



普通高等教育“十二五”规划教材

电工测量基础与 电路实验教程

颜湘武 主 编

赵书涛 冯文宏 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

电路分析	卢小芬
电路原理	王 玫
电路原理实验教程	宋卫菊
电路原理学习指导与习题详解	王 玫
电工测量基础与电路实验教程	颜湘武
电工测试基础 (第二版)	刘青松
电工技术 (高等学校分层教学A)	罗映红
电子技术 (高等学校分层教学A)	罗映红
模拟电子技术	黄福林
数字电子技术基础	李文娜
模拟电子技术基础 (第二版)	韩学军
数字电子技术基础 (第二版)	王义军
现代电子设计与创新(第二版)	李 洋
信号与系统分析 (第二版)	宗 伟
信号与系统分析习题解答	宗 伟
电力电子技术 (第二版)	石新春
电力电子技术习题集	孙丽玲
电机学	林文荣
电机学 (第二版)	戈宝军
电机与拖动 (第三版)	刘启新
电机与拖动	厉 虹
微特电机及系统(第二版)	程 明
电磁场 (第二版)	薛太林
电磁场与电磁波	金立军
工程电磁场 (第二版)	杨宪章

中国电力出版社教材中心

教材网址 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn>

服务热线 010-63412706 63412548

ISBN 978-7-5123-1686-7



9 787512 316867 >

定价: 18.50 元



普通高等教育“十二五”规划教材

电工测量基础与 电路实验教程

主 编	颜湘武	
副主编	赵书涛	冯文宏
编 写	王新年	崔桂彦
主 审	柳 焯	梁贵书



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，是根据教育部工科电工课程教学指导委员会关于电路和电工技术课程的基本要求编写的。

全书分为3篇共9章，主要内容有测量和误差的基本概念、电工测量仪表、认识实验、电阻电路实验、动态电路实验、交流稳态电路实验、其他实验，以及电路仿真实验研究。

本书可作为高等院校工科类各专业的电路或电工技术基础实验本科教材，也可作为高职高专及函授教材，同时可供工程技术人员自学或参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工测量基础与电路实验教程/颜湘武主编. —北京: 中国电力出版社, 2011.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1686-7

I. ①电… II. ①颜… III. ①电气测量-高等学校-教材②电路-实验-高等学校-教材 IV. ①TM93②TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 088359 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11 印张 262 千字

定价 18.50 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

电子电气基础课程教材编审委员会

主任委员	王志功	东南大学		
副主任委员	张晓林	北京航空航天大学	胡敏强	东南大学
	王泽忠	华北电力大学	戈宝军	哈尔滨理工大学
	马西奎	西安交通大学	刘新元	北京大学
	孟 桥	东南大学		
秘书长	李兆春	中国电力出版社		
委 员	(按姓氏笔画排列)			
	于守谦	北京航空航天大学	公茂法	山东科技大学
	王 殊	华中科技大学	王万良	浙江工业大学
	王小海	浙江大学	王建华	西安交通大学
	王松林	西安电子科技大学	邓建国	西安交通大学
	付家才	黑龙江科技学院	刘润华	中国石油大学（华东）
	刘耀年	东北电力大学	朱承高	上海交通大学
	宋建成	太原理工大学	张正平	贵州大学
	张彦斌	西安交通大学	李 承	华中科技大学
	李 青	中国计量学院	李 琳	华北电力大学
	李守成	北京交通大学	李国丽	合肥工业大学
	李哲英	北京联合大学	李晓明	太原理工大学
	李晶皎	东北大学	杨 平	上海电力学院
	陈后金	北京交通大学	陈庆伟	南京理工大学
	陈意军	湖南工程学院	陈新华	山东科技大学
	宗 伟	华北电力大学	范蟠果	西北工业大学
	段哲民	西北工业大学	段渝龙	贵州大学
	胡虔生	东南大学	赵旦峰	哈尔滨工程大学
	赵荣祥	浙江大学	唐庆玉	清华大学
	徐淑华	青岛大学	袁建生	清华大学
	郭陈江	西北工业大学	高会生	华北电力大学
	崔 翔	华北电力大学	梁贵书	华北电力大学
	曾孝平	重庆大学	曾建唐	北京石油化工学院
	韩 璞	华北电力大学	韩学军	东北电力大学
	雷银照	北京航空航天大学		

序

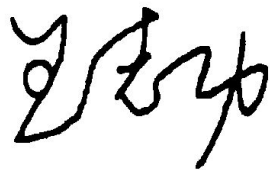
进入 21 世纪,“985 工程”和“211 工程”的实施,推动了高水平大学和重点学科的建设,在高校中汇聚了一大批高层次人才,产生了一批具有国际先进水平的学术和科学技术研究成果。然而高校规模的超高速增大,导致不少学校的专业设置、师资队伍、教材资源和教学实验条件不能迅速适应发展需要,教学质量问题日益突现。高校教材,作为教学改革成果和教学经验的结晶,其质量问题自然备受关注。

需要指出的是,很多高等学校教材经过多年的教学实践检验,已经成为广泛使用的精品教材。同时,我们也应该看到,现用的教材中有不少内容陈旧、未能反映当前科技发展的最新成果,不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要。这就要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进、开拓创新,在内容质量和出版质量上均有新的突破。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的 [2003] 141 号文件,在教育部组织下,历经数年,2006~2010 年教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会按照教育部的要求,致力于制定专业规范或教学质量标准,组织师资培训、教学研讨和信息交流等工作,并且重视与出版社合作,编著、审核和推荐高水平电子电气基础课程教材。

“电工学”、“电路”、“信号系统”、“电子线路”、“电磁场”、“自动控制原理”、“电机学”等电子电气基础课程是许多理工院校的先修课程,也是电子科学与技术、电气工程及其自动化等专业学科的基石,在科学研究领域和产业应用中发挥着极其重要的作用。此类教材的编写,应提倡新颖的立意,“适用、先进”的编写原则和“通俗、精炼”的编写风格,以百花齐放的形式和较高的编写质量来满足不同学科、不同层次的师生的教学要求。

本电子电气基础课程教材编审委员会即是基于此目的而设立的,希望能够鼓励更多的优秀教师参与其中,为高质量教材的编写和出版贡献出聪明才智和知识经验。



2009 年 10 月于东南大学

前言

本书是根据教育部工科电工课程教学指导委员会对电路和电工技术课程的基本要求,结合多年的教学和实验指导经验,在吸取已有实验指导书优点的基础上编写而成。

本书强调电工测量仪表工作原理、数据处理以及误差分析基本方法的熟练掌握,注重实验内容模块化,以提高学生的实验设计能力和理论知识的应用能力为原则,采用通用的电路仿真软件,将电路实践与后续课程实践以及工程实际应用融入同一平台,简单易学、连贯性好,有利于学生实验技能的培养和提高。

全书分为3篇共9章。其中:第一篇由第一、二章组成,主要涉及电工测量的基本方法、实验数据处理和误差分析,以及常用电工测量仪表的工作原理;第二篇由第三~八章组成,涵盖了基本实验以及综合设计性实验,主要包括认识实验、直流电阻电路实验、暂态电路实验、交流稳态电路实验以及拓展实验等模块,着力培养学生的动手操作能力、实验设计能力及知识应用能力;第三篇由第九章组成,主要包括通用仿真软件的使用(包括附录F)、电路仿真实验研究等内容,采用通用的电路仿真平台,注重学生分析问题和解决问题能力的提高。

本书第一篇由赵书涛负责编写,第二篇和概述由冯文宏负责编写,附录A~E由崔桂彦负责编写,第三篇和附录F的编写以及全书的校核与定稿工作由颜湘武负责,王新年参与了本书编写和校核的部分工作。

同时华北电力大学电工实验中心主任、其他教师和实验人员对本书的编写给予了大力支持和帮助,并提出了宝贵的意见和建议。在此,向他们表示诚挚的谢意。

在本书的编写过程中,哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院柳焯教授、华北电力大学电气与电子工程学院梁贵书教授认真细致地审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2011年3月于华北电力大学

目 录

序	
前言	
概述 走进实验室	1

第一篇 电工测量技术基础

第一章 测量和误差的基本概念	4
第一节 测量的基础知识	4
第二节 测量误差	7
第三节 测量结果的数据处理	10
第四节 实验结果的计算机处理及绘图	13
第二章 电工测量仪表	23
第一节 直读电工测量仪表的一般知识	23
第二节 直读电工测量仪表组成及工作原理	25
第三节 比较式仪表	37
第四节 数字测量和电子测量仪器	41

第二篇 电 路 实 验

第三章 认识实验	48
第一节 简单直流电路及元件伏安特性测试	48
第二节 示波器和信号发生器的使用	50
第三节 单相交流电路的认识	51
第四章 电阻电路实验	53
第一节 基尔霍夫定律和叠加定理的验证	53
第二节 戴维南定理/诺顿定理	56
第三节 电阻电路的实验研究(研究性实验)	60
第五章 动态电路实验	62
第一节 一阶电路阶跃激励下的动态响应	62
第二节 二阶电路阶跃激励下的动态响应	65
第六章 交流稳态电路实验(一)	68
第一节 交流电路及其等效参数的测量(综合性实验)	68
第二节 改善功率因数的实验	72
第三节 互感电路实验(研究性实验)	75

第四节 三相交流电路（综合性实验）	78
第七章 交流稳态电路实验（二）	83
第一节 交流电路频率特性的研究（综合性实验）	83
第二节 非正弦周期信号的研究（综合性实验）	88
第八章 其他实验	91
第一节 双口网络传输参数的测试（设计研究性实验）	91
第二节 负阻抗变换器	94
第三节 回转器	96
第四节 受控源的实验研究	99
第五节 非线性电路中混沌现象的实验研究	103

第三篇 电路实验的计算机仿真

第九章 电路仿真实验研究	107
第一节 直流电路仿真分析	107
第二节 暂态电路仿真分析	109
第三节 交流电路频率特性仿真分析	118
第四节 交流谐振电路频率特性仿真分析	123
第五节 混沌现象的仿真研究	127
 附录 A SS-7802A 型示波器使用说明	 136
附录 B TFG2000 系列 DDS 函数信号发生器使用说明	140
附录 C SL2302 型直流稳压/恒流电源使用说明	143
附录 D DGX-1 型电工技术实验装置简介	144
附录 E DG03 型多功能全数控制智能函数信号发生器使用说明	149
附录 F 电路仿真软件（PSpice）的使用说明	150
 参考文献	 165

概述 走进实验室

曾有位 IT 行业的成功人士说过：“听过的会忘记，见过的会记住，做过的才会真正懂得。”这句话可为工科课程学习的经验之谈。

电工实验是实践理论知识、培养实验技能、提高理论认识水平的重要环节，也是将来从事电气工程科技工作的基础。

完成一个实验任务大致有如下过程。

(1) 实验前预习，明确实验任务和安全注意事项，设计实验方案，制定实验步骤或技术路线。

(2) 实验中细致操作，分析并解决实验中所遇到的问题，严谨地记录实验数据和结果。

(3) 实验后仔细分析、总结实验规律，认真撰写实验报告。

上述每一步都是完成一个实验任务的重要环节，缺一不可。

一、实验前预习和实验技能

通过严谨的科学实验和动手实践，实验探究理论原理及科学规律，可以培养求真务实的科学作风，锻炼理论联系实际的知识运用能力，还能培养过硬的实践技能。

1. 实验前的预习

实验前应进行预习（看教材相关内容、查实验指导书、利用网络教学系统及课件），以了解本次实验的实验项目、主要内容，通过实验应达到加强哪一方面的知识理解。预习后可列写简单的预习报告或实验提纲，以利于实验的进行。

2. 实验操作和技能培养

(1) 团队协作。

1) 同组人员应合理分工、协调配合、沟通交流。

2) 进行重要操作时，应预先告知同组人。

(2) 接线。

1) 合理安排仪表组件位置，接线要牢固可靠、长短适宜、布线合理、易于检查、方便操作。

2) 导线色别的选择要规范。直流实验中选择红（或黄/绿）、黑（或蓝）分别接正、负极。交流实验须用“黄、绿、红”三色导线依序连接 A、B、C 三个相线，黑（或蓝）色导线接零线。

3) 先接主回路，再接并联电路（如电压表等）。

4) 连线较多时，需注意一个接线柱上不得接过多导线。

5) 实验中应随时监视，实验值不能大于所用仪器及变阻器等电气设备的电压、电流、功率等安全定值。

6) 实验完毕应断开电源再拆线。

(3) 实验过程。

1) 实验操作要做到心中有数、胆大心细、严谨求实、规范操作。

2) 基本实验项目和内容完成后如果还有时间,可以重复练习接线和操作,或者进行其他选做实验。

(4) 测量数据的选择和使用。

1) 每项实验应记明实验项目、所用主要仪表及编号、实验条件及测量数据等,以求得到完整、精炼、可靠的原始数据。

2) 如实记录实验过程和数据,培养严谨求实的科学作风。

3) 了解被测曲线趋势和特殊点,曲率大处测点可较密集,所取点数应合理,使曲线能真实反映客观情况。绘制曲线时应配合实验结果的有效数字,选择合适的比例尺,避免夸大或淹没实验误差。

3. 实验中应培养的工程素养

(1) 实验课程是理工科学生接触实践的基本环节,通过实验预习、操作、测量、记录、整理、分析等,培养严谨求实、善于分析和总结归纳的工程技能和素养。

(2) 教师在指导实验的过程中,也应注意引导学生建立和培养工程概念。

(3) 实验过程中,尽量避免使用口语化的语言,而应使用规范的术语。

(4) 教师在发现问题或遇学生提出问题时,可不直接告诉其问题所在,而是引导学生自己找出出现问题的原因和解决办法。比如在实验中出现接线错误或不合理等问题时,可以引导学生自行检查并解决,而不是直接帮助其纠正。

二、实验室守则

(1) 实验时应保证人身、设备安全,爱护实验室设备,遵守实验室的规定。

(2) 使用本组的实验设备和器材,未经教师许可不得随意动用其他实验台的物品。

(3) 学生按实验台号分组后应保持稳定,不得擅自换组。

(4) 鼓励在基本实验项目完成且时间允许的情况下增加实验内容,但须征得指导教师的同意。

(5) 不论任何原因造成设备损坏,须向指导教师如实报告,不得隐瞒或自行更换。

(6) 不在实验室吃零食,沟通交流时不大声喧哗。

(7) 实验过程中不乱扔杂物,保持实验室、实验台的整洁。

三、实验报告要求

1. 实验报告内容

(1) 实验名称、实验目的、实验电路或接线图。

(2) 实验仪器设备的名称、型号和数量。

(3) 原始数据记录。

(4) 实验数据的整理及计算、绘制的实验曲线。

(5) 实验中出现的問題及解决办法。

(6) 实验误差分析。

(7) 实验结论、思考及体会等。

2. 实验报告的撰写

(1) 实验前所使用的仪表设备,实验过程中的电路图、元件参数,与实验数据一并在原始记录中予以记载。

(2) 原始记录中应包括同组实验人、实验时间等信息。

(3) 简要列写与实际实验直接相关的实验目的、实验原理(必要时),应特别注意不要完全照抄实验教材或实验指导书,不要列写与所做实验无关的内容。

(4) 简述实验内容和实验过程,整理实验数据。

(5) 处理实验数据、绘制图形和曲线。

(6) 结合理论计算,进行误差分析,得出实验结果。

第一篇 电工测量技术基础

第一章 测量和误差的基本概念

第一节 测量的基础知识

一、测量的概念

1. 测量的定义

测量是通过物理方法对自然界中客观事物定量表征的过程,是用实验方法把被测量与标准量进行比较的操作。其本质是对被测物理量进行“取样”,并定量“读出”测量结果,可以表示为

$$\text{测量结果} = \frac{\text{被测参数量值}}{\text{单位标准量}}$$

即

$$A_x = \frac{X}{x_0} \quad (1-1)$$

测量方法、测量标准和测量手段是测量中不可缺少的三个要素。

2. 准确度

准确度是指测量得到的结果与被测对象的真实值接近的程度。

3. 精密度

精密度是指多次重复测定同一量时,各测定值之间彼此接近的程度,它是表征测量过程中随机误差大小的指标。精密度高表明测定中随机误差小,但不能保证系统误差也小,故精密度高不一定准确度高。精密度也可以简称为精度,描述测量数据的分散程度。

4. 灵敏度

在仪表输入的被测量始终小于仪表输出满标值的条件下,仪表输出信号的变化量 $\Delta\alpha$ 与输入信号的变化量 Δx 之比称为仪表的灵敏度,用 S 表示,即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-2)$$

仪表灵敏度等于单位被测量变化引起的仪表输出量变化,该变化可以用满标值的百分数表示。例如,以指针满偏电流 I_g 的大小表征电表的灵敏度,满偏电流愈小灵敏度愈高,表头满偏电流一般为十几毫安到几百毫安。

二、测量方法分类

测量方法直接关系到测量工作能否正常进行以及测量结果的有效性,一般根据测量结果和被测量性质对测量方法进行分类。

1. 根据测量结果分类

(1) 直接测量。从仪表的指示机构直接获取被测量大小的测量方法,称为直接测量。例如,用电流表测量支路电流、用电阻表测量电阻等。

(2) 间接测量。先对与被测量有关的物理量进行直接测量,然后根据它们之间的函数

关系通过计算求出被测量大小的测量方法,称为间接测量。例如,通过测量无源二端电阻网络两端的电压和通过电阻的电流,根据欧姆定律,即

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-3)$$

可以计算出被测二端网络的等效电阻值。

显然,间接测量要比直接测量复杂,一般情况下,应尽量采用直接测量;只有在不能进行直接测量的场合或不具备直接测量条件的情况下才选择间接测量。

(3) 组合测量。在测量过程中,需要改变测量条件进行多次测量,根据直接测量和间接测量的结果,解联立方程组求出被测量的测量方法,称为组合测量。例如,测量电阻 R 的温度系数 α 和 β ,根据电阻在温度 t 时阻值与温度系数的关系,分别测量 R 在温度 t_1 和 t_2 状态下的电阻值 R_{t1} 和 R_{t2} ,然后解方程组

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] \\ R_{t2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] \end{cases} \quad (1-4)$$

可以求出电阻的温度系数 α 和 β 。

测量方法的选择与仪表的选择同等重要,即使在同一种类的测量方法中仍有很多具体的测量方法。在实际测量时,应根据具体情况选择合适的测量方法。

2. 按被测量性质分类

(1) 时域测量。时域测量主要是测量被测量随时间变化的规律,被测量是时间的函数,如交流电压、电流等。它们的稳态值和有效值多用仪表直接测量,而它们的瞬时值可以用示波器测量,同时观察波形,可获得其随时间变化的规律。

(2) 频域测量。频域测量主要是测量被测量的频率特性和相位特性,被测量是频率的函数,如测电路的幅频特性、相频特性等。

(3) 数字域测量。复杂数字电路和系统的响应不再是简单的线性关系,时域和频域测量无法达到要求。数字域测量主要是指对数字电路和系统的数字逻辑量进行测量。例如用逻辑分析仪对数字量或电路的逻辑状态进行测量,同时观察多条数据通道上的逻辑状态,或者显示某条数据线上的时序波形。

(4) 随机测量。随机测量主要是指对各种噪声、干扰信号等随机量的测量。

此外,测量方法还可以分为静态测量和动态测量;根据使用的仪表类别不同,又可分为直读测量和比较测量。

对于同一事物可能有多种不同的测量方法。测量方法与测量仪表选择的正确与否,直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量工作的经济性和可行性。不恰当的和错误的测量方法,除了得不到正确的测量结果外,甚至还会损坏测量仪器和被测设备。准确度高的测量仪器设备不一定就能获得准确的测量结果,只有根据不同的测量对象、测量要求和测量条件来选择正确的测量方法,构成合理的测量系统,同时进行细心的操作,才能得到正确的测量结果。

三、电工测量及测量设备

1. 电工测量

电工测量是将被测量的电学量或磁学量与作为测量单位的同类电学量或磁学量进行比较,以确定被测电学量或磁学量的大小的操作。电工测量的范围包括电流、电压、功率、频

率、相位等电学量和电阻、电容、电感等电参数的测量，以及经相应变换器把某些非电量（温度、湿度、压力、速度）等转换为电学量后的测量（即非电量电测法）。

测量过程中，被测参数的量值和单位标准量进行比较，所得的数值配以单位构成对测量的完整表述。

2. 测量单位

把测量中的标准量定义为“单位”。为了对同一量在不同时间、空间进行测量时得到相同的结果，必须采用统一的而且固定不变的单位。单位制就是在这一要求下建立起来的。

单位制主要有“公制”和“英制”两种，目前普遍采用的由国际计量大会（CGPM）所推荐的一种一贯单位制，即是国际单位制（SI），俗称“公制”。SI 的七个基本单位是 m、kg、s、A、K、mol 和 cd，它们表示的量的名称、单位名称和符号见表 1-1 所列。

表 1-1 国际单位制基本单位

量	单位名称		符号
长度	米	metre	m
质量	千克	kilogram	kg
时间	秒	second	s
电流	安 [培]	ampere	A
热力学温度	开 [尔文]	kelvin	K
物质的量	摩 [尔]	mole	mol
发光强度	坎 [德拉]	candela	cd

SI 导出单位是用 SI 基本单位以代数形式表示的单位。SI 导出单位由两部分组成，一部分是包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位，另一部分是组合形式的 SI 导出单位。表 1-2 列出了部分具有专门名称的 SI 导出单位。

表 1-2 国际单位制中具有专门名称的部分导出单位

量	单位名称	符号	量	单位名称	符号
电压、电位、电动势	伏 [特]	V	磁通 [量]	韦 [伯]	Wb
功率	瓦 [特]	W	力、重力	牛 [顿]	N
电荷、电量	库 [仑]	C	压力、压强、应力	帕 [斯卡]	Pa
电阻	欧 [姆]	Ω	光通	流明	lm
电感	亨 [利]	H	光照度	勒 [克斯]	lx
电容	法 [拉]	F	摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$
电导	西 [门子]	S	能、功、热量	焦 [耳]	J
频率	赫 [兹]	Hz	吸收剂量	戈 [瑞]	Gy
磁感应强度	特 [斯拉]	T	剂量当量	希沃特	Sv

在电工测量中，量值的单位一般采用国际单位制，采用非国际单位时必须按照国家标准执行。

3. 度量器和测量仪器

度量器是测量单位的复制实体，也称为量具。根据准确度的高低，度量器分为基准器

(基准量具)、标准器(标准量具)和工作量具。

基准器是现代科学技术水平所能达到的最高准确度的度量器,由国际和各国最高计量部门保存,分为主要基准器、副基准器、比较基准器和工作基准器。在电磁学计量中,主要的基准器有电压基准器、电阻基准器和计算电容基准器。

标准器的准确度低于基准器,供地方计量部门和科研单位、高等院校、工厂的计量部门保存,对工作量具进行检定或标定时使用。

工作量具的准确度低于标准器,用于科研、生产、实验及工程测量。

在电工实验中,常使用的度量器有标准电池、标准电阻、标准电容及标准电感等。

(1) 标准电池。标准电池是保存和传递直流电动势单位伏特的标准量具。标准电池的电动势一般在 $1.0185 \sim 1.0195\text{V}$ 之间。标准电池是一种化学电池,由硫酸镉溶液和电极构成。标准电池主要用于电压的比较,不能用作电源供电。

(2) 标准电阻。标准电阻是保存和传递电阻单位欧姆的标准量具,对标准电阻的要求是准确度高、稳定性好、可靠性强。标准电阻一般由锰铜材料制成,如用锰铜丝绕制而成。锰铜具有很高的电阻率和很低的温度系数,并且热电动势也很小。通过适当的工艺处理,采用特殊的绕制方法(如交流标准电阻双线并绕和交叉并绕的方法),可以制成比较理想的标准电阻。

变值标准电阻(可变电阻箱)由若干个定值标准电阻串联构成,分成 $\times 1000$ 、 $\times 100$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 等多挡结构,各挡按十进制进位,利用转换开关实现对总电阻的调节,由于转换开关挡中存在接触电阻,因此,变值标准电阻的准确度低于定值标准电阻。

(3) 标准电容。标准电容是保存和传递电容单位法拉的标准量具,对标准电容的要求是准确度高、稳定性好、线性度好、损耗因数小。

(4) 标准电感。标准电感是保存和传递电感单位亨利的标准量具,标准电感包括标准自感和标准互感。对标准电感的要求是准确度高、稳定性好、线性度好、品质因数高。

第二节 测 量 误 差

由于仪表的不准确、工作条件的不同、测量方法的缺陷等各种因素,都会使测量结果产生误差,在测量过程中,应尽量消除或减小这些误差,使测量结果尽可能与实际值接近,但同时也应考虑测量的经济性、可靠性、复杂性等因素。

一、误差的分类

按照误差的性质分类,测量误差可分为系统误差、偶然误差和疏失误差。

1. 系统误差(规律误差)

在一定的测量条件下,误差的大小和符号保持恒定或按照某种已知的函数规律变化,这种误差称为系统误差。

(1) 产生系统误差的原因。

- 1) 仪表本身不完善,如刻度不准确、本身功耗的影响等。
- 2) 测量方法不当,如接线不合理、理论依据不严密等。
- 3) 使用不当,如仪表放置方向不正确、未经调零等。
- 4) 行为的影响,如视觉缺陷、读数时人体位置不当等。

5) 环境条件的影响, 如温度、湿度的改变, 电场、磁场的干扰等。

系统误差是客观存在的, 但有一定规律, 在电工测量中可以采取必要的措施, 将其消除或减小。

(2) 系统误差的表示。

1) 绝对误差。被测量的测量值 X 与实际值 A 之差称为绝对误差, 用 Δ 表示, 即

$$\Delta = X - A \quad (1-5)$$

可见, 绝对误差是有单位的数值, 而且可正可负, 它的大小和符号分别表示了测量值偏离实际值的程度和方向, 它不能表示测量结果的准确度。

2) 相对误差。绝对误差与实际值之比的百分数称为相对误差, 用 γ 表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A} \times 100\% = \frac{X - A}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

相对误差表示了测量值与实际值的偏差在实际值中所占的比例, 显然, 它可以表示测量结果的准确度。

2. 偶然误差 (随机误差)

在一定的测量条件下, 多次测量同一个量, 误差的大小和符号不定, 不存在已知的变化规律, 也不可预知, 这种误差称为偶然误差。产生偶然误差的原因主要是电源电压或频率无规则波动和环境条件的瞬态变化。

偶然误差只有在多次重复测量时才会发现, 系统误差表示必然性, 偶然误差表示可能性。当在同一测量条件下, 对某一被测量进行多次测量时, 系统误差的规律不变, 偶然误差出现的概率密度呈正态分布, 可采用概率统计的方法处理。

实验中常采用对被测量进行多次重复测量取其算术平均值作为测量结果的最佳值, 以消除可能存在的偶然误差, 即有

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1-7)$$

式中: a_i 为第 i 次测量值; A 为测量结果。

一系列直接测量值与测量结果 A 的差值称为剩余误差或残余误差, 简称残差, 即

$$d_i = a_i - A \quad (1-8)$$

偶然误差一般用精密度表示。精密度用剩余误差计算, 有以下三种表示方法。

(1) 均方根误差 (标准偏差)。

一系列测量结果的均方根误差定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 也叫贝塞尔公式。均方根误差表示对同一被测量进行多次测量所得结果的分散性, 也称为测量列中单次测量的标准偏差。均方根误差大, 表明误差取值范围宽、分散程度大、测量结果的精密度低; 均方根误差小, 则表明测量结果的精密度高。标准偏差在正式的误差分析和计算中, 常作为偶然误差大小的量度。被测物理量的结果可表示为 $A \pm \sigma$ 。

当对同一被测量进行多次测量时, 测量列算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

(2) 或然误差。或然误差是从剩余误差中找出的一个数值,使剩余误差中比该数值大的和比该数值小的数出现的机会相等。当 $n \rightarrow \infty$ 时,或然误差为

$$\epsilon = 0.6785\sigma \approx \frac{2}{3}\sigma$$

(3) 算术平均误差。一系列测量结果的算术平均误差定义为

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \quad (1-10)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\alpha = 0.7979\sigma \approx \frac{4}{5}\sigma$ 。

3. 疏失误差 (粗大误差)

测量结果与实际值明显不符所对应的误差称为疏失误差。产生这种误差的原因主要是读错数或记错数、计算错误、仪表出现故障等。处理疏失误差时,可将其对应的测量值一律删去。

二、误差的估计

1. 直接测量中误差的估计

在直接测量中,由仪表产生的最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\pm K\% \times A_m}{A} \quad (1-11)$$

式中: K 是仪表的准确度等级; A_m 是仪表的量程; A 是被测量的实际值。

在不知道 A 的情况下,可以取被测量多次测量值的平均值代替 A 。

2. 间接测量中误差的合成与估计

根据被测量和各直接测量物理量之间的函数关系,可以估计间接测量中的误差。

(1) 加法关系。设 $y = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$, x_i 的绝对误差为 Δx_i , $i = 1, 2, \cdots, n$ 。当 Δx_i 为已知时, y 的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \cdots + \Delta x_n}{y} \quad (1-12)$$

各单项相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta x_1}{x_1}; \gamma_2 = \frac{\Delta x_2}{x_2}; \cdots; \gamma_n = \frac{\Delta x_n}{x_n}$$

事实上,一般情况并不知道 Δx_i 具体的大小,只知道一个范围。据此可对其绝对误差做粗略估计,得出其绝对值的粗略估计值 $|\Delta \tilde{x}_i|$ 。此后,可按最坏的情况考虑,即 Δx_i 均为正或均为负,则估计最大可能的相对误差为

$$\gamma = \frac{\pm (|\Delta \tilde{x}_1| + |\Delta \tilde{x}_2| + \cdots + |\Delta \tilde{x}_n|)}{y} \quad (1-13)$$

当单项项数较少时,这种可能性较大,采用该方法比较合适;当单项项数较多时,这种可能性很小,不宜采用式 (1-13) 所述方法,一般采用几何合成法进行估计,即

$$\gamma = \frac{\pm \sqrt{(\Delta \tilde{x}_1)^2 + (\Delta \tilde{x}_2)^2 + \cdots + (\Delta \tilde{x}_n)^2}}{y} \quad (1-14)$$

(2) 减法关系。设 $y=x_1-x_2$ ，考虑最坏的情况，有

$$\Delta y = \pm (|\Delta \tilde{x}_1| + |\Delta \tilde{x}_2|) \quad (1-15)$$

y 的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\pm (|\Delta \tilde{x}_1| + |\Delta \tilde{x}_2|)}{x_1 - x_2} \quad (1-16)$$

从式 (1-16) 可以看出，当 x_1 和 x_2 相差很小时，即使单项绝对误差很小， y 的相对误差往往会很大，因此，应避免这样的间接测量。当单项项数较多时，误差的估计与加法关系时相同。

(3) 乘法关系。设 $y=x_1x_2$ ，合成误差为

$$\gamma = \frac{\Delta y}{y} = \frac{x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1}{x_1 x_2} = \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (1-17)$$

可见，在乘法的误差合成中，积的相对误差等于单项相对误差之和。

单项项数较少时，采用

$$\gamma = \pm (|\gamma_1| + |\gamma_2|) \quad (1-18)$$

进行估计。单项项数较多时，采用

$$\gamma = \pm \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \cdots + \gamma_n^2} \quad (1-19)$$

进行估计。

(4) 除法关系。设 $y=\frac{x_1}{x_2}$ ，根据乘法关系中的误差合成可得

$$\gamma = \gamma_1 - \gamma_2 \quad (1-20)$$

误差的估计与乘法关系时相同。

在误差合成中，如果某一项局部误差小于总误差的 $1/3$ 时，可以认为是小误差，小误差在计算中可以忽略。

第三节 测量结果的数据处理

要从实验数据中得出可靠的实验结果，必须在测量过程中处理好多个环节。选用合适的量具、仪表，并且注意仪表准确调零、正确放置仪表方位、纠正读数角度、远离电场和磁场等干扰源，减小由工具带来的误差。在测量方法上采用替代法、正负误差抵消法、等时距对称消去法和差值法等。在处理测量结果时，找出各物理量之间的内在关系及其变化规律，需要对实验数据进行分析整理、归纳计算等处理。

一、有效数字及其运算

在测量过程中，读数、记录和运算是处理测量结果的三个环节，每个环节都涉及对有效数字的处理，如果处理不好，可能增加不必要的工作量或造成计算不准确，因此，需要掌握有效数字的取舍原则以及学会如何对测量数据进行运算。

1. 有效数字的意义

对于一个数据，从左边第一个非零数字到右边最末一位欠准数字，均为有效数字。一个

数据的最后一位数字是近似的，其他数字是准确的，称为可靠数字。欠准数字以后的数字是无效数字，无效数字是不需要的。例如实验中测量某一电压为 130.5V，前三位“130”是可靠数字，最后一位“5”则是欠准数字。可靠数字加上欠准数字称为有效数字。

在读数和记录数据时，应注意以下几个问题。

(1) 有效数字与小数点无关，135 和 13.5 均为三位有效数字。

(2) 记录数据时，只需保留一位欠准数字。

(3) 0 在数字之间或在数字之末都是有效数字，但在数字之前不是有效数字。例如，2.05 和 69.0 均为三位有效数字，0.18 和 0.0046 均为两位有效数字。要特别注意，小数点后面最后的 0 是不能随便省去的，例如 69.0 不能写成 69，二者的意义是不同的，在 69.0 当中，0 是欠准数字，9 是可靠数字；而在 69 当中，9 是欠准数字。

(4) 对于很大的数和很小的数，通常采用数字乘以 10^n 的形式表示数据， 10^n 前面的数字为有效数字。例如 2.8×10^8 为两位有效数字， 2.86×10^{-5} 为三位有效数字。

2. 数据的取舍

有效数字的位数确定以后，对于多余的数字按照四舍五入原则进行处理，具体原则是：当其值大于 5 时，纳入前一位进；当其值小于 5 时，舍去之，不向前进位；当其值等于 5 时，如果 5 之后有数，舍 5 进 1，5 之后没有数或为 0 时，5 之前为奇数，则舍 5 进 1，5 之前为偶数，则舍 5 不进位，例如，把 52.7451、36.135、18.365 用四位有效数字表示分别为 52.75、36.14、18.36。

3. 有效数字的运算

(1) 加减运算。当几个数相加或相减时，哪个数据欠准数字的数位最高，运算结果就取这个数位作为欠准数字位，其他数字均按四舍五入原则处理。

例如，求 $10.2838 + 15.03 + 8.69574$ 的运算结果，采用不删略运算，有

$$10.2838 + 15.03 + 8.69574 = 34.00954$$

由于 15.03 中的 3 欠准数字的数位最高，因此，运算结果取小数点后第二位为欠准数字位，最后结果取 34.01；采用删略运算，即先对数据按四舍五入原则处理，再进行运算，有

$$10.28 + 15.03 + 8.70 = 34.01$$

可见，两种运算方法的结果相同，但前者比较麻烦，后者比较简单。

(2) 乘除运算。当几个数做乘除运算时，运算结果的有效数字取决于有效数字最少的一项，一般要求比有效数字最少的数据多保留一位，例如

$$\frac{517.43 \times 0.28}{4.08} \approx 35.5$$

(3) 乘方、开方和对数运算。乘方与开方的运算，要求运算结果的有效数字比原数据多保留一位，例如

$$25.6^2 = 665.4$$

$$\sqrt{4.8} = 2.19$$

对数运算，要求运算结果的有效数字与原数据相同，例如

$$\ln 106 = 4.66$$

二、测量数据的表示方法

实验中处理测量数据时,需要计算、分析测量结果,测量结果规范处理常用数字、列表和图形表示。

1. 数据的数字表示法

在进行数据处理时,用数字量和一个单位共同来表示测量结果,如测得某电压为130.5V。最后一位是欠准数字,它与仪表的标度尺有关,读取时应注意正确取舍。计算过程中结果表示要符合有效数字的运算规则,数据计算处理时要尽量减小测量中随机误差的影响。

2. 数据的列表表示法

用数据表格可清晰地表示测量结果,体现相关物理量之间的关系,便于实验者随时检查结果是否合理,以便及时发现问题,减少和避免错误。在分析表中数据时,还可以发现相关物理量的变化规律,进而得出实验结论。列表的要求有以下几点。

(1) 简单明了,便于分析相关物理量之间的关系。

(2) 在标题栏中,要标明各物理量的单位。在记录各个数值时,不再重复写上单位。

(3) 合理选择测量点。在数据变化剧烈的部分要多取几个测试点,在变化较平坦部分可少取几个测试点。

(4) 表中所列数据要正确反映测量结果的有效数字。

(5) 除原始测量数据外,计算过程中的一些中间结果和最后结果也可以列入表中。

3. 数据的图形表示法

把实验结果用函数图形表示出来,具有明显的直观性,能清楚地反映出实验过程中变量之间的变化进程和连续变化的趋势。若以图形表示测量结果,则应考虑坐标的选择和正确的绘图方法,以及对所绘图形的评定等。将实验数据按其对应关系用曲线(或直线)在坐标纸上绘出,使其尽可能真实地反映实验结果。图示法能直观地表现出一系列实验数据的关系或变化情况,与列表法一样,使用非常广泛。

在实际测量过程中,由于存在各种误差,测量数据将出现离散现象,若将各测量值直接依次连接起来,得到的是一条波动的折线。最接近实际情况的应是一条光滑的曲线,

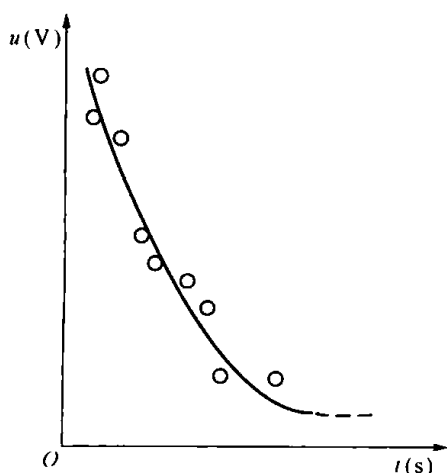


图 1-1 电压波形图

在要求不高的场合,可以用直尺或曲线板,结合误差理论把点连成直线或光滑的曲线,使曲线两侧的数据点较均匀地分布,个别偏离过大的点应当舍去。如曲线需延伸到测量范围之外,则应按其趋势用虚线表示,如图 1-1 所示的电压波形图。

曲线应绘在坐标纸上,比例要适当,坐标轴上应注明物理量的符号和单位、起始值,并标明比例和曲线的名称。

4. 绘图的一般方法

先把测量数据点标在适当的坐标系中,然后绘出拟合曲线(或直线)。在绘图时应注意下面几个问题。

(1) 绘图之前, 为了避免差错, 应将测量数据列成表格备查。

(2) 绘图最常用的坐标为直角坐标, 此外还有极坐标、对数坐标等其他形式的坐标。一般以自变量作为横坐标, 因变量数据点可用空心小圆圈、实心圆点等作标记。

(3) 测量数据点的选择, 应根据曲线的具体形状而定。在使用图示法时要注意自变量取值的两个端点, 因变量变化的最大值和最小值点都必须测出。通常让各数据点大体上沿曲线均匀分布, 而数据点沿横轴和纵轴的分布就不一定均匀。在曲率较大的区段要密集些, 极值点附近更要密集, 如图 1-2 所示。例如, 在研究串联谐振时电阻上电压随频率变化的曲线, 在谐振点附近取点可以密集些。

(4) 选择合适的坐标分度及比例, 对正确反映和分析测量结果至关重要。根据便于读数、分析和使用的原则, 直角坐标系中常选择线性分度, 分度大小与测量误差对应。横坐标和纵坐标的比例可以不一致, 也不一定都要从坐标原点开始。

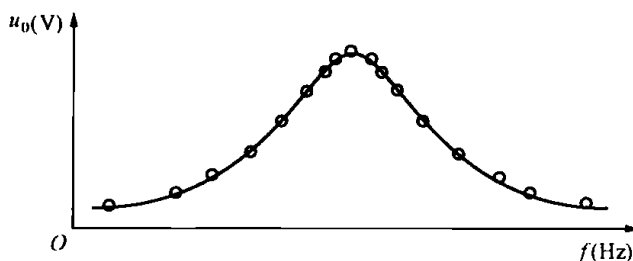


图 1-2 谐振曲线中数据点的选择

(5) 由于测量数据不可避免地存在误差, 所以在一般情况下不宜直接把各数据点连成一条折线 (如图 1-3 所示), 当测量数据点的弥散程度不大时, 采用平滑的拟合曲线拟合 (如图 1-4 所示), 尽可能靠近多个数据点, 且曲线两侧的数据点数目相差不多。

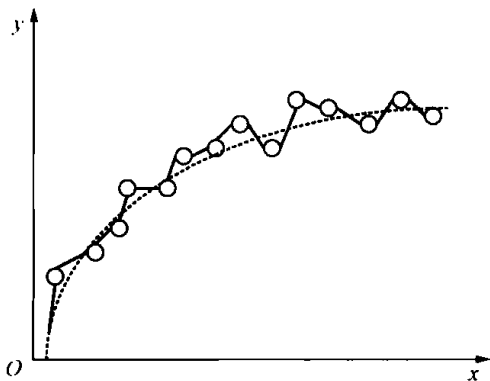


图 1-3 数据点的折线连接

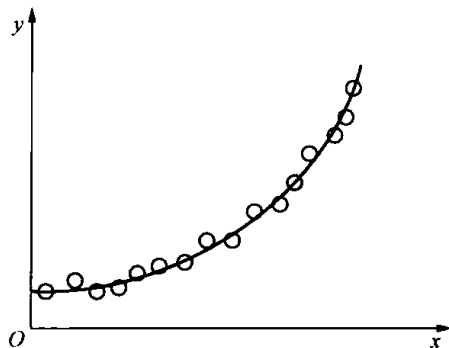


图 1-4 数据点的平滑曲线拟合

第四节 实验结果的计算机处理及绘图

随着计算机技术的发展, 出现了许多种文字处理和数据处理软件。例如 WPS、Word 和 Excel 等文字和表格处理软件, MATLAB、Mathematica、Maple 和 Origin 等数据处理软件。实验报告是实验的重要环节, 借助计算机处理实验数据、书写实验报告将更准确、清晰和规范。本节介绍在 MATLAB 中进行实验数据处理和绘图的基本方法。

MATLAB (Matrix Laboratory) 是一种编程语言和可视化工具, 专门以矩阵的形式处理数据, 是理工科大学生应该掌握的技术工具。MATLAB 将高性能的数值计算和可视化集成在一起, 并提供了大量的内置函数。它采用开放式结构, 可非常容易地对功能进行扩充, 工具箱涵盖了数据采集、科学计算、控制系统设计与分析、数字信号处理、数字图像处理、

金融财务分析以及生物遗传工程等专业领域。

一、MATLAB 的工作环境

在计算机上安装 MATLAB 7.0 或相近版本软件, 运行 MATLAB 程序, 其工作界面主要由菜单栏、工具栏、命令窗口、工作空间管理窗口、命令历史窗口、当前目录窗口和图形窗口组成, 如图 1-5 所示。

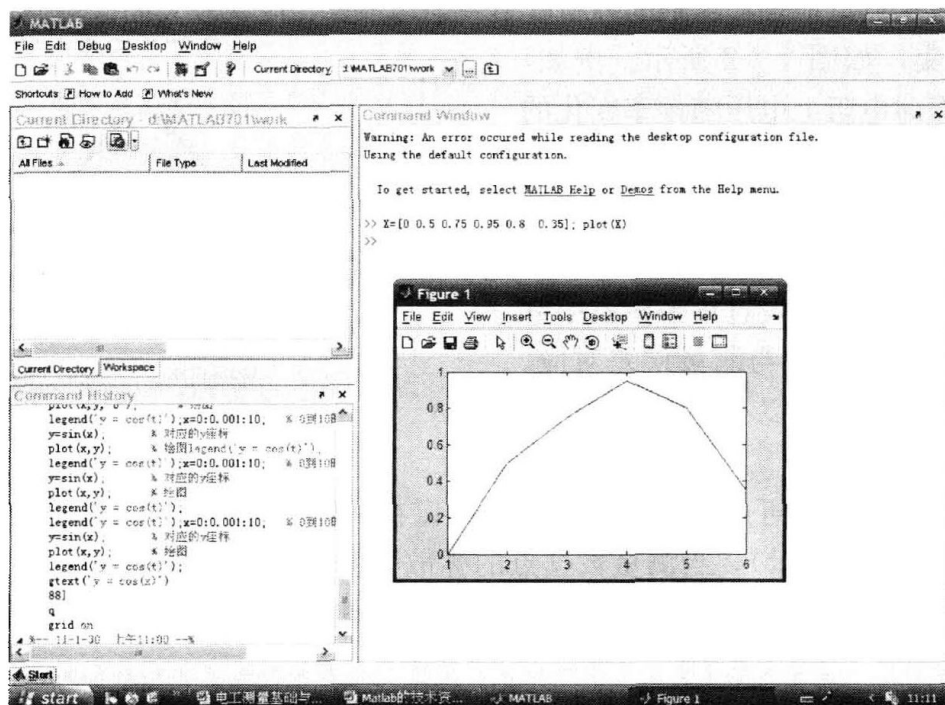


图 1-5 MATLAB 工作界面

1. 菜单栏和工具栏 (Menus and Toolbars)

MATLAB 的菜单栏和工具栏界面位于窗口顶端, 与 Windows 程序的界面类似, 利用菜单栏和工具栏可以方便地掌握其功能和使用方法。

2. 命令窗口 (Command Window)

MATLAB 命令窗口是用来接收 MATLAB 命令的窗口。在命令窗口中直接输入命令, 可以实现显示、清除、储存、调出、管理、计算和绘图等功能。MATLAB 命令窗口中的符号“>>”为运算提示符, 表示 MATLAB 处于准备状态。当在提示符后输入一段数据处理或绘图程序后按回车键, MATLAB 会给出计算和绘图结果, 并将其保存在工作空间管理窗口中, 然后再次进入准备状态。

3. 工作空间管理窗口 (Workspace Window)

工作空间管理窗口显示当前 MATLAB 的内存中使用的所有变量的变量名、变量的大小和变量的数据结构等信息, 数据结构不同的变量对应着不同的图标。

4. 命令历史窗口 (Command History Window)

在默认设置下, 该窗口会保留自 MATLAB 安装后所有执行过的命令, 并标明使用的时间。

5. 当前目录窗口 (Current Directory Window)

当前目录窗口显示当前目录下所有文件的文件名、文件类型和最后修改时间。

6. 图形窗口 (Figure Window)

图形窗口是 MATLAB 绘图的输出窗口, 就像一张绘图纸。当调用绘图函数时可自动打

开图形窗口，也可使用菜单上的 figure 命令打开图形窗口，可以同时打开多个图形窗口，但活跃图形窗口是唯一的（即当前窗口），使用 close 命令可关闭图形窗口。

二、MATLAB 的绘图基本方法

MATLAB 采用交互式高级编程语言——M 语言，强大的图形功能是 MATLAB 的优点之一，它能方便快速地绘出 2D 和 3D 图形。实验中所测量的结果常用数或数组形式表示，数据计算和处理若借助 MATLAB 的运算和函数进行，通过编写脚本或函数文件实现实验数据的计算机处理和图形显示，将给数据处理工作带来极大的方便。

1. 坐标系

坐标系是图形窗口中所绘图形的定位系统。在一个图形窗口中可以有多个坐标系，但只有一个当前的坐标系。绘图在当前坐标系中，需要定义的坐标系参数如下所示。

(1) 坐标范围定义。一般 MATLAB 自动定义坐标范围，如用户认为设定的不合适，可用 `axis([Xmin, Xmax, Ymin, Ymax])` 命令来重新设定，“[]”中分别给出了 x 轴和 y 轴的最小、最大值范围。

(2) 坐标轴控制。MATLAB 在绘图时，默认方式是将所在的坐标系也绘出。为隐去坐标系，可用 `axis off` 命令；如要显示坐标轴（默认值），则可用 `axis on` 命令。

(3) 坐标系形状。通常 MATLAB 的坐标系是长方形，长宽比例大约是 4:3，为了得到一个正方形的坐标系可用 `axis square` 命令，此命令绘出的图框呈方形。

(4) 横纵轴的比例。MATLAB 中坐标系的 x 轴和 y 轴是自动设置的，比例可能不一样，要得到相同比例的坐标系，可用 `axis equal` 命令设置 x 轴和 y 轴单位长度相同。

(5) 图形的标题。可以通过 `title` 函数设置图形标题，调用格式为 `title('字符串')`，字符串可以写中文。例如，`title('谐振数据曲线')`。

(6) 坐标轴的标识。使用 `xlabel` 和 `ylabel` 函数设置坐标轴标题，调用格式为 `xlabel('字符串')`；`ylabel('字符串')`。例如，`xlabel('频率')`。

(7) 多条曲线的标识（图例）。在图形中可添加图例框对多条曲线加以说明，函数调用格式为 `legend('字符串 1', '字符串 2', ...)`。

例如，下面的程序是在含多条曲线的图形中添加标题、坐标轴标识和曲线图例。

```
x=0:pi/10:2*pi;
y1=sin(x);
y2=0.6*sin(x);
y3=0.3*sin(x);
plot(x,y1,x,y2,'-o',x,y3,'-*');
title('正弦曲线');
xlabel('相位 rad');
ylabel('幅值 V');
legend('曲线 1','曲线 2','曲线 3')
```

绘出的图形如图 1-6 所示。

2. 基本绘图函数

MATLAB 绘图是通过描点、连线来实现的，故在绘一曲线图形之前，必须先取得该图形上的一系列的点的坐标，然后将该点集的坐标传给 MATLAB 函数绘图，即根据外部输入

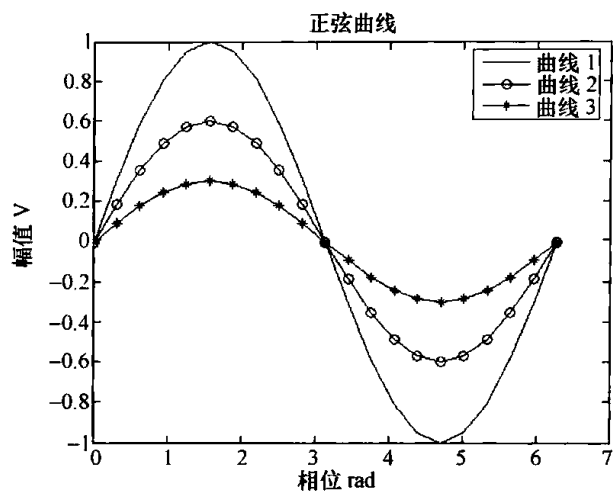


图 1-6 坐标系及曲线图

数据或通过函数数值计算得到的数据进行绘图。绘制二维图形最常用的命令是 plot，对于不同形式的输入，该函数可以实现不同的功能。

(1) 当仅有一个输入变量时，使用 plot (x) 函数绘图。如果 x 为实相量，则以 x 的索引坐标作为横坐标，以 x 的各元素作为纵坐标绘制图形。如果 x 为复向量，则以 x 的实部作为横坐标，虚部作为纵坐标绘制图形。如果 x 为实数矩阵，则绘制 x 的列相量对其坐标索引的图形。

例如，串联谐振实验的数据见表 1-3。

表 1-3 串联谐振实验数据记录表

频率 f (Hz)	300	500	800	1000	1200	1400	1550	1700	1900	2100	2400
电容电压 U_C (V)	3.06	3.15	3.35	3.48	3.52	3.39	3.09	2.89	2.46	2.06	1.73
电感电压 U_L (V)	0.197	0.425	1.00	1.52	2.12	2.73	3.21	3.36	3.55	3.61	3.53
电阻电压 U_R (V)	0.373	0.650	1.11	1.40	1.71	1.92	2.00	1.99	1.89	1.75	1.61

在命令窗口中输入：

```
>>x=[3.06 3.15 3.35 3.48 3.52 3.39 3.09 2.89 2.46 2.06 1.73];plot(x);
>>title('电容电压曲线');
>>xlabel('测量点');ylabel('电压(V)');
```

回车后，图形窗口中显示每个测量点上电容的电压波形，如图 1-7 所示的实数相量图形，电感和电阻上的电压波形可以类似绘出。

例如输入 x 为复数相量，分别以实部和虚部为坐标轴绘出图形，则在命令窗口中输入：

```
>>x=[1+2i,2+4i,3+2i,5+i,7+6i];plot(x)
```

回车后，在图形窗口中显示如图 1-8 所示的复数相量图形。

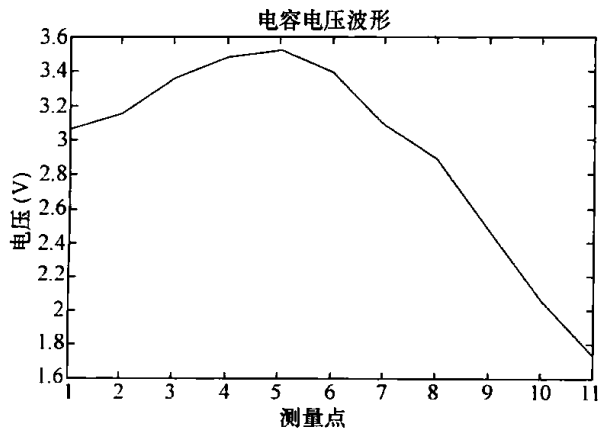


图 1-7 实数相量图形显示

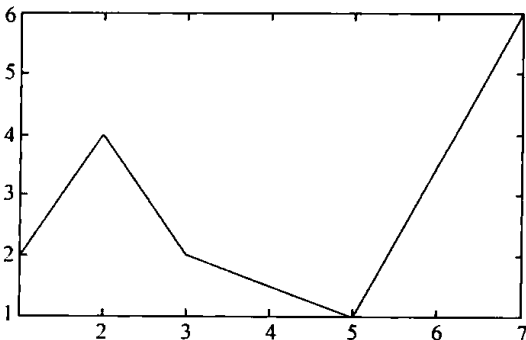


图 1-8 复数相量图形显示

(2) 两个输入变量的绘图函数 `plot(x, y)`。当 x 和 y 为相量时, x 和 y 的维数必须相同, 且同时为行相量或同时为列相量。此时以第一个相量的分量为横坐标, 第二个相量的分量为纵坐标绘制图形, 这是处理数据过程中最为常用的。

例如在上面给出的串联谐振实验例子中, 要显示电阻上电压随频率变化的波形, 可以在命令窗口中输入:

```
>>x=[300 500 800 1000 1200 1400 1550 1700 1900 2100 2400];
>>y=[0.373 0.650 1.11 1.40 1.71 1.92 2.00 1.99 1.89 1.75 1.61];
>>plot(x,y);title('串联谐振实验电阻电压变化曲线');
>>xlabel('频率(Hz)');ylabel('电阻电压(V)');
```

执行后, 输出的图形如图 1-9 所示。

当 x 是相量, y 是矩阵时, 则绘制 y 矩阵中各行或列对应于相量 x 的曲线。如果 y 矩阵中行的长度与 x 相量的长度相同, 则以 y 的行数据作为一组绘图数据; 如果 y 矩阵中列的长度与 x 相量的长度相同, 则以 y 的列数据作为一组绘图数据; 如果 y 矩阵中行、列均与 x 相量的长度相同, 则以 y 的每列数据作为一组绘图数据。

例如在命令窗口中输入:

```
>>x=0:pi/50:2*pi;y=[sin(x);0.6*sin(x);0.3*sin(x)];
>>plot(x,y)
```

如图 1-10 所示, MATLAB 可同时绘出三条曲线, 所绘制的曲线颜色会按照一定的规律自动变化。

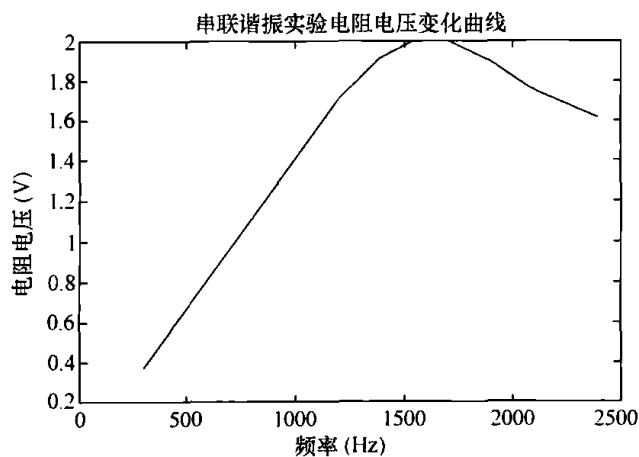


图 1-9 两个相量绘出的图形

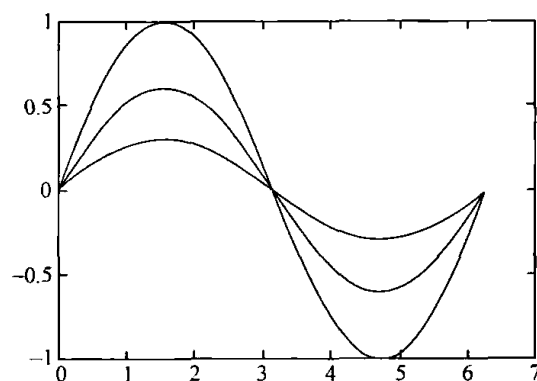


图 1-10 x 相量和 y 矩阵绘出的图形

当 x 、 y 为 $m \times n$ 矩阵时, 将在同一幅图中绘出 n 条不同颜色的连线。绘制规则为以 x 矩阵的第 j 列分量作为横坐标, 矩阵 y 的第 j 列分量作为纵坐标, 绘得第 j 条连线。若在同一幅图中出现多条曲线, MATLAB 会自动地把不同曲线绘制成不同的颜色, 以进行简单的区别。例如:

```
>>x=0:0.01*pi:pi;y=[sin(x'),cos(x')];
>>plot([x',x'],y)
```

(3) 三个输入变量绘图函数 `plot(x, y, 'Linespec')`。想绘制不同的线型、颜色、标识

等的图形时，可以调用此函数，第3个输入变量为图形显示属性的设置选项：线型、颜色和标识。

线型包括：—实线；:点线；-虚点线；--虚线；

颜色包括：y黄；m紫；c青；r红；g绿；b蓝；w白；k黑；

标识包括：.点；o圆点；x叉号；+加号；*星号；s方形；d菱形；v下三角；^上三角；<左三角；>右三角；p五角星；h六角星。

应用上述符号的不同组合可以为图形设置不同的线型、颜色、标识。在调用时，选项应置于单引号内，当多于一个选项时，各选项直接相连，中间不需要任何的分隔符。

例如，输入如下命令：

```
>>x=1:0.1*pi:2*pi; y=sin(x); z=cos(x); plot(x,y,'--k',x,z,'- .kd')
```

回车后，图形窗口中将输出不同标识和线型的曲线，如图1-11所示。

3. 符号函数绘图

(1) fplot 函数。在实际测量应用中，可能并不知道某一函数随自变量变化的趋势，若采用 plot 命令在整个自变量取值范围内绘图，则可能会因为自变量的取值间隔不合理，而使曲线图形不能反映出自变量在某些区域内函数值的变化情况。此时，虽然可以将自变量间隔取得足够小，以体现函数值随自变量变化的曲线，但这样会使数据量变大。

fplot 命令可以很好地解决这个问题。该命令通过内部的自适应算法来动态决定自变量的取值间隔，当函数值变化缓慢时间隔取大一点，变化剧烈时间隔取小一点。fplot 命令的调用方式为：

```
fplot('fun',[xmin xmax ymin ymax])
```

在 [xmin xmax] 内画出字符串 fun 表示的函数的图形，[ymin ymax] 给出了 y 的限制。fun 函数必须是 M 文件的函数名或是独立变量为 x 的字符串，fplot 函数不能画参数方程和隐函数图形，但在一个图上可以画多个图形。

例如，输入命令：

```
>>fplot('sin(x)/x',[-20 20 -0.3 1.3])
```

回车后，显示的自变量的自动取值间隔如图1-12所示。

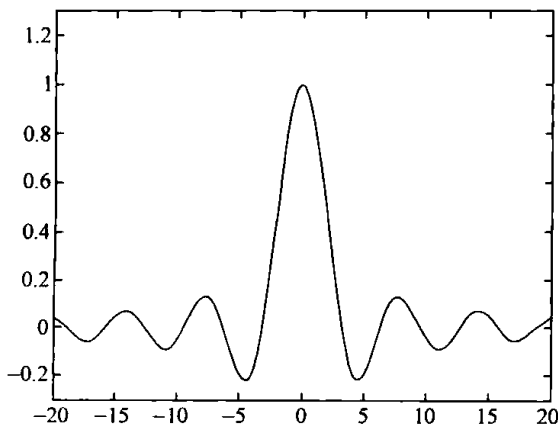


图 1-11 不同标识和线型的曲线

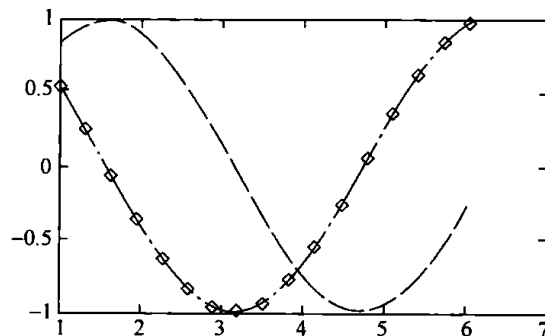


图 1-12 自变量的自动取值间隔

(2) `ezplot` 函数。`ezplot('f(x)', [a, b])` 函数表示在 $a < x < b$ 绘制显函数 $f=f(x)$ 的函数图。

`ezplot('f(x, y)', [xmin, xmax, ymin, ymax])` 函数表示在区间 $x_{\min} < x < x_{\max}$ 和 $y_{\min} < y < y_{\max}$ 绘制隐函数 $f(x, y)=0$ 的函数图形。

`ezplot('x(t)', 'y(t)', [tmin, tmax])` 表示在区间 $t_{\min} < t < t_{\max}$ 绘制参数方程 $x=x(t)$, $y=y(t)$ 的函数图形。

例如, 在 $[-2, 0.5]$, $[0, 2]$ 上画隐函数 $e^x + \sin(xy)=0$ 的图形可以输入命令:

```
ezplot('exp(x)+sin(x*y)', [-2, 0.5, 0, 2])
```

4. 其他二维曲线绘图函数

(1) 绘制极坐标图函数: `polar(theta, rho, s)`, 用角度 `theta` (弧度表示) 和极半径 `rho` 作极坐标图, 用 `s` 指定线型。

(2) 绘制散点图函数: `scatter(X, Y, S, C)`, 在相量 `X` 和 `Y` 的指定位置显示彩色圈, `X` 和 `Y` 必须大小相同。

(3) 绘制平面等值线图函数: `contour(x, y, z, n)`, 即可以绘制 n 个等值线的二维等值线图。

三、MATLAB 的数据处理与统计

MATLAB 具有计算和统计功能, 在实验报告中可以用来处理实验数据, 计算实验结果误差、绘出误差曲线和拟合实验结果变化趋势。

1. 求数据方差

样本方差的计算式可表示为 $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, 若 `X` 为实验数据相量, 利用函数 `var(X)` 可以计算相量的样本方差。

求样本标准差的计算式可表示为 $\text{std} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$, 利用函数 `std(X)` 可以求出相量 (矩阵) `X` 的样本标准差 (置前因子为 $\frac{1}{n-1}$); 利用函数 `std(X, 1)` 计算相量 (矩阵) `X` 的标准差 (置前因子为 $\frac{1}{n}$)。

例如, 求样本 `[14.7 15.21 14.9 14.91 15.32 15.32]` 的样本方差和样本标准差, 方差和标准差, 可分别输入如下命令:

```
>>X=[14.7 15.21 14.9 14.91 15.32 15.32];
>>DX=var(X,1)
DX=0.0559                % 方差计算结果
>>sigma=std(X,1)
sigma=0.2364              % 标准差计算结果
>>DX1=var(X)
DX1=0.0671                % 样本方差计算结果
>>sigma1=std(X)
sigma1=0.2590             % 样本标准差计算结果
```


2. 数据插值

在电路实验中分析实验数据，常将点状分布的数据绘制成曲线图以便于分析。确定满足特定要求的曲线或曲面时，所求曲线（面）要通过给定的数据点，如果在测试数据较少的情况下，只有对已知数据进行插值才能取得较好的效果。

(1) 一维数据插值。在 MATLAB 中，实现插值的函数是 `interp1`，其调用格式为

```
Y1=interp1(X,Y,X1,'method')
```

函数根据 X 、 Y 的值，计算函数在 X_1 处的值。 X 、 Y 是两个等长的已知相量，描述的是插值点， X_1 是一个相量或标量，描述被插值的点； Y_1 是一个与 X_1 等长的插值结果；`method` 是所要采用的插值方法，允许的取法有 'linear'（线性插值）、'nearest'（最邻近插值）、'cubic'（立方插值）、'spline'（三次样条插值）。

注意：所有的插值方法都要求 X 是单调的，并且 X_i 不能够超过 X 的范围。

例如，在 1~12h 中的 11h 内，每隔 1h 测量一次温度，测得的温度依次为 5、8、9、15、25、29、31、30、22、25、27、24。试估计每隔 1/10h 的温度值。

要估计多个点的温度，这就需要插值，程序如下：

```
>>hours=1:12;
>>temps=[5 8 9 15 25 29 31 30 22 25 27 24];
>>h=1:0.1:12;
>>t=interp1(hours,temps,h,'spline'); % (线性插值增加数据)
>>plot(hours,temps,'+',h,t,hours,temps,'r:');
>>xlabel('Hour'),ylabel('Degrees Celsius');
```

插值后的图形结果如图 1-13 所示。

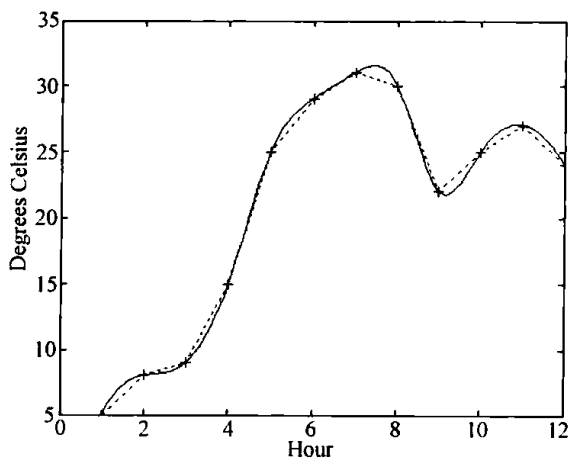


图 1-13 数据线性插值后的图形

同样，要求 X 、 Y 单调； X 、 Y 可取为矩阵，或 X 取行相量， Y 取为列相量， $X_i Y_i$ 的值分别不能超出 X 、 Y 的范围。

(3) 散点数据的插值。在二维插值中，若插值点不单调，则应采用插值函数 `griddata`，其调用格式为

```
cz =griddata(X,Y,Z,X1,Y1,'method')
```

函数的用法与上面相同。但要求 X_1 取行相量， Y_1 取为列相量。

(2) 二维数据插值。在 MATLAB 中，提供了解决二维插值问题的函数 `interp2`，其调用格式为：

```
Z1=interp2(X,Y,Z,X1,Y1,'method')
```

其中 X 、 Y 是两个相量，分别描述两个参数的采样点， Z 是与参数采样点对应的函数值， X_1 、 Y_1 是两个相量或标量，描述被插值的点。 Z_1 是根据相应的插值方法得到的插值结果。`method` 的取值与一维插值函数相同。 X 、 Y 、 Z 也可以是矩阵形式。

3. 数据和曲线拟合

如果不要求曲线（面）通过所有数据点，而是要求它反映对象整体的变化趋势，可得到更简单实用的近似函数，这就是数据拟合，又称曲线拟合或曲面拟合。

(1) 多项式数据拟合。在 MATLAB 中，用 polyfit 函数来求得拟合多项式的系数，其调用格式为：

```
a=polyfit(x,y,m)
```

其中 x, y 输入同长度的数组，m 表示拟合多项式的次数。m 取 1 时，即为最小二乘法。例如某次实验数据如表 1-4 所列，对这一组数据做二次多项式拟合。

表 1-4 实验数据记录表

x_i	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
y_i	1.978	3.28	6.16	7.34	7.66	9.58	9.48	9.30	11.2

输入以下命令：

```
>>x=0:0.1:1;
>>y=[-0.447 1.978 3.28 6.16 7.08 7.34 7.66 9.56 9.48 9.30 11.2];
>>A=polyfit(x,y,2);
>>z=polyval(A,x);
>>plot(x,y,'k+',x,z,'r'); % 作出数据点和拟合曲线的图形
```

命令执行后，二次多项式拟合图形如图 1-14 所示。

(2) 非线性最小二乘拟合。MATLAB 提供了两个求非线性最小二乘拟合的函数：lsqcurvefit 和 lsqnonlin。两个命令都要先建立 M 文件 fun.m，在其中定义函数 $f(x)$ ，但两者定义 $f(x)$ 的方式是不同的。

1) lsqcurvefit 函数。已知数据点：xdata = (xdata1, xdata2, ..., xdatan),

```
ydata=(ydata1, ydata2, ..., ydatan)
```

lsqcurvefit 用以求含参量 x（相量）的相量值函数 $F(x, xdata) = (F(x, xdata1), \dots, F(x, xdatan))^T$ 中的参变量 x（相量）。其调用格式为：

```
x=lsqcurvefit('fun',x0,xdata,ydata,options);
```

其中 fun 是一个事先建立的定义函数 $F(x, xdata)$ 的 M 文件，自变量为 x 和 xdata；x0 为迭代初值；xdata, ydata 为已知数据点；options 为指定优化参数选项。

2) lsqnonlin 函数。已知数据点：xdata=(xdata1, xdata2, ..., xdatan)

```
ydata=(ydata1, ydata2, ..., ydatan)
```

lsqnonlin 用以求含参量 x（相量）的相量值函数 $f(x)=(f1(x), f2(x), \dots, fn(x))^T$ 中

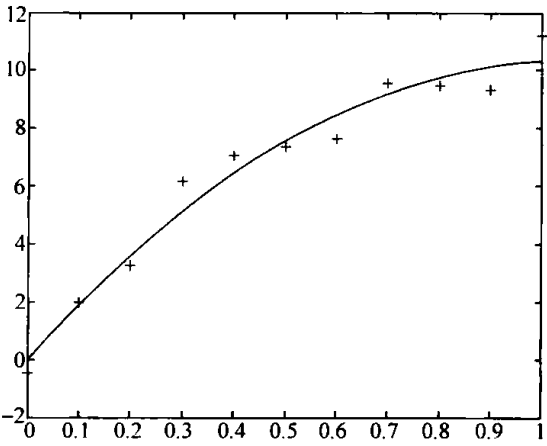


图 1-14 二次多项式拟合图形

的参量 x 。其中 $f_i(x) = f(x, xdata_i, ydata_i) = F(x, xdata_i) - ydata_i$ 。其调用格式为：

```
x=lsqnonlin('fun',x0,options)
```

其中参变量含义同上。

(3) 绘制最小二乘拟合线函数。除上述方法外，也可直接使用函数 `lsline` 对图中点、数据点进行最小二乘拟合直线。

例如，采用如下命令进行实验结果的直线拟合。

```
>>x=[2.2 3.6 5.6 8 11 12.3 13.8 15.3 17.8 18.9];
>>plot(X,'+');
>>lsline
```

命令执行后，最小二乘拟合直线如图 1-15 所示。

(4) 绘制多项式拟合曲线。使用函数 `refcurve(p)` 可将实验结果拟合成曲线，从而观察变化趋势。参数 $p=[p_1, p_2, p_3, \dots, p_n]$ 为多项式系数相量，其中 p_1 为最高幂项系数。

例如，拟合如下测量数据 `[65 152 230 289 339 381 443 437 452 458 456 420 400 356]`，可以输入：

```
>>h=[65 152 230 289 339 381 443 437 452 458 456 420 400 356];
>>plot(h,'+');
>>refcurve([-4.9 100 0])
```

