

高等学校教学用书

工程测试技术

马英明 程锡禄 编

煤炭工业出版社

高等学校教学用书

工程测试技术

马英明 程锡禄 编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了工程测试技术的基础理论和基本知识,如传感器的原理、结构、标定和埋设方法,测量系统的组成及仪器的合理选配,常用仪表的使用等,使读者能根据测试的目的和对象,正确选择传感器和测量系统,拟定合理的测试方案。

本书的特点是紧密结合矿山建设工程和其它地下工程的实际,根据作者多年来从事科研测试的实践体会,着重介绍地下工程结构内外力、位移、振动、强度和隐患,以及施工中遇到的温度和流量等物理力学参数的测试方法与操作技术。内容简明扼要,重点突出,实用性强。

本书是矿山建设工程专业、各种地下工程专业以及工业与民用建筑专业的《工程测试技术》课程的教材,也可供有关专业的研究生和科技人员参考。

责任编辑:吴 秀 文

高 等 学 校 教 学 用 书

工 程 测 试 技 术

马英明 程锡禄 编

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^1/16$ 印张 $13^{3/4}$

字数 327 千字 印数 1—1,880

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

ISBN 7-5020-0198-0/TD·198

书号 3041

定价 2.80元

前 言

《工程测试技术》初稿于1984年5月由中国矿业大学内部印刷，作为矿山建设工程专业试用教材。1984~1987年期间在该专业本科生中试用过四次，研究生中试用过两次，另外在工业与民用建筑专业和矿建工程师培训班中也试用过。

在这次正式出版前，我们认真考虑了专家和读者们的宝贵意见，并结合教学和科研实践的亲身体会，作了删改、调整和充实。本书前半部着重介绍传感器的原理、测量系统的组成及其仪表选择；后半部介绍测试技术在工程实践中的应用。

通过本书学习可基本达到：（1）能根据工程实际拟订合理的测试方案；（2）正确选择传感器和测量系统；（3）掌握传感器的原理和标定方法，以及常用仪器的使用知识。

本书由中国矿业大学矿山建筑系马英明和程锡禄合编。其中，第一、二、五、六、九章由马英明编写，第三、四、七、八章由程锡禄编写。全书经淮南矿业学院刘万禧教授审阅，由马英明和吴秀文最后审校。在编写过程中，高桐、刘铮敏、郁楚侯、庞俊勇等专家教授提出了宝贵意见。在此仅向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

1987年10月

目 录

前 言

第一章 概论	1
一、测试技术的实质和意义	1
二、测试技术分类	1
三、测量系统的组成	4
四、本课程的任务及与其它课程的关系	6
第二章 传感器	7
第一节 传感器的分类和性能要求	7
第二节 电阻式传感器	10
第三节 电感式传感器	12
第四节 电容式传感器	17
第五节 振弦式传感器	21
第六节 压电式传感器	25
第七节 磁电式传感器	29
第八节 热电式传感器	31
第三章 电阻应变式测试技术	38
第一节 概述	38
第二节 电阻应变片	38
第三节 测量电路	51
第四节 电阻应变仪	65
第五节 现场采用电阻应变式测试的几个问题	70
第四章 常用的几种记录仪表	77
一、笔记录仪	77
二、自动平衡式记录器	78
三、X-Y函数记录仪	78
四、磁带记录器	79
五、光线示波器	84
六、各种记录器的性能比较	95
第五章 传感器的设计与标定	98
第一节 传感器的设计	98
第二节 传感器的标定	110
第六章 地下工程内外力与位移测试技术	117
第一节 地下工程内外力测试技术	117
第二节 围岩和支架位移测试技术	138
第七章 振动测试技术	148
第一节 概述	148
第二节 拾振器的组成与工作原理	148

第三节	常用的典型拾振器结构与性能	154
第四节	测振系统的组成与标定	156
第五节	振动记录图的分析	157
第八章	声波测试技术	163
第一节	概述	163
第二节	声波测试的物理基础	164
第三节	声波测试仪器的基本原理与换能器	171
第四节	声波测试的基本方法	180
第五节	声波测试在矿井建设中的应用	186
第九章	温度和流量测试技术	197
第一节	温度测试技术	197
第二节	流量测试技术	206
参考文献		215

第一章 概 论

一、测试技术的实质和意义

随着科学技术的发展,人类发明和创造了各种仪器、仪表和传感器,并利用它们开展各种科学实验,取得单靠人的感官所不能取得的各种信息,经过加工处理和利用,促进了生产的发展,反过来也推动了科学技术的进步。就这样,随着科学技术和生产的发展逐步地形成了现代测试技术。

