

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI
GAOZHUAN
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

测试技术

张 淼 马 光 申桂英 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI
GAOZHUAN
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

测 试 技 术

主 编 张 淼 马 光 申桂英
编 写 罗 胜 陈玉芳 姚喜贵
周 晨
主 审 郭 健



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”规划教材。

本书全面系统地分析了测试系统的特性,介绍了测试技术在各个领域中的应用及实例,并对信号处理的基本知识作了必要的讨论。全书共分九章。内容包括:常用传感器,测试系统的特性,中间转换电路与记录,信号分析与数据处理,位移、力、扭矩、压力的测量,振动的测量,温度的测量,计算机测控与现代仪器仪表。

本书取材适当,结构新颖,内容丰富。可作为工科电气技术、工业电气自动化、供用电技术、机电一体化等专业及相近专业的高职高专教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测试技术/张森,马光,申桂英主编. —北京:中国电力出版社, 2004.8

高职高专“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2084-0

I. 测… II. ①张…②马…③申… III. 测试技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 080183 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 8 月第一版 2004 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 306 千字

印数 0001—4000 册 定价 19.80 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)

随着新世纪的到来,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。新世纪新阶段的新任务,对我国高等职业教育提供了新要求。我国加入世界贸易组织和经济全球化迅速发展的新形势,也要求高等职业教育必须开创新局面。

高职高专教材建设是高等职业教育的重要组成部分,是一项极具重要意义的基础性工作,对高等职业教育培养目标的实现起着举足轻重的作用。为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神,进一步推动高等职业教育的发展,加强高职高专教材建设,根据教育部关于通过多层次的教材建设,逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系的精神,中国电力教育协会会同中国高等职业技术教育研究会和中国电力出版社,组织有关专家对高职高专“十五”教材规划工作进行研究,在广泛征求各方面意见的基础上,制订了反映电力及相关行业特点、体现高等职业教育特色的高职高专“十五”教材规划。同时,为适应电力体制改革和电力高等职业教育发展的需要,中国电力教育协会筹备组建全国电力高等职业教育教材建设指导委员会,以便更好地推动新世纪电力高职高专教材的研究、规划与开发。

高职高专“十五”规划教材紧紧围绕培养高等技术应用性专门人才开展编写工作。基础课程教材注重体现以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为教学重点;专业课程教材着重加强针对性和实用性。同时,“十五”规划教材不仅注重内容和体系的改革,还注重方法和手段的改革,以满足科技发展和生产实际的需求。此外,高职高专“十五”规划教材还着力推动高等职业教育人才培养模式改革,促进高等职业教育协调发展。相信通过我们的不断努力,一批内容新、体系新、方法新、手段新,在内容质量上和出版质量上有突破的高水平高职高专教材,很快就能陆续推出,力争尽快形成一纲多本、优化配套,适用于不同地区、不同学校、特色鲜明的高职高专教育教材体系。

在高职高专“十五”教材规划的组织实施过程中,得到了教育部、国家电力公司、中国电力企业联合会、中国高等职业技术教育研究会、中国电力出版社、有关院校和广大教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要不断完善。因此,在教材的使用过程中,请大家随时提出宝贵的意见和建议,以便今后修订或增补。(联系方式:100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222)

前言

对于一门新课程,学生无疑希望能有一本简明易懂的教材。但是,如果教材像小说或者报道那样,虽然读来轻松,却不会在心目中留下什么印象。尤其是测试技术这样的应用技术课程,涉及到电工学、电子学、力学、信号处理、自动控制、机械振动、数学、计算机、液压、气动、光学和热力学等诸多领域,如果仅罗列实际应用中的技术,读者就会发现,在迅速发展的今天,这样的知识根本解决不了面临的新问题。但是,如果过多地强调众多测试系统中的共同理论基础,势必陷入复杂的数学分析,忽略了测试技术的主要研究内容,如同又学习了一次《信号与系统》课程。

因此,本书在内容上,选择了各个领域常用的和比较能突出本领域测试系统共性的实例;在安排章节上,从测试系统基本特性开始分析,然后列举各个应用领域的实例,最后将测试技术提升到信号处理的高度进行总结。本书并不追求数学上的严密,力争以易于理解的表达方式,将物理的直观和抽象的理论联系起来,使读者见木亦见林,能初步掌握静态机械参量测试方法和常用工程试验所必需的基本知识和技能,能够将信息处理技术与各种具体应用领域的知识综合起来,将软硬件结合去解决实际中遇到的技术问题。

