

普通高等学校岩土工程（本科）规划教材

岩土工程测试技术

王复明 主编

YANTU GONGCHENG CESHU JISHU



黄河水利出版社

普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

岩土工程测试技术

主 编 王复明

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书为普通高等学校岩土工程(本科)规划教材,主要包括绪论、测试技术基础知识、土的物理力学性质测试、岩体物理力学性质测试、岩土工程原位测试技术、岩土体动力测试技术、桩基测试技术、岩土工程监测技术。

本书可作为高等院校土木工程、岩土工程、水利水电工程、地下工程、隧道工程、交通运输工程及采矿工程等专业本科生的教材,也可供相关专业的研究生以及从事教学、科研、规划、勘察、设计、施工、管理等科技工作者使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程测试技术/王复明主编. —郑州:黄河水利出版社,2012. 8

普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0321 - 0

I. ①岩… II. ①王… III. ①岩土工程 - 测试技术 - 高等学校 - 教材 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 185794 号

策划编辑:王志宽 电话:0371-66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:14.75

字数:340 千字

印数:1—3 100

版次:2012 年 8 月第 1 版

印次:2012 年 8 月第 1 次印刷

定价:30.00 元

普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

编审委员会

主任	刘汉东			
副主任	王复明	肖昭然	勾攀峰	杨小林
委员	李广慧	祝彦知	郭院成	乐金朝
	黄志全	姜宝良	孙文怀	闫富有
	李化敏	姜 彤	孔德志	

前 言

随着现代化建设事业的飞速发展,各类建设工程的发展方向呈现高、大、深、重的趋势,给岩土工程领域带来了新的契机,如一系列新理论及新的设计方法的出现,对岩土工程测试技术提出了更高的要求。岩土工程测试技术是岩土工程理论发展的主要检测手段,也是确保工程质量的关键,不论设计理论与方法如何先进、合理,如果没有先进的测试技术做支撑,不仅新理论和设计方法没法得到合理的验证,且岩土工程的质量与精度也难以保证。岩土工程检测与测试水平的提高为岩土工程领域的不断扩展打下了坚实的基础,进而推动岩土工程理论的形成和发展,保证岩土工程设计的合理性和施工质量。因此,岩土工程检测在整个岩土工程中与理论计算和生产实践是相辅相成的,岩土工程测试贯穿于岩土工程勘察、岩土工程设计、岩土工程施工、岩土工程监测的全过程。

本书较系统地介绍了岩土工程测试的目的和意义,分析了岩土工程测试技术的发展现状,给出了岩土工程测试技术中常用的传感器的原理和使用方法。本书重点介绍了土的物理力学性质测试、岩体物理力学性质测试、岩土工程原位测试技术、岩土体动力测试技术、桩基测试技术、岩土工程监测技术等内容。在介绍相关测试理论的同时结合工程实例,便于读者学习与掌握。

本书由郑州大学王复明教授统稿。王复明编写第一章,蔡迎春编写第二章,石明生编写第三章及第五章,王志荣编写第四章,乐金朝、郑元勋编写第六章,王俊林、李坤轩编写第七章,余强编写第八章。

本书在编写过程中得到了相关单位及专家的支持与协助,在此深表谢意。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正,不胜感激。

编 者

2012年2月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 岩土工程测试的目的和意义	(1)
第二节 岩土工程测试技术发展现状与展望	(2)
第三节 岩土工程测试的主要内容	(4)
第二章 测试技术基础知识	(7)
第一节 测试的基本概念	(7)
第二节 传感器基本原理	(9)
第三节 电阻应变式传感器	(10)
第四节 测量误差与数据处理	(13)
第五节 系统误差的通用处理方法	(18)
第六节 测量数据处理中的几个问题	(22)
第三章 土的物理力学性质测试	(29)
第一节 概 述	(29)
第二节 土的物理性质测试	(29)
第三节 液、塑限试验	(33)
第四节 土体渗透性试验	(36)
第五节 土体变形测试	(40)
第六节 土体强度试验	(44)
第四章 岩体物理力学性质测试	(53)
第一节 概 述	(53)
第二节 岩体的物理性能与地球物理探测	(57)
第三节 岩体的渗透性与现场抽水试验	(66)
第四节 岩体变形观测	(73)
第五节 岩体的强度测试	(82)
第五章 岩土工程原位测试技术	(100)
第一节 概 述	(100)
第二节 静力载荷试验	(100)
第三节 静力触探试验	(106)
第四节 动力触探试验	(111)
第五节 十字板剪切试验	(117)
第六节 扁铲侧胀试验	(120)
第七节 现场剪切试验	(124)

