

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

岩土工程测试技术

(第2版)

Y T G C C S J S

任建喜 主 编
年廷凯 赵 毅 副主编



UTP

武汉理工大学出版社

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审定

岩土工程测试技术

(第2版)

主 编 任建喜
副主编 年廷凯 赵 毅
参 编 邳 彬 朱 彬

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

【内 容 提 要】

本书是土木工程专业地下工程方向系列教材之一。本书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发展现状,给出了岩土工程测试技术中常用传感器的原理和使用方法。本书重点介绍岩土工程现场监测和检测技术,内容有边坡工程监测技术、软土地基(路基)监测技术、桩基测试技术、城市地铁区间隧道盾构施工监测技术、基坑工程监测技术、地下隧洞矿山巷道施工监测技术、地下工程无损检测技术与声发射技术等内容。本书在介绍了相关测试理论后,给出了工程实例,便于学生学习,每章后的思考题可用于巩固所学知识。

本书可作为土木工程专业地下工程方向、矿井建设工程方向、岩土工程方向、城市地下工程方向、隧道工程方向以及城市地下空间工程专业岩土工程测试技术课程的本科生教材,也可作为地质工程、采矿工程、工程力学等专业本科生、研究生相关课程的参考教材。

本书还可作为从事城市轨道交通工程、地下工程、公路工程、岩土工程、隧道工程、矿山工程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/任建喜主编. —2版. —武汉:武汉理工大学出版社,2015.1
ISBN 978-7-5629-4715-8

I. ①岩… II. ①任… 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(2014)第 217801 号

项目负责人:高 英

责任编辑:高 英

责任校对:梁雪姣

装帧设计:一 尘

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.techbook.com.cn>

印 刷:武汉兴和彩色印务有限公司

经 销:各地新华书店

开 本:880×1230 1/16

印 张:11.75

字 数:376 千字

版 次:2015 年 1 月第 2 版

印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数:5001—8000

定 价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

第2版前言

本书自2009年第1版出版以来,由于具有系统性强、内容全面、简洁易学、实用性强的特点而得到广大师生和企业技术人员的喜爱。岩土工程测试技术在岩土工程建设实践和岩土工程理论的形成和发展过程中起着重要作用。近年来,随着大型复杂岩土工程测试技术问题越来越多,为了保证安全施工,更好地指导测试和监测方案的制定,国家发布和更新了许多测试和监测技术规范。本着与时俱进的原则,本书作者按照新的规范,重新编写了书中的内容。为保证统一性,第2版仍按照9章进行编写,由于部分章节内容更新较多,从某种意义上说,本书第2版是一本新书。

2011年住房和城乡建设部制定了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,岩土工程测试技术是该规范推荐的地下工程方向必修的专业基础课,本书第2版参照该规范推荐的教学大纲进行编写。

本次修订中,在第1章补充了部分岩土工程测试技术的新进展。近年来,《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)和《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)开始施行,为了体现教材的新颖性,对第3、4、5章做了局部修改,包括概要性地补充新进展和更新规范。城市地铁在我国许多大城市开始建设,城市轨道交通工程施工监测得到广泛重视,2014年5月1日起,《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)开始实施,本书对照该规范,对第6、7、8章进行了全面的改写,增加了部分新内容。第2章和第9章也进行了小的修改。此外,还增加了部分章节的思考题。

作为本科教材,本书第2版仍强调理论与实践的结合,重视培养学生解决具体问题的能力,强调工程应用,在介绍相关理论后给出了工程实例,这样便于学生掌握具体工程问题测试方案的制定原则,学习测试设备的选择方法、测试方案的实施步骤以及测试结果的分析方法,提高学生的动手能力。每章后的思考题可用于巩固所学知识,提高学习效率。

作者结合所承担的科研项目取得的成果,将科研成果转化为本科教学内容,在编写过程中,注重介绍近几年来在国内工程建设中得到广泛应用并取得成功的新仪器和新技术。

本书在编写过程中参考了大量的国内外文献,由于文献众多,没有一一列出,仅在书末给出了主要参考文献的目录,在此向所有列出和没有列出的文献作者表示衷心的感谢。

本书由西安科技大学任建喜编写第1、7章,大连理工大学年廷凯编写第3、4、5章,中原工学院赵毅编写第2、9章,西安科技大学邳彬编写第6章,西安科技大学朱彬编写第8章。由任建喜任主编,年廷凯、赵毅任副主编。任建喜负责统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者

