



高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材

总主编 何若全

# 岩土工程测试技术

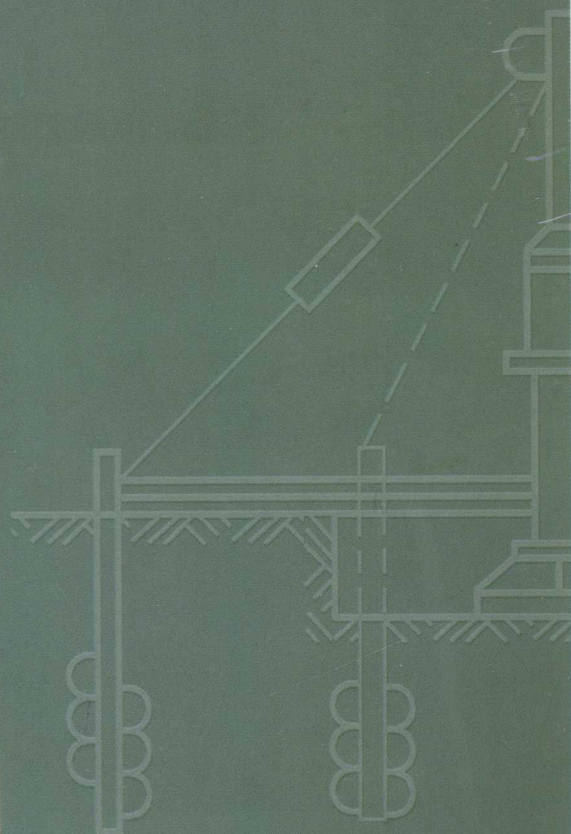
YANTU GONGCHENG  
CESHI JISHU

主 编 刘尧军  
副主编 叶朝良  
主 审 张明聚



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>



013048059

TU4-43

41



高等学校土木工程本科指导性专业规

总主编 何若全

# 岩土工程测试技术

YANTU GONGCHENG  
CESHI JISHU

主 编 刘尧军  
副主编 叶朝良  
主 审 张明聚



TU4-K3

41

重庆大学出版社



北航

C1655395

01308020

## 内 容 提 要

本书是《高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材》之一。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;重点介绍岩土工程现场监测和检测技术,涵盖岩土原位测试、基桩检测、边坡工程施工监测、基坑工程施工监测、地下洞室围岩和支护系统施工监测、地质雷达技术及其在隧道工程中的应用、隧道地质超前预报等内容。本书在介绍相关测试理论和测试方法后,均给出了工程实例,实用性较强。

本书可作为土木工程专业相关方向岩土工程测试技术课程的本科教材,也可作为市政工程、地质工程、采矿工程、工程力学等专业本科、研究生相关课程的参考教材;还可作为从事土木工程、市政工程、地质工程、采矿工程等专业领域相关科技人员的技术参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩土工程测试技术/刘尧军主编. —重庆:重庆大学出版社,2013.5

高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材  
ISBN 978-7-5624-7171-4

I. ①岩… II. ①刘… 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(2013)第 000354 号

高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材

### 岩土工程测试技术

主 编 刘尧军

副主编 叶朝良

主 审 张明聚

责任编辑:张 婷 版式设计:张 婷

责任校对:陈 力 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617183 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆现代彩色书报印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:356千

2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷

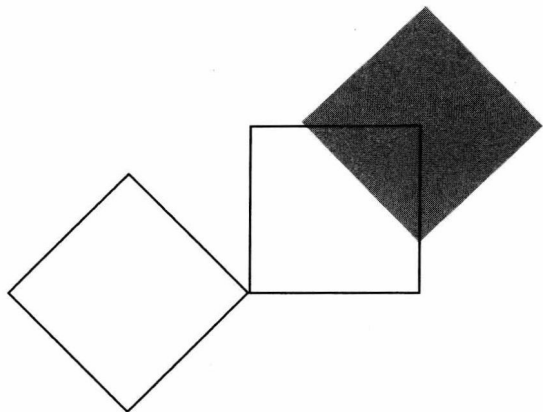
印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-7171-4 定价:26.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