测试是人们借助于一定的测量手段,通过实际测量的方法,对客观事物和自然现象取得数量上和质量上的认识过程。任何一事物和现象都可以用一些特征物理量或物理参数的数值大小及其变化规律的信息来描述,而测试技术就是研究这些信息的获得、传输和变换、显示记录和分析处理的原理和技术。总之,测试技术就是测量工具和测量方法的统称。测试可在现场条件下对实物原型来进行,通称为现场实测;也可在实验室内对模型来进行,通称为实验测试。

不随时间变化的信息,称为静态信息,其获得是采用静态测试技术。累积随时间变化的信息,称为动态信息(参数的数值随时间而变),是采用动态测试技术。测试的结果可以表现为数字,也可以表现为曲线或图象。

科技的发展是与测试技术的发展息息相关。在科学技术发展的过程中,一些科学理论和研究成果,可以通过测试来验证;一些新的现象(包括物质、能量和自然规律)往往是通过测试来发现。在生产过程中,为确保生产安全、高效、优质,必须采用测试技术进行检测和控制。可见,先进的测试技术是科学技术现代化必不可少的条件,也是生产顺利发展的重要保证。

当代科学技术正在日新月异地向前发展,一批批新兴学科和技术领域正在崛起,但它们不仅离不开测试技术,而且它们还对测试技术提出了越来越高的要求。为了加快我国四化建设步伐,适应世界新技术革命的形势,科技工作者和工程技术人员很有必要学习和掌握现代测试技术,以胜任自己所从事的专业工作。

矿井建设等各类地下工程的设计和施工,历来是人们感到困难而棘手的问题。其主要原因是地下工程结构与地层两者处于共同作用的复杂体系之中,其受力特性和变形规律与地层性质、施工方法和结构类型密切相关,仅凭理论不能解决设计和施工中的实际问题。所以,目前国内外正在提倡所谓“信息设计”和“信息施工”的科学方法,即在施工过程中进行测试和信息反馈,以达到下列目的:(1)检验原设计是否合理,并为新设计提供优化依据;(2)指导施工;(3)监控工程安全;(4)完善与发展设计理论和施工技术。测试在设计和施工中的作用如图1-1所示。

二、测试技术分类

目前所用的测试技术种类非常繁多,难以确切的统一分类。根据测试方法的物理原理,大致可分为以下几大类:

(1) 机械式测试技术(包括液压式);

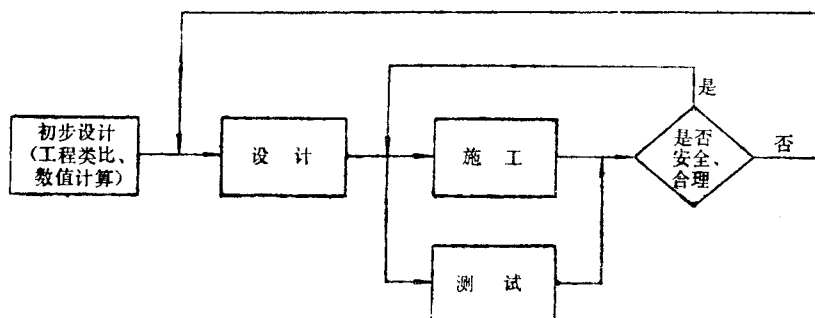


图 1-1 测试在设计和施工中的作用

- (2) 电磁式测试技术;
- (3) 光学式测试技术;
- (4) 声学式测试技术;
- (5) 其它物理效应测试技术 (如微波、激光、同位素等)。

早期的测试技术往往是与理论研究工作结合在一起,曾采用一些简单的机械式量具或机械式仪表进行实验。随后,由于电学、光学、声学、……等技术的发展,为测试技术的迅速发展创造了条件。尤其是近二、三十年来,由于电子技术的飞速发展,对电量(电阻、电流、电压等)的测量技术水平不断提高,使灵敏度高、反应迅速、连续测量、自动记录的仪表不断涌现。可是在工程技术上要测量的各种参量(统称物理量)绝大多数为非电量,如力、压力、应力、应变、位移、速度、温度、流量等等,因而又发展了把非电量转换成电量的技术,以使用电测的方法来测量非电量,这样就形成了“非电量电测法”测试技术。目前,非电量电测法测试技术在各个科技领域和生产部门获得最广泛的应用,并逐渐取代了早期出现的机械式测试技术。随着电测技术发展的同时,光学式测试技术在实验应力分析中获得了应用和发展,声波和超声波探测技术在无损探测(内部缺陷、结构的厚度和强度等)方面日益受到重视。由于光测法、声测法与电测法的关系非常密切,而且往往都要以电测法为辅助,所以,有人将光学式和声学式测试技术也统统划入非电量电测技术的范畴,而把测试技术统分为两大类:机械式和电测式。

