



高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材

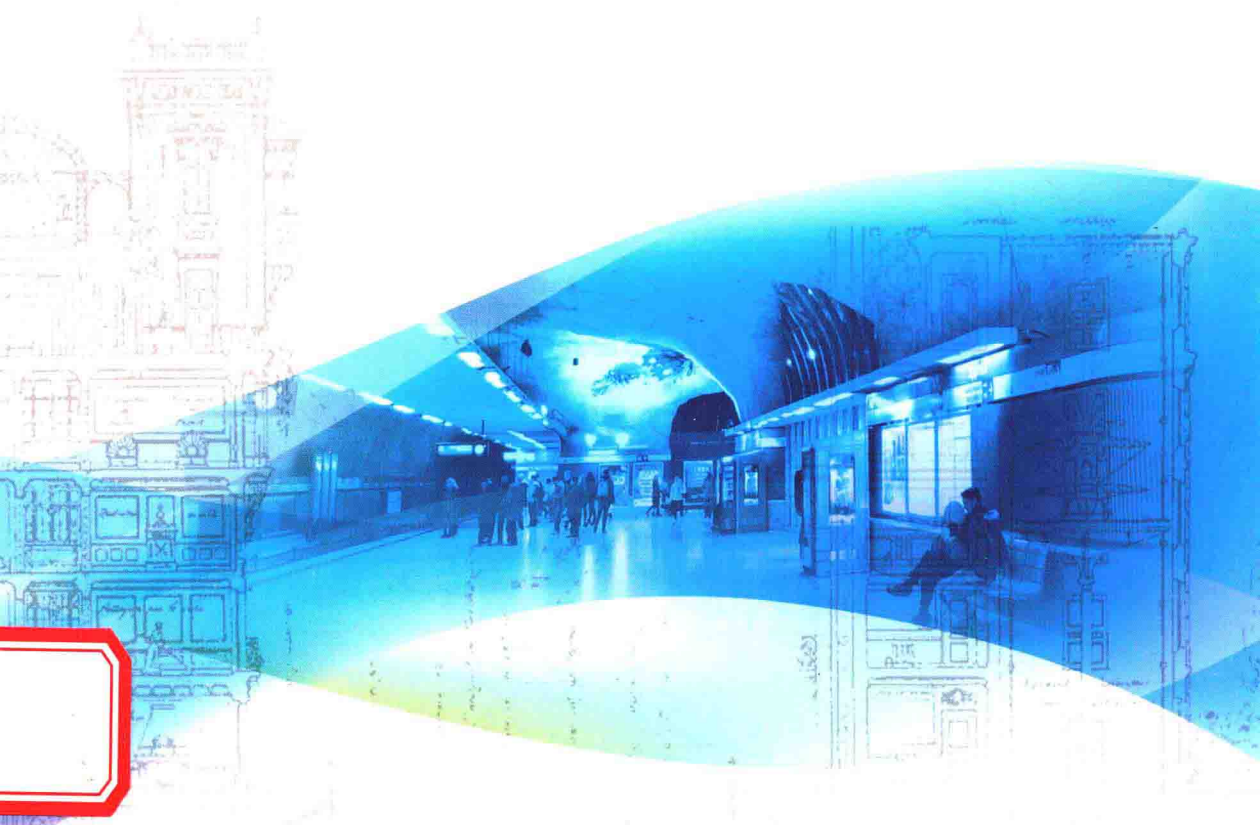
地下工程测试技术

DIXIA GONGCHENG CESHI JISHU

主 编 张 蕾 丁祖德

副主编 欧明喜 刘海明

主 审 曹 净



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材

地下工程测试技术

主 编 张 蕾 丁祖德
副主编 欧明喜 刘海明
主 审 曹 净



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书为“高等院校城市地下空间工程专业‘十三五’规划教材”之一，书中内容涵盖地下空间工程在建设过程中所涉及的各种测试技术，主要针对施工过程中及后期监测管理时可能使用的监测检测技术。本书内容主要包括绪论、地下工程测试和监测技术基础知识、基坑工程监测技术、隧道施工监测技术、软土地基预压处理方法监测技术、边坡工程监测及桩基测试技术。

