

中国矿业大学教材建设工程资助教材

Tumu Gongcheng Ceshi

土木工程测试

主 编 宋 雷
副主编 张 勇

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学教材建设工程资助教材

土木工程测试

主 编 宋 雷
副主编 张 勇



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以具体的工程实践为依托,内容涵盖了土木工程测试的全过程,建立了从理论到实践的完整的知识体系。其中在基础知识部分,针对各种测试方法,介绍了其构造、原理、工程应用、适用条件,并给出了各种典型物理量的测试系统构成。在工程应用部分,结合典型工程,分析工程特点,从监测方案设计到监测数据分析提供了完整的监测案例。

编者主要参照土木工程专业的教学大纲,根据多年从事土木工程测试技术研究和教学的经验,在参考了大量相关规范、教材、论文和工程资料的基础上编写了该教材。本教材实用性强,能够满足土木工程专业学生的学习需求和土木工程测试技术的教学要求。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程测试 / 宋雷主编. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016. 7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3231 - 1

I. ①土… II. ①宋… III. ①土木工程—建筑测量—高等学校—教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 179487 号

书 名 土木工程测试

主 编 宋 雷

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数 380 千字

版次印次 2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价 23.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在土木工程勘察、设计、施工、验收和使用的各个环节,均需定量评估建(构)筑物的质量及其对周边环境的影响,往往需要开展土木工程测试。目前,测试技术已渗透到土木工程各个领域,成为工程监测和科学研究的重要手段。对于土木工程专业的技术人员来说,工程测试是一门技术基础课和必修课。编者依据《2012 版高等学校土木工程本科指导性专业规范》,根据多年从事土木工程测试技术研究和教学的经验,并参考了相关教材、论文和工程资料,编写了本教材。

与一般的工程测试技术不同,土木工程测试中所采用的测试仪器、处理方法和方案设计有其自身的特点。本书的主要特点是系统性强和注重实际应用。本书重点讲述目前土木工程测试中的常用的传感器和测试系统,并结合其具体的工程背景展开介绍,力求使读者能够掌握土木工程测试技术的基础知识和基本技能,并了解其最新进展。

本教材由中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室宋雷教授担任主编,中国矿业大学力建学院张勇副教授担任副主编,中国矿业大学力建学院韩涛博士、张驰博士及河南城建学院宋锦虎博士和西安科技大学朱彬博士参编。全书共 8 章,具体分工为:宋雷负责绪论和第 4 章、第 8 章第 2、3、4 节,张勇负责第 5 章和第 7 章,韩涛、张驰、宋锦虎、朱彬和张营营分别负责第 1、2、3、6 章和第 8 章 1、5 节。全书由宋雷负责统稿。

本教材由中国矿业大学黄家会教授主审,杨维好教授、岳丰田教授、王衍森教授、崔振东教授、李海鹏副教授、任彦龙副教授、石荣建博士、杨志江博士、陆路博士等对本书的编写提出了大量的宝贵意见和建议,研究生李茂强、张文亮等在教材编写中付出了辛苦的劳动,在此表示衷心的感谢。本教材的编写参考

并引用了大量的相关领域专著、教材以及有关单位的研究成果和技术报告,在此谨致谢忱。本教材的编写得到了中国矿业大学教务处的资助,在此表示衷心的感谢。

受编者水平所限,教材中难免存在不当之处,敬请读者和同行予以批评指正。书中引用了本单位和合作单位的部分内部资料,未能在书中一一标注,在此表示歉意和感谢。

作 者

2016 年 5 月于徐州

目 录

绪论	1
第 1 章 传感器	4
1.1 电阻式传感器	5
1.2 振弦式传感器	9
1.3 光纤光栅传感器	13
1.4 热电偶传感器	18
1.5 压电式传感器	22
1.6 电容式和电感式传感器	26
1.7 其他传感器	34
1.8 测试系统的组成及其主要性能指标	38
第 2 章 电阻应变测试技术	45
2.1 电阻应变片	45
2.2 应变测量电路	54
2.3 应变测试仪器	56
2.4 电阻应变式传感器	60
2.5 现场应变—应力测量	63
第 3 章 动态测试与分析技术	69
3.1 动态测试的响应特性与不失真测试条件	69
3.2 动载试验的量测仪器、加载方法与设备	72
3.3 结构动力特性与动力反应的试验测定	76
3.4 结构疲劳试验	80
第 4 章 土木工程无损检测	82
4.1 回弹法	82
4.2 超声回弹法	87
4.3 超声波法	92
4.4 探地雷达法	108
第 5 章 典型物理量的测试及其系统组成	123
5.1 力、压力等参数的量测	123