2014年7月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 岩土工程测试的意义和内容	(1)
1.1.1 岩土工程测试的意义	(1)
1.1.2 岩土工程测试的内容	(1)
1.2 岩土工程测试技术发展现状	(3)
1.2.1 发展现状	(3)
1.2.2 需要进一步研究的内容	(3)
1.3 本书的编写宗旨	(4)
思考题	(4)
2 测试技术基础知识	(5)
2.1 概述	(5)
2.1.1 测试	(5)
2.1.2 测试系统的组成	(5)
2.2 测试系统的静态传递特性	(6)
2.2.1 线性系统	(6)
2.2.2 非线性度	(6)
2.2.3 灵敏度	(7)
2.2.4 回程误差	(7)
2.3 常用传感器的类型和工作原理	(8)
2.3.1 电阻式传感器	(8)
2.3.2 电感式传感器	(13)
2.3.3 电容式传感器	(16)
2.3.4 压电式传感器	(16)
2.3.5 压磁式传感器	(18)
2.3.6 光纤传感器	(18)
2.3.7 钢弦式传感器	(22)
2.3.8 传感器的选择和标定	(22)
2.4 计算机辅助测试系统基本原理及其特点	(23)
2.4.1 基本原理	(23)
2.4.2 特点	(23)
2.5 误差与数据处理	(24)
2.5.1 测量误差	(24)
2.5.2 数据处理技术	(25)
思考题	(26)
3 边坡工程监测技术	(27)
3.1 边坡监测的目的	(27)
3.2 边坡监测的内容、方法及仪器选型	(27)
3.2.1 边坡监测的内容	(27)
3.2.2 边坡工程监测方法	(28)

3.2.3	边坡监测项目的选定及仪器的选型	(29)
3.3	边坡变形监测	(31)
3.3.1	地面变形量测	(31)
3.3.2	边坡表面裂缝量测	(32)
3.3.3	边坡岩体表面移动的观测	(33)
3.3.4	边坡深部位移和滑动面监测	(34)
3.3.5	边坡变形量测资料的处理与分析	(36)
3.4	边坡应力监测	(36)
3.4.1	边坡内部应力监测	(36)
3.4.2	岩石边坡地应力监测	(36)
3.4.3	边坡锚固应力监测	(37)
3.5	边坡地下水监测	(38)
3.5.1	地下水水位监测	(38)
3.5.2	孔隙水压力监测	(38)
3.6	全自动化遥控边坡监测工程实例	(39)
3.6.1	监测系统的构成	(39)
3.6.2	现场试验及结果分析	(40)
3.6.3	结论	(42)
	思考题	(42)
4	软土地基(路基)监测技术	(43)
4.1	软土地基(路基)监测的目的及其主要内容	(43)
4.1.1	监测的目的	(43)
4.1.2	监测的主要内容	(43)
4.2	预压法地基处理施工监测	(44)
4.2.1	预压法试验区监测	(44)
4.2.2	预压法施工区监测	(48)
4.2.3	预压法周边环境监测	(48)
4.2.4	预压法地基处理监测中的注意事项	(48)
4.3	软土路基监测	(48)
4.3.1	监测方案	(48)
4.3.2	沉降监测	(49)
4.3.3	水平位移监测	(50)
4.3.4	土中应力监测	(51)
4.3.5	监测资料的整理与分析	(52)
4.4	软土地区高速公路地基施工监测实例	(54)
4.4.1	概述	(54)
4.4.2	监测方案设计	(55)
4.4.3	监测结果分析	(56)
4.4.4	地基沉降及固结度分析	(59)
4.4.5	结论	(60)
	思考题	(61)
5	桩基测试技术	(62)
5.1	桩基检测方法及项目	(62)
5.2	桩基静力测试技术	(63)