(一) 机械式测试技术

机械式测试技术是以机械式和液压式仪表为测量手段,其工作原理是基于机械传动学原理和液压传动学原理。这类仪表的特点是结构简单、使用方便、性能可靠、测读直观、无电气部分,在近距离就地观测和需防爆的井下测试中,为常用的测试技术。机械式测试仪表一般有如下两种:

1. 机械式仪表

这种仪表是以杠杆、弹簧、齿轮、量具(游标卡尺、百分表、千分表)等为基本元件制造的,如日常生活中的弹簧秤、握力计;矿山常用的杠杆式机械测力计、弹簧式锚杆测力计、各种量具式位移计和位移测杆等。

2. 液压式仪表

这种仪表是利用液体不可压缩和各向均匀传递压力的原理制造的,如测量岩土压力的液压式压力盒、测量结构物受力的液压枕式或活塞式测力计等。

（二）电磁式测试技术

电磁式测试技术是以电磁学为基本原理，它涉及的面非常广泛，除常用的电工仪表对电量的测量技术外，这里主要研究的是非电量的电测技术，它是本教材的主要内容，将于以后各章中详细讲述。

（三）光学式测试技术

利用光学原理对各种物理量（如应力、应变、位移）进行测量的技术称为光学式测试技术，简称光测法。目前以光弹性法在模型实验中应用最广，其它光测法有云纹法、全息干涉法、激光散斑干涉法等。

1. 光弹性法

它是由光学和弹性理论相结合用以对工程结构作应力分析的实验方法。它利用某些光学弹性材料（如环氧树脂、有机玻璃、透明塑料等）制成模型，在受力情况下置于偏振光场中，利用偏振光干涉在模型中产生应力条纹而测得模型各处的应力分布。光弹性的基本原理是：（1）荷载作用于模型上，由于各点应力不相等使模型各点的光学性质发生变化，即由光学各向同性体变为光学各向异性体；（2）偏振光通过光学各向异性体，由于其任一点各个方向上的折射率不相等，在平面内将发生双折射现象而出现干涉条纹；（3）这些条纹与各点应力有直接联系，通过条纹分布可找出应力分布规律。

光弹性法不仅可应用于测量平面应力，而且已研制出应力冻结切片法或散射光法，用于测量三维应力。从光弹性模型实验法派生出的光弹性贴片法（或叫光弹性涂层法），也是利用偏振光的干涉现象，在结构表面上粘贴光弹性材料的薄片，结构受力后显示出条纹图形，由此提供结构表面的应力分布，从而使光弹性法可在现场实际结构上广泛应用。在岩石力学的现场实测中可使用依此原理制成各种光弹应变计和光弹应力计。此外，随着全息照相技术的应用，将激光全息照相技术应用于光弹性实验，可直接由实验数据中得出应力的大小和方向，而避免了繁琐的计算。

2. 云纹法

它是利用两块密集栅线板之间光线干涉现象产生条纹（称云纹现象）来测定构件的应变和位移。所用的测量基本元件称为栅。栅是由透明和不透明相间的平行等距线条所组成，组成栅的不透明线条称为栅线，栅线之间的间距称为节距。将一组栅线刻制或粘贴在试件表面上（称为试件栅），用另一块不变形的栅板（称为基准栅或分析栅）与其重迭，当试件受力发生变形时，试件栅跟随变形，而基准栅不变，因此就会有云纹产生。根据云纹图象中云纹的位置及云纹间的间距或转角，便可求出试件的应变或位移。在实验应力分析中光栅的栅线间距一般均大于光的波长，所以，云纹法实际上是一种几何干涉法。

云纹法的主要优点是：设备简单，只需要一般光源和照相器材；直观性强，可直接得到全域应变场分布的图形；测量范围大，从弹性变形到塑性变形，从静荷载、蠕变松弛、塑性流动到振动波传播等均能测量。其缺点是对微小应变测量缺乏足够的灵敏度和精确度，在试件表面复制高精确度的密栅线技术上较困难。云纹法的图象与光弹性实验相似，但计算方法不同，对模型材料没有光学性能要求，能在现场实物或室内模型上进行测量。