5.2	位移参数的量测	126
5.3	温度的量测	133
5.4	振动	137
5.5	流量	143
5.6	传感器的选择与标定	151
第 6 章	土木工程测试数据的处理方法	156
6.1	测试数据的分布	156
6.2	测量误差	159
6.3	数据回归分析	164
6.4	土木工程测试数据处理——以灰色系统理论为例	170
第 7 章	相似理论和模型试验	176
7.1	概述	176
7.2	相似理论基础	177
7.3	相似准则的导出	180
7.4	数学模拟试验	182
7.5	物理试验设计	184
第 8 章	测试技术的工程应用	190
8.1	高层建筑监测	190
8.2	基坑工程监测	199
8.3	隧洞工程信息化施工	210
8.4	冻结法凿井的安全监测监控	218
8.5	网架网壳结构监测	226
参考文献		233

绪 论

土木工程标志着不同时代的文明特征,是人类伟大事业的标志之一。土木工程建设,就是人类不断挑战自我,发挥自身创造力,尝试各种新材料、新工艺、新结构和新技术的过程。这个过程离不开大量的工程实践、工程测试和经验总结。其中一个重要的环节就是土木工程测试。据编者的不完全统计,在土木工程类学术期刊公开发表的研究性论文中,测试及与之相关的论文达 60% 以上。

(1) 土木工程测试的概念和特点

广义地看,测试是人的本能,包括视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉等,是人类感知或测试周围环境的基本技能。但是在实际工程中,单纯依赖人的知觉,往往无法精确感知材料和结构的荷载、内力和变形等参数的微小变化,这时就需要借助工程测试的方法和技术手段。

工程测试是测量和试验技术的总称,是实验科学的重要环节,其核心是研究物理量的测量原理和信号分析处理方法,它是进行科学实验研究和生产过程参数测量必不可少的手段。测试技术广泛应用于各种工程及科研领域,如航空航天、机械电子、道路交通、建筑、生物、医学等,在自动化过程中参数的检测、反馈、调控,与现场的实时检测与监控,以及试验过程中的参数测量与分析中广泛应用。测试技术水平已成为衡量国家科技发展水平的重要标志之一,其功用主要体现在:各种参数的测定;自动化过程中参数的检测、反馈、调控;现场的实时检测与监控;试验过程中的参数测量与分析等。

具体到土木工程领域,土木工程测试是指在土木工程结构物或试验对象上,使用仪器设备和工具,采用各种试验技术手段,在各种荷载(重力、机械扰动力、地震力、风力等)或其他因素(温度、变形)的作用下,通过量测与结构工作性能有关的各种参数,判明结构的实际工作性能,估计结构的承载力,确定结构对使用要求的符合程度,并用以检验和发展土木工程的设计和计算理论的技术和方法的统称。它是土木工程结构科学研究的重要手段,也是土木工程试验、结构检测、监测的技术基础,服务于土木工程建设的施工、验收和使用的各个阶段。

与一般的工程测试技术(如机械工程测试)相比,因所面向的工程对象的建造与使用条件的不同,土木工程测试有其自身的特点。土木工程建设和使用周期长,要求相应的传感器和监测系统需要满足长期稳定性要求;土木工程所处的环境更为复杂,既有地面结构、道桥,又有地下的基础、隧洞等,要求测试系统能够适应高围压、高温差、潮湿、腐蚀、动载等环境条件,并需要对其环境影响进行校验;土木工程所涉及的材料有混凝土、砖石、钢筋等非均质材料,而机械工程中多为均质的金属或塑料材料,埋设在土工材料中的传感器将不可避免受到周围介质的影响,实现高精度测试及分析的难度更大。

因此,在土木工程测试中,需要根据工程的实际情况,依照相关规范规程,选择适当的测试方法和仪器设备、合理的布设测试传感器、严格校验测试数据,并通过土木工程的相关知识分析测试数据中所蕴含的科学规律。