5.2.1	基桩竖向抗压静载荷试验	(63)
5.2.2	单桩竖向抗拔静载荷试验	(67)
5.2.3	单桩水平静载荷试验	(69)
5.3	基桩动力测试技术	(73)
5.3.1	低应变动力测桩法——反射波法	(73)
5.3.2	高应变动力测桩法——锤击贯入法	(76)
5.4	混凝土管桩静动力测试工程实例	(79)
5.4.1	工程概况	(79)
5.4.2	竖向抗压静载试验结果分析	(79)
5.4.3	高应变动力检测结果分析	(81)
5.4.4	低应变动力检测结果分析	(81)
5.4.5	钻芯取样测试结果分析	(83)
5.4.6	原因分析	(84)
	思考题	(84)
6	城市地铁区间隧道盾构施工监测技术	(85)
6.1	盾构法施工地层变形理论	(85)
6.1.1	盾构法施工简介	(85)
6.1.2	盾构施工地层变形的原因	(86)
6.1.3	地层位移的特征	(87)
6.1.4	地面沉降及影响范围的预测	(87)
6.2	隧道盾构施工监测的意义和目的	(89)
6.2.1	隧道盾构施工监测的意义	(89)
6.2.2	隧道盾构施工监测的目的	(89)
6.3	工程监测的等级划分	(89)
6.3.1	工程影响分区及检测范围	(89)
6.3.2	工程自身风险等级	(90)
6.3.3	周边环境风险等级	(90)
6.3.4	地质条件复杂程度	(91)
6.3.5	工程监测等级划分	(91)
6.4	盾构隧道监测内容及项目选取	(91)
6.4.1	岩土介质和周围环境的监测	(92)
6.4.2	盾构隧道结构的监测	(92)
6.4.3	施工进程中的监测	(93)
6.4.4	监测项目的选取	(93)
6.4.5	远程视频监控	(95)
6.5	盾构隧道监测方案及监测点布置	(95)
6.5.1	监测方案的制定	(95)
6.5.2	监测工作流程	(96)
6.5.3	监测点的布置	(96)
6.5.4	监测频率的确定	(98)
6.5.5	监测项目控制值和预警	(99)
6.6	盾构邻近或穿越构造物时的保护措施	(100)
6.6.1	盾构邻近或穿越构造物时可能出现的问题	(100)
6.6.2	盾构施工影响范围的判断	(101)

6.6.3	保护对象的确定	(101)
6.6.4	保护措施	(102)
6.7	广州地铁2号线某区间隧道盾构施工监测	(103)
6.7.1	工程概况	(103)
6.7.2	沉降观测方法	(103)
6.7.3	沉降观测结果及分析	(104)
	思考题	(105)
7	基坑工程监测技术	(107)
7.1	基坑工程现场监测的意义	(107)
7.2	监测方案的制定过程及其主要内容	(107)
7.2.1	监测方案的制定步骤	(107)
7.2.2	监测方案的内容	(108)
7.3	监测项目与监测点的布置原则	(108)
7.3.1	现场监测项目的确定	(108)
7.3.2	监测点的布置原则	(109)
7.4	基坑工程的监测方法	(111)
7.4.1	墙(坡)顶水平位移监测	(111)
7.4.2	竖向位移监测	(111)
7.4.3	深层水平位移监测	(112)
7.4.4	建筑物倾斜监测	(113)
7.4.5	建筑物裂缝监测	(113)
7.4.6	支护结构的内力监测	(113)
7.4.7	土压力监测	(114)
7.4.8	孔隙水压力监测	(114)
7.4.9	地下水位监测	(114)
7.4.10	锚杆及土钉内力监测	(115)
7.4.11	坑外土体分层竖向位移监测	(115)
7.4.12	巡视检查	(115)
7.4.13	控制监测数据精度的措施	(115)
7.5	监测频率与监测警戒值	(116)
7.5.1	监测频率的确定	(116)
7.5.2	监测警戒值	(117)
7.6	监测数据处理	(119)
7.6.1	数据处理的一般原则	(119)
7.6.2	信息反馈	(119)
7.7	城市轨道交通基坑工程监测技术	(120)
7.7.1	监测内容	(120)
7.7.2	监测频率	(121)
7.8	北京某深基坑围护结构变形特性监测	(122)
7.8.1	围护结构形式	(122)
7.8.2	围护结构参数设计	(122)
7.8.3	监测方案	(123)
7.8.4	监测数据分析	(125)
7.8.5	结论	(129)

