

JIANCE JISHU

检测技术与应用

常太华 苏 杰 田 亮 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

CEPP

JIANCE JISHU YUYINGYONG

ISBN 7-5083-1634-7



9 787508 316345 >

ISBN 7-5083-1634-7

定价: 24.00 元

CHI

CHINA
OVER PRESS

检测技术与应用

常太华 苏 杰 田 亮 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书在重点讲述一些发展比较成熟的仪表及传感器的基本原理和基本结构的同时,对近年来检测领域中的新技术、新方法和新发展做了比较全面的介绍。在系统地阐述检测基本理论的基础上,通过丰富的图示、详细的文字论述,列举了检测技术在生产、科研中的应用实例,使读者不仅对现代检测技术理论有较全面、系统的了解,而且更重要的是在感性上对检测技术产生完整的认识。

全书共分六章,分别介绍了激光、光纤、超声波、微波、红外辐射、核辐射技术对参数检测的原理及其应用。

本书可作为高等院校相关专业的教材,亦可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术与应用/常太华,苏杰,田亮编. - 北京:中国电力出版社,2003

ISBN 7-5083-1634-7

I. 检… II. ①常…②苏…③田… III. 自动检测 - 高等学校 - 教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 042041 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
航远印刷厂印刷
各地新华书店经售

2003 年 8 月第一版 2003 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 334 千字
印数 0001—3000 册 定价 24.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

检测技术是科学技术的重要分支。检测就是借助专门的技术工具，通过实验和计算找到被测量与测量单位的比值（大小和正负）的过程。

检测的目的是在限定的时间内，尽可能正确地收集被测对象的有关信息，以便获取被测对象的参数，从而管理和控制生产。检测是生产过程中的眼睛，是过程控制中最重要的一环，生产过程中，可以没有自动控制，但绝不能没有检测。

检测技术，有时也称为测试技术，它包含着测量和试验两个内容。测量就是把被测对象中的某种信息检测出来并加以量度；试验就是通过专门的装置把被测系统所存在的某种信息激发出来并加以测量。

检测通常包括两个过程：一是能量形式的一次或多次转换过程；二是将被测变量与其相应的测量单位进行比较。前者一般包括检测（敏感）元件、变换（或转换）器、信号传输等部分；后者一般包括信号处理、测量电路及显示装置等部分。检测元件一般将被测信息转换成电信号，也就是把被测信号转换成电压、电流或电路参数（电阻、电感、电容）等电信号输出；再利用变换器、信号传输和信号处理等部分，把信号转换成传输方便、功率足够、可以传输、存储、记录，并具有驱动能力的电压。信号的显示和记录是由显示器、指示器和记录仪完成，信号的处理和分析用数据分析仪、频谱分析仪、计算机等完成。通过对信号的处理和分析，找出被测信息的规律，从而为研究和鉴定工作提供有效依据，为控制提供信号。由此可见，检测技术有如下三种功能：①过程中参数测量功能；②过程中参数监测控制功能；③测量数据分析判断功能。

随着科学技术的进步，检测技术正在迅速地发展，反过来检测技术的发展又进一步促进着科学技术的进步。现从如下几个方面介绍检测技术的发展。

（1）检测理论方面。随着科学技术的发展，生产规模的扩大和强度的提高，对于生产控制与管理的要求也越来越高，因而需要收集生产过程中的信息的种类也将越来越多，这就对参数检测提出了更高要求。参数的检测理论和方法与物理、化学、电子学、材料、信息等学科密切相关，随着这些学科的发展，检测技术现已有很大发展。在现代科技领域，出现了许多新的检测技术。它们往往是利用各种不同波长的电磁波的特性来实现检测工作。例如，用核辐射、激光、红外、微波、超声波等进行检测。这些检测技术从广义上来说也是一种传感技术，因为它们也是将待测参量经过某种电磁波或声波的中介作用和一系列转换最后变为电量而指示出被测参量值。这与普通传感器的作用相同，只是不再像普通

CHUANG

前言

传感器那样是单个的器件而是由若干个起不同作用的器件集合组成。这些传感检测技术现已获得越来越多的应用,特别是在一些环境恶劣、高温、高压、高速度和远距离等的场合下,它们更有其优越性。

(2) 检测领域方面。工业生产和科学技术的发展使新的检测领域、新的检测对象和新的检测要求不断出现。如过程工业的不断发展,生产过程中的参数检测已逐渐地由对表征生产过程的间接参数(如温度、压力、流量、物位等)的检测转向对表征生产过程本质的物性、成分、能量等参数的检测;对于装置的检测,已逐渐由单参数发展到多参数的综合检测;参数的显示已逐渐地由模拟式变为数字式或图像显示等。

(3) 测量工具和方法。随着新的测量领域的出现,新的检测方法和测量工具也随之出现。如利用激光脉冲原理测量大距离(如地球到月亮距离),可以大大提高精度。计算机技术和微电子技术的发展,使得检测技术和仪器仪表得到了划时代的进步和发展。仪器仪表向智能化、数字化、小型化、网络化、多功能化方向发展。近年来,由于计算机软件技术和数据处理技术的巨大进步,微型、智能、集成传感器的迅速开发,使仪器仪表的面貌发生了很大的变化。检测技术中数据处理能力和在线检测、实时分析的能力大大增强,仪器仪表的功能得以扩大,精度及可靠性有了很大的提高。这种发展的总趋势,今后将变得更快更深更广。

本书是在历年讲稿、讲义的基础上经多次修改完善而成的,书中重点介绍了一些发展比较成熟的仪表及传感器的基本原理和基本结构,力求做到理论与实践的密切结合,同时在内容上也力求反映近年来检测领域中的新技术、新方法和新发展,在阐述方法上注意深入浅出,循序渐进。全书共分六章。第一章至第六章分别介绍了激光、光纤、超声波、微波、红外辐射、核辐射技术对参数检测的原理及其应用。

本书可以作为高等院校“检测技术及仪器仪表”和“工业自动化”等专业和电类有关专业的本科生的教材,亦可作为有关工程技术人员的参考书。

本书由华北电力大学的常太华、苏杰、田亮编著,最终由常太华教授整理定稿。书中的部分内容参考了其他兄弟院校所编的有关教材,在此致以谢意。博士生导师徐大平教授对全书进行了仔细的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此也表示深深的谢意。

由于编者水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 激光检测技术

第一节 激光的形成原理	1	第六节 激光准直测量技术	26
第二节 激光的特性与用途	4	第七节 激光载波测温技术	31
第三节 激光器	6	第八节 激光干涉法测量位移、压力、振动	35
第四节 激光多普勒测速技术	11	第九节 激光测距技术	38
第五节 激光全息干涉测量技术	20	第十节 激光视觉三维测量技术	41

第二章 光纤检测技术

第一节 光纤检测的基本知识	46	第五节 光纤位移及压力测量	75
第二节 光纤传感器及其分类特点	53	第六节 光纤电压电流测量	83
第三节 光纤在温度检测中的应用	58	第七节 光纤检测技术在其他方面的	
第四节 光纤流速及流量测量	70	应用	88

第三章 超声波检测技术

第一节 超声波检测的基本知识	95	第五节 超声波物位计	113
第二节 超声波换能器	100	第六节 超声波流量计	122
第三节 超声波换能器的接口电路	105	第七节 超声波测厚仪	129
第四节 超声无损检测	107	第八节 超声波在其他测量方面的应用	131

第四章 微波检测技术

第一节 微波检测的基础知识	137	第五节 微波物位计	149
第二节 微波测温技术	140	第六节 微波无损检测技术	153
第三节 微波多普勒测速技术	145	第七节 微波在其他测量方面的应用	155
第四节 微波测量厚度	147		

目 录

第五章 红外辐射检测技术

第一节 红外辐射的基本知识	159	第五节 红外无损检测	195
第二节 红外辐射源和红外探测器	161	第六节 红外水分仪	200
第三节 红外温度检测	171	第七节 红外辐射检测在其他方面	
第四节 红外气体分析	192	的应用	202

第六章 核辐射检测技术

第一节 核辐射检测的基本原理	205	第四节 核辐射式物位计	220
第二节 放射源和核辐射探测器	209	第五节 核辐射在其他检测方面的应用	223
第三节 透射式 γ 射线测厚仪	216	第六节 射线的防护	228

1960年红宝石激光器的问世,开创了激光技术的先河。激光因其具有高亮度和良好的方向性、单色性、相干性,在工农业生产、国防、通信及科学实验等领域得到了广泛的应用。

第一节 激光的形成原理

一、光和物质的相互作用

原子由原子核和核外电子组成,核外电子在特定的轨道上围绕原子核做高速旋转运动。在不同轨道上运动的电子具有不同的能量,当电子从一个轨道跃迁到另一个轨道时电子的能量会发生变化,这种能量的变化反映到整个原子上就是整个原子能量的变化。通常我们在讨论电子在原子中的运动时不说电子的能量,而是说原子的能量。

原子能量的大小是用能级图表示的,典型的能级图如图1-1所示。根据量子理论,原子中的电子都是处在一些不连续的能级上的,原子能量的这种不连续性反映到图上就是系列离散的横线条。图中的每一条横线代表原子可能具有的能量,横线之间的能量值是原子不可能具有的能量。图中, E_0 代表的最低能级,称之为基态能级,其余能级称之为激发能级。在正常状态下,原子中绝大多数的电子处于靠近原子核的基态能级上,处于基态的原子在不受外界激发的情况下

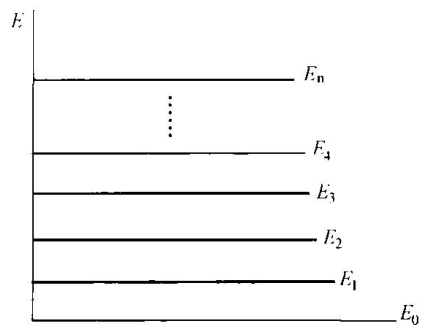


图 1-1 原子能级图

是比较稳定的;同时也有极少数原子处于激发能级上,激发能级越高,在该能级上的原子数量就越少。但是,当原子受到光的照射或高能粒子的碰撞等外界因素的激发时,电子吸收了一定的能量而从低能级跃迁到高能级,从而使原子处于激发态,原子的这种能态变化过程称为激发。在不受任何外界影响的情况下,原子在某个激发态上的平均停留时间叫做该激发态的寿命。如果原子的某些激发态与比它低的能级之间没有或只有很弱的辐射跃迁,从而使其平均寿命高几个数量级,那么这种激发态就称为亚稳态。亚稳态的存在,为激光的产生提供了条件。

从上面介绍的原子能级分布可以看出,实际原子的能级是很多的,为了讨论问题的方便,下面只用两个能级来分析问题,其中 E_1 代表基态能级, E_2 代表第一激发能级。

光和物质的相互作用有三种不同的基本过程:自发辐射、受激吸收和受激辐射。

1. 自发辐射

处于激发态的原子是不稳定的。即使没有任何外界影响,原子中处于高能级 E_2 的电子在经过一段时间以后,也会自发地跃迁到较低能级 E_1 ,同时发射一个频率为 f 、能量为

$hf = E_2 - E_1$ 的光子。大量处于高能级的原子,各自独立地发射一系列频率相同的光波,各光波之间没有固定的相位关系、偏振方向与传播方向。原子的这种发光过程,称为“自发辐射”,其过程如图 1-2 所示。普通光源(白炽灯、日

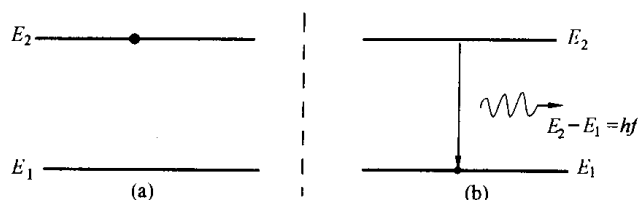


图 1-2 自发发射过程

光灯等)的发光主要是靠自发辐射。

2. 受激吸收

处于低能级 E_1 的原子受到能量为 $hf = E_2 - E_1$ 的光子作用时,光子的能量被原子所吸收,原子的能量增加了,由低能级 E_1 跃迁到高能级 E_2 。

3. 受激辐射

处于高能级 E_2 的原子,受能量为 $hf = E_2 - E_1$ 的外来光子诱发而跃迁到低能级 E_1 ,并发射一个与外来光子一样的光子。受激辐射的光与入射光具有相同的频率、相位、偏振方向和传播方向,这样的一束光子叫做激光。其过程如图 1-3 所示。

需要指出的是,受激辐射和自发辐射是两个本质不同的过程。自发辐射是原子不受外界辐射场控制的自发过程,其向外界发射

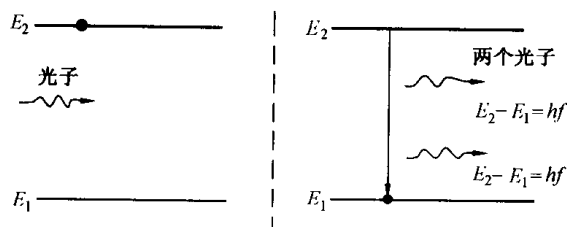


图 1-3 受激辐射过程

的光子的方向、相位是任意的,无规则的。受激辐射是在外界辐射场控制下的发光过程,其发射光子的方向、相位、频率等均与入射光子相同,即经过这一过程后光被放大了。激光就是由受激辐射产生的相干光。

二、粒子数反转分布及泵浦过程

并非任何受激辐射都能产生激光。理论分析表明,在正常条件下,处于低能级的原子总是多于处于高能级的原子。在热平衡条件下,原子在能级图上是按玻耳兹曼法则分布的,即

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} \quad (1-1)$$

式中 k ——玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$;

T ——热力学温度, K;



N_1 ——低能级上的粒子数;

N_2 ——高能级上的粒子数。

当 $T > 0$, $E_2 > E_1$ 时, 总有 $N_1 > N_2$, 即处于高能级的粒子数总要小于处于低能级的粒子数。因此, 在普通光源的发光过程中, 尽管也存在着少量的受激辐射, 但绝不可能由此产生激光。

要想得到大量的受激辐射光, 就必须首先造成一种反常的分布状态, 使物质中处于高能级的粒子数超过处于低能级的粒子数。物质的这种反常分布状态叫做粒子数反转分布, 粒子的反转分布是产生激光的必要条件。能够形成粒子数反转分布的工作物质称为增益介质。由式 (1-1) 可知, 若要使 $N_2 > N_1$, 只有在负温度状态下 (0K 以下) 才能实现, 这是不可能的。要实现粒子数反转分布, 就必须借助外界能量, 使增益介质内大量处于低能级的原子跃迁到相应的高能级上去。为此, 在增益介质的能级结构中, 应该有一个能够积累大量高能级原子的亚稳态, 同时, 还要采用强有力的激励手段, 把原子送上高能级。把粒子从基态激发到高能级, 使在某两个能级之间实现粒子数反转的过程称为泵浦。

实现泵浦的方法有很多, 通常采用以下几种:

(1) 光泵浦。外来光照射介质, 处于基态 E_1 的粒子吸收外来光子而跃迁到高能级 E_2 , 结果在 E_1 和 E_2 两能级之间实现粒子数反转。固体激光器, 如红宝石激光器, 常采用光泵浦方法。

(2) 电泵浦。利用气体放电实现泵浦过程 (气体激光器), 如 He-Ne 激光器。

(3) 化学反应。利用化学反应释放能量实现泵浦过程 (化学激光器)。

三、谐振腔的共振作用与激光的形成

形成了粒子数反转分布的增益介质, 由于受激辐射形成“光放大”, 从而产生大量特征相同的光子。一般情况下外来光子的传播方向是不同的, 受激辐射产生的光子也是射向各个方向的, 其中的大多数射向工作物质之外而消失, 而对于我们关心的沿轴向传播的光子, 虽然其数量较原先沿轴向传播光子的数量有显著增多, 但由于沿轴向传播的外来光子的数量有限, 因此产生的轴向传播的光子数量往往还不能满足需要。为了获得足够多的光子, 通常, 在增益介质的两端安装两块相互平行的反射镜, 一块为全反射镜 (反射率近似为 1), 另一块为部分反射镜 (反射率必须大于某一值), 构成一个光学共振腔 (又称谐振腔)。反射镜可以是平面镜或球面镜。但是, 安装时必须保证反射镜的中心与增益介质的轴线相吻合。在谐振腔中, 沿增益介质轴线方向运动的光子, 遇到全反射镜后, 几乎全部被反射回增益介质, 一小部分透过部分反射镜输出。光子在两反射镜间往返运行的过程中, 不断地碰撞处于激发态的原子, 如同提供了“正反馈”作用, 以致形成雪崩式的放大。如果光子在增益介质中来回反射一次所产生的增益大于在这个来回中的种种损耗, 那么经过多次来回反射, 增益介质因粒子数反转分布而积累起来的能量就变成了强度极高的激光, 沿轴向透过部分反射镜而输出。另外, 谐振腔对光的模式有选择作用, 即对光的频率、相位、偏振及传播方向有严格的选择。



由上面的介绍可知,要形成激光,首先必须利用激励能源,即泵浦激活介质内部的一种粒子,使其在某些能级间实现粒子数反转分布。同时,还必须有使光产生放大作用的增益介质和使光产生共振作用的谐振腔。泵浦、增益介质和谐振腔是激光产生的三要素。同时光在谐振腔内来回一次所获得的增益必须等于或大于它所遭受的各种损耗之和。这些损耗主要指腔内的光学元件的吸收损耗、散射损耗、衍射损耗以及因工作物质不均匀和吸收所引起的损耗。

第二节 激光的特性与用途

与普通光源发出的光相比,激光既具有普通光的特征(如反射、折射、干涉、衍射、偏振等),又具有高方向性、高亮度、高单色性和高相干性的特点。

一、激光的方向性

光源发出光束的方向性通常用发散角来描述。发散角是指光源发光面所发出的光线中两光线之间的最大夹角,一般用 2θ 表示,单位为 rad。日光灯发出光线的最大夹角为 180° ,所以日光灯的发散角 $2\theta = 180^\circ$ 。激光器的发光面仅仅是一个端面上的一个圆光斑,发出光束的发散角 2θ 可小于 10^{-3} rad,因此,激光的方向性很好,几乎是一束平行光。

不同类型激光器所发激光的方向性差别很大,这与增益介质的类型及均匀性、谐振腔的类型及腔长、激励方式和激光器的工作状态有关。气体激光器的增益介质有良好的均匀性,且腔长大,方向性最好,其发散角 $2\theta = 10^{-3} \sim 10^{-6}$ rad,接近衍射极限,是普通光源中方向性很好的弧光的 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 倍,是当前最好的探照灯系统的 $1/1000$ 。固体激光器的方向性较差,一般为 10^{-2} rad 量级。半导体激光器的方向性最差,一般在 $(5 \sim 10) \times 10^{-2}$ rad,且两个方向的发散角不一样。

由于具有良好的方向性,激光可作为准直技术的理想光源,在安装和测量过程中提供理想的基准直线。根据这一原理制成的激光准直仪,可用于机床导轨的平直度测量,并可用于同心度测量和多自由度的准直等。如在电厂汽轮发电机组的安装中,转子轴的对中心可使用这种方法。

二、激光的高亮度

亮度是单位面积的光源在单位时间内向着其法线方向上的单位立体角范围内辐射的光功率,可表示为

$$B = \frac{\Delta E}{\Delta S \Delta \Omega \Delta t} \quad (1-2)$$

式中 B ——亮度;

ΔE ——光源辐射的能量;

ΔS ——光源的面积;

$\Delta \Omega$ ——光源发光立体角;

Δt ——光源发光时间。

由上式可见,光源发光立体角 $\Delta\Omega$ 越小,发光时间 Δt 越短,亮度越高。

由于激光束的发散角小,光能在空间高度集中,从而提高了亮度。一台较高水平的红宝石激光器的亮度,比普通光源中以高亮度著称的高压脉冲氙灯的亮度高 37 亿倍。把这种高亮度的激光束会聚后能产生几百万度的高温。

在工业生产中,可利用激光能量高度集中的特性,进行精密焊接、打孔及切割。例如用激光焊接处在真空中的热电偶,可保证热电偶丝材料不被杂质污染,用激光把热电偶材料焊接在金属表面,可以测量金属表面的温度。此外,还可利用激光在瞬间能产生很高温度的特性,使物质气化,再利用光谱分析方法来分析该物质的成分。

三、激光的单色性

光的颜色不同,是因为它们的波长(或频率)不同。单色光即所谓波长(或频率)单一的光。实际上的单色光的波长也并非单一的,而具有一定的波长范围,这个波长范围称做单色光的谱线宽度。谱线宽度是衡量光源单色性好坏的标志。

由于激光本身是一种受激辐射,再加上谐振腔的选模作用,所以激光发出的是单一频率的光。但是,由于激发态总有一定的能级宽度,并且温度、振动、泵浦电源的波动等因素会造成谐振腔腔长的变化和谱线频率改变,故激光也有一定的谱线宽度。

一般来说,谱线宽度越窄,单色性就越好。在普通光源中,单色性最好的光是由同位素 86 氪灯(^{86}Kr)发出的波长 $\lambda = 0.6057\mu\text{m}$ 的光,其谱线宽度和波长的比值 $\Delta\lambda/\lambda \approx 7.76 \times 10^{-7}$ 。一台普通的单模稳频氦氖激光器,其发出的波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 的光时,谱线宽度与波长的比值可达 $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-11}$ 。可见,激光的单色性是非常高的。

激光的单色性好的特性有很高的实用价值。在精密的长度计量中,光源的单色性越好,最大可测距离就越长。如 ^{86}Kr 光源,最长可测距离是 38.5cm,而用氦氖激光器可测数十千米之长。激光因其良好的单色性,而在小孔、细丝、狭缝等小尺寸的衍射测量中得到了广泛的应用。

四、激光的相干性

两束光交迭时,产生明暗相同的条纹(单色光)或彩色条纹(自然光)的现象称为光的干涉。能产生干涉现象的两束光称为相干光。只有频率和振动方向相同,相位相等或周相位差恒定的两束光才具有相干性。

普通光源主要依靠自发辐射发光,各发光中心彼此独立。因此,一束普通光是由频率、振动方向、相位各不相同的光波组成的,这样两束光交迭时,当然不会产生干涉现象。

激光是由受激辐射产生的,各发光中心是相互关联的,能在较长时间内形成稳定的相位差,振幅也是恒定的,所以具有良好的相干性。

为度量相干性引入了时间相干性与空间相干性的概念。时间相干性是指光源在不同时刻发出的光束间的相干性。激光由于单色性好,因而具有良好的时间相干性。空间相干性是指光源的不同部分发出的光波间的相干性。满足设计要求的激光器发出的激光,可以有

几乎无限的空间相干性。

激光的相干性好的特性有极重要的用途，例如全息摄影就是利用了激光相干性好的这一特性。

第三节 激光器

一、激光器的分类及特点

产生激光的器件称为激光器。到目前为止，激光器的品种已达数百种，激光波长也已包括了可见光、近红外、红外、直至远红外的整个光谱波段范围。根据激光器的工作物质可以把激光器分为以下几类：

(1) 固体激光器。用晶体或玻璃制成的激光器叫做固体激光器。在这一类器件中，所采用的晶体或玻璃材料中都必须掺有少量的稀土元素或其他元素，它们能把强的闪光灯或稳定的白炽灯所发出的一部分光转变为激光，故称为光泵器件。属于此类的激光器有红宝石、钕玻璃、掺钕钇铝（石榴石 YAG）激光器等，其特点是功率大，可用于产品零件的加工等领域。

(2) 气体激光器。气体激光器利用气体的原子、分子、离子或金属蒸气作为产生激光的物质，通过气体放电，电子与原子之间碰撞而产生激光。其特点是种类多，波长分布区域宽，应用广，频率稳定性好。气体激光器是很好的相干光源，可实现最大功率连续输出，且具有结构简单，造价低，转换效率高等特点。气体激光器可广泛应用在计量及测试领域，其中 He-Ne 激光器的应用最为广泛。

(3) 半导体激光器。半导体激光器利用半导体材料作为产生激光的工作物质，它把电流直接转变成激光。这类激光器具有体积小、重量轻、成本低、能量转换效率高、波长范围广、寿命长等特点，可用于通信光源、测距、激光光盘、唱片、印刷术、办公自动化等方面。

(4) 液体激光器。液体激光器利用某些液体作为产生激光的工作物质，如有机染料激光器，它也是光泵器件。如果采用特种技术，可使染料激光器所发射的激光波长作连续变化。也就是说，它们所发射出来的激光波长可以连续地变化，而前述器件所产生的激光波长是固定不变的。液体激光器可用在光化学、光生物学、激光医学等方面。

(5) 化学激光器。化学激光器有 HF、碘原子激光器等，其特点是可将化学能直接转换为光能，不需外加激光源，输出的波长范围宽（从紫外到红外），可获得高功率、高能量输出，适合于无电源的野外作业。

(6) 其他激光器。有 X 射线、薄膜、光纤激光器等。

二、激光器的结构与工作原理

下面分别以氦氖激光器和砷化镓激光器为例，来说明激光器的结构与工作原理。

1. 氦氖激光器

(1) 结构。氦氖激光器的工作物质是在放电管中按一定比例和压力所充的氦氖混合气



体。氦氖激光器的激励方式有直流放电、交流放电和射频激发,一般多用输出功率较高、工作比较稳定的直流放电方式。除激励电源之外,氦氖激光器通常包括放电管、电极和谐振腔等基本组成部分。根据放电管和组成谐振腔的两块反射镜的连接方式,可将氦氖激光器分为内腔式、半内腔式(半外腔式)和外腔式三种结构。

①内腔式。内腔式结构又称全腔式结构,其放电管和谐振腔固定在一起,如图 1-4 (a) 所示。激光管的放电管通常用玻璃制成,其中心是一细长毛细管 T,它是放电的主要区域,与外壳的玻璃管(放电管) L 同轴,放电管的阳极 A 一般是用钨棒或金属小圆筒(钼或镍筒)制成,阴极 K 为一金属圆筒,一般用“阴极溅射”较小的材料如钼、铝或钽等制成,谐振腔的两个反射镜 M_1 和 M_2 固定在放电管外壳的两个端面上。这两片反射镜,一片是反射率高达 99% 以上的全反射镜,一片是反射率为 98% 左右的部分反射镜。由于氦氖激光器的增益比较小,因此为了降低光能量的损失和便于谐振腔的调整,通常采用半球腔(一个反射镜为平面镜,另一个为球面镜)或共焦腔(两个反射镜都是曲率半径相等且等于腔长的球面镜)。由于反射镜与放电管密封在一起,因此使用时不需要调整谐振腔,只要接通电源,调整到合适的电流,就有激光输出,使用极为方便。内腔式激光器的结构简单,在反射镜和放电管之间没有光学元件(如窗片或透镜),光的损耗小,能获得较大的输出功率。其缺点是腔体因受温度影响易产生变形,导致输出激光频率稳定性和方向稳定性均较差。

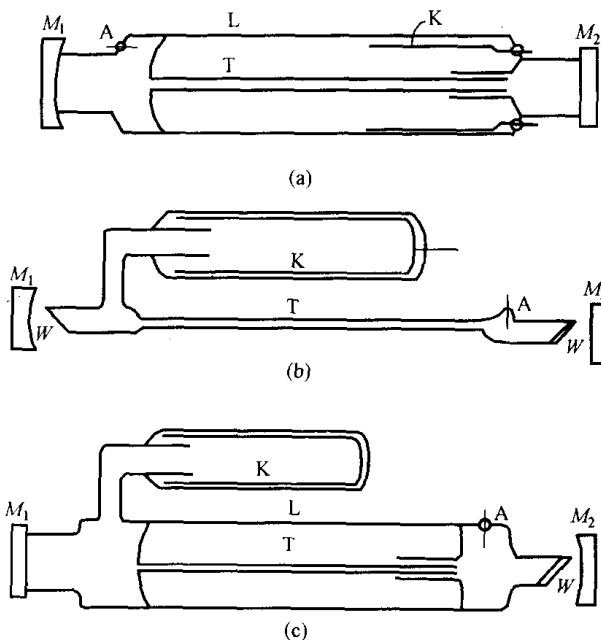


图 1-4 He-Ne 激光管的结构

(a) 内腔式; (b) 外腔式; (c) 半内腔式

与放电管密封在一起,因此使用时不需要调整谐振腔,只要接通电源,调整到合适的电流,就有激光输出,使用极为方便。内腔式激光器的结构简单,在反射镜和放电管之间没有光学元件(如窗片或透镜),光的损耗小,能获得较大的输出功率。其缺点是腔体因受温度影响易产生变形,导致输出激光频率稳定性和方向稳定性均较差。

②外腔式。外腔式结构又称全外腔式结构,即放电管与谐振腔完全分开,如图 1-4 (b) 所示。谐振腔的反射镜上有调整装置可以随时进行调整,以保证反射镜的光轴与放电管轴线重合。放电管的两端按一定角度贴有布儒斯特窗片(一般是熔融石英材料),它既可以封闭放电管,又可以减少光的损失,还可使激光器输出偏振度较好的线偏振光。由于放电管与谐振腔完全分离,所以腔体受温度影响较小,输出很稳定。还可以在谐振腔内插入光学元件,以便于进行激光器性能研究。外腔式激光器的缺点是使用不方便,经常需要调整反射镜,且由于在腔内有窗片存在,因而增加了损耗,使激光器的输出功率有所降低。

③半内腔式。半内腔式结构也可称做半外腔式结构,其谐振腔中的一块反射镜与放电管固定在一起,而另一块反射镜与放电管分开,如图 1-4 (c) 所示。在放电管的一端按内腔式胶合一反射镜,而另一端则按外腔式胶合一块布儒斯特窗片,因而它兼有上述两种结构的优点。由于它有一个布儒斯特窗,输出也是线偏振光,使用时仅需调整一面反射镜,

工作比较方便。

(2) 工作原理。在氦氖激光器中起受激辐射作用而发光的是氖原子，而氦原子只起传递能量的作用。图 1-5 为氦与氖原子的能级简图。如图所示，氖原子具有两个寿命较长的高能级 $2S$ 和 $3S$ ，它们的寿命是 $2P$ 和 $3P$ 能级的 10 倍。当处于 $3S$ 能级的氖原子向 $2P$ 能级跃迁时，即发出波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 的谱线，这就是通常由氦氖激光器发出的那种红色可见光。当氖原子从 $3S$ 能级向 $3P$ 能级跃迁时，则发出 $3.39\mu\text{m}$ 的谱线；此外还有一种波长为 $1.15\mu\text{m}$ 的谱线，对应于 $2S$ 到 $2P$ 之间的跃迁。

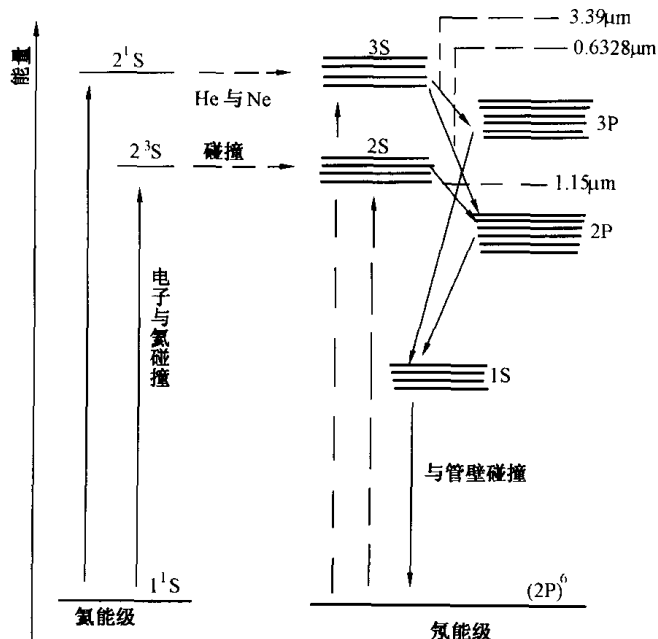


图 1-5 氦氖激光器能级简图

现以氖原子从 $3S$ 到 $2P$ 之间的跃迁过程来说明氦氖激光的形成。如前所述，形成激光的必要前提条件是形成粒子数反转分布。由于 $3S$ 能级的寿命比 $2P$ 能级长得得多，所以处于高能级 $3S$ 上的氖原子不会马上自发地落到 $2P$ 上，而处于能级 $2P$ 上的原子却会立即跃迁到更低的能级 $1S$ 或基态，故 $2P$ 能级基本上总是“空”着的，这样 $3S$ 对 $2P$ 很可能实现粒子数反转分布。但是，由于氖原子的吸收放电能力很小，所以在通常情况下， $3S$ 能级上的氖原子数并不会很多，难以构成对于 $2P$ 能级的粒子数反转分布。

如何把氖原子从基态激发到 $3S$ 态，以实现 $3S$ 对 $2P$ 之间的粒子数反转分布呢？除了气体放电时，电子与氖原子碰撞，直接将部分氖原子激发到 $3S$ 能级之外，起主要作用的还是氦原子。在氦氖激光器的放电管中，氦的充气比例要比氖大（氦与氖的充气气压配比为 7:1）。当激光器通电后，氦氖混合气体在外加电场的高电压作用下产生电离，而加在放电管两端电极上的电压又使自由电子和离子加速。当电子与氦原子碰撞时，便把能量传递给氦原子，从而使大量的氦原子被激发到高能级，并落在寿命较长的亚稳态 2^1S 和 2^3S 上。其中 2^1S 态的能量与氖原子 $3S$ 能级的能量很相近。因而，当处于 2^1S 态上的氦原子与处于基态的氖原子相互碰撞时，氦原子就把能量交给氖原子，使氖原子激发到 $3S$ 态，而自己回到基态。大量的氖原子被激发到 $3S$ 态，即可构成对于 $2P$ 态的粒子数反转分布。

处于粒子数反转分布状态的工作物质，在具备一定特征的光子作用下，可以得到大量特征相同的光子的受激辐射。利用光学谐振腔，使受激辐射光在两块反射镜之间每往返一次都得到一定的放大和加强，最终射出一束极强的激光。

为了形成激光，必须使谐振腔的腔长 L 满足下述关系式：

$$L = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1-3)$$

式中 N ——任意正整数；

λ ——光波的波长。

式 (1-3) 称为谐振条件，它是形成激光所必须满足的条件。由此可以看出，对于一定长度的谐振腔，只有某些特定频率的光波在腔内走一个来回后，其相位的改变量恰好是 2π 的整数倍，也只有这些特定的频率才能满足上述谐振条件并在腔内形成激光。因此，谐振腔具有选频作用。

通常使用的氦氖激光器输出的是波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 的红色激光，而 $3.39\mu\text{m}$ 谱线的总增益高，可不必用振荡即可获得激光输出。为了增加可见红光 $0.6328\mu\text{m}$ 的振荡强度，往往采用抑制 $3.39\mu\text{m}$ 振荡谱线的办法，即在谐振腔内放置适当的棱镜，使得光谱振仅对 $0.6328\mu\text{m}$ 谱线有效，而让 $3.39\mu\text{m}$ 谱线逸出外面。

(3) 输出特性。

①输出波长。氦氖激光器能产生多种波长的激光，其中最主要的有三个波长的激光： $0.6328\mu\text{m}$ 为可见光， $1.15\mu\text{m}$ 和 $3.39\mu\text{m}$ 为不可见的红外光。

②输出激光的单色性和频率稳定性。氦氖激光器输出激光的单色性和频率稳定性较好。其频率宽度和发散角都很窄。一般其频率宽度小于 20Hz ，光束发散角为 $1 \sim 2\text{mrad}$ ，优于固体激光器和半导体激光器。

③输出功率。氦氖激光器输出功率一般在几毫瓦到上百毫瓦，能量转换效率约 0.1% 。虽然它的输出功率较低，但由于输出激光的单色亮度很高，因而在一些实际应用中已能满足需要。

2. 半导体激光器

半导体激光器是指以半导体材料为工作物质的一类激光器。它具有结构简单、体积小、高效率、成本低、调制方便等优点，是光纤通信的重要光源，在激光测距、激光准直、光信息处理、光存储、光计算机以及激光引信等方面获得了广泛应用。

(1) 结构。半导体激光器的基本结构如图 1-6 所示。其主要部分是一只具有光发射二极管作用的 P-N 结，P-N 结的两个端面是经过晶体解理作用做成的非常平行的反射镜面，它们与 P-N 结的平面垂直，形成一个共振腔。P-N 结的两个侧面是粗糙的，不透光。由于激发而产生的光子辐射在这两个反射面之间来回反射，形成振荡，产生正反馈，使光的辐射放大。当这种放大的光辐射超过各种损失的时候，P-N 结中间发光区的发

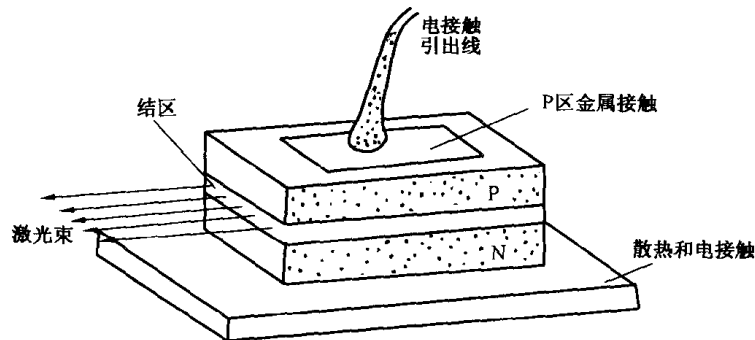


图 1-6 半导体激光器的基本结构

射端就会发出激光。

GaAs 激光器是最早期的、也是应用最广泛的一种半导体激光器。它是在 N 型 GaAs 的衬底上用液相外延法生长 P 型层，或在 P 型衬底上生长 N 型层而制成的。这种激光器的典型尺寸为 $0.1\text{mm} \times 0.15\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ ，体积非常小。其发射波长为 $0.84\mu\text{m}$ ，在低温下连续输出功率可达几瓦以上，总效率为 30%，量子效率可高达 70%，是效率最高的一种激光器。

(2) 工作原理。氦氖激光器的工作原理是通过能级图加以说明的，但对于半导体材料，由于其结构的特殊性，不能采用能级的概念而采用能带的概念来描述半导体材料中粒子的能量大小。半导体的能带分为导带、禁带和价带。禁带为在导带与价带之间的一个能量间隔。在价带中电子都被原子紧紧地束缚着，它们的能量很低。如果由于外界能量（热、光、电）激发，价带中的电子被激发到导带中去，使导带中有电子存在，那么这时半导体材料就具有一定的导电能力。在某一温度下被激发到导带的电子数由禁带宽度决定，禁带宽度较小，被激发到导带中的电子数就较多。当价带中的电子被激发到导带中去后，在价带中便留下一个空穴。空穴是带正电的粒子，也有导电能力。

目前常用的半导体激光器的材料是砷化镓晶体。砷化镓晶体中掺锌，晶体便成为 P 型半导体；砷化镓晶体中掺碲，晶体便成为 N 型半导体。掺杂的结果，N 型半导体可获得大量电子，P 型半导体能获得大量空穴，这时半导体的导电性能大大增强。当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，在结合处形成 PN 结，而且在结的两侧建立了一个相对稳定的空间电荷区，称为势垒区。

半导体激光器中的半导体是高掺杂的半导体，在 P 型区域中空穴很多，在 N 区中电子很多。由于高掺杂，因而空间电荷区的正负电荷也很多，势垒区的坡度很陡，以至于 N 区的导带底 E_c 比 P 区的价带顶 E_v 还低，如图 1-7 (a) 所示。当给 PN 结加上正向偏压后，其能带结构由图 1-7 (b) 所示，势垒缩小，这时大量的电子和空穴向 PN 结区注入，在结区内导带中有大量的电子，价带中有大量的空穴，从而在导带与价带间实现了粒子数的反转分布，这就具备了产生激光的条件。结区内导带中大量电子自发地向价带跃迁，并和价带中的空穴相复合，同时把能量差以光的形式释放出来，形成自发发射过程，它们的方向各不相同，大部分光子一旦穿出结区便消失了。但沿轴线方向的光子在由两磨光面所组成的谐振腔中来回振荡，不断地刺激导带中的电子跃迁到价带中去与空穴复合，从而逐渐地使受激发射过程占主导地位，最后输出激光。应该指出，必须有足够大的正向电流，才能产生激光。当电流较小时，注入结区的电子与空穴数也较少，辐射小于吸收，只能出

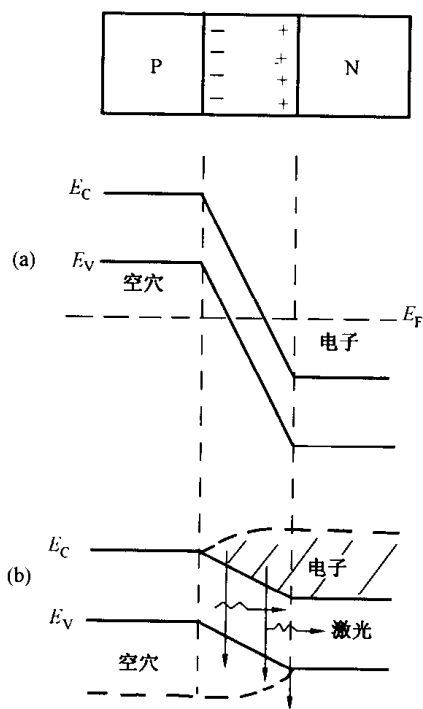


图 1-7 半导体激光器工作原理示意图

(a) 能带构造；(b) 激光产生



现荧光。我们把刚开始产生激光的电流称为激光器的阈值电流。

(3) 基本特性。

①输出光束特性。半导体激光器相当于一个矩形介质波导腔，其输出激光在垂直和平行于 P-N 结平面方向上的发散角是不同的，如东芝公司生产的半导体激光器 TOLD9211，其输出功率为 5mW，波长为 670nm，输出光束在水平方向和垂直方向上的发散角分别为 8° 和 33° 。

一般的 GaAs/GaAlAs 激光器连续输出功率为几十毫瓦，脉冲激光器的峰值功率一般为几瓦至十几瓦。半导体激光器的输出波长范围广，不同的结构可获得不同波长输出，输出波长可从 500nm 到 $30\mu\text{m}$ 。

②调制特性。半导体激光器光频调制的基本原理是利用各种方法引起禁带宽度发生变化，从而实现输出光频率的调谐。常用的光频调谐方法是电流调制。当注入电流大于半导体激光器的阈值电流时，输出激光，且注入电流增加，输出的光功率增大，谱线宽度增宽，相干长度增大，同时会有模跳变现象发生。但注入电流不能无限增加，否则激光器件会迅速老化。一般最高工作电流不应超过阈值的 4 倍。半导体激光器的输出光频特性与注入调制电流频率的大小有关，根据注入调制电流频率的大小，可将半导体激光器的输出光频特性分为线性区和非线性区。

③温度特性。温度对半导体激光器的特性影响很大。一般单纵模半导体激光器发射光频率随温度漂移为 $20 \sim 30\text{GHz}/^\circ\text{C}$ ，在 $-20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内，温度变化系数为 $0.2\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，而在注入电流的调制下输出光频变化为 $5\text{GHz}/\text{mA}$ 。所以温度对半导体激光器的影响要比注入电流的影响大得多。

第四节 激光多普勒测速技术

应用激光测量流体的流速，是 20 世纪 60 年代迅速发展起来的一门新技术，它和传统测速方法相比，具有很多优点，如不干扰流动，具有一切非接触测量的优点，尤其是对小尺寸管道流速的测量、困难环境条件下（低温、低速、高温、高速等）的流速测量更加显示出它的重要价值。此外激光测速还有动态响应快、测量准确、仅对流速敏感而与流体其他参数（温度、压力、密度、成分等）无关的特点。目前，激光多普勒测速技术已广泛地应用到流体力学、空气动力学、燃烧学、生物医学以及工业生产中的速度测量。

一、激光多普勒测速原理

激光多普勒测速技术（LDV 或 LDA）是基于运动物体散射光线的多普勒效应。利用激光多普勒效应测量流体速度的基本原理可以简述如下：当激光照射到跟随流体一起运动的微粒上时，激光被运动着的微粒所散射。和入射光的频率相比较，散射光的频率有正比于流体速度的频率偏移，测量这个频率偏移，就可以测得流体速度。

1. 光学多普勒效应

当光源与光接收器之间存在相对运动时，发射光波与接收光波之间会产生频率偏移，

其大小与光源和光接收器之间相对速度有关, 这种现象就是光学多普勒效应。

首先讨论光源和光接收器沿同一直线方向运动时的多普勒效应。如图 1-8 所示, 光源

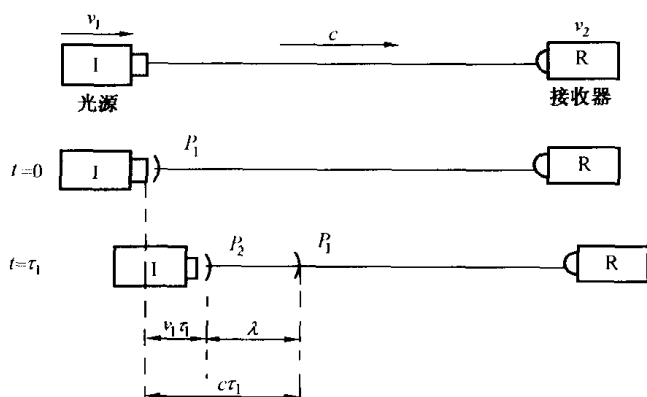


图 1-8 光学多普勒效应

I 和光接收器 R 在同一直线上相向运动。光源 I 的运动速度为 v_1 , 光接收器的运动速度为 v_2 。一束单色平面光波从光源发射出来, 射向光接收器。光源发射出的光波频率为 f_1 , 光波的传播速度为 c 。

如果光源在 $t=0$ 的某一时刻发出第一个波面 P_1 , 那么经历一个周期 $\tau_1 = 1/f_1$ 之后, 光源将发出第二个波面 P_2 。

此时, 波面 P_1 离开起始位置的距离是

$$\lambda = c \cdot \tau_1 - v_1 \cdot \tau_1 = \frac{1}{f_1} (c - v_1) \quad (1-4)$$

光源 I 不断地以频率 f_1 发射出一系列波面。这些波面相对于运动着的光源 I 的速度是 $c - v_1$, 而相对于在同一直线上相向运动的光接收器 R 的速度是 $c - v_2$ 。两个相邻的波面, 例如 P_1 和 P_2 , 先后到达光接收器, 这个时间间隔就是光接收器所接收到的光波的周期 τ_2 。

$$\tau_2 = \frac{\lambda}{c - v_2} \quad (1-5)$$

显然, 接收器所能接收到的光波频率 f_2 应是

$$f_2 = \frac{1}{\tau_2} = \frac{c - v_2}{\lambda} \quad (1-6)$$

将式 (1-4) 代入式 (1-6) 得

$$f_2 = f_1 \left(\frac{c - v_2}{c - v_1} \right) \quad (1-7)$$

光接收器接收到的光波与光源所发出的光波之间的频率偏移 f_D 为

$$f_D = f_2 - f_1 = f_1 \left(\frac{v_1 - v_2}{c - v_1} \right) \quad (1-8)$$

式 (1-7) 和式 (1-8) 表达了在同一直线方向上相向运动的光源和接收器之间的多普勒效应。显然, 接收器所能接收到的光波频率不同于光源所发射出的光波频率, 它的大小取决于接收器与光源各自的运动速度, 而接收器与光源之间的多普勒频移, 则正比于接收器与光源之间的相对速度。

对于光源 I 和光接收器 R 之间任意相对运动 (不论是一维的还是多维的) 的多普勒效应, 上述基本表达式仍然是正确的, 只不过应该用向量形式来表示光源和光接收器的运

动速度, 并且要规定光传播方向上的单位向量。设光源 I 的运动速度为 $\vec{v}_1$, 光接收器 R 的运动速度为 $\vec{v}_2$, 光波在光源到光接收器方向上传播的单位向量为 $\vec{k}_i$, 那么式 (1-7) 可改写成如下的形式:

$$f_2 = f_1 \left(\frac{c - \vec{v}_2 \cdot \vec{k}_i}{c - \vec{v}_1 \cdot \vec{k}_i} \right) \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表达了光源与光接收器之间的任意相对运动下的多普勒效应。

有两种特殊情况对于激光多普勒测速特别重要:

(1) 若光源 I 静止不动, 而光接收器 R 以速度 $\vec{v}$ 运动, 光源与光接收器之间多普勒效应表达式可写为

$$f_2 = f_1 \left(1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}_i}{c} \right) \quad (1-10)$$

(2) 若光源 I 以速度 $\vec{v}$ 运动, 而光接收器静止不动, 光源与光接收器之间多普勒效应表达式可写为

$$f_2 = f_1 \left[\frac{1}{1 - (\vec{v} \cdot \vec{k}_i / c)} \right] \quad (1-11)$$

2. 激光多普勒效应测速原理

将多普勒效应直接应用于流速测量, 无异于要求光源和光接收器二者之一必须随同被测流体一起运动, 这是不现实的。为了利用多普勒效应测量流速, 必须使光源和光接收器都固定, 而在流体中加入随流体一起运动的微粒。由于微粒对入射光的散射作用, 当它接收到频率为 f 的入射光的照射之后, 也会以一定的频率向四周散射。这样随流体一起运动着的微粒既作为入射光的接收器, 接收入射光的照射, 又作为散射光的光源, 向固定的光接收器发射出散射光波。固定的接收器所接收到的微粒散射光频率, 将不同于光源发射出的光频率, 二者之间同样会产生多普勒频移。

图 1-9 是激光多普勒效应测速原理图。图中, I 是固定的激光光源, 它射出的单色平面光波频率为 f_i , 光波波长为 λ_i , 入射光传播方向上的单位向量为 $\vec{k}_i$ 。点 A 代表一个跟随流体一起运动的微粒, 它的运动速度是 $\vec{v}$ 。微粒 A 接收入射光后, 成为散射中心。与光源对应的另一侧安放着一个固定的接收器 R, 它接收运动着的散射中心向它发射的散射光波, 其方向用单位向量 $\vec{k}_r$ 表示。

根据光学多普勒效应, 对固定光源 I 和以速度 $\vec{v}$ 运动的微粒 A (此处 A 相当于入射光的接收器), 微粒 A 所接收到的光波频率 f_a 是

$$f_a = f_i \left(1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}_i}{c} \right) \quad (1-12)$$

对以速度 $\vec{v}$ 运动的微粒 A (此处 A 作为散射中心, 相当于散射光光源) 和固定的接收器 R, 根据多普勒效应, 同样可求得接收器所接收到的

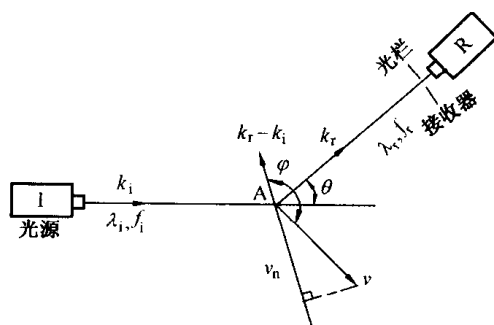


图 1-9 激光多普勒效应测速原理示意图

散射光的频率 f_r 为

$$f_r = f_a \left(\frac{1}{1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}_r}{c}} \right) \quad (1-13)$$

因此, 可得到固定接收器接收到的光频率与固定光源发射出的光频率之间的多普勒频移 f_D 为

$$f_D = f_r - f_i = f_i \left[\frac{\vec{v} \cdot (\vec{k}_r - \vec{k}_i)}{c} \right] \left(1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}_r}{c} \right) \quad (1-14)$$

考虑到 $|v| \ll c$, 上式可简化为

$$f_D = f_i \frac{\vec{v} \cdot (\vec{k}_r - \vec{k}_i)}{c} = \frac{1}{\lambda_i} \cdot \vec{v} \cdot (\vec{k}_r - \vec{k}_i) \quad (1-15)$$

设 $\vec{k}_r$ 与 $\vec{k}_i$ 之间的夹角为 θ , $\vec{v}$ 与 $(\vec{k}_r - \vec{k}_i)$ 之间的夹角为 φ , 则

$$\vec{v} \cdot (\vec{k}_r - \vec{k}_i) = |\vec{v}| \cdot |\vec{k}_r - \vec{k}_i| \cdot \cos \varphi \quad (1-16)$$

根据简单的几何关系, 很容易得到

$$|\vec{k}_r - \vec{k}_i| = 2 \cdot \sin \frac{\theta}{2}$$

所以

$$f_D = \frac{2 \cdot v \cdot \cos \varphi \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda_i} \quad (1-17)$$

式中 v ——速度 $\vec{v}$ 的模。

若设 $v_n = v \cdot \cos \varphi$, 则式 (1-17) 可写为

$$f_D = \frac{2 \cdot v_n \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda_i} \quad (1-18)$$

或者

$$v_n = \frac{\lambda_i}{2 \cdot \sin \frac{\theta}{2}} f_D \quad (1-19)$$

式 (1-19) 就是激光多普勒效应测速原理的基本表达式。只要入射激光波长 λ_i 一定, 入射光方向与微粒到光接收器的散射光方向之间的夹角 θ 一定, 那么, 微粒在 $(\vec{k}_r - \vec{k}_i)$ 方向上速度分量 v_n 就与多普勒频移 f_D 成简单的线性关系, 测量多普勒频移, 可求得流体的速度。

二、激光多普勒测速仪的组成

激光多普勒测速仪由激光器、光学系统、信号处理系统等部分组成。

1. 激光器

由于多普勒频移相对光源波动频率来说变化很小, 因此, 必须用频带窄及能量集中的激光作光源。为便于连续工作, 通常使用气体激光器, 如 He-Ne 激光器或氩离子激光器。

与氩离子激光器相比, He-Ne 激光器功率较小, 输出激光频率稳定, 价格便宜, 适用于流速较低或者被测粒子较大的情况。氩离子激光器功率较大, 信号较强, 适用于要求功率较大的场合。

2. 光学系统

激光多普勒测速仪按光学系统的结构不同, 可分为参考光束系统、单光束系统和双光束系统三种光路。

(1) 参考光束系统。图 1-10 为参考光束系统的光路图。来自同一光源的激光被分束镜分成两束, 其中绝大部分由透镜聚焦到管道中需要测量流速的测点处, 被随流体运动的微粒散射, 其散射光由光电检测器接收, 这束光为信号光。从分束器出来经过衰减器的较弱的那部分光是没有频移的参考光, 它直射光电检测器。在参考光路中一般有可调衰减器, 使参考光和散射光的强度不会相差太大。光电检测器的输出包含了这两种光的频差信号, 且正是多普勒频移 f_D 。测得多普勒频移 f_D , 即可得出流体的速度。

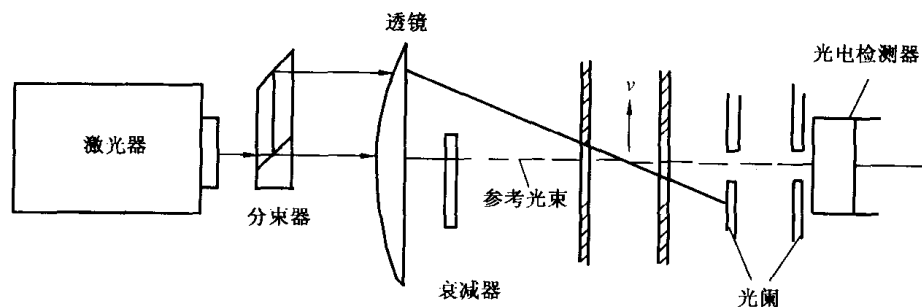


图 1-10 参考光束系统光路

(2) 单光束系统。图 1-11 为单光束系统的光路图。激光器发出的激光照射 P 点处运动着的粒子, 光屏让两束散射光①和②通过, 它们经透镜后成为平行光, 其中一束经全反射镜 A 、半反半透镜 B 与另一束叠加后经光阑而被光电元件接收。光电元件所接收到的是这两束散射光的频差。

由于单光束系统对光能利用率低, 目前已很少使用。

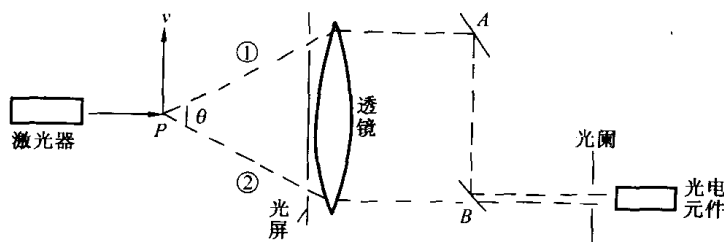


图 1-11 单光束系统光路

(3) 双光束系统。双光束系统的光路, 如图 1-12 所示。激光器发射的激光, 由分光镜 A 及反射镜 B 分为两条相同的光束, 通过透镜聚焦在焦点 P 上, 粒子流经 P 点时, 接收来自两个方向、频率和强度都相同的入射光的照射后, 发出两束具有不同频率的散射光, 在微粒到光接收器的方向上, 两束不同频率的散射光经透镜、光阑会聚到光电元件

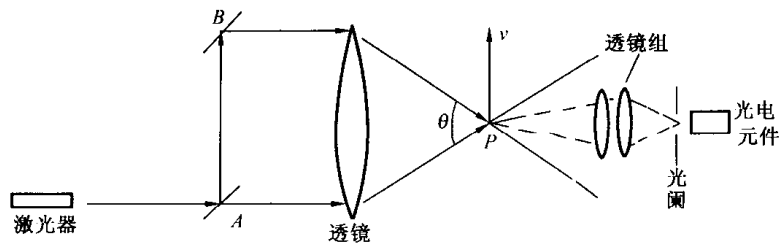


图 1-12 双光束光路系统

上。光电元件接收的是经透镜组收集来的这两束光的散射光叠加后的频率差。此频差信号与流速的关系如式(1-19)所示。

双光束系统只要两束入射光严格平行，通过透镜后入射光就能自动地在焦平面上会聚成一个光斑，而且两束光的散射光在散射时就能互相混合而产生多普勒频差。光电元件稍稍偏离轴线方向，也不会影响对该频差的测量。这种光路还可使用大口径的接收透镜，粒子散射的光能量能极大地得到利用，信噪比高。由于进入光电探测器的散射光来自两束具有同样强度的光线的交点，它对所有尺寸的散射微粒都发生高效率的拍频作用，避免了信号的“脱落”现象。调整时只需根据两束光交点处干涉条纹的清晰度进行调整，使用很方便。这是目前使用最广泛的一种光路。

上述三种光路系统，又都可分为前向散射方式和后向散射方式。入射光路部分和接收光路部分在实验段的两侧，称为前向散射方式；入射光路部分和接收光路部分在实验段的同一侧，称为后向散射方式。目前常采用的是前向散射方式，因为在这种方式中，微粒散射强度较大。但后向散射方式能使仪器设计时结构紧凑，在某些场合下（如测量压气机级间气流速度时），可采用后向散射方式。

3. 光电元件

激光测速仪的光电元件一般采用光电倍增管，它特别适用于微弱信号的测量，图 1-13

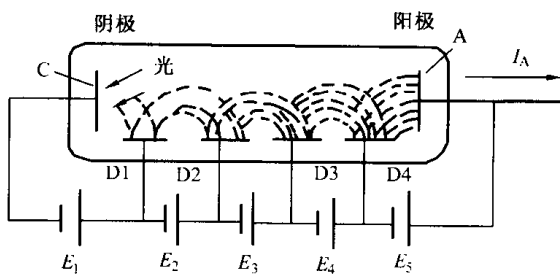


图 1-13 光电倍增管

为它的结构示意图。它由多个阴极（C、D1~D4）组成，各级间加上逐级升高的电压 E ($E_1 < E_2 < E_3 < E_4 < E_5$)。当第一级阴极在光照作用下有少量电子逸出时，这些电子被电场 E_1 加速，打到 D1 阴极上，D1 阴极被打出的电子较多。这些极上电子被电场 E_2 加速打击到 D2 阴极，这样电子数逐级增多，最后聚集到阳极 A 上形成光电流 I_A 。由此可

见，光电倍增管有电流放大作用，其电流增益很大，可达到 $10^5 \sim 10^7$ ，而且时间常数很小，仅有几毫秒。光电倍增管的级数由几级到十几级，能满足不同的需要。

4. 信号处理系统

多普勒信号是一种不连续的变幅调频信号，由于微粒通过测点时体积的随机性、通过时间有限及噪声多等原因，多普勒信号的处理比较困难。信号处理系统的任务是从这些复

杂的信号中提取那些反映流速的真实信息,传统的测频仪很难满足要求。现已有多种多普勒信号处理方法,如频谱分析法、频率跟踪法、频率计数法、滤波器组分析法、光子计数相关法及扫描干涉法等。下面介绍频谱分析法、频率跟踪法及近几年发展较快的频率计数法。

(1) 频谱分析法。频谱分析法是利用频谱分析仪对输入的多普勒信号进行频谱分析,可以在所需要的扫描时间内给出多普勒频率的概率密度分布曲线。求频域中振幅最大的频率作为多普勒频移,从而测得测点处的平均流速,而根据频谱的分散范围,可以粗略求得流速脉动分量的变化范围。由于频谱仪工作需要一定的扫描时间,它不适于实时地测量变化频率较快的瞬时流速,只用来测量定常流动下流场中某点的平均流速。

(2) 频率跟踪法。频率跟踪法就是通过频率反馈回路自动跟踪一个具有频率调制的信号,并把调制信号用模拟信号解调出来。输出的模拟电压与流体速度成正比,能够给出瞬时流速以及流速随时间变化的过程,配合均方根电压表可测湍流速度。输出的频率量可直接用频率计显示平均流速。

图 1-14 是频率跟踪器方框图。前置放大器把微弱的、混有高低频噪声的多普勒频移信号 f_D 滤波放大后,送入混频器,与电压控制振荡器输出的信号 f_{vc0} 进行外差混频,其输出信号是包含差频为 $f_0 = f_{vc0} - f_D$ 的混频信号。混频信号经中频放大器选频、放大,把含有差频 f_0 的信号选出并放大,滤掉高频信号和噪声,经限幅器消除掉多普勒信号中无用的幅度脉动后送到一个灵敏的鉴频器中去。

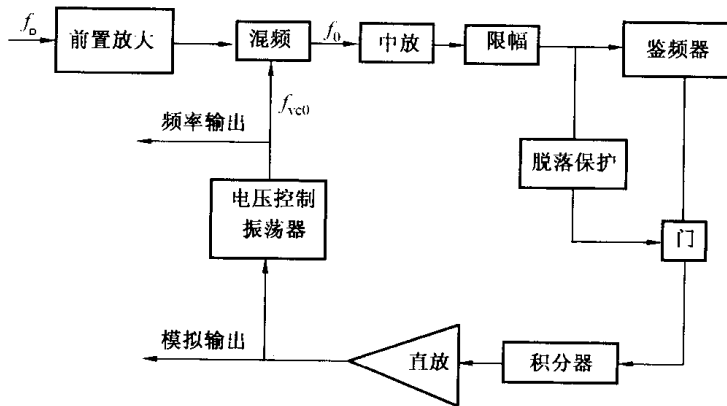


图 1-14 频率跟踪器方框图

鉴频器由中频放大器、限幅器和相位比较器组成。它的作用是将中频频率换成直流电压 U , 其数值正比于中频频偏, 实现频率/电压转换。也就是说, 如果混频器输出的信号频率恰好是 f_0 , 则鉴频器输出电压为零。当多普勒频移信号由于被测流速的变化而有 Δf 的变化时, 混频器输出信号的频率将偏离中频 f_0 , 这个差额被鉴频器检出并转换为直流电压信号 U 。信号 U 经积分器积分并经直流放大器放大后变成电压 V , 它使电压控制振荡器的输出频率相应地变化一个增量 Δf_{vc0} , 以补偿多普勒频移增量, 使混频器输出信号频率重新靠近中频 f_D , 再使系统稳定下来。因此, 电压 V 反映了多普勒频率瞬时变化值, 并作为系统的模拟量输出。系统的输出可以自动地跟踪多普勒频率信号的变化。

由于大多数多普勒信号是随机振幅波，电路中还设有脱落保护电路。所谓“脱落”是指输入信号不足以使电路锁定的时间间隔。电路失锁的原因主要有：微粒浓度太低、跟踪器不能跟上频率的快速变化和信号幅度太小。脱落保护电路作用是防止由于上述原因引起信号中断而产生系统失锁。具体地说，当限幅器输出的中频方波消失，或方波频率超过两倍中频，或频率低于 $2/3$ 倍中频时，都会使脱落保护电路起保护作用，输出一个指令，把积分器锁住，使直流放大器输出电压保持在信号脱落前的电压值上，电压控制振荡器的输出频率也保持在信号脱落前的频率值上。当多普勒频移信号重新落在一定的频带范围内时，脱落保护电路的保护作用解除，仪器又重新投入自动跟踪。

(3) 频率计数法。频率计数法是通过测量规定数目的信号周期所对应的时间来测量信号频率的一种方法，频率计数测频仪是一种计时装置，如图 1-15 所示。当微粒通过干涉区时，散射光强度按正弦规律变化。在这段时间内，光检测器输出的是一列已调幅的正弦波脉冲。如果测量体积内干涉条纹数 n 已知，那么计数一个粒子通过 n 个干涉条纹的时间，可计算出频率，进而求出流速。流速 v 由下式计算：

$$v = \frac{nd}{\Delta t}$$

式中 d ——条纹间隔；

n ——人为设定的穿越条纹数；

Δt ——穿越 n 条条纹所用的时间。

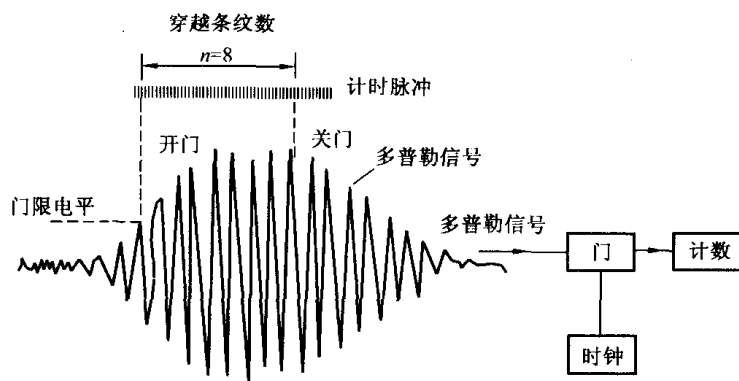


图 1-15 频率计数法信号处理原理图

频率计数信号处理系统的主体部分相当于一个高频的数字频率计，以被测信号来开启或关闭电路，以频率高于被测信号若干倍的振荡器的信号作为时钟脉冲（常用 $200 \sim 500\text{MHz}$ ），用计数电路记录门开启和关闭期间通过的脉冲数，亦即粒子穿过两束光在空间形成的 n 个干涉条纹所需的时间 Δt ，就可计算出被测信号的多普勒频移。

频率计数测频仪测量精度高，且可将信号送入计算机处理，得出平均速度、湍流速度、相关系数等气流参数。同时，由于它是取样和保持型仪器，没有信号脱落，特别适用于低浓度粒子或高速流体的测试。频率计数法几乎包括了所有其他方法所能适用的范围（从极低速到高超音速流体的测量），且不必人工添加散射粒子，是一种极具发展前途的测频方法。丹麦 DISA 公司生产的 55L90 型信号处理器，测频范围为 $1\text{kHz} \sim 100\text{MHz}$ ，可测速

度范围为 $2.0\text{mm/s} \sim 2000\text{m/s}$ ，测量精度在 40MHz 处为 1% ，在 100MHz 处为 2.5% 。

5. 散射粒子

利用激光多普勒效应测量流速，实际上是测量悬浮在流体中跟随流体一起运动的微粒的速度。为了正确地测量，要求流体中的散射粒子有良好的跟随性和较强的散射光的能力，这与微粒的形状、尺寸、浓度等因素有关。

在某些流体介质中，本来就有足够多的散射微粒，可以直接利用。如自来水或一般流体，它本身已含有足够使光散射的微粒，但在测纯净的气体或特殊流体时，被测介质所含微粒的量可能不够多，这时需要掺入粒子。加入的粒子要求呈现与被测流体相同的运动状态，并希望它们的密度相近，粒子的直径要小，且呈球形。在光学上，粒子要能散射足够的光，其直径以 $0.3 \sim 1.0\mu\text{m}$ 为好，同时不能污染被测介质，弄脏观察窗。

测点中微粒的浓度多大是合适的，目前尚无定论。微粒数量过多，测点体积内各个微粒之间速度差和相位差将会引起频带变宽，测量精度下降。微粒数量太小，会使频率跟踪器脱落保护时间延长，系统工作的稳定性降低。最理想的微粒数量应该是使测点体积内始终保持一个粒子，有的资料推荐，粒子浓度以 $10^5 \sim 10^7$ 个/ cm^3 为宜。

三、激光多普勒测速技术的应用

激光多普勒技术是研究流体力学的强有力手段，它具有非接触测量、不干扰测量对象、测量装置可远离被测物体、空间分辨力高等优点，可用于测量某些不适于或不可能用其他方法来测量的流体速度或湍流。下面举两个应用的例子。

1. 管道内水流的测量

用激光多普勒测速技术可以测量圆管或矩形管内的水流速度分布。图 1-16 为一台普通的差动多普勒装置。当将 LDA 的光学装置装在精密多维移动测试台上时，可以精密移动测量体的 X 、 Y 方向上的位置，绘制沿横截面上的运动流体速度剖面 and 湍流强度分布。如果能够提供适宜的窗口，就可以在实际工作系统上进行测量，或在专门设计制造的比例模型上进行测量。进行 LDA 测试用的窗口一般用标准平板玻璃或有机玻璃。最好是在相对方向开两个窗，使光线能够直线穿过。这时就可采用前向散射，以提高信号质量。

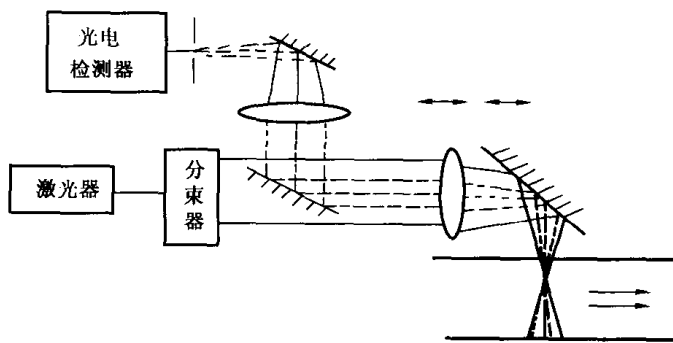


图 1-16 测量速度分布的 LDA 装置

2. 燃烧过程的研究

燃烧过程的环境是很恶劣的，温度很高，不宜插入探头。对燃烧进行测量，是 LDA 具有的独特功能。LDA 是研究火焰中速度分布的惟一实用技术。从预混的层流本生火焰到带有湍流环流区的工业燃烧，已经用这种技术进行了大量的研究。对燃烧进行测量的 LDA 装置如图 1-17 所示。虽然在燃烧过程中可以产生散射微粒，但一般仍需要在空气进口处

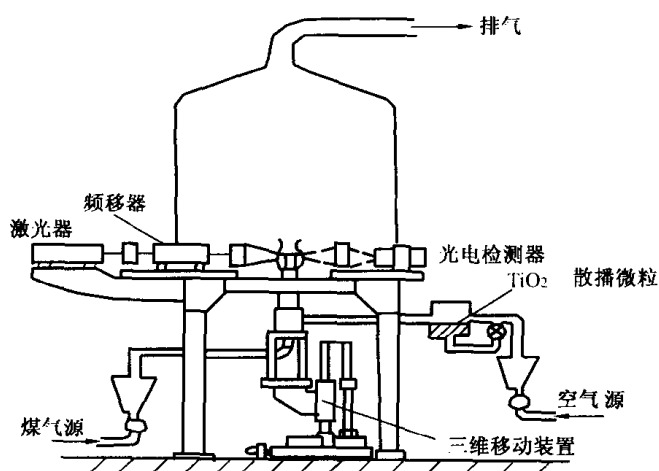


图 1-17 研究工业燃烧过程的 LDA 装置

添加难熔材料的微粒，例如二氧化钛微粒。由图可以看出，LDA 装置有一个三维移动装置，被测的燃烧器装在移动装置上，光学装置是固定不动的。当用移动装置移动燃烧火焰相对于测量体的位置时，可测量火焰不同位置的速度分布。

燃烧时产生的光对测量影响不大，因为它比激光弱，并且当在光电检测器前加一块窄带滤光片时可减弱对激光波长以外光的敏感性。

虽然，多普勒频移与速度的关系和温度无关，但温度梯度对折射率的影响可使光束偏移，导致光束不重合或不相交。实际上由于高温只在靠近测量点的一个较小范围内，故不存在什么问题。

第五节 激光全息干涉测量技术

激光全息技术是现代发展起来的非接触式测量新技术，它在热工参数场（如流速场、温度场和浓度场等）的测量中有着非常重要而广阔的应用前景。随着计算机技术的高速发展，激光全息技术的后处理更加快速、准确与方便，因而也更多的应用在工程测量中。

一、全息技术的基本原理

根据物理中的光学原理，利用光波的干涉现象可以在照相底片上同时记录下被测物体反射或透射光波的振幅和相位，也就是说，可以将物光的全部信息都记录下来，这种技术即全息摄影技术。全息技术分两步成像，即全息图的记录和物光波的再现。

1. 全息图的记录

如图 1-18 所示，激光光源 1 发出单色平行光，经分光镜 2 分成相等的两束光。其中一束经反射镜 3、扩束镜 4、准直镜 5 作为物光透过被测物体 6 而达到全息底片 7。另一束经反射镜 8、扩束镜 9、准直镜 10 作为参考光抵达全息底片 7。两束相干光在全息底片 7 上产生干涉，形成干涉图样，于是记录下物光相对参考光在底片处振幅和相位的变化。下面给出全息底片上光强的分布规律。

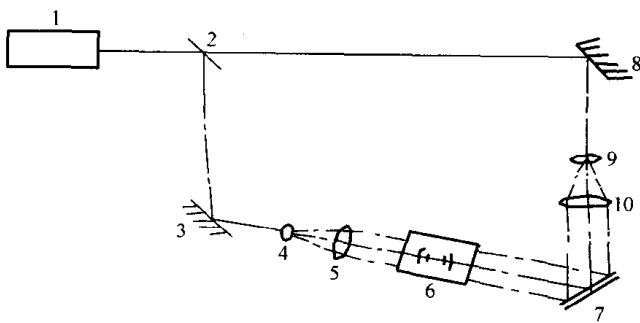


图 1-18 全息图像的拍摄过程原理图

设物光的复振幅为

$$A_0 = a_0 e^{j\varphi_0}$$

参考光的复振幅为

$$A_r = a_r e^{j\varphi_r} \quad (1-20)$$

式中 a_0 、 a_r ——物光和参考光波的最大振幅；

φ_0 、 φ_r ——物光和参考光波的相位。

两列光在感光底片上的光强分布为

$$\begin{aligned} I &= (A_0 + A_r) \cdot (A_0 + A_r)^* \\ &= (A_0 + A_r) \cdot (A_0^* + A_r^*) \\ &= A_0 \cdot A_0^* + A_r \cdot A_r^* + A_0 \cdot A_r^* + A_r \cdot A_0^* \\ &= a_0^2 + a_r^2 + a_0 a_r \exp[j(\varphi_0 - \varphi_r)] + a_0 a_r \exp[-j(\varphi_0 - \varphi_r)] \\ &= a_0^2 + a_r^2 + 2a_0 a_r \cos(\varphi_0 - \varphi_r) \end{aligned} \quad (1-21)$$

式中 A_r^* 、 A_0^* 、 $(A_0 + A_r)^*$ —— A_r 、 A_0 、 $(A_0 + A_r)$ 的共轭。

由式 (1-21) 可见感光底片上的光强分布由两部分组成：一部分为振幅项 ($a_0^2 + a_r^2$)，是一个常量；另一部分为相位项 $2a_0 a_r \cos(\varphi_0 - \varphi_r)$ ，是一个周期性变化量，该变量决定了底片上明暗相间变化的干涉条纹，这些条纹就是被测对象的稳态或拍摄瞬态时的参数信息。

2. 物像再现过程

将拍摄的全息底片经显影和定影处理后，可以观察到干涉图样是一种条纹极细、间距不等、弯曲畸变的光栅条纹。把全息底片复位到原拍摄时的架上，用原参考光作为再现光照射底片，底片上的条纹相当于一块透过率不均匀的障碍物，再现光经过时发生衍射，在全息底片的背面会出现原物体的空间像，如图 1-19 所示（图中部件同图 1-18）。当入射光照射全息底片时，会有一部分的光透过底片进行衍射，定义此时透射光波的复振幅与入射光波的复振幅之比为全息底片的振幅透射率，记为 T 。由于物像再现过程是采用参考光作为再现光的，所以这种情况下的 T 为

$$T = A_r / A_r \quad (1-22)$$

式中 A_r ——作为再现光的参考光透射过底片的透射光的复振幅。

由于在一定的曝光范围内可以假定振幅透射率与全息底片上条纹的光强分布成正比，即

$$T = \beta I \quad (1-23)$$

式中 β ——比例常数。

所以有

$$\begin{aligned} A_r &= \beta \cdot A_r \cdot I \\ &= \beta \cdot A_r (A_0 \cdot A_0^* + A_r \cdot A_r^* + A_0 \cdot A_r^* + A_r \cdot A_0^*) \\ &= \beta [(A_0 \cdot A_0^* + A_r \cdot A_r^*) A_r + (A_r \cdot A_r^*) A_0 + A_r^2 \cdot A_0^*] \\ &= \beta [(a_0^2 + a_r^2) \cdot a_r \cdot e^{j\varphi_r} + a_r^2 \cdot a_0 \cdot e^{j\varphi_0} + a_r^2 e^{2j\varphi_r} \cdot a_0 e^{-j\varphi_0}] \end{aligned} \quad (1-24)$$

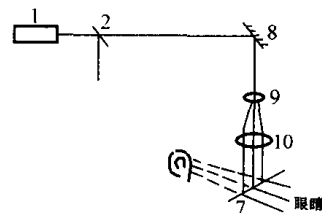


图 1-19 全息图像的再现过程

由上式可见,如果参考光是均匀的, a_r^2 在整个全息图上近似常数。右边第一项就是入射光照射底片时沿入射光方向透射的光波,方向不变,称为零级光波。第二项表示的是沿原来物光方向传播,具有原物光性质的衍射光。如果迎着这个光波观察就会看到原物体位置有一个物像,这就是原物体的再现,这个光波叫+1级衍射光波,是一发散波,形成的是虚像。第三项也含有物光光波的振幅和相位信息,但它与物光的前进方向不同,与原物光在相位上是共轭的,它是会聚波,形成物体的实像,这个光波叫-1级衍射光波。

二、全息干涉测量技术

全息干涉测量技术是把普通的干涉测量同全息技术结合起来,是全息技术应用于实际的最主要的技术之一。利用全息干涉测量技术,能够对具有任意形状和粗糙表面的三维表面进行测量,且可以对一个物体在两个不同时刻的状态进行对比,因而可以探测物体在一段时间内发生的任何改变。全息干涉测量技术中常用的方法有实时法、二次曝光法和时间平均法。这里介绍二次曝光法。

二次曝光法全息图的制作分两步完成。第一步是用相干光照射物体,物体散射出来的光波投射到全息干板上,同时用同一光源发出的另一部分相干光波作参考光也照射到全息干板上,于是在干板上形成两束光的干涉。在感光乳胶的作用下,干涉条纹被记录下来。第二步将拍摄了第一次未变形物体的全息底片不立刻进行处理,仍放在原来的位置不动,让加载系统对物体加载使物体变形,当物体变形到所要观察的状态时,再在同一张全息干板上对变形后的物体进行第二次曝光记录,这时将干板进行处理。这样全息干板上就记录了物体在两个状态时的全息图。当用和记录时参考光束入射方向相同的照明光波照明二次曝光全息图后,再现的原物体光波和变形后的物体光波发生干涉,在再现像上会看到由变形或位移引起的干涉条纹。

由于二次曝光法的干涉条纹是两个再现光波之间的干涉,因而可以获得物体两个状态变化的永久记录。但是这种方法在使用时,由于两次曝光光波频率的变化会对干涉条纹产生影响,为保证测量的准确性,要严格控制激光器输出光波频率的稳定性。

二次曝光法可用于研究许多材料的性能参数,如检查材料内部缺陷,或在两个不同时刻材料或物体的变形量等。若采用脉冲激光,二次曝光法就可以应用于瞬态现象的研究,可以计量到 $1/10$ 波长的微小变化。

三、全息干涉测量技术的应用

1. 用双激光全息干涉仪同时测量温度场和浓度场

在传热实验中,经常要遇到热质交换同时存在的情况,这时常常需要同时测量温度场和浓度场,而采用双激光全息干涉仪就可以解决这个问题。

双激光全息干涉仪的光路系统如图1-20所示。两激光光源通常采用功率5mW左右、波长为632.8nm(红光)的He-Ne激光器和功率为50mW左右、波长为457.9nm(蓝光)的氩离子激光器。两束光(红光和蓝光)分别经反射镜 S_3 和 S_1 反射后都经快门 V ,再分别由反射镜 S_4 和 S_2 反射即进入分光镜 S_T 进行分光。然后,两束混合光分别进入扩束器。

扩束器由直径为 $\phi 30$ 的显微镜物镜和 $10\mu\text{m}$ 的针孔光阑以及直径为 $\phi 60$ 的准直透镜（焦距 400mm ）所组成。出扩束器后的光束直径达 60mm 。对物光光束的单色性要求高，所以在进入扩束器之前需先经过滤光镜 F 滤光，光束出扩束器后经反射镜 S_5 进入测试段，最后抵达全息底片。参考光则经反光镜 S_7 反射后也射入底片。

假定测试段仅存在二维浓度场，采用两次曝光法来拍摄全息底片。若第一次曝光是在测试段内仅充满单一均匀气体 a ，其状态参数温度和压力与第二次曝光时的相同，密度为 ρ_0 ，折射率为 n_0 ，根据格拉德斯通—戴尔公式，均匀介质的折射率和密度的关系为

$$n_0 - 1 = k_a \cdot \rho_0 \quad (1-25)$$

式中 k_a ——格拉德斯通—戴尔常数。

第二次曝光是在测试段内充满要测的混合气体，浓度场的分布仍然是二维的。假定此时混合气体由 a 和 b 两种气体组成，其各点的质量密度分别为 $\rho_a(x, y)$ 和 $\rho_b(x, y)$ 。混合气体相应点的质量密度为 $\rho(x, y)$ ，折射率分布为 $n_c(x, y)$ 。于是处处有下式成立

$$\rho = \rho_a + \rho_b \quad (1-26)$$

根据光的波动学原理，可以列出光波振动的一般方程式

$$A = a_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_0 \right] \quad (1-27)$$

式中 ω ——光波的角频率；

z ——光波传播距离；

c ——光在介质中的传播速度；

a_0 ——光波振幅；

φ_0 ——光波初相位；

t ——光波传播时间。

显然，光波在传播光路上任何坐标位置 z 与原点的相位差为

$$\Delta = \frac{\omega \cdot z}{c} = \frac{\omega \cdot z \cdot n}{c_0} \quad (1-28)$$

物理学中将折射率 n 与传播距离 z 的乘积定义为光传播的光程，光在不均匀介质中传播时的光程为

$$\overline{PL} = \int n \cdot dz \quad (1-29)$$

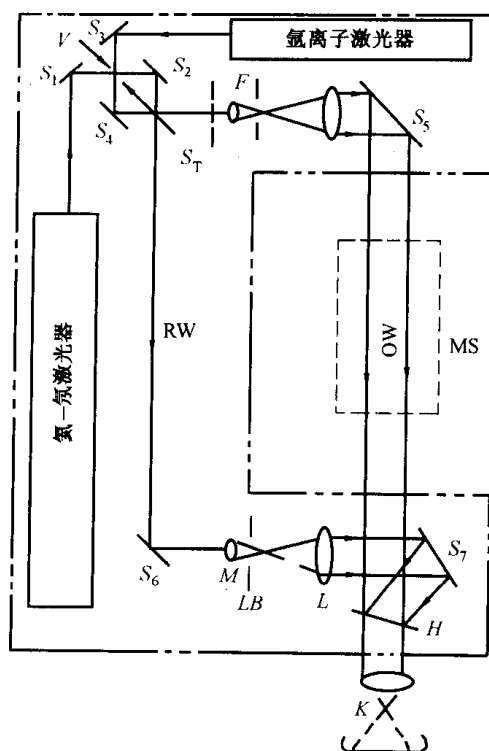


图 1-20 双激光全息干涉仪的光路系统

由同一光源分成两个光束经过不同的行程进行传播, 由于介质折射率不同, 其光程差为

$$\overline{\Delta PL} = \overline{PL_2} - \overline{PL_1} = \int_2 n_2 dz - \int_1 n_1 dz \quad (1-30)$$

其相位差 Δ 为

$$\Delta = \frac{\omega}{c_0} \cdot \overline{\Delta PL} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \overline{\Delta PL}$$

或

$$\frac{\Delta}{2\pi} = \frac{\overline{\Delta PL}}{\lambda_0} = \epsilon \quad (1-31)$$

上式表示了相位差与光程差之间的关系。 $\Delta/2\pi$ 表示了用 2π 来衡量的相位差, 而 $\overline{\Delta PL}/\lambda_0$ 表示了用真空中波长 λ_0 来衡量的光程差, 当它们变化了 1 时, 就表示干涉图上干涉条纹变化了一条。因此等式值又表示条纹位移数, 用 ϵ 表示。 $\Delta/2\pi$ 数值确定了视屏上的干涉情况, 即光强度是加强了还是减弱了。

对于上面的二次测量来说, 因为是二维场, 即介质密度仅在 x 、 y 坐标上有变化, 而在光的传播 z 方向上整个测试段内是不变的, 所以其光程差可表示成

$$\epsilon = \frac{\overline{\Delta PL}}{\lambda_0} = \frac{n_c - n_0}{\lambda_0} \cdot L \quad (1-32)$$

式中 L ——测试段内光束通过的整个长度;

n_c ——混合气体的折射率。

根据格拉德斯通—戴尔公式得

$$n_c - 1 = k_a \rho_a + k_b \rho_b \quad (1-33)$$

式中 k_a 、 k_b ——分别为气体 a 和 b 的格拉德斯通—戴尔常数。

由式 (1-25) 和式 (1-33) 得

$$n_c - n_0 = k_b \cdot \rho_b - k_a(\rho_0 - \rho_a) \quad (1-34)$$

由于一摩尔的各种不同气体在标准状态下占有相同的容积, 而第一次与第二次曝光时其温度和压力都相同, 所以对于微元气体有下式成立, 即相同的容积的气体应具有相同的摩尔数:

$$\frac{\rho_0}{M_a} = \frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_b}{M_b}$$

式中 M_a 、 M_b ——分别为组分 a 、 b 的分子量。

化简上式得

$$\rho_0 - \rho_a = \frac{M_a}{M_b} \cdot \rho_b \quad (1-35)$$

将式 (1-35) 代入式 (1-34) 得

$$n_c - n_0 = \left(k_b - \frac{M_a}{M_b} \cdot k_a \right) \cdot \rho_b \quad (1-36)$$

再代入式 (1-32) 得

$$\epsilon = \frac{L}{\lambda_0} \left(k_b - \frac{M_a}{M_b} \cdot k_a \right) \rho_b \quad (1-37)$$

可见, 只要测得干涉图上需求点的条纹移动值, 就可以根据式 (1-37) 求得 ρ_b 的值。求出各点的 ρ_b 的值, 即可得出 ρ_b 的分布, 以后再根据式 (1-35) 又可求得相应的 ρ_a 的分布。

如在测试段内混合气体既存在二维浓度分布, 同时还存在二维温度分布, 这时式 (1-35) 应作如下的温度修正 (即 ρ_0 应取温度 T 时的值):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_0}{M_a} \cdot \frac{T_0}{T} &= \frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_b}{M_b} \\ \rho_a &= \rho_0 \frac{T_0}{T} - \frac{M_a}{M_b} \cdot \rho_b \end{aligned} \quad (1-38)$$

将上式代入式 (1-34) 得

$$n_c - n_0 = \left(k_b - \frac{M_a}{M_b} k_a \right) \rho_b + k_a \cdot T_0 \cdot \rho_0 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (1-39)$$

利用理想气体状态方程式

$$T_0 \cdot \rho_0 = \frac{M_a \cdot P}{R}$$

代入式 (1-39), 得

$$n_c - n_0 = \left(k_b - \frac{M_a}{M_b} k_a \right) \rho_b + \frac{M_a \cdot P \cdot k_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (1-40)$$

式中 R ——气体常数。

比较式 (1-36) 和式 (1-40) 可知, 测试场中增加了式 (1-40) 中的第二项, 即二维温度场的变化引起的折射率的变化。将式 (1-40) 代入式 (1-32) 得

$$\epsilon = \frac{L}{\lambda_0} \left[\left(k_b - \frac{M_a}{M_b} \cdot k_a \right) \rho_b + \frac{M_a \cdot P \cdot k_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1-41)$$

由于该式有两个未知量 T 和 ρ_b , 所以必须建立两个方程才能解出这两个未知量。对此采用双波长法, 即同时用两种波长 λ_1 和 λ_2 的光波穿过实验段与相干的参考光产生干涉, 并拍摄全息干涉图像。然后分别用此两波长的参考光使之再现, 于是在两组底片上得到两组不同的全息干涉图像, 从而求得条纹位移值 $\epsilon_{\lambda 1}$ 和 $\epsilon_{\lambda 2}$, 分别代入上式得

$$\epsilon_{\lambda 1} = \frac{L}{\lambda_{01}} \left[\left(k_{b\lambda 1} - \frac{M_a}{M_b} \cdot k_{a\lambda 1} \right) \rho_b + \frac{M_a \cdot P \cdot k_{a\lambda 1}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1-42)$$

$$\epsilon_{\lambda 2} = \frac{L}{\lambda_{02}} \left[\left(k_{b\lambda 2} - \frac{M_a}{M_b} \cdot k_{a\lambda 2} \right) \rho_b + \frac{M_a \cdot P \cdot k_{a\lambda 2}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1-43)$$

式中 λ_{01} 、 λ_{02} ——两光波在真空中的波长;

$k_{a\lambda 1}$ 、 $k_{a\lambda 2}$ ——气体 a 分别在不同波长 λ_1 和 λ_2 下的格拉德斯通—戴尔常数;

$k_{b\lambda 1}$ 、 $k_{b\lambda 2}$ ——气体 b 分别在不同波长 λ_1 和 λ_2 下的格拉德斯通—戴尔常数。

联立两式可解得 T 和 ρ_b , 再根据式 (1-35), 可求得相应的 ρ_a 。

由于格拉德斯通—戴尔常数有时随波长的变化不大, 因此两种波长下所拍摄的干涉图

像有时差异就不大,这时计算温度分布和浓度分布时就会对计算结果带来较大的误差。所以在进行这类测量时,务必使方程式(1-42)和(1-43)保持更强的独立性,即要求在两种波长下拍摄的全息干涉图像差异要大些。在这种情况下,如能精确地读图、计量及在测试条件下正确设置条纹取向,对测得准确的温度场和浓度场均有很重要的意义。目前,随着计算机图像识别技术的高速发展,这些要求已经比较容易做到,即使是在两波长的干涉图样差异不大的情况下,交由计算机处理也能做到精确读图。

2. 振动的测量

通过对振动物体拍摄的全息图进行再现,可实现对振动的测量。最基本的方法是时间平均法。对周期振动物体作一次曝光,当记录的曝光时间远大于物体振动周期时,全息图上记录的是振动物体各个状态在这段时间中的平均干涉条纹。当这些光波又重新再现出来时,它们在空间必然要相干叠加,由于物体不同点振幅不同而引起的再现波相位不同,叠加结果是再现像上必然会呈现和物体的振动状态相对应的干涉条纹,亦即产生和振动的振幅相关的干涉条纹。

这种测振的方法准确度和灵敏度都很高,可用非接触方法来获得振动体的振动模,能对整个二维扩散的表面精密地测出振动的振幅。同时,可对小至晶体振子大至扩音器、乐器、涡轮机翼等进行振动分析。

第六节 激光准直测量技术

直线度是指一系列的点列或连续表面相对于几何直线的距离,直线度测量是平面度、平行度、垂直度等几何量测量的基础。对于直线度的测量早期采用拉钢丝法,后来随着自准直光管和准直望远镜被用于直线度测量,使测量和准直精度都有所提高。激光出现后,由于其具有能量集中、方向性和相干性好等优点,给准直测量开辟了新的途径。激光准直仪具有拉钢丝法的直观性、简单性和普通光学准直的精度,并可实现自动控制。

一、激光准直测量原理

激光准直仪按工作原理可分为振幅测量法、干涉测量法和偏振测量法。下面以干涉测量法为例说明激光准直测量的原理。

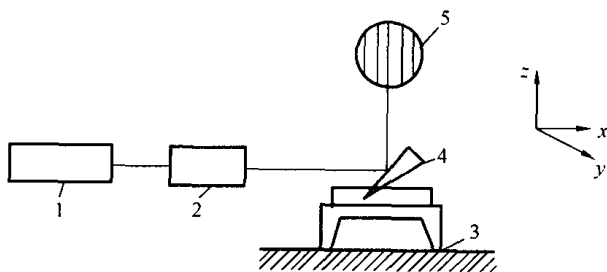


图 1-21 楔形板干涉法原理

1—激光器; 2—倒置望远镜; 3—靶基座;
4—楔形分光板; 5—观察屏

干涉测量法是在以激光束作为直线基准的基础上,又以光的干涉原理进行读数来进行直线度测量的。

1. 楔形板干涉法

楔形板干涉法的原理如图 1-21 所示。由激光器发出的光束,经开普勒内调焦倒置望远镜得到扩束的平行光束,投射到置于被测导轨上作为接收靶的楔形光学玻璃板上,依次在分光板的前后

表面反射,形成的两路光束重新会合,其中重叠部分相互干涉,在观察屏上可获得一组等间距相互平行的干涉条纹。将靶标沿被测导轨移动,若导轨有直线度误差,将使干涉条纹发生移动,移动量的大小经光电转换处理后,在显示器上可显示出被测导轨表面的微小倾角。

2. 双频激光干涉法

图 1-22 是双频激光干涉仪测量直线度的原理图。双频激光器 1 发出的光束通过 1/4 波片 2 后,变为两束正交线偏振光 f_1 和 f_2 。经半反半透镜 3 后射至渥拉斯顿偏振分光器 4 上,正交线偏振光 f_1 和 f_2 被分开成夹角为 θ 的两束线偏振光,分别射向双面反射镜 5 的两翼并由原路返回,返回光在渥拉斯顿偏振分光器 4 上重新会合,经半反射镜 3、全反射镜 6 反射到检偏器 7,两束光经过检偏器后形成拍频并被光电接收器 8 接收。若双面反射镜沿 x 轴平移到 A 点,由于 f_1 和 f_2 光所走的光程相等,所以, $\Delta f_1 = \Delta f_2$, 拍频互相抵消,计算机上的频移值为零。若在移动中由于导轨的直线度偏差而使反射镜沿 y 方向下落至 B 点,如图中虚线所示,于是 f_1 光的光程较原来减少了 $2\Delta L$, 而 f_2 光的光程却增加 $2\Delta L$, 两者光程的总差值为 $4\Delta L$, 这时计算机 9 上的频移值 $\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2$ 。据此,可以计算出下落量 AB 。

$$AB = \frac{\Delta L}{\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{\lambda \int_0^t \Delta f dt}{4 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (1-44)$$