本书可用于城市地下空间工程专业、岩土工程专业教学使用，也可用于基坑、城市隧道与管线、软弱地基预压处理、边坡及桩基等工程在施工过程中及工后对建筑物、管线及周边环境的监测检测设计、施工、管理及科学研究等工作。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程测试技术 / 张蕾, 丁祖德主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2016. 10
高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-4869-5

I. ①地… II. ①张… ②丁… III. ①地下工程测量—高等学校—教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第266713号

书 名	高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材 地下工程测试技术 DIXIA GONGCHENG CESHI JISHU
作 者	主编 张蕾 丁祖德 副主编 欧明喜 刘海明 主审 曹净
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 296千字
版 次	2016年10月第1版 2016年10月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前 言

2012年,中华人民共和国住房和城乡建设部制定颁布的《高等院校土木工程本科指导性专业规范》中将城市地下空间工程专业确定为土木工程重要专业方向之一。地下工程测试技术是城市地下空间工程专业的一门重要专业课。通过本课程的学习,可使城市地下空间专业的学生,初步掌握地下岩土工程各种测试技术的基本原理和方法,为毕业后从事地下工程测试工作打好基础。

在土木工程专业教学中,地下工程测试技术一直是个盲点,监测检测工作早已是土木行业的一个重要分支领域,从事监测检测的单位人员众多,然而在相应的本科及专科基础教学中涉及该工作内容的课程却少之又少,本书的编写极大弥补了这项空白。本课程的教学内容将有效培养本专业学生从事地下工程测试工作的专业知识及动手能力,以及从事相关领域科学试验研究的理论基础。

本书由昆明理工大学建筑工程学院组织编写。全书共分7章,具体分工如下:第1章由张蕾编写,第2章由丁祖德、蔡海兵编写,第3章由欧明喜编写,第4章由丁祖德编写,第5章由张蕾编写,第6章由刘海明编写,第7章由张蕾编写。全书由曹净、张蕾进行统稿与审定。此外,张博、李夕松、张瑞、高越等研究生为本书的编写付出了辛勤工作,在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中查阅大量工程资料,力求做到理论联系实际,参考国家及多个地方现行规范、规程与标准,结合土木行业领域常用技术方法,反映目前我国地下空间工程及岩体工程的先进技术水平。但由于作者的水平有限,不足之处在所难免,望广大读者批评指正。

本教材部分章节受国家自然科学基金项目(51408283)资助。

编者

2016年8月

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 地下工程测试的目的、意义	1
1.2 地下工程测试的内容	1
1.3 地下工程测试技术的现状	2
1.4 地下工程测试技术的发展趋势	3
1.5 地下工程测试人员应具备的条件	3
1.6 本课程学习目的及要求	4
第2章 地下工程测试和监测技术基础知识	5
2.1 测试系统的组成	5
2.1.1 荷载系统	5
2.1.2 测量系统	6
2.1.3 信号处理系统	6
2.1.4 显示和记录系统	6
2.2 测试系统的基本原理与传递特性	6
2.2.1 概述	6
2.2.2 测试系统的静态传递特性	7
2.3 测试系统的误差分析和测试系统的选择	8
2.3.1 测试系统误差	8
2.3.2 精度、精密度与准确度	9
2.3.3 测试系统的选择	9
2.4 传感器原理	11
2.4.1 传感器的定义、组成和分类	11
2.4.2 电阻式传感器	12
2.4.3 电感式传感器	21
2.4.4 电容式传感器	23
2.4.5 钢弦式传感器	26
2.4.6 光纤传感器	29
2.4.7 传感器的选择	34
2.4.8 传感器的标定	34
思考题	34

第3章 基坑工程监测技术	36
3.1 基坑工程监测目的和意义	37
3.2 基坑工程监测原则和方案	37
3.2.1 监测原则	37
3.2.2 监测方案	37
3.3 监测项目与监测点的布置	38
3.3.1 监测项目	38
3.3.2 监测点布置	40
3.4 基坑工程监测方法及仪器	42
3.4.1 水平位移监测	42
3.4.2 竖向位移监测	43
3.4.3 深层水平位移监测	44
3.4.4 墙体和桩体的内力监测	47
3.4.5 锚杆(索)拉力监测	47
3.4.6 水平支撑内力监测	48
3.4.7 地下水位监测	50
3.4.8 土压力监测	50
3.4.9 孔隙水压力监测	52
3.4.10 坑外土体分层竖向位移监测	52
3.4.11 建筑物倾斜监测	54
3.4.12 建筑物裂缝监测	54
3.5 监测频率与监测警戒值	54
3.5.1 监测频率	54
3.5.2 监测警戒值	57
3.6 监测数据处理及监测报告	58
3.6.1 数据处理	58
3.6.2 监测报告	58
思考题	59
第4章 隧道施工监测技术	60
4.1 概述	60
4.1.1 隧道施工监测的意义	60
4.1.2 隧道施工监测的目的及要求	60
4.2 隧道施工监测项目及方法	61
4.2.1 监测项目	61
4.2.2 监测方法	63
4.3 监测数据分析处理与信息反馈	77
4.3.1 量测数据分析处理	77
4.3.2 监控量测控制标准	78