执行后，多项式拟合曲线如图 1-16 所示。

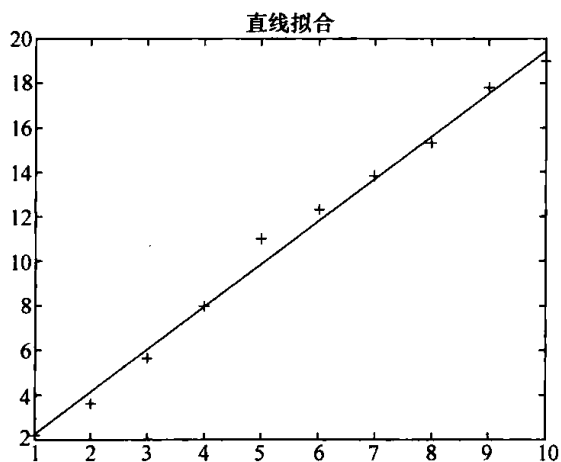


图 1-15 最小二乘拟合直线

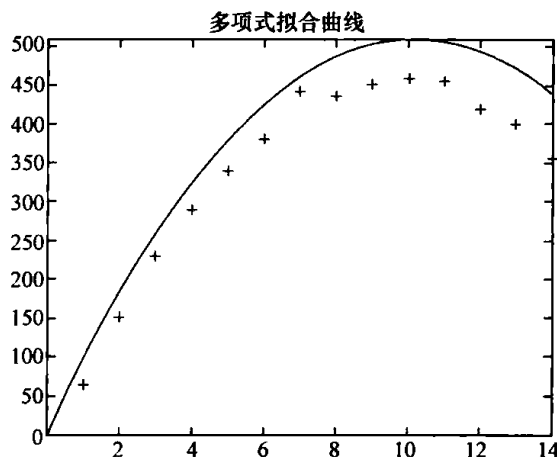


图 1-16 多项式拟合曲线

MATLAB 具有数值计算、矩阵运算和丰富的数据处理函数，绘图功能强大，在实验中还会用到一些高级处理技巧，读者若想进一步学习请参阅 MATLAB 相关书籍。



第二章 电 工 测 量 仪 表

电工测量仪表（简称为电测仪表）按测量方法不同可分为直读式仪表和比较式仪表。直读式仪表能直接指示被测量的大小，可分为模拟式仪表和数字式仪表。模拟式仪表用指针在刻度盘上指示出被测量的数值，该数值可随被测量的变化而连续变化。数字式仪表是将被测模拟量转换为数字量后，再用离散数字来显示被测量的大小，这样就可消除人为读数引起的误差。比较式仪表（例如直流电桥、交流电桥、直流电位差计）是将被测量和已知的标准量直接进行比较，从而确定被测量的大小。

第一节 直读电工测量仪表的一般知识

直读电工测量仪表也称直接作用模拟指示电测量仪表，它的种类很多，在仪表的标度盘上和端钮上有许多符号，在选择和使用时应了解它们的分类和标志符号。

一、直读电工测量仪表的分类

根据电工仪表的作用原理可以分为磁电系、电磁系、电动系、整流系、感应系、热电系及电子系等。电工测量仪表常用的表示符号见表 2-1。

表 2-1 常用直流电工测量仪表的符号及表示的意义

分类	符号	意义	分类	符号	意义
工作原理		磁电系仪表	外界条件		防外磁场等级
		整流系仪表			防外电场等级
		电磁系仪表			绝缘经 2kV 耐压试验
		电动系仪表	工作位置		垂直放置
		感应系仪表			水平放置
		静电系仪表			相对水平面倾斜 45°
电量性质		直流表	准确度等级		准确度等级为 1.0 (基准值为量程)
		交流表			准确度等级为 1.0 (基准值为标尺长度)
		交直流两用表			准确度等级为 1.0 (基准值为指示值)
		三相交流表			

二、仪表的准确度等级

由于在测量仪表的整个标度尺上，每一点上的绝对误差不同，为保险起见，用最大引用误差来表示仪表的准确度。最大引用误差是最大绝对误差与量程之比的百分数，即

$$\gamma_{\text{nm}} = \frac{\Delta_{\text{m}}}{A_{\text{m}}} \times 100\% = \pm K\% \quad (2-1)$$

用 K 来描述仪表的准确度等级， K 级的仪表表示它的最大引用误差不超过 $\pm K\%$ 。显然， K 值越小，仪表的准确度越高。

根据国家标准规定：电流表和电压表的准确度等级分为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、2.5、3、5 共 11 个等级；功率表分为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、2.5、3.5 共 10 个等级；电阻表分为 0.05、0.1、0.2、0.5、1、1.5、2、2.5、3、5、10、20 共 12 个等级；频率表分为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、2.5、5 共 11 个等级；相位表和功率因数分为 0.1、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、2.5、3、5 共 10 个等级。

0.05、0.1、0.2 级的仪表一般作为标准表来校验准确度较低的仪表；0.5、1、1.5、2 级的仪表一般用于实验室；2.5 级及其以上级别的仪表一般用于现场监视。

三、直读仪表的测量机构

电工测量仪表种类很多，基本原理一般是将被测电学量变换成仪表可动部分的偏转角位移。电工测量直读仪表主要由测量线路和测量机构组成，如图 2-1 所示。测量线路的作用

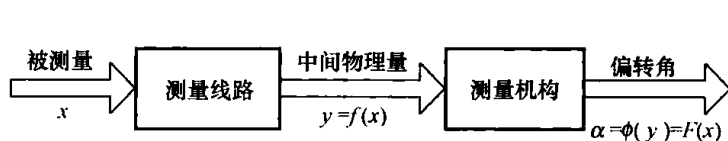


图 2-1 直读仪表组成原理方框图

是把被测量 x （如电压、电流、功率等）变成测量机构能够直接测量的中间物理量 y ； y 经过测量机构，使仪表的可动部分发生偏转，偏转角设为 α 。

测量机构是仪表的核心，测量机构中主要有三种力矩。

1. 转动力矩

驱动仪表的可动部分发生偏转的力矩称为转动力矩。转动力矩可以由电流和磁场相互作用而产生，也可以由磁场和磁场相互作用产生。磁场的建立可利用永久磁铁或通有电流的线圈产生。

常用的几种直读仪表的转动力矩的产生方式不同。

(1) 磁电系仪表：固定永久磁铁的磁场与通有直流电流的可动线圈间相互作用产生转动力矩。

(2) 电磁系仪表：通有电流的固定线圈产生的磁场与动铁片相互作用（或处在磁场中的两个铁片的相互作用）产生转动力矩。

(3) 电动系仪表：通有电流的固定线圈产生的磁场与通有电流的可动线圈产生的磁场之间的相互作用产生转动力矩。

2. 反作用力矩

如果只有转动力矩作用在仪表的可动部分上，当被测量通过测量机构时，无论被测量的大小如何，仪表的可动部分都会偏转到不能再偏转的地方为止，这样就不能反映被测量的大小。因此，必须有一个和转动力矩方向相反的力矩与之平衡，使仪表的可动部分有一个固定

的偏转，这个力矩就叫做反作用力矩。反作用力矩通常由游丝的弹力产生，也可以由张丝或吊丝的扭力产生，或者由电磁力产生。

3. 阻尼力矩

当被测量通过测量机构时，由于仪表的可动部分的惯性，它不可能立即稳定在转动力矩和反作用力矩的平衡点上，而是在平衡点附近减幅摆动，需要一段时间才能稳定下来，为了使仪表的可动部分尽快地稳定在平衡点上，在仪表的可动部分偏转过程中，需要一个与转动力矩方向相反的力矩来减小其偏转速度，这个力矩就叫做阻尼力矩。阻尼力矩只有在仪表的可动部分偏转过程中存在，当仪表的可动部分稳定在平衡点时便消失，因此，阻尼力矩不影响转动力矩和反作用力矩的平衡。阻尼力矩过大称为过阻尼，阻尼力矩过小称为欠阻尼。在过阻尼和欠阻尼两种情况下，仪表的可动部分稳定在平衡点所需要的时间都比较长，在临界阻尼状态所需要的时间最短。由于临界阻尼状态不易确定，因此，阻尼力矩一般都设计在微欠阻尼状态。阻尼力矩可以由电磁力产生，也可以由空气阻尼器产生。

产生转动力矩的装置叫做驱动装置，产生反作用力矩的装置叫做控制装置（制衡装置），产生阻尼力矩的装置叫做阻尼装置，这三个装置称为测量机构的三要素。

第二节 直读电工测量仪表组成及工作原理

一、磁电系仪表

1. 磁电系仪表的测量机构

磁电系测量机构是磁电系仪表的核心，它包括固定部分和可动部分，如图 2-2 所示。固定部分包括永久磁铁、极掌和圆柱形铁心，铁心放在极掌之间，用来减小磁阻，并使极掌和铁心气隙中产生一个均匀的辐射形磁场，如图 2-3 所示；可动部分由铝框、线圈、游丝、转轴、指针等组成。线圈的作用是在其通电后与磁场相互作用产生转动力矩；游丝的作用是产生反作用力矩，同时又将电流引入线圈；铝框在磁场中转动时产生的感应电流可用来产生阻尼力矩。

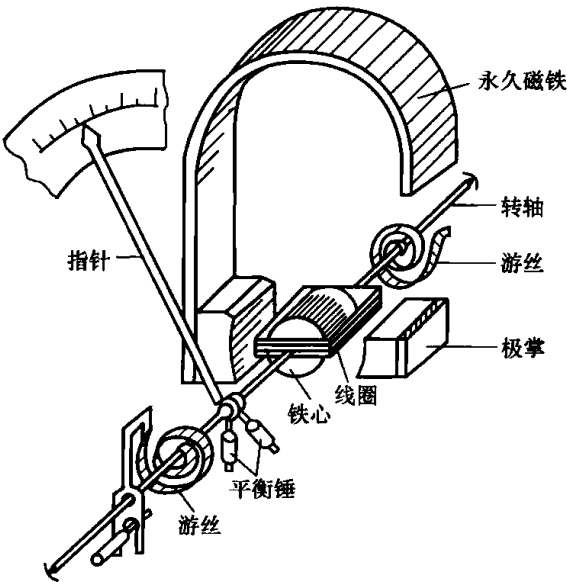


图 2-2 磁电系测量机构

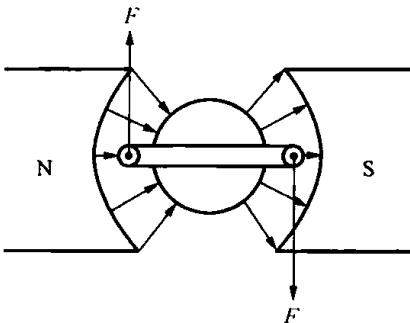


图 2-3 测量机构中的磁场

(1) 转动力矩。在磁电系测量机构中, 辐射状磁场沿着圆柱形铁心的表面, 磁感应强度处处相等, 而方向则和圆柱形表面垂直。当位于磁场中的线圈通入电流时, 线圈与磁场相互作用产生电磁力, 电磁力的大小为

$$F = BaNI \quad (2-2)$$

式中: B 为气隙中的磁感应强度; a 为线圈的有效长度; I 为通入线圈的电流; N 为线圈的匝数。

电磁力的方向总是与线圈平面垂直, 因为线圈两边所受电磁力的大小相等、方向相反, 所以两个电磁力形成一个转矩, 即转动力矩

$$M = Fb = BabNI \quad (2-3)$$

式中: b 为线圈的有效宽度。

因 B 、 N 、 a 和 b 均为已知, 令

$$K = BabN$$

则

$$M = KI \quad (2-4)$$

可见, 磁电系测量机构的转动力矩与通过线圈的电流成正比。

(2) 反作用力矩。反作用力矩由游丝产生, 游丝的一端与线圈相连, 另一端固定在支架上, 当线圈发生偏转时, 使游丝变形, 产生了反抗转动力矩的反作用力矩, 反作用力矩的大小与指针的偏转角成正比, 即

$$M_{\alpha} = W_{\alpha} \quad (2-5)$$

式中: W 为弹性系数, 其大小取决于游丝的材料、尺寸、形状等因素。

当反作用力矩与转动力矩相等时, 指针停留在平衡点, 有

$$M = M_{\alpha} \quad (2-6)$$

即

$$KI = W_{\alpha}$$

得

$$\alpha = \frac{K}{W} I = S_1 I \quad (2-7)$$

式中: S_1 为测量机构的电流灵敏度, 它表示单位电流引起的测量机构可动部分的偏转, 也反映测量机构对最小电流的分辨能力。

(3) 阻尼力矩。磁电系测量机构的阻尼力矩属于电磁力矩, 当铝框在磁场中运动时, 闭合铝框切割磁力线产生感应电流 I_p (涡流)。 I_p 与磁场相互作用产生电磁阻尼力矩, 其方向与铝框架运动方向相反, 因此能使指针较快停在平衡位置。当然铝架上的线圈与外电路也会构成闭合回路, 同样也会产生阻尼力矩。但上述阻尼力矩只有在可动线圈转动时才产生, 当指针稳定在平衡点时, 可动线圈静止后, 它就不存在了。由于阻尼力矩只在指针偏转过程中存在, 所以它对测量结果并无影响。

磁电系测量机构的主要技术特性包括以下几个方面。

(1) 准确度高, 可达 0.05 级。因永久磁铁的磁场很强, 气隙又小, 磁路近于闭合, 可动线圈转动力矩大, 因此由摩擦、温度及外磁场的影响引起的误差相对较小。

(2) 灵敏度高。测量机构的内部磁场强, 使很小的电流产生足够大的力矩, 因此磁电系测量机构灵敏度较高, 可做成低量程的仪表, 如微安表、指零表和检流表。

(3) 功耗小。为了使可动线圈轻巧灵敏,可动线圈的线径小,允许通过的电流小,仪表本身消耗的功率也小。

(4) 刻度均匀。测量机构指针偏转角与被测电流的大小成正比,因此仪表刻度是均匀的。

(5) 过载能力小。因为被测电流要通过游丝和可动线圈,游丝和可动线圈的导线都很细,若电流过载,容易导致游丝过热而使弹性系数发生变化或使线圈损坏。

(6) 只能测量直流。因为永久磁铁的磁场方向不变,转动力矩的方向取决于线圈中电流的方向。当通过线圈的电流为交流时,转动力矩的大小和方向随电流不断变化。由于仪表可动部分的惯性,它跟不上电流的变化,因此,指针只能反映电流的平均值。如果通过线圈的电流正负半周幅值和时间均对称,指针应停在零点的位置;如果通过线圈的电流频率很低,指针应在零点附近摆动。

磁电系测量机构也称为磁电系表头,一般情况都把它作为一个独立元件,可以制成其他的仪表,图 2-4 所示为 C31 型磁电系电压/电流表。

利用磁电系测量机构设计各类实用仪表,必须首先知道表头的参数才能进行,表头的参数是指表头灵敏度和表头内阻。

表头灵敏度是指表头的满偏电流,即表头的电流量程,用 I_g 表示, I_g 的范围一般在几十微安到几百毫安之间。因为游丝很细,允许通过的电流很小。表头内阻是两个游丝的直流电阻与线圈的直流电阻之和,用 R_g 表示。

2. 磁电系电流表

由于磁电系测量机构的指针偏转角与通过线圈的电流成正比,因此,它可以用来测量电流。当被测电流不超过表头灵敏度时,可以用表头直接测量;当被测电流超过表头灵敏度时,可以在表头两端并联一个分流电阻。此时测量的电流只是被测电流的一部分,流过表头的电流为

$$I' = \frac{R_s}{R_s + R_g} I$$

确定 R_s 以后,流过表头的电流与被测电流成比例关系。如果在表头的刻度尺上按照满量程为 I 刻度,则成为一只量程为 I 的单量程电流表如图 2-5 所示。

一般情况下,电流表都设计成多量程的,以提高表头的利用率。多量程电流表采用闭路式结构,图 2-6 所示为一个闭路式三量程电流表的电路。

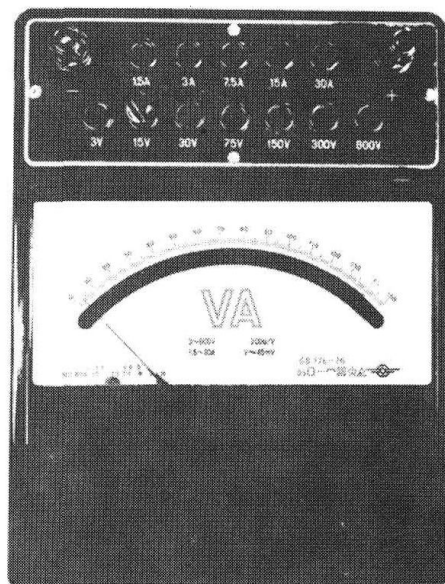


图 2-4 C31 型磁电系电压/电流表

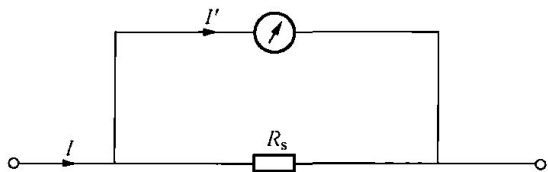


图 2-5 单量程电流表电路

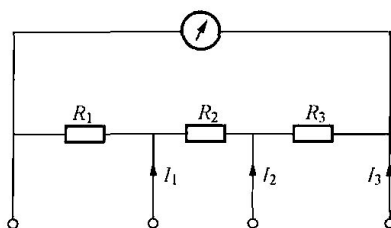


图 2-6 闭路式三量程电流表电路

当量程为 I_3 时, 分流电阻为 $R_1 + R_2 + R_3$, 如果把 $R_1 + R_2 + R_3$ 看成一个电阻, 这与单量程电流表一样, 根据

$$R_1 + R_2 + R_3 = \frac{I_g R_g}{I_3 - I_g} \quad (2-8)$$

可以求出 $R_1 + R_2 + R_3$; 当量程为 I_2 时, 分流电阻为 $R_1 + R_2$, 此时 R_3 与表头串联, 根据

$$R_1 + R_2 = \frac{I_g (R_g + R_3)}{I_2 - I_g} \quad (2-9)$$

可以求出 $R_1 + R_2$, 即可求出 R_3 ; 当量程为 I_1 时, 分流电阻为 R_1 , 此时 $R_2 + R_3$ 与表头串联, 根据

$$R_1 = \frac{I_g (R_g + R_3 + R_2)}{I_1 - I_g} \quad (2-10)$$

可以求出 R_1 , 再根据式 (2-9) 可以求出 R_2 。

使用磁电系电流表应注意的事项如下。

- (1) 电流表必须串入电路中。
- (2) 注意电流表的极性, 要求电流从电流表的“+”端流入, 从“-”端流出。
- (3) 正确选择仪表的量程, 测量时尽量使指针在半偏以上。
- (4) 选择内阻合适的仪表, 希望电流表内阻越小越好。
- (5) 不可使用磁电系电流表去测量电压, 以免过大电流烧坏表头。

3. 磁电系电压表

当在表头两端施加电压时, 将有电流流过表头, 指针的偏转角与流过表头的电流成正比, 由于表头的内阻是不变的, 因此, 指针的偏转角也与表头两端的电压成正比。如果将表头的标度尺按照电压单位刻度, 就成为电压表。表头两端能够承受的电压很小, 当被测电压超过表头两端能够承受的电压时, 需要用分压电阻与表头串联来扩大量程, 如图 2-7 所示。分压电阻可根据

$$R_m = \frac{U}{I_g} - R_g \quad (2-11)$$

确定。

电压表一般也设计成多量程, 采用多个电阻与表头串联, 再从电阻与电阻之间引出抽头。图 2-8 所示为一个三量程电压表的电路, 在确定电压量程以后, 分压电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 可根据

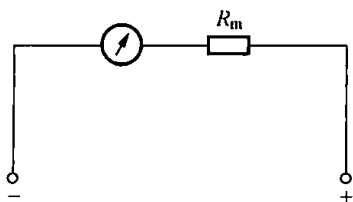


图 2-7 单量程电压表电路

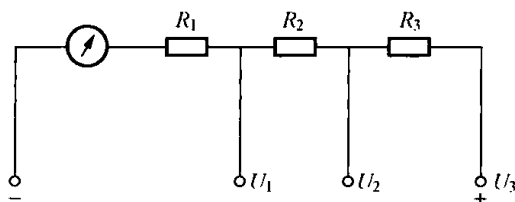


图 2-8 三量程电压表电路

$$R_1 = \frac{U_1}{I_g} - R_g; R_2 = \frac{U_2 - U_1}{I_g}; R_3 = \frac{U_3 - U_2}{I_g}$$

确定。

多量程电压表的内阻通常用电压灵敏度 S_U 表示, S_U 是电压表任一量程的内阻与该量程

电压的比值, 单位是 Ω/V 。因为

$$I_g = \frac{U_1}{R_1 + R_g} = \frac{U_2}{R_1 + R_2 + R_g} = \frac{U_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_g}$$

是常数, 所以

$$S_U = \frac{R_1 + R_g}{U_1} = \frac{R_1 + R_2 + R_g}{U_2} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_g}{U_3} \quad (2-12)$$

也是常数。

多量程电压表某一量程内阻的阻值等于该量程与电压灵敏度的乘积。

使用磁电系电压表应注意的事项如下。

- (1) 电压表必须并入电路中。
- (2) 注意电压表的极性, 要求电压表“+”端接高电位, “-”端接低电位。
- (3) 正确选择仪表的量程, 测量时尽量使指针在半偏以上。
- (4) 选择内阻合适的仪表, 希望电压表内阻越大越好。

磁电系仪表指针偏转方向与线圈中电流方向有关, 当电流反向时, 指针也反向偏转, 即磁电系仪表有极性。刻度线的零点在一端时, 指针是不许反向偏转的, 因此不能用磁电系仪表直接测交流信号。

4. 磁电系检流计

磁电系检流计是一种灵敏度很高的仪表, 常用来检测电路中有无电流通过, 例如在直流电桥和直流电位差计中作为指零仪。

磁电系检流计的结构分为指针式和光标式两种, 以光标式为例, 其结构如图 2-9 所示。为了提高检流计的灵敏度, 在结构上采取了一系列的措施。

(1) 用张丝或吊丝取代游丝, 将可动线圈悬挂起来, 可以减小反作用力矩, 消除摩擦力矩, 同时使可动部分双向偏转。

(2) 采用无铝框可动线圈, 减轻可动部分的重量。检流计的阻尼力矩可通过调节外电路的电阻来满足要求。

(3) 采用光点多次反射, 增加单位偏转角在标尺上的位移长度。

(4) 增大可动线圈面积、减小气隙。

使用检流计应注意的事项如下。

- (1) 要求水平放置的检流计, 使用前应调好水平, 校准零点。
- (2) 检流计的标尺不是用电流标度, 而是按指针末端的线位移标度, 单位为 mm。
- (3) 选择合适的灵敏度。若灵敏度太高, 由于平衡困难而延长测量时间; 若灵敏度太低, 可能达不到应有的测量准确度。如果没有适当外临界电阻的检流计, 则应接入分流器或附加电阻以相匹配。
- (4) 不允许用欧姆表或电桥测量检流计的内阻, 否则, 会因过电流而损坏检流计。
- (5) 用完检流计, 要用止动器锁定检流计的可动部分。
- (6) 搬动检流计时, 要注意轻拿轻放, 避免振断张丝。

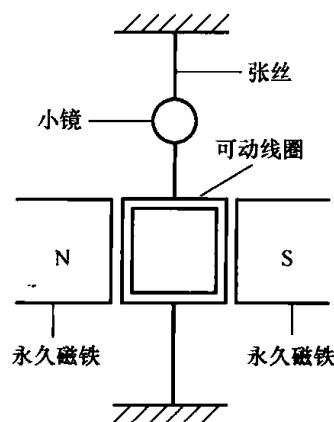


图 2-9 磁电系检流计结构

二、欧姆表

1. 欧姆表的工作原理

欧姆表由磁电系表头、电池和附加电阻构成,如图 2-10 所示。由于磁电系测量机构指针的偏转角与通过的电流 I 成正比,当接入被测电阻 R_x 时,流过表头的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R_x} \quad (2-13)$$

$$R_0 = R_m + R_g$$

式中: R_0 是欧姆表的内阻。

可见,当电源电压保持不变时,对于不同的 R_x ,流过表头的电流不同,对应指针的偏转角也不同,用电阻值标刻度就可以用来直接测量电阻。由式 (2-13) 可见, I 与 R_x 不是线性关系,电阻标尺和电流标尺的方向相反,而且电阻标尺的刻度是不均匀的,如图 2-11 所示。

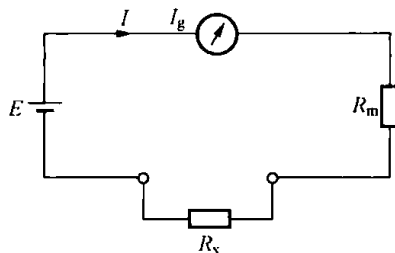


图 2-10 欧姆表的电路

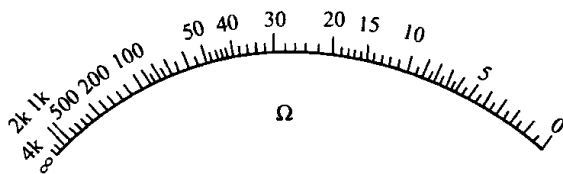


图 2-11 欧姆表电阻标尺

2. 使用欧姆表的注意事项

(1) 每次测量和切换量程之前都必须调零。这是由于电池使用时间越久,其端电压就越低,当 $R_x=0$ 时,表头的指针就不可能再达到满刻度偏转,如果此时用欧姆表测量电阻,将会给测量结果带来误差。通过调节表头两端并联的可调电阻使指针达到满偏,即欧姆标尺的零位。

(2) 注意被测对象。欧姆表不能直接测带电的电阻,不能直接测量磁电系仪表表头内阻。判断晶体管的极性和测量电解电容的漏电流等,应注意万用表“正”、“负”表笔与各管脚的正确连接。测量晶体管时应选用 $\times 100$ 或 $\times 1k$ 挡,其“正”表笔与内部电池的负极相接,其“负”表笔与内部电池的正极相接。

(3) 测量阻值较高的电阻时,手不得同时接触表笔的金属部分。

(4) 测量网络中的电阻时,要断开电阻一端,如果不允许断开电阻一端,应采用其他方法进行测量。

(5) 测量电阻时,应尽量使指针偏转在标尺的 $20\% \sim 80\%$ 范围内,以提高测量的准确度。欧姆表的误差特性与电压表、电流表的误差特性不同,电压表和电流表的误差特性是指针越接近标尺的 0 刻度端误差越大,指针越接近满量程误差越小;而欧姆表的误差特性是指针越接近标尺的正中间误差越小,指针越接近标尺两端误差越大。当指针接近标尺的 ∞ 时,虽然被测量很大,由于刻度很稀,读数绝对误差更大,测量结果的误差也就更大。

三、整流系仪表

磁电系仪表只能用来测量直流电压或电流,如果用磁电系仪表测量交流电流或电压,就必须增加把交流变为直流的电路,即整流电路。整流电路通常由二极管组成,利用二极管加正向电压导通、加反向电压截止的特性,可以把交流变为直流,然后再通过磁电系表头,从而实现对交流电压或电流的测量。

1. 整流电路

(1) 半波整流电路。图 2-12 所示为半波整流电路原理图，VD1 和 VD2 是两个二极管， u 为正弦交流电压。在 u 的正半周，VD1 导通，VD2 截止，有电流 i 流过表头；在 u 的负半周，VD1 截止，VD2 导通，表头中没有电流流过。因此，通过表头的电流 i 是一个只有大小变化而没有方向变化的脉动直流，如图 2-13 所示。

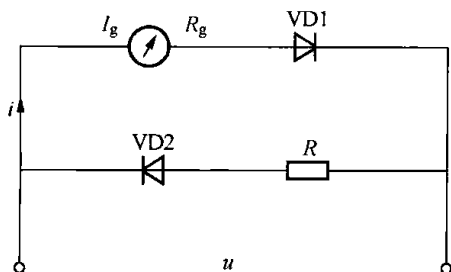


图 2-12 半波整流电路原理图

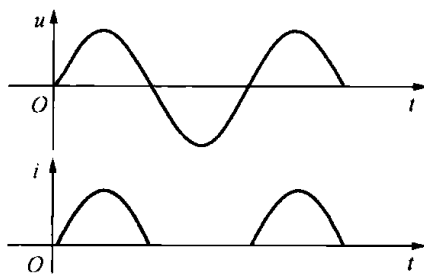


图 2-13 半波整流电路中的电流波形

在半波整流电路中，真正起作用的是 VD1，但 VD2 不能省去，VD2 对 VD1 起反向保护作用。如果没有 VD2，则在 u 的负半周时 VD1 截止，相当于开路，外加电压几乎全部加到 VD1 上，可能将 VD1 击穿。电路中的 R 取值应与 R_g 接近，以保证外加电压在正、负半周都有接近相等的负载。

(2) 全波整流电路。图 2-14 所示为全波整流电路，它由四个二极管组成一个桥式整流电路。在外加电压 u 的正半周，VD1 和 VD3 导通，VD2 和 VD4 截止，有电流流过表头；在 u 的负半周，VD2 和 VD4 导通，VD1 和 VD3 截止，也有电流流过表头，而且，正、负半周流过表头的电流方向一致，流过表头的电流也是一个只有大小变化而没有方向变化的脉动直流，如图 2-15 所示。

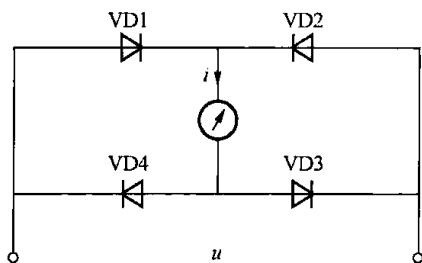


图 2-14 全波整流电路

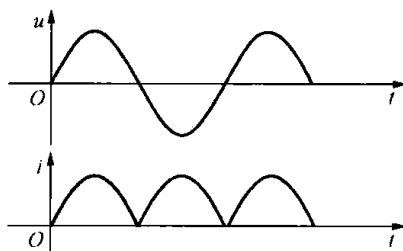


图 2-15 全波整流电路中的电流波形

2. 整流系仪表工作原理

将整流电路与磁电系表头相连，就构成了整流系仪表。经过半波整流或全波整流电路，流过表头的电流变换为脉动直流电流。由于磁电系表头可动部分的惯性，只能反映脉动电流的平均值，因此，指针的偏转角与通过表头电流的平均值成正比，即

$$\alpha = KI_{av} \quad (2-14)$$

在工程测量中，一般都有效值表示交流量的大小，所以整流系仪表都按正弦量的有效值刻度。对一正弦电流

$$i = \sqrt{2}I\sin\omega t$$

在全波整流系仪表中， i 经整流后的平均值为

$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |\sqrt{2}I\sin\omega t| dt \approx 0.9I \quad (2-15)$$

则

$$I \approx 1.11 I_{av}$$

式中：1.11 是正弦电流的有效值与整流后的平均值之比，称为波形因数。

同理，在半波整流系仪表中，有

$$I'_{av} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sqrt{2} I \sin \omega t dt \approx 0.45 I \quad (2-16)$$

得

$$I \approx 2.22 I'_{av}$$

因此，对于全波整流系仪表在刻度为 0.9 处标成 1，即在刻度 1 处标成 1.11，则指示机构的示值即为正弦量的有效值。

如果用整流系仪表测量非正弦量，这时非正弦量的有效值与整流后的平均值不满足式 (2-15) 和式 (2-16)，即波形因数与正弦量不同，这时将产生波形误差，但是，如果将读数除以正弦量的波形因数，所得的非正弦量整流后的平均值是正确的。所以，也可以用整流系仪表测量非正弦量整流后的平均值。

3. 整流系表的技术特性

- (1) 灵敏度高，由于采用磁电系表头，因此保留了磁电系仪表灵敏度高的优点；
- (2) 准确度低，主要是由于元件不理想以及其特性受环境温度的影响，最高为 1.0 级；
- (3) 只能测量正弦量，测量非正弦量时将产生波形误差；
- (4) 适应最高频率为 10kHz，由于整流元件存在分布电容，限制了被测量的频率范围；
- (5) 整流元件的串入增加了仪表的内阻，所以一般多做成电压表；
- (6) 最小量程单独使用一条标尺，由于整流元件的不理想，在测量较低电压时，整流元件的压降将起明显的作用而不能忽略，所以，一般 10V 以下的量程都单独用一条标尺。

四、万用表

将测量直流电压、直流电流、交流电压、交流电流和电阻等功能组合在一起，可以制成万用表。图 2-16 所示为万用表的简化电路。切换开关、二极管、电池和附加电阻组成测量线路，先将各种被测量转换成直流电流，然后通过磁电系表头建立起被测量与指针偏转角的对应关系，根据指针位置变化即可获得被测量的大小。500 型万用表的外形图如图 2-17 所示。

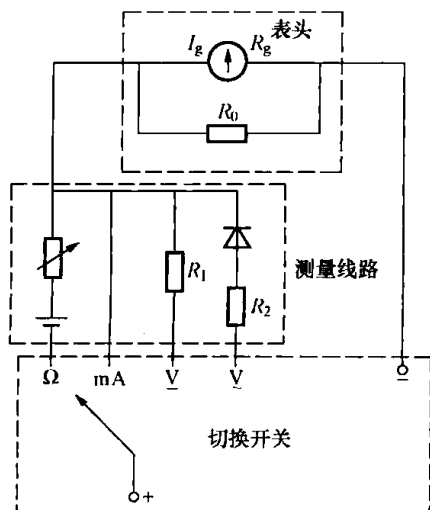


图 2-16 万用表的简化电路

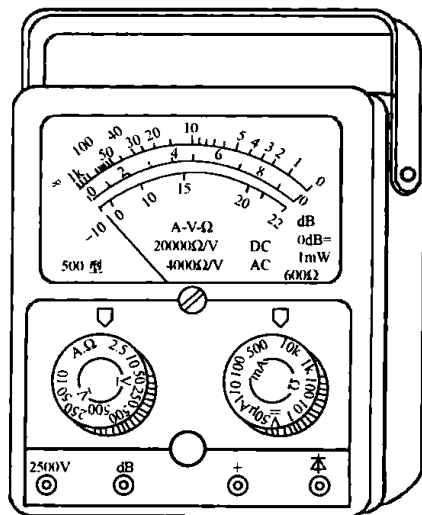


图 2-17 500 型万用表的外形图

五、电磁系仪表

整流系仪表虽然可以测量交流电压和电流，但该表价格高，过载能力差，测非正弦量有较大的波形误差，因此不宜大量使用。而电磁系仪表具有价格低、坚固耐用、过载能力强等优点，是测量交流电压和电流的常用仪表之一。

1. 电磁系测量机构

电磁系测量机构是利用磁化后的铁片吸引或排斥的原理而构成的，利用吸引作用构成的称为吸引型，如图 2-18 所示；利用排斥作用构成的称为排斥型，如图 2-19 所示。

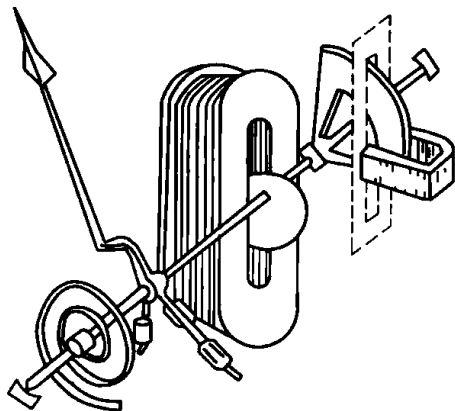


图 2-18 吸引型测量机构

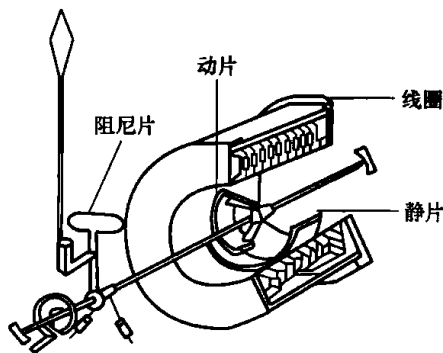


图 2-19 排斥型测量机构

对于吸引型的结构，可动部分有转轴、偏心铁片、指针、阻尼片、游丝、平衡锤等；固定部分有线圈、刻度盘、永久磁铁等。当线圈中通过电流时，线圈内产生磁场，使偏心铁片磁化，磁场吸引铁片进入线圈的缝隙中，于是在转轴上产生一个转动力矩，带动指针偏转。当线圈中电流的方向改变时，磁场方向改变，铁片被磁化的方向也同时改变，磁场对铁片仍是吸引，所以这种仪表既可测量直流也可测量交流。

排斥型结构有两块铁片，一块装在线圈的内壁（称为静片），另一块装在转轴上（称为动片），其余的和吸引型相同。当线圈中通过电流时，两块铁片同时被磁化，而且磁化的方向相同，根据同性相斥的原理，使动片受到静片的斥力而发生偏转。当线圈中的电流方向改变时，线圈的磁场方向改变，两铁片被磁化的极性也同时改变，它们仍然是互相排斥，所以这种仪表也是既可测量直流又可测量交流。

2. 电磁系仪表的工作原理

无论是哪种结构的电磁系仪表，都是由通过线圈的电流产生磁场，使处于磁场中的铁片被磁化，由磁场和磁场相互作用而产生力矩，因而它们的工作原理是相同的，下面以吸引型电磁系仪表为例来说明其工作原理。

(1) 转动力矩。根据能量的平衡关系，铁片偏转时所做的机械功等于磁场能量的变化量，设线圈的电感为 L ，当线圈中通入交流电流 i 时，线圈中的平均转动力矩为

$$M = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} \quad (2-17)$$

式中： I 是电流 i 的有效值； dL 是铁片偏转过程中线圈电感的变化量； $d\alpha$ 是铁片偏转角变量。 $\frac{dL}{d\alpha}$ 可以近似认为是常数，所以，平均转动力矩可以表示为

$$M = kI^2$$

(2) 反作用力矩。电磁系仪表的反作用力矩与磁电系仪表相同，也是用游丝来产生的，有

$$M_{\alpha} = W_{\alpha}$$

当转动力矩与反作用力矩相等时，指针稳定在平衡点，则

$$kI^2 = W_{\alpha}$$

整理得

$$\alpha = \frac{k}{W} I^2 = KI^2 \quad (2-18)$$

可见，电磁系仪表指针的偏转角与通过线圈电流有效值的平方成正比。

在工程测量中，一般需要测出被测量的有效值，如果用电磁系仪表测出有效值，再进行开方运算，显然太麻烦。实际的电磁系仪表是把开方运算放在刻度中完成，这样就可直接读出被测量的有效值，因此，电磁系仪表的刻度不均匀。T51 型电磁系电压表如图 2-20 所示。

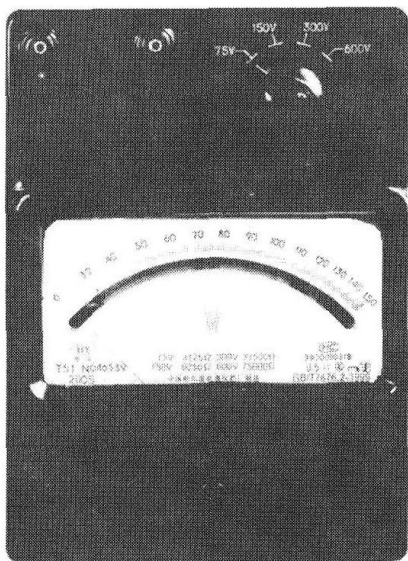


图 2-20 T51 型电磁系电压表

电磁系仪表可以测量正弦量的有效值，也可以测量非正弦量的有效值。

(3) 阻尼力矩。电磁系仪表的阻尼力矩由两种形式的阻尼器产生：一种是空气阻尼器，如图 2-21 所示；另一种是电磁阻尼器，如图 2-22 所示。

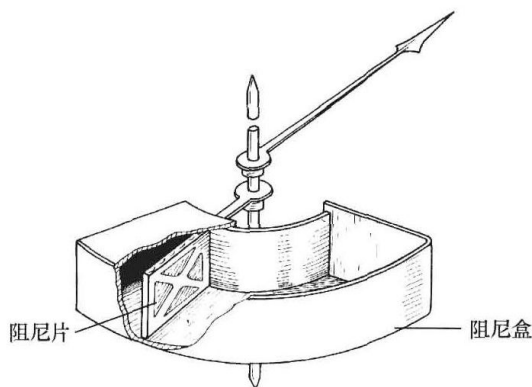


图 2-21 空气阻尼器

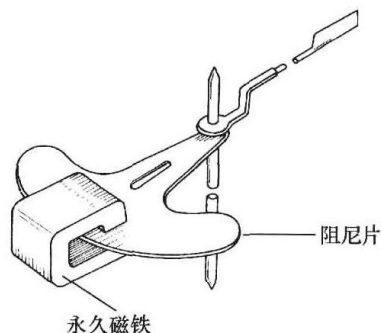


图 2-22 电磁阻尼器

空气阻尼器是由两个固定在转轴上的阻尼片（薄铝片）装在封闭的两个扇形小盒内构成的，当指针偏转时，阻尼片在盒内运动压缩空气受到阻力，从而限制了指针偏转的速度。电磁阻尼器是利用装在转轴上的阻尼片（铝片）在永久磁铁的气隙内运动时，在阻尼片中产生涡流与磁场相互作用，从而产生阻尼力矩。

3. 电磁系仪表的技术特性

- (1) 结构简单，价格低廉。
- (2) 准确度低，最高为 0.5 级。
- (3) 灵敏度低，因为线圈需要足够的电流来产生磁场。
- (4) 交直流两用。
- (5) 刻度不均匀。
- (6) 频率误差大，主要用于工频测量。
- (7) 由于本身磁场较弱，抗干扰能力差。

- (8) 内部功耗较大。
- (9) 因为它的可动部分不通过电流，所以过载能力强，这是它最大的优点。

4. 电磁系电流表

由于电磁系仪表指针的偏转角与通过线圈电流有效值的平方成正比，所以，可以把它做成电流表。为了使线圈有足够的磁场，一般需要有 200~300 安匝的磁通势。测量小电流时，需用细线绕较多的匝数；测量大电流时，需用粗线绕较少的匝数，导线过粗，加工很困难。因此，不宜直接用电磁系电流表测量太大的电流，测大电流时，应采用电流互感器转变为小电流（5A 以下）再进行测量。

多量程电磁系电流表不能采用在测量机构并联电阻的方法来改变量程，因为电阻的分流与总电流不满足线性关系，一般是将固定线圈分段，利用各段线圈的串联或并联来改变电流量程。例如，双量程的电流表是把线圈分成两段，假设每段线圈的额定电流为 I ，当两段线圈串联时电流表的量程为 I ，当两段线圈并联时电流表的量程为 $2I$ 。

5. 电磁系电压表

电磁系电压表是在固定线圈上串联附加电阻构成的，由于线圈内必须有足够的电流才能产生所需的磁场，附加电阻不能太大，因此电磁系电压表内阻较低。

电磁系电压表指针偏转角与被测电压的关系为

$$\alpha = KU^2 \tag{2-19}$$

电磁系电压表只能在设计规定的频率下使用。这是因为电压表的读数也将随频率而改变，特别是低量程电压表，受频率的影响更大。

多量程电压表可以采用多个电阻与线圈串联再从电阻之间引出抽头的方法来改变量程，也可以采用先将线圈分段串联或并联后再与电阻串联的方法来改变量程。

六、电动系仪表

1. 电动系测量机构

电动系仪表有固定和可动两个线圈，简称定圈和动圈。定圈也叫电流线圈，用来产生磁场，定圈不带铁心的电动系仪表的结构如图 2-23 所示。定圈分成两段，在两段线圈的气隙内产生比较均匀的磁场。动圈也叫电压线圈，作用和电磁系仪表线圈的作用相同，处在定圈的气隙的磁场内并固定在转轴上，转轴上装有指针和游丝，如图 2-24 所示。另外还有空气阻尼器、标度尺等。

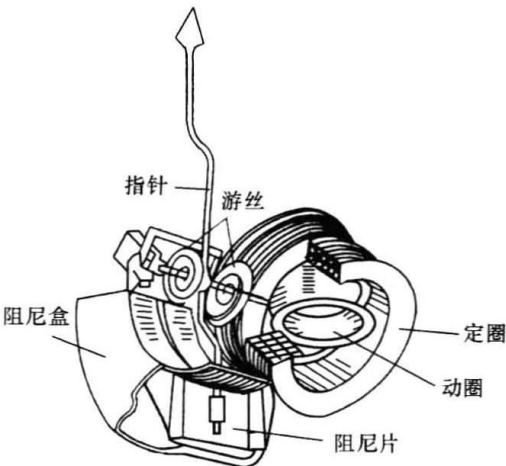


图 2-23 电动系仪表的结构

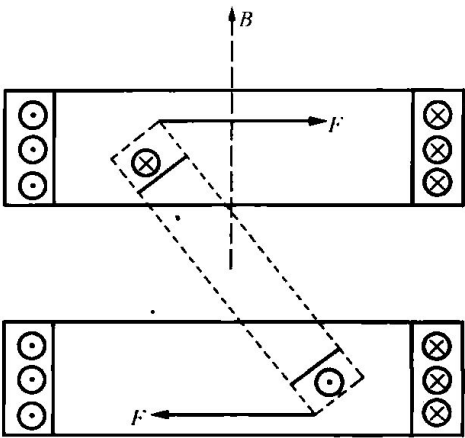


图 2-24 定圈和动圈

设通过定圈的电流为 i_1 ，通过动圈的电流为 i_2 ，则定圈中产生的磁感应强度为

$$B = k_1 i_1$$

动圈在定圈磁场中，受力及转矩分析与电磁系测量机构相类似。由于可动部分的惯性，指针偏转角与通过两线圈电流有效值及两电流相位差的余弦三者乘积成正比，即

$$\alpha = KI_1 I_2 \cos \varphi \quad (2-20)$$

因此可以制成测量交流量的电流表和电压表，除此之外最主要的是制成功率表（瓦特表）。

2. 电动系仪表的技术特性

- (1) 准确度高，最高为 0.1 级。
- (2) 灵敏度低，由于被测量太小，在电流线圈中不能产生足够的磁场。
- (3) 交直流两用。
- (4) 电流表和电压表刻度不均匀。
- (5) 适应最高频率为 2kHz。
- (6) 过载能力差。
- (7) 功耗大。

3. 电动系功率表

电动系功率表是将电流线圈（定圈）和电压线圈（动圈）做成两个独立回路，如图 2-25

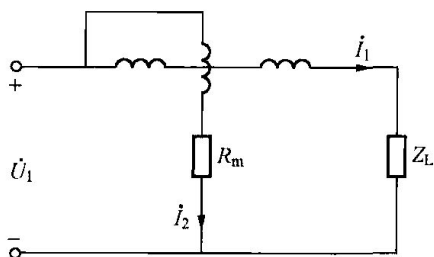


图 2-25 电动系功率表的电路

所示，图中的 R_m 是一个大电阻串联在电压线圈中， Z_L 是被测负载。从图 2-25 中可以看出，流过电流线圈的电流即流过负载的电流，即

$$I_1 = I \quad (2-21)$$

由于 R_m 很大，可忽略电压线圈的感抗，则通过电压线圈的电流为

$$I_2 = \frac{U}{R_m} \quad (2-22)$$

根据

$$\alpha = KI_1 I_2 \cos \varphi$$

得

$$\alpha = K \frac{U}{R_m} I \cos \varphi = K_P UI \cos \varphi \quad (2-23)$$

式中： φ 是 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 的相位差角； $K_P = \frac{K}{R_m}$ 。

由于 R_m 远大于动圈的感抗，可以认为 $\dot{I}_2$ 和 $\dot{U}$ 同相位，则 φ 就是 $\dot{I}$ 和 $\dot{U}$ 的相位差角，即负载的功率因数角，故式 (2-23) 可以写成

$$\alpha = K_P P \quad (2-24)$$

由此可见，指针的偏转角与负载消耗的有功功率成正比，若按有功功率刻度，即成为功率表。电动系功率表可以测量直流功率，也可以测量交流功率，且刻度均匀。D72-W 型功率表如图 2-26 所示。

4. 功率表的接线

测量负载消耗的有功功率，必须保证通过电流线圈

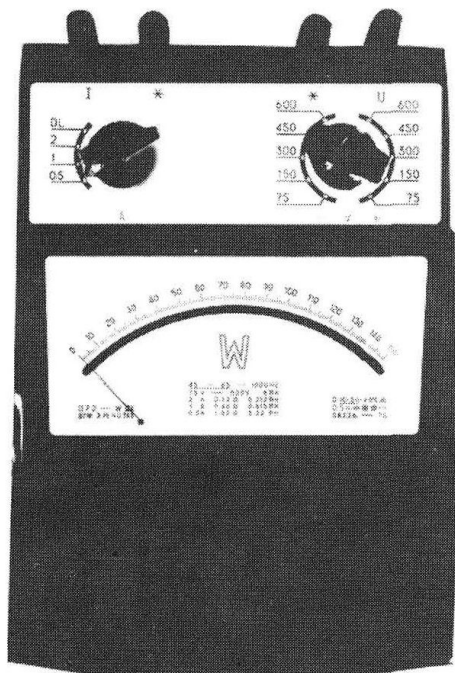


图 2-26 D72-W 型功率表

的电流等于通过负载的电流；电压线圈与 R_m 串联电路两端的电压等于或基本上等于负载两端的电压。电流线圈和电压线圈都有两个端子，两对端子中都有一个标有 * 或 ± 的符号，带有该符号的端子称为同名端，使用时不得接错。图 2-27 所示的接线方式称为电压线圈（动圈）前接，适用于负载电阻远大于电流线圈的电阻；图 2-28 所示的接线方式称为电压线圈（动圈）后接，适用于负载电阻远小于电压线圈支路的电阻。

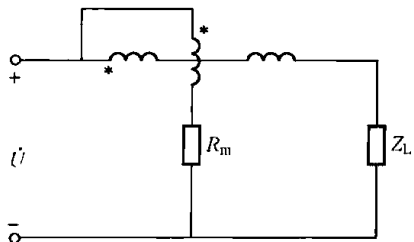


图 2-27 电压线圈前接

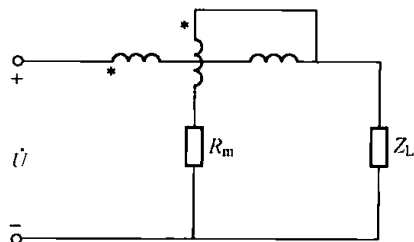


图 2-28 电压线圈后接

改变电动系功率表的量程是通过改变电流量程或电压量程来实现的，改变电流量程与电动系电流表改变量程的方法相同，改变电压量程与电动系电压表改变量程的方法相同。

5. 功率表的读数

功率表的读数不像电流表和电压表的读数那样简单，它的标度尺只标有格数而不标瓦数，因此，必须把格数换算成瓦数才能得到正确的读数。功率表的读数为

$$P = \frac{U_N I_N}{D_m} D \quad (2-25)$$

式中： U_N 为功率表的电压量程； I_N 为电流量程； D_m 为满偏格数； D 为指针偏转的格数。

实际测量功率时，不但要求功率值不能超过功率表的量程，而且，要求电流和电压也不能超过各自的量程。在测量过程中，当负载的功率因数较低时，容易出现电流或电压超过量程而功率不超量程的情况，因此，必须使用电流表和电压表监视电流和电压。

第三节 比较式仪表

比较式测量仪表是将被测量与标准量直接相互比较，从而得到测量结果，一般可分为补偿法和电桥法两大类。

一、电位差计

电位差计是根据电压补偿原理制成的。电压补偿就是把一个未知固定电压 U_x 与一个已知可变标准电压 U_N 进行比较，当 U_N 变化到与 U_x 相等时，就认为 U_N 完全补偿了 U_x 。由于补偿方式不同，直流电位差计又分为定流式和定阻式。

1. 直流电位差计的工作原理

下面以定流式为例来说明直流电位差计的工作原理。图 2-29 所示为一个定流式直流电位差计的电路，该电路包括三个回路，回路①用来产生工作电流；回路②用来校准工作电流；回路③用来测量

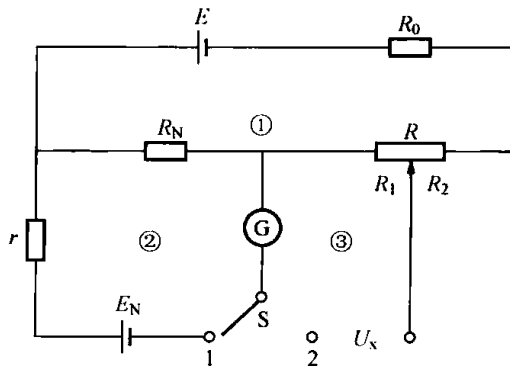


图 2-29 定流式直流电位差计的电路
 R_N —标准电阻； E_N —标准电池； r —限流电阻；
 R —标准电阻箱； U_x —被测电压

电压。

首先校准工作电流，将开关 S 合向“1”，调节 R_0 使检流计指向零点，此时， R_N 两端的电压与标准电池的电动势相等，有

$$I = \frac{E_N}{R_N} \quad (2-26)$$

然后将开关 S 合向“2”，调节 R 使检流计指向零点，此时， R_1 两端的电压等于被测电压 U_x ，即

$$U_x = IR_1 = \frac{E_N}{R_N} R_1 \quad (2-27)$$

R_N 取值一般为 E_N 的 n 倍， $n=10, 100, 1000, \dots$ ，例如 $E_N=1.018\text{V}$ ， R_N 取 1018Ω ，则

$$I = \frac{1.018}{1018} = 1\text{mA}$$

R_1 可以在 R 的刻度盘上直接读出，即可得出被测电压 U_x 的值。

直流电位差计准确度高，但是量程低，一般不超过 2V 。测量电路中的电压时，不从被测电路吸收能量，其相当于内阻无穷大的电压表。

2. 使用直流电位差计应注意的问题

(1) 选择灵敏度合适的检流计，以满足测量的需要，灵敏度过低将产生较大误差，灵敏度过高电位差计难以达到平衡。

(2) 选择电压足够稳定的工作电源，否则会因工作电流不稳定而产生误差。

(3) 注意标准电池、工作电源和被测电压的极性不能接错。

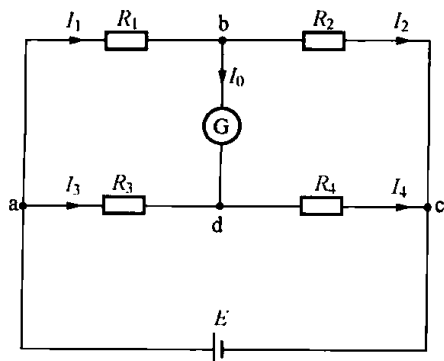
(4) 校准工作电流时，要避免长时间给标准电池充放电，以免损坏标准电池。

(5) 按照说明书要求的温度和湿度条件保存和使用。

二、直流电桥

直流电桥是一种用来直接测量电阻的比较式仪表，它的测量原理是通过被测电阻与标准电阻直接比较而得到被测结果。直流电桥又分为直流单电桥和直流双电桥，直流单电桥适用于测量中值电阻，直流双电桥适用于测量低值电阻。

图 2-30 所示为直流单电桥的原理电路，四个电阻支路称为桥臂，所以也叫四臂电桥。测量时把被测电阻作为一个桥臂，其他三个电阻为已知标准电阻；G 是指零仪，一般采用检流计，它的作用是检测 b、d 支路的电流是否等于零，即 b、d 两点是否等电位。当流过检流计的电流为零时，称电桥达到了平衡。



1. 电桥的平衡条件

在图 2-30 中，当电桥达到平衡时，b、d 两点等电位，即 $I_0=0$ ，则

$$I_1 R_1 = I_3 R_3$$

$$I_2 R_2 = I_4 R_4$$

两式相比，得

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_3}{I_4 R_4}$$

因 $I_1=I_2$ ， $I_3=I_4$ ，故

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2-28)$$

图 2-30 直流单电桥的原理电路

即为电桥的平衡条件，也可以写成

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (2-29)$$

可见，电桥的平衡条件与电源电压无关。

在实际的直流单电桥中，一般总是把一个臂的电阻做成均匀可变的，这个臂叫做比较臂；把另外两个臂做成电阻的比值能跳跃变化的，这两个臂叫做比例臂，比例臂的比值叫做倍率。例如对于图 2-30 所示的电桥，假设 R_4 为被测电阻，可以把 $\frac{R_2}{R_1}$ 作为比例臂的倍率， R_3 作为比较臂；或把 $\frac{R_3}{R_1}$ 作为比例臂的倍率， R_2 作为比较臂。实际测量时，被测电阻的阻值等于比例臂的倍率与比较臂阻值的乘积。

2. 单电桥的使用及注意事项

(1) 电桥放平，打开检流计锁扣，校正检流计零点。

(2) 将被测电阻接在 R_x 接线端钮上（有些电桥将两个接线端钮标为 X1, X2）。

(3) 选择合适的比例臂倍率。较小的电阻选择较小的比例臂倍率，较大的电阻选择较大的比例臂倍率，使比较臂各挡电阻能够充分利用，以获得较准确的测量结果。

(4) 调节平衡。选择好倍率后，先接通电源，再接通检流计，慢慢调节比较臂，最终使检测计的指针（或光标）指向零，则电桥达到了平衡。

(5) 电桥达到平衡后，即可读数。被测电阻 = 比例臂倍率 × 比较臂阻值。

(6) 在被测电阻未接入时，电桥处于极不平衡状态，禁止接电源和检流计，因为此时流过检流计的电流非常大，会损坏检流计。

(7) 注意被测对象，如不能测量带电的电阻，不能直接测量磁电系表头内阻等。

(8) 用单电桥测较小的电阻时，应尽量降低电源电压，并且只允许在短时间内接通电源，以免导致桥臂过流。

(9) 电桥用毕，用锁扣将检流计的可动部分锁定，以防震动损坏检流计。

用单电桥测量低值电阻时，由于接触电阻和引线电阻的影响，将给测量结果带来较大误差。

双电桥在单电桥的基础上增加了两个支路（两个臂），对接触电阻和引线电阻采取了排除、覆没和按比例分配等处理措施，适合测量低值电阻。

三、交流电桥

交流电路中的参数主要有电阻、电容、电感和互感。由于存在趋肤效应和临近效应，在测量交流电路中的电阻时，不能照搬直流电阻的测量方法。交流电桥广泛地被用来测量交流等效电阻、电容、电感和互感，以及表示介质损耗的 $\tan\delta$ 等。

1. 交流电桥的平衡条件

常用的交流电桥电路与直流单电桥具有相同的形式，但是它各臂上的元件不限于电阻，而是单一的 R 、 L 、 C 、 M 或它们的组合，并采用交流电源和交流指零仪。

单频正弦交流供电稳态情况下的四臂交流电桥的一般形式如图 2-31 所示，图中小写的 u 表示交流电压的瞬时值，“+”、“-”表示电压的正方向（参考方向），

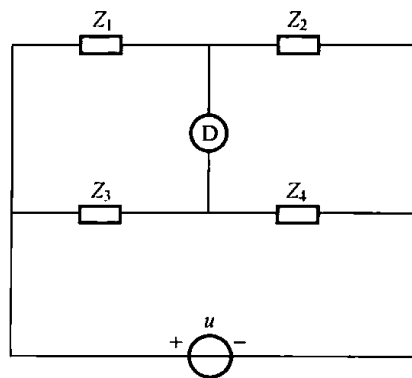


图 2-31 四臂交流电桥的一般形式

当 u 为正时, 电源的十端比一端电位高。 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 是复阻抗, 可以表示为

$$Z_i = R_i + jX_i = z_i \angle \varphi_i \quad (2-30)$$

其中

$$z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \quad (2-31)$$

$$\varphi_i = \arctan \frac{X_i}{R_i} \quad (2-32)$$

式中, $i=1, 2, 3, 4$ 。

类似求直流单电桥的平衡条件, 有

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

则

$$z_1 z_4 \angle (\varphi_1 + \varphi_4) = z_2 z_3 \angle (\varphi_2 + \varphi_3)$$

两个复数相等, 它们的模和辐角必须分别相等, 可得

$$z_1 z_4 = z_2 z_3 \quad (2-33)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (2-34)$$

即为交流电桥的平衡条件。

式 (2-33)、式 (2-34) 也可以根据

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{Z_4}{Z_3}$$

写成

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{z_4}{z_3} \quad (2-35)$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_4 - \varphi_3 \quad (2-36)$$

说明:

(1) 因为交流电桥的平衡条件由两个方程式构成, 因此测量时至少要调节两个变量, 电桥才能达到平衡。

(2) 任意配置桥臂参数, 电桥不一定能调到平衡。如果电桥只满足模的条件, 不满足幅角的条件, 电桥永远不能调到平衡, 只有两个条件同时满足时, 电桥才能达到平衡。

(3) 平衡条件与电源电压无关, 但可能与电源频率有关, 如果平衡条件与电源频率有关, 在其他参量为已知时, 该电桥可以用来测量电源的频率。一般希望平衡条件与电源频率无关, 这样可使平衡条件变得更简单。

2. 交流电桥桥臂结构

交流参数较多, 测量时被测参数接入四个臂中的一个桥臂。从交流电桥的实用角度考虑, 其他桥臂中两个桥臂采用接近理想的电阻和电容元件, 通过配置桥臂电阻电容串并联形式和位置的组合, 尽量使电桥平衡条件与电源频率无关, 并尽量使电桥电路较为简单。交流电桥可按被测对象不同进行分类, 也可以按平衡条件分类。平衡条件与桥臂阻抗配置有关, 由此可分为实积电桥、虚积电桥、实比电桥和虚比电桥四大类。

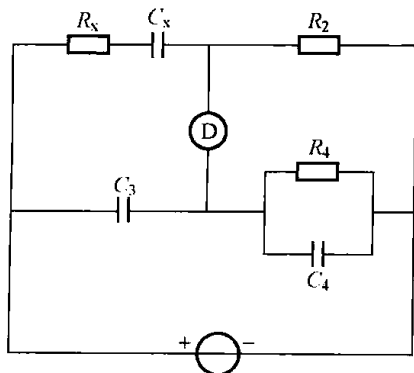


图 2-32 西林电桥

图 2-32 所示为一个虚积电桥, 该电桥称为西林

(Schering) 电桥, 它适用于测量高压电容。由于加到被测电容上的电压比较高, 为保证使用电桥的安全, 指零仪和可调元件臂上各点对地的电压不能太高, 西林电桥就是按这个要求设计的, 根据

$$\frac{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}{R_2} = \frac{\frac{1}{j\omega C_3}}{\frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}}$$

即

$$\frac{R_x}{R_2} + \frac{1}{j\omega C_x R_2} = \frac{C_4}{C_3} + \frac{1}{j\omega C_3 R_4} \quad (2-37)$$

等式两边实部和虚部分别相等, 可得其平衡条件

$$R_x = \frac{C_4}{C_3} R_2 \quad (2-38)$$

$$C_x = \frac{R_4}{R_2} C_3 \quad (2-39)$$

被测电容的损耗因数为

$$\tan\delta = \omega C_x R_x = \omega R_4 C_4 \quad (2-40)$$

该电桥的平衡条件与电源频率无关。如果把图 2-32 中的 C_4 和 R_4 改为串联的形式或把 R_x 和 C_x 改为并联, 则电桥的平衡条件与电源频率有关。

其他种类电桥可根据被测量配置桥臂元件及串并联形式, 由式 (2-33) 和式 (2-34) 给出的平衡条件一般形式, 计算出被测的交流参数。

第四节 数字测量和电子测量仪器

随着计算机和微电子技术发展, 实验室测量中越来越多地采用数字式仪表或电子测量仪器。与模拟式指针表相比, 数字仪表有很高的灵敏度和准确度, 显示清晰、直观, 性能稳定、过载能力强、便于携带, 并有量程切换和自身保护电路。

一、数字电压表

1. 工作原理

直流数字电压表 DVM (Digital Volt Meter) 采用数字化电压测量技术, 它可将仪表基本量程限度范围内的直流电压直接转换为数字量进行处理并显示电压测量结果。

数字电压表的原理框图如图 2-33 所示。输入电路主要有被测量经阻容滤波、衰减与放大、量程切换、阻抗变换、线性检波及自身保护等功能。经输入电路处理后的信号为直流电压, 该电压送入模数 (A/D) 转换器, 经过 A/D 转换后的数字量通过计数器计数, 在逻辑控制电路控制下转化为表示电压值的编码, 然后经译码及驱动后由发光二极管显示器 LED (Light Emitting Diode) 或液晶显示器 LCD (Light Crystal Display) 显示被测电压值。数字形式显示的结果只反映出本次采样周期内被测量的大小。

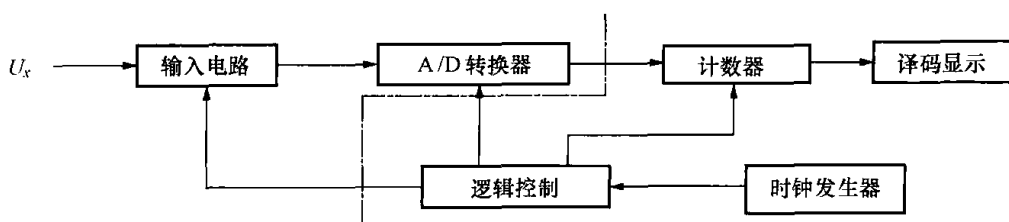


图 2-33 数字电压表的原理框图

2. 数字电压表的技术指标

(1) 测量范围。测量范围指标包括量程范围、显示位数和超量程能力。

(2) 分辨力与分辨率。分辨力是指相应量程挡下数字电压表显示器末位每变化一个字所对应的电压值变化量。分辨率是指数字电压表能够显示的最小非零数字（一般相当于一个字）与最大可显示数字的比值。

(3) 准确度。数字电压表的准确度由测量误差反映，主要来源于模拟测量电路转换误差和测量值的数字化处理误差。

数字电压表准确度量值是由基准电压精度和 A/D 转换器分辨率决定的数字化处理误差。

(4) 测量速率。测量速率反映数字电压表每秒钟可完成的电压测量次数。测量速率主要取决于 A/D 转换器的转换速率及所选择的仪表测量功能。

(5) 输入阻抗。数字电压表输入阻抗值大小反映出在测量过程中所体现的负载效应强弱，高输入阻抗有利于减少因负载效应而引起的系统误差，尤其是测量高阻信号源的输出电压情况下。数字电压表的输入阻抗通常可达到 $10\text{M}\Omega$ 以上，甚至可达吉欧数量级，其电压灵敏度可达 $(50\text{M}\Omega \sim 1\text{G}\Omega) / \text{V}$ 。

(6) 抗干扰能力。

二、数字万用表

在数字电压表的基础上再增加交流—直流 (AC/DC) 转换器、电流—电压 (I/U) 转换器和电阻—电压 (Ω/U) 转换器，就构成了数字万用表。数字万用表的原理框图如图 2-34 所示。

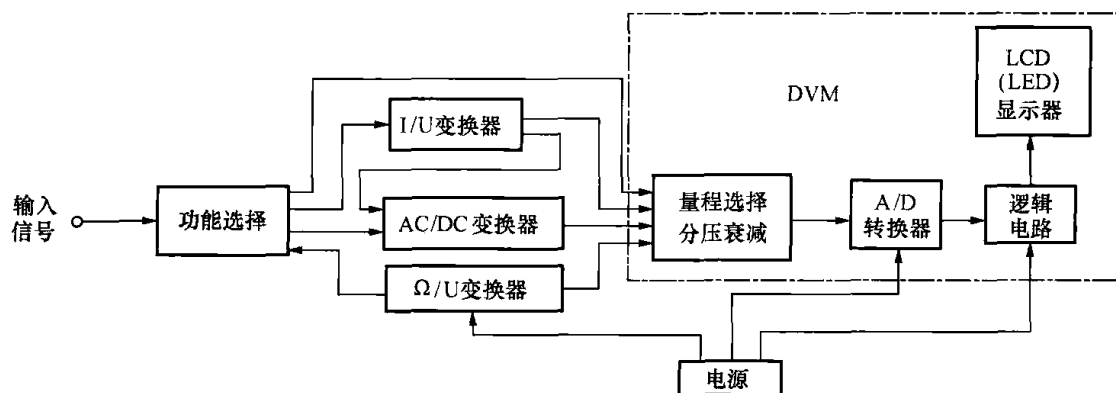


图 2-34 数字万用表的原理框图

测电流时，先经过 I/U 转换器将电流转换为电压（交流电流还要经 AC/DC 转换成直流电压）。测电阻时，由内部电池提供的电流，经串联 Ω/U 转换后，产生对应电阻值的直流

电压。直流电压再经电阻分压转变为 $0\sim 200\text{mV}$ 的直流电压，送入 A/D 转换器转换为数字量，再经过逻辑电路的处理译码后，显示出十进制表示的被测量数值。

数字万用表功能强大，具有交直流电压测量、交直流电流测量、电阻测量、二极管的通断测试、电容量测量、自动极性显示、自动校零、过量程显示、低电池电压显示、自动关机等功能。有的数字万用表还有电感测量、温度测量、频率测量、数据保持、自动量程切换、占空比测量、特定频率的方波输出等功能。

常见数字万用表多为 3 位半或 4 位半。所谓 3 位半，即后 3 位可显示 $0\sim 9$ ，第 1 位只能显示 0 或 1，故满码为 1999。4 位半与此类似，满码为 19999。显示器均为七段 LCD 或 LED 显示器。

三、示波器组成及原理

示波器是用来显示测试信号波形的一种电子仪器，示波器的原理框图如图 2-35 所示。

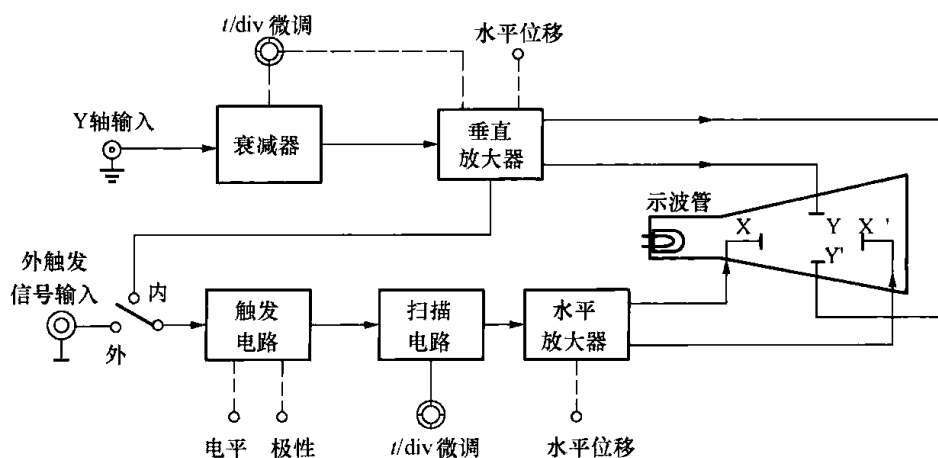


图 2-35 示波器的原理框图

(1) Y 轴系统。Y 轴系统有两个独立输入通道，信号经衰减器以适应观察不同幅度被测信号的需要，然后经垂直放大器以提高示波管 Y 轴偏转灵敏度，最后处理后的输出信号加到示波管的垂直偏转板上，在屏幕上显示出一定幅度的波形。

示波器面板上设有“Y 轴衰减器”（通常称“Y 轴灵敏度选择”开关）和“Y 轴增益微调”旋钮，分别调节 Y 轴衰减器的衰减量和 Y 轴放大器的增益。为了避免杂散信号的干扰，被测信号一般都通过同轴电缆或带有探头的同轴电缆加到示波器 Y 轴输入端。但必须注意，两个通道虽然独立，但是被测信号的参考地在示波器内部接在一起，因此实际测试中要处理好这种共地问题。将幅值衰减（或不衰减）是通过探头来实现的，其衰减比为 $10:1$ （或 $1:1$ ）。

(2) X 轴系统。X 轴系统主要是控制电子束按时间值在水平方向上偏移，由扫描发生器、水平放大器和触发电路组成。

普通示波器的 X 轴扫描是连续进行的。在脉冲示波器中采用“触发扫描”，扫描发生器工作在待触发状态。仅在外加触发信号作用下，时基信号才开始扫描，否则便不扫描。这个外加触发信号通过触发选择开关可取自“内触发”（Y 轴的输入信号经由内触发放大器输出触发信号），也可取自“外触发”（外接同步触发输入信号）。触发脉冲信号经整形、微分后，由上升沿或下降沿来触发扫描发生器，产生锯齿波扫描电压。锯齿波信号经 X 轴放大器放