(2) 土木工程测试的由来

土木工程测试是科学性、实践性很强的活动,是研究和发展新材料、新体系、新工艺以及探索结构设计新理论的重要手段,在工程结构科学研究和技术革新方面起着重要的作用。以“受弯梁横截面应力分布”的认识过程为例,1638年伽利略(意)认为受弯梁横截面应力分布是均匀受拉的;1684年,马里奥脱(法)和莱布尼兹(德)认为受弯梁横截面上应力呈三角形分布;1713年,巴朗(法)提出了中性层假设,一边受拉,另一边受压,但因无法验证而未被接受。1767年法国科学家容格密里首先用简单的试验方法,令人信服地证明了断面上压应力的存在。他在一根简支梁的跨中,沿上缘受压区开槽,槽的方向与梁轴垂直,槽内塞入硬木垫块。试验证明,这种梁的承载能力丝毫不低于整体的未开槽的木梁。这说明只有上缘受压力,才可能有这样的结果。当时,科学家们对容格密里的这个试验给予极高的评价,誉为“路标试验”。1821年,拿维叶(法)从理论上推导了应力分布公式;二十多年后,阿莫列恩(法)完成试验验证。

模型试验是土木工程研究的重要手段,通过对小尺度试验模型的测试,可以使人们获得对大尺度原型工程的变形、内力和可靠度的认识。1772年,俄工程师库利宾验证一座跨长298.76 m的木拱桥的可靠性(1:10的模型)。19世纪中叶,俄工程师茹拉夫斯基用弦测探求斜杆桁架中的内力分布情况。1846年英国罗伯斯坦福森等人对一座管型结构铁桥做了模型试验。19世纪末,随着大跨度桥梁和大型建筑物的出现,要求确知结构可靠性能,承载能力,长期安全荷载大跨度;编制结构设计规范,推广经验,用精密仪器和设备来进行测试,测取各种数据,对数据进行的分析和研究,进入了采用测试技术研究土工工程的时期。二次世界大战结束到20世纪60年代末,是土木工程测试的推广发展阶段,随着高层建筑、大跨度桥梁、长隧道和高大坝的发展,模型试验得到了推广和发展,美、英、法、德、日本先后建立了大型的土工工程试验室,为新材料、新结构和新工艺的研制发挥了重大作用。

20世纪80年代以来,由于电子技术、信息技术的发展,为土木工程测试解决更为复杂的研究课题提供了有力手段。尤其是在进入到21世纪后,无损检测技术和动态仿真计算技术的应用,使得超前预测重大和复杂的土木工程的安全状况成为可能,土木工程测试进入了新的阶段,并在施工过程控制中起到了越来越重要的作用。以隧道施工的新奥法为例,新奥法的核心在于充分发挥围岩的自承能力,通过监测围岩变形和应力等参数,适时施做支护结构以控制隧洞的变形;再以国家体育场“鸟巢”为例,其所采用的巨型空间马鞍形钢桁架编织式“鸟巢”结构,安装精度要求高、焊接难度大、空间构件的稳定难度大,需要在工程中通过精准的位移测试、无损的焊缝检测等来予以保证。

(3) 土木工程测试的发展趋势

传感器的研发和应用代表着一个国家科学研究的水平,是航空航天、超深钻孔、军工装备和医学检测等领域的核心技术。新材料和新的物理、化学、生物效应的发明发现,为开发新型传感器提供了可能。集成芯片、人工智能技术的进步,促进了高度集成的、多功能的、微型化与智能化的传感器的研发。近年来,研发了分布式光纤传感器、CCD传感器、生物传感器、非晶体合金传感器、超导体传感器、液晶传感器、薄膜传感器、微传感器、智能传感器、模糊传感器(学习型传感器)等。其中,光纤传感器因其灵敏度高、适应性强等优点,已经在土工工程中得到了广泛的应用,在本教材中将着力予以呈现。

无损检测是工业发展必不可少的有效工具,在一定程度上反映了一个国家的工程技术

发展水平,其重要性已得到公认。近年来,无损检测技术也被广泛应用到建筑工程质量检测中,声发射、相控阵超声(B超)、层析成像(CT)、探地雷达、红外、非线性超声等检测技术为土木工程研究提供了新的有力的工具。

在数据采集与处理方面,计算机虚拟仪器技术是一大进步,计算机加仪器板卡现已替代了传统的、功能单一的大型仪器,如示波器、XY函数记录仪等。此外,通过计算机软件来替代硬件中的分析电路,已实现测试数据采集与处理的集成化和智能化。为此,本教材中未单独测试系统的组成及其系统特性,而是将其放在第1章中进行介绍。

