

高等学校教材

大学物理实验

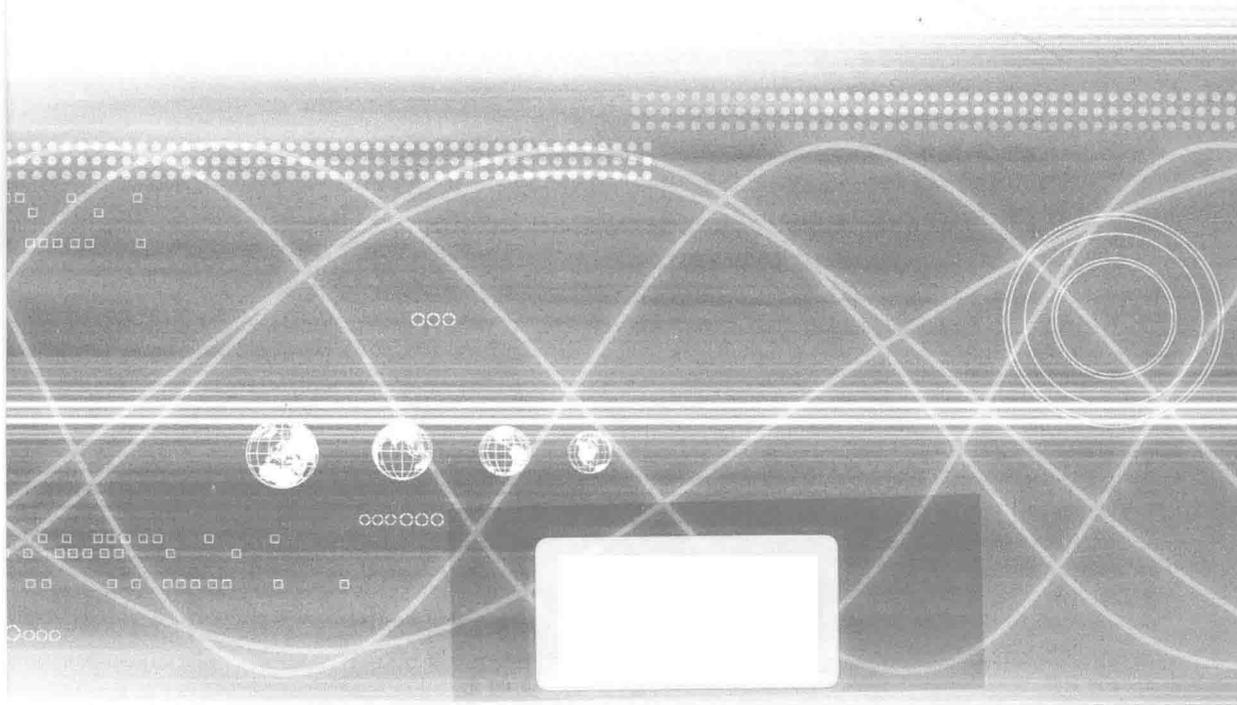
主 编 胡 冰 刘纪彩 黄 霞
副主编 付星球 李瑞洁 李社强 段志强

高等教育出版社

高等学校教材

大学物理实验

主 编 胡 冰 刘纪彩 黄 霞
副主编 付星球 李瑞洁 李社强 段志强



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)为指导,结合华北电力大学物理实验室建设的经验以及当前实验教学的实际编写而成的。全书共分8章,主要内容为绪论、测量及误差理论基础、实验数据处理的基本方法、物理实验方法和技术、基本物理量的测量及常用仪器的使用、基础性实验、综合性实验与近代物理实验、设计性与研究性实验。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业大学物理实验课程的教学用书,也可作为科研及工程技术人员和其他有关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/胡冰,刘纪彩,黄霞主编.--北京:高等教育出版社,2017.3

ISBN 978-7-04-047314-8

I. ①大… II. ①胡… ②刘… ③黄… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第020328号

Daxue Wuli Shiyān

策划编辑 高建
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 高建
责任校对 窦丽娜

封面设计 张志
责任印制 田甜

版式设计 王艳红

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京市联华印刷厂
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 29
字数 620千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>

版次 2017年3月第1版
印次 2017年3月第1次印刷
定 价 50.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 47314-00

前 言

物理学是一门实验科学,理论和实验都是研究物理的手段,终极目标是找到物质运动和变化的规律。所有通过理论手段得到的物理规律最终都要通过实验来验证其正确性,不能在实验中证实的规律很有可能是错误的,无论得到的物理规律是如何的漂亮。物理实验作为面向全体理工科大学生的第一门系统的、完整的实验课,肩负着让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握科学实验的基本知识、方法的重任,对培养学生的动手能力、科研创新能力是必不可少的。

近年来,高等教育中的人才培养模式发生了深刻的变化,更加注重素质教育,特别是创新精神和实践能力的培养。为此,华北电力大学数理学院物理实验教学中心进行了物理实验教学体系的改革。本书是以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)为指导,在华北电力大学北京校部使用多年的校内讲义和曾用教材的基础上编写而成。本书共分为8章。第1章介绍了大学物理实验课的作用、基本教学要求以及如何撰写实验报告。第2章阐述了测量及误差理论基础,为了让学生掌握评定不确定度的基本方法而不陷入过于严格的繁琐计算,特别对这部分内容进行了一些必要的简化,以适合于大学物理实验要求。第3章讲述了几种常用的处理实验数据的基本方法。第4章一般性地介绍了物理实验中常用的基本实验方法、测量方法以及基本实验操作技术。第5章介绍了长度、质量、时间及温度等几个基本物理量的测量方法及相关测量仪器的使用,同时也介绍了电流、电压及电阻等几个电学量的测量方法以及相关的测量仪器。第4章、第5章的内容以及第6章前两节的电学实验与光学实验的基本知识是学生在正式开始实验前应该仔细阅读的。第6章安排的是十四个基础性实验,这些实验通常是必做的。综合性实验与近代物理实验置于第7章,这些实验涉及物理学多个方面的内容,不但包括了近代物理实验,还包括了密切结合当今科技的实验。第8章是设计性与研究性实验。这一章的教学模式由教师排好实验,准备好仪器,学生来做实验的程序,过渡到学生在教师的指导下,自己设计实验,自己准备仪器完成实验的程序,以培养学生的综合思维和创造能力。这部分实验内容可根据教学的具体情况予以适当选取。

物理实验教学是一个集体的事业,从实验仪器的制作、购置,到实验的编排和实验内容的编写都需要许多教师和实验技术人员长期的努力和改进。本书是华北电力大学数理学院物理实验教学中心集体劳动的成果,是近年来教学改革成果的体现。本书是在彭建、皮伟主编的华北电力大学曾用教材《大学物理实验》的基础上,吸收了兄弟院校实验教学的经验编写而成的。感谢彭建、皮伟、邓加军、师青梅、李克强、马续波等老师为本书的编写打下的坚实基础,没有他们的辛勤劳动,就不可能有本书的出版。陈雷老师以及其他多位老师在本书的编写过程中提出了许多宝贵的具体意见,对于他们的贡献表示诚挚的感谢。同时感谢数理学院及学校相关部门对于本书的出版所给予的帮助和支持。

由于编者水平有限且时间紧迫,本书不妥之处在所难免,恳请老师和同学们在使用中不吝指正。

编 者

2015年12月于华北电力大学

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 大学物理实验课的地位、作用和要求	1
§ 1.2 大学物理实验课的基本教学要求和基本教学程序	2
§ 1.3 大学物理实验报告格式	4
§ 1.4 学生实验守则	5
第 2 章 测量及误差理论基础	7
§ 2.1 测量及分类	7
§ 2.2 误差的性质与处理	9
§ 2.3 测量结果的不确定度评定	19
§ 2.4 有效数字及其运算规则	29
习题	33
第 3 章 实验数据处理的基本方法	36
§ 3.1 列表法	36
§ 3.2 作图法	37
§ 3.3 逐差法	41
§ 3.4 最小二乘法	42
§ 3.5 数据处理软件及计算器统计计算介绍	46
习题	59
第 4 章 物理实验方法和技术	61
§ 4.1 物理实验中的基本实验方法	61
§ 4.2 物理实验中的基本测量方法	64
§ 4.3 物理实验中基本操作技术	70
第 5 章 基本物理量的测量及常用仪器的使用	73
§ 5.1 长度的测量	73
§ 5.2 质量的测量	83
§ 5.3 时间的测量	86
§ 5.4 温度的测量	89
§ 5.5 电流的测量	94
§ 5.6 电压的测量	98
§ 5.7 电阻的测量	99
习题	100

第 6 章 基础性实验	101
§ 6.1 电学实验的基本知识	101
§ 6.2 光学实验的基本知识	110
实验一 长度、密度的测量	117
实验二 利用碰撞打靶研究平抛运动	129
实验三 单摆运动特性的研究	134
实验四 液体表面张力系数的测定	139
实验五 静态法测量金属丝的杨氏模量	143
实验六 落球法测定液体在不同温度下的黏度	149
实验七 用惠斯通电桥测电阻	157
实验八 用电势差计测量电动势和内阻	164
实验九 示波器的使用	170
实验十 用模拟法测绘静电场	178
实验十一 磁悬浮动力学实验	184
实验十二 分光计的调整与光的衍射	194
实验十三 分光计的应用与棱镜折射率的测量	202
实验十四 用牛顿环测量透镜曲率半径	208
第 7 章 综合性实验与近代物理实验	213
实验十五 刚体转动惯量的测量	213
实验十六 玻尔共振实验	224
实验十七 动态法测量杨氏模量	235
实验十八 空气声速与绝热系数的测定	245
实验十九 准稳态法测导热系数和比热容	252
实验二十 电表的改装与校准	260
实验二十一 双臂电桥测量低电阻	265
实验二十二 电子荷质比的测定	273
实验二十三 霍尔效应	280
实验二十四 用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	286
实验二十五 密立根油滴实验	296
实验二十六 用小型棱镜摄谱仪测定光波波长	307
实验二十七 迈克耳孙干涉实验	315
实验二十八 双棱镜干涉法测量光波波长	320
实验二十九 偏振光实验	328
实验三十 微波光学实验	335
实验三十一 普朗克常量的测定	343
实验三十二 弗兰克-赫兹实验	352
实验三十三 太阳能电池基本特性测量	358

实验三十四	PN 结正向特性的研究和应用	368
实验三十五	燃料电池综合特性研究	375
实验三十六	液晶电光效应实验	385
第 8 章	设计性与研究性实验	394
§ 8.1	设计性实验的设置与实施	394
§ 8.2	设计性实验的目的	394
§ 8.3	设计性实验的基本步骤	394
实验三十七	非平衡电桥的应用	397
实验三十八	等厚干涉的应用	402
实验三十九	弗兰克-赫兹实验的深入研究	405
实验四十	LED 基本特性测量	407
实验四十一	巨磁电阻效应	410
实验四十二	光栅常量与半导体激光波长的测定	413
实验四十三	光栅传感器特性测定实验	414
实验四十四	多普勒效应综合实验	415
实验四十五	真空的获得与测量	416
实验四十六	真空镀膜	419
实验四十七	氧化锌纳米材料的制备	421
实验四十八	锁相放大器的使用	423
实验四十九	低温的获得与测量	425
实验五十	反常霍尔效应	427
实验五十一	光纤特性及传输实验	429
实验五十二	声波在物质中的衰减系数的测量	431
实验五十三	空气物理参量的测量	432
实验五十四	磁悬浮导轨上碰撞设计性实验	433
实验五十五	用电势差计校准电压表	438
实验五十六	简易万用表的设计与制作	439
附表		440
附表 1	国际单位制	440
附表 2	常用物理常量表	441
附表 3	SI 词头	442
附表 4	部分物质的比热容	443
附表 5	部分固体的导热系数	443
附表 6	铜-康铜热电偶分度表	444
附表 7	海平面上不同纬度处的重力加速度	444
附表 8	部分固体的摩擦因数	444
附表 9	20 ℃ 时常见固体的密度	445

附表 10	20 ℃时常见液体的密度	446
附表 11	标准状态下常见气体的密度	446
附表 12	部分固体的弹性模量	446
附表 13	部分液体的黏度 η	447
附表 14	部分液体的表面张力系数	448
附表 15	部分固体中的声速(沿棒传播的纵波)	448
附表 16	20 ℃时部分液体中的声速	448
附表 17	标准状态下部分气体中的声速	449
附表 18	水的饱和蒸汽压与温度的关系	449
附表 19	101 325 Pa 下部分物质的熔点和沸点	450
附表 20	相对湿度查对表	450
附表 21	常温下部分物质相对于空气的光的折射率	451
附表 22	常用光源的谱线波长	451
参考文献		452

第1章 绪 论



绪论

NOTE

§ 1.1 大学物理实验课的地位、作用和要求

物理学是自然科学的基础,也是当代工程技术的重要支柱.物理学本质上是一门实验学科,从物理学的发展历史看,物理规律的发现和物理理论的建立都必须以物理实验为基础,物理学中的每一项突破都与实验密切相关.例如麦克斯韦总结前人的实验结果和理论,统一成完整的电磁场理论,并预言了电磁波的存在,但直到1887年,赫兹完成了电磁波的发射和接收实验后,才使这一深深影响我们当代生活的理论假设得到最终确认.物理学理论就是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法,并通过实验的检验而建立起来的.

科学技术的进步离不开物理学理论和实验.物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位,而且在推动其他自然科学、工程技术的发展中也起着重要作用.物理学有助于技术的基本建设,有助于扩展和提高我们对其他学科的理解,物理学也提供了应用于其他学科新设备和新技术所需的基本知识,特别在不少交叉学科中,物理试验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科的相互结合已取得丰硕的成果.鉴于物理学的重要性,联合国大会于2004年6月通过了将2005年为“国际物理年”的决议,该决议摘录如下:“联合国大会承认物理学为了解自然界提供了重要基础,注意到物理学及其应用是当今众多技术进步的基石,确信物理教育提供了建设人类发展所必需的科学基础设施的工具……”.

大学物理实验是高等学校理工科专业课程体系中的一门重要的基础课程,是这些专业的学生进校后的第一门科学实验课程,是后续专业实验的基础,也是学生实验素质的基础.其教学目的不仅仅是让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握进行科学实验的基本知识、方法和技巧,更重要的是培养学生敏锐的观察能力和严谨的思维能力,培养学生分析问题和解决问题的能力,特别是与科学技术发展相适应的综合能力和创新精神.

近三十多年来,物理实验得到更普遍的重视,很多高校都把物理实验从大学物理课程里面分离出来,单独设立为一门基础课,而且也加大了实验方面人力、财力的投入,很多综合性大学都建立了物理实验教学中心.

物理实验是物理学的重要内容,是学生进行科学实验基本训练的必修的基础课程,是学生受到系统的实验方法和实验技能训练的开端.大学物理课程的具体任务是:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验的基础知识.

① 掌握常用物理量的基本测量方法、常用实验方法及常用测量仪器的原理和使用等.这些测量方法及有关仪器在科学实验或日常工作中会经常遇到.

② 学习误差理论、有效数字的读取、记录和运算方法以及正确处理实验数据的基本方法,学习提高实验精度和减小实验误差的常用方法和技巧.例如,学会分析哪些误差是主要的,哪些可以减小或忽略.在满足精度要求的前提下,能够提出初步的最简便、经济的实验方案,包括选择恰当的仪器与测量步骤等.

③ 了解理论知识的有关应用,包括最新应用.这不但能加深对物理学原理的理解,反过来还可以提高理论课的学习兴趣及主动性,同时也可以拓宽知识面,开阔思路,丰富应用实践方面的经验.

(2) 培养和提高学生的科学实验能力.

① 独立阅读实验教材和仪器说明书,查阅相关参考资料以及做好实验前准备工作的能力,正确使用常用仪器进行测量的能力.

② 初步掌握常用物理仪器的基本操作方法以及利用这些仪器对基本物理量进行测量的能力.

③ 运用物理学理论及相关知识对实验现象进行初步分析判断的能力.

④ 正确记录和处理实验数据,绘制曲线和图表,说明实验结果,撰写合格实验报告的能力.

(3) 培养和提高学生的科学实验素养.

使学生具有理论联系实际的优良作风,实事求是、严谨认真的科学态度,有序细致的操作习惯,自觉研究和探索科学问题的创新精神,自觉遵守纪律、团结协作爱护公共财物的优秀品德.

§ 1.2 大学物理实验课的基本教学要求和基本教学程序

本书包括力学、热学、电学、光学和近代物理等实验,课程的基本教学要求如下:

(1) 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力.

① 掌握测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估.

② 掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等.随着计算机及其应用技术的普及,还应包括用计算机软件处理实验数据的基本方法.

(2) 掌握基本物理量的测量方法.

例如:长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、元电荷、普朗克常量、里德伯常量等常用物理量及物性参量的测量,注意加强数字化测量技术和计算机技术在物理实验教学中的应用.

(3) 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用.

例如:比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法.

(4) 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用.

例如:长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光计、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器.

各校可根据条件,在物理实验课中逐步引进当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,例如,激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等.

(5) 掌握常用的实验操作技术.

例如:零位调整、水平/竖直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节方法.

(6) 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识.

要想实现物理实验的培养目标,完成物理实验教学任务,学生应该根据物理实验课的特点和要求认真对待实验教学的各个环节,潜心钻研,才可以达到更好的效果.大学物理实验课通常分下列四个阶段进行:

(1) 实验前的预习.

为了在规定的时间内保质保量地完成实验内容,学生在实验前必须做好预习工作.

实验教材是实验的指导参考,它对每一个实验的目的、要求、实验原理都作了明确的阐述,因此,在上实验课前必须认真阅读.还需查阅相关参考资料,实验中涉及的仪器有许多是从未见过的,在预习时就需认真阅读教材中的仪器介绍,弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等,特别是注意事项,不仅要看,还要牢记,否则会造成仪器损坏,甚至人身事故.对仪器的构造,应尽可能地去理解、去想象,必要时还需要去实验室观察实物.

在预习的基础上,写好预习报告,其内容包括实验名称、实验目的、实验原理和数据记录表格.此外,根据实验内容,准备好实验中所需的绘图工具和计算器等.

(2) 课堂讲解.

实验前老师对仪器的调节使用方法、主要实验内容、具体步骤和注意事项进行简要的讲解,为学生准确无误地完成实验打好基础.

(3) 实验操作.

课堂实验操作是实验课最重要的环节,实验时应严格遵守实验室的规章制度.

① 实验前必须检查和辨认仪器设备、材料是否完好、齐备,明确各部分的作用、使用方法和注意事项.

② 根据实验要求正确地将有关仪器组成所需的测试系统.经检查确保无误,方可按步骤进行实验操作.特别是在电磁学实验中,在连接电路前,应考虑仪器设备的合理布局及电源的正负极性,电路连接好之后,还要注意把仪器调节到“安全

NOTE

待测状态”，然后请教师检查，确定电路连接正确无误后方可接通电源进行实验。

③ 在实验中必须仔细观察、积极思考、认真操作、防止急躁，做到实事求是地观察和测量。要初步学会分析实验现象，遇到问题时应冷静分析和思考；在实验中有意识地培养自己的独立工作能力。

④ 实验数据的记录是实验结果和分析问题的依据。在实验中，应根据所使用仪器的精度和实验条件认真、真实地读取和记录实验数据，千万不可根据主观臆想来编造数据、凑数据，特别是要正确使用有效数字。原始数据必须要用钢笔或圆珠笔记录在原始数据记录本上，不要随意涂改，对认为错误的数字应轻轻划上一道，在旁边写上正确值，以便在分析测量结果和误差时参考。

两人以上合作做实验时要合理分工，充分交流，协调一致，共同达到实验要求。

实验完毕，应将所测量的数据交给任课老师检查、签字。对不合理的或错误的实验结果，应分析原因，及时补测或重做。离开实验室前，应听从实验管理员和指导老师的指挥，自觉整理好仪器，并做好清洁工作。

(4) 实验报告的书写。

书写实验报告的目的是为了培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力。一份完整的实验报告应包括：实验名称、实验目的、实验原理、原始数据、数据处理和讨论等主要内容。对于实验原理应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述，做到简明扼要。实验步骤只要写出关键性的仪器调整方法和测量技巧，不要完全照抄教材中的内容。原始测量数据一般要求以列表形式出现。数据处理要写出数据计算的主要过程，作出图表，对最后结果的误差分析、对实验过程和结果的讨论要具体深入、有分析、有见解，不要泛泛而谈，其内容一般不受限制，可以是对观察到的实验现象进行分析，对结论和误差原因进行分析，也可以对实验方案提出改进意见。

§ 1.3 大学物理实验报告格式

实验报告是对实验过程及其结果的系统而全面的总结，要用简明的形式将实验结果完整而真实地表达出来。实验报告要用统一规格的实验报告纸书写（可加附页），必须独立及时地完成，要做到文字通顺、表述明确、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确、讨论认真。好的实验报告可以给予同行或老师以清晰的思路、独到见解和新的启迪。

实验报告通常包括预习报告、原始数据记录、数据处理分析和结果讨论等部分。

(1) 预习报告。预习报告是实验能否顺利进行的关键，应在实验前完成。进入实验室须带上预习报告，经教师检查合格方可进行实验。预习报告包括以下内容：

- ① 实验名称。
- ② 实验目的。

③ 实验仪器.

④ 实验原理. 用简洁的语言对实验所依据的理论进行叙述, 不要照抄书本. 要给出实验所依据的定理、定律、线路图、光路图以及有关实验条件等. 其中主要公式要有简要推导过程, 重要实验仪器要有原理图、操作要领和操作中的注意事项, 要有对实验结果的评价手段及减少实验误差的方法.

⑤ 实验的内容和步骤. 要求简明扼要地说明主要实验内容和关键步骤.

⑥ 原始数据记录表格. 在理解实验原理及实验内容的基础上, 科学合理地设计出原始数据记录表格于规定的地方.

特别说明: 预习报告是预习时写的实验报告, 可以作为实验报告的一部分. 撰写实验报告时可以在此基础上续加其他内容.

(2) 实验记录. 实验数据要用表格或其他形式简洁明了地列出, 正确表示有效位数和单位. 数据记录还应包括相关的常量.

(3) 数据处理分析. 包括结果计算、实验曲线、表格、误差分析、最后结果表示等内容. 计算按照有效数字的运算法则进行. 根据要求计算各直接测量量和间接测量量的标准误差, 并将实验结果正确地表示出来.

(4) 结果讨论. 根据实验的具体情况, 必要时应对实验结果进行讨论, 讨论内容不限. 如实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验仪器选择和实验方法改进的建议、实验异常现象的解释、回答实验思考题、实验中存在的问题讨论等.

撰写实验报告是实验的重要组成部分, 是分析问题解决问题的过程, 也是综合运用知识的过程, 对培养实验能力起到重要的作用. 同时, 实验报告是学生实验考核的主要依据, 必须严肃对待, 认真完成.

§ 1.4 学生实验守则

为了维护正常的实验教学秩序, 提高实验课的教学质量, 顺利完成各项实验任务, 确保人身、设备安全, 在实验过程中学生应遵守如下规则:

(1) 准时上课, 迟到者本次实验成绩作降分处理(降 5 ~ 10 分), 迟到 10 分钟及以上者, 教师有权禁止该生做实验. 一般不得请假, 特殊情况(如生病)需出具证明(班主任或辅导员在请假条上签字并盖院系公章), 并及时找相应实验教师联系补做时间. 缺做一次实验者, 本学期的实验成绩为不及格.

(2) 学生实验前必须认真预习, 并写好预习报告(含教材指定课前必做内容及实验数据表格). 进入实验室须带上预习报告, 经教师检查合格方可进行实验.

(3) 遵守课堂纪律, 保持安静整洁的实验环境. 严禁吸烟、吃东西、随地吐痰、乱扔脏物、大声喧哗等不文明行为.

(4) 按实验步骤规范操作. 实验前先检查实验仪器, 仪器完好无损时, 在签字板上签下自己的名字. 实验过程中爱护仪器, 严格按仪器说明书或操作规程操作, 如果仪器有问题应及时报告教师, 不得擅自更换实验仪器. 否则出现仪器损坏情

况,按有关规定予以处罚并降低本次实验成绩.

(5) 使用电源时,严禁带电接线或拆线,务必经过教师检查线路后才能接通电源;实验后要切断电源.

(6) 实验中要注意安全,如仪器设备出现异常气味、响声、打火、冒烟、发热、震动等现象,应立即切断电源,关闭仪器,并向教师报告.

(7) 实验中要注意节约使用实验材料.

(8) 如实记录数据,原始数据不得改动.伪造或抄袭他人者,数据无效.

(9) 实验完毕,数据记录要经过教师检查无误并签字后才能生效.学生整理好实验仪器,待教师在签字板上签字后方可离开.

在整个实验过程中,对不遵守本守则的学生,指导教师和实验技术人员视情况给予批评教育,直至责令其停止实验.

第2章 测量及误差理论基础

本章围绕测量、误差、测量结果的表示及实验的数据处理等方面介绍其基本知识,作为实验前的基础准备.这些知识在每次实验中都要用到,是必须了解和掌握的.相信掌握好本章的内容,对学习物理实验课和今后从事科学实验工作都具有重要意义.

NOTE

§ 2.1 测量及分类

一、测量及测量分类

物理实验是以测量为基础的.在实验中,研究物理现象、物质特性、验证物理原理都需要进行测量.所谓测量,就是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较,得出它们的数量关系的过程.选来作为标准的同类量称为单位,数量关系的值称为测量数值.测量所得的值(数据)应包括数值(大小)和单位,两者缺一不可.

在人类的发展历史上,不同时期,不同的国家,乃至不同的地区,同一种物理量有着许多不同的计量单位.如长度单位就分别有码、英尺、市尺和米等.为了便于国际交流,国际计量大会于1990年确定了国际单位制(SI),它规定了以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位,其他物理量(如力、能量、电压、磁感应强度等)的单位均作为这些基本单位的导出单位.

1. 直接测量与间接测量

测量按测量过程可分为两类,直接测量与间接测量.

直接测量,是指直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较而得到测量值的一种测量,它无需进行任何函数关系的辅助运算.如用尺测量长度、秒表计时间、天平称质量、电流表测电流等.

间接测量,是指被测量与直接测量的量之间需要通过一定的函数关系的辅助运算,才能得到被测量物理量的量值的测量.如单摆测量重力加速度时,需先直接测量单摆长 l 和单摆的周期 T ,再应用公式 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$,求得重力加速度 g .物理量的测量中,绝大部分是间接测量,但直接测量是一切测量的基础.不论是直接测量,还是

间接测量,都需要满足一定的实验条件,按照严格的方法正确地使用仪器,才能得

出应有的结果. 因此实验过程中, 一定要充分了解实验目的, 正确使用仪器, 细心地进行操作、读数和记录, 才能达到巩固理论知识和加强实验技能的目的.

2. 等精度测量与不等精度测量

测量按测量条件可分为两类, 等精度测量与不等精度测量.

对某一物理量进行多次测量, 而且每次测量的条件相同(如同一观察者, 同一组仪器, 同一测量方法和同样的环境条件下测试等), 测得的数据为 X_1, X_2, \dots, X_n , 称为等精度测量. 在所有的测量条件中, 只要有一个发生变化, 这时所进行的测量就是不等精度测量.

严格地说, 在实验过程中保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的, 但当某一条件的变化对结果的影响不大, 甚至可以忽略时, 仍可将此种测量视为等精度测量. 除了特别指明外, 一般情况下的测量都作为等精度测量来讨论. 物理实验中大多采用等精度测量.

二、测量值的确定

1. 直接测量值的确定——算术平均值

如果对同一物理量进行多次测量, 例如对物理量 X 进行等精度测量, 得到一系列数据 X_1, X_2, \dots, X_n , 在测量没有误差及符合统计规律的情况下, 可以用算术平均值 \bar{X} 表示测量的最佳值, 即

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-1)$$

可以证明, 当测量次数无限多时, 算术平均值将无限接近真值.

对于有限次测量, 平均值会随着测量次数的不同而有所改变, 也会因不同范围的测量数据而稍有差别.

2. 间接测量值的确定

对于间接测量值 $w = f(x, y, \dots)$, 它由直接测量值 (x, y, \dots) 所确定. 当多次测量时, 有两种可能的情况.

(1) 对于各直接测量值 (x_i, y_i, \dots) 相互独立地进行测量, 且测量条件变化幅度很小. 首先分别求出各自的算术平均值 $(\bar{x}, \bar{y}, \dots)$, 然后将其带入函数关系式 $w = f(x, y, \dots)$ 中求得 w 的测量值, 即

$$\bar{w} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \quad (2-2)$$

(2) 在同一条件下, 对各量测量一遍, 得到一组 (x_i, y_i, \dots) , 相应的有 $w_i = f(x_i, y_i, \dots)$, 而每次间接测量之间又是相互独立的, 用测量算术平均值 \bar{w} 作为测量值, 即

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^k w_i / k = \sum_{i=1}^k f(x_i, y_i, \dots) / k \quad (2-3)$$

通常, 当测量条件没有大幅度变化时, 两种计算方法所得到的结果是极其相近的. 所以, 除了测量条件变化幅度过大时必须采用式(2-3)外, 一般都可以采用较简单的式(2-2)来计算.

§ 2.2 误差的性质与处理

物理实验一般都离不开物理测量. 由于测量仪器, 环境条件, 实验方法(测量手段与计算方法等)的限制和测量者的观察能力的局限, 实验测量得到的物理量的数值与它的真实值并不一致, 这种情况在数值上的表现即为误差. 随着科学技术水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识的丰富, 误差可以控制得越来越小, 但不能使误差降低为零. 因此, 实验结果都具有误差, 误差始终存在于一切科学实验过程之中.

一、误差的定义

1. 绝对误差

若实际测得值 X 与该物理量的客观真值 A 之间的差值为 ΔX , 则称 ΔX 为测量值的绝对误差.

如果 X 是指针式仪器的示值, 则 ΔX 称为示值误差, 如果 X 为某一元器件的标准值, 则 ΔX 称为标称误差, 这些都通常称之为误差, 表示为

$$\Delta X = X - A \quad (2-4)$$

真值有 3 种类型:

(1) 理论值或定义值: 如三角形的内角和等于 180° .

(2) 计量学约定真值: 国际计量大会决议的 7 种标准.

(3) 标准器相对真值: 高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比, 为其 $\frac{1}{5}$ (或者说 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{3}$) 时, 则可以认为前者是后者的相对真值. 如 0.5 级电压表测得某电阻上的电压值为 1.03 V, 而用 1.0 级电压表测得的电压值为 1.05 V, 则可认为 1.0 级电压表测得的电压值的误差为 +0.02 V.

2. 相对误差

绝对误差的表示方式往往不能反映测量的精确程度. 例如, 测量两个不同物体的长度, 用最小分度值为 1 mm 的米尺测量一个物体长度为 $L_1 = 51.4$ mm, 绝对误差 $\Delta L_1 = 0.02$ mm; 用最小分度为 0.01 mm 的螺旋测微器测量另一物体的长度为 $L_2 = 0.235$ mm, 绝对误差 $\Delta L_2 = 0.005$ mm. 初看起来, 绝对误差 0.2 mm 远大于 0.005 mm, 但我们不能说后者的测量精度比前者高, 而恰恰相反, 这是因为 L_1 的测量误差对 51.4 mm 而言仅为 0.4%, 而 L_2 的测量误差相对 0.235 mm 却为 2%. 因此, 为了弥补绝对误差的不足, 我们引进相对误差 E_r . 根据所取的相对参考值的不同, 可分为

(1) 实际相对误差 = (误差/真值) $\times 100\%$, 即

$$E_r = \frac{|\Delta X|}{A} \times 100\% \quad (2-5)$$

(2) 标称相对误差 = (误差/测量值) $\times 100\%$, 即

$$E_r = \frac{|\Delta X|}{X} \times 100\% \quad (2-6)$$

(3) 额定相对误差(或称引用误差) = (误差/满刻度值) × 100%, 即

$$E_r = \frac{|\Delta X|}{X_{\max}} \times 100\% \quad (2-7)$$

由于一般有 $\Delta X \leq X$, $X \approx A$, 故前两种误差基本上没有区别, 但它们与额定相对误差则可能相差较大. 因为 $X \leq X_{\max}$, 有:

$$\frac{\Delta X}{A} \approx \frac{\Delta X}{X} \geq \frac{\Delta X}{X_{\max}}$$

一般电工仪表常以额定误差的大小来分级. 如量程为 150 mV 的 0.5 级电压表, 表示测量 150 mV 电压以内的任何一个电压时最大的误差为 0.75 mV, 用这个电压表测量 100 mV 的电压时, 其相对误差 $E_r = 0.75 \text{ mV} / 100 \text{ mV} = (0.5\% \times 150 \text{ mV}) / 100 \text{ mV} = 0.75\%$, 这在使用电工仪表时必须要注意. 电子仪器和元器件一般用标称相对误差来表示, 如 $100 \Omega \times (1 \pm 5\%)$ 等. 对于电子仪器, 因受外部条件影响较大, 要求在使用时必须详细阅读说明书.

二、误差的分类及处理方法

误差按性质和来源分为系统误差和偶然误差(随机误差).

1. 系统误差

在同一实验条件下多次测量同一物理量时, 误差的绝对值和符号保持恒定, 或在条件改变时按某一确定的规律变化的误差.

(1) 系统误差的来源

① 理论误差

由于测量原理所依据的理论具有一定的近似性, 从而在测量结果中引入误差. 单摆实验是一个很好的例子, 由于引入了 $\sin \theta \approx \theta$, 得到了单摆周期的简化公式为

$$T_0 = 2\pi \sqrt{l/g}$$

它的精确级数解为

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right)$$

通过计算可得, 当摆幅角为 5° 时, 由上式引入的误差约为 0.05%, 摆幅角越小, 由理论引入的误差越小. 对于这种理论误差, 我们可以根据测量结果总精确度的要求来进行修正.

② 人为误差

由于观察者的生理和心理因素而引起的测量结果的误差. 如有的人在启动停表时总是提前, 而有的人则总是滞后, 一般在正常情况下, 人们看到一个信号而开启停表的误差为 0.05 ~ 0.1 s; 又如用米尺测量长度, 对于 1 mm 以下的估读数的误差与操作者的视力习惯有关等.

③ 环境误差

由于环境(如温度、大气、电磁场等)的影响而产生的误差. 如在流体静力称衡

法实验当中,在称量时,水的温度由 $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变到 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,水的温度的改变导致被测物体密度产生误差.

④ 仪器误差

仪器的误差也称工具误差.这是由于测量所用的工具(仪器、量具等)本身不完善而产生的误差.它包括:

- a. 仪器的示值误差;
- b. 仪器的零值误差;
- c. 仪器机构误差和测量附件误差等.

⑤ 装置误差

由于测量设备、仪器和电路的安装、布置、调整不当而产生的误差.例如,在电磁学一类实验中,经常需要考虑电磁的屏蔽和良好的接地问题,以减小测量的系统误差.

(2) 如何发现系统误差

① 理论分析法

a. 分析实验理论公式所要求的条件在测量过程中是否得到满足.如在单摆实验中,只有摆角 θ 趋于零时才能套用公式 $T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}$,实验是达不到这个要求的,必然产生系统误差.

b. 分析仪器要求的使用条件是否得到满足.

② 对比测量法

a. 实验方法与测量方法的对比.

用不同的实验方法测量同一个被测量,如果测量的结果在偶然误差允许的范围内不重合,则说明其中至少有一种方法存在系统误差.如用单摆与自由落体两种方法测某地的重力加速度,实验结果分别是 $g = (9.81 \pm 0.01)\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $g = (9.76 \pm 0.01)\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.显然,其中至少有一种方法存在系统误差,因为两种方法测出的重力加速度值之差无法用偶然误差解释,必然是系统误差所致.

同一种实验方法,有时改变测量方案也可发现系统误差.比如在拉伸法测金属丝实验中,用增加砝码与减少砝码过程中读数的方法来发现摩擦等因素带来的系统误差.

b. 仪器的对比.

一个量用不同的仪器同时或分别地进行测量可发现仪器的系统误差.如果用两只电流表接入同一串联电路,若读数不一致,说明至少有一只存在系统误差.如果有一只是标准表,就可发现并消除另一只表的系统误差.

c. 改变实验参量进行对比.

如改变电路中的电流大小,而测量结果有单调变化或规律性的变化,说明存在某种系统误差.

d. 换人测量,发现人员误差.

③ 数据分析法

当偶然误差很小时,将测量的偏差

$$\Delta N_i = N_i - \bar{N} \quad (2-8)$$

按测量的先后次序排列,观测 ΔN_i 的变化,如果 ΔN_i 呈现规律性变化,如线性增大或减小或稳定的周期性变化,则必有系统误差存在。

(3) 恒定系统误差的消除

系统误差的特点是它的确定性,因此不能用重复多次测量的方法去消除或减小,没有像偶然误差那样统一的处理方法.下面介绍几种消除系统误差的常用方法:

① 消除产生系统误差的根源.如采用符合实际的理论公式,保证仪器使用所必需的条件等.

② 有些系统误差当测量条件变化时,其大小和符号始终保持不变,称恒定系统误差(又称定值系统误差,即对同一测量值的影响均为一定的常量),如千分尺、电表等的调零误差.可采取找出修正值对测量值进行修正,如找出“零差”对测量值进行修正,用标准仪器对测量中使用的仪器进行校正,找出修正值后进行修正,即

$$\text{真值} = \text{测量值} + \text{修正值}$$

只要找到修正值进行修正就可消除这类系统误差.

③ 对其他形式的恒定系统误差采取适当的测量方法去抵消,常用的方法有:

a. 异号法

改变测量中某些条件进行测量,例如改变测量方向等使两种条件下的测量结果的误差符号相反,取平均值作为测量值来消除不均匀性带来的系统误差.例如,在研究金属材料弹性实验中,加砝码和减砝码各记一次数,取平均值可消除光杠杆上升或下降时因摩擦、金属丝伸缩滞后等因素产生的系统误差.

b. 交换法

本质上也是异号法,但在形式上是将测量中的某些条件,例如被测物体的位置相互交换,是产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用,从而抵消系统误差.用电桥法测量未知的电阻值时,将待测物放在不同的桥臂上,如图 2-1(a)所示,有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$$

置换后,如图 2-1(b)所示,有

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3'$$

则

$$R_x^2 = R_3 R_3', \quad R_x = \sqrt{R_3 R_3'}$$

c. 替代法

保持测量条件不变,用一个已知量替换被测量,再进行测量以达到消除系统误差的目的.用天平测量一个物体的质量,可以不直接从左盘的砝码读出物体的质量,而是把右盘的物体取下用砝码代替物体再保持天平平衡,然后,读出右盘砝码的质量来消除等臂引起的系统误差.

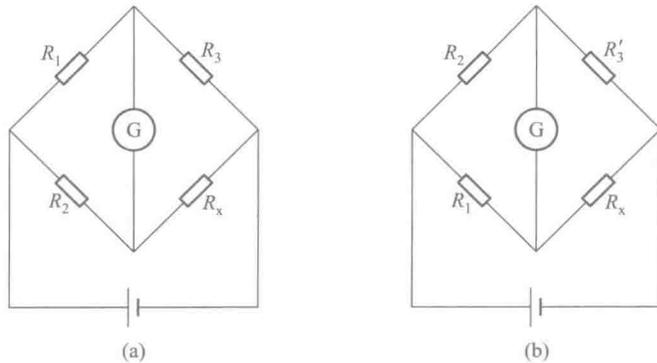


图 2-1 交换法消除误差原理图

d. 零示法

为了消除指示仪表不准而造成的系统误差,测量中当被测量的量与标准量相互平衡使指示仪指示零.这时被测量的值就等于标准量,这就是零示法.例如:电桥电路、电势差计等都是用这种方法来消除指示仪表不准引起的系统误差的.

(4) 可变系统误差(变值系统误差或对称变化系统误差)的消除

在测量条件或某几个因素变化时,误差的大小和符号按确定的函数规律而变化,变值系统误差的种类很多,有的还比较复杂,我们只简略介绍一下常用的几种.

① 线性变化的系统误差

在整个测量过程中,随时间线性变化(递增或递减)的系统误差,如图 2-2 所示,可将观测程序对某时刻对称地再做一次.例如,一只灵敏电流计零点随时间有线性漂移,在测量读数前记下一次零点值,测量读数后再记一次零点值,取两次零点值的平均值来修正测量.这种消除系统误差的方法称为对称观测法.

由于很多随时间变化的误差在短时间内均可认为是线性变化,因此对称观测法是一种能够消除随时间变化的系统误差的好方法.

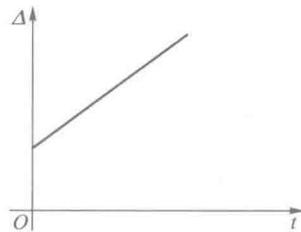


图 2-2 线性系统误差

② 周期性变化的系统误差

随着测量值或时间的变化而呈正弦曲线变化的系统误差,即为周期性系统误差,如分光计的偏心差可表示成

$$\varepsilon = e \sin \varphi$$

当 $\varphi = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 时, $\varepsilon = 0$; 而当 $\varphi = 90^\circ, 270^\circ$ 时, $\varepsilon = e$.

周期性系统误差一般可以表示为

$$\varepsilon = e \sin(2\pi t/T)$$

式中 T 为误差变化周期, t 为决定周期误差的自变量(如时间、角度等). 当 $t = t_0$ 时, 有

$$\varepsilon_0 = e \sin(2\pi t_0/T)$$

当 $t = t_0 + T/2$ 时, 有

$$\varepsilon_1 = e \sin[2\pi(t_0 + T/2)/T] = -e \sin(2\pi t_0/T)$$

取算术平均值,则有

$$\varepsilon = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1) / 2 = 0$$

可见,对于选读的一个量 ε_0 ,每隔半个周期进行一次测量,只要测量次数是偶数,取平均值即可消除周期性系统误差。

③ 复杂规律变化的系统误差

在整个测量过程中,这一类误差是按一定的但是比较复杂的规律变化的系统误差.这些复杂规律,可能是某些初等函数形式,如对数、幂指数、指数函数等形式,也可能是经验曲线的形式.对于按复杂规律变化的误差,一般可以将它展开成代数多项式或三角多项式来分析它与某因素的关系。

此外,系统误差校对其掌握和可处理的程度又可分为已定系统误差和未定系统误差.在原则上一般都是可以发现、分离和消除的.而未定系统误差是指实验过程中不能确切地掌握其大小和方向,或没有必要去掌握它的规律,而只需要估计它的极限范围的系统误差.我们在实验中遇到的大部分测量仪器误差属于这一类.它们虽然有系统误差特征,但在大多数情况下,其本身的规律比较复杂,修正比较麻烦;另一方面,测量一般也只要求掌握系统误差的大小范围和方向,也不必要花大力气去处理它.如量程为 U_0 的 0.5 级电压表,表明在被测量的范围内,测量值 U 的最大误差为 $\pm U_0 \times 0.5\%$ 。

2. 偶然误差(又称随机误差)

在实际相同的条件下,多次测量同一物理量时,误差的绝对值和符号的变化,时大时小,时正时负,以随机的方式变化的误差。

(1) 偶然误差来源

是由大量微小的涨落性的个别扰动累积而成的。

① 判断的起伏,如用仪器时对最小分度以下进行估读,仪器调整和操作上的不一致,而观测者由于感官分辨能力的局限性时时改变。

② 测量工作状态的偶然变化,如空气流动,温度起伏,湿度、压强的变化,电源电压的波动等。

③ 实验和测量过程中各种外界因素的干扰,如振动、电磁场、热、光、声等。

④ 被测物体本身的不确定性,如钢丝的直径,由于加工方面的技术困难,一般不可能很均匀,而在不同位置、不同方向去测量其值是不完全相同的,因而钢丝的直径是不确定的,只能去测它的平均直径。

(2) 偶然误差的规律

对一般物理实验和大多数测量来说,认为产生偶然误差的原因是相对独立的,微小的多种因素影响的综合效果,而不是某一因素起主要作用.由概率统计论证明,此时偶然误差将服从正态分布(也称为高斯分布),实际的观测结果也证实了这一点。

正态分布的特征:

① 有界性

偶然误差的绝对值不会超过一定界限。

② 单峰性

绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

③ 对称性

绝对值相等的正负误差出现的概率相等。

④ 抵偿性

正负误差的代数和为零。

这一统计规律在数学上可用概率密度函数(高斯误差分布函数)来描述:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2} \quad (2-9)$$

式中 $f(\delta)$ 为概率密度函数,即误差值 δ 在其附近单位区间内出现的概率, $\delta = x - x_0$ 为测量值的误差, σ 是高斯分布函数的唯一参量,表示在一定条件下随机误差的离散程度。

高斯分布曲线如图 2-3 所示。横坐标表示误差值,纵坐标表示概率密度的大小。坐标原点相当于 $\delta=0$,对应着真值 x_0 。曲线下的总面积表示各种可能误差值出现的总概率,为

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (2-10)$$

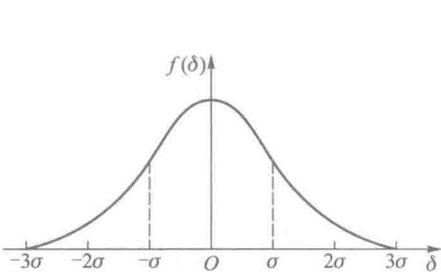


图 2-3 高斯分布曲线

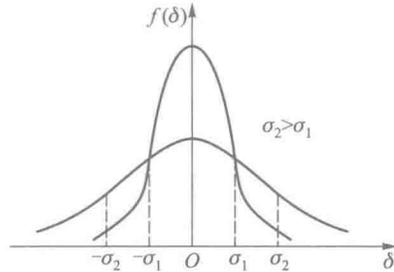


图 2-4 不同标准误差的高斯分布曲线

σ 是高斯分布曲线成拐点的横坐标,称为标准误差(均方根误差),它的大小确定曲线的形状,如图 2-4 所示。 σ 大,表明随机误差离散程度大,测量的精密度低,曲线形状低而宽;反之,曲线形状高而窄。因而参量 σ 用来量度测量的精密度。 σ 的数学表达式是

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (2-11)$$

式中,测量次数趋于无限大。

由概率密度分布函数的定义式(2-9),可计算出某次测量偶然误差出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率

$$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \quad (2-12)$$

NOTE

同样可以计算,某次测量偶然误差出现在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为

$$P = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta) d\delta = 0.955 \quad (2-13)$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta) d\delta = 0.997 \quad (2-14)$$

以上三式所表示的积分面积如图 2-5 中阴影部分所示.

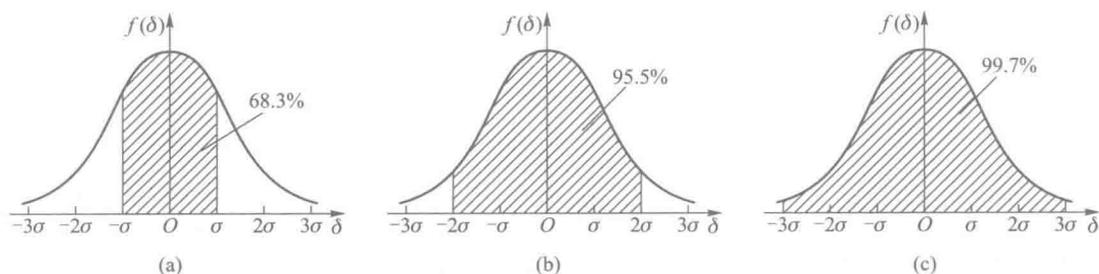


图 2-5 不同标准误差对应的积分面积

通过以上的分析可以得出标准误差 σ 所表示的概率意义. 对物理量 x 任做单次测量时, 测量误差落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间的可能性为 68.3%, 落在 -2σ 到 $+2\sigma$ 之间的可能性为 95.5%, 而落在 -3σ 到 $+3\sigma$ 之间的可能性为 99.7%. 由于标准误差 σ 具有这样明确的概率含义, 因此, 国内外已普遍采用标准误差作为评价测量优劣的指标.

实际测量的次数 n 是不可能达到无穷大的, 而且真值 x_0 一般也无法确知, 因此, 计算标准误差 σ 的公式 (2-9) 只具有理论上的意义而没有实际应用价值. 那么, 在对物理量 x 进行的有限次测量而真值又不可确知的情况下, 确定 σ 可根据偶然误差的可抵偿性, 即在相同的测量条件下对同一物理量进行多次重复测量, 每一次测量的误差时大时小、时正时负, 但误差的代数和趋于零. 用测量列 x_1, x_2, \dots, x_n 表示对物理量 x 进行 n 次测量的值, 那么

$$\begin{aligned} \delta_1 &= x_1 - x_0 \\ \delta_2 &= x_2 - x_0 \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_n &= x_n - x_0 \end{aligned}$$

将以上各式相加, 得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

由于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

因此有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x} \rightarrow x_0$$

可见,测量次数越多,算术平均值 \bar{x} 越接近真值 x_0 . 可以用算术平均值 \bar{x} 作为真值 x_0 的最佳估计值. 在实际测量过程中用残差来计算每次测量的偏差:

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (2-15)$$

可以证明,当测量次数为有限次时,可以用标准偏差 S_x 作为标准误差 σ 的估计值. S_x 的计算公式如下:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-16)$$

有时也简称 S_x 为标准差,它具有与标准误差 σ 相同的概率含义. 式(2-16)称为贝塞尔(Bessel)公式,在实际测量中经常用到它. 一般情况下,对 x 进行不同组的有限次测量,各组结果的算术平均值是不相同的. 可以证明,平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 为 S_x 的 $1/\sqrt{n}$,即

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-17)$$

3. 粗大误差

粗大误差是由实验者的失误造成的,如在记录和计算数据时写错数据,或者实验操作不当、仪器损坏等. 这是一种人为因素的错误,实验者必须要避免它. 我们所说的误差不应包括这类误差. 粗大误差属于异常数据,对于剔除测量列中异常数据的标准有几种,如 $3\sigma_x$ 准则、 t 准则、格鲁布斯准则、肖维涅准则等.

(1) $3\sigma_x$ 准则(莱以特准则)

统计理论表明,测量值的偏差超过 $3\sigma_x$ 的概率已小于1%. 因此,可以认为偏差超过 $3\sigma_x$ 的测量值是由其他因素或过失造成的,为异常数据,应当剔除. 剔除的方法是将多次测量所得的一系列数据,算出各测量值的偏差 Δx_i 和标准偏差 σ_x ,把其中最大的 Δx_j 与 $3\sigma_x$ 比较,若 $\Delta x_j > 3\sigma_x$,则认为第 j 个测量值是异常数据,舍去不计. 剔除 x_j 后,对余下的各测量值重新计算偏差和标准偏差,并继续审查,直到各个偏差均小于 $3\sigma_x$ 为止.

(2) 罗曼诺夫斯基准则(t 准则)

数理统计证明,当测量次数较少时,按 t 分布的实际误差分布范围来判别粗大误差较为合理. 以 t 分布为依据建立了罗曼诺夫斯基准则,又称为 t 检验准则.

设对某量进行多次等精度测量,得 x_1, x_2, \dots, x_n ,若认为测量值 x_j 为可疑数据,将其剔除后计算平均值和标准差(计算时不包括 x_j):

$$\bar{x} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq j}^n x_i, \quad S' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, i \neq j}^n v_i^2}{n-2}}$$

若

$$|x_m - \bar{x}'| > kS'$$

则将 x_m 剔除 (k 值查表 2-1).

表 2-1 罗曼诺夫斯基准则检验系数 $k(n-1, \alpha)$

$k \backslash \alpha$ $n-1$	α		$k \backslash \alpha$ $n-1$	α		$k \backslash \alpha$ $n-1$	α	
	0.01	0.05		0.01	0.05		0.01	0.05
4	11.46	4.97	9	3.71	2.51	14	3.17	2.26
5	6.53	3.56	10	3.54	2.43	15	3.12	2.24
6	5.04	3.04	11	3.41	2.37	20	2.95	2.165
7	4.36	2.78	12	3.31	2.33	30	2.81	2.08
8	3.96	2.62	13	3.23	2.29			

(3) 格鲁布斯 (Grubbs) 准则

若有一组由测量得出的数值, 其中某次测量得出的数值的偏差的绝对值 $|\Delta x_i|$ 与该组测量列的标准偏差 σ_x 之比大于某一阈值 $g_0(n, 1-P)$, 即

$$|\Delta x_i| > g_0(n, 1-P) \cdot \sigma_x$$

则认为此测量值中有异常数据, 并可予以剔除. 这里 $g_0(n, 1-P)$ 中的 n 为测量数据的个数. 而 P 为服从此分布的置信概率. 一般取 P 为 0.95 和 0.99 (至于在处理具体问题时, 究竟取哪个值则由实验者自己来决定). 我们将在表 2-2 中给出 $P = 0.95, 0.99$ 时或 $1-P = 0.05, 0.01$ 时, 不同的 n 值所对应的 g_0 值.

表 2-2 $g_0(n, 1-P)$ 值

$n \backslash 1-P$	$1-P$		$n \backslash 1-P$	$1-P$	
	0.05	0.01		0.05	0.01
3	1.15	1.15	17	2.48	2.78
4	1.46	1.49	18	2.50	2.82
5	1.67	1.75	19	2.53	2.85
6	1.82	1.94	20	2.56	2.88
7	1.94	2.10	21	2.58	2.91
8	2.03	2.22	22	2.60	2.94
9	2.11	2.32	23	2.62	2.96
10	2.18	2.41	24	2.64	2.99
11	2.23	2.48	25	2.66	3.01
12	2.28	2.55	30	2.74	3.10
13	2.33	2.61	35	2.81	3.18
14	2.37	2.66	40	2.87	3.24
15	2.41	2.70	45	2.91	3.29
16	2.44	2.75	50	2.96	3.34

综上所述, 随机误差和系统误差在产生原因、性质、特点和处理方法上是不同的, 但是它们又有密切的联系. 在实际测量时二者可能同时出现. 一般仪器误差既

包含系统误差也包含随机误差. 当实验条件变化时, 随机误差和系统误差又可能互相转化. 这要求我们根据具体情况分析误差的性质, 再进行相应的处理.

三、测量的精密度、准确度、精确度

我们常用精度反映测量结果中误差大小的程度. 误差小的精度高, 误差大的精度低, 这里精度却是一个笼统的概念, 它并不明确表示描述的是哪一类误差, 为描述更具体, 我们把精度分为精密度、准确度和精确度.

1. 精密度

精密度表示测量结果中的随机误差大小的程度, 它是指在一定条件下进行重复测量时, 所得结果的相互接近程度, 它用来描述测量的重复性. 精密度高, 即测量数据得重复性好, 随机误差较小.

2. 准确度

准确度表示测量结果中系统误差大小的程度, 用来描述测量值接近真值的程度. 准确度高, 即测量结果接近真值的程度高, 系统误差小.

3. 精确度

精确度是对测量结果中系统误差和随机误差的综合描述. 它是指测量结果的重复性及接近真值的程度.

为了形象地说明这三个概念的区别和联系, 我们以打靶为例说明(图 2-6):

- (a) 精密度高而准确度较差;
- (b) 准确度高而精密度较差;
- (c) 精密度和准确度都很高, 即精确度很高.

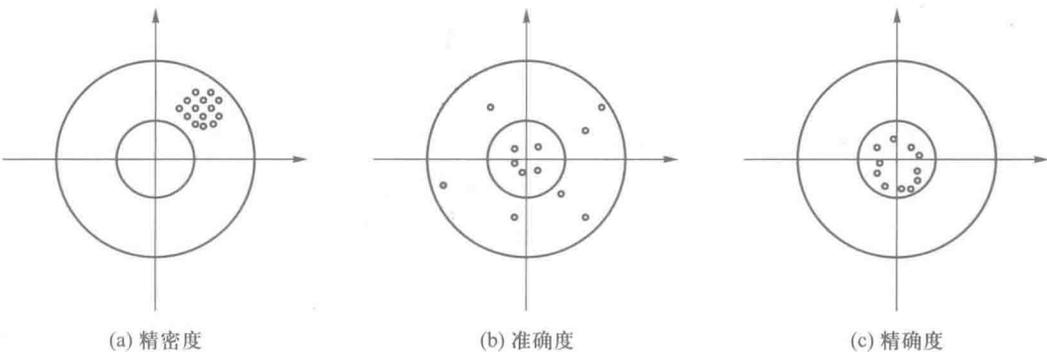


图 2-6 测量的精密度、准确度和精确度(以打靶为例)

§ 2.3 测量结果的不确定度评定

在测量过程中, 测量误差是普遍存在的. 各种误差因素必然导致测量结果偏离真值, 即具有误差, 且每次结果的误差又具有一定的不确定性. 为了对测量结果的这种不确定程度进行定量的估计, 需要引入一个新的概念——不确定度. 1993 年,

国际计量局(BIPM)等七个国际组织正式发布了《测量不确定度表示指南》,简称“GUM”,指南中规范了各领域中测量不确定度计算和表达的方法.我国自1999年5月1日起实施GUM,科学、准确、规范地表示测量结果.

不确定度反映了可能存在的误差分布范围,即误差的随机误差分量和未定系统误差分量的联合分布范围,这个范围叫做置信区间,这个区间以一定的概率(叫做置信概率)包含着被测量的真值.不确定度越大,置信区间内包含真值的置信概率就越高,即测量结果落在该区间内的把握就越大.置信区间的半宽度就是测量不确定度的大小.所以说,测量不确定度是测量质量的一个极其重要的指标.

例如:测量人体温度为 $37.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,加或减 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,置信概率为95%,则该结果可以表示为 $(37.2\pm 0.1)\text{ }^{\circ}\text{C}$,不确定度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,置信概率为 $P=95\%$.这个表述是说,我们此次测量的人体温度处在 $37.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $37.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,有95%的把握.

由于误差来源不同,一个直接测量的不确定度会有很多分量,按获得的方法可把这些分量分为A类不确定度和B类不确定度.

注意,A、B两类不确定度与传统划分的随机误差、系统误差并不存在简单的对应关系.不确定度理论仍保留了系统误差的概念.

研究不确定度的意义,在于它能够科学地反映测量结果的数值和可靠程度;可以根据对测量不确定度的要求,确定实验方案,选择仪器和环境;同时能够找出和减小系统误差,提高实验精度.

不确定度必须正确评价.如果评价得过大,则在实验中会因怀疑结果的正确性而不能果断地作出判断,在生产中会因测量结果不能满足要求而造成浪费;如果评价得过小,在实验中可能会得出错误的结论,在生产中则产品质量不能保证,造成危害.

测量结果是否有用,在很大程度上取决于其不确定度的大小,所以测量结果必须有不确定度说明时,才是完整和有意义的.一个完整的测量结果应包括测量对象、测量对象的量值、测量不确定度、测量值的单位(又称测量的四个要素).

例如电桥法测某一电阻的结果可表示为: $R=(910.3\pm 0.4)\Omega$.这里, R 代表测量对象(电阻),910.3是被测量值,0.4为测量不确定度, Ω 是电阻的单位.

一、标准不确定度的A类评定(u_A)

不确定度的A类评定,就是用统计方法计算出多次重复测量时与随机误差有关的分量.其基本方法和步骤如下:

(1) 在相同条件下对物理量 x 进行 n 次测量,得到测量数据列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$.

(2) 计算测量数据列的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-18)$$

特殊情况:如果存在已定系统误差 Δx_0 ,则要计算测量值的修正值: $x = \bar{x} - \Delta x_0$.

(3) 利用贝塞尔公式(2-17)计算算术平均值的实验标准差 S_x ,就得到平均值 \bar{x}_0 的A类标准不确定度

$$u_A(\bar{x}) = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-19)$$

二、标准不确定度的 B 类评定 (u_B)

不确定度的 B 类评定,不是用统计的方法,而是用经验或资料以及假设的概率分布估计出的不确定度与未定系统误差有关分量,用估计的标准偏差表示。

获得 B 类标准不确定度的信息来源一般有:以前的观测数据;对有关技术资料 and 测量仪器的了解和经验;生产部门提供的技术说明文件;校准证书、检定证书或其他文件提供的数据、准确度的级别,包括目前暂在使用的极限误差;手册或某些资料给出的参考数据及其不确定度;规定实验方法的国家标准或类似技术文件中给出的重复性限或复现性等。信息的来源不同,评定的方法也不同。

在本书中,对 B 类不确定度,我们主要讨论仪器不准确对应的不确定度。由于仪器误差是仪器的最大允许误差限 Δ_m ,表示误差落在区间 $[-\Delta_m, \Delta_m]$ 内概率为 100%,这样一来,B 类标准不确定度为

$$u_B(x) = \frac{\Delta_m(x)}{k} \quad (2-20)$$

式中的 $\Delta_m(x)$ 就是置信区间的半宽度,而包含因子 k 由可能的误差概率分布决定:按正态分布、均匀分布和三角分布,分别取 $3\sqrt{3}$ 和 $\sqrt{6}$ 。在大学物理实验中,被测量既受随机因素影响又受系统影响,而在对影响量缺乏任何其他信息的情况下,一般假设为均匀分布,即取 $k=\sqrt{3}$ 。

三、标准不确定度合成 (C 类不确定度 u_C)

1. 直接测量量标准不确定度合成

在相同置信概率下,把不确定度的 A、B 两类分量用“方和根”方法合成,便得到合成标准不确定度(也叫做总标准不确定度),即

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}) + u_B^2(x)} \quad (2-21)$$

直接测量量的最终测量结果可以表示为

$$x = \bar{x} \pm u_C(x) \quad (2-22)$$

这个结果表明置信区间为 $[\bar{x} - u_C(x), \bar{x} + u_C(x)]$, $u_C(x)$ 为置信区间的半宽度,如果是正态分布,则置信概率为 $P=68.3\%$ 。

2. 间接测量量不确定度的合成(或传递)

设 N 为间接测量量,它是相互独立的 3 个直接测量量 x, y, z 的函数,即

$$N = f(x, y, z) \quad (2-23)$$

显然,间接测量的近似真实值和合成不确定度必须由直接测量结果通过函数式计算出来。既然直接测量有误差,那么间接测量也必有误差,这就是误差的传递(或合成)。由直接测量量及其不确定度来计算间接测量量不确定度的关系式称为误差的传递公式。

设各直接测量的测量结果分别为

$$x = \bar{x} \pm u_c(x), \quad y = \bar{y} \pm u_c(y), \quad z = \bar{z} \pm u_c(z)$$

(1) 如果将各个直接测量的近似真实值 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 代入函数表达式(2-23)中, 即可得到间接测量的近似真实值

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \quad (2-24)$$

(2) 求间接测量的合成不确定度. 由于不确定度均为微小量, 类似于高等数学中的微小增量, 对函数式 $N = f(x, y, z)$ 求全微分, 即得

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz$$

式中 dN 、 dx 、 dy 、 dz 均为微小量, 代表各变量的微小变化, dN 的变化由各自变量的变化决定, $\frac{\partial f}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial f}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial f}{\partial z}$ 为函数对自变量的偏导数. 将上面全微分式中的微分项改写为不确定度 u , 并将微分式中的各项求“方和根”, 即为间接测量的合成不确定度

$$u_c(N) = \sqrt{\left[\frac{\partial f}{\partial x} u_c(x) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial y} u_c(y) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial z} u_c(z) \right]^2} \quad (2-25)$$

(3) 当间接测量的函数表达式为积或商(或含和、差的积或商)的形式时, 为了使运算简便起见, 可以先将函数式两边同时取自然对数, 然后再求全微分, 即

$$\frac{dN}{N} = \frac{\partial \ln f}{\partial x} dx + \frac{\partial \ln f}{\partial y} dy + \frac{\partial \ln f}{\partial z} dz$$

同样改写微分项为不确定度, 再求其“方和根”, 便得到间接测量的相对不确定度, 即

$$u_{cr}(N) = \frac{u_c(N)}{\bar{N}} = \sqrt{\left[\frac{\partial \ln f}{\partial x} u_c(x) \right]^2 + \left[\frac{\partial \ln f}{\partial y} u_c(y) \right]^2 + \left[\frac{\partial \ln f}{\partial z} u_c(z) \right]^2} \quad (2-26)$$

如果 $u_{cr}(N)$ 、 \bar{N} 已知, 则由式(2-26)可以求出合成不确定度

$$u_c(N) = \bar{N} \cdot u_{cr}(N) \quad (2-27)$$

在计算间接测量的不确定度时, 如果函数表达式仅为和、差形式, 可以直接利用式(2-25), 求出间接测量的合成不确定度 $u_c(N)$; 如果函数表达式为积或商(或积商和差混合)等较为复杂的形式, 可采用式(2-26), 先求出相对不确定度 $u_{cr}(N)$, 再利用式(2-27)求出合成不确定度 $u_c(N)$. 表 2-3 列出一些常用函数的不确定度传递公式.

表 2-3 常用函数的不确定度传递公式

函数表达式	不确定度传递(合成)公式
$N = ax + by$	$u_c(N) = \sqrt{a^2 u_c^2(x) + b^2 u_c^2(y)}$
$N = ax - by$	
$N = xy$	$u_{cr}(N) = \sqrt{\left[\frac{u_c(x)}{\bar{x}} \right]^2 + \left[\frac{u_c(y)}{\bar{y}} \right]^2}$
$N = x/y$	
$N = x^m y^n z^p$	$u_{cr}(N) = \sqrt{\left[m \frac{u_c(x)}{\bar{x}} \right]^2 + \left[n \frac{u_c(y)}{\bar{y}} \right]^2 + \left[p \frac{u_c(z)}{\bar{z}} \right]^2}$

(4) 最后,将对间接测量量 N 的测量结果写成如下标准形式:

$$N = \bar{N} \pm u_c(N)$$

需要指出的是,在进行测量不确定度评定时,往往不可能将所有不确定度来源所导致的不确定度分量都考虑在内,这样会使评定复杂化. 所以不确定度来源的分析尤为重要,每一个有影响的因素应不重复同时也不能遗漏. 重复将导致不确定度过大,遗漏将导致不确定度过小,应抓住对结果影响的不确定度来源.

有些不确定度分量的数值很小时,相对而言可以略去不计. 在计算合成不确定度式(2-25)中求“方和根”时,如果某一平方值小于其他平方值的 $1/9$,则这一项就可以略去不计,这一结论叫做微小误差准则. 在进行数据处理时,利用微小误差准则可减少不必要的计算.

NOTE

四、扩展不确定度 U 和包含因子 k

1. 扩展不确定度

对于科学研究和工程技术的实际需要来说,68.3%的置信概率显得太小,因而必须在更高的置信概率下来评定测量值的精度. 置信概率 P 通常取较大值,此时的不确定度称为扩展不确定度,常用标准不确定度的倍数表达,即

$$U = k u_c \quad (k \text{ 通常取 } 2 \sim 3) \quad (2-28)$$

比如,当 k 取 2 且对应不确定度分布为正态分布时,置信概率 P 约为 95%. 而当不确定度分布不明确时,我们不具体说它的置信概率是多少.

2. 包含因子和自由度

(1) 包含因子

为求得扩展不确定度而对合成标准不确定度所乘的数字因子 k ,称为包含因子,有时也称为覆盖因子.

包含因子的取值决定了扩展不确定度的置信水平. 在使用时 k 一般为 2 或 3. 在被测量估计值拉近于正态分布的情况下, k 就是 t 分布(学生分布)中的 t_p 值,即

$$k = t_p \quad (2-29)$$

扩展不确定度

$$U = k u_c = t_p u_c \quad (2-30)$$

评定扩展不确定度 U 时,已知 P 与自由度 i ,即可查表得到 t_p ,进而求得 U . 参见本节附录 2:“ t 分布在不同置信概率 P 与自由度 i 的 $t_p(i)$ 值”.

(2) 自由度

在概率论与数理统计中所定义的自由度,表示变量中的独立变量的个数,在这里表示不确定评定的可靠程度,自由度越大,不确定度可靠性越高. 自由度的确定如下:

- ① A 类标准不确定度的自由度: $i = n - 1$, 其中 n 为测量次数;
- ② B 类标准不确定度的自由度:

$$i_i = \frac{1}{2} \frac{u^2(x_i)}{\sigma^2[u(x_i)]} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (2-31)$$

其中方括号中的比值是 $u(x_i)$ 的相对不确定度,或者叙述为“不确定度的不确

定度”。

(3) 自由度的合成

合成标准不确定的自由度 i 并根据下式计算：

$$i = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{i_i}} \quad (2-32)$$

有效自由度 i_{eff} 的数值大小一般只取整数，小数位原则上只舍不进。

一般情况若我们不特别指明，不确定度均指扩展不确定度。

五、测量结果的表述规范

(1) 总不确定度数值截尾时，采取“只入不舍”的方法，以保证其置信概率不降低。

例如，计算得到的总不确定度为 $u_c(x) = 0.4212 \text{ m}$ ，截去后面的三位，便得到 $u_{\text{Cr}}(x) = 0.5 \text{ m}$ 。

(2) 如果测量结果是最终结果，其不确定度可用一位或两位有效数字表示。本书约定，当不确定度的第一位数字为 1、2、3 时，取两位有效数字，第一位数字 ≥ 4 时，取一位有效数字。

例如，某测量数据计算的不确定度为 $u_c(x_1) = 0.01383 \text{ m}$ ，则取 $u_c(x_1) = 0.014 \text{ m}$ ；另一个测量数据计算的不确定度为 $u_c(x_2) = 0.04332 \text{ m}$ ，则取 $u_c(x_2) = 0.04 \text{ m}$ 。

如果是作为间接测量的中间结果，其不确定度位数可比正常截断多取一位以免造成截尾误差的累积。

本书约定，测量结果的相对不确定度一律用两位数的百分数表示。

例如，某测量数据计算的相对不确定度为 $u_{\text{Cr}}(x) = 1.27549\%$ ，则取 $u_{\text{Cr}}(x) = 1.3\%$ 。

(3) 测量结果的有效数字位数由不确定度来确定。

测量结果的最后一位应与不确定度的最后一位对齐，即不确定度决定测量结果的有效数字位数。数据截断时其尾数按本教程采用的“4 舍 6 入 5 凑偶”的方法处理。测量结果与不确定度的数量级、单位要相同。

例如，某测量数据计算的平均值为 $\bar{x} = 1.83549 \text{ m}$ ，其不确定度计算得 $u_c(x) = 0.04347 \text{ m}$ ，则测量结果可表示为 $x = (1.84 \pm 0.05) \text{ m}$ 。

(4) 在测量结果后一般要求用括号注明置信概率的近似值。本书中为方便起见，在表示测量结果时，置信概率一般取 95%。

六、数据处理举例

例 2-1 用千分尺测量小钢球的直径，八次的测量值分别为 $d/\text{mm} = 2.125, 2.131, 2.121, 2.127, 2.124, 2.126, 2.123, 2.129$ ，千分尺的零点读数 d_0 为 $+0.008 \text{ mm}$ ，最小分度数值为 0.01 mm ，试写出测量结果的标准式。

解 (1) 求直径 d 的算术平均值

$$\begin{aligned}\bar{d}' &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^8 d_i = \frac{1}{8} \times (2.125 + 2.131 + 2.121 + 2.127 + 2.124 + 2.126 + 2.123 + 2.129) \text{ mm} \\ &= 2.126 \text{ mm}\end{aligned}$$

(2) 修正千分尺的零点误差

$$\bar{d} = \bar{d}' - d_0 = (2.126 - 0.008) \text{ mm} = 2.118 \text{ mm}$$

(3) 计算 A 类不确定度

$$\begin{aligned}u_A(\bar{d}) &= \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^8 (d_i - \bar{d}')^2} \\ &= \left\{ \frac{1}{8 \times (8-1)} \times [(2.125 - 2.126)^2 + (2.131 - 2.126)^2 + (2.121 - 2.126)^2 + (2.127 - 2.126)^2 + (2.124 - 2.126)^2 + (2.126 - 2.126)^2 + (2.123 - 2.126)^2 + (2.129 - 2.126)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= 1.15 \times 10^{-3} \text{ mm} \approx 1.2 \times 10^{-3} \text{ mm}\end{aligned}$$

在本题中, $u_A(\bar{d})$ 是中间结果, 因此多取了一位, 下面计算 $u_B(d)$ 时也是如此。

(4) 计算 B 类不确定度

仪器误差取最小分度值的一半, 即 $\Delta_m = 0.005 \text{ mm}$, 因此

$$u_B(d) = \frac{\Delta_m}{\sqrt{3}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 2.9 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

(5) 合成不确定度

$$\begin{aligned}u_c(x) &= \sqrt{u_A^2(\bar{d}) + u_B^2(d)} = \sqrt{(1.2 \times 10^{-3})^2 + (2.9 \times 10^{-3})^2} \text{ mm} \\ &= 3.138 \times 10^{-3} \text{ mm} \approx 0.004 \text{ mm}\end{aligned}$$

$u_c(x)$ 是最终结果, 因此取了一位, 而且采取了“只入不舍”的方法。

(6) 测量结果

$$d = \bar{d} \pm u_c(d) = (2.118 \pm 0.004) \text{ mm}$$

(7) 相对不确定度

$$u_{cr}(d) = \frac{u_c(d)}{\bar{d}} \times 100\% = \frac{0.004}{2.118} \times 100\% = 0.18888\% \approx 0.19\%$$

按照约定, 测量结果的相对不确定度用两位数的百分数表示。

例 2-2 已知电阻 $R_1 = (50.2 \pm 0.5) \Omega$, $R_2 = (149.8 \pm 0.5) \Omega$, 求它们被串联后的总电阻 R 及合成不确定度。

解 串联电阻的阻值为

$$\bar{R} = \bar{R}_1 + \bar{R}_2 = (50.2 + 149.8) \Omega = 200.0 \Omega$$

合成不确定度

NOTE

$$\begin{aligned}
 u_c(R) &= \sqrt{\left[\frac{\partial R}{\partial R_1} u_c(R_1)\right]^2 + \left[\frac{\partial R}{\partial R_2} u_c(R_2)\right]^2} \\
 &= \sqrt{u_c^2(R_1) + u_c^2(R_2)} \\
 &= \sqrt{0.5^2 + 0.5^2} \Omega = 0.707 \Omega \approx 0.7 \Omega
 \end{aligned}$$

相对不确定度

$$u_{cr}(R) = \frac{u_c(R)}{R} \times 100\% = \frac{0.7}{200.0} \times 100\% = 0.35\%$$

测量结果为

$$R = \bar{R} \pm u_c(R) = (200.0 \pm 0.7) \Omega$$

例 2-3 已知金属环的内径 $D_1 = (2.880 \pm 0.004) \text{ cm}$, 外径 $D_2 = (3.600 \pm 0.004) \text{ cm}$, 高度 $h = (2.575 \pm 0.004) \text{ cm}$, 求环的体积和不确定度。

解 环体积为

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} h (\bar{D}_1^2 - \bar{D}_2^2) = \frac{\pi}{4} \times 2.575 \times (3.600^2 - 2.880^2) \text{ cm}^3 = 9.435733 \text{ cm}^3 \approx 9.436 \text{ cm}^3$$

取环体积的对数, 并计算偏导数:

$$\ln V = \ln \frac{\pi}{4} + \ln h + \ln(D_1^2 - D_2^2)$$

$$\frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial D_1} = \frac{2D_1}{D_1^2 - D_2^2}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial D_2} = -\frac{2D_2}{D_1^2 - D_2^2}$$

代入“方和根”合成公式(2-26)中, 得体积 V 的相对不确定度:

$$\begin{aligned}
 u_{cr}(V) &= \frac{u_c(V)}{\bar{V}} = \sqrt{\left[\frac{u_c(h)}{h}\right]^2 + \left[\frac{2D_1 u_c(D_1)}{D_1^2 - D_2^2}\right]^2 + \left[\frac{-2D_2 u_c(D_2)}{D_1^2 - D_2^2}\right]^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{0.004}{2.575}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 3.600 \times 0.004}{3.600^2 - 2.880^2}\right)^2 + \left(\frac{-2 \times 2.880 \times 0.004}{3.600^2 - 2.880^2}\right)^2} \\
 &= 0.008056 \approx 0.81\%
 \end{aligned}$$

由式(2-27), 得体积 V 的总不确定度:

$$u_c(V) = \bar{V} \cdot u_{cr}(V) = 9.436 \times 0.008056 \text{ cm}^3 = 0.07602 \text{ cm}^3 \approx 0.08 \text{ cm}^3$$

因此环体积为

$$V = (9.44 \pm 0.08) \text{ cm}^3$$

V 的表达式中, $\bar{V} = 9.436 \text{ cm}^3$ 的最后一位应与不确定度的最后一位取齐, 因此将小数点后的第三位数字 6 按照数字修约原则进到百分位, 所以为 $\bar{V} = 9.44 \text{ cm}^3$ 。

附录 1 教学中常用仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$

1. 为什么 u_B 取成 $\Delta_{\text{仪}}$ 呢?

在有限次直接测量结果的不确定度评定中, 如何分析“仪器误差”的影响, 是大学物理实验教学中的一个较难的问题, 也是一个十分重要的问题。所谓较难是指其

理论和实践还处于发展阶段,不够成熟;所谓重要是指 u_B 取成 $\Delta_{\text{仪}}$ 具有一定的合理性,使不确定度的估计趋于正确和全面。

评定 B 类标准不确定度,以数字电压表制造说明为例:“仪器检定 1 至 2 年间,其 1 V 内精度为 $(14 \times 10^{-6} \times \text{读数}) + 2 \times 10^{-6} \times \text{测量范围}$ ”。设检定 20 个月 after 仪器在 2 V 内测量电压为 V , V 的重复观测值平均为 $\bar{V} = 0.928\ 571\ \text{V}$, 其 A 类标准不确定度 $u_A(\bar{V}) = 12\ \mu\text{V}$; B 类标准不确定度可以由制造厂商说明书评定,并认为所得值使 \bar{V} 的附加修正 $\Delta\bar{V}$ 产生一个对称信赖限, $\Delta\bar{V}$ 期望值为 0 (即 $\overline{\Delta\bar{V}} = 0$), 在限内以等概率在任何处出现, ΔV 的对称矩形概率分布半宽 A 为

$$A = 14 \times 10^{-6} \times 0.928\ 571\ \text{V} + 2 \times 10^{-6} \times 1\ \text{V} = 15\ \mu\text{V}$$

$$u^2(\Delta\bar{V}) = 75\ \mu\text{V}^2, \quad u(\Delta\bar{V}) = 8.7\ \mu\text{V}$$

上例说明:一定条件下完全可以把“高精度”仪器的误差限值当作非随机分量,进而评定 B 类不确定度 u_B , 将 B 类与 A 类合成。

在《互换性与技术测量》和《实用计量全书》等测量专著中,也有类似将计量器具的总不确定度(相当于仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$)与其他测量不确定度分量“方和根”合成,以求得测量结果的总不确定度(测量极限误差)的典型例子。

由类似的典型事例说明: $\Delta_{\text{仪}}$ 不是以随机分量为主,而是非随机分量占的比重较大,将 $\Delta_{\text{仪}}$ 简化、纯化为非随机分量的 B 类不确定度 u_B 是符合情理的;在有限次等精度测量中,那种只估计不确定度的 A 类分量 u_A , 而将 $\Delta_{\text{仪}}$ 因素等的 B 类分量 u_B 完全抛开不计的做法是不可取的。由此可见“方和根”式中的 u_B 取成 $\Delta_{\text{仪}}$ 是比较全面和合理的。

2. 约定正确使用仪器时选取的 $\Delta_{\text{仪}}$ 值

米尺 $\Delta_{\text{仪}} = 0.5\ \text{mm}$

游标卡尺(20、50 分度) $\Delta_{\text{仪}} = \text{最小分度值}(0.05\ \text{mm 或 } 0.02\ \text{mm})$

千分尺 $\Delta_{\text{仪}} = 0.004\ \text{mm 或 } 0.005\ \text{mm}$

分光计 $\Delta_{\text{仪}} = \text{最小分度值}(1' \text{ 或 } 30'')$

读数显微镜 $\Delta_{\text{仪}} = 0.005\ \text{mm}$

各类数字式仪表 $\Delta_{\text{仪}} = \text{仪器最小读数}$

计时器(1 s、0.1 s、0.01 s) $\Delta_{\text{仪}} = \text{仪器最小分度}(1\ \text{s、} 0.1\ \text{s、} 0.01\ \text{s})$

物理天平(0.1 g) $\Delta_{\text{仪}} = 0.05\ \text{g}$

电桥(QJ23 型) $\Delta_{\text{仪}} = K\% \cdot R$ (K 是准确度或级别, R 为示值)

电势差计(UJ33 型) $\Delta_{\text{仪}} = K\% \cdot V$ (K 是准确度或级别, V 为示值)

转柄电阻箱 $\Delta_{\text{仪}} = K\% \cdot R$ (K 是准确度或级别, R 为示值)

电表 $\Delta_{\text{仪}} = K\% \cdot M$ (K 是准确度或级别, M 为示值)

其他仪器、量具 $\Delta_{\text{仪}}$ 根据实验实际情况由实验室给出示值误差

NOTE

附录2 t 分布在不同置信概率 P 与自由度 i 的 $t_p(i)$ 值

自由度 i	置信概率 P						
	80%	90%	95%	98%	99%	99.50%	99.73%
1	3.077 68	6.313 75	12.706 20	31.820 52	63.656 74	127.321 34	235.783 69
2	1.885 62	2.919 99	4.302 65	6.964 56	9.924 84	14.089 05	19.206 02
3	1.637 74	2.353 36	3.182 45	4.540 70	5.840 91	7.453 32	9.218 70
4	1.533 21	2.131 85	2.776 45	3.746 95	4.604 09	5.597 57	6.620 07
5	1.475 88	2.015 05	2.570 58	3.364 93	4.032 14	4.773 34	5.506 98
6	1.439 76	1.943 18	2.446 91	3.142 67	3.707 43	4.316 83	4.903 99
7	1.414 92	1.894 58	2.364 62	2.997 95	3.499 48	4.029 34	4.529 91
8	1.396 82	1.859 55	2.306 00	2.896 46	3.355 39	3.832 52	4.276 58
9	1.383 03	1.833 11	2.262 16	2.821 44	3.249 84	3.689 66	4.094 20
10	1.372 18	1.812 46	2.228 14	2.763 77	3.169 27	3.581 41	3.956 89
11	1.363 43	1.795 88	2.200 99	2.718 08	3.105 81	3.496 61	3.849 89
12	1.356 22	1.782 29	2.178 81	2.681 00	3.054 54	3.428 44	3.764 24
13	1.350 17	1.770 93	2.160 37	2.650 31	3.012 28	3.372 47	3.694 15
14	1.345 03	1.761 31	2.144 79	2.624 49	2.976 84	3.325 70	3.635 76
15	1.340 61	1.753 05	2.131 45	2.602 48	2.946 71	3.286 04	3.586 39
16	1.336 76	1.745 88	2.119 91	2.583 49	2.920 78	3.251 99	3.544 09
17	1.333 38	1.739 61	2.109 82	2.566 93	2.898 23	3.222 45	3.507 46
18	1.330 39	1.734 06	2.100 92	2.552 38	2.878 44	3.196 57	3.475 44
19	1.327 73	1.729 13	2.093 02	2.539 48	2.860 93	3.173 72	3.447 20
20	1.325 34	1.724 72	2.085 96	2.527 98	2.845 34	3.153 40	3.422 12
21	1.323 19	1.720 74	2.079 61	2.517 65	2.831 36	3.135 21	3.399 69
22	1.321 24	1.717 14	2.073 87	2.508 32	2.818 76	3.118 82	3.379 52
23	1.319 46	1.713 87	2.068 66	2.499 87	2.807 34	3.104 00	3.361 29
24	1.317 84	1.710 88	2.063 90	2.492 16	2.796 94	3.090 51	3.344 72
25	1.316 35	1.708 14	2.059 54	2.485 11	2.787 44	3.078 20	3.329 60
26	1.314 97	1.705 62	2.055 53	2.478 63	2.778 71	3.066 91	3.315 75
27	1.313 70	1.703 29	2.051 83	2.472 66	2.770 68	3.056 52	3.303 02
28	1.312 53	1.701 13	2.048 41	2.467 14	2.763 26	3.046 93	3.291 27
29	1.311 43	1.699 13	2.045 23	2.462 02	2.756 39	3.038 05	3.280 40

续表

自由度 i	置信概率 P						
	80%	90%	95%	98%	99%	99.50%	99.73%
30	1.310 42	1.697 26	2.042 27	2.457 26	2.750 00	3.029 80	3.270 30
40	1.303 08	1.683 85	2.021 08	2.423 26	2.704 46	2.971 17	3.198 74
50	1.298 71	1.675 91	2.008 56	2.403 27	2.677 79	2.936 96	3.157 12
60	1.295 82	1.670 65	2.000 30	2.390 12	2.660 28	2.914 55	3.129 91
70	1.293 76	1.666 91	1.994 44	2.380 81	2.647 90	2.898 73	3.110 73
80	1.292 22	1.664 12	1.990 06	2.373 87	2.638 69	2.886 97	3.096 48
90	1.291 03	1.661 96	1.986 67	2.368 50	2.631 57	2.877 88	3.085 48
100	1.290 07	1.660 23	1.983 97	2.364 22	2.625 89	2.870 65	3.076 73
110	1.289 30	1.658 82	1.981 77	2.360 73	2.621 26	2.864 76	3.069 61
120	1.288 65	1.657 65	1.979 93	2.357 82	2.617 42	2.859 86	3.063 69
∞	1.281 55	1.644 85	1.959 96	2.326 35	2.575 83	2.807 03	2.999 98

NOTE

§ 2.4 有效数字及其运算规则

由于物理测量中总存在误差,因而测量误差决定了测量值的位数只能是有限位数,测量结果数字最后一位应与误差相对应,不能随意取舍.因此,在物理测量中必须按照一定的表示方法和运算规则来正确表达和计算测量结果.

一、有效数字的概念

1. 有效数字的定义

测量结果中所有可靠数字加上末位(一位)有误差的数字统称为测量结果的有效数字.虽然最后一位数字是有误差的,但是它还是能够反映测量的客观实际.

测量结果有效数字位数的计算:自左至右,从第一个非零数字起至末位所有数字.例如 123.4 有四位有效数字,0.012 34 也有四位有效数字,23.600 有五位有效数字.

常数的有效数字为无限多位,可以根据需要取舍.例如圆周率 π ,根据需要可以取 3.14,也可以取 3.142、3.141 59 等.

2. 有效数字的读取

使用测量仪器测量数据时,必须使用有效数字来表示测量结果,即除了记录能准确读取的数字外,还必须记录一位有误差的数字,也就是说必须估读一位.

(1) 对于以刻度示值的仪器,准确数字应该是最小刻度的整数倍;有误差的一

位应该估读到最小刻度的十分位,即最小刻度十分之一的整数倍.如用最小刻度为 1 mm 的米尺测量长度时,应该估计到零点几毫米.用游标卡尺进行测量时应该估计到最小分度值的下一位,一般估计到最小分度值的二分之一.若测量值恰好为整数,最后必须添零至误差发生的那一位.

(2) 对于某些仪器读数时只需估计最小分度值.例如,仪器的最小分度值为 0.5,则 0.1~0.4,0.6~0.9 都是估计的,不必估到下一位.

(3) 对于数字显示型测量仪器,测量结果直接由仪器读取,不需估计,并且认定最末位为有误差位.若进行单次测量时,用读数的最小单位作为误差.如数字毫秒计的最小单位是 1 ms,则进行单次测量时其误差 $\delta=1$ ms.

3. 有效数字的基本特征

(1) 有效数字的位数与仪器精度(最小分度值)有关.

对于同一被测量,如果使用不同精度的仪器进行测量,则测得的有效数字的位数是不同的.仪器精度越高,测量结果的有效数字越多.例如,用精度为 0.01 mm 的千分尺测量一个物体的长度,读数为 8.344 mm,共有四位有效数字,其中前三位数字“8.34”是可靠数字,末位“4”是可疑数字.如果改用最小分度值为 1 mm 的米尺来测量,其读数为 8.3 mm,测量结果只有两位有效数字.

(2) 有效数字的位数与被测量的大小有关.

例如用同一仪器测量大小不同的被测量,被测量越大,测得结果的有效数字的位数也就越多.

(3) 有效数字的位数与单位的选择无关.

例如,34.2 m 不等于 3 420 cm,前者是三位有效数字,后者则是四位有效数字;也不等于 34 200 mm,它表示五位有效数字.有效数字变了表明所用的测量仪器也变了.如果要进行单位的换算,应该用科学计数法来表示,即

$$34.2 \text{ m} = 3.42 \times 10^3 \text{ cm} = 3.42 \times 10^4 \text{ mm}$$

4. 间接测得量有效数字尾数的舍入规则

在对直接测量量进行测量时,必须用有效数字表示其量值.而要通过有效数字进行运算得到间接测量量时,不可避免地会遇到间接测量量有效数字位数的舍入问题.根据国家的相关标准,将运算结果中多余的存疑数字舍去时,本书采用“4舍6入5凑偶”的规则.根据这个规则,当要保留 n 位有效数字时,如果

(1) 第 $n+1$ 位数字 ≤ 4 ,就把它直接舍掉;

(2) 第 $n+1$ 位数字 ≥ 6 时,则要向第 n 位数字进 1;

(3) 第 $n+1$ 位数字 = 5,并且后面的数字都为 0,则第 n 位数字若为偶数时就把这个 5 舍掉;第 n 位数字为奇数时就向前进 1;若第 $n+1$ 位数字 = 5 且后面还有不为 0 的任何数字时,无论第 n 位数字是奇数或偶数都进 1.

例如,要保留 3 位有效位数,则

$$9.82462 = 9.82 \text{ [见上述第(1)条]}$$

$$7.62671 = 7.63 \text{ [见上述第(2)条]}$$

$$9.82500 = 9.82 \text{ (5后面的数字都为0,并且它前面的2是偶数)}$$

3. 135 00=3. 14(5 后面的数字都为 0, 并且它前面的 3 是奇数)

6. 325 02=6. 33(5 后面有不为 0 的数字)

5. 测量误差决定了测量结果的有效数字位数

测量误差决定了测量结果的有效数字位数, 即测量误差所在的那一位必须与测量结果的最后一位(误差位)对齐. 对于直接测量量, 这一点比较好理解, 仪器的精度决定了误差发生在哪一位, 即测量结果的有效数字应该读到哪一位. 测量误差位与测量结果的有效数字的末位是对齐的, 也就决定了有效数字的位数.

对于间接测量量也是如此, 标准误差所在的那一位必须与测量结果的最后一位(误差位)对齐. 例如, 如果根据直接测量数据计算出圆柱体密度为 $\rho=7.8172\text{ g/cm}^3$, 其标准误差为 $S(\bar{\rho})=0.004\text{ g/cm}^3$, 说明误差发生在小数点后第三位, 密度测量结果中小数点后第三位的“7”也是有误差的, 根据有效数字的定义, 测量结果的有效数字中只保留一位有误差的数字, 应该与标准误差所在的那一位“3”对齐. 所以密度测量值中小数点后第四位的“2”没有必要保留. 结果应该写成 $\rho=\bar{\rho}\pm S(\bar{\rho})=(7.817\pm 0.004)\text{ g/cm}^3$. 反之, 如果 $\rho=7.817\text{ g/cm}^3$, 标准误差为 $S(\bar{\rho})=0.0004\text{ g/cm}^3$, 则结果应该写成 $\rho=\bar{\rho}\pm S(\bar{\rho})=(7.8170\pm 0.0004)\text{ g/cm}^3$. 总之, 测量结果有效数字的最末位必须与标准误差所在的那一位对齐. 如果写成 $\rho=(7.8172\pm 0.004)\text{ g/cm}^3$ 或 $\rho=(7.817\pm 0.0004)\text{ g/cm}^3$, 都是错误的.

NOTE

二、有效数字的运算规则

间接测量量是由直接测量量通过一定的函数关系计算出来的. 而各直接测量量的大小和有效数字位数一般都不相同, 间接测量量的有效数字必须根据函数运算关系来确定. 有效数字运算的总原则是: 准确数字之间运算得到的结果仍为准确数字; 准确数字与非准确数字之间运算、非准确数字与非准确数字之间运算得到的结果为非准确数字. 另外, 间接测量结果的误差也是由各直接测量结果的误差通过误差传递公式求出来的, 计算中也有如何确定有效数字的问题. 根据上述有效数字确定的总原则可以得到如下的结论.

1. 加减运算时有效数字的保留规则

根据有效数字运算的总原则, 作加减运算时, 其运算结果在小数点后面保留的位数应与参与运算的各运算数中小数点后位数最少的相同.

例 2-4 求下列运算后的结果及有效数字的位数:

$$23+12.56+58.8$$

解 作上述算式的竖式运算, 如图 2-7 所示. 参与运算的各数中用下划线表示的“3”“6”“8”都是有误差的数字, 根据有效数字运算的总原则, 经过加减运算后的结果中, 只有“9”是准确数字, 其他用下划线表示的三个数字“4”“3”“6”均为有误差的数字, 又因为测量结果中只保留一位有误差的数字 4, 必须将后两位有误差的数字“3”和“6”舍去, 所以最后结果为“94”, 两位有效数字.

$$\begin{array}{r} 23 \\ 12.56 \\ + 58.8 \\ \hline 94.36 \end{array}$$

图 2-7 加法运算时有效数字的保留规则

2. 乘除运算时有效数字的保留规则

根据有效数字运算的总原则,作乘法运算时,其运算结果的有效数字位数应与参与运算的各运算数中有效数字位数最少的相同。

例如, $124 \times 23.65 \div 82 = 36.753$, 由于参与运算的三个运算数中,除数“82”的有效数字的位数最少,为两位,所以运算结果也只保留两位有效数字,即结果为“36”。

3. 乘方、开方运算最后结果的有效数字位数

一般取与底数的有效数字位数相同,例如

$$(7.325)^2 \approx 53.66$$

$$\sqrt{32.8} \approx 5.73$$

4. 指数、对数、三角等函数运算结果的有效数字位数

由其改变量对应的数位决定。例如,在

$$\ln 2.32 = 0.841567\dots$$

中,2.32 的存疑数字为 0.02,那么我们将它的末位数改变 1 (即 $\ln 2.33 = 0.845868\dots$) 后比较,看出发生改变的位置在小数点后的第三位(千分位)上,就能得知 $\ln 2.32 \approx 0.842$ 。

5. π 、 e 、 $1/3$ 、 $\sqrt{2}$ 等常数的有效数字位数

可以认为是无限的,应取足够的有效位数参与运算,直接根据计算器上的计算结果取用。

以上这些结论,在一般情况下是成立的,有时会有 1 位的出入。为了防止数字截尾后运算引入新误差,在中间过程中,参与运算的数据可多取 1 至 2 有效数字。

在当今的计算机时代,对参与运算的数和中间运算结果都可不作修约,也可比传统方法估计的位数适当多取几位,只在最后结果表示前再作修约,这样可能更有利于实验效率的提高。

附录 3 国家标准 GB/T 8170—2008 数值修约规则与极限数值的表示和判定(节选)

在国家标准 GB/T 8170—2008 中,对需要修约的各种测量、计算的数值,已有明确的规定:

(1) 原文“拟舍弃数字的最左一位数字小于 5,则舍去,保留其余各位数字不变。”例如,在 3.605 6 43 数字中拟舍去 43 时, $4 < 5$, 则应为 3.605 6, 我们简称为“四舍”。

(2) 原文“拟舍弃数字的最左一位数字大于 5,则进一,即保留数字的末位数字加 1。”例如,在 3.605 623 数字中拟舍去 623 时, $6 > 5$, 则应为 3.606, 我们简称为“六入”。

(3) 原文“拟舍弃数字的最左一位数字是 5,且其后有非 0 数字时进一,即保留数字的末位数字加 1。”例如,在 3.605 123 数字中拟舍去 5123 时, $5 = 5$, 其后有非 0 数字,则应为 3.61, 我们简称为“五看右”。

(4) 原文“拟舍弃数字的最左一位数字为 5,且其后无数字或皆为 0 时,若所保

留的末位数字为奇数(1,3,5,7,9)则进一,即保留数字的末位数字加1;若所保留的末位数字为偶数(0,2,4,6,8),则舍去。”例如,在3.6050数字中拟舍去50时,5=5,且其后皆为零,而所保留的末位数字为偶数(0),则舍去,故此时应为3.60,简称为“五看右左”。

上述规定可概述为:拟舍弃数字中最左一位数小于等于4舍;大于等于6入;为5时则看其后,若为非0的数则入,若为0则往左看所保留的数的末位数,为奇数则入,为偶数则舍.可简述为“四舍六入五看右左”。

可见,采取惯用的“四舍五入”法进行数字修约,既粗糙又不符合国标的科学规定.类似的不严谨、甚至是错误的提法和做法有“大于5入,小于5舍,等于5保留位凑偶”;尾数“小于5舍,大于5入,等于5则把尾数凑成偶数”;“若舍去部分的数值,大于所保留的末位的一半,则末位加1,若舍去部分的数值,小于所保留的末位的一半,则末位不变”等.还要指出,在修约最后结果的不确定度时,为确保其可信性,要根据实际情况执行“宁大勿小”的原则。

NOTE

习题

1. 何谓绝对误差,何谓相对误差?

2. 测量结果的完整表示有几部分? 已知 \bar{A} 、 ΔA , 试写出测量量 A 的测量结果.

3. 指出下列情况属于随机误差还是系统误差:

- (1) 视差; (2) 天平零点漂移; (3) 游标卡尺零点不准; (4) 照相底板收缩; (5) 水银温度计毛细管不均匀; (6) 电表的接入误差; (7) 雷电影响; (8) 振动; (9) 电源不稳.

4. 求下列各组的 \bar{x} 、 S_x 值.

(1) 4.113, 4.198, 4.152, 4.147, 4.166, 4.154, 4.132, 4.170;

(2) 2.904, 2.902, 2.900, 2.903, 2.900, 2.904;

(3) 4.496, 4.504, 4.538, 4.504, 4.498, 4.490;

(4) 2.010, 2.010, 2.011, 2.012, 2.009, 1.980.

5. 用单摆测得重力加速度 $g_1 = (978 \pm 2) \text{ cm/s}^2$, 用自由落体仪测得重力加速度 $g_2 = (981.1 \pm 0.6) \text{ cm/s}^2$, 已知当地的 g 的标准值为 $g_0 = 979.729 \text{ cm/s}^2$.

(1) g_1 、 g_2 中哪一个存在系统误差?

(2) 如果不知道 g_0 , 从 g_1 和 g_2 能得出什么结论?

6. 一个铅圆柱体, 测得直径 $d = (2.04 \pm 0.01) \text{ cm}$, 高度 $h = (4.12 \pm 0.01) \text{ cm}$, 质量 $m = (149.18 \pm 0.05) \text{ g}$.

(1) 计算此物体的密度 ρ ;

(2) 计算 ρ 的不确定度和相对不确定度;

(3) 正确表示结果.

7. 实验结果表示.

(1) 用 1 m 的钢卷尺通过自准法测量某凸透镜的焦距 f 共 8 次, 得到:

116.5 mm、116.8 mm、116.5 mm、116.4 mm、116.6 mm、116.7 mm、116.2 mm、116.3 mm, 试计算并表示出该凸透镜焦距的实验结果.

(2) 用精密三级天平称一个物体的质量 m , 共称 6 次, 结果分别为 3.612 7 g、3.612 2 g、3.612 1 g、3.612 0 g、3.612 3 g 和 3.612 5 g, 试正确表示实验结果.

8. 对某实验样品(液体)的温度, 重复测量 10 次, 得如下数据:

$t/^\circ\text{C} = 20.42, 20.43, 20.40, 20.43, 20.42, 20.43, 20.39, 19.20, 20.40, 20.43;$

试计算平均值, 并判断其中有无粗大误差存在.

9. 写出下列函数的不确定度传递公式:

(1) $N = x + y - z;$

(2) $N = \frac{x-y}{x+y};$

(3) $n = \frac{\sin \varphi}{\varphi};$

(4) $f = \frac{L^2 + e^2}{4L}.$

10. 指出下列各量有几位有效数字:

(1) $L = 0.000\ 1\ \text{cm};$

(2) $c = 2.998\ 003\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1};$

(3) $g = 9.840\ 3\ \text{m/s}^2;$

(4) $\pi = 3.141\ 59;$

(5) $e = 2.718\ 281\ 8;$

(6) $E = 2.7 \times 10^{25}\ \text{J}.$

11. 把下列各数取成三位有效数字:

(1) 2.095 2;

(2) 0.752 49;

(3) 31.053;

(4) 5.316 4;

(5) 0.004 01;

(6) 7.865 6.

12. 按照误差理论和有效数字运算规则, 改正下列错误:

(1) $N = (10.800 \pm 0.2)\ \text{cm};$

(2) 0.287 0 有五位有效数字, 而另一种说法为三位有效数字, 请纠正, 并说明理由;

(3) $28\ \text{cm} = 280\ \text{mm}, 280\ \text{mm} = 28\ \text{cm};$

(4) $L = (28\ 000 \pm 8\ 000)\ \text{mm};$

(5) $0.022\ 1 \times 0.221 = 0.000\ 488\ 41;$

(6) $\frac{400 \times 1\ 500}{12.60 \times 11.60} = 600\ 000.$

13. 试利用有效数字运算规则计算下列各式:

(1) $1.048 + 0.3;$

(2) $98.754 + 1.3;$

(3) $2.0 \times 10^5 + 2\ 345;$

(4) $2.0 \times 10^{-5} + 2\ 345;$

(5) $2.00 \times 10^5 + 2\ 345;$

(6) $170.50 - 2.5;$

(7) $111 \times 0.100;$

(8) $237.5 \div 0.10;$

(9) $\frac{76.000}{40.00 - 2.0};$

(10) $\frac{50.00 \times (18.30 - 10.3)}{(103 - 3.0) \times (1.00 + 0.001)};$

(11) $\frac{100.0 \times (5.6 + 4.412)}{(98.00 - 77.0) \times 10.000} + 110.0;$

(12) $\frac{89.046\ 78 \times (3.081\ 1 - 1.98)}{3}.$

14. 某间接测量的函数关系为 $y = x_1 + x_2$, x_1, x_2 为实验值. 若

(1) $x_1 = (1.1 \pm 0.1)\ \text{cm}, x_2 = (2.387 \pm 0.001)\ \text{cm};$

(2) $x_1 = (37.13 \pm 0.02) \text{ mm}$, $x_2 = (0.623 \pm 0.001) \text{ mm}$;

试计算出 y 的测量结果.

15. 计算 $\rho = \frac{4m}{\pi D^2 H}$ 的结果, 其中 $m = (236.124 \pm 0.002) \text{ g}$; $D = (2.345 \pm 0.005) \text{ cm}$;

$H = (8.21 \pm 0.01) \text{ cm}$. 并且分析 m , D , H 对 ρ 的合成不确定度的影响.

16. 利用单摆测重力加速度 g , 当摆角 $\theta < 5^\circ$ 时, $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$, 式中摆长 $L = (97.69 \pm 0.02) \text{ cm}$, 周期 $T = (1.9842 \pm 0.0002) \text{ s}$. 求 g 和 $u(g)$, 并写出标准式.

第3章 实验数据处理的基本方法

测量获得了大量的实验数据,而要通过这些数据来得到可靠的实验结果或物理规律,则需要学会正确的数据处理方法.本章将介绍在物理实验中常用的列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等数据处理的基本方法.

§3.1 列表法

列表法是记录数据的基本方法.欲使实验结果一目了然,避免混乱,避免丢失数据,便于查对,列表法是记录的最好方法.将数据中的自变量、因变量的各个数值一一对应排列出来,简单明了地表示出有关物理量之间的关系;检查测量结果是否合理,及时发现问题;有助于找出有关量之间的联系和建立经验公式,这就是列表法的优点.设计记录表格时要求:

(1) 列表要简单明了,利于记录、运算处理数据和检查处理结果,便于一目了然地看出有关量之间的关系.

(2) 列表要标明符号所代表的物理量的意义.表中各栏中的物理量都要用符号标明,并写出数据所代表物理量的单位及量值的数量级要交代清楚.单位写在符号标题栏,不要重复记在各个数值上.

(3) 列表的形式不限,根据具体情况,决定列出哪些项目.有些个别量,与其他项目联系不大,可以不列入表内.列入表中的除原始数据外,计算过程中的一些中间结果和最后结果也可以列入表中.

(4) 表格记录的测量值和测量偏差,应正确反映所用仪器的精度,即正确反映测量结果的有效数字.一般记录表格还有序号和名称.

例如,用千分尺测量钢丝直径,数据列表如表3-1所示.

表3-1 钢丝直径记录表

次数	初读数/mm	未读数/mm	直径 D_i /mm	\bar{D} /mm	$u(D)$ /mm	U_r
1	0.002	2.147	2.145	2.145	0.001	0.06%
2	0.004	2.148	2.144			
3	0.003	2.149	2.146			
4	0.001	2.145	2.144			
5	0.004	2.149	2.145			
6	0.003	2.147	2.144			

§ 3.2 作图法

物理实验中所得的一系列测量数据,也可以用图线直观地表示出来,作图法就是在坐标纸上描绘出一系列数据间对应关系的图线.可以研究物理量之间的变化规律,找出对应的函数关系,求经验公式的常用方法之一.同时作好一张正确、实用、美观的图是实验技能训练中的一项基本功,每个同学都应该掌握.

一、图示法

物理实验所揭示的物理量之间的关系,可以用一个解析函数关系来表示,也可以用坐标纸在某一坐平面内由一条曲线表示,后者称为实验数据的图形表示法,简称图示法.

图示法的作图规则如下:

1. 选取坐标纸

作图一定要用坐标纸,根据不同实验内容和函数形式来选取不同坐标纸,在物理实验中最常用的是直角坐标纸.再根据所测得数据的有效数字和对测量结果的要求来定坐标纸的大小,原则上是以不损失实验数据的有效数字和能包括所有实验点作为选择依据,一般图上的最小分格至少应是有效数字的最后一位可靠数字.

2. 定坐标和坐标标度

通过以横坐标表示自变量,纵坐标表示因变量.写出坐标轴所代表的物理量的名称和单位.为了使图线在坐标纸上的布局合理和充分利用坐标纸,坐标轴的起点不一定从变量的“0”开始.图线若是直线,尽量使图线比较对称地充满整个图纸,不要使图线偏于一角或一边.为此,应适当放大(或缩小)纵坐标轴和横坐标轴的比例.在坐标轴上按选定的比例标出若干等距离的整齐的数值标度,标度的数值的位数应与实验数据有效数字位数一致.选定比例时,应使最小分格代表“1”“2”或“5”,不要用“3”“6”“7”“9”表示一个单位.因为这样不仅使标点和读数不方便,而且也容易出错.

3. 标点

根据测量数据,找到每个实验点在坐标纸上的位置,用铅笔以“×”标出各点坐标,要求与测量数据对应的坐标准确地落在“×”的交点上.一张图上要画几条曲线时,每条曲线可用不同标记如“+”“⊙”“△”等以示区别.

4. 连线

用直尺、曲线板、铅笔将测量点连成直线或光滑曲线,校正曲线要通过校正点连成折线.因为实验值有一定误差,所以曲线不一定要通过所有实验点,只要求线的两旁实验点分布均匀且离曲线较近,如图3-1所示.在曲线的转折处多测几个点,对个别偏离很大的点,要重新审核,进行分析后决定取舍.

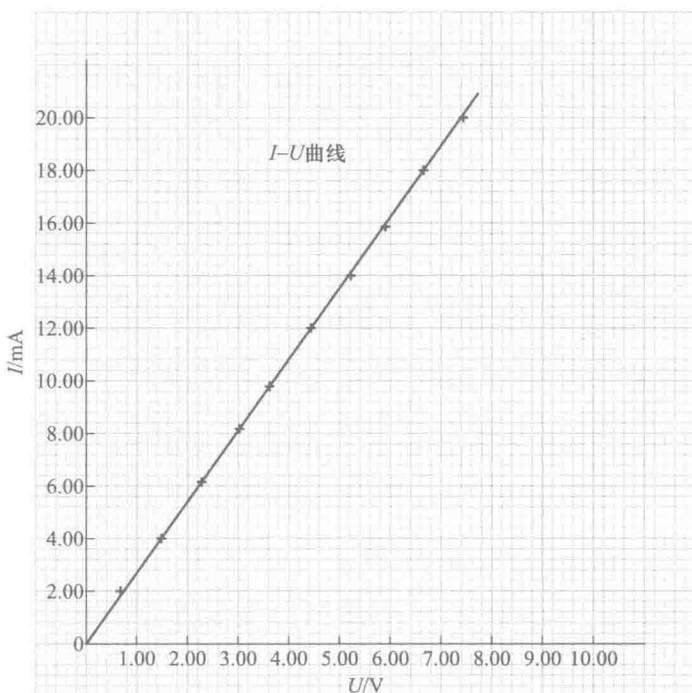


图 3-1 作图法

5. 写出图纸名称

要求在图纸的明显位置标明图纸的名称,即图名、作者姓名、日期、班级等.

二、图解法

图解法就是根据实验数据所作好的图线,用解析法找出相应的函数形式,如线性函数、二次函数、幂函数等,并求出其函数的参数,得出具体的方程式.特别是当图线是直线时,采用此法更为方便.

1. 直线图解法

(1) 取点

在直线上任取两点 $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, 其坐标值最好是整数值. 用“ Δ ”符号表示所取的点,与实验点相区别. 一般不要取原实验点. 所取两点在实验范围内应尽量彼此分开一些,以减小误差.

(2) 求斜率 k

在坐标纸的适当空白的位置,由直线方程 $y=kx+b$, 写出斜率的计算公式:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3-1)$$

将两点坐标值代入上式,写出计算结果.

(3) 求截距 b

如果横坐标的起点为零,其截距 b 为 $x=0$ 时的 y 值,其直线的截距即由图上直接读出. 如果起点不为零,可由下式求出截距:

$$b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} \quad (3-2)$$

例 3-1 用伏安法测量电阻的电压和电流,如表 3-2 所示,求其电阻.

表 3-2 伏安法测电阻实验数据

U/V	0.74	1.52	2.33	3.08	3.66	4.49	5.24	5.98	6.76	7.50
I/mA	2.00	4.01	6.22	8.20	9.75	12.00	13.99	15.92	18.00	20.01

解 (1) 选择合适的坐标分度值,确定坐标纸的大小.坐标分度值的选取应能基本反映测量值的准确度或精密度.根据表中数据, U 轴可选 1 mm 对应于 0.10 V, I 轴可选 1 mm 对应于 0.20 mA,并可定坐标纸的大小(略大于坐标范围、数据范围).

(2) 标出图线特征.在图上空白位置标明实验条件或从图上得出的某些参量.利用所绘直线可给出被测电阻 R 的大小:从所绘直线上读取两点 A 、 B 的坐标就可求出 R 值,如图 3-2 所示.

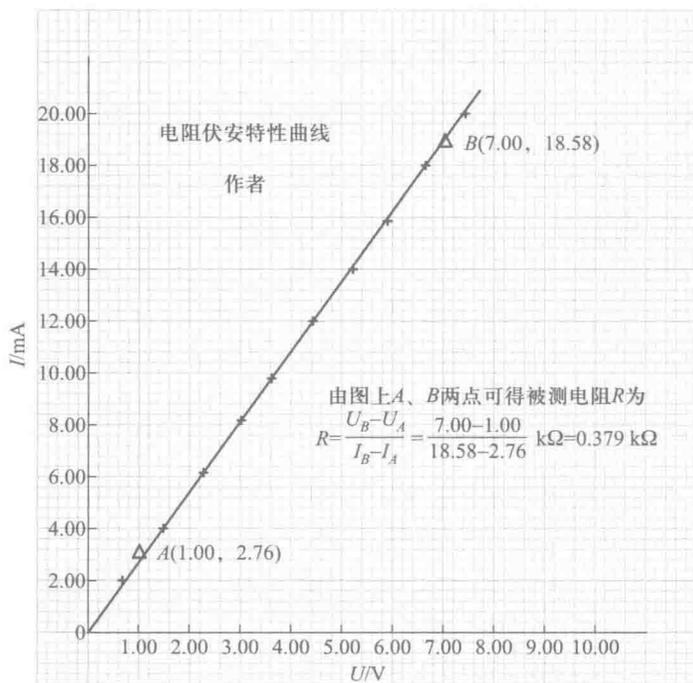


图 3-2 电阻伏安特性曲线

(3) 在直线上取两点 $(7.00, 18.58)$, $(1.00, 2.76)$, 则

$$R = \frac{U_B - U_A}{I_B - I_A} = \frac{7.00 - 1.00}{18.58 - 2.76} \text{ k}\Omega = 0.379 \text{ k}\Omega$$

故有

$$R = 0.379 \text{ k}\Omega$$

(4) 在图线下方或空白位置写出图线的名称及某些必要的说明.

2. 曲线的改直

在实际工作中,许多物理量之间的函数关系形式是复杂的,并非都是线性,但是可以经过适当变换后成为线性关系,即把曲线变成直线,这种方法叫曲线改直.例如:

(1) $pV=C$, C 为常量.

由 $p=C \frac{1}{V}$ 作 $p-\frac{1}{V}$ 图得直线,斜率即为 C .

(2) $S=v_0t+\frac{1}{2}at^2$, v_0, a 为常量.

两边除以 t 得: $\frac{S}{t}=v_0+\frac{1}{2}at$, 作 $\frac{S}{t}-t$ 图为直线,其斜率为 $\frac{1}{2}a$,截距为 v_0 .

(3) $y=ax^b$, 其中 a, b 为常量.

两边取对数,得 $\lg y=\lg a+b\lg x$, 以 $\lg x$ 为横坐标, $\lg y$ 为纵坐标作图得一直线,截距为 $\lg a$,斜率为 b .

例 3-2 在恒定温度下,一定质量的气体的压强 p 随容积 V 而变,作 $p-V$ 图,为一双曲线,如图 3-3 所示.

用坐标轴 $1/V$ 置换坐标轴 V ,则 $p-1/V$ 图为一一直线,如图 3-4 所示.直线的斜率为 $pV=C$,即玻-马定律.

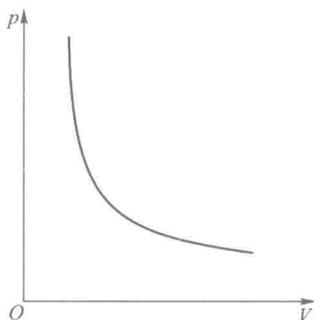


图 3-3 $p-V$ 曲线

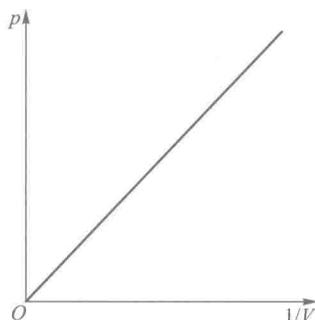


图 3-4 $p-1/V$ 曲线

例 3-3 单摆的周期 T 随摆长 L 而变,绘出 $T-L$ 实验曲线为抛物线,如图 3-5 所示.

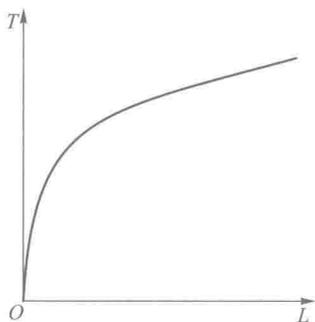


图 3-5 $T-L$ 曲线

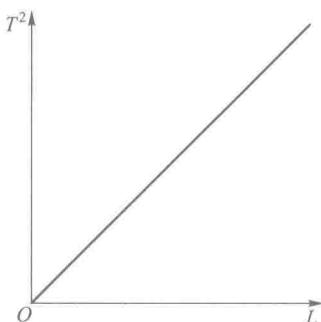


图 3-6 T^2-L 曲线

若作 T^2-L 图则为一一直线,如图 3-6 所示.斜率

$$k = \frac{T^2}{L} = \frac{4\pi^2}{g}$$

由此可写出单摆的周期公式

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

3. 作图法的优点

直观:这是作图法的最大优点之一,可根据曲线形状,很直观很清楚地表示出在一定条件下,某一物理量与另一物理量之间的相互关系,找出物理规律.

简便:在测量精度要求不高时,由曲线形状探索函数关系,作图法比其他数据处理方法要简便.

可以发现某些测量错误:若在曲线上个别点偏离特别大,可提醒实验者重新核对.

在图线上,可以直接读出没有进行测量的对应于某 x 的 y 值(内插法).在一定条件下,也可以从图线的延伸分部读出测量数据范围以外的点(外推法).

但也应看到作图法有其局限性.特别是受图纸大小的限制,不能严格建立物理量之间函数关系,同时受到人为主观性进行的描点、连线的影响,不可避免地会带来误差.

§ 3.3 逐 差 法

逐差法是对等间距测量的有序数据进行逐项或相等间隔项相减得到结果的一种方法.它计算简便,并可充分利用测量数据,及时发现差错,总结规律,是物理实验中常用的一种数据处理方法.

一、逐差法的使用条件

(1) 自变量 x 是等间距离变化的.

(2) 被测的物理量之间的函数形式可以写成 x 的多项式,即 $y = \sum_m a_m x^m$.

二、逐差法的应用

以拉伸法测弹簧的劲度系数为例,说明如下:

设实验中等间隔地在弹簧下加砝码(如每次加 1 g),共加 9 次,分别记下对应的弹簧下端点的位置 $L_0, L_1, L_2, \dots, L_9$,则可用逐差法进行以下处理.

1. 验证函数形式是线性关系

把所测的数据逐项相减,即

$$\Delta L_1 = L_1 - L_0$$

$$\Delta L_2 = L_2 - L_1$$

.....

$$\Delta L_9 = L_9 - L_8$$

看 $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_9$ 是否基本相等. 而当 ΔL_i 均基本相等时, 就验证了外力与弹簧的伸长量之间的函数关系是线性的, 即

$$F = k\Delta L$$

用此法可检查测量结果是否正确, 但注意的是必须要逐项逐差.

2. 求物理量数值

现计算每加 1 g 砝码时弹簧的平均伸长量:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta L} &= \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \dots + \Delta L_9}{9} \\ &= \frac{(L_1 - L_0) + (L_2 - L_1) + (L_3 - L_2) + \dots + (L_9 - L_8)}{9} \\ &= \frac{L_9 - L_0}{9} \end{aligned}$$

从上式可看出, 中间的测量值全部抵消了, 只有始末两次测量值起作用, 与一次加 9 g 砝码的测量完全等价.

为了保证多次测量的优点, 只要在数据处理方法上作一些组合, 仍能达到多次测量来减小误差的目的. 因此使用逐差法一般用如下方法:

通常可将等间隔所测量的值分成前后两组, 前一组为 L_0, L_1, L_2, L_3, L_4 , 后一组为 L_5, L_6, L_7, L_8, L_9 , 将前后两组的对应项相减, 得

$$\begin{aligned} \Delta L'_1 &= L_5 - L_0 \\ \Delta L'_2 &= L_6 - L_1 \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta L'_5 &= L_9 - L_4 \end{aligned}$$

再取平均值

$$\begin{aligned} \overline{\Delta L'} &= \frac{1}{5} [(L_5 - L_0) + (L_6 - L_1) + \dots + (L_9 - L_4)] \\ &= \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 (L_{5+i} - L_i) \end{aligned}$$

由此可见, 与上面一般求平均值方法不同, 这时每个数据都用上了. 但应注意, 这里的 $\overline{\Delta L'}$ 是增加 5 g 砝码时弹簧的平均伸长量. 故对应项逐差可以充分利用测量数据, 具有对数据取平均和减小的效果.

§ 3.4 最小二乘法

由一组实验数据找出一条最佳的拟合直线(或曲线), 常用的方法是最小二乘法. 所得的变量之间的相关函数关系称为回归方程. 所以最小二乘法线性拟合亦称为最小二乘法线性回归. 本章只讨论用最小二乘法进行一元线性回归的问题, 有关

多元线性回归和非线性回归,请参考其他书籍.

一、一元线性回归

最小二乘法所依据的原理是:在最佳拟合直线上,各相应点的值与测量值之差的平方和应比在其他的拟合直线上的都要小.

假设所研究的变量只有两个: x 和 y ,且它们之间存在着线性关系,是一元线性方程

$$y = A_0 + A_1 x \quad (3-3)$$

实验测量的一组数据是

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$$

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$$

需要解决的问题是:根据所测得的数据,如何确定式(3-3)中的常数 A_0 和 A_1 . 实际上,相当于作图法求直线的斜率和截距.

由于实验点不可能都同时落在式(3-3)表示的直线上,为使讨论简单起见,限定:

(1) 所有测量值都是等精度的. 只要实验中不改变实验条件和方法,这个条件就可以满足.

(2) 只有一个变量有明显的随机误差. 因为 x_i 和 y_i 都含有误差,把误差较小的一个作为变量 x ,就可满足该条件.

假设在式(3-3)中的 x 和 y 是在等精度条件下测量的,且 y 有偏差,记作 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_m$. 把实验数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ 代入式(3-3)后得

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = y_1 - y = y_1 - A_0 - A_1 x_1 \\ \varepsilon_2 = y_2 - y = y_2 - A_0 - A_1 x_2 \\ \dots\dots\dots \\ \varepsilon_m = y_m - y = y_m - A_0 - A_1 x_m \end{cases}$$

其一般式为

$$\varepsilon_i = y_i - y = y_i - A_0 - A_1 x_i \quad (3-4)$$

ε_i 的大小与正负表示实验点在直线两侧的分散程度, ε_i 的值与 A_0, A_1 的数值有关. 根据最小二乘法的思想,如果 A_0, A_1 的值使 $\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2$ 最小,那么,式(3-3)就是所拟合的直线,即由式

$$\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - A_0 - A_1 x_i)^2 \quad (3-5)$$

对 A_0 和 A_1 求一阶偏导数,且使其为零,得

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial A_0} \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 \right) = -2 \sum_{i=1}^m (y_i - A_0 - A_1 x_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial A_1} \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 \right) = -2 \sum_{i=1}^m [(y_i - A_0 - A_1 x_i) x_i] = 0 \end{cases} \quad (3-6)$$

令 \bar{x} 为 x 的平均值, 即 $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i$, \bar{y} 为 y 的平均值, 即 $\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i$, $\overline{x^2}$ 为 x^2 的平均值, 即 $\overline{x^2} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2$, \overline{xy} 为 xy 的平均值, 即 $\overline{xy} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i y_i$, 代入式(3-6)中, 得

$$\begin{cases} \bar{y} - A_0 - A_1 \bar{x} = 0 \\ \overline{xy} - A_0 \bar{x} - A_1 \overline{x^2} = 0 \end{cases}$$

解方程组得

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \\ A_0 = \bar{y} - A_1 \bar{x} \end{cases} \quad (3-7)$$

二、把非线性相关问题变换成线性相关问题

在实际问题中, 当变量间不是线性关系时, 可以通过适当的变量变换, 使不少曲线问题能够转化成线性相关的问题. 需要注意的是, 经过变换等精度的限定条件不一定满足, 会产生一些新的问题. 遇到这类情况应采取更恰当的曲线拟合方法, 下面举几例说明.

(1) 若函数为 $x^2 + y^2 = C$, 其中 C 为常数, 令

$$X = x^2, \quad Y = y^2$$

则有

$$Y = C - X$$

(2) 若函数为 $y = \frac{x}{a+bx}$, 其中 a, b 为常数, 将原方程化为 $\frac{1}{y} = b + \frac{a}{x}$, 令

$$Y = \frac{1}{y}, \quad X = \frac{1}{x}$$

则有

$$Y = b + aX$$

三、相关系数 R

以上所讨论的都是实验在已知的函数形式下进行, 由实验的测量数据求出的回归方程. 因此, 在函数形式确定以后, 用回归法处理数据, 其结果是唯一的, 不会像作图法那样因人而异. 可见用回归法处理问题的关键是函数形式的选取.

但是当函数形式不明确时, 要通过测量值来寻求经验公式, 只能靠实验数据的趋势来推测. 对同一组实验数据, 不同的工作者可能会取不同的函数形式, 得出不同的结果.

为了判断所得结果是否合理, 在待定常数确定以后, 还需要计算一下相关系数 R . 对于元线性回归, R 定义为

$$R = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \quad (3-8)$$

相关系数 R 的数值大小反映了相关程度的好坏. 可以证明, $|R|$ 的值介于 0 和

1 之间, $|R|$ 值越接近于 1, 说明实验数据能密集在求得的直线附近, x 、 y 之间存在着线性关系, 用线性函数进行回归比较合理. 相反, 如果 $|R|$ 值远小于 1 而接近 0, 说明实验数据对求得的直线很分散, x 、 y 之间不存在线性关系, 即用线性回归不妥, 必须用其他函数重新试探. 在物理实验中, 一般当 $|R| \geq 0.9$ 时, 就认为两个物理量之间存在较密切的线性关系.

例 3-4 已知电阻丝的阻值 R_t 与温度 t 的关系为

$$R_t = R_0(1+at) = R_0 + R_0at$$

其中 R_0 、 a 是常量. 现有一电阻丝, 其阻值随温度变化如下表所示:

$t/^\circ\text{C}$	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
R_t/Ω	28.05	28.52	29.10	29.56	30.10	30.57	31.00	31.62

结合最小二乘法完成以下内容:

- (1) 线性拟合, 并写出直线方程;
- (2) 求出电阻温度系数 a 和 0°C 时的电阻 R_0 ;
- (3) 求出相关系数 R , 评价相关程度.

解 金属导体的电阻和温度的关系为

$$R_t = R_0(1+at) = R_0 + aR_0t$$

令 $y = R_t$, $x = t$, $A_0 = R_0$, $A_1 = aR_0$

上式可变为 $y = A_0 + A_1x$

例中的实验数据填入下表, 并进行计算, 结果见下表:

i	x_i	x_i^2	y_i	y_i^2	$x_i y_i$
1	15.0	225.0	28.05	786.8	420.8
2	20.0	400.0	28.52	813.4	570.4
3	25.0	625.0	29.10	846.8	727.5
4	30.0	900.0	29.56	873.8	886.8
5	35.0	1 225	30.10	906.0	1 054
6	40.0	1 600	30.57	934.5	1 223
7	45.0	2 025	31.00	961.0	1 395
8	50.0	2 500	31.62	999.8	1 581
平均值	32.5	1 187.5	29.815	890.269	982.219

由上表可得

$$\bar{x} = 32.5, \quad \overline{x^2} = 1\,187.5, \quad \bar{y} = 29.815, \quad \overline{y^2} = 890.269, \quad \overline{xy} = 982.219$$

代入式(3-7)中得

$$aR_0 = A_1 = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} = 0.101$$

$$R_0 = A_0 = \bar{y} - A_1 \bar{x} = 26.5$$

故函数关系为

$$R_t = 26.5 + 0.101t$$

式中 R_t 的单位用 Ω , t 的单位用 $^{\circ}\text{C}$. $R_0 = 26.5 \Omega$, $a = \frac{A_1}{R_0} = \frac{0.101}{26.5} ^{\circ}\text{C}^{-1} = 3.81 \times 10^{-3} ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

又由式(3-8)可得

$$R = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} = 0.9995$$

由 R 值可见, R_t 与 t 之间有较好的线性关系, 即相关程度较好.

用最小二乘法与用作图法求得的 R_t-t 之间的关系有一定的差别, 说明作图法有一定的随意性.

§ 3.5 数据处理软件及计算器统计计算介绍

前面所叙述的处理物理实验数据的方法, 有列表法、作图法、最小二乘法等, 其中最小二乘法较作图法准确、客观、无主观随意性, 虽然它的计算较为繁琐, 但是目前可以借助计算机很方便地对数据进行处理(如进行线性拟合、曲线拟合等). 在物理实验中引入计算机处理物理实验数据这一现代化手段, 利用微软、金山等常用办公软件中的电子表格软件, 或者 OriginLab 公司(其前身为 Microcal 公司)的 Origin 软件, 对复杂的物理实验数据进行处理, 可以节省大量繁琐的人工计算和绘图工作, 减少中间环节的计算错误, 节省时间, 提高效率. 对于简单的数据处理也可以用计算器的统计功能实现. 以下简单介绍数据处理软件及计算器统计功能的使用方法.

一、常用数据处理软件

1. Excel 软件在物理实验数据处理中的应用

现以 Excel 2010 版本为例, 简单介绍 Excel 软件在物理实验中的应用.

(1) Excel 中常用的公式使用方法

① 用 SUM() 函数求一系列数据的总和

点击菜单栏上的“公式”, 找到“自动求和”, 点击“求和”按钮, 如图 3-7 所示, 接下来选中需要求和的数据, 回车即可, 如图 3-8 所示.

或者在要显示求和的单元格中输入“=SUM(A:B)”回车, 其中 A 代表第一个数字所在单元格的位置, 比如图 3-8 中显示 20 在第 C 列, 第 7 行, 于是 A 代表 C7, 以此类推.

② 用 AVERAGE() 函数求一系列数据的平均值

与步骤①类似, 在“自动求和”中选择“平均值”即可, 也可以以手动的方式输入“=AVERAGE(A:B)”.



图 3-7 求和

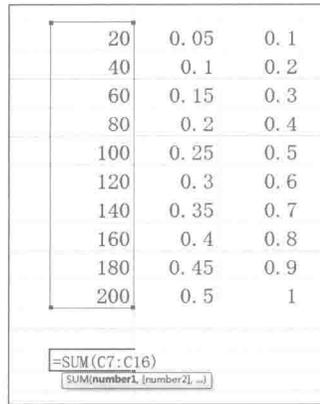


图 3-8 SUM() 函数

③ 用 STDEVA() 函数求一系列数据的标准差

在菜单栏中选择“公式”，然后选择“其他函数”—“统计”，选择“STDEVA”函数，如图 3-9 所示，注意只有这个函数是我们需要的测量列的标准差 σ ，其他函数不是，计算出测量列的标准差 σ 后，再除以 \sqrt{n} ，即可得到测量列的算术平均值的标准差 u_A ，也即测量列的 A 类标准不确定度。

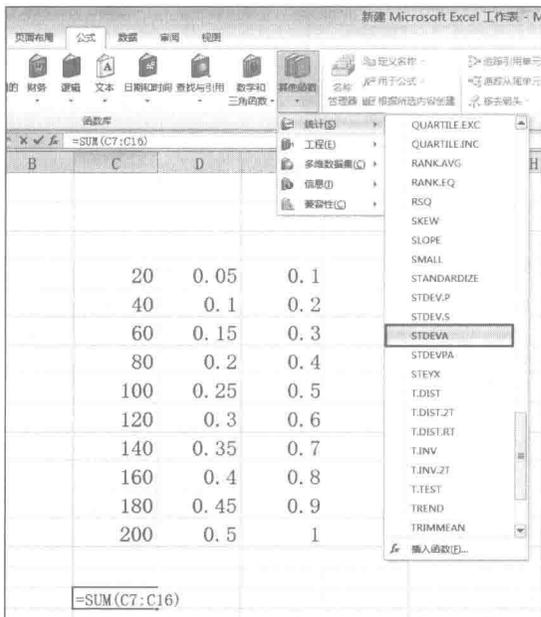
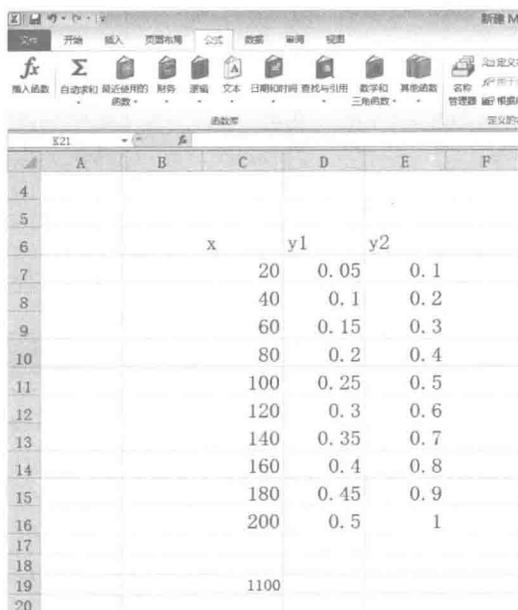


图 3-9 STDEVA() 函数

(2) 利用 Excel 作图并求出拟合曲线

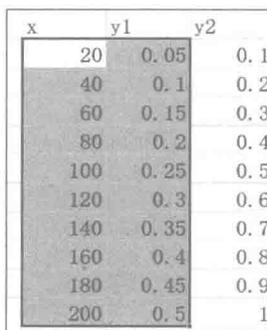
① 将所测数据输入到 Excel 表格中,最好保证第一列为自变量,即 x 轴数据,如图 3-10 所示。



	A	B	C	D	E	F
4						
5						
6			x	y1	y2	
7				20	0.05	0.1
8				40	0.1	0.2
9				60	0.15	0.3
10				80	0.2	0.4
11				100	0.25	0.5
12				120	0.3	0.6
13				140	0.35	0.7
14				160	0.4	0.8
15				180	0.45	0.9
16				200	0.5	1
17						
18						
19				1100		
20						

图 3-10 数据输入

② 选中需要作图的数据,如图 3-11 所示,选中 x 和 $y1$ 列。



x	y1	y2
20	0.05	0.1
40	0.1	0.2
60	0.15	0.3
80	0.2	0.4
100	0.25	0.5
120	0.3	0.6
140	0.35	0.7
160	0.4	0.8
180	0.45	0.9
200	0.5	1

图 3-11 选中数据

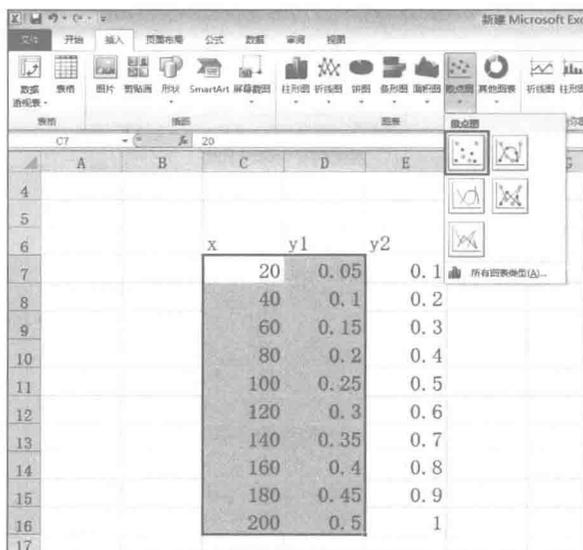


图 3-12 选择“散点图”

③ 在选中数据的基础上,点击菜单栏的“插入”,找到“散点图”,点击如图 3-12 所示的散点图,可以得到如图 3-13 所示的结果。

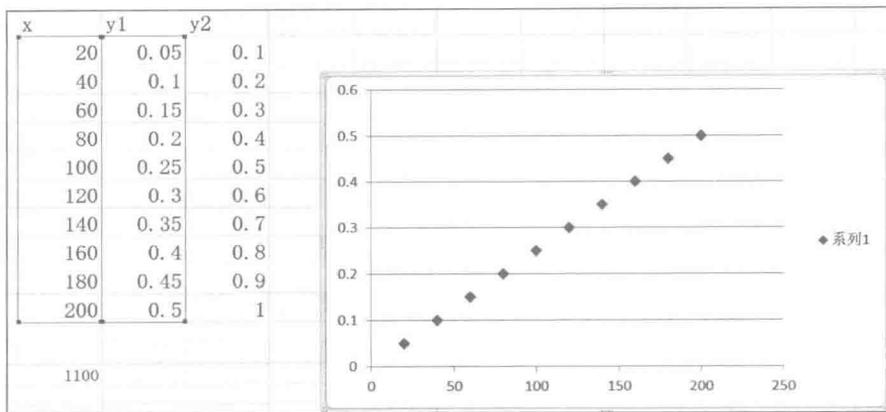


图 3-13 散点图

④ 选中上一步得到的图形,在菜单栏找到“布局”选项,如图 3-14 所示,可以看到在布局选项卡下边有“图表标题”“坐标轴标题”“图例”“数据标签”“坐标轴”等选项,每一个选项均可以设置相应内容。

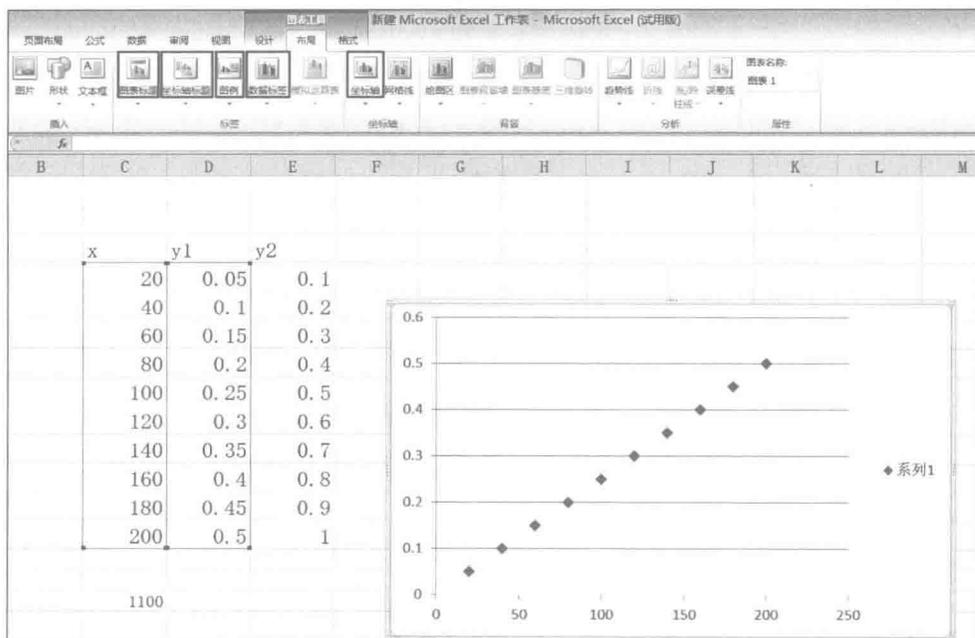


图 3-14 图表选项

⑤ 设置“坐标轴标题”包括横坐标和纵坐标,横坐标选择“坐标轴下方标题”,如图 3-15 所示。

纵坐标选择“旋转过的标题”,如图 3-16 所示。

经过上述步骤后可以得到如图 3-17 所示的效果。

⑥ 单击选中图中的数据点,在选中的状态下单击右键并选择“添加趋势线”,如图 3-18 所示。

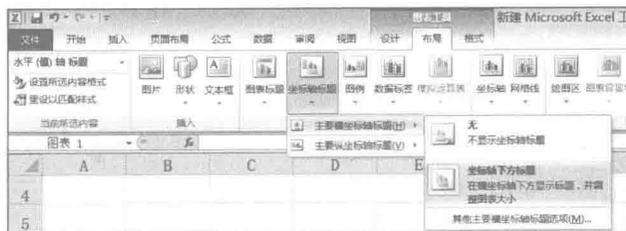


图 3-15 设置坐标轴标题

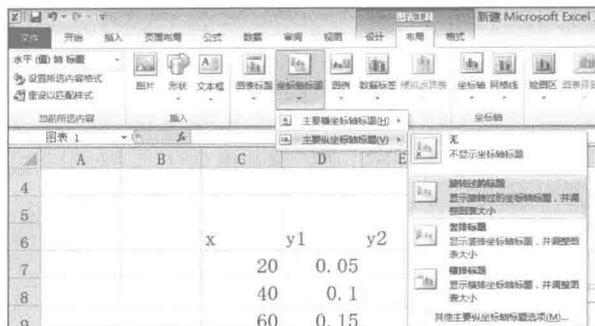


图 3-16 纵坐标轴标题

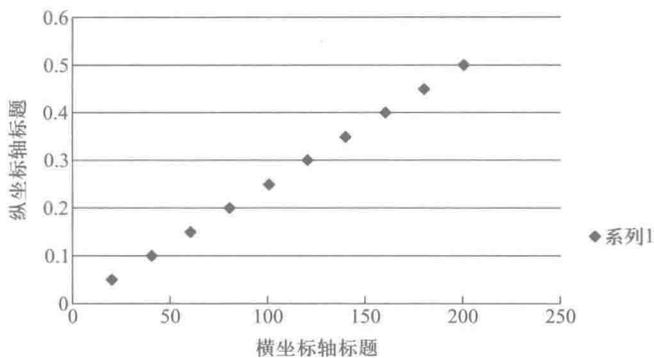


图 3-17 坐标轴标题

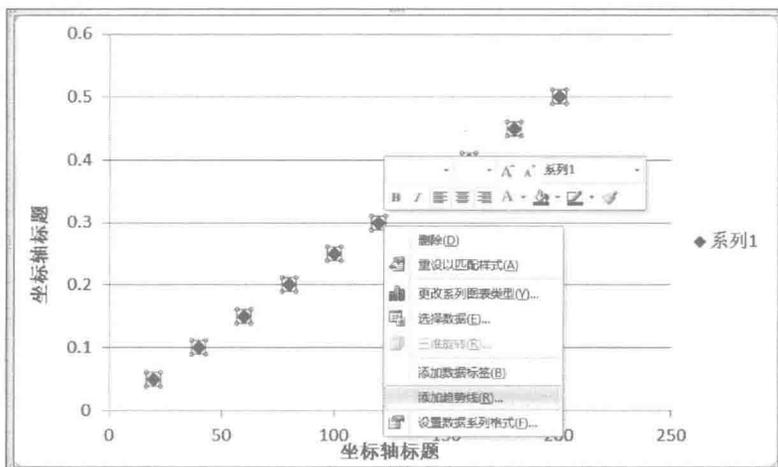


图 3-18 选择“添加趋势线”

在打开的选项卡中选择合适的趋势线。本例中选择“线性”，如图 3-19 所示，同时必须注意图 3-19 中的底部圆圈标示，需将“显示公式”和“显示 R 平方值”选中，此时得到的效果如图 3-20 所示。



图 3-19 趋势线选项

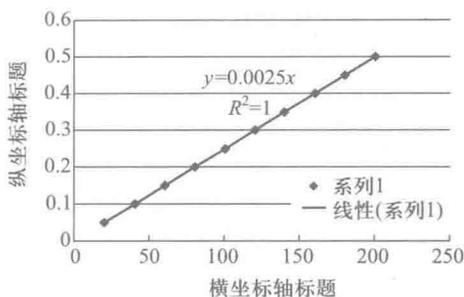


图 3-20 添加趋势线

⑦ 图例的修改. 如果是单独的一条曲线, 可以不要图例; 如果是两条曲线, 必须要图例, 而且两个图的数据点效果显示应不同. 例如, 一个用方块形状, 另一个用菱形形状. 如图 3-20 中, 选中“线性(系列 1)”然后删除, 只剩下“系列 1”, 此时需要将“系列 1”字样修改成我们需要的字样, 比如修改成“单桥时”, 修改方法为: 选中“系列 1”字样, 单击右键, 选择“选择数据”, 如图 3-21 所示.



图 3-21 选择数据

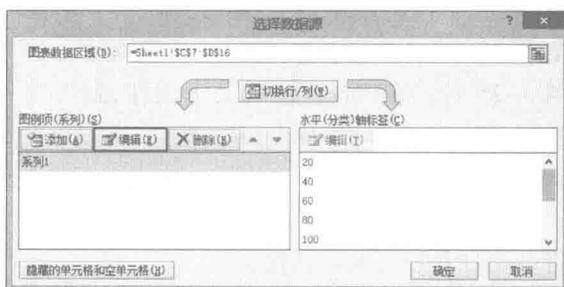


图 3-22 编辑

在跳出的选项卡中红色标出部分, 单击编辑, 如图 3-22 所示.