大后,送至示波器 X 水平偏转板。适当地调节“扫描速率”开关和“电平”调节旋钮,能在荧光屏上显示出具有合适宽度的被测信号波形。

锯齿波的频率(或周期)调节是由“扫描速率选择”开关和“扫速微调”旋钮控制的。使用时,调节“扫速选择”开关和“扫速微调”旋钮,使其扫描周期为被测信号周期的整数倍,保证在示波管屏幕上显示稳定的波形。

(3) 示波管。示波管是示波器的核心部件,由电子枪、偏转系统和荧光屏三部分组成,其结构图如图 2-36 所示。电子枪包括灯丝、阴极、栅极、聚焦、阳极和加速阳极等。当接通电源后,灯丝加热阴极,使阴极发射出一束电子束,电子束通过第一阳极与第二阳极时,受到静电场的聚焦作用,就会在荧光屏上显示出可见光点。改变栅极电压,可调节光点亮度。加速阳极是为避免调聚焦(改变 A1 电位)时,改变电子束密度从而影响亮度变化。

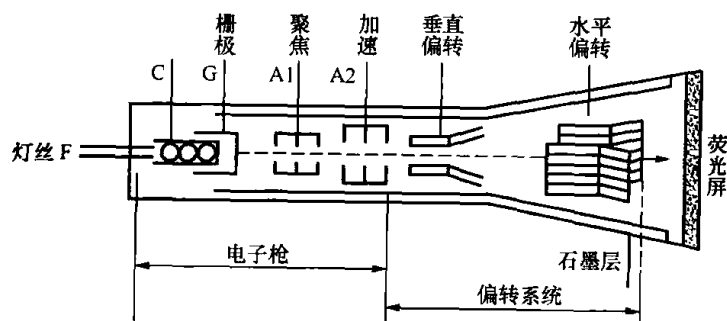


图 2-36 示波管结构图

(4) 偏转系统。由一对水平(X)偏转板和一对垂直(Y)偏转板组成。当电子束穿过偏转系统时,将受到 X、Y 偏转板电场的共同作用,按照加于偏转板上的电压信号做出相应的偏转,就能在荧光屏上绘出被测信号的波形。

四、函数信号发生器组成及原理

函数信号发生器可以产生幅值、频率均可变的方波、三角波、正弦波等多种函数信号。函数信号发生器的基本原理框图如图 2-37 所示。当该仪器电源刚合上时,设积分电容 C_1 上的电荷为零,而多谐振荡器的 a 点电位为 $-E_r$ 。积分器输出端 b 点电位向正值方向增加,当 b 点电位增加到参考电压 $+E_r$ 时,电压比较器工作产生一个触发信号使多谐振荡器翻转。同时 a 点电位变为 $+E_r$,因而积分器输出端 b 点电位开始下降,当电位下降到参考电压 $-E_r$ 时,电压比较器工作,又产生一个触发信号,使多谐振荡器回到初始状态。周而复始,电路如此产生振荡。振荡器振荡频率由 a 点电位、积分电阻 R_1 、积分电容 C_1 和电压比较器的参考电压来决定。 R_1 和 C_1 用来确定频率范围,调节 R_{p1} 可实现频率的连续可调,电压比较器电压 $\pm E_r$ 固定不变。

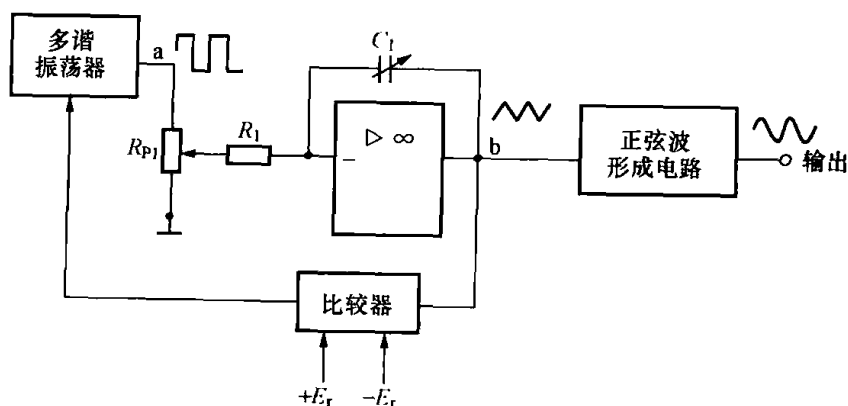


图 2-37 函数信号发生器的基本原理框图

五、晶体管毫伏表组成及原理

晶体管毫伏表是测量毫伏级正弦电压信号有效值的仪器，它具有测量灵敏度高、精确度高、频率特性好的优点，而且具有隔直流功能。晶体管毫伏表的原理框图如图 2-38 所示。

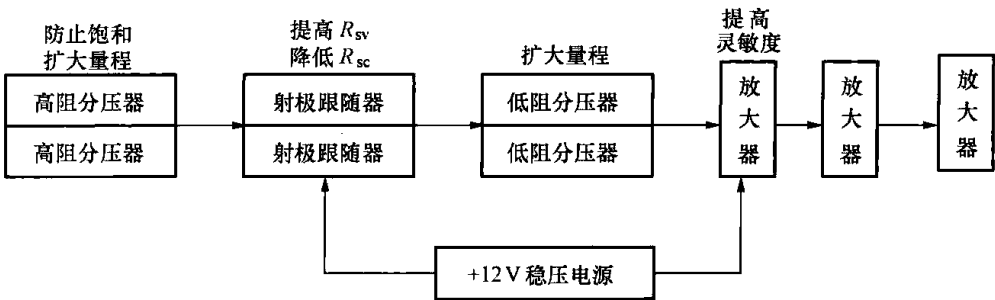


图 2-38 晶体管毫伏表的原理框图

(1) 晶体管毫伏表内部有三级放大器，采用射极跟随器作输入级，故输入阻抗很大，对被测电路影响很小。晶体管毫伏表具有较高的灵敏度，可以测量毫伏级的电压，且频率范围宽（从几十赫兹到几十兆赫兹），所以它的性能大大优于万用表，在电压测量中获得了广泛应用。

(2) 输入信号采用二级分压（高阻分压、低阻分压），将 0.3V 以下信号采用低阻分压器衰减，对于大于 0.3V 的信号，先经高阻分压器进行衰减后，进入射极跟随器，再经低阻分压器分压。

(3) 所用指示表头是磁电系电流表，不能测交流，故加检波器，使交流变成直流。电表指示值为正弦波电压有效值。当波形失真或为非正弦波时，存在波形误差。

六、智能仪器

智能仪器是计算机技术与测量仪器相结合的产物，是含有微计算机或微处理器的测量仪器。它具备数据存储、运算、逻辑判断、自动化操作等功能，在测量原理、灵敏度、准确度、可靠性、多功能性以及自动化水平等方面都发生了巨大的变化，具有智能化、网络化和虚拟化的仪器特征。

1. 智能仪器的组成和基本工作原理

智能仪器主要由硬件和软件两大部分组成。硬件部分主要包括信号调理与数据采集单元、微处理器、输入输出接口、键盘输入、显示和通信等单元电路，其硬件组成框图如图 2-39 所示。

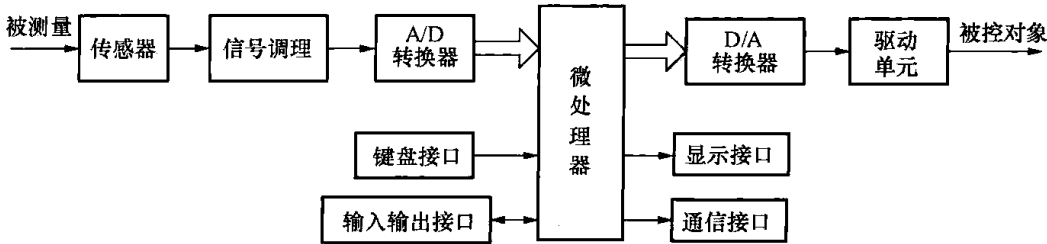


图 2-39 智能仪器的硬件组成框图

信号调理与数据采集单元主要包括传感器、信号调理电路和 A/D 转换器等。传感器将外界的非电信号转化为电信号，此时信号常常较微弱且外界干扰较大。信号调理电路将信号

进行滤波放大,转换为合适的模拟信号,并由 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号。微处理器单元是智能仪器的核心部分,根据事先设定的程序和各个参量的初值进行相应的数据运算和处理,运算结果可以用于显示或打印。该单元可由单片机、数字信号处理器或可编程器件及其扩展器件组成,用于存储程序和数据、执行数据运算和处理、实现各种控制功能等。键盘是输入单元主要部件,可通过键盘操作输入各种操作命令。输入输出接口单元可以实现其他形式的输入、控制及打印等功能。微处理器对被控对象控制可以通过 D/A 转化器和驱动电路完成。通信单元可通过 RS-232、RS-485、GPIB 或以太网等接口实现与其他仪器或计算机之间的通信。

从发展的角度看,示波器、万用表、函数信号源和其他数字仪表越来越多地使用了微处理器,增强了其功能,成为智能仪表。

2. 智能仪器的特点

(1) 友好的人机界面。通过键盘输入命令,操作人员就能实现测量功能,并且由显示屏可直观地显示仪器运行情况和数据处理结果。

(2) 操作自动化。微处理器是智能仪器的核心,整个工作过程都以微处理器操作(例如键盘扫描、量程选择、开关启动闭合、数据采集、数据传输及其处理、显示打印),实现了基于计算机的自动化测量。

(3) 量程自动切换。智能仪器可根据实际的测量值自动调整量程,提高了测量精确度。

(4) 数据处理功能完备。智能仪器可以实现数字滤波,有效抑制干扰,并对采集的数据进行频谱分析、统计分析等多种复杂运算。

(5) 可实现多样化的控制方式。智能仪器能实现多种控制规律。

(6) 具有强大的通信组网功能。

七、电子测量仪器的接地

在电工测量中,电路、仪器是否接地以及接地是否正确,不仅关系到测试结果是否正确可靠,同时还关系到仪器、设备和人身的安全。一般所说的地或地线有两种含义:一是指真正的大地;二是指测量仪器、设备、实验板等的公共接点,这个接点通常与机壳直接连在一起。

1. 接地的类型

接地有两个目的:一是将电气设备接地以后,可防止由于设备上电荷积累,电压升高而造成人身不安全或引起火花放电;二是将仪器设备外壳或导线屏蔽层等接地,给高频干扰电压提供低阻抗通路,避免了对电子设备的干扰。前者称为保护接地,后者称为技术接地。

(1) 保护接地。为了保护人身安全,通常要将电气设备在正常情况下不带电的金属外壳接地(与大地相连)。实验室中的电子仪器采用三眼插座即属这种接地,仪器外壳经插座上等腰三角形顶点的插孔与地线相接,则机壳上电压为零,可保证人身安全。

(2) 技术接地。技术接地又称工作接地或信号接地。电子仪器中的电路都需要直流供电才能工作,而电路中所有各点的电位都是相对于参考零电位来度量的。通常将直流电源的某一极作为这个参考零电位点,称为“公共端”,它虽未与大地相连,也被称为“接地”点。此“接地”点是所有电路及测量装置的公共电位参考点。正确设计和选择这种接地点,就是要尽可能地减少级间耦合干扰、抑制外界电磁干扰。

2. 电工测量中的接地

在电工测量中,通常要求将电子仪器的输入或输出线的黑色端子与被测电路的公共端相

连,可以防止外界干扰,这种接法也称为“接地”。因为在交流电路中存在电磁感应现象,空间的各种电磁波经过各种途径窜扰到电子仪器的线路中,影响仪器正常工作。将电子仪器的金属外壳与仪器的黑色端子(接地端子)相连,当外界存在电磁干扰时,干扰信号被金属外壳短接到地,不会对测量系统产生影响。

在实际电工测量中,常因为接地不当产生一些问题。

(1) 接地不当引起短路。

1) 对于采用三端电源插头的电子测量仪器,其外壳和黑色端子已经与电网的地连接在一起了,测量中应随时注意:当被测电路有直接接地端时,仪器的黑色端子只能接在被测电路的接地端上,而不能随意乱接,否则会造成被测电路短路。

2) 在使用双踪示波器、双路输入晶体管毫伏表和双路输出信号源等时要注意:它的两路信号输入(出)端子中的黑色端子已通过机壳连通,当同时观察两路信号时,必须将两根输入线的黑色端子连接在被测电路的同一点上,或者只接一个黑色端子,另外一个黑色端子悬空(此时两个黑色端子已通过机壳接在一起)。若连接不当,会造成被测电路短路,影响测量的正常进行。

如图 2-40 所示的电路接法中,测试 R 、 L 、 C 串联电路中电压波形时,因双踪示波器的两个黑色端子接在电阻 R 的两端,造成电阻 R 短路。要想得到正确的测量结果,只要将 CH2 的两个接线端子位置互换,即可比较信号发生器输出和 R 上的电压波形。

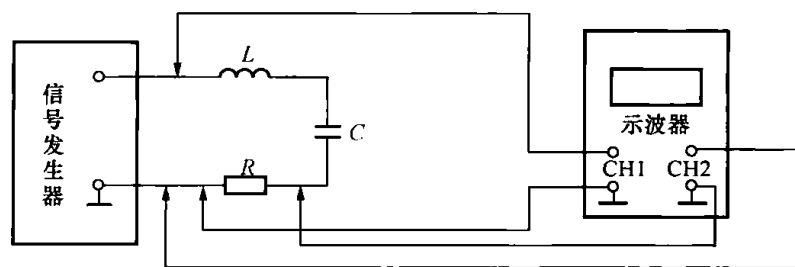


图 2-40 接地不当引起的短路示意图

(2) 输入端开路或接地不良引起干扰。

电工测量中也存在由于输入端断开或接地不良,影响测量准确度的问题。如图 2-41 所示,用晶体管毫伏表测量交流电压时,如果测量时未接地或接地不良,被测电路与晶体管毫伏表对大地分别有分布电容 C_1 、 C_2 ,在 C_1 和 C_2 上就感应有 50Hz 的干扰电压 e_1 、 e_2 。电压表输入端所加的实际电压除被测电压 U_x 外,还有 e_1 和 e_2 ,因此,未接地或接地不良引入了干扰。此外,人体在电网电场中也会感应出较大的 50Hz 干扰电压,在测量中不能用手去触摸电子仪器的输入端,特别是在小量程时更要注意。

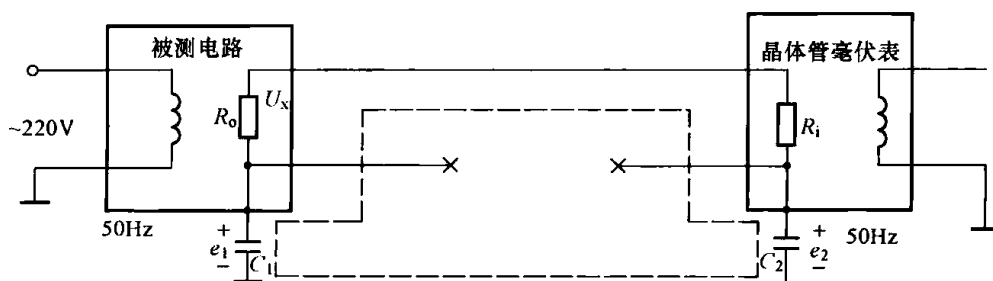


图 2-41 由于未接地或接地不良引起的干扰示意图

第二篇 电 路 实 验

第三章 认 识 实 验

本章主要内容是对电路以及实验仪表的认识实验。通过认识实验了解实验环境，掌握简单电路的连接和实验操作，学习使用实验室的仪器仪表，完成基本的电路测量实验。本章设置的实验有简单直流电路及元件伏安特性测试、示波器和信号发生器的使用、单相交流电路的认识。

各个实验可以安排在整个电路实验开始时进行，也可以拆分安排在后续对应单元实验之前进行。

第一节 简单直流电路及元件伏安特性测试

一、实验目的

- (1) 熟悉常用仪器设备的使用。
- (2) 掌握线性、非线性电阻元件伏安特性的测试方法。

二、实验内容

1. 实际电压源和实际电流源

在电路实验中实际使用的电压源和电流源，都是由电子元器件构成的电源，与理想电源有差异，其伏安特性曲线如图 3-1 所示。

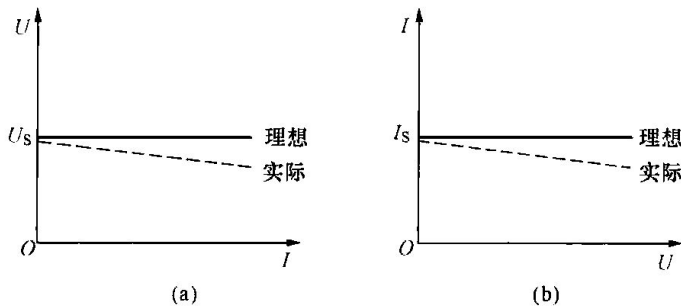


图 3-1 理想电源和实际电源的伏安特性

(a) 电压源；(b) 电流源

实际电源受所能输出功率的限制，其带负载能力有一定限度。在设计、搭接电路时要注意两点：一是电源的输出功率限制，二是外接元件上消耗的功率限制。电压源外接并联的电阻阻值不能过小，一般在几百欧到几千欧之间，以免阻值过小烧坏器件或输出电流过大影响电源正常工作；电流源外接串联的电阻阻值不能过大。

2. 线性元件和非线性元件的伏安特性

线性电阻元件、非线性电阻元件，如白炽灯、普通二极管、稳压二极管、发光二极管(LED)等，都可以看成是电阻元件，它们的伏安特性不尽相同，如图 3-2 所示为几类电阻元件的伏安特性曲线。

(1) 电阻元件伏安特性的测试。

1) 选取合适阻值的电阻、电位器，与直流稳压电源、直流毫安表构成简单的串联电路，如图 3-3 所示。

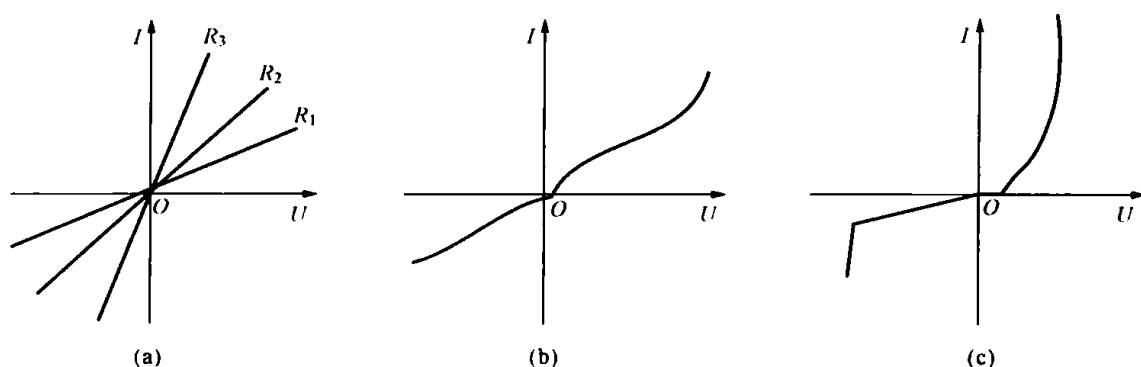


图 3-2 几类电阻元件伏安特性曲线

(a) 线性电阻; (b) 非线性电阻; (c) 普通二极管

2) 或者选取几个电阻构成简单的串联(并联)电路, 确定其中一个为待测元件, 将直流毫安表与该电阻串联, 连接稳压电源。

3) 打开稳压电源并调节输出使其在合理范围变化, 或调节可调电阻使得加在待测电阻上的电压为不同值时, 使用直流电压表、直流毫安表测量待测元件的电压、电流参数值。

4) 将测得的数据记入表格中, 绘制其伏安特性曲线, 计算其测量阻值, 并与标称的电阻参数比较。还可以用万用表的电阻测量挡实测其阻值, 再行比较。

(2) 普通二极管伏安特性测试。

1) 参照上面步骤, 把待测电阻元件换成普通二极管, 如图 3-4 所示。注意必须选择合适阻值的电阻与二极管串联, 以起到限制电流作用, 以免二极管被烧坏。

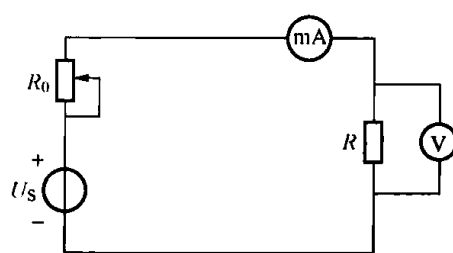


图 3-3 简单直流电路参考接线图

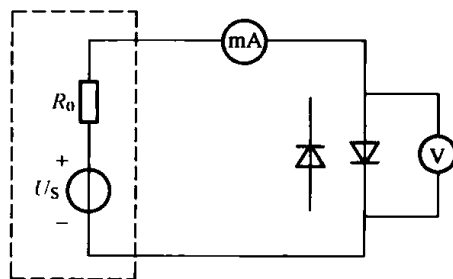


图 3-4 二极管特性测试参考电路图

2) 通过调节电源电压, 调整加在二极管上的正向电压, 测量正向导通情况下, 二极管的伏安特性。特别要注意流过二极管的电流不可过大, 一般不超过 25mA, 以免烧坏二极管。可在 0.5~0.8V 间多测几组数据, 以便描点绘制出平滑的曲线。

3) 将二极管反向接入回路, 测量其在反向截止情况下的特性, 为避免加在二极管上的电压过大而击穿二极管, 电压不得超过 12V。

(3) 稳压二极管伏安特性测试。将普通二极管替换成稳压二极管, 分别测量正向导通、反向截止时的伏安特性, 与普通二极管的特性进行比较。

(4) 发光二极管测试。将发光二极管正向接入电路, 观察电压、电流变化时其亮度变化, 测量其伏安特性, 并与普通二极管的特性进行比较。注意正向电流一般不得超过发光二极管的额定电流 (20mA), 反向电压不得超过发光二极管的额定电压 (如 12V)。

3. 电阻破坏性实验

可观察单个电阻元件上电压、电流以及发热的情况, 甚至可以进行功率耐受的破坏性实验。

三、实验注意事项

- (1) 电源的“+”“-”分别用红色、黑色（或蓝色）导线连接到电路中。
- (2) 直流电压表和电流表的正、负极可分别用红色（或黄色）、黑色（或蓝色）导线连接。
- (3) 线性电阻和二极管正向导通时通过的电流不能过大，以免烧坏元件；二极管反向电压也不能过高，以免击穿甚至发生炸裂。

四、实验报告要求

- (1) 绘出电路图，标明元件参数、电压和电流的参考方向。
- (2) 将测得的数据整理成曲线、表格。
- (3) 记录本实验用到的仪器、设备等。
- (4) 简述实验的收获和体会。

第二节 示波器和信号发生器的使用

一、实验目的

- (1) 认识和了解双踪示波器、信号发生器的基本功能和使用方法；
- (2) 学习使用示波器和信号发生器进行电路实验，观察和测量信号波形。

二、实验内容

1. 双踪示波器、函数信号发生器的了解和使用

对照仪器，阅读本指导书附录相关内容，了解和认识常用的旋钮、按键等的功能和作用，了解示波器和信号发生器的基本功能和使用方法。

操作信号发生器，使其输出不同频率和幅值的正弦波、方波、三角波、锯齿波等信号。

2. 用示波器观察和测量电压信号

(1) 从示波器的一个信号输入通道接入示波器本身的校正源信号（通常为 1V、1kHz 标准信号），调整示波器的垂直灵敏度、垂直位移、水平位移、扫描速度、触发电平等操作旋钮和其他按键，使得示波器的扫描频率在 $100\mu\text{s}\sim 1\text{ms}$ 之间，Y 轴灵敏度在 $200\text{mV}\sim 2\text{V}$ 之间，触发电平正常（触发电平信号灯亮），使得波形稳定显示，以便验证该输入信号探头、示波器对应通道完好，示波器的旋钮、按键、显示等调整到合适的位置。然后，换另一路探头和示波器通道，验证其完好性。

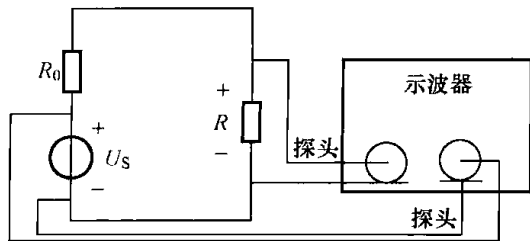


图 3-5 用示波器测量元件电压

(2) 改变示波器的垂直灵敏度、扫描速度等，观察波形变化，体会相关调节的功能和作用。

(3) 用时间频率差值测量、电压差值测量功能，测量信号的频率和幅值。

(4) 按图 3-5 所示电路连接电路、示波器和信号发生器，这是用示波器的两个通道同时测量两路电压信号，示波器需“共地”连接。

(5) 信号发生器输出给定为 5V、2kHz，调整示波器的垂直灵敏度、垂直位移、水平位移、扫描速度、触发电平等操作旋钮和其他按键，使得示波器触发电平正常（触发电平信号

灯亮), 波形清晰、显示稳定, 观察电路的输入、输出波形信号。

3. 测量相位差及观察李萨育图形

(1) 将信号发生器 A、B 两路信号, 分别接入示波器的两个通道, 调节使两路正弦波信号正常显示。在信号发生器上改变输出信号的频率、幅值, 在示波器上观察波形的变化, 用时间差值 (Δt) 测量两个信号的相位差。

(2) 在两通道同时输入两路正弦波信号时, 按下示波器的 X-Y 按键, 示波器显示出两路信号分别加在 X、Y 轴上形成的轨迹——李萨育图形。改变其中一路信号的频率, 如调至另一路信号频率的整数倍, 再观察波形变化与频率比值的关系。

三、实验报告要求

(1) 回顾使用示波器、信号发生器的过程, 总结示波器、信号发生器主要按键、旋钮的功能。

(2) 列出实验的主要步骤, 总结实验的主要内容。

(3) 记录并整理测量的信号波形。

(4) 记录实验操作中遇到的问题及解决方法。

第三节 单相交流电路的认识

一、实验目的

(1) 了解和认识单相交流电路, 构建简单的交流实验电路。

(2) 学习使用交流电压表、交流电流表测量交流电路参数。

二、实验内容

1. 电源电压的测量

将电压表笔的一端连接在交流电压表上, 手持表笔分别测量实验台上电源的 U、V、W (或 A、B、C) 三相与零线之间的电压 (即相电压); 再分别测量两相之间的线电压。比较线电压与相电压的值是否满足 $\sqrt{3}$ 倍关系。

2. 连接白炽灯电路

按照 3-6 所示的实验电路图接线, 从实验台的交流电输出接单相调压器, 再从调压器输出端将相线 (俗称火线) 接开关, 最后接到实验箱的白炽灯负载, 灯的另一端接调压器零线。选择导线时需注意, 接相线的用红色 (或黄、绿色), 接零线的用黑色 (或蓝色)。

有些实验台的内部已经接好了三相调压器, 可以选择调压器输出 U、V、W 三相中的一相作为电源相线接入实验电路。

3. 测量电压和电流

调节调压器的旋转手轮, 使得接入的交流电压表指示电压逐渐上升, 在 0~220V 间变化, 观察白炽灯的明暗变化。以 20V 电压为间隔, 读取交流电压表、交流电流表的数值, 绘制白炽灯的伏安特性曲线。计算不同电压值下白炽灯的功率和电阻值, 绘制功率电压曲线。

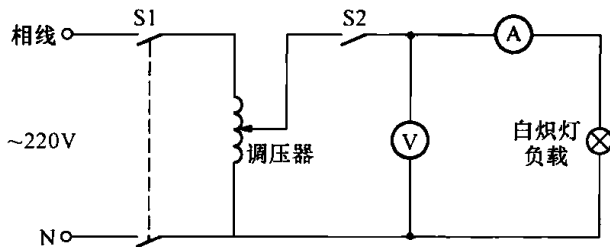


图 3-6 单相交流电路实验接线图

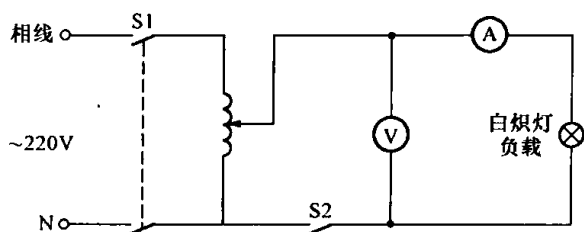


图 3-7 单相交流电路思考题接线图

还可以接入单相功率表（功率表的接线图参考本书第六章第一节），对以上测量结果进行验证。

【思考题】 如果按照图 3-7 接线，与图 3-6 所示接线方式相比，对实验过程和测量数据有没有影响，这样接线有什么问题？

三、实验注意事项

1. 接线

由于实验电源是三相交流 380V 系统，要注意接线时电源输出端的选择，一定要选择相线和零线。如果将线电压接入电路，则可能因电压过高而损坏白炽灯。

选择导线时，除了要注意颜色的区别外，还应尽量长短适中、合理布局、简洁清晰。

2. 实验完成后

实验完毕后，先回调调压器的旋转手轮，使调压器输出电压降低至零，依次断开 S2 和 S1，拆除接线和仪器设备。

3. 人身和设备安全

实验过程中，注意身体不要触碰设备、导线、仪表、接线柱的裸露带电部分，以免触电。

实验过程中，还需严格遵守“断电接线、检查线路、通电调压、实验测量、电压调零、断电拆线”的规则，避免带电接线及操作。

四、实验报告要求

- (1) 整理和分析电路图和实验数据，绘制曲线。
- (2) 记录遇到的问题及解决办法。



第四章 电阻电路实验

本章实验是以电阻电路为研究对象，用实验方法验证、探究电路的基本规律。主要内容包括：基尔霍夫定律和叠加定理、戴维南定理/诺顿定理、电阻电路的研究等。

第一节 基尔霍夫定律和叠加定理的验证

一、实验目的

- (1) 验证基尔霍夫定律，加深对基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律的理解。
- (2) 验证线性电路中叠加定理的正确性，加深对线性电路叠加性、齐次性的认识和理解。
- (3) 通过线性电路和非线性电阻电路的测量实验，认识定律和定理的适用范围。

二、预习思考题

- (1) 预习电路理论中的基尔霍夫定律、叠加定理和齐性定理。
- (2) 在图 4-1 所示电路中，单一电源作用时，另一侧电源处如何接线？能否将不作用的电压源短接？
- (3) 实验中，若使用指针式表计进行测量，在什么情况下会出现指针的反偏？应如何处理并记录数据。

三、实验原理说明

1. 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律 (KCL)：对于任一集中参数电路中的任一节点，在任一时刻，流出（或流入）该节点的所有支路电流的代数和等于零。

基尔霍夫电压定律 (KVL)：对于任一集中参数电路中的任一回路，在任一时刻，该回路中所有支路电压的代数和等于零。

实验过程中，通过测量电路中各支路电流、每个元件两端的电压，再根据测得的数据计算并验证 KCL 和 KVL。

2. 叠加定理及齐性定理

叠加定理：线性电阻电路中所有独立电源共同作用产生的响应（支路电压、支路电流或节点电压），等于各独立电源单独作用所产生响应的叠加。

齐性定理（亦称齐次性定理）：在线性电阻电路中，当所有激励都增大或都缩小 K 倍（ K 为实常数）时，响应也将同样增大或缩小 K 倍。

四、实验设备（见表 4-1）

表 4-1

实验设备及型号

设备名称	型号与规格
直流稳压电源	DGX-1 实验台电源挂箱，0~30V/1A 二路电压输出
	SL2302 稳压电源，0~30V 二路电压输出

续表

设备名称	型号与规格
直流毫安表	0~200mA 三挡量程数字毫安表
	C65 0~300mA 八挡量程指针式毫安表
直流电压表	0~200V 四挡量程数字电压表
	C65 0~300V 七挡量程指针式电压表
实验电路	叠加定理实验电路
	分立电阻元件若干

五、实验内容

1. 电路原理图

图 4-1 所示为本节实验的电路原理图，图中未标出元件参数和电压电流的参考方向，需自行标注。图 4-2 和图 4-3 所示分别为 U_{S1} 和 U_{S2} 单独作用时的电路原理图。

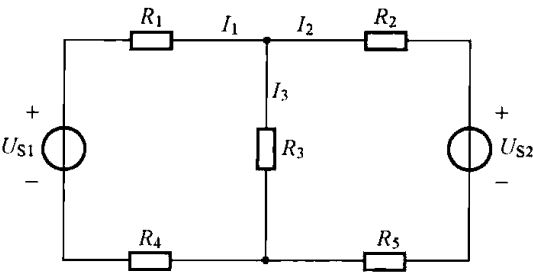


图 4-1 实验电路原理图

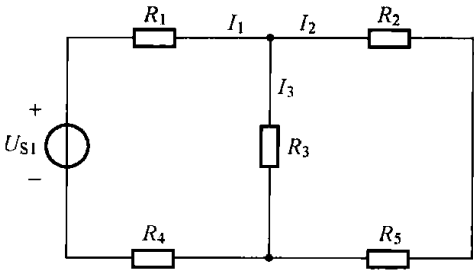


图 4-2 U_{S1} 单独作用时的电路原理图

2. 带电流测量插孔的电路

在一些实验挂箱的电路中，设计了测量电流的插孔，如图 4-4 所示，与其配合使用的是电流插头和电流表。如图 4-5 所示，电流插孔内有两个触头，在不插入电流插头时，两触头接触将支路连通；插头插入后，插孔内的两个触头分别与插头上互相绝缘的两触头连接，插头引出线接电流表，这样就将电流表串联在了支路中。

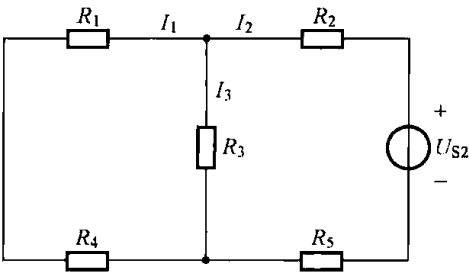


图 4-3 U_{S2} 单独作用时的电路原理图

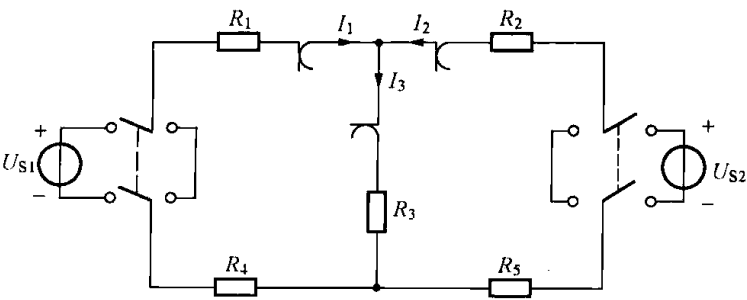


图 4-4 带电流插孔的电路

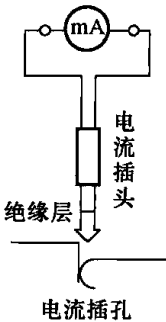


图 4-5 电流插头的使用

需要注意的是，在电力系统现场中并没有这样的电流插孔，与实验用电流插孔功能相似的是电流端子，在正常情况下，电流端子处于短接状态且不得开路运行。

3. 实验电路的确定

可按照电路图自行搭接电路，也可选择实验挂箱上提供的电路。不论选取哪个电路，均需标注元件电压、支路电流的参考方向。

自行设计电路时，电阻元件的阻值一般取几百欧至几千欧，电源电压选取几伏至十几伏。

4. 验证基尔霍夫定律

(1) 按照电路图和元件参数进行理论计算，填入数据记录表（见表 4-2）中。

(2) 连接实验电路，测量电源电压并调到预设的给定值。

(3) 测量所有元件电压和支路电流。如使用电流插头测电流，需将电流插头的两引出线接至直流电流表两端，再将插头插入需测量支路的电流插孔中，即可测得电流值。

(4) 将电路中的一个电阻换成二极管（稳压、普通、LED 均可），再行测量非线性电路的电压、电流值。注意二极管正向导通电流和反向截止电压都不可过大，以免烧坏或击穿元件发生意外。

(5) 根据电压和电流参考方向，将测得数据记入表 4-2。

表 4-2 验证基尔霍夫定律数据记录

电压 (V) 电流 (mA)	U_{S1}	U_{S2}	I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
测量值										
计算值										

5. 验证叠加定理及齐性定理

(1) 线性电路。在线性电路中，进行单侧电源分别单独作用、两侧电源共同作用、电源电压值增大或减小到原电压值的 k 倍（ k 可取 2, 3, 0.5, ...）等各种情况下的实验，测量数据记入表 4-3 中。

表 4-3 叠加定理及齐性定理实验数据

	U_{S1}	U_{S2}	I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
U_{S1} 单独作用										
U_{S2} 单独作用										
U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用										
kU_{S1} 单独作用										
kU_{S2} 单独作用										

单侧电源作用时，另一侧电源可不接入电路。有的实验箱在 U_{S1} (U_{S2}) 处，分别可用两个小开关控制其接点短路和电源接入。若不使用小开关而直接用导线连接时，需注意防止将电源短路，以免造成设备损坏。

(2) 非线性电路。将线性电路中的一个电阻替换成二极管，仿照上面步骤，进行非线性电路的实验。接线时，可分别测量在二极管正向导通和反向截止两种情况下的电路参数，并比较两组数据的差异。

自制表格记录数据,通过数据计算和分析,说明在非线性电路中叠加定理和齐性定理是否满足。

6. 电路故障分析

一些实验挂箱的“基尔霍夫定律/叠加定理”实验电路下方有三个故障设置按键,按下某个按键,再根据所测得数据,分析并判断在电路中发生故障的位置及类型。

六、实验注意事项

- (1) 原始数据至少应包括电路图(标明元件参数、参考方向)、数据记录。
- (2) 电源电压的大小以电压表测量值为准,电源模块上的显示值仅供参考。
- (3) 不得将稳压源的输出端短路,以免损坏其内部硬件电路;在较长时间不使用恒流源时,可将其电源小开关断开。

(4) 使用指针式电压表、电流表时,应预判所测参数的极性,避免表计反偏。如果出现反偏,需调换测量端极性,再行测量。

(5) 使用导线时,注意颜色与电源和仪表极性相配,且长短适中、布局合理。

七、实验报告要求

(1) 根据线性电路和非线性电路的实验数据,分别验证 KCL、KVL,与理论计算值进行比较,定量分析误差,并分析产生误差的原因。

(2) 根据实验数据和必要的计算,验证叠加定理和齐性定理,计算过程从略,计算结果可列入数据表格中。

(3) 根据数据分析,说明非线性电路中是否存在叠加性和齐次性。

(4) 思考各电阻元件消耗的功率能否用叠加原理计算得出,并试用实验数据进行验算及作出结论。

(5) 记录实验过程中出现的问题及解决的办法。

第二节 戴维南定理/诺顿定理

一、实验目的

- (1) 验证戴维南定理和诺顿定理的正确性,加深对该定理的理解;
- (2) 掌握测量含源二端网络等效参数的一般方法。

二、预习思考题

(1) 在求戴维南或诺顿等效电路时,做短路试验,测 I_{sc} 的条件是什么?在本实验中可否直接做负载短路实验?实验前对线路预先作好计算,以便调整实验线路及在测量时准确地选取电表的量程。

(2) 说明测量含源二端网络开路电压及等效内阻的几种方法,并比较其优缺点。

三、实验原理说明

1. 戴维南定理和诺顿定理

戴维南定理:一个与外部电路无耦合关系的线性含源二端电阻网络,对外电路而言,可以用一个电压源和一个电阻串联的支路来等效。此电压源的电压值等于网络 N 的开路电压 U_{oc} 。等效电阻 R_{eq} (也称 R_0) 等于网络 N 中全部独立电源置零,即理想电压源视为短接,理想电流源视为开路,所得二端网络 N_0 的输入电阻,如图 4-6 所示。

诺顿定理：一个与外部电路无耦合关系的线性含源二端电阻网络，对外电路而言，可以用一个电流源和一个电阻并联的回路来等效，如图 4-7 所示。此电流源的电流值等于网络 N 的短路电流 I_{sc} 。等效电阻的定义同戴维南定理。

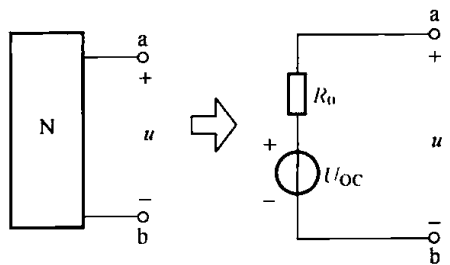


图 4-6 戴维南定理图示

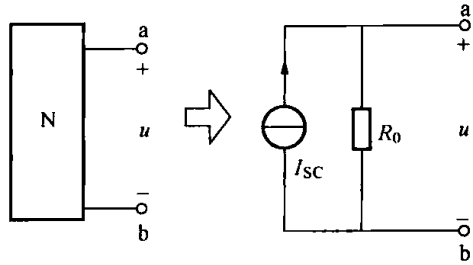


图 4-7 诺顿定理图示

2. 含源二端网络等效参数的实验测量方法

(1) 开路电压、短路电流法。测量含源二端网络端口处的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} ，则等效内阻为 $R_0 = U_{oc} / I_{sc}$ 。

需注意此方法不适用于内阻很小的含源二端网络，因为很可能由于端口短路时电流过大而损坏网络内的元件。

(2) 伏安法测算 R_0 。测量含源二端网络的外特性，绘出伏安特性曲线如图 4-8 所示。根据外特性曲线求出斜率 $\tan\varphi$ ，则等效电阻 $R_0 = \tan\varphi$ 。

或者根据式 $R_0 = (U_{oc} - U_L) / I_L$ ，求取 R_0 。

(3) 半压法测 R_0 。在含源二端网络的端口连接可调电阻，调节电阻值并测量其电压，当外接电阻上的电压值为 U_{oc} 的一半时，电阻的阻值即等于含源二端网络的等效电阻值 R_0 。

(4) 零示法测 U_{oc} 。在测量高内阻含源二端网络的开路电压时，由于电压表也有较大内阻，直接测量 U_{oc} 可能会引起较大的误差。

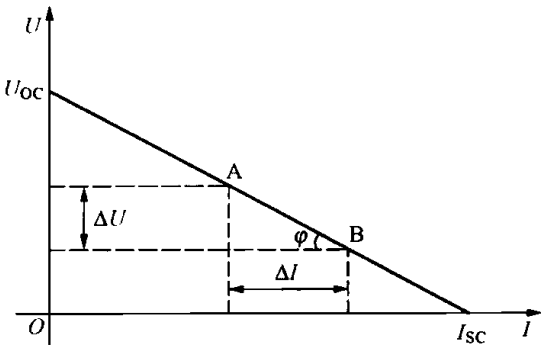


图 4-8 含源二端网络负载特性

用一低内阻的稳压电源与被测含源二端网络连接，其间串接一块电压表；调节电压源使得电压表读数为零时，将电路断开，测量稳压源的输出电压，其值即与含源二端网络的开路电压相等。

(5) 万用表直接测等效电阻 R_0 。将含源二端网络内的所有独立电源置零，即电压源置零而各处短接，电流源不作用而开路，将万用表接在端口测量电阻，所得值即为等效网络的等效电阻 R_0 。

四、实验设备和电路

1. 实验设备（见表 4-4）

表 4-4

实验设备及型号

设备名称	型号与规格
直流稳压恒流电源	DGX-1 实验台电源挂件箱
	SL2302 稳压恒流电源

续表

设备名称	型号与规格
可调电阻箱	0~99 999.9Ω
实验电路	戴维南定理实验电路或电阻元件若干
直流毫安表	0~200mA 三挡量程数字毫安表
	C65 0~300mA 八挡量程指针式毫安表
直流电压表	0~200V 四挡量程数字电压表
	C65 0~300V 七挡量程指针式电压表
万用表	UT56 MULTIMETER

2. 实验电路的确定

按照电路图自行连接电路，也可选择挂件箱上提供的电路，还可以设计一个含源二端网络进行实验，如图 4-9 所示。

五、实验内容

1. 测量开路电压、短路电流

按图 4-10 所示电路接线，分别测量端口 A、B 处的开路电压 U_{OC} 和短路电流 I_{SC} ，测量所得数据记入表 4-5 中，再计算得出 R_0 。

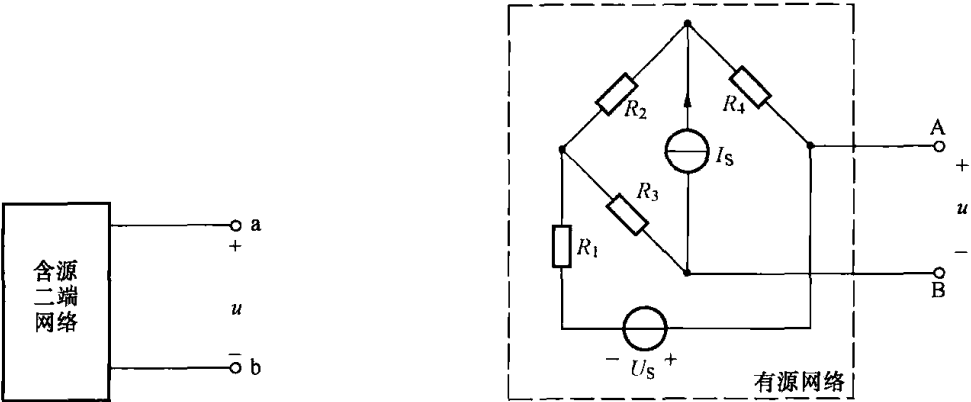


图 4-9 自行设计含源二端网络

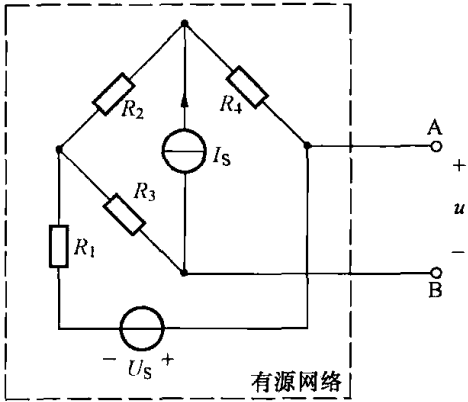


图 4-10 参考实验电路

表 4-5 戴维南定理实验数据记录

	网络内电压源 U_S	网络内电流源 I_S	U_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	等效电阻 $R_0=U_{OC}/I_{SC}$ (Ω)
1	12V	10mA			
2	12V	-10mA			
3	-12V	10mA			
4	-12V	-10mA			
5	8、14V	6、12mA			

注 2~5 项可以选做，即改变电源大小，比较多种情况下测得的 U_{OC} 、 I_{SC} 、 R_0 的异同。

2. 半压法测定等效内阻 R_0

在被测含源网络的端口连接一个可调电阻，调节电阻值的大小并测量其电压，当电压值为先前测得的开路电压 U_{OC} 的一半时，可调电阻的阻值即等于含源二端网络的等效电阻值

R_0 。半压法测量 R_0 电路如图 4-11 所示。

3. 零示法测定 U_{OC}

在含源网络的端口处, 按图 4-12 所示接入电压源和电压表, 调节电压源的输出电压, 直到电压表指示为零, 断开连接, 测量稳压源的输出电压, 其值就等于含源网络的 U_{OC} 。

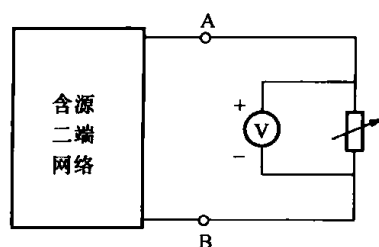


图 4-11 半压法测量 R_0

4. 含源二端网络的负载实验

从实验箱上选择不同阻值的分立电阻, 接入含源二端网络的端口处进行负载实验, 如图 4-13 所示, 测量接入电阻上的电压和电流值, 记入表 4-6 中, 绘制含源网络的外特性曲线。

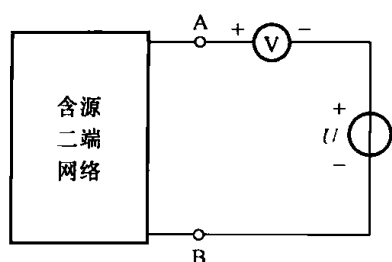


图 4-12 零示法测量 U_{OC}

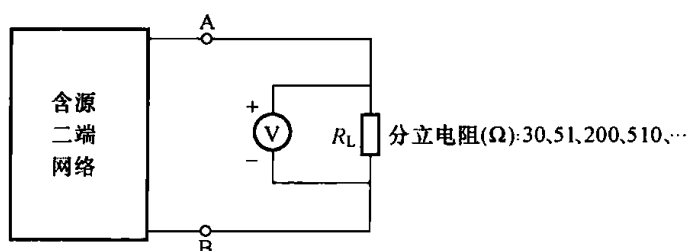


图 4-13 含源二端网络负载实验

表 4-6

含源二端网络的负载实验数据记录

$R_L (\Omega)$	0	30	51	200	510	1k	6.2k	8.2k	∞
$U (V)$									
$I (mA)$									

5. 戴维南等效电路的外特性

按图 4-14 所示连接电路, 其中等效电阻 R_0 用可调电阻设定, R_L 用分立电阻。测量 R_L 的电压和电流, 自拟表格填入数据, 再与上一步测得的数据进行比较, 对戴维南定理进行验证。

6. 诺顿等效电路的外特性

按图 4-15 所示连接电路, 参照上面实验步骤, 测得等效电路的外特性, 与原含源网络测得的负载特性进行比较, 对诺顿定理进行验证。

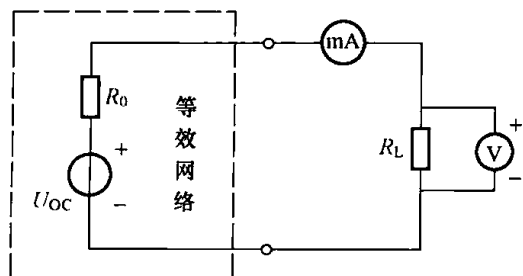


图 4-14 戴维南等效电路测负载特性

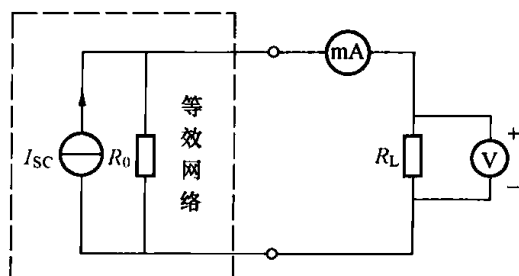


图 4-15 诺顿等效电路测负载特性

六、实验报告要求

(1) 根据各实验步骤测得的数据, 进行整理计算、绘制曲线。

- (2) 根据负载特性曲线, 计算等效电阻 R_0 。
- (3) 根据实验数据和结果, 分析并验证戴维南定理和诺顿定理的正确性。
- (4) 比较几种方法测得的结果, 分析并得出结论。
- (5) 对本次实验进行归纳和总结, 同时写出个人的收获和体会。

第三节 电阻电路的实验研究 (研究性实验)

一、实验目的

- (1) 加深对电阻电路基本理论的认识和理解。
- (2) 归纳和总结电阻电路满足的规律和具有的性质。
- (3) 了解和初步掌握科学研究中通过实验方法, 归纳和总结科学规律的方法。

二、实验任务

1. 自行设计电路

自行设计线性 (和非线性) 电阻元件及独立源构成的电路, 绘制电路图并按图接线, 测量记录实验数据, 通过对数据的整理和分析, 研究线性及非线性电阻电路的一些性质, 归纳出电阻电路的若干规律、定律、定理和原理, 从而加深对电阻电路的分析和理解。

2. 线性电阻电路基本实验任务

(1) 按设计的线性电阻电路接线, 在两个电源分别单独作用时 (电压可分别取多组), 测量电源输出值、各元件电压和支路电流值。

(2) 接线并测量两个电源同时作用时, 各元件电压和支路电流值。

(3) 自行选择某一电源单独作用 (或者两个电源都作用) 的电路, 将电源值调高 (或调低) 2 倍或 3 倍, 再测量各元件电压和支路电流值。

3. 线性电阻电路选做实验任务

(1) 戴维南和诺顿等效电路。选择所设计电路中的一个端口, 将所设计的电路分成两部分, 选择带有电源的一部分, 参照第二节中验证戴维南和诺顿定理的实验内容, 进行实验, 加深对两个定理的理解。

(2) 线性电阻电路中的替代。选择某一电源独立作用的线性电阻电路, 把其中一条支路 (或一个元件) 用电压源 (或电流源) 替代, 测量并记录各元件电压和支路电流值。注意替代电源的电压值 (电流值) 应与被替代支路在原电路中的电压 (电流) 值相同, 接线时的电源接入方向与原电路中该元件的实际电压 (电流) 方向一致。

由于实验用的电源并不是理想电源, 或者由于电路参数选择、连接不甚合理, 故一般在进行替代时, 可能测量数据不够理想。可以找几个元件分别替代并测量少许数据, 选取其中在替代前后测量数据差异相对较小的, 进行替代并完成测量, 真实记录所得数据。实验报告中可以对引起数据差异的原因进行分析。

(3) 线性电阻电路中的互易。在一个电源单独作用的线性电阻电路中, 选取合适的两个端口, 按照互易定理的几种形式, 分别做实验、测量并记录数据。

(4) 线性电阻电路中的最大功率传输。在一个端口处接可调电阻 R_L , 测量其电压和电流, 计算功率并找到最大功率时的阻值, 绘制 $P-R$ 曲线。

4. 非线性电阻电路

- (1) 将原电路中的一个线性电阻换成非线性电阻元件（如二极管）。
- (2) 测量两个电源分别单独作用时，各元件电压和支路电流值。
- (3) 测量两个电源同时作用时，各元件电压和支路电流值。
- (4) 选择某一电源独立作用的非线性电阻电路，把其中的非线性电阻用电压源（电流源）替代，测量并记录各元件电压和支路电流值；用阻值为 $R=U/I$ 的线性电阻替代非线性电阻，再测量各元件电压和支路电流值。

5. 归纳和总结

(1) 根据自行设计的电路、测量得到的数据，归纳和总结电阻电路的 KCL、KVL、叠加定理、齐性定理、特勒根定理、替代定理、互易定理、戴维南定理、诺顿定理和最大功率传输定理等。

(2) 对于非线性电阻电路，根据实验测量的数据，分析其满足电阻电路的哪些定理，且又有哪些不适用、不满足。

三、设计电路的基本要求

- (1) 根据实验室能够提供的实验设备、元器件参数等条件，设计实验电路。
- (2) 具体要求：电阻元件 3 个及以上，独立电源 2 个，独立网孔 2 个及以上。
- (3) 选取的几个电阻元件的阻值相差不能过大，建议一般选取几百欧的。
- (4) 设计电路图，应标明电压、电流的参考方向，以指导接线、测量和记录数据。
- (5) 可以参照图 4-1、附图 F-5 所示的电路图，在其基础上改动并进行实验，结合计算机仿真的方法将物理实验和仿真实验进行比较和分析。

四、实验注意事项

- (1) 使用电源时，应注意控制稳压源输出 $U_s \leq 15\text{V}$ ，恒流源 $I_s \leq 20\text{mA}$ 。
- (2) 记录数据时，如果电路结构和元件参数没有变化，数据可以记录在一张表格中。电路如有变化，则可另列表记录。
- (3) 要测量所有元件（含电源）电压和支路电流等参数。
- (4) 自行设计的电路应避免元件太少、接线过于简单。
- (5) 注意支路或元件上消耗的功率不要过大，以免烧坏器件，实验中可以估算元件上的功率大小并控制其不超过元件耐受值。

五、实验报告要求

- (1) 整理实验数据并进行分析，尽可能多地总结出所设计和进行实验的电路能够满足的一般规律。
- (2) 在单一电源作用情况下，确定一对输入与输出，作图并讨论其间的关系。
- (3) 尝试对你提出的结论给出理论证明，并说明结论的适用范围。
- (4) 记录实验过程中发现的问题及解决办法。
- (5) 除了你得出的结论外，指出测得的数据还有何用途，并简要说明其原理。

第五章 动态电路实验

本章主要内容为一阶 RC 动态电路、二阶 RLC 并联动态电路、二阶 RLC 串联动态电路的实验。通过实验和学习,使学生加深对电路动态特性的认识和理解,熟悉信号发生器、双踪示波器的主要功能和使用。

第一节 一阶电路阶跃激励下的动态响应

一、实验目的

- (1) 熟悉使用信号发生器和双踪示波器。
- (2) 观察和测定 RC 一阶电路的零输入响应、零状态响应和全响应,观察元件参数对响应的影响。
- (3) 学习动态电路时间常数的测量方法。

二、预习思考题

- (1) 在什么条件下,RC 一阶动态电路可以分别近似为积分电路和微分电路?在方波序列信号的激励下,电路输出信号的波形变化规律如何?积分电路和微分电路有何功用?
- (2) 已知 RC 一阶电路 $R=10\text{k}\Omega$ 、 $C=0.1\mu\text{F}$,试计算时间常数 τ ,并根据 τ 值的物理意义,拟定测量 τ 的方案。

三、实验原理

1. 激励信号

信号发生器输出的周期性方波信号可以用来模拟重复性的阶跃激励信号,方波的正跳变相当于阶跃激励信号,负跳变后相当于激励信号回归到零。只要所选择的方波重复周期 T 远大于电路的时间常数 τ (一般取 $T>5\tau$),在这样的方波信号的激励下,电路中的响应就分别等同于电路接通时的零状态响应和断开时的零输入响应过程。

2. RC 一阶电路阶跃激励下的动态响应

图 5-1 (a) 所示的 RC 一阶电路,其零输入响应和零状态响应分别按指数规律衰减和增长,过渡过程的长短决定于电路的时间常数 τ 。在观察零输入响应波形的同时,还可以用示波器的时间和频率差值 (Δt) 及电压差值 (ΔU) 测量功能,结合起来测量时间常数 τ 。

根据一阶微分方程的求解得知 $u_C(t)=u_i e^{-t/RC}=u_i e^{-t/\tau}$ 。当 $t=\tau$ 时, $u_C(\tau)=0.368U_m$ 。此时所对应的时间就等于 τ 。也可用零状态响应波形增加到 $0.632U_m$ 时所对应的时间测得。

一个简单的 RC 串联电路,在周期为 T 的方波序列脉冲激励下,将电阻两端电压 u_R 作为响应输出且当 $\tau\ll T/2$ 时, u_R 即转变为尖脉冲电压信号。将电容两端的电压 u_C 作为响应输出且当 $\tau\gg T/2$ 时, u_C 即成为三角波电压。

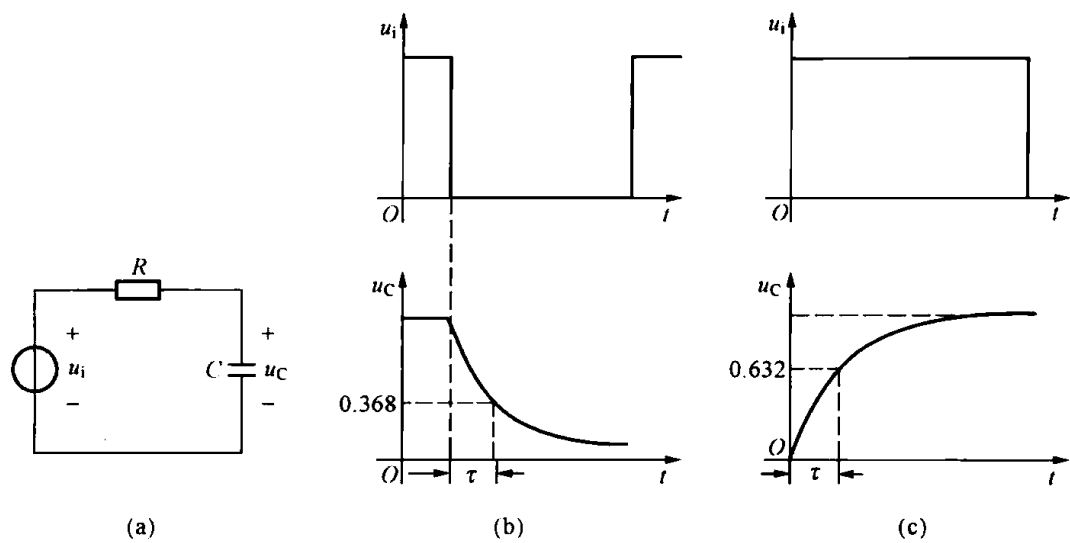


图 5-1 RC 一阶电路阶跃激励及响应
(a) RC 一阶电路；(b) 零输入响应；(c) 零状态响应

四、实验设备（见表 5-1）

设备名称	型号与规格
函数信号发生器	TFG2006 DDS
示波器	SS-7802A 双踪示波器
	Tektornix TDS1002 数字式可存储双踪示波器
电阻、电容和电感元件若干	

五、实验内容

1. 双踪示波器、函数信号发生器的了解和使用

实验开始前，参见第三章和附录的相关内容，熟悉双踪示波器和信号发生器的主要功能和操作。

2. RC 电路的阶跃激励与响应

(1) 分别观察 RC 串联电路在方波信号的激励下，其响应 u_C 和 u_R 的波形，以及取不同 R 、 C 参数值时的波形变化趋势，分别测量其时间常数 τ 。为方便观察，可在信号发生器上将方波信号设置成正方波（具体操作见附录）。

(2) 三角波电压信号的形成。实验电路如图 5-2（a）所示，选取适当参数的电阻和电容连接电路，用探头将信号发生器的方波电压 u_i 接入电路，再将 u_i 和 u_C 信号分别接入示波器的通道，调整示波器使波形稳定显示，观察并记录波形。

改变电容 C ，使得时间常数（ $\tau=RC$ ）变化并至少满足三种情况，即 $RC \ll T/2$ ， $RC < T/2$ ， $RC > T/2$ 。观察波形变化，绘制两个方波周期下 u_i 和 u_C 的波形。

电阻的参考取值：1、5.1、10、30kΩ；电容的参考取值：1000、3300、6800pF，0.01、0.047、0.1、0.22μF。

(3) 尖脉冲电压信号的形成。实验电路如图 5-2 (b) 所示。将方波电压激励信号 u_i

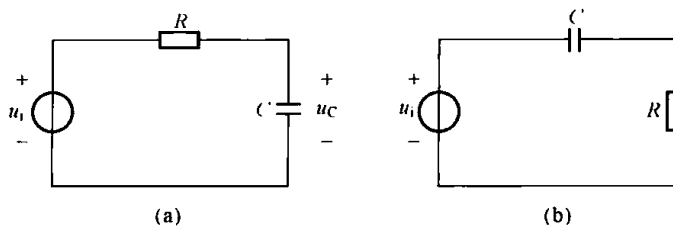


图 5-2 RC 一阶电路

(a) 测量 u_i 和 u_C ; (b) 测量 u_i 和 u_R

接入电路, 再将 u_i 和 u_R 信号分别接至示波器通道。改变电容, 观察并记录不同时间常数下 u_i 和 u_R 的波形。

(4) 利用示波器的时间频率差值测量功能 (Δt , $1/\Delta t$)、电压差值测量功能 (ΔU), 参照图 5-1, 测量 u_R 的时间常数 τ 。

3. RL 电路的阶跃激励与响应

(1) 在 RL 串联电路中加入正方波 (或正负方波) 的激励信号, 观察其响应 u_L 和 u_R 的波形及在不同 R 、 L 值时的波形变化, 测量时间常数 τ 。

(2) 参照图 5-3 连接 RL 电路, 改变元件参数, 分别观察时间常数较短、适中、很长等几种情况下 u_i 、 u_R 、 u_L 的波形。

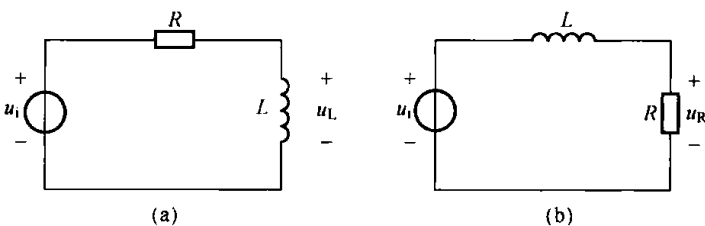


图 5-3 RL 一阶电路

(a) 测量 u_i 和 u_L ; (b) 测量 u_i 和 u_R

电阻的参考取值: 300Ω 、 1 、 5.1 、 10 、 $30\text{k}\Omega$; 电感的参考取值: 22 、 30 、 50 、 100mH 。

六、实验注意事项

(1) 实验开始前, 先阅读示波器、信号发生器的使用说明, 熟悉仪器的操作和调节方法。

(2) 轻柔操作、调节示波器和信号发生器。

(3) 当用示波器的两个通道同时测量两个信号时, 注意共地接线, 避免信号短接、错接。

(4) 示波器的辉度不宜过亮, 尤其应避免光点长期停留在荧光屏上不动。

七、思考题

(1) 为什么要选用周期性方波信号作为 RC 一阶电路的输入, 而不是直接采用直流电压源通过开关接入电路?

(2) 为了较好地获得电路的零输入响应或零状态响应特性, 对输入的方波信号有何要求? 为了较好地获得电路的全响应特性, 又对信号发生器输出的方波信号有何要求?

(3) 已知 RC 一阶电路 $R=10\text{k}\Omega$, $C=0.1\mu\text{F}$, 试计算时间常数 τ , 并根据 τ 值的物理意义, 拟定测量 τ 的方案。

八、实验报告要求

(1) 记录所使用的实验设备、仪器、元件参数等。

(2) 用坐标纸绘出 RC 电路中 u_i 、 u_C 、 u_R 的观察波形。

(3) 在曲线上测算 τ 值, 并与理论计算结果作比较。

(4) 总结参数变化对波形的影响, 说明三角波和尖脉冲波的形成条件。

(5) 记录实验过程中遇到的问题及解决方法。

第二节 二阶电路阶跃激励下的动态响应

一、实验目的

- (1) 观察、测定二阶动态电路的零输入响应和零状态响应波形。
- (2) 观察和分析二阶动态电路响应的三种状态轨迹及特点，了解电路元件参数对响应的影响。

二、预习思考题

- (1) 根据图 5-4 所示电路，分别写出 RLC 串联电路和 GLC 并联电路的微分方程。
- (2) 分析在什么条件下，能够出现欠阻尼、过阻尼和临界阻尼等几种响应波形。

三、实验原理

二阶电路在阶跃信号的激励下，将会出现暂态过渡过程，其响应的变化轨迹取决于电路的固有频率。当调整电路中元件的参数值，使电路的固有频率分别为负实数、共轭复数及虚数时，可获得单调衰减、衰减振荡和等幅振荡的响应特性，实验中可观察到欠阻尼、临界阻尼和过阻尼等典型的暂态响应波形。

典型的二阶电路有 RLC 串联电路和 GLC 并联电路，如图 5-4 所示。

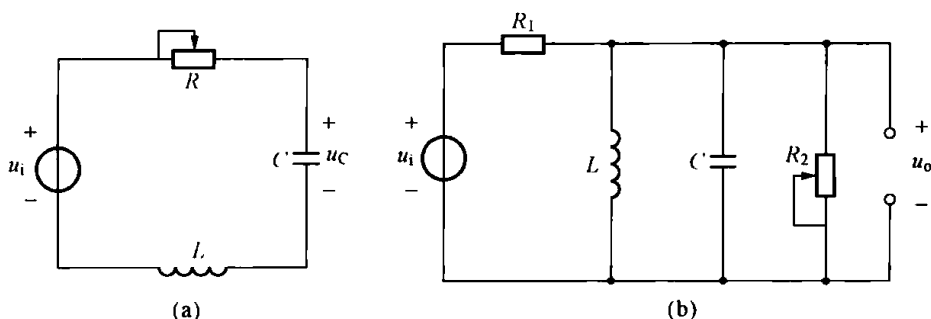


图 5-4 典型的二阶动态电路
(a) RLC 串联电路；(b) GLC 并联电路

下面以 RLC 串联电路为例来说明几种情况下的响应。在 RLC 串联二阶电路中，电路的阻尼系数和振荡周期为 $\alpha = R/2L$ ， $\omega_d = 1/\sqrt{LC}$ 。

(1) RLC 串联电路欠阻尼下的衰减振荡。当电路中的电阻不等于零，元件参数变化使得阻尼系数满足 $0 < \alpha < \omega_d$ ，也即 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时，电路的零输入响应为振幅逐渐衰减的正弦振荡，且 α 越大衰减越快，如图 5-5 (a) 所示。

(2) RLC 串联电路临界阻尼时的非振荡。当阻尼系数变化到满足 $\alpha = \omega_d$ ，即 $R = 2\sqrt{L/C}$ 时，电路的响应介于振荡和非振荡之间，称此时的阻尼为临界阻尼。实际上，用实验方法只能找到近似的临界点，即 $\alpha \approx \omega_d$ 或 $R \approx 2\sqrt{L/C}$ ，响应波形如图 5-5 (b) 所示。

(3) RLC 串联电路过阻尼时的非振荡。当阻尼系数变化到 $\alpha > \omega_d$ ，即在 $R > 2\sqrt{L/C}$ 后，电路的零输入响应呈非振荡的放电过程，如图 5-5 (c) 所示。

(4) RLC 串联电路无阻尼时的等幅振荡。当电路满足 $\alpha = 0$ 即 $R = 0$ 时，电路即为 LC 串联，其零输入响应呈现等幅正弦振荡的形式。由于实际电路中如电感元件总存在一定的阻

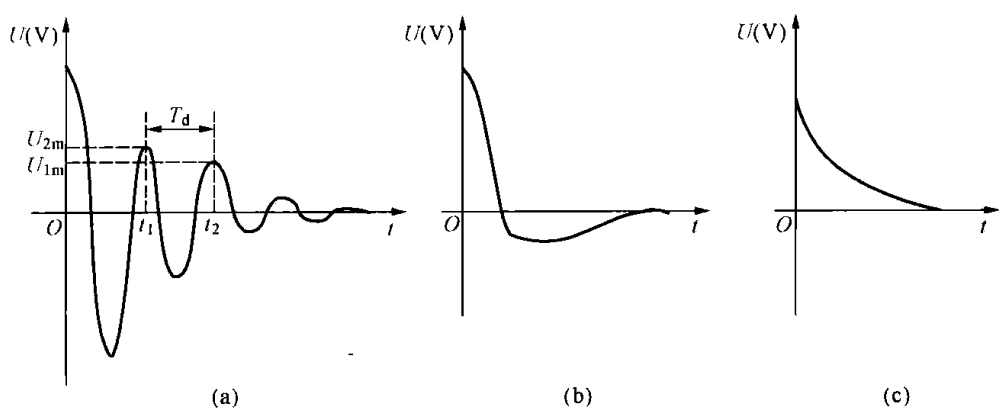


图 5-5 二阶动态电路阶跃响应
(a) 欠阻尼；(b) 临界阻尼；(c) 过阻尼

值，故无法获得等幅振荡的波形。用计算机仿真可以获得等幅振荡波形，实验方法参见本书仿真实验的相关内容。

(5) 测量 ω_d 和 α 的方法。用示波器的时间和电压差值测量功能，按图 5-5 (a) 所示进行测量，再利用下面的公式算出振荡角频率 ω_d (对应振荡周期 T_d) 和衰减系数 α

振荡周期：
$$T_d = t_2 - t_1$$

振荡角频率：
$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_d}$$

衰减系数：
$$\alpha = \frac{1}{T_d} \ln \frac{U_{1m}}{U_{2m}}$$

使用示波器的 ΔU 、 Δt 测量功能，在衰减振荡波形下，测量 U_{1m} 、 U_{2m} 和 T_d ，再求得衰减系数 α 。

四、实验设备 (见表 5-2)

表 5-2 实验设备及型号	
设备名称	型号与规格
函数信号发生器	TFG2006 DDS
示波器	SS-7802A 双踪示波器
	Tektornix TDS1002 数字式可存储双踪示波器
电阻、电容和电感元件若干	

五、实验内容

1. RLC 串联电路的阶跃激励及响应

选择元件，组成如图 5-4 (a) 所示的 RLC 串联电路。设置信号发生器输出电压为 1~3V、频率为 1kHz 的方波信号，用探头接至电路中的激励端，同时将激励信号和响应信号分别接入双踪示波器的两个通道 (接线时注意共地问题)。

有的信号发生器输出信号功率不够，需要将面板正面的输出信号接到背面“功放输入”端口，再将经过功率放大的信号接到电路中。

(1) 调节可变电阻器，观察二阶电路的零输入响应和零状态响应在过阻尼、临界阻尼和欠阻尼之间的变化过程，分别定性地描绘三种典型的响应波形。

(2) 调节 R 使示波器荧光屏上呈现稳定的欠阻尼响应波形, 测量此时电路的振荡频率 ω_d 和衰减系数 α 。

(3) 改变电路元件的参数, 如增减 L 或 C 之值, 重复观察当电路参数改变时, ω_d 和 α 的变化趋势, 并描绘出观察到的波形。

2. 正方波、正负方波激励及响应的波形观察与比较

熟悉信号发生器设置正方波、正负方波的方法, 参见附录中相关内容。

设置信号发生器, 使输出信号为零偏置的正方波 (即低电位为零), 调整电路的元件参数, 观察电路在不同阻尼情况下的波形特征。

再将输入电路的信号发生器信号设为偏置值等于幅值的正负方波, 调整电路的元件参数, 观察电路在不同阻尼情况下的波形特征。

比较上述两种方波信号作用下电路响应特征的差异。

3. 状态轨迹的观察

将电路的输出电压信号和电流信号分别接入到示波器的两个通道, 调节示波器显示状态轨迹的图形。在 RLC 串联电路中, 可将电阻上的电压信号作为电流信号, 再与 u_C 同时接入示波器两通道。而在 GLC 并联电路中, 三个元件上的输出电压信号相同, 要测量电容上的电流信号, 需串接一个测量电流的采样电阻, 其阻值应远小于整个电路的电阻值。

4. GLC 并联电路的阶跃激励及响应

连接一个 GLC 并联电路, 选取适当的元件参数, 参照上面串联电路的内容和步骤进行实验。

六、实验注意事项

同本章第一节一阶动态电路。

七、思考题

(1) 根据 RLC 实验电路元件的参数, 计算出处于临界阻尼状态的 R 值。

(2) 在示波器上, 如何测得 RLC 实验电路零输入响应欠阻尼状态的衰减常数 α 和振荡频率 ω_d ?