本书由张淼、马光、申桂英主编,参加编写工作的有温州大学张淼(第一、二章、第三章第四节)、温州大学申桂英(第三章第一~三节)、温州大学马光(第四章)、温州大学罗胜(第五章)、温州职业技术学院陈玉芳(第六、七章)、温州大学姚喜贵(第八章)、温州大学周晨(第九章)。张风云老师也编写了部分章节。本书由郭健主审。

通用集成仪器平台的构成技术、数据采集、数字信号分析处理软件技术是决定现代测试仪器系统性能与功能的三大关键技术,这三个方面正逐渐与蓬勃发展中的计算机技术和人工智能技术相结合,测试技术即将出现一个崭新的局面。于此之际,编写的教材中错误与不妥肯定存在,而且编者水平有限,舛误难免,恳请读者批评指正。

编者
2004年5月

目 录

序	
前言	
第一章 概论	1
第二章 常用传感器	5
第一节 概述	5
第二节 电阻式传感器	7
第三节 电感式传感器	14
第四节 电容式传感器	20
第五节 磁电式传感器	25
第六节 压电式传感器	30
第七节 光电式传感器	35
习题	39
第三章 测试系统的特性	40
第一节 概述	40
第二节 测试系统的静态特性	41
第三节 测试系统的动态特性	43
第四节 测试系统的特性举例分析	53
习题	55
第四章 中间转换电路与记录	56
第一节 电桥电路	56
第二节 调制与解调	60
第三节 滤波器	64
第四节 信号记录装置	70
习题	75
第五章 信号分析与数据处理	77
第一节 信号的分类	77
第二节 周期信号	81
第三节 非周期信号	86

第四节 随机信号	99
第五节 信号分析	102
第六节 数字信号处理初步	121
习题	132
第六章 位移、力、扭矩、压力的测量	135
第一节 位移的测量	135
第二节 力的测量	143
第三节 扭矩的测量	145
第四节 压力的测量	147
习题	156
第七章 振动的测量	158
第一节 振动的基础知识	158
第二节 振动的激励与激振器	161
第三节 振动测量与测振传感器	163
习题	174
第八章 温度的测量	175
第一节 液体温度计	175
第二节 热电偶温度计	176
第三节 电阻式温度计	183
第四节 电磁波高温计	188
第五节 温度计的校准	189
习题	189
第九章 计算机测控与现代仪器仪表	190
第一节 计算机测控系统	190
第二节 现代测试仪器	193
第三节 纳米科技与仪器仪表	201
习题	204
参考文献	205

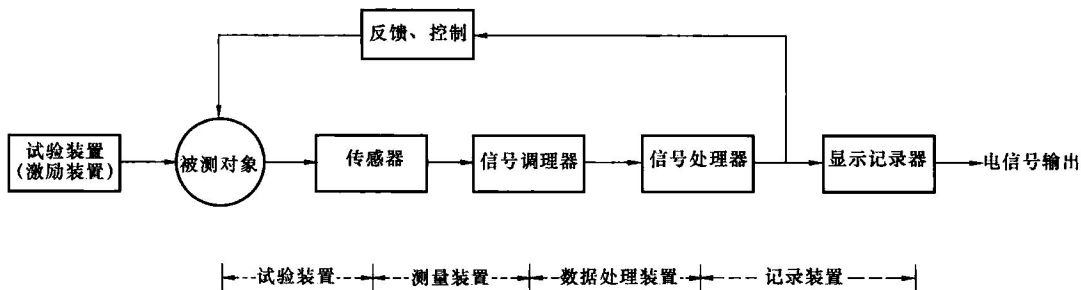
第一章

概 论

测试技术包含了测量（measurement）和试验（test）两方面的含义，是指具有试验性质的测量或测量与试验的综合。科学始于测量，没有测试就没有科学。从广义上讲，测试技术属于信息科学的范畴，与计算机技术、自动控制技术、通信技术构成完整的信息技术学科。其主要任务是从被测对象的测试信号中提取所需的特征信息，与设计、工艺共同构成工程技术的三大支柱，并为设计、工艺环节提供原始的数据基础。