3. 全息干涉法

全息干涉法是利用全息照相技术进行全息干涉计量的方法，它同时记录物体光波的振幅和相位，将记录物体原始和变形后状态的全息图再现时产生干涉条纹进行分析，得出

物体受力后位移和应变分布。普通照相只能记录物体光波的振幅信息，而不能记录物体光波的相位信息。全息照相是利用光的干涉将物体光波的全部信息即振幅和相位都记录在底片上，得到全息图。再利用光的衍射，在一定条件下使物体光波再现，得到与物体十分逼真的立体图象，这种既记录振幅又记录相位的照相称之为全息照相。

全息干涉法是一种非接触式、高精度的全域测试方法，可用于任意表面形状的位移测量和振动分析，可在实物和模型表面全域显示。

在全息干涉法基础上，近年发展了另一种新方法——激光散斑干涉法。它是利用与物体表面变形或位移有内在联系的散斑图，将物体二维和三维位移或变形测量出来，进而求得应变应力分布。

以上简介的几种光测技术，在有关力学教科书（如材料力学、岩石力学、实验应力分析等）中都有详细叙述，在现场工程测试中目前应用还有较大的局限，故本教材不再重复。

（四）声学式测试技术

声学式测试技术的实质是在被测物体中（如金属结构、混凝土、岩体等），利用声波或超声波的传播速度、相位、振幅、频率等的变化规律取得数据或图象，再通过计算或按事先标定的曲线求得所需的物理参数，通称声波探测法。它属于非破损检测技术的一种。用它可探测金属和非金属结构内部的缺陷、结构的厚度、材料的强度等物理力学参数。在矿山工程中目前应用较广的有岩体、井巷工程、钢筋混凝土结构物等的声波检测技术，有关内容将于第八章详细讲述。

测试技术紧密地伴随着现代科学技术的发展而发展。目前除不断提高测试仪表的性能和扩大应用范围外，总的发展趋势是：高精度高速度化、微型化、集成化（传感器与测量电路合在一起）、非接触化、智能化等等。由于以大规模集成电路为基础的微处理机应用到测试技术中来，把传统的测量仪器变成了智能仪器，从而大大扩展了功能，如自动校正功能、信息变换功能、信息处理功能和指令功能等等。另外，人们不断探索新的测量原理，如利用新的物理效应、研究仿生学等，来开发和研制新型传感器。

三、测量系统的组成

由于电子技术和计算机的飞速发展，一般都优先采用电测法来测量包括非电量在内的绝大多数物理量，这是因为电测技术具有以下优点：

- （1）能连续测量和自动记录；
- （2）测量范围广，反应速度快，不仅适于静态测试，而且也适于动态测试；
- （3）可实现信息的远距离传输和遥测，便于实现集中控制和遥控；
- （4）测量的灵敏度和精度高；
- （5）能进行多点扫描检测，易于实现检测过程自动化；
- （6）易于同许多后续的数据处理仪器连接，对复杂的测量结果进行运算处理，如与电子计算机连接进行处理，或用微处理机做成智能装置。

一个完整的非电量电测系统，通常以信息流的过程来划分为以下几个组成部分：

信息的获得——传感器（换能器、变送器、探头）；

信息的传输和变换——测量电路；

信息的显示记录——指示器、记录器、示波器；

信息的处理——运算器、分析仪、处理机、电子计算机。

由此可见，一个完整的现代测量系统有如图1-2所示。而在一般情况下，常用的测量系统主要由三部分组成：传感器、测量电路、显示记录器。辅助电源则给系统的各个部分供电，但有些场合传感器本身就是电源（如热电式、光电式传感器），则辅助电源仅用于显示记录部分。