**版权所有,请勿擅自翻印和用本书**

**制作各类出版物及配套用书,违者必究**



# 编委会名单

总主编：何若全

副总主编：杜彦良 邹超英 桂国庆 张永兴

编委（按姓氏笔画为序）：

卜建清	王广俊	王连俊	王社良
王建廷	王雪松	王慧东	仇文革
文国治	龙天渝	代国忠	华建民
向中富	刘凡	刘建	刘东燕
刘尧军	刘俊卿	刘新荣	刘曙光
许金良	孙俊	苏小卒	李宇峙
李建林	汪仁和	宋宗宇	张川
张忠苗	范存新	易思蓉	罗强
周志祥	郑廷银	孟丽军	柳炳康
段树金	施惠生	姜玉松	姚刚
袁建新	高亮	黄林青	崔艳梅
梁波	梁兴文	董军	覃辉
樊江	魏庆朝		

# 总 序

进入 21 世纪的第二个十年,土木工程专业教育的背景发生了很大的变化。“国家中长期教育改革和发展规划纲要”正式启动,中国工程院和国家教育部倡导的“卓越工程师教育培养计划”开始实施,这些都为高等工程教育的改革指明了方向。截至 2010 年底,我国已有 300 多所大学开设土木工程专业,在校生达 30 多万人,这无疑是世界上该专业在校大学生最多的国家。如何培养面向产业、面向世界、面向未来的合格工程师,是土木工程界一直在思考的问题。

由住房和城乡建设部土建学科教学指导委员会下达的重点课题“高等学校土木工程本科指导性专业规范”的研制,是落实国家工程教育改革战略的一次尝试。“专业规范”为土木工程本科教育提供了一个重要的指导性文件。

由“高等学校土木工程本科指导性专业规范”研制项目负责人何若全教授担任总主编,重庆大学出版社出版的《高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材》力求体现“专业规范”的原则和主要精神,按照土木工程专业本科期间有关知识、能力、素质的要求设计了各教材的内容,同时对大学生增强工程意识、提高实践能力和培养创新精神做了许多有意义的尝试。这套教材的主要特色体现在以下方面:

(1) 系列教材的内容覆盖了“专业规范”要求的所有核心知识点,并且教材之间尽量避免了知识的重复;

(2) 系列教材更加贴近工程实际,满足培养应用型人才对知识和动手能力的要求,符合工程教育改革的方向;

(3) 教材主编们大多具有较为丰富的工程实践能力,他们力图通过教材这个重要手段实现“基于问题、基于项目、基于案例”的研究型学习方式。

据悉,本系列教材编委会的部分成员参加了“专业规范”的研究工作,而大部分成员曾为“专业规范”的研制提供了丰富的背景资料。我相信,这套教材的出版将为“专业规范”的推广实施,为土木工程教育事业的健康发展起到积极的作用!

中国工程院院士 哈尔滨工业大学教授

沈世钊

# 前 言

随着我国城市建设和交通事业的迅速发展,地铁工程、深基坑工程、公路和铁路隧道工程日益增多,岩土工程测试技术也得到了快速发展,它不仅在岩土工程建设实践中十分重要,而且在岩土工程理论的形成和发展过程中也起着决定性的作用。岩土工程测试作为一门工程实践性很强的学科,测试的方法和监测的要求必须和实践相结合,不断融入最新科研成果和经验,为岩土工程的设计和施工服务。岩土工程的测试、检测与监测是从事岩土工程勘察、设计、施工和监理的工作者所必需的基本知识,同时也是从事岩土工程理论研究所必须具备的基本手段。因此,对土木工程专业学生而言,岩土工程检测和测试技术是一门必须掌握的专业基础课程。

本书是《高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材》之一,强调理论与实践相结合,目的就是使地下工程专业方向的学生在熟悉和掌握岩土工程测试基本原理的基础上提高测试技能,具备制订试验监测方案、选择预测方法、分析测试结果和编写报告的能力。在本书编写过程中,编者特别注重从实用方面出发,将相关理论与现代新技术、新方法相结合,并尽可能地吸收国内外在该领域的最新成果,引导学生掌握理论知识,着重培养其解决实际工程技术问题的能力。

本书主要根据岩土工程施工所涉及的内容编写而成,系统地介绍了岩土工程测试的基础知识、岩土原位测试、基桩检测、边坡工程施工监测、基坑工程施工监测、地下洞室围岩和支护系统施工监测、地质雷达技术及在隧道工程中的应用、隧道地质超前预报等内容。