八、实验报告要求

(1) 根据观测结果, 在坐标纸上描绘二阶电路过阻尼、临界阻尼和欠阻尼的响应波形。

(2) 测算欠阻尼振荡曲线的 α 与 ω_d 。

(3) 归纳、总结电路元件参数的改变对响应的影响。

第六章 交流稳态电路实验 (一)

本章主要学习工频交流稳态电路的实验方法,熟悉交流电路及其接线。实验内容包括交流电路等效参数的测量、互感电路实验、功率因数的改善、三相交流电路综合实验等。

第一节 交流电路及其等效参数的测量 (综合性实验)

一、实验目的

- (1) 熟悉单相交流电路的接线。
- (2) 掌握功率表的基本原理、接线和使用。
- (3) 了解单相电能表的基本原理、接线和使用。
- (4) 掌握交流电路等效参数测量的实验方法。
- (5) 了解判别电路阻抗性质的方法。

二、预习思考题

- (1) 在 50Hz 的交流电路中,测得一只铁心绕组的 P 、 I 和 U , 如何算得其阻值及电感量?
- (2) 如何用串联电容的方法来判别阻抗的性质? 试用 I 随 X'_C (串联容抗) 的变化关系作

定性分析,证明串联试验时, C' 须满足 $\frac{1}{\omega C'} < |2X|$ 。

三、实验原理

1. 三表法测算等效参数

在交流电路中,负载可以是单一的 R 、 L 、 C 元件,也可以是 R 、 L 、 C 元件的串并联组合构成的二端网络。如果只关心负载与外部连接端口的特性,而对其内部元件构成和连接方式并不在意,则可将负载看成为一个等效阻抗,只需确定该等效阻抗的电阻、电抗以及阻抗的性质。

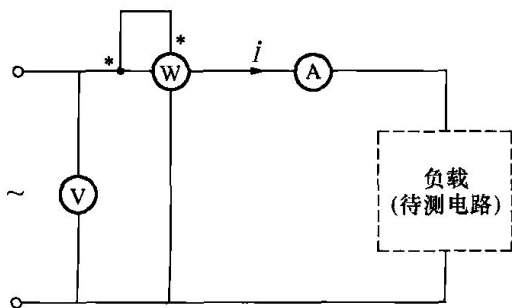


图 6-1 交流电路等效参数的测量

在交流稳态电路中,通过用交流电压表、交流电流表以及功率表分别测量出负载的电压 U 、电流 I 和消耗的功率 P , 计算得到待测负载的等效电阻、等效电抗,再判断负载的性质(感性、容性或阻性),从而用实验的方法确定待测负载的等效阻抗参数,如图 6-1 所示,这种方法称为三表法,此为测量工频交流电路参数的基本方法之一。三表法测得负载的电压、电流和功率后,计算其等效参数的基本公式为

阻抗模值:

$$|Z| = \frac{U}{I}$$

功率因数:

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI}$$

等效电阻:
$$R = \frac{P}{I^2} = |Z| \cos \varphi$$

等效电抗:
$$X = |Z| \sin \varphi$$

负载呈感性时的等效电感:
$$L = X / 2\pi f$$

负载呈容性时的等效电容:
$$C = 1 / 2\pi f X$$

2. 试验方法判别阻抗性质

判断电路阻抗的性质, 可以根据负载的电流和电压的相位关系来判断。若 i 超前于 u , 负载为容性阻抗; i 滞后于 u , 则为感性。

(1) 由仪表读出。智能数字功率表可以测得功率因数, 同时还能显示所接负载是容性还是感性。

(2) 用示波器观察。将电压、电流信号接到示波器上, 观察电压和电流的相位关系, 从而判断待测元件或网络的负载性质。电压信号接到示波器前需变换到合适的幅值, 电流信号需转换成同相位的电压信号。

(3) 用试验方法判别。在待测负载两端并联电容, 测量回路总的电流并根据其变化判别; 或将待测负载与电容串联, 测量待测负载上的电压并根据其变化判别。

与待测负载串联一个容抗适当的试验电容, 若待测负载的端电压下降, 则判断其为容性, 端电压上升则为感性。判定容抗是否适当的条件为

$$\frac{1}{\omega C'} < |2X|$$

式中: X 为被测阻抗的电抗值; C' 为串联试验电容值。

此关系式可自行证明。

如图 6-2 所示, 在待测负载两端并联一只容抗适当的试验电容, 若串接在电路中的电流表的读数增大, 则被测阻抗为容性, 电流减小则为感性。由于待测 Z 的性质和阻抗大小不同, 并联试验电容后的电路变化也不同。

图 6-2 (a) 中, Z 为待测负载的阻抗, C' 为试验电容。在图 6-2 (b) 所示的等效电路中, G 、 B 为待测阻抗 Z 的电导和电纳, B' 为试验电容 C' 的电纳。

当 B 为容性电纳时, 在端电压有效值不变的情况下, 对并联电容 C' 值无特殊要求。

当 B 为感性电纳时, 若 $B' > |2B|$, 电流单调上升 (如图 6-3 所示), 与 B 为容性时相同, 并不能说明电路是感性的。因此 $B' < |2B|$ 是判断试验电容的容纳是否适当的条件, 故得 $C' < \left| \frac{2B}{\omega} \right|$ 。由此得到的 C' 即为试验电容的适当容量值。

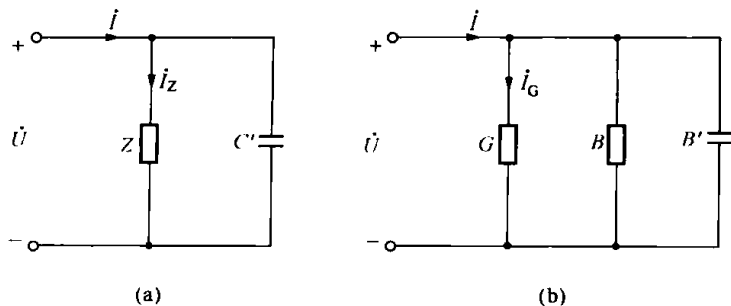


图 6-2 并联试验电容法判断负载性质
(a) 待测负载并联试验电容; (b) 等效电路

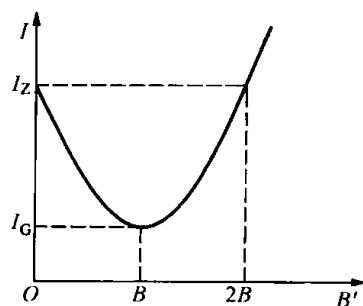


图 6-3 等效电路 $I-B'$ 关系曲线

3. 测量负载等效参数的其他方法

测量交流电路参数或无源二端网络等效参数的方法还有电桥法、谐振法等。对测量准确度要求较高时可以采用电桥法；当电路的频率较高时，可以采用谐振法。三表法是测量工频电路等效参数较为简便的基本方法。随着数字测量技术的发展，目前也越来越多地使用数字式仪器仪表，方便快捷地测得电路及元件的等效参数。

4. 有功功率和电能的测量

在交流电路中，往往使用功率表和电能表测量有功功率和电能。

指针式功率表内部有电流线圈和电压线圈，通过两个线圈之间的耦合测量有功功率。接线时必须将电流线圈与负载串联，电压线圈并联在负载两端。数字式功率表的内部是电流支路和电压支路，其工作原理与指针式功率表相似，外部接线则相同。

电能表与功率表的接线也相似。

四、实验设备（见表 6-1）

表 6-1 实 验 设 备 及 型 号

设备名称	型号与规格	设备名称	型号与规格
交流电压表	0~500V 数字表或指针表	自耦调压器	0~450V
交流电流表	0~5A 数字表或指针表	电感线圈（镇流器）	与日光灯配用
单相功率表	0~450V, 0~5A	阻性负载	白炽灯或其他
单相电能表	0~450V, 0~5A	日光灯负载	220V 日光灯
电容器	1~4.7 μ F, 交流 500V		

五、实验内容

1. 不同负载时电路参数的测量

(1) 按图 6-4 或图 6-5 接线，需注意功率表的电流接线端（电流线圈）与负载串联，电压接线端（电压线圈）与负载并联（如图 6-6 所示）。检查接线后接通电源，旋动调压器升压，使相电压达到需要的电压值。

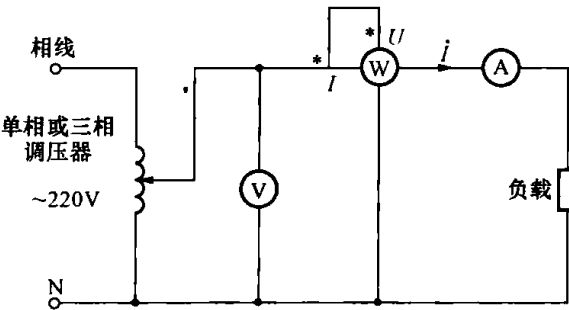


图 6-4 三表法测量电路参数接线图一

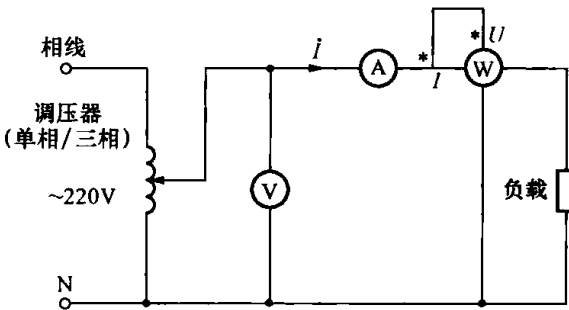


图 6-5 三表法测量电路参数接线图二

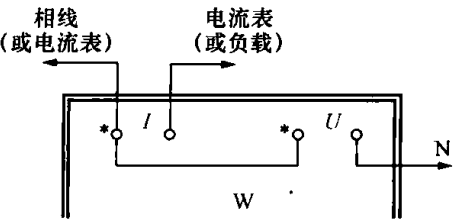


图 6-6 功率表接线

(2) 分别测量如白炽灯（阻性负载）、镇流器（感性负载）和电容器等元器件的电压、电流、有功功率和功率因数等参数。

(3) 将负载分别改为电感与电容的串联和并联，测量其电路参数，记录于表 6-2 中。

表 6-2 不同负载等效参数的测量和计算

负载	测量值							计算值		
	电压设定 (V)	实测电压 (V)	I (A)	P (W)	$\cos\varphi$	Z (Ω)	$\cos\varphi$	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
阻性负载 (白炽灯)	220									
	150									
电感器 L	150									
电容器 C	220									
	150									
L 、 C 串联	150									
L 、 C 并联	C_1 150									
	C_2 150									

2. 用试验电容判别负载的性质

参照上面的电路进行实验，可以不接功率表，在原负载上分别串接、并接试验电容，按表 6-3 给出的内容进行测量和记录，并判断原负载的阻抗性质。

表 6-3 试验电容法测量数据

	串 $1\mu\text{F}$ 电容 C'		并 $1\mu\text{F}$ 电容 C'	
	串前端电压 (V)	串后端电压 (V)	并前电流 (A)	并后电流 (A)
R (三只白炽灯)				
C ($4.7\mu\text{F}$)				
L (1H)				
L 与 C 串联				
L 与 C 并联				

3. 单相电能表接线和电能的测量

单相电能表的接法，与上面实验中功率表的接法相似，其电流接线端与负载串联，电压接线端应与负载并联。

负载正常工作后，可以观察到电能表的表盘旋转并计量电能。由于负载功率一般较低，在短时间内，电能表只能计得很少的电能。

改变所接负载的大小（如白炽灯的盏数），观察电能表表盘旋转的快慢变化。可以将电能表与功率表互相对照，根据功率表测得的有功功率值，估算一定时间内负载消耗的电能。

六、实验注意事项

- (1) 由于实验电源的调压器输出可到 380V，注意电源输出端要接相线和零线。如果将线电压接入电路，则可能因电压过高而损坏负载。
- (2) 选择导线时，除了要注意颜色的区别外，还应做到长短适中、合理布局、简洁清晰。
- (3) 实验过程中，注意身体不要触碰设备、导线、仪表、接线柱的裸露带电部分。
- (4) 注意做到“断电接线、先检查再通电调压、调零断电拆线”，避免因接线错误而直

接加电造成实验设备或仪器损坏。

七、实验报告要求

- (1) 根据实验测得的参数数据, 进行等效参数的计算。
- (2) 根据实验数据绘制电压电流相量图。
- (3) 完成预习思考题。
- (4) 分析和总结实验所得数据。

第二节 改善功率因数的实验

一、实验目的

- (1) 了解负载性质及变化对功率因数的影响。
- (2) 研究感性负载两端并联电容对改善功率因数的作用, 理解改善功率因数的意义。

二、预习思考题

- (1) 在电感电路中, 如何用实验方法寻找电路的最大功率因数?
- (2) 并联电容后, 电路中哪些参数不变? 哪些参数发生变化、如何变化?
- (3) 为什么采用并联电容的方法提高功率因数, 而不用串联法? 所并电容是不是越大越好?

三、实验原理

1. 感性负载及功率因数

电力系统中的大多数负载是感性负载, 比如常见的电动机、日光灯等。感性负载的功率因数都比较低, 在电压一定而又需输送较高有功功率时, 只能提高电流值, 这样对电力系统的运行是不利的: 一是使电源的容量得不到充分利用, 二是较大电流引起输电线上的损耗功率很大, 使得输电效率大大降低。

因此一般在电力系统中, 总希望负载能够尽可能运行在较高的功率因数下。实际中, 往往通过在感性负载两端并联电容的方法, 来适当地提高功率因数, 提高后的功率因数一般能达到 $0.8 \sim 0.85$ 。有些感性负载的功率因数非常低, 在采取提高功率因数的措施后, 其总的功率因数仍可能较低。

本实验以灯管、镇流器和启辉器组成的日光灯电路作为负载, 由于镇流器是一带铁心的绕组, 因此整个电路是感性负载, 其功率因数较低, 一般在 0.5 以下。

2. 日光灯的工作原理

日光灯的镇流器在启动时产生高电压以电离灯管内气体使日光灯导通, 而在正常工作时又能限制灯管的电流。启辉器相当于一个自动开关, 其内部有两个电极 (双金属动片、固定片), 两电极间并联一个小容量电容器。启动过程中, 较低的电压加在启辉器两端, 产生辉光放电, 双金属动片因放电而受热伸直, 与固定片接触, 之后放电停止, 双金属片冷却复位, 两电极分离。

日光灯管两端各有一小阻值的灯丝电极, 玻璃管壁内涂有荧光物质, 管内抽真空后再充进微量的惰性气体和少量汞。两端灯丝之间加有高压电时, 管内产生弧光放电, 水银蒸气受激发辐射大量紫外线, 管壁上的荧光粉在紫外线的激发下, 辐射出可见光。

日光灯电路开关接通或升高电压时, 电压加在镇流器、灯丝电阻和启辉器上, 灯管两端

电压不足以使其产生弧光放电。启辉器两电极间产生辉光放电，随后动片受热变形与固定片接触，辉光放电停止，动片冷却收缩复位，断开所接回路。此时由于回路突然断开，镇流器（带铁心的电感线圈）上产生较高的自感电压，高电压加在灯管两端，使管内产生弧光放电、激发荧光粉辐射出可见光。日光灯正常工作时，灯管两端的电压低于启辉器的动作电压，启辉器不再动作。

实际上，日光灯电路是电阻与电感的串联电路。

3. 电路原理

在感性负载两端并联适当的电容可以提高整个电路的功率因数，如图 6-7 所示。

四、实验设备 (见表 6-4)

表 6-4

实验设备及型号

设备名称	型号与规格	设备名称	型号与规格
日光灯	220V	单相功率表	0~450V, 0~5A
电感线圈 (镇流器)	与日光灯配用	交流电压表	0~500V 数字表或指针表
电容器	0~500V 可调电容箱	交流电流表	0~5A 数字表或指针表

五、实验内容

1. 日光灯电路功率因数提高

- (1) 选定接线图并依其接线, 将相电压调到 220V, 日光灯正常工作后开始实验测量。
- (2) 电容为零的情况下, 测量 I 、 P 、 $\cos\varphi$ 、 I_{HW} 、 I_C 。
- (3) 投入并联电容, 找到电流 I 最小且功率因数最高的一点, 此时即为近似的谐振点, 测量并记录数据。
- (4) 取几个小于谐振电容的不同 C 值, 测量对应的数据, 其中应有将功率因数提高到 0.8~0.85 之间的一组。
- (5) 取几个大于谐振电容的不同 C 值, 测量对应的数据。

2. 接线图

改善功率因数实验接线图如图 6-8~图 6-10 所示。

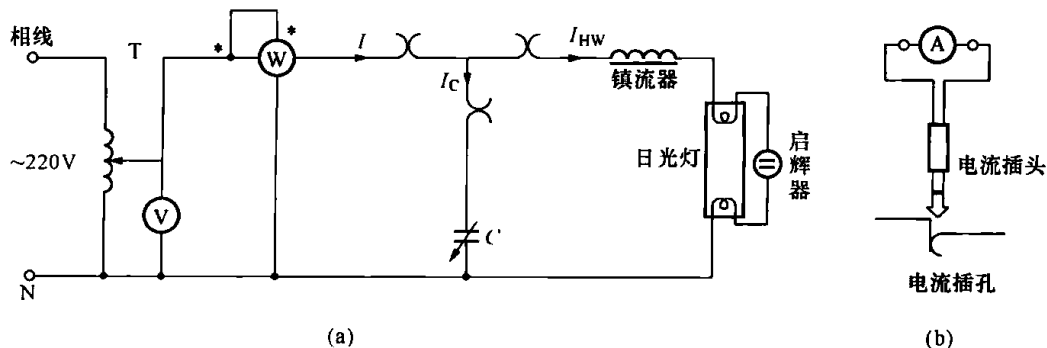


图 6-8 改善功率因数实验接线图一

(a) 接线图; (b) 用电流插头测电流

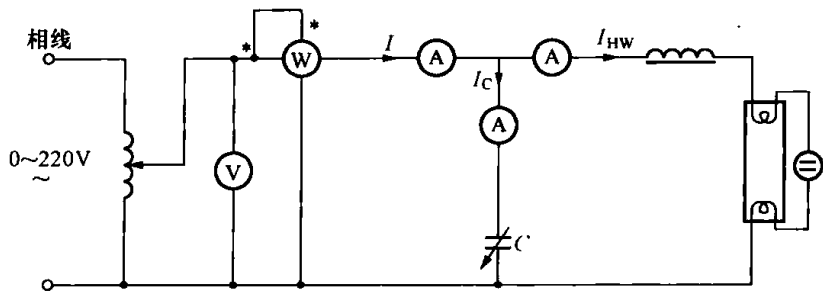


图 6-9 改善功率因数实验接线图二

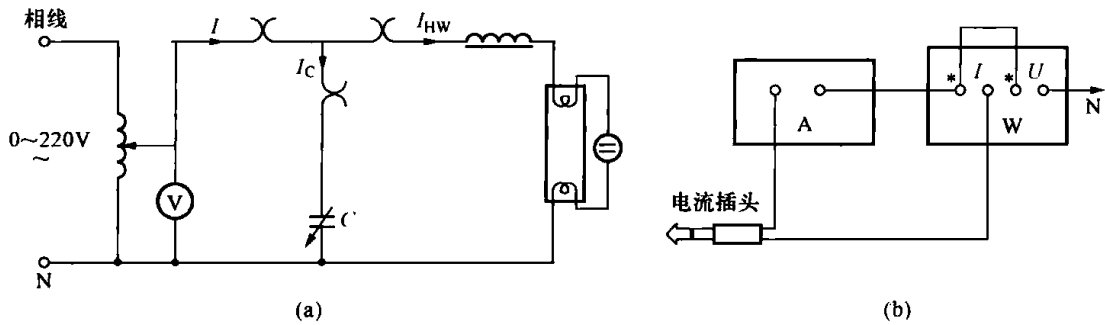


图 6-10 改善功率因数实验接线图三
(a) 接线图；(b) 电流插头接电流表和功率表

3. 实验数据记录

将实验测得的数据记入表 6-5，并计算相关参数。

表 6-5 功率因数改善实验数据

电路状态	测量数据							计算数据			
	U(V)	I(A)	I _{HW} (A)	I _C (A)	P(W)	cosφ	C(μF)	cosφ	Q(var)	S(VA)	C
未加电容											
感性（几组不同电容值）											
谐振											
容性（几组不同电容值）											

4. 计算电路的等效参数

参照本章第一节交流电路及等效参数的测量，计算日光灯及并联不同电容时电路的等效参数。

六、实验注意事项

- (1) 日光灯回路一定要接镇流器，否则极易烧坏日光灯。
- (2) 发现接线错误，必须先将电压调到零、断开电源、改接线后再送电。

七、实验报告要求

- (1) 根据测得的数据，计算 $\cos\varphi$ 、 Q 、 S 、 C ，与测得的 $\cos\varphi$ 进行对比，分析计算值与实测值间产生差异的可能原因。
- (2) 绘制 $C - \cos\varphi$ 关系曲线，分析负载性质与 φ 、 $\cos\varphi$ 的关系。
- (3) 绘制相量图，结合实验数据进行分析。
- (4) 记录本实验过程中发现的问题及处理方法。

(5) 总结实验及记录心得体会。

第三节 互感电路实验 (研究性实验)

一、实验目的

- (1) 通过实验学习测定互感电路的同名端、互感系数及耦合系数。
- (2) 观察和理解两个绕组相对位置变化、不同材料作绕组芯对互感的影响。

二、预习思考题

(1) 用直流法判断同名端时, 可否根据开关 S 断开瞬间毫安表指针的正、反偏来判断同名端?

(2) 本实验用直流法判断同名端是用插拔铁心时, 观察电流表的正、负读数变化来确定的, 这与实验原理中所叙述的方法是否一致?

三、实验原理

1. 判断互感绕组同名端的方法

(1) 直流法。

1) 瞬间通电法。如图 6-11 (a) 所示, 当开关 S 闭合瞬间, 若毫安表的指针正偏, 则可断定 1、3 为同名端; 若指针反偏, 则 1、4 为同名端。

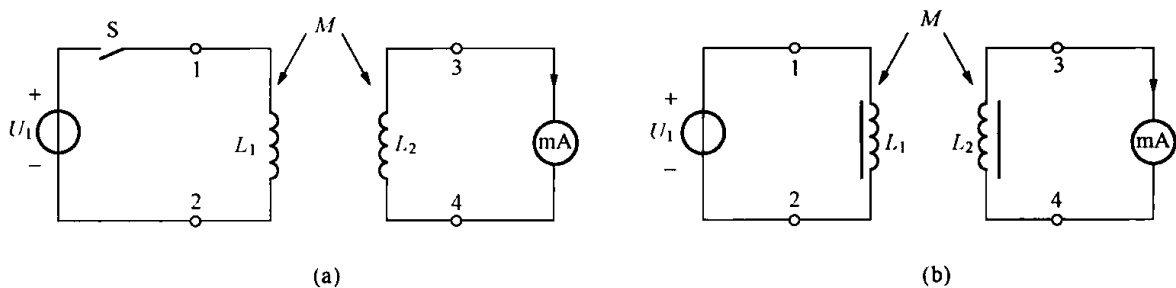


图 6-11 直流电压法测定互感绕组同名端

(a) 瞬间通电法; (b) 插拔铁心法

2) 插拔铁心。如图 6-11 (b) 所示, U_1 为可调直流稳压电源, 调至 10V。流过 L_1 侧的电流不可超过 0.4A (选用 5A 量程的数字电流表)。 L_2 侧直接接入小量程的指针式毫安表。将铁心迅速地插入和拔出, 观察毫安表指针的正、反偏变化, 参照瞬间通电法, 判定 L_1 和 L_2 两个线圈的同名端。

(2) 交流法。如图 6-12 所示, 将两个绕组 L_1 和 L_2 的任意两端 (如 2、4 端) 连在一起, 在其中的一个绕组 (如 L_1) 两端加一个低电压, 另一绕组 (如 L_2) 开路, 用交流电压表分别测出端电压有效值 U_{13} 、 U_{12} 和 U_{34} 。若 U_{13} 的值等于两个绕组端压之差, 则 1、3 是同名端; 若 U_{13} 的值等于两绕组端电压之和, 则 1、4 是同名端。

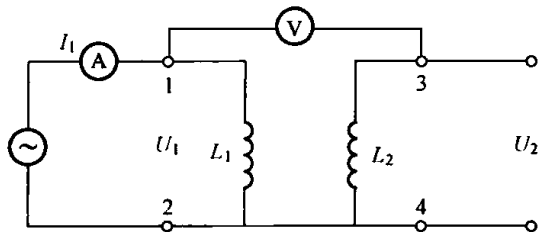


图 6-12 交流法测定互感绕组的同名端

2. 两绕组互感系数 M 的测定

在 L_1 侧施加低压交流电压 $\dot{U}_1$, 测出 $\dot{I}_1$ 及 $\dot{U}_2$ 有效值。根据互感电动势 $E_{2M} \approx U_{20} =$

ωMI_1 ，可算得互感系数为 $M=\frac{U_2}{\omega I_1}$ 。

3. 耦合系数 k 的测定

两个互感绕组耦合松紧的程度可用耦合系数 k 来表示，即

$$k = M/\sqrt{L_1L_2}$$

先在 L_1 侧加低压交流电压 $\dot{U}_1$ ，测出 L_2 侧开路时的电流有效值 I_1 ；然后再在 L_2 侧加电压 $\dot{U}_2$ ，测出 L_1 侧开路时的电流有效值 I_2 ，求出两绕组的自感 L_1 和 L_2 ，即可算得 k 值。

四、实验设备（见表 6-6）

表 6-6 实验设备及型号

设备名称	型号与规格	数量
数字直流电压表	0~200V	1
数字直流电流表	0~200mA	2
交流电压表	0~500V	1
交流毫安表	0~5A	1
空心互感线圈	大线圈 L_1 、小线圈 L_2	各 1
自耦调压器		1
直流稳压电源	0~30V	1
电阻器	30Ω/8W、510Ω/2W	
发光二极管	红色或绿色	1
铁心	粗、细	各 1
铝心	粗、细	各 1
变压器	36V/220V	1

五、实验内容

1. 测定互感线圈的同名端

(1) 直流法。实验线路如图 6-13 所示。先将 L_1 和 L_2 两线圈的四个接线端子编以 1、2 和 3、4 号。将 L_1 、 L_2 同心地套在一起，并放入细铁棒。

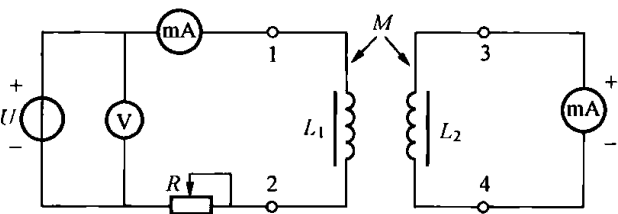


图 6-13 直流法测定互感线圈同名端

U 为可调直流稳压电源，调至 10V。流过 L_1 侧的电流不得超过 0.4A。 L_2 侧直接接入指针式毫安表。将铁棒迅速地拔出和插入，观察毫安表读数正、负的变化，判定 L_1 和 L_2 两个线圈的同名端。

(2) 交流法。按照如图 6-14 所示的电路进行实验。将 L_2 放入 L_1 中，并在两线圈中插入铁棒。电流表量程在 2.5A 以上， L_2 侧开路。

接通电源前，应首先检查自耦调压器是否调至零位，确认后方可接通交流电源，令自耦调压器输出一个很低的电压（约 12V），使流过电流表的电流小于 1.4A，然后用 0~30V 量程的交流电压表测量端电压有效值 U_{13} ， U_{12} ， U_{34} ，判定同名端。

拆去 2、4 连线，并将 2、3 相接，重复上述步骤，判定同名端。

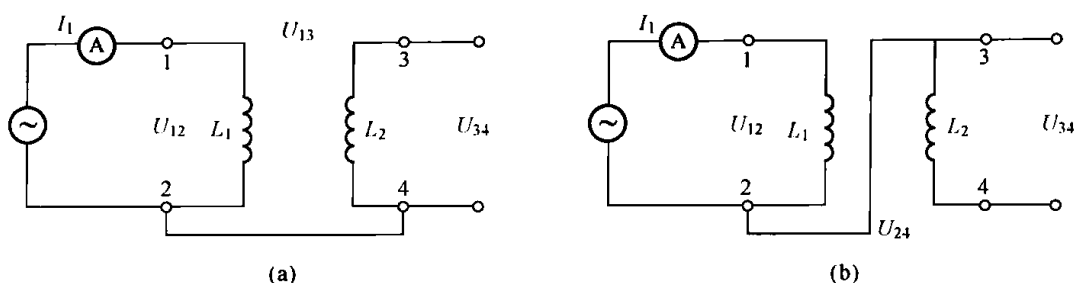


图 6-14 交流法测定同名端

(a) 短接 2、4; (b) 短接 2、3

2. 测定互感系数和耦合系数

(1) 如图 6-15 (a) 所示, 拆去两线圈间的连线, 测 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 的有效值, 计算出 M 。

(2) 将低压交流加在 L_2 侧, 使流过 L_2 侧电流小于 1A, L_1 侧开路, 如图 6-15 (b) 所示, 测出 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{U}_1$ 的有效值, 计算耦合系数 k 。

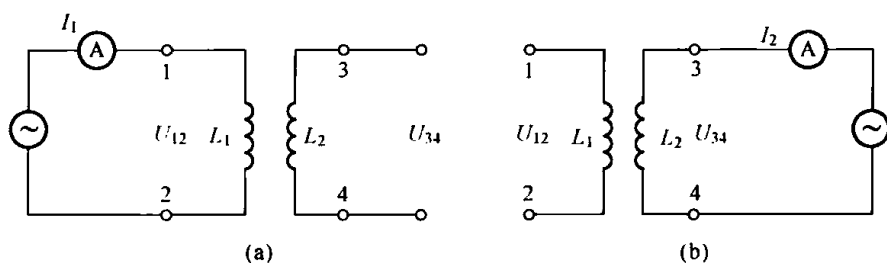


图 6-15 测定互感系数和耦合系数

(a) 电源加在 L_1 侧; (b) 电源加在 L_2 侧

(3) 用万用表的电阻挡分别测出 L_1 和 L_2 线圈的电阻值 R_1 和 R_2 , 计算变比 k 值。

3. 观察互感的影响因素

在 L_2 侧串联接入 LED 发光二极管和 510Ω 电阻, 如图 6-16 所示。

(1) 将铁心慢慢地从两线圈中抽出和插入, 观察 LED 亮度的变化及各表计读数的变化, 记录现象。

(2) 将两线圈改为并排放置, 并改变其间距, 以及分别或同时插入铁心, 观察 LED 亮度的变化及仪表读数。

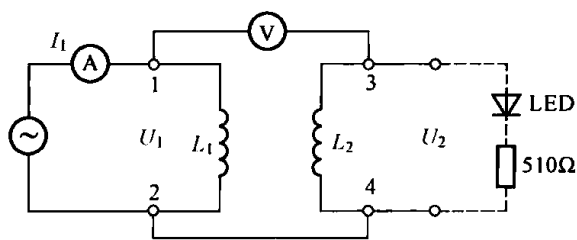


图 6-16 观察互感现象

(3) 改用铝心替代铁心, 重复上述步骤, 观察 LED 的亮度变化。

4. 测量磁通及变化

在上述实验过程中, 还可以使用磁通密度测量仪器, 测量观察各种情况下的磁密变化情况。

六、实验注意事项

(1) 整个实验过程中, 流过线圈 L_1 的电流不得超过 1.4A, 流过线圈 L_2 的电流不得超过 1A。

(2) 测定同名端和测量互感参数时, 应将小线圈 L_2 套在大线圈 L_1 中。

(3) 进行交流试验前, 首先要检查自耦调压器是否在零位。因实验时加在 L_1 上的电压只有 $2\sim 3\text{V}$, 因此调节时要特别仔细, 随时观察电流表的读数, 不得超过规定值。

(4) 实验过程中, 如果闻到焦糊味或发现异常情况, 应立即断电并检查原因、向指导教师报告。

七、实验报告要求

- (1) 结合实验说明互感线圈同名端、互感系数的实验测试方法。
- (2) 自拟表格记录数据并完成计算。
- (3) 描述并解释实验中观察到的互感现象及各种因素对其的影响。
- (4) 分析与总结实验数据。

第四节 三相交流电路 (综合性实验)

一、实验目的

- (1) 掌握三相交流电路相序的测量方法。
- (2) 掌握三相负载星形连接、三角形连接的方法, 验证两种接法时线电压与相电压、线电流与相电流之间的关系。
- (3) 观察和理解三相四线供电系统中零线 (即中线) 的作用。
- (4) 掌握三相电路功率测量的常用方法。

二、预习思考题

(1) 配电变压器的低压侧线电压为 380V 且不可调, 那么在什么情况下三相负载可以作三角形连接?

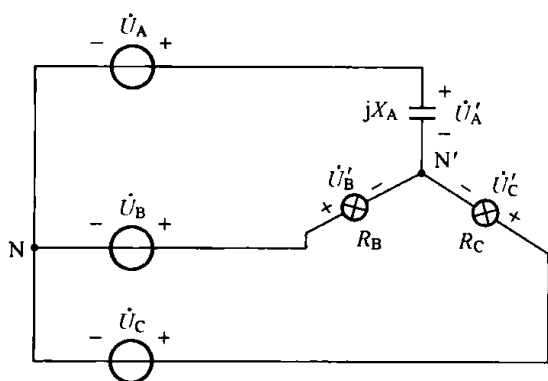


图 6-17 三相电路电源相序的测量

(2) 分析三相星形连接的不对称负载在无中线情况下, 当某相负载开路或短路时会出现什么情况? 如果接上中线, 情况又如何?

(3) 实验中为什么要通过三相调压器将 380V 的线电压降为 220V ?

三、实验原理

1. 三相电源相序的测定

图 6-17 所示的电路, 由一个电容器和两个电灯连接成星形不对称三相负载, 此相序指示器测量电路可用以测定三相电源的相序。

推导公式如下:

$$\text{设} \quad \frac{1}{\omega C} = R, \quad U_A = U_P \angle 0^\circ \text{V}$$

则

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{U_P \left(-\frac{1}{jR} \right) + U_P \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) + U_P \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right)}{-\frac{1}{jR} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}}$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_{N'N} = U_P \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - U_P(-0.2 + j0.6)$$

$$= U_P(-0.3 - j1.466) = 1.49 \angle -101.6^\circ U_P$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_{N'N} = U_P \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - U_P(-0.2 + j0.6)$$

$$= U_P(-0.3 + j0.266) = 0.4 \angle -138.4^\circ U_P$$

由于 $\dot{U}'_B > \dot{U}'_C$, 故 B 相灯光较亮。

实验中如果电容器接电源 A 相, 则灯光较亮的一相接的是电源 B 相, 较暗的就是 C 相, 其他情况以此类推。

2. 三相负载的星形接线

(1) 无中线的星形接线 (Y 形接线)。三相负载作星形无中线连接, 电源的中性点 N 与负载中性点 N' 间不连通。

在三相负载对称时, 线电压 U_L 与相电压 U_P 之间满足 $U_L = \sqrt{3}U_P$; 线电流 I_L 与相电流 I_P 之间满足 $I_L = I_P$ 。

在三相负载不对称时, 负载中性点发生位移, 电源中性点与负载中性点之间产生较大的电压 $U_{NN'}$, 造成负载较轻一相的电压高于对称时的正常值 (即 $U_P > U_L/\sqrt{3}$), 情况严重时可能使该相负载损坏; 负载较重一相的电压又降低, 有可能使该相负载无法正常工作。

(2) 有中线的星形接线 (YN 接线)。三相负载作有中线星形连接, 电源的中性点 N 与负载中性点 N' 间连通, 又称 YN 接线。

在三相电源和三相负载都完全对称时, 负载的电压和电流分别满足关系式: $U_L = \sqrt{3}U_P$, $I_L = I_P$, 且此时流过中线的电流 I_0 为零。

三相负载不对称时, 由于中线的存在, 使得负载每相电压仍维持不变, 中线电流 I_0 的大小随负载不对称的情况而变化。

3. 三相负载的三角形接线

当对称三相负载作三角形接线 (也称 Δ 形接线) 连接时, 有 $I_L = \sqrt{3}I_P$, $U_L = U_P$ 。

当不对称负载作 Δ 形接线时, 只要电源的线电压 U_L 对称, 加在三相负载上的电压仍是对称的, 但因为各相负载不对称, 故相电流和线电流关系为 $I_L \neq \sqrt{3}I_P$ 。

由于 Δ 形接线时相电压等于线电压, 故实验时必须注意负载的工作电压不得高于其额定电压。

4. 三相负载功率的测量

对 YN 接线, 用单相功率表测量每相负载的功率, 再求得三相负载的总有功功率。

对三相负载的 Y 形或 Δ 形接线, 不论负载对称与否, 都可以用两个单相功率表测得三相负载的总有功功率。以 B 相为电压公共端接两表法测量, 计算三相负载总有功功率 P 的公式可表示为

$$P = P_1 + P_2 = U_{AB}I_A \cos\varphi_1 + U_{BC}I_B \cos\varphi_2$$

四、实验设备（见表 6-7）

表 6-7 实 验 设 备 及 型 号

设备名称	型号与规格	设备名称	型号与规格
三相自耦调压器	0~450V	单相功率表	0~450V, 0~5A
交流电压表	0~500V 数字表或指针表	三相灯组负载	白炽灯三组
交流电流表	0~5A 数字表或指针表	电感、电容元件	

五、实验内容

1. 相序的测定

- (1) 用 220V 白炽灯和 $1\mu\text{F}/500\text{V}$ 电容器，按图 6-17 接线，将调压器的输出线电压调整为 220V，观察两只灯泡的明、暗，判断三相交流电源的相序。
- (2) 将电源线任意调换两相后再接入电路，观察两灯的明亮状态，判断三相交流电源的相序。

2. 三相负载星形连接

接线前，检查三相调压器的输出是否在最小值，选择图 6-18~图 6-21 给出的接线图之一，将三相灯组负载接到调压器的三相输出电源，分别将三相负载搭接成 YN 和 Y 形接线，测量并记录参数（见表 6-8），同时观察记录灯组负载开不同盏数时的亮度及变化。

接线完成需经检查后，方可开启实验台电源，逐渐增大调压器输出使得线电压达到 220V，分别测量三相负载的相电流、线电压、相电压、中线电流 I_0 和中点电压 $U_{NN'}$ 。

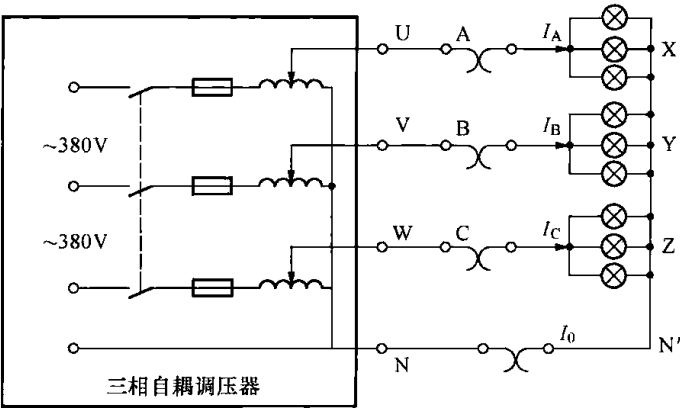


图 6-18 三相负载有中线星形（YN）接线一

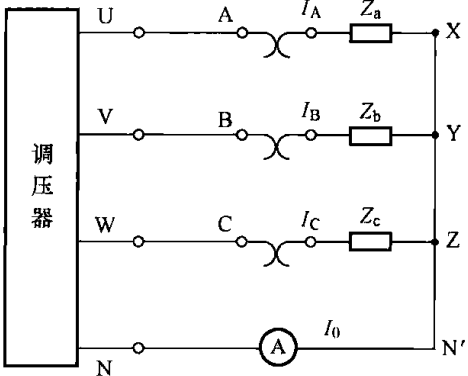


图 6-19 三相负载有中线星形（YN）接线二

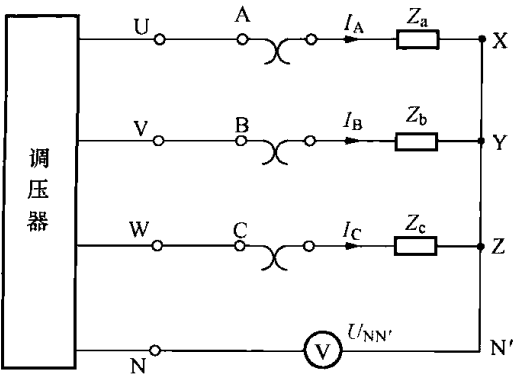


图 6-20 三相负载无中线星形（Y形）接线一

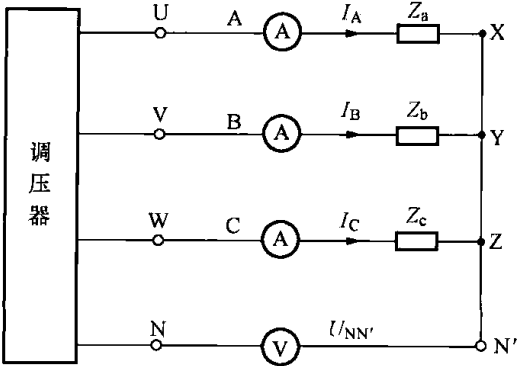


图 6-21 三相负载无中线星形（Y形）接线二

图 6-18 和图 6-20 是用电流插孔测量负载电流。图 6-19 和图 6-21 是直接在回路中串接电流表测量负载电流。

表 6-8 负载星形接线 (Y形和 YN 接线) 实验数据记录

	各相负载 (开灯盏数)			灯的明暗程度	负载相电流			负载线电压 (V)			负载相电压 (V)			中线电流	中点电压
	A 相	B 相	C 相		I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{A0}	U_{B0}	U_{C0}	I_0	$U_{NN'}$
负载 YN 接线	...														
负载 Y 形接线	...														

3. 三相负载三角形接线

按图 6-22 将三相负载接成三角形, 检查后送电并调节三相调压器, 使其输出线电压为 220V, 测试各相灯组负载在打开不同盏数情况下的电压、电流参数, 同时观察白炽灯的明暗变化, 记录于表 6-9 中。

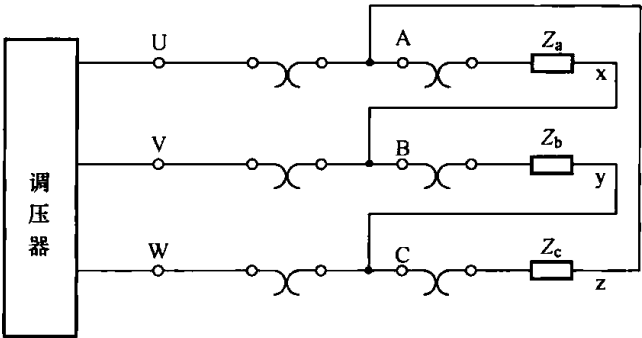


图 6-22 三相负载三角形接法接线图

表 6-9 负载三角形接线测量数据记录

	各相负载 (开灯盏数)			灯的明暗程度	线电压 = 相电压			线电流			相电流		
	A 相	B 相	C 相		U_{AX}	U_{BY}	U_{CZ}	I_A	I_B	I_C	I_{AX}	I_{BY}	I_{CZ}
三相平衡	...												
三相不平衡	...												

(2) 接通三相电源开关, 调节调压器输出使线电压为 220V, 分别测量 P_1 、 P_2 并作记录。此时测得的 P_1 和 P_2 之和即为三相负载的总有功功率 P_Σ 。注意, P_1 、 P_2 并不是某相负载的功率。

(3) 改变功率表接线, 使其电压线圈公共端分别为 A、B、C 相, 电流线圈接相应的线电流, 再分别测量功率 (图 6-23 中未绘出以 B 相为公共端的接线图, 可自行绘制)。

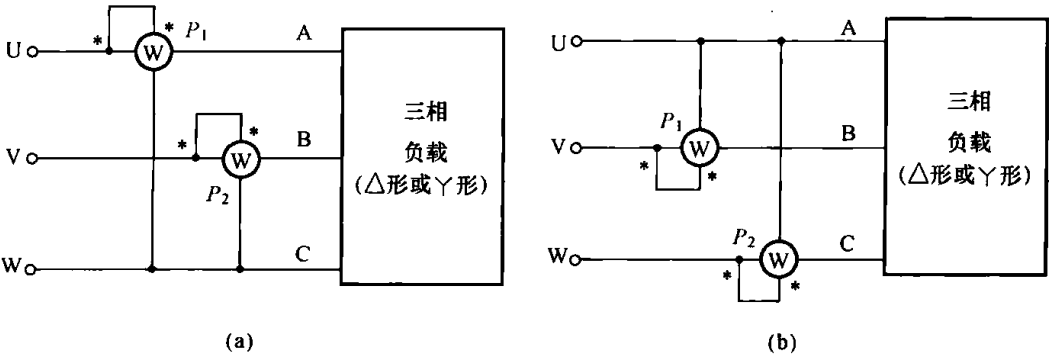


图 6-23 两表法测量负载三相功率接线图
(a) C 相为公共端; (b) A 相为公共端

5. 负载星形接线的功率测量

(1) 对有中线的三相负载星形接线 (YN 接线), 不能用两表法测量三相功率, 而需测量每相功率, 三相负载总功率为各相功率之和, 这种方法称为单表法。如图 6-24 所示电路中, 不论三相负载是否对称, 均可测量其三相有功功率。

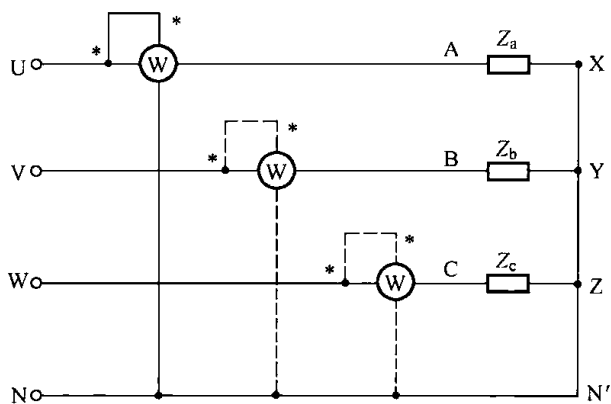


图 6-24 三相负载 YN 接线测量三相功率电路

(2) 当负载作 Y 形接线时, 不论负载对称与否, 也可以用两功率表法测量三相功率。

6. 选做实验

(1) 无功功率的测量。按照图 6-25 所示接线, 可以测量三相对称负载的无功功率。

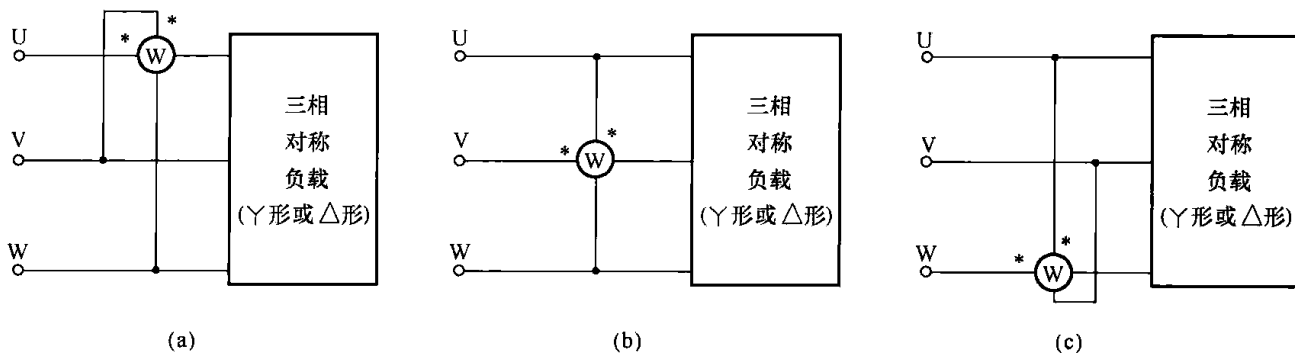


图 6-25 用有功功率表测量三相无功功率接线图

(a) 接线方式一; (b) 接线方式二; (c) 接线方式三

(2) 其他负载类型的三相电路实验。实际系统中的三相负载, 往往并不是白炽灯这样的阻性负载, 常见的有如日光灯、节能灯、电动机等感性负载及其他容性负载, 实验时可以挑选不同类型的三相负载接到电路中, 进行三相电路实验。

六、实验注意事项

(1) 实验电源采用三相交流供电, 调压器输出的线电压最大可到 400V 左右。实验时要注意安全, 不可触及设备和线路的带电部分, 防止发生意外。

(2) 接线前检查调压器调节在最低位, 接线完毕经检查后方可接通电源。

七、实验报告要求

(1) 根据实验测得的数据, 分析三相电路中的相电压与线电压、相电流与线电流之间的关系。

(2) 根据实验数据和观察到的现象, 总结不同接线方式下电路参数与负载的关系, 比较星形接线有无中线的异同。

(3) 分别绘制三相负载星形接线的电压相量图, 结合数据进行分析。

(4) 绘制三角形接线负载不对称时的电流相量图, 求出线电流值, 与测得的线电流作比较。

第七章 交流稳态电路实验 (二)

本章实验主要包括交流电路频率特性的研究(包括 RLC 串联谐振、滤波器及 RC 选频网络特性测试)、非正弦周期信号的研究。

第一节 交流电路频率特性的研究(综合性实验)

一、理论基础

1. 正弦稳态 RLC 串联电路及其谐振

(1) 在图 7-1 所示的正弦稳态 RLC 串联电路中,当正弦交流信号源的频率 f 改变时,电路中的感抗、容抗随之而变,电路中的电流也随之变化。取电阻上的电压 U_o 作为响应,以 f 为横坐标,以 U_o/U_i 为纵坐标(因 U_i 不变,也可以 U_o 为纵坐标),绘出频率特性曲线(即谐振曲线),如图 7-2 所示。

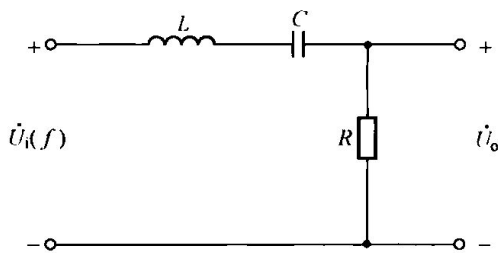


图 7-1 正弦稳态 RLC 串联电路

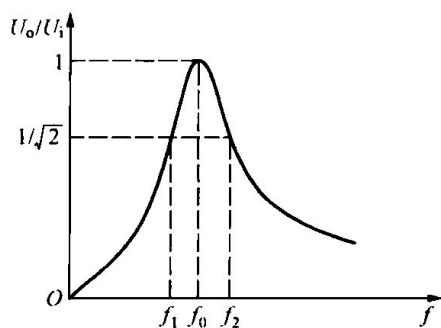


图 7-2 正弦稳态电路的幅频特性

(2) 在频率特性曲线的顶点 $f=f_0=1/2\pi\sqrt{LC}$ 处, $X_L=X_C$, 电路呈纯阻性, 电路阻抗的模最小, 此时的频率称为谐振频率。输入电压 U_i 的有效值为定值时, 电路中的电流 I 达到最大值, 且与输入电压 U_i 同相位。从理论上讲, 此时 $U_i=U_R=U_o$, $U_L=U_C=QU_i$ 。但在实际电路中, 由于元件参数并不是理想参数, 尤其是电感元件有一定的等效电阻, 而非理想的纯电感, 所以实验中测得的数据并不完全与理论值相符。

(3) 电路品质因数 Q 值的两种测量方法。

方法一是根据公式 $Q=\frac{U_L}{U_o}=\frac{U_C}{U_o}$ 测定, U_C 与 U_L 分别为谐振时电容器 C 和电感线圈 L 上的电压。

方法二是通过测量谐振曲线的通频带宽度 $\Delta f=f_2-f_1$, 再由式 $Q=\frac{f_0}{f_2-f_1}$ 求得。式中 f_0 为谐振频率。 f_2 和 f_1 是失谐时, 即输出电压的幅度下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ 时的上、下频率点。

电路的品质因数 Q 值越大, 曲线越尖锐, 通频带越窄, 电路的选择性越好。在恒压源

供电时,电路的品质因数、选择性与通频带只决定于电路本身的参数,而与信号源无关。

2. 滤波器及 RC 选频网络特性

在电气、电子工程实际中,有时要设计专门的电路或网络,使得需要的频率分量能够通过,而拟制或阻断不需要的频率分量。这种具有频率选择功能的网络,工程上称为滤波器。

如图 7-3 所示的 RC 选频电路结构简单,常常作为选频环节应用在低频振荡电路中,可以获得很高品质的正弦电压。

(1) 幅频特性的测量。以函数信号发生器输出的正弦信号作为激励信号 u_i , 并保持 u_i 值不变的情况下,改变输入信号的频率 f , 用交流毫伏表或示波器测出输出端相应于各个频率点下的输出电压有效值 u_o , 以 f 为横轴、 u_o 为纵轴,画出电路的幅频特性曲线。

RC 选频电路的一个特点是其输出电压幅度不仅会随输入信号的频率而变,而且还会出现一个与输入电压同相位的最大值,如图 7-4 (a) 所示。

由电路分析得知,该网络的传递函数为

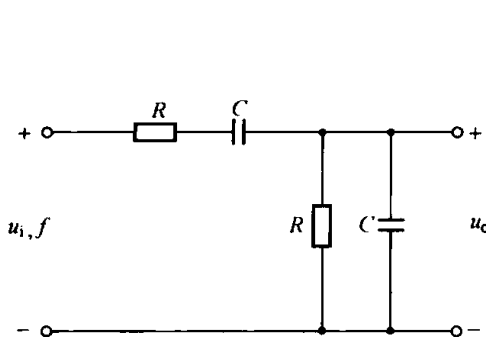


图 7-3 RC 选频电路

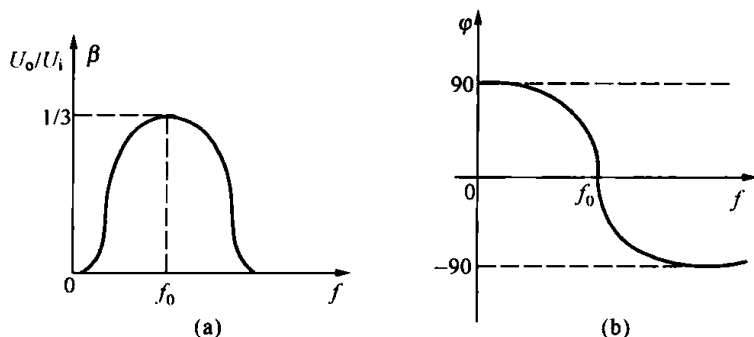


图 7-4 RC 选频电路的特性曲线

(a) 幅频特性曲线; (b) 相频特性曲线

$$\beta(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - 1/\omega RC)}$$

当角频率 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时, $|\beta| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{3}$, $\dot{U}_o$ 与 $\dot{U}_i$ 同相, 可见 RC 串并联选频电路具有带通特性。

(2) 相频特性的测量。将上述电路的输入和输出分别接到双踪示波器的 Y_A 和 Y_B 两个输入端, 改变输入正弦信号的频率, 观测相应的输入和输出波形间的时延 τ 及信号的周期 T , 则两波形间的相位差为 $\varphi = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ = \varphi_o - \varphi_i$ (输出相位与输入相位之差)。

将各个不同频率下的相位差 φ 画在以 f 为横轴, φ 为纵轴的坐标纸上, 用光滑的曲线将这些点连接起来, 即是被测电路的相频特性曲线, 如图 7-4 (b) 所示。

由电路分析理论得知, 当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$, 即 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, $\varphi = 0$, $\dot{U}_o$ 与 $\dot{U}_i$ 同相位。

二、实验目的

1. 正弦稳态 RLC 串联电路谐振

(1) 用实验方法测量 RLC 串联电路中不同频率下的 u_o 、 u_L 、 u_C , 并绘制频率电压曲线。

(2) 改变 R 、 L 、 C 值, 重复步骤 (1), 分析元件参数变化对电路的影响。

(3) 加深理解电路发生谐振的特点, 掌握电路品质因数 (电路 Q 值) 的物理意义及其测定方法。

2. 滤波器及 RC 选频网络特性

- (1) 熟悉 RC 选频电路的结构特点及其应用;
- (2) 学会用交流毫伏表和示波器测定 RC 选频电路的幅频特性和相频特性。

三、预习思考题

1. 正弦稳态 RLC 串联电路谐振

- (1) 根据实验线路板给出的元件参数值, 估算电路的谐振频率。
- (2) 改变电路的哪些参数可以使电路发生谐振, 电路中 R 的数值是否影响谐振频率值?
- (3) 如何判别电路是否发生谐振? 测试谐振点的方案有哪些?
- (4) 电路发生串联谐振时, 为什么输入电压不能太大, 如果信号源给出 $3V$ 的电压, 电路谐振时, 用交流毫伏表测 U_L 和 U_C , 应该选择用多大的量限?
- (5) 要提高 RLC 串联电路的品质因数, 电路参数应如何改变?
- (6) 本实验在谐振时, 对应的 U_L 与 U_C 是否相等? 如有差异, 原因何在?

2. 滤波器及 RC 选频网络特性

- (1) 根据电路参数, 分别估算 RC 选频电路两组参数时的固有频率 f_0 。
- (2) 推导 RC 串并联电路的幅频、相频特性的数学表达式。

四、实验设备

- (1) 正弦稳态 RLC 串联电路谐振实验设备见表 7-1。

表 7-1 正弦稳态 RLC 串联电路谐振实验设备列表

设备名称	型号与规格	数量
函数信号发生器	实验台挂箱信号发生器	1 台
	TFG2006 DDS	
交流毫伏表	EM2182 双通道数字毫伏表	2 块
示波器	SS-7802A 双踪示波器	1 台
	Tektornix TDS1002 数字式可存储双踪示波器	
RLC 串联谐振电路		

- (2) 滤波器及 RC 选频网络特性实验设备见表 7-2。

表 7-2 滤波器及 RC 选频网络特性实验设备列表

设备名称	型号与规格	数量
函数信号发生器	实验台挂箱信号发生器	1 台
	TFG2006 DDS	
交流毫伏表	EM2182 双通道数字毫伏表	2 块
示波器	SS-7802A 双踪示波器	1 台
	Tektornix TDS1002 数字式可存储双踪示波器	
RC 选频网络实验电路		

五、实验内容

1. 正弦稳态 RLC 串联电路及其谐振

(1) 选择 R 、 L 、 C 元件，与信号发生器、交流毫伏表连接，使信号发生器输出电压恒定（如 3V）而频率变化的正弦信号。用交流毫伏表测量各频率点元件上的电压值 u_o 、 u_L 、 u_C 。在调整正弦输入信号频率的过程中，注意监视其电压，如有变化及时调整使其保持不变。

(2) 在测量过程中注意找出电路的谐振频率 f_0 。测量中 u_o 最大，并且 u_L 和 u_C 的大小接近相等的点，就可以看成是谐振点。

(3) 实验测量时，在谐振点两侧频率变化的间隔可以小一些，在远离谐振点时，频率间隔变化可以大些。逐点测出 u_o 、 u_L 、 u_C 之值，记入表 7-3 中。

表 7-3 正弦稳态 RLC 串联电路及其谐振实验数据记录

f														...
u_o														
u_L														
u_C														
$u_i =$ $C =$ $R =$ $L =$ $f_0 =$ $f_2 - f_1 =$ $Q =$														

(4) 改变 R 、 L 、 C 元件的参数，可以只改变电阻 R ，也可同时改变 R 、 C ，再行测量并记录数据，并与前次测量的数据进行比较，分析引起数据变化的因素。

(5) 电压相位的观察。

用示波器的两个通道分别连接 u_i 、 u_o 、 u_L 、 u_C 中的两个信号，在示波器上观察电压相位的变化，注意在使用探头连接时的“共地”问题。

2. 滤波器及 RC 选频网络特性

(1) 测量 RC 选频网络的幅频特性。

1) 取 $R=1\text{k}\Omega$ ， $C=0.1\mu\text{F}$ 或利用实验箱上的“RC 选频网络”，连接成如图 7-5 所示的电路。

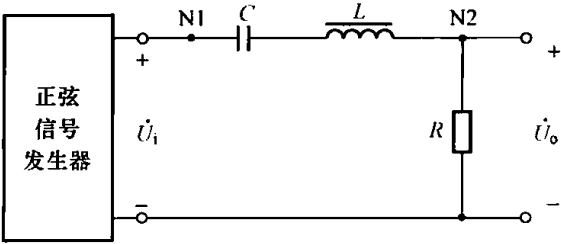


图 7-5 RLC 选频网络电路

2) 调节信号源输出电压为 3V 的正弦信号，将其接到电路的输入端。

3) 改变信号源的频率 f ，并保持 $U_i=3\text{V}$ 不变，测量输出电压 U_o ，测量数据记入表 7-4 中（可先测量 $\beta=1/3$ 时的频率 f_0 ，然后再在 f_0 左右设置其他频率点测量）。

4) 取 $R=200\Omega$ ， $C=2.2\mu\text{F}$ ，重复上述测量。

表 7-4 测量 RC 选频网络的幅频特性实验数据

$R=1\text{k}\Omega$ $C=0.1\mu\text{F}$	f (Hz)	
	U_o (V)	
$R=200\Omega$ $C=2.2\mu\text{F}$	f (Hz)	
	U_o (V)	

(2) 测量 RC 选频网络的相频特性。将图 7-5 中的输入 u_i 和输出 u_o 分别接至双踪示波器的 Y_A 和 Y_B 两个输入端, 改变输入正弦信号的频率, 观测不同频率点时, 相应的输入与输出波形间的时延 τ 及信号的周期 T , 测量数据记入表 7-5 中。两波形间的相位差为

$$\varphi = \varphi_o - \varphi_i = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ$$

表 7-5 测量 RC 选频网络的相频特性实验数据

$R=1\text{k}\Omega$ $C=0.1\mu\text{F}$	$f(\text{Hz})$	
	$T(\text{ms})$	
	$\tau(\text{ms})$	
	φ	
$R=200\Omega$ $C=2.2\mu\text{F}$	$f(\text{Hz})$	
	$T(\text{ms})$	
	$\tau(\text{ms})$	
	φ	

六、实验注意事项

1. 正弦稳态 RLC 串联电路谐振

(1) 调整频率时应注意频率间隔的疏密要选择得当, 可在谐振频率附近多取几点。还要注意测出 u_L 、 u_C 最大值及其随频率增减而出现下降的趋势。调整频率后如果信号电压发生变化, 应及时调节使其输出维持在所需要的值。

(2) 由于一只毫伏表的两个测量通道是内部共地的, 所以如果两通道都接入了信号, 需注意两根信号线连接被测元件的“共地”问题。

2. 滤波器及 RC 选频网络特性

由于信号源内阻的影响, 输出电压信号的幅度可能会随信号频率变化。因此, 在调节输出频率时, 应同时观察并保持输出电压的幅度不变。

七、实验报告要求

1. 正弦稳态 RLC 串联电路谐振

(1) 根据测量数据, 在一个坐标上绘出 R 、 L 、 C 元件上的三条幅频特性曲线, 即

$$U_o = H_1(f); \quad U_L = H_2(f); \quad U_C = H_3(f)$$

改变元件参数, 即改变品质因数 Q , 再绘制一组曲线, 与前一组曲线进行对比分析。

(2) 计算通频带与 Q 值, 说明不同 R 值时对电路通频带与品质因数的影响。

(3) 对两种不同的测量 Q 值的方法进行比较, 分析误差原因。

(4) 谐振时, 比较输出电压 U_o 与输入电压 U_i 是否相等, 试分析原因。

(5) 通过本次实验, 总结、归纳串联谐振电路的特性。

2. 滤波器及 RC 选频网络特性

(1) 根据实验数据, 绘制 RC 选频电路的幅频特性和相频特性曲线。

(2) 将实验测得的 f_o 与理论计算值比较, 分析误差原因。

(3) 总结并分析实验数据。

第二节 非正弦周期信号的研究 (综合性实验)

一、实验目的

- (1) 正确理解非正弦周期信号及谐波的概念。
- (2) 掌握非正弦周期信号的测量方法。
- (3) 研究非正弦周期电路的规律。

二、预习思考题

- (1) 复习电路理论中关于非正弦周期信号部分的相关概念和知识。
- (2) 能否用单相功率表直接测量非正弦周期电路的负载总的平均功率?