在试验技术方面,试验设备越来越大型化、多功能化,同时其测试精度不断提高,为开展深部地下工程、大跨度结构和超高层建筑的试验研究提供了条件;同时,测试仪器,包括传感器和二次仪表,越来越小型化、集成化和智能化;计算机模拟试验技术的应用,使研究者可以实现加载、测试和后处理的全程自动控制,提高了试验的精度。土木工程试验往往是破坏性的、不可逆的,成本高、难再现。高精度的测试技术,可实时获得结构的应力、应变、荷载等全程动态数据,为通过结构非破损试验分析结构的承载性能提供了基础。此外,通过自设的信号基站、公共电信网络或卫星载波传递,可实现测试数据的远程无线遥测,该技术在土木工程测试中应用也越来越广泛。

总之,土木工程测试是高等工科学学校土木工程专业的一门技术基础课和必修课程。测试技术已渗透到土木工程的各个领域,成为工程监测和科学研究的重要手段。通过本教材的学习,使读者具备工程测试的基本知识和基本理论,了解测试系统的组成和测试仪表的选择方法,掌握传感器的工作原理、构造、性能和标定方法,并掌握温度、力、压力、位移、应变、振动、流量等常见物理量的测量方法,为从事土木工程施工、设计和科研工作打下必要的基础。

第1章 传 感 器

传感器的定义:根据我国国家标准(GB/T 7665—2005),传感器定义为能够感受规定的被测量(主要为各种非电的物理量、化学量、生物量等)并按照一定规律转换成(便于人们应用、处理)可用输出信号(通常为电参量)的器件和装置,通常由敏感元件和转换元件组成。传感器的典型组成如图 1-1 所示。

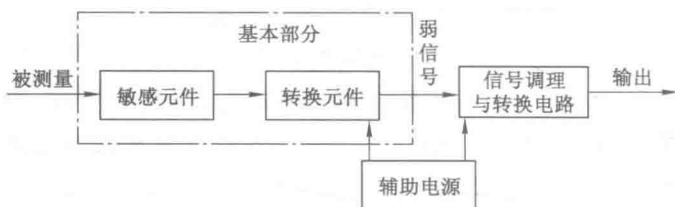


图 1-1 传感器的典型组成部分

传感器的定义包含以下几个方面的内容:① 传感器是一种实物测量装置,可用于对指定被测量进行检测;② 传感器能感受某种被测量(传感器的输入量),如某种非电的物理量、化学量、生物量的大小,并把被测量按一定规律转换成便于人们应用、处理的另一参量(传感器的输出值),通常为电参量。③ 在其规定的精确度范围内,传感器的输出量与输入量具有对应关系。

根据传感器的定义,传感器的基本组成部分为敏感元件和转换元件两部分,分别完成检测和转换两个基本功能。敏感元件是指传感器中能直接感受和响应被测量的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输和测量的电信号部分。值得指出的是,一方面,并不是所有的传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件这两个部分,如半导体气敏或湿度传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等,它们一般是将感受到的被测量直接转换为电信号输出,即将敏感元件和转换元件的功能合二为一;另一方面,只由敏感元件和转换元件组成的传感器通常输出信号弱,还需要信号调理与转换电路将输出信号进行放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的格式。信号调理与转换电路的作用:一是把来自传感器的信号进行转移和放大,使其更适合于作进一步处理和传输,多数情况下是将各种电信号转换成电压、电流、频率等少数几种便于测量的电信号;二是进行信号处理,即对经过转换的信号,进行滤波、调制或解调、衰减、运算、数字化处理等。常见的信号调理与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器等。另外,传感器的基本部分和信号调理与转换电路还需要辅助电源提供工作能量。

传感器的分类:传感器种类繁多,其分类方法也较多。传感器常见的分类方法如表 1-1 所示。

土木工程测试中,需测量的物理量大多数为非电量,如位移、压力、应力、应变、温度、加速度等。本章以土木工程测试为背景,主要介绍土木工程测试中常涉及和普遍使用的电阻

式传感器、振弦式传感器、光纤光栅传感器、压电式传感器、电容式和电感式传感器和其他类型传感器。

表 1-1 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按传感器输入参量分类	位移传感器、压力传感器、温度传感器、一氧化碳传感器等	传感器以被测参量命名
按传感器转换机理(工作原理)分类	电阻式、振弦式、电容式、电感式、压电式、超声波式、霍尔式等	以传感器转换机理命名
按物理现象分类	结构型传感器	传感器依赖其结构参数的变化实现信息转换
	物性型传感器	传感器依赖其敏感器件物理特性的变化实现信息转换
按能量关系分类	能量转换型传感器	传感器直接将被测对象的能量转换为输出能量
	能量控制型传感器	由外部供给传感器能量,由被测量大小比例控制传感器的输出能量
按输出信号分类	模拟式传感器	将被测量的非电学量转换成模拟量
	数字式传感器	将被测量的非电学量转换成数字量(直接或间接转化)