在弹出的窗口中输入“系列名称”为“单桥时”即可, 如图 3-23 所示.

经过上述步骤就可以将实验数据对应的图形作出来, 为了美观, 图行上的每一块都是可以单独调节的, 只要选中就可以拖动或者修改其格式, 请自行操作. 最终可以形成如图 3-24 所示的效果.

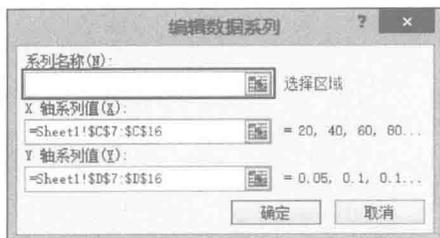


图 3-23 输入系列名称

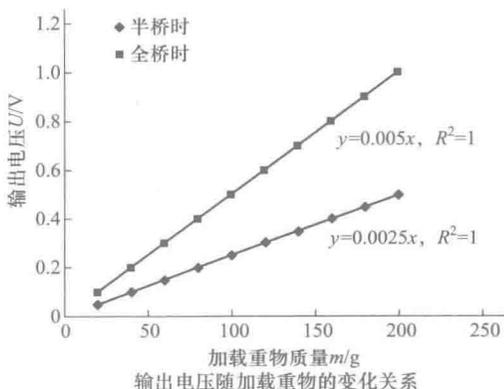


图 3-24 实验曲线的最终效果

2. Origin 软件在物理实验数据处理中的应用

以 Origin 7.0 软件为例,它的主要功能和用途有:对物理实验数据进行常规地处理和一般的数据统计分析,例如,求测量数据列的平均值和标准偏差、快速傅里叶变换、回归分析等.此外,还可以用其对实验数据进行绘图(即利用图形来表示测量数据之间的相互关系)、用多种函数对实验曲线进行拟合等.

下面简单介绍 OriginLab 公司 Origin 7.0 软件的部分功能以及该软件是如何对物理(或科学)实验数据进行处理和绘制图形的.

(1) 利用已有的数据文件读取物理实验数据

Origin 7.0 除了可以导入以 Origin 7.0 的二进制(.opj)方式保存的数据以外,还能够读取文本格式(ASCII)、Office 的 Excel 格式(.xls)和数据库文件(.dbf)的数据文件.

具体做法如下:

① 在 Origin 7.0 所激活的数据页窗口,选择“File”下拉菜单中的“Import”命令,其下拉菜单显示了 Origin 7.0 支持的数据格式,如图 3-25 所示.例如,若读取文本文件,就可以选用“Single ASCII”“Multiple ASCII”或“ASCII Options”;

② 选择好相应的文件类型后,Origin 7.0 将自动打开相应的对话框;

③ 选择文件所在的位置(目录路径)及文件名,单击“打开”命令按钮即可将数据导入数据页.

(2) 利用统计功能计算物理实验数据的平均值和标准偏差

在物理实验数据处理和科技论文对实验结果的分析中,经常采用数据分析方法对实验数据进行处理.Origin 7.0 软件提供



图 3-25 Origin 导入数据的类型

了强大易用的数据分析(Data Analysis)功能,其中的数据统计功能是必不可少的手段之一。

例 3-5 利用 50 分度的游标卡尺测量某圆环的外径,其测量数据如下(单位为 cm):

15.272, 15.276, 15.268, 15.274, 15.270, 15.274, 15.268, 15.274, 15.272

试求其不确定度。

解 如图 3-26(a)所示,对整列测量数据进行赋值操作,即可获得如图 3-26(b)所示的计算结果。对其作出说明如下:

① 数据列 B 中的数值 0.000 9 为数据列 A(测量数据)的平均值标准误差 SE(是由实验者本人输入的);

② 数据列 C 中的数值 0.002 为所用 50 分度游标卡尺的仪器误差;

③ 而数据列 D 中的数值 0.001 49,即为利用函数关系式对其合成不确定度的计算。

	A[Y]	B[Y]	C[Y]	D[Y]
1	15.272	9.24809E-4	0.002	0.00149
2	15.276			
3	15.268			
4	15.274			
5	15.27			
6	15.274			
7	15.268			
8	15.274			
9	15.272			
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				

(a)

Col(X)	Rows(Y)	Mean(Y)	sd(Y)?	se(Y)?	Min(Y)	Inin(Y)	Max(Y)	Inex(Y)	Range(Y)	Sum(Y)	N(Y)
A	[1:9]	15.272	0.00283	9.42809E-4	15.268	3	15.276	2	0.008	137.448	9

(b)

图 3-26 Data1 中 A 列的统计结果

具体做法如下:对数据页进行列统计,首先选中需要统计的整个数列或数列的一部分;打开下拉菜单“Statistics”的命令,选择“Descriptive Statistics”中的“Statistics on Columns”命令,即可实现对该列进行统计分析。该菜单命令会自动创建一个新

的数据表,给出统计的结果,如图 3-26(b)所示,亦即平均值(Mean)、最小值(Minimum)、最大值(Maximum)、值域(Range)、和(Sum)、数据点数(N)、标准差(Standard Deviation, Std, Sd)和平均值标准误差(Standard Deviation of the Mean, Se)等参数. 该标准差和标准误差列将作为直接绘图的误差棒.

而有关行的统计是与列统计的方法相类似的,这里就不再重复介绍了.

(3) 利用拟合功能求解实验数据的直线拟合公式

对于许多物理实验数据或统计数据而言,为了描述不同变量之间的关系,进一步分析曲线特性,经常需要对物理实验数据进行线性回归和曲线拟合,找出相应函数关系的系数,以建立一个物理经验公式或数学模型.

Origin 7.0 正好提供了强大的线性回归和曲线拟合功能,其中最有代表性的是线性拟合和非线性最小平方拟合. 大多数菜单拟合命令不需要输入参数,拟合将自动完成. 有些拟合可能要求输入参数,但是也能根据拟合数据给出缺省值进行拟合.

例 3-6 以铜电阻与温度的关系为例,用数显温度计和欧姆计测得一组数据,如图 3-27(a)所示(数据已经输入 Origin). 已知 R 和 t 的函数关系为 $R = a + bt$, 试利用最小二乘法,求出相应的关系系数 a, b .

解 以线性拟合为例,如果绘图窗口被激活,那么选择相应的回归分析方法(线性拟合)后,则 Origin 将仅仅针对所激活的数据点(曲线)进行拟合.

以 X 作为自变量, Y 作为因变量,那么,其回归拟合的函数形式应为

$$Y = A + BX$$

其中 A, B 为拟合参数,即 A 为直线的截距, B 为直线的斜率,它们是由最小二乘法确定的.

具体做法如下:首先激活需要进行直线拟合的绘图窗口,然后选择“Analysis”中的“Fit Linear”命令,那么 Origin 就可以实现对该数据点(曲线)的直线拟合,如图 3-27(c)所示. 拟合完成后,Origin 将生成一个隐藏的拟合数据文件(数据列窗口),拟合好的直线(曲线)则存放在相应的绘图窗口里,所拟合的回归参数结果将显示在 Results Log 的窗口中,如图 3-27(b)所示.

在 Results Log 窗口中的每个条目都包含了进行直线拟合操作的日期/时间、文件位置、分析类型和最后的计算结果. 其中:

A 为截距及其标准偏差;

B 为斜率及其标准偏差;

R 为相关参数;

N 为数据点数目;

P 为概率值;

SD 为拟合的标准偏差.

(4) 二维数据点关系图形的绘制

用图形方法显示数据关系比较直观,容易理解,因而在科技论文和实验报告中经常使用. 数据曲线图主要包括二维和三维图,但在科技文章和实验报告中,绝大

多数采用二维坐标. Origin 7.0 的绘图功能非常灵活,功能十分强大,能绘制出数十种精美、可满足绝大多数科技文章和实验报告的绘图要求的二维数据曲线图,它是 Origin 7.0 重要核心和特点之一.

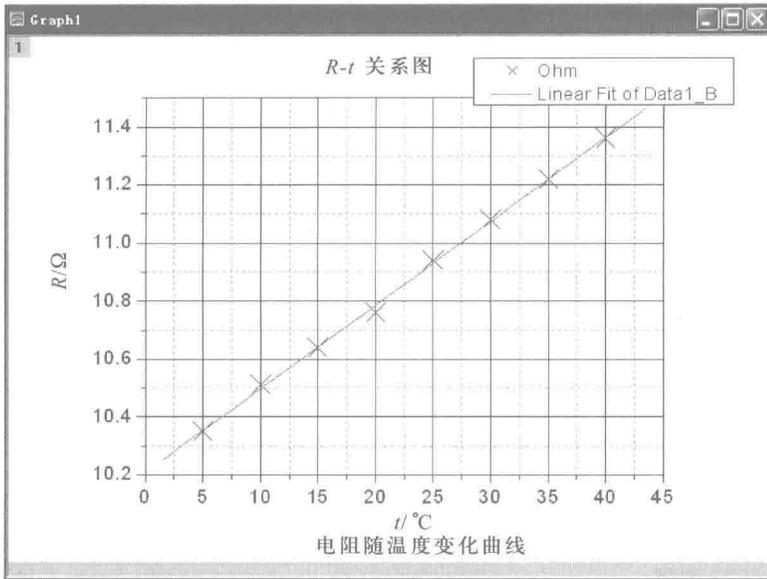
	A[Ω]	B[γ]
1	5.0	10.35
2	10.0	10.51
3	15.0	10.64
4	20.0	10.76
5	25.0	10.94
6	30.0	11.08
7	35.0	11.22
8	40.0	11.36
9		
10		
11		
12		
13		

(a)

Parameter	Value	Error
A	10.20821	0.00995
B	0.02886	3.94118E-4

R	SD	N	P
0.99944	0.01277	8	<0.0001

(b)



(c)

图 3-27 线性回归拟合及其结果记录

常用的二维绘图的图形样式有“Line”(线图)、“Scatter”(散点图)、“Line+Scatter”(点线图)等,可以随个人的兴趣而确定.

例 3-7 温度为 20 °C 时,对具有一定质量的某稀有气体的压强 p 和体积 V 进行测量,所得到的测量数据值如图 3-28(a) 所示(数据已经输入 Origin). 那么,根据所测量的数据可以作出 $p-V$ 图,如图 3-28(b) 所示.

具体做法如下:选定要绘制的数据页中的数据列,打开“Plot”下拉菜单,选择“Line”(线图)、“Scatter”(散点图)、“Line+Scatter”(点线图)其中之一,或者直接单击绘图工具条中相应的制图模板命令按钮,就可以制图了,如图 3-28(b) 所示. 在有多个 Y 数据列的情况下,可以为图形安排数个 Y ,而在一个图形页面中显示出多组数据图.

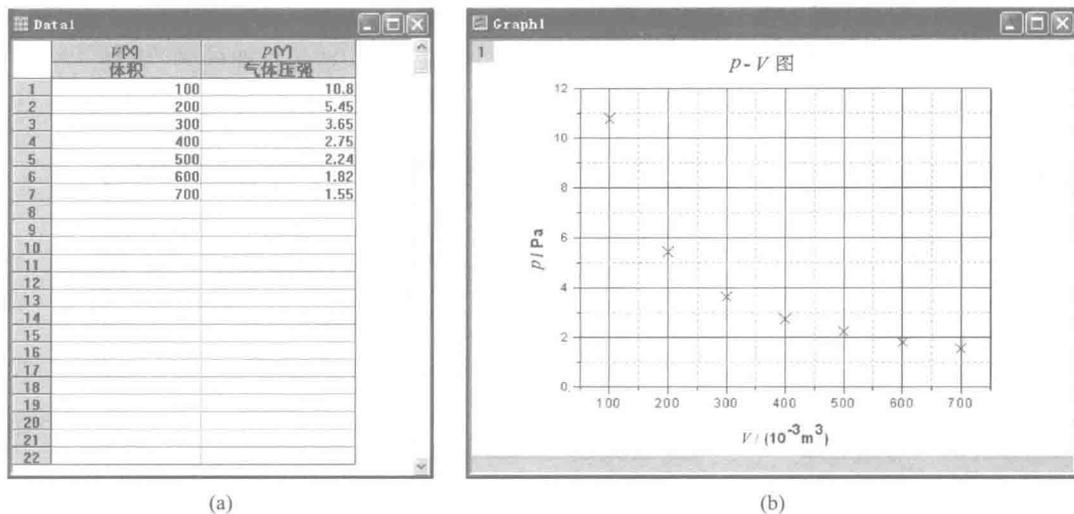


图 3-28 单击 Scatter 按钮制图窗口

(5) 模板文档的保存

自己付出辛勤劳动的绘图风格是可以通过模板文件被保存下来的,该文件仅存储绘图的信息和设置,而不保存具体数据和曲线.在下次再创建类似的图形时,可以只选择数据列和绘图模板即可.

具体做法如下:选择 File/Save template as,打开“另存为”对话框,设置好名称、位置及类型等参数就可以把制好的绘图作为模板而保存下来.

以上仅简单地介绍了 Origin 7.0 软件处理物理实验数据的一些基本功能.当然,它还有许多诸如三维图形绘制、非线性拟合和编程绘图等高级功能,有待于同学们在今后的学习、工作和实践中去逐步地具体掌握和应用.

二、计算器统计计算介绍

1. 电子计算器

电子计算器携带方便、使用简单,是目前使用较广泛的统计分析工具,除了具有最常用的一般数学运算功能外,还可以进行统计分析.按其功能可以分为普通型、函数型、高级函数型和可编程序型.尽管其操作方法不尽一致,但其基本原理、方法和多数运算功能均相似,在使用时先学会一种以后,则可参照说明书掌握其他类型计算器的使用方法.现以 CASIO fx-82TL 为例介绍计算器功能的用法,其他型号可参考使用说明.

(1) 进入统计状态

先开机,按 **MODE** (加方框表示键盘的按键,下同),按“SD”对应的 **2** (单变数统计模式),此时屏幕下方中间出现“SD”符号,计算器已进行统计状态.退出按“COMP”对应的 **1** (普通计算模式),此时屏幕下方中间“SD”符号消失.

(2) 清空数据库

在输入数据(或下一组数据)之前,必须将计算器数据库中的数据清空,否则会导致统计结果错误。

(3) 检查数据库

按 $\boxed{\text{RCL}} \rightarrow \boxed{\text{hyp}}$, 屏幕左上方显示“n=”, 屏幕右侧如果是“0”, 则数据库内没有数据, 否则内有数据, 需清除。

(4) 数据库清空

按 $\boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{\text{AC}^{\text{ON}}} \rightarrow \boxed{=}$ 可清空数据库, 重复步骤(2)可检查是否清空。

(5) 数据输入、结果输出与应用

例如, 试分别计算表 3-3 中两个玉米品种的 10 个果穗长度的样本容量、平均数、方差、标准差、平方和以及变异系数。

表 3-3 两个玉米品种果穗长度

品种	果穗长度/cm									
BS24	19	21	20	20	18	19	22	21	21	19
金皇后	16	21	24	15	26	18	20	19	22	19

① 数据输入

先输入品种“BS24”的资料, 方法如下:

依次按“19” $\rightarrow \boxed{\text{M+}}$, “21” $\rightarrow \boxed{\text{M+}}$, “20” $\rightarrow \boxed{\text{M+}}$ ……直到“19” $\rightarrow \boxed{\text{M+}}$ 。

② 结果输出(初级统计数)

按 $\boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{1} \rightarrow \boxed{=}$, 得算术平均数“20”; 按 $\boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{2} \rightarrow \boxed{=}$ 得总体标准差“1.183 2”(分母为“n”时的标准差); 按 $\boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{3} \rightarrow \boxed{=}$ 得样本标准差“1.247 2”(分母为“n-1”时的标准差); 按 $\boxed{\text{RCL}} \rightarrow \boxed{(-)}$ 得数据的平方之和“4 014”; 按 $\boxed{\text{RCL}} \rightarrow \boxed{.,.,.}$ 得数据之和“200”; 按 $\boxed{\text{RCL}} \rightarrow \boxed{\text{hyp}}$ 得数据个数(即样本容量)“10”(可检验输入的数据个数是否正确)。

③ 结果应用(次级统计数)

计算平方和(SS): 按 $\boxed{\text{RCL}} \rightarrow \boxed{(-)} \rightarrow \boxed{=}$ $\rightarrow \boxed{-}$ $\rightarrow \boxed{\text{RCL}} \rightarrow \boxed{.,.,.}$ $\rightarrow \boxed{\text{x}^2}$ $\rightarrow \boxed{\div}$ $\rightarrow \boxed{\text{RCL}} \rightarrow \boxed{\text{hyp}} \rightarrow \boxed{=}$, 得“14”(此时屏幕上排显示: “Ans-B²×C”)。

计算样本方差(s^2): $\boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{3} \rightarrow \boxed{\text{x}^2}$, 得“1.555 6”[应该等于“SS/(n-1)"]。

计算变异系数(cv): $\boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{3} \rightarrow \boxed{\div}$ $\rightarrow \boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{1} \rightarrow \boxed{\times}$ \rightarrow “100”, 得“6.236”(即 6.236%)。

得到相应结果后, 按照(4)方法清空数据库, 再按照(5)①方法输入品种“金皇后”的数据, 按照②和③方法输出结果和应用结果, 在此不再赘述。

(6) 错误数据的更正

① 错误数据未输入数据库

如果错误的数字还没有输入统计数据库中(按 $M+$ 前发现错误),则更正比较简单,只要按 AC^{ON} 归零后重新输入正确数据即可。

② 错误数据已输入数据库

如果错误的数字已输入统计数据库中(按 $M+$ 后发现错误),则依“直接法”或“加权法”数据输入格式将错误的数字再按出来(暂不按 $M+$),再按 $SHIFT \rightarrow M+$,清除错误的数字,最后再重新输入正确的数字即可。

例如,“86”输入数据库后发现是错误的,则按“86” $\rightarrow SHIFT \rightarrow M+$,从数据库中清除错误的“86”,然后再重新输入正确的数字。

“184;24”输入数据库后发现是错误的,则按“184” $\rightarrow , \rightarrow$ “24” $\rightarrow SHIFT \rightarrow M+$,从数据库中清除错误的“184;24”,然后再重新输入正确的数字。

2. Windows 自带计算器统计功能介绍

Windows 7 计算器除了提供传统“标准型”加减乘除得计算器之外,也提供“科学型”“程序员”与“统计信息”等计算器得功能,还有“单位转换”“日期计算”以及“抵押”等功能,我们主要介绍其统计功能如下:

(1) 打开 Windows 7 中的计算器,如图 3-29(a)所示,然后再点击“查看”选择“统计信息”,如图 3-29(b)所示,即进入统计功能模式,如图 3-29(c)所示。



图 3-29 计算器

(2) 进入统计模式后,先输入一系列已知的数据,每次输入数据点击“add”按钮,然后计算各种统计数据(注意,这里清除之前输入的一组数据的按钮为“CAD”,清除当前一个数据的按钮为“C”),如图 3-30 所示.支持的统计数据包括平均值、平方平均值,和,平方和,还有就是标准差,标准差是方差的平方根,用来表示一组数据的离散程度.这里提供了两种标准差的计算方式:

σ_n :总体标准差,其在计算方差的过程中是除以 n 的.

σ_{n-1} :样本标准差,其在计算方差的过程中是除以 $n-1$ 的.

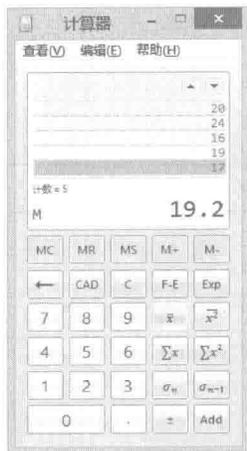


图 3-30 统计数据

习题

1. 示波管磁偏转实验中,偏转距离与电流之间关系数据如下表所示.

I/mA	6.0	10.5	15.5	21.0	26.2	31.6	36.8	42.1
L/mm	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0

(1) 用直角坐标纸作图,并求出 $I-L$ 之间的关系式;

(2) 用逐差法求出 $I-L$ 之间的关系式.

2. 已知某两个量 u 与 L 之间具有关系 $L=ku+b$,测量数据如下表所示.

$u/10^3$	8.75	19.43	30.52	41.86	52.71	63.44
$L/10^{-2}$	0.72	5.70	10.81	15.69	20.71	25.83

用最小二乘法写出 u 与 L 的关系式.

3. 实验测得在容器体积不变的情况下,不同温度的气体压强如下表所示,请用图示法表示.

温度 $t/^\circ\text{C}$	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0
压强 p/Pa	82.0	85.0	90.0	94.0	97.0	100.0	103.0	106.6

4. 用伏安法测电阻数据如下表所示,试用直角坐标纸作图,并求出 R .

U/V	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
I/mA	2.00	4.01	6.05	7.85	9.70	11.83	13.75	16.02

5. 用最小二乘法求出 $y=A_0+A_1x$ 中的 A_0, A_1 , 并检验线性.

(1)

i	1	2	3	4	5	6	7
x_i	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0
y_i	14.34	16.35	18.36	20.34	22.39	24.38	26.33

(2)

i	1	2	3	4	5	6	7
x_i	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
y_i	5.45	5.66	5.96	6.20	6.45	6.86	7.01

6. 用单摆法测重力加速度 g , 得如下实测值:

摆长 L/cm	61.5	71.2	81.0	89.5	95.5
周期 T/s	1.571	1.696	1.806	1.902	1.965

请按作图规则作 $L-T$ 曲线和 $L-T^2$ 曲线, 并求出 g 值.

7. 用直线检验法验证下列数据可以用曲线 $y=ab^x$ 表示.

x	30	35	40	45	50	55	60
y	-0.478 6	-2.188	-11.22	-45.71	-208.9	-870.9	-3 802

第4章 物理实验方法和技术

科学实验的过程可归纳为:①提出问题,确立课题;②分析问题,构建相应的物理模型;③确立实验方案,配置测量仪器;④通过实验,修正与完善实验方案,且得出实验数据;⑤分析处理实验数据,得出定性及定量结论。

本章将简述实验的基本方法、测量方法以及基本实验操作技术。其中实验方法是战略,将决定测量方法是否正确,而测量方法是战术,以保障实验方法得以正确的实施。两者相辅相成,互相依存,有时难以截然分开。实验方法与测量方法在具体实验中的运用就构成了实验方案。实验方案的实施必须借助一定的操作技术才能完成。

§4.1 物理实验中的基本实验方法

一、换测法

寻找与待测参量有关的物理量,利用它们之间的函数关系,通过对有关物理量的测量求出待测参量的方法称为换测法。它是常用的实验方法之一,几乎渗透到科学实验的各个领域。换测法大致可分为参量换测法与能量换测法两类。

1. 参量换测法

参量换测法是利用各种参量在一定实验条件下的相互关系来实现待测参量的变换测量。如测定钢丝的杨氏模量 E , 是利用应变与应力在一定范围内成线性变化的规律, 将待测量 E 用杨氏模量测定仪转换成对“应变” $\Delta L/L$ 与“应力” F/S 的测量, 即通过测量 $L, \Delta L, F, S$, 以 $E = (F/S) / (\Delta L/L)$ 求出待测量。类似这样的参量换测法, 几乎贯穿于所有实验之中。

2. 能量换测法

此法是利用换能器(又称传感器或变换器)将一种形式的能量转化成另一种形式的能量来进行测量的。能量的转化方式取决于换能器的种类。

(1) 热电换测。它是将热量学转换成电学量再进行测量, 如在“实验十九 准稳态法测导热系数和比热容”中, 热电偶就将对温度的测量转换成了对温差电动势的测量。

(2) 磁电换测。这种方法常利用半导体的霍尔效应来实现, 由霍尔电势的大小可求出磁感应强度的大小, 而由霍尔电势的方向, 可判断出磁感应强度的方向。在

“实验二十三 霍尔效应”中即使用这种方法,也可利用电磁感应的方法来实现磁电换测,如利用冲击电流计测磁场即属于此。

(3) 压电换测. 它通过压力与电势差间的变换来进行测量. 一些结构上不对称的晶体,如石英、钛酸钡、酒石酸钾钠等,它们在特定方向受压力作用时发生极化,而在两个端面出现电势差(压电效应). 利用这种性质可制成压电传感器,如心电图示仪的核心部分即是压电陶瓷片,它将心脏跳动对其产生的压力转换为电压输出,再用示波器予以显示。

压电效应相反的过程是,在这种晶片的特定方向加上一定电压,晶片将发生弹性形变(电致伸缩). 若让它工作在其“固有共振频率”上,则压电效应(或逆压电效应)尤为明显,这时用它作为激振或拾振元件,效率最高。

(4) 光电换测. 将光通量的变化转换为电学量的变化再进行测量称为光电换测. 硅光电池、光敏二极管、光敏三极管、光电倍增管、电荷耦合器件(CCD)等皆为光电换测元件(光电传感器). 其中硅光电池可把光能直接转化为电能,转换效率已超过 12%,故还可作为电源使用。

必须指出,设计或采用任何形式的换测应遵循以下原则:

- (1) 进行参量转换时,其转换原理以及转换参量间的函数关系应正确无误。
- (2) 参量换测必须起到简化测量过程或是提高测量精度的作用。
- (3) 换能器要有足够的输出,并且性能必须稳定。
- (4) 变换中若伴有其他效应,应予以校正和补偿,见“实验二十三 霍尔效应”中的附加效应的讨论及消除。
- (5) 要考虑技术上是否可行,经济上是否在可承受的范围內。

二、静态与动态研究法

物理现象总是在一定的条件下有其特定的物理过程,其过程可能是线性的,也可能是非线性的,因此任何实验均应先确定在什么条件下进行。

1. 静态研究法

静态研究法是将物理过程视为一系列静止状态加以研究,以得出整体的变化过程. 以电阻的伏安特性为例,若是线性的变化,则可在测量范围内(研究区间)采用定间隔定点测量法,而得出 U_1, U_2, \dots, U_i 及其对应的 I_1, I_2, \dots, I_i , 最后将一系列状态 (U_i, I_i) 标示在坐标纸上,再连成曲线,以得出 $U-I$ 的函数关系. 对于非线性的变化范围,为了把握曲线局部的细节变化,要求在曲线弯曲部分、拐点附近加密测量点距,这在“实验三十一 普朗克常量的测定”中有所体现。

2. 动态研究法

将静态研究法的点距缩小到近乎连续状态即为动态研究. 一般通过仪器自动测量,或通过计算机的快速采样及检测,测出自变量与因变量在极短间隔内相应各点的数值,并将其曲线显示在屏幕上或打印出来,从而得到动态曲线. 常用的显示器是示波器、XY 函数记录仪或微机联机后的显示屏或打印机. 在“实验二十四 用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线”中就是用动态研究法来观测磁

滞回线的. 在“用晶体管特性测试仪测三极管的特性曲线”中,用的也是动态研究法.

动态研究法采用的是电学仪器,被测量(无论是自变量还是因变量)均应转换为适于显示器输入的电学量(若显示器为示波器,则均应转变为电压),此外,转换而成的电学量应与原待测量线性相关,否则会畸变而不能如实反映客观规律.

三、模拟法

此法并不直接研究某物理现象或物理过程本身,而是采用与之相似的模型进行研究. 它对于不便于或无法直接测量的物理量是行之有效的. 依据模拟的手段,模拟法可分为物理模拟和数学模拟两类.

1. 物理模拟

若被模拟的物理过程与模拟的物理过程本质上是一致的就称为物理模拟. 如利用小尺寸的实物模型进行“风洞”试验以改进飞机与导弹的设计,用“流槽”模型预演河流的水力作用等皆属于物理模拟.

2. 数学模拟

两个物理量,尽管它们的物理本质和产生的物理现象或过程并不相同,但它们却具有相同的数学表达式反映它们各自的规律. 这时用其中一个物理过程来模拟另一个物理过程的方法就称为数学模拟. 如流体力学中,用液体的速度场模拟气体的速度场,在“实验十 用模拟法测绘静电场”中利用恒定电流场来模拟静电场,即属于此类.

四、干涉法

干涉法广泛应用于各种机械波、电磁波、光波等研究中. 这种方法将一系列行波分成两个或两个以上的波列,并使它们在同一区域中叠加而形成稳定的干涉图样,通过对干涉图样的分析而研究行波的特性. 这样就可将瞬息变化并难以测量的动态研究对象变成稳定的静态对象——干涉图样,从而简化了研究过程,提高了研究的精度. 干涉法在引入全息摄影技术后已发展成一门新技术——干涉计量术,并在生产实践与科学研究中发挥着越来越重要的作用. 依据参与叠加的波列数的不同,干涉法可分为驻波法和衍射法.

1. 驻波法

驻波是指两列纵波或两列具有相同偏振面的横波,以相同的频率、相近的振幅和恒定的相位差,彼此沿相反方向传播,叠加后而形成的波. 实验中常使波传播遇到障碍物(或另一种介质的界面)产生反射波,与入射波叠加相互干涉而形成驻波. 光学测量中广泛应用的“等厚干涉法”就是利用入射光波与反射光波相干叠加形成驻波而进行测量的,它在检验元件的光洁度、测量微小长度、角度等方面是行之有效的. 在“实验十四 用牛顿环测量透镜曲率半径”中,即使用此方法测透镜的曲率半径,驻波法还可测量其他微小长度及其变化.

2. 衍射法

当波通过与其波长可以比拟的狭缝时会出现衍射现象. 在波的衍射中,波场能

量的分布是连续的无数相干波源发出的波相互干涉的结果,所以衍射现象的本质是一种特殊的干涉.衍射法也是光学测试的一种重要方法,许多仪器即是依此而设计的.如光栅摄谱仪,由于光的衍射,将入射到其上的各种波长的光分开,通过特征光谱分析,可进行物质的微量检测.

§ 4.2 物理实验中的基本测量方法

NOTE

测量方法是指具体测量某一个物理量时,如何根据测量要求,在给定的条件下尽可能地消除或减小系统误差以及减小随机误差,使获得的测量值更为精确的方法.本节将介绍物理实验中最常用的几种基本测量方法.

一、比较法

它是测量方法中最基本的方法.任何物理量,为了测量都必须规定出它的标准单位,测量就是将待测物理量与规定的该物理量的标准单位进行比较,以确定待测量是标准单位的多少倍,即得该待测量的测量值.比较法可分为直接比较法和间接比较法两类.

1. 直接比较法

(1) 通过量具直接比较示值.将待测量与经过校准的量具进行直接比较测出其大小,称为直接比较法.如用刻度尺测量长度就是最简单的直接比较法.这种直接比较法的测量精度受到测量仪器自身精度的局限,欲提高测量精度就得提高量具的精度.为达此目的,需依靠不同物理量的标准件,例如用于长度测量的“块规”、用于质量测量的高精度砝码、用于电阻测量的标准电阻、用于电动势测量的标准电池等.

(2) 通过平衡、补偿或零示测量进行直接比较.在利用天平称量物体的质量时,是利用天平这一仪器使待测量与标准件(砝码)直接比较,其测量结果的准确度受天平本身灵敏度的制约而只能接近砝码的精度.在“实验七 用惠斯通电桥测电阻”中,从测量未知电阻角度而言,用的是平衡测量,而作为表征电桥是否平衡却使用的是检流计零示法.

用电势差计测量电池电动势的原理如图 4-1 所示,它是补偿法测量的典型.合上 K,调节 R,使电阻丝 AB 上通过有一定电流 I,再合上 K_1 ,改变 C 在 AB 上的位置至检流计示零,则待测电动势 E_x 被电势差 U_{AC} 所补偿,这时有

$$E_x = U_{AC} = IR_{AC}$$

它也是以检流计示零后而获得测量结果,故又可称为零示测量法.

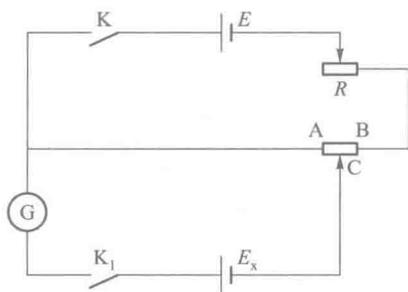


图 4-1 测量电池电动势原理图

零示测量法最突出的优点是,无论是平衡测量或是补偿测量中皆以检流计示零而得出测量结果,所以测量的精度高低与示零仪器的灵敏度密切相关.而对于测量仪器而言,欲得到高精度的电流计是困难的,但高灵敏度的检流计却易于实现,故常常利用零示法来实现较高精度的测量.

必须指出,要有效地运用直接比较法应考虑以下两个方面:

① 创造条件使待测量能与标准件直接对比.

② 无法直接对比时,则考虑其能否用零示测量法予以比较,此时只要注意选择灵敏度足够高的平衡指示仪即可.

2. 间接比较法

此种比较法在测量中是更为普遍的方法,因为多数物理量是无法直接通过比较而测出的,往往需利用物理量之间的函数转换关系制成相应的仪器来简化测量过程.例如电流表,是利用通电线圈在磁场中受到的电磁力矩与游丝的扭转力矩平衡时,电流的大小与电流表指针的偏转量之间具有一定的对应关系而制成,因此可用电流表指针的偏转量而间接比较出电路中的电流大小.

图 4-2 是利用补偿法进行间接比较来测待测电池的电动势的原理图,其中 K_1 是双刀双掷开关, E_s 是标准电池.合上 K ,调节 R ,使 AB 电阻丝中的电流 I 为某定值,让 K_1 拨向 E_s ,调节滑动触点 C 使 G 示零,这时 AC 间电阻丝的长度为 l_{AC} ;在 I 不变的情况下将 K_1 拨向 E_x ,再滑动触点 C 至 C' 时 G 又示零,这时 AC' 间电阻丝的长度为 $l_{AC'}$,则可对前后两次达到补偿的情况进行比较,得

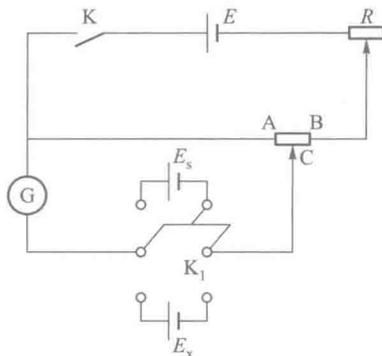


图 4-2 补偿法测量电池电动势原理图

$$E_x = U_{AC} = IR_{AC} = I\rho l_{AC}/S$$

$$E_s = U_{AC'} = IR_{AC'} = I\rho l_{AC'}/S$$

最后可得

$$E_x = (l_{AC}/l_{AC'})E_s$$

式中 ρ 为电阻丝 AB 的电阻率; S 为 AB 电阻丝的截面积.可见,对 E_x 的测量被转换为对电阻丝长度的测量,也是间接测量.从推导过程来看,上述测量必须在 I 与 ρ 皆保持不变时才是正确的.

3. 替代法

当待测量无法与标准件直接比较时,可利用它们对某一物理过程具有等效的作用,而用标准件替代待测量从而提高测量精度.这种方法实质上是平衡测量法的引申.

如用伏安法测未知电阻,可用标准电阻箱进行替代测量.只要改变标准电阻的大小,使加在标准电阻两端的电压及流经标准电阻的电流与测量未知电阻时的数值相同,则标准电阻的数值即等于待测的未知电阻的阻值.

二、宽度展延法

当待测量的数量级与测量仪器的仪器误差限较为接近时,其测量数据是不可信的.如何改进测量方法,增加测量值的有效数字,从而提高测量的精度呢?宽度展延法将在一定程度上解决这一问题.

如欲测某均匀细丝的直径,可并排密绕一百匝,测量出这一百匝宽度而求得细丝的直径.又如在“用单摆测重力加速度实验”及“用三线摆测转动惯量实验”中,测量摆的周期时,可采用测量 10 个或 50 个周期的时间来求单个周期.类似情况不胜枚举.

这种在不改变待测物理量性质的情况下,将待测量延展若干倍,从而增加了待测量的有效数字位数,减小测量值的相对误差的方法称为测量宽度展延法.

现分析展延前后测量精度的变化.设某仪器对某物理量进行单次测量,测得值为 L ,其绝对误差限即仪器误差限为 ΔL ,则最大相对误差为

$$E = \Delta L / L$$

若让该物理量展延 m 倍(m 为大于 1 的整数),还用这个仪器对之进行单次测量,其测量值应为 mL ,而该测量值绝对误差限应仍为 ΔL ,则最大相对误差为

$$E_m = \Delta L / mL$$

可见, $E_m = E/m$,即展延后相对误差减小了.展延后的待测量的测量值为 mL/m ,由于 mL 的有效数字的位数,必大于展延前的 L ,所以展延后由测量值计算出的待测量的有效数字位数必然增加,从而提高了测量的精度.

必须指出的是,使用宽度展延法,首先必须保证待测量在展延过程中不能有变化,其次在展延中应努力避免引入新的误差因素(如细丝并排密绕时应避免出现间隙).

三、线性放大法

当待测量很小又无法使用宽度展延法时,就必须考虑采用线性放大法.常见的放大方法有机械放大法,电磁放大法、光学放大法等.

1. 机械放大法

利用机械部件之间的几何关系使标准单位量在测量过程中得到放大,从而提高测量仪器的分辨率,增加测量的有效数字的位数.游标卡尺和螺旋测微器的工作原理皆属于此类.

2. 电磁放大法

在对电磁量的测量中,如果被测量非常微弱,常需放大才便于检测.在对非电学量的测量中,将其转换成电学量再进行放大测量,已成为科技人员首选方法之一.

在“实验三十一 普朗克常量的测定”中,由光电效应产生的光电流通常是非常微小的,因此设置了微电流放大器,通过电子电路以实现放大,否则无法检测.实验中也常将待测电学量或者非电学量通过传感器转变为电学量输入到示波器进行

信号放大后测量,这不但可进行定性、定量测量,而且可以直观地展示被测量的变化,“实验十八 空气声速与绝热系数的测定”即用到了此方法。

3. 光学放大法

光学放大具有稳定性好、受环境干扰小的优点。望远镜、读数显微镜以及其他很多实验中应用的“光杠杆”皆属于光学放大,其中光杠杆法被广泛应用于各个科研领域。在“实验五 静态法测量金属丝的杨氏模量”中,为了测金属丝长度的微小变化,即用到此方法。

四、对称测量法

对称测量法是消除测量中某些系统误差的重要方法。由于一些系统误差的大小与方向是个确定值(或按一定规律变化),故可以用对称测量法予以消除。可采用的对称测量法常有“正向”与“反向”测量、平衡情况下的待测量与标准量的位置互换、测量状态的“过度”与“不足”(如超过平衡位置与未达平衡位置的对称、过补偿与未补偿的对称)等。

下面介绍常用的几种对称测量法:

1. 双向对称测量法

对于大小及取向不变的系统误差,通过正、反两个方向的测量后,可收到正、负系统误差相消的结果。

如某一物理量真值为 A_0 ,测量时的系统误差为 $+\Delta A$,则正向测量时的测量值为

$$A_{\text{正}} = A_0 + \Delta A$$

反向测量时的测量值为

$$-A_{\text{反}} = -A_0 + \Delta A$$

即

$$A_{\text{反}} = A_0 - \Delta A$$

由此可得

$$\bar{A} = (A_{\text{正}} + A_{\text{反}}) / 2 = \frac{(A_0 + \Delta A) + (A_0 - \Delta A)}{2} = A_0$$

从而在测量值 \bar{A} 中消去了系统误差的影响。

此方法可参见灵敏检流计实验。检流计常量 C 为

$$C = \frac{R_0 U}{(R_1 + R_0)(R_2 + R_g) d}$$

测量电路如图 4-3 所示,为了消除检流计与回路接线上可能出现的系统误差,利用 K_2 改变回路中的电流方向,若调节 R 使正反两次测量时检流计的指针正向的偏转量 d_1 等于反向的偏转量 d_2 (数值上皆等于 d),而分别测出正反向时的电压 U_1 和 U_2 ,于是依上述公式可分别求出 C_1 和 C_2 ,取平均值 $C = (C_1 + C_2) / 2$,即可消去检流计与回路连接时可能产生的系统误差。

用分光计测量角度所采用的对径测量法,从广义上说,也属于对称测量。这种由于游标盘与刻度盘转轴不同心引起的变值系统误差,仍可通过对称测量使该系统误差正、负相消。如图 4-4 所示,刻度盘的转轴 C' 与游标盘转轴 C 不重合,因此,

刻度盘实际转过 φ 角, 而游标盘两个对径上读出的却是 φ_1 和 φ_2 , 即产生了偏心误差. 它是一种周期性变化的系统误差, 但若以对径测得的两个角度取平均, 则可消除该系统误差. 从图 4-4 中可以看出

$$\beta_1 = \frac{\varphi_1}{2}, \quad \beta_2 = \frac{\varphi_2}{2}$$

而

$$\varphi = \beta_1 + \beta_2 = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2)$$

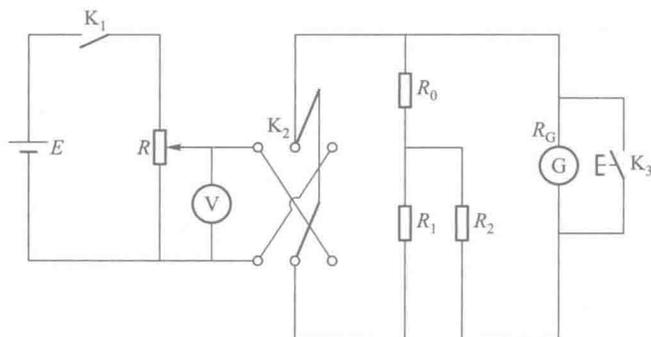


图 4-3 检流计实验中的双向对称测量法

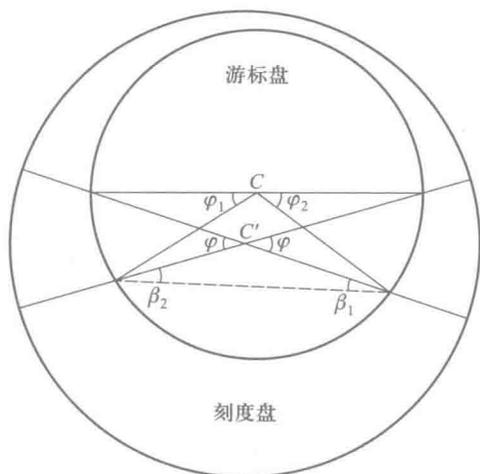


图 4-4 分光计测角度中的双向对称测量法

2. 平衡位置互易法

此法是指在应用平衡测量法时, 常使待测量与标准量位置互相交换, 这样交换前后两次所测得的数据, 可通过乘除来消除部分直接测量的系统误差. 此法常见于天平称质量以及惠斯通电桥测电阻的实验中.

惠斯通电桥测电阻的电路如图 4-5(a) 所示, 待测电阻 R_x 与其余三个桥臂上的比较电阻 R'_0 、 R_1 、 R_2 的平衡条件是

$$\frac{R_x}{R'_0} = \frac{R_1}{R_2}$$

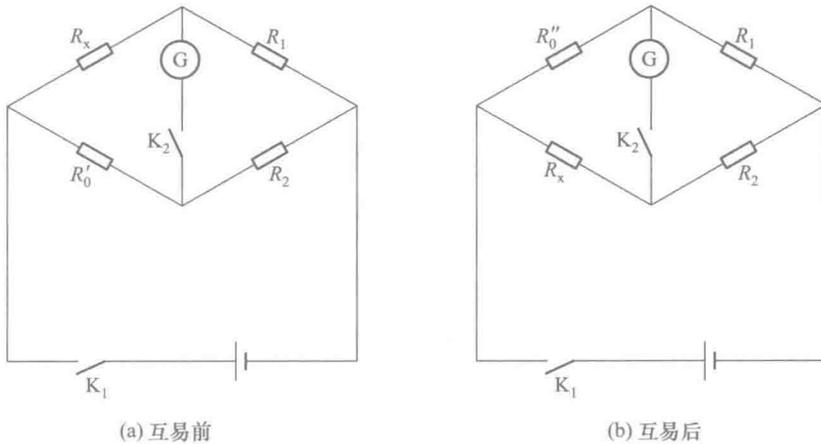


图 4-5 惠斯通电桥测电阻时的平衡位置互易法

其中 R_1, R_2 上存在着接触电阻及接线电阻等系统误差. 若待测电阻 R_x 与比较电阻 R_0' 的位置互换, 且保持 R_1, R_2 不变, 如图 4-5(b) 所示, 此时平衡条件为

$$\frac{R_0''}{R_x} = \frac{R_1}{R_2}$$

解位置互换前后的两个方程可得

$$R_x = \sqrt{R_0' R_0''}$$

这样, R_x 即不受 R_1, R_2 的误差的影响.

用天平进行质量的精密测量时, 常采用砝码与待测物位置互换法, 亦即复称法 (高斯法). 这种测量方法可消除由于两个臂长短可能有微小的差异引起的系统误差. 对于如图 4-6(a) 所示的情况, 有

$$\frac{G}{G_1} = \frac{l_2}{l_1}$$

位置互换后, 即图 4-6(b) 所示的情况, 有

$$\frac{G_2}{G} = \frac{l_2}{l_1}$$

若以质量表示则为

$$\frac{m}{m_1} = \frac{l_2}{l_1} \quad \text{及} \quad \frac{m_2}{m} = \frac{l_2}{l_1}$$

故可得

$$m = \sqrt{m_1 m_2}$$

这就消除了 l_1 与 l_2 不等而产生的系统误差.

3. 内插法

在对称测量中往往要求在平衡状态下获取测量数据. 但作为标准的量往往是跃变的非连续量, 如作为惠斯通电桥的比较臂的电阻箱, 其最小步幅为 0.1Ω . 当电

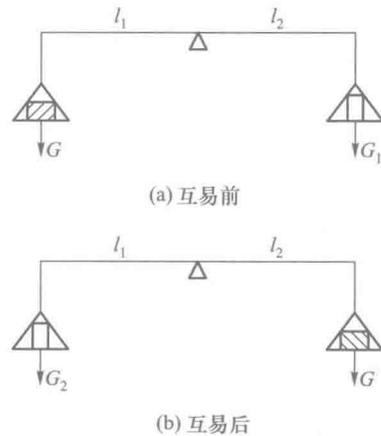


图 4-6 用天平进行质量精密测量时的平衡位置互易法

桥接近平衡时,比较臂的电阻为 R_0 ,若增加 0.1Ω 时指针正向偏了 $+n$ 格,而减少 0.1Ω 时指针却反向偏了 $+m$ 格,这就无法从实际测量中得到平衡时的比较臂电阻值,此时可用内插法求 R ,即得

$$R = (R_0 + 0.1 \Omega) - n \left(\frac{0.2 \Omega}{m+n} \right)$$

或是

$$R = (R_0 - 0.1 \Omega) + m \left(\frac{0.2 \Omega}{m+n} \right)$$

也可用作图法求解,这时以 R 为横坐标,以指针相对于平衡位置的偏转格数为纵坐标,将 $(R_0 + 0.1 \Omega, +n)$ 与 $(R_0 - 0.1 \Omega, -m)$ 两点连成直线,如图 4-7 所示,该直线与 R 轴的交点即为平衡时的比较臂的电阻值。

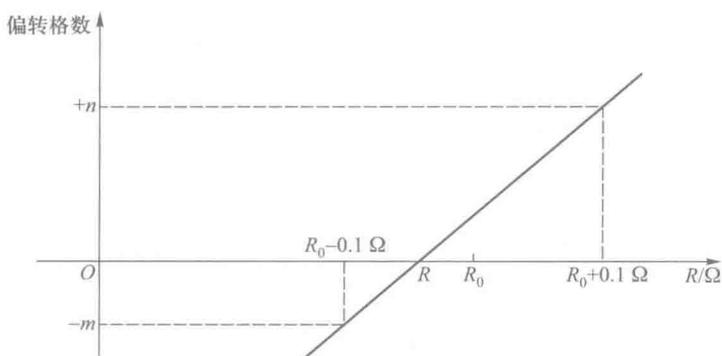


图 4-7 内插法示意图

还应指出的是,当无法得到平衡点两侧的测量点时,可用同侧两个测量点(或数点)通过外推法作图求出。

§ 4.3 物理实验中基本操作技术

一、仪器初态和安全位置

所谓“初态”是指仪器设备在进入正式调节、实验前的状态。正确的初态可保证仪器设备安全,保障实验工作进行。如设置有调节螺钉(迈克耳孙干涉仪上的反光镜的方位调节螺钉,望远镜的俯仰调节螺钉等)的仪器,在正式调节前,应先调节螺钉处于松紧合适的状态,使其在各个方向都具有足够的调节量,以便于仪器的调整。这在光学仪器中常会遇到。

在电学实验中则有所谓安全位置问题。例如,未合电源前,应使电源的输出调节旋钮处于使电压输出为最小的位置。又如使滑线变阻器的滑动端处于对电路最“安全”的状态(若作分压用,使分压输出最小;若作限流用,使电路电流最小)。还有在平衡调节前,把保护电阻接入示零电路等。这样既保证了仪器设备的安全,又

便于控制调节.

二、零位(零点)调节

绝大多数测量工具及仪表,如千分尺、电压表、检流计等都有其零位(零点).在应用它们进行测量之前,都必须校正零位.如零位不对,能调节则调节,不能调节则记下其对零点的偏差值,再在测量中予以修正.

三、水平与竖直调节

有些仪器设备必须在水平或竖直状态下才能正常工作.水平状态可借助于水平仪进行判断,竖直状态可借助重锤进行判断.对其进行调节时,一般借助于仪器基座上的三个调节螺钉.三个螺钉成正三角形或等腰三角形排列,调节其中一个,基座将以另外两个螺钉的连线为轴转动.

四、避免回程误差

由丝杠-螺母构成的转动与读数机构,由于螺母与丝杠之间有螺纹间隙,往往在测量刚开始或刚反向转动丝杠时,丝杠需转过一定的角度(可能达几十度)才能与螺母啮合.结果与丝杠连接在一起的鼓轮已有读数改变,但是螺母带动的机构未产生实际位移,造成虚假读数而产生回程误差.为避免回程误差,使用这类仪器(如千分尺、读数显微镜等)时,必须单向旋转鼓轮待丝杠-螺母啮合后,才能开始测量,并且保持整个读数过程继续沿同一方向前进,切勿忽正忽反旋转.

五、逐次(逐步)逼近调节

依据一定的判据,逐次缩小调节范围,使系统较快地收敛于所需状态的方法称为逐次逼近调节法.在不同的仪器中其判据是不同的,如天平平衡是看天平指针是否指在中央,电桥平衡是看检流计是否指零.逐次逼近调节法在天平、电势差计等仪器的平衡调节中要用到,在光路调节、分光计调节中也要用到,是一个经常使用的调节方法.

六、消视差调节

当刻度尺与指示器或标识物(如电表的表盘与指针、望远镜中分划板上的叉丝的虚像与被观察物的虚像)不在同一平面时,眼睛从不同方向观察会出现读数差异,或者物的像与叉丝的像有相对移动的现象,就称为视差现象.为了测量正确,实验时必须消除视差.消除视差的方法有两种:一是使视线垂直标尺平面读数,如1.0级以上的电表表盘均附有平面反射镜,当观察到指针与其像重合时,指针所指刻度即为正确读数值;二是使标尺平面与被测物密合于同一平面内,如游标卡尺的游标尺被做成斜面,就是为了使游标尺刻线端与主尺接近于同一平面,以减少视差.使用光学测量仪器时均需作消视差调节,须使被观测物的实像成在刻有标尺的分划板上,即让它们的虚像处于同一平面上.

NOTE

七、调焦

使用望远镜、显微镜和测微目镜等光学仪器时,为了进行正确的测量或看清目的物,均需进行调焦.例如使用望远镜时要调节物镜的位置,使远处物体的像成于目镜的焦平面上,使用显微镜时要使被观察对象处于物镜的工作距离处,以使其像成于分划板上,并且要对目镜作适度调节,这些调节统称为调焦.调焦是否准确,常以是否能看清目的物上的局部细小特征为标准.

八、光路的等高共轴调节

在由两个或两个以上的光学元件组成的实验系统中,为获得好的像质,满足近轴光线条件,必须进行等高共轴调节(如分光计的调整),即是使所有光学元件的光轴重合,使其物面、屏面垂直于光轴.一般分为两步进行调节,第一步粗调(目测调节),第二步根据光学规律进行细调,常用的方法有自准法和二次成像法.

九、回路接线法

一个电路常可分解为若干个闭合回路.接线时沿回路由始点(如等电势点)依次首尾相连,最后仍回到始点,此接线方法称回路接线法.按照此法接线和查线,可确保电路连接正确无误.但需注意的是在接线前应先对电路中元器件以及仪器设备合理布局.

十、跃接法

在示零法测量中,经常采用瞬间(而不是较长时间)接通示零电路的方法来对是否达到平衡状态或偏离平衡的方向作出判断.这样做的好处是,在远离平衡状态时保护仪表,使其免受长时间的大电流冲击;在接近平衡时,通过电路的瞬间通断比较,提高检测灵敏度.

第5章 基本物理量的测量及常用仪器的使用

物理学中的基本物理量包括长度、质量、时间、温度、电流、物质的量与发光强度等。本章将主要阐述其中的一些基本物理量的测量及相关仪器仪表的使用。除此之外，还简要介绍了电动势、电压及电阻的测量，这些量的测量在物理实验中经常涉及。

§ 5.1 长度的测量

物理学中的物理量虽然很多，但大多数都可由长度、质量、时间和电流等几个最基本的量推导出来。掌握这些基本量的测量方法，熟练使用常用的测量仪器，是实验的最基本技能。

长度的测量处于计量的基础地位。很多物理量的直接测量，最终都通过仪器转化为对长度的测量，如水银温度计是利用热胀冷缩引起毛细管中水银柱的长度变化来测量温度的变化，福丁(Fortin)气压计则是利用水银柱相对于某一基准位置的高度来表示气压的大小。有些物理量是将其转化为弧线长度来进行测量的，如量角器及各种指针式仪表等。直接测量长度的量器有刻度尺、游标卡尺、螺旋测微器。这三种量器测量长度的范围和精密度各不相同，需依据测量对象和条件来选用。当长度在 10^{-2} cm 以下时，需用更精密的长度测量仪器(如比长仪)或采用其他的测量方法(如用光的干涉或衍射、光杠杆等)来测量。

现在对长度的测量已能轻易地达到很高的精度。测量长度的精密仪器大多是基于显微镜或其他光学装置，但其读数绝大多数是利用游标卡尺或螺旋测微器来进行的。游标卡尺和螺旋测微器在其他精密仪器上也被广泛应用。本节将着重介绍它们的原理及使用方法。

一、长度的单位

长度的国际标准，从 1795 年法国颁布米制条例以来，一直在不断地完善。

最早，科学家设想从自然界选取长度标准，把从北极通过巴黎到赤道的地球子午线长度的一千万分之一作为长度的基本单位，称为“米”，并用纯铂制成了米的基准器。显然，这种基准器(称为自然基准器)的准确度受到对地球子午线的测量准确程度的限制。

在 1889 年巴黎第一届国际计量大会上规定长度的国际标准是一根横截面呈 X 形的铂铱(90% 铂和 10% 铱)合金棒,保存于巴黎附近的塞弗尔市的国际计量局中,叫做国际米原器. 刻在棒的两端附近金栓上的两条细线之间的距离(棒处在 0°C 、标准大气压、湿度不超过 10 mmHg ,并用规定的方法支撑)定义为 1 m .

由于国际米原器及其复制品的长度可能由于外界的作用而随时间发生极微小的变化,所以对于极其精密的测量来说,国际米原器不是理想的长度标准. 任何大块物质都不可能保持本身的物理性质永久不变,但单个原子的性质可以合理地假定为基本上不随时间而变化,所以许多年来,科学家们就企图把长度的标准和原子的性质联系起来. 由于实验技术的发展,人们已经能够极精密地测定光的波长. 1960 年第 11 届国际计量大会决定,以氩的一种纯同位素——氩-86 原子的 $2p^{10}$ 和 $5d^5$ 能级间跃迁的辐射在真空中的波长作为长度的新标准,并规定 1 m 等于该波长的 $1\,650\,763.73$ 倍. 新标准一方面提高了测量的准确度,另一方面比旧标准方便得多,因为在任何设备比较完善的实验室中,都能够获得氩-86 发出的橙红色光.

用氩-86 波长复现长度单位“米”时,在最好的复现条件下,其准确度为 $\pm 4 \times 10^{-9}\text{ m}$. 要继续提高存在着困难,因为受激原子跃迁时,总要受外部电磁场作用和其他干扰的影响,使谱线偏移以及增加谱线的半值宽度. 后来,又发现氩-86 标准谱线不对称,其原因不清. 正是由于这些因素,限制了长度计量精确度的进一步提高.

20 世纪 70 年代初,有些国家在研究光速方面投入了很大的力量. 因为当时的时间频率测量精度已经比较高了,如果能准确测量光速,则必然会提高长度测量的精确度.

1983 年 10 月 7 日,在巴黎召开的第 17 届国际计量大会上,审议并批准了米的新定义. 决定:① 米是光在真空中 $(1/299\,792\,458)\text{ s}$ 时间间隔内所经路径的长度;② 废除 1960 年以来使用的建立在氩-86 原子在 $2p^{10}$ 和 $5d^5$ 之间能级跃迁的米的定义.

新定义用词简单,含义明确、科学,又能够为广大非科技人员所理解. 这个定义带有开放性,定义本身不限制单位量值的复现精度,随着科学技术的发展,复现精度可不断提高,定义复现方便,即使是经济不很发达的国家,也有能力复现,并有足够的精确度.

在国际单位制(SI)中,长度单位是“米”(m). 除了“米”以外,在国际制中还可使用“米”的十进倍数或分数作长度单位. 常用长度单位的符号及其与“米”的关系如下:

$$1\text{ km(千米)} = 10^3\text{ m}$$

$$1\text{ cm(厘米)} = 10^{-2}\text{ m}$$

$$1\text{ mm(毫米)} = 10^{-3}\text{ m}$$

$$1\text{ }\mu\text{m(微米)} = 10^{-6}\text{ m}$$

$$1\text{ nm(纳米)} = 10^{-9}\text{ m}$$

天文学中计量天体之间的距离时,常用“天文单位”或“光年”作为长度单位. 1 天文单位就是地球和太阳的平均距离,约等于 $1.496 \times 10^8\text{ km}$. 1 光年就是光在真

空中一年时间内所走过的路程. 1 s 内光在真空中走过的路程约 3×10^8 m, 所以 1 光年约等于 9.46×10^{15} m.

二、长度测量的基本仪器

在工程技术和科学研究中经常需要测量不同量值、不同精度要求的长度. 针对不同情况, 需使用不同的长度测量仪器.

在物理实验中常用的长度测量仪器有刻度尺、游标卡尺、螺旋测微器、读数显微镜、百分表等. 选用时要注意仪器的量程和分度值(一般分度值越小, 仪器越精密).

1. 刻度尺

在粗略的测量中, 可以用木尺和塑料尺. 要进行较精确的测量就需用金属刻度尺. 通常应选用温度系数小的材料(如不锈钢、殷钢、铁铬镍合金)制作刻度尺. 刻度尺的分度值为 1 mm, 用刻度尺测量长度时, 可准确到毫米这一位, 毫米以下的一位, 则靠估读. 例如, 用刻度尺测量一个物体的长度 $l = |AB|$, 如图 5-1(a) 所示, A 点位置的读数是 10.00 cm, B 点的位置的读数是 12.63 cm, 则 $l = (12.63 - 10.00)$ cm = 2.63 cm. 毫米以下的一位读数(10.00 中最后的“0”和 12.63 中的“3”)是估读的, 在这一位存在着随机误差.

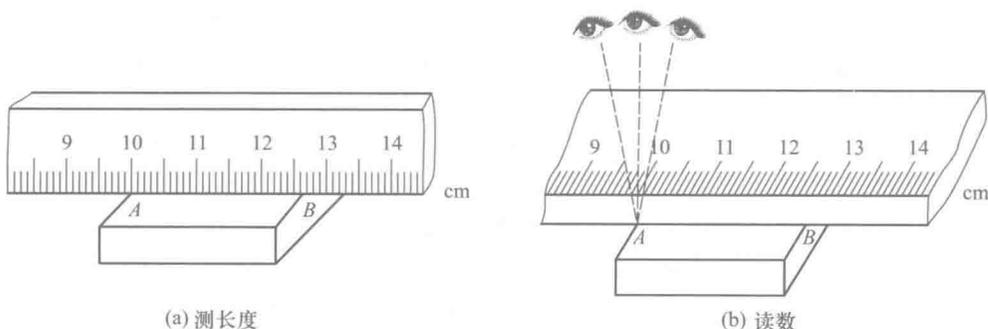


图 5-1 刻度尺的读数

用刻度尺测量时, 应注意以下两点:

(1) 尽量减小视差, 使待测物与刻度尺的刻度紧贴, 如图 5-1(a) 所示. 否则因刻度尺有一定的厚度, 测量时从不同的角度去看, 会导致读数的差异, 如图 5-1(b) 所示.

(2) 当刻度尺的刻度由端边开始时, 一般不要用刻度尺的端边作为测量的起点, 以免由于刻度尺端边磨损而引入系统误差.

在进行物理实验时, 常用的刻度尺有钢板尺和卷尺. 钢板尺用后应擦净, 以防生锈, 并将尺挂起或平放于桌面上, 以防钢板尺变形.

在使用卷尺时应注意以下两点:

① 尺带的刻线面一般镀铬、铬或其他涂层, 要保持清洁, 测量时尽量不使它和被测面摩擦, 防止划伤.

② 拉尺时不要用力过猛,用完后,慢慢地退回尺带.使用制动式卷尺时,应先按下制动按钮,然后拉出尺带.用毕按下按钮,尺带自动卷入.尺带只能卷,不能折.

2. 游标卡尺

在刻度尺上附加一个可滑动的、刻有若干分度的小尺(称为游标),就可以把刻度尺的毫米以下的那一位精确地读出.

图 5-2 是测量精确到 0.1 mm 的游标(称为十分度游标)的原理图.游标上有 10 个分度,其总长正好等于主尺的 9 个分度,因此游标上的一个分度等于 0.9 mm.

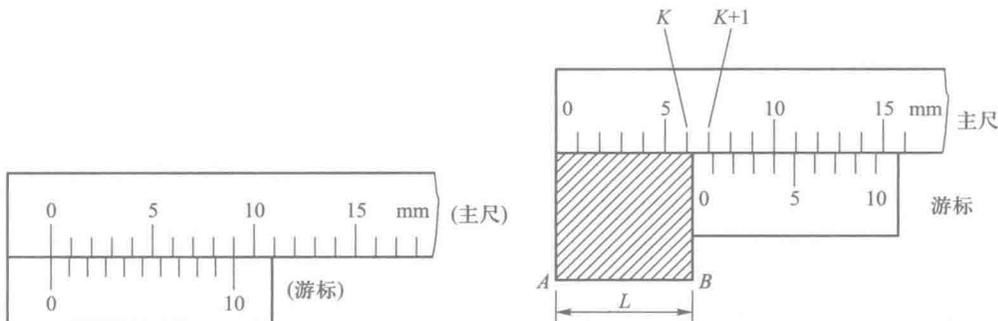


图 5-2 主尺与游标

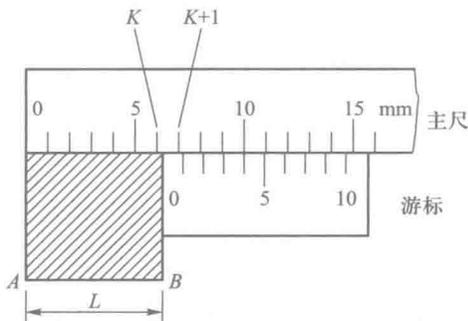


图 5-3 十分度游标卡尺的读数

图 5-3 是使用十分度游标卡尺测量的读数示意图.测量时将物体 AB 的 A 端和主尺的零线对齐,若另一端 B 在主尺的第 6 和第 7 分度之间,比 6 mm 长 Δl ,则将游标的零线和物体的末端 B 相接,找出游标与主尺对齐的刻线为第四条,因此

$$\Delta l = (4 - 4 \times 0.9) \text{ mm} = 4 \times (1 - 0.9) \text{ mm} = 4 \times 0.1 \text{ mm} = 0.4 \text{ mm}$$

由此得该物体的长度应为 6.4 mm.对于十分度游标卡尺,由于毫米以下这一位数是准确的,根据仪器读数的一般规则,读数的最后一位应该是读数误差所在的一位,写为 $L = 6.40 \text{ mm}$.最后加一个“0”表示读数误差出现在最后这一位上.如果不能判定游标上相邻两条刻线中哪一条与主尺刻线重合或更相近些,则最后一位可估读为“5”,如图 5-4 所示,读作 $L = 0.55 \text{ mm}$.

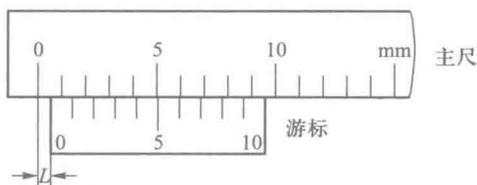


图 5-4 十分度游标卡尺最后一位的读数

若以 l_m 表示主尺上一个分度的长度,以 l_n 表示游标上一个分度的长度,通常游标的全部 n 个分度的总长等于主尺的 $(n-1)$ 个分度的长度,即

$$l_n n = l_m (n-1) \quad (5-1)$$

由此可以求出主尺上一个分度与游标上一个分度的长度之差

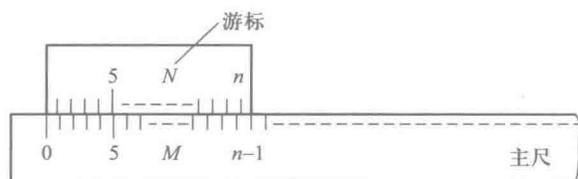
$$\delta x = l_m - l_n = \frac{1}{n} l_m \quad (5-2)$$

式(5-2)表示的即是游标的精密度,取决于主尺的一个分度的长度 l_m 和游标的分度数 n 。

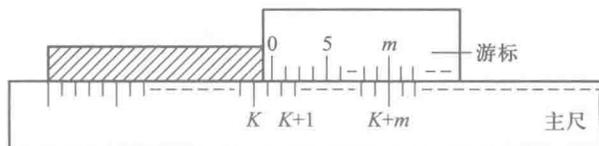
图 5-5 是一般游标卡尺的读数原理图。使用 n 分度游标卡尺测量时,如图 5-5(a)所示,若游标的第 m 条刻线与主尺某一刻线对齐,如图 5-5(b)所示,则

$$\Delta L = m l_m - m \frac{n-1}{n} l_m = m \frac{l_m}{n}$$

$$L = K l_m + \Delta L = K l_m + m \frac{l_m}{n}$$



(a) 用 n 分度游标卡尺测量



(b) 游标的第 m 条刻线与主尺某一刻线对齐

图 5-5 一般游标卡尺的读数原理图

常用的游标卡尺的分度数 n 有 10、20、50 三种,它们的最小分度值分别为 0.1 mm、0.05 mm 和 0.02 mm。对于后两种游标卡尺,为了读数的方便,通常以几个最小分度值为一组,标示出较长的刻度线,且将其读数值直接标示出来。

图 5-6 和图 5-7 都是二十分度游标卡尺。图 5-6 中,主尺上的 19 mm 等分为游标上的二十格。图 5-7 中,主尺上的 39 mm 等分为游标上的二十格,因此它们的分度值分别为

$$\delta x = \left(1.0 - \frac{19}{20}\right) \text{mm} = 0.05 \text{mm} \quad \text{和} \quad \delta x = \left(2.0 - \frac{39}{20}\right) \text{mm} = 0.05 \text{mm}$$



图 5-6 二十分度游标卡尺(等于主尺上的 19 mm)

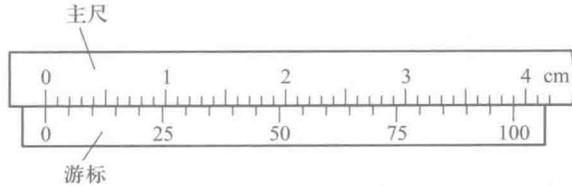


图 5-7 二十分度游标卡尺(等于主尺上的 39 mm)

为便于直接读数,二十分度游标卡尺上刻有 0、25、50、75、100 等示数.如游标上第 5 条刻线与主尺上的某一刻线对齐,则主尺最小刻度以下的示数为 $5\delta x = 0.25 \text{ mm}$,可直接读出.二十分度游标的估读误差($< \frac{1}{2}\delta x$)可认为在百分之一毫米这一位上,如 $l = 10.75 \text{ mm}$,这时不再在其后面加“0”.

五十分度游标卡尺的工作原理与读数规则类同,不再赘述.游标卡尺的结构如图 5-8 所示.

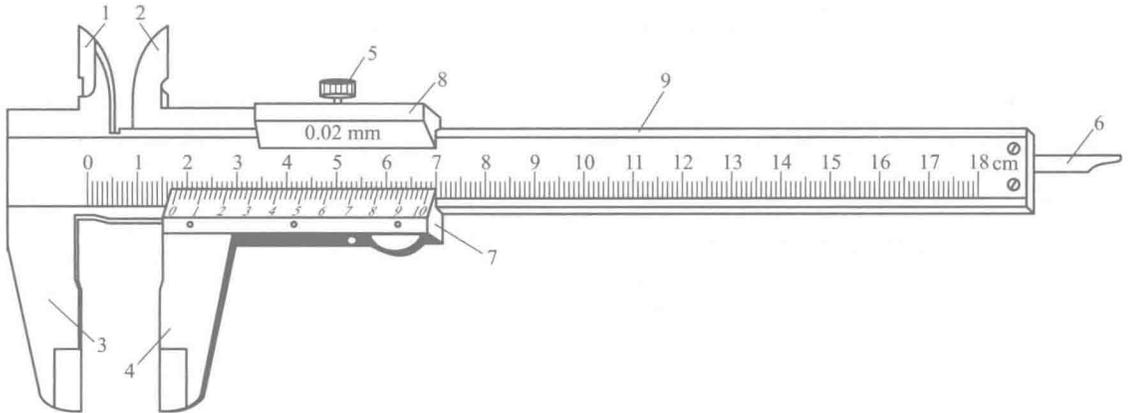


图 5-8 游标卡尺的结构

1、2—上量爪;3、4—下量爪;5—紧固螺钉;6—测深尺;7—游标;8—可滑动尺框;9—尺身

使用游标卡尺时应注意以下几点:

(1) 合拢下量爪,检查游标“0”线与主尺“0”线是否重合.如不重合,应记下零点读数,加以修正.

(2) 测量外尺寸时,应先把下量爪张开得比被测尺寸稍大,而测量内尺寸时,则应把上量爪张开得比被测尺寸稍小,然后慢慢推或拉尺框,使量爪轻轻地接触被测件表面.

(3) 当量爪接触被测件后,用力的大小应正好使两个量爪恰好能接触被测件表面.如果用力过大,尺框和量爪会倾斜一个角度,这样量出的尺寸会偏离实际尺寸.

(4) 不要用它去量粗糙物体.物体夹紧后,不要在卡口挪动物体,防止卡口的磨损.

在游标卡尺上所用的游标,称为直游标.还有一种弯游标,被广泛应用于精密

测量角度的仪器仪表上,如分光计及一些电学测量仪表.

弯游标是一个能沿着与其同心的圆刻度盘(弧尺)转动的小弧尺.其工作原理与直游标基本相同.游标上刻有 n 个分度,其总的弧长等于圆刻度盘的 $(n-1)$ 个分度的弧长,如图 5-9(a) 所示.因此,与式(5-1)完全类似,可以写出

$$\beta_n n = \beta_l (n-1) \quad (5-3)$$

式中 β_l, β_n 分别表示圆刻度盘和游标的分度值(以角量表示).

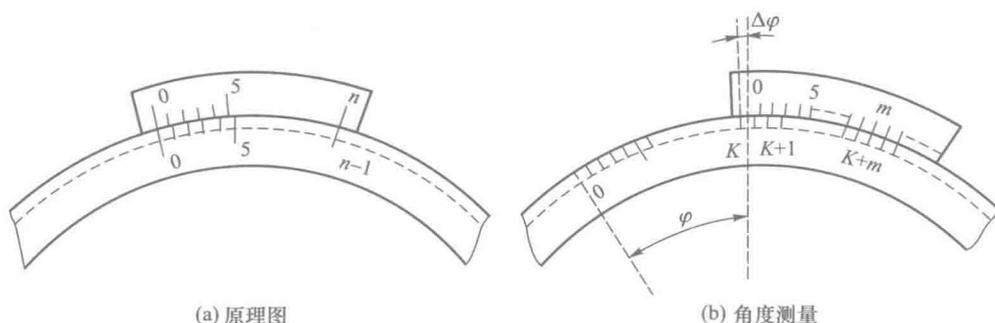


图 5-9 弯游标

弧尺与游标分度的差值是

$$\beta_l - \beta_n = \frac{\beta_l}{n} \quad (5-4)$$

用 φ 表示被测的角,其值介于圆刻度盘的第 K 个和第 $(K+1)$ 个刻度线之间,如图 5-9(b) 所示,游标的第 m 个刻度与弧尺的第 $(K+m)$ 个刻度线重合,则

$$\varphi = K\beta_l + m(\beta_l - \beta_n) = K\beta_l + \frac{\beta_l}{n}m \quad (5-5)$$

即被测的角度等于它所具有的弧尺的整分度数 $(K\beta_l)$ 加上游标精度值 (β_l/n) 和游标上与弧尺某一分度线重合的分度的号数 (m) 的乘积,这与直游标的关系完全类似.

在应用弯游标时,还应注意以下几点:

(1) 因为角度是以度、分和秒表示的,所以十进制的弯游标,即十分之一度或百分之一度的弯游标,较少采用.弯游标通常都是这样设计的,使所得的结果直接就是分或秒.常用弯游标的精度值列于表 5-1 中.最精密的弯游标(表的右端)只在特别需要下,例如在最精密的天文仪器中才用到.

表 5-1 常用弯游标的精度值

圆刻度的分度值(β_l)	1°	1°	1/2°	1/3°	1/4°	1/4°	1/6°	1/12°
游标的分度数(n)	12	30	30	20	15	30	60	60
游标精度值(β_l/n)	5'	2'	1'	1'	1'	30"	10"	5"

(2) 游标的旋转轴应与弧尺的中心重合,但是要完全达到这点实际上是不可

能的,甚至就是最好的测角仪器,也不能完全没有偏心率.这种偏心率可能引进较显著的系统误差.为了消除偏心率的影响,通常不是用一个而是用两个游标,这两个游标彼此相对地位于圆刻度盘直径的两端.测量时,读取两个游标的示数,以通过两个游标各自的读数变化而得的两个角度的平均值作为测量值,这将在分光计的使用中涉及.

(3) 当测角度时,如游标没有通过弧尺的零刻度线,则游标的两个读数之差就等于被测的角度(对于双游标,则取两边游标转过的角度的平均值).但当游标通过弧尺的零刻度线时,注意计算时两边的角度取不同的符号.

弯游标上的分度值通常是非常小的,以致很难用肉眼对它们直接读数,因此在许多仪器的弯游标上安装有放大镜.如果仪器上没有,则在读数时可采用普通的手持放大镜.

总体来说,游标上的最大读数通常等于主尺上的最小一格的值(极少数情况除外),由此可确定游标上最小一格的值.读数时,从上往下,一级一级往下读,力争一气呵成地读出测量值.

3. 螺旋测微器(外径千分尺)

螺旋测微器是一种比游标卡尺更精密的长度测量仪器,其外形如图 5-10 所示.

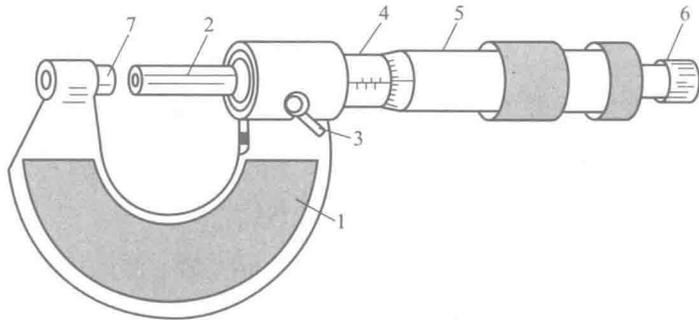


图 5-10 螺旋测微器外形

1—弓架;2—测微螺杆;3—制动器;4—固定套筒;5—微分筒;6—测力旋钮;7—测量砧

固定套筒 4 上的最小分度是 0.5 mm(注意上下两排最小分度为 1 mm 的刻度线在中间交错排列,因此从上排某一刻度线至下排相邻的两条刻度线的距离均是 0.5 mm).旋转微分筒 5(沿筒的圆周等分 50 个分度)一周,测微螺杆 2 就移动 0.5 mm,因此微分筒每转过一个分度,测微螺杆就移动 $(0.5/50) \text{ mm} = 0.01 \text{ mm}$,也即微分筒上的最小分度为 0.01 mm.

测量过程中,当测微螺杆与被测物体快接触时,只能轻轻转动测力旋钮 6,使测微螺杆与被测物体以恒定的压力保持接触,其中的棘轮便发出“咔咔”的响声.这时即使继续转动测力旋钮,微分筒也不再转动,测微螺杆也就不再前进了.读数时,先从固定套筒的标尺上读出整数格(每格 0.5 mm),0.5 mm 以下的读数则由微分筒圆周上的刻度读出,需要注意的是,微分筒的最小分度值以下必须估读一位.刚

学习使用时,容易将整数格读错,如图 5-11 所示.

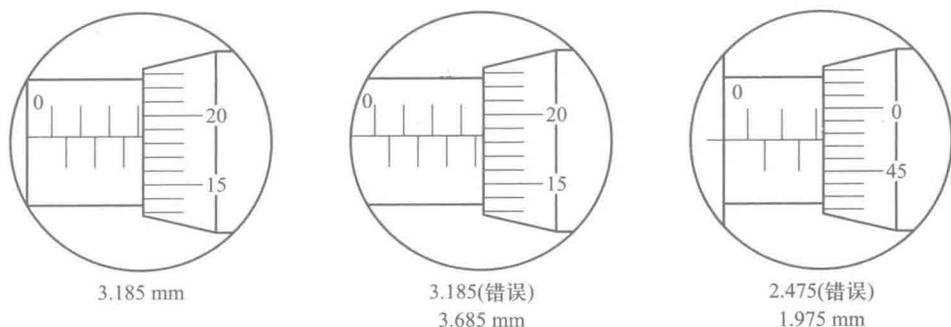


图 5-11 螺旋测微器的读数

使用螺旋测微器时应注意以下几点:

(1) 记录零点读数. 测微螺杆与测量砧接触时,理想情况下微分筒上的零线应正好和固定套筒上的长横线对齐,但通常是不对齐的,必须记下零点读数. 如图 5-12 所示是两种情况下的零点读数(注意零点读数均是以微分筒上的零刻度线为读数起点),注意它们的符号不同. 显然,测量值=读数值-零点读数.

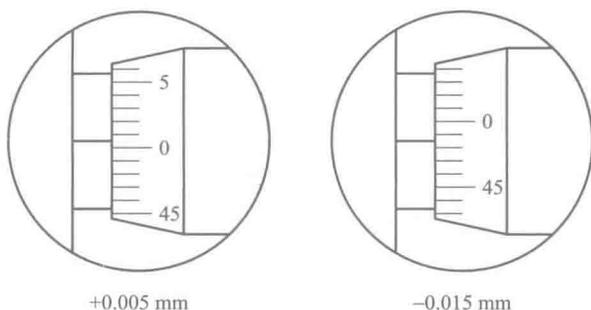


图 5-12 螺旋测微器的零点读数

(2) 测微螺杆接近待测物时不要直接旋转微分筒,而应旋转测力旋钮,以免压力过大,致使测微螺杆上的螺纹发生形变而损坏仪器.

(3) 用完后应使测微螺杆与测量砧之间有一个间隙,避免热胀时损坏测微螺杆上的精密螺纹.

4. 读数显微镜

读数显微镜是测微螺旋和显微镜的组合物,是用来精确测量长度的仪器. 其外形如图 5-13 所示.

目镜 1 安插在棱镜座 2 的目镜套筒内. 棱镜座 2 可以转动. 目镜紧固螺钉 16 可以固定目镜的位置. 物镜 4 直接旋在镜筒 3 上. 转动调焦手轮 15 可使显微镜上下升降以进行调焦. 支架 13 通过旋钮 12 可紧固在立柱 14 的适当位置上.

旋转测微鼓轮 9 时,测量工作台沿 x 轴方向平移. 当鼓轮旋转一周时,工作台沿 x 轴方向移动 1 mm. 测微鼓轮边缘上刻有 100 个分度,因此每分度表示测量工作

NOTE

台的移动量为 0.01 mm. y 轴方向螺旋测微器周边刻有 50 个分度,当测微器旋转一周时,工作台沿 y 轴方向移动 0.5 mm,因此每分度表示的移动量也是 0.01 mm.

测量工作台还可以转动. 圆形工作台的边缘刻有角度值. 绕垂直轴旋转的角度由弯游标读数,弯游标上的最小分度值为 6'. 测量工作台装配在平台 11 上. 通过旋钮 10 可将平台 11 紧固在立柱 14 上. 反光镜 7 装在底座 8 上. 根据光源方向,可以任意转动反光镜 7,以使显微镜的视场明亮.

读数显微镜的光学系统如图 5-14 所示.

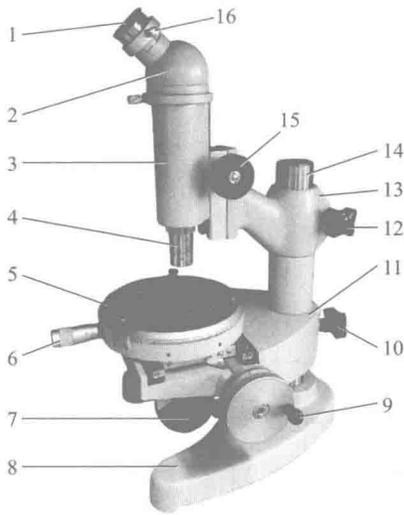


图 5-13 读数显微镜外形

1—目镜;2—棱镜座;3—镜筒;4—物镜;5—测量工作台;6—测微螺旋;7—反光镜;8—底座;9—测微鼓轮;10—旋钮;11—平台;12—旋钮;13—支架;14—立柱;15—调焦手轮;16—紧固螺钉

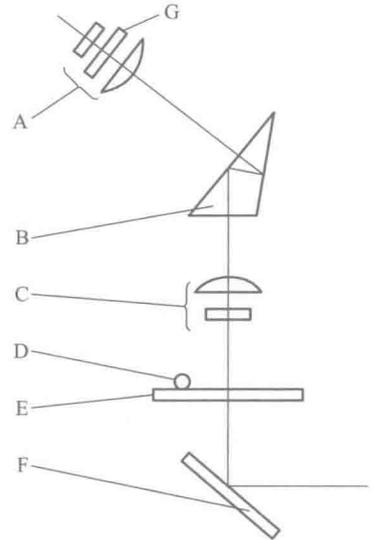


图 5-14 读数显微镜的光学系统

A—目镜;B—棱镜;C—物镜;D—待测物;E—测量工作台;F—反光镜;G—分划板

外界光线通过反光镜 F 而垂直向上反射,照亮测量工作台 E 上的待测物 D. 被照亮的待测物和背景由物镜 C 放大经过转向棱镜 B 而成像在分划板 G 上(分划板上刻有十字分划线). 观察者经目镜 A 观察物体最终的像和分划板的像.

使用读数显微镜进行测量的主要步骤如下:

- (1) 调节目镜 1,看清叉丝.
- (2) 将待测物安放在测量工作台上,转动反光镜 7,以得到适当亮度的视场.
- (3) 旋动调焦手轮 15,使物镜 4 下降到接近物体的表面,然后逐渐上升,看清待测物.

(4) 转动测微鼓轮 9,使叉丝交点和被测物上的一点(或一条线)对准,记下读数. 继续旋转鼓轮,使叉丝对准另一点,再记下读数,两次读数之差即所测两点间的距离.

使用该仪器应注意以下几点:

(1) 使工作台的移动方向和被测两点间的连线平行.

(2) 防止回程误差.

移动显微镜使它从两个相反方向对准同一点的两次读数可能不同. 这是由于使工作台移动的丝杆和螺母的螺纹不能完全紧密接触, 当转动方向改变时, 它们的接触状态也将改变, 由此产生回程误差. 为了防止回程误差, 在测量时应向同一方向转动鼓轮(不能中途反转), 使叉丝和各点对准. 如要从相反方向继续测量各点的位置, 则必须通过转动鼓轮(使工作台移动), 直到观察到叉丝越过反向测量的起始点较大距离时, 才能反向转动鼓轮进行测量.

§ 5.2 质量的测量

物体的质量可以用两种方法来测量. 一种方法是利用质量的定义式, 将一个已知力作用在一个物体上, 测出该物体的加速度, 再用这个力除以此加速度, 就可得到该物体的质量. 这种方法多用于测量微小粒子的质量. 另一种方法是与某一标准件的质量相比较. 如采用等臂天平, 则当天平平衡时, 左边被测物体的质量与右侧所加的全部砝码的质量(包括游码的读数)理论上相等.

直接测量物体质量的仪器通常叫做秤. 秤的种类繁多, 结构形式各不相同, 量限、精度也相差很大. 就其平衡原理来讲, 有的是利用杠杆原理(如杠杆秤), 有的是利用液压原理(如液压秤), 有的是利用牛顿第二定律和弹性理论(如扭力天平、弹簧秤及惯性秤), 有的则是利用电磁原理(如磁悬秤及电磁秤).

在日常的质量计量工作中, 遇到最多的是单杠杆秤, 通常称为天平. 如果这种杠杆左右两臂相等, 就称为等臂天平; 如果杠杆的左右两臂不相等, 就称为不等臂天平.

质量的国际单位, 在 1889 年以前经历了与长度的国际单位相类似的完善过程. 1795 年以后, 把“千克”作为重量单位(当时还没有使用质量这一名词), 它等于十分之一米长度的立方体(1 dm^3)的纯水在 4°C 时的重量, 并用纯铂制成了“千克”的基准器. 随着测量技术的提高, 经过反复地精确测量, 发现重为 1 kg 的纯水, 在 4°C 时的体积并不是 1 dm^3 , 而是 1.00028 dm^3 . 即千克基准器的重量和理论千克的重量之间存在着很大的差别.

质量的国际标准是一个直径和高度均为 39 mm 的铂铱合金圆柱体, 称为国际千克原器. 1889 年巴黎第一届国际计量大会规定: 千克是质量单位, 等于国际千克原器的质量, 国际千克原器放置在双层玻璃罩内的石英托盘上, 与国际米原器一起, 保存于国际计量局.

把质量标准(千克)细分为相等的小质量的仪器是等臂天平. 经常采用的其他质量单位有:

$$1 \text{ g(克)} = 10^{-3} \text{ kg}$$

$$1 \text{ mg(毫克)} = 10^{-6} \text{ kg}$$

$$1 \mu\text{g}(\text{微克}) = 10^{-9} \text{ kg}$$

1. 天平的构造和性能

实验室常用的天平有精密度较高的分析天平和精密度较低的物理天平两种。我们主要介绍物理天平。

物理天平如图 5-15 所示。其主要部分是横梁，梁上有三个用玛瑙或钢制成的刀口。中间刀口向下，可由立柱上的刀承支起，两侧刀口上挂有吊耳，吊耳下边悬挂秤盘。三个刀口在同一平面上，且间距相等，即横梁是等臂杠杆。在立柱下方，有一个制动旋钮，用以升降横梁。当顺时针转动制动旋钮时，立柱中上升的刀承将横梁从支架上托起，横梁即可灵活地摆动，进行称衡。用毕，逆时针转动制动旋钮，横梁下降，由支架托住，中间刀口和刀承分离，两侧刀口也由于秤盘落在底座上而减去负荷，从而保护刀口不受损伤。横梁上刻有游码尺，用以放置游码，测量前应将游码置于游码标尺左端的“0”刻线处。

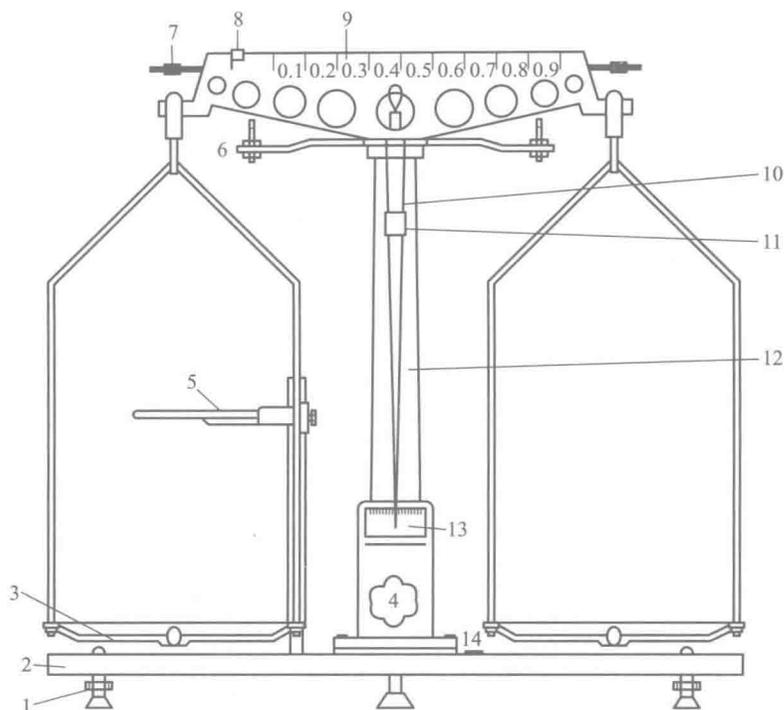


图 5-15 物理天平

1—水平调节螺钉；2—底板；3—秤盘；4—制动旋钮；5—托架；6—支架；7—平衡调节螺母；8—游码；
9—横梁；10—指针；11—感量调节器；12—立柱；13—标尺；14—水准器

天平的性能用最大称量和灵敏度表示。灵敏度是指天平两侧的负载相差一个单位质量时，指针在标尺上偏转的分格数。有时也用感量代替灵敏度，感量是指天平的指针偏转一个最小分格时，秤盘上所要增加的砝码。可见，感量与灵敏度互为倒数。例如，某物理天平的最大称量为 500 g，灵敏度为 0.1 分格/mg，则其感量为 10 mg/分格。

天平是比较精密的仪器，应放在牢固的实验台上。不要让阳光直接射到天平

上,以防止天平的横梁由于受热不均匀而引起系统误差.平时应保持天平的洁净,尤其是刀口和刀承处的洁净.移动天平时,要取下秤盘.

2. 砝码

砝码是以固定形式复现某一给定质量值的一种“从属的实物量具”.因为不能只靠砝码就能测出质量值,而必须结合天平和秤这一类测量仪器才能进行质量的计量.

砝码上标示的质量值,称为砝码的标称值,又叫砝码的名义值.

为使砝码具有稳定的质量值,适应精密称衡的需要,砝码的材料必须具有良好的物理和化学方面的稳定性,不易受周围介质的腐蚀;具有一定硬度,坚固耐磨.高等级的砝码还需考虑抗磁性好、组织紧密没有孔隙等因素.90%铂与10%铱的合金,性能理想,但价格昂贵,只适用于制造质量原器.非磁性不锈钢也是较好的砝码材料.目前使用最广泛的,还是传统的黄铜和青铜.用青铜制造的砝码,外部都有一定厚度的镀层,一般是镀铬(或铑、铂).毫克组的砝码可用钛、铂和铝制造,其中铝制毫克组砝码使用最广泛.对于精度更低的砝码,常用铸钢、铸铁或锻钢制造.

为了使用方便,砝码都配套成组.组合的原则是在满足使用要求、便于检定的前提下,用最少数量的砝码能够组成所需要的任何质量.使用最广泛的组合方式是按5、2、2、1组合.如毫克组砝码的组合为:500 mg、200 mg、200 mg、100 mg、50 mg、20 mg、20 mg、10 mg等.

使用砝码时特别要注意以下两方面:

(1) 必须保持砝码的清洁,不受腐蚀.使用砝码时,要注意不污染和腐蚀砝码表面,不要使砝码与腐蚀性液体接触.在使用一等至三等砝码时尽量避免对着砝码呼气,不得用手直接接触砝码,只准用镊子、夹叉或带上细纱手套拿取.砝码上有水滴时,要马上擦干.用完砝码,必须顺手放回砝码盒内.砝码盒放在洁净干燥而无剧烈温度变化的房间里或放在专用的玻璃干燥皿中.定期清洗砝码,可视情况选择无水乙醇、航空汽油、苯、乙醚、丙酮等作为清洗液.清洗具有调整腔结构的砝码时,要防止清洗液渗入调整腔内.

(2) 必须保证砝码完好无损.砝码要轻拿、轻放,避免撞击在其他物体上或掉到地上.使用镊子、夹叉时,应注意不划伤砝码表面.对于具有调整腔的砝码,其调整腔盖只允许在修理或周期检定时才能打开.

3. 天平的使用步骤

(1) 调水平.配合转动底板下面的三个水平调节螺钉,使水准器中的气泡处于正中央,以保证天平的立柱竖直.

(2) 调节天平平衡.将游码置于游码尺零刻度处,将横梁两边的平衡调节螺母置于可调量的中间位置,挂上两边的挂钩及秤盘.转动制动旋钮,支起横梁,通过指针两边摆动的幅度,判断天平是否平衡,如不平衡,则反复调节横梁两边的平衡调节螺母.这里要注意的是:支起横梁前,应使两边的秤盘止动,否则横梁升起后,将会在水平方向摆动而落不回支架上;横梁明显不平衡时,则不应将横梁全支起来;调节平衡螺母时,须将横梁降下来托在支架上才能进行,以保护天平的刀口.

下面介绍快速判断天平是否平衡的方法. 天平平衡时, 指针最后应停在标尺中线. 但指针在标尺中线两侧摆动直至静止要经历一个缓慢的过程. 实际测量中, 不可能等指针完全静止下来才继续后面的操作, 因此必须要能快速地判断指针静止时所指的刻度值(简称停点).

假设在摆动中的某一短时间内, 指针在刻度尺的中线两侧所达到的刻度值为 a_1, b_1, a_2, b_2, a_3 , 如图 5-16 所示, 则停点为

$$e_0 = \frac{\frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)}{2} \quad (5-6)$$

图 5-16 中, $a_1 = 3.4, b_1 = 17.5, a_2 = 4.0, b_2 = 16.9, a_3 = 4.8$, 将它们代入式(5-6), 得 $e_0 = 10.6$. 因此指针稍微偏向右侧, 说明左侧较重.

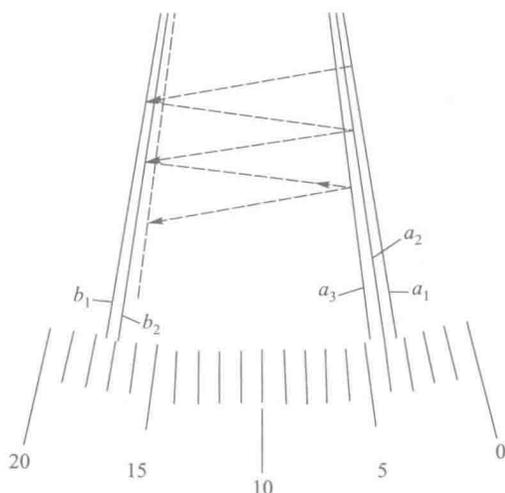


图 5-16 停点的确定

为了判断指针位置的方便, 通常将标尺的中线取为“10”. 如果天平的停点偏离标尺的中线, 则应放下横梁后继续调节两边的平衡调节螺母, 然后再支起进行检查, 直到把停点调到和标尺中线相差不超过 1 个分格就可以了.

(3) 称量. 降下横梁, 使它托在支架上. 把待测物放在左盘中央(或挂在盘框上方的钩子上), 然后根据对待测量的初步估计, 从大到小, 依次将砝码放入右盘. 每次都稍稍升起横梁, 注意指针偏转的情况, 以判断砝码量应增减多少. 逐步调整砝码的大小及个数, 还有游码的位置, 直到指针的停点和标尺中线重合时为止.

(4) 天平用完后, 务必将横梁放下, 并托在支架上. 砝码按顺序放回盒中. 将横梁两边的挂钩从刀口取下. 将秤盘等擦净.

§ 5.3 时间的测量

关于时间的测量, 可能碰到两类问题: 第一类是测定某一现象开始的真正时

刻,这主要在天文和地球物理等的研究中有意义;第二类是测定两个时刻之间的时间间隔,例如,某一现象的开始和终止时刻之间的时间间隔.在物理学的研究中经常遇到的是第二类问题.

1960年以前,国际上对时间的标准规定为太阳在头顶连续两次出现的时间间隔,取其一年中的平均值,称为平均太阳日.1960—1967年,时间的标准改为1900年的回归年,即1900年太阳从天空某一特定的位置(所谓春分点)出发再回到同一点所经历的时间.1967年10月,第十三届国际计量大会规定,秒是铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间.

用来定义标准时间的钟是铯钟.它是一个大型、复杂、昂贵的实验仪器,它的精度非常高,能以 10^{-11} 以上的准确度维持其频率不变.它也可以用来校验其他高精度的钟,校验时间只需1h左右,而用回归年的天文标准来校验,则需要几年的时间.

在国际单位制中,除“秒”以外,还可使用其他某些时间单位.常用的其他时间单位及其与“秒”的关系如下:

$$1 \text{ d(日)} = 86\,400 \text{ s}$$

$$1 \text{ h(时)} = 3\,600 \text{ s}$$

$$1 \text{ min(分)} = 60 \text{ s}$$

$$1 \text{ ms(毫秒)} = 10^{-3} \text{ s}$$

$$1 \mu\text{s(微秒)} = 10^{-6} \text{ s}$$

$$1 \text{ ns(纳秒)} = 10^{-9} \text{ s}$$

以下仅对物理实验中常用的停表作简单的介绍.

停表通常用来测量几秒到几分的时间间隔.常用的有机械停表和电子停表两种.

1. 机械停表

机械停表外形如图5-17所示.表盘上有一个长的秒针和一个短的分针.最小分度值有0.2s和0.1s两种.

端钮用来上紧发条和控制停表的走动和停止.使用时,用手握紧停表.当拇指第一次按下端钮时,开始计时,指针开始走动.第二次按下时,停止计时,指针停止走动.再按一次时,指针回到零点.有的停表,带有专用的回零按钮.

使用机械停表的注意事项:

(1) 使用前先上发条.不宜过紧,以免损坏发条.

(2) 检查零点是否正确.若秒表不指零,应记下读数,在测量后进行校正.

(3) 按端钮时不要用力过猛,以免

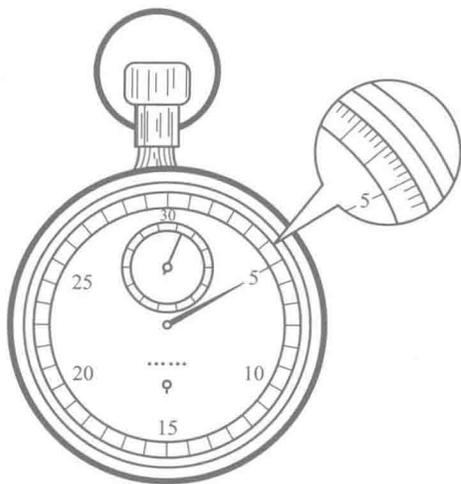


图5-17 机械停表外形

损坏机件。

(4) 不要摔碰停表。

(5) 实验结束后,应让停表继续走动,以使发条放松。

2. 电子停表

电子停表的机芯全部采用电子元器件组成.利用石英振荡器的振荡频率作为时间基准,一般采用六位数液晶显示器,具有精度高、显示清楚、使用方便、功能较多等优点.有的表还装有太阳能电池,可延长表内电池的使用寿命。

下面以 SE7-1 型电子表为例,介绍电子表的主要特性和使用方法。

(1) 主要特性.石英振荡器的振荡频率为 32 768 Hz,平均日差小于 0.5 s。

停表功能:具有基本停表显示、累加计时、取样和分段计时等功能,最小测定单位为 $(1/100)$ s,可累计 59 min 59.99 s。

带有计时计历功能,可显示时、分、秒、月、日、星期。

(2) 使用方法.按钮使用如图 5-18 所示。

S_1 按钮:启动/停止、调整、计时/计历; S_2 按钮:调整置位; S_3 按钮:状态选择、分段计时/复位。

电子停表状态选择如图 5-19 所示。 S_1 可作计时、计历选择.在计时状态时,按 S_1 3 s,即进入秒表功能.若要回到计时状态,再按 S_1 3 s 即可。

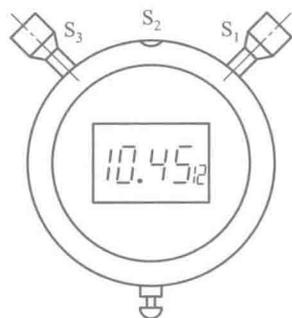


图 5-18 电子停表按钮使用

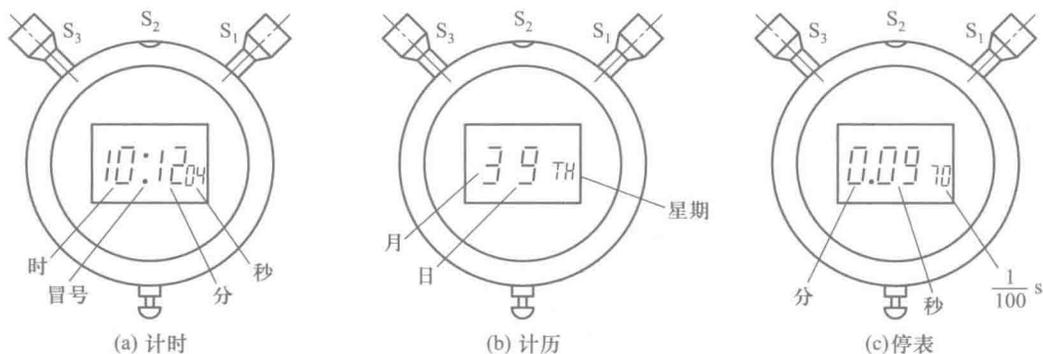


图 5-19 电子停表状态选择

(3) 停表的几种用途。

① 基本停表显示(即相当于机械停表的单针功能),如图 5-20(a)所示.当 S_1 在停表状态时,应先使它复零.按 S_1 ,秒计数开始;再按 S_1 ,秒计数停止;若再按 S_1 ,停表复零。

② 累加计时.按一下 S_1 ,秒计数开始;再按一下 S_1 ,秒计数停止;若再按一下 S_3 ,即累加计数,如此可以重复继续累加。

③ 取样,如图 5-20(b)所示.按一下 S_1 ,秒计数开始;再按一下 S_3 ,液晶显示器上的数字立刻停止,并在右上角出现“□”的记录信号,点号仍在闪动,如图 5-20

(c)所示,这时读出数字即为取样计时.要取消这个取样“□”可再按一下 S_3 即可.若还原到“计时状态”,按 S_3 3 s.

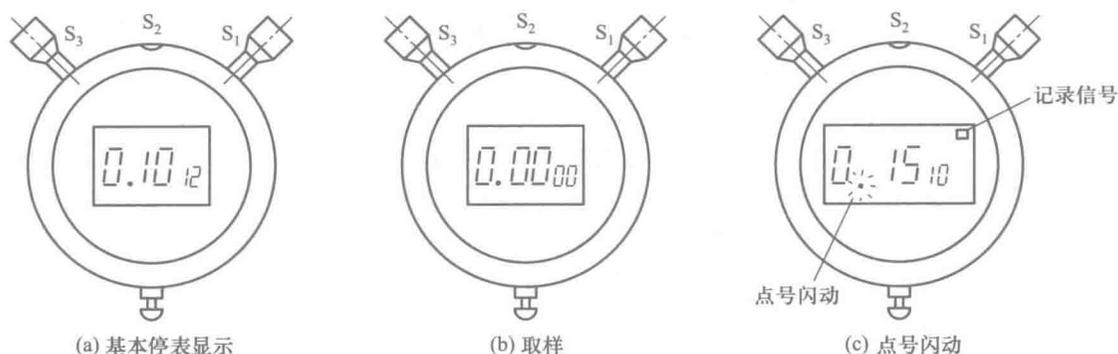


图 5-20 电子停表的几种显示

④ 分段计时(相当于机械停表的双针功能),如图 5-21 所示,以两个运动员竞赛计时为例.按 S_1 ,停表开始计时.当运动员甲到达终点时,按 S_3 ,液晶显示器右上角出现“□”的记录信号,其读数为运动员甲的成绩,而停表内部继续在计数,点号仍在闪动.当运动员乙到达终点时,按一下 S_1 ,停表停止计时,点号停止闪动.记录下运动员甲的成绩,再按 S_3 出现运动员乙的成绩,再按一下 S_3 ,停表复零.

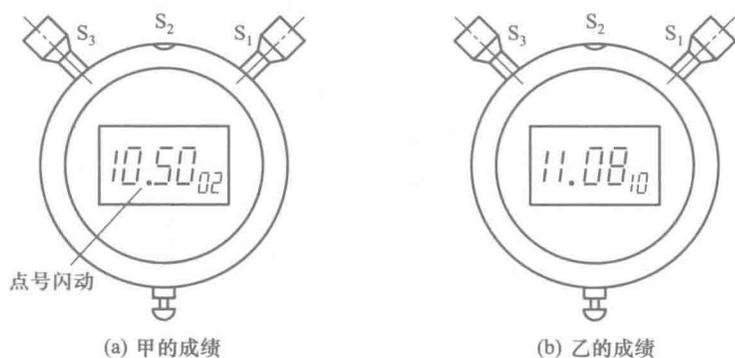


图 5-21 电子停表的分段计时

§ 5.4 温度的测量

温度是表征物体冷热程度的物理量.当用手触摸物体时,感觉越热,温度就越高.这种依靠感觉判断物体温度高低的做法是非常粗略的,只能作为定性的参考.

要定量地确定温度,就必须对不同的温度给以具体的数量表示.温度的数量表示方法叫做温标.为使温度的测量统一,就必须建立统一的温标.人们总结了生产

和科学研究中的测量温度的经验,并经理论分析得出热力学温标是最科学的温标.因此,国际上规定热力学温标为基本温标.热力学温度单位是国际单位制中的温度单位.1954年的第十届国际计量大会,对它的定义规定为选取水的三相点为基本点,并定义其温度为273.16 K.1967年第十三届国际计量大会通过以开尔文的名称(符号K)代替“K 氏度”(符号 $^{\circ}\text{K}$),并对热力学温度单位定义如下:“热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$.”

除了开尔文表示的热力学温度(以符号 T 表示)外,也使用由式 $t/^{\circ}\text{C} = (T - T_0)/\text{K}$ 所定义的摄氏温度(以符号 t 表示).按定义,式中 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ (T_0 是水的冰点的热力学温度,它与水的三相点的热力学温度相差 0.01 K).摄氏温度单位用摄氏度($^{\circ}\text{C}$). 1°C 与 1 K 相等,摄氏温度间隔或温度差也可以用热力学温度单位开尔文来表示.

现代科学技术中要求测量的温度范围很大,从接近于绝对零度的极端低温到几千甚至上万摄氏度的高温.这样广的范围需要各种不同的测温仪器,即需要各种温度计.这些温度计的准确度和应用范围都是有区别的.基本仪器有:气体温度计、水银温度计、电测温度计以及光测温度计.

1. 气体温度计

气体温度计可应用于从极低的温度至 1500°C 左右的温度范围.如图5-22所示是一种定容气体温度计的原理图.玻璃泡C内装有气体,通常为氦气.泡中气体的压强可以从开口管的水银压强计测得.温度升高时,气体就膨胀,迫使B管内的水银下降,A管内的水银上升.用橡皮管D使A、B两管和水银存储器R连通.升高R,可使B管中的水银面回到参考记号E.这样就保证气体具有恒定的体积.因为A管是和大气相通的,所以知道了大气压强之后,由A、B两管水银面的高度差,就可以测出C泡中气体的压强.我们只要确定该压强与温度间的对应关系,就可以用这套装置来测量温度.

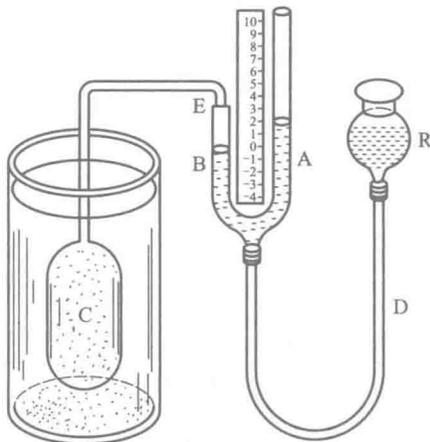


图5-22 定容气体温度计原理图

气体温度计所用的气体应根据测量温度的范围来选择.如果是用它来测量低温,必须使用低温时不会液化的气体,当温度低于 -260.5°C 时,使用氦气.当测量温度不高于 200°C 时,使用氢气.高于 200°C 时,由于氢气太活泼,且扩散强烈,所以用氮气或空气.

标准气体温度计是很复杂的,实际使用起来也很麻烦,因此很少直接用于测量温度,主要用于检验其他的测温仪器.

2. 水银温度计

水银温度计的测量范围为 $-38 \sim 350^{\circ}\text{C}$,因为水银只在这一温度范围内保持为液态.如果温度计外壳用石英制作,并在水银面上充以惰性气体(如氦气、氩气等)

时,测温上限可达 1 200 ℃. 但在这种情况下,水银温度计的示数变得很不可靠,所以很少用它来测 300 ℃ 以上的温度. 水银温度计的优点是读数方便且迅速,但用它进行精密测量则受到诸多限制. 引起水银温度计示值失真的主要原因有:

(1) 玻璃的热后效. 制作温度计时,必须先把玻璃加热到软化温度,然后再冷却到常温. 玻璃恢复到原来的体积是非常缓慢的. 因此,温度计的水银球在温度计制成以后,会继续很缓慢地改变体积,有时持续若干年,这种现象叫做玻璃的热后效.

热后效使温度计的示数失真,例如,使温度计的基本点(0 ℃ 和 100 ℃)发生变化. 这种变化可以达到 1 ℃ 甚至更大一些. 除了温度计基本点的这种经常的变化以外,每当温度计在使用时受热以后,基本点还会暂时的变化,而且这种变化要经过两三天才能消失. 不同种类玻璃的热后效程度不同. 制作精密的标准温度计的玻璃,其热后效很小. 即使如此,基本点还是有变化的. 因此,对每一个温度计必须定期地确定它的基本点的位置,即确定基本点的修正值,特别是要确定其零点,因为温度的读数是从该点算起的. 对于较精密的温度测量,应在测量前后,校验其零点.

(2) 温度计的毛细管粗细不均匀. 这一因素对示值引入的误差为 0.1 ℃ 的量级. 较简便的修正方法是与气体温度计或标准水银温度计进行比较.

(3) 水银柱受热不均匀. 在测量时通常只有温度计的一部分处在它要测定的温度空间中,而水银柱的其余部分则置于其外,为了进行读数,这往往是必要的. 这一因素引入约 0.01 ℃ 量级的误差,这种误差可以用计算的方法求出. 如果整个水银柱的温度等于被测温度时,水银柱露出部分的长度会发生变化. 可利用公式

$$\Delta t = (\beta - \alpha)(t - t_1)L \quad (5-7)$$

计算相应的修正值 Δt . 其中 β 和 α 是水银和玻璃的膨胀系数; t 是待测的温度; t_1 是水银柱露出部分的平均温度,这一温度很难确定,通常是在水银柱露出部分的中部附近放置另外一个温度计来测量这个平均温度; L 是以 ℃ 表示的温标的长度.

(4) 温度计的滞豫. 这一因素引入的误差在 0.01 ℃ 的量级,其原因为在毛细管很细的温度计中,水银柱的移动将受到较大的摩擦阻力. 因此,如果在温度不断变化的情况下来进行读数,则在相同的温度下,温度计的示数不同,而且还与温度是上升还是下降有关. 温度上升时,温度计的示数要比下降时低些. 当温度计的示数下降时,滞豫现象表现得比较显著. 因此在测量温度差时,应该在水银柱总是往一个方向运动时进行测量. 如果在读数前,用一个小橡皮锤轻轻敲击温度计,使它受到轻微的振动,则滞豫现象可以有效减轻.

3. 电测温度计

这种温度计的测量范围很大,从接近绝对零度到 1 500 ℃. 电测温度计又可分为电阻温度计和温差电偶温度计两类.

(1) 电阻温度计. 电阻温度计是根据金属丝的电阻随温度变化的原理制成的. 它是由一根很细的铂丝(尽可能为纯铂)绕制的线圈,封在薄壁银管中而构成. 用导线把它连接到测量电阻的仪器,如惠斯通电桥上. 因为电阻的测量可达到很高的精确度,所以它是测量温度的最精密仪器之一.

(2) 温差电偶温度计. 温差电偶温度计通常称为温差电偶, 是根据温差电现象制成的.

1821 年塞贝克发现: 把两种不同的金属 A 和 B 连接成如图 5-23 所示的闭合电路, 如果把它们两个接点分别置于温度各为 T_0 及 T (假定 $T > T_0$) 的热源中, 则在电路中就有电流产生. 这一现象叫做塞贝克效应, 这样的电路叫做温差电偶, 而产生电流的电动势叫做温差电动势.

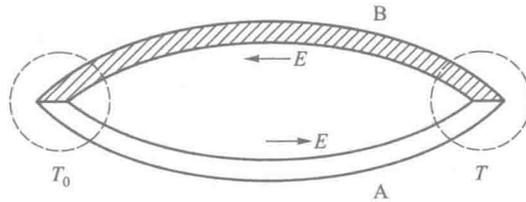


图 5-23 温差电偶

实验结果表明, 温差电动势 E 与温度差 $(T - T_0)$ 的关系, 在温度范围变化不大时, 可以用下式表示:

$$E = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 \quad (5-8)$$

其中 a 、 b 是与用作温差电偶的金属性质有关的常量. 现列举几种温差电偶的 a 值和 b 值于表 5-2 中.

表 5-2 常见温差电偶的特性常量 (a 与 b)

温差电偶	$a / (V \cdot ^\circ C^{-1})$	$b / (V \cdot ^\circ C^{-2})$
Cu-Fe	-13.403×10^{-6}	$+0.0275 \times 10^{-6}$
Cu-Ni	$+20.390 \times 10^{-6}$	-0.0453×10^{-6}
Pt-Fe	-19.272×10^{-6}	-0.0289×10^{-6}
Pt-Au	-5.991×10^{-6}	-0.0360×10^{-6}

表 5-2 中的“+”“-”号与选取电动势 E 的指向有关. 表中选取的电动势的指向是: 如果在热端接头处, 电流由后一种金属流入前一种金属, 则取电动势为正, 反之取负.

从表 5-2 可看出, 一般 $a \gg b$, 因而电动势 E 和温度差 $(T - T_0)$ 的关系可近似表示为

$$E = a(T - T_0) \quad (5-9)$$

用温差电偶测量温度时, 应使热电偶冷端接头的温度 T_0 保持恒定 (通常保持在冰点), 另一端与待测物体相接触, 再用电势差计测出热电偶回路的电动势, 如图 5-24 所示. 如果在不同温差 $(T - T_0)$ 的情况下精确地测定出温差电偶的电动势, 将所测得的结果作出 $E - (T - T_0)$ 曲线, 或者直接在电势差计上刻出各电动势所对应的温度值, 那么就可以用这套仪器直接测量其他热源的温度.

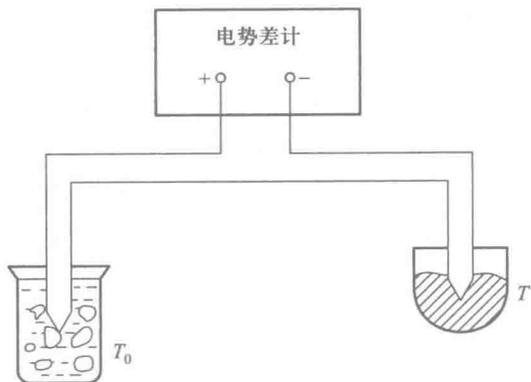


图 5-24 用电势差计测热电偶回路的电动势

实验应用的温差电偶有以下几种:测量 300 °C 以下的温度时用铜-康铜温差电偶;800 °C 以下的温度用铁-康铜温差电偶;1 100 °C 以下的温度用镍的两种合金(镍铬和镍铝合金)制成的温差电偶;当温度更高或测量范围更大时,通常用铂-铂铑合金制成的温差电偶,应用范围从-200 ~ 1 700 °C;如果温度高达 2 000 °C 时,则用钨-钽(HK40)热电偶。

表 5-3 列出了几种温差电偶在冷端接头处为 0 °C (即 $T_0 = 0$ °C) 时,不同温度下的温差电动势的值。

表 5-3 几种热电偶的温差电动势(冷端为 0 °C) 单位:mV

热电偶 温度差/°C	铂-铂铑 Pt-(87% Pt+13% Rh)	镍铬-镍铝	铁-康铜	铜-康铜
-200		-5.75		-5.540
-100		-3.49		-3.349
0	0.000	0.00	0.0	0.000
100	0.645	4.10	5.2	4.277
200	0.464	8.13	10.5	9.288
300	2.395	12.21	15.8	14.864
400	3.400	16.40	26.6	20.873
500	4.459	20.65	43.4	
800	7.921	33.31		
1 000	10.473			
1 500	17.360			
1 700	20.069			

用温差电偶测量温度的优点很多,主要有以下几点:

(1) 测量范围很广,可从-200 ~ 2 000 °C. 因而对于测量炼钢炉中的高温,或液态空气的低温,均可使用。

(2) 灵敏度和准确度很高(可达 $10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上),特别是铂和铑的合金做成的温差电偶稳定性很高,常用作标准温度计.

(3) 由于受热面积和热容量都可以做得很小,因此能测量很小范围内的温度或微小的温度变化. 研究金相变化、化学反应以及小生物体温的变化都可以采用它. 这个优点是一般水银温度计所不及的. 还有一种真空热偶是装置于真空管里的温差电偶,在一个触点上焊有涂了炭黑的金属片,以便有效地吸收外来光或辐射的能量,而真空的绝热作用可提高热电偶的灵敏度. 这是一种测量光通量或辐射量的十分灵敏的器件.

4. 光测高温计

光测高温计原理如图 5-25 所示,主要由望远镜 T 构成. 在望远镜的镜筒里装上红色玻璃滤光片 F 和小电灯泡 L. 当高温计对准待测热源时,观察者通过望远镜看到待测热源光亮本底上的暗灯丝. 灯丝的电池组 E 与可变电阻 R 相连. 转动可变电阻器的旋钮,可以逐渐增加灯丝电流,从而逐渐提高灯丝亮度,直到灯丝亮度与本底亮度一致为止. 测量前,须在不同的已知温度下对仪器定标. 测量时,可从电路中电流表 A 的标度直接读出待测热源的温度. 因为该温度计没有任何部分与待测热源接触,所以光测温度计可用来测量金属熔点以上的非常高的温度.

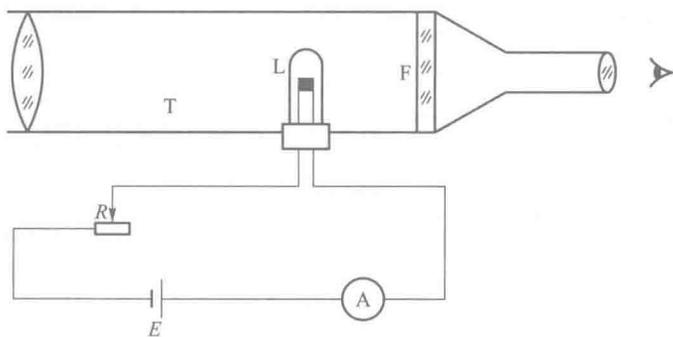


图 5-25 光测高温计原理

§ 5.5 电流的测量

在国际单位制中,电流是基本物理量之一. 电流的单位是安培,用符号 A 表示. 在真空中,截面积可忽略的两根相距 1 m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N,则每根导线中的电流为 1 A.

电流的测量不仅是电磁学中其他物理量测量的基础,也是其他很多非电磁量测量的基础. 利用电流的各种物理效应,可以制成各种相应的测量电流的仪器仪表. 在实验中常用的是磁电式电流表.

1. 磁电式电流表的结构与工作原理

图 5-26 是一块磁电式电流表(微安表)的结构简图. 在永久磁铁 N、S 两极中

间,装有圆柱形软铁芯.在磁极和铁芯的狭小气隙间,形成了一个很强的均匀的径向磁场.以软铁芯轴线为轴的矩形平面线圈,置于气隙间的均匀径向磁场之中.

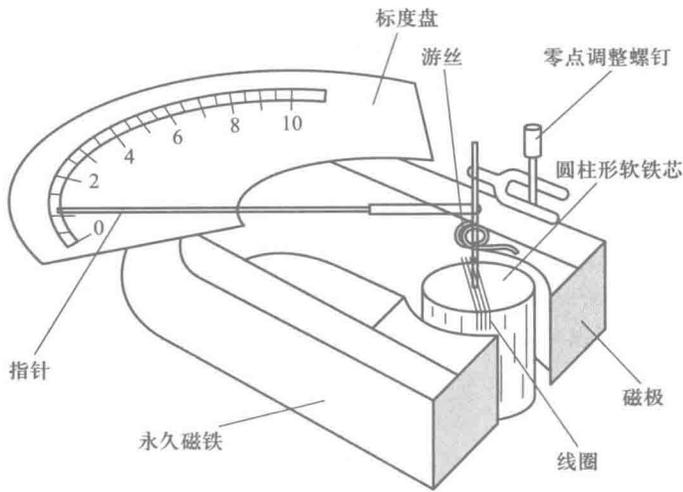


图 5-26 磁电式电流表的结构简图

当线圈通以直流电流 I 时,线圈受磁力矩作用而绕轴旋转.磁力矩的大小为

$$M = NISB \quad (5-10)$$

式中 N 为线圈匝数, S 为线圈面积, B 为气隙间的磁感应强度.

线圈在旋转过程中,其转轴带动游丝扭转,故线圈又受到游丝弹性扭力矩的反作用.在弹性限度内,扭力矩为

$$M' = c\alpha \quad (5-11)$$

式中 c 为游丝的扭转常量, α 为线圈旋转的角度.

当线圈所受的磁力矩与弹性扭力矩相等时,线圈处于平衡状态,指针指示一定数.此时有 $NISB = c\alpha$,从而得到

$$I = \frac{c}{NSB}\alpha = k\alpha \quad (5-12)$$

式中 $k = \frac{c}{NSB}$,称为电表常量. k 值越小,表示电流表越灵敏.

2. 磁电式电流表的主要参量

(1) 电流灵敏度.设指针的长度为 L ,指针偏转时刻度盘上指示的格数或长度(单位为 mm)为 d ,对应的角度为 α ,则有

$$d = L\alpha = \frac{NSBL}{c}I = S_1 I \quad (5-13)$$

$$S_1 = \frac{d}{I} = \frac{\alpha}{I}L = S'_1 L = \frac{1}{k}L \quad (5-14)$$

由上可知, S_1 表示电流表的线圈通过单位电流时指针偏转的格数,单位为格/安培或 mm/A; S'_1 则表示电流表的线圈通过单位电流时指针偏转的角度,单位为 $(^\circ)/A$ 或 rad/A. S_1 或 S'_1 值越大,电流表越灵敏.

(2) 量程(量限) I_m . 量程(量限)就是电流表允许通过的最大电流值. 一般来说, 电流表面板上的满刻度值就是该表的量程. 实际使用的电流表, 通过改装的方法, 可以有不同的量程, 称为多量程电流表.

(3) 内电阻 R_g . 电流表线圈的绕线电阻, 称为内电阻或称内阻. 电流表的内阻可用比较法由实验测定.

3. 磁电式电流表表头的改装

磁电式电流表的线圈和游丝, 一般不能承受大电流冲击, 只允许小电流通过. 通常可以将它直接作为检流计(俗称表头)来使用, 用来检验电路中是否有电流通过. 若用以测量电路中电流的大小, 则必须依据表头的内阻 R_g , 选定一适当阻值的电阻 R_A 与表头并联, 构成一定量程的安培表, 如图 5-27 所示. 这种方法称为电流表的改装. 若以 n 表示表头量程扩大的倍数, 则改装电流表所并联的电阻值必须为

$$R_A = \frac{1}{n-1} R_g \quad (5-15)$$

磁电式电流表表头除了能改装成量程较大的电流表外, 还可改装成电压表, 见 § 5.6 节.

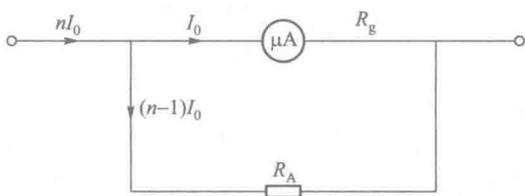


图 5-27 磁电式电流表表头改装成量程较大的电流表

4. 电表的校准

任何电表都不可避免地存在着某种程度的固有缺陷, 如轴承与轴的摩擦、游丝弹力不均匀、径向磁场不均匀、刻度不准等. 在正确使用情况下, 也不可避免地存在着误差.

如果某电表的量程为 I_m , 用该表进行正确测量时可能引起的最大误差为 ΔI_m (即该表在该量程时的仪器误差限), 则比值为

$$a\% = \frac{\Delta I_m}{I_m} \times 100\% \quad (5-16)$$

就反映了该表的准确程度. 式(5-16)中, a 称为电表的准确度等级. 电表存在 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个准确度等级, 并标示在电表的面板上. 如对于 0.5 级的电表, 正确使用时, 它所引起的误差不超过该量程的 0.5%. 实际计量中, 应该定期对电表的准确度等级进行校验.

校验电表, 可用比较法. 选取一块比被校表的准确度等级高一至二级的电表作为标准表, 将两者都连入电路中. 在表的整个刻度范围内, 逐点比较被校表与标准表的差值, 并作出校正曲线, 如图 5-28 所示. 横坐标 I 表示被校表的读数,

纵坐标 ΔI 表示被校表读数 I 与标准表读数 I' 之差, 即 $\Delta I = I - I'$. 从校正曲线上, 可以查出电表读数的校正量. 例如, 某次测量中, 电表读数值为 $I = 80.0 \text{ mA}$, 从校正曲线上查得校正量 $\Delta I = -0.1 \text{ mA}$, 则实测电流值为 $I' = I - \Delta I = 80.0 \text{ mA} - (-0.1) \text{ mA} = 80.1 \text{ mA}$.

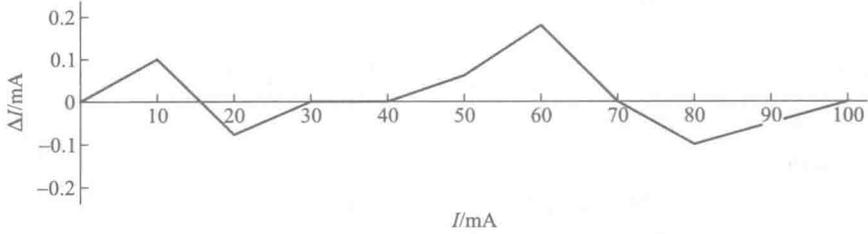


图 5-28 某毫安表的校正曲线

NOTE

5. 量程的选择

在测量中, 若选用准确度等级为 a 、量程为 I_m 的电表, 那么该电表可能引起的最大误差为

$$\Delta I_m = I_m a\% \tag{5-17}$$

可见, 用同一准确度等级的电表测量时, 可能的最大误差与量程有关.

如果用 1.0 级的电流表测量某电流 $I = 100.0 \text{ mA}$, 若选用 150 mA 的量程, 可能的最大误差为

$$\Delta I_m = 150 \text{ mA} \times 1.0\% = 1.5 \text{ mA}$$

这时可能的最大相对误差为

$$\frac{\Delta I_m}{I} \times 100\% = \frac{1.5}{100.0} \times 100\% = 1.5\%$$

若选用 300 mA 的量程, 可能的最大误差为

$$\Delta I'_m = 300 \text{ mA} \times 1.0\% = 3.0 \text{ mA}$$

可能的最大相对误差则为

$$\frac{\Delta I'_m}{I} \times 100\% = \frac{3.0}{100.0} \times 100\% = 3.0\%$$

因此, 为了减小测量误差, 在不超出电表量程的前提下, 应尽可能选用小的量程. 一般来说, 选择量程时, 应保证测量时表针指示在表盘的 1/3 至满刻度之间.

6. 电流表的使用注意事项

- (1) 使用前应对指针作零点校准.
- (2) 电流表串联在被测回路中. 使用直流表时, 应注意接线柱的正、负极性.
- (3) 先估计被测量的数值范围, 选用合适的量程. 如果无法估计, 应先用大量程, 然后改用合适的小量程.
- (4) 避免读数视差.
- (5) 读数时注意有效数字位数的选取.

§ 5.6 电压的测量

电压与电动势,是电学中非常重要的物理量.在电磁量的测量中,电压与电动势的测量更是常见.

电压的测量方法有多种.在物理实验中常用的仪器有电压表、电势差计、晶体管电压表、数字电压表以及示波器等.

1. 电压表

电压表通常是用磁电式电流表表头改装而成的,也可具有多个量程.改装方法如图 5-29 所示,依据表头内阻 R_g ,串联一个适当数值的电阻 R_v 以扩大其量程.若以 n 表示量程扩大的倍数,则串联的电阻应为

$$R_v = (n-1)R_g \quad (5-18)$$

改装后的电压表的量程就是电流表表头指针指在满刻度时,其线圈绕线电阻跨压的 n 倍.

电压表的准确度等级、可能的最大误差、校准、量程的选择、读数等与电流表的相类似.需要强调的是,在测量中,电压表须与待测支路并联.

2. 电势差计

用电压表测量电压,如图 5-30(a)所示,由于必然有电流 I' 流经电压表而改变了待测电路的工作状态(电路中的电流变为 $I-I'$),为了准确地测量电压,需采用如图 5-30(b)所示的补偿法.

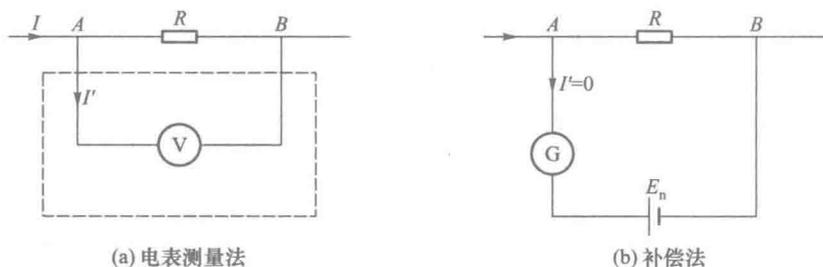


图 5-30 电压的测量

补偿法的原理是,当待测电压与处于同一回路中的反向的标准电压相等时,回路中的电流为零.在图 5-30(b)中,若检流计 G 指零,则说明待测电压 U_{AB} 恰与标准电池的电动势 E_n 相等.

利用补偿法构成的电压测量仪器——电势差计,是一种比较准确而且应用广泛的仪器.一般电势差计的测量范围较小,如 UJ31 型电势差计,最大测量值为

171 mV. 在使用电势差计进行测量时, 必须事先估计待测电压值的大小, 再用标准电阻组成适当的分压器(衰减器), 才能进行测量.

3. 示波器

利用示波器测电压时, 通常是把待测电压从示波器的 Y 轴输入. 示波器垂直刻度线的每一格通过定标而表示一定电压值, 由电压图形的高度(或相对于基准位置的移动, 如测直流电压的情况)便可知待测的电压. 如果待测的是交流电压, 则由电压图形可读出电压峰-峰值. 对于正弦变化的交流电压, 峰-峰值与电压表测得的电压有效值的换算关系为

$$U_{\text{有效}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{\text{峰}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} U_{\text{峰-峰}} \quad (5-19)$$

用示波器测量电压的优点是, 在测量电压幅度的同时, 还能显示出波形、频率和相位. 其缺点是精度不够高.

4. 数字电压表

数字电压表可非常方便地用来测量直流电压与交流电压. 实验室常用的数字电压表可读出 4~8 位有效数字.

数字电压表内具有较高精度的采样电路与模数转换电路, 并有电压补偿与温度补偿措施, 因而其具有测量精度高、输入阻抗大、读数方便等优点. 数字电压表通常被结合使用在万用表中.

5. 晶体管电压表

晶体管电压表输入阻抗很高, 因而对被测电路影响非常小, 适宜于精确测量低值电压. 其工作性能稳定、测量准确, 是实验中常备的仪器.

电压的测量, 除上面介绍的几种测量方法和测量仪器外, 还有许多种. 如静电学中的静电电势计, 是用以测量静电电势的仪器, 可以测量几万伏到几十万伏的高电势.

§ 5.7 电阻的测量

在实验中, 最常测量的是阻值介于 $10 \sim 10^6 \Omega$ 的中电阻. 有时也可能需要测量介于 $10^7 \sim 10^{18} \Omega$ 的高电阻与超高电阻, 如一些高阻半导体、新型绝缘材料等的电阻; 另外可能需要测量阻值低于 1Ω 乃至 $10^{-7} \Omega$ 的低阻与超低阻, 如金属材料的电阻、接触电阻、低温超导电阻等.

测量电阻常用的方法有伏安法测电阻, 电桥法测电阻, 电容器充、放电法测高电阻等.

1. 伏安法测电阻

伏安法测电阻利用电压表与电流表分别测量待测电阻两端的电压与流过的电流, 依据部分电路的欧姆定律, 可求得待测电阻为 $R_x = \frac{U}{I}$.

测量时, 根据具体情况可选择电流表内接或是外接, 如图 5-31 所示.

NOTE

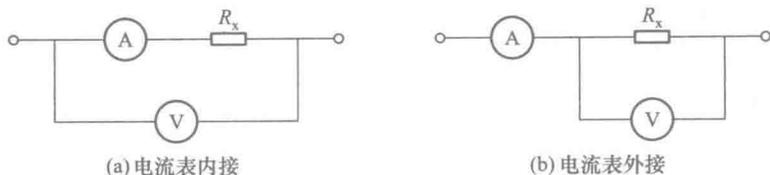


图 5-31 伏安法测电阻

伏安法测电阻方法简便,并且能绘制待测元件伏安特性的直观曲线,所以应用普遍.其缺点是测量电表接入电路中改变了待测电路的工作状态,给测量带来误差.若用电势差计取代电压表,测量精度将大大提高.

2. 万用表测电阻

万用表是一种常用的电工测量仪表,用它可以直接测出不同大小的直流电流和电压、交流电流和电压,还可直接测出电阻等电学量.

3. 电桥法测电阻

电桥法测电阻,是用桥式电路(或称电桥)将待测量与已知的标准量进行比较以获得测量结果.电桥法测电阻的优点是测量简便、准确度较高、对电源稳定性要求不高.

电桥的种类很多,有直流电桥和交流电桥、平衡电桥和非平衡电桥、电阻比较式电桥和电流比较式电桥等.在大学物理实验中,常用箱式惠斯通电桥(单臂电桥)测量 $10 \sim 10^6 \Omega$ 范围的电阻,而用开尔文电桥(双臂电桥)测量小于 1Ω 的低电阻.

测量电阻还有很多其他方法,在以后的具体实验中另作介绍.

习题

1. 一块 0.5 级的毫安表,量程为 100 mA,它的最大可能误差是多少?若读数值为 68.3 mA,其测量结果应如何表示?
2. 电表的校正曲线有何用途?如何使用?
3. 电表改装时,可能因为一些其他因素的影响,按式(5-15)计算阻值 R_A 后,把阻值为 R_A 的电阻并联到表头两端并不完全符合实际要求.怎样在实验中使并联的电阻最符合实际要求?
4. 用伏安法测电阻,若已知电压表的内阻为 R_V ,电流表的内阻为 R_A ,试推导电流表内接与外接时所测得电阻 R_x 的修正公式,进而指出伏安法测电阻的两种测量电路的适用条件.

第6章 基础性实验

NOTE

§ 6.1 电学实验的基本知识

电学测量,除了可以直接测量电学量外,还可以通过特定的传感器,进行非电学量的测量.在电学测量中,应用了物理实验中许多典型的实验方法,如模拟法、比较法、补偿法及放大法等.

通过电学实验,要求实验者能掌握各种常用的电学仪器仪表及电路元器件的使用方法,能看懂电路图,能正确连接电路,能分析判断实验中常见的故障,能使用电学实验的一般方法进行有关物理量的测量和有关规律的研究.

一、常用电学仪器简介

1. 电源

电源是把其他形式的能量转化为电能的装置,分为直流电源和交流电源两类.

(1) 直流稳压电源.实验室普遍采用的直流电源是晶体管直流稳压电源,这种电源稳定性好、内阻小,输出电压可以在一定范围内按需要调节,使用方便.如图 6-1 所示是实验室常用的一种双路跟踪稳压稳流电源,它可以作为两路稳压源及恒流源使用,也可将两路电源串联或并联起来使用.使用时只要将电源线接到 220 V 电源上,调节电压或电流调节旋钮,即可得到需要的电压或电流.多数直流稳压电源

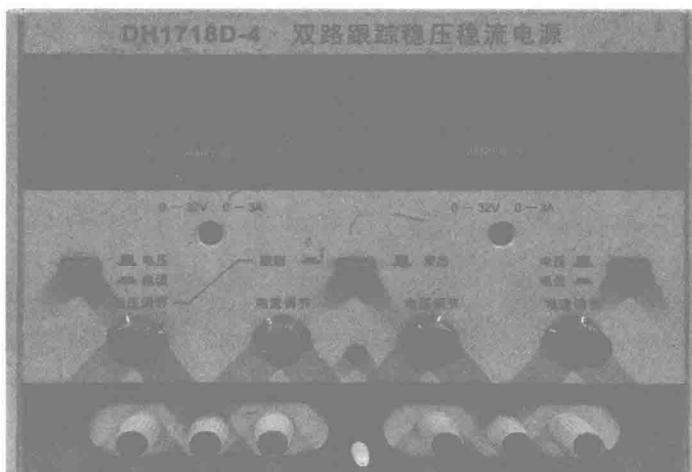


图 6-1 双路跟踪稳压稳流电源

都装有自动保护装置,当输出过载或瞬间短路时,会自动停止输出,这时需排除故障才能恢复正常使用.使用这种电源要注意允许输出的最大电压和电流,防止过载.

(2) 干电池.为了提高电压的短时稳定度,实验室也常用到一种化学电池——干电池,它的电动势约为 1.5 V,供电电流较小(一般小于几十毫安).

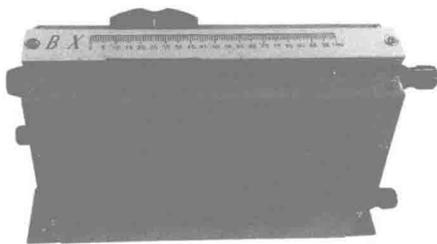
(3) 交流电源.常用的交流电源是 220 V 市电,也可以通过变压器升压或降压使用.当电压较高(30 V 以上)时,要注意用电安全,防止触电.

无论使用哪一类电源,应特别注意不能使电源短路,即不能将电源两极直接接通,从而使外电路电阻等于零.

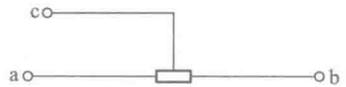
2. 电阻器

(1) 滑线式变阻器

滑线式变阻器是控制电路中广泛使用的仪器,通常用符号  表示.依据连接方式的不同,它可起限流或分压作用,以控制负载或测量电路所需要的电压和电流.它的外形如图 6-2(a) 所示.把长电阻丝绕在绝缘瓷管上,电阻丝两端与接线柱 a、b 相连,其间的电阻称为总电阻.在瓷管上方的滑动头可以沿粗金属棒滑动,滑动时它的下端始终与瓷管上的电阻丝接触.金属棒的一端装有接线柱 c 便于接线.改变滑动头的位置,就可以改变 ac 之间和 bc 之间的电阻,如图 6-2(b) 所示.



(a) 外形



(b) 图形符号

图 6-2 滑线式变阻器

滑动变阻器的参量主要有两个:总电阻和变阻器允许通过的最大电流.