4.3.3	监控量测信息反馈	82
4.4	监测组织与管理	82
4.4.1	监测人员组织	82
4.4.2	监测实施细则	82
4.4.3	监测质量保证体系	83
4.4.4	监测报告	83
	思考题	84
第5章	软土地基预压处理方法监测技术	85
5.1	概述	85
5.2	预压地基监测的目的及监测项目	86
5.2.1	监测目的	86
5.2.2	监测项目	87
5.3	堆载预压法	87
5.3.1	堆载预压工艺	87
5.3.2	堆载预压施工监测内容	89
5.4	真空预压法	99
5.4.1	真空预压工艺	99
5.4.2	真空预压施工监测内容	103
5.5	监测数据的处理及监测中的注意事项	108
5.5.1	监测(检测)成果报告内容	108
5.5.2	预压地基处理监测中的注意事项	108
5.5.3	预压地基周边环境监测	108
	思考题	109
第6章	边坡工程监测	110
6.1	概述	110
6.1.1	边坡工程监测的意义和作用	110
6.1.2	边坡监测原则	111
6.1.3	边坡监测的主要内容与方法	111
6.1.4	边坡变形监测技术的发展趋势	114
6.2	边坡地表变形监测	115
6.2.1	设站观测法	115
6.2.2	近景摄影测量法	120
6.2.3	自动化监测网	120
6.3	边坡表面裂缝量测	124
6.4	边坡内部变形监测	125
6.4.1	简单地下位移监测	126
6.4.2	应变管监测	127

6.4.3	固定式钻孔测斜仪监测	127
6.4.4	钻孔伸长计监测	128
6.4.5	活动式测斜仪监测	128
6.5	边坡变形量测资料的处理与分析	129
6.5.1	边坡变形量测数据的预处理	129
6.5.2	边坡变形状态的判定	130
6.5.3	边坡变形的预测分析	131
6.6	边坡应力监测	132
6.6.1	边坡内部应力测试	132
6.6.2	岩石边坡地应力监测	133
6.6.3	边坡锚固应力测试	133
6.7	边坡地下水监测	134
6.7.1	地下水位监测	134
6.7.2	孔隙水压力监测	135
6.8	监测方案设计	135
6.8.1	监测设计的原则	136
6.8.2	测点布点原则	137
6.8.3	边坡工程监测周期与频率	137
	思考题	138
第7章	桩基测试技术	139
7.1	概述	139
7.1.1	桩基分类	139
7.1.2	桩基检测程序	140
7.1.3	桩基承载力代表值与静载试验	140
7.2	单桩竖向抗压静载试验	141
7.2.1	竖向受压荷载作用下的单桩工作机理	141
7.2.2	试验设备	143
7.2.3	试验要求	147
7.2.4	试验方法	148
7.2.5	试验资料整理	151
7.2.6	单桩竖向抗压承载力的确定	151
7.2.7	常见的单桩荷载-位移 ($Q-s$) 曲线	152
7.3	单桩竖向抗拔静载试验	153
7.3.1	竖向拉拔荷载作用下的单桩工作机理	153
7.3.2	试验设备	154
7.3.3	试验方法	155
7.3.4	试验资料整理	156
7.3.5	单桩竖向抗拔承载力的确定	157