第六章 岩土体动力测试技术	(129)
第一节 概 述	(129)
第二节 动三轴试验	(130)
第三节 动单剪试验	(136)
第四节 动扭剪试验	(137)
第五节 共振柱试验	(139)
第六节 自振柱试验	(146)
第七节 振动台试验	(147)
第七章 桩基测试技术	(150)
第一节 概 述	(150)
第二节 单桩载荷试验	(151)
第三节 桩基低应变动测试	(164)
第四节 桩基高应变动测试	(171)
第五节 桩基完整性声波测试	(180)
第八章 岩土工程监测技术	(185)
第一节 概 述	(185)
第二节 基坑工程监测	(185)
第三节 地下工程监测与监控	(203)
第四节 边坡工程监测	(216)
参考文献	(227)

第一章 绪论

第一节 岩土工程测试的目的和意义

一、岩土工程测试的目的

岩土工程是 20 世纪 60 年代末至 70 年代初,将土力学及基础工程、工程地质学、岩体力学三门学科逐渐结合为一体并应用于土木工程实际而形成的新学科,其目的是利用土力学、岩体力学及工程地质学的理论与方法,研究各类土建工程中涉及的岩土体的利用、整治和改造问题等。

随着现代化建设事业的飞速发展,各类建设工程的发展方向呈现高、大、深、重的趋势,给岩土工程领域带来了新的契机,如一系列新理论及新设计方法的出现,同时也对岩土工程测试技术提出了更高的要求。测试技术是岩土工程理论发展的主要检测手段,也是确保工程质量的关键。因此,不论设计理论与方法如何先进、合理,如果缺乏先进的测试技术做支撑,不仅新理论和设计方法没法得到合理的验证,且岩土工程的质量与精度也难以保证。另外,岩土工程检测与测试水平的提高,为岩土工程领域的不断扩展打下了坚实的基础,进而推动岩土工程理论的形成和发展,保证岩土工程设计的合理性和施工质量。因此,岩土工程检测在整个岩土工程中与理论计算和生产实践是相辅相成的,岩土工程测试贯穿于岩土工程勘察、岩土工程设计、岩土工程施工、岩土工程监测的全过程。

岩土工程测试的目的大致有以下几种:

(1) 施工控制测试。如隧道施工期间的收敛监测、大型基坑开挖时的沉降测试,可以及时发现问题实现施工信息动态反馈,及时优化设计与施工方案,避免工程事故发生。

(2) 运营期监控测试。如大型土石坝建成后都要经过几个月甚至数年才能稳定,在这期间要对大坝关键部位进行监测,发现危情及时进行补救。

(3) 在岩体和结构分析中的测试。一般应用在实验室,即通过岩体和结构的力学观测,配以本构模型、模拟试验和数值分析,为改进岩体和地下工程的设计方法及结构分析方法提供依据。测试内容大致有岩体的力学参数测试、应力和应变测试、压力测试、变形和位移测试以及温度测试等。

在具体岩土工程测试中,测试目的依据实际工程具体情况而定。

二、岩土工程测试的意义

岩土工程测试就是对岩土体的工程性质进行观测和度量,得到岩土体的各种物理力学性质指标的试验工作。开展岩土工程测试技术工作具有重要的意义,主要体现在以下几个方面:

(1) 岩土工程测试技术是保证岩土工程设计合理可行的重要手段。随着岩土工程的快速发展,工程实践中出现了更多、更复杂的岩土工程问题,需要运用创新的工程设计方法来解决。而创新的设计方法需要相应测试技术的支撑与验证,以便保证岩土工程的设计合理、经济。