① 限流控制电路.将变阻器的一个固定端和一个滑动端串接在电源 E 和负载 R_L (这里 R_L 可理解为测量电路) 之间,就构成了限流控制电路,如图 6-3 所示,不难看出, R_L 上的电流和电压分别为

$$I = \frac{E}{R_{ac} + R_L} \quad (6-1)$$

$$U = IR_L = \frac{R_L}{R_{ac} + R_L} E \quad (6-2)$$

当变阻器滑动端 c 移至 a 端时, $R_{ac} = 0$, 则

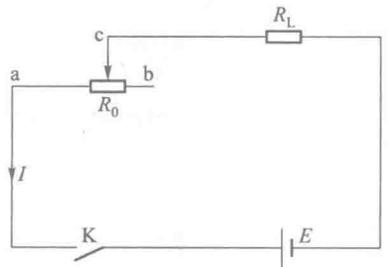


图 6-3 限流控制电路

$$I_{\max} = \frac{E}{R_L} \quad (6-3)$$

$$U_{\max} = I_{\max} R_L = E \quad (6-4)$$

当 c 端移至 b 端时, $R_{ac} = R_0$ (变阻器总电阻), 则

$$I_{\min} = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (6-5)$$

$$U_{\min} = I_{\min} R_L = \frac{R_L}{R_0 + R_L} E \quad (6-6)$$

NOTE

可见, 限流控制电路, 可以使负载中的电流在 $\frac{E}{R_0 + R_L} \sim \frac{E}{R_L}$ 范围内变化, 或使负载上的电压在 $\frac{R_L}{R_0 + R_L} E \sim E$ 范围内变化, 从而起到了控制负载上所需要的电压和电流的目的。

选用变阻器组成限流控制电路时, 应根据已知的 E 、 R_L 或实验要求的 I 和 U 的值, 计算出 R_0 。务必使选用的变阻器总电阻大于 R_0 , 同时变阻器的允许电流必须大于实验要求的最大电流。

例如, 电源电压 $E = 1.5 \text{ V}$, 负载电阻 $R_L = 100 \Omega$, 负载 R_L 上所需电压 $U \geq 0.5 \text{ V}$, 求所需变阻器电阻值和允许电流。由

$$U = U_{\min} = \frac{R_L}{R_0 + R_L} E$$

$$R_0 = \left(\frac{E}{U} - 1 \right) R_L = \left(\frac{1.5}{0.5} - 1 \right) \times 100 \Omega = 200 \Omega$$

即变阻器电阻大于 200Ω 才能满足要求, 这时

$$I = \frac{U_{\max}}{R_L} = \frac{1.5}{100} \text{ A} = 15 \text{ mA}$$

因而变阻器允许电流必须大于 15 mA 。

② 分压控制电路. 电路如图 6-4 所示, 是将变阻器的两个固定端 a、b 与电源 E 的两极相连, 而由滑动端 c 和一个固定端 b (或 a) 与负载 R_L 相接. 这种连接方式也可以控制负载 R_L 上的电流和电压。

当 $R_L \gg R_0$ 时, 可近似看作变阻器 R_0 中有

固定电流 I 流过, $I = \frac{E}{R_0}$. R_L 两端电压为

$$U = IR_{bc} = \frac{R_{bc}}{R_0} E \quad (6-7)$$

滑动端 c 移至 b 端时, $R_{bc} = 0$, 有

$$U_{\min} = 0 \quad (6-8)$$

滑动端 c 移至 a 端时, $R_{bc} = R_0$, 则有

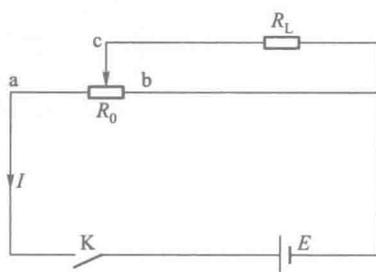


图 6-4 分压控制电路

$$U_{\min} = E \quad (6-9)$$

可见,分压控制电路,可以使负载上的电压在 $0 \sim E$ 整个范围内变化,调节滑动端的位置,就可以使负载上得到需要的电压。

选用变阻器组成分压电路时,变阻器的额定电流必须大于电源回路的总电流 $I, I \approx E/R_{\#}, R_{\#}$ 是 R_L 和 R_0 的并联值。当 $R_L \gg R_0$ 时, I 可用 E/R_0 来估算。

为了保证负载上的电流、电压不超过允许值,无论是分压或限流电路,在接通电源前,滑动端都要滑到安全位置,即负载上电流、电压最小的位置,如图 6-3 和图 6-4 所示, c 应滑到 b 的位置。

(2) 电阻箱

在电路图中用符号  表示。转盘式电阻箱是可变电阻器的一种,电阻数值比较准确,并可从面板上直接读出。转盘式电阻箱面板如图 6-5 所示。箱面上有四个(或两个)接线柱和若干个转盘,每个转盘上都刻有 $0 \sim 9$ 一组数字,在每个转盘旁边刻有一个箭头(或白点),并标有 $\times 0.1, \times 1, \dots$ 的字样。使用时,根据需要的电阻值分别将导线接在 0 和 $0.9 \Omega, 0$ 和 9.9Ω 或 0 和 99999.9Ω 上,并使各转盘上需要的数值对准箭头。例如需要 7.5Ω 的电阻,则将导线接在 0 和 9.9Ω 两接线柱上, $\times 1$ 位的转盘调到 $7, \times 0.1$ 位转盘调到 5 , 其余转盘调到 0 。又如需要 97300.0Ω 的电阻,则导线接在 0 和 99999.9Ω 两接线柱上,各转盘调到如图 6-5 所示的位置即可。

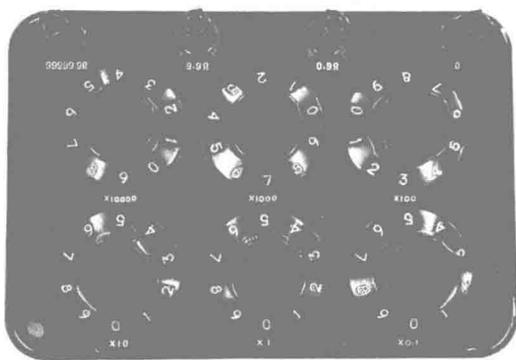


图 6-5 转盘式电阻箱面板图

电阻箱指示值的最大相对误差可近似用电阻箱的准确度等级的百分数表示,即

$$\frac{\Delta R}{R} = a\% \quad (6-10)$$

$$\Delta R = a\% R \quad (6-11)$$

式中 ΔR 为允许基本误差, R 为电阻箱接入的电阻值, a 为准确度等级。

使用电阻箱时应注意勿使电流过大,以免因发热造成电阻值不准或烧毁。一般转盘式电阻箱的允许功率为 0.25 W , 其电流限制为

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.25 \text{ W}}{R}} \quad (6-12)$$

显然,电阻值越大,允许通过的电流就越小。

使用电阻箱时,还应注意从9到0的突变。若某一位转盘增加到9还需增加时,必须先把比它高的那一位转盘增加1,再将此盘由9变到0,否则会因电流突然变大而带来安全问题。

3. 磁电式电表

磁电式电表工作原理见 §5.5 节。

(1) 检流计

电路图中用符号— G —表示。它是专门用来检验电路中是否有微小电流通过的磁电式电表。其特点是零点位于刻度盘的中央,未通电流时指针正对零点,当有微小电流通过时,随电流方向不同,指针可以向左或向右偏转。检流计平常处于断开状态,仅当按下“电计”按钮时才接入电路中。由于它具有比较高的灵敏度,故常用来检验电路的某一部分是否有微弱电流存在,例如用作电桥、电势差计等的指示仪器。

如图 6-6 所示是实验室常用的 AC5 型直流指针式检流计。具体使用方法为:先将指针锁扣由“红点”拨向“白点”位置,使指针可以偏转,同时调节“零位调节”旋钮(注意当锁扣拨向“红点”位置时,不能调节),使表针停在中心零线上。“电计”按钮是接通检流计开关,按下则通,弹起则不通。若需长时间接通检流计,可按下“电计”按钮后再转一下,此时电计按钮不再弹起(注意,只有当指针在零位置附近时,才允许这样做,否则会由于流入检流计的电流太大而损坏检流计)。“短路”按钮是一个阻尼开关,使用时为了使指针能在零位附近快速停止摆动即可按下此按钮。

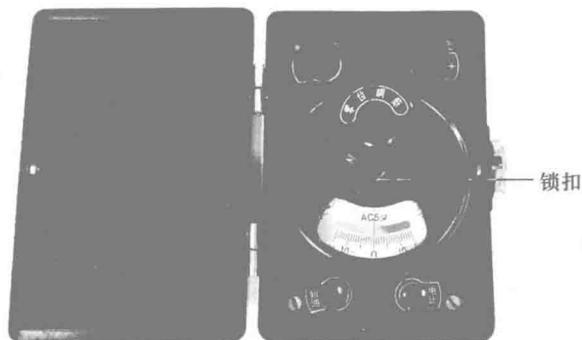


图 6-6 AC5 型直流指针式检流计

为了防止振动或搬动时损坏检流计,平时都用电磁阻尼或机械办法锁住线圈。使用检流计时,应打开锁扣,而使用完毕又必须记住锁好锁扣(锁扣这时处于“红点”位置)。

(2) 电流表(安培计)

电路图中用— A —表示。它是用来测量直流电路中电流大小的仪表,其构造与前面介绍的基本相同,只是在线圈两端并联了电阻值合适的低电阻。为了扩大指针

NOTE

的有效偏转范围,将指针的零点调到了刻度盘的最左端。

电流表的两个主要参量是量程(量限)与内阻。

① 量程(量限) I_m 。它是指电流表所能测量的最大电流值。有些多量程的电流表有两排插孔,每个插孔旁边都标有相应的数值,通过插入铜塞来选择相应的量程。实验时应注意选择合适的量程。

② 内阻 R_A 。它是电流表本身的电阻值。对于多量程的电流表,量程越大,内阻越低,一般几十毫安以上的电流表内阻都小于 $1\ \Omega$ 。为了表示方便,常常给出电流表的额定压降 U_m ,则电流表的内阻即为

$$R_A = \frac{U_m}{I_m} \quad (6-13)$$

使用时,应把电流表串联在被测电路中,并注意选择合适的量程,标“+”号的接线柱表示电流流入端,不可接反。由于电流表内阻很小,绝不能把它与电源并联,否则电表和电源都可能被烧坏。

(3) 电压表(伏特计)

电路图中用 $\text{—}\text{V}\text{—}$ 表示。它是用来测量电路中某两点之间的直流电势差的仪表,其构造与前面介绍的基本相同,但是在线圈上串联了电阻值合适的高电阻。指针零点也是调到刻度盘的最左端。

电压表也是用量程和内阻两个参量描述:

① 量程(量限) U_m 。它是电压表能测量的最大电势差值。

② 内阻 R_V 。它是电压表本身的电阻值。如电表的额定电流值以 I_m 表示,则可得电压表内阻为

$$R_V = \frac{U_m}{I_m} \quad (6-14)$$

有些电压表给出的是“欧姆/伏”的数值,这时电压表的内阻也可相应算出。

使用时,应将电压表并联在被测电路两端,接线柱的“+”端应接电势高的一端,并注意选择合适的量程。

以上介绍的是电流表、电压表的基本知识,具体使用可参考§5.5节与§5.6节。要正确使用电表,还应注意以下几个问题:

① 遵守电表面板上标示出的各项技术要求。常见仪表盘符号的含义如表6-1所示。

表 6-1 常见仪表表盘符号的含义

名称	符号	名称	符号
指示测量仪表的一般符号	○	微安表	μA
检流计	⊕	电压表	V
电流表	A	毫伏表	mV
毫安表	mA	千伏表	kV

续表

名称	符号	名称	符号
欧姆表	Ω	直流	—
兆欧表	$M\Omega$	交流(单相)	~
负端钮	-	直流和交流	\approx
正端钮	+	准确度等级	1.5, (1.5)
公共端钮	*	标度尺位置为垂直的	\downarrow, \uparrow
接地端钮	\perp	标度尺位置为水平的	\square, \rightarrow
磁电系仪表	\square	绝对强度试验电压为 2 kV	☆
静电系仪表	\perp	击穿电压	⚡ 2 kV
电磁系仪表	\approx	调零器	\curvearrowright
		II 级防外磁场及电场	\square \square

NOTE

② 使用前,调整零点调节螺丝使指针对准零点.

③ 正确的读数方法. 电表上的镜面是为准确读数而设的,读数时,移动眼睛以观察到指针和它在镜面内的像重合,再顺着指针去读指示数,这样可以减少读数时的视差. 还要注意表盘刻度与所用量程下实际代表的数值之间的关系,确定每一大格与每一小格表示多少. 最小刻度后面通常应有一位估读数字. 对于基本仪表的读数,实验者应注意训练自己一气呵成地熟练读出.

4. 万用表

万用表实际上是由多量程的直流电压表、电流表、整流式交流电压表和欧姆表所组成,它们合用一个表头(磁电式微安表),在国家标准中称为复用表. 它能测量交直流电压、电流和电阻等电学量. 此外,万用表还广泛用于电路故障的检测. 由于应用广泛,操作简单,携带方便,万用表是实验室、电工和无线电爱好者的必备仪表.

实验室常用的万用表有指针式和数字式两种,下面简单介绍万用表的使用方法.

(1) 万用表的操作规程. 万用表的结构形式多种多样,板面上的旋钮、开关的布局各有差异. 测量不同的电学量或者测量同一电学量但其大小改变时需要换挡. 为了防止损坏万用表,使用时应注意如下方面:

① 认清表盘和刻度,根据待测量的种类(如交流或直流的电流、电压或电阻)和大小,将选择开关置于合适的位置(一般应先选最大量程进行试测),接好表笔(“+”端接红色表笔).

② 测量直流电压和电流时,表笔的正负不能接反.

③ 测电阻时每次换挡后都要调节零点;不得测带电的电阻;也不得测额定电

流极小的电阻(如灵敏电流计的内阻);测试时不得双手同时接触两支表笔的金属部分,以免人体的电阻与待测电阻并联,特别是在测高电阻时必须注意,以免造成较大的测量误差。

④ 操作完毕,务必将万用表选择开关扳离欧姆挡,至空挡或最大电压量程挡,以保护仪表。

(2) 数字式万用表的使用方法. 数字式万用表与指针式万用表的使用方法和操作规程基本上相同,只是数字式万用表将测量值直接显示在液晶屏上,这样使用起来更为方便. 下面以实验室常用到的 VC9806⁺型数字式万用表(图 6-7)为例介绍其使用方法。

使用前应首先检查红(+)黑(-)表笔及选择开关功能和量程的位置是否正确,然后打开电源开关,观察液晶显示器上是否有“—”符号出现,如果没有,则表示电源正常;如有,则应更换新电池才可进行测量。

① 测电阻. 测量范围:0.1 Ω ~ 20 M Ω . 测量时,功能选择开关置于“ Ω ”中的适当量程,将黑表笔的一端插接“COM”,红表笔的一端插接“V Ω Hz”,红黑表笔的另一端接待测电阻. 若显示屏上只出现“1—”而无其他数字,则表示超出量程,应换大电阻挡位直至屏上出现电阻读数。

当只是为了检查导线是否导通时,则可将开关旋至“ \rightarrow ”挡. 若导通,表内会发出连续的蜂鸣声;无声则表示不导通,需要更换该导线。

② 测直流电流. 测量范围:0.1 μ A ~ 20 A. 测量时,功能选择开关置于“A—”中的适当量程,若被测电流在 200 mA 以下,黑表笔的一端插接“COM”,红表笔一端插接“mA”. 若测量 200 mA ~ 20 A 之间的电流时,则红表笔的一端插接至“20 A”处。

③ 测直流电压. 测量范围:0.1 mV ~ 1 000 V. 测量时,功能选择开关置于“V—”中的合适量程. 红表笔一端接“V Ω Hz”,黑表笔一端插接“COM”,接通电源即可进行测量。

④ 测交流电流. 测量范围:40 ~ 400 Hz,0.001 mA ~ 20 A. 测量时,功能选择开关置于“A~”中的适当量程,其测量方法与测量直流电流相同。

⑤ 测交流电压. 测量范围:4 ~ 400 Hz,0.001 ~ 750 V. 测量时,功能选择开关置于“V~”中合适的量程,其测量方法与测量直流电压相同。

⑥ 二极管检查. 检查时,功能选择开关置于“ \rightarrow ”位置,黑表笔的一端插接“COM”,红表笔的一端插接“V Ω Hz”,红表笔的另一端接二极管的正极,黑表笔的另一端接负极时,显示的是正向压降,接通电源时,应在 500 ~ 800 mV 之间,如果显



图 6-7 VC9806⁺型
数字式万用表

示“000”表示短路,显示“1”表示断路.若黑表笔接二极管的正极,红表笔接负极时,显示“1”是好管,显示“000”或其他数值是坏管.

⑦ 测量三极管放大系数 h_{FE} . 测量时,功能选择开关置于 h_{FE} 位置,连接好三极管 b、c、e 三个管脚,好的三极管的 h_{FE} 值介于 40 ~ 1 000 之间.

5. 开关

(1) 单刀双掷开关. 如图 6-8(a) 所示,开关合向 1 时,2 与 1 接通;开关合向 3 时,2 与 3 接通. 若用作电源开关,注意必须将 2、1 或 2、3 串联在电源回路中.

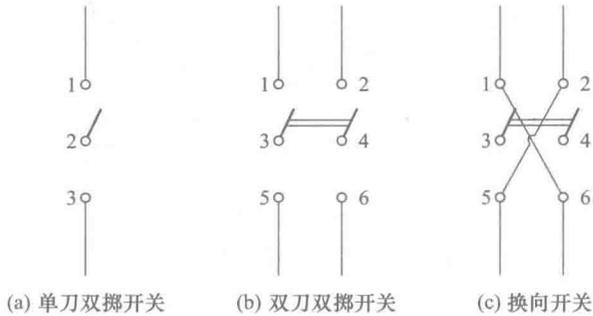


图 6-8 几种电路开关

(2) 双刀双掷开关. 如图 6-8(b) 所示,它相当于同步的两个单刀双掷开关. 当开关向上合时,3 与 1 接通,同时 4 与 2 也接通(注意 3 与 4 之间不通);当向下合时,3 与 5 接通,同时 4 与 6 接通. 这样就可以将接在 1、2 之间的部分电路和 5、6 之间的部分电路通过开关的转换分别串联在主电路 3、4 之间.

(3) 换向开关. 如图 6-8(c) 所示,它是在双刀双掷开关的 1、6 对角和 2、5 对角分别接上一段互相绝缘的导线构成. 当开关向上合时,3 与 1 接通,同时 4 与 2 接通;当开关向下合时,3 与 2(通过 5)接通,同时 4 与 1(通过 6)接通. 这样,开关向上合或向下合时,1、2 之间部分电路中的电流方向相对于 3、4 所连接的主电路发生变化,从而起到了改变电流方向的作用.

二、电磁学实验操作规程

为了保证实验顺利进行,避免发生人身安全事故和防止仪器、设备的损坏,实验者务必注意遵守电磁学实验操作规程.

(1) 实验操作前,应结合实验目的和原理看懂电路图,了解所用仪器的性能和作用,明确各条导线的作用和连接的必要性. 对比较简单的电磁学实验,最好能不看讲义,默记住实验电路图.

(2) 连接电路前,应先进行好仪器设备的布局. 仪器设备的布局应综合考虑到安全、便于操作和读数等因素,还要考虑到实验桌面的整齐,不要让一个简单的电路弄得桌面非常凌乱. 连接导线时,应按一个回路一个回路的连接. 如图 6-9 所示的电路,可以看成是由 I、II 两回路组成,接线时先从电源 E 的正极接一条线到电阻 R_1 的一端,再由电阻 R_1 的另一端接一条线到电阻 R_3 的一端,由 R_3 的另一端接

一条线到开关 K 的一端,由 K 的另一端接一条线到电源的负极,这样就完成了第 I 回路的连接;由 R_1 与电源 E 正极相连的那个端点连一条线到电阻 R_2 的一端,由 R_2 的另一端接一条导线到电流表 A 的正接线柱,由电流表 A 的负接线柱接一条导线到 R_1 、 R_3 之间的端点,这样就完成了第 II 回路的连接.按回路接线是电路连接的基本方法,这样就不易造成漏接或错接.

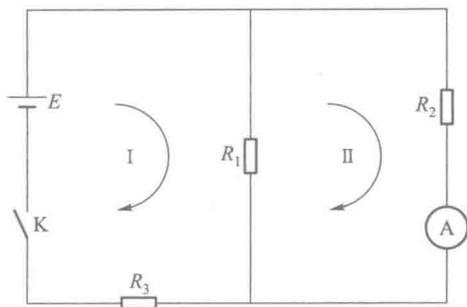


图 6-9 电路连接方法示意图

(3) 接线完毕,首先自己仔细检查一遍,注意:电路各部分接线是否正确;正负极是否接对;各线头是否接牢;开关是否断开;变阻器是否处于安全位置;电阻箱是否有一定的阻值;电源输出电压调节旋钮是否调到最小等.

自己检查无误后,如有必要,再请教师检查电路,经教师允许后才能接通电源进行实验.

(4) 初合开关时,应采用点接.此时要注意观察电路及仪器有无异常现象(如打火花、冒烟、仪器指针偏转过猛或反向偏转等).如有异常,应立即断开电源排除故障.这可概括为“手合电源,眼观全局,先看现象,再读数据”.

(5) 实验因故中断,或需要改电路的某一部分,或改变仪表的量程等,都必须断开电源.实验进行时一旦发生事故或出现异常现象,应立即切断电源,并向教师报告.

(6) 实验完毕,先断开电源开关,实验数据经教师审阅合格后再拆线,拆线时先拆连接主电源的导线端,最后将仪器还原,导线整理好,桌面收拾整齐.

§ 6.2 光学实验的基本知识

光学是物理学的一个古老分支.随着激光技术和半导体技术的出现,光学的研究与应用焕发出了崭新的活力.光学实验方法与现代光学仪器设备已广泛应用于国防、通信、精密计量、微量检测、加工、医疗等领域.光学实验是物理实验的重要组成部分,有着物理实验的共性,也有着它独有特点.其主要特点有:实验所使用的仪器比较精密,也容易损坏;实验中对仪器和光路的调节要求较高,测试精度也较高;实验与理论的联系比力学、电学等实验更为密切,对各种现象的正确分析以及实验

操作的各个方面都需要理论来指导。

为了确保光学实验的顺利进行及保护好实验仪器设备,实验者在光学实验过程中务必做到:① 实验前作好充分预习,包括理解实验的基本原理、熟悉仪器设备的光路结构及工作原理,掌握仪器调节的思想与方法等方面;② 实验中要按正确的方法与步骤调节、使用仪器,要细致地观察、分析与比较实验现象,准确地读出实验过程中的微量数据或数据变化并进行正确处理。

一、常用光源

光学实验都需要光源。适用于光学实验的光源种类很多,普通光学实验中常用的光源有白炽灯、气体放电光源、激光器、发光二极管等。

1. 白炽灯

通常用来照明的各种普通钨丝灯,如家用的 220 V 电灯、机床上使用的 36 V 工作灯、仪器仪表上的 6.3 V 指示灯等,都属于白炽灯。为了抑制钨丝的蒸发,延长其使用寿命,可在灯泡内充入微量卤素气体(碘或溴蒸气),就制成了卤素灯(碘钨灯或溴钨灯)。卤素灯的发光效率相对于普通白炽灯来说,大为提高,可作为强光源使用。

白炽灯是利用电流流过钨丝加热至白炽状态而发光的热辐射光源,其发光光谱为分布在红外、可见光到紫外光范围的连续谱,其中红外成分居多,紫外成分很少。光谱成分和相对光强与钨丝温度有关。

2. 气体放电光源

气体放电光源是利用气体放电而发光的,其光谱为线状谱。钠光灯、汞灯、氢灯、氙灯、氦灯等都属此类光源。

(1) 汞灯(水银灯)。汞灯是汞蒸气弧光放电灯。依据其稳定工作时灯内汞蒸气压的高低,分为低压汞灯和高压汞灯。低压汞灯的辐射能量主要集中在 253.7 nm 的谱线上,因而通常作为紫外光源使用。高压汞灯在紫外、可见、红外区域都有辐射,在可见光和近紫外区域有几条很强的谱线,主要有 578.0 nm (579.1 nm 与 577.0 nm 两条谱线的平均波长)、546.1 nm、435.8 nm、404.7 nm、365.0 nm 等。高压汞灯是光学实验和光谱分析中常用到的光源。

使用汞灯时要注意:汞灯必须与镇流器或限流器串联使用;汞灯从启动到正常工作需要 5~10 min 的预热时间;汞灯熄灭后,需要冷却几分钟后才能再次点亮。

(2) 钠光灯。钠光灯是将金属钠封闭在抽空的放电管内,再在管中充有少量的氩、氖等辅助气体制成的,它是钠蒸气弧光放电灯。在可见光范围内有两条靠得很近的较强谱线, $\lambda_1=589.0$ nm 和 $\lambda_2=589.6$ nm。在精度要求不是很高的普通光学实验中,通常取两条谱线的平均值 $\lambda=589.3$ nm 作为单色钠黄光的波长。

钠在常温下是固体,蒸气压强很低,因此在钠光灯中还必须充有一定量的氩气或氖气,以使放电现象得以发生。由于放电而使管内温度升高,钠开始蒸发,出现黄光,几分钟之后,钠黄光达到一定的强度,方可使用。管内的氩或氖气放电时会发出略带粉红色的光,在光谱仪中能看到相应的谱线。

如在管内充有其他金属蒸气,就可制成相应的金属蒸气弧光灯.其中有一种很重要的金属蒸气镉灯,其发出的明亮、细锐的波长为 643.84722 nm 的红色特征谱线(在温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,压强为 1 个标准大气压的干燥空气中),历史上曾作为波长的原始标准.

使用钠光灯时要注意:钠光灯同样必须与镇流器串联使用;钠光灯一旦点亮,就不要随便熄灭,因为钠光灯每开一次都会减小其使用寿命;钠蒸气活泼,遇水发生爆炸,使用时注意不能碰碎;报废的钠光灯管应由实验室统一处理.

3. 激光器

激光是通过光受激辐射放大而产生的.产生激光的两个必要条件是:① 激光工作物质实现粒子数布居反转;② 存在光学谐振机制,以使光受激辐射产生正反馈.激光具有单色性好、方向性强以及亮度高等优点,是极好的相干光源.激光器最早出现于 20 世纪 60 年代.目前,激光器的种类繁多,在物理实验室中最常用到的是氦-氖激光器及半导体激光器.

(1) 氦-氖(He-Ne)激光器. He-Ne 激光器的典型结构简图如图 6-10 所示.它由激光管和直流高压激光电源组成.激光管的构造是在一个抽成真空的粗玻璃管内固定着一个充以氦-氖混合气体(增益介质)的毛细玻璃管谐振腔,细管两端装上镀介质膜的反射镜.在通常状态下,管内增益介质的粒子数分布是下能级的粒子数多于上能级的粒子数.但可通过在管的两端加高压的电激励方法使上能级 E_2 的粒子数多于下能级 E_1 的粒子数,这种状态称为粒子数布居反转.当增益介质处于此种状态时,由于自发辐射的存在,产生频率为 $\nu = \frac{1}{h}(E_2 - E_1)$ 的光子.若处于 E_2 能级上的粒子受到这个光子的激励,就会由 E_2 能级受迫跃迁到 E_1 能级,同时辐射出一个与激励光子频率、相位、传播方向以及偏振状态完全相同的光子,该过程称为受激辐射.通过受激辐射光子被放大,光子传到反射镜又被反射回来,再通过介质继续放大,如此往返多次形成持续振荡.在近轴方向上往返一次增益大于损耗的那些频率的光逐渐加强,最后在谐振腔内形成稳定的光强分布,便有激光输出.输出激光的功率取决于毛细管的结构参数及放电条件.实验中使用的 He-Ne 激光器的功率一般在几毫瓦至十几毫瓦.输出激光的波长为 632.8 nm ,属于可见光波段的红光.相对而言,He-Ne 激光器的光束质量较好,具有很小的光束发散角($<0.5^{\circ}$)

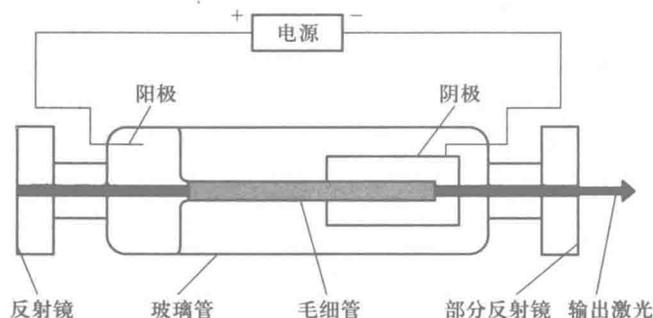


图 6-10 He-Ne 激光器典型结构简图

以及良好的空间相干性,在实验室中广泛用于光路的调节以及在扩束后作为良好的单色光源使用。

使用氩-氟激光器时必须注意:激光电源为直流高压电源,使用中应谨防触电;激光管的电极不能反接,以免损坏激光管;不能正视未经扩束的激光束,以免损伤眼睛。

(2) 半导体激光器(激光二极管 LD)。半导体激光器的工作物质主要是各类具有直接带隙结构的半导体材料。半导体材料的种类决定了输出激光的波长,如 In-GaAlP/GaAs 激光器的输出激光波长在可见光红光波段,为 610 ~ 690 nm, GaAlAs/GaAs 激光器的输出激光波长为 650 ~ 870 nm, InGaAsP/InP 激光器的输出激光在光纤通信的 1.31 μm 与 1.55 μm 两个窗口波段, GaN 基材料的输出激光则在蓝光波段。半导体激光器的结构种类非常多,如图 6-11 所示是一种双异质结的 AlGaAs/GaAs 条形激光器的典型结构简图,其 GaAs 有源区的厚度在 0.1 ~ 0.2 μm ,晶体两端的天然解理面即构成了平行平面谐振腔,又称法布里-珀罗(Fabry-Perot)谐振腔。

NOTE

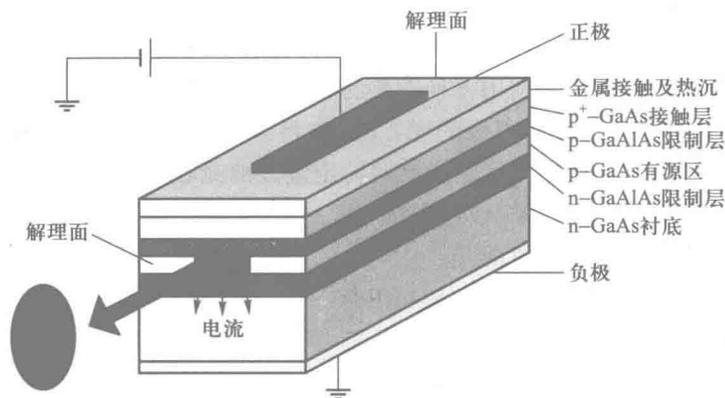


图 6-11 双异质结 AlGaAs/GaAs 条形激光器典型结构简图

半导体激光器的工作原理是:有源区与其两侧的限制层相当于一个 pn 结,施加如图 6-11 所示的正向电压,外电源注入的电子与空穴即被有效地约束在有源区中而形成粒子数布居反转,这时电子从其导带跃迁到价带而与空穴复合产生受激辐射,经过其两端的解理面构成的谐振腔的反馈作用而输出激光。

半导体激光器输出的远场光斑通常是椭圆形的,即在两个相互垂直方向的发散角是不同的(垂直于结平面方向的发散角在 30° ~ 40°,平行于结平面方向的发散角在 10° ~ 20°),如图 6-11 所示。为满足某些应用方面的要求,通常使输出激光束经过一个特别结构的微透镜,以改善其光场分布特性。尽管半导体激光的光束质量(发散角、光谱线宽等)通常比 He-Ne 激光器的差,但对于一般的实验使用,基本能满足要求。半导体激光器的输出光功率取决于注入电流的大小,注入电流一般在 mA 量级,输出功率则一般在 mW 量级。

使用半导体激光器时必须注意:使用专用的电源,以防突发性的瞬间电脉冲(浪涌)而对激光器造成损坏;防止静电;尽量保持温度稳定(其阈值电流、输出光

功率、输出光波波长及光谱宽度等都与温度有关);不可频繁地开关激光器。

4. 半导体发光二极管(LED)

半导体发光二极管也是实验中广泛应用的光源,由于其具有电源电压低、发光效率高、寿命长、可靠性好等优点,作为仪器面板的照明及指示等方面,有取代白炽灯的趋势。

相对于激光二极管(LD)而言,LED的结构简单,没有谐振腔结构,因而发光的机理是电子与空穴在pn结中扩散而复合产生的自发辐射。LED发出的光束的发散角很大(平行于pn结方向,可达 120° ,垂直于pn结方向也可达几十度)。LED的发射光谱线宽通常可达几十甚至上百纳米。

二、光学滤光器

光学实验中,经常需要使用某些滤光器以从复色光中获取单色光或去掉某些波段范围的光。依据工作原理的不同,可分为反射滤光器、吸收滤光器、色散滤光器、干涉滤光器等。

反射滤光器是指利用物体的不同颜色的表面对不同波段的光的反射能力的强弱不同而制成的滤光器,如利用各种颜色的膜片制成的滤光片。吸收滤光器是利用物质对光的选择吸收特性而制成的滤光器,如将某些化学药品溶液盛于平行平面的吸收皿中,利用其吸收特性可制成某些特定波段的吸收滤光器。色散滤光器则是利用色散元件(如棱镜等)将不同颜色的光分开,而获取或去掉某些波段的光。

还有一类重要的干涉滤光器,是利用介质膜层上下表面反射光产生的多光束干涉的原理制成的,如图6-12所示,它能使某些特定波长的光反射或透射。很多光学仪器的光学表面以及光学实验中的很多镜片都镀有这种特别设计的介质膜层。

在图6-12中,一束平行光以入射角*i*入射到厚度为*d*、折射率为*n*₂的介质膜上,*n*₁为空气层(也可是另一种介质)的折射率,*n*₃为基片(如玻璃等)的折射率,设*n*₁<*n*₂<*n*₃,从上表面反射出去的相邻两条光线的光程差为

$$\delta = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} = 2dn_2 \cos r \quad (6-15)$$

而从下表面透射出去的相邻两条光线的光程差为

$$\delta' = \delta - \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} = 2dn_2 \cos r - \frac{\lambda}{2} \quad (6-16)$$

由此可看出,当 δ 为 $\lambda/2$ 的偶数倍时, δ' 必为 $\lambda/2$ 的奇数倍,这样反射光发生相长干涉,而透射光发生相消干涉;而当 δ 为 $\lambda/2$ 的奇数倍时, δ' 必为 $\lambda/2$ 的偶数倍,则

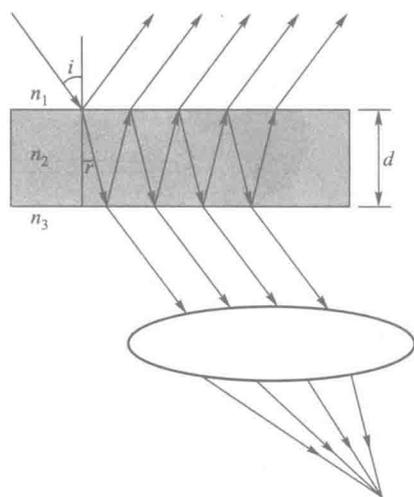


图6-12 介质膜层的多光束干涉

反射光发生相消干涉,而透射光发生相长干涉.因而可通过改变薄膜的厚度 d 及材料(即其折射率 n_2 改变)来使某些光反射或透射,以实现滤光的作用.

在实际应用中,光通常是正入射的($i=0$),则将薄膜层设计成 $1/4$ 波片($n_2 d = \lambda/4$),并且寻找合适的薄膜材料,以满足 $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$,这样才能使某些特定波长的光被有效地反射或透射.但一般情况下很难寻找到满足 $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$ 的薄膜材料,且有时需要使比较宽的波长范围内的光反射或透射,因此单层薄膜已不能满足要求.为了解决这个问题,可将折射率高低不同的两种薄膜交替镀在镜片上,有时多达几十层,这样其光强(能量)的反射率为

$$R = \left(\frac{1-Y}{1+Y} \right)^2 \quad (6-17)$$

其中

$$Y = \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2p} \frac{n_H^2}{n_S} \quad (6-18)$$

式中 n_H 、 n_L 、 n_S 分别表示高折射率薄膜、低折射率薄膜及基片的折射率; $2p$ 表示薄膜的总层数.这时高反射区的谱宽范围可以表示为

$$\Delta\lambda_R = \frac{4}{\pi} \lambda_0 \arcsin \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (6-19)$$

式中 λ_0 为其中心波长.

按上述方法镀膜而成的镜片,其膜层很容易损坏,因此使用时,一定要注意防尘,不能用手去触摸,必须采用专门的工具与方法去清洁,以保护镜片,防止划伤.

三、光路与光学仪器的调节

光学实验离不开光路的调节.实验前,可依据实验的内容、使用的仪器设备、实验室的设施条件、实验者的操作习惯等方面进行光路的整体布局.光学实验离不开光路及仪器设备的精细调节,而大部分人习惯于使用右手,另外仪器设计的时候也通常是将各种操控旋钮、按钮等尽量布置在右侧,所以光路布局时特别要考虑到这些方面,以使操作简单、调节方便.

光路布局以后,就必须对光路进行等高共轴调节.首先将要调节的各光学元件、光学仪器设备的可调部分置于“中平”状态,以保证向各个方向具有等量的调节余地.在精密微调前,通常要运用肉眼观察进行粗调,以使大致达到等高共轴状态.光路调节时要有全局的观念,不可仅仅考虑到某个器件或设备,大家可体会“实验五 静态法测量金属丝的杨氏模量”中望远镜与平面镜构成的光路系统的调节步骤的设计.最后借助工具(如光屏上的小孔)、仪器(如平行光管)或是专门的方法(如自准法和二次成像法等),进行等高共轴的微细调节.

光学实验中常用到望远镜、显微镜等成套的光学仪器.这类仪器本身就是一个复杂的光学系统.对它们的调节是借助于其目镜中的分划板来进行的.当人的眼睛通过显微镜或望远镜进行观测时,要求物体成像于目镜的分划板上,以使用其上的分划线(叉丝)确定观测物的坐标或相对位置,并且这时人的眼睛也处于自然放松状态.首先应调节目镜与分划板的间距(旋转目镜筒),以确保看到的分划线(叉

NOTE

丝)最为清晰且没有重影(这时分划线的像面与物面重合)。再精细调节物镜的位置,确保看到物体的像没有视差,即移动眼睛时,像与分划线无相对移动,这时物像成在分划板上,已调试准确,可进行下一步的测量。

四、光学仪器的使用与维护规则

光学仪器由精心制作的光学元件及精密测量机构组成,所以光学仪器一方面很精密,另一方面大多贵重且容易损坏。使用与维护时要注意遵循有关的规则。

(1) 必须在了解仪器性能和使用方法以后才能操作仪器,不可随意乱动。

(2) 使用时要轻拿轻放,用完的器件顺手放回仪器盒,不可在桌面上乱放。

(3) 任何时候不能用手直接接触及光学表面,不可对着光学元件打喷嚏、咳嗽等。

(4) 光学表面有玷污时,未镀膜的表面可在教师指导下用洁净的镜头纸轻轻擦拭干净或用吹气球吹跑灰尘,不可用嘴哈气。有镀膜的表面,应由实验室人员用酒精与乙醚的混合溶液按正确的方法擦拭,以保护膜层。

(5) 对于光学仪器中的机械部分,如分光计的刻度盘、迈克耳孙干涉仪的旋钮、读数显微镜的测微鼓轮等,要按规程操作,且要做到动作轻缓、力度均匀。不准随意拆卸仪器或乱拧旋钮,以免造成仪器损坏或零件丢失。

(6) 注意防尘。仪器使用完毕,盖好防尘罩,以保持清洁。

实验一 长度、密度的测量

一、实验目的

1. 掌握游标卡尺和螺旋测微器的工作原理;
2. 学会正确使用米尺、游标卡尺和螺旋测微器;
3. 学习在实验中正确读数、记录和数据处理的方法;
4. 了解天平的构造原理和正确使用方法;
5. 掌握流体静力称衡法测不规则固体密度的方法;
6. 学习间接测量量的数据处理方法.

NOTE

二、实验仪器

米尺、游标卡尺、螺旋测微器、天平、温度计.

三、实验原理

1. 测量金属圆管的体积

若待测物体是一个外径为 D 、内径为 d 、长度为 L 、深度为 l 的圆管壳,其体积为

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 L - d^2 l) \quad (1)$$

2. 钢球体积测量

钢球的体积公式为

$$V = \frac{\pi}{6} D^3 \quad (2)$$

式中 D 为钢球的直径,用螺旋测微器进行测量.

3. 流体静力称衡法测量不规则固体的密度

密度是物质的基本属性之一,在工业上常常通过物质密度的测定而作成分分析和纯度鉴定.按密度定义

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

测出物体质量 m 和体积 V 后,可间接测得物体的密度 ρ .

这一方法的基本原理是阿基米德原理(图1):物体在液体中所受的浮力等于它所排开液体的重量.在不考虑空气浮力的条件下,物体在空气中重为 $W = mg$,它浸没在液体中的视重 $W_1 = m_1 g$.那么,物体受到的浮力为

$$F = W - W_1 = (m - m_1) g \quad (4)$$

其中 mg 和 $m_1 g$ 是该物体在空气中及完全浸没液体称量时相应的重量.又物体所

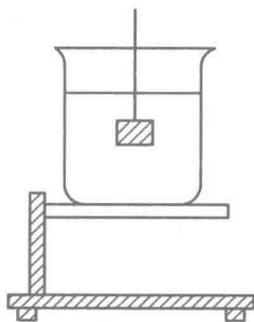


图1 称量示意图

受浮力等于所排液体重量,即

$$F = \rho_0 Vg \quad (5)$$

式中 ρ_0 是液体的密度, V 是排开液体的体积, 亦为物体的体积, g 为重力加速度. 由式(3)、式(4)、式(5)可得待测固体的密度

$$\rho = \frac{m}{m - m_1} \rho_0 \quad (6)$$

用这种方法测密度, 避开了不易测量的不规则体积 V , 转换成只需测量较易测量的质量. 这种测量方法称为流体静力称衡法. 用流体静力称衡法测定物体密度的必要条件是: 物体浸入液体后, 其物理及化学性质不会改变. 而一般实验时, 液体常用水, ρ_0 为水的密度. 在不同温度下纯水的密度是不同的, 用温度计测量出水的温度, 可查纯水密度随温度的变化表, 见附录.

四、实验装置介绍

1. 米尺

进行比较精确的长度测量时, 常用到测量工具——米尺. 米尺的分度值为 1 mm , 用米尺测量长度时, 可准确到毫米这一位, 毫米以下的一位则靠估计. 例如, 用米尺测量一个物体的长度 $l = AB$, 如图 2(a) 所示. A 点位置的读数是 9.50 cm , B 点位置的读数是 12.63 cm , 则 $l = (12.63 - 9.50)\text{ cm} = 3.13\text{ cm}$. 毫米以下的一位读数 (9.50 中的“0”和 12.63 中的“3”) 是估读的, 在这一位存在误差.

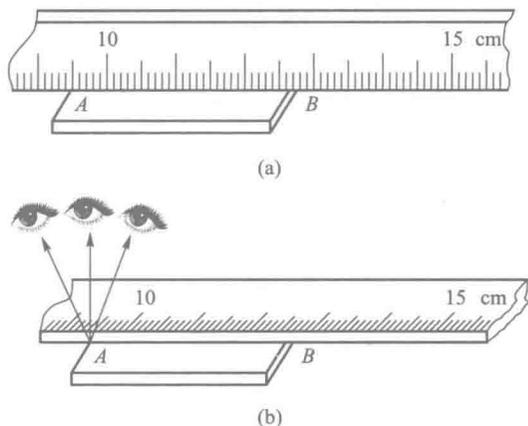


图 2 米尺

用米尺测量时, 应注意以下两点: 首先, 尽量减小误差, 使待测物与米尺的刻度紧贴, 如图 2(a) 所示. 否则如图 2(b) 所示, 因米尺有一定的厚度. 测量时从不同的角度看, 会导致读数的差异. 其次, 当米尺的刻度由端边开始时, 不要用米尺的端边作为测量的起点, 以免由于米尺端边的磨损对测量结果引入系统误差.

2. 游标卡尺构造及读数原理

游标卡尺主要由两部分构成, 如图 3 所示: 在以毫米为单位的主尺上附加一个能够滑动的有刻度的小尺(副尺), 叫游标, 利用它可以把主尺估读的那位数值较为

准确地读出来.

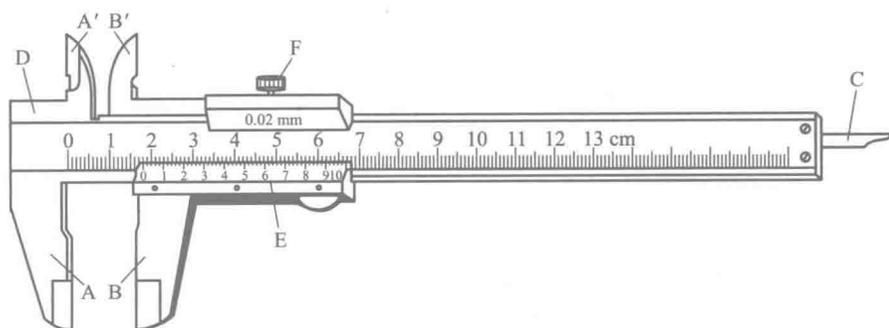


图3 游标卡尺

游标卡尺在构造上的主要特点是:游标上 N 个分度格的总长度与主尺上 $(N-1)$ 个分度格的长度相同,若主尺上最小分度为 a ,游标上最小分度值为 b ,则有

$$Nb = (N-1)a \quad (7)$$

那么主尺与游标上每个分格的差值(游标的精度值或游标的最小分度值)是

$$\delta = a - b = a - a \frac{N-1}{N} \quad (8)$$

常用的游标是五十分游标($N=50$),即主尺上 49 mm 与游标上 50 格相当,如图 4 所示.五十分游标的精度值 $\delta=0.02$ mm. 游标上刻有 0,1,2,3, ..., 9, 以便于读数.

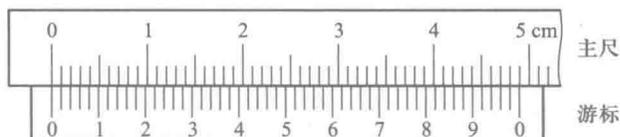


图4 游标卡尺原理图

毫米以上的读数要从游标“0”刻度线在主尺上的位置读出,毫米以下的数由游标(副尺)读出,即:先从游标卡尺“0”刻度线在主尺的位置读出毫米的整数位,再从游标上读出毫米的小数位.

游标卡尺测量长度 l 的普遍表达式为

$$l = Ka + n\delta \quad (9)$$

式中 k 是游标的“0”刻度线所在处主尺刻度的整刻度(毫米)数, n 是游标的第 n 条线与主尺的某一条线重合, $a=1$ mm. 图 5 所示的情况,即 $l=21.58$ mm.

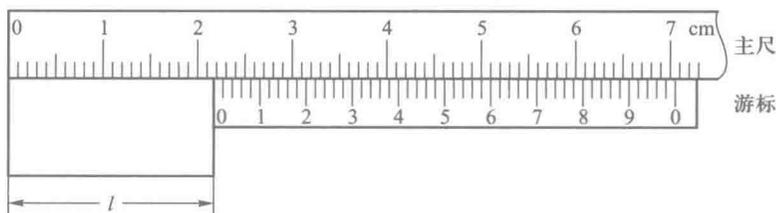


图5 游标卡尺读数

在用游标卡尺测量之前,应先把量爪 A、B 合拢,检查游标的“0”刻度线是否与主尺的“0”刻度线重合.如不重合,应记下零点读数,加以修正,即待测量 $l=l_1-l_0$.其中, l_1 为未作零点修正前的读数值, l_0 为零点读数. l_0 可以正也可以负.

使用游标卡尺时,可一手拿物体,另一手持尺,如图 6 所示.要特别注意保护量爪不被磨损.使用时轻轻把物体卡住即可读数.

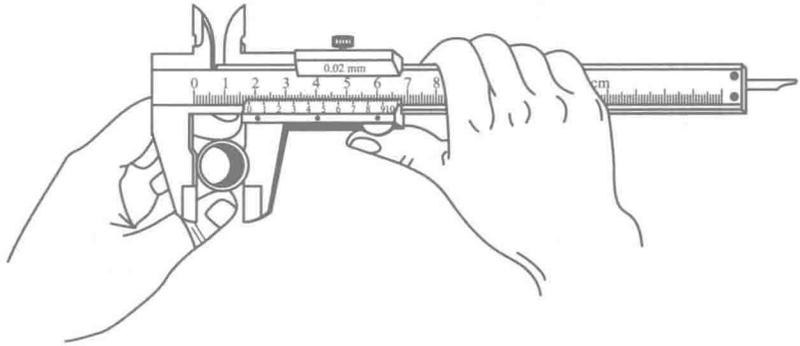


图 6 游标卡尺操作图

3. 螺旋测微器(千分尺)

(1) 螺旋测微器构造

螺旋测微器是比游标卡尺更精密的量具,实验室中常用它来测量金属丝的直径或金属薄片的厚度等,其最小刻度为 $(1/100)\text{mm}$,常见的螺旋测微器外形如图 7 所示.螺旋测微器结构的主要部分是一个微螺旋杆.螺距是 0.5mm .因此,当螺旋杆旋一周时,它沿轴线方向只前进 0.5mm .螺旋柄圆周上,等分为 50 格,螺旋杆沿轴线方向前进 0.01mm 时螺旋柄圆周上的刻度转过一个分格,这就是所谓机械放大原理.

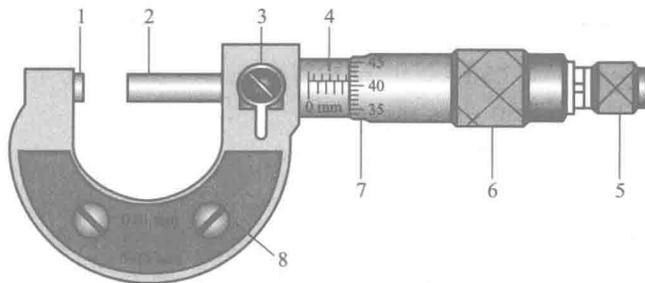


图 7 螺旋测微器(千分尺)

1—测砧;2—测微螺杆;3—制动栓;4—固定刻度;5—棘轮转柄;6—微分套筒;7—可动刻度;8—尺架

测量物体长度时,应轻轻转动螺旋柄后端的棘轮转柄,推动螺旋杆,把待测物体刚好夹住时读数,可以从固定标尺上读出整格数.

(2) 读数方法

螺旋测微器固定套管上沿轴向刻有一条细线,在其下方刻有 15 分格,每分格

1 mm,在其上方,从与下方“0”线错开 0.5 mm 处开始,每隔 1 mm 刻有一条线,这就使得主尺的分度值为 0.5 mm. 在测量时,把物体放在测微螺杆和测砧的测量面之间,旋转棘轮使测量面与待测物体接触,当听到棘轮“咔咔”的响声,便可读数. 先将主尺上没有被微分套筒前段遮住的刻度读出,再读出固定套管横线所对准的微分套筒上可动刻度的读数,还要估读一位,即读到 0.001 mm. 把主尺上读出的数(如 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 等)和从微分套筒读出的数(小于 0.5 mm)相加,即是测量值.

使用螺旋测微器测量时,要注意防止读错主尺数(整圈数),如图 8 所示的三例,(a)比(b)多转一圈,读数相差 0.5 mm,(a)的读数为 5.904 mm,(b)的读数为 5.404 mm.(c)的微分套筒转的圈数是 3 而不是 4,读数为 1.758 mm 而不是 2.258 mm.

NOTE

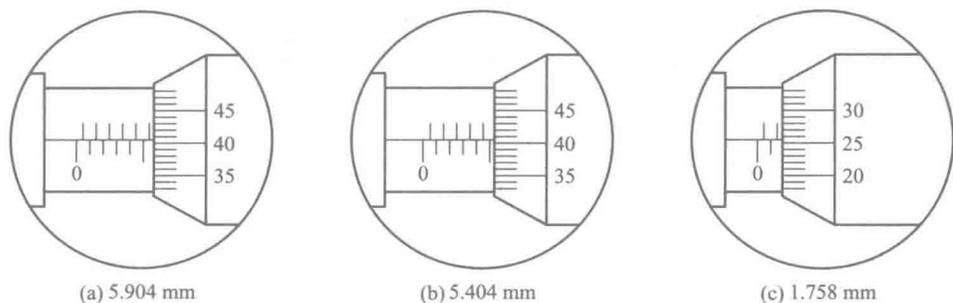


图 8 螺旋测微器读数

螺旋测微器尾端有一个棘轮转柄 5,拧动棘轮可使测微螺杆移动,当测微螺杆与物体(或测砧)相接后的压力达到某一数值时,棘轮将滑动并有咔咔的响声,微分套筒不再转动,测微螺杆也停止前进,这时就可读数. 设置棘轮可保证每次的测量条件(对被测物的压力)一定,并能保护螺旋测微器的精密的螺纹. 不使用棘轮而直接转动微分套筒去卡住物体时,由于对被测物的压力不稳定,而测不准. 另外,如果不使用棘轮,微分套筒上的螺纹将发生变形和增加磨损,降低了仪器的准确度,这是使用螺旋测微器必须注意的问题.

不夹被测物而使测微螺杆与测砧相接时,微分套筒上的零线应当刚好和固定套管上的横线对齐. 实际使用的螺旋测微器,由于调整得不充分或使用不当,其初始状态和上述要求不符,即有一个不等于零的零点读数,并注意零点读数的符号不同. 每次测量之后,要从测量值的平均值中减去零点读数.

4. 物理天平

天平按其精确程度分为物理天平和分析天平. 物理天平主要有横梁、支柱、底盘、托盘及吊耳构成. 物理天平的构造如图 9 所示,在横梁上装有三角刀口,中间刀口置于支柱顶端的玛瑙刀口垫上,作为横梁的支点. 两边刀口各有秤盘,随横梁上升或下降,当横梁下降时,制动架就会把它托住,以免刀口磨损. 横梁两端各有一平衡螺母,用于空载调节平衡. 横梁上装有游动砝码,用于 1 g 或 2 g 以下的称量.

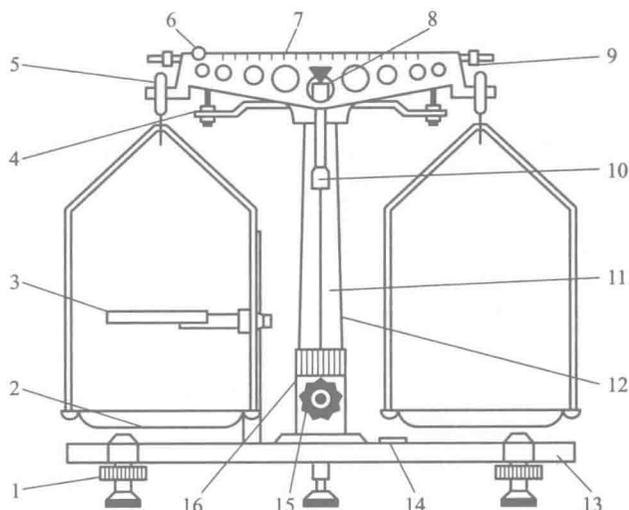


图9 物理天平构造

- 1—调节螺母;2—称盘;3—托架;4—支架;5—挂钩;6—游码;7—游码标尺;8—刀口、刀垫;
 9—平衡螺母;10—感量调节器;11—读数指针;12—支柱;13—底座;14—水准仪;
 15—起动旋钮;16—指针标尺

天平的使用:

- (1) 调节刀垫的水平:调节底角螺丝使支柱竖直或底盘水平.
- (2) 调零点:在横梁两侧刀口上挂上秤盘.将止动旋钮向右旋转,支起横梁.游码放在零位置上,用平衡螺丝进行调整.
- (3) 称量:将物体放在左盘,砝码放在右盘,进行称衡(包括测分度值).
- (4) 每次称衡完毕将止动旋钮向左旋转放下横梁,全部称完后应将挂秤盘的吊钩从刀口上取下,并将砝码复位.

五、实验内容及步骤

1. 测量金属圆筒的体积

- (1) 用米尺测量金属圆筒不同位置处的长度 L 五次,记录数据于表 1 中.
- (2) 用游标卡尺测量金属圆筒不同位置的外径 D 、内径 d 和深度 l 各五次,记录数据于表 1 中.
- (3) 用式(1)计算出金属圆筒的体积.
- (4) 求出金属圆筒体积的不确定度.
- (5) 正确表达测量结果.

2. 测量钢球体积

- (1) 用螺旋测微器测量钢球直径 D ,记录数据于表 2 中.
- (2) 用式(2)计算出钢球的体积.
- (3) 求出钢球体积的不确定度.
- (4) 正确表达测量结果.

3. 测量不规则物体的密度

(1) 正确使用天平,测量物体在空气中的质量 m 五次,记录数据于表 3 中.

(2) 用细线悬挂物体,置于天平挂钩上,悬线长度合适,将铝块浸没水中,测出铝块在水中的质量 m_1 ,同样称量五次记录数据于表 3 中.

(3) 测出实验时的水温,查附表给出该温度下水的密度 ρ_0 .

(4) 用式(6)计算出不规则物体的密度,并计算不确定度,写出结果表达式.

六、数据记录及数据处理

NOTE

1. 测量金属圆筒的体积

表 1 测量金属圆筒体积数据表格

米尺指标:量程_____,分度值_____, $\Delta_{\text{仪}} =$ _____

游标卡尺指标:量程_____,分度值_____, $\Delta_{\text{仪}} =$ _____

次数 \ 项目	外径 D/cm	内径 d/cm	长度 L/cm	深度 l/cm
1				
2				
3				
4				
5				
平均值				
实验标准差 $S(x)$				
t_p				

数据处理:

金属圆筒的体积

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}^2 \bar{L} - \bar{d}^2 \bar{l}) = \text{_____ cm}^3$$

外径 D 的不确定度为

$$U_A(D) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(D), \quad U_B(D) = \Delta_{\text{仪}}(D)$$

$$U(D) = \sqrt{U_A^2(D) + U_B^2(D)}$$

内径 d 的不确定度为

$$U_A(d) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(d), \quad U_B(d) = \Delta_{\text{仪}}(d)$$

$$U(d) = \sqrt{U_A^2(d) + U_B^2(d)}$$

长度 L 的不确定度为

$$U_A(L) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(L), \quad U_B(L) = \Delta_{\text{仪}}(L)$$

$$U(L) = \sqrt{U_A^2(L) + U_B^2(L)}$$

深度 l 的不确定度为

$$U_A(l) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(l), \quad U_B(l) = \Delta_{\text{仪}}(l)$$

$$U(l) = \sqrt{U_A^2(l) + U_B^2(l)}$$

体积 V 的不确定度为

$$U(V) = \frac{\pi}{4} \sqrt{4\bar{D}^2 \bar{L}^2 U^2(D) + \bar{D}^4 U^2(L) + 4\bar{d}^2 \bar{l}^2 U^2(d) + \bar{d}^4 U^2(l)}$$

结果表达式

$$V = \bar{V} \pm U(V)$$

2. 测量钢球体积

表 2 测量钢球体积数据表格

千分尺指标: 量程 _____, 分度值 _____, $\Delta_{\text{仪}} =$ _____, 零点误差 $\varepsilon =$ _____

测量次数	1	2	3	4	5	平均值 \bar{D}'	实验标准差 $S(x)$	t_p
D_i/mm								

数据处理:

钢球直径

$$\bar{D} = \bar{D}' - \varepsilon = \text{_____ mm}$$

钢球体积

$$\bar{V} = \frac{\pi}{6} \bar{D}^3 =$$

D 的不确定度为

$$U_A(D) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(D), \quad U_B(D) = \Delta_{\text{仪}}(D)$$

$$U(D) = \sqrt{U_A^2(D) + U_B^2(D)}$$

V 的不确定度为

$$U(V) = \frac{1}{2} \pi \bar{D}^2 U(D)$$

结果表达式

$$V = \bar{V} \pm U(V)$$

3. 测量不规则物体的密度

表 3 测量不规则物体密度数据表格

天平指标: 量程 _____, 分度值 _____, $\Delta_{\text{仪}} =$ _____

温度 $t =$ _____ $^{\circ}\text{C}$, 水密度 $\rho_0 =$ _____ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (查附表得)

测量次数	1	2	3	4	5	平均值	实验标准差 $S(x)$	t_p
m/g								
m_1/g								

数据处理:

待测物体密度为

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{\bar{m} - m_1} \rho_0$$

m 的不确定度为

$$U_A(m) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(m), \quad U_B(m) = \Delta_{\text{仪}}(m)$$

$$U(m) = \sqrt{U_A^2(m) + U_B^2(m)}$$

m_1 的不确定度为

$$U_A(m_1) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(m_1), \quad U_B(m_1) = \Delta_{\text{仪}}(m_1)$$

$$U(m_1) = \sqrt{U_A^2(m_1) + U_B^2(m_1)}$$

ρ 的不确定度为

$$U(\rho) = \frac{\sqrt{[mU(m)]^2 + [m_1U(m_1)]^2}}{(\bar{m} - m_1)^2} \rho_0$$

结果表达式

$$\rho = \bar{\rho} \pm U(\rho)$$

七、注意事项

1. 使用游标卡尺时,首先看清游标卡尺的精度,测量时应使测量爪轻轻夹住被测物,不要夹得过紧,然后用紧固螺母将游标卡尺固定,最后读数.测量物上被测距离的连线必须平行于主尺.

2. 使用螺旋测微器的注意以下事项:

(1) 在测微螺杆快靠近被测物体时应停止使用旋钮,而改用微调旋钮,避免产生过大的压力,既可使测量结果精确,又能保护螺旋测微器.

(2) 在读数时,要注意固定刻度尺上表示半毫米的刻线是否已经露出.

(3) 当小砧和测微螺杆并拢时,可动刻度的零点与固定刻度的零点不相重合,将出现零误差,应加以修正,即在最后测长度的读数上去掉零误差的数值.

3. 使用天平时注意以下事项:

(1) 天平的负载量不得超过其最大称量值,以免损坏刀口或横梁.

(2) 为了避免刀口受冲击而损坏,在取放物体、取放砝码、调节平衡螺母以及不使用天平时,都必须使天平制动.只有在判断天平是否平衡时才将天平启动.天平启动或制动时,旋转制动旋钮动作要轻.

(3) 砝码不能用手直接取拿,只能用镊子间接挟取.从秤盘上取下后应立即放入砝码盒中.

(4) 天平的各部分以及砝码都要防锈、防腐蚀,高温物体以及有腐蚀性的化学药品不得直接放在盘内称量.

(5) 称量完毕将制动旋钮左旋转,放下横梁,保护刀口.

八、思考题

1. 何谓仪器的分度数值? 米尺、50 分度游标卡尺和螺旋测微器的分度数值各为多少? 如果用它们测量一个物体约 7 cm 的长度,问每个待测量能读得几位有效数字?

2. 游标刻度尺上 30 个分格与主刻度尺 29 个分格等长,问这种游标尺的分度数值为多少?

3. 使用螺旋测微器时,为什么不可直接转动套筒? 棘轮是做什么用的?

4. 怎样判断螺旋测微器的零点读数的符号?

5. 测量小球直径,是测同一部位好些还是测不同部位好些? 为什么?

6. 何谓回程误差? 怎样防止回程误差?

7. 使用游标卡尺时应注意哪些问题? 为什么?

8. 使用螺旋测微器时应注意哪些问题? 为什么?

9. 用流体静力称衡法测量固体物体的密度时,若待测物体的密度小于液体的密度,应怎样测量?

附录 纯水密度随温度的变化表(不考虑大气压的影响)

单位: $g \cdot cm^{-3}$

$t/^\circ C$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999 849 3	0.999 855 8	0.999 862 2	0.999 868 3	0.999 874 3	0.999 880 1	0.999 885 7	0.999 891 2	0.999 896 4	0.999 849 3
1	0.999 901 5	0.999 906 5	0.999 911 2	0.999 915 8	0.999 920 2	0.999 924 4	0.999 928 4	0.999 932 3	0.999 936 0	0.999 939 5
2	0.999 942 9	0.999 946 1	0.999 949 1	0.999 951 9	0.999 954 6	0.999 957 1	0.999 959 5	0.999 961 6	0.999 963 6	0.999 965 5
3	0.999 967 2	0.999 968 7	0.999 970 0	0.999 971 2	0.999 972 2	0.999 973 1	0.999 973 8	0.999 974 3	0.999 974 7	0.999 974 9
4	0.999 975 0	0.999 974 8	0.999 974 6	0.999 974 2	0.999 973 6	0.999 972 8	0.999 971 9	0.999 970 9	0.999 969 6	0.999 968 3
5	0.999 966 8	0.999 965 1	0.999 963 2	0.999 961 2	0.999 959 1	0.999 956 8	0.999 954 4	0.999 951 8	0.999 949 0	0.999 946 1
6	0.999 943 0	0.999 939 8	0.999 936 5	0.999 933 0	0.999 929 3	0.999 925 5	0.999 921 6	0.999 917 5	0.999 913 2	0.999 908 8
7	0.999 904 3	0.999 899 6	0.999 894 8	0.999 889 8	0.999 884 7	0.999 879 4	0.999 874 0	0.999 868 4	0.999 862 7	0.999 856 9
8	0.999 850 9	0.999 844 8	0.999 838 5	0.999 832 1	0.999 825 6	0.999 818 9	0.999 812 1	0.999 805 1	0.999 798 0	0.999 790 8
9	0.999 783 4	0.999 775 9	0.999 768 2	0.999 760 4	0.999 752 5	0.999 744 4	0.999 736 2	0.999 727 9	0.999 719 4	0.999 710 8
10	0.999 702 1	0.999 693 2	0.999 684 2	0.999 675 1	0.999 665 8	0.999 656 4	0.999 646 8	0.999 637 2	0.999 627 4	0.999 617 4
11	0.999 607 4	0.999 597 2	0.999 586 9	0.999 576 4	0.999 565 8	0.999 555 1	0.999 544 3	0.999 533 3	0.999 522 2	0.999 511 0
12	0.999 499 6	0.999 488 2	0.999 476 6	0.999 464 8	0.999 453 0	0.999 441 0	0.999 428 9	0.999 416 7	0.999 404 3	0.999 391 8
13	0.999 379 2	0.999 366 5	0.999 353 6	0.999 340 7	0.999 327 6	0.999 314 3	0.999 301 0	0.999 287 5	0.999 274 0	0.999 260 2
14	0.999 246 4	0.999 232 5	0.999 218 4	0.999 204 2	0.999 189 9	0.999 175 5	0.999 160 9	0.999 146 3	0.999 131 5	0.999 116 6
15	0.999 101 6	0.999 086 4	0.999 071 2	0.999 055 8	0.999 040 3	0.999 024 7	0.999 009 0	0.998 993 2	0.998 977 2	0.998 961 2
16	0.998 945 0	0.998 928 7	0.998 912 3	0.998 895 7	0.998 879 1	0.998 862 3	0.998 845 5	0.998 828 5	0.998 811 4	0.998 794 2
17	0.998 776 9	0.998 759 5	0.998 741 9	0.998 724 3	0.998 706 5	0.998 688 6	0.998 670 6	0.998 652 5	0.998 634 3	0.998 616 0
18	0.998 597 6	0.998 579 0	0.998 560 4	0.998 541 6	0.998 522 8	0.998 503 8	0.998 484 7	0.998 465 5	0.998 446 2	0.998 426 8

续表

$t/^\circ\text{C}$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
19	0.998 407 3	0.998 387 7	0.998 368 0	0.998 348 1	0.998 328 2	0.998 308 1	0.998 288 0	0.998 267 7	0.998 247 4	0.998 226 9
20	0.998 206 3	0.998 185 6	0.998 164 9	0.998 144 0	0.998 123 0	0.998 101 9	0.998 080 7	0.998 059 4	0.998 038 0	0.998 016 4
21	0.997 994 8	0.997 973 1	0.997 951 3	0.997 929 4	0.997 907 3	0.997 885 2	0.997 863 0	0.997 840 6	0.997 818 2	0.997 795 7
22	0.997 773 0	0.997 750 3	0.997 727 5	0.997 704 5	0.997 681 5	0.997 658 4	0.997 635 1	0.997 611 8	0.997 588 3	0.997 564 8
23	0.997 541 2	0.997 517 4	0.997 493 6	0.997 469 7	0.997 445 6	0.997 421 5	0.997 397 3	0.997 373 0	0.997 348 5	0.997 324 0
24	0.997 299 4	0.997 274 7	0.997 249 9	0.997 225 0	0.997 200 0	0.997 174 9	0.997 149 7	0.997 124 4	0.997 099 0	0.997 073 5
25	0.997 048 0	0.997 022 3	0.996 996 5	0.996 970 7	0.996 944 7	0.996 918 6	0.996 892 5	0.996 866 3	0.996 839 9	0.996 813 5
26	0.996 787 0	0.996 760 4	0.996 733 7	0.996 706 9	0.996 680 0	0.996 653 0	0.996 625 9	0.996 598 7	0.996 571 4	0.996 544 1
27	0.996 516 6	0.996 489 1	0.996 461 5	0.996 433 7	0.996 405 9	0.996 378 0	0.996 350 0	0.996 321 9	0.996 293 8	0.996 265 5
28	0.996 237 1	0.996 208 7	0.996 180 1	0.996 151 5	0.996 122 8	0.996 094 0	0.996 065 1	0.996 036 1	0.996 007 0	0.995 977 8
29	0.995 948 6	0.995 919 2	0.995 889 8	0.995 860 3	0.995 830 6	0.995 800 9	0.995 771 2	0.995 741 3	0.995 711 3	0.995 681 3
30	0.995 651 1	0.995 620 9	0.995 590 6	0.995 560 2	0.995 529 7	0.995 499 1	0.995 468 5	0.995 437 7	0.995 406 9	0.995 376 0
31	0.995 345 0	0.995 313 9	0.995 282 7	0.995 251 4	0.995 220 1	0.995 188 7	0.995 157 2	0.995 125 5	0.995 093 9	0.995 062 1
32	0.995 030 2	0.994 998 3	0.994 966 3	0.994 934 2	0.994 902 0	0.994 869 7	0.994 837 3	0.994 804 9	0.994 772 4	0.994 739 7
33	0.994 707 1	0.994 674 3	0.994 641 4	0.994 608 5	0.994 575 5	0.994 542 3	0.994 509 2	0.994 475 9	0.994 442 5	0.994 409 1
34	0.994 375 6	0.994 342 0	0.994 308 3	0.994 274 5	0.994 240 7	0.994 206 8	0.994 172 8	0.994 138 7	0.994 104 5	0.994 070 3
35	0.994 035 9	0.994 001 5	0.993 967 1	0.993 932 5	0.993 897 8	0.993 863 1	0.993 828 3	0.993 793 4	0.993 758 5	0.993 723 4
36	0.993 688 3	0.993 653 1	0.993 617 8	0.993 582 5	0.993 547 0	0.993 511 5	0.993 475 9	0.993 440 3	0.993 404 5	0.993 368 7
37	0.993 332 8	0.993 296 8	0.993 260 7	0.993 224 6	0.993 188 4	0.993 152 1	0.993 115 7	0.993 079 3	0.993 042 8	0.993 006 2
38	0.992 969 5	0.992 932 8	0.992 896 0	0.992 859 1	0.992 822 1	0.992 785 0	0.992 747 9	0.992 710 7	0.992 673 5	0.992 636 1
39	0.992 598 7	0.992 561 2	0.992 523 6	0.992 486 0	0.992 448 3	0.992 410 5	0.992 372 6	0.992 334 7	0.992 296 6	0.992 258 6
备注	数据引自 CRC Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition(2006—2007)									

实验二 利用碰撞打靶研究平抛运动

一、实验目的

1. 研究两球碰撞过程及碰撞后的平抛运动的规律;
2. 讨论不同大小的球体之间碰撞中的动量和能量的转化与守恒;
3. 比较实验值和理论值的差异,分析实验现象.

二、实验仪器

碰撞打靶实验仪、摆球(撞击球)、被撞球、水准仪、游标卡尺、钢卷尺、物理天平.

三、实验原理

1. 碰撞

两个或两个以上有相对运动的物体在空间相遇,并迅速改变其运动状态的现象就是碰撞.物体间的碰撞是自然界中普遍存在的现象,从宏观物体的天体碰撞到微观物体的粒子间碰撞都是物理学极其重要的研究内容.通常碰撞过程十分短暂,而碰撞物体间的冲力远比物体所受的其他作用力大得多.因此在处理物体的碰撞时,一般将相互碰撞的物体作为一个孤立系统,只考虑系统内物体间的相互作用内力,而忽略其外力,系统的动量守恒.设质量分别为 m_1 和 m_2 的两物体,在碰撞前的速度分别为 v_{10} 、 v_{20} ,碰撞后的速度分别为 v_1 、 v_2 ,则根据动量守恒,可得

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (1)$$

如果碰撞后两物体的机械能完全没有损失,这种碰撞称为**完全弹性碰撞**;如果碰撞后体系机械能有损失,则称为**非弹性碰撞**.如果两物体在碰撞后以同一速度运动,则称为**完全非弹性碰撞**.如果两物体碰撞前后的速度和碰撞时的相互作用冲力都在一条直线上,则这种一维碰撞称为**对心碰撞**.

在完全弹性碰撞时,碰撞前后两物体机械能守恒,即

$$\frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (2)$$

如果两物体质量相等 $m_1 = m_2$,则在完全弹性对心碰撞后,两物体交换速度,即 $v_1 = v_{20}$, $v_2 = v_{10}$.

2. 平抛运动

抛体运动是由沿水平方向的匀速运动和沿竖直方向的自然加速运动组成的.如果物体以一定的初速度沿水平方向抛出,仅在重力作用下运动,这样的运动叫做平抛运动.

平抛运动可以看作水平方向的匀速直线运动以及竖直方向的自由落体运动的

NOTE

合运动,运动轨迹为抛物线.平抛运动的时间仅与抛出点的竖直高度 y 有关,

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度.物体落地的水平位移 x 与时间(竖直高度)及水平初速度 v_{x0} 有关,即

$$x = v_{x0}t \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可得,平抛运动的轨迹为一抛物线

$$y = \frac{g}{2v_{x0}^2}x^2 \quad (5)$$

任何物体系统在势能和动能相互转化过程中,如果所有外力和非保守内力都不做功,则系统的机械能守恒.在不考虑空气阻力对抛体运动的影响时,随着物体高度的变化,物体的动能和势能相互转化,系统的势能和动能的总和保持不变.物体落地时,沿竖直方向的速度大小为

$$v_y = \sqrt{2gy} \quad (6)$$

在实际情况下,物体在空气中运动时,总会受到空气阻力的影响.由于空气阻力的耗散作用,平抛运动中物体的机械能将会受到损耗.通常,物体在空气中运动受到的阻力和物体本身的大小、形状、物体运动的速率、空气密度等因素都有关系.

四、实验装置介绍

碰撞打靶实验仪如图 1 所示,它由底盘(靶盒)、导轨、双线摆、装有小电磁铁的升降架、载球升降台等组成.

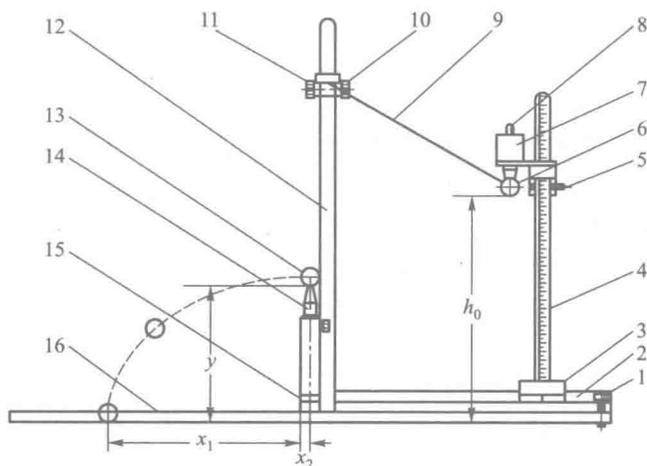


图 1 碰撞打靶实验仪示意图

1—水平调节螺钉;2—导轨;3—滑块;4—立柱(刻线尺);5—拧紧螺丝;6—摆球;7—电磁铁;8—衔铁螺钉;
9—摆线;10—拧紧螺钉;11—调节旋钮;12—立柱;13—被撞球;14—载球升降台;15—滑块;16—底盘(靶盒)

底盘是一个内凹式的盒体,是整个实验仪的基板,有三只螺丝用以调节仪器水平.

载球升降台,由圆柱形的外套、载球内柱及固定螺钉三部分组成.内柱可以在外套中自由升降,确定合适的高度后,再用固定螺钉把它固定.载球内柱上端为圆锥形平头状,以减小钢球与支柱接触面积,在被撞球受击运动时,减少摩擦力做功.

升降架上装有可上下升降的磁场方向与立柱平行的电磁铁,立柱上有刻度尺及读数指示移动标志.实验时,用细绳挂在杆上的摆球 A 被吸在磁铁下,切断电磁铁电源瞬间磁力消失,摆球 A 做自由下摆运动并对心撞击到被撞球 B,使被撞球 B 作平抛运动.靶盒内放有一张靶纸,可用来记录被撞球 B 的着地位置.

NOTE

五、实验内容及步骤

1. 实验内容

- (1) 理论推导,得到摆球高度 h_0 与被撞球高度 y 及落球点位置 x 的关系.
- (2) 研究质量、大小相同的两球之间的碰撞.
- (3) 研究质量、大小不相同的两球之间的碰撞.

2. 实验步骤

- (1) 推导出摆球高度 h_0 与被撞球高度 y 及落球点位置 x 的关系.
- (2) 调节实验仪底盘的螺丝使底盘水平.
- (3) 用天平称量摆球(可用大小、材料都与摆球相同的被撞球代替称量)的质量 m_1 及被撞球的质量 m_2 .
- (4) 在底盘的对称中心线上,选某一合适位置放置靶纸,以靶心为中心确定 x 值;然后根据步骤(1)推出的公式,确定被撞球的高度 y 及摆球的高度 h_0 .
- (5) 调节载球升降台的高度为 y ,调节摆球至 h_0 的高度被电磁铁吸住,同时系摆球的两根细绳要拉直,且使摆球在摆动至最低点和被撞球发生对心碰撞.
- (6) 切断电磁铁电源,让摆球撞击被撞球,记下被撞球击中靶纸的位置 x' (多次撞击求平均),据此计算出如果击中靶心需要增加摆球的高度 Δh .
- (7) 调整摆球的高度,再重复若干次实验,以确定能击中靶心的 h 值.
- (8) 改变靶心的位置 x (摆球的高度 h_0),重复步骤(4)~(7),观察摆球在碰撞前后的运动状态,分析各种能量损失的原因.
- (9) 换质量、大小不同的被撞球,重复上述实验步骤(3)~(8).

六、数据记录及数据处理

1. 数据记录

- (1) 导出摆球高度 h_0 与被撞球高度 y 及落球点位置 x 的关系

设载球升降台距离靶盒底部的高度为 y ,若使质量为 m_2 的被撞球落入靶盒时击中与载球升降台中轴线水平距离为 x 的靶心位置,在不计能量损失的条件下,计算质量为 m_1 的摆球距离靶盒底部的初始高度 $h_0 =$ _____;当 $m_1 = m_2$ 时, $h_0 =$ _____.

- (2) 质量、大小相同的两球碰撞($m = m_1 = m_2$)

相关数据记录于表 1 和表 2 中.

表 1 打靶前各参量测量值

摆球质量 m_1/g	摆球直径 d_1/mm	摆球高度 h_0/cm
被撞球质量 m_2/g	被撞球直径 d_2/mm	被撞球高度 y/cm
靶心位置 x_1/cm	载球升降台半径 x_2/cm	靶心位置 $x(=x_1+x_2)/cm$

NOTE

表 2 各次打靶测量数据

打靶组数	摆球高度 /cm		打靶次数	中靶环数	x_1/cm	x_2/cm	x/cm	平均值 \bar{x}/cm	实验标准差 $S(x)/cm$	$\Delta h/cm$
1	h_0		1							
			2							
			3							
	h		4							
			5							
			6							
2	h_0		1							
			2							
			3							
	h		4							
			5							
			6							
3	h_0		1							
			2							
			3							
	h		4							
			5							
			6							

(3) 质量、大小不相同的两球碰撞

实验内容与步骤同(2)质量、大小相同的两球碰撞,但要注意是在 $m_1 \neq m_2$ 、 $d_1 \neq d_2$ 情况下的实验.

2. 数据处理

(1) 计算碰撞过程中的总能量损失 $\Delta E = mg(h-h_0)$.

(2) 分析能量损失的原因.

(3) 总结碰撞中的能量损失大小与摆球高度、被撞球大小等物理量之间的关系.

七、注意事项

1. 摆球运动时,摆臂不得晃动,相关的固定螺丝必须拧紧.
2. 电磁铁吸住摆球时,摆线应处于直线状态,摆线不得有明显的松弛现象.

八、思考题

1. 质量相同的两球碰撞后,摆球的运动状态与理论分析是否一致? 为什么?
2. 如果不放被撞球,摆球在摆动回来时能否达到原来的高度? 为什么?
3. 绳的张力对小球是否做功? 为什么?

实验三 单摆运动特性的研究

一、实验目的

1. 掌握光电计时仪的使用方法；
2. 利用单摆测量当地重力加速度；
3. 利用最小二乘法进行实验数据处理.

二、实验仪器

单摆测量仪、光电计时计数毫秒仪、游标卡尺、米尺.

三、实验原理

用一根不可伸长的细绳悬挂一个质量为 m 的小球,如图 1 所示,如果细绳的质量比小球的质量小得多,而小球的直径比细绳的长度小得多,可将小球视为质点,整个装置可以视作单摆.

忽略空气阻力和浮力,小球只受重力和悬线拉力作用,在竖直平面内沿圆弧摆动. 小球在摆动中相对于悬线竖直位置的角位移为 θ 时,受到垂直于绳的切向力的大小为 $F_t = mg \sin |\theta|$,且方向指向 $\theta=0$ 的平衡位置方向. 将 $\sin \theta$ 在 $\theta=0$ 的邻域内进行泰勒级数展开, $\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \dots$. 当角位移 θ 很小时,略去级数展开式中的高阶项,切向力可表示为

$$F_t = -mg\theta \quad (1)$$

切向力 F_t 是线性回复力,与角位移 θ 反号,所以单摆作简谐振动. 设悬线长度为 l ,根据牛顿第二定律,单摆的动力学方程为

$$F_t = -mg\theta = m \frac{d^2(\theta l)}{dt^2}$$

即

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l}\theta = 0 \quad (2)$$

方程的解为

$$\theta(t) = \theta_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (3)$$

式中 θ_0 是单摆的最大偏角(振幅), φ_0 是初相位,两者均由摆球的初始运动状态决定. 而

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (4)$$

是单摆振动的角频率,由系统本身性质决定, l 是单摆的摆长,其长度为悬挂点 O 到小球球心的距离, g 是重力加速度,由此可知,单摆简谐振动的周期为

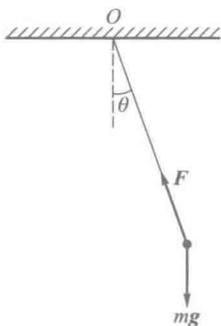


图 1 单摆示意图

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (5)$$

单摆的振动周期 T_0 只与摆长 l 和重力加速度 g 有关, 因此, 只要我们测量出单摆的振动周期 T_0 与摆长 l 的值, 就可以计算出重力加速度 g .

重力加速度是一个重要的地球物理常量, 准确测定它的量值, 无论在理论上, 还是在科研和工程技术等方面都有极其重要的意义. 重力加速度 g 的大小一般由物体所在地区的纬度、海拔高度以及矿藏分布等因素决定. 单摆实验通常限于在小角度 ($<5^\circ$) 摆动的情況下对小球振动周期进行测量.

在单摆角振幅大于 5° 的情况下, 小角度近似失效, 此时单摆的运动和简谐振动的差异增大. 要研究振动周期与摆角之间的关系, 必须在不同摆角、甚至在大摆角下进行单摆振动周期的测量. 不考虑单摆运动过程中所受的摩擦阻力, 对单摆与地球组成的系统应用机械能守恒定律, 有

$$\frac{1}{2}ml \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - mgl \cos \theta = 0 - mgl \cos \theta_0 \quad (6)$$

此时, 单摆为非线性摆. 利用雅可比椭圆函数求解方程 (6), 可得单摆的振动周期为,

$$T = T_0 \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 \frac{\theta_0}{2} + \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4} \right)^2 \sin^4 \frac{\theta_0}{2} + \dots \right] \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 当摆角较大时, 单摆的周期与角振幅有关, 随着角振幅的增大, 单摆振动周期增大.

当考虑空气阻尼的存在时, 摆角会随振动时间的增加而衰减, 于是一般无法对大角度摆动的周期进行精确测量. 采用光电传感器和多功能毫秒仪实现自动计时, 能在很短几个振动周期内准确测得单摆在大角度下的周期, 如此便可以忽略空气阻尼的影响, 研究振动周期与摆角的关系, 并精确地测量重力加速度.

四、实验装置介绍

1. 单摆实验仪

单摆实验仪如图 2 所示, 包括底座、立杆、单摆、水平直尺、光电门、小球限位装置、阻挡棒等.

2. 光电计时计数毫秒仪

光电计时计数毫秒仪的前面板如图 3 所示. FB213A 型光电计时计数毫秒仪具有两种“周期”和三种“计时”功能. 切换到两种“周期”功能时, 左侧窗口二位数数码管点亮, 可“预置”测量周期个数 $0 \sim 99$ 并显示, 随计数进程逐次递减至“1”, 计数停止, 恢复显示预置数. 切换到三种“计时”功能时, 左侧窗口二位数数码管熄灭.

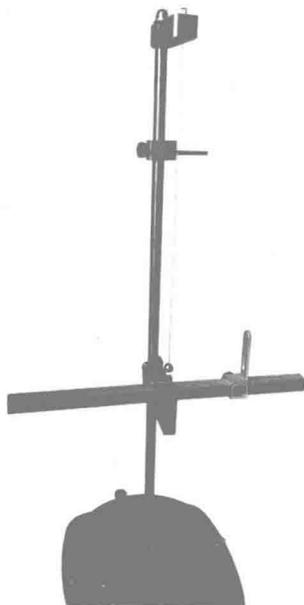


图 2 单摆实验仪

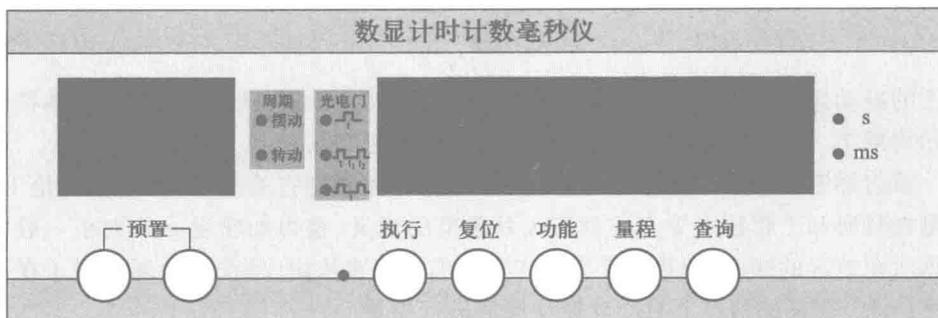


图3 光电计时计数毫秒仪前面板

在单摆实验中,选用“周期”功能中的“摆动”,预置好摆动周期次数(小球每来回摆动1次为1个周期).按“执行”键,“执行”工作指示灯亮(等待测量状态),由传感器启动测量,灯光闪烁,表示毫秒仪进入测量状态.电子计时器每计数一个周期,周期次数显示自动减1.在每个周期结束时,显示并存储该周期对应的时间值,在预设周期数执行完后,显示并存储总时间值,然后退出执行状态.在执行过程中,可以按“复位”键退出执行.执行结束后,逐次按“查询”键可以依次查询每个周期对应的时间值,在最后周期显示出总时间值.查询完毕后,按“复位”键退出查询.

五、实验内容及步骤

1. 实验内容

- (1) 测量不同摆长情况下,单摆的振动周期,并计算出重力加速度;
- (2) 测量单摆振动周期与角振幅之间的关系;
- (3) 测量组合式单摆的振动周期,并计算重力加速度(选做).

2. 实验步骤

- (1) 了解光电计时计数毫秒仪的功能和使用方法;
- (2) 熟悉单摆实验仪的结构和性能,调节实验仪底座水平;
- (3) 用游标卡尺测量小球直径,记录于表1中,重复测量多次求平均值;
- (4) 用钢卷尺测量悬线长度,记录于表2中,根据需要调节悬线长度;
- (5) 调整水平直尺及光电门的水平位置和高度,使光电门处于摆球正下方适当位置,摆球中部正好能挡光,从而能保证正常启动光电计时器;
- (6) 将光电计时计数毫秒仪的功能调至“周期”下的“摆动”,预置20个计时周期;
- (7) 将小球拉开一段距离,使小球与限位装置相切,并且角振幅 $\theta_0 < 5^\circ$;
- (8) 放开小球,让其在传感器所在竖直平面内摆动,按下“执行”按钮,计时器自动计数计时.
- (9) 测量角振幅 $\theta_0 < 5^\circ$ 情况下,单摆连续摆动20个周期所用的时间,在同一摆角处应多次测量,求出单摆振动周期的平均值;
- (10) 改变悬线长度,重复步骤(4)~(9),计算出不同摆长情况下,单摆的振

动周期 T ;

(11) 利用最小二乘法处理数据, 求出当地的重力加速度 g ;

(12) 利用三角函数关系, 计算出不同角振幅情况下, 悬线末端距离通过悬挂点 O 的竖直线的水平距离 X_0 , 记录于表 3 中;

(13) 测量不同角振幅情况下单摆的振动周期.

(14) 利用阻挡棒, 构成组合式单摆, 测量组合式单摆的振动周期, 步骤同 (4) — (9) (选做).

NOTE

六、数据记录及数据处理

1. 数据记录

表 1 小球直径

测量次数	1	2	3	平均值
小球直径 d/mm				

表 2 测量重力加速度 ($\theta_0 < 5^\circ$)

小球直径 $d = \underline{\hspace{2cm}}$ mm

悬线长度 L/cm	20	30	40	50	60	70	80	90
摆长 $l(=L+d/2)/\text{cm}$								
$20T/\text{s}$								
\bar{T}/s								

表 3 角振幅与振动周期之间的关系

悬线长度 $L = \underline{\hspace{2cm}}$ cm

θ_0	5°	10°	20°	30°	45°	60°	90°
悬线水平距离 X_0/cm							
$20T/\text{s}$							
\bar{T}/s							

2. 数据处理

(1) 作出摆长与振动周期平方的关系曲线 T^2-l ;

(2) 分别利用作图法和最小二乘法处理数据, 求出当地的重力加速度 g ;

(3) 利用三角函数关系, 计算出给定角振幅下, 悬线末端距离悬线竖直线的水平距离 X_0 ;

(4) 作出单摆的角振幅与振动周期之间的关系曲线 $T-\theta_0$.

七、注意事项

1. 必须保证小球在竖直平面内摆动,防止形成圆锥摆.
2. 水平直尺必须固定在距离摆球合适的位置.
3. 光电门与小球的相对位置务必调整到位,保证小球的摆动能启动光电计时器.
4. 要认真调整小球摆动的方向,保证小球在摆动时不会碰撞光电门.

八、思考题

1. 空气浮力对单摆运动周期有何影响?
2. 如何通过测得的角振幅与振动周期之间的关系求出重力加速度?

实验四 液体表面张力系数的测定

将一根缝衣针,轻轻地横放在水面上,就能把水面压出一条细小的沟,但针并不下沉.这一现象表明,液体表面处在张力状态中.对于液体边界上或液体表面上,任一条线的两侧物质,彼此之间有拉力作用,这个拉力处于液面平面内,并与该线垂直.表面张力 F 和线长 L 成正比,即

$$F = \sigma L \quad (1)$$

比例系数 σ 是作用在液体表面单位长度上的表面张力,称为表面张力系数,其单位是 N/m .

本实验采用拉脱法测定表面张力系数,也可以用毛细管法测定 σ .

一、实验目的

1. 用焦利秤测量微小力.
2. 测定弹簧的形变与拉力的关系,用作图法求出弹簧的劲度系数.
3. 用拉脱法测定水的表面张力系数,并观察杂质对表面张力的影响.

二、实验原理

将一洁净的金属丝框竖直地浸入水中,然后轻轻提起,丝框上就挂有一层水膜.水膜的两个表面沿长度 L 方向分布有表面张力 F , φ 为接触角,如图 1 所示.

当金属丝下形成两表面互相平行的水膜时,两表面作用在金属丝框上的总的表面张力为 $2\sigma L$,方向朝下.这时作用在金属丝框上的各力关系为

$$F_T = W + 2\sigma L \quad (2)$$

式中 F_T 为向上的拉力; W 为作用于金属丝框和水膜上的重力; L 为丝框上水平段的长度.

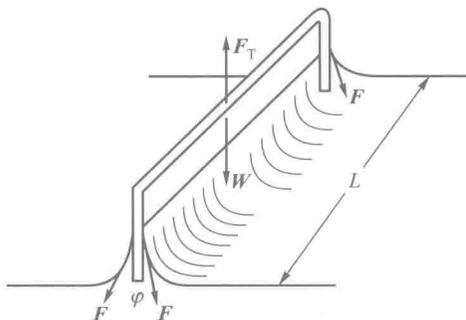


图 1 液体的表面张力

$$\sigma = \frac{F_T - W}{2L} \quad (3)$$

只要测得 $F_T - W$ 和 L ,即可求得 σ .

三、实验装置介绍

本实验用焦利秤测量 $F_T - W$,其结构如图 2 所示.转动旋钮 R,可以使带有米尺刻度的 M 杆上下移动.套管上附有游标 N.在 M 的横梁上,挂一个锥形弹簧 D. D 的下端挂一个带有水平刻线的指标杆,它可在刻有横线的玻璃管 C 中上下移动.指标

杆下端挂有砝码盘和金属丝框. 玻璃皿放在小平台 P 上, 移动 B 夹可粗调 P 的高度, 如需细调, 则可拧动螺钉 E. 仪器的垂直度由底脚螺旋 H 和 I 来调节.

四、实验内容及步骤

(1) 测量弹簧的劲度系数 k .

调节底脚螺旋 H 和 I, 使指标杆正处于玻璃管的中心并保持垂直.

将砝码放入砝码盘内, 每次 0.2 g, 直到 1.2 g 为止. 每次都要旋转 R, 使指标杆的刻线、玻璃管 C 的横线以及横线在镜面上的像重合 (以下简称三线对齐), 读出 M 杆上的标尺读数 l (重复测六次).

作 $mg-l$ 曲线. 以 mg 为纵轴, 以 l 为横轴. 求出直线的斜率, 即得到弹簧的劲度系数 k .

(2) 测量 F_T-W .

将盛有蒸馏水的玻璃皿放在平台 P 上, 使金属丝框浸入水中, 调节 A 夹, 使三线基本对齐.

慢慢旋转 R, 使金属丝框向上提起. 同时慢慢旋转 E, 使玻璃皿下降 (注意三线始终对齐), 直到水膜破裂为止. 记下此时 M 上的标尺读数 l_1 .

用吸水纸把丝框上的小水珠吸干. 旋转 R, 使三线重新对齐. 读出标尺读数 l_2 , 则

$$F_T - W = k(l_1 - l_2)$$

反复测量五次.

(3) 往水中滴入肥皂水, 重复上述测量.

(4) 测丝框水平段的长度以及水的温度.

(5) 按式(3)计算 σ .

五、数据记录及数据处理

1. 数据记录 (见表 1—表 3)

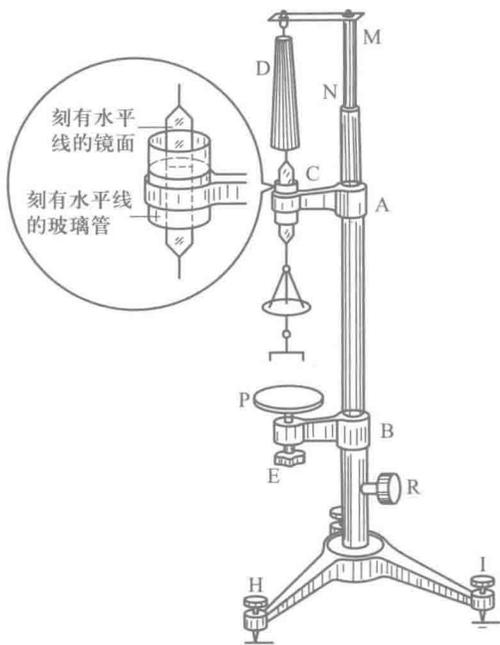


图 2 焦利秤

表 1 测量弹簧的劲度系数

砝码 m/kg						
重力 mg/N						
标尺刻度 l/m						

表 2 测量 F_T-W (水中)

丝框水平段长度 $L = \underline{\hspace{2cm}}$ cm 水温度 $t = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

次数 项目	1	2	3	4	5	平均	$S(l_1-l_2) =$
l_1							
l_2							
l_1-l_2							

表 3 测量 F_T-W (肥皂水中)

水温度 $t = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

次数 项目	1	2	3	4	5	平均	$S(l'_1-l'_2) =$
l'_1							
l'_2							
$l'_1-l'_2$							

2. 数据处理

(1) 在 $mg-l$ 曲线上取两点求劲度系数(依据 § 3.2 节作图法处理数据的有关内容进行).

(2) 求水的表面张力系数 σ

$$\sigma = \frac{\overline{F_T - W}}{2L} = \frac{k(\overline{l_1} - \overline{l_2})}{2L}$$

(3) 求肥皂水的表面张力系数 σ

$$\sigma = \frac{\overline{F'_T - W'}}{2L} = \frac{k(\overline{l'_1} - \overline{l'_2})}{2L}$$

(4) 水的表面张力系数 σ 的不确定度计算.

在这里不考虑劲度系数 k 的不确定度, 认为 σ 的不确定度主要由 l_1-l_2 的不确定度和 L 的不确定度决定.

l_1-l_2 的不确定度为

$$U_A(l_1-l_2) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(l_1-l_2), \quad U_B(l_1-l_2) = \sqrt{2} \Delta(l_1)$$

$$U(l_1-l_2) = \sqrt{U_A^2(l_1-l_2) + U_B^2(l_1-l_2)}$$

L 的不确定度主要由 B 类分量决定(因为是单次测量)

$$U(L) = U_B(L) = \Delta(L)$$

水的表面张力系数 σ 的不确定度为

$$U(\sigma) = \frac{k}{2L^2} \sqrt{[LU(l_1-l_2)]^2 + [(l_1-l_2)U(L)]^2}$$

测量结果为

$$\sigma = \sigma \pm U(\sigma)$$

(5) 肥皂水的表面张力系数 σ 的不确定度计算方法同上.

六、注意事项

1. 本实验所用的弹簧比较精密,取时用镊子夹,不要用手拿,更不应随意玩弄.
2. 杂质对表面张力系数的影响很大,因此器皿和金属丝框必须保持清洁.
3. 操作应轻缓,尤其是水膜将要破裂时,更应注意.

七、思考题

1. 金属丝框向上提起,水膜即将破裂时, $F_T = W + 2\sigma L$ 成立. 若过早读数,对实验结果有什么影响?
2. 试比较焦利秤与普通弹簧秤的特点与异同.
3. 在水中滴入几滴皂液(或将水加热)后,水的表面张力有什么变化? 由此可得出什么结论?

附录 不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 σ

温度/°C	$\sigma/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	温度/°C	$\sigma/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	温度/°C	$\sigma/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
0	75.62	15		24	72.12
5	74.90	16	73.34	25	71.96
6	74.76	17	73.20	30	71.18
8	74.48	18	73.05	40	69.55
10	74.22	19	72.89	50	67.91
11	73.92	20	72.75	60	66.17
12	73.78	21	72.60	70	64.40
13	73.64	22	72.44	80	62.60
14	73.48	23	72.28	90	60.74

实验五 静态法测量金属丝的杨氏模量

一、实验目的

1. 掌握拉伸法测量金属丝杨氏模量的方法；
2. 理解光杠杆测量微小长度变化的原理；
3. 学会用逐差法处理数据。

二、实验仪器

杨氏模量仪、光杠杆、尺读望远镜、钢卷尺、螺旋测微器和游标卡尺等。

三、实验原理

1. 杨氏模量

一根粗细均匀的金属丝或棒(设长度为 L , 截面积为 S), 两端受到沿长度方向的外力 F 作用, 其长度发生变化(伸长或缩短), 伸缩量为 ΔL . F/S 是物体单位面积上的作用力, 称为应力; $\Delta L/L$ 是单位长度上的伸缩量, 称为应变. 根据胡克定律可知, 在弹性限度内, 其两端的应力与应变成正比, 即

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

因为应变是量纲为一的量, 所以杨氏模量 E 的量纲与应力相同, 在 SI 中, E 的单位为 $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$. 杨氏模量是沿纵向的弹性模量, 它是表征在弹性限度内固体材料抗拉或抗压变形能力大小的物理量. 杨氏模量与材料的结构、化学成分及制造方法有关, 是工程技术中常用的力学参量. 它的测定对研究金属材料、光纤材料、半导体、纳米材料、聚合物、陶瓷、橡胶等多种材料的力学性质有着重要意义.

研究表明: ① 杨氏模量的数值与待测物体的具体尺寸无关, 只依赖于待测材料本身的物理性质; ② 杨氏模量与某线性工件的弹性系数 κ 之间的关系是

$$\kappa = \frac{ES}{L}$$

测量杨氏模量的方法一般有静力学拉伸法、梁弯曲法、动力学共振法、内耗法等, 本实验采用拉伸法测定金属丝的杨氏模量. 根据公式(1), 只要测出金属丝的原长 L 、截面积 S 、伸长量 ΔL 和受到的拉力 F , 就可以计算出杨氏模量 E . 但是在这些待测量的物理量中, 只有金属丝长度的伸长量 ΔL 非常小, 不能用普通的长度测量仪器直接测量, 因此必须用光杠杆把长度的微小伸长量 ΔL 放大来间接测量.

2. 光杠杆的原理

如图 1(a) 所示为杨氏模量仪, 图中待测金属丝上端固定于夹子 A, 下端固定有夹头 E, 夹头 E 可随金属丝的伸缩而上下无摩擦移动. 光杠杆[图 1(c)]是一个

带平面镜的支架, 支架的两前支点 b 和 b' 放在固定平台 G 的凹槽内, 后支点 a 放在夹头 E 上. 当金属丝下端没加砝码时, 金属丝为原长, 此时光杠杆的平面镜 M 处于竖直状态, 尺读望远镜 [图 1(b)] 的标尺上某一刻度线通过平面镜反射后刚好成像到望远镜物镜的十字叉丝中央, 从望远镜中观察到该读数, 记作 x_0 . 当金属丝下端加挂砝码时, 金属丝伸长, 光杠杆后支点 a 也随之向下移动, 从而平面镜产生一个小的偏转角度 α , 如图 2 所示, 此时从望远镜中观察到标尺上另一个刻度线, 读数变为 x_i . 根据光的反射定律, 保持入射光线方向不变, 当平面镜转动 α 角时, 则反射光线转动 2α 角, 由几何关系可得

$$\tan \alpha = \frac{\Delta L}{R}$$

$$\tan 2\alpha = \frac{|x_i - x_0|}{D} = \frac{\Delta x_i}{D}$$

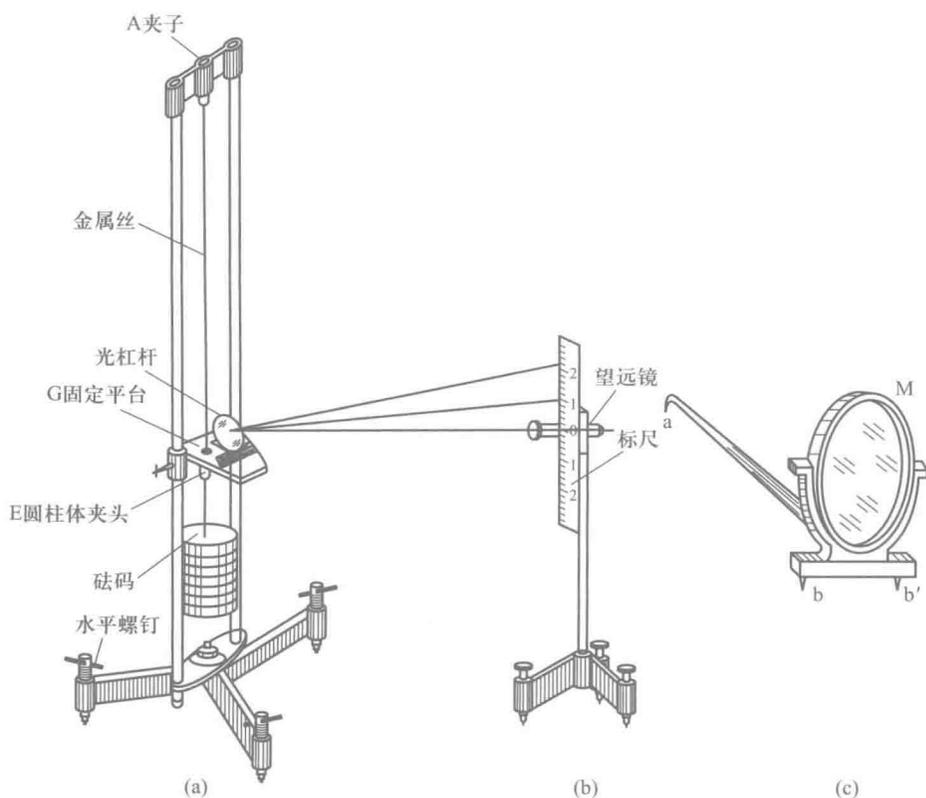


图 1 杨氏模量实验装置示意图

R 为光杠杆后支点 a 到两前支点 b 和 b' 连线的垂直距离, D 为平面镜与标尺之间的距离. 由于金属丝伸长量 ΔL 很小, 平面镜偏转的角度 α 也很小, 有 $\tan \alpha \approx \alpha$, $\tan 2\alpha \approx 2\alpha$, 故近似可得

$$\alpha = \frac{\Delta L}{R}, \quad 2\alpha = \frac{\Delta x_i}{D}$$

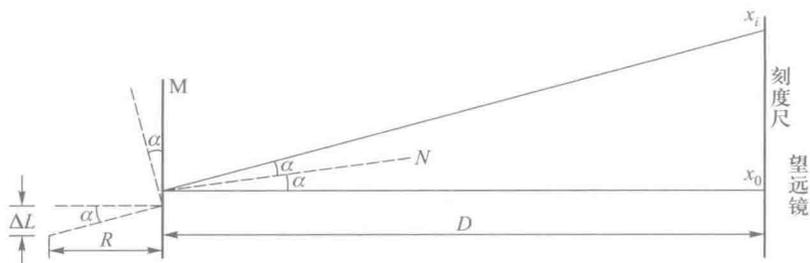


图2 光杠杆原理示意图

联立两式消去 α , 得

$$\Delta L = \frac{R}{2D} \Delta x_i \quad (2)$$

虽然 ΔL 作为长度的微小变化量不容易直接测量, 但是经过光杠杆放大 $2D/R$ 倍后的 Δx_i 作为一个较大的量, 可以通过标尺读数得到. 将式(2)代入式(1), 得

$$E = \frac{F}{S} \frac{L}{\Delta L} = \frac{F}{S} \frac{L}{\frac{R \Delta x_i}{2D}}$$

设金属丝直径为 d , 则截面积 $S = \frac{1}{4} \pi d^2$, 代入上式整理得

$$E = \frac{8FLD}{\pi d^2 R \Delta x_i} \quad (3)$$

这是本实验测量杨氏模量的计算公式.

四、实验装置介绍

1. 杨氏模量仪

如图 1(a) 所示, 其底座上有三个水平螺钉, 调节螺钉可使仪器保持竖直状态. 底座上的两根立柱上部有一横梁, 横梁上的夹子 A 将待测金属丝的上端固定, 金属丝下端固定在夹头 E 上. 为使金属丝保持伸直状态, E 下端挂有砝码钩, 砝码钩上可以添加砝码, E 正好穿过固定平台 G 中部圆孔.

2. 尺读望远镜和光杠杆

(1) 如图 1(b) 所示, 尺读望远镜是带有标尺和望远镜的支架, 支架底部有三个水平螺钉, 用于调整标尺处于竖直状态, 支架中部固定有望远镜和标尺, 二者的上下位置分别可调, 望远镜水平位置的俯仰角度也可调.

(2) 如图 1(c) 所示, 光杠杆是一个带平面镜的支架, 支架的两前支点 b 和 b' 放在固定平台 E 的凹槽内, 后支点 a 放在夹头 E 上.

五、实验内容及步骤

1. 实验装置调整

(1) 调节杨氏模量仪底座水平螺丝使待测金属丝处于竖直状态.

(2) 将光杠杆放在固定平台 G 上,两前支点 b 和 b' 放在固定平台 G 的凹槽内,后支点 a 放在夹头 E 上,调整平面镜镜面大致处于竖直状态.

(3) 将尺读望远镜置于光杠杆前 1.5 ~ 2 m 处,标尺面对平面镜;调整尺读望远镜支架底部水平螺丝,保持标尺竖直;调整望远镜上下位置与平面镜位于同一高度.

(4) 望远镜瞄准平面镜(即望远镜、瞄准准星、平面镜三点一线),从望远镜外侧沿镜筒轴线方向应看到平面镜中有标尺的像.如仅见到桌面或天花板,应微小幅度改变平面镜的仰俯角度;如仅见到标尺附近物体,则只需轻微左右平移尺读望远镜,直至沿望镜外侧可以直接看到标尺的像为止.

(5) 先调整目镜焦距旋钮使望远镜视场中的黑色“十”字叉丝最为清晰,然后调整物镜焦距旋钮直到视场中标尺的像也变清晰.如果从望远镜中观察到标尺的像上部或下部模糊,则望远镜水平位置可能需要通过仰俯角螺丝进行适当调整,直到视场中标尺的上下部分均很清晰.

(6) 当观察者眼睛上下晃动时,望远镜视场中标尺刻度线的像和叉丝间相对位置无偏移,称为无视差.如果有视差,则要再反复几次调节目镜和物镜焦距旋钮,直到消除视差为止.

2. 数据测量

(1) 测量望远镜中观察到的标尺刻度线.

调整标尺上下位置,使得砝码钩上无砝码时和加上 7 kg 砝码时,从望远镜中都可以观察到刻度线.从砝码钩上加有 7 kg 砝码开始,逐次减少 1 kg 砝码,并分别记下相应读数 x_{-i} ($i=7,6,\dots,1,0$).然后再逐次增加 1 kg 砝码,相应标尺读数为 x_{+i} ($i=0,1,\dots,6,7$).其中 $i=0$ 时,砝码钩上无砝码,砝码钩质量为 m_0 ,记录于表 1 中.

注意:加减砝码动作要轻,避免光杠杆后支点 a 发生移动;加减砝码过程要有序连贯,不得中途倒转;实验过程中,整个实验装置必须保持稳定,不得发生变动.

(2) 用米尺测量 L, D 各一次.

(3) 将光杠杆取下放在纸上,压出三个足痕,画出后支点到两前支点连线的垂线.用游标卡尺测出垂直距离 R , 单次测量.

(4) 用螺旋测微器测量金属丝直径,在不同位置测量五次,记录于表 2 中.

六、数据记录及数据处理

表 1 钢丝伸长与外力关系表

两夹头之间钢丝长度 $L =$ _____ cm, 反射镜 M 到尺间的距离 $D =$ _____ cm;

光杠杆前后脚间垂直距离 $R =$ _____ cm.

序号	砝码质量 m_i	望远镜中读数 x/cm			$\Delta x_i/cm$
		减重 x_{-i}	加重 x_{+i}	$x_i = \frac{x_{-i} + x_{+i}}{2}$	
0	$m_0 =$				
1	$m_1 = m_0 + 1\ 000\ g =$				

续表

序号	砝码质量 m_i	望远镜中读数 x/cm			$\Delta x_i/cm$
		减重 x_{-i}	加重 x_{+i}	$x_i = \frac{x_{-i} + x_{+i}}{2}$	
2	$m_2 = m_0 + 2\ 000\text{ g} =$				
3	$m_3 = m_0 + 3\ 000\text{ g} =$				
4	$m_4 = m_0 + 4\ 000\text{ g} =$				
5	$m_5 = m_0 + 5\ 000\text{ g} =$				
6	$m_6 = m_0 + 6\ 000\text{ g} =$				
7	$m_7 = m_0 + 7\ 000\text{ g} =$				

表中 $\Delta x_i = x_{i+4} - x_i = C_i$.

表 2 钢丝直径数据表

千分尺初读数 $d_0 =$ _____ cm

测量次数	1	2	3	4	5	平均
读数 d'/cm						
直径值 $(d' - d_0)/\text{cm}$						
$d_i^2 = (d' - d_0)^2/\text{cm}^2$						

对于本实验所得数据要求采用两种方法进行处理,分别计算待测金属丝的杨氏模量.

1. 用逐差法处理数据

(1) 计算 $\Delta x_i = x_{i+4} - x_i =$ _____ cm, $\Delta x = \frac{\Delta x_0 + \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3}{4} =$ _____ cm,

$E = \frac{8FLD}{\pi d^2 R \Delta x} =$ _____ N/m² (注意 F 为 4 个砝码的重量).

(2) 计算不确定度

因为 D, L, R 只测量了一次,故只有 B 类不确定度.

$U(D) = U_B(D) = \Delta(D) =$ _____ cm, $U(L) = U_B(L) = \Delta(L) =$ _____ cm,

$U(R) = U_B(R) = \Delta(R) =$ _____ cm.

d 的不确定度为

$U_A(d) =$ _____ cm, $U_B(d) = \Delta =$ _____ cm, $U(d) = \sqrt{U_A^2(d) + U_B^2(d)} =$ _____ cm.

C 的不确定度为

$U_A(C) =$ _____ cm, $U_B(C) = \Delta =$ _____ cm, $U(C) = \sqrt{U_A^2(C) + U_B^2(C)} =$ _____ cm.

E 的不确定度

$$\frac{U(E)}{E} = \left\{ \left[\frac{U(D)}{D} \right]^2 + \left[\frac{U(L)}{L} \right]^2 + \left[\frac{U(R)}{R} \right]^2 + \left[\frac{U(d)}{d} \right]^2 + \left[\frac{U(C)}{C} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$U(E) = E \left[\frac{U(E)}{E} \right] = \underline{\hspace{2cm}} \text{ N/m}^2$$

(3) 写出测量结果

$$E = E \pm U(E) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ N/m}^2$$

2. 用作图法处理数据

把式(3)改写为

$$\Delta x = \frac{8LD}{\pi d^2 RE} \Delta F = K \Delta F \quad (4)$$

式中 $K = \frac{8LD}{\pi d^2 RE}$, Δx 取值 $x_i - x_0$ (即 $x_1 - x_0, x_2 - x_0, x_3 - x_0, \dots$), ΔF 取值 $F_i - F_0$ (即 $F_1 - F_0, F_2 - F_0, F_3 - F_0, \dots$). 注意: $F_i = m_i g$.

以 Δx 为纵坐标, ΔF 为横坐标, 作图得到一条直线, 求出斜率 K , 即可算出杨氏模量 E 为

$$E = \frac{8LD}{\pi d^2 RK} \quad (5)$$

七、注意事项

1. 使用光杠杆系统测量时, 光杠杆的镜面 M 要与光杠杆和望远镜间的连线垂直, 望远镜的高度要与光杠杆的反射镜等高, 否则望远镜中看不到标尺的像.
2. 调节望远镜时, 要消除视差, 否则会影响读数的正确性.
3. 光杠杆、望远镜和标尺构成的光学系统一经调好, 在实验过程中就不可再移动, 否则所测数据无效.

八、思考题

1. 材料相同, 但粗细、长度不同的两根钢丝, 它们的杨氏模量是否相同?
2. 实验中测量不同的长度时为什么要使用不同的长度测量仪器? 分析实验结果中哪一项的误差最大? 能否进一步提高它的测量精度?
3. 本实验应用的“光杠杆”放大法与力学中的杠杆原理有什么异同?

实验六 落球法测定液体在不同温度下的黏度

黏度又称为黏性系数,不同液体具有不同程度的黏度.液体流动时,许多平行于流动方向的液层速度不同,形成速度梯度.由于速度梯度的存在,液体内各部分之间存在相对运动,接触面之间有内摩擦力,阻碍液体的相对运动,这种性质称为液体的黏性,液体的内摩擦力称为黏性力.黏性力的大小与接触面面积以及接触面处的速度梯度成正比,比例系数 η 称为黏度,它是表征液体黏性强弱的重要参量.对液体黏性的研究在流体力学、化学化工、医疗、水利等领域都有广泛的应用,例如在用管道输送液体时要根据输送液体的流量、压力差、输送距离及液体黏度来设计输送管道的口径;又如现代医学发现,许多心血管疾病和血液黏度的变化有关系,血液黏度的大小是检查人体是否健康的重要标志之一.

测量液体黏度可用落球法、毛细管法、转筒法等方法,其中落球法适用于测量黏度较高的液体.黏度的大小取决于液体的性质与温度,温度升高黏度将迅速减小.例如对于蓖麻油,在室温附近温度改变 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,黏度值改变约 10% .因此,测定液体在不同温度的黏度具有很大的实际意义,欲准确测量液体的黏度,必须精确控制液体温度.

一、实验目的

1. 用落球法测量不同温度下蓖麻油的黏度;
2. 了解 PID 温度控制的原理;
3. 练习用秒表计时,用螺旋测微器测直径.

二、实验仪器

变温黏度测量仪,ZKY-PID 温控实验仪,秒表,螺旋测微器,钢球若干.

三、实验原理

1. 落球法测定液体的黏度

一个在静止液体中下落的小球受到重力、浮力和黏性阻力的作用,如果小球的速度 v 很小,且液体可以看作是在各方向上都是无限广阔的,则从流体力学的基本方程出发可以得出表示黏性阻力的斯托克斯公式:

$$F = 3\pi\eta vd \quad (1)$$

其中 d 为小球直径.由于黏性阻力与小球速度 v 成正比,小球在下落很短一段距离后(参见附录的推导),所受三个力达到平衡,小球将以 v_0 匀速下落,则有

$$mg = \rho_0 g V + 3\pi\eta v_0 d \quad (2)$$

利用 $V = \frac{\pi}{6}d^3$, $m = \rho V$, 上式可得出黏度 η 的表达式:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0} \quad (3)$$

其中 ρ 为小球密度, ρ_0 为液体密度. 可见只要测得式(3)中右边各物理量的值, 便可求出液体的黏度.

本实验中, 小球是在直径为 D 的玻璃管中下落, 因而液体在各方向无限广阔的条件并不满足, 即小球会不可避免地受到容器壁及液体有限深度的影响, 因此黏度的表达式需修正为

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0(1 + 2.4d/D)} \quad (4)$$

如果小球的密度较大, 直径不是太小, 而液体的黏度值又较小时, 小球在液体中的平衡速度 v_0 会达到较大的值, 下式反映了液体运动状态对斯托克斯公式的影响:

$$F = 3\pi\eta v_0 d \left(1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2 + \dots \right) \quad (5)$$

其中 Re 称为雷诺数, 是表征液体运动状态的量纲为 1 的量, 有

$$Re = v_0 d \rho_0 / \eta \quad (6)$$

当 $Re < 0.1$ 时, 可认为式(1)、式(4)成立. 当 $0.1 < Re < 1$ 时, 应考虑式(5)中 1 阶修正项的影响, 当 $Re > 1$ 时, 还要考虑高阶修正项.

考虑式(5)中 1 阶修正项的影响及玻璃管的影响后, 黏度 η_1 可表示为

$$\eta_1 = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0 \left(1 + \frac{2.4d}{D} \right) \left(1 + \frac{3Re}{16} \right)} = \eta \frac{1}{1 + \frac{3Re}{16}} \quad (7)$$

由于 $3Re/16 \ll 1$, 将 $1/(1 + 3Re/16)$ 按幂级数展开后近似为 $1 - 3Re/16$, 式(7)又可表示为

$$\eta_1 = \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho_0 \quad (8)$$

以上分析可知, 测量得到 ρ 、 ρ_0 、 D 、 d 、 v_0 等参量后, 由式(4)计算出黏度 η , 再根据式(6)得出雷诺数 Re , 从而判断是否需要考虑修正项, 如果需要 1 阶修正则可由式(8)计算经修正的黏度 η_1 .

在国际单位制中, η 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕斯卡秒), 在厘米克秒制中, η 的单位是 P (泊) 或 cP (厘泊), 它们之间的换算关系是

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP} \quad (9)$$

2. PID 调节原理

PID 调节是自动控制系统中应用最为广泛的一种调节规律, 自动控制系统的原理可用图 1 说明. 被控量与设定值之间有偏差 $e(t) = \text{设定值} - \text{被控量}$, 调节器依据 $e(t)$ 及一定的调节规律输出调节信号 $u(t)$, 执行单元按 $u(t)$ 输出操作量至被控对象, 使被控量逼近直至最后等于设定值. 调节器是自动控制系统的指挥机构. 在我们的温控系统中, 调节器采用 PID 调节, 执行单元是由可控硅控制加热电流的加热器, 操作量是加热功率, 被控对象是水箱中的水, 被控量是水的温度. PID 调节器

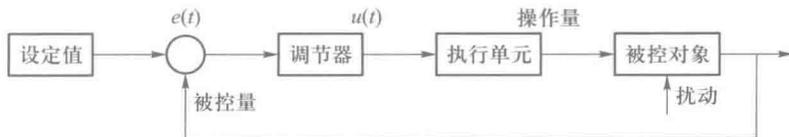


图1 自动控制系统框图

是按偏差的比例 (proportion)、积分 (integral)、微分 (differential) 进行调节, 其调节规律可表示为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (10)$$

式中第一项为比例调节, K_p 为比例系数. 第二项为积分调节, T_i 为积分时间常量. 第三项为微分调节, T_d 为微分时间常数. PID 温度控制系统在调节过程中温度随时间的一般变化关系曲线可用图 2 表示, 控制效果可用稳定性、准确性和快速性评价. 系统重新设定 (或受到扰动) 后经过一定时间的过渡过程能够达到新的平衡状态, 则为稳定的调节过程; 若被控量反复振荡, 甚至振幅越来越大, 则为不稳定调节过程, 不稳定调节过程是有害的, 故不能采用. 准确性可用被调量的动态偏差和静态偏差来衡量, 二者越小, 准确性越高. 快速性可用过渡时间表示, 过渡时间越短越好. 实际控制系统中, 上述三方面指标常常是互相制约, 互相矛盾的, 应结合具体要求综合考虑.

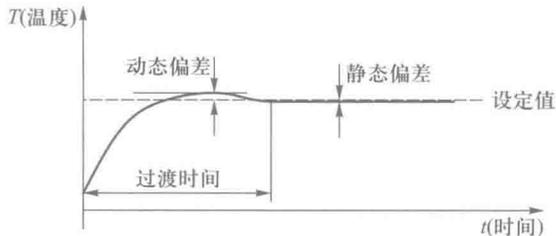


图2 PID 调节系统过渡过程

由图 2 可见, 系统在达到设定值后一般并不能立即稳定在设定值, 而是超过设定值后经一定时间的过渡过程才重新稳定, 产生超调的原因可从系统惯性、传感器滞后和调节器特性等方面予以说明. 系统在升温过程中, 加热器温度总是高于被控对象温度, 在达到设定值后, 即使减小或切断加热功率, 加热器存储的热量在一定时间内仍然会使系统升温, 降温有类似的反向过程, 称之为系统的热惯性. 传感器滞后是指由于传感器本身热传导特性或是由于传感器安装位置的原因, 使传感器测量到的温度比系统实际的温度在时间上滞后, 系统达到设定值后调节器无法立即作出反应, 产生超调. 对于实际的控制系统, 必须依据系统特性合理确定 PID 参量, 才能取得好的控制效果.

由式 (10) 可见, 比例调节项输出与偏差成正比, 它能迅速对偏差作出反应, 并减小偏差, 但它不能消除静态偏差. 这是因为任何高于室温的稳态都需要一定的输入功率维持, 而比例调节项只有偏差存在时才输出调节量. 增加比例调节系数 K_p

可减小静态偏差,但在系统有热惯性和传感器滞后时,会使超调加大.积分调节项输出和偏差与时间的积分成正比,只要系统存在偏差,积分调节作用就不断积累,输出调节量以消除偏差.积分调节作用缓慢,在时间上总是滞后于偏差信号的变化.增加积分作用(减小 T_I)可加快消除静态偏差,但会使系统超调加大,增加动态偏差,积分作用太强甚至会使系统出现不稳定状态.微分调节项输出与偏差和时间的变化率成正比,它阻碍温度的变化,能减小超调量,克服振荡.在系统受到扰动时,它能迅速作出反应,减小调整时间,提高系统的稳定性.

PID 调节器的应用已有一百多年的历史,理论分析和实践都表明,应用这种调节规律对许多具体过程进行控制时,都能取得满意的结果.

四、实验装置介绍

1. 落球法变温黏度测量仪

变温黏度仪的外形如图 3 所示.待测液体装在细长的样品管中,能使液体温度较快的与加热水温达到平衡,样品管壁上有刻度线,便于测量小球下落的距离.样品管外的加热水套连接至温控仪,通过热循环水加热样品.底座下有调节螺钉,用于调节样品管的竖直.

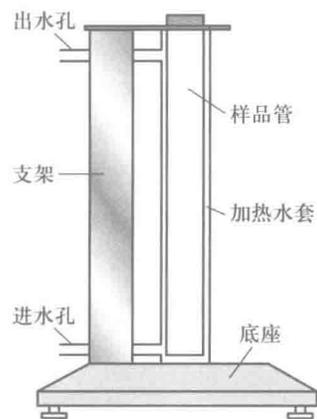


图 3 变温黏度仪

2. 开放式 PID 温控实验仪

温控实验仪包含水、水泵、加热器、控制及显示电路等部分.

本温控实验仪内置微处理器,带有液晶显示屏,具有操作菜单化,能根据实验对象选择 PID 参数以达到最佳控制,能显示温控过程的温度变化曲线和功率变化曲线及温度和功率的实时值,能存储温度及功率变化曲线,控制精度高等特点,仪器面板如图 4 所示.

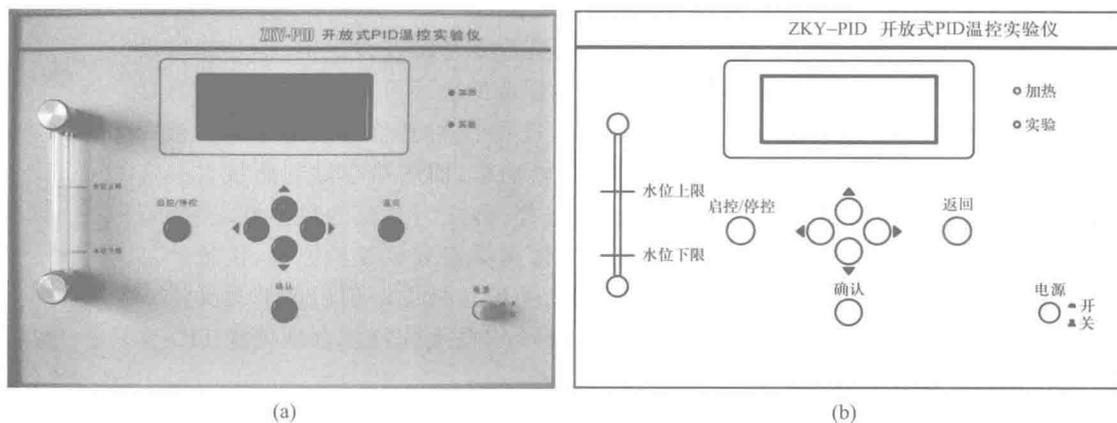


图 4 温控实验仪面板

开机后,水泵开始运转,显示屏显示操作菜单,可选择工作方式,输入序号及室温,设定温度及 PID 参量. 使用 ◀▶ 键选择项目, ▲▼ 键设置参量,按确认键进入下一屏,按返回键返回上一屏.

进入测量界面后,屏幕上方的数据栏从左至右依次显示序号、设定温度、初始温度、当前温度、当前功率、调节时间等参量. 图形区以横坐标代表时间,纵坐标代表温度(以及功率),并可用 ▲▼ 键改变温度坐标值. 仪器每隔 15 s 采集 1 次温度及加热功率值,并将采集的数据标示在图上. 温度达到设定值并保持 2 min,温度波动小于 0.1 °C,仪器自动判定达到平衡,并在图形区右边显示过渡时间 t_s 、动态偏差 σ 和静态偏差 e . 一次实验完成退出时,仪器自动将屏幕按设定的序号存储(共可存储 10 幅),以供必要时查看、分析、比较.

NOTE

3. 秒表

PC396 电子秒表具有多种功能. 按功能转换键,待显示屏上方出现符号“----”,且第 1 和第 6、7 短横线闪烁时,即进入秒表功能. 此时按开始/停止键可开始或停止计时,多次按开始/停止键可以累计计时. 一次测量完成后,按暂停/回零键使数字回零,准备进行下一次测量.

五、实验内容及步骤

1. 检查仪器后面的水位管,将水箱水加到适当值

平常加水从仪器顶部的注水孔注入. 若水箱排空后第 1 次加水,应该用软管从出水孔将水经水泵加入水箱,以便排出水泵内的空气,避免水泵空转(无循环水流出)或发出嗡鸣声.

2. 设定 PID 参量

本仪器的 PID 参量是通过理论分析和大量的实验得到的一个最符合本仪器的参量,已经达到最佳控制,故不可调节.

3. 测定小球直径

由式(6)和式(4)可知,当液体黏度及小球密度一定时,雷诺数 $Re \propto d^3$. 在测量蓖麻油的黏度时建议采用直径 1~2 mm 的小球,这样可不考虑雷诺修正或只考虑 1 级雷诺修正.

用螺旋测微器测定小球的直径 d ,将数据记入表 1 中.

4. 测定小球在不同温度液体中的下落速度并计算黏度

(1) 将水平仪放置于玻璃管的管口上,调节黏度测量仪地板上的螺丝,使水平仪气泡位于圆圈中央. 或者用如下方法判断水平:用镊子夹住小球沿样品管中心轻轻放入液体,观察小球是否一直沿中心下落,若样品管倾斜,应调节使其竖直.

(2) 设定温控仪温度,达到设定值后等待约 10 min,使样品管中的待测液体温度与加热水温完全一致,才能测液体黏度.

(3) 用挖油勺盛住小球,将其沿样品管中心轻轻放入液体,用秒表测量小球下落经过一段距离 $L_0 = 20$ cm 的时间间隔 t ,共测量 5 次,将数据记入表 2 中,取其平

均值 \bar{t} 用来计算小球速度 $v_0 = \frac{L_0}{\bar{t}}$, 根据公式(4)计算该温度下的黏度 η , 再由式(6)得出雷诺系数 Re 的大小, 判断是否需要黏度进行修正, 如需要则根据式(8)计算 η_1 , 记入表2中。测量过程中, 尽量避免对液体的扰动。

(4) 改变温控仪温度, 用磁铁沿玻璃管的外壁将小球从管口吸出, 重复操作步骤(2)一(3), 从而测量不同温度下的蓖麻油黏度。

(5) 实验全部完成后, 用磁铁将小球吸引至玻璃管口, 用镊子夹入塑料盒中保存, 以备下次实验使用。

六、数据记录及数据处理

表1 测量小球的直径

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
$d/(10^{-3} \text{ m})$									

表2 黏度的测量

温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/s						速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Re	$\eta_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
	1	2	3	4	5	平均				
25										
30										
35										
40										
45										
50										

距离 $L_0 = 20 \text{ cm}$, 小球密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 蓖麻油密度 $\rho_0 = 0.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 样品管直径 $D = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。

表3 不同温度下蓖麻油的黏度

$T/^{\circ}\text{C}$	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$								
4.5	4.00	13.0	1.87	18.0	1.17	23.0	0.75	30.0	0.45
6.0	3.46	13.5	1.79	18.5	1.13	23.5	0.71	31.0	0.42
7.5	3.03	14.0	1.71	19.0	1.08	24.0	0.69	32.0	0.40
9.5	2.53	14.5	1.63	19.5	1.04	24.5	0.64	33.5	0.35
10.0	2.41	15.0	1.56	20.0	0.99	25.0	0.60	35.5	0.30
10.5	2.32	15.5	1.49	20.5	0.94	25.5	0.58	40.0	0.23
11.0	2.23	16.0	1.40	21.0	0.90	26.0	0.57	42.0	0.20
11.5	2.14	16.5	1.34	21.5	0.86	27.0	0.53	45.0	0.15
12.0	2.05	17.0	1.27	22.0	0.83	28.0	0.49	48.0	0.10
12.5	1.97	17.5	1.23	22.5	0.79	29.0	0.47	50.0	0.06

数据处理:

(1) 表 3 中列出了不同温度下黏度的标准值,将表 2 中不同温度下黏度的测量值与标准值比较,并计算相对误差.

$$E_r = \left| \frac{\eta_{\text{测量}} - \eta_{\text{标准}}}{\eta_{\text{标准}}} \right| \times 100\%$$

(2) 以温度为横坐标,测量黏度为纵坐标,在坐标纸上作出蓖麻油的黏度随温度的变化曲线.

(3) 计算某一温度(如 35 °C)下黏度的不确定度.

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18\nu_0(1+2.4d/D)} = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2\bar{t}}{18L_0(1+2.4d/D)}$$

$$U(\eta) = \sqrt{\left[\frac{\partial \eta}{\partial d} U(d) \right]^2 + \left[\frac{\partial \eta}{\partial t} U(t) \right]^2}$$

$$U(d) = \sqrt{[U_A(d)]^2 + [U_B(d)]^2}$$

$$U(t) = \sqrt{[U_A(t)]^2 + [U_B(t)]^2}$$

结果: $\eta \pm U(\eta) =$

七、注意事项

1. 通电前,应保证水位指示在水位上限;若水位指示低于水位下限,严禁开启电源,必须先用漏斗加水;

2. 建议使用软水,避免产生水垢;

3. 安装时根据机壳背板示意图正确连线;

4. 仪器内部的加热棒长期浸泡在水里,可能会锈蚀,建议每三年更换一次;

5. 为保证使用安全,三芯电源线须可靠接地;

6. 测量小球通过两刻度线的时间时,观察者的视线必须与刻度线在同一水平面上,这是本实验的关键步骤,应仔细测量;

7. 由于 PID 温控实验仪只具备加热功能,不能制冷,因而待测样品的温度必须在室温以上;

8. 变温黏度测量仪的基座应保持水平状态(用镊子夹住小球沿样品管中心轻轻放入液体,观察小球是否一直沿中心下落,若样品管倾斜,应调节使其竖直);

9. 温控仪温度达到设定值后再等约 10 min,使样品管中的待测液体温度与加热水温完全一致,才能测液体黏度;

10. 测量过程中,尽量避免对液体的扰动.

八、思考题

1. 用何种方法来判断小球处于匀速状态?

2. 实验中,如果不设刻度线,而测量小球进入油面后到落至筒底的相应距离和时间,是否可以?为什么?

3. 如果小球靠近筒壁处下落,是否可以?

NOTE

4. 如果测量小球下落过程中,小球表面附有气泡,那么对测量结果有何影响?
5. 如何保证玻璃圆筒的中心轴线处于竖直?你能找出实验方法进行判断吗?
6. 对同一液体,小球直径的大小对终极速度有何影响?当液体温度改变时,小球的终极速度有何变化?
7. 测量小球下落的距离,你认为大些好还是小些好?为什么?
8. 加热时,如何判断液体的温度与加热水温一致?若不一致,测量数据会有何差别?

附录 小球在达到平衡速度之前所经路程 L 的推导

由牛顿运动定律及黏性阻力的表达式,可列出小球在达到平衡速度之前的运动方程:

$$\frac{1}{6}\pi d^3 \rho \frac{dv}{dt} = \frac{1}{6}\pi d^3 (\rho - \rho_0) g - 3\pi \eta r v \quad (11)$$

经整理后得

$$\frac{dv}{dt} + \frac{18\eta}{d^2 \rho} v = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) g \quad (12)$$

这是一阶线性微分方程,其通解为

$$v = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) g \cdot \frac{d^2 \rho}{18\eta} + C e^{-\frac{18\eta}{d^2 \rho} t} \quad (13)$$

设小球以零初速放入液体中,代入初始条件($t=0, v=0$),定出常量 C 并整理后得

$$v = \frac{d^2 g}{18\eta} (\rho - \rho_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{18\eta}{d^2 \rho} t}\right) \quad (14)$$

随着时间增大,式(14)中的负指数项迅速趋近于0,由此得平衡速度

$$v_0 = \frac{d^2 g}{18\eta} (\rho - \rho_0) \quad (15)$$

式(15)与正文中的式(3)是等价的,平衡速度与黏度成反比. 设从速度为0到速度达到平衡速度的99.9%这段时间为平衡时间 t_0 ,即令

$$e^{-\frac{18\eta}{d^2 \rho} t_0} = 0.001 \quad (16)$$

由式(16)可计算平衡时间.

若钢球直径为 10^{-3} m,代入钢球的密度 ρ ,蓖麻油的密度 ρ_0 及 40°C 时蓖麻油的黏度 $\eta = 0.231 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,可得此时的平衡速度约为 $v_0 = 0.016 \text{ m/s}$,平衡时间约为 $t_0 = 0.013 \text{ s}$. 平衡距离 L 小于平衡速度与平衡时间的乘积,在我们的实验条件下,小于 1 mm ,基本可认为小球进入液体后就达到平衡速度.

实验七 用惠斯通电桥测电阻

一、实验目的

1. 了解用惠斯通电桥测电阻的原理;
2. 掌握用线式和箱式惠斯通电桥测电阻的方法;
3. 掌握检流计的使用及保护方法.

二、实验仪器

线式惠斯通电桥;

稳压电压 $0 \sim 15 \text{ V}$ (可调), 0.5 A ;

AC5/2 型检流计, 分度值 $2 \times 10^6 \text{ A/格}$, 内阻 50Ω , 临界电阻 500Ω ;

ZX21 型电阻箱, $99\,999.9 \Omega$, 0.1 级, 0.25 W ;

QJ23 型箱式惠斯通电桥, 0.2 级;

保护电阻、金属膜电阻、导线、开关等.

三、实验原理

惠斯通电桥是一种精确测量电阻的装置.

电桥法测电阻的实质是将被测电阻与已知电阻相比较, 从而确定待测电阻的阻值. 制造高精度的电阻比较容易, 因此电桥法测电阻容易获得较高的测量精度.

直流电桥主要分为单臂电桥 (又称惠斯通电桥) 和双臂电桥 (又称开尔文电桥). 单臂电桥用于测量中值电阻 ($10 \sim 10^6 \Omega$), 双臂电桥用于测量 1Ω 以下的低值电阻.

惠斯通电桥的基本电路如图 1 所示. 电阻 R_1 、 R_2 、 R_x 、 R_s 组成电桥的四个桥臂, B 、 D 两点间接有检流计将两点的电势直接进行比较, 当两点电势相等时, 检流计 G 中无电流通过, 我们称电桥达到平衡. 这时有

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$I_1 R_x = I_2 R_s$$

由上两式得出电桥的平衡条件:

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_s} \quad \text{或} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_s}$$

平衡时, 若已知 R_s 、 $\frac{R_1}{R_2}$, 则可求得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s \quad (1)$$

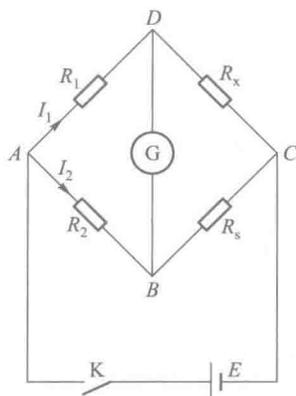


图 1 惠斯通电桥基本电路

式中 $\frac{R_1}{R_2}$ 称为比率或比率臂, R_s 为标准电阻, 称为比较

臂, R_x 称为测量臂。

使用线式惠斯通电桥测电阻 R_x 时的电路如图 2 所示, B 点为滑动按键, 其触点将 AC 间电阻丝分为 L_1 和 L_2 两段, 对于电阻率和横截面积都均匀的电阻丝, 则

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

所以电桥平衡时式(1)变为

$$R_x = \frac{L_1}{L_2} R_s \quad (2)$$

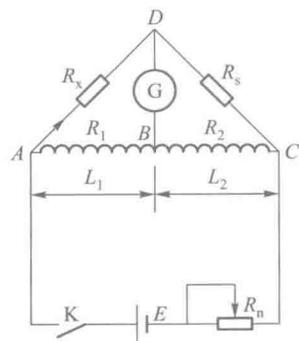


图 2 线式惠斯通电桥电路

式(2)是根据理想情况得出的, 实际上, 由于长期使用, 电阻丝受到磨损而导致电阻分布不均匀, 此时再根据式(2)计算, 必然会对测量结果引进一定的系统误差。为了消除这种系统误差, 我们可以采用换位测量法。保持 L_1/L_2 的比值不变, 即保持按键 B 位置不动, 然后将 R_x 与 R_s 交换位置, 再调节 R_s 使电桥重新平衡, 设此时 R_s 变为 R'_s , 则有

$$R_x = \frac{L_2}{L_1} R'_s \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得

$$R_x = \sqrt{R_s R'_s} \quad (4)$$

从式(4)可看出, 通过换位测量法求出的 R_x 值仅与 R_s 和 R'_s 有关, 与 B 的位置(即 L_1 和 L_2 的长度)无关, 从而消除了电阻丝阻值不均匀引起的系统误差。

在实际工作中, 箱式惠斯通电桥的应用更加广泛。它是将电源、开关、比较臂电阻、比率臂和检流计等集中在一个箱子里。其基本原理与线式惠斯通电桥一样。其详细介绍在实验装置介绍中可见。

1. 电桥灵敏度

电桥是否平衡是依据检流计指针是否偏转来判断的。当检流计指针偏转较小, 人眼无法分辨时, 就会产生系统误差。为了估计这个误差, 我们引入电桥灵敏度这个概念。当电桥达到平衡后, 若比较臂电阻 R_s 有微小的改变量 ΔR_s , 检流计将有相应的偏转格数 Δn , 则定义此电桥(绝对)灵敏度为

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_s} \quad (5)$$

如果 R_s 在较大范围内变化尚不能引起检流计指针反应, 则说明此电桥灵敏度较低。提高电桥灵敏度的方法主要有: 适当增大电桥工作电压、适当减小比较臂电阻值以及选取高灵敏度低内阻的检流计等。

人们在判断检流计偏转时因为存在视差而给测量结果引进一定的误差, 一般检流计指针偏转 0.2 格时人眼便可察觉, 所以由电桥灵敏度引起的误差限为

$$\Delta_s = \frac{0.2}{S} \quad (6)$$

2. 电阻箱仪器误差限

电阻箱的仪器误差限计算公式为

$$\Delta_1(R) = \sum a_i \% R_i + R_0 \quad (7)$$

式中 a_i 为电阻箱各示值盘的准确度等级; R_i 为电阻箱各示值盘表示的阻值; R_0 为残余电阻. 有的电阻箱将各电阻盘视为同一级别, 直接给出一个准确度等级; 有的则用铭牌标出各电阻盘的不同准确度等级, 如图 3 所示的 ZX-21 型电阻箱的铭牌, 第一行是各电阻盘的倍率, 第二行是以百万分数 (10^{-6}) 表示的准确度. 以 $\times 10\,000$ 倍率的电阻盘为例, 有

$$a_i \% = 1\,000 \times 10^{-6} = 0.1\%$$

则 $\times 10\,000$ 倍率电阻盘的准确度等级 $a = 0.1$. 同理可得其他各电阻盘的准确度等级: $\times 10\,000 \sim \times 100$ 各电阻盘均为 0.1 级, $\times 10$ 电阻盘为 0.2 级, $\times 1 \sim \times 0.1$ 电阻盘均为 0.5 级.

$\times 10\,000$	$\times 1\,000$	$\times 100$	$\times 10$	$\times 1$	$\times 0.1$
1 000	1 000	1 000	2 000	5 000	5 000 $\times 10^{-6}$
$R_0 = (20 \pm 5) \text{ m}\Omega$					

图 3 ZX-21 型电阻箱的铭牌

例如, ZX-21 型电阻箱的阻值为 148.5Ω 时, 由式(7)可知, 其仪器误差限为

$$\begin{aligned} \Delta_1(R) &= \sum a_i \% R_i + R_0 \\ &= (0.1\% \times 100 + 0.2\% \times 40 + 0.5\% \times 8 + 0.5\% \times 0.5 + 0.02) \Omega = 0.265 \Omega \end{aligned}$$

或直接用铭牌上第二行数值计算

$$\begin{aligned} \Delta_1(R) &= (1\,000 \times 10^{-6} \times 100 + 2\,000 \times 10^{-6} \times 40 + 5\,000 \times 10^{-6} \times 8 + \\ &\quad 5\,000 \times 10^{-6} \times 0.5 + 0.02) \Omega \\ &= 0.265 \Omega \end{aligned}$$

式中 0.02Ω 为残余电阻 R_0 .