AB 值即为以线量表示的导轨直线性偏差,它可由计算机直接求得并显示。

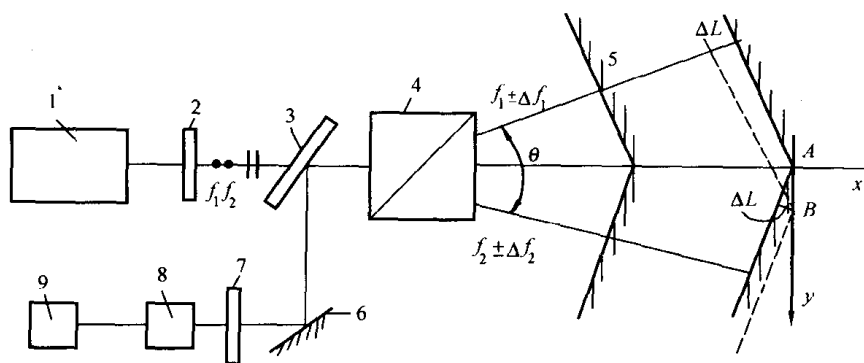


图 1-22 双频激光干涉法原理

1—激光器; 2—1/4 波片; 3—半反半透镜; 4—偏振分光器; 5—双面反射镜;
6—全反射镜; 7—检偏器; 8—光电接收器; 9—计算机

上述的直线度测量系统是美国 HP 公司的 HP5526A、HP5528A、HP5529A 系列双频激光干涉仪,以及日本东京精密 DISTAX 公司双频激光测量系统中所附的直线度测量部件所采用的原理。这一直线度测量系统的测量精度可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$, 最大检测距离为 3m, 最大下落量可测到 1.5mm。英国的 RENISHAW 公司的双频干涉仪做了些改进,使之调整方便、简单和整体小型化。其主要的特点是用屋脊二面反射镜代替二面反射镜,减小了一个自由度的调节,而且返回光平移了一段距离,避免了激光的回授。

二、激光准直仪的组成

激光准直仪主要由产生基准光束的激光器、光束准直扩束系统和光电接收及处理电路三部分组成。

1. 激光器

激光准直仪大多采用单模输出的 He-Ne 激光器，其功率约为 $1 \sim 2\text{mW}$ ，波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 。对这种激光器的要求，主要是光束方向的漂移要尽可能小。而光束方向漂移的大小取决于组成谐振腔的两块反射镜的稳定性。普通的 He-Ne 激光器，光束方向稳定性大约为 $10^{-4} \sim 10^{-6}\text{rad}$ ；性能良好的外腔式激光器，光束方向稳定性为 $2.5 \times 10^{-7}\text{rad}$ ，这样的激光器对于 1m 长的测量光程，其光束漂移量大约为 0.1 至数微米。为了减小激光器输出光束的漂移，可以采用具有热稳定装置的激光器。

具有热稳定装置的激光器如图 1-23 所示。在激光器外壳 1 外面放一个波形管 2，其作用是与激光器外表面保持良好的弹性接触。同时，波形管是用导热性比较好的金属材料做成的，例如不锈钢或磷青铜。波形管周围填充着具有相当低的导热系数和相当高的比热容的绝热材料 3，例如颗粒状的氧化镁。在氧化镁的外面是导热较好的材料做成的套筒 4。两端用绝热材料环将波形管与套筒之间的绝热材料封闭住。整个装置的作用是使激光器沿长度方向的温度梯度减少，同时使装置维持在较低的工作温度，从而减少变形。

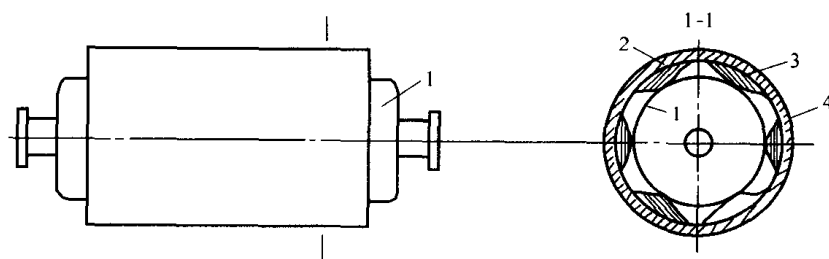


图 1-23 具有热稳定装置的激光器

1—He-Ne 激光器；2—波形管；3—绝热材料；4—套筒

2. 光学准直扩束系统

激光束虽然具有良好的方向性，但由于出射孔径上存在衍射现象，激光束也不能构成发散度为零的理想平行光束。为了改善光束的方向性，需要加一定的光学系统。在激光准直仪中，将望远镜倒置过来使用，即将光束从望远镜的目镜 L_2 中入射，从物镜 L_1 中射出，这样就可以把光束的发散角缩小。在激光准直仪中经常采用的光学系统有开普勒形式的倒置望远镜系统、伽利略形式的倒置望远镜、组合式倒置望远镜。

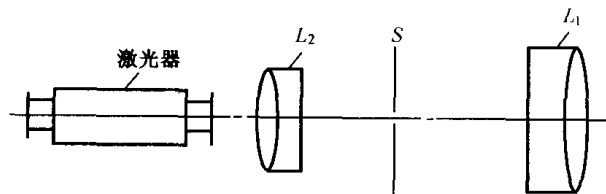


图 1-24 开普勒倒置望远镜

的倒置望远镜系统、伽利略形式的倒置望远镜、组合式倒置望远镜。

开普勒形式的倒置望远镜系统如图 1-24 所示，可以在视场光阑位置上（也就是物镜的像方焦点和目镜的物方焦点的重合点上）加一个空间滤波器（小孔

光阑) \$S\$ 消除杂散光, 改善准直光束的质量。光阑的直径在 \$8\mu\text{m}\$ 到 \$0.01\text{mm}\$ 左右。当加上空间滤波器以后, 输出光束的能量分布将有很大改善。干涉环和斑点基本消失, 使光束截面的近场分布和远场分布一致, 截面的能量中心不随距离而变化, 可以提高仪器精度。

这种形式的望远镜镜筒较长, 当需要尽量缩短镜筒时, 物镜组可以改用内调焦形式。

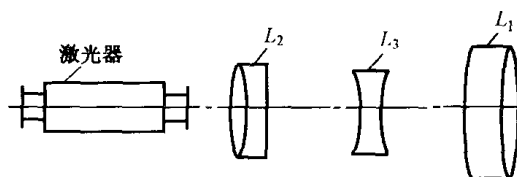


图 1-25 开普勒内焦倒置望远镜

图 1-25 为内焦形式的倒置望远镜系统。增加调焦镜 \$L_3\$ 在一定程度上增加了反射杂散光和光能吸收, 但它有镜筒短、体积小的优点。

3. 光电探测器及处理电路

在激光准直技术中广泛应用四象限光电池和 PSD 来探测光束的中心位置。

(1) 四象限光电池。四象限光电池一般由四个扇形的硅光电池组成, 也有的是一片整个的硅光电池, 正交切开 \$N\$ 或 \$P\$ 层形成具有公共基底的四象限, 如图 1-26 (a) 所示。四象限探测器中每片硅光电池的转换效率应该一致, 它们之间的相对位置也应准确。但实际上两片光电池的转换效率往往相差很远, 有的可差 20%。因此, 所使用的光电池必须精心挑选, 使每组的转化效率一致。

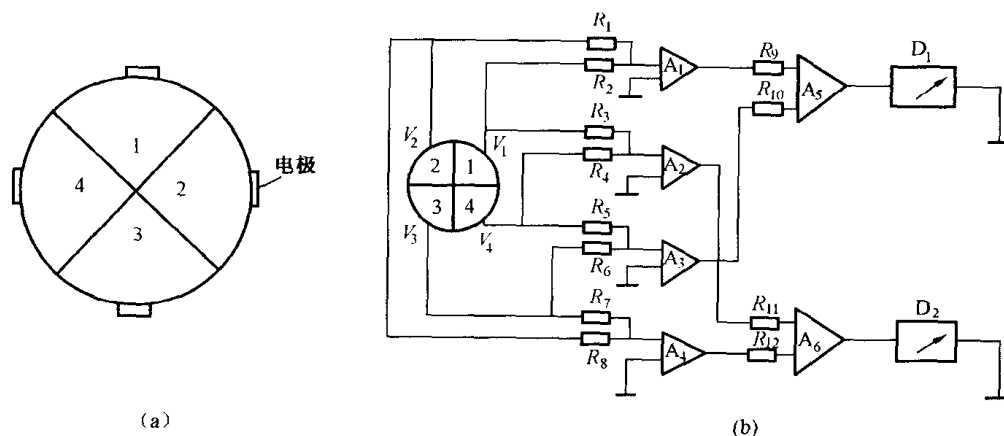


图 1-26 四象限硅光电池及处理电路

(a) 四象限硅光电池; (b) 处理电路

处理电路一般采用如图 1-26 (b) 所示的加减运算电路来实现, 这时, 水平和垂直方向的输出电压为

$$\begin{aligned} V_x &= (V_1 + V_4) - (V_2 + V_3) \\ V_y &= (V_1 + V_2) - (V_3 + V_4) \end{aligned} \quad (1-45)$$

式中 \$V_1\$、\$V_2\$、\$V_3\$、\$V_4\$——光电池四个电极的输出电压。

图 1-26 中, \$A_1 \sim A_6\$ 为放大器, \$D_1\$、\$D_2\$ 为显示器。为避免激光束的输出功率变化和大气传输引起的衰减, 可附加一个除法 (用 \$V_1\$、\$V_2\$、\$V_3\$、\$V_4\$ 的总和除 \$V_x\$、\$V_y\$) 电路即可。

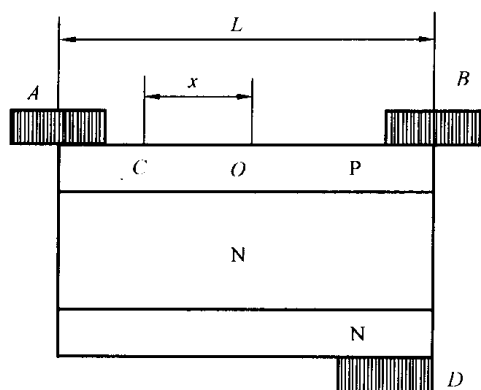


图 1-27 一维 PSD 原理图

(2) PSD。位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector) 简称 PSD，是一种具有特殊结构的大光敏面的光电二极管，又称为 P-N 结光电传感器。PSD 与象限位置探测器和 CCD 不同，它有一个完整的光敏面，通过不同电极之间的电流输出，能连续给出入射光点中心在光敏面上的位置。它有一维 PSD 和二维 PSD 两种形式。

一维 PSD 原理如图 1-27 所示。在高阻半导体硅的两面形成均匀的电阻层，即 P 型和 N 型半导体层，并在电阻层的两端制作电极引出电信号，图中 C 点决定了 AC 段和 BC 段电阻的比例。当有光照无外加偏压时，面电极 A、B 与衬底电极 D 相当于短路，可检测出短路电流。设 AC 段电阻值为 R_1 ，BC 段电阻值为 R_2 ， R 为 R_1 和 R_2 的并联值。光电流 I_0 由 R_1 和 R_2 分流并由 A 和 B 电极流出，其值分别为

$$I_1 = I_0 R / R_1 \quad (1-46a)$$

$$I_2 = I_0 R / R_2 \quad (1-46b)$$

假设 PSD 光敏面的表面电阻层具有理想的均匀特性，则表面电阻层的阻值与长度成正比，设入射光点能量中心 C 相对于 PSD 中心 O 位置的坐标为 x ，则有

$$I_1 / I_0 = R / R_1 = L / \left(\frac{L}{2} - x \right) \quad (1-47a)$$

$$I_2 / I_0 = R / R_2 = L / \left(\frac{L}{2} + x \right) \quad (1-47b)$$

经运算可得

$$x = \frac{L}{2} \cdot \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (1-48)$$

式中， $I_1 - I_2$ 和 $I_1 + I_2$ 的比值线性地表达了其与光点位置的关系。这个比值与入射光强和光斑大小无关，只取决于器件的结构及入射光点能量中心的位置，从而克服了光点强度（波长或调制频率）变化对检测结果的影响。

光点位移探测元件还有四象限光电倍增管，管中有四个独立的光阴极片，用来探测微弱光点的位移，它的响应时间是 10ns 数量级，而硅光电池为 20μs 数量级。另外，CCD（电荷耦合器件）也常用于激光准直测量中。

三、激光准直测量的应用

激光准直仪可用在各种工业中，如在重型机床制造中，利用激光准直仪对机床导轨做不直度和不同轴度检查。在电厂汽轮发电机组的安装中，转子轴的对中心可使用这种方法。采用激光准直仪不但提高了效率，同时能直接测出各点沿垂直和水平方向的偏差，提高了测量精度。另外，将光电探测器的输出信号输入记录仪，可对机床工作台的运动误差

进行连续记录。

1. 不直度的测量

图 1-28 是激光准直仪测量机床导轨不直度的示意图。将激光准直仪固定在机床身上或放在机床体外，在滑板上固定光电探测靶标，光电探测器件可选用四象限光电管或 PSD。测量时首先将激光准直仪发出的光束调至与被测机床导轨大体平行，再将光电靶标对准光束。滑板沿机床导轨运动，光电探测器输出的信号经放大、运算处理后，输入到记录仪记录不直度的曲线。另外可以对机床导轨进行分段测量，读出每个点相对于激光束的偏差值。

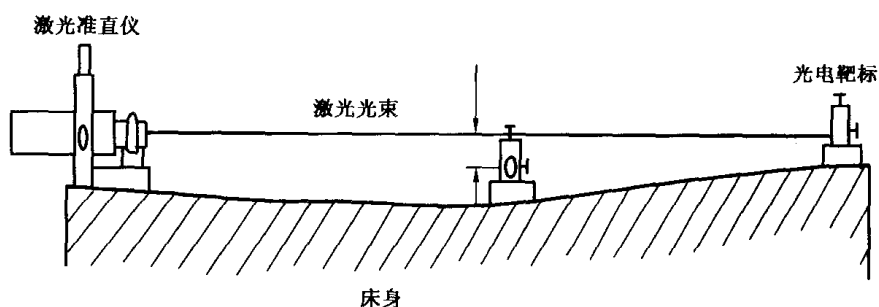


图 1-28 机床导轨不直度的激光准直测量原理图

2. 不同轴度的测量

大型柴油机轴承孔的不同轴度，以及轮船轴系不同轴度等的测量均可用激光准直仪和定心靶来进行。其测量原理如图 1-29 所示。在轴承座 1 两端的轴承孔中各置一定心靶 2 并调整激光准直仪 3 使其光束通过两定心靶的中心，即建立了直线度基准。再将测量靶（与定心靶 2 同）依次放入各轴承孔，测量靶中心相对于激光束基准的偏移值。

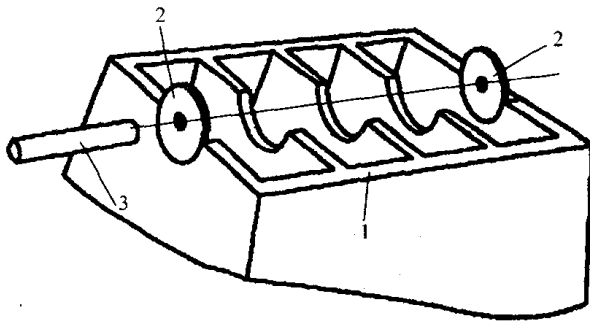


图 1-29 激光准直仪测量不同轴度的原理图

1—轴承座；2—定心靶；3—激光准直仪

实际应用时要将激光束精确地调到两定心靶的中心位置比较麻烦，若设计使激光光轴通过支承球体中心，这样在测量不同轴度时，仪器仅需调整偏摆、俯仰就可很快对准另一点，调整就比较简单，仪器结构也大为简化。

第七节 激光载波测温技术

一、激光载波测温的原理

激光载波测温的工作原理是：利用激光作为载波，用温度信息调制激光，而后把含有温度信息的激光通过空间传播到接收部分，经信号处理达到测量温度的目的。

二、激光载波测温系统的组成

激光载波测温系统的组成框图如图 1-30 所示。它分为两部分，左边为发射部分，右边为接收部分。

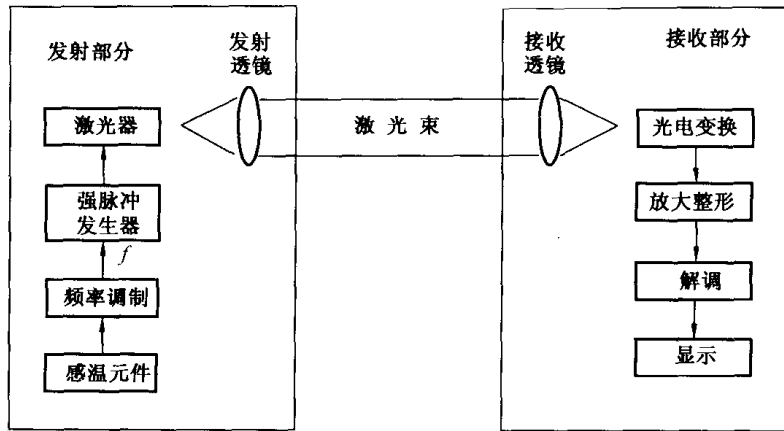


图 1-30 激光载波测温原理方框图

1. 发射部分

这部分由四个单元组成，它的主要作用是用温度信号调制激光，使激光器的输出频率与温度相对应。感温元件为具有负电阻温度系数的热敏电阻，其电阻值随着温度的升高而减小。热敏电阻与频率调制单元共同组成温控变频振荡器，其输出频率随着温度的变化而变化。此频率信号送入强脉冲发生器（相当于功率放大器），控制半导体激光器发出激光脉冲。该激光脉冲通过发射装置（一台光学望远镜）发射给接收部分，这样就实现了高压（发射部分）与低压（接收部分）的隔离。放置在变压器框架上的发射装置虽然带有高电位，但由于温度信号是通过激光束传递的，因而该高电位并不影响温度的正确测量。若此电位直接引到表盘上去，则可能对人身及设备造成损害。利用激光作为载波把温度信息传送给接收部分，接收部分把含温度信息的激光经解调后由显示装置显示测得的温度值。

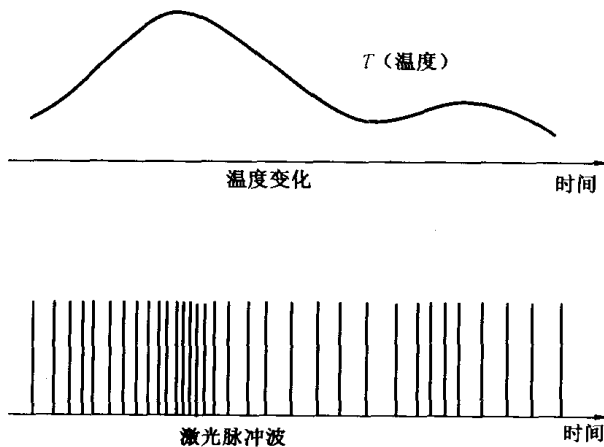


图 1-31 脉冲调频波与温度的关系

脉冲调制的方法很多，有脉冲调幅、脉冲调宽、脉冲调频等。这里采用脉冲调频，主要是因为半导体激光器的输出功率随环境温度的变化而变化。为了避免环境温度变化引起测量误差，要采用脉冲调频，因为这时半导体激光器的功率虽然随环境温度变化，但频率却能保持不变，这就保证了测量的准确性。图 1-31 为激光脉冲调频波与温度的关系图。由图可见，激光脉冲频率（密度）随温度的高低而变：温度高，频率

也高；温度低，频率也低。半导体激光器调制比较容易，通常情况下选用的是砷化镓半导体激光器。

发射部分的整套线路由图 1-32 所示。 R_T 为热敏电阻，它与单晶体管 V_1 共同组成变频振荡器，其振荡频率由下式确定

$$f = \frac{1}{R_T C_T \ln \frac{1}{1-\eta}} \quad (1-49)$$

式中 R_T ——感温热敏电阻 R_T 的阻值；

C_T ——振荡器电容 C_1 的电容量；

η ——单晶体管分压比；

当单晶体管选定后， η 值就不变了，这时固定 C_T 值，变频振荡器的振荡频率 f 就与 R_T 成反比，即 R_T 越大， f 值就越小。而 R_T 是热敏电阻的阻值，随测点的温度升高阻值减小。由此可看出，测点温度升高时，变频振荡器的振荡频率增大，这就形成了温度对频率的调制过程。这套装置实际测得的温度与频率的关系由表 1-1 所示。

表 1-1

温度与频率的关系

温度 (°C)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
频率 (Hz)	363	408	455	500	545	590	625	672	720

变频振荡器的输出脉冲经过脉冲变压器 T_1 来控制晶闸管 V_2 的导通与截止。当脉冲没有来时（低电位），晶闸管截止，这时 E_2 经 R_2 向电容 C 充电。当脉冲来时（高电位），晶闸管导通，这时电容上充的电经晶闸管、脉冲变压器 T_2 的一次绕组而放电。当脉冲过去后（低电位），晶闸管又截止，电容 C 又充电。此过程循环往复，使强脉冲发生器的输出脉冲频率与变频振荡器的振荡频率相同。在脉冲变压器 T_2 的一次绕组中产生的频率与变频振荡器振荡频率相同的强脉冲，经脉冲变压器的次级线圈输给砷化镓激光器，形成激光脉冲输出。砷化镓激光器必须满足通过大电流的要求才能产生激光，另外为了散热，在室温下只能工作在窄脉冲方式下。该强脉冲发生器电路所产生的电流脉冲幅度可达到几十或几百安培，持续时间仅为 $0.2\mu s$ ，重复频率为 $500 \pm 200\text{Hz}$ 。这个窄强电流脉冲信号用来激励砷化镓激光器产生激光脉冲，完全能满足要求。

2. 接收部分

图 1-30 右边部分为接收装置，它由常规的低电压装置组成，主要实现信号的光电转换、解调、显示。激光脉冲由发射透镜经过空间发射给接收透镜，这套装置的最大发射距离可达 100m。由接收透镜把含有被测温度信息的激光脉冲聚焦后送给光电元件，由光电元件把光脉冲信号转换为电脉冲信号，此信号经过脉冲放大器放大、整形器整形后送到解调器解调。解调过程就是把温度信息从调制波中取出来，再经过放大后送给显示单元显示

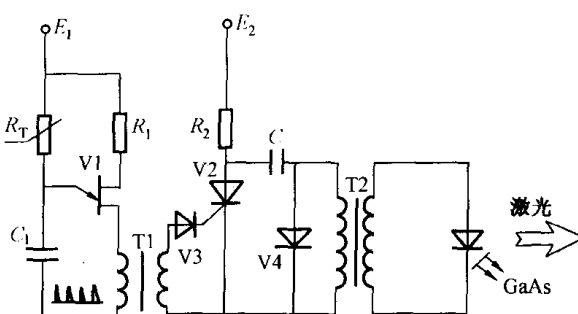


图 1-32 激光载波测温的发射部分

R_T ——热敏电阻； V_1 ——单晶体管；

V_2 ——晶闸管； T_1 、 T_2 ——脉冲变压器

出被测温度值。

将调频波恢复为原调制信号，通常是先把调频波的频率变化转换成相应的振幅变化，即把调频波变成相应的调幅波，然后经二极管检波取出所需的原调制信号。把调频波转换成相应调幅波的一种简单方法是利用 LC 谐振并联电路，使其工作在失谐状态下。图 1-33 所示为调频波解调原理。电路的工作过程是：当输入调频波的中心频率 f_0 低于 LC 谐振电路的谐振频率时，中心频率 f_0 就落在谐振曲线的一边 A 点上，相应的谐振电路的输出电压为 u_0 ；当输入频率增大到 $f_0 + \Delta f$ 时，相应的输出电压为 u_0' ，这时的工作点落在 B 点上；当输入频率减小到 $f_0 - \Delta f$ 时，相应的输出电压也减小到 u_0'' ，其工作点落在 C 点上。由此可见，输入信号频率高，LC 谐振电路两端的输出电压也高；反之输入信号频率低，输出电压也低。这样就把调频信号转换为调幅信号了，其波形如图 1-33 (c) 所示。图 (a) 中的 $I(t)$ 为调频波的电流。LC 谐振电路两端输出电压的幅度随调频电流 $I(t)$ 的瞬时频率而变，这样就把振幅一定的调频波变换为振幅随频率变化的调幅信号了。此信号再经过二极管检波，就成为所需的被调制信号，如图 1-34 所示。由该电路输出的信号经过放大后就可送到显示器显示被测点温度值的大小。

利用激光来进行温度测量的最大优点是使用很安全、方便。例如，在电力系统中需连续测量变压器运行状态下各部分的温度，尤其是测量线圈内部任一点的温度，由于受到高

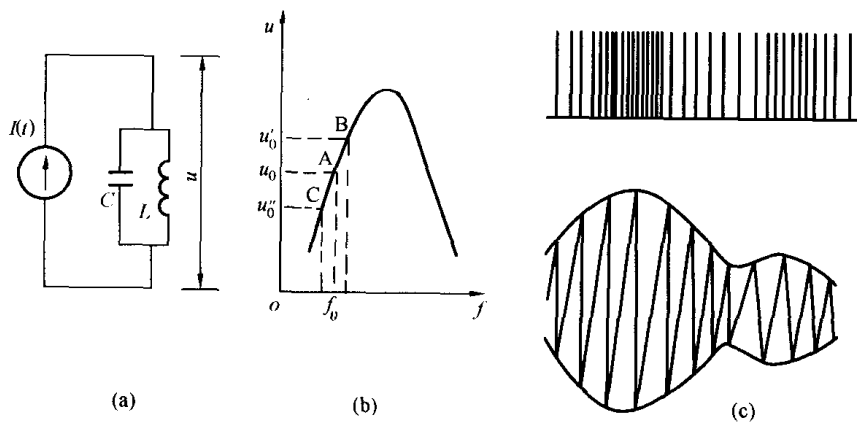


图 1-33 调频波解调原理

(a) LC 谐振电路；(b) 谐振曲线；(c) 调频波及调幅波

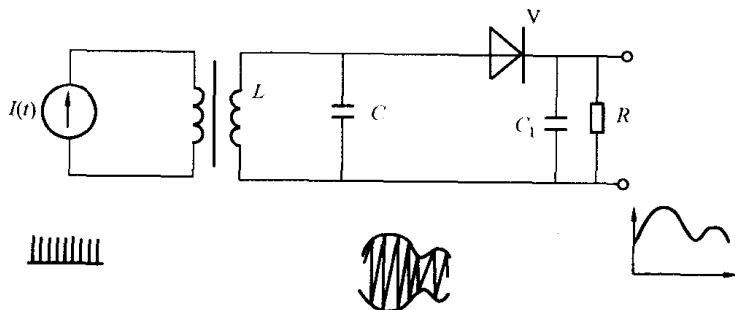


图 1-34 调频波解调线路

电压的限制,采用接触测温方法有很多困难,即使将感温元件埋入到线圈内部,将温度信号引到变压器外面,要达到测量的目的,在绝缘问题上也是较难解决的,采用激光载波测温技术能较好地解决这一问题。

第八节 激光干涉法测量位移、压力、振动

激光干涉测量技术是以光波干涉原理为基础进行测量的一门技术,属于非接触测量,具有很高的测量灵敏度和精度。干涉测量技术的应用范围很广,可用于位移、长度、角度、介质折射率的变化及振动等方面的测量。常用的干涉仪有迈克尔逊干涉仪、马赫-泽德干涉仪、菲索干涉仪等。

一、激光干涉测量的原理

在干涉测量中,干涉仪以干涉条纹来反映被测件的信息,其原理是将光分成两路,干涉条纹是两路光光程差相同点联成的轨迹。光程差是干涉仪两条光路光程之差,用下式表示:

$$\Delta = \sum_{i=1}^N n_i l_i - \sum_{j=1}^M n_j l_j \quad (1-50)$$

式中 Δ ——光程差;

n_i 、 n_j ——干涉仪两条光路的介质折射率;

l_i 、 l_j ——干涉仪两条光路的几何路程差。

若把被测件放入干涉仪的一条光路中,干涉仪的光程差将随着被测件的位置与形状而变,干涉条纹也随之变化。测量出干涉条纹的变化量,便可直接获得 l 或 n , 还可间接获得与 l 或 n 有关的各种被测信息。

二、激光干涉测量位移、压力和振动

1. 原理

利用干涉仪进行实际测量时,利用了光学理论中的这样一个结论:若两束相干光的光程差为零或 $\lambda_0/2$ (λ_0 为真空中的波长) 的偶数倍,则它们的相交点为加强干涉(即亮条纹);当它们的光程差为 $\lambda_0/2$ 的奇数倍时,其交点为相消干涉(即暗条纹)。测量时一般把目标反射镜与被测对象相连,参考反射镜固定不动。当目标反射镜随被测对象移动时,两路光束的光程差发生变化,干涉条纹也随之发生明暗交替变化。若用光电探测器接收,当被测对象移动一定距离时,明暗条纹交替变化一次,光电探测器输出信号也将变化一个周期。记录下信号变化的周期数,便确定了被测位移。

2. 测量装置

在很多情况下,位移测量及压力测量是一回事,因为压力可通过弹性元件而转换为位移量。下面介绍用迈克尔逊干涉仪测量这些参数。

图 1-35 为用迈克尔逊干涉仪测量位移装置示意。其工作过程为:氦氖激光器发射出

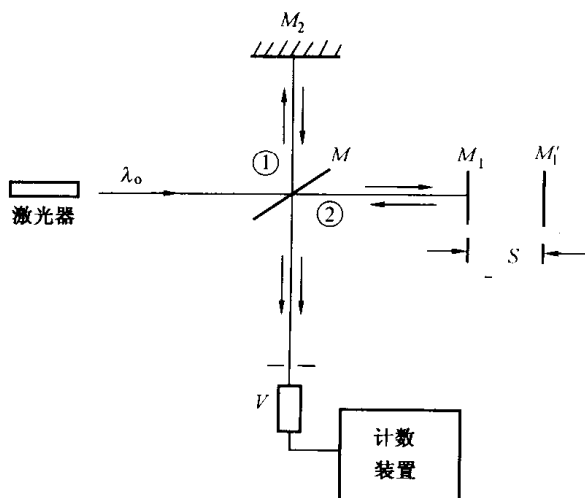


图 1-35 位移测量装置示意

波长 $\lambda_0 = 6328 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的激光，由半反半透镜 M 分解成互相垂直的两束光①和②，它们分别由全反射镜 M_1 和 M_2 反射回来，经 M 而到达光电元件 V 。设开始时这两束光的光程差为零，光电元件所接收到的是亮条纹信号，而后使 M_1 移动。当 M_1 移动 $\lambda_0/4$ 时，光电元件接收到的是暗条纹信号（因光是来回的，故这时两束光的光程差为 $\lambda_0/2$ ）。若 M_1 再移动 $\lambda_0/4$ ，则又呈亮条纹。所以只要测得光电元件所接收到亮条纹的数目 N ，就能知道 M_1 移动的距离 S ， $S = N \times \lambda_0/2$ 。这里 λ_0 是知道的，

用计数装置测得光电元件所接收到亮条纹的数目 N ，就可求得 M_1 的位移量了。

同样也可用类似装置对压力进行测量。图 1-36 所示为测压装置。它的测量原理是利用介质的折射率 n 随着压力的变化而变化。在光束①和②的光路上安放了参考容器和测压容器，在这两容器中充有相同的物质。参考容器是封闭的，测压容器中介质的压力随外加的压力而变。当测压容器中压力变化时，介质的折射率 n 也随之变化，介质折射率的变化使光束②的光程变化，而光束①的光程没有变，因此两束光的光程差就随着压力 p 的变化而变化，即光电元件接收到的亮条纹数与压力 p 有关。当知道了介质的折射率 n 和压力 p 之间的关系后，就能由亮条纹数来确定压力的大小。有人用它来测量射流元件的脉动压力的大小，并取得较好的效果。

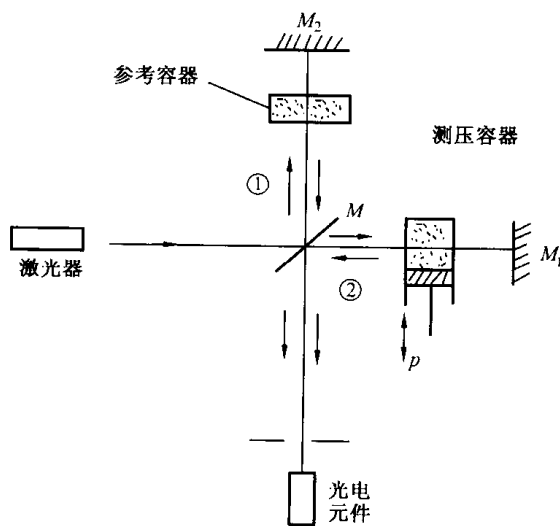


图 1-36 测压装置

图 1-37 为某单位研制成功的振动表校验

台方框图，可用此表来校验工业上用的振动表。振动架的振动频率与幅度由信号发生器经过激振功率放大器和激振器来控制，计数显示装置的门控信号也由信号发生器供给，其光路部分工作情况与前述相同。双线示波器显示的是信号发生器及光电元件输出的波形，波形由图 1-38 所示。振动架位移的幅度 A 由下式确定：

$$A = N \times \frac{\lambda_0}{2} \times \frac{1}{4H} \quad (1-51)$$

式中 N ——亮条纹数目（即计数装置显示的数值）；

H ——所取振动架振动的周期数（即测定 H 个周期中亮条纹的数目，本套装置取 $H = 8$ ）。

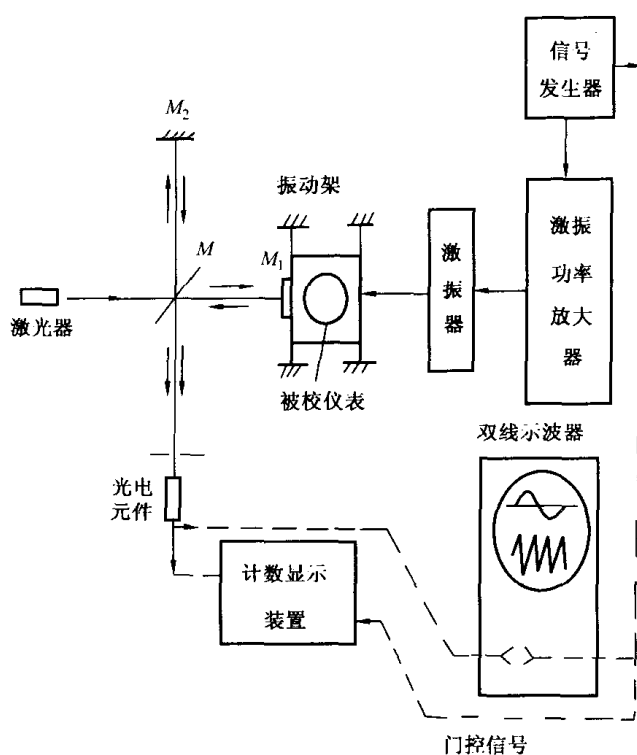


图 1-37 振动表校验台方框图

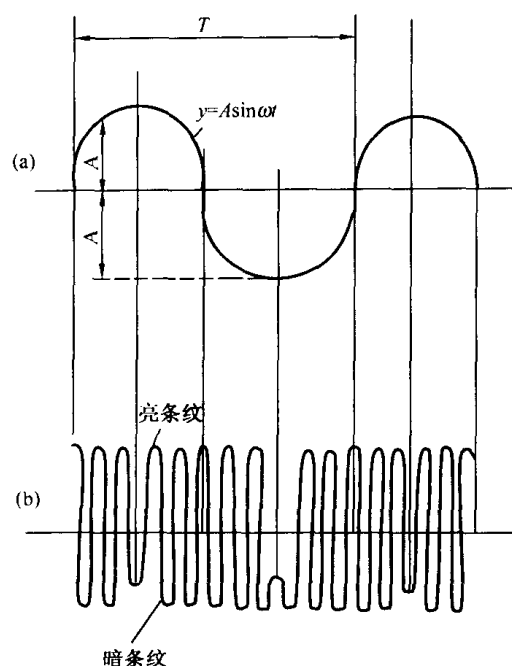


图 1-38 示波器显示的波形

(a) 信号发生器输出信号波形；

(b) 光电元件输出信号波形

把 $H=8$ 及 $\lambda_0 = 6328 \times 10^{-10} \text{m}$ 代入式 (1-51)，得

$$A = \frac{0.6328}{64} N = 0.00989 N \approx 0.01 N (\mu\text{m})$$

由此可见，振幅 A 值就是 8 个周期的亮条纹数 N 乘以 0.01。例如计数显示装置的读数为 1000，那么 $A = 10 \mu\text{m}$ 。

计数显示装置方框图如图 1-39 所示。该装置的工作过程为：采样脉冲发生器每隔 4s 发出一个脉冲，该脉冲信号使分频器和计数器清零，同时使触发器 B 翻转。B 翻转使门 2

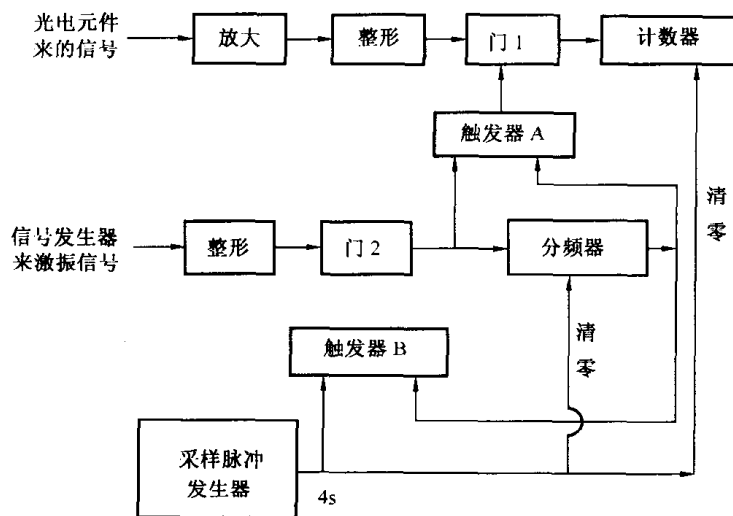


图 1-39 计数显示装置方框图

开启, 这时信号发生器来的激振信号经整形, 通过门 2 送到分频器并使触发器 A 翻转。触发器 A 翻转使门 1 开启, 由光电元件来的信号经放大整形后经门 1 送到计数器计数。当激振信号到第九个周期时 ($H=8$), 分频器输出信号使 A、B 触发器都翻转, 这时门 1 和门 2 都关闭, 把计数器所显示的数值的小数点左移两位, 就得到振幅 A 的数值。

该套装置的测量范围: 频率可达到 150Hz, 最大振幅 $A_{\max} = 250\mu\text{m}$ 。

第九节 激光测距技术

一、脉冲激光测距

1. 测距原理

脉冲激光测距基于回声测距的原理。由脉冲激光器发出一持续时间极短的脉冲激光, 称之为主波。经过待测距离 L 后射向被测目标, 被反射回来的脉冲激光称之为回波。回波返回测距仪, 由光电探测器接收, 根据主波信号和回波信号之间的时间间隔, 即激光脉冲从激光器到被测目标之间的往返时间 t , 就可算出待测目标的距离为

$$L = \frac{ct}{2} \quad (1-52)$$

式中 c ——光速。

2. 结构

图 1-40 (a) 是脉冲激光测距仪的结构图。它主要由脉冲激光发射系统、光电接收系

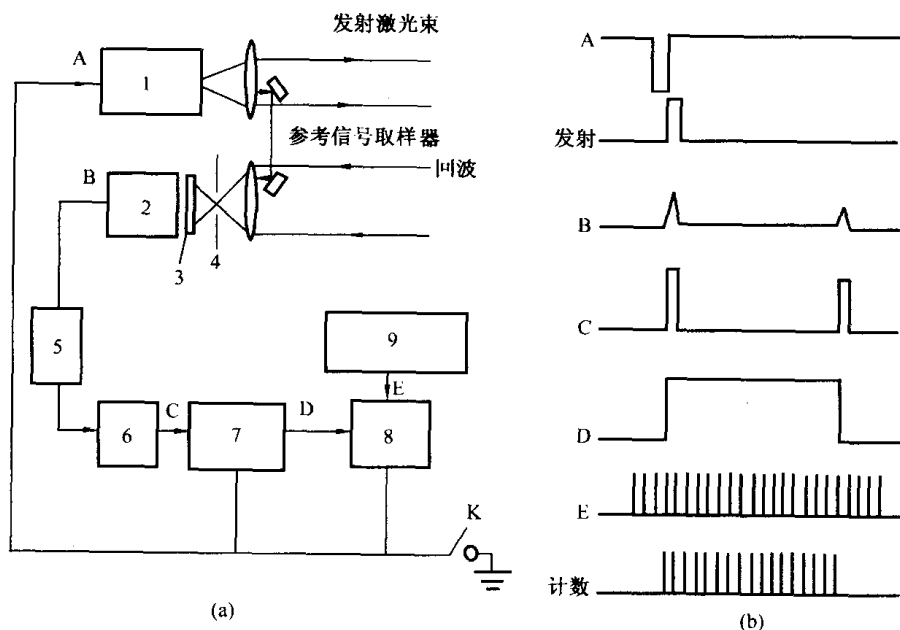


图 1-40 脉冲激光测距原理图

(a) 结构图; (b) 各输入、输出点信号波形

1—激光器; 2—光电探测器; 3—干涉滤光片; 4—光阑; 5—放大器;
6—整形电路; 7—触发器; 8—计数器; 9—时钟脉冲振荡器

统、门控电路、时钟脉冲振荡器以及计数显示电路组成。其工作过程是：首先开启复位开关 K，复位电路给出复位信号，使整机复位，准备进行测量；同时触发脉冲激光发生器 1，产生激光脉冲。该激光脉冲有一小部分能量由参考信号取样器直接送到接收系统，作为计时的起始点，大部分光脉冲能量射向待测目标。由目标反射回测距仪的光脉冲能量被接收系统接收，这就是回波信号。参考信号和回波信号先后由光电探测器转换为电脉冲，并加以放大和整形。整形后的参考信号能使触发器 7 翻转，控制计数器 8 开始对晶体振荡器 9 发出的时钟脉冲进行计数。整形后的回波信号使触发器的输出翻转无效，从而使计数器停止工作。图 1-40 (b) 为结构图中各点的信号波形。这样，根据计数器的输出即可计算出待测目标的距离

$$L = \frac{cN}{2f_0} \quad (1-53)$$

式中 N ——计数器计到的脉冲个数；

f_0 ——计数脉冲的频率。

3. 影响测距仪测量精度的因素

由测距仪的测量原理可知，其测量精度主要取决于 c 和 t 的测量精度。一般来说，光速 c 的精度取决于大气折射率 n 的测定，由 n 值测量误差而带来的误差是非常小的。所以，对短距离脉冲激光测距仪（几到几十公里）来说，测距精度主要取决于时间的测量精度。影响时间 t 测量精度的因素很多，如激光的脉宽、反射器和接收系统对脉冲的展宽、测量电路对脉冲信号的响应延迟等。

另外，背景光及杂散光也影响测量精度，可通过干涉滤光片和小孔光阑的作用减小其影响，降低探测器输出信号的背景噪声。

测距仪的分辨力取决于计数脉冲的频率，若要求测距仪的分辨力为 1m，则要求计数脉冲的频率为 150MHz。由于计数脉冲的频率不能无限提高，脉冲测距仪的分辨力一般较低，通常为数米的量级。

二、激光相位测距

1. 测量原理

与脉冲激光测距仪不同，激光相位测距仪测量的是光波往返一次的相位变化。激光相位测距是通过对激光的强度进行调制来实现的。

设激光的调制频率为 f ，波长为 λ ， $\lambda = c/f$ ， c 为光速。调制波形如图 1-41 所示。光波从 A 点传播到 B 点的相移 φ 可表示为

$$\begin{aligned} \varphi &= 2m\pi + \Delta\varphi \\ &= 2\pi(m + \Delta m) \end{aligned} \quad (1-54)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

式中， $\Delta m = \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$ 。

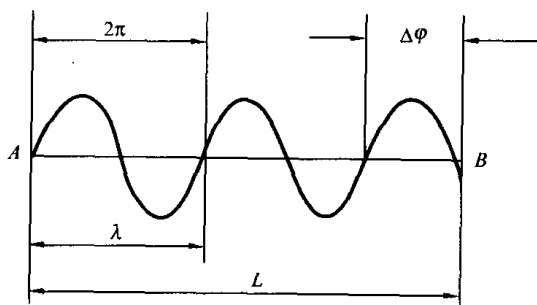


图 1-41 相位测距原理图

若光从 A 点传播到 B 点所用时间为 t , 则 A 、 B 两点之间的距离

$$L = ct = c \frac{\phi}{2\pi f} = \lambda(m + \Delta m) \quad (1-55)$$

由上式可知, 只要测出光波相移 ϕ 中周期 2π 的整数 m 和余数 Δm , 就可计算出被测距离 L 。调制光波的波长 λ 是相位测距的一把“光尺”。式 (1-55) 为激光相位测距式。

实际测距时, 在需要测距点处 (B 点) 设置一个反射器 (测量靶标), 使从测距仪发出的光波经靶标反射再返回到测距仪, 由测距仪的测相系统对光波往返一次的相位变化进行测量。由于此时光波传播距离为 $2L$, 由式 (1-55) 可得

$$\begin{aligned} 2L &= \lambda(m + \Delta m) \\ L &= \frac{\lambda}{2}(m + \Delta m) = L_s(m + \Delta m) \end{aligned} \quad (1-56)$$

式中 L_s ——半波长度, 它作为量度距离的光尺。

相位测量技术只能测量出不足 2π 的相位尾数 $\Delta\phi$, 即只能确定余数 Δm , 而不能确定相位的整周期数 m 。因此, 当被测距离 L 大于 L_s 时, 用一把光尺是无法测定距离的。如果被测距离较长, 可降低调制频率, 使得 $L_s > L$, 即可确定距离 L 。但由于测相系统存在测相误差, 增大 L_s 会使测距误差增大。

为能实现长距离的高精度测量, 可同时使用 L 不同的几把光尺。最短的光尺用于保证必要的测距精度, 最长的光尺用于保证测距仪的量程。目前采用的测距技术主要有直接测尺频率和间接测尺频率两种。

2. 激光相位测距技术

(1) 直接测尺频率。由测尺量度 L_s 可得光尺的调制频率

$$f_s = c/2L_s \quad (1-57)$$

这种方法所选定的测尺频率 f_s 直接和测尺长度 L_s 相对应, 即测尺长度直接由测尺频率决定。直接测尺频率一般应用于短程测距, 如 GaAs 半导体激光短程相位测距仪。

(2) 间接测尺频率。在实际测量中, 由于测程要求较大, 大都采用间接测尺频率方式。间接测尺频率法测距的基本原理是通过测量频率 f_{s1} 和 f_{s2} 的相位尾数并取其差值来间接测定相应的差频频率的相位尾数。

现用两个频率 f_{s1} 和 f_{s2} 调制的光分别测量同一距离 L , 由式 (1-56) 可得

$$\begin{aligned} L &= L_{s1}(m_1 + \Delta m_1) \\ L &= L_{s2}(m_2 + \Delta m_2) \end{aligned} \quad (1-58)$$

这时

$$\begin{aligned} \frac{L_{s1} L_{s2}}{L_{s2} - L_{s1}} &= \frac{L}{(m_1 - m_2) + (\Delta m_1 - \Delta m_2)} \\ L &= \frac{L_{s1} L_{s2}}{L_{s2} - L_{s1}} [(m_1 - m_2) + (\Delta m_1 - \Delta m_2)] = L_s(m + \Delta m) \end{aligned} \quad (1-59)$$

$$\text{式中 } L_s = \frac{L_{s1} L_{s2}}{L_{s2} - L_{s1}} = \frac{1}{2} \frac{c}{f_{s1} - f_{s2}} = \frac{1}{2} \frac{c}{f_s};$$

$$f_s = f_{s1} - f_{s2};$$

$$m = m_1 - m_2;$$

$$\Delta m = \Delta m_1 - \Delta m_2 = \Delta \phi / (2\pi);$$

$$\Delta \phi = \Delta \phi_1 - \Delta \phi_2$$

由式 (1-59) 可见, L_s 是一个新的测尺长度, f_s 是与 L_s 对应的新的测尺频率。这样, 用 f_{s1} 和 f_{s2} 分别测量某一距离时, 所得相位尾数 $\Delta \phi_1$ 和 $\Delta \phi_2$ 之差, 与用 f_{s1} 和 f_{s2} 的差频率 $f_s = f_{s1} - f_{s2}$ 测量该距离时的相位尾数 $\Delta \phi$ 相等。通常把 f_{s1} 和 f_{s2} 称为间接测尺频率, 而把差频频率称为相当测尺频率。一般来说, 这种测距方式的各间接测尺频率非常接近, 故间接测尺频率又称为集中测尺频率。测尺频率的集中, 不仅可使放大器和调制器能够获得相接近的增益和相位稳定性, 而且各相对应的石英晶体也可统一。

相位测距仪一般采用差频测相技术。图 1-42 是采用两把测尺的差频相位测距仪的原理图。为便于驱动调制, 通常采用 GaAs 系列的红外激光二极管作为光源, 由开关控制主控振荡器 1、2 分别以 $f_1 = 15\text{MHz}$ 、 $f_2 = 150\text{kHz}$ 的调制频率通过信号发生器 6 交替发射。返回的信号由光电接收机 7 接收。基准振荡器 3、4 发出的基准信号频率分别为 $f_{11} = 14.006\text{MHz}$, $f_{12} = 146\text{kHz}$, 送到混频器 8 和 9 分别与发射信号和接收信号进行混频。这样, 无论采用哪一把光尺进行测量, 混频信号均为 4kHz , 便于保证相位的检测精度。用相位检测电路 10 测出这两个混频信号相位差, 并通过运算器 11 可得到待测距离。

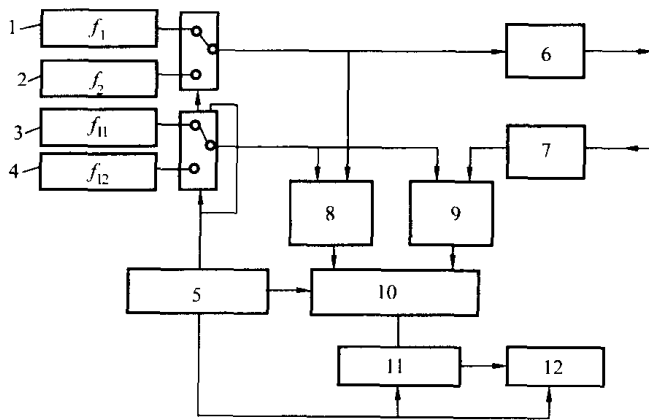


图 1-42 相位测距仪原理框图

- 1、2—主控振荡器；3、4—基准振荡器；5—信号控制器；
6—信号发射器；7—信号接收器；8、9—混频器；
10—相位检测电路；11—运算器；12—显示器

相位测距仪既能保证大的测量范围, 又能保证较高的测量精度, 应用广泛。其在使用过程中主要受大气温度、气压、湿度等方面的影响。

第十节 激光视觉三维测量技术

计算机视觉技术是近些年发展起来的一门崭新的学科, 而视觉检测技术是在计算机视觉理论上发展起来的。根据照明方式和几何结构关系的不同, 视觉检测技术分为主动视觉检测和被动视觉检测两大类。主动视觉检测是采用结构光照明, 通过结构光在被测物体上的精确定位来获取被测信息。利用激光做光源来获取结构光的主动视觉检测称为激光视觉检测技术。被动视觉采用非结构光照明, 它是根据被测空间点在不同像面上的相关匹配关系, 来获得空间点的三维坐标。由于视觉检测技术具有非接触、速度快、精度适中、

可实现在线等优点,已广泛地应用于工业生产中的在线检测。

一、激光视觉检测的原理

1. 激光三角法测量原理

激光三角法是激光视觉检测技术的基础。下面以单点式激光三角法为例说明激光三角法测量原理。

单点式激光三角法测量常采用直射式和斜射式两种结构。图 1-43 (a) 为直射式三角法测量原理。激光器 1 发出的光线,经会聚透镜 2 聚焦后垂直入射到被测物体表面 3 上,物体移动或表面变化,导致入射光点沿入射光轴移动。接收透镜 4 接收来自入射光点处的散射光,并将其成像在光电位置探测器 5 (如 PSD、CCD) 敏感面上。若光点在成像面上的位移为 x' ,可求出被测面的位移为

$$x = \frac{ax'}{b \sin \theta - x' \cos \theta} \quad (1-60)$$

式中 a ——激光束光轴和接收透镜光轴的交点到接收透镜前主面的距离;

b ——接收透镜后主面到成像面中心点的距离;

θ ——激光束光轴与接收透镜光轴之间的夹角。

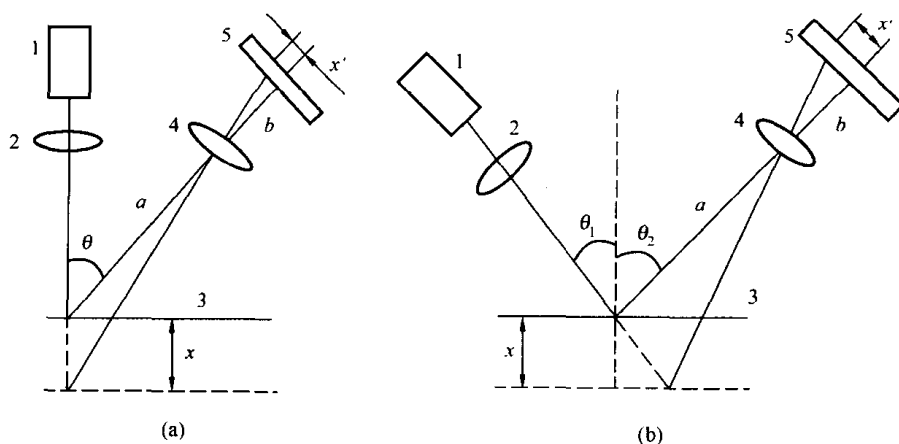


图 1-43 三角法测量原理图

(a) 直射式结构; (b) 斜射式结构

1—激光器; 2—会聚透镜; 3—被测表面; 4—接收透镜; 5—光电探测器

图 1-43 (b) 为斜射式三角法测量原理图。激光器发出的光和被测面的法线成一定角度入射到被测面上, 同样用一接收透镜接收光点在被测面的散射光或反射光。若光点的像在探测器敏感面上移动 x' , 则物体表面沿法线方向的移动距离为

$$x = \frac{ax' \cos \theta_1}{b \sin(\theta_1 + \theta_2) - x' \cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1-61)$$

式中 θ_1 ——激光束光轴和被测面法线的夹角;

θ_2 ——成像透镜光轴和被测面法线的夹角。

直射式由于其接收散射光的特点,适合于测量散射性能好的表面,而斜射式不受此限制。斜射式传感器分辨力虽然高于直射式,但它测量范围小、体积大。

根据三角法测量原理制成的仪器称为激光三角位移传感器。一般采用半导体激光器作光源,功率在 5mW 左右,光电位置探测器可采用 PSD 或 CCD。目前斜射式三角位移传感器有日本 Keyence 公司的 LD 系列,直射式有 Renishaw 公司生产的 OP2、Keyence 生产的 LC 系列和 LB 系列等多种型号。

2. 激光视觉测量的基本原理

激光视觉测量的基本原理为:利用激光作光源产生各种结构光,如点结构光、线结构光及多线结构光,用一个或多个 CCD 摄像机来接收,通过一定算法来获取结构光所携带的被测物体的三维信息。

把由结构光和 CCD 摄像机组成的测量装置称为激光视觉传感器。按激光产生结构光的形式,激光视觉传感器可分为点结构光传感器、线结构光传感器及多线结构光传感器。点结构光传感器以半导体激光器作光源,其产生的光束照射被测表面,经表面散射(或反射)后,用面阵 CCD 摄像机接收,光点在 CCD 敏感面上的位置将反映表面在法线方向上的变化。线结构光传感器是将半导体激光器产生的激光经柱面镜变成线结构光,透射到被测区域形成一激光带,用面阵 CCD 摄像机接收散射光,从而获得表面被照区域的截面形状或轮廓。多线结构传感器是将半导体激光器发出的激光扩束后照射到光栅上,产生多条线结构光,投射到被测表面上形成多条亮带,用面 CCD 摄像机接收,可获得表面的三维信息。

激光视觉传感器的数学模型是激光视觉测量技术的核心内容,所建模型越接近测量实际且模型参数能较准确地标定出来,则可获得较高的测量精度。视觉传感器中,CCD 摄像机是重要的组成部分,传感器的建模就是建立摄像机像面坐标系与测量参考坐标系之间的关系。根据模型的参数选择,建模方法主要有两种:①完全利用投影变换理论,通过无任何物理意义的中间参数,将图像坐标系与测量参考坐标系联系起来。②通过具有明确物理意义的几何结构参数,如光学中心、焦距、位置以及方向等,建立图像坐标系与测量参考坐标系的关系。这类方法的模型参数一般分为摄像机内部参数和传感器结构参数两部分。这种模型直观,根据使用场合及要求达到不同的精度,建立不同复杂程度的数学模型。因此,在视觉检测技术中被广泛使用。

二、激光视觉三维测量技术在露天煤场存煤量自动计量中的应用

燃煤电厂露天煤场存煤量的计量目前尚未很好解决。基于激光视觉三维测量技术的旋转式自动盘煤装置正是为解决这一工程实际问题而研制的。该装置适用于露天煤场存煤量的计量,对煤场的形状及大小无严格要求,适用面广,测量速度快,操作过程简单,应用前景广泛。

1. 旋转式自动盘煤装置的设计原理

(1) 基于主动三角形法的定点测距成像。CCD 与激光器刚性连接在同一水平位置上如图 1-44 所示, A 是激光器光束在物体上形成的光斑, A' 是 A 在经过透镜后成的像点, A*

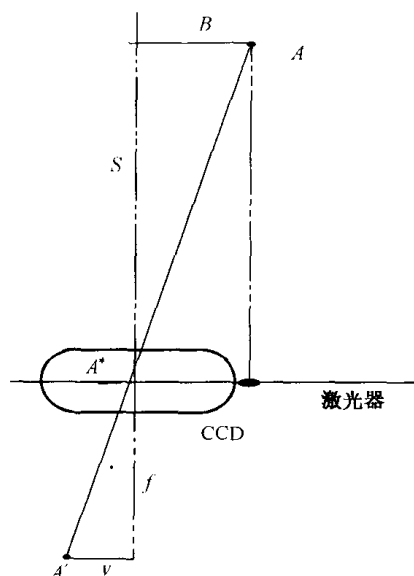


图 1-44 光学三角形成像原理示意图

是 A' 在 CCD 上的投影, 即 A 在 CCD 所成的像点。设 CCD 与激光器二者间的距离为 B , f 是镜头的焦距, y 是像点的像距, 其大小可以通过图像处理软件从计算机读出, 由光学成像的相似三角形原理可得 $B/S = y/f$, 即可算出光斑到激光源的距离 $S = Bf/y$ 。

(2) 选择二维转台作为旋转驱动装置。将 CCD 与激光器水平固定在转台的台面上并安装在具有一定高度的支架上。由计算机发布俯仰和水平旋转指令使装置按极坐标方式转动扫描, 从而实现区域内的定点测量。

(3) 基于直角坐标系的体积计算。图 1-45 是系统定点测高的原理示意图。设 B 为待测点, B^* 为待测点在水平面 xy 上的投影, a 是转台的俯仰角度, b 是转台的水平转角, L 是支架的高度, 运用上面介绍的光学三角形成像的原理我们可以计算出激光源与待测点之间的距离 S , 由于激光源和 CCD 的距离很近, 所以在实际系统中, 我们认为上面的激光器与待测点之间的距离 S 就是 CCD 与待测点之间的距离。从图中可以看出, 由直角三角形的关系得:

定点 B 的高度为

$$Z = L - S \times \cos a$$

定点 B 的水平位置

$$X = S \times \sin a \times \cos b$$

$$Y = S \times \sin a \times \sin b$$

将极坐标扫描获得的定点高度数据转化成直角坐标数据, 在直角坐标系里将煤场底面分成若干相等的方块, 根据每个方块内所有落点的高度平均值作为该小柱体的高度, 从而求出小柱体的体积。再求和得整个煤场的存煤体积。

2. 旋转式自动盘煤装置的组成

(1) 系统硬件的组成。为完成上述

测量工作, 激光盘煤装置的硬件需要由以下几个部分组成 (部分设备的主要技术指标由被测量对象的区域形式及大小来确定): 586 工控机、高分辨率 CCD 摄像机、高倍高精度特种镜头、二维高精度转台、大功率固体激光器及位置调整仪、 640×480 线图像卡。

(2) 系统软件的组成。系统软件由激光盘煤系统管理程序、像素读取及点距测量子系统、体积计算子系统、转台控制子系统和镜头控制子系统组成。

3. 旋转式自动盘煤装置中有关参数的设计原理

根据光学相似三角形成像原理得装置测距相对误差计算公式

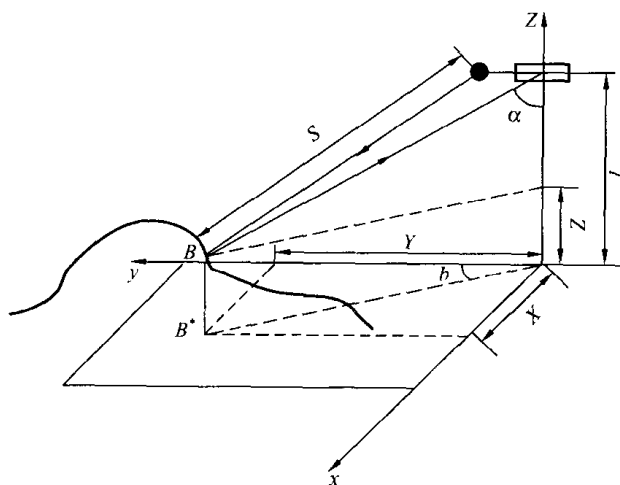


图 1-45 系统定点测高原理示意图

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta y}{y} \quad (1-62)$$

综合考虑装置测量总误差,应尽量减少各项的相对误差。从镜头的加工、设备的安装和图像的读取角度出发,镜头及设备安装等参数的设计做了以下工作。

(1) 镜头焦距的合理分段。根据装置的测量范围可选择不同焦距测量不同的距离,从而使测量的距离范围在 CCD 上所占的线数最大。

(2) 中心点的选择。根据三角形的成像原理,当 CCD 中心线和激光束平行时,物距的成像总是在 CCD 靶面的一侧,故整个测量范围仅占 320 线。为扩大成像范围,使 CCD 中心线和激光束之间有一个微小的倾角,让距离为 90m 的物距在 CCD 靶面的中心成像、距离小于或大于 90m 的物距在中心点两侧成像。在安装调试过程中是通过激光器位置微型调整仪实现的。

(3) CCD 中心和激光器光源中心安装间距的选择。从理论上间距 B 的值大,对提高装置的计量精度有利,但物距的成像范围会随之减小,同时考虑到其工程实现,在旋转的二维转台上二者安装跨度越大,越不利于设备的稳定性。故因兼顾二者综合考虑。

(4) B 、 f 的相对误差在安装调试过程中的修正。在同一光束上按不同焦距下的测量范围选定两点目标,通过微调 f 使物距的测量值逼近计算值。由此可以同时减少 B 和 f 两项的相对误差。

装置在测距过程产生最大误差的地方是在最远物距处。通过上述处理,经实践证明:以最远测距 200m 为例装置测距的最大相对误差为 0.5%。

将整套装置用于现场中进行试验,装置的测量精度可以满足用户要求,且装置的测量速度很快。

近年来,光导纤维在检测技术中的应用得到了迅速发展。以光导纤维作为检测元件和传输通路的光纤传感器,能够用于温度、压力、液位、流量、速度、加速度、电流、磁场等参数的检测。光纤检测已成为检测技术中很有发展前途的新分支。

第一节 光纤检测的基本知识

一、光纤的基本结构、材料和分类

1. 基本结构

光纤是传光的纤维波导或光导纤维的简称。通常,它是由高纯度的石英玻璃为主掺少量杂质锗(Ge)、硼(B)、磷(P)等的材料制成的,呈圆柱形,细如发丝(通常直径为几微米到几百微米)。实用的光导纤维的结构如图2-1所示。中心的圆柱体(半径 a ,折射率 n_1)为纤芯,直径只有几十微米,纤芯的外面有一圈包层(半径 b ,折射率 n_2),其外径约为 $100\sim 200\mu\text{m}$ 。为了增强光纤的强度及可挠性,在光纤包层的外表面还涂上一被覆层(环氧树脂或硅胶),作为光纤的保护层(半径 c ,折射率 n_3 , $n_3\geq n_2$)。这样的构造可以保证入射到光纤内的光波集中在纤芯内传输。光纤是用光纤预制棒在电炉中加热软化后,由光纤拉丝机拉制出来的。在拉制过程中被覆层也同时被涂覆上去。一般一根预制棒可拉制1000m长的光纤。

2. 材料

作为光纤材料的基本条件是:①可加工成均匀而细长的丝;②透光率高(光损耗低)。另外,最好具有长期稳定性、资源丰富、价格便宜等优点。目前光纤的纤芯常用石英材料制成。石英光纤不仅具有原料资源丰富、化学性能稳定等特点,而且在生产技术方面也是最先进、最成熟的。石英光纤在结构上可保证具有可挠性,其抗拉强度也很高。除石英外,多组分玻璃、塑料等材料也可用来制作光纤,如医疗上用的内窥镜中主要用多组分玻璃光纤。塑料光纤用来制作传感装置是比较理想的,但目前它的性能还不够好。

3. 分类

光纤的种类按不同分类方法可分成很多种。按材料来分,可分为石英光纤、多组分玻璃光纤、塑料光纤、液芯光纤等。

根据光纤能传输的模式数目,可将其分为单模光纤和多模光纤。模式是指传输线横截面和纵截面的电磁场结构图形,即电磁波的分布情况。一般说来,不同的模式有不同的场结构,且每一种传输线都有一个与其对应的基模或主模。基模是截止波长最长的模式。除基模外,截止波长较短的其他模式称为高次模。单模光纤只能传输一种模式,但这种模式可以按两种相互正交的偏振状态出现,纤芯的芯径很小,一般在 $5\mu\text{m}$ 以下。单模光纤纤芯通常很细,因此光纤间的耦合比较麻烦。多模光纤能传输多种模式,甚至几百到几千个模式,纤芯的芯径较大,为几十微米,典型的为 $50\mu\text{m}$ 。

根据纤芯径向的折射率分布不同,光纤又可分为阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤。阶跃折射率光纤的纤芯材料的折射率为 n_1 ,包层材料的折射率为 n_2 ,在纤芯与包层的分界面处折射率突然变化。在这一类光纤中,光线在纤芯中以 Z 字形折线传送。由于各种模在阶跃型光纤中的行程长度不同,而纤芯的折射率为常数 n_1 ,各种模的传输速度一样,因此传输过程中各种模的时间延迟是不同的,反映到信号上就是信号的失真。渐变折射率光纤材料的折射率沿半径方向是按抛物线形状分布的,如图 2-1 (b) 所示。光纤中心部分的折射率最大,愈往外折射率愈小。光线在这一类光纤中传播时方向要改变,光线会逐渐自动地向轴线方向折回靠拢,即光纤对光有聚焦作用,形成一近于正弦曲线的传播途径。这类光纤比阶跃折射率光纤的透过率要高得多,这是它的优点。

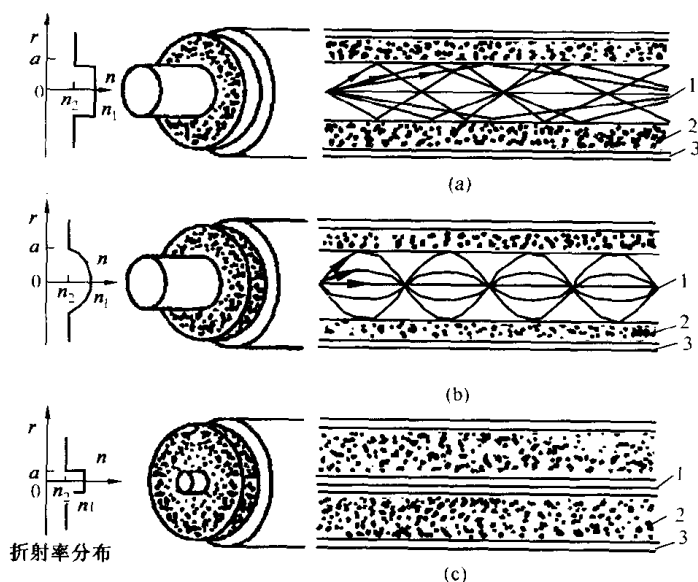


图 2-1 光纤的结构和类型
(a) 阶跃光纤; (b) 渐变光纤; (c) 单模光纤
1—纤芯; 2—包层; 3—套层

二、光纤导光的基本原理

1. 几何光学分析方法

根据光学理论,在尺寸远大于波长而折射率变化缓慢的空间,可以用几何光学的方法分析光波的传播现象,这对于光纤中的多模光纤是完全适用的。因此,我们采用几何光学

的方法来分析光纤导光原理。

斯乃尔定理认为,当光由光密物质(折射率大)出射至光疏物质(折射率小)时,发生折射,其折射角大于入射角,即 $n_1 > n_2$, $\theta_r > \theta_i$, 它们之间的关系为

$$n_1 \cdot \sin\theta_i = n_2 \cdot \sin\theta_r \quad (2-1)$$

可见,入射角 θ_i 增大时,折射角 θ_r 也随之增大,且始终有 $\theta_r > \theta_i$, 这种情况如图 2-2 (a) 所示。

当 $\theta_r = 90^\circ$ 时, θ_i 仍小于 90° , 此时,出射光线沿界面传播,称为临界状态,这时有

$$\sin\theta_r = \sin 90^\circ = 1$$

$$\sin\theta_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-2)$$

式中 θ_0 ——临界角。这种情况如图 2-2 (b) 所示,

当 $\theta_i > \theta_0$ 并继续增大时, $\theta_r > 90^\circ$, 这时便发生全反射现象,如图 2-2 (c) 所示,其出射光不再折射而全部反射回来。

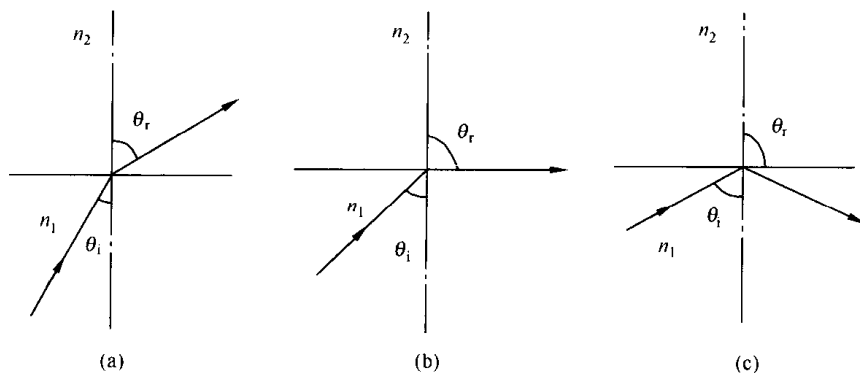


图 2-2 光在不同分界面的传播

下面根据光纤结构图和光的全反射现象进一步分析光由所在空间入射至光纤的传播情况。

由图 2-3 可看出,入射光线 AB 与光纤的轴线 OO 相交,夹角为 θ_i ,入射后折射角为 θ_j ,而且入射后折射至纤芯与包层界面上的 C 点,与 C 点界面法线 DE 成 θ_k 角,并由界面折射至包层 (CK 与 DE 夹角为 θ_r)。

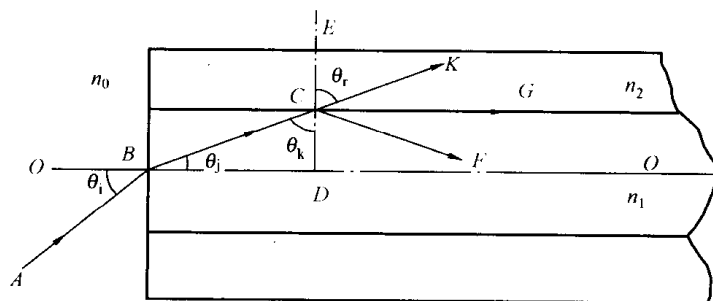


图 2-3 光纤导光示意图

由光纤导光示意图可得出:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_j \quad (2-3)$$

$$n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin \theta_r \quad (2-4)$$

由式 (2-3) 可推出

$$\sin \theta_i = \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_j$$

又

$$\theta_j = 90^\circ - \theta_k$$

所以

$$\begin{aligned} \sin \theta_i &= \frac{n_1}{n_0} \sin(90^\circ - \theta_k) \\ &= \frac{n_1}{n_0} \cos \theta_k \\ &= \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_k} \end{aligned} \quad (2-5)$$

由式 (2-4) 可推出

$$\sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \theta_r$$

代入式 (2-5) 得

$$\begin{aligned} \sin \theta_i &= \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_r \right)^2} \\ &= \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_r} \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中 n_0 ——入射光线 AB 所在空间的折射率, 空间介质一般为空气, 折射率 $n_0 \approx 1$;

n_1 ——纤芯的折射率;

n_2 ——包层的折射率。

当 $n_0 = 1$, 由式 (2-6) 得

$$\sin \theta_i = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_r} \quad (2-7)$$

当 $\theta_r = 90^\circ$, 即临界状态时, $\theta_i = \theta_0$

$$\sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \sqrt{2n_1^2 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)} = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} \quad (2-8)$$

式中 Δ ——相对折射率, $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ 。

纤维光学中把式 (2-8) 中的 $\sin \theta_0$ 定义为“数值孔径”: NA。由式 (2-7) 和图 (2-2) 可看出: 当 $\theta_r = 90^\circ$ 时, $\sin \theta_i = \text{NA}$; 当 $\theta_r > 90^\circ$ 时, $\sin \theta_i < \text{NA}$, 发生全反射; 当 $\theta_r < 90^\circ$ 时, $\sin \theta_i > \text{NA}$, 光线散失。

θ_0 是一个临界值, 凡入射角 $\theta_i > \theta_0$ 的那些光线进入光纤后都不能传播而在包层散失;

相反只有入射角 $\theta_i < \theta_0$ 的那些光线才可以进入光纤被全反射传播。

2. 基于麦克斯韦电磁波理论的分析方法

用几何光学理论对粗光纤中光传播规律进行的分析, 只适用于纤芯直径比波长大得多的情况, 而当光纤的直径小到可以和入射光波长 λ 相接近时 (如半径为 $2\mu\text{m}$ 的光纤中射入由 He-Ne 激光器产生的 $0.6328\mu\text{m}$ 的光) 就应该用模式理论, 即物理光学来分析才可以得到较精确的结果。在模式理论中光被看作是波长较短的电磁波, 它服从一般电磁波的传输规律, 以交变电场和交变磁场之间的相互感生规律传播。

麦克斯韦方程严格地描述了电磁场在线性均匀、各向同性的无源介质中的时空依赖关系。光纤是柱状介质波导, 光在其中的传输规律可以应用光纤所具有的边界条件求解电磁

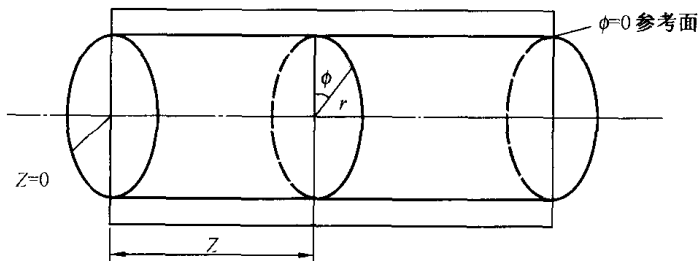


图 2-4 圆柱坐标系

场基本方程组得出。为了方便描述光在光纤里的传播, 一般选用柱坐标系 (Z 、 r 、 ϕ), 如图 2-4 所示。光纤轴线, 即对称波导的中心轴取做 Z 轴, 距参考平面的距离是 Z 。径向坐标 r 为离 Z 轴的距离、角坐标 ϕ 为离 $\phi=0$ 的参考面的角度, 用这三个参数可以确定光纤中一个空间点的位置。

电磁场在光纤中传输的分布形式的不同称为不同的模式。如:

(1) TE_{mn} 模——轴向只有磁场分量 H_z , 横截面上只有电场分量 E_ϕ 、 E_r , 称此为横电波, m 、 n 分别表示 ϕ 向和 r 向的波节数。

(2) TM_{mn} 模——轴向只有电场分量 E_z , 横截面上只有磁场分量 H_ϕ 、 H_r , 称此为横磁波。

(3) HE_{mn} 模和 EH_{mn} 模——轴向既有电场分量又有磁场分量, 称此模为混合模, HE_{mn} 模是磁场分量占优, 反之 EH_{mn} 模是电场分量占优。

下面我们介绍两个重要的概念, 传播常数 β 和归一化频率 ν

在阶跃型光纤中的设有沿 Z 轴无穷大方向传播的电磁波, V_z 为光在 Z 轴方向传播的速度; ω 为光的角频率, 与光频率之间的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。

令 $\frac{\omega}{V_z} = \beta$, β 被称为电磁波在 Z 轴方向的传播常数。

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n \cos \theta = k_0 n \cos \theta \quad (2-9)$$

式中 n ——传播光的介质的折射率;

θ ——光传播方向 (速度 V 方向) 和 Z 轴 (速度 V_z 方向) 夹角;

λ_0 ——光在真空中的波长, $\lambda_0 = n\lambda$;

k_0 ——自由空间波数量。

对于阶跃光纤, 要使电磁波能在光纤中传播, 在纤芯中必须为振荡形式的驻波, 而在包层中应为指数衰减的衰减波, 要达到此要求, 应保证 β 满足不等式 $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$, 即

β 是处于 $n_2 k_0 \sim n_1 k_0$ 之间的一系列离散值, 这些离散值是归一化频率 ν 的函数, 因为 ν 取决于光纤参数 a (半径)、 n_1 、 n_2 (纤芯和包层的折射率) 以及 k_0 , 所以 ν 又被称为结构参数。通过求解可得 ν 值为

$$\nu = 2\pi a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / \lambda_0 \quad (2-10)$$

即

$$\nu = 2\pi a (\text{NA}) / \lambda_0 \quad (2-11)$$

式中 a ——纤芯半径;

λ_0 ——真空中的光波长;

NA——光纤的数值孔径。

通过求解得出 ν 和 β 之间的函数关系如图 2-5 所示, 由图中可知:

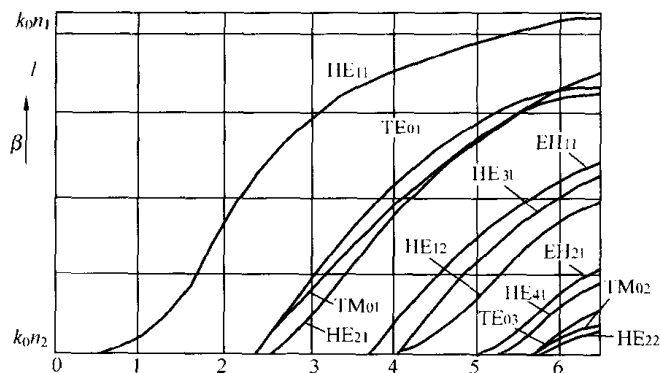


图 2-5 传播常数 β 和不同模式的速度与 ν 参数的函数关系

(1) 当 $\nu < 2.405$ 时, 只有一种 HE_{11} 模, 其他的模均不能传播, 故称此为单模传输, HE_{11} 常称为光纤的主模。在 $\nu < 2.405$ 的范围内, 依据光纤的结构 (a 、 n_1 、 n_2) 及入射光的波长 λ , 由式 (2-10) 可以计算出 ν 值, 再从曲线上得到一个相应的 β 值, 由式 (2-9) 得到一个与此 β 值对应的 θ : $\cos \theta = \frac{\beta a_0}{2\pi} n_1$, 光的入射角只有满足此式才能在光纤中以单模方式传播。

(2) 当 ν 在 2.405 ~ 3.8 之间时, 一个 ν 值就可以在 HE_{11} 、 HE_{21} 、 TE_{01} 、 TM_{01} 四种模式中找到四个对应的 β 值和四个对应的入射角, 故将这种传输称为多模传输。

(3) 随着 ν 值的增大, 可以传输的模式也增加, 对应的 β 值亦多, 相应的入射角也多, 以至于 β 逐渐接近为一个连续量, 入射角也趋向于连续而不是限定在几个特定的角度。

(4) 从波动方程可知, β 在电磁波中是一个相位因子, 多模光纤的各种模式的 β 值是不同的, 因此输送的光的相位信息会在多模光纤的传播过程中遭到破坏, 并发生模式间的干涉, 因此要在传播过程中保持相位信息, 必须用单模光纤。对于单模光纤, 其相应的纤芯半径 a 较小, 纤芯和包层间折射率差 ($n_1 - n_2$) 也较小。

三、光纤的主要特性

这里主要介绍光纤的传输特性 (或称光学特性) 和几何特性。



1. 传输特性

光纤的衰减(或损耗)和色散(或带宽)是描述光纤传输特性的两个重要参量。衰减是描述光纤使光能在传输过程中沿着波导逐渐减小或消失的特性。在给定信号和工作条件,即给定发射机输出功率和检测器灵敏度时,光纤的衰减决定信号无失真传输通路的最大距离。色散限制了光纤传输频响的上限。色散引起的脉冲展宽限制了脉冲调制或数据传输系统中给定长度光纤的最高脉冲或数据传输速度。

光纤的发展和应用过程一直是围绕着降低损耗来进行的。光纤的导光原理人们早就发现了,但由于科学技术的限制,当时制造出来的光纤传输损耗太大,在工业上没有实用价值。直到1970年美国康宁玻璃公司拉制出损耗为20dB/km的光纤,这个领域才引起人们的重视。目前已制成0.2dB/km的光纤,这种光纤信号在传送50km后还有1/10的光强输出,这已达到了人们所说的石英光纤传输损耗的极限了。但由于光纤的衰减受光纤材料固有因素和制造工艺的影响,损耗是绝对不会消除的。

当光从光纤的一端射入,而从另一端射出时,由于各种原因,光强会减弱。这就意味着光在光纤中传输时有损耗。由各种损耗引起的功率衰减通常定义为

$$A(\lambda) = 10\lg(P_i/P_o) \quad (\text{dB}) \quad (2-12)$$

式中 P_i ——输入功率;

P_o ——输出功率。

定义单位长度的衰减为衰减系数 $a(\lambda)$ (dB/km)

$$a(\lambda) = A(\lambda)/L = \frac{1}{L} 10\lg(P_i/P_o) \quad (\text{dB/km}) \quad (2-13)$$

式中 L ——光纤长度(km)。

按引起光纤损耗的因素不同,其损耗主要有吸收损耗、散射损耗和微扰损耗三种。

(1) 吸收损耗。吸收损耗是由光纤材料吸收光能并转化为其他形式能量引起的。吸收损耗可分为两种:固有吸收损耗和非固有吸收损耗。固有吸收损耗是指由光纤的基质材料 SiO_2 和掺杂材料锗(Ge)、硼(B)等引起的损耗,而非固有吸收损耗是由在光纤制造过程中,产生的 OH^{-1} 、 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等无用的杂质引起的吸收损耗,这些离子吸收只出现在其固有的吸收波长范围内。为了制作低损耗光纤,必须将上述这些杂质离子浓度控制到最低限度。

(2) 散射损耗。这种损耗改变部分功率流的传输方向,使在传输方向上的功率流减小,但没有能量转换,瑞利散射在所有散射中最为重要。瑞利散射是由纤芯材料中存在微小颗粒和气孔等结构不均匀性引起的。而这种不均匀性是拉制光纤时冷却过程中直接产生的,是不可避免的,它是降低光纤最低固有损耗的决定因素。瑞利散射与 $1/\lambda^4$ (λ 是波长)成比例,因而它随着传输光波波长的减小而急剧地增加。

(3) 微扰损耗。微扰损耗是指由光纤的几何不均匀性引起的损耗。其中包括由内部因素和外部干扰引起的不均匀性,如宏观结构上折射率和直径的不均匀性、微弯曲等。若光纤有微弯曲,会使纤芯中的导模变换成包层模,从而从纤芯中消失,也就是说,原来满足

全反射条件的光线,射到微弯曲部分时不满足全反射条件了,一部分光便从包层逸出而成为损耗。

综上所述,吸收损耗和瑞利散射损耗是构成光纤总衰减的两个基本因素,且瑞利散射决定最终的损耗极限。

2. 几何特性

光纤的几何特性是指其结构的几何形状和尺寸,它直接影响着光纤的光学传输特性。表征光纤几何特性的参数是纤芯直径、包层直径、纤芯不圆度、包层不圆度和纤芯与包层的同心度误差。光纤横截面的折射率分布和最大理论数值孔径也是决定光纤光学特性的两个重要参数。

前面提到,只有入射角小于临界角的光才能在光纤中传输,因此光源与光纤之间存在着耦合的效率问题,即光源发出的光到底有多少能被光纤所接收而传送,这是由数值孔径决定的。数值孔径是表示光纤集光能力大小的一个参数。它愈大,表示光纤的集光能力愈大,光纤所能接收的光能也愈多,光与光纤之间的耦合效率也愈高;反之则低。

第二节 光纤传感器及其分类特点

一、光纤传感器的组成

光纤传感器是一种把被测的某种量转换为可测的光信号的装置,它是由光发送器、敏感元件、光接收器、信号处理电路及光纤构成的。由光发送器发出的光经源光纤引导至敏感元件,经敏感元件,光的某一性质受到被测量的调制,已调光经接收光纤耦合到光接收器,使光信号变为电信号,最后经信号处理电路处理得到所需要的被测量。

1. 光源

光纤传感器用的光源的种类很多,按照光的相干性可以分为两大类:相干光源和非相干光源。激光器为相干光源,白炽光源和发光二极管为非相干光源。前面已经介绍了激光器,这里介绍白炽光源和发光二极管。

(1) 白炽光源。白炽光源通常为钨丝灯泡,辐射光是从通有电流的钨丝发出来的。钨丝装在抽成真空的或充有惰性气体的玻璃泡里,工作温度 $2200 \sim 3000\text{K}$ 。白炽灯发光近于黑体辐射,光源的亮度正比于辐射体热力学温度的 4 次方。在 2000K 时,其总辐射功率约为 $80\text{W}/\text{cm}^2$,等效亮度约 $6\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 。白炽灯发光分布于整个 4π 球面上,在发射光谱中对光纤传感系统有用的可见光和近红外光部分所占比例较小。白炽灯光源的优点是价廉、容易获得、使用方便,可用作某些传感器的光源。但因其辐射密度小,故只能与光纤束和粗芯阶跃光纤配合使用。其缺点是稳定性较差,寿命短(通常只有几百小时)。

(2) 发光二极管。发光二极管是一种冷光源,是固态 PN 结器件,加正向电流时发光。它是直接把电能转换成光能的器件,没有热转换的过程,其发光机制是电致发光,辐射波长在可见光或红外光区。由于其发光面积很小,故可视为点光源。对在光纤系统中作为光源使用的发光二极管要求其发射光波长应在光纤的低损耗区,亮度高、工作可靠、调

制速率高,制作发光二极管的材料采用晶体材料,使用最广泛的是砷化镓—铝镓砷材料系。

根据出射光的方向,发光二极管可分为表面发光型和侧面发光型两类。表面发光型的发光方向与PN结相垂直,如图2-6(a)所示。侧面发光型的发光方向与PN结相平行,如图2-6(b)所示。表面发光型发光二极管发光体的直径与光纤的芯径相差不大,一般是 $35\sim 75\mu\text{m}$ 。由于其发光亮度不高,故不适用于单模光纤系统,常用作多模光纤的光源。侧面发光二极管的光束发散角在垂直方向约 30° ,在水平方向约 120° ,和表面发光二极管相比,有较高的光耦合效率。对于接收立体角小的光纤来说,此优点尤显突出。侧面发光二极管的有效亮度比表面发光二极管要高 $40\sim 60$ 倍,因此,侧面发光二极管可以作为单模光纤的非相干光源。

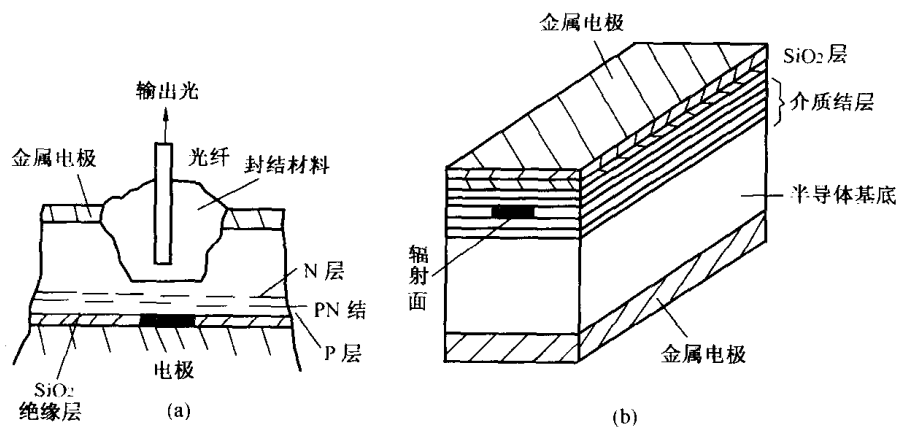


图 2-6 两种发光二极管
(a) 表面发光型; (b) 侧面发光型

要增加光纤内的光通量,必须提高LED的亮度,因此发光二极管的驱动电流密度要高些,约为 $10\text{kA}/\text{cm}^2$ 。发光二极管通过注入电流的变化来调制发光强度,其调制速度受PN结上电荷集聚的影响。通过发光二极管结构与驱动波形的改善,调制速率可达到 250MHz 。LED与光纤耦合时,大多采用透镜。由于LED的老化问题已经解决,其寿命能在100万小时以上,所以很多光纤传感器采用LED作为光源。

光纤传感器所用的光源种类繁多,从白炽光源到激光器的各种光源都可采用。对光源的基本要求是相同的,即必须使具有适当特性的、功率足够大的光到达检测器,以确保检测系统有足够大的信噪比。因此,选择光源时,应当遵循下述原则:

- ①光源要有足够的亮度,以提高传感器输出的光功率。
- ②由于光纤传感器结构所限,要求光源的体积小,便于与光纤耦合。
- ③光源发出的光波长应适合,以减少光波在光纤中传输时的能量损耗。
- ④光源工作时稳定性好、噪声小,能在室温下连续长期工作。
- ⑤光源要便于维护,使用方便。

2. 检测器

在光纤传感器中,光电检测器是必不可少的器件,它起着把光信号变为电信号的关键

作用。

(1) 半导体光电检测器。半导体光电检测器是光纤传感器常用的一种光电检测器，主要有 PIN 光电二极管、雪崩式光电二极管、PIN-FET 微型组件等。它们的结构虽有所不同，但检测过程基本相同，即在入射光子作用下，产生电子—空穴对，然后受强电场作用而分离出自由电子，最后收集起来形成光电流。

硅光电二极管价廉，性能良好，使用方便，是理想的传感器用光检测器。

雪崩光电二极管 (APD) 的优点是其本身具有增益，从而提高了系统的灵敏度；但由于这种增益特性严重地依赖于温度，因此它的偏置电路需要有适当的热漂移补偿，而且增益对电场也极为敏感。因此，即使在恒温下，其偏压也必须保持恒定，一般要求稳定到几十微伏数量级。

PIN-FET 微型组件是小面积低电容二极管与高输出阻抗场效应管前置放大器的复合体。由于其电容小、输入阻抗高，因此，它具有热噪声小的优点，这一点对于长波段更为突出。

(2) 光电倍增管。光电倍增管是一种非常灵敏的光电检测器，它能检测出每秒钟只有一个光子的光电流。

上述光电检测器的主要性能见表 2-1。

表 2-1 各种光电检测器的性能

光检测器	功率范围	波段	量子效率	响应频率	暗电流
光电二极管 (PIN)	受闪烁噪声限制，一般 $P > 100\text{nW}$	$0.4 \sim 1.6\mu\text{m}$ 视材料而定	$60\% \sim 90\%$ 以上， 视材料而定	$> 16\text{Hz}$	Si-PIN $100\text{pA} \sim 1\mu\text{A}$ Ge-PIN $1\mu\text{A} \sim 10\mu\text{A}$
微型组件 (PIN-FET)	受热噪声限制，一般 $P < 100\text{nW}$	$0.8 \sim 0.9\mu\text{m}$ 最好在 $1.3 \sim 1.5\mu\text{m}$	超过 50%	$> 1\text{GHz}$	
雪崩光电二极管 (APD)	增益为 $10 \sim 100$ 时， $P < 100\text{nW}$	$0.8 \sim 0.9\mu\text{m}$ ，也可 用于 $1.3 \sim 1.5\mu\text{m}$	90% 以上	$> 1\text{GHz}$	Si-APD $500\text{pA} \sim 5\mu\text{A}$ Ge-APD $5\text{nA} \sim 5\mu\text{A}$
光电倍增管 (PMT)	能检测 10^{-19}W ，通常 功率 $< 1\text{nW}$ 功率，过高 会损坏阴极	$0.1 \sim 1.0\mu\text{m}$	$< 50\%$	100MHz	

一般光纤传感器对光探测器要求如下：

- ①线性好，按比例将光信号转换为电信号。
- ②灵敏度高，对微小的输入光信号也敏感，并输出较大的电信号。
- ③响应频带宽、响应速度快，动态特性好。
- ④性能稳定，噪声小。

二、光纤传感器分类

在实际光通信过程中发现，光纤受到外界环境因素的影响，如压力、温度、电场、磁

场等环境条件变化时,将引起光纤传输的光波量,如光强、相位、频率、偏振态等变化。因此,如果能测量出光波量变化的大小,就可以知道导致这些光波量变化的压力、温度、电场、磁场等物理量的大小,于是就出现了光纤传感技术。