(2) 岩土工程测试技术为岩土工程施工质量与施工安全提供了技术保障。施工过程中的质量与施工安全已经得到广泛关注,施工中应力、应变、位移对参数的实时测试与分析技术为施工质量和安全提供了全面的技术保障。特别是大型岩土工程信息化施工,现场测试已经成为岩土工程施工不可分割的重要组成部分,且已经形成相关规范或行规。监测技术在隧道工程、边坡工程、地下工程、路基工程、基坑工程、桩基工程等施工中发挥着越来越重要的作用。

(3) 岩土工程测试技术有效地推动了岩土工程理论的形成和发展。众所周知,理论分析、室内外测试和工程实践是岩土工程分析的三个重要方面。理论分析指导工程实践,而测试又是理论分析的基础。岩土工程中的许多理论是建立在试验基础上的,如太沙基(Terzaghi)的有效应力原理是建立在压缩试验中孔隙水压力的测试基础上的,达西(Darcy)定律是建立在渗透试验基础上的,剑桥模型是建立在正常固结黏土和微超固结黏土压缩试验及等向三轴压缩试验基础上的。

(4) 岩土工程测试技术是保证大型重要岩土工程长期安全运行的重要手段。在重大岩土工程的运营过程中,如地质条件复杂的隧道及海底隧道、大型地下空间、城市地下铁道、大型高陡边坡、高速铁路路基等工程需要在运营期间对岩土工程及其结构的变形、受力、温度、渗流状况、沉降等进行长期监测,以保证其运营期的安全,避免重大工程事故的发生。

第二节 岩土工程测试技术发展现状与展望

一、岩土工程测试技术发展现状

随着科学技术的发展,现代测试技术较传统机械式的测试技术已发生了根本性的变革,在符合岩土力学理论和满足工程要求的前提下,电子计算机技术、电子测量技术、光学测试技术、航测技术、电磁场测试技术、声波测试技术、遥感测试技术等先进技术在岩土工程测试技术中得到了广泛应用,进而推动了岩土工程测试技术的快速发展,更先进、精密的测试设备相继问世,使测试结果的可靠性、可重复性方面得到很大的提高。

经过多年的发展,岩土工程测试技术的主要进展有:

(1) 测试方法和试验手段的不断更新。近年来,用原位测试确定土工参数在国内外普遍受到重视。通过原位测试技术确定土工参数,该方法特别适用于对深层土和难以取土样(如砂土、卵砾石等)或难以保证土样质量的土进行土工参数确定。针对特殊土(如湿陷性黄土、淤泥质黏土、高有机质黑土、红壤土,以及围海造陆的吹填土等)工程性质和工程行为的测试、试验方法得到了一定的改善与提高,如利用现场大型浸水试验分析马兰黄土和离石黄土湿陷性差异、通过循环蠕变试验研究淤泥质黏土蠕变的三阶段模式和两

个应力比临界值等,为提高对特殊土工程性质的认识提供了可靠的检测方法。

(2)新型传感器及相关的测试系统不断出现及改进。如表面水平位移观测采用全站仪,深层侧向位移观测出现了梁式倾斜仪,分层沉降观测中开始采用磁环式沉降仪等,测试手段不断更新。依据我国实际工程情况,邵龙潭等对传统室内测试设备三轴试验机、动力三轴试验机、平面应变仪、水(气)压力控制器、水土特性和渗透系数联合测定仪等进行了改进及国产化,在降低造价的同时进一步提高了实用性。王锺琦等研制了多功能触探装置,并发展了独特测试方法;赵大军等研制了具有静动力触探、高频振动回转钻进的多功能钻机;吉锋等研制了用于结构面起伏形态测量的接触打孔器等。

(3)大型工程的自动监测系统不断出现。软基加固、公路路基、基坑支护等工程现场监测很多采用了先进的实时自动化监测。如多通道无线遥测隧道围岩位移系统已用于工程实践,基于GIS和可视化技术的大型边坡安全监测系统已经有了成功的使用。在上海轨道交通建设中,在上海地铁建设多年的科研成果和管理经验基础上开发的地铁远程施工监控系统已经全面应用,该系统是基于网络通信传输、无线通信传输、网络数据库、数据分析、预测、决策等开发的,综合了施工、监理、监测、管理等多种信息。