3. 箱式电桥仪器误差限

箱式电桥的仪器误差限计算公式为

$$\Delta_1(R_x) = a \% \left(R_x + \frac{R_0}{10} \right) \quad (8)$$

式中 a 为准确度级别, R_x 为测量值, R_0 为箱式电桥有效量程的基准值.

四、实验装置介绍

1. 线式惠斯通电桥

如图 4 所示, 线式惠斯通电桥由长度为 100.0 cm 的电阻丝、米尺及接线柱等组成. 各接头之间均用镀铬铜片连接, 以减少接触电阻. 滑键 B 位于电阻丝上方, 可在导轨上沿着电阻丝和米尺滑动, 其上面有一按钮, 当按下它时, 接触点才与电阻丝上某一点接触.

图4为线式惠斯通电桥电路连接图,电路中的滑线变阻器 R_n 主要作用是控制整个回路的电流,以调整电桥的灵敏度.本实验控制电流为0.2 A左右,开关K是为了切断电源,因为在不测量时,应尽可能断开电源,以免电阻丝发热,影响测量的准确度.

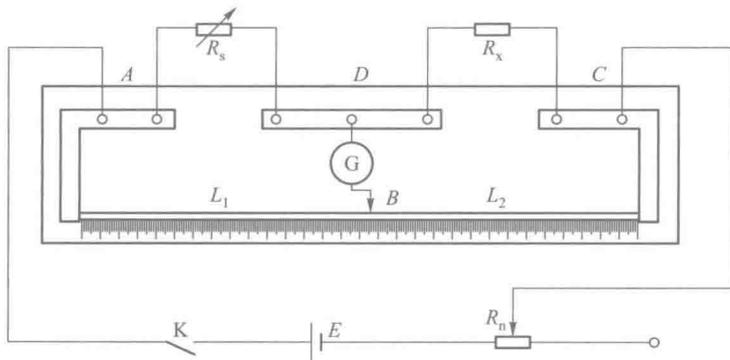


图4 线式惠斯通电桥电路连接图

2. QJ23 型箱式惠斯通电桥

QJ23 型箱式惠斯通电桥电路及板面布置如图5所示,比率臂 N (相当于图1中的 R_1/R_2)、比较臂电阻 R_x 、检流计及电源等都装在一个箱子里,测量 $1 \sim 10^6 \Omega$ 范围内的电阻时极为方便,该电桥准确度等级为0.2级,被测电阻为 $10 \sim 9999 \Omega$ 时,用内部电源和内附检流计测量结果的相对误差可近似为 $\pm 0.2\%$.

QJ23 型箱式电桥面板各旋钮和接线柱的功用如下:

- (1) R_x : 为被测电阻接线柱.
- (2) B^+ 、 B^- : 外接电源接线柱. 如用增加电源电压的办法来测量时,在这里按正、负接上外接电源,此电源即与内部4.5 V电源串联,特别注意外接电源时,金属连接片必须拿开. 若只用内部电源时,应用连接片接与该两接线柱之间.

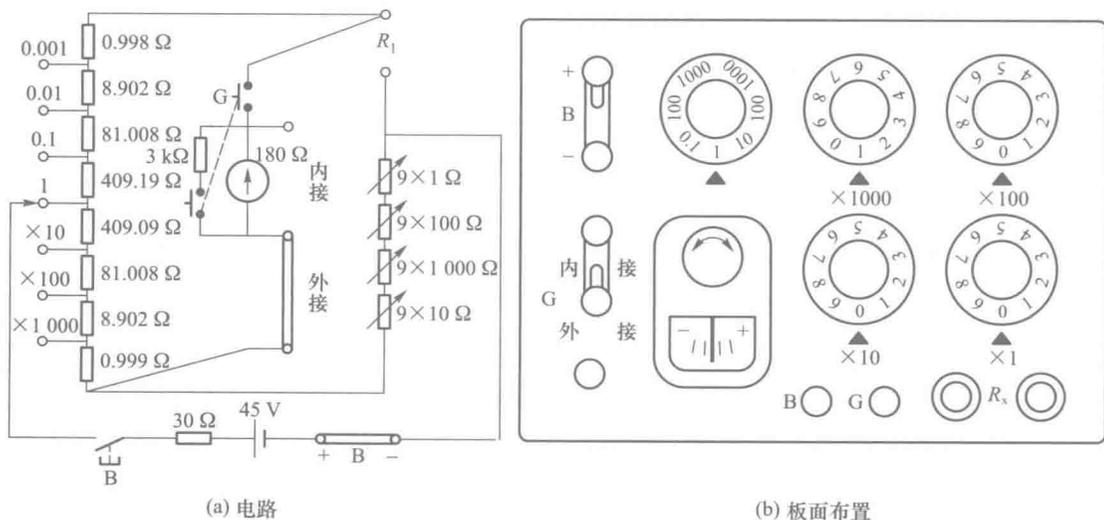


图5 箱式惠斯通电桥电路及板面布置图

(3) G 外接:外接检流计接线柱.当所需电桥灵敏度不够时,可在这里另接灵敏度更高的检流计.当用内附检流计时,应用连接片接于该接线柱之间.

(4) G 内接:用外接检流计时,需用连接片接于该两接线柱之间.使用完电桥或搬动电桥时,应将连接片接于该两接线柱之间,使内附检流计短路.

(5) B 按钮:电源按接开关.按下 B 则电源接入电路.若需长时间接通电源,按下 B 顺时针转 90° 即可锁住.

(6) G 按钮:检流计按接开关.按下 G 则检流计接入电路.若需长时间接通检流计,可按下 G 顺时针转 90° 锁住.

(7) 比较臂旋钮 R_x :用法同电阻箱.

(8) 比率臂旋钮 N : N 等于原理图中的 R_1/R_2 ,其值可以直接从比率臂旋钮上读出.被测电阻 $R_x = NR_x$.

(9) 调零旋钮:利用检流计上面的圆形旋钮,可以左右微调检流计指针位置,使指针指在零点,转动时要轻微、缓慢,以免扭断检流计旋丝.

五、实验内容及步骤

1. 用线式惠斯通电桥测量金属膜电阻 R_1 、 R_2 的电阻值.

(1) 按图 4 连接电路,断开开关 K.

(2) 滑线变阻器 R_n 起到调节电桥工作电流的作用,先将其置于最大阻值.

(3) 调整稳压电源指示为 3 V.

(4) 将滑动按键 B 移至中间位置附近,调节电阻箱 R_x 阻值等于 R_x 的估计值.

(5) 闭合开关 K,用点接法按下按键 B(按下后立即松开),观察检流计是否偏转,适当改变 R_x 值使检流计偏转幅度减小.我们采用逐步逼近法改变 R_x 值使电桥平衡.若 R_x 取较小阻值 R_{01} 时检流计指针向“+”方向偏转,取较大阻值 R_{02} 时指针向“-”方向偏转,则接下来 R_x 值应取 R_{01} 和 R_{02} 的中间值 R_{03} ,即 $R_{03} = (R_{01} + R_{02})/2$. R_x 值取 R_{03} 时,若检流计指针向“+”方向偏转,则接下来 R_x 值应取 R_{03} 和 R_{02} 的中间值,若指针向“-”方向偏转,则应取 R_{03} 和 R_{01} 的中间值.如此重复调节使阻值范围不断缩小,可快速找到平衡点.

(6) 减小 R_n ,调节 R_x 使电桥重新平衡.如此不断减小 R_n 直至为零,记下电桥平衡时的 R_x 值.

(7) 保持按键 B 位置不变,将 R_x 与 R_n 位置交换,重复上述步骤并记下 R'_x 值.

(8) 用上述方法测量另一只待测电阻.

(9) 测量电桥灵敏度.电桥平衡后,改变 R_x 到 $R_x + \Delta R_x$,使检流计指针偏转 5 格(即 $\Delta n = 5$),记下 ΔR_x . 数据记录于表 1 中.

2. 用箱式电桥测 R_1 和 R_2 的阻值,以及 R_1 和 R_2 的串联和并联电阻值.

(1) 放平电桥,断开内接检流计连接片,按要求接好电源连接片和检流计连接片.让检流计指针自由摆动,待表针停稳后,就可调整调零旋钮.

(2) 在 R_x 两接线柱间接上被测电阻.

(3) 根据待测电阻的大致数值(可参看标称值或万用表粗测).选择合适的比率

臂,使测量结果保持四位有效数字,也就是使比较臂电阻 R_s 保持千欧姆的数量级,例如被测电阻为几十欧姆, R_s 要保持几千欧姆,根据 $R_x = NR_s$, N 应取 0.01. 测量时用点接法按下 B 和 G 按钮(按下后立即松开),若指针偏向“+”方向,则增加 R_s 的数值;若偏向“-”方向,则减小 R_s . 反复调节直至电桥平衡. 记下比率臂 N , 调节臂 R_s 的阻值.

(4) 用上述方法依次测出另一电阻,以及这两个电阻串联和并联的电阻值. 数据记录于表 2 中.

(5) 使用完毕,必须断开 B 和 G 按钮,并将检流计连接片接在“内接”位置,以保护检流计.

六、数据记录及数据处理

1. 线式电桥测电阻

表 1 用线式电桥测电阻

被测电阻	调节臂电阻		$\Delta n/\text{格}$	$\Delta R_s/\Omega$
	交换前 R_s/Ω	交换后 R'_s/Ω		
R_1				
R_2				

(1) 根据表 1 中测量数据,由式(4)计算 $R_x = \sqrt{R_s R'_s} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$.

(2) 计算 R_x 的不确定度 $U(R_x)$.

① 计算电阻箱仪器误差引起的不确定度 $U_1(R_x)$:

读取 R_s 的仪器误差限 $\Delta_1(R_s) = \sum a_i \% R_i + R_0 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$.

读取 R'_s 的仪器误差限 $\Delta_1(R'_s) = \sum a_i \% R_i + R_0 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$.

由 $R_x = \sqrt{R_s R'_s}$, 得

$$\frac{U_1(R_x)}{R_x} = \frac{1}{2\sqrt{\left[\frac{U_1(R_s)}{R_s}\right]^2 + \left[\frac{U_1(R'_s)}{R'_s}\right]^2}} = \frac{1}{2\sqrt{\left[\frac{\Delta_1(R_s)}{R_s}\right]^2 + \left[\frac{\Delta_1(R'_s)}{R'_s}\right]^2}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

所以 $U_1(R_x) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$

② 计算电桥灵敏度引起的不确定度 $U_s(R_x)$.

电桥灵敏度

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{格}/\Omega$$

其引起的不确定度

$$U_s(R_x) = \Delta_s(R_x) = \frac{0.2}{S} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

③ 计算合成不确定度 $U(R_x)$.

由于测量次数为 1(没有多次重复测量,是源于不确定度 A 类分量远小于 B 类分量),所以 R_x 的不确定度只有 B 类分量. 它由标准电阻箱误差引起的仪器误差限和电桥灵敏度引起的仪器误差限合成得到,即

$$U(R_x) = \sqrt{U_1^2(R_x) + U_s^2(R_x)} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

(3) 测量结果为

$$R_1 \pm U(R_1) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

$$R_2 \pm U(R_2) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

2. 箱式电桥测电阻

表 2 箱式电桥测电阻

被测电阻	比率臂 N	调节臂 R_x/Ω	$R_x (=NR_x)/\Omega$
R_1			
R_2			
$R_{\text{中}}$			
$R_{\text{并}}$			

(1) 根据公式(8)计算电桥仪器误差引起的不确定度 $U_1(R_x)$.

$$U_1(R_x) = \Delta_1(R_x) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

(2) 箱式电桥灵敏度引起的不确定度 $U_s(R_x)$ 计算方法与线式电桥相同. 但箱式电桥的 $U_s(R_x)$ 比 $U_1(R_x)$ 小得多, 可以忽略.

(3) 计算箱式电桥的不确定度 $U(R_x)$.

$$U(R_x) \approx U_1(R_x) = \Delta_1(R_x) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

(4) 测量结果为

$$R_1 \pm U(R_1) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

$$R_2 \pm U(R_2) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

$$R_{\text{中}} \pm U(R_{\text{中}}) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

$$R_{\text{并}} \pm U(R_{\text{并}}) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

七、注意事项

1. 用线式电桥测电阻, 计算电阻阻值时要注意有效数字运算的规则.
2. 用箱式电桥测电阻, 最好要先按下“B”按键, 后按下“G”按键, 然后先放开“G”后放开“B”. “B”按键和“G”按键不能长时间按住或锁住, 否则箱内电池损耗太大. 测量结束后, 一定要仔细检查“B”按键是否放开了.

八、思考题

1. 为何用线式惠斯通电桥测电阻时, B 点选择在电阻丝中间位置测量精度较高? 既然用换位测量法测出的电阻值与 B 点位置无关, 为何还要求将 B 点选择在中间位置? 试说明其理由. (提示: 试根据间接测量量不确定度传递公式推导出 B 点在中间位置时测量的相对不确定度最小.)

2. 如果电桥线路连接无误, 闭合开关, 调节比较臂电阻.

(1) 无论如何调节, 检流计指针都不偏转, 线路中哪一部分出现了故障?

(2) 无论如何调节, 检流计指针始终向一个方向偏转无法平衡, 电路中什么地方可能有故障?

实验八 用电势差计测量电动势和内阻

电势差计是将未知电动势(电压)与电势差计上的已知直流电压(该已知电压通过与标准电池相比较获得)进行比较来测定未知电动势(电压)的仪器.用电势差计测电动势(电压)与使用电压表测量电动势(电压)不同,前者在被测电路中通过的电流为零,因而不干扰被测电路,测量结果仅仅依赖准确度极高的标准电池、标准电阻和高灵敏度的检流计.电势差计用途很广,不仅能精确测量电动势、电势差(电压)、电流、电阻等电学量,校准电表和直流电桥等电学仪表,还可用于温度、压力、位移和速度等非电学量的测量和控制.

一、实验目的

1. 学习“补偿法”在实验中的应用;
2. 掌握电势差计的工作原理、结构及测量操作方法;
3. 学会测量电动势和内阻的一种方法.

二、实验仪器

FB325B 型电势差计,标准电池,直流低压稳压电源.

三、实验原理

1. 补偿法原理

补偿法是一种准确测量电动势(电压)的有效方法.如图 1 所示, E_0 为一个连续可调已知电动势(电压),而 E_x 为待测电动势,调节 E_0 使检流计 G 示零(即回路电流 $I=0$),则 $E_x=E_0$.上述过程的实质是,不断地用已知电动势与待测的电动势进行比较,当检流计指示电路中的电流为零时,电路达到平衡补偿状态,此时被测电动势与已知电动势相等,这种方法称为补偿法.据此原理构成的测量电动势或电势差的仪器称为电势差计.

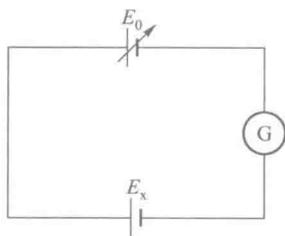


图 1 补偿法原理图

在电势差计中,连续可调已知电动势 E_0 是这样获得的:让一个阻值连续可调的标准电阻上流过恒定的工作电流,则该电阻两端的电压便可作为连续可调的已知电动势.

2. 电势差计原理

图 2 是一般直流电势差计的原理图. E_x 为待测电动势, E_s 为标准电池. E 为可调稳压电源,与开关 K_1 、可变电阻 R_n 和电阻丝 AB 串联构成主回路,工作电流 I_p 在电阻丝 AB 上产生电势差 U_{AB} .触点 D 、 C 可在电阻丝任意位置进行选择,因此可得到相应改变的电势差 U_{CD} .

闭合 K_1 , 开关 K 向上闭合到 E_s 处, 调节可调工作电源 E , 改变工作电流 I_p 或改变触点 D 、 C 位置, 可使检流计 G 指零, 此时 U_{DC} 与 E_s 达到补偿状态, 则

$$E_s = U_{DC} = I_p r_0 L_s \quad (1)$$

式中 r_0 为单位长度电阻丝的电阻, 电阻丝 DC 段的长度为 L_s .

保持工作电流 I_p 大小不变, K 向下合到 E_x 处, 即用 E_x 代替 E_s , 只要 $E_x \leq U_{AB}$, 调节触点 D 、 C 的位置至 D' 、 C' , 可使电路再次达到补偿, 此时电阻丝 $D'C'$ 段长度为 L_x , 则

$$E_x = U_{C'D'} = I_p r_0 L_x \quad (2)$$

式(1)、式(2)相比, 可得

$$E_x = E_s \frac{L_x}{L_s} \quad (3)$$

所以, 在相同工作电流 I_p 条件下, 电势差计处于补偿状态时测得 L_s 和 L_x , 再利用标准电池的电动势 E_s 便可确定待测电池的电动势.

四、实验装置介绍

1. FB325B 型电势差计

图 3 是 FB325B 型十一线电势差计盒式结构示意图, AB 间电阻丝总长 11 m, 为 11 根电阻丝串联, 每根长度为 1 m. 它的第 1 ~ 10 根电阻线分别绕在 10 根有机玻璃棒上, 接线插孔 0, 1, 2, ..., 10 依次位于这 10 根电阻丝两端, 接头 C 可选 0, 1, 2, ..., 10 中任一个插孔位置连接. 第 11 根电阻线安装在一只滑线盘上, 接头 D 与电刷相连接, 电刷可在这根电阻丝上滑动. 因此, 接头 CD 间电阻丝长度可在 0 ~ 11 m 间连续变化. 滑线盘刻度盘分辨率为 0.01 m, 利用游标尺, 最小分度值为 0.001 m.

2. 标准电池

标准电池是一种汞镉电池, 由于其电动势比较稳定、复现性好, 长期以来在国际上用作电压标准. 这种电池有 H 管和单管两种结构, 前者只能正立使用, 且不能晃动或倒置.

图 4 为 H 型标准电池示意图, 其两极为汞和镉汞齐, 正、负极引出线都是铂丝, 电解液为硫酸镉溶液, 按溶液浓度又可分为饱和式和不饱和式两种, 饱和式的电动势最稳定, 但其电动势易随温度变化, 不饱和式则不必作温度校正. 摄氏温度为 t 时的饱和式标准电池的电动势为

$$E_s(t) = E_{20} - 4 \times 10^{-5}(t-20) - 10^{-6}(t-20)^2 \quad (4)$$

式中 E 的单位用 V, t 的单位用 $^{\circ}\text{C}$, $E_{20} = 1.018\ 60\ \text{V}$, 为标准电池在 $20\ ^{\circ}\text{C}$ 时的电动势. 本实验使用的是 H 型饱和式标准电池.

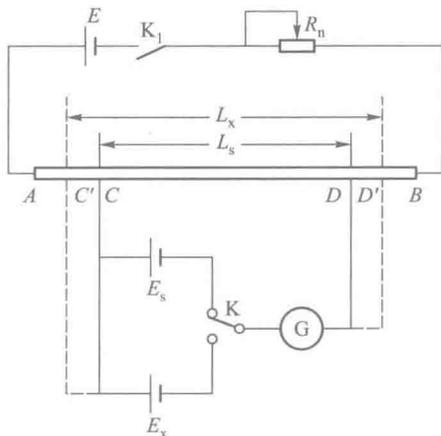


图 2 电势差计原理图

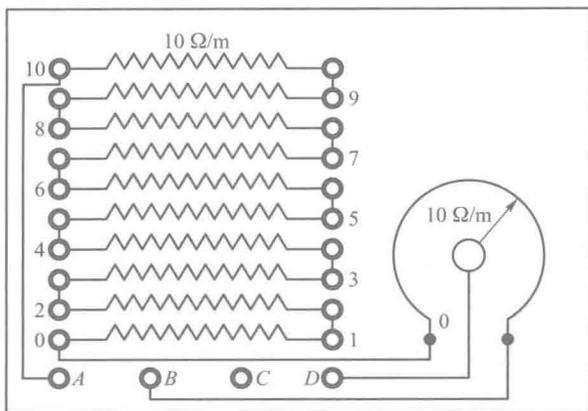


图3 FB325B型电势差计结构示意图

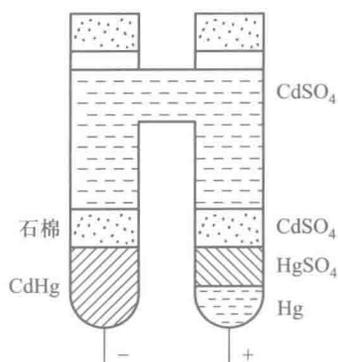


图4 H形标准电池内部结构示意图

标准电池准确度分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级。Ⅰ、Ⅱ级的最大容许电流为 $1\ \mu\text{A}$ ，内阻不大于 $1\ \text{k}\Omega$ ；Ⅲ级的最大容许电流为 $10\ \mu\text{A}$ ，内阻不大于 $600\ \Omega$ 。可见，标准电池只能作电动势的参考标准，绝不能作为电源使用，也不准直接用伏特计测量其电压。

使用标准电池注意事项：

- (1) 不允许倾斜，更不允许摇晃和倒置；
- (2) 正负极不能接反；
- (3) 使用和存放的环境温度波动要小，远离热源和冷源，避免阳光和灯光直射；
- (4) 不能过载，不要用手同时触摸两个端钮，绝不允许用电压表或万用表去测量标准电池的电动势值。

五、实验内容及步骤

1. 测量干电池的电动势

- (1) 测量室温 t ，填入表1中，并按照式(4)计算标准电池电动势 $E_s(t)$ 。
- (2) 按照图5所示接线，开启稳压电源前，需确保所有开关断开，并特别注意稳压电源的正负极应与标准电池和待测电池的正负极相对。
- (3) C 端导线插头连接时，可选择插孔4、5、6中任意一个，并将滑线盘指针置于0刻度附近。打开稳压电源，调节输出电压为 $3\ \text{V}$ 左右，闭合开关 K_1 ，将 K_2 与标准电池 E_s 端接通，调节滑线变阻器 R_n 直到检流计不偏转。然后闭合 K_3 ，去掉保护电阻，再次微调 R_n 直到 G 的指针指在中央零刻度位置，记下 CD 间长度 L_s 。
- (4) 断开 K_3 ，保持稳压电源 E 输出电压和电阻 R_n 不变，即保持主回路中标准工作电流 I_p 不变。 K_2 与 E_x 端接通，滑线盘指针置于0刻度位置，移动 C 端导线插头位置，若发现 C 端导线插头在两个数值相邻插孔上变化时， G 的指针偏离中点向两个不同方向摆动，则将 C 端导线插头插入数字较小的插孔。然后转动滑线盘（即改变 D 的位置）使 G 的指针指到零，最后 K_3 闭合，再次微调滑线盘，使 G 指针指到零不动，记下此时 CD 间长度 L_x 。

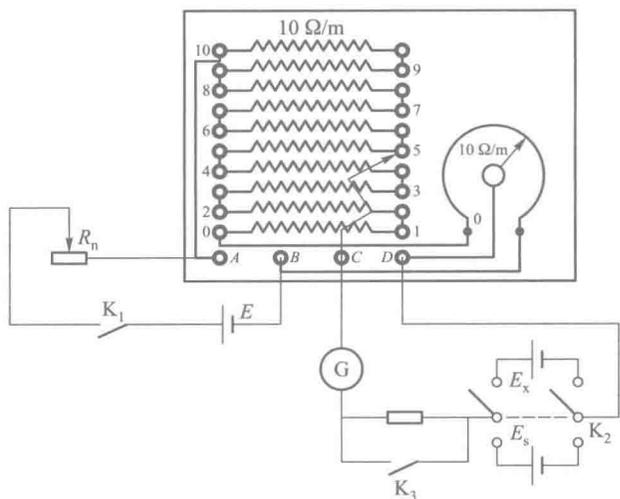


图5 电势差计实验装置接线示意图

(5) 改变 L_s , 在不同标准工作电流 I_p 条件下, 重复(3)、(4)两步骤, 共测量 5 次, 数据记录在表 1 中。

2. 测量干电池的内阻

(1) 将图 5 中电势差计上接头 C 与 D 间部分电路换为图 6 所示电路, 其中 R 为高精度低值电阻箱, 实验中可取 $R = 100.0 \Omega$ 。断开 K_4 , 保持稳压电源 E 的原输出电压和电阻 R_n 大小不变, 电势差计达到补偿状态时, 记下 CD 间长度 L_1 ;

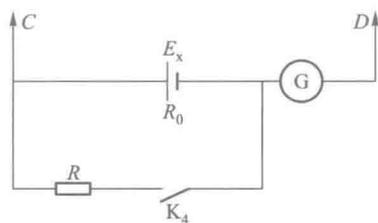


图6 测电池内阻时接头 C 与 D 间的部分电路

(2) 闭合 K_4 , 电势差计达到补偿状态时, 记下 CD 间长度 L_2 ; 根据下式可计算得干电池的内阻为

$$R_0 = R \left(\frac{L_1 - L_2}{L_2} \right) \quad (5)$$

(3) 改变 L_1 , 在不同标准工作电流 I_p 条件下, 重复上述过程, 共测量 5 次, 将数据记录在表 2 中。

六、数据记录及数据处理

1. 测干电池的电动势

表 1 测电动势数据记录与处理

检流计型号 _____; 室温 $t =$ _____ $^{\circ}\text{C}$; $E_s(t) =$ _____ V;

次数 i	1	2	3	4	5
L_s/m					
L_x/m					

续表

E_{xi}/V					
\bar{E}_x/V					
$S(E_x)/V$					
$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$					

根据公式(3)计算 $E_{xi} = \underline{\hspace{2cm}}$ V, 平均值 $\bar{E}_x = \underline{\hspace{2cm}}$ V.

计算不确定度 $U(E_x)$ 时, 忽略检流计及标准电池的不确定度, $U(E_x)$ 的 A 类分量为

$$U_A(E_x) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(E_x) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

对于 B 类分量 $U_B(E_x)$, 计算起来比较复杂, 因为其与 L_x 、 L_x 、 $U_B(L_x)$ 和 $U_B(L_x)$ 都有关, 此时 L_x 、 L_x 每次测量值都不同, 而且 $U_B(L_x)$ 和 $U_B(L_x)$ 的大小也不再是与刻度尺的最小刻度相关联的仪器误差限, 而是与 D 端滑线盘上电阻丝横截面的改变以及电阻丝上的金属屑落在刻度尺上形成的电流微通道等因素相关. 因此, 对 $U_B(E_x)$ 仅作示范性简略估算, 即

$$U_B(E_x) = 0.5\% \bar{E}_x = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

E_x 的不确定度为

$$U(E_x) = \sqrt{U_A^2(E_x) + U_B^2(E_x)} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

最后测量结果表述为

$$E_x = \bar{E}_x \pm U(E_x) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

2. 测干电池的内阻

表 2 测量电池内阻数据记录与处理

检流计型号 ; $R = 100.0 \Omega$

次数	1	2	3	4	5
L_1/m					
L_2/m					
R_{0i}/Ω					
\bar{R}_0/Ω					
$S(r)/\Omega$					
$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$					

根据公式(5)计算 $R_{0i} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$, $\bar{R}_0 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$, $U_A(R_0) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$. 对

于 $U_B(R_0)$, 同样作粗略的近似, 设 $\frac{U_B(R_0)}{R_0} = 0.5\%$, 仿照电池电动势的不确定度计

算, 求出 $U(R_0) = \sqrt{U_A^2(R_0) + U_B^2(R_0)} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$, 最后结果表示为

$$R_0 = \bar{R}_0 \pm U(R_0) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

七、注意事项

1. 标准电池切忌短路或倾斜.
2. 测量干电池电动势时, 公式(3)成立的前提条件是在先后对 E_s 和 E_x 补偿时工作电流 I_p 保持不变, 为避免电阻丝热效应引起的误差, 要求时间间隔尽可能短, 而且每次补偿调节动作要快, 指针指零后应立即断开开关.
3. 注意电池极性不得接错.

八、思考题

1. 为何用电压表无法准确测量电池电动势, 而电势差计则可以?
2. 按图 5 连接线路, 无论 C 移动到什么位置, 检流计指针总向一边偏转, 试分析有哪些可能的原因?

实验九 示波器的使用

示波器是利用示波管内电子束在电场或磁场中的偏转,以显示电压信号随时间变化波形的一种电子观测仪器.示波器用途极其广泛,利用示波器可直接观察电压波形,并可测量电压的大小.一切可转化为电压的电学量(如电流、电功率等)、非电学量(如温度、位移、压力、频率、磁场强度等)以及他们随时间的变化过程,都可以用示波器及一些必要的配置仪器来观察和测量.

一、实验目的

1. 了解示波器的基本结构和工作原理,学会正确使用示波器;
2. 掌握用示波器观察波形;
3. 学会利用李萨如图形测量正弦波信号的频率.

二、实验仪器

GOS-620 双轨迹示波器、信号发生器.

三、实验原理

本实验以 GOS-620 双轨迹示波器为例,介绍其基本结构与工作原理.

1. 示波器的基本结构和简单工作原理

示波器的内部结构大致可分为示波管(CRT 或阴极射线管)、扫描同步系统、放大与衰减系统、电源系统四个部分.

示波管是示波器的核心部件,如图 1 所示,可分为电子枪、偏转系统和荧光屏三部分.

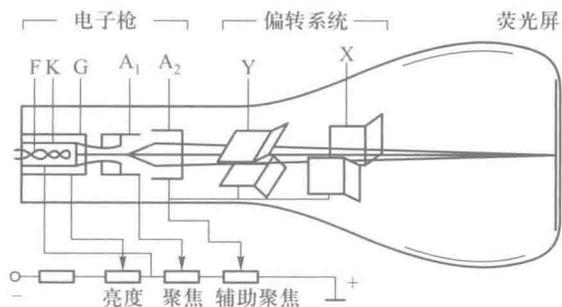


图 1 示波管结构简图

F—灯丝;K—阴极;G—控制栅极; A_1 、 A_2 —第一、第二阳极;Y、X—竖直、水平偏转板

(1) 电子枪

电子枪包括灯丝 F、阴极 K、控制栅极 G、第一阳极 A_1 (聚焦电极)、第二阳极 A_2

(辅助聚焦)等. 阴极被灯丝加热后,可沿轴向发射电子,成为电子枪的电子源,经过聚焦后最终会在荧光屏上显现一个清晰的小圆点.

(2) 偏转系统

偏转系统位于电子枪和荧光屏之间,由两对互相垂直的金属偏转板 X 和 Y 组成,分别控制电子束在水平方向和竖直方向的偏转.

若 X、Y 偏转板上所加电压都为 0 时,从电子枪射出的电子束将沿轴线前进并在荧光屏的中心呈现静止的光点. 若只在 X 偏转板上加不断变化的电压,则横向电场控制光点在水平方向的位移,将在水平方向形成一条亮线. 若只在 Y 偏转板上加不断变化的电压,则纵向电场控制光点在竖直方向的位移,将在竖直方向形成一条亮线. 如果两对偏转板都加上电场,则光点在二者的共同控制下,将在荧光屏平面二维方向上发生位移.

(3) 荧光屏

荧光屏是示波器的显示部分,其作用是将电子束轰击点的轨迹显示出来以供观测. 当经加速聚焦后的电子打到荧光屏上时,屏上所涂的荧光物质就会发光,从而显示出电子束的位置. 当电子停止作用后,荧光剂的发光需经一定时间才会停止,称为余辉时间.

2. 示波器显示波形的原理

在竖直的 Y 偏转板上加一交变正弦电压,虽然偏转电压的大小随时间变化,但始终沿垂直方向,电子束沿垂直方向的往复运动的轨迹是一条直线,因此可在荧光屏上看到一条竖直的亮线,如图 2(a)所示. 此时,若在水平 X 偏转板上加“锯齿波电压”,如图 2(b)所示,就可使荧光屏上的亮线沿水平方向拉开,则电子的运动是两个相互垂直的运动的合成. 当锯齿波电压与正弦电压的变化周期相等时,在荧光屏上将显示出一个稳定的正弦电压波形图,如图 2(c)所示.

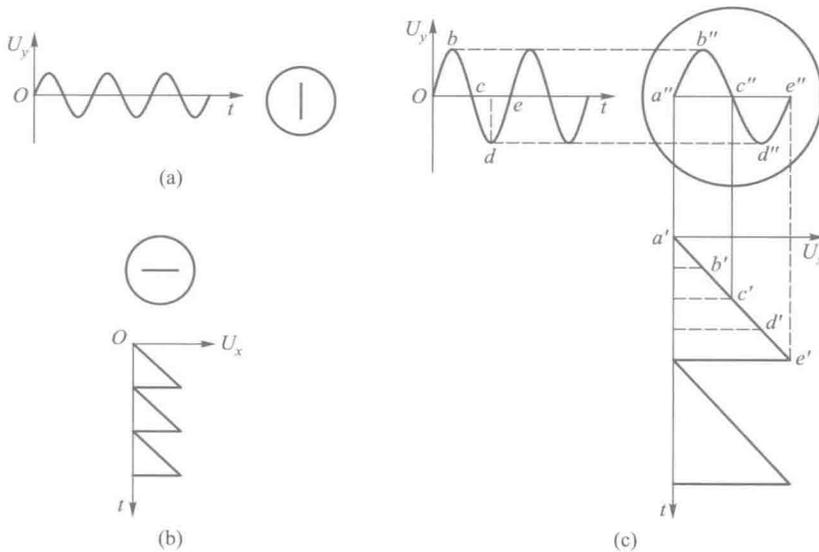


图 2 示波器波形

当波形信号的频率等于锯齿波频率的整数倍时,荧光屏上将呈现整数个完整而稳定的被测信号的波形;当两者不成整数倍时,对于被测信号来说,每次扫描的起点都不会相同,结果造成波形在水平方向上不断移动.为了消除这一现象,必须使被测信号的起点与扫描电压的起点保持“同步”,这一功能由机内“触发同步”电路来完成.

3. 李萨如图形法测量正弦信号的频率

通过观察荧光屏上李萨如图形进行频率对比的方法称为李萨如图形法,此法于1855年由李萨如所证明.如果在X偏转板上和Y偏转板同时加上正弦信号

$$x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

屏幕上的亮点将参与两个互相垂直谐振动的合成,消去两式中的参量 t ,亮点的轨迹方程为

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{A_1 A_2} = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)$$

此式表明:两个相互垂直同频率简谐振动的合成在一般情况下是个椭圆.如果在两个偏转板的正弦信号成倍数关系,合振动的轨迹一般也是闭合曲线,这些闭合曲线成为李萨如图形.

图3给出了几种不同频率比的李萨如图形.在稳定不动的李萨如图形上分别作水平直线和竖直直线与图形相交(注意避开图线交叉点处),设水平线上的交点数为 N_x ,竖直线上的交点数为 N_y ,则交点数和两个偏转板上所加信号的频率 $f (f = \frac{\omega}{2\pi})$ 之间的关系为

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_x}{N_y}$$

如果 f_x 和 f_y 中其中一个已知,则可利用此式求出另一个未知频率.

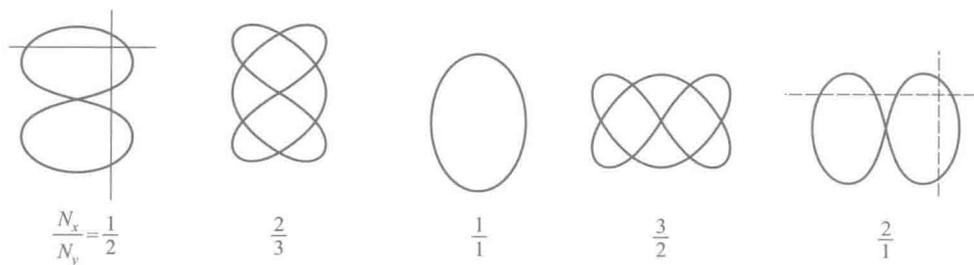


图3 李萨如图形

四、实验装置介绍

GOS-620 双轨迹示波器面板的说明详见附录部分.

五、实验内容及步骤

1. 调整示波器.

按表 1 正确设置示波器前面板上各功能键(见图 4),调整示波器. 然后接通电源,按下 power 开关键⑥,指示灯亮.

表 1 设置示波器前面板上各功能键

项目		设定	项目		设定
POWER	⑥	OFF 状态	AC-GND-DC	⑩⑬	GND
INTEN	②	中央位置	SOURCE	⑳	CH1
FOCUS	③	中央位置	SLOPE	㉔	凸起(+斜率)
VERT MODE	⑭	CH1	TRIG. ALT	㉗	凸起
ALT/CHOP	⑫	凸起(ALT)	TRIGGER MODE	㉕	AUTO
CH2 INV	⑯	凸起	TIME/DIV	㉙	0.5 ms/DIV
POSITION \blacktriangle	⑪⑱	中央位置	SWP. VAR	㉚	顺时针到底 CAL 位置
VOLTS/DIV	⑦⑳	0.5 V/DIV	◀POSITION▶	㉛	中央位置
VAR.	⑨㉑	顺时针转到底 CAL 位置	×10 MAG	㉜	凸起

2. 观察正弦波形.

(1) 将信号发生器的输出的正弦信号加到 CH1 的输入插座上,将 AC-GND-DC 开关⑩置于 AC 位置,被观察信号的波形就显示在荧光屏上.

(2) 将旋钮 VAR. ⑨或㉑旋到 CAL 位置时,VOLTS/DIV ⑦或㉒上的指示值就表示垂直方向偏转一格的电压是多少,由此可测出电压的幅度.

3. 观察并记录李萨如图形.

(1) 将两个信号发生器连接在示波器的 CH1 和 CH2 的输入插口,调节信号发生器,使各自输出的信号为正弦信号.

(2) 信号发生器 TIME/DIV ㉙设定为 X-Y 模式,同时确保触发源 SOURCE ㉚置于 CH1 位置,两个 AC-GND-DC ⑩⑬都置于 CH1 位置 AC 位置. 此时加在 CH1 输入插口的信号为 X 轴信号,CH2 输入插口的信号为 Y 轴信号.

(3) 调节 VOLTS/DIV ⑦和㉒,直至屏幕上图形大小合适.

(4) 保持 CH1 的正弦信号频率 $f_x = 50 \text{ Hz}$,改变 CH2 的正弦信号 f_y ,依次为 25 Hz、50 Hz、75 Hz、100 Hz、150 Hz. 在 f_y 的理论值附近缓慢调整信号发生器的频率,直至得到稳定的图形. 观察并记录李萨如图形,以及此时信号发生器的指示值 f_y' .

六、数据记录及数据处理

1. 数据记录于表 2 中.

2. 画校正曲线.

以 f_y 为横坐标, Δf 为纵坐标,在坐标纸上作出信号发生器的校正曲线(折线).

表 2 数据记录与处理

 $f_x = 50 \text{ Hz}$

理论值 f_y/Hz	25	50	75	100	150
$f_x : f_y$					
李萨如图形					
Y 轴交点数 N_y					
X 轴交点数 N_x					
信号发生器示数 f'_y/Hz					
校正值 $\Delta f (=f_y - f'_y)/\text{Hz}$					

七、注意事项

1. 信号发生器、示波器预热 3 min 以后才能正常工作。
2. 测信号电压时,一定要将电压衰减旋钮的微调顺时针旋足(校正位置);测信号周期时,一定要将扫描速率旋钮的微调顺时针旋足(校正位置);
3. 不要频繁开关机,示波器上光点的亮度不可调得太强,也不能让亮点长时间停在荧光屏的一点上,如果暂时不用,把辉度降到最低即可。
4. 转动旋钮和按键时必须有的放矢,不要将开关和旋钮强行旋转、生拉硬拧,以免损坏按键、旋钮和示波器,示波器探头与插座的配合方式类似于挂口灯泡与灯座的锁扣配合方式,切忌生拉硬拽。

八、思考题

1. 若示波器一切正常,但开机后荧光屏上无光点出现,有哪些可能的原因?怎样调节才能使光点出现?
2. 如果被观测的波形不稳定,出现左移或右移的原因是什么?该如何使之稳定?
3. 李萨如图形变化的快慢与哪些因素有关?

附录 GOS-620 双轨迹示波器面板(图 4)说明

1. CRT 显示屏
 - ② INTEN: 轨迹及光点亮度控制钮。
 - ③ FOCUS: 轨迹聚焦调整钮。
 - ④ TRACE ROTATION: 使水平轨迹与刻度线成平行的调整钮。
 - ⑥ POWER: 电源主开关,按下此钮可接通电源,电源指示灯⑤会发亮;再按一次,开关凸起时,则切断电源。
 - ③ FILTER: 滤光镜片,可使波形易于观察。
2. VERTICAL 垂直偏向
 - ⑦⑧ VOLTS/DIV: 垂直衰减选择钮,以此钮选择 CH1 及 CH2 的输入信号衰减幅度,范围为 5 mV/DIV ~ 5 V/DIV,共 10 挡。

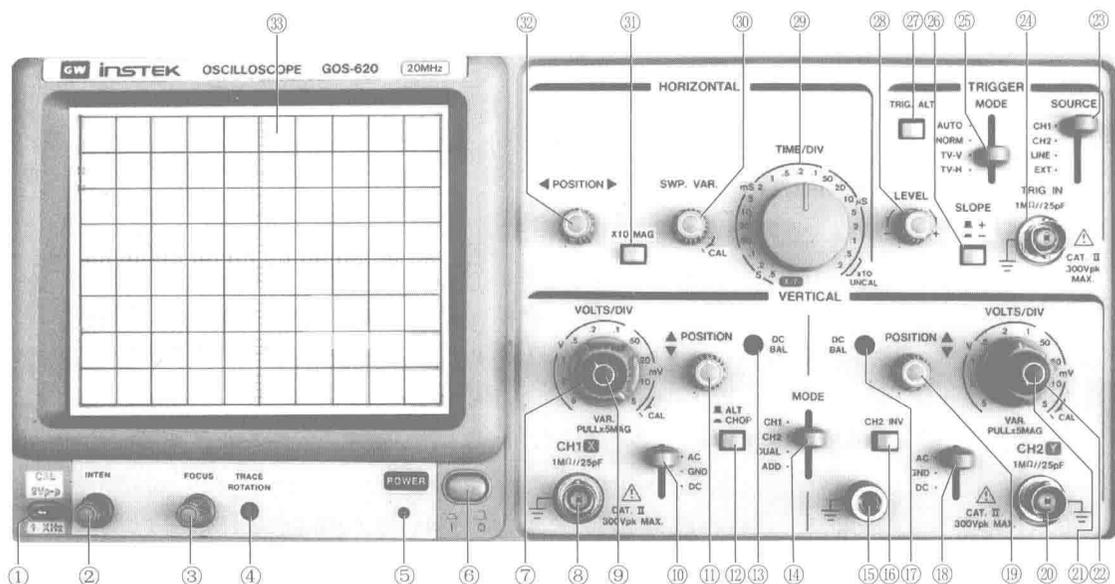


图4 示波器前面板

⑩ ⑱ AC-GND-DC:输入信号耦合选择按钮组。

AC:垂直输入信号电容耦合,截止直流或极低频信号输入。

GND:按下此键则隔离信号输入,并将垂直衰减器输入端接地,使之产生一个零电压参考信号。

DC:垂直输入信号直流耦合,AC与DC信号一齐输入放大器。

⑧ CH1(X)输入:CH1的垂直输入端;在X-Y模式中,为X轴的信号输入端。

⑨⑳ VARIABLE:灵敏度微调控制,至少可调到显示值的1/2.5.在CAL位置时,灵敏度即为挡位显示值.当此旋钮拉出时($\times 5$ MAG状态),垂直放大器灵敏度增加5倍。

㉑ CH2(Y)输入:CH2的垂直输入端;在X-Y模式中,为Y轴的信号输入端。

⑪⑲ POSITION:轨迹及光点的垂直位置调整钮。

⑭ VERT MODE:CH1及CH2选择垂直操作模式。

CH1:设定本示波器以CH1单一频道方式工作。

CH2:设定本示波器以CH2单一频道方式工作。

DUAL:设定本示波器以CH1及CH2双频道方式工作,此时并可切换ALT/CHOP模式来显示两轨迹。

ADD:用以显示CH1及CH2的相加信号;当CH2 INV键⑯为按下状态时,即可显示CH1及CH2的相减信号。

⑬⑰ CH1&CH2:调整垂直直流平衡点。

⑫ ALT/CHOP:当在双轨迹模式下,放开此键,则CH1&CH2以交替方式显示(一般使用于较快速之水平扫描文件位)。当在双轨迹模式下,

按下此键,则 CH1&CH2 以切割方式显示(一般使用于较慢速之水平扫描文件位).

- ⑩ CH2 INV:此键按下时,CH2 的信号将会被反向. CH2 输入信号于 ADD 模式时,CH2 触发截选信号(Trigger Signal Pickoff)亦会被反向.

3. TRIGGER 触发

- ⑪ SLOPE:触发斜率选择键

+:凸起时为正斜率触发,当信号正向通过触发准位时进行触发.

-:按下时为负斜率触发,当信号负向通过触发准位时进行触发.

- ⑫ TRIG. IN:TRIG. IN 输入端子,可输入外部触发信号. 欲用此端子时,须先将 SOURCE 选择器⑬置于 EXT 位置.

- ⑬ TRIG. ALT:触发源交替设定键,当 VERT MODE 选择器⑭在 DUAL 或 ADD 位置,且 SOURCE 选择器⑬置于 CH1 或 CH2 位置时,按下此键,本仪器即会自动设定 CH1 与 CH2 的输入信号以交替方式轮流作为内部触发信号源.

- ⑭ SOURCE:内部触发源信号及外部 EXT TRIG. IN 输入信号选择器.

CH1:当 VERT MODE 选择器⑭在 DUAL 或 ADD 位置时,以 CH1 输入端的信号作为内部触发源.

CH2:当 VERT MODE 选择器⑭在 DUAL 或 ADD 位置时,以 CH2 输入端的信号作为内部触发源.

LINE:将 AC 电源线频率作为触发信号.

EXT:将 TRIG. IN 端子输入的信号作为外部触发信号源.

- ⑮ TRIGGER MODE:触发模式选择开关

AUTO:当没有触发信号或触发信号的频率小于 25 Hz 时,扫描会自动产生.

NORM:当没有触发信号时,扫描将处于预备状态,屏幕上不会显示任何轨迹. 本功能主要用于观察 ≤ 25 Hz 的信号.

TV-V:用于观测电视信号的垂直画面信号.

TV-H:用于观测电视信号的水平画面信号.

- ⑯ LEVEL:触发准位调整钮,旋转此钮以同步波形,并设定该波形的起始点. 将旋钮向“+”方向旋转,触发准位会向上移;将旋钮向“-”方向旋转,则触发准位向下移.

4. HORIZONTAL 水平偏向

- ⑰ TIME/DIV:扫描时间选择钮,扫描范围从 $0.2 \mu\text{s}/\text{DIV}$ 到 $0.5 \mu\text{s}/\text{DIV}$,共 20 个挡位.

X-Y:设定为 X-Y 模式.

- ⑱ SWP. VAR:扫描时间的可变控制旋钮,若按下 SWP. UNCAL 键⑲,并旋转此控制钮,扫描时间可延长至少为指示数值的 2.5 倍;该键若未压下时,则指示数值将被校准.

⑳ $\times 10$ MAG: 水平放大键, 按下此键可将扫描放大 10 倍.

㉑ ◀ POSITION ▶: 轨迹及光点的水平位置调整钮.

5. 其他功能

① CAL($2V_{p-p}$): 此端子会输出一个 $2V_{p-p}$, 1 kHz 的方波, 用以校正测试棒及检查垂直偏向的灵敏度.

② GND: 本示波器接地端子.

实验十 用模拟法测绘静电场

一、实验目的

1. 学习模拟法,用恒定电流场模拟静电场的电场分布;
2. 加深对描述静电场的两个基本量即电场强度和电势的理解.

二、实验仪器

GVZ-3 型导电微晶静电场描绘仪.

三、实验原理

1. 直接测量静电场的困难

带电体在周围空间产生静电场,静电场可以通过电场强度或电势的空间分布来描述.原则上,我们可以从已知的电荷分布,通过静电场方程求出其对应的静电场分布.对形状稍微复杂的电极(电荷分布)要求其电场的具体分布,在数学上仍然十分困难,只能借助于实验方法来直接测定.但是,目前直接测量静电场往往也很困难.首先,静电场中无电流,不能用我们所熟悉的磁电式电表,而要采用较复杂的静电仪表和相应的测量方法;其次,探测装置总是导体或电介质,一旦放入静电场中,会产生感应电荷使原电场发生畸变,影响测量结果的准确性.如果用相似的电流场来模拟静电场,就可以通过电流场的实验测量得到静电场的具体分布.可见,模拟法是一种简单的测量电场的方法.

2. 用模拟法测量静电场

静电场与恒定电流场是两种不同性质的场,但是它们两者在一定条件下具有相似的空间分布,即两种场遵守的规律在形式上相似,都可以引入电势 U , 电场强度 $E = -\nabla U$, 都遵守高斯定律.

对于静电场,电场强度在无源区域内满足以下积分关系:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 0, \quad \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

对于恒定电流场,电流密度矢量 \mathbf{j} 在无源区域内也满足类似的积分关系:

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0, \quad \oint_L \mathbf{j} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

由此可见, \mathbf{E} 和 \mathbf{j} 在各自区域中满足同样的数学规律.在相同边界条件下,具有相同的解析解.因此,如果恒定电流场和静电场的空间电极形状与边界条件都相同,则其中的任一个场都可以作为另一个场的模拟场.由于测量恒定电流场中的电势比测量静电场的电势要简易得多,因此常用恒定电流场的测量代替静电场的测量.在模拟的条件上,要保证电极形状一定,电极电势不变,空间介质均匀.下面根据具体实验来讨论这种等效性.

3. 同轴圆柱面之间的电场

下面我们分别对两个均匀带等量异号电荷的无限长同轴圆柱面之间的静电场和恒定电流场的分布进行推导,目的是说明恒定电流场数学表示形式与静电场相似,可以用它模拟静电场.同时,也便于实验结果与理论结果进行比较.今后碰到难以处理的静电场问题,就可以毫不怀疑地创造相似s的恒定电流场条件,来模拟出其静电场分布.

(1) 同轴圆柱面之间的静电场

如图 1(a) 所示,在真空中有一个半径为 r_A 的长圆柱形导体 A 和一个内半径为 r_B 的长圆筒形导体 B,它们同轴放置,分别带等量异号电荷.由高斯定理可知,在垂直于轴线的任一截面 S 内,都有均匀分布的辐射状电场线,这是一个与坐标 z 无关的二维场.在二维场中,电场强度 E 平行于 xy 平面,其等势面为一簇同轴圆柱面.因此只要研究 S 面上的电场分布即可.

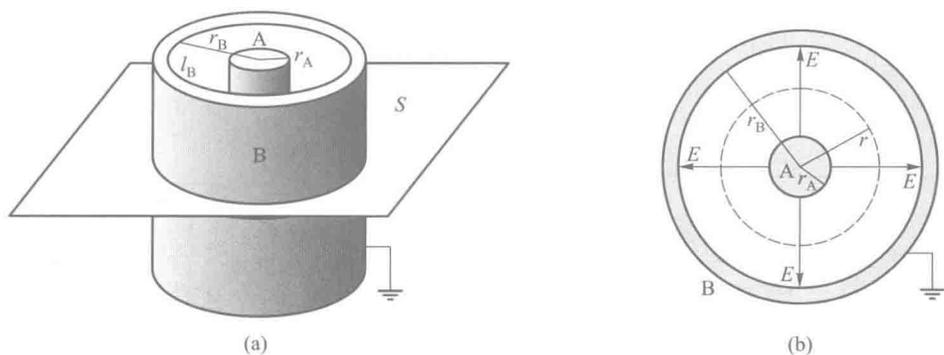


图 1 同轴圆柱面及其静电场分布

由静电场中的高斯定理可知,距轴线的距离为 r 处[图 1(b)]各点电场强度为

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (1)$$

式中 λ 为柱面上沿轴向的电荷线密度,其电势为

$$U_r = U_A - \int_{r_A}^r \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = U_A - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{r_A} \quad (2)$$

设 $r=r_B$ 时, $U_B=0$,则有

$$\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} = \frac{U_A}{\ln \frac{r_B}{r_A}} \quad (3)$$

代入式(2),得

$$U_r = U_A \frac{\ln \frac{r_B}{r}}{\ln \frac{r_B}{r_A}} \quad (4)$$

$$E_r = -\frac{dU_r}{dr} = \frac{U_A}{\ln \frac{r_B}{r_A}} \frac{1}{r} \quad (5)$$

(2) 同轴圆柱面之间的恒定电流场

设电极形状、大小、位置以及电极电势,与前面研究静电场时的同轴圆柱面完全相同,电极间充满均匀的导电介质,且电极的电导率远大于导电介质的电导率.现计算电极间恒定电流场的电势分布.由于导电介质的电导率远远大于空气介质的电导率,电流从电极 A 均匀辐射状地沿平面流向电极 B.沿此平面取厚度为 t 的导电介质圆柱体[图 2(a)],则半径为 r 的圆柱面到半径为 $r+dr$ 的圆柱面之间的导电介质薄层的电阻为

$$dR = \rho \frac{dr}{S} = \rho \frac{dr}{2\pi r t} = \frac{\rho}{2\pi t} \frac{dr}{r} \quad (6)$$

式中 ρ 为导电介质的电阻率.由半径为 r 至 r_B 之间的圆柱片的电阻为

$$R_{r r_B} = \frac{\rho}{2\pi t} \int_r^{r_B} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{r_B}{r} \quad (7)$$

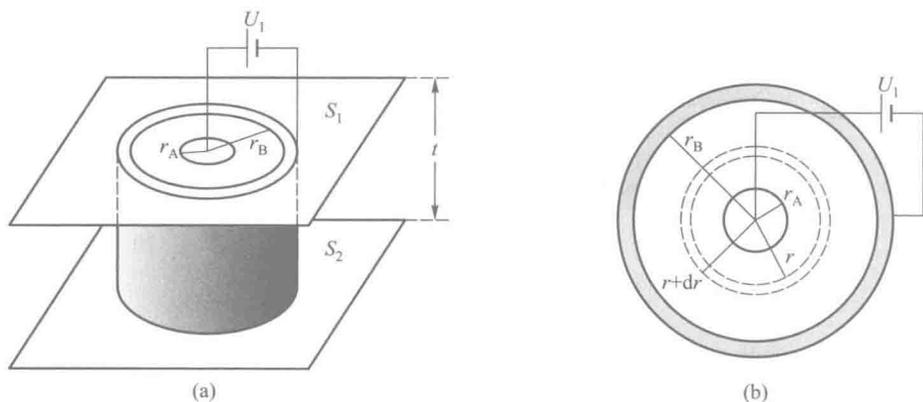


图 2 同轴圆柱面之间的电阻的计算

由半径为 r_A 的内圆柱面至半径为 r_B 的外圆柱面之间的总电阻为

$$R_{r_A r_B} = \frac{\rho}{2\pi t} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{r_B}{r_A} \quad (8)$$

由于是恒定电流场,从半径为 r_A 的内圆柱面至半径为 r_B 的外圆柱面间,流过任何圆柱面的电流都相等,设为 I . 设 $U_B = 0$, 则两圆柱面间所加电压为 U_A , 径向电流 I 为

$$I = \frac{U_A}{R_{r_A r_B}} = \frac{2\pi t U_A}{\rho \ln \frac{r_B}{r_A}} \quad (9)$$

距轴线 r 处的电势为

$$U'_r = IR_{r r_B} = U_A \frac{\ln \frac{r_B}{r}}{\ln \frac{r_B}{r_A}} \quad (10)$$

距轴线 r 处的电场强度为

$$E'_r = -\frac{dU'_r}{dr} = \frac{U_A}{\ln \frac{r_B}{r_A}} \frac{1}{r} \quad (11)$$

比较式(4)和式(10),式(5)和式(11)可以看出,真空中的静电场和导电介质中的恒定电流场的电势分布相同,电场分布相同.为什么两种场的分布相同呢?我们可以从电荷产生场的观点加以分析.真空中的静电场是由 A、B 两带电体上的静止电荷产生的,在恒定电流场的导电介质中,若有电流通过,其任意体积元内从一侧面流入的电荷量等于从另一侧面流出的电荷量,净电荷为零,导电介质中的电场也是由 A、B 电极上的电荷产生,不过这个电荷不是不动的,而是一边流失一边由电源不断地补充,在动态平衡条件下保持着电极电荷数量不变,所以这两种情况下电场分布相同.

图 3 给出了几种典型静电场的模拟电极形状及相应的电场分布.

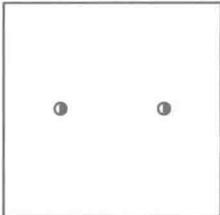
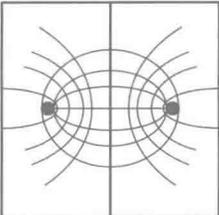
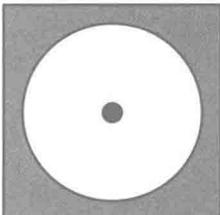
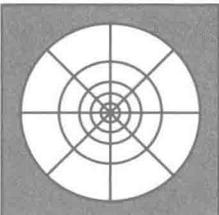
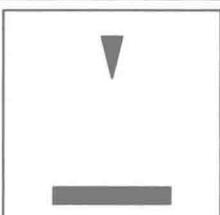
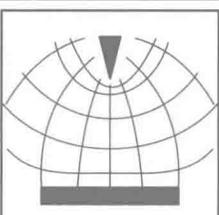
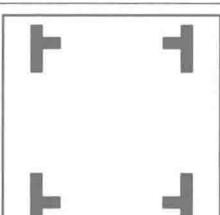
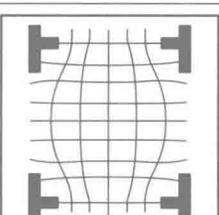
极型	模模板型式	等势线、电场线理论图形
长平行导线(输电线)		
长同轴圆筒(同轴电缆)		
劈尖型电极		
模拟聚焦电极		

图 3 几种典型静电场的模拟电极形状及相应的电场分布

四、实验装置介绍

GVZ-3 型导电微晶静电场描绘仪采用各向均匀导电的微晶导电板,在其上面安置一些不同的金属电极.当有直流电流经两个电极在导电板上通过时,由于微晶导电板相比于金属导体电导率低得多,故在两个电极间沿电流线会存在不同的电势,这种不同的电势可用数字电压表直接测出来.分析各测量点电势的变化规律,就可间接地得知相似的静电场中电势分布规律.

该实验仪包括导电微晶、双层固定支架、同步探针等.支架采用双层式结构,上层放记录纸,下层放导电微晶.电极已直接制作在导电微晶上,并将电极引线接到外接线柱上,接通直流电源就可以进行实验.在导电微晶和记录纸上方各有一探针,通过金属探针臂把两探针固定在同一手柄座上,两探针始终保持在同一竖直线上.移动手柄座时,可保证两探针的运动轨迹是一样的.由导电微晶上方的探针找到待测点后,按一下记录纸上方的探针,在记录纸上留下一个对应的标记.移动同步探针在导电微晶上找出若干电势相同的点,即可描绘出等势线.

五、实验内容及步骤

电场强度在数值上等于电势梯度,方向指向电势降落的方向.考虑到电场强度是矢量,而电势是标量,从实验测量来讲,测定电势比测定场强容易实现,所以可先测绘等势线,然后根据电场线与等势线正交的原理,画出电场线.这样就可由等势线的间距确定电场线的疏密和方向,将抽象的电场形象地表示出来.

1. 描绘同轴圆柱面(同轴电缆)之间的静电场分布

(1) 如图 2(b) 所示,将导电微晶上内外两电极分别与直流稳压电源(7.00 ~ 13.00 V 输出)的正负极相连接,电压表(探针测量)正极与同步探针相连接,电压表(探针测量)负极与电源负极相连接.调节到校正挡位,把电源电压调到 10 V,然后拨到测量挡位.移动探针架至一个电极上,如电压表显示为 0 V,则移动探针架到另一个电极上,电压表显示为 10 V,然后纵横移动探针架,则电压表显示读数随着探针架移动发生变化.将记录纸铺在上层平板上,从 $U_r = 1$ V 开始,平移同步探针,用导电微晶上方的探针找到等势点后,按一下记录纸上方的探针,测出一系列等势点.然后从 2 V 开始描出等势点,每隔 1 V 测一条等势线.共测 9 条等势线,每条等势线上找 10 个以上的点.以每条等势线上各点到原点的平均距离 r 为半径画出等势线的同心圆簇.然后根据电场线与等势线正交原理,再画出电场线,并指出电场强度方向,得到一张完整的电场分布图.

(2) 用刻度尺测出等势线的半径 r ,在坐标纸上作出相对电势 U_r/U_A 和 $\ln r$ 的关系曲线.

(3) 用刻度尺测出内、外两圆柱形电极的半径 r_A 和 r_B .将 r 、 r_A 和 r_B 代入式(10),求出 U_r/U_A ,并与电压表直接测量的值进行比较.

2. 描绘一个劈尖形电极(图 4)和一个条形电极形成的静电场分布

将电源电压调到 10 V,从 1 V 开始,平移同步探针,测出一系列等势点.共测 9

条等势线,每条等势线上找 10 个以上的点,在电极端点附近应多找几个等势点.画出等势线,再作出电场线.

3. 描绘模拟聚焦电极和长平行导线间的电场分布图

方法与上面类似,不再详述.



图 4 劈尖形电极

六、思考题

1. 如果电极间电压增加一倍,等势线、电场线的形状是否变化? 电场强度和电势分布是否发生变化?

2. 从实验结果能否说明电极的电导率远大于导电介质的电导率? 如不满足这条件会出现什么现象?

3. 在描绘同轴圆筒的等势线簇时,如何正确确定圆形等势线簇的圆心,如何正确描绘圆形等势线?

4. 由导电微晶与记录纸的同步测量记录,能否模拟出点电荷激发的电场或同心圆球壳型带电体激发的电场? 为什么?

5. 用电压表测量恒定电流场中某点电势时,要使电压表的接入对该点电势无影响,对电压表的内阻有什么要求?

6. 能否用恒定电流场模拟稳定的温度场? 为什么?

实验十一 磁悬浮动力学实验

一、实验目的

1. 学习导轨的水平调整,熟悉磁悬导轨和智能速度加速度测试仪的调整和使用;
2. 学习作图法处理实验数据,掌握匀变速直线运动规律;
3. 测量重力加速度 g ,并学习消减系统误差的方法;
4. 探索牛顿第二定律,加深物体运动时所受外力与加速度的关系;
5. 探索动摩擦力与速度的关系.

二、实验仪器

DHSY-1 型磁悬浮动力学实验仪.

三、实验原理

随着科技的发展,磁悬浮技术的应用成为技术进步的热点,例如磁悬浮列车.永磁悬浮技术作为一种低耗能的磁悬浮技术,也受到了广泛关注.本实验使用的永磁悬浮技术,是在磁悬浮导轨与滑块两组带状磁场的相互作用斥力之下,使磁悬浮滑块浮起来,从而减少了运动的阻力,来进行多种力学实验.通过实验,学生可以接触到磁悬浮的物理思想和技术,拓宽知识面,加深牛顿定律等动力学方面的感性知识.

本实验仪可构成不同倾斜角的斜面,通过滑块的运动可研究匀变速运动直线规律,加速度测量的误差消除,物体所受外力与加速度的关系等.

1. 瞬时速度的测量

一个作同方向直线运动的物体,在 Δt 时间内,物体经过的位移为 Δs ,则该物体在 Δt 时间内的平均速度为

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

为了精确地描述物体在某点的实际速度,应该把时间 Δt 取得越小越好, Δt 越小,所求得平均速度越接近实际速度.当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速度趋近于一个极限,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} \quad (1)$$

这就是物体在该点的瞬时速度.

但在实验时,直接用式(1)来测量某点的瞬时速度是极其困难的,因此,一般在一定误差范围内,且适当修正时间间隔,可以用历时极短的 Δt 内的平均速度近似地代替瞬时速度.

2. 匀变速直线运动

如图 1 所示,沿光滑斜面下滑的物体,在忽略空气阻力的情况下,可视作匀变速直线运动.匀变速直线运动的速度公式、位移公式、速度和位移的关系分别为

$$v_t = v_0 + at \quad (2)$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (3)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2as \quad (4)$$

如图 2 所示,在斜面上物体从同一位置 P 处(置第一光电门)静止开始下滑,测得在不同位置 P_0, P_1, P_2, \dots 处(置第二光电门),用智能速度加速度测试仪测量 t_0, t_1, t_2, \dots 和速度 v_0, v_1, v_2, \dots 并以 t 为横坐标, v 为纵坐标作 $v-t$ 图线,如果图线是一条直线,则证明该物体所作的是匀变速直线运动,其图线的斜率即为加速度 a ,截距为 v_0 .

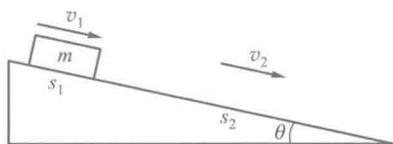


图 1 滑块示意图

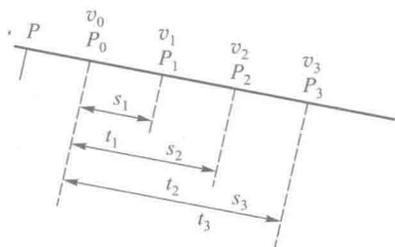


图 2 匀变速运动分析图

同样取 $s_i = P_i - P_{i-1}$, 作 $\frac{s}{t} - t$ 图和 $v^2 - s$ 图,若为直线,也证明物体所作的是匀变速直线运动,两图线斜率分别为 $\frac{1}{2}a$ 和 $2a$,截距分别为 v_0 和 v_0^2 .

物体在磁悬浮导轨中运动时,摩擦力和磁场的不均匀性对小车可产生作用力,对运动物体有些阻力作用,用 F_f 来表示,即 $F_f = ma_f$, a_f 作为加速度的修正值.在实验时,把磁悬浮导轨设置成水平状态,将滑块放到导轨中,用手轻推一下滑块,让其以一定的初速度从左(在斜面状态时的高端)到右运动,依次通过光电门 I 和 II,测出加速度值 a_f .重复多次,用不同力度,推动一下滑块,测出其加速度值 a_f ,比较每次测量的结果,查看有何规律.平均测量结果 a_f ,得到滑块的阻力加速度 \bar{a}_f .

3. 系统质量保持不变,改变系统所受外力,考察动摩擦力的大小及其与外力 F 的关系

考虑到滑块在磁悬浮导轨中运动时,将其所受阻力用 F_f 来表示.根据力学分析滑块所受的力,有

$$ma = mgsin \theta - F_f$$

$$F_f = mgsin \theta - ma \quad (5)$$

用已知重力加速度 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ 、小车质量和通过测量不同轨道角度 θ 时的滑块加速度值 a ,可以求得相应的动摩擦力大小.

将 F_f 与 F 的值作图,可以考察 F_f 与 F 的关系.

4. 重力加速度的测定及消减导轨中系统误差的方法

令 $F_f = ma_f$, 则有

$$a = g \sin \theta - a_f \quad (6)$$

式中 a_f 作为与动摩擦力有关的加速度修正值.

$$a_1 = g \sin \theta_1 - a_{f1} \quad (7)$$

$$a_2 = g \sin \theta_2 - a_{f2} \quad (8)$$

$$a_3 = g \sin \theta_3 - a_{f3} \quad (9)$$

.....

根据前面得到的动摩擦力 F_f 与 F 的关系可知, 在一定的小角度范围内, 滑块所受到动摩擦力 F_f 近似相等, 且 $F_f \ll mg \sin \theta$, 即

$$a_{f1} \approx a_{f2} \approx a_{f3} \cdots = \bar{a}_f \ll g \sin \theta$$

由式(7)、式(8)、式(9)可得

$$g = \frac{a_2 - a_1}{\sin \theta_2 - \sin \theta_1} = \frac{a_3 - a_2}{\sin \theta_3 - \sin \theta_2} = \cdots \quad (10)$$

5. 系统质量保持不变, 改变系统所受外力, 考察加速度 a 和外力 F 的关系

根据牛顿第二定律 $F = ma$, $a = \frac{1}{m}F$, 斜面上 $F = G \sin \theta$, 故

$$a = kF$$

如图 1 所示, 设置不同的角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \cdots$ 的斜面, 测出物体运动的加速度 a_1, a_2, a_3, \cdots 作 $a-F$ 拟合直线图, 求出斜率 $k, k = \frac{1}{m}$, 即可求得 $m = \frac{1}{k}$.

四、实验装置介绍

1. 磁悬浮原理

磁悬浮实验装置如图 3 所示, 磁悬浮导轨(图 4)实际上是一个槽轨, 长约 1.2 m, 在槽轨底部中心轴线嵌入钕铁硼(NdFeB)磁钢, 在其上方的滑块底部也嵌入磁钢, 形成两组带状磁场. 由于磁场极性相反, 上下之间产生斥力, 滑块处于非平衡状态. 为使滑块悬浮在导轨上运行, 采用了槽轨.

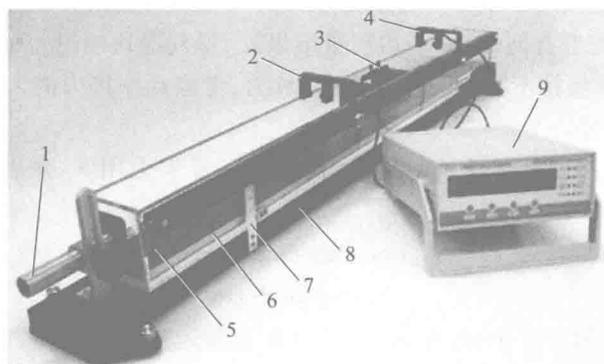


图 3. 磁悬浮实验装置

1—手柄; 2—光电门 I; 3—磁悬浮滑块; 4—光电门 II; 5—导轨; 6—标尺; 7—角度尺; 8—基板; 9—计时器

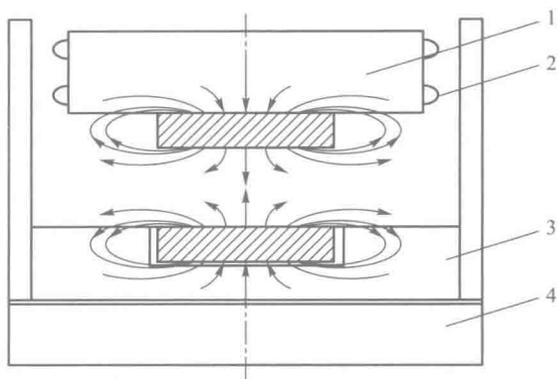


图4 磁悬浮导轨截面图

1—磁悬浮滑块;2—导向滑轮;3—磁悬浮导轨;4—基板

在导轨的基板上安装了带有角度刻度的标尺. 根据实验要求, 可把导轨设置成不同角度的斜面.

2. 仪器使用

计时器按模式0功能进行操作(见附录).

每条导轨配有三个滑块, 用来研究运动规律. 每个滑块上有两条挡光片, 滑块在槽轨中运动时, 挡光片对光电门进行挡光, 每挡光一次, 光电转换电路便产生一个电脉冲信号, 去控制计时门的开和关(即计时的开始和停止).

如图5所示, 导轨上有两个光电门, 本光电测试仪测定并存储了运动滑块上的两条挡光片通过第一光电门的时间间隔 Δt_1 、通过第二光电门的时间间隔 Δt_2 和运动滑块从第一光电门到第二光电门所经历的时间间隔 $\Delta t'$. 根据两挡光片之间的距离 Δx , 即可算出滑块上两挡光片通过第一光电门时的平均速度 $v_1 = \frac{\Delta x}{\Delta t_1}$ 和通过第二光电门时的平均速度 $v_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t_2}$.

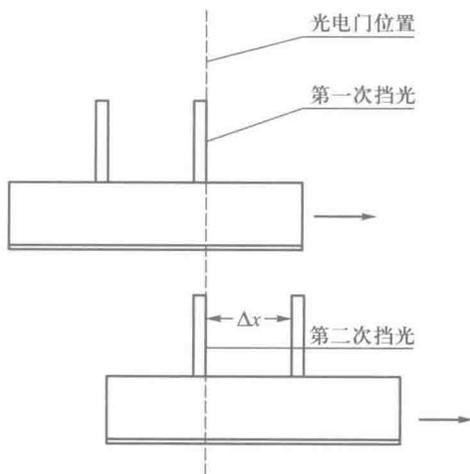


图5 时间测量图

调整导轨和基板之间成一夹角, 则实验仪成一斜面, 斜面倾斜角即为 θ , 其正弦值 $\sin \theta$ 为块规高度 h 和导轨(标尺)读数 L 的比值, 磁悬浮滑块从斜面上端开始下落, 则其重力在斜面方向分量为 $G \sin \theta$.

为使测得的平均速度更接近挡光片中心处通过时的瞬时速度, 本仪器在时间处理上已作如图6所示的处理, 本实验测试仪中, 从 v_1 增加到 v_2 所需时间已修正为 $\Delta t = \Delta t' - \frac{1}{2} \Delta t_1 + \frac{1}{2} \Delta t_2$. 根据测得的 Δt_1 , Δt_2 , $\Delta t'$ 和键入的挡光片间隔 Δx ,

六、数据记录及数据处理

1. 匀变速直线运动的研究

数据记录表如表 1 所示(供参考).

表 1 匀变速直线运动测量数据

$$P_0 = \underline{\hspace{2cm}}, \Delta x = \underline{\hspace{2cm}}, \theta = \underline{\hspace{2cm}}$$

i	P_i	$s_i = P_i - P_0$	Δt_0	v_0	Δt_i	v_i	t_i
1							
2							
3							
4							
5							
6							

NOTE

分别作直线 $v-t$ 图线和 $\frac{s}{t}-t$ 图线,若所得均为直线,则表明滑块作匀变速直线运动,由直线斜率与截距求出 a 与 v_0 ,将 v_0 与上列数据表中 \bar{v}_0 比较,并加以分析和讨论.

2. 重力加速度 g 的测量

数据记录表格如表 2 所示(供参考).

表 2 重力加速度测量数据

$$\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}, s = s_2 - s_1 = \underline{\hspace{2cm}}, a_i = \underline{\hspace{2cm}}$$

i	θ_i	a_i	$\sin \theta_i$	g_i
1				
2				
3				
4				
5				

(1) 根据 $g_i = \frac{a_i - a_f}{\sin \theta}$, 分别算出每个倾斜角度下的重力加速度 g_i ;

(2) 计算测得的重力加速度的平均值 \bar{g} , 与本地区公认值 $g_{\text{标}}$ 相比较, 求出

$$E_g = \frac{|\bar{g} - g_{\text{标}}|}{g_{\text{标}}} \times 100\%$$

3. 系统质量保持不变, 改变系统所受外力, 考察加速度 a 和外力 F 的关系
利用上一内容的实验数据, 数据记录表格如表 3 所示(供参考).

表3 加速度 a 和外力 F 的关系测量数据

$$\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}, s = s_2 - s_1 = \underline{\hspace{2cm}}, m_{\text{标}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

i	θ_i	$\sin \theta_i$	$F_i = m_{\text{标}} g \sin \theta_i$	a_i
1				
2				
3				
4				
5				

作 $a-F$ 拟合直线图, 求出斜率 k . 由 $k = \frac{1}{m}$, 求出 $m = \frac{1}{k}$, 与 $m_{\text{标}}$ 相比较, 求出

$$E_m = \frac{|m - m_{\text{标}}|}{m_{\text{标}}} \times 100\%$$

七、注意事项

1. 称量磁悬浮滑块质量时, 请用非铁磁材料放于滑块下方, 防止磁铁与电子天平相互作用, 影响称量准确性.
2. 实验做完后, 磁悬浮滑块不可长时间放在导轨中, 防止滑轮被磁化.

八、思考题

1. 实验误差主要来源有哪些? 如何消除?
2. 磁悬浮技术的主要应用有哪些?

附录 DHSY-1 型磁悬浮导轨实验智能测试仪使用说明书

1. 概述

DHSY-1 型磁悬浮导轨实验智能测试仪(简称磁悬浮测试仪)是一种将磁悬浮机理和动力学相结合的力学实验仪. 本实验仪可构成斜面, 通过滑块的运动探索牛顿第二运动定律的建立, 考察动能定理. 通过本实验, 学生可以接触到磁悬浮的物理思想和技术, 拓宽其知识面, 加深牛顿定律、动能定理等动力学的感性知识.

2. 主要工作条件及技术指标

(1) 工作条件

电源电压及频率: $220 \times (1 \pm 10\%) \text{ V}$, $50 \times (1 \pm 5\%) \text{ Hz}$;

功率 $\leq 20 \text{ W}$;

工作温度范围 $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

(2) 技术指标

磁悬浮导轨几何尺寸 $(130.0 \times 9.0 \times 21.0) \text{ cm}^3$;

磁场强度: 200 mT ;

磁悬浮小车几何尺寸(15.4×6.8×6.0)cm³.

3. 实验装置

如图3所示.

(1) 概述

DHSY-1型磁悬浮测试仪是根据磁悬浮导轨实验专门设计研制的实验装置,可同时实现十组加速度测量存储和十二种碰撞实验.本测试仪基于微控制器嵌入式设计,具有测量精度高、读数清晰、使用方便等特点.

(2) 性能

测量值	范围	精度
光电门挡光时间 t_1 、 t_2	0.00 ~ 99 999.99 ms	0.01 ms
两次挡光时间差 t_3	0.00 ~ 99 999.99 ms	0.01 ms
速度 v_1 、 v_2	0.00 ~ 600.00 cm/s	0.01 cm/s
加速度 a	0.00 ~ 600.00 cm/s ²	0.01 cm/s ²

(3) 测试仪面板

如图7所示.



图7 测试仪面板

(4) 操作

约定:加速度测量时将首先经过的光电门定为光电门I;碰撞测量时A小车位于B小车左侧,将导轨左侧光电门定为光电门I.

① 加速度测量

a. 按“功能”按钮,选择工作模式,选择加速度模式,则会使“加速度”指示灯亮(信号源是从加速度到碰撞依次扫描显示).

b. 按“翻页”按钮,可选择需存储的组号或查看各组数据.最高位数码管显示“0”~“9”,表示存储的组号.

c. 按“开始”按钮,即开始一次加速度测量过程,测量结束后数据会自动保存在当前组中.

d. 测量数据依次显示顺序: $t_1 \rightarrow v_1 \rightarrow t_2 \rightarrow v_2 \rightarrow t_3 \rightarrow a$,对应的指示灯会依次亮,每

个数据显示时间为 2 s.

e. 清除所有数据按“复位”按钮.

② 碰撞测量

a. 按“功能”按钮,选择碰撞模式,则会使“碰撞”指示灯亮.最高位数码管显示“1”~“C”,对应十二种碰撞模式(信号源是从加速度到碰撞依次扫描显示).

b. 按“开始”按钮,即开始一次碰撞测量过程,测量结束后数据会自动保存在当前组中.

c. 测量数据依次显示顺序: $At_1 \rightarrow Av_1 \rightarrow At_2 \rightarrow Av_2 \rightarrow Bt_1 \rightarrow Bv_1 \rightarrow Bt_2 \rightarrow Bv_2$,对应的指示灯会依次亮,每个数据显示时间 2 s.

d. 碰撞模式说明,如图 8 所示.

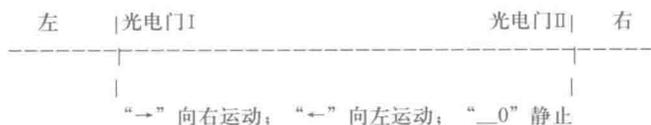


图 8 碰撞模式说明

③ 挡光片宽度设置

a. 按“功能”按钮选择工作模式,使测试仪显示为“00”,等待数秒钟,“加速度”和“碰撞”指示灯都灭后开始设置.

b. 按“翻页”按钮设置十位数字,按“开始”按钮设置各位数字.设定范围:0 ~ 99 mm,默认值:30 mm.

c. 低二位数码管显示当前设定的宽度值.

滑块上有两条挡光片或挡光框(图 5),滑块在护垫上运动时,挡光片对光电门进行挡光,每挡光一次光电转换电路便产生一个电脉冲讯号,去控制计时器的开和关.

磁浮导轨上有两个光电门,本光电测试仪测定并存储了运动滑块上的两条挡光片通过第一光电门时的第一次挡光与第二次挡光的时间间隔 Δt_1 、通过第二光电门时的第一次挡光与第二次挡光的时间间隔 Δt_2 和运动滑块从第一光电门到第二光电门所经历的时间间隔 $\Delta t'$ (图 6). 根据两挡光片之间的距离参数即可运算出滑块上两挡光片通过第一光电门时的平均速度 $v_1 = \frac{\Delta x}{\Delta t_1}$ 和通过第二光电门时的平均速度

$v_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t_2}$. 由于 Δt_1 和 Δt_2 都很小,我们又可近似地认为在该时间内物体作匀加速

运动,因此得出,时间 Δt_1 内的平均速度当作 $\frac{1}{2}\Delta t_1$ 这一时刻的瞬时速度 v_1 ; 把 Δt_2

时间内的平均速度当作 $\frac{1}{2}\Delta t_2$ 这一时刻的瞬时速度 v_2 .

在本实验测试仪中,已将从 v_1 增加到 v_2 所需时间已修正为 $\Delta t = \Delta t' - \frac{1}{2}\Delta t_1 +$

$\frac{1}{2}\Delta t_2$, 因此, 所测数据为修正值. 根据加速度定义, 在 Δt 时间内的加速度为

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

根据测得的 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t$ 和键入的挡光片间隔 Δx 值, 经智能测试仪运算已显示, 得 v_1, v_2, a_0 ; 测试仪中显示的 t_1, t_2, t_3 对应上述的 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t$.

实验十二 分光计的调整与光的衍射

光的衍射是光的波动性的一种表现. 研究光的衍射不仅有助于加深对光的波动特性的理解, 也有助于进一步学习近代光学实验技术, 如光谱分析、全息照明、光学信息处理等.

分光计作为基本的光学仪器之一, 它可以精确测定光线的偏转角, 也被称为测角仪. 光学中很多基本量(如反射角、折射角、衍射角等)都可以由它直接测量. 因此, 可以用它测定物质的有关常量(如折射率、光栅常量、光波波长等), 或研究物质的光学特性(如光谱分析). 分光计是一种精密测量仪器, 使用时必须经过一系列仔细的调整, 才能得到准确的结果. 因此, 在学习使用过程中必须认真揣摩, 注意观察, 要做到严谨、细致, 才能正确掌握.

本实验中利用分光计和光栅衍射原理来测定待测光源的波长.

一、实验目的

1. 观察光的衍射现象;
2. 了解分光计构造的基本原理, 学习分光计的调整方法;
3. 掌握测量钠光光波波长的原理和方法.

二、实验仪器

分光计、光栅、钠光灯(包括电源)、平面反射镜.

三、实验原理

由大量等宽、等间距的平行狭缝所组成的光学器件叫做光栅. 设 a 为光栅每条狭缝的宽度, b 为相邻狭缝间不透光部分的宽度, 则 $a+b=d$ 就称为光栅常量.

当一束单色平行光垂直照射在透射光栅上时, 每一狭缝透过的光都要发生衍射. 与光栅平面法线成 θ 角的平行光, 经过透镜而聚焦于屏幕上一点 P_1 (图 1). 由于光栅上各狭缝是等间距的, 所以沿 θ 角方向的由两相邻狭缝发出光束的对应光线的光程差都等于 $d \sin \theta$. 由于光程差一定, 光线彼此之间又会发生干涉. 利用凸透镜将光线会聚在屏幕上,

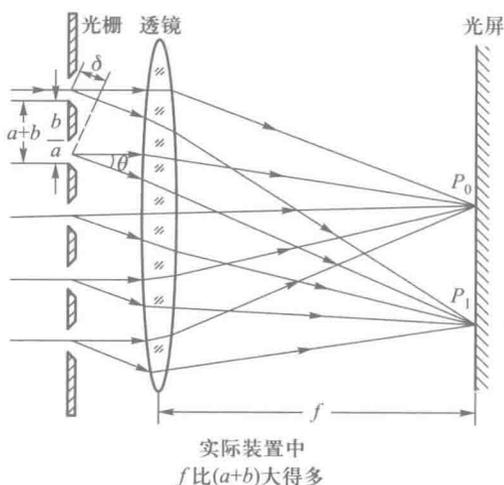


图 1 平面衍射光栅截面示意图

将会呈现由单缝衍射和多缝干涉所形成的光栅衍射条纹. 当光程差 $d\sin\theta$ 为入射光波长的整数倍时, 各平行光相互干涉而加强, 产生亮条纹. 因此, 产生亮条纹的条件为

$$d\sin\theta = \pm k\lambda \quad (1)$$

式中 d 为光栅常量, θ 为衍射角, λ 为入射光的波长, k 为谱线级次. $k=0$ 是中心亮条纹, $k=\pm 1$ 是一级亮条纹.

光栅衍射实际上是在单缝衍射基础上缝与缝之间的衍射光再产生干涉, 即衍射条纹应看作是衍射与干涉的总效果. 只有当 θ 角满足式(1)时, 才形成亮条纹, 而形成暗条纹的机会远比形成亮条纹的机会多, 这样就在亮条纹之间, 充满大量的暗条纹, 形成一片黑暗的背景. 从式(1)还可看出因为 d 很小, 所以各级亮条纹将分得很开. 一般光栅上狭缝总数很多, 透射光束较强, 干涉所得亮条纹很亮, 清晰程度也很高. 实验中可利用分光计和光栅来精确地测量衍射条纹的衍射角, 根据公式(1)可计算出入射光波长.

四、实验装置介绍

分光计的型号很多, 但结构基本相同. 现以 JJY-1'型分光计为例来介绍其结构和使用方法, 其外形结构如图 2 所示. 它由四个部件组成: 平行光管、望远镜、载物台和读数装置. 分光计的底座中心有一固定竖轴, 称为分光计的中心旋转轴. 除平行光管外, 其余部件均可绕中心轴转动.

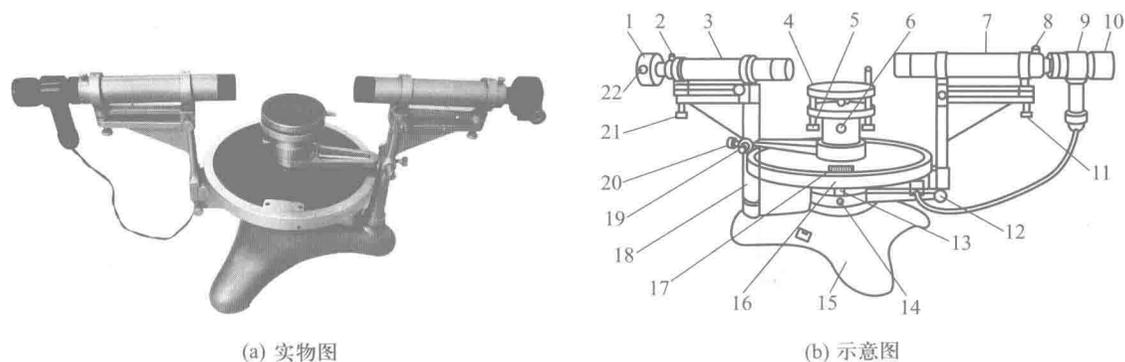


图 2 JJY-1'分光计

- 1—狭缝; 2—狭缝套筒锁紧螺钉; 3—平行光管; 4—载物台; 5—载物台水平调节螺钉(3只); 6—载物台锁紧螺钉;
7—望远镜; 8—目镜套筒锁紧螺钉; 9—阿贝式自准直目镜; 10—目镜视度调节圈; 11—望远镜水平调节螺钉;
12—望远镜转动微调螺钉; 13—刻度盘制动螺钉; 14—望远镜制动螺钉; 15—底座; 16—刻度盘; 17—游标盘;
18—立柱; 19—游标盘转动微调螺钉; 20—游标盘制动螺钉; 21—平行光管水平调节螺钉; 22—狭缝宽度调节螺钉

1. 平行光管(3)

其作用为产生平行光束. 管的一端装有会聚透镜, 另一端插入一套筒, 套筒末端为一可调狭缝, 如图 3 所示. 旋转螺钉(22)可调节狭缝宽度. 伸缩套筒可改变狭缝至透镜之间距, 当其间距等于透镜的焦距时, 就能使照在狭缝上的光经过透镜折射后成为平行光束.

螺钉(21)可调节平行光管的俯仰倾斜程度.

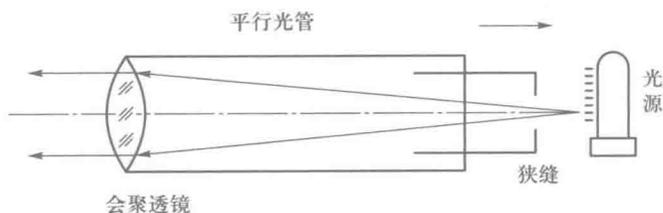


图3 平行光管结构示意图

2. 望远镜(7)

其作用为接受并观察平行光. 它由目镜、分划板及物镜三部分组成, 如图4所示. A筒为阿贝目镜. B筒中装有全反射小棱镜(在其涂黑的端面上刻有透光小十字)和分划板(为了调节和测量, 板上刻有上叉丝及中叉丝, 上叉丝十字交点与透光小十字位于中叉丝十字的对称位置). C筒上有一固定物镜. 移动A筒可以改变目镜与分划板的间距, 使在目镜视场中能清晰地看到叉丝像(即目镜对叉丝调焦). 前后移动B可以改变分划板与物镜的间距, 使叉丝位于物镜的焦平面, 则无穷远处的物体一定会成像在分划板上, 亦即望远镜适于接收并观察平行光.

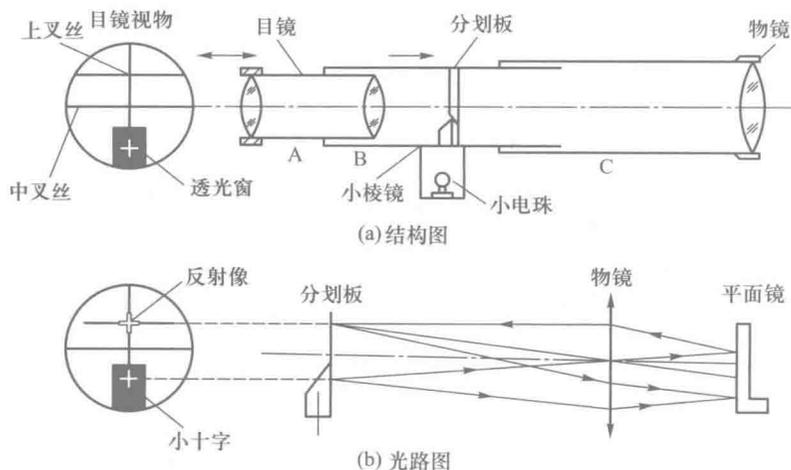


图4 望远镜内部结构示意图

3. 载物台(4)

其作用为放置待测器件(如平面镜、棱镜、光栅等). 平台上有一弹簧压片夹, 用以夹紧物体. 平台下有呈正三角形分布的(B_1 、 B_2 、 B_3), 三个调节螺钉(5), 用来调节平台面使之与中心轴垂直. 松开载物台锁紧螺钉(6), 可调节平台的高度.

待测器件放置方法, 一般可如图5所示, 以便于调节.

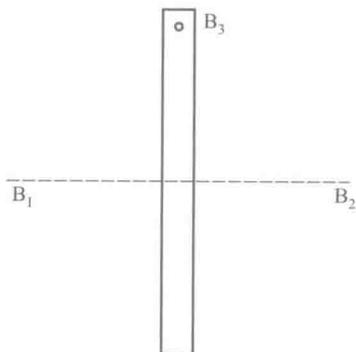


图5 待测器件放置方法

4. 读数装置

它由度盘 A 和游标盘 B 组成(图 6). 度盘 A 按圆周等分成 720 个格, 最小分格值为 $360^\circ/720=30'$. 小于 $30'$ 的读数由游标盘 B 读出. 游标圆弧等分成 30 小格, 最小分格值为 $30'/30=1'$.

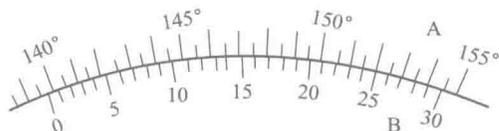


图 6 游标度盘读数示例

$$A = 139^\circ 30', B = 24', \theta = A + B = 139^\circ 54'$$

读数方法按弯游标原理读取: 以游标盘的“0”线为准, 在度盘 A 上读出 A 值, 即最小刻度以上的值 ($30'$ 以下的值); 再找游标 B 上与度盘重合的刻线, 并由游标上读出 B 值 ($30'$ 以下的值), 此二值之和即为该位置所处的角度值, 即 $\theta = A + B$.

为了消除度盘中心与分光计中心转轴的偏心而引起的误差 (即所谓仪器的偏心差), 在度盘对称方向设置有两个对称的角游标, 每次皆应读出两个角游标的读数, 并分别求出它们转过的角度, 再取平均, 以消除偏心差.

五、实验内容及步骤

1. 调整分光计

分光计调整方法如下:

(1) 对照图 2 和实物, 熟悉分光计各部分的具体结构及调整、使用方法.

(2) 粗调. 用目视法进行粗调, 使望远镜与平行光管大致共轴且与中心轴垂直, 载物台下方三只螺钉外伸部分等长, 以使载物台平面大致与中心轴垂直.

(3) 细调可分为下列三点:

① 调整望远镜聚焦于无穷远.

a. 先调整目镜, 直至从目镜中看清分划板上的刻线为止.

b. 接通照明系统, 在载物台上放上平面反射镜, 放置方法如图 5 所示. 小电珠发出的光线经全反射棱镜照亮分划板上的“十”字刻线 [图 7(a)], 当小“十”字刻线平面处在物镜的焦平面上时, 从刻线发出的光线经物镜成平行光. 平行光经平面反射镜的一个光学面反射回来, 再经物镜, 必成像于焦平面上. 于是从目镜中可以同时看到叉丝和小“十”字刻线的反射像 (绿色“十”字), 并且无视差 [图 7(b)]. 此时, 望远镜已聚焦于无穷远. 如果望远镜光轴垂直于平面反射镜, 反射像将与上叉丝重合 [图 7(c)]. 注意在调节中可前后调节望远镜的 B 筒以获得清晰绿“十”字像. 此过程就是自准法.

② 调整望远镜光轴与分光计中心轴垂直.

a. 调整原理. 若望远镜光轴垂直于平面反射镜镜面, 而且平面镜镜面平行于中心轴, 则望远镜必垂直于中心轴. 此时若将载物台绕中心轴转 180° , 使平面镜另一面对准望远镜, 望远镜光轴仍将垂直于平面镜. 若望远镜光轴开始时垂直于

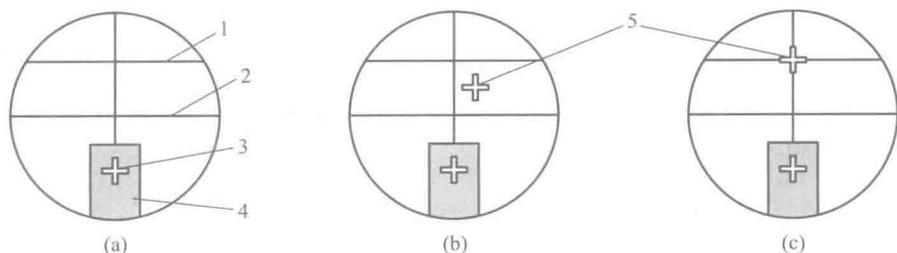


图7 望远镜视场示意图

1—上叉丝;2—中心叉丝;3—透光“十”字刻线;4—绿色背景;5—“十”字刻线的反射像(绿色)

平面镜,但不垂直于中心轴,亦即平面镜不平行于中心轴,则转动载物台 180° ,使其上面的平面镜的另一面对准望远镜时,望远镜的光轴将不再垂直于平面镜镜面。

由望远镜的结构及基本光学规律可知,当望远镜光轴垂直于平面镜镜面时,绿“十”字与上叉丝重合,如图4(b)所示。若同时有平面镜镜面平行于中心轴和望远镜光轴垂直于中心轴,则平面镜反转 180° 后,仍有望远镜光轴与平面镜垂直,绿“十”字仍与上叉丝重合,否则将不再重合。

b. 调整方法. 在望远镜聚焦于无穷远的基础上,观察绿色小“十”字,一般是偏离上叉丝的. 调节载物台调节螺钉 B_2 或 B_1 (图5),使绿色小“十”字向上叉丝字移近 $\frac{1}{2}$ 的偏离距离;再调节望远镜俯仰螺钉(图2的11);使绿色小“十”字与上叉丝重合(图8),这时,望远镜光轴与平面镜镜面垂直. 将平面镜反转 180° (通过转动载物台 180° 来实现),重复调节载物台下的调节螺钉 B_1 或 B_2 (注意不能调 B_3),以及调节望远镜俯仰调节螺钉,使绿“十”字各自消除 $\frac{1}{2}$ 与上叉丝的偏离量,这样再次使望远镜光轴与平面镜镜面垂直. 如此重复多次,直至平面镜绕中心轴旋转 180° (即转动载物台 180°),绿色小“十”字始终落在上叉丝中心为止. 每进行一次调节,望远镜光轴与中心轴垂直状态及平面镜与中心轴的平行状态就改善一次. 多次调节,逐渐达到完全重合为止,故称为逐次逼近调节. 又由于每次调节各调 $\frac{1}{2}$ 偏离量,故又称半调法。

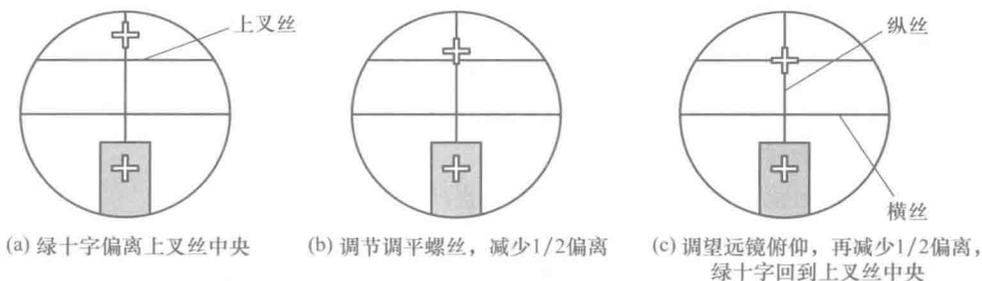


图8 半调法

③ 调整平行光管发出平行光,并使其光轴与中心轴垂直.

a. 点亮钠光灯,将狭缝照亮.

b. 打开狭缝,松开螺钉(2),如图8所示,前后移动狭缝装置(1),使从望远镜中看到清晰的狭缝像,调节螺钉(22),使缝宽约为1 mm.

c. 转动狭缝装置(1)使其狭缝呈水平,调节平行光管水平调节螺钉(21),如图8所示,使狭缝与分划板中间水平线重合.转动狭缝装置(1)使之呈垂直状态,锁紧螺钉(2).

狭缝宽度调至1 mm,并使叉丝竖线与狭缝平行,这时叉丝交点恰好在狭缝像中点,再注意消除视差.调好后固定望远镜.

2. 安置光栅

安置光栅时要求入射光垂直照射光栅表面,否则式(1)将不适用,同时平行光管狭缝与光栅刻痕相平行.

具体调节步骤为:

(1) 将光栅按图9所示,放在载物台上,先用目视使光栅平面和平行光管轴线大致垂直,然后以光栅面作为反射面,用自准法调节光栅面与望远镜轴线相垂直(注意:望远镜已调节好,不能再调).可以调节光栅支架或载物台的两个调节螺钉 B_1 、 B_2 ,使得从光栅面反射回来的叉丝像与上叉丝相重合,随后固定载物台.

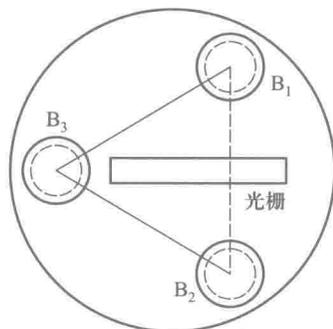


图9 光栅放置方法

(2) 转动望远镜,观察衍射光谱的分布情况,注意中央明条纹两侧的衍射光谱是否在同一水平面内.如果观察到光谱线有高低变化,说明狭缝与光栅刻痕不平行,此时调节载物台的调节螺钉 B_3 (图9),直到中央明条纹两侧的衍射光谱基本上在同一水平面内为止.

(3) 记下光栅常量 d .

3. 测量钠光各光谱线的衍射角

(1) 由于衍射光谱对中央明条纹是对称的,为了提高测量准确度,测量第 k 级光谱时,应测出 $+k$ 级和 $-k$ 级光谱线的位置.两位置的差值之半即为 θ_k .

(2) 为消除分光计刻度盘的偏心误差,测量每一条谱线时,在刻度盘上的两个游标都要读数,然后取其平均值.

(3) 为使叉丝精确对准光谱线,必须使用望远镜转动微调螺钉来对准.

(4) 测量时,可将望远镜移至最左端,从 -2 、 -1 到 $+1$ 、 $+2$ 级依次测量,以免漏测数据.

4. 计算

将测得的衍射角代入式(1),计算相应钠光光波波长.并在报告上叙述观察到的光栅衍射现象.

六、数据记录及数据处理

1. 数据表格见表 1

表 1 数据表格

光栅常量 $d = \frac{1}{300}$ mm

k	亮线位置		衍射角 θ $\theta = \frac{1}{2}(P_k - P_0 + P'_k - P'_0)$	波长 λ/nm $\lambda_k = d \sin \theta_k / k$
	P_k	P'_k		
+2				
+1				
0				
-1				
-2				

2. 计算 $k = \pm 1, \pm 2$ 级衍射光波长的平均值 $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{-1} + \lambda_{+1} + \lambda_{-2} + \lambda_{+2}}{4}$$

3. 计算 λ 的不确定度

$$\lambda_k = d \sin \theta_k / k$$

$$U(\lambda_k) = \frac{d\lambda_k}{d\theta} \cdot U(\theta_k)$$

$$U(\theta_k) = \frac{1}{2} \sqrt{U^2(P'_k) + U^2(P'_0) + U^2(P_k) + U^2(P_0)}$$

波长 λ 的不确定度为

$$U(\lambda) = \frac{1}{4} \sqrt{U^2(\lambda_{-1}) + U^2(\lambda_{+1}) + U^2(\lambda_{-2}) + U^2(\lambda_{+2})}$$

4. 表示测量结果

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm U(\lambda)$$

七、注意事项

1. 光栅是精密光学器件,不要用手去触摸表面,以免弄脏或损坏.
2. 汞灯、钠光灯灯泡需与限流器(镇流器)串联使用,不可直接与 220 V 电源相连.
3. 分光计是较精密的光学仪器,要加倍爱护,不应在制动螺丝锁紧时强行转动望远镜,也不要随意拧动狭缝.
4. 望远镜的调整是重点.首先转动目镜手轮看清分划板上的十字线,而后伸缩目镜筒看清亮十字.
5. 测量中应正确使用望远镜转动的微调螺丝,以便提高工作效率和测量准确度.

八、思考题

1. 光栅光谱和棱镜光谱有哪些不同之处?
2. 利用本实验装置怎样测定光栅常量呢?
3. 当用钠光($\lambda = 589.3 \text{ nm}$)垂直入射到 1 mm 内有 500 条刻痕的平面透射光栅上时,最多能看到第几级光谱? 说明理由.
4. 当狭缝太宽或太窄时将会出现什么现象? 为什么?

实验十三 分光计的应用与棱镜折射率的测量

光线在传播过程中,遇到不同介质的分界面(如平面镜和三棱镜的光学表面)时,就要发生反射和折射,光线将改变传播方向.反射定律、折射定律等正是这些方向之间的关系定量表述.很多光学量,如折射率、光波波长等的测量也可通过测量有关角度来进行.因而精确测量角度,在光学实验中显得非常重要.本实验中,借助分光计和光的折射原理来测量棱镜折射率.

一、实验目的

1. 进一步熟悉分光计的调整和使用;
2. 掌握测定棱镜角的方法;
3. 学会用最小偏向角法测定三棱镜对钠光的折射率.

二、实验仪器

分光计(JJY 型 1')、双面镜、钠灯、三棱镜。

三、实验原理

如图 1 所示,三角形 ABC 表示三棱镜的横截面; AB 和 AC 是透光的光学表面,又称折射面,其夹角 α 称为三棱镜的顶角; BC 为毛玻璃面,称为三棱镜的底面.假设有一束单色光 LD 入射到棱镜上,经过两次折射后沿 ER 方向射出,则入射线 LD 与出射线 ER 的夹角 δ 称为偏向角.根据图中的几何关系,偏向角 $\delta = \angle FDE + \angle FED = (i_1 - i_2) + (i_4 - i_3)$.因顶角 $\alpha = i_2 + i_3$,因而可得

$$\delta = (i_1 + i_4) - \alpha \quad (1)$$

对于给定的棱镜来说, α 是固定的, δ 随 i_1 和 i_4 而变化,而 i_4 又与 i_3, i_2, i_1 依次相关,因此 i_4 归根结底是 i_1 的函数.偏向角 δ 也就仅随 i_1 而变化.在实验中可观察到,当 i_1 变化时, δ 有一极小值,称为最小偏向角.当入射角 i_1 满足什么条件时, δ 才处于极值呢?这可按求极值的办法来推导.令 $d\delta/di_1 = 0$,则由式(1)得

$$\frac{di_4}{di_1} = -1 \quad (2)$$

再利用 $\alpha = i_2 + i_3$ 和两折射面处的折射条件

$$\sin i_1 = n \sin i_2 \quad (3)$$

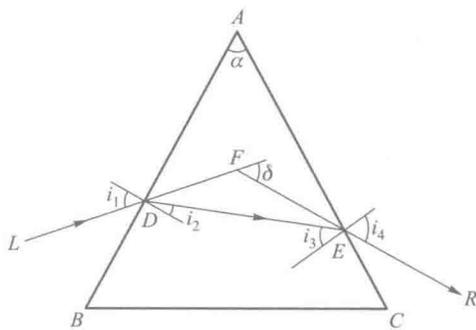


图 1 棱镜的折射

$$\sin i_4 = n \sin i_3 \quad (4)$$

得到

$$\begin{aligned} \frac{di_4}{di_1} &= \frac{di_4}{di_3} \frac{di_3}{di_2} \frac{di_2}{di_1} = \frac{n \cos i_3}{\cos i_4} \times (-1) \times \frac{\cos i_1}{n \cos i_2} \\ &= -\frac{\cos i_3 \sqrt{1-n^2 \sin^2 i_2}}{\cos i_2 \sqrt{1-n^2 \sin^2 i_3}} \\ &= -\frac{\sqrt{\sec^2 i_2 - n^2 \tan^2 i_2}}{\sqrt{\sec^2 i_3 - n^2 \tan^2 i_3}} \\ &= -\frac{\sqrt{1+(1-n^2) \tan^2 i_2}}{\sqrt{1+(1-n^2) \tan^2 i_3}} \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)和式(2)比较,有 $\tan i_2 = \tan i_3$. 在棱镜折射的情形下, i_2 和 i_3 均小于 $\pi/2$, 故有 $i_2 = i_3$. 代入式(3)和式(4), 得到 $i_1 = i_4$. 可见, δ 具有极值的条件是

$$i_2 = i_3 \quad \text{或} \quad i_1 = i_4 \quad (6)$$

当 $i_1 = i_4$ 时, δ 具有极小值. 显然, 这时入射光和出射光的方向相对于棱镜是对称的. 若用 δ_{\min} 表示最小偏向角, 将式(6)代入式(1), 得到

$$\delta_{\min} = 2i_1 - \alpha$$

或

$$i_1 = \frac{1}{2}(\delta_{\min} + \alpha)$$

而 $\alpha = i_2 + i_3 = 2i_2$, $i_2 = \alpha/2$. 于是, 棱镜对该单色光的折射率 n 为

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta_{\min} + \alpha)}{\sin \frac{1}{2}\alpha} \quad (7)$$

因此, 如果测出棱镜的顶角 α 和最小偏向角 δ_{\min} , 按照式(7)就可算出棱镜的折射率 n .

四、实验内容及步骤

1. 分光计的调整

(1) 调整要求.

- ① 望远镜能接收平行光(即望远镜聚焦于无穷远处).
- ② 平行光管能够发出平行光.
- ③ 望远镜与平行光管的光轴共轴, 且与分光计的中心轴垂直.

(2) 调整方法. 具体调整方法见“实验十二 分光计的调整与光的衍射”相关内容.

(3) 待测件的调整. 三棱镜两个光学表面的法线应与分光计的中心轴相垂直. 为此, 可根据自准原理, 用已调好的望远镜来进行调整. 先将三棱镜如图 2 所示安放在载物台上, 然后转动载物台, 使棱镜的一个折射面正对望远镜, 调整载物台下面的水平调节螺钉, 达到自准(注意: 此时望远镜已调好, 不能再调). 再旋转载物

台,使棱镜另一折射面正对望远镜,调到自准.这样反复校核几次,直到转动载物台时,两个折射面都能达到自准.

2. 棱镜顶角的测定

测量三棱镜顶角的方法有反射法及自准法两种.图3所示为反射法.将三棱镜放在载物台上,并使棱镜顶角对准平行光管,则平行光管射出的光束照在棱镜的两个折射面上.从棱镜左面反射的光可将望远镜转至 I 处观测,用望远镜转动微调螺钉使竖直叉丝对准狭缝,此时从左右两个游标可读出角度为 φ_1 和 φ'_1 ,再将望远镜转至 II 处观测从棱镜右面反射的光,同样可从左右两个游标读出角度 φ_2 和 φ'_2 ,填入表 2 中.由图 3 可得顶角为

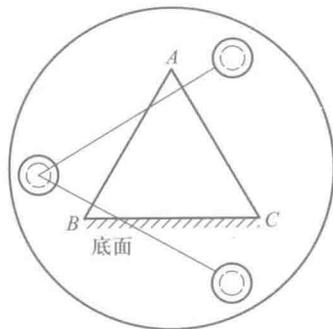


图 2 三棱镜的放法

$$\alpha = \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{4} [(\varphi_2 - \varphi_1) + (\varphi'_2 - \varphi'_1)] \quad (8)$$

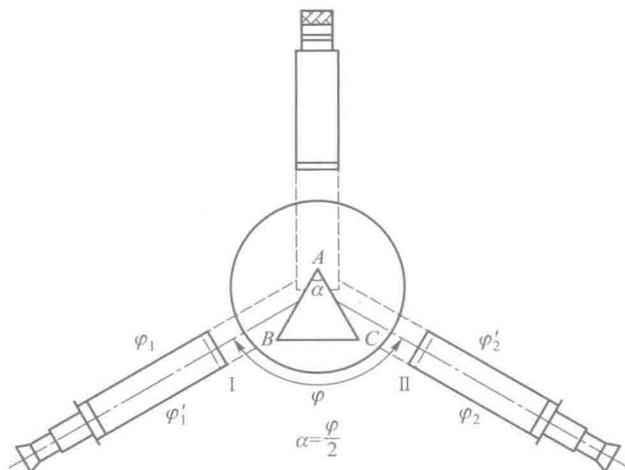


图 3 用反射法测定棱镜的顶角

重复测量多次,求出顶角的平均值.

注意:在计算望远镜转过的角度时,要注意望远镜是否经过了刻度盘的零点.例如,当望远镜由图 3 中位置 I 转到位置 II 时,读数见表 1.下面计算望远镜转过的角度.

表 1 测量读数

望远镜位置	I	II
游标 1(望远镜左侧游标)	$175^{\circ}45'(\varphi_1)$	$295^{\circ}43'(\varphi_2)$
游标 2(望远镜右侧游标)	$355^{\circ}45'(\varphi'_1)$	$115^{\circ}43'(\varphi'_2)$

游标 1 未经过零点,望远镜转过的角度为

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 119^{\circ}58'$$

游标 2 经过了零点,这时望远镜转过的角度应按下式计算:

$$\varphi = (360^\circ + \varphi_2') - \varphi_1' = 119^\circ 58'$$

如果从游标读出的角度 $\varphi_2 < \varphi_1$, $\varphi_2' < \varphi_1'$, 而游标又未经过零点, 则式(8)中的 $(\varphi_2 - \varphi_1)$ 和 $(\varphi_2' - \varphi_1')$ 应取绝对值。

三棱镜顶点应放在靠近载物台中心. 否则, 棱镜折射面的反射光不能进入望远镜。

3. 测量最小偏向角

(1) 将棱镜置于载物台上, 并使棱镜折射面的法线与平行光管轴线的夹角大致为 60° 。

(2) 观察偏向角的变化. 用光源照亮狭缝, 根据折射定律, 判断折射光线的出射方向. 先用眼睛在此方向观察, 可看到钠光谱线, 然后轻轻转动载物台, 同时注意谱线的移动情况, 观察偏向角的变化. 选择使偏向角减小的方向去缓慢转动载物台, 可看到谱线移至某一位置后将反向移动. 这说明偏向角存在一个最小值. 谱线移动方向发生逆转时的偏向角就是最小偏向角(图 4)。

(3) 用望远镜观察谱线, 在细心转动载物台时, 使望远镜一直跟踪谱线, 并注意观察钠光谱线的移动情况. 在该谱线逆转移动前, 旋紧刻度盘制动螺钉(13)和游标盘制动螺钉(20), 使载物台与游标盘固定在一起, 再利用游标盘转动微动螺钉(19), 使谱线刚好停在最小偏向角位置。

(4) 旋紧望远镜制动螺钉(14), 再用望远镜转动微调螺钉(12)作精细调节, 使竖直叉丝对准谱线中央, 从两个游标上读出角度 θ 和 θ' , 填入表 3 中。

(5) 测定入射光方向. 移去三棱镜, 将望远镜对准平行光管, 微调望远镜, 使叉丝对准狭缝中央, 在两个游标上又读得角度 θ_0 和 θ'_0 , 填入表 3 中。

(6) 按 $\delta_{\min} = \frac{1}{2} [(\theta - \theta_0) + (\theta' - \theta'_0)]$ 计算最小偏向角 δ_{\min} [差值 $(\theta - \theta_0)$ 和 $(\theta' - \theta'_0)$ 应取绝对值]. 重复测量多次, 算出 δ_{\min} 的平均值。

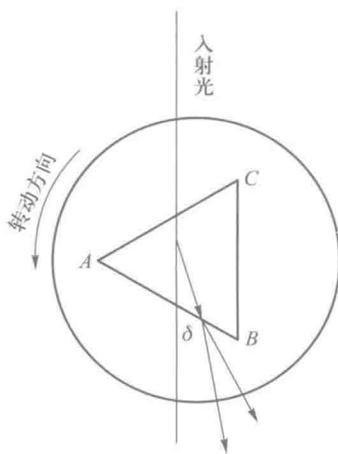


图 4 最小偏向角

五、数据记录及数据处理

1. 测量三棱镜顶角 α (注意在测量过程中, 载物台不能移动)。

表 2 测量三棱镜顶角 α

项目 次数	位置 I		位置 II		$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 $	$\Delta\varphi' = \varphi_2' - \varphi_1' $	$\alpha = \frac{1}{4} (\Delta\varphi + \Delta\varphi')$	$\bar{\alpha}$	$S(\alpha)$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$
	φ_1	φ_1'	φ_2	φ_2'						
1										
2										
3										

- (1) 求 α 的平均值.
- (2) 求 α 的不确定度(注意求不确定度时,角度应化成弧度后计算).

$$U_A(\alpha) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(\alpha)$$

$$U_B(\alpha) = \frac{1}{2} \Delta_1(\varphi) [\Delta_1(\varphi) = 1', \text{在计算中要化为弧度}]$$

$$U(\alpha) = \sqrt{U_A^2(\alpha) + U_B^2(\alpha)}$$

2. 测最小偏向角.

表 3 测最小偏向角

项目 次数	位置 I		位置 II		$\Delta\theta = \theta - \theta_0 $	$\Delta\theta' = \theta' - \theta'_0 $	$\delta_{\min} = \frac{1}{2}(\Delta\theta + \Delta\theta')$	$\overline{\delta_{\min}}$	$S(\delta_{\min})$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$
	θ	θ'	θ_0	θ'_0						
1										
2										
3										

- (1) 求 δ_{\min} 的平均值.
- (2) 求 $U(\delta_{\min})$, 方法同上.
- (3) 由式(7)计算折射率 \bar{n} .
- (4) 计算 n 的不确定度(不确定度公式自己推导,这里给出结果)为

$$U(n) = \sqrt{\left[\frac{\partial n}{\partial \delta_{\min}} U(\delta_{\min}) \right]^2 + \left[\frac{\partial n}{\partial \alpha} U(\alpha) \right]^2}$$

$$= \frac{n}{2} \sqrt{\left(\cot \frac{\alpha}{2} - \cot \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2} \right)^2 U^2(\alpha) + \cot^2 \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2} U^2(\delta_{\min})}$$

- (5) 测量结果为

$$n = \bar{n} \pm U(n)$$

六、注意事项

1. 望远镜、平行光管上的镜头,三棱镜、平面镜的镜面不能用手摸、擦.如发现尘埃时,应该用镜头纸轻轻擦拭.三棱镜、平面镜不准磕碰或跌落,以免损坏.
2. 在测量数据前务必检查分光计的几个制动螺丝是否锁紧,若未锁紧,测得的数据会不可靠.
3. 在游标读数过程中,由于望远镜可能位于任何方位,故应注意望远镜转动过程中是否过了刻度的零点.
4. 调整时应调整好一个方向,这时已调好部分的螺丝不能再随便拧动,否则会造成前功尽弃.

七、思考题

1. 用自准法调节望远镜时,如果望远镜中叉丝交点在物镜焦点以外或以内,

则叉丝交点经平面镜反射回到望远镜后的像将成在何处?

2. 在用反射法测三棱镜顶角时,为什么三棱镜放在载物台上的位置要使得三棱镜顶角离平行光管远一些,而不能太靠近平行光管呢?试画出光路图,分析其原因.

3. 除了用反射法测定棱镜顶角外,还有一种常用的自准法,请简要说明这种方法的基本原理和测量步骤.

实验十四 用牛顿环测量透镜曲率半径

牛顿环是一种同心等厚干涉条纹,因为是牛顿最早观察到的光的干涉现象,故称为牛顿环.牛顿环仪由一个球面曲率半径很大的平凸透镜的凸面紧贴在一块平板玻璃上组成,平板表面与透镜球面之间形成一个空气薄膜,膜的厚度从切点到边缘逐渐增加.在以切点为中心的任一圆周上,各点的空气层厚度相等.当用单色光垂直照射空气膜时,由平板玻璃和透镜球面反射的两束光线在透镜球面上相互干涉,形成以切点为中心的圆环形同心等厚干涉条纹.等厚干涉的应用很多,特别是在光学元件加工及质量检测方面.例如,可用于检测透镜的曲率,测定光波波长,测量微小长度、厚度和角度,检验物体表面的光洁度、平整度等.

一、实验目的

1. 观察光的等厚干涉现象,了解等厚干涉的特点;
2. 掌握利用牛顿环干涉法测量平凸透镜曲率半径的方法;
3. 了解读数显微镜的原理并能正确使用读数显微镜.

二、实验仪器

牛顿环、读数显微镜(0~50 mm,0.01 mm)、单色光源(钠灯、汞灯).

三、实验原理

如图1所示,牛顿环由平凸透镜L和磨光的平玻璃板P组成,两者相切于O点.牛顿环干涉是利用分振幅法将一束光分成两束相干光.当用波长为 λ 的单色平行光入射时,由空气膜上下表面反射的光波将在空气膜附近发生干涉,两束光的光程差随空气膜厚度的变化而变化,空气膜厚度相同处反射的光束具有相同的光程差,所得到的干涉条纹是一系列以O为中心的明暗相间的同心圆(图2).

设透镜曲率半径为 R ,对应于某干涉圆环的空气薄膜厚度为 h ,在光线垂直入射时,从空气膜上下表面反射的相干光的光程差 Δ 仅由空气薄膜的厚度 h 及光从空气到玻璃界面上反射时的附加光程差 $\lambda/2$ 决定,即

$$\Delta = 2h + \lambda/2 \quad (1)$$

由图1中的几何关系可知, $h = R - \sqrt{R^2 - r^2}$.由于 $r \ll R$,利用泰勒级数展开并略去二级小量,可得

$$h = \frac{r^2}{2R} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

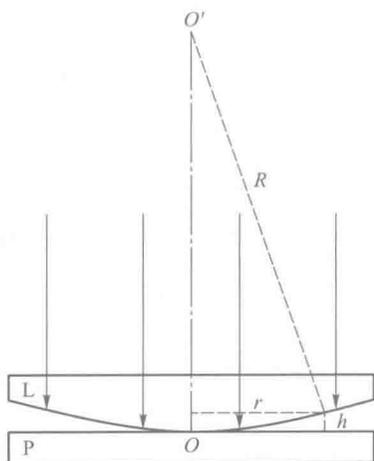


图1 牛顿环干涉示意图

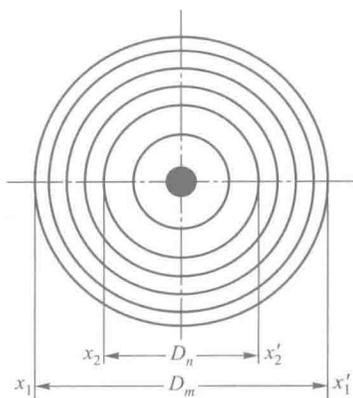


图2 牛顿环干涉条纹

再根据干涉条件,亮、暗条纹满足的关系式为

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} K\lambda, & K=1,2,3,\dots \quad (\text{亮环}) \\ (2K+1)\frac{\lambda}{2}, & K=0,1,2,\dots \quad (\text{暗环}) \end{cases} \quad (4)$$

从而可得,干涉条纹的半径为

$$r_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{(2K-1)\lambda R}{2}}, & K=1,2,3,\dots \quad (\text{亮环}) \\ \sqrt{K\lambda R}, & K=0,1,2,\dots \quad (\text{暗环}) \end{cases} \quad (5)$$

由上式可知,牛顿环干涉条纹具有如下特点:

- (1) 由于存在附加光程差,中心零级干涉应为暗点;
- (2) 由于 $r_k \propto \sqrt{K}$,故低级次干涉圆环在内,高级次干涉圆环在外;
- (3) 条纹间距不是等宽的,而是内疏外密.

公式(5)表明,当入射光波长 λ 已知时,只要测出第 K 级暗环(或亮环)的半径,即可算出透镜的曲率半径 R ;相反,当 R 已知时,即可算出 λ . 但是,由于透镜与平板玻璃在接触时由于受压力难免会发生形变,因而接触处不可能是一个几何点,而是一个圆斑,使得近圆心处花纹粗且模糊. 而且两接触面之间也极易附着尘埃,从而引起附加的光程差,以致难以确切判定环纹的干涉级数. 为了避免这一困难并减少误差,必须测量距中心较远的、比较清晰的干涉圆环,并利用两个环半径的平方差来消除附加光程差带来的影响.

假设由非光学接触或受力引起的附加光程差为 a ,则 K 级暗环满足的光程差公式为

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} + a = (2K+1)\frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

得
$$r^2 = K\lambda R - 2aR \quad (7)$$

则 m 级和 n 级暗环的半径分别满足

$$r_m^2 = m\lambda R - 2aR$$

$$r_n^2 = n\lambda R - 2aR$$

以上两式相减,得

$$r_m^2 - r_n^2 = (m-n)\lambda R \quad (8)$$

上式表明,任意两干涉圆环半径的平方差与附加光程差以及圆环的干涉级次都无关,而只与这两个环的级次之差有关.因此,只要精确测定两个环的半径,由两个半径的平方差值就可准确地算出透镜的曲率半径 R . 又因为圆环的圆心不易确定,通常通过测量圆环的直径 D 来计算透镜的曲率半径 R ,即

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} \quad (9)$$

四、实验装置

1. 牛顿环仪

牛顿环仪是由待测平凸透镜 L 和磨光的平玻璃板 P 叠合安装在金属框架 F 中构成的(图3). 框架边上有三个螺旋 H ,用以调节 L 和 P 之间的接触,以改变干涉环纹的形状和位置.

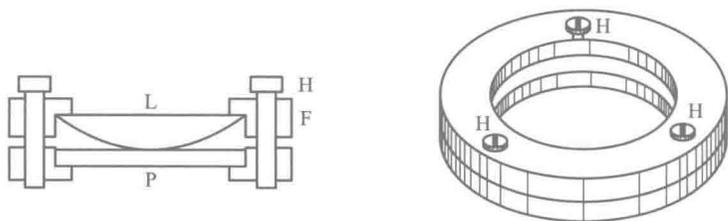


图3 牛顿环仪

2. 读数显微镜

如图4所示,读数显微镜是测微螺旋和显微镜的合体,可以用于精密的长度测量.

五、实验内容及步骤

1. 熟悉读数显微镜的构造、调节方法及读数方法

(1) 调整目镜,看清叉丝.

(2) 将待测物放到载物台上,并适当调节视场亮度.

(3) 转动调焦手轮,使镜筒下降到接近物体表面,然后从下向上缓慢移动镜筒看清待测物体.

(4) 转动测微鼓轮,使叉丝交点对准被测物体上的点或线,记下读数.

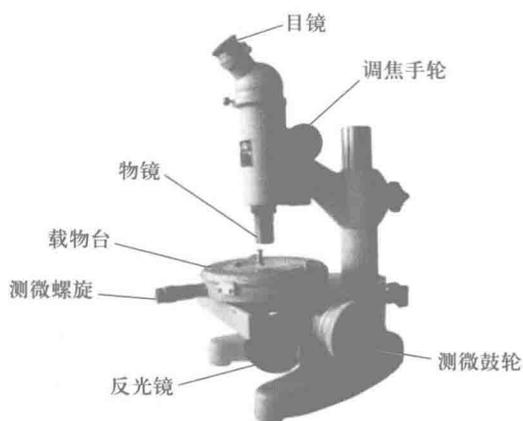


图4 读数显微镜

2. 调节实验装置

(1) 借助室内灯光,用眼睛直接观察牛顿环仪,调节框上的螺旋 H 使牛顿环呈圆形,并位于透镜的中心,但要注意螺旋不可旋得过紧.

(2) 如图 5 所示,将牛顿环置于读数显微镜正下方,打开钠光灯 S,调节 45° 玻璃片 G、读数显微镜及光源的相对位置,使显微镜中呈现明亮的黄色视场.

(3) 调节移测显微镜 M 的目镜,看清目镜中的叉丝,将移测显微镜对准牛顿环的中心,从下向上移动镜筒对干涉条纹进行聚焦,直到能清晰地看到干涉圆环.

(4) 微调牛顿环的位置并转动测微鼓轮,使叉丝交点在牛顿环中心暗环上,并保证整个调节范围内至少能观测到 50 个干涉圆环.

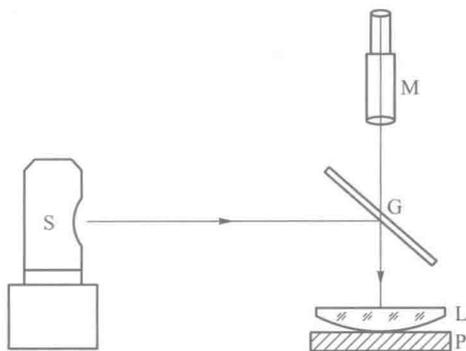


图 5 实验装置示意图

3. 测量牛顿环的直径

(1) 调节测微鼓轮,使竖直叉丝与左侧(右侧)第 50 条暗环相切,然后按级次递减的顺序依次记录第 50 条至第 46 条暗环的位置以及第 25 条至第 21 条暗环的位置;

(2) 继续沿同一方向移动读数显微镜至右侧(左侧)第 21 条暗环,然后按级次递增的顺序依次记录第 21 条至第 25 条暗环的位置以及第 46 条至第 50 条暗环的位置.

(3) 注意:为防止移测显微镜的“回程误差”,移测时必须向同一方向旋转显微镜驱动杆转盘,不许倒转.

六、数据记录及数据处理

1. 实验数据记录(见表 1,供参考)

表 1 干涉圆环级次及位置数据表

$$R_0 = \quad \text{mm}$$

暗环级次 m		50	49	48	47	46
暗环位置 /mm	右侧					
	左侧					
暗环直径 D_m /mm						
D_m^2 /mm ²						
暗环级次 n		25	24	23	22	21
暗环位置 /mm	右侧					
	左侧					
暗环直径 D_n /mm						

续表

D_n^2/mm^2					
$(D_m^2 - D_n^2)/\text{mm}^2$					
透镜曲率半径 R/mm					
$(D_m^2 - D_n^2)/\text{mm}^2$					
透镜曲率半径 \bar{R}/mm					

2. 实验数据处理

(1) 利用逐差法处理数据, 求出各级牛顿环直径的平方值 $D_m^2 - D_n^2$ 并求出相应的透镜曲率半径 R ;

(2) 求出 $\overline{D_m^2 - D_n^2}$ 及透镜曲率半径的平均测量值 $\bar{R} = \frac{\overline{D_m^2 - D_n^2}}{4(m-n)\lambda}$;

(3) 求实验测量 R 的相对误差 $E_r = \frac{|\bar{R} - R_0|}{R_0} \times 100\%$.

七、注意事项

1. 调节牛顿环仪时, 不可旋得过紧, 以免接触压力过大引起透镜弹性形变, 甚至损坏透镜;

2. 牛顿环仪、透镜和显微镜的光学表面不清洁, 要用专门的擦镜纸轻轻擦拭, 不可用手触碰;

3. 读数显微镜的测微鼓轮在每一次测量过程中只能向一个方向旋转, 中途不能反转;

4. 当用镜筒对待测物聚焦时, 为防止损坏显微镜物镜, 正确的调节方法是使镜筒逐渐移离载物台.

八、思考题

1. 如何利用牛顿环干涉测量入射光波波长?
2. 为什么有些牛顿环干涉条纹的局部呈不规则圆形?
3. 是否可以利用牛顿环透射光束的干涉来进行实验测量?

第7章 综合性实验与近代物理实验

实验十五 刚体转动惯量的测量

转动惯量是描述刚体在转动中惯性大小的物理量,它取决于刚体的总质量、质量分布、形状大小以及转轴位置.对于形状简单、质量分布均匀的刚体,可以通过数学方法计算出它绕特定转轴的转动惯量,但对于形状比较复杂或质量分布不均匀的刚体而言,用数学方法计算其转动惯量是非常困难的,因而大多采用实验方法来测定.转动惯量的测定,对于机电制造、航空、航天、航海、军工等工程技术和科学研究具有十分重要的意义.比如为了使射击更准确,可以在枪膛中设计来福线从而增加子弹飞行中的转速;高速旋转的陀螺在其支撑面角度发生变化时而陀螺转轴方向保持不变可直接应用在航空等领域;两个车轮的自行车可以在运动中保持平衡等,这些现象都不能忽视转动惯量在其中的作用.因此,学会用实验的方法测定刚体的转动惯量显然具有实际意义.测定转动惯量的方法有多种,如双线摆法、复摆法、扭摆法、落体法和恒力矩转动法等.本实验采用恒力矩转动法来测量刚体的转动惯量.

一、实验目的

1. 学习用恒力矩转动法测定刚体转动惯量的原理和方法;
2. 研究作用在刚体上的外力矩与刚体角加速度的关系,验证刚体定轴转动定律;
3. 观测刚体的转动惯量随其总质量、质量分布及转轴不同而改变的情况,验证平行轴定理;
4. 学会使用智能计时计数器测量时间.

二、实验仪器

1. ZKY-ZS 转动惯量实验仪一台(包括转动主体一套、载物台一个、待测刚体圆盘和圆环各一个)、圆柱体两个、滑轮支架一套、砝码若干、支脚三个、1 m 细线一根;
2. ZKY-J1 智能计算机计时器一台(计时范围 0 ~ 999.999 s, 计量误差 < 0.0005 s), 配备一个 +9 V 稳压直流电源;
3. 游标卡尺、钢尺各一把、天平一台、水平仪一个.

三、实验原理

1. 恒力矩转动法测定转动惯量的原理

刚体的定轴转动定律为

$$M = J\alpha \quad (1)$$

根据方程(1)可知,测定刚体定轴转动时所受的总合外力矩及该力矩作用下刚体转动的角加速度,即可计算出该刚体的转动惯量.这就是恒力矩转动法测量刚体转动惯量的基本原理和设计思路.

如图1(a)所示,放置被测刚体的空实验台可绕中心轴转动,设其绕其中心轴的转动惯量为 J_1 .空实验台在未加砝码时以一定初始角速度转动,由于摩擦阻力矩 M_μ 的作用,空实验台将以角加速度 α_1 作匀减速转动,其动力学方程为

$$-M_\mu = J_1\alpha_1 \quad (2)$$

其中 M_μ 是摩擦阻力矩, α_1 是空实验台减速过程中的角加速度.若将质量为 m 的砝码用细线通过定滑轮绕在半径为 R 的实验台塔轮上,并让其由静止开始自由下落,系统在恒外力作用下将作匀加速运动.对砝码进行受力分析,如图1(b)所示,细线中张力 F 和砝码重力满足牛顿第二定律

$$mg - F = ma \quad (3)$$

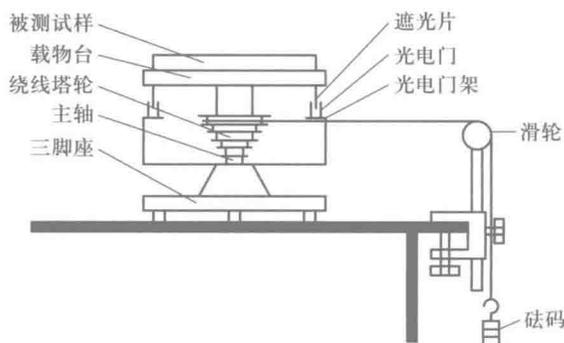
空实验台绕轴做匀加速转动,根据定轴转动定律可知

$$FR - M_\mu = J_1\alpha_2 \quad (4)$$

方程中 α_2 是空实验台加速过程中的角加速度, F 为细线中的张力, R 是细线所绕的空实验台塔轮半径.加速度 a 和角加速度 α 之间满足关系 $a = R\alpha_2$.联立方程(2)、(3)、(4)消去摩擦阻力矩 M_μ ,可以解出空实验台的转动惯量为

$$J_1 = \frac{mgR}{\alpha_2 - \alpha_1} - \frac{mR^2\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (5)$$

根据方程(5)可知,测出砝码质量、细线所绕塔轮半径 R 以及空实验台转动的角加速度 α_1 、 α_2 ,即可得出空实验台的转动惯量.



(a) 转动惯量实验仪

(b) 砝码受力分析示意图

图1 转动惯量实验装置图

将待测刚体放置在空实验台上,利用相同测量方法和原理可以得出空实验台和待测刚体的总转动惯量 J_2 为

$$J_2 = \frac{mR(g - R\alpha'_2)}{\alpha'_2 - \alpha'_1} \quad (6)$$

由转动惯量的叠加原理可知,待测刚体的转动惯量 J' 为

$$J' = J_2 - J_1 \quad (7)$$

因此,测得 R, m 及 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha'_1, \alpha'_2$, 由式(5)、(6)、(7)即可计算出被测试件的转动惯量.

2. 角加速度 α 的测量

下面分析实验台转动中的角加速度的测量方法. 实验台作匀变速转动,角坐标满足

$$\theta = \omega t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (8)$$

假设 t_0 为初始时刻,对应的角坐标和角速度分别为 θ_0 和 ω_0 ,则任意时刻 t_1 和 t_2 的角坐标满足

$$\begin{cases} \theta_1 - \theta_0 = \omega_0(t_1 - t_0) + \frac{1}{2}\alpha(t_1 - t_0)^2 \\ \theta_2 - \theta_0 = \omega_0(t_2 - t_0) + \frac{1}{2}\alpha(t_2 - t_0)^2 \end{cases} \quad (9)$$

联立方程(8)、(9),消去 ω_0 ,可求角加速度大小为

$$\alpha = \frac{2[(\theta_2 - \theta_0)(t_1 - t_0) - (\theta_1 - \theta_0)(t_2 - t_0)]}{(t_2 - t_0)^2(t_1 - t_0) - (t_1 - t_0)^2(t_2 - t_0)} \quad (10)$$

由此可知,只需测量出两个不同时间间隔下对应的角位移,可计算出角加速度.

实验中采用智能计时计数器记录时间间隔和相应的角位移,固定在载物台圆周边缘、角度相差 π 的两遮光细棒,每转动半圈遮挡固定在底座上的光电门一次,即产生一个计数光电脉冲,计数器就会计下遮挡次数 k 和相应的时间 t . 若从第一次挡光 ($k_0=0, t_0=0$) 开始计次、计时,且初始角速度为 ω_0 ,则对于匀变速运动中测量得到的任意两组数据 (k_1, t_1) 和 (k_2, t_2),相应的角位移满足 $\theta_1 - \theta_0 = k_1\pi$ 和 $\theta_2 - \theta_0 = k_2\pi$,则角加速度

$$\alpha = \frac{2\pi(k_2t_1 - k_1t_2)}{t_2^2t_1 - t_1^2t_2} \quad (11)$$

由式(11)即可计算出角加速度大小.

3. 平行轴定理

若质量为 m 的刚体围绕其几何中心轴转动的转动惯量 J_0 ,则刚体绕与中心轴平行且相距为 d 的另一轴转动的转动惯量 J 为

$$J = J_0 + md^2 \quad (12)$$

这就是平行轴定理,本实验利用转动惯量实验仪可以验证此定理.

四、实验装置介绍

1. ZKY-ZS 转动惯量实验仪

转动惯量实验仪装置如图 1 所示,被测试样放置在载物台(又称空实验台)上,

可随其一起绕中心轴转动. 绕线塔轮通过特制的轴承安装在主轴上,使其转动时摩擦力矩很小. 塔轮半径为分别 15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm,共 5 挡,可与质量不同的砝码组合产生大小不同的力矩. 载物台用螺钉与塔轮固定在一起,随塔轮一起转动. 细线一端连接一定质量的砝码,另一端通过固定于桌面的定滑轮紧密绕在塔轮的凹槽中. 若砝码由静止释放,则在下落过程中空实验台及试样会随着塔轮一起作匀加速转动. 空实验台边缘下方对称位置固定两个遮光片,其随空实验台一起转动,遮光片每通过光电门一次,连接光电门的智能计时计数器就会计数、计时一次,并保存相关数据. 转动惯量实验仪上设定有两个光电门,其中一个光电门作测量用,另一个作备用,可通过智能计时计数器上的按钮切换功能.

被测试样有 1 个圆盘、1 个圆环、两个圆柱,试样上都标有几何尺寸及质量,可利用理论公式计算各自绕其中心轴的转动惯量,便于将转动惯量的测试值与理论计算值进行比较. 圆柱试样可插入载物台上的不同小孔,这些小孔离中心的距离分别为 50 mm、75 mm、100 mm,如图 2 所示,将圆柱体放置于不同位置处,测量其转动惯量,可用来验证平行轴定理. 铝制小滑轮的转动惯量与实验台相比可忽略不计.

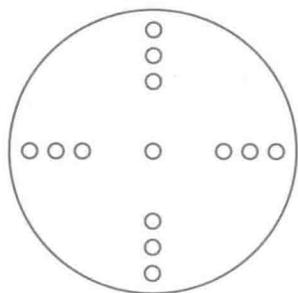


图 2 载物台俯视图



图 3 智能计时计数器

2. 智能计时计数器简介及技术指标

(1) 主要技术指标

时间分辨率(最小显示位)为 0.0001 s,误差为 0.004%. 最大功耗 0.3 W

(2) 智能计时计数器简介

智能计时计数器配备一个+9 V 稳压直流电源.

智能计时计数器(图 3):+9 V 直流电源输入端;122×32 点阵图形 LCD;三个操作按钮:模式选择/查询下翻按钮、项目选择/查询上翻按钮、确定/开始/停止按钮;四个信号源输入端,两个 4 孔输入端是一组,两个 3 孔输入端是另一组,4 孔的 A

通道与 3 孔的 A 通道统属同一通道,不管接哪个效果一样,同样 4 孔的 B 通道与 3 孔的 B 通道统属同一通道,如图 4 所示。

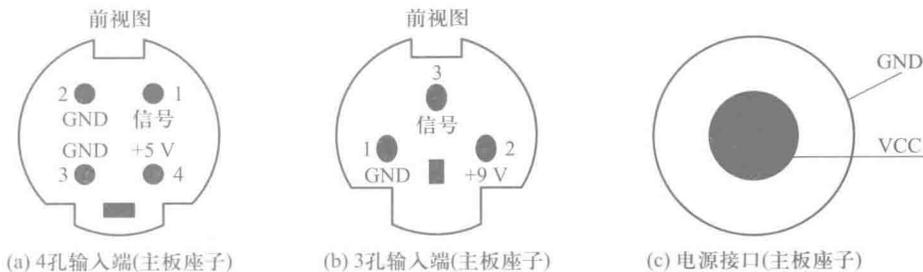


图 4 智能计时计数器接口

(3) 智能计时计数器操作

通电开机后显示“智能计数计时器”画面,延时一段时间显示操作界面:

上方为测试模式名称和序号,例:“1 计时 ←”表示按模式选择/查询下翻按钮选择测试模式;

下方为测试项目名称和序号,例:“1-1 单电门 ⇌”表示按项目选择/查询上翻按钮选择测试项目。

选择好测试项目后,按确定键,LCD 将显示“选 A 通道测量 ⇌”,然后通过按模式选择/查询下翻按钮和项目选择/查询上翻按钮进行 A 通道或 B 通道的选择,选择好后再次按下确认键即可开始测量.一般测量过程中将显示“测量中 * * * *”,测量完成后自动显示测量值,若该项目有几组数据,可按查询下翻按钮或查询上翻按钮进行查询,再次按下确定键退回到项目选择界面.如未测量完成就按下确定键,则测量停止,将根据已测量到的内容进行显示,再次按下确定键将退回到测量项目选择界面。

AB 通道可以互换,如为单电门时,使用 A 通道或 B 通道都可以,但是尽量避免同时插入 AB 两通道,以免互相干扰.如为双电门,则产生前脉冲的光电门可接 A 通道也可接 B 通道,后脉冲则可插在另一个通道。

如果光电门被遮挡时输出的信号端是高电平,则仪器测量脉冲的上升前沿间的时间.如果光电门被遮挡时输出的信号端是低电平,则仪器测量脉冲的上升后沿间的时间。

智能计时计数器模式种类及功能见附录。

五、实验内容及步骤

1. 实验准备

在桌面上放置 ZKY-ZS 转动惯量实验仪,借助水平仪,调节基座上的三个调平螺钉,使仪器处于水平状态.将滑轮支架固定在实验台面边缘,调整滑轮高度及方位,使滑轮槽与选取的绕线塔轮槽等高,且确保其方位相互垂直,如图 1 所示.并且用数据线将智能计时计数器中 A 或 B 通道与转动惯量实验仪其中一个光电门相

连接.

2. 测量并计算空实验台的转动惯量 J_1

(1) 测量匀减速角加速度 α_1

通电开机后 LCD 显示“智能计数计时器”欢迎界面,延时一段时间显示操作界面:

① 选择“计时 1-2 多脉冲”;

② 选择通道;

③ 用手轻轻拨动载物台,使实验台有一个初始转速度并在摩擦阻力矩作用下作匀减速转动;

④ 按确认键进行测量;

⑤ 载物盘转动 15 圈后按确认键停止测量;

⑥ 查阅数据,并将查阅到的数据记入表 1 中;

⑦ 按确认键后返回“计时 1-2 多脉冲”界面.