7.4	单桩水平静载试验	157
7.4.1	水平荷载作用下的单桩工作机理	158
7.4.2	试验设备	158
7.4.3	试验方法	159
7.4.4	试验步料整理	161
7.4.5	单桩水平临界荷载和极限荷载的确定	163
7.5	钻芯法	164
7.5.1	试验仪器	164
7.5.2	试验方法	165
7.5.3	试验准备及芯样的选取	165
7.5.4	芯样加工及技术要求	166
7.5.5	试件抗压强度试验	167
7.5.6	试验数据分析与判定	167
7.6	低应变动力检测法	169
7.6.1	一维弹性应力波理论	170
7.6.2	检测设备	172
7.6.3	检测方法	173
7.6.4	检测结果的应用	175
7.7	高应变动力检测法	179
7.7.1	概述	179
7.7.2	CASE法	179
7.7.3	检测设备	181
7.7.4	检测方法	182
7.7.5	检测报告	183
7.8	声波透射法检测	183
7.8.1	声波法的基本原理	184
7.8.2	检测设备	184
7.8.3	声测管的布置方式	184
7.8.4	检测方法	185
7.8.5	完整性判定	186
	思考题	186
	参考文献	187

第 1 章 绪 论

随着经济发展,城市化步伐的加快,满足日益增长的人们生产、生活、出行、轨道交通换乘、商业、停车等功能的需要,在用地越发紧张的密集城市里建设、开发、改造大型地下空间已经成为一种必然趋势。诸如,高层建筑多层地下室、地下铁道及地下车站、地下道路、地下停车场、地下街道、地下商场、地下变电站、地下仓库、地下民防工事以及地下民用和工业设施等地下空间开发规模越来越大。深大基坑、地下工程通常位于密集城市中心,常常紧邻建筑物、交通干道、地铁隧道及各种地下管线等,施工场地紧张、施工条件复杂、工期紧迫,导致地下工程的设计施工难度越来越大,重大恶性地下事故频发,工程建设的安全生产形势越来越严峻。

地下工程建筑物与岩土体之间所存在的问题复杂多样,沉降差异、基坑开挖支护、降水、边坡稳定、地面沉降等各种地下岩土工程问题越来越多地摆在科研、设计人员面前。传统解决岩土问题的方法是理论分析及试验研究,然而,由于岩土体自身的缺陷原因,时至今日仍没有一套科学理论能全面、真实、准确地解决岩土体问题。试验研究可以较真实地模拟工程实施过程,有效指导、辅助理论研究的进行,可是往往由于资源条件有限,试验研究所能反映的岩土问题存在局限。因而,需要一种能够在工程实施过程中,真实、全面、可靠地反映工程问题的技术手段。

1.1 地下工程测试的目的、意义

地下工程测试是借助一定的测量手段,采用实际测量方法对地下工程结构、构件、性质及岩土体的应力、位移进行观测和度量,得到各类物理力学指标,对获得的数据进行分析整理,进而用于指导工程实际,补充完善理论及试验研究的工作。

测试技术是一门对信息的获得、传输、转换、显示记录和分析出来的原理和技术,包括测量工具和测量方法。

地下工程测试工作在岩土工程中占有很重要的位置,测试工作一般在施工过程中进行,有时为了指导设计工作,部分测试操作也可在设计工作开始前进行。从根本上说,测试技术是一种保障岩土工程设计的经济性和准确性的手段,对地下岩土体进行试验,及时获取并分析地下岩土体的有效信息,以便为设计师提供最基本的设计依据。为了确保工程质量和施工的安全进行,进行现场检测和监测显得尤为重要,地下工程测试技术越来越多地被岩土工程师给予高度重视。

1.2 地下工程测试的内容

地下工程测试包括室内试验测试技术、原位测试技术和现场监测技术三个方面,在岩

土工程方面有着重要而特殊的作用。具体的技术手段包括工程地质测绘和调查、勘探和取样、各种原位测试技术、室内土工试验和岩石试验、检验和现场监测、分析和计算、数据处理等。

1. 室内试验测试技术

室内试验一般在室内进行，其优点为试验条件易于把握，应力条件可控，有明确的边界条件，还能大量采样。包括土的室内试验测试、岩石的室内试验测试、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。

2. 原位测试技术

原位测试可以最大限度地减小对岩体的干扰，避免其对实验结果的影响，测试过程短，效率高。测试结果可以直接反映测试对象的物理力学状态，比较接近工程实际。原位测试试验技术包括土体原位测试试验、岩体的原位测试试验。土体原位测试试验包括静载试验、静力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、现场直剪试验、地基土动力特性原位测试、旁压试验等。岩体原位测试试验包括地应力测试、弹性波测试、回弹试验、岩体变形试验、岩体强度试验等。