1.1 电阻式传感器

电阻式传感器是把被测量(如位移、力等参数)转换为电阻变化的一种传感器,本节主要介绍电位器式传感器、电阻应变式传感器、热电阻式传感器。

1.1.1 电位器式传感器

电位器是具有三个引出端、阻值可按某种变化规律调节的电阻元件,是可变电阻器的一种。电位器的作用是调节电压(含直流电压与信号电压)和电流的大小。电位器通常由电阻体和转动或滑动系统(可移动的电刷)组成。电位器是由电阻率很高的绝缘细导线在绝缘骨架上密绕而成,由弹性金属片或金属丝制成的电刷在一定的压力下与导线绕组保持接触并能移动。当电阻体的两个固定触点之间外加一个电压时,通过转动或滑动系统改变触点在电阻体上的位置,在动触点与固定触点之间便可得到一个与动触点位置成一定关系的电压。

电位器主要是一种把机械的线位移或角位移输入量转换为与它成一定函数关系的电阻或电压输出的传感元件来使用。电位器常做成变阻器和分压器两种,变阻器是电阻输出,而分压器是电压输出。线性电位器的理想空载特征曲线应具有严格的线性关系,电位器式位移传感器原理图如图 1-2 所示,如果把它作为电阻器使用,且假定全长为 $x_{\max}$ 的电位器总电阻为 $R_{\max}$,电阻沿长度的分布是均匀的,则当滑臂由 A 向 B 移动 x 后,A 到滑臂间的阻值为 R_x 。

$$R_x = \frac{x}{x_{\max}} \cdot R_{\max}$$

(1-1)

如把它作为分压器使用,且假定加在电位器 A,B 之间的电压为 $U_{\max}$,则输出电压为

$$U_x = \frac{x}{x_{\max}} \cdot U_{\max} \quad (1-2)$$

图 1-3 所示为电位器式角度传感器,如作为变阻器使用,则电阻值与角度的关系为

$$R_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \cdot R_{\max} \quad (1-3)$$

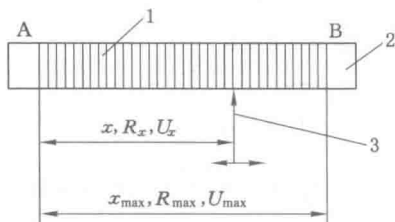


图 1-2 电位器式位移传感器原理图

1——电阻丝;2——骨架;3——滑臂

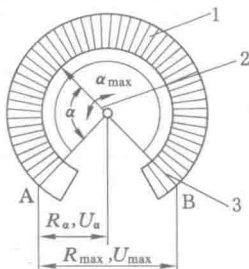


图 1-3 电位器式角度传感器

1——电阻丝;2——滑臂;3——骨架

如作为分压器使用,则有

$$U_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \cdot U_{\max} \quad (1-4)$$

电位器式位移传感器的可动电刷与被测物体相连。物体的位移引起电位器移动端的电阻变化。阻值的变化量反映了位移的量值,阻值的增加还是减小则表明了位移的方向。图 1-4 为电位器式位移传感器的结构,其中 3 为输出轴,电阻丝 1 缠绕在绝缘骨架上,触点 2 沿着电阻丝的裸露部分滑动,并由导电片 4 输出。

电位器式压力传感器是利用弹性元件(如弹簧管,膜片或膜盒)把被测得的压力变换为弹性元件的位移,并使此位移变为电刷触电的移动,从而引起输出电压或电流相应的变化,图 1-5 为远程压力表原理图,它是由一个弹簧管和电位器组成的压力传感器。图 1-6 所示为另一种电位器式压力传感器的工作原理,其弹性敏感元件膜盒的内腔通入被测流体压力,在此压力作用下,膜盒中心产生位移,推动连杆上移,使曲柄轴带动电刷在电位器电阻丝上滑动,同样输出与被测压力成正比的压力信号。