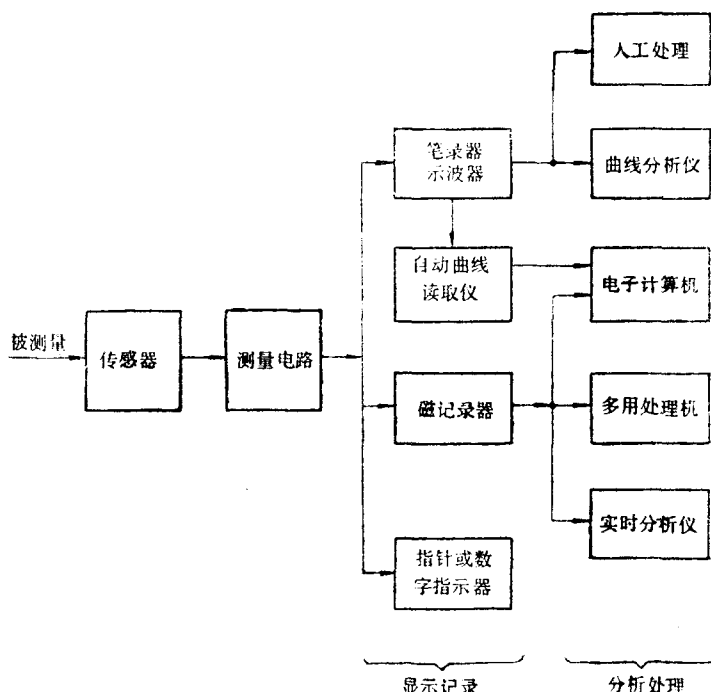


图 1-2 非电量电测的测量系统图

在测量系统中，有时将传感器称为一次仪表，而将测量电路及显示记录和数据处理的仪表称为二次仪表。传感器是我们研究的重点，而二次仪表可以采用市售通用的电量测量仪表。

传感器 是一个把被测物理量转换为与之有确定对应关系的电量的装置，因此它是一种获得信息的工具。

测量电路 是把传感器输出的电量变换为易于显示、记录 and 处理的电路。测量电路的种类常由传感器的类型而定。使用较多的是电桥电路和放大电路，此外，还有滤波、整流、积分、微分电路以及其它特殊电路。由于传感器的输出信号一般比较微弱，为了便于显示和记录，常常要将信号加以放大，所以大多数测量电路都带有放大器。在最简单的情况下，测量电路就是连接传感器和显示器之间的导线。

显示记录器 是显示和记录测量结果的仪器。常用的显示方式有三种：模拟显示、数字显示和图象显示。模拟显示一般用指针指示读数，常用的有毫伏表、毫安表、微安表等。数字显示是用数字形式来显示读数，如数字电压或电流表、电子计数器、数字频率计

等。图象显示是用屏幕显示读数或被测参数变化曲线的图象。记录显示仪器往往是一独立的通用装置，能够与不同的测量电路配合使用。目前常用的自动记录仪器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、数字打印机等。

信息处理装置 在测量过程中或测得数据之后，有时必须对测得的电信号数值加以分析和数据处理，例如对复杂的波形进行频谱分析，对复杂的数据进行运算等。常用的仪器有频谱分析仪、波形分析仪，实时信号分析仪，快速傅里叶变换仪，以及微处理机等。

辅助电源 一般包括电源稳压电路和供给传感器的专用电源电路（如振荡电路等）。

四、本课程的任务及与其它课程的关系

本课程的任务是，使学生掌握以非电量电测法为主要内容的工程测试技术的基本知识；了解常用传感器和测量系统的原理及结构；学会地下工程结构主要物理力学参数的测试方法。具体来说，通过本课程的学习，要求达到：（1）根据科学研究或工程检测的实际需要能提出合理的测试方案；（2）根据被测对象的性质、环境特点及对测量精度的要求，对传感器和测量系统能够进行合理的选择；（3）初步掌握传感器的标定和常用仪器的操作技术；（4）了解对试验数据进行分析处理的基本方法。

《工程测试技术》课程的特点是涉及的知识面广，实践性强。与本课程有密切关系的有数学、物理学、工程力学、电工学、电子学以及有关的专业课，其中尤以物理学和电子学更为密切。在学习方法上要注意理论联系实际，一方面重视有关基础理论和基本知识的学习，另一方面也必须重视实验操作及数据处理等实践环节，勤于动手，方能不断提高自己解决实际问题的能力。

第二章 传 感 器

把被测物理量转换为易于测量、传输、显示、记录或处理的电信号的装置称为传感器，也称变换器、变送器、测试元件等，在声学测试技术中则称为换能器或探头。

传感器一般由弹性元件、传感元件和其他辅助件组成。弹性元件是指直接感受被测量（一般为各种形式的非电量），并输出与被测量成确定对应关系的其它非电量（如位移或应变）的元件，如膜片和波纹管等，可以把被测压力变成位移量。传感元件是指将敏感元件输出的非电量转换成电量信息的器件。例如差动变压器式压力传感器，膜片直接感受被测压力后转换成位移的变化，膜片位移时带动衔铁位移，使变压器产生电压信号输出。这里的膜片就是弹性元件，差动变压器就是传感元件。在一些情况下，弹性元件和传感元件合二为一，如弹性元件直接输出电量或传感元件直接感受被测量并输出电量，例如电阻应变片、热电偶和热敏电阻等。辅助件是指传感器构造要求的附件，如防护罩、接线座、引线、补偿元件等。