光纤传感器的发展虽然不是很长,但是已研制出百余种光纤传感器。光纤传感器可根据光纤的传感原理、光受被测量调制的形式或根据光纤传感器中对光信号的检测方法进行分类。

(1) 根据光纤的传感原理,光纤传感器分为功能型(或称传感型)和非功能型(或称传光型、结构型)两类。

功能型光纤传感器,主要使用单模光纤,如图 2-7 所示。光纤在其中不仅起导光作用,而且也是敏感元件。它是利用光纤本身的传输特性受被测物理量作用而发生变化,使光纤中波导光的属性(光强、相位、偏振态、波长等)被调制这一特点工作的。这类传感器的优点是结构紧凑、灵敏度高。但是它需用特殊光纤和先进的检测技术,技术上难度较大,成本高,调整也比较困难。图 2-8 为这类传感器的实例——光纤压力计。光纤穿过两块齿形板的夹缝,当齿形板在压力作用下产生微小位移时,齿形板中的光纤便产生微弯曲,其传输损耗会变化,变化量与压力有关,因此可用测量输出光照度的变化量来确定压力的变化量。由这一实例可见,这里的光纤不仅传光,而且还感受被测压力的变化,也就是起敏感元件的作用。

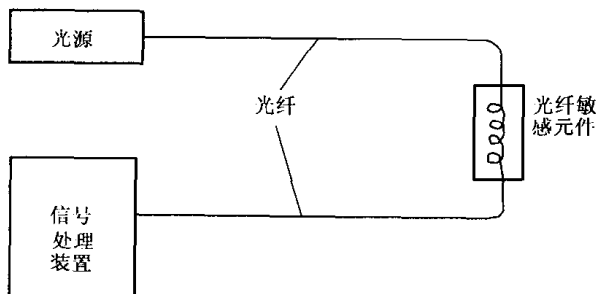


图 2-7 功能型光纤传感器方框图

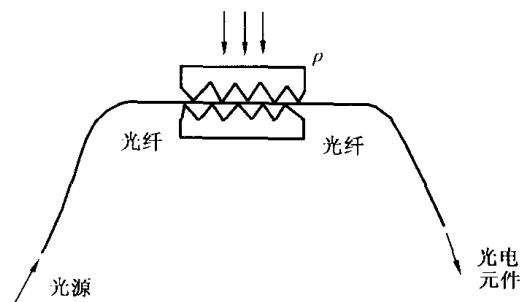


图 2-8 光纤压力计

非功能型光纤传感器中,光纤不是敏感元件。如图 2-9 所示,它是利用在光纤的端面或在两根光纤中间放置光学材料,通过机械式或化学式的敏感元件感受被测物理量的变化,使透射光或反射光强度随之发生变化工作的。为了得到较大受光量和传输的光功率,这类传感器使用的光纤主要是数值孔径和芯径大的阶跃型多模光纤。它的特点是结构简单、可靠,技术上容易实现,成本低,但灵敏度也较低,适用于对灵敏度要求不太高的场

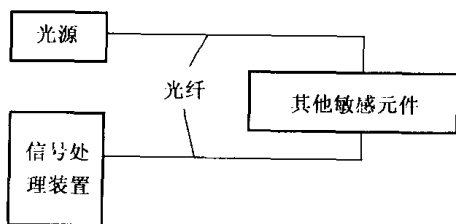


图 2-9 非功能型光纤传感器方框图

合。目前,已实用化或尚在研制中的光纤传感器,大都是非功能型的。图 2-10 是一种非功能型光纤传感器的实例——光纤温度报警器。当水银柱还没有升到预定的报警温度时,由光源来的光能透过温度计而到达对面的光纤;当水银柱升到预定的报警温度时,光路就被切断,由信号处理装置发出声、光

报警信号。由此例可见,这类光纤传感器中的光纤是不连续的,中间有断点,中断部分接上其他敏感元件,光纤仅起传光的作用。

(2) 根据被调制的光波参数不同,光纤传感器可分为强度调制光纤传感器、相位调制光纤传感器、偏振调制光纤传感器、频率调制光纤传感器。

强度调制光纤传感器是利用被测对象的变化引起敏感元件的折射率、吸收率或反射率等参数的变化,而导致光强度变化来实现敏感测量的传感器。这类光纤传感器的优点是结构简单、容易实现,成本低,其缺点是受光源强度的波动和连接器损耗变化等的影响较大。

相位调制传感器的基本原理是利用被测对象对敏感元件的作用,使敏感元件的折射率或传播常数发生变化,而导致光的相位变化,利用干涉仪来检测这种相位变化而得到被测对象的信息。这类传感器的灵敏度很高,但由于需用特殊光纤及高精度检测系统,因此成本很高。

偏振调制光纤传感器是利用光的偏振态的变化来传递被测对象信息的传感器。这类传感器可以避免光源强度变化的影响,因此灵敏度较高。

频率调制光纤传感器是利用由被测对象引起的光频率的变化来进行监测的传感器。

(3) 根据被测参数的不同,光纤传感器又可分为位移、压力、温度、流量、速度、加速度、振动、应变、电压、电流、磁场、化学量、生物量等各种光纤传感器。

表 2-2 归纳了各类光纤传感器基于某种光学效应的原理、分类以及光纤的种类。

表 2-2 光纤传感器的原理、分类以及光纤的种类

被测物理量	光的调制	光 学 效 应	传感器分类	光 纤
电流、磁场	偏光	法拉第效应	传感型、传光型	单模、多模
	相位	干涉现象(磁致伸缩)	传感型	单模
电压-电场	偏光	泡克耳效应	传光型	多模
	相位	干涉现象(电应变效应)	传感型	单模
温度	光强度	用隔板遮断光路	传光型	多模
		半导体光吸收效应	传光型	多模
		荧光反射	传光型	多模
	光强度-光谱	发射体辐射	传光型	多模
	偏光	双折射变化	传光型	多模
角速度	相位	萨格纳克效应	传感型	单模
速度-流速	频率	多普勒效应	传光型	单模、多模

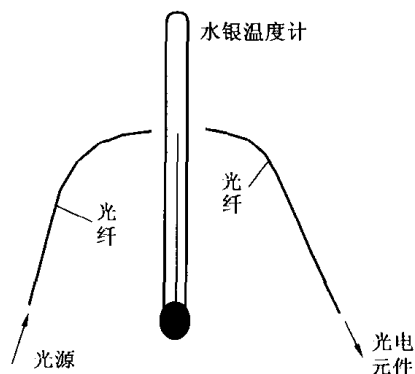


图 2-10 光纤温度报警器



续表

被测物理量	光的调制	光 学 效 应	传感器分类	光 纤
流量	相位	干涉现象	传感器	多模
位移、振动、 加速度、压力	光强度	微弯曲损耗	传感型	多模
		用隔板遮断光路	传光型	多模
		反射光强的变化	传光型	多模
	偏光	光弹性效应	传光型	多模
	相位	干涉现象（光弹性效应）	传感型	单模
	频率	多普勒效应	传光型	单模、多模

三、光纤传感器的特点

光纤传感器用光而不用电来作为敏感信息的载体，用光纤而不用导线来作为传递敏感信息的媒质。因此它有一些常规传感器所没有的特点，主要有如下几个方面：

(1) 电绝缘性好。光纤本身是非金属材料，光纤的外层涂覆材料也不导电，因此光纤传感器具有良好的电绝缘性。由于测量时不会把高电压设备的高电位引出来，光纤传感器特别适用于高压供电系统及大容量电机的测试。

(2) 抗电磁干扰能力强。这是光纤测量及光纤传感器的极其独特的性能特征，因此光纤传感器特别适用于高压大电流、强磁场噪声、强辐射等恶劣环境中，能解决许多传统传感器无法解决的问题。

(3) 防爆性能好，耐腐蚀。在光纤内部传输的是能量很小的光信息，因而不会产生火花、高温、漏电等不安全因素。又由于光纤本身耐腐蚀，故光纤传感器特别适用于易燃、易爆、有强腐蚀性的对象参数测量。

(4) 高灵敏度。高灵敏度是光学测量的优点之一。利用光作为信息载体的光纤传感器的灵敏度很高，是某些精密测量与控制的必不可少的工具。

(5) 体积小，重量轻。光纤可以做成非常小巧的传感器，用于特殊场合。

第三节 光纤在温度检测中的应用

温度检测在工业生产中占所需检测量的 50% 左右。光纤传感技术在温度测量中的应用，已取得不少成就。利用不同原理研制的光纤温度传感器的种类很多，有晶体光纤温度传感器、半导体吸收光纤温度传感器、双折射光纤温度传感器、光路遮断式光纤温度传感器、荧光光纤温度传感器、Fabry-Perot 标准器光纤温度传感器、辐射式光纤温度传感器、分布参数式光纤温度传感器等，其中有些产品已经商品化了。现在对几种典型的光纤温度传感器（温度计）予以介绍。

一、辐射式光纤温度计

辐射式光纤温度计属于非接触式光纤温度计，它是依靠光纤接收被测体辐射能量来确

定被测体温度的仪器。

1. 工作原理

辐射光纤温度计是基于全辐射体辐射的原理来工作的。由全辐射体辐射的原理可知,所有的物质,当它的温度高于绝对零度时,均发出一定量的热辐射,这种热辐射的量取决于该物质的温度及其材料的辐射系数。而对于理想的透明材料,其辐射系数为零,这时不产生任何热辐射。但实际上,所有的透明材料都不可能是理想的,因而它的辐射系数也不可能为零。例如,低损耗的石英玻璃,在 $100 \sim 1000^\circ\text{C}$ 的温度范围内有很大的热辐射,也具有一定的辐射系数。

对于理想全辐射体,辐射源发射的光谱辐射出射度 $E_{0\lambda}$ 与波长 λ 和温度 T 的关系可用普朗克公式表示:

$$E_{0\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (2-14)$$

式中 C_1 ——第一辐射常数, $C_1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$;

C_2 ——第二辐射常数, $C_2 = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

当波长 λ 一定时, $E_{0\lambda}$ 与温度 T 之间就有一一对应的关系。

全辐射体的辐射出射度 E_0 (波长从 $0 \sim \infty$) 与温度 T 有如下关系:

$$E_0 = \int_0^\infty E_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2-15)$$

式中 σ ——斯忒藩-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

以上两式适用于全辐射体的辐射情况。对于真实物体,应用上述定律要进行修正。修正后的式子见式 (2-16)。

真实物体的光谱辐射出射度 E_λ 与 T 的关系为

$$E_\lambda = \epsilon(\lambda) \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (2-16)$$

式中 $\epsilon(\lambda)$ ——实际物体混在波长 λ 下的光谱发射率。

真实物体的辐射出射度 E 与 T 的关系为

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2-17)$$

式中 ϵ ——实际物体的全辐射发射率。

利用这些定律可以制造出三种辐射温度计。一种是利用单色辐射定律制造的单色辐射温度计,物体的光谱辐射出射度和温度的关系是确定的,通过测量某一波长的光谱辐射出射度,就可以计算出所对应的温度。第二种是利用全辐射定律制造的全辐射温度计,通过测量物体的辐射出射度来得到被测物体的温度。由于发射率变化的影响和中间介质对热辐射的吸收,这两种测温计的准确度较低。第三种是利用两光谱(波长分别为 λ_1 和 λ_2) 的辐射出射度之比与温度之间的关系来测定高温物体温度的比色高温计,它基本上可以消除发射率变化和中间介质吸收的影响,具有较高的准确度,但价格比较贵,结构复杂。要提高这类仪表的测量精度,必须要消除发射率影响和中间介质对热辐射吸收的影响。可采用人为制造全辐射体环境的办法来减小第一种影响。要消除第二种影响只有将探头靠近被测对象。光纤辐射式温度计就是利用了石英光纤既能导光又耐高温的特性而制成的。石英光

纤材料的软化温度为 1400°C ，在 1000°C 以下呈晶体状，不发生失透现象，因而这类温度计的传感头（石英光纤棒）可接近高温物体，能消除中间介质（蒸汽、尘埃、各种气体成分）对辐射吸收的影响，提高测量精度。

2. 结构

辐射式光纤温度计的组成框图如图 2-11 所示。

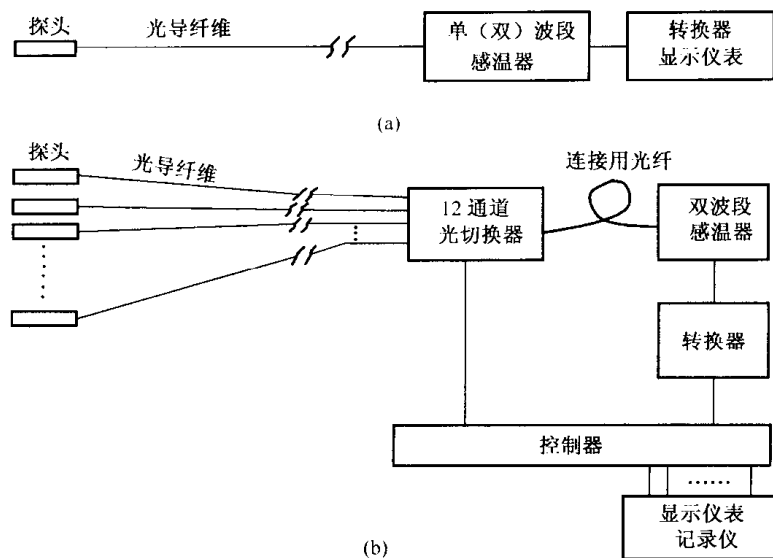


图 2-11 辐射式光纤温度计的组成框图

(a) 单（双）波段光纤温度计；(b) 多点温度测量系统

单波段光纤温度计结构简单，灵敏度高，仪表组成有直接接收放大型，也有光负反馈型，能够测量较低温度（如低至 100°C ）。但是，当探头端面被沾污，光纤束断线，便不能准确地测量温度，必须重新校验或重新分度。

双波段光纤温度计结构较为复杂，有单通道比色型，也有双通道比色型。这里采用两光谱段能量比值方法，目的并非追求测量真实温度，而是在于当探头端面具有一定程度沾污，小渣粒遮挡一部分接收面积时，或者光纤束断了几根线，仪表示值不受影响。

图 2-11 (b) 为一台双波段光纤辐射仪表，多支光纤束能够进行多点温度测量，便于多点温度的集中显示和控制。由以上辐射式光纤温度计的组成框图可知，这类温度计基本由三部分组成：测温探头（光纤传感元件）、传送光纤、显示仪表（或信号处理装置）。

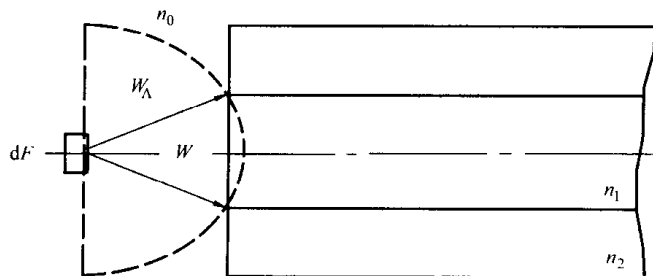


图 2-12 耦合效率

(1) 测温探头。测温时测温探头将接近被测对象，它是决定拾光大小和温度计灵敏度的主要元件，而耦合效率是其重要参数。如图 2-12 所示，对于辐射面元 dF 入射到具有平端面的光纤时，其耦合效率为

$$\eta = W/W_A = \frac{1}{n_0^2}(\text{NA})^2 \quad (2-18)$$

式中 W_A ——辐射面元 dF 沿半球空间的辐射能量；

W ——经耦合进入光纤被传播的辐射能量；

n_0 ——辐射面元 dF 所在介质的折射率。

为提高传感器的灵敏度，必须采用较大数值孔径的光纤。但是，NA 数值的大小又直接影响到距离系数的性能指标，因而要综合考虑。如图 2-13 所示，距离系数 K 由下式定义

$$K = \frac{L_0}{D} = \frac{L_0}{2r} = \frac{1}{2} \cot \theta_{\max} = \frac{1}{2} \cot(\arcsin NA) \quad (2-19)$$

由上式看出，增大 NA 虽然可以提高耦合效率及传感器的灵敏度，但却要相应地减小 K ，即在保持测量距离不变的情况下，要求有更大的被测靶径，这样便不能用于小目标测量。

辐射式光纤温度计的测温探头的结构分为两类：直接耦合式探头和透镜耦合式探头。

①光导棒探头（石英光纤预制棒）。图 2-14 是直接耦合式探头的示意图。探头采用石英光纤预制，因为石英耐高温又能传输辐射能，同时起着温度隔离作用，如果直接使光纤束与对象靠近，则由于光纤束的粘结剂不耐高温而使光纤束受到损坏。这里采用吹风的方法，目的是保持光导棒接收端面不被灰尘和其他污物等沾污。吹风空气本身必须清洁。光导棒测温探头必须靠近对象，如果远离对象，势必要求被测对象的面积很大。

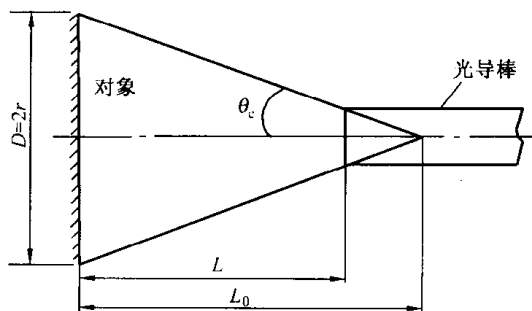


图 2-13 光导棒探头的目标与距离的关系

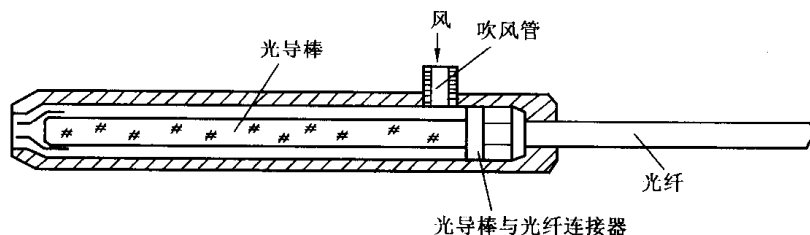


图 2-14 光导棒探头结构

根据距离系数 K 的定义，如果 $NA = 0.25$ ，则 $K = 1.94$ ；如果 $L_0 = 500\text{mm}$ ，则 $D = 258\text{mm}$ 。因此，测小目标时，必须靠近对象或采用透镜测温探头。

②透镜测温探头。图 2-15 所示为带有小透镜的测温探头。图中， L 为透镜物距； L' 为透镜像距； D 为对象直径； d 为光纤束接收端面直径。由距离系数 K 的定义可知

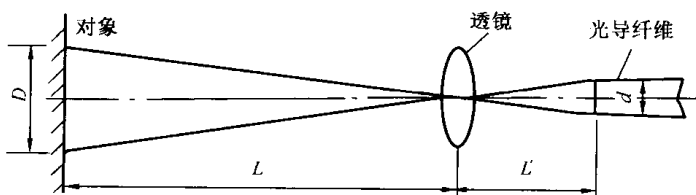


图 2-15 透镜测温探头结构

$$K = \frac{L}{D} = \frac{L'}{d} \quad (2-20)$$

如果设计透镜成像于光纤接收端面，像距 $L' = 50\text{mm}$ ，光纤端面直径为 2.5mm ，则距离系数 $K = 20$ ；如果 $L = 500\text{mm}$ ，则 $D = 25\text{mm}$ 。因此，这种探

头可以在灵敏度一定的情况下平衡数值孔径与距离系数之间的关系。

图 2-16 所示为一种石英光纤传感元件结构。柱状透镜由石英材料制成，冷空气流一方面冷却石英光纤棒，另一方面从喷嘴喷出防止尘埃污染石英柱状透镜的端面，保持光学系统的透明度。石英光纤棒的尾部与传送光纤相连接。

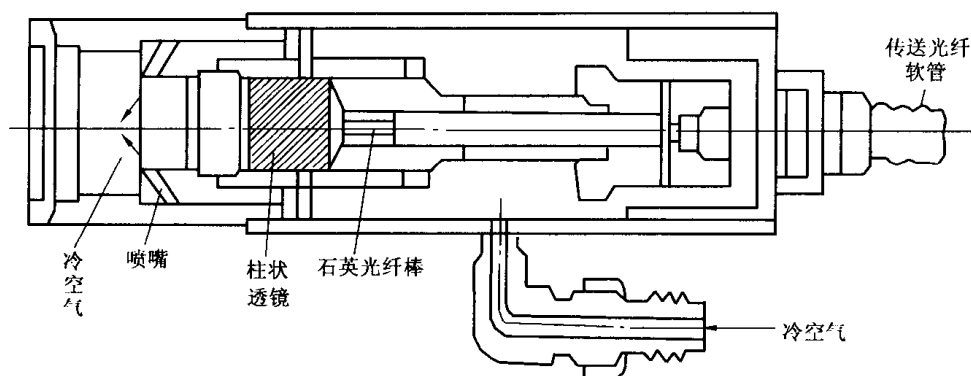


图 2-16 石英光纤传感元件结构

(2) 传送光纤。传送光纤一般由多根大芯径、大数值孔径的石英光纤束组成，外加金属软管保护，是软性材料，可以弯曲。它的作用是将端部耦合进入光纤的辐射能传输至尾部光电转换元件。光纤的输出端也有直接耦合和透镜耦合两种方式。透过率是传输光纤的主要参数。当传送光纤的材料一定时，可加大光纤直径及缩短光纤长度来提高传输功率。

(3) 信号处理装置。这部分的作用是将光信息转换成电量输出并加以显示。由传送光纤输出的辐射能经光电元件转换成电信号。根据不同的测温范围选用不同的光电元件，如表 2-3 所示。光电元件输出的电信号经处理后，由显示器（数字量或模拟量）显示出被测温度值。显示部分与一般的辐射温度计相同。

表 2-3 不同测温区域所用的光电元件

温区	测温范围 (°C)	波长 (μm)	光电元件
低温	500 ~ 1500	1 ~ 2.5	PbS (硫化铅)
中温	700 ~ 2000	0.8 ~ 1.0	Si
		0.4 ~ 0.6	光电倍增管
高温	1500 ~ 3000	0.5 ~ 0.6	Si

值得一提的是，为了提高测量的准确性及测温上限，研制了光纤高温传感器。其原理与辐射式光纤高温计相同，不同处在于它是以光纤纤芯中的热点本身所产生的全辐射体辐射现象为基础，非常类似于传统的高温计，只不过这种装置不是探测来自炽热的不透明的物体表面的辐射，而是把光纤本身作为一个待测温度的全辐射体腔。因为它只探测辐射，故无需任何光源。

光纤高温传感器的基本工作原理如图 2-17 所示。它由传感器的高温探头、高低温光纤耦合器、信号检测和处理系统等几部分组成。高温探头是由单晶蓝宝石棒或纯石英棒用

镀膜技术制作成为黑体辐射腔。当它放在被测温度场中，黑体腔通过开口处向外辐射能量，辐射能量经高低温光纤耦合器后，由低温低损耗光纤传输到光电二极管（在光电二极管前用透射率大于50%的窄带滤光片），再由 PIN-FET 组成的前置放大器和锁相放大电路进行信号检测。采用 PIN-FET 低噪声前置放大电路，选择合适的宝石棒直径和低温光纤纤芯直径，并设计最佳的高温光纤耦合器可以提高探测灵敏度和检测信噪比。

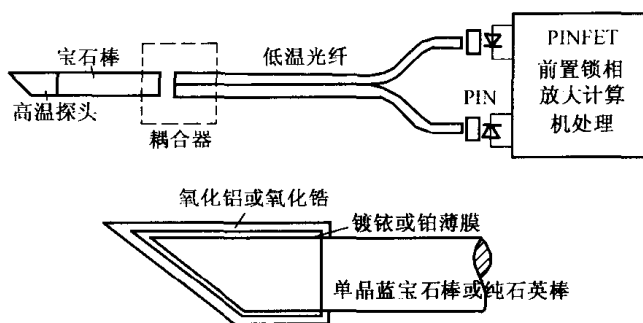


图 2-17 光纤高温传感器的基本工作原理

光纤高温传感器的关键之一，是研制性能稳定的传感器探头。探头的质量取决于镀膜技术、光学冷加工及探头材料的性能。有关研究结果表明，在 1000°C 以下温区，采用纯石英棒作高温探头材料是可行的，它的热稳定性和传光性能良好， 1000°C 以上温区，则需采用单晶蓝宝石棒作高温探头，并且宝石棒的光轴与棒轴之间夹角小于 5° 为佳。用宝石棒和石英棒制作的高温探头均能较好地测量温度。

实践表明，采用单晶蓝宝石棒和纯石英棒，用镀膜技术制作成黑体辐射腔的高温探头是可行的，它具有测量精度高，结构简单，使用方便等特点，是一种较理想而实用的高温传感器，可以用于航空工业中的尾焰温度或内燃机车汽缸温度测量，还可以进行多点温度测量。

3. 辐射式光纤温度计的应用

(1) 在燃气涡轮发动机中的应用。燃气涡轮发动机发展的一个重要内容就是不断提高发动机进口温度。涡轮进口温度的提高，可以大大改善发动机的性能，但对燃气涡轮发动机的温度检测也提出了更高的要求，特别是对涡轮叶片温度的测量。过去曾采用过硅光电探测器作敏感元件的辐射式温度计，但无法解决燃气对透镜的污染和硅光电元件在高温下工作的稳定性等问题。纤维光学技术的发展给光辐射信号的远距离传输提供了可能性，这样辐射高温计的敏感元件就可以安装在离发动机壁比较远的低温环境中。典型的航空机载叶片辐射高温计系统主要由光探头、光纤、探测器和信号处理装置四个部分组成，其结构如图 2-18 所示。

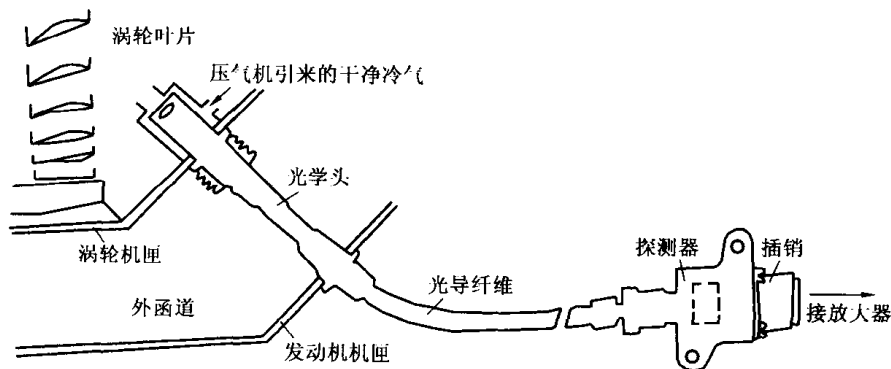


图 2-18 典型的辐射高温计示意图

光探头安装在发动机的涡轮机匣上,包括一蓝宝石透镜。透镜钎焊在一个钛合金的安装座内,安装座又和不锈钢的主体焊在一起。

蓝宝石是氧化铝的晶体,有高的热稳定性、良好的强度和透射性,熔点在 2030°C ,可以工作在 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ 的温度条件和 $350\text{N}/\text{cm}^2$ 的压力条件下。蓝宝石的透射波长范围为 $0.14\sim 6.5\mu\text{m}$,保证在探测器的光谱响应范围内有良好的透射性。

为了降低光导纤维接头处的温度,不锈钢探头主体的后部制成散热片形状。在主体的外部有一瞄准管,直接固定在涡轮机匣上面。从压气机引来的干净冷空气就在瞄准管内通过,它的另一个作用是遮挡周围的热金属部分的干扰辐射。涡轮叶片被测区域的辐射,则通过透镜聚焦在光探头后部的光导纤维端面上。

光导纤维的作用是把辐射能量由光探头传送到探测器,由石英光纤束制成,外加保护套。

探测器是一个方形的铝合金盒子,一端和光导纤维相连,另一端是输出插头,内部放着一个光敏感元件。很多研究试验表明,光敏感元件选用扩散结型的硅光电探测器较好,它具有较好的线性度和较低的漂移。环境温度的变化会引起光电元件输出的漂移,为此要采取一定的措施。

信号处理装置的主要功能是:①把光敏感元件输出的微弱电信号加以放大;②补偿环境温度引起的信号漂移;③清除干扰信号的影响;④进行线性化处理以便配接显示器或控制系统。

实用化的这种产品,测温范围从 $700\sim 1100^{\circ}\text{C}$,总系统的误差不超过 5°C 。

(2) 在电厂锅炉灭火保护装置中的应用。在电厂锅炉灭火保护装置中,测定燃烧器火焰“燃”或“灭”的探头就是利用了光纤辐射温度计的原理。光纤火焰监测器探头结构和测量电路原理如图 2-19 所示。图 2-19 (a) 为光纤探头结构,探头由石英光纤棒、硅光电池及保护套管三部分组成。这里的压缩空气主要是起防止光纤棒端面被尘埃污染及使硅光电池工作环境温度较稳定的作用。硅光电池采用 2DR20 型元件。光纤探头输出的是开关量,若燃烧器喷出的燃料在燃烧,探头输出为“1”,灭时为“0”。这种监视有两种方法:全炉膛监视法与单个燃烧器监视法。全炉膛监视法,整个炉膛仅装一个光纤探头;单个燃烧器监视法是每个燃烧器安装一个光纤探头,各探头的输出信号由逻辑电路来判别及处理。

信号处理及显示部分由图 2-19 (b) 电路所示。因为它只需判别“燃”或“灭”,所以

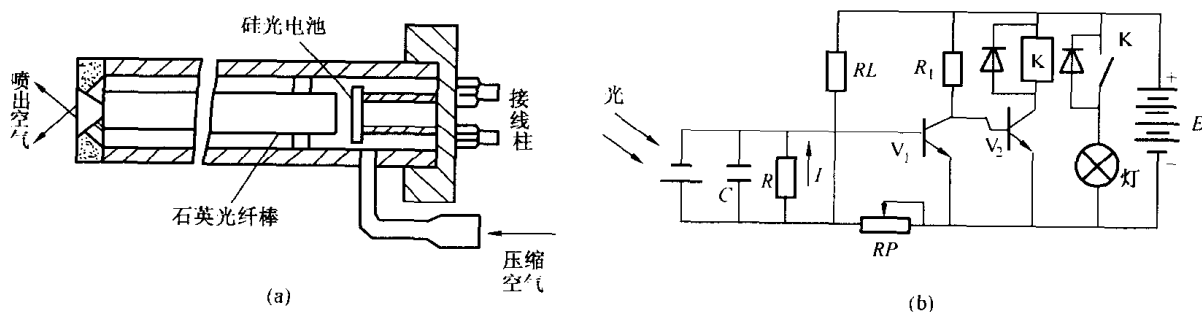


图 2-19 光纤火焰监测器探头结构和测量电路

用一个灯泡显示就行。电位器 RP 为调零电位器, 它所调节的电压 U_d 称为坎值电压。设置 RP 的目的是调 U_d , 因为锅炉炉膛内的燃烧非常复杂, 当一个燃烧器熄灭时, 其他燃烧器可能还在燃烧, 因而背景光还很亮, 这时光电池还会有一信号输出, 这里通过调节坎值电压 U_d 的值来抵消这一信号电压。坎值电压为

$$U_d = U_R + U_{bel} \quad (2-21)$$

$$\text{即} \quad U_{bel} = U_d - U_R = U_d - IR \quad (2-22)$$

式中 U_{bel} —— V_q 所加电压。

若电位器 RP 已调整好, 则电阻为定值, U_d 也不变了。当燃烧器燃烧时, 光纤接收了火焰的辐射能并传送给硅光电池。光电池输出电压增大, 电流 I 也增大, 由式 (2-22) 知, U_{bel} 下降, 则 V_1 截止, V_2 导通, 继电器 K 工作, 其接点 K 合上, 灯亮, 表示燃烧器在燃烧。反之当燃烧器熄灭时, 过程相反, 灯灭, 表示燃烧器熄灭。

这套装置有如下的特点: 因光纤传送的是热辐射能, 所以反应速度快, 迟延很小; 石英光纤能耐高温, 因而适当采取一些措施后就能与被测对象靠近; 方向性好, 因为它只有 $2\theta_0$ 立体角内的光能才能被接收传送, 所以抗杂光干扰的能力较强; 整套装置的结构和线路较简单, 故实施方便。

二、半导体光纤温度计

半导体光纤温度计是由半导体吸收器、光纤、光源和包括光探测器的信号处理系统等组成。其体积小、灵敏度高、工作可靠、容易制作, 且没有杂散光损耗, 可以应用于高压电力装置中的温度测量。

1. 工作原理

半导体光纤温度计工作的基本原理是利用有些半导体材料 ($GaAs$ 或 $CdTe$) 的光吸收随着温度的变化而变化。由半导体理论知道, 半导体的禁带宽度 E_g 随着温度的变化关系式为

$$E_g(t) = E_g(0) - \frac{\alpha t^2}{\beta + t} \quad (2-23)$$

式中 $E_g(0)$ ——绝对零度时半导体材料的禁带宽度;

α ——经验常数, eV/K ;

β ——经验常数, K 。

对于 $GaAs$ 材料, 由实验得到

$$\begin{aligned} E_g(0) &= 1.522 \text{ eV} \\ \alpha &= 5.8 \times 10^{-4} \text{ eV/K} \\ \beta &= 300 \text{ K} \end{aligned}$$

由式 (2-23) 可知, 半导体材料的 E_g 随温度上升而减小, 随温度下降而增大。由普朗克定律可得

$$E_g = hf_g \quad (2-24)$$

式中 f_g ——与能量差为禁带宽度 E_g 相对应的频率;

h ——普朗克常数。

式(2-24)的意义是,电子从价带跃迁到导带上去需要吸收频率为 f_g 的光子,所以把 f_g 称为吸收频率,与其相对应的吸收波长 $\lambda_g = c/f_g$, c 是光速,则得

$$\lambda_g = ch/E_g \quad (2-25)$$

由式(2-25)可知,吸收波长 λ_g 随着禁带宽度 E_g 的增大而减小,而前述 E_g 随着温度 T 的增大而减小,所以吸收波长 λ_g 随着温度 T 的增加而增大,随着温度 T 的减小而减小。

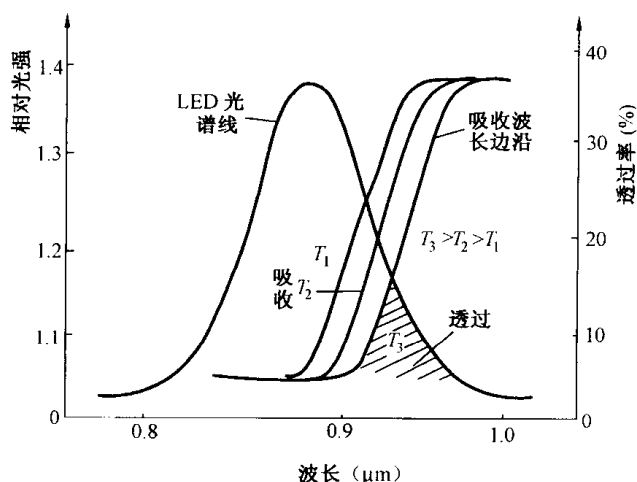


图 2-20 半导体光纤温度计的测温原理

作为传感材料的半导体可以是碲化镉和砷化镓,厚度分别为 0.5mm 和 0.2mm,两个端面经过抛光。测温范围受环氧树脂耐温上限的限制,一般为 $-50 \sim 120^{\circ}\text{C}$,测量精确度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

如图 2-20 所示,对应于半导体的透射率特性曲线的吸收波长 λ_g ,随温度增加而向长波长方向移动。当一个辐射光谱峰值波长与 λ_g 相一致的光源发出的光通过此半导体时,其透射光的强度随温度的增加而减少。

2. 测量装置结构

根据上述原理,可以制成半导体光纤温度计,其装置及探头结构如图 2-21 所示。在两根光纤之间夹放着一块半导体薄片,并套入一根细的不锈钢管之中固定紧(直径 2mm),用环氧树脂封死。

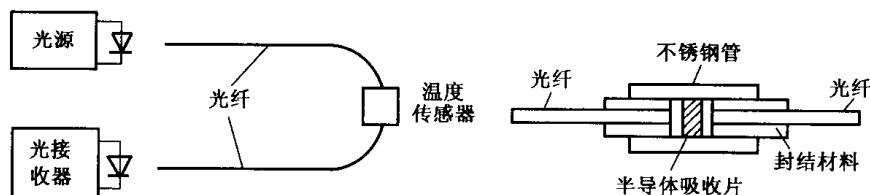


图 2-21 半导体光纤温度计的测温系统及结构

整个测温系统由光源(LED)、光接收器、半导体传感器及光纤组成。光源由恒流电源供电而发光,使光源发光的光强稳定不变。光接收器由光电元件及信号处理装置组成。光电元件一般采用光电三极管或 PIN 型光电二极管。信号处理装置是把光电元件输出的包含有温度信息的电信号,经放大等环节,最终用模拟量或数字量显示出来。这种单光源、单光纤的半导体光纤温度计容易受外界环境因素的影响。主要影响为两个方面,一是受光源发光的稳定度的影响,二是传送光纤受环境变化的影响,因而这种简单结构的测温系统误差较大。为了提高测量精确度,人们在此基础上采取了一些措施,现介绍一种实用的半导体光纤温度计,如图 2-22 所示。

半导体光纤温度计的组成包括上述半导体传感器、信号处理电路以及两个光源、一个

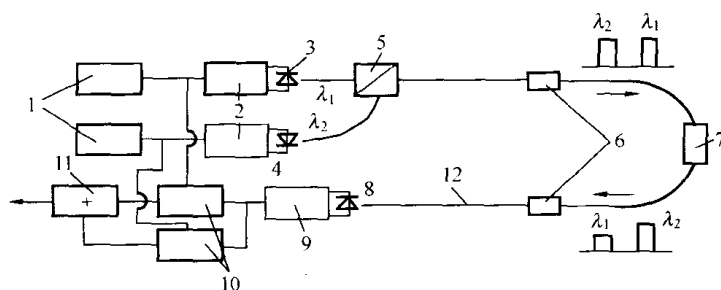


图 2-22 一种实用的半导体光纤温度计

1—脉冲发生器；2—LED 驱动器；3—AlGaAs-LED (λ_1)；4—InGaPAs-LED (λ_2)；5—光耦合器；6—光纤连接器；7—探头；8—APD；9—光接收电路；10—采样放大器；11—除法器；12—光纤

光探测器。光源是采用两只不同波长的发光二极管，一只是 AlGaAs 发光二极管，波长为 $\lambda_1 \approx 0.88\mu\text{m}$ ，另一只是 InGaPAs 发光二极管，波长为 $\lambda_2 \approx 1.27\mu\text{m}$ 。它们由脉冲发生器激励而发出两束脉冲光，并通过一个光耦合器 5 一起耦合到输入光纤中。每个光脉冲宽度为 10ms，占空比为 3%，光脉冲的时间间隔为 20ms。两个光脉冲进入探头 7 后，其中的吸收元件对 λ_1 光的吸收随温度而变化，但由于温度传感头的半导体对 λ_2 的光不吸收，即 λ_2 光几乎是全部透过，故取 λ_1 光作为测量信号，而 λ_2 光作为参考信号。另一方面，采用雪崩光电二极管 (APD) 作为光探测器。光脉冲信号从探头出来后通过输出光纤传送到光探测器上，然后进入采样放大器，以便获得正比于脉冲高度的直流信号。在转换成直流信号后，再由除法器以参考光 (λ_2) 信号为标准将与温度相关的光信号 (λ_1) 归一化。显然除法器的输出只取决于半导体透射率特性曲线边沿的位移，即与温度有关。这种半导体光纤温度计可以在 $-10 \sim 300^\circ\text{C}$ 的温度范围内进行测量，精度可达 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

这类温度计在电力系统中主要用在高压及超高压电力变压器中热点温度的直接测量，这种测量对变压器的安全、经济运行和延长使用寿命有着决定性的作用。变压器线圈的最热点的绝缘由于过热而容易老化，有可能发展成整个变压器损坏，酿成重大事故。反之，若线圈最热点的温度过低，变压器的能力就没得到充分利用，降低了经济效益。因此测量热点温度对寻求一种最佳运行状态是十分必要的。过去由于高电压的隔离问题不能很好解决，所以直接测量很困难。采用半导体光纤温度计则能较好地解决这一问题。

三、荧光衰变式光纤温度计

1. 工作原理

这种光纤温度计是基于光致发光效应工作的。稀土磷元素在外加光波能量的激励下，其粒子处于激发状态。当其回到基态时，把能量以光（荧光）的形式释放出来。当外加光能一定时，荧光的某种特征参数（强度、余辉的衰减时间等）是温度的相关函数，通过测量这种特性参数，就可得知与之有关的温度信号。荧光衰变式光纤温度计就是利用荧光物质所发出的荧光衰变时间随温度变化的特性制成的温度传感器。

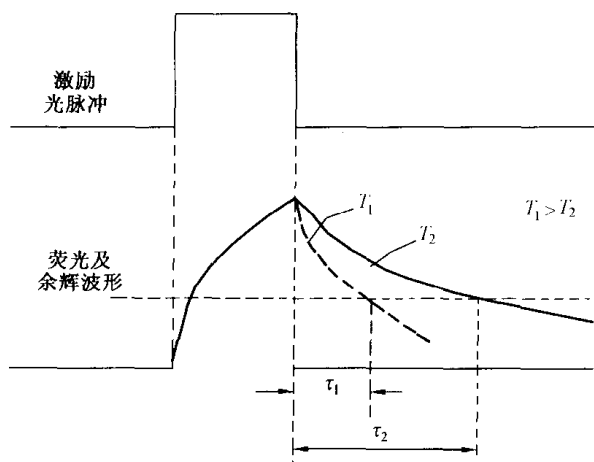


图 2-23 余辉式光纤温度测量原理图

闪烁光照射在掺杂的晶体上，可以激励出荧光来，荧光的强度衰变到初值的 $1/e$ 时所需要的时间，称为荧光衰变时间 τ 。 τ 值的大小与荧光物质的温度 T 有关，如图 2-23 所示，温度高则荧光的余辉衰减快， τ 值小；反之，温度低则荧光的余辉衰减慢， τ 值大。具体说来， τ 值与温度的关系可用下式表示：

$$\tau(T) = \frac{1 + e^{-\frac{\Delta E}{kT}}}{R_E + R_T \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}}} \quad (2-26)$$

式中 R_T 、 R_E 、 ΔE 、 k ——常数；

T ——绝对温度。

根据上述原理，可制成光纤温度传感器。当温度变化时，荧光衰变时间发生变化，利用晶体的荧光衰变时间来控制激励光源调制频率，从而改变了光源调制频率，若测出频率即测出温度。

2. 基本结构

荧光光纤温度计的传感装置如图 2-24 所示。在传感装置的端部放有稀土材料的荧光晶体作为敏感元件，晶体的四周涂敷一层银。用一根石英光纤的端面与它接触，晶体的另一端为反射镜，这样可以通过多次的反射来提高激励效应和充分的利用激发出的荧光。

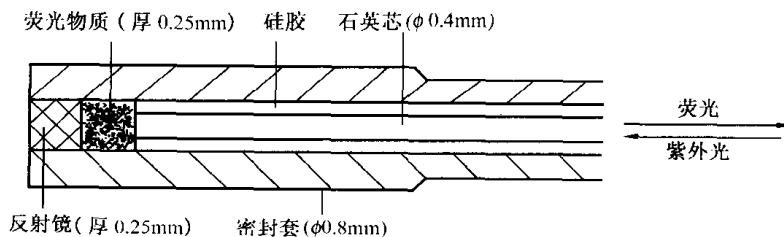


图 2-24 荧光光纤温度计传感装置

简单的测量系统就是通过测量衰变中荧光强度的变化，确定荧光强度衰变到初始值的 $1/e$ 的那一点的时间，由于容易受到环境中各种干扰的影响，这种测量时间的方法在实际应用中是很不准确的，实际的系统通常用的是下面的两种测量方法。

(1) 振荡系统的频率计量法。采用这种方法的荧光衰变式光纤温度计的传感装置如图 2-25 所示。该系统采用发光二极管 (LED) 作为光源，光源的光通过透镜 2 进入一个滤光器 3，把长波部分滤去，然后经过分光镜 4 和透镜 5 注入光纤射向晶体，以便激发荧光。探头内的荧光物质受到激发后开始发出荧光，当激励脉冲消失后，荧光物质发出余辉。这种余辉沿着原光路传导回来，经过分光镜 4 反射到滤光器 7，滤光器 7 的作用是滤掉余辉荧光中的短波光，这样滤光器 3 和 7 的协同作用避免了光源发出的光的影响，从而使光电检测器只检测到荧光。经过滤光器后的荧光经透镜 8 进入探测器 9 转换成电信号，此电信

号经放大器 10、相移器 11 和幅度控制器 12，最后反馈到调制器控制 LED 的发光。

系统工作在自激振荡的状态下，光信号的时序图如图 2-26 所示。LED 光源发出一个矩形的光脉冲，在它的激励下，荧光物质开始发出荧光，光强按指数规律上升。当激励脉冲消失后，荧光的余辉按照指数的规律下降，下降的时间 τ_F 与温度有关，所以系统的自激振荡的频率就取决于温度了。通过一个计数器测量系统的频率就可以得到被测温度了。

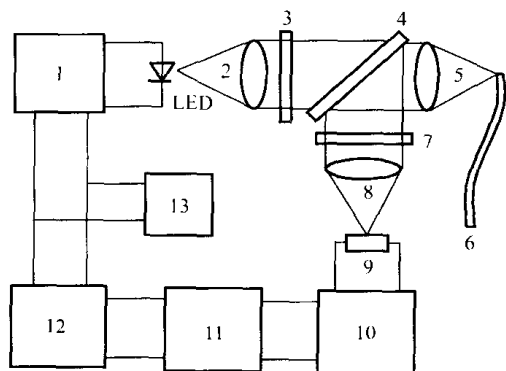


图 2-25 荧光衰变式光纤温度计

1—调制器；2、5、8—透镜；3、7—滤光器；4—分光镜；6—探头；9—探测器；10—放大器；11—相移器；12—幅度控制器；13—时标记数器

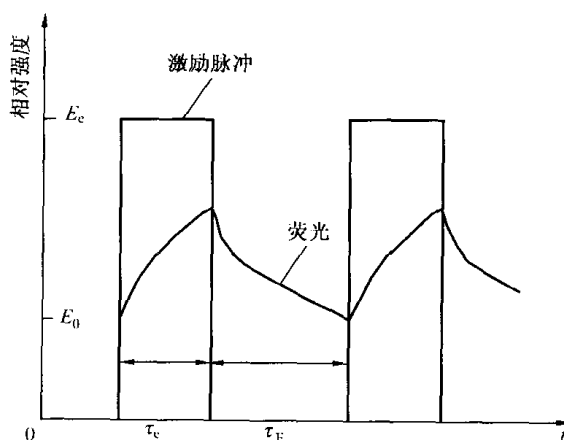


图 2-26 光信号时序图

(2) 余辉积分亮度法采用这种方法的测温系统的 LED 光源发出幅值、频率、占空比恒定的激励光，由它激发的荧光及其余辉的波形如图 2-27 所示。所谓的余辉积分亮度法就是在规定的时间内对余辉的大小进行采样，对采样值进行累加求和。当采样的时间比较短时，累加的和就相当于荧光余辉的积分亮度。在激励光脉冲一定的情况下，荧光所能达到的峰值亮度是一定的，荧光余辉的时间长，余辉的积分亮度就大些；荧光的余辉时间短

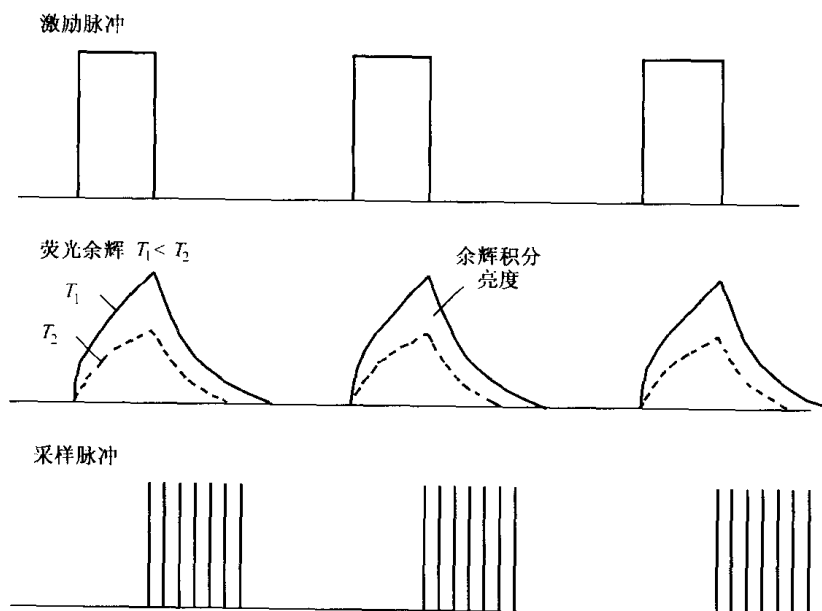


图 2-27 余辉时间积分亮度计量方法

些,余辉的积分亮度值就小些。这样测量出余辉积分亮度的大小就可以得知被测温度的高低。在实际的测温中,并不是测量一个光脉冲的余辉积分亮度的大小,而是测量 m 个光脉冲激励的 m 个余辉积分亮度之和,再对其求平均值后得出被测温度,这样可以消除某些随机因素的干扰。

荧光余辉衰减式温度传感器具有很高的灵敏度和准确度,包括连续使用引起的漂移在内,在 $-30 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 的范围内,测量精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。由于它的探头结构小巧,热惯性低,在电力生产的测温中将会有一席之地。

第四节 光纤流速及流量测量

一、光纤涡轮流量计

涡轮流量计实质上为一零功率输出的涡轮机。当被测流体通过流量计时,冲击涡轮叶片,使涡轮旋转,在一定的流量范围、一定的流体粘度下,涡轮转速与流速成正比。测出涡轮转速即可测出流体的流速或流量。涡轮流量计结构如图 2-28 (a) 所示。

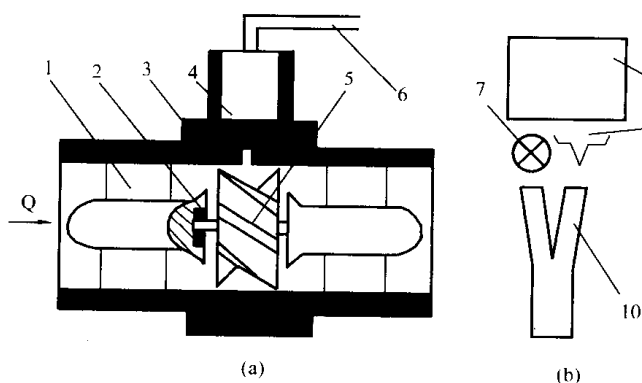


图 2-28 光纤涡轮流量计

- 1—导流器; 2—轴承; 3—壳体; 4—信号检测装置;
5—涡轮; 6—传输光纤; 7—光源; 8—信号处理
电路; 9—光电探测器; 10—光纤束

光纤涡轮流量计的原理是在涡轮叶片上贴一小块具有高反射率的薄片或镀有一层反射膜,探头内的光源通过光纤把光线照射到涡轮叶片上。当被测流体沿管道流过涡轮叶片时,涡轮叶片将产生旋转运动。当叶片顶端对准光纤端面时,光将发生反射,此时光电接收器将产生一个电脉冲信号,该信号的频率与被测流体的流量具有对应关系。因此,只要测出脉冲信号的频率,就可以求得流体的瞬时流量值,瞬时流量对时间进行积分可求得累积流量。

图 2-28 (b) 是光纤涡轮流量计信号检测装置原理图,主要由光纤束、发光光纤、光电探测器及信号处理电路组成。光纤束设计成 Y 型结构,分为发送光纤束和接收光纤束。发送光纤束的一端与光源耦合,并将光源射入其纤芯的光传输到涡轮叶片端面上,反射光由接收光纤接收,并传送到光电探测器上,光电探测器将光信号转换为电信号输出。

发送光纤束和接收光纤束在探头内部按同轴分布排列。中心圆内为发送光纤束,其周围为接收光纤束,该分布方式的特点是照射光集中,采光面积大。光纤采用芯径为 $50\mu\text{m}$ 的大数值孔径的多模阶跃型光纤,这样可尽量多收集反射光信号,以提高传感器的抗干扰能力。

光电探测器输出的电信号一般比较微弱,必须进行放大和整形,最后变成与 TTL 电平



兼存的频率信号,以便于后续电路处理。

光纤速度式涡轮流量计可以设计成组合式和分离式两种结构,前者是将光纤、光电探测器和信号处理电路等纳入传感器主体内;后者仅将光纤纳入其中,其余部分远离测试现场,中间通过光缆传输。

光纤涡轮流量计输出的电脉冲频率 f 与流量 Q 的关系如下

$$Q = f/K \quad (2-27)$$

式中 K ——仪表常数。

仪表常数 K 与涡轮叶片与轴线的夹角、涡轮的平均半径、涡轮处的流动面积、涡轮转动时受到的阻力矩等因素有关。在小流量区域, K 不为常数。随着流量的增加, Q 与 f 基本成线性关系。

光纤涡轮流量计具有重复性和稳定性好、显示迅速、精度高、测量范围较大、不需另加电源以及不易受电磁、温度等环境因素干扰的特点。尤其是分离式光纤涡轮流量计,在测试现场不带电,对燃油及可燃性气体流量测量是一种安全可靠的流量检测仪表。此外,它可用来测量大磁场、高温及大电流等环境下的转速以及涡轮的转速。其主要缺点是只能用来测量透明的气体或液体,不允许流体中有不透明杂质出现,所以在叶轮前应安装过滤装置。

二、光纤激光多普勒测速计

激光多普勒测速技术是流体力学中已经广泛应用的测量技术,它具有分辨率高、没有电感应噪声等优点。如果在此基础上采用光纤传输,将大大改善多普勒光学系统的结构,使其变得灵活和小型化,从而使系统工作更可靠,并能使测量系统的取样部分能更程度地接近目标,提高测量的分辨能力。

1. 测量原理

如果频率为 f 的光入射到速度为 v 的运动目标上,则从运动目标物体反射到观察者的光的频率 f_1 产生了频移

$$\Delta f = f_1 v \cos \theta / c \approx f v \cos \theta / c \quad (2-28)$$

式中 Δf ——多普勒频移, $\Delta f = f_1 - f$;

c ——真空中的光速;

θ ——运动目标物体与观察者的连线与物体运动方向之间的夹角。

由上式可以看到,只要把多普勒频移 Δf 测量出来,就可以推算出目标的运动速度。

2. 用于内燃机的光纤激光多普勒测速系统

上述原理的多普勒测速系统可用于内燃机气缸内部气体流动状态的测量,这时光纤激光多普勒系统称为光纤 LDA 传感器,其基本结构如图 2-29 所示。整个系统包括光学传感器探头 LDA (组件 3)、微型双布拉格包 (组件 2)、光学系统 (组件 1) 以及激光器等。

激光器发出激光后,通过阶跃型光纤传输到分束器上,分成两束光分别入射到两个微型布拉格包,然后进入传感器探头,穿过掩膜和聚焦透镜进入被测的流动气体之中。经过流动气体的散射,形成的多普勒光信号再反射回来,穿过聚焦透镜引入到接收光纤之中,

最后到达光电倍增管 PM 的接收表面, 在这里把多普勒光信号转换成电信号, 然后经频谱分析装置处理, 得出内燃机气缸气体的流动状态。

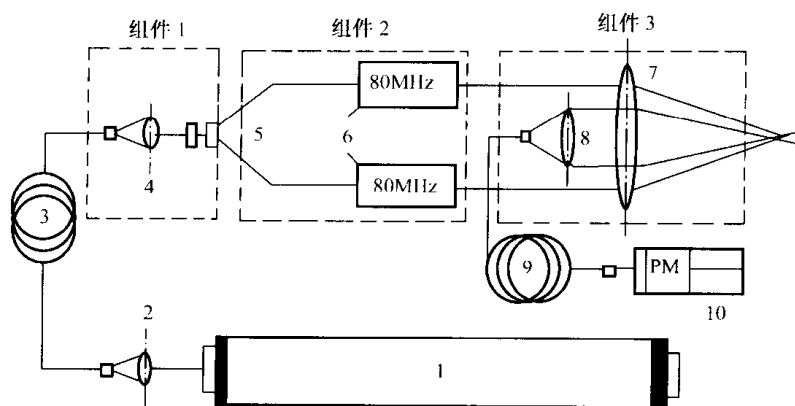


图 2-29 光纤 LDA 传感器

1—激光器；2—透镜；3—发射光纤；4—准直镜；5—分光束；6—微型双布拉格包；7—大聚焦透镜；8—小聚焦透镜；9—接收光纤；10—光探测器

三、光纤涡街流量计

光纤涡街流量计是传感型光纤流量计中最典型的一种。由流体力学原理可知, 在流体中放置一个有对称形状的非流线体时, 在某些条件下在非流线体的下游两侧就会交替出现漩涡, 两侧漩涡的旋转方向相反, 并轮流地从非流线体上分离出来, 在下游侧形成所谓“涡街”。当每个漩涡产生并泻下时, 它会在非流线体壁上产生一个侧向力, 非流线体便受到一个周期振动力的作用。如果非流线体具有弹性, 则将产生振动, 液体、气体等流体均有这种现象。

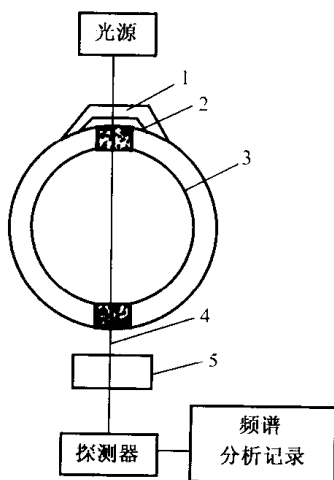


图 2-30 光纤涡街流量计
安装示意

1—夹具；2—密封胶；3—流体管道；4—光纤；5—张力载荷

通过大量实验证明, 单侧的漩涡产生的频率 f 与非流线体附近的流体流速 v 成正比, 与非流线体的特征尺寸 d 成反比, 即

$$f = S_t \frac{v}{d} \quad (2-29)$$

式中 S_t ——斯特劳哈尔数。

S_t 与非流线体的特征尺寸 d 及流体雷诺数有关, 在所考虑的流体范围 (例如 $0.3 \sim 3\text{m/s}$, $Re = 100 \sim 3300$) 内, $S_t = 0.2$ 。因此, 当非流线体的形状、尺寸决定后, 就可以通过测定单侧漩涡释放频率 f 来测量流速和流量。

光纤涡街流量计便是根据上述原理制成的, 其结构如图 2-30 所示。在横贯流体管道的中间装有一根绷紧的多模光纤, 当流体流动时, 光纤就产生振动, 其振动频率近似与流速成正比。光纤的振动频率将采用光纤自差技术来检测。

在多模光纤中,光以多种模式进行传输,这样在光纤的输出端,各模式的光就产生干涉,形成一个复杂的干涉图样。一根没有外界扰动的光纤所产生的干涉图样是稳定的。当光纤受到外界扰动时,各个模式的光被调制的程度不同,相位变化也就不同,于是干涉图样的明暗相间的斑纹或斑点发生移动。如果外界扰动仅是由漩涡引起的,干涉图样的斑纹或斑点就会随着振动的周期变化而来回移动。利用小型探测器对图样斑点的移动进行检测,即可获得对应于振动频率 f 的信号,利用式(2-29)即可推算出流体的流速。

光纤涡街流量计可广泛地使用于纯流体的液体和气体测量。它具有很多优点,例如光纤中没有活动部件,测量可靠,对流体流动没有造成阻碍。这些优点是孔板、涡轮等许多传统流量计所无法比拟的。

如果作为非流线体的光纤不是像上面的装置那样垂直于流体流动方向,而是与流动方向相平行,如图2-31所示,根据上述原理,也可以从光纤的振动频谱测出流体流动的速度。

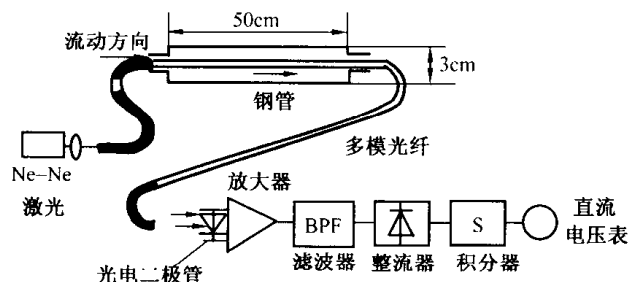


图 2-31 光纤涡街流量计

1—激光器; 2—光纤; 3—铜管; 4—光探测器; 5—放大器;
6—滤波器; 7—精密整流器; 8—积分器; 9—测量显示器

四、相关型光纤流量传感器

这种流量传感器是美国与瑞典斯得哥尔摩微波研究所合作研制的,主要用于测量纸浆流量。它包括两个部分:①传感器单元,包括焊入的双头螺栓和光纤;②处理单元,包括输出单元。如图2-32所示。

在传感器单元中,两套光纤AB和CD都装在探头里,并与管子内壁齐平。光纤AB和CD两者之间安装时具有精确的距离。红外线通过两套光纤和高阻透明窗口,被光纤反射,而光的图像则在前置放大器内被转变为幅度不变的电信号,进而从浆料流动中接收两反射信号,如图2-33所示。

这两个相似的信号,由于沿纤维AB到CD所需的时间不同(见图2-32)而有一定的时差,可以利用处理单元中的延时锁定回路DLL来测得,测得时差时,速度和流量也就知道了。

这个时差还需经过简化并如图2-34所示加以处理。来自第一个探头的信号 $S_1(t)$ 经过具有控制延时 τ 的延时电路,在时差检测器内,第二个探头的信号 $S_2(t)$ 与被延时的信号作对比。如果 $\tau > \Delta t$,则探测器的输出信号为正,否则为负。

把探测信号进行积分并馈送到压控振荡器(VCO),此振荡器就发出一个与其输入电

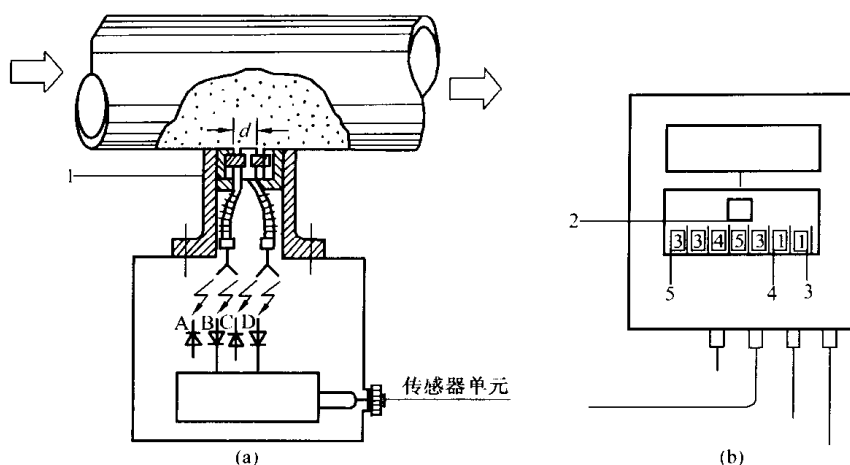


图 2-32 相关光纤流量传感器

(a) 传感结构；(b) 显示装置

1—装有探头与光纤的焊入式螺栓；2—mA 输出指示器；

3、4、5—调节量程、零位和衰减用拨盘开关

压成反比的频率信号。把这个频率信号反馈到延时电路，对延迟的时间 τ 进行调节，若 $\tau > \Delta t$ ，VCO 的频率就会增加；若 $\tau < \Delta t$ ，VCO 的频率就会减少。直至 $\tau = \Delta t$ 时，延时电路就被电子作用所锁定。这样，VCO 的频率与流速就成正比。然后把它馈入输出单元以变成直流 0 ~ 20mA，4 ~ 20mA 或频率的流量输出信号。

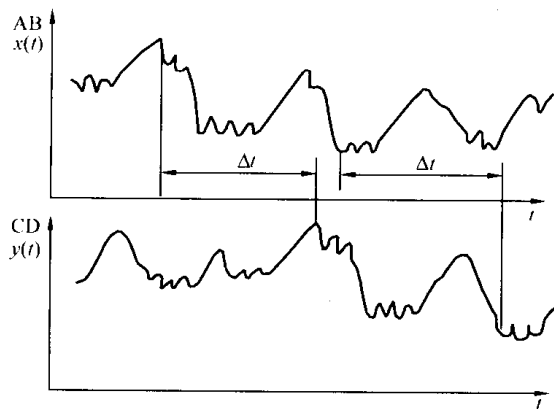


图 2-33 光纤探头 AB 与 CD 的信号探测曲线

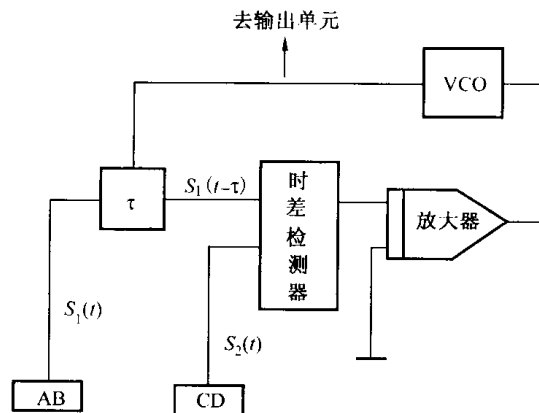


图 2-34 信号处理装置

这种传感器的机械结构轻巧，使用与安装都很方便。各种管径都用相同的传感器单元与处理单元。传感器单元与信号处理单元之间的距离可长达 200m。

这种测量方法对颜色、pH 值或导电性变化的反应均不敏感，因为所测得的光是反射的噪声特性，而不是直流或交流的电平信号。又因为传感器单元与管子的内壁齐平，故不会引入压力损失。

光学流量传感器的量程一经确定，其校准工作仅仅是推一下处理单元上的姆指轮开关，以后无需重校。

这种流量传感器用于纸浆流量测量时，在全量程中都有精度高达 $\pm 1\%$ 的测量值。而

且这种传感器用途广泛,几乎能用于所有流动浆液的流量测量,是一种很有竞争力的精密流量传感器。

第五节 光纤位移及压力测量

压力和位移是两个相关的测量参数,压力可以通过弹性元件转换成位移量,对此位移量进行测量就能知道压力值的大小,本节介绍位移和压力传感器。

一、光纤微弯曲位移和压力传感器

这是一种基于光纤的微弯效应制成的光纤位移传感器,如图 2-35 所示,它是一种典型的功能型光纤传感器。当待测物理量变化时,引起光纤发生微弯变形,改变模式耦合,纤芯中的光部分透入包层,从而导致光能的损耗。微弯程度不同,泄漏光波的强度也不同,从而实现了光强度的调制。由于光强与位移之间有一定的函数关系,所以利用微弯效应可以制成光纤位移传感器。

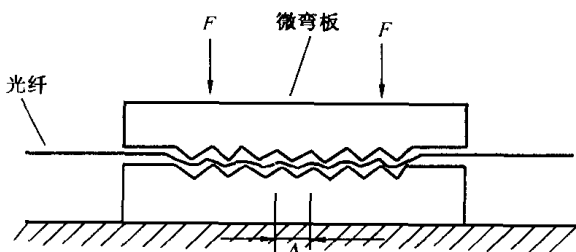


图 2-35 光纤微弯传感器原理

理论和实验都已证明,使光纤沿轴向产生周期性微弯时,传播常数为 β 和 β' 的模之间就会产生光功率的耦合,有下列关系存在:

$$|\beta - \beta'| = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2-30)$$

式中 Λ ——微弯板梳状结构的齿间距。

通过选择适当的 Λ ,就能得到任何所需的模式耦合。

光纤微弯传感器分为亮场微弯传感器和暗场微弯传感器。测量纤芯中光强的称为亮场微弯传感器,因纤芯中光很强,由位移引起的光强相对变化量很小,需采用高灵敏度光电探测器,但有时光强会使信号饱和,不易检测出相对变化较小的信号。测量包层中泄漏光强的称为暗场微弯传感器。由于暗场中背景光很弱,位移引起的光强变化相对更明显,因而检测灵敏度高。

图 2-36 所示是亮场微弯传感器测量实验装置。引起微弯板位移的物理量可以是温度、压力、位移等。两块微弯板组成一个微弯变形器,在变形器前后均设有脱模器,前面的脱模器的作用是在光纤进入微弯变形器之前,吸收掉光纤包层中的光。变形器后面的脱模器的作用是把经变形器作用而射进包层的光都吸收掉,不让这部分光进入光电探测器,以免干扰测量结果。最简单的脱模方法就是在几厘米长的光纤外面涂上黑漆。

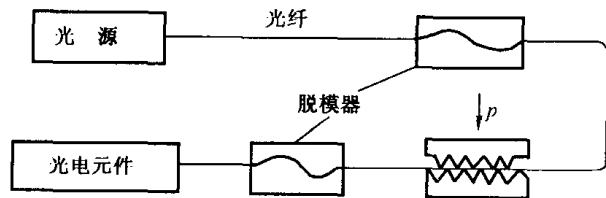


图 2-36 亮场微弯传感器测量实验装置

微弯效应不仅和微弯板的位移有关,而且也和光源的光射入光纤的入射角有关。当光线沿着光纤芯轴方向入射,即入射角为 0° 时,增加变形最多只能使芯模光强减少20%。在接近临界入射角的情况下,则因为这时纤芯中的光比较容易射进包层,同样的变形可使芯模光强减少40%。

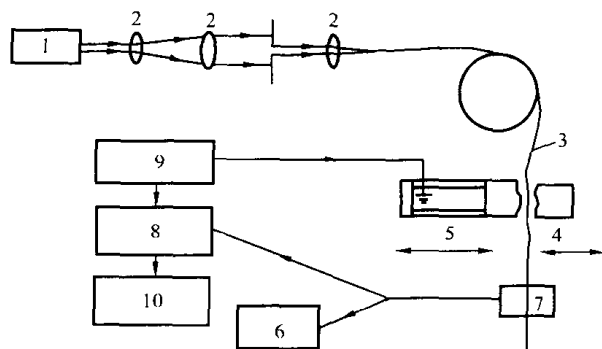


图 2-37 暗场微弯传感器实验装置

1—氦氖激光器; 2—透镜; 3—涂黑漆的光纤; 4—变形器;
5—压电变换器; 6—数字电压表; 7—探测器; 8—锁相放大器;
9—发生器; 10—记录仪

为消除包层模的光,在变形器前5cm长的光纤上涂上油基黑漆。变形器由两块配对的有机玻璃波形微弯板夹着一根多模光纤组成,微弯板的两个面上有相对

的五个齿,齿距为3mm。一个微弯板与压电变换器连接,另一个与手动千分尺连接。一个微弯板可以相对另一个产生位移,可以测量交变位移。

图中探测器是一个密封盒子,盒子内壁六个面上都有光电池,接收光纤包层模的光强。数字电压表显示输出的直流电压。锁相放大器检测交流输出信号,记录仪记录锁相放大器的输出。其灵敏度达到 $6\mu\text{V}/\text{nm}$,可检测的最小位移为8nm,动态范围大于110dB。

二、透射式光纤位移传感器

这种位移传感器是采用两根同样芯径的光纤,并将两根光纤的端面靠近装配到一起。光从一根光纤输出,通过两根光纤间微小空隙,进入另一根光纤。此时,如果两根光纤的中心轴为同轴,光通过光纤的连结处几乎不损失光能。但当两根光纤的光轴错开,光通过光纤间连结处光能损耗增加,光纤芯径端面起到接收光的天线作用,两根光纤芯径交叠面成为天线的“孔径”。多模光纤在芯径内传输的光能密度分布为均匀的,因此光纤连结处的光通量,基本上与两根光纤的芯径交叠面的面积成比例。如图 2-38 (a) 所示,两根光纤光轴错开的距离随物体位移的大小而变化,光纤输出光通量又随光轴错开距离的大小而变化,这就是透射式(亦称传输型或天线型)光纤位移传感器的工作原理。对于光纤芯径为 $50\mu\text{m}$ 的多模光纤,当位移量为 $1\mu\text{m}$ 时,可得到2%的光通量变化。采用芯径小的单模

光纤，并控制光纤端面上的光强分布，可进一步提高透射式光纤位移传感器的灵敏度。图 2-38 (b) 给出了位移（芯径 D 的倍数）与相对光强之间的关系曲线。

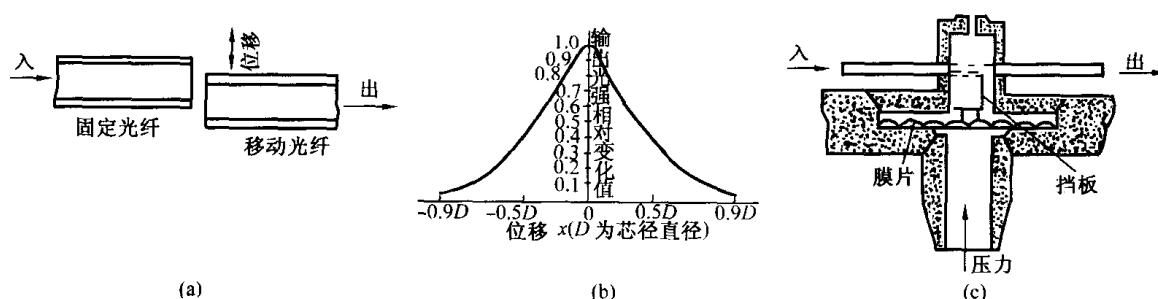


图 2-38 透射式光纤位移传感器

图 2-39 (a) 表示在两根光纤端面之间放入活动光闸门，以代替移动光纤的传感器。为提高传感器灵敏度，可利用图 2-39 (b) 所示的栅格法。这种结构因增加了光纤端面间的距离，需在光纤端面上组装光学透镜，以提高光传输效率。

图 2-38 (c) 为用这一原理制成的测压装置，膜片承受压力变化而产生位移，同时带动挡板上下移动，挡板挡住部分光路，膜片的位移量（也是挡板的位移量）与压力成正比，因此通过的光强与压力也成反比。测出光强量就能知道压力的大小。

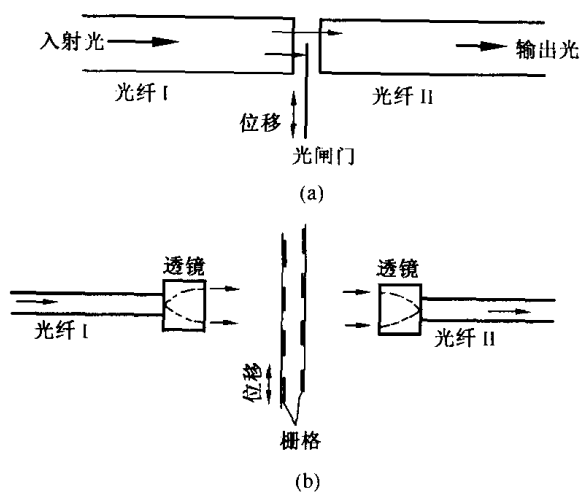


图 2-39 透射式光闸门光纤位移传感器

三、Y形光纤位移及压力传感器

图 2-40 为 Y 形光纤位移传感器原理图。这是一种基于改变反射面与光纤端面之间距离的反射光强调制型传感器。反射面是被测物的表面。Y 形光纤束由约几百根至几千根直径为几十微米的阶跃型多模光纤集束而成。它被分成纤维数目大致相等、长度相同的两束：发送光纤束和接收光纤束。发送光纤束的一端与光源耦合，并将光源射入其纤芯的光传播到被测物表面（反射面）上。反射光由接收光纤束拾取，并传播到光电探测器转换成电信号输出。

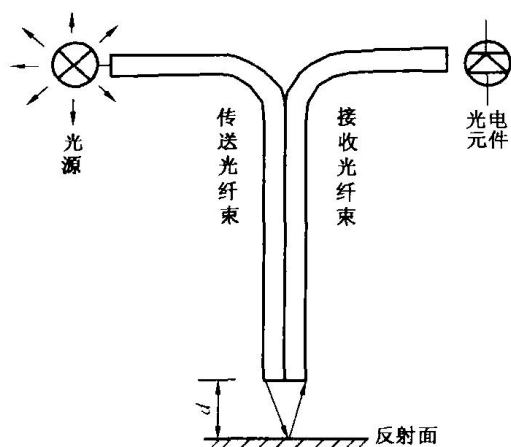


图 2-40 Y形光纤位移传感器原理图

按 $x^{3/2}$ 变化（图 2-42 曲线 1 的左半部分）；当距离较大（ $x \gg d$ ）时，则按 x^{-2} 的规律变化。

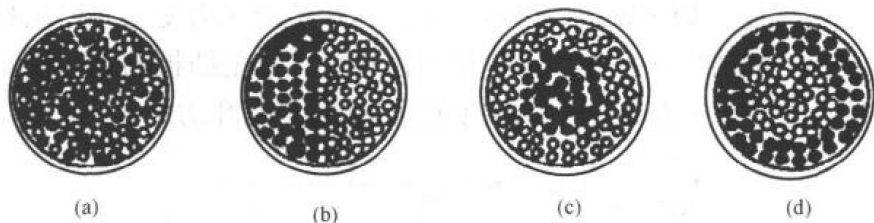


图 2-41 光纤分布方式

●—发送光纤；○—接收光纤

(a) 随机分布；(b) 对半分布；(c) 同轴分布（发送光纤在内）；(d) 同轴分布（发送光纤在外）

曲线在峰顶的两侧有两段近似线性的工作区域（AB 段和 CD 段）。AB 段的斜率比 CD 段的大得多，线性度也较好。因此位移和压力传感器的工作范围应选择在 AB 段，而偏置工作点则设置在 AB 段的中点 M 点。在 AB 段工作，虽然可以获得较高的灵敏度和较好的线性度，但是测量的位移范围较小。如果要测量较大的位移量，也可以选择 CD 段工作，工作点设置在 CD 段的中点 N，但是灵敏度要比在 AB 段工作时低得多。

假设传感器选择在 AB 段工作，被测物体的反射面与光纤端面之间的初始距离是 M 点所对应的距离 x_M 。当被测物体相对光纤发生位移时，两者之间的距离 x 将变化， x 的变化量即为物体的

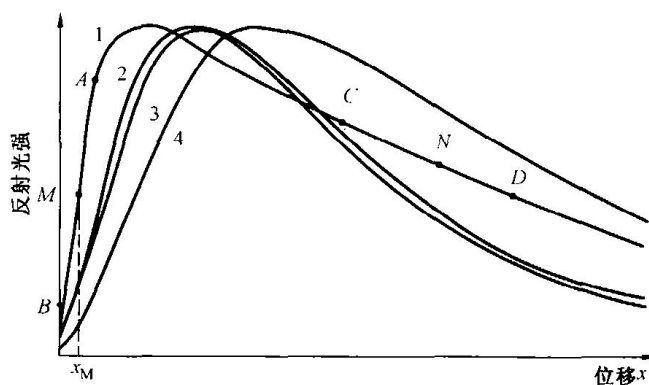


图 2-42 反射光强与位移的关系

1—随机分布；2—同轴分布（发送光纤在外）；
3—同轴分布（发送光纤在内）；4—对半分布

位移量。由曲线可知,随着物体位移增加,反射光光强近似线性增加;反之则近似线性减小。反射光信号由接收光纤束传播到光电探测器并转换成相应的电信号输出,就可以检测出物体的位移大小。根据输出信号的极性,可以知道位移的方向。

Y形光纤位移传感器一般用来测量小位移,最小能检测零点几微米的位移量。这种传感器已在镀层的不平度、零件的椭圆度、锥度、偏斜度等测量中得到应用,还可用来测量压力值,其特点是非接触测量。

图 2-43 所示为 Y 形光纤压力传感器。光导端面有一承压膜片(可以是金属或者是涂有反射膜的塑料膜)。当压力 p 变化时,膜片位移量改变,其位移量与压力值有一定的关系。当膜片在小挠度下(挠度 $s < 0.5t$, t 为膜片厚度),膜片中心位移量与压力之间的关系为

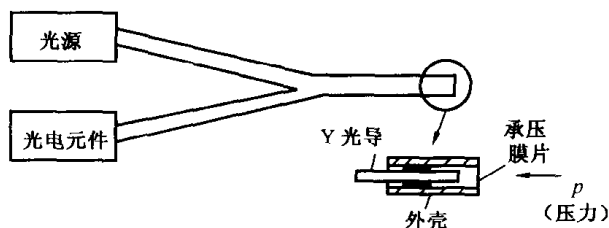


图 2-43 Y 形光纤压力传感器

$$s = \frac{3(1 - \mu^2)r^4}{16Et^3}p \quad (2-31)$$

式中 r ——膜片的有效半径;

E ——弹性模量;

μ ——泊松比。

若膜片材料为钢材,则 $E = 205\text{GPa}$; $\mu = 0.3$; $t = 0.1\text{mm}$; $r = 8\text{mm}$ 。若产生 $s = 50\mu\text{m}$ 的挠度,其压力为

$$p = \frac{16Et^3}{3(1 - \mu^2)r^4} = 15 \times 10^3 \text{ (Pa)} \quad (2-32)$$

若 $s = 1\mu\text{m}$, 则 $p = 0.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

由此可见在小挠度下,压力与膜片中心位移量成正比。

膜片最低固有频率按下式计算:

$$f_0 = \frac{2.56t}{\pi r^2} \sqrt{\frac{gE}{3\rho(1 - \mu^2)}} \quad (2-33)$$

式中 ρ ——膜片材料密度;

g ——重力加速度。

若膜片厚度 $t = 0.1\text{mm}$; $r = 8\text{mm}$; $\rho = 7.8\text{g/cm}^3$; $E = 205\text{GPa}$; $\mu = 0.3$, 则

$$f_0 = 4 \times 10^3 \text{ Hz}$$

由此可见,虽然传感器的固有频率受到光电元件等因素的限制,但频率响应特性还较好。

由于这类传感器测量的是输出光强与压力之间的关系,所以它要求光源稳定。另外,反射膜片的反射率也应该保持不变,否则会带来测量误差。

图 2-44 给出了改进型的 Y 形光纤压力传感器的结构,其中采用了特殊结构的光纤束。该光纤束的一端分成三束,其中一束为输入光纤,两束为输出光纤。三束光纤在另一端结合成一束,并且在端面成同心环排列分布,如图 2-44 (b) 所示。其中最里面一圈为输出

光纤束 1, 中间一圈为输入光纤束, 外面一圈为输出光纤束 2。当压差为零时, 膜片不变形, 反射回两束输出光纤的光强相等, 即 $I_1 = I_2$ 。当膜片受压变形后, 使得处于里面一圈的光纤束, 接收到的反射光强减小, 而处于外面一圈的光纤束 2 接到的反射光强增大, 形成差动输出。

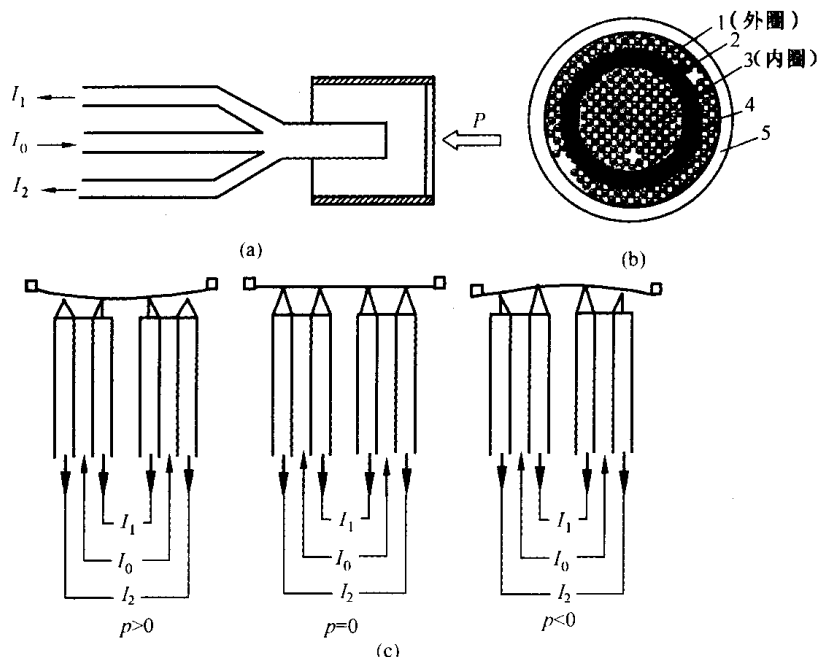


图 2-44 Y 形光纤压力传感器

(a) 传感器结构; (b) 探头截面结构; (c) 测量原理

1—输出光纤; 2—输入光纤; 3—输出光纤; 4—胶; 5—膜片

两束输出光的光强之比可表示为

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 + Ap}{1 - Ap} \quad (2-34)$$

式中 A ——与膜片尺寸、材料及输入光纤束数值孔径等有关的常数;

p ——待测压力。

式 (2-34) 表明, 输出光强比 I_2/I_1 与膜片的反射率、光源强度等因素均无关, 因而可有效地消除这些因素的影响。若选用的光纤束中每根光纤的芯径为 $70\mu\text{m}$, 包层厚度为 $3.5\mu\text{m}$, 纤芯和包层折射率分别为 1.62 和 1.52, 则该传感器可获得 115dB 的动态范围, 线性度为 0.25%。采用不同的尺寸、材料的膜片, 即可获得不同的测量范围。

四、球透镜位移及压力传感器

图 2-45 所示为球透镜位移传感器原理图。发送光纤与接收光纤在球透镜两边, 光强为 I_0 的光束通过发送光纤照射到球透镜上, 接收光纤由互相贴近的两根相同的光纤组成, 球透镜把光束聚焦到两个接收光纤的端面上。当球透镜在平衡位置时, 从两个接收光纤得到的光强 I_1 和 I_2 是相同的。当球透镜在垂直于光路的方向上产生微小的位移时, 两接收

光纤的出射光强度将发生变化,其输出光强的比值 I_1/I_2 的对数值与球透镜的位移量 x 成线性关系,且光强之比 I_1/I_2 与初始光强 I_0 无关。输出光强之比对数值与球透镜位移 x 之间的关系曲线如图 2-46 所示。实验选用两种光纤,曲线 K 对应阶跃型光纤,其芯径 $176\mu\text{m}$,包层直径 $250\mu\text{m}$ 。曲线 G 对应渐变型光纤,其芯径为 $50\mu\text{m}$,包层直径为 $125\mu\text{m}$ 。由图可知,曲线线性度很好,灵敏度也较高,球透镜产生光纤芯径大小的位移时,引起光强比值的变化可达 10dB 以上。设曲线的斜率为 s ,则有

$$10\log \frac{I_1}{I_2} = sx \quad (2-35)$$

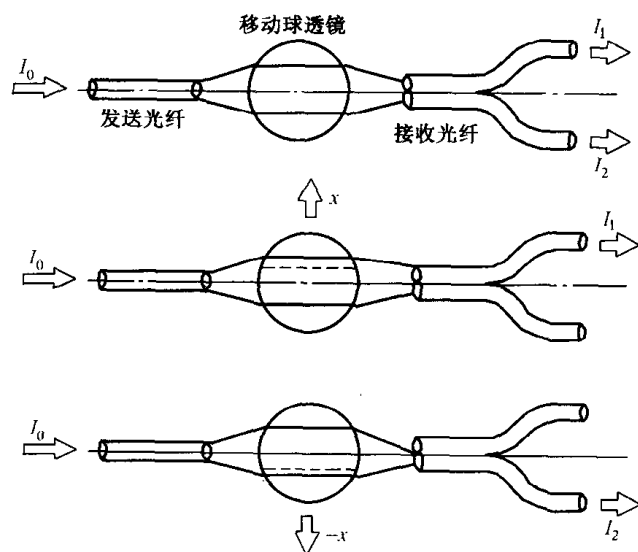


图 2-45 球透镜位移传感器原理图

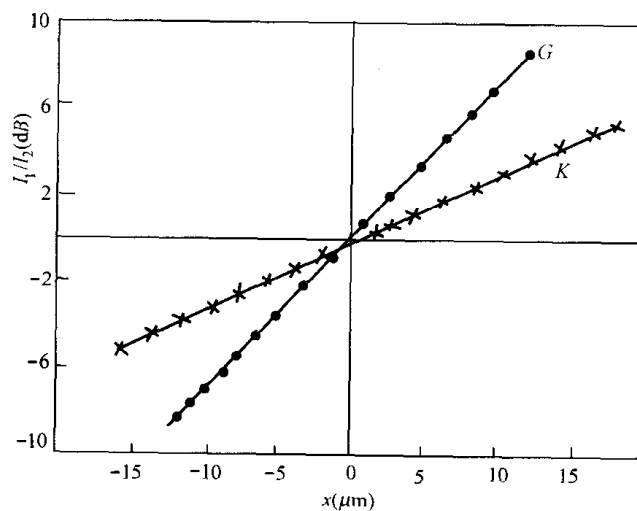


图 2-46 球透镜位移 x 与 I_1/I_2 的关系

图 2-47 所示是利用球透镜位移传感器制成的差动式压力传感器。当膜片承受压力后产生位移,经连杆推动球透镜移动时,引起接收光纤输出光强 I_1 和 I_2 发生变化。测得其变化量就得到了压力值。膜片内充满的硅油是为了保护承压膜片不受损害。

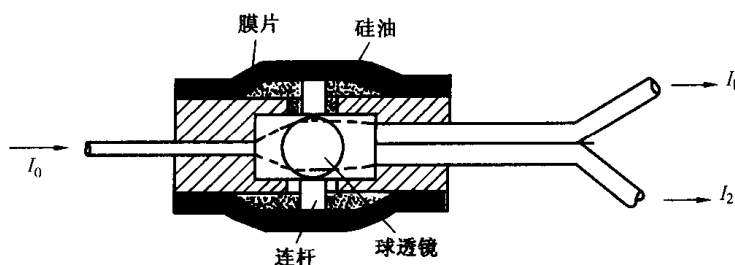


图 2-47 光纤差动式压力传感器

五、全内反射光纤位移、压力传感器

图 2-48 为全内反射光纤位移（压力）传感器示意图。两根光纤由一个直角棱镜连接，棱镜斜面与位移膜片之间有很小的气隙，约 $0.3\mu\text{m}$ ，在膜片的下表面镀有光吸收层。膜片发生位移时，光吸收层与棱镜上界面的光学接触面积改变，使棱镜上界面的全反射破坏，光纤传输到棱镜的光部分泄漏到界面之外，接收光纤的光强也相应发生变化。光吸收层可选用玻璃材料或可塑性好的有机硅橡胶，采用镀膜方式制作。

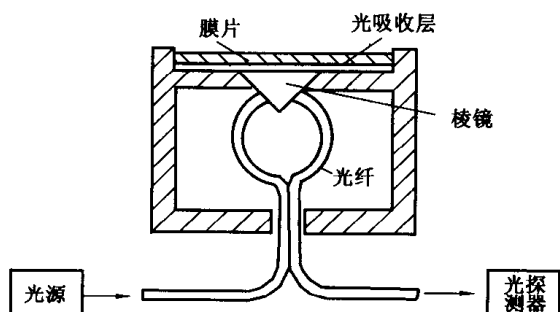


图 2-48 全内反射光纤位移（压力）传感器

在测量压力时，常压下膜片没有变形，膜片与光纤间保持着较大的初始间隙，故此膜片的照射面积较大，反射到接收光纤的光强也大，使光电探测器的输出电信号也大。膜片受压力作用时要向内侧挠曲，使光纤与膜片间气隙减小，因此发送光纤在膜片内表面的光照面积也缩小，致使反射到接收光纤的光强减小，光电探测器输出随之减小。

传感器的输出信号只与光纤和膜片之间的距离以及膜片的形状有关。为了减小传感器的非线性，膜片弯曲挠度一定要控制在小于膜片厚度的范围以内。当膜片过载时，传感器产生明显的非线性输出。在测量大压力时，如果膜片直径一定，则必须增大膜片的厚度。

光纤压力传感器是一种适用于动态压力测量的装置，其频率特性是十分重要的指标。在膜片周边固定条件下，膜片最低固有频率可按式 (2-33) 计算。由于该传感器尺寸甚小，因此固有频率相当高。例如，直径为 2mm ，厚度为 0.65mm 的不锈钢膜片，固有频率高达 128kHz 。实际上，传感器的频率响应除决定于膜片的固有频率外，还与压力容腔及压力导管有密切的关系。考虑这些因素后，传感器的频率响应通常低于膜片的固有频率。此外，光电探测器件的频响特性也限制了传感器的频响。工作于反向偏置的半导体光电二极管，光电流随入射光变化的上升时间虽短，但其响应频率一般也比膜片的固有频率低。尽管传感器的频率响应受到光电器件特性限制，但它的响应频率还是相当高的。由于这种传感器尺寸非常小，受对流体的流场影响不大，灵敏度很高，受环境（声、振动、温度）影响都很小，因此，在动态压力测试中是一种比较理想的传感器。

第六节 光纤电压电流测量

在电力系统中，常会遇到要在强电磁干扰的情况下测量高压、大电流等电磁参量的问题。由于光纤传感器具有绝缘性好、抗电磁场干扰、灵敏度高特性，因此在电力系统测量中具有很大优势。

一、法拉第效应光纤电流传感器

利用法拉第旋光效应，由电流所形成的磁场会引起光纤中线偏振光的偏转，检测偏振角的大小，可以得到相应的电流数值。

偏振角 θ 与磁场强度 H 、磁场中光纤的长度 L 成正比：

$$\theta = VHL \quad (2-36)$$

式中 V ——费尔德常数。

由于载流导线在周围空间产生的磁场满足安培环路定律，故对于长直导线有

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (2-37)$$

式中 R ——光纤圈的半径。

由式 (2-36) 和式 (2-37) 可得

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{VLI}{2\pi R} \\ I &= \frac{2\pi\theta R}{VL} \end{aligned} \quad (2-38)$$

由上式可知，偏振角 θ 与电流 I 成线性关系。因此，只要测出 θ 、 L 、 R ，就可求出长直导线中的电流 I 。

如图 2-49 所示，从激光器 1 发出的激光束经起偏器 2 变成线偏振光，再经 10 倍的显微物镜耦合到单模光纤中去。为消除光纤中的包层模，把光纤浸在高折射率的油中。5 是高压载流导线，通过其中的电流为 I ，6 是绕在导线上的光纤，在这段光纤中产生法拉第磁光效应，使通过光纤的偏振光产生一角度为 θ 的偏振面的旋转。出射光由显微物镜 7 耦合到沃拉斯顿棱镜 8。经棱镜 8 把光束分成振动方向相互垂直的两束偏振光，最后分别送入探测器 9，信号处理系统 10 及显示器 11。由信号处理系统输出的函数为

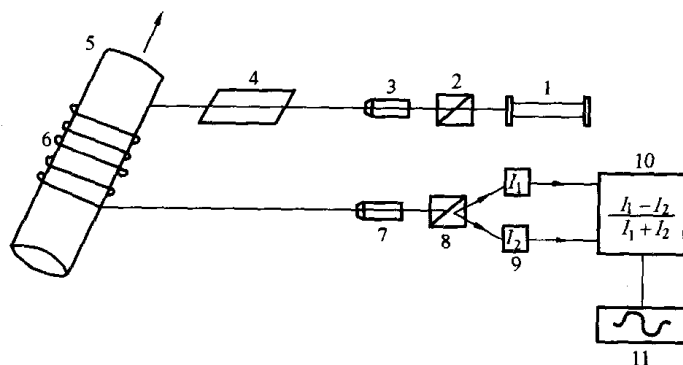


图 2-49 电流检测装置示意图

1—激光器；2—起偏器；3—显微物镜；4—耦合器；5—高压载流导线；6—绕在导线上的光纤；7—显微物镜；8—沃拉斯顿棱镜；9—接收器；10—信号处理系统；11—显示器

