



城市轨道交通系列教材

地下工程监测和检测理论与技术

DIXIA GONGCHENG
JIANCE HE JIANCE LILUN YU JISHU



周晓军 编著



科学出版社

城市轨道交通系列教材

地下工程监测和检测理论与技术

周晓军 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍和论述了地下工程监测与检测的基础知识、基本理论和基本技术。全书共分为 12 章,包括测试技术基础知识及传感器原理、地下工程的特点与监测目的、地下工程监测项目及控制基准、地下工程的监测仪器、地下工程监测项目的实施方法、地下工程的声波测试技术、地下工程的无损检测技术、地面建筑物的监测技术、地下工程监测实例、地下工程监测信息反馈技术、地下工程监测的组织与实施及测量误差分析与数据处理。

本书可供隧道与地下工程、城市轨道交通、市政工程等专业方向的本科生和研究生教学使用,也可供从事隧道与地下工程专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程监测和检测理论与技术 / 周晓军编著. —北京:科学出版社, 2014.2

城市轨道交通系列教材

ISBN 978-7-03-039696-9

I. ①地… II. ①周… 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(2014)第 020040 号

责任编辑:杨 岭 于 楠 / 封面设计:墨创文化

责任校对:贺江艳 / 责任印制:邝志强

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 2 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:370 千字

定价:33.00 元

“城市轨道交通系列教材”编委会

主 编	蒋葛夫	翟婉明	
副 主 编	阎开印		
编 委	张卫华	高 波	高仕斌
	彭其渊	董大伟	潘 炜
	郭 进	易思蓉	张 锦
	金炜东		

前 言

人口的急剧增加带来了严峻的社会问题，尤其是城市建筑、环境和交通容量等已经不能适应和满足城市人口快速增长的需求。为解决城市社会与经济发展中因人口增加而带来的突出问题，地下空间资源的开发和利用得到了前所未有的重视，而以地下铁道为代表的城市轨道交通则集中体现了现代科学技术的发展水平和城市现代化的进程。地下空间资源的开发与利用需要与之相适应的科学技术作为支撑。鉴于地下工程所处环境的特殊性，其安全 and 质量就成为工程建设的永恒主题。而监测和检测是确保地下工程建设质量与安全 and 耐久的重要技术环节。

当前我国地下工程正处于蓬勃发展时期，急需大量从事地下工程监测和检测的专业技术人员。地下工程监测与检测涵盖了测量学、试验力学、土力学、岩体力学、结构力学、钢筋混凝土力学、计算机科学及土木工程设计和施工的理论和方法等学科，并以仪器仪表、传感器、测试技术等学科为技术支撑，同时融合了地下工程施工工艺和积累的工程实践经验，因此地下工程监测与检测是一门综合性和实践性很强的学科。

为满足土木工程专业的教学需要，培养既具有地下工程监测基础理论又具有工程监测与检测实践能力的专门技术人才，特编写了本教材。通过本课程的学习，学生能够全面了解和掌握地下工程监测和检测的基本知识和基本理论，旨在提高学生从事地下工程监测与检测的基本技能，服务于工程实践。

在本书的编写过程中引用了近年来国内同行在地下工程建设与科研中所取得的研究成果，在此向本书所引用参考文献的作者表示衷心感谢。此外，本书的编写还得到了科学出版社和西南交通大学地下工程系全体教师的支持和帮助，在此也一并致谢！限于编者水平，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编著者
2013. 10

目 录

前言

第 1 章 测试技术基础知识及传感器原理	1
1.1 测试系统的组成和特性	1
1.1.1 测试系统的组成	1
1.1.2 测试系统的主要性能指标	3
1.1.3 线性系统	4
1.2 测试系统的静态传递特性	5
1.2.1 静态方程和标定曲线	5
1.2.2 静态传递特性	6
1.3 传感器原理	7
1.3.1 应力计和应变计	8
1.3.2 电阻式传感器	9
1.3.3 钢弦式传感器	16
1.3.4 电容式、压电式和压磁式传感器	18
1.3.5 测试系统选择的原则与标定	22
第 2 章 地下工程的特点与监测目的	26
2.1 地下工程的主要特点与施工方法	26
2.1.1 地下工程的主要特点	26
2.1.2 地下工程的主要施工方法	27
2.2 监测的目的及国内外现状	32
2.2.1 监测的目的	32
2.2.2 监测的国内外现状	32
2.2.3 监测中存在的问题	33
第 3 章 地下工程的监测仪器	35
3.1 监测仪器	35
3.1.1 经纬仪	35
3.1.2 水准仪	36
3.1.3 全站仪	36
3.1.4 收敛计	37
3.1.5 测斜仪	37
3.1.6 分层沉降仪	38
3.1.7 多点位移计	39
3.1.8 水位计	39