一、测试系统的组成

为了完成测试任务，使用相关的器件、仪器和测试装置有机组合，从而获取所需信息。这个整体通常被称为测试系统，如图 1-1 所示。测试系统将被测对象置于预定状态下，并对被测对象所输出的特征信息进行拾取，变换放大，分析处理，判断，记录显示，最终获得测试目的所需要的信息。



由图 1-1 可见，一个测试系统一般由试验装置、测量装置、数据处理装置和显示记录装置等组成。

（1）试验装置。一个被测对象的信息总是通过一定的物理量——信号表现出来，因此，信号是信息的载体，信息是信号的内涵。有些信息可以在被测对象处于自然状态时所表现出的物理量中显现出来，有些信息却无法显现或显现得不明显。在后一种情况下，需要通过激励装置作用于被测对象，使之产生有用信息载于其中的一种新的信号，如对零件或设备激振测量其固有频率等。试验装置是使被测对象处于预定的状态下，并将其有关方面的内在联系充分显露出来，以便进行有效测量的一种专门装置。

（2）测量装置。信号可能是电信号和非电信号，测试过程中，非电信号常常需要被转

换成电信号。传感器就是将被测信息转换成某种电信号的器件。它包括敏感器和转换器两部分。敏感器一般是将被测量如温度、压力、位移、振动、噪声、流量等转换成某种容易检测的信号，而转换器则是将这种信号变成某种易于传输、记录、处理的电信号。

(3) 数据处理装置。来自传感器的信号，由调理环节转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这种信号的转换，多数是电信号之间的转换，如幅值放大，将阻抗的变化转换成电压的变化或频率的变化等等。信号处理环节是对来自信号调理环节的信号进行各种运算和分析。

(4) 显示记录装置。显示记录装置是测试系统的输出环节，它可将被测对象所测得的有用信号及其变化过程显示或记录（或存储）下来，数据显示可以用各种表盘、电子示波器和显示屏等来实现。数据记录则可采用模拟式的各种笔式记录仪、磁带记录仪或光线记录示波器等设备来实现，而在现代测试工作中，越来越多的是采用虚拟仪器直接记录并存储在硬盘或软盘上。

需要指出的是，为了准确地获得被测对象的信息，要求测试系统中每个环节的输出量与输入量之间必须具有一一对应关系，而且输出的变化能够准确地反映出其输入的变化，即实现不失真的测试。

二、测试技术的任务

被测信号中既包含着需要研究的有用信息，但也不同程度地混入了无用信息（例如噪声信号等），各种电磁测量线路和测试装置在不同的环境下工作，不可避免地会受到噪声的干扰。噪声对被测信号所产生的影响，最终将以误差的形式表现出来，导致测试的精度降低，甚至难以正常进行测试工作。因此，工程测试的主要任务就是从设备的测试信号中提取所需的特征信息。

测试技术的任务主要有以下五个方面。

(1) 在工业自动化生产中，通过对工艺参数的测试和数据采集，实现对设备的状态监测、质量控制和故障诊断。

(2) 在设备设计中，通过对新旧产品的模型试验或现场实测，为产品质量和性能提供客观的评价，为技术参数的优化和效率的提高提供基础数据。

(3) 在设备改造中，为了挖掘设备的潜力，以便提高产量和质量，经常需要实测设备或零件的载荷、应力、工艺参数和电动机参数，为设备强度校验和承载能力的提高提供依据。

(4) 在工作和生活环境的净化及监测中，经常需要测量振动和噪声的强度及频谱，经过分析找出振源，并采取相应的减振、防噪措施，改善劳动条件与工作环境，保证人的身心健康。

(5) 科学规律的发现和新的定律、公式的诞生都离不开测试技术。从实验中可以发现规律，验证理论研究结果，实验与理论可以相互促进，共同发展。

三、测试技术研究的内容

测试技术研究的主要内容包括四个方面，被测量的测量原理、测量方法、测量系统以及数据处理。

测量原理是指实现测量所依据的物理、化学、生物等现象及有关定律的总体。例如，

压电晶体测振动加速度所依据的是压电效应；电涡流位移传感器测静态位移和振动位移所依据的是电磁效应；热电偶测量温度所依据的是热电效应等。不同性质的被测量用不同的原理去测量，同一性质的被测量亦可用不同的原理去测量。测量原理确定后，根据测量任务的具体要求和现场实际情况，需要采用不同的测量方法，如直接测量法或间接测量法、电测法或非电测法、模拟量测量法或数字量测量法、等精度测量法或不等精度测量法等。在确定了被测量的测量原理和测量方法以后，就要设计或选用测量装置，组成测量系统。最后，对实际测试得到的数据必须加以处理，才能得到正确可靠的结果。