本书的编写人员都具有丰富的现场工作经验和教学经验,具体参加编写的有石家庄铁道大学刘尧军(第1、7章),石家庄铁道大学于跃勋(第2章),石家庄铁道大学叶朝良(第3、4章),石家庄铁道大学高新强(第5、6章)、石家庄铁道大学刘秀峰(第8章)。本书由刘尧军教授任主编,叶朝良任副主编,北京工业大学张明聚教授任主审,刘尧军负责统稿和审定。在编写过程中,编者参考和引用了大量文献和有关资料,在此对其原作者深表谢意。

由于水平有限,本书难免有错误和不足之处,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2012年8月

# 目 录

1	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	岩土工程测试的作用	2
1.3	岩土工程测试的内容	2
1.4	岩土工程测试技术发展现状	3
1.5	本课程学习的目的	4
	本章小结	4
	思考题	5
2	测试技术的基础知识	6
2.1	概述	6
2.2	测试系统的组成和特性	7
2.3	测试系统的静态传递特性	10
2.4	传感器原理	13
2.5	测试系统选择的原则与标定	21
2.6	计算机辅助测试系统基本原理及其特点	24
2.7	误差与数据处理	26
	本章小结	34
	思考题	35
3	土体原位测试	36
3.1	概述	36
3.2	静载荷试验	37
3.3	静力触探试验	43
3.4	圆锥动力触探和标准贯入试验	52
3.5	基桩检测方法简介	61
	本章小结	74
	思考题	74
4	边坡工程施工监测	75
4.1	概述	75
4.2	边坡的变形监测	78
4.3	边坡应力监测	84
4.4	边坡地下水监测	89
4.5	边坡监测实例及报告编写	90
	本章小结	97
	思考题	97

5	基坑工程施工监测 .....	98
5.1	概述 .....	98
5.2	监测仪器和方法 .....	101
5.3	监测方案设计 .....	118
5.4	监测实例与监测报告 .....	127
	本章小结 .....	131
	思考题 .....	132
6	地下洞室围岩和支护系统施工监测 .....	133
6.1	概述 .....	133
6.2	地下洞室监测目的与项目 .....	135
6.3	现场量测计划 .....	137
6.4	地下洞室监控量测方法 .....	141
6.5	量测数据处理与反馈 .....	153
6.6	地下洞室监测实例与监测报告 .....	156
	本章小结 .....	162
	思考题 .....	162
7	地质雷达检测技术 .....	163
7.1	概述 .....	163
7.2	地质雷达探测原理 .....	166
7.3	地质雷达现场工作设计 .....	167
7.4	雷达资料数字处理与地质解释 .....	172
7.5	地质雷达在隧道工程中的应用 .....	175
7.6	隧道衬砌检测与探测的典型图像 .....	180
7.7	隧道检测实例与检测报告 .....	185
	本章小结 .....	187
	思考题 .....	187
8	隧道地质超前预报 .....	188
8.1	概述 .....	188
8.2	隧道地质超前预报的方法 .....	192
8.3	地震反射波法地质超前预报技术 .....	193
8.4	红外探测地质超前预报技术 .....	205
8.5	地下全空间瞬变电磁地质超前预报技术 .....	207
8.6	声波探测地质超前预报技术 .....	209
8.7	地质雷达超前预报技术 .....	210
8.8	石太客运专线南梁隧道地质超前预报应用实例 .....	212
	本章小结 .....	216
	思考题 .....	216
	参考文献 .....	217





# 绪论

## 本章导读：

概述岩土工程测试技术的内容及其在岩土工程中的重要作用,简述岩土工程测试技术的发展现状,并提出有待进一步研究的几方面内容。

- **基本要求** 了解岩土工程测试的作用、内容和发展现状。
- **重点** 岩土工程测试的作用和内容。
- **难点** 岩土工程测试需要进一步研究内容。

## 1.1 概述

岩土工程是土木工程的分支,是运用工程地质学、土力学、岩石力学解决各类工程中关于岩石、土的工程技术问题的科学。其内容包括:岩土工程勘察、岩土工程设计、岩土工程治理、岩土工程监测、岩土工程检测等。

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指标的试验工作,理论分析、室内外测试和工程实践是岩土工程分析三个重要方面。它不仅在岩土工程建设实践中十分重要,而且在岩土工程理论的形成和发展过程中也起着决定性的作用。岩土工程中的许多理论是建立在试验基础上的,如 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,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粘土和微超固结粘土压缩试验和等向三轴压缩试验基础上的。此外,测试技术也是保证岩土工程设计的合理性和保证施工质量的重要手段。