采用逐差法处理数据,将第 1 和第 5 组,第 2 和第 6 组……分别组成 4 组,根据式 (11) 计算出对应各组的 α_1 值,然后取其平均值作为 α_1 的测量值.

(2) 测量匀加速角加速度 α_2

① 选择合适的塔轮半径 R 及砝码质量,将一端打结的细线沿塔轮上开的细缝塞入,并且不重叠的密绕于所选定塔轮半径的凹槽中,细线另一端通过定滑轮连接砝码托上的挂钩,用手将载物台稳住;

② 释放载物台,砝码重力产生的恒力矩使实验台产生匀加速转动,记录 8 组数据后停止测量. 查阅、记录数据于表 2 中,同样采用逐差法并根据式 (11) 计算 α_2 的值.

(3) 将加速度 α_1 、 α_2 代入式 (5) 即可算出空实验台的转动惯量 J_1 的大小.

3. 测量并计算空实验台放上试样后的总转动惯量 J_2 , 计算试样的转动惯量 J' , 并与理论值比较

将待测试样(圆盘、圆环)放上载物台并使试样几何中心轴与转轴中心重合,按与测量空试验台转动惯量 J_1 相同的方法可分别测量匀减速转动的角加速度 α'_1 与匀加速转动的角加速度 α'_2 . 将测得的 α'_1 、 α'_2 代入式 (6) 计算总的转动惯量 J_2 的值,根据式 (7) 可进一步计算出试样的转动惯量 J' .

圆盘绕其几何中心轴的转动惯量理论公式为

$$J_{\text{理}} = \frac{1}{2}mR^2 = \frac{1}{8}mD^2 \quad (13)$$

圆环绕其几何中心轴的转动惯量理论公式为

$$J_{\text{理}} = \frac{m}{2}(R_{\text{外}}^2 + R_{\text{内}}^2) = \frac{m}{8}(D_{\text{外}}^2 + D_{\text{内}}^2) \quad (14)$$

将圆盘、圆柱的相关数据填入表 3、表 4 中.

计算试样的转动惯量理论值并与测量值 J' 比较,计算测量值的相对误差

$$E_r = \left| \frac{J' - J_{\text{理论}}}{J_{\text{理论}}} \right| \times 100\% \quad (15)$$

4. 验证平行轴定理

将两个圆柱体对称插入载物台上与中心相距为 d 的圆孔中, 利用上述方法测量并计算出圆柱体关于中心轴的转动惯量. 而此转动惯量可根据平行轴定理得出理论结果, 即

$$J_{\text{理}} = J_0 + md^2 \quad (16)$$

其中

$$J_0 = \frac{1}{2}mR^2 = \frac{1}{8}mD^2 \quad (17)$$

为圆柱体绕自身几何中心轴转动的转动惯量, 将测量值与理论值相比较, 计算测量值的相对误差, 并验证平行轴定理.

六、数据记录及数据处理

表 1 测量空实验台的角加速度

匀减速					匀加速 $D_{\text{磨轮}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mm}, m_{\text{砝码}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ g}$						
k	1	2	3	4	平均	k	1	2	3	4	平均
t/s						t/s					
k	5	6	7	8		k	5	6	7	8	
t/s						t/s					
$\alpha_1' / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$						$\alpha_2' / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$					

表 2 测量空实验台加圆环的角加速度

$$D_{\text{外}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mm}, D_{\text{内}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mm}, m_{\text{圆环}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ g}$$

匀减速					匀加速 $D_{\text{磨轮}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mm}, m_{\text{砝码}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ g}$						
k	1	2	3	4	平均	k	1	2	3	4	平均
t/s						t/s					
k	5	6	7	8		k	5	6	7	8	
t/s						t/s					
$\alpha_1' / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$						$\alpha_2' / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$					

表 3 测量实验台加圆盘的角加速度

$$D_{\text{圆盘}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mm}, m_{\text{圆盘}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ g}$$

匀减速					匀加速 $D_{\text{磨轮}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mm}, m_{\text{砝码}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ g}$						
k	1	2	3	4	平均	k	1	2	3	4	平均
t/s						t/s					
k	5	6	7	8		k	5	6	7	8	
t/s						t/s					
$\alpha_3' / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$						$\alpha_4' / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$					

表 4 测量两圆柱中心与转轴距 $d=75\text{ mm}$ 的角加速度

$$D_{\text{圆柱}} = \text{--- mm}, m_{\text{圆柱}} = \text{--- g}$$

匀减速					匀加速 $D_{\text{塔轮}} = \text{--- mm}, m_{\text{砝码}} = \text{--- g}$						
k	1	2	3	4	平均	k	1	2	3	4	平均
t/s						t/s					
k	5	6	7	8		k	5	6	7	8	
t/s						t/s					
$\alpha'_5 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$						$\alpha'_6 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$					

七、注意事项

1. 注意智能计时计数器的操作方法,特别要避免按错键,使所测得的数据被清除.智能计时计数器有 A、B 两个通道,每通道都各有两个不同的插件(分别为电源+5V 的光电门 4 芯和电源+9V 的光电门 3 芯),同一通道不同插件的关系是互斥的,禁止同时接插同一通道不同插件.

2. 注意调整好仪器以下部分:载物台水平、塔轮及滑轮两者凹槽等高且方位垂直,以免细线张力和转轴摩擦阻力以外的力矩作用于转动的刚体,造成测量误差.

3. 细线长度不得超过定滑轮顶部至地面的距离,避免砝码落地后,细线仍然缠绕在塔轮上.

八、思考题

1. 由实验结果可以看出,圆盘与圆环的质量和半径很接近,但转动惯量不同,试想为什么?

2. 如何测定任意形状的物体绕特定轴转动的转动惯量?

3. 如果载物台关于旋转轴的质量分布不对称,对实验是否有影响?应如何处理?

4. 实验中所选取的塔轮半径和砝码质量的大小对测量结果有何影响?理论上,同一待测样品的转动惯量不随转动力矩的变化而变化.改变塔轮半径或砝码质量(5 个塔轮,5 个砝码)可得到 25 种组合,形成不同的力矩.可改变实验条件进行测量并对数据进行分析,探索其规律,寻求产生误差的原因,探索测量的最佳条件.

5. 固定在桌面上的定滑轮半径和质量的大小对实验结果有何影响,如何作最佳选择?

6. 如果你曾经用三线摆和单丝扭摆测量过刚体转动惯量,试比较这三种测量方法的优缺点.

附录 模式种类及功能

A 计时

计时	单电门 	多脉冲 	双电门 	单摆周期 	时钟
----	---------	---------	---------	----------	--------

B 速度

速度	单电门 (cm/s) 	碰撞 (cm/s) 	角速度 (rad/s) 	转速 (rev/s)
----	-------------------	------------------	--------------------	-------------------

C 加速度

加速度	单电门 (cm/s ²) 	线加速度 (cm/s ²) 	角加速度 (rad/s ²) 	双电门 (cm/s)
-----	---------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------

D 计数

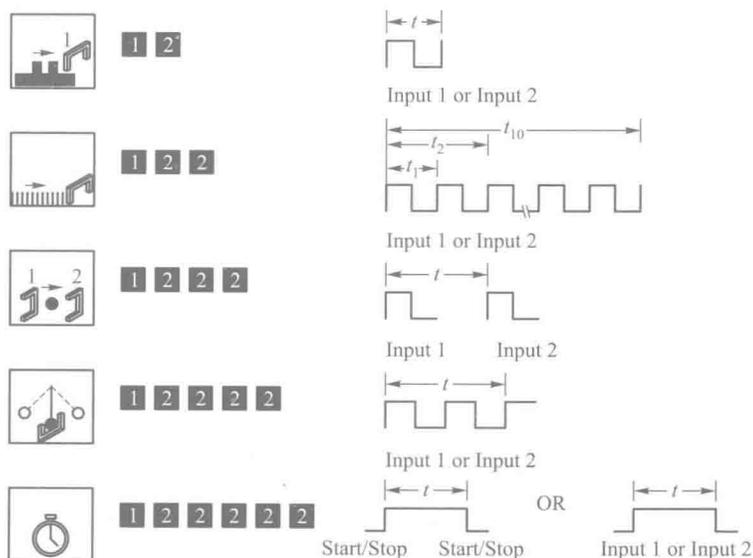
计数	30秒	60秒	3分钟	手动
----	-----	-----	-----	----

E 自检

自检	光电门自检
----	-------

测量信号输入:

A 计时



A-1 单电门,测试单电门连续两脉冲间距时间.

A-2 多脉冲,测量单电门连续脉冲间距时间,可测量 99 个脉冲间距时间.

A-3 双电门,测量两个电门各自发出单脉冲之间的间隔时间.

A-4 单摆周期,测量单电门第3个脉冲到第1个脉冲之间的间隔时间.

A-5 时钟,类似跑表,按下确定键则开始计时.

B 速度

	1 1 2		Speed=1 cm/t
		Input 1 or Input 2	
	1 1 2 2		Speed _n =1 cm/t _n
		Input 1 Input 1 Input 2 Input 2	
	1 1 2 2 2		Speed=[(2*pi rad/rev)*0.1 rad]/t
		Input 1 or Input 2	
	1 1 2 2 2 2		Speed=0.1 rev/t
		Input 1 or Input 2	

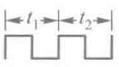
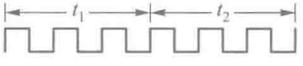
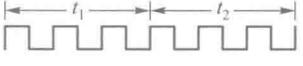
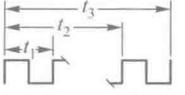
B-1 单电门,测得单电门连续两脉冲间距时间 t ,然后根据公式计算速度.

B-2 碰撞,分别测得各个光电门在去和回时遮光片通过光电门的时间 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ,然后根据公式计算速度.

B-3 角速度,测得圆盘两遮光片通过光电门产生的两个脉冲间时间 t ,然后根据公式计算速度.

B-4 转速,测得圆盘两遮光片通过光电门产生的两个脉冲间时间 t ,然后根据公式计算速度.

C 加速度

	1 1 1 2		Accel=2*(5 cm/t ₁ -5 cm/t ₂)/(t ₁ +t ₂)
		Input 1 or Input 2	
	1 1 1 2 2		Accel=2*[(0.4 rev*15 cm)/t ₁ -(0.4 rev*15 cm)/t ₂]/(t ₁ -t ₂)
		Input 1 or Input 2	
	1 1 1 2 2 2		Accel=2*0.4 rev*2*pi*[(1/t ₁)-(1/t ₂)]/(t ₁ -t ₂)
		Input 1 or Input 2	
	1 1 1 2 2 2 2		dT ₁ =t ₁ , dT ₂ =t ₃ -t ₂ dT=t ₂ +[(t ₃ -t ₂)/2-t ₁ /2]=(t ₃ +t ₂ -t ₁)/2 v ₁ =1 cm/dT ₁ , v ₂ =1 cm/dT ₂ , dv=v ₂ -v ₁ a=dv/dT
		Input 1 Input 2	

C-1 单电门,测得单电门连续三脉冲之间的时间间隔 t_1 、 t_2 ,然后根据公式计算加速度.

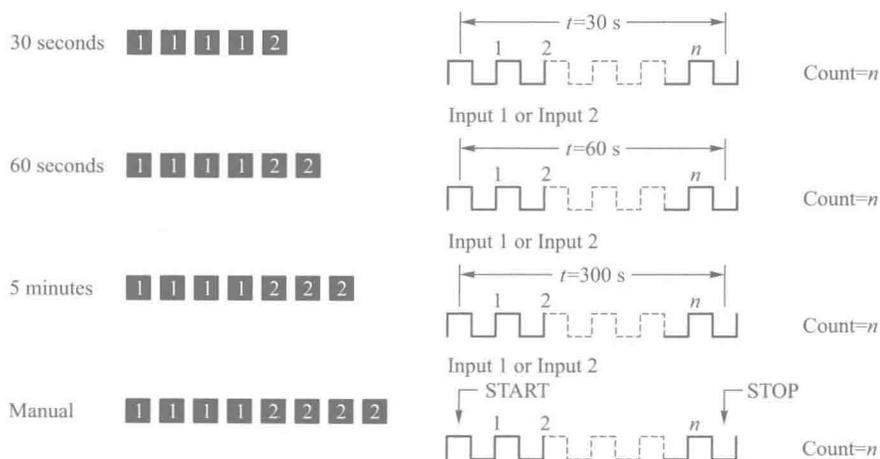
C-2 线加速度,测得单电门连续七脉冲的第1个脉冲与第4个脉冲之间的时间间隔 t_1 、第7个脉冲与第4个脉冲之间的时间间隔 t_2 ,然后根据公式计算加速度.

C-3 角加速度,测得单电门连续七脉冲的第1个脉冲与第4个脉冲之间的时

间间隔 t_1 、第 7 个脉冲与第 4 个脉冲之间的时间间隔 t_2 ，然后根据公式计算角加速度。

C-4 双电门，测得 A 通道第 2 个脉冲与第 1 个脉冲之间的时间间隔 t_1 ，B 通道第 1 个脉冲与 A 通道第 1 个脉冲之间的时间间隔 t_2 ，B 通道第 2 个脉冲与 A 通道第 1 个脉冲之间的时间间隔 t_3 ，然后根据公式计算加速度。

D 计数



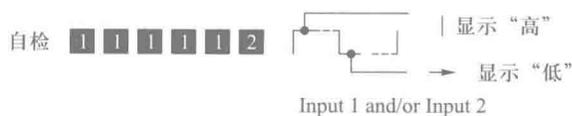
D-1 30 s，第 1 个脉冲开始计时，共计 30 s，记录累计脉冲个数。

D-2 60 s，第 1 个脉冲开始计时，共计 60 s，记录累计脉冲个数。

D-3 5 min，第 1 个脉冲开始计时，共计 5 min，记录累计脉冲个数。

D-4 手动第 1 个脉冲开始计时，手动按下确定键停止，记录累计脉冲个数。

E 自检



检测信号输入端电平。特别注意：如某一通道无任何线缆连接，将显示“高”。自检时正确的方法应该是通过遮挡光电门来查看 LCD 显示通道是否有高低变化。有变化则光电门正常，反之异常。

实验十六 玻尔共振实验

在机械制造和建筑工程等科技领域中, 受迫振动所导致的共振现象引起工程技术人员极大注意, 因为共振既有破坏作用, 但也有许多实用价值. 众多电声器件是运用共振原理设计制作的. 此外, 在微观科学研究中, “共振”也是一种重要研究手段, 例如利用核磁共振和顺磁共振研究物质结构等. 表征受迫振动性质有受迫振动的振幅-频率特性和相位-频率特性(简称幅频和相频特性). 本实验中采用玻尔共振仪定量测定机械受迫振动的幅频特性和相频特性, 并利用频闪方法来测定动态的物理量——相位差.

一、实验目的

1. 研究玻尔共振仪中弹性摆轮受迫振动的幅频特性和相频特性;
2. 学习测量阻尼系数;
3. 学习用频闪法测定运动物体的某些量, 例如相位差.

二、实验仪器

ZKY-BG 玻尔共振实验仪.

三、实验原理

物体在周期性外力的持续作用下发生的振动称为受迫振动, 这种周期性的外力称为强迫力(驱动力). 如果外力是按简谐振动规律变化, 那么稳定状态时的受迫振动也是简谐振动, 此时, 振幅保持恒定, 振幅的大小与强迫力的频率和原振动系统无阻尼时的固有振动频率以及阻尼系数有关. 在受迫振动状态下, 系统除了受到强迫力的作用外, 同时还受到回复力和阻尼力的作用. 所以在稳定状态时物体的位移、速度变化与强迫力变化不是同相位的, 存在一个相位差. 当强迫力频率与系统的固有频率相近时产生共振, 此时振幅最大, 相位差为 90° .

本实验采用摆轮在弹性力矩作用下作自由振动, 在电磁阻尼力矩作用下作阻尼振动, 在周期性强迫外力矩作用下作受迫振动来研究振动特性, 可直观地显示机械振动中的一些物理现象. 当摆轮受到周期性强迫外力矩 $M = M_0 \cos \omega t$ 的作用, 并在有空气阻尼和电磁阻尼的介质中运动时(阻尼力矩为 $-b \frac{d\theta}{dt}$), 其运动方程为

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -k\theta - b \frac{d\theta}{dt} + M_0 \cos \omega t \quad (1)$$

式中 J 为摆轮的转动惯量, $-k\theta$ 为弹性力矩, M_0 为强迫力矩的幅值, ω 为强迫力的圆频率. 令 $\omega_0^2 = \frac{k}{J}$, $2\beta = \frac{b}{J}$, $m = \frac{M_0}{J}$, 则式(1)变为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\beta \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \theta = m \cos \omega t \quad (2)$$

当 $m \cos \omega t = 0$ 时, 式(2)即为阻尼振动方程. 同时当 $\beta = 0$, 即在无阻尼情况时, 式(2)变为简谐振动方程, 系统的固有频率为 ω_0 . 式(2)的通解为

$$\theta = \theta_1 e^{-\beta t} \cos(\omega_1 t + \alpha) + \theta_2 \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

其中 $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ 由式(3)可得, 受迫振动可分成两部分:

第一部分: $\theta_1 e^{-\beta t} \cos(\omega_1 t + \alpha)$ 和初始条件有关, 经过一定时间后衰减消失.

第二部分: 表示强迫力矩对摆轮做功, 向振动体传送能量, 最后达到一个稳定的振动状态. 振幅为

$$\theta_2 = \frac{m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (4)$$

它与强迫力矩之间的相位差为

$$\varphi = \arctan \frac{-2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \arctan \frac{-\beta T_0^2 T}{\pi(T^2 - T_0^2)} \quad (5)$$

式中 T 为强迫力的周期, T_0 为系统的固有周期. 由式(4)和式(5)可看出, 振幅 θ_2 与相位差 φ 的数值取决于比值 m 、强迫力的频率 ω 、系统的固有频率 ω_0 和阻尼系数 β 四个因素, 而与振动初始状态无关. 由

$$\frac{\partial}{\partial \omega} [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2] = 0$$

的极值条件可得出, 当强迫力的圆频率 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ 时, 振幅 θ_2 达到极大值, 产生共振. 若共振时圆频率和振幅分别用 ω_r 、 θ_r 表示, 则

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (6)$$

$$\theta_r = \frac{m}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (7)$$

式(6)、式(7)表明, 阻尼系数 β 越小, 共振时圆频率越接近于系统固有频率, 振幅 θ_r 也越大. 图1和图2表示在不同 β 时受迫振动的幅频特性和相频特性.

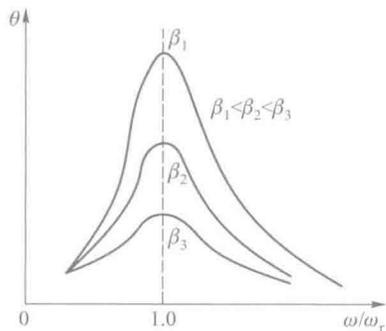


图1 受迫振动幅频特性

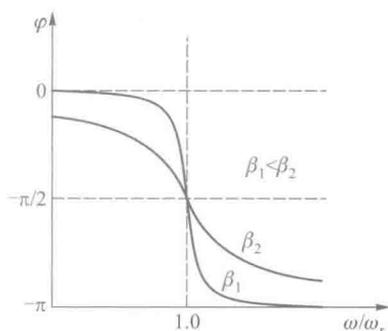


图2 受迫振动相频特性

四、实验装置介绍

ZKY-BG 型玻尔共振仪由振动仪与电器控制箱两部分组成。振动仪部分如图 3 所示,铜质圆形摆轮 4 安装在机架上,弹簧 6 的一端与摆轮 4 的轴相连,另一端可固定在机架支柱上,在弹簧弹性力的作用下,摆轮可绕轴自由往复摆动。在摆轮的外围有一圈槽型缺口,其中一个长形凹槽 2 比其他凹槽长出许多。机架上对准长型缺口处有一个光电门 1,它与电器控制箱相连接,用来测量摆轮的振幅角度值和摆轮的振动周期。摆轮振幅是利用光电门 1 测出摆轮 4 圈上凹型缺口个数,并在控制箱液晶显示器上直接显示出此值,精度为 1° 。在机架下方有一对带有铁芯的线圈 8,摆轮 4 恰巧嵌在铁芯的空隙,当线圈中通过直流电流后,摆轮受到一个电磁阻尼力的作用。改变电流的大小即可使阻尼大小相应变化。为使摆轮 4 作受迫振动,在电动机轴上装有偏心轮,通过连杆机构 9 带动摆轮,在电动机轴上装有带刻线的有机玻璃转盘 13,它随电机一起转动。由它可以从角度读数盘 12 读出相位差 φ 。调节控制箱上的电机转速调节旋钮,可以精确改变加于电机上的电压,使电机的转速在实验范围($30 \sim 45 \text{ r/min}$)内连续可调,由于电路中采用特殊稳速装置、电动机采用惯性很小的带有测速发电机的特种电机,所以转速极为稳定。电机的有机玻璃转盘 13 上装有两个挡光片。在角度读数盘 12 中央上方 90° 处也有光电门 11(强迫力矩信号),并与控制箱相连,以测量强迫力矩的周期。

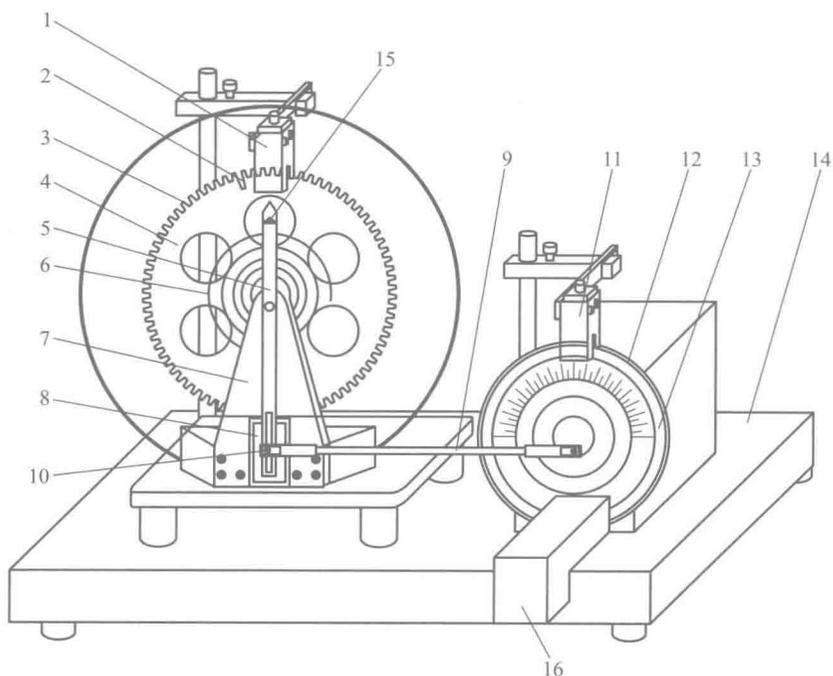


图 3 玻尔振动仪

1—光电门;2—长凹槽;3—短凹槽;4—铜质摆轮;5—摇杆;6—蜗卷弹簧;7—支承架;8—阻尼线圈;9—连杆;
10—摇杆调节螺丝;11—光电门;12—角度盘;13—有机玻璃转盘;14—底座;15—弹簧夹持螺钉;16—闪光灯

受迫振动时摆轮与外力矩的相位差是利用小型闪光灯来测量的. 闪光灯受摆轮信号光电门控制, 每当摆轮上长型凹槽 2 通过平衡位置时, 光电门 1 接受光, 引起闪光, 这一现象称为频闪现象. 在稳定情况时, 由闪光灯照射下可以看到有机玻璃转盘 13 的指针好像一直“停在”某一时刻处, 所以此数值可方便地直接读出, 误差不大于 2° . 闪光灯放置位置如图 3 所示, 搁置在底座上, 切勿拿在手中直接照射刻度盘.

波尔共振仪电器控制箱的前面板和后面板分别如图 4 和图 5 所示. 电机转速调节旋钮, 是带有刻度的十圈电位器, 调节此旋钮时可以精确改变电机转速, 即改变强迫力矩的周期. 锁定开关处于图 6 的位置时, 电位器刻度锁定, 要调节大小须将其置于该位置的另一边. $\times 0.1$ 挡旋转一圈, $\times 1$ 挡走一个字. 一般调节刻度仅供实验时作参考, 以便大致确定强迫力矩周期值在多圈电位器上的相应位置.

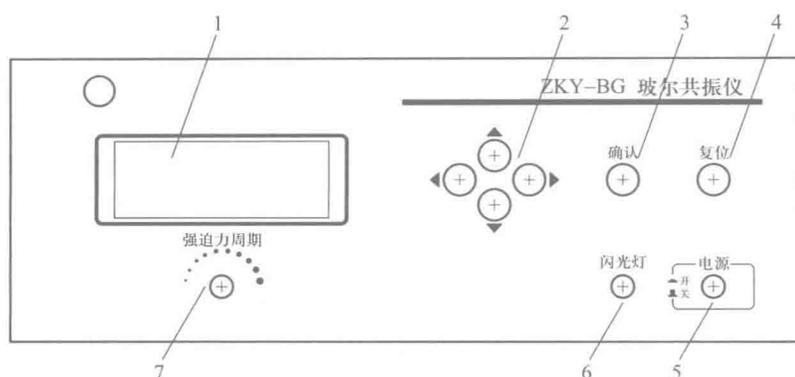


图 4 波尔共振仪前面板示意图

- 1—液晶显示屏; 2—方向控制键; 3—确认按键; 4—复位按键;
5—电源开关; 6—闪光灯开关; 7—强迫力周期调节电位器

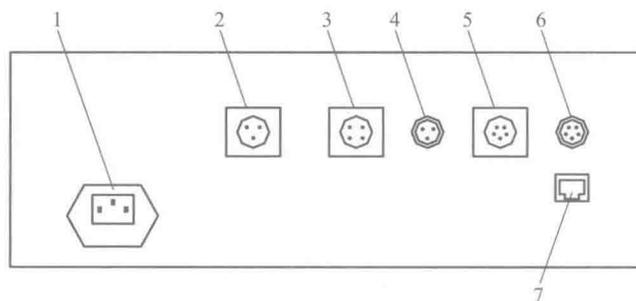


图 5 波尔共振仪后面板示意图

- 1—电源插座(带保险); 2—闪光灯接口; 3—阻尼线圈;
4—电机接口; 5—振幅输入; 6—周期输入; 7—通信接口

可以通过软件控制阻尼线圈内直流电流的大小, 达到改变摆轮系统的阻尼系数的目的. 阻尼挡位的选择通过软件控制, 共分 3 挡, 分别是“阻尼 1”“阻尼 2”“阻尼 3”. 阻尼电流由恒流源提供, 实验时根据不同情况进行选择(可先选择在“阻尼 2”处, 若共振时振幅太小则可改用“阻尼 1”), 振幅在 150° 左右.

闪光灯开关用来控制闪光与否,当按住闪光灯按钮、摆轮长缺口通过平衡位置时便产生闪光,由于频闪现象,可从相位差读数盘上看到刻度线似乎静止不动的读数(实际有机玻璃 13 上的刻度线一直在匀速转动),从而读出相位差数值.为使闪光灯管不易损坏,采用按钮开关,仅在测量相位差时才按下按钮.电器控制箱与闪光灯和玻尔共振仪之间通过各种专业电缆相连接,可有效避免接线错误.

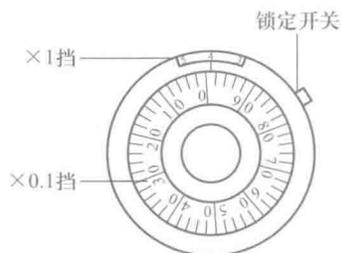


图6 电机转速调节电位器

五、实验内容及步骤

按下电源开关后,屏幕上出现欢迎界面,其中 NO.0000X 为电器控制箱与电脑主机相连的编号.过几秒钟后屏幕上显示如图 7(a)“按键说明”字样.符号“◀”为向左移动;“▶”为向右移动;“▲”为向上移动;“▼”为向下移动.根据是否连接电脑选择联网模式或单机模式.

1. 测量自由振动下的摆轮振幅 θ 与系统固有周期 T_0 的关系

在图 7(a) 状态按确认键,显示图 7(b) 所示的实验类型,默认选中项为自由振荡,字体反白为选中.再按确认键,显示如图 7(c).

用手转动摆轮 160° 左右,放开手后按“▲”或“▼”键,测量状态由“关”变为“开”,控制箱开始记录实验数据,振幅的有效数值范围为: $50^\circ \sim 160^\circ$ (振幅小于 160° 测量开,小于 50° 测量自动关闭).测量显示关时,此时数据已保存并发送主机.

查询实验数据,可按“◀”或“▶”键,选中回查,再按确认键如图 7(d) 所示,表示第一次记录的振幅 $\theta_0 = 134^\circ$,对应的周期 $T = 1.442$ s,然后按“▲”或“▼”键查看所有记录的数据,该数据为每次测量振幅相对应的周期数值,回查完毕,按确认键,返回到图 7(c) 状态.由此测出振幅 θ 与 T_0 的对应关系.若进行多次测量可重复操作,自由振动完成后,选中返回,按确认键回到前面图 7(b) 进行其他实验.

因电器控制箱只记录每次摆轮周期变化时所对应的振幅值,因此有时转盘转过光电门几次,测量才记录一次(其间能看到振幅变化).当回查数据时,有的振幅数值被自动剔除了(当摆轮周期的第 5 位有效数字发生变化时,控制箱记录对应的振幅值,控制箱上只显示 4 位有效数字,故无法看到第 5 位有效数字的变化情况,在电脑主机上则可以清楚地看到).

2. 测量阻尼系数 β

在图 7(b) 状态下,根据实验要求,按“▶”键,选中阻尼振荡,按确认键显示阻尼,如图 7(e) 所示.阻尼分三个档次,阻尼 1 最小,根据自己实验要求选择阻尼挡,例如选择阻尼 2 档,按确认键,显示如图 7(f).

首先将角度盘指针放在 0° 位置,用手转动摆轮 160° 左右,选取 θ_0 在 150° 左右,按“▲”或“▼”键,测量由“关”变为“开”并记录数据,仪器记录 10 组数据后,测量自动关闭,此时振幅大小还在变化,但仪器已经停止记数.

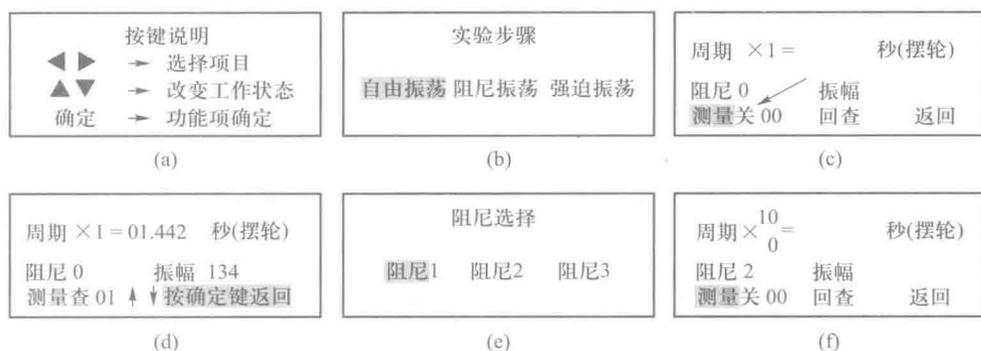


图7 θ 与 T_0 的关系

阻尼振荡的回查同自由振荡类似,请参照上面操作.若改变阻尼挡测量,重复阻尼2的操作步骤即可.从液显窗口读出摆轮作阻尼振动时的振幅数值 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$, 利用公式

$$\ln \frac{\theta_0 e^{-\beta t}}{\theta_0 e^{-\beta(t+nT)}} = n\beta \bar{T} = \ln \frac{\theta_0}{\theta_n} \quad (8)$$

求出 β 值,式中 n 为阻尼振动的周期次数, θ_n 为第 n 次振动时的振幅, \bar{T} 为阻尼振动周期的平均值.通过测量摆轮振动10个周期的时间除以10获得 \bar{T} .一般阻尼系数需测量2~3次.

3. 测量受迫振动下的幅频特性和相频特性

在进行受迫振动前必须先作阻尼振荡,否则无法实验.仪器在图7(b)状态下,选中强迫振荡,按确认键,显示如图8(a)所示,默认状态选中电机.

按“▲”或“▼”键,让电机启动,显示“电机开”.此时保持周期为1,待摆轮和电机的周期相同,特别是振幅已稳定,变化不大于1,表明两者已经稳定了[如图8(b)所示],方可开始测量.

测量前应先选中周期,按“▲”或“▼”键把周期由1[如图8(b)所示]改为10[如图8(c)所示],(目的是为了减少误差,若不改周期,测量无法打开).再选中测量,按“▲”或“▼”键,显示“测量开”,测量打开并记录数据[如图8(c)所示].

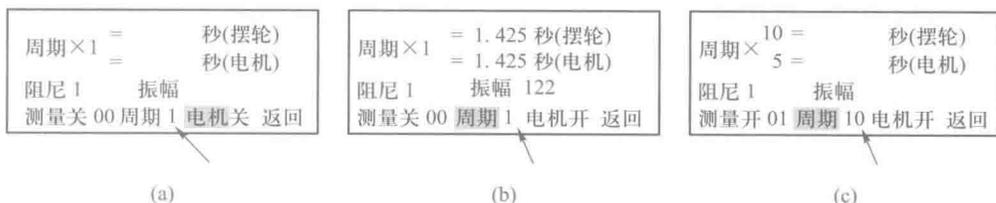


图8 幅频、相频特性

一次测量完成,显示“测量关”后,读取强迫力矩的周期和摆轮的振幅值,再利用闪光灯测定受迫振动位移与强迫力间的相位差.

调节强迫力矩周期电位器,改变电机的转速,即改变强迫外力矩频率 ω ,从而

均值,则将在共振点附近使相位差的计算值与测量值相差很大.为此可先测出振幅与固有周期 T_0 的对应数值,在公式 $\varphi = \arctan \frac{-\beta T_0^2 T}{\pi(T^2 - T_0^2)}$ 中 T_0 采用对应于某个振幅的数值代入(可查看自由振动实验中作出的 θ 与 T_0 的对应表,找出该振幅在自由振动实验时对应的摆轮固有周期.若此 θ 值在表中查不到,则可根据对应表中摆轮的运动趋势,用内插法,估计一个 T_0 值),这样可使系统误差明显减小.

七、注意事项

1. 为保证使用安全,三芯电源线须可靠接地.
2. 受迫振动实验时,调节仪器面板“强迫力周期”旋钮,从而改变不同电机转动周期,该实验必须做 10 次以上.改变“强迫力周期”,必须使得摆轮振幅处于自由振动实验时摆轮振幅的测量范围内,以便根据表 1 查出与受迫振动中振幅 θ 对应的固有周期 T_0 .
3. 在做受迫振动实验时,须待电机与摆轮的周期相同(末位数差异不大于 2),即系统稳定后,方可记录实验数据.且每次改变了强迫力矩的周期,都需要重新等待系统稳定.
4. 因为闪光灯的高压电路及强光会干扰光电门采集数据,因此须待一次测量完成,显示测量关后[参看图 8(b)],才可使用闪光灯读取相位差.
5. 做完实验确保测量数据保存后,才可在主机上查看特性曲线及振幅比值.

八、思考题

1. 实验中摆轮作受迫振动所需的弹性力矩、阻尼力矩和周期性强迫外力矩分别是通过什么方法实现的?
2. 受迫振动的位移振幅与哪些因素有关?受迫振动位移与强迫力矩之间的相位差与哪些因素有关?
3. 实验中是怎样利用频闪原理来测定相位差 φ 的?
4. 研究发现,当强迫力的频率发生变化时,振动系统会达到位移共振、速度共振和加速度共振三种状态.这三种共振的条件分别是

$$\bar{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}, \quad \bar{\omega} = \omega_0, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}}$$

三种共振都有很大的振幅,其中位移共振的振幅最大.试推导后两种共振的条件.

附录 ZKY-BG 型玻尔共振仪调整方法及简单故障排除

玻尔共振仪各部分经校正后,请勿随意拆装改动,电器控制箱与主机有专门电缆相接,不要混淆,在使用前请务必清楚各开关与旋钮功能.经过运输或实验后若发现仪器工作不正常可行调整,具体步骤如下:

1. 将有机玻璃转盘 13 的指针放在“0”处.
2. 松开连杆上锁紧螺母,然后转动连杆 9,使摇杆 5 处于垂直位置,然后再将

锁紧螺母固定。

3. 此时摆轮上一条长形槽口(用白漆线标志)应基本上与指针对齐,若发现明显偏差,可将摆轮后面三只固定螺丝略松动,用手握住蜗卷弹簧6的内端固定处,另一手即可将摆轮转动,使白漆线对准尖头,然后再将三只螺丝旋紧。一般情况下,只要不改变弹簧6的长度,此项调整极少进行。

4. 若把弹簧6与摇杆5相连接处的外端夹持螺钉15放松,此时弹簧6外圈即可任意移动(可缩短、放长)缩短距离不宜少于6cm。再旋紧夹持螺钉15时,务必保持弹簧处于垂直面内,否则将明显影响实验结果。

5. 将光电门1中心对准摆轮上白漆线(即长狭缝),并保持摆轮在光电门中间狭缝中自由摆动,此时可选择阻尼挡为“1”或“2”,打开电机,此时摆轮将作受迫振动,待达到稳定状态时,打开闪光灯开关,此时将看到指针在相位差读数盘中有一似乎固定读数,两次读数在调整良好时应相差 1° 以内(在不大于 2° 时实验即可进行),若发现相差较大,则可调整光电门位置。若相差超过 5° 以上,必须重复上述步骤重新调整。

由于弹簧制作过程中问题,在相位差测量过程中可能会出现指针在相位差读数盘上两端重合较好、中间较差,或中间较好、两端较差现象。

简单故障排除见表4。

表4 简单故障排除

故障现象	原因及处理办法
“受迫振动”实验无法进行,一直无测量值显示	检查刻度盘上的光电门11指示灯是否闪烁。 ① 若此指示灯不亮,左右移动光电门,会看到指示灯亮,再将其调整到合适的阻碍转盘运动的位置。 ② 指示灯长亮,不闪烁。说明光电门11位置偏高,使有机玻璃转盘13上的白线无法挡光,实验不能进行。调整光电门11的高度,直到合适位置即可。 若以上情况都不是,则“周期输入”小五芯电缆有断点或有粘连,拆开接上断点或排除粘连即可。
“受迫振动”实验进行时,按住闪光灯,电机周期会变	有两个原因: ① 闪光灯的强光会干扰光电门1及光电门11采集数据。 ② 闪光灯的高压电路会对数据采集造成干扰。 因此必须待一次测量完成,显示“测量关”后,才可使用闪光灯读取相位差。
幅频和相频特性曲线数据点非常密集	在做“受迫振动”实验时,未调节强迫力矩周期电位器来改变电机的转速。每记录一组数据后,应该调节强迫力矩周期电位器来改变电机的转速,再进行测量。

续表

故障现象	原因及处理办法
除 1、2 号集中器外,其他编号的集中器(如 3、4 号等)连接好后系统无法识别	系统默认的是 1、2 号集中器,如果是其他编号的集中器,则需要在软件界面“系统管理/连接装置管理”中添加,只有添加后才能被系统识别。
“自由振动”实验时无测量值显示	连接“振幅输入”的大五芯线内有断点或有粘连,拆开接上断点或排除粘连即可。

实验十七 动态法测量杨氏模量

在外力的作用下,当物体的长度变化不超过某一限度时,撤去外力之后,物体又能完全恢复原状,在该限度范围内,物体的长度变化程度与物体内部恢复力之间存在正比关系,反映该关系的物理量就是杨氏模量.杨氏模量是描述固体材料刚性特征的重要力学参量,反映了固体材料抵抗外力产生形变的能力,也是进行热应力计算、防热与隔热层计算、选用机械构件材料的主要依据之一.因此,精确测量杨氏模量对理论研究和工程技术都具有重要意义.

杨氏模量的测量是物理学的基本测量之一,属于力学的范围.测量杨氏模量有多种方法,可分为静态法、动态法和波传播法三类.静态法(包括拉伸法、扭转法和弯曲法)通常适用于在大形变及常温下测量金属试样.静态法测量载荷大、加载速度慢并伴有弛豫过程,对脆性材料(如石墨、玻璃、陶瓷等)不适用,也不能在高温状态下测量.波传播法(包括连续波法和脉冲波法)所用设备复杂、换能器转变温度低且价格昂贵,普遍应用受到限制.动态法(又称共振法或声频法)包括弯曲(横向)共振法、纵向共振法和扭转共振法,其中弯曲共振法所用设备精确易得,理论同实验吻合度好,适用于各种金属及非金属(脆性)材料的测量,测定的温度范围极广,可从液氮温度至 $3\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右.由于在测量上的优越性,动态法在实际应用中已经被广泛采用,也是推荐使用的测量杨氏弹性模量的一种方法.本实验采用动态弯曲共振法测定常温条件下固体材料的杨氏模量.

一、实验目的

1. 理解动态法测量杨氏模量的基本原理,掌握动态法测量杨氏模量的基本方法,学会用动态法测量杨氏模量;
2. 了解基频共振的基本概念,学会判断基频共振的基本方法,掌握利用示波器观测共振频率的基本方法;
3. 理解外延法测量物理量的基本思想,掌握外延法测量基频共振频率的基本原理和实现方法;
4. 培养学生综合运用物理实验仪器的能力.

二、实验仪器

杨氏模量测量仪(图1)、示波器、测试物件(铜棒、钢棒、铝棒)、钢尺、游标卡尺、天平.

三、实验原理

1. 圆杆横向振动的动力学方程求解

如图2所示,长度 L 、直径 $d(L \gg d)$ 的一细长棒,作微小横振动(弯曲振动)时



图1 杨氏模量测量仪

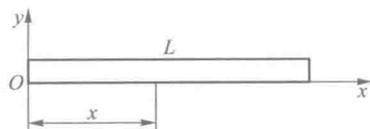


图2 细长棒的弯曲振动

满足的动力学方程(横振动方程)为

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\rho S}{EI} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

棒轴线沿 x 方向, 式中 y 为棒距左边端点 x 处截面的 y 方向位移, E 为杨氏模量, 单位为 Pa 或 N/m^2 ; ρ 为材料密度, S 为截面积, I 为某一截面的转动惯量, $I = \int_S y^2 \text{d}S$. 方程(1)的具体求解可参阅附录 1, 这里我们直接利用圆杆的杨氏模量结果[见方程(17)]:

$$E = 1.6067 mL^3 \frac{f_r^2}{d^4} \quad (2)$$

根据式(2)可求得圆杆材料的杨氏模量 E , 其中 m 是圆杆质量可以用天平称量, 长度 L 可以利用刻度尺直接测得, 通过游标卡尺测量圆杆直径 d , f_r 为圆杆的共振频率, 可以由杨氏模量测量仪直接测量.

2. 实际测量误差消除方法

由于上述结果的理论推导是基于两端自由的圆杆, 忽略了杆的剪切变形和截面绕中性轴转动惯量的影响, 只有在 $d \ll L$ 的条件下才能严格成立, 因而式(2)中必须引入修正因子 T_1 , 修正后的杨氏模量计算公式为

$$E = 1.6067 mL^3 \frac{f_r^2}{d^4} \times T_1 \quad (3)$$

其中修正因子 T_1 可由圆杆的径长比确定, 具体如表 1 所示.

表 1 修正因子 T_1 与径长比 d/L 对照表

径长比 d/L	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10
修正因子 T_1	1.001	1.002	1.005	1.008	1.014	1.019	1.033	1.055

四、实验装置及共振频率测量方法

1. 实验装置

图 3(a) 和图 3(b) 分别为悬挂法和支撑法两种方式测杨氏模量的实验装置. 图 3(a) 所示的悬挂法杨氏模量实验装置中, 1 为杨氏模量测量仪振动实验台, 主体结构件为: 1-1 拾振器、1-2 激振器、1-3 悬丝; 2 为杨氏模量测量仪电气控制箱; 3 为示波器; 4 为被测试件. 图 3(b) 所示的支撑法杨氏模量实验装置则将拾振器 1-1、

激振器 1-2 固定横梁的旋钮拧松,将图 3(a)中的拾振器 1-1 和激振器 1-2 倒置,将被测试件 4 直接搁置于拾振器 1-1 和激振器 1-2 上方的凸台上进行实验.在两种实验方式中均可通过拧松拾振器 1-1、激振器 1-2 固定横梁的旋钮移动拾振器 1-1、激振器 1-2 在横梁上的位置.

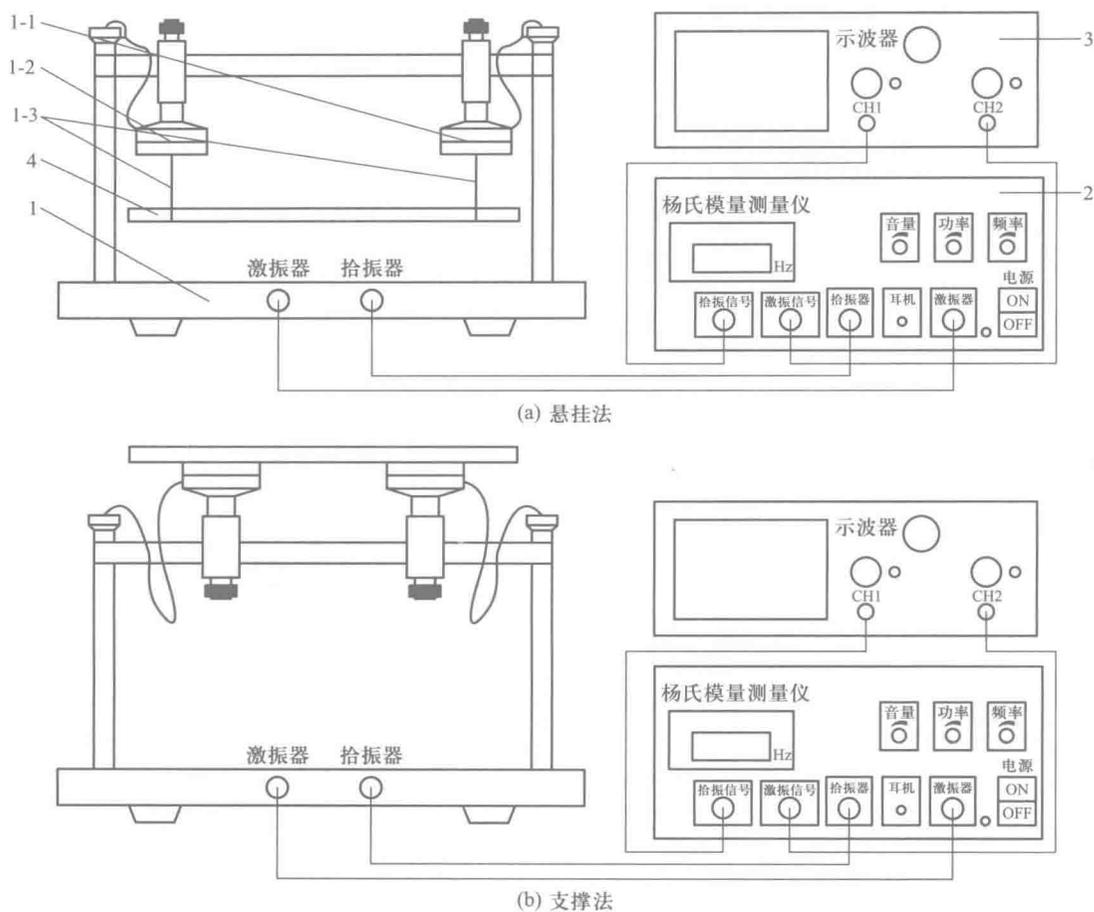


图 3 测杨氏模量实验装置

2. 共振频率测量方法

(1) 等幅正弦波测共振频率

动态法测量杨氏模量的实验原理图如图 4 所示.由信号源 1 输出的等幅正弦波信号加在发射换能器(激振器)2 上,使电信号变成机械振动,再由试样一端的悬丝或支撑点将机械振动传给试样 3,使试样受迫作横振动,机械振动沿试样以及另一端的悬丝或支撑点传送给接收换能器(拾振器)4,这时机械振动又转变成电信号,该信号经放大处理后送示波器 5 显示.当信号源的频率不等于试样的固有频率时,试样不发生共振,示波器上几乎没有电信号波形或波形很小,只有当试样发生共振时,示波器上的电信号突然增大,这时通过频率计读出信号源的频率即为试样的共振频率.测出共振频率,由上述相应的公式可以计算出材料的杨氏模量.

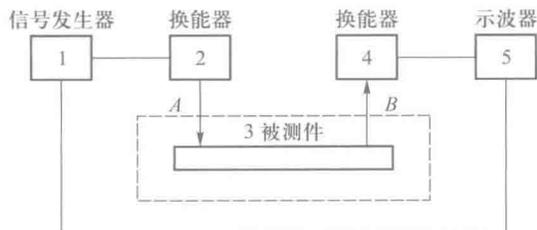


图4 动态法测量杨氏模量实验原理图

(2) 李萨如图形测共振频率

实验时也可采用李萨如图测量共振频率. 激振器和拾振器的信号分别输入示波器的 X 和 Y 通道, 示波器处于观察李萨如图形状态, 从小到大调节信号发生器的频率, 直到出现稳定的正椭圆时, 即达到共振状态. 这是因为, 拾振器和激振器的振动频率虽然相同, 但是当激振器的振动频率不是被测样品的固有频率时, 试样的振动振幅很小, 拾振器的振幅也很小甚至检测不到振动, 在示波器上无法合成李萨如图形(正椭圆), 只能看到激振器的振动波形; 只有当激振器的振动频率调节到试样的固有频率达到共振时, 拾振器的振幅突然很大, 输入示波器的两路信号才能合成李萨如图形(正椭圆).

(3) 外延法精确测量基频共振频率

理论上试样在基频下共振有两个节点, 要测出试样的基频共振频率, 只能将试样悬挂或支撑在 $0.224L$ 和 $0.776L$ 的两个节点处. 但是, 在两个节点处振动振幅几乎为零, 悬挂或支撑在节点处的试样难以被激振和拾振. 实验时由于悬丝或支撑架对试样的阻尼作用, 所以检测到的共振频率是随悬挂点或支撑点的位置变化而变化的. 悬挂点偏离节点越远(距离棒的端点越近), 可检测的共振信号越强, 但试样所受到的阻尼作用也越大, 离试样两端自由这一定解条件的要求相差越大, 产生的系统误差就越大. 由于压电陶瓷换能器拾取的是悬挂点或支撑点的加速度共振信号, 而不是振幅共振信号, 因此所检测到的共振频率随悬挂点或支撑点到节点的距离增大而变大. 为了消除这一系统误差, 测出试样的基频共振频率, 可在节点两侧选取不同的点对称悬挂或支撑, 利用外延法可找出激振点和拾振点位于节点处的共振频, 其实际振动测试模型如图 5 所示.

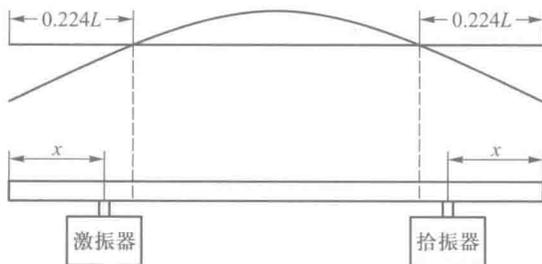


图5 实际振动测试模型

所谓的外延法,就是所需要的数据在测量数据范围之外,一般很难直接测量,采用作图外推求值的方法求出所需要的数据.外延法的适用条件是在所研究的范围内没有突变,否则不能使用,其具体方案可参见附录2.

本实验中就是以悬挂点和支撑点的位置为横坐标、以相对应的共振频率为纵坐标做出关系曲线,求出曲线最低点(即节点)所对应的共振频率即试样的基频共振频率.

3. 基频共振的判断

实验测量中,激发换能器、接收换能器、悬丝、支架等部件都有自己共振频率,可能以其本身的基频或高次谐波频率发生共振.另外,根据实验原理可知,试样本身也不只在一个频率处发生共振现象,会出现几个共振峰,以致在实验中难以确认哪个是基频共振峰,但是计算杨氏模量的公式(3)只适用于基频共振的情况.因此,正确的判断示波器上显示出的共振信号是否为试样真正共振信号并且是否为基频共振成为关键.对此,可以采用下述方法来判断和解决:

(1) 实验前先根据试样的材质、尺寸、质量等参量通过理论公式估算出基频共振频率的数值,在估算频率附近寻找.

(2) 换能器或悬丝发生共振时可通过对上述部件施加负荷(例如用力夹紧),可使此共振信号变化或消失.

(3) 试样发生共振需要一个孕育过程,共振峰有一定的宽度,信号亦较强,切断信号源后信号亦会逐渐衰减.因此,发生共振时,迅速切断信号源,除试样共振会逐渐衰减外,其余假共振会很快消失.

(4) 试样共振时,可用一小细杆沿纵向轻碰试样的不同部位,观察共振波振幅.波节处波的振幅不变,波腹处波的振幅减小.波形符合图6(a)的规律即为基频共振.

(5) 用听诊器沿试样纵向移动,能明显听出波腹处声大,波节处声小,并符合图6(a)的规律.对一些细长棒状(或片状)试样,有时能直接听到波腹和波节.

(6) 当输入某个频率在显示屏出现共振时,即使托起试样,示波器显示的波形仍然很少变化,说明这个共振频率不属于试样.悬丝共振时可明显看见悬丝上形成驻波.

(7) 试样振动时,观察各振动波形的幅度,波幅最大的共振是基频共振;出现几个共振频率时,基频共振频率最低.

五、实验内容及步骤

本实验的被测试件包含铜、钢、铝三根细长圆杆.实验步骤如下:

1. 利用游标卡尺分别在试件的6个不同位置测量直径 d ,将数据填入表2中,并求出平均值.再用刻度尺测量它们的长度 L ,天平称量其质量 m ,将数据填入表4中的相应位置;

2. 在室温下,实验中被测试件的材料分别为铜、钢、铝,其杨氏模量分别约为 $0.969 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、 $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、 $0.7 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,先由式(3)初步估算出它们的共振频率,以便快速寻找共振点;

3. 将试件圆杆采用悬挂法或者支撑法分别安装于杨氏模量测量仪振动实验

台,连接实验中各接线,将杨氏模量测量仪电气控制箱的拾振信号、激振信号输出端连接示波器 CH1 和 CH2 通道,将电气控制箱拾振器和激振器的端口连接杨氏模量测量仪振动实验台的拾振器和激振器端口,安装和接线方法具体如图 3 所示;

4. 将激振器和拾振器分别放置于偏离圆杆节点左右两边对称点处(距离端点 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm、5 cm、6 cm 和 7 cm 处),调节电气箱频率(粗调旋钮)至共振点附近,若听到电气箱发出尖锐刺耳的声音,再调节细调旋钮,同时查看示波器显示屏上的拾振器发出的信号,振幅最大时电气箱的频率读数即为共振点.将实验数据记入表 3 中,再根据前述外延法作图整理得两端自由的圆杆共振频率;

5. 换取不同试件重复步骤 4 的实验操作;

6. 将上述步骤所得的实验数据根据式(3)和表 4 分别计算不同试件材料的杨氏模量.

六、数据记录及数据处理

1. 数据表格

表 2 试件圆杆尺寸直径测量

次数 试件	1	2	3	4	5	6	平均值
	铜棒						
钢棒							
铝棒							

表 3 激振点与拾振点不同位置共振频率测量

频率/Hz 位置/cm 试件	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	外推值
	铜棒							
钢棒								
铝棒								

表 4 杨氏模量实验结果与参考值对比

实验温度: _____ °C

试件材料	质量/g	长度/mm	直径/mm	径长比	共振频率/Hz	杨氏模量实验值/ (10^{10} N/m^2)	杨氏模量参考值/ (10^{10} N/m^2)	相对误差
铜棒							9.69	
钢棒							20.6	
铝棒							7.0	

2. 数据处理

(1) 利用外延推算方法求出基频共振频率:将上述测量得到的各位置共振点

在坐标纸上标记,用光滑的曲线依次连接各点,可参考附录2中的图8,在试件节点位置,即总长度的0.224倍位置(此处试件总长20 cm,则节点位置为4.48 cm)处作一垂线与曲线相交,交点所对应图中纵坐标即为外延法得到的共振频率。

(2) 将三个试样的杨氏模量测量值与理论值进行比较,计算相对误差。

七、注意事项

1. 千万不能用力拉悬丝,否则会损坏膜片或换能器。悬挂试样或移动悬丝位置时,应轻放轻动,不能给予悬丝冲击力。

2. 换能器由厚度为0.1~0.3 mm的压电晶体用胶粘接在0.1 mm左右的黄铜片上构成,故极其脆弱。测定时一定要轻拿轻放,不能用力,也不能敲打。

3. 试样棒不能随处乱放,要保持清洁;拿放时应特别小心,避免弄断悬丝摔坏试样棒。

4. 安装试样棒时,应先移动支架到既定位置后再悬挂试样棒。

5. 实验时,悬丝必须绷紧,不能松动,且在通过试样轴线的同一截面上,一定要等试样稳定之后才可正式测量。

6. 尽可能采用较小的信号激发,激振器所加正弦信号的峰-峰值幅度限制在6 V内,这时发生虚假信号的可能性较小。

7. 信号源、换能器、放大器、示波器等测试仪器均应共“地”。

8. 悬挂点或支撑点如在节点时极难进行测量;全放在端点,测量虽很方便但易引入系统误差。

9. 如试样材质不均匀或呈椭圆形,就会有多个共振频率出现,这时只能通过更换合格试样来解决。

八、思考题

1. 你在实验中是否发现假共振峰,是何原因,如何消除? 是否有新的判据?

2. 悬挂时捆绑的松紧,悬丝的长短、粗细、材质、刚性都对实验结果有影响,是何原因,可否消除?

3. 如何用外推法算出试棒节点真正的共振频率?

4. 试样的固有频率和共振频率有何不同,有何关系? 可否不测量质量而引入材料密度 ρ ,这时公式(3)应如何变动?

附录1 圆杆横向振动方程的详细求解

横振动方程(1)的边界条件为:棒的两端($x=0, L$)是自由端,端点既不受正应力也不受切向力。用分离变量法求解方程(1),令 $y(x, t) = X(x)T(t)$,则有

$$\frac{1}{X} \frac{d^4 X}{dx^4} = \frac{\rho S}{EI} \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} \quad (4)$$

由于等式两边分别是两个变量 x 和 t 的函数,所以只有当等式两边都等于同一个常量时等式才成立。假设此常量为 K^4 ,则可得到下列两个方程

$$\frac{d^4 X}{dx^4} - K^4 X = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \frac{K^4 EI}{\rho S} T = 0 \quad (6)$$

如果棒中每点都作简谐振动,则方程(5)、(6)的通解分别为

$$\begin{cases} X(x) = a_1 \cos Kx + a_2 \sin Kx + a_3 \operatorname{ch} Kx + a_4 \operatorname{sh} Kx \\ T(t) = b \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{式中} \quad \omega = \left(\frac{K^4 EI}{\rho S} \right)^{1/2} \quad (8)$$

为振动圆频率,适用于不同边界条件任意形状截面的试样.于是可以得出

$$y(x, t) = b(a_1 \operatorname{ch} Kx + a_2 \operatorname{sh} Kx + a_3 \cos Kx + a_4 \sin Kx) \cos(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

推论证明该式对于任意形状截面、不同边界条件下都是成立的,故我们只要用特定的边界条件即可定出常量 K , 代入特定截面的惯性矩, 就可得到具体条件下的计算公式. 如将棒悬挂(或支撑)在节点处(即处于共振状态时棒上位移恒等于零的位置), 此时, 边界条件为两端力矩及横向作用力均为零, 即

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad F = -\frac{\partial M}{\partial x} = -EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0$$

根据边界条件

$$\left. \frac{d^2 X}{dx^2} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{d^2 X}{dx^2} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{d^3 X}{dx^3} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{d^3 X}{dx^3} \right|_{x=L} = 0 \quad (10)$$

将通解代入边界条件得到

$$\cos KL \cdot \operatorname{ch} KL = 1 \quad (11)$$

解超越方程可以得出本征值 K 和棒长 L 应满足如下关系:

$$K_0 L = 0, \quad K_1 L = 1.5060\pi, \quad K_2 L = 2.4997\pi, \quad K_3 L = 3.5004\pi, \dots, K_n L = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi \quad (12)$$

再根据式(8), 可得出 K_n 对应的振动频率为

$$f_n = \frac{(K_n L)^2}{2\pi} \left[\frac{EI}{\rho S} \right]^{1/2}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

其中 $n=0$ 对应着棒处于静止状态; $n=1$ 所对应的频率 f_1 即为该两端自由圆杆弯曲振动的一阶模态频率, 也称为基振频率(基频), 此时的振动状态如图 6(a) 所示; $n=2$ 所对应的振动状态如图 6(b) 所示, 称为一次谐波. 由图可知, 棒在作基频振动时存在两个节点, 它们的位置分别距端面 $0.224L$ 和 $0.776L$. 而对一次谐波共有三个节点, 其位置分别在 $0.132L$ 、 $0.5L$ 和 $0.868L$ 处. 表 5 中给出基频、一次谐波、二次谐波对应的节点数和节点位置.

实际振动是各阶模态振动的叠加, 一般系统的固有频率 f_n 与一阶模态频率 f_1 接近. 而共振频率 f_r 则由系统的固有频率 f_n 和阻尼 β 决定, 在阻尼 β 很小的情况下近似相等, 它们具体关系如下:

$$f_r^2 = f_n^2 - \beta^2 \quad (14)$$

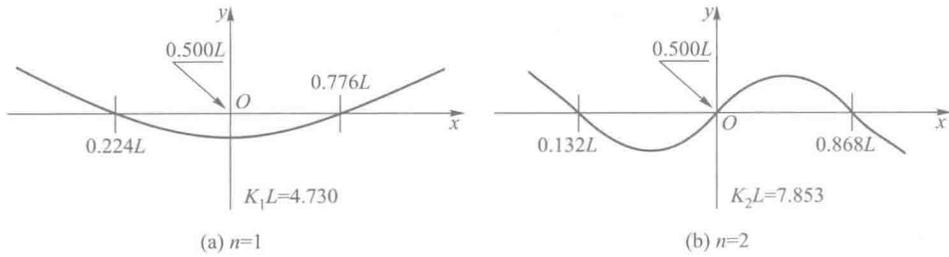


图6 两端自由的棒作基频振动波形和一次谐波振动波形

表5 振动级次、节点位置、频率比关系(表中 L 为杆的长度)

级次 n	基频 $n=1$	一次谐波 $n=2$	二次谐波 $n=3$
节点数	2	3	4
节点位置	0.224L 0.776L	0.132L 0.502L 0.868L	0.094L 0.356L 0.644L 0.906L
频率比	f_1	$f_2 = 2.76f_1$	$f_3 = 5.40f_1$

在这里,一阶模态振型为主振型,共振频率近似与一阶模态频率 f_1 相等,我们可以采用共振法测得的共振频率 f_n 替代方程(13)中的 f_1 ,变换方程(13)便可求解材料的杨氏模量。

下面对圆杆主振型 $X(x)$ 进行求解.将前述解得的 $K_1L = 1.5060\pi$ 代入方程(7),可以将式(7)变形为主振型方程:

$$X_1\left(\frac{x}{L}\right) = a_1 \cos K_1L \cdot \frac{x}{L} + a_2 \sin K_1L \cdot \frac{x}{L} + a_3 \operatorname{ch} K_1L \cdot \frac{x}{L} + a_4 \operatorname{sh} K_1L \cdot \frac{x}{L} \quad (15)$$

其中,系数 a_1, a_2, a_3, a_4 在前面方程组(10)的求解中可以得出:

$$a_1 = a_3 = \cos K_1L - \operatorname{ch} K_1L, \quad a_2 = a_4 = \sin K_1L - \operatorname{sh} K_1L$$

令 $X\left(\frac{x}{L}\right) = 0$,解得 $\frac{x}{L} = 0.224$ 或 0.776 ,这两个位置即为主振型的节点,也近似为共振振型节点,在该振动中振幅位移始终为0.由式(15)也可作出圆杆的共振振型,如图7所示.将基频对应的 K_1 值代入频率公式,可得到杨氏模量为

$$E = \frac{(2\pi)^2 \rho SL^4}{(K_1L)^4 I} f_r^2 \quad (16)$$

对于圆杆来说,可以通过游标卡尺测量圆杆直径,从而间接得到圆杆的截面面积 S ;长度 L 可以利用刻度尺直接测得;密度 ρ 可以通过查表获得或者可以用天平称量圆杆质量 m 除以圆杆体积 SL 获得;圆杆截面相对圆心的惯性矩为 $I = \frac{\pi}{64} d^4$,带入式(16)可得

$$E = 1.6067 mL^3 \frac{f_r^2}{d^4} \quad (17)$$

根据此式即可求得圆杆材料的杨氏模量 E 。

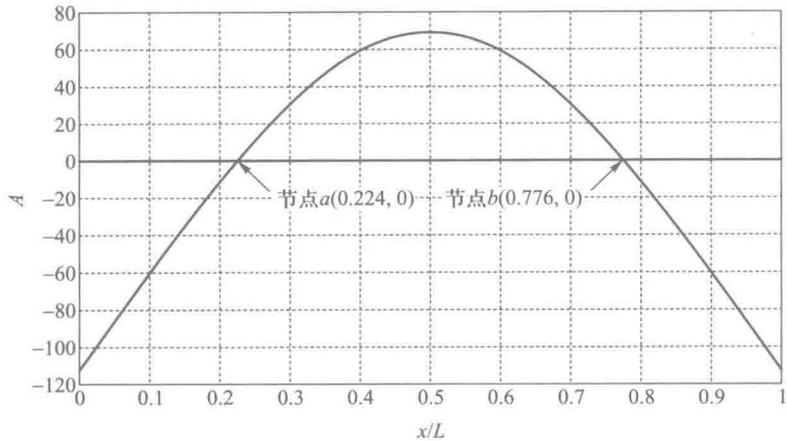


图7 两端自由圆杆的共振振型

附录2 外延法的具体方案示例

测量试件圆杆的总长度 L ,由附录1中推导可知 $x=0.224L$ 可以确定节点位置 x 的大小. 测量不同激振点和拾振点离杆端距离 x 情况下圆杆的共振频率,以表6所列测量数据为例. 根据表6所示数据在坐标纸上作出各测试点测试值,通过光滑的曲线依次连接各点,如图8所示. 在图像中找出节点位置 $x=0.224L=4.48\text{ cm}$ 处所对应的纵坐标 $f=452.0\text{ Hz}$ 即为共振频率的大小,再根据式(17)计算该圆杆材料的杨氏模量 E .

表6 振动测试测量数据

x/cm	1.0	2.0	3.0	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0
f_r/Hz	488.9	476.3	462.4	456.8	450.9	451.5	454.9	458.0

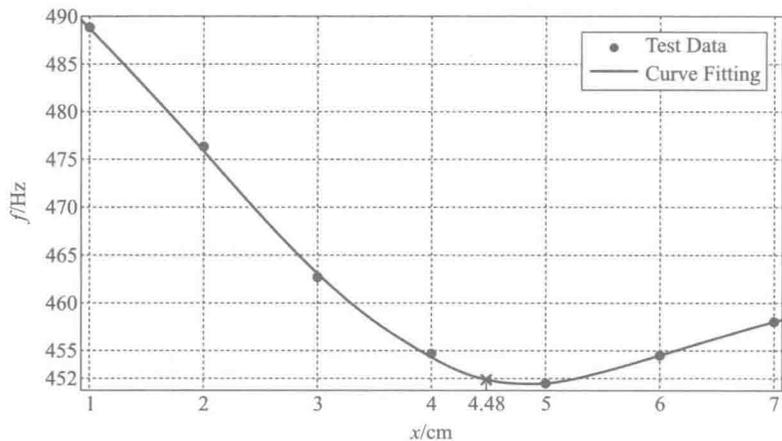


图8 振动测试数据拟合

实验十八 空气声速与绝热系数的测定

声波是一种在弹性介质中传播的机械波,是纵波.声波在空气中传播时,作用于人耳产生声音感觉.人耳可闻的声波频率是 $20 \sim 20\,000$ Hz,低于 20 Hz 的声波称为次声波,高于 20 000 Hz 的声波称为超声波.由于超声波具有波长短、易于定向发射、不会造成听觉污染等优点,故在超声波段进行声速测量比较方便.声速与介质的特性及状态等因素有关,因此测量声速可了解被测介质的特性或状态变化,因而有广泛的应用,如无损检测、测距和定位、超声医学诊断、测液体的流速等.

本实验用压电陶瓷超声换能器来测定超声波在空气中的传播速度,它是非电量电测方法的一个例子.

一、实验目的

1. 了解超声波的产生及接收原理.
2. 学习用干涉法和相位法测空气的声速和绝热系数.
3. 熟悉超声声速测量仪和示波器的使用.

二、实验仪器

1. ZKY-SS 型声速测定实验仪一台.
2. GOS-620 双轨迹示波器一台.
3. 信号发生器(TFG6900A 系列函数/任意波形发生器)一台.
4. 温度计一支.

三、实验原理

在波动过程中,波速 v 、波长 λ 和频率 f 之间的关系为: $v = f\lambda$, 实验中可通过测定声波的波长 λ 和频率 f 来求得声速 v . 常用的方法有驻波干涉法与相位比较法.

1. 驻波干涉法测量声速

当两束幅度相同、方向相反的相干声波相交时,将产生干涉现象,出现驻波.对于波束 1: $Y_1 = A\cos(\omega t - 2\pi X/\lambda)$ 和波束 2: $Y_2 = A\cos(\omega t + 2\pi X/\lambda)$, 当它们交会时,叠加后的波形成波束 3: $Y_3 = 2A\cos(2\pi X/\lambda)\cos\omega t$, 这里 ω 为声波的角频率, t 为经过的时间, X 为经过的距离. 由此可见,叠加后的声波幅度随距离按 $\cos(2\pi X/\lambda)$ 变化. 不难证明:任何两相邻的振幅最大值的位置之间(或两相邻的振幅最小值的位置之间)的距离均为 $\lambda/2$.

本实验中,发生干涉的两列超声波由声速测定实验仪上的压电陶瓷换能器产生,如图 1 所示. 声速测定实验仪的压电陶瓷换能器 S_1 作为声波发射器,它由信号

源供给交流电信号,由逆压电效应发出一列平面超声波;而换能器 S_2 则作为声波的接收器,正压电效应将接收到的声压转换成电信号,该信号输入示波器,我们在示波器上可看到一组由声压信号产生的正弦波形,如图 2 所示.声源 S_1 发出的声波,经介质传播到 S_2 ,在接收声波信号的同时反射部分声波信号,如果接收面(S_2)与发射面(S_1)严格平行,入射波即在接收面上垂直反射,入射波与发射波相干形成驻波.我们在示波器上观察到的实际上是这两个相干波合成后在声波接收器 S_2 处的振动情况.

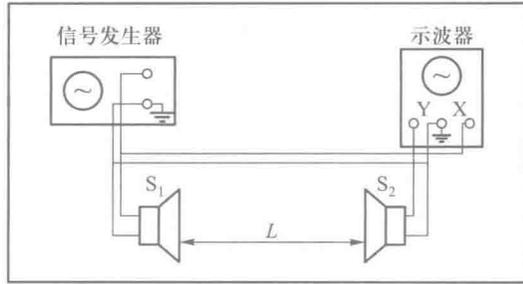


图 1 超声波测声速实验装置图

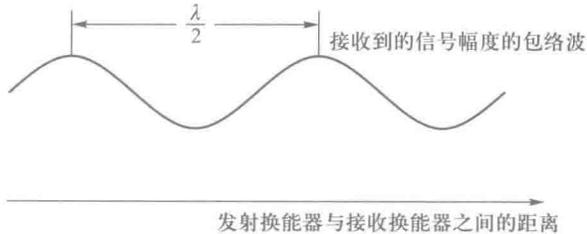


图 2 干涉法原理图

移动 S_2 位置(即改变 S_1 与 S_2 之间的距离 L),示波器显示出,当 S_2 在某些位置时振幅有最小值或最大值.改变两个换能器之间的距离 L (可通过转动螺杆的鼓轮来实现),示波器上可观察到接收换能器输出的电信号大小发生周期性的改变.每当距离 L 变化 $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ 时,输出电信号的幅度变化一个周期.由此可测出超声波的声速

$$v = f\lambda = 2f\Delta L \quad (1)$$

2. 相位比较法测量声速

当把发射器 S_1 驱动的正弦信号与接收器 S_2 接收到的正弦信号分别接到示波器的 X 及 Y 输入端,则相互垂直的同频率正弦波叠加,其合成轨迹称为李萨如图形.当 S_1 与 S_2 之间距离为 L 时,它们的正弦信号间将有相位差 $\Delta\Phi = 2\pi L/\lambda$.当 $\Delta\Phi = 2n\pi$ 时,合振动为一条斜率为正的直线;当 $\Delta\Phi = (2n+1)\pi$ 时,合振动为一条斜率为负的直线.当 $\Delta\Phi$ 为其他值时,合成振动为椭圆,如图 3 所示.

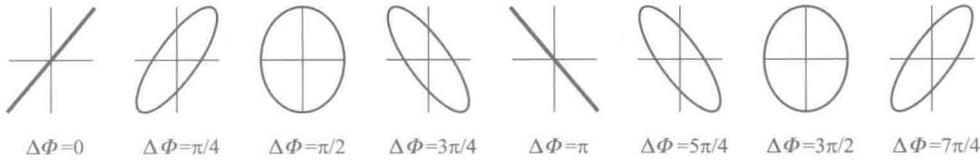


图3 相位差不同的李萨如图

每当接收器和发射器的距离变化等于一个波长时,则发射与接收信号之间的相位差也正好变化一个周期(即 $\Delta\Phi = 2\pi$),相同的图形就会出现.反之,当准确观测相位差变化一个周期时接收器移动的距离 ΔL ,即可得出其对应声波的波长 $\lambda = \Delta L$,再根据声波的频率,即可求出声波的传播速度

$$v = f\lambda = f\Delta L \quad (2)$$

3. 空气绝热系数的测定

理想气体中声波的传播速度为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3)$$

其中 M 是气体的摩尔质量, T 是热力学温度, 摩尔气体常量 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ 为气体的绝热系数, 该大小由该气体的分子结构所决定. 对空气而言, 可近似取 $\gamma = 1.40$ (理论值). 在标准状况下 ($1 \text{ atm}, 0 \text{ }^\circ\text{C}$), 由式(3)可算出此时的声速 $v_0 = 331 \text{ m/s}$.

在室温 t 下, 空气中的声速理论值为

$$v_{\text{理}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{M} \frac{T}{T_0}} = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (4)$$

其中 $T_0 = 273.15 \text{ K}$.

根据本实验两种方法实测的空气声速, 可由式(3)计算此时绝热系数的实测值

$$\gamma_{\text{测}} = \frac{MV_{\text{测}}^2}{RT}$$

及相对误差

$$E_\gamma = \frac{|\gamma_{\text{测}} - \gamma_{\text{理}}|}{\gamma_{\text{理}}} \times 100\% = \frac{|\gamma_{\text{测}} - 1.40|}{1.40} \times 100\%$$

四、实验装置介绍

1. 超声声速测定仪

主要部件是两个压电陶瓷换能器和一个游标卡尺(图4). 超声实验装置中发射器固定, 摇动丝杆的摇柄可使接收器前后移动, 以改变发射器与接收器的距离. 丝杆上方安装有游标尺, 可准确显示位移量.

2. 函数信号发生器

提供一定频率的信号, 使之等于系统的谐振频率, 如图5所示. 本实验所用仪器的频率特性: 频率精度 50 ppm , 分辨率 $1 \text{ } \mu\text{Hz}$.

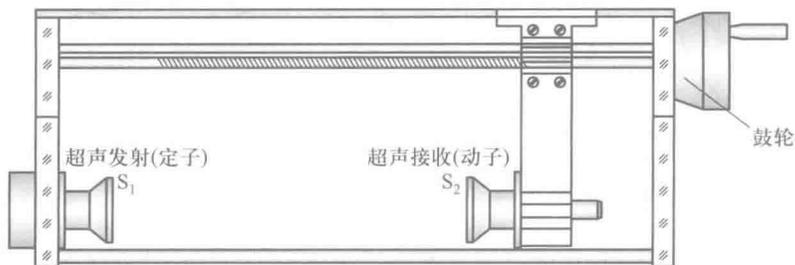


图4 超声声速测定仪(换能器及移动支架组合)

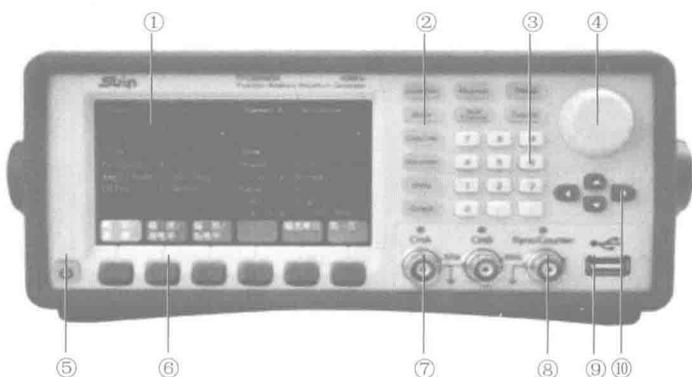


图5 函数信号发生器

- ①—显示屏;②—功能键;③—数字键;④—调节旋钮;⑤—电源按钮;
⑥—菜单软键;⑦—CHA、CHB 输出;⑧—同步输出/计数输入;⑨—U 盘插座;⑩—方向键

3. 示波器

示波器的 X、Y 轴输入各接一个换能器,改变两个换能器之间的距离会影响示波器上的李萨如图形.并由此可测得当前频率下声波的波长,结合频率,可以求得空气中的声速.本实验所用的示波器是 GOS-620 双轨迹示波器(图 6),其使用方法见“示波器的使用”实验.

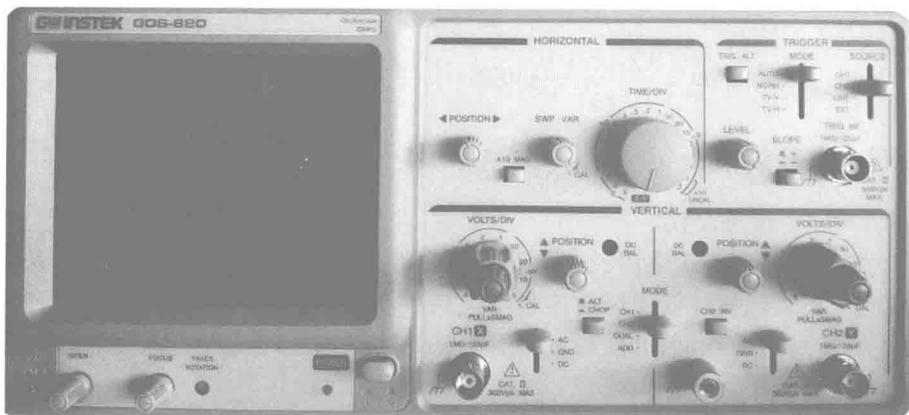


图6 GOS-620 双轨迹示波器

五、实验内容及步骤

1. 调整仪器使系统处于最佳工作状态

按图 1 连接好电路. 调节信号发生器使其产生约 40 kHz 的正弦波输出. 调整示波器并在其上观察所看到的图形. 开机预热约 5 min, 待信号源和换能器工作稳定后即可开始实验.

2. 用驻波干涉法测量声速和绝热系数

(1) 将信号发生器的输出信号频率调至换能器的谐振频率 38 kHz 附近. 转动声速测定仪上丝杆的鼓轮(图 4), 先使接收器 S_2 移近 S_1 至相距 5 cm 左右. 微调鼓轮, 使示波器上显示的信号幅度最大. 然后朝同一方向旋转鼓轮使 S_2 缓慢远离 S_1 , 示波器就可以看到信号不断地由最大变到最小再变到最大, 二相邻的振幅最大之间 S_2 移动过的距离为 $\lambda/2$.

(2) 在 S_2 持续缓慢远离 S_1 的过程中, 每当示波器上出现最大振幅时, 记下读数标尺位置 L_i , 共 12 个值, 填入表 1, 用逐差法处理数据.

注意: 测量时, S_1 、 S_2 的距离从近到远或从远到近均可, 但要保证接收器 S_2 可移动的距离不小于 8 cm.

(3) 将信号发生器频率分别调至 40 kHz、42 kHz, 重复以上步骤.

3. 用相位比较法测声速和绝热系数

(1) 在驻波干涉法的基础上, 调整示波器, 使图像按“X-Y”方式显示, 此时示波器上将出现一个椭圆.

(2) 将信号发生器的输出信号频率调至 38 kHz, 使接收器 S_2 移近 S_1 至相距 5 cm 左右, 然后朝同一方向转动鼓轮使 S_2 缓慢远离 S_1 , 椭圆将按图 3 依次变化.

(3) 为方便观察, 可从示波器上的图形显示为一、三象限的直线时开始记录. 每移动 5 个周期(相当于 L 移动 5 个波长), 接收器 S_2 的位置由 L_0 移至 L_5 , 将 L_0 、 L_5 填入表 2, 则 $\lambda = (L_5 - L_0)/5$, 并由此算出声速和绝热系数.

(4) 将信号发生器频率分别调至 40 kHz、42 kHz, 重复以上步骤.

六、数据记录及数据处理

1. 室内空气温度 $t = \underline{\hspace{2cm}}$ °C, $T = 273.15 + t = \underline{\hspace{2cm}}$ K, 式中 t 的单位为 °C.

2. 驻波干涉法测量声速及绝热系数

表 1 驻波干涉法测量声速数据记录与处理

$$f_{\text{I}} = 38 \text{ kHz}, \quad f_{\text{II}} = 40 \text{ kHz}, \quad f_{\text{III}} = 42 \text{ kHz}$$

测量次数 i	位置 L_i/mm			测量次数 $i+6$	位置 L_{i+6}/mm			$\lambda_i = 2 \Delta L = (L_{i+6} - L_i)/3/\text{mm}$		
	f_{I}	f_{II}	f_{III}		f_{I}	f_{II}	f_{III}	f_{I}	f_{II}	f_{III}
1										
2										
3										

续表

测量次数 i	位置 L_i/mm			测量次数 $i+6$	位置 L_{i+6}/mm			$\lambda_i = 2 \Delta L = (L_{i+6} - L_i)/3/\text{mm}$		
	f_I	f_{II}	f_{III}		f_I	f_{II}	f_{III}	f_I	f_{II}	f_{III}
4										
5										
6										

当 $f_I = 38 \text{ kHz}$ 时,有

$$v_I = f_I \bar{\lambda}_I \quad \left(\text{其中 } \bar{\lambda}_I = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_6}{6} \right)$$

同理,可求 $f_{II} = 40 \text{ kHz}$ 时的 v_{II} 及 $f_{III} = 42 \text{ kHz}$ 时的 v_{III} . 最后,有

$$\bar{v} = \frac{v_I + v_{II} + v_{III}}{3}$$

$$\gamma_{\text{测}} = \frac{M\bar{v}^2}{RT}$$

$$v_{\text{理}} = v_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (v_0 = 331 \text{ m/s}, T_0 = 273.15 \text{ K})$$

$$E_r(v) = \frac{|\bar{v} - v_{\text{理}}|}{v_{\text{理}}} \times 100\%$$

$$E_r(\gamma) = \frac{|\gamma_{\text{测}} - \gamma_{\text{理}}|}{\gamma_{\text{理}}} \times 100\% \quad (\gamma \text{ 的理论值 } \gamma_{\text{理}} = 1.40)$$

3. 相位比较法测量声速及绝热系数

表 2 相位比较法测声速数据记录与处理

输入信号频率	L_0/mm	L_5/mm	$\lambda_i = [(L_5 - L_0)/5]/\text{mm}$ ($i = I, II, III$)	$v_i = f_i \cdot \lambda_i / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ($i = I, II, III$)
$f_I = 38 \text{ kHz}$				
$f_{II} = 40 \text{ kHz}$				
$f_{III} = 42 \text{ kHz}$				

$$\bar{v}_{\text{测}} = \frac{v_I + v_{II} + v_{III}}{3}, \quad \gamma_{\text{测}} = \frac{M\bar{v}_{\text{测}}^2}{RT}$$

$$E_r(v) = \frac{|\bar{v}_{\text{测}} - v_{\text{理}}|}{v_{\text{理}}} \times 100\%, \quad E_r(\gamma) = \frac{|\gamma_{\text{测}} - \gamma_{\text{理}}|}{\gamma_{\text{理}}} \times 100\% \quad (\gamma \text{ 的理论值 } \gamma_{\text{理}} = 1.40)$$

七、注意事项

1. 信号发生器、示波器预热 3 min 以后才能正常工作。
2. 确保两个换能器 S_1 和 S_2 端面的平行。
3. 信号发生器输出信号频率与压电换能器谐振频率保持一致。

4. 测量中,在转动鼓轮移动接收器的过程中,应一直朝一个方向转动,中途不可后退,以免螺旋空程带来实验误差.

八、思考题

1. 固定距离,改变频率以求声速,是否可行?
2. 各种气体中的声速是否相同? 为什么?
3. 为什么发射换能器和接收换能器的接收面要互相平行?
4. 是否可用此方法测定超声波在其他介质(如液体和固体)中的传播速度?

实验十九 准稳态法测导热系数和比热容

导热亦称“热传导”，是热传递三种基本方式之一，也是固体中热传递的主要方式。要发生热传导，必须存在温度梯度。温度梯度定义为单位距离的两点之间的温度差，单位为 K/m 。导热系数定义为稳态条件时，单位温度梯度下单位时间内由单位面积传递的热量，单位为 $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})$ 。导热系数是表征物质热传导性质的特征量。

比热容，即比热，是单位质量物质的热容量。单位质量的某种物质，在温度升高（或降低） 1K 时所吸收（或放出）的热量，叫做这种物质的“比热容”。在国际单位制中，比热容的单位是 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

一、实验目的

1. 了解热电偶传感器的工作原理。
2. 了解准稳态法测量导热系数和比热容的原理。
3. 用准稳态法测量不良导体的导热系数和比热容。

二、实验仪器

1. ZKY-BRDR 型准稳态法比热容导热系数测定仪。
2. 主机、样品加热台、实验样品各两套（橡胶和有机玻璃每套各四块）、保温杯一个。

三、实验原理

如图 1 所示的一维无限大导热模型，无限大不良导体平板厚度为 $2D$ ，初始温度为 t_0 ，平板两侧为加热面，两侧同时施加均匀的指向中心面的热流密度 q_c [单位时间通过单位面积的热量，单位为 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]，则平板各处的温度 $t(x, \tau)$ 将随加热时间 τ 而变化，中间平面称为中心面 ($x=0$ 面)，两平板初始温度同为 t_0 。

上述模型的数学描述可表达如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\pm D} = \frac{q_c}{\lambda} \\ \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ t(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = t_0 \end{cases}$$

式中 $a = \lambda / \rho c$ ； λ 为材料的导热系数， ρ 为材料的密

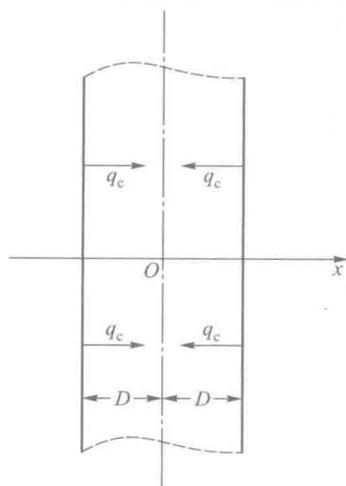


图 1 理想无限大不良导体平板

度; c 为材料的比热容. 此方程组的解为

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{a}{D} \tau + \frac{1}{2D} x^2 - \frac{D}{6} + \frac{2D}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos\left(\frac{n\pi x}{D}\right) e^{-\frac{a^2 n^2 \tau}{R^2}} \right] \quad (1)$$

考察 $t(x, \tau)$ 的解析式(1)可以看到, 随加热时间 τ 的增加, 样品各处的温度将发生变化, 而且注意到式中的级数求和项由于指数衰减的原因, 会随加热时间的增加而逐渐变小, 直至所占份额可以忽略不计.

定量分析表明当 $\frac{a\tau}{D^2} > 0.5$ 以后, 上述级数求和项可以忽略. 这时式(1)变成

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{D} + \frac{x^2}{2D} - \frac{D}{6} \right) \quad (2)$$

这时, 在样品中心处有 $x=0$, 因而有

$$t(0, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{D} - \frac{D}{6} \right) \quad (3)$$

在样品加热面处有 $x=D$, 因而有

$$t(D, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{D} + \frac{D}{3} \right) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可见, 当加热时间满足条件 $\frac{a\tau}{D^2} > 0.5$ 时, 在样品中心面和加热面处温度和加热时间成线性关系, 升温速率同为 $\frac{aq_c}{\lambda D}$, 此值是一个和材料导热性能和初始条件有关的常量, 此时加热面和中心面间的温度差为

$$\Delta t = t(D, \tau) - t(0, \tau) = \frac{1}{2} \frac{q_c D}{\lambda} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 此时加热面和中心面间的温度差 Δt 和加热时间 τ 没有直接关系, 保持恒定. 系统各处的温度和时间是线性关系, 升温速率也相同, 我们称此种状态为准稳定导热状态即准稳态. 当系统达到准稳态时, 由式(5)得到

$$\lambda = \frac{q_c D}{2\Delta t} \quad (6)$$

根据式(6), 只要测量出进入准稳态后加热面和中心面间的温度差 Δt , 并由实验条件确定相关参量 q_c 和 D , 则可以得到待测材料的导热系数 λ .

另外在进入准稳态后, 由比热容的定义和能量守恒关系, 可以得到下列关系式:

$$q_c = c\rho D \frac{dt}{d\tau} \quad (7)$$

比热容为

$$c = \frac{q_c}{\rho D \frac{dt}{d\tau}} \quad (8)$$

式中 $\frac{dt}{d\tau}$ 为准稳态条件下样品中心面的升温速率(进入准稳态后各点的升温速率是相同的).

由以上分析可以得到结论:只要在上述模型中测量出系统进入准稳态后加热面和中心面间的温度差和中心面的升温速率,即可由式(5)和式(8)得到待测材料的导热系数和比热容。

为了尽量减少热量散失,保证热量均匀稳定地流动,采用如图2所示的四块样品的配置。加热面和中心面间的温度差 Δt 和中心面升温速率 $\frac{dt}{d\tau}$ 的测量方法如下:

将一热电偶(工作原理见 § 5.4)热端置于中心面中心,另一热电偶热端置于加热面中心,两热电偶冷端置于冰水混合物中(若实验中能保证冷端温度恒定不变,不用冰水混合物也不影响本实验导热系数和比热容的测量结果,一般可在实验中把冷端置入盛有水的保温瓶中)。

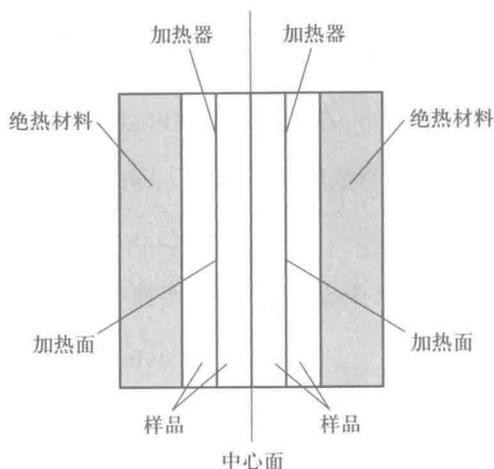


图2 被测样品安装配置图

中心面升温速率 $\frac{dt}{d\tau}$ 的测量是通过测量相同时间间隔内中心面热电偶的读数,利用 $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$ 而得到。加热面和中心面间的温度差 Δt 可以由将两个热电偶反向串联后的输出测量值得到。

四、实验装置介绍

本实验仪主要包括了主机、样品加热台和保温杯三部分。主机是控制整个实验操作并读取实验数据的装置。样品加热台是安放实验样品和通过热电偶测温并放大感应信号的平台。保温杯用于保证热电偶的冷端温度在实验中保持一致。

1. 主机前面板(如图3所示)

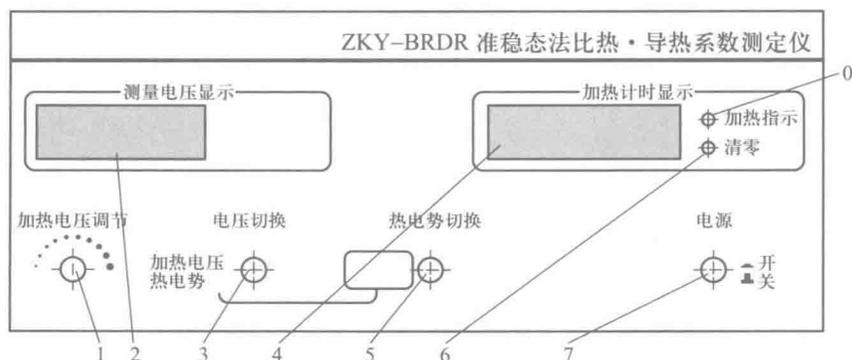


图3 主机前面板示意图

0—加热指示灯. 指示加热控制开关的状态. 亮时表示正在加热, 灭时表示加热停止.

1—加热电压调节. 调节加热电压的大小(范围:15.00 ~ 19.99 V)

2—测量电压显示. 显示两个电压, 即“加热电压(V)”和“热电势(mV)”.

3—电压切换. 在加热电压和热电势之间切换, 同时测量电压显示表显示相应的电压数值.

4—加热计时显示. 显示加热的时间, 前两位表示分, 后两位表示秒, 最大显示 99 : 59.

5—热电势切换. 在中心面热电势和中心面-加热面的温差热电势之间切换, 同时测量电压, 显示相应的热电势数值.

6—清零. 当不需要当前计时显示数值而需要重新计时时, 可按此键实现清零.

7—主机电源开关. 打开或关闭实验仪器.

2. 主机后面板(如图4所示)

8—电源插座. 接 220 V、1.25 A 的交流电源.

9—控制信号. 为放大盒及加热薄膜提供工作电压.

10—热电势输入. 将传感器感应的热电势输入到主机.

11—加热控制. 控制加热的开关.

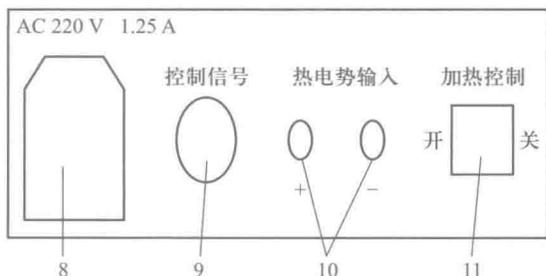


图4 主机后面板示意图

3. 样品加热台(如图5所示)

12—放大盒. 将热电偶感应的电压信号放大并将此信号输入到主机.

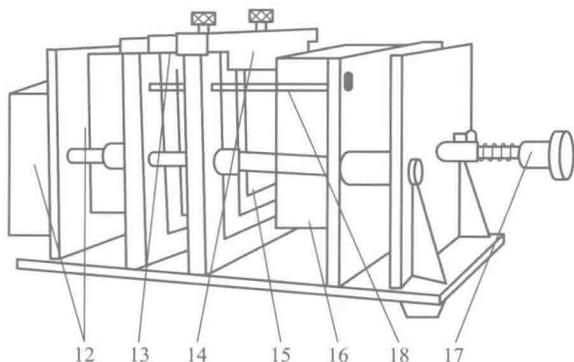


图5 样品加热台示意图

- 13—中心面横梁. 承载中心面的热电偶.
- 14—加热面横梁. 承载加热面的热电偶.
- 15—加热薄膜. 给样品加热.
- 16—隔热层. 防止加热样品时散热, 从而保证实验精度.
- 17—螺杆旋钮. 推动隔热层压紧或松动实验样品和热电偶.
- 18—锁定杆. 实验时锁定横梁, 防止未松动螺杆取出热电偶导致热电偶损坏.

五、实验内容及步骤

1. 安装样品

戴好手套(尽量保证四个实验样品初始温度保持一致), 将冷却好的样品放进样品架中(注意两个热电偶之间、中心面与加热面的位置不要放错, 同时热电偶不要嵌入到加热薄膜里), 然后旋动旋钮以压紧样品, 准备开始实验.

2. 设定加热电压

检查“加热控制”开关是否关上(可以根据前面板上加热计时指示灯的亮和不亮来确定, 亮表示加热控制开关打开, 不亮表示加热控制开关关闭), 没有关则应立即关上, 然后就可以实验了.

开机后, 先让主机预热 10 min 左右再进行实验. 在记录实验数据之前, 应该先设定所需要的加热电压, 步骤为: 先将“电压切换”钮按到“加热电压”挡位, 再由“加热电压调节”旋钮来调节所需要的电压(参考加热电压: 18.00 V、19.00 V).

3. 测定样品的导热系数和比热容

将测量电压显示调到“热电势”的“温差”挡位, 如果显示数值小于 0.004 mV, 就可以开始加热了, 否则应等到显示降到小于 0.004 mV 再加热(如果实验要求精度不高, 显示在 0.010 左右也可以, 但不能太大, 那样会使得不好确认进入准稳态的时间和准稳态时的温差 Δt).

保证上述条件后, 打开“加热控制”开关并开始记数, 记入表 1 中(记数时, 建议每隔 1 min 记录一次中心面热电势和温差热电势, 这样便于后面的计算. 一次实验时间最好在 25 min 之内完成, 一般在 15 min 左右为宜). 分别测量有机玻璃和橡胶样品的导热系数及比热容. 当记录完一次数据需要换样品进行下一次实验时, 其操作顺序是: 关闭加热控制开关→关闭主机电源开关→旋螺杆以松动实验样品→取出实验样品.

以上操作中特别要注意的是, 须先松动螺杆再取实验样品, 否则会损坏热电偶传感器.

六、数据记录及数据处理

1. 有机玻璃导热系数及比热容测定

表 1 有机玻璃导热系数及比热容实验数据

时间/min	温差热电势 $\Delta t'/\text{mV}$	中心面热电势 U_1/mV	$\frac{dt'}{d\tau}$
1			—

续表

时间/min	温差热电势 $\Delta t'/\text{mV}$	中心面热电势 U_c/mV	$\frac{dt'}{d\tau}$
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
平均		—	

其中 $\frac{dt'}{d\tau} = U_{t_{n+1}} - U_{t_n} (n \in N)$.

由于铜-康铜热电偶温度(K)和热电势(mV)对应关系为温度每改变1K对应热电势0.040 mV,因此有

$$\overline{\Delta t} = \frac{\overline{\Delta t'}}{0.040}, \quad \frac{\overline{dt}}{d\tau} = \frac{\overline{dt'}}{60 \times 0.040}$$

$$\lambda = \frac{q_c D}{2 \Delta t}, \quad c = \frac{q_c}{\rho D \frac{dt}{d\tau}}$$

其中热流密度 q_c (单位为 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 可由下式得到:

$$q_c = \frac{U^2}{2Sr}$$

式中 U 为加热电压, S 为样品面积, r 为每个加热器电阻(本实验取 110Ω), 有机玻璃板尺寸为 $90.0 \text{ mm} \times 90.0 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm}$, 密度为 $\rho = 1196 \text{ kg/m}^3$.

2. 橡胶导热系数及比热容测定(同上)

橡胶板尺寸为 $90.0 \text{ mm} \times 90.0 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm}$, 密度为 $\rho = 1374 \text{ kg/m}^3$.

七、注意事项

1. 尽量保证每组实验样品的初始温度一样, 安装时应戴手套.
2. 实验样品放好后尽量压紧, 基本保证整个样品处于密封状态, 防止散热.

3. 主机开机前必须关好主机的“加热控制”开关,开机后预热 10 min 左右再打开“加热控制”开关.

4. 更换样品时,其操作顺序是:关闭加热控制开关→关闭主机电源开关→旋螺杆以松动实验样品→取出实验样品,冷却加热薄膜 5 ~ 10 min 后再进行第二组实验.

八、思考题

1. 什么叫准稳定导热状态? 如何判定实验达到了准稳定导热状态?

2. 试分析本实验过程中影响测量结果的因素有哪些? 哪些已采取措施? 还可以做哪些改进?

附录 热传导方程的求解

在我们的实验条件下,以样品中心为坐标原点,温度 t 随位置 x 和时间 τ 的变化关系 $t(x, \tau)$ 可用如下热传导方程及边界,初始条件描述

$$\begin{cases} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial t(D, \tau)}{\partial x} = \frac{q_c}{\lambda} \\ \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0 \\ t(x, 0) = t_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $a = \lambda / \rho c$, λ 为材料的导热系数, ρ 为材料的密度, c 为材料的比热容, q_c 为从边界向中间施加的热流密度, t_0 为初始温度.

为求解式(9),应先作变量代换,将式(9)的边界条件换为齐次的,同时使新变量的方程尽量简洁,故此设

$$t(x, \tau) = u(x, \tau) + \frac{aq_c}{\lambda D} \tau + \frac{aq_c}{2\lambda D} x^2 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),得到 $u(x, \tau)$ 满足的方程及边界,初始条件

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial u(D, \tau)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u(0, \tau)}{\partial x} = 0 \\ u(x, 0) = t_0 - \frac{q_c}{2\lambda D} x^2 \end{cases} \quad (11)$$

用分离变量法解方程式(11),设

$$u(x, \tau) = X(x)T(\tau) \quad (12)$$

代入式(11)中第 1 个方程后得出变量分离的方程

$$T'(\tau) + \alpha\beta^2 T(\tau) = 0 \quad (13)$$

$$X''(x) + \beta^2 X(x) = 0 \quad (14)$$

式(13)、式(14)中 β 为待定系数. 式(13)的解为

$$T(\tau) = e^{-a\beta^2\tau} \quad (15)$$

式(14)的通解为

$$X(x) = c \cos \beta x + c' \sin \beta x \quad (16)$$

为使式(12)是式(11)的解,式(16)中的 c, c', β 的取值必须使 $X(x)$ 满足式(11)的边界条件,即必须 $c' = 0, \beta = n\pi/D$.

由此得到 $u(x, \tau)$ 满足边界条件的一组特解

$$u_n = c_n \cos\left(\frac{n\pi}{D}x\right) e^{-\frac{an^2\pi^2}{D^2}\tau} \quad (17)$$

将所得特解求和,并代入初始条件,得

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n \cos \frac{n\pi}{D}x = t_0 - \frac{q_c}{2\lambda D}x^2 \quad (18)$$

为满足初始条件,令 c_n 为 $t_0 - \frac{q_c}{2\lambda D}x^2$ 的傅里叶余弦展开式的系数

$$c_0 = \frac{1}{D} \int_0^D \left(t_0 - \frac{q_c}{2\lambda D}x^2\right) dx = t_0 - \frac{q_c D}{6\lambda} \quad (19)$$

$$c_n = \frac{2}{D} \int_0^D \left(t_0 - \frac{q_c}{2\lambda D}x^2\right) \cos\left(\frac{n\pi}{D}x\right) dx = (-1)^{n+1} \frac{2q_c D}{\lambda n^2 \pi^2} \quad (20)$$

将 c_0, c_n 的值代入式(17),并将所有特解求和,得到满足式(11)条件的解为

$$u_n(x, \tau) = t_0 - \frac{q_c D}{6\lambda} + \frac{2q_c D}{\lambda \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos\left(\frac{n\pi}{D}x\right) e^{-\frac{an^2\pi^2}{D^2}\tau} \quad (21)$$

将式(21)代入式(10)可得

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{a}{D}\tau + \frac{1}{2D}x^2 - \frac{D}{6} + \frac{2D}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos\left(\frac{n\pi}{D}x\right) e^{-\frac{an^2\pi^2}{D^2}\tau} \right]$$

即为式(9).

实验二十 电表的改装与校准

一、实验目的

1. 掌握由微安表改装成电流表及电压表的原理和方法；
2. 掌握改装后的电流表和电压表的校准方法。

二、实验仪器

微安表、标准电流表、标准电压表、滑线变阻器、电阻箱(最大电阻 $99\,999.99\ \Omega$ ，最小步进 $0.01\ \Omega$)、直流低压稳压电源、开关、导线等。

三、实验原理

实验室常用的磁电式微安表主要组成部件有：用于产生磁场的永久磁铁、可绕中心轴转动的线圈、能产生机械反力矩的游丝以及用作指示的指针。当电流通过线圈时，载流线圈在磁场中受磁力矩 $M_{\text{磁}}$ 的作用而转动，同时带动指针偏转。线圈偏转角度的大小与线圈中通过的电流大小成正比，这是磁电式微安表能够测量电流的原理。

微安表习惯上称为表头，一般只能测量很小的电流和电压，若用它测量较大的电流和电压，就必须对其进行改装来扩大其量程。将表头改装成电流表或电压表的方法是根据分流或分压原理，给表头并联或串联适当阻值的电阻。改装前，需要了解表头的两个重要参量：① 表头的量程 I_g ，指表头允许通过的最大电流，可由表盘上直接读出；② 表头的内阻 R_g ，指表头中线圈有一定内阻，一般需要实际测量，作为改装的依据。

1. 测量表头内阻

表头内阻 R_g 的测定有多种方法，这里我们介绍一种替代法供参考，测量电路如图 1 所示，选择一个参考表头，其量程与被测表头接近，将两个表头及电阻箱三者并联，滑线变阻器 R 作为限流器，以控制电流不要超过两表头的量程。

将 K_2 置于 1 处，调节滑线变阻器 R 使参考表头指针偏转到某一较大正值刻度处（比如满刻度的 $2/3$ 处）。然后将 K_2 置于 2 处，保持 R 不变，调节电阻箱阻值，直到参考表头指针指在原来刻度处，则电阻箱所示阻值即为被测表头的内阻 R_g 。

2. 将表头改装为电流表

表头的量程很小，如果要测量超过其量程的电流，就必须扩大量程。扩大量程

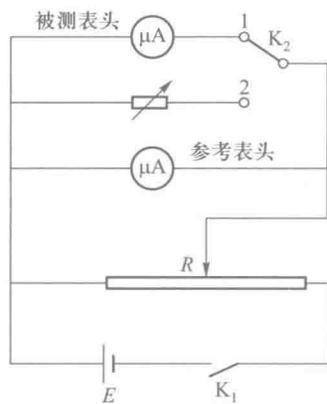


图 1 替代法测量表头内阻电路图

的办法是在表头上并联一个分流电阻 R_s (如图 2 所示), 这样被测电流中的大部分从分流电阻 R_s 流过, 而表头中流过的电流不会超过其被允许通过的最大电流 I_g . 虚线框中的表头和分流电阻 R_s 组成改装后的电流表.

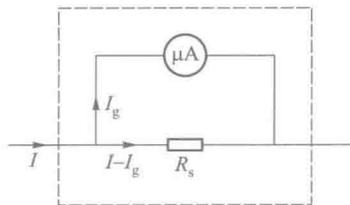


图 2 改装后的电流表

设改装后的电流表量程为 I , 由欧姆定律可知

$$I_g R_g = (I - I_g) R_s$$

令 $I = nI_g$, n 为表头量程的扩大倍数, 则

$$R_s = \frac{1}{n-1} R_g \quad (1)$$

可见, 在已知表头内阻 R_g 和量程 I_g 的基础上, 根据所需扩大量程的倍数 n , 由式 (1) 算出需要并联的分流电阻 R_s , 即可实现表头的扩程. 当然, 如果根据需要, 在同一表头上并联不同阻值大小的分流电阻 R_s , 便得到多量程的电流表.

3. 将表头改装为电压表

用一只内阻为 R_g 和量程为 I_g 的表头测电压时, 其电压量程 $U_g = I_g R_g$ 一般也不大. 为了测量较大的电压, 必须在表头上串联分压电阻 R_m (如图 3 所示), 从而使得外加电压中的大部分降落在分压电阻 R_m 上.

虚线框中的表头和分压电阻 R_m 组成改装后的电压表, 若电压表的量程为 U_m , 则分压电阻

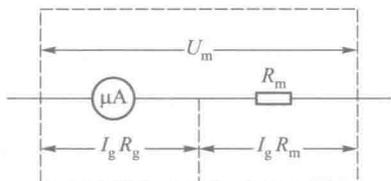


图 3 改装后的电压表

$$R_m = \frac{U_m}{I_g} - R_g \quad (2)$$

同一表头串联不同阻值大小的分压电阻 R_m , 可得到不同量程的电压表.

4. 改装表的校准

改装后的电流表或电压表必须经过校准才能投入使用, 常用的校准方法是比较法, 即把改装表与级别较高的标准表进行比较来实现校准.

(1) 校准改装后的电流表

校准改装后的电流表需要用到标准电流表, 校准电路如图 4 所示. 校准时, 必须先调好零点, 再校准量程 (满刻度点), 校准点应选在改装表整个量程范围内各个标度值位置上, 确定每一个标度值位置处的校准值 $\Delta I = I_{\text{改}} - I_{\text{标}}$. 将 ΔI 与等级误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作比较, 判断各校准点的 ΔI 是否超过 $\Delta_{\text{仪}}$, 以评定改装表是否仍符合原表头准确度等级. 若 ΔI 小于 $\Delta_{\text{仪}}$, 则认为改装表达到要求; 若 ΔI 大于 $\Delta_{\text{仪}}$, 则应调整接入的分流电阻 R_s , 以使其达到要求为止. 作 $\Delta I - I_{\text{改}}$ 校准曲线, 以便使用改装表时对读数修正.

(2) 校准改装后的电压表

使用标准电压表对改装后的电压进行校准, 校准电路如图 5 所示. 与校准改装后

的电流表一样,校准点也应选在改装表整个量程范围内各个标度值位置上,并确定每一个标度值位置处的误差 $\Delta U = U_{\text{改}} - U_{\text{标}}$, 将其与 $\Delta_{\text{仪}}$ 比较, 作 $\Delta U - U_{\text{改}}$ 校准曲线。

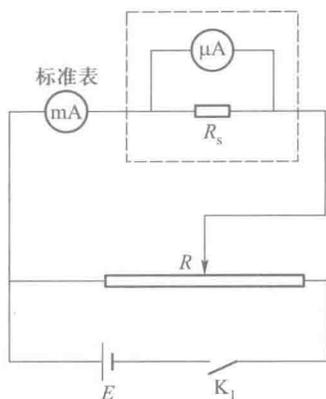


图4 校准改装后的电流表

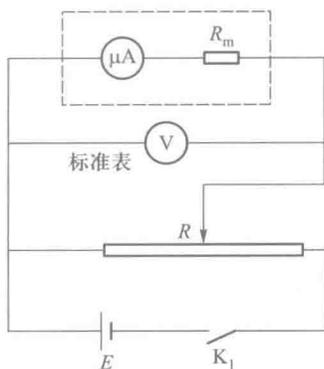


图5 校准改装后的电压表

四、实验内容及步骤

1. 测量表头内阻

按照图 1 所示线路连接, 对表头内阻进行测量并记录。

2. 将微安表量程扩大 N 倍, 改装成电流表

(1) 根据改装后的量程, 计算需连入电路中的电阻值 R_s (用电阻箱代替), 并检查标准表和待改装表头的零点, 确保指针指零。

(2) 按照图 4 所示线路连接, 将滑线变阻器 R 置于安全位置, 经教师检查线路后再接通电源。

(3) 调节滑线变阻器 R 使标准表的示值正好为改装表的量程时, 改装表应指示满刻度。若不符合, 应适当调节分流电阻 R_s 的阻值, 注意此时标准表的示值也会变化, 需要再调节滑线变阻器 R , 如此反复调节 R_s 和 R , 直到标准表和改装表示值都达到要求。记下此时分流电阻 R_s 的阻值。

(4) 校准改装后的电流表, 分别增大电流和减小电流各校准一遍, 依次对改装后表头上有标度值的点进行校准。数据记入表 1。

3. 将微安表改装成电压表

(1) 根据改装后的量程, 计算需联入电路中的电阻值 R_m (用电阻箱代替), 并检查标准表和待改装表头的零点, 确保指针指零。

(2) 按照图 5 线路连接, 经教师检查线路后再接通电源。

(3) 调节滑线变阻器 R 使标准表的示值正好为改装表的量程时, 改装表应指示满刻度。若不符合, 应适当调节分压电阻 R_m 的阻值, 直到标准表和改装表的示值都达到要求。记下此时分压电阻 R_m 的阻值。

(4) 校准改装后的电压表, 与校准改装后的电流表方法一样, 分别增大电压和减小电压各校准一遍。数据记入表 2。

五、数据记录及数据处理

1. 表头参量

量程 I_g _____, 等级 _____, 内阻 R_g _____.

2. 扩大量程为电流表

量程 _____, 扩大量程倍数 _____, R_s _____, 实际电阻值 R'_s _____, 标准表量程 _____, 等级 _____, 分度值 _____.

表 1 校准改装后的电流表

改装表读数 $I_{改}/\text{mA}$	标准电流表读数/ mA			$\Delta I/\text{mA}$
	增大电流	减小电流	平均值 $I_{标}$	

计算各校准点的 $\Delta I = I_{改} - I_{标} =$ _____, 选择其中的 $|\Delta I|_{\max}$ 与 $\Delta_{仪} = \text{量程} \times a\% =$ _____ (a 为表头的准确度等级) 比较, 并作 $\Delta I - I_{改}$ 校准曲线, 注意保留 ΔI 的正负号, 校准曲线为各点间所连接的折线.

3. 改装为电压表

量程 _____, R_m _____, 实际电阻值 R'_m _____, 标准表量程 _____, 等级 _____, 分度值 _____.

表 2 校准改装后的电压表

改装表读数 $U_{改}/\text{V}$	标准电压表读数/ V			$\Delta U/\text{V}$
	增大电压	减小电压	平均值 $U_{标}$	

计算各校准点的 $\Delta U = U_{改} - U_{标} =$ _____, 选择其中的 $|\Delta U|_{\max}$ 与表头的等级度误差 $\Delta_{仪} =$ _____ 比较, 并作 $\Delta U - U_{改}$ 校准曲线, 注意保留 ΔU 的正负号, 校准曲线为各点间所连接的折线.

六、注意事项

1. 线路连接完毕, 应仔细检查变阻器是否调到安全位置, 电阻箱上是否有需

要的数值。

2. 当标准表调到改装表量程时,按照公式计算的电阻数值并联或串联后的改装表,不一定正好也指在满刻度,这时需要调节 R_s 或 R_m ,但调节 R_s 或 R_m 时,标准表的指示数又会发生变化,此时又必须调节滑线变阻器 R ,使得标准表指在改装表量程,然后改装表指示数又变化,又要调节 R_s 或 R_m ……如此反复进行,直到标准表和改装表的指示值达到要求。

3. 校准时,应将改装表调到需要的指示值,再读标准表的指示值,不可颠倒。

4. 调节电阻箱的电阻时,防止电阻值从 9 到 0 的突然减小烧坏电表。

七、思考题

1. 为何要校准改装表? 方法特点是什么?

2. 校准改装后的电流表或电压表时,要使改装表和标准表指示数由大到小或由小到大变化,以便逐点进行比较,这时应该调节表头并联电阻或串联电阻还是调节变阻器?

实验二十一 双臂电桥测量低电阻

一、实验目的

1. 了解四端引线法的意义及双臂电桥的结构;
2. 学习使用双臂电桥测量低电阻;
3. 学习测量导体的电阻率.

二、实验仪器

DH6105 型组装式双臂电桥,检流计,低电阻测试架(待测铜、铝棒各一根),换向开关,通断开关,导线,千分尺等.

三、实验原理

1. 四端引线法

测量中等阻值的电阻,惠斯通电桥法是一种精密的测量方法,伏安法是比较简单的方法,但在测量低电阻时都遇到了困难.这是因为导线本身的电阻和导线端点接触电阻(总称附加电阻)的存在.图1为伏安法测电阻的等效电路图,图中 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 、 R_{04} 为附加电阻,通常电压表内阻较大, R_{01} 和 R_{04} 对测量的影响不大,而 R_{02} 和 R_{03} 与 R_x 串联在一起,被测电阻为 $(R_{02}+R_x+R_{03})$,若 R_{02} 和 R_{03} 数值与 R_x 为同一数量级,或超过 R_x ,显然不能用此电路来测量 R_x .

若采用四端引线法接入低电阻 R_x ,则图1等效电路变为如图2所示,即待测低电阻 R_x 两侧的接点分为两个电流接点 $C-C$ 和两个电压接点 $P-P$, $C-C$ 在 $P-P$ 的外侧.显然电压表测量的是 $P-P$ 之间一段低电阻两端的电压,消除了 R_{02} 和 R_{03} 对 R_x 测量的影响.这种测量低电阻阻值或低电阻两端电压的方法叫做四端引线法,它广泛应用于各种测量领域中.例如为了研究高温超导体在发生正常超导转变时的零电阻现象和迈斯纳效应,必须测定临界温度 T_c ,正是用通常的四端引线法,通过测量超导样品电阻 R 随温度 T 的变化而确定的.低值标准电阻正是为了减小接触电阻而设有四个端钮.

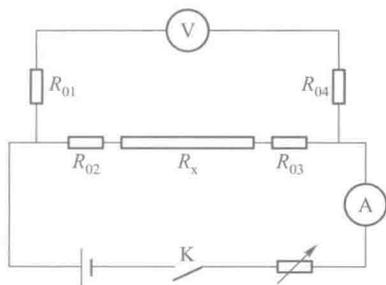


图1 伏安法测电阻等效电路

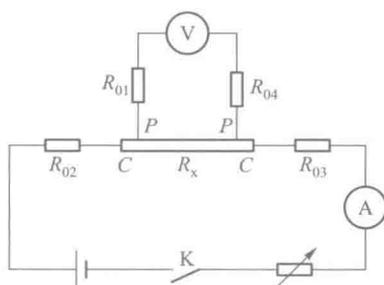


图2 四端引线法测电阻等效电路

2. 双臂电桥测量低电阻

用惠斯通电桥测量中值电阻 ($10 \sim 10^6 \Omega$), 测出的 R_x 值中, 实际上含有导线电阻和接触电阻这些附加电阻的成分 (一般为 $10^{-4} \sim 10^{-3} \Omega$ 数量级), 通常可以不考虑它们的影响, 而当被测电阻达到较小值 (如 1Ω 以下) 时, 附加电阻所占的比重就明显了. 双臂电桥 (又称开尔文电桥) 正是通过对惠斯通电桥改进, 把四端引线法和电桥的平衡比较法结合起来精密测量低电阻的一种电桥, 适用于 $10^{-6} \sim 10^2 \Omega$ 范围内低值电阻的测量.

图 3 双臂电桥测低电阻电路中, R_1, R_2, R_3, R_4 为桥臂电阻. R_n 为比较用的已知标准电阻, R_x 为被测电阻. R_n 和 R_x 采用四端引线接线法, 电流接点为 C_1, C_2 , 位于外侧; 电势接点 P_1, P_2 位于内侧. 图 4 等效电路中, 桥路上 $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ 为 R_n 和 R_x 电势接点处的附加电阻, $R'_{01}, R'_{02}, R'_{03}, R'_{04}$ 为电流接点处的附加电阻.

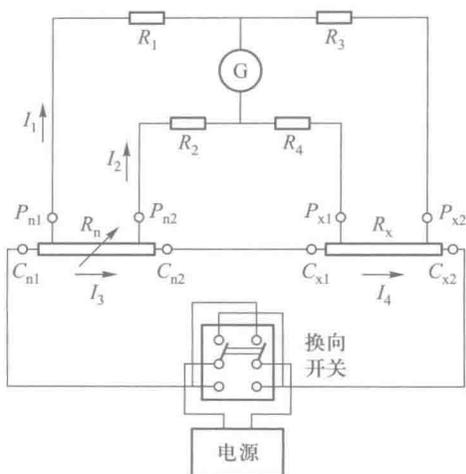


图 3 双臂电桥测低电阻电路

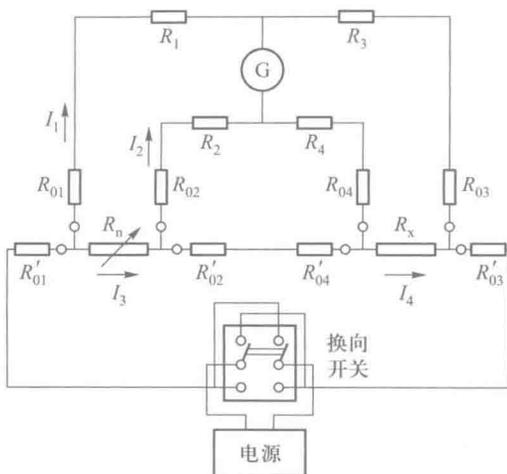


图 4 双臂电桥测低电阻等效电路

当使检流计指示为零时, 电桥处于平衡状态, 这时 $I_3 = I_4$, 根据基尔霍夫定律可得

$$\begin{aligned} I_1(R_1 + R_{01}) &= I_3 \cdot R_n + I_2(R_2 + R_{02}) \\ I_1(R_3 + R_{03}) &= I_3 \cdot R_x + I_2(R_4 + R_{04}) \\ (I_3 - I_2)R_0 &= I_2(R_2 + R_{02} + R_4 + R_{04}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $R_0 = R'_{02} + R'_{04}$. 由于 $R_i \gg R_{0i} (i = 1, 2, 3, 4)$, 所以近似可得

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_3 \cdot R_n + I_2 R_2 \\ I_1 R_3 &= I_3 \cdot R_x + I_2 R_4 \\ (I_3 - I_2) R_0 &= I_2 (R_2 + R_4) \end{aligned} \quad (2)$$

对方程组求解, 可得

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} R_n + \frac{R_0 R_2}{R_3 + R_2 + R_0} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2} \right) \quad (3)$$

由此可见, 用双臂电桥测电阻, R_x 的结果由等式右边的两项来决定, 其中第一

项与单臂电桥相同,第二项称为更正项.为了方便测量和计算,使双臂电桥求 R_x 的公式与单臂电桥相同,所以实验中可设法使更正项尽可能做到为零.在双臂电桥测量时,通常可采用同步调节法, $R_3/R_1 = R_4/R_2$,使得更正项能接近零.在实际的使用中,通常使 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$,则式(3)变为

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} R_n \quad (4)$$

在这里必须指出,在实际的双臂电桥中,很难做到 R_3/R_1 与 R_4/R_2 完全相等,所以 R_n 和 R_x 电流接点间的导线应使用较粗的、导电性良好的导线,以使 R_0 (即 $R'_{02} + R'_{04}$) 值尽可能小,这样,即使 R_3/R_1 与 R_4/R_2 两项不严格相等,但由于 R_0 值很小,更正项仍能趋近于零.

为了更好地验证这个结论,可以人为地改变 R_1, R_2, R_3 和 R_4 的值,使 $R_1 \neq R_2, R_3 \neq R_4$ 时,并与 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ 时的测量结果相比较.

双臂电桥之所以能测量低电阻,总结为以下关键两点:

(1) 单臂电桥测量小电阻时之所以误差大,是因为用单臂电桥测出的值,包含有桥臂间的导线电阻和接触电阻,当接触电阻与 R_x 相比不能忽略时,测量结果就会有很大误差.而双臂电桥电势接点的导线电阻与接触电阻位于 R_1, R_2, R_3, R_4 的支路中,实验中设法令 R_1, R_2, R_3, R_4 都不小于 100Ω ,那么接触电阻的影响就可以略去不计.

(2) 双臂电桥电流接点的导线电阻与接触电阻,一端包含在电阻 R_0 里面,而 R_0 是存在于更正项中,对电桥平衡不发生影响;另一端则包含在电源电路中,对测量结果也不会产生影响.当满足 $R_3/R_1 = R_4/R_2$ 条件时,基本上消除了 R_0 的影响.

四、实验装置介绍

1. 桥臂电阻

桥臂电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 ,每个桥臂电阻均有三种阻值 $100 \Omega, 1 \text{ k}\Omega, 10 \text{ k}\Omega$,精度: 0.02% .

2. 可变标准电阻 R_n

R_n 有 C_1, P_1, P_2, C_2 四个引出端 (C_1, C_2 为电流端; P_1, P_2 为电势端;其中 C_1 与 P_1 相连, C_2 与 P_2 相连),由 $10 \times 0.01 \Omega + 10 \times 0.001 \Omega$ 组成.其中 $10 \times 0.001 \Omega$ 是一个 100 分度的划线盘,分辨率为 0.0001Ω .

3. 电流换向开关 DHK-1

如图 5 所示,具有正向接通、反向接通、断开三挡功能;面板上 1 脚和 2 脚为输入,分别接 DH6105 电源输出的正负端,3 脚和 4 脚为输出;当开关打向正接时,1 和 3 接通,2 和 4 接通,即 3 脚为正输出,4 脚为负输出;当开关打向反接时,1 和 4 接通,2 和 3 接通,即 3 脚为负输出,4 脚为正输出;当开关打向断时,3 和 4 端无电压输出.

4. AZ19 检流计

用于指示电桥是否平衡,灵敏度可调.在测量 $0.01 \sim 11 \Omega$ 范围内,在规定的电压下,当被测量电阻变化允许一个极限误差时,指零仪的偏转大于等于一个分格,

就能满足测量准确度的要求. 灵敏度不要过高, 否则不易平衡, 导致测量电阻时间过长. AZ19 检流计的使用说明书详见附件.

5. 检流计开关

用于控制检流计的通和断.

6. 低电阻测试架

如图 6 所示, 采用四端接法, 配有不同的金属试材, 并带有长度指示, 可用于测量金属的电阻率. C_1, C_2 为电流端; P_1, P_2 为电势端. C_1, P_1, P_2, C_2 接线柱内部分别与样品上 4 个固定螺钉相连, 其中连接 C_1, C_2, P_1 的螺钉固定不动, 连接 P_2 的固定螺钉可以在试材上滑动, 样品的实测长度即为中间两个固定螺钉 P_1 和 P_2 之间的距离. 注意: 在测试时候, 固定螺钉一定要锁紧, 减小接触电阻.

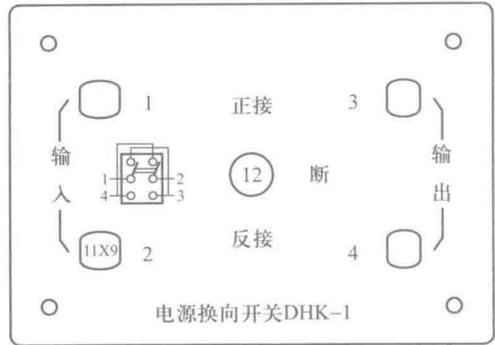


图 5 电流换向开关



图 6 低电阻测试架

7. 电桥专用电源

1.5 V 输出, 随负载阻抗的变化而不同, 最大电流 1.5 A, 由指针式 2 A 电流表指示输出电流大小.

8. 电桥量程

电桥总有效量程: $0.000\ 01 \sim 11.0\ \Omega$, 量程可以自由设置. 典型的整数倍的有效量程及对应的电桥准确度等级指数如表 1 所示.

表 1 电桥量程

×倍率 K	有效量程/ Ω	准确度等级指数 a
×100	0.1 ~ 11.0	0.2
×10	0.01 ~ 1.10	0.2
×1	0.001 ~ 0.110	0.5
×0.1	0.000 1 ~ 0.011 0	1
×0.01	0.000 01 ~ 0.001 10	5

五、实验内容及步骤

(1) 按图 3 连接好电路. 将可调标准电阻 R_n 、被测电阻 R_x , 按四端连接法, 与

R_1, R_2, R_3, R_4 连接, 注意 C_{n2}, C_{s1} 之间要用粗短导线.

(2) 打开电桥专用电源和检流计电源开关, 加电后, 等待 5 min, 调节指零仪指针指在零位上. 在测量未知电阻时, 为保护指零仪指针不被打坏, 指零仪的灵敏度调节旋钮应放在最低位置或非线性挡, 使电桥初步平衡后再增加指零仪灵敏度. 在改变指零仪灵敏度或环境等因素变化时, 有时会引起指零仪指针偏离零位, 在测量之前, 随时都应调节指零仪指零.

(3) 估计被测电阻值大小, 选择适当 R_1, R_2, R_3, R_4 的阻值, 调定 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$, 先按下“G”开关按钮, 再正向接通 DHK-1 开关, 接通电桥专用电源, 调节步进盘和划线读数盘, 用逐步逼近法使指零仪指针指在零位上, 电桥平衡. 在表 2 中记下 R_1, R_2, R_3, R_4 和 R_n 的阻值. R_n 阻值为步进盘读数+滑线盘读数.

注意: 测量低阻时, 工作电流较大, 由于存在热效应, 会引起被测电阻阻值的变化, 所以电源开关不应长时间接通, 应该间歇使用.

(4) 反向接通 DHK-1 开关, 使电路中电流反向, 重新调节电桥平衡, 这样做的目的是减小接触电势和热电势对测量的影响. 在表 2 中记下 R_1, R_2, R_3, R_4 和 R_n 的阻值.

(5) 低电阻测试架上读取并记录金属棒的长度 L , 单次测量. 用螺旋测微器测量金属棒的直径 d , 在不同部位测量五次, 并在表 3 中记录.

(6) 改变金属棒的长度, 重复上述步骤, 并比较两次测量结果.

六、数据记录及数据处理

表 2 测量金属棒电阻

电流方向	R_1	R_2	R_3	R_4	R_n	R_x
正向接通 DHK-1 开关						
反向接通 DHK-1 开关						

根据公式(4)计算正向接通 DHK-1 开关时 $R_{x1} = \underline{\hspace{2cm}}$, 反向接通 DHK-1 开关时 $R_{x2} = \underline{\hspace{2cm}}$, 然后计算被测电阻 $R_x = \frac{R_{x1} + R_{x2}}{2} = \underline{\hspace{2cm}}$.

表 3 测量金属棒电阻率

序号	R_x/Ω	L/m	d/m				$\rho/(\Omega \cdot m)$	$\bar{\rho}/(\Omega \cdot m)$
1								
2								

计算金属棒直径的平均值 $\bar{d} = \underline{\hspace{2cm}}$ m, 根据公式 $\rho = \pi \bar{d}^2 R_x / 4L$, 分别计算不同长度金属棒的电阻率 $\rho_i = \underline{\hspace{2cm}}$ $\Omega \cdot m$, 及平均电阻率 $\bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \underline{\hspace{2cm}}$ $\Omega \cdot m$.

七、注意事项

1. 在测量带有电感电路的直流电阻时,应先接通电桥电源,再按下“G”按钮,断开时,应先断开“G”按钮,后断开电桥电源,以免反冲电势损坏指零电路。

2. 在测量 $0.1\ \Omega$ 以下阻值时, C_1 、 P_1 、 C_2 、 P_2 接线柱到被测量电阻之间的连接导线电阻为 $0.005 \sim 0.01\ \Omega$, 测量其他阻值时,连接导线电阻应小于 $0.05\ \Omega$ 。

3. 使用完毕后,应断开电桥电源,松开“G”按钮。关断交流电。如长期不用,应拔出电源线确保用电安全。

4. 仪器长期搁置不用,在接触处可能产生氧化,造成接触不良,使用前应该来回转动 R_0 开关数次。

八、思考题

1. 双臂电桥与惠斯通电桥有哪些异同?
2. 双臂电桥怎样消除附加电阻的影响?
3. 如果待测电阻的两个电压端引线电阻较大,对测量结果有无影响?
4. 如何提高测量金属棒电阻率的准确度?

附录 AZ19 型直流检流计

1. 概述

AZ19 型直流检流计是由高增益、低漂移、低噪声放大器配以大表面的指针式表头而构成的新型直流检流计,可以用作高精度的直流电桥、精密电势差计的外接检流计,也可作低噪声低漂移直流放大器或直接作直流电压表使用。市电供电的检流计供实验室使用,干电池供电的可供实验室和室外现场使用。

仪器主要特点有:

(1) 由于本检流计具有灵敏度高,不需外配临界电阻,过载能力强,阻尼时间短,抗震性好等特点,可以直接替代 AC15/1 ~ AC15/6 等光电复射式检流计,能较好地适应高精度直流电桥、精密电势差计等的使用。

(2) 本检流计设有非线性挡,压缩动态约 10 dB,适合指零使用的粗调。

(3) 仪器采用双层屏蔽,信号地悬浮,具有较高的抗干扰能力。

2. 主要技术指标

(1) 使用条件

① 环境温度: $0 \sim 40\ ^\circ\text{C}$

② 环境湿度: $\leq 80\% \text{ RH}$

③ 避免阳光直射,空气中无腐蚀性气体,避免严重振动。

(2) 电源

① 干电池供电形式: 1 ~ 3 节 6F22 型 9 V 层电池,并联使用。

② 市电供电形式: 220 V/50 Hz 交流电,耗电 $\leq 3\ \text{W}$ 。

(3) 仪器基本参量如下表:

量程	电压常量	电流常量	输入阻抗	响应时间
非线性(“0”附近)	50 $\mu\text{V}/\text{格}$	5×10^{-9} A/格	10.2 k Ω	<2 s
$\pm 30 \mu\text{V}$	0.5 $\mu\text{V}/\text{格}$	5×10^{-11} A/格		
$\pm 100 \mu\text{V}$	2 $\mu\text{V}/\text{格}$	2×10^{-10} A/格		
$\pm 300 \mu\text{V}$	5 $\mu\text{V}/\text{格}$	5×10^{-10} A/格		
$\pm 1 \text{ mV}$	20 $\mu\text{V}/\text{格}$	2×10^{-9} A/格		
$\pm 3 \text{ mV}$	50 $\mu\text{V}/\text{格}$	5×10^{-9} A/格		
$\pm 10 \text{ mV}$	200 $\mu\text{V}/\text{格}$	2×10^{-8} A/格		

(4) 电压噪声: $\leq \pm 0.25 \mu\text{V}_{p-p}$.

(5) 零电压漂移: $\leq 2.5 \mu\text{V}/4 \text{ h}$.

(6) 电压指示误差: $\leq \pm 5\%$.

(7) 对市电串联干扰抑制比: 大于 60 dB. 对市电共模干扰抑制比: 大于 80 dB.

(8) 温度系数: $\leq 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

(9) 外形尺寸: 170 mm \times 160 mm \times 230 mm.

(10) 重量: 约 2 kg.

3. 基本工作原理

检流计电路原理如图 7 所示.

直流信号接入输入端,经低通滤波加入到低噪声低漂移放大电路进行前置放大.为了补偿输入信号偏移和运算放大器的输入失调电压,本检流计设置了输入电压补偿电路.量程控制使输入信号归一化.在主放大电路输出端设置了调零电路,输出调零主要用于克服主放大电路失调电压的影响.应用宽表面表头不但提高了指针分辨力,也增加了检零仪美观程度.

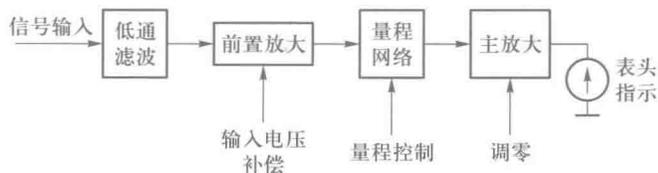


图 7 检流计工作原理

4. 使用方法

(1) 使用前准备

干电池供电形式的检流计,第一次使用前,要求打开后板上的电池盖,装入 1~3 节 6F22 型 9 V 电池,盖好电池盖,调节前面板上的量程开关,从“关机”旋至“调零”挡,干电池向检流计供电.市电供电形式的检流计,由电源线接入 220 V/50 Hz 电源上,打开后盖板上电源开关,面板上“电源指示”灯亮,检流计即可进入使用前的“调零”准备工作.

检流计加电后,检流计输入端短路,量程开关置“调零”挡,调节“调零”装置,使表头指针指向“0”. 开关置“补偿”挡,调节“补偿”装置,使表头指针指向“0”,反复调节“调零”和“补偿”,表头指针都指向“0”位,说明调零工作已经完成,已经作好了检流计工作前的准备工作.

(2) 作直流电桥或电势差计指零用

将直流电桥或电势差计的“检流计”端和本检流计输入端子用导线连接起来,检流计开关置“非线性”挡,调节电桥或电势差计,达到粗平衡,然后选择合适的量程,用于电桥或电势差计的精细指零. 高精度电桥或精密电势差计指零时,一般建议选择 $\pm 100 \mu\text{V}$ 挡,使用者可根据使用经验自行选择合适的量程.

如果电桥或电势差计尚未加电,而检流计指针已出现些许偏移,这时量程为 $\pm 30 \mu\text{V}$ 或 $\pm 100 \mu\text{V}$ 挡,可以稍稍调节“补偿”装置,使指针指“0”;量程为大量程时,可稍稍调节“调零”装置,使指针指“0”. 这种现象的出现,往往是由于存在一定的接触电势或热电势,稍稍调节“补偿”和“调节”,补偿了接触电势和热电势的影响,对平衡指零影响不大.

(3) 作直流电压表使用

作直流电压表使用时,可根据量程挡,直接从表头指针位置读数.

(4) “接地”端

检流计面板上设有“接地”端子,该端子和指零仪屏蔽外壳相连. 如果干扰严重时,可将该端子用导线连到电桥或电势差计的屏蔽端子上. 有条件时,可一起接入大地.

5. 维护和保养

(1) 仪器工作环境应符合使用条件要求.

(2) 每次使用完毕后,干电池供电形式检流计,量程开关一定打至“关机”位置,以切断干电池电源. 长期不用时,应将干电池取出,以免漏电腐蚀检流计. 市电供电形式检流计,一定要关断后板上交流电源开关,量程开关打至“表头保护”挡. 长期不用时,应拔出电源线,以免引发不测之事故.

实验二十二 电子荷质比的测定

1897年在英国剑桥大学(University of Cambridge)的卡文迪什实验室(Cavendish Laboratory)里,汤姆孙(Joseph John Thomson)发现构成阴极射线的微粒都是一样的,与管内阴极或对阴极或气体的成分无关,进一步测定出此微粒的电荷量与质量的比值,并采用1891年斯托尼(George Johnstone Stoney)提出的术语“电子”来称呼这种粒子.后来,美国的物理学家密立根(Robert Andrews Millikan)于1917年用实验测得电子电荷的精确数值.

在发现电子之前,一般都认为原子是“不能分割的”的东西,汤姆孙实验指出原子是由许多部分组成的,标志着科学的一个新时代,人们称他是“一位最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人”.电子荷质比是一个常用的物理常量,它的定义是电子的电荷量的大小与其质量的比值.近代公认的慢速电子荷质比为 $e/m = 1.758\ 820\ 024(11) \times 10^{11}$ C/kg,由于质量的相对论效应,荷质比将随粒子速度的加大而减小,当速度达到光速的一半时,电子的荷质比为 $e/m = 1.523\ 165\ 480\ 176\ 071 \times 10^{11}$ C/kg.

在物理实验中测量电子荷质比的方法有许多种,本实验仪是以当年英国物理学家汤姆孙的思路,利用电子束在磁场中运动轨迹发生偏转的方法来测量,通过该实验的操作不仅可以测量出电子荷质比还能加深对洛伦兹力的认识.

一、实验目的

1. 加深对洛伦兹力的认识,熟悉电子在磁场中的运动特点;
2. 掌握利用电子在磁场中偏转的方法来测定电子荷质比.

二、实验仪器

FB710型电子荷质比测定仪、亥姆霍兹线圈.

三、实验原理

1. 磁场的产生

亥姆霍兹线圈是用两个半径和匝数完全相同的线圈,将其同轴排列并令间距等于半径,串接而成的线圈.其产生的磁感应强度 B 的大小为

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \mu_0 \frac{N}{R} I \quad (1)$$

其中,真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N · A⁻²,亥姆霍兹线圈的平均半径 $R = 158$ mm,单个线圈的匝数 $N = 130$, I 为线圈中的电流大小.

2. 洛伦兹力

带电粒子沿磁场方向运动时,作用在带电粒子上的磁场力为零;带电粒子的运

动方向与磁场方向相垂直时,所受磁场力最大,记作 F_m ,其值为

$$F_m = qvB \quad (2)$$

并且磁力 F_m 、电荷运动速度 v 和磁感应强度 B 三者相互垂直.

在一般情况下,如果带电粒子运动的方向与磁场方向成夹角 θ ,则所受磁力 F 的大小为

$$F = qvB\sin\theta \quad (3)$$

方向垂直于 v 和 B 所决定的平面,指向由 v 经小于 180° 的角转向 B ,由右手螺旋定则决定.用矢量式可表示为

$$F = qv \times B \quad (4)$$

上式就是洛伦兹力-磁场对运动电荷的作用力公式,式中各量的方向关系如图 1 所示.对于正电荷, F 在 $v \times B$ 的方向上,对于负电荷,则所受的力的方向正好相反.

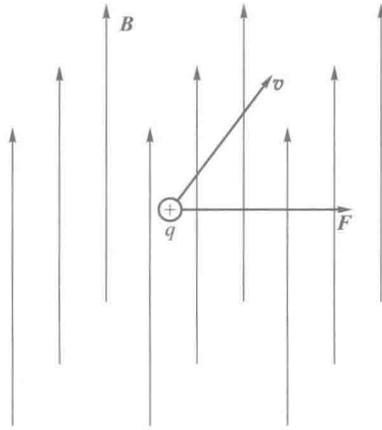


图 1 运动电荷在磁场中所受力的方向

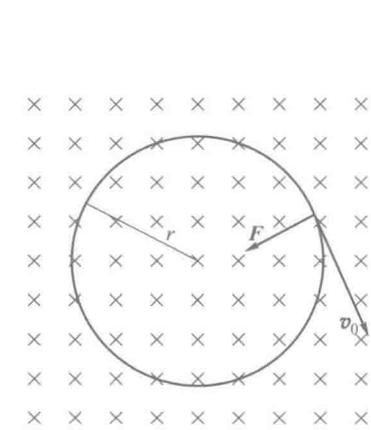


图 2 电子垂直进入均匀磁场中的运动轨迹

3. 电子在均匀磁场中的运动

当电子以初速度 v_0 垂直进入均匀磁场 B 时,将受到与运动方向垂直的洛伦兹力 F 的作用作匀速圆周运动,如图 2 所示,此时洛伦兹力提供向心力,有

$$ev_0B = m \frac{v_0^2}{r} \quad (5)$$

其中 r 是电子的圆形轨道半径, m 是电子的质量.由此电子的荷质比可表示为

$$\frac{e}{m} = \frac{v_0}{Br} \quad (6)$$

4. 电子初速度的获得

当电子枪中的阴极加热到一定温度时,即有热电子发射,在阴阳极间加速电压 U 的作用下,形成电子束飞向阳极.电子的动能全部来源于电场做功,即

$$Ue = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (7)$$

联立式(6)和式(7),则有

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2} \quad (8)$$

将式(1)代入,得

$$\frac{e}{m} = \frac{125}{32} \left(\frac{R}{\mu_0 NI} \right)^2 \frac{U}{r^2} \quad (9)$$

四、实验装置介绍

1. 仪器结构

亥姆霍兹线圈及电子荷质比测定仪整机外形如图3所示,其主要结构有以下几部分:

A—亥姆霍兹线圈;B—电子束发射威尔尼氏管;C—反射镜;D—滑动标尺。

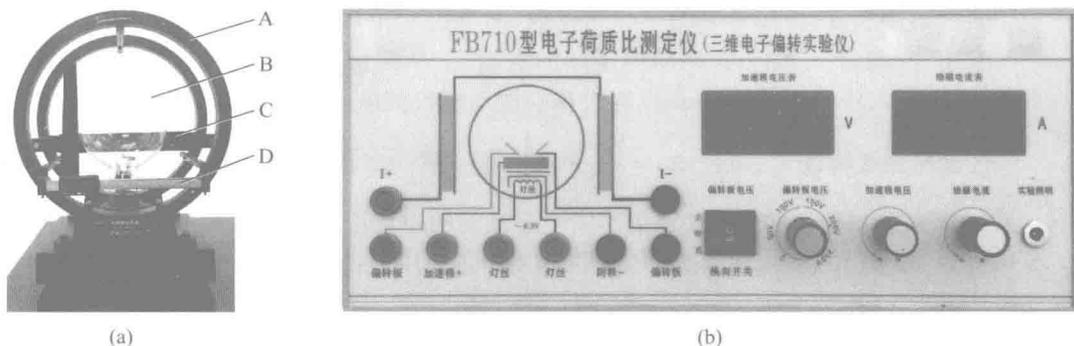


图3 亥姆霍兹线圈和电子荷质比测定仪

2. 仪器主要器件的技术参量

(1) 威尔尼氏管

真空气压: 10^{-1} Pa;灯丝电压:6.3 V;调制电压: $-15 \sim 0$ V;最大加速电压 250 V.