(4)一系列新兴技术用于岩土工程测试中。如国内外已有将光纤传感技术用于岩土工程现场监测中的实例。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating Sensors,简称FBG)传感器已经用于深基坑钢筋混凝土内支撑应变监测。大测距的分布式光纤技术,开始实现由点到线的监测,甚至可以完成重大工程的三维在线监测。声发射技术在岩体局部冒落的预测预报、岩爆现象的预测预报、地应力测试等领域得到了广泛应用。瞬变电磁仪、红外成像仪等开始大量应用于地下工程的超前预报。近景摄影测量技术已经应用于地下工程位移监测,并达到了较高的精度。三维隧道影像扫描仪已经用于全面精确地记录隧道开挖面地质及支撑施工结果的影像与几何资料,该法有助于提高施工质量和工程管理水平。雷达等非破损探测技术开始应用于岩土工程测试中,由于工程物探具有精度高、成本低的特点,再结合工程需要,探测诸如基岩面、地下洞穴、孤石、管线、古墓、防空洞、桩身缺陷、破碎带、漏水点等目的物方面,已成为岩土工程勘察不可缺少的技术手段。

(5)监测数据的分析和反馈技术提高迅速。先进的三维地质建模软件、数据库系统、数据挖掘和专家系统等都在逐步应用。人工神经网络技术、时间序列分析、灰色系统理论、因素分析法、支持向量机方法等数据处理技术得到了广泛应用。岩土工程反分析,特别是基于现场量测变形的位移反分析研究取得了重要进展,反分析得到的综合弹性模量等参数成为岩土工程围岩稳定性数值模拟分析的重要基础,在岩土工程信息化施工中发挥了巨大作用。岩土工程施工监测信息管理、预测预报系统的发展成绩显著。

(6)相关岩土工程测试法规的陆续制定与出台。为了保证取样的质量及操作程序的规范化,依据我国实际,同时考虑与国际上通用标准接轨,我国相继出台了《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)、《建筑工程地质钻探技术标准》(JGJ 87—92)、《原状土取样技术标准》(JGJ 89—92)等,使相关岩土工程测试技术及操作程序有法可依。这些标准既与国际上通用标准一致,也考虑了我国的国情。另外,“第三方监测”在我国岩土工程建设中也越来越受到重视,实施城市地下工程施工“第三方监测”是保证施工安全和工程质量十分重要的举措,有效地避免了施工过程中可能发生的事故。

(7) 岩土工程结构运营期健康安全监测受到重视。对于如磁悬浮铁路路基工程等大型重要的岩土工程,不仅在施工过程中应开展监测,而且在运营过程中也要进行监测。岩土工程运营期间长期健康监测系统的建立和研究已经发展为岩土工程领域的重要课题之一。

二、岩土工程测试技术发展展望

如今各类建设工程和科学技术不断开发与应用,给岩土工程领域带来了巨大的活力,同时也提出了更高的要求。结合目前发展现状,展望未来,岩土工程测试技术发展趋势如下:

(1) 国产测试设备的改进及进口测试设备的国产化。目前,国产岩土工程现场监测仪器的信息化程度及精度还有待进一步提高,以满足当前岩土工程测试技术的要求。国外进口设备虽然具有较好的精度及较高的信息化程度,但造价高昂,一定程度上限制了它在岩土工程测试领域的应用。因此,急需我们对先进的国外监测仪器进行消化吸收,提高国产化率,降低监测仪器的成本。

(2) 新型测试仪器及技术的开发。针对岩土工程测试中出现的新问题,仅靠现有测试设备及技术难以完成测试任务,如千米深地质结构精细探测与解释技术、岩土体物理力学性质和参数的原位直接测试与地球物理间接测试技术、高可靠性地应力测试技术、TMB隧道施工超前预报技术、多物理过程监测技术(如岩体破裂过程的变形、应力、结构变化配套监测与解释技术)等。