3.1.9	电阻应变仪	40
3.1.10	钢弦式频率接收仪	40
3.1.11	爆破振动监测仪	40
3.2	监测传感器	41
3.2.1	钢筋计	41
3.2.2	土压力计	42
3.2.3	孔隙水压力计	42
3.2.4	轴力计	43
3.2.5	混凝土应力计	43
3.2.6	应变计	44
3.2.7	锚杆测力计	44
3.2.8	爆破振动速度传感器	45
第4章	地下工程监测项目及其控制基准	46
4.1	地下工程主要监测项目	46
4.1.1	钻爆法的主要监测项目	46
4.1.2	盾构法的主要监测项目	48
4.1.3	明挖法的主要监测项目	48
4.2	监测控制基准的确定	50
4.2.1	控制基准确定的基本原则	50
4.2.2	地表沉降控制基准的确定	51
4.2.3	支护结构(围岩)位移控制基准的确定	54
4.2.4	明挖基坑工程变形控制基准的确定	58
第5章	地下工程监测项目的实施方法	62
5.1	常规项目的监测方法	62
5.1.1	地表沉降监测	62
5.1.2	支护体系水平位移监测	64
5.1.3	支撑轴力监测	66
5.1.4	支护结构的钢筋应力监测	67
5.1.5	支护结构混凝土应变监测	69
5.1.6	土压力的监测	69
5.1.7	孔隙水压力的监测	71
5.1.8	地下水水位监测	72
5.1.9	围护结构水平位移监测	73
5.1.10	深层土体位移监测	76
5.1.11	地下管线变形监测	78
5.1.12	拱顶下沉监测	80
5.1.13	净空收敛监测	81
5.1.14	爆破振动监测	82
5.1.15	地质状况观察和素描	85

5.2	地下工程的远程监测系统	85
5.2.1	近景摄影测量系统	85
5.2.2	多通道无线遥测系统	87
5.2.3	光纤监测系统	88
5.2.4	自动全站仪非接触监测系统	89
5.2.5	巴塞特(Bassett)结构收敛系统	91
5.2.6	轨道变形监测系统	91
5.3	光纤传感系统	92
5.3.1	系统简介	92
5.3.2	光纤系统组成	92
5.3.3	工作原理	93
5.3.4	光纤传感器的埋设	95
第6章	地下工程中的声波测试技术	98
6.1	声波的传播规律	98
6.2	波动方程	98
6.2.1	纵波(primary wave)	98
6.2.2	横波(secondary wave)	99
6.2.3	表面波(rayleigh wave)	99
6.3	声波探测技术	100
6.3.1	声波探测仪器及其使用	100
6.3.2	测试技术	101
6.4	声波测试在地下工程中的应用	103
6.4.1	围岩松弛带测试	103
6.4.2	利用弹性波评价岩体强度和完整性程度	104
6.4.3	岩体力学参数测定	105
6.4.4	测定张开裂隙的延伸深度	105
6.4.5	声波测井	105
6.5	声波测试在混凝土结构质量评价中的应用	106
6.5.1	结构混凝土厚度检测	106
6.5.2	混凝土中空洞的检测	107
6.5.3	混凝土裂缝检测	107
6.5.4	深孔法检验混凝土质量	108
6.5.5	声波测试在桩基完整性检测中的应用	108
第7章	地下工程的无损检测技术	111
7.1	概论	111
7.2	回弹法检测	111
7.2.1	回弹仪	112
7.2.2	回弹值的量测	112
7.2.3	碳化深度值的测量	114