原位测试技术多应用在岩土工程勘察工作及工程验收检验中。

3. 现场监测技术

现场监测技术是随着各种复杂的大型岩土工程发展起来的，以实际的工程为对象，在事先选定好的监测点上进行，在工程施工中期及后期对岩土体及其周边环境进行定时定点监测应力及变形。

现场检测与监测技术主要包含施工作用和各类荷载对岩土反应性状的监测、施工和运营中的结构物监测和对环境影响的监测等方面。

现场检测、监测与工程勘察的区别：现场检测、监测是构成岩土工程系统的一个重要环节，大量工作在施工和运营期间进行；由于检测、监测工作一般需在高级勘察阶段开始实施，所以也被列为一种勘察方法。它的主要目的在于保证工程质量和安全，提高工程效益。现场检（监）测的含义包括施工阶段对先前岩土工程勘察成果的验证核查以及岩土工程施工监理和质量控制。

本书介绍的地下工程测试技术主要指现场监测技术。

1.3 地下工程测试技术的现状

地下工程测试工作是工程中一个必不可少的环节。它会直接影响岩土工程数值提取的准确性，进而影响整个工程的安全和质量。现今由于各种原因导致地下工程测试工作存在很多问题：

(1) 地下工程测试是一项技术性很强的工作，需要检测技术人员有较高的责任心。如果检测单位无视检测工作的专业要求，聘用非专业技术人员操作，或测试人员在工作中玩忽职守，将造成地下工程测试存在很大的漏洞。

(2) 地下工程测试目的是获取工程所需的有效可靠的岩土工程参数。某些单位并不具备岩土测试的能力，却违规从事测试工作，通过简化测试方法，得到一些似是而非、不合

实际的结论，监测数据的可靠性难以保证，留下不良隐患。

(3) 多数测试单位存在取样技术有待提高，测试设备过时、老化等问题。

(4) 行业管理制度的不健全，在某种意义上影响岩土工程领域的发展。

(5) 为适应我国岩土工程的发展，必须对有关测试人员进行严格的培训及考核，提高岩土工程测试的要求。

1.4 地下工程测试技术的发展趋势

最近几年以来，随着科学技术的飞速发展以及设计、施工、监理等各部门对现场监测的愈加重视，地下工程测试技术也相对得到了较快发展，监测范围也在不断扩大，对监测的要求也越来越高，实时监测必然成为工程施工常态，自动化监测系统的应用越来越多。目前的监测仪器和技术正朝着自动化、微型化、智能化、高精度化和网络化方向发展。

地下工程测试技术的发展趋势主要表现在以下几个方面：

(1) 高科技仪器与新方法的结合。因为测试方法在某种程度上影响着岩土力学理论的发展，引入有关高新技术的最新科研成果，研制出多功能、高精度、速度快、抗干扰能力强的高精度智能化测试仪器，在简化操作过程的同时，也大大提高了测试结果的可靠性。

(2) 工程地球物理探测技术的飞速发展。最近几年，国内外相继利用物探原理研发了一些高性能的仪器，如探地雷达、波速仪、管线探测仪等，能适应不同工程的需要，具有精度高、抗干扰能力强等优势，这将成为以后发展的一个重要趋势。

(3) 信息化施工技术的广泛使用。随着各种大型工程的不断增加，对地质条件的要求愈加严格，为了保证岩土施工过程和使用过程中的安全，过程监测显得尤为重要，通过对测试结果的数据分析，判断工程施工的安全性能。

(4) 现场监测、室内试验测试、设计计算和数值反分析及其再预测的有机结合与循环。室内试验测试是基础，并且以此进行设计；现场监测能对预测值进行修正，在经过反分析等方式得到工程所需的数值。

(5) 虚拟测试技术近年来发展迅速，将会广泛应用于岩土工程测试技术。有效、及时地利用其他领域的科技成果，将对推动岩土工程测试技术的发展有很大帮助，如电子计算机技术、光学测试技术、声波测试技术、遥感测试技术等方面的新进展都有可能在岩土工程测试方面找到相应的切合点。同时，测试数据的准确性、可重复性也会有很大的改善和提高。