思考题	(129)
8 地下隧洞矿山巷道施工监测技术	(130)
8.1 地下隧洞新奥法施工监测	(130)
8.1.1 观测的意义、适用范围及主要内容	(130)
8.1.2 监测方案设计	(132)
8.1.3 监测数据的分析及警戒值的确定	(135)
8.2 矿山巷道锚喷支护工程施工监测	(137)
8.2.1 监测目的	(137)
8.2.2 巷道围岩表面位移观测	(137)
8.2.3 巷道围岩深部位移监测	(138)
8.2.4 顶板离层监测	(139)
8.2.5 巷道喷层质量监测	(141)
8.2.6 锚杆受力监测	(141)
8.3 矿山法施工城市地铁隧道施工监测	(142)
8.3.1 监测项目的选择	(142)
8.3.2 监测点的布设	(144)
8.3.3 监测频率	(145)
8.3.4 监测项目控制值和预警	(146)
8.3.5 监测成果及信息反馈	(146)
8.4 岩体隧道施工监测实例	(147)
8.4.1 工程概况	(147)
8.4.2 监测方案设计	(148)
8.4.3 监测结果	(148)
8.5 矿山巷道锚喷支护施工监测实例	(149)
8.5.1 工程概况	(149)
8.5.2 监测方案的制定	(149)
8.5.3 结果分析	(152)
8.6 矿山法施工城市地铁隧道施工监测实例	(153)
8.6.1 工程概况	(153)
8.6.2 监测方案的制定	(154)
8.6.3 监测结果	(156)
思考题	(157)
9 地下工程无损检测技术与声发射技术	(158)
9.1 地下工程无损检测技术基本理论简介	(158)
9.1.1 波动方程	(158)
9.1.2 波的反射与透射	(160)
9.1.3 声波测试仪器	(161)
9.2 回弹法检测结构混凝土的抗压强度	(163)
9.2.1 回弹仪	(163)
9.2.2 回弹值的测量	(164)
9.2.3 碳化深度值的测量	(166)
9.2.4 结构或构件混凝土强度的推定	(166)
9.2.5 回弹法工程案例	(167)
9.3 超声波检测结构混凝土的抗压强度	(168)

9.3.1	超声法检测结构混凝土强度的依据	(168)
9.3.2	超声波检测仪	(169)
9.3.3	混凝土声学参数测量技术	(170)
9.3.4	混凝土强度检测与推定	(170)
9.3.5	超声回弹综合法检测混凝土强度简介	(171)
9.4	声发射技术及其应用简介	(171)
9.4.1	声发射检测基本原理	(171)
9.4.2	声发射检测仪器的组成与类型	(171)
9.4.3	声发射换能器	(173)
9.4.4	声发射技术在岩体工程测试中的应用	(173)
	思考题	(174)
	参考文献	(175)

1 绪 论

本章提要

本章介绍岩土工程测试技术的意义和内容,分析岩土工程测试技术的发展现状,提出需要进一步研究的内容。

1.1 岩土工程测试的意义和内容

1.1.1 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:

(1) 岩土工程测试技术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。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测试基础上的,达西(Darcy)定律是建立在渗透试验基础上的。

(2) 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。随着经济和社会的发展,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。创新的设计方法要求测试技术要有新的发展和突破,以提高岩土体物理力学参数的测试水平,保证工程实践的精度。如基于测试结果的反分析理论可以为岩土工程加固设计提供第一手重要资料。

(3) 岩土工程测试技术是大型岩土工程信息化施工的保障,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。监测技术在边坡工程、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。

(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,如水电系统的地下厂房群、大型地下空间、城市地下铁道、大型高陡边坡、高速铁路路基、海底隧道等工程需要在运营期间进行岩土工程及其结构的变形、受力、温度、渗流状况、沉降的长期监测。

1.1.2 岩土工程测试的内容

岩土工程测试技术一般分为室内试验技术、原位测试试验技术和现场监测技术三个方面,它们各自的特点和优势,不能相互取代。本书重点介绍现场监测与检测技术的内容。

1.1.2.1 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测试试验、岩石的物理力学指标室内测试试验、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) 土的室内试验在“土力学”和“土动力学”中进行讲解,主要试验有:土的含水率试验、土的密度试验、土的颗粒分析试验、土的界限含水率试验、砂的相对密度试验、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、未冻土含水率试验、冻土导热系数试验、冻胀量试验和冻土融化压缩试验等。