7.2.4	混凝土强度评定	114
7.2.5	评定报告和有关表格	115
7.3	超声波检测	116
7.3.1	超声波检测仪	116
7.3.2	超声波传播时间即声时值的测量	118
7.3.3	测区声速值计算	118
7.3.4	混凝土强度评定	118
7.4	超声回弹综合检测	119
7.4.1	测试仪器	119
7.4.2	回弹值的测量与计算	119
7.4.3	超声值的测量与计算	119
7.4.4	测区混凝土强度换算值	119
7.4.5	结构或构件的混凝土强度推定值	120
7.5	地质雷达监测技术	120
7.5.1	地质雷达原理及特点	120
7.5.2	地质雷达仪器及其发展	121
7.5.3	地质雷达数据采集的最优化分析	122
7.5.4	地质雷达图像解释	126
7.6	常见特殊地质体的地质雷达图像特征	128
第8章	地面建筑物的变形监测	133
8.1	工程建筑物变形监测	133
8.1.1	变形监测的含义	133
8.1.2	建筑物变形监测的项目	134
8.1.3	沉降的原因及种类	134
8.2	变形监测的周期及其精度	135
8.2.1	变形监测的周期	135
8.2.2	变形监测的精度	136
8.2.3	高程控制网的建立及沉降监测	137
8.2.4	变形监测平面控制网的建立	142
8.3	建筑物的倾斜监测	144
8.3.1	直接测定建筑物倾斜的方法	144
8.3.2	测定建筑物基础相对沉降的方法	146
8.3.3	液体静力水准测量方法	146
8.4	建筑物裂缝与挠度监测	147
8.4.1	裂缝监测	147
8.4.2	挠度监测	148
第9章	地下工程监测实例	150
9.1	南京地铁1号线某盾构区间隧道工程监控	150
9.1.1	工程概况	150

9.1.2	监测项目及控制标准	150
9.1.3	监测结果分析	151
9.1.4	监测信息反馈	159
9.2	广州地铁1号线某区间隧道工程监测	160
9.2.1	工程概况	160
9.2.2	监测项目及控制基准	160
9.2.3	监测结果分析	161
9.2.4	监测信息反馈	167
第10章	地下工程监测的信息反馈技术	170
10.1	信息反馈的目的及内容	170
10.1.1	信息反馈的目的	170
10.1.2	信息反馈的内容	170
10.2	监测数据的处理方法	171
10.2.1	散点图与回归分析法	171
10.2.2	位移监测数据分析中常用的回归函数	174
10.3	信息反馈	175
10.3.1	监测反馈的程序	175
10.3.2	收敛约束法	176
10.3.3	参数控制法	176
10.3.4	工程类比法	178
10.3.5	有限元法	180
10.3.6	反分析法	183
10.4	稳定围岩与支护结构的技术措施	185
10.4.1	钻爆法施工的围岩与支护结构稳定技术措施	186
10.4.2	盾构法施工时围岩与支护结构的稳定措施	193
10.4.3	明挖法施工时地层与围护结构的稳定措施	196
第11章	地下工程现场监测的组织与实施	199
11.1	监测方案的编制	199
11.1.1	监测方案的设计原则	199
11.1.2	监测项目的确定	199
11.1.3	监测方案的编制	200
11.1.4	监测方案的主要内容	200
11.1.5	编制监测方案的基础资料	200
11.2	监测的组织与实施	201
11.2.1	监测的前期准备	201
11.2.2	监测工作的实施	202
11.3	监测资料的整理与分析	205
11.3.1	监测资料的种类	205
11.3.2	监测数据的整理	206

11.3.3	监测数据的分析与反馈	206
第 12 章	测量误差分析与数据处理	207
12.1	概述	207
12.2	测量误差及其分类	207
12.2.1	误差分类	208
12.2.2	精密度、准确度和精度	208
12.3	单随机变量的数据处理	209
12.3.1	误差估计	209
12.3.2	误差的分布规律	210
12.3.3	可疑数据的舍弃	211
12.3.4	处理结果的表示	212
12.4	多变量数据的处理	214
附录 A	侧区混凝土强度值换算表	217
附录 B	泵送混凝土测区混凝土强度值换算表	227
	主要参考文献	236

第 1 章 测试技术基础知识及传感器原理

1.1 测试系统的组成和特性

没有试验和测试技术就没有科学,科学技术的发展需要试验和测试技术加以支撑。试验与测试技术和科学在各自发展与相互促进的对立统一关系中不断发展。现代科学研究的方法包括理论分析、试验测试和数值计算,因此,试验与测试技术是构成科学研究的重要方法之一。