(2) 亥姆霍兹线圈

内径:300 mm;外径:332 mm;有效半径: $R = 158$ mm;单线圈匝数: $N = 130$;最大励磁电流 $I_{\max} = 3.5$ A.

(3) 电源

加速电压: $0 \sim 250$ V;调制电压: $-15 \sim 0$ V(内置);照明电压:2.5 V.

五、实验内容及步骤

1. 洛伦兹力的演示

(1) 无磁场时,电子束轨迹如图4(a)所示.

(2) 有磁场时,当电子束与磁场完全垂直时,电子束呈现圆形轨迹,如图4(b)所示.

(3) 有磁场时,当电子束与磁场不完全垂直时,电子束呈现螺旋线状轨迹,如图4(c)所示.

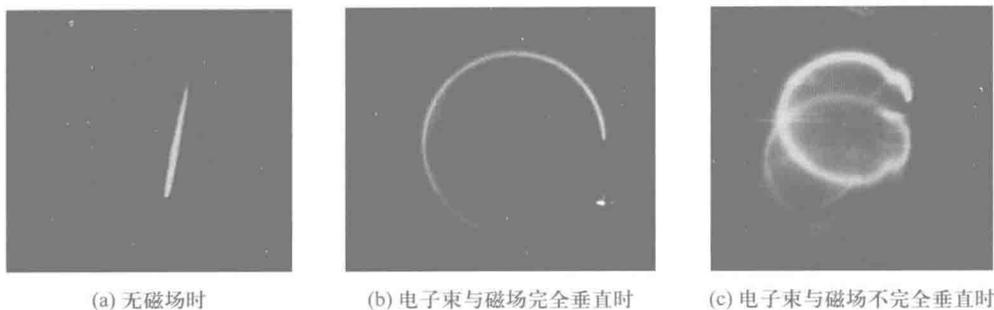


图4 电子束轨迹

2. 电子圆形轨道半径 r 的测量

如图5所示,调节仪器后线圈上反射镜的位置,以方便观察.移动测量机构上的滑动标尺,用黑白分界的中心刻度线,对准电子枪口与反射镜中的像的分界线,采用“三线合一”的方法测出电子圆的右端点,从游标上读出刻度读数 S_0 (一般此时按清零,作 $S_0 = 00.00 \text{ mm}$).再次移动滑动标尺到电子圆的左端点,采用同样的方法读出刻度读数 S_1 ,用公式 $r = \frac{S_1 - S_0}{2}$ 求出电子圆的半径.依次增加偏转电流约 $\Delta I = 0.05 \text{ A}$,用前面同样的方法测出不同电流激发的磁场中电子运动圆形轨道的两端点 S_0, S_n ,共测10次,并将测量结果记入表1中进而用公式计算出电子的荷质比.

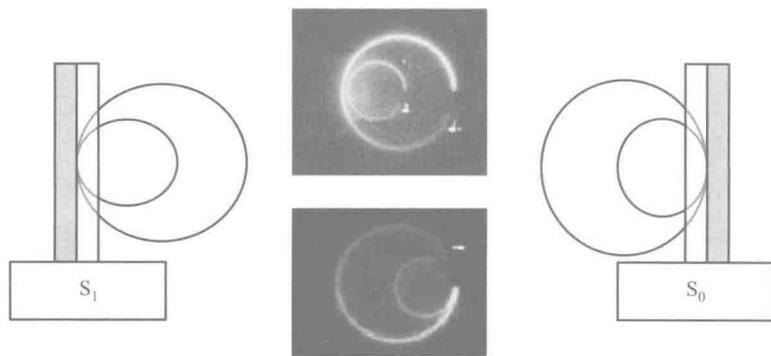


图5 相切法测量电子圆形轨迹的直径

3. 实验步骤

- (1) 正确完成仪器的连接.
- (2) 开启电源,使加速电压不高于 120 V .
- (3) 调节偏转电流,使电子束的运行轨迹形成封闭的圆,细心调节聚焦电压,使电子束明亮,缓缓改变亥姆霍兹线圈中的电流,观察电子束大小、偏转的变化.
- (4) 调节仪器后线圈上的反射镜的位置,以方便观察.
- (5) 移动测量机构上的滑动标尺,用黑白分界的中心刻度线,对准电子枪口与反射镜中的像,采用“三线合一”的方法测出电子圆的右端点,从游标上读出刻度数,并记录.

(6) 再次移动滑动标尺到电子圆的左端点,采用同样的方法读出刻度数,并记录,同时记录对应的电流值.

(7) 用公式 $r=(S_1-S_0)/2$ 求出电子圆的半径.

(8) 记录实验环境条件,整理好实验仪器.

六、数据记录及数据处理

1. 保持加速电压 $U=100\text{ V}$ 不变,改变线圈中的电流大小 I ,数据记入表 1 中.

表 1 电子圆形轨道半径的测量及荷质比的计算

n	S_0/mm	S_n/mm	r_n/mm	I_n/A	$\left(\frac{e}{m}\right)_n / (\text{C} \cdot \text{kg})$	$\frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \left(\frac{e}{m}\right)_n / (\text{C} \cdot \text{kg})$
1	0.00			1.00		
2				1.05		
3				1.10		
4				1.15		
5				1.20		
6				1.25		
7				1.30		
8				1.35		
9				1.40		
10				1.45		

2. 保持线圈中的电流大小 $I=1.2\text{ A}$ 不变,改变加速电压 U ,数据记入表 2 中.

表 2 电子圆形轨道半径的测量及荷质比的计算

n	S_0/mm	S_n/mm	r_n/mm	U_n/V	$\left(\frac{e}{m}\right)_n / (\text{C} \cdot \text{kg})$	$\frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \left(\frac{e}{m}\right)_n / (\text{C} \cdot \text{kg})$
1	0.00			92		
2				94		
3				96		
4				98		
5				100		
6				102		
7				104		
8				106		
9				108		
10				110		

3. 数据处理

(1) $U=100\text{ V}$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_1 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_2 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_3 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_4 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_5 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_6 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_7 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_8 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_9 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{10} = \underline{\hspace{15em}}$$

与理论值比较,求相对误差:

$$E_r = \left| \frac{\frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \left(\frac{e}{m}\right)_n - 1.75882 \times 10^{11}}{1.75882 \times 10^{11}} \right| \times 100\% = \underline{\hspace{15em}}$$

(2) $I = 1.2 \text{ A}$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_1 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_2 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_3 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_4 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_5 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_6 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_7 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_8 = \underline{\hspace{15em}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_9 = \underline{\hspace{15cm}}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{10} = \underline{\hspace{15cm}}$$

与理论值比较,求相对误差:

$$E_r = \left| \frac{\frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \left(\frac{e}{m}\right)_n - 1.75882 \times 10^{11}}{1.75882 \times 10^{11}} \right| \times 100\% = \underline{\hspace{15cm}}$$

七、注意事项

1. 实验开始时,首先应当耐心调节电子束与磁场方向垂直,务必形成一个不带重影的圆形轨迹(调焦)。

2. 威尔尼氏管电子束的激发加速电压不要调得过高,否则容易引起电子束散焦。电子束刚激发时的加速电压,需要偏高一些,大约为 130 V,但一旦激发后,电子束在 90 ~ 100 V 即能维持发射,此时可以适当降低加速电压。

3. 测量电子束圆形轨道半径时,应仔细按“三线合一”法进行,避免读数偏离(因人而异)引入系统误差。

4. 为了保护威尔尼氏管,假如不小心把加速电压调得太高,将启动自动保护电路,加速电压会自动降到正常电压范围内使加速电压限制在一定数值,不能再升高。

5. 亥姆霍兹线圈的励磁电流短时间最大可以调节到 3.5 A,电流的变化一般取 0.05 A 左右测一次。但不允许长时间大电流工作,否则线圈将会发热,本仪器也设计了自动保护电路,线圈温度升高,励磁电流会自动切断,这时候只要关掉电源再重新开机,仪器即可自动恢复功能。

6. 测量结束后,将电流和电压均调至零后才能关掉电源。

八、思考题

1. 除了本实验介绍的方法可以确定电子圆形轨道半径的大小,你还有其他更好更简捷的方法吗?

2. 测量电子荷质比还有哪些不同的实验方法?

3. 分析洛伦兹力在不同角度下对电子束的影响。

实验二十三 霍尔效应

一、实验目的

1. 了解霍尔效应产生的物理过程；
2. 观察霍尔效应；
3. 掌握利用霍尔效应测量磁场的方法。

二、实验仪器

霍尔效应实验仪、霍尔效应测试仪。

三、实验原理

霍尔效应是美国物理学家霍尔(Edwin Herbert Hall, 1855—1938)于1879年在研究磁场对电流的作用时发现的一种电磁现象。后来曾有人利用霍尔效应制成测量磁场的磁传感器,但因金属的霍尔效应太弱而未能得到实际应用。随着半导体材料和制造工艺的发展,人们又利用半导体材料制成霍尔元件,由于它的霍尔效应显著而得到应用和发展,现在广泛用于工业自动化技术、电磁检测技术及信息处理等方面。

1. 霍尔效应

当电流垂直于外磁场方向通过导体或半导体时,在垂直于电流和磁场的方向会产生附加电场,从而在物体的两侧产生电势差,这一现象称为霍尔效应。霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力的作用而引起的偏转。当带电粒子(电子或空穴)被约束在固体材料中,这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷在不同侧的聚积,从而形成附加的横向电场。

如图1所示,将一块通有电流 I_s 的半导体薄片垂直放置于磁场 \mathbf{B} 中,工作电流 I_s 沿 x 轴正方向,磁场 \mathbf{B} 沿 z 轴正方向且与电流 I_s 及薄片平面垂直。当电流方向一定时,半导体内载流子的运动方向与其所带电荷的正负号有关。如图1(a)所示,若载流子带负电,则其运动方向与电流方向相反,它将受到沿 y 轴负方向的洛伦兹力,导致带负电的载流子向 A 侧积聚,使得 A 侧电势比 A' 侧电势低,此时载流子在侧向还要受到与洛伦兹力 F_B 方向相反的沿 y 轴正方向的电场力 F_E 的作用;如图1(b)所示,若载流子带正电,则其运动方向与电流方向相同,它仍将受到沿 y 轴负方向的洛伦兹力,但此时 A 侧将有正电荷积聚,使得 A 侧电势比 A' 侧电势高,此时载流子所受电场力方向同样是沿 y 轴正方向。总之,由于洛伦兹力 F_B 的作用,载流子将向薄片侧面方向漂移积聚,从而在 A 、 A' 两侧面之间形成电势差,此时载流子在侧向还要受到与洛伦兹力 F_B 方向相反的电场力 F_E 的作用。在电荷积聚过程的初始阶段,积聚到 A 、 A' 两侧面的电荷量较少,载流子所受洛伦兹力远大于电场

力,电荷不断在薄片的两侧积聚,使得两侧面之间的电势差不断增大,电场逐渐增强,而载流子所受的洛伦兹力基本保持不变.随着电荷积累量的增加,当载流子所受电场力与洛伦兹力大小相等(方向相反)时,两侧面的电荷积聚达到动态平衡状态.这时在 A 、 A' 两侧面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H ,相应的电势差称为霍尔电压 U_H .

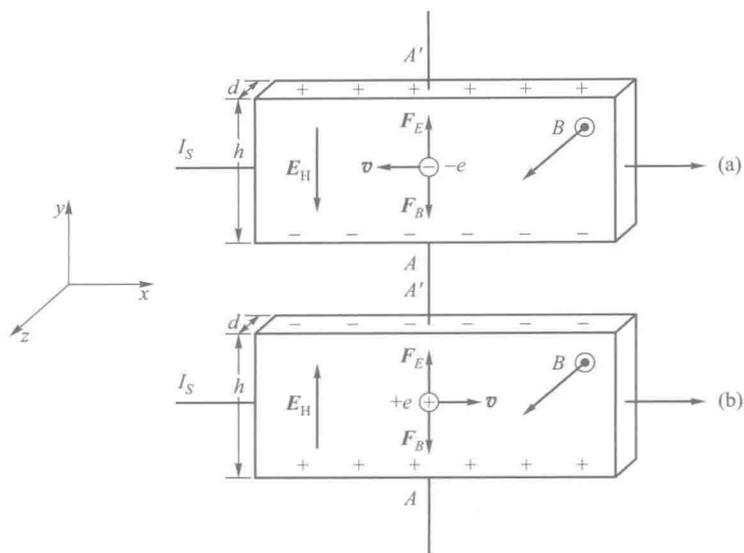


图1 霍尔效应原理图

当电流方向一定时,半导体薄片中的载流子的电荷符号决定了 A 、 A' 两侧面的电势高低.因此,通过测定 A 、 A' 两侧面的电势差,可以判断半导体薄片中的载流子所带电荷的正负.

2. 霍尔电压及磁场的测量

设当通过半导体薄片的电流为 I_S 时,薄片内载流子的平均定向移动速率为 v ,则载流子所受洛伦兹力大小为

$$F_B = qvB \quad (1)$$

式中 q 为载流子的电荷量.由于洛伦兹力的作用,载流子发生侧向漂移,并且在 A 、 A' 两侧面形成电荷积聚,产生电势差 U ,形成电场强度为 E 的电场,使得载流子所受电场力大小为

$$F_E = qE = q \frac{U}{h} \quad (2)$$

当电荷积聚达到动态平衡后,载流子所受电场力与磁场力大小相等, $F_E = F_B$,方向相反,即

$$q \frac{U_H}{h} = qvB \quad (3)$$

式中 h 是 A 、 A' 两侧面之间的距离.

若薄片的厚度为 d , 薄片中的载流子数体密度为 n , 则电流 I_s 与载流子的定向移动速率 v 的关系为 $I_s = nqv dh$, 代入式(3), 得霍尔电压为

$$U_H = \frac{I_s B}{nqd} \quad (4)$$

令 $R_H = \frac{1}{nq}$, 则式(4)可写为

$$U_H = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (5)$$

R_H 称为霍尔系数, 是反映材料霍尔效应强弱的重要参量. R_H 与载流子浓度 n 成反比, 由于半导体中的载流子浓度小于金属的, 因此半导体的霍尔效应比金属显著.

在实验测量中, 对于确定的样品, 材料的 n, q, d 各参量都是确定的, 因此通常引入系数 K_H 来描述材料霍尔效应的强弱, 其值由材料的性质及元件的几何尺寸决定, 有

$$K_H = \frac{1}{nqd} \quad (6)$$

K_H 称为霍尔灵敏度, 表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位工作电流下的霍尔电压大小, 即

$$U_H = K_H I_s B \quad (7)$$

因此, 在利用已知霍尔灵敏度 K_H 值的霍尔元件测量磁场时, 只要测出工作电流 I_s 与霍尔电压 U_H 的关系, 即可得到与霍尔元件表面垂直的待测磁场的磁感应强度 B , 即

$$B = \frac{U_H}{K_H I_s} \quad (8)$$

当磁感应强度 B 与霍尔元件表面不垂直时, 作用在元件上的有效磁场是其法线方向上的分量, 所以一般在使用时应调整元件方位, 使 U_H 达到最大.

四、实验装置介绍

实验装置包括霍尔效应实验仪和霍尔效应测试仪两部分.

1. 霍尔效应实验仪

由 C 型电磁铁、二维移动尺及霍尔元件、面板标示牌、三个双刀双掷开关等组成.

(1) 二维移动尺可调节霍尔元件水平、垂直移动, 可移动范围: 水平 $0 \sim 50 \text{ mm}$, 垂直 $0 \sim 30 \text{ mm}$.

(2) 霍尔元件上有 4 只引脚(图 2), 其中编号为 1、2 的两只为工作电流端, 编号为 3、4 的两只为霍尔电压端(图形“○”仅标示霍尔元件正方向). 同时将这 4 只引脚焊接在印制板上, 然后引到仪器双刀双掷开关上, 接线柱旁标有 1、2、3、4 四个编号, 按对应编号连线.

(3) 三个双刀双掷开关(图 3), 分别对励磁电流 I_M 、工作电流 I_s 、霍尔电压 U_H 进行通断和换向控制.

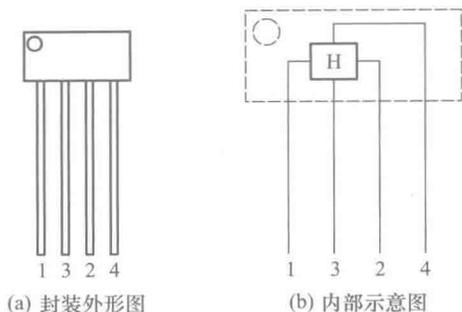


图2 霍尔元件

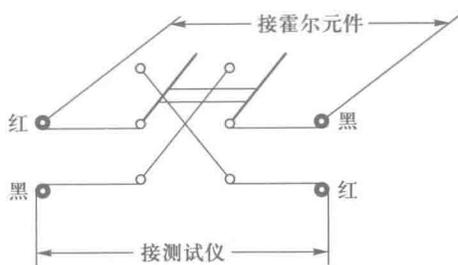


图3 双刀双掷开关示意图

NOTE

2. 霍尔效应测试仪

仪器面板分为三大部分:

(1) 霍尔元件工作电流 I_S 输出: 前面板左侧, 四位数码管显示电流值 I_S . 恒流源可调范围: $0 \sim 10.00 \text{ mA}$;

(2) 霍尔电压 U_H 输入: 前面板中部, 四位数码管显示电压值 U_H . 测量范围: $0 \sim 99.99 \text{ mV}$.

(3) 励磁电流 I_M 输出: 前面板右侧, 四位数码管显示电流值 I_M . 恒流源可调范围: $0 \sim 1000 \text{ mA}$.

五、实验内容及步骤

1. 实验内容

- (1) 测量霍尔电压 U_H 与通过霍尔元件的工作电流 I_S 之间的关系;
- (2) 测量霍尔电压 U_H 与通过电磁铁线圈的励磁电流 I_M 之间的关系;
- (3) 通过对霍尔元件在电磁铁气隙中不同位置处霍尔电压的测量, 研究电磁铁产生磁场的空间分布情况.

2. 实验步骤

根据仪器面板上的文字和符号提示将霍尔效应实验仪与霍尔效应测试仪正确连接.

首先, 将工作电流、励磁电流调节旋钮逆时针旋转到底, 使电流最小; 将测试仪的电压量程调至高量程. 然后, 将测试仪面板右下方提供励磁电流 I_M 的恒流源输出端接到实验仪上励磁电流的输入端; 将测试仪左下方为霍尔元件提供工作电流 I_S 的恒流源输出端接到实验仪工作电流输入端; 将实验仪上的霍尔电压输出端接到测试仪中部下方的霍尔电压输入端; 最后, 将测试仪与 220 V 交流电源相连, 按下开机键.

按上述步骤连接好实验电路后, 分别对不同情况下输出的霍尔电压进行测量、记录.

在霍尔电压的测量过程中, 不可避免地会出现一些附加效应. 例如, 由于制作工艺上的困难, A, A' 两侧面的引线不可能完全对称地焊接在相应的几何位置而引起的不等势效应; 由于霍尔元件内载流子的速度分布使元件内部形成温度梯度而

引起的埃廷斯豪森效应以及里吉-勒迪克效应;由于工作电流的两个电极与霍尔元件的接触电阻不同形成两电极间的温差电动势而引起的能斯特效应等.由此而产生的附加电势叠加在霍尔电势上,形成测量系统误差.为了消除或减小这些附加效应引起的系统误差,常采用“对称(交换)测量法”进行测量,即通过改变工作电流及励磁电流的方向,分别测量出四种不同的工作电流及磁场方向组合情况下的霍尔电压 U_H ,然后取其绝对值的平均值作为最后的测量结果.

六、数据记录及数据处理

1. 实验数据记录

霍尔效应实验仪型号 _____;霍尔元件的灵敏度 $K_H =$ _____ $\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$.

表 1 $U_H - I_S$ 数据表

$I_M = 1\,000\text{ mA}$;霍尔元件置于 C 型电磁铁气隙中心, $X_C =$ _____ mm ; $Y_C =$ _____ mm

I_S/mA	$+I_M, +I_S$	$+I_M, -I_S$	$-I_M, -I_S$	$-I_M, +I_S$	\bar{U}_H/mV	B/mT
	U_{H1}/mV	U_{H2}/mV	U_{H3}/mV	U_{H4}/mV		
2.00						
3.00						
4.00						
5.00						
6.00						
7.00						
8.00						
9.00						
10.00						

表 2 $U_H - I_M$ 数据表

$I_S = 10.00\text{ mA}$;霍尔元件置于 C 型电磁铁气隙中心, $X_C =$ _____ mm ; $Y_C =$ _____ mm

I_M/mA	$+I_M, +I_S$	$+I_M, -I_S$	$-I_M, -I_S$	$-I_M, +I_S$	\bar{U}_H/mV	B/mT
	U_{H1}/mV	U_{H2}/mV	U_{H3}/mV	U_{H4}/mV		
100						
200						
300						
400						
500						
600						
700						
800						
900						
1 000						

表3 U_H 沿 X 轴的分布情况

$I_S = 10.00 \text{ mA}$; $I_M = 1\ 000 \text{ mA}$; 霍尔元件置于 C 型电磁铁气隙中心所在水平线上, $Y_c = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}$

X/mm	$+I_M, +I_S$	$+I_M, -I_S$	$-I_M, -I_S$	$-I_M, +I_S$	\bar{U}_H/mV	B/mT
	U_{H1}/mV	U_{H2}/mV	U_{H3}/mV	U_{H4}/mV		
0.00						
2.00						
4.00						
6.00						
8.00						
10.00						
12.00						
15.00						
20.00						
25.00						
30.00						
35.00						
40.00						
45.00						
48.00						
50.00						

NOTE

2. 实验数据处理

(1) 根据交换法测得各霍尔电压值, 求出霍尔电压平均值

$$\bar{U}_H = \frac{|U_{H1}| + |U_{H2}| + |U_{H3}| + |U_{H4}|}{4}$$

(2) 作出霍尔电压 \bar{U}_H 、磁感应强度 B 与工作电流 I_S 之间的关系曲线;

(3) 作出霍尔电压 \bar{U}_H 、磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 之间的关系曲线;

(4) 求出电磁铁气隙不同位置处的磁感应强度 B , 并作出磁感应强度 B 随空间位置 X 的分布曲线.

七、注意事项

1. 由于励磁电流较大, 千万不能将 I_M 和 I_S 接错, 否则励磁电流将烧坏霍尔元件;
2. 为了防止电磁铁因过热而受到损害或影响测量精度, 除在短时间内读取数据时通以励磁电流 I_M 外, 其余时间应该断开励磁电流开关;
3. 霍尔元件及二维移动标尺容易折断、变形, 应注意避免受挤压、碰撞等.

八、思考题

1. 如何测定霍尔元件内载流子的浓度?
2. 如何测定霍尔元件内载流子的迁移速率?
3. 如何通过霍尔效应的测量来判定半导体材料的类型(P型、N型)?

实验二十四 用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线

一、实验目的

1. 掌握磁滞、磁滞回线和磁化曲线的概念,加深对铁磁材料的主要物理量:矫顽力、剩磁和磁导率的理解;
2. 学会用示波法测绘基本磁化曲线和磁滞回线;
3. 根据磁滞回线确定磁性材料的饱和磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 的数值;
4. 研究不同频率下动态磁滞回线的区别,并确定某一频率下的磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 数值;
5. 改变不同的磁性材料,比较磁滞回线形状的变化。

二、实验仪器

DH4516C 型磁滞回线测量仪、示波器。

三、实验原理

磁性材料应用广泛,从常用的永久磁铁、变压器铁芯到录音、录像、计算机存储用的磁带、磁盘等都采用磁性材料。磁滞回线和基本磁化曲线反映了磁性材料的主要特征。通过实验研究这些性质不仅能掌握用示波器观察磁滞回线以及基本磁化曲线的基本测绘方法,而且能从理论和实际应用上加深对材料磁特性的认识。

铁磁材料分为硬磁和软磁两大类,其根本区别在于矫顽磁力 H_c 的大小不同。硬磁材料的磁滞回线宽,剩磁和矫顽磁力大(达 $120 \sim 20\,000 \text{ A/m}$,甚至以上),因而磁化后,其磁感应强度可长久保持,适宜做永久磁铁。软磁材料的磁滞回线窄,矫顽磁力 H_c 一般小于 120 A/m ,但其磁导率和饱和磁感强度大,容易磁化和去磁,故广泛用于电机、电器和仪表制造等工业部门。磁化曲线和磁滞回线是铁磁材料的重要特性,也是设计电磁机构作仪表的重要依据之一。

本实验采用动态法测量磁滞回线。需要说明的是用动态法测量的磁滞回线与静态磁滞回线是不同的,动态测量时除了磁滞损耗还有涡流损耗,因此动态磁滞回线的面积要比静态磁滞回线的面积要大一些。另外涡流损耗还与交变磁场的频率有关,所以测量的电源频率不同,得到的 $B-H$ 曲线是不同的,这可以在实验中清楚地从示波器上观察到。

1. 磁化曲线

如果在由电流产生的磁场中放入铁磁物质,则磁场将明显增强,此时铁磁物质中的磁感应强度比单纯由电流产生的磁感应强度增大百倍,甚至在千倍以上。铁磁物质内部的磁场强度 H 与磁感应强度 B 有如下的关系:

$$B = \mu H$$

对于铁磁物质而言,磁导率 μ 并非常量,而是随 H 的变化而改变的物理量,即 $\mu=f(H)$,为非线性函数.所以如图1所示, B 与 H 也是非线性关系.

铁磁材料的磁化过程为:其未被磁化时的状态称为去磁状态,这时若在铁磁材料上加一个由小到大的磁化场,则铁磁材料内部的磁场强度 H 与磁感应强度 B 也随之变大,其 $B-H$ 变化曲线如图1所示.但当 H 增加到一定值(H_s)后, B 几乎不再随 H 的增加而增加,说明磁化已达饱和,从未磁化到饱和磁化的这段磁化曲线称为材料的起始磁化曲线.如图1中的 OS 端曲线所示.

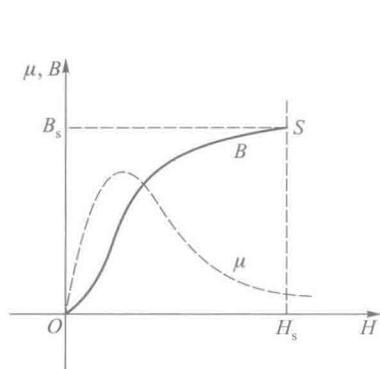


图1 磁化曲线和 $\mu-H$ 曲线

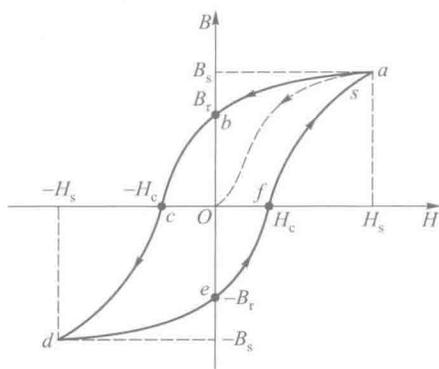


图2 起始磁化曲线与磁滞回线

2. 磁滞回线

当铁磁材料的磁化达到饱和之后,如果将磁化场减少,则铁磁材料内部的 B 和 H 也随之减少,但其减少的过程并不沿着磁化时的 OS 段退回.从图2可知当磁化场撤消, $H=0$ 时,磁感应强度仍然保持一定数值 $B=B_r$ 称为剩磁(剩余磁感应强度).

若要使被磁化的铁磁材料的磁感应强度 B 减少到0,必须加上一个反向磁场并逐步增大.当铁磁材料内部反向磁场强度增加到 $H=H_c$ 时(图2上的 c 点),磁感应强度 B 才是0,达到退磁.图2中的 bc 段曲线为退磁曲线, H_c 为矫顽磁力.如图2所示,当 H 按 $O \rightarrow H_s \rightarrow O \rightarrow -H_c \rightarrow -H_s \rightarrow O \rightarrow H_c \rightarrow H_s$ 的顺序变化时, B 相应沿 $O \rightarrow B_s \rightarrow B_r \rightarrow O \rightarrow -B_s \rightarrow -B_r \rightarrow O \rightarrow B_s$ 顺序变化.图中的 Oa 段曲线称起始磁化曲线,所形成的封闭曲线 $abcdefa$ 称为磁滞回线. bc 曲线段称为退磁曲线.由图2可知:

(1) 当 $H=0$ 时, $B \neq 0$,这说明铁磁材料还残留一定值的磁感应强度 B_r ,通常称 B_r 为铁磁物质的剩余感应强度(剩磁).

(2) 若要使铁磁物质完全退磁,即 $B=0$,必须加一个反方向磁场 H_c .这个反向磁场强度 H_c ,称为该铁磁材料的矫顽磁力.

(3) B 的变化始终落后于 H 的变化,这种现象称为磁滞现象.

(4) H 上升与下降到同一数值时,铁磁材料内的 B 值并不相同,退磁化过程与铁磁材料过去的磁化经历有关.

(5) 当从初始状态 $H=0, B=0$ 开始周期性地改变磁场强度的幅值时,在磁场由弱到强地单调增加过程中,可以得到面积由大到小的一簇磁滞回线,如图3所

示. 其中最大面积的磁滞回线称为极限磁滞回线.

(6) 由于铁磁材料磁化过程的不可逆性及具有剩磁的特点, 在测定磁化曲线和磁滞回线时, 首先必须将铁磁材料预先退磁, 以保证外加磁场 $H=0, B=0$; 其次, 磁化电流在实验过程中只允许单调增加或减少, 不能时增时减. 在理论上, 要消除剩磁 B_r , 只需通一个反向磁化电流, 使外加磁场正好等于铁磁材料的矫顽磁力即可. 实际上, 矫顽磁力的大小通常并不知道, 因而无法确定退磁电流的大小. 我们从磁滞回线得到启示, 如果使铁磁材料磁化达到磁饱和, 然后不断改变磁化电流的方向, 与此同时逐渐减少磁化电流, 直至零. 则该材料的磁化过程中就是一连串逐渐缩小而最终趋于原点的环状曲线, 如图 4 所示. 当 H 减小到零时, B 亦同时降为零, 达到完全退磁.

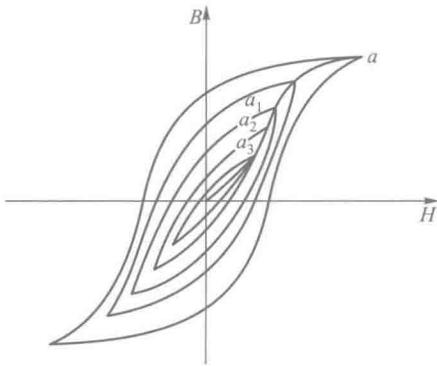


图3 基本磁化曲线

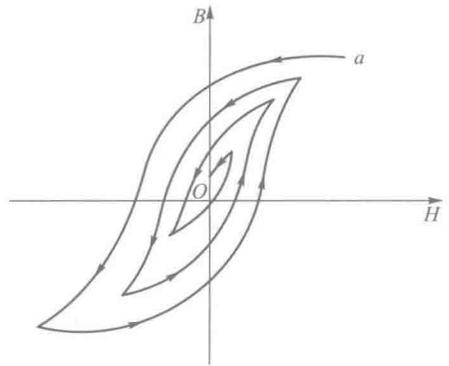


图4 退磁示意图

实验表明, 经过多次反复磁化后, $B-H$ 的量值关系形成一个稳定的闭合的“磁滞回线”. 通常以这条曲线来表示该材料的磁化性质. 这种反复磁化的过程称为“磁锻炼”. 本实验使用交变电流, 所以每个状态都是经过充分的“磁锻炼”, 随时可以获得磁滞回线.

我们把图 3 中原点 O 和各个磁滞回线的顶点 a_1, a_2, \dots, a 所连成的曲线, 称为铁磁性材料的磁化曲线. 不同的铁磁材料其基本磁化曲线是不相同的. 为了使样品的磁特性可以重复出现, 也就是指所测得的基本磁化曲线都是由原始状态 ($H=0, B=0$) 开始, 在测量前必须进行退磁, 以消除样品中的剩余磁性.

在测量基本磁化曲线时, 每个磁化状态都要经过充分的“磁锻炼”. 否则, 得到的 $B-H$ 曲线即为开始介绍的起始磁化曲线, 两者不可混淆.

3. 示波器法观测磁滞回线原理

示波器测量 $B-H$ 曲线的实验线路如图 5 所示.

本实验研究的铁磁物质是一个环状试样 (如图 6 所示). 在试样上绕有励磁线圈 N_1 匝和测量线圈 N_2 匝. 若在线圈 N_1 中通过磁化电流 i_1 时, 此电流在试样内产生磁场, 根据安培环路定理, 有 $HL=N_1 i_1$, 磁场强度 H 的大小为

$$H = \frac{N_1 i_1}{L} \quad (1)$$

其中 L 为环状试样的平均磁路长度(在图 6 中用虚线表示)。

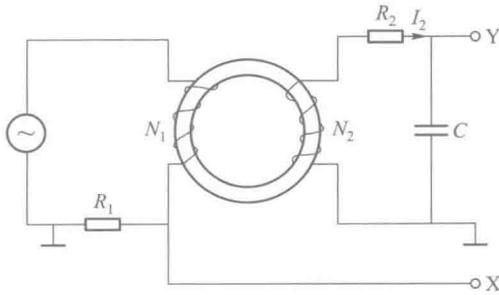


图 5 实验线路图

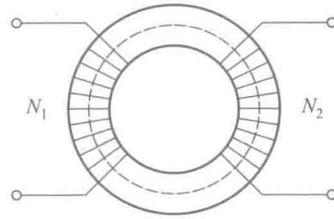


图 6 铁磁体环状试样

由图 5 可知示波器 X 轴偏转板输入电压为

$$U_x = U_R = i_1 R_1 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得

$$U_x = \frac{LR_1}{N_1} H \quad (3)$$

上式表明在交变磁场下,任一时刻电子束在 X 轴的偏转正比于磁场强度 H 。

为了测量磁感应强度 B ,在次级线圈 N_2 上串联一个电阻 R_2 与电容 C 构成一个回路,同时 R_2 与 C 又构成一个积分电路.取电容 C 两端电压 U_c 至示波器 Y 轴输入,若适当选择 R_2 和 C 使 $R_2 \gg 1/\omega C$,则

$$I_2 = \frac{E_2}{\left[R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{E_2}{R_2} \quad (4)$$

式中, ω 为电源的角频率, E_2 为次级线圈的感应电动势。

因交变的磁场 H 的样品中产生交变的磁感应强度 B ,则

$$E_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (5)$$

式中 $S = \frac{(D_2 - D_1)h}{2}$ 为环试样的截面积,设磁环厚度为 h ,则

$$U_y = U_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{CR_2} \int E_2 dt = \frac{N_2 S}{CR_2} \int dB = \frac{N_2 S}{CR_2} B \quad (6)$$

上式表明接在示波器 Y 轴输入的 U_y 正比于 B 。

$R_2 C$ 构成的电路在电子技术中称为积分电路,表示输出的电压 U_c 是感应电动势 E_2 对时间的积分.为了如实地绘出磁滞回线,要求:① $R_2 \gg 1/(2\pi fc)$;② 在满足上述条件下, U_c 振幅很小,不能直接绘出大小适合需要的磁滞回线.为此,需将 U_c 经过示波器 Y 轴放大器增幅后输至 Y 轴偏转板上.这就要求在实验磁场的频率范围内,放大器的放大系数必须稳定,不会带来较大的相位畸变.事实上示波器难以完全达到这个要求,因此在实验时经常会出现如图 7 所示的畸变.观测时将 X 轴输入选择“AC”,Y 轴输入选择“DC”挡,并选择合适的 R_1 和 R_2 的阻值,可避免这

NOTE

种畸变,得到最佳磁滞回线图形.

这样,在磁化电流变化的一个周期内,电子束的径迹描出一条完整的磁滞回线.适当调节示波器 X 和 Y 轴增益,再由小到大调节信号发生器的输出电压,即能在屏上观察到由小到大扩展的磁滞回线图形.逐次记录其正顶点的坐标,并在坐标纸上把它联成光滑的曲线,就得到样品的基本磁化曲线.

4. 示波器的定标

从前面说明中可知从示波器上可以显示出待测材料的动态磁滞回线,但为了定量研究磁化曲线磁滞回线,必须对示波器进行定标.即还须确定示波器的 X 轴的每格代表多少 H 值 (A/m),Y 轴每格实际代表多少 $B(T)$ (见参考文献[1]的第 143 页).

由公式(3)、(6)可以得知,在 U_x, U_y 可以准确测得且 R_1, R_2 和 C 都为已知的标准元件的情况下,就可以省去繁琐的定标工作(见参考文献[1]的第 143—144 页).下面就如何在这种情况下测量进行分析.

一般示波器都有已知的 X 轴和 Y 轴的灵敏度,设 X 轴灵敏度为 $S_x(V/格)$,Y 轴的灵敏度为 $S_y(V/格)$.将 X 轴、Y 轴的灵敏度旋钮顺时针打到底并锁定,则上述 S_x 和 S_y 均可从示波器的面板上直接读出,则有:

$$U_x = S_x x, \quad U_y = S_y y$$

式中 x, y 分别为测量时记录的坐标值(单位:格,注意,指一大格,示波器一般有 8 ~ 10 大格),可见通过示波器就可测得 U_x, U_y 值.

由于本实验使用的 R_1, R_2 和 C 都是阻抗值已知的标准元件,误差很小,其中的 R_1, R_2 为无感交流电阻, C 的介质损耗非常小.这样就可结合示波器测量出 H 值和 B 值的大小.

综合上述分析,本实验定量计算公式为

$$H = \frac{N_1 S_x}{LR_1} x \quad (7)$$

$$B = \frac{R_2 CS_y}{N_2 S} y \quad (8)$$

式中各量的单位为: R_1, R_2 的单位为 Ω ; L 的单位为 m ; S 的单位为 m^2 ; C 的单位为 F ; S_x, S_y 的单位为 $V/格$; X, Y 的单位为格(分正负向读数); H 的单位为 A/m ; B 的单位为 T .

四、实验装置介绍

1. DH4516C 型磁滞回线测量仪(图 8)

实验使用的仪器由测试样品、功率信号源、可调标准电阻、标准电容和接口电路等组成.测试样品有两种,一种磁滞损耗较大,另一种较小,其他参量相同;信号源的频率在 20 ~ 250Hz 间可调;可调标准电阻 R_1 的调节范围为 0.1 ~ 11 Ω ; R_2 的

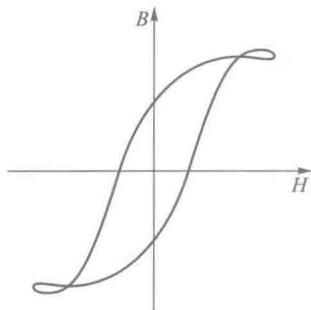


图 7 U_y 和 B 的相位差等因素引起的畸变

调节范围为 1 ~ 110 kΩ;标准电容有 0.1 μF、1 μF、20 μF 三挡可选;接口电路包括 uX、uY 接示波器的 X 和 Y 通道;uB、uH 接 DH4516A 测试仪,可自动测量 H、B、HC、BR 等参量,连接微机后可用微机作磁滞回线曲线,并测量 H、B、HC、BR 等参量,详见 DH4516A 说明书。

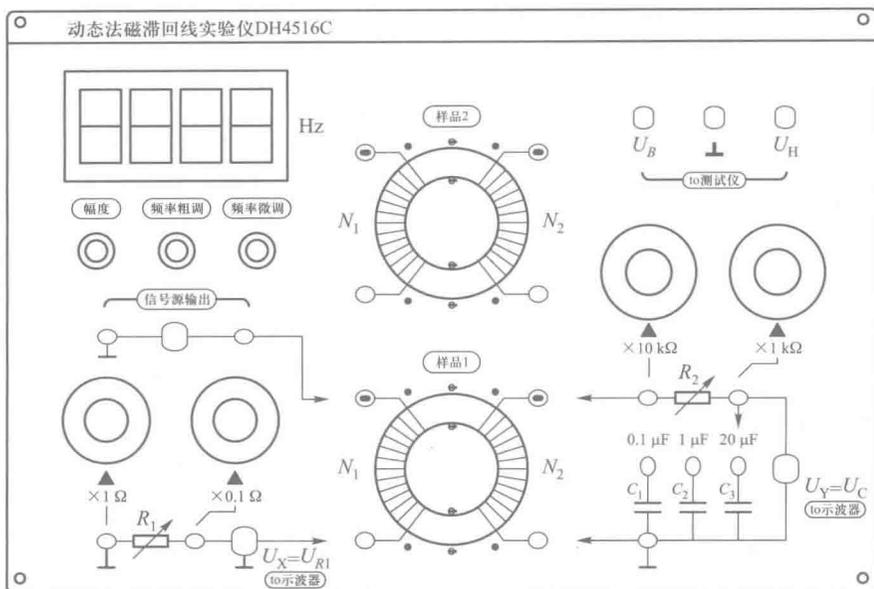


图 8 DH4516C 型磁滞回线测量仪

2. 示波器(图 9)

示波器是一种能将随时间变化的电压信号转换成图形直接显示和观测的电子仪器,它不仅可以定性观察各种电压信号的动态过程,还可以定量测量信号波形

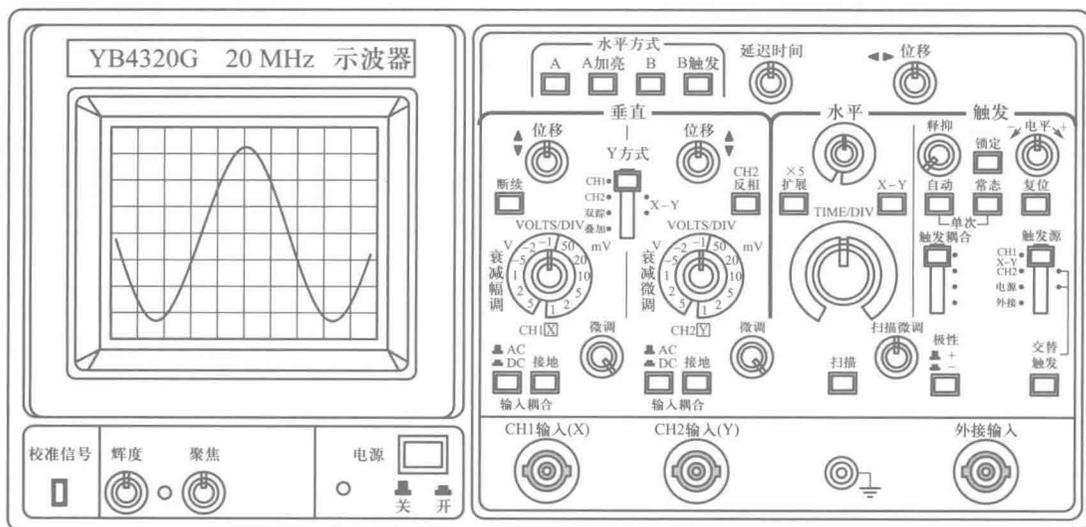


图 9 示波器

的周期、频率、幅度、相位、上升/下降时间、占空比等参量。配上转换电路和相应的传感器后,一切可转化为电压信号的电学量(如电流、阻抗)和非电学量(如光强、声强、磁场、温度、频率、位移)均可以用示波器来观察和测量。具体参考前实验示波器的使用。

五、实验内容及步骤

实验前先熟悉实验的原理和仪器的构成。使用仪器前先将信号源输出幅度调节旋钮逆时针到底(多圈电位器),使输出信号为最小。

标有红色箭头的线表示接线的方向,样品的更换是通过换接接线来完成的。

1. 观察两种样品在 25 Hz、50 Hz、100 Hz、150 Hz 交流信号下的磁滞回线图形。

(1) 按图 5 所示的原理线路接线。

① 逆时针调节幅度调节旋钮到底,使信号输出最小。

② 调示波器显示工作方式为 X-Y 方式,即图示方式。

③ 示波器 X 输入为 AC 方式,测量采样电阻 R_1 的电压。

④ 示波器 Y 输入为 DC 方式,测量积分电容的电压。

⑤ 选择样品 1 先进行实验。

⑥ 接通示波器和 DH4516C 型动态磁滞回线实验仪电源,适当调节示波器辉度,以免荧光屏中心受损。预热 10 min 后开始测量。

(2) 示波器光点调至显示屏中心,调节实验仪频率调节旋钮,频率显示窗显示 50.00 Hz。

(3) 单调增加磁化电流,即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮,使示波器显示的磁滞回线上 B 值增加缓慢,达到饱和。改变示波器上 X、Y 输入增益段开关并锁定增益电位器(一般为顺时针到底),调节 R_1 、 R_2 的大小,使示波器显示出典型美观的磁滞回线图形。

(4) 单调减小磁化电流,即缓慢逆时针调节幅度调节旋钮,直到示波器最后显示为一点,位于显示屏的中心,即 X 和 Y 轴线的交点,如不在中间,可调节示波器的 X 和 Y 位移旋钮。

(5) 单调增加磁化电流,即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮,使示波器显示的磁滞回线上 B 值增加缓慢,达到饱和,改变示波器上 X、Y 输入增益波段开关和 R_1 、 R_2 的值,示波器显示典型美观的磁滞回线图形。磁化电流在水平方向上的读数为 (-5.00, +5.00) 格。

(6) 逆时针调节(幅度调节旋钮到底),使信号输出最小,调节实验仪频率调节旋钮,频率显示窗分别显示 25.00 Hz、100.0 Hz、150.0 Hz,重复上述(3)~(5)的操作,比较磁滞回线形状的变化。表明磁滞回线形状与信号频率有关,频率越高磁滞回线包围面积越大,用于信号传输时磁滞损耗也大。

(7) 换实验样品 2,重复上述(2)~(6)步骤,观察 25.00 Hz、50.00 Hz、100.0 Hz、150.0 Hz 时的磁滞回线,并与样品 1 进行比较,有何异同。

2. 测磁化曲线和动态磁滞回线,用样品 1 进行实验。

(1) 在实验仪上接好实验线路, 逆时针调节幅度调节旋钮到底, 使信号输出最小. 将示波器光点调至显示屏中心, 调节实验仪频率调节旋钮, 频率显示窗显示 50.00 Hz.

(2) 退磁.

① 单调增加磁化电流, 即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮, 使示波器显示的磁滞回线上 B 值增加变得缓慢, 达到饱和. 改变示波器上 X 、 Y 输入增益段开并和 R_1 、 R_2 的值, 示波器显示典型美观的磁滞回线图形. 磁化电流在水平方向上的读数为 $(-5.00, +5.00)$ 格, 此后, 保持示波器上 X 、 Y 输入增益波段开关和 R_1 、 R_2 值固定不变并锁定增益电位器 (一般为顺时针到底), 以便进行 H 、 B 的标定.

② 单调减小磁化电流, 即缓慢逆时针调节幅度调节旋钮, 直到示波器最后显示为一点, 位于显示屏的中心, 即 X 和 Y 轴线的交点, 如不在中间, 可调节示波器的 X 和 Y 位移旋钮. 实验中可用示波器 X 、 Y 输入的接地开关检查示波器的中心是否对准屏幕 X 、 Y 坐标的交点.

3. 磁化曲线 (即测量大小不同的各个磁滞回线的顶点的连线).

单调增加磁化电流, 即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮, 磁化电流在 X 方向读数为 0、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00、4.00、5.00, 单位为格, 记录磁滞回线顶点在 Y 方向上读数如表 1, 单位为格, 磁化电流在 X 方向上的读数为 $(-5.00, +5.00)$ 格时, 示波器显示典型美观的磁滞回线图形. 此后, 保持示波器上 X 、 Y 输入增益波段开关和 R_1 、 R_2 值固定不变并锁定增益电位器 (一般为顺时针到底), 以便进行 H 、 B 的标定.

4. 动态磁滞回线.

在磁化电流 X 方向上的读数为 $(-5.00, +5.00)$ 格时, 记录示波器显示的磁滞回线在 X 坐标为 5.0、4.0、3.0、2.0、1.0、0、-1.0、-2.0、-3.0、-4.0、-5.0 格时, 相对应的 Y_1 和 Y_2 坐标, 填入表 2 中.

5. 换一种实验样品进行上述实验.

6. 改变磁化信号的频率, 进行上述实验.

六、数据记录及数据处理

1. 分别观察两种样品在 25 Hz、50 Hz、100 Hz、150 Hz 交流信号下的磁滞回线图形.

(1) 样品 1 磁滞回线形状与信号频率关系:

_____;

(2) 样品 2 磁滞回线形状与信号频率关系:

_____;

(3) 样品 1 与样品 2 磁滞回线形状比较:

_____.

2. 测量磁化曲线.

(1) 单调增加磁化电流, 即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮, 使磁滞回线顶点在

NOTE

X 方向读数分别为 0、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00、4.00、5.00，单位为格（指一大格），记录磁滞回线顶点在 Y 方向上读数。将数据填入表 1 中。

表 1 磁化曲线的数据表

$$f = \text{___ Hz}, R_1 = \text{___ } \Omega, R_2 = \text{___ k}\Omega$$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X/格	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
$H/(A \cdot m)$												
Y/格												
B/mT												

由前所述 H 、 B 的计算公式为

$$H = \frac{N_1 S_x}{L R_1} x, \quad B = \frac{R_2 C S_y}{N_2 S} y$$

上述公式中，两种铁芯实验样品和实验装置参量如下： $L = 0.130 \text{ m}$ ， $S = 1.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ， $B_1 = 100 \text{ T}$ ， $B_2 = 100 \text{ T}$ ， R_1 、 R_2 值根据仪器面板上的选择值计算。 $C = 1.0 \times 10^{-6} \text{ F}$ ，其中， L 为铁芯实验样品平均磁路长度； S 为铁芯实验样品截面积； N_1 为磁化线圈匝数； N_2 为副线圈匝数； R_1 为磁化电流采样电阻，单位为 Ω ； R_2 为积分电阻，单位为 Ω ； C 为积分电容，单位为 F 。 S_x 为示波器 X 轴灵敏度，单位 V/格 ； S_y 为示波器 Y 轴灵敏度，单位 V/格 ；所以得到一组实测的磁化曲线数据，整理如表 1。

(2) 由表 1 中的 B 与 H 值作 $B-H$ 磁化曲线。

3. 测量动态磁滞回线。

(1) 在磁化电流 X 方向上的读数为 $(-5.00, +5.00)$ 格时，记录示波器显示的磁滞回线在 X 坐标为 5.00、4.00、3.00、2.00、1.00、0、-1.00、-2.00、-3.00、-4.00、-5.00 格时，相对应的 Y_1 和 Y_2 坐标，并计算出相应 H 与 B 值，填入表 2 中。

表 2 磁滞回线的测量数据表

$$f = \text{___ Hz}, R_1 = \text{___ } \Omega, R_2 = \text{___ k}\Omega$$

X/格	5.00	4.00	3.00	2.00	1.00	0	-1.00	-2.00	-3.00	-4.00	-5.00
$H/(A \cdot m)$											
Y_1 /格											
B/mT											
Y_2 /格											
B/mT											

(2) 由表 2 中的 B 与 H 值作磁滞回线图。

(3) 给出饱和磁化强度、剩磁和矫顽力的大小。

B 最大值对应饱和磁感应强度 $-B_s = \text{___ mT}$ ， $B_s = \text{___ mT}$ 。

$H=0$ 时， B 读数对应剩磁 $-B_r = \text{___ mT}$ ， $B_r = \text{___ mT}$ 。

$B=0$ 时, H 读数对应矫顽力 $-H_c = \underline{\quad\quad}$ A/m, $H_c = \underline{\quad\quad}$ A/m.

4. 换一种实验样品进行上述实验, 并与之比较.

5. 改变磁化信号的频率, 进行上述实验, 并与之比较.

七、注意事项

1. 实验开始前需预热 10 min.

2. 由于信号源、电阻 R_1 和电容 C 的一端已经与地相连, 所以不能与其他接线端相连接. 否则会短路信号源、 U_R 或 U_C , 从而无法正确做出实验.

3. 测量过程中保持示波器上 X、Y 输入偏转因数旋钮和 R_1 、 R_2 值固定不变, 励磁电流在实验过程中只允许单调增加或减少, 不能时增时减.

4. 在频率较低时, 由于相位失真, 磁滞回线经常会出现如图 7 所示的畸变. 这时需要选择合适的 R_1 、 R_2 和 C 的阻值, 可避免这种畸变, 得到最佳磁滞回线图形.

八、思考题

1. 在测量 $B-H$ 曲线过程, 为何不能改变 X 轴和 Y 轴的分度值?

2. 示波器显示的正弦波电压值与交流电压表显示的电压值有何区别? 两者之间如何换算?

3. 硬磁材料的交流磁滞回线与软磁材料的交流磁滞回线有何区别?

4. 为什么测磁化曲线先要退磁?

5. 为什么测量磁化曲线要进行磁锻炼?

6. 为什么动态磁滞回线的面积比静态磁滞回线大, 损耗大?

7. 如何判断铁磁材料属于软、硬磁材料?

实验二十五 密立根油滴实验

20 世纪初,物理学处于向原子领域进发的新时期,一大批物理实验起了先导的作用. 1897 年英国物理学家汤姆孙 (Joseph John Thomson) 通过测定阴极射线的荷质比,证实了电子的存在,为近代物理学的发展奠定了重要实验基础. 然而,仅仅从荷质比的数据还不足以确定电子的性质,因为由此无法直接得出电子电荷和质量绝对数值. 所以,测定电子的电荷大小 e_0 就成了当时物理学家面临的重大课题.

1908 年,美国杰出物理学家密立根 (Robert Andrews Millikan, 1868—1953) 在总结前人实验经验的基础上,开始研究带电液滴在电场中的运动过程. 结果表明,液滴上的电荷是元电荷的整数倍,但因测量结果不够准确而不具说服力. 1910 年,他用油滴代替容易挥发的水滴,获得了比较精确的测量结果. 1913 年,他宣布了其开创性的研究成果,计算出电子电荷量的平均值. 这一结果具有里程碑的意义: ① 明确了带电油滴所带的电荷量都是元电荷的整数倍; ② 用实验的方法证明了电荷的不连续性; ③ 测出了元电荷 (从而通过荷质比计算出电子的质量). 此后,又继续改进实验,提高实验精度,最终获得了可靠的结果并最早完成了元电荷的测量工作. 这一结果再次证明电子的存在,使对“电子存在”的观点持怀疑态度的物理学家信服. 由于在测定元电荷值和测出普朗克常量等方面做出的成就,密立根在 1923 年获得了诺贝尔物理学奖.

随着现代测量精度的不断提高,目前公认的元电荷 $e_0 = 1.602\ 176\ 620\ 8(98) \times 10^{-19}$ C. 本实验采用 CCD 摄像机和监视器,可非常清楚地看到钟表油滴的运动过程,大大改善了实验条件,使测量结果更为准确.

一、实验目的

1. 学习用油滴实验测量电子电荷的原理和方法;
2. 测量电子的电荷量并验证电荷的不连续性;
3. 训练学生在实验过程中严谨的态度、实事求是的作风.

二、实验仪器

CCD 显微密立根油滴仪、液晶显示器、喷雾器、钟表油滴盒.

三、实验原理

1. 静态(平衡)测量法

用喷雾器将油滴从正极板上方中央小孔处喷入两极板之间,设油滴质量为 m , 所带电量为 q ,两极板间距为 d ,两极板间电压为 U . 如图 1 所示,油滴静止时受到三个力的作用,一个是重力 G ,另一个是电场力 F_e ,还有一个是空气的浮力 F_b ,平衡时则有

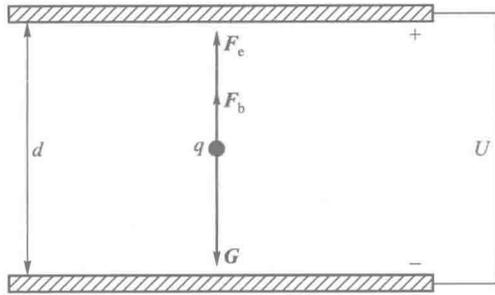


图1 静止的油滴在电场中的受力示意图

NOTE

$$G = F_e + F_b \quad (1)$$

即

$$mg = q \frac{U}{d} + F_b \quad (2)$$

式中 g 为重力加速度,为了测出油滴所带的电荷量 q ,除了需测定平衡电压 U 和极板间距离 d 外,还需要测量油滴的质量 m . 因 m 很小,需用如下特殊方法测定:平行极板不加电压时,油滴受重力作用而加速下降,由于空气黏性阻力的作用,下降一段距离后达到某一速度 v ,此时,黏性阻力 F 与重力 mg 及空气浮力 F_b 平衡,油滴将匀速下降,此时有

$$mg = F + F_b \quad (3)$$

油滴的质量 m 可表示为

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{油}} \quad (4)$$

油滴所受的空气浮力 F_b 可表示为

$$F_b = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a g \quad (5)$$

式中 r 为油滴半径, $\rho_{\text{油}}$ 为油滴密度, ρ_a 为空气的密度.

实验表明:黏性阻力的大小与物体的形状,速度,流体的黏度等有关.对半径为 r 的小球,在黏度为 η 的流体中以速度 v 运动时受到的黏性阻力为

$$f = 6\pi\eta rv \quad (6)$$

上式(6)被称为斯托克斯定律(Stokes' Law),或斯托克斯公式.该式可用来测定流体的黏度和微小颗粒的半径.对于半径小到 10^{-6} m 的油滴颗粒,考虑其直径与空气分子的间隙相当,空气已不能看成是连续介质,其黏度 η 应作如下修正:

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \quad (7)$$

式中 b 为修正系数, p 为大气压强.这时斯托克斯定律应改为

$$f = \frac{6\pi\eta'rv}{1 + \frac{b}{pr}} \quad (8)$$

联立式(3)—(6),得

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2g(\rho_{\text{od}} - \rho_{\text{a}})}} \quad (9)$$

联立式(3)一(5)及式(8),得

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2g(\rho_{\text{od}} - \rho_{\text{a}}) \left(1 + \frac{b}{pr}\right)}} \quad (10)$$

式(10)的根号中还包含油滴的半径 r , 但因它处于修正项中, 不需十分精确, 因此可用式(9)代入计算, 即

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2g(\rho_{\text{od}} - \rho_{\text{a}}) \left[1 + \frac{b}{p \sqrt{\frac{9\eta v}{2g(\rho_{\text{od}} - \rho_{\text{a}})}}}\right]}} \quad (11)$$

实验中常常固定油滴运动的距离 s , 通过测量油滴在距离 s 内所需要的运动时间 t 来求得其运动速度 v , 则有

$$v = \frac{s}{t} \quad (12)$$

联立式(2)、式(4)、式(5)、式(11)及式(12), 可得

$$q = \frac{9\sqrt{2}\pi d}{U} \left(\eta \frac{s}{t}\right)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{(\rho_{\text{od}} - \rho_{\text{a}})g}\right]^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{b}{p \sqrt{\frac{9\eta s}{2gt(\rho_{\text{od}} - \rho_{\text{a}})}}}\right]^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

上式中, 各参数如下: 极板间距 $d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$, 空气黏度 $\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 下落距离 $s = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$, 油滴的密度 $\rho_{\text{od}} = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 空气的密度 $\rho_{\text{a}} = 1.2928 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (标准状况下), 重力加速度 $g = 9.8015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (北京), 修正系数 $b = 0.00823 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 标准大气压强 $p = 1.01325 \text{ Pa}$. 此外, U 为平衡电压, t 为油滴匀速下落时间.

2. 动态(非平衡)测量法(选做)

首先分析重力场中一个足够小的油滴, 其以速度 v_1 匀速下降, 其受到重力 G 、浮力 F_b 及黏性阻力 F_1 的作用. 有

$$G = F_1 + F_b \quad (14)$$

若加上电场, 则油滴以速度 v_2 匀速上升, 其受到重力 G 、浮力 F_b 、电场力 F_e 及黏性阻力 F_2 的作用, 有

$$G + F_2 = F_e + F_b \quad (15)$$

由斯托克斯定律, 黏性阻力与物体运动速度成正比, 比例系数为 K , 即

$$F_1 = K v_1 \quad (16)$$

$$F_2 = K v_2 \quad (17)$$

联立式(14)一(17), 消去比例系数 K , 并将 $F_e = q \frac{U}{d}$ 代入, 则有

$$q = \frac{d}{U} \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) (G - F_b) \quad (18)$$

同前,参考式(3)~(8),可得

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_1}{2g(\rho_{od}-\rho_a)}} \quad (19)$$

考虑修正后,有

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2g(\rho_{od}-\rho_a) \left[1 + \frac{b}{p \sqrt{\frac{9\eta v_1}{2g(\rho_{od}-\rho_a)}}}} \right]}} \quad (20)$$

NOTE

参考式(12),使油滴上升和下降的距离相等,有

$$v_1 = \frac{s}{t_1} \quad (21)$$

$$v_2 = \frac{s}{t_2} \quad (22)$$

联立式(4)、式(5)、式(18)及式(20)~(22),可得

$$q = \frac{9\sqrt{2}\pi d}{U} (\eta s)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{(\rho_{od}-\rho_a)gt_1} \right]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{p \sqrt{\frac{9\eta s}{2gt(\rho_{od}-\rho_a)}}}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (23)$$

四、实验装置介绍

1. 仪器结构

(1) 仪器主要由两个部分组成,如图2所示。

- ① 主机包括可控高压电源、计时装置、A/D 采样、视频处理等单元模块。
- ② CCD 成像系统包括 CCD 传感器、光学成像部件等。
- ③ 油滴盒包括高压电极、照明装置、防风罩等部件。
- ④ 监视器是视频信号输出设备。

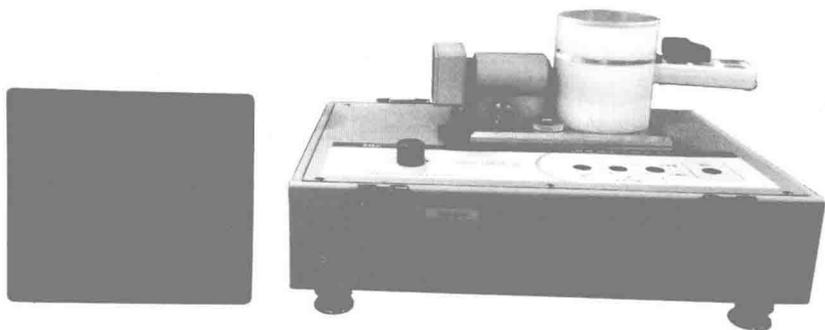


图2 CCD显微密立根油滴仪和显示器

(2) CCD 模块及光学成像系统用来捕捉暗室中油滴的像,同时将图像信息传给主机的视频处理模块。

实验过程中可以通过调焦旋钮来改变物距,使油滴的像清晰地呈现在 CCD 传感器的窗口内. 仪器部件示意如图 3 所示.

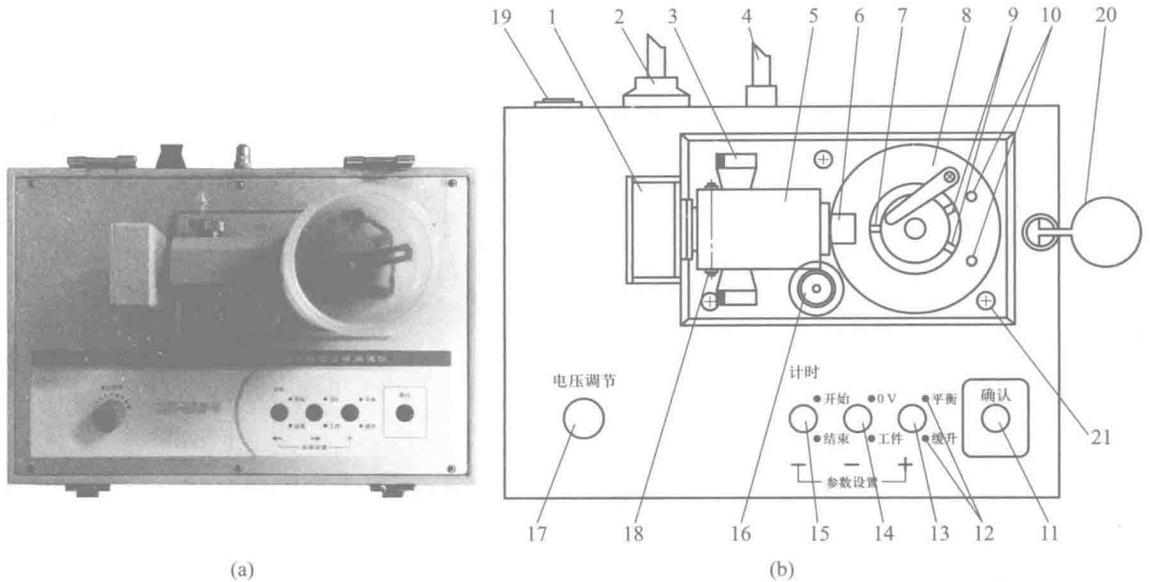


图 3 主机部件示意图

- 1—CCD 盒;2—电源插座;3—调焦旋钮;4—Q9 视频接口;5—光学系统;6—镜头;7—观察孔;8—上极板压簧;9—进光孔;
10—光源;11—确认键;12—状态指示灯;13—平衡/提升切换键;14—0 V/工作切换键;15—计时开始/结束切换键;
16—水准泡;17—电压调节旋钮;18—紧固螺钉;19—电源开关;20—油滴管收纳盒安放环;21—调平螺钉(3 颗)

电压调节旋钮可以调整极板之间的电压大小,用来控制油滴的平衡、下落及提升.“开始/结束”按键用来计时,“0 V/工作”按键用来切换仪器的工作状态,“平衡/提升”按键可以切换油滴平衡或提升状态,“确认”按键可以将测量数据显示在屏幕上,从而省去了每次测量完成后手工记录数据的过程,使操作者把更多的注意力集中到实验本质上来.

(3) CCD 油滴盒是一个关键部件,具体构成,如图 4 所示.

上、下极板之间通过胶木圆环支撑,三者之间的接触面经过机械精加工后可以将极板间的不平行度、间距误差控制在 0.01 mm 以下;这种结构基本上消除了极板间的“势垒效应”及“边缘效应”,较好地保证了油滴室处在匀强电场之中,从而有效地减小了实验误差.

胶木圆环上开有两个进光孔和一个观察孔,光源通过进光孔给油滴室提供照明,而成像系统则通过观察孔捕捉油滴的像.照明由带聚光的高亮发光二极管提供,其使用寿命长、不易损坏;油雾杯可以暂存油雾,使油雾不会过早地散逸;进油量开关可以控制落油量;防风罩可以避免外界空气流动对油滴的影响.

2. 仪器主要器件的技术参数

实验仪由主机、CCD 成像系统、油滴盒、监视器和喷雾器等部件组成.综合的参数指标如下:

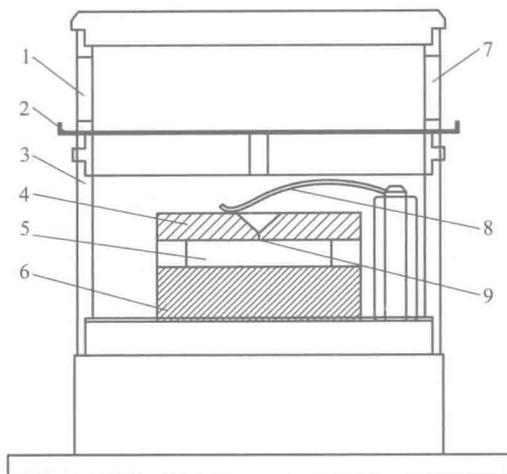


图4 油滴盒装置示意图

1—喷雾口;2—进油量开关;3—防风罩;4—上极板;
5—油滴室;6—下极板;7—油雾杯;8—上极板压簧;9—落油孔

(1) 平行极板间距 $5.00 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$, 平衡电压 $0 \sim 420 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$, 提升电压及平衡电压 $+200 \sim 300 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$.

(2) 数字电压表 $0 \sim 1999 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$, 数字计时器 $0 \sim 99.99 \text{ s} \pm 0.01 \text{ s}$.

(3) 垂直视场 2 mm , 格线分度值 0.2 mm/格 , 电视显微镜: 总放大倍数 60 (标准物镜).

(4) 电源 220 V , 50 Hz , CCD 传感器指标 TV, 制式 NTSC3.58, 32 万像素, 分辨率 480 线以上, 最低照度 $F1.2/0.05 \text{ LUX}$, 视频输出 $1.0 U_{pp} \pm 10\% U_{pp} (75 \Omega)$.

五、实验内容及步骤

1. 调整仪器

(1) 水平调整

调整实验仪主机的调平螺钉旋钮 (俯视时, 顺时针平台降低, 逆时针平台升高), 直到水准泡正好处于中心 (注: 严禁旋动水准泡上的旋钮). 将实验平台调平, 使平衡电场方向与重力方向平行以免引起实验误差. 极板平面是否水平决定了油滴在下落或提升过程中是否发生左右的漂移.

(2) 喷雾器调整

将少量钟表油缓慢地倒入喷雾器的储油腔内, 使钟表油湮没提油管下方, 油不要太多, 以免实验过程中不慎将油倾倒在油滴盒内堵塞落油孔. 将喷雾器竖起, 用手挤压气囊, 使得提油管内充满钟表油.

(3) 仪器硬件接口连接

主机接线: 电源线接交流 $220 \text{ V}/50 \text{ Hz}$. 监视器: 视频线缆输入端接“VIDEO”, 另一 Q9 端接主机“视屏输出”. DC 12 V 适配器电源线接 $220 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ 交流电压. 前面板调整旋钮自左至右依次为显示开关、返回键、方向键、菜单键 (建议亮度调整为

20、对比度调整为 100)。

(4) 实验仪联机使用

① 打开实验仪电源及监视器电源,监视器出现仪器名称及研制公司界面。

② 按主机上任意键:监视器出现参数设置界面,首先,设置实验方法,然后根据该地的环境适当设置重力加速度、油密度、大气压强、油滴下落距离。“←”表示左移键、“→”表示为右移键、“+”表示数据设置键。

③ 按确认键后出现实验界面:计时“开始/结束”键为结束、“0 V/工作”键为 0V、“平衡/提升”键为“平衡”。

(5) CCD 成像系统调整

打开进油量开关,从喷雾口喷入油雾,此时监视器上应该出现大量运动油滴的像。若没有看到油滴的像,则需调整调焦旋钮或检查喷雾器是否有油雾喷出。

2. 熟悉实验界面

在完成参数设置后,按确认键,监视器显示实验界面,不同的实验方法的实验界面有一定差异。

(1) 极板电压:实际加到极板的电压,显示范围:0 ~ 1 999 V。

(2) 计时时间:计时开始到结束所经历的时间,显示范围:0 ~ 99.99 s。

(3) 电压保存提示:将要作为结果保存的电压,每次完整的实验后显示,当保存实验结果后(即按下确认键)自动清零。

(4) 保存结果显示:显示每次保存的实验结果,共 5 次,显示格式与实验方法有关。当需要删除当前保存的实验结果时,按下确认键 2 s 以上,当前结果被清除(不能连续删)。

(5) 下落距离:显示设置的油滴下落距离。当需要更改下落距离的时候,按住平衡、提升键 2 s 以上,此时距离设置栏被激活,动态法步骤(1)和步骤(2)之间不能更改,通过“+”键(即平衡、提升键)修改油滴下落距离,然后按确认键确认修改。

(6) 距离标志:显示当前设置的油滴下落距离,在相应的格线上做数字标记,显示范围:0.2 ~ 1.8 mm。垂直方向视场范围为 2 mm,分为 10 格,每格 0.2 mm。

3. 选择适当的油滴并练习控制油滴(以平衡法为例)

怎样选择合适的油滴?

(1) 根据油滴在电场中受力平衡公式以及多次实验的经验,当油滴的实际半径在 0.5 ~ 1.0 μm 时最为适宜。若油滴过小,布朗运动影响明显,平衡电压不易调整,时间误差也会增加;若油滴过大,下落太快,时间相对误差增大,且油滴带多个电子的概率增加。

(2) 操作方法:三个参数设置按键分别为“结束”“工作”“平衡”状态,平衡电压调为约 400 V。喷入油滴,调节调焦旋钮,使屏幕上显示大部分油滴,可见带电多的油滴迅速上升出视场,不带电的油滴下落出视场,约 10 s 后油滴减少。选择那种上升缓慢的油滴作为暂时的目标油滴,切换“0 V/工作”键,这时极板间的电压为 0 V,在暂时的目标油滴中选择下落速度为 0.2 ~ 0.5 格/s 的作为最终的目标油

滴,调节调焦旋钮使该油滴最小最亮。

(3) 平衡电压的确认. 目标油滴聚焦到最小最亮后,仔细调整平衡时的“电压调节”使油滴平衡在某一格线上,等待一段时间(大约 2 min),观察油滴是否飘离格线. 若油滴始终向同一方向飘离,则需重新调整平衡电压;若其基本稳定在格线或只在格线上下做轻微的布朗运动,则可以认为油滴达到了力学平衡,这时的电压就是平衡电压。

(4) 控制油滴的运动,如下图所示。

NOTE

	○(开始下落的位置)	
	●(开始计时的位置) ○ ○ ○ ●(结束计时的位置)	
	○(停止下落的位置)	

将油滴平衡在屏幕顶端的第一条格线上,将工作状态按键切换至“0 V”,绿色指示灯点亮,此时上、下极板同时接地,电场力为零,油滴在重力、浮力及空气阻力的作用下作下落运动. 油滴是先经一段变速运动,然后变为匀速运动,但变速运动的时间非常短(小于 0.01 s,与计时器的精度相当),所以可以认为油滴是立即匀速下落的. 当油滴下落到有 0 标记的格线时,立刻按下“计时”键,计时器开始记录油滴下落的时间;待油滴下落至有距离标志(1.6)的格线时,再次按下计时键,计时器停止计时(计时位置见图 3),此时油滴停止下落.“0 V/工作”按键自动切换至“工作”,“平衡/提升”按键处于“平衡”,可以通过“确认”键将此次测量数据记录到屏幕上. 将“平衡/提升”按键切换至“提升”,这时极板电压在原平衡电压的基础上增加约 200 V 的电压,油滴立即向上运动,待油滴提升到屏幕顶端时,切换至“平衡”,找平衡电压,进行下一次测量. 对同一颗油滴共测量 5 次,而且每次测量都要重新调整平衡电压,系统会自动计算出这颗油滴的电荷量。

4. 实验步骤

正确完成仪器的连接. 实验可选用平衡法、动态法(选做). 实验前仪器必须调水平。

(1) 开启电源,进入实验界面将工作状态按键切换至“工作”,红色指示灯点亮;将“平衡/提升”按键置于“平衡”。

(2) 将平衡电压调整为 400 V 左右,通过喷雾口向油滴盒内喷入油雾,此时监视器上将出现大量运动的油滴. 选取合适的油滴,仔细调整平衡电压 U ,使其平衡在起始(最上面)格线上。

(3) 将“0 V/工作”状态按键切换至“0 V”,此时油滴开始下落,当油滴下落到有“0”标记的格线时,立即按下计时开始键,同时计时器启动,开始记录油滴的下落

时间 t .

(4) 当油滴下落至有距离标记的格线时(例如:1.6),立即按下计时结束键,同时计时器停止计时,油滴立即静止,“0 V/工作”按键自动切换至“工作”.通过“确认”按键将这次测量的“平衡电压和匀速下落时间”结果同时记录在监视器屏幕上.

(5) 将“平衡/提升”按键置于“提升”,油滴将向上运动,当回到高于有“0”标记格线时,将“平衡/提升”键切换至平衡状态,油滴停止上升,重新调整平衡电压.注意:如果此处的平衡电压发生了突变,则该油滴得到或失去了电子.这次测量不能作数,从步骤(2)开始重新找油滴.

(6) 重复步骤(3)一(5),并将数据(平衡电压 U 及下落时间 t)记录到屏幕上.当5次测量完成后,按“确认”键,系统将计算5次测量的平均平衡电压及平均匀速下落时间,并根据这两个参数自动计算并显示出油滴的电荷量 q .

(7) 重复步骤(2)一(6),共找5颗油滴,并测量每颗油滴的电荷量.

六、数据记录及数据处理

1. 数据记录

静态(平衡)测量法

油滴 1:

次数	平衡电压 U/V	运动时间 t/s	所带电荷量 q/C	元电荷整数倍 n	所测元电荷值 e/C
1					
2					
3					
4					
5					
平均所测元电荷值(\bar{e}_1)					

油滴 2:

次数	平衡电压 U/V	运动时间 t/s	所带电荷量 q/C	元电荷整数倍 n	所测元电荷值 e/C
1					
2					
3					
4					
5					
平均所测元电荷值(\bar{e}_2)					

油滴 3:

次数	平衡电压 U/V	运动时间 t/s	所带电荷量 q/C	元电荷整数倍 n	所测元电荷值 e/C
1					
2					
3					
4					
5					
平均所测元电荷值(\bar{e}_3)					

NOTE

油滴 4:

次数	平衡电压 U/V	运动时间 t/s	所带电荷量 q/C	元电荷整数倍 n	所测元电荷值 e/C
1					
2					
3					
4					
5					
平均所测元电荷值(\bar{e}_4)					

油滴 5:

次数	平衡电压 U/V	运动时间 t/s	所带电荷量 q/C	元电荷整数倍 n	所测元电荷值 e/C
1					
2					
3					
4					
5					
平均所测元电荷值(\bar{e}_5)					

2. 数据处理

(1) 计算方法

测量油滴上所带电荷量 q 的目的是找出电荷的最小单位 e_0 . 为此可以对不同的油滴, 分别测出其所带的电荷值 q_i , 它们应近似为元电荷的整数倍:

$$n_i = \frac{q_i}{e_0} \quad (n_i \text{ 四舍五入取整}) \quad (24)$$

所测元电荷值作如下计算:

$$e_i = \frac{q_i}{n_i} \quad (25)$$

计算相对误差:

$$E_r = \left| \frac{\bar{e}_i - e_0}{e_0} \right| \times 100\% \quad (26)$$

(2) 作图法

根据式(24), n_i 为横坐标, q_i 为纵坐标, e_0 为直线方程的斜率, 通过拟合直线即可求的 e_0 值, 并在坐标纸上计算相对误差(一个油滴五个点作一张图, 共五张图)。

七、注意事项

1. 实验前必须调节水准泡。
2. CCD 盒、紧定螺钉、摄像镜头的机械位置不能变更, 否则会对像距及成像角度造成影响。
3. 仪器使用环境: 温度为 $0 \sim 40$ °C 的静态空气中。
4. 仪器内有高压, 实验人员避免用手接触电极。
5. 实验前应对仪器油滴盒内部进行清洁, 防止异物堵塞落油孔。注意仪器的防尘保护。
6. 每次都要调节平衡电压, 要求每个油滴的平衡电压和下降时间都不同。
7. 喷雾时喷雾器应竖拿, 食指赌住气孔, 对准油雾室的喷雾口, 轻轻喷入少许即可。
8. 喷油后应将风口盖住, 以防止空气流动对油滴的影响。
9. 注意跟踪油滴, 随时调节显微镜镜筒, 不断校准平衡电压, 发现平衡电压有明显改变, 则应放弃测量, 或作为一颗新油滴重新测量。
10. 选择平衡电压 200 V 左右, 下降时间 $8 \sim 20$ s 的油滴。

八、思考题

1. 如何判断油滴盒内平衡极板是否水平? 如果上下极板不水平, 对测量结果有什么影响?
2. 对实验结果造成影响的主要因素有哪些?

实验二十六 用小型棱镜摄谱仪测定光波波长

物质中的分子、原子永远处于运动状态,这种物质内部的运动,在外部则以辐射或吸收能量的形式表现出来,这种形式就是电磁辐射.对于不同波长的电磁辐射,经过光谱仪的分光处理后,按照波长值的大小顺序记录在感光底片上,使之呈现出有规则的线条排列,称这些排列图为光谱图.光谱可分为原子光谱(包括离子光谱)和分子光谱,其中原子光谱是由原子外层电子能级发生变化而产生的辐射或吸收,谱线形状为线状光谱.分子光谱是由分子中的原子的电子能级及分子振动、分子转动能级的变化所产生的光谱,光谱形式为带状光谱.

20世纪30年代摄谱仪已基本形成系列,随着科技的不断发展摄谱仪日趋完善.在光谱技术领域内,虽然光谱仪的发展迅速且占有主导地位,但是摄谱仪在光谱技术中的应用仍然是不可缺少的.摄谱仪的种类很多,根据应用光谱范围可分为真空紫外摄谱仪和紫外可见近红外摄谱仪.在短波部分,感光板的光谱灵敏范围已远远地超过光学光谱区,因此整个真空紫外光谱区均可建立真空紫外摄谱仪.在长波部分,感光板的光谱灵敏范围只能小于 $1.2\ \mu\text{m}$,实际上,超过波长为 $800\ \text{nm}$ 时,就很少采用摄谱法,紫外可见近红外摄谱仪的工作波段为 $200\sim 800\ \text{nm}$,在实际光谱技术工作中,应用摄谱法最多的波长区仍是从 $220\sim 450\ \text{nm}$,其次是 $450\sim 600\ \text{nm}$.

我们知道物质的原子和分子都能够辐射和吸收自己的特征光谱.分析物质的辐射或吸收光谱,就可以了解物质的组成和各成分的含量.由于光谱分析具有较高的灵敏度,特别是对低含量元素的分析准确度较高,分析速度快,因此,它在科学实验和研究中有着重要应用.用小型棱镜摄谱仪来做原子光谱测定实验时,由于仪器的线色散率与分辨率均较小,要摄取清晰成像的谱片,其中较为关键的是调节好入射狭缝的宽度,合适放置棱镜的位置,选择合适摄谱面的倾角等.

一、实验目的

1. 了解摄谱仪的结构、原理和使用方法,学习小型摄谱仪的定标方法;
2. 观察物质的发射光谱,测定氢原子光谱线的波长,验证原子光谱的规律性,测定氢原子光谱的里德伯常量;
3. 掌握棱镜摄谱仪的调节方法,学会测定某一光谱线的波长.

二、实验仪器

小型棱镜摄谱仪、光源(汞灯、钠灯)及其电源.

三、实验原理

1. 光谱和物质结构的关系

每种物质的原子都有自己的能级结构,原子通常处于基态,当受到外部激励

NOTE

后,可由基态跃迁到能量较高的激发态.由于激发态的不稳定,处于高能级的原子很快就返回基态,当由高能级跃迁到低能级时,将辐射出一定能量的光子,光子的波长为 λ ,由能级间的能量差 ΔE_i 决定: $\Delta E_i = E_i - E_0$, E_i 和 E_0 分别表示原子处于对应的激发态和基态的能量,即

$$\lambda_i = \frac{hc}{\Delta E_i} \quad (1)$$

式中 $i=1,2,3,\dots,h$ 为普朗克常量, c 为光速. ΔE_i 不同, λ 也不同.同一种原子所辐射的不同波长的光,经色散后按一定程序排列而成的光谱,称发射光谱.通过对发射光谱的测量和分析,可确定物质的元素成分,这种分析方法称为光谱分析.通过光谱分析,不仅可以定性地分析物质的组成,还可以定量地确定待测物质所含各种元素的多少.

2. 棱镜摄谱仪的光学构造原理

本实验所用的小型棱镜摄谱仪,原理如图1所示,其光学构造主要有以下三部分组成:

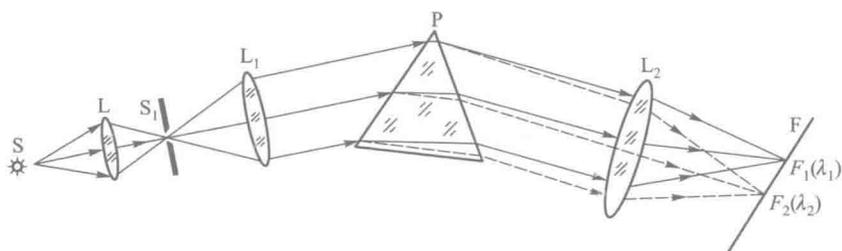


图1 小型棱镜摄谱仪光学原理示意图

(1) 准直管

准直管由狭缝 S_1 和透镜 L_1 组成,狭缝 S_1 位于透镜 L_1 的物方焦平面上.被分析物质发出的光射入狭缝 S_1 ,经透镜 L_1 后就成为平行光.实际使用中,为了使光源 S 射出光在 S_1 上具有较大的照度,在光源与狭缝之间放置会聚透镜 L ,使光束会聚在狭缝上.

(2) 棱镜部分

主要是一个(或几个)棱镜 P ,利用棱镜的色散作用,将不同波长的平行光分解成不同方向的平行光.

(3) 光谱接收部分

光谱接收部分实际上就是一个照相装置,它包括透镜 L_2 和放置在 L_2 像方焦平面上的照相底板 F ,透镜 L_2 将棱镜分解开的各种不同波长的单色平行光聚焦在底板 F 的不同位置上,如图1所示.由于透镜对不同波长光的焦距不同,当不同波长的光经 L_2 聚焦后并不分布在与光轴垂直的同一平面上,所以,必须适当地调整照相底板 F 的位置,方可清晰的记录各种波长的谱线.

3. 摄谱仪的定标校正

本实验利用汞灯为摄谱仪进行定标校正.用汞灯的光谱线(已知汞灯的波长)

作标准,测出它们移动到读数标记位置处时螺旋刻度尺的读数后,以读数为横坐标,汞灯的波长为纵坐标,作“读数-波长”定标校正曲线。

保持各谱线组不发生横向移动(棱镜部分保持已经调节好的位置且不作任何改动),对于待测光谱波长的光源只要记下它各条谱线所对应的螺旋刻度尺上的读数,对照定标校正曲线,就可确定各谱线的波长。

NOTE

4. 线性插入法求待测波长

这是一种近似的测量波长的方法,一般情况下,棱镜是非线性色散元件,但是在一个较小的波长范围内(几个纳米内),可以认为色散是均匀的,即谱线在底板上的位置和波长有线性关系,如波长为 λ_x 的待测谱线位于已知波长 λ_1 和 λ_2 谱线之间,如图 2 所示,它们在底片上的位置可用读数显微镜测出,如用 d 和 x 分别表示谱线 λ_1 和 λ_2 的间距及 λ_1 和 λ_x 的间距,那么待测谱线波长满足下式:

$$\frac{\lambda_x - \lambda_1}{x} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{d} \quad (2)$$

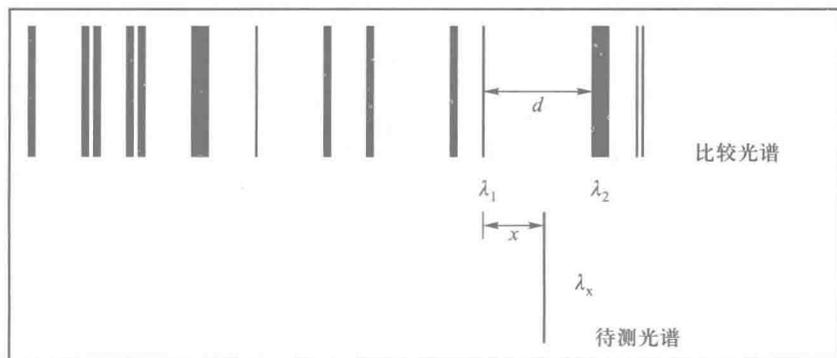


图 2 待测谱线位于已知谱线之间

如波长为 λ_x 的待测谱线位于已知波长 λ_1 和 λ_2 谱线之外,如图 3 所示,它们在底片上的位置可用读数显微镜测出,如用 d 和 x 分别表示谱线 λ_1 和 λ_2 的间距及 λ_2 和 λ_x 的间距,那么待测谱线波长满足下式:

$$\frac{\lambda_x - \lambda_2}{x} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{d} \quad (3)$$

注意:相邻谱线间隔不能相差过大,否则会增大实验误差。

5. 谱线位置的记录

如图 4 所示,测量时,使用测微目镜调节支架上的螺旋测微器进行测量,转动支架上的螺旋测微器可以使测微目镜做平行移动。当叉丝的交叉点或竖线对准待测谱线的一个边缘时,记下主尺的读数,继续转动螺旋测微器,使得叉丝对准下一个待测谱线的同一个边缘,再记录下主尺的读数,其差值即为两条谱线之间的距离。

6. 验证巴耳末公式和氢原子光谱的规律(选做)

1884 年 6 月 25 日,瑞士数学兼物理学家巴耳末(Johann Jakob Balmer, 1825—

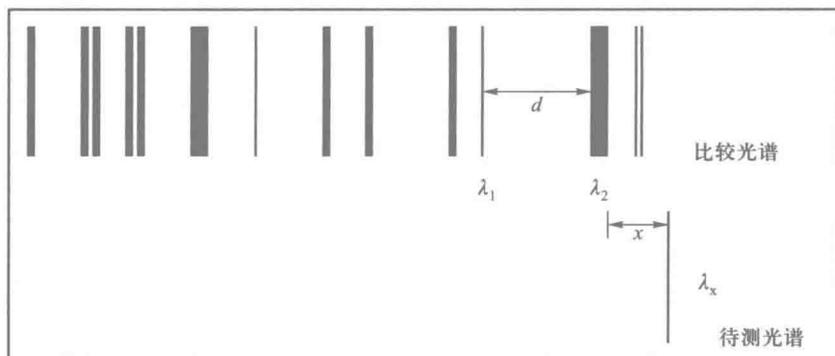


图3 待测谱线位于已知谱线之外

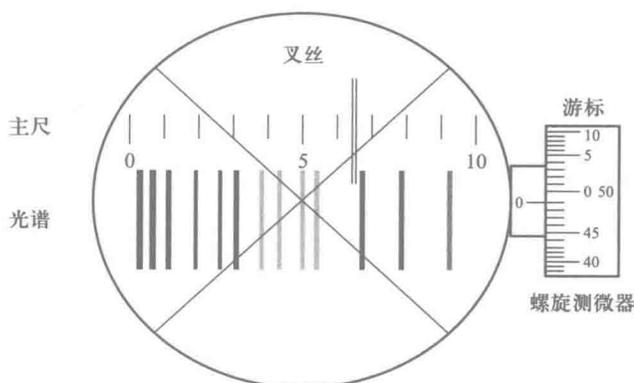


图4 测微目镜原理图

1898)公开发表了氢光谱波长公式,他发现在可见光区域内,氢原子发射的光谱遵循一定的规律,谱线的波长满足如下经验公式(即巴耳末公式):

$$\frac{1}{\lambda_n} = R_\infty \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (4)$$

其中, $n=3,4,5, \dots$, 组成一个谱线系,称为巴耳末线系, λ_n 为氢原子可见光区域内的波长, R_∞ 称为氢原子光谱的里德伯常量.

用摄谱仪测出巴耳末线系各谱线的波长后,就可由式(4)算出里德伯常量,与公认值 $R_\infty = 1.097\ 373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 相比在一定误差范围内,即为验证了巴耳末公式和氢原子光谱的规律.

四、实验装置介绍

1. 仪器结构

(1) 小型棱镜摄谱仪实物图,如图5所示.

(2) 小型棱镜摄谱仪装置图,如图6所示.

2. 仪器主要器件的技术参数

(1) 测微目镜放大倍率:15倍,可直接读谱.

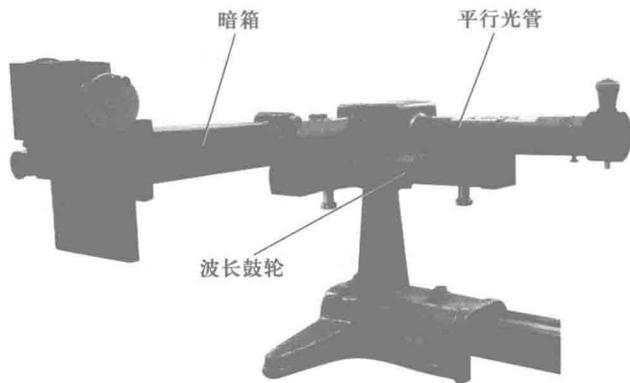


图 5 小型棱镜摄谱仪

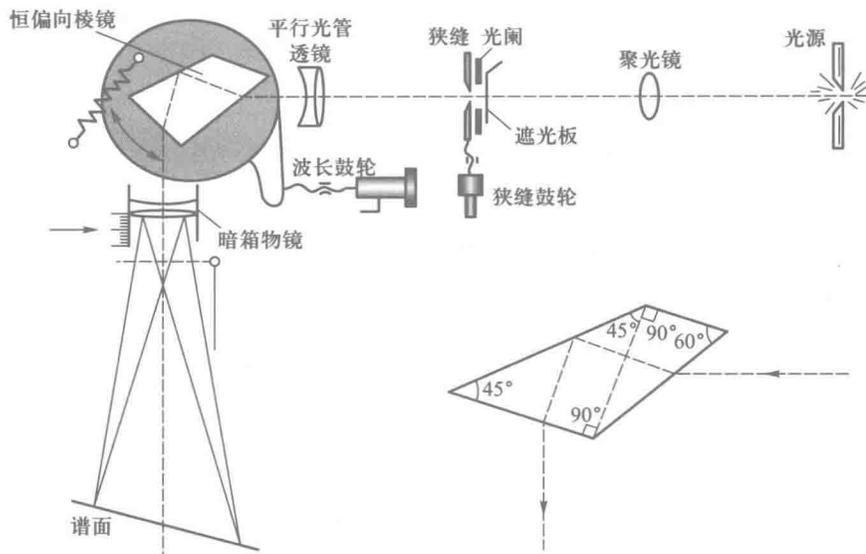


图 6 小型棱镜摄谱仪装置图

右下方的附图为中心波长的光线在恒偏向棱镜中的光路图

(2) 摄谱仪波长范围: 365.0 ~ 700.0 nm.

五、实验内容及步骤

1. 光源预热

实验所用汞灯及氩灯需要提前预热,至少 5 min. 注意:汞灯和氩灯只有在稳定发光的时候才可以被移动,预热阶段及关灯后请勿移动.

2. 摄谱仪的调节

(1) 将汞灯竖直放置于轨道上,并调节与入射缝等高,沿摄谱仪的底座导轨将汞灯逐渐由靠近狭缝移动到远离狭缝,从暗盒中央向摄谱仪内观察,调整汞灯光源的位置,使光源的像位于照相物镜的中央.

(2) 在光源与狭缝之间加入聚光透镜,调节透镜的位置,使光源成像在入射缝上.若更换光源,只能调整光源的位置,而透镜的位置以及波长鼓轮的位置不应变动,以保证光源始终处在准直物镜的光轴上.

(3) 取掉狭缝罩盖,从暗盒处可看到汞灯的线光谱.调节照相物镜位置和缝宽(0.1 mm),要求所有谱线都清晰,若不清晰还需调节暗匣相对于系统轴线的倾角.注意:在一般情况下尽量避免将缝宽调到零,以免损坏刀口!

(4) 慢慢转动波长鼓轮,调整恒偏棱镜的位置,通过看谱线管观察汞灯的435.8 nm(蓝)谱线是否和看谱管视场内中心指针对齐.一般实验前已经调好,不用再调节,如果误差太大,再进行调节.

(5) 将看谱管装置装好,将波长鼓轮刻度调节到43.58上.用看谱管浏览光谱,找出已知谱线和待测谱线在光谱中所在的位置并记录数据.

3. 关闭光源并整理仪器

六、数据记录及数据处理

1. 数据记录

(1) 汞灯作为参考光源,利用测微目镜读出汞灯及氦灯各光谱对应的位置,数据记入表1.

表1 汞灯光谱标准波长的对应位置以及氦灯光谱的对应位置

汞灯	颜色	紫	紫	蓝	蓝绿	绿	黄	黄	红	
	标准波长 /nm	404.66	407.80	435.84	491.60	546.07	576.96	579.07	623.40	
	位置 /mm									
氦灯	颜色	蓝	蓝	蓝绿	蓝绿	蓝绿	蓝绿	黄	红	红
	测量波长 /nm									
	位置 /mm									

(2) 汞灯作为参考光源,利用测微目镜读出汞灯及氦灯各光谱对应的位置,数据记入表2(选做).

表2 汞灯光谱标准波长的对应位置以及氦灯光谱的对应位置

汞灯	颜色	紫	紫	蓝	蓝绿	绿	黄	黄	红
	标准波长 /nm	404.66	407.80	435.84	491.60	546.07	576.96	579.07	623.40
	位置 /mm								

续表

氢灯	颜色	紫	蓝	红					
	测量波长 /nm								
	位置 /mm								

2. 数据处理

(1) 利用表 1 汞灯的数据作出摄谱仪的定标校正曲线。

在校正曲线图上求出氢灯对应谱线的波长,将计算出的波长与表 3 中的氢灯标准波长比较并计算相对误差。

表 3 氢灯光谱的标准波长

氢灯	颜色	蓝	蓝	蓝绿	蓝绿	蓝绿	蓝绿	黄	红	红
	标准波长 /nm	438.79	447.15	471.32	492.19	501.57	504.77	587.56	667.82	706.57

(2) 利用插值法,求出氢灯对应谱线的波长,并计算相对误差(写出计算过程)。

(3) 在校正曲线图上求出氢灯对应谱线的波长,代入式(4)计算里德伯常量并用表 4 数据计算相对误差(选做)。

表 4 氢灯光谱的标准波长

氢灯	颜色	紫	蓝	红
	标准波长 /nm	434.05	486.13	656.28

七、注意事项

1. 选择聚光透镜的焦距和位置时,应注意保持透镜孔径对入射狭缝的张角和摄谱仪准直物镜的入射孔径相匹配。

2. 使用棱镜台的波长鼓轮可调整棱镜的位置,使被拍摄的光谱段位于适中的位置。

3. 使用移动显微镜测量光谱线的位置时,要注意聚焦,使十字叉丝与谱线间无视差,防止回程误差。

4. 光谱仪中的狭缝是比较精密的机械装置,实验中不要任意调节。旋转波长鼓轮时,动作一定要缓慢,禁止用手触摸透镜等光学元件。

5. 可调狭缝是光谱仪中非常重要的机械部件,它用来限制入射光束并构成光

谱的实际光源,其直接决定谱线的质量,因此要特别保护好可调狭缝.不要使刀口处于紧闭的状态,因为刀口比较锐利,相互紧闭容易产生卷边而使刀口受到损伤与破坏.因此操作狭缝鼓轮调整狭缝宽度时要细心,旋转时用力要小而均匀,而且要慢慢地旋转,千万不要急促地快转,因为狭缝部件上的零件都比较精密,弹簧力量比较小,如果猛然或快速旋转会使之受冲击力而影响狭缝的精度和寿命,这一点必须注意.

6. 光源使用的是高压电源,应特别小心.打开光源前,先将出灯窗口的位置摆放好,然后再通电源;关闭光源时,断开电源后切记不要移动灯管.

八、思考题

1. 要能在看谱目镜中看到不同波长的谱线,应如何调节?各谱线出射时的相对位置应在何处读出?
2. 测物质光谱波长时,如何定标?
3. 要使比较光谱的各个光源的位置都位于摄谱仪准直透镜的光轴上,应怎样进行调节?
4. 利用比较光谱测定光波波长的原理是什么?
5. 你知道有哪些测定光波波长的方法?你已做过的实验有哪几种?试比较它们的特点.

实验二十七 迈克耳孙干涉实验

光的干涉现象是光的波动性的一种表现. 当一束光被分成两束, 经过不同路径再相遇时, 如果光程差小于该束光的相干长度, 将会出现干涉现象. 迈克耳孙干涉仪是一种利用分割光波振幅的方法实现干涉的精密光学仪器, 其结构简单、光路直观、精度高, 其调整和使用具有典型性. 根据迈克耳孙干涉仪的基本原理发展的各种精密仪器已广泛应用于生产和科研的各个领域.

NOTE

一、实验目的

1. 了解迈克耳孙干涉仪的结构、工作原理和调节方法;
2. 观察干涉条纹, 区别等倾干涉和等厚干涉, 巩固加深对干涉理论的理解;
3. 用迈克耳孙干涉仪产生的等倾条纹测定光源的波长;
4. 用逐差法处理数据.

二、实验仪器

迈克耳孙干涉仪、激光器、扩束镜、观察屏.

三、实验原理

1. 迈克耳孙干涉仪干涉原理

迈克耳孙干涉仪的光路和结构如图 1 所示. M_1 、 M_2 是一对精密磨光的平面反射镜, M_2 的位置固定, M_1 可沿导轨前后移动. G_1 、 G_2 是材料和厚度都完全相同的一对平行玻璃板, 与 M_1 成 45° 角. G_1 称为分光板, 一面镀有半反射、半透射膜 A, 使入射到其上的光线分为光强度差不多相等的反射光和透射光; G_2 是补偿板, 起补偿光程的作用, 使光线①和②最后到达观察屏 E 处时, 通过玻璃片的次数相同.

当光照到 G_1 上时, 在半透膜上分成相互垂直的两束光: 反射光①入射到 M_1 , 经 M_1 反射后, 透过 G_1 射向观察屏 E. 透射光②入射到 M_2 , 经 M_2 反射后, 透过 G_2 , 在 G_1 的半透膜上反射后也射向观察屏 E, 两束光相遇发生干涉.

当观察者从 E 处向 G_1 看去时, 除直接看到 M_1 外, 还看到 M_2 的像 M_2' . 于是①、②两束光如同从 M_1 与 M_2' 反射来的, 因此迈克耳孙干涉仪中所产生的干涉等效于 M_1 、 M_2' 间“形成”的空气薄膜的干涉.

2. 利用等倾干涉条纹测定单色光的波长

如图 1 所示, 当 M_1 、 M_2' 互相平行时 (即 M_1 、 M_2 互相垂直), 将看到等倾圆形干涉条纹. 如图 2 所示, 入射角为 i 的光线, 经 M_1 、 M_2' 反射后的两平行光线的光程差为

$$\Delta = |AB| + |BC| - |AD| = 2d \left(\frac{1}{\cos i} - \frac{\sin^2 i}{\cos i} \right) = 2d \cos i \quad (1)$$

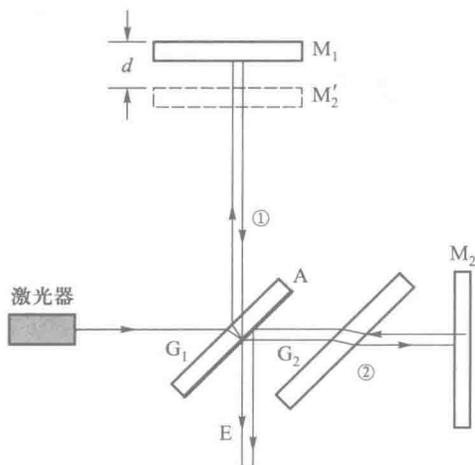


图1 迈克耳孙干涉仪光路图

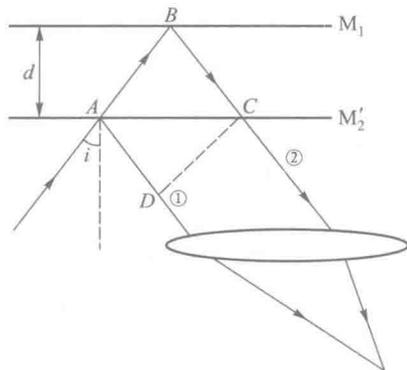


图2 相干光的光程差

可见在空气薄膜厚度 d 一定时,光程差 Δ 仅取决于入射角 i . 凡角 i 相同的光线,光程差都相等. 考虑附加光程差,对于 k 级亮条纹,则有

$$\Delta = 2d \cos i + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (2)$$

当 $i=0$ 时光程差最大,对应于圆环中心处的干涉条纹的级数 k 就最高,越往外干涉级次越低. 当移动 M_1 ,使 M_1 、 M_2' 的距离 d 逐渐增大时,对于 k 级干涉条纹, $\cos i$ 的值必定减小,故干涉条纹向 i 增大的方向移动,即环纹向外扩展. 此时我们看到条纹好像从中心一个一个向外“冒出”. 反之,当 d 逐渐减小时,条纹将向中心“缩进”.

由式(2)不难得出, d 每改变 $\frac{\lambda}{2}$,就有 1 个条纹冒出或缩进. 若有 N 个条纹冒出或缩进,则 M_1 、 M_2' 间距离 d 的改变量为

$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

实验中,若能测出 M_1 移动的距离 Δd ,数出冒出或缩进的条纹数 N ,即可由(3)式求出入射光的波长.

3. 等厚干涉条纹

如图3所示,当 M_1 和 M_2' 有一很小角度、 M_1 和 M_2' 所形成的空气劈尖很薄时,以扩展光源照明就出现等厚干涉条纹.

当 M_1 和 M_2' 交角很小时,光程差仍可近似地表示为

$$\Delta = 2d \cos i + \frac{\lambda}{2} = 2d \left(1 - 2 \sin^2 \frac{i}{2} \right) + \frac{\lambda}{2} \approx d(2 - i^2) + \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

当镜 M_1 和 M_2' 相交时,交线上 $d=0$,光程差为 $\frac{\lambda}{2}$,一般应观察到直线暗条纹(中央条纹). 在交线左右两侧附近,由于 i 很小,故 di^2 项可以忽略,于是 $\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$,在

交线左右附近,凡是 d 相等的地方,光程差相等,所以产生近似的直线条纹,且这些条纹与中央条纹平行.离中央条纹较远的地方,因 di^2 的影响增大,条纹发生明显弯曲,弯曲的方向凸向中央条纹.离交线越远, d 越大,条纹也越弯曲,如图 4 所示.

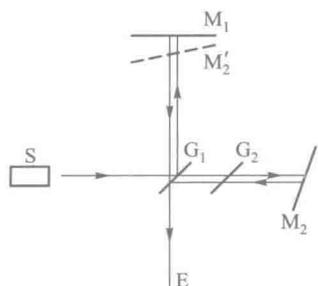


图 3 M_1 和 M_2' 之间形成的空气劈尖

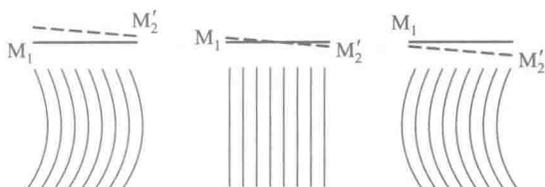


图 4 等厚干涉条纹

NOTE

四、实验装置介绍

干涉仪是根据光的干涉原理制成的.图 5 是实验室常用的迈克耳孙干涉仪.固定反射镜 5,其倾角可通过它背面的粗调螺钉 7 进行粗调,细调时可分别用 8 和 9 通过弹簧改变在水平和垂直方向上的倾角.活动反射镜 6,其倾角也是通过它背面的螺钉进行,但没有细调.活动反射镜 6 安装在一个滑块上,通过丝杆的转动使滑块沿轨道前后移动.活动反射镜 6 的移动距离,可通过导轨上的标尺(主尺)、鼓轮读数窗 11 和微动鼓轮 10 上读数的得出.

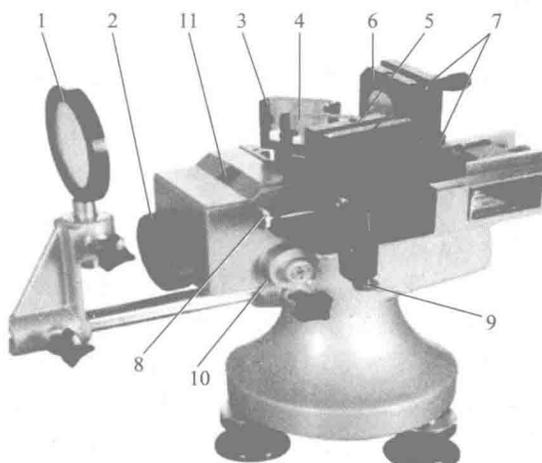


图 5 迈克耳孙干涉仪

- 1—观察屏;2—粗动鼓轮;3—分光板;4—补偿板;5—固定反射镜;6—活动反射镜;
7—粗调螺钉;8—水平微调;9—垂直微调;10—微动鼓轮;11—读数窗

五、实验内容及步骤

1. 迈克耳孙干涉仪的调节

(1) 观察仪器结构,将激光光源、迈克耳孙干涉仪按图 1 安置好。

(2) 调节激光器,使激光束水平入射到 M_1 、 M_2 反射镜中部并基本垂直于仪器导轨。方法是:目测激光管的中心轴线大致垂直于固定反射镜。打开激光器,使光束入射到分光板的中部。调节两反射镜后的螺钉,使其反射的光束返回激光发射孔,从而保证 M_1 垂直于 M_2 。

(3) 旋转粗动手轮,使活动反射镜和固定反射镜到分光板的渡膜面的距离大致相等。

(4) 从观察屏向活动反射镜望去,可以看到两排亮点。找到每排两点中最亮的一个,调节两个反射镜后面的螺钉,使两个最亮的光点重合,产生干涉现象。

(5) 在激光器和干涉仪的分光板的入射光路中放置扩束镜,在观察屏上可看到干涉圆环。通过水平微调 8 和垂直微调 9,使圆环中心移动到合适的位置。

2. 观察等倾干涉条纹,测量激光的波长

(1) 调零

先顺时针(或逆时针)转动微动鼓轮,使读数基准线对准零刻度线;然后沿同样方向转动粗动鼓轮至对齐任一刻线,此后微动鼓轮可带动粗动鼓轮一起旋转(注意两个鼓轮的旋转方向一致)。

(2) 测量

按原方向转动微动鼓轮(即改变 d 值),可以看到一个一个干涉环从环心冒出(或缩进)。当干涉环中心最亮时,记下活动镜位置读数 d_0 ,然后继续缓慢转动微动鼓轮,每当冒出(或缩进) $N=100$ 个条纹时,记下活动反射镜的位置读数 d_1 ,连续测量 10 次。

注意:测量过程中不可转动粗动鼓轮,只可单向转动微动鼓轮。读数时应依次从导轨上的标尺、读数窗和微动鼓轮上一级一级往下读。

(3) 由式(3)计算波长

用逐差法处理数据。

3. 观察等厚干涉条纹(选做)

(1) 调出激光的圆形干涉条纹。方法同“1. 迈克耳孙干涉仪的调节”。

(2) 沿逆时针方向缓慢旋转粗调鼓轮,使 M_1 和 M_2' 的距离逐渐减小。这时可以看到条纹的缩进现象。当条纹变成等轴双曲线时,说明 M_1 和 M_2' 已十分接近了(这时主尺标线约在 35 mm 处)。然后稍微旋转 M_2 的水平微调 8,使 M_1 、 M_2' 形成很小的夹角。再沿同方向旋转微调鼓轮,使条纹逐渐变直,这表明中央条纹正在逐渐向视场中央移动(当条纹变直时,主尺标线约在 35 mm 处)。继续沿同一方向旋转微调鼓轮,可看到条纹反方向弯曲,此时可看到等厚干涉条纹,如图 4 所示。

六、数据记录及数据处理

测量激光的波长

测量次数	d_i/mm	d_{i+5}/mm	$\Delta d_i = d_{i+5} - d_i /\text{mm}$	$\overline{\Delta d} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta d_i/\text{mm}$
1				
2				
3				
4				
5				

$$\overline{\lambda} = 2 \frac{\overline{\Delta d}}{N'} \quad (\text{注意: 此处取 } N' = 500)$$

Δd 的不确定度:

$$U_A(\Delta d) = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S(\Delta d), \quad U_B(\Delta d) = \sqrt{2} \Delta_1(d_i)$$

其中 $\Delta_1(d_i) = 0.00005 \text{ mm}$.

$$U(\Delta d) = \sqrt{U_A^2(\Delta d) + U_B^2(\Delta d)}$$

$$\lambda \text{ 的不确定度: } U(\lambda) = \frac{2}{N'} U(\Delta d)$$

测量结果: $\lambda = \overline{\lambda} \pm U(\lambda)$

$$\text{相对误差: } E_r = \frac{|\overline{\lambda} - \lambda_0|}{\lambda_0} \times 100\% \quad (\text{标准值 } \lambda_0 = 650 \text{ nm})$$

七、注意事项

1. 调节螺钉和转动鼓轮时,动作要轻、慢,不可强扭硬扳.
2. 切勿用手触摸光学表面.
3. 测量前应先调整零点,测量过程中,转动鼓轮只能缓慢地沿一个方向转动,防止引起空程误差.
4. 不要让激光直射眼睛.

八、思考题

1. 分束板的镀膜层透过率要求约在 50%,为什么? 如不符此要求将对干涉条纹的观察产生什么影响?
2. 如果去掉干涉仪中的补偿板,对哪些测量有影响? 哪些测量无影响?
3. 在什么条件下产生等倾干涉条纹? 什么条件下产生等厚干涉条纹? 迈克耳孙干涉仪产生的等倾干涉条纹与牛顿环有何不同?
4. 迈克耳孙干涉仪的调整要点是什么?
5. 当干涉条纹从中央冒出时, M_1 与 M_2' 是相互接近还是相互远离? 为什么?

实验二十八 双棱镜干涉法测量光波波长

如果两列频率相同的光波沿着几乎相同的方向传播,并且它们的相位差不随时间而变化,那么在两列光波相交的区域,光强分布是不均匀的,而是在某些地方表现为加强,在另一些地方表现为减弱(甚至可能为零),这种现象称为光的干涉.法国土木工程师、物理学家、波动光学的奠基人之一菲涅耳(Augustin Jean Fresnel, 1788—1827)于1826年进行的双棱镜实验证明了光的干涉现象的存在,他借助光的衍射而形成分波阵面干涉,用毫米级的测量得到纳米级的精度.

分波阵面法是将点光源的波阵面分割为两部分,使之分别通过两个光具组,经反射、折射或衍射后交叠起来,在一定区域形成干涉.由于波阵面上任一部分都可看作新光源,而且同一波阵面的各个部分有相同的相位,所以这些被分离出来的部分波阵面可作为初相位相同的光源,不论点光源的位相改变得如何快,这些光源的初相位差却是恒定的.

双棱镜干涉实验包含很多波动光学和几何光学等方面的知识与技能,而双棱镜干涉光场相当复杂,需要深入研讨其中涉及的理论、技术和仪器,指导学生更好地理解双棱镜分波前双光束干涉的原理和进行实验设计与操作,获得适于观察和测量的干涉条纹并测算出光波长,更好地促进学生的实验能力的提高和科学素质的培养.

一、实验目的

1. 熟悉干涉装置的光路调节技术,深刻理解多元件等高共轴调节的重要性,掌握有关调节方法;
2. 利用双棱镜掌握分波阵面实现双光束干涉的方法,观察干涉图样的特点,进一步加深对干涉的理解;
3. 熟悉测微目镜的使用与测量方法,学会用测微目镜测量微小长度.

二、实验仪器

光学导轨实验台及光学配件(双棱镜、测微目镜、钠光源、激光光源可调狭缝等).

三、实验原理

1. 利用干涉条纹计算单色光的波长

狭缝光源 S 发射的光束,经双棱镜折射后变为两束相干光,在它们的重叠区内,将产生干涉,形成明暗相间的干涉条纹,这两束相干光可认为是由实际光源 S 的两个虚像 S_1 、 S_2 发出的,称 S_1 、 S_2 为虚光源,如图 1 所示.

干涉条纹以 O 点为对称点上下展开,用不同的单色光源做实验时,各亮条纹的间距也不同,波长越短的单色光,条纹越密;波长越长的单色光,条纹越疏.如果用

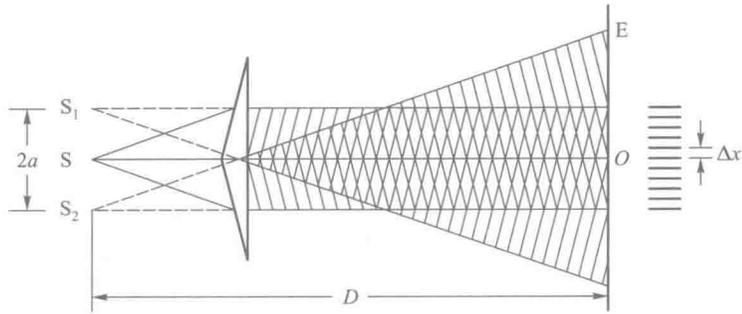


图1 双棱镜产生的相干光束示意图

白色光做实验,则只有中央亮条纹是白色的,其余条纹在中央白条纹两边,形成由紫到红的彩色条纹.

利用干涉条纹可测出单色光的波长,单色光的波长 λ 由下式决定:

$$\lambda = \frac{d}{D} \Delta x \quad (1)$$

式中 $d=2a$ 为两个虚光源 S_1 、 S_2 之间的距离, Δx 为干涉条纹间距, D 为虚光源到观察屏的距离. 用测微目镜的分划板作为观察屏,就可直接从该测微目镜中读出条纹间距 Δx 值, D 为几十厘米,可直接量出,因而只要设法测出 d ,即可由式(1)算出光的波长 λ .

2. 测量两虚光源间的距离

(1) 二次成像法

两虚光源之间的距离 d 需借助透镜将两条虚光源成像在测微目镜叉丝板上进行测量,即在双棱镜与测微目镜之间加入一个焦距为 f 的凸透镜 L ,当 $D > 4f$ 时,可移动 L 而在测微目镜中看到两虚光源的缩小像或放大像,如图2所示. 用测微目镜分别测量在这两次成像时像面上的两条亮线的距离 d_1 和 d_2 (两虚光源像的距离),则可求出两虚光源之间的距离为

$$d = \sqrt{d_1 d_2} \quad (2)$$

式中 d_1 为虚光源两放大像之间的距离, d_2 为虚光源两缩小像之间的距离.

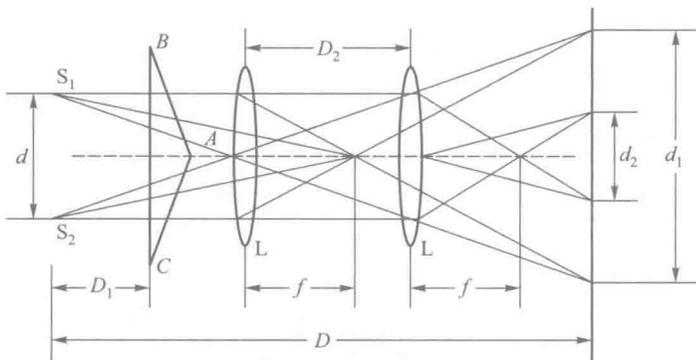


图2 二次成像法光路示意图

(2) 物距像距法

在双棱镜与目镜间加上凸透镜,调节透镜高度,并前后移动透镜,在目镜中看到二虚光源 S_1 、 S_2 的像 S'_1 、 S'_2 。将目镜叉丝先后对准 S'_1 和 S'_2 ,测出其间之距离为 d' ,如图 3 所示。然后根据透镜成像公式,即可求得二虚光源的距离 d 为

$$d = \frac{p}{p'} d' \quad (3)$$

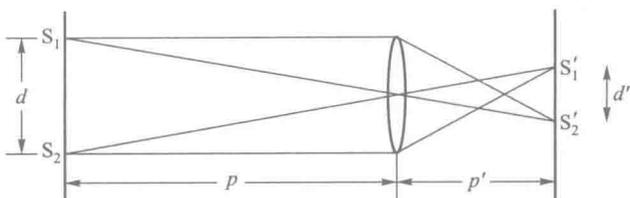


图 3 物距像距法光路示意图

式中 p 为物距(狭缝到透镜距离), p' 为像距(透镜到测微目镜分划板距离)。 p 和 p' 可从光具座上测出,注意修正狭缝和测微目镜的附加距离。

四、实验装置介绍

1. 仪器结构

(1) 实验装置如图 4 所示。

- ① 导轨(长 0.8 m,分度值 1 mm),滑块 5 个。
- ② 配有半导体激光和钠光两种单色光源。半导体激光经大幅度降低光强处理,用其作光源具有相干性好且不伤害眼睛的优点,可很方便调出清晰干涉条纹。也为钠光干涉条纹调节带来方便,可以测量两种光的波长并进行比较。
- ③ 带转盘的狭缝,缝宽可调。
- ④ 双棱镜及支架各 1 个。
- ⑤ 凸透镜 1 个。
- ⑥ 测微目镜和支架。

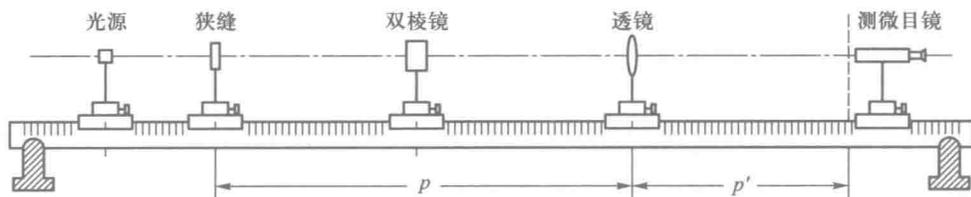


图 4 双棱镜干涉实验示意图

(2) 测微目镜是用来测量微小实像线度的仪器,其结构如图 5(a)所示。在目镜焦平面附近,有一块量程为 8 mm 的刻线玻璃标尺,其分度值为 1 mm,如图 5(b)中的 8 条短线所示。在该尺后 0.1 mm 处,平行地放置了一块分划板,分划板由薄玻

璃片制成,其上刻有十字准线和一对双线,人眼贴近目镜筒观察时,可同时看到这块分划板和玻璃标尺的刻线,如图 5(b)所示.分划板的框架与读数鼓轮相连,当读数鼓轮旋转时,分划板会左右移动;鼓轮每转一圈(100 小格),分划板移动 1 mm (即每小格 0.01 mm).测量微小实像时,先调节目镜与分划板间的距离,使能清晰地观察到分划板上的准线;然后调节测微目镜与待测实像的距离使实像也清晰并与准线无视差;接着旋转鼓轮使准线对准待测像的一边,读下此时玻璃标尺的读数和鼓轮读数;再旋转鼓轮使准线对准待测像的另一边,读下玻璃标尺的读数和鼓轮读数;最后把前后两次读数相减,即得待测像的长度.测微目镜不确定度为 0.004 mm,测量时应注意鼓轮必须沿同一方向旋转,中途不要倒退,以避免螺距误差.

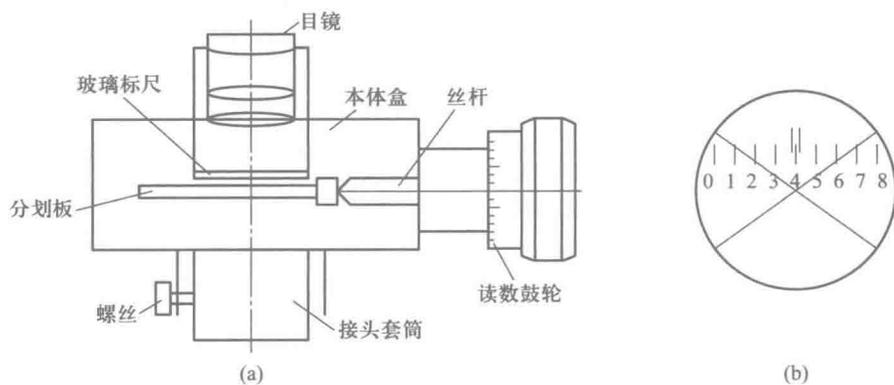


图 5 测微目镜结构示意图

(3) 双棱镜是一个分割波前的分束器,形状如图 6 所示,其端面与棱脊垂直,楔角很小(一般为 $37'$ 或 $40'$),从外表看,就像一块平行的玻璃板.

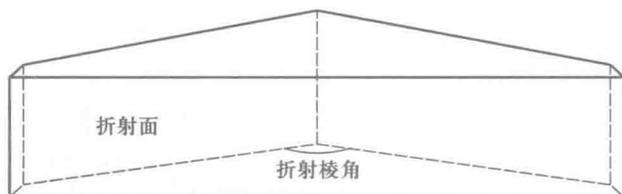


图 6 双棱镜示意图

2. 仪器主要器件的技术参数

- (1) 半导体激光和钠光两者波长分别为 650.0 nm 和 589.3 nm.
- (2) 凸透镜焦距 f 约为 10 cm.
- (3) 测微目镜量程 0 ~ 8 mm,分度值 0.01 mm.

五、实验内容及步骤

1. 双棱镜干涉装置的共轴调节与干涉现象的观察

为了获得清晰的干涉条纹,保证测量准确度,实验装置的调节必须达到下述

状态:

(1) 光具座上各元件等高共轴.

① 点亮光源,先将狭缝稍放大点,光具座上只放光源、狭缝、透镜,观察屏放在测微目镜的位置.调节光源和狭缝的位置,使半导体激光器或钠光灯对准并均匀照亮狭缝(半导体激光器端口经工艺处理,出射的是柱形光斑,应使光斑中心对准狭缝)使狭缝靠近光源,调节二者中心等高.调狭缝中心与透镜的主光轴共轴,并使主光轴平行于导轨.再放入双棱镜,并调节左右高低,使屏上出现两个强度相同、等高并列的虚光源的像.最后用测微目镜代替观察屏,调节测微目镜,使两个虚光源的像位于测微目镜中心.

② 光具座上放置凸透镜和白屏,使屏与狭缝的距离略大于 $4f$.移动透镜,在屏上二次成像,调节透镜高低及左右位置,使狭缝中心与透镜主光轴共轴,并使主光轴平行于光具座.此时狭缝的大、小像均位于白屏的中心位置.

(2) 狭缝平行于双棱镜的棱脊.

① 靠近狭缝放上双棱镜,并使棱脊位于光轴上,微调狭缝的方位,使狭缝与棱脊平行,移动透镜,在屏上可见两条强度相同、等高并列的狭缝像.

② 取下白屏,放上测微目镜,并使它与透镜等高共轴,移动透镜,可依次见到大像和小像.再取下透镜,则应在测微目镜中看到干涉条纹.若此时看不清条纹,但可见一明亮的红光带(或黄光带),则是双棱镜棱脊未与狭缝平行.可以先使测微目镜距双棱镜近一些,微调狭缝方向和左右位置边观察干涉条纹,直到调出清晰等距的干涉条纹后,再把测微目镜移到原先位置.

③ 调节狭缝、双棱镜及测微目镜的相对位置,使目镜视野中至少能够看清 15 条以上的干涉条纹(条纹宽度不能过窄).将双棱镜和测微目镜锁紧(在后期的整个测量过程中,都不能移动双棱镜的位置),将目镜叉丝对准所选定的某条暗纹的一侧,从镜里的标尺及旋钮上记下读数 x_1 ,再转动旋钮,使叉丝经 10 条暗纹的同侧,记下读数 x_2 ,由下式即可求得 Δx ,如图 7 所示,有

$$\Delta x = \frac{|x_1 - x_2|}{10} \quad (4)$$

2. 测量单色光波长

(1) 用测微目镜测量干涉条纹间距 Δx .依次测出第 1 至第 5 和第 11 至第 15 每条条纹的位置(依据实验情况或要求等可作适当改变),用逐差法处理数据,求出 $\overline{\Delta x}$.

(2) 双棱镜的楔角小于 1° ,可近似认为虚光源与狭缝在同一平面,测量过程中,我们是用测微目镜进行观察的,因此 D 实际上应该为狭缝到测微目镜分划板的距离.由于狭缝所在平面与光具座滑座的中心不重合,并且测微目镜分划板平面也不与光具座滑座的中心重合,因此必须进行修正,如图 8 所示,有

$$D = |Y_s - Y_e| + \Delta s + \Delta e \quad (5)$$

式中 Y_s 为狭缝滑座中心的位置, Y_e 为测微目镜滑座中心的位置, Δs 为狭缝到滑座

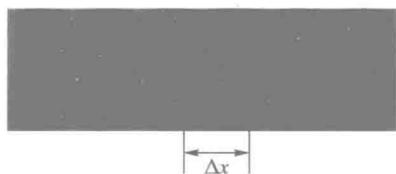


图 7 干涉条纹的宽度

中心的距离, Δe 为测微目镜分划板到滑座中心的距离.

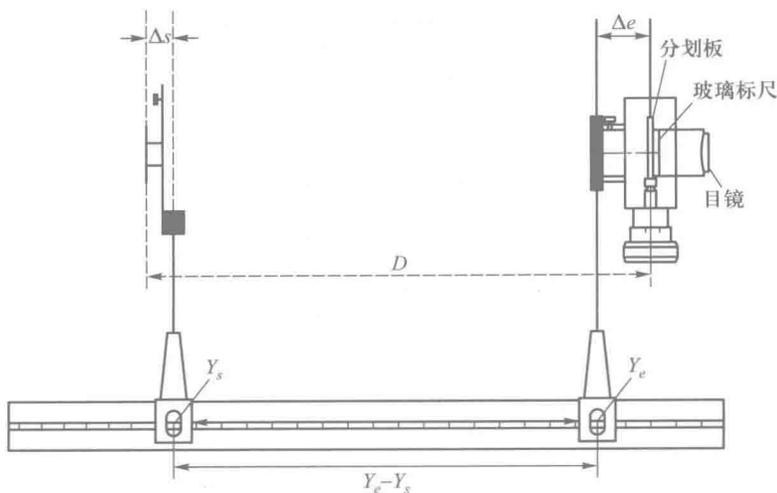


图 8 狭缝到观察屏的修正距离

(3) 测量两虚光源的间距 d . 将测微目镜取下, 插入光屏, 移动光屏使狭缝到光屏的距离大于辅助透镜焦距的 4 倍, 固定光屏. 将凸透镜置于双棱镜与光屏之间, 移动透镜, 在光屏上可有两次呈像, 此时可利用二次成像法测虚光源的间距. 测量之前要利用“小像追大像”法再次调共轴. 而若光具座较短或透镜焦距过小, 此时虚光源经透镜只能成一次像, 此时只能用物距像距法测虚两光源的间距 (两虚光源的像, 应为两条亮度相同的平行线). 放入透镜并移动透镜, 可在测微目镜叉丝平面上分别观察到大像和小像, 依次测量大像和小像的像宽, 重复测量五次, 得到 $\overline{d_1}$ 和 $\overline{d_2}$ (测量时可在透镜上加小孔光阑以提高成像质量), 代入公式(2)可得 d 值.

(4) 将 $\overline{\Delta x}$ 、 D 和 d 代入公式(1)中, 即可求得光源的波长.

六、数据记录及数据处理

1. 数据记录

(1) (半导体激光)干涉条纹间距测量数据记录于表 1 中.

表 1 单组测量条纹间距数 $n=10$

条纹序号	1	2	3	4	5
条纹位置 x_i/mm					
条纹序号	$1+n$	$2+n$	$3+n$	$4+n$	$5+n$
条纹位置 x_{i+n}/mm					
$(x_{i+n} - x_i)/\text{mm}$					
条纹间距 $\Delta x_i/\text{mm}$					
	$\overline{\Delta x_i} =$ mm				

(2) 狭缝平面与测微目镜叉丝面之间的距离 D 测量数据记录于表 2 中.

表 2 $\Delta s=0.00 \text{ mm}, \Delta e=35.00 \text{ mm}$

狭缝座位置 Y_s/mm	目镜座位置 Y_e/mm	狭缝面相对座 中心偏移 $\Delta s/\text{mm}$	叉丝面相对座 中心偏移 $\Delta e/\text{mm}$	$D(= Y_e-Y_s +\Delta s+\Delta e)$ /mm
		0.00	35.00	

NOTE

(3) 两次成像法测两虚光源的间距 d 数据记录于表 3 中.

表 3 放大及缩小像间距测量

测量对象 第 i 次	放大像间距 d_1 测量					测量对象 第 i 次	缩小像间距 d_2 测量				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
左像位置 x_{l_i}/mm						左像位置 x_{l_i}/mm					
右像位置 x_{r_i}/mm						右像位置 x_{r_i}/mm					
$d_{1i}(= x_{l_i}-x_{r_i})/\text{mm}$						$d_{2i}(= x_{l_i}-x_{r_i})/\text{mm}$					
$\bar{d}_1 =$	mm					$\bar{d}_2 =$	mm				
$\bar{d} = \sqrt{\bar{d}_1 \bar{d}_2} =$						mm					

2. 数据处理

将 $\bar{\Delta x}$ 、 D 和 d 代入公式(1)中,即可求得光源(半导体激光)的波长,与理论值比较并计算相对误差.

$$E_r = \left| \frac{\lambda_{\text{实验}} - \lambda_{\text{理论}}}{\lambda_{\text{理论}}} \right| \times 100\% = \frac{\lambda_{\text{实验}} - \lambda_{\text{理论}}}{\lambda_{\text{理论}}} \times 100\%$$

七、注意事项

1. 严格进行共轴调节,该实验对共轴性要求非常严格,调节时可用白屏在外观察双缝所产生的光束亮度是否均匀,狭缝宽度必须适当.

2. 测微目镜读数时,读数鼓轮必须顺着同一个方向旋转,动作要平稳、缓慢,以免产生回程误差.

3. 测量虚光源到测微目镜的距离时要注意修正.

4. 尽可能把激光输出强度调到最低;除了在测微目镜中观察干涉条纹或大、小像外,眼睛不要直视半导体激光器发出的激光,寻找干涉光带或大小像,可借助于白屏,且小像不宜太小.

5. 由于透镜座滑槽较宽,移动透镜时,应始终贴住光具座的一侧,以保证透镜光心位置横向不变.

6. 测量前应先消除视差.仔细调节测微目镜,应使干涉条纹或大、小像成像在测微目镜叉丝平面上,与叉丝平面的刻度线无视差.

7. 测量中如果测量标记线到达零刻度处,应立即返回,以免损坏测微目镜.

8. 不能用手指触摸光学透镜和棱镜,以免灰或汗水将光学元件玷污.

八、思考题

1. 为什么狭缝宽度较大时干涉条纹消失?
2. 为什么狭缝方向必须与双棱镜的棱边平行才能看到干涉条纹?
3. 试分析双棱镜棱脊的方向对实验测量是否有影响,光源照射到双棱镜的正面与光源照射到双棱镜的反面所得干涉条纹有何区别,对测量有何影响?
4. 若要求光波波长测量误差在 1% 左右,请考虑测量 x 、 d 、 D 时各量允许误差的分配方案.

实验二十九 偏振光实验

光的偏振现象证实了光的横波性质.如今光的偏振在高科技领域如光信息处理、光通信、光调制、光电子器件、应力分析等方面的应用日趋广泛.

NOTE

一、实验目的

1. 观察光的偏振现象,加深对偏振光的理解;
2. 了解偏振光的产生和检验方法,验证马吕斯定律;
3. 理解旋光现象的物理本质,测定蔗糖溶液的旋光率;
4. 了解波片的作用,观测椭圆偏振光和圆偏振光.

二、实验仪器

LB-PL 偏振光实验仪,配套仪器有:

1. 半导体激光光源 1 个(波长 650 nm);
2. 光具座 1 个(导轨长 0.8 m),移动座 6 只;
3. 转盘式带度盘偏振片 2 个;
4. 转盘式带度盘 $1/4$ 波片 1 个;
5. 转盘式带度盘 $1/2$ 波片 1 个;
6. 接收屏 1 个;
7. 数字式光功率计 1 个,光电探头(带 MT 数字检流计)1 个;
8. 蔗糖溶液管(带底座,管长 1.50 dm)2 支.

三、实验原理

1. 光的偏振性

光是一种电磁波,通常把电矢量 E 称为光波的振动矢量,即光矢量, E 与传播方向垂直.根据光矢量的不同振动状态,通常把光分为 5 种:自然光(非偏振光)、部分偏振光、线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光.自然光各方向 E 的振幅都相等,振动方向在垂直于光的传播方向的平面内可取所有可能的方向,没有一个方向占优势.线偏振光在垂直于传播方向的平面内,光矢量只沿一固定方向振动,其投影为一条直线.部分偏振光可看成自然光和线偏振光混合而成,即某个方向的振幅占优势,且各方向的振动无固定的位相关系.圆偏振光和椭圆偏振光的光矢量绕着传播方向旋转,其末端在垂直于光传播方向的平面上的轨迹分别是圆和椭圆.

2. 线偏振光的产生(起偏方法)

(1) 偏振片起偏

分子型偏振片是利用聚乙烯醇塑胶膜制成,具有梳状长链形结构的分子,这些分子平行地排列在同一方向上.这种胶膜只允许垂直于分子排列方向的光振动通

过,因而产生线偏振光(如图1所示),是常用的起偏元件.

偏振片既可以使自然光变成线偏振光——起偏,也可以用来鉴别自然光、线偏振光和部分偏振光——检偏.用作起偏的偏振片叫起偏器,用作检偏的偏振片叫检偏器.事实上,起偏器和检偏器是通用的.使待测光垂直照在检偏器上,观察投射光的光强变化(如图2所示).旋转检偏器,若透射光光强不变,表示入射光为自然光;若透射光光强变化,但无全暗位置(无消光),表示入射光为部分偏振光;若有全暗位置(有消光),表示入射光为线偏振光.

NOTE

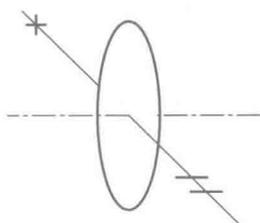


图1 偏振片的起偏

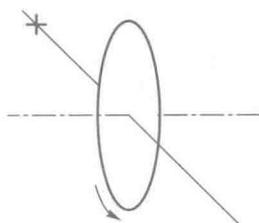


图2 偏振片的检偏

(2) 非金属表面的反射起偏

当光入射到两种介质的交界面时,反射光和折射光都将成为部分偏振光,偏振的程度取决于光的入射角 i 及反射物质的性质(如介质的折射率 n_1, n_2),当 $i = i_b$, 且满足

$$\tan i_b = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

时,反射光为线偏振光,且振动方向与入射面垂直,如图3所示.式(1)称为布儒斯特定律,该入射角 i_b 叫布儒斯特角或起偏角.

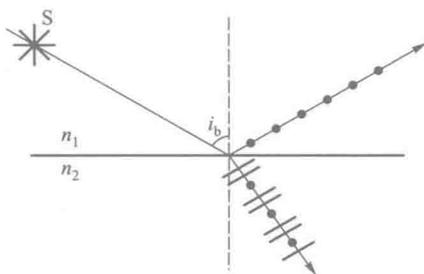


图3 布儒斯特定律示意图

(3) 晶体双折射起偏

当光束通过各向异性的晶体时,会产生两束折射光,称为双折射,这两束光都是线偏振光,具有相同的振动频率,但振动方向和在晶体中的传播速度不同.

3. 马吕斯定律

强度为 I_0 的线偏振光通过检偏器后的光强 I 为

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2)$$

式中 θ 为线偏振光偏振方向与检偏器透振方向的夹角,式(2)为马吕斯(Malus)定律.可见,改变角度 θ 可以改变透过检偏器的光的强度.

由式(2)可知,当 $\theta = 0, \pi$, 即入射和出射光振动方向平行时,出射光强 I 最大;当 $\theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$, 即入射和出射光振动方向垂直时, $I = 0$, 出射光“消光”.

4. 旋光现象

当线偏振光通过某些透明物质的溶液或晶体后,其振动面将以光的传播方向

为轴旋转一定的角度,这种现象称为旋光现象,旋转的角度 φ 称为该物质的旋光度或旋转角,如图 4 所示.能使偏振光振动面旋转的物质称为旋光物质,如蔗糖溶液、石英晶体等.旋光物质有左旋和右旋之分.当面对光线观察,若振动面顺时针方向旋转,则为右旋物质,反之为左旋物质.

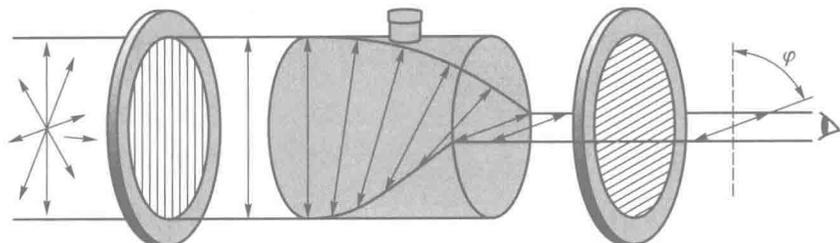


图 4 旋光现象

当入射光波长 λ 一定时,对旋光溶液有

$$\varphi = \alpha Cl \quad (3)$$

式中 φ 为旋光度,单位为度($^{\circ}$); C 为溶液浓度,单位为 g/ml ; l 为光在溶液中经过的长度,单位为 dm , α 表征了物质的旋光能力,称为旋光率,它与旋光物质的性质、入射光波长、旋光溶液的温度有关.旋光率用下式表示:

$$[\alpha]_{\lambda}^t = \frac{\varphi}{Cl} \quad (4)$$

(4)式中, $[\alpha]_{\lambda}^t$ 右上角的 t 表示实验时的温度(单位: $^{\circ}\text{C}$).

如果已知待测溶液浓度 C 和液柱长度 l ,只要测出旋光度 φ 就可以计算出旋光率.同样,也可以测量旋光性溶液的旋光度 φ ,确定溶液的浓度 C .

此外,旋光物质还具有旋光色散现象.在相同条件下不同波长的光偏振面旋转的角度不同,旋转角度大致与波长的平方成反比.

5. 波片与圆偏振光和椭圆偏振光的产生(选做)

波片是用来改变或检验光的偏振情况的晶体薄片,一般采用优质的石英、云母等矿物双折射晶体,沿光轴方向切割而成.

线偏振光垂直于入射晶体薄片,如果光轴平行于晶片的表面,会产生比较特殊的双折射现象.这时非常光(e 光)和寻常光(o 光)的传播方向一致,但速度不同,因而从晶片出射时会产生相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_o - n_e)d \quad (5)$$

式中 λ_0 表示单色光在真空中的波长, n_o 和 n_e 分别为晶体中 o 光和 e 光的折射率, d 为晶片厚度.