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (2-39)$$

式中 I_1 、 I_2 ——两偏振光的强度。

计算表明, P 和 θ 的关系为

$$P = \sin 2\theta \quad (2-40)$$

由于一般电力系统中偏振面旋转的角度 θ 都很小, 因此有

$$P \approx 2\theta$$

这种测量电流方式的优点是: 测量范围大, 约 $0 \sim 1000\text{A}$, 与高压线无接触, 电绝缘性好, 特别适用于高压大电流的测量。但在实际测量中, 也存在一些问题。主要是光纤本身的双折射效应随环境、压力等因素而改变, 因而会引起额外的偏振面旋转, 影响了测量准确性和灵敏度。为了改进这种传感器的性能, 首先需要增强光纤的法拉第效应, 降低光纤固有的双折射, 同时保持光纤的其他光学特性。如研制超低双折射光纤, 使光纤固有的双折射性能很低。一般减少双折射的方法有两种, 一是降低纤芯的非圆率, 二是选择热膨胀系数相等的材料, 以减少不对称的应力。现已获得延迟角达 $2.6^\circ/\text{m}$ 的光纤, 用这种光纤制作的电流传感器, 对某电站母线电流进行检测, 效果很好。但它制造工艺困难, 不能控制很长的光纤, 目前光纤长度仍在 100m 以内。

二、金属涂覆光纤电流传感器

金属涂覆光纤可以分为金属涂覆多模光纤和金属涂覆单模光纤, 这两种光纤相应地组成两种类型的电流传感器。

1. 金属涂覆多模光纤电流传感器

在光纤位移传感器中已经讲过, 利用光纤的微弯现象可以制成强度调制传感器。多模光纤在产生微弯时, 还将使各导波模式的相位差发生变化, 引起输出光的干涉图样改变。利用这一原理可以制成金属涂覆多模光纤电流传感器。其原理是在多模光纤表面涂覆上一层较厚的铝金属膜, 这样光纤可起着载流和光传输的双重作用, 当光纤放置到特殊形状的磁场中, 并在铝涂层中通以电流时, 电流与磁场相互作用而导致光纤发生微弯。因此可通过检测光纤末端输出光束的干涉图样变化或光能量的变化来实现检测。

典型的金属涂覆多模光纤电流传感器的结构如图 2-50 (a) 所示。光纤直径为 $70\mu\text{m}$, 涂覆层外径为 $175\mu\text{m}$, 数值孔径 $\text{NA} = 0.20$, 光纤绕在一个圆柱体上, 沿圆柱体长度方向表面有几条凸起的棱脊, 用来使光纤在磁场作用下产生微弯变形。一个永久磁场作用在圆柱体的轴线方向, 磁场强度约为 0.1T 。整个器件尺寸为高 0.8cm , 直径 1.3cm 。在 7kHz 的交流激励下, 传感器可以检测到由于微弯效应引起的横向相位调制的光纤自差信号, 经解调放大后得到的信号电压与电流幅度的线性关系如图 2-50 (b) 所示。在 $5 \sim 2000\text{mA}$ 范围内线性特性良好。

金属涂覆多模光纤电流传感器的特点是工作原理简单, 结构紧凑, 成本低。

2. 金属涂覆单模光纤电流传感器

金属涂覆单模光纤电流传感器是根据被测电流流过金属护套光纤时产生电阻热效应而

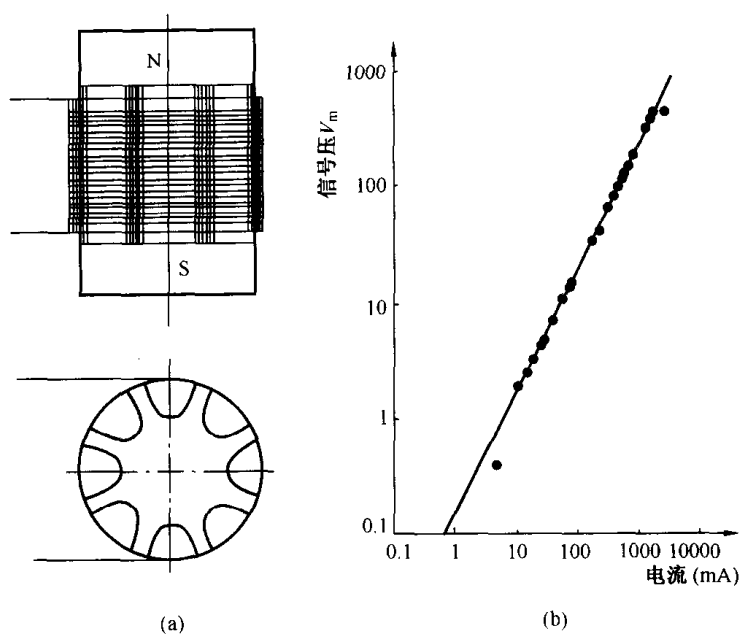


图 2-50 金属涂覆多模光纤电流传感器

(a) 传感器结构; (b) 传感器的输出特性

实现电流检测的。

图 2-51 为一根涂覆铝金属层的单模光纤，铝层厚度为 $2\mu\text{m}$ ，长约 10cm，阻抗约为 3Ω ，待测电流 I 直接通过铝涂覆层，产生热量为 $I^2 R$ ，对光纤进行加热。将涂覆铝金属层的单模光纤作为马赫—泽德尔光纤干涉仪的测量臂，测量臂的光纤在电流的热效应作用下，温度升高，长度发生变化，从而使干涉仪的两臂内两束光的相位不等。

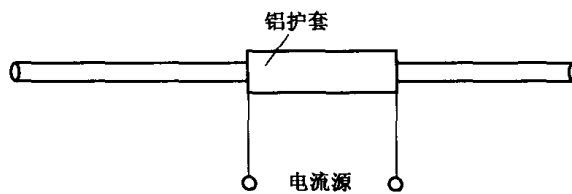


图 2-51 涂覆铝金属层的单模光纤

利用上述结构的光纤作测量臂的全光纤电流传感器的结构如图 2-52 所示。这种传感器的突出优点是灵敏度较高，但被测电流与输出信号有二次函数关系。

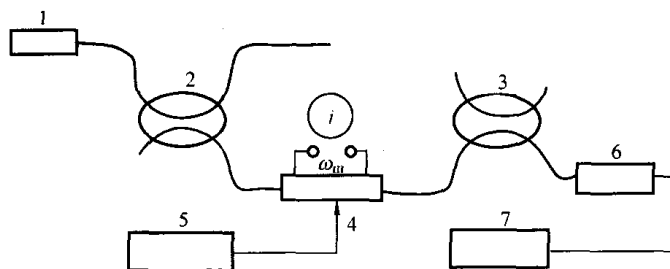


图 2-52 光纤电流传感器结构

1—半导体激光器; 2、3—光纤耦合器; 4—涂覆光纤测量臂;

5—补偿系统; 6—探测器; 7—锁相放大器

三、光纤电压传感器

1. 工作原理及结构

当强电场施加于光正在穿行的各向异性晶体时, 所引起的感生双折射正比于所加电场的一次方, 这种效应称为普克耳效应, 也称为线性电光效应。光纤电压传感器是基于普克耳效应工作的。

普克耳效应使晶体的双折射性质发生改变, 晶体的折射率可用折射率椭球方程表示

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (2-41)$$

对于双轴晶体, 主折射率 $n_1 \neq n_2 \neq n_3$, 对于单轴晶体, 主折射率 $n_1 = n_2 = n_0$, $n_3 = n_e$, 其中, n_0 称为寻常光折射率, n_e 称为非常光折射率。晶体的两端设有电极, 并在两极间加一个高压电场, 外加电场平行于通光方向, 这种工作方式称为纵向运用, 或称为纵向调制。晶体折射率的变化 Δn 与电场 E 的关系为

$$\Delta n = n_0^3 \gamma E \quad (2-42)$$

式中 γ ——晶体的纵向运用的电光系数。

两正交的平面偏振光穿过厚度为 l 的晶体后, 光程差为

$$\Delta L = \Delta n l = n_0^3 \gamma E l = n_0^3 \gamma U \quad (2-43)$$

式中 U ——加在晶体上的纵向电压, $U = El$ 。

由折射率变化所引起的相位变化为

$$\Delta \varphi = 2\pi n_0^3 \gamma U / \lambda_0 \quad (2-44)$$

当相位差为 π 时, 所加电压称为半波电压

$$U_{\lambda/2} = \lambda_0 / 2n_0^3 \gamma \quad (2-45)$$

如果检偏器与起偏器正交, 而且与电场方向成 45° , 则出射光波的光强为

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta \varphi}{2} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma U \right) \quad (2-46)$$

图 2-53 是利用普克耳效应的光纤电压传感器示意图。它由 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 晶体、起偏器、检偏器、光电检测装置和光纤组成。传感器工作过程为: 从光源(激光器或发光二极管)发出一定波长的光波沿光纤传送到电压传感器, 先经起偏器变成线偏振光, 然后经波片变成椭圆偏振光, 当光通过电光晶体时, 在电压(或电场)的作用下发生双折射, 经检偏器检偏后变成强度与被测电压成正比的偏振光。

其输出光强为

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta \varphi}{2} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma U \right) \quad (2-47)$$

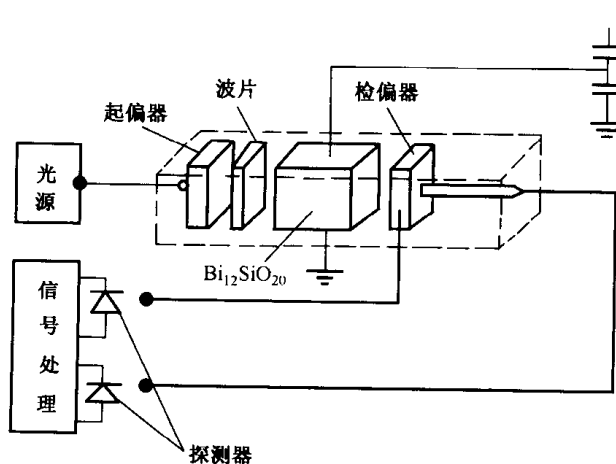


图 2-53 光纤电压传感器结构

式中 γ —— $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 晶体的电光系数;

I_0 ——射入晶体的光强。

上式说明,传感器的输出光强与被测电压之间有对应关系,通过测量光强的大小就能测出被测电压的大小。信号经光电转换、滤波、放大等处理,最后由计算机显示出被测电压。

图 2-54 为光纤电压测量系统的原理框图。

用于制作电压传感器的晶体要选用电光系数大,而其他效应如光弹性效应、压电效应、旋光效应等可以忽略的晶体。表 2-4 中给出了光纤电压传感器常用的电光材料及其特性参数。

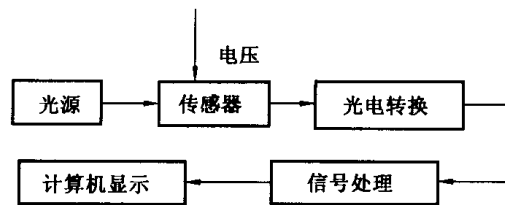


图 2-54 光纤电压测量系统

表 2-4

光纤电压传感器常用的电光材料

材 料	电光系数 $[\times 10^{-12}(\text{m}\cdot\text{V}^{-1})]$	相对介电常数	材 料	电光系数 $[\times 10^{-12}(\text{m}\cdot\text{V}^{-1})]$	相对介电常数
LiNbO_2	$Y_{33} = 30.8 \quad Y_{13} = 8.6$	98	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	$Y_{41} = 5.0$	56
	$Y_{22} = 3.4 \quad Y_{42} = 2.8$		$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	$Y_{41} = 1.0$	
LiTaO_3	$Y_{33} = 30.3 \quad Y_{12} = 5.7$	43	ZnS	$Y_{41} = 2.0$	≈ 10
ADP	$Y_{41} = 28 \quad Y_{63} = 8.5$	12	KDP	$Y_{41} = 8.6 \quad Y_{62} = 10.6$	45
ZnTO	$Y_{41} = 3.9$	7.3	石 英	$Y_{41} = 0.2 \quad Y_{22} = -0.47$	≈ 4.3

2. 光纤电压传感器的应用

(1) 高电压的测量。目前,在电力系统中用于电压和电流测量的设备主要是电磁式电压互感器(TV)和电流互感器(TA),其体积庞大,存在饱和问题,暂态特性差。而如上所述的光纤电压测量系统(亦称光纤电压互感器)具有无铁磁饱和、动态特性好、测量精度高、电器绝缘强度高、防爆等特点。其在电力系统中的工作方式如图 2-55 所示:将三台光纤电压互感器在户外分别与 A、B、C 三相电压相连,由在远方的控制室发出一定波长的光信号通过光纤传至三台互感器中的光纤电压传感器,被电压调制的光信号又由光纤传至控制室进行光电转换及信号处理,最后显示被测电压值。

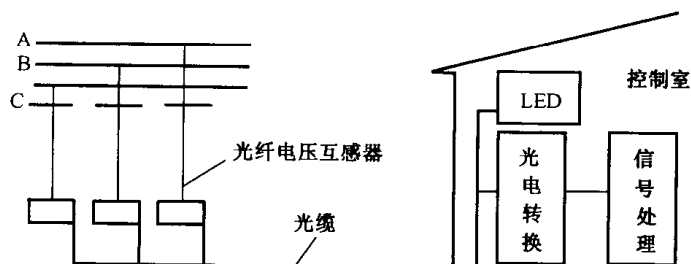


图 2-55 电力系统光纤电压互感器三相电压测量

(2) 在电力系统继电保护中的应用。光纤电压互感器频带宽、响应快、延时短、动态性能好,其输出为模拟电压信号,适合于微机采样和信号分析。

(3) 用于空间电场测量。光纤电压传感器体积小,方向性强,适合于空间电场的测

量,尤其是狭小空间电场的测量。利用光纤电场传感器还可对高压绝缘子的劣化进行在线监测。图 2-56 为检测原理图,在正常情况下,高压母线悬垂绝缘子串从高到低的电压分配是平缓的,但当某一绝缘子绝缘损坏或劣化时,该绝缘子的电压分配将发生突变,由此可判断绝缘子串工作是否正常。

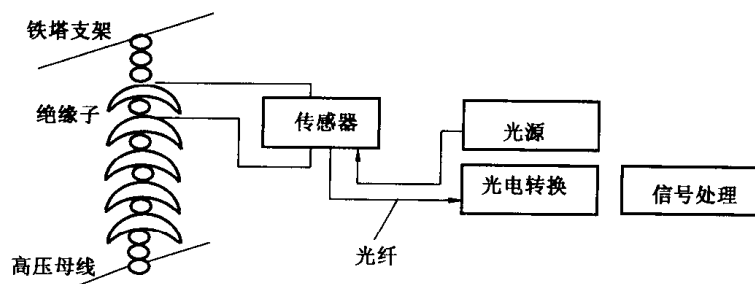


图 2-56 绝缘子串电压测量

第七节 光纤检测技术在其他方面的应用

一、光纤液位传感器

利用光强度调制的原理,能够设计出各种各样的光纤液位传感器。

1. 球面光纤液位传感器

球面光纤液位传感器的结构如图 2-57 所示。将光纤用高温火焰烧软后对折,并将端部烧结成球状。光源的光由光纤的一端导入,在球状对折端部一部分光透射出去,而另一部分光反射回来,由光纤的另一端导向探测器。反射光强的大小取决于被测介质的折射率。被测介质的折射率与光纤折射率越接近,则反射光强度越小。显然,探头处于空气中时比处于液体中时的反射光强要大,因此,该探头可用于液位报警。若以探头在空气中时的反射光强度为基准,则当探头接触水时反射光强将变化 $-6 \sim -7\text{dB}$,接触油时变化 $-25 \sim -30\text{dB}$ 。

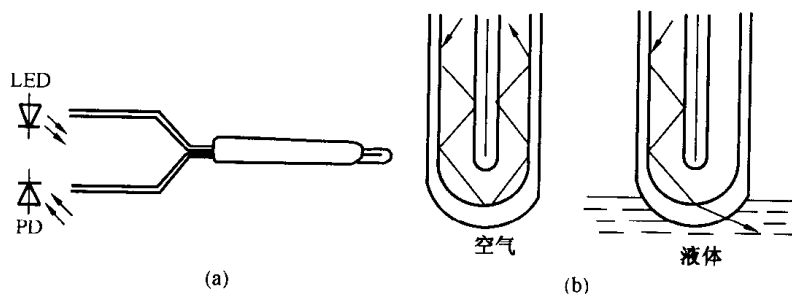


图 2-57 球面光纤液位传感器

(a) 探头结构; (b) 检测原理

这种液位报警探头体积小、响应快、成本低,可用于液位监视、报警,也可用于两种液体分界面的监测。如果在不同的高度上安装几个探测器构成液位计,就可以分别测定液

面的升降变化。

2. Y型光纤液位探头

图 2-58 是 Y 型光纤液位探头。在探头顶端有一个圆锥体反光面，当探头置于空气中而没有接触液面时，光线在圆锥体内发生全内反射而返回到光电二极管。当探头接触液面时，由于液体折射率与空气不同，全内反射被破坏，将有部分光线透入液体内，使返回光电二极管的光强变弱，返回光强是液体折射率的线性函数，即返回光强发生突变时，探头恰好与水面相接触。

3. 棱镜耦合液位传感器

如图 2-59 所示，在两根大芯径的石英光纤的端部粘上（或烧结后加工而成）石英棱镜，其中一根光纤与光源耦合，另一根与光电元件耦合，这样就制成了光纤液面计。当探头置于空气中时（空气的折射率为 1.01，石英棱镜的折射率为 1.46），棱镜的作用好似一根用空气作为包层的光纤。由光源传入的光在其中全反射到接收光纤而送给光电元件。当探头接触到液体时，由于液体与空气的折射率不同，光线在棱镜中的全反射被破坏，有一部分的光泄漏到液体中去，这样送到光电元件的光强就减弱了，且光强的变化量很大，由此可判定出液位的高度。

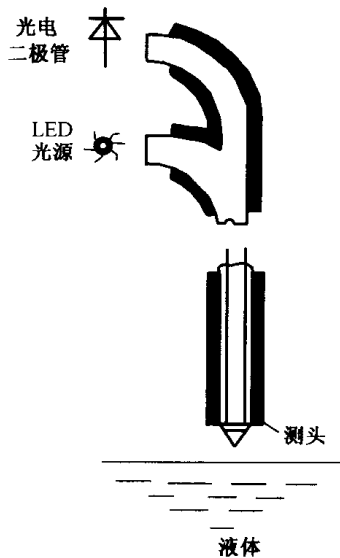


图 2-58 Y型光纤液位探头

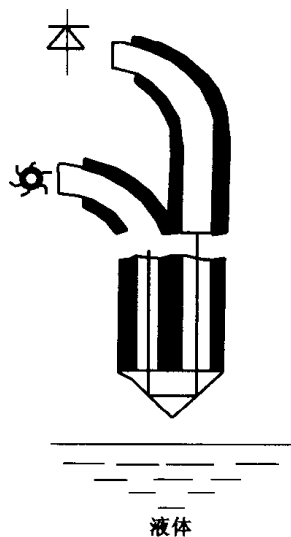


图 2-59 棱镜耦合液位传感器

上述探头在接触液面时能快速响应，但离开液面时，探头端部被液体弄湿，回到空气中不能立即干燥，恢复工作需要一定的时间，尤其探测粘稠污浊液体时更为严重。为此，需对光纤探头结构加以改进（如图 2-60 所示）。为防止液滴停留在探头尖端，可将圆锥尖端的一小部分沿垂直于光轴方向磨平抛光，并镀金属反射膜，或者在尖端再设置一个圆柱形凸起，以便导引液体下滑，这样可以保证探头在离开液位时也能快速地响应。

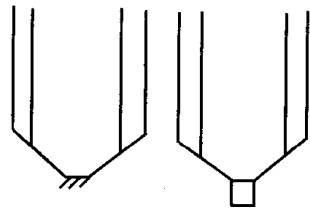


图 2-60 改进的光纤探头结构

若想连续测量液位，除了在不同高度上安装多个光纤探头

外(如图 2-61 所示),还可以对探头进行改进,形成可连续测量液位的光纤探头,如图 2-62 所示。在探头底部安装一个三角棱镜,此棱镜可以放在由电机驱动自由移动的托体棱镜部分浸入液体后,反射光强明显减小。探测器检测到这一差值,通过负反馈伺服系统来驱动电机上下移动,实现液位的连续测量。

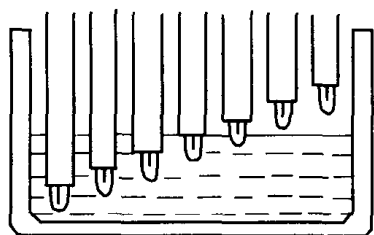


图 2-61 液位的检测

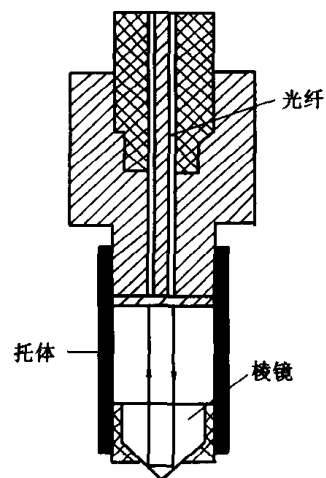


图 2-62 连续测量液位的光纤探头

另外,因为油与水的折射率不同,用光纤探头可以探测有明显分界的油水分界面。一种溶液在不同浓度时的折射率也不同,如砂糖水溶液,含糖量不同,折射率也不同,过标定之后,这种光纤探测器实质上就是一个使用方便的浓度计。

二、光纤转速表

光纤转速表的整套装置由图 2-63 所示。它由转速—光电脉冲转换、光纤光路及信处理装置三部分组成。

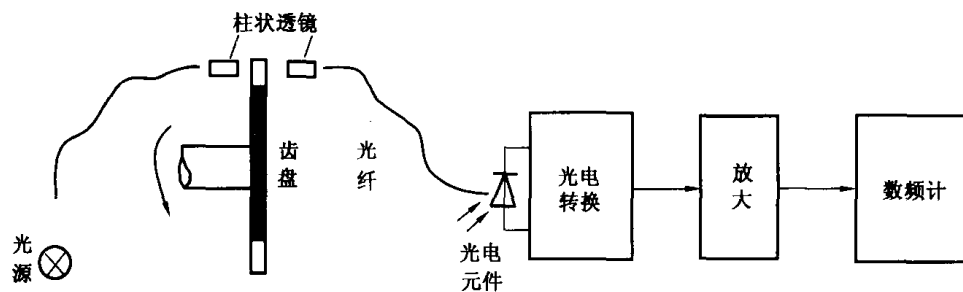


图 2-63 光纤转速表系统

1. 转速—光电脉冲转换

在转动机构的转轴上固定一个测速齿盘,齿盘的边缘有 n 个齿(如 n 可选 60),这相当于把时间放大 n 倍。齿盘转一圈,光电元件接收到 n 个光脉冲。欲要测量发电机转速,只要测得每秒钟内有多少个光脉冲数就可以了。

2. 光纤光路

光纤光路由光源、光纤及柱状透镜组成。光源可采用发光二极管或一般的聚光灯泡。光纤采用单芯光缆;柱状透镜的作用是把光纤送来的点光转变成平行光束,经齿隙传送

柱状透镜，由透镜聚焦成点光进入光纤而传送给光电元件。

3. 信号处理装置

信号处理装置由光电元件、光电脉冲转换放大电路和数字频率计组成。光电元件采用二极管，光电脉冲转换放大电路如图 2-64 所示。受光部分用 PIN 光电二极管作光电转换和放大，采用的是在同一管壳 (TQ-5) 内装设放大器的光检测器。该光检测器的受光面积为 5mm^2 ($\phi 2.52$)，由于内部装放大器，所以其灵敏度高，响应也足够。放大电路输出脉冲送给数字频率计。频率计由计数单元、分频单元及控制单元组成。计数单元的作用是对脉冲信号进行计数、译码及显示。各指令的时间信号由分频单元提供。整机的协工作靠控制单元完成。

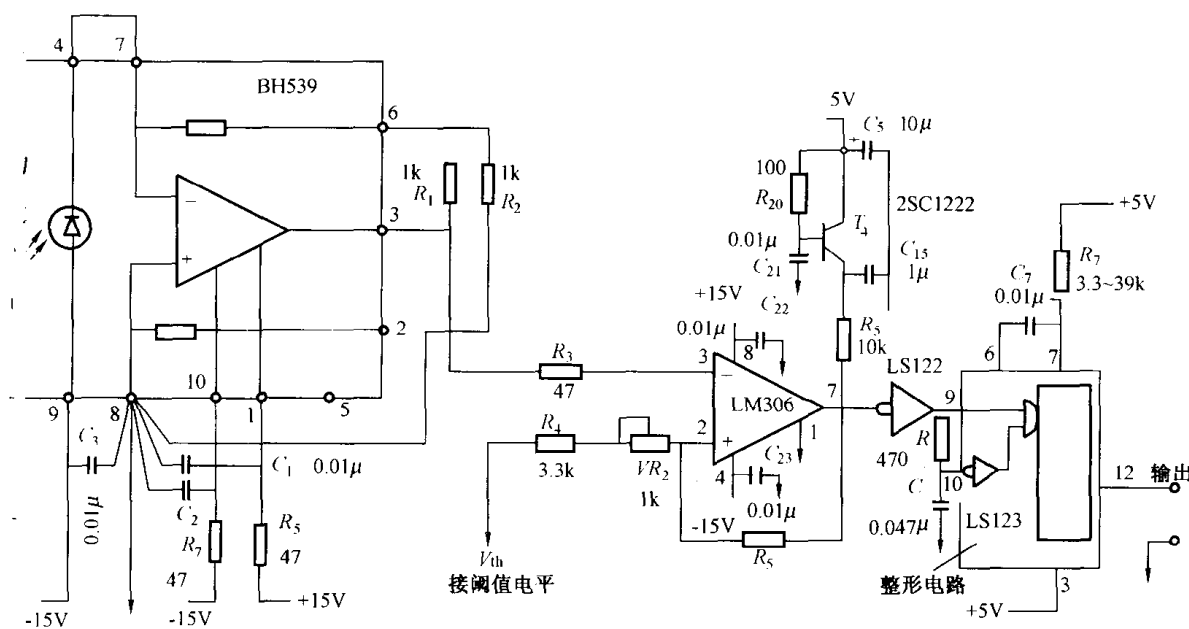


图 2-64 光电脉冲转换放大电路

光纤转速表可对发电厂汽轮发电机组的转速进行测量，现场全部采用光纤来传送信号，可不受电磁场的干扰，工作可靠。

三、光纤灰尘传感器

用光学的方法测量悬浮于气相介质或液相介质中的微小颗粒特性的技术已被广泛采用。这种方法具有非接触式测量、不扰动被测对象、测量速度快、实时性好等优点。光纤灰尘传感器用于测量烟气、灰尘的相对浓度，尤其适用于恶劣和危险环境中的测量。

1. 工作原理

微粒和分子在光的照射下，会产生光的散射现象，与此同时，还吸收部分照射光的能量。当一束强度为 I_0 的平行单色光入射到被测颗粒场时，会受到颗粒团散射和吸收的影响，光强将衰减为 I ，两者的关系由 Lambert-beer 定律的简单形式确定

$$I = I_0 e^{-cd} \quad (2-48)$$

式中 c ——消光系数，与颗粒直径、颗粒尺寸分布、光源波长及颗粒与环境的相对折射率

有关;

l ——光程。

在已知光源光强 I_0 衰减后的光强 I 后, 就可以求得入射光通过待测浓度场的相对衰减率。而相对衰减率的大小基本上能线性反映待测场灰尘的相对浓度。光强的大小与经光电转换的电信号强弱成正比, 通过测得电信号就可以求得相对衰减率。通常相对衰减率由以下定义表示

透过率: $T\% = 100 (I/I_0)$

光密度: $D = 10 \lg (I_0/I)$

比光密度 (又称能见度): $D_L = (10/L) \lg (I_0/I)$

2. 光纤灰尘传感器的结构

整套装置的结构如图 2-65 所示。光源采用波长为 $0.565\mu\text{m}$ 的绿光, 绿光耦合进光纤, 经分路器分为光强相等的两路光。一路作为参考光源直接与硅兰光伏探测器连接; 另一路

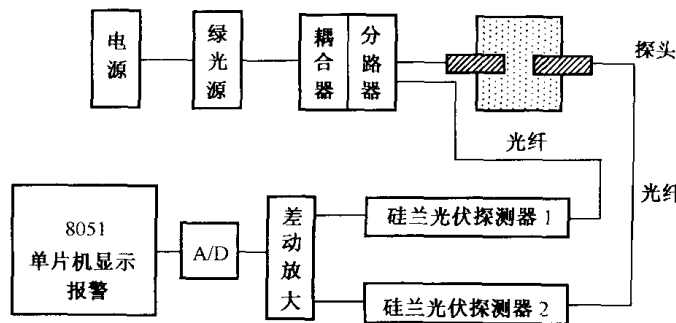


图 2-65 光纤灰尘传感器的结构

与透镜耦合, 经被测浓度场后再与另一硅兰光伏探测器连接, 两路光经硅兰光伏探测器后转接为 $0 \sim 300\text{mV}$ 的电压信号, 送给差动放大器放大为 $0 \sim 5\text{V}$ 的电压信号, 该信号经 A/D 转换后送给 8051 单片机系统, 以供显示、报警、打印之用。

这套装置具有如下的性能:

(1) 采用光纤连接, 耦合器耦合,

测量仪器可以远离被测浓度场。

(2) 采用 90mW 的 BT303Gap 发光二极管作为发射光源, 波长为 $0.565\mu\text{m}$ 。

(3) 采用 2CR1226 硅兰光伏探测器, 带有接地线, 输出电压为 $0 \sim 300\text{mV}$ 。

(4) 输入输出光纤芯径为 $50\mu\text{m}$, 长度为 10m , 从输入光纤出来的光束, 经 $\phi 45$ 的透镜扩散后又聚集在输出光纤端面。

(5) 测量时应注意被测对象的温度, 光纤的耐热温度不高, 一般为 1500°C 左右, 高温下不能使用光纤, 必用场合可用水冷或气冷。

(6) 传感器探头带有自动擦镜头装置, 可提高测量精度。

(7) 该仪器可用于各种布袋除尘器的灰尘相对浓度的测量以及各种除尘器效率的测量, 但仪器应放在控制室。

四、光纤湿度传感器

近些年来, 如空调系统、环保、医疗和工业设备等对湿度传感器的需求日益增长, 因此湿度传感器的市场很大, 市面上也就出现了各种湿度传感器。这些湿度传感器根据湿敏材料的不同可以大致分为电解质类、多孔陶瓷类和高分子聚合物等三类。

电解质类湿度传感器如果长期在高湿度环境下工作, 感湿材料中的电解质盐会吸水而

被稀释甚至变质,从而破坏传感器的感湿性能;陶瓷类湿度传感器具有优异的耐热性能,而且对湿度响应迅速,但它的温度—电阻系数较大,测量结果的再现性和互换性较差;亲水性聚合物膜或聚电解质薄膜能用于宽湿度范围内的测湿,响应迅速、结构简单、易于制作、价廉。目前用亲水性聚合物膜或聚电解质薄膜制成的湿度传感器很有发展前景,光纤湿度传感器正是亲水性聚合物与光纤检测技术相结合的产物。

光纤湿度传感器的原理结构图如图2-66所示。利用离子自组装技术,首先在光纤端面制备多层含有亲水基团的聚电解质薄膜,即在光纤的一端“镀”许多层感湿层,于是光纤和感湿层之间形成一个FABRY-PEROT干涉腔,其中的干涉腔的两个反射面分别是光纤-感湿层交界面和感湿层-空气交界面。当检测环境中的湿度发生变化时,感湿层物质的体积发生变化(膨胀或收缩),干涉腔的长度也随之发生变化,从而引起两个反射面反射回的反射光的相位差发生变化,进而使得反射光干涉后的光强也随之变化,只要通过实验确定反射光光强的变化同湿度之间的关系,就可以通过测量反射光强的变化来检测湿度的变化。图2-

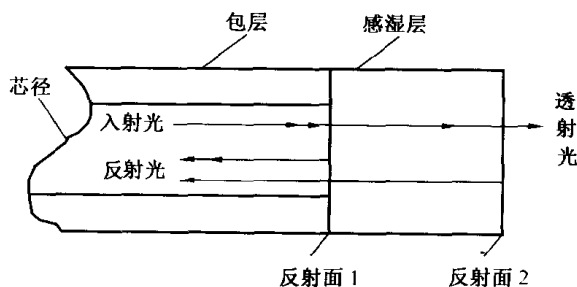


图 2-66 光纤湿度传感器原理结构图

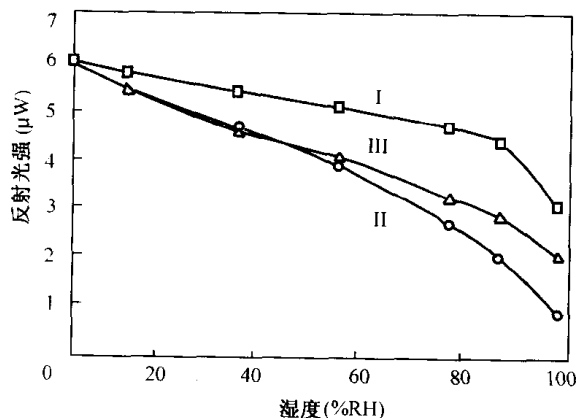


图 2-67 反射光强随湿度变化曲线

67 为实验所得的反射光强随湿度变化的特征曲线,其中横坐标为相对湿度,纵坐标为感湿膜的反射光强,曲线 I、II、III 分别代表薄膜的层数为 30 层、40 层、50 层时的曲线。

光纤湿度传感器是一种新型的湿度传感器,它的优点是灵敏度高、感湿曲线的线性度好、响应时间短、不受电磁干扰、湿度测量范围大、可在易燃易爆环境中使用。当然实际环境的变化是不可避免的,温度的变化也能引起感湿层体积的变化从

而影响湿度测量的准确性,因此在实际使用中,光纤湿度传感器的温度补偿问题必须考虑。

五、光纤氧传感器

氧气的检测在工业控制、环境监测、医学以及人们日常生活等许多方面都有非常重要的意义,国内外对快速、灵敏、有效的氧气检测方法的研究很多。传统的检测氧气的传感器大多数通过探头的电阻或电容变化来测定氧气浓度,易受到外界电场、磁场等的干扰,而且在易燃、易爆环境中还存在安全隐患。而光纤氧传感器具有检测精度高、抗干扰能力强、使用安全、成本低等特点,下面介绍基于荧光猝灭原理的光纤氧传感器。

氧气对一些荧光物质 [如 Ru 的联吡啶配合物 $\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$] 的荧光具有猝灭作用, 从而导致荧光强度的降低和荧光寿命的缩短。荧光物质的荧光强度或寿命与氧气浓度的关系可用 Stern - Volmer 方程来描述

$$\frac{I_0}{I} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + K[Q] \quad (2-49)$$

式中 I_0 ——无氧气时的荧光强度;

I ——有氧气时的荧光强度;

τ_0 ——无氧气时的荧光寿命;

τ ——有氧气时的荧光寿命;

$[Q]$ ——氧气的浓度;

K ——Stern - Volmer 常数。

对于特定的猝灭剂来说 K 值是固定的, 通过测定 I_0 , I , τ_0 , τ 即可测定氧气的浓度。

采用相移法测定荧光寿命, 使用的激发荧光光源是经过正弦调制的, 故指示剂的荧光强度也呈正弦变化, 但相对于激发光有一滞后相移 φ , φ 的正切函数与荧光寿命 τ 有如下关系

$$\tan \varphi = 2\pi f \tau \quad (2-50)$$

其中 f 为正弦调制频率, 因此通过测量 φ 即可得到 τ , 由式 (2-49) 和式 (2-50) 可得

$$\frac{\tan \varphi_0}{\tan \varphi} - 1 = K[Q] \quad (2-51)$$

式中 φ_0 ——无氧气时的滞后相移。

由式 (2-51) 知, 测定不同氧气浓度下的 φ 即可算出氧气的浓度。

由于检测对象是待测信号与参考信号之间的相位差, 而不是光强的变化, 从而可以排除杂散光对荧光信号的影响, 具有较强的抗干扰能力和较高的测量精度。由于荧光寿命是荧光物质的本征参量, 不受其浓度变化的影响, 也不受光源光强变化的影响, 因此, 通过对荧光寿命的测定来测定氧气的浓度可显著提高检测精度和抗干扰能力。

实验证明, 这种氧气检测方法是可行的, 滞后相移的变化对氧气浓度变化的响应很快, 响应时间不超过 10 秒。将镀有荧光指示剂的探头放置 4 个月后再进行上述测定, 其滞后相移变化的幅度下降为原来的 70%, 其重复性和响应速度基本不变, 这表明该传感器具有较好的稳定性。

超声波检测技术是一门以物理、电子、机械及材料学为基础, 各行各业都要使用的通用技术之一, 它是通过超声波产生、传播及接收的物理过程完成的。目前, 超声波技术广泛应用于工业(探伤、距离和厚度测量、流量和密度测量、超声清洗、超声焊接等)和以超声诊断装置为代表的医疗仪器以及海洋探测(鱼群探测、深度测量、水中摄影等海洋测量用装置)等领域内。

第一节 超声波检测的基本知识

一、超声波及其特点

声波是一种能在气体、液体和固体中传播的机械波。根据声波振动频率的范围, 可以分为次声波、声波、超声波和特超声波。一般人耳能听到的声音的频率范围在 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 之间, 频率低于 20Hz 的波称为次声波, 而高于 20kHz 的波称为超声波。频率高于 10^9Hz 的称为特超声波。声波的频率界限如图 3-1 所示。超声波检测中常用的工作频率在 $0.25 \sim 20\text{MHz}$ 范围内。

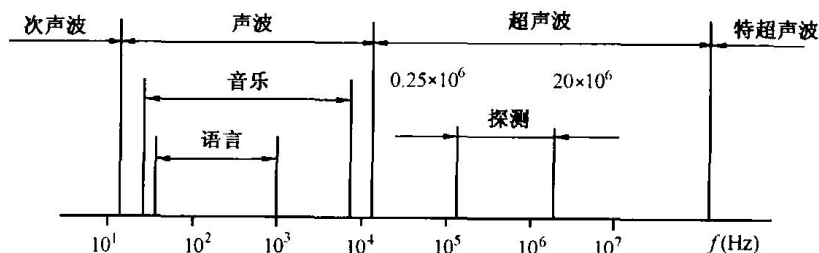


图 3-1 声波的频率界限

超声波具有与电磁波相似的一面, 同时又有其自身的一些特点:

(1) 能以各式各样的传播模式(纵波, 横波、表面波, 薄板波)在气体、液体、固体或它们的混合物等各种媒质中传播, 也可在光不能通过的金属、生物体中传播, 是探测物质内部的有效手段。

(2) 由于超声波与电磁波相比速度慢, 对于相同的频率波长短, 容易提高测量的分辨率。



(3) 由于传播时受介质声速、声阻抗和衰减常数的影响大, 所以, 反过来可由超声波传播的情况测量物质的状态。

超声检测技术的基本原理是利用某种待测的非声量(如密度、浓度、强度、弹性、硬度、粘度、温度、流量、液位、厚度、缺陷等)与某些描述媒质声学特性的物理量(如声速、声阻抗、衰减等)之间存在着的直接或间接的关系, 在确定了这些关系之后就可通过测定这些超声物理量来测出待测的非声量。

正是在这种工作原理下, 我们可以充分地利用超声波的各种特性来研制超声波传感器, 配合不同的信号处理与显示电路完成许多待测量的检测工作。目前各种超声波仪器和装置已经广泛地应用在了工业、通信、医疗等许多行业中, 超声波技术的应用如表 3-1 所示。

表 3-1 超声波技术的应用

	用 途	备 注		用 途	备 注
工 业	金属材料及部分非金属材料的探伤	各种制造业	海 洋	鱼群探测 深度测量 声纳 水中摄影	
	测量金属与非金属材料的厚度	板材、管材			
	超声振动切削加工(金属与非金属)	钟表业、精密仪表、轴承	通 信	定向通信	
	超声波清洗零件	半导体器件生产			
业	超声波焊接	化工、石油、轻工 污水处理	医 疗	超声波流量计	断层图像
	超声波液位及液位检测和控制			超声波诊断仪(显像技术)	
	超声波显微镜			超声波胎儿状态检查仪	
	硬度计			超声波血流计	
	温度计			超声波洁牙器	

在超声检测技术的实际应用中, 为了获得较大的输出信号, 可以增大超声波发射装置的发射功率。但是因为超声波是一种机械波, 所以过强的超声波会产生许多对测量不利的效应, 这些不利的效应统称为超声效应。例如过强的超声波引起的化学效应可以使媒质本身发生根本的改变; 过强的超声波可以引起液体媒质的空化效应, 大量空化的气泡使超声波的能量在空化区域耗散而无法传播到远处; 过强的超声波引起媒质的温升而导致媒质特性的变化等。为了避免超声效应的出现, 实际应用中除了根据情况限制超声波的强度外, 还可以采用高峰值的脉冲信号, 这样做既有利于测量, 又减少了能耗, 因此在超声检测中应用得很广泛。

二、超声波的类型

超声波在介质中传播的波型取决于介质本身的固有特性和边界条件, 对于流体介质(空气、水等), 当超声波传播时, 在介质中只有拉伸形变而没有切变形变发生, 所以只存在超声纵波; 在固态介质中, 由于切变变形产生, 故还存在超声横波。

1. 纵波

当介质中的质点振动方向和超声波传播方向相同时, 此种超声波为纵波波型, 以 L 表示。任何介质, 当其体积发生交替变化时均产生纵波。由于纵波的产生和接收都较容易,

所以纵波在超声波检测中得到了广泛应用。

2. 横波

当介质中质点振动方向和超声波的传播方向垂直时, 此种超声波为横波波型, 以 T 表示。以超声波入射的固体材料的界面为基准, 横波又可分为垂直偏振和水平偏振两类, 即 TV 和 TH 波。

3. 表面波

表面波是沿介质表面传播的一种波, 如图 3-2 所示。在表面波的传播中, 介质表面内受扰动的质点振动轨迹为一椭圆, 在固体上距表面四分之一波长深处的振幅最强, 随着深度的增加其振幅衰减很快, 实际上距表面一个波长以上的地方, 振动已近消失, 超声表面波在固态介质表面的传播速度小于介质体内超声横波的传播速度。

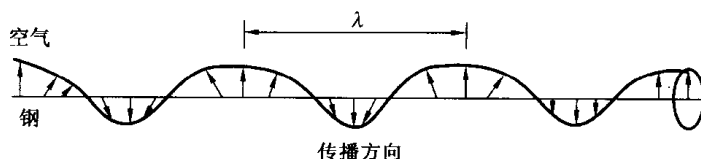


图 3-2 钢表面传播的表面波

4. 板波

板波亦称拉姆波, 是板材特有的一种波型, 它在板材厚度小于入射波波长时产生, 如图 3-3 所示。在一个给定的板材中可以存在三种不同偏振的板波, 一是横波, 偏振方向与板表面平行, 如图 3-3 (a) 的情形, 这种类型的波在材料检测中不太重要。第二种如图 3-3 (b) 所示, 是一种对称型的拉姆波, 在板中心面上的质点的偏振方向与传播方向平行, 如同纵波的偏振, 而其他位置的质点的偏振轨迹为椭圆, 第三种为非对称型的拉姆波, 如图 3-3 (c) 所示, 板中心面上质点的偏振方向与传播方向垂直, 其他位置上的质点的偏振轨迹亦为椭圆。

5. 棒中的波

细棒中可产生纯纵波、弯曲波和扭转波。在材料检测中比较有用的是棒中的纵波, 由声波导理论可知, 棒中纯纵波的产生条件是超声源的策动频率 f 必须满足下式

$$f > 1.84 \cdot \frac{C_b}{2\pi a} \quad (3-1)$$

式中 C_b ——棒中纵波声速;
 a ——圆棒横截面半径。

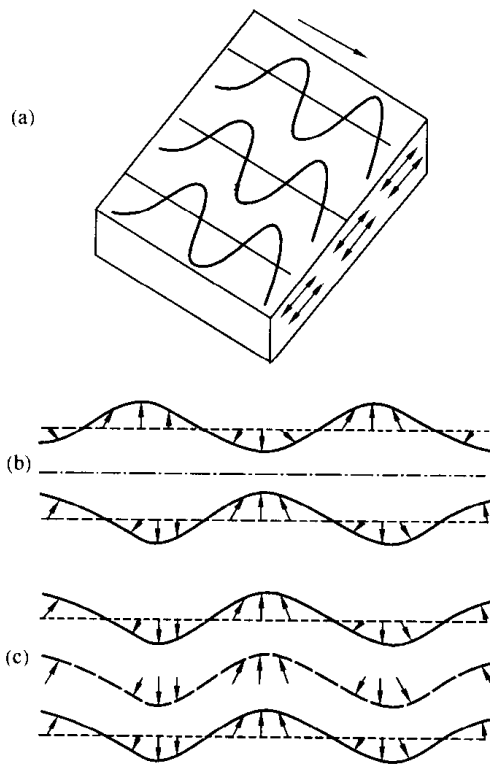


图 3-3 板中的波

(a) 与表面平行的横波; (b) 对称型拉姆波;
 (c) 弯曲型拉姆波

对于矩形截面棒, 相应的公式为

$$f > \frac{C_b}{2} \cdot \frac{1}{L} \quad (3-2)$$

式中 L ——矩形截面之边长。

三、介质的超声传播特性

1. 声速

超声波在介质中传输的速度即介质的声速, 用 C 表示。它是一秒钟超声波等相位面所通过的距离, 与介质的密度和弹性性质有关。对于液体介质, 只能传播纵波, 以 C_L 表示。

$$C_L = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3-3)$$

式中 K ——介质的体积弹性模量;

ρ ——介质的密度。

声速是随着介质及其状态 (如温度) 的不同而不同。如在常温下, 空气中的声速约为 334m/s, 在水中的声速约为 1440m/s, 而在钢铁中约为 5000m/s。除水以外, 大部分液体的声速随温度的升高而减小, 而水中的声速随温度的升高而增加。流体中的声速随压力的增加而增加。

声速与介质的许多特性有关, 有的关系非常直接, 可有精确的理论公式, 有的关系比较间接而复杂, 但在特定条件下, 也可建立一些经验公式, 例如介质的成分、混合物的比例、溶液的浓度、某些液体的比重等, 都可以与声速建立一定关系, 这样就可通过声速来测定这些特性参数。由于介质的温度、压强和流速等状态参量的变化都会引起相应的声速变化, 因此出现了超声温度计和超声流量计等。在声速已知的介质中, 可以利用声波传播距离 L 和传播时间 t 的关系式 $L = vt$, 进行超声测距, 超声液位计和超声测厚计就是这方面的典型应用。

2. 声阻抗

声波从一种介质传播到另一种介质, 在两个介质的分界面上一部分声波被反射, 另一部分透射过界面, 在另一种介质内部继续传播。这样的两种情况称之为声波的反射和折射, 如图 3-4 所示。

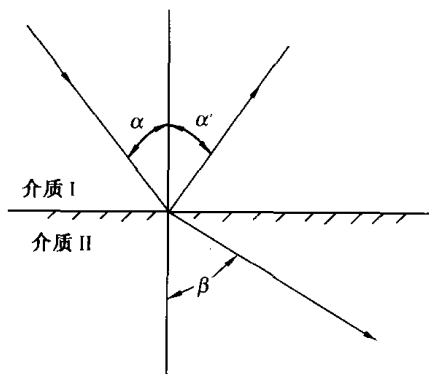


图 3-4 超声波的反射和折射

由物理学可知, 当波在界面上产生反射时, 入射角度 α 的正弦与反射角 α' 的正弦之比等于波速之比, 当入射波和反射波的波型相同时, 波速相同, 入射角度 α 等于反射角 α' 。当波在界面处产生折射时, 入射角 α 的正弦与折射角 β 的正弦之比, 等于入射波在第一介质中的波速 C_1 与折射波在第二介质中的波速 C_2 之比, 即

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_1}{C_2} \quad (3-4)$$



超声波在两种介质的界面上的反射能量和透射能量的变化, 取决于这两种介质的声阻抗之比。声阻抗定义为传声介质的密度 ρ 与声速 C 的乘积, 用 Z 表示。它是介质固有的一个常数, 它的数值对超声波在介质中的传播非常重要, 单位为瑞利 (rayl)。1 rayl = $1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3 = 1 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。

对空气, 0°C 时 $Z = 428 \text{ rayl}$, 20°C 时 $Z = 415 \text{ rayl}$;

对水, 20°C 时 $Z = 1.48 \times 10^6 \text{ rayl}$;

对钢铁, 20°C 时 $Z \approx 10^7 \text{ rayl}$ 。

空气和钢铁的声阻抗相差甚远, 垂直入射到空气和钢铁界面上的超声波几乎全被反射。

3. 声衰减

超声波在弹性介质中传播时, 会发生能量的衰减, 其产生原因可分为三个方面: ①由于波前的扩展而产生的能量损失; ②超声波在介质中的散射而产生的能量损失, 即散射衰减; ③由于介质内耗所产生的吸收衰减。

在平面波的情况下, 距离声源 x 处的声压 p 和声强 I 的衰减规律为

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \quad (3-5)$$

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (3-6)$$

式中 p_0 ——距离声源 $x = 0$ 处的声压;

I_0 ——距离声源 $x = 0$ 处的声强;

α ——衰减系数, Np/cm (奈培/厘米)。

若 α' 为以 dB/cm (分贝/厘米) 表示的衰减系数, 则 $\alpha' = 20 \lg e \cdot \alpha = 8.686 \cdot \alpha$, 则上面的两个式子相应地变成

$$p = p_0 \cdot 10^{-0.05\alpha'x}$$

$$I = I_0 \cdot 10^{-0.1\alpha'x}$$

如嫌 dB/cm 太大, 可用 $10^{-3} \text{ dB}/\text{mm}$ 为单位, 这时在一般的检测频率上, α' 为一到数百。例如水和其他低衰减材料的 α' 为 $(1 \sim 4) \times 10^{-3} \text{ dB}/\text{mm}$ 。

例如衰减系数为 $1 \text{ dB}/\text{mm}$, 则声波穿透 1 mm 衰减 1 dB , 即衰减 10% ; 声波穿透 20 mm 时, 衰减 $1 \text{ dB} \times 20 \text{ mm} = 20 \text{ dB}$, 即衰减 90% 。

下面简要介绍吸收衰减和散射衰减。

(1) 吸收衰减。声波在介质中传播时, 由于介质的粘滞性而造成的质点之间的内摩擦, 从而使一部分声能转变为势能; 同时, 由于介质的热传导所, 介质的稠密和稀疏部分之间进行热交换, 从而导致声能的损耗, 这就是介质的吸收现象。通常由于介质的吸收引起的超声波的衰减叫做粘滞衰减。

(2) 散射衰减。超声波在介质中传播遇到障碍物, 当阻碍物的尺寸与超声波长可相比或更小时会产生散射衰减。产生散射衰减的因素很多, 总的说来是由于介质阻抗的不连续性造成的。可分为两种情况, 一是材料本身的不均匀, 如具有不同密度和声速的两种材料的交界面、金属锻件中的杂质和气孔、晶体材料的各向异性等等; 另一种是晶粒尺寸可以与超声波长相比的粗晶粒材料, 入射的超声波在晶界的反射散乱使得声能变为热能而损

耗,这叫做晶粒散射。在多晶金属材料中,晶粒散射往往是超声波衰减的主要原因之一。

介质的声衰减是很复杂的物理量。声衰减绝对值的测量较繁琐,一般是测量其相对值,此测量方法虽简易,但能做到自动连续测量,只是测量精度较低,不如声速测量的精度高。当所要测的介质特性与声速关系不明显时可用声衰减法。在媒质中含有散射粒子时,选择适当高的频率往往可使散射衰减成为衰减中的主要因素,于是通过对衰减量的测量可反映散射粒子的大小和多少,球墨铸铁的球化程度、泥浆的浓度等量都可利用这种原理来测量。

第二节 超 声 波 换 能 器

超声波换能器又称为超声波探头,是完成超声波发射和接收的关键器件。所谓换能器就是能进行能量转换的器件。超声波换能器可以将其他形式的能量转换成高频声能(发射换能器),并且也能够把超声能量转换成其他易于检测的能量(接收换能器)。在超声检测中往往用一个超声换能器,既作发射换能器,又作接收换能器。能量的形式是多种多样的,因而换能器的形式也各不相同。换能器按能量转换原理,分为磁性换能器和电性换能器。磁性换能器有电动式、电磁式、磁致伸缩式;电性换能器有压电式、电容式、电致伸缩式。磁致伸缩换能器是基于磁场的磁力效应来实现机电能量转换的。电致伸缩换能器是基于某些晶体或极化了的陶瓷体的电致伸缩效应来实现电声能量转换的一种电声换能器。极化了的电致伸缩换能器,从换能原理和处理方法上可以看做压电换能器,一般也把它称为压电换能器。压电换能器是基于某些晶体的压电效应来实现电声能量转换的一种电声换能器。

在超声检测中,最常用的是压电换能器,其次是磁致伸缩换能器。

一、压电换能器

1. 压电效应

(1) 逆压电效应。将具有逆压电效应的介质置于电场内,由于电场作用介质内部正负电荷中心发生位置变化,这种位置变化在宏观上表现为产生了形变,形变与电场强度成正比。如电场反向,则形变亦相反。这一现象称为逆压电效应。利用逆压电效应能产生超声波。将适当的交变电信号施加到晶体上,晶体将发生交替的压缩和拉伸,因而产生振动,振动频率与交变电压的频率相同,若把晶体耦合到弹性介质中,晶体将充当一个超声源的作用,超声波将被辐射到那种介质中。

(2) 正压电效应。当对某电介质施加应力时,产生的变形将引起内部正负电荷中心发生相对位移而产生极化,在介质两端面上出现符号相反的束缚电荷,其电荷密度与应力成正比,这种效应称为正压电效应。利用正压电效应将机械能(即声能)转换成电能,并用来接收超声波的装置,称为接收换能器。

2. 压电材料和压电换能器

(1) 压电材料。常见的压电材料有石英晶体、压电陶瓷、压电半导体、高分子压电材

料等,下面介绍石英晶体。

石英晶体的化学式是 SiO_2 , 它属于三角系晶体, 排列示意如图 3-5 (a) 所示, 图中大圆代表 Si 原子, 小圆代表 O 原子。每个硅原子带四个单位的正电荷, 每个氧原子带两个单位的负电荷。各原子间的电荷相互平衡, 整个晶体呈电中性。如果把它沿 x_1 轴方向压缩 [如图 3-5 (b)], 则硅原子与氧原子的相对位置发生变化, 此时正负电荷中心不再重合, 这就使上侧面带负电荷, 下侧面带正电荷。如果沿 x_1 轴方向拉伸则带电情况相反, 这就是正压电效应。若在压电晶体的两侧加交变电场, 则晶体会产生交变变形, 这是逆压电效应。

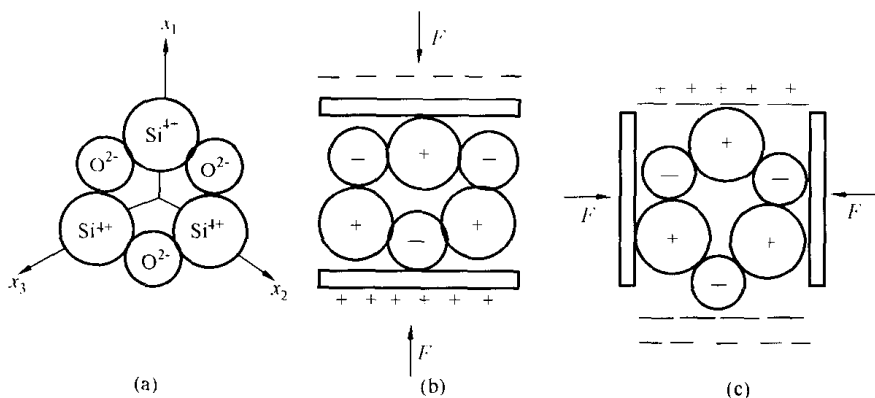


图 3-5 压电效应原理

(a) 晶系排列; (b) 压缩情况; (c) 拉伸情况

(2) 超声换能器的结构。超声波换能器的外形如图 3-6 所示。几种典型超声波换能器结构如图 3-7 所示。

下面介绍应用最广泛的纵波直探头, 其结构如图 3-7 (a) 所示。它可以发射和接收纵波, 主要由压电晶片、保护膜和吸收块组成, 另外还有壳体和连接高频电缆的接插件。

1) 压电晶片。直探头中压电晶片一般为圆形, 以厚度振动模式激发纵波, 同一晶片兼有发射和接收功能。压电材料选定后, 晶片厚度决定了振动频率, 频率和厚度的乘积为一常数即频率常数。晶片的直径 D 越大, 指向性越尖锐, 超声波愈不易扩散。但 D 过大, 近场区的声场分布越不均匀, 这是不希望的, 所以晶片直径 D 应综合两者考虑。

另外, 晶片两面的平行度直接影响晶片的振动性能, 必须保证光滑、平整。晶片两面镀有银层作为正负电极, 正极引线接发射端, 负极引线接地。

2) 保护膜。为防止压电晶片与被测物直接接触造成的磨损和腐蚀, 用一层保护膜覆盖在晶片上。保护膜分两类: 一类是硬性保护膜, 用不锈钢片、钢玉片或环氧树脂浇铸而成; 另一类是软性保护膜, 用耐磨橡胶或塑料制成, 它可使工件粗糙面有较好的声耦合,

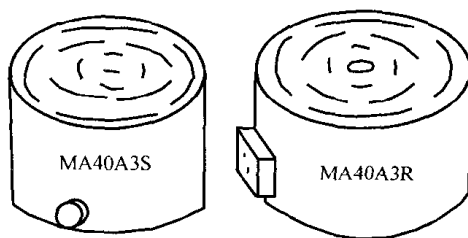


图 3-6 超声波换能器外形

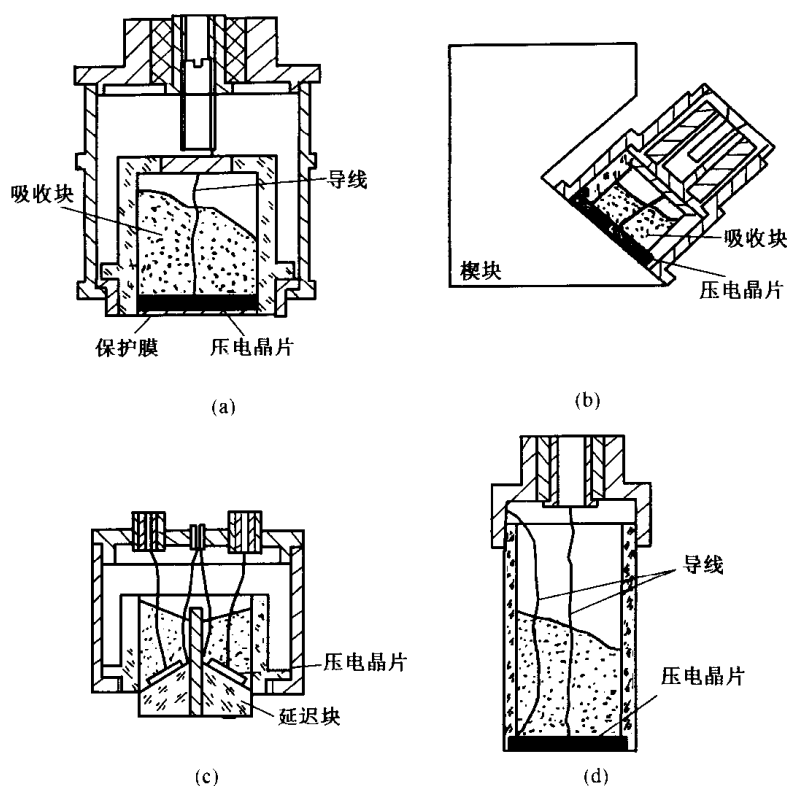


图 3-7 几种典型超声波探头结构

(a) 直探头; (b) 斜探头; (c) 双探头; (d) 水浸探头

但声能损失比硬性保护膜大。

选取保护膜除考虑材料的耐磨性外,还要求有较大的透声率,这要求综合考虑压电晶片、保护膜和工件的声阻抗。

3) 吸收块。起振后的压电晶片去掉激励后,要经过多次振动才会停止,这会使发射脉冲变宽而降低探头的分辨力。一般采取在压电晶片的负极浇铸吸收块的办法吸收声能量,即增加振动阻尼,因此也把吸收块称为阻尼块。

吸收块作为支撑晶片的背衬材料,主要用来吸收向背面发射的声波,抑制径向振动和杂波,对压电晶片的振动起阻尼作用,使晶片的振动能量很快地消耗掉,从而在电脉冲结束后很快停振,缩短余振时间,使发射脉冲变窄,波形不失真,从而提高检测分辨力。

选用吸收块材料的原则是:吸收块和压电晶片之间的声耦合匹配要好;材料的吸收系数要大。通常是在环氧树脂中加入钨粉和固化剂制成吸收块,使声能进入吸收块后被散射而消耗掉。

应当指出,在探头中浇铸吸收块提高了分辨率,同时也降低了辐射功率,牺牲了检测灵敏度。所以,要根据实际情况制作吸收块。

二、磁致伸缩换能器

磁致伸缩换能器工作的基本原理是磁致伸缩现象。所谓的磁致伸缩现象是指铁磁物质

置于交变的磁场中时在沿着磁场方向产生伸缩的现象。磁致伸缩换能器就是把铁磁材料置于交变磁场中，使它产生机械尺寸的交替变化，即机械振动，从而产生超声波。

不同的铁磁物质在外加磁场变化时磁致伸缩效应的大小是不同的，即伸长缩短的程度是不同的。镍的磁致伸缩效应最大，它在一切的磁场中都是缩短的。常用的磁致伸缩换能器是用厚度为 0.1 ~ 0.4mm 的镍片叠加而成的，片与片之间采取绝缘措施以减少涡流电流损失。其形状有矩形、窗形等，如图 3-8 所示。如果对磁致伸缩换能器先加一定的直流磁场，再通以交流电时它就可以工作在特性比较好的区域。

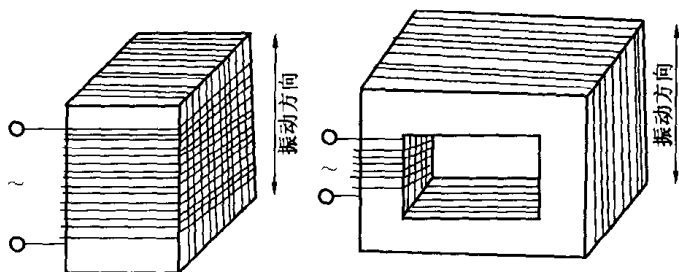


图 3-8 磁致伸缩换能器

磁致伸缩换能器的材料除了镍外，还有铁钴钒合金（铁 49%，钴 49%，钒 2%）和含锌、镍的铁氧体。

磁致伸缩换能器只能用在几万赫兹的频率范围以内，但功率可以达到十几千瓦，声强可以达到几千瓦每平方厘米，并且能耐较高的温度。

三、超声换能器的分类

超声波探头的种类很多，表 3-2 列举出了常用的超声波换能器的特性，根据结构和用途的不同，我们可将压电超声换能器分为以下几类：

表 3-2 常用的超声波换能器的特性

型 号	标称频率 (kHz)	灵敏度·声压 (dB)	频 带 (kHz)	静电容 (pF)	温度特性	备 注	厂家
MA40A5R	40	-67 以上	6 以上 (-74dB)	2000	10dB 以内	接收用 (宽频带)	村田 制作 所
MA40A5S	40	112 以上	7 以上 (90dB)	2000	(-20 ~ +60℃)	发送用 (宽频带)	
MA40S2R	40	-74 以上	6 以上 (-80dB)	1600	10dB 以内	接收用, 小型	
MA40S2S	40	100 以上	7 以上 (90dB)	1600	(-20 ~ +60℃)	发送用, 小型	
MA40E1R	40	-74 以上	2 以上 (-80dB)	2200	10dB 以内	接收用防滴型	
MA40E1S	40	106 以上	1.5 以上 (100dB)	2200	(-30 ~ +80℃)	发送用防滴型	
MA40A3R	40	-68 以上	4 以上 (-73dB)	1300	10dB 以内	接收用	
MA40A3S	40	110 以上	4 以上 (100dB)	1300	(-20 ~ +80℃)	发送用	
MA23L3	23	-70 以上	6 (-73dB)	2800	10dB 以内 (-20 ~ +60℃)	接收发送兼用	
EFR-RSB40K6	40	-67 以上	4 以上			接收用	松下 电子 产品
EFR-OSB40K6	40	110 以上	4 以上			发送用	
EFR-RCB40K7	40	-67 以上	3.5 以上			接收用	
EFR-OCB40K7	40	112 以上	3.5 以上			发送用	

- (1) 按产生的波形分为纵波直探头，横波斜探头，表面波探头，板波探头。
- (2) 按接触方式分为直接接触探头，水浸探头。
- (3) 按检测用途分为分割式联合双探头，聚焦探头，可变角探头，专用探头等。
- (4) 按探头的频带宽度分为通用型，宽频带型，密封型，高频型。

①通用型。超声波换能器频带宽一般可达数千赫，并有对频率的选择性。图 3-9 是 MA40A3R（接收用）和 MA40A3S（发送用）型换能器的频率特性。通用型超声波换能器频带窄，但灵敏度高，抗干扰性强。在多通道并且通道频率接近的应用中最好使用窄频带型的超声波换能器。

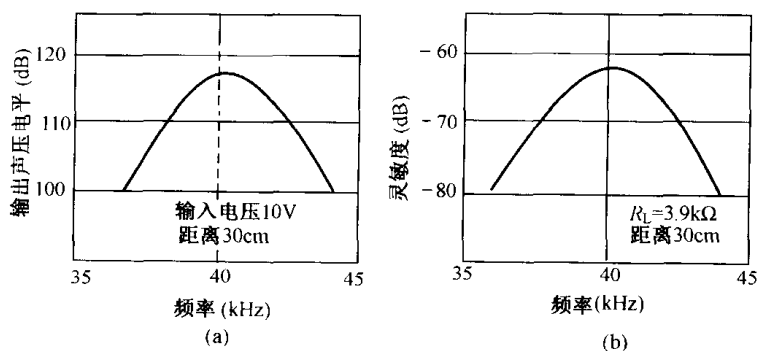


图 3-9 频率特性

(a) MA40A3S; (b) MA40A3R

通用型超声波换能器一般备有发送换能器和接收换能器。

②宽频带型。宽频带型超声波换能器（如 MA23L3）能在工作频带内有两个共振点，因而加宽了频带，在很宽的频带范围内，具有较高的灵敏度。MA23L3 的频率特性如图 3-10 所示，换能器兼作发送和接收换能器。

③密封型。密封型超声波换能器（如 MA40F1R/S）适用于室外环境，有较好的耐风雨性能，可用于汽车后方检测物体的装置等，其频率特性曲线如图 3-11 所示。

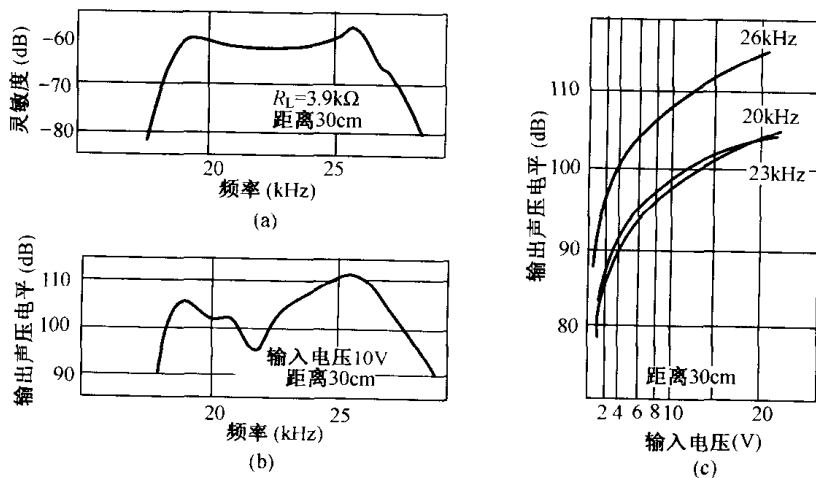


图 3-10 MA23L3 的频率特性

(a) 接收特性; (b) 发送特性; (c) 输入电压与输出声压电平特性

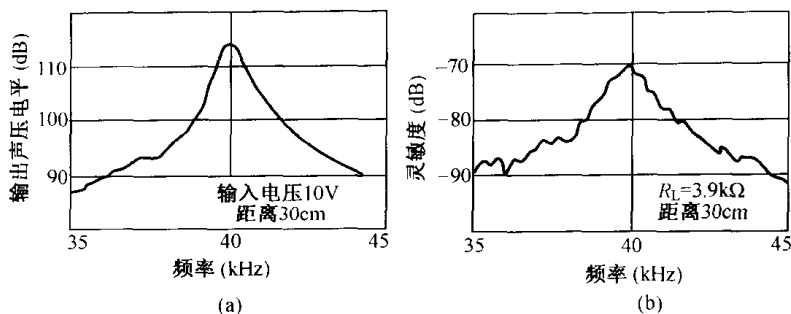


图 3-11 MA40E1R/S 的频率特性
(a) MA40E1S 的频率特性; (b) MA40E1R 的频率特性

④高频型。上述各类换能器的中心频率只有数十千赫，但中心频率高于 100kHz 的换能器近来也有销售。MA200A1（发送与接收共用）换能器中心频率高达 200kHz，可以进行较高分辨率的测量，其特性见表 3-3。

表 3-3 MA200A1 的特性

中 心 频 率	收发灵敏度	可能检测的范围	方 向 性
200kHz ± 10kHz	- 54dB 以上	20 ~ 100cm	7°以下

第三节 超声波换能器的接口电路

一、超声波换能器的驱动电路

图 3-12 为数字集成电路构成的超声波振荡电路，振荡器产生的高频电压通过耦合电容 C_p 供给超声波换能器 MA40S2S。其工作过程为： H_1 和 H_2 产生与超声波频率相对应的高频电压信号，此信号通过反向器 $H_3 \sim H_6$ 进行功率放大，再经过耦合电容 C_p 供给超声波换能器 MA40S2S。超声波换能器若长时间加直流电压，会使其特性明显变差，因此，一般用交流电压通过耦合电容 C_p 供给换能器。

图 3-13 是采用脉冲变压器的超声波振荡电路。电路中使用 NPN 晶体管 VT 来放大频率可调振荡器 OSC 的输出信号，放大的信号经脉冲变压器 T 升压为较高的交流电压供给超

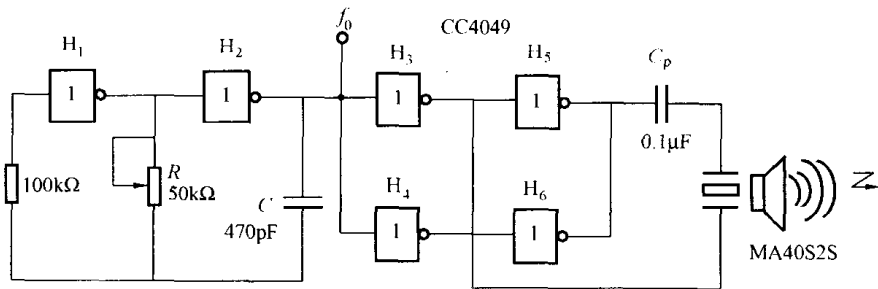


图 3-12 数字式超声波振荡电路

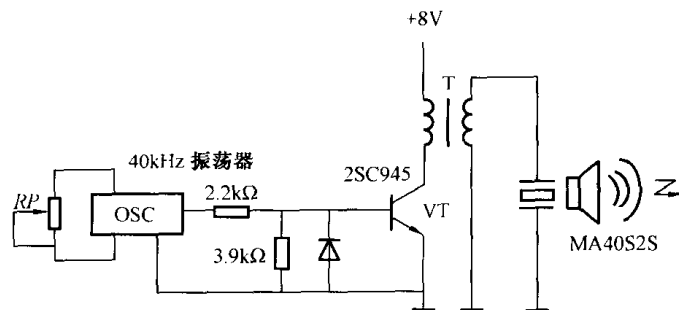


图 3-13 采用脉冲变压器的超声波振荡电路

声波换能器 MA40S2S。超声波换能器 MA40S2S 产生 40kHz 的超声波。

二、超声波换能器接收电路

由于超声波换能器接收到的信号极其微弱，一般要接几十分贝以上的高增益放大器。图 3-14 为超声波接收电路，超声波换能器采用 MA40S2R，放大电路采用 NPN 晶体管 VT。

超声波换能器用于检测反射波时，它远离超声波发生器，能量衰减较大，只能接收到几毫伏左右的微弱信号。因此，实际应用时要加多级放大器。

图 3-15 是采用运放的超声波接收电路，电路增益较高。电路输出为高频电压，实际应

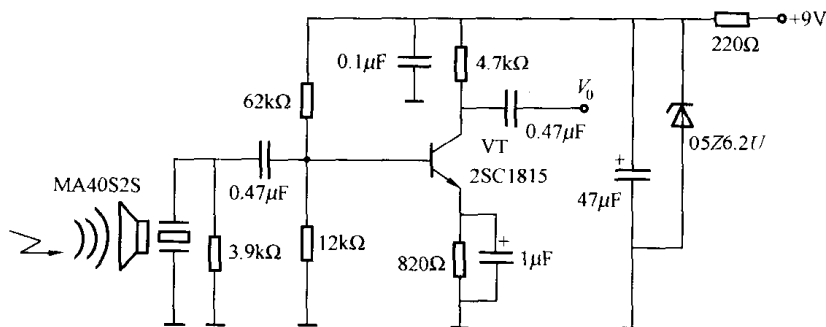


图 3-14 晶体管超声波接收电路

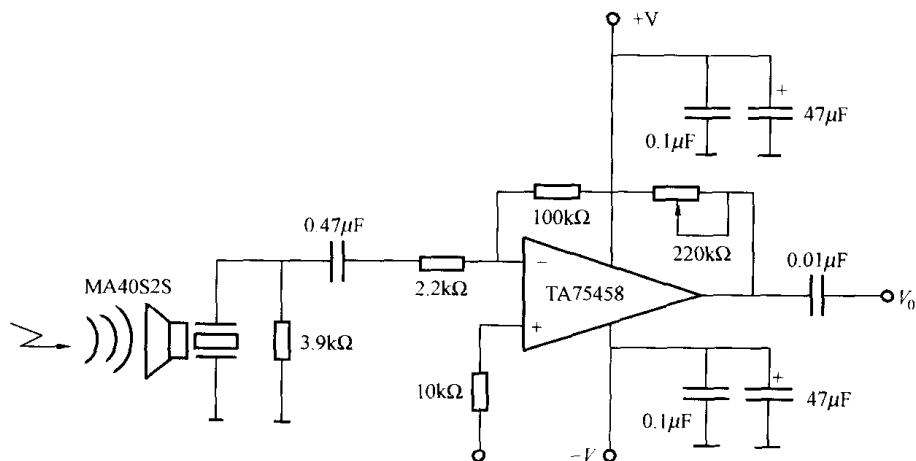


图 3-15 采用运放的超声波接收电路

用中后面还要接检波电路、放大电路和开关电路等。

三、超声波换能器接收发送两用电路

用一个超声波换能器发送信号的同时还可以接收信号，其电路组成如图 3-16 所示。发送器 T 由门电路、缓冲器以及脉冲变压器的升压电路组成。用 20Hz 调制 40kHz 的高频信号加到脉冲变压器 T_1 上，经脉冲变压器升压，得到较高的脉冲电压供给超声波换能器，换能器获得的能量以声能形式辐射出去。

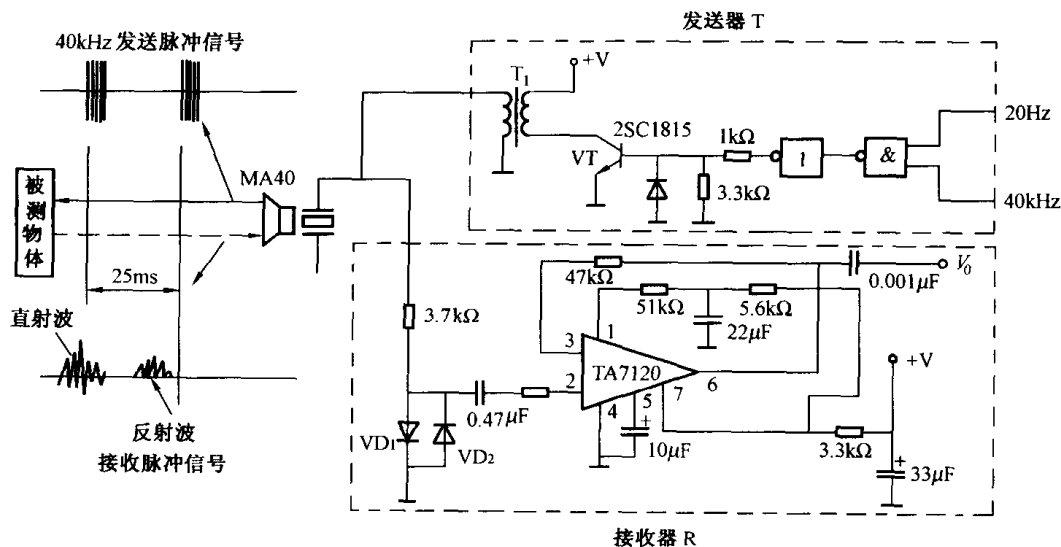


图 3-16 收发信号两用电路

接收器 R 由二极管钳位电路以及交流放大器等组成，发送接收信号共用一个超声波换能器，因而收发信号之间要产生干扰，较大的发送信号能量有可能直接进入接收电路。直接进入的能量会比反射波大得多，因此，前级放大器会饱和，电路工作不稳定，为此，接收信号放大器的输入端要接入二极管 VD_1 和 VD_2 的钳位电路。

第四节 超声无损检测

超声检测是无损检测中最重要的一种方法，由于超声波具有穿透能力强、对材料人体无害、使用方便等特点，利用此方法可对高速运动的金属板材、棒料进行检测。使用全自动检测系统，不但能发出报警信号，还可在有缺陷区域喷上有色涂料，并根据缺陷的数量或严重程度作出“通过”或“拒收”的决定，超声检测目前已广泛地应用到了现代工业生产中。下面以 A 型显示脉冲反射式超声探伤仪为例对超声检测的原理和方法进行介绍。

A 型显示脉冲反射式超声探伤仪是目前使用最广泛的探伤仪，它不采用连续波，而是采用按一定频率间隔发射的具有一定持续时间的超声脉冲波，其探测结果以荧光屏显示，具有灵敏度高、缺陷定位精度高、适应范围广的优点。

一、探伤仪的工作原理

当被检测的均匀材料中存在缺陷时,将造成材料的不连续性,这种不连续性往往伴随着声阻抗的突变。由超声传播理论可知:超声波在两个不同声阻抗的交界面上将发生反射,反射能量的大小取决于交界面两边材料声阻抗的大小与交界面的取向和尺寸。脉冲反射式超声探伤仪正是根据这个原理而设计的。目前这种类型的探伤仪已有各种各样的形式,但其基本结构大体上是相同的,主要由同步、发射脉冲、时基、接收放大、显示及报警、时标、电源等部分组成,其方框图如图 3-17 所示。

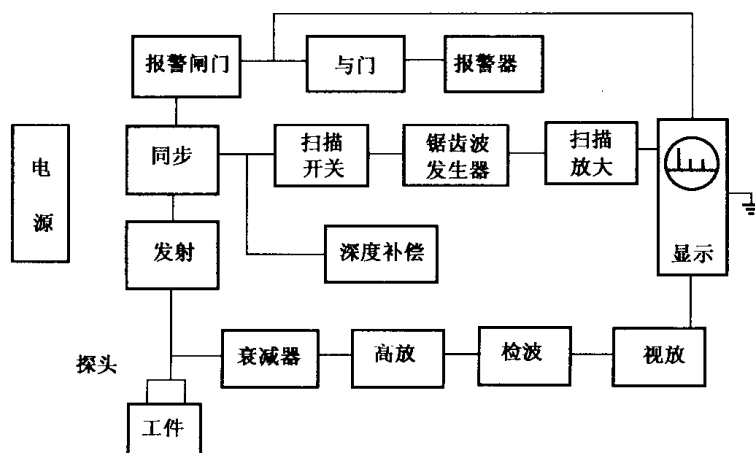


图 3-17 A 型显示超声波探伤仪方框图

图 3-17 中,报警电路不是必须的。若需要,可由同步电路触发报警闸门电路,在与门的作用下,报警器将闸门时间内出现的缺陷波取出进行报警。

目前生产的探伤仪,工作频率大致为 500kHz ~ 5MHz,实验研究中采用的特殊仪器,也有使用更低频 (< 500kHz) 或更高频 ($\geq 20\text{MHz}$) 的,下面简要介绍各部分电路的功能。

1. 同步电路

同步电路又称为触发电路,它产生周期性的脉冲信号电压,用以同时触发仪器各部分电路协调工作,是整机的指挥中心。其结构一般由多谐振荡器或其他脉冲振荡器产生的前沿很陡的周期性矩形脉冲,经微分后由射极跟随器输出正负触发脉冲,同时触发发射、时基、时标、报警等单元,使其同步工作。同步脉冲的重复频率一般为 50 ~ 10kHz。

2. 发射电路

发射电路用来产生高频、高幅度的窄脉冲信号,通过超声换能器转换成超声波,从而对被检测对象进行探测。随着电子器件的发展、更新、具体电路形式很多,但从探伤的需要而言,发射电路应满足以下两个要求:

(1) 发射功率大。发射功率是发射电路中一个很重要的指标。为了穿透较厚的工件,需要用较大的电功率转换成声功率,而电功率是由电容充电电荷的能量决定的,即

$$\bar{P} = \frac{V^2 \cdot C}{t} \quad (3-7)$$

式中 $\bar{P}$ ——平均电功率;
 V ——放电时电容上的瞬时电压;
 C ——电容容量;
 t ——放电时间。

当工作频率及放电时间常数限定后,电功率主要取决于 V^2 和 C ,而增大 C 将使放电时间加长,引起严重的阻塞,这种阻塞在低频时显得更加严重。因此,提高发射功率的主要途径是加大发射电压,但当发射电压超过一定值时,换能器中压电晶片电声转换效率将大大下降。另外受压电陶瓷极化电压的限制,发射电压亦不宜提得过高,否则将加速晶片的老化甚至损坏。一般超声探伤仪发射电压不超过 1800V,若使用石英、铌酸锂等单晶材料作压电晶片,电压可以再提高,另外也可以使用其他形式的换能器。

(2) 脉冲宽度窄。为了提高检测分辨率,希望使用很窄的声脉冲,声脉冲的宽度主要取决于晶片的 Q 值(品质因数),增加阻尼可以减窄声脉冲,但这将使声脉冲幅度减小,影响检测的灵敏度,降低穿透深度,因此必须兼顾高分辨率和高灵敏度的要求而设计最佳电路。

3. 接收放大电路

接收放大电路是超声波探伤仪的关键性单元,它应具有如下特点:

(1) 宽频带。超声波探伤仪所采用的信号脉冲一般包含很多频率成分,脉冲越窄,所包含的谐波成分就越多,为了使放大脉冲信号不失真,放大器应有足够的带宽。

(2) 抗阻塞性。使用单探头探伤时,发射和接收电路将连在一起,因此将有几百伏的发射信号加到放大器输入端,这使放大器在发射信号过后的一段时间内不能正常工作,此现象称为阻塞。放大器因阻塞不能正常放大的时间称为阻塞时间或阻塞区。如果在阻塞时间内出现缺陷波,则缺陷波将得不到正常放大,这在实际探伤中是不允许的。因此,在设计和检验放大器性能时,抗阻塞是一个很重要的指标,必须把阻塞时间减小到探伤允许的范围。

(3) 较大的动态范围。动态范围是指放大器的线性放大区,这也是放大器的另一个十分重要的指标,由于探伤放大器所放大的信号幅度相差很大,因此该指标对探伤仪显得更为重要。

接收放大电路主要由前置放大、高频放大、检波器、视频放大、深度补偿等部分组成,方框图如图 3-18 所示。

实现 A 型显示的波形有两种,一是直接显示回波声压的射频信号,二是显示检波后的射频信号的回波声压

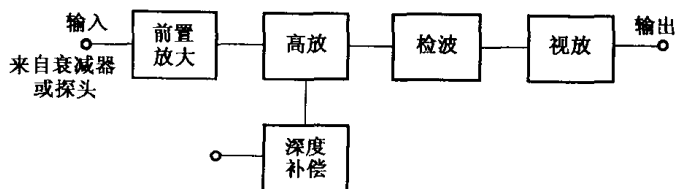


图 3-18 接收、放大电路方框图

信号,不检波显示和检波显示的波形分别如图 3-19 (a)、(b) 所示。

射频全波显示能真实地反映超声波在介质中的传播情况,通过对缺陷回波的波形、相位进行分析,有利于判断缺陷的性质。检波视频放大显示以正向回波形式显示,波形简单,便于对缺陷的位置、大小进行判断,从而为大多数探伤仪所采用。

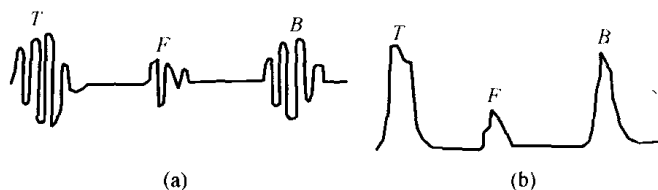


图 3-19 A 型显示波形

(a) 射频显示; (b) 视频显示

4. 时基电路

时基电路即扫描电路,一般由延时、扫描两部分组成。同步脉冲信号经延迟后,再去触发扫描电路,产生锯齿波电压,加在显象管的偏转板上,使电子束匀速移动进行扫描,扫描光点的移动速度与锯齿波电压幅度

变化成正比,只要控制锯齿波电压的斜率,就可以改变扫描速度,使之与超声波在介质中的传播时间相一致,从而调整探测范围。通过延迟一段时间后再进行扫描,可以把需要仔细观测的某一区域展现在荧光屏上,便于对缺陷波观察。

二、探伤仪的使用方法

比较常用的超声探伤的方法有透射法、反射法,对于连续波还有共振法等。下面介绍最广泛的脉冲反射法。

脉冲反射法就是根据缺陷及底面反射波的有无、大小及其在时基轴上的位置来判断缺陷的有无、大小及缺陷深度。

比较常用的超声探伤是利用超声波入射到两种不同介质交界面上发生反射的原理进行检测。仪表采用同一换能器兼作发射和接收,接收信号显示在检测仪的荧光屏上。

如前所述,脉冲反射式超声探伤仪的同步电路按一定频率间隔发射具有一定持续时间的触发脉冲信号,同时触发扫描电路和发射电路。扫描电路产生的与时间成正比的锯齿波电压加到示波器水平偏转板上,形成水平扫描线。与此同时,发射电路产生一个高频脉冲信号去激励换能器,这个发射脉冲信号同时加至接收电路,在时基轴的始端形成一个幅度很大的起始脉冲信号。通过逆压电效应,发射换能器将高频电能,通过机械振动转换成声能,并耦合到被测试件中,以超声波的形式在介质中进行传播,遇到缺陷或被测物底面时,会产生反射。反射声波被同一换能器接收,并通过正压电效应,将声能转换成电能,电脉冲送入仪表的接收、放大电路,将放大后的反射信号加至示波器的垂直偏转板上,形成反射脉冲信号。

直接接触纵波脉冲反射法是脉冲反射法中应用最广的一种方法。所谓直接接触法是将换能器通过耦合介质直接与探测面发生接触的检测方法。

为了使换能器有效地向试件中发射或从试件中接收超声波,必须保持两者之间良好的声耦合,避免因空气层的存在将声能几乎全部反射。这可以通过填充耦合介质来实现。根据耦合介质和耦合条件的不同,换能器和试件的耦合方式分为直接接触法和液浸法两种。

直接接触法是在换能器与试件之间填充很薄的一层耦合剂。为了实现良好的声耦合,避免各种损耗,确保探测结果的准确性,必须使换能器与被检物的探测面之间有良好的声学接触,这取决于探测面的平行度、平整度和光洁度,也取决于耦合剂的性能。耦合剂应具有较高的声阻抗,透声性能好,一般用油类,如硅油、甘油、机油等。

“液浸法是使探头发射的声波经过一段液体后再进入工件的探伤方法。常用的浸液有

水、油或其他液体。液浸法中探头与被检物不接触，因此，超声波的发射与接收都比较稳定，受油膜厚度、接触压力和表面光洁度的影响较小。”

1. 单直探头纵波脉冲反射法

纵波是介质中质点振动方向与声传播方向一致的波形。利用纵波进行检测的方法，称为纵波法。纵波法是超声检测应用最广泛的方法，利用压电换能器的厚度模式振动，可直接激发纵波。检测时，当直探头垂直地或以一小角度耦合到工件上时，在工件内部能获得纵波。直接接触纵波法广泛应用于板材、铸件、锻件及复合材料的检测中。

直接接触纵波脉冲反射法分为一次脉冲反射法、多次脉冲反射法和组合双探头脉冲反射法。

(1) 一次脉冲反射法。纵波一次脉冲反射法原理和波形如图 3-20 所示。当工件中无缺陷时，接收波形如图 3-20 (a)，荧光屏上只有始波 T 和底波 B ；当有小于声束截面的缺陷时，有缺陷波 F 出现， F 波在时基轴上的位置取决于缺陷声程，由此确定缺陷在试件中的位置，缺陷回波的高度取决于缺陷的反射面积，可评价缺陷的当量大小。由于缺陷使部分声能反射，从而底波高度下降，如图 3-20 (b)；当有大于声束截面的大缺陷时，全部声能被缺陷反射回去，只有始波和大的缺陷波，如图 3-20 (c)。

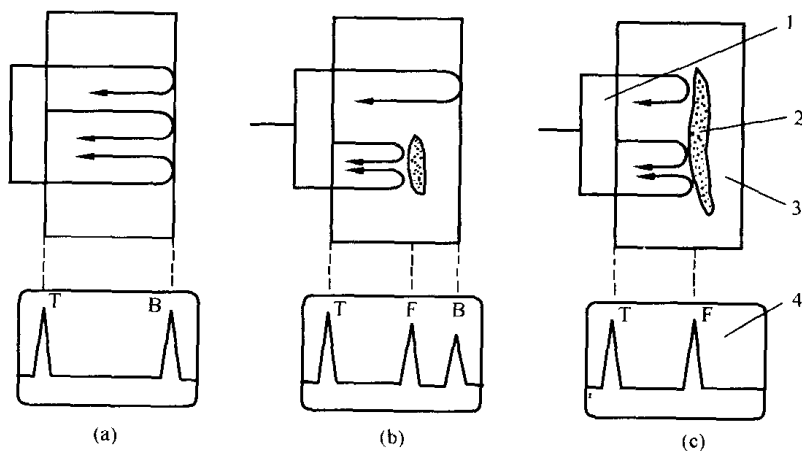


图 3-20 直接接触纵波一次脉冲反射法

(a) 无缺陷；(b) 有小缺陷；(c) 有大缺陷

1—探头；2—缺陷；3—工件；4—荧光屏

(2) 多次脉冲反射法。这是以多次底面反射波为依据进行探伤的方法。当声波在两个平行端面上传播时，若无缺陷存在，从底面反射回来的回波，一部分声能被探头接收、转换，在荧光屏上显示为一次底波 B_1 ，另一部分声能又折回底面被再次反射回来，其中一部分声能又被探头接收、转换，产生二次底波 B_2 ，如此往复多次，直至声波耗尽为止。从而获得多次底面回波如图 3-21 (a) 所示。

对于吸收性缺陷，声传播过程中无缺陷反射波出现，但引起声衰减，可根据声衰减系数的大小，判断材质性能。也可用专门的超声衰减仪进行测试。对非吸收性缺陷，若缺陷较小，在每次反射中缺陷波与底波相继出现，如图 3-21 (b) 所示；若有大于声束截面的

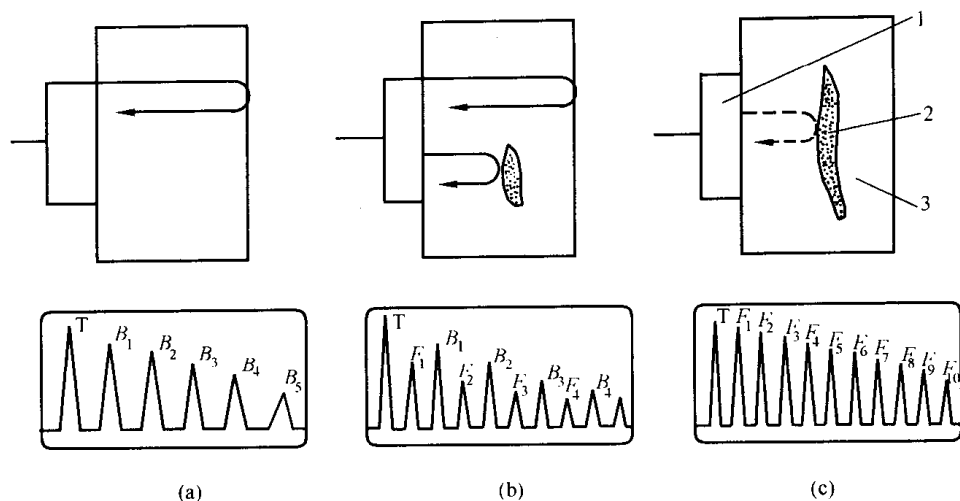


图 3-21 直接接触纵波多次脉冲反射法

(a) 无缺陷; (b) 有小缺陷; (c) 有大于声束直径的缺陷

1—探头; 2—缺陷; 3—工件

缺陷时, 则仅有缺陷的多次反射波, 底波消失, 如图 3-21 (c)。

2. 双直探头纵波脉冲反射法

直接接触纵波组合双探头脉冲反射法如图 3-22 所示。它是在一个探头壳体内安装两块晶片, 分别用来发射和接收声波, 两晶片之间用隔声层隔开, 晶片下面是有机玻璃的延迟块, 用来减少盲区。

双直探头脉冲反射法利用了穿透法和反射法的优点, 将二者统一起来。它适用于表面和近表面缺陷的探伤, 以及薄壁工件或板材的探伤。其波形与一次脉冲反射法相似, 只是增加了一次界面回波。