现代测试技术包括测量和试验技术,是研究测试与试验技术的规律、方法、原理及其应用的一门学科。随着现代科学技术的快速发展和生产水平的提高,各种测试技术已越来越广泛地被应用于各种工程领域和科学研究当中。测试技术水平的高低已经成为衡量一个国家科学技术现代化的重要标志之一。现代测试技术的作用主要体现在四个方面:①各种参数的测定;②自动化过程中参数的监测、反馈、调节和控制;③现场实时检测和监控;④试验过程中的参数测量和分析。

现代科学技术的不断发展为测试技术水平的提高创造了物质条件,反之拥有高水平的测试理论和测试技术又会促进科技成果的不断创新。目前,随着半导体技术的新突破和大规模集成电路构成的微处理器的应用,测试技术正向高精度、小型化和智能化的方向发展,新型传感器的研制也是目前测试技术的重要内容。

只有对测试系统有一个完整的了解,才能按照实际需要设计或配置出一个有效的测试系统,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。

模拟式测试系统就是将被测物理量变换成电阻、电压、电磁、指针位移和记录曲线等模拟量的测试系统。而数字式测试系统就是将被测的物理量变换成二进制或十进制数码的测试系统。

1.1.1 测试系统的组成

一个测试系统可以由一个或若干个功能单元组成。图 1.1 为一个完整的力学测试系统,它由三大部分组成,即荷载系统、测量系统、显示与记录系统。荷载系统主要由加载体系和被测对象构成,测量系统主要包括传感器、信号变换与测量电路,显示与记录系统主要包括数据处理、打印机、存储器和绘图仪等外围设备。若要以最佳方案完成测试任务,就应该对整个测试系统的各个功能单元做全面和综合的分析与研究。

一个测试系统根据测试目的和要求不同,也可以只有其中的一至两个部分,如常用的弹簧秤,它只有一根弹簧、挂钩和刻度尺,仅仅包含了测量和显示功能。

图 1.2 为岩石和混凝土试件应力与应变测试系统，其是由多个测试单元组成的测试系统。



图 1.1 测试系统的组成

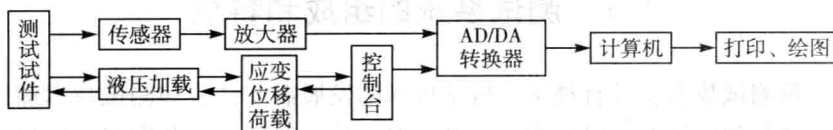


图 1.2 岩石和混凝土试件应力与应变测试系统

1) 荷载系统

荷载系统也称加载系统，它是使被测对象处于一定的约束或受力状态，使之与被测对象（如试件等）有关的物理力学量之间的联系充分显现出来，以便进行有效测量的一种专门系统。

例如，在图 1.2 所示的测定岩石和混凝土抗压或抗剪试验系统中，液压加载系统就是一个荷载系统。它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进行施加，并在需要时保持恒定，从而使试件处于一定的法向应力水平下进行剪切试验。在隧道与地下工程中，荷载是通过施工和开挖等工程活动而施加的。

2) 测量系统

测量系统由传感器和测量电路组成，其主要作用是将被测物理量如力、位移等通过传感器转换成电信号，并经过后接仪器的变换、放大和运算，变成易于处理和记录的电信号。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，因此，有时传感器也称为测试系统的一次仪表，其余部分为二次仪表或三次仪表。

例如，在图 1.2 所示的测试系统中，需要观察在不同正应力或法向应力作用下，试件在抗压或剪切过程中法向和剪切方向力和位移的变化。采用四只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，用荷载传感器和动态电阻应变仪组成力测量系统，而用位移传感器和位移变送器组成位移测量系统。

动态电阻应变仪和位移变送器内的中间变换和测量电路中通常设有电桥电路、放大电路、滤波电路及调频电路等。所以测量系统是根据不同的被测物理量，选用不同的传感器和后接仪器组成的。不同的传感器要求具备与其相匹配的后接仪器。

3) 信号处理系统

信号处理系统是将测量系统的输出信号进一步进行处理以排除干扰，或输出不同的物理量，如对位移量的一次微分得到速度，二次微分得到加速度。在图 1.2 中，计算机中需要设计智能滤波等软件，以排除测量系统中产生的噪声干扰和偶然波动，以提高所获得信号的置信度。对模拟电路则需要用专门的仪器或电路，如滤波器等。