(2) 岩石的室内试验在“岩石力学”中进行讲解,主要试验有:含水率试验、颗粒密度试验、块体密度试验、吸水性试验、渗透性试验、膨胀性试验、耐崩解性试验、冻融试验、岩石断裂韧度测试试验、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) 相似材料模型试验主要在“模型试验”中进行讲解。该试验采用相似理论,用与岩土工程原型力学性质相似的材料按照几何常数缩制成室内模型,在模型上模拟各种加载和开挖过程,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,主要试验有:岩土工程开挖施工过程围岩破坏规律试验、岩土工程加固机理研究、地下工程开挖引起的地表损害规律研究、岩爆机理研究、地下洞室群支护设计优化分析、离心模型试验等。

(4) 数值仿真试验主要在“有限单元法”等课程中进行讲解。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、可以模拟复杂边界条件、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、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。

1.1.2.2 原位测试试验技术

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,更接近工程实际。同时,对于某些难于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方面是研究的重点。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类。

(1) 土体的原位测试试验主要在“基础工程”中讲解。主要有: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主要在“岩石力学”中讲解。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,应引起充分重视。

1.1.2.3 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,由于信息化施工的普及,现场监测已成为保证上述工程安全施工的重要手段。岩土工程现场测试技术将在本书中详细介绍,这里仅介绍其涉及的领域和分类。

(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。按开展监测的时间可分为施工期监测和运营期监测。按监测的建筑物类型可分为: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形态的变化;效应量是建筑物对原因量变化而产生的响应。

1.2 岩土工程测试技术发展现状

1.2.1 发展现状

考虑到本书的重点是岩土工程原位测试与监测技术的介绍,因此,这里介绍岩土工程原位监测技术的发展现状。经过多年的发展,岩土工程现场监测越来越受到设计、施工、监理部门的重视,其主要进展有:

(1) 新型传感器及相关的测试系统不断出现,如采用全站仪进行表面水平位移观测,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。

(2) 大型工程的自动监测系统不断出现,如软基加固、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,基于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、预警等基础上开发的,综合了施工、监理、监测、管理等多种信息。

(3) 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。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广泛应用。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。

(4) 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。

(5) 国内很多地方对实行“第三方监测”进行了探索和实践,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。

(6) 对于如磁悬浮铁路路基工程等大型重要的岩土工程,监测不仅在施工过程中开展,而且在运营过程中也要进行,岩土工程的运营期间的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。

(7) 远程视频监控技术发展迅速。由于通信、控制及摄像技术的快速发展,对于岩土工程施工中风险较大的部位采用远程视频监控的工程越来越多。

1.2.2 需要进一步研究的内容

岩土工程的规模越来越大,要求的施工技术越来越高,现场监测成为保证安全施工的重要手段。展望未来,为了满足不断发展的岩土工程对监测技术的要求,岩土工程现场监测技术需要在以下几个方面开展进一步的研究:

(1) 目前,国产的岩土工程现场监测仪器的信息化程度较低,急需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) 发展岩土工程施工自动监测系统,提高监测的可靠性,同时应降低自动监测系统的造价,便于广泛使用。岩土工程施工监测信息系统主要以隧道、基坑和边坡工程施工监测为应用对象,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无缝集成,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。系统

功能齐全,交互灵活,无须其他应用软件系统支撑,对工程施工、设计与科学研究具有实用价值。

(3) 研制施工期监测信息预测预报系统软件。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。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。

(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。

1.3 本书的编写宗旨

考虑到岩土工程室内试验和有关的原位试验已经在相关前导课程中进行了介绍,本书重点介绍岩土工程现场监测技术。“岩土工程测试技术”是一门专业基础课,涉及的知识很多。开设本课程的目的是培养地下工程及岩土工程专业本科生的实践动手能力,通过学习,使学生可以熟练应用有关知识分析和解决岩土工程中遇到的测试问题,为岩土工程安全施工提供重要帮助。

思考题

1. 开展岩土工程测试工作有什么意义?
2. 岩土工程测试的主要内容有哪些?
3. 简述岩土工程监测技术研究的发展现状。

2 测试技术基础知识

本章提要

本章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和特点、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工作原理和适用范围。