(1) 如果晶片的厚度使产生的相位差 $\Delta\varphi = \frac{1}{2}(2k+1)\pi, k=0, 1, 2, \dots$, 这样的晶片称为 $1/4$ 波片,其最小厚度为 $d_{\min} = \frac{\lambda_0}{4(n_o - n_e)}$. 线偏振光通过 $1/4$ 波片后,透射

光一般是椭圆偏振光;当入射线偏振光的振动方向与波片光轴的夹角 $\theta = \pi/4$ 时,则为圆偏振光;当 $\theta = 0$ 或 $\pi/2$ 时,椭圆偏振光退化为线偏振光.由此可知,1/4 波片可将线偏振光变成椭圆偏振光或圆偏振光;反之,它也可将椭圆偏振光或圆偏振光变成线偏振光.

(2) 如果晶片的厚度使产生的相差 $\Delta\varphi = (2k+1)\pi, k=0,1,2,\dots$, 这样的晶片称为半波片,其最小厚度为 $d_{\min} = \frac{\lambda_0}{2(n_o - n_e)}$. 若入射线偏振光的振动面与半波片光轴的交角为 θ , 则通过半波片后的光仍为线偏振光,但其振动面相对于入射光的振动面转过 2θ 角.

(3) 如果晶片的厚度使产生的相差 $\delta = 2k\pi, k=1,2,3,\dots$, 这样的晶片称为全波片,其最小厚度为 $d_{\min} = \frac{\lambda_0}{n_o - n_e}$. 从该波片透射的光为线偏振光.

因为椭圆偏振光和圆偏振光经 1/4 波片都能成为线偏振光,而自然光和部分偏振光则不能,所以用 1/4 波片与检偏器配合,可区分自然光与圆偏振光、部分偏振光与椭圆偏振光,也可用来区分椭圆偏振光与圆偏振光.

四、实验内容及步骤

1. 观察起偏和消光现象

(1) 按图 5 布置好实验装置,此时偏振片 P_2 和波片 C 暂时不要安放. 本实验采用激光光源,即波长为 650 nm 的半导体激光器,它发出的是部分偏振光,在它的前面加上一块偏振片 P_1 ,只要用接收屏接收,在沿一个方向转动偏振片 P_1 时,就能观察到偏振光强度的强弱变化.当获得的偏振光强度最强时,此方向就是偏振片的偏振化方向与激光最强的偏振轴方向一致的方向.此时如果使用光电式数字检流计接收,读数最大.

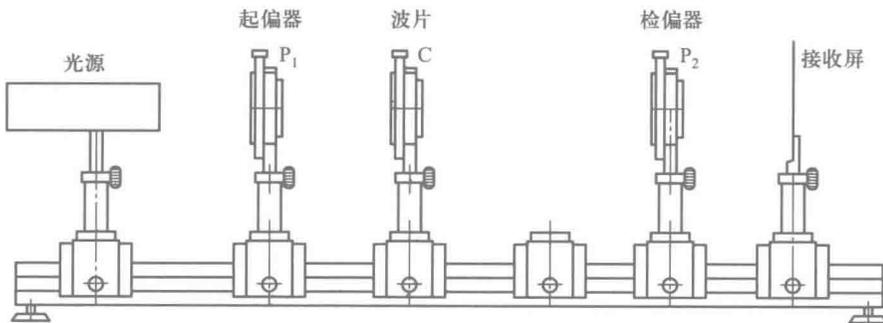


图 5 实验装置图

(2) 观察起偏现象.将激光投射到接收屏上(注意使光斑照在接收屏的中心位置),在光源至接收屏的光路上插入第一个偏振片(起偏器) P_1 ,在垂直于光束的平面内,沿同一方向旋转 P_1 ,观察接收屏上光斑的变化情况,把实验现象记录在表 1 中,体会激光束的偏振情况.

(3) 观察消光现象. 在起偏器 P_1 和接收屏之间再插入第二个偏振片(检偏器) P_2 , 固定 P_1 的方位, 使 P_2 旋转 360° , 观察接收屏上光斑的变化情况, 观察消光次数, 并在表 1 中作记录.

2. 验证马吕斯定律

(1) 在上述实验的基础上, 以光电池代替接收屏, 以接收 P_2 出射的光束. 注意: 光源、起偏器 P_1 、检偏器 P_2 和光电池应在同一水平线上.

(2) 旋转 P_2 至光电流最大, 记录此时 P_2 的位置, 并作为起始位置, 此时 $\theta = 0^\circ$, 记录相应的光电流值 I_0 ; 再旋转 P_2 , 每隔 10° 记录一次光电流值 I 于表 2 中. 在坐标纸上作出相对光强 $I/I_0 - \cos^2 \theta$ 关系曲线.

3. 测量蔗糖溶液的旋光率

(1) 实验装置如图 6 所示, 在安装蔗糖溶液管之前先用光电池探头检测光强, 并转动检偏器 P_2 到完全消光. 记下此时 P_2 的读数 φ'_0 于表 3 中. 注意: 如果做不到完全消光, 则只要数字检流计的读数在最小值即可.

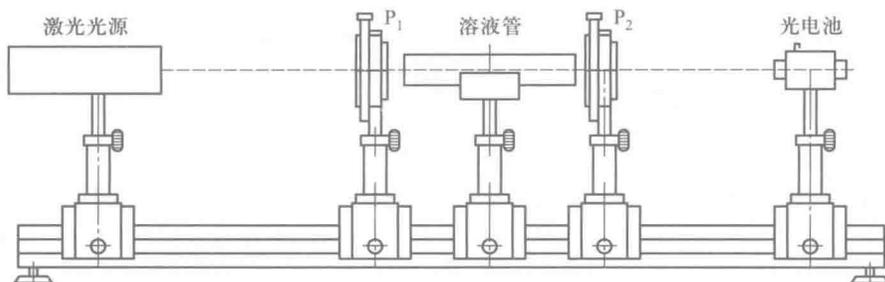


图 6 测定旋光率的实验装置图

(2) 摇晃溶液管使浓度均匀, 然后将其安装在托架上静置片刻, 并调节至与激光同轴, 使激光穿过蔗糖溶液管. 此时的数字检流计便出现了读数增加, 表示已经出现了旋光效应. 注意: 两个偏振器应紧靠试管的两端面.

(3) 再次转动检偏器 P_2 , 注意旋转的方向并确定该溶液是右旋还是左旋, 直到光强数值再次达到最小, 记下检偏器 P_2 的角度值(即消光位置读数 φ'_1).

(4) 保持 P_1 不动, 将 P_2 转回到消光位置 φ'_0 , 然后轻微缓慢转动检偏器 P_2 到再次出现消光, 立即停止, 记下 P_2 的角度值 φ'_2 .

(5) 反复测试 3 次, 记录于表 3 中. 计算出它们的平均值 $\overline{\varphi}'_{\text{消光}}$, 按公式 $\alpha = \frac{\varphi}{Cl}$ 求出近似旋光率. 其中 $\varphi = \overline{\varphi}'_{\text{消光}} - \varphi'_0$.

(6) 用已求出的近似旋光度, 完成表 4 的测量, 以确定未知浓度的蔗糖溶液的近似浓度.

4. 观察圆偏振光和椭圆偏振光(选做)

(1) 按图 5 布置好实验装置, 此时先不要安放波片 C, 使光束经过偏振片 P_1 、 P_2 的中心区域. 先转动检偏器 P_2 , 使出现消光现象. 然后在 P_1 和 P_2 之间插入 $1/4$ 波片 C_1 (注意: 入射光要垂直于波片), 转动波片 C_1 , 使接收屏仍处于消光状态. 再

使 C_1 从消光位置转过 45° , 然后将 P_2 转动 360° , 发现光强不变, 此时从 C_1 出来的光为圆偏振光; 再使 $1/4$ 波片 C_1 从消光位置转过 15° , 然后再使 P_2 转动 360° , 就会发现光强有强弱变化, 说明来自 C_1 的光是椭圆偏振光.

(2) 将 $1/4$ 波片换为 $1/2$ 波片 C_2 , 然后再使 P_2 转动 360° , 观察光强变化和消光情况, 总结 $1/2$ 波片的作用——线偏振光透过半波片后仍为线偏振光.

五、数据记录及数据处理

1. 观察起偏和消光现象

表 1 起偏和消光

	光强是否变化	转动一周出现消光的次数
起偏: 转动 P_1		
消光: 转动 P_2		

2. 验证马吕斯定律

表 2 马吕斯定律

P_2 的起始位置: \quad° , $I_0 = \quad \mu\text{A}$

角度 θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$\cos^2 \theta$	1.000	0.970	0.883	0.750	0.587	0.413	0.250	0.117	0.030	0
光电流 $I/\mu\text{A}$										
I/I_0										

在坐标纸上作出 $I/I_0 - \cos^2 \theta$ 的关系曲线, 并加以讨论.

3. 测量蔗糖溶液的旋光率及未知溶液浓度

表 3 由浓度已知的蔗糖溶液确定旋光率

已知浓度 $C = \quad \text{g/ml}$, 偏振片 P_2 的初始读数 $\varphi'_0: \quad^\circ$				
P_2 的消光位置 读数/ $^\circ$	φ'_1	φ'_2	φ'_3	$\bar{\varphi}'_{\text{消光}}$ (平均值)

计算旋光率 $\alpha = \frac{\varphi}{Cl}$, 其中 $\varphi = |\bar{\varphi}'_{\text{消光}} - \varphi'_0|$, $l = 1.50 \text{ dm}$ (溶液管的长度).

表 4 由近似旋光率求浓度未知的蔗糖溶液的近似浓度

近似旋光率 $\alpha = \quad$, 偏振片 P_2 的初始读数 $\varphi'_0: \quad^\circ$				
P_2 的消光位置 读数/ $^\circ$	φ'_1	φ'_2	φ'_3	$\bar{\varphi}'_{\text{消光}}$ (平均值)

计算近似浓度 $C = \frac{\varphi}{\alpha l}$. 其中旋光度 $\varphi = |\bar{\varphi}'_{\text{消光}} - \varphi'_0|$, $l = 1.50 \text{ dm}$ (溶液管的长度).

六、注意事项

1. 半导体激光器功率较强,不要用眼睛直接观察激光,以免损伤眼睛.
2. 半导体激光器不可直接射入至探测器上,以免损坏探测器.
3. 测量时要使偏振系统的出射光射入探测器的中间部位.
4. 做旋光率测量时,由于该蔗糖溶液浓度是不饱和状态,在长时间不用后浓度分布变的不均匀.因此在实验前要摇晃试管,使浓度分布变均匀,并静置一会儿,让气泡减少.
5. 环境温度对溶液的浓度有影响,因此不同季节,温度差异很大,应更换溶液.

七、思考题

1. 分析误差产生的原因.
2. 如果用自然光通过波片,出射光还是自然光吗?为什么?
3. 实验时为什么必须使入射光与波片垂直?
4. 如何区别圆偏振光和椭圆偏振光?

实验三十 微波光学实验

微波是一种特定波段的电磁波,其波长范围大约为 $1\text{ mm} \sim 1\text{ m}$. 与普通电磁波一样,微波也存在反射、折射、干涉、衍射和偏振等现象. 但因为其波长、频率和能量具有特殊的量值,微波表现出一系列不同于光波的特点. 微波的波长比光波和 X 射线的波长长得多,因此用微波来做波动实验比光学实验更直观、方便和安全. 比如在验证晶格的组成特征时,布拉格衍射就非常形象和直观,发生明显衍射效应的“晶格”可以放大到宏观的尺度.

微波在科学研究、工程技术、交通管理、医疗诊断、国防工业的国民经济的各个方面都有十分广泛的应用. 研究微波,了解其特性具有十分重要的意义.

一、实验目的

1. 了解微波的特点,学习微波器件的使用.
2. 了解微波的反射现象,测量反射角.
3. 了解布拉格衍射原理,并计算晶面间距.
4. 观察偏振现象,了解微波经喇叭极化后的偏振特性.
5. 了解微波的双缝干涉特性,并计算微波波长.

二、实验仪器

ZKY-WB-2 微波光学实验仪.

三、实验原理

1. 反射

微波和光都是电磁波,微波在传播过程中若遇到障碍物(如金属板)则会发生反射,且同样遵循和光线一样的反射定律:即在反射线在入射线与法线所决定的平面内,反射角等于入射角. 在光学实验中,可以用肉眼看到反射的光线. 本实验将通过电流表的读数确定反射角的位置,电流表读数最大处为反射角的位置. 如图 1 所示,入射波轴线与反射镜法线之间的夹角称为入射角,接收器轴线和反射镜法线间的夹角称为反射角.

2. 布拉格衍射

(1) 晶体结构. 由结晶物质构成的、其内部的结构质点(如原子、分子)呈周期性排列的固体叫做晶体. 晶体内的原子、分子占据着点阵的结构,最简单的晶体结构是立方点阵(如图 2),两相邻结点的距离叫晶体的晶格常量. 组成晶体的原子可以看成分别处在一系列相互平行而且间距一定的平面族上,这些平面称为晶面.

真实晶体的晶格常量约为 10^{-8} cm 的数量级. X 射线的波长与晶体常量属于同一数量级. 实际上晶体是起着衍射光栅的作用. 因此可以利用 X 射线在晶体点阵上

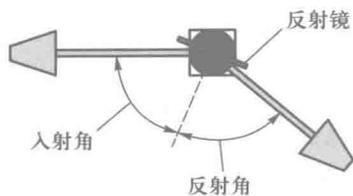


图 1

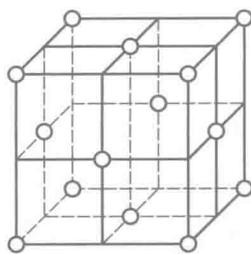


图 2 立方点阵

的衍射现象来研究晶体点阵的间距和相互位置的排列,以达到对晶体结构的了解.

(2) 布拉格衍射. 电磁波入射到晶体, 要受到晶体的衍射. 处在同一晶面上的原子组成一个镜面, 它们的反射波相干叠加的结果遵从反射定律, 反射角等于入射角, 如图 3 所示. 当从相距为 d 的两个相邻晶面反射的两束波的波程差 $2d \sin \theta = n\lambda$ 时 (n 为整数), 形成干涉极大. 这个方程称为晶体衍射的布拉格公式.

本实验仿照 X 射线入射真实晶体发生衍射的基本原理, 用金属球制成了一个面间距为 50 mm、直径 10 mm 的模拟立方“晶体”. 用微波代替 X 射线, 将微波射向模拟晶体, 观察从不同晶体点阵面反射的微波相互干涉所需要的条件——布拉格公式.

在研究布拉格衍射时, 需注意入射波必须满足两个条件, 即

(1) 入射角等于反射角.

(2) 布拉格公式: $2d \sin \theta = n\lambda$. 其中 d 为晶面间距, θ 为掠射角 (入射线或反射线与晶面的夹角), n 为整数, λ 为入射波波长.

3. 偏振

平面电磁波是横波, 其电场强度矢量 E 与波的传播方向垂直. 在与传播方向垂直的二维平面内, 电矢量 E 可能具有各方向的振动. 如果 E 在该平面内的振动只限于某一确定方向 (偏振方向), 这样的电磁波叫做极化波, 在光学中叫做偏振波. 用来检测偏振状态的元件叫做偏振器, 它只允许沿某一方向振动的电矢量 E 通过, 该方向叫做偏振器的偏振轴. 强度为 I_0 的偏振波通过偏振器时, 透过波的强度 I 随偏振器的偏振轴和偏振方向的夹角的变化而有规律地变化, 遵循马吕斯定律

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

本信号源输出的电磁波经喇叭后电场矢量方向与喇叭的宽边垂直, 相应磁场矢量与喇叭的宽边平行. 而接收器由于其物理特性, 只能收到与接收喇叭口宽边相垂直的电场矢量. 所以当两喇叭的朝向 (宽边) 相差 θ 角时, 接收器只能接收一部分信号. 本实验中将研究偏振现象, 找出偏振板是如何改变微波偏振的规律.

4. 双缝干涉

两束传播方向不一致的相干波相遇时将在空间相互叠加, 在空间某些点上形

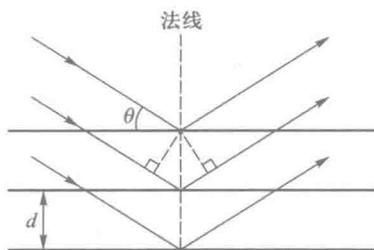


图 3 晶面间的干涉

成极大值或极小值. 而电磁波通过一个金属板的两个狭缝后, 狭缝就成为次级波源, 由两缝发出的次级波是相干波, 因此在金属板的背后空间将产生干涉现象. 对接收器来说就等于是两束传播方向不一致的波相遇.

双缝屏外波束的强度随探测角度的变化而变化. 若两狭缝之间的距离为 d , 接收器距离双缝屏的距离大于 $10d$, 当探测角 θ 满足 $d \sin \theta = n\lambda$ 时, 会出现最大值(其中 λ 为入射波的波长, n 为整数), 如图 4 所示.

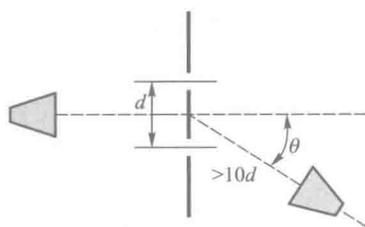


图 4 双缝干涉示意图

四、实验仪器介绍

微波光学实验仪由发射器组件、接收器组件、平台及其他配件组成.

1. 发射器组件

由缆腔换能器、谐振腔、隔离器、衰减器、喇叭天线、支架及微波信号源组成. 其中微波信号源输出的微波中心频率为 $10.5 \text{ GHz} \pm 20 \text{ MHz}$, 波长 2.85517 cm , 功率 15 mW , 频率稳定度可达 2×10^{-4} , 幅度稳定度为 10^{-2} , 这种微波源相当于光学实验中的单色光束, 将电缆中的微波电流信号转换为空中的电磁场信号. 喇叭天线的增益大约是 20 dB , 当发射喇叭口面的宽边与水平面平行时, 发射信号电矢量的偏振方向是垂直的.

2. 接收器组件

组成部分: 喇叭天线、检波器、支架、放大器和电流表. 检波器将微波信号变为直流或低频信号. 放大器分三个挡位, 分别为 $\times 1$ 挡、 $\times 0.1$ 挡和 $\times 0.02$ 挡, 可根据实验需要来调节放大器倍数, 以得到合适的电流表读数. 读数时, 实际电流值等于读数乘以所在挡位的系数.

3. 平台

组成部分: 中心平台和四根支撑臂等. 中心平台上刻有角度, 直径为 20 cm , 是测试部件的载物台. 3 号臂为固定臂, 用于固定微波发射器, 1 号臂为活动臂, 可绕中心作 $\pm 160^\circ$ 旋转, 用于固定微波接收器, 剩下的两臂可以拆除.

4. 其他配件

反射板、模拟晶阵及晶阵座、偏振板、双缝板、DC 12 V 电源.

五、实验内容及步骤

1. 熟悉仪器操作

(1) 将发射器和接收器安置在带有角度计的中心平台上, 其中发射器安置在固定臂(3 号钢直尺)上, 接收器安置在可动臂(1 号钢直尺)上. 注意发射器和接收器的喇叭口相对, 宽边与地面平行, 如图 5 所示.

(2) 调节发射器和接收器之间的距离(相距 40 cm 左右, 左右各 20 cm). 将电流表上的挡位开关置于“ $\times 0.1$ ”挡, 调节发射器上的“微波强弱”旋钮, 使接收器上

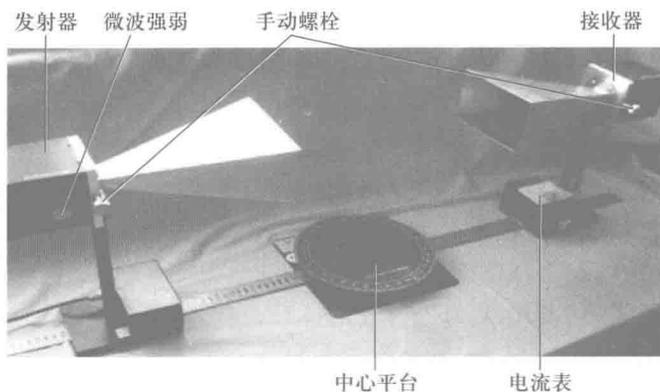


图5 基础仪器实物图

的电流表的指示在 $1/2$ 量程左右(约 $5 \mu\text{A}$)。

(3) 沿着可动臂缓慢向右移动接收器 30 cm , 同时观察不同位置处对应的电流值的变化. 实际过程中电流表读数过大或过小都可通过调节挡位来读数.

(4) 将发射器和接收器之间的距离调节为 70 cm (建议发射器和接收器到中心的距离各 35 cm), 调节“微波强弱”使电流表在“ $\times 0.1$ ”挡时的电流值居中.

(5) 松开接收器上面的手动螺栓, 慢慢转动接收器, 同时观察电流表上读数的变化, 并解释这一现象.

2. 反射实验

(1) 按照图5布置实验仪器, 喇叭朝向一致, 宽边水平. 发射器和接收器距离中心平台中心约 35 cm , 电流表置于“ $\times 0.02$ ”挡, 打开信号源, 调节“微波强弱”, 使电流表读数适中.



图6 反射实验实物图

(2) 把反射板夹在中心支架上, 如图6所示, 再转动中心支架使入射角分别为 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, \dots, 70^\circ$, 通过转动装有接收器的活动臂, 找到电流表读数最大的位置, 该位置对应的角度就是反射角, 将反射角记录于表1中, 比较入射角和反射角之间的关系. 注意: 中心支架上白色刻线的方向代表反射板法线的方向, 接收器喇叭的轴线与反射板法线之间的夹角称为反射角.

3. 布拉格衍射

(1) 如图 7 所示布置实验仪器,将晶阵座和模拟晶阵依次安放在中心转台上.先让晶体平行于微波光轴,即接收器置于 180° ,晶阵座上的指示线与 90° 对齐,此时掠射角 θ 为 0° .

(2) 接通信号源,顺时针旋转晶体座,使掠射角增大到 20° ,反射方向的掠射角也相应改变 20° (此时晶体座对应刻度为 70° ,活动臂中心刻度线对应同方向 140°).调节“微波强弱”及电流表的挡位,使电流表的显示电流值适中 ($1/2$ 量程),记下该值.

(3) 然后顺时针旋转晶体座 1° (即掠射角增加 1°),接收器活动臂顺时针旋转 2° (使反射角等于入射角),记录掠射角角度和对应的电流表读数.

(4) 重复步骤(3),记录掠射角角度从 20° 到 70° 之间的数值于表 2 中.

(5) 作衍射信号强度相对掠射角的函数曲线,根据曲线找出极大值对应的角度.根据布拉格方程计算晶面间距,并比较测出的晶面间距与实际间距 50 mm 之间的误差.

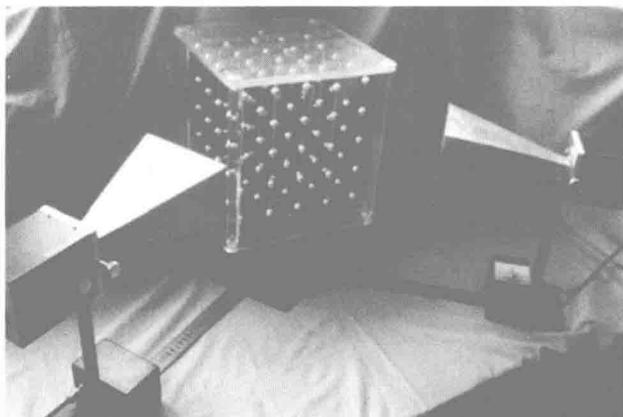


图 7 布拉格衍射实验实物图

4. 偏振实验(选做)

(1) 如图 5 布置实验仪器,将发射器和接收器的喇叭宽边与地面平行,活动臂刻线与 180° 对齐.发射器和接收器距离中心平台约 35 cm .打开电源,电流表置于“ $\times 1$ ”挡,调节微波强弱,使电流表的读数最大 ($100\ \mu\text{A}$).

(2) 松开接收器上的喇叭止动旋钮,以 10° 增量旋转接收器,记录每个位置电流表上的读数于表 3 中.

(3) 将偏振板放置在中心支架上,如图 8 所示,中心支架上的白色刻线与转盘上的刻线对齐,偏振板的栅条方向与竖直方向分别为 45° 、 90° 时,重复步骤(2).

(4) 将理论值、不加偏振板时的实验值及与竖直方向成 90° 时的实验值做比较,进行分析.

5. 双缝干涉实验(选做)

(1) 如图 9 布置实验仪器,将发射器和接收器都处于水平偏振状态(喇叭宽边

NOTE

NOTE

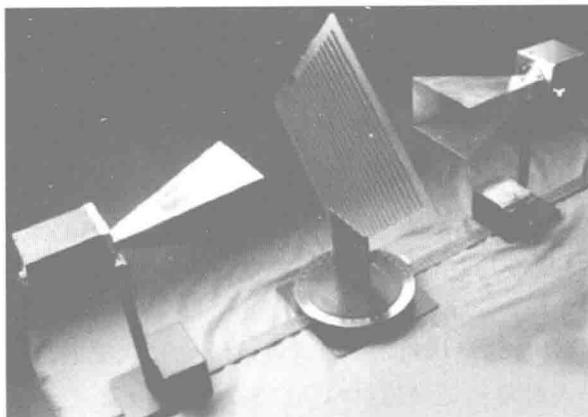


图 8 偏振实验实物图

与地面平行),初始位置时活动臂刻线与 180° 对齐.发射器距离中心平台约 35 cm,接收器到中心平台距离大于 65 cm.将双缝板安装在中心支架上,接通电源,调节微波强弱和电流表挡位开关,使电流表满刻度,记录此时初始位置的电流值.

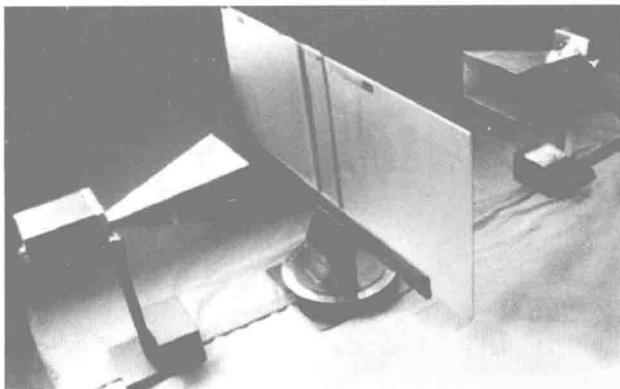


图 9 双缝干涉实验实物图

(2) 缓慢转动可动臂,观察电流表的变化.记录下电流表各极大值和极小值时的角度和对应电流于表 4 中.并根据表 4 中数据,绘制接收电流随转角变化的曲线图,分析实验结果,并根据 $d\sin\theta=n\lambda$,计算微波的波长和误差(本实验所用的双缝板两缝距离 $d=5$ cm,缝宽为 1.5 cm,微波波长标准值为 $\lambda=28.5517$ mm).

六、数据记录及数据处理

1. 测量反射角

表 1 反射角测量

入射角度/ $^\circ$	反射角度/ $^\circ$	误差度数/ $^\circ$	误差百分比
20			

续表

入射角度/(°)	反射角度/(°)	误差度数/(°)	误差百分比
30			
40			
50			
60			
70			

结论: _____.

2. 布拉格衍射

表 2 布拉格衍射

初始位置:掠射角 $\theta=20^\circ$, 电流 $I=$ _____ μA

掠射角 $\theta/(^\circ)$	$I/\mu\text{A}$								
21		31		41		51		61	
22		32		42		52		62	
23		33		43		53		63	
24		34		44		54		64	
25		35		45		55		65	
26		36		46		56		66	
27		37		47		57		67	
28		38		48		58		68	
29		39		49		59		69	
30		40		50		60		70	

(1) 作衍射信号强度 I 相对掠射角 θ 的函数曲线, 根据曲线找出极大值对应的角度。

(2) 根据布拉格方程 $2d\sin\theta=n\lambda$, 计算晶面间距 d 。(实验中入射光波长为 $\lambda=2.85517\text{ cm}$.)

(3) 比较测出的晶面间距与实际间距 50 mm 之间的误差。

3. 偏振实验(选做)

表 3 偏振特性测量

初始条件: 发射器、接收器距中心点 _____ cm

接收器转角/(°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
理论 $I/\mu\text{A}$	100	97.0	88.3	75.0	58.7	41.3	25.0	11.7	3.0	0
无偏振板 $I/\mu\text{A}$										
偏振板栅条与竖直方向夹角	45°									
	90°									

将理论值、不加偏振板时的实验值及与竖直方向成 90° 时的实验值作比较,进行分析.

4. 双缝干涉测波长(选做)

表 4 双缝干涉测波长

初试条件:接收器距离中心点的位置为 _____ mm(顺时针为正,逆时针为负)

接收器转角/ $^\circ$	电流值/ μA	接收器转角/ $^\circ$	电流值/ μA
-50		0	
-45		5	
-40		10	
-35		15	
-30		20	
-25		25	
-20		30	
-15		35	
-10		40	
-5		45	
0		50	

电流极大值对应的
角度:

电流极小值对应的
角度:

(1) 绘制接收电流随转角变化的曲线图,分析实验结果.

(2) 根据 $d \sin \theta = n\lambda$, 计算微波的波长和误差(本实验所用的双缝板两缝距离 $d = 50 \text{ mm}$, 缝宽为 15 mm , 微波波长标准值为 $\lambda = 28.5517 \text{ mm}$).

七、注意事项

1. 微波波长相对较长,在调节和观察实验现象时变化不如光波一样灵敏,要注意仔细调节和观察.两个喇叭的方向对正,发射和接收喇叭方向不正将严重影响实验结果,务必小心不可碰歪.

2. 电源连接无误后,打开电源使微波预热 10 min 左右.

3. 实验前应根据实验需要来调节放大器倍数,以得到合适的电流表读数.(测峰值时,注意峰值是否超过量程)

4. 实验中由于信号的不稳定可能造成测量数据波动,应根据实际情况进行多次测量.

5. 做“布拉格衍射”实验前应仔细将模拟晶体排成方形点阵,并将小球调整到规则位置.

八、思考题

1. 微波在日常生活中有哪些应用?

2. 光的波动性表现是什么?微波与光波的本质有什么区别?

3. 实验前,为什么必须将两喇叭天线对正?如果不对正,对实验结果将产生什么影响?

实验三十一 普朗克常量的测定

光电效应是指一定频率的光照射在金属表面时会有电子从金属表面逸出现象。在光电效应中,光显示出它的量子性质,所以这种现象对于认识光的本质,具有极其重要的意义。1887年赫兹首先发现了光电效应现象,以后又经过很多科学家的研究,总结出了一系列的实验规律,但是这些规律用经典的电磁理论无法完满地解释。直到爱因斯坦于1905年应用并发展了普朗克的量子理论,首次提出了“光量子”的概念,并成功地解释了光电效应的全部实验规律。爱因斯坦的论述极具想象力与说服力,但却遭到学术界强烈的抗拒,这是因为它与麦克斯韦所表述的且经过严格理论检验、精密实验证明的光的波动理论相互矛盾。十年后,密立根用实验证实了爱因斯坦的光量子理论,并精确地测定了普朗克常量。爱因斯坦和密立根两位物理大师因在光电效应等方面的杰出贡献,分别于1921年和1923年获得诺贝尔物理学奖。光电效应实验和光量子理论在物理学的发展史中具有重大而深远的意义。利用光电效应制成了许多光电器件,在科学和技术上得到了极其广泛的应用。

NOTE

一、实验目的

1. 通过实验了解光的量子性,加深对爱因斯坦光电效应方程物理意义的理解。
2. 掌握用光电效应方程测定普朗克常量的方法。

二、实验仪器

汞灯及电源、滤色片、光阑、光电管、普朗克常量实验仪、基座。

三、实验原理

当某种金属材料受到一定频率的光照射时,金属中有电子逸出,这种现象叫光电效应(又称外光电效应)。逸出的电子叫光电子。

如图1所示是当高于某种金属“红限”频率 ν_0 的光,照在金属表面,光电子逸出金属表面的基本规律:

- (1) 光电流(光电子形成的电流)与光强成正比,见图1(a)、图1(b)。
- (2) 光电效应存在一个阈频率,当入射光的频率低于某一阈值时,不论光的强度如何,都没有光电子产生,见图1(c)。
- (3) 光电子的初动能与光强无关,但与入射频率成正比,见图1(d)。
- (4) 光电效应是瞬时效应,一经光线照射,立即产生光电子。

然而,用经典波动理论是无法对上述事实作出完满解释的。

爱因斯坦认为从一点发出的频率为 ν 的光,以 $h\nu$ 为能量单位(光量子)的形式一份一份地向外辐射,而不是按麦克斯韦电磁学说提出的那样以连续分布的形式

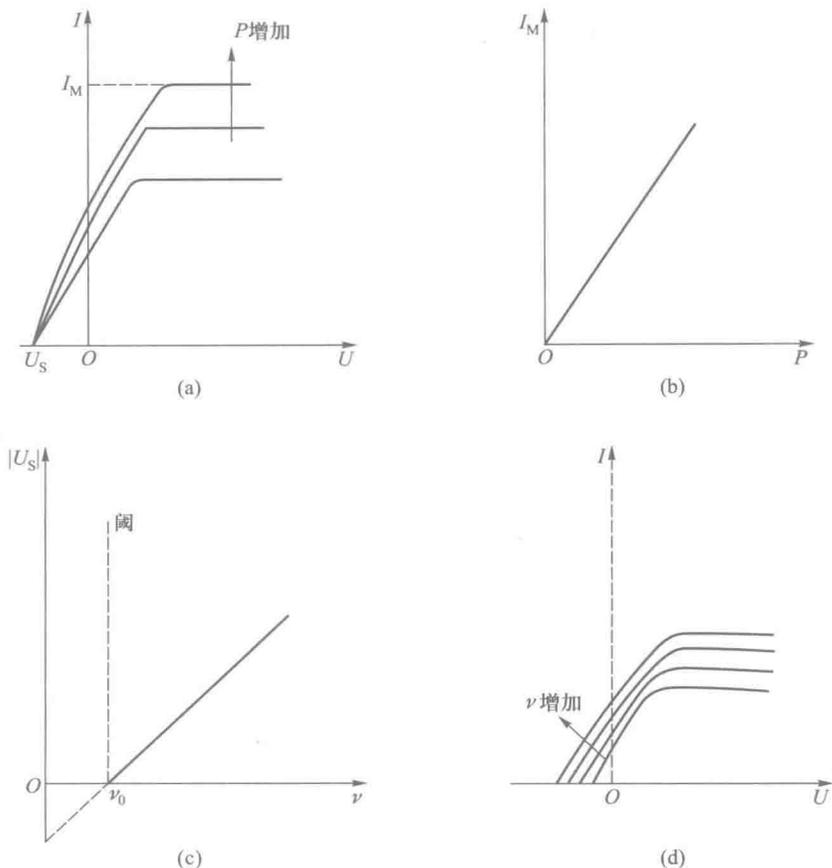


图1 光电效应实验规律

I —光电流; I_M —饱和电流; U —阳极电压; U_s —截止电压; P —光的强度; ν —光的频率

把能量传播到空间的. 当频率为 ν 的光以 $h\nu$ 为能量单位作用于金属中的一个自由电子, 而自由电子获得能量后, 克服金属表面的逸出功 W_s , 再逸出金属表面, 其初动能为 $mv^2/2$.

按照能量守恒定律有

$$mv^2/2 = h\nu - W_s \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常量, 其公认值为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; ν 为入射光频率; m 为电子的质量; v 为光电子逸出金属表面的初速度; W_s 为受光照射的金属材料表面的逸出功.

式(1)就是著名的爱因斯坦光电效应方程.

在式(1)中, $mv^2/2$ 是没有受到空间电荷阻止, 从金属中逸出的光电子的最大初动能. 从金属内部出射的光电子由于受到空间电荷的阻止, 初动能比 $mv^2/2$ 要小. 把金属作为阴极, 光照射到阴极上, 有光电子逸出. 正因为光电子具有最大初动能, 所以即使阳极不加电压也会有光电子到达阳极而形成光电流, 甚至阳极相对于阴极电势为负时, 也会有光电子到达阳极. 直到阳极电势低于某一值时, 所有光电

子都被阻止而不能到达阳极,光电流为零,见图 1(a).此相对于阴极为负值的阳极电势 U_s 被称为光电效应的截止电势差(或称截止电压).此时有

$$e|U_s| - mv^2/2 = 0 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中有

$$e|U_s| = h\nu - W_s \quad (3)$$

由于金属表面的逸出功 W_s 是金属的固有属性,对于给定的金属材料而言, W_s 为一个定值,它与入射光的频率无关,不同金属材料, W_s 值不同.令 $W_s = h\nu_0$,则 $\nu_0 = W_s/h$ 为“红限频率”;即只当入射光的频率 $\nu > \nu_0$ 时,电子才能从金属中逸出.

将式(3)改写成

$$|U_s| = h\nu/e - W_s/e = h/e(\nu - \nu_0) \quad (4)$$

式(4)表明,截止电压的大小 $|U_s|$ 是入射光频率 ν 的线性函数.当入射光的频率 $\nu = \nu_0$ 时, $|U_s|$ 为零,即无光电子逸出,见图 1(c),其斜率 $k = h/e$,是一个常量,亦即

$$h = ek \quad (5)$$

可见,只要用实验方法获得不同频率下的截止电压的大小 $|U_s|$,作 $|U_s| - \nu$ 直线,并求出该直线的斜率 k ,就可以通过式(5)求出普朗克常量的数值.其中, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C 是元电荷.

图 2 是用光电管进行光电效应实验的原理图.频率为 ν ,强度为 P 的光线照射到光电管阴极 K 上,即有光电子从阴极逸出,如图 2 所示.若在阴极 K 和阳极 A 之间加有正向电压 U_{AK} ,则在电极 K、A 之间建立起的电场对光电阴极逸出的光电子起加速作用,随着电压 U_{AK} 的增加,到达阳极的光电子将逐渐增多,光电流逐渐增大.当正向电压 U_{AK} 增加到 U_M 之后,阴极发射的光电子几乎全部被收集到阳极,光电流不再增大或变化很小,此时称为饱和状态,对应的光电流即饱和电流 I_M ;若在阴极 K 和阳极 A 之间加反向电压 U_{KA} ,它使电极 K 和 A 之间建立起的电场对光电阴极逸出的光电子起减速作用,随着电压 U_{KA} 逐渐增加,到达阳极的光电子将逐渐减少,光电流逐渐减小.当 $U_{KA} = |U_s|$ 时,光电流降为零,如图 3 光电管始末 $I-U$ 特性曲线所示.不同强度的光照射(光通过不同孔径的光阑),可以得到图 1(a)和图 1(b)情形.入射到阴极的光的频率越高,逸出来的电子初动能必然越大,根据式(4),截止电压越大,如图 1(d)所示.

不同频率的光照射,可以得到与图 3 相类似的 $I-U$ 特性曲线及 U_s 电压值.在直角坐标系中作出 $|U_s| - \nu$ 关系曲线,如果它是一条直线,就证明了爱因斯坦光电效应方程的正确.而由该直线的斜率 k 则可以求出普朗克常量($h = ek$).由该直线与横坐标轴的交点又可以求出光电阴极表面的逸出功($W_s = h\nu_0$),见图 1(c).

四、实验装置介绍

本实验所用的为 ZKY-GD-3 光电效应(普朗克常量)实验仪.仪器由汞灯及电源、滤色片、光阑、光电管、实验仪(含光电管电源和微电流放大器)构成,仪器结构如图 4 所示,测试仪的调节面板如图 5 所示.

主要技术参数如下:

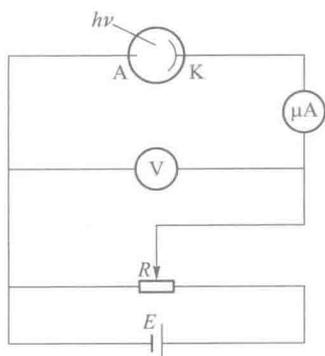


图2 光电效应实验原理图

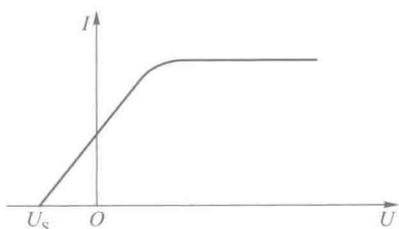


图3 光电管始末 $I-U$ 特性曲线

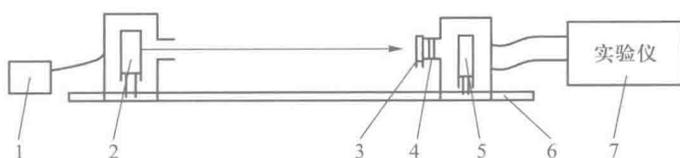
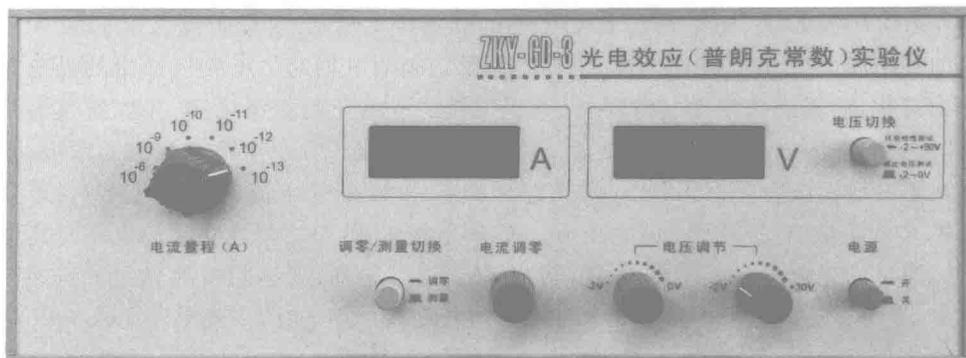
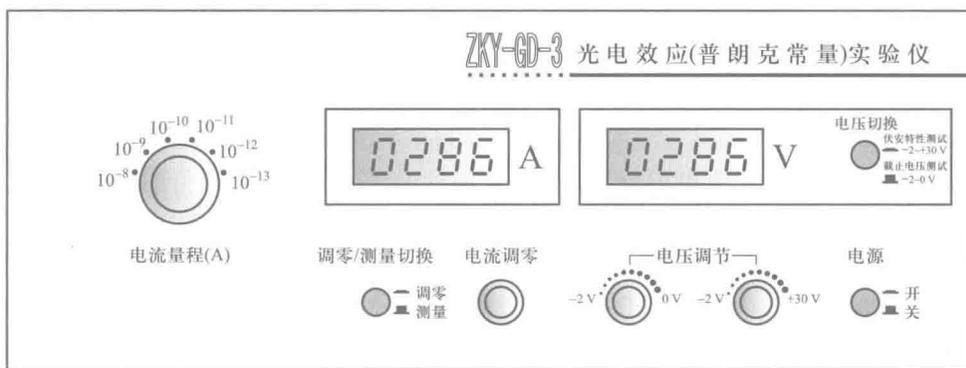


图4 仪器结构示意图

1—汞灯电源;2—汞灯;3—滤色片;4—光闸;5—光电管;6—基座;7—实验仪



(a) 实物图



(b) 示意图

图5 普朗克常量测试仪前面板

(1) 汞灯:可用谱线 365.0 nm、404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm、579.0 nm.

(2) 滤色片:5片,透射波长 365.0 nm、404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm.

(3) 光阑:3片,直径 2 mm、4 mm、8 mm.

(4) 光电管:光谱响应范围 320 ~ 700 nm,最小阴极灵敏度 $\geq 1 \mu\text{A}/l_m$. 阳极为镍圈,阴极为银-氧-钾.

(5) 暗电流: $I \leq 2 \times 10^{-13} \text{ A}$ ($-2 \text{ V} \leq U_{\text{AK}} \leq 0 \text{ V}$).

(6) 光电管电源:2挡, $-2 \sim 0 \text{ V}$, $-2 \sim +30 \text{ V}$,三位半数显,稳定度 $\leq 0.1\%$.

(7) 微电流放大器:电流测量范围 $10^{-13} \sim 10^{-8} \text{ A}$,分6挡,三位半数显.零漂:开机 20 min 后,30 min 内不大于满度读数的 $\pm 0.2\%$ (10^{-13} A 挡).

五、实验内容及步骤

具体实验电路简图见图 6.

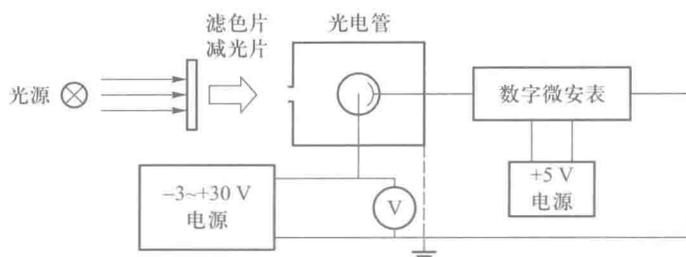


图 6 具体实验电路简图

1. 测试前准备

(1) 将实验仪及汞灯电源接通,预热 20 min.

(2) 把汞灯及光电管暗箱遮光盖盖上,将汞灯暗箱光输出口对准光电管暗箱光输入口,调整光电管与汞灯距离为约 40 cm 并保持不变.

(3) 用专用连接线将光电管暗箱电压输入端与实验仪电压输出端(后面板上)连接起来(红-红,蓝-蓝).

(4) 将“电流量程”选择开关置于所选挡位,仪器在充分预热后,进行测试前调零,旋转“调零”旋钮使电流指示为 000.0.

(5) 用高频匹配电缆将光电管暗箱电流输出端与实验仪微电流输入端(后面板上)连接起来.

2. 测光电管的伏安特性曲线

(1) 将电压选择按键置于 $-2 \sim +30 \text{ V}$ 挡;将“电流量程”选择开关置于 10^{-11} A 挡,将仪器按照前面方法调零;将直径 2 mm 的光阑及 435.8 nm 的滤色片装在光电管暗箱光输入口上.从低到高调节电压,记录电流从零到非零点所对应的电压值作为第一组数据,以后电压每变化一定值记录一组数据到表 1 中.

(2) 在 U_{AK} 为 30 V 时,将“电流量程”选择开关置于 10^{-10} A 挡,将仪器按照前

面方法调零,记录光阑分别为 0 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm 时对应的电流值于表 2 中.

(3) 换上直径为 4 mm 的光阑及 546.1 nm 的滤色片,重复测量步骤(1)、(2).

3. 测普朗克常量

(1) 讨论影响准确测量截止电压的因素. 理论上,测出各频率的光照射下阴极电流为零时对应的电压,其绝对值即该频率的截止电压,然而实际上由于极间接触电势差、光电管的暗电流、本底电流和阳极反向电流的影响,实测电流并非阴极电流,实测电流为零时对应的电压也并非截止电压. 测出的光电流和电压的特性曲线较图 3 所示的要复杂.

极间接触电势差. 导线和阴极材料间存在着正向接触电势差,这就是极间接触电势差. 极间接触电势差与入射光频率无关,是个常量,只影响 U_s 的准确性,不影响 $|U_s| - \nu$ 直线的斜率,对测定 h 无影响.

暗电流和本底电流. 暗电流是指在没有光照射时由于热电子发射、光电管管壳漏电等原因形成的电流. 本底电流是由于室内各种漫反射光射入光电管所引起的电流. 它们均使光电流不能降为零,且随电压的变化而变化. 暗电流和本底电流可以在光电管制作,或测量过程中采取适当措施以减小或消除它们的影响.

阳极反向电流. 由于制作时阳极 A 也往往溅有少量阴极材料,所以当光射到 A 上, A 也有光电子发射,另外阴极 K 发射的光电子有可能被 A 反射,当 A 加负电势, K 加正电势时,对 K 发射的光电子起了减速作用,但对 A 发射和反射的光电子却起了加速作用,这样形成的电流叫阳极反向电流(或称反向电流). 所以 $I-U$ 关系曲线不再像图 3 那样,而是变成图 7 所示实线的样子. 图 7 中实线显示电流为零并不是阴极电流为零,而是阴极电流和阳极反向电流的代数和为零. 即是说该点所对应的电压值并不是截止电压 U_s . 但由于阳极反向电流很小,在反向电压不大时就已达到饱和,所以曲线下部变成平直的. 这样我们只要确定出曲线开始变成直线时的转变点(拐点),就是确定了阴极电流为零的点. 其所对应的电压 U'_s 可近似为阴极电流的截止电压

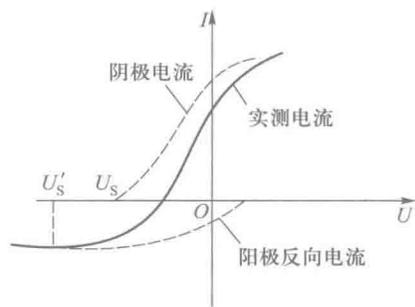


图 7 光电效应实际 $I-U$ 曲线示意图

U_s . 本实验仪器采用了新型结构的光电管. 由于其特殊的结构使光不能直接照射到阳极,由阴极反射照到阳极的光也很少,加上采用新型的阴、阳极材料及制造工艺,使得阳极反向电流大大降低,暗电流也很低.

此外,由于光电流测量的准确性直接影响截止电压的判断,若电流放大器灵敏度不够,或稳定性不好,都会给测量带来较大误差.

(2) 测量截止电压的方法. 基于本仪器的特点,在测量各谱线的截止电压 U_s 时,可不采用难操作的“拐点法”,而用“零电流法”或“补偿法”.

“零电流法”是直接将在各谱线照射下测得的电流为零时对应的电压 U_{AK} 的绝对值作为截止电压 $|U_s|$. 此法的前提是阳极反向电流、暗电流和本底电流都很小,用

零电流法测得的截止电压与真实值相差很小. 且各谱线的截止电压都相差 ΔU , 对 $|U_s|-\nu$ 曲线的斜率无大的影响, 因此对 h 的测量不会产生大的影响.

“补偿法”是调节电压 U_{AK} 使电流为零后, 保持 U_{AK} 不变, 遮挡汞灯光源, 此时测得的电流 I_1 为电压接近截止电压时的暗电流和本底电流. 重新让汞灯照射光电管, 调节电压 U_{AK} 使电流值至 I_1 , 此时可认为阴极电流为零, 将此时对应的电压 U_{AK} 的绝对值作为截止电压 $|U_s|$. 此法可补偿暗电流和本底电流对测量结果的影响.

(3) 测量普朗克常量. 将电压选择按键置于 $-2 \sim 0$ V 挡; 将“电流量程”选择开关置于 10^{-13} A 挡, 将测试电流输入电缆断开, 调零后重新接上; 将直径 4 mm 的光阑及 365.0 nm 的滤色片装在光电管暗箱光输入口上.

从低到高调节电压, 用“零电流法”或“补偿法”测量该波长对应的 $|U_s|$, 并将数据记录于表 3 中.

依次换上波长分别为 404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm 的滤色片, 重复以上测量步骤.

六、数据记录及数据处理

1. 测光电管的伏安特性曲线

表 1 $I-U_{AK}$ 关系

435.8 nm	U_{AK}/V					...			
光阑 2 mm	$I/(10^{-11} A)$...			
546.1 nm	U_{AK}/V					...			
光阑 4 mm	$I/(10^{-11} A)$...			

表 2 $I_M-\Phi^2$ 关系

$U_{AK} = \text{---} V$

435.8 nm	光阑孔直径 Φ/mm	0	2	4	8
	$I/(10^{-10} A)$				
546.1 nm	光阑孔直径 Φ/mm	0	2	4	8
	$I/(10^{-10} A)$				

(1) 用表 1 中的数据在坐标纸上作对应于以上两种波长及光强的伏安特性曲线.

(2) 由于照到光电管上的光强与光阑孔面积成正比, 用表 2 中的数据验证光电管的饱和电流与入射光强成正比, 并在坐标纸上作出相应的 $I_M-\Phi^2$ 曲线.

2. 测普朗克常量

表 3 $|U_s|-\nu$ 关系

光阑孔直径 $\Phi = \text{---} mm$

波长 λ_i/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 $\nu_i/(10^{14} Hz)$	8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
截止电压 $ U_s /V$					

可用以下三种方法之一处理表 3 中的实验数据, 得出 $|U_s|-\nu$ 直线的斜率 k .

(1) 根据线性回归理论, $|U_s|-\nu$ 直线的斜率 k 的最佳拟合值为

$$k = \frac{\overline{\nu |U_s| - \nu |U_s|}}{\overline{\nu^2} - \overline{\nu}^2}$$

其中 $\overline{\nu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i$ 表示频率 ν 的平均值; $\overline{\nu^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i^2$ 表示频率 ν 的平方的平均值;

$\overline{|U_s|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_{s_i}|$ 表示截止电压 $|U_s|$ 的平均值; $\overline{\nu |U_s|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i |U_{s_i}|$ 表示频率 ν 与截止电压 $|U_s|$ 的乘积的平均值.

(2) 根据 $k = \frac{\Delta |U_s|}{\Delta \nu} = \frac{|U_{s_m}| - |U_{s_n}|}{\nu_m - \nu_n}$, 可用逐差法从表 3 的后四组数据中求出两个 k , 将其平均值作为所求 k 的数值.

(3) 可用表 3 数据在坐标纸上作 $|U_s|-\nu$ 直线, 由图求出直线斜率 k .

求出直线斜率 k 后, 可用 $h = ek$ 求出普朗克常量, 并与 h 的公认值 h_0 比较, 求出相对误差 $E_r = \left| \frac{h-h_0}{h_0} \right| \times 100\%$, 式中 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

七、注意事项

1. 本机配套滤色片是经过精选和精加工的组合滤色片, 更换滤色片时应避免污染或使用前用镜头纸认真擦拭, 以保证良好透光, 更换滤色片时应平整放入套架, 以免不必要的折光带来的实验误差.

2. 更换滤色片时应先将出光孔遮住, 且实验完毕后用遮光罩盖住光电管暗盒进光窗, 避免光直接照射阴极, 缩短光电管寿命.

3. 光源与光电管暗盒之间距离取 40 cm, 从光源出光孔射出的光必须直接照射光电管阴极, 暗盒可作左右高低调节.

4. 每一次更换“电流量程”挡位后, 要将测试电流输入电缆断开, 调零后重新接上, 再开始测量.

5. 实验虽不必在暗室进行, 但在安排仪器时, 光电管入光孔请勿对着其他强光源(如窗户等), 以免杂散光干扰, 仪器不宜在强磁场、强电场、强振动、高温、带辐射物质等环境下工作.

八、思考题

1. 何谓光电效应? 它的规律是什么?
2. 爱因斯坦光电效应方程是怎样的? 它的物理意义是什么?
3. 光电流或截止电压随光源光强变化吗? 对这些现象的解释与光的波动理论是否一致?
4. 试定性解释 $I-U$ 曲线的饱和部分、光电流逐渐减小部分及截止电压的形成原因.

5. 从截止电压 $|U_s|$ 与入射光频率 ν 的关系曲线,你能确定阴极材料的逸出功吗?
6. 如何通过测量截止电压,以测定普朗克常量?
7. 怎样正确使用微电流实验仪?
8. 测量普朗克常量实验中误差的主要来源是什么?如何减少这些误差?

实验三十二 弗兰克-赫兹实验

一、实验目的

1. 了解原子内部结构及能量量子化概念；
2. 通过测量氩原子的第一激发电势,证明原子内部量子化能级的存在.

二、实验仪器

智能弗兰克-赫兹实验仪(弗兰克-赫兹管、程控直流稳压电源)、示波器.

三、实验原理

在 1897 年汤姆孙(Joseph John Thomson, 1856—1940)从实验上发现电子之后,关于原子内部结构问题科学家们提出了许多理论模型和假设. 根据人们在光谱实验中观测到的氢原子线状光谱的离散化特征,丹麦物理学家玻尔(Niels Bohr, 1885—1962)在 1913 年连续发表三篇具有划时代意义的巨著,提出了著名的氢原子理论,成功解释了氢原子的结构和光谱性质,揭开了原子物理学的新篇章.

玻尔的氢原子理论指出:

(1) 原子内部电子只能处于一些分立的轨道上,电子在这些定态轨道上运动时,原子具有一定的能量,不会发射电磁辐射,此即玻尔的定态条件;

(2) 当电子从一个定态轨道跃迁到另一个定态轨道时,原子会以电磁波的形式放出(或吸收)特定大小的能量,即辐射频率是一定的,此即玻尔的频率条件,又称辐射条件. 电子从能量为 E_m 的定态跃迁到能量为 E_n 的定态时,辐射频率由如下关系决定:

$$h\nu = E_m - E_n \quad (1)$$

式中普朗克常量 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

(3) 根据对应原理,电子在各定态轨道运动的角动量只能是普朗克常量的整数倍,此即角动量量子化条件.

玻尔理论表明,原子内部存在一系列稳定的量子化的状态,对应着一系列不连续的量子化的电子轨道和原子能量状态,电子只能通过吸收或放出特定大小的能量在这些量子态之间跃迁.

1914 年,玻尔理论发表的第二年,德国物理学家弗兰克(James Franck, 1882—1964)和赫兹(Gustav Ludwig Hertz, 1887—1975)进行了利用电子碰撞汞原子的实验,发现电子和原子碰撞时会交换某一特定大小的能量,将原子从低能量状态(基态)激发到某一具有较高能量的状态(第一激发态),表明原子发生跃迁时吸收的能量是分立的、不连续的,从而直接证明了原子能级的存在,即原子内部能量的量子化,为玻尔理论提供了有力的支持. 之后,弗兰克和赫兹对实验装置进行了改进,

又测得了汞原子一系列较高的激发态能级,进一步证实原子内部能量是量子化的. 弗兰克-赫兹实验至今仍是探索原子结构的重要手段之一.

初速度接近于零的电子在外加电压形成的静电场作用下加速,可以获得一定的动能 E_k . 当具有一定能量的电子与某种原子的稀薄气体(例如汞原子、氩原子)发生碰撞时,就有可能发生能量交换,将电子的平动能转化为该原子内部状态的能量,从而将原子由低能态激发到高能态. 以 E_1 代表原子的基态能量、 E_2 代表原子的第一激发态能量,那么当被原子吸收的从电子传递来的能量恰好等于原子第一激发态与基态能量差值时,即

$$eU_g = E_2 - E_1 \tag{2}$$

原子就会从基态跃迁到第一激发态,与这一能量相对应的电势差就称为该原子的第一激发电势. 因此,只要测定出这个电势差 U_g ,就可以根据式(1)求出该原子的基态和第一激发态之间的能量差.

图1给出了弗兰克-赫兹实验的示意图. 在充有氩气的弗兰克-赫兹管中,电子从热阴极K发出,经K和栅极之间的电场加速. 在第二栅极 G_2 和板极A之间加有反向拒斥电压 U_{G_2A} . 管内空间电势分布如图2所示. 当电子通过 KG_2 空间进入 G_2A 空间时,如果有较大的能量($E_k \geq eU_{G_2A}$),就能冲过反向拒斥电场而到达板极A,成为通过微电流计的电流. 如果电子在 KG_2 空间与氩原子碰撞,把自己一部分能量传给氩原子而使后者激发,电子自身所剩余的能量就可能很小,以致通过第二栅极后已不足以克服拒斥电压而到达A,这时,通过微电流计的电流将显著减小. 图3给出了A极电流随 KG_2 间电压变化的曲线. 当 KG_2 间的电压由零逐渐增加时,A极电流呈现周期性地上升、下降,出现一系列的峰和谷,相邻峰(或谷)间距离大致相等.

NOTE

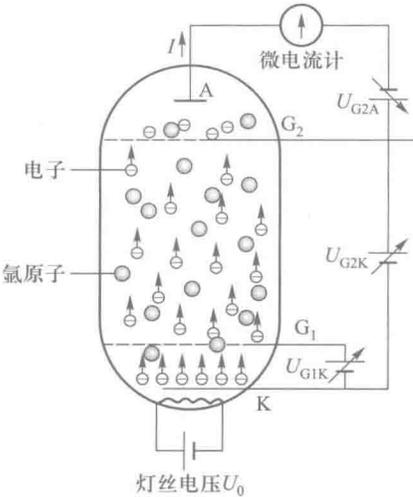


图1 弗兰克-赫兹实验装置示意图

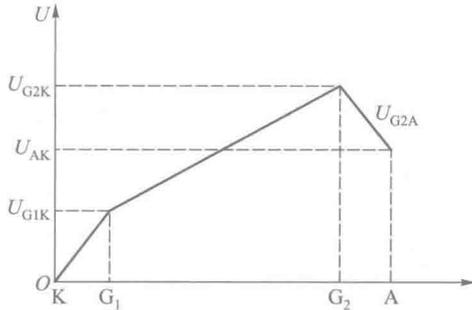


图2 弗兰克-赫兹管管内空间电势分布

在 U_{G_2K} 增加的起始阶段,由于电压较低,电子在 KG_2 空间加速所获得的能量较小,电子在加速过程中即使与管内氩原子相撞也是弹性碰撞,而不能将氩原子激发,因此穿过栅极的电子所形成的板极电流 I_A 将随着加速电压 U_{G_2K} 的增大而增大.

当 KG_2 间的电压达到氩原子的第一激发电势 $U_{\#}$ 时,电子在栅极附近与氩原子发生非弹性碰撞,可以将从加速电场中获得的部分能量传递给氩原子,把氩原子从基态激发到第一激发态,而电子本身由于能量损失而不能克服反向拒斥电压到达 A 极,所以,板极电流 I_A 将显著减小 (U_1 位置处). 随着 KG_2 间电压的增加,电子的能量也随之增加,它与氩原子相碰撞后留下的能量足以克服拒斥电压而达到 A 极,电流又开始上升. 直到 KG_2 间电压两倍于氩原子第一激发电势时,电子在 KG_2 间又会因二次碰撞而失去能量,因而又造成了第二次板极电流的下降 (U_2 位置处). 这样随着 KG_2 间电压的增加,板极电流 I_A 周期性地出现极大值和极小值. 上述实验现象表明,原子内存在量子态,而原子的第一激发电势等于峰(或谷)间电压差. 对氩原子,其第一激发态的激发能为 11.5 eV,相应的第一激发电势 $U_{\#}$ 等于 11.5 V.

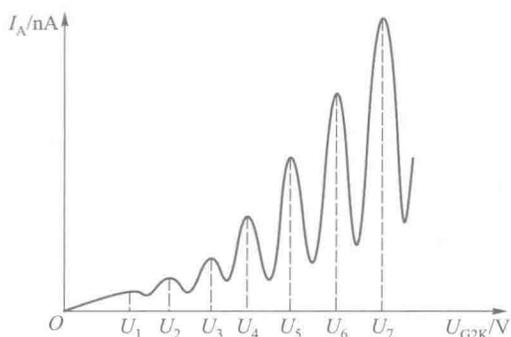


图3 弗兰克-赫兹实验 $U_{G2K}-I$ 曲线

四、实验装置介绍

图4给出了智能弗兰克-赫兹实验仪前面板示意图. 智能弗兰克-赫兹实验仪主要包括弗兰克-赫兹管及电路连接区,测试信号输入输出区,电流、电压显示区,电压调节区以及工作状态指示区.

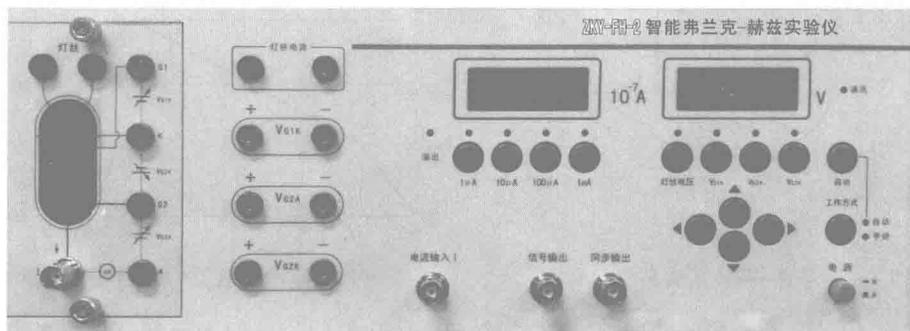


图4 智能弗兰克-赫兹实验仪前面板示意图

五、实验内容及步骤

1. 实验内容

(1) 在实验仪自动工作方式下,寻找最佳实验参量;

(2) 在实验仪自动工作方式下,研究不同灯丝电压 U_0 、拒斥电压 U_{G2A} 取值对 $I-U_{G2K}$ 曲线的影响;

(3) 在实验仪手动工作方式下,测量 $I-U_{G2K}$ 曲线.

2. 实验步骤

(1) 将弗兰克-赫兹实验仪上的信号输出端与示波器上的 CH1 或 CH2 通道连接,将实验仪的同步输出端与示波器上的外触发输入端(EXT)连接,并将扫描电路内触发信号的选择开关(SOURCE)置于“EXT”位置,同时适当调节示波器的显示状态;

(2) 连接弗兰克-赫兹管各组工作电源线,检查无误后开机.将实验仪预热 10 ~ 20 min;

(3) 开机后的初始状态如下时,表明仪器工作正常:① 实验仪的“1 mA”电流挡位指示灯亮,表明此时电流的量程为 1 mA 挡;② 电流显示值为 000.0 (10^{-7} A);③ 实验仪的“灯丝电压”挡位指示灯亮,表明此时修改的电压为灯丝电压;④ 电压显示值为 000.0 V;最后一位在闪动,表明现在修改位为最后一位;⑤ “手动”指示灯亮.

(4) 寻找最佳实验参量值.将实验仪切换到“自动”工作状态,根据实验仪提供的实验参量参考值,选择合适的微电流计量程,设置灯丝电压 U_0 、第一加速电压 U_{G1K} 及拒斥电压 U_{G2A} 的数值,同时将 U_{G2K} 设为实验测量上限值 80.0 V,按下启动按钮,在示波器上观察所得到的 $I-U_{G2K}$ 曲线;

(5) 根据 $I-U_{G2K}$ 曲线形状,微调灯丝电压 U_0 及拒斥电压 U_{G2A} 的数值,重复步骤(3),直到 $I-U_{G2K}$ 曲线形状较好,即曲线中至少有四个连续的峰值谷值,且峰值谷值对比度明显;将此时所使用的各电压参量值 U_0 、 U_{G1K} 及 U_{G2A} 记入表 1;

(6) 改变灯丝电压 U_0 、拒斥电压 U_{G2A} 的取值,观察灯丝电压 U_0 、拒斥电压 U_{G2A} 对 $I-U_{G2K}$ 曲线的影响,数据记入表 2;

(7) 测量 $I-U_{G2K}$ 关系.在“手动”工作状态下,使用步骤(4)找到的 U_0 、 U_{G2A} 的最佳参量值,手动将加速电压 U_{G2K} 从 10.0 V 依次增加到 80.0 V,每隔 0.5 V 记录相应电流值 I ,数据记入表 3.

六、数据记录及数据处理

1. 实验数据记录

表 1 最佳实验参量表

环境温度	灯丝电压 U_0	第一加速电压 U_{G1K}	拒斥电压 U_{G2A}	电流量程

表 2 改变灯丝电压 U_0 、拒斥电压 U_{G2A} 对 $I-U_{G2K}$ 曲线的影响

	$I-U_{G2K}$ 曲线变化规律	原因
灯丝电压 U_0 增大 0.5 V		
灯丝电压 U_0 减小 0.5 V		
拒斥电压 U_{G2A} 增大 1.0 V		
拒斥电压 U_{G2A} 减小 1.0 V		

NOTE

表 3 $I-U_{G2K}$ 关系数据表

$I_A / (10^{-7} \text{ A})$	U_{G2A} / V	U_{G2K} / V						
		0.0	0.5	1.0	8.5	9.0	9.5
10								
20								
30								
40								
50								
60								
70								
80								

2. 实验数据处理

- (1) 根据实验观测到的 $I-U_{G2K}$ 曲线随各电压的变化关系, 分析原因;
- (2) 利用作图法, 画出 $I-U_{G2K}$ 曲线, 并分别将相邻的四个电流峰值、四个电流谷值所对应的电压值 U_{G2K} 填入表 4;

表 4 相邻电流 I_A 峰值、谷值对应的电压 U_{G2K} 数据表

U_{G2K} / V	1	2	3	4
峰值电压 U_p				
谷值电压 U_v				

- (3) 利用逐差法计算氩原子第一激发电势 \bar{U}_g :

$$\bar{U}_g = \frac{(U_{p3} - U_{p2}) + (U_{p3} - U_{p1}) + (U_{v4} - U_{v2}) + (U_{v3} - U_{v1})}{8}$$

- (4) 计算实验测量值 \bar{U}_g 的相对误差:

$$\Delta E = \frac{|\bar{U}_g - U_g|}{U_g} \times 100\%$$

七、注意事项

弗兰克-赫兹管极易因电压设置不合适而遭受损坏. 由于弗兰克-赫兹管使用过程中的衰老, 每只管子的最佳状态会发生变化, 使用时可参照原参数适量调节灯丝电压 U_0 、 U_{G1K} 、 U_{G2A} (灯丝电压的调整建议先控制在标牌参数的 $\pm 0.3 \text{ V}$ 范围内小步进行, 若波形幅度不好, 再适量扩大调整范围).

(1) 灯丝电压 U_0 不宜过高, 否则会加快弗兰克-赫兹管老化.

(2) U_{G2K} 不宜超过 85 V , 否则管子易被击穿.

(3) 手动测量过程中, U_{G2K} 电压必须从小到大单向调节, 不可在过程中反复.

八、思考题

1. 为什么 $I-U_{G2K}$ 曲线中第一个峰到电压零点的距离不等于第一激发电势?
2. 实验中板极电流的下降并不是完全突然的, 其峰值总是有一定的宽度, 为什么?

实验三十三 太阳能电池基本特性测量

能源是人类社会存在与发展的重要物质基础. 目前世界能源结构是以煤炭、石油、天然气等化石能源为主体的结构. 而化石能源是不可再生的资源, 将在几十至一百多年间衰竭, 并且在生产和消费过程中有大量污染物排放, 破坏生态与环境. 因此必须大力开发利用清洁、干净的新能源和可再生能源.

太阳能是一种清洁、“绿色”的能源, 太阳能发电有两种方式. 光—热—电转化方式通过利用太阳辐射产生的热能发电, 一般是由太阳能集热器将所吸收的热能转换成蒸汽, 再驱动汽轮机发电, 太阳能热发电的缺点是效率很低而成本很高. 光—电直接转化方式是利用光生伏打效应而将太阳光能直接转化为电能, 光—电转化的基本装置就是太阳能电池. 根据所用材料的不同, 太阳能电池可分为硅太阳能电池, 化合物太阳能电池, 聚合物太阳能电池, 有机太阳能电池等. 其中硅太阳能电池是目前发展最成熟的, 在应用中居主导地位. 目前硅太阳能电池除应用于人造卫星和宇宙飞船外, 还应用于许多民用领域, 如太阳能汽车、太阳能游艇、太阳能乡村电站等. 太阳能的利用和太阳能电池特性的研究已经成为 21 世纪新型能源开发的重点课题.

一、实验目的

1. 了解太阳能电池发电的基本原理;
2. 熟悉太阳能电池的基本特性;
3. 测量太阳能电池的基本特性参量.

二、实验仪器

1. 导轨及滑动支架.
2. 单晶硅太阳能电池, 多晶硅太阳能电池, 非晶硅太阳能电池.
3. 电阻箱.
4. 太阳能电池特性实验仪.
5. 碘钨灯光源.
6. 光强探头.
7. 遮光罩.

三、实验原理

1. 太阳能电池发电的基本原理

太阳能电池主要是用半导体材料制成的, 占绝对主导市场的太阳能电池是以硅材料为主的. 为了理解太阳能电池的原理, 有必要对半导体材料, 特别是硅材料作一定的了解.

硅材料通常是大量硅原子规则排列形成的晶体. 由于晶体中原子的电子轨道的交叠和电子的共有化运动, 孤立原子的能级在晶体中分裂成为能量非常接近但又大小不同的许多能级. 这些由许多条能量相差很小的能级组成的区域, 看上去像一条带子, 因而称为能带. 各个能带与单个原子的各个能级相对应. 能量较低的能带常被电子填满, 称为满带. 满带中能量最高的, 即价电子填满的能带称为价带. 空带中能量最低的, 即离价带最近的能带称为导带. 各能带间存在的能带区域称为禁带. 通常所说的禁带是导带底和价带顶之间的能量间隔, 它们的能量差称为禁带宽度, 简称带隙. 带隙反映了使电子从价带激发到导带所需要的能量.

硅原子在外电子层具有四个电子, 即本质上决定其物理性能和化学性能的价电子. 在晶体中每个硅原子通过四个价电子和四个相邻的硅原子键合形成结合, 即共价键. 通过在硅晶体中掺入杂质原子代替原来硅原子的位置, 如加入硼或者磷杂质原子, 就可达到改变硅导电性的目的. 如果在硅晶体中掺入磷, 例如以一个磷原子对一百万个硅原子的比例关系进行掺杂, 磷原子在晶格中取代硅原子的位置. 磷原子在外层有 5 个电子, 在与周围的 4 个硅原子键合仅需要 4 个电子, 第 5 个电子是准自由的, 在晶体中能够移动而形成电流. 因为此时电子, 即负的载流子移动形成电流, 所以用磷或其他 5 价原子掺杂的硅称为 N 型硅. 多数载流子是带负电荷, 导电主要由电子决定的半导体称为 N 型半导体. 磷原子在晶体中起施放电子的作用, 所以把这类杂质称为施主杂质.

如果在硅晶体中掺入硼, 硼原子在晶格中取代硅原子的位置. 硼原子在外层只有 3 个电子, 在硅晶格中缺少 1 个电子与第 4 个相邻硅原子结合. 这个空缺的位子被称为空穴. 一个空穴的行为与 N 型半导体中的多数载流子(电子)完全类似: 它在晶体中移动并形成电流. 严格来讲, 当然不是空穴移动, 而是一个电子从相邻键合处跳到空穴处, 而在它原来的位子形成一个空穴, 好像空穴移动了一样. 空穴可以被看成是一个带正电的粒子, 其所带电荷与电子相等, 但符号相反. 因为此时空穴, 即正的载流子移动形成电流, 所以用硼或其他 3 价原子掺杂的硅称为 P 型硅. 多数载流子是带正电荷, 导电主要由空穴决定的半导体称为 P 型半导体. 硼原子在晶体中起接受电子的作用, 所以把这类杂质称为受主杂质.

在一块完整的半导体材料上, 用不同的掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体, 另一边形成 P 型半导体, 那么在两种半导体交界面附近就形成了 PN 结, 如图 1 所示. 由于 P 区的多数载流子(简称多子)是空穴, 少数载流子(简称少子)是电子; N 区的多数载流子是电子, 少数载流子是空穴, 这就使交界面两侧明显地存在着两种载流子的浓度差. 由于载流子的浓度分布不均匀, 载流子会从高浓度区域流向低浓度区域, 这个运动叫扩散运动. N 区电子浓度比 P 区高, N 区电子向 P 区扩散, 与 P 区界面附近的空穴复合而消失, 在 N 区的一侧留下了一层不能移动的施主正离子. 同样, P 区空穴浓度比 N 区高, P 区空穴向 N 区扩散, 与 N 区界面附近的电子复合而消失, 在 P 区的一侧留下了一层不能移动的受主负离子. 扩散的结果使交界面两侧出现了由不能移动的带电离子组成的空间电荷区, 因而形成了一个由 N 区指向 P 区的电场, 称为内建电场. 载流子在电场力的作用下的运动叫漂移运动. 随着扩散

的进行,空间电荷区加宽,内建电场增强,N区的少数空穴在电场力的作用下向P区漂移,漂移运动与扩散运动方向相反.同时P区的少数电子在电场力的作用下向N区漂移.最终多子参与的扩散运动和少数子参与的漂移运动达到动态平衡,空间电荷区的厚度不再增加,内建电场不再增强.形成的稳定的空间电荷区,称为PN结.由于空间电荷区内缺少载流子,所以又称PN结为耗尽层或高阻区.

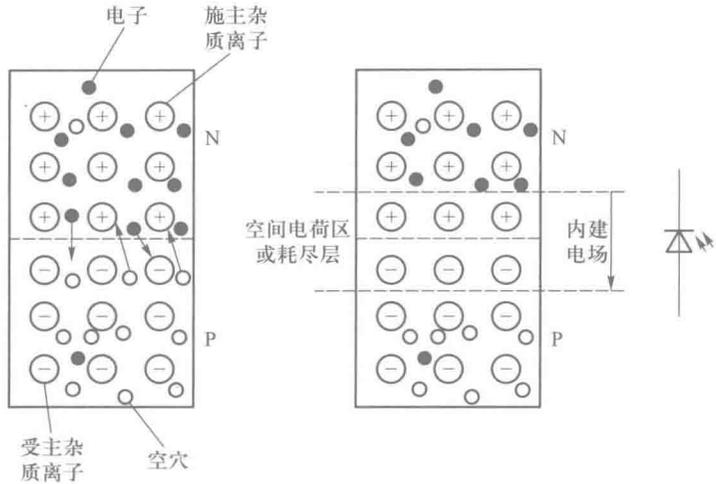


图1 PN结形成的物理原理

当光照射到PN结上时,如果入射光子的能量大于半导体材料的带隙,价带中的电子会吸收光子能量跳入导带,在价带中留下空穴,产生电子-空穴对.界面层附近的电子和空穴在复合之前,在内建电场的作用下相互分离.电子在内建电场力的作用下向N区运动,空穴向P区运动,从而使N区有过剩的电子,P区有过剩的空穴,于是就在PN结附近形成了与内建电场方向相反的光生电场.光生电场的一部分抵消内建电场,其余部分使P区积累了大量的正电荷,N区积累了大量的负电荷,于是就使得N区和P区之间的薄层产生了电动势,即光生伏特电动势.当接通外电路时,便有电能输出.这就是PN结接触型太阳能电池发电的基本原理.

2. 太阳能电池的基本特性

太阳能电池可视为图2所示的等效电路,它由一个理想电流源(光照产生光电流的电流源)和一个理想二极管所组成. I_{ph} 为太阳能电池在光照时该等效电流源的输出电流. I_d 为通过太阳能电池内部等效二极管的电流.在没有光照时,太阳能电池等效为一个二极管,其正向偏压 U 与通过电流 I_d 之间的关系是

$$I_d = I_0 (e^{\beta U} - 1) \quad (1)$$

式中 I_0 和 β 为常量,取决于太阳能电池的材料及工作温度.

太阳能电池接受光照时,则由式(1)得

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 (e^{\beta U} - 1) \quad (2)$$

式中 I 为太阳能电池的输出电流; U 为输出电压.

在太阳能电池输出端短路时, $U = 0$,这时的输出电流即为短路电流,由式(2)

可得短路电流 $I_{sc} = I_{ph}$. 而开路时, $I = 0$, 即 $I_{sc} - I_0 (e^{\beta U_{oc}} - 1) = 0$. 因此可得开路电压 U_{oc} 为

$$U_{oc} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (3)$$

式(3)即为在理想情况下, 太阳能电池的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 的关系式.

在一定的光照条件下, 改变太阳能电池负载电阻的大小, 测量其输出电压与输出电流, 得到输出伏安特性, 如图 3 实线所示. 太阳能电池的输出功率 $P = UI$. 同样的太阳能电池及光照条件, 随着负载电阻变化, 输出电压 U 和输出电流 I 会发生变化, 输出功率 P 会相应的变化. 若以输出电压为横坐标, 输出功率为纵坐标, 绘出的 $P-U$ 曲线如图 3 虚线所示.

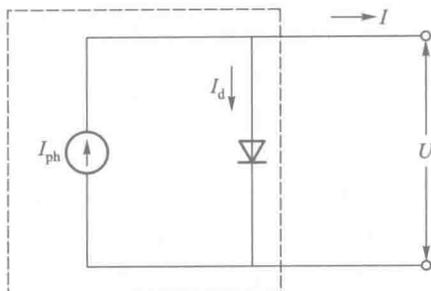


图 2 太阳能电池的等效电路

NOTE

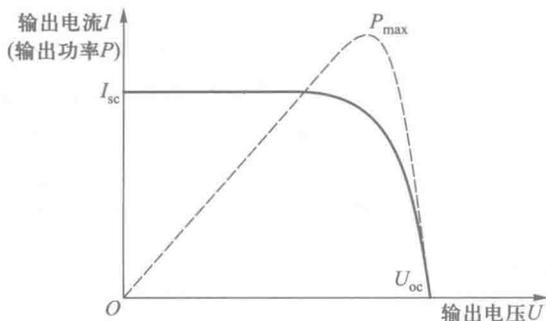


图 3 太阳能电池的输出特性

输出功率的最大值就是最大输出功率 P_{max} . 由于短路电流 I_{sc} 是太阳能电池的最大输出电流, 开路电压 U_{oc} 是最大输出电压, 所以输出功率 $P = UI \leq U_{oc} I_{sc}$. 定义太阳能电池的填充因子 FF 为

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} I_{sc}} \quad (4)$$

填充因子是评价太阳能电池输出特性好坏的一个重要参量, 它的值越高, 表明太阳能电池的光电转化效率越高. 一般的硅光电池 FF 值在 0.75 ~ 0.8 之间. 光电转化效率 η_s 定义为

$$\eta_s = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

P_{in} 为入射到太阳能电池表面的光功率.

太阳能电池的短路电流 I_{sc} , 开路电压 U_{oc} , 最大输出功率 P_{max} , 填充因子 FF 和光电转化效率 η_s 是太阳能电池的基本特性参量.

理论分析及实验表明, 在不同的光照条件下, 短路电流随入射光功率线性增长, 而开路电压在入射光功率增加时只略微增加, 如图 4 所示.

NOTE

硅太阳能电池分为单晶硅太阳能电池、多晶硅薄膜太阳能电池和非晶硅薄膜太阳能电池三种。单晶是指整个晶体中的原子(或离子)排列具有周期性,或者称为是长程有序的。多晶是由大量的微小单晶体(晶粒)随机堆积而成的整块材料。非晶指晶体无规则的外形和固定的熔点,内部结构也不存在长程有序,但在若干原子间距的较小范围内存在结构上的有序排列,称为短程有序的。

本实验研究单晶硅、多晶硅、非晶硅 3 种太阳能电池的特性。

单晶硅太阳能电池转化效率最高,技术也最为成熟。在实验室里最高的转化效率约为 24.7%,规模生产时的效率可达到 15%。在大规模应用和工业生产中仍占据主导地位。但由于单晶硅价格高,大幅度降低其成本很困难,为了节省硅材料成本,发展了多晶硅薄膜和非晶硅薄膜作为单晶硅太阳能电池的替代产品。

多晶硅薄膜太阳能电池与单晶硅比较,成本低廉,而效率高于非晶硅薄膜电池,其实验室最高转化效率约为 18%,工业规模生产的转化效率可达到 10%。因此,多晶硅薄膜电池可能在未来的太阳能电池市场上占据主导地位。

非晶硅薄膜太阳能电池成本低,重量轻,便于大规模生产,有极大的潜力。如果能进一步解决稳定性及提高转化效率,无疑是太阳能电池的主要发展方向之一。

四、实验装置介绍

太阳能电池实验装置如图 5 所示,太阳能电池特性实验仪面板如图 6 所示。

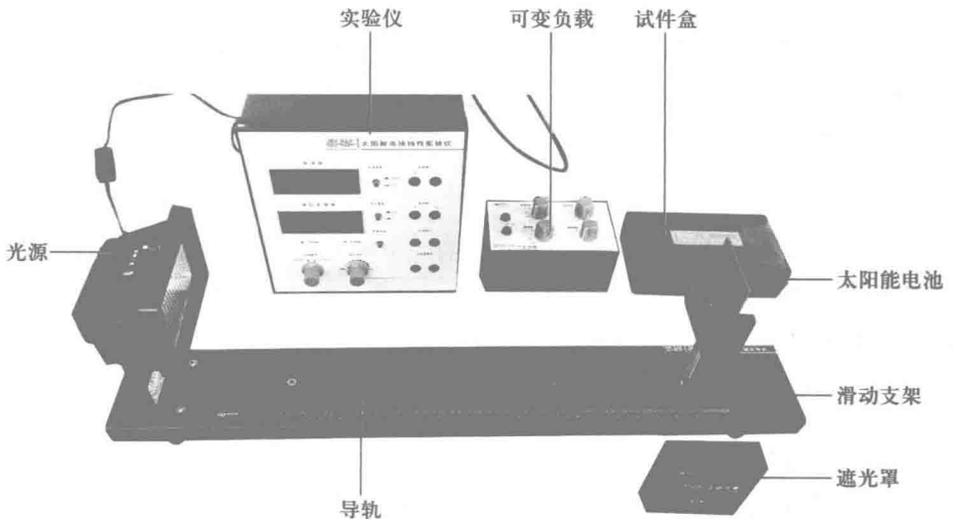


图 5 太阳能电池实验装置

光源采用碘钨灯,它的输出光谱接近太阳光谱。调节光源与太阳能电池之间的

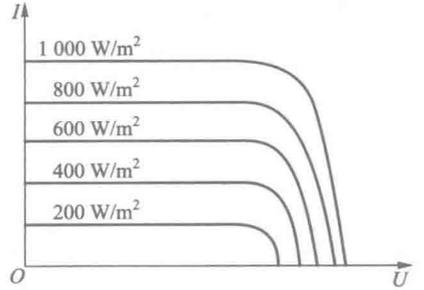


图 4 不同光照条件下的 $I-U$ 曲线

距离可以改变照射到太阳能电池上的光强,具体数值由光强探头测量。

太阳能电池特性实验仪包括电压源、电流表、电压/光强表,为实验提供电源,同时可以测量并显示电流、电压以及光强的数值。

电压源:可以输出 0~8 V 连续可调的直流电压。为太阳能电池伏安特性测量提供电压。

电流表:可以测量并显示 0~200 mA 的电流,根据测量范围选择适当的“电流量程”。

电压/光强表:通过“测量转换”按键,可以测量输入“电压输入”接口的电压,或接入“光强输入”接口的的光强探头测量到的光强数值。表头下方的指示灯确定当前的显示状态。根据测量范围,可以选择适当的“电压量程”或“光强量程”。

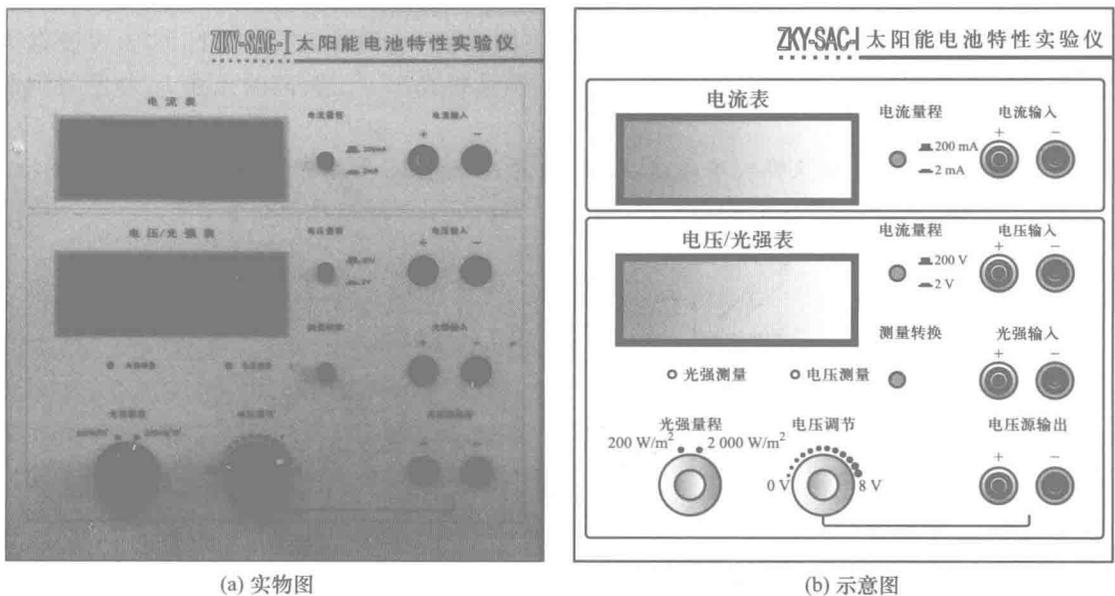


图 6 太阳能电池特性实验仪面板

五、实验内容及步骤

1. 硅太阳能电池的暗伏安特性测量

暗伏安特性是指无光照射时,流经太阳能电池的电流与外加电压之间的关系。

太阳能电池的基本结构是一个大面积平面 PN 结,单个太阳能电池单元的 PN 结面积已远大于普通的二极管。在实际应用中,为得到所需的输出电流,通常将若干电池单元并联。为得到所需输出电压,通常将若干已并联的电池组串联。因此,它的伏安特性虽类似于普通二极管,但也取决于太阳能电池的材料,结构及组成组件时的串并连关系。本实验提供的组件是将若干太阳能电池单元并联形成的电池组。

用遮光罩罩住太阳能电池。按图 7 所示连接电路。将待测的太阳能电池接到实验仪上的“电压输出”接口,电压源输出的正极接太阳能电池的正极,给太阳能电池加上正向电压。电阻箱调至 50 Ω 后串联进电路起保护作用,用电压表测量太阳能

电池两端电压, 电流表测量回路中的电流.

将电压源调到 0 V, 然后逐渐增大输出电压, 每间隔 0.3 V 记一次电流值. 记录到表 1 中.

将电压输入调到 0 V. 然后将“电压输出”接口的两根连线互换, 即给太阳能电池加上反向的电压. 逐渐增大反向电压, 记录电流随电压变换的数据于表 1 中.

2. 开路电压、短路电流与光强关系测量

打开光源开关, 预热 5 min. 打开遮光罩. 将光强探头装在太阳能电池板位置, 探头输出线连接到太阳能电池特性实验仪的“光强输入”接口上. 实验仪设置为“光强测量”. 由近及远移动滑动支架, 测量距光源一定距离的光强 I_0 , 将测量到的光强记入表 2.

将光强探头换成单晶硅太阳能电池, 实验仪设置为“电压表”状态. 按图 8(a) 接线, 按测量光强时的距离值(光强已知), 记录开路电压值于表 2 中.

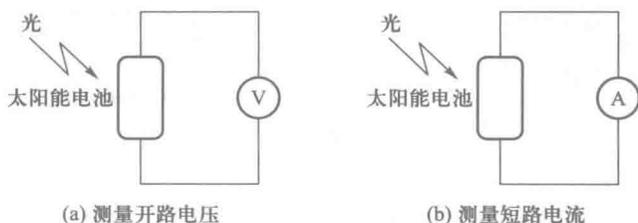


图 8 开路电压、短路电流与光强关系测量电路

按图 8(b) 接线, 记录短路电流值于表 2 中.

将单晶硅太阳能电池更换为多晶硅太阳能电池, 重复测量步骤, 并记录数据.

将多晶硅太阳能电池更换为非晶硅太阳能电池, 重复测量步骤, 并记录数据.

3. 太阳能电池输出特性测量

按图 9 接线, 以电阻箱作为太阳能电池负载. 将滑动支架固定在导轨上某一个位置, 记录下滑动支架处的光照强度. 保持光照强度不变, 分别将三种太阳能电池板安装到支架上, 通过改变电阻箱的电阻值, 记录太阳能电池的输出电压 U 和电流 I , 并计算输出功率 P , 填于表 3 中.

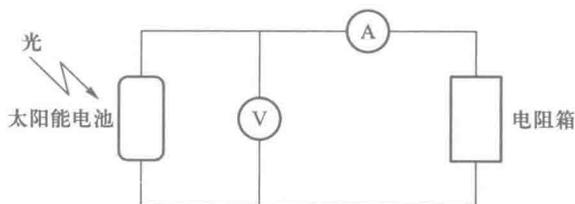


图 9 太阳能电池输出特性测量电路

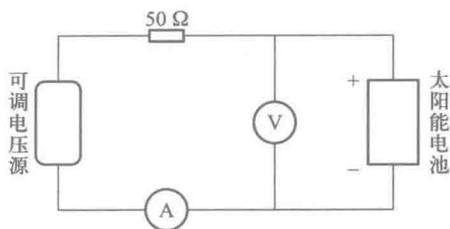


图 7 暗伏安特性测量电路

NOTE

六、数据记录及数据处理

1. 硅太阳能电池的暗伏安特性测量

表 1 三种太阳能电池的暗伏安特性测量

电压 U/V	电流 I/mA		
	单晶硅	多晶硅	非晶硅
-7.00			
-6.00			
-5.00			
-4.00			
-3.00			
-2.00			
-1.00			
0.00			
0.30			
0.60			
0.90			
1.20			
1.50			
1.80			
2.10			
2.40			
2.70			
3.00			
3.30			
3.60			
3.90			

NOTE

以电压为横坐标,电流为纵坐标,根据表 1 画出三种太阳能电池的暗伏安特性曲线.讨论太阳能电池的暗伏安特性与一般二极管的伏安特性有何异同.

2. 开路电压、短路电流与光强关系测量

表 2 三种太阳能电池开路电压与短路电流随光强变化关系

距离/cm		15	20	25	30	35	40	45	50
光强 $I_0/(W \cdot m^{-2})$									
单晶硅	开路电压 U_{oc}/V								
	短路电流 I_{sc}/mA								
多晶硅	开路电压 U_{oc}/V								
	短路电流 I_{sc}/mA								
非晶硅	开路电压 U_{oc}/V								
	短路电流 I_{sc}/mA								

根据表 2 数据,画出三种太阳能电池的开路电压随光强变化的关系曲线.

根据表 2 数据,画出三种太阳能电池的短路电流随光强变化的关系曲线.

3. 太阳能电池输出特性测量

表 3 三种太阳能电池输出特性实验

光强 $I_0 = \quad W/m^2$

负载电阻 R/Ω									
单晶硅	输出电压 U/V								
	输出电流 I/mA								
	输出功率 P/mW								
多晶硅	输出电压 U/V								
	输出电流 I/mA								
	输出功率 P/mW								
非晶硅	输出电压 U/V								
	输出电流 I/mA								
	输出功率 P/mW								

根据表 3 数据作三种太阳能电池的输出伏安特性 $I-U$ 曲线及输出功率随负载电阻变化 $P-R$ 曲线.

找出最大输出功率 P_{max} 和最佳匹配负载,最大输出功率时对应的电阻值即为最佳匹配负载.

由式(4)计算填充因子.

由式(5)计算转化效率.入射到太阳能电池板上的光功率 $P_{in} = I_0 S_1$, I_0 为入射

到太阳能电池板表面的光强, S_1 为太阳能电池板面积(约为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$).

七、注意事项

1. 在预热光源的时候,需用遮光罩罩住太阳能电池,以降低太阳能电池的温度,减小实验误差.
2. 光源工作及关闭后的约 1 h 期间,灯罩表面的温度都很高,请不要触摸.
3. 可变负载只能适用于本实验,否则可能烧坏可变负载.
4. 220 V 电源须可靠接地.

八、思考题

1. 太阳能电池的基本特性参量有哪些?
2. 什么是 P 型半导体和 N 型半导体?
3. PN 结是如何形成的?
4. 单晶硅、多晶硅和非晶硅的区别是什么?
5. 测量条件不变的情况下,测量中发现太阳能电池的短路电流发生变化,试分析是什么原因造成的?

实验三十四 PN 结正向特性的研究和应用

一、实验目的

1. 在同一恒定正向电流条件下,测绘 PN 结正向压降随温度的变化曲线,确定其灵敏度,估算被测 PN 结材料的禁带宽度;
2. 测量同一温度下,正向电压随正向电流的变化关系,绘制伏安特性曲线;
3. 学习指数函数的曲线回归的方法,并计算出玻耳兹曼常量,估算反向饱和电流;

二、实验仪器

DH-PN-2 型 PN 结正向特性综合实验仪。

三、实验原理

1. PN 结的正向特性

理想情况下,PN 结(有关 PN 结的理论参见实验太阳能电池基本特性测量。)的正向电流随正向压降按指数规律变化.其正向电流 I_F 和正向压降 U_F 存在如下近关系:

$$I_F = I_s \exp\left(\frac{qU_F}{kT}\right) \quad (1)$$

其中 q 为电子电荷; k 为玻耳兹曼常量; T 为热力学温度; I_s 为反向饱和电流,它是一个和 PN 结材料的禁带宽度以及温度有关的系数,可以证明:

$$I_s = CT^r \exp\left[-\frac{qU_{g(0)}}{kT}\right] \quad (2)$$

其中 C 是与结面积、掺质浓度等有关的常量, r 是常数(r 的数值取决于少数载流子迁移率对温度的关系,通常取 $r=3.4$); $U_{g(0)}$ 为绝对零度时 PN 结材料的导带底和价带顶的电势差,对应的 $qU_{g(0)}$ 即为禁带宽度.将式(2)代入式(1),两边取对数可得

$$U_F = U_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right) T - \frac{kT}{q} \ln T^r = U_1 + U_{nl} \quad (3)$$

其中 $U_1 = U_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right) T$, $U_{nl} = -\frac{kT}{q} \ln T^r$

方程(3)就是 PN 结正向压降作为电流和温度函数的表达式,它是 PN 结温度传感器的基本方程.令 $I_F =$ 常量,则正向压降只随温度而变化,但是在方程(3)中还包含非线性项 U_{nl} .下面来分析一下 U_{nl} 项所引起的非线性误差.

设温度由 T_1 变为 T 时,正向电压由 U_{F1} 变为 U_F ,由式(3)可得

$$U_F = U_{g(0)} - [U_{g(0)} - U_{F1}] \frac{T}{T_1} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{T}{T_1}\right)^r \quad (4)$$

按理想的线性温度响应, U_F 应取如下形式:

$$U_{\text{理想}} = U_{F1} + \frac{\partial U_{F1}}{\partial T} (T - T_1) \quad (5)$$

其中 $\frac{\partial U_{F1}}{\partial T}$ 等于 T_1 温度时的 $\frac{\partial U_F}{\partial T}$ 值. 由式(3)求导, 并变换可得到

$$\frac{\partial U_{F1}}{\partial T} = -\frac{U_{g(0)} - U_{F1}}{T_1} - \frac{k}{q} r \quad (6)$$

所以

$$\begin{aligned} U_{\text{理想}} &= U_{F1} + \left[-\frac{U_{g(0)} - U_{F1}}{T_1} - \frac{k}{q} r \right] (T - T_1) \\ &= U_{g(0)} - [U_{g(0)} - U_{F1}] \frac{T}{T_1} - \frac{k}{q} (T - T_1) r \end{aligned} \quad (7)$$

由理想线性温度响应式(7)和实际响应式(4)相比较, 可得实际响应对线性的理论偏差为

$$\Delta = U_{\text{理想}} - U_F = -\frac{k}{q} (T - T_1) r + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_1} \right)^r \quad (8)$$

设 $T_1 = 300 \text{ K}$, $T = 310 \text{ K}$, 取 $r = 3.4$, 由式(8)可得 $\Delta = 0.048 \text{ mV}$, 而相应的 U_F 的改变量约为 20 mV 以上, 相比之下误差 Δ 很小. 不过当温度变化范围增大时, U_F 温度响应的非线性误差将有所递增, 这主要由于 r 因子所致.

综上所述, 在 I_F 为恒定小电流的条件下, PN 结的 U_F 对 T 的依赖关系取决于线性项 U_1 , 即正向电压降几乎随温度升高而线性下降, 这也就是 PN 结测温的理论依据.

2. 求 PN 结温度传感器的灵敏度, 测量禁带宽度

由前所述, 我们可以得到一个测量 PN 结的结电压 U_F 与热力学温度 T 关系的近似关系式:

$$U_F = U_1 = U_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F} \right) T = U_{g(0)} + ST \quad (9)$$

式中 S (单位为 $\text{mV}/^\circ\text{C}$) 为 PN 结温度传感器灵敏度. 用实验的方法测出 $U_F - T$ 变化关系曲线, 其斜率 $\Delta U_F / \Delta T$ 即为灵敏度 S . 在求得 S 后, 根据式(9)可知

$$U_{g(0)} = U_F - ST \quad (10)$$

从而可求出温度 0 K 时半导体材料的近似禁带宽度 $E_{g(0)} = qU_{g(0)}$. 硅材料的 $E_{g(0)}$ 约为 1.21 eV .

必须指出, 上述结论仅适用于杂质全部电离, 本征激发可以忽略的温度区间 (对于通常的硅二极管来说, 温度范围为 $-50 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$). 如果温度低于或高于上述范围时, 由于杂质电离因子减小或本征载流子迅速增加, $U_F - T$ 关系将产生新的非线性, 这一现象说明 $U_F - T$ 的特性还随 PN 结的材料而异, 对于宽带材料 (如 GaAs, E_g 为 1.43 eV) 的 PN 结, 其高温端的线性区则宽; 而材料杂质电离能小 (如 InSb) 的 PN 结, 则低温端的线性范围宽. 对于给定的 PN 结, 即使在杂质导电和非本征激发温度范围内, 其线性度亦随温度的高低而有所不同, 这是非线性项 U_{ni} 引起的, 由

U_{ni} 对 T 的二阶导数 $\frac{d^2 U}{dT^2} = \frac{1}{T}$ 可知, $\frac{dU_{ni}}{dT}$ 的变化与 T 成反比, 所以 $U_F - T$ 的线性度在高温端优于低温端, 这是 PN 结温度传感器的普遍规律. 此外, 由式(4)可知, 减小 I_F , 可以改善线性度, 但并不能从根本上解决问题, 目前行之有效的方法大致有两种:

(1) 利用对管的两个 PN 结 (将三极管的基极与集电极短路与发射极组成一个 PN 结), 分别在不同电流 I_{F1} 、 I_{F2} 下工作, 由此获得两者之差 ($I_{F1} - I_{F2}$) 与温度成线性函数关系, 即

$$U_{F1} - U_{F2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{F1}}{I_{F2}} \quad (11)$$

本实验所用的 PN 结也是由三极管的 c、b 极短路后构成的. 尽管还有一定的误差, 但与单个 PN 结相比其线性度与精度均有所提高.

(2) 采用电流函数发生器来消除非线性误差. 由式(3)可知, 非线性误差来自 T^r 项, 利用函数发生器, I_F 比例于绝对温度的 r 次方, 则 $U_F - T$ 的线性理论误差为 $\Delta = 0$. 实验结果与理论值比较一致, 其精度可达 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$.

3. 求玻耳兹曼常量

由式(11)可知, 在保持 T 不变的情况下, 只要分别在不同电流 I_{F1} 、 I_{F2} 下测得相应的 U_{F1} 、 U_{F2} 就可求得玻耳兹曼常量 k , 即

$$k = \frac{q}{T} \ln \frac{I_{F2}}{I_{F1}} (U_{F1} - U_{F2}) \quad (12)$$

为了提高测量的精度, 也可根据式(1)指数函数的曲线回归, 求得 k 值. 方法是以公式 $I_F = A \exp(BU_F)$ 的正向电流 I_F 和正向电压降 U_F 为变量, 根据测得的数据, 用 Excel 进行指数函数的曲线回归, 求得 A 、 B 值, 再由 $A = I_S$ 求出反向饱和电流, $B = q/kT$ 求出玻耳兹曼常量 k .

四、实验装置介绍

DH-PN-2 型 PN 结正向特性综合实验仪由两部分组成:

1. DH-SJ5 温度传感器实验装置

本装置是以 Pt100 为温度传感器测量和控制温度的, 该温度传感器可以插入由金属铜块构成的温度源, 配合 PID 控温仪, 就可进行温度的测量和控制.

装置具有以下的特点:

(1) 控温精度高、范围广, 加热所需的温度可自由设定, 采用数字显示.

(2) 使用低电压恒流加热、安全可靠、无污染. 加热电流连续可调.

(3) 提供的是通用式的温度源, 有多个温度插孔, 可方便地插入被测传感器. 例如, 除 PN 结传感器外, 用户可根据自有条件, 用来测量热敏电阻 (NTC 和 PTC)、铜电阻 Cu50、铜-康铜热电偶、AD590 和 LM35 等温度传感器, 所以具有很好的拓展性.

(4) 加热部分配有风扇, 在做降温实验过程中可采用风扇快速降温.

装置的主要技术指标:

- (1) 电源电压: AC 220 V \times (1 \pm 10%), 50/60 Hz;
- (2) 工作环境: 温度 0 ~ 40 $^{\circ}$ C, 相对湿度 < 80% 的无腐蚀性场合;
- (3) 测控温传感器: Pt100; 控温范围: 室温 ~ 120 $^{\circ}$ C; 温度控制精度: \pm 0.2 $^{\circ}$ C; 分辨率: 0.1 $^{\circ}$ C; 控制方式: PID 控制.
- (4) 默认配备的传感器: 2 个 PN 结传感器: S9013, C1815, 均由小功率 NPN 晶体三极管的 CB 结短路而形成的 PN 结.

2. PN 结正向特性综合实验仪

实验仪独创地将测量玻耳兹曼常量和禁带宽度的实验内容统一到一个实验过程中, 只需测量出正向电压随正向电流的变化曲线即可. 为了更精确地测量玻耳兹曼常量, 没有采取常规的加正向压降测正向微电流的方法, 而是特别设计了一个能稳定输出 1 nA ~ 1 mA 范围的精密微电流源, 避免了因测量微电流跳字、不稳定而引起的误差, 只要能测量出准确的正向压降就可测得实验曲线. 另外, 根据较为精确的推导, 在常温下就能估测出绝对零度时硅材料的禁带宽度, 而不需要在冰水混合物中测量, 不但简化了测量方法和过程, 还避免了由于冰水混合物温度失准带来的误差.

实验仪的主要技术指标:

- (1) 电流输出范围 1 nA ~ 1 mA, 分 4 段可调; 调节细度: 最小 1 nA; 开路电压: 约 5 V;
- (2) 微电流显示范围: 1 nA ~ 1 999 μ A, 分辨率 10^{-9} A; 微电流精度: 0.3% \pm 2 个字;
- (3) 正向压降测量范围: 0 ~ 2 V; 分辨率: 1 mV; 电压测量精度: 0.3% \pm 2 个字;
- (4) 工作环境: 温度 0 ~ 40 $^{\circ}$ C, 相对湿度 < 85% 的无腐蚀性场合.

五、实验内容及步骤

实验前, 将 DH-SJ 型温度传感器实验装置上的“加热电流”开关置“关”位置, 将“风扇电流”开关置“关”位置, 接上加热电源线. 插好 Pt100 温度传感器和 PN 结温度传感器, 两者连接均为直插式. PN 结引出线分别插入 PN 结正向特性综合试验仪上的 +U、-U 和 +I、-I. 注意插头的颜色和插孔的位置.

打开电源开关, 温度传感器实验装置上将显示出室温 T_R , 记录下起始温度 T_R .

1. 测量同一温度下伏安特性曲线, 并计算玻耳兹曼常量

为了获得较为准确的测量结果, 我们在仪器通电预热 10 min 后进行实验. 先以室温为基准, 测整个伏安特性实验的数据.

首先将 PN 结正向特性综合试验仪上的电流量程置于 $\times 1$ 挡, 再调整电流调节旋钮, 观察对应的 U_F 值应有变化的读数. 可以按照表 1 的 U_F 值来调节设定电流值, 如果电流表显示值到达 1 000, 可以改用大一挡量程, 记录下一系列电压、电流值于表 1. 由于采用了高精度的微电流源, 这种测量方法可以减小测量误差.

注意, 在整个实验过程中, 都是在室温下测量的. 实际的 U_F 值的起、终点和间隔值可根据实际情况微调.

NOTE

2. 在同一恒定正向电流条件下,测绘 PN 结正向压降随温度的变化曲线,确定其灵敏度,估算被测 PN 结材料的禁带宽度

选择合适的正向电流 I_F , 并保持不变. 一般选小于 $100 \mu\text{A}$ 的值, 以减小自身热效应. 将 DH-SJ 型温度传感器实验装置上的“加热电流”开关置“开”位置, 根据目标温度, 选择合适的加热电流, 在实验时间允许的情况下, 加热电流可以取得小一点, 如 $0.3 \sim 0.6 \text{ A}$ 之间. 这时加热炉内温度开始升高, 开始记录对应的 U_F 和 T 于表 2; 然后关闭“加热电流”开关, 打开“风扇电流”开关, 记录降温过程的 U_F 和 T 于表 3. 为了更准确地记数, 可根据 U_F 的变化 (建议步长 ΔU_F 为 0.005 V) 记录数据.

注意: 实验过程中, 正向电流 I_F 应保持不变; 设定的最高温度不宜过高, 必须控制在 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内; 升温过程对起点温度无要求, 建议降温过程起点温度不低于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

六、数据记录及数据处理

1. 绘制伏安特性曲线, 计算玻耳兹曼常量

表 1 同一温度下正向电压与正向电流的关系
 $T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ }^\circ\text{C}$

U_F/V	0.350	0.360	0.370	0.380	0.390	0.400	0.410	0.420
$I_F/\mu\text{A}$								
U_F/V	0.430	0.440	0.450	0.460	0.470	0.480	0.490	0.500
$I_F/\mu\text{A}$								
U_F/V	0.510	0.520	0.530	0.540	0.550	0.560	0.570	0.580
$I_F/\mu\text{A}$								

(1) 根据表 1 中数据, 绘制伏安特性曲线.

(2) 计算玻耳兹曼常量, 学习用 Excel 进行指数函数的曲线回归的方法.

① 直接计算法: 根据表 1 测得的数据, 利用公式 (12), 计算出玻耳兹曼常量 $k = \underline{\hspace{2cm}}$.

② 曲线拟合法: 借用 Excel 程序拟合指数函数. 以公式 $I_F = A \exp(BU_F)$ 的正向电流 I_F 和正向压降 U_F 为变量, 根据表 1 测得的数据, 以 U_F 为 x 轴数据, I_F 为 y 轴数据, 用 Excel 进行指数函数的曲线回归, 求得 A 、 B 值; 再由 $A = I_s$, 估算出反向饱和电流; 由 $B = q/kT$, 求出玻耳兹曼常量 k .

Excel 中自动拟合曲线的方法:

在 Excel 中将选中需要拟合的正向电压和正向电流数据, 依次点击 Excel 程序菜单插入—图表—标准类型— xy 散点图—子表类型—无数据点平滑散点图—下一步, 出现数据区域、系列选项, 在数据区域选项中, 可根据实际的数据区域的排列, 选择行或列; 在系列选项中可填入不同系列的代号, 如该曲线测量时的温度值; 点击下一步, 出现图标选项, 在标题项中, 可填入图表标题、数值 (X) 轴、数值 (Y) 轴内容, 如 PN 结伏安特性、正向电压 (V)、正向电流 (μA), 在网格线项中, 可选择主要网格线、次要网格线; 点击下一步, 可完成曲线的图表绘制.

完成后的图表,如果需要更改,还可以继续设置.双击图表区域,在弹出的绘图区格式中,可以选择绘图区的背景色;双击坐标轴,在弹出的坐标轴格式框中,可设置坐标轴的刻度、起始值等,可根据需要自行设置.

完成以上设置后,在已产生图表中,右键单击数据曲线,在右键菜单中,选择添加趋势线,在类型菜单中选择要生成曲线的类型,这里选择指数(X),在选项菜单中选中显示公式、显示 R 平方值,点击确定即可显示公式.右键点击公式,点击数据标志格式,选择数字栏的科学计数,小数位数选择 3 位,点击确定,即可根据此公式求出:

$$A = \underline{\hspace{2cm}}, B = \underline{\hspace{2cm}}, \text{相关系数 } R = \sqrt{R^2} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

$$\text{估算反向饱和电流 } I_s = A = \underline{\hspace{2cm}},$$

$$\text{玻尔兹曼常量 } k = q/(BT) = \underline{\hspace{2cm}}.$$

2. 求被测 PN 结的灵敏度 S , 估算被测 PN 结材料的禁带宽度

表 2 同一 I_F 下,正向电压与温度的关系(升温过程)

$$I_F = \underline{\hspace{2cm}} \mu\text{A}$$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$T/^\circ\text{C}$								
T/K								
U_F/V								
U_F/mV								
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
$T/^\circ\text{C}$								
T/K								
U_F/V								
U_F/mV								

表 3 同一 I_F 下,正向电压与温度的关系(降温过程)

$$I_F = \underline{\hspace{2cm}} \mu\text{A}$$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$T/^\circ\text{C}$								
T/K								
U_F/V								
U_F/mV								
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
$T/^\circ\text{C}$								
T/K								
U_F/V								
U_F/mV								

NOTE

求被测 PN 结正向压降随温度变化的灵敏度 S (单位用 mV/K), 估算被测 PN 结材料的禁带宽度.

以 T 为横坐标, U_F 为纵坐标, 在坐标纸上作 U_F-T 曲线, 其斜率就是 S , 建议 x 轴坐标起始点选 270 K . 注意: 这里的 T 单位为 K , U_F 的单位为 mV . 按照作图法处理数据的要求, 分别求解升温 and 降温 U_F-T 曲线斜率 $S_{\text{升}}$ 和 $S_{\text{降}}$ 及截距 $U_{g(0)\text{升}}$ 和 $U_{g(0)\text{降}}$, 然后计算平均值.

NOTE

斜率, 即传感器灵敏度 $S = (S_{\text{升}} + S_{\text{降}}) / 2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mV/K}$;

截距 $U_{g(0)} = [U_{g(0)\text{升}} + U_{g(0)\text{降}}] / 2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V(0 K)}$;

将实验所得的 $E_{g(0)} = qU_{g(0)} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ eV}$, 与公认值 $E_{g(0)} = 1.21 \text{ eV}$ 比较, 并求相对误差.

七、注意事项

1. 在选择电流量程时在保证测量范围的前提下尽量选择小挡位, 以提高精度.
2. 为了保证微电流源的准确性, 仪器内部显示电路与微电流源是不共地的, 所以与常规电流源不同的是: 当负载开路时显示的电流信号不为零. 这是正常的, 并且有一个优点: 我们可以在不接负载时就能预先设定需要的电流.
3. 仪器出厂时已经校准. 请不要用普通的万用表或其他仪器, 直接测量或比对 PN 结的正向电压和正向微电流, 否则会得到失准的结果, 原因是 PN 结实验时处于高阻状态.
4. 仪器的电压表测量电压量程仅为 2 V , 请不要超量程使用或测量其他未知电压.
5. 仪器的连接线要注意使用, 有插口方向的对齐插拔, 插拔时不可用力过猛.
6. 加热装置温升不应超过 $120\text{ }^\circ\text{C}$, 否则将造成仪器老化或故障.
7. 使用完毕后, 一定要切断电源, 并存放于干燥、无灰尘、无腐蚀性气体的环境中.

八、思考题

1. PN 结作为温度传感器能够测温的理论依据是什么?
2. 实验中, 正向电流 I_F 一般选小于 $100\text{ }\mu\text{A}$, 不宜太大, 为什么?
3. 对于给定的 PN 结, 改善 U_F-T 线性度的方法有哪些? 如何从根本上消除 $U_F(T)$ 函数中的非线性项 U_{nl} 对 PN 结测温的影响?

实验三十五 燃料电池综合特性研究

1839年,威廉·格罗夫(Willian Grove)爵士发明了燃料电池(Fuel Cell),但是燃料电池本身存在的两个缺点一直制约着它的发展.首先,它的价格十分昂贵,使它的使用受到局限,仅被用于太空任务或偏远地区发电.其次,氢气是一种挥发性极强的易燃气体,储存难度很高.随着社会的发展和科技的进步,历经近两百年,在材料,结构,工艺不断改进之后,燃料电池进入了实用阶段.燃料电池是一种高效(50%~70%)、环境友好的新能源发电装置,它不经过燃烧而是以电化学反应的方式将燃料的化学能直接转化为电能.燃料电池与普通电池存在差别:燃料电池的正、负极本身不包含活性物质,只是电催化和集流的转换元件,也是电化学反应的场所.燃料电池是开放体系,活性物质储存在电池之外,只要不断地供给燃料和氧化剂就能连续发电,因而容量很大.

按照燃料电池电解质的不同,燃料电池可分为5类:碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC)、磷酸燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)、固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)和质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell 或 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC).在这些燃料电池中,质子交换膜燃料电池工作温度是最低的,也是目前发展规模最大的一种.

燃料电池的燃料氢(反应所需的氧可从空气中获得)可电解水获得,也可由矿物或生物原料转化制成.本实验包含太阳能电池发电(光能—电能转化)、电解水制取氢气(电能—氢能转化)、燃料电池发电(氢能—电能转化)几个环节,形成了完整的能量转化、储存、使用的链条.实验内含物理内容丰富,实验内容紧密结合科技发展热点与实际应用,实验过程环保清洁.

一、实验目的

1. 了解燃料电池的工作原理;
2. 观察仪器的能量转化过程:光能→太阳能电池→电能→电解池→氢能(能量储存)→燃料电池→电能;
3. 测量质子交换膜电解池的特性,验证法拉第电解定律;
4. 测量燃料电池输出特性,作出所测燃料电池的伏安特性(极化)曲线,电池输出功率随输出电压的变化曲线;计算燃料电池的最大输出功率及效率;
5. 测量太阳能电池的特性,作出所测太阳能电池的伏安特性曲线,电池输出功率随输出电压的变化曲线;获取太阳能电池的开路电压、短路电流、最大输出功率、填充因子等特性参量(选做).

二、实验仪器

燃料电池综合实验仪.

NOTE

三、实验原理

1. 燃料电池

质子交换膜燃料电池在常温下工作,具有启动快速,结构紧凑的优点,最适宜作汽车或其他可移动设备的电源,近年来发展很快,其基本结构如图1所示.目前广泛采用的全氟磺酸质子交换膜为固体聚合物薄膜,厚度0.05~0.1 mm,它提供氢离子(质子)从阳极到达阴极的通道,而电子或气体不能通过.催化层是将纳米量级的铂粒子用化学或物理的方法附着在质子交换膜表面,厚度约0.03 mm,对阳极氢的氧化和阴极氧的还原起催化作用.膜两边的阳极和阴极由石墨化的碳纸或碳布做成,厚度0.2~0.5 mm,导电性能良好,其上的微孔提供气体进入催化层的通道,又称为扩散层.

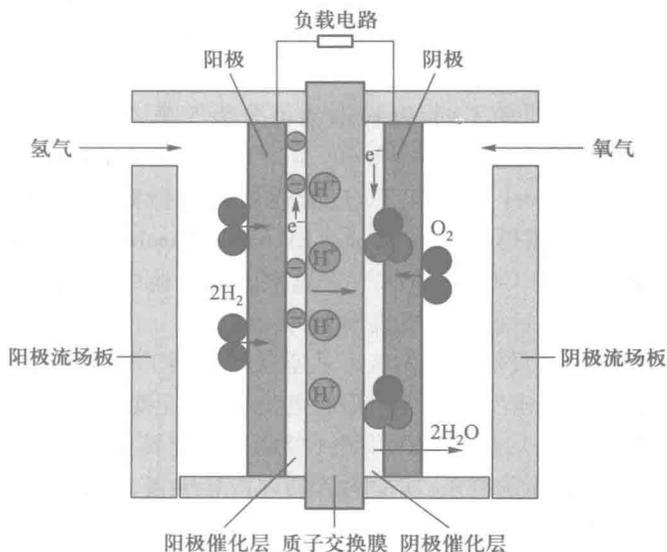


图1 质子交换膜燃料电池结构示意图

商品燃料电池为了提供足够的输出电压和功率,需将若干单体电池串联或并联在一起,流场板一般由导电良好的石墨或金属做成,与单体电池的阳极和阴极形成良好的电接触,称为双极板,其上加工有供气体流通的通道.教学用燃料电池为直观起见,采用有机玻璃作流场板.

进入阳极的氢气通过电极上的扩散层到达质子交换膜.氢分子在阳极催化剂的作用下解离为2个氢离子,即质子,并释放出2个电子,阳极反应为



氢离子以水合质子 $\text{H}^+(n\text{H}_2\text{O})$ 的形式,在质子交换膜中从一个磺酸基转移到另一个磺酸基,最后到达阴极,实现质子导电,质子的这种转移导致阳极带负电.

在电池的另一端,氧气或空气通过阴极扩散层到达阴极催化层,在阴极催化层的作用下,氧与氢离子和电子反应生成水,阴极反应为



阴极反应使阴极缺少电子而带正电,结果在阴阳极间产生电压,在阴阳极间接通外电路,就可以向负载输出电能.总的化学反应为



阴极与阳极:在电化学中,失去电子的反应叫氧化,得到电子的反应叫还原.产生氧化反应的电极是阳极,产生还原反应的电极是阴极.对电池而言,阴极是电的正极,阳极是电的负极.

NOTE

2. 水的电解

将水电解产生氢气和氧气,与燃料电池中氢气和氧气反应生成水互为逆过程.

水电解装置同样因电解质的不同而各异,碱性溶液和质子交换膜是最好的电解质.若以质子交换膜为电解质,可在图 1 右边电极接电源正极形成电解的阳极,在其上产生氧化反应 $2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. 左边电极接电源负极形成电解的阴极,阳极产生的氢离子通过质子交换膜到达阴极后,产生还原反应 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$. 即在右边电极析出氧,左边电极析出氢.

燃料电池与电解器的电极在制造上通常有些差别,燃料电池的电极应利于气体吸纳,而电解器需要尽快排出气体.燃料电池阴极产生的水应随时排出,以免阻塞气体通道,而电解器的阳极必须被水淹没.

3. 太阳能电池

太阳能电池利用半导体 PN 结受光照射时的光伏效应发电,太阳能电池的基本结构就是一个大面积平面 PN 结,图 2 为半导体 PN 结示意图.

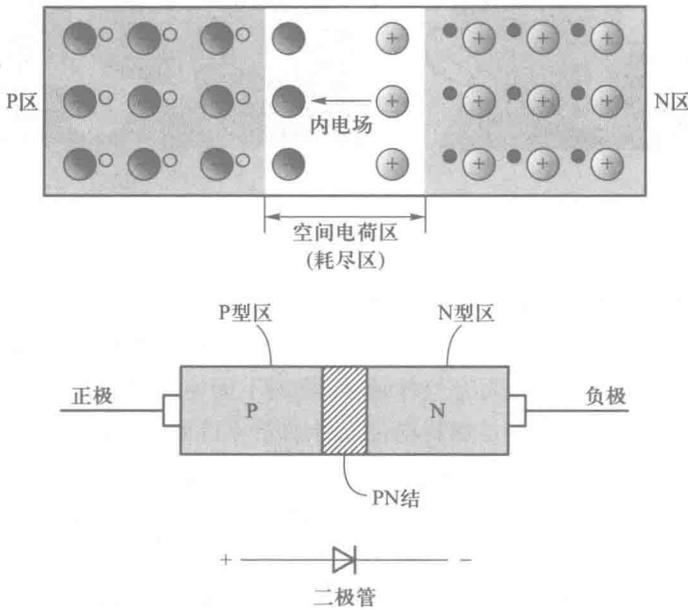


图 2 半导体 PN 结示意图

P 型半导体中有相当数量的空穴,几乎没有自由电子. N 型半导体中有相当数量的自由电子,几乎没有空穴. 当两种半导体结合在一起形成 PN 结时, N 区的电子(带负电)向 P 区扩散, P 区的空穴(带正电)向 N 区扩散,在 PN 结附近形成空间电荷区与势垒电场. 势垒电场会使载流子向扩散的反方向作漂移运动,最终扩散与漂移达到平衡,使流过 PN 结的净电流为零. 在空间电荷区内, P 区的空穴被来自 N 区的电子复合, N 区的电子被来自 P 区的空穴复合,使该区内几乎没有能导电的载流子,又称为结区或耗尽区.

当光电池受光照射时,部分电子被激发而产生电子-空穴对,在结区激发的电子和空穴分别被势垒电场推向 N 区和 P 区,使 N 区有过量的电子而带负电, P 区有过量的空穴而带正电, PN 结两端形成电压,这就是光伏效应,若将 PN 结两端接入外电路,就可向负载输出电能(详细的太阳能电池发电的基本原理参见“实验三十三 太阳能电池基本特性测量”).

四、实验装置介绍

1. 仪器结构

仪器的构成如图 3 所示.

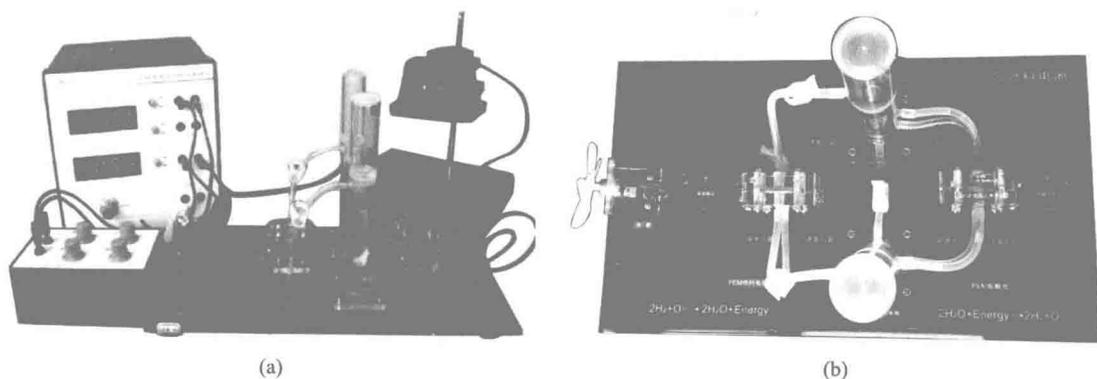


图 3 燃料电池综合实验仪

(1) 燃料电池、电解池、太阳能电池的原理见实验原理部分.

(2) 质子交换膜必须含有足够的水分,才能保证质子的传导. 但水含量又不能过高,否则电极被水淹没,水阻塞气体通道,燃料不能传导到质子交换膜参与反应. 如何保持良好的水平衡关系是燃料电池设计的重要课题. 为保持水平衡,我们的电池正常工作时排水口打开,在电解电流不变时,燃料供应量是恒定的. 若负载选择不当,电池输出电流太小,未参加反应的气体从排水口泄漏,燃料利用率及效率都低. 在适当选择负载时,燃料利用率约为 90%.

(3) 气水塔为电解池提供纯水(二次蒸馏水),可分别储存电解池产生的氢气和氧气,为燃料电池提供燃料气体. 每个气水塔都是上下两层结构,上下层之间通过插入下层的连通管连接,下层顶部有一根输气管连接到燃料电池. 初始时,下层

近似充满水,电解池工作时,产生的气体会汇聚在下层顶部,通过输气管输出.若关闭输气管开关,气体产生的压力会使水从下层进入上层,而将气体储存在下层的顶部,通过管壁上的刻度可知储存气体的体积.两个气水塔之间还有一个水连通管,加水时打开使两塔水位平衡,实验时切记关闭该连通管.

(4) 风扇作为定性观察时的负载,可变负载作为定量测量时的负载.

(5) 测试仪前面板如图 4 所示.测试仪可测量电流、电压.若不用太阳能电池作电解池的电源,可从测试仪供电输出端口向电解池供电.实验前需预热 15 min.

① 区域 1

电流表部分,作为一个独立的电流表使用.其中两个挡位:2 A 挡和 200 mA 挡,可通过电流挡位切换开关选择合适的电流挡位测量电流.两个测量通道:电流测量 I 和电流测量 II.通过电流测量切换键可以同时测量两条通道的电流.

② 区域 2

电压表部分,作为一个独立的电压表使用.共有两个挡位:20 V 挡和 2 V 挡,可通过电压挡位切换开关选择合适的电压挡位测量电压.

③ 区域 3

恒流源部分,为燃料电池的电解池部分提供一个从 0 ~ 350 mA 的可变恒流源.

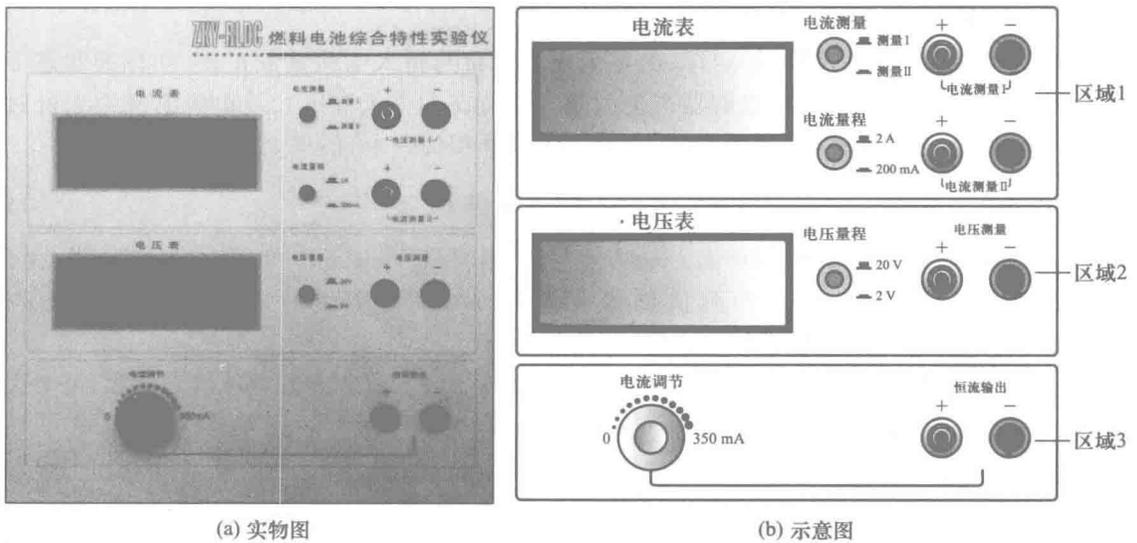


图 4 燃料电池测试仪前面板示意图

2. 仪器主要器件的技术参数

(1) 直流电压表

完全独立,输入端口可与实验仪上的任意电势连接.电压量程范围:0 ~ 20 V 和 0 ~ 2 V,分为两挡.最高分辨力:10 mV;精度:5%.

(2) 直流电流表

完全独立,输入端口可与实验仪上的任意回路连接.电流范围:0 ~ 1 999 mA,

分为两挡:0~199.9 mA 和 0~1 999 mA. 最高分辨力:0.1 mA(0~199.9 mA 挡);精度:1%(0~199.9 mA 挡). 2 个电流表共用一个显示表头,用开关切换.

(3) 直流可调恒流源

完全独立. 电流输出范围:0~350 mA 连续可调;最高分辨力:1 mA;精度:1%(负载 0~10 Ω);开路输出电压:8.8 V \pm 0.2 V.

(4) 其他

燃料电池功率:50~100 mW;燃料电池输出电压:800~1 000 mV;电解池工作状态:电压<6.0 V,电流<300 mA;太阳能电池功率:1 W;交流供电:220 V,1 A.

NOTE

五、实验内容及步骤

1. 质子交换膜电解池的特性测量

(1) 理论分析表明,若不考虑电解器的能量损失,在电解器上加 1.48 V 电压就可使水分解为氢气和氧气,实际由于各种损失,输入电压高于 1.6 V 电解器才开始工作. 电解器的效率为

$$\eta_{\text{电解}} = \frac{1.48 \text{ V}}{U_{\text{输入}}} \times 100\% \quad (4)$$

输入电压较低时虽然能量利用率较高,但电流小,电解的速率低,通常控制电解器输入电压在 2 V 左右.

根据法拉第电解定律,电解生成物的量与输入电荷量成正比. 在标准状态下(温度为零摄氏度,电解器产生的氢气保持在 1 个大气压),设电解电流为 I ,经过时间 t 生产的氢气体积(氧气体积为氢气体积的一半)的理论值为

$$V_{\text{氢气}} = \frac{It}{2F} \times 22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (5)$$

式中 $F = eN = 9.65 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$,为法拉第常量; $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$,为元电荷; $N = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$,为阿伏伽德罗常量; $It/2F$ 为产生的氢分子的物质的量; $22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ 为标准状态下气体的摩尔体积.

若实验时的摄氏温度为 T ,所在地区气压为 p ,根据理想气体物态方程,可对式(5)作修正:

$$V_{\text{氢气}} = \frac{273.16+T}{273.16} \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{It}{2F} \times 22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (6)$$

式中 p_0 为标准大气压, T 的单位用 $^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{氢气}}$ 的单位用 L. 自然环境中,大气压受各种因素的影响,如温度和海拔高度等,其中海拔对大气压的影响最为明显. 由国家标准 GB/T 4797.2—2005 可查到,海拔每升高 1 000 m,大气压下降约 10%.

由于水的分子量为 $18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$,且每克水的体积约为 1 cm^3 ,故电解池消耗的水的体积为

$$V_{\text{水}} = \frac{It}{2F} \times 18 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \quad (7)$$

应当指出上式(6),式(7)的计算对燃料电池同样适用,只是其中的 I 代表燃料电池输出电流, $V_{\text{氢气}}$ 代表燃料消耗量, $V_{\text{水}}$ 代表电池中水的生成量.

确认气水塔水位在水位上限与下限之间.将气水塔输气管止水夹关闭,调节恒流源输出到最大(旋钮顺时针旋转到底),让电解池迅速的产生气体.当气水塔下层的气体低于最低刻度线的时候,打开气水塔输气管止水夹,排出气水塔下层的空气.如此反复 2~3 次后,气水塔下层的空气基本排尽,剩下的就是纯净的氢气和氧气了.

(2) 测量当电解池输入电流大小分别为 100 mA、200 mA、300 mA 时的电解池输入电压,产生一定体积氢气所需要的时间.注意在改变恒流源的输出电流后,需要待电解池输出气体稳定后(约 1 min),方可关闭气水塔输气管.

NOTE

2. 燃料电池输出特性的测量

(1) 在一定的温度与气体压力下,改变负载电阻的大小,测量燃料电池的输出电压与输出电流之间的关系,其称为极化特性曲线,习惯用电压作纵坐标,电流作横坐标,如图 5 所示.

理论分析表明,如果燃料的所有能量都被转化成电能,则理想电动势为 1.48 V.实际燃料的能量不可能全部转化成电能,例如总有一部分能量转化成热能,少量的燃料分子或电子穿过质子交换膜形成内部短路电流等,故燃料电池的开路电压低于理想电动势.

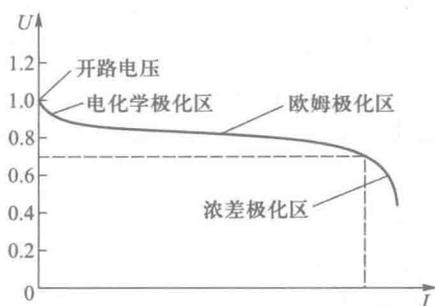


图 5 燃料电池的极化特性曲线

随着电流从零增大,输出电压有一段下降较快,主要是因为电极表面的反应速度有限,有电流输出时,电极表面的带电状态改变,驱动电子输出阳极或输入阴极时,产生的部分电压会被损耗掉,这一段被称为电化学极化区.

输出电压的线性下降区的电压降,主要是电子通过电极材料及各种连接部件,离子通过电解质的阻力引起的,这种电压降与电流成比例,所以被称为欧姆极化区.输出电流过大时,燃料供应不足,电极表面的反应物浓度下降,使输出电压迅速降低,而输出电流基本不再增加,这一段被称为浓差极化区.

综合考虑燃料的利用率(恒流供应燃料时可表示为燃料电池电流与电解电流之比)及输出电压与理想电动势的差异,燃料电池的效率为

$$\eta_{\text{电池}} = \frac{I_{\text{电池}}}{I_{\text{电解}}} \frac{U_{\text{输入}}}{1.48 \text{ V}} \times 100\% = \frac{P_{\text{输出}}}{I_{\text{电解}} \times 1.48 \text{ V}} \times 100\% \quad (8)$$

某一输出电流时燃料电池的输出功率相当于图 5 中虚线围出的矩形区,在使用燃料电池时,应根据伏安特性曲线,选择适当的负载匹配,使效率与输出功率达到最大.

(2) 实验时让电解池输入电流保持在 300 mA,关闭风扇.将电压测量端口接到燃料电池输出端.打开燃料电池与气水塔之间的氢气、氧气连接开关,等待约 10 min,让电池中的燃料浓度达到平衡值,电压稳定后记录开路电压值.

将电流量程按钮切换到 200 mA. 可变负载调至最大, 改变负载电阻的大小, 使输出电压值分别为 0.90 V, 0.85 V, 0.80 V, 0.75 V, 0.70 V, … (输出电压值可能无法精确该数值, 只需相近即可), 稳定后记录电压电流值.

负载电阻猛然调得很低时, 电流会猛然升到很高, 甚至超过电解电流值, 这种情况是不稳定的, 重新恢复稳定需较长时间. 为避免出现这种情况, 输出电流高于 210 mA 后, 每次调节减小电阻 0.5 Ω , 输出电流高于 240 mA 后, 每次调节减小电阻 0.2 Ω , 每测量一点的平衡时间稍长一些 (约需 5 min). 稳定后记录电压电流值.

实验完毕, 关闭燃料电池与气水塔之间的氢气氧气连接开关, 切断电解池输入电源.

3. 太阳能电池特性的测量 (选做)

(1) 在一定的光照条件下, 改变太阳能电池负载电阻的大小, 测量输出电压与输出电流之间的关系, 如图 6 所示.

U_{oc} 代表开路电压, I_{sc} 代表短路电流, 图 6 中虚线围出的面积为太阳能电池的输出功率. 与最大功率对应的电压称为最大工作电压 U_m , 对应的电流称为最大工作电流 I_m .

表征太阳能电池特性的基本参数还包括光谱响应特性、光电转换效率、填充因子等. 填充因子 FF 定义为

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}} \quad (9)$$

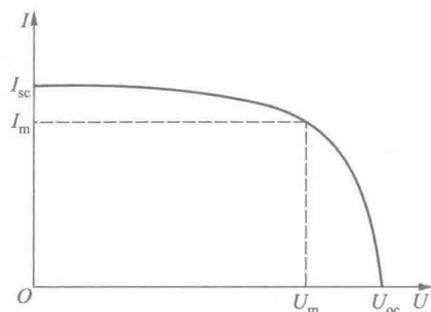


图 6 太阳能电池的伏安特性曲线

(2) 保持光照条件不变, 改变太阳能电池负载电阻的大小, 测量输出电压电流值, 并计算输出功率, 自行设计表格记录相关数据.

六、数据记录及数据处理

1. 数据记录

(1) 测量输入电流, 电压及产生一定体积的气体的时间, 记入表 1 中. 由式 (6) 计算氢气产生量的理论值并与氢气产生量的测量值比较, 验证法拉第定律. $F = 9.650 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $p = 99.86 \text{ kPa}$, $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$.

表 1 电解池质子交换膜特性实验 (当地温度 = ____ $^{\circ}\text{C}$)

输入电压 U/V	输入电流 I/mA	时间 t/s	电荷量 It/C	氢气产生量		百分差 $E_0/\%$	电解器效 率 $\eta/\%$	时间 t (按分秒显示)
				测量值 /ml	理论值 /ml			
	100.0							
	200.0							
	300.0							

(2) 测量输出电流, 记入表 2 中, 作出所测燃料电池的极化曲线以及该电池输出功率随输出电压的变化曲线, 并求出燃料电池最大输出功率及其对应的效率。

表 2 燃料电池输出特性的测量(输出电压值可能无法精确该数值, 只需相近即可)

输出电流 I/mA												
输出电压 U/mV	1 000	950	900	850	800	750	700	650	600	550	...	0
功率 $P(=UI)/\text{mW}$												
效率 $\eta/\%$												
等效负载电阻 $R(=U/I)/\Omega$	开路											

NOTE

实验结论: 电解池电流 300.0 mA, 最大输出功率 ___ mW, 此时对应的效率 $\eta =$ ___ %.

(3) 测量输出电压, 记入表 3 中, 作出所测太阳能电池的伏安特性曲线以及该电池输出功率随输出电压的变化曲线. 并求出该太阳能电池的开路电压 U_{oc} , 短路电流 I_{sc} , 最大输出功率 P_m , 最大工作电压 U_m , 最大工作电流 I_m , 填充因子 FF(选做, 见图 7 及图 8).

表 3 太阳能电池输出特性的测量

输出电压 U/V												
输出电流 I/mA	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
功率 $P(=UI)/\text{mW}$	0											0
等效负载电阻 $R(=U/I)/\Omega$	开路											短路

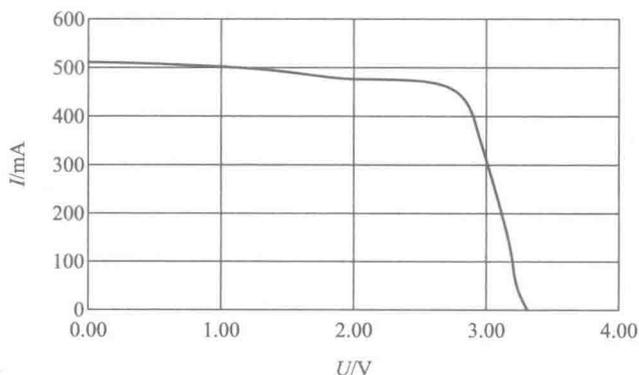
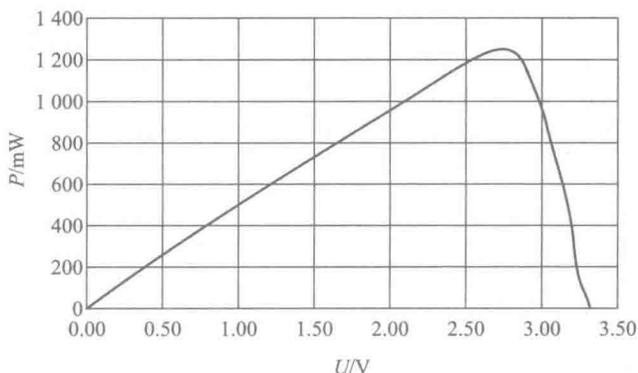


图 7 太阳能电池输出特性曲线($I-U$)

2. 数据处理

将上述测量数据按照要求在坐标纸上作图并计算分析。

图8 太阳能电池输出特性曲线($P-U$)

七、注意事项

1. 该实验系统必须使用去离子水或二次蒸馏水,容器必须清洁干净,否则将损坏系统.
2. PEM 电解池的最高工作电压为 6 V,最大输入电流为 1 000 mA,否则将极大地伤害 PEM 电解池.
3. PEM 电解池所加的电源极性必须正确,否则将毁坏电解池并有起火燃烧的可能.
4. 绝不允许将任何电源加于 PEM 燃料电池输出端,否则将损坏燃料电池.
5. 气水塔中所加入的水面高度必须在上水位线与下水位线之间,以保证 PEM 燃料电池正常工作.
6. 该系统主体系有机玻璃制成,使用中需小心,以免打坏和损伤.
7. 太阳能电池板和配套光源在工作时温度很高,切不可用手触摸,以免被烫伤.
8. 绝不允许用水打湿太阳能电池板和配套光源,以免触电和损坏该部件.
9. 配套“可变负载”所能承受的最大功率是 1 W,注意只能使用于该实验系统中.
10. 电流表的输入电流不得超过 2 A,否则将烧毁电流表.
11. 电压表的最高输入电压不得超过 25 V,否则将烧毁电压表.
12. 实验时必须关闭两个气水塔之间的连通管.
13. 燃料电池刚刚启动时 H_2 和 O_2 产生速率不稳定,造成读数不稳定,所以要等数据稳定后再读数.