4) 显示与记录系统

显示与记录系统是测试系统的输出环节,它是将对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,而数据记录则可采用函数记录仪、光线示波器、磁盘、存储器等设备来实现。例如,图1.2所示的测试系统中,以计算机屏幕、打印机和绘图仪等作为测试系统的显示与记录设备。

1.1.2 测试系统的主要性能指标

测试系统的主要性能指标有精度和误差、稳定性、测量范围(量程)、分辨率和传递特性等。测试系统的主要性能指标是经济合理地选择测试系统时必须明确提出的指标。

1) 精度和误差

测试系统的精度是指测试系统示出的指示值和被测量的真值之间的接近程度。精度与误差是同一概念的两种不同表示方法。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。实际中常用测试系统相对误差和引用误差的大小来表示其精度的高低。

绝对误差

$$E_a = x - X_0 \quad (1.1)$$

相对误差

$$E_r = \frac{E_a}{X_0} = \frac{x - X_0}{X_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

引用误差

$$E_q = \frac{E_a}{X_m} = \frac{x - X_0}{X_m} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中, x 为由仪器或传感器测量获得的测量值; X_0 为被测物理量的真实值; X_m 为测量仪器的测量上限值。

绝对误差越小,说明测量结果越接近被测量的真值。实际上真值是难以确切测量的,因此,常用更高精度的仪器来进行测量,并将测得的值 X_0 代替真值,也叫约定真值。在使用引用误差表示测试仪器的精度时,应尽量避免仪器在靠近测量下限的1/3量程内工作,以免产生较大的相对误差。

相对误差可用来比较同一仪器不同测量结果的准确程度,但不能用来衡量不同仪器的质量好坏,或不能用来衡量同一仪器在不同量程时的质量。因为对同一仪器在整个量程范围内,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,精度随之降低。当被测量值接近到量程起始零点时,相对误差趋于无限大。实际中,常以引用误差来划分仪器的精度等级,可以较全面地衡量测量精度。

2) 稳定性

仪器示值的稳定性有两种指标加以衡量。一是时间上稳定性,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) 稳定性。

稳定性是由于仪器随机性变动、周期性变动、漂移等引起的示值变化,一般用精密度的数值和时间长短同时表示。例如,每8h内引起的电压波动为1.3mV,则写成稳定度为

$S_v = 1.3\text{mV}/8\text{h}$ 。

(2) 环境影响。

环境影响指仪器工作场所的环境条件,如大气压、室温、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产生的影响,统称为环境影响,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 β_t ,即示值变化/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 β_u 来表示,即示值变化与电压变化率的比值。如 $\beta_u = 0.02\text{mA}/10\%$,表示电压每变化 10% 所引起的电流示值变化为 0.02mA 。

3) 测量范围或量程

测试系统在正常工作时所能测量的最大量值范围称为测量范围或量程。在动态测量时还需同时考虑仪器的工作频率范围。

4) 分辨率

分辨率是指系统能够检测到的被测量的最小变化值,也叫灵敏阈。例如,若某一位移测试系统的分辨率是 $0.5\mu\text{m}$,则当被测量的位移小于 $0.5\mu\text{m}$ 时,该位移测试系统没有反应。但并不是没有量的变化,只是测试仪器或仪表的分辨率大于被测量的变化而无法测出数据。通常要求测定仪器在零点和 90% 满量程点的分辨率,一般来说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度和正确选用系统或校准系统是十分重要的。

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;而对随时间变化的量的测量叫做动态测量。与此相应,测试系统的传递特性又可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输入与输出之间函数关系的方程、图形、参数等称为测试系统的静态传递特性。同理,描述测试系统动态测量时的输入与输出之间函数关系的方程、图形、参数等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。而作为动态测量的系统,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。

1.1.3 线性系统

为达到不同测试目的,可组成各种不同功能的测试系统,这些系统所具有的主要功能应保证系统的输出能够精确地反映输入。对于一个理想的测试系统,其应该具有确定的输入与输出关系,其中以输出与输入呈线性关系时为最佳,即理想的测试系统应该是一个时不变线性系统。