岩土工程测试技术包括室内试验技术、原位测试试验技术和现场监测技术 3 个方面。室内试验的土工试验和原位试验技术在本系列教材中的《土力学与基础工程》中讲述,岩石的室内试验和原位试验技术在本系列教材中的《岩石力学》中讲述,本教材主要讲述岩土工程的现场测试技术。

## 1.2 岩土工程测试的作用

随着生产的发展,岩土工程的发展也日新月异,如工程结构趋向高、深、大,岩土工程测试技术是从根本上保证岩土工程勘察、设计、治理、监理、施工的准确性、可靠性以及经济合理性的重要手段,其作用主要体现在以下几个方面:

①岩土工程测试是岩土工程理论分析的基础,推动岩土工程理论的形成和发展。

②岩土工程测试保证岩土工程设计合理可行。通过现场监测与测试,利用反演分析的方法,求出能使理论分析与实测基本一致的工程参数,保证工程设计的可靠性和经济性。

③岩土工程测试是岩土工程信息化施工的保障。通过现场测试随时调整施工进度、施工工序与设计参数等,保障岩土工程施工安全。

④岩土工程测试是保证大型岩土工程长期安全运行的重要手段。通过对岩土工程在运营期间结构变形、应力、温度、沉降等方面的长期监测,评价结构的稳定性,保证运营安全。

## 1.3 岩土工程测试的内容

岩土工程测试技术包括室内试验技术、原位测试技术和现场监测技术三个方面,在整个岩土工程中占有特殊而重要的地位。

### 1.3.1 室内试验

目前,室内试验主要包括土的物理力学指标室内试验、岩石物理力学指标室内试验、模型试验和数值仿真试验。其相关内容将由专门的课程进行讲授,本节只作简单介绍。

#### (1) 室内土工试验

室内土工试验大致可分为观察判别试验、物理性质试验、化学性质试验和力学性质试验等。

#### (2) 室内岩石试验

室内岩石试验包括岩石物理指标测试、岩石常规力学指标测试、岩石变形与破坏机理等方面的分析研究。

#### (3) 模型试验

模型试验采用相似理论,用与岩土工程原型力学性质相似的材料按照相似原理制作室内模型,利用室内模型模拟现场实际工况,研究岩土工程的变形和破坏等方面的机理。这方面的理论和试验一般在研究生课程《相似材料与模型试验》中讲解。

#### (4) 数值仿真试验

数值仿真试验利用计算机进行岩土工程问题的研究,可模拟大型岩土工程、模拟复杂边界条件,具有成本低、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、有限差分法、不连续变形法、颗粒流法、流形单元法、无单元法等,其计算模拟一般采用大型商用软件,这方面的知识一般在研究生课程中讲解。

### 1.3.2 岩土的原位测试技术

原位测试是在岩土工程施工现场,在基本保持被测试岩土体的结构、含水量以及应力状态不变的条件下测定其基本物理力学性能。原位测试结果可以直接反映岩土体的物理力学状态,更接近工程实践的实际情况。岩土原位测试又可以分为两种:一种是为获取设计参数的原位测试试验;另一种是为施工控制和反演分析提供参数的原位检测。原位测试技术,主要包括标准贯入试验、静力触探试验、静载荷试验、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、基桩高应变测试、基桩低应变测试、变形观测、水土压力测试等内容。在上述内容中,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方面将会成为研究的重点。

土体原位测试试验主要在本系列教材的《土力学与基础工程》中讲解,岩体原位测试试验主要在本系列教材的《岩石力学》中讲解。

### 1.3.3 现场监测技术

现场监测技术是以实际工程作为对象,在施工期间及工后对整个岩土体和结构以及周围环境,按其设计的测点和测试频率进行应力、变形等内容的现场监测。现场监测技术涉及众多领域,主要有铁路、公路、水电、矿山、港口、地下空间开发与利用等。现场监测按监测时间可分为施工期监测和运营期(工后)监测;按监测的建筑物类型可分为大坝监测、地下洞室监测、基坑监测、边坡监测。本教材将介绍地下洞室监测、基坑监测和边坡监测。