2.1 概 述

岩土工程测试的任务是正确地掌握各种信息。大多数情况下是要求获取被测对象信息的大小,即被测测试值的大小,所以信息采集的主要含义就是测试并取得测试数据。

“测试系统”这一概念是传感器发展到一定阶段的产物。在工程中,需要有传感器与多台仪表组合在一起,才能完成信号的检测,这样便形成了测试系统。尤其是随着计算机技术及信息处理技术的发展,测试技术所涉及的内容也不断地得以充实。为了更好地掌握传感器的相关知识,需要对测试的基本概念、测试系统等方面的理论及工程方法进行系统学习和研究。

2.1.1 测试

测试是以确定量值为目的的一系列操作。所以测试也就是将被测试值与同种性质的标准量进行比较,确定被测试值对标准量的倍数。它可由下式表示:

$$x = nu \quad (2.1)$$

或

$$n = \frac{x}{u} \quad (2.2)$$

式中 x ——被测试值;

u ——标准值;

n ——比值,含有测试误差。

由测试所获得的被测的量值叫测试结果。测试结果可用一定的数值表示,也可以用一条曲线或某种图形表示。但无论其表现形式如何,测试结果均应包括两部分:比值和测试单位。确切地讲,测试结果还应包括误差部分。

被测试值和比值等都是测试过程的信息,这些信息依托于物质才能在空间和时间上进行传递。参数承载了信息而成为信号。选择其中适当的参数作为测试信号,例如热电偶温度传感器的工作参数是热电偶的电势。测试过程就是传感器从被测对象获取被测试的信息,建立起测试信号,经过变换、传输、处理,从而获得被测试的量值。

2.1.2 测试系统的组成

测试技术包括测量技术和试验技术两个方面。测试技术是通过测试系统来实现的,按照信号传递方式来分,常用的测试系统可分为模拟式和数字式两种。一个测试系统可以由一个或若干个功能单元组成。通常,测试系统应具有以下几个功能:将被测对象置于预定状态下并对其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。图 2.1 为测试系统原理结构框图。

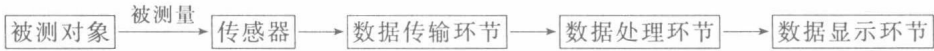


图 2.1 测试系统原理结构框图

系统中的传感器是感受被测的大小并输出相对应的可输出信号的器件或装置。

数据传输环节用来传输数据。

数据处理环节是将传感器的输出信号进行处理和变换。如对信号进行放大、运算、滤波、线性化、数模(D/A)或模数(D/A)转换,转换成另一种参数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,也可与计算机系统连接,以便对测量信号进行信息处理。

数据显示环节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,可以由记录装置进行自动记录或由打印机将数据打印出来。

2.2 测试系统的静态传递特性

传递特性是表示测试系统输入与输出对应关系的性能。了解测试系统的传递特性,才能根据测试要求达到的目标合理地选用测试仪器,构建相应的测试系统。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。与此相对应,测试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-输出函数关系的方程、图形、参数称为测试系统的静态传递特性。描述测试系统动态测量时的输入-输出函数关系的方程、图形、参数称为测试系统的动态传递特性。作为静态测量的系统,可以不考虑动态传递特性,而作为动态测量系统,则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,所以下面介绍测试系统的静态传递特性。有关动态传递特性的内容参考有关文献。

2.2.1 线性系统

一个理想的测试系统,应该具有确定的输入-输出关系,其中以输出与输入呈线性关系为最佳,即理想的测试系统应当是一个线性不变系统。因此,我们在研究线性测试系统中的任一环节(如传感器、运算电路等)都可简化为一个方框图,并用 $x(t)$ 表示输入量, $y(t)$ 表示输出量, $h(t)$ 表示系统的传递关系,则三者之间的关系可用图 2.2 表示。 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $h(t)$ 是三个具有确定关系的量,若已知其中任何两个量,即可求第三个量,这便是工程测试中常常需要处理的实际问题。



图2.2 系统、输入与输出三者之间的关系

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,输入和输出的关系如下式:

$$y = \frac{a_0}{b_0}x = kx \tag{2.3}$$

上式称为系统的静态传递特性方程(简称静态方程),斜率 $k = \frac{a_0}{b_0}$ 是常数。

但实际的测试系统并非理想的线性不变系统,二者之间存在差别。测试系统的静态特性就是在静态测量情况下描述实际测量系统与理想线性不变系统的接近程度,所以常用灵敏度、非线性度和回程误差等主要定量指标来表征实际的测试系统的静态特性。