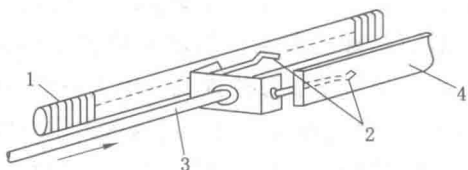


图 1-4 电位器式位移传感器原理图

1——电阻丝;2——触点;3——输出轴;4——导电片

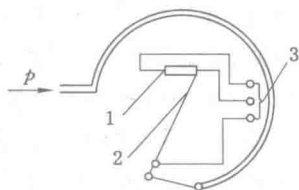


图 1-5 压力传感器原理图

1——电位器;2——电刷;3——输出端子

电位器式传感器的优点是结构简单、使用方便、稳定性和直线性较好。其主要器件为变阻器,可根据需要做成不同的形状,而得到的位移量与输出电量成线性或非线性的关系。电位器式传感器是测试技术中常用的一种机电参数转换元件,其功能是把输入的机械位移转换成与位移有确定函数关系的电阻,并引起输出电压或电流的变化。当它配上各种弹性元件和传动

机构,主要用于测量位移、压力、加速度、航面角等各种参数,还可用来测量液压、温度、速度和加速度等参数。

1.1.2 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器的工作原理是基于电阻应变效应,其结构通常由应变计、弹性元件和其他附件组成。根据电阻应变效应先将被测测量转换成应变,再将应变量转换成电阻,所以它也是电阻式传感器的一种,得到了广泛的应用。

(1) 金属材料的电阻应变效应

应变片的工作原理是电阻应变效应,即应变片线材(金属丝或箔片)电阻值随着构件受力变形(伸长或缩短)而发生改变的物理现象。

以丝式应变片为例,金属丝电阻值 $R(\Omega)$ 和电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$ 、栅长 $L(\text{m})$ 、横截面积 $A(\text{mm}^2)$ 之间的关系为

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{\pi r^2} \quad (1-5)$$

一般当一根金属丝承受轴向拉力产生机械变形时,它的长度增加,横截面积 A 减少,电阻率 ρ 也将发生变化。对式(1-5)全微分后,得到

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dr}{r} \quad (1-6)$$

式中 $\frac{dL}{L}$ ——电阻丝的轴向应变, $\frac{dL}{L} = \epsilon_x$;

$\frac{dr}{r}$ ——电阻丝的径向应变, $\frac{dr}{r} = \epsilon_y$ 。

在弹性范围内,根据材料力学原理,电阻丝的轴向应变与径向应变存在如下关系:

$$\epsilon_y = -\mu \epsilon_x \quad (1-7)$$

式中 μ ——金属丝材料的泊松比,负号表示两者变化方向相反。

将上式代入式(1-6)中,得到

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dr}{r} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon_x \quad (1-8)$$

电阻丝电阻率变化与体积变化率存在线性关系,即

$$\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V} \quad (1-9)$$

式中 m ——常数,对给定的材料和加工方法, m 为定值;

V ——金属材料的体积。

在单向受力状态下,体积变化率可表示为

$$\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + \frac{d(\pi r^2)}{r} = (1 - 2\mu)\epsilon_x \quad (1-10)$$

式(1-9)、式(1-10)代入式(1-6)中得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dr}{r} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon_x = [1 + 2\mu + m(1 - 2\mu)]\epsilon_x = k_0 \epsilon_x \quad (1-11)$$

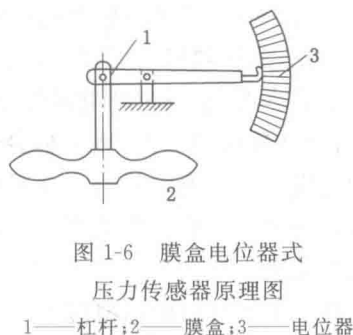


图 1-6 膜盒电位器式
压力传感器原理图

1——杠杆;2——膜盒;3——电位器

式中 k_0 ——金属丝对应变的灵敏系数, $k_0 = 1 + 2\mu + m(1 - 2\mu)$ 。

可见,当材料确定时, k_0 仅为金属材料泊松比 μ 的函数。

上式表明,金属材料电阻的相对变化与其轴向应变成正比,称为金属材料的电阻应变效应,对于金属材料的 k_0 ,前半部分是受力后金属丝几何尺寸改变所引起的;后半部分则是材料的电阻率变化所引起的。金属材料的电阻应变效应主要以结构尺寸变化为主。各种材料金属丝的灵敏系数由实验测定,某些金属(如康铜、镍合金等)的应变与电阻值变化率之间存在线性关系。