## 1.4 岩土工程测试技术发展现状

### 1.4.1 发展现状

近年来,随着科技的发展以及设计、施工、监理等各部门对现场测试的重视,岩土工程测试技术得到了快速的发展,主要表现在以下几个方面:

#### (1) 新仪器新方法的开发

岩土工程测试技术与现代科技结合,一些传统测试方法得以更新。如近年来高精度的全站仪和隧道断面仪广泛应用于隧道围岩收敛量测,相对于收敛计量测提高了监测效率并可进行三维位移监测;光纤光栅传感器应用于岩土工程的应力、应变和变形测试,提高了测试精度等。

#### (2) 自动监测系统

实时自动监测、远程数据传输、可视化技术、地理信息系统(GIS)等目前已经在大型边坡安全监测、基坑施工、隧道施工、沉降监测等方面得到成功应用,推动了岩土测试技术的发展。

#### (3) 工程地球物理探测

利用各种物探原理(弹性波、声波、电磁波、应力波等)开发的一系列性能很强的专用仪器,如波速仪、探地雷达、TSP地质预报系统、红外探水仪、管线探测仪、瞬变电磁仪等,这些专用仪

器探测精度高、抗干扰能力强,将是岩土工程测试发展的一个重要方向。

#### (4) 数据处理与反馈技术

数据处理中多种数据处理技术(人工智能技术、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)的应用以及岩土工程领域相应大型商用计算机软件的开发,为岩土工程信息化施工和反分析研究提供了保障,推动了岩土工程施工监测信息管理、预测预报系统的发展。

#### (5) 第三方监测和检测的推广和认可

目前许多岩土工程施工普遍引入具有资质的第三方监测和检测机构,其测试结果具有公证效力,有效地避免了施工过程中可能发生的事故。同时,测试结果和监测资料有助于确定引发工程事故的原因和责任。

### 1.4.2 需要进一步研究的内容

①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方面将会成为研究的重点。随着总体测试技术的进步,这些传统的难点将会取得突破性进展。

②虚拟测试技术将会在岩土工程测试技术中得到广泛的应用。如电子计算机技术,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,遥感测试技术等方面的新的进展都将推动岩土工程领域的测试技术发展,令测试结果的可靠性、可重复性得到很大的提高。

③监测仪器和精密传感器国产化。目前国产的岩土工程现场监测仪器和传感器的信息化程度较低、稳定性与国外同类产品尚有一定的差距,急需对先进的国外监测仪器制造技术进行分析研究,提高国产化率,降低监测仪器的成本。

④岩土工程施工自动监测、预测预报系统的开发应用,其目的是提高监测的实时性和可靠性,同时降低系统成本,便于推广应用。

⑤加强第三方监测的规范管理,制定相应的法律法规,从而全面提高岩土工程监测和检测水平。

## 1.5 本课程学习的目的

岩土工程测试是从事岩土工程工作人员必须掌握的基本知识,同时也是从事岩土工程理论研究所必须掌握的基本手段。岩土工程测试的内容较多,其中一些知识已在一些课程中进行了介绍,本书仅介绍现场监测和检测方面的内容。通过课程学习,熟悉掌握岩土工程测试原理和技术,提高测试技能和试验研究能力,增强试验设计和监测方案制订的实际动手能力,达到培养实用型人才的目的。

## 本章小结

本章介绍了岩土工程和岩土工程测试技术的内容,对岩土工程测试的作用、岩土工程测试

技术发展现状和需要进一步研究的内容进行了总结。通过本章学习,学生可以了解本课程的教学内容和学习目的。

## 思考题

- 1.1 简述岩土工程测试的作用。
- 1.2 岩土工程测试的主要内容有哪些?
- 1.3 查阅相关资料,简述岩土工程测试未来的重点发展方向。



# 2

## 测试技术的基础知识

### 本章导读:

简要介绍了测试系统的组成及其静态传递特性、计算机辅助测试系统的基本原理、测量误差及试验数据处理方法等内容,在此基础上,重点介绍了常用传感器的原理、测试系统的选择原则和标定方法。

- **基本要求** 掌握测试系统的组成和静态传递特性;掌握常用传感器工作原理;掌握测试系统选择原则和传感器的标定方法;了解计算机辅助测试系统的基本原理;掌握测量数据处理方法。