(3) 提高岩土工程施工监测系统的自动化及监测结果的可靠性。已有的软件适合现场施工人员使用的很少,并且功能不够全面,集成性较差,导致数据处理及分析实时性差、方法落后,自动化、信息化程度低,根据监测信息及时反馈指导施工的水平差。因此,急需研究利用监测数据开展地下工程施工风险预测预报的完善系统,发挥监测工作的优化设计和及时反馈指导施工的作用。运用工程可视化技术与地理信息系统的全新思想,将数据库管理、分析预测与测点图形功能三者高度集成,实现以测点地图为中心的查询和数据输入输出的双向可视化,并提供监测概预算和图形报表等完整的实用工具。同时,将监测系统由以前的施工监测及预报运用到结构在运营期的健康检测与诊断。

(4) 积极发展第三方监测,全面提高地下工程安全施工的水平。由于针对第三方监测没有国家性的法规进行明确规定和管理,各地第三方监测处于无序状态。因此,急需对第三方监测的内容、责任主体、监测指标及管理信息系统数据标准等进行统一的管理和规定,确保岩土工程施工质量和安全。

第三节 岩土工程测试的主要内容

岩土工程测试技术一般分为室内试验技术、原位测试技术和现场监测技术三个方面。室内试验包含了常规的土工试验和模型试验,它的主要优点是可以控制试验条件,而它根本性的缺陷则在于试验对象难以反映天然条件下的性状和工作环境,抽样的数量也相对有限,有时会导致测试结果一定程度的失真。岩土工程的原位测试一般是指在工程现场

通过特定的测试仪器对测试对象进行试验,并运用岩土力学的基本原理对测试数据进行归纳、分析、抽象和推理以判断其状态或得出其性状参数的综合性试验技术。现场监测是保证岩土工程施工质量与安全的重要技术手段,能有效地避免重大工程事故的发生,目前在重大岩土工程中得到了广泛的应用。因此,岩土工程测试技术的三个方面各具特点和优势,不能相互取代。下面介绍各种测试技术的主要内容。

一、室内试验技术

室内试验技术能进行各种理想条件下的控制试验,在一定程度上容易满足理论分析的要求。室内试验主要有土的物理力学指标室内试验、岩土的物理力学指标室内试验、利用相似材料完成的岩土工程模型试验和采用数值方法完成的数值仿真试验。有关上述试验的原理和方法由专门的课程进行讲授。

下面列举一些试验的具体名称。

(1)土的物理力学指标室内试验主要有土的含水量试验、土的密度试验、土的颗粒分析试验、土的界限含水量试验、相对密度试验、击实试验、回弹模量试验、渗透试验、固结试验、黄土湿陷试验、三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验、直接剪切试验、反复直剪强度试验、土的动力特性试验、自由膨胀率试验、膨胀力试验、收缩试验、冻土密度试验、冻土温度试验、未冻土含水量试验、冻土导热系数试验、冻胀量试验和冻土融化压缩试验等。

(2)岩土的物理力学指标室内试验主要有含水量试验、颗粒密度试验、块体密度试验、吸水试验、渗透性试验、膨胀性试验、耐崩解性试验、冻融试验、岩土断裂韧度测试试验、单轴压缩强度和变形试验、三轴压缩强度和变形试验、抗拉强度试验、点荷载强度试验等。

(3)岩土工程模型试验主要是利用相似理论,用与岩土工程原型力学性质相似的材料按照几何常数缩制成室内模型,在模型上模拟各种加荷和开挖过程,研究岩土工程的变形和破坏等力学现象。模型试验种类繁多,主要有岩土工程开挖施工过程围岩破坏规律试验、岩土工程加固机制研究、地下工程开挖引起的地表损害规律研究、岩爆机制研究、地下洞室群支护设计优化分析、离心模型试验等。

(4)数值仿真试验。利用计算机进行岩土工程问题的研究,具有可以模拟大型岩土工程、模拟复杂边界条件、成本低、精度高等特点。岩土工程数值仿真试验常用的数值方法有有限元法、离散元法、边界元法、有限差分法、不连续变形法、颗粒流法、无单元法等。