四、测试技术的发展动向

随着科学技术水平的不断提高和生产技术的高速发展，工程测试技术也随之向前发展，卡式仪器、总线仪器直至集成仪器，近年出现的虚拟仪器和集成虚拟仪器库不断丰富测试领域的手段。此外，测试系统的体系结构、测试软件、人工智能测试技术等也有很大的发展。仪器与计算机技术的深层次结合产生了全新的测试仪器的概念和结构。

针对工程领域的测试技术，目前以下几方面比较受到关注：

1. 测量方式的多样化

(1) 多传感器融合技术在制造过程中的应用。多传感器融合是解决测量过程中信息获取的方法，它可以提高测量信息的准确性。由于多传感器是以不同的方法或从不同的角度获取信息的，因此可以通过它们之间的信息融合去伪存真，提高测量精度。

(2) 积木式、组合式测量方法。增加测试系统的柔性，实现不同层次、不同目标的测试目的。

(3) 便携式测量仪器。如便携式光纤干涉测量仪、便携式大量程三维测量系统等，用于解决现场大尺寸的测量问题。

(4) 虚拟仪器。虚拟仪器是虚拟现实技术在精密测试领域的应用，一种是将多种数字化的测试仪器虚拟成一台以计算机为硬件支撑的、数字式的智能化测试仪器，另一种是研究虚拟制造中的虚拟测量，如虚拟量块、虚拟坐标测量机等。

(5) 智能结构。它用于结构检测与故障诊断，是融合智能技术、传感技术、信息技术、仿生技术、材料科学等于一体的一门交叉学科，使监测的概念过渡到在线、动态、主动地实时监测与控制。

2. 视觉测试技术

视觉测试技术是建立在计算机视觉研究基础上的一门新兴测试技术。与计算机视觉研究的视觉模式识别、视觉理解等内容不同，视觉测试技术重点研究物体的几何尺寸及物体的位置测量，如三维面形的快速测量、大型工件同轴度测量、共面性测量等。它可以广泛应用于在线测量、逆向工程等主动、实时测量过程。

3. 测量尺寸继续向两个极端发展

两个极端就是指相对于现在测量尺寸的大尺寸和小尺寸。通常尺寸的测量已被广为注意，也开发了多种多样的测试方法。近年来，国民经济的快速发展和迫切需要，使得很多行业的生产和工程中测试的要求超过了我们所能测试的范围，如飞机外形测量、大型机械关键部件测量、高层建筑电梯导轨的准直测量、油罐车的现场校准等都要求能进行大尺寸

测量。而微电子技术、生物技术的快速发展,探索物质微观世界的需求和测量精度的不断提高,又要求进行微米、纳米测量。纳米测量仪器多种多样,有光干涉测量仪、量子干涉仪、电容测微仪、 x 射线干涉仪、频率跟踪式法珀标准量具、扫描电子显微镜(SEM)、扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜(AFM)、分子测量机(M3)等。

五、本课程的学习要求

现代测试系统常常是集机电于一体,软硬件相结合,智能化、自动化的系统。它涉及到传感技术、微电子技术、控制技术、计算机技术、信号处理技术、精密机械设计技术等众多技术。因此,要求测试工作者具有深厚的多学科知识,如力学、电学、信号处理、自动控制、机械振动、计算机、数学等。

同时测试技术是实验科学的分支,学习中要求理论学习与实验密切结合,应参加必要的实验,以得到基本实验技能的训练。通过教学实验和实践环节,学生应该能做到:

- (1) 熟练掌握各类典型传感器、记录仪器的基本原理和适用范围。
- (2) 掌握测试技术的基本理论,包括信号的时域和频域的描述方法、频谱分析和相关分析的原理和方法、信号调理和信号处理的基本概念和方法。
- (3) 具有测试系统的机械技术、电子技术、计算机方面的总体设计能力。
- (4) 具有实验数据处理和误差分析能力。