传感器是获得信息的首要环节，是整个测量系统的核心部分，它的性能好坏直接影响测试的效果，所以说，没有精确可靠的传感器，就没有精确可靠的测试和控制系统。

第一节 传感器的分类和性能要求

一、传感器的分类

传感器种类繁多，一种被测物理量往往可以应用多种不同类型的传感器来检测，而同一种传感器往往也可以测量多种物理量。为了对传感器的原理和用途有一概括的认识，有必要对传感器加以分类。常用的分类方法有两种：按被测物理量（测量对象）分类和按工作原理分类。

（一）按被测物理量分类

这种分类方法是以被测物理量的性质来给传感器命名的，即测量什么量，就叫什么传感器，实质是按用途分类。例如以表2-1所列的基本物理量和派生物理量来命名，可将传感器分为位移传感器、测力传感器、温度传感器、速度传感器等等。这种分类方法的优点是明确地说明了传感器的用途，便于使用者根据测量对象来选择。但缺点是名目繁多，对掌握传感器的工作原理和设计不利。

（二）按传感器工作原理分类

这种分类方法是以被测物理量转换为电量时的转换原理给传感器命名。按传感器工作时是否需要外加辅助能源，又可分为两类：

1. 有源传感器

有时也称为自源型、能量型或发电型传感器。其特点是，犹如一台微型发电机，它能够将被测的非电能量转换成电能，信息的能量直接从被测对象中取得。因此，对于有源传感器输出的信号可直接进行放大和测量。例如压电式传感器可将机械能转换为电能；光电式、热电式传感器可将光能、热能转换为电能等等。

表 2-1 常见被测物理量表

基本物理量		派生物理量
力	压力	应力、重量、比重、力矩
位移	线位移 角位移	应变、长度、厚度、振动 偏转角、倾斜角
速度	线速度 角速度	振动、流量 转速、角振动
加速度	线加速度 角加速度	振动、冲击、质量、力 角振动、角冲击、力矩
温度		温度、比热

2. 无源传感器

有时也称为它源型、参量型或能量控制型传感器。其特点是，它不能起换能作用，只能将被测物理量转换成电阻、电感、电容之类的电路参量，而后经过测量电路将它进一步变换成电压或电流信号才能进行放大和测量。所以，这类传感器必须由外部供给辅助电源，才能检测被测对象能量的变化。例如，电阻应变计中的电阻接于电桥上，电桥工作的电源是由外部供给，而控制电桥失稳程度是由于被测量变化所引起的电阻变化。