二、原位测试技术

原位测试可以在最大限度上减少试验前对岩土体的扰动,避免这些扰动对试验结果的影响。原位测试结果可以直接反映原位测试体的物理力学状态,更接近工程实践的实际情况。同时,对于某些难以采样进行室内测试的岩土体(如承受较大固结压力的砂层),原位测试是必需的。在原位测试方面,地基中的位移场、应力场测试,地下结构表面的土压力测试,地基土的强度特性及变形特性测试等是研究的重点。原位测试技术可以分为土体的原位测试试验和岩体的原位测试试验两大类。

(1)土体的原位测试试验主要内容有静载荷试验、静力触探试验、标准贯入试验、轻

便触探试验、十字板剪切试验、现场直剪试验、地基土动力特性原位测试试验、场地土波速测试、场地微震观测、循环荷载板试验、地基土刚度系数测试、振动衰减测试、旁压试验等。

(2) 岩体的原位测试试验内容主要有地应力测试、弹性波测试、回弹试验、岩体变形试验、岩体强度试验等。需要指出的是,地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力,也称原岩应力,它是引起地下工程开挖变形和破坏的根本作用力。地应力测试的结果对地下工程洞室和巷道的合理布置、地下洞室围岩稳定性数值分析和地下工程支护设计方案的优化设计具有重要意义,在工程分析中应引起重视。

三、现场监测技术

现场监测技术是随着大型复杂岩土工程的出现而逐渐发展起来的。在水电工程大型地下厂房群、城市地铁建设中的车站及区间隧道、大型城市地下空间、复杂条件下矿山巷道、大断面隧道、高陡边坡加固等工程施工中,由于信息法施工的普及,现场监测已成为保证上述工程安全施工的重要手段。

(1) 岩土工程现场监测涉及的领域众多,主要有水利电力工程、铁路、公路交通、矿山、城市建设、国防建设、港口建设、地下空间开发与利用等。

(2) 岩土工程现场监测的分类。按开展监测的时间,岩土工程现场监测可分为施工期监测和运营期监测。按监测的建筑物类型,岩土工程现场监测可分为大坝监测、地下洞室监测、隧道监测、地铁监测、基坑监测、边坡监测、支挡结构监测等。按影响因素,岩土工程现场监测可分为对人类工程活动进行的监测、自然地质灾害监测。按监测物理量的类型,岩土工程现场监测一般可以分为变形监测、应力(压力)应变监测、渗流监测、温度监测和动态监测等。按监测变量,岩土工程现场监测可分为原因量监测和效应量监测,原因量即环境参量,它们的变化将引起建筑物性态的变化;效应量是建筑物对原因量变化而产生的响应。

第二章 测试技术基础知识

第一节 测试的基本概念

一、测试系统组成

测试系统是将传感器与测量仪表、变换装置、显示或存储装置等有机组合在一起,实现对被测物理量的量取,并得到具体数据。测试系统的基本构成如图 2-1 所示。

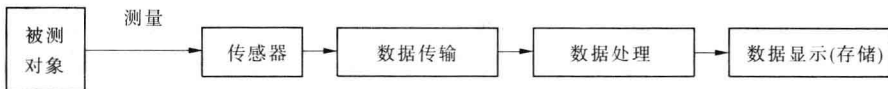


图 2-1 测试系统的基本构成

系统中各个环节的具体功能如下:

(1) 传感器是感受被测量的大小并输出相应信号的器件或装置,它是整个测试系统中的感知元件,也是测试系统的核心环节。

(2) 数据传输是用来传输数据的。当传感器测量得到被测对象的物理量时,数据有时需要传输到另一个环节进行处理或显示,数据传输环节就是完成这种传输功能的。当然,目前也有许多传感器本身自带存储功能,这时候数据传输仅仅完成传感器与另外存储设备的数据交换或导入。

(3) 数据处理是将传感器输出信号进行处理和变换,如对信号进行放大、运算、线性化、数-模或模-数转换,变成另一种参数的信号或某种标准化的统一信号等,使其输出信号便于显示、记录,同时得到最终需要的测量数据。特别是一些模拟信号的传感器,必须经过模-数转换,才能进行存储或数字化显示。例如,加速度传感器测得的原始信号往往是模拟的电压信号,首先需要经过模-数转换,转换成数字信号,然后经过灵敏度参数的转换,使电压信号变成加速度信号。目前,有的传感器自带微型处理器,可直接输出数字信号;有的传感器将处理功能集成一体,直接得到被测物理量。