第二章

常用传感器

第一节 概 述

人类为了从外界获得信息，必须借助于感觉器官。但是人的感觉器官并不是万能的，要想获得更为丰富的信息，如高温、高压、振动频率、海水深度、与太阳的距离等，人的感官就显得不够用了。作为人类感觉器官的延伸，传感器的历史比近代科学的出现还要古老。如天平作为测重的工具，在古埃及就开始使用了，一直沿用到现在。利用液体膨胀特性的温度测量在16世纪就已经出现。

传感器是将被测的某一物理量（或信息）按一定规律转换成为与之对应的、便于应用的物理量（或信息）输出的装置。它获取的信息可以是各种物理量、化学量和生物量，而转换后的信息也可以有各种形式。以电学的基本原理为基础的传感器是在近代电磁学发展的基础上产生的，随着微电子技术的进步，这种类型的传感器得到了飞速发展，现在谈到传感器大都指有电信号输出的装置。因而从狭义上讲，将传感器定义为：把外界输入的非电物理量转换成电量的装置。

由于传感器直接或间接与被测对象发生联系，将被测参数转换成可以直接测量的信号，为系统提供进行处理和决策所必需的原始信息，其性能直接影响整个测试工作的质量，因此传感器已成为现代测试系统中的关键环节。

一、传感器的分类

（一）几种常见分类方法

传感器的种类繁多。在工程测试中，一种物理量可以用不同类型的传感器来检测；而同一种类型的传感器也可测量不同的物理量。

传感器的分类方法很多，概括起来，可按以下几个方面进行分类。

（1）按**被测物理量**来分，可分为位移传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器、温度传感器等。

（2）按传感器工作的**物理原理**来分，可分为机械式、电气式、辐射式、流体式等。

（3）按**信号变换特征**来分，可分为**物性型**和**结构型**。

所谓**物性型**传感器，是利用敏感器件材料本身物理性质的变化来实现信号的检测。例如，用水银温度计测温，是利用了水银的热胀冷缩的现象；用光电传感器测量转速，是利用了光电器件本身的光电效应；用压电测力计测力，是利用了石英晶体的压电效应等。

所谓**结构型**传感器，则是通过传感器本身结构参数的变化来实现信号转换的。例如，

电容式传感器,是通过极板间距离发生变化而引起电容量的变化进行工作的;电感式传感器,是通过活动衔铁的位移引起自感或互感的变化进行工作的等。

(4)按传感器与被测量之间**能量转换**情况来分,可分为**能量转换型**和**能量控制型**。

能量转换型传感器(或称无源传感器),是直接由被测对象输入能量使其工作的。例如,热电偶将被测温度直接转换为电量输出。由于这类传感器在转换过程中需要吸收被测物体的能量,因此容易造成测量误差。

能量控制型传感器是从外部供给辅助能量使其工作的,并由被测量来控制外部供给能量的变化。例如电阻应变式传感器将被测量(如应变)转换成应变片电阻值的变化,应变片作为电阻元件接于电桥电路,电桥工作能源由外部供给,应变片电阻值的变化控制电桥的失衡程度从而导致测量电路的输出量发生变化(详见第四章第一节)。

能量控制型的另一种形式是被测对象对激励信号的响应,它反映了被测对象的性质或状态,例如超声波探伤、用X射线测残余应力、用激光散斑技术测量应变等。

(二)传感器在教材中的分类

初学者总是希望教材简明易懂、循序渐进。本教材是先按传感器的物理原理进行分类讲解,分类如下:

(1)电参量式传感器,包括电阻式、电容式、电感式三种基本形式,以及由此派生出来的差动变压器式、涡流式等。

(2)磁电式传感器,包括磁电感应式、霍耳式、磁栅式等。

(3)压电式传感器。

(4)光电式传感器,包括一般光电式、光栅式、激光式、光电码盘式、光纤式、红外式、摄像式等(本章讲解)。

(5)热电式传感器,包括热电偶、热电阻及热敏电阻等(本教材第八章讲解)。

(6)气电式传感器。^①

(7)射线式传感器。^①

(8)波式传感器,包括超声波式、微波式等。^①

(9)半导体式传感器。^①

(10)其他原理传感器,如振筒式、振弦式、力平衡式传感器。^①

在此基础上,本教材后续章节将对传感器按被测物理量分类讲解。在这些章节中,按位移、力、扭矩、压力、振动、温度等物理量,对传感器的原理、性能及应用等,分别进行较详细论述。