1.5 地下工程测试人员应具备的条件

地下测试技术是有效辅助岩土工程顺利实施的有效手段之一，测试仪器、测试方法、测试人员的专业素养将直接影响测试结果的准确性。作为一名合格的地下工程测试人员应具备以下条件：

(1) 有较强的责任心，能够耐心、细致地完成各类地下工程测试工作。

(2) 秉承对测试工作负责的态度，拒绝对测试数据造假。

(3) 熟悉掌握岩土工程、结构工程等相关专业的设计、施工、检(监)测工作的理论知识。

(4) 了解工程测量学专业知 识, 熟练掌握各类测量仪器操作原理及方法。

(5) 了解各类测试技术的基本原理、掌握测试仪器的操作方法。

(6) 当测试结果出现较大误差时, 具备找出误差的原因, 并能够分析、解决误差的能力。

1.6 本课程学习目的及要求

通过本课程的学习, 学生应掌握运用地下工程测试技术的有关知识分析、解决岩土工程中遇到测试问题的能力, 达到以下要求:

(1) 掌握岩土工程测试的基本理论和技术技能。

(2) 基本掌握基坑、软土地基、桩基、隧道及边坡等工程的测试技术手段, 学会各种测试数据的整理运用。

(3) 学会编制不同工程的监测检测报告。

第 2 章 地下工程测试和监测技术基础知识

随着地下空间的不断地开发与利用，大量的地下建筑物、构筑物、交通线已经与人们的生活息息相关。如今，人们对工程施工的安全意识和环保意识不断增强，在工程投标和施工中，工程施工监测已成为一项必不可少的内容，当代科学技术水平的不断发展促进测试技术向着高精度、小型化、智能化发展，因此，测试技术水平已成为反映国家科技现代化水平的重要标志之一。现代测试技术主要有以下四个方面的作用：

- (1) 各种参数的确定。
- (2) 自动化过程中参数的反馈、调节和自控。
- (3) 现场实时检测和监控。
- (4) 试验过程中的参数测量和分析。

要实现这四个方面的作用，必须有一个合理、高效、经济的测试系统。合理就是能测试所需要的参数和变量，高效就是省时、省力、构造简单，经济就是造价低、学习起来快。

2.1 测试系统的组成

测试系统可以由一个或者若干个功能单元组成，单元的个数不固定是因为由于面对的工程不同、测试参数的不同系统在构成上会有很大的差别。通常，测试系统具有以下几个功能：将被测对象置于预定状态下，并对被测对象所输出的信息进行采集、变换、传输、分析、处理、判断和显示记录，最终获得测试所需的信息。就如同我们日常使用计算机计算，需要键盘输入，计算机进行计算，显示屏输出结果。图 2.1 所示为一个典型的力学测试系统，由荷载系统、测量系统、信号处理系统和显示记录系统四大部分组成。若要以最佳方案完成测试任务，应该对整套测试系统的各功能单元进行全面综合的考虑。

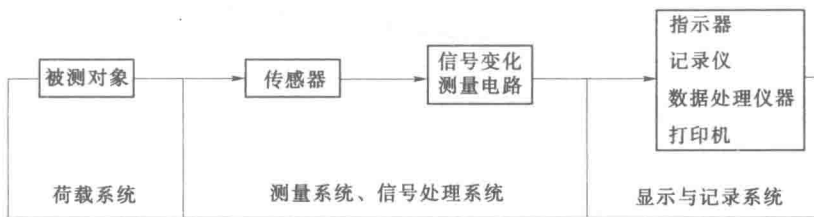


图 2.1 测试系统的组成

2.1.1 荷载系统

荷载系统是使被测对象处于一定的受力状态下，使被测对象（试件）有关的力学量之

间的联系充分显露出来,以便于进行有效测量的一种专门系统。这里使有关力学量之间的联系显露出来的力学系统是指狭义广义的荷载,因为世界上没有不受力的对象,这里的荷载是使力学量之间联系可测时的力。这种力通常是比较大和人为施加的。例如,在混凝土试块进行抗压强度试验时油压机施加的力。在岩土工程测试时采用的荷载系统通常有液压式、重力式、杠杆式、气压式等。