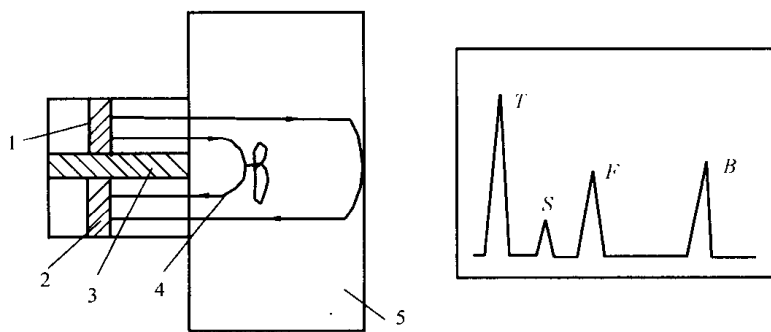


图 3-22 双直探头纵波脉冲反射法

1—发射探头; 2—接收探头; 3—隔声层; 4—缺陷; 5—工件

在脉冲反射法中, 除了直接接触纵波脉冲反射法之外, 还有直接接触斜探头脉冲反射法。直接接触斜探头脉冲反射法利用超声波在异质界面上发生反射和折射时会产生新类型的波的特点, 可以检查不同角度的缺陷。直接接触斜探头脉冲反射法可分为横波法、表面法等。

第五节 超声波物位计

超声波在介质中传播时,会被吸收而减弱。超声波的频率越高,方向性越强,则在介质中的衰减越大。声波遇到不同的分界面时会产生反射、折射等现象。利用超声波的这些特性可制成各种超声波物位计。

超声波物位计可以分为两类:

(1) 定点发信超声波物位计。物位的升降及介质吸收或反射声波能使透过的声波被通断,通过这种开关作用可实现液体在定点有无的测量。

(2) 连续测量超声波物位计。声波发射到分界面(即物料表面或液体表面)后产生反射,由接收换能器接收反射回波,利用发射到接收的时间间隔及声速,通过计算可得物位高度。

定点发声超声波物位计对物位可实现定点报警或控制液位、固体料位,换能器可全部装于容器壁外,不接触介质,可测熔融金属液位。本节重点介绍连续测量超声波物位计。

一、超声波液位计

1. 基本原理及方案

超声波液位计是利用回声测距原理进行工作的。由于超声波可以在不同介质中传播,所以超声波液位计分为气介式、液介式及固介式三类,最常用的是气介式和液介式。图3-23所示是液介式与气介式超声波液位计的几种测量方案,其中(a)、(b)为液介式,(c)、(d)为气介式;(a)、(c)两种方案发射和接收都是由一个探测器完成的,是单探头式;(b)、(d)是一个发射一个接收的双探头式。

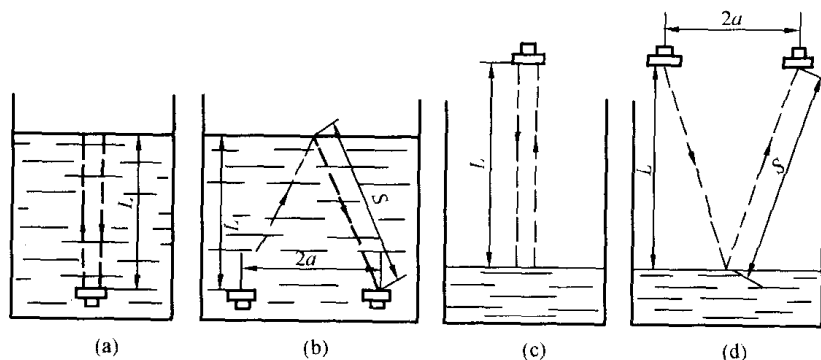


图 3-23 超声波液位计的几种方案原理

(a) 液介式单探头; (b) 液介式双探头; (c) 气介式单探头; (d) 气介式双探头

液介式超声波液位计的探测器安装在液罐底部,有时也可安装在容器底外部。对于图3-23(a)的单探头形式,探头发出的超声波脉冲经过液体传至液面,再经液面反射回到原来的发射器,此时发射器又变成了接收器,接收了超声波脉冲。如果探头距液面的高度为 L ,从发射到接收超声波脉冲的时间间隔为 t ,则 L 可表示为

$$L = \frac{1}{2} \cdot C \cdot t \quad (3-8)$$

式中 C ——超声波在被测介质中的传播速度。

由上式可知, 如果知道介质中声波传播速度 C , 再测得时间, 就可以准确测量液位高度。

图 3-23 中, (c) 方案与 (a) 方案基本一致, 只是 (c) 方案中超声波在空气介质中传播, 探头应放在高出液位可能达到的高度上。

图 3-23 中的 (b)、(d) 是双探头式, 声波经过的路程是 $2S$, 即

$$S = \frac{1}{2} \cdot C \cdot t \quad (3-9)$$

$$L = \sqrt{S^2 - a^2} \quad (3-10)$$

式中 a ——两个探测器之间距离之半。

对于单探头与双探头方案的选择, 主要应根据测量对象的具体情况考虑。一般多采用单探头方案, 因为单探头简单、安装方便、维修工作量也较小, 可以直接测出距离 L , 不必修正。

在一些特殊情况下, 必须选择双探头方案。例如, 当探测距离较远时, 为了保证一定灵敏度, 必须加大发射功率, 用大功率换能器。大功率换能器作为接收探测器时灵敏度很低, 甚至无法用于接收, 在这种情况下, 只能用灵敏度高的接收探测器。

另外, 单探头方案还有一个接收探测器的“盲区”问题。如果同一探头既作发射器又作接收器, 那么在发射超声波脉冲时, 要在探头上加较高的激励电压, 这个电压虽然持续时间较短, 但在停止发射时, 在探头上仍存在一定时间的余振。如图 3-24 所示, $0 \sim t_1$ 是

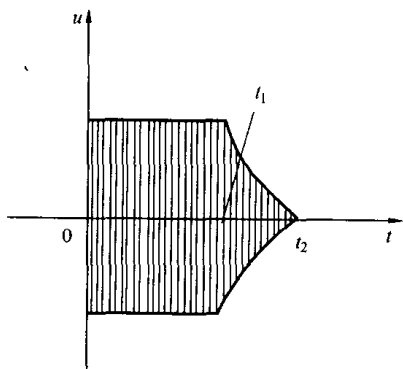


图 3-24 发射的超声波脉冲波形

发射超声脉冲的时间, 在 $t_1 \sim t_2$ 时间为余振时间。如果在余振时间将探测器转向接收放大线路, 则放大器的输入将还有一个足够强的信号。显然在这段时间内, 即便能收到回波信号, 该信号也很难被分辨出来, 因此称这段时间为盲区时间。过了盲区时间后, 接收器才能分辨回波信号。探测器的盲区时间与结构参数、工作电压、频率等因素有关, 可以通过实验确定。如果知道盲区时间, 再求得声速, 就可以确定盲区距离。由于盲区距离的限制, 采用单探头方案时, 不能测量小于盲区距离的液位。采用双探头方案时, 从理论上讲没有盲区问题,

实际上, 由于难以避免的电路耦合及非定向声波对接收器的作用, 在发射超声脉冲时, 接收线路中也将产生微弱的输出, 也可以认为有一定的盲区, 但它要比单探头小的多。

2. 声速校正

从式 (3-8) 可见, 要想通过测量超声波传播时间确定液位, 声波传播速度 C 必须恒定, 实际上声波传播速度在不同介质中都不一样, 如在 0°C 时, 空气中声波传播速度约为 331m/s , 在水蒸汽中为 404m/s , 而在氢气中将为 1269m/s 。即使在同一介质中, 温度不同

声速也不同,例如,0℃空气中的声速为331m/s,而当温度为100℃时速度增加到387m/s。因此为了能准确测量液位,必须对温度修正。此时,一般不能采用简单的温度补偿,因为对于测量液位来讲,温度是一个范围很大的分布参数,不能用某点的温度对实际的随机温度场进行校正。下面介绍两种经常采用的校正方法。

(1) 用校正具校正声速。校正具是在传声介质中,相隔一个固定距离 L_0 处安装一个探头—反射板系统,用以测出实际声速(如图3-25所示)。液介式超声波液位计校正具应安装在液体介质最低处,以防止液位变化时露出液面。对于气介式液位计,校正具应放在容器顶端的容积中。

校正具上安装有一个超声探头,同时作发射和接收之用,距探头 L_0 处安装一反射板(与发射器方向垂直),如果超声脉冲从发射经反射再回到超声探头所用时间为 t_0 ,走过的距离则为 $2L_0$,就可以得到

$$C_0 = \frac{2L_0}{t_0} \quad (3-11)$$

式中 C_0 ——介质中的实际声速。

如果认为测量段声速 C 等于校正段上的声速 C_0 ,即 $C = C_0$,则式(3-8)就可以变为以下形式:

$$L = L_0 \cdot \frac{t}{t_0} \quad (3-12)$$

也就是说,要测知液位高度,只要测出两个时间 t 和 t_0 即可,而不必测声速。

实际上,上述校正的前提是 $C = C_0$,即测量段声速与校正段声速相同。在很多情况下,这个假设条件得不到保证,因为校正具放在容器最低处,由于容器中上下温度场不均匀及有时介质密度上下层不均匀等,容器中其他位置与底面声音传播速度有差别。对于气介式,除由于温度不一致外,气体成分的变化也会使 $C \neq C_0$ 。因此上述安装在固定点的校正具有时还是不能很好地对声速进行校正。

为了更好地解决由于密度、成分、温度分布不均匀产生的一些误差问题,液介式目前

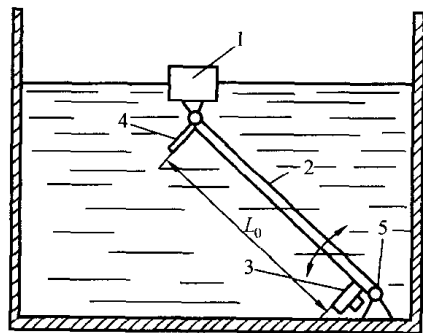


图 3-26 浮臂式校正具

1—浮子; 2—浮臂; 3—超声探头;
4—反射板; 5—转轴

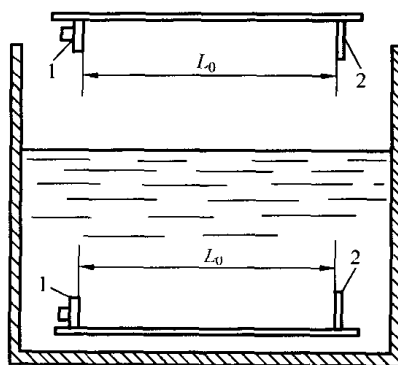


图 3-25 声速校正具

1—超声探头; 2—反射板

常采用浮臂校正具。浮臂式校正具的原理示意图如图3-26。校正具一端固定在液面最低处的可转动轴上;另一端与浮在液面上的浮子相连。在液位高度变化时,在浮子的带动下,校正具将围绕下边的固定轴转动。应用上述装置,就使得校正段随液位的变化也在变化,使校正段基本包括了液位不同高度上的温度梯度及密度梯度,通过这种方法求出的速度 C_0 就非常接近于测量段的实际声速 C ,可以得到较高的校正精度。应当指出,这种校正虽然具有校正精度高的优点,但缺点是安装不方便,另外要求容器直径(或长度)要大于

液位可能的高度。

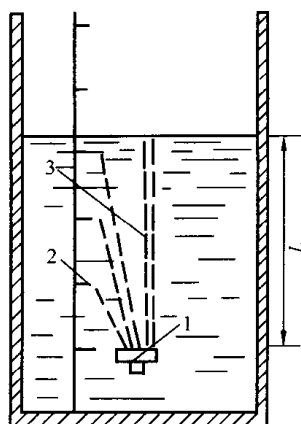


图 3-27 固定标记校正原理

1—超声探头；2—小反射板；
3—固定臂

(2) 用固定标记校正声速。这种校正方法是在声波传播介质中靠近探头侧面的上方，每隔一定距离放一个小反射板，如图 3-27 所示。这样布置反射板以后，在探头接收到的回波信号中就会包含有从小反射板反射回来的回波，如图 3-28 所示。如果每隔 1m 安一个反射板，则每个回波就代表 1m 的距离。例如液位高度为 3750mm，则在输出波形中将有三个完整的标记回波即表示 3m 距离，最后一个回波是液面波，它不足 1m (750mm)，显然整数部分 (3m) 是用固定距离标定的，只有长度标定误差 (实际上可以很小)，余下的不足 1m 仍应按测时法换算求出。假如这不到 1m 的距离不加修正可以满足测量精度要求，就可以不再采取其他措施。在有些情形下，精度要求较高时，这一米距离测量产生的误差已不允许，则可考虑对余数部分再采用校正臂方法校正，这样可以得到比较满意的精度。

从声速校正角度来看，采用液介式液位计似乎更好一些。因为气介式做到准确地校正声速是很困难的，影响气体中声速的因素很多，如气体成分的影响。在液位上部的水蒸气一般较多，对于其他液体也同样存在挥发的蒸气，其含量随压力、温度变化，而且愈接近液面变化愈显著，校正具离开液面较远时，校正误差会很大。温度对声速也有影响，在靠近液面处与远离液面上方气体的温度可以相差很大，这样将形成明显的声速梯度。总之，成分、温度、压力对声速都有影响，而且这些因素又往往相互影响，这样给校正增加难度。

液体主要是受温度影响，一般温度梯度在液体中比在气体中小些，在通常情况下，即使不加校正，精度也可达百分之一左右，如果采用前面介绍过的一些校正方法，精度可优于千分之一。

综上所述，在液体挥发性不强、气体温度较均匀、压力变化不大时，可以采用气介式，其他情况多采用液介式。

除气介式和液介式液位计以外，还有固介式。固介式用固体传声，把传声棒插入液体中，探头装在传声棒上端，当声波经传声棒传到液体表面时，就有反射波沿传声棒传回。从声速校正角度看，固介式最佳，因为气体、液体成分的变化几乎对声速没有影响，温度变化对固体之中声速影响也较小，固体（如金属）导热性好，不易形成较大的温度梯度，总之，这一切都极有利于声速校正。但由于固体中声波传播较为复杂、同时存在几种不同速度的声波，干扰很大，信噪比很难提高，因此精度也很难提高，所以一般很少用固介式方案。

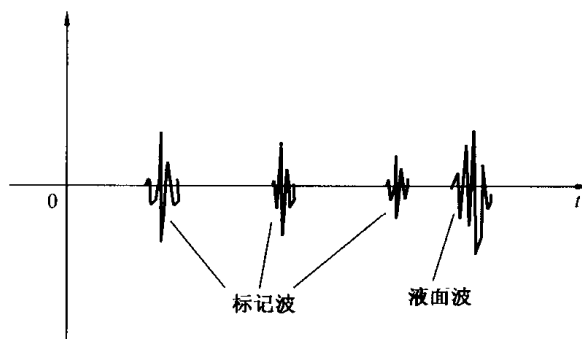


图 3-28 固定标记及液面的回波

3. 回波时间测量

从前边分析知,如果采用声速校正,液位测量就变成了对时间间隔的测量。液位计中回波时间的测量一般可采用两种方案。

(1) 双稳法测时。这种测时方法利用一个双稳电路来计时,即触发发射电路的脉冲同时触发这个双稳电路,当反射的回波前沿到达这个接收器时,再用这个接收波前沿脉冲触发双稳,使之翻回。显然这个双稳脉冲输出的方波宽度就是要测的回波时间。

如果采用数字显示,就可以利用一个门电路,使得只在双稳输出方波这段时间内对脉冲信号发生器送来的脉冲计数,用脉冲数表示方波延续的时间,最后再用数字显示装置显示出脉冲数。采用前边介绍的校正具校正温度误差,把校正信号输入计时双稳,此时方波宽度将为 t_0 ,如图 3-29 (a) 所示,相应的校正段长度为 L_0 。调整脉冲发生器的频率,使两个脉冲间的时间间隔相当于声速走过 1mm 来回一次的时间(即走 2mm 的时间),如校正具长度为 $L_0 = 1\text{m}$ (即来回声程为 2m),则要求在 t_0 时间内共有 1000 个脉冲。应用校正具校准的脉冲就相当于一个“尺子”,即每个脉冲相当于测量具体条件下液位高度为 1mm。如图 3-29 (b) 所示,在计时双稳输出方波的时间间隔内对校正后的脉冲信号发生器的输出进行计数,假定在方波宽度为 t 的范围内计时,脉冲数为 2800 个,则可直接得到相对应的距离即为 2800mm。这个输出数就是被测液位的高度值。

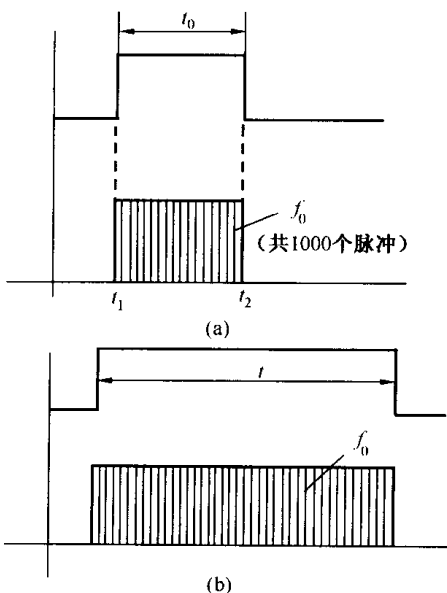


图 3-29 双稳法测时原理图

(2) 测时法。这种方法是触发探头发射超声脉冲后经过被测液面反射,当回波回到探头上时,这个回波的前沿又接着触发探头发第二个超声脉冲,第一个脉冲的前沿和第二个脉冲的前沿中间经过的时间 t ,如果液位高度不变,就是一个等间距的发射信号。如若进行校正,也和上述过程一样,只是这里距离 L_0 为已知(假定 1m),时间间隔为 t_0 。如果 $L_0 = 1\text{m}$,液位单位选用毫米,则应用 1000 倍频,得到一系列脉冲,每个脉冲相当于 1mm。在测量段时间 t 中,可以通过的脉冲数就是以毫米为单位的液位数值。

通过上述方法可以得到经过校正以后的液位输出。

利用上述双稳法测时原理设计的采用手动校正的液介式单探头液位计,其原理方框图如图 3-30 所示。时钟控制定时发出超声脉冲,发生脉冲的时间间隔应大于自然发射到最高液位经反射再返回到探头所需要的时间(波形 1),与此同时可控硅振荡器不断发出窄脉冲波,其周期事先已校正好,使脉冲时间间隔正好等于超声波在介质中往返 1mm 间距的时间。

从超声波发射时起,通过控制回路打开与门(波形 2),使可控硅振荡器的窄脉冲波输入计数器,开始计数(波形 3)。当超声波至液面被反射回,又被接收后,立即发出信

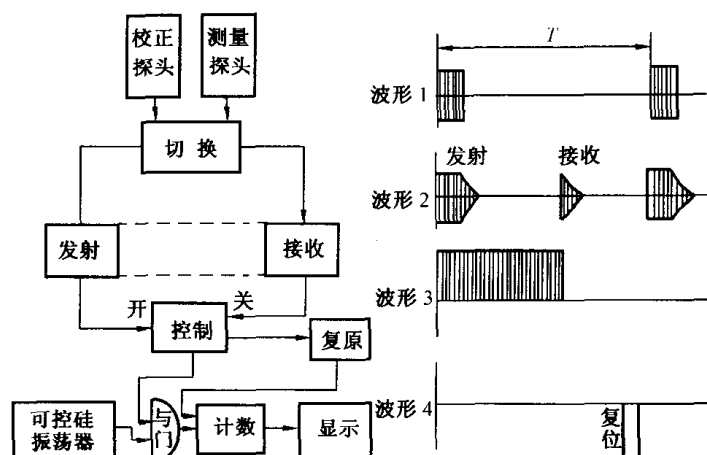


图 3-30 双稳测时单探头液位计原理框图

号（见波形 2 的接收波）通过控制回路关闭与门，切断计数器的输入，计数停止，这时计数器所得结果通过显示部分显示出来。由于每一窄脉冲波恰好等于 1mm 的距离，所以计数器所累计的数值正好为所测液位高度。

测完一次脉冲，控制回路发出信号（波形 4）使计数器复原，等待下一次测量。

窄脉冲波频率的调整是用定长度校正具进行的，此时用手动方法将超声波脉冲的发射与接收切换到校正具上，调整可控硅振荡器的窄脉冲频率，使计数器显示部分正好等于校正具的定长，即此窄脉冲波的周期正好等于超声波在被测介质中往返 1mm 间距的时间。校正完毕，可以把开关切换到测量位置。

上面介绍的是最简单的原理方块图，实际上为了保证足够的测量精度，线路还要更复杂些。

4. 超声波液位计的应用实例

超声波液位计除用于测量各种容器或管道内液体的液位高低外，也可用于水渠、水库、江河和湖海水位的测量，尤其适用于污水、有腐蚀性的场合，如城市排水泵站拦污栅前后水位的测量。

德国产 FUM 系列超声波液位计设计精巧，安装使用方便，精度高，抗干扰性能好，可以单独使用，也可以和计算机连接使用。其工作原理如前所述。常用的型号有：860 型（测量密封容器液位）、861 型（测量液位和流量）和 862 型 [采用双探头，可同时测量两处不同液位的高度（即可以测量出液位差）]。

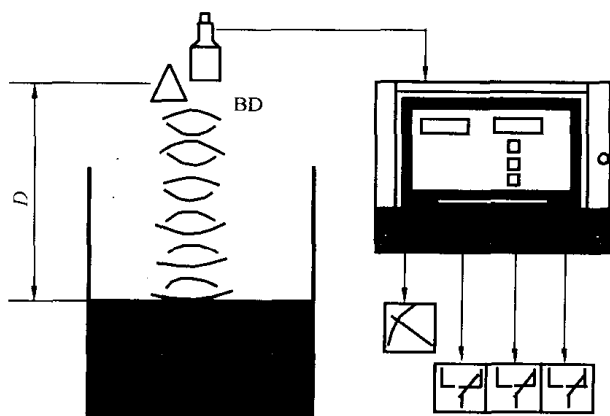


图 3-31 FUM 系列超声波液位计

(1) 液位计组成。FUM 系列超声波液位计由仪表和探头两部分组成，如图 3-31 所示。

①液位计仪表。仪表面板上有数字

显示和参数设置触摸按键, 仪表下部有多组接线端子, 分别连接 220V AC 电源、0/4 ~ 20mA 输出接口、RS-485 接口、继电器接口和传感器探头接口等。如果带有 RS-485 接口, 则可以直接连接到 RS-485 网络中, 否则必须通过 0/4 ~ 20mA 输出接口与采样模板连接, 再转接到 RS-485 网络中。继电器接口有 3 ~ 5 个, 可分别连接泵机开关或用于蜂鸣器等报警控制。

②液位计探头。液位计探头分为 FDU80、FDU81、FDU82、FDU83、FDU84 和 FDU85 五种型号, 可用于测量液体的深度, 也可以用于测量固体的高度, 其量程分别为 5m、9m、20m 和 25m 几种。探头带有自动清除其表面覆盖的霜和冰的功能。

(2) 液位计的安装。仪表部分应垂直安装在墙上适当的高度, 以方便观察和进行操作。探头安装时应加保护罩, 垂直安装在支架上。探头距液面的距离要根据液位变化的最大范围和探头的量程决定。若测量的是污水等浮有其他杂质的液体, 则应在探头的下方放置铁丝网围井, 将杂质隔离在探头正确测量范围之外。由于监测点距安放液位计的地方较远, 还需加接延长电缆。对于不好敷设电缆的情况, 可以采用无线采样模块与液位计探头相连, 在控制室同样用无线采样模块进行接收, 灵活方便, 最大距离 150m 左右。

(3) 液位计的设置。详细阅读使用手册后, 用液位计仪表面板上的触摸式按键进行参数设定: 设置正常的液位范围、最高液位、最低液位, 设置单位, 设置操作模式, 设置继电器连接的外部报警限位开关等设备。完成后, 还要进行调试和根据当时实际液位进行调整, 保证测量的准确。

二、超声波料位计

超声波料位计的工作原理是: 从粉仓顶部的已知高度 L 处向料面发射一个超声脉冲波, 该波在空气中传播 (速度是 $C = 340\text{m/s}$), 遇到料面时反射回来。若能测得声波往返时间 t , 则由式 (3-13) 就能求得料位高度 h 值。

$$h = L - \frac{1}{2} Ct \quad (3-13)$$

图 3-32 所示为脉冲回波法超声波料位计示意图。图中的 A 和 B 为压电换能器, 既发射超声波, 又接收超声脉冲回波信号。这种测量方法称为气介式超声脉冲回波法。

式 (3-13) 中 L 是已知的, 设在空气中的传播速度 C 是常数, 那么只要测得时间 t 就可以得到料位的高度 h 了。

把式 (3-13) 变换一下, 则有

$$L - h = \frac{1}{2} Ct \quad (3-14)$$

设 $t = 1\text{s}$, 则

$$L - h = \frac{1}{2} \times 340 \times 1 = 170(\text{m}) = 17000(\text{cm}) \quad (3-15)$$

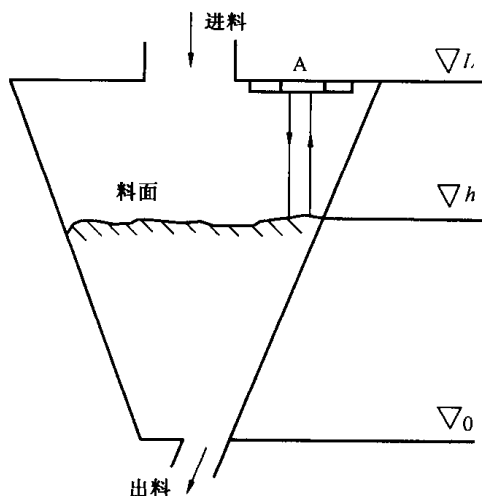


图 3-32 脉冲回波法超声波料位计示意图

一个 17kHz 的振荡器, 如图 3-33 所示, 如果门开启 1s, 则计数器显示 17000, 每个脉冲代表 1cm。假如开门信号是在发射超声脉冲波的同时提供, 关门信号由接收到的回波信号提供, 那么这时计数器所显示的数值为 $\frac{1}{2} Ct$ 。再由式 (3-13) 可求得 h 值。

如果采用减法计数器, 先预置数 L 值, 最终显示的数值就是料位 h 值。

考虑到料面倾斜与仓内飞灰较浓的情况, 采用发射频率较低的弯曲振动式压电陶瓷, 如图 3-34 所示。压电陶瓷采用两片铌镁酸铅陶瓷压电晶片, 按极化方向并联粘合, 一伸一缩引起弯曲振动。晶片上粘有半球面不锈钢膜片, 用以提高辐射功率, 改善辐射阻抗匹配, 同时起到防止粉尘污染腐蚀、保护晶片的作用。接收换能器采用多探头串联, 提高声波接收能力, 同时提高接收灵敏度。

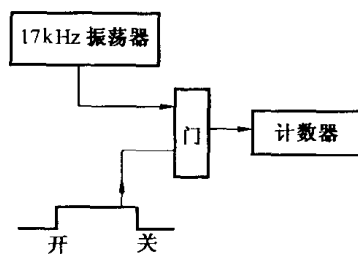


图 3-33 测试原理

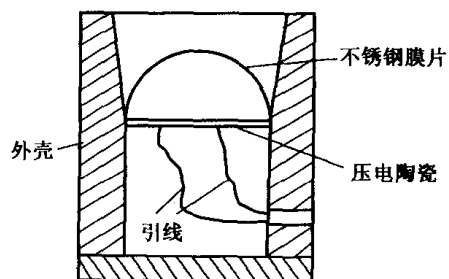


图 3-34 压电换能器

声压在介质中的传播是按指数规律衰减的, 由式 (3-16) 表示:

$$P = P_0 e^{-2ah'} \quad (3-16)$$

式中 P_0 ——发射膜片处声压;

P ——接收膜片处声压;

h' ——发射距离;

a ——衰减系数。

由上式看出, 发射距离 h' 越大, 则接收声压 P 越小。为了保证测量的稳定性, 应把强弱不同的回波信号放大到具有一定幅度的输出。为此第一级放大器的电压增益应随时间的推移而呈指数关系上升, 即电压增益有下式关系:

$$K = K_0 e^{2ah'} \quad (3-17)$$

式中 K ——任意时刻的电压增益;

K_0 —— $t=0$ 时电压增益。

随着 h' 增加, 放大器的电压增益呈指数关系上升, 从而补偿声压随距离增加而呈指数衰减的特性。这种补偿方法称为放大器的自动增益控制。

超声波料位计的整机方框图如图 3-35 所示。主振荡器每隔 2s 发出一个触发脉冲, 它送往四个单元, 其一是复位单元, 使计数器复零。其二是发射单元, 使发射换能器发出一个超声波脉冲。其三是延时单稳, 脉冲信号经延时单稳延时一定时间后 (延时的时间可调), 去触发双稳使计数门打开, 17kHz 振荡器的振荡脉冲通过计数门送给计数器计数; 另一方面去触发报警单稳 I, 使报警系统处于准备高位报警状态。其四是触发自动增益控

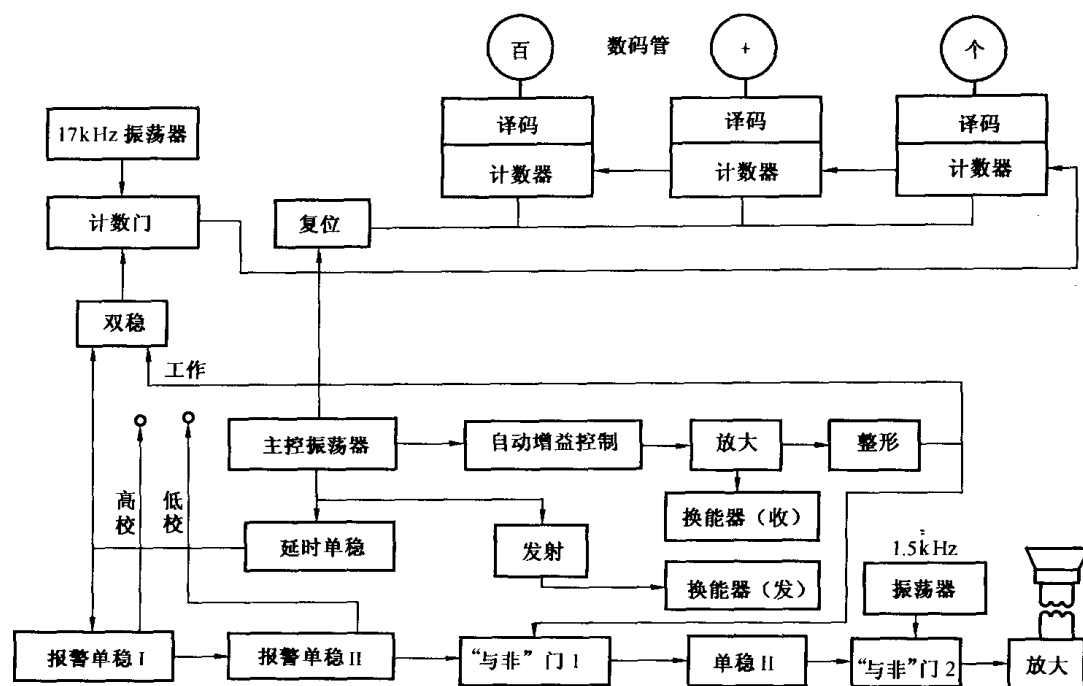


图 3-35 超声波料位计整机方框图

制，使放大器的电压增益随时间的增加而增加。从料面反射回来的超声脉冲波由接收换能器接收，经放大和整形去触发双稳，使其翻转而关闭计数门，这时计数器所显示的值是 $\frac{1}{2} C_t$ 值。

计数门的开门信号要经过延时单稳延迟一段时间，因为在发射超声脉冲时，其发射脉冲的前沿很陡，但收到的超声回波脉冲信号 P 的前沿有一段上升时间，信号上升到 B 点后放大器才有足够的输出信号使双稳翻转而关闭计数门，这样接收信号使双稳翻转关门有一段时间延迟 (Δt)，为了抵消它，所以使开门信号也延迟相应一段时间。超声回波信号 P 如图 3-36 所示，报警单元由图 3-35 中最下一排环节组成，其中各单元的波形如图 3-37 所示。高位报警距离由报警单稳 I 的脉冲宽度来控制。

低位报警距离由报警单稳 I 和报警单稳 II 的输出脉冲宽度之和来控制。其工作过程是：延时单稳触发报警单稳 I 翻转，若在报警单稳 I 还没翻回来前回波信号就来了，那么这时整形环节的输出信号除了去触发双稳关门外，另一路经“与非”门 I 去触发单稳 II，使“与非”门 II 开启，1.5kHz 信号经“与非”门 II、放大器放大后使喇叭发出声响报警信号，报警时间由单稳 II 的脉冲宽度来决定。

如果在报警单稳 I 翻回来前超声脉冲回波信号还没来，那么报警单稳 I 翻回的同时去

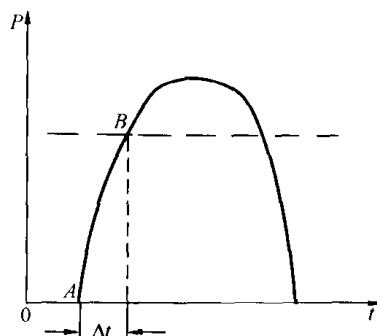


图 3-36 脉冲回波信号

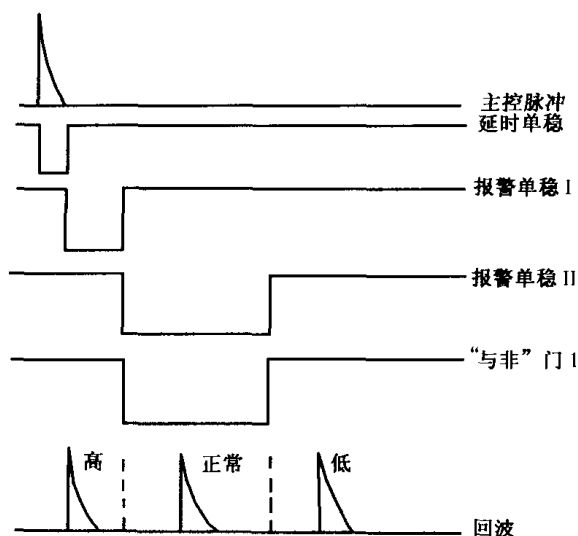


图 3-37 报警单元各环节波形图

触发报警单稳 II 使其翻转, 去把“与非”门 1 关闭, 这时脉冲回波信号只能去关门而不能进入报警系统, 这说明料位在正常状态。低位报警是脉冲回波信号在报警单稳 II 翻回后才来, 这时“与非”门 1 由于报警单稳 II 的翻回而开启。回波信号能通过它去触发音响单元而报警。报警距离可在仪表上直接设置。把切换开关切到“高校”位置, 可通过调整报警单稳 I 的翻转时间 (调电阻或电容), 一直调到数码管显示所需要设置的高位报警值。把切换开关拨到“低校”位置, 通过调整报警单稳 II 的翻转时间来设置低位报警值。高低位报

警值设置好以后, 把切换开关拨到正常工作位置, 仪器就投入正常工作了。数码管显示的数码值每个周期 (2s) 变换一次。本装置的测量范围为 0~10m。

非接触式超声波仪表在固体料位测量中具有许多优点, 它容易安装维护、成本效率高, 并且能通过模拟或数字接口提供快速便捷的料位测量。它无机械可动部分, 探头的压电晶片的振幅很小, 寿命较长, 并且超声波的传播不受光线、湿度和粘度的影响。

随着科学技术的不断进步, 超声波换能器自身也有了很大改进。首先, 在超声波换能器中加入了温度补偿, 内设温度补偿提高了系统的准确度, 并且降低了安装费用。其次, 换能器的材料也有很大改变。如今换能器的材料有多种, 如聚四氟乙烯、氟塑料 40、聚偏二氟乙烯、氯化聚氯乙烯和不锈钢等。这样可通过选择换能器来保证换能器材料与待测料没有化学反应。再次, 改进的设计已使换能器的最高温度范围扩展到约 300°F, 正好满足工作场合的要求。超声波换能器在许多存在较大温度波动的场合也能保证可靠的工作。另外在防止积尘方面也有一些行之有效的措施。如在灰尘严重的场合可选用大输出功率的换能器, 在更严重的场合可使用远程换能器。采用具有良好释放特性的材料和设计带有表面脉动位移的大功率换能器会使表面无积尘。

由于数字信号处理能力的发展和其他技术的进步, 如今的超声波装置能分析单个数据点, 从而为大多数料位, 甚至为动态条件下的料位测量提供可靠的结果。

第六节 超声波流量计

在使用接触式流量计 (如差压式、涡轮式流量计等) 测量时, 流量计传感部分需放入被测流体之中, 会对流体的流动产生一定的阻力, 而且在粘性比较大的流体中使用, 精度会显著降低。而超声波流量计采用非接触测量的方法, 不会产生附加阻力, 也很少受流体粘性的影响, 还可以在特殊条件下 (如高温、高压、防爆、强腐蚀等) 进行测量。另外, 超声波流量计受介质物理性质的限制比较少, 适应性较强, 例如电磁流量计对不导电

流体就难以应用，而超声流量计则不受影响。

超声波流量计根据其测量介质的不同可分为气体流量计和液体流量计。气体流量计在国内还处于探索试用阶段。超声波流量计的测量原理是多样的，如传播速度变化法、波速偏移法、多普勒效应法、流动听声法等。目前应用较广的是超声波传输时间差法。

一、传播速度变化法

超声波在流动介质中传播时，其传输速度与在静止介质中的传播速度不同，其变化量与介质流速有关。测得这一变化量就能求得介质的流速，进而求出流量。

超声波在顺流和逆流中的传播情况，如图 3-38 所示，图中 F 为发射换能器，J 为接收换能器， u 为介质流速， C 为介质静止时声速。顺流中超声波的传播速度为 $C + u$ ，逆流中超声波的传播速度为 $C - u$ ，顺流和逆流之间速度差与介质流速 u 有关，测得这一差别可求得流速，进而通过计算得到流量值。测量速度差的方法很多，常用的有时间差法、相位差法和频率差法。

图 3-39 所示为超声波在管壁间的传播轨迹。介质静止时超声轨迹为实线，它与轴线之间的夹角为 θ 。当介质平均流速为 u 时，传播的轨迹为虚线所示，它与轴线间夹角为 θ' 。速度 C_u 为两个分速度（ u 和 C ）的矢量和，为了使问题简化，认为 $\theta = \theta'$ （因为在一般情况下 $C \gg u$ ），这时可得 $C_u = C + u \cos \theta$ 。

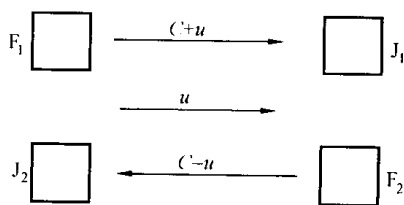


图 3-38 声波在顺流、逆流中的传播情况

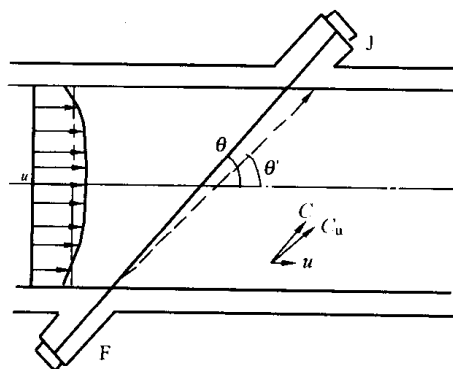


图 3-39 超声波在管壁间的传播

1. 时间差法

时间差法是通过测量逆流和顺流中超声波传播的时间差来测量流速的一种方法。安装在管道两侧的换能器交替地发射和接收超声脉冲波，设顺流传播时间为 t_1 ，逆流传播时间为 t_2 ，有下列关系式

$$t_1 = \frac{D/\sin\theta}{C + u \cdot \cos\theta} + \tau \quad (3-18)$$

$$t_2 = \frac{D/\sin\theta}{C - u \cdot \cos\theta} + \tau \quad (3-19)$$

式中 D ——管道直径；

τ ——超声波在管壁内传播所用的时间。

两者差值

$$\Delta t = \frac{2D \cdot \cot \theta}{C^2 - u^2} \cdot u \approx \frac{2D \cdot \cot \theta}{C^2} \cdot u \quad (3-20)$$

即

$$u = \frac{C^2 \cdot \tan \theta}{2D} \cdot \Delta t \quad (3-21)$$

对于已安装好的换能器和已定的被测介质, 式中 D 、 θ 和 C 都是已知常数, 体积流量等于介质流速乘以管道面积, 故和时间差成正比。

图 3-40 所示为时间差法超声流量计的结构。主振荡器以一定频率控制切换器, 使两个换能器以一定频率交替发射和接收脉冲波, 接收到的超声脉冲信号由接收放大器放大, 发射和接收的时间间隔由输出门获得。由输出门控制的锯齿波电压发生器所输出的是有良好线性的锯齿波电压, 其电压峰值与输出门所输出的方波宽度成正比。由于逆流和顺流传播的超声波所获得的方波宽度不同, 响应产生锯齿波电压的峰值电压也不相等。其工作波形如图 3-41 所示, 图中 u_1 、 u_2 分别为顺流和逆流时产生的峰值电压。利用主控振荡器控制的峰值检波器分别将逆流和顺流的锯齿波电压峰值检出后送到差分放大器进行比较放大。这个信号将与时间差 Δt 成正比, 对其进行一定的运算处理, 可以得到流量信号。

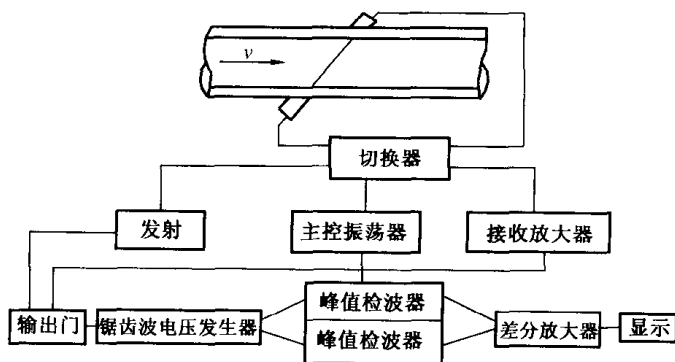


图 3-40 时间差法超声波流量计原理

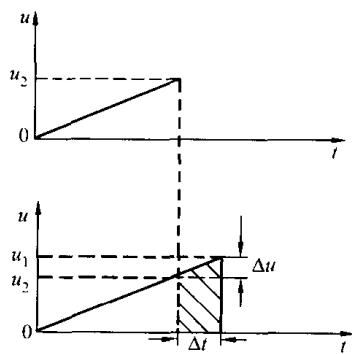


图 3-41 时间差法测时波形图

2. 相位差法

连续超声波振荡的相位可以写成： $\varphi = \omega t$ ，这里角频率 $\omega = 2\pi f$ ， f 为超声波的振荡频率。如果换能器发射连续超声波或者发射周期较长的脉冲波列，则在顺流和逆流发射时接收到的信号之间就产生了相位差 $\Delta\varphi$ ， $\Delta\varphi = \omega\Delta t$ ， Δt 是时间差。因此可根据时间差法的流速公式得到

$$u = \frac{C^2 \cdot \tan \theta}{2 \cdot \omega \cdot D} \Delta \varphi \quad (3-22)$$

所以

$$q_v = \frac{C^2 \tan \theta \Delta \varphi}{2 \omega D} \cdot A = A \cdot u \quad (3-23)$$

式中 q_v ——体积流量；

A ——管道的截面积。

图 3-42 所示为相位差法超声波流量计的方框图。换能器采用双通道形式，振荡器发

出连续正弦波电压激励发射换能器, 经过一段时间后此超声波被接收换能器接收。调相器用来调整相位检波器的起始工作点及零点。放大器把接收换能器输出的信号放大后送到相位检波器。相位检波器输出的直流电压信号与相位差 $\Delta\varphi$ 成正比, 即与介质流量成正比。相位法测量的精度比时间差法高。

3. 频率差法

频率差法超声波流量计的工作原理是超声换能器向被测介质发射超声脉冲波, 经过一段时间此脉冲波被接收并放大, 放大的信号再去触发发射电路, 使发射换能器再次向介质发射超声脉冲波, 系统形成振荡。设顺流时振荡的频率为 f_1 , 逆流时振荡的频率为 f_2 , 则

$$f_1 = \left[\frac{D}{(C + u \cdot \cos\theta) \cdot \sin\theta} + \tau \right]^{-1} \quad (3-24)$$

$$f_2 = \left[\frac{D}{(C - u \cdot \cos\theta) \cdot \sin\theta} + \tau \right]^{-1} \quad (3-25)$$

$$\Delta f = f_1 - f_2 \approx \frac{\sin 2\theta}{D \left(1 + \frac{\tau \cdot C \cdot \sin\theta}{D} \right)^2} \cdot u \quad (3-26)$$

$$u = \frac{D \left[1 + \frac{\tau \cdot C \cdot \sin\theta}{D} \right]}{\sin 2\theta} \cdot \Delta f \quad (3-27)$$

图 3-43 所示为频率差超声波流量计示意图。定时器控制切换器, 使两个超声换能器交替发射超声脉冲波, 由收发两用电路来发射和接收信号。顺流和逆流的重复频率分别选

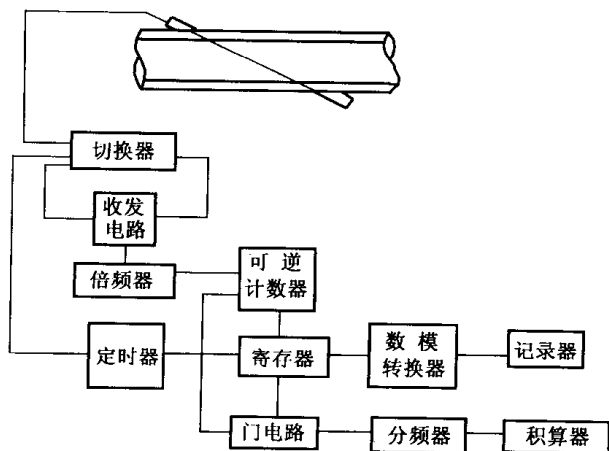


图 3-43 频率差法超声波流量计方框图

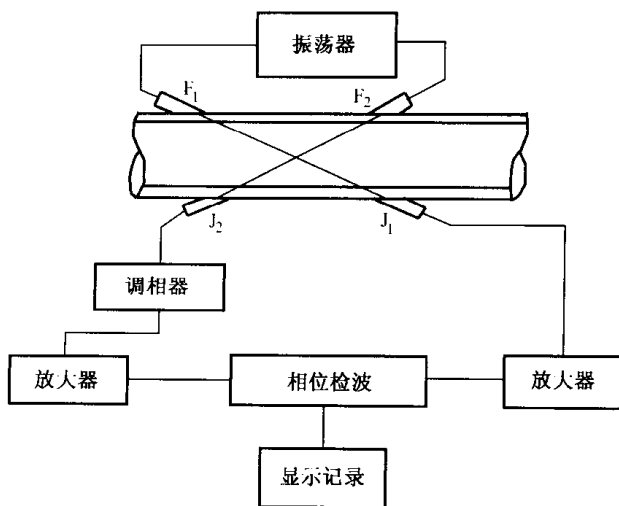


图 3-42 相位差法超声波流量计方框图

出后进行 M 倍频, 倍频器输出 Mf_1 及 Mf_2 的频率信号到可逆计数器进行频率差的运算, 得到 $M\Delta f$ 的值。经过运算处理, 可以算出流量值。

4. 超声波流量计的应用实例

利用超声波流量计可以测量煤气流量。图 3-44 为大管径超声波煤气流量计的工作原理示意图。在煤气管道中斜装一对超声波探头, 两个超声波探头之间的距离为超声波的传播声程。煤气管道与超声波探头的连接是由截止阀来实现

的。截止阀的作用为：在安装超声波探头时，可将截止阀关闭，防止管道内煤气泄漏；当

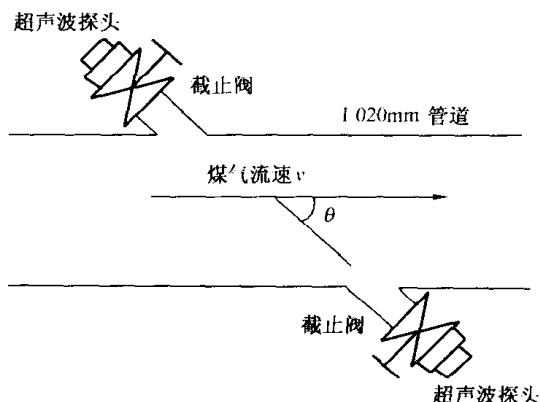


图 3-44 超声波煤气流量计的工作原理示意图

超声波探头安装完毕，打开截止阀，两个超声波探头之间的声道就畅通了。超声波煤气流量计工作原理基于时间差法。只要分别在顺流方向和逆流方向上测量出超声波在管道内部的传播速度，就可以通过计算得出煤气的流速。煤气的流量则可以根据对煤气的流速和煤气管道的截面积进行计算，并通过温度和压力进行校正后得到。

超声波煤气流量计的组成方框图如图 3-45 所示。它主要由微处理器、超高速计时器、窄脉冲发生器、延时器、闸门触发器、超声波发生器、接收放大器、电平转换器、整形器、LCD 液晶显示器、RS-232 数据发送器、4~20mA 信号输出器和非介入式收发两用型超声波探头等组成。

微处理器通过一个用于数据收发的双向接口，输出周期为 100ms、宽度为 $0.2\mu\text{s}$ 的初始化信号。初始化信号分别被送往窄脉冲发生器、延时器和超高速计时器。(1) 初始化信号被送往窄脉冲发生器，该信号的脉冲上升沿使窄脉冲发生器产生一个宽度为 $0.2\mu\text{s}$ 的发射触发信号，经过超声波发生器后，向安装在煤气管道上的超声波探头发出一个超声激励脉冲。(2) 初始化信号同时被送往延时器，该信号的脉冲上升沿使延时器产生一个 $100\mu\text{s}$ 的延时脉冲，这个延时脉冲被送往闸门触发器，在延时脉冲出现的瞬间，闸门触发器的一端跳变为高电平。

(3) 初始化信号被送往超高速计时器，

该信号的脉冲上升沿使超高速计时器清零，并同时开始计时。与此同时，超声波在煤气管道中传播，超声波探头发射的超声波信号经过传播，被安装在煤气管道另一侧的超声波探头接收，转变为电信号。接收放大器将超声波接收信号放大，送往电平转换器，再经过整形器的倒向整形，送往闸门触发器。闸门触发器的状态，在超声波接收信号到达的瞬间，立即由高电平突变为低电平，闸门触发器输出的高电平脉冲的宽度就分别代表了超声波在煤气管道中顺流的传播时间和逆流的传播时间。顺流和逆流的测量换向时间为 100ms。超高速计时器在这一闸门脉冲的作用下进行精密计时，并将计时结果通过双向接口送往微处

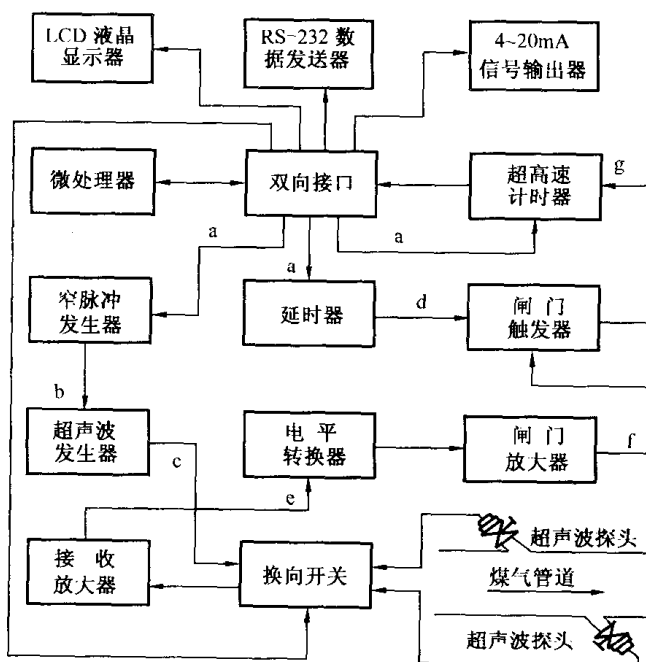


图 3-45 超声波煤气流量计的组成

理器。微处理器将超声波在煤气管道中顺流的传播时间 t_1 和逆流的传播时间 t_2 转化为管道内煤气的流量。

微处理器同时提供 RS-232 的数字输出信号和 4 ~ 20mA 的电流输出信号, 用于生产过程的自动控制。超声波煤气流量计采用液晶显示器, 可分别显示实时测量到的管道内煤气的瞬时流速、温度和压力、瞬时流量、累计流量。采用高容量的 GP 镍氢电池对微处理器进行掉电自动保护, 掉电后的数据包括参数设定值和流量累计值可自动保存 30 天以上。

超声波煤气流量计具有其他流量计无法比拟的优点: 它无插入部件和活动部件, 因而不改变气体的流态, 对煤气流速无阻力, 无压力损耗, 适用范围广, 流速测量范围大, 操作简单, 安装方便, 维护量小。

5. 流量计的正确使用

(1) 测点的选择。

- 1) 测量介质必须是干净流体和单一介质, 液体必须充满管段。
- 2) 对测点的选择, 必须要有足够的完全水平的管段或者流体上流的垂直管段。
- 3) 必须远离弯管段、三通、节流阀或泵、调节阀等部位, 即远离有动力、阻力的地方。
- 4) 探头安装位置必须在管侧面的正侧线上。
- 5) 注意保证管表温度不能超过发射器的额定工作温度。选择内部没有腐蚀或锈斑的管段。

(2) 发射器安装方法的正确选择。发射器有 V 法、W 法和 Z 法安装三种安装方法, 如图 3-46 所示。

1) V 法安装。V 法安装是一种标准的安装方法, 和 Z 法相比, 读数更精确。因为被测信号所要走的距离更长, 在管径适中、介质纯净、无颗粒时大多数情况下采用此法。发射器和接收器为同侧安装。

2) W 法安装。对大于 51mm 的小口径金属管道, 流量计可通过 W 法安装提高测量的可靠性。采用 W 法安装, 声波在管中要四次穿过流体, 三次经过管内壁反射。同 V 法安装一样, 发射器和接收器为同侧安装。

3) Z 法安装。选用 Z 法安装时, 信号在传播中的衰减要比选用 V 法时小, 因为信号为直接传输, 无反射过程, 仅一次穿过流体。当流体中气体或固粒含量较多、锈层过厚、粘着表面状况较差时, 信号衰减过大, 不宜采用 V 法, 此时可采用 Z 式安装法。

选择合适的发射器安装方法至关重要, 否则导致信号减弱或无法接收。管径大小适中时通常采用 V 法; 在管径很小发射器间距很短时

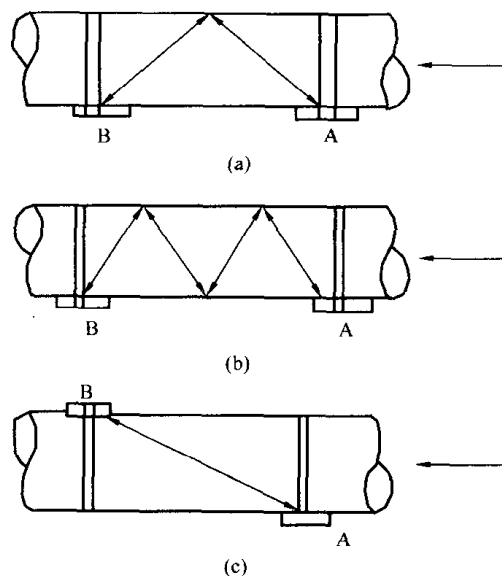


图 3-46 三种安装方式示意图

(a) V 法安装; (b) W 法安装; (c) Z 法安装

要用 W 法安装；当介质的单一性较差时，要用 Z 法安装。

二、多普勒效应法

多普勒流量计是利用声学多普勒效应进行流体测量的。流量计向被测流体发射固定频率的超声波，该超声波被流体中的悬浮粒子或气泡反射并接收，接收波的频率与被测流体的流速有关，通过测量发射波和接收波的频率差，可以计算出被测流体的流速和流量。多普勒流量计为反射式流量计，只有当超声波能被流体中的颗粒或气泡反射回来时，才能进行测量。

图 3-47 是多普勒流量计原理图。发射探头 T 以频率 f_i 发射超声波，遇到流体中的微粒

反射后，由接收探头 R 接收。这时产生多普勒频移，有下面关系：

$$f_r = \frac{c + v \cos \theta}{c - v \cos \theta} \cdot f_i \quad (3-28)$$

式中 f_i ——发射频率；

f_r ——接收频率；

v ——流速；

θ ——探头发射轴和流速方向的夹角；

c ——水中声速。

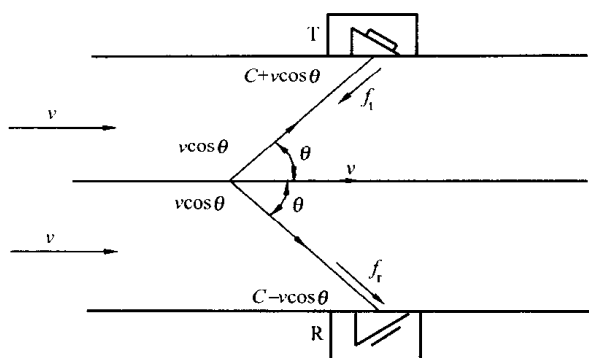


图 3-47 多普勒流量计原理

由此可得流速 v 和频差 f_d 的关系式为

$$f_d = \frac{2v \cdot \sin \phi_1}{c_1} \cdot f_i \quad (3-29)$$

式中 c_1 ——声楔材料（固体）的声速；

ϕ_1 ——声波的入射角。

和传播速度变化法相反，多普勒效应法不能用于不含固体微粒或气泡的流体流量的测量。多普勒流量计根据其用途和结构的不同，分为如下几种不同类型：

(1) 多普勒式管道流量计。这种流量计使用外夹式换能器，和时差式流量计不同，其发射和接收换能器可以组合在一起，结构更加简单。这种流量计一般用在对测量精确度要求不高、不能应用时差式流量计的场合，如用在石油化工、轻工食品、环保等行业测量含有较多杂质或气泡的流体。

(2) 多普勒式管渠流量计。这种流量计由流速换能器、水位换能器和流量计主机构成，在国外广泛应用于环保系统中，是污水计量的关键设备。城市污水中不仅含有大量杂质异物，而且污水管道往往又是非满管运行，无法使用常规的流量计。多普勒式管渠流量计是专门用于污水管道的流量计。考虑到污水管道的特点，多普勒式管渠流量计的流速和水位换能器为潜水式，固定在水下管壁上。有的流量计主机为全封闭式，可以安放到下水道的窨井中。主机有数据存储功能，所测流量数据经通信线路送至采集中心，或者由运行人员定期读出。

(3) 多普勒式江河流量计。为了防洪和进行水资源管理,需对江河的流量进行监测。多普勒式江河流量计用于江河流量测量,取得了良好效果。它有两种类型,即多普勒水流剖面仪和多普勒江河固定流量计。多普勒水流剖面仪是一种需渡越载体(如小船)的游动式测流设备,工作时将流量计的主机和换能器装在一个防水容器中全部浸入水中,通过防水电缆与外部计算机相连。流量计的换能器由3或4个发射头构成,它们向水下发射超声波,根据返回信号的频率可以测出流量计和各水层以及河底的相对位移速度(即船速),扣除船速便可求取各层水流对河底的流速。根据河底返回信号的时间测出水深。流量计由河岸向对岸穿行测量,便可测出经过各点的水深以及流速的大小和方向,将流速矢量对河床水流断面进行积分,便可求得河流流量。

(4) 多普勒点式流速仪。多普勒点式流速仪是能进行三维流速测量的高精度仪器,它可以对水流中的某一点进行远距离采样,不干扰原来的流态分布。其声学换能器装于一细杆端头的三爪形构件上,中间为发射头,三爪顶端为接收头,四头的端面法线相交于前方某点,所测值即为该点的流速。

第七节 超声波测厚仪

一、超声反射法测厚仪的工作原理

用超声波探头向被测物体发出超声脉冲,此超声脉冲便在被测物体内部传播,传播至被测物体的底面时由于声阻抗的变化发生反射,反射回来的超声波又被超声波探头接收。从超声波探头发出超声脉冲到超声波探头接收到反射脉冲所用的时间 t 可通过电路精确地检测出来,在 t 时间内超声波在被测物体内部完成了一个往返。如果被测物体的厚度用 d 表示,超声波的总行程就是 $2d$ 。由于声波在某一物体内部传播的速度 c 是常数(如钢的声速是5950m/s,石英玻璃的声速是5570m/s),所以被测物体厚度可由下式算出:

$$d = \frac{1}{2} ct \quad (3-30)$$

二、超声波探头的结构

超声波探头采用收发独立式,其结构如图3-48所示。

收发两部分做在一个壳体内,中间由隔离层分开。压电陶瓷晶片是探头的核心部分,它具有声电转换特性。探头在发射声波时,将电路产生的电脉冲转变为超声波脉冲,探头在接收超声波时,将接收到的超声波转变为电信号送回电路。收发两部分的特性是相同的,使用中可互换。压

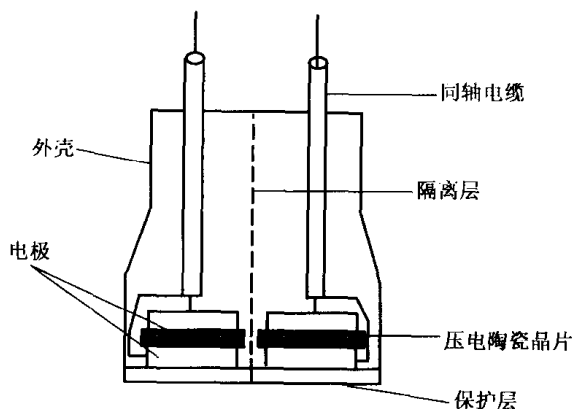


图 3-48 超声波探头结构

电陶瓷片两侧的电极分别与同轴电缆的内导体和外导体连接。

三、测厚仪的工作过程

测厚仪的实际工作过程如图 3-49 所示。首先电路产生的高电压窄脉冲 T 输送到超声波探头，超声波探头将高压电脉冲转变成同频率的超声波脉冲，通过耦合剂传播至被测物体表面，其中一部分由被测物体表面反射回来，为上表面波 S ，其余部分射入被测物体，再从被测物体的底面反射回来，为底面反射波 B ，反射波 B 又被超声波探头接收并转换为电信号送入电路，经放大后同发射脉冲一起送入闸门电路产生闸门脉冲。当被测物体较厚时，超声波束在物体内部传播的时间长，产生的闸门脉冲就宽。被测物体较薄时，超声波束在物体内部传播的时间短，产生的闸门脉冲就窄。将闸门脉冲和时钟脉冲送给与门电路，由于闸门脉冲的宽度不同，所以与门输出的时钟脉冲数就不同，由此可反映被测物体厚度值。将与门输出的脉冲数经标定变换后送给显示电路，即可显示出被测物体的实际厚度。

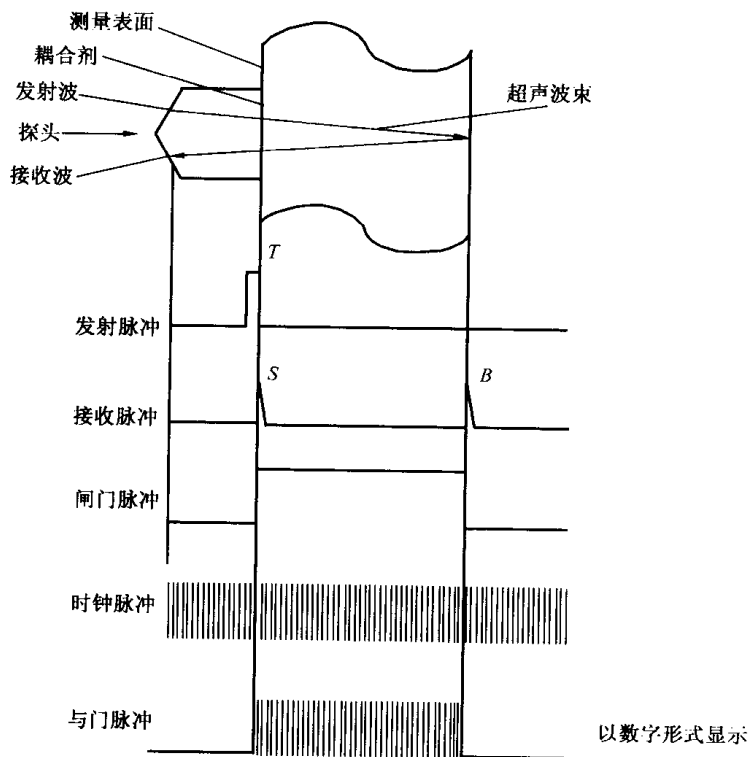


图 3-49 超声波测厚仪的工作过程

T —发射脉冲； S —上表面回波段； B —底面回波

四、超声反射法测厚仪的实现

超声波测厚仪由发射脉冲振荡器、发射脉冲整形放大电路、反射脉冲放大器、闸门发生器、时钟脉冲振荡器、中断信号发生器、与门、微处理器、键盘接口、LCD 显示等部分组成。

发射脉冲振荡器产生的频率为 2kHz 的方波输送到发射脉冲整形放大电路，转变成脉

冲宽度为 $3\mu\text{s}$ ，幅度为 100V 的窄脉冲去驱动超声波探头，超声波探头将电脉冲转变成超声波束射入被测物体，在被测物体底面发生反射，反射波又被超声波探头接收并转变成电脉冲（此时脉冲幅度在传播和转换过程中已衰减为几毫伏），将接收到的反射脉冲送给反射脉冲放大器放大至逻辑电平，同发射脉冲一起送给闸门发生电路产生闸门脉冲。闸门脉冲的前沿和后沿分别由发射脉冲和反射脉冲确定，即闸门宽度为超声波在被测物体入射和反射所用的时间。最后将闸门脉冲和 12.8MHz 的时钟脉冲送给与门电路。闸门脉冲到来时，时钟脉冲通过与门输出，闸门脉冲没来到时与门无时钟脉冲输出。与门通过的时钟脉冲数可反映被测物体的厚度，将与门通过的时钟脉冲数送入智能化单元进行相关处理，可由 4 位液晶屏显示测得的厚度值及设定的声速值。

超声波测厚仪在测量不同材料的厚度时，由于超声波在不同材料里的传播速度不同，在进行测量之前，一般需先设定材料的声速。由于环境温度和工作电压等因素的影响，测量系统的某些参数时常发生漂移，测量时应对应仪表进行厚度标定。标定操作是用仪表测量一片 5mm 厚的标准试件，若仪器显示不等于 5mm ，就应进行厚度标定。这两项工作可分别通过键盘上的声速设定键和厚度标定键完成。

第八节 超声波在其他测量方面的应用

一、超声波测量粘度

粘度是液态工业产品的一项重要指标，在生产过程中往往要求能够连续测量粘度。采用超声波测量粘度是测量粘性液体对超声换能器的切变阻抗，可以采用两种检测方法：一种是适用于实验室精密测量的扭转石英晶体法，另一种是工业生产中适用的磁致伸缩法。磁致伸缩法测量液体粘度如图 3-50 所示。

在流体介质中，一般都假定没有切变弹性，如果介质受到切变应力，能起作用的是切变粘滞力，切变粘滞力服从牛顿粘滞力的规律。磁致伸缩超声换能器振动时，通过液体的切变粘滞力带动附近液体，使液体中出现一个个向前传递的切变波，其振幅随传播距离的增大而迅速减小，减小的快慢与液体的密度和粘度有关。因此若将一个磁致伸缩换能器浸入液体中，并使振子的振动方向与液固界面平行，当超声换能器振动频率一定时，只要测量液体的切变声阻抗和密度或超声换能器在液体中振动时的振幅衰减率，就可求出液体的粘度。

磁致伸缩换能器测量液体粘度也可用共振法。它是在换能器振子上施加固定振幅的周期性外力，使振子作等幅受迫振动，并调整外力的频率来达到共振状态。共振时振子的振速幅值与液体粘度和密度乘积的平方根成反比，因此可以通过测定共振时的振速幅值来求出液体的粘度。

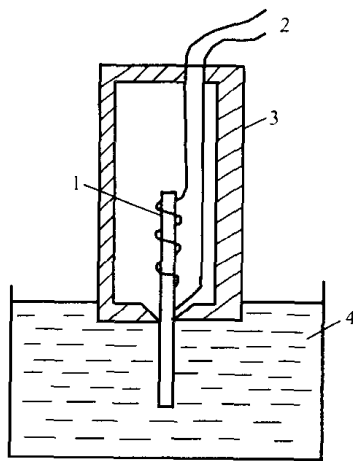


图 3-50 磁致伸缩法测量粘度

- 1—薄片振子；2—导线；
3—密封罩；4—液体

二、超声波测量密度

密度是工业生产中需要监视的一个重要参数。下面以石油产品的密度测量为例介绍超声波密度测量的原理。

通过对原油、重油、柴油、润滑油和调合油进行大量的试验和测试,得知油品密度 ρ 、超声波传播距离 L 、油品温度 T 是超声波传播时间 t 的函数,即

$$t = f(L, T, \rho) \quad (3-31)$$

对于绝大多数单一油品,当把温度 T 恒定,声程 L 选定后, t 就在一定范围内与密度 ρ 成线性关系,即

$$t = -K\rho + C \quad (3-32)$$

式中 C ——常数项;

K ——比例系数, $K = \Delta t / \Delta \rho$;

ρ ——密度。

设所测的油品密度的量程为 $\rho_1 \sim \rho_2$, 对应的超声波传播时间用 t_1 和 t_2 表示, 由式 (3-32) 可得下列关系式:

$$(t_1 - t) / (t_1 - t_2) = (\rho - \rho_1) / (\rho_2 - \rho_1) \quad (3-33)$$

令 $t' = t_1 - t$, $\tau = t_1 - t_2$, 则式 (3-33) 成为

$$t' / \tau = (\rho - \rho_1) / (\rho_2 - \rho_1) \quad (3-34)$$

从式 (3-34) 可知, 油品密度的测量问题归结为测量超声波在密度为 ρ 和 ρ_1 两种油品中传播时间的差值, ρ_1 和 ρ_2 是人为规定的, 其相应的 τ 值可由实验测定得出。若测得 t' , 根据式 (3-34) 就能计算出 ρ 值:

$$\rho = \rho_1 + (t' / \tau) \cdot (\rho_2 - \rho_1) \quad (3-35)$$

根据上述原理设计的测量室如图 3-51 所示。

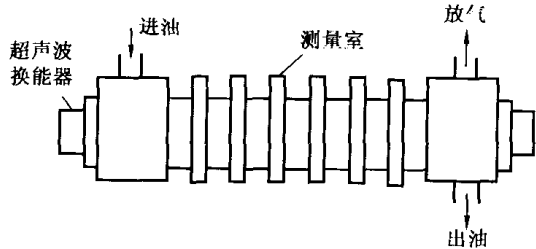


图 3-51 仪表测量室结构

将油品充满其中, 超声波换能器按一定的发射周期向油品发射超声波脉冲, 超声波脉冲通过油品后被接收下来, 测量电路测出超声波脉冲从发射到被接收所需要的时间 t , 对 t 进行变换和计算就可得油品密度值。

整个系统构成如图 3-52 所示。该仪表由采样系统、恒温油浴、测量室、恒温控制器、声时 t 测量系统、防爆结构等组成。采样系统采用引流式结构, 被测油品从工艺管道中引入采样系统, 经采样处理后进入恒温油浴, 油温恒定后进入测量室, 进行测量。由于被测油品不断流经测量室, 故可进行连续测量, 测量信号通过电缆传送到测量电路, 指示出密度值。

三、超声波测量温度

超声波测温是一种新的测温技术, 是一种非接触式测温方法, 可用于测量超低温和高

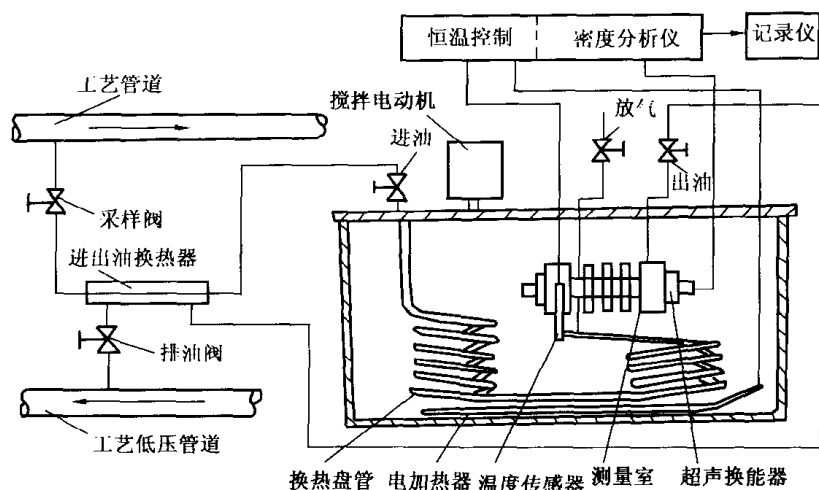


图 3-52 测量密度的仪表系统构成

温高压气体温度的测量，也可用于测量汽轮机进气、汽缸燃烧气体、核反应堆石墨芯等处的温度。

超声波测温技术是建立在介质中的声速与温度的相关性基础上的。超声波的测温方法可以分为两类：一类是使声波直接通过被测介质，即以介质本身作为敏感元件，如超声气温计，它具有响应快、不干扰温度场的特点；另一类是使声波通过与介质呈热平衡状态的敏感元件，如石英温度计、细线温度计等。

超声气温计是通过直接测量声波在气体介质中的声速来测温的，在理想气体中声波的传播速度 c 为

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3-36)$$

式中 R ——气体常数；

γ ——定压比热容和定容比热容之比；

M ——分子量；

T ——绝对温度。

当声波在气体中传播时，气体的气压、流速、温度等因素都会影响其声速，对于空气来说影响声速最主要最敏感的因素是温度，且两者之间有如下关系：

$$c = 20.067 \sqrt{T} \quad (3-37)$$

又 $T = t + 273.15$ (K)，于是有

$$t = \frac{c^2}{402.684} - 273.15 \quad (3-38)$$

测量声速的方法很多，如脉冲时间传播法、回鸣法、相位比较法、共振法等。共振跟踪式超声气温计能自动跟踪共振频率，克服了因温度变化引起声速变化而产生的测量误差，特别适用于遥测和遥控。共振法测温是通过测量相对设置的两块板之间的空气柱的共振频率来求出声速，从而计算出温度。具体可采用振幅跟踪或相位跟踪两种方式，自动调谐到共振频率。一般来说，相位跟踪方式的响应速度和灵敏度都比振幅跟踪方式好。

四、声纳

声纳（亦称声波定位仪）是利用超声波探测水中目标的装置，一般它是利用超声波反射的回波来进行测量的。声纳可用来测定水深。超声波探头发出的超声波从水面垂直向下发射，当遇到障碍物（如海底）时发生反射，反射信号被超声波探头接收，若发射波发射到接收波出现的时间间隔为 T ，海水中的声速为 v ，则水深 H 为

$$H = \frac{1}{2} vT \quad (3-39)$$

应注意到海水是分层的，由于水温、盐分不同，各层的声速不同，测深时应采用平均声速。若各层的声速分别为： v_1 、 v_2 、 $v_3 \cdots v_n$ ，则平均声速为

$$v = \frac{1}{n} (v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + \cdots + v_n) \quad (3-40)$$

鱼群探测器用的是相同原理，只是超声波向下发射时遇到的是密集鱼群而被反射，这时能探测到鱼群并能测知鱼群所在位置的深度。

五、超声波测距

超声波测距是利用超声波的回波来进行测量的，原理并不复杂。下面介绍两个超声波测距仪的电路。

图 3-53 是超声波测距仪电路，超声波换能器采用 MA40S2S，工作原理为：用 NE555 低频振荡器调制 40kHz 的高频信号，高频信号通过超声波换能器以声能形式辐射出去，辐射波遇到被检测物体就形成反射波，被 MA40S2S 所接收。

反射波的电平与被检测物体远近距离有关，距离不同时电平差别约有几十分贝以上。为此，电路中增设可变增益放大器（STCC）对电平进行调整，该信号通过定时控制电路、触发电路、门电路变换为与距离相适应的信号。用时钟脉冲对这信号的发送波与接收波之

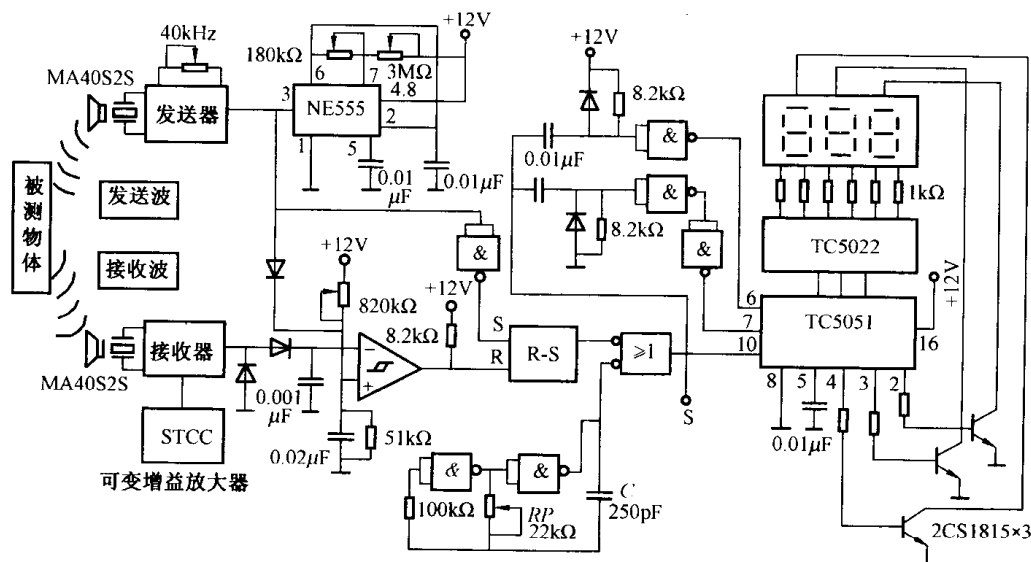


图 3-53 超声波测距仪

间的延迟时间进行计数，计数器的输出值就是相应的距离。

图 3-54 为脉冲反射方式的测距电路。电路的工作原理为：定时器 μPD556C 决定脉宽与脉冲周期，4011B 构成 RC 振荡器，振荡频率为 40kHz，RC 振荡电路的振荡频率受温度影响较大，因此，要获得稳定的振荡频率应采用晶振。

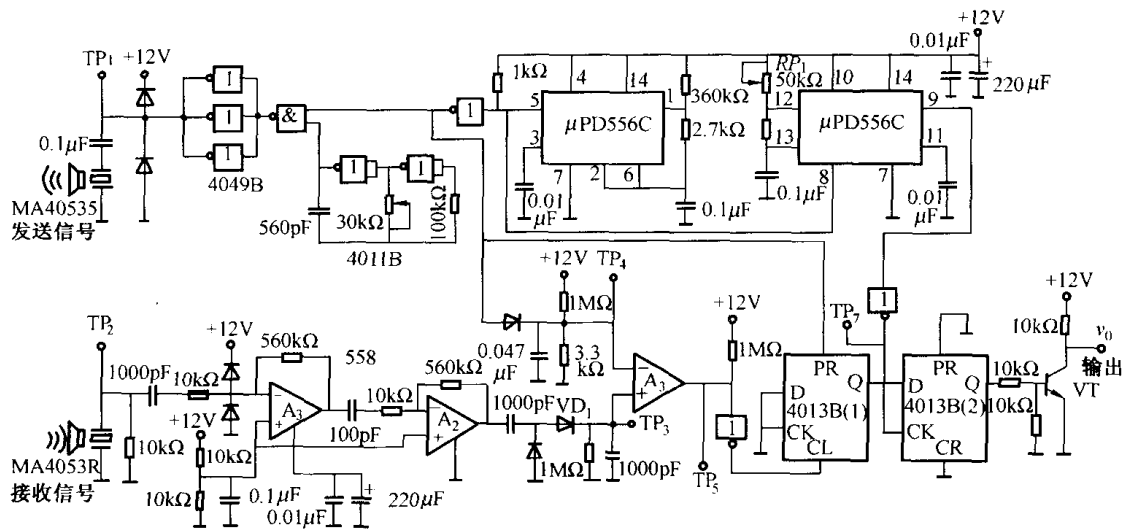


图 3-54 脉冲反射方式的测距电路

接收换能器接收的电压信号经 558 运放放大，再经二极管 VD_1 进行检波，但直接接收到发射换能器发送的信号也得到同样放大，为了只测量反射信号，必须消除直接接收的信号。因此，采用比较器 A_3 使检波后信号与基准信号进行比较从而消除直接接收的信号。采用 4013B (1) 构成 RS 触发器，使比较后的信号仅在超声波反射时间内输出为高电平。

采用 4013B (2) 构成 D 触发器，距离设定的信号作为其时钟脉冲信号，RS 触发器的输出信号作为数据 (D) 的输入信号。4013B (2) 输出 Q 在以上时钟脉冲输入后 5.8ms 时由低电平上升为高电平，当换能器与被测物体之间距离超过 1m 时，4013B (2) 的 Q 输出为高电平，未超过 1m 时输出为低电平。Q 输出信号经 VT 放大，放大后的输出信号 V_0 驱动有关装置。这样，当被测物体位于 1m 以内，输出高电平控制相关装置动作。

改变电路中的可变电阻 RP_1 ，就可以设定换能器与被测物体之间基准距离。当被测物体位于 L 内输出为高电平，否则为低电平。

六、油井超声成像测试

超声成像是超声检测中的一个重要分支，由于它提供结果的方式形象、直观，不仅在医学方面（如 B 型超声诊断仪的使用），而且在石油、煤矿、物探等领域也有应用。下面主要介绍用于石油测井中的数字超声电视测井系统。

超声电视测井是利用一个旋转的超声探头向井壁发射超声脉冲，检测回波的强弱进行调制而成像。由于岩层性质、岩层结构和井眼大小等因素的影响，使回波的强度和回波到达时间不同，在监视器上可展现井壁的图像。数字超声电视测井系统能在裸眼井中识别岩

层裂缝、裂缝特性和孔洞结构,测量井眼的几何尺寸、孔洞大小、地层裂缝的视倾角、井下温度,并可根据井壁图像特征定性区分岩性等。在套管井中,可精确测量套管的内径大小、检查套管变形、腐蚀、破裂和射孔情况等。

整个系统包括现场测试设备和室内图像处理设备两大部分。现场测试设备的原理框图如图 3-55 所示。

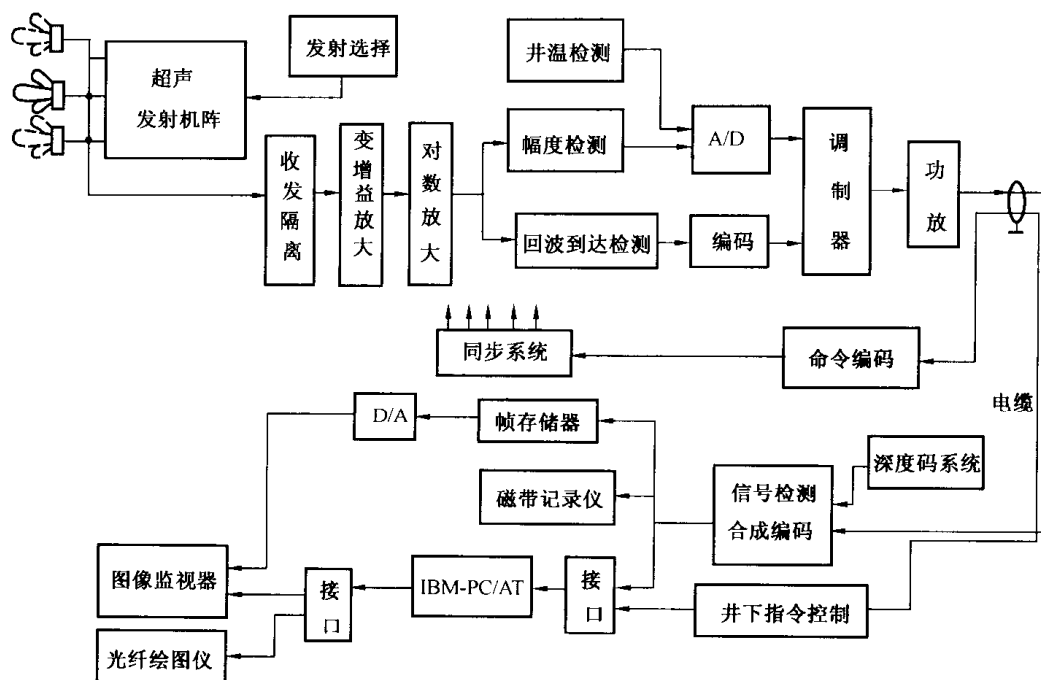


图 3-55 超声测井系统的现场测试设备

根据井下实际情况(井径大小、泥浆稠度等)选择不同的超声发射机工作(由发射选择器选择),激发相应频率的超声波射向井壁(换能器采用压电陶瓷)。超声波的发射和接收由同一换能器完成,收发隔离的作用是防止高电压的发射信号进入接收通道。变增益放大器用于调整接收通道增益以适应接收信号电平的巨大起伏,其增益选择由井上控制。对数放大器用于扩展系统的动态范围。回波的每一幅度经 A/D 转换成 8 位码,相应的回波到达时间由编码电路编为 12 位码。井下温度隔一段时间经 A/D 变换一次 8 位码。两路码(幅度码和时间码)经合成后调制放大送上电缆。电缆将井下送来的数据送给井场系统的信号检测部分,数据编码与深度码合成后成为信号检测合成编码,送给 IBM/PC 微机分析处理后可以在图像监视器上显示井壁图像和测井数据,也可用光纤绘图仪绘图。信号检测部分的输出数据也可直接送帧存贮器,经 D/A 转换后显示图像,不受计算机的控制。输出数据也可录在磁带记录仪的磁带上以备详细分析。

室内微机图像处理设备配备有较高档次的微机或小型机,以便进行地质分析等。主要利用现场磁带机记录的数据及丰富的支持软件来对井壁图像进行更详细更准确的分析,能进行井壁图像的平面、立体、局部放大显示和井截面图像显示等提供完备的测井资料。

第一节 微波检测的基础知识

一、微波的定义及其特点

各种物体发射的自然辐射的频率遍布整个电磁波谱。通常将波长在 $0.001 \sim 1\text{m}$ ，频率从 $300 \sim 300000\text{MHz}$ 范围内的电磁波称为微波。

微波既具有电磁波的特性，又与普通的无线电波及光波不同，其特点为：

(1) 定向传播。由于其波长可以和周围物体的几何长度相比拟，因此具有直线传播的性质。利用这一特点，通过方向性较强的天线，可将电磁波定向传输到空间。

(2) 准光学特性。具有与光波近似的特性，即从一种媒质进入另外一种媒质时，将产生折射与反射。遇到金属平面时，将发生全反射，其绕射能力差。

(3) 传输特性好。传播过程中受烟雾、火焰、灰尘、强光等影响很小，穿透云层、雾和小雨能力强，对环境遥感和军事应用十分有利。

(4) 介质对微波吸收与介质的介电常数成比例，水对微波的吸收作用最强。

二、微波的有关概念

尽管微波是一种电磁波，但描述低频电路的主要技术参量为电压、电流等，在微波频段，这些概念已失去了确切的含义。微波技术中主要的性能指标是频率、波长、功率、驻波比、反射系数等。微波波段常用的仪器是功率计、频率计、波长表等。

1. 波长与波速

一个周期 T 内，电磁波所走的路程称为波长，用 λ 表示。电磁波是按一定速度传播的，电磁波每秒钟所行的距离称为波速，用字母 v 代表。波速与波长、周期、频率有以下关系：

$$\lambda = T \cdot v \quad (4-1)$$

或

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4-2)$$

电磁波在介质中传播时,其波速为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (4-3)$$

式中 ϵ ——介质的介电常数;

μ ——介质的磁导率。

对真空来说,其 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$,

$$\epsilon = \epsilon_0 = \frac{1}{36} \pi \times 10^{-9} \text{ F/m}$$

代入后得:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

由于介质的极化作用,电磁波在介质中传播时要比在真空中传播慢。

2. 行波和驻波

由信号源产生的电磁波,波峰随着时间的推移向前不断运动。这种不断向前行进的波称为行波。电磁波遇到障碍或不连续的地方会产生反射波,反射波与入射波的传输方向相反,这两种波彼此干涉,结果使得在传输方向上的某些地方起伏程度总是最大,而在另一些地方总是最小,合成波的最大与最小波幅驻在那里不动,故称为驻波。驻波的最小点称为波节点,振幅最大点称为波腹点。在微波传输中,要尽量避免驻波的产生。

三、微波振荡器与微波天线

微波检测系统是由微波电路、检波器和数据处理、显示器等组成,微波电路中有各种各样的微波元件,常用的微波元件如表 4-1 所示,微波传感器正是由这些元件组成的。微波电路中需要注意的问题就是微波电路是高频电路,它与低频电路分析和处理时最大的

表 4-1 常用微波电路元件

名 称	功 能	性 能 要 求
微波发生器	产生微波能量	功率输出大、调谐性能好、寿命长、噪声低
传输线	输送微波能量	传输功率大、损耗小、频带宽
天 线	向自由空间发射或从自由空间接收微波能量	效率高、功率大、方向性好、频带宽
连接 分支 元件	弯接头	改变能量传输方向
	分支接头	将一路能量分为几路传输
	环行器	定向传输能量
	定向耦合器	定向传输能量
衰减 移相 元件	衰减器	衰减微波能量
	隔离器	单向传输能量
	匹配负载	吸收微波能量
	移相器	改变被导波场强的相位
谐振 元件	谐振腔	微波电路储能以及产生选频特性

区别就是元件连接线之间的分布参数是不能忽略的。在微波电路中这些分布参数有分布电容、分布电感、分布电导,分布电容存储了部分电场能量,分布电感存储了部分磁场能量,分布电导则消耗电磁能量,在分析和设计微波电路时必须注意这些特点。下面介绍一下微波振荡器和微波天线。

微波是用微波振荡器产生的。由于微波的波长很短,所以它的振荡频率 f 很高(300MHz ~ 300GHz),这样就要求起振回路具有很高的固有频率。由 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 可知,为了得到很高的频率 f ,振荡回路的电感 L 和电容 C 就要很小,因此不能用普通的电子管与晶体管构成微波振荡器。构成微波振荡器的器件有速调管、磁控管和某些固体元件,小型的微波振荡器也可采用体效应管。

微波振荡器产生的振荡信号要用波导管引到发射天线(波长为 10cm 以上可用同轴电缆)发射出去。波导管通常是截面为圆形或矩形的金属管,微波就在管内传播。波导壁起了屏蔽作用,它强迫电磁波沿着波导移动。为了保证发射的微波有很强的方向性,必须使用特殊结构的发射天线。常有的发射天线有喇叭形天线、抛物面天线、介质天线等如图 4-1 所示。喇叭形天线具有圆形或矩形截面,结构简单,制造方便,它实际上是波导管的延续,喇叭形天线在波导管与敞开的空间之间起匹配作用,可以获得最大能量输出。为使微波辐射具有良好的方向性,喇叭筒的张角一般为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。抛物面天线类似凹面镜产生平行光,因此使微波发射的方向性得到改善。

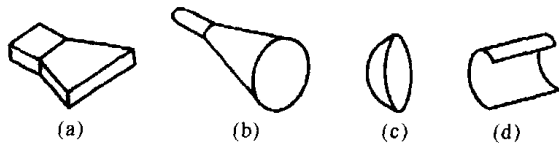


图 4-1 常见的微波天线

(a) 扇形喇叭天线; (b) 圆锥形喇叭天线;
(c) 旋转抛物面天线; (d) 抛物柱面天线

四、微波在检测技术中的应用

微波检测技术利用微波的定向辐射、反射特性及吸收特性等来检测某些物理量。根据使用情况的不同,选用的微波信号可以是连续波、脉冲波,也可以是调制波,信号的传输通路可以是传输线也可以是自由空间。

1. 利用微波的定向辐射特性进行测量

由微波振荡器产生的具有一定功率的微波经发射天线射向被测现场,当无任何障碍时,微波束被发射天线对面的接收天线所接收,经检波、放大后与规定参数进行比较,发出无障碍信号。微波在行进过程中若遇到障碍时,微波被物体反射、吸收一部分,使接收天线接收到的信号减弱,据此原理可以制成开关式物位计。若再配上计数器,也可制成计数仪表。

2. 利用微波的反射特性进行测量

微波遇到的障碍物的尺寸比微波波长大得多时,微波发生反射。根据这一特性可以制成液位计、测厚仪和微波雷达等。

3. 利用物质对微波的选择性吸收特性进行测量

在微波范围内,水分对微波的吸收是最强的。当物料中的含水量增加时,微波能量的

衰减也将成比例地增加。通过测量湿物料对于微波的吸收衰减量,便可测出物料中的水分。根据这一原理,可以测量纸张、粮食、木材、糖果等固体物料的含水量。

五、微波检测方法的优缺点

微波检测方法具有以下优点:

- (1) 非接触测量。由于检测时不与对象接触,因此可对活体进行检测。
- (2) 检测速度快、灵敏度高,可以进行动态检测与实时处理,便于自动控制。
- (3) 不受恶劣检测环境的限制,可在高温、高压、放射性环境下进行检测。
- (4) 输出信号可以方便地调制在载频信号上进行发射与接收,便于实现遥测与遥控。

微波检测方法具有以下缺点:

- (1) 利用这种检测方法在进行参数检测时,易受温度、气压、取样位置的影响,需考虑补偿措施。
- (2) 微波检测仪表的零点漂移和标定问题尚未很好解决。

第二节 微波测湿技术

一、电介质的微波特性

从狭义上讲,绝缘材料都是电介质,微波测湿的对象就是电介质,下面介绍电介质的特性。

1. 电介质的极化

一般的电介质都由分子组成,分子由原子组成,原子由带正电的原子核和带负电的电子组成。分子中的正负电荷并不是集中在一点的,假定用一个集中的带负电的点电荷来等效所有负电荷群对周围的作用,则这个等效负电荷所在的位置称为这个分子的负电荷“重心”。同理,正电荷群也有一个重心。

电介质可以分为两类,一类是正负电荷重心重合在一起的物质,如图 4-2 (a) 所示。当外加电场作用在无极性分子上时,正负电荷重心将产生相对位移,如图 4-2 (b) 所示,当外加电场消失后,正负电荷重心又重合在一起,这种位移好像具有弹性一样,故称弹性位移,这种极化形式称为位移极化。另一类电介质,即使没有外加电场,其原子或分子的正负电荷重心也不重合,形成电偶极子。由于分子的热运动,这些偶极子的排列是杂乱无章的,如图 4-3 (a),因此对外不显电性。当