二、传感器的性能要求

在实现对原始信息的准确、可靠的捕获与转换过程中,传感器的性能起着至关重要的作用。为了减少测量误差,要求传感器具有下述良好性能:

(1)传感器的输出信号与输入信号之间成比例关系,即**线性度好**。这样才能避免或减小线性度误差。

① 因篇幅原因部分讲解或未讲解。

(2) 传感器的输入信号变化一定数值时, 输出信号变化较大, 通常把输出信号的变化量与输入信号的变化量之比值称为灵敏度, 也就是说, 要求传感器具有高的灵敏度。

(3) 传感器反应敏捷。当被测量是一随时间而变化的动态信号时, 就必须考虑其输出能否跟得上输入信号的变化, 它会产生多大的动态误差。因此, 要求传感器能够迅速、精确地跟踪输入信号, 并具有相应的输出。

(4) 要求传感器内部噪声小, 不受外界干扰及被测对象状态的影响, 使用寿命长, 维修容易和校准方便等。

当然, 衡量一个传感器是否满足使用要求, 还应根据测量目的、被测对象、精度要求、环境条件、信号处理等条件做全面考虑。

第二节 电阻式传感器

电阻式传感器将被测物理量的变化转换成电阻值的变化, 再经相应的测量电路显示或记录被测量值的变化。其种类繁多, 应用广泛, 下面摘要讨论其中几种。

一、电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是利用金属的电阻应变效应, 测量物体受力变形的一种传感器。最常用的传感元件为电阻应变片。将电阻应变片粘贴在被测试件表面或各种弹性敏感元件上, 可构成测量位移、加速度、力、力矩、压力等各种参数的电阻应变式传感器。

(一) 工作原理

如前所述, 被测试件在外力作用下发生机械变形时, 粘贴在其表面的电阻应变片的金属导体, 其电阻值也将发生变化, 这种现象称为电阻应变效应。金属应变片就是利用这种效应, 将构件的应变转换为电阻值变化的一种转换元件。

以金属丝为例, 若长度为 L , 截面积为 A , 电阻率为 ρ , 其未受力时的电阻为 R , 则

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-1)$$

如果金属丝沿轴向受力而变形, 其长度 L 变化 dL , 截面积 A 变化 dA , 电阻率 ρ 变化 $d\rho$, 因而引起电阻值变化 dR , 将式 (2-1) 全微分, 整理可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-2)$$

式中的 $\frac{dL}{L} = \varepsilon$ 代表电阻丝的轴向相对伸长, 称为轴向应变, 是一个无量纲的量。 dA 是

因电阻丝受轴向力作用引起的截面变化量, 设电阻丝原来半径为 r , 径向应变为 $\frac{dr}{r}$, 由材料力学可知

$$\frac{dr}{r} = -\nu \frac{dL}{L} = -\nu \varepsilon$$

式中 ν 为电阻丝材料的泊桑系数。电阻丝截面积的变化

$$dA = \pi(r+dr)^2 - \pi r^2 = \pi(r-v\varepsilon r)^2 - \pi r^2 \approx -2\pi r^2 v\varepsilon$$

所以

$$\frac{dA}{A} \approx -2v\varepsilon \quad (2-3)$$

将式(2-3)代入式(2-2)，并整理得

$$\frac{dR}{R} = (1+2v)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-4)$$

或

$$S_0 = \frac{dR/R}{\varepsilon} = (1+2v) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (2-5)$$

S_0 称为金属丝的灵敏度系数，其物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化。

由式(2-5)可以明显看出，金属材料的灵敏度系数受两个因素影响：一个是受力后材料的几何尺寸变化引起的，即 $(1+2v)$ 项；另一个是受力后材料的电阻率变化所引起的，即 $(d\rho/\rho)/\varepsilon$ 项。对于金属材料， $(d\rho/\rho)/\varepsilon$ 项比 $(1+2v)$ 项小得多。大量实验表明，在电阻丝拉伸比例极限范围内，电阻的相对变化与其所受的轴向应变成正比，即 S_0 为常数，于是式(2-5)也可以写成

$$dR/R = S_0\varepsilon \quad (2-6)$$

通常金属电阻丝的 $S_0=1.7\sim 4.6$ 。

(二) 结构、分类与测量原理

如上所述，当电阻应变片与受力元件一起变形时，它的电阻变化量能反映应变片所在处受力元件的应变大小，为了使应变片既具有一定的电阻值，又不太长，应变片都做成栅状，如图2-1所示。这样，金属导体的轴向长度缩短了，集中在一块小面积，因而能近似地反映这一面积的平均应变。