三、实验原理

1. 工程实际中的非正弦周期信号

在电力系统中,一方面,由于发电机设计和制造工艺的原因,以及实际运行工况的影响,发电机的定子和转子气隙间的磁感应强度很难严格按照正弦分布,所以发电机感应产生的电压波形并不是完全意义上的正弦波形,而是周期性的非正弦波形;另一方面,电力负荷并不都是线性对称负载,由于大型工业设备,如电弧炉、电力机车、大型牵引设备等的运行和启停,以及系统中发生各种短路故障时,都会使系统的电压和电流波形畸变,这些影响有些是周期性的,有些是非周期性的。其他如电信工程、电力电子技术、自动控制、计算机技术等领域,也常常遇到非正弦周期信号的问题。

本节实验主要是观察和研究在非正弦周期信号作用下,线性电路的稳态响应及波形。

2. 非正弦周期信号的分解

为了分析和研究非正弦周期信号,应用傅里叶级数将非正弦周期电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 信号分解为不同频率的正弦波信号的叠加,即

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_{ku})$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \varphi_{ki})$$

式中: U_0 、 I_0 分别为非正弦周期电压和电流的直流分量; U_{km} 、 I_{km} 分别为 k 次谐波电压、电流的最大值; φ_{ku} 、 φ_{ki} 分别为 k 次谐波电压、电流的相角。

非正弦周期电压和电流的有效值可分别写成

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

式中: U_1 、 U_2 、 U_3 和 I_1 、 I_2 、 I_3 分别为各次谐波的有效值。

非正弦周期电流电路的平均功率为

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} P_k$$

3. 用三倍频率器产生三次谐波电压

产生非正弦周期信号的方法和装置很多,此处介绍能够形成三次谐波电压的三倍频率器。在图 7-6 (a) 所示的电路中,三个相同的单相变压器一次侧作无中线星形连接,二次

侧连接成开口三角形。

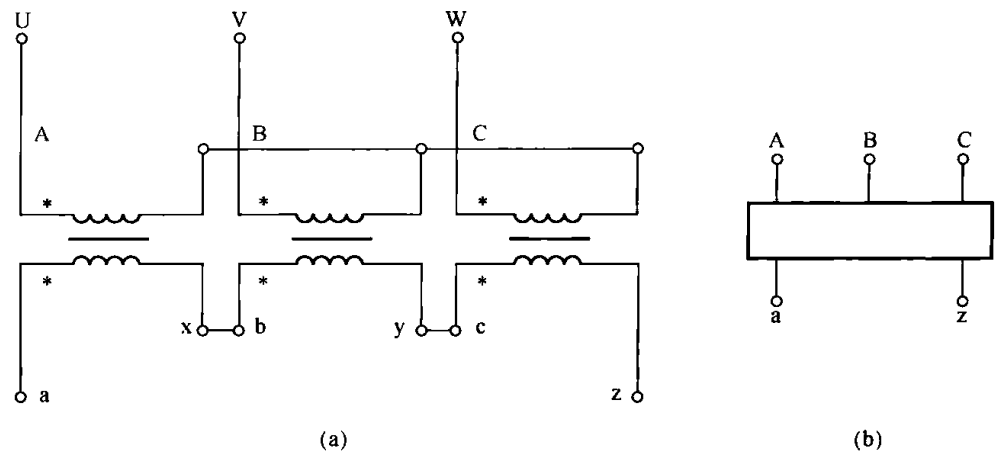


图 7-6 三倍频率器
(a) 电路图；(b) 三倍频率器示意图

当一次侧接三相对称电源时，铁心饱和造成磁通变化是非正弦的，在每个单相变压器的二次侧感应的电压也是非正弦的，但由于三个变压器的二次侧接成开口三角形，使得基波电压相加为零，即有 $u_{ab1} + u_{bc1} + u_{ca1} = 0$ ，而对三次谐波电压则有： $u_{ab3} + u_{bc3} + u_{ca3} \neq 0$ ，所以在二次侧 a、z 两端得到的总电压（基波分量加上三次谐波分量）只有三次谐波电压，且其幅值为每个单相变压器二次侧感应电压的 3 倍，其频率为电源频率（基波频率）的 3 倍，故称这种装置为三倍频率器。

由于感抗与频率成正比，在非正弦周期电路中，串接电感元件，可以使得高次谐波电流相对削弱；若接入电容元件，由于容抗与频率成反比，则会削弱基波和低次谐波。

四、实验设备（见表 7-6）

表 7-6 实验设备及型号			
设备名称	型号与规格	设备名称	型号与规格
单相调压器	0~450V	交流电流表	0~5A 数字表或指针表
单相变压器（3 台）	0~450V	交流毫伏表	EM2182 双通道数字毫伏表
单相功率表	0~450V，0~5A	线性电阻、电感、电容元件	
交流电压表	0~500V 数字表或指针表		

五、实验内容

1. 基波和三次谐波电压的测量

实验电路如图 7-7 所示，这时单相调压器输出电压 u_1 为正弦基波电压。三倍频率器一次侧接三相对称电源，则二次侧的输出电压 u_3 为三次谐波电压，而总电压 u_{13} 即为一个含有基波和三次谐波的非正弦周期电压。

(1) 接通电源，调整单相调压器的输出电压在 30~50V 之间，用交流电压表测量 U_1 ，用交流毫伏表测量 U_3 ，再用示波器观察 u_1 、 u_3 和 u_{13} 的波形，记录数据和波形，计算 U_{13} 并验证： $U_{13} = \sqrt{U_1^2 + U_3^2}$ 。

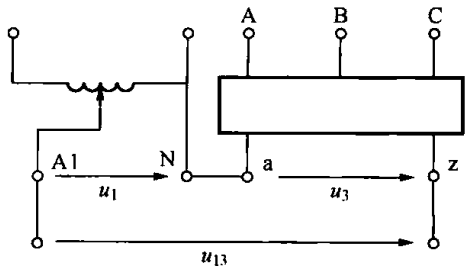


图 7-7 非正弦周期电压的测量

(2) 将 a、z 两端对调 (即 N 与 z 相连), 重复步骤 (1) 实验内容。

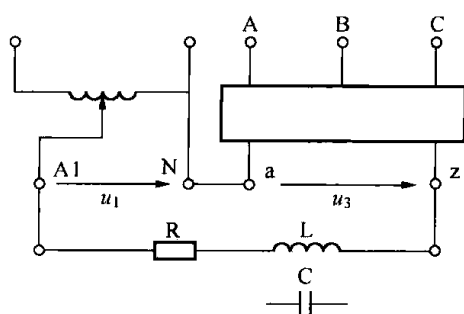


图 7-8 非正弦周期电流测量电路

2. 电感和电容对电流波形的影响

(1) 按图 7-8 所示接线, 在电路的 A1、z 端分别接入电感和限流电阻, 用示波器观察并记录 A1、z 两端的电压波形和 R 两端的电压波形 (即回路中的电流波形), 观察和研究电感对非正弦周期电流波形的影响。

(2) 把电感换成电容, 参照步骤 (1) 进行实验, 观察并记录电容对非正弦周期电流波形的影响。

3. 测量非正弦周期电路的平均功率

在图 7-8 所示电路中, 自行绘制测量基波平均功率和三次谐波平均功率的功率表连接图。分别测量基波和三次谐波的负载平均功率, 计算该非正弦周期电路负载的总平均功率。

六、实验注意事项

- (1) 正确连接变压器和电路, 改换电路时须切断电源;
- (2) 使用示波器观察波形时, 不得使电压信号超过示波器的限定值; 学会辨别基波和三次谐波及合成的波形。

七、实验报告要求

- (1) 绘出实验任务中要求观察和记录的波形。
- (2) 分析电感、电容对非正弦周期电流波形的影响。
- (3) 计算非正弦周期电压有效值 U 和总平均功率 P , 与测量值比较, 讨论误差及产生原因。

第八章 其他实验

本章实验主要为双口网络测试、负阻抗变换器、回转器、受控源、非线性电路中混沌现象研究等实验内容。

第一节 双口网络传输参数的测试（设计研究性实验）

一、实验目的

- (1) 加深理解双口网络的基本理论。
- (2) 掌握直流双口网络传输参数的测量方法。

二、预习思考题

- (1) 试述同时测量法与分别测量法的主要步骤、优缺点及适用情况。
- (2) 本实验方法可否用于交流双口网络的测定？

三、实验原理

对于一个无源线性双口网络（也称二端口/两端口网络），往往只关心其两个端口的电压和电流之间的相互关系，用以描述端口外特性的几组参数主要有 R 参数、G 参数、T 参数、H 参数等。

本节是通过实验方法测定双口网络的传输参数 T，并学习两个双口网络的连接及 T 参数的求取方法。

对一个如图 8-1 所示的双口网络，采用输出口的电压 U_2 和电流 I_2 作为自变量，以输入口的电压 U_1 和电流 I_1 作为应变变量，所得的方程称为双口网络的传输方程，即



图 8-1 无源二端口网络

$$\dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2$$

式中：A、B、C、D 为双口网络的传输参数，其值完全取决于网络的拓扑结构及各支路元件的参数值。

1. 同时测量法

这四个参数表征了该双口网络的基本特性，它们的含义是

$$A = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_2=0}; \quad B = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0}; \quad C = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_2=0}; \quad D = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

由此可知，只要在网络的输入口加上电压，在两个端口同时测量其电压和电流，即可求出 A、B、C、D 四个参数，此即为双端口同时测量法。

2. 分别测量法

若要测量一条远距离输电线构成的双口网络，采用同时测量法就很不方便。这时可采用分别测量法，即先在输入口加电压，而将输出口开路 and 短路，在输入口测量电压和电流，由

传输方程可得

$$R_{10} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \Big|_{\dot{I}_2=0} = \frac{A}{C}; \quad R_{1S} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \Big|_{\dot{U}_2=0} = \frac{B}{D}$$

然后在输出加电压，而将输入口开路 and 短路，测量输出口的电压和电流，此时可得

$$R_{20} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \Big|_{\dot{I}_1=0} = \frac{D}{C}; \quad R_{2S} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \Big|_{\dot{U}_1=0} = \frac{B}{A}$$

R_{10} 、 R_{1S} 、 R_{20} 、 R_{2S} 分别表示一个端口开路和短路时另一端口的等效输入电阻，其中有三个是独立的，并可求出传输参数，即

$$A = \sqrt{R_{10}/(R_{20} - R_{2S})}; \quad B = R_{2S}A; \quad C = A/R_{10}; \quad D = R_{20}C$$

3. 网络的级联

双口网络级联后的等效双口网络的传输参数也可采用前述的方法之一求得。理论推导得出，两个双口网络级联后，其传输参数与原每个双口网络的参数之间有如下关系

$$\begin{aligned} A &= A_1A_2 + B_1C_2; & B &= A_1B_2 + B_1D_2 \\ C &= C_1A_2 + D_1C_2; & D &= C_1B_2 + D_1D_2 \end{aligned}$$

四、实验设备（见表 8-1）

表 8-1 实验设备及型号

设备名称	型号与规格
直流稳压电源	DGX-1 实验台电源挂件箱，0~30V/1A 二路电压输出
	SL2302 稳压电源，0~30V 二路电压输出
直流毫安表	0~200mA 三挡量程数字毫安表
	C65 0~300mA 八挡量程指针式毫安表
直流电压表	0~200V 四挡量程数字电压表
	C65 0~300V 七挡量程指针式电压表
实验电路	双口网络实验电路
	分立电阻元件若干

五、实验内容

1. 自行设计双口网络

自行设计一个双口网络，确定端口电压、电流的参考方向，参照下面的实验步骤进行测量。

2. 按提供的双口网络进行实验

两个参考双口网络如图 8-2 和图 8-3 所示，有的实验电路箱上有电流插孔、小开关，

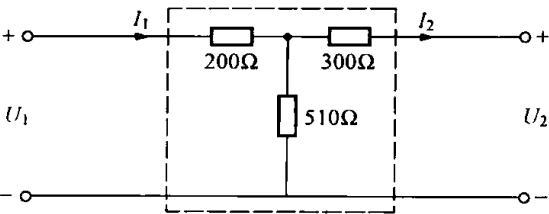


图 8-2 双口网络 I

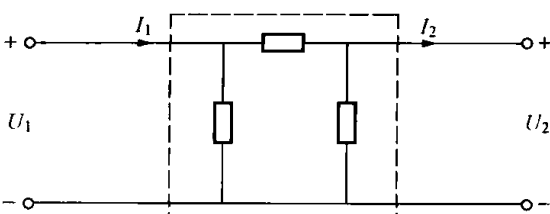


图 8-3 双口网络 II

便于进行实验测量。也可不用插孔、小开关，在确保不会使仪器设备故障的条件下，串接电流表，连接短线进行实验。

(1) 用同时测量法分别测试两个双口网络，将测量数据记入表 8-2 和表 8-3 中，计算传输参数并列出的传输方程。

表 8-2 同时测量法测试双口网络 I 数据记录表

测试项目	测 量 值			传输参数计算值	
输出端开路 $I_2=0$	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (mA)	A_1	B_1
输出端短路 $U_2=0$	U_1 (V)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	C_1	D_1

表 8-3 同时测量法测试双口网络 II 数据记录表

测试项目	测 量 值			传输参数计算值	
输出端开路 $I_2=0$	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (mA)	A_2	B_2
输出端短路 $U_2=0$	U_1 (V)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	C_2	D_2

(2) 用分别测量法分别测试两个双口网络，测量得到的数据记入表 8-4 中，并计算传输参数。

表 8-4 分别测量法测试双口网络 I 数据记录表 (网络 II 数据表略)

输出端开路 $I_2=0$			输出端短路 $U_2=0$			计算 传输参数
U_{10} (V)	I_{10} (mA)	R_{10} (k Ω)	U_{1S} (V)	I_{1S} (mA)	R_{1S} (k Ω)	
输入端开路 $I_1=0$			输入端短路 $U_1=0$			$A_1=$ $B_1=$ $C_1=$ $D_1=$
U_{20} (V)	I_{20} (mA)	R_{20} (k Ω)	U_{2S} (V)	I_{2S} (mA)	R_{2S} (k Ω)	

(3) 两个网络级联的测试。将两个双口网络级联，即将网络 I 的输出接至网络 II 的输入。先后用同时测量法和分别测量法，测量级联后等效双口网络的传输参数 A 、 B 、 C 、 D 。数据记录在表格中（自拟），通过计算，验证等效双口网络传输参数与级联的两个双口网络传输参数之间的关系。

六、实验报告要求

- (1) 完成对数据表格的测量和计算任务。
- (2) 列写参数方程。
- (3) 验证级联后等效双口网络的传输参数与级联的两个双口网络传输参数之间的关系。

(4) 总结、归纳双口网络的测试方法。

第二节 负阻抗变换器

一、实验目的

- (1) 了解负阻抗变换器的组成原理及其应用。
- (2) 用实验方法研究含有负阻的电路，加深对负阻抗概念的认识。
- (3) 掌握负阻器的测试方法。

二、实验原理

(1) 负阻抗是电路理论中的一个重要基本概念，在工程实践中有广泛的应用。有些非线性元件（如隧道二极管）在某个电压或电流范围内具有负阻特性。除此之外，一般都由一个有源双口网络来形成一个等效的线性负阻抗。该网络由线性集成电路或晶体管等元件组成，这样的网络称为负阻抗变换器。

按有源网络输入电压电流与输出电压电流的关系，负阻抗变换器可分为电流倒置型和电压倒置型两种（INIC 及 VNIC），如图 8-4 所示。

在理想情况下，负阻抗变换器的电压、电流关系为

INIC 型： $\dot{U}_2 = \dot{U}_1, \quad \dot{I}_2 = K\dot{I}_1$ （ K 为电流增益）

VNIC 型： $\dot{U}_2 = -K_1\dot{U}_1, \quad \dot{I}_2 = -\dot{I}_1$ （ K_1 为电压增益）

(2) 本实验用线性运算放大器组成如图 8-5 所示的 INIC 电路，在一定的电压、电流范围内可获得良好的线性度。

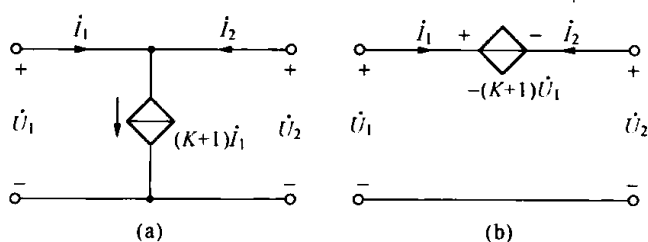


图 8-4 负阻抗变换器
(a) INIC; (b) VNIC

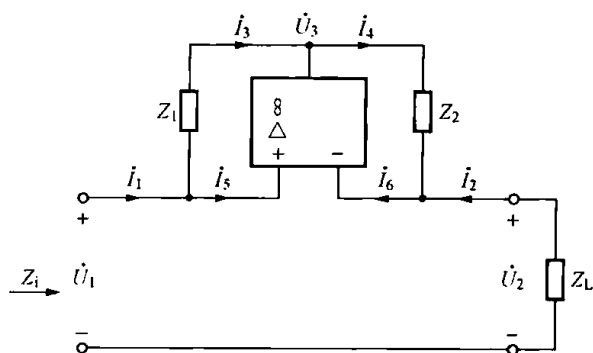


图 8-5 线性运放组成的 INIC

根据运放理论可知

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_+ = \dot{U}_- = \dot{U}_2$$

又

$$\dot{I}_5 = \dot{I}_6 = 0; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_3; \quad \dot{I}_2 = -\dot{I}_4$$

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}; \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_3}{Z_1}; \quad \dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_2}{Z_2} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_1}{Z_2}$$

所以得

$$\dot{I}_4 Z_2 = - \dot{I}_3 Z_1, \quad - \dot{I}_2 Z_2 = - \dot{I}_1 Z_1$$

故有

$$\frac{\dot{U}_2}{Z_L} Z_2 = - \dot{I}_1 Z_1$$

因此得

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_i = - \frac{Z_1}{Z_2} Z_L = - K Z_L \quad \left(\text{令 } K = \frac{Z_1}{Z_2} \right)$$

当 $Z_1 = R_1 = R_2 = Z_2 = 1\text{k}\Omega$ 时, $K = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{R_1}{R_2} = 1$ 。

1) 当 $Z_L = R_L$ 时, 有

$$Z_i = - K Z_L = - R_L$$

2) 当 $Z_L = \frac{1}{j\omega C}$ 时, $Z_i = - K Z_L = - \frac{1}{j\omega C} = j\omega L \quad \left(\text{令 } L = \frac{1}{\omega^2 C} \right)$

3) 当 $Z_L = j\omega L$ 时, $Z_i = - K Z_L = - j\omega C = \frac{1}{j\omega L} \quad \left(\text{令 } C = \frac{1}{\omega^2 L} \right)$

实验表明, 负阻抗变换器可实现容性阻抗和感性阻抗的互换。

三、实验设备 (见表 8-5)

表 8-5 实验设备及型号

设备名称	型号与规格
直流稳压电源	DGX-1 实验台电源挂件箱, 0~30V/1A 二路电压输出
直流毫安表	0~200mA 三挡量程数字毫安表
直流电压表	0~200V 四挡量程数字电压表
低频信号发生器	TFG2006DDS
示波器	SS-7802A 双踪示波器
交流毫伏表	EM2182 双通道数字毫伏表
可变电阻箱	0~99 999.9Ω
电容器	0.1μF
线性电感	100mH
电阻器	200Ω, 1kΩ
负阻抗变换器实验电路	

四、实验内容

1. 测量负阻抗的伏安特性

实验电路如图 8-6 所示, 将实验挂件箱上 INIC 实验电路右下部的两个插孔短接, U_1 接直流稳压电源, Z_L 接挂件箱上的电阻。实验测量数据记入表 8-6 中, 计算电流增益 K 及等值负阻抗。

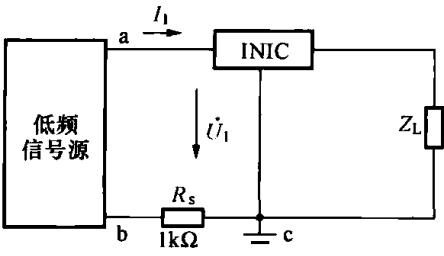


图 8-6 负阻抗实验参考接线图

表 8-6 测量负电阻的伏安特性

$R_L=300\Omega$	U_1 (V)								
	I_1 (mA)								
	R_- (k Ω)								
$R_L=600\Omega$	U_1 (V)								
	I_1 (mA)								
	R_- (k Ω)								

- (1) 取 $Z_L R_L=300\Omega$ ，测量不同 U_1 时的 I_1 值。 U_1 取 0.1~2.5V（非线性部分应多测几点，下同）。
- (2) 令 $Z_L R_L=600\Omega$ ，重复上述的测量（ U_1 取 0.1~4.0V）。
- (3) 计算等效负阻抗和电流增益。

2. 阻抗变换及相位观察

(1) 感抗特征的观察。按图 8-6 接线， R_s 为电流取样电阻， Z_L 接电容 $C=0.1\mu F$ 。双踪示波器的地端接 b，通道 Y_A 和 Y_B 分别接 a、c。因为电阻两端的电压波形与流过电阻的电流波形同相，所以用示波器观察 R_s 上的电压波形就反映了电流 i_1 的相位。

调节低频信号使 $U_1\leq 3V$ ，改变信号源频率 $f=500\sim 2000Hz$ ，用双踪示波器观察 u_1 与 i_1 的相位差，判断是否具有感抗特征。

(2) 容抗特征的观察。用电感替换电容，测量并观察是否具有容抗特征。

五、实验注意事项

本实验接线较多，应仔细检查，特别是信号源与示波器的地端不可接错。

六、实验报告要求

- (1) 完成计算、绘制特性曲线。
- (2) 总结对负阻抗 INIC 的认识。

第三节 回 转 器

一、实验目的

- (1) 掌握回转器的基本特性。
- (2) 测量回转器的基本

参数。

- (3) 了解回转器的应用。

二、实验原理

(1) 回转器是一种有源非互易的二端口网络元件，电路符号及其等效电路如图 8-7 所示。

理想回转器的电导方程为

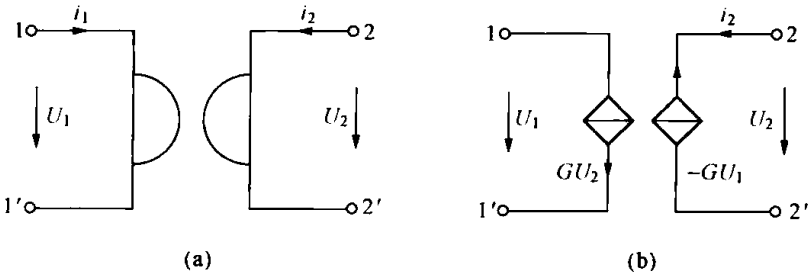


图 8-7 回转器电路符号及其等效电路
(a) 电路符号；(b) 等效电路

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g \\ -g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

或写成

$$i_1 = gu_2; \quad i_2 = -gu_1$$

理想回转器的电阻方程为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -R \\ R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

或写成

$$u_1 = -Ri_2, \quad u_2 = Ri_1$$

式中： g 、 R 分别为回转电导和回转电阻，统称为回转常数。

(2) 若在端口 2-2' 接一电容负载 C ，则从 1-1' 端看进去就相当于一个电感，即回转器能把一个电容元件“回转”成一个电感元件；相反也可以把一个电感元件“回转”成一个电容元件，所以也称为阻抗逆变器。

端口 2-2' 接入 C 后，从 1-1' 端看进去的导纳 Y_i 为

$$Y_i = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} = \frac{g\dot{U}_2}{-\dot{I}_2/g} = \frac{-g^2\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$$

由于

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = -Z_L = -\frac{1}{j\omega C}$$

所以得 $Y_i = g^2/j\omega C = \frac{1}{j\omega L}$

式中： $L = \frac{C}{g^2}$ 为等效电感。

(3) 由于回转器有阻抗逆变作用，在集成电路中，可以用一个带有电容负载的回转器来获得数值较大的电感。图 8-8 所示为由运算放大器组成的回转器电路图。

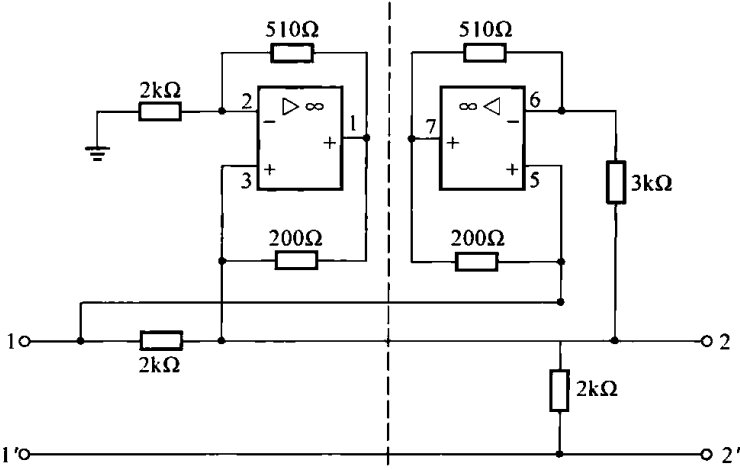


图 8-8 由运算放大器组成的回转器电路图

三、实验设备 (见表 8-7)

表 8-7 实验设备及型号

名 称	型号与规格	名 称	型号与规格
低频信号发生器	DFG2006 DDS	电容器	0.1μF, 1μF
交流毫伏表	EM2182 双通道数字毫伏表	电阻器	1kΩ
示波器	SS-7802A 双踪示波器	回转器实验电路	
可变电阻	0~999 99.9Ω		

续表

频率 参数	200	400	500	700	800	900	1000	1200	1300	1500	2000
$g\left(\frac{1}{\Omega}\right)$											
L' (H)											
L (H)											
$\Delta L = L' - L$											

(4) 用模拟电感组成 RLC 并联谐振电路。用回转器作电感，与电容器 $C=1\mu\text{F}$ 构成并联谐振电路，如图 8-11 所示。

取 $U \leq 3\text{V}$ 并保持恒定，在不同频率时用交流毫伏表测量 1-1' 端的电压 U_1 ，并找出谐振频率。

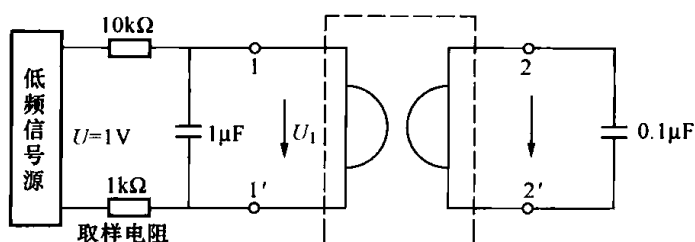


图 8-11 回转器实验测量谐振频率电路

五、实验注意事项

(1) 回转器的正常工作条件是 u 或 u_1 、 i_1 的波形须是正弦波。为避免运放进入饱和状态使波形失真，输入电压不宜过大。

(2) 实验过程中，示波器及交流毫伏表电源线应使用两线插头。

六、实验报告要求

(1) 完成各项规定的实验内容（测试、计算、绘曲线等）。

(2) 从各实验结果中总结回转器的性质、特点及应用。

第四节 受控源的实验研究

一、实验目的

通过测试受控源的外特性及其转移参数，进一步理解受控源的物理概念，加深对受控源的认识和理解。

二、预习思考题

(1) 受控源和独立源相比有何异同点？比较四种受控源的代号、电路模型、控制量与被控量的关系如何？

(2) 四种受控源中的 r_m 、 g_m 、 α 和 μ 的意义是什么？如何测得？

(3) 若受控源控制量的极性反向，试问其输出极性是否发生变化？

(4) 受控源的控制特性是否适合于交流信号？

(5) 如何由两个基本的 CCVS 和 VCCS 获得其他两个受控源 CCCS 和 VCVS，输入和输出如何连接？

三、实验原理

(1) 电源有独立电源（如电池、发电机等）与非独立电源（或称为受控源）之分。

受控源与独立源的不同点是：独立源的电动势 E_s 或电流 I_s 是某一固定的数值或是时间的某一函数，它不随电路其余部分的状态而变。而受控源的电动势或电激流则是随电路中另一支路的电压或电流而变的一种电源。

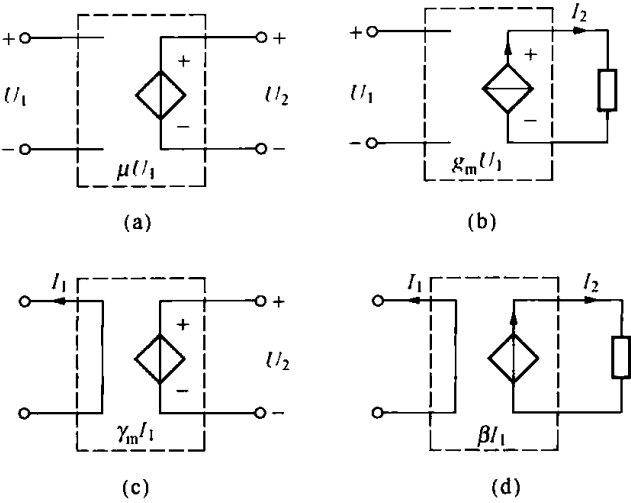


图 8-12 受控源

(a) VCVS; (b) VCCS; (c) CCVS; (d) CCCS

受控源又与无源元件不同，无源元件两端的电压和它自身的电流有一定的函数关系，而受控源的输出电压或电流则和另一支路（或元件）的电流或电压有某种函数关系。

(2) 独立源与无源元件是二端器件，受控源则是四端器件（或称双口元件），它有一对输入端（ U_1, I_1 ）和一对输出端（ U_2, I_2 ）。输入端可以控制输出端电压或电流的大小。施加于输入端的控制量可以是电压或电流，因而受控电压源有 VCVS 和 CCVS，受控电流源有 VCCS 和 CCCS，如图 8-12 所示。

(3) 当受控源的输出电压（或电流）与控制支路的电压（或电流）成正比变化时，称该受控源是线性的。

理想受控源的控制支路中只有一个独立变量（电压或电流），另一个独立变量等于零，即从输入口看，理想受控源或者是短路（即输入电阻 $R_1=0$ ，因而 $U_1=0$ ）或者是开路（即输入电导 $G_1=0$ ，因而输入电流 $I_1=0$ ）；从输出口看，理想受控源或是一个理想电压源或者是一个理想电流源。

(4) 受控源的控制端与受控端的关系式称为转移函数。

四种受控源的转移函数参量的定义如下。

- 1) 压控电压源 (VCVS): $U_2=f(U_1)$, $\mu=U_2/U_1$ 称为转移电压比（或电压增益）。
- 2) 压控电流源 (VCCS): $I_2=f(U_1)$, $g_m=I_2/U_1$ 称为转移电导。
- 3) 流控电压源 (CCVS): $U_2=f(I_1)$, $r_m=U_2/I_1$ 称为转移电阻。
- 4) 流控电流源 (CCCS): $I_2=f(I_1)$, $\alpha=I_2/I_1$ 称为转移电流比（或电流增益）。

四、实验设备（见表 8-10）

表 8-10 实验设备及型号

设备名称	型号与规格	设备名称	型号与规格
可调直流稳压恒流源	DGX-1 实验台电源挂件箱	可变电阻	0~999 99.9Ω
直流数字电压表	0~200V	受控源实验电路	
直流数字毫安表	0~200mA		

五、实验内容

1. 测定 VCVS 特性

实验电路如图 8-13 所示，测量受控源 VCVS 的转移特性 $U_2=f(U_1)$ 和负载特性 $U_2=f(I_L)$ 。

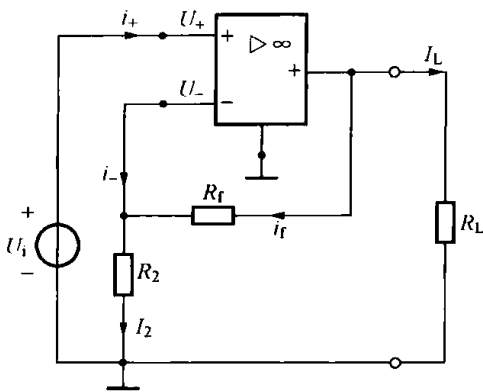


图 8-13 VCVS 实验电路

(1) 不接电流表，固定 $R_L=2\text{k}\Omega$ ，调节稳压电源输出电压 U_1 ，测量 U_1 及相应的 U_2 值，记入表 8-11。

表 8-11 不接电流表测转移特性

U_1 (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	μ
U_2 (V)									

在方格纸上绘出电压转移特性曲线 $U_2=f(U_1)$ ，并在其线性部分求出转移电压比 μ 。

(2) 接入电流表，保持 $U_1=2\text{V}$ ，调节 R_L 可变电阻箱的阻值，测 U_2 及 I_L ，测量结果记入表 8-12，绘制负载特性曲线 $U_2=f(I_L)$ 。

表 8-12 接入电流表测负载特性

R_L (k Ω)	1	2	3	4	5	6	8	∞
U_2 (V)								
I_L (mA)								

2. 测定 VCCS 特性

测量受控源 VCCS 的转移特性 $I_L=f(U_1)$ 及负载特性 $I_L=f(U_2)$ ，实验线路如图 8-14 所示。

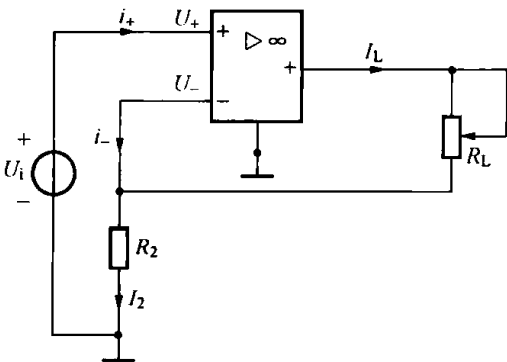


图 8-14 VCCS 实验电路

(1) 固定 $R_L=2\text{k}\Omega$ ，调节稳压电源的输出电压 U_1 ，测出相应的 I_L 值记入表 8-13 中，绘制 $I_L=f(U_1)$ 曲线，并由其线性部分求出转移电导 g_m 。

表 8-13 固定 R_L 测转移特性

U_1 (V)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	g_m
I_L (mA)									

(2) 保持 $U_1=2V$ ，令 R_L 从大到小变化，测出相应的 I_L 及 U_2 ，记入表 8-14 中，并绘制 $I_L=f(U_2)$ 曲线。

表 8-14 令 R_L 从大到小变化测负载特性

R_L (k Ω)	50	20	10	8	7	6	5	4	2	1
I_L (mA)										
U_2 (V)										

3. 测定 CCVS 特性

测量受控源 CCVS 的转移特性 $U_2=f(I_1)$ 与负载特性 $U_2=f(I_L)$ ，实验线路如图 8-15 所示。

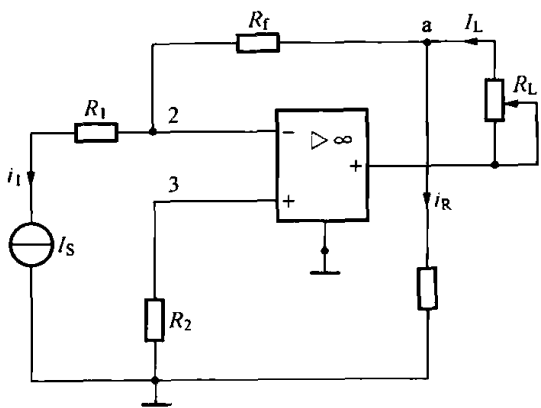


图 8-15 CCVS 实验电路

(1) 固定 $R_L=2k\Omega$ ，调节恒流源的输出电流 I_S ，按表 8-14 所列 I_1 值，测出 U_2 ，并填入表 8-15 中，绘制 $U_2=f(I_1)$ 曲线，并由其线性部分求出转移电阻 r_m 。

表 8-15 测量转移特性数据记录

I_1 (mA)	0.05	0.06	0.08	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	r_m
U_2 (V)									

(2) 保持 $I_S=0.5mA$ ，按表 8-16 所列 R_L 值，测出 U_2 及 I_L ，绘制负载特性曲线 $U_2=f(I_L)$ 。

表 8-16 测量负载特性数据记录

R_L (k Ω)	0.5	1	2	4	6	8	10
U_2 (V)							
I_L (mA)							

4. 测定 CCCS 特性

测量受控源 CCCS 的转移特性 $I_L=f(I_1)$ 及负载特性 $I_L=f(U_2)$ ，实验线路如图 8-16 所示。

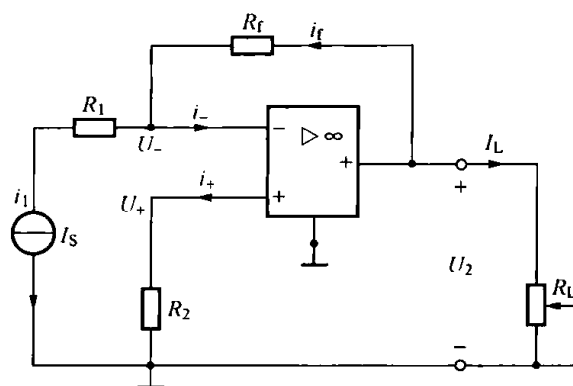


图 8-16 CCCS 实验电路

(1) 固定 $R_L = 2\text{k}\Omega$, 调节恒流源的输出电流 I_S , 按表 8-17 所列 I_1 值, 测出 I_L , 绘制 $I_L = f(I_1)$ 曲线, 并由其线性部分求出转移电流比 α 。

表 8-17 测量转移特性数据记录

I_1 (mA)	0.05	0.06	0.08	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	α
I_L (mA)									

(2) 保持 $I_S = 0.5\text{mA}$, 令 R_L 为表 8-18 所列值, 测出 I_L , 绘制 $I_L = f(U_2)$ 曲线。

表 8-18 测量负载特性数据记录

R_L (k Ω)	0	0.1	0.5	1	2	5	10	20	30	80
I_L (mA)										
U_2 (V)										

六、实验报告要求

(1) 根据实验数据, 在方格纸上分别绘出四种受控源的转移特性和负载特性曲线, 并求出相应的转移参量。

(2) 完成预习思考题。

(3) 对实验的结果作出合理的分析和结论, 总结对四种受控源的认识和理解。

第五节 非线性电路中混沌现象的实验研究

一、实验目的

(1) 了解混沌的一些基本概念。

(2) 学习使用双踪示波器观测两个信号形成的状态轨迹。

(3) 认识混沌现象和产生混沌的原因。

(4) 了解和测量双运放构成的有源非线性负阻器件, 即蔡氏二极管 (Chua's Diode) 的伏安特性曲线。

二、实验概述

长期以来, 人们在认识和描述运动时, 大多只局限于线性动力学描述方法, 即确定的运

动有一个完美确定的解析解。但是，在相当多情况下，自然界的非线性现象却起着很大的作用。1963 年美国气象学家洛伦兹（Lorenz）在分析天气预报用到的三个动力学方程模型时，首先发现空气动力学中的混沌（Chaos）现象，该现象只能用非线性动力学来解释。1975 年，“混沌”作为一个新的科学名词首次出现在科学文献中。粗略地说，混沌是发生在确定性系统中的一种不确定行为，即在一定参数的条件下，系统会出现复杂的解，这种解既不是周期解，也不是拟周期解，在状态平面上它的相轨道始终不会重复，但是有界的，它对初始条件十分敏感。在一些二阶非线性非自治电路或三阶非线性自治电路中就存在着混沌现象。本实验将建立一个非线性动态电路，采用实验方法研究 LC 振荡器产生的正弦波与经过 RC 移相器移相的正弦波合成相图（李萨育图），观测振动周期发生的分岔及混沌现象，测量非线性单元电路的电流—电压特性，从实验上对混沌现象进行一些探讨，从而对非线性电路及混沌现象有一个初步了解。

三、实验设备（见表 8-19）

表 8-19 实验设备及型号

设备名称	型号与规格
非线性电路混沌实验仪	NCE-II
示波器	SS-7802A 双踪示波器
	Tektornix TDS1002 数字式可存储双踪示波器
函数信号发生器	TFG2006DDS
电阻箱	0~99 999.9Ω 可变电阻箱

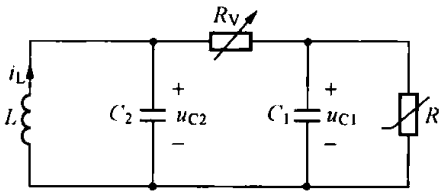


图 8-17 非线性电路

四、实验原理

实验电路采用的是蔡氏电路（Chua’s circuit），又称为双涡卷（Double scroll）电路，如图 8-17 所示。该电路包括有源非线性负阻、LC 振荡器和 RC 移相器三部分。图中只有一个非线性电阻元件 R ，它是一个压控有源非线性负阻器件，其特性方程为 $i=g(u)$ ，如图 8-18 所示。实验中用到的非线性负阻由双运算放大器和六个电阻组成实现，如图 8-19 所示。电感器 L 和电容器 C_2 组成一个损耗可以忽略的谐振回路；可变电阻 R_V 和电容器 C_1 串联将振荡器产生的正弦信号移相输出。

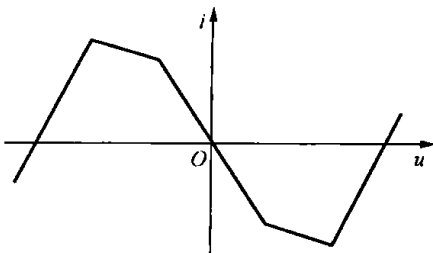


图 8-18 非线性电阻元件伏安特性

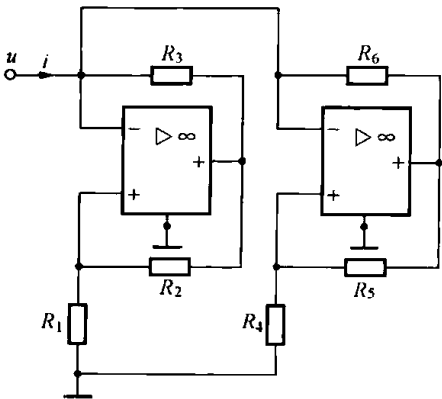


图 8-19 实现蔡氏二极管的 Kennedy 电路

非线性电路的状态方程为

$$C_1 \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{R_V} (u_{C2} - u_{C1}) - g(u_{C1})$$

$$C_2 \frac{du_{C2}}{dt} = \frac{1}{R_V} (u_{C1} - u_{C2}) + i_L$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -u_{C2}$$

式中： u_{C1} 、 u_{C2} 分别是加在电容器 C_1 和 C_2 上的电压； i_L 表示流过电感器 L 的电流。

混沌现象表现了非周期有序性，看起来似乎是无序状态，但呈现一定的统计规律（如图 8-20 所示），其基本判据有以下两种。

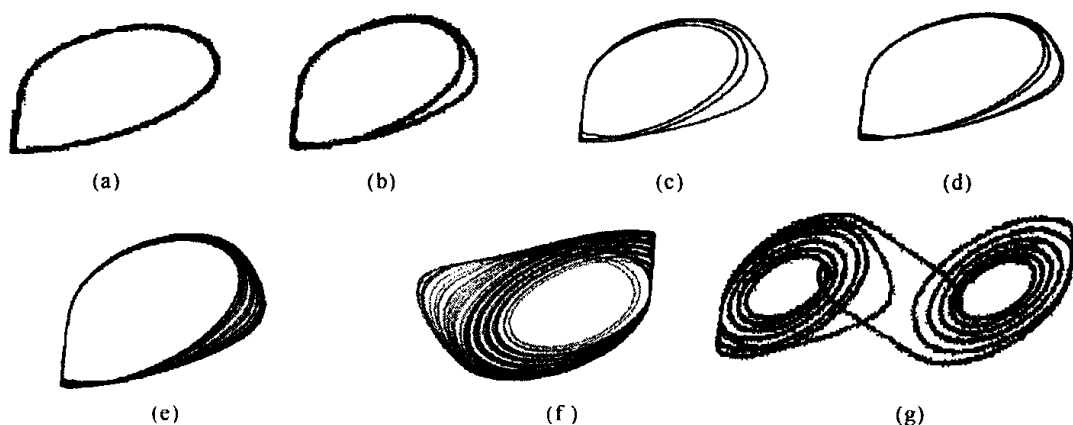


图 8-20 倍周期分岔及混沌系列图

(a) 1 倍周期；(b) 2 倍周期；(c) 3 倍周期；(d) 4 倍周期；(e) 阵发混沌；(f) 奇异吸引子；(g) 双吸引子

(1) 分岔 (Bifurcation)：当系统一个参数值从某一临界值以下变到该临界值以上时，系统长期行为发生突然变化的现象。

(2) 混沌：①完全混沌，表征一个动力系统的特征，在该系统中大多数轨道显示敏感依赖性；②有限混沌，表征一个动力系统的特征，在该系统中某些特殊轨道是非周期的，但大多数轨道是周期或准周期的。奇异吸引子 (Strange Attractor) 有一个复杂但明确的边界，这个边界保证了在整体上的稳定，在边界内部具有无穷嵌套的自相似结构，运动是混合和随机的，它对初始条件十分敏感。

R_V 很小时，系统只有一个稳定的状态（对应 1 个解），随 R_V 的变化系统由一个稳定状态变成在两个稳定状态之间跳跃（2 个解），即出现两个“分裂”的环图（分岔现象），由原来 1 周期变为 2 周期，继续减小 R_V 值，两个稳定状态分裂为 4 个稳定状态（4 周期，4 个解），8 个稳定状态（8 周期，8 个解）……，进而出现多倍周期与阵发混沌交替现象，直至分裂进入无穷周期，即为连续频谱，接着进入混沌，系统的状态无法确定。分岔是进入混沌的途径。

五、实验内容

(1) 测量铁氧体介质电感器的电感量，并解释电感量变化的原因。用串联谐振法测电感器电感量。把电感器、电阻箱（取 $R' = 30\Omega$ ）和电容器串联，并与低频信号发生器相接，实

验电路如图 8-21 所示。保持信号发生器输出电压不变,用示波器测量电阻两端的电压,调节函数信号发生器正弦波频率,使电阻两端电压达到最大值,此时对应的频率即为谐振频率。依次增大输出电压为 3、6、9、12、15V,分别测出对应的谐振频率,并计算出对应的

电感 $L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}$ ($C=0.01\mu\text{F}$), $I = \frac{U_s}{2\sqrt{2}R'}$; 作出电感器的电感和电流的关系图。

(2) 测量非线性负阻器件电路的伏安特性曲线。图 8-22 所示为测量非线性负阻器件伏安特性曲线的实验电路。图 8-22 中伏特表用来测量非线性元件两端的电压。由于非线性电阻是有源的,因此,回路中始终有电流流过。元件 R_0 使用的是电阻箱,其作用是改变非线性元件的对外输出。使用电阻箱可以得到很精确的电阻,尤其可以对电阻值做微小的改变,进而微小地改变输出;元件 R_0 的值从 200Ω 逐渐增大至 $2\text{k}\Omega$,依次记录电压的变化,由所记录的数据作出非线性电路的伏安特性曲线。

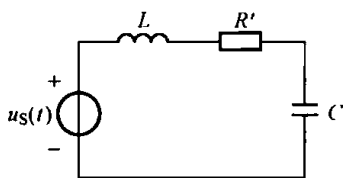


图 8-21 测量电感的电路

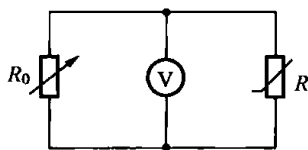


图 8-22 测量蔡氏二极管伏安特性

(3) 用示波器观测 LC 振荡器产生的波形以及经 RC 移相后的波形。

(4) 用双踪示波器观测上述两个波形组成的相图 (李萨育图)。

(5) 改变移相器中可调电阻 R_v 的值,观测相图周期的变化,观测记录倍周期分岔、阵发混沌、三倍周期、吸引子 (混沌) 和双吸引子 (混沌) 相图,分析混沌产生的原因。

六、实验注意事项

(1) 运算放大器的正负极不能接反,地线与电源接地点必须接触良好。

(2) 关掉电源后再拆接线。

(3) 设备需经预热后再开始实验和测量。

七、实验报告要求

(1) 通过示波器观察蔡氏二极管的伏安特性曲线,并绘制曲线。

(2) 通过示波器观察到的状态轨迹,分别描绘出出现周期分岔、二倍周期、三倍周期、多倍周期、单涡旋混沌、双涡旋混沌现象等李萨育图形。

(3) 对比观察电路中 C_1 、 C_2 电容的电压 $u_{C1(t)}$ 、 $u_{C2(t)}$ 对应波形特点,总结并描绘出对应出现周期分岔、二倍周期、三倍周期、多倍周期、单涡旋混沌、双涡旋混沌现象时的电压 $u_{C1(t)}$ 、 $u_{C2(t)}$ 时域波形。

(4) 分析产生混沌现象的原因。

第三篇 电路实验的计算机仿真

第九章 电路仿真实验研究

在学习电路理论课程过程中,借助计算机模拟仿真实验,不受实验环境、实验仪器的限制,实验的重复性好,实验操作更方便、快捷,实验数据处理手段、结果显示功能更丰富,是传统实验教学很好的拓展和补充。

初学者参照本教程的附录 F,可以熟悉 OrCAD Capture CIS 绘制电路原理图和 OrCAD PSpice A/D 仿真环境的使用,在此基础上,进行直流电路分析、暂态电路分析、交流电路频率特性、交流谐振电路分析以及非线性电路混沌现象的仿真研究共五个方面的仿真实验训练,用来加深和提高对所学电路理论课程内容,尤其是对那些不易理解、实验中物理模型不直观等内容的认识和理解。

第一节 直流电路仿真分析

一、实验目的

- (1) 熟悉使用 OrCAD Capture CIS 绘制仿真电路原理图。
- (2) 掌握直流电路的仿真分析方法。
- (3) 加深对电阻电路基本理论的认识和理解。
- (4) 探究电路的基本规律,验证基尔霍夫定律和叠加定理、戴维南定理/诺顿定理等。

二、实验任务

- (1) 如图 9-1(a) 所示,采用节点电压分析法手工计算电路节点电压、各支路电流以及元件耗散的功率。
- (2) 采用仿真求解电路“直流工作点”的方法,计算如图 9-1(a) 所示电路的节点电压、各支路电流以及元件耗散的功率。

三、实验要点

(1) 启动 Capture CIS,创建项目文件(Circuit Experiment 1);在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下,绘制如图 9-1(a) 所示电路的电路仿真模型,如图 9-2 所示。注意:绘图前,先确认是否已加载所需的库文件。

1) 电阻元件模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\analog.olb”。

2) 电压源、电流源元件模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\source.olb”。

3) 受控源(VCCS 电压控制电流源)元件模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\advanls\spice_elem.olb”。

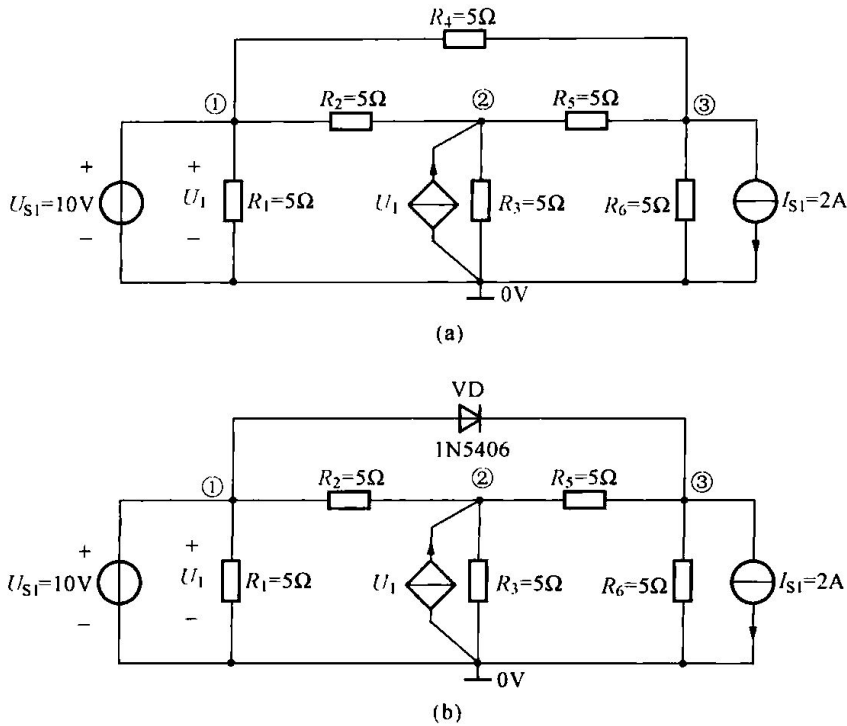


图 9-1 电路图绘制窗口
(a) 线性电阻电路；(b) 非线性电阻电路

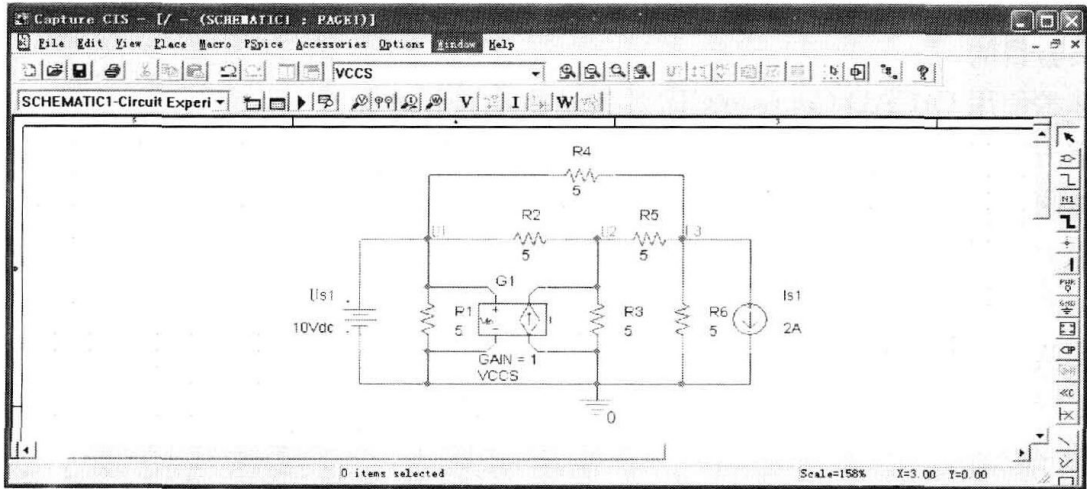


图 9-2 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的电路仿真模型

4) 放置接地符号。值得注意的是，Spice 是用改进的电压节点法列写方程，只有指定零参考节点后才能保证方程是独立的，因此，画电路图时一定要放置零参考地。放置零参考地的方法是：点击菜单栏“Place”中“Ground”选项，或者单击右侧绘图工具栏第九个图标，或者按快捷键“G”，在弹出的“Place Ground（放置电源地线）”对话框中，选取 SOURCE 库中符号为“0”的元素，作为接地符号；将接地符号就近放置在所设定的零参考节点附近，并连通。

(2) 定义分析类型。

- 1) 创建仿真分析类型管理文件，取文件名为“Circuit Experiment 1 Simulation”。
- 2) 设置仿真环境，本项目为直流电路仿真分析，故仿真分析类型设置为“Bias Point（即静态偏置工作点）”。

(3) 仿真运行和仿真结果查看。

1) 查看“Simulation Output File”内容。注意：仿真结果输出文件中“THE TOTAL DISSIPATION”仅指电路中所有独立电压源的功率耗散，不包含电路中独立电流源的功率耗散。

2) 直接查看电路静态工作参数。选取“OrCAD Capture CIS”界面中第四行测量仪器工具栏中的“V”，“I”，“W”，观察直流电路各节点电压、支路电流、元器件的功率。

3) 完整保存本项目实验仿真文件。

(4) 重复步骤(1)，启动 Capture CIS，创建项目文件（Circuit Experiment 2）；在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下，绘制如图 9-1 (b) 所示电路的电路仿真模型。注意：绘图前，先确认是否已加载所需的库文件。

二极管元件模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\diode.olb”；重复步骤(2)、(3)。

(5) 形成仿真实验报告，主要内容包括以下几项。

1) 叙述完成本仿真实验的主要技术操作步骤及其用意。

2) 对比仿真实验和手工计算结果的一致性。

3) 整理各支路电流、节点电压以及元件功率仿真实验数据并进行分析，归纳和总结电阻电路满足的规律和具有的性质。

4) 说明在本仿真实验过程中遇到的主要软件使用技术问题，若自行解决了问题，请陈述所采用的办法或措施。

5) 随实验报告，同时递交仿真结果输出文件，即“Simulation Output File”。

第二节 暂态电路仿真分析

一、实验目的

(1) 熟悉暂态电路的仿真分析方法。

(2) 观察一阶、二阶动态电路的零输入响应和零状态响应波形，分析一阶、二阶动态电路响应的状态轨迹的特性。

(3) 认识电路元件参数对电路响应特性的影响。

二、实验任务

某一直流电感线圈 $L=0.16\text{H}$ ， $R=1\Omega$ ，与 $R_1=3\Omega$ 电阻负载并联，经由 $U_s=+24\text{V}$ ， $R_s=0.75\Omega$ 直流电源供电，如图 9-3 (a) 所示，开关在 $t=0\text{s}$ 闭合，闭合前，电路处于零状态，并且开关在 $t=1\text{s}$ 断开。

(1) 试观察和分析 $0\text{s}\leq t\leq 3\text{s}$ 期间，开关闭合和断开过程中电感线圈的电流 i_L 和电压 $u(t)$ 的波形；

(2) 为了避免电感线圈两端电压 $u(t)$ 出现过电压，拟将 $R_1=3\Omega$ 电阻替换为一个反并联二极管，如图 9-3 (b) 所示。重新观察和分析 $0\text{s}\leq t\leq 3\text{s}$ ，开关闭合和断开过程中电感线圈的电流 i_L 和电压 $u(t)$ 的波形，如图 9-3 (c) 所示。

(3) 采用电容替换 R_1 ，也可以避免电感线圈两端电压 $u(t)$ 出现过电压，但需选取合适的电容值，试通过分析计算确定电容值。

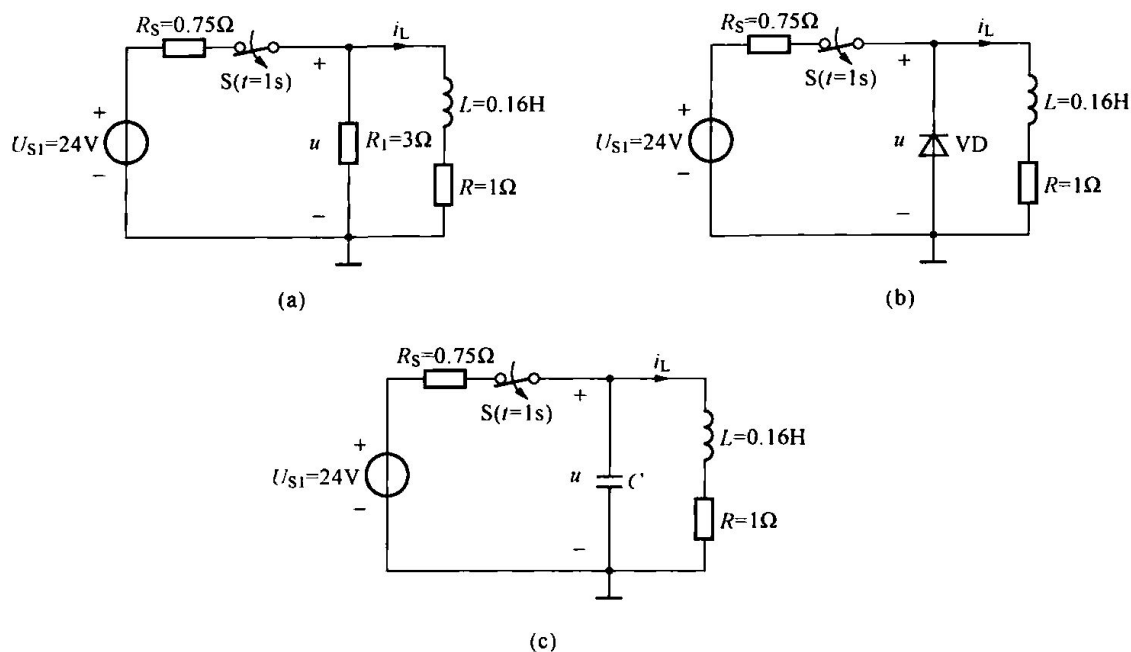


图 9-3 某直流电感线圈电路

(a) $R_1=3\Omega$ 时; (b) 反并联二极管时; (c) 电容时

三、实验要点

(1) 启动 Capture CIS, 创建项目文件 (Transient Circuit Experiment 1); 在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下, 绘制图 9-3 (a) 所示电路的电路仿真模型, 如图 9-4 所示。注意: 绘图前, 先确认是否已加载所需的库文件; 绘图后, 进一步确认是否放置了接地符号。

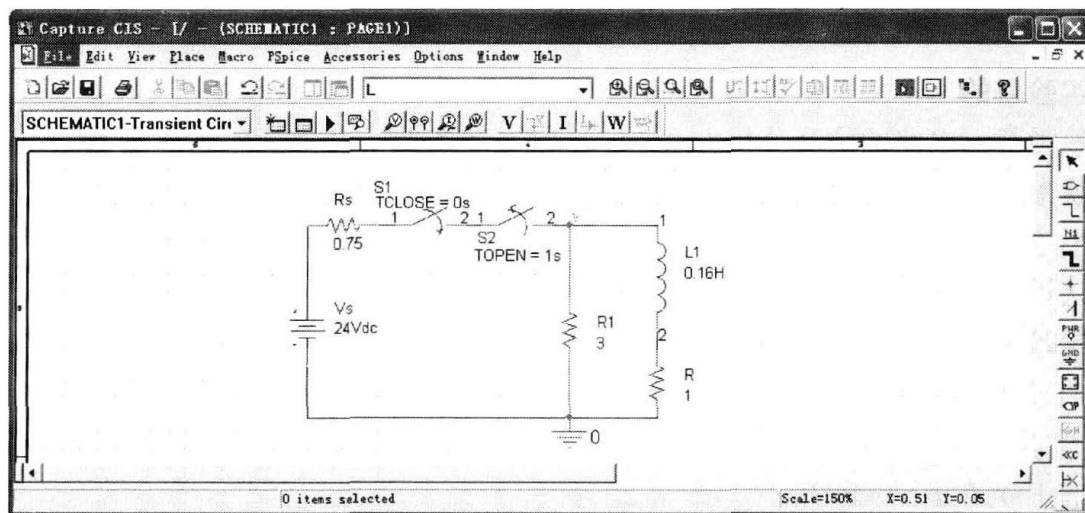


图 9-4 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的暂态电路仿真模型

1) 电阻、电感元件模型取自 “C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\analog.olb”。

2) 电压源、电流源元件模型取自 “C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\source.olb”。

3) 开关元件模型取自 “C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\anl_

misk. olb”。

4) 放置接地符号。参考本章第一节中的操作。

(2) 定义分析类型。

1) 创建仿真分析类型管理文件，取文件名为“Transient Circuit Experiment 1 Simulation”。

2) 在仿真设置对话框中设置仿真环境，本项目为暂态电路仿真分析，故仿真分析类型设置为“Time Domain (Transient) (即暂态电路仿真)”。

3) 进一步将本实验的仿真时间设置为 3s，仿真数据保存时间从 0s 开始。

(3) 仿真运行和仿真结果观察。

1) 用“示波器”观察仿真波形。利用 OrCAD Capture CIS 菜单栏“PSpice”中的“Markers”选项，还可以在电路不同位置设置检测探头，像示波器那样来观察仿真波形 i_L 和 $u(t)$ 。

2) 直接观察仿真的波形。点击“OrCAD PSpice A/D”菜单栏“Trace”中的“Add Trace”选项，在弹出的“Add Traces”对话框中，选择待观察变量 i_L 和 $u(t)$ 作为观察对象，可以单踪、两踪或多踪，或两个及以上“示波器”观察仿真波形。

① 单踪“示波器”分别观察。如图 9-5 (a)、(b) 所示波形分别为单踪“示波器”观察 $i_L(t)$ 和 $u(t)$ 波形。

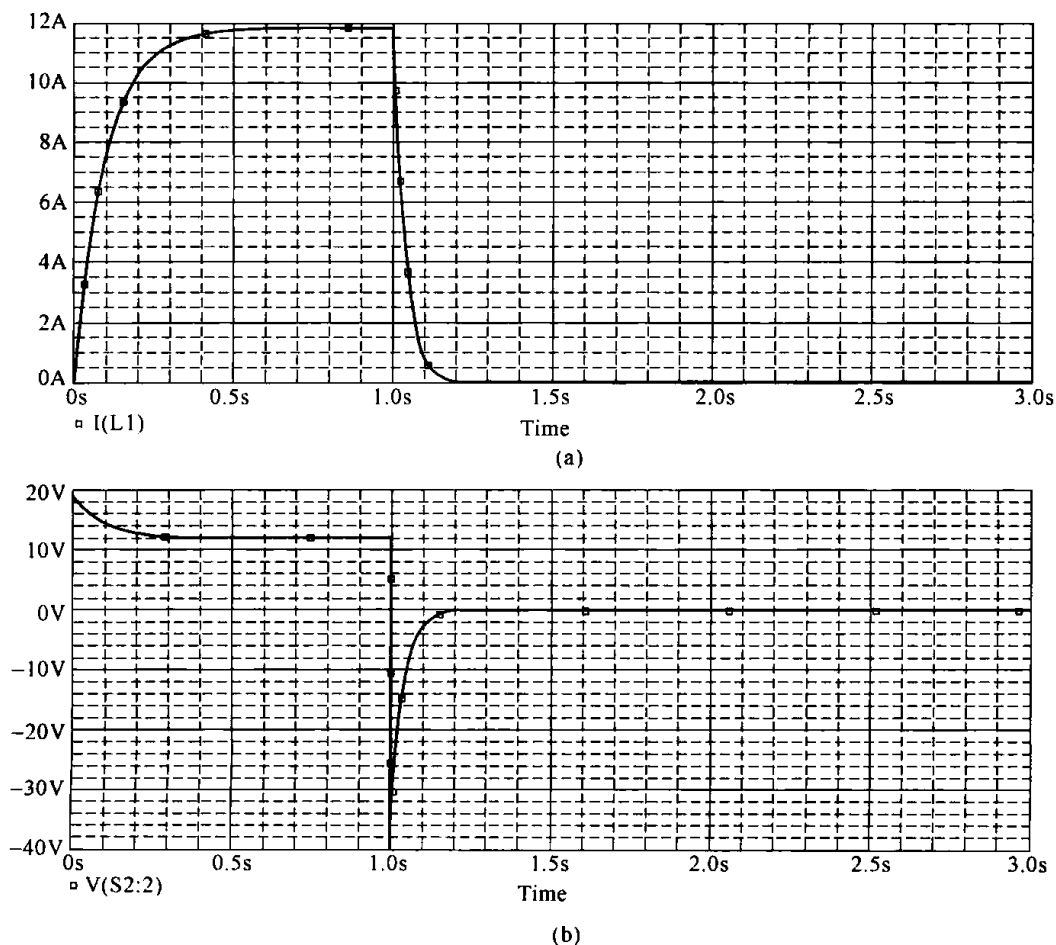


图 9-5 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的暂态电路仿真模型

(a) i_L 波形; (b) $u(t)$

② 在同一“示波器”上同时观察两个变量，即双踪“示波器”方式。可在“Add Traces”对话框中，同时选择 i_L 和 $u(t)$ 作为观察对象，即双踪“示波器”方式，如图 9-6 所示，可以从颜色上区分电流波形 i_L 、电压波形 $u(t)$ ，但两个波形混杂在一起，效果并不理想。

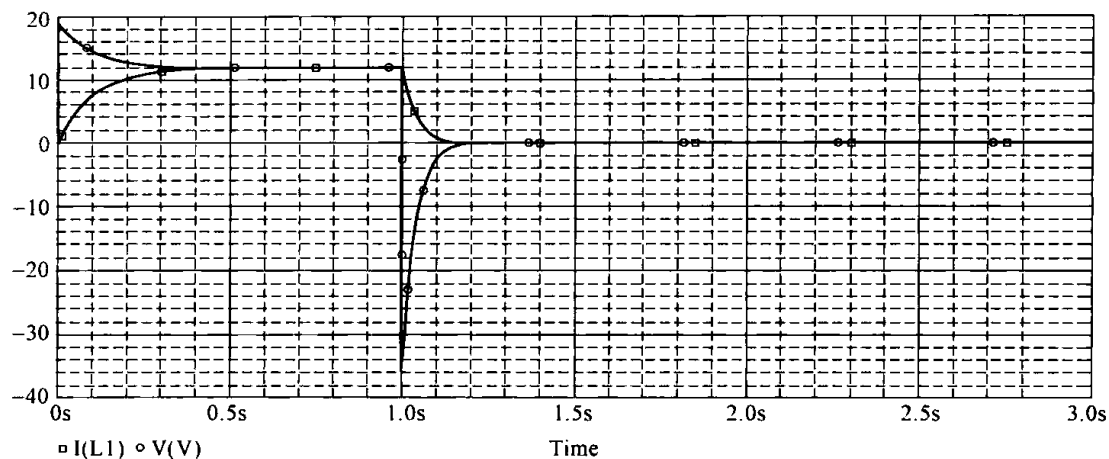


图 9-6 在同一“示波器”中观察两个变量 i_L 和 $u(t)$ 的仿真波形（即双踪“示波器”方式）

③ 两个“示波器”同时观察。如图 9-7 所示波形分别为单踪“示波器”观察 i_L 和 $u(t)$ 的波形。其方法是：在“Plot”菜单栏中，点击“Add Plot to Window”，则在显示窗口中增加了一个“示波器”子窗口。各“示波器”信号的加载方法是：先点击选中显示窗口中所预期选中的“示波器”，然后点击菜单栏“Trace”中的“Add Trace”选项，在弹出的“Add Traces”对话框中，选择预期所要观察的变量名称。例如，在图 9-7 中选择第一个“示波器”观察电流 i_L ，选择第二个“示波器”观察电压 $u(t)$ ，其设置过程是：先点击第一个“示波器”位置区，待第一个“示波器”纵轴左侧出现“SEL>>”符号，表明已选中，可加载信号，然后点击菜单栏“Trace”中的“Add Trace”选项，在弹出的“Add Traces”对话框中，选择“ $I(L1)$ ”变量，并点击“OK”键，就可在第一个“示波器”中观察到电流 i_L 的仿真波形，如图 9-7 所示；第二个“示波器”的信号加载操作相似。

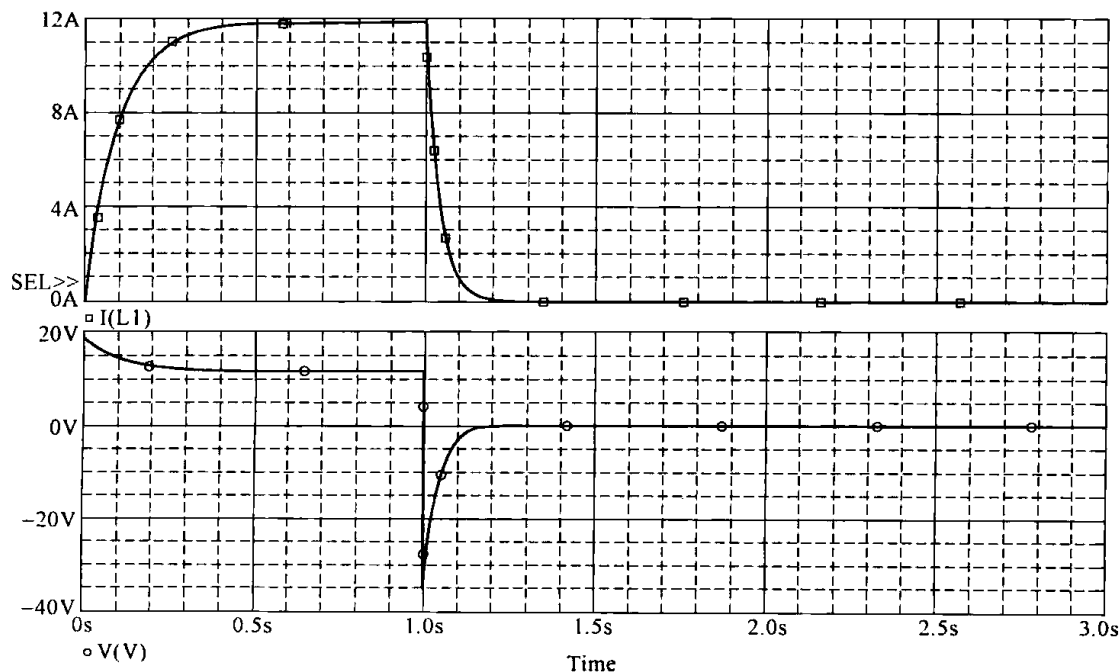


图 9-7 两个单踪“示波器”同时观察变量 i_L 和 $u(t)$ 仿真波形（即两个“示波器”同时观察方式）

(4) 仔细观察并描述在开关闭合和开关断开操作前后, 电感线圈流过的电流以及两端的电压变化情况, 并进一步说明以下两个问题。

1) 在开关断开操作瞬间, 为何电感线圈两端的电压有大的跃变? 其值大于电源电压多少?

2) 如果图 9-3 (a) 所示电路中电阻 R_1 换为 $1\text{k}\Omega$, 电感线圈两端的过电压情况 (加重或减轻), 以及电感线圈两端出现的最大电压。

(5) 如图 9-3 (a) 所示电路中电阻 R_1 用二极管 VD (1N4500) 代替, 电路变为如图 9-3 (b) 所示电路。

1) 在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下, 新建项目文件 [Transient Circuit Experiment 2]; 绘制图 9-3 (b)] 所示电路的电路仿真模型。二极管元件模型 1N4500 取自 “C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\diode.olb”。

2) 创建仿真分析类型管理文件, 取文件名为 “Transient Circuit Experiment 2 Simulation” 重新仿真, 观察和描述在开关闭合和开关断开操作前后, 电感线圈流过的电流以及两端的电压变化情况。

3) 说明用二极管 VD (1N4500) 代替图 9-3 (a) 电路中电阻 R_1 后, 在开关断开操作瞬间, 电感线圈两端的过电压情况是加重了还是减轻了, 电感线圈两端出现的最大电压是多少?