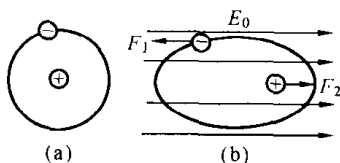


图 4-2 无极分子的位移极化

(a) 正负电荷重心重合的物质;(b) 正负电荷重心位移

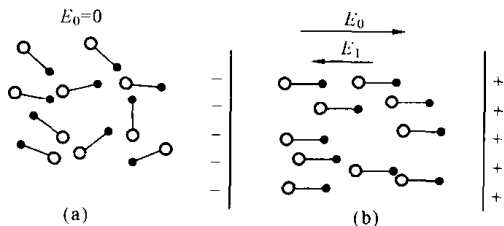


图 4-3 有极分子的取向极化

(a) 排列杂乱的偶极子;(b) 排列整齐的偶极子

外电场作用在这些有极性的分子上时, 它们将沿外电场方向排列, 外电场越强, 它们的取向排列就越整齐, 如图 4-3 (b) 所示。偶极子的这种随外电场取向的过程称为有极分子的取向极化。

水分子的分子结构是等腰三角形的, 两个 H—O 键间的夹角为 $104^{\circ}45'$, 如图 4-4 所示。

由于 H、O 共用电子对被氧原子强烈地吸引, 所以 H—O 键的氢原子端显正电性, 而氧原子端显负电性。由于水分子中的两个键并不对称, 所以其正负电荷的重心并不重合于一点, 因而水是一种强极性分子。

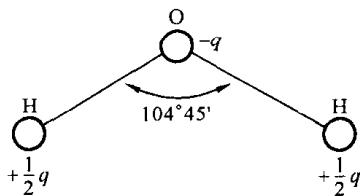


图 4-4 H_2O 的分子结构

2. 介电常数

在交变电场作用下, 极化从开始建立至处于稳定状态, 需要经过一段时间, 一般材料建立位移极化所需的时间为 $10^{-16} \sim 10^{-12} \text{ s}$, 而微波频率对应的振荡周期为 $10^{-12} \sim 10^{-9} \text{ s}$, 故在微波频率范围内, 建立位移极化所需的时间可以忽略不计, 这类极化称为无惯性极化。电偶极子在外电场作用下, 产生偶极转向极化, 从开始建立极化至处于稳定状态, 需要相当长的时间, 约 10^{-10} s 或更长一些, 在微波频段, 这一时间已经不能忽略, 这类极化称为有惯性极化, 或称松弛极化。通常, 将建立稳态极化所需的时间称为弛豫时间, 用 τ 表示。在室温下, 对稀释分散在低粘度溶剂中的小偶极子而言, $\tau = 10^{-10} \text{ s}$ 左右, 对于粘稠介质溶剂中的大偶极子而言, $\tau = 10^{-4} \text{ s}$ 左右。在常温下, 水的 $\tau = 0.25 \times 10^{-10} \text{ s}$ 。

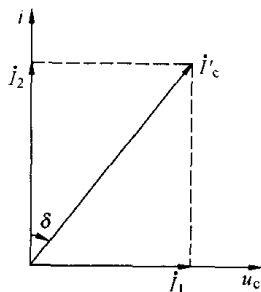


图 4-5 介质弛豫的影响

弛豫的宏观表现为介质损耗, 现以平板介质电容器为例说明这一现象。当电压 $\dot{U}_c$ 作用于平板电容两个极板上时, 如果没有介质损耗, 电流 $\dot{I}_c$ 与 $\dot{U}_c$ 相差 90° , 如图 4-5 所示。但由于介质的弛豫, 实际流过介质的电流 $\dot{I}'_c$ 比 $\dot{I}_c$ 滞后一个角度 δ , 此时 $\dot{I}'_c$ 可分解为两个垂直的分量 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$, 其中一个垂直的分量 $\dot{I}_1$ 与 $\dot{U}_c$ 同相。在交变电路里, 只有流经电阻的电流才与电压同相, 所以 $\dot{I}_1$ 可看成是由于介质损耗所引起的损耗电流, 并用 σ 表征介质中存在的损耗, σ 称为介质的电导率; 另一个分量 $\dot{I}_2$ 与 $\dot{I}_c$ 同相, $\dot{I}_2$ 是介质极化产生的位移电流, 于是 $\dot{I}'_c$ 可以用下式表示

$$\dot{I}'_c = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \sigma \cdot \dot{U}_c + j\omega\epsilon_0\epsilon_r'\dot{U}_c = j\omega\epsilon_0\left(\frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} + \epsilon_r'\right)\dot{U}_c \quad (4-4)$$

定义真空的介电常数为 ϵ_0 , 则介质的相对介电常数可表示成复数形式

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \epsilon_r' + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \\ &= \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \end{aligned} \quad (4-5)$$

式 (4-5) 中, ϵ_r' 表示储能特性, ϵ_r'' 表示耗能特性, 两者的比值是描述介质特性的另一参数, 称为损耗角正切

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (4-6)$$

显然 ϵ_r'' 越大, $\tan \delta$ 越大, 介质损耗也越大。

二、微波测湿的原理

不同的外加电场频率, 使水分子损耗能量的原因各不相同。从低频(包括直流)到超短波段, 主要为正负电荷迁移所引起的导电损耗(欧姆热); 微波频段, 主要为偶极子的取向极化损耗, 当波长为 1cm 时, 这种损耗最大; 红外频段时, 主要为离子间的共振吸收损耗; 光波频段内, 主要是电子与原子核间的共振吸收, 这些损耗与频率的关系如图 4-6 所示。

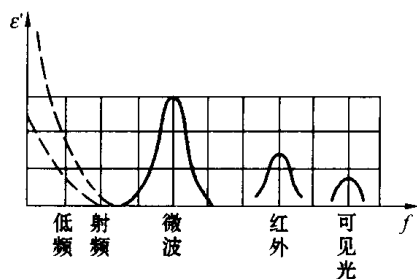


图 4-6 不同频段水分子吸收能量的机理

水分子是强极性分子, 在外电场作用下将产生强的取向极化, 与此同时还将产生位移极化。极化的结果是将外电场的能量转换成水分子的势能, 这一势能意味着将从外电场获得的能量储存起来, 可以用复介电常数的实部 ϵ' 表示。由于分子运动有惰性, 转向极化运动相对于外电场的变化有一时间上的滞后, 这种滞后即前面所说的弛豫。弛豫的宏观效果是使水分子产生损耗, 这一损耗可用复介电常数的虚部 ϵ'' 表示。

由于水分子是极性很强的偶极子, 在外电场作用下, 水的极化程度远大于其他物质。在微波频段, 不同波长对应水的介电常数不同, 表 4-2 列出了常温时不同波长下的水的介电常数。

表 4-2 不同波长下水的复介电常数

波长 (cm)	1.26	3.25	8.22	10.00	17.20	52.0
ϵ'	30.8	61.5	76.3	77.2	79.3	80.3
ϵ''	35.2	31.4	15.6	13.1	7.9	2.75

在频率 3~30GHz 范围内(即波长从 10~1cm), 水的 ϵ' 为 77.2~30, $\tan \delta$ 为 0.17~1.2; 而其他电介质的 ϵ' 为 1~5, $\tan \delta$ 约为 $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$ 。可见, 水的介电常数比其他电介质的介电常数要大得多。因此, 通过测量含水物质在微波场中的介电常数, 便能间接测得该物质中含水量的多少。

由于水的吸收损耗远较其他电介质大, 所以, 当微波功率通过物料时, 其衰减量的大小将主要取决于物料中水分含量的多少, 这就是衰减法微波测湿的原理。虽然其分辨率不如频率法、相位法高, 但因它的装置简单, 对信号源频率变化不敏感, 故获得了广泛的应用。

三、微波测湿技术的应用

利用微波测量湿度或水分的方式基本上有三种类型, 即空间波式、波导式和反射式。空间波式结构通常需用两个喇叭天线, 分别置于被测物料的两侧, 一个作为发射天线, 另一个作为接收天线。被测物料从两个喇叭天线之间通过, 物料对微波信号的衰减量与物料

中的含水量有关。波导式结构是将被测物料放在波导管内进行测试,例如可测量糖果、烟草等产品的含水量。反射式结构通常是将被测物料置于一个喇叭天线与一个金属反射器之间,从喇叭天线发射出来的微波束透过被测物料后,被金属反射器的表面反射回来,根据所接收到的回波信号,即可判定被测物料的含水量,如木板含水量的测量。对于这三种类型,采用哪一种取决于被测物料的情况和具体的测量要求。下面举出两个水分测量的例子。

1. 煤中含水量的测量

大中型发电厂的锅炉一般采用煤粉炉,即将原煤磨制成煤粉后,由热风送入锅炉中进行燃烧。煤中的含水量是煤质的一个很重要的指标,它的大小直接关系到锅炉的燃烧状况及机组的安全经济运行。对原煤和煤粉的含水量进行测定是十分重要的。对煤中含水量的测量可采用空间波式结构。

衰减法微波测湿的测量原理示意图如图 4-7 所示。由信号源发出一定功率的微波信号,经隔离器隔离后,将功率信号送入传感器。由于传感器中的物料把微波的能量吸收掉了一部分,因此微波功率被衰减,进入检波器的能量将减小,检波后的电平也减小,这样就可以把物料含水量的多少用仪表显示出来。

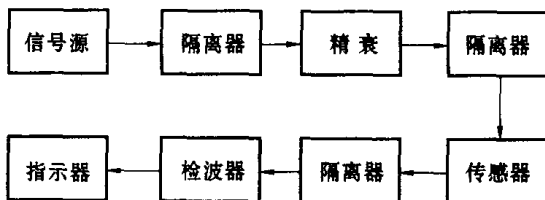


图 4-7 衰减法微波测湿原理方框图

测量系统中的隔离器的作用是:只允许微波信号单向通过,这样可以避免后级对前级的干扰,保证了信号源的稳定性。精密衰减器的作用是用来校准初值,由于煤种的不同,各种煤种的含湿量初值差别很大,往往会超出仪器的测量范围。通过精密衰减器的校准,就可以保证仪器在较大的测量范围内有较高的精度。

实际的测量系统结构如图 4-8 所示,为了提高测量的精度,对微波进行了调制,调制频率为 1000Hz。当接收器接到微波信号后,先由检测器对其进行检波,然后再由选频放大器对 1000Hz 的信号进行选频放大,经放大后的信号再转化成直流信号显示。选频放大

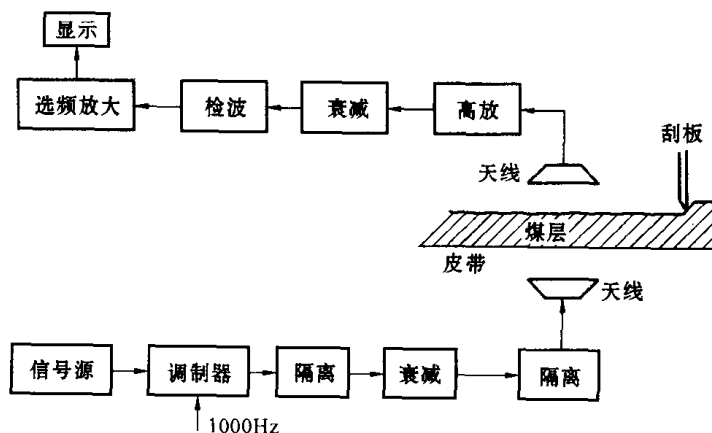


图 4-8 微波测量煤的含水量示意图

器只对 1000Hz 的信号进行选频放大,抑制了其他频率的干扰,提高了测量的信噪比。

微波的发射天线为喇叭形天线,它可以保证按一定方向发射微波信号。接收天线也是如此。由于金属对微波有很强的反射作用,所以,在微波场周围应避免有大块的金属物体。另外,在输煤皮带上应设置一刮板,以保证测量煤层有相同的厚度。

典型的煤含水量校正曲线如图 4-9。在极低水分段曲线近似直线,在高水分段呈指数

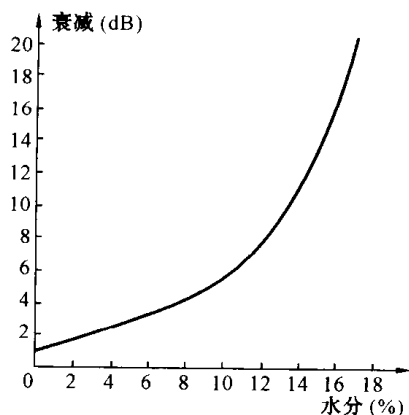


图 4-9 校准曲线

上升状态。经过校准的仪表,其每日精度约为 $\pm 1\%$ 。由于微机特别是单片机的发展,采用微机对信号进行处理,还可进一步提高测量精度。

2. 糖果含水量的测量

对糖果含水量的测量,可采用波导式结构。原理框图如图 4-10 所示。图中,微波源通常采用功率大而输出稳定的速调管。隔离器的作用是允许信号单向通过,防止负载的反射波进入微波信号源。测试波导通常就是一个直波导管,糖果放在其内进行测试。微波在波导管内透过被测物料,其能量大大衰减。微波信号经晶体管检波器检波后成为直流电信号,由指示仪表进行显示。

这里,调零衰减器用于调整仪表零位;指示仪表仅作为定位指示器,而采用读数衰减器(结构与调零衰减器相同)的千分刻度作为水分计读数,以避免因检波管受温度影响所引起的误差。测试前,先把读数衰减器调到满刻度位置(即衰减最大处),再调整调零衰减器,使表头指针指在满刻度位置。然后,把被测物料放入测试波导内。由于微波透过被测物料后能量衰减,表头指针将向零位方向偏转。此时,再调节读数衰减器(向减小衰减的方向旋转),使表头指针重新返回到满刻度位置,在读数衰减器的千分刻度上读出其衰减量,与事先标定好的定标曲线相对照,即可求得相对应的含水量。

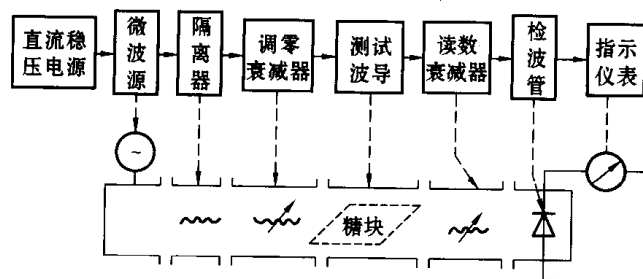


图 4-10 微波测量糖果中含水量

采用微波测定物料的水分时,要特别注意以下问题:①物料温度对测量的影响。因为水的介电常数在不同温度时具有不同数值,所以含水物料在不同温度下引起的微波衰减也不同。温度愈高,衰减愈大,测出的水分值偏高。②被测物料表面对微波的反射也将影响水分的测定。反射量的多少与物料的形状、尺寸有关,随着被测物料含水量的增加,反射影响越来越小。③对于粒状、粉状物料而言,物料的密度以及物料的排列方式也将影响测量结果。

第三节 微波多普勒测速技术

当由微波天线对准被测目标发射一束频率一定的微波时,如果目标在微波的发射方向有速度分量,那么返回的信号在频率上相对发射频率将有频移,这种效应称为微波多普勒效应,频移量称为多普勒频移。微波多普勒测速就是利用这种效应进行测量的。

一、测速原理

下面考虑一种最简单的情况,如图 4-11 所示,发射微波的天线(同时也是接收天线)位置固定,目标在微波传播方向上相对于天线直线运动。考虑一个波长的传播情况,在某一时刻,微波的 A 点到达目标,并被反射,经过 Δt 的时间, B 点也到达目标并被反射,则有

$$c\Delta t + v\Delta t = \lambda_0 \quad (4-7)$$

式中 c ——微波的波速;

v ——目标物体的速度;

λ_0 ——入射微波的波长。

微波上的 A 点到达目标后被反射,经过时间 Δt 后走过的距离为 $c\Delta t$,而经过 Δt 的时间, B 点也恰好被反射,则反射波的波长 λ 可以用下式表示

$$c\Delta t - v\Delta t = \lambda \quad (4-8)$$

式 (4-8) 与式 (4-7) 联立可得

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c+v}{c-v} = \frac{(c+v)^2}{c^2-v^2} \quad (4-9)$$

由于电磁波的传播速率远大于一般物体的运动速率,即 $c \gg v$, 式 (4-9) 可简化为

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \left(1 + \frac{2v}{c}\right) \quad (4-10)$$

或

$$\frac{f}{f_0} = \left(1 + \frac{2v}{c}\right) \quad (4-11)$$

即

$$f = f_0 \left(1 + \frac{2v}{c}\right) \quad (4-12)$$

式中 f_0 ——入射微波的频率;

f ——反射微波的频率。

当目标向着接近于微波天线的方向运动时, v 为正, 否则 v 为负。当目标速度与微波

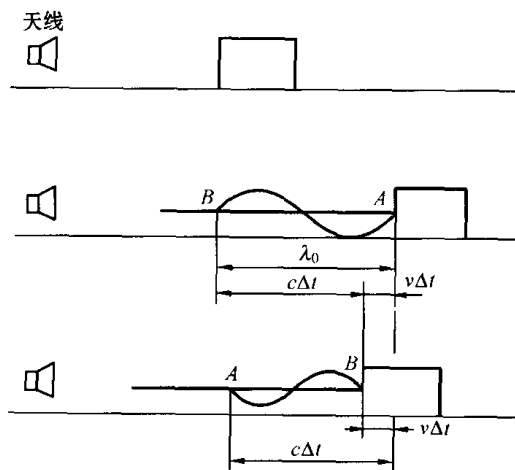


图 4-11 微波多普勒测速原理

传播方向有夹角时, 应该用实际速度在此方向上的投影来计算。

二、微波多普勒测速仪的结构原理

微波多普勒测速仪的结构原理如图 4-12 所示。由微波信号源发出频率为 f_0 的微波信号, 经环行器后送入微波天线发射出去。接收到的反射信号由环行器取出, 再与发射频率相减, 得到频率差值 f_d 。对 f_d 进行滤波、放大后经过一定的运算处理可得到被测物体的运动速度。

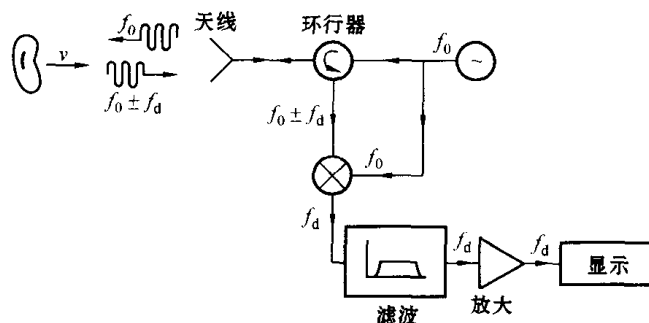


图 4-12 多普勒测速系统

环行器是一种微波元件, 它只允许微波沿一定方向 (例如逆时针方向) 流入流出。滤波器应采用带通滤波器, 其通频带对应于预期的目标速率所能产生的频率, 这样可以避免各种干扰, 特别是发射频率 f_0 所造成的干扰。

由于在解调的过程中 f_d 的符号已丢失, 故此仪器不能区分目标是接近还是远离。如果采用能分别通过上边带和下边带的滤波器, 则可以确定目标的运动方向。

三、微波多普勒流量计

微波多普勒流量计可用于测量封闭输送管道中的流体、粉末或颗粒的流速和流量。它具有响应速度快、不影响流动场、牢固可靠等优点。其结构原理图如图 4-13 所示。

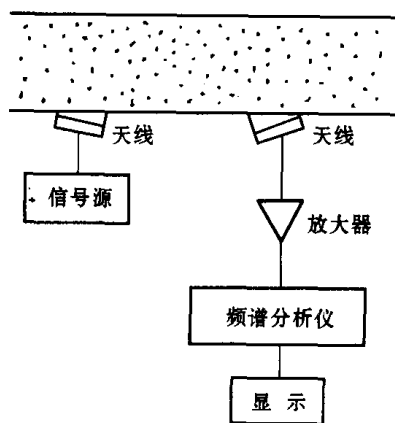


图 4-13 多普勒测流量示意图

在微波照射下, 运动流体的不均匀区、微粒、气泡或两相流中的运动微粒都会产生散射, 散射波的频谱中包含有多普勒频率的信息。但由于微粒运动的随机性, 并不能获得象测量单个物体那样的单一的频差信号。经过混频后得到的是一些频谱信号, 需要用频谱分析仪对其中正比于微粒流速的那些量进行分析、处理。

在气粉两相流的检测中, 由于散射波功率信号与粉粒的浓度存在着一定关系, 所以, 采用一定的方法对散射波进行处理, 不仅能测得介质的流速, 还可以得到关于混合物浓度的信息。

第四节 微波测量厚度

厚度及其均匀性是许多产品重要的质量指标。用微波测量厚度,具有非接触测量、不受水气和灰尘的影响、测量精度高等特点,因此,国内外对此展开了比较广泛的研究工作,并在一些方面的应用中取得了良好的效果。本节介绍一些常用的微波测厚的方法。

一、反射幅度法

反射幅度法适用于测量金属板的厚度。当金属板很靠近天线的近场区时,从金属板反射回的微波强度与天线到金属板的距离有关,距离远时反射波的强度小;距离近时反射波的强度大,并且有良好的线性。用公式表示为

$$I = I_0 \cdot k(c - d) \quad (4-13)$$

式中 I 、 I_0 ——分别为反射波和入射波的强度;

k ——比例常数;

c ——常数;

d ——金属板与天线间的距离。

若采用两个天线对称地向金属板发射微波(如图4-14),则有

$$I_1 = I_{10} \cdot k(c_1 - d_1) \quad (4-14)$$

$$I_2 = I_{20} \cdot k(c_2 - d_2) \quad (4-15)$$

取 $I_{10} = I_{20}$, $c_1 + c_2 = c$, 则有

$$I_1 + I_2 = I_{10} \cdot k(c - d_1 - d_2) \quad (4-16)$$

因为金属板的厚度可以表示为 $L - d_1 - d_2$ (L 为两天线间的距离),所以经校准后的 $I_1 + I_2$ 与金属板的厚度成正比。

反射幅度法的优点是输出信号只与金属板的厚度有关而与金属板的位置无关,就能有效地克服金属板偏移、振动等因素的影响,但这种测量因采用强度信号,易受到干扰,测量精度不够高。

利用这种原理设计的测厚仪原理如图4-15所示。被1kHz进行幅度调制的微波信号通过定向耦合器送至喇叭天线,从金属板两侧表面反射的微波,经线性检波器及放大器转化成电平信号,进行线性相加。经过适当的校准,线性相加后的信号可以与金属板的厚度成正比。测量精度为 $\pm 25\mu\text{m}$, 仪表采用的微波频率为10GHz。

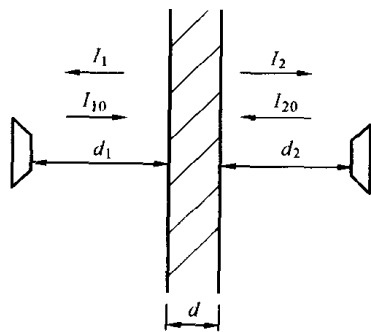


图 4-14 反射幅度法
测量原理

二、反射相位法

用相位法测量金属板厚度的测量系统如图4-16所示。在被测金属板两侧各安装一个终端器。微波信号源产生的微波信号经环行器A、上传输波导管、上终端器发射到被测物

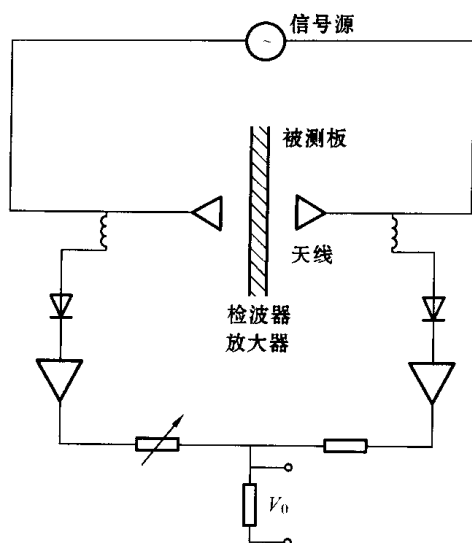


图 4-15 反射测厚仪示意图

体表面，反射波经上终端器、传输导管、环行器 A、下传输波导管、下终端器发射到被测物体下表面，其反射波经下终端器、下传输波导管回到环行器 A。微波传输的行程长度与金属板的厚度有关，金属板的厚度增加，微波传输的行程长度减小。

由于金属板厚度变化引起的微波传输过程的行程长度的变化非常微小，故检测时采用微波自动平衡电桥法。微波的实际传输行程作为测量臂，用完全模拟测量臂的传输过程设置一个参考臂（图 4-16 右边所示）。若测量臂与参考臂行程完全相同，叠加后经检波器 C 检波后，输出为零；若两臂行程长度不同，则两微波信号之间有相位差，叠加后使检波器检波后有不平衡信号输出，经放大后控制可逆电机转动，带动补偿短路器产生位移，改变补偿短路器的长度，直到两臂长度完全相同为止，这时补偿短路器位移值为金属板厚度变化值。

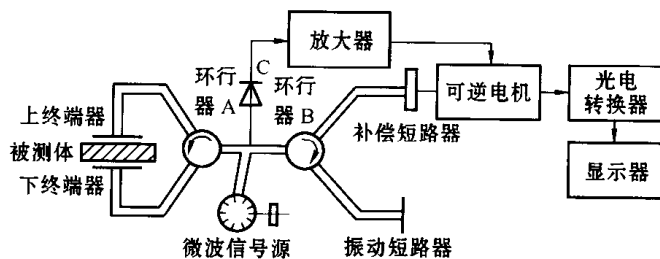


图 4-16 反射相位法金属测厚仪

三、谐振腔微扰法

谐振腔微扰法适合于非金属的介质薄膜（厚度一般为 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ ）的厚度测量。其传感器原理示意图如图 4-17 所示，传感器为一圆柱形的谐振腔，在腔体轴向中央处开一横向缝隙，被测薄膜穿过此缝插入到腔体中。腔中的驻波电场平行于薄膜表面，根据微波理论可以得出腔体的谐振频率 f 为

$$\frac{f - f_0}{f} = -(\epsilon_r' - 1) \frac{d}{L} \quad (4-17)$$

式中 f_0 ——没有介质时腔体的谐振频率；

ϵ_r' ——介质的介电常数的实部；

d ——介质薄膜厚度；

L ——谐振腔长度。

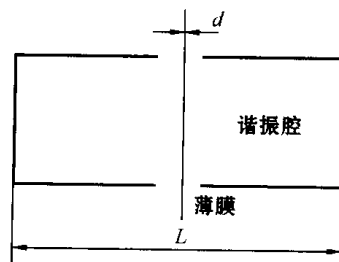


图 4-17 谐振腔传感器

由式 (4-17) 可知，谐振频率的变化与介质薄膜的厚度成正比。测出频移量，经过一定处理，即可获得厚度信号。

谐振腔微扰法具有抗干扰性好(包括静电干扰)的特点,特别适合于柔性非金属膜的测量。

第五节 微波物位计

一、概述

物位是工业生产过程中重要的测量参数之一,非接触式测量方法是近些年测量物位的主要方法。以前较成熟的非接触测量技术有超声波技术和核辐射技术,核辐射物位计因有放射源,应用需特别批准,故只用于其他方法不能解决的场合,应用受到限制。超声波技术近年来发展较快,价格也有所降低,是目前应用最广泛的非接触式测量方法,但超声波必须借助媒质传播,在物位测量中通常以空气作传播媒质,而气相媒质的温度、湿度、组分等的变化都会影响超声波传播速度,故测量时需要进行补偿。

1998年,在过程检测领域出现了高性能、低价格的微波物位计。微波的传播则不受上述因素影响,特别是在化工、石化等过程工业领域,由于被测物位介质普遍存在高温、高压、腐蚀、挥发、冷凝等复杂工况,而且有防爆要求,故比起超声波物位计,它更有优势。近年来超高频半导体器件技术的发展,低价、高性能的微波物位计的推出,使其能以较低的价格用于过程检测。

与微波相比,超声波是机械波,频率在人耳正常听觉阈值之上(频率高于20kHz),其传播速度受温度影响较大。例如在空气中,0℃时,声速为331.6m/s,20℃时为344m/s,故必须进行温度补偿。在测量挥发性液体时,空气中含有挥发组分不同,声速也不同,并且难以补偿,误差较大,而微波是电磁波,其频率范围为300MHz~300GHz。微波的传播速度为 3×10^8 m/s,其传播速度不受介质成分或组分的影响。

微波和超声波都是采取向被测目标发射波并接收目标反射波来计算距离、测量物位的,因此都需要一个波发生器及一个波接收器,具体的差别如表4-3所示。

表 4-3 微波和超声波的差别

	微 波	超 声 波
波 类 型	电 磁 波	机 械 波
反射特性	在不同介电常数的界面上反射	在不同声阻抗率介质的界面上反射
压力影响	微不足道	很 小
温度影响	微不足道	需温度补偿
传播速度	约 3×10^8 m/s (在真空中)	约 344m/s (空气中, 20℃)
测量盲区	到天线顶端	离辐射面大于 250mm
动态范围	高达 150dB	高达 100dB
传播环境	很少受气相环境影响	要求均一的气体环境

二、微波物位测量原理

微波物位计有遮断式和反射式两种。

1. 遮断式物位计

遮断式物位计的原理如图 4-18 所示。当被测物位低于给定值时,由微波振荡器经发射天线发射出的微波束为接收天线所接收,经检波、放大后与定电压比较器进行比较,比较后输出正常工作信号。当物位升高而遮断微波时(微波被反射或吸收),接收天线接收到的信号就相应地减弱,此信号经检波放大后,低于定电压信号,仪表就发出高位信号。这种遮断式物位计又称为开关式物位计。

2. 反射式物位计

反射式物位计是利用回声测距的原理工作的。如图 4-19 所示,发射天线向被测目标发射微波,被测目标反射的微波被接收天线接收。由于天线与待测界面的距离不同(因物位变化),接收天线接收到的微波功率也不一样,物位的高度可由接收到的功率的大小来反映。在发射功率及两天线的距离 S 为定值、其他有关参数不变的情况下,接收功率与天线距物位的距离 d 有关。测出接收功率即可求得距离 d ,从而能测得物位。

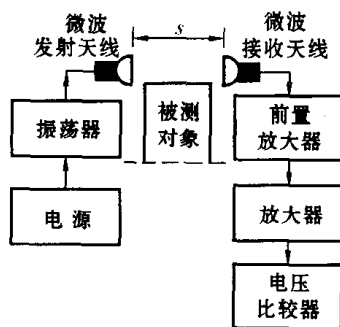


图 4-18 遮断式物位计

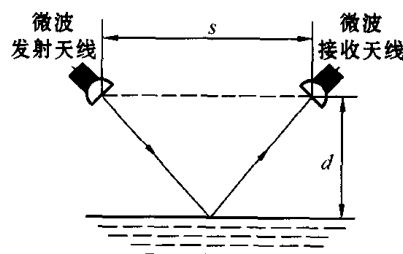


图 4-19 微波液位计

由于微波在传播途径上有衰减和干扰反射(因泡沫、蒸汽粉尘、冷凝、贮罐内部构件反射等),故测量的关键是要能接收到反射回波,并识别出有效回波。接收的回波能量 P_k 可用简化的雷达方程表示为

$$P_k = P_t C C_i G_t G_k / r^4 \quad (4-18)$$

式中 P_t ——天线辐射功率;

C ——经验系数,由系统决定;

G_i ——目标表面介电特性及面积决定的反射增益;

G_t 、 G_k ——天线的发射和接收增益(效率);

r ——天线与目标间距离。

三、微波系统的分类和主要技术因素

1. 分类

用于测距的微波系统通常分为脉冲雷达和调频连续波雷达(FMCW)两类。

(1) 脉冲雷达。脉冲雷达技术用于较短距离的测量及物位测量。微波脉冲来回传播时间 t 由下式决定:

$$t = 2a/c$$

(4-19)

式中 a ——天线到被测目标的距离；

c ——微波传播速度。

由于传播距离较短，微波脉冲的传播时间是纳秒级的。

(2) 调频连续波雷达。一个波幅恒定的线性锯齿波或三角波调频的微波信号从天线发射，并从目标上反射回来，调频的上升时间必须足够长，以便在调制结束前反射信号能返回到接收器。在用于物位测量的雷达中，调频产生在 $8 \sim 24\text{GHz}$ 之间。

被反射的微波信号在延时时间 t 后被接收，并和频率已变化的发射信号混合。两者的差频被分离出来，假设物料表面是静止的，则混频器输出信号的频率正比于延时时间 t ，因而可据此计算天线到反射面的距离。用数字信号处理使之对同一变化方向上的突然相位变化不敏感，这样就能用中频 (IF) 信号来计算过零 (零交叉) 的数字。它需要测量 IF 频谱，用快速傅立叶变换 (FFT) 来计算 IF 信号，然后确定到反射目标的物位距离，并消除干扰反射。

调频连续波雷达与脉冲雷达相比，由于物位测量距离约数米至数十米范围，微波渡越时间在数十纳秒级，调频连续波雷达将距离转为频率来测量，容易得到较高的精确度，信号也容易处理。时间的积分效应能滤去液面不稳定的影响，甚至在干扰信号比主信号大时，还能清楚地识别主信号与干扰反射信号，早期的雷达物位计大多用此方案。但这种物位计线路较复杂，成本高，难以普及。目前高精度雷达物位计仍用调频连续波方案，近年推出的普及型雷达大多为脉冲雷达，其精确度已达 $\pm 0.2\% \sim \pm 3\% \text{ F.S.}$ 。由于采用较低频率 (5.8GHz) 及绝缘棒天线，受环境影响较小，价格低很多，并且可以直接利用超声波技术中的回波信号处理技术，还可在有搅拌器等的复杂工况中识别有效回波，所以为大多数原来使用超声波物位计的场所所采用。

2. 主要技术因素

(1) 响应回波强度的因素。微波以光速传播，速度几乎不受介质特性的影响。传播衰减也很小，约 0.2dB/km 。回波信号强弱很大程度取决于被测液面上的反射情况。在被测液面上的反射率除了面积及形状因素外，主要取决于物料的相对介电常数 ϵ_r 。相对介电常数高，反射率也高，得到的回波强度高。对于普及型的雷达液位计，通常要求被测物料介电常数 $\epsilon_r > 4$ ，对于更低介电常数的物料，要求增设波导管来增强回波信号，或选用较复杂的雷达，通常的测量下限是 $\epsilon_r > 2$ 。

(2) 数据和信息的传送。对于高精度雷达，通常提供 RS-232/485 通信接口和计算机直接通信。对于目前大量使用的普及型雷达，则提供传统的 $4 \sim 20\text{mA DC}$ 模拟信号来代表物位、距离或体积。一般还在其上叠加 HART 数字信号，或提供各种协议的现场总线数字通信。

(3) 对人体健康的影响。微波辐射会引起人和动物的损伤，这是众所周知的。一般对外泄漏的微波的功率密度通常限制在 $1 \sim 10\text{mW/cm}^2$ ，不会对人体健康造成损伤，而物位测量中雷达系统功率密度约为 0.125mW/cm^2 ，低于临界限制值，所以雷达物位计不会有这方面的问题。

四、微波物位计的应用

从目前技术发展状况来看,微波物位计将迅速、大量地进入过程检测仪表市场,主要是在化工、石化、医药、食品等过程工业领域。例如,微波物位计已在水泥厂得到成功应用。

在进行系统设计时要对微波物位计进行选型。在水泥行业宜采用脉冲雷达,首选适用于固体的品种。另外,要根据不同的储库结构决定最大料位和最小料位。同时要综合入料和卸料所形成的物料安息角、物料的介电常数值和表面情况,确定有效量程(如图4-20所示)。例如20m量程的雷达物位计,用于测粉煤灰,有效量程约为8m。有些制造商在样本中给的量程是低限,还有扩展的余地,故选型时有必要和制造商讨论,根据实际的物料特性和储库结构最终确定有效量程。在选定品种时,最好要确定天线的类型。现有的天线除号角天线(喇叭口)和棒状天线(图4-21)外,还有缆绳天线和安装波导管的的天线,缆绳和波导管一直延伸到库底,用此来增强回波信号。在水泥厂建议用棒状天线,在某些储库内要充气或粉尘较大时,要求增设波导管,以增强回波信号,也可采用缆式天线,缆式天线实际上是把缆绳既当天线又作为波导管,合二为一。

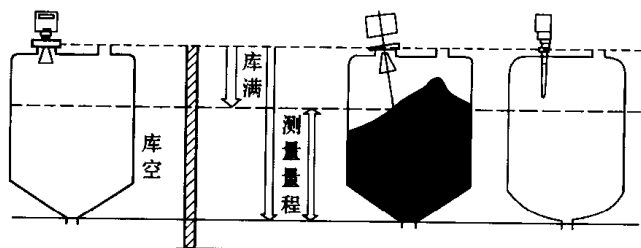


图 4-20 雷达物位计的应用

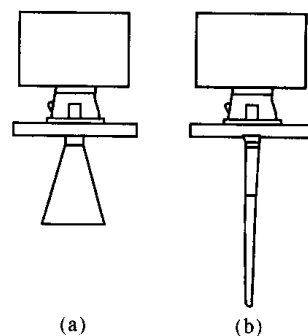


图 4-21 号角天线和棒状天线

(a) 号角天线; (b) 棒状天线

雷达物位计安装十分简单。在水泥行业应用时,如用棒状天线,法兰可直接安装到储库顶部,也可将法兰安装到储库顶部的接管上,但接管不能长于150mm;如用管螺纹棒状天线,则可直接安装在螺纹开孔上。雷达物位计安装位置一般设在离库壁约二分之一半径处,要尽量避免卸料口或库内其他装置进入微波发射区。如用于测量固体,安装时应使用倾斜一定角度的法兰接管,以便使传感器的中轴线与物料的堆积角表面垂直。表4-4列出了目前市场上的脉冲雷达液位计的典型品种及规格。

表 4-4

脉冲雷达液位计的典型品种及规格

特 性	号角天线	精密度	棒状天线	波导管	静止管	分隔系统	清洗系统
量 程 (m)	0 ~ 30	0 ~ 30	0 ~ 10/20	0 ~ 5	0 ~ 20	—	—
产品品种	L/S/G	L	L/S	L/G	L/G	L/S	L/S
精确度 (mm)	± 10	± 5	± 10	± 10	± 10	—	—

续表

特 性	号角天线	精密度	棒状天线	波导管	静止管	分隔系统	清洗系统
压力 (MPa)	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	0.6	0.6
法兰处的温度 (℃)	200	200	200	200	200	200	200
EEx 认证	0 区	0 区	0 区/1 区	0 区	0 区	1 区	1 区
连接法兰	50/150	50/200	50/150	50/150	50/150	50/150	50/200
天线类型	号 角	号角/棒状	棒状天线	波导管	号 角	号 角	号 角
标准材料	SS	SS/PFTE	PFTE	SS	SS	Glass/PFTE	SS
食 品	—	+	+	—	—	+	+
LPG	+	+	—	+	+	—	—
固 体	+	+	—	—	—	+	+
高 温	—	+	—	—	—	+	+

注 1. 产品有用于液体 (L)、固体 (S)、液化气 (G) 3 类;

2. “+”、“-” 分别表示产品在食品、LPG (液化气)、固体、高温场合能用或不能用。

第六节 微波无损检测技术

微波无损检测技术始于 20 世纪 60 年代, 最初该项技术的主要应用领域是军事工业。近些年来, 国内外一些研究机构倾注大量的精力对此进行研究, 使微波无损检测的理论、技术和硬件系统都有了长足进步, 从而大大推动了微波无损检测技术的发展。

一、微波无损检测技术的特点

与其他无损检测技术相比, 微波无损检测技术具有其自身的特点。超声波无损检测技术通常需要在材料和超声传感器之间使用耦合剂 (水或油), 这样会造成信号的衰变而产生不良的后果。当检测聚合复合物时, 由于水分的渗透将降低材料的机械性能, 从而限制了它的检测能力。射线成像技术也常用于复合物的无损检测, 但其仅仅可以提供二维 (平面) 图象, 并且利用此项技术, 类似孔隙这样的缺陷仅在很厚的材料中才被检测到。虽然层析 X 射线摄像技术可以得到较好的三维立体效果, 但费用很高。

微波无损检测技术克服了上述几种无损检测技术存在的问题, 对于声学传输性能不良的非金属材料的检测以及非接触非电量测量是十分有用的, 微波无损检测还可以用于其他无损检测技术无法探测的材料和结构的完整性评估。微波无损检测最显著的特点在于可以进行最有效的无损扫描。微波的极化特性使材料纤维束方向的确定和生产过程中非直线性的监控成为可能。微波无损检测可提供精确的数据, 使缺陷区域的大小和范围得以准确确定。此外, 微波无损检测无需做特别的分析处理, 缺陷区域的三维实时图像可以随时获得。非接触方式的检测, 便于实现自动检测, 尤其适宜于生产流水线上的连续、快速测量。微波由于具有“非金属、非电量、非接触、非破坏”的四非特点, 受到国内外工业界的广泛重视, 其应用领域也从航天航空领域向民用工业拓展, 在电力、船舶、石化及机械

部门得到应用。

二、微波无损检测的原理

微波无损检测的基本原理是综合利用微波与物质的相互作用,一方面微波在不连续界面处会产生反射、散射、透射,另一方面微波还能与被检材料产生相互作用,此时的微波场会受到材料中的电磁参数和几何参数的影响,通过测量微波信号基本参数的改变即可达到检测材料内部缺陷的目的。

M. Rockwitz 等人提出:当以金属介质内的气孔作为散射源,产生明显的散射效应时,最小气隙的半径与波长的关系符合下列关系:

$$2\pi a/\lambda = Ka \approx 1 \quad (4-20)$$

式中, $K = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, a 为气隙的半径。

当微波的工作频率为 36.5GHz 时, $a = 1.0\text{mm}$, 也就是说当 $\lambda = 6\text{mm}$ 时,可检出的孔隙的最小直径约为 2.0mm。根据所需检测的介质中最小气隙的半径即可确定微波的工作频率。

三、微波无损检测技术的应用

微波无损检测技术的应用很广泛。微波无损检测方法主要有连续波穿透法、扫频波穿透法、脉冲调制波穿透法、连续波反射法、扫频波反射法、脉冲调制波反射法、驻波干涉法、散射法、全息法以及 CT 法等。它可以检测增强塑料和各种金属、非金属的复合胶接结构与蜂窝结构件中的分层、脱层,固体推进剂、橡胶轮胎内部的气孔、裂缝,陶瓷及复合物中的孔隙,金属加工表面光洁度、裂纹、划痕及其深度等。在航天航空工业中,各种高性能的复合材料、陶瓷材料等应用广泛,微波无损检测技术得到了更进一步的发展,解决了用其他技术无法解决的问题。在探地方面,微波断层扫描成为地质及地下工程的得力助手。随着计算机网络技术日新月异的发展和普及,将检测或探测结果进行远距离传输,专家和政府主管部门可以通过互连网络进行诊断及决策。

1. 国外的应用情况

20 世纪 70 年代以来,微波无损检测技术已成功应用于大型固体火箭发动机的无损检测中。主要使用驻波干涉法、反射法和散射法。驻波法用于测厚。反射法能发现固体推进剂内深 600mm 处 $\phi 25\text{mm}$ 的气孔缺陷。散射法散射最大值出现在缺陷周长等于波长时。

20 世纪 80 年代美国人首次将微波技术用于高温绝热陶瓷的检验,工作频率 100GHz,对航天飞机绝热片陶瓷内气孔分辨率达 $500\mu\text{m}$,对含铁夹杂分辨率达 $100\mu\text{m}$,采用的是微波相干散射检测系统。80 年代中期我国研制成功该种方法的同类装置。

近年来,在利用微波对固体火箭推进剂进行非均匀性测定及对固体火箭推进剂的固化状况的监测方面,国外已取得了研究成果。

2. 国内的应用情况

我国微波无损检测技术研究最早在航天工业总公司四十四研究所立项,开展玻璃钢壳体固体火箭发动机的阵地检测课题。此后国内经历了三个发展阶段。1969 年到 1982 年是

第一阶段,厘米波模拟量记录军用为主;1983年到1990年是第二阶段,毫米波数字化合作研究为主;1991年至今是第三阶段,毫米波计算机化从军用向民用转移。

在我国航天工业部门,为解决固体火箭发动机的脱粘问题,国内的有关单位先后研制了3cm微波探伤仪、反射计和幅相仪器以及自动扫查装置,还研制了2cm波段频域干涉仪。为了提高检测灵敏度,到20世纪90年代基本上都采用毫米波功率源,建立了3mm穿透法检测系统。

1983年以前,微波探伤仪用于火箭发动机玻璃钢壳体检测,大多采用模拟量电平记录方式。1983年以后,随着微波计算机断层成像技术的开发成功,微波无损检测进入了数字化及其计算机应用的新时期。

1991年以后,我国微波无损检测技术已经从军事工业转到民用工业。在金属表面裂纹深度及金属表面粗糙度微波检测方面,利用微波天线作为微波传感器对不同材料不同工件实测,平均误差不大于 $\pm 2\%$,检测速度快,使用方便。它既可用于黑色金属,也适用于有色金属。随着非金属复合材料应用向民用工业渗透,国内有关部门又研制了楔形介质天线,检波灵敏度 $0.2\text{mV}/\mu\text{W}$,获得绝缘棒用穿透法扫查气孔 $\phi 2.6\text{mm}$ 、缺陷信号400mV的实验结果。1996年研制成功的应用于电力系统500kV超高压材料的“微波无损检测在役检查工作站”装置,采用先进的微波传感器、精密的扫查机械和计算机数据处理技术,解决了电力工业的一大难题。

第七节 微波在其他测量方面的应用

一、微波温度传感器

微波温度传感器工作时基于热辐射的原理。任何物体的温度高于环境温度时,都能够向外辐射能量,如果该辐射能到达接收机输入端口时仍然高于基准温度(或室温),在接收机的输出端就会有信号输出,输出信号的大小与辐射能的多少即被测体的温度有关,这就是辐射计或噪声温度接收机的基本原理。微波频段的辐射计就是一个微波温度传感器。图4-22为微波温度传感器的原理方框图。其关键部件是低噪声放大器,它决定了辐射计的灵敏度。

微波温度传感器最主要的应用是微波遥测。将微波温度传感器装在航天器上,可以遥测大气对流层状况,进行大地测量与探矿;可以遥测水质污染程度,确定水域范围;还可以判断土地肥沃程度及植物品种等。

近年来,微波温度传感器又用在医学方面探测人体癌变组织。癌变组织与周围正常组织之间存在着一个微小的温度差,如果能精确测量出 0.1°C 温差,就可以发现

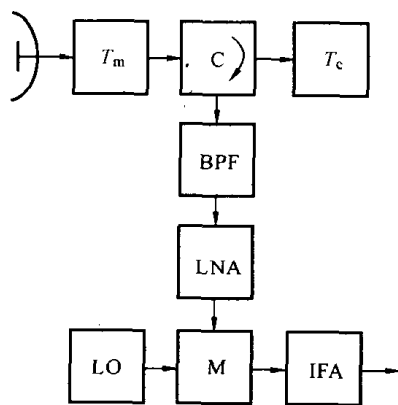


图 4-22 微波温度传感器原理框图
 T_m —被测温度; T_c —基准温度; C—环行器; BPF—带通滤波器; LNA—低噪声放大器; IFA—中频放大器; M—混频器; LO—本机振荡器

早期癌变,从而可以早日治疗。

二、微波谐振腔法测飞灰含碳量

锅炉的飞灰含碳量是反映锅炉燃烧是否经济的重要指标,在实际的燃烧系统中可以通过飞灰含碳量的测量来调整风煤比从而提高机组运行的经济性。传统的测量飞灰中含碳量的方法是采用对飞灰取样后在实验室进行分析测量,是一种离线的测量方法,对于实际生产的指导存在一定的滞后性。利用微波谐振腔来检测飞灰中含碳量是一种新的方法。

1. 基本原理

微波电路中的谐振腔是一个电磁振荡系统,当腔内有外来介质时,谐振腔的某些参数(如谐振频率、品质因数等)会发生相应的变化,检测外来介质进入前后这些腔体参数的变化就可以间接测量出引入的外来介质的性质和含量。微波谐振腔法测量飞灰含碳量正是基于这种原理的一种在线检测的方法。

假定在扰动前的谐振腔中的电场和磁场的关系为

$$E = E_0 e^{j\omega t} \quad (4-21)$$

$$H = H_0 e^{j\omega t} \quad (4-22)$$

当扰动引入后电磁场变为

$$E' = (E_0 + E_1) e^{j(\omega + \delta\omega)t} \quad (4-23)$$

$$H' = (H_0 + H_1) e^{j(\omega + \delta\omega)t} \quad (4-24)$$

式中 E_0 、 H_0 ——腔中位置的函数;

E_1 、 H_1 ——场中附加改变量;

$\delta\omega$ ——角频率改变量。

当将介质放入微波谐振腔中时,由于不同含碳量的飞灰引起的介质损耗(ϵ_r)不同,

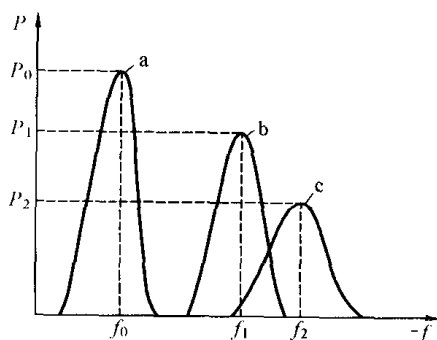


图 4-23 谐振曲线示意图

率跌落 δP 之间的关系。

因此谐振腔的谐振曲线将呈现出不同的状态,如图 4-23 所示。图 4-23 中横坐标代表频率,纵坐标代表功率幅度。谐振曲线 a 为测试管中没有飞灰时,其谐振频率为 f_0 ,峰值功率为 P_0 ;谐振曲线 b 为测试管中有飞灰样本 1 时,其谐振频率为 f_1 ,峰值功率为 P_1 ;谐振曲线 c 为测试管中有飞灰样本 2 时,其谐振频率为 f_2 ,峰值功率为 P_2 。不同的含碳量的飞灰得到的频率偏移 δf 和峰值功率跌落 δP 是不同的,由此可以构造出飞灰的含碳量与谐振腔的频率偏移 δf 和峰值功

$$\text{Carbon\%} = F(\delta f, \delta P) \quad (4-25)$$

2. 测量电路

微波谐振腔法测飞灰含碳量的测量系统由一个 S 波段的微波扫频信号源、隔离器、衰减器、微波耦合器、矩形谐振腔、检波器、D/A 转换卡、A/D 转换卡、信号预处理单元、

计算机、显示器等组成,如图 4-24 所示。灰样测试管穿过谐振腔宽面中心轴线,因为此处微波集中,微扰的作用最强。为了减少微波功率的损耗,测试管采用了相对介电常数较小的材料,如聚四氟乙烯、石英等。

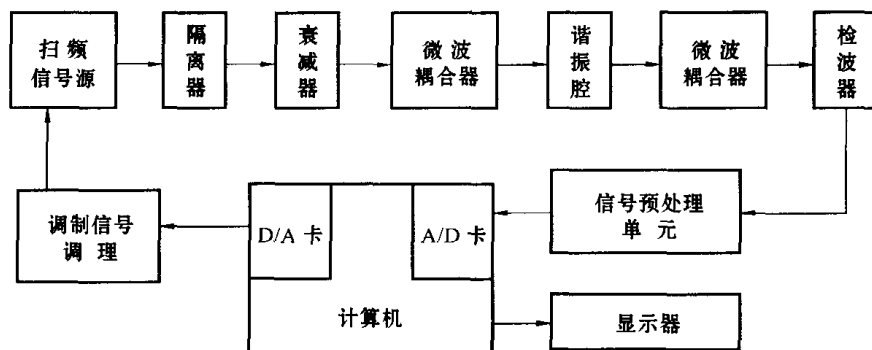


图 4-24 微波测试系统组成示意图

测量时首先由计算机经 D/A 转换卡发出频率调制电压,以此控制扫描信号源的压控振荡器,改变微波信号源的输出频率,同时检波器采集的信号经过预处理后由 A/D 转换卡将模拟信号转化为数字信号送入计算机,然后由相应的软件计算出谐振功率的峰值和共振频率,根据飞灰的含碳量与谐振腔的频率偏移 δf 和峰值功率跌落 δP 之间的关系即可得出飞灰中的含碳量。

采用微波谐振腔法测量飞灰中的含碳量时,尽管每次测量都需要检测空腔和装入灰样两种情况下的谐振功率峰值和共振频率,但是相对于传统方法具有方便、准确、快速和可连续检测等优点,对于合理地调整锅炉燃烧、降低供电煤耗等都有重要意义。目前,该方法已经在某些电厂的实际应用中取得了不错的效果。

三、微波方法测量表面粗糙度

表面粗糙度是零件的重要质量指标,加工测量技术中粗糙度测量已经显得日益重要。利用微波测量表面粗糙度是一种快速、非破坏性的有效测量方法。

对于理想导体面,当一均匀平面电磁波垂直入射到其表面上时,入射波的功率全部被反射回来。对实际加工金属件,如果被测工件表面是理想光滑的,正入射的微波功率全部被反射;如果表面是粗糙的,正入射的微波功率被散射而偏离正反射方向。对正入射微波的反射功率来说,工件表面粗糙度值越小,反射功率越大;粗糙度值越大,反射功率越小。若将被测工件表面反射(包括散射)的微波功率用立体天线加以接收,则可根据测出的反射功率的大小来评定表面粗糙度值。

微波金属表面粗糙度测量装置主要由微波信号发生器、微带天线辐射器、微波探测天线(或称微波传感器)、微弱信号放大器、单片机系统和显示电路等组合而成,其框图如图 4-25 所示。

微波信号发生器产生的微波束经小型微带天线辐射器输出,垂直入射到金属工件粗糙表面时,除极少部分被表面吸收外,绝大部分被表面反射,由微波探测天线所接收。微波

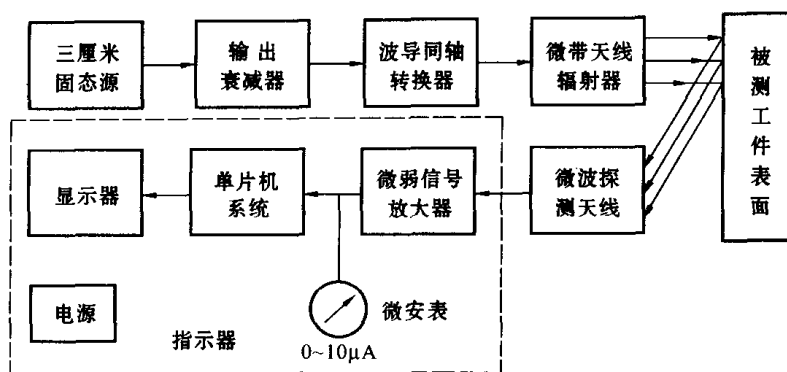


图 4-25 测量装置的组成

探测天线由利用铈、铋金属的热偶效应制成的三个单级有耗半波振子，在空间相互垂直彼此串联而成。当微波极化方向与天线振子平行时，有耗半波振子天线上感应出较强的高频电流。由于铈铋的热偶效应，在天线的两端就有直流电压产生，其大小与微波场强的平方成正比，通过微弱信号放大器放大后，直接送入指示器显示被测值。指示器可用微安计或用单片机处理信号，进行数字显示（或打印）。

实际测定时，先对一系列已知表面粗糙度数值的标准样块进行实验测量，得到相应的一系列反射功率的分布曲线，作为标准样块的校正曲线。然后测量被测工件，将测得的反射功率分布曲线与标准样块的校正曲线相比较，即可确定被测工件的表面粗糙度值。

四、微波定位传感器

微波定位传感器是一种反射式的微波传感器，其基本工作原理是由微波源定向的发射微波，由于物体位置的不同反射回的微波信号的强弱就有所区别，根据反射微波的变化就可以判断物体位置的变化。图 4-26 为微波定位传感器原理图。微波源（MS）发射的微波，经环行器（C）从天线发射出微波信号。当物料远离小孔（O）时，反射信号很小；当物料移近小孔时，反射信号突然增大，该信号经转换器（T）变换为电压信号，即可以将其转化为位置信息送显示器（D）显示，也可将此信号送至控制器来实现控制功能，使物料停止运动或加速运动。

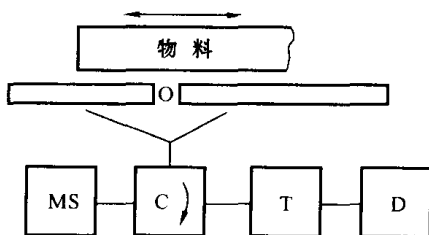


图 4-26 微波定位传感器

第一节 红外辐射的基本知识

一、红外辐射及其特性

红外辐射又称红外线，是一种人眼看不见的光线。自然界中任何物体，只要温度高于绝对零度（ -273.16°C ），就会有红外线向周围空间辐射。

红外辐射是一种电磁波，它的波长范围大致在 $0.76\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 的频谱范围之内，相对应的频率大致在 $4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 之间。从电磁波谱中可知（如图 5-1 所示），红外辐射是位于可见光（红色光）和微波之间的一种不可见光。一般将红外辐射分为四个区域，即近红外区、中红外区、远红外区和极远红外区。这里所说的远近是指红外辐射在电磁波谱中与可见光的距离而言。

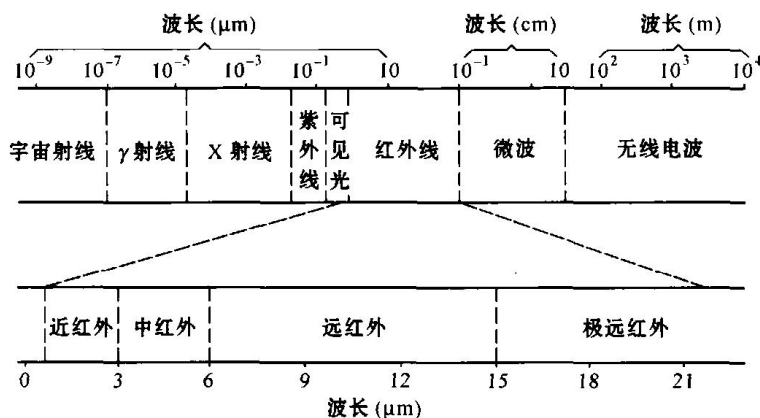


图 5-1 电磁波谱图

同所有电磁波一样，红外辐射也具有反射、折射、散射、干涉、吸收等性质。

红外辐射的最大特点是具有光热效应，能辐射热量，它是光谱中最大的光热效应区。物体的温度越高，辐射出来的红外线越多，红外辐射的能量就越强，据此可以利用红外辐射来测量物体温度。

红外线在介质中传播时，由于介质的吸收和散射作用而衰减。各种气体和液体对于不同波长红外辐射的吸收是具有选择性的，即不同的气体和液体只能吸收某一波长或几个波长

范围的辐射能。这是利用红外线进行成分分析的依据之一。

红外辐射在大气中传播时,由于大气中的气体分子、水蒸气以及固体微粒、尘埃等物质的吸收和散射作用,使辐射在传输过程中逐渐衰减。但空间的大气、烟云对红外辐射的吸收程度与红外辐射的波长有关,尤其对波长范围在 $2 \sim 2.6\mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 这三个波段的吸收相对很弱,这三个波段的红外线穿透能力较强,透过率高,统称它们为“大气窗口”,对红外探测技术特别重要,现有红外探测器一般都工作在这三个波段(大气窗口)之内。

二、红外辐射检测的理论基础

红外辐射作为热辐射的一种形式,也同样服从热辐射的一些定律。

1. 基尔霍夫定律

一切物体向周围发射热辐射能的同时也吸收周围物体所发射的辐射能。如果几个物体处于同一温度场中,它们的发射能力正比于它们的吸收能力,这就是基尔霍夫定律,用公式表示为

$$E_r = \alpha \cdot E_0 \quad (5-1)$$

式中 E_r ——物体单位面积单位时间内发射的辐射能;

α ——该物体对辐射能的吸收系数;

E_0 ——等价于全辐射体在相同温度下的发射本领。

2. 普朗克定律与维恩公式

全辐射体的光谱辐射出射度 $M_{0\lambda}$ 与波长 λ 和温度 T 的关系可由普朗克定律表示为

$$M_{0\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (5-2)$$

式中 C_1 ——普朗克第一辐射常数, $C_1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$;

C_2 ——普朗克第二辐射常数, $C_2 = 1.44 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

当波长 λ 一定时, $M_{0\lambda}$ 与温度 T 之间就有一一对应的关系。

温度低于 3000K, 波长在较短的可见光范围内, 可用维恩公式代替普朗克公式。维恩公式为

$$M_{0\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

3. 斯忒藩-玻尔兹曼定律

全辐射体的辐射出射度 M_0 (波长从 $0 \sim \infty$) 与温度 T 有如下关系:

$$M_0 = \int_0^\infty M_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (5-3)$$

式中 σ ——斯忒藩-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

上式说明, 全辐射体的辐射出射度与它自身的绝对温度 T 的四次方成正比。

需要说明的是, 由于实际物体为非全辐射体, 对实际物体, 式 (5-2) 和式 (5-3) 可改写为

$$M_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}$$

$$M = \epsilon \sigma T^4$$

式中 ϵ_{λ} ——实际物体在波长为 λ 时的光谱发射率；

ϵ ——实际物体的全辐射发射率。

发射率 ϵ 是物体表面辐射出射度和同一温度下全辐射体辐射出射度的比值。对于全辐射体， $\epsilon = 1$ ，对于实际物体， $0 < \epsilon < 1$ 。

4. 朗伯-贝尔定律

光线通过溶液或气体等均匀介质时，其对应介质特征频率波长的那部分能量被介质吸收，透过介质层的能量减少。能量减少的规律服从朗伯-贝尔定律，即

$$I = I_0 \cdot e^{-KCL} \quad (5-4)$$

由上式可知，当强度为 I_0 的红外线通过介质层厚度为 L 、吸收系数为 K 的待测组分后，通过的红外线强度 I 是待测组分浓度 C 的函数，并随着待测组分浓度 C 的增加而以指数规律下降。但当浓度 C 很小，且 KCL 数值很小时，可以近似用线性吸收规律来代替，即

$$I = I_0(1 - KCL)$$

第二节 红外辐射源和红外探测器

无论是利用物体的红外辐射特性，还是利用物体对红外的反射、吸收、透射等特性进行检测的系统，尽管具体组成上可能存在差异，但是总的说来红外检测系统由红外辐射源、光学系统、红外探测器和数据处理显示等四大部分组成，如图 5-2 所示。本节着重介绍红外辐射源和红外探测器。

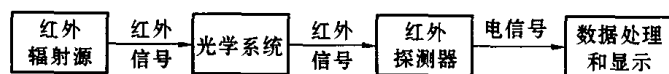


图 5-2 红外检测系统

一、红外辐射源

当物体温度高于绝对零度时，就有红外线向周围空间辐射出来，有红外辐射的物体就可以视为红外辐射源。在红外检测系统中，无论是主动式还是被动式，红外辐射源都是必不可少的组成部分。在主动式检测系统中，有一个外加的红外辐射源产生红外辐射，被测信息可以包含在辐射源中，直接进入传输通道，也可以利用被测信息调制辐射器产生的辐射，然后进入传输通道，常用的红外辐射源如表 5-1 所示。在被动式系统中，辐射源是被测物本身，被测量的信息就包含在被测物体自身的红外辐射里。

按辐射源面积的大小可以将红外辐射源分为点源和面源两种，一般把充满红外光学系统视场的大面积辐射源叫做面源，将没有充满红外光学系统视场的小面积辐射源叫做点

源。

表 5-1

常用的红外辐射源

种 类		名 称	构 成	特点和应用
热 辐 射	空腔辐射器	黑体型辐射器	带孔的空腔	光谱连续分布，总的辐射率高，作红外设备的校准
	固体辐射器	能斯特灯	锆、钇、钛等金属氧化物 烧结而成	除 2~5μm 有吸收外，其光谱分布近于黑体，作 红外分光光度计的辐射源
		发光硅碳棒	碳化硅	反射本领高，在 7~9μm 有较大辐射，作红外分 光光度计的辐射源，无需预热
		白炽灯	钨丝	作近红外辐射源，效率低
非 热 辐 射	光敏发光 阴极发光 电敏发光 半导体发光	发光二极管 发光二极管	固体图像增强器 阴极射线管 GaP、GaAs、InAs… 等 LED	图像显示 在热像仪中用作图像显示 可作为半导体激光器 可构成二极管矩阵，用于热像仪
	激 光 器	气体激光器	CO ₂ ， 氦氖	单色性好，方向性强，亮度极高，可作为选择发 射特性的高亮度辐射源
		液体激光器	染料	
		固体激光器	红宝石、钕-铝石榴石	
		半导体激光器	砷化镓	

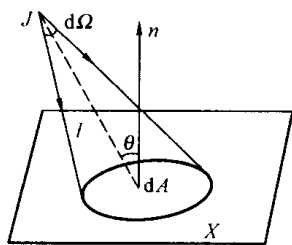


图 5-3 点源

理想的点源被认为是没有面积的几何体, 如图 5-3 所示。点源的辐射强度 J 是点源在某一指定方向、单位立体角内发射的辐射功率, 即

$$J = \frac{\partial P}{\partial \Omega} \quad (5-5)$$

式中 P ——立体角 Ω 内的发射功率;
 Ω ——立体角。

由式 (5-5) 可见, 点源的辐射强度 J 仅与方向有关, 而与源面积无关。

设点源的辐射强度为 J , 它与被照面上 X 处的圆面积 dA 的距离为 l , 圆面积 dA 的法线 n 与 l 的夹角为 θ , 则 dA 接收到的辐射功率为

$$dP = J d\Omega = J \frac{dA \cos \theta}{l^2} \quad (5-6)$$

故点源在被照面上 X 处所产生的辐照度与点源辐射强度和被照面法线的夹角的余弦的乘积成正比, 与它们之间的距离平方成反比。

对于面源, 它的辐射强度为

$$N = \frac{\partial^2 P}{\cos \theta \cdot \partial A \cdot \partial \Omega} \quad (5-7)$$

可见, 面辐射强度 N 与被照面在面源表面上的位置、方向及面源的面积 ΔA 有关。

面源单位面积发射的辐射出射度为

$$M = \frac{\partial P}{\partial A} \int_{\text{半球}} N \cos \theta d\Omega \quad (5-8)$$

面源在与它相距 l 处的被照面上产生的辐照度为

$$H = N \cos \theta \cdot \Delta A \frac{\cos \theta'}{l^2} = N \cos \theta' \cdot \Delta \Omega' \quad (5-9)$$

式中 ΔA ——小面源的表面积；

θ ——面源表面法线 n 与 l 的夹角；

θ' ——被照表面法线 n' 与 l 的夹角；

$\Delta \Omega'$ ——小面源 ΔA 对被照面所张的小立体角。

$$\Delta \Omega' = \frac{\Delta A \cos \theta}{l^2} \quad (5-10)$$

对于一般辐射，求 M 与 N 的关系，必须先确定 N 与 θ 的关系。

实际应用中，全辐射器由石墨制做而成，外壁包上较厚一层可长时间承受工作高温的热绝缘材料，以利于保温。采用电加热线圈加热，其线圈绕制、排列保证均匀加热。此外，腔体内置有高精度的热电偶或热电阻，用以检测辐射器空腔内的温度。

二、红外探测器

1. 红外探测器的分类和基本工作原理

红外探测器是能够把红外辐射能量的变化转换为电量变化的器件。红外探测器按工作温度可分为低温探测器、中温探测器和室温探测器；按响应波长范围可分为近红外、中红外和远红外探测器；按结构和用途可分为单元探测器、多元列阵探测器和焦平面等成像探测器；按其所依据的物理效应可分为热探测器和光子探测器。

(1) 红外热探测器。红外热探测器是根据入射红外辐射的热效应引起材料某一物理性质变化而工作的一类探测器。红外热探测器的主要优点是响应波段宽，可以在室温下工作，使用方便。但是，它的响应时间长，灵敏度较低，一般用于红外辐射变化缓慢场合。

根据材料不同物理性质的变化，又可以把红外热探测器分成以下几种：

1) 热电偶型探测器。热电偶型红外探测器是利用热电效应现象制成的红外探测器。其工作原理基本与一般热电偶相同，所不同的是它对红外辐射敏感，它由热电功率差别较大的两种材料（如铋—银、铜—康铜、铋—铋锡合金等）构成的。当红外辐射照射到热电偶热接点上，该点温度升高，而冷接点温度保持不变，这时在热电偶回路中将产生热电势，而热电势的大小反映了热接点吸收红外辐射的强弱。在实际应用中，往往将几个热电偶串联起来组成热电堆来检测红外辐射的强弱。通常采用真空镀膜和光刻技术制作薄膜温差电堆，薄膜温差电堆的一个突出优点是长期稳定性极好。

热电偶型红外探测器的时间常数较大，所以响应时间较长、动态特性较差，被测辐射变化频率一般应在 10Hz 以下。有的红外测温仪或红外温度报警器为能在环境温度下持续工作，往往使用这类探测器。

2) 热敏电阻型探测器。热敏电阻型红外探测器的热敏电阻由锰、镍、钴等金属的氧



化物混合后烧结而制成,通常制成薄片状。当红外辐射照射在热敏电阻上时,其电阻率发生较大变化。热敏电阻型探测器在红外测温仪中也有较广泛应用。

3) 热释电型探测器。热释电型红外探测器是由具有极化现象的热晶体或称“铁电体”制做的。当这种晶体受辐射时,由于温度升高,自发极化强度减小,晶体表面上的自由电荷被释放出来。热释电晶体材料在调制的红外辐射作用下,因晶体温度周期性变化而引起晶体自发极化强度的周期性变化。若在晶体垂直于电极化强度的两个端面镀上电极,并通过负载连成闭合回路,就会在闭合回路中有电流流过,或在负载两端有随入射红外辐射功率变化的交变信号电压输出,从而实现红外辐射信号向输出电信号转换的功能。与其他红外热探测器相比,热释电探测器不仅具有较宽的频率响应范围和很高的响应速度(响应时间可小于微秒量级),而且十分灵敏。所以广泛用做红外测温仪的信号转换元件和红外热电视的摄像管。

(2) 红外光子探测器。入射红外辐射光子流与探测器材料中的电子之间直接相互作用,引起各种电学现象(统称为光子效应),使材料的电学性质发生变化,通过测量电学性质的变化,可以确定红外辐射的强弱。利用光子效应制成的红外探测器统称光子探测器。依据产生的不同电学现象可做成不同的红外光子探测器。光子探测器的主要特点是灵敏度高,响应速度快,响应频率高。但其一般需在低温下工作,探测波段较窄。

按照光子探测器的工作原理,一般可分为外光电探测器和内光电探测器两种。内光电探测器又分为下面三种:

1) 光电导(PC)探测器。在通常情况下,半导体中的载流子(自由电子和自由空穴)浓度很小,因此电阻率很大。当有能量足够大的红外光子照射半导体材料时,在其体内原来处于束缚状态的电子和空穴,由于吸收了入射光子能量而被激发成自由电子和自由空穴,导致半导体电导率增大,这种现象叫做光电导效应。根据光电导效应探测红外辐射的器件称为光电导探测器,光电导探测器通常利用硫化铅、硒化铅、碲化铋等半导体材料制造而成。光敏电阻就属于光电导探测器。使用光电导探测器时,需要致冷并且加上一定偏压,否则会影响探测器的性能,使响应率降低,噪声大,响应波段窄,甚至损坏探测器。

2) 光生伏特(PV)探测器。当红外辐射照射在某些半导体材料构成的P-N结上时,在P-N结附近产生了与辐射能量相应的激发电子-空穴对,在P-N结内电场的作用下,P区的自由电子移向N区,N区的空穴移向P区。如果P-N结是开路的,则在P-N结两端产生一个附加电势,称为光生电动势。利用此效应制成的探测器称为光生伏特探测器。光电池就属于这种探测器。制造光生伏特探测器常用的材料为砷化铟、碲化铟、碲镉汞、碲锡铅等,如在红外诊断仪器中使用的光伏探测器,主要有在液氮温度工作的碲化铟PV探测器(响应波长 $2\sim 5.8\mu\text{m}$)和碲镉汞PV探测器(响应波长 $8\sim 14\mu\text{m}$)。光伏探测器是一个自生偏压装置,不需要偏压电源,这种情况有时能降低电路的复杂性。光伏探测器在理论上能达到的最高探测率,比光电导探测器大40%。

3) 光磁电探测器(PEM器件)。当红外辐射照射在某些半导体材料表面上时,在材料的表面产生电子和空穴对,并向内部扩散,在扩散中受到强磁场作用,电子与空穴各偏向一边,因而产生了开路电压,这种现象称为光磁电效应。利用光磁电效应制成的红外探

测器,称为光磁电探测器。

光磁电探测器响应波段在 $7\mu\text{m}$ 左右,时间常数小,响应速度快,不用加偏压,内阻极低,噪声小,性能稳定。但其灵敏度低,同时低噪声放大器制作困难,因而影响了光磁电探测器的使用。

2. 红外探测器的参数和性能指标

(1) 使用条件参数。红外探测器的性能往往与使用条件有关,红外探测器的在设计和使用时应注意所选用的探测器的使用条件。

1) 光敏面的形状和尺寸。红外探测器的光电信号转换功能是依靠探测器光敏面(响应平面)完成的,信号与噪声也和光敏面有关。如光电导探测器的光敏面多呈方形,尺寸从 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 到 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 。其余探测器有的呈方形,有的则为长条形或圆形,尺寸不等。

2) 输入信号的光谱分布。许多红外探测器对不同波长的辐射有不同响应,所以,选择探测器时必须注意分清探测器的参数是在什么光谱范围的入射辐射条件下测量的。

3) 调制频率和电路频率范围。选择探测器或比较其性能时,应注意是在什么调制频率下测量的,以及测量电路的通频带如何。当通频带很宽时,还应注意它的基频值。

4) 探测器的偏置参数。所有电阻型红外探测器,都需要外加偏置电场才能形成光信号电压或电流,常用偏置电路如图 5-4 所示,其中 R_0 为探测器的暗电阻, R_L 为负载电阻, V_b 是偏置电源电压。随着偏置电压(或偏置电流)进一步增加,探测器中消耗的功率增大,产生的热能会使探测器暗电阻降低,因而导致输出信号上升速度随偏压增加而降低,当偏压增大到一定程度时,热量积累使温度迅速上升,以致引起探测器严重损坏。随着偏流加大,探测器噪声也会从与电流无关逐步转入以过剩噪声为主,后者随电流增加而增大。因此,探测器存在一个最佳偏置工作点。通常探测器制造者推荐的最大偏置是指可使用的最大偏置值,并非最佳偏置值,最佳偏置值是指在指定入射辐射波长与调制频率时,能使探测器输出信噪比达到最大值的偏置值。

在图 5-4 所示的电阻型红外探测器直流偏置电路中,如果取负载电阻 R_L 等于探测器的暗电阻 R_0 ,则为匹配偏置;如果取 $R_L \gg R_0$,则流过探测器的电流近似地由 V_b 及 R_L 决定,与 R_0 无关,这种情况的偏置为恒流偏置;如果取 $R_L \ll R_0$,则加在探测器上的电压近似为 V_b ,与 R_0 无关,这种偏置为恒压偏置。各种偏置方式都有各自的特点,使用时应视具体情况进行选择。

对于自生偏压的红外探测器,如热电偶、热电堆、热释电探测器和光生伏特探测器,其中前三类都不需要外加偏置电源。而光生伏特型红外光子探测器,既可不加偏置电压,也可施加反向偏置电压,但在不同波长范围工作的不同类型光生伏特探测器,所需要的偏置参数也不相同,使用时必须注意。

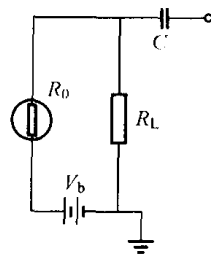


图 5-4 电阻型红外探测器的直流偏置电路

5) 探测器阻抗和电阻值。红外探测器按其电阻值高低可分为三类:阻值小于 100Ω 的为低阻探测器,必须与放大器作变压器耦合; $100\Omega \sim 1\text{M}\Omega$ 的为中阻探测器,与放大器最容易耦合;阻值在 $1\text{M}\Omega$ 以上

的为高阻探测器, 此时热噪声较大, 而且与其配合的放大器需要有高的输入阻抗。

6) 工作温度。对于许多红外探测器 (尤其半导体光子探测器), 无论是输出信号和噪声, 还是器件电阻值, 都决定于工作温度。因此选择探测器应注意探测器对工作温度的要求。

7) 其他参数。有些红外探测器对工作条件还有某些特殊要求。例如, 光子噪声为主要噪声的探测器对视场立体角和背景温度的要求, 非线性响应探测器对入射辐射功率值的要求, 以及存放探测器的温度限制、性能随时间的变化特性、制冷探测器的制冷源持续工作时间和整个探测器耐机械震动的特性等等。

(2) 红外探测器的主要性能参数。

1) 电压响应率 R_λ 。当 (经过调制的) 红外辐射照射到探测器的敏感元件上时, 探测器的输出电压与输入红外辐射功率之比, 叫做探测器的电压响应率, 记作 R_λ 。

$$R_\lambda = \frac{U_s}{P_0 A} \quad (5-11)$$

式中 U_s ——红外探测器的输出电压, V;

P_0 ——投射到红外敏感元件单位面积上的功率, W/cm²;

A ——红外探测器敏感元件的面积, cm²。

2) 响应波长范围。响应波长范围 (或称光谱响应), 是表示探测器的电压响应率与入射的红外辐射波长之间的关系, 如图 5-5 所示。热电探测器的电压响应率与波长无关, 它的响应曲线是平行于横坐标 (波长) 的直线, 如曲线 1 所示。而光子探测器的电压响应率是波长的函数, 如曲线 2 所示。一般将响应率最大值所对应的波长称为峰值波长 (λ_p), 而把响应率下降到响应值的一半所对应的波长称为截止波长 (λ_c), 它表示红外探测器使用的波长范围。

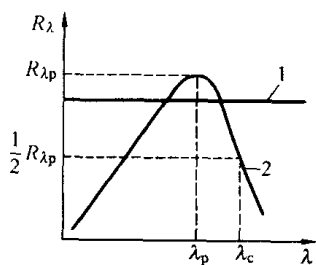


图 5-5 红外探测器的两种典型光谱响应曲线

3) 噪声等效功率 (NEP)。如果投射到红外探测器敏感元件上的辐射功率所产生的输出电压正好等于探测器本身的噪声电压, 则这个辐射功率就叫做噪声等效功率, 通常用符号 NEP 表示。

$$NEP = \frac{P_0 A}{U_s / U_N} = \frac{U_N}{R_\lambda} \quad (5-12)$$

式中 U_N ——红外探测器的综合噪声电压, V;

R_λ ——红外探测器的电压响应率, V/W。

噪声等效功率是信噪比为 1 的红外探测器探测到的最小辐射功率。其值愈小, 探测器所能探测到的辐射功率愈小, 探测器灵敏度愈高。

4) 探测率和比探测率。探测率是噪声等效功率的倒数, 即

$$D = \frac{1}{NEP} = \frac{R_\lambda}{U_N} \quad (5-13)$$

红外探测器的探测率越高, 表明探测器所能探测到的最小辐射功率越小, 探测器就越

灵敏。

比探测率又称归一化探测率，也叫探测灵敏度。经过分析，发现 NEP 都与探测元件的面积 A 的平方根成正比，与放大器带宽 Δf 的平方根成正比，因而 $\text{NEP}/\sqrt{A\Delta f}$ 就应当与 A 和 Δf 没有关系，其倒数称为比探测率，并记为 D^* ，即

$$D^* = \frac{1}{\text{NEP}} \cdot \sqrt{A\Delta f} = D \sqrt{A\Delta f} = \frac{R_\lambda}{U_N} \cdot \sqrt{A\Delta f} \quad (5-14)$$

由式 (5-14) 可以看出， D^* 实质上就是当探测器的敏感元件面积为单位面积，放大器的带宽为 1Hz 时，单位功率的辐射所获得的信噪比。在一般情况下， D^* 越高，探测器的灵敏度越高，性能就越好。

5) 时间常数。时间常数表示红外探测器的输出信号随射入红外辐射变化的速率。在一般情况下，当红外辐射突然照射或消失时，红外探测器的输出信号不会马上达到最大值或下降为零，而是要经过一段时间以后，才能达到最大值或降为零。把红外探测器的输出达到最终稳态的 63.2% 所需要的时间称为红外探测器的时间常数。时间常数 τ 也可由下式求出：

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (5-15)$$

式中 f_c ——幅频特性下降到最大值的 0.707 (3dB) 时的调制频率。

表 5-2 列出上海技术物理所研制的各种红外探测器的特性，表 5-3 列出了国外某些常用红外探测器的性能参数。

表 5-2 国产红外探测器的特性 (上海技术物理所研制)

探测器名称	工作模式	响应波段 $\Delta\lambda$ (μm)	峰值探测率 $D_{\lambda p}^*$ ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	响应时间 τ (s)	面积 A (mm^2)	阻值 R (Ω)	工作温度 T (K)	已经应用的设备
LATGS	热释电	1~38	$(3 \sim 10) \times 10^2$	10^{-2}	$\phi 1\text{mm}$	$\geq 10^{11}$	300	光谱仪
LiTaO ₂	热释电	2~25	$(4 \sim 5) \times 10^2$	$< 10^{-2}$	1.8×1.8	$> 10^{12}$	300	测温
锰-镍-钴氧化物	热敏 (浸没)	2~25	$(2 \sim 5) \times 10^2$	$(2 \sim 3) \times 10^{-2}$	有效 $\phi 4$ 以上	$(2 \sim 2.5) \times 10^5$	300	卫星、测温
PbS	光导	1~3	$(5 \sim 7) \times 10^{10}$	$(1 \sim 10) \times 10^{-4}$	0.1~10	$(1 \sim 5) \times 10^5$	300	测温
InSb	光伏	3~5	$(0.5 \sim 1.6) \times 10^{11}$	$< 10^{-5}$	0.3~30	$(1 \sim 10) \times 10^3$	77	跟踪、热像仪、航空扫描仪
HgCdTe	光伏	7~14	$(0.1 \sim 1) \times 10^{10}$	$< 5 \times 10^{-9}$	0.01~0.2	30~100	77	热像仪、多光谱扫描仪激光外差接收
HgCdTe	光导	8~14	$(0.5 \sim 1) \times 10^2$	$< 10^{-6}$	0.1~0.2	50~100	193	
HgCdTe	光导 (浸没)	2~5	$(0.5 \sim 1) \times 10^2$	$< 10^{-6}$	有效 $\phi 4$	300~1000	300	森林探火、瓦斯报警

续表

探测器名称	工作模式	响应波段 $\Delta\lambda$ (μm)	峰值探测率 $D_{\lambda p}^*$ ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	响应时间 τ (s)	面积 A (mm^2)	阻值 R (Ω)	工作温度 T (K)	已经应用的设备
HgCdTe	光导	2~5	$(2 \sim 5) \times 10^9$	$< 10^{-6}$	0.5	300~1000	253	测温、激光接收
PbSnTe	光伏	8~14	$(0.1 \sim 1) \times 10^{10}$	$< 10^{-8}$	0.3~1	20~50	77	热像仪
Ce:Hg	光导	6~14	$(2 \sim 4) \times 10^{10}$	$< 10^{-7}$	0.1~10	$(1 \sim 10) \times 10^5$	38	航空扫描仪、激光接收

表 5-3

国外某些常用红外探测器的性能参数

	探测器材料	工作模式	响应波段 $\Delta\lambda$ (μm)	峰值波长 λ_p (μm)	峰值探测率 $D_{\lambda p}^*$ ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	响应率 R	上升时间 τ (μmin)	工作温度 T (K)
热 电	高莱管	气动	0.4~1000	—	10^{10}	10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.02 (s)	300
	热敏电阻	热敏	0.1~300	—	2.5×10^3	10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	1.5×10^3	300
	钽酸锂	热释电	0.2~500	—	3×10^3	$10^4 \sim 10^6$ ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.01 (s)	300
	铌酸锶钡	热释电	2~20	—	$(1 \sim 5) \times 10^3$	3×10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	5×10^4	300
	碳酸三甘钛	热释电	0.1~300	—	10^3	3×10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	10^4	300
半 导 体	硫化铅	光导	1~3.5	2.4	8×10^{10}	1 ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	200	300
			1~4	2.4	2×10^{11}	5 ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	10^3	195
			1~4.5	3	2×10^{11}	1 ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	10^3	77
	硒化铅	光导	1~5	4	2×10^9	3×10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	<3	300
			1~6	4.5	2×10^{10}	6×10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	30	195
			1~7	5	1.5×10^{12}	9×10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	50	77
	铋化钢	光伏	1~6	5	$(1 \sim 3) \times 10^{11}$	$(1.5 \sim 2)$ ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.02~0.2	77
	碲锡铅	光伏	1~14	10	2×10^{10}	3 ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	1	77
锑 碲 汞	碲碲汞	光导	1~24	4~21	3×10^{10}	10 ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.05~0.5	77
	本征锗		0.5~1.6	1.5	10^{12}	7×10^2 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.02	243
	锗掺金	光导	1~10	5	10^{10}	10^4 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.01~0.1	77
	锗掺汞	光导	1~14.5	10	$(1 \sim 2) \times 10^{10}$	10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.01~0.1	5
	锗掺镉	光导	1~24	19	$(2 \sim 3) \times 10^{10}$	10^4 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.01~0.1	5
	锗掺铜	光导	1~31	12; 21	2×10^{10}	10^4 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.01~0.1	5
	锗掺锌	光导	1~41	39	$(1 \sim 2) \times 10^{10}$	10^3 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.01~0.1	5
	锗掺镓	光导	1~150	100	2×10^{10}	10^4 ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	<1	4
硅	本征硅	光伏	0.5~1.5	0.84	$(1 \sim 5) \times 10^{11}$	0.38 ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	<1	300
	硅掺锌	光导	1~3.3	2.5	10^{10}	0.04 ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	<1	112

3. 红外电荷耦合器件 (IRCCD)

CCD 是电荷转移器件 (CTD) 中的一类, 主要用于成像、存储和模拟延迟, 它是在金

属-氧化物-半导体 (MOS) 技术基础上发展起来的新型固体器件。它以少数载流子作为信息代表, 存储于 MOS 电容器的反型层中, 并通过电极下势阱进行传输。就基本原理而言, CCD 相当于一个模拟移位寄存器。

为了讨论 CCD 作为成像探测器的工作原理, 首先以最简单的三相器件为例说明 CCD 中的电荷存储与传输过程。如图 5-6 (a) 所示, 当在 P 型半导体为衬底的 MOS 结构中以一个正向偏压 V_1 加到金属电极 A 上时, 迫使空穴远离绝缘层表面, 产生耗尽区。如果有一个稍高的电压 V_2 加到电极 B, 该电压将产生更深的耗尽区, 这相当于形成了很深的少数载流子 (在此为电子) 的势阱或积累区。于是, 材料表面的电子浓度骤增, 直到导带迫近费米能级为止。因而, 在此局部出现半导体“反型”成 N 型区。这个势阱也就起到了暂时存储少数载流子 (电子) 的作用 [见图 5-6 (b)]。为使存储于势阱中的电荷定向传输, 可以加一个比 V_2 更高的电压 V_3 [见图 5-6 (c)]。当一个少数载流子的电荷包 (即由耗尽边限定的一群单元传输电荷) 事先存储到金属电极 B 的势阱中时, 如果相邻电极加上电压 V_3 , 则电荷包将移动到更深的势阱 (比如电极 C 之下)。一旦完成这个转移过程, 电极 C 上的电压就降到 V_2 的电平, 电极 B 上的电压降到 V_1 的电平 [见图 5-6 (c)]。为了把电荷再传输到下一个相邻势阱中去, 只需要把 V_3 加到下一个电极上去。此时, 少数载流子将离开电极 C 下的区域。依此类推, 加到任何电极上的电压都从 V_1 上升到 V_2 、 V_3 , 再降到 V_1 , 电荷包就沿着这些电极排列成的链相继移动。在三相器件中三个电极为一组, 作为一个存储单元, 两边的电极起隔离作用。因此, 三相移位寄存器中每隔两个的电极都

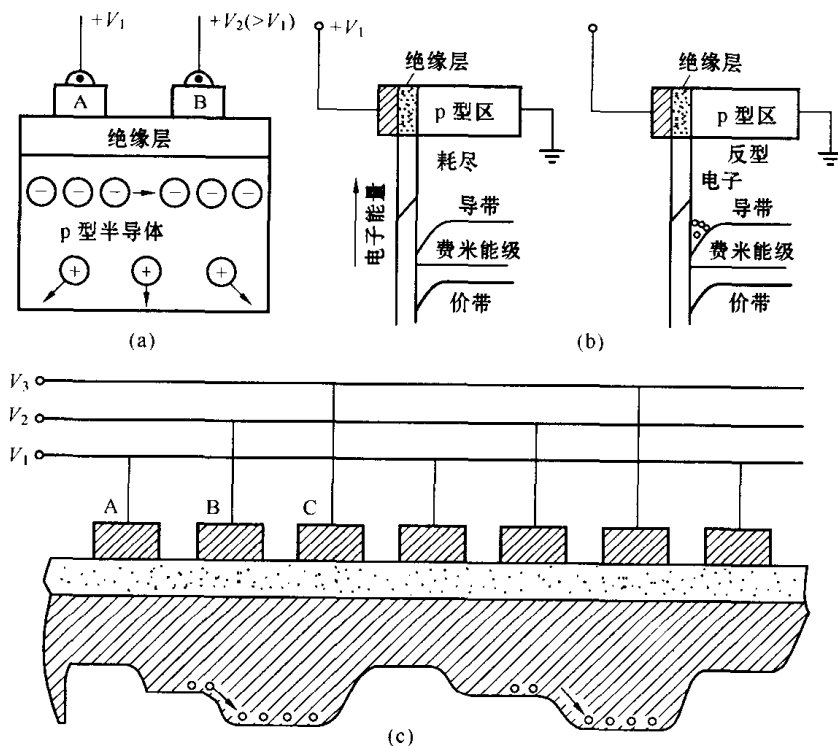


图 5-6 CCD 中的电荷存储与传输

(a) 电荷存储; (b) 能带结构和反型; (c) 电荷传输

是并联的。这种按一定规律加在电极上的脉冲电压，称为时钟电压。

如果在上述 MOS 结构中的衬底材料不是 P 型半导体而是 N 型半导体，那么，加在电极上的电压应该是负偏压，但是其量值仍然是 $V_1 < V_2 < V_3$ 。此时，在半导体表面处存在的是空穴势阱，因此，存储和传输的少数载流子电荷包，就应该是空穴群了。

显然，如果电荷包代表某种信息，则往势阱注入电荷，再使这些电荷沿着器件传输，并在某一部位测量出它们的量值，连续探测半导体中传出的电荷包，将可以实现多种功能。例如，当把聚焦的被测对象红外辐射投射到 CCD 列阵表面上时，由于吸收入射光子而产生电子—空穴对（相当于把电荷引入器件），并在每个存储电极下面的电势影响下，电荷聚集成电荷包。这些存储起来的电荷数量正比于被测对象的强度（即辐照度分布）。因此，与一被测对象辐射分布相对应的空间电荷代表物，就在器件中存储起来。当在电极上施加时钟电压时，这些电荷包就在器件中传输，每一个运动着的电荷包接连不断地从一个存储组移向另一个存储组，直至所有电荷都到达输出二极管为止。

电荷耦合概念的形成，促进了固体成像技术的发展。作为固体成像器件或图像传感器而言，虽然 CCD 也与其他电子图像传感器一样是把光子转换成电荷，但是，由于 CCD 具有自扫描特性，不需要像电子束扫描的复杂而又消耗功率的装置，所以，CCD 不同于其他摄像管。此外，CCD 还有封装密度高、速度快、多功能、相对成本低和简单可靠等优点，因此，在红外热成像等许多领域中都有广泛的应用。

三、红外检测中基本应用电路

红外线发光与受光电路如图 5-7 所示。电路中用红外发光二极管 LED 产生脉冲光信号，不受周围干扰光信号的影响。受光元件采用对很多波长都灵敏的光电二极管 S2386，可以接收范围较宽的波长的光信号。主要用于光远控、光电断路器等，受光元件也可以用作可见光传感器。电路中振荡器采用 555，其振荡频率

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

图 5-8 所示电路主要用于红外分光光度计、气体分析仪、红外水分仪、辐射温度计等的输入电路，其作用是将输入的红外线信号转换为放大的电信号输出。

PdS 元件响应特性较差，用于中间波长红外线的检测。然而 PdS 元件类似电阻，因

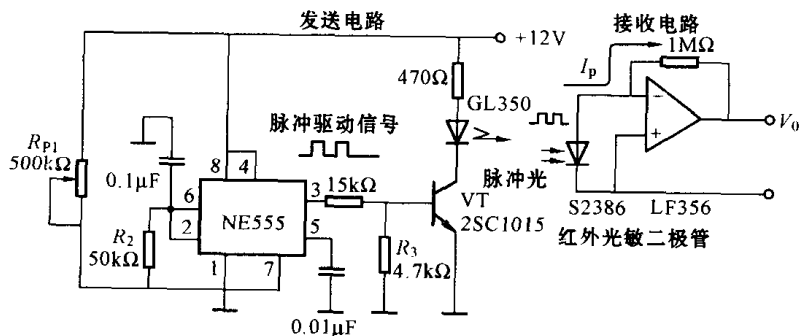


图 5-7 红外线发光与受光电路

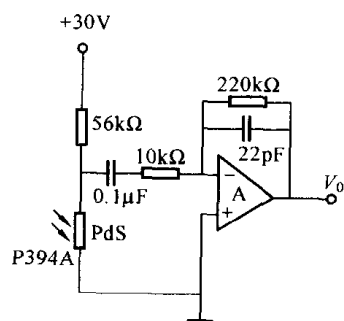


图 5-8 采用 PdS 元件的电路

此, 电路结构非常简单。

第三节 红外温度检测

一、红外测温的基本原理

红外测温是基于热辐射定律, 通过测量物体发射的红外辐射能量来测量物体的温度。如由斯忒藩-玻尔兹曼定律可知, 物体的温度愈高, 辐射功率就愈大。只要知道物体的温度和它的发射率, 就可算出它所发射的辐射功率; 反之, 如果测出物体所发射的辐射功率, 就可利用斯忒藩-玻尔兹曼定律确定它的温度。

红外测温一般有下面三种方法:

(1) 亮度测温。亮度测温是通过测量目标在某一波段的辐射亮度来获得目标的温度。按这种方法工作的测温仪表称为亮度测温仪, 它所测出的温度是目标的亮度温度。这种测温仪通常使用限定入射辐射波长的滤光片来选择接收特定波长范围内的目标辐射。但是, 为了在测量较低温度时能够获得足够的辐射能量, 往往选用较宽的辐射波段。亮度测温仪的特点是结构简单、使用方便、灵敏度较高, 而且能够抑制某些干扰, 因此在高温或低温范围内部有较好的使用效果。但是, 这种测温仪测出的亮度温度与目标的真实温度 T 有一定的偏差。