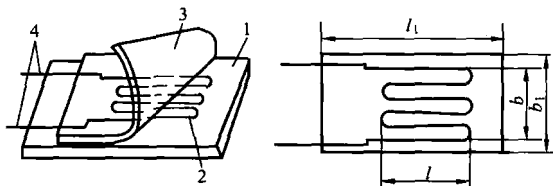


图 2-1 电阻应变片的基本结构

1—基片；2—电阻丝；3—覆盖层；4—引线

根据电阻应变片原材料形状和制造工艺的不同，它的结构形式有丝式、箔式和膜式三种，如图2-2所示。

(1) 金属丝式应变片常用直径为0.025mm左右的高电阻率的电阻丝制成，如图2-1所示。电阻丝为了获得高的电阻值，实际使用的电阻应变片将电阻丝排列成栅状，称为敏感栅，并粘贴在绝缘的基底上。电阻丝的两端焊接引线。敏感栅上面粘贴有起保护作用的覆盖层。

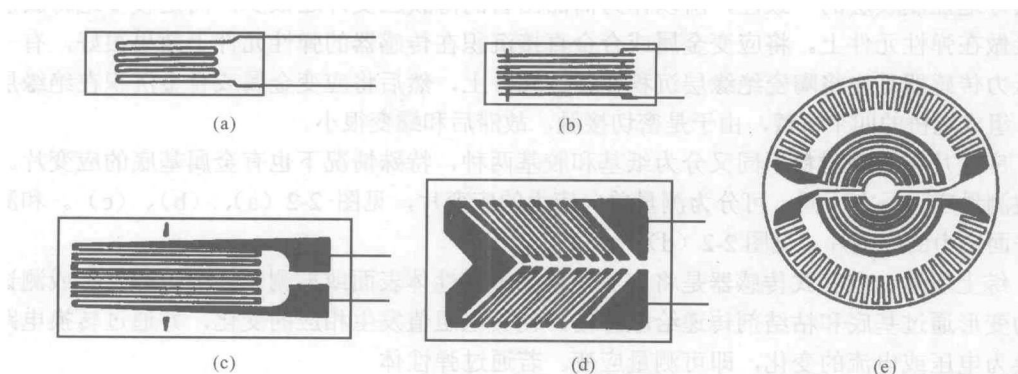


图 2-2 电阻应变片

(a)、(b) 丝式；(c)、(d)、(e) 箔式

l 为栅长（标距）， b 为栅宽（基宽）， $l \times b$ 为应变片的使用面积。应变片的规格一般以使用面积和电阻值表示，如 $3\text{mm} \times 20\text{mm}$ ， 120Ω 。

金属丝式应变片有回线式和短接式两种。如图 2-2 (a) 所示为回线式应变片，它制作简单、性能稳定、成本低、易粘贴，但因圆弧部分参与变形，故横向效应较大。图 2-2 (b) 为短接式应变片，它的敏感栅平行排列，两端用直径比栅线直径大 5~10 倍的镀银丝短接而成，其优点是克服了横向效应。丝式应变片敏感栅常用的材料有康铜、镍铬合金、镍铬铝合金以及铂、铂钨合金等。但是由于敏感栅上焊点较多，因而疲劳性能差，不适用于长期的动应力测量。

(2) 金属箔式应变片是利用照相制版或光刻技术，将厚约 $0.003 \sim 0.01\text{mm}$ 的金属箔片制成敏感栅，金属箔的材料常用康铜和镍铬合金等。箔式应变片具有如下优点：①可制成多种复杂形状、尺寸准确的敏感栅，其栅长最小目前可做到 0.2mm ，以适应不同的测量要求；②横向效应小；③散热条件好，允许电流大，提高了输出灵敏度；④蠕变和机械滞后小，疲劳寿命长；⑤生产效率高，便于实现自动化生产。因此，箔式应变片已经在许多场合取代了丝式应变片。