基于金属材料的电阻应变效应原理,主要用于测量位移、压力、加速度、扭矩等,配合各种弹性元件和传动机构,可制成检测不同物理量的多种传感器,如应变式拉压力、荷重、位移、压力、加速度、扭矩传感器等。

(2) 半导体材料的电阻应变效应

对于半导体材料,电阻率变化与材料受力和变形之间存在线性关系,即

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi E\epsilon_x \quad (1-12)$$

式中 σ ——作用于材料的轴向应力;

π ——半导体材料在受力方向上的压阻系数;

E ——半导体材料的弹性模量。

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2\frac{dr}{r} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon_x \\ &= \pi E\epsilon_x + (1 + 2\mu)\epsilon_x = (1 + 2\mu + \pi E)\epsilon_x = k_s\epsilon_x \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中 $1 + 2\mu + \pi E$ ——半导体材料的电阻应变系数,称为半导体材料的电阻应变效应。

对于半导体材料的 k_s ,前半部分同样是由几何尺寸变化引起的;后半部分则是由半导体材料的压阻效应引起的。半导体材料的电阻应变效应主要基于压阻效应。使用半导体材料应变片时,应采取温度补偿和非线性补偿措施。

一般常用应变片灵敏度系数大致是:金属导体应变片灵敏度系数约为 2,但不会超过 4~5;半导体材料应变片灵敏度系数为 100~200。可见,半导体材料应变片的灵敏度系数比金属材料的灵敏度系数大几十倍。此外,根据选用的材料或掺杂多少的不同,半导体应变片的灵敏度系数可以做成正值或负值,即拉伸时应变片电阻值增加或降低。

1.1.3 热电阻式传感器

(1) 热电阻传感器

热电阻传感器是利用某些金属导体的电阻率随温度变化而变化(或增大,或减小)的特性,制成各种热电阻传感器,用来测量温度,达到将温度变化转换成电量变化的目的。因而,热电阻传感器一般是温度计,金属导体的电阻和温度的关系可用下式表示:

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (1-14)$$

式中 R_t, R_0 ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 和 $t_0^\circ\text{C}$ 时的电阻值;

Δt ——温度的变化值, $\Delta t = t - t_0$;

α ——温度在 $t_0 \sim t$ 之间时金属导体的平均电阻温度系数。

电阻温度系数 α 是温度每变化 1°C 时材料电阻的相对变化值。 α 越大,电阻温度计越灵敏。因此,制造热电阻温度计的材料应具有较高、较稳定的电阻温度系数和电阻率,在工

作温度范围内,其物理性质和化学性质稳定。常用的热电阻材料有铂、铜等,其中,铜热电阻常用来测量 $-50\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度。它可用于各种场合的温度测量,如大型建筑物厚底板温差控制测量等。其特点是:电阻与温度呈线性关系,电阻温度系数较高,机械性能好,价格便宜。热电阻温度计的测量电路一般采用电桥,把随温度变化的热电阻或热敏电阻值转换成电信号。

(2) 半导体热电阻传感器

半导体热电阻是由半导体材料做成的电阻,它与一般电阻不同,不仅可具有正的电阻系数,而且还可具有负的电阻温度系数,即当温度升高时,它的电阻值反而会减小,且电阻温度系数的绝对值比金属的大 $4\sim 9$ 倍,因此,它的灵敏度和电阻率高,体积小,可测点温度和固体表面温度,而且结构简单、性能稳定、寿命长。其缺点是复现性和互换性差,电阻值与被测温度呈非线性关系。它一般用来测量温度在 $-100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间反映温度变化很灵敏的场所,如自动防火报警系统等。

在土木工程中,电阻式传感器结构简单,原理清楚,得到了广泛的应用。电阻式传感器与相应的测量电路组成的测力、测压、称重、测位移、加速度、扭矩等测量仪表是土木工程、冶金、电力、交通、石化、生物医学和国防等部门进行结构检测、自动称重、过程检测和实现生产过程自动化等不可缺少的工具之一。

1.2 振弦式传感器

1.2.1 振弦式传感器原理

振弦式传感器工作原理如图 1-7 所示。图中 1 为预先拉紧的金属丝弦,该金属丝在振弦式传感器中称为“振弦”,也叫“钢弦”。图 1-7(a)中振弦 1 被置于磁激励线圈和铁芯产生的磁场里,其两端均固定在传感器受力部件 3 的两个支架 2 上,且平行于受力部件。而图 1-7(b)中振弦 1 置于两个电磁激励线圈(称双线圈)和铁芯产生的磁场中,被固定于受力部件 3 的两端,且位于受力部件的轴线上。对压力传感器而言,该受力部件 3 系指受压板,也叫受压膜或受力膜。当受压板受到外荷载后,则产生微小的挠曲,致使支架 2 产生相对倾角而松弛或拉紧振弦,振弦的内应力发生变化,则使振弦的振动频率相应变化;对应变传感器而言,该受力部件 3 系指传力应变筒,当应变筒受到外荷载后,产生轴向变形,则钢弦被拉紧或松弛产生内应力的大小由待测的力学参数决定。