(2) 全辐射测温。全辐射测温是通过测量物体发出的全辐射能量 ($\lambda = 0 \sim \infty$) 来测量物体的温度。按这种方法工作的测温仪表称为全辐射测温仪, 它所测出的是目标的辐射温度, 在数学上它完全遵从斯忒藩-玻耳兹曼定律的四次方关系。实际的全辐射测温仪, 并非要求真正测量全部波长的辐射能量, 这样可以简化测温仪的结构, 使用更加方便。全辐射测温仪的灵敏度较低, 用这种测温仪测量得到的目标辐射温度与其真实温度 T 之间有较大偏差。

(3) 比色测温。所谓比色测温, 就是利用两组 (或多组) 带宽很窄的不同单色滤光片, 收集两个 (或多个) 相近波段内的辐射能量, 转换成电信号后在电路上进行比较, 由此比值确定目标温度。按这种方法工作的测温仪表称为比色测温仪, 它所测出的是目标的比色温度。比色测温仪的特点是灵敏度较高, 测出的比色温度与目标真实温度 T 偏差较小, 在中高温度范围内使用效果较好, 抗干扰能力强。缺点是结构较为复杂, 价格比较昂贵。

由于光纤技术的发展, 利用光纤的传光特性, 在红外测温仪中加入了光纤, 制成红外光纤比色测温仪、红外光纤单色测温仪, 这类测温仪特别适用于恶劣环境中难以接近的及测量通道弯曲、狭小、受阻的目标温度的测量。

使用上面三种方法测温时, 红外测温仪的测温显示都是用黑体辐射进行标定的。由于任何实际物体的辐射都不同于黑体辐射, 故所测的温度都不等于物体的真实温度 T 。考虑到各种物体的光谱发射率或发射率都各有不同, 为了尽可能减小测量结果与目标真实温度之间的偏差, 必须在测温仪的信号处理系统中增设发射率修正电路。

二、红外测温的特点

红外测温是比较先进的测温方法，其特点如下：

(1) 可远距离和非接触测温，不影响被测目标的温度分布，测温准确度高。红外测温特别适合于带电体、高压及高温物体的温度测量。

(2) 反应速度快。红外测温不需要与物体达到热平衡的过程，只要接收到目标的红外辐射即可测量目标的温度，因此可对高速运动目标测温。被测目标表面温度稍有变化，红外测温仪表就能立即反映出来。

(3) 灵敏度高。因为物体的辐射能量与温度的四次方成正比，物体温度的微小变化，就会引起辐射能量较大的变化，只要目标有微小的温度差异就能分辨出来。

(4) 测温范围广。可测量摄氏零下几十度到零上几千度的温度，几乎可以使用在所有的温度测量场合。

三、红外测温仪

1. 红外测温仪的工作原理和基本结构

红外测温仪是红外辐射测温仪的简称，也称红外温度计。它是利用被测目标的红外辐射能量与温度成一定函数关系的原理制成的仪器。工作时，首先把物体发射的红外辐射能量收集起来转换成电信号。然后，对电信号进行放大、处理，并利用物体温度与其辐射功率大小（目前都表现为信号电压高低）的一一对应关系，显示出物体温度的测量结果。因此，任何红外测温仪的基本结构，都必须包括光学系统、红外探测器、电信号放大及处理系统、结果显示系统和其他附属部分（包括目标瞄准器、供电电源与整体机械结构）等几个主要功能部分。

(1) 光学系统。红外测温仪的光学系统首要功能是收集被测目标发射的红外辐射能量，并且把它汇聚在红外探测器的光敏面上。为了尽可能多地接收目标辐射量，增加探测器光敏面上的照度，要求光学系统有较大的相对光学孔径（ D/F ）。其 D 为光学系统的通光孔径， F 为光学系统焦距。光学系统的另一个作用是限定测温仪视场，遮挡非被测目标的辐射入射到探测器上。红外测温仪的一个重要参数是距离系数，它被定义为测量距离 L 与限制在视场范围内与视场光轴垂直的目标线度 d 之比（如图 5-9 所示），距离系数与视场角 θ 成反比，它取决于红外测温仪的光学系统。

红外测温仪的光学系统还有限定接收目标辐射的光谱范围的作用。这种测温仪的光学系统需要配有适当的滤光片，根据需要可以分别选用截止滤光片、带通滤光片、窄带滤光片或双色滤光片等。也有的直接做在光学系统的场镜或探测器窗口上。

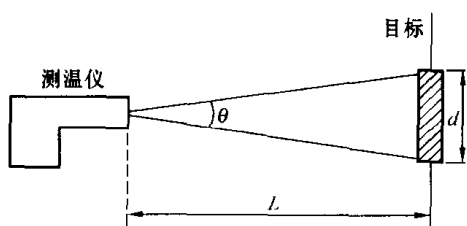


图 5-9 红外测温仪的距离系数与视场

片或双色滤光片等。也有的直接做在光学系统的场镜或探测器窗口上。

为了便于把测温仪对准被测的目标部位，红外测温仪中应配有可见光瞄准光路或激光瞄准装置，以便构成瞄准器。

(2) 红外探测器。红外探测器是红外测温仪所

必备的心脏部分,它完成把接收到的目标红外辐射能量转换成输出电信号的功能。

(3) 电信号处理系统。红外测温仪信号处理系统一般完成如下功能:

- 1) 放大探测器输出的微弱电信号;
- 2) 抑制非目标辐射的干扰噪声和系统噪声;
- 3) 线性化输出处理;
- 4) 目标表面发射率修正;
- 5) 环境温度补偿;
- 6) 供计算机处理的模拟信号、A/D 和 D/A 转换;
- 7) 向温度显示系统提供输出信号和配套装置要求的其他特殊信号处理机构等。

(4) 显示系统。红外测温仪的显示系统功能在于显示目标温度的测量结果。目前多采用发光二极管、数码管或液晶等进行数字显示。为了便于应用,有的红外测温仪显示系统还配有记录仪或输出打印装置。

2. 红外测温仪的分类

从不同的角度,可把红外测温仪分成不同类型。按测温范围,可分为高温测温仪(测量 900℃ 以上的温度)、中温测温仪(测量 300 ~ 900℃ 的温度)和低温测温仪(测量 300℃ 以下的温度)。按测温仪结构型式,又可分为便携式、台式、光纤式和前置式红外测温仪。按测温仪的不同设计原理和所能测量的不同目标温度,又可把红外测温仪分为全辐射测温仪、亮度测温仪和比色测温仪三大类。下面介绍亮度测温仪和比色测温仪的基本情况。

(1) 亮度测温仪。

1) 亮度测温仪的工作原理。高温物体会发光,不同温度的物体发出的光的亮度是不同的。物体的光谱辐射亮度 L_λ 与物体的光谱辐射出射度 M_λ 之间的关系是

$$L_\lambda = cM_\lambda = C\epsilon_\lambda M_{0\lambda}$$

式中 C ——比例常数 ($1/\pi$);

ϵ_λ ——物体的光谱发射率;

$M_{0\lambda}$ ——全辐射体的光谱辐射出射度。

由普朗克定律可知,物体的光谱辐射出射度 $M_{0\lambda}$ 与物体的温度 T 之间的关系是

$$M_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}$$

式中 λ ——波长 (m);

T ——物体的温度;

C_1 ——普朗克第一辐射常数, $C_1 = 3.7413 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$;

C_2 ——普朗克第二辐射常数, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

由此可见物体的温度 T 和物体的光谱辐射亮度 L_λ 之间有对应的关系,通过测量物体的光谱辐射亮度 L_λ 并处理后就可以得到物体的温度 T 。

2) 亮度测温仪结构原理。红外测温仪的工作原理框图如图 5-10 所示。工作时,被测目标的红外辐射能量经仪器透镜会聚,并通过红外滤光片进入探测器。探测器将辐射能转换成电信号,经放大器放大、电子电路处理,最终由液晶显示器显示出被测物体的表面温

度。

图 5-10 给出了信号传递、接收、处理、显示的过程,光学系统的作用是收集辐射能量并将其会聚到红外探测器上,它的测量准确性决定于距离系数。具有目视瞄准系统的测温仪还有一个 45°反射分光镜,它把红外辐射反射到探测器上,把可见光透射到分划板上。分划板上刻有一个圆环,圆环的面积等于探测器光阑孔的面积,分划板后有一套目视透镜组。使用者通过目视透镜组观察被测物在分划板上所成的图像,以便确定对被测物体的瞄准情况和目标是否已经充满小环。

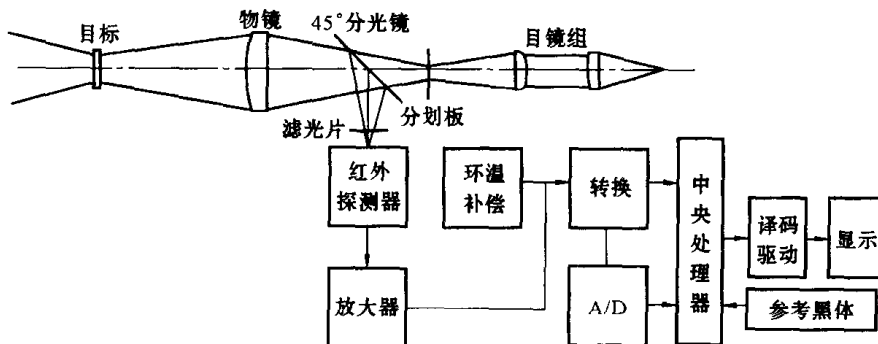


图 5-10 红外测温仪工作原理示意图

(2) 比色测温仪。

1) 比色测温仪的工作原理。比色测温仪是根据维恩偏移定律工作的温度计。由维恩偏移定律可知,当温度变化时物体的最大辐射出射度向波长增加或减小的方向移动,使在波长 λ_1 和 λ_2 下的光谱辐射亮度比发生变化,测量光谱辐射亮度比的变化即可测得相应的温度。对于全辐射体(黑体),由维恩公式可得

$$L_{0\lambda_1 T_s} = C \cdot C_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T_s}} \quad (5-16)$$

$$L_{0\lambda_2 T_s} = C \cdot C_1 \cdot \lambda_2^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T_s}} \quad (5-17)$$

式中 $L_{0\lambda_1 T_s}$ 、 $L_{0\lambda_2 T_s}$ ——波长 λ_1 、 λ_2 的单色亮度,由单色辐射出射度乘以一常数 C 得到。

两式相除后取对数,整理后得

$$T_s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{L_{0\lambda_1 T_s}}{L_{0\lambda_2 T_s}} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (5-18)$$

式(5-18)的 λ_1 和 λ_2 是预先确定的值,只要知道在此两波长下的亮度比,就可测得被测全辐射体的温度 T_s 。

对于温度为 T 的实际物体,有

$$L_{\lambda_1 T} = CC_1 \epsilon_{\lambda_1} \lambda_1^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T}} \quad (5-19)$$

$$L_{\lambda_2 T} = CC_1 \epsilon_{\lambda_2} \lambda_2^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T}} \quad (5-20)$$

两式联立得

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{L_{\lambda_1 T}}{L_{\lambda_2 T}} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \frac{\epsilon_{\lambda_2}}{\epsilon_{\lambda_1}}} \quad (5-21)$$

式中 ϵ_{λ_1} 、 ϵ_{λ_2} ——实际物体在波长 λ_1 、 λ_2 时的光谱发射率。

由式 (5-21) 可见, 在 λ_1 、 λ_2 和 $\frac{\epsilon_{\lambda_2}}{\epsilon_{\lambda_1}}$ 确定的情况下, 测得物体在上述两波长下的亮度比就可以求出它的实际温度。

同一物体的 ϵ_{λ_1} 和 ϵ_{λ_2} 的比值变化比较小, 因此物体的光谱出射度变化对比色测温的影响较小。另外, 中间介质对波长 λ_1 和 λ_2 的辐射都有吸收, 对其比值的影响也较小。所以, 比色测温法具有较高的准确度。

现在介绍一种从比色测温法发展而来的三色红外温度计。波长为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的辐射通量分别为 M_{λ_1} 、 M_{λ_2} 、 M_{λ_3} , 它们任何两者的比值都随温度变化而不同。对全辐射体而言, 用维恩公式可得

$$\frac{M_{0\lambda_1}}{M_{0\lambda_3}} = \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1} \right)^5 \cdot e^{\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}$$

$$\frac{M_{0\lambda_2}}{M_{0\lambda_3}} = \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right)^5 \cdot e^{\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

令

$$R_E = \frac{M_{0\lambda_1} \cdot M_{0\lambda_2}}{M_{0\lambda_3}^2}$$

则有

$$R_E = \left(\frac{\lambda_3^2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \right)^5 \cdot e^{\frac{C_2}{T} \left(\frac{2}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}$$

可得

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{2}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln R_E - 5 \ln \frac{\lambda_3^2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2}} \quad (5-22)$$

对于实际物体, 可以推出

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{2}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln R_E - 5 \ln \frac{\lambda_3^2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} + \ln \frac{\epsilon_{\lambda_3}^2}{\epsilon_{\lambda_1} \cdot \epsilon_{\lambda_2}}} \quad (5-23)$$

材料对光辐射波的辐射率 ϵ_λ 可以表示为

$$\epsilon_\lambda = 1 - \frac{(n-1)^2 + n^2}{(n+1)^2 + n^2} = \frac{4n}{2n^2 + 2n + 1} \quad (5-24)$$

式中 n ——材料对光的折射率。

金属材料的折射率与它的导磁率、电阻率、光波速度和波长有关, 因此

$$n = \sqrt{\frac{\lambda_0 \mu_0 C_0}{4\pi \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{30 \cdot \lambda_0}{\rho}} \quad (5-25)$$

式中 μ ——材料的导磁率, 除铁磁材料外, $\mu = \mu_0 = 12.57 \times 10^{-7} \text{mH} \cdot \text{m}^{-1}$;

λ_0 ——温度计的工作波长;

C_0 ——真空中的光速, $C_0 = 3 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

ρ ——金属的电阻率, $\rho = 10^{-2} \sim 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ 。

将式 (5-24) 展开成劳伦级数得

$$\begin{aligned} \epsilon_\lambda &= \frac{2}{i} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \left[\left(\frac{1-i}{2n} \right)^k - \left(\frac{1+i}{2n} \right)^k \right] \\ &= \frac{2}{n} - \frac{2}{n^2} + \frac{1}{n^3} - \dots \end{aligned}$$

取级数第一项, 并把式 (5-25) 代入后可得

$$\epsilon_\lambda = \frac{2}{n} = \frac{2}{\sqrt{30\lambda_0/\rho}} = 2A \cdot \lambda_0^{-\frac{1}{2}} \quad (5-26)$$

这就是 Hagen-Rubens 方程。当被测材料一定时, 其电阻率 ρ 是确定的, 有

$$A = (\rho/30)^{\frac{1}{2}} = \text{常数}$$

因为单色辐射率只与波长有关, 则有

$$\frac{\epsilon_{\lambda_1} \cdot \epsilon_{\lambda_2}}{\epsilon_{\lambda_3}^2} = \frac{\lambda_1^{-\frac{1}{2}} \cdot \lambda_2^{-\frac{1}{2}}}{\lambda_3^{-1}} = \frac{\lambda_3}{\sqrt{\lambda_1 \cdot \lambda_2}} \quad (5-27)$$

只要选定 λ_1 、 λ_2 , 按 $\lambda_3 = \sqrt{\lambda_1 \cdot \lambda_2}$ 的规则选定 λ_3 , 即可使 $\frac{\epsilon_{\lambda_1} \cdot \epsilon_{\lambda_2}}{\epsilon_{\lambda_3}^2} = 1$, 由式 (5-23) 可

以看出, 温度将与材料的光谱发射率无关。

以上是在假定被测材料是光学平滑表面并具有各向同性、温度计工作在红外波长波段、被测物体既不是铁磁材料也不是电介质的情况下才适用。

2) 红外三色温度计结构原理。HDW-1 型红外三色温度计原理结构如图 5-11 所示。来自被测对象的辐射能, 经温度计的光学系统与调制系统中的三块波长为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的干涉滤光片, 将光束调制成三路波长不同的交变光信号投射到探测器上, 产生的电脉冲信号经整形、放大和检波后, 得到与 A/D 转换器匹配的直流信号 (例如 0~5V)。把调制系统产生的, 对应于 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的同步信号 1、2、3 送入单片机, 由它按预先编制的程序启

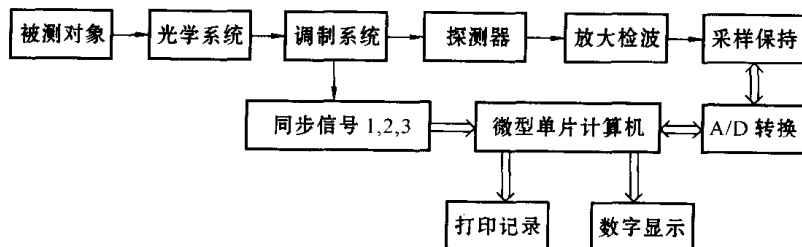


图 5-11 红外三色温度计原理框图



动采样保持器,自动采集和保持对应于 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的三个电流信号,等待进行A/D转换;经A/D转换后的三个数字信号送入计算机,按式(5-23)编制好的程序自动进行运算处理,并将计算结果送数字显示表指示出测量的温度,必要时也可同时送入打印机自动打印记录下来。

HDW-1型红外三色温度计的测温范围为 $800 \sim 1200^\circ\text{C}$,在 1100°C 处的不确定度为 7°C ,响应时间小于等于 15s ,测量距离大于 1m ,使用环境温度为 $5 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

红外三色温度计用于测量金属表面温度能有效地消除 ϵ_λ 的影响。三个波长选得较近,误差较小;选得间隔较大,虽对提高仪表灵敏度有利,但测量精度受到影响。

3. 红外测温仪的选择原则

(1) 确定测温范围。测温范围是红外测温仪能够测量的温度下限和上限的这段区间,它是测温仪最重要的一个性能指标。红外测温仪的测温范围很宽,但不能由一种型号的红外测温仪来完成所有温度范围的测量。每种型号的测温仪都有自己特定的测温范围。因此,对所测的温度范围一定要考虑准确、周全,既不要过窄,又不要过宽。一般来说,测温范围窄,监控温度的输出信号分辨率高,精度可靠性容易解决。测温范围过宽,会降低测温精度。在允许的情况下最好不要选择过宽的测温范围,这样会增加成本和误差。

(2) 确定目标尺寸。对目标尺寸的确定也非常重要,否则测量会产生误差。一般亮度测温仪在进行测温时,被测目标面积应充满测温仪的视场。建议被测目标尺寸超过视场50%为好。如果目标尺寸小于视场,背景辐射就会进入测温仪的视场,使光学系统汇聚的红外辐射能量发生偏差,造成误差。比色测温仪的温度是由两个独立的波长带内辐射能量的比值来确定的,因此当被测目标很小,不充满视场,测量通路上存在烟雾、尘埃、阻挡,对辐射能量有衰减时,都不对测量结果产生重大影响。对于细小而又处于运动或振动之中的目标,比色测温仪是最佳选择。如果存在测量通道弯曲、狭小、受阻等情况,测温仪和目标之间不可能直接瞄准,则比色光纤测温仪是最佳选择。这是由于光纤直径小,有柔性,可以在弯曲、阻挡和折叠的通道上传输光辐射能量。

(3) 确定距离系数(光学分辨率)。距离系数由测温仪探头到目标之间的距离 L 与被测目标直径 d 之比决定,距离系数越大,允许被测目标越小。不同的测温仪的距离系数可从低距离系数(如 $2:1$)到高距离系数(高于 $300:1$)不等。如果测温仪远离目标,而目标又小,就应选择高距离系数的测温仪。对于单波段测温仪,目标必须大于通过距离系数计算出的尺寸,至少应是计算值的1.5倍。可调焦距测温仪的距离系数用数字表示,如50、100、150、300等。使用时应注意允许的测量距离或调焦范围,通常最近的距离有一定限制。

(4) 确定波长范围。工作波长是红外测温仪根据测温范围所选择的红外辐射波段。选择正确的工作波段区域至关重要,同时被测物体必须在工作波长区域有较高的辐射率、较低的透射率和反射率。

目标材料的发射率和表面特性决定测温仪的光谱响应或波长。在高温区,测量金属材料的最佳波长是近红外,可选用 $0.8 \sim 1.0\mu\text{m}$ 。其他温区可选用 $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 和 $3.9\mu\text{m}$ 。由于一些材料在一定波长上是透明的,因而对这些材料应选择特殊的波长。如测量玻璃内



部温度选用 $1.0\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 和 $3.9\mu\text{m}$ (被测玻璃要很厚, 否则会透过); 测玻璃表面温度选用 $5.0\mu\text{m}$ 。另外, 测低温区选用 $8\sim 14\mu\text{m}$ 为宜。如测量聚乙烯塑料薄膜选用 $3.43\mu\text{m}$, 聚酯类选用 $4.3\mu\text{m}$ 或 $7.9\mu\text{m}$, 厚度超过 0.4mm 的选用 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。测火焰中的 CO_2 用窄带 $4.24\sim 4.3\mu\text{m}$, 测火焰中的 CO 用窄带 $4.64\mu\text{m}$, 测火焰中的 NO_2 用 $4.47\mu\text{m}$ 。

(5) 确定响应时间。响应时间是指被测目标突然进入并充满视场后到温度显示值稳定后的时间, 它与光电探测器、信号处理电路及显示系统的时间常数有关。各生产厂家对这项指标的规定不同, 有的规定为达到稳定值的 99% 的时间, 也有的规定为 95%、90% 或 63.2%, 使用者应注意这一点。确定响应时间, 主要根据目标的运动速度和目标的温度变化速度。对于温度变化快的固定目标, 如果变化速度是每秒 5°C , 要识别的温差为 1°C , 那么每变化 1°C 的时间是 0.2s 。测温仪的响应时间为 0.2s 的二分之一, 即 0.1s 。对于过快的变化速度, 仪器指标不能满足时, 测得的是平均温度。对于多数用户来说, 这种测量结果是允许的。过快的响应速度会引起显示温度的变化过快, 现场操作人员反而不能读出温度值。当测量静止的目标或目标存在热惯性、或现有控制设备的速度受到限制时, 对测温仪的响应时间就可以放宽要求。

(6) 信号处理功能。考虑到离散过程 (如零件生产) 和连续过程不同, 要求红外测温仪应具有多信号处理功能 (如峰值保持、谷值保持、平均值) 可供选用。

(7) 环境条件考虑。测温仪所处的环境条件对测量结果有很大影响, 应对其予以考虑并适当解决, 否则会影响测温精度甚至损坏测温仪。当环境温度高, 存在灰尘、烟雾和蒸汽时, 比色测温仪是最佳选择。在存在噪声、电磁场、振动和难以接近的环境条件下, 或其他恶劣条件时, 宜选光纤比色测温仪。当测温仪工作环境中存在易燃气体时, 可选用本征安全型红外测温仪, 从而在一定浓度的易燃气体环境中进行安全测量和监视。

4. 红外测温仪的应用

(1) 在电力系统中的应用。在电力系统中主要使用便携式红外测温仪测量高压隔离开关接头和触头的温度、高压线夹的温度、设备引流接点的温度等。传统蜡片测温不方便、不准确, 有时也不安全。高压线夹测温要求测温仪具有 300 到 500 的距离系数。

(2) 在钢铁生产过程中的应用。在板坯、方坯连铸过程中, 可安装红外测温仪测量铸坯表面的温度。由于环境恶劣, 现场多灰尘、烟雾和蒸汽, 影响温度的精确测量, 可选用比色测温仪或光纤比色测温仪。当带卷开卷后进入精轧机进行轧制时, 操作人员根据钢材的温度设置轧机参数, 为了精确测量以 $20\sim 30\text{m/s}$ 速度移动的钢材温度, 可使用低温快速响应红外测温仪测量其温度。在线、棒材的轧制过程中, 线、棒材处于高速振动之中, 在测温仪视场内, 目标时常偏离, 甚至移出视场, 且存在灰尘、蒸汽等, 在这种情况下选用比色测温仪为宜。

钢材进入矫直机前需要加热, 但温度不能超过 100°C , 否则会损伤矫直机的压延轴。为此, 选用两台测温仪, 探头装在距钢材 2m 高的位置上, 测温仪 $4\sim 20\text{mA}$ 信号输入微处理器, 在大屏幕显示的同时, 测温信号控制矫直机流程, 当钢材温度等于或大于 100°C 时, 发出报警, 机械装置将超温钢材剔出, 从而有效地保护贵重设备, 避免停机事故。

(3) 在交通运输中的应用。交通运输中应用红外测温仪最广泛的是火车温度报警系统。这些测温仪安装在铁路两侧，它们都具有良好的防尘、防雨、防雪、防风沙、防日晒和抗震性能。这个系统还配备大量便携式低温测温仪，以便对报警的轴温人工探测。在火车和轮船运行过程中，可以用便携式测温仪测量发动机的温升情况，以便及时发现故障。在飞机发动机涡轮叶片、汽车齿轮箱、联轴器、刹车片、气缸活塞环等的实验室检验工作中也都有专门的红外辐射测温仪。

(4) 监控轴承外圈感应加热温度。轴承是一种高精密机械，产品质量至关重要，每道工序都有严格的质量检验规定。以往，对轴承外圈进行冲压弯边时，因其硬度较高，极易在弯边部分出现裂纹，合格率仅在 40% 左右。为提高合格率，可采用感应加热，但由于无法精确掌握温度数值，加工质量仍不稳定。另外，由于轴承外圈弯边部位仅为 0.07mm 厚、2mm 高，目标较小，加热时间只能在 2s 内完成，而且零件在高速旋转，加热时还有烟雾，测温难度很大。根据目标小、响应速度要求快的特点，选用比色红外测温仪，成功地解决了上述难题，使用效果很好。为了进一步提高工作效率和经济效益，还可以将测温仪和感应加热设备相连接，实现感应加热的自动控制。

(5) 在国防科研和生产中红外辐射测温更是重要的检测手段，如火箭和飞机尾喷管的温度，核燃料生产和废料处理的温度，弹药混合研磨的温度，枪炮发射身的温度，火箭、飞机、舰船、车辆蒙皮的温度，弹药爆炸温度等，它们都需要使用性能独特的专用测温仪和通用测温仪。

红外测温仪还在其他多种行业，如纺织、制药等都有广泛的应用。表 5-4 给出了美国 RAYTEK 公司生产的红外测温仪的主要性能。

表 5-4 美国 RAYTEK 公司的红外测温仪

产品名称		温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	距离系数	最小目标 (直径) (mm)	响应时间 (ms)
便 携 式	ST 系列	-20 ~ 500	8 : 1	20	500
	PM 系列	-18 ~ 870	50 : 1	21	350
		-30 ~ 1200	75 : 1	8	700
		-30 ~ 1200	120 : 1	23	600
	31 系列	200 ~ 1800	90 : 1	23	550
		600 ~ 3000	180 : 1	7	550
	IP 系列	-18 ~ 260	4 : 1	2.5	1000
固 定 式	IT 系列	-18 ~ 538	13 : 1	8	800
	ET 系列	0 ~ 800	50 : 1	23	100
		260 ~ 1650			
		500 ~ 1700	35 : 1	6	80
	TX 系列	-18 ~ 500			
		200 ~ 1000	60 : 1	2.5	165
		250 ~ 1650	60 : 1	2.5	165
		500 ~ 2000	60 : 1	1.3	165

续表

产品名称		温度范围 (℃)	距离系数	最小目标 (直径) (mm)	响应时间 (ms)
固 定 式	T 系列	0 ~ 800	33 : 1	2.5	367
		200 ~ 1200			
		400 ~ 3000	90 : 1	2.0	367
		500 ~ 3000	192 : 1	0.95	88
	CI 系列	0 ~ 350	5 : 1	4	450
		30 ~ 500			
	MI 系列	0 ~ 500	4 : 1	5	120

四、红外热电视

红外热电视是用电子束扫描成像的一种标准电视制式红外成像装置。1965 年法国南锡大学 Hadni 教授提出热释电摄像管理论，20 世纪 70 年代国外开始研制出各种红外热电视系统，80 年代初，国内也开始研制出类似装置。

1. 红外热电视工作原理与结构

红外热电视是红外技术与工业电视技术相结合的产物。工业电视是用电的方法在特定范围内传递光图像的装置，它主要由摄像机、传输电缆、监视器和控制器等四个主要部分构成。其中，摄像机的基本功能是将可见光图像转变为电视信号，并通过电缆传输到监视器。作为工业电视接收机的监视器把电视信号重新转变为光图像显示在荧光屏上。控制器则是产生各种脉冲信号及供电电源的附加装置。红外热电视中除了摄像机以外，传输电缆、监视器和控制器等均可选用工业电视已有的定型产品替代。当前，用于故障诊断的实用型红外热电视，在图像显示和处理方面也有了很大的进步，这是不同于普通工业电视之处。

红外热电视是根据热释电效应通过热释电摄像管（PEV）接收被测目标物体的表面红外辐射，并把目标表面热辐射分布的不可见热图像转变成视频信号的装置。因此，热释电摄像管是红外热电视的关键器件，它是一种实时成像、宽谱成像（对 3 ~ 5 μm 及 8 ~ 14 μm 有较好的频率响应）、具有中等分辨率的成像器件，主要由透镜、靶面和电子枪三部分组成，热释电摄像管的结构简图如图 5-12 所示。

透镜是红外热电视的“窗口”，红外辐射通过“窗口”被吸收，“窗口”材料选用只有 3 ~ 5 μm 及 8 ~ 14 μm 两个电磁波长区间的红外辐射才能透过的晶体材料 [如单晶锗 (Ge) 或硅 (Si)] 制成镜头。

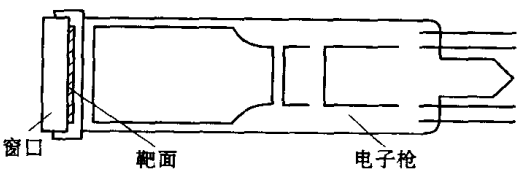


图 5-12 热释电红外摄像管结构简图

靶面是热释电摄像管对通过透镜的红外辐射进行热—电转换的部分。靶面材料选用一种具有自发性电极化现象的热释电材料，如硫酸三甘肽 (TGS)、钽酸锂 (LTAO)。这类材料由于温升而产生热释电效应，并在其表面上出现

与红外辐射能量分布成比例的电荷变化。这些电荷被 PEV 内的扫描电子束拾取,从而形成与目标红外辐射图像相应的电视信号电流。PEV 产生的信号电流很小,一般只有几个 nA,大大低于普通电视摄像管产生的靶面数百毫安的信号电流,因此对被测目标红外辐射探测时必须用高增益低噪声的特制预放大器进行信号放大处理。

热释电管正常工作时必须满足热释电管各电极所需的电压及偏转聚焦组件所需的电流。此外,在同步与消隐脉冲发生器的作用下,扫描电路给偏转聚焦组件提供行、场扫描电流使其产生水平与垂直的偏转磁场,推动 PEV 内电子束在靶面上收集电荷信号的扫描,这种扫描和一般普通电视摄像时电子束在光电靶面上的扫描规律一样,即进行水平方向的行扫描和垂直方向的场扫描,扫描的制式也是我国标准的电视制式,每秒 50 场,每帧 625 行。

PEV 靶面形成的视频信号由预放大器放大后,经视频处理电路加工处理,最后在视频输出电路内混入同步信号,形成全电视信号输出。这个全电视信号与普通摄像机输出的信号完全一样,可使用一般监视器显示出被测目标的热图像。由屏幕显示被测目标的红外热像,图像中白的部分温度较高,暗的部分温度较低,根据图像灰度的变化来判断目标表面温度的分布情况。

2. 红外热电视的调制方式

红外热电视的热释电管靶面只有在红外热幅射不断变化时才有信号输出,且信号电流的大小与目标温度的变化率成正比,否则就不能建立热像或对准目标不动时热像很快消失。所以红外热电视要进行调制才能达到建立图像的基本要求。

红外热电视的调制方式目前主要有平移调制、斩波调制、瞬变调制等几种。

(1) 平移调制。平移调制的工作方式是将被测目标与仪器之间作相对运动以改变热释电管靶面接收目标温度的变化率,因此平移调制的热电视工作时要不停地摇动仪器才能建立热像和建立热像后保持热像。平移调制的热电视结构简单,灵敏度高,价格低。但测温时仪器不能静止,这就给使用者带来不便,而且不能反映目标在平移方向上的均匀温度信息(例如,当水平方向平移来观测高压输电线路上的连接件目标时,就会使热图像模糊,甚至观察不到热像),同时仪器摇动时图像有拖尾和沾污,造成图像失真、清晰度不高且无法稳定。所以,较先进的红外热电视多数改为斩波调制型结构。

(2) 斩波调制。斩波调制是采用周期性斩断被测目标入射的红外辐射的方法。为了在不摇动摄像机的情况下使静止目标红外辐射图像能够周期性地入射到 PEV 靶面上,必须用带伺服系统的直流电动机驱动调制盘转动。调制盘是边缘开孔的圆盘,在旋转时实现对入射红外辐射的周期性调制,因此,在 PEV 靶面上的温度和表面电荷图像也随之发生周期性变化,再经电子束扫描,输出反映目标表面温度分布的电视信号。图 5-13 为斩波调制型红外热电视系统。

工作于斩波调制方式的红外热电视,其图像稳定、清晰、无拖尾、无图像失真、测温准确、定位方便,但机械调制及同步跟踪的技术较复杂,灵敏度和仪器本身的可靠性相对平移调制的热电视要差一些,价格也相对要高。

(3) 瞬变调制。瞬变调制的工作方式是将电子快门用于照相方式,利用瞬时拍摄的一

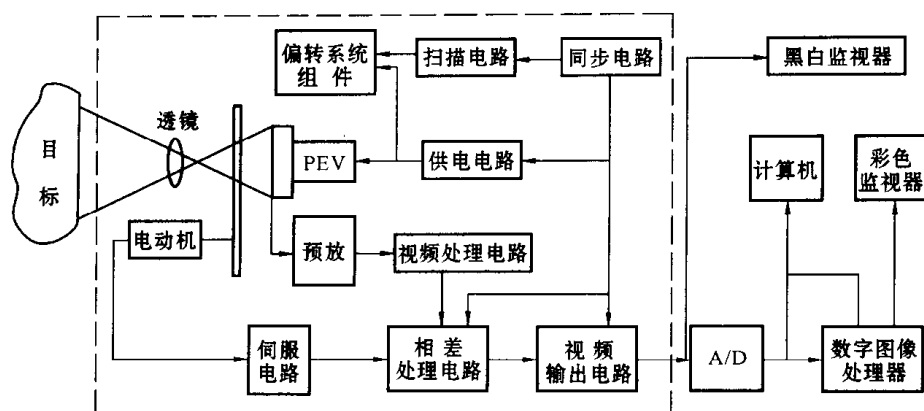


图 5-13 斩波调制型红外热电视系统

幅被测目标热像测量目标的温度和对定格的热像进行分析。瞬变调制消除了红外热电视固有的图像拖尾、沾污和失真的缺点。

瞬变调制的特点是可将图像定格，即可测量图像上任一点的温度。由于图像稳定、无拖尾、方便用单片机进行数据处理，又因计入了目标发射率、环境温度等参量，因此准确度较高。但瞬变调制所得的热像不是目标的实时值，因此不能连续地跟踪和拍摄图像。其先进性和实用性介于平移调制和斩波调制方式之间。

3. 红外热电视的应用

红外热电视的应用范围很广。在电力行业中，使用红外热电视可进行快速探测和热点普查。如对联结点、压接点等全部外露的过热点，互感器内部绝缘不良导致的局部或整体发热，主变瓷套管内的油位面降低而致外部温度的变化，高压设备受潮、绝缘老化等的设备故障，熔断器、断路器等过载发热，均可应用红外热电视进行非接触检测。在机械、制冷行业，可对工业窑炉、蒸汽系统、制冷系统机械设备的缺陷进行检查，还可进行无损探伤。在造纸工业、森林、消防等领域，可对特种材料的自燃、森林火灾寻找火源。在军事领域进行夜间的目标搜索。部分红外热电视的技术参数如表 5-5 所示。

表 5-5 国内目前主要红外热电视新型号产品技术性能参数

技术指标		HD97 型红外热电视	DL-202 系列红外热电视	SAT-9501A 型红外热电视
	工作波段	3 ~ 5 μm , 8 ~ 14 μm	8 ~ 14 μm	3 ~ 5 μm , 8 ~ 14 μm
	测温范围	- 30 ~ 1500 $^{\circ}\text{C}$	- 30 ~ 1100 $^{\circ}\text{C}$	0 ~ 999 $^{\circ}\text{C}$ (可扩展到 2000 $^{\circ}\text{C}$)
	温度分辨率	0.1 $^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$	$\leq 0.5^{\circ}\text{C}$
	测温温差	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	$\leq 10\%$	$\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$ 或满量程的 $\pm 5\%$
	聚焦范围	0.5m ~ ∞	0.5m ~ ∞	0.5 ~ 100m
	扫描制式	我国标准电视制式	CCIR625 行 50 场, 2 : 1 隔行	我国标准电视制式 PAL-D
	空间分辨率	≥ 250 电视线	≥ 200 电视线	
	调制方式	斩波调制	平移调制	平移调制
	电 源		DC + 12V	交直流两用 DC18V AC220V

续表

		HD97 型红外热电视	DL-202 系列红外热电视	SAT-9501A 型红外热电视
技术指标	最大尺寸		260mm × 110mm × 165mm	260mm × 125mm × 170mm
	质量		机身 2.35kg	2.5kg
	功耗		≤14W	≤20W
技术性能		斩波调制, 仪器可静止成像 可显示彩色和黑白热图像, 激光瞄准 图像清晰, 分辨率高, 具有多场累积功能 内附电子存储, 可随时保留有用图像 可在全屏幕任意点测温及最高温度自动搜索定位; 丰富的红外图像处理软件 一体化结构, 小巧轻便	中文 Windows 界面专用图像分析, 全屏温度显示 多种图像处理功能 多点温度显示 线温度分布测量 直方图显示 最高发热点温度坐标显示, 综合报表输出	视频信号经计算机用图像滤波, 边缘增强, 可实现二维图像、伪彩等温面、图像反置、任意点测温等图像形式, 可通过打印机输出彩色图像, 仪器采用一体化结构

五、红外热像仪

红外热像仪是利用红外扫描原理测量物体表面温度分布的。它不仅能用于非接触式测温, 而且还可实时显示物体表面温度的二维分布与变化情况, 又有稳定、可靠、测温迅速、分辨率高、直观、不受电磁干扰, 以及信息采集、存贮、处理和分析方便等优点。尽管它比红外测温仪、红外热电视等装置的结构复杂、价格较贵、功耗较大, 但在许多领域都得到了广泛应用。

1. 红外热像仪的工作原理

红外热像仪摄取来自被测物体各部分射向仪器的红外辐射通量的分布, 利用红外探测器, 顺序地直接测量物体各部分发射出的红外辐射, 综合起来就得到物体发射红外辐射通量的分布图像, 这种图像称为热像图。由于热像本身包含了被测物体的温度信息, 也有人称之为温度图。红外热像仪一般分为光机扫描成像系统和非扫描成像系统, 光机扫描红外热像仪已得到广泛应用。非扫描成像的红外热像仪, 如近几年推出的阵列式凝视成像的焦平面热像仪, 属新一代的热成像装置, 在性能上大大优于光机扫描式热像仪, 有逐步取代光机扫描式热像仪的趋势。其关键技术探测器是由单片集成电路组成, 被测目标的整个视场被聚焦在这片焦平面阵列式 (FPA) 集成电路上, 类似于照相机的镜头将目标图像在底片上聚焦曝光, 从而克服了机械扫描的复杂性和不可靠性, 并且图像更加清晰, 使用更加方便, 仪器重量轻, 可靠性更好, 功能多。下面以光机扫描红外热像仪为例介绍红外热像仪的工作原理和结构。

红外热像仪的基本结构由摄像头、显示记录系统和外围辅助装置等组成。光机扫描热像仪的摄像头主要包括接收光学系统、光机扫描机构、红外探测器、前置放大器和视频信号预处理电路, 如图 5-14 所示。

工作时, 目标的红外辐射经光学系统会聚和滤光, 聚焦在焦平面上。焦平面内安装一

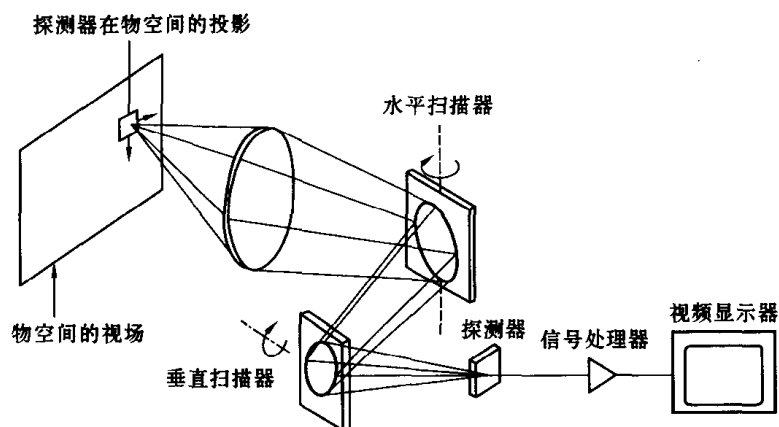


图 5-14 扫描热像仪原理示意图

探测元件。在光学系统与探测器之间有一个光学—机械扫描装置，它由两个扫描反射镜组成，一个用作垂直扫描，一个用作水平扫描。从目标入射到探测器上的红外辐射随着扫描镜的转动而转动，按次序扫描过物空间的整个视场。在扫描过程中，入射红外辐射使探测器产生响应。一般来说，探测器的响应是与红外辐射的能量成正比的电压信号，扫描过程使二维的物体辐射图形转换成一维的模拟电压信号序列。该信号经过放大、处理后，由视频监视系统实现热像显示和温度测量。

2. 热像仪的基本组成

不同热像仪的实施方法可以大不相同，最简单的热像仪只沿一个坐标轴方向扫描，另一维扫描由被测物体本身的移动来实现，这类热像仪只适用于测量运动着或转动着的物体出射红外辐射的分布。对一般物体，需要进行两维的扫描才能获得被测物体的热像图，近些年发展起来的热像仪功能更为全面，不仅可以摄取热像图，而且能够进行热像的分析、记录，能满足许多热测量问题的需要。

图 5-15 是热像仪系统的基本组成方框图。

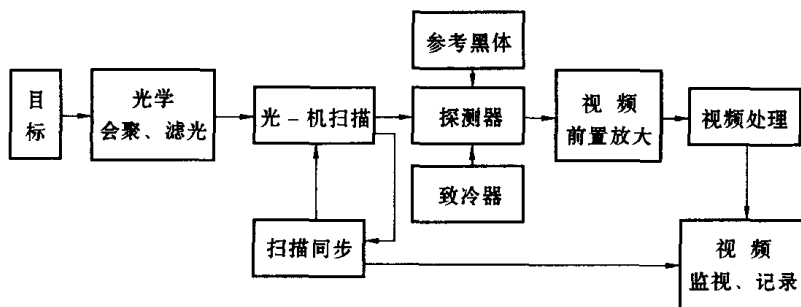


图 5-15 热像仪系统的基本组成方框图

(1) 光—机扫描系统。热像仪能够显示出物体热图像的原因，关键在于首先要把物体按一定规律进行分割，即把要观测的景物空间按水平和垂直两个方向分割成若干个小的空间单元，使用光—机扫描系统可实现这项功能。

光—机扫描系统的作用是使红外探测器顺序地接收被测物体表面各微元面积上的红外

辐射。在原理上,就是构成一个如图 5-16 所示的光学系统,红外探测器位于系统的焦点。图中,abcd 是目标物所在的区域,即被测目标出射红外辐射通量分布的区域。红外探测器在某一瞬间只能看到目标很小的部分(图中画斜线的部分),通常称为“瞬时视场”。光学系统能够在垂直与水平两个方向上移动。水平转动时,瞬时视场在水平方向上横扫过目标区域一条带。光学系统垂直转动与水平转动相配合,在瞬时视场水平扫过一条带后,垂直转动恰好使它回到这一横带之下的一端,接着扫出的一条横带与前者相衔接。经过多次水平方向扫描,瞬时视场扫完整个 abcd 面积后,机械运动使它回到原来的起始位置 a 处。如果探测器的响应足够快,那么,它对任一瞬时视场都会产生一个与接收到的入射红外辐射通量成正比的输出信号。在整个扫描过程中,探测器的输出将是一个强弱随时间变化且与各瞬时视场出射的红外辐射通量变化相应的序列电压信号。

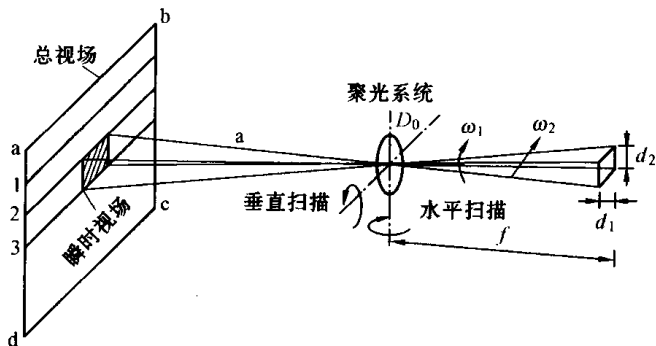


图 5-16 光机扫描成像示意图

红外热像仪光—机扫描系统的扫描方式主要有以下三种类型:

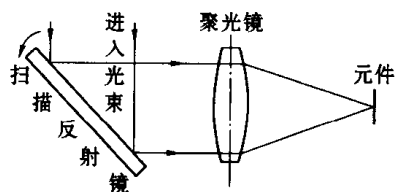


图 5-17 物扫描方式原理

1) 物扫描方式。扫描光学系统放置在聚光光学系统之外,摆动或者转动扫描光学系统,实现所谓物扫描,图 5-17 是物扫描方式的工作原理示意图。在物扫描方式中,由于聚光系统在扫描镜之后,要提高聚光后光的强度,光束需要增大,扫描镜也随之增大,因而扫描速度受到限制。

2) 像扫描方式。像扫描方式的原理如图 5-18 (a) 所示。在这种扫描方式中,扫描光学系统插在聚光系统和探测器之间,摆动或转动扫描光学系统,实现所谓像扫描。像扫描方式扫描速度高,但扫描角度有限制。图 5-18 (b) 是应用于某型号热像仪中像扫描方式的实例。在此例中,聚光光学系统中间插入两个平行平面棱镜。来自目标的红外辐射能量由红外透镜聚焦后,进入垂直扫描棱镜。垂直扫描棱镜以 180r/m 的转速旋转,进行垂直像扫描;水平扫描棱镜以 18000r/m 的转速旋转,进行水平像扫描。从水平扫描棱镜输出的光,经过接收透镜最终被聚焦到红外探测元件上。

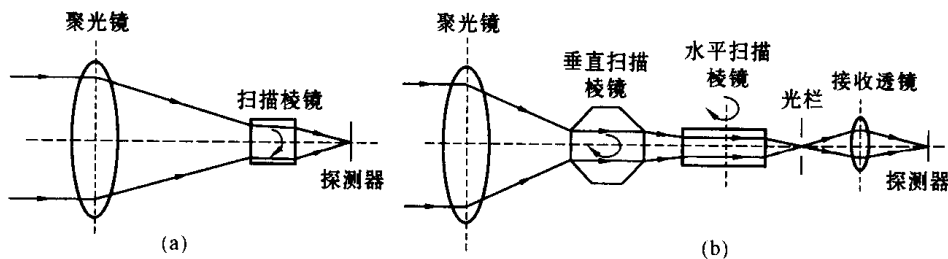


图 5-18 像扫描原理与实例

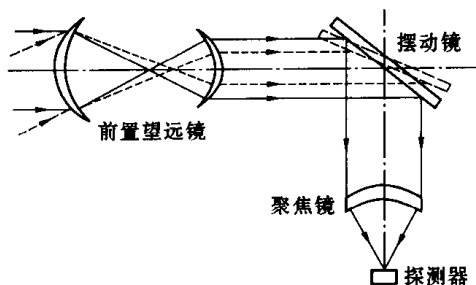


图 5-19 伪物扫描系统示意图

3) 改进的物扫描系统。这种系统的扫描原理如图 5-19 所示, 该扫描方式是物扫描系统的改进, 因此又称作伪物扫描系统。它是把物方光束经前置望远镜压缩光束宽度后, 再由置于望远镜系统出射光瞳处的高速扫描镜扫描, 最后再经探测器光学系统会聚成像。因此该系统具有物扫描和像扫描两者的优点, 可用小反射镜做大角度扫描, 对扫描镜材料无特殊要求, 且可改变扫描视场。所以, 这种扫描方式是光机扫描式红外热像仪中用得较多的扫描系统。

(2) 红外探测器。红外探测器的光谱响应特性、时间常数及探测率直接影响到热像仪的性能。对红外探测器的要求是像素量大、均匀性好、响应速度快、能耗低、易操作、温度灵敏度高。在热像仪中, 除根据被测物体的辐射特性和大气的传输特性选择探测器外, 总希望探测器具有高的探测率和小时间常数, 以使热像仪具有良好的灵敏度和短的帧时。尽管红外辐射的各种效应都可以用来制造红外探测器, 但目前真正应用的是基于光电导效应和光生伏特效应的一些红外探测器。这些红外探测器比热探测器更为灵敏, 并具有小得多的时间常数, 能够适应高速扫描的要求。缺点是光谱范围有限, 且必须在低温下工作才能满足灵敏度要求。同时, 为了使红外探测器敏感元件所感应的只是被测目标产生的红外辐射, 防止探测器自身及仪器中高速运动的机械部件和仪器内工作电流产生的热辐射对信号的干扰, 必须对探测器及周围材料冷却, 以保证热像信号的准确性。如某型号热像仪短波 ($3 \sim 5.6\mu\text{m}$) 系统中使用的碲化铋探测器, 它与装有液氮的杜瓦瓶构成一个整体, 被致冷到液氮温度 (77K), 其响应时间短于热像仪扫描速度所要求的 $1\mu\text{s}$ 。但碲化铋对信号波长响应限制在小于 $5.6\mu\text{m}$ 的范围。该型热像仪长波 ($8 \sim 14\mu\text{m}$) 系统采用的是碲镉汞, 它在液氮温度下对 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 光谱范围内的信号有很好的响应。

20 世纪 90 年代中期以后发展起来的非制冷红外探测器是近年来被迅速推广应用的非制冷焦平面阵列凝视红外热像仪上的先进实用技术。它应用微型辐射热量热探测器的工作原理, 不同于制冷的光子探测器, 属于一种热探测器。这种探测器的工作过程类似于热敏电阻, 探测器通过吸收入射的红外辐射致使自身的温度上升, 从而引起探测器电阻值的变化, 在外加电压的情况下进而产生信号电压。这种非制冷的辐射热量热探测器单元尺寸可做到 $50\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 大小, 可以满足焦平面阵列式凝视成像热像仪的高性能的要求。

辐射热量热探测器常用的有金属型和半导体型两种。由于半导体型辐射热量热探测器的响应率比金属型要大得多, 因此, 非制冷红外热像仪通常采用半导体辐射热量热探测器。

(3) 视频监视与记录系统。热像仪视频监视与记录系统的作用是把红外探测器提供的顺序变化电信号转换成可见图像。显示记录系统取决于热像仪的用途, 显示装置通常采用 CRT 显示器或与电视兼容的监视器; 记录装置可以用普通照相机、快拍照相机或磁卡与磁带录像机等。外围辅助装置包括电源、同步机构、图像处理与分析系统等。当热像仪用

CRT 显示时, 探测器输出的顺序电压信号经过放大处理, 作为显示器的视频信号, 显示器的扫描系统用同步脉冲保持与目标扫描系统同步, 产生全部水平扫描线, 这些扫描线的起点都在同一垂线上, 并在垂直方向上依次下移, 在显示管荧光屏上显示出目标的温度分布图像。

利用 CRT 显示, 通过适当的信号处理很容易得到各种显示图像, 如普通灰度显示热像、伪彩色显示热像、等温显示热像等。在普通灰度显示热像图上, 白的地方表示温度高的区域, 黑的地方表示温度低的区域, 而中间的灰度等级相应表示各中等温度。一般热像仪内设有灰度标尺, 通常分为十级, 各级之间等距, 代表同一显示灵敏度下显示温度范围的 1/10。将显示器热图上各处的灰度与灰度标尺相比较, 则能判断相应图像部位的温度值。为了便于辨认热图像对应的温度分布, 在热像仪显示中常把黑白灰度转换成不同的颜色, 在显示器一侧也设有伪彩色温标, 形成伪彩色显示, 其显示方法原则上与灰度显示方法相同。

3. 热像仪测温技术

热像仪在显示器上显示出的热像图, 直接反映的是被测物体表面上各点的热分布状况, 即红外辐射通量分布状况。由于被测物体温度与其红外辐射通量之间有对应关系, 因而反映红外辐射通量分布的热像图也同样反映了被测物体表面温度分布情况。然而, 由于热像仪所接收到的红外辐射与目标温度之间呈非线性关系, 而且还要受到目标表面发射率、大气衰减及目标所处环境反射辐射等因素的影响, 热像图只能给出物体表面温度分布的定性描述, 要根据热像图获得被测物体绝对温度值, 必须采用一定的方法:

(1) 模拟量测温方法。这种方法就是利用标定函数(可以以标定曲线的形式给出, 也可以以计算程序的形式给出)把热像仪输出的热值(红外辐射的数字量度)转换成被测物体的绝对温度值。

①标定曲线。描述测量热值与温度之间关系的标定曲线通常由实验方法确定。标定曲线的实际形状依赖于热像仪扫描光学系统中实际光圈的大小以及采用的滤光镜。

标定曲线可以精确地用如下的数学模型来描述:

$$I = \frac{A}{C_{\exp}(B/T) - 1} \quad (5-28)$$

式中 I ——对应于温度 T 的热值;

T ——绝对温度, K;

A 、 B 、 C ——标定常数, 取决于实际光圈、滤光镜和扫描器类型。

标定时, 用热像仪对着不同温度下的基准黑体热源进行测量, 用最小二乘法拟合测量数据, 得到一条热值—温度关系的最佳拟合曲线作为标定曲线, 同时也可以求出描述标定曲线的数学模型中各项标定常数的数值, 得到具体的数学模型。一般情况下, 热像仪都附有典型标定曲线, 但为了提高精度, 有时仍需测量者单独进行标定。

②温度测量技术。使用热像仪测量目标温度一般有两种方法, 一种是直接测量法, 另一种是对比测量法。直接测量法是利用热像仪内部的基准黑体或者钳位电位, 在不使用外界温度参考体的情况下测量目标温度值。对比测量则是利用具有已知温度和发射率的外界

温度参考体来对比测量目标温度值。

如果被测物体可视为绝对黑体,在理想条件下,热像仪测得的热值可以直接利用标定曲线转换成被测物体的温度值。采用直接测量方法时,只要得到热像仪输出的测量热值 I_0 ,并在标定曲线的纵坐标上标出它的数值,那么,很容易在标定曲线的横坐标上得到目标的温度值,如图 5-20 所示。直接测量法简单,但精度不易保证。在精度要求较高的场合,只要条件允许,而且可以得到外界温度参考体,采用对比测量法更合适。外界参考体的选择,取决于要求的测量精度和实际的测量条件。一个理想的参考体,其温度应尽量接近被测物体的温度,发射率应与目标的发射率相同,并且最好放置在目标周围。如果被测物体表面上某一点温度准确已知,那么用它作为外界温度参考体是很理想的。在进行对比测量时,可以从热像仪的输出中得到目标与温度参考体的热差值 ΔI ,热差值可正可负,当参考体温度高于目标温度时,其值为正,低于目标温度时,其值为负。然后,在标定曲线上找出参考体温度 t_r 所对应的热值 I_r ,再把热差值 ΔI 加到参考体热值 I_r 上,给出目标热值 I_0 。最后,借助于同一标定曲线,可以得到目标的温度值,对比测量过程如图 5-21 所示。

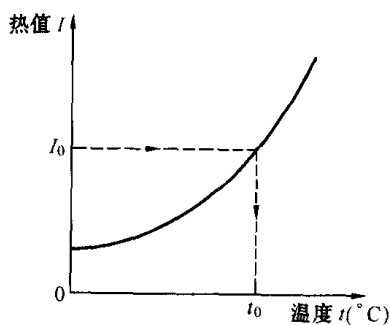


图 5-20 直接测量过程

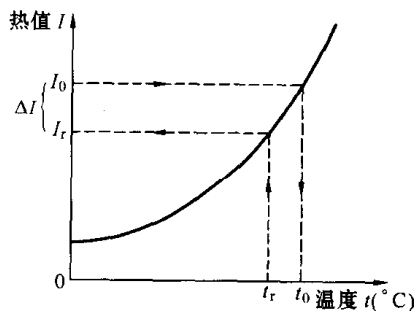


图 5-21 对比测量过程

上述把热像仪输出的热值(或热差值)直接转换成被测物体温度的方法,适用于目标是绝对黑体且没有其他外界因素干扰测量的理想情况。实际测量中,被测物体的发射率 $\epsilon < 1$,而且测量过程总会存在一些不可忽略的外界因素的影响。这就使在利用标定曲线将目标热值(或热差值)转换成绝对温度值时,需首先对目标的非黑体性质和干扰因素的影响进行计算修正。外界干扰因素的影响主要表现在以下几个方面:

①目标周围环境的影响。不透明的漫反射表面的反射率 $\xi = 1 - \epsilon$ 。因此,对非黑体目标,来自周围环境的干扰红外辐射也会因目标的反射而进入热像仪扫描器,使热像仪输出热值中含有相应的影响分量,这个分量的大小与环境温度有关。

②目标透明性的影响。有些目标可以或多或少地透过红外辐射,从这类目标接收的红外辐射将包括来自目标背后的无关辐射。

③大气影响。红外辐射在大气中传输时,大气中某些成分对红外辐射的吸收作用会减弱目标到热像仪的红外辐射。在另一些情况下,大气本身的发射率也将对测量产生影响,需加以考虑。引入大气修正系数 τ ,可以修正大气对红外辐射的影响。修正系数可以测定,也可以采用某种大气模型计算。

图 5-22 描述了一般测量条件下的辐射情况。目标产生的红外辐射和目标反射的周围环境各有关表面的红外辐射通过大气衰减后,进入热像仪扫描器,与此同时,大气所产生的红外辐射也进入扫描器。这样,热像仪扫描器所接收到的红外辐射应是目标辐射、目标对环境辐射的反射辐射以及大气辐射的总和。如果目标的温度为 t_0 , 周围环境各有关表面具有相同的温度 t_a , 且发射率 $\varepsilon \approx 1$ (这对大多数实际情况是很好的近似), 大气温度为 t_{atm} , 那么, 热像仪扫描器通过大气从目标表面所接收到的红外辐射 E'_0 可用下式表示

$$E'_0 = \tau_0 \varepsilon_0 E_0 + \tau_0 (1 - \varepsilon_0) E_a + (1 - \tau_0) E_{atm} \quad (5-29)$$

式中 E_0 、 E_a 、 E_{atm} ——温度为 t_0 、 t_a 、 t_{atm} 的黑体发射的红外辐射;

ε_0 ——目标的发射率, 对不透明的目标, $(1 - \varepsilon_0)$ 是目标的反射率;

τ_0 ——扫描器和目标之间的大气修正系数 (即作为系统光谱响应修正的大气透射率);

$(1 - \tau_0)$ ——大气发射率。

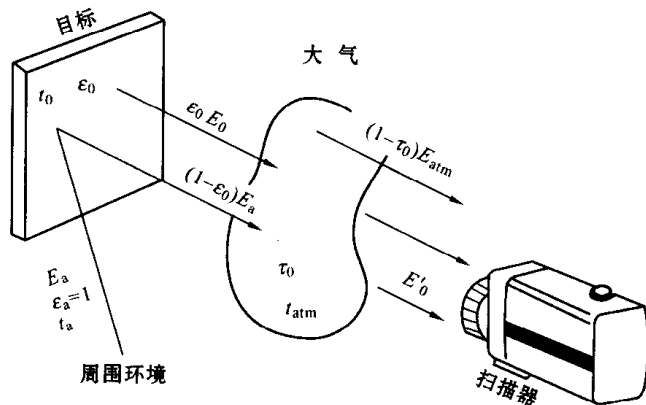


图 5-22 一般测量条件下的辐射情况

由于热值与接收到的红外辐射呈线性关系, 可以把式 (5-29) 所表达的辐射关系直接转换成热值关系

$$I'_0 = \tau_0 \varepsilon_0 I_0 + \tau_0 (1 - \varepsilon_0) I_a + (1 - \tau_0) I_{atm} \quad (5-30)$$

式中 I'_0 ——测量得到的目标热值 (即与扫描器通过大气从目标表面接收到的红外辐射相应的热像仪读数);

I_0 、 I_a 、 I_{atm} ——温度分别为 t_0 、 t_a 、 t_{atm} 时, 由标定曲线标定的热值。

式 (5-30) 是热像仪测量温度的通用测量公式, 它表达了如何把测量热值 I'_0 与测量过程中三个基本辐射源连同它们的有关参数联系起来。各辐射项表达为黑体热值, 它们分别由各辐射源温度及标定函数确定。

$$I_0 = \frac{I'_0}{\tau_0 \varepsilon_0} - \left(\frac{1}{\varepsilon_0} - 1 \right) I_a - \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{1}{\tau_0} - 1 \right) I_{atm} \quad (5-31)$$

对直接测量, 可由式 (5-31) 求得与目标温度 t_0 相应的热值 I_0 , 进而直接由标定函数求得被测物体的温度值 t_0 。

对具有已知温度参考体的对比测量, 由式 (5-31) 可分别得到

$$I'_0 = \tau_0 \epsilon_0 I_0 + \tau_0 (1 - \epsilon_0) I_{a0} + (1 - \tau_0) I_{atm} \quad (5-32)$$

$$I'_r = \tau_r \epsilon_r I_r + \tau_r (1 - \epsilon_r) I_{ar} + (1 - \tau_r) I_{atm} \quad (5-33)$$

式中 I'_r ——测量得到的温度参考体热值;

I_r ——温度为 t_r 时, 由标定曲线标定的热值;

t_r ——参考体温度;

I_{a0} 、 I_{ar} ——由标定曲线标定的相应于目标环境温度 t_{a0} 和参考体环境温度 t_{ar} 的热值;

ϵ_r ——温度参考体的发射率;

τ_r ——扫描器和温度参考体之间的大气修正系数。

在实际测量中, 假定被测目标与温度参考体放在一起(如果有可能, 总是这样), 那么

$$\tau_r = \tau_0$$

$$I_{a0} = I_{ar} = I_a$$

式 (5-32) 与式 (5-33) 相减, 可得测量热差值

$$\Delta I = I'_0 - I'_r = \tau_0 \epsilon_0 I_0 - \tau_0 \epsilon_r I_r + \tau_0 (\epsilon_r - \epsilon_0) I_a \quad (5-34)$$

测量热差值 ΔI 可由热像仪输出得到。由式 (5-34) 可见, 利用接近被测目标的温度参考体进行对比测量时, 大气发射的红外辐射对测量结果没有影响。根据式 (5-34), 可求得与目标温度 t_0 相应的热值

$$I_0 = \frac{\Delta I}{\tau_0 \epsilon_0} + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_0} I_r + \left(1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_0}\right) I_a \quad (5-35)$$

进而根据标定函数求出目标温度值 t_0 。特别是当目标与参考体的发射率近似相等时, 例如, 选择目标上温度已知的某一部分作为温度参考体表面, 就有可能实现这一条件, 则对比测量公式 (5-35) 将被化简为

$$I_0 = \frac{\Delta I}{\tau_0 \epsilon_0} + I_r \quad (5-36)$$

总的测量精度因此而得到改善。

在特定条件下, 式 (5-34) 和式 (5-35) 都可大为化简。例如, 若所有测量中涉及的 ϵ 和 τ 都接近于 1, 那么

$$I_0 \approx I'_0$$

及

$$I_0 \approx \Delta I + I_r$$

这正好对应于理想条件下的直接测量和对比测量。

(2) 智能化测温方法。模拟化测温方法比较麻烦, 准确度差, 使用智能化热像仪就方便得多。在智能化热像仪中, 微处理机通过多路模拟开关和 A/D 转换器分别获得被测物体图像信号电压与参考黑体温度电压的数值, 然后根据各自的函数关系进行计算, 这样得到的温度值比模拟量校正叠加方法要精确得多, 当计算温度时, 只需要输入物体表面发射

率和环境温度, 用一个功能键, 由计算机程序对温度值进行修正, 就能够得到被测物体表面的真实温度。

(3) 软件化测温方法。先进的红外热像仪都配置有完整的图像处理系统, 它包括相应的硬件和软件。运用其中的图像分析软件, 在采集红外热图像的同时, 只要把测量参数(如镜头参数、光圈、测量范围、测温电平、环境温度、目标发射率、目标距离等)记录到图像信息中去, 利用该软件, 可以随时测量并显示出目标及其热图像上任意位置点温度值的精确结果和区域分析结果等。

4. 红外热像仪的应用

由于红外热像仪能将物体发出的红外辐射变为可见的热分布图像, 这就为人们提供了一个直观的观察工具, 即直接观察记录这种红外热图的变异用来分析判断物体的各种状况, 达到应用的目的。红外热像仪的应用领域很广, 主要的应用有:

(1) 工业方面的应用。热像仪在电力工业、机械工业、化学工业上都有应用, 主要是观察和监测生产过程中工业设备和工艺流程中物料的热分布和异常情况, 如温度场分布、局部过热、设备运转异常发热、工艺流程故障反映的热图变异。环保工业中监视天气、海洋、环境、地表、植被等的情况以及灾情预报、确报等。制造业方面, 对钢铁业中的钢铁温度分布、塑料业中的塑料膜温控、造纸业中的纸浆干燥监控、玻璃业中的玻璃制造过程监控都用到红外热像仪。

(2) 军事方面的应用。军事方面主要用于夜间观测, 飞机、军舰导航和瞄准跟踪目标, 以及导弹红外成像制导, 还可用于海上搜索以及隐蔽和伪装的目标识别。

(3) 医学方面的应用。人体是一个天然的红外辐射源, 人体患病或某些生理状况发生变化, 会导致人体某些部位红外热图的变化, 这种变化异常就可以作为诊断疾病和判断病灶的依据。部分热像仪的技术性能见表 5-6。

表 5-6 部分红外热像仪的技术性能参数

产品名称	型号	工作波段 (μm)	制冷 方式	视场 ($^\circ$)	空间 分辨率 (mrad)	温度 分辨率 (K)	显示及 接口方式	帧频 (Hz)	工作温度 ($^\circ\text{C}$)	输入 功率 (W)
小型快速 红外热像 仪	HWRX-2	8~12	液氮	7×7 14×14 25×25	1.2 (7×7时)	≤ 0.2	黑白显示器, 计算机伪彩色	25, 12.5, 6.25	0~+40	60
慢扫描 热像仪	HR-II	8~12	液氮	15×15 ($\phi 50$ 孔径)	2	0.1		0.2	0~+40	约 300
单元智能 热像仪	DSR-3	8~12	液氮	25×25 ($\phi 20$)	4	0.2	CCIR-TV	10, 2, 0.5	0~+18	45
红外手持 热像仪	HRS-12	3~5	半导体 热电制 冷	10×7 ($\phi 110$)	1	0.3	LED 单目观 察	23	-25~+40	6.8
红外便携 式热像仪	PII-32	8~12	液氮	1.5×2.5 3.75×6.25 ($\phi 100$)	0.218	0.3	CRT 直接间 接潜望观察	25	-32~+50	7.6

续表

产品名称	型号	工作波段 (μm)	制冷 方式	视场 ($^\circ$)	空间 分辨率 (mrad)	温度 分辨率 (K)	显示及 接口方式	帧频 (Hz)	工作温度 ($^\circ\text{C}$)	输入 功率 (W)
红外 热像仪	IR100A	3~5	一级 热电	F/1.3, 40mm	0.25	0.5	CRT-TV 微机 接口	0.25	室温	45
红外 热像仪	IR100B	8~12	液氮	F/1.3, 40mm	0.25	0.2	CCIR-TV 微 机接口	0.25	室温	40
智能 热像仪	841	8~12	液氮	20×20		0.2	CCIR-TV 微 机接口	10	室温	100
红外 热像仪	ZSR901	3.6~5.5	液氮	15×9 ($\phi 25$)	1	0.1	PAL-D 制全 电视信号	25	-10~+40	≤ 60

第四节 红 外 气 体 分 析

红外分析是基于物质的吸收特性来进行的。许多化合物的分子在红外波段都有吸收带，而且因物质的分子不同，吸收带所在的波长和吸收的强弱也不相同。根据吸收带分布的情况与吸收的强弱可以识别物质分子的类型，从而得出物质的组成及各组成成分的百分比。根据不同的目的与要求，红外分析仪可设计成多种不同的形式，如红外气体分析仪、红外分光光度计、红外光谱仪等。

一、红外气体分析的原理

根据红外理论，许多化合物分子在红外波段都具有一定的吸收带，吸收带的强弱及所在的波长范围由分子本身的结构决定。只有当物质分子本身固有的特定的振动和转动频率与红外光谱中某一波段的频率相一致时，分子才能吸收这一波段的红外辐射能量，将吸收到的红外辐射能转变为分子振动动能和转动动能，使分子从较低的能级跃迁到较高的能级。实际上，每一种化合物的分子并不是对红外光谱内所有波长的辐射或任意一种波长的辐射都具有吸收能力，而是有选择性地吸收某一个或某一组特定波段内的辐射。这个所谓的波段就是分子的特征吸收带。气体分子的特征吸收带主要分布在 $1 \sim 25 \mu\text{m}$ 波长范围内的红外区。特征吸收带对某一种分子是确定的、标准的，如同“物质指纹”。通过对特征吸收带及其吸收光谱的分析，可以鉴定识别分子的类型，这是红外光谱分析的基本依据。根据上述原理制成的红外光谱分析仪器“红外分光光度计”是对混合物进行定性分析、鉴定其中含有哪一种物质组分的理想仪器，而且还可以进行定量分析，确定各种组分在混合物中的百分含量。

在工业、医学方面，有时需要测定混合气体中某种已知组分的百分含量，例如电力工业中，为了提高锅炉的燃烧效率，常常需要测定烟气中 CO 、 CO_2 或 O_2 的含量，作为控制燃烧过程的一个重要依据。在这种情况下，只需选择真正代表混合气体中待测组分的一个特征吸收带，测量这个吸收带所在的一个窄波段的红外辐射的吸收情况，就可以得到待测

组分的含量。

对于一定波长的红外辐射的吸收,其强度与待测组分浓度间的关系可以由贝尔定律来描述:

$$I = I_0 \cdot e^{-k_\lambda c l} \quad (5-37)$$

式中 I ——透射红外辐射的强度;

I_0 ——入射红外辐射的强度;

k_λ ——是待测组分对波长为 λ 的红外辐射的吸收系数;

c ——待测组分的摩尔百分浓度;

l ——红外辐射穿透过的待测组分的长度。

由式 (5-37) 可见,当红外辐射穿过待测组分的长度 l 和入射红外辐射的强度 I_0 一定时,由于 k_λ 对某一种特定的待测组分是常数,故透过的红外辐射强度 I 仅仅是待测组分摩尔百分浓度 c 的单值函数,其关系如图 5-23 所示。通过测定透射的红外辐射强度,可以确定待测组分的浓度。以这一原理为基础发展起来的光谱仪器,称为红外气体分析仪。

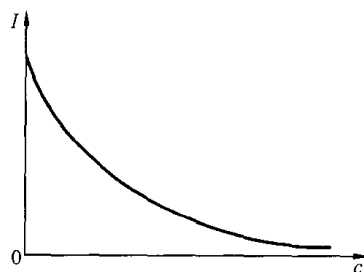


图 5-23 贝尔定律确定的 I - c 关系曲线

二、红外气体分析仪的原理结构

红外气体分析仪可根据不同要求设计成各种不同形式。尽管各种成品的红外气体分析仪的结构可能有许多差异,但不考虑具体系统,红外气体分析仪的工作原理可以由图 5-24 来说明。图中,某一红外光源产生的红外辐射由抛物面反射镜反射后会聚成平行的红外光,一束通过样品气室,另一束通过参比气室,然后再通过聚光器投射到红外探测器上。聚光器与气室之间有一块干涉滤光片,它只允许某一窄波段的红外辐射通过,该窄波段的中心波长就选取待测组分特征吸收带的中心波长。例如,待测组分是烟气中的 CO 含量。CO 在近红外光谱区有一以 $4.65\mu\text{m}$ 为中心的特征吸收带,可选择这个带中的一个窄波段进行红外辐射测量。分析仪中选用的干涉滤光片,只允许中心波长为 $4.65\mu\text{m}$ 的一个窄波段内(例如 $4.5 \sim 5.0\mu\text{m}$)的红外光通过,红外探测器所接收的也仅仅是这个窄波段内的红外辐射。在红外光源与气室中间,有一切光片,切光片是布有若干圆孔的圆盘,如图 5-25 所示,

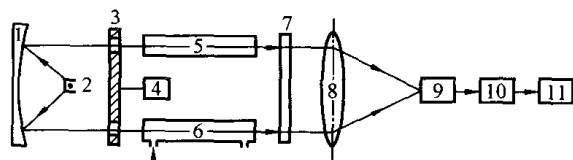


图 5-24 单组分红外气体分析仪原理示意图

1—反射镜; 2—红外光源; 3—切光片; 4—马达; 5—参
考
气室; 6—样品气室; 7—干涉滤光片; 8—聚光镜;
9—红外探测器; 10—信号放大器; 11—显示器

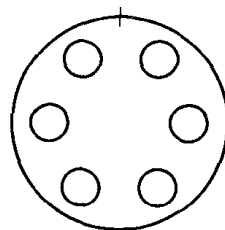


图 5-25 切光片

由同步电机带动。只要适当地安排样品室、参比室与切光片之间的相对位置,使得红外辐射通过切光片上的开孔进入样品室时,切光片上未开口处恰好遮断进入参比气室的红外光辐射的光路,而当切光片遮断进入样品气室的红外辐射光路时,又恰好使红外辐射通过进入参比气室。这样,红外辐射在切光片的作用下,轮流通过样品气室和参比气室。红外探测器交替地接收通过样品气室的红外辐射和通过参比气室的红外辐射。

参比气室内封有某种不含待测组分的气体。例如,分析烟气中 CO 含量时,参比气室中可封入 N_2 。样品气室中通以被分析的混合气体样品。当被分析的混合气体尚未进入样品气室时,两气室中均无待测组分,红外辐射不会在选定的窄波段上被吸收,因此,红外探测器上交替接收到的红外辐射通量相等,探测器只有直流响应,接在其后的交流选频放大器输出为零。如果样品气室中通以含有待测组分的混合气体,由于待测组分在其特征吸收带上对相应波段红外辐射有吸收作用,使通过样品气室的红外辐射发生变化,这样,通过样品气室和参比气室的两束红外辐射的通量不相等,红外探测器接收到的是交变的红外辐射,交流选频放大器输出信号不再为零。待测组分浓度变化,输出信号也相应地随之变化,经过适当标定,可以根据输出信号的大小显示待测组分的百分含量。

近年来,对多种组分浓度进行同时自动连续分析的多组分红外气体分析仪的研制取得了很大进展。多组分红外气体分析仪与单组分分析仪的原理基本相同,其关键是信号的分离技术以及对信号间相互干扰的处理。计算机技术、激光技术和分光技术的应用和发展,使得这类多组分红外气体分析仪可以达到更高的技术水平。图 5-26 是一种同时测定三种组分的红外气体分析仪原理示意图。图中,红外辐射源所产生的平行红外辐射光束,通过切光器、样品室被红外探测器接收。切光器上布置有六个气室。如果被分析的混合气体是由三种待测组分 A、B、C 所构成,那么切光器上的三个气室 R_a 、 R_b 、 R_c 分别是组分 A、B、C 的参比室。参比室中分别被充以浓度为 100% 的待测组分 A、B、C,气室的窗口相

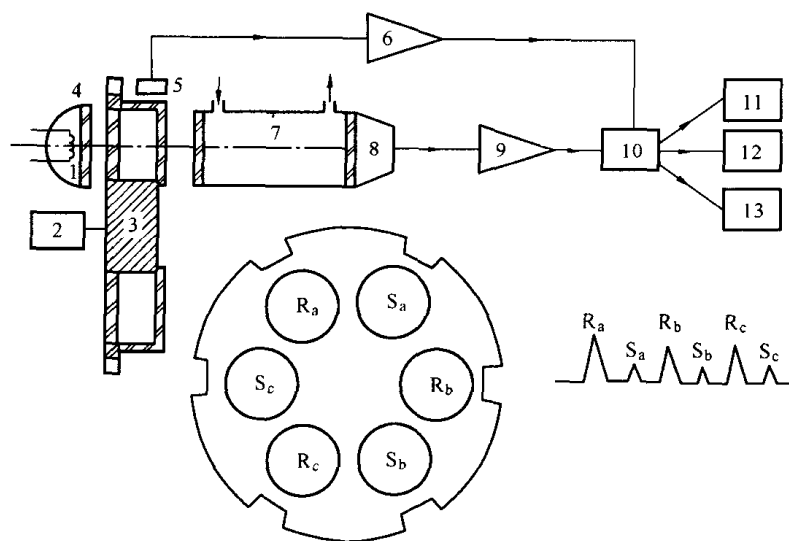


图 5-26 三组分红外气体分析仪原理示意图

1—红外光源; 2—马达; 3—切光片; 4—光源; 5—光电二极管; 6—放大器; 7—样品室; 8—红外探测器; 9—信号放大器; 10—分离器; 11、12、13—显示器

应地安装着对 A、B、C 组分无吸收作用的滤光片。切光器上的另外三个气室 S_a 、 S_b 、 S_c 分别是相应于 A、B、C 三种组分的分析室， S_a 中充有一定浓度的 B、C 组分， S_b 中充以一定浓度的 A、C 组分， S_c 中则充以一定浓度的 A、B 组分，样品室中通入被分析的混合气体。电动机带动切光器转动，红外探测器上就出现六个波峰， R_a 和 S_a 峰是相应于 A 组分的参比峰和分析峰； R_b 和 S_b 峰与组分 B 相对应； R_c 和 S_c 峰则与组分 C 相对应。小灯泡和光敏二极管给放大器提供一个同步信号，使分离器根据程序而将三组信号分开并相减，分别在三个放大器上得到相应于待测组分 A、B、C 各自浓度的信号。

单组分和多组分红外气体分析仪都是以贝尔定律为分析原理的光谱仪器。严格地讲，贝尔定律只适合于描述在某一波长上红外辐射的吸收。在红外气体分析仪中，测量得到的不是在某一波长上红外辐射的吸收，而是在某一窄波段内红外辐射的吸收。这种情况比原理上贝尔定律所描述的红外辐射吸收与待测组分浓度之间的关系复杂得多。因此，红外气体分析仪测定的红外辐射吸收与待测组分浓度之间的关系必须通过实际标定确定。

红外气体分析仪除了单原子气体（如 He、Ne、Ar 等）和双原子气体的同核分子（如 O_2 、 N_2 、 H_2 等）不能分析外，其他具有偶极矩的气体分子都可以分析。此外，它还具有精度高、灵敏度高、反应迅速等独特的优点。

第五节 红外无损检测

红外无损检测是 20 世纪 60 年代以后发展起来的新技术。对于某些采用 X 射线、超声波等无法探测的局部缺陷，用红外无损检测可取得较好的效果。

一、红外无损检测的原理和基本方法

所谓红外无损检测，就是在不破坏物体原有结构的情况下，借助检测物体的红外辐射（或表面温度场）变化来判断物体内部有无缺陷的一种试验方法。红外无损检测是通过测量热流或热量来鉴定金属或非金属材料质量、探测内部缺陷的。如果向一块试样表面注入一定的热流，则其中一部分热流必然向试样内部扩散，其扩散速率取决于试样的热物理性质，并可通过试样表面的温度分布显示出来。对于无缺陷均匀试样而言，当热流均匀稳定地注入其表面后，热流能够均匀地向试样内部扩散和从表面反射，因而试样表面温度场也是均匀分布的。对于内部含有隔热性缺陷的非均匀试样而言，当均匀注入的热流向试样内部扩散时，因在缺陷处受阻，形成热量堆积，反映到试样表面的温度场，在相应部位将出现温度较高的局部“热区”。对于内部含有良好导热性缺陷的非均匀试样而言，将使注入热流更快地向体内扩散或传递，相应地在试样表面温度场中形成比周围温度稍低的“冷区”。由此可见，不论试样内部存在哪种缺陷，当热流从表面注入时，都会在含有缺陷的试样表面位置与无缺陷表面位置之间产生温差，并且这个温差的大小不仅取决于试样本底材料的热物理性质，也决定于缺陷的热物理性质、几何尺寸及其距表面的深度。由于有与无缺陷部位的表面间局部温差的存在，则表面的红外辐射强度必然出现差异。利用红外成



像方法将能很容易地检测出温度的变化情况,从而可判定出缺陷的情况。

红外无损检测方法可以分为被动检测法和主动检测法两大类。

(1) 被动检测法。如果被检测零件自身具有高温(如零件在生产过程中已具备较高温度),那么当在较低环境温度下自然冷却时,零件内部热量向外界传递,若其内部存在局部缺陷,在传递过程中会造成有缺陷和无缺陷均匀部位表面出现温度不同的温度场;如果被检测零件自身不具有高温,可把被测零件放入较高温度环境中恒温保持一定时间后,再迅速置于另一个较低的恒温环境自然冷却,在零件自然冷却放热过程中,也会因缺陷热物性参数不同而导致传热受阻或加快,于是,零件表面红外辐射(或温度分布)出现不均匀现象。此时,若用红外扫描方式检测,就会在记录曲线上出现温度分布的凹陷或凸起尖峰;若使用红外热像仪进行成像检测,就会在记录的热图像上出现反映内部存在缺陷的暗斑(冷区)或亮斑(热区)。由于这种检测方法不是在检测过程中主动向被测零件注入热流,故称为被动检测法。

(2) 主动检测法是首先人为地向被测零件以不同方式注入热流,然后通过检测其表面温度场来鉴别零件内部有无缺陷的试验方法。对于主动式红外无损检测而言,选择合适的热流源和热注入方式是十分重要的。通常,可供使用的热流源包括如下几种类型:

- 1) 喷注式热流源。如热空气喷注、等离子喷注及火焰直接加热等。
- 2) 光辐射热流源。如利用红外灯、弧光灯、激光器等光源产生的辐射热流。
- 3) 电加热线源。如感应加热线圈;在导电零件上直接通以均匀电流加热;在不导电材料零件上涂敷一层导电材料,并通以电流加热;或者对绝缘材料施加交变电压,借助介质损耗或内部缺陷放电加热等。
- 4) 机械热流源。如利用摩擦加热等。

红外无损检测中究竟选用主动还是被动检测法,则应根据具体检验对象和检验零件条件(如是否需要注入热流源)来确定。不论选择哪种热流源,首先必须根据被检测零件材料的性质和可能达到的检验灵敏度来确定。其次,在选择热流源时,还应该考虑到对零件表面加热的速度、均匀性、注入范围要适中,以及尽可能使检测系统简单,便于应用红外探测系统进行检测等要求。

二、红外无损检测的特点

红外无损检测方法具有如下特点:

(1) 非接触检测。使用红外无损检测方法在检测时不需要与被测物体直接接触,故不会破坏被测物体的热平衡状态。被测物体可以是冷的或热的,还可以是运动着的和正在制造过程中的零件成品或半成品,因此,红外无损检测方法便于在生产现场进行在线质量检验。

(2) 使用安全,快速省时。红外无损检测探测的是物体红外辐射,没有对体会造成伤害的其他射线,使用安全。现代红外探测系统的响应时间在微秒至毫秒量级之间,对于一个大的视场完成一次扫描,只需几秒至几分钟,故能在零件的生产流程之中同时完成质量检验工序。

(3) 准确可靠, 空间分辨能力强。由于使用了高温分辨率红外扫描探测系统, 对温差的检测是非常精确的。另外, 一般红外辐射计可以把扫描焦点聚焦到直径小于 0.5mm , 能在几毫米大小的目标表面上测绘出温度分布的热图像, 若使用红外显微镜, 还能使聚焦直径小于 0.025mm , 分辨力更强。

(4) 操作简单, 容易判读。由于加热和探测设备比较简单, 可以针对各种特殊需要设计出适宜的检测方案。输出电信号便于控制和处理, 不需要对操作人员进行专门的培训。不论被测零件的数量多少或面积多大, 只要这些零件或全部面积都能够处在红外检测仪器的扫描范围之内, 总可以检测到所有零件面积上的温度分布。

三、红外无损检测系统

红外无损检测系统可以有多种多样的结构形式, 但它们的工作原理是基本相同的, 区别仅在于热流注入的方式和对被测零件表面温度的检测记录与处理方法上的不同而已。下面介绍一种实用化的红外无损检测系统。

在红外无损检测的应用中, 各种热流源向被测零件注入的热量以前常采用稳定的连续热流。20 世纪 80 年代逐步发展的用调制光辐射加热被测零件的红外无损检测技术称为光热辐射 (PTR) 测量技术。由于这种红外无损检测方法采用峰值功率很高的光脉冲加热, 用红外热像仪或热电视成像检测缺陷, 所以, 又有人称其为脉冲电视热成像无损检测技术。调制式红外无损检测的热注入可在被测零件内部形成一个热能波传播的热不平衡过程, 其探测能力与注入的热功率成正比, 与注入恒定热流的红外无损检测方法相比, 对被测零件厚度的限制较小, 更适用于较厚的钢、铝、铜、塑料板材和厚度不超过 $10 \sim 15\text{cm}$ 的层状复合材料的无损检测。

图 5-27 为一种使用红外热像仪的实用型自动红外无损检测系统结构框图, 该系统属于光辐射热流源注入的检测系统, 用红外热像仪做成像检测, 采用大面积热激励方式。该系统更适用于检测大尺寸零件中的缺陷。下面介绍这种自动化红外无损检测系统的各组成部分及其功能。

1. 光辐射热流源

作为激励被测零件的注入热流源, 该系统使用 4 个一组的直线照射灯, 配置成一个 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的正方形 (这个尺寸也是被测零件尺寸所要求的), 它们由输出 $4 \sim 20\text{kJ}$ 的电容器组供电。为了减小热图像的不均匀, 光源在被测零件表面上照射的能量分布应尽量均匀。为使检测条件达到最佳状态, 不仅应该能改变照射的能量值 (或零件表面上的辐照强度), 而且还应该能够改变照射光脉冲的持续时间 (例如从 $0.1 \sim 100\text{ms}$), 这样, 就可以避免由于表面温度在短时间内升得过高而损坏被测零件。通常, 可

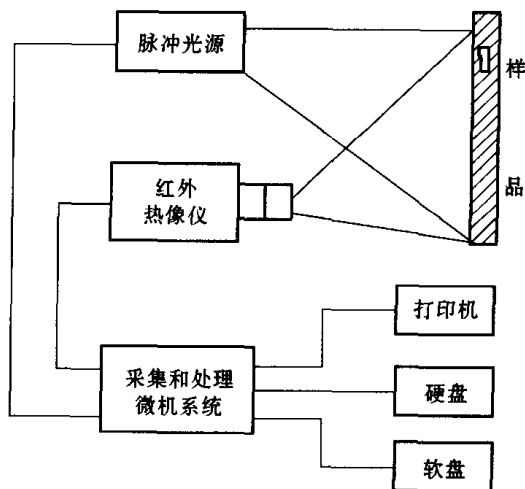


图 5-27 实用型自动红外无损检测系统结构框图

以把激励和设想中的缺陷深度匹配起来,即缺陷离表面越远,其热特征信号就出现得越迟。为了满足在某些方面使用的灵活性和简便性的需要,激励源可以做成组件式闪光灯。

2. 红外检测装置

为了检测在上述光辐射激励下零件表面的温度(或红外辐射)分布,使用一台性能参数适宜的红外热像仪作为红外检测装置。

3. 红外图像采集和处理系统

在这种红外无损检测系统中,控制、红外图像采集、处理以及结果显示等全部功能都是通过一个与所用红外热像仪相配合的微型计算机处理系统来完成的。

该系统的主要采集功能有如下四个方面:

- (1) 在第一帧或任何一帧上的同步。
- (2) 启动的主同步或从同步(整张图像或部分图像的格式)。
- (3) 按顺序进行带平均或者不带平均的实时采集。

(4) 所采集热图像的最大数量,取决于计算机的配置。例如在使用 512K 字节盘时为 63 帧完整图像;使用 2M 字节盘时为 255 帧完整图像。

该系统的主要处理功能包括:可同时打印出 20 张的热图像,并对热图像进行比较;按预定的设置进行滤波;确定区域,画出轮廓;进行三维绘线;完成图像的加法和减法运算;在纸上或者透明片上以 16 或者 128 灰度等级显示的高分辨率彩色打印;在任何时候都可以对彩色屏幕进行清除(采集和处理);在所拥有的存储器极限范围内,可以与其他所有的软件发生交互作用,能以任何语言写入(如专门的计算机程序、正文处理和语言等)等。

该处理系统的优点之一是它允许加以任何语言写成的个人处理软件。通常的图像处理功能既快速,又能够自动编制文件(如滤波、加法、减法、分布、三维显示、放大温度图等)。其他的一些功能则是专门为无损检测的应用而设立的(例如,文件顺序的扫描,一系列图像的比较、轮廓探测操纵机构以及缺陷分析等)。

4. 缺陷的自动探测和特征研究方法

一般使用的图像处理方法包括如下几个步骤:

(1) 热图像的采集。为了与以后采集的图像作比较,在注入光辐射之前采集第一帧图像并用作参考。然后,用光辐射热流源激励被测零件,并在热弛豫过程中采集一系列热图像。

(2) 图像序列的预处理。预处理包括能够获取一张综合图像的操作序列,该图像另外还能够用来对缺陷进行 $x-y$ 定位和估计它们的面积。

(3) 缺陷轮廓的确定和计算机显示。利用上面经过预处理的热图像,将能够确定缺陷并且计算出其面积的大小。

(4) 缺陷深度的测定。在检测的最后阶段,利用软件测定每个缺陷的深度。

上述系统主要是针对各种层状结构材料的红外无损检测而设计的,稍加改进就可以借助反射或透射的检测方式,用于其他类型零件生产中的无损检测。

四、红外无损检测的应用

1. 红外无损检测的适用范围

(1) 材料、零件成品或半成品的质量检验。运用红外扫描方法与质量完美的标准样品红外扫描曲线或热图像对照, 可对原材料或半成品进货质量、生产工艺过程及最终的产品质量做出评价。例如, 在航空航天工业中广泛使用的胶合剂粘合的骨架蒙皮、整体壁板和夹层结构, 固体燃料的导弹或火箭发动机壳体也是胶合的夹层结构, 在飞机翼片中普遍使用胶合铝蜂窝结构。所有这些夹层或多层胶合结构, 均可用红外无损检测方法做鉴别。

(2) 生产过程的自动监控。利用红外无损检测的非接触特点, 进行生产工艺过程的及时(或在线)检验, 使质量检验与加工过程同时完成, 实现了现场监控。

(3) 疲劳损伤探测与剩余寿命预测。各种机械设备零件在过载荷作用下会产生疲劳损伤或裂纹。定期对关键性零件的疲劳损伤情况及其发展趋势进行红外无损检测, 不仅可以及时发现已产生的损伤缺陷, 防止突然断裂, 而且可以估算设备的剩余寿命, 保障设备安全运行。

(4) 指导产品设计。在产品的设计阶段, 可借助红外无损检测来核实或验证设计者的某些计算是否正确, 结构设计是否合理, 从而减少设计失误。

2. 红外无损检测的应用举例——定子线棒本体缺陷的检测

定子绕组故障是大型发电机和电动机的主要故障之一, 而造成定子绕组故障的主要原因包括绕组绝缘缺陷、定子线棒本体内部缺陷以及线棒接头焊接质量不佳等。下面介绍对定子线棒本体缺陷的检测方法。

定子线棒本体缺陷主要包括机械损伤(裂纹)和内部砂眼或空洞等缺陷。带有这种本体缺陷的线棒一旦投入使用, 运行中因线棒内部电流密度分布不均匀, 必然在电流密度比较集中处引起局部过热。而且, 含有内部缺陷的定子线棒长期在局部高温下运行, 还会诱发上述绕组绝缘故障。借助红外无损检测方法, 在制造大型电动机过程中, 把含有内部缺陷的不合格线棒筛选出来, 会大大减少电机类设备投运后的事故发生率。同时, 还可对从旧机组拔下的线棒绝缘老化程度、是否存在机械损伤和能否继续使用等做出可靠的评定。

定子线棒的缺陷检测与质量评定, 尽管可以应用各种常规的电气试验方法和电子显微镜来完成, 但都不如红外无损检测方法简便而直观, 且对于一些微小的缺陷而言, 一般电气试验方法也往往难以发现。当对定子线棒缺陷进行红外无损检测时, 为了方便起见, 采用图 5-28 所示的直接通电加热方法。即取两根线棒(额定电压 10.5kV, 额定电流 1460A), 通过试验电流 2000A (电流大小可视情况而定), 并用红外热像仪连续记录线棒逐点的温度分布。当线棒存在不同缺陷时, 将表现有

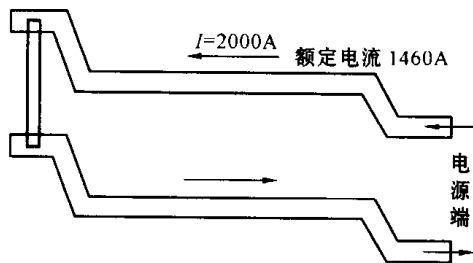


图 5-28 定子线棒缺陷红外无损检测的实施方案

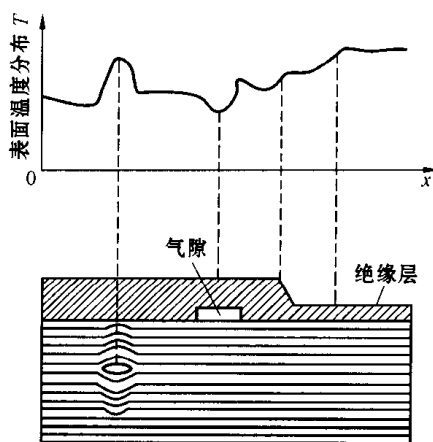


图 5-29 不同线棒缺陷的表面温度特性

不同的表面温度特征。如图 5-29 所示, 当线棒本体内部存在裂纹或空洞等缺陷时, 因电流密度分布不均匀, 必然在缺陷对应的表面区出现较高的局部温升; 当线棒绝缘层存在气隙、分层或脱壳缺陷时, 如果缺陷内介质 (如空气) 热导率低于绝缘层材料的热导率, 则缺陷将阻碍线棒发热向表面传递, 因此, 有缺陷区域的绝缘层局部表面温升将低于周围均匀区域表面的温升; 当线棒绝缘层过薄时, 由于热阻减小, 所以, 相对于正常区域, 薄绝缘层部位应有较高的温升。这样一来, 通过分析红外热像仪记录的线棒表面温度分布热像图, 就可以判定定子线棒是否存在机械损伤或内部缺陷, 绝缘层厚度是否均匀, 绝缘层内部有无气隙、分层或脱壳等缺陷, 甚至还可以确定有没有局部或整体受潮现象。