(3) 金属膜式应变片是采用真空蒸镀、沉积或溅射等方法，在薄的绝缘基片上形成厚度小于 $0.1\mu\text{m}$ 的金属电阻材料薄膜的敏感栅，最后再加上保护层制成的。当膜的厚度很小时，薄膜实际上是由无数彼此不相连的微小膜片组成的，称为不连续膜。此时的电传导是基于膜片之间的电子隧道效应，具有较高的电阻率，类似于半导体的特性，其应变灵敏系数比丝式或箔式应变片高一个或两个数量级。随着膜厚的增加，膜片之间逐渐连接而形成整体，称为连续膜，它的电传导特性与整体金属相同，其应变灵敏系数与一般的箔式应变片相近。由于薄膜应变片不像箔式应变片需经腐蚀工序，它可采用那些耐腐的高温金属材料，从而制成耐高温应变片。例如，采用铂或铬等材料沉积在蓝宝石薄片或覆有陶瓷绝缘层的钼条上，膜层上再覆上一层二氧化硅的保护膜。基底为钼条的薄膜应变片最高工作温度为 600°C ，用蓝宝石薄片为基底的工作温度可达 800°C 以上。目前薄膜应变片的制造还不

能很好地控制膜层的一致性, 所以作为商品出售的薄膜应变片还很少, 而是较多地将膜层直接做在弹性元件上。将应变金属或合金直接沉积在传感器的弹性元件上效果很好, 有一种压力传感器是先将陶瓷绝缘层沉积在弹性元件上, 然后将应变金属或合金沉积在绝缘层上, 组成电桥的四个桥臂, 由于是密切接触, 故滞后和蠕变很小。

应变片按基底材料不同又分为纸基和胶基两种, 特殊情况下也有金属基底的应变片。按被测量应力场之不同, 可分为测量单向应力的应变片, 见图 2-2 (a)、(b)、(c)。和测量平面应力的应变片, 见图 2-2 (d)、(e)。

综上所述, 应变式传感器是将应变片粘贴于弹性体表面或被测试件上。弹性体或测试件的变形通过基底和粘结剂传递给敏感栅, 使其电阻值发生相应的变化, 并通过转换电路转换为电压或电流的变化, 即可测量应变。若通过弹性体或测试件把位移、力、力矩、加速度、压力等物理量转换成应变, 则可做成各种应变式传感器。

[例 2-1] 某测试件的截面积 A 为 5cm^2 , 已知该测试件材料的弹性模量 E 为 $2.0 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, 沿轴向受到 10^5N 的拉力 F , 若沿受力方向粘贴一阻值 R 为 120Ω 、灵敏度系数 S_0 为 2 的应变片, 将该应变片接入图 2-3 的电路中, 试求:

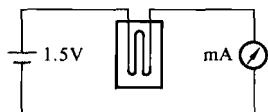


图 2-3

- (1) 该应变片的电阻值变化。
- (2) 受力前电流表示值。
- (3) 受力后电流表示值。
- (4) 受力前后电流的变化能否从电流表中准确读出。

解

$$(1) \text{ 由材料力学可知 } \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{AE} = \frac{10^5}{5 \times 10^{-4} \times 2.0 \times 10^{11}} = 1 \times 10^{-3}$$

而应变片的灵敏度系数 S_0 , 其物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化, 即

$$S_0 = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}$$

$$\Delta R = S_0 \frac{\Delta L}{L} R = 2 \times 1 \times 10^{-3} \times 120 = 0.24 (\Omega)$$

$$(2) \text{ 受力前电流表示值 } I_1 = \frac{U}{R} = \frac{1.5}{120} = 0.0125 (\text{A}) = 12.5 (\text{mA})$$

$$(3) \text{ 受力后电流表示值 } I_2 = \frac{U}{R + \Delta R} = \frac{1.5}{120 + 0.24} = 0.012475 (\text{A}) = 12.475 (\text{mA})$$

$$(4) \text{ 受力前后 } \Delta I = I_2 - I_1 = 12.475 - 12.5 = -0.025 (\text{mA})$$

由于电流的变化 ΔI 很小, 只有 I_1 的 0.5%, 因此, 不能从电流表中准确读出。

如何能准确测量出电流的变化 ΔI ? 显然用图 2-3 的电路不行, 在本书的第四章将讲解相关的测量电路。