(6) 如图 9-3 (c) 所示电路, 开关闭合, 电路相当于一个二阶电路的零状态响应; 开关断开, 电路相当于典型 RLC 串联二阶电路的零输入响应。

1) 为了弄清楚该电路的暂态过程, 需依据 RLC 二阶暂态电路零输入响应理论计算方法, 针对本 RLC 串联实验电路中电感和电阻一定的特定情况, 确定该电路在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼情况下电容的取值范围, 经计算得出: 在电感 $L=0.16\text{H}$ 、电阻参数 $R=1\Omega$ 前提条件下, $C=0.64\text{F}$ 时, 电路为临界阻尼情况; $C=0.05\text{F}$ 时, 电路为欠阻尼情况; $C=2.5\text{F}$ 时, 电路为过阻尼情况。为了比较电路在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下电感线圈两端的电压变化特点, 仿真分析类型定义为 “Time Domain (Transient)” 类型, 并设置为 “Parametric Sweep (参数扫描)” 方式。

2) 在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下, 新建项目文件 (Transient Circuit Experiment 3); 绘制图 9-3 (c) 所示电路的电路仿真模型, 如图 9-8 所示电路。注意:

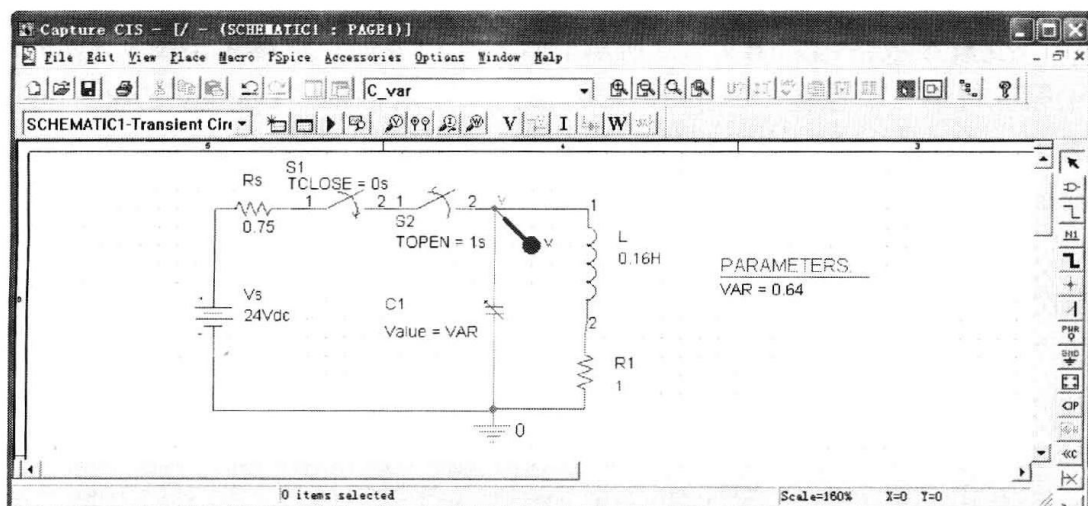


图 9-8 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的暂态电路仿真模型

① 在暂态仿真“Parametric Sweep (参数扫描)”方式下, 电容改用可变电容元件, 该模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\analog.olb”, 并且可变电容值“Value”用变量表示, 例如本实验中用“VAR”表示;

② 在暂态仿真“Parametric Sweep (参数扫描)”方式下, 需使用特殊的“PARAM (参数)”元件, 该模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\special.olb”, 如图 9-7 中右侧所示。

③ 变量参数“PARAM (参数)”元件的设置, 双击“PARAM”元件, 直到出现如图 9-9 所示的背景窗口界面; 再点击背景窗口中第五行第一个按键“New Column”, 将弹出一个对话框“Add New Column”, 如图 9-9 所示的顶层子窗口界面; 在该对话框中, 输入变量参数名称, 例如, 本实验中变量参数名称为“VAR”, 然后在“Value”文本框中先输入一个预设值, 例如, 本实验中变量参数的预设值设为 0.64, 单击“OK”按钮完成一个变量参数的添加和设置。如果实验中有两个或以上变量需设置时, 再次单击按键“New Column”进行下一个变量参数的设置。

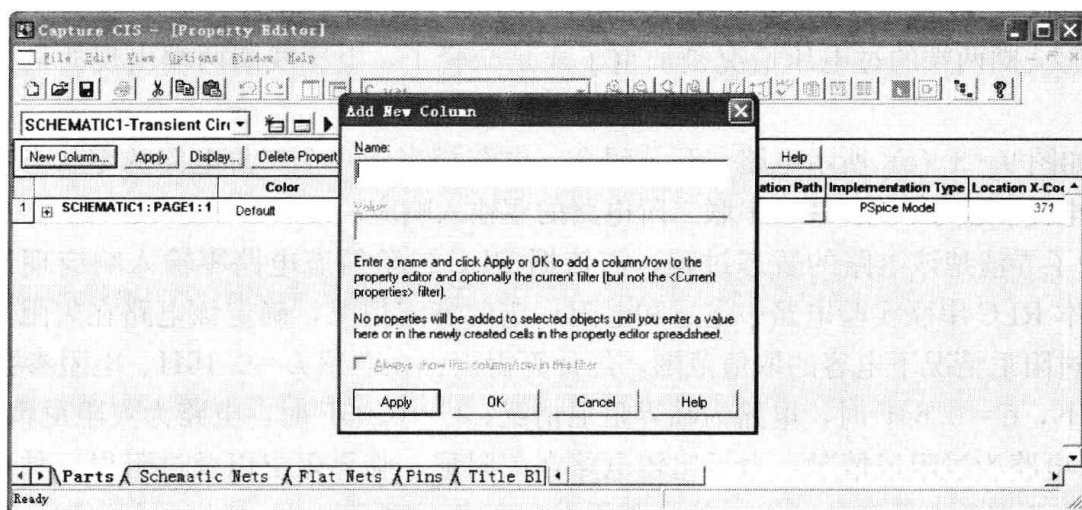


图 9-9 变量参数“PARAM (参数)”元件的设置

④ 为了在图 9-8 右侧所示“PARAMETERS”下, 显示变量参数行“VAR=0.64”, 在图 9-9 所示的背景窗口界面中, 单击鼠标左键选中水平滚动条, 并右移至最右端, 单击选中“VAR”变量参数格, 如图 9-10 所示的背景窗口界面; 继续单击图 9-10 所示的背景窗口界面中第五行第三个按键“Display”, 将弹出一个对话框“Display Properties (显示属性)”, 如图 9-10 所示的顶层子窗口界面; 在该对话框中, 选取“Name and Value”选项, 点击“Display Properties (显示属性)”对话框中的“OK”按钮完成显示属性的设置。从而在图 9-8 右侧所示“PARAMETERS”下, 看到显示变量参数行“VAR=0.64”。

3) 创建仿真分析类型管理文件, 取文件名为“Transient Circuit Experiment 3 Simulation”, 仿真分析类型定义为“Time Domain (Transient)”类型, 如图 9-11 所示。仿真时间设为 3s, 从 0s 开始保存仿真数据; 并且, 为了保证仿真波形的效果, 仿真的最大步长设为 1ms。

4) 为了比较电路在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下电感线圈两端的电压变化特点, 在方式设置上选中“Parametric Sweep (参数扫描)”, 选中后方框中出现“√”符号, 如图 9-12 所示。

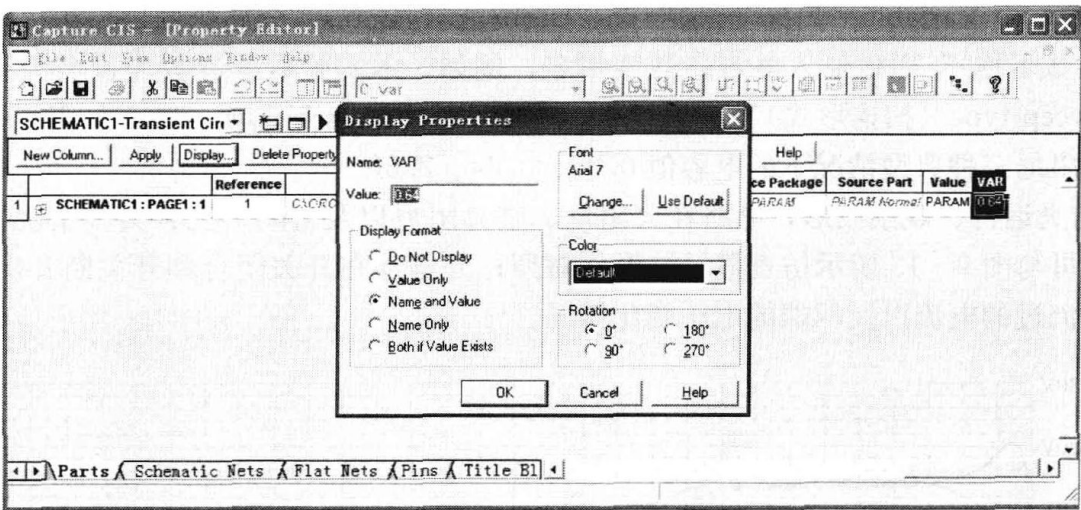


图 9-10 变量参数“PARAM (参数)”元件显示变量参数行设置

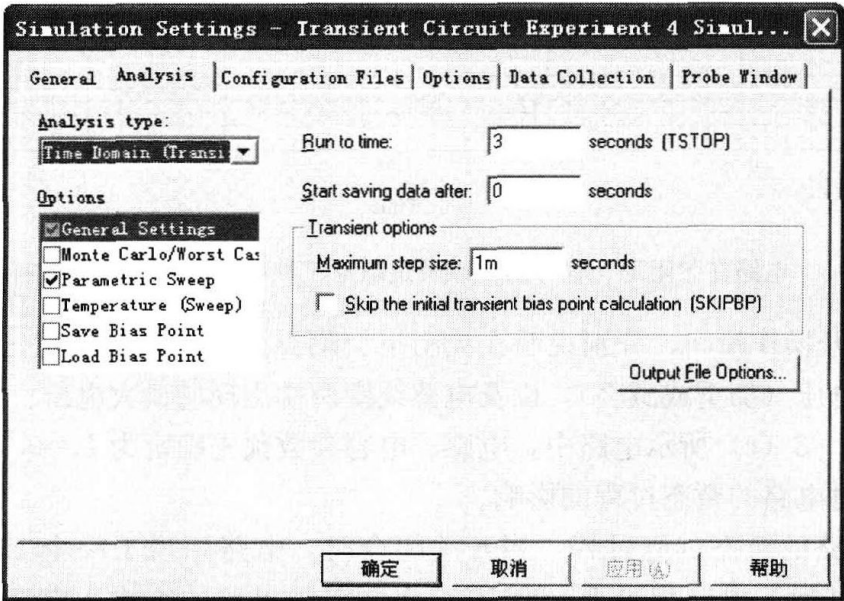


图 9-11 暂态仿真分析时分析类型设置

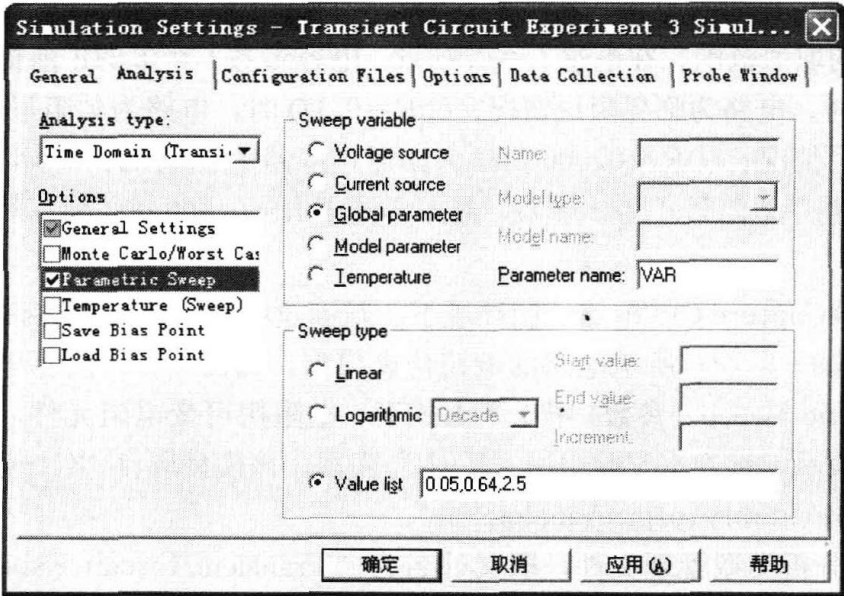


图 9-12 暂态仿真分析时参数扫描方式设置

5) “Sweep Variable (扫描变量)”选“Global parameter (全局变量)”;在“Parameter name (参数名称)”栏中输入电容参数变量名,例如,本实验电容参数变量名为“VAR”;并在“Sweep type (扫描形式)”选项栏中,选取“Value list”选项,输入欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下的电容值 0.05、0.64、2.5F。

6) 仿真运行、观察波形,电路在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下的暂态响应波形可与图 9-13 所示仿真显示波形作对照;并描述在开关闭合和开关断开操作前后,电感线圈流过的电流以及两端的电压变化情况。

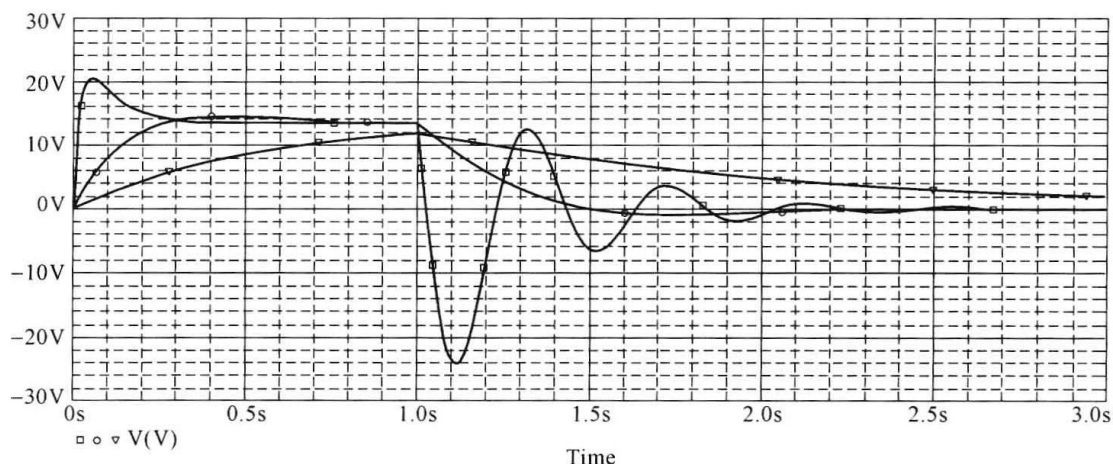


图 9-13 电路在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下的暂态响应波形

7) 在开关断开操作瞬间,分别说明在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下电感线圈两端的过电压(加重或减轻),以及电感线圈两端出现的最大电压。

(7) 如果图 9-3 (c) 所示电路中,电感、电容参数预先确定为 $L=0.16\text{H}$, $C=0.64\text{F}$, 现讨论电阻参数对电路的暂态过程的影响。

1) 先考察电路的暂态过渡过程,当开关闭合时,电路相当于一个二阶电路的零状态响应;而开关断开后,电路相当于典型 RLC 串联二阶电路的零输入响应。为了弄清楚该电路的暂态过渡过程,同样依据 RLC 二阶暂态电路零输入响应理论计算方法,针对本 RLC 串联实验电路中电感和电容一定的特定情况,确定该电路在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼情况下电阻的取值范围,在电感 $L=0.16\text{H}$ 、电容参数 $C=0.64\text{F}$ 前提条件下,经计算得出:① $R=1\Omega$ 时,电路为临界阻尼情况;② $R=0.1\Omega$ 时,电路为欠阻尼情况;③ $R=10\Omega$ 时,电路为过阻尼情况;④ $R=0.000\,000\,01\Omega$ 时,电路为无阻尼、等幅振荡情况。注意:在 PSpice 仿真电路中电阻最小为 $10^{-8}\Omega$,故本实验中 $R=0.000\,000\,01\Omega$ 时,近似认为电阻为零。

2) 在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下,新建项目文件 (Transient Circuit Experiment 4);绘制图 9-3 (c) 所示电路的电路仿真模型,如图 9-14 所示电路。注意:在暂态仿真“Parametric Sweep (参数扫描)”方式下,电阻用可变电阻元件,并且可变电阻值“Value”用变量表示,例如本实验中用“VAR”表示。该模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\analog.olb”。

3) 创建仿真分析类型管理文件,取文件名为“Transient Circuit Experiment 4 Simulation”,仿真分析类型定义为“Time Domain (Transient)”类型。为了比较电路在欠阻尼、

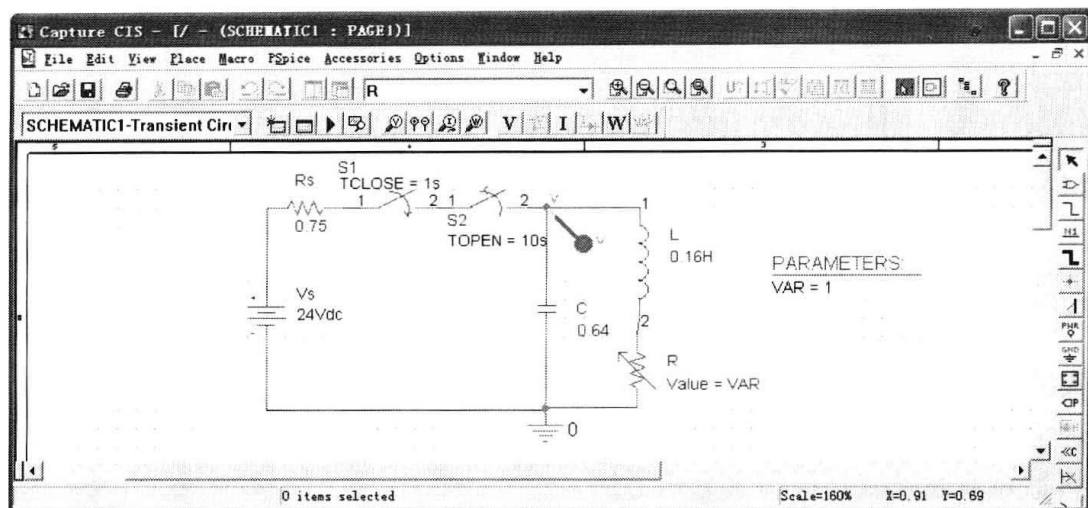


图 9-14 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的暂态电路仿真模型

临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下电感线圈两端的电压变化特点，同样在方式设置上选中“Parametric Sweep（参数扫描）”，如图 9-12 所示。

4) “Sweep Variable（扫描变量）”选“Global parameter（全局变量）”；在“Parameter name（参数名称）”栏中输入电阻参数变量名，例如，本实验电阻参数变量名为“VAR”；并在“Sweep type（扫描形式）”选项栏中，选中“Value list”选项，输入欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下的电阻值 0.1、1.0、10Ω。（设置仿真时间为 20s）

5) 仿真运行、观察波形，电路在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下的暂态响应波形可与图 9-15 所示仿真显示波形作比照；并描述在开关闭合和开关断开操作前后，电感线圈流过的电流以及两端的电压变化情况。

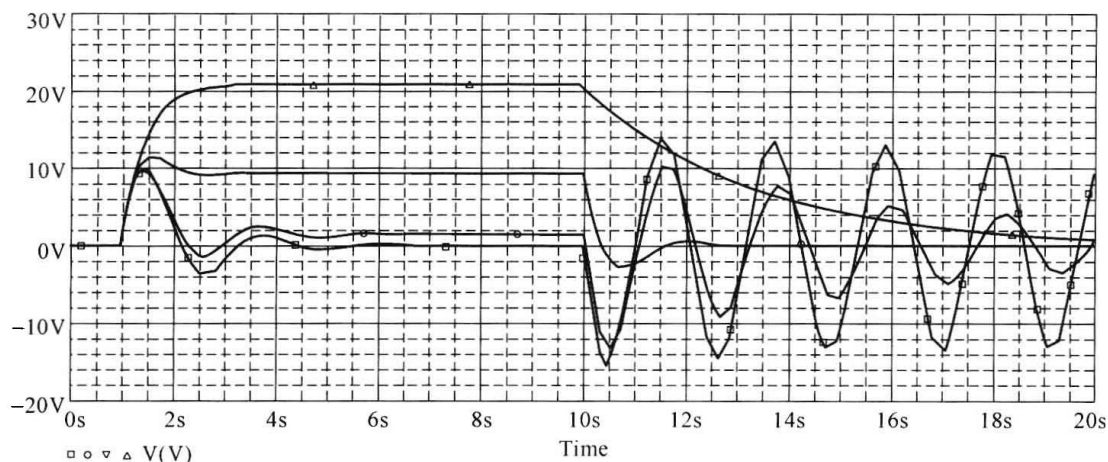


图 9-15 电阻取不同参数时，电路处于四种典型情况下的暂态响应波形

6) 在开关断开操作瞬间，分别说明在欠阻尼、临界阻尼以及过阻尼三种典型情况下，电感线圈两端的过电压情况（加重或减轻），以及电感线圈两端出现的最大电压。

(8) 形成仿真实验报告，主要内容包括以下几项。

- 1) 叙述完成本仿真实验的主要技术操作步骤及其用意；
- 2) 对比仿真实验和理论计算结果的一致性；
- 3) 分别归纳、总结电路元件参数的改变对一阶和二阶电路响应的影响；

4) 说明在本仿真实验过程中遇到的主要软件使用技术问题, 若问题已解决, 请陈述所采用的办法或措施;

5) 随实验报告, 同时递交仿真结果输出文件, 即“Simulation Output File 1~4 (*.out 文件)”和仿真波形文件“Transient Circuit Experiment Simulation 1~4 (*.dat 文件)”。

第三节 交流电路频率特性仿真分析

一、实验目的

- (1) 理解网络幅频特性和相频特性的概念, 并掌握网络幅频和相频特性计算方法。
- (2) 熟悉并掌握频域扫描仿真分析方法。
- (3) 熟悉 RC 选频电路的结构特点及其电气特性。

二、实验任务

如图 9-16 所示电路称为选频网络, 电路参数为 $R=0.1\text{k}\Omega$, $C=0.1\mu\text{F}$ 。

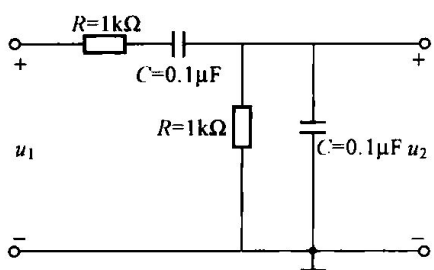


图 9-16 选频电路

(1) 计算选频网络的电压转移函数 $[A_u(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}]$, 定

性分析选频网络的幅频和相频特性。

(2) 通过交流频率扫描仿真方法, 画出该网络的幅频和相频特性曲线, 并确定选频网络的通频带。

三、实验要点

(1) 启动 Capture CIS, 创建项目文件“AC Experiment 1”; 在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下, 绘制图 9-16 所示电路的仿真模型, 如图 9-17 所示。绘图前, 先确认是否已加载所需的库文件。

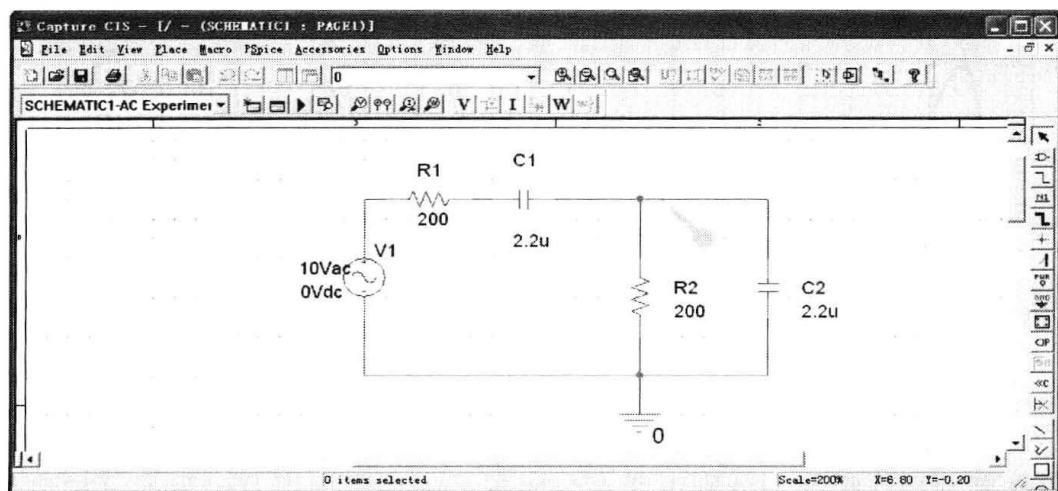


图 9-17 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的选频网络仿真模型

交流电压源元件模型取自“C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\source.olb”。

(2) 定义分析类型。

1) 创建仿真分析类型管理文件，取文件名为“AC Experiment 1 Simulation”。

2) 在仿真设置子窗口设置仿真环境，本项目为频域扫描仿真分析，故仿真分析类型设置为“AC Sweep (即频域扫描分析)”。

3) “General Settings”选项设置如图 9-18 所示，并在“AC Sweep Type (交流扫描形式)”选项框中，选中“Linear”选项，扫描起始频率从 1Hz 开始 (不能设为零)；总扫描点数按 10Hz 或 100Hz 间隔确定；终止频率用猜试法从大到小反复仿真试探，最后确定一个合适的频率，例如，在本例中，初选终止频率为 2MHz，运行仿真，观察输出波形是否显示恰当，通过反复试探，最后确定终止频率为 2kHz。

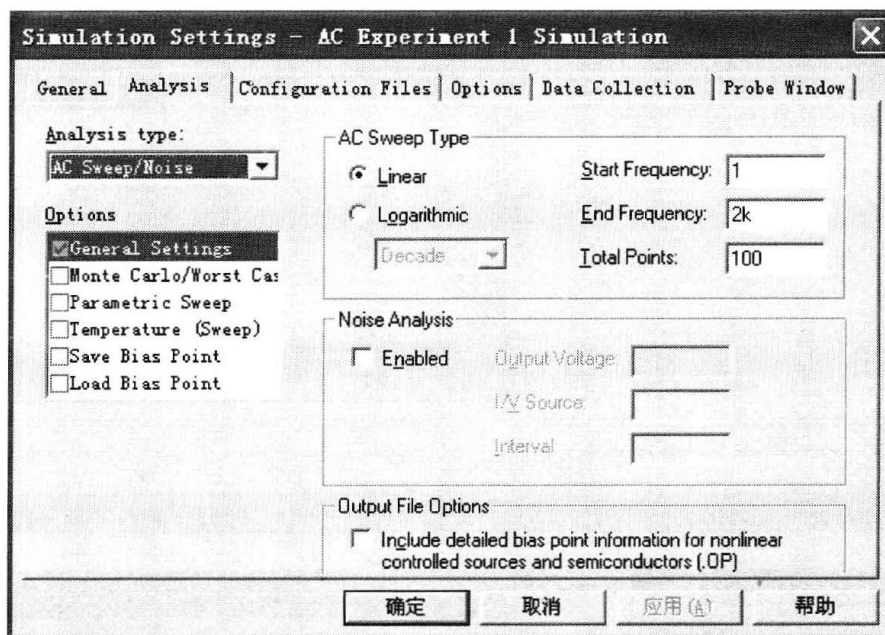


图 9-18 交流频率扫描仿真分析时“General Settings”选项设置

(3) 仿真运行和仿真结果观察。

1) 观察选频网络输出频率特性曲线。利用 OrCAD Capture CIS 菜单栏“PSpice”中的“Markers”选项，设置检测探头检测输出电压，如图 9-17 所示，在仿真运行后，在 OrCAD PSpice A/D 界面下可以观察到选频网络输出频率特性曲线 $u_2(f)$ ，如图 9-19 所示，并确认波形图横坐标轴下面左端列出的物理量的名称为 V (C2:1)，如果不是，则回

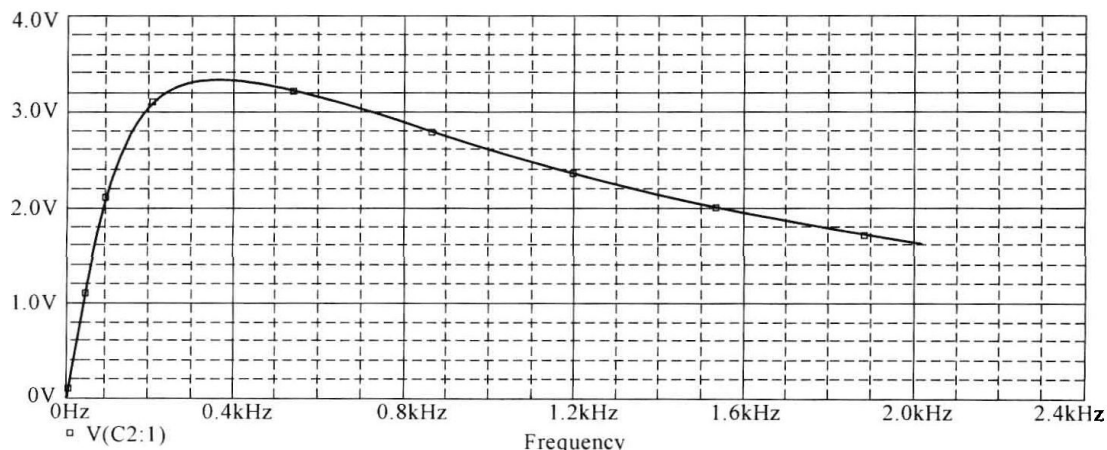
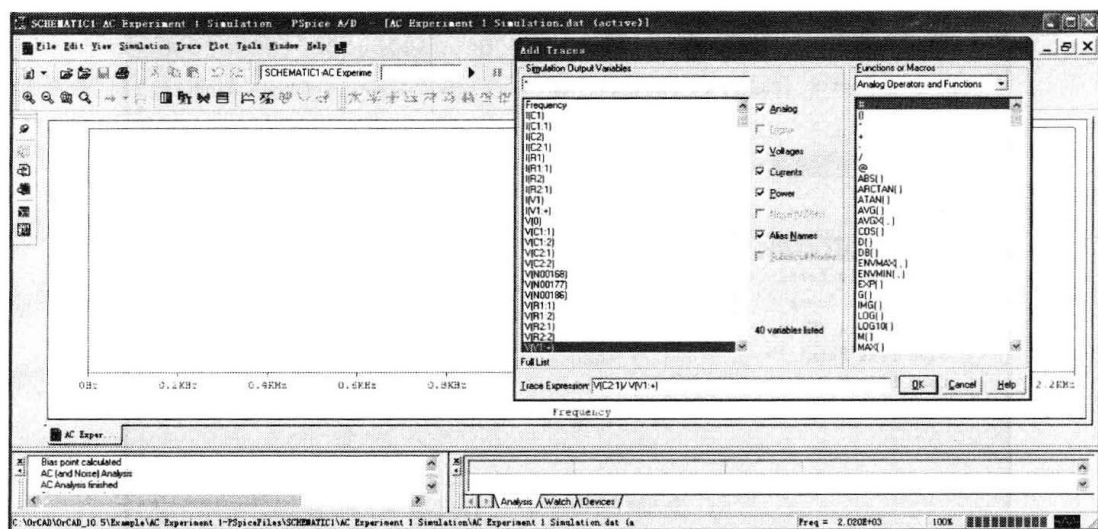


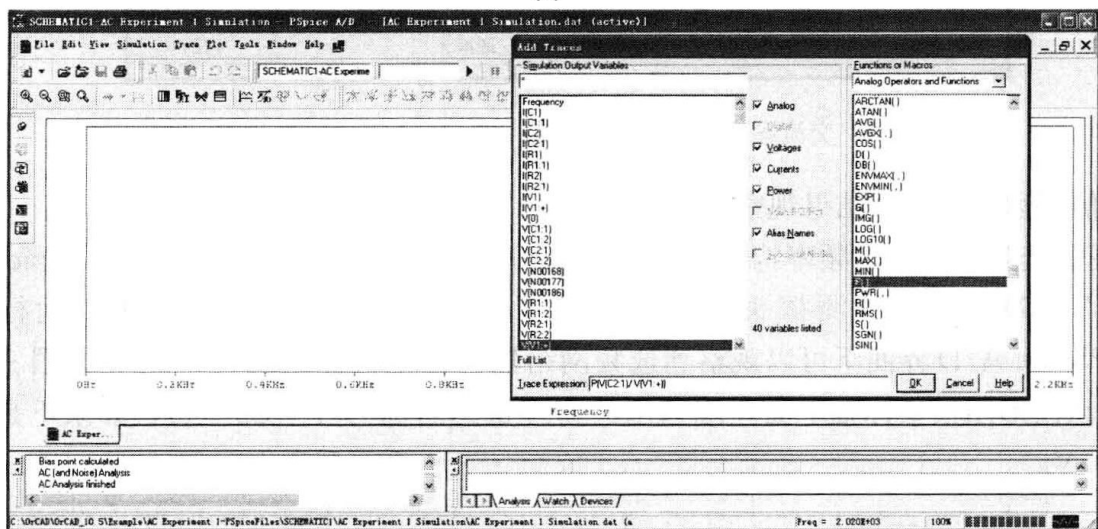
图 9-19 选频网络输出频率特性曲线 $u_2(f)$

到 Capture CIS 电路图编辑界面中旋转元件 C2，使其引脚换位，重复 (1) 直到测量量名称指示为 V (C2 : 1)。

2) 求选频网络的幅频特性曲线。点击 OrCAD PSpice A/D 菜单栏中的“Add Trace”选项，在弹出的“Add Traces”对话框中，利用右侧“Functions or Macros”功能对话框，选择“/”选项，如图 9-20 (a) 所示。“Trace Expression”文本框中，表示出： $V(C2 : 1)/V(V1 : +)$ ，即选频网络的输出输入电压函数幅值比，然后，点击“OK”按钮完成幅频特性曲线的设置和添加，如图 9-20 (a) 所示，选频网络的幅频特性曲线如图 9-21 上半部所示。



(a)



(b)

图 9-20 选频网络的幅频 $\left[H(\omega) = \left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right| \right]$ 、相频 $[\varphi(\omega)]$ 特性曲线显示设置

(a) 输出输入信号比表达式的设置；(b) 输出输入信号相位差表达式的设置

3) 求选频网络的相频特性曲线。点击 OrCAD PSpice A/D 菜单栏中的“Add Trace”选项，在弹出的“Add Traces”对话框中，利用右侧“Functions or Macros”功能对话框，选择“P ()”选项，如图 9-20 (b) 所示。“Trace Expression”文本框中，表示出： $P[V(C2 : 2)/V(V1 : +)]$ ，即选频网络的输出输入函数比的相位，然后，点击“OK”

按钮完成相频特性曲线的设置和添加,如图 9-20 (b) 所示,选频网络的相频特性曲线如图 9-21 下半部所示。

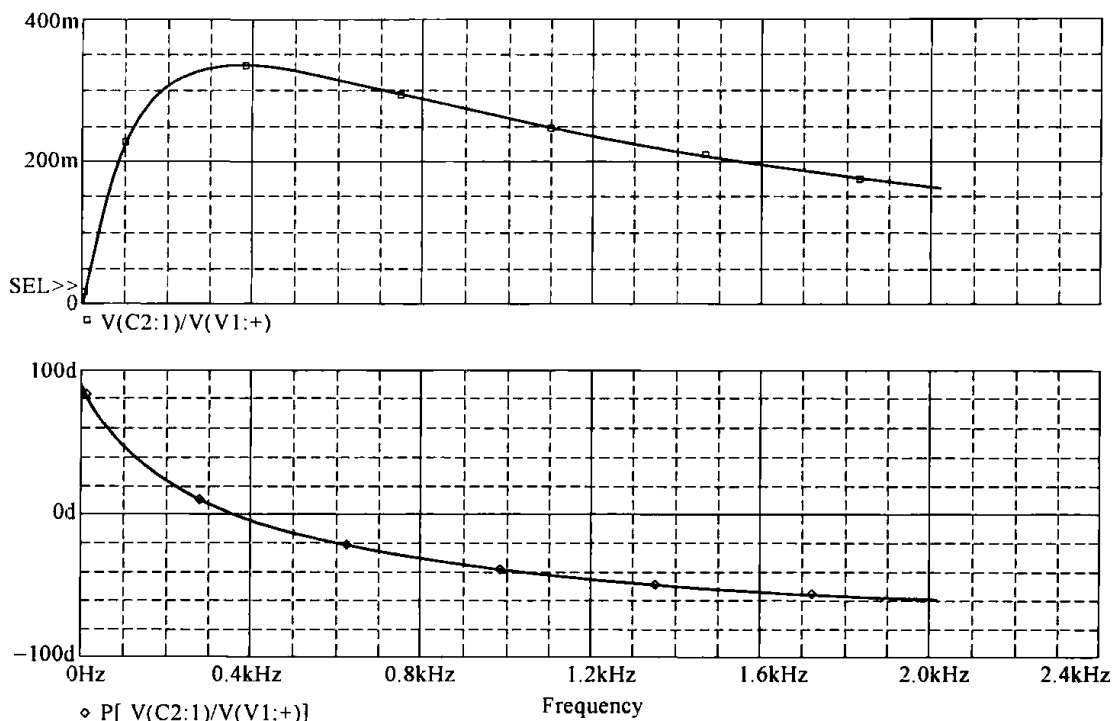


图 9-21 选频网络的幅频 $\left[H(\omega) = \left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right| \right]$ 、相频 $[\varphi(\omega)]$ 特性曲线

4) 确定选频网络的通频带。选择 OrCAD PSpice A/D 菜单栏 “Trace” 中的 “Evaluate Measurement” 选项,如图 9-22 (a) 所示。再在弹出的对话框中的 “Functions or Macros” 选项区域选中 “Measurements” 类中的 “Bandwidth (,)” 选项,如图 9-22 (b) 所示。“Trace Expression” 文本框中,将显示出: Bandwidth [V (C2:1)/V (V1: +), 3],即选频网络的通频带表示式,然后,点击 “OK” 按钮完成选频网络的通频带的设置和添加,如图 9-23 所示, P1、P2 两点之间的频率差就是选频网络的通频带。

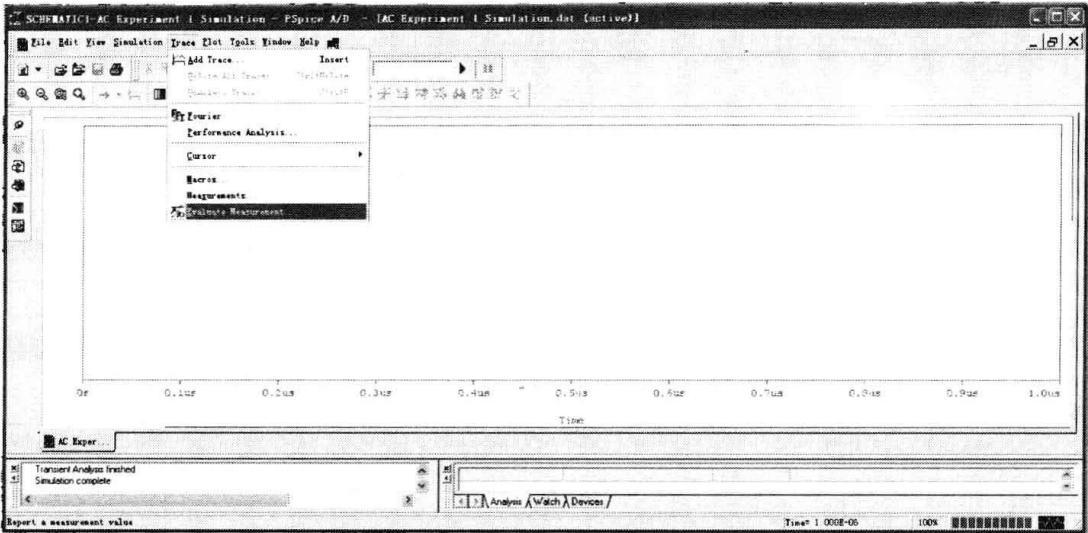
5) 为了能在曲线图中显示被测量的参数,需在 OrCAD PSpice A/D 界面中进行如下设置: 选择 “Tools” → “Options” → “General” 命令,再选中 Display Evaluation 选项即可。

(4) 形成仿真实验报告,主要包括以下几项。

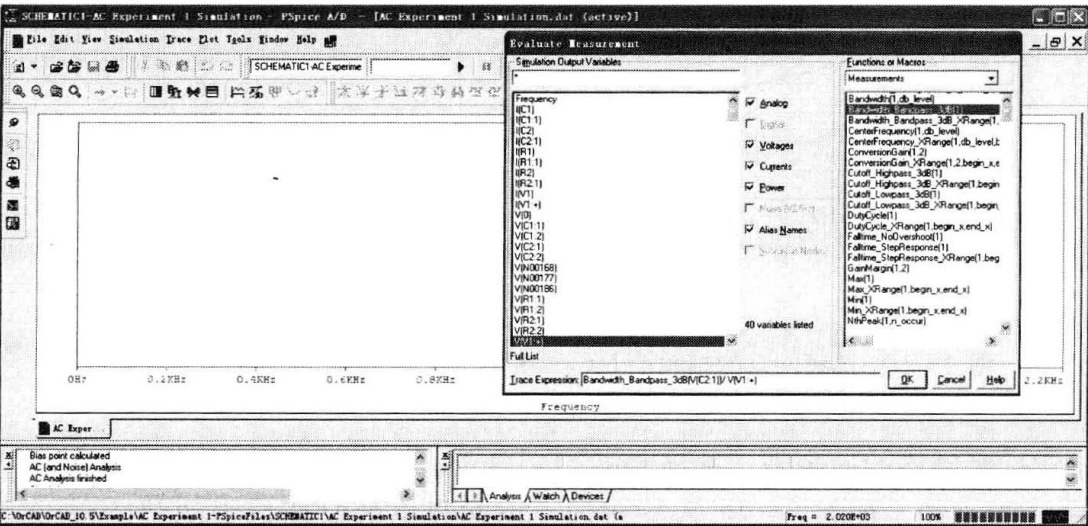
- 1) 叙述完成本仿真实验的主要技术操作步骤及其用意。
- 2) 对比仿真实验和理论计算结果的一致性。
- 3) 根据仿真实验绘制 RC 选频电路的幅频特性和相频特性曲线,总结其电气特性以及应用方法。

4) 说明在本仿真实验过程中遇到的主要软件使用技术问题,若问题已解决,请陈述所采用的办法或措施。

5) 随实验报告,同时递交仿真结果输出文件,即 “AC Experiment 1 Output File (*.out文件)” 和仿真波形文件 “AC Experiment 1 Simulation (*.dat 文件)”。



(a)



(b)

图 9-22 选频网络的通频带显示设置

(a) 选频网络的通频带显示设置 1; (b) 选频网络的通频带显示设置 2

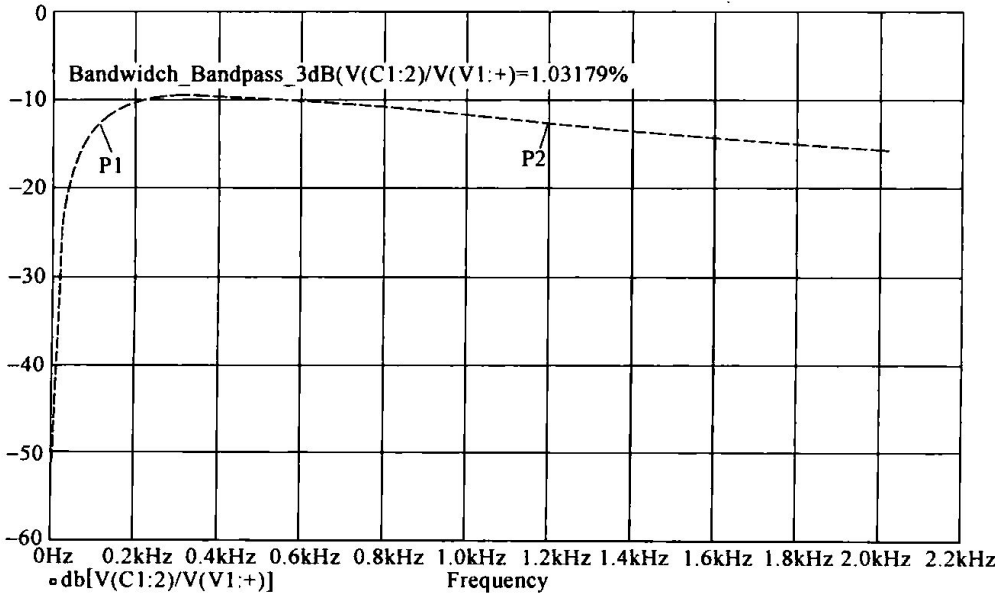


图 9-23 选频网络的通频带显示

第四节 交流谐振电路频率特性仿真分析

一、实验目的

- (1) 熟悉并掌握频域扫描仿真分析方法。
- (2) 观察 RLC 串联电路中元件电压、支路电流随频率变化的曲线，加深对交流电路频率特性的理解。
- (3) 认识电路品质因数（电路 Q 值）和网络通频带的物理意义。
- (4) 了解电路元件参数变化对电路品质因数和网络通频带的影响。

二、实验任务

某无线电调谐电路等效为如图 9-24 所示 RLC 电路，电路参数为 $L=0.1\text{mH}$ ， $R=0.75\Omega$ ， $C=220\text{pF}$ 。

(1) 通过交流频率扫描仿真方法，确定图 9-24 所示 RLC 电路的谐振点频率 f_0 、品质因数 Q 以及通频带 BW 。

(2) 电阻参数随工作温度变化 $\pm 10\%$ ，试观察图 9-24 所示 RLC 电路的谐振点频率 f_0 、品质因数 Q 以及通频带 BW 的变化。

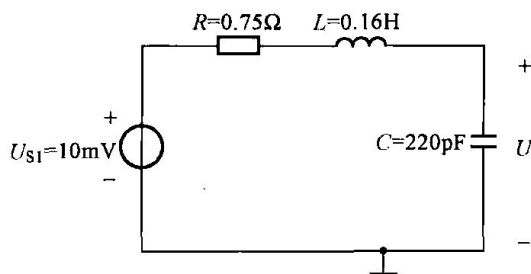


图 9-24 某无线电调谐电路等效的 RLC 电路串联谐振电路

三、实验要点

(1) 启动 Capture CIS，创建项目文件“AC Experiment 2”；在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下，绘制图 9-24 所示电路的仿真模型，如图 9-25 所示。注：绘图前，先确认是否已加载所需的库文件；交流电压源元件模型取自“C:\OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\source.olb”。

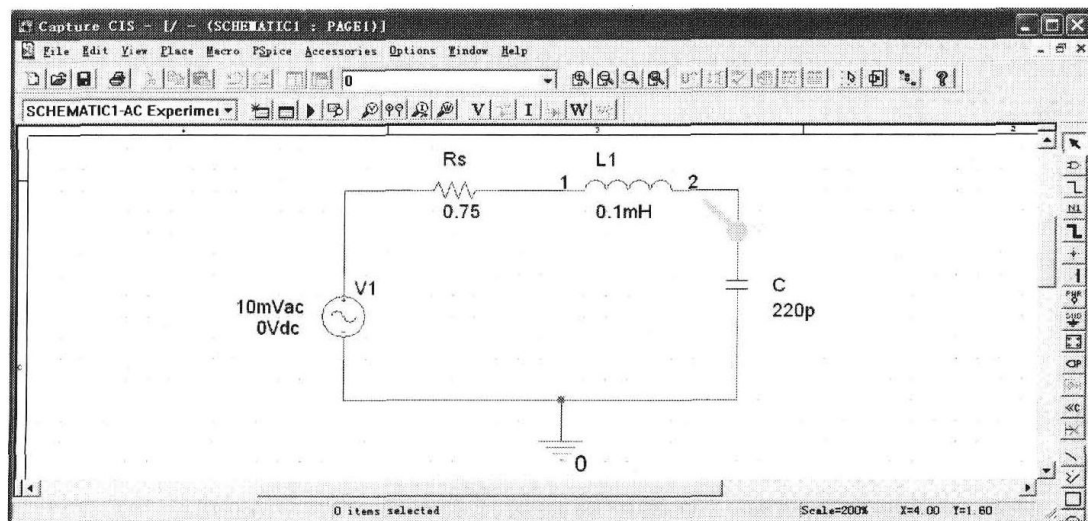


图 9-25 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的 RLC 串联谐振电路仿真模型

(2) 定义分析类型。

1) 创建仿真分析类型管理文件，取文件名为“AC Experiment 2 Simulation”。

2) 在仿真设置子窗口设置仿真环境, 本项目为频域扫描仿真分析, 故仿真分析类型设置为“AC Sweep (即频域扫描分析)”。

3) “General Settings”选项设置如图 9-26 所示, 并在“AC Sweep Type (交流扫描形式)”选项框中, 选中“Linear”选项, 扫描起始频率从 1Hz 开始 (不能设为零); 总扫描点数按 10Hz 或 100Hz 间隔确定; 终止频率用猜试法从大到小反复仿真试探, 最后确定一个合适的频率, 例如, 在本例中, 初选终止频率为 2MHz, 运行仿真, 观察输出波形是否显示恰当, 通过反复试探, 最后确定终止频率为 2MHz。

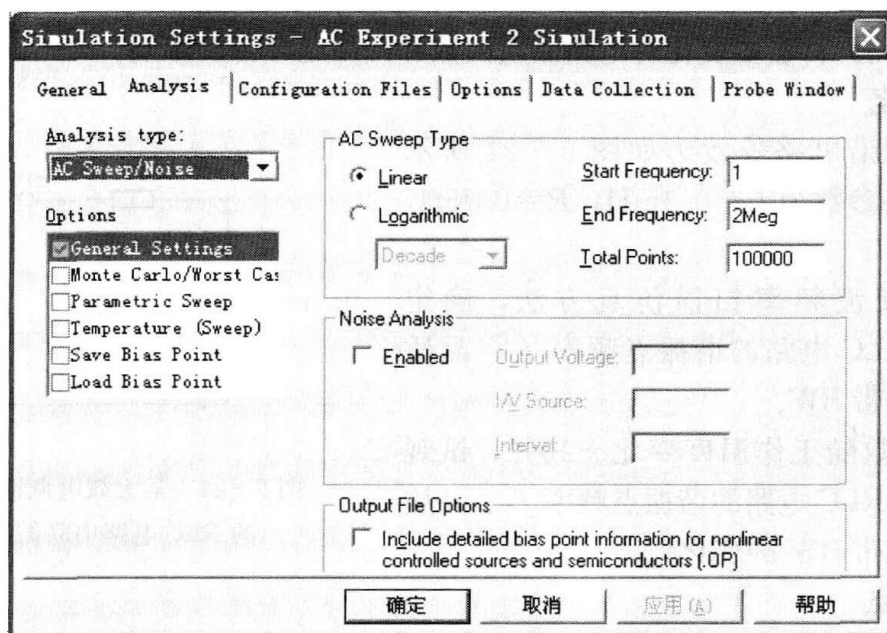


图 9-26 交流频率扫描仿真分析时“General Settings”选项设置

(3) 仿真运行和仿真结果观察。

1) 观察 RLC 串联谐振电路电容输出波形。利用 OrCAD Capture CIS 菜单栏“PSpice”中的“Markers”选项, 设置检测探头检测输出电压, 如图 9-25 所示, 在仿真运行后, 在 OrCAD PSpice A/D 界面下可以观察到 RLC 串联谐振电路输出电压频率特性曲线 $u_C(f)$, 如图 9-27 所示。

2) 要以数字显示图 9-27 中电容电压的最大值, 其操作方法是: 在 OrCAD PSpice A/D 界面中依次点击第四行的图标“Toggle Cursor”、“Cursor Max”和“Mark Label”即可得到 (图标的位置已在图 9-27 中注明, 以方便学习)。

3) 观察 RLC 串联谐振电路品质因数频率特性 $Q(f)$ 。点击 OrCAD PSpice A/D 菜单栏中的“Add Trace”选项, 在弹出“Add Traces”的对话框中, 利用右侧“Functions or Macros”功能框, 选择“/”选项, 如图 9-20 (a) 所示。“Trace Expression”文本框中, 将显示出: $V(L1:2)/V(V1: +)$, 即 RLC 串联谐振电路的输出输入函数幅值比, 然后, 点击“OK”按钮完成设置和添加, 品质因数频率特性曲线 $Q(f)$ 如图 9-28 上半部所示。

4) 确定 RLC 串联谐振电路通频带 (BW)。选择 OrCAD PSpice A/D 菜单栏“Trace”中的“Evaluate Measurement”选项, 如图 9-22 (a) 所示, 再在弹出的对话框中的“Functions or Macros”选项区域选中“Measurements”类中的“Bandwidth (,)”选项, 如图 9-22 (b) 所示。“Trace Expression”文本框中将显示出: $\text{Bandwidth } [V(L1:2)/V$

(V1: +), 3], 即 RLC 串联谐振电路通频带表示式, 然后, 点击“OK”按钮完成 RLC 串联谐振电路通频带的设置和添加, 如图 9-28 下半部所示, P1、P2 两点之间的频率差就是 RLC 谐振电路的通频带。

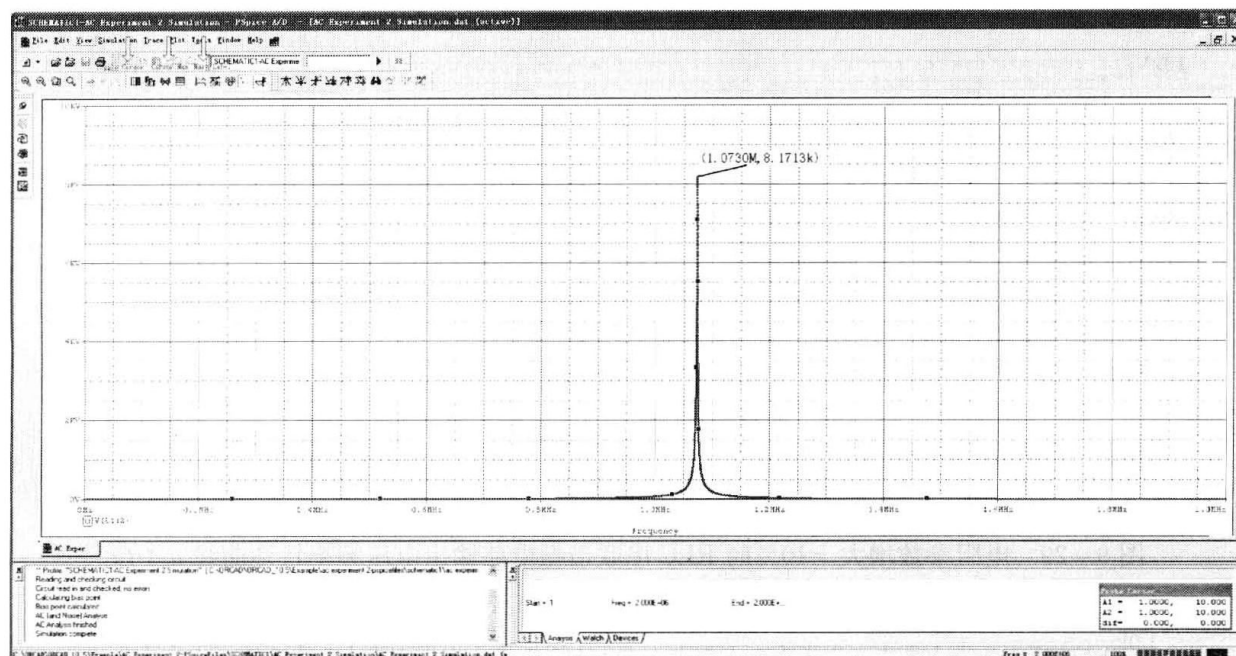


图 9-27 输出电压频率特性曲线 $u_c(f)$

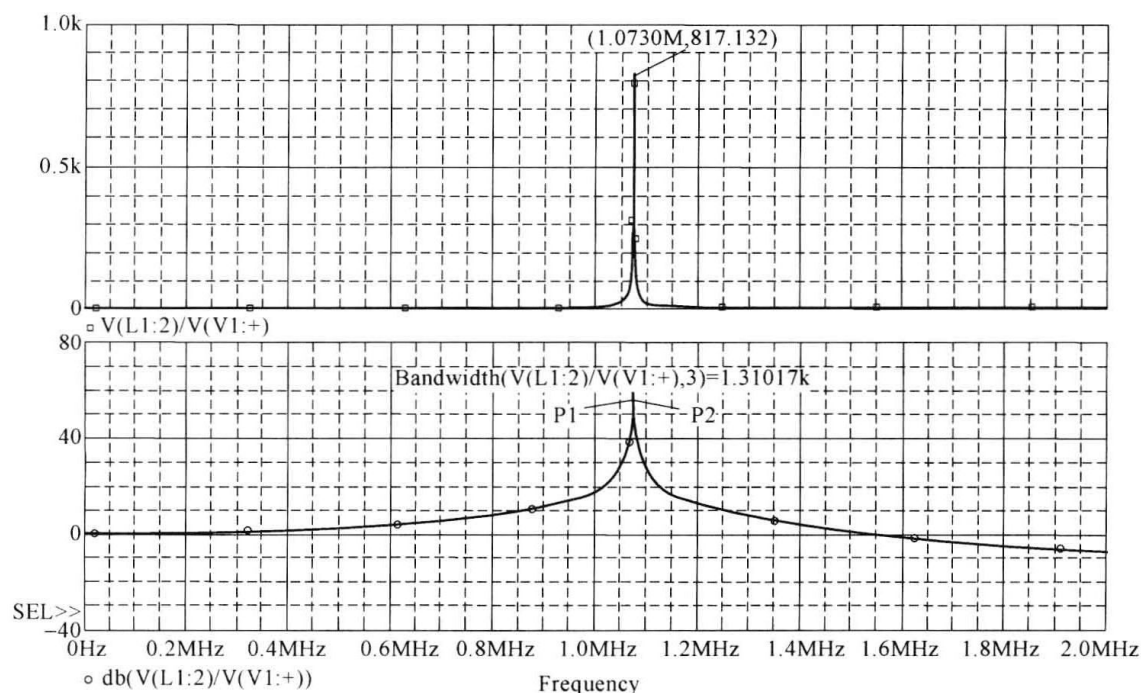


图 9-28 品质因数频率特性曲线 $Q(f)$ 及通频带

(4) 当电阻参数随工作温度变化+10%时, 修改图 9-25 所示电路仿真模型中电阻参数, 重复上述 (1)~(3) 步骤。从而, 可以观察到:

1) 如图 9-29 所示, 电阻参数增大+10%时, RLC 串联谐振电路输出电压频率特性曲线 $u_c(f)$ 。

2) 如图 9-30 上半部所示, 电阻参数增大+10%时, RLC 串联谐振电路品质因数频率特性曲线 $Q(f)$ 。

3) 如图 9-30 下半部所示, P1、P2 两点之间的频率差就是 RLC 串联谐振电路的通频带。

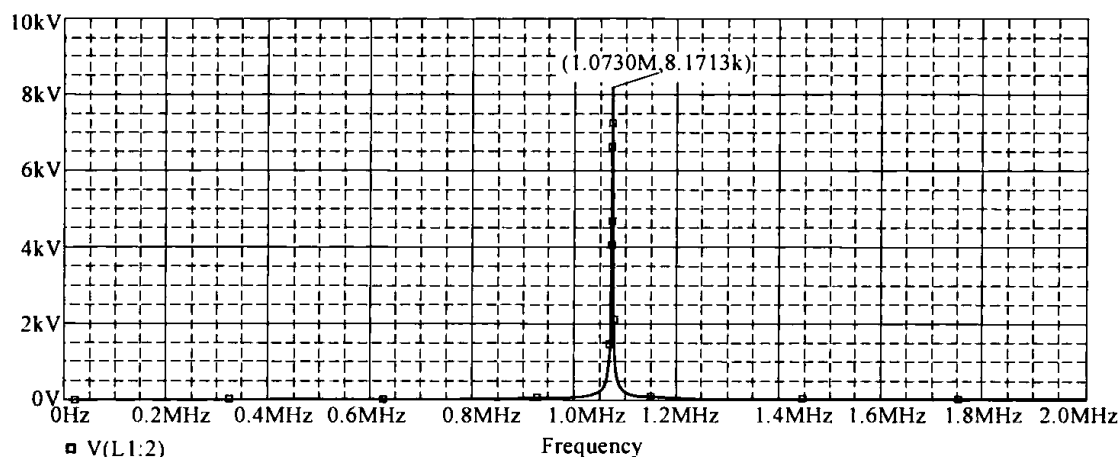


图 9-29 电阻参数增大+10%时 RLC 串联谐振电路输出电压频率特性曲线 $u_c(f)$

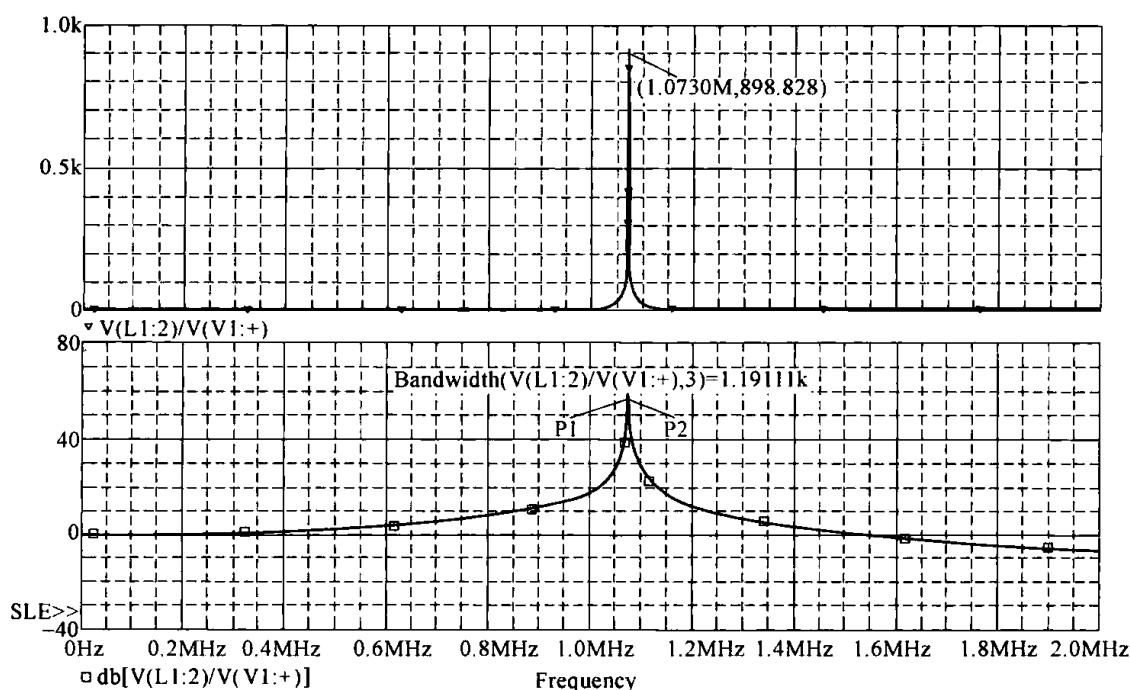


图 9-30 电阻参数增大+10%时品质因数频率特性曲线 $Q(f)$ 和 RLC 串联谐振电路的通频带

(5) 形成仿真实验报告, 主要内容包括以下几项。

- 1) 叙述完成本仿真实验的主要技术操作步骤及其用意。
- 2) 对比仿真实验和理论计算结果的一致性。
- 3) 总结电阻参数变化前后谐振点频率 f_0 , 品质因数 Q 以及通频带 BW 的变化情况, 分析会带来何种影响。
- 4) 总结电路元件参数变化对电路品质因数和网络通频带影响的规律。

5) 说明在本仿真实验过程中遇到的主要软件使用技术问题, 若问题已解决, 请陈述所采用的办法或措施。

6) 随实验报告, 同时递交仿真结果输出文件, 即“AC Experiment 2 Output File (*.out 文件)”和仿真波形文件“AC Experiment 2 Simulation (*.dat 文件)”。

第五节 混沌现象的仿真研究

一、实验目的

- (1) 熟悉时域(暂态)电路的仿真分析方法。
- (2) 了解典型有源非线性负阻器件蔡氏二极管(Chua's Diode)的特性。
- (3) 采用双运算放大器电路实现非线性负阻特性。
- (4) 观察蔡氏非线性电路(Chua's Circuit)振荡周期混沌现象, 加深对非线性电路及混沌理论的认识。

二、实验任务

实验电路采用的是蔡氏电路(Chua's circuit), 又称为双涡卷(Double scroll)电路, 如图 9-31 所示。该电路包括有源非线性负阻 R 、RLC 振荡器和 RC 移相器三部分。图中非线性电阻元件 R 是一个压控有源非线性负阻器件, 其元件伏安特性如图 9-32 所示。该非线性负阻按 Kennedy 于 1993 年提出的方法, 即由双运算放大器和 6 个电阻组成实现, 电路拓扑及其参数如图 9-33 所示。电感器 L 和电容器 C_2 组成一个损耗可以忽略的谐振回路; 可变电阻 R_V 和电容器 C_1 串联将振荡器产生的正弦信号移相输出。

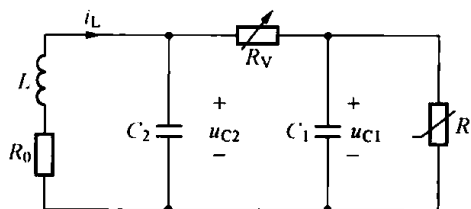


图 9-31 蔡氏电路

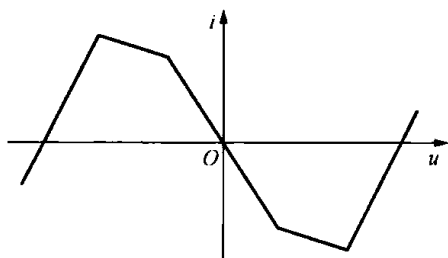


图 9-32 非线性负阻器件的伏安特性

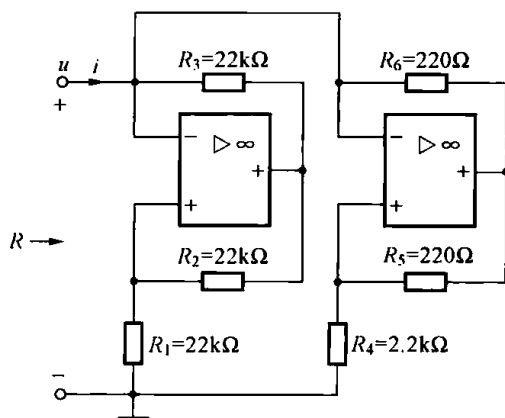


图 9-33 实现蔡氏二极管的 Kennedy 电路拓扑

(1) 应用双运算放大器电路构建蔡氏二极管(Chua's Diode)非线性负阻器件仿真电路, 并仿真分析其伏安特性。

(2) 建立如图 9-31 所示非线性动态仿真实验电路, 电路参数为 $L=23.3\text{mH}$, $C_1=10\text{nF}$, $C_2=100\text{nF}$, $R_0=15\Omega$, $R_V=1800\sim 2200\Omega$, 研究 LC 振荡器产生的正弦波与经过 RC 移相器移相的正弦波合成的相图(李萨育图), 观测振动周期发生的分岔及混沌现象。

三、实验要点

(1) 构建非线性负阻器件，即蔡氏二极管 (Chua's Diode) 仿真电路。启动 Capture CIS，创建项目文件 “Nonlinear Circuit”；在 OrCAD Capture CIS 电路绘图环境下，绘制图 9-33 所示电路的仿真模型，并且，为了测试该负阻器件的伏安关系，在其端口添加一个电压源 V5，如图 9-34 所示。注意：绘图前，先确认是否已加载所需的库文件。

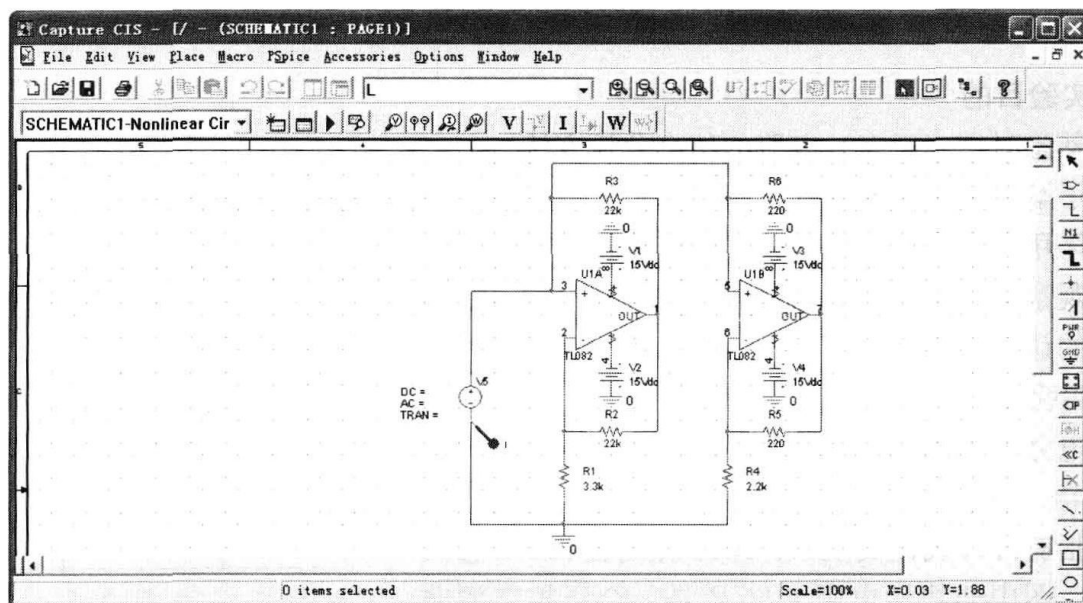


图 9-34 在 OrCAD Capture CIS 下绘制的非线性负阻器件 (蔡氏二极管) 仿真模型

1) 电阻元件模型取自 “C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\analog.olb”。

2) 运算放大器元件模型取自 “C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\OPAMP.olb\TL082”。

3) 直流电压源元件 V1~V4 模型取自 “C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\source.olb\VDC”。

4) 直流电压源元件 V5 模型取自 “C: \OrCAD\OrCAD_10.5\tools\capture\library\pspice\source.olb\VSRC”。

(2) 定义分析类型。

1) 创建仿真分析类型管理文件，取文件名为 “Chua's Diode”。

2) 在仿真设置子对话框 “Simulation Settings - Chua's Diode” 设置仿真环境，本项目为直流扫描仿真分析，故仿真分析类型 “Analysis type” 设置为 “DC Sweep (即直流扫描分析)”。

3) “Analysis Settings” 选项设置如图 9-35 所示，“Sweep variable Name” 设为 “V5”，Sweep type 选中 “Linear” 选项，扫描起始电压设为 “-15V”，终止电压设为 “+5V”，每次增量设为 “0.1V”；仿真运行。

(3) 仿真运行和仿真结果观察。观察非线性负阻器件 (蔡氏二极管) 伏安特性曲线。利用 OrCAD Capture CIS 菜单栏 “PSpice” 中的 “Markers” 选项，设置检测探头检测电压源 “V5” 的输出电流，注意：在关联方向下电压源 “V5” 的输出电流为 “-I (V5)”，如图 9-34

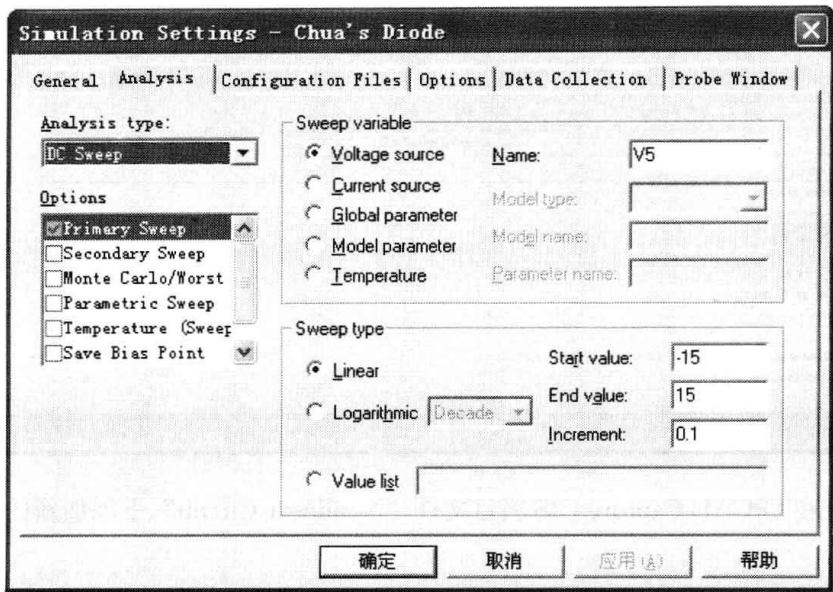


图 9-35 直流电压扫描仿真分析时“General Settings”选项设置

所示。仿真运行后，在OrCAD PSpice A/D 界面下可以观察到非线性负阻器件（蔡氏二极管）的伏安特性曲线如图 9-36 所示，其纵坐标表示的物理量为“- I（V5）”，即波形图横坐标轴下面左端列出的物理量的名称为“- I（V5）”，横坐标表示的物理量为“V5”。

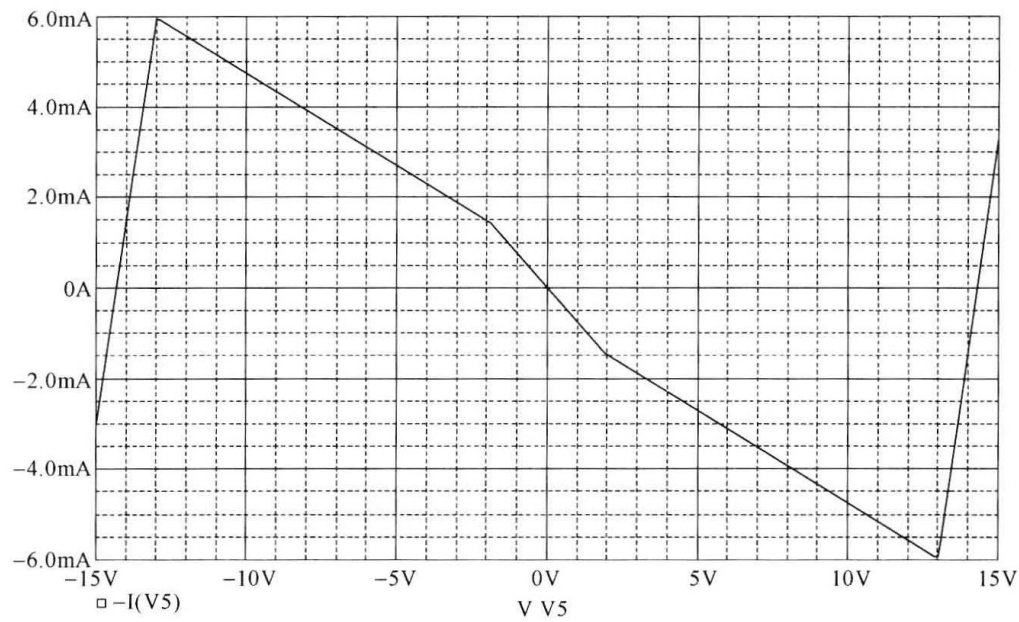


图 9-36 非线性负阻器件（蔡氏二极管）的伏安特性曲线

(4) 建立非线性动态仿真电路。

1) 启动 Capture CIS，在所创建项目文件“Nonlinear Circuit”下，逐级双击“Design Resources→nonlinear circuit. dsn→SCHEMATIC1”，如图 9-37 所示，在选中“SCHEMATIC1”层级后，打开菜单栏第二项“Design”，选中“New Schematic Page”项，新建一页“PAGE2”绘图页面；将“PAGE1”页的蔡氏二极管电路复制至“PAGE2”，并添加 LC 振荡器和移相电路，建立完整的非线性动态仿真电路模型及其参数，如图 9-38 所示。