工程测试中，常用的传感器按其工作原理分类，示于图2-1。

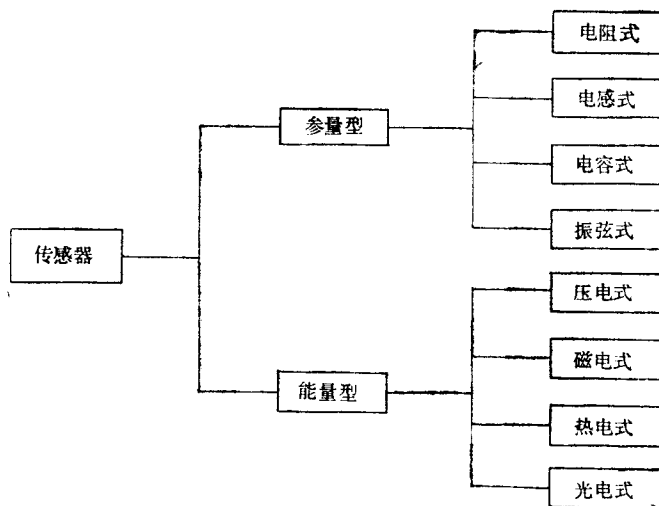


图 2-1 传感器分类

这种分类方法，清楚地指明传感器的工作原理，有利于对传感器和测量系统的分析研究、设计和研制。

有些场合，常把用途和原理结合起来命名某一传感器，如电感式位移传感器、电阻式压力传感器、振弦式应力计或应变计等等。

为了避免重复叙述，本教材采用按传感器工作原理分类的方法，并将结合工程实践举

例说明一些传感器的用途。

二、传感器的性能要求

传感器作为测量系统的一个重要组成部分，必须具有良好的性能。评价性能优劣的主要指标一般有：

(1) 灵敏度高。灵敏度是指传感器或测量系统输出变化对输入变化的比值，用 K 表示，即

$$K = \frac{\text{输出量的变化量}}{\text{输入量的变化量}} = \frac{dy}{dx}$$

所谓灵敏度高，是指用相等的被测量作用时，该传感器的输出量（电量）比别的灵敏度低的传感器要大得多。

(2) 精度高。精度是指测量结果的精确（可靠）程度。测试中要求测定值与其真值之间的误差尽量小一些。实际上真值无法得到，往往用多次重复测定所得测值的算术平均值，近似地看作是真值。精度在数理统计中可用标准离差表示，标准离差越小，精度越高。在实际应用中，精度可用下列两种实用方法表示：(1) 以测量读数精确程度来表示，如百分表的最小读数为 0.01mm ，千分表为 0.001mm ，则说它们的精度分别为 0.01mm 和 0.001mm ；又如应变仪读数盘的最小刻度为 $1\mu\varepsilon$ ，则说它的精度为 $1\mu\varepsilon$ ；(2) 以传感器满量程的百分之几来表示，如某振弦传感器的满量程是 2000Hz ，且标明精度是满量程的 0.05% ，则它的精度就是 1Hz 。

(3) 稳定性好。是要求传感器在长时间内正常工作（读数可靠）。通常，稳定性包含两方面的内容：一是零点漂移，二是耐久性。零点漂移是指在恒温、恒湿度又无外载的条件下，传感器读数的稳定程度。一个合格的传感器，其零漂应在允许范围内。耐久性是指传感器在现场使用中能正常工作的时间。在地下工程测试中，一般要求传感器的耐久性为一至数年。

(4) 重复性好。重复性是当传感器受多次反复作用（如荷载）时，它在每一级相同作用时的几次读数值相接近的程度。如果相等或很接近，就认为该传感器的重复性好。对于反复加载和卸载的结构试验，重复性必须很好。

(5) 直线性好。要求传感器的输出量的变化与输入量的变化之间呈直线关系，或者直线化的范围尽可能大。

(6) 抗干扰能力强。要求受环境干扰少，内部噪声小，传感器的信噪比高。

(7) 动态特性好。这是对用于动态测试的传感器的特殊要求。以上几条指标可谓静态特性，而动态特性则是传感器对于随时间快速变化的输入量的响应特性，因此，所谓动态特性好是指反应速度快（瞬态响应好）和频率响应好。

(8) 不影响或少影响被测物物理参量分布的原始状态。

(9) 能适应使用的环境条件，如防潮、抗震、防爆等。

(10) 容易使用、维修和校准。

能完全满足这些要求的传感器是很少的，我们应根据测量目的、使用环境、被测对象、精度要求和信号处理等条件，进行综合考虑，尽可能更多地满足上述的性能要求。

第二节 电阻式传感器

电阻式传感器的种类繁多,应用十分广泛。它们的基本原理是将被测的非电物理量(如力、位移等)转换为电阻值的变化,然后通过对电阻值的测量来达到测量被测非电量的目的。

根据欧姆定律,导线的电阻 R 和导线长度 l 成正比,和导线的面积 S 成反比,比例常数 ρ 为电阻率,即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2-1)$$

改变其中任一个值,将引起电阻的变化。因此,电阻式传感器有三种基本类型:

(1) 利用电刷位移来改变电路中电阻器(丝)长度 l 的方法来获得信息转换,如变阻器式(也称滑动电阻式)传感器。

(2) 利用物体受力发生应变使电阻丝变形从而使电阻丝的长度 l 、截面积 S 和电阻率 ρ 都发生变化的方法来获得信息转换,如电阻应变片或应变计。

(3) 利用压力改变导线的截面积 S 的方法来获得信息转换,如接触电阻式传感器。

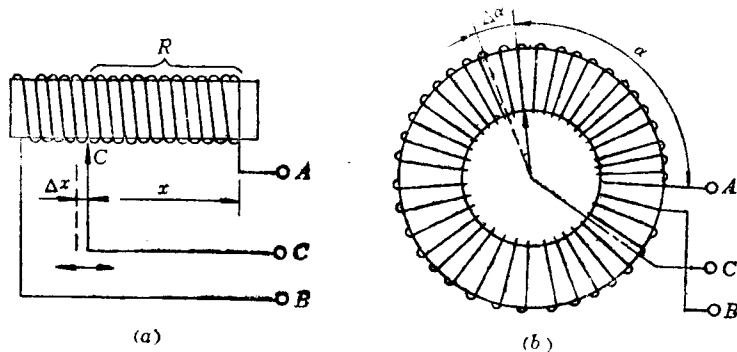


图 2-2 线性型变阻器式传感器原理

一、变阻器式传感器

这种传感器就是用高强度电阻丝或漆包线规则地绕在绝缘芯体上的滑动电阻器,它通过改变电路中电阻值的大小,实现将位移转换为电阻的变化。按变阻器(有时也称电位器)特性曲线的不同,常用变阻器式传感器有线性型和非线性型两种。