2.1.2 测量系统

测量系统由传感器、信号变换和测量电路组成,它将被测量(如力、位移等)通过传感器变成电信号,经过变换、放大、运算,变成易于处理和记录的信号。传感器是整个测试系统中采集信息首要的关键环节,它的作用是把被测非电量转换成便于放大、记录的电量。所以,有时称传感器为测试系统的一次仪表,其余部分为二次仪表或三次仪表。比如在岩石直剪试验系统中,需要观察在不同法向应力水平下,试件在剪切过程中法向和剪切方向的力和位移的变化。采用四支位移传感器分别测量试件在法向和剪切方向的位移,采用两只液压传感器分别测量试件在法向和剪切方向的荷载。其中,位移传感器和位移变位器组成位移量测系统,荷载传感器和动态电阻应变仪组成力的量测系统。

2.1.3 信号处理系统

信号处理系统是将测量系统的输出信号做进一步处理以便排除干扰。如智能测试系统中需要设置智能滤波软件,以便排除测量系统中的干扰和偶然波动,提高所获得信号的置信度。对模拟电路,则要专用的仪器或电路(如滤波器)来达到这些目的。回想一下在做物理实验时,波的干涉实验就是通过偏正片来排除其他波的影响的。信号处理系统就是测试系统的优化师。

2.1.4 显示和记录系统

显示和记录系统是测试系统的输出环节,它是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来实现,数据记录可以采用记录仪、光式示波器等设备来实现,智能测试系统中以微机、打印机和绘图仪等作为显示记录设备。

在测试系统中,测试过程的全部或大部分操作调试计算机等工作是由测试人员直接参与并取得结果的测试系统称为人工测试系统,这是传统的测试方法。目前,尤其是在地下工程现场测试中,它仍然是被较多采用的测试手段。在自动测试系统中,所有仪器及设备都与计算机联机工作,具有程控输入和编码输出的功能,测试过程不用人工参与。

2.2 测试系统的基本原理与传递特性

2.2.1 概述

测试系统的任务是感受被测的物理量(力、位移、变形等)并将其转换为可以理解或量化的输出形式。一个特定的系统无论是否适合测量某些输入信号,其总是对输入作出响应(输出)。一般的测试系统都可以用一个模型(微分方程、传递函数等)来描述,这种表示测量系统输入与输出对应关系性能的模型特性称为传递特性。了解测量系统的传

递特性对于提高测量的精确性和正确选用系统或校准系统特性是十分重要的。对不随时间变化（或变化很慢而可以忽略）的量的测量叫静态测量，对随时间变化的量的测量叫动态测量。与此对应，测量系统的传递特性分为静态传递特性和动态传递特性。描述测试系统静态测量时的输入与输出关系的模型特性称为测试系统的静态传递特性。描述动态测试系统的模型特性称为动态传递特性。作为静态测量的系统。可以不考虑动态传递特性，而作为动态测试系统，既要考虑动态传递特性，又要考虑静态传递特性。因为测试系统的精度很大程度上与其静态传递特性有关，所以在此主要介绍静态传递特性。有关动态传递特性的内容参考有关书籍。

2.2.2 测试系统的静态传递特性

2.2.2.1 测试系统与线性系统

一个理想的测试系统，应该具有确定的输入与输出关系，其中以输入和输出呈线性关系为最佳，即理想的测试系统应当是一个线性系统。用模型来描述一个测试系统时，测试系统与其输入、输出之间的关系可以用图 2.2 表示，其中 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示输入与输出， $h(t)$ 表示系统的传递特性。 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $h(t)$ 是三个彼此具有确定关系的量，已知其中任意两个量时，即可求第三个量，这便构成了地下工程测试中需要解决的实际问题：①输入和输出能观测，推断系统的传递特性；②输入能观测，系统的传递特性已知，推断输出；③输出能观测，系统的传递特性已知，推断输入。



图 2.2 测试系统与其输入、输出之间的关系

2.2.2.2 静态方程和标定曲线

当测试系统处于静态测量时，输入量 x 和输出量 y 不随时间而变化，因而输入和输出的各阶导数等于零，其关系式为

$$y = \frac{a_0}{b_0} x = kx \quad (2.1)$$

上式称为系统的静态传递方程，简称静态方程，斜率 k （称标定因子）是常数。表示静态方程的图形称为测试系统的标定曲线（又称特性曲线、率定曲线）。在直角坐标系中，习惯上以标定曲线的横坐标为输入量 x ，纵坐标为输出量 y 。图 2.3 是几种标定曲线及其相应的曲线方程。图 2.3 (a) 的输出和输入呈线性关系，是理想状态，而其余的三条曲线则可看成是线性关系上叠加了非线性的高次分量。