(4) 数据显示(存储)是将被测量信息变成人感官能接受的形式,以达到监视、控制或分析的目的。测量结果可以采用模拟显示,也可以采用数字显示,还可以由记录装置进行自动记录并存储,或由打印机将数据打印出来。当然,数据显示功能还有一定的不足,因为所有测量数据均希望得到永久保存,所以实时的数据存储也是必要的。

二、测试系统分类

测试系统通常可以分为开环测试系统与闭环测试系统。

(一) 开环测试系统

开环测试系统全部信息变换只沿着一个方向进行,如图 2-2 所示。

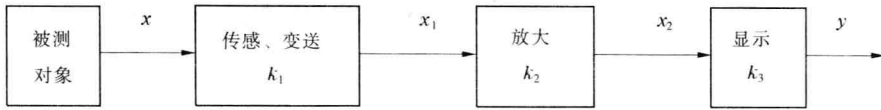


图 2-2 开环测试系统框图

其中, x 为输入量, y 为输出量, k_1 、 k_2 、 k_3 为各个环节的传递系数。输入输出关系为各个环节的传递系数的函数。

$$y = f(k_1, k_2, k_3, x) \quad (2-1)$$

采用开环方式构成的测试系统,结构较简单,但各环节特性的变化都会造成测量误差,有的误差甚至是线性或几何放大。

(二) 闭环测试系统

闭环测试系统有两个通道:一为正向通道,二为反馈通道。闭环测试系统结构框图如图 2-3 所示。其中 Δx 为正向通道的输入量, β 为反馈环节的传递系数,正向通道的总传递系数 $k = k_2 k_3$ 。

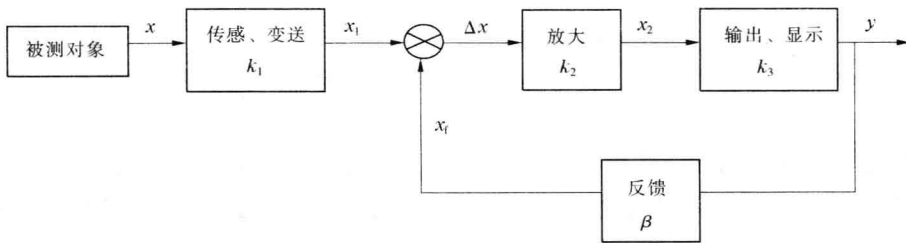


图 2-3 闭环测试系统结构框图

由图 2-3 可知:

$$\Delta x = x_1 - x_f; \quad x_f = \beta y; \quad y = k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y; \quad y = \frac{k}{1 + k\beta} x_1 = \frac{1}{\frac{1}{k} + \beta} x_1$$

当 $k \gg 1$ 时,则

$$y \approx \frac{1}{\beta} x_1 \quad (2-2)$$

因为 $x_1 = k_1 x$, $y = \frac{k}{1 + k\beta} x_1$

所以,系统的输入输出关系为 $y = \frac{k k_1}{1 + k\beta} x \approx \frac{k_1}{\beta} x$ (2-3)

显然,这时整个系统的输入输出关系由反馈环节的特性决定,放大器等环节特性的变化不会造成测量误差,或者说造成的误差很小。但是系统设计较复杂,成本相对要高。

根据以上分析可知,在构成测试系统时,应将开环测试系统与闭环测试系统巧妙地组合在一起加以应用,才能达到所期望的目的。特别是目前应用相当广泛的伺服类传感器就是采用了反馈回路的闭环测量。

第二节 传感器基本原理

一、传感器的基本概念

根据 GB 7665—87,传感器的定义为:“能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。”这一定义所表述的传感器的主要内涵包括:

(1)从传感器的输入来看,一个指定的传感器只能感受规定的被测量,即传感器对规定的物理量具有最大的灵敏度和最好的选择性。

(2)从传感器的输出来看,传感器的输出信号为“可用信号”,即指便于处理、传输的信号,如常见的电信号、光信号等。当然或许是更先进、更实用的其他信号形式。

(3)从输入与输出的关系来看,输入与输出之间的关系应具有“一定规律”,即传感器的输入与输出不仅是相关的,而且可以用确定的数学模型来描述,也就是它有确定规律的静态特性和动态特性。

二、传感器的分类

传感器的种类繁多,因此有许多种分类方法。常用的分类方法如下。

(一)按被测量分类

- (1)机械量:位移、力、速度、加速度等。
- (2)热工量:温度、热量、流量(速)、压力(差)、液位等。
- (3)物性参量:浓度、黏度、比重、酸碱度等。
- (4)状态参量:裂纹、缺陷、泄漏、磨损等。

这种分类方法是按用途进行分类的,给使用者提供了方便,容易根据测量对象来选择传感器。

(二)按测量原理分类

按测量原理传感器可分为电阻式、电感式、电容式、压电式、光电式、光纤、磁敏式、激光、超声波等。现有传感器的测量原理都是基于物理、化学与生物等各种效应和定律,这种分类方法便于从原理上认识输入与输出之间的变换关系,有利于专业人员从原理、设计及应用上作归纳性的分析与研究。

(三)按信号变换特征分类

(1)结构型:主要通过传感器结构参量的变化实现信号变换。例如,电容式传感器依靠极板间距离的变化引起电容量的改变。

(2)物性型:利用敏感元件材料本身物理属性的变化来实现信号变换。例如,水银温度计利用水银的热胀冷缩现象测量温度,压电式传感器利用石英晶体的压电效应实现测量等。

(四)按能量关系分类

(1)能量转换型:传感器直接由被测对象输入能量使其工作。例如热电偶、光电池等,这种类型的传感器也称为有源传感器。

(2)能量控制型:传感器从外部获得能量使其工作,由被测量的变化控制外部供给能量的变化,例如电阻式、电感式等传感器。这种类型的传感器必须由外部提供激励源(电源等),因此也称无源传感器。

传感器按能量关系分类如表 2-1 所示。

表 2-1 传感器按能量关系分类

能量转换型	能量控制型
压电效应(压电式)	应变效应(应变片)
压磁效应(压磁式)	压阻效应(应变片)
热点效应(热电偶)	热阻效应(热电阻、热敏电阻)
电磁效应(磁电式)	磁阻效应(磁敏电阻)
光伏特效效应(光电池)	内光电效应(光敏电阻)
热磁效应	霍尔效应(霍尔元件)
热电磁效应	电容(电容式)
静电式	电感(电感式)

除以上分类方法外,按照输出量传感器可分为模拟式传感器和数字式传感器,按照测量方式传感器可分为接触式传感器和非接触式传感器等。

三、常用技术性能指标

一般传感器常用的技术性能指标如下:

- (1)输入量的性能指标:量程或测量范围、过载能力等。
- (2)静态特性指标:线性度、迟滞、重复性、精度、灵敏度、分辨率、稳定性和漂移等。
- (3)动态特性指标:固有频率、阻尼比、频率特性、时间常数、上升时间、响应时间、超调量、稳态误差等。
- (4)可靠性指标:工作寿命、平均无故障时间、故障率、疲劳性能、绝缘、耐压、耐高温等。
- (5)对环境要求的指标:工作温度范围、温度漂移、灵敏度漂移系数、抗潮湿、抗介质腐蚀、抗电磁场干扰能力、抗冲振要求等。
- (6)使用及配接要求:供电方式(直流、交流、频率、波形等)、电压幅度与稳定度、功耗、安装方式(外形尺寸、重量、结构特点等)、输入阻抗(对被测对象影响)、输出阻抗(对配接电路要求)等。

第三节 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是应用最广泛的传感器之一,它可用于不同的弹性敏感元件形式,构成测量位移、加速度、压力等各种参数的电阻应变式传感器。虽然新型传感器不断出现,为测试技术开拓了新的领域,但是,由于电阻应变测试技术具有其独特的优点,因此它仍然是目前非常重要的检测手段之一。其他类型的传感器可以参阅相关的书籍,电阻应