若系统的输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 之间关系可以用常系数线性微分方程式来表示,则该系统就称为线性时不变系统,简称线性系统。这种线性系统的方程的通式为

$$\begin{aligned} & a_n y^n(t) + a_{n-1} y^{n-1}(t) + a_{n-2} y^{n-2}(t) + \cdots + a_1 y^1(t) + a_0 y^0(t) \\ & = b_m x^m(t) + b_{m-1} x^{m-1}(t) + b_{m-2} x^{m-2}(t) + \cdots + b_1 x^1(t) + b_0 x^0(t) \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中, $y^n(t)$ 、 $y^{n-1}(t)$ 、 $\cdots$ 、 $y^1(t)$ 、 $y^0(t)$ 分别是输出函数 $y(t)$ 的各阶导数; $x^m(t)$ 、 $x^{m-1}(t)$ 、

$\cdots, x^1(t), b_0 x^0(t)$ 分别是输入函数 $x(t)$ 的各阶导数; $a_n, a_{n-1}, a_{n-2}, \cdots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, b_{m-2}, \cdots, b_1, b_0$ 为常数, 其与测试系统特性和输入状况、测试点的分布因素有关。

从式(1.4)可以看出, 线性方程中的每一项都不包含输入输出以及它们的各阶导数的高次幂和它们的乘积。此外其内部参数也不随时间的变化而变化, 信号的输出与输入和信号的加入时间无关。

在研究线性测试系统时, 对系统中的任一环节(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, 用 $y(t)$ 表示输出量, 用 $h(t)$ 表示系统的传递关系, 则三者之间的关系可用图 1.3 表示。 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $h(t)$ 是三个具有确定关系的量, 若已知其中任何两个量, 即可求出第三个量, 这便是工程测试中常常需要处理的实际问题。

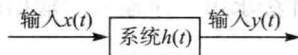


图 1.3 系统的输入与输出关系

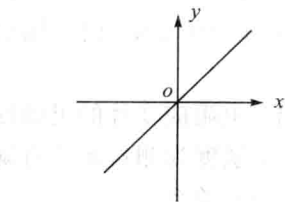
1.2 测试系统的静态传递特性

1.2.1 静态方程和标定曲线

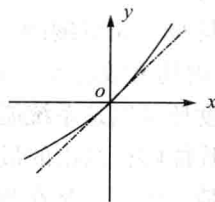
当测试系统处于静态测量时, 输入量 x 和输出量 y 不随时间而发生变化, 因而输入和输出的各阶导数均等于零, 则式(1.4)将变成代数方程:

$$y = \frac{a_0}{b_0} x = Sx \quad (1.5)$$

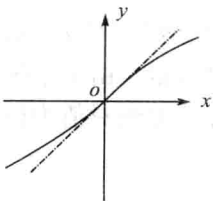
式(1.5)称为系统的静态传递特性方程, 简称静态方程。斜率 S 称为标定因子, 其为常数。表示静态或动态方程的图形称为测试系统的标定曲线或特性曲线、率定曲线、定度曲线等。在直角坐标系中, 标定曲线的横坐标为输入量 x , 即自变量; 而纵坐标为输出量 y , 即因变量。图 1.4 是标定曲线的不同实例及其相应的曲线方程。



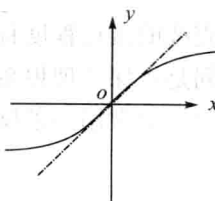
(a) 曲线方程 $y = a_0 x$



(b) 曲线方程 $y = a_0 x + a_1 x^2 + a_3 x^4$



(c) 曲线方程 $y = a_0 x + a_2 x^3 + a_4 x^5$



(d) 曲线方程 $y = a_0 x + a_1 x^2 + a_2 x^3 + a_3 x^4$

图 1.4 标定曲线的种类

图 1.4(a)为输出与输入呈线性关系,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。其中图 1.4(c)标定曲线包含了 x 的奇次幂,而且它在零点附近有一段对称的近似于直线的线段,可以作为近似标定曲线,图 1.4(b)和(d)的曲线则是不合适的。

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,实际的输出与输入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,需在测试前、后都对测试系统进行标定。当测试前、后标定结果的误差在允许的范围内时才能确定测试结果为有效。

求取静态标定曲线时常以标准量作为