标定曲线是反映测试系统输入 x 和输出 y 之间关系的曲线，一般情况下，实际的输入、输出关系曲线并不完全符合理论所要求的理想线性关系。所以，定期标定测试系统的标定曲线是保证测试结果精确可靠的必要措施。对于重要的测试，在进行测试前后都要对测试系统进行标定，当前后标定结果的误差在容许的范围内时，才能确定测试结果有效。

求取静态标定曲线，通常以标准量作为输入信号并测量出对应的输出，将输入与输出数据描在坐标纸上的相应点上，再用统计法求出一条输入与输出曲线，标准量的精度应较被标定系统的精度高一个数量级。

2.2.2.3 测试系统的主要静态特性参数

根据标定曲线便可以分析系统的静态特性。衡量测试系统静态特性的主要技术指标有

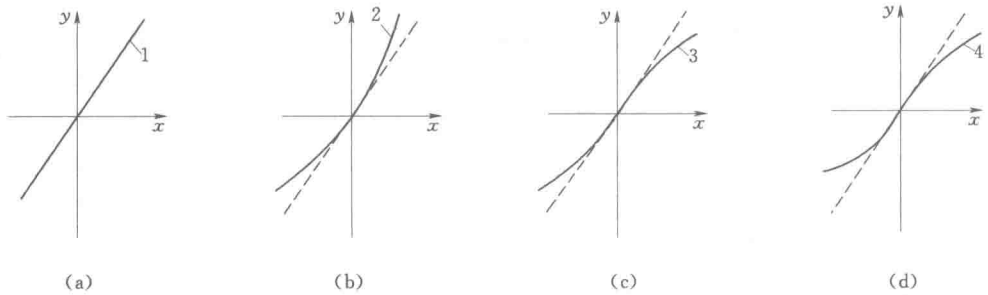


图 2.3 标定曲线的种类

1—曲线方程: $y=a_0x$; 2—曲线方程: $y=a_0x+a_1x^2+a_3x^4$; 3—曲线方程:
 $y=a_0x+a_2x^3+a_4x^5$; 4—曲线方程: $y=a_0x+a_1x^2+a_2x^3+a_3x^4$

灵敏度、线性度、回程误差、重复性等。

灵敏度是稳态时传感器输出值 y 和输入值 x 之比, 或输出值 y 的增量与输入值 x 的增量之比。

线性度(直线度)指理想传感器的输出值与输入值呈线性关系。传感器的输出-输入校准曲线与理论拟合直线之间的最大偏差与传感器满量程输出之比称为该传感器的线性度或非线性误差。

回程误差是输入值逐渐增加到某一值与输入值逐渐减小到同一输入值时的输出值不相等现象, 也称迟滞。用迟滞差表示不相等的程度。迟滞差为同一输入值所得到的两个输出值之间的最大差值与量程的比值的百分率。

重复性指传感器在同一条件下, 被测输入值按同一方向作全量程连续多次重复测量时, 所输出值-输入值曲线的不一致程度。

量程(测量范围)指在允许差限内, 被测量值的下限到上限之间的范围。

分辨力为传感器能检测到的最小输入增量。

2.3 测试系统的误差分析和测试系统的选择

2.3.1 测试系统误差

被测对象某参数的量值的真实大小是客观存在的, 由于使用的仪器设备、测量方法、周围环境、人的因素等条件的限制, 测量值与真值之间存在差值, 该差值称为测量误差。在测量过程中它是不可避免的, 但是可以通过分析误差的来源、研究误差的规律来减小误差, 提高精度, 并且用科学的方法处理试验数据, 以达到更接近于真值的最佳效果。误差分为随机误差、系统误差和粗大误差三类。

1. 随机误差

随机误差的产生是随机的, 没有确定的规律性, 也可以说带有偶然性。随机误差就个体而言, 从单次测量结果来看是没有规律的, 但就其总体来说, 其数值变化规律服从一定的统计规律。因此, 随机误差的度量可用标准偏差, 随着对同一量的测量次数的增加, 标准偏差的值变得更小, 从而使该物理量的值更为可靠。