第六节 红 外 水 分 仪

在近红外光谱区有某些波长的红外辐射能量可以被水分子选择性地吸收, 而在这些中心波长之外的红外辐射能量几乎不被水分子吸收。据有关资料介绍, 纸张中的水分对红外辐射能量的吸收波长分别为 1.18 、 1.46 、 1.94 和 $2.92\mu\text{m}$ 。由于水分对波长为 $1.94\mu\text{m}$ 的红外辐射具有较高的吸收灵敏度, 而且被测纸张的其他组分在这一波段内对其的影响最小, 所以 $1.94\mu\text{m}$ 被大多数红外水分仪选作测量波长。为了提高测量的可靠性和准确性, 选用不被水分吸收的 $1.81\mu\text{m}$ 作为参比波长, 利用两种波长的红外辐射轮流交替地透过被测纸张, 取其透过纸页的辐射强度的比值来测定纸张的水分。

如果以 $E_{1.81}$ 和 $E_{1.94}$ 分别代表两种波长红外辐射透过纸页后的检出强度, 则当纸张水分为零时, $E_{1.81} = E_{1.94}$, 两者之差亦为零。当纸张水分大于 0% 时, 有

$$E_0 = E_{1.81} - E_{1.94} = E_{1.81} \left(1 - \frac{E_{1.94}}{E_{1.81}} \right)$$

若 $K = E_{1.81}$ 为一常数, 则
$$E_0 = K \left(1 - \frac{E_{1.94}}{E_{1.81}} \right) \quad (5-38)$$

由式 (5-38) 可知, 只要保证参比信号 $E_{1.81}$ 为常数, 则测量值 E_0 的大小与精度就仅取决于 $E_{1.94}/E_{1.81}$ 的值。

图 5-30 为红外水分仪组成原理图。显然, 该仪表的光学系统采用的是时间双光路形式。测量滤光片 ($1.94\mu\text{m}$) 和参比滤光片 ($1.81\mu\text{m}$) 安装在一个调制盘上。此调制盘在同步电机的带动下旋转, 对红外光源发出的红外线进行调制, 从而使波长为 $1.94\mu\text{m}$ 和 $1.81\mu\text{m}$ 的红外辐射交替地投射到被测纸张上。透过纸张的散射光, 通过一光锥集光系统投射到光敏电阻 (PbS) 上, 并被转换成相应的电信号。由于硫化铅光敏电阻的输出阻抗

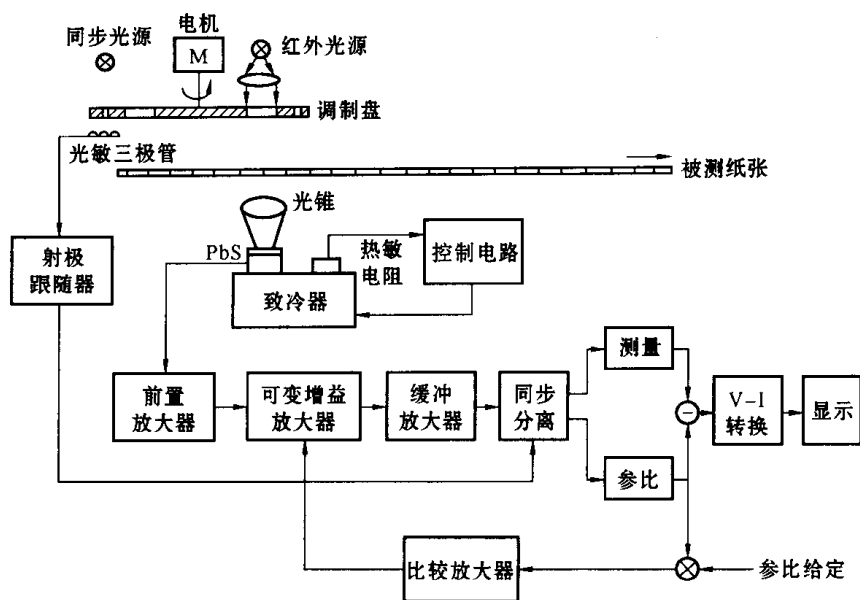


图 5-30 红外水分仪原理框图

较高，故采用低噪声高输入阻抗的前置放大器与之匹配，再经过可变增益放大器和缓冲放大器，将测量信号放大到足够大的幅度，然后进入同步分离开关电路。在调制盘上有四条斩光槽，交替地照到光敏三极管上，产生同步信号，与 $1.81\mu\text{m}$ 的红外线（参比）同步的电信号；与 $1.94\mu\text{m}$ 红外线（测量）同步的信号。在同步信号的作用下，同步分离电路将测量与参比信号分开。测量信号和参比信号经减法器相减得出差值，再经电压—电流转换电路处理后，推动指示装置显示出水分的测量值。在测量过程中，为了保持参比信号为一常数，把分离出来的参比信号进行比较放大，亦即将参比信号与给定信号相比较，其差值经放大后去控制可变增益放大器的增益，以保持参比值恒定。

该仪表所用的硫化铅光敏电阻是一种对温度非常敏感的光敏器件。为此，采用半导体制冷器与控温电路进行控温，使温度保持在 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 之间的某一温度，其变化范围不超过 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。同时，为了防止致冷器表面结露和保护光锥面的清洁，在光锥集光部件内充以干燥的氮气后加以密封。

该仪表由于使用单一光源、单一光路、单一光电探测器并采用参比技术测量，所以光源和光敏电阻的偏压及其灵敏度的小范围变化对输出信号不产生明显的影响，纸张的定量（单位面积的纸页重量）以及大气中的水蒸汽、灰尘及纸毛对测量的影响也不大。但应指出，由于构成纸张的纤维物本身对红外线存在反射和吸收作用，透过纤维物的红外线是无规则的散射，这些散射效应与纤维的粗细和填料的多少有密切关系。其结果是不能把透过纸张的红外辐射能量全部转变为测量信号，从而使得纸张水分对红外线的吸收变得复杂。因此，使用红外水分仪测量纸张水分时，不同的纸种对应着不同的标定曲线。

第七节 红外辐射检测在其他方面的应用

一、红外应力分析

红外应力分析又称热辐射应力图分析, 它是以检测伴随应力变化的微小温度变化的热变化为基础的一种非接触式的、可以在现场对实物进行实时应力测定的方法。

测量应力的原理是利用物体或构件的热弹性效应, 即材料在弹性极限以下的受力过程中, 表面温度与所受应力的变化有联系。

当一材料被绝热变形时, 需对它做功, 根据热力学第一定律, 这个功可以转换为温度的变化, 也就是说, 物体的应变状态发生变化时, 将产生微小的温度变化。

对于各向同性材料, 如果变形是可逆过程, 则由热力学定律和弹性体的结构方程可推导出

$$\begin{aligned}\Delta T &= -\frac{T \cdot \alpha}{C_p \cdot \rho} \sum_{i=1,2,3} \Delta \sigma_i \\ &= -K_m \cdot T \cdot (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)\end{aligned}\quad (5-39)$$

式中 $K_m = \frac{\alpha}{C_p \cdot \rho}$;

α ——线膨胀系数;

C_p ——定压比热;

ρ ——材料密度;

T ——瞬时绝对温度;

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——物体任一点的主应力;

$\Delta \sigma_i$ ——主应力的变化。

由式 (5-39) 可见, 温度变化与主应力变化的和成线性关系。若采用红外辐射测温技术, 测出了温度变化, 就可以得到物体的应力分布, 这就是红外测应力的原理。

对红外应力图的测定方法主要有红外热成像系统测量和采用红外应力分析仪测量两种。

1. 红外热成像系统

应变状态变化产生的温度变化, 在弹性范围内低于 1°C 。为了准确测量, 目前多采用红外辐射技术, 即采用红外热像仪来测量温度的变化。

休斯公司制造的热成像系统, 主要由热像机头、微处理器、显示器组成。热像机头内有扫描器和镜头, 将物体发射的红外辐射转换成电信号输出, 传输到成像处理器, 微处理器将数据转换成彩色电视信号, 由显示器显示 16 级的彩色热像图。

该设备给出的是试件表面温度。用它来测定温度的变化 ΔT , 乘以标定因子 K 后, 可求出主应力变化的和。

2. 红外应力分析仪

按照斯忒藩—玻尔兹曼定律, 经历温度变化 ΔT 的表面辐射变化由下式给出

$$\Delta E = 4\epsilon\sigma T^3 \Delta T \quad (5-40)$$

如果用—个线性系统测量表面发射率变化,系统的输出信号 S 将与这个变化成正比,即

$$S = R\Delta E \quad (5-41)$$

式中 R ——探测器的响应因子。

结合式 (5-39) 得出

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = -\frac{S}{4R\epsilon\sigma T^4 K_m} \quad (5-42)$$

即

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = AS \quad (5-43)$$

式中 A ——不变的“标定因子”,与物理常数、材料常数及系统参数有关。

由式 (5-43) 可知,如果已知标定因子 A ,测出物体表面辐射率变化 S ,即可得出主应力变化的和。红外应力分析仪就是这样一种辐射率测量系统,它的分辨率较高,可达 0.001°C 。目前红外应力分析仪已被用来进行薄壁压力容器端部的弹性应力以及复合材料柱状壳体的应力分析。

二、红外线测距系统

红外线测距系统是利用红外线发射器不断发射出一定频率的红外线,经障碍物反射,红外线接收器接收到反射波信号,并将其转变为电信号。测出发射波与接收到反射波的时间差 t ,即可求出距离 s

$$s = \frac{1}{2} ct \quad (5-44)$$

式中 c ——光速,一般取 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

根据该测距原理设计出的红外线测距系统的基本框图如图 5-31 所示。红外发射电路发射的红外线,遇到障碍物发生漫反射,红外线接收电路第一次接收到反射的红外线时,给单片机一个信号脉冲,启动单片机内的计数器,计数器置位进入计数状态;当接收电路第二次接收到反射器的红外线时,经单片

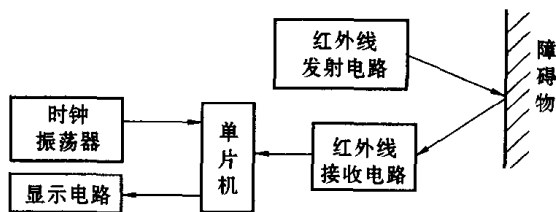


图 5-31 红外线测距系统基本框图

机处理给出一个信号脉冲,使计数器停止计数,数据被锁存。通过编程,单片机自动处理,用脉冲的周期 T 乘以脉冲数 n 就得到发射红外线到接收红外线的时间差 t ,利用 $s = \frac{1}{2} ct$ 可得到测量的距离,其值显示在显示器上。

红外线测距可用在汽车防撞系统中。该系统由发射部分、接收部分、单片机、译码显示电路、报警部分及自动刹车减速装置六部分组成。

发射部分由 40kHz 振荡器、恒流发射电路和发射探头等组成,振荡器产生占空比非常

小的窄脉冲,采用恒流源提供 20mA 左右的电流,这样减小了功耗,提高了发射率,最后红外线由发射探头聚焦,以散射角小于 2° 发射。

接收部分由接收探头、第 1 级放大电路、第 2 级放大电路、整形、AGC 控制增益等电路组成,接收探头接收信号后经第 1 级与第 2 级放大电路放大,由施密特触发器电路整形,送入单片机处理。其中 AGC 控制接收电路的增益,保证恒幅输出。

单片机由时钟振荡器和单片机组成,经过编程,单片机实现自动计数、计算时间 t 和测量距离 s ,并将测量距离连续输出给显示装置,同时在车间距离为 30m 时产生报警信号和车间距离为 20m 时,产生自动刹车减速信号。

译码显示电路由译码电路、显示器组成,单片机输出的距离信号经译码器译码,通过显示器显示出来,可动态显示车与障碍物的距离。

报警部分由触发器、驱动电路和小喇叭组成。当车间距为 30m 时单片机给触发器一个信号,使触发器置位产生一组脉冲,通过驱动电路,使小喇叭发出报警声,当大于 30m 时,触发器复位,停止产生脉冲。

自动刹车减速装置由开关 K 和自动刹车减速装置组成,当司机认为有必要用到自动刹车减速装置时,闭合开关 K。当车间距小于 20m 时,单片机提供一个信号,启动自动刹车减速装置,防止碰撞。

三、红外遥测

运用红外光电探测器和光学机械扫描成像技术构成的现代遥测装置,可代替空中照相技术,从空中获取地球环境的各种图像资料。图 5-32 为现代遥测装置普遍应用的行扫描仪结构示意图。

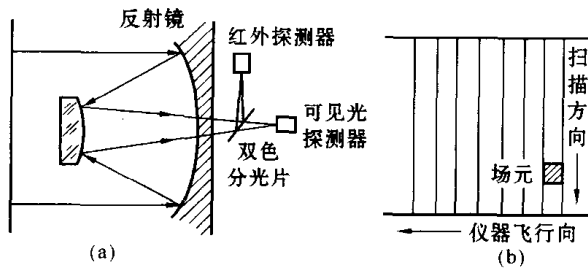


图 5-32 行扫描仪结构及成像原理

在气象卫星上采用的“双通道扫描仪”装有可见光探测器和红外探测器。扫描机构每扫描一次将地面和云层的每个场元的辐射依次收入光学系统,经过聚焦射向可见光探测器和红外探测器。探测器输出的信号经处理后记录在磁带上暂时储存,也可以同时用无线电发射机将视频发射到地面接收。

接收到的信号可以在屏幕上观看或制成照片送入计算机进行图像处理。

红外探测还可用于森林资源、矿产资源、水文地质、地图绘制等勘测工作。

第一节 核辐射检测的基本原理

一、放射性同位素

各种物质都是由一些最基本的物质组成的,人们把这些最基本的物质称为元素。当不同种类的元素在一定的条件下按不同的数量进行化合后,就形成了很多较复杂的物质。

组成每种元素的基本单元就是原子,每种元素的原子不是只存在一种,如氢原子就有三种: H^1 、 H^2 、 H^3 。具有相同的核电荷数 Z 而有不同的质子数 A 的原子所构成的元素称同位素。它们在元素周期表中占有同一位置。

假如某种同位素的原子核在没有任何外因的作用下,它的核成分自动变化,这种变化称为放射性衰变。在衰变过程中将放出射线的同位素就称为放射性同位素。原子核成分不发生自动变化的同位素称为稳定的同位素。

根据实验可得出放射性衰变规律为

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6-1)$$

式中 N_0 ——原有的物质原子数;

N ——物质在 t 时尚未衰变的原子数;

λ ——物质的衰变常数。

元素衰变的速度决定于 λ 的量值, λ 越大则衰变越快。习惯上常用和 λ 有关的另一个常数即半衰期 T 来表示衰变的快慢。放射性元素从 N_0 个原子衰变至 $N_0/2$ 个原子所经历的时间,称为半衰期,可以求出为

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad (6-2)$$

$$T = \frac{0.693}{\lambda} \quad (6-3)$$

T 和 λ 一样是不受任何外界作用的影响且和时间无关的恒量,不同放射性元素的半衰期 T 是不同的。原子序数在 83 以下的每一种元素都有一个或几个稳定的同位素,原子序数在 83 以上的同位素则只有放射性同位素。放射性同位素又分天然的和人工的两种。从天然矿石



中提出的天然放射性同位素数量少、品种少而且价格贵。目前知道的可以利用的放射性同位素有二百多种,这些放射性同位素是用原子能反应堆和回旋加速器等办法制造出来的。原子能反应堆是用人工办法制备放射性同位素的“加工厂”。物质被反应堆中的电子流照射而变为放射性物质,这种方法产量高、品种多、成本低。利用回旋加速器也可以制备一些反应堆所不能制备的放射性同位素。

二、各种射线的基本特征

放射性同位素的原子核在核衰变过程中放出各种带有一定能量的粒子或射线的现象称为核辐射(也叫放射性蜕变)。有的衰变后就变成稳定的同位素,有的衰变后仍然是不稳定的,并且继续衰变直到变为稳定的同位素为止。常见的核辐射的种类有 α 辐射、 β 辐射、 γ 辐射、X辐射和中子辐射。

核衰变中,核辐射粒子或量子具有能量。为了估计这个能量的数量,在原子物理中使用专用的单位——电子伏特(eV)。电子伏特是一个电子在1伏特电压的作用下被加速所获得的能量数值。

1. α 辐射

从放射性同位素原子核中放射出的 α 粒子,实际上就是氦原子核。它的质量为4.002775个原子质量单位(1原子质量单位= 1.66057×10^{-24} g),并带有两个正电荷。 α 粒子对气体的电离作用比其他辐射强得多。当 α 粒子通过气体时,使其分子或原子的轨道电子产生加速运动。如果轨道电子获得足够大的能量,就能脱离原子成为自由电子,从而产生一对由自由电子和正离子组成的电子对,这种现象称为电离。每形成一个离子, α 粒子便损失一部分能量。经过与物质分子或原子的多次碰撞, α 粒子自身的能量不断消耗,速度愈来愈慢,最后和自由电子结合成中性氦原子, α 粒子即达到径迹的末端。

α 粒子在物质中运动时会改变方向,这种现象称为散射,但数目较少。 α 粒子的射程很短,在标准状态的空气中,4MeV的 α 粒子平均射程为2.5cm;7MeV的射程约为6cm。放射源放射的 α 粒子的能量一般为4~10MeV。

作 α 衰变的放射性同位素有 ^{210}Po (钋)、 ^{226}Ra (镭)等。人造同位素大部分不放射出 α 粒子,只有少数人造同位素放出 α 粒子,如 ^{213}Ra (镭)、 ^{233}Np (镎)等。在测量中 α 辐射主要用于气体分析和测量气体压力、流量等有关参数。

2. β 辐射

β 粒子实际上就是电子,它的质量为0.000549原子质量单位。放射性同位素的原子核放射出电子的衰变称为 β 衰变。能进行 β 衰变的同位素很多,但能单独产生 β 射线的放射体却不多,在多数情况下,放射体除了放射 β 粒子外,还伴随放射 γ 射线。

β 射线与 α 射线相比,电离作用小而穿透能力大。放射性同位素产生的 β 粒子所带的能量一般为几十万电子伏特到几兆电子伏特。 β 粒子的运动速度均较 α 粒子的运动速度高得多,约超过20万km/s。 β 粒子在空气中的射程可达20m。在检测技术中,常用物质对 β 辐射的吸收作用来测量材料的厚度、密度或重量,根据辐射的反散射来测量覆盖层的厚度。



3. 中子辐射

中子是一种不带电的粒子，它的质量为一个原子质量单位。按其本身的能量可将中子分为快中子、中能中子、慢中子和热中子。中子是不带电的粒子，它和原子核之间不存在电排斥力，因此常利用它来产生原子核反应，人们用中子打击原子核，使它们发生原子核反应，从而得到上千种同位素。中子辐射具有较强的贯穿能力，可以从含氢介质中打出质子，因此可用来测量含氢介质的物位和成分等。

4. X 辐射和 γ 辐射

X 射线和 γ 射线本质上都是波长很短的电磁波，X 射线在真空中的波长约为 $10^{-8} \sim 10^{-11} \text{m}$ ， γ 射线的波长一般为 $10^{-10} \sim 10^{-13} \text{m}$ 。X 射线是原子核内层轨道电子产生跃迁时发出的； γ 射线是在原子核受到激发后产生跃迁时发出的。由于波长不同，X 射线和 γ 射线的能量不同，其贯穿能力也不一样。X 射线可以穿透几十厘米厚的金属板，而 γ 射线能穿透几十厘米厚的铅板。它们的电离作用很弱，当 X 光子或 γ 光子照射到物质上时，光子的能量可全部转移给电子，使其成为光电子而逸出，这种现象称为光电效应。当 X、 γ 射线通过物质时，由于发生了光电效应，它的强度将减弱。因为这一特点，X 射线和 γ 射线被广泛地应用到了探伤、厚度、物位的测量等方面。

三、核辐射检测的物理基础

核辐射检测是以射线和物质的相互作用为基础的。

1. 带电粒子和物质的相互作用

所谓带电粒子指的是 α 粒子和 β 粒子，它们与物质的作用主要有电离、激发、散射等。带电粒子通过物质时，由于不断和原子发生碰撞，将逐渐损失自己的能量而逐渐减速以致停止，其能量主要消耗在物质中原子的电离和激发上。一般在空气中产生一对离子所需的能量为 32.5eV 。 α 粒子比 β 粒子的电离本领大，在空气中 1cm 的路程上可以产生 30000 离子对，而 β 粒子只能产生几十到几百个离子对。 α 粒子的质量较大，电荷量较大，其电离本领强，射程较短。 β 粒子由于质量小，其电离本领远小于同样能量的 α 粒子。

带电粒子穿过物质时因受原子核的电场作用而改变方向称为散射。当散射角大于 90° 时，粒子经过散射之后将向后返回，这种散射称为反散射。 β 粒子的散射较 α 粒子的散射复杂得多， β 粒子由于质量较 α 粒子小，故容易被散射，并常常产生多次散射。

上述电离、激发、散射的结果就表现为入射粒子被吸收。

2. X 射线和 γ 射线与物质的相互作用

X 射线和 γ 射线与物质的相互作用主要有光电效应、康普敦散射和电子对的形成。当入射光子穿过物质时，光子和物质中的原子发生碰撞而把自身的能量交给原子核外的一个电子使它脱离原子而运动，而光子本身则被吸收，这种反应称为光电效应。光子所带走的能量 E_γ 为

$$E_\gamma = h\nu - \epsilon_i \quad (6-4)$$

式中 ν ——光子的频率；

h ——普朗克常数；

ϵ_i ——从 i 层移去一个电子所需的能量。

随着入射光子能量的增加, 能量损失主要表现在康普顿散射。它实际上是入射光子和物质中的电子发生弹性碰撞, 即光子偏离它原来的方向, 失去一部分能量, 然后将能量转移给电子。

当入射光子的能量大于所形成的电子对的静止能量 (大于 1.002MeV) 时, 就在物质中形成正—负电子对, 而光子则消失了。电子对生成的概率是随着入射光子能量增加而增大的, 且与该种物质的原子序数的平方成正比关系增加。

由于光电效应、康普敦散射和电子对的形成, 射线通过物质时其强度逐渐减弱, 它的减弱按指数曲线下降。

3. 核辐射检测的基本原理

根据粒子、射线与物质的相互作用原理, 选择合适的辐射源, 使其射线与被测物质相互作用, 由此产生的相应变化由探测器检测出来, 即可达到测量的目的。例如, 由于气体原子电离而形成的电离电流, 其大小与被电离气体压力成正比, 根据这种原理可以测量出电离气体流过已知距离所需的时间, 并且可以做出气体压力计和气体流量计, 若用一个合适的初级射线去照射被测量样品时, 样品中的物质受到激发而产生各种元素的特征 X 射线。由于特征 X 射线的能量和元素种类有关, 特征 X 射线的强度与该元素的含量有关, 根据这种关系就可以做出用来分析物质成分的 X 荧光分析仪。当射线投射到被测物以后, 一部分射线被物质吸收, 而一部分射线穿过被测物质。穿过被测物质的射线强度, 在物质成分一定的情况下与被测物的厚度和密度有关。因此, 若被测物的密度为已知时, 则可以根据射线强度来测出被测物质的厚度。若被测物质的厚度已知时, 则可以制成密度计。而反散射回来的射线强度在物质成分一定的情况下, 和物质厚度、密度以及射线源与被测物的相互位置有一定关系, 因此在密度和相互位置已知的情况下就可以制成反射式厚度计。根据同样的道理, 也可以制成反射式密度计和物位计。利用 X 射线和 γ 射线较强的贯穿能力, 可以对构件进行无损探伤等。

β 、X、 γ 射线穿过物质层后, 由于物质的吸收作用, 射线的强度按指数规律衰减, 即

$$I = I_0 e^{-\mu h} \quad (6-5)$$

式中 I 、 I_0 ——出射和入射的辐射通量的强度;

μ ——吸收层的线性吸收系数;

h ——吸收层的厚度。

式 (6-5) 是设计穿透式厚度计和物位计的理论基础。

若引入质量吸收系数 $\mu_m = \mu/\rho$ (其中 ρ 为密度), 则上式可改写为

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho h} \quad (6-6)$$

当厚度 h 一定后, 式 (6-6) 即成为核辐射式密度计的理论基础。

研究结果表明, 当 γ 射线能量 E 大于 0.3MeV 时, 质量吸收系数 μ_m 与吸收体的化学成分无关, 而当 E 小于 0.3MeV 时, 质量吸收系数将取决于吸收体的化学成分。成分复杂

的物质对 γ 射线的吸收系数 μ_m 可表示为

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n F_i \mu_{mi} \quad (6-7)$$

式中 F_i ——物质中第 i 种成分的质量百分比；

μ_{mi} ——物质中第 i 种成分的质量吸收系数。

利用这种关系可以分析物质的成分。

除了利用以上原理外，还可以利用放射源的标记作用进行测量。将放射源装在被测物体上，利用放射源和核辐射探测器间的距离变化使射入核辐射探测器的辐射强度发生变化，根据测得的射线强度可以确定被测物的位置和运动情况。利用这种原理可以测量线位移、角位移、转速、液位、流量等参数，还可以把放射性同位素掺入物料中，观察其与其他物质的混合情况及在设备中的流通情况等。

第二节 放射源和核辐射探测器

核辐射检测装置一般由放射源、探测器、电信号转换电路和显示装置等组成。放射源是这种仪表的特殊部分，是由放射性同位素做成的。探测器可以探测出射线的强弱及变化，并将射线信号转变为电信号。电信号转换电路由各种电路单元组成，它将电信号进行各种变换和处理。显示装置可以是电流表或指示灯，也可以是数字显示装置，它的作用是将被测参数显示出来。

一、放射源

1. X 射线的获得

在工业应用方面，X 射线是由一种特制的 X 射线管产生的，X 射线管的原理图如图 6-1 所示。它由阴极、阳极、玻璃或陶瓷的外壳组成。阴极是一加热的灯丝，用于发射电子，阳极是由耐高温的钨制成。工作时在两极之间加有高电压，从阴极灯丝发射的高速电子撞击到阳极靶上，部分电子在原子核场中受到急剧阻止，而有一部分动能转变为连续能量的电磁辐射，产生所谓韧致 X 射线，即连续 X 射线，但大部分电子的动能消耗于阳极材料原子的电离和激发，最后转变成热能。

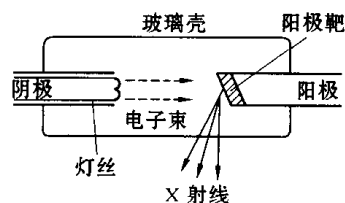


图 6-1 X 射线管原理图

为减少电子在飞往阳极过程中与气体分子相碰撞损失动能，X 射线管被抽成 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa 的真空。

电子流所带动能的绝大部分（97% 以上）都转化为热能传给阳极，因此阳极材料一般应选用耐高温的材料并通以冷却介质加以冷却。动能中仅一小部分（3% 左右）转变为 X 射线的能量。

阴极发射电子的数量基本上决定了从阴极飞往阳极电子流的大小（即管电流），而 X 射线的穿透能力则决定于电子从阴极飞往阳极的运动速度，它与加于两极之间的电压（即

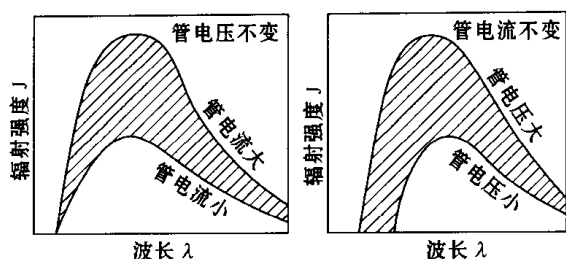


图 6-2 X 射线管管电压与管电流对 X 射线质与量的影响

管电压) 直接有关。X 射线管的管压愈高, 则产生的 X 射线波长愈短、穿透能力愈大。X 射线管电流与管压对 X 射线管质与量的影响如图 6-2 所示。

从图 6-2 中可以看出, 当只增加管电流时, X 射线辐射强度只是在原有各波长下相应增加, 而只增加管电压时, 则除原来各波长下相应增加辐射强度外, 还出现了更短波长的 X 射线。

X 射线管的转换效率随管电压的升高而升高, 当电压为 200kV 时, 转换效率只有 1.5%; 当外加电压上升到 5MV 时, 转换效率可达 37%。

2. β 、 α 、 γ 射线的获得

β 、 α 、 γ 射线一般是由放射性同位素产生的。常用的放射性同位素衰变的基本参数见表 6-1。

表 6-1

常用的放射性同位素及其基本参数

同位素	符号	半衰期	辐射种类	β 粒子能量 (MeV)	α 粒子能量 (MeV)	γ 射线能量 (MeV)	X 射线能量 (MeV)
碳 ¹⁴	¹⁴ C	5720 年	β	0.155			
铁 ⁵⁵	⁵⁵ Fe	2.7 年	X				5.9
钴 ⁵⁷	⁵⁷ Co	270 天	γ , X			0.136, 0.0014	6.4
钴 ⁶⁰	⁶⁰ Co	5.26 年	β , γ	0.31		1.17, 1.33	
镍 ⁶³	⁶³ Ni	125 年	β	0.067			
氪 ⁸⁵	⁸⁵ Kr	9.4 年	β , γ	0.672, 0.159		0.513	
锶 ⁹⁰	⁹⁰ Sr	19.9 年	β	0.54, 2.24			
钌 ¹⁰⁶	¹⁰⁶ Ru	290 天	β , γ	0.039, 3.5		0.52	
镉 ¹⁰⁹	¹⁰⁹ Cd	1.3 年	α , γ		0.022	0.085	
铯 ¹³⁴	¹³⁴ Cs	2.3 年	β , γ	0.658, 0.090, 0.24		0.568, 0.602, 0.794	
铯 ¹³⁷	¹³⁷ Cs	33.2 年	β , γ	0.532, 0.004		0.6614, 0.0007	
铈 ¹⁴⁴	¹⁴⁴ Ce	282 天	β , γ	0.3, 2.56		0.03 ~ 0.23 0.7 ~ 2.2	
钷 ¹⁴⁷	¹⁴⁷ Pm	2.2 年	β	0.229			
铥 ¹⁷⁰	¹⁷⁰ Tm	120 天	β , γ	0.884, 0.004, 0.968		0.0841, 0.0001	
铱 ¹⁹²	¹⁹² Ir	74.7 天	β , γ	0.67		0.137, 0.651	
铊 ²⁰⁴	²⁰⁴ Tl	2.7 年	β	0.783			
钋 ²¹⁰	²¹⁰ Po	138 天	α , γ		5.3	0.8	
钚 ²³⁸	²³⁸ Pu	86 年	X				12 ~ 21
镅 ²⁴¹	²⁴¹ Am	470 天	α , γ		5.44, 0.06	5.48, 0.027	

从元素周期表看出,放射性同位素种类很多。由于核辐射式检测仪表要求采用的放射性同位素的半衰期比较长,且对放射出来的能量也有一定要求,因此常用的放射性同位素只有二十种左右,例如 ^{90}Sr (锶)、 ^{60}Co (钴)、 ^{137}Cs (铯)、 ^{241}Am (镅)等。

射线源的结构应使射线从测量方向射出,而其他方向必须使射线射出的剂量尽可能小,以减少射线对人体的危害。 β 射线源一般为圆盘状, γ 射线源一般为丝状、圆柱状或圆片状。如 ^{204}Tl (铊)镀在铜片上,上面覆盖云母片,然后装入铝或不锈钢的壳内,最后用环氧树脂密封,即成为仪表用铊 204 放射源。图6-3所示为 β 厚度计辐射源容器,射出口处装有耐辐射薄膜,以防灰尘进入,并能防止放射源受到意外损伤而造成污染。容器是铅制的,铅抵抗放射线穿透的性能极强。

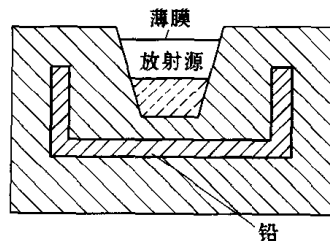


图6-3 放射源容器

放射源的强度单位为“居里”(在SI单位制中,放射性强度用“贝可”作单位,1居里 $=3.7 \times 10^{10}$ 贝可)。一居里的放射源每秒钟有 3.7×10^{10} 次核衰变。仪表常用毫居里为单位,一毫居里的放射源每秒钟有 3.7×10^7 次衰变。放射源的强度是随着时间按指数规律而减低的。

3. 中子射线的获得

常用的中子源有核反应堆、加速器和放射性同位素(常用的为 ^{252}Cf)。反应堆中子产额丰富,但缺点是无法移动。 ^{252}Cf 源的半衰期为2.65年,产额为 2.3×10^{12} 中子/(s·g),目前价格还很贵。小型加速器的优点是可以关闭,不用时可以不加屏蔽,产额可达 10^{12} 个中子。

4. 放射源的选择

放射性同位素很多,其半衰期长短、辐射线种类、辐射能量的大小都各不相同,因此在实际的工业检测中,具体选用哪种放射源需要考虑的因素很多,除了要注意放射源的来源和价格外,还应该注意源种(包括半衰期、射线强度)和源活度等,具体常按下面的因素来考虑:

(1) 根据放射源所辐射的射线与被测物质作用强度变化规律,按照被测量变化时,辐射强度变化的最大的角度来选用相应的源种。

(2) 保证一定的检测速度和检测误差。

1) 由于核衰变有随机性,在一定的时间内裂变的核数有统计涨落,它造成的误差符合泊松分布,故相对均方根误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}} = \sqrt{\frac{1}{t_m f_N \eta}} \quad (6-8)$$

式中 n ——在检测时间 t_m 内探测器记录到的粒子数;

η ——探测器的效率;

f_N ——单位时间内产生的粒子数。

由上式可以看出,应该按保证一定的测量精度(σ)和检测时间(t_m)来选择具有一定强度、能辐射一定能量的放射源与探测器配用。

2) 由于放射源活度随时间呈指数规律衰减, 故在检测时间 t_m 内由于放射源的活度衰减造成的误差 σ_T 为

$$\sigma_T = 1 - e^{-\frac{0.693}{T_H} t_m} \quad (6-9)$$

式中 T_H ——半衰期。

因此要求选用半衰期尽可能长的放射源。

二、核辐射探测器

在核辐射检测仪表中, 核辐射探测器和放射源共同组成参数变换器, 将被测量的信息转化成辐射强度的信息。核辐射探测器的作用是把入射到其中的与被测参数有一定函数关系的核辐射信号转变成一个电信号, 这个电信号仍与被测参量有着函数关系, 并把它输给下一级电路。常用的核辐射探测器有电离室、正比计数器、盖革—弥勒计数器和半导体探测器等。

1. 电离室

电离室的重要部分是两个电极和充满在两个电极间的气体。气体可以是空气或某些惰性气体。电离室的形状有圆柱体和方盒状。电离室的基本结构如图 6-4 所示。电离室中有

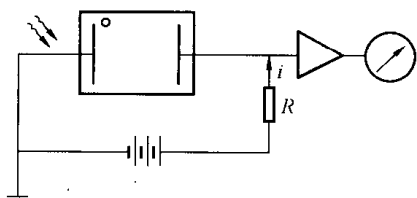


图 6-4 电离室结构示意图

两个相互绝缘的电极, 电极间加适当的电压。当射线进入电离室后, 电离室内的气体由于放射线的电离作用而产生离子。在电压的作用下, 带正电的离子向负极移动, 电子向正极移动, 形成电流, 电流强度 i 是射线强度的函数。电流 i 通过电阻 R 后其两端有电压 U , 通过测量 U 的大小就可以判断射线强度。

极板间电压变化时电极收集到的离子数也发生变化, 其关系如图 6-5 所示。当外加电压很低时 ($0 \sim U_1$), 电极没有足够吸引离子的力量, 离子向电极移动的能力很小。因此离子在形成后大部分又很快地互相复合起来, 这样就无法进行探测。当外加电压增加时 ($U_1 \sim U_2$), 离子在电场作用下向极板运动的速度增加, 而且离子复合的机会也大大减小, 在此区域内电流 i 差不多达到饱和, 且与射线强度成线性关系, 其极板电压的变化对电流的影响已很小, 故称为饱和区, 电离室即工作在此区域中。当电压大于 U_2 时曲线又开始上升, 这是因为电离室内发生气体放电的缘故。这时由于离子在强的电场中运动, 获得大的速度, 碰撞其他气体分子或原子产生新的离子对, 即发生了所谓碰撞电离。由于 α 粒子的电离作用强, 产生的一次离子较多, 然后又由一次离子打出更多的二次离子, 所以可以形成较大的电流, 而 β 粒子产生的则要小得多, 可以容易地区别两者。这一区域称为比例区。当电压大于 U_3 后, 气体的放大系数 (即由一次离子打出的二次离子数目) 随电压加大而加大, 且与原离子的大小有关, 即原离子大的气体放大系数小, 原离子小的气

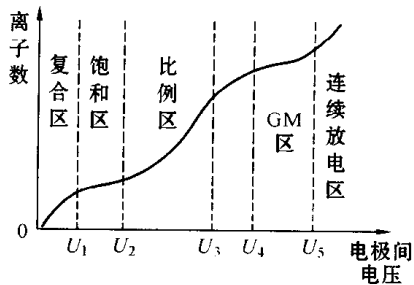


图 6-5 离子数和极间电压关系

体放大系数大,不再与原离子数量成正比。当电压大于 U_4 时,曲线与入射放射线产生的一次离子数无关,即与入射离子的能量无关,这个区域称为 GM 区。当电压大于 U_5 时即为连续放电区。

电离室内所充气体的压力、极板的大小和两极间的距离对电离电流都有较大的影响。例如,增大气体压力或增大电极面积都将会使电离电流增大,电离室的特性曲线也将向增大电离电流的方向移动。

电离室主要用于探测 α 、 β 射线,它具有成本低、寿命长、测量效率近于 100% 等优点,但其输出电流较小。由于 γ 射线没有直接电离本领,靠二次电子起电离作用,所以效率极低。值得注意的是探测 α 、 β 或 γ 射线的电离室不能相互通用。

2. 正比计数管

正比计数管的结构如图 6-6 所示,在由封入稀有气体、氮气、二氧化碳、甲烷、丙烷等计数气体的金属管构成的阴极的中心配置有作为阳极的均匀粗芯线。因放射线入射而生成的正离子和电子分别向阴极和阳极移动。但由于在芯线附近电场密度高,电子在碰撞间被加速,在气体的电离中获得足够的能量,进而生成正离子和电子。此过程反复进行而被放大。人们将此过程称为气体放大。放大作用仅限于芯线附近,所以可得到与放射线的入射区域无关的一定的放大倍数,由于放大而产生的阳离子迅速离开气体放大区域而产生输出脉冲,输出脉冲的大小正比于因放射线入射而产生的电子、正离子对的数目,而电子、正离子对的数目正比于气体吸收的放射线的能量。因此,正比计数管可以探测入射放射线的能量,正比计数管以上述原理为基础,可用于低能 X 射线与 β 射线的测量。

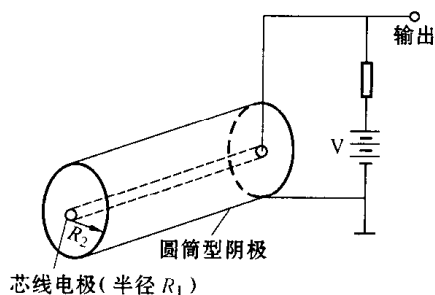


图 6-6 正比计数管的结构模型

正比计数管大多呈圆柱形或者球形、半球形。阳极很细,阴极直径较大。这主要是为了在外加电压较小的情况下,使阳极附近仍能有很强的电场,以便有足够大的气体放大倍数。

正比计数管可以在很宽的能量范围内测定入射粒子的能量,能量分辨率相当高,分辨时间很短,并且可作快速计数。

3. 盖革—弥勒计数管

盖革—弥勒计数管结构与正比计数管很相似。在管部封入稀有气体和有机气体,通常采用氩 (Ar) 和乙醇的混合气体。在阳极和阴极间施加比正比计数管高的电压。X 射线、 α 射线、 β 射线入射时,产生比正比计数管激烈的气体放大,且伴随辐射量子的放出,产生雪崩现象,放电扩大到整个芯线。因此产生不取决于电子、正离子对数的输出脉冲。由于在芯线附近产生的正离子迁移率小,从而产生空间电荷层而使电子雪崩停止。但是正离子一到达阴极产生碰撞就放出二次电子,同时,由于空间电荷层移动到阴极,中央阳极电场已恢复,这些次级电子又能产生雪崩,再产生空间电荷层,再产生电压脉冲,造成所谓连续放电现象,为了克服这个问题,可混入有机气体,如乙醇等。正离子在迁移中与乙醇

气体碰撞而使之电离,从而消耗了大半能量。离解的乙醇离子的能量也十分低,从而从阴极打出次级电子的可能性变得非常小。从阴极拉出电子中和后,受激的乙醇分子主要是通过自身的离解而释放多余的能量,这样放电就自动停止了。若是加入微量的卤素气体,由于卤素分子的电离电势比惰性原子的电离电势低得多,因此与有机蒸汽一样达到自动淬灭的目的。这样当辐射强度越大时,则盖革—弥勒计数管输出的脉冲数越大。

盖革—弥勒计数管由于有气体放大作用,所产生的电流比电离室的离子流大好几千倍,因此它不需要高电阻,其负载电阻一般不超过几兆欧,输出的脉冲一般为几伏到几十伏。

盖革—弥勒计数管的优点是结构简单,缺点是记录了辐射粒子后计数管内形成的电子云,从而影响了电场的分布,在这种影响没恢复前,计数管不能记录入射粒子或所产生的脉冲很小。计数管不记录粒子的时间称为死时间,计数管的死时间一般为几十微秒,最大计数率为 $10^3 \sim 10^4$ 数量级,盖革—弥勒计数管常用于探测 β 射线和 γ 射线。

4. 闪烁计数器

闪烁计数器如图 6-7 所示。它由闪烁晶体和光电倍增管组成。当核辐射射入闪烁体时,闪烁体的原子受激发光,光透过闪烁体射到光电倍增管的阴极上,打出电子并在倍增管中倍增,在阳极上形成电流脉冲,最后由电子仪器显示或记录下来。

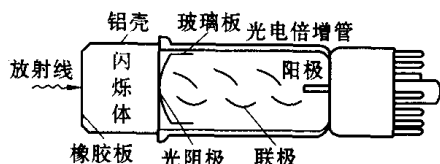


图 6-7 闪烁计数器结构

闪烁体是一种能将射线的能量转变为光能的物质,按物质形态分,有固态、液态、气态三种,按化学组成又分为有机和无机两大类。通常使用固态闪烁体,有银激活的硫化锌 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 、铊激活的碘化钠 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 、铊激活的碘化铯 $\text{CsI}(\text{Tl})$ 、金激活的碘化锂 $\text{LiI}(\text{Au})$ 等。有机闪烁体中应用最广的有蒽、芪、三联苯和萘等。无机闪烁体的特点是对入射射线阻止能力强,发光效率也高,因此探测率高,常用于 γ 射线探测。有机闪烁体的特点是发光时间甚短,只有用分辨率较高的光电倍增管配合时,才能获得 10^{-11}s 的分辨时间,并且制成的闪烁计数器体积较大,常用于 β 粒子探测。

闪烁计数器已被广泛应用于核辐射检测中,它也有平均电流和脉冲状态两种工作状态。可用来测量 α 、 β 、 γ 射线及中子的能量和强度。对于不同射线的测量,只是所用的闪烁体不同而已。

5. 半导体探测器

半导体探测器是近年来迅速发展起来的一种射线探测器。P-N 结半导体探测器的结构如图 6-8 所示。其核心部分是由两种半导体材料决定的 P-N 结。通过负载电阻 R 在 P-N 结上加上适当的反向电压,由于结内缺乏载流子,电阻率很高,故电压几乎全部加在 P-N 结上。当射线射入结内时,损失自己的能量而在结内产生很多电子—空穴对。这些电子和空穴由于电场的作用很快地移向结的两侧,产生一个信号电

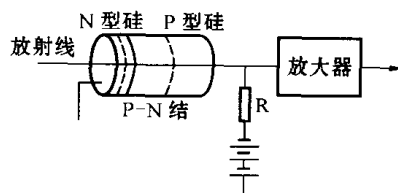


图 6-8 P-N 结半导体探测器

流。这个电流脉冲在负载电阻上变成电压脉冲，再经过放大器等电路加以测量。由于电信号与入射粒子的能量损失成正比，可据此电信号确定入射粒子的能量及射线的其他性质。P-N 结探测器主要用来探测 α 粒子。

已开发出的 PIN 结探测器可测 β 射线和 γ 射线，这种探测器可以看成是由一块 P 型半导体和一块 N 型半导体的当中加了一块本征半导体组成的。PIN 结探测器的能量分辨率很高，硅型 PIN 结探测器可在常温下应用，锗型 PIN 结探测器则需在液氮温度下保存和工作。

三、核辐射检测仪表中的前置放大电路

1. 用于电离室的前置放大电路

一个电离粒子每损失 1MeV 的能量，约产生 3 万个电子或 $5 \times 10^{-15} \text{C}$ （即安·秒）的电荷。当电离室的积分电容取 20pF 典型数值时，其脉冲幅度也只有 0.25mV/(MeV)，因此所得脉冲必须放大。放大电路中的系统的噪声，限制了仪表的能量分辨率及灵敏度。用于电离室的前置放大电路有两个要求，一是能对脉冲进行放大，另一要求是得到比较好的信号噪声比。

通常放大过程由低噪声前置放大器和主放大器两部分承担。而低噪声前置放大器是基本输入电路，图 6-9 给出了两种典型的前置放大电路。

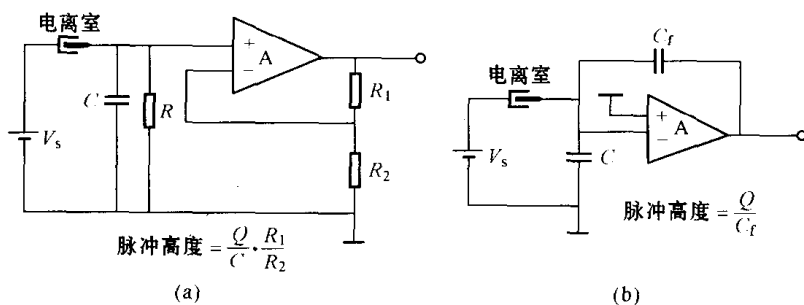


图 6-9 前置放大器的电路图

(a) 电压放大器；(b) 电荷放大器

2. 用于正比计数管的前置放大电路

用于正比计数管的前置放大电路主要对脉冲进行放大，由于脉冲幅度大大超过噪声电平，故无需采取特殊措施保证低噪声工作。

在正比计数管系统中，前置放大器通常是由一个简单的发射极跟随器组成。其功用像一个阻抗变换器，使计数管的高电阻输出能与接至主放大器的低电阻连接电缆（50~100 Ω ）相匹配。为了获得低电容 C，前置放大器常常直接安装在计数管的外壳盒（即探头）中。图 6-10 是一个简单的发射极跟随电路。

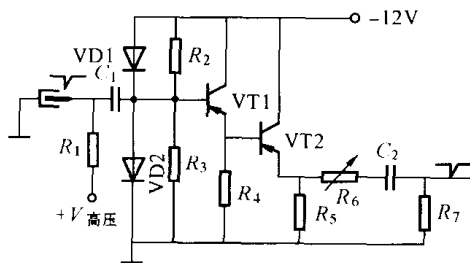


图 6-10 简单的发射极跟随电路

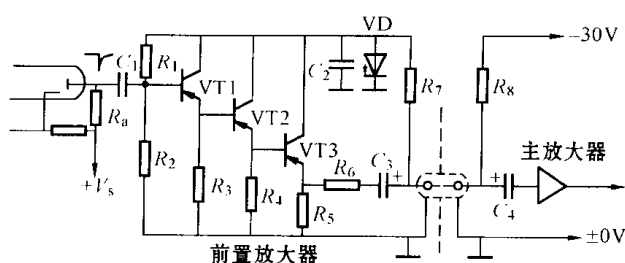


图 6-11 用于闪烁计数器的前置放大器

3. 用于闪烁计数器的前置放大电路
在以闪烁计数器作为探测器时，信号脉冲幅度往往比一般前置放大器的噪声电平高很多，所以前置放大器就不需要是低噪声型的，它往往只起一个作用，就是让光电倍增管的输出阻抗与所连接的屏蔽电缆的特性阻抗相匹配。

图 6-11 是一个用于闪烁计数器的前置放大器电路图，它是用负脉冲输入的。假如从光电倍增管引出的是正脉冲，则使用 NPN 型晶体管比较有利。前置放大器的电源电压是从主放大器通过信号电缆送过来的。

核辐射检测仪表还有一些特殊的测量电路，主要有两类。一类是属于信号处理电路，包括对脉冲信号的甄别、分频、整形、计数、显示等，以数字量显示出被测量的数值，或通过数模变换电路，以模拟量的形式给出测量结果；另一类是为了使检测仪表提高测量精度、灵敏度或改善性能的辅助电路，包括淬灭电路、稳定电路、线性化电路以及各种补偿电路等。

第三节 透射式 γ 射线测厚仪

一、透射式 γ 射线测厚仪工作原理

透射式 γ 射线测厚仪是利用射线可以穿透物质的能力制成的检测仪表，它的特点是放射源和核辐射探测器分别置于被测物体的两侧，射线穿过被测物体后射入核辐射探测器。由于物质的吸收作用，使得射入核辐射探测器的射线强度降低，降低的程度和物质的厚度等参数有关，如前所述，射到探测器的透射射线强度 I 和物质厚度 h 的关系为

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho h} \quad (6-10)$$

或

$$h = \frac{1}{\mu_m \rho} \ln \frac{I_0}{I} \quad (6-11)$$

对于一定的放射源和一定的材料就有一定的 I_0 和一定的 μ_m ，测出 I 即可计算确定材料的厚度。

二、透射式 γ 射线测厚仪的结构

透射式 γ 射线测厚仪的原理框图如图 6-12 所示，射线源是置于铅制容器内的 ^{137}Cs ， γ 射线由铅制容器的细孔射出，检测器可以用盖革—弥勒计数管或 PIN 结半导体探测器，也可以用图中的闪烁计数器构成。碘化钠晶体受到 γ 射线照射时发出闪光，闪光的频率和入射的 γ 光子的个数成正比，光电倍增管将闪光脉冲转化成电脉冲并加以放大。采用以上类型的核辐射探测器，得到的都是有一些随机起伏的（由于衰变的随机性造成的）脉冲信号，脉冲信号的频率和入射的 γ 射线的强度成正比。脉冲信号经主放大器放大后由甄别器对其进行甄别，取出有用的频率信号，并消除各种干扰特别是低频干扰。频率信号经

分频后由成形器确保脉冲宽度，以便积分。对数积分器可以将和材料厚度成对数关系的辐射强度信号转化成线性关系的信号，便于显示、处理及提供自动控制信号。

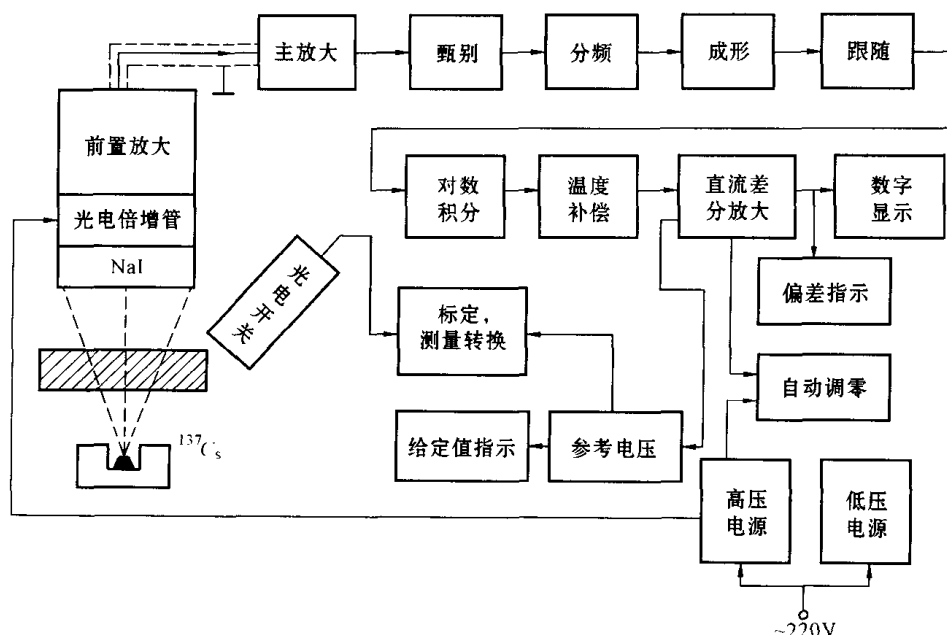


图 6-12 透射式 γ 射线测厚仪的原理框图

为了提高精度，仪表采用了温度补偿和自动调零电路。由于闪烁式的核辐射探测器的稳定性较差，故在材料未进入检测区之前，应将全辐射时输出的信号和参考电压信号比较，若有偏差，将其放大后驱动可逆电机去调节高压电源，使偏差为零，从而确保仪表零点稳定。

透射式 γ 射线厚度仪可用于非接触测量物料的厚度，具有穿透能力强和检测范围宽等优点。其缺点是需要安全防护措施，放射源超过半衰期时需要更新放射源。当检测厚度为几厘米到十几厘米时，其误差为几毫米到几十毫米。

三、透射式 γ 射线测厚仪的应用

1. 输煤量的测量

火力发电厂中，燃煤消耗量是一个重要的测量量。电厂中一般采用传送皮带将破碎好的原煤送入原煤斗中再进入磨煤机，因此需要连续地对输煤量进行监视。

以前电厂广泛采用的是自动磅称对输煤量进行测量。它的基本原理是在输煤皮带上安装几个滚筒，将皮带上原煤的重量转变成压力信号，对压力进行测量，配合传送皮带的转速信号，经过运算处理后求得原煤的质量。由于它是机械式的接触测量，误差较大并且设备的故障率很高，需要经常维护。采用了 γ 射线放射源、探测器、测速仪、微型计算机及支架等构成的核子皮带秤属于非接触式的测量，设备的故障率很低，大大减少了维护和检修的工作量。

γ 射线放射源和检测器的安装示意图如图 6-13 所示。为了使煤层保持一定形状以保证测量的准确性，输煤皮带前方应安装一些刮板。测量用的三套放射源核辐射探测器输出

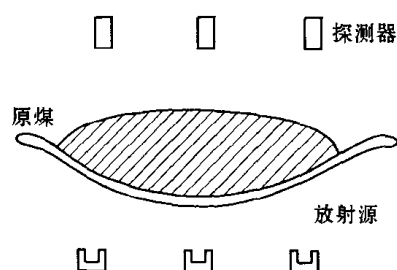


图 6-13 检测器安装位置示意图

的信号，经单片机的计算处理，可以求出煤层的截面积，再测出传送皮带的速度，即可由微处理器计算出煤的质量流量并予以显示。如果把这个信号进行积分处理，还可以得到总的耗煤量的信息。由于煤层对 γ 射线的吸收能力较弱，放射源可以采用 ^{137}Cs ，它的半衰期为 33.2 年，其质量小于 10g，源强为 100mCi。

γ 射线探测器是一圆柱形电离室，外有保护层。电离室有两只通有高电压的电极板，室内充有绝缘性气体。当射线进入后，气体介质被电离，并在电场作用下流向两极板。在极板上检测到的微弱电流，经放大后再送入微处理机，就作为物料质量的信号。电离室外有电阻丝加热，以控制其温度为 60°C ，保证其性能稳定并可防止空气中的水分凝结而造成电器短路故障。电离室输出的电流十分微弱 (10^{-12}A)，因此要将其放大处理成适合于微处理机使用的电压。由测速发电机测得的皮带速度信号也送入微处理机，两个信号在微机内按照已定的系统软件和应用软件完成过程测量计算和处理。

2. 钢管壁厚的在线检测

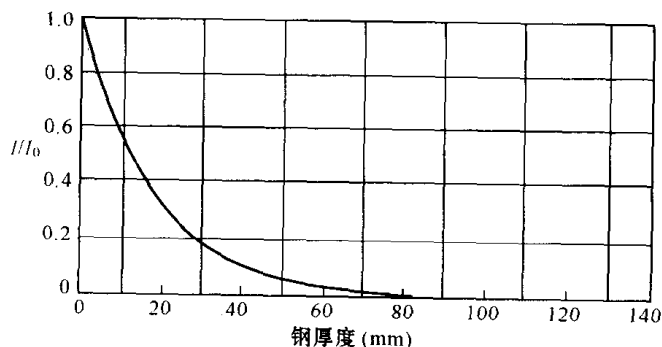
钢管生产中在线测量壁厚是一项比较复杂的工作，以往采用的方法是通过测量长度、重量和外径来计算钢管的平均壁厚，这种方法不能直接得到钢管各段壁厚，不能对无缝钢管头尾的增厚进行描述，更不能对钢管轧制过程进行全面控制。采用核辐射测厚仪对钢管在线测厚可对轧制过程钢管的质量进行监控及调整，控制平均壁厚和中心偏差，提高产品精度，还可控制头尾增厚段，提高合格率。

(1) 钢管壁厚的在线检测的基本原理。采用放射源对金属进行照射，测量穿透被测物体放射线的强度，根据放射线衰减程度计算出被测物体的厚度。不同的测量厚度采取不同能量等级的发射源（目前测量钢管常用的放射源为 ^{137}Cs ），穿透被测物体射线的强度与被测物体的厚度的关系如前所述

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho d} \quad (6-12)$$

$$d = (\ln I_0 - \ln I) / \rho \mu_m \quad (6-13)$$

在射线强度一定的条件下，对于密度 ρ 和物体吸收系数 μ_m 为常数的物质，其透过的强度和厚度之间的关系如图 6-14 所示。

图 6-14 ^{137}Cs 的放射线强度比

放射源发出的射线穿过被测物体后,其强度的衰减与物体厚度呈指数函数。对于典型的放射源 ^{137}Cs ,其强度的半值衰减值为12.2mm,最大测量厚度为100mm。从图中可以看出测量的精度与被测物体的厚度有关,测量精度随厚度的增加而降低。

图6-15是钢管测厚的原理图,放射源(^{137}Cs)发出的射线经准直孔校正成近似垂直的射线,透过钢管的放射线进入电离室,在高压的作用下产生出与射线强度成正比的信号电压,经前置放大器处理后将信号送至计算机进行壁厚计算。由于电离室中产生的电信号非常小,为了抗干扰而在电离室中充了高压惰性气体,以使随机噪声信号降到最低点。

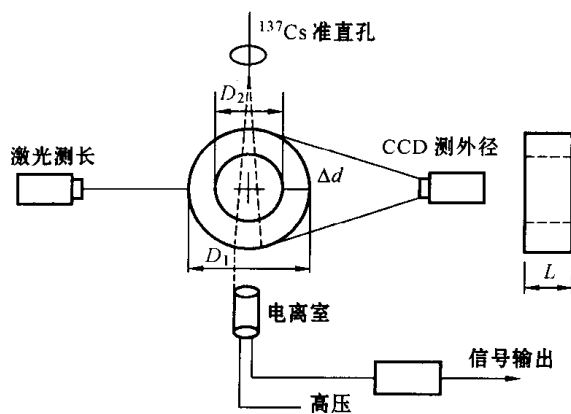


图6-15 钢管测厚系统原理图

由于钢管是圆型,在测厚时分为两种情况:

1) 管子被射线局部照射。当管子的直径较大时,被照射管子的双壁壁厚可按式(6-12)计算,由CCD测出管子的外径曲线率,对管壁圆弧段进行修正。

2) 管子被射线全部照射。当管子的直径较小时,管子被射线全部照射, I/I_0 得到的是这段管子全部的质量,无法用式(6-12)来计算管子的壁厚,因此要用下列公式算出管子的壁厚

$$\Delta d = (D_1 - D_2)/2 \quad (6-14)$$

$$V = \pi L/4(D_1^2 - D_2^2) \quad (6-15)$$

$$V = m/\rho \quad (6-16)$$

$$D_2^2 = D_1^2 - (4m/\pi\rho L) \quad (6-17)$$

$$\Delta d = \frac{1}{2} [D_1 - \sqrt{D_1^2 - (4m/\pi\rho L)}] \quad (6-18)$$

式中 D_1 ——管子外径(由CCD测出);

D_2 ——管子内径;

m ——管子质量, $m = f(I/I_0)$;

Δd ——管子壁厚;

ρ ——管子的密度;

L ——管子长度。

该系统还配有激光测长、红外线测温和CCD测外径装置。用激光测长测得管子的纵向长度,做出管子壁厚沿长度方向的分布曲线;红外线测温测出管子表面温度,折算出管子冷态时的各种数值;CCD测外径除具有上述的作用外,还能用于补偿管子运动时水平方向位移引起壁厚的误差,并能做出纵向的外径曲线。

当然实际测量时壁厚的计算要比上述复杂得多,而且还用了许多其他的补偿和修正,如密度补偿及测量环境修正等。

(2) 系统配置及安装。钢管壁厚在线检测系统中的核辐射测厚仪为德国 IMS 公司生产, 两套测厚装置采用 ^{137}Cs 铯 (5 居里) 作为测量放射源, 附属配备了两套 MERCAON 公司的激光测长装置, 3 套西门子公司引进的 CCD 测长测径装置和 7 套红外测控温装置, 检测系统配置框图如图 6-16 所示。

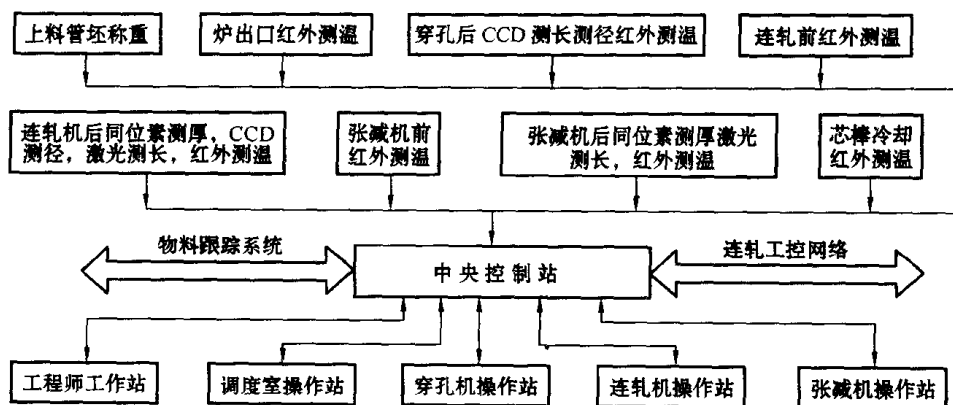


图 6-16 在线检测系统配置框图

为了能更快反馈轧制过程中钢管壁厚信息, 两套核辐射测厚仪分别安装在 MPM 连轧机 (芯棒脱管机后) 和张减机后, 操作站分别设在工程师室、调度室、穿孔机操作站、连轧机操作站和张减机操作站内。目的是可以时刻监控连轧荒管和半成品管的厚度变化情况。如果壁厚发生变化并且超过设定值, 可以马上通知各机组操作员和机组技术人员, 并及时对穿孔机、连轧机和张减机的设定参数进行修订, 使被测的轧管壁厚恢复到设定值范围内, 从而达到消除壁厚误差的目的。

第四节 核辐射式物位计

核辐射式物位计也是基于物质对放射线的吸收特性设计的, 其原理前面已有介绍。目前在物位检测仪表中, 一般都采用穿透能力强的 γ 射线, 其放射源采用 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 等同位素。放射性物位计测量物位的示意图如图 6-17 所示, 放射源发出的 γ 射线穿过设备和介质后, 由探测器接收, 并把射线的强弱转换成电信号, 供监视和计算机使用。

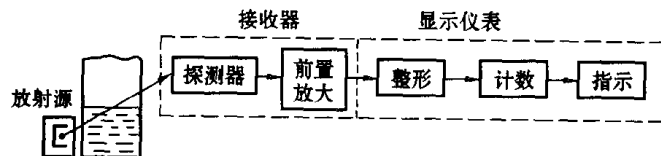


图 6-17 放射性物位计测量物位示意图

一、 γ 射线物位计的几种类型

γ 射线物位计有许多种类型, 如定点监视型、跟踪型、透过型、照射型和多射线源型

等,应当根据生产的要求和介质情况及容器的具体情况合理选择。下面分别介绍各种 γ 射线物位计的工作原理和特点。

1. 定点监视型

如图 6-18 所示,将射线源对置安装在容器的同一水平面上。由于液体(或固体)吸收射线的能力远比气体强,因而当物料超过或低于此平面时,接收器接收到的射线强度会发生急剧变化,从而可发出物位控制信号。可见,定点监视型是根据 γ 射线是否达到探测器来判断容器内盛物料是否超过设定位置的物位计。这种测量方式不是测量 γ 射线的强度,而是测量 γ 射线的有无,所以受外部

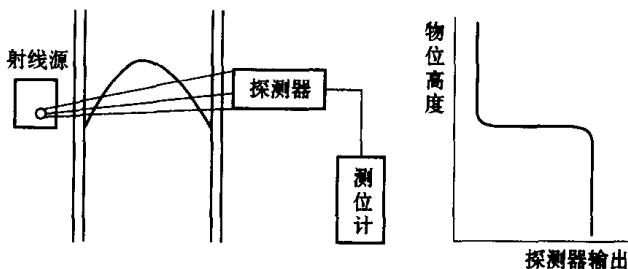


图 6-18 定点监视型物位计原理图

条件和内盛物料的性质、形状以及内壁附着物的影响小,工作稳定可靠。对于粉粒体或块状物料,其物位面往往不是水平的,一般调整到物料占据容器截面一半时发出信号。

2. 跟踪型 γ 射线物位计

如图 6-19 所示,自动跟踪式物位计是用一组放射线源和探测器测量物位大范围变化的装置。它通过伺服机构带动放射源和接收器沿导轨升降,始终保持放射源和探测器在同一高度,并对料位自动跟踪。这种测量方式既有定点监视型的优点又可以实现连续测量。跟踪测量方式的测量范围很宽,测量高度可达 5m 以上,甚至 10m。缺点是由于有运动部件,结构复杂。

3. 透过式 γ 射线物位计

如图 6-20 所示,使 γ 射线倾斜或垂直地透过容器,随着内盛物料位置的变化, γ 射线衰减的程度也发生变化。它实际上是测量容器内所盛物料厚度的物位计。这种测量方式没有运动部件。确定 γ 射线通路时要注意躲避容器内部构件。

4. 射线源和接收器多点组合方式

为了测量变化范围较大的液位或物位,可以采用射线源多点组合或接收器多点组合或两者并用的方式,如图 6-21 所示。这几种方案都可以实现连续测量,并且可以使物位计的输出与物位呈线性关系。

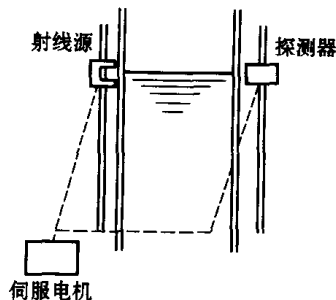


图 6-19 跟踪型物位计原理图

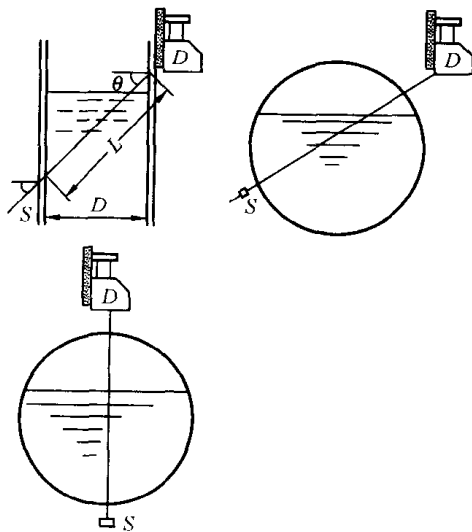


图 6-20 透过型物位计原理图

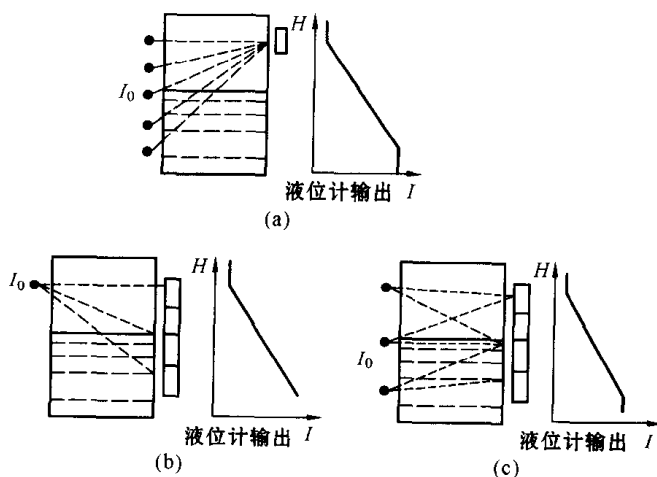


图 6-21 各种测量方法和输出特性示意图

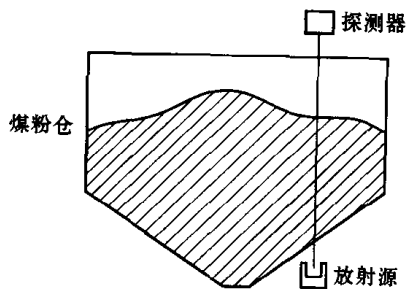
(a) 线源多点组合式; (b) 接收多点组合式; (c) 线源多点接收器多点组合式

二、 γ 射线物位计的应用

1. 煤粉仓粉位的测量

在中储式制粉系统中, 煤粉都要经过粉仓暂时储存, 再由给粉机送入管道中被一次风吹入锅炉炉膛。煤粉仓粉位过高, 底部的煤粉容易被压实、结块造成堵粉, 粉位过低, 煤粉层又容易被一次风吹透, 造成给粉机不能正常供粉, 引起锅炉燃烧不稳定甚至是炉膛灭火。所以, 对煤粉仓粉位进行测量, 把它控制在一定范围内是必要的。

测量煤粉仓粉位的方法有很多, 如重锤法、超声波法、微波法等, γ 射线测量方法最大的优点是不用在煤粉仓内安装各种设备, 这就给测量仪表的安装维护提供了很大的方便。只要遵守安全规程, 放射线基本上对人体无害。

图 6-22 γ 射线物位计
测量煤粉仓粉位

放射源—探测器的安装方式很多, 常用的是使 γ 射线垂直的穿透容器, 如图 6-22 所示。由于煤粉厚度较大, 放射源一般采用能产生很强的 γ 射线的 ^{60}Co 作为放射源。煤粉仓内煤粉的堆积面一般不是水平面, 故放射源—探测器安装的位置要仔细选择, 使测量结果能够代表粉仓的粉位。

2. 钢水的液位测量

(1) 测量原理与系统组成。用 γ 射线检测结晶器钢水液位, 放射源、结晶器和探测器布置如图 6-23 所示。当放射源一定时, 探测器接收的射线强度随结晶器内钢水液位高度的改变而变化。由于探测器接收的射线强度与钢水液位高度之间的关系呈非线性, 放射源设计成使放射强度呈一定函数分布的特殊线状放射源, 以使得液位测量仪的输出信号总是与钢水液位成近似线性关系。可采用 ^{60}Co 放射源, ^{60}Co 制成金属丝状, 以不同绕距 (螺距角) 绕在芯棒上, 从而产生要求的射线强度分布。

探测器及其高压电源和前置放大器一同封装在探头内，通过耐高温电缆与测量单元相连。

探测器采用闪烁计数器，闪烁体选用 ST101ANaI 闪烁晶体，所用的光电倍增管型号是 R1306。闪烁体将接收到的 γ 射线转换成光能，发射光子，光子数目由射线强度决定。光电倍增管接收闪烁体发射的光子并转换成光电子，将光电子倍增放大后在阳极形成脉冲输出，输出的脉冲经放大器放大后，测得脉冲的计数率就可测得射线强度。

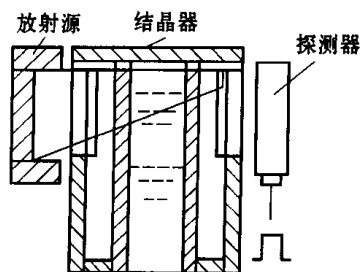


图 6-23 检测系统布置

(2) 信号测量与处理。信号测量处理采用数字电路和单片机技术，将探测器送来的脉冲信号转换成钢水液位进行显示和标准的直流电压和电流信号输出。

信号测量与处理单元硬件组成如图 6-24 所示。来自探头的脉冲经过光电隔离和补偿电路进入单片机系统进行计数测量。单片机系统由 87C51 单片机及接口电路组成，采用定时计数方法测量辐射脉冲计数率，单片机的定时/计数器 T_0 工作于计数方式，用于接收测量脉冲， T_1 用作测量定时。串行口用作显示器接口，测量结果除了实时显示外，还由 DAC-0832 转换成模拟信号，输出 0~5V 的直流电压和 4~20mA 的直流电流。

软件采用主控程序循环扫描和计数/定时器中断的并行结构，脉冲计数与信号处理并行。主控程序根据操作命令进行仪表校验与调整，处理测量数据，进行信号显示和输出。主控程序流程图如图 6-25 所示。

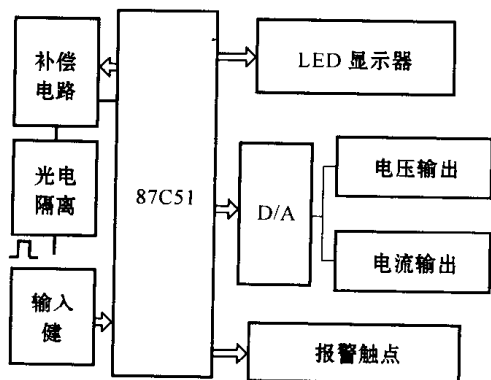


图 6-24 信号测量与处理单元硬件组成

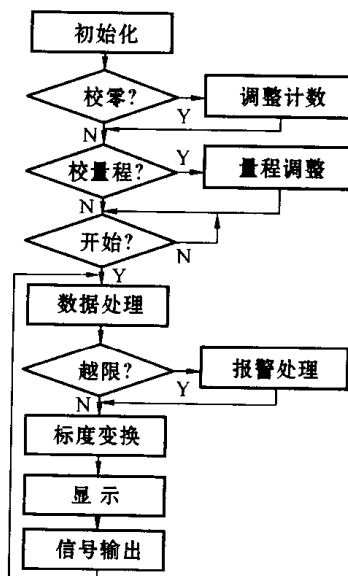


图 6-25 主控程序流程图

第五节 核辐射在其他检测方面的应用

一、密度测量

同位素密度计是基于同位素的放射性原理构成的检测仪表，能够对容器（管道）中高温、高压、强腐蚀的介质的密度进行在线连续测量。由于它具有非接触检测的特点，因而

广泛应用于化工、建材、冶金、食品等工业部门。

由前所述, γ 射线的强度与吸收体之间的关系可用下式表示

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho h}$$

对上式求导, 有

$$dI/d\rho = -\mu_m h I_0 e^{-\mu_m \rho h} = -\mu_m h I \quad (6-19)$$

式中 I ——探测器接收到的射线强度;

I_0 ——穿过吸收体前的射线强度;

μ_m ——吸收体的质量吸收系数;

ρ ——吸收体的密度;

h ——吸收体的厚度。

从式 (6-19) 可以看出, 在吸收体的质量吸收系数和材料厚度保持不变的情况下, 探测器接收到的射线强度变化量就依赖于吸收体密度的变化, 并且与其成正比。从式 (6-19) 还可以看出, 通过使用具有良好吸收本领的发射辐射的放射源、增大吸收体的厚度、提高放射源的活度可以提高同位素密度计测量灵敏度。在现行的同位素密度计中, 放射源大多采用 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 。在仪表选型确定的情况下, 提高同位素密度计灵敏度的唯一途径就是选择大直径的测量容器(管道)。然后向厂家订购合适的放射源。提高放射源的活度虽然也可以提高仪表的灵敏度, 但是考虑到现场的同位素安全防护, 最好在满足测量要求的情况下, 尽可能地减少使用放射源的活度。

同位素密度计的安装位置也要合理选择。仪表安装点的被测量管道必须充满。为了确保射线强度的变化量正比于吸收体密度的变化量, 必须保证吸收介质的厚度保持不变。为此, 仪表在安装点的测量容器必须备有溢出装置, 或者安装在上斜的管道上, 最好安装在垂直管道上。在长的运输管道中, 测量位置最好选在增压泵之后, 或者刚好选在上斜管道区段卸料口之前。测量点充满度的变化将会给密度的测量带来较大的误差, 甚至使仪表密度的显示值变得毫无意义。安装点的测量管道中不能有气泡和沉积物。测量管道的磨损也会导致吸收体的厚度变化, 从而给仪表的测量带来误差, 选用大直径的测量管道可以减小由此而来的误差。另外, 放射源和探测器的中心一定要对准。

利用物质对 γ 射线的散射效应还可以测量各种疏松物质的密度。一般将探头做成插入式的, 以便于在煤田、油田等地质勘测中测量密度, 或测量淤泥、土壤的密度。探头中包括 γ 射线源、屏蔽物(铅)、核辐射探测器及前置放大器。它们被装在一个密封

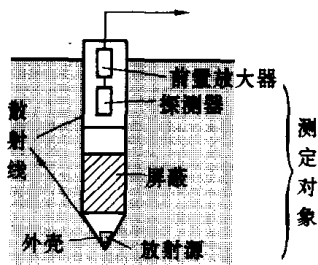


图 6-26 散射式密度计

的金属圆筒内, 屏蔽物放在放射源和探测器之间, 用来防止 γ 射线直接射入探测器。前置放大器将核辐射探测器输出的信号放大后, 经电缆传输到后级电路进行处理。 γ 射线射出金属圆筒经被测物质的散射后再回到核辐射探测器, 放射线的透射量和散射量与物质的密度有关。图 6-26 所示为插入式散射式密度计, 在工业中可测液体、粉体或液体中混有各种物质的浆体的密度。电厂中可用它来测量原煤、煤粉、灰水等的密度。

二、核辐射流量计

核辐射流量计可以测量气体、液体以及两相流在管道中的流量，其工作原理如图 6-27 所示。若测气体流量，在气流管壁上装有如图所示的两个活动电极，其中一个电极的内侧面涂覆有放射性物质，整个传感器的结构犹如一个电离室。当气体流经两电极间时，由于核辐射使被测气体电离，产生电离电流；电离子的一部分被流动的气体带出电离室，电离电流减小；随着气流速度的增加，带出电离室的离子数增加，电离电流也随之减小。当外加电场一定，辐射强度恒定时，离子的迁移率基本是固定的，因此可以比较准确地测出气体流量，为了精确地测量，可以配用差动电路。放射线一般采用 α 、 β 射线。

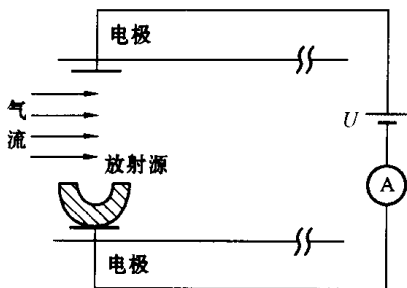


图 6-27 核辐射流量计示意图

若在流动的液体中，掺入少量放射性物质，也可以用放射性同位素跟踪法求取液体流量。

三、核辐射探伤

射线探伤是工业上常用的无损探伤的方法，一般采用 X 射线和 γ 射线。X 射线穿透钢板的厚度一般小于 100mm，而 γ 射线可用于检测厚度大于 300mm 的钢板。

图 6-28 为 γ 射线探伤示意图。如图 (a) 所示，放射源放在被测管道内，沿着平行管道的焊缝与探测器同步移动。当管道焊缝质量存在问题时，穿过管道的 γ 射线会产生突变，探测器将接到的信号进行放大，然后送入记录仪记录下来。图 (b) 为其特性曲线，横坐标表示放射源移动的距离，纵坐标表示与放射强度成正比的电压信号。图中的两个突变波型表示管道焊缝在该两部位存在大小不同的缺陷。上述方法也可用于探测块状铸件内部的缺陷。

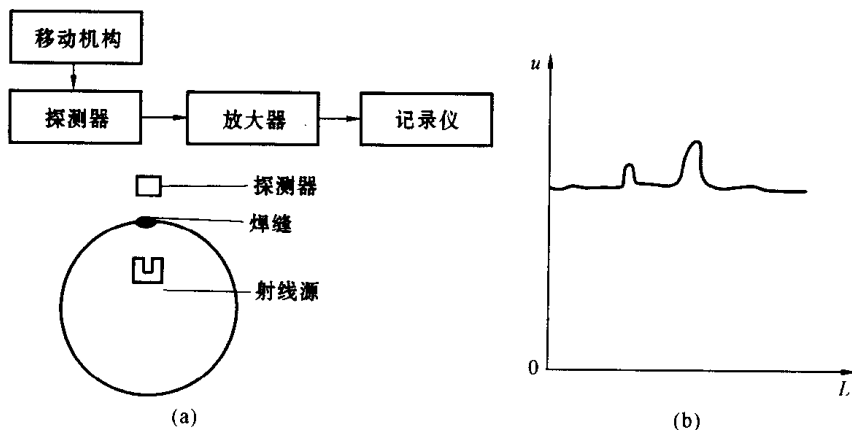


图 6-28 γ 射线探伤示意图

(a) 工作框图；(b) 特性曲线

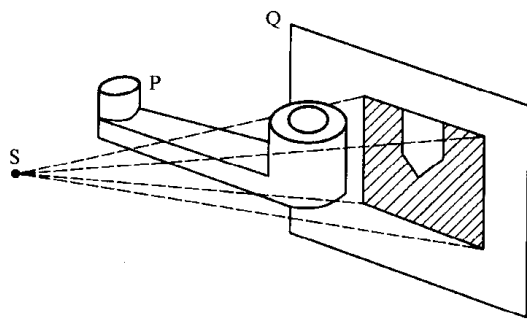


图 6-29 照相法探伤示意

图 6-29 是更为常见的照相法探伤原理示意图。图中 S 为放射源，P 为被检工件，Q 为用不透光封套包裹的感光胶片。由放射源放射的射线照射到被检测物体上，如果被测物中有缺陷，透射后的射线强度是不同的，照射到底片上后得到与透射后射线强度相关的像。底片上的对比度与缺陷大小有关。

射线探伤早在 20 世纪 50 年代就成为电力设备的重要检测方法，主要用于锅炉、压力容器焊缝、铸件内部缺陷的检测。这种方法理论上、技术上都比较成熟，且操作简单，检验结果直观可靠，且有底片作为永久记录，重要部件往往以射线检测结果为依据。

四、 β 射线纸张定量测定仪

纸张定量是指单位面积纸张试样的重量，其单位为 kg/m^2 ，它记作 B_w ，当放射源放出的 β 射线穿过纸张时，由于与纸张物质发生散射、吸收、激发等复杂的相互作用而被衰减， β 射线衰减的多少与纸张定量有关。 β 射线穿过纸张时的强度近似呈指数规律衰减，即 $I = I_0 e^{-\mu_m \rho h}$ 。这里，纸张厚度与其密度乘积 $\rho \cdot h$ 为纸张定量 B_w 。根据这一关系，即可通过测量透过纸张的 β 射线强度来确定被测纸张定量。

β 射线纸张定量测定仪由检测装置、转换器和显示仪表三部分组成，如图 6-30 所示。纸页在 C 形架中间通过，C 形架由矩形金属管制成，下面有导轨，可来回移动以便测量纸页横幅各点的定量。放射源（如 ^{85}Kr 或 ^{147}Pm ）装在架上放在纸张的下面。探测器多用电离室，装在纸张上面，电离室内形成的离子流的大小就随纸张定量的变化而变化。

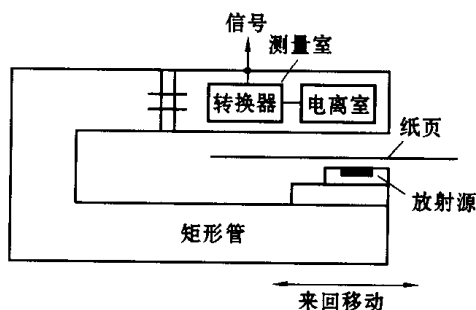
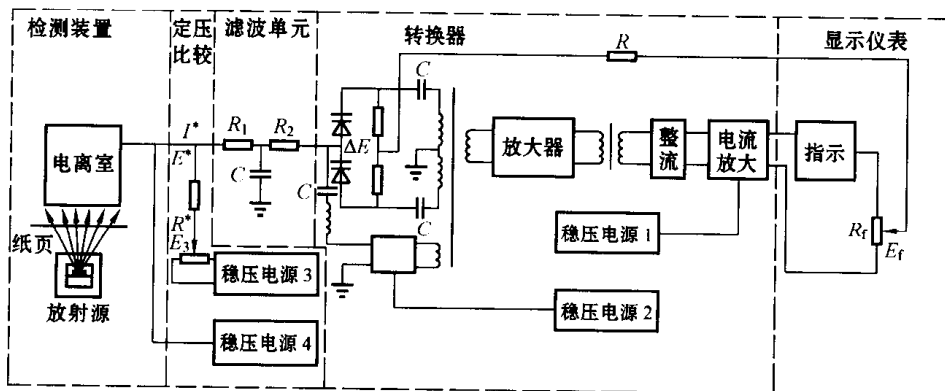


图 6-30 C 形架结构图

大多数纸张和纸板的定量波动是不大的，因此这种仪表的线路都是根据补偿原理设计

图 6-31 β 射线纸张定量测定仪的整机原理图

的,即仪表测量的不是纸张定量的绝对值,而是实际值对标准值的偏差值。图 6-31 为 β 射线纸张定量测定仪的整机原理图。其中转换器的输入信号是由电离室输出信号决定的电压信号 E^* 与标准定量的代表电压 E_3 比较后的差值 $\Delta E = E^* - E_3$, 这一偏差信号经电路转换后输出与偏差同信号的电流值。这个电流值可用直流电流表显示。

五、X 荧光材料成分分析仪

荧光仪器是基于射到物质上的核辐射所产生的次级荧光射线(如特征 X 射线)的能谱和强度与该物质的成分、厚度及密度等有关的原理而工作的。X 荧光材料成分分析仪是根据初级射线从样品中激发出来的特征 X 射线荧光对材料成分进行定性分析和定量分析的核辐射检测仪器。

当使用 X 荧光材料成分分析仪测量时,由于样品中不同元素的 KX 射线或 LX 射线是同时激发的,它们混在一起离开样品,向四周飞去,故必须用分光的办法设法把它们按波长或能量的大小分开,这样才能进行样品组成元素的定性分析和定量分析。分光方法有两种,一种称为波长色散法,另一种叫能量色散法,相对应的有两种 X 射线荧光分析仪。

波长色散 X 射线荧光分析仪是利用分光晶体将不同波长的 X 射线分开,需庞大而精密的分光装置,X 射线要用 X 射线管提供。相比之下,能量色散 X 射线荧光分析仪结构简单,由于采用同位素 X 射线源所以它的成本低、体积小、重量轻、发射的 X 射线强度稳定、能量不变且能谱的单色性好。因此能量色散 X 射线荧光分析仪的应用越来越广泛。

能量色散 X 射线荧光分析仪的工作原理是:初级射线从样品中激发出来的多种能量的各组成元素的特征 X 射线射入探测器,该探测器输出一个和射入其中的 X 射线能量成正比的脉冲,这些脉冲输给脉冲高度分析器、定标器和显示记录仪器,给出以 X 射线荧光能量为横坐标的能谱曲线,由谱线的峰位置及峰面积的大小,就可知道样品中含有什么元素及其重量含量。

能量色散型 X 射线荧光分析仪的探头部分如图 6-32 所示。它由放射源、探测器、样品台架孔板、滤光片和安全屏蔽快门等组成。在 X 荧光分析仪中,低能 γ 射线源和 X 射线源用得最多。最常使用的有 ^{55}Fe 、 ^{238}Pu 、 ^{109}Cd 、 ^{241}Am 等。常用的探测器有正比计数管、闪烁计数管和半导体探测器。

X 射线荧光分析仪具有分析速度快、精确度高、灵敏度高、应用范围广、成本低、易于操作等优点,已经得到广泛应用。它可以分析原子序数大于 13 的任何元素,而原子序数小于 13 的元素的特征 X 射线不易被激发,即使激发出来也因能量很低,难以用一

般方法测量。X 射线荧光分析法可以分析固态、液态、粉末状和糊状样品。固体样品的靠近放射源的那个表面应相当平整。粉末状、糊状和液态样品则需有特制样品盒,样品盒底面靠近放射源的那一面应是一个薄膜。粉末样品的密度和颗粒度应均匀,否则将会产生误差。另外,放射源、样品和探测器的布置方式也要考虑。如图 6-33 所示, θ 称为散射角,

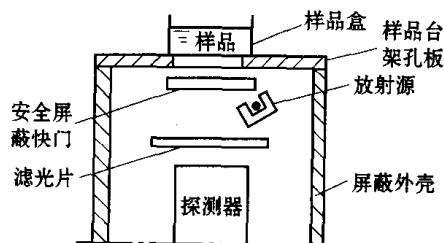


图 6-32 X 射线荧光分析仪的探头部分

选择合适的散射角可以使能谱曲线上的散射峰和散射光子的逃逸峰对所测荧光峰的干扰最小。最常用的散射角为 90° 到 180° ，这种布置可使探头结构简单、尺寸较小、使用方便。

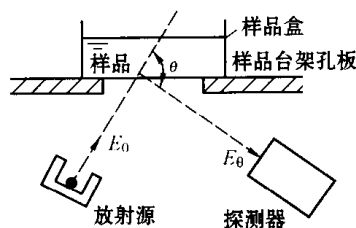


图 6-33 散射角 θ

第六节 射线的防护

放射线过度地照射人体，会引起多种放射性疾病，影响人体健康。若防护工作注意不够，则放射性辐射不仅危害使用者和单位，而且放射性物质可以通过各种途径（如风、地下水等）散布，影响周围环境。

检测中的射线防护，就是采取各种适当的措施，从各方面把射线剂量控制在允许的范围内，以避免超剂量照射和尽量减少射线对人体的影响。目前防护工作已随着同位素应用相应地完善起来，很多问题的研究已经形成专门的学科，如辐射医学、辐射生物学、剂量学、防护学等。了解了射线的危害，就能够积极地去进行防护，从而使放射性同位素能更好地应用于工业生产中。

从事同位素仪表工作的人员主要是要防止射线的照射。一般防护的办法是缩短接触时间，远离射线，在射线和人体之间加上屏蔽物。

1. 缩短接触时间

在接近放射源工作时，受到外界照射的累计剂量是和时间成正比的。也就是说，接触放射线的时间越长，接受的累计剂量越大。当因工作需要必须进入辐射场时，为了减少工作人员所受剂量，应事先安排好工作计划，缩短工作时间。

2. 远离射线

放射性同位素的辐射强度与距离的平方成反比，因此工作人员所受的剂量率也和距离的平方成反比（所谓剂量率是单位时间内所受的剂量）。例如：1 毫居里的钴源，在 10mm 处产生的 γ 射线剂量率和 100 毫居里的钴源在 1m 处的剂量率是相同的。因此可以采取使工作地点与放射源有一定距离的办法来达到防护的目的。

国家标准 BG 16368—1996 对仪表泄露射线控制量要求如表 6-2 所示。

3. 在射线和人体之间加上屏蔽物

单靠缩短时间和增加距离是不够的。放射源一般都装在金属容器中，使人和放射源间隔一屏蔽物以减少射线的照射。由于不同的材料对于不同的射线屏蔽效果不同，因此应该根据射线的性质选择适宜的屏蔽材料，以便获得较好的防护效果。由于 α 射线的射程很短，用一张纸就可以把它吸收掉，因此对 α 射线的防护就很容易，只要避免其直接射向人

表 6-2

仪表泄露射线控制量要求

检 测 仪 表 的 使 用 场 合	距边界外下列距离处的剂量当量率 H 控制值 ($\mu\text{Sv/h}$)	
	5cm	100cm
对人员的活动范围不限制	$H < 2.5$	$H < 0.25$
距源容器 1m 区域内很少有人停留	$2.5 \leq H < 25$	$0.25 \leq H < 2.5$
距源容器表面 3m 的区域内不可能有人进入, 或放射工作场所划出了监督区和非限制区	$25 \leq H < 250$	$2.5 \leq H < 25$

体的皮肤就可以了。 β 射线比 α 射线穿透能力大, 对人体的危害也比较大, 并且高速电子流轰击在物质上时会产生韧致辐射, 发射 X 射线, 所以对 β 射线一般采用二级防护, 先用一层密度小的物质吸收 β 射线, 再用一层密度大的物质吸收掉 X 射线。X、 γ 射线的穿透能力强, 防护比较困难。重金属 (如铅) 对射线有较强的吸收能力, 但出于经济上的考虑, 大面积防护时仍采用砖、混凝土等材料, 增加防护层的厚度。

另外, 仪表安装时要选择合适的安装场所。应用单位根据仪表使用情况, 在满足仪表测量的条件下, 安装在远离高温、强振动和便于检修拆卸的地方, 并使有用射线避开人员停留和经常经过的区域。安装地点应设置警示装置, 避免人员接受不必要的射线照射。在仪表安装后, 含密封源仪表中的放射源一般需单独安装。在有放射源的地点可设置固定式防护装置, 如将生产线上使用的放射源容器装入一般为 2mm 厚钢板箱, 牢固锁于支架上, 既可增加屏蔽效果, 使泄漏射线进一步降低, 也起到了防盗效果。在仪表初步安装后, 可根据对现场辐射水平的监测情况采取相应措施, 如泄漏射线较高, 可增强防护措施 (增加屏蔽), 进一步降低泄漏射线。对放射源也要有妥善的保管措施以防其泄露或流失。

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "MTExNzIzMjZf5qOA5rWL5oqA5pyv5LiO5bqU55SoLnppcA==",
  "filename_decoded": "11172326_\u68c0\u6d4b\u6280\u672fu4e0e\u5e94\u7528.zip",
  "filesize": 29413150,
  "md5": "4e865b345bd804ffbfa5bb4901c364c9",
  "header_md5": "6d807c2e90416c6ef570d040d40b77ac",
  "sha1": "4ffda4a5d188cc15011657764dc73c186afd4abb",
  "sha256": "2015fbae5812d38437bbca2587b84cb2b51e5a5344968919f2e621c0b028c618",
  "crc32": 2130780311,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 31268486,
  "pdg_dir_name": "11172326_\u255d\u221e\u2593\u0393\u255d\u255d\u2569\u2321\u2559\u03b4\u2559\u00aa\u2559\u251c",
  "pdg_main_pages_found": 229,
  "pdg_main_pages_max": 229,
  "total_pages": 237,
  "total_pixels": 1568459168,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```