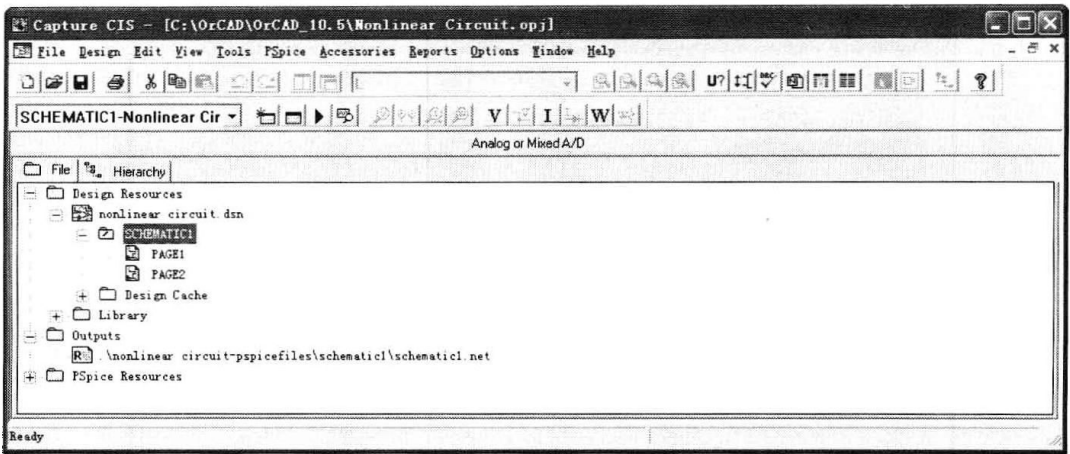


图 9-37 在 OrCAD Capture CIS 项目文件“Nonlinear Circuit”下添加新的绘图页面

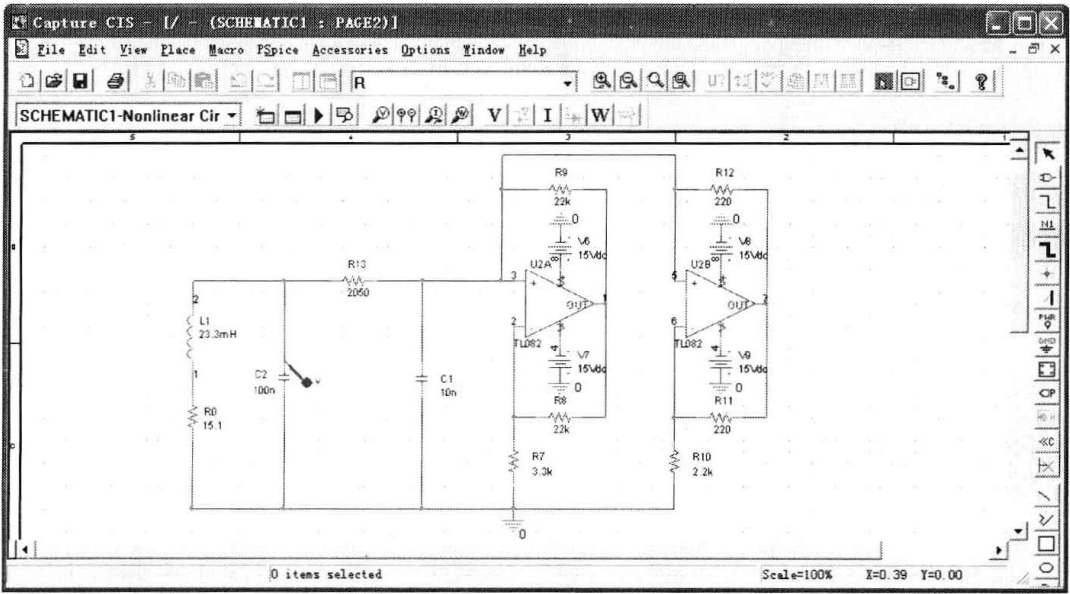


图 9-38 在 OrCAD Capture CIS 绘制的非线性动态电路仿真模型

2) 定义非线性动态电路仿真分析类型。

① 创建“PAGE2”的仿真分析类型管理文件，取文件名为“Nonlinear Circuit”。

② 在仿真设置子窗口设置仿真环境，本项目为时域仿真分析，故仿真分析类型设置为“Time Domain (Transient) (即时域分析)”，如图 9-39 所示。

③ “General Settings”选项设置如图 9-39 所示，仿真时间“Run to time (运行时间)”设为 100ms，数据记录时间设为 0s 开始，仿真时间最大步长设为 10 μ s，点击“确定”按钮后，回到主页面，点击“▶”按钮仿真运行开始。

3) 非线性动态电路仿真运行和仿真结果观察。

① 观察电容 C2 的电压波形。利用 OrCAD Capture CIS 菜单栏“PSpice”中的“Markers”选项，设置检测探头检测电容 C2 的电压 u_{C2} ，如图 9-38 所示，在仿真运行后，在 OrCAD PSpice A/D 界面下可以观察到电容 C2 的电压 u_{C2} ，如图 9-40 (a) 所示。

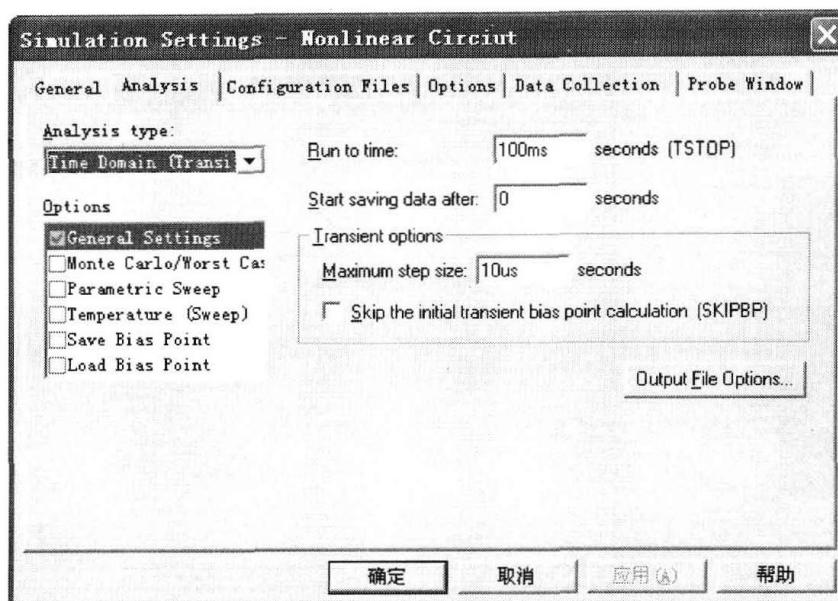


图 9-39 仿真分析类型设置界面

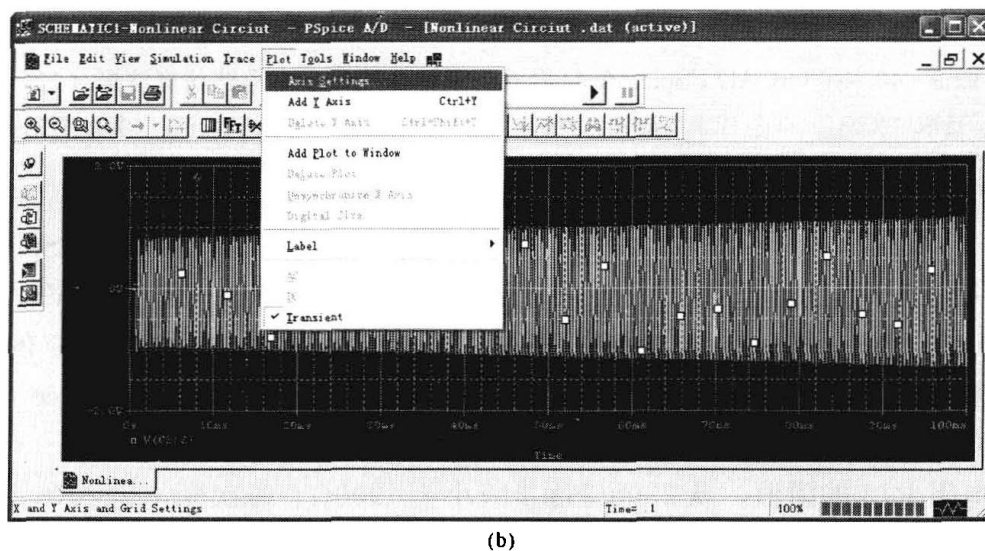
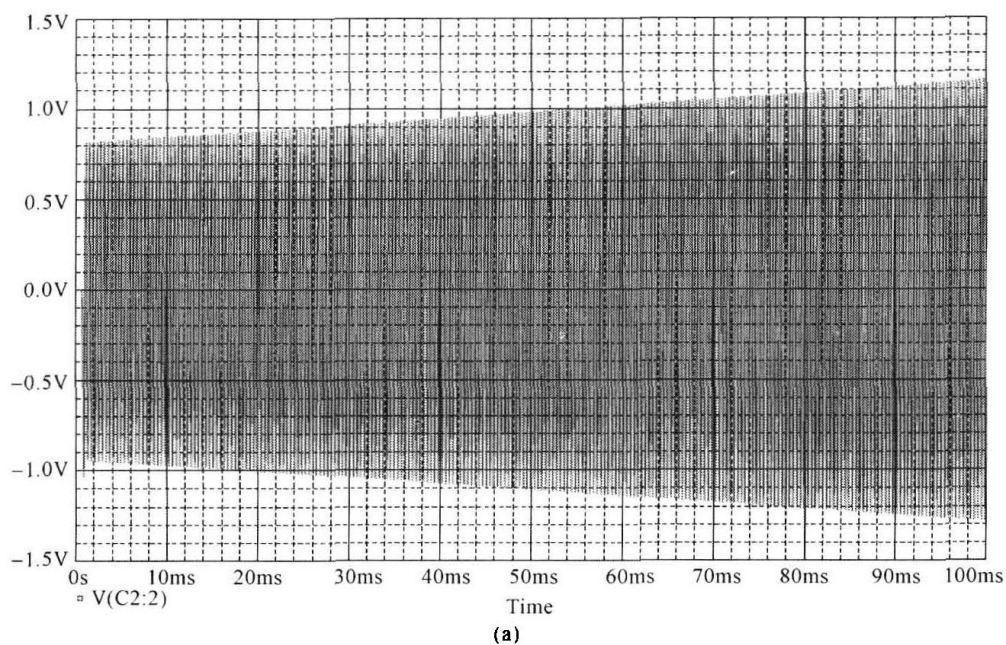
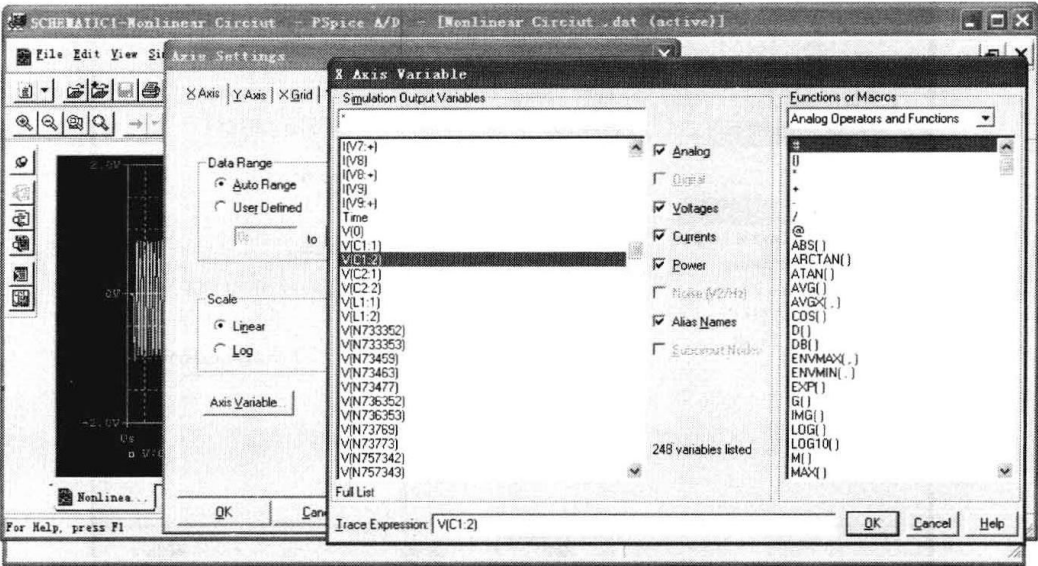
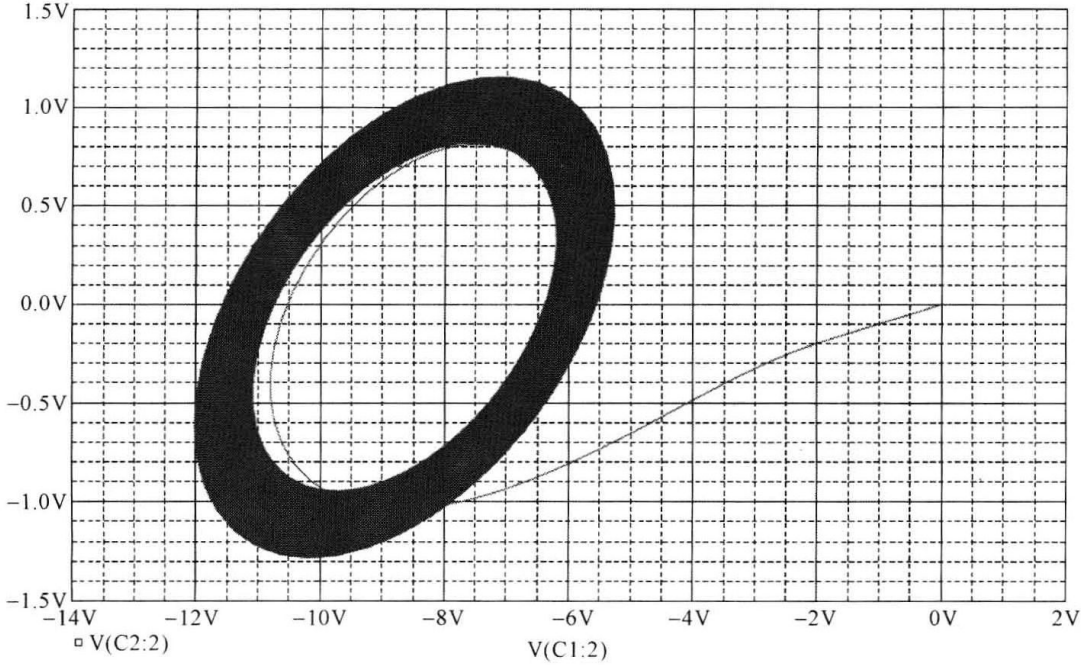


图 9-40 在 OrCAD PSpice A/D 界面下观察非线性动态电路仿真波形 (一)

(a) 电容 C_2 的电压 u_{C2} 波形; (b) X 轴、Y 轴输入设置



(c)



(d)

图 9-40 在 OrCAD PSpice A/D 界面下观察非线性动态电路仿真波形 (二)
(c) 选取 “V (C1 : 2)” 作为 X 轴输入设置; (d) u_{C1} — u_{C2} 合成的状态轨迹图 (李萨育图形)

② 观察李萨育图形, 即在本实验中, 以电容 C1 的电压 u_{C1} 作为 X 轴输入, 电容 C2 的电压 u_{C2} 作为 Y 轴输入, 所形成的状态轨迹图。具体方法是: 在 OrCAD PSpice A/D 界面下, 如图 9-40 (b) 所示, 选择 “Plot→Axis Settings→X Axis→X Axis Variable” 命令, 在 “X Axis Variable” 子界面中, 进一步选取 “V (C1 : 2)”, 即以电容 C1 的电压作为 X 轴输入, 如图 9-40 (c) 所示; 点击 “OK” 按钮确认后, 回到 OrCAD PSpice A/D 主界面, 将看到如图 9-40 (d) 所示状态轨迹图 (即李萨育图形)。

③ 改变电阻 R13 的阻值, 从 2300Ω 逐步减小至 1900Ω 、每次变化量 $\Delta R \leq 10\Omega$, 观察李萨育图形周期分岔、二倍周期、三倍周期、多倍周期、单涡旋混沌、双涡旋混沌等现象, 如图 9-41 (a)~(f) 所示。

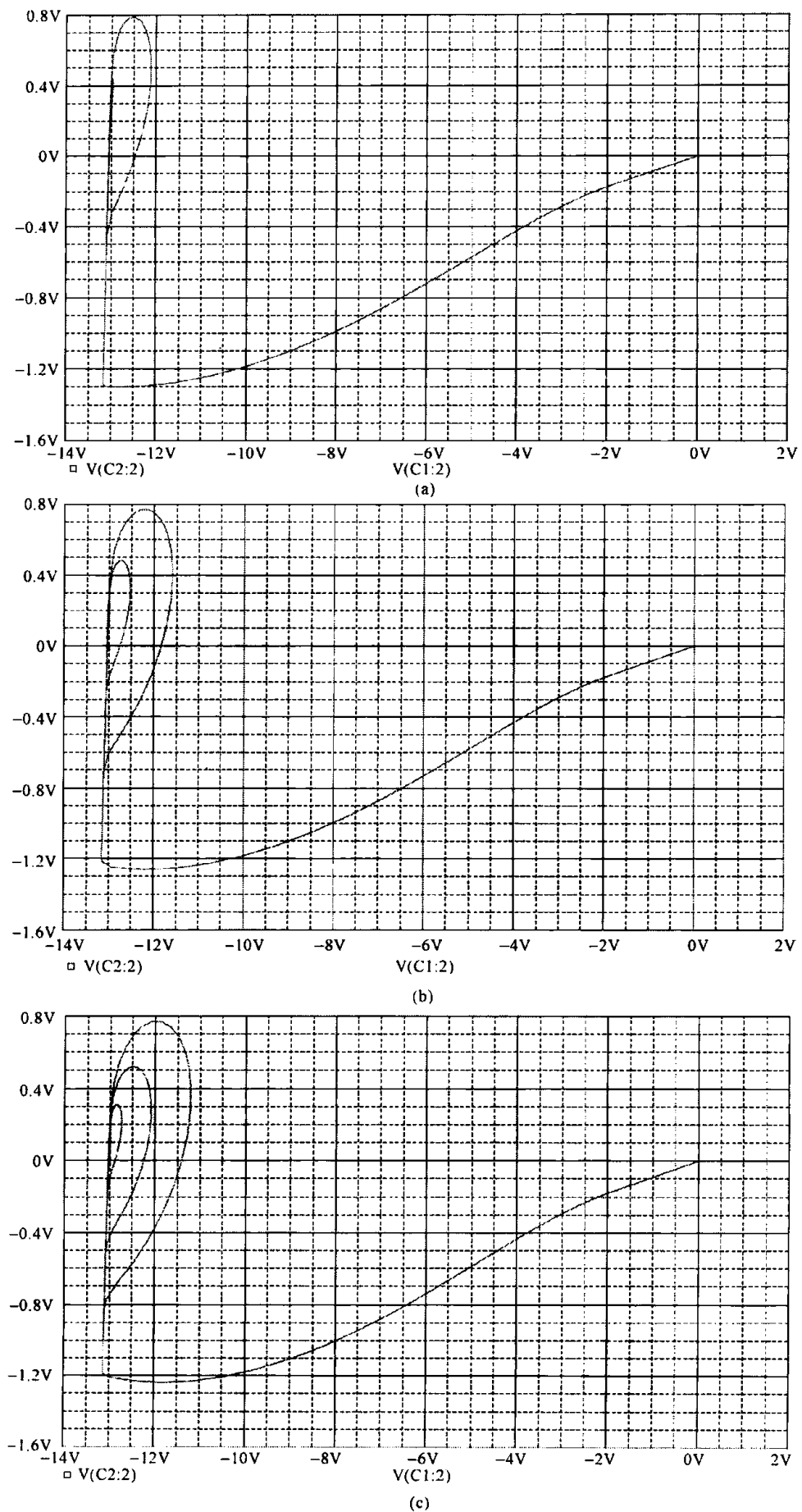


图 9-41 在 OrCAD PSpice A/D 界面下观察非线性动态电路李萨育图形 (一)

(a) 周期分岔; (b) 二倍周期; (c) 三倍周期

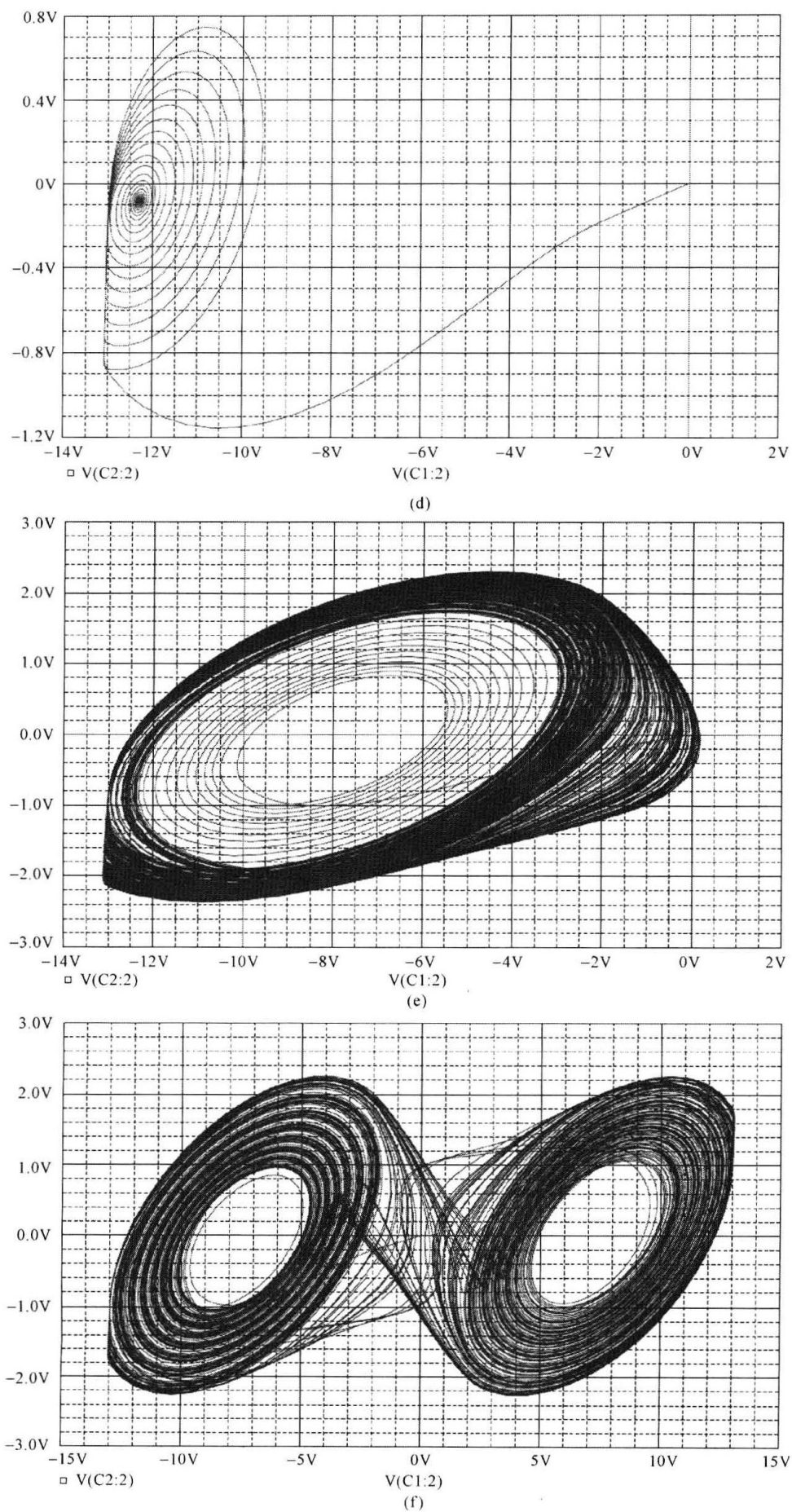


图 9-41 在 OrCAD PSpice A/D 界面下观察非线性动态电路李萨育图形 (二)
(d) 多倍周期; (e) 单涡旋混沌; (f) 双涡旋混沌

(5) 形成仿真实验报告。其主要内容包括以下几项。

1) 叙述完成本仿真实验的主要技术操作步骤及其用意。

2) 采用双运算放大器电路实现非线性负阻特性, 仿真得出其伏安特性曲线。

3) 根据图 9-41 所示李萨育图形周期分岔、二倍周期、三倍周期、多倍周期、单涡旋混沌、双涡旋混沌等现象, 对比观察电路中 C_1 、 C_2 电容的电压 $u_{C1}(t)$ 、 $u_{C2}(t)$ 对应波形特点, 总结其相应时域波形特性。

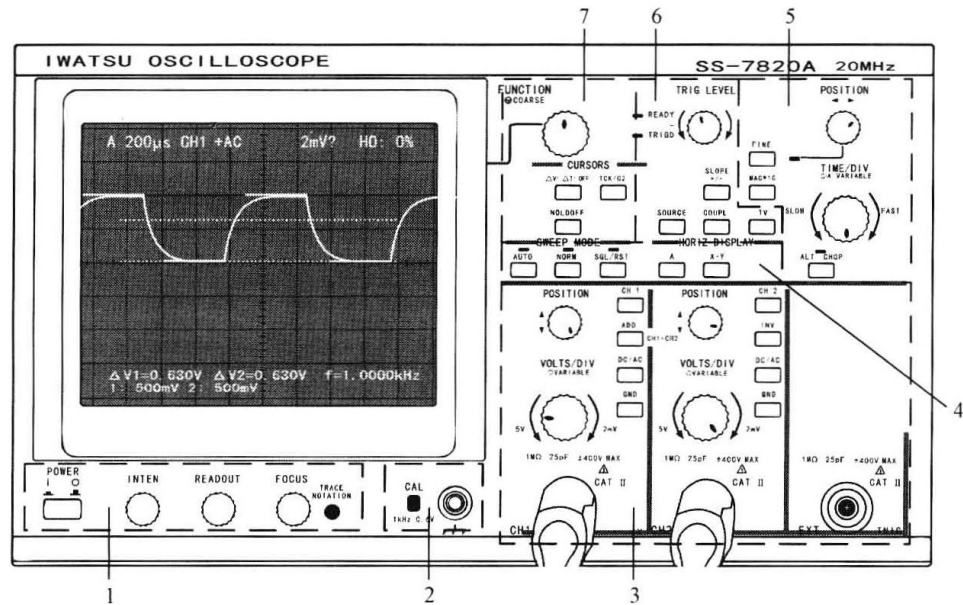
4) 说明在本仿真实验过程中遇到的主要软件使用技术问题, 若自行解决了问题, 请陈述所采用的办法或措施。

5) 随实验报告, 同时递交仿真结果输出文件, 即“Nonlinear Circuit Output File (*.out文件)”和仿真波形文件: ①“Chua's Diode (*.dat 文件)”; ②周期分岔时的 R_V 以及相应的“Nonlinear Circuit (*.dat 文件)”; ③二倍周期时的 R_V 以及相应的“Nonlinear Circuit (*.dat 文件)”; ④三倍周期时的 R_V 以及相应的“Nonlinear Circuit (*.dat 文件)”; ⑤多倍周期时的 R_V 以及相应的“Nonlinear Circuit (*.dat 文件)”; ⑥单涡旋混沌时的 R_V 以及相应的“Nonlinear Circuit (*.dat 文件)”; ⑦双涡旋混沌时的 R_V 以及相应的“Nonlinear Circuit (*.dat 文件)”。

附录 A SS-7802A 型示波器使用说明

示波器能将电信号转换成直观具体的波形图像，使用方便，波形显示直观，并且可用于观测信号的周期、幅值、波形及相位等，是电子测量中使用广泛的测量仪器之一。下面介绍 SS-7802A 型示波器的具体使用方法。

一、面板按键及旋钮的功能（如附图 A-1 所示）



附图 A-1 SS-7802A 型示波器前面板图

- 1—电源及屏幕显示控制部分；2—标准信号及接地端口；3—垂直控制部分；
- 4—水平显示及扫描部分；5—水平控制部分；6—触发控制部分；
- 7—[FUNCTION] 功能旋钮、测量部分

1. 电源及屏幕显示控制部分

POWER 键：用于开启电源。

【INTEN】 旋钮：屏幕亮度调节。

【FOCUS】 旋钮：用于图形和文字聚焦，使图形和文字更清晰。

【READOUT】 旋钮：文字显示。

2. 标准信号及接地端口

标准信号 **[CAL]** 可输出校准电压信号，用于本仪器的操作检查及调整探头波形。

3. 垂直控制部分

垂直控制部分包括两个输入通道 CH1、CH2 及一个外部输入通道 EXT INPUT。

【POSITION】 旋钮：调节垂直位移。

【VOLTS/DIV】 旋钮：设定波形的幅度。屏幕纵坐标每一格表示的大小在相应通道名右侧显示，按下后可进行微调，显示“>”号。

CH1、**CH2** 键：显示通道，屏幕左下方显示相应通道名 1、2。

DC/AC键：输入耦合，选择直流（DC）或交流（AC）耦合。直流耦合显示输入信号的 DC 和 AC 成分，交流耦合只显示输入波形的 AC 成分。

GND键：接地开关，按下后屏幕下方相应通道有接地标志“⊥”。

ADD键：相加功能，屏幕下方通道 2 左边显示“+”符号，两通道波形的和（CH1+CH2）显示在屏幕上。

INV键：相减功能，屏幕下方通道 2 右边显示“↓”符号，CH2 信号被反向，波形差（CH1-CH2）显示在屏幕上。

4. 水平显示及扫描模式部分

A键：选择 A 扫描，波形水平显示在屏幕上。

X-Y键：将 CH1 信号作为 X 轴，CH1、CH2 或 ADD 信号作为 Y 轴，用于观察李萨育图形或磁滞回线等。

AUTO键：自动扫描模式，适用于 50Hz 以上触发信号。

NORM键：正常扫描模式，适用于 50Hz 以下触发信号。

SGL/RST键：单次扫描模式。

5. 水平控制部分

【POSITION】旋钮：调节波形左右位移。

【TIME/DIV】旋钮：扫描速率旋钮，屏幕横坐标每一格表示的大小在屏幕左上角显示。按下后微调，显示“>”号。

MAG×10键：以水平中心线为参考的信号放大 10 倍，屏幕右下角显示 MAG。

ALT/CHOP键（交替/断续）：当两个或更多通道显示时需要选择显示模式。ALT（交替）模式是两个或更多信号交替扫描，适于观测两个或多个通道的高频信号；CHOP（断续）模式是两个或多个信号以约 555kHz 的频率切换显示，适于两个或多个通道的低频信号。

6. 触发控制部分

输入信号能以稳定的状态显示于屏幕上，以便观察。

SOURCE键：选择触发来源。

(1) CH1：用输入到 CH1 的信号做触发源。

(2) CH2：用输入到 CH2 的信号做触发源。

(3) LINE：用电源频率做触发源，便于观察电源频率触发的信号。

(4) EXT：用外触发信号做触发源。外信号通过前面板的 EXT INPUT 接入。

COUPL键：选择触发耦合。

(1) AC：隔离触发信号中的直流成分。

(2) DC：通过触发信号中的所有成分。

SLOPE键：选择触发沿。

(1) +：扫描在波形的上升沿开始。

(2) 一：扫描在波形的下降沿开始。

【TRIG LEVEL】旋钮：调节触发电平，使波形稳定。

7. 【FUNCTION】功能旋钮、测量部分

主要是用光标测量时间和频率的差值 (Δt , $1/\Delta t$) 及电压差值 (ΔU)。

具体用法如下：

按 $\Delta V - \Delta t - \text{OFF}$ 键选择 ΔU (测量电压差值)、 Δt (测量时间差值)，或按下 OFF (关闭测量)；选择 Δt 及 ΔU 时，将显示两条测量光标；旋转 【FUNCTION】旋钮调整光标位置。

每按一次 $\text{TCK}/2$ 键，光标及其序号按如下顺序改变：C1 (光标 1)→C2 (光标 2)→TCK (跟踪)，这样即可测量出时间或电压差值。

二、使用方法

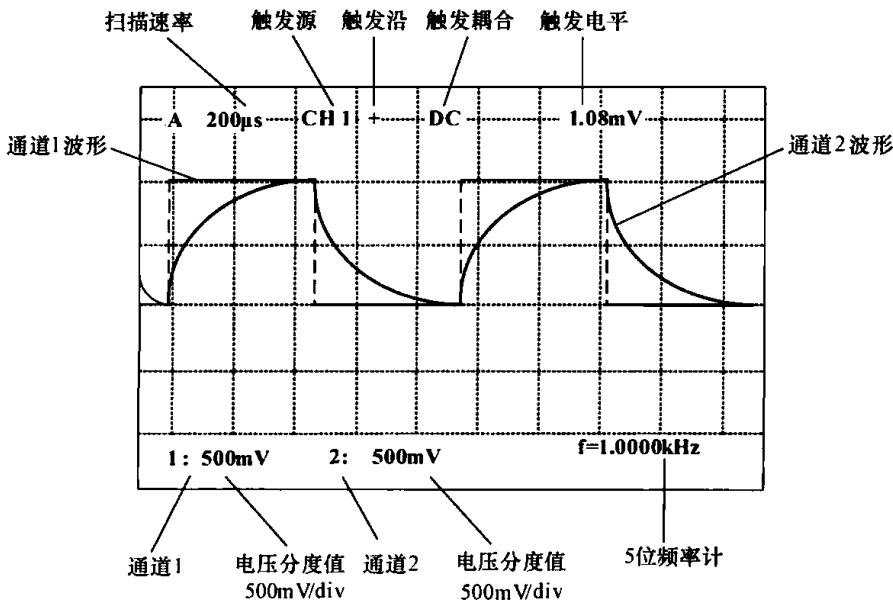
(1) 开启电源开关，机器进行自检后屏幕上应出现一条或两条水平线。若没有出现，可通过调节屏幕亮度旋钮 【INTEN】，通道显示键 CH1 、 CH2 ，水平位移旋钮 【POSITION】和通道垂直位移旋钮 【POSITION】调节出来。扫描模式为 AUTO。

(2) 按下相应通道的 GND 键，屏幕下方相应通道显示接地符号标志 “ $\perp$ ”。调整垂直位移旋钮 【POSITION】使扫描线位于屏幕坐标中间，作为测试的零电平参考线。再按 GND 键，取消接地。

(3) 选择正确的触发源、触发耦合。如选择 1 通道作为触发源 (一般为激励信号)，按下 SOURCE 键使屏幕上方触发源显示为 CH1。按触发耦合键 COUPL 选择 AC 或 DC 耦合。

(4) 将信号线的信号端接到校准信号 CAL 上，示波器将显示频率为 1kHz，输出电压为 0.6V 的方波信号，说明示波器工作正常。然后断开校准信号，将被测信号通过信号线连接到示波器。此时屏幕上就显示被测信号的波形，通过调整通道电压幅度和扫描速率旋钮使波形的大小适中。如果波形不稳定，调节 【TRIG LEVEL】旋钮使波形稳定。

屏幕显示的具体内容如附图 A-2 所示。



附图 A-2 屏幕显示内容示意图

(5) 如果想观察李萨育图形, 可按以下操作步骤操作: 首先通道 1 和通道 2 接入的信号都是正弦波信号, 按上面的步骤操作使屏幕上出现两个通道的波形, 调整信号发生器使两个通道的频率为 1 : 1, 按下 **X-Y** 键, 屏幕上就出现了一个旋转的圆。选择不同的频率比值, 则出现不同的李萨育图形。如果想恢复单通道信号, 只需按下 **A** 键即可。

三、示波器使用中的常见问题及解决方法 (见附表 A-1)

附表 A-1 示波器使用中的常见问题及解决方法		
现象	检查及确认	解决方法
无轨迹或亮点显示	检查 【INTEN】 旋钮是否打开	顺时针旋转 【INTEN】 旋钮至足够亮度
	检查扫描模式是否置于 SINGLE 或其他模式	将扫描模式置为 AUTO
	检查是否按下 X-Y 键	按下 A 键
	检查 【FOCUS】 旋钮是否被调整	调整 【FOCUS】 旋钮直至清楚
轨迹和参数聚焦不清楚	检查探头是否正确连接	重新连接探头
信号输入后无波形显示	检查屏幕下方是否有接地标志	按下 GND 键, 屏幕接地标志消失
	检查是否正确选择了通道	按下 CH1 键或 CH2 键屏幕下方出现 1: 或出现 2:
	检查是否正确选择了触发源	按 SOURCE 键选择触发输入的通道
波形不稳定	检查触发耦合模式是否正确选择	按 COUPL 键重新选择适合输入信号的触发耦合模式
	检查电平设置是否不足	旋转 【TRIG LEVEL】 旋钮调整电平触发位置

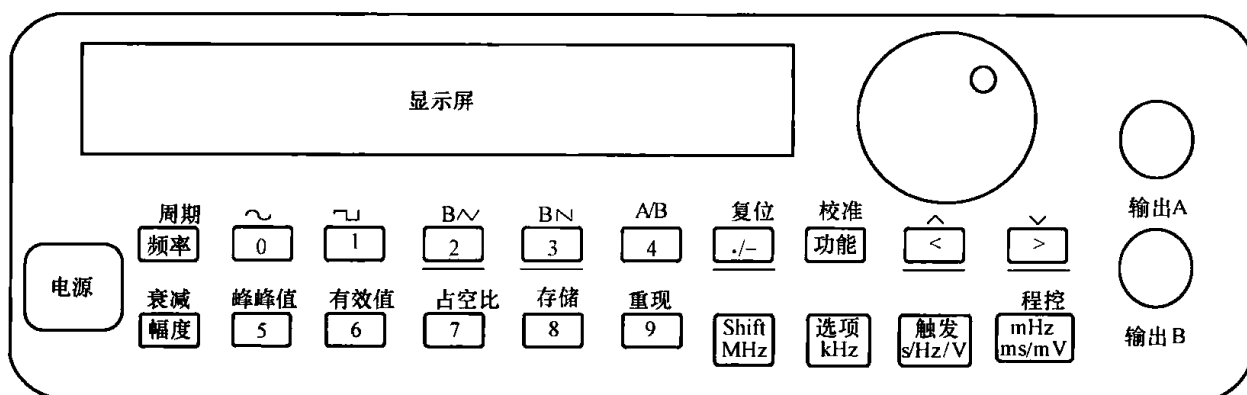
四、注意事项

- (1) 输入电压不要超过下述范围: CH1, CH2: 直接输入时±400V 最大; 用 SS-0110 型衰减探头 (10 : 1) 时±600V 最大。
- (2) 示波器可同时观察两路波形, 内部已将两通道的地端连接在一起。因此在做电路实验时要注意共地的问题。

附录 B TFG2000 系列 DDS 函数信号发生器使用说明

信号发生器是产生不同频率和波形的常用仪器，可以产生正弦波、方波和三角波等。下面介绍 TFG2000 系列 DDS 函数信号发生器的具体使用方法。

一、面板按键、旋钮功能介绍（如附图 B-1 所示）



附图 B-1 TFG2000 系列 DDS 函数信号发生器前面板图

频率、**幅度** 键：频率和幅度选择键。

0、**1**、**2**、**3**、**4**、**5**、**6**、**7**、**8**、**9** 键：数字输入键。

MHz、**kHz**、**Hz**、**mHz** 键：双功能键，在数字输入之后执行单位键功能，同时作为数字输入的结束键。直接按 **MHz** 键执行“Shift”功能，直接按 **kHz** 键执行“选项”功能，直接按 **Hz** 键执行“触发”功能。

./- 键：双功能键，在数字输入之后输入小数点，“偏移”功能时输入负号。

<、**>** 键：光标左右移动键。

功能 键：主菜单控制键，循环选择六种功能。

选项 键：子菜单控制键，在每种功能下循环选择不同的项目。

触发 键：在“扫描”、“调制”、“触发”、“键控”、“外测”功能时作为触发启动键。

Shift 键：上挡键（屏幕上显示“S”标志），按 **Shift** 键后再按其他键，分别执行该键的上挡功能。

手轮旋钮：左右转动可使数字增大或减小，并能连续进位或借位，由此可任意粗调或细调频率。

二、使用方法

开机后，仪器进行自检初始化，进入正常工作状态，自动选择“连续”功能，默认 A 路正弦输出，频率 1000Hz，幅度 1V。

1. A 路常用功能设定说明

A 路频率设定：以设定频率值 3.5kHz 为例，即按[频率]、[3]、[.]、[5]、[kHz]键。

A 路频率调节：按[>]或[<]键使光标指向需要调节的数字位，左右转动手轮可使数字增大或减小，并能连续进位或借位，由此可任意粗调或细调频率。

A 路周期设定：以设定周期值 25ms 为例，即按[Shift]、[周期]、[2]、[5]、[ms]键。

A 路幅度设定：以设定幅度值为 3.2V 为例，即按[幅度]、[3]、[.]、[2]、[触发]键。

A 路幅度格式选择：有效值或峰峰值，即按[Shift]、[有效值]键或[Shift]、[峰峰值]键。

A 路衰减选择：选择固定衰减 0dB（开机或复位后选择自动衰减 AUTO），即按[Shift]、[衰减]、[0]、[触发]键。

A 路偏移设定：以设定偏移值为 5V 为例，按[选项]键，选中“A 路偏移”，再按[5]、[触发]键。

当幅度 U_{p-p} 值大于 2V 时，实际输出偏移值等于偏移设定值。当幅度 U_{p-p} 值大于 0.2V 而小于 2V 时，实际输出偏移值为偏移设定值的 1/10。当幅度 U_{p-p} 值小于 0.2V 时，实际输出偏移值等于偏移设定值的 1/100。

A 路波形选择：在输出路径为 A 路时，选择正弦波或方波，即按[Shift]、[0]键或[Shift]、[1]键。

A 路占空比设定：在 A 路选择为方波时，以设定占空比为 65% 为例，即按[Shift]、[占空比]、[6]、[5]、[触发]键。

通道设置选择：反复按下面两键可循环选择为 A 路，B 路，即按[Shift]、[A/B]键。

恢复初始化状态：按[Shift]、[复位]键。

2. B 路功能设定说明

B 路波形选择：在输出路径为 B 路时，选择正弦波、方波、三角波、锯齿波，即按[Shift]、[0]键，[Shift]、[1]键，[Shift]、[2]键，[Shift]、[3]键。

B 路多种波形选择：B 路可选择 32 种波形，按[选项]键，选中“B 路波形”，按[>]或[<]键使光标指向个位数，使用旋钮可从 0~31 选择 32 种波形。

3. 初始化状态

开机或复位后仪器的工作状态

A 路：

波形：正弦波	频率：1kHz	幅度：1 U_{p-p}
衰减：AUTO	偏移：1V	方波占空比：50%
时间间隔：10ms	扫描方式：往返	猝发计数：3 个
调制载波：50kHz	调频频偏：15%	调幅深度：100%
相移：0°		

B 路:

波形: 正弦波 频率: 1kHz 幅度: $1U_{p-p}$

4. 举例说明

(1) 正方波输出操作方法。一阶动态电路实验中, 需要用信号发生器输出的方波来模拟阶跃激励信号, 信号发生器输出的方波是正负方波, 而我们需要的是正方波, 这就需要进行如下操作: 开机→进行自检, 屏幕显示 A 路正弦 1000Hz→按下 **[Shift]** 键和 **[1]** 键, 屏幕显示 A 路方波 1000Hz→按下 **[选项]** 键, 直到屏幕出现“A 路偏移”→按下 **[5]**、**[触发]** 键 (实际偏移 0.5V), 用示波器就可以观察到 A 路输出的频率为 1kHz、幅值为 1V 的正方波了。

(2) 2 倍功率输出信号操作方法。如果在示波器上观察到的波形失真, 可通过下列操作来解决: 将 A 路输出信号接到信号源后面板的功放输入端, 从 2 倍功放输出端输出的信号即可作为激励信号。

三、注意事项

信号发生器外壳有一手柄, 需要移动时要两手同时向外拉出, 然后转动到所需位置。不可直接用力硬转, 否则会把手柄损坏。

附录 C SL2302 型直流稳压/恒流电源使用说明

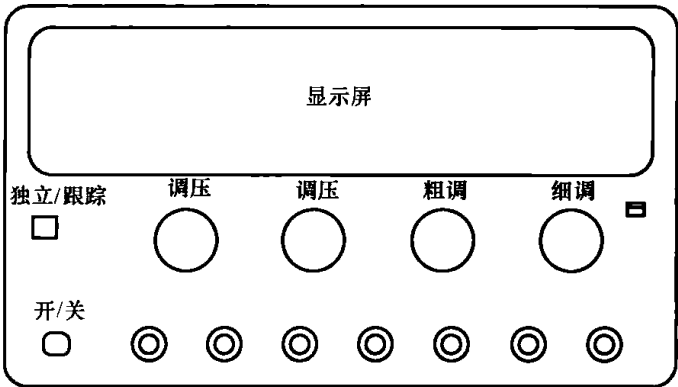
直流稳压电源能够提供稳定可调的电压。SL2302 型电源能够输出两路 30V/2A 直流稳压电源和一路 30V/500mA 的恒流源。下面介绍 SL2302 直流稳压/恒流电源的具体使用方法。

一、面板按键、旋钮功能介绍（如附图 C-1 所示）

独立/跟踪键：按下该键选择跟踪工作方式（两路为串联跟踪或两路对称输出），抬起该键选择独立工作方式（两路输出各自独立）。

【调压】旋钮：有两个，分别为两路电源的电压输出调节，相应输出电压在显示屏上显示。

【粗调】、【细调】旋钮：用于恒流源的输出调节，相应输出电流在显示屏上显示。



附图 C-1 SL2302 型直流稳压/恒流电源前面板图

0 - 10mA/10 - 500mA键：恒流源输出范围有两挡，抬起表示输出范围是 10~500mA，按下表示输出范围是 0~10mA。

面板下方有三组输出端子，分别是两路电压源和一路恒流源的输出，红色为正，黑色为负。

二、使用方法

开启电源开关，稳压电源开始工作。开机后预热 30s 后就可以使用。若需要电压输出，可以从两路输出端中任选一路输出，也可同时使用。输出值的大小可通过**【调压】**旋钮来调节，做实验时要求用电压表测量输出，以电压表为准调整到所需的电源值。“Ⅰ”是第一路输出，“Ⅱ”是第二路输出。

若需要电流输出，可用“Ⅲ”第三路输出，恒流源分两挡，先选择合适的挡，电流输出的大小可用右边两个旋钮进行粗调和细调，调节到所需的稳流值。

三、注意事项

- (1) 做实验一般采用独立工作方式，注意**独立/跟踪**键的位置。
- (2) 面板上的绿色端子是电源保护接地端子。距离电压输出端子很近，不要混淆。
- (3) 做实验时，要把电压调整旋钮和电流调整旋钮调到最小，接好线路，检查无误后方可开启电源，再根据实验需要调整电压或电流输出值。做完实验后，把电压或电流调到最小，关闭电源。

附录 D DGX-1 型电工技术实验装置简介

DGX-1 型电工技术实验装置可进行电路理论、电工技术基础的实践教学。本装置由控制屏、实验桌和若干实验挂箱等组成。

一、控制屏和实验挂箱介绍

1. 控制屏

控制屏提供三相 0~450V 连续可调交流电源，设有过电流保护技术，相间、线间过电流及直接短路均能自动保护，配有三只指针式交流电压表，通过开关可指示三相电网电压值和三相调压器的输出电压值。

2. DG03 型多功能全数控制智能函数信号发生器

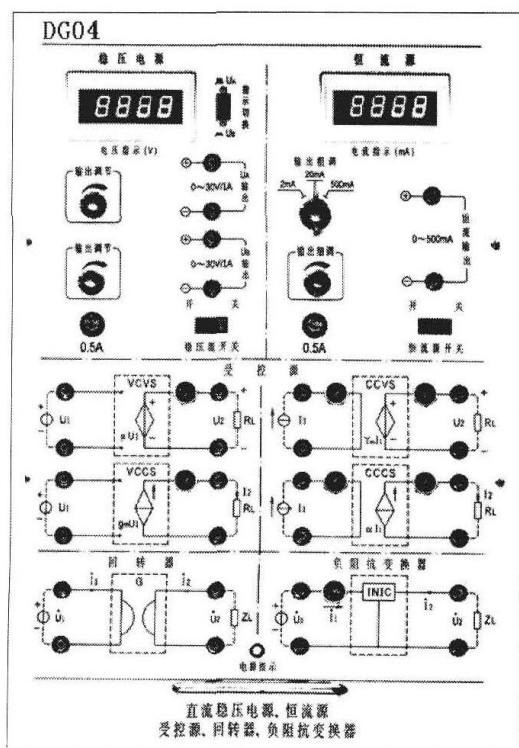
此信号发生器具体使用方法见附录 E。

3. DG04 型直流稳压电源（两路）、恒流源（如附图 D-1 所示）

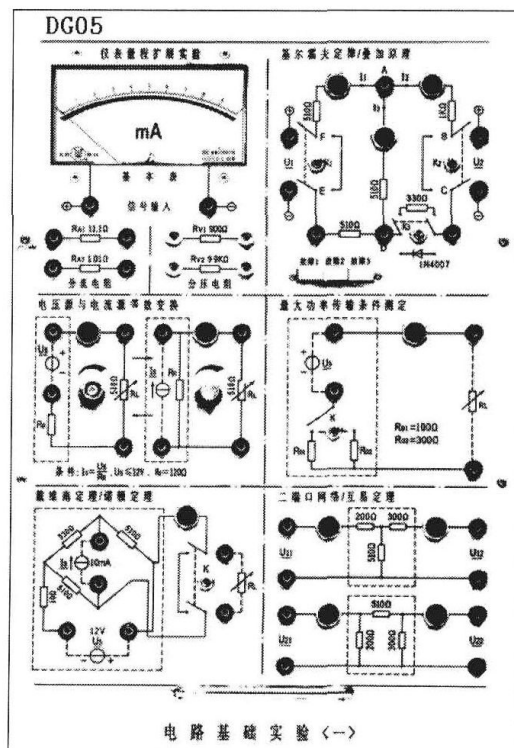
DG04 型直流稳压电源、恒流源提供两路 0~30V/1A 可调直流稳压电源，具有短路软保护和自动恢复功能，数字显示；提供一路 0~500mA 连续可调恒流源，分 2、20、500mA 三挡，最大输出功率 10W，数字显示，具有输出开路、短路保护功能；提供受控源、回转器以及负阻抗变换器实验电路。

4. DG05 电路基础实验（一）（如附图 D-2 所示）

此电路能够提供仪表量程扩展、电压源与电流源等效变换、基尔霍夫定律、叠加原理、戴维南定理、诺顿定理、最大功率传输条件测定、二端口网络及互易定理等实验项目。



附图 D-1 DG04 挂箱面板图



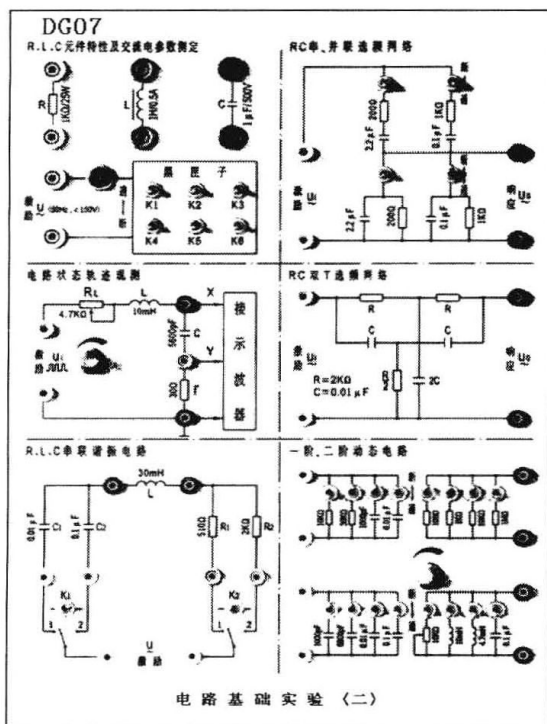
附图 D-2 DG05 挂箱面板图

5. DG07 电路基础实验 (二) (如附图 D-3 所示)

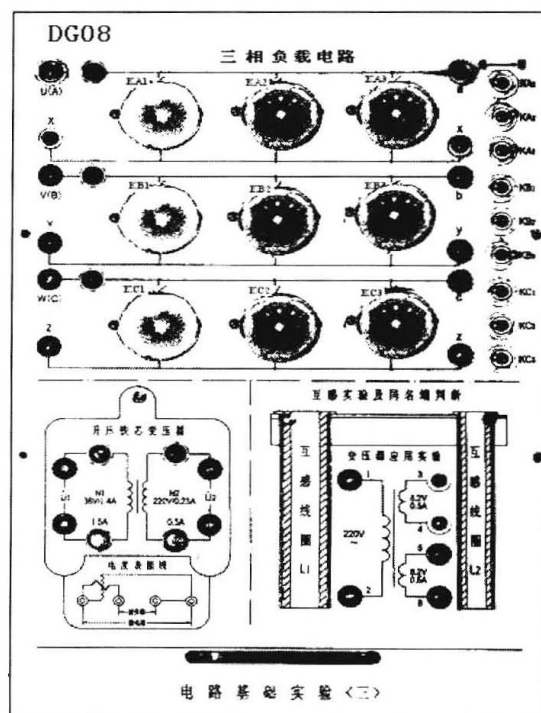
此电路能够提供 R 、 L 、 C 元件特性及交流参数测定 RLC 串联谐振电路、一阶及二阶动态电路实验等项目。

6. DG08 电路基础实验 (三) (如附图 D-4 所示)

此电路能够提供三相负载、互感及变压器有关的实验。



附图 D-3 DG07 型挂箱面板图



附图 D-4 DG08 型挂箱面板图

7. DG09 型元件箱 (如附图 D-5 所示)

DG09 型元件箱设有三组高压电容 (每组 $1\mu\text{F}/500\text{V}$ 、 $2.2\mu\text{F}/500\text{V}$ 、 $4.7\mu\text{F}/500\text{V}$ 高压电容各一只)、十进制可变电阻箱 (阻值 $0\sim 99999.9\Omega/2\text{W}$)、固定阻值功率电阻、日光灯启辉器插座、镇流器、短接按钮、电感、电流插孔、电位器、开关及非线性元件等实验器件。

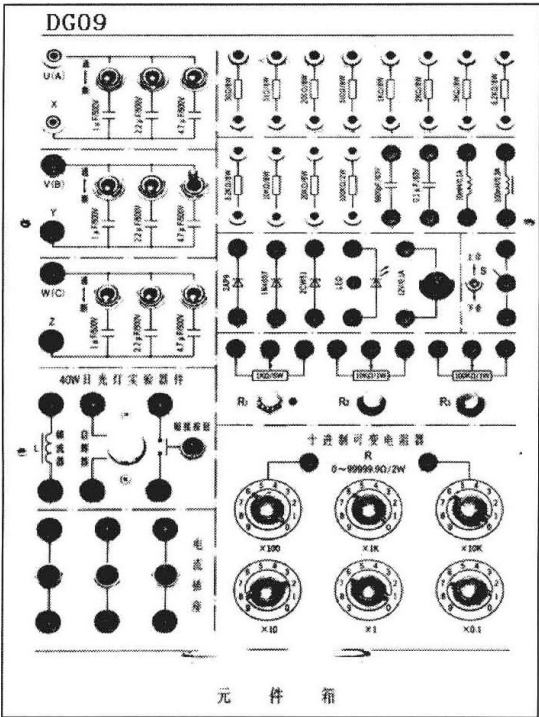
8. D31 型直流数字电压表、毫安表 (如附图 D-6 所示)

直流数字电压表, 测量范围 $0\sim 200\text{V}$, 分 200mV , 2 、 20 、 200V 四挡, 琴键开关切换, 数字显示, 输入阻抗为 $10\text{M}\Omega$, 具有超量程报警、指示、切断总电源等功能。

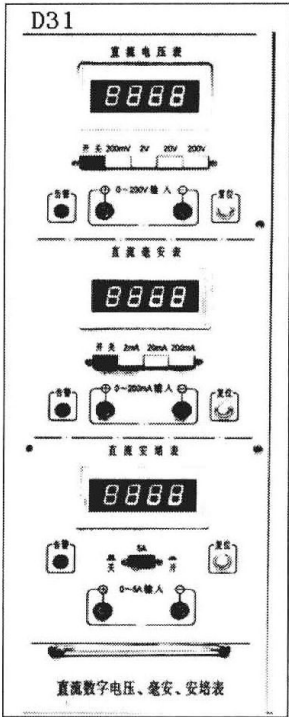
直流数字毫安表, 测量范围 $0\sim 200\text{mA}$, 分 2 、 20 、 200mA 三挡, 琴键开关切换, 数字显示, 具有超量程报警、指示、切断总电源等功能。

9. D34 型智能功率、功率因数表 (如附图 D-7 所示)

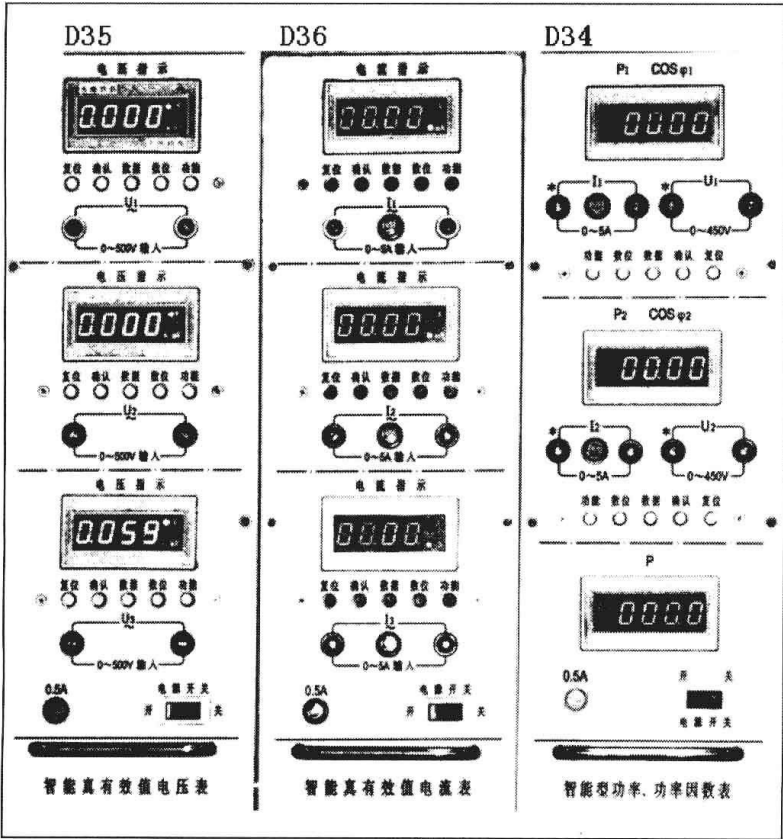
D34 型智能功率、功率因数表由两路高速、高精度 A/D 转换芯片和全数显电路构成。通过键控、数显窗口实现人机对话的智能控制模式。为了提高测量范围和测试精确度, 将被测电压、电流瞬时值的取样信号经 A/D 变换, 采用专用 DSP 计算有功功率, 可测量负载的有功功率、功率因数及负载的性质等。



附图 D-5 DG09 型挂箱面板图



附图 D-6 D31 型挂箱面板图



附图 D-7 D34、D35、D36 型挂箱面板图

10. D35 型交流电流表 (如附图 D-7 所示)
D35 型交流电流表提供三块数字交流电流表, 测量范围为 0~5A。

11. D36 型交流电压表（如附图 D-7 所示）

D36 型交流电压表提供三块数字交流电压表，测量范围为 0~450V。

二、使用方法

实验台上安装着交流电源的启动控制装置、三相电源电压指示切换装置。

1. 交流电源的启动

实验屏的左后侧有一根三相四芯电源插头，接好机壳的接地线，将三相四芯插头接通 380V 交流市电。

将左侧面的自耦调压器的旋转手柄按逆时针方向旋至零位。

将电压表指示切换开关置于左侧（三相电源输入电压）。

开启钥匙式三相电源总开关，停止按钮灯亮（红色），三只电压表（0~450V）指示出输入的三相电源线电压之值。

按下启动按钮（绿色），红色按钮灯灭，绿色按钮灯亮，同时可听到屏内交流接触器的瞬间吸合声。此时启动完毕，实验屏上电源插座均有相应的交流电压输出。

2. 三相可调交流电源输出电压的调压

将三相“电源指示切换”开关置于右侧（三相调压输出），三只电压表指针回到零位。

按顺时针方向缓缓旋转三相自耦调压器的旋转手柄，三只电压表随之偏转，即指示出三相可调电压输出端 U、V、W 两两之间的线电压之值，直至调节到实验所需的电压值。实验完毕，将旋柄调回零位，并将“电压指示切换”开关拨至左侧。

3. 用于照明和实验的日光灯的使用

实验屏有一个或两个 40W 日光灯管。由手动开关控制是照明还是实验，置于“实验”位时，如果已连接好电路，不能将开关置于“照明”位。实验用的日光灯管通过四个引出端接入电路，作为实验中的灯管元件使用。

4. 直流稳压电源、恒流源的输出与调节

开启直流稳压电源开关，两路输出插孔均有电压输出。每一路都有输出调节旋钮调节输出电压。

“电压指示切换”屏显示的是 A 路或是 B 路的输出电压值。做实验时，要求用直流电压表来测量 A 路或 B 路的电压输出，通过输出调节得到所需的电压值。如需要 6V 电压，那就用直流电压表测量电源两端，调节输出，直至电压表显示 6V。

恒流源的输出调节是将负载接至“恒流源输出”两端，开启恒流源开关，指针式毫安电流表即指示出恒流电流值。调节输出粗调波段开关和“输出细调”旋钮，可在三个量程段（满度为 2、20、500mA）连续调节输出的恒流电流值。

恒流源虽有开路保护功能，但不应长时间处于开路状态。

5. 电压表及电流表的使用

开启电源总开关，直流表选择合适的量程，各挡量程都有过电流保护和过电压保护。交流表可直接进行测量。

6. 单相智能功率、功能因数表使用

按接线原理图接好线路并接通电源，按复位后，面板上将显示功率值。面板上有五个按键，在实际测试过程中只用到复位、功能、确认三个键。

功能键是仪表测试与显示功能的选择键，含义如下：

P：显示功率。

COS：显示功率因数及负载性质。

F：显示被测信号的频率。

SAVE：数据记录，可存储 16 个数据。

DISP：数据显示，可查看已存数据。

确认键的作用是：在选定相应功能后，按一下确认键，将显示相应数据。

复位键的作用是：在任何状态下，只要按一下此键，便可直接显示功率。

三、注意事项

- (1) 在测量过程中，外来的干扰信号难免干扰主机工作，若出现死机，请按**复位**键。
- (2) 使用前应检查屏上开关是否置于“关”的位置，调压器是否回到零位。
- (3) 使用中对各旋钮进行调节时，动作要轻，用力切忌过度，以防旋钮开关损坏。
- (4) 如遇仪器及仪表不工作时，应关闭控制屏电源，检查各熔断器是否完好。
- (5) 更换挂箱时，动作要轻，防止强烈碰撞，以免损坏部件和影响外表。

附录 E DG03 型多功能全数控制智能函数信号发生器使用说明

信号发生器是产生不同频率和波形的常用仪器，可以产生正弦波、方波和三角波等函数波形。下面介绍 DG03 型多功能全数控制智能函数信号发生器的具体使用方法。

一、面板按键、旋钮功能介绍（如附图 E-1 所示）

波形键：可在六种信号中选取所需波形作为输出，如连续按动此键，六个 LED 发光二极管将循环指示当前输出信号。显示窗口将显示输出信号的频率。

脉宽键：可改变矩形波的占空比。数码显示屏上的数码将依次显示 1:1、1:3、1:5、1:7 四种比例。

测频/取消键：按“测频”键，显示窗口便转换为频率计的功能，显示屏上显示接在面板“信号输入口”处的被测信号的频率值，输出信号仍保持原来的信号的正常输出。此时除按“取消”键外，按其他键均无效，只有按“取消”键撤销测频功能后，整个键盘才恢复对输出信号的控制操作。

A 口键：表示 A 口输出信号，为模拟信号，包括正弦波、三角波和锯齿波。

B 口键：表示 B 口输出信号，为脉冲信号，包括矩形波、四脉方波和八脉方波。

粗、**中**、**细**键：可以调节信号的频率，箭头向上表示频率增大，箭头向下表示频率减小。“粗”调节频率的千位，“中”调节频率的百位，“细”调节频率的十位。

【幅度调节】旋钮：可用毫伏表测量所需信号的幅度大小。

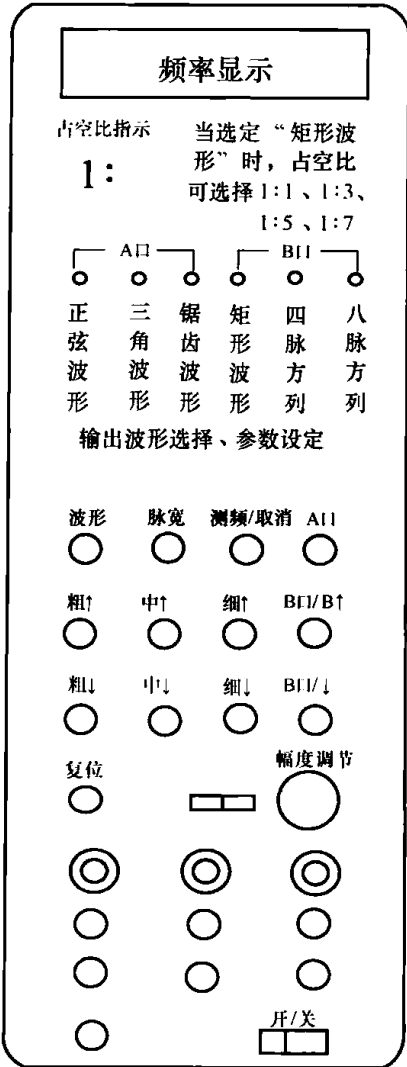
复位键：屏幕显示乱码时可按下，恢复机器默认信号。

二、使用方法

电源开关置于“开”的位置，机器开始工作。开机后默认为 A 口输出正弦波形，相应的红色 LED 指示灯亮，输出频率为 1000Hz，屏幕上显示 1000，输出幅度可用毫伏表测量。输出信号可以用同轴信号线引出，也可以从下面的红、黑两个插孔中引出，红为正，黑为负。在进行谐振实验时，用 A 口输出的正弦波的幅度有时调整不到所需的值，这时可以用正弦波功率输出作为电源信号，开关打到“开”。

三、注意事项

【幅度调节】旋钮左侧有两个按键，分别是 20dB 和 40dB 衰减，作用是使输出幅度产生衰减。做串联谐振实验时不需要按下。



附图 E-1 DG03 型函数信号发生器前面板图

附录 F 电路仿真软件 (PSpice) 的使用说明

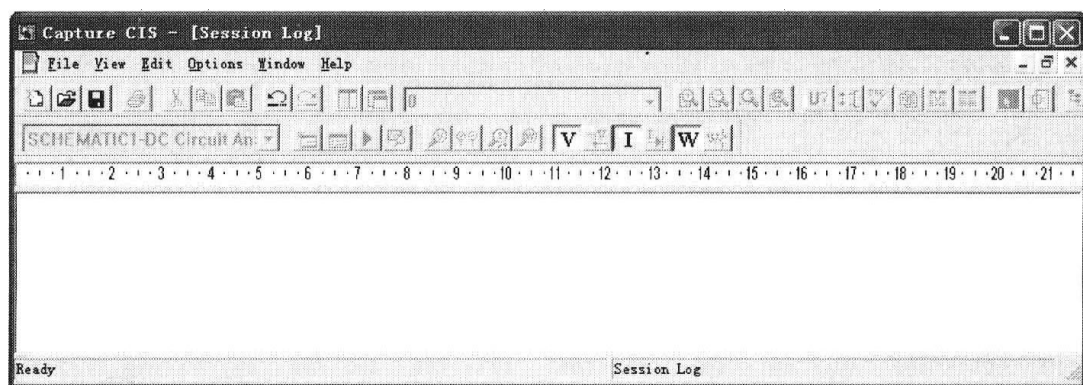
PSpice 电路仿真大致分为三大步骤:

- (1) 绘制电路原理图 (Drawing the circuit);
- (2) 定义分析类型 (Specifying the type of circuit analysis);
- (3) 仿真结果处理 (Simulation Results)。

一、绘制电路原理图 (Drawing the circuit)

1. 启动 Capture CIS

Capture CIS 是 OrCAD 的统一输入和管理软件, 称为前端处理程序。从此开始, 依次点击“开始”→“程序”→“OrCAD 10.5”→“Capture CIS”, 进入程序基本操作界面, 如附图 F-1 所示, 按照惯例, 界面分为标题栏 (第一行)、菜单栏 (第二行)、常用工具栏 (第三行)、工作区、状态栏 (末行)。