2.2.2 非线性度

非线性度是指测试系统的输出、输入保持常值线性比例关系的一种度量。在静态测量中,通常用实验的办法获取系统的输入-输出关系曲线,并称之为“定度(标定)曲线”。由定度曲线采用拟合方法得到的输入-输出之间的线性关系称为“拟合直线”。非线性度就是定度曲线偏离其拟合直线的程度,如图 2.3 所

示。作为静态特性参数,非线性度是采用在测试系统的标称输出范围(全量程) A 内,定度曲线与该拟合直线的最大偏差 B 与 A 的百分比,即:

$$\text{非线性度} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (2.4)$$

拟合直线的确定,目前国内外尚无统一的标准,常用的是端基直线和独立直线。端基直线是指连接测量范围上、下限点的直线,如图 2.4 所示。使用端基直线代替输入-输出曲线,其求解过程比较简单,但其非线性度较差。独立直线是指输入-输出曲线上各点的线性误差 B_i 的平方和最小,即令 $\sum B_i^2$ 为最小的直线,其拟合方法往往采用最小二乘法。

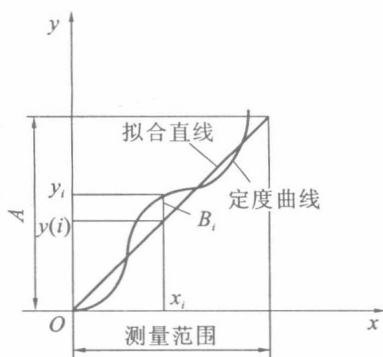


图 2.3 非线性度

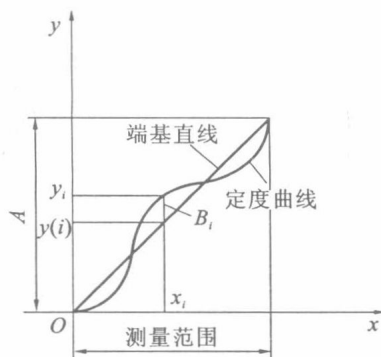


图 2.4 端基直线

2.2.3 灵敏度

灵敏度表征的是测试系统对输入信号变化的一种反应能力。一般情况下,当系统的输入 x 有一个微小增量 Δx 时,将引起系统的输出 y 也发生相应的微量变化 Δy ,则定义该系统的灵敏度 S 为:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.5)$$

对于静态测量,若系统的输入-输出特性为线性关系,灵敏度为常数,而对于非线性测试系统,其灵敏度就是该系统特性曲线的斜率,即:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (2.6)$$

灵敏度的量纲取决于输入-输出的量纲。当输入与输出的量纲相同时,则灵敏度是一个无量纲的数,常称之为“放大倍数”,也称为“增益”。

2.2.4 回程误差

回程误差表征测试系统在全量程范围内,输入量在递增变化(由小变大)中的定度曲线和在递减变化(由大变小)中的定度曲线二者静态特性不一致的程度。它是判别实际测试系统与理想系统特性差别的一项指标参数,如图 2.5 所示。回程误差通常用同一输入量的两条定度曲线之差的最大值 $|h_i|_{\max}$ 与标称输出范围 A 之比来表示,即

$$\text{回程误差} = \frac{|h_i|_{\max}}{A} \times 100\% \quad (2.7)$$

回程误差可以由摩擦、间隙、材料的受力变形或磁滞等因素引起,也可能反映着仪器的不工作区(又称死区)的存在,所谓不工作区就是输入变化对输出无影响的范围。

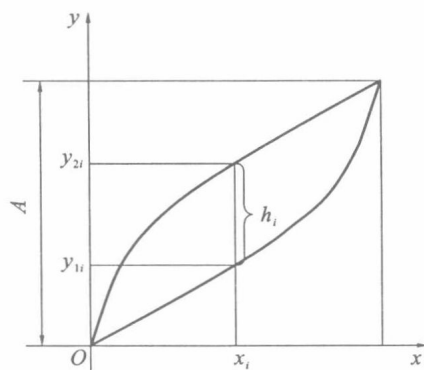


图 2.5 回程误差