(一) 线性型变阻器式传感器

图2-2a为直线位移型,当被测位移变化时,滑动触点(电刷)C沿变阻器移动。假设每单位长度的电阻 $R_l = \text{const}$,当C移动距离 x 时,则C点与A点之间电阻为

$$R = R_l x \quad (2-2)$$

传感器的灵敏度为

$$K = \frac{dR}{dx} = R_l = \text{const} \quad (2-3)$$

图2-2b为角位移型或回转型变阻器式传感器，其电阻值随转角 α 而变化，单位弧度对应的电阻值为 $R_\alpha = \text{const}$ ，则传感器的灵敏度为

$$K = \frac{dR}{d\alpha} = R_\alpha = \text{const} \quad (2-4)$$

这种传感器的输出（电阻）与输入（位移）呈线性关系。

（二）非线性型变阻器式传感器

非线性变阻器，也称函数变阻器，其输出电阻与电刷位移之间具有非线性函数关系。通过它可以使传感器获得特殊要求的各种非线性函数（如指数函数、三角函数、对数函数等）输出，也可通过它的非线性，使得它与其它元件共同组成的传感器有线性输出。

图2-3是一种非线性变阻器式传感器的原理图。当输入量（如被测对象的位移）与变阻器位移 x 成某种函数关系时，若要获得与输入量成线性关系的输出（电阻），则需采用这种类型的传感器，即用它作线性化装置。

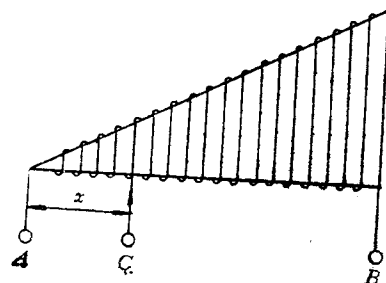


图 2-3 非线性型变阻器式传感器原理

变阻器式传感器的优点是结构简单、使用方便、量程大、稳定性和直线性较好，缺点是精度较低。

图2-4为变阻器式位移传感器的一种。它是一个管式滑阻位移计，其线圈骨架为一个带有纵向窗口的圆管，滑块在其内滑动，靠弹簧的推力保持测杆位移的平衡。其量程根据需要可为50~200mm，精度为 $\pm 0.10 \sim \pm 0.20 \text{mm}$ 。

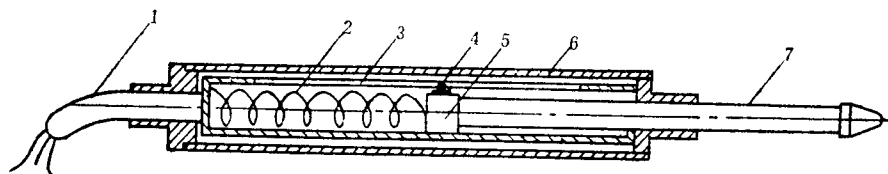


图 2-4 管式滑阻位移计

1—引线电缆；2—压缩弹簧；3—线圈；4—滑动触点；5—内滑块；6—外壳；7—伸缩测杆

二、差动电阻式传感器

差动电阻式（卡尔逊式）传感器的工作原理如图2-5所示。当传感器的基座3和4之间发生轴向相对位移时，与其相连的两根电阻丝1与2，一根伸长，另一根缩短，成相反方向变动，即所谓差动。伸长量和缩短量是相等的，利用惠斯通电桥原理即可测读这两根电阻丝电阻比值的变化，来反映被测量的变化。

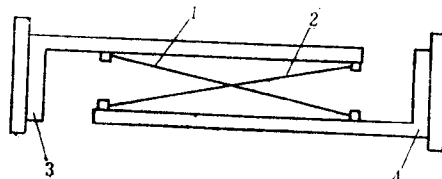


图 2-5 差动电阻式传感器原理
1、2—电阻丝；3、4—传感器基座