附图 F-1 OrCAD Capture CIS 基本操作界面

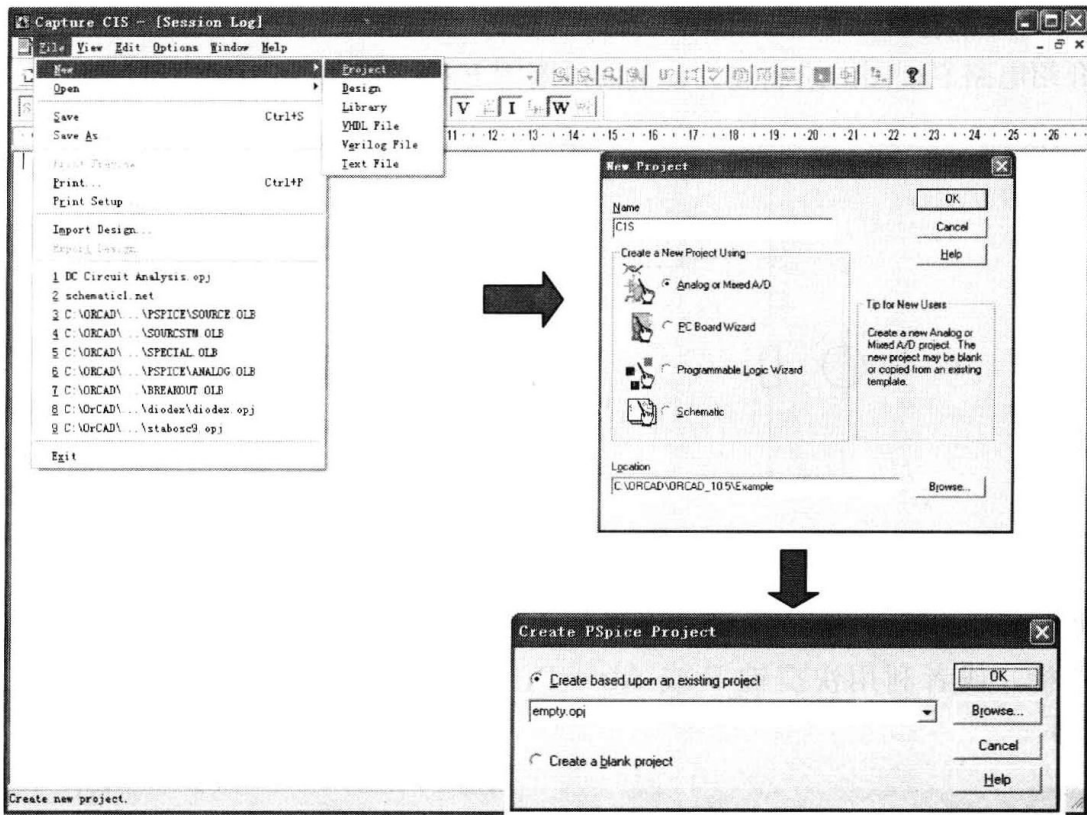
2. 创建项目文件

(1) 依次点击菜单栏中“File”→“New”→“Project”, 弹出“New Project”对话框, 如附图 F-2 所示。

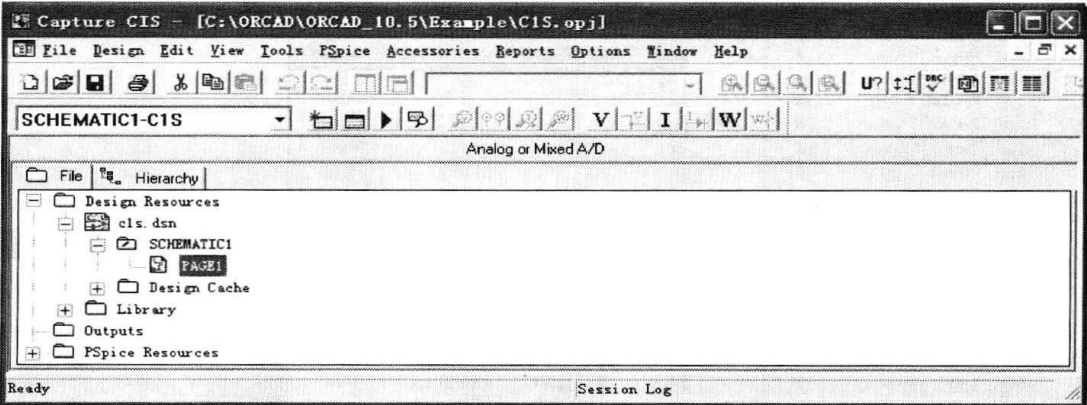
(2) 在“New Project”对话框中的“Name”文本框中填入所要新建的项目文件名, 例如“CIS”的项目文件名; 选中“Analog or Mixed A/D”; 并通过点击“Browse”按钮选定所要保存项目文件的目录, 例如选定保存项目文件的目录为“C: \ OrCAD \ OrCAD_10.5 \ Example” (注意: 初次使用时需创建 Example 文件夹); 在“New Project”对话框设置好后, 单击“OK”按钮, 自动弹出“Create PSpice Project”对话框。

(3) 在“Create PSpice Project”对话框中, 选中第一项“Create based upon an existing project”; 在其下拉列表框中, 选择“empty.opj”; 单击“OK”按钮, 就会出现项目管理窗口, 如附图 F-3 左列所示。

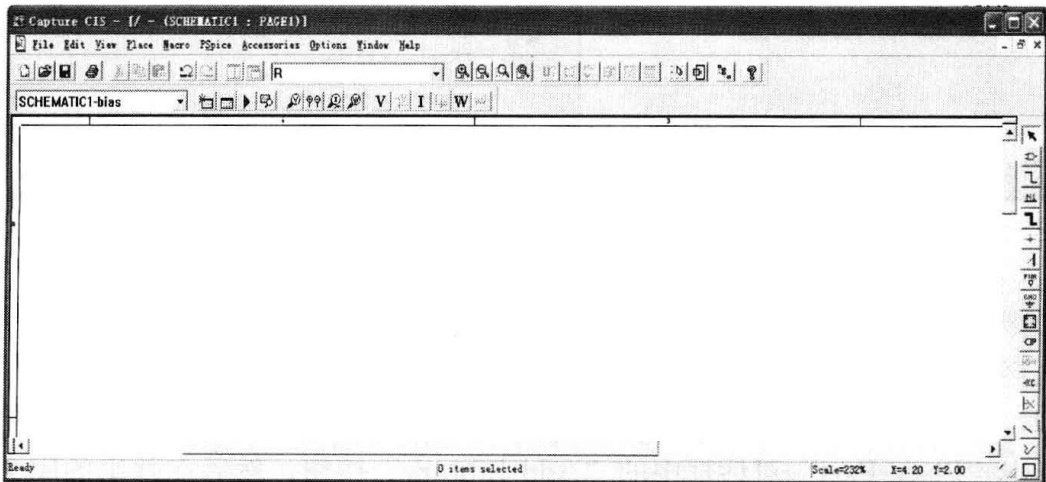
(4) 在“Design Resources”设计资源库下, 可见扩展名为.dsn的项目文件名, 例如 cis.dsn; 双击该项目文件名“cis.dsn”, 弹出“SCHEMATIC1”条目, 如图 F-3 中列所示; 双击“SCHEMATIC1”条目, 弹出“PAGE 1”条目; 双击“PAGE1”条目会出现电路图绘制窗口, 如附图 F-4 所示。



附图 F-2 创建项目文件



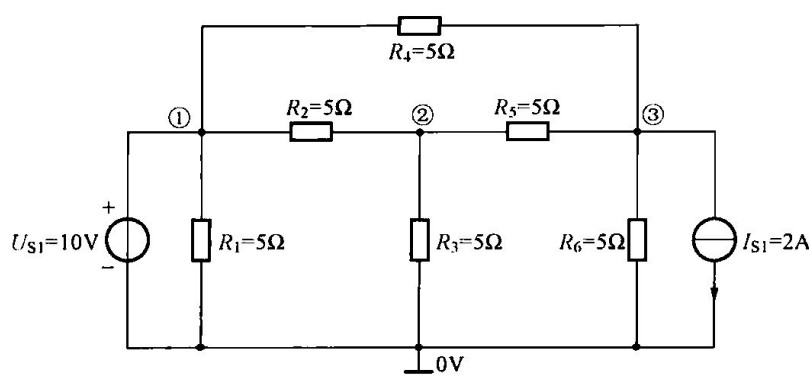
附图 F-3 创建新电路图文件



附图 F-4 电路图绘制窗口

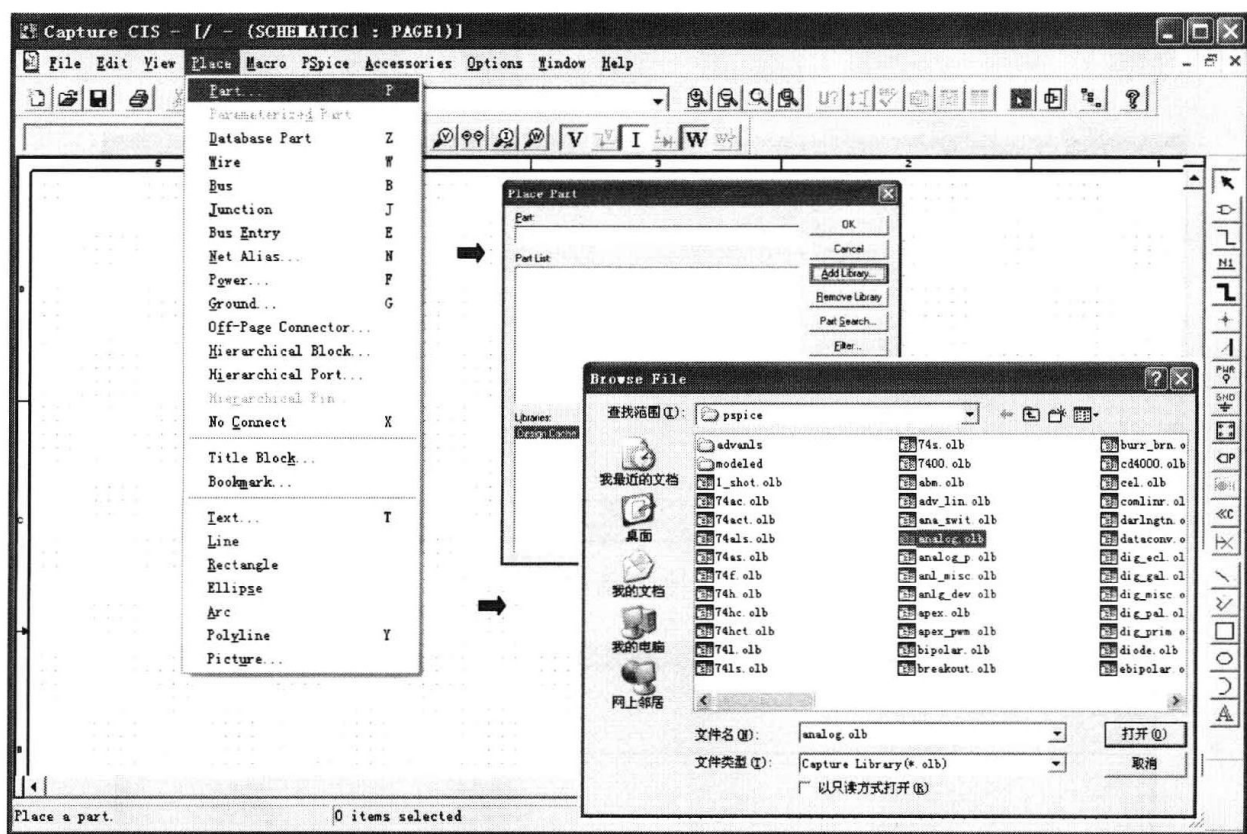
3. 绘制电路原理图

为了介绍电路原理图的绘制过程，下面以附图 F-5 所示电路为例进行说明。



附图 F-5 所要绘制的电路图

(1) 进入元件调用窗口。依次点击菜单栏中“Place”→“Part”，或者单击右侧绘图工具栏第二个图标，或者利用快捷键 P 或 Alt + P，进入元件调用“Place Part”窗口，如附图 F-6 所示。



附图 F-6 加载元件库

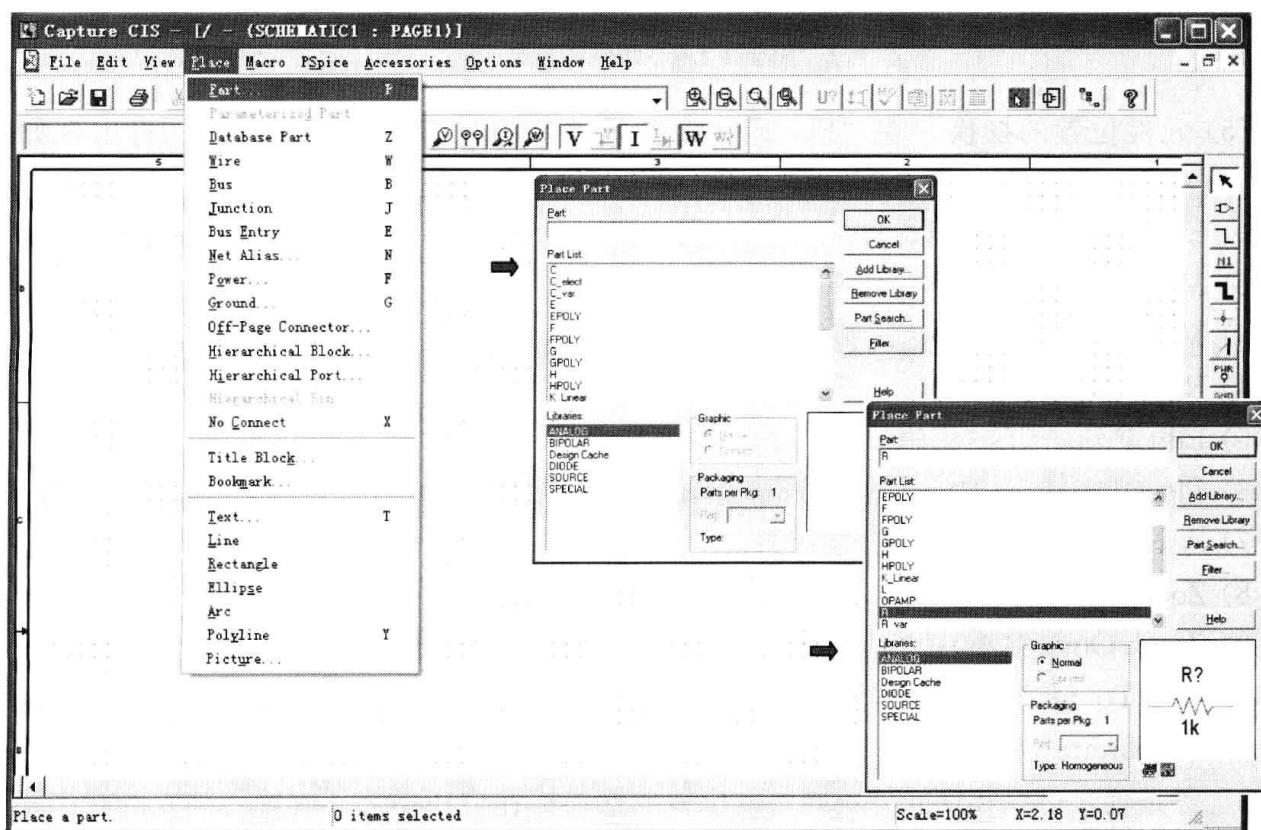
(2) 加载元件库。OrCAD 10.5 Capture CIS 电路元件符号库中备有各种元件符号，除了电阻、电容、电感、晶体管、电源等基本器件及符号外，还有运算放大器、比较器等上万种元件模型，因此，若是软件安装后第一次运行，或者在使用过程中，需添加、更换新的元件库，先点击“Place Part”对话框中的“Add Library”按钮，然后在弹出的库文件列表中选择所预期的元器件库，如附图 F-6 所示。在绘制电路原理图时，一般元件直接从电路元

件库中调用, 特殊的元件则可以通过“PSpice Model Editor”先自建模型。

一些元件库的说明如下。

- 1) ANALOG: 模拟电路元件, 如电阻、电容、电感等。
- 2) BIPOLAR: 三极管。
- 3) DIODE: 二极管。
- 4) SOURCE: 电源, 如直流电压源、电流源, 交流电压源、电流源。
- 5) SPECIAL: 一些特殊元件, 如电压表、电流表。

(3) 调用一个元件。在“Place Part”窗口中, 一般可见所加载的常用元件库, 例如, “ANALOG” (模拟电路元件库), “SOURCE (电源元件库)”等。为了调用一个元件, 先从“Libraries”中选择合适的库, 例如, 为了绘制附图 F-5 所示电路, 选择“ANALOG (模拟元件库)”; 然后, 在“Part List”栏中, 点击查找电阻元件, 或者在“Part”栏中, 输入电阻元件符号“R”, 同时观察右下角预览窗口中元件的形状是否是所预期的, 可重复选择, 直到选到合适元件为止; 再单击对话框中的“OK”按钮, 将该元件调入绘图工作区, 如附图 F-7 所示。

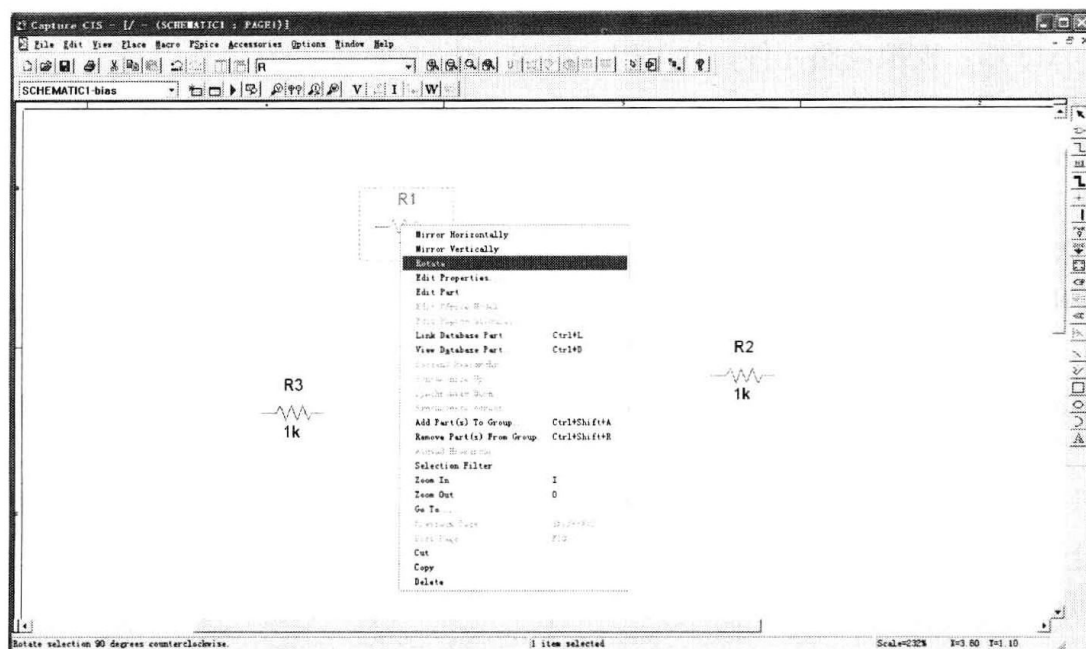


附图 F-7 电路图绘制窗口

调用元件的另一种方法是在“Place Part”对话框中, 点击“Part Search”按钮, 直接搜索需要的元件, 例如, 要搜索电阻元件, 直接在搜索栏中键入“R”即可, 调用电容、电感、电压源、电流源等其他元件类似。

(4) 放置一个元件。上述步骤 (3) 完成后, 元件处于“Place” (放置) 状态, 元件随光标移动到合适的位置后, 每单击一次鼠标左键, 将一个元件放置在绘图工作区指定位置上, 元件编号自动加 1, 若连续点击鼠标左键, 则可以依次放置多个同类元件到光标指定位置,

如附图 F-8 所示。



附图 F-8 元件的摆放

(5) 元件位置的摆换。在“Place”（放置元件）的状态下，单击右键，将出现如附图 F-8 所示选项菜单，详列如下：

- 1) End Mode（结束模式）；
- 2) Mirror Horizontally（水平镜像）；
- 3) Mirror Vertically（垂直镜像）；
- 4) Rotate（旋转）；
- 5) Edit Properties（编辑属性）；
- 6) Place Database Part（放置数据库元件）；
- 7) Ascend Hierarchy（上升层级）；
- 8) Zoom In（放大）；
- 9) Zoom Out（缩小）；
- 10) Go To（跳转到指定位置）。

点击“Rotate（旋转）”、“Mirror Horizontally（水平镜像）”、“Mirror Vertically（垂直镜像）”等选项，可以实现元件不同角度位置的摆换；在“Place”（放置元件）的状态下或元件被选中状态下，还可以直接按快捷键“R”、“H”、“V”等实现元件的旋转、水平和垂直镜像变换；直到按下“Esc”或单击右键，出现对话框后，选择“End Mode”，结束本次元件绘制的操作。

(6) 放置电源。绘制附图 F-5 所示电路中的电压源、电流源，过程与绘制电阻类似，即重复上述 (3)~(5) 步骤，不同之处是在步骤 (3) 中，先在“Libraries”子栏中点击“SOURCE（电源库）”，以选择“SOURCE（电源库）”作为当前元件库；然后，在“Part List”栏中，点击查找所预期的电源元件。在 OrCAD Capture CIS 软件中，有多种电源表示形式，例如，点击菜单栏“Place”中的“Power”选项，或者单击右侧绘图工具栏第八个图

标, 或者按快捷键“F”, 都会弹出“Place Power”对话框, 但该对话框中一般为单极偏置电源形式, 不大适合电路分析中, 电源为二端钮元件、一端口标准形式。

(7) 连接线路。当选择并放置好所有的元件后, 就可以进行连线了。连接线路的具体方法是: 点击菜单栏“Place”中的“Wire”选项, 或者单击右侧绘图工具栏第三个图标, 或者按快捷键“W”, 光标变为“十”字形光标, 表示进入“连线”状态; 连线时, 将“十”字形光标对准元件的端钮作为连线的首端并点击, 然后“十”字形光标移动到下一个预期连接的元件的端钮, 将“十”字形光标对准元件的端钮作为连线的末端并点击, 完成一条电路的连线绘制。

(8) 放置节点。在放置好所有的元件, 并连好线后, 还需要在三条及三条以上支路相交之处放置节点, 表示其连通性。方法是: 点击菜单栏“Place”中的“Junction”选项, 或者单击右侧绘图工具栏第六个图标, 或者按快捷键“J”, 进入“Place Junction (放置节点)”状态, 便可在支路相交之处放置节点。

(9) 放置接地符号。值得注意的是: SPICE 是用改进的电压节点法列写方程, 只有指定零参考节点后才能保证方程是独立的, 因此, 画电路图时一定要放置零参考地。放置零参考地的方法是: 点击菜单栏“Place”中的“Ground”选项, 或者单击右侧绘图工具栏第九个图标, 或者按快捷键“G”, 在弹出的“Place Ground (放置电源地线)”对话框中, 选取SOURCE库中符号为“0”的元素, 正是接地符号; 将接地符号就近放置在所设定的零参考节点附近, 并连通。

(10) 元件属性编辑。元件参数的设定和修改, 例如, 电阻元件的序号、阻值等参数的设定。方法是: 双击所要编辑的元件, 可以进入属性编辑器, 选中所要修改的选项, 输入修改的内容。例如, 若要将电阻 R_1 的阻值修改为 5Ω , 具体步骤是: 双击电阻 R_1 的阻值“1k” Ω , 进入属性编辑状态, 选中“Value”列中表示阻值的参数格, 输入修改值“5”, 修改完成后, 退出属性编辑状态即可。也可以选中所有元件, 一起编辑元件属性。

OrCAD Capture CIS 中单位约定使用惯例——单位前缀 (缩放因子) 说明: F (=1E-15), P (=1E-12), N (=1E-9), U (=1E-6), M (=1E-3); K (=1E3), MEG (=1E6), G (=1E9), T (=1E12)。

为了以后查看方便, 可以将节点编上熟悉的名称, 例如, 节点电压用“U1”、“U2”、“U3”表示, 方法是: 点击菜单栏“Place”中的“Net Alias”选项, 在弹出的对话框中输入名称, 点击“OK”按钮, 然后将光标移至待编辑的节点上, 单击确认节点与所编辑的名称关联上, 如附图 F-9 所示。

(11) 放置总线。在数字电路中一组性质相同、并行的线路可以用一条“Bus (总线)”统一来表示。放置总线的方法是: 点击菜单栏“Place”中的“Bus”选项, 或者单击右侧绘图工具栏第五个图标, 或者按快捷键“B”, 进入“Place Bus (放置总线)”状态, 便可在绘图工作区任意绘制总线。

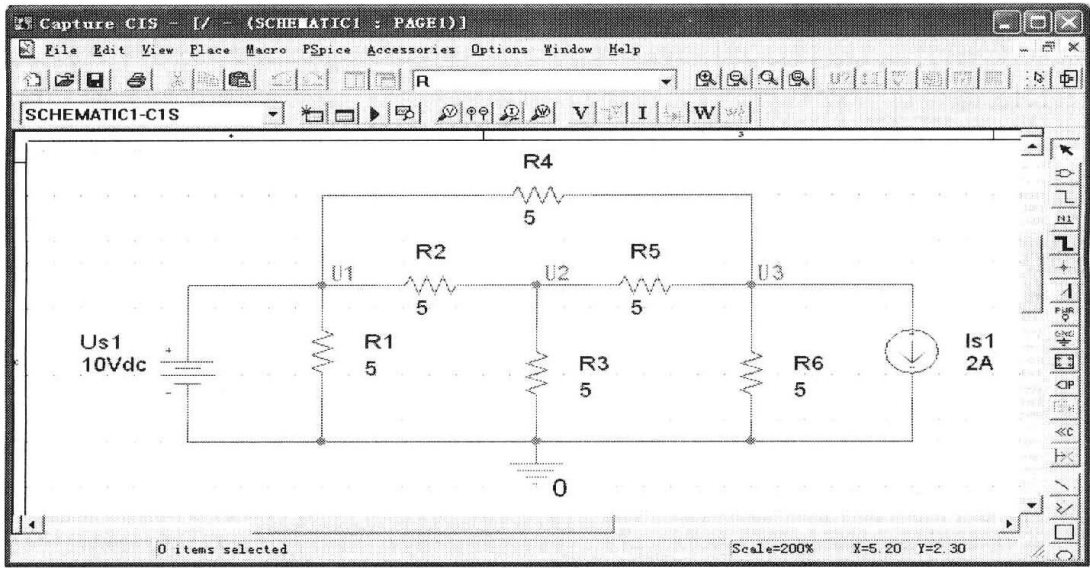
(12) 放置总线引入线。某一条线路进入或退出总线, 可以通过“Bus Entry (总线引入线)”实现。放置总线引入线的方法是: 点击菜单栏“Place”中的“Bus Entry (总线引入线)”选项, 或者单击右侧绘图工具栏第五个图标, 或者按快捷键“E”, 进入“Place Entry (总线引入线)”状态, 便可在绘图工作区放置总线引入线了。

(13) 一些不具有电气连接关系的元素。在“Place”菜单栏中有一些不具有电气连接关

系的元素，将这些元素放置到绘图工作区，可以绘制出直线、曲线、方框、椭圆、文本文字、折线以及图形等。但需要注意的是，这些元素不具有电气连接关系，不能作为连线用于电路连接，详列如下。

- 1) 直线：依次点击菜单栏 “Place”→“Line”，进入直线绘图工作状态。
- 2) 曲线：依次点击菜单栏 “Place”→“Arc”，进入曲线绘图工作状态。
- 3) 框：依次点击菜单栏 “Place”→“Rectangle”，进入方框绘图工作状态。
- 4) 椭圆：依次点击菜单栏 “Place”→“Ellipse”，进入椭圆绘图工作状态。
- 5) 文字：依次点击菜单栏 “Place”→“Text”，进入文本编辑工作状态。
- 6) 折线：依次点击菜单栏 “Place”→“Polyline”，进入折线绘图工作状态。
- 7) 图：依次点击菜单栏 “Place”→“Picture”，进入图形绘图工作状态。

至此，可在 OrCAD Capture CIS 绘图工作区将附图 F - 5 绘制成如附图 F - 9 所示电路。



附图 F - 9 基于 OrCAD Capture CIS 绘制的电路原理图

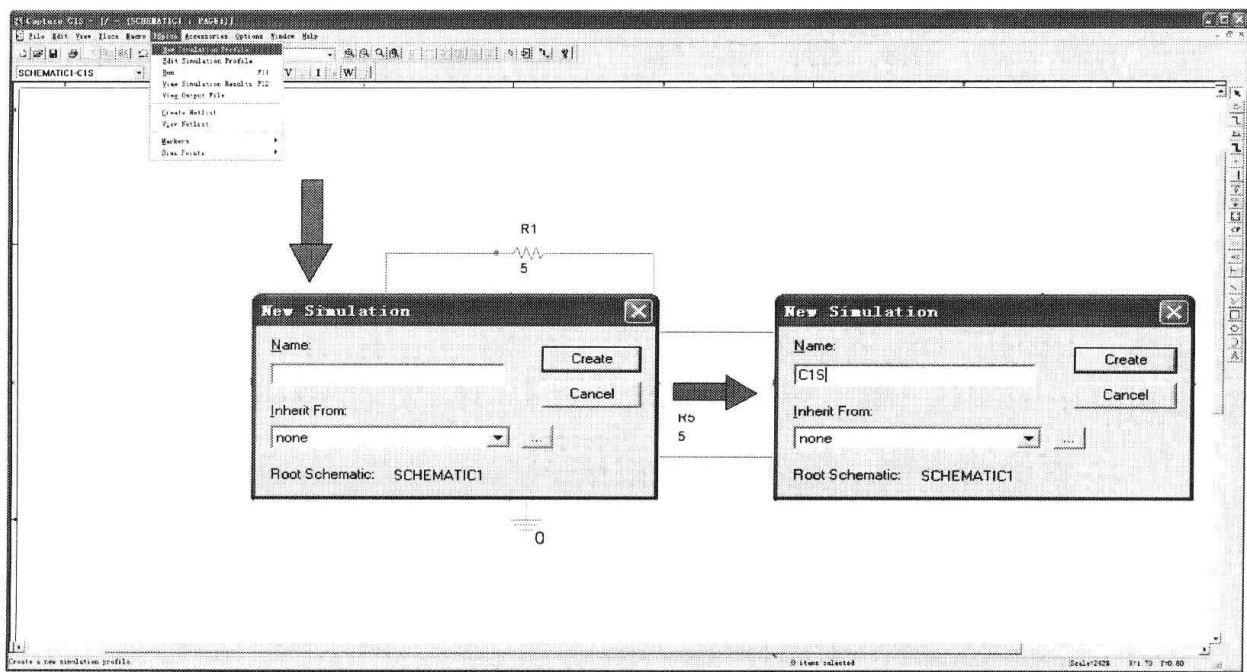
二、定义分析类型 (Specifying the type of circuit analysis)

在 OrCAD Capture CIS 下完成了电路原理图的绘制，相当于完成了 PSpice 电路仿真三大步骤的第一大步骤。下面进行第二大步骤，即定义分析类型 (Specifying the type of circuit analysis)。

OrCAD PSpice A/D 软件可以进行直流电路分析、暂态电路分析、交流电路分析、灵敏度分析以及统计分析等多种功能，具体对某一电路进行仿真时，需要有一个文件来管理所设置的仿真分析类型参数，该管理文件就称为“仿真分析类型定义文件”。创建“仿真分析类型定义文件”的方法如下。

- 1. 创建仿真分析类型定义文件名

如附图 F - 10 所示，点击菜单栏 “PSpice” 中的 “New Simulation Profile” 选项，弹出 “New Simulation” 对话框，在该对话框 “Name” 栏目下，输入仿真分析类型定义文件名，例如，起名为 “C1S”；进一步单击该对话框中的 “Create” 按钮，对话框界面自动换为 “Simulation Settings - C1S”，即文件名为 C1S 的仿真环境设置对话框，如附图 F - 11 所示。

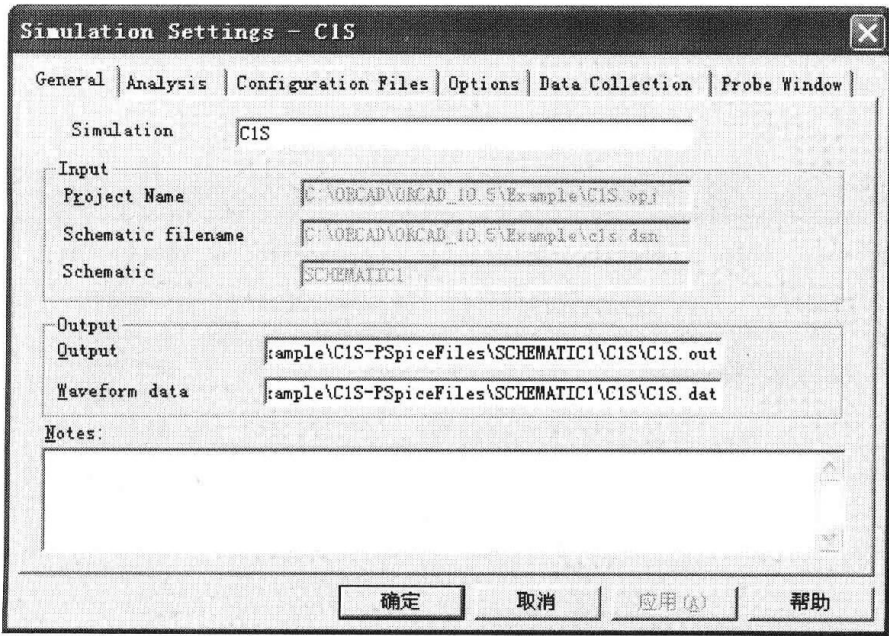


附图 F-10 创建仿真分析类型定义文件名

2. 设置仿真环境

在仿真环境设置对话框中有六项内容需要设定。

(1) “General” 常规性设置。例如，仿真文件名、项目文件和电路原理图文件路径，以及仿真输出文件 (*.out) 和波形输出文件 (*.dat) 等的路径设定。注意：一般为默认，不需修改，如附图 F-11 所示。



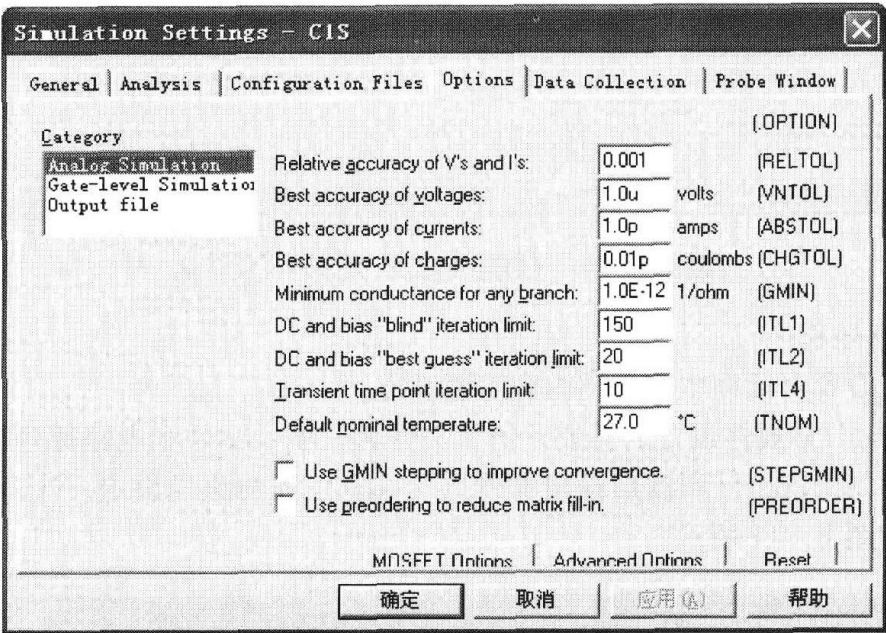
附图 F-11 设置仿真环境

(2) “Analysis” 仿真分析类型设置。仿真类型共分为 4 类，分别是时域暂态分析、直流扫描分析、交流扫描或噪声分析、直流电路分析。例如，对上述附图 F-9 所示电路进行分析，求解各节点的电压、各支路的电流以及各元件的功率，适合设置为 “Bias Point (直流

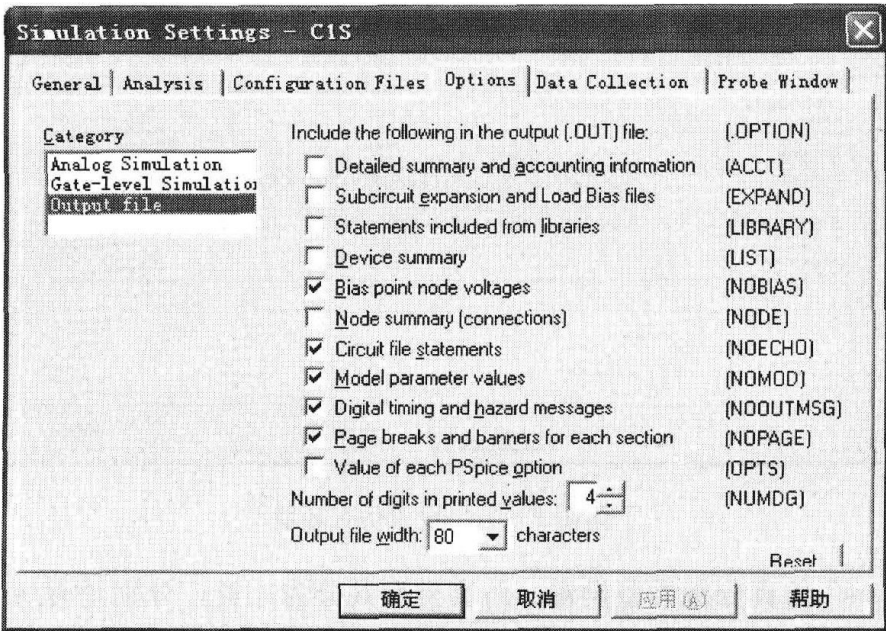
工作点)”，即直流电路分析类型。

(3) “Configuration Files” 配套文件设置。例如，激励信号文件、元器件库文件等的路径设置。注意：一般为默认，不需修改。

(4) “Options” 仿真选项设置。有三类仿真选项可根据需要设置，如附图 F-12 所示左列 “Category (类目)” 分为 “Analog Simulation (模拟仿真)”、“Gate - level Simulation (数字仿真)”、“Output file (输出文件)” 三类。点击 “Analog Simulation (模拟仿真)” 类时，如附图 F-12 所示中所列：列出了仿真时的电压、电流相对精度，最佳精度，环境温度等默认参数，一般情况下可以采用默认参数，不需修改；点击 “Output file (输出文件)” 类时，如附图 F-13 所示中列选项框，可以根据需要选择输出文件的内容项以及文本格式。

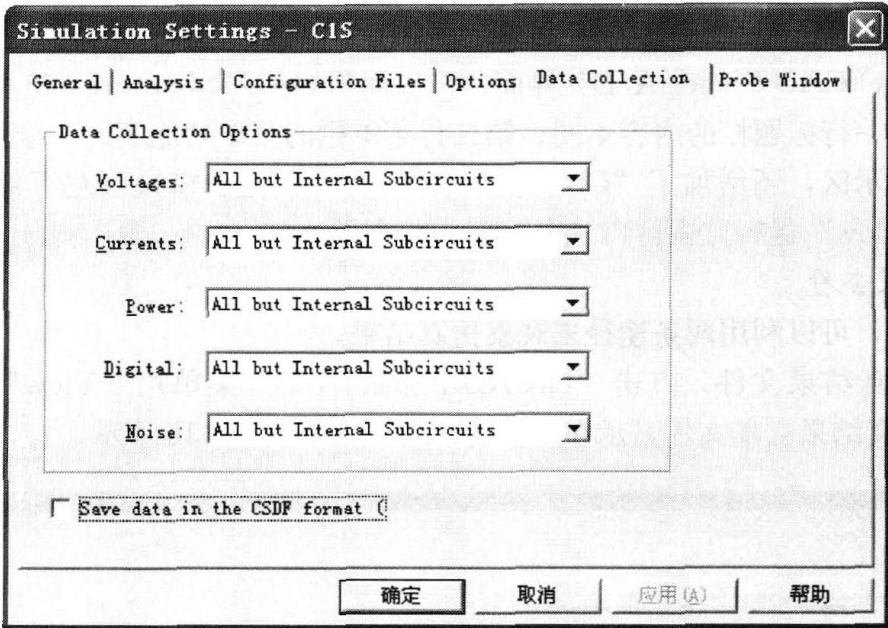


附图 F-12 模拟仿真选项设置



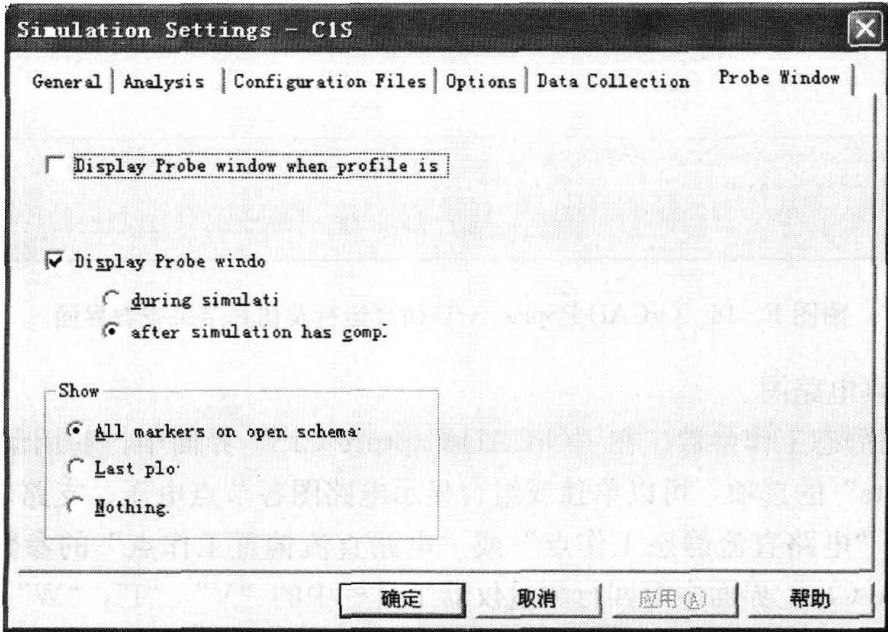
附图 F-13 仿真输出文件选项设置

(5) “Data Collection” 仿真数据采集器选项设置。如附图 F - 14 所示，电压、电流、功率等仿真数据可以全部、部分采集或不采集，默认选项为全部采集，一般情况下可以采用默认参数。



附图 F - 14 仿真数据采集器选项设置

(6) “Probe Window” 图形后处理窗口选项设置。如附图 F - 15 所示，可以按仿真观察需要设置显示图形后处理窗口的方式以及显示的内容，一般情况下可以采用默认参数。



附图 F - 15 图形后处理窗口选项设置

至此，完成了 PSpice 电路仿真三大步骤的第二大步骤，即创建了仿真分析类型管理文件，并设置了仿真环境。

三、仿真分析和仿真结果处理 (Simulation Results)

OrCAD PSpice A/D 电路仿真的第三大步骤是仿真运行和仿真结果观察和处理。其方法如下。

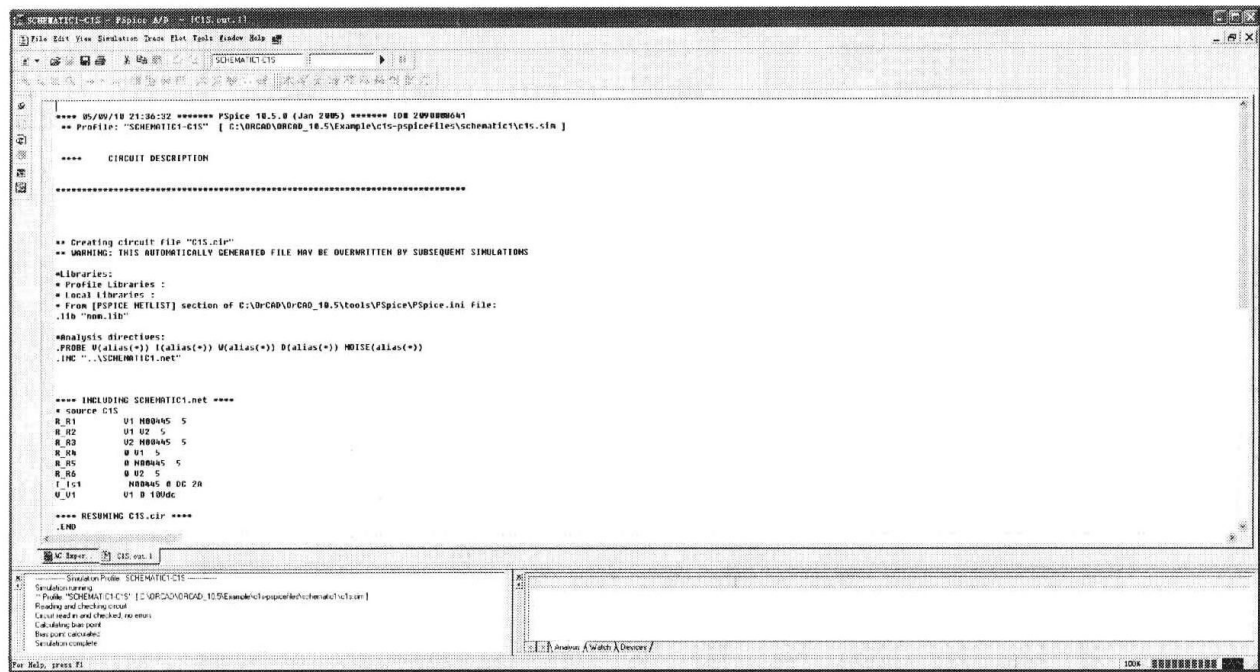
1. 仿真运行

点击 OrCAD Capture CIS 菜单栏 “PSpice” 中的 “Run” 选项，程序仿真开始，并且画面自动切换为 “OrCAD PSpice A/D” 界面，该界面与 OrCAD Capture CIS 电路图绘制界面不同之处是：第一行标题栏的内容不同、第二行菜单栏的菜单功能不同、绘图工作区换成了仿真计算结果显示区，还增加了 “Output Window” 阶段记录窗口（左下部）和 “Simulation Status Window” 运行监视窗口（右下部）两个子窗口。

2. 仿真结果查看

仿真运行后，可以利用两条途径来观察仿真结果。

(1) 查看仿真结果文件。点击 “OrCAD PSpice A/D” 菜单栏 “View” 中的 “Output File” 条目，仿真结果文本文件显示在结果显示区，如附图 F-16 所示。

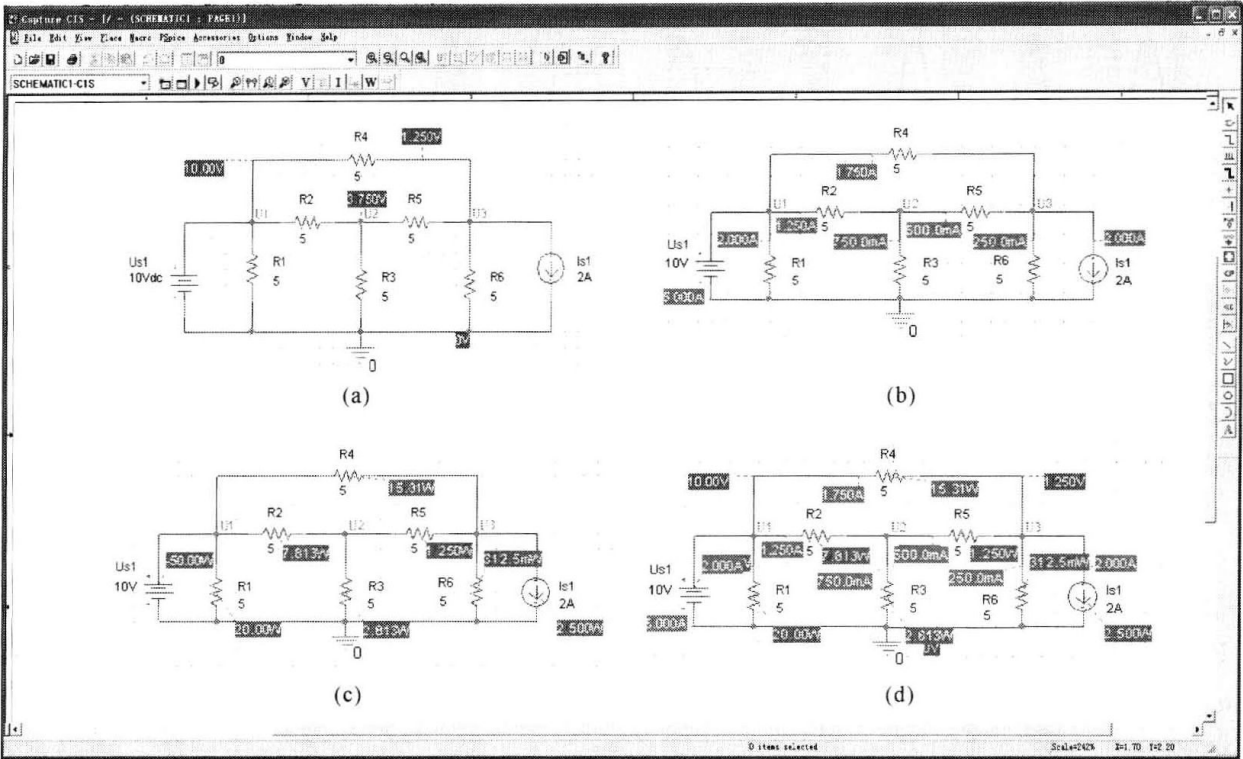


附图 F-16 OrCAD PSpice A/D 仿真运行及仿真结果查看界面

(2) 观察仿真电路图

1) 观察电路静态工作参数。在 “OrCAD Capture CIS” 界面中，利用菜单栏 “PSpice” 中的 “Bias Points” 的选项，可以单独或组合显示电路图各节点电压、支路电流、元器件的功率，用来观察 “电路直流静态工作点” 或 “电路直流偏置工作点” 的参数；或直接点击 “OrCAD Capture CIS” 界面中第四行测量仪器工具栏中的 “V”，“I”，“W”，选取观察直流电路各节点电压、支路电流、元件的功率。如附图 F-17 所示 (a)、(b)、(c) 为分别选取 “V”，“I”，“W” 为观察内容时，直流电路图的显示内容，也可以设置为组合方式在一个电路图中同时显示更多的内容，如附图 F-17 (d) 所示。

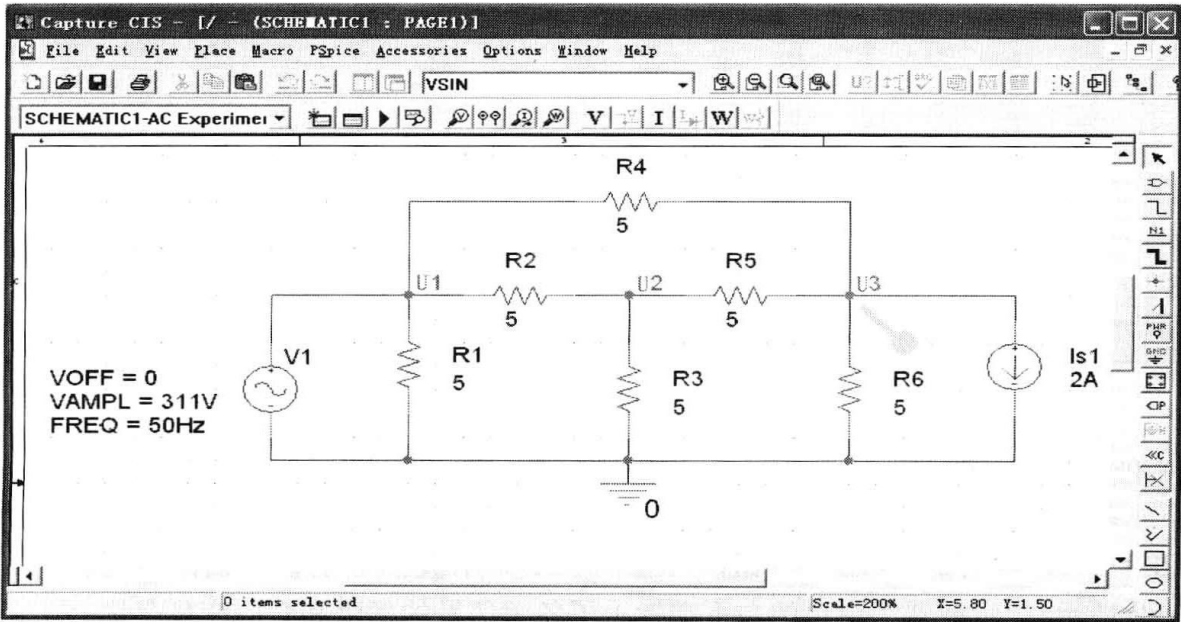
2) 像示波器那样来观察仿真结果。利用菜单栏 “PSpice” 中的 “Markers” 选项，还可以在电路不同位置设置检测探头，像示波器一样来观察仿真结果，例如用来观察仿真类型被



附图 F-17 电路直流工作点参数

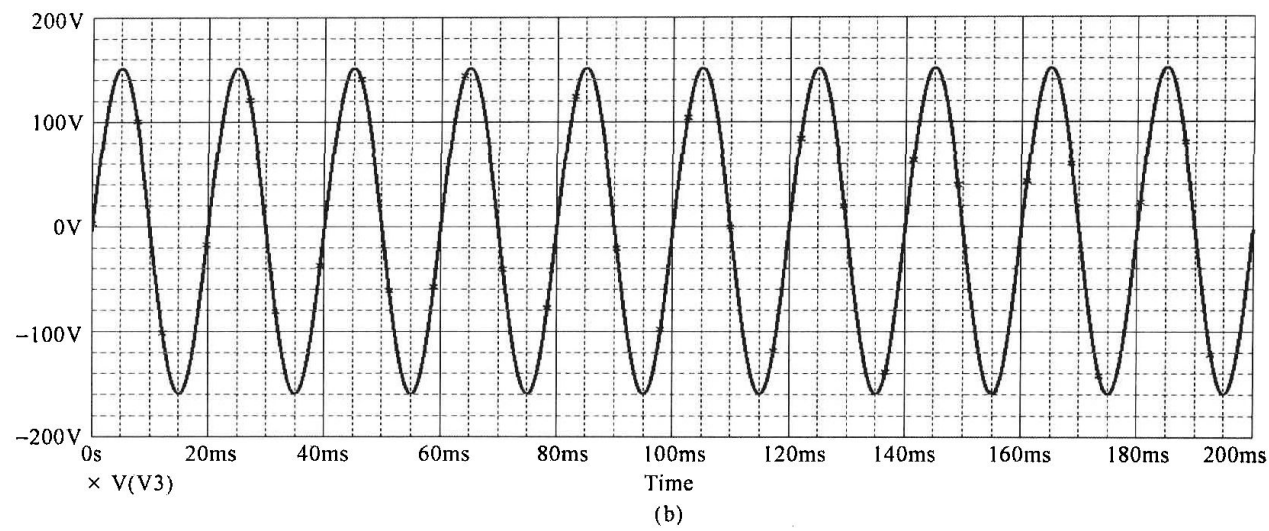
- (a) 显示直流静态工作点节点电压；(b) 显示直流静态工作点各支路电流；
- (c) 显示直流静态工作点各元件的功率；(d) 显示节点电压、支路电流和功率

定义为“Time Domain (Transient) (暂态分析)”、“AC Sweep/Noise (交流频率特性/噪声分析)”以及“DC Sweep (直流扫描分析)”时的电压、电流以及功率波形。创建项目文件“AC Experiment”，重复前面步骤绘制附图 F-18 (a) 所示电路图，定义分析类型，运行后点击“View”中“Simulation Results”即可查看“示波器”波形，如附图 F-18 (b) 所示。



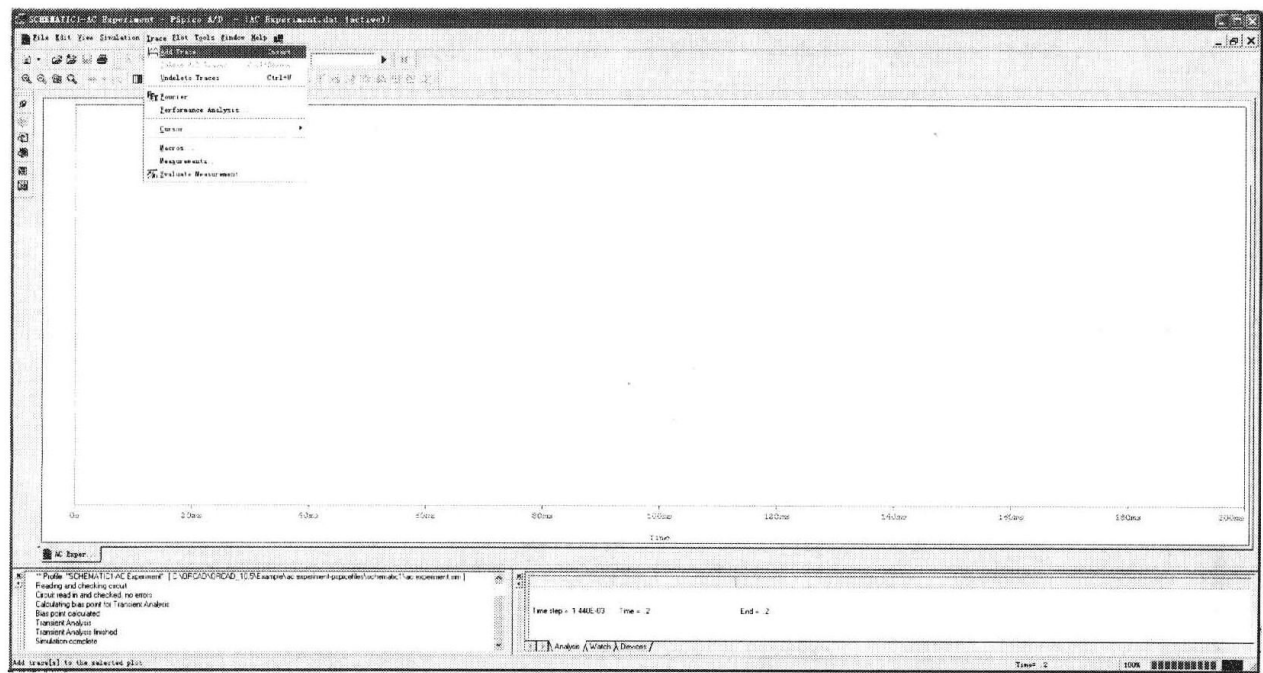
(a)

附图 F-18 “Time Domain (时域分析)”用探针观测节点电压“V3”(一)
(a) 探针位置设置



附图 F-18 “Time Domain (时域分析)” 用探针观测节点电压 “V3” (二)
(b) 节点电压 “V3” 的波形

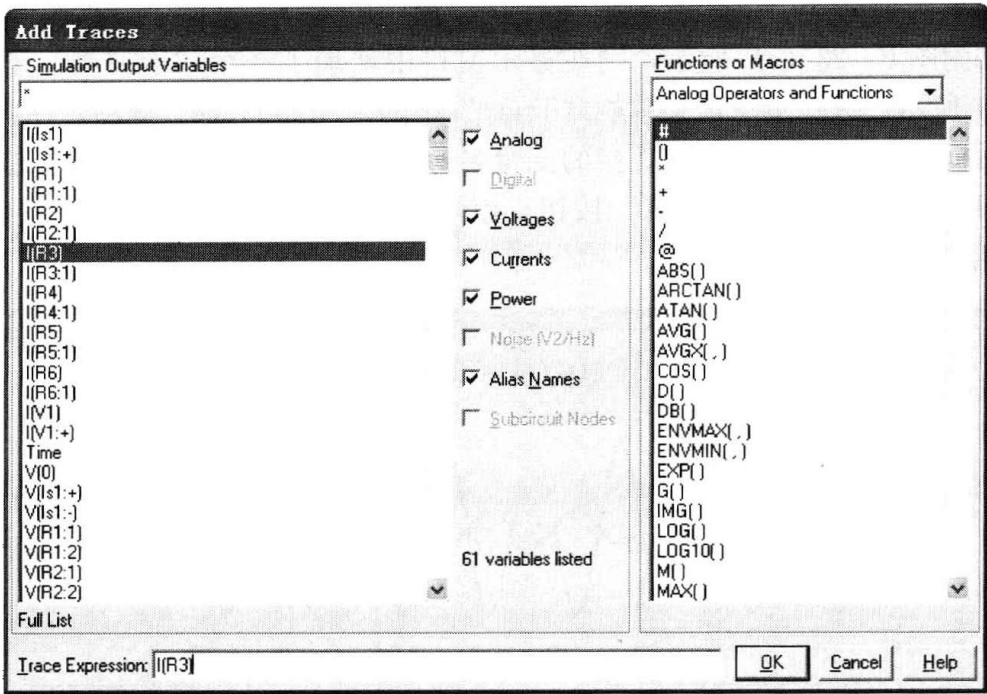
3) 直接观察仿真的波形。如附图 F-19 所示, 点击 “OrCAD PSpice A/D” 菜单栏 “Trace” 中的 “Add Trace” 选项, 在弹出的 “Add Traces” 对话框中, 可以选择仿真电路的节点电压、支路电流以及元件功率作为观察对象, 如附图 F-20 所示。例如, 选择观察流过 R_3 的电流 “I (R3)”, 然后点击 “OK” 按钮, 可观察到如附图 F-21 所示波形。



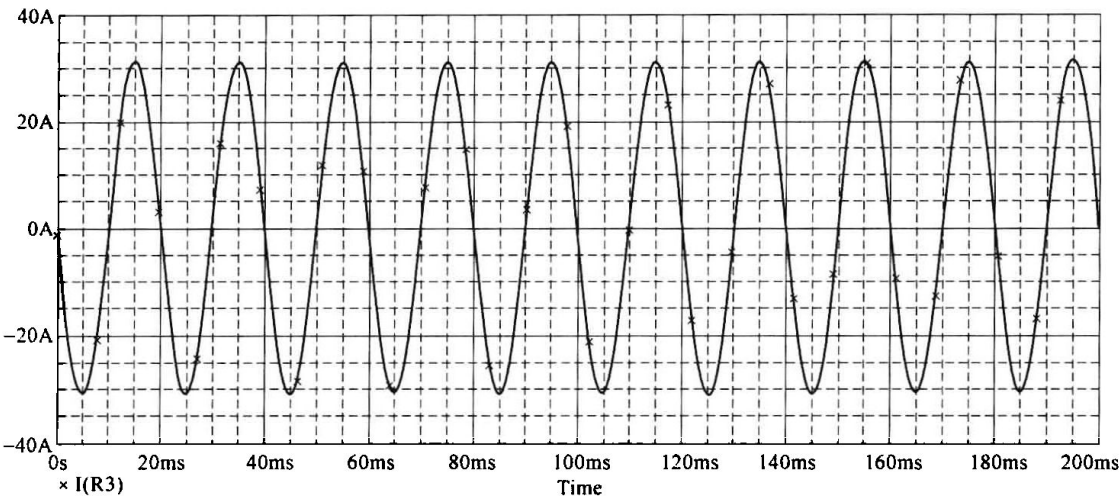
附图 F-19 直接观察仿真波形的操作

4) 在一个 “示波器” 中观察两个或多个波形。在 “Add Traces” 对话框中, 若同时选择两个或多个变量作为观察对象, 例如, 同时选择观察流过 R_3 的电流 “I (R3)” 和电压 “V (R3: 2)”, 并点击 “OK” 按钮, 可在同一个 “示波器” 上显示两踪信号波形, 如附图 F-22 所示。“示波器” 窗口的左下端指示了各踪信号的颜色和对应变量名称。

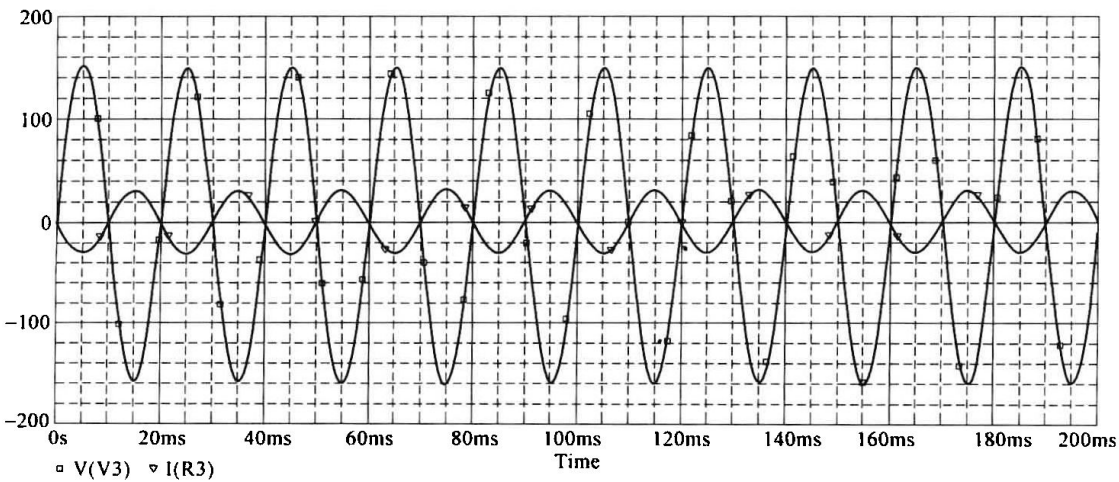
5) 从 “示波器” 窗口删除信号波形。若想从 “示波器” 显示窗口中删除某一踪信号波形, 方法是将光标对准 “示波器” 窗口左下端所要删除信号的变量名称, 并点击选中该 “变量名称”, 然后按 “Delete (删除)” 键, 就可从 “示波器” 窗口删除该踪信号波形。



附图 F - 20 选择观察波形对象

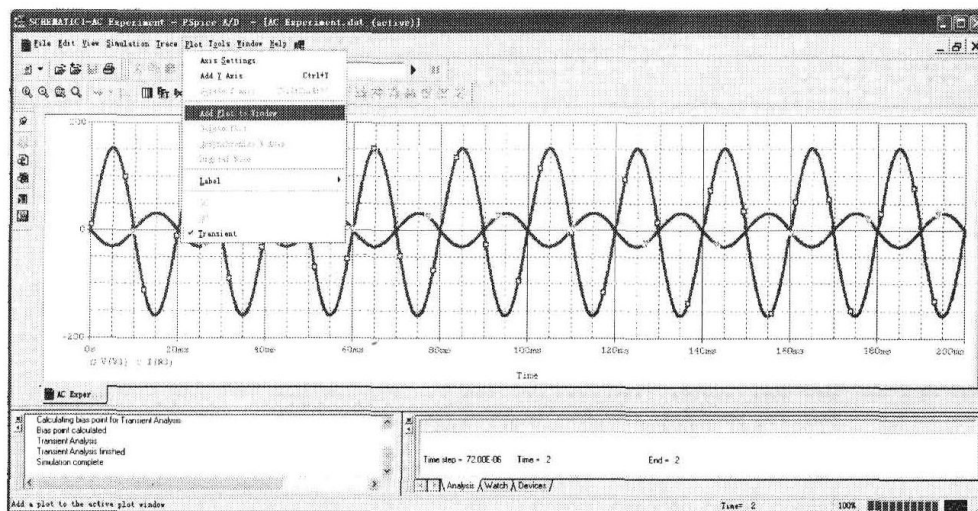


附图 F - 21 直接观察所选取的仿真波形

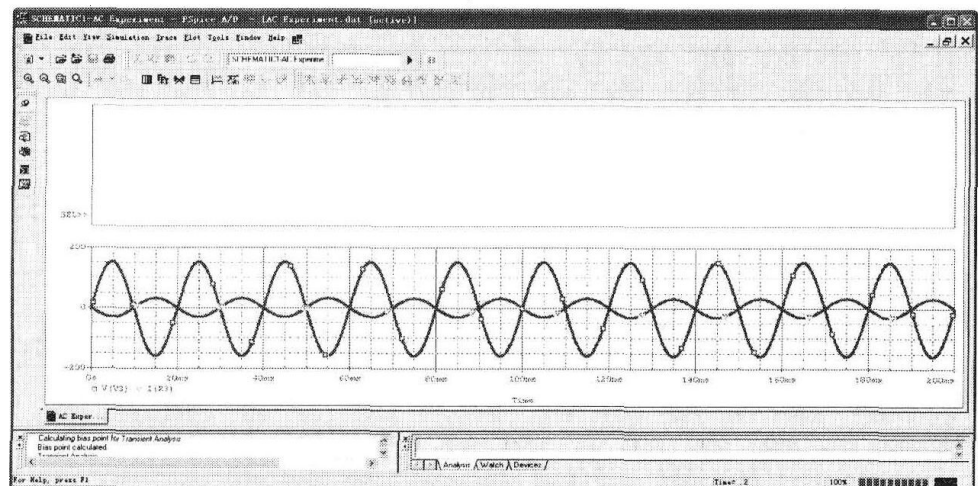


附图 F - 22 两踪或多踪信号波形显示

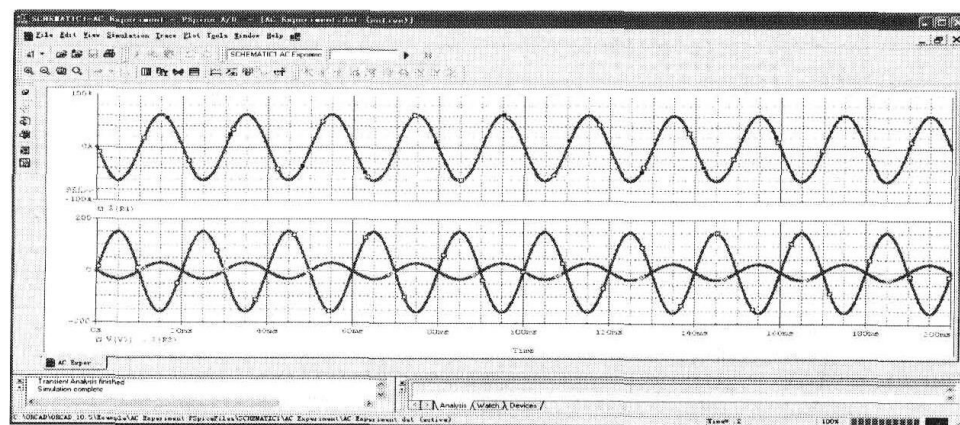
6) 设置两个或多个“示波器”。其方法是: 在“Plot”菜单栏中, 点击“Add Plot to Window”, 如附图 F-23 (a) 所示, 则在显示窗口中增加了一个“示波器”子窗口, 如附图 F-23 (b) 所示。进一步点击菜单栏“Trace”中的“Add Trace”选项, 在弹出的“Add Traces”对话框中, 选择预期所要观察的变量名称, 例如, 在附图 F-20 中选择观察流过 R_1 的电流 “I (R1)”, 并点击 “OK” 按钮, 就可在第二个“示波器”中观察到 “I (R1)” 的波形, 如附图 F-23 (c) 所示。



(a)



(b)



(c)

附图 F-23 两个或多个“示波器”设置及使用界面

(a) 增加“示波器”显示子窗口设置选项; (b) 增加一个“示波器”显示子窗口;

(c) 在第二个“示波器”中显示所选中的信号波形

参 考 文 献

- [1] 梁贵书. 电路理论基础. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 邱关源, 罗先觉. 电路. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 李宝树, 贾秀芳, 赵书涛. 电磁测量技术. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 唐统一, 赵伟. 电磁测量. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] 陶时澍. 电气测量技术. 北京: 中国计量出版社, 1991.
- [6] 于轮元. 电气测量技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [7] 尤德斐. 数字化测量技术及仪器. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [8] 刘兴兰, 龙克勇, 郭永德. 电工测量技术. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.
- [9] 刘青松, 李巧娟. 电工测试基础. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 李继凡, 等. 精密电气测量. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [11] 任德祺. 常用电测仪器仪表. 北京: 中国计量出版社, 2003.
- [12] 李颂伦. 电气测试技术. 西安: 西北工业大学出版社, 1992.
- [13] 顾龙芳. 计量学基础. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- [14] 申忠如, 等. 电气测量技术. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 王鸿钰, 等. 电工仪器仪表原理与应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- [16] 沙占友. 数字化测量技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [17] 陈传硕, 等. 数字测量仪表. 北京: 中国计量出版社, 1991.
- [18] 汪建, 等. 电路实验. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [19] 黄大刚, 刘毅平, 朱连津. 电路基础实验. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [20] 卓郑安. 电路与电子技术实验教程. 2 版. 上海: 上海科学技术出版社, 2009.
- [21] 刘耀年, 蔡国伟. 电路实验与仿真. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [22] 陈晓平, 李长杰. 电路实验与仿真设计. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [23] 孙桂瑛, 齐风艳. 电路实验. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "55S15bel5rWL6YeP5Z+656GA5LiO55S16Lev5a6e6aqM5pWZ56iLXzEyOTU4NTg4LnppcA==",
  "filename_decoded": "\u7535\u5de5\u6d4b\u91cf\u57fa\u7840\u4e0e\u7535\u8def\u5b9e\u9a8c\u6559\u7a0b_12958588.zip",
  "filesize": 47941534,
  "md5": "a5475071c05a68373502951a649baf41",
  "header_md5": "a22b911dd2437243b2c76483d6db17c6",
  "sha1": "a5aff363e465ced08eaac73f05c6cd24a4ccf7f5",
  "sha256": "0eed5f33803525a56d68a3ef02efacb0bf2e9c018ff848284c7d5183b0f03407",
  "crc32": 2351349905,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 51382210,
  "pdg_dir_name": "\u2561\u03c4\u2563\u00f1\u2593\u0393\u2534\u2510\u2557\u2219\u2524\u00ed\u2559\u03b4\u2561\u03c4\u252c\u2556\u2569\u2561\u2564\u0398\u255c\u2560\u2502\u2560_12958588",
  "pdg_main_pages_found": 165,
  "pdg_main_pages_max": 165,
  "total_pages": 174,
  "total_pixels": 1099950008,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```