- **重点** 测试系统的静态传递特性;常用传感器工作原理;测试系统及传感器的选择原则;试验数据处理方法。

- **难点** 传感器的选择和标定。

### 2.1 概 述

测试技术是测量技术和试验技术的总称。

测试技术的发展与生产和科学技术的发展是紧密相关的,它们互相依赖、相互促进。现代科技的发展不断地向测试技术提出新的要求,推动了测试技术的研发,测试技术迅速汲取各个科技领域(如材料科学、微电子学、计算机科学等)的新成果,开发出新的测试方法和先进的测试仪器,同时又给科学研究提供了更先进的手段。

在大型岩土工程建设中,由于工程的复杂性,许多问题往往难以通过完善的理论分析和计算分析的方法来检验,而需要通过试验研究来解决。且随着人们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。

现代测试技术的发展方向主要有以下4个方面:

- ①量程范围更加宽广;
- ②传感器向新型、微型、智能型发展;
- ③测量仪器向高精度和多功能方向发展;
- ④参数测量与数据处理向自动化发展。

只有对测试系统有完整的了解,才能按照实际需要设计或配置出有效的测试系统,以达到实际测试目的。按照信号传递方式来分,常用的测试系统可分为模拟式测试系统和数字式测试系统。

## 2.2 测试系统的组成和特性

### 2.2.1 测试系统的组成

随着现代科学技术的迅速发展,非电物理量的测试与控制技术,已广泛地应用于岩土与岩土工程试验中。非电量的电测系统是最常用的测试系统。对于一个实际的测试系统,它可能由一个或若干个功能单元组成。一个完善的测试系统由试验装置、测量装置、数据处理装置、显示记录装置四大部分组成,图2.1即为典型的测试系统。但因测试目的、要求的不同,测试系统的实际组成差别很大,并非必须包含以上4个部分,可繁可简。

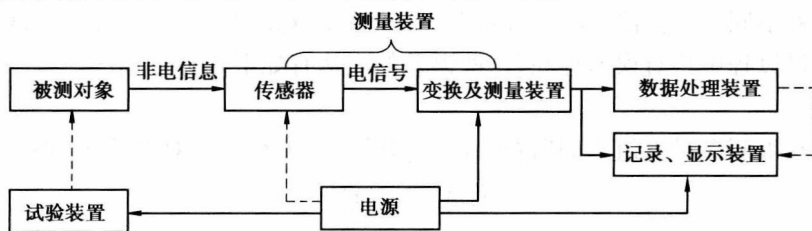


图 2.1 测试系统的组成

#### 1) 试验装置

试验装置是使被测对象处于预定状态下,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。例如,测定岩石及结构面力学性质的直剪试验系统装置,由直剪试验架、液压控制系统组成,液压泵提供施加到试件上的荷载,液压控制系统则使荷载按一定速率平稳地施加,并在需要时保持其恒定,从而使试件处于一定法向应力水平下进行剪切试验。

#### 2) 测量装置

测量装置由传感器和测量电路组成,它可把被测量(如力、位移)通过传感器变成电信号,经过后接仪器的变换、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的关键环节,它的作用是将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。测量装置就是根据不同的被测参量,选用不同的传感器和后接仪器组成的测量环节。不同的传感器要求与其相匹配的后接仪器也不同。

### 3) 信号处理装置

信号处理系统是将测量系统输出的信号进一步进行处理以排除干扰,并清楚地估计测量数据的可靠程度,提高所获得信号(或数据)的置信度。计算机中需设计智能滤波等软件,以排除测量系统中的噪声干扰和偶然波动,以提高所获得信号的置信度。对模拟电路则要用专门的仪器或电路,如滤波器等。亦可通过信号处理系统来输出不同的物理量,如对位移量的一次微分得到速度,二次微分得到加速度。

### 4) 显示和记录装置

显示和记录装置是测试系统的输出环节,它是将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,而数据记录则可采用计算机、函数记录仪、光线示波器、磁盘等设备来实现。

## 2.2.2 测试系统的主要性能指标

测试系统的主要性能指标有精确度、稳定性、测量范围(量程)、分辨力阈值和传递特性等。测试系统的主要性能指标是经济合理选择测试系统时必须参考的指标。

### 1) 测试系统的精度和误差

测试系统的精度是指测试系统给出的指示值和被测量的真值的接近程度。精度与误差是同一概念的不同表示方法。通常,测试系统的精度越高,其误差越小;反之,精度越低,则误差越大。在测量过程中均有误差存在,这些误差的表达有如下几种形式:

#### (1) 绝对误差

测量结果与被测参量真值之间所存在的差值的绝对值称为绝对误差  $\delta$ ,即:

$$\delta = |X - Q| \quad (2.1)$$

式中  $X$ ——被测参量的测量值;

$Q$ ——被测参量的真值。

测量的绝对误差,反映了测量的精度,绝对误差越大,测量精度越低。绝对误差只能评估同一被测值的测量精度,对于不同量值的测量,它就难以判断其精度了。

#### (2) 相对误差

测量的绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差  $\varepsilon$ ,通常以百分数表示,即:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{Q} \times 100\% \quad (2.2)$$

相对误差可用来评价同一仪器不同被测值的精度,例如测量 100 mm 与测量 10 mm 的尺寸,如果其绝对误差都是 0.01 mm,则测量 100 mm 的精度比测量 10 mm 的精度高得多。

但是,相对误差不能用来比较不同仪表的精度,或不能用来衡量同一仪表在不同量程时的精度。因为同一仪表在整个量程内,其相对误差是一个变值,随着被测量量程的减少,相对误差增大,而精度随之降低。当被测值接近量程起始零点时,相对误差趋于无限大。

#### (3) 引用误差

测量的绝对误差与仪表的满量程之比称为引用误差  $\gamma_m$ ,它常以百分数表示,即:



$$\gamma_m = \frac{\delta}{y_{FS}} \times 100\% \quad (2.3)$$

这一指标通常用来表征仪器自身的精度,而不是测量的精度,所以式中的 $\delta$ 采用的是最大允许误差。实际中,常以引用误差来划分仪表的精度等级,可以较全面地衡量测量精度。

## 2) 稳定性

稳定性又称长期稳定性,即测试系统在相当长的时间内保持其原性能的能力。衡量仪器示值的稳定性有两种指标:一是时间上的稳定性,以稳定度表示;二是仪器外部环境和条件变化所引起的示值不稳定性,以各种影响系数表示。

### (1) 稳定度

由于仪器中随机性变动、周期性变动、漂移等会引起稳定度的示值变化。稳定度一般用精密度的数值和时间长短同时表示。例如,每8 h内引起电压的波动为1.3 mV,则写成稳定度为 $\delta_s = 1.3 \text{ mV}/8 \text{ h}$ 。

### (2) 环境影响

仪器工作场所的环境条件,诸如室温、大气压、振动等外部状态以及电源电压、频率和腐蚀气体等因素对仪器精度的影响,统称环境影响,用影响系数表示。例如,周围介质温度变化所引起的示值变化,可以用温度系数 $\beta_t$ (示值变化/温度变化)来表示;电源电压变化所引起的示值变化,可以用电源电压系数 $\beta_u$ (示值变化/电压变化率)来表示。如 $\beta_u = 0.02 \text{ mA}/10\%$ ,表示电压每变化10%引起示值变化0.02 mA。

## 3) 测量范围(量程)

系统所能测量的最大被测量(即输入量)的数值称为测量上限,所能测量的最小的被测量则称为测量下限;而用测量下限和测量上限表示的测量区间,则称为测量范围。在动态测量时,还需同时考虑仪器的工作频率范围。

测量范围有单向(只有正向或负向)、双向对称、双向不对称和无零值的几种。测量上限和测量下限的代数差值为量程。

## 4) 分辨力与阈值

分辨力是指系统在规定测量范围内所能够检测到的被测输入量的最小变化值。有时对该值用相对满量程输入值的百分数表示,则称为分辨率。

阈值是能使测试系统的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值,即零点附近的分辨能力。有的测试系统在零点附近有严重的非线性情况,形成所谓“死区”,则将死区大小作为阈值;更多情况下阈值主要取决于测试系统中传感器噪声的大小。

若某一位移测试系统的分辨率是 $0.5 \mu\text{m}$ ,则当被测的位移小于 $0.5 \mu\text{m}$ 时,该位移测试系统将没有反应。通常要求测定仪器在零点和90%满量程点的分辨率,且分辨率的数值越小越好。

## 5) 传递特性

传递特性是表示测量系统输入与输出对应关系的性能。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)的量的测量叫做静态测量;对随时间而变化的