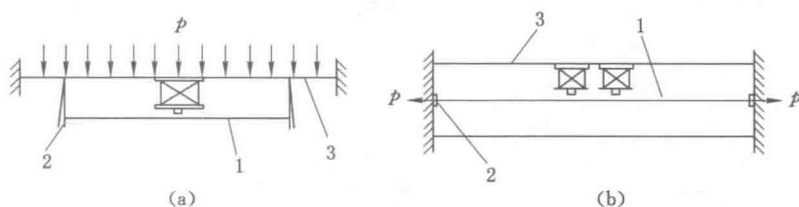


图 1-7 振弦式传感器工作原理图

(a) 压力传感器;(b) 应变传感器

1——钢弦;2——支架;3——受力部件

由于振弦的自振频率取决于它的长度、振弦材料的密度和振弦的内应力。故其关系式表示为

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (1-15)$$

式中 f ——振弦振动频率, Hz;

L ——振弦长度, m;

ρ ——振弦的密度, kg/m³;

σ ——振弦所受的张拉应力, MPa。

由式(1-15)可见,对于振弦的密度和长度为定值的钢弦,其自振频率由钢弦的内应力所决定,所以内应力可用自振频率来表示。由于振弦被置于磁场中,因此它在振动时则在线圈中感应出电势。感应电势的频率就是钢弦振动的频率。因此测出感应电势的频率就可以知道钢弦的振动频率,也就知道了待测的振弦内应力的大小。

振弦的内应力的变化为

$$\Delta\sigma = K(f^2 - f_0^2) \quad (1-16)$$

式中 f ——受力后振弦的频率, Hz;

f_0 ——未受力时振弦的频率, Hz;

K ——标定系数,与传感器构造等有关的常数。

当被测参量发生变化时,振动元件的固有振动频率随之改变,通过相应的测量电路,就可得到与被测参量成一定关系的电信号。以拉紧的金属弦作为敏感元件,利用振动元件把被测参量转换为频率信号的传感器称为钢弦式传感器,又称为振弦式传感器或频率式传感器。振弦的材料与质量直接影响传感器的精度、灵敏度和稳定性。钨丝的性能稳定、硬度、熔点和抗拉强度都很高,是常用的振弦材料。此外,还可用提琴弦、高强度钢丝、钛丝等作为钢弦材料。振弦式传感器由振弦、磁铁、夹紧装置和受力机构组成,振弦一端固定、一端连接在受力机构上,利用不同的受力机构可做成测压力、扭矩或加速度等的各种振弦式传感器。振弦式传感器按被测物理量可分为力传感器、压力、位移传感器等。振弦式力传感器包括应变计、钢筋测力计、锚杆应力计、锚索测力计、反力计等;振弦式压力传感器主要包括孔隙水压力计、土压力计等;振弦式位移传感器主要包括位移计、测缝计、测斜仪、沉降仪等。在土木工程测试中,振弦式传感器常用于测力、位移、应力和应变等。

1.2.2 振弦式测力传感器

测力传感器主要用于分布和集中荷载的量测,是工业和工程测试中用得较多的传感器。

(1) 振弦式土压力传感器

振弦式压力盒构造简单,测试结果比较稳定,受温度影响小,易于防潮,可用于长期观测,故在地下工程和岩土工程现场测试和监测中得到广泛应用。其缺点是灵敏度受压力盒尺寸的限制,且不能用于动态测试。图 1-8 所示是测定地下结构和岩土体压力常用振弦式压力盒的构造图,当表面刚性板 1 受力后,发生挠曲,带动两个支架 12 向两侧拉开,振弦 3 被拉紧,使得振弦应力发生变化,以致弦的自振频率发生相应变化,根据频率变化测定膜片所受压力的大小,通过预先标定的传感器压力与振动频率的标定曲线,就可换算出所要测定的土压力量值。

土压力传感器的研制和使用,在国内外已有几十年的历史,在路基、挡土墙、坝体以及隧