八、思考题

1. 测量电解池产生的氢气体积时,为什么要考虑测量时的温度和压强?
2. 测量燃料电池开路电压的步骤及注意事项?
3. 测量太阳能电池的输出特性时,会发现即使不打开仪器的照射光源,太阳能电池也会有输出电压,为什么?
4. 如何提高燃料电池的燃料利用率?
5. 对于太阳能电池来说,填充因子 FF 有什么意义?

实验三十六 液晶电光效应实验

液晶是介于液体与晶体之间的一种物质状态。一般的液体内部分子排列是无序的,而液晶既具有液体的流动性,其分子又按一定规律有序排列,使它呈现晶体的各向异性。当光通过液晶时,会产生偏振面旋转、双折射等效应。液晶分子是含有极性基团的极性分子,在电场作用下,电偶极子会按电场方向取向,导致分子原有的排列方式发生变化,从而液晶的光学性质也随之发生改变,这种因外电场引起的液晶光学性质的改变称为液晶的电光效应。

1888年,奥地利植物学家 Reinitzer 在做有机物溶解实验时,在一定的温度范围内观察到液晶。1961年美国 RCA 公司的 Heimeier 发现了液晶的一系列电光效应,并制成了显示器件。从 20 世纪 70 年代开始,日本公司将液晶与集成电路技术结合,制成了一系列的液晶显示器件,并至今在这一领域保持领先地位。液晶显示器件由于具有驱动电压低(一般为几伏),功耗极小,体积小,寿命长,环保无辐射等优点,在当今各种显示器件的竞争中有独领风骚之势。

一、实验目的

1. 掌握液晶光开关的基本工作原理,测量液晶光开关的电光特性曲线,并得到液晶的阈值电压和关断电压;
2. 测量液晶显示器的视角特性以及在不同视角下的对比度,了解液晶光开关的工作条件;
3. 了解液晶光开关构成图像矩阵的方法,学习这种矩阵所组成的液晶显示器构成文字和图形的显示模式;
4. 测量液晶光开关的时间响应曲线,并得到液晶的上升时间和下降时间。

二、实验仪器

液晶光开关电光特性综合实验仪、示波器。

三、实验原理

1. 液晶光开关的工作原理

液晶的电光效应种类很多,主要有动态散射型(DS)、扭曲向列相型(TN)、超扭曲向列相型(STN)、有源矩阵液晶显示(TFT)、电控双折射(ECB)等。其中应用较广的有 TFT 型——主要用于液晶电视、笔记本电脑等高档产品;STN 型——主要用于手机屏幕等中档产品;TN 型——主要用于电子表、计算器、仪器仪表、家用电器等中低档产品。

本实验仅以常用的 TN 型液晶为例,说明其工作原理。TN 型光开关的结构如图 1 所示。在两块玻璃板之间夹有正性向列相液晶,液晶分子的形状如同火柴一

NOTE

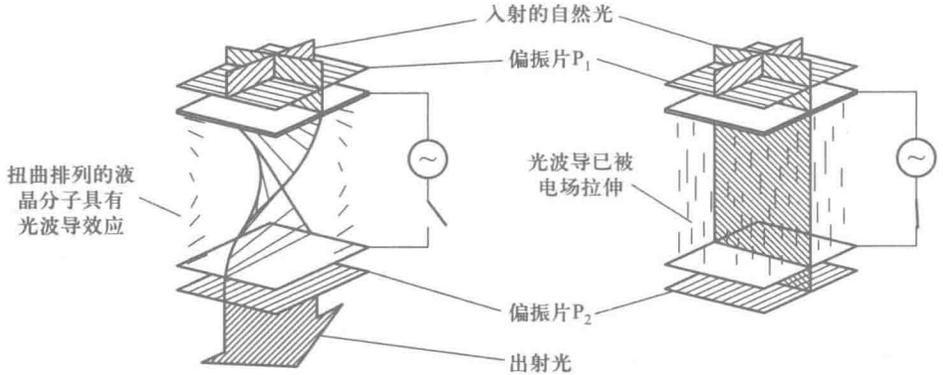


图1 液晶光开关的工作原理

样,为棍状,长度为 $1 \sim 2 \text{ nm}$,直径为 $0.4 \sim 0.6 \text{ nm}$,液晶层厚度一般为 $5 \sim 8 \text{ }\mu\text{m}$ 。玻璃板的内表面涂有透明电极,电极的表面预先作了定向处理(可用软绒布朝一个方向摩擦,也可在电极表面涂取向剂),这样,液晶分子在透明电极表面就会躺倒在摩擦所形成的微沟槽里,液晶分子按微沟槽方向排列;电极表面的液晶分子按一定方向排列,且上下电极上的定向方向相互垂直。上下电极之间的那些液晶分子因范德瓦耳斯力的作用,趋向于平行排列。然而由于上下电极上液晶的定向方向相互垂直,所以从俯视方向看,液晶分子的排列从上电极沿 -45° 方向排列逐步地、均匀地扭曲到下电极沿 $+45^\circ$ 方向排列,整个扭曲了 90° 。如图1的左图所示。理论和实验都证明,上述均匀扭曲排列起来的结构具有光波导的性质,即偏振光从上电极表面透过扭曲排列起来的液晶传播到下电极表面时,偏振方向会旋转 90° 。

取两块偏振片贴在玻璃的两面, P_1 的透光轴与上电极的定向方向相同, P_2 的透光轴与下电极的定向方向相同,于是 P_1 和 P_2 的透光轴相互正交。在未加驱动电压的情况下,来自光源的自然光经过偏振片 P_1 后只剩下平行于透光轴的线偏振光,该线偏振光到达输出面时,其偏振面旋转了 90° 。这时光的偏振面与 P_2 的透光轴平行,因而有光通过。在施加足够电压情况下(一般为 $1 \sim 2 \text{ V}$),在静电场的作用下,除了基片附近的液晶分子被基片“锚定”以外,其他液晶分子趋于平行于电场方向排列。于是原来的扭曲结构被破坏,成了均匀结构,如图1的右图所示。从 P_1 透射出来的偏振光的偏振方向在液晶中传播时不再旋转,保持原来的偏振方向到达下电极。这时光的偏振方向与 P_2 正交,因而光被关断。由于上述光开关在没有电场的情况下让光透过,加上电场的时候光被关断,因此叫做常通型光开关,又叫做常白模式。若 P_1 和 P_2 的透光轴相互平行,则构成常黑模式。

液晶可分为热致液晶与溶致液晶。热致液晶在一定的温度范围内呈现液晶的光学各向异性,溶致液晶是溶质溶于溶剂中形成的液晶。目前用于显示器件的都是热致液晶,它的特性随温度的改变而有一定变化。

2. 液晶光开关的电光特性

图2为光线垂直液晶面入射时本实验所用液晶相对透射率(以不加电场时的透射率为 100%)与外加电压的关系。

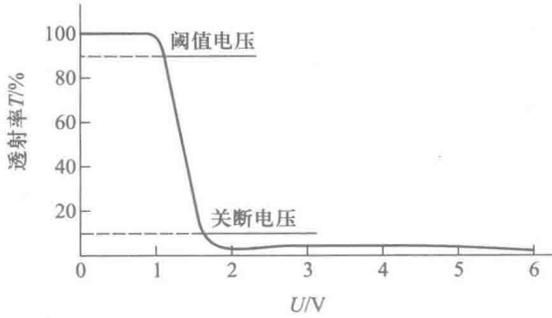


图2 液晶光开关的电光特性曲线

NOTE

由图2可见,对于常白模式的液晶,其透射率随外加电压的升高而逐渐降低,在一定电压下达到最低点,此后略有变化.可以根据此电光特性曲线图得出液晶的阈值电压和关断电压.

(1) 阈值电压(U_{in}):透过率为90%时的驱动电压.

(2) 关断电压(U_{off}):透过率为10%时的驱动电压.

液晶的电光特性曲线越陡,即阈值电压与关断电压的差值越小,由液晶开关单元构成的显示器件允许的驱动路数就越多.TN型液晶最多允许16路驱动,故常用于数码显示.在电脑,电视等需要高分辨率的显示器件中,常采用STN(超扭曲向列)型液晶,以改善电光特性曲线的陡度,增加驱动路数.

3. 液晶光开关的视角特性

液晶光开关的视角特性表示对比度与视角的关系.对比度定义为光开关打开和关断时透射光强度之比,对比度大于5时,可以获得满意的图像,对比度小于2,图像就模糊不清了.一般较好的液晶显示器的对比度可高达上千甚至上万.

图3表示了某种液晶视角特性的理论计算结果.图3中,用与圆心的距离表示垂直视角(入射光线方向与液晶屏法线方向的夹角)的大小.图中三个同心圆分别表示垂直视角为 30° , 60° 和 90° . 90° 同心圆外面标注的数字表示水平视角(入射光线在液晶屏上的投影与 0° 方向之间的夹角)的大小.图3中的闭合曲线为不同对比度时的等对比度曲线.

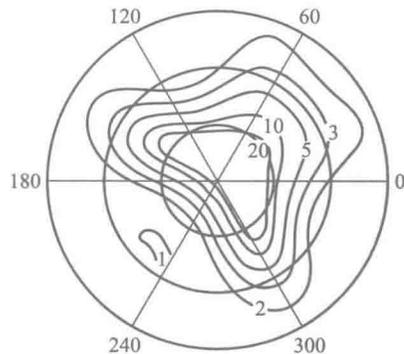


图3 液晶的视角特性

由图3可以看出,液晶的对比度与垂直与水平视角都有关,而且具有非对称性.若我们把具有图3所示视角特性的液晶开关逆时针旋转,以 220° 方向向下,并由多个显示开关组成液晶显示屏.则该液晶显示屏的左右视角特性对称,在左、右和俯视三个方向,垂直视角接近 60° 时对比度为5,观看效果较好.在仰视方向对比度随着垂直视角的加大迅速降低,观看效果差.

4. 液晶光开关构成图像显示矩阵的方法

除了液晶显示器以外,其他显示器靠自身发光来实现信息显示功能. 这些显示器主要有以下一些:阴极射线管显示(CRT),等离子体显示(PDP),电致发光显示(ELD),发光二极管(LED)显示,有机发光二极管(OLED)显示,真空荧光管显示(VFD),场发射显示(FED).

液晶显示器通过对外界光线的开关控制来完成信息显示任务,为非主动发光型显示,如辅以LED背光源,则能将能耗降至极低. 液晶显示器在便携式装置例如电子表、万用表、手机、传呼机等显示方面具有不可代替地位. 下面我们来看看如何利用液晶光开关来实现图形和图像的显示.

矩阵显示方式,是把图4(a)所示的横条形状的透明电极做在一块玻璃片上,叫做行驱动电极,简称行电极(常用 X_i 表示),而把竖条形状的电极制在另一块玻璃片上,叫做列驱动电极,简称列电极(常用 S_j 表示). 把这两块玻璃片面对面组合起来,把液晶灌注在这两片玻璃之间构成液晶盒. 为了画面简洁,通常将横条形状和竖条形状的ITO电极抽象为横线和竖线,分别代表扫描电极和信号电极,如图4(b)所示.

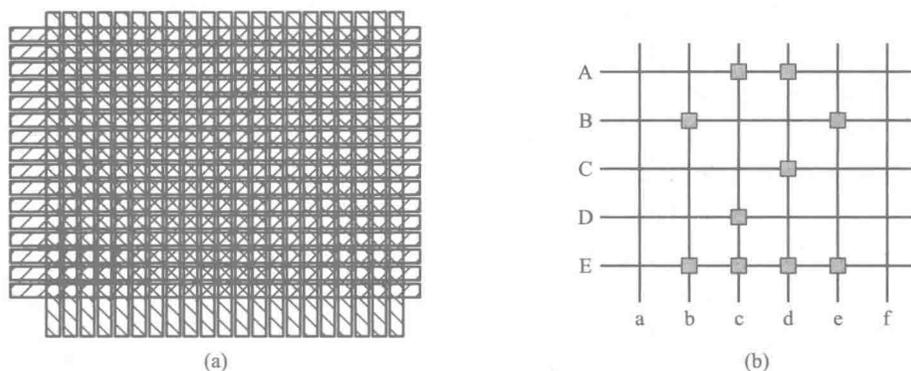


图4 液晶光开关组成的矩阵式图形显示器

矩阵型显示器的工作方式为扫描方式. 显示原理可按以下的简化说明作一介绍. 欲显示图4(b)的那些有方块的像素,首先在A行加上高电平,其余行加上低电平,同时在列电极的对应电极c、d上加上低电平,于是A行的那些带有方块的像素就被显示出来了. 然后B行加上高电平,其余行加上低电平,同时在列电极的对应电极b、e上加上低电平,因而B行的那些带有方块的像素被显示出来了. 然后是C行、D行……以此类推,最后显示出一整场的图像. 这种工作方式称为扫描方式.

这种分时间扫描每一行的方式是平板显示器的共同的寻址方式,依这种方式,可以让每一个液晶光开关按照其上的电压的幅值让外界光关断或通过,从而显示出任意文字、图形和图像.

5. 液晶光开关的时间响应特性

加上(或去掉)驱动电压能使液晶的开关状态发生改变,是因为液晶的分子排序发生了改变,这种重新排序需要一定时间,反映在时间响应曲线上,用上升时间 τ_r 和下降时间 τ_d 描述. 给液晶开关加上一个如图5所示的周期性变化的电压,就可

以得到液晶的时间响应曲线,上升时间和下降时间,如图 5 所示.

(1) 上升时间(τ_r):透过率由 10% 升到 90% 所需时间.

(2) 下降时间(τ_d):透过率由 90% 降到 10% 所需时间.

液晶的响应时间越短,显示动态图像的效果越好,这是液晶显示器的重要指标.早期的液晶显示器在这方面逊色于其他显示器,现在通过结构方面的技术改进,已达到很好的效果.

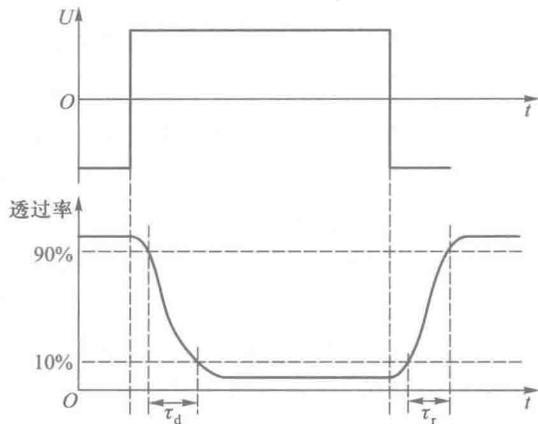


图 5 液晶驱动电压和响应时间

四、实验装置介绍

本实验所用仪器为液晶光开关电光特性综合实验仪,其外部结构如图 6 所示.下面简单介绍仪器各个按钮的功能.

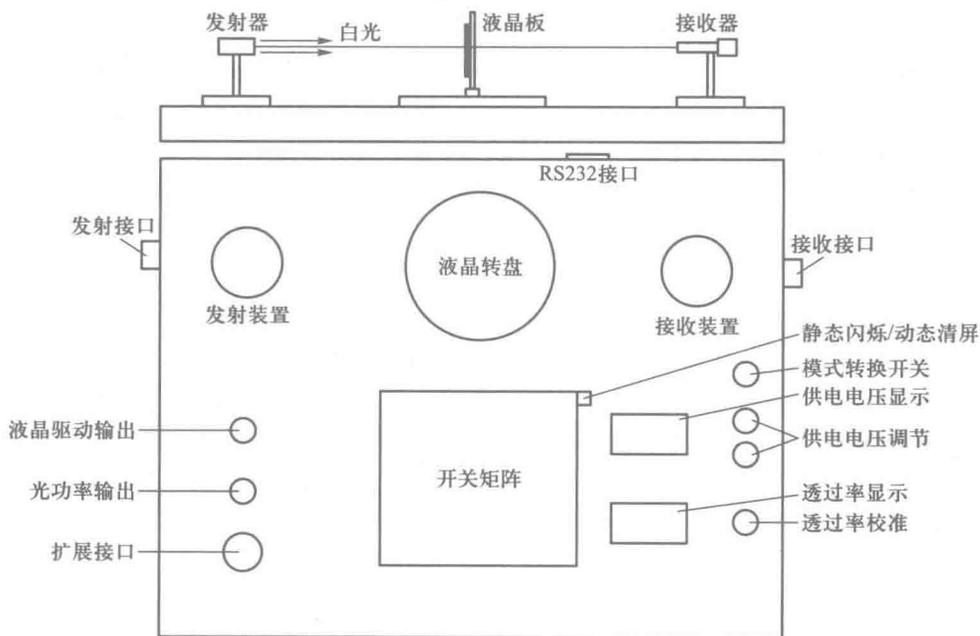


图 6 液晶光开关电光特性综合实验仪功能键示意图

(1) 模式转换开关. 切换液晶的静态和动态(图像显示)两种工作模式. 在静态时,所有的液晶单元所加电压相同,在动态(图像显示)时,每个单元所加的电压由开关矩阵控制. 同时,当开关处于静态时打开激光发射器,当开关处于动态时关闭激光发射器.

(2) 静态闪烁/动态清屏切换开关. 当仪器工作在静态的时候,此开关可以切换到闪烁和静止两种方式;当仪器工作在动态的时候,此开关可以清除液晶屏幕因按动开关矩阵而产生的斑点.

(3) 供电电压显示. 显示加在液晶板上的电压,范围在 $0.0 \sim 7.6 \text{ V}$ 之间.

(4) 供电电压调节按键. 改变加在液晶板上的电压,调节范围在 $0.0 \sim 7.6 \text{ V}$ 之间. 其中单击“+”按键(或“-”按键)可以增大(或减小) 0.01 V . 一直按住“+”按键(或“-”按键) 2 s 以上可以快速增大(或减小)供电电压,但当电压大于或小于一定范围时需要单击按键才可以改变电压.

(5) 透过率显示. 显示光透过液晶板后光强的相对百分比.

(6) 透过率校准按键. 在激光接收器处于最大接收状态的时候(即供电电压为 0 V 时),如果显示值大于“250”,则按住该键 3 s 可以将透过率校准为 100% ;如果供电电压不为 0 ,或显示小于“250”,则该按键无效,不能校准透过率.

(7) 液晶驱动输出. 接存储示波器,显示液晶的驱动电压.

(8) 光功率输出. 接存储示波器,显示液晶的时间响应曲线,可以根据此曲线来得到液晶响应时间的上升时间和下降时间.

(9) 扩展接口. 连接 LCDEO 信号适配器的接口,通过信号适配器可以使用普通示波器观测液晶光开关特性的响应时间曲线.

(10) 激光发射器. 为仪器提供较强的光源.

(11) 液晶板. 本实验仪器的测量样品.

(12) 激光接收器. 将透过液晶板的光强信号转换为电压输入到透过率显示表.

(13) 开关矩阵. 此为 16×16 的按键矩阵,用于液晶的显示功能实验;

(14) 液晶转盘. 承载液晶板一起转动,用于液晶的视角特性实验.

(15) 电源开关. 仪器的总电源开关.

五、实验内容及步骤

将液晶板金手指 1(图 7)插入转盘上的插槽,液晶凸起面必须正对激光发射方向. 打开电源开关,点亮激光器,使激光器预热 10 min 左右.

在正式进行实验前,首先需要检查仪器的初始状态. 看发射器光线是否垂直入射到接收器;在静态、 0 V 供电电压条件下,让激光垂直通过液晶板(以 0° 入射),透过率显示是否为“ 100% ”. 如果显示正确,则可以开始实验,如果不正确,需要校准后再进行实验.

1. 液晶光开关电光特性测量

将模式转换开关置于静态模式, 0 V 供电电压条件下,让激光垂直通过液晶板(以 0° 入射),将透过率显示校准为 100% ,按表 1 的数据改变电压,使得电压值从 0 V

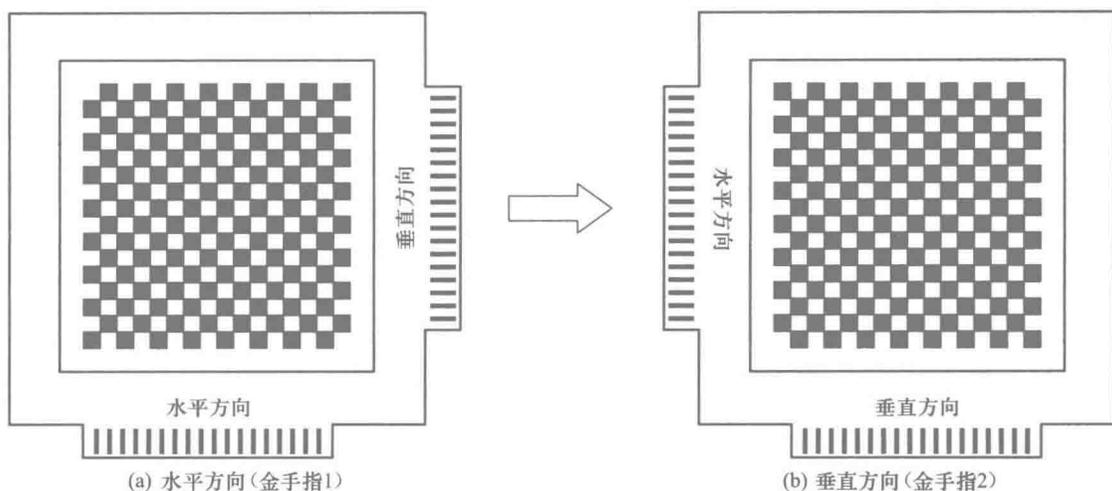


图7 液晶板方向(视角为正视液晶屏凸起面)

到 5 V 变化,记录相应电压下的透射率数值.重复 3 次并计算相应电压下透射率的平均值,依据实验数据绘制电光特性曲线,可以得出阈值电压和关断电压.

2. 液晶光开关视角特性的测量

(1) 水平方向视角特性的测量.将模式转换开关置于静态模式.首先将透过率显示调到 100%,然后再进行实验.

确定当前液晶板为金手指 1(水平方向)插入的插槽(如图 7 所示).在供电电压为 0 V 时,按照表 2 所列举的角度调节液晶屏与入射激光的角度,在每一角度下测量光强透过率最大值 T_{\max} .然后将供电电压置于关断电压(由前面的实验得出),再次调节液晶屏角度,测量光强透过率最小值 T_{\min} ,并计算其对比度.以角度为横坐标,对比度为纵坐标,绘制水平方向对比度随入射光入射角而变化的曲线.

(2) 垂直方向视角特性的测量.关断总电源后,取下液晶显示屏,将液晶板旋转 90° ,将金手指 2(垂直方向)插入转盘插槽(如图 7 所示).重新通电,将模式转换开关置于静态模式.按照与(1)相同的方法和步骤,可测量垂直方向的视角特性,并记录于表 2 中.

3. 液晶显示器显示原理

将模式转换开关置于动态(图像显示)模式.液晶供电电压调到 5 V 左右.此时矩阵开关板上的每个按键位置对应一个液晶光开关像素.初始时各像素都处于开通状态,按 1 次矩阵开关板上的某一按键,可改变相应液晶像素的通断状态,所以可以利用点阵输入关断(或点亮)对应的像素,使暗像素(或亮像素)组合成一个字符或文字.以此让学生体会液晶显示器件组成图像和文字的工作原理.矩阵开关板右上角的按键为清屏键,用以清除已输入在显示屏上的图形.

4. 液晶时间响应的测量(选做)

将模式转换开关置于静态模式,透过率显示校准到 100%,然后将液晶供电电压调到 2.0 V 左右,在液晶静态闪烁状态下,用存储示波器观察此光开关时间响应

特性曲线,可以根据此曲线得到液晶的上升时间 τ_r 和下降时间 τ_d . 实验完成后,关闭电源开关,取下液晶板妥善保存.

六、数据记录及数据处理

1. 液晶光开关电光特性测量

表 1 液晶光开关电光特性测量

电压/V	0.00	0.50	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	3.00	4.00	5.00
透 过 率 T/%	1																	
	2																	
	3																	
	平均																	
阈值电压 ($T=90\%$) = _____ V										关断电压 ($T=10\%$) = _____ V								

以电压为横坐标,透光率为纵坐标作出电光特性曲线,得出阈值电压和关断电压.

2. 液晶光开关视角特性的测量

(1) 水平方向视角特性的测量.

表 2 液晶水平方向视角特性的测量

正角度/(°)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	70.0	80.0
$T_{\max}/\%$															
$T_{\min}/\%$															
T_{\max}/T_{\min}															
负角度/(°)	0.0	-5.0	-10.0	-15.0	-20.0	-25.0	-30.0	-35.0	-40.0	-45.0	-50.0	-55.0	-60.0	-70.0	-80.0
$T_{\max}/\%$															
$T_{\min}/\%$															
T_{\max}/T_{\min}															
水平方向较好视角范围:负 _____ ° ~ 正 _____ ° ($T_{\max}/T_{\min} \geq 5$, 且 $T_{\max} \geq 50\%$)															

以角度为横坐标,对比度为纵坐标,绘制水平方向对比度随入射光入射角而变化的曲线.

(2) 垂直方向视角特性的测量.

表格同表 2,请自行设计.以角度为横坐标,对比度为纵坐标,绘制垂直方向对比度随入射光入射角而变化的曲线.

3. 液晶显示器显示原理

动态模式下将电压调到 5 V 左右,利用矩阵开关按键在液晶板上显示各种文字、符号或图形,并作简单记录.

4. 液晶时间响应的测量(选做)

七、注意事项

1. 禁止用光束照射他人眼睛或直视光束本身,以防伤害眼睛.
2. 在进行液晶视角特性实验中,更换液晶板方向时,务必断开总电源后,再进行插取,否则将会损坏液晶板.
3. 液晶板凸起面必须要朝向激光发射方向,否则实验记录的数据为错误数据.
4. 在调节透过率 100% 时,如果透过率显示不稳定,则可能是光源预热时间不够,或光路没有对准,需要仔细检查,调节好光路.
5. 在校准透过率 100% 前,必须将液晶供电电压显示调到 0.00 V 或显示大于“250”,否则无法校准透过率为 100%. 在实验中,电压为 0.00 V 时,不要长时间按住“透过率校准”按钮,否则透过率显示将进入非工作状态,本组测试的数据为错误数据,需要重新进行本组实验数据记录.

八、思考题

1. 什么是液晶的电光效应?
2. 液晶光开关的工作原理是什么?

第8章 设计性与研究性实验

§ 8.1 设计性实验的设置与实施

设计性实验是在完成了一定数量的基本实验后,由实验室提出的一种带有综合应用性质或一定设计性任务要求,由实验者自行完成的提高性教学实验.它既不同于以掌握科学实验基本知识、基本方法和基本技能为目的的常规教学实验,又不同于工程实践和科学研究中以对未知问题进行探索为目的的研究性实验.完成此类实验的要求是可以变通的,通常只提出最低的要求(下限),而不限内容或要求的上限.在进行设计性实验的一般过程中,实验者须根据实验室提供的设备器材自行推证有关理论,自行确定实验方案,自行选择组配仪器设备,自行拟订实验程序和注意事项等.在条件许可下,实验者在实验过程中可加工一些零配件或者订购个别专用器材.但是,所确定的实验内容与实验方案,应经过指导教师审核、听取参考意见后才能实施.实验结束后,实验者应该按照实验要求得出实验结果,做出定性与定量分析,写出比较完整的设计性实验报告.

§ 8.2 设计性实验的目的

设计性实验的目的是充分调动实验者的学习主动性和创造性,将所学的物理知识应用于实验的选题与设计、实验动手操作乃至独立进行数据处理的全过程.通过设计性实验能使实验者将学到的理论知识与实践的感性认识更好地结合,激发其创新能力,提高其发现问题、分析问题、解决问题的能力,也有助于将严谨的科学作风与创新精神更好地结合起来.

§ 8.3 设计性实验的基本步骤

一、选题

指导教师首先针对设计性实验的科学思想与方法进行专题讲座,给出一些研究领域的背景与发展动态、有待解决或阐明的的问题或热点问题及研究意义.学生以

自己的兴趣爱好与有关背景相结合,选择课题题目.根据设计性实验的题目充分查阅文献,保证课题的科学性与可行性,并要求有一定的先进性或创新性,然后根据实验室的综合条件选择相应的实验方法,使课题切实可行.

二、确定实验方案

首先应经过一定的准备(查阅已有资料,思考并拟订初步的实验方案),形成“最优化”的设计.注意到不同的设计性实验课题在要求上的差别,如有的设计性实验重点在于对实验现象的观察分析,有的重点在于实验规律的探索,还有的重点在于实验结果的比较和实验内容的变通、引申等.要根据其侧重点及实验条件拟定一个原理简单、方法新颖、实施方便以及应用可行的实验方案.

三、准备实验

与常规实验不同的是,设计性实验前的准备工作更为重要.在实验研究的目的、要求及任务明确后,要根据实验的设计方案准备资料,列出实验所需的仪器和用品的清单,并提交给指导教师审查.实验室没有的设备或用品,要求学生独立准备.这既是收集资料的过程,又是调查研究的过程,直接影响到实验设计是否科学、合理和先进.较好的资料储备才能开阔视野,才能较好地符合设计性实验的基本原则.

四、预实验与实验方案的完善

按照实验设计方案和操作步骤认真进行预实验.在预实验过程中,学生要作好各项实验的原始数据记录.实验结束后,应及时整理实验结果,发现和分析预实验中存在的问题和需要改进、修改的地方,并向指导教师进行汇报.得到教师同意后,在正式实验中加以改进完善.如果指导教师认为预实验已基本达到目的和要求,预实验阶段即算完成.

五、正式实验

按照修改的实验设计方案和操作步骤认真进行实验,记录好实验的原始数据,独立操作,教师仅在操作的难点部分适当指导.

六、设计性实验报告的撰写

在完成实验后,要对实验结果作出科学的整理、分析,得出结论.如果实验失败,或与预期结果及文献报道不符,则应找出相应的原因,再重复实验,以期得到稳定的科学结果与结论.之后,写出完整的实验报告.设计性实验报告与一般的实验报告类似,但又有自身的特点,基本格式如下.

(1) 标题.应当以最恰当、最简明的词语反映报告中最重要、最特定的内容,高度概括、画龙点睛,一般不超过20个字.

(2) 实验目的和要求.与一般的实验报告类似,应将实验目的和要求简单归纳成几条,说明设计性实验的基本内容和实验结果要求.

(3) 实验原理和步骤. 根据实验要求选择实验原理和方法, 确定计算公式, 选择仪器, 给出原理图及实验条件和参数, 具体实验操作步骤.

(4) 数据处理. 将测量数据整理列表, 进行数据处理, 给出实验结果和不确定度, 由此得出完整、准确的结论. 有可能分析一下系统误差消除情况, 提出进一步改进建议, 做到图文并茂, 一目了然.

(5) 参考文献. 为了帮助读者深入了解此项工作, 应列出与之有关的参考文献的名称、作者、出处, 供读者需要时查找.

(6) 附录. 对需要详细论证的问题或公式推导, 不应列入正文, 以保证实验报告或论文的简洁. 为此, 可将其作为附录放在报告最后, 供想要深入学习的读者阅读.

实验报告是实验工作全面系统的总结, 既是交流、推广的纽带, 也是评审、改进的依据. 实验报告的撰写是一项十分重要的工作, 也可为今后撰写课程设计报告和毕业论文进行有益的训练.

实验三十七 非平衡电桥的应用

电桥按测量方式可分为平衡电桥和非平衡电桥. 虽然它们都可以准确地测量电阻, 但平衡电桥只能用于测量相对稳定的电阻值, 而非平衡电桥能用于测量连续变化的电阻值.

非平衡电桥也称微差电桥, 是单臂电桥在非平衡状态下的一种工程运用, 当外界温度、压力、光照等物理量发生变化时, 相应的电阻传感器电阻值发生变化, 电桥就从平衡状态(预调平衡)变成不平衡状态, 通过测量指零仪表测量的电压(或电流)发生的变化即所表征的电阻传感器电阻值的变化, 从而间接地测量出传感器相应物理状态的变化.

一、实验目的与任务

自行设计电路, 掌握非平衡电桥的工作原理, 并利用非平衡电桥对电阻、温度、应变、光照强度等进行测量.

二、实验仪器

电源、导线、开关、检流计、电阻箱、电压表、电流表、待测物等.

三、实验原理

1. 平衡电桥

平衡电桥的原理如图 1 所示, 调节 R_3 使检流计 G 无电流流过时, C 、 D 两点等电势, 电桥平衡, 从而得到

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (1)$$

2. 非平衡电桥

图 2 为非平衡电桥的原理图, B 、 D 之间为一负载电阻 R_B . 用非平衡电桥测量电阻时, 使 R_1 、 R_2 和 R_3 保持不变, R_x (即 R_4) 变化时则 U_0 变化. 再根据 U_0 与 R_x

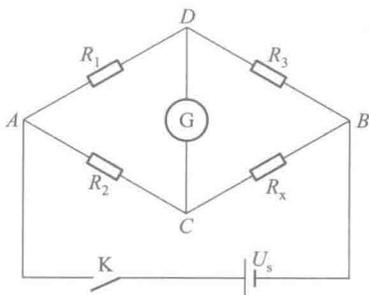


图 1 平衡电桥

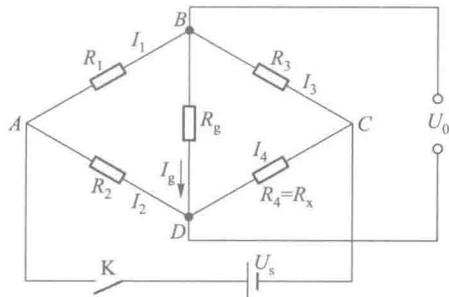


图 2 非平衡电桥

的函数关系,通过检测 U_0 的变化从而测得 R_x . 由于可以检测连续变化的 U_0 ,所以可以检测连续变化的 R_x .

(1) R_x 相对桥臂电阻很大时的非平衡电桥(电压输出形式)

当负载电阻 $R_x \rightarrow \infty$, 即电桥输出处于开路状态时, $I_x = 0$, 仅有输出电压, 用 U_0 表示. ABC 半桥的电压降为 U_s (即电源电压), 根据分压原理, 通过 R_1 、 R_3 两臂的电流为

$$I_1 = I_3 = \frac{U_s}{R_1 + R_3} \quad (2)$$

则 R_3 上的电压降为

$$U_{BC} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} U_s \quad (3)$$

同理 R_4 上的电压降为

$$U_{DC} = \frac{R_4}{R_2 + R_4} U_s \quad (4)$$

输出电压 U_0 为 U_{BC} 与 U_{DC} 之差, 即

$$U_0 = U_{BC} - U_{DC} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} U_s - \frac{R_4}{R_2 + R_4} U_s = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} U_s \quad (5)$$

当满足条件 $R_2 R_3 = R_1 R_4$ 时, 电桥输出 $U_0 = 0$, 即电桥处于平衡状态. 为了测量的准确性, 在测量的起始点, 电桥必须调至平衡, 称为预调平衡. 预调平衡可使输出只与某一臂的电阻变化有关. 若 R_1 、 R_2 和 R_3 固定, R_4 为待测电阻, 当 R_4 因外界条件变化(如温度 t) 而变为 $R_4 + \Delta R$ 时, 此时因电桥不再平衡, 而产生的输出电压为

$$U_0 = \frac{R_2 R_3 + R_2 \Delta R - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + \Delta R(R_2 + R_4)} U_s \quad (6)$$

各种电桥的输出电压公式如下:

① 等臂电桥 ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$)

$$U_0 = \frac{R \Delta R}{4R^2 + 2R \Delta R} U_s = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \quad (7)$$

② 输出对称电桥 ($R_1 = R_3 = R$, $R_2 = R_4 = R'$, 且 $R \neq R'$)

$$U_0 = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \quad (8)$$

③ 电源对称电桥 ($R_1 = R_2 = R'$, $R_3 = R_4 = R$, 且 $R \neq R'$)

$$U_0 = U_s \frac{RR'}{(R+R')^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R+R'}} \quad (9)$$

注意: 上面式(7)~(9)中的 R 和 R' 均为预调平衡后的电阻. 此外, 当电阻增量 ΔR 较小, 即满足 $\Delta R \ll R$ 时, 上面式(7)~(9)三式的分母中含 ΔR 项可略去, 公式可得简化, 这里从略.

一般来说,等臂电桥和输出对称电桥的输出电压比电源对称电桥高,因此灵敏度也高,但电源对称电桥的测量范围大,可以通过选择 R 和 R' 来扩大测量范围, R 和 R' 差距越大,测量范围也越大.

在用非平衡电桥测电阻时,需将被测电阻 R_x 作为桥臂 R_4 接入非平衡电桥,并进行预调平衡,这时电桥输出电压为 0. 改变外界条件(如温度 t),则被测电阻发生变化,这时电桥输出电压 $U_0 \neq 0$,开始作相应变化. 测出这个电压 U_0 后,可根据式(7)~(9)计算得到 ΔR ,从而求得 $R_x = R_4 + \Delta R$.

(2) R_g 相对桥臂电阻可比拟时的非平衡电桥(功率输出形式)

当负载电阻 R_g 与桥臂电阻可比拟时,则电桥不仅有输出电压 U_g ,也有输出电流 I_g ,也就是说有输出功率,此种电桥也称为功率桥. 功率桥可以表示为图 3(a).

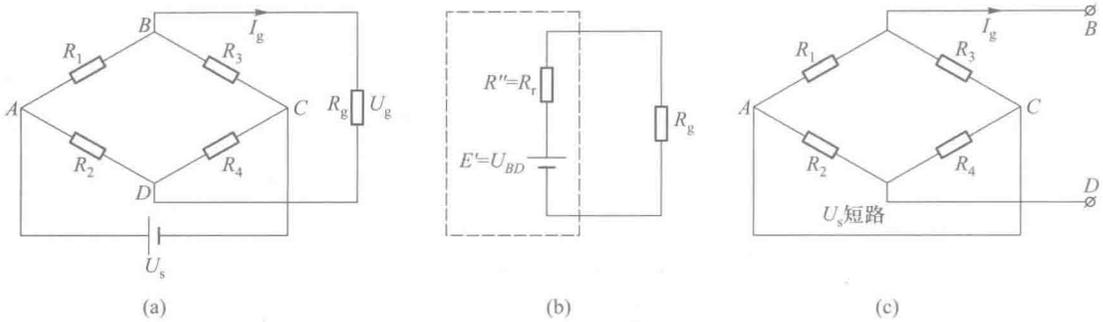


图 3 非平衡电桥功率输出电路

应用有源端口网络定理,功率桥可以简化为如图 3(b)所示电路. U_{BD} 为 BD 之间的开路电压,由式(5)表示可知, R'' 是有源一端网络等值支路中的电阻,其值等于该网络入端电阻 R_r ,参见图 3(c),即

$$R'' = R_r = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} \quad (10)$$

由图 3(b)可知,流经负载电阻 R_g 的电流为

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{U_{BD}}{R'' + R_g} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} \cdot U_s \left/ \left(\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} + R_g \right) \right. \\ &= U_s \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)R_g + R_1 R_3(R_2 + R_4) + R_2 R_4(R_1 + R_3)} \quad (11) \end{aligned}$$

当 $I_g = 0$ 时,有 $R_2 R_3 - R_1 R_4 = 0$,这是功率桥的平衡条件,与式(5)一致,也就是说功率输出形式与电压输出形式的非平衡电桥的平衡条件是一致的.

最大功率输出时,电桥的灵敏度最高. 当电桥的负载电阻 R_g 等于输出电阻 R_r (电源内阻),即

$$R_g = R_r = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} \quad (12)$$

即阻抗匹配时,电桥的输出功率最大. 此时电桥的输出电流由式(11)得

$$I_g = \frac{U_s}{2} \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 R_3(R_2 + R_4) + R_2 R_4(R_1 + R_3)} \quad (13)$$

输出电压为

$$U_{\text{g}} = I_{\text{g}} R_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}}{2} \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_2 + R_4)(R_1 + R_3)} \quad (14)$$

当桥臂 R_4 的电阻有增量 ΔR 时,我们可以得到三种桥路形式的电流、电压和功率变化。测量时都需要预调平衡,平衡时的 I_{g} 、 U_{g} 和 P_{g} 均为 0,电流、电压和功率变化都是相对平衡状态时而言的。

最大功率输出时,三种桥路形式的电流、电压和功率变化分别为

① 等臂电桥 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 则有

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}}{2} \cdot \frac{R \Delta R}{2R^2(R + \Delta R) + R^2(2R + \Delta R)} = \frac{U_{\text{s}}}{8} \cdot \frac{\Delta R}{R^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{4} \frac{\Delta R}{R}} \\ \Delta U_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}}{8} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}} \\ \Delta P_{\text{g}} = \Delta I_{\text{g}} \cdot \Delta U_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}^2}{64R} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{3\Delta R}{4R}\right)\left(1 + \frac{\Delta R}{2R}\right)} \end{cases} \quad (15)$$

② 输出对称电桥 $R_1 = R_3 = R, R_2 = R_4 = R'$, 则有

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}}{2} \cdot \frac{R' \Delta R}{2R^2 R' + 2RR' \Delta R + 2R(R')^2 + (R')^2 \Delta R} = \frac{U_{\text{s}}}{4(R+R')} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2R+R'}{2(R+R')} \cdot \frac{\Delta R}{R}} \\ \Delta U_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}}{8} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}} \\ \Delta P_{\text{g}} = \Delta I_{\text{g}} \cdot \Delta U_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}^2}{32(R+R')} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{2R+R'}{2(R+R')} \cdot \frac{\Delta R}{R}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \end{cases} \quad (16)$$

③ 电源对称电桥 $R_1 = R_2 = R', R_3 = R_4 = R$, 则有

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}}{4(R+R')} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2R+R'}{2(R+R')} \cdot \frac{\Delta R}{R}} \\ \Delta U_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}}{2} \cdot \frac{RR'}{(R+R')^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R+R'}} \\ \Delta P_{\text{g}} = \Delta I_{\text{g}} \cdot \Delta U_{\text{g}} = \frac{U_{\text{s}}^2 RR'}{8(R+R')^3} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{2R+R'}{2(R+R')} \cdot \frac{\Delta R}{R}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R+R'}} \end{cases} \quad (17)$$

测得 ΔI_{g} 和 ΔU_{g} 后,很方便可求得功率 ΔP_{g} ,通过上述相关公式(注意:上式中的 R 和 R' 均为预调平衡后的电阻)可运算到相应的 ΔR_I 和 ΔR_U ,然后运用公式

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_I \Delta R_U} \quad (18)$$

可得到 ΔR , 从而求得 $R_x = R_4 + \Delta R$.

当电阻增量 ΔR 较小时, 即满足 $\Delta R \ll R$ 时, 上面式(15)~(17)三组公式的分母中含 ΔR 项可略去, 公式得以简化, 这里从略.

四、思考题

1. 非平衡电桥与平衡电桥有何异同?
2. 你所设计的电桥在测量中途发生电表溢出时, 应采取什么措施?
3. 举例说明非平衡电桥可以应用在哪些工程技术中?

五、参考资料

1. 韩春娟, 芮法成. 用非平衡电桥测质量[J]. 吉林教育, 2009(7): 25.
2. 王桂英. 非平衡电桥在大学物理实验中的应用[J]. 电子世界, 2014(1): 192—193.
3. 李林, 徐泽红, 吴新全. 应用非平衡电桥测量电阻实验的研究[J]. 实验技术与管理, 2007, 24(3): 31—34.
4. 倪新蕾. 非平衡电桥的输出特性研究[J]. 大学物理, 2009, 28(3): 33—35.
5. 徐建元, 葛晓辉. 非平衡电桥的研究与应用[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2001, 14(2): 74—76.

实验三十八 等厚干涉的应用

薄膜干涉分为两种:一种叫做等倾干涉,另一种叫做等厚干涉.等厚干涉是由平行光入射到厚度变化均匀、折射率均匀的薄膜上、下表面而形成的干涉条纹.薄膜厚度相同的地方形成同条干涉条纹,故称等厚干涉.牛顿环和楔形平板干涉均属等厚干涉.

常规的等厚干涉现象研究以牛顿环为例进行讨论.牛顿环仪是在一块平板玻璃上放置一个平凸透镜,两者之间有一空气薄层,当用单色的平行光照射时,就会在空气层中形成等厚干涉条纹,这些条纹是一组同心圆环.牛顿环实验内容简单、现象单调,学生能很快按步骤完成,但效果不理想,对课堂教学的辅助作用和培养学生的创新能力、操作技能并不明显.对等厚干涉现象的研究予以拓展和延伸,可以引发学生的实验兴趣,培养学生的创新精神和创新能力,加深对理论和实验教学双方面的理解和巩固,培养学生的科研能力.

一、实验目的与任务

玻璃表面缺陷的定性观察及定量计算.

二、实验仪器

读数显微镜、钠光灯、劈尖等.

三、实验原理

图1为劈尖装置示意图,一块平板玻璃水平放置,另一块玻璃与水平玻璃存在一定夹角.下侧玻璃上表面存在一个球面凸起缺陷,两块玻璃之间形成一定厚度的空气间隙.当一单色平面波从上向下垂直照射到劈尖装置上时,其中一部分光在 AB 表面反射并与从 CD 面反射的光发生干涉.假设干涉的两束光的强度均为 I_0 ,则距离 C 点水平距离为 x 处的干涉条纹的强度可以写为

$$I(x) = 4I_0 \sin^2 [k_0 d(x)] \quad (1)$$

其中 k_0 为入射光在真空中的波矢, $d(x)$ 为 x 位置处两个玻璃表面的距离,如图1所示.在无缺陷的位置,空气间隙的厚度为线性变化,即

$$d(x) = x \tan \alpha \quad (2)$$

其中 α 为劈尖的夹角.在缺陷位置,空气间隙的厚度不再是线性变化.考虑到缺陷的形状为球形曲面,结合劈尖实验和牛顿环实验中空气厚度公式来推导缺陷位置的空气间隙厚度公式.图2为放大后的凸起缺陷结构示意图,其中缺陷厚度为 h_0 ,半径为 r ,曲面的曲率半径为 R .如果曲率半径 R 远大于缺陷半径 r ,则凸起缺陷的厚度分布可以近似为

$$h(x', y') = \sqrt{R^2 - (x')^2 - (y')^2} - \sqrt{R^2 - r^2} \quad (3)$$

其中 x' 和 y' 是以 O' 为圆心的新的坐标系中的坐标, R 可以通过缺陷的厚度 h_0 和半径 r 来求得:

$$R = \frac{r^2 + h_0^2}{2h_0} \quad (4)$$

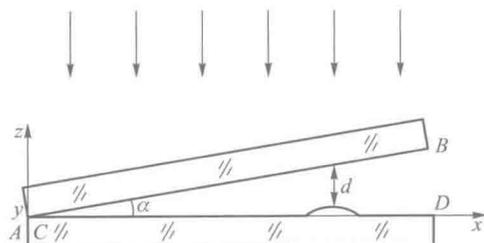


图1 存在缺陷的劈尖结构图

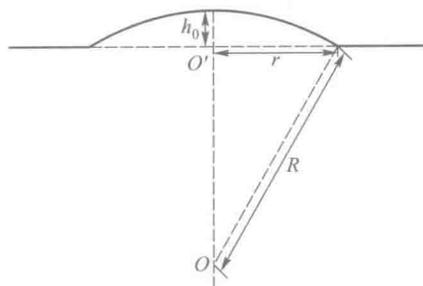


图2 球形曲面结构图

不同缺陷厚度、不同深度及不同夹角条件下的劈尖干涉图样分别如图3、图4、图5所示,图中不同的灰度表示不同的光强.

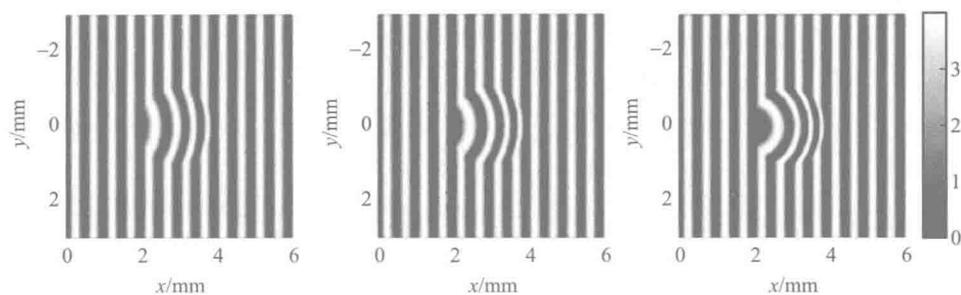


图3 不同缺陷厚度下的劈尖干涉图样

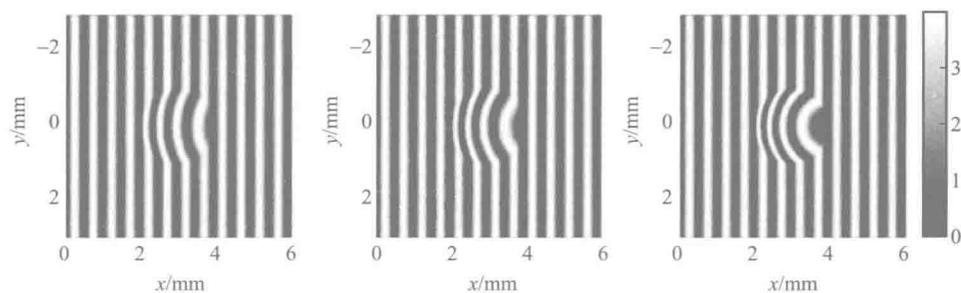


图4 不同深度的凹陷的劈尖干涉图样

四、思考题

1. 在劈尖干涉实验中,主要利用上玻璃片的下表面和下玻璃片的上表面所形成的空气劈尖来产生干涉条纹,那么上、下玻璃片另外两个表面的反射光是否会对

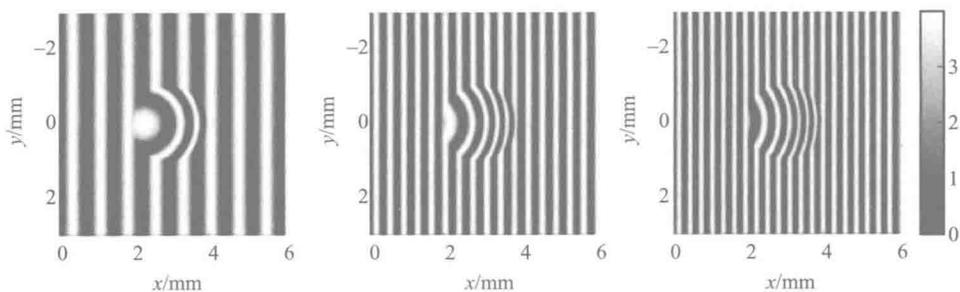


图5 不同劈尖夹角的干涉图样

空气劈尖干涉条纹产生影响?

2. 在透射光中是否也可以观测干涉条纹? 与反射光中观测的结果又有何不同?

五、参考资料

1. 刘建龙,高扬. 等厚干涉实验中缺陷检测的数值模拟[J]. 物理实验,2015(1):23—26.
2. 赵新闻,黄生祥,周克省. 对劈尖薄膜等厚干涉的讨论[J]. 广西物理,2005(4):44—46.
3. 赵新闻,杨兵初,黄生祥. 对劈尖薄膜等厚干涉光程差公式的推导[J]. 物理与工程,2006,16(2):11—12.
4. 张明霞. 分振幅薄膜干涉—等厚干涉实验拓展[J]. 实验室研究与探索,2012,31(10):16—18.
5. 薛立范. 等厚干涉与等倾干涉之比较[J]. 科技创新导报,2010(13):225.

实验三十九 弗兰克-赫兹实验的深入研究

弗兰克-赫兹实验是近代物理发展史中的一个著名实验,它的实验结果是玻尔理论重要的实验依据.弗兰克和赫兹更由于这一贡献而同获 1925 年的诺贝尔物理学奖.通常的弗兰克-赫兹实验都只是测量气体的第一激发电势,而事实上,利用相同的实验装置,通过对实验稍作改进和测量技术优化,可以观测更高的激发电势.

针对弗兰克-赫兹实验中测量曲线易受各管极电压影响的问题,通过独立改变各管极电压的方法进行数据测量,可分别就灯丝电压、第一栅极电压、拒斥电压对实验曲线的影响进行分析讨论,得到一些有价值的规律.还可以对曲线中出现的“台阶现象”“双谷现象”进行合理的解释,进一步加深对原子能级的理解.此外,可以通过对该实验内容的扩展可同时完成测定普朗克常量的实验内容.

一、实验目的与任务

1. 测量各管极电压对曲线的影响;
2. 改进电路观测更高激发电势及电离电势;
3. 测定普朗克常量.

二、实验仪器

弗兰克-赫兹管、示波器等.

三、实验原理

1. 弗兰克-赫兹管

弗兰克-赫兹实验的原理图如图 1 所示.在充氩的弗兰克-赫兹管中,电子由灯丝发出,阴极 K 和第二栅极 G_2 之间的加速电压 U_{G_2K} 使电子加速.在板极 A 和第二栅极 G_2 之间加有反向拒斥电压 U_{G_2A} .当电子通过 KG_2 空间进入 G_2A 空间时,如果有较大的能量 ($\geq eU_{G_2A}$),就能冲过反向拒斥电场而到达板极形成板极电流,为微电流计表检出.如果电子在 KG_2 空间与氩原子碰撞,把自己一部分能量传给氩原子而使后者激发的话,电子本身所剩余的能量就很小,以致通过第二栅极后已不足以克服拒斥电场而被折回到第二栅极,这时,通过微电流计表的电流将显著减小.

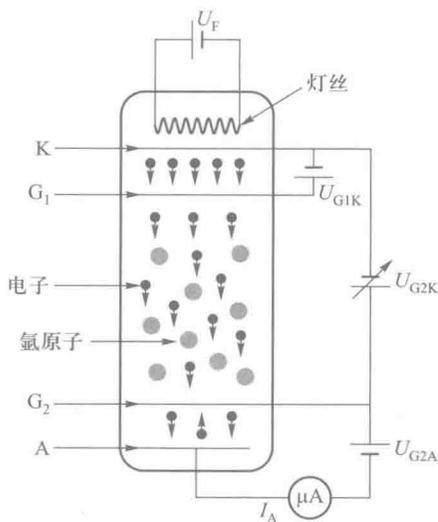


图 1 弗兰克-赫兹管结构原理示意图

2. 普朗克常量的测定

按照玻尔原子理论,原子的能量是量子化的.原子只能处于一些不连续的能量状态,原子从一个状态跃迁到另一状态,必须满足关系:

$$h\nu = |E_m - E_n| \quad (1)$$

式中 E_m 、 E_n 分别是两个状态的能量, h 则为普朗克常量.

设原子基态能量为 E_0 , 第一激发态能量为 E_1 , 则在弗兰克-赫兹实验中存在如下等式:

$$U_0 = (E_1 - E_0) / e \quad (2)$$

式中 U_0 为原子的第一激发电势. 联立式(1)与式(2), 可得

$$h = \frac{e}{\nu} U_0 \quad (3)$$

可见在弗兰克-赫兹实验中只要测出原子的第一激发电势 U_0 , 便可利用上式方便地测出普朗克常量 h .

3. 更高激发电势的电路改造

将 G_1 与 G_2 短接, 使 G_1 和 G_2 之间形成一个等势碰撞区. 至于 G_2 和阳极 A 之间仍然接一个反向减速电压. 改进后的电路由于加速区很短, 而电子的平均自由程远大于阴极和第一栅极之间的距离, 电子在这样一个区域内发生碰撞的概率很小. 由于电子可以被加速到相当高的能量, 发生碰撞时, 原子有可能被激发到较高的激发态, 从而我们就可以观测到比第一激发电势更高的高激发电势.

四、思考题

1. 管中还能充什么其他气体, 为什么?
2. 什么是能级? 玻尔的能级跃迁理论是如何描述的?
3. 温度对实验中的各参量有什么影响?

五、参考资料

1. 杨洋. 弗兰克-赫兹实验内容的拓宽[J]. 物理通报, 1994.
2. 王恣, 张智力, 李达亮, 等. 弗兰克-赫兹实验中的高激发电势[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(s1): 36—38.
3. 林洽武. 弗兰克-赫兹实验的理论探讨[J]. 广东第二师范学院学报[J], 2014(5): 57—59.
4. 白忠, 苗仁德, 林上金, 等. 弗兰克-赫兹实验中管极电压对实验曲线影响的研究[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(6): 59—62.
5. 杜树槐. 教学中改进弗兰克-赫兹实验的尝试[J]. 物理与工程, 1994(1): 23—26.

实验四十 LED 基本特性测量

一、实验目的与任务

1. 了解 LED 的发光原理;
2. 测量 LED 的伏安特性;
3. 测量 LED 的电光转换特性.

二、实验设计提示

1. LED 发光原理

发光二极管是由 P 型和 N 型半导体组成的二极管(图 1). P 型半导体中有相当数量的空穴,几乎没有自由电子. N 型半导体中有相当数量的自由电子,几乎没有空穴.当两种半导体结合在一起形成 PN 结时, N 区的电子(带负电)向 P 区扩散, P 区的空穴(带正电)向 N 区扩散,在 PN 结附近形成空间电荷区与势垒电场.势垒电场会使载流子向扩散的反方向作漂移运动,最终扩散与漂移达到平衡,使流过 PN 结的净电流为零.在空间电荷区内, P 区的空穴被来自 N 区的电子复合, N 区的电子被来自 P 区的空穴复合,使该区内几乎没有能导电的载流子,所以又称为结区或耗尽层.

当加上与势垒电场方向相反的正向偏压时,结区变窄,在外电场作用下, P 区的空穴和 N 区的电子就向对方扩散运动,从而在 PN 结附近产生电子与空穴的复合,并以热能或光能的形式释放能量.采用适当的材料,使复合能量以发射光子的形式释放,就构成发光二极管.发光二极管发射光谱的中心波长,由组成 PN 结的半导体材料的禁带宽度所决定,采用不同的材料及材料组分,可以获得发射不同颜色的发光二极管.

2. LED 的伏安特性

LED 的伏安特性测量原理如图 2 所示.

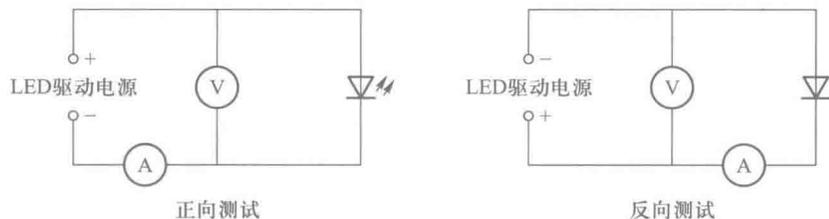


图 2 LED 伏安特性测试原理图

伏安特性反映了在 LED 两端加电压时,电流与电压的关系,如图 3 所示.

在 LED 两端加正向电压,当电压较小,不足以克服势垒电场时,通过 LED 的电流很小.当正向电压超过死区电压 U_{th} (图 3 中的正向拐点)后,电流随电压迅速增长.

正向工作电流指 LED 正常发光时的正向电流值,根据不同 LED 的结构和输出功率的大小,其值在几十毫安到 1 A 之间.

正向工作电压指 LED 正常发光时加在二极管两端的电压.

允许功耗指加于 LED 的正向电压与电流乘积的最大值,超过此值,LED 会因过热而损坏.

LED 的伏安特性与一般二极管相似.在 LED 两端加反向电压,只有微安级反向电流.反向电压超过击穿电压 U_B 后,LED 被击穿损坏.为安全起见,激励电源提供的最大反向电压应低于击穿电压.

3. LED 的电光转换特性

LED 的电光转换特性测量原理如图 4 所示.

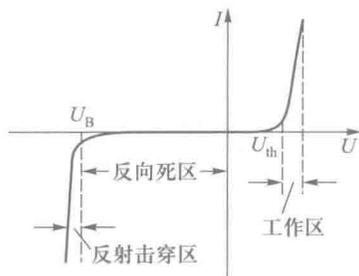


图 3 LED 的伏安特性曲线

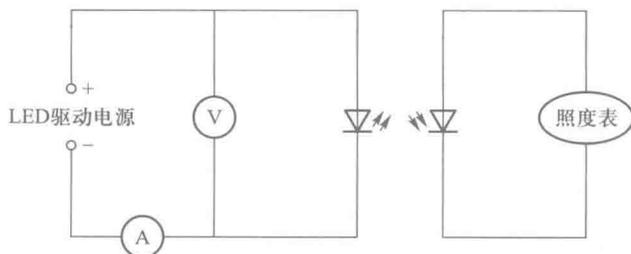


图 4 LED 电光转换特性测试原理图

图 5 反映发光二极管发出的光在某截面处的照度与驱动电流的关系,其照度值与驱动电流近似呈线性关系,这是因为驱动电流与注入 PN 结的电荷量成正比,在复合发光的量子效率一定的情况下,输出光通量与注入电荷量成正比,其照度正比于光通量.

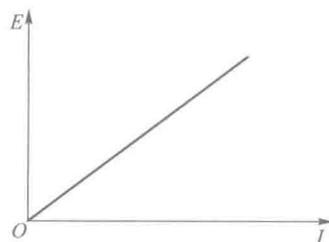


图 5 LED 电光转换特性曲线

三、实验要求

学习使用 LED 综合特性实验仪,实验装置包括激励电源、测试仪、LED 组件盒、LED 光发射器、直线轨道和照度检测探头等.利用实验装置,设计实验步骤和实验数据表格,研究 LED 的伏安特性和电光转换特性,包括 LED 样品的反向偏压与正向偏压特性.

四、注意事项

1. 使用前请仔细阅读说明书.
2. 为保证使用安全,三芯电源线须可靠接地.
3. 严禁在反向测试时使用电流源作为 LED 的驱动电源.
4. 严禁在正向电流较大时(高亮型 $>2\text{ mA}$,功率型 $>20\text{ mA}$)使用稳压源作为 LED 的驱动电源.

五、参考资料

1. 王悦,李泽深,刘维. LED 发光二极管特性测试[J]. 物理实验,2013(02).
2. 路秋生. LED 照明与应用[J]. 灯与照明,2009(04).
3. 陈莹梅,刘平安,陆申龙. 发光二极管基本物理特性测量及研究——介绍一个与节能有关的研究性物理实验[J]. 大学物理,2007(08).
4. 蒋芸,鲍丽莎,曹正东. 发光二极管的特性研究[J]. 实验室研究与探索,2007(06).
5. 李炳乾. 1 W 级大功率白光 LED 发光效率研究[J]. 半导体光电,2005(04).
6. 马春雷,鲍超. 一种高功率 LED 热阻的测试方法[J]. 光学仪器,2005(02).

实验四十一 巨磁电阻效应

一、实验目的与任务

1. 了解巨磁电阻(GMR)效应的原理;
2. 测量 GMR 模拟传感器的磁电转换特性曲线;
3. 测量 GMR 的磁阻特性曲线.

二、实验设计提示

2007 年诺贝尔物理学奖授予了巨磁电阻 (Giant Magneto Resistance, 简称 GMR) 效应的发现者——法国物理学家费尔 (Albert Fert) 和德国物理学家格伦贝格尔 (Peter Grunberg).

根据导电的微观机理, 电子在导电时并不是沿电场直线前进, 而是不断和晶格中的原子产生碰撞 (又称散射), 每次散射后电子都会改变运动方向, 总的运动是电场对电子的定向加速与这种无规则散射运动的叠加. 电子在两次散射之间走过的平均路程称为平均自由程, 电子散射概率小, 则平均自由程长, 电阻率低.

电阻定律 $R = \rho l / S$ 中, 把电阻率 ρ 视为常量, 与材料的几何尺度无关, 这是因为通常材料的几何尺度远大于电子的平均自由程 (例如铜中电子的平均自由程约 34 nm), 可以忽略边界效应. 当材料的几何尺度小到纳米量级, 只有几个原子的厚度时, 例如, 铜原子的直径约为 0.3 nm, 电子在边界上的散射概率大大增加, 可以明显观察到厚度减小、电阻率增加的现象.

电子除携带电荷外, 还具有自旋特性, 自旋磁矩有平行或反平行于外磁场两种可能取向. 早在 1936 年, 英国物理学家、诺贝尔物理学奖获得者莫特 (N. F. Mott) 指出: 在过渡金属中, 自旋磁矩与材料的磁场方向平行的电子, 所受散射概率远小于自旋磁矩与材料的磁场方向反平行的电子. 总电流是两类自旋电流之和; 总电阻是两类自旋电流的并联电阻, 这就是所谓的两电流模型.

在图 1 所示的多层膜结构中, 无外磁场时, 上下两层磁性材料是反平行 (反铁磁) 耦合的. 施加足够强的外磁场后, 两层铁磁膜的方向都与外磁场方向一致, 外磁场使两层铁磁膜从反平行耦合变成了平行耦合. 电流的方向在多数应用中是平行于膜面的.

图 2 是某种 GMR 材料的磁阻特性. 由图可见, 随着外磁场增大, 电阻逐渐减小, 其间有一段线性区域. 当外磁场已使



图 1 多层膜 GMR 结构图

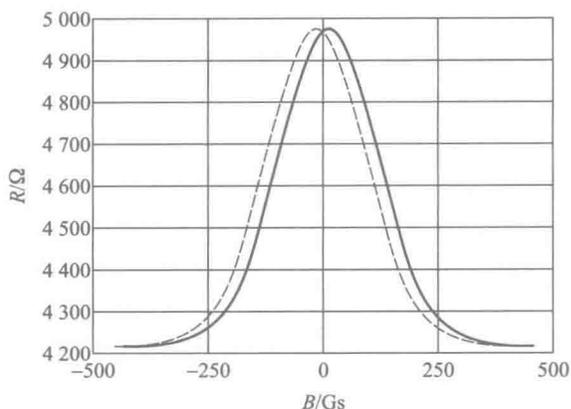


图2 某种 GMR 材料的磁阻特性曲线

两铁磁膜完全平行耦合后,继续加大磁场,电阻不再减小,进入磁饱和区域.磁阻变化率 $\Delta R/R$ 达百分之十几,加反向磁场时磁阻特性是对称的.注意到图 2 中的曲线有两条,分别对应增大磁场和减小磁场时的磁阻特性,这是因为铁磁材料都具有磁滞特性.

有两类与自旋相关的散射对巨磁电阻效应有贡献.

其一,界面上的散射.无外磁场时,上下两层铁磁膜的磁场方向相反,无论电子的初始自旋状态如何,从一层铁磁膜进入另一层铁磁膜时都面临状态改变(平行-反平行,或反平行-平行),电子在界面上的散射概率很大,对应于高电阻状态.有外磁场时,上下两层铁磁膜的磁场方向一致,电子在界面上的散射概率很小,对应于低电阻状态.

其二,铁磁膜内的散射.即使电流方向平行于膜面,由于无规散射,电子也有一定的概率在上下两层铁磁膜之间穿行.无外磁场时,上下两层铁磁膜的磁场方向相反,无论电子的初始自旋状态如何,在穿行过程中都会经历散射概率小(平行)和散射概率大(反平行)两种过程,两类自旋电流的并联电阻相似两个中等阻值的电阻的并联,对应于高电阻状态.有外磁场时,上下两层铁磁膜的磁场方向一致,自旋平行的电子散射概率小,自旋反平行的电子散射概率大,两类自旋电流的并联电阻相似一个小电阻与一个大电阻的并联,对应于低电阻状态.

三、实验要求

学习使用巨磁阻实验仪,利用基本特性组件对 GMR 的磁电转换特性和磁阻特性进行测量.基本特性组件由 GMR 模拟传感器、螺线管线圈、比较电路和输入输出插孔组成.

GMR 传感器置于螺线管的中央,螺线管用于在实验过程中产生大小可计算的磁场大小.对无限长直螺线管内部轴线上任一点的磁感应强度为

$$B = \mu_0 n I$$

式中 n 为线圈密度, I 为流经线圈的电流, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空中的磁导率.采

NOTE

用国际单位制时,由上式计算出的磁感应强度单位为 T($1\text{ T}=10\ 000\text{ Gs}$).

自行设计实验数据表格,研究不同外磁场强度时,GMR 模拟传感器的磁电转换特性以及 GMR 的磁阻特性.

四、注意事项

1. 由于巨磁阻传感器具有磁滞现象,因此,在实验中,恒流源只能单方向调节,不可回调.否则测得的实验数据将不准确.实验表格中的电流只是作为一种参考,实验时以实际显示的数据为准.

2. 测试卡组件不能长期处于“写”状态.

3. 实验过程中,实验环境不得处于强磁场中.

五、参考资料

1. 都有为.巨磁电阻效应[J].自然杂志,1996(02).

2. 李端明,刘海顺,王怀军,等.巨磁电阻效应及其应用[J].物理教学,2008(03).

3. 张朝民,张欣,陆申龙,等.巨磁电阻效应实验仪的研制与应用[J].物理实验,2009(06).

实验四十二 光栅常量与半导体激光波长的测定

一、实验目的与任务

1. 根据光栅的衍射原理设计实验方案来测定光栅常量；
2. 利用该光栅测定半导体激光器所发光波波长。

NOTE

二、实验设计提示

光栅衍射中最关键的是衍射角的测量,实验室中能够准确测量角度的仪器就是分光计.测定光栅常量需要借助已知光波波长的单色光光源.

三、实验要求

简述实验原理,画出光路图,确定实验方案;拟定实验步骤,设计数据记录表格,独立完成实验并进行数据处理,形成完整、规范的实验报告.

四、参考资料

1. 本书中关于分光计的使用与说明.
2. 物理教材中波动光学部分内容.
3. 丁慎训,张连芳.物理实验教程[M].北京:清华大学出版社,2002.
4. 李相银.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2004.
5. 彭建,皮伟.大学物理实验[M].北京:中国电力出版社,2010.

实验四十三 光栅传感器特性测定实验

一、实验目的与任务

NOTE

在掌握光栅传感器的基本原理和机构的基础上,设计直线光栅产生的莫尔条纹,并测定直线光栅常量;观察径向光栅和切向光栅的莫尔条纹,并利用条纹的移动测定角位移及验证其特性.

二、实验设计提示

可供使用的光栅传感器主要由光源系统、光栅副系统、光电转换及处理系统等组成,示意图如图 1 所示.光源系统使光源以平面波或球面波的形式照射到光栅副系统,光电转换及处理系统用于检测莫尔条纹的变化并经适当处理后转换为位移或角度的变化,其中光栅副系统主要用于产生各种类型的莫尔条纹,是关键部分.利用不同光栅进行组合产生不同莫尔条纹,从而设计验证其各种特性.

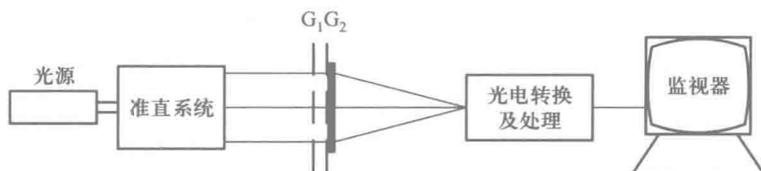


图 1 光栅传感器系统组成示意图

三、实验要求

查阅资料,掌握光栅传感器的工作原理及特性参量;利用光栅传感仪,初步设计各种莫尔条纹,测试其特性;拟定实验内容及实验步骤,设定数据表格进行数据测量,完成数据处理;考虑影响实验误差的因素,估算特性参量的不确定度;形成完整、规范的实验报告.

四、参考资料

光栅传感实验仪实验指南(实验室资料).

实验四十四 多普勒效应综合实验

一、实验目的与任务

1. 利用多普勒效应综合实验仪验证多普勒效应,测量超声接收器运动速度与接收频率之间的关系,并利用此关系求声速;

2. 利用多普勒效应综合实验仪研究:

(1) 自由落体运动,并求重力加速度;

(2) 简谐振动,可测量简谐振动的周期等参量;

(3) 匀加速直线运动,测量力、质量与加速度之间的关系,验证牛顿第二定律;

(4) 其他变速直线运动.

二、实验设计提示

多普勒效应综合实验仪由实验仪、超声发射/接收器、红外发射/接收器、导轨、运动小车、支架、光电门、电磁铁、弹簧、滑轮、砝码等组成.实验仪内置微处理器,带有液晶显示屏.利用以上组件设计任务中要求的实验装置,并通过实验操作获取所需数据,测出相关物理量.

三、实验要求

查找相关资料,利用实验室已有条件,进行试验方案的设计,完成试验数据测量,形成完整、规范的试验报告.

四、参考资料

1. 多普勒效应综合实验仪指南(实验室资料).

2. 李相银.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2004.

实验四十五 真空的获得与测量

一、实验目的与任务

1. 了解真空技术的基本知识；
2. 了解几种常用真空泵的基本工作原理；
3. 掌握低、高真空的获得和测量的基本原理和方法。

二、实验设计提示

用来获得真空的设备称为真空泵,真空泵按其工作原理可分为排气泵和吸气泵两大类.排气型真空泵是利用内部的压缩机构,将被抽容器内气体压缩排出,如机械泵、分子泵等.吸气型真空泵利用表面吸气的方法将分子长期吸着在吸气剂表面上,使被抽容器保持真空,如离子泵、低温泵等.

低真空条件可以靠机械泵获得.机械泵种类很多,目前常用的是旋片式机械泵,它由一个定子和偏心转子组成,定子为一个圆形空腔,空腔上装着进气孔和出气阀门,转子顶端保持与空腔壁相接触,转子上开槽,槽内安放了由弹簧连接的两个刮板,当转子旋转时,两刮板的顶端始终沿着空腔的内壁滑动.整个空腔放置在油箱内.工作时,转子带着旋片不断旋转,使得被抽容器内气体的体积不断膨胀压缩,就有气体不断排出,完成抽气作用.旋片式机械泵的工作压力范围为 $10^{-2} \sim 10^5$ Pa.

高真空条件常用分子泵获得.实验室里用的分子泵通常为涡轮分子泵,其工作原理是依靠高速旋转的转子叶片把定向速度传递给叶片表面的气体分子,造成泵出口、入口的气体分子正向、反向传输概率的差异,使气体定向流动而产生抽气作用.涡轮分子泵主要由涡轮叶片组件(包括转子叶轮和定子叶轮)、驱动系统(即中频马达)和外壳组成.单个叶轮的压缩比很小,涡轮分子泵要由十多个转子叶轮和定子叶轮组成.转子叶轮和定子叶轮交替排列.转子、定子叶轮几何尺寸基本相同,但叶片倾斜角相反.分子泵的压缩比与气体分子量的平方根成正比,气体分子越轻,压缩比越小.分子泵的残气主要由氢组成,较重的碳氢化合物极少,因此分子泵油蒸气污染较轻.涡轮分子泵的工作压力范围为 $10^{-5} \sim 10^2$ Pa.

超高真空条件通常用离子泵、低温泵来获得,这里不再介绍.

用来测量真空度的仪器叫真空计.真空计种类繁多,角度不同,分类方法也不同,这里用一种常见的分类方法,介绍几种常用的真空计.按真空计刻度方法分类,真空计可以分为绝对真空计和相对真空计.

(1) 绝对真空计:直接读取气体压力,其压力响应(刻度)可通过自身几何尺寸计算出来或由测力计确定.绝对真空计对所有气体都是准确的且与气体种类无关.

典型的如波尔登(Bourdon)真空计,主要用来测量粗真空,测量范围为 $10^2 \sim$

10^5 Pa. 它有一根细铜管与被测真空空间相连,铜管受气体压力不同会有舒展现象,会带动杠杆和齿轮旋转,使得指针指示在不同刻度上,即可读出相应的气压值。

(2) 相对真空计. 由一些与气体压力有函数关系的量来确定压力,不能通过简单的计算进行刻度,必须进行校准才能刻度. 相对真空计一般由作为传感器的真空计规管和用于控制、指示的测量器组成,读数与气体种类有关。

典型的如热电偶真空计,主要用来测量低真空,测量范围为 $10^{-1} \sim 10^3$ Pa. 它有一根热电偶接在白金或钨的细线上,这段细线通过电流后会发热,在保持电流一定的条件下,真空度越高气体导热性越差则细线的温度越高,热电偶的电动势就越大,因此,通过测量热电偶的电动势即可确定相应的气压大小. 由于不同气体在相同气压时导热性不同,所以需要在不同的使用气体下标定。

在高真空区域,人们常用另一种相对真空计——热阴极电离真空计,测量范围为 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ Pa. 它由热阴极(即灯丝)发射电子,电离真空中的气体分子产生离子,由收集极收集产生的离子,形成离子电流,通过测量离子电流的大小来推算真空中气体分子的密度,进而得到气压大小. 由于不同气体在相同气压下的电离率不同,所以使用时需要在不同气体下进行标定。

在用真空泵获取真空的过程中,经常还会用到检漏技术. 通常情况下,如果真空系统长时间无法达到预期的真空度,就要对系统进行检漏,漏点大多位于系统的接口部位,也可能位于管道或者真空泵本身. 检漏方法和仪器有很多,这里只介绍几种简单常用的方法和仪器。

(1) 高频火花检漏器:它的工作压力范围为 $0.5 \sim 10^3$ Pa,主要用于玻璃真空系统的低真空检漏. 使用时,接通开关,放电簧处便产生高频火花. 当放电簧与玻璃容器表面接近 1 cm 左右时,在容器内激起高频放电,如果放电簧沿玻璃表面移动,没有漏孔时,则会在玻璃表面形成散开的杂乱火花;有漏孔时,则形成细长而明亮的火花束,束的末端指向漏孔。

如果要对金属真空系统和管路检漏,需要用真空胶管把一段玻璃管接到金属真空系统上,然后让玻璃管内产生高频火花. 由于高频火花颜色与真空系统内气体种类有关,所以在系统怀疑有漏孔的地方施以示漏物质(如酒精等),观察玻璃管内放电颜色有无变化,就可判定漏点位置。

(2) 电离真空计:多数高真空系统上自带有电离真空计,平时用来测量系统的真空度,比如上面提到的热阴极电离真空计,此时可用它来检漏. 我们利用电离真空计的读数不仅与压力有关,还与气体种类有关的性质来进行检漏. 当示漏物质(如酒精灯)通过漏孔进入真空系统时,电离真空计读数发生变化,据此可判定漏孔位置。

三、实验要求

1. 查阅文献资料了解并掌握几种真空泵和真空计的操作过程及注意事项;
2. 查阅文献资料了解并掌握几种检漏法的具体步骤及注意事项;
3. 设计实验方案,确定实验条件,拟定实验步骤,获取预期的真空;

4. 采用静态升压法,记录压强和时间,作出 $p-t$ 曲线,并计算真空系统的漏率.

四、参考资料

1. 朱武. 真空测量与控制[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2008.
2. 高本辉. 真空物理[M]. 北京:科学出版社,1983.
3. 彭建,皮伟. 大学物理实验[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

实验四十六 真空镀膜

一、实验目的与任务

1. 了解真空镀膜的基本知识;
2. 学习掌握蒸发镀膜的基本方法.

二、实验设计提示

真空镀膜是指在真空中通过电流加热、电子束加热或激光溅射等方法,将原材料气化成为气态原子、分子或部分电离成离子,它们在低气压条件下以较大自由程作直线运动,碰撞基片表面并沉积凝结,从而形成一层具有某种特殊功能薄膜的技术.在真空镀膜方法中,最常用的是热蒸发法和溅射法.热蒸发法的优势是沉积速率高、实验过程中真空度较高以及由此导致薄膜的生长质量也较高等;溅射法的优势为基片与薄膜的结合力较强、多元合金薄膜的化学成分比较容易控制等.本实验使用的镀膜方法为热蒸发法.

蒸发镀膜要求镀膜室内残余气体分子的平均自由程大于蒸发源到基片的距离,尽可能减少残余分子与其他气体分子碰撞的机会,这样才能保证薄膜纯净和牢固.蒸发薄膜时,薄膜材料被加热蒸发成为原子或分子,在一定的温度下,薄膜材料单位面积的质量蒸发效率由 Langmuir 导出的公式决定:

$$G \approx 4.73 \times 10^{-3} p_v \sqrt{\frac{M}{T}}$$

式中 M 为蒸发材料的摩尔质量; p_v 为蒸发材料的饱和蒸气压; T 为蒸发材料温度.材料的饱和蒸气压随温度的上升而迅速增大,温度变化 10%,饱和蒸气压就要变化一个数量级.因此,在蒸发镀膜过程中,要想控制蒸发速率,就必须精确控制蒸发源的温度.

蒸发镀膜最常用的加热方法是电阻大电流加热.例如蒸发 Zn 进行镀膜, Zn 的熔点为 419.6 °C, 沸点为 907 °C, 实际上在低于 907 °C 时,一部分 Zn 就已经被蒸发到基片上形成薄膜了,这就如同水温在达到 100 °C 之前就已经产生水蒸气一样.真空镀膜过程中,飞抵基片的气态原子或分子,除一部分被发射外,其余的被吸附在基片表面上,被吸附的原子或分子在基片表面进行扩散运动,一部分经过一段时间的滞留后再被蒸发而离开基片表面,另一部分在基片表面运动中因互相碰撞而团聚成团,形成“晶核”,随着基片表面凝结的原子或分子越来越多,“晶核”不断生长最后形成薄膜.

薄膜的生长过程通常遵循下面三个模式:① 层状 (Frank-van der Merwe) 生长模式,这种模式适用于被沉积材料与基片之间浸润性较好条件下的薄膜生长;② 岛状 (Volmer-Weber) 生长模式,适用于被沉积材料与基片之间浸润性较差条件

NOTE

下的薄膜生长;③层状-岛状(Stranski-Krastanov)生长模式,最开始是层状生长模式,之后转为岛状生长模式,这是由薄膜生长过程中各种能量的相互消长决定的。

三、实验要求

1. 了解并掌握真空镀膜机的使用方法;
2. 查阅文献资料详细了解薄膜的生长机理;
3. 设计实验方案,拟定实验步骤,在基片表面生长符合规定要求的薄膜;
4. 观察薄膜的表面形貌,分析实验结果,形成实验报告。

四、参考资料

1. 杨邦朝. 薄膜物理与技术[M]. 成都:电子科技大学出版社,1994.
2. 尚世铉. 近代物理实验技术(Ⅱ)[M]. 北京:高等教育出版社,1993.
3. 唐伟忠. 薄膜材料制备原理、技术及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
4. 彭建,皮伟. 大学物理实验[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

实验四十七 氧化锌纳米材料的制备

一、实验目的与任务

1. 了解纳米材料的基本知识;
2. 学习并掌握热蒸发法制备氧化锌纳米材料的方法.

二、实验设计提示

纳米是一种度量单位. 广义地说, 纳米材料是指微观结构在三维空间中至少有一维处在纳米尺度(1~100 nm)范围, 或由它们作为基本单元构成的材料, 包括零维的原子团簇(几十个原子的聚集体)和纳米微粒、一维的纳米线、二维的纳米薄膜(涂层). 纳米材料由于尺度很小, 当其达到纳米范围后, 就会出现许多块体材料所不具备的特殊物理效应, 主要表现出小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、介电限域效应等, 从而导致纳米材料的热、磁、光、敏感特性等不同于其他材料, 这就使得它们具有广阔的应用前景.

ZnO 纳米材料同样具有一些特殊的性质, 如非迁移性、荧光性、压电性、吸收和散射紫外线性、催化降解作用等, 因此, 它可以应用于气体传感器、荧光体、变阻器、紫外线遮蔽材料、图像记录材料、压电材料、压敏电阻、高效催化剂、磁性材料和塑料薄膜等.

ZnO 纳米材料的制备方法有很多, 如热蒸发法、微波法、静电纺丝法、离子液体法、脉冲激光烧蚀沉积法、频磁控溅射法等, 本实验采用热蒸发法制备 ZnO 纳米材料, 实验装置为水平管式炉, 如图 1 所示. 从原理上讲, 热蒸发法是一个比较简单的制备纳米材料的过程. 在预先设计好的生长条件下(包括温度、气体压力、气体流量、基片到材料源的距离等), 材料源(金属粉末或颗粒)在高温下瞬间蒸发, 不断与气体碰撞, 发生化学反应, 先是结晶成核, 然后逐渐生长, 最后在低温区获得期望的纳米材料. 通过改变生长温度, 气体流量, 是否使用催化剂等生长条件, 可以获得不同形貌的 ZnO 纳米材料.

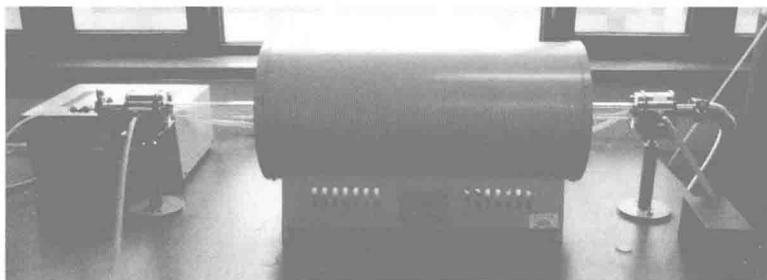


图 1 ZnO 纳米材料生长装置

三、实验要求

1. 查阅文献资料了解热蒸发法制备 ZnO 纳米材料的实验条件；
2. 设计实验方案,确定实验条件,拟定实验步骤,制备预期形貌的 ZnO 纳米材料；
3. 观察制备所得 ZnO 纳米材料的形貌,分析实验结果,形成实验报告.

四、参考资料

1. 张立德. 纳米材料与纳米结构[M]. 北京:科学出版社,2001.
2. 周瑞发. 纳米材料与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
3. 彭建,皮伟. 大学物理实验[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

实验四十八 锁相放大器的使用

一、实验目的与任务

1. 了解锁相放大器的工作原理和基本结构；
2. 熟悉锁相放大器的使用方法；
3. 测试与研究双相锁相放大器的特性。

二、实验设计提示

在物理学的许多测量中,常常遇到极微弱信号.检测微弱信号的核心问题是对噪声的处理,通常的方法是采用选频放大技术,使放大器的中心频率与待测信号频率相同,从非线性器件直接产生的或外部引入的(干扰等)众多频率分量中间取出有用分量,滤除其他无用分量.但此方法存在中心频率不稳定、带宽不能太窄及对信号缺乏跟踪能力等缺点.

锁相放大器(Lock-in amplifier, LIA)自问世以来,在微弱信号检测方面显示出优秀的性能,它能够在较强的噪声中提取信号,使测量精度大大提高,在科学研究的各个领域得到了广泛的应用.它利用待测信号和参考信号的互相关检测原理实现对信号的窄带化处理,能有效地抑制噪声,实现对信号的检测和跟踪.目前,锁相放大技术已广泛地用于物理、化学、生物、通信、医学等领域.因此,培养学生掌握锁相放大技术的原理和应用,具有重要的现实意义.

锁相放大器的基本结构包括信号通道、参考通道、相敏检测器(PSD)和低通滤波器(LPF)等.

(1) 信号通道包括:低噪声前置放大器、带通滤波器及可变增益交流放大器.前置放大器用于对调制正弦信号输入进行交流放大,将微弱信号放大到足以推动相敏检测器工作的平台.带通滤波器的作用是对混在信号中的噪音进行滤波,尽量排除带外噪音,这样不仅可以避免 PSD 过载,而且可以进一步增加 PSD 输出信噪比,以确保微弱信号的精确测量.可变增益放大器是信号放大的主要部件,它必须有很宽的增益调节范围,以适应不同的信号的需要.

(2) 参考通道对参考输入进行放大和衰减,以适应相敏检测器对幅度的要求.参考通道的另一个重要功能是对参考输入进行移相处理,以使各种不同的相移信号的检测结果达到最佳.

(3) 锁相放大器的核心部件是 PSD,它以参考信号 $r(t)$ 为基准,对有用信号 $x(t)$ 进行相敏检测,从而实现频谱迁移过程.将 $x(t)$ 的频谱由 $\omega = \omega_0$ 处,再经 LPF 滤除噪声,输出直流信号,其幅度与两路输入信号幅度及它们的相位有关.其输出 $u_0(t)$ 对 $x(t)$ 的幅度和相位都敏感,这样就达到了既鉴别幅度又鉴别相位的目的.因为 LPF 的频带可以做得很窄,所以可使锁相放大器达到较大的信号噪声干扰比

NOTE

(SNIR).

三、实验要求

1. 查阅有关资料了解锁相放大器的工作原理、性能参量及使用方法.
2. 设计实验方案,拟定实验步骤,研究双相锁相放大器的特性,测量其主要参量,并作好实验记录.
3. 对相关实验结果和实验数据进行分析,形成实验结论.

四、参考资料

1. 吕斯骅,朱印康.近代物理实验技术[M].北京:高等教育出版社,1991.
2. 万心平,张厥盛.集成锁相环路——原理、特性及应用[M].北京:人民邮电出版社,1990.
3. 李相银.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2004.
4. 张孔时.物理实验教程:近代物理部分[M].北京:人民邮电出版社,1990.

实验四十九 低温的获得与测量

一、实验目的与任务

1. 掌握低温获得与测量的原理和方法.
2. 了解氦闭循环制冷机的工作原理.

二、实验设计提示

获取低温的方法主要有两种:

(1) 直接用液化的气体作为冷源获取低温. 常用的冷源为液氮和液氦, 常压下它们的沸点分别是 77 K 和 4.2 K. 这种方法获取低温的过程非常复杂而且费时, 同时又要消耗过多的液氮和液氦, 因此代价较高, 难以广泛使用.

(2) 利用制冷机闭循环获得低温. 实验上使用的小型制冷机主要有 GM 制冷机、ST 制冷机、SV 制冷机、VM 制冷机等. 它们的工作原理基本一致, 都是将高压氦气经绝热放气过程从而实现降温目的, 不同之处主要是装置结构和气体循环过程.

本实验采用氦闭循环制冷机获取低温, 工作温度范围 4.2 ~ 325 K, 并且提供全量程的样品安装支架, 可以很方便地安装样品进行各种试验, 非常适合在宽温度范围内研究材料的物理特性.

该制冷机采用 GM 制冷循环, 不需要液氮或液氦, 只需接上电就可以很方便地使用. 制冷机主要组成部分有: 压缩机、氦气管线、冷头、样品架, 真空罩、防辐射屏、温度计、加热器、控温仪等仪器.

压缩机和冷头通过氦气管线相连, 压缩机内充满高纯的氦气, 氦气在冷头和压机之间作热力学循环, 在二级冷头上产生 4.2 K、功率为 0.5 W 的冷量. 在二级冷头上安装有样品架, 样品可以固定在样品架上, 从而使样品达到低温.

在样品架上安装有温度计和加热器, 温度计可以实时测量样品的温度. 温度计加热器通过电缆和控温仪相连. 实验时可以在控温仪上设定需要的温度, 当实际测量温度和设定温度不同时, 控温仪比较实际测量温度和设定温度的差别, 对样品进行加热, 当制冷和加热达到平衡时, 样品温度稳定在实验需要的温度, 此时可以进行实验.

为了同大气隔离, 冷头、样品架、温度计、加热器等安装在真空罩内, 同时真空罩内安装了防辐射屏, 从而保证 4.2 K 的低温.

本实验为获取高真空所用的涡轮分子泵是一种机械式真空泵, 是通过高速旋转的多级涡轮转子叶片和静止涡轮叶片的组合进行抽气的, 在分子流区域内对被抽气体产生很高的压缩比, 从而获得所需要的真空性能, 对被抽气体无选择性、无记忆效应、操作简单、使用方便. 由于对分子量大的气体具有很高的压缩比, 因此在转过程中, 高真空区域不会受到油蒸气的污染, 该泵不需要冷阱和油挡板, 即可

获得清洁的高真空和超高真空环境. 它广泛应用于表面分析、加速器技术、等离子体技术、电真空器件的制造及真空技术的各个领域.

三、实验要求

1. 查阅有关资料了解氦闭循环制冷机和涡轮分子泵的工作原理和结构;
2. 查阅资料了解温度测量的原理;
3. 查阅资料设计实验操作步骤;
4. 测量温度,设计数据表格记录温度和时间,画出温度随时间变化的曲线.

四、参考资料

1. 阎守胜,陆果. 低温物理实验的原理与方法[M]. 北京:科学出版社,1985.
2. 张祉祐,石秉三. 制冷及低温技术[M]. 北京:机械工业出版社,1981.
3. 李志超,轩植华,霍剑青. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2001.

实验五十 反常霍尔效应

一、实验目的与任务

1. 了解低温环境下稀磁半导体材料的反常霍尔效应；
2. 了解反常霍尔效应的应用研究进展状况；
3. 学习测量霍尔电阻随磁感应强度的变化关系。

二、实验设计提示

1881年,霍尔在研究磁性金属的霍尔效应时发现,即使不加外磁场也可以观测到霍尔效应,这种零磁场中的霍尔效应就是反常霍尔效应.正常霍尔效应是指垂直于电流方向的磁场对导体中载流子施加洛伦兹力从而在导体两端产生横向电压的电磁输运现象.而反常霍尔效应则完全不同,它是由于材料本身的自发磁化而产生的,因此是一类新的重要物理效应.

研究霍尔效应时,我们称导体两端产生的横向电压为霍尔电压,将霍尔电压与电流的比值定义为霍尔电阻,记作 ρ_{H} .正常霍尔效应中, ρ_{H} 与加在材料上的磁感应强度 B 成正比.然而在多晶形式的铁磁性金属和合金中,霍尔电阻具有以下表达式:

$$\rho_{\text{H}} = R_0 B + \mu_0 R_s M_s$$

R_0 是正常霍尔系数, R_s 是反常霍尔系数, B 是磁感应强度, M_s 是饱和磁化强度, μ_0 是真空磁导率.等号右边第一项是由于载流子受到洛伦兹力产生的,是正常霍尔效应;第二项是表征材料磁化状态的特性,与磁化强度成正比,是源于自发磁化的反常霍尔效应.

所谓稀磁半导体(Diluted Magnetic Semiconductor, DMS),是指磁性过渡金属或稀土金属离子部分取代化合物半导体(通常为AB型)的阳离子,从而形成三元或四元的化合物.通过研究稀磁半导体的反常霍尔效应、正常霍尔效应、电阻的温度依赖关系和磁阻的各向异性等磁输运特性,人们期望得到多功能、高性能、超高速和低功耗的半导体自旋器件,例如自旋场效应晶体管(Spin 2 FET)、自旋发光二极管(Spin 2 LED)、自旋共振磁隧道结(Spin 2 RTD)、光隔离器(Optical Isolator)、磁传感器(Magnetic Sensor)和非挥发存储器(Nonvolatile Memory)等,这些器件有望满足信息技术的超高速、超宽带和超大容量发展趋势.

三、实验要求

1. 查阅文献资料了解反常霍尔效应的产生机制、特性及应用研究进展；
2. 设计实验方案,拟定实验步骤,测量样品的反常霍尔效应；
3. 测量霍尔电阻随磁感应强度的变化关系,记录实验数据,作出霍尔电阻随

NOTE

磁感应强度变化的曲线图.

四、参考资料

1. 田源. 铁及铁合金的反常霍尔效应和磁性研究[D]. 上海:复旦大学,2010.
2. 于广华,彭文林. 反常霍尔效应及其应用研究进展[J]. 金属功能材料,2016(3).
3. 赵建华,邓加军. 稀磁半导体的研究进展[J]. 物理学进展,2007,27(2): 109—150.

实验五十一 光纤特性及传输实验

一、实验目的与任务

1. 学习光纤信号传输系统的基本结构及各部件选配原则;
2. 熟悉光纤传输系统中电光/光电转换器件的基本性能;
3. 训练如何在光纤传输系统中获得较好信号传输质量.

二、实验设计提示

光纤是光纤通信和光纤传感器的基本材料. 光纤通信就是用光波作载波, 用光纤传输光信号的通信方式. 光纤传输系统一般由三部分组成: 光信号发送端、用于传送光信号的光纤和光信号接收端. 光信号发送端的功能是将待传输的电信号经电光转换器件转换为光信号, 光纤的功能是将发送端光信号以尽可能小的衰减和失真传送到光信号接收端, 目前光纤一般采用在近红外波段 $0.84\ \mu\text{m}$ 、 $1.31\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$ 有良好透过率的多模或单模石英光纤. 光信号接收端的功能是将光信号经光电转换器件还原为相应的电信号, 光电转换器件一般采用半导体光电二极管或雪崩光电二极管. 组成光纤传输系统光源的发光波长必须与传输光纤呈现低损耗窗口的波段、光电检测器件的峰值响应波段匹配.

衡量光纤性能的好坏主要是它的损耗特性和色散特性. 损耗特性决定光纤传输的中继距离. 损耗越小, 中继距离越长. 损耗用损耗系数表示, 光在有损耗的介质中传播时, 光强按指数规律衰减, 在通信领域, 损耗系数用单位长度的分贝值表示, 定义为 $\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_0}{P_1}$, 单位为 dB/km.

三、实验要求

根据实验室现有的设备和条件, 充分调研相关资料, 掌握光纤信号传输系统的结构和原理, 给出测量光纤特性(如光纤损耗系数、光纤弯曲损耗、激光二极管的伏安特性与输出特性、光电二极管的伏安特性等)的具体方案和步骤. 换用不同信号进行传输实验, 观察外界因素对传输的影响.

四、参考资料

1. 谢行恕. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
2. 郇文忠. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
3. 丁慎训. 张连芳. 物理实验教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
4. 杨述武. 普通物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

5. 王秉超. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
6. 仲志强. 大学物理实验[M]. 南京:南京大学出版社,2009.
7. 徐寒. 大学物理实验[M]. 北京:科学出版社,2011.
8. 赵海军. 工科物理实验[M]. 武汉:武汉大学出版社,2012.

实验五十二 声波在物质中的衰减系数的测量

一、实验目的与任务

基于“空气声速与绝热系数的测定”实验,进一步研究声波在物质中衰减系数的测量.

二、实验设计提示

机械波必须依靠弹性介质进行传播,声波(实验室中常常使用超声波)在物质中传播时,其能量随着传播距离的增加而逐渐减弱的现象称为声波的衰减.衰减规律为 $I=I_0e^{-\alpha d}$,其中 I_0 是入射声波的初始声强, I 为深入介质 d 距离处的声强(即衰减后的声波强度), α 是衰减系数.

三、实验要求

1. 基于实验室既有的设备和条件,选择被测的物质类型(如空气、固体或液体),查阅相关资料,自行设计实验方案.
2. 测量出衰减系数并与公认值比较,对实验结果进行分析,写出规范的实验报告.

四、参考资料

1. 贺梅英,黄沛天.声速测量实验中声波衰减现象的研究[J].物理测试,2007,25(1).
2. 江兴方.声速测量实验中的三点思考[J].大学物理,2002,21(12).
3. 张庆,李卓凡,王小怀.声速测定中声强的综合衰减系数的测定[J].大学物理实验,2005(1).

实验五十三 空气物理参量的测量

一、实验目的与任务

对空气的常用物理参量(如密度、大气压强、折射率、介电常量、导热系数、比热容比等)进行测量.

二、实验设计提示

地球周围被很厚的大气层包围着,这个空气层一直延伸到离地面几千米的高空.由于地球有强大的吸引力,使约 80% 的空气集中在离地面平均为 15 km 的范围里.这一空气层对人类生活影响很大,我们所做的任何实验都离不开它的影响.因此,对某些实验必须要知道空气的物理参量,以有效消除或减小其影响,从而得到更好的实验结果.

三、实验要求

基于实验室既有的设备和条件,选择要测量的空气参量,充分调研,自行设计测量方法和步骤,形成完整的实验报告.

四、参考资料

1. 李相银. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
2. 丁慎训,张连芳. 物理实验教程[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
3. 王国栋. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2008.

实验五十四 磁悬浮导轨上碰撞设计性实验

一、实验目的

1. 了解磁悬浮的物理思想和永磁悬浮技术；
2. 用两个磁悬浮滑块,设计多种弹性和非弹性碰撞实验；
3. 观察系统中物体间的各种形式的碰撞,考察动量守恒定律；
4. 观察碰撞过程中系统动能的变化情况,分析实验中的碰撞是属于哪种类型的碰撞。

二、实验仪器

DHSY-1 型磁悬浮动力学实验仪。

三、实验原理

碰撞问题在历史上曾是科学界共同关心的课题,惠更斯、牛顿等科学家先后曾作过系统的研究,总结了碰撞规律,牛顿正是在碰撞定律基础上提出牛顿第三定律,碰撞定律同样适用于微观领域和现实生活,如汽车的碰撞等。

本实验是在磁悬浮导轨上进行的,提供三辆滑块;一辆滑块是一头装有弹簧;一辆滑块装有黏性尼龙毛,一辆滑块装有黏性尼龙刺。碰撞装置如图 1 所示。

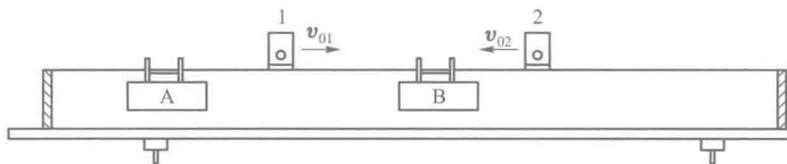


图 1 碰撞实验装置图

设有两物,其质量分别为 m_1 和 m_2 ,碰撞前的速度分别为 v_{01} 和 v_{02} ,碰撞后的速度分别为 v_{11} 和 v_{12} ,而且在碰撞的瞬间,此二物体构成的系统在所考察的速度方向上不受外力的作用或所受的外力远小于碰撞时物体间的相互作用力,则根据动量守恒定律,系统在碰撞前的总动量等于碰撞后的总动量,即

$$m_1 v_{01} + m_2 v_{02} = m_1 v_{11} + m_2 v_{12}$$

系统在碰撞前后的动能,却不一定守恒,根据动能的变化和运动状态,把碰撞分为三种类型:

- (1) 碰撞过程中没有机械能损失,系统的总动能保持不变,称为“弹性碰撞”;
- (2) 碰撞过程中有机械能损失,系统碰撞后的动能小于碰撞前的动能保持不变,称为“非弹性碰撞”;
- (3) 碰撞后两物体连接在一起运动,即两物体在碰撞后的速度相等,称为“完

全非弹性碰撞”。

碰撞形式可以多种多样,就是在导轨上也可以有相对碰撞和尾随碰撞, v_{01} 和 v_{02} 速度方向可以相反也可以相同, v_{11} 和 v_{12} 也是如此, v_{01} 也可以为零。

四、实验装置介绍

1. 磁悬浮原理

磁悬浮实验装置如图 2 所示,磁悬浮导轨(图 3)实际上是一个槽轨,长约 1.2 m,在槽轨底部中心轴线嵌入钕铁硼(NdFeB)磁钢,在其上方的滑块底部也嵌入磁钢,形成两组带状磁场.由于磁场极性相反,上下之间产生斥力,滑块处于非平衡状态.为使滑块悬浮在导轨上运行,采用了槽轨.

在导轨的基板上安装了带有角度刻度的标尺.根据实验要求,可把导轨设置成不同角度的斜面.

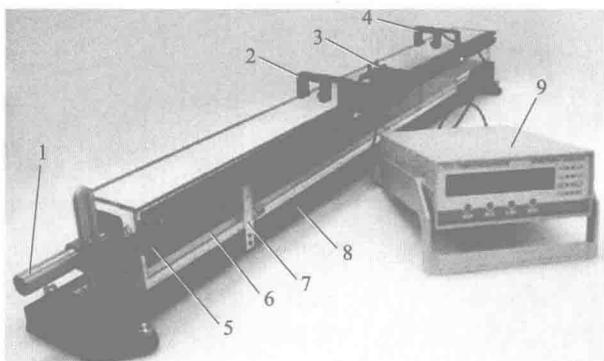


图 2 磁悬浮实验装置

1—手柄;2—光电门 I;3—磁悬浮滑块;4—光电门 II;5—导轨;6—标尺;7—角度尺;8—基板;9—计时器

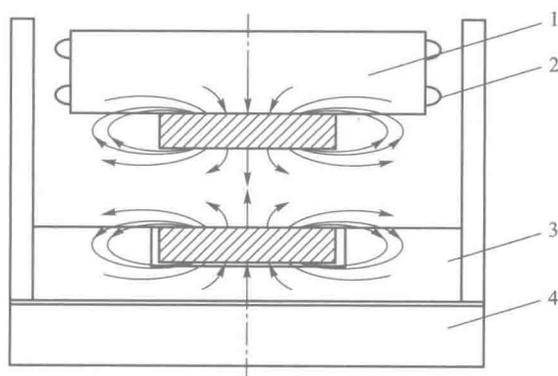


图 3 磁悬浮导轨截面图

1—磁悬浮滑块;2—导向滑轮;3—磁悬浮导轨;4—基板

2. 仪器使用

时器按模式 0 功能进行操作.

每条导轨配有三个滑块,用来研究运动规律.每个滑块上有两条挡光片,滑块在槽轨中运动时,挡光片对光电门进行挡光,每挡光一次,光电转换电路便产生一个电脉冲信号,去控制计时门的开和关(即计时的开始和停止).

如图4所示,导轨上有两个光电门,本光电测试仪测定并存储了运动滑块上的两条挡光片通过第一光电门的时间间隔 Δt_1 、通过第二光电门的时间间隔 Δt_2 和运动滑块从第一光电门到第二光电门所经历的时间间隔 $\Delta t'$. 根据两挡光片之间的距离 Δx ,即可算出滑块上两挡光片通过第一光电门时的平均速度 $v_1 = \frac{\Delta x}{\Delta t_1}$ 和通过第二光电门

时的平均速度 $v_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t_2}$.

调整导轨和基板之间成一夹角,则实验仪成一斜面,斜面倾斜角即为 θ ,其正弦值 $\sin \theta$ 为块规高度 h 和导轨(标尺)读数 L 的比值,磁悬浮滑块从斜面上端开始下落,则其重力在斜面方向分量为 $G \sin \theta$.

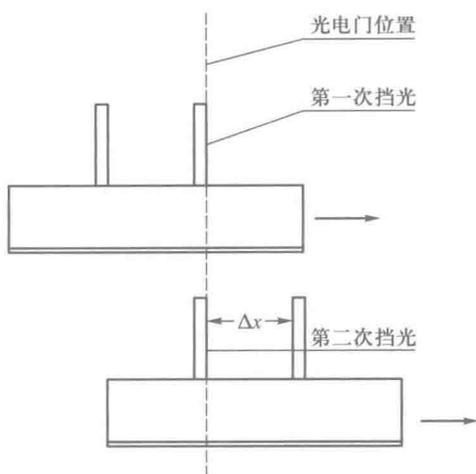


图4 时间测量图

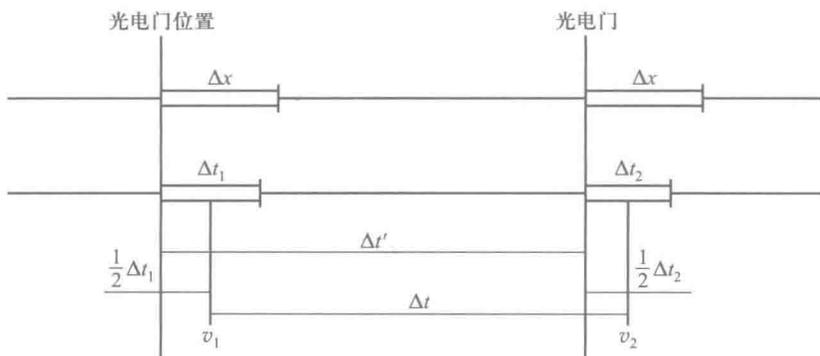


图5 时间测量修正图

为使测得的平均速度更接近挡光片中心处通过时的瞬时速度,本仪器在时间处理上已作如图5所示的处理,本实验测试仪中,从 v_1 增加到 v_2 所需时间已修正为 $\Delta t = \Delta t' - \frac{1}{2} \Delta t_1 + \frac{1}{2} \Delta t_2$. 根据测得的 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t'$ 和键入的挡光片间隔 Δx ,经智能测试仪运算已显示,得 v_1, v_2, a_0 ; 测试仪中显示的 t_1, t_2, t_3 对应上述的 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t'$.

五、实验设计内容及步骤

1. 深刻理解动能守恒定律. 注意动量的矢量性和滑块在导轨上碰撞的标量表示式.

2. 设计出观察两等质量滑块间发生弹性碰撞的实验方案.

(1) 设计弹性碰撞的实验方案时,首先画出发生弹性碰撞实验的示意图.

(2) 注明两光电门位置,滑块放置的位置.

(3) 参照表 1 设定两悬浮滑块的发生弹性碰撞的各种可能的运动方向等.以及设计数据记录和处理的表格,表格中必须列入动量增量和动能增量及其相对变化值.

(4) 实验测试.按照设计的弹性碰撞的实验方案,进行实验测试,并将数据记录在表格中,观察动量增量和动能增量及其相对变化值.验证设计方案的正确性.

3. 设计出观察两等质量滑块间利用尼龙搭扣进行完全非弹性碰撞的实验方案.

(1) 采用粘有黏性尼龙的两个滑块发生完全非弹性碰撞.

(2) 设计方法同步骤 2.

4. 用简单的实验方法,估算出平均阻力的大小.

磁悬浮导轨上运动的滑块所受的阻力虽然很小,但不等于零.阻力的大小也随实验条件的不同略有不同,平均阻力为 10^{-3} N 数量级.请你根据力学定律,用简单的实验方法,估算出平均阻力的大小,并用求得平均阻力进一步考虑是否该修正实验测得的数据.

5. 写实验预习报告.

预先写出预习报告,然后在实验室里对照仪器,再进行修改,做完实验后再写出完整的实验报告.实验报告的内容包括:目的,原理,碰撞的示意图,简单的实验步骤,数据记录、处理和结果分析.

两磁浮滑块在碰撞前后的速度方向可有 12 类的类型,见表 1.表中的内容与实验智能测试仪智能的操作、设置模式相同.

表 1 实验设置模式及操作方法

模式	初始状态		结束状态	
1	A 位于光电门 I 左侧 向右运动, B 静止于两光电门之间	A → B_0	A → B →	A 过光电门 I 光电门 II 后向右运动 B 过光电门 II 后向右运动
2		A → B_0	A ← B →	A 过光电门 I 后折返向左运动 B 过光电门 II 后向右运动
3		A → B_0	A_0 B →	A 过光电门 I 后静止在两光电门中间 B 过光电门 II 后向右运动
4		A → B ←	A → B →	A 过光电门 I 光电门 II 后向右运动 B 过光电门 II 后折返向右运动
5		A → B ←	A ← B ←	A 过光电门 I 后折返向左运动 B 过光电门 II 光电门 I 后向左运动
6		A → B ←	A ← B →	A 过光电门 I 后折返向左运动 B 过光电门 II 后折返向右运动

续表

模式	初始状态		结束状态	
7	A 位于光电门 I 左侧 向右运动, B 位于光电门 II 右侧向左 运动	A→ B←	A_0 B→	A 过光电门 I 后静止在两光电门中间 B 过光电门 II 后折返向右运动
8		A→ B←	A← B_0	A 过光电门 I 后折返向左运动 B 过光电门 II 后静止在两光电门中间
9		A→ B←	A_0 B_0	A 过光电门 I 后静止在两光电门中间 B 过光电门 II 后静止在两光电门中间
A	A 和 B 都 位于光电门 I 左侧, A 撞击 B 后同 时向右侧运 动	A→ B→	A→ B→	A 过光电门 I 光电门 II 后向右运动 B 过光电门 I 光电门 II 后向右运动
B		A→ B→	A← B→	A 过光电门 I 后折返向左运动 B 过光电门 I 光电门 II 后向右运动
C		A→ B→	A_0 B→	A 过光电门 I 后静止在两光电门中间 B 过光电门 I 光电门 II 后向右运动

注: A、B 分别表示导轨中的滑块。

六、数据记录及数据处理

设计实验表格,并选择合适的实验数据处理方法,并对实验精度进行合理分析。

七、注意事项

1. 称量磁悬浮滑块质量时,请用非铁磁材料放于滑块下方,防止磁铁与电子天平相互作用,影响称量准确性。
2. 实验做完后,磁悬浮滑块不可长时间放在导轨中,防止滑轮被磁化。

八、思考题

测出一组数据后,最好先算出来检验动量是否守恒,是否在我们的实验误差范围内(碰撞前后的动量相差不大于碰撞前系统动量的 2%)。如果不是,必须找出产生误差的原因,重新进行实验,再检验动量变化的情况。

实验五十五 用电势差计校准电压表

一、实验目的与任务

1. 了解箱式电势差计的工作原理和结构；
2. 掌握箱式电势差计的使用方法；
3. 运用箱式电势差计校正电压表。

二、实验设计提示

1. 校准方法是用电势差计测出被校电压表两端的实际电压,再与被校表的指示数逐一比较.实际上这里的电势差计作为标准电压表使用。

2. 被校电压表量程 1.5 V,内阻约为 1.5 k Ω ,准确度等级 1.5 级.实验室可提供 UJ-31 型低电势电势差计,能测量的最大电压只有 171 mV,故需考虑如何用它来测量较大的电压。

3. 依据国家相关规定,标准表应比被校表高两个等级.因此要求电势差计(包括其附属电路)所测的电压的误差不超过 0.5%.据此进行相关器件的性能参数的选择。

三、实验要求

1. 简述实验原理,确定实验方案。
2. 画出实验电路图,选定所需实验器件,确定相关的性能参数。
3. 拟定实验步骤,设计数据记录表格。
4. 通过实验得到电压表的校正曲线,作出完整、规范的实验报告。

四、参考资料

1. 本书 § 5.5, § 5.6, § 5.7, § 6.1 和“实验八 用电势差计测量电动势和内阻”。
2. 浙江工学院等.工科物理实验教程[M].杭州:浙江大学出版社,1991。
3. 杨述武.普通物理实验[M].北京:高等教育出版社,2000。
4. 彭建,皮伟.大学物理实验[M].北京:中国电力出版社,2010。

实验五十六 简易万用表的设计与制作

一、实验目的与任务

1. 掌握万用表的基本原理,设计出简易万用电表的电路图.
2. 通过电路元器件的选择和测试,电路的焊接,制作出一个简易万用电表.

NOTE

二、可提供的实验器件

可变电阻标准电阻箱、成品万用表、直流电源、交流电源、滑线变阻器、多种阻值的电阻元件、导线、单刀多位开关等.

三、实验要求

1. 要求将一个微安表表头(满偏电流 $50\ \mu\text{A}$)改装成如下规格的万用表:两量程直流电流 $5\ \text{mA}$ 、 $50\ \text{mA}$,两量程直流电压 $5\ \text{V}$ 、 $50\ \text{V}$,两量程交流电压 $10\ \text{V}$ 、 $50\ \text{V}$,两挡电阻 $\times 1\ \text{k}\Omega$ 、 $\times 1\ \Omega$.
2. 设计电路图,通过详细计算,列出各电路元器件的性能参数.
3. 在电路板上焊接电路.
4. 用成品万用表检验电流、电压、电阻各挡.

四、参考资料

1. 本书 § 5.5, § 5.6, § 5.7, § 6.1 和“实验二十 电表的改装与校准”.
2. 李学慧. 大学物理实验[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2016.
3. 杨述武. 普通物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
4. 周殿清. 大学物理实验[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.
5. 彭建,皮伟. 大学物理实验[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

附 表

附表 1 国际单位制

分类	物理量名称	单位名称	单位符号	用其他 SI 单位表示
基本量与基本单位	长度	米	m	
	质量	千克	kg	
	时间	秒	s	
	电流	安[培]	A	
	热力学温度	开[尔文]	K	
	物质的量	摩[尔]	mol	
	发光强度	坎[德拉]	cd	
导出量与导出单位	[平面]角	弧度	rad	
	立体角	球面度	sr	
	面积	平方米	m ²	
	速度	米每秒	m/s	
	加速度	米每二次方秒	m/s ²	
	密度	千克每立方米	kg/m ³	
	频率	赫[兹]	Hz	s ⁻¹
	力	牛[顿]	N	m · kg · s ⁻²
	压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	N/m ²
	功,能[量],热量	焦[尔]	J	N · m
	功率,辐[射能]通量	瓦[特]	W	J/s
	电荷[量]	库[仑]	C	s · A
	电压,电动势,电位,电势	伏[特]	V	W/A
	电容	法[拉]	F	C/V
	电阻	欧[姆]	Ω	V/A
	磁通[量]	韦[伯]	Wb	V · s
	磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m ²
	电感	亨[利]	H	Wb/A
	光通量	流[明]	lm	
	[光]照度	勒[克斯]	lx	lm/m ²
	黏度	帕斯卡秒	Pa · s	
	表面张力	牛顿每米	N/m	
	比热容	焦耳每千克每开尔文	J/(kg · K)	
	热导率	瓦特每米每开尔文	W/(m · K)	
	介电常量(电容率)	法拉每米	F/m	
	磁导率	亨利每米	H/m	

附表 2 常用物理常量表

物理量	符号	数值	单位	相对标准不确定度
真空中的光速	c	299 792 458	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	精确
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$	精确
真空电容率	ε_0	$8.854\ 187\ 817 \dots \times 10^{-12}$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	精确
引力常量	G	$6.674\ 08(31) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	4.7×10^{-5}
普朗克常量	h	$6.626\ 070\ 040(81) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	1.2×10^{-8}
约化普朗克常量	$\hbar/2\pi$	$1.054\ 571\ 800(13) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	1.2×10^{-8}
元电荷	e	$1.602\ 176\ 6208(98) \times 10^{-19}$	C	6.1×10^{-9}
电子质量	m_e	$9.109\ 383\ 56(11) \times 10^{-31}$	kg	1.2×10^{-8}
质子质量	m_p	$1.672\ 621\ 898(21) \times 10^{-27}$	kg	1.2×10^{-8}
中子质量	m_n	$1.674\ 927\ 471(21) \times 10^{-27}$	kg	1.2×10^{-8}
电子比荷	$-e/m_e$	$-1.758\ 820\ 024(11) \times 10^{11}$	$\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$	6.2×10^{-9}
精细结构常数	α	$7.297\ 352\ 5664(17) \times 10^{-3}$		2.3×10^{-10}
精细结构常数的倒数	α^{-1}	137.035 999 139(31)		2.3×10^{-10}
里德伯常量	R_∞	10 973 731.568 508(65)	m^{-1}	5.9×10^{-12}
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.022\ 140\ 857(74) \times 10^{23}$	mol^{-1}	1.2×10^{-8}
摩尔气体常量	R	8.314 4598(48)	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	5.7×10^{-7}
玻耳兹曼常量	k	$1.380\ 648\ 52(79) \times 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	5.7×10^{-7}
斯特藩-玻耳兹曼常量	σ	$5.670\ 367(13) \times 10^{-8}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	2.3×10^{-6}
维恩位移定律常量	b	$2.897\ 7729(17) \times 10^{-3}$	$\text{m} \cdot \text{K}$	5.7×10^{-7}
原子质量常量	m_u	$1.660\ 539\ 040(20) \times 10^{-27}$	kg	1.2×10^{-8}
理想气体的摩尔体积(标准状态)	V_m	$22.413\ 962(13) \times 10^{-3}$	$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	5.7×10^{-7}
玻尔磁子	μ_B	$927.400\ 9994(57) \times 10^{-26}$	$\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$	6.2×10^{-9}
核磁子	μ_N	$5.050\ 783\ 699(31) \times 10^{-27}$	$\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$	6.2×10^{-9}
玻尔半径	a_0	$0.529\ 177\ 210\ 67(12) \times 10^{-10}$	m	2.3×10^{-10}
经典电子半径	r_e	$2.817\ 940\ 3227(19) \times 10^{-15}$	m	6.8×10^{-10}

注:表中的数据为国际科学联合会理事会科学技术数据委员会(CODATA)2014年的国际推荐值。

附表3 SI词头

所表示的因数	词头名称		词头符号
	英文	中文	
10^{24}	yotta	尧[它]	Y
10^{21}	zetta	泽[它]	Z
10^{18}	exa	艾[可萨]	E
10^{15}	peta	拍[它]	P
10^{12}	tera	太[拉]	T
10^9	giga	吉[咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{-24}	yocto	幺[科托]	y

附表 4 部分物质的比热容

物质	温度/K	比热容/ ($10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	物质	温度/K	比热容/ ($10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Al	298	9.04	水	298	41.73
Ag	298	2.37	乙醇	298	24.19
Au	298	1.28	石英玻璃	293 ~ 373	7.87
C(石墨)	298	7.07	黄铜	273	3.70
Cu	298	3.850	康铜	291	4.09
Fe	298	4.48	石棉	273 ~ 373	7.95
Ni	298	4.39	玻璃	293	5.9 ~ 9.2
Pb	298	1.28	云母	293	4.2
Pt	298	1.363	橡胶	288 ~ 473	11.3 ~ 20
Si	298	7.125	石蜡	273 ~ 293	29.1
Sn(白)	298	2.22	木材	293	约 12.5
Zn	298	3.89	陶瓷	293 ~ 473	7.1 ~ 8.8

附表 5 部分固体的导热系数

物质	温度/K	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	物质	温度/K	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Ag	273	428	锰铜	273	22
Al	273	235	康铜	273	22
Au	273	318	不锈钢	273	14
C(金刚石)	273	660	镍铬合金	273	11
C(石墨)	273	250	硼硅酸玻璃	300	1.1
Ca	273	98	软木	300	0.042
Cu	273	401	耐火砖	500	0.21
Fe	273	83.5	混凝土	273	0.84
Ni	273	91	玻璃布	300	0.034
Pb	273	35	云母(黑)	373	0.54
Pt	273	73	花岗岩	300	1.6
Si	273	170	赛璐珞	303	0.02
Sn	273	67	橡胶(天然)	298	0.15
水晶(//c)	273	12	杉木	293	0.113
水晶($\perp c$)	273	6.8	棉布	313	0.08
石英玻璃	273	1.4	尼龙	303	0.043
黄铜	273	120	有机玻璃		0.18

附表 6 铜-康铜热电偶分度表

单位: mV

温度/°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.54									
-100	-3.35	-3.62	-3.89	-4.14	-4.38	-4.60	-4.82	-5.02	-5.20	-5.38
0-	0	-0.38	-0.75	-1.11	-1.47	-1.81	-2.14	-2.46	-2.77	-3.06
0+	0	0.39	0.79	1.19	1.61	2.03	2.47	2.91	3.36	3.81
100	4.28	4.75	5.23	5.71	6.20	6.70	7.21	7.72	8.23	8.76
200	9.29	9.82	10.36	10.91	11.46	12.01	12.57	13.14	13.71	14.28
300	14.86	15.44	16.03	16.62	17.22	17.82	18.42	19.03	19.64	20.25
400	20.87									

附表 7 海平面上不同纬度处的重力加速度

纬度 $\varphi/(^{\circ})$	$g/(m \cdot s^{-2})$	纬度 $\varphi/(^{\circ})$	$g/(m \cdot s^{-2})$
0	9.780 49	50	9.810 79
5	9.780 88	55	9.815 15
10	9.782 04	60	9.819 24
15	9.783 94	65	9.822 49
20	9.786 52	70	9.826 14
25	9.789 69	75	9.828 73
30	9.793 38	80	9.830 65
35	9.797 40	85	9.831 82
40	9.808 18	90	9.832 21

注:表中列出数值根据公式 $g=9.780\ 49(1+0.005\ 288\sin^2\varphi-0.000\ 006\sin^22\varphi)$ 算出,式中 φ 为纬度。

附表 8 部分固体的摩擦因数
物体 I 在物体 II 上静止或运动的情况

I	II	静摩擦因数		动摩擦因数	
		干燥	涂油	干燥	涂油
钢铁	钢铁	0.7	0.005 ~ 0.1	0.5	0.03 ~ 0.1
钢铁	铸铁	—	0.18	0.23	0.13
钢铁	铝	0.95	0.5	0.95	0.3
镍	钢铁	—	—	0.64	0.18
铝	钢铁	0.61	—	0.47	—
铜	钢铁	0.53	—	0.36	0.18
黄铜	钢铁	0.51	0.11	0.44	—
黄铜	铸铁	—	—	0.30	—
铜	铸铁	1.05	—	0.29	—

续表

I	II	静摩擦因数		动摩擦因数	
		干燥	涂油	干燥	涂油
铸铁	铸铁	1.10	0.2	0.15	0.070
铝	铝	1.05	0.30	1.4	—
玻璃	玻璃	0.94	0.35	0.4	0.09
铜	玻璃	0.68	—	0.53	—
聚四氟乙烯	聚四氟乙烯	0.04	—	0.04	—
聚四氟乙烯	钢铁	0.04	—	0.04	—

附表9 20℃时常见固体的密度

物质	密度/(g·cm ⁻³)	物质	密度/(g·cm ⁻³)	物质	密度/(g·cm ⁻³)
银	10.492	铅锡合金 ^①	10.6	软木	0.22~0.26
金	19.3	磷青铜 ^②	8.8	电木板	1.32~1.40
铝	2.70	不锈钢 ^③	7.91	纸	0.7~1.1
铁	7.86	花岗岩	2.6~2.7	石蜡	0.87~0.94
铜	8.933	大理石	1.52~2.86	蜂蜡	0.96
镍	8.85	玛瑙	2.5~2.8	煤	1.2~1.7
钴	8.71	熔融石英	2.2	石板	2.7~2.9
铬	7.14	玻璃(普通)	2.4~2.6	金刚石	3.51
铅	11.342	玻璃(冕牌)	2.2~2.6	硬橡胶	1.1~1.4
锡(白四方)	7.29	玻璃(火石)	2.8~4.5	丙烯酸树脂	1.182
锌	7.12	瓷器	2.0~2.6	尼龙	1.11
黄铜 ^④	8.5~8.7	砂	1.4~1.7	聚乙烯	0.90
青铜 ^⑤	8.78	砖	1.2~2.2	聚苯乙烯	1.056
康铜 ^⑥	8.88	混凝土 ^⑩	2.4	聚氯乙烯	1.2~1.6
硬铝 ^④	2.79	沥青	1.04~1.40	冰(0℃)	0.917
德银 ^⑤	8.30	松木	0.6~0.8	石棉	2.0~2.8
殷钢 ^⑥	8.0	竹	0.31~0.40	石墨	2.22

① Cu 70% ,Zn 30% .

② Cu 90% ,Sn 10% .

③ Cu 60% ,Ni 40% .

④ Cu 4% ,Mg 0.5% ,Mn 0.5% ,其余为 Al.

⑤ Cu 26.3% ,Zn 36.6% ,Ni 36.8% .

⑥ Fe 63.8% ,Ni 36% ,C 0.2% .

⑦ Pb 87.5% ,Sn 12.5% .

⑧ Cu 79.7% ,Sn 10% ,Sb 9.5% ,P 0.8% .

⑨ Cr 18% ,Ni 8% ,Fe 74% .

⑩ 水泥 1 份,砂 2 份,碎石 4 份.

附表 10 20 °C 时常见液体的密度

物质	密度/(g · cm ⁻³)	物质	密度/(g · cm ⁻³)	物质	密度/(g · cm ⁻³)
重水	1.105	水银	13.558	蓖麻油	0.96 ~ 0.97
苯	0.879 0	煤油	0.80	海水	1.01 ~ 1.05
甲醇	0.791 3	汽油	0.66 ~ 0.75	牛乳	1.03 ~ 1.04
三氯甲烷	1.489	柴油	0.85 ~ 0.90	硫酸	1.030 4
酒精	0.791	甘油	1.261	盐酸	1.016 2

附表 11 标准状态下常见气体的密度

物质	密度/(kg · m ⁻³)	物质	密度/(kg · m ⁻³)
Ar	1.783 7	Cl ₂	3.214
H ₂	0.089 9	NH ₃	0.771
He	0.178 5	乙炔	1.173
Ne	0.900 3	甲烷	0.716 8
N ₂	1.250 5	丙烷	2.009
O ₂	1.429 0	空气	1.292 8
CO ₂	1.977		

附表 12 部分固体的弹性模量

名称	杨氏模量 $E/(10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	切变模量 $G/(10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	泊松比 σ
金	8.1	2.85	0.42
银	8.27	3.03	0.38
铂	16.8	6.4	0.30
铜	12.9	4.8	0.37
铁(软)	21.19	8.16	0.29
铁(铸)	15.2	6.0	0.27
铁(钢)	20.1 ~ 21.6	7.8 ~ 8.4	0.28 ~ 0.30
铝	7.03	2.4 ~ 2.6	0.355
锌	10.5	4.2	0.25
铅	1.6	0.54	0.43
锡	5.0	1.84	0.34
镍	21.4	8.0	0.336
硬铝	7.14	2.67	0.335

续表

名称	杨氏模量 $E/(10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	切变模量 $G/(10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	泊松比 σ
磷青铜	12.0	4.36	0.38
不锈钢	19.7	7.57	0.30
黄铜	10.5	3.8	0.374
康铜	16.2	6.1	0.33
熔融石英	7.31	3.12	0.170
玻璃(冕牌)	7.1	2.9	0.22
玻璃(火石)	8.0	3.2	0.27
尼龙	0.35	0.122	0.40
聚乙烯	0.077	0.026	0.46
聚苯乙烯	0.36	0.133	0.35
橡胶(弹性)	$(1.5 \sim 5) \times 10^{-4}$	$(1.5 \sim 5) \times 10^{-5}$	0.46 ~ 0.49

附表 13 部分液体的黏度 η 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}$

温度/ $^{\circ}\text{C}$	水/ 10^{-4}	水银/ 10^{-4}	乙醇/ 10^{-4}	氯苯/ 10^{-4}	苯/ 10^{-4}	四氯化碳/ 10^4	蓖麻油
0	17.94	16.85	18.43	10.56	9.12	13.5	53.00
10	13.10	16.15	15.25	9.15	7.58	11.3	24.20
20	10.09	15.54	12.0	8.02	6.52	9.7	9.86
30	8.00	14.99	9.91	7.09	5.64	8.4	4.51
40	6.54	14.50	8.29	6.34	5.03	7.4	2.30
50	5.49	14.07	7.06	5.74	4.42	6.5	
60	4.70	13.67	5.91	5.20	3.91	5.9	0.80
70	4.07	13.31	5.03	4.76	3.54	5.2	
80	3.57	12.98	4.35	4.38	3.23	4.7	0.30
90	3.17	12.68	3.76	3.97	2.86	4.3	
100	2.84	12.40	3.25	3.67	2.61	3.9	0.169

附表 14 部分液体的表面张力系数

物质	接触气体	温度/°C	表面张力系数/($10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)
水	空气	10	74.22
	空气	30	71.18
	空气	50	67.91
	空气	70	64.4
	空气	100	58.9
水银	空气	15	487
乙醇	空气	20	22.3
甲醇	空气	20	22.6
乙醚	水蒸气	20	16.5
甘油	空气	20	63.4

附表 15 部分固体中的声速(沿棒传播的纵波)

固体	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	固体	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
铅	5 000	锡	2 730
黄铜(Cu 70%, Zn 30%)	3 480	钨	4 320
铜	3 750	锌	3 850
硬铝	5 150	银	2 680
金	2 030	硼硅酸玻璃	5 170
电解铁	5 120	重硅钾铅玻璃	3 720
铝	1 210	轻氯铜银铅冕玻璃	4 540
镁	4 940	丙烯酸树脂	1 840
莫涅尔合金	4 400	尼龙	1 800
镍	4 900	聚乙烯	920
铂	2 800	聚苯乙烯	2 240
不锈钢	5 000	熔融石英	5 760

附表 16 20 °C时部分液体中的声速

液体	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	液体	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
CCl_4	935	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ (甘油)	1 923
C_6H_6	1 324	CH_3OH	1 121
CHBr_3	928	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	1 168
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	1 327.5	CS_2	1 158.0
CH_3COCH_3	1 190	H_2O	1 482.9
CHCl_3	1 002.5	Hg	1 451.0
$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	1 284.5	4.8% NaCl 水溶液	1 542

附表 17 标准状态下部分气体中的声速

气体	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	气体	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
空气	331.45	H_2O (水蒸气,100℃)	404.8
Ar	319	He	970
CH_4	432	N_2	337
C_2H_4	314	NH_3	415
CO	337.1	NO	325
CO_2	258.0	N_2O	261.8
CS_2	189	Ne	435
Cl_2	205.3	O_2	317.2
H_2	1 269.5		

附表 18 水的饱和蒸汽压与温度的关系

温度/℃	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
-20.0	0.779 0	0.707 6	0.642 2	0.582 4	0.527 7	0.477 8	0.432 3	0.390 7	0.352 9	0.318 4
-10.0	1.956	1.790	1.636	1.495	1.365	1.246	1.135 8	1.034 8	0.942 1	0.857 0
-0.0	4.581	4.220	3.884	5.573	3.285	3.018	2.771	2.542	2.331	2.136
0.0	4.581	4.925	5.292	5.683	6.099	6.542	13.635	7.531	8.045	8.609
10.0	9.209	9.844	10.518	11.231	11.988	12.788	13.635	14.531	15.478	16.478
20.0	17.535	18.651	19.828	21.070	22.379	23.759	25.212	26.742	28.352	30.046
30.0	31.827	33.700	35.668	37.735	39.904	42.181	44.570	47.075	49.701	52.453
40.0	55.335	58.354	61.513	64.819	68.277	71.892	75.671	79.619	83.744	88.050
50.0	92.545	97.236	102.129	107.232	112.551	118.09	123.84	129.88	136.14	142.66
60.0	149.44	156.50	163.83	171.46	179.38	187.62	196.17	205.05	214.27	223.84
70.0	233.76	244.06	254.74	265.81	277.29	289.17	301.49	314.24	327.45	341.12
80.0	355.26	369.89	385.03	400.68	416.87	433.59	450.88	468.73	487.18	506.22
90.0	528.88	546.18	567.12	588.73	611.02	634.01	657.71	682.14	707.32	733.27
100.0	1.000	1.036	1.074	1.112	1.151	1.192	1.234	1.277	1.321 4	1.367 0
110.0	1.413 8	1.462 0	1.511 6	1.562 4	1.614 7	1.668 4	1.723 6	1.780 3	1.838 4	1.898 0
120.0	1.959 3	2.022 2	2.086 7	2.152 9	2.220 8	2.290 4	2.361 8	2.435 0	2.510 1	2.587 0
130.0	2.665 3	2.746 6	2.829 2	2.913 9	3.000 7	3.089 6	3.180 5	3.273 6	3.368 9	3.466 4

注:在 100℃ 以上,压强 $\times 101\ 325\ \text{Pa}$;在 100℃ 以下,压强 $\times 133\ 322\ \text{Pa}$ 。

附表 19 101 325 Pa 下部分物质的熔点和沸点

物质	熔点/℃	沸点/℃	物质	熔点/℃	沸点/℃
铜	1 048.5	2 580	金	1 064.43	2 710
铁	1 535	2 754	银	961.93	2 184
镍	1 455	2 731	锡	231.97	2 270
铬	1 890	2 212	铅	327.5	1 750
铝	660.4	2 486	汞	-38.86	356.72
锌	419.58	903			

附表 20 相对湿度查对表

单位: %

湿表温度/℃	干湿差度/℃									
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0
30	93	89	86	83	79	76	73	67	61	55
—	93	89	86	82	79	76	72	66	60	54
—	93	89	86	82	79	75	72	65	59	53
—	93	89	85	81	78	75	71	65	59	53
25	92	88	85	81	78	74	71	64	58	51
—	92	88	85	81	77	74	70	63	57	51
—	92	88	84	80	77	73	70	62	56	49
—	92	88	84	80	76	72	69	62	55	48
20	91	87	83	79	75	71	67	60	52	45
—	91	87	83	78	74	70	66	59	51	44
—	91	86	82	78	74	70	65	58	50	43
—	91	86	82	77	73	69	65	56	49	41
—	90	86	81	77	72	68	63	55	47	39
15	90	85	81	76	71	67	62	54	48	37
—	90	85	80	75	71	66	61	53	44	35
—	90	84	79	74	70	65	60	51	42	33
—	89	84	79	74	69	64	59	49	40	31
—	89	83	78	73	68	62	57	48	38	29
10	88	83	77	72	66	61	56	46	36	26
—	88	82	77	71	65	60	55	44	34	24
—	88	82	76	70	64	58	53	42	31	21
—	87	81	75	69	62	57	71	40	29	18
—	87	80	75	67	61	55	49	37	26	14
5	86	79	73	66	60	53	47	35	23	
—	86	79	72	65	58	51	45	32	19	
—	85	78	70	63	56	49	42	29		
—	84	77	68	62	54	47	40	25		
—	84	76	68	60	52	45	37	22		
0	83	75	66	58	50	42	34	18		
—	82	73	64	56	47	39	31			

例:干温度 20℃,湿温度 17℃,它们相差 3℃,查表中干湿差度 3.0 所在列的数往下对准湿表温度 17℃,交叉数可读出湿度为 72%。

附表 21 常温下部分物质相对于空气的光的折射率

物质	H _α 线(656.3 nm)	D 线(589.3 nm)	H _β 线(486.1 nm)
水(18℃)	1.331 4	1.333 2	1.337 3
乙醇(18℃)	1.360 9	1.362 5	1.366 5
二硫化碳(18℃)	1.619 9	1.629 1	1.654 1
冕玻璃(轻)	1.512 7	1.515 3	1.521 4
冕玻璃(重)	1.612 6	1.615 2	1.621 3
燧石玻璃(轻)	1.603 8	1.608 5	1.620 0
燧石玻璃(重)	1.743 4	1.751 5	1.772 3
方解石(寻常光)	1.654 5	1.658 5	1.667 9
方解石(非常光)	1.484 6	1.486 4	1.490 8
水晶(寻常光)	1.541 8	1.544 2	1.549 6
水晶(非常光)	1.550 9	1.553 3	1.558 9

附表 22 常用光源的谱线波长

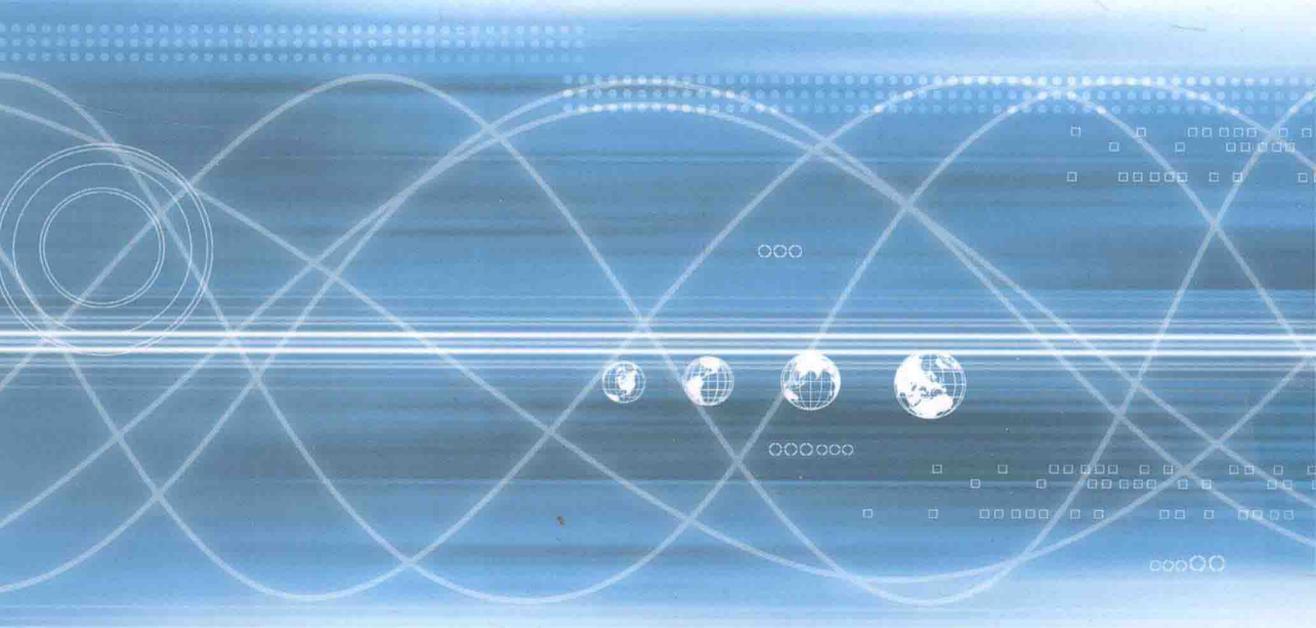
单位: nm

H(氢)	447.15 蓝	589.592(D ₁) 黄
656.28 红	4 387.9 紫	588.995(D ₂) 黄
486.13 绿蓝	4 143.8 紫	Hg(汞)
434.05 蓝	Ne(氖)	623.44 红
410.17 蓝紫	650.65 红	579.07 黄
397.01 蓝紫	640.23 橙	576.96 黄
He(氦)	638.30 橙	546.07 黄绿
706.52 红	626.25 橙	491.60 蓝绿
667.82 红	621.73 橙	435.84 蓝紫
587.56(D ₃) 黄	614.31 橙	407.78 紫
501.57 蓝绿	588.19 黄	404.66 紫
492.19 蓝绿	585.25 黄	He-Ne 激光
471.31 蓝	Na(钠)	632.8 红

参 考 文 献

- [1] 彭建,皮伟.大学物理实验[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 丁慎训,张连芳.物理实验教程[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [3] 陈孝彬,张念宏,卫景福,等.教师百科全书[M].北京:社会科学文献出版社,1987.
- [4] 胡盘新,汤毓骏.普通物理学简明教程[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [5] 张兆奎.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [6] 李平.大学物理实验教程[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.
- [7] 熊晓军,周平和.大学物理实验[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [8] 罗宏雷.新编大学物理实验[M].杭州:浙江大学出版社,2013.
- [9] 王瑞平.大学物理实验[M].西安:西安电子科技大学出版社,2013.
- [10] 沈元华,陆申龙.基础物理实验[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [11] 李学慧.大学物理实验[M].3版.北京:高等教育出版社,2016.
- [12] 李相银.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [13] 杨述武.普通物理实验[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [14] 王国栋.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [15] 王秉超.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [16] 赵海军.工科物理实验[M].武汉:武汉大学出版社,2011.
- [17] 王植恒.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [18] 赵凯华.新概念物理教程:光学[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [19] 谢行恕.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [20] 徐寒.大学物理实验[M].北京:科学出版社,2011.
- [21] 李文斌.大学物理实验[M].长沙:中南大学出版社,2012.
- [22] 严导淦.物理学[M].5版.北京:高等教育出版社,2010.
- [23] 侯俊玲,孙铭.物理学实验[M].北京:科学出版社,2010.
- [24] 温诚忠,郭开慧,魏云.物理学实验教程[M].成都:西南交通大学出版社,2002.
- [25] 江影,安文玉.普通物理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.
- [26] 陈群宇.大学物理实验[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [27] 费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [28] 吴石林.误差分析与数据处理[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [29] 孙丽媛,祖新慧.大学物理实验[M].北京:清华大学出版社,2014.
- [30] 张捷民,刘汉臣.大学物理实验[M].北京:科学出版社,2007.
- [31] 李义宝.大学物理实验[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [32] 徐润君,汪成.大学物理实验[M].北京:北京邮电大学出版社,2010.

Introductory Physics Experiments



ISBN 978-7-04-047314-8



9 787040 473148 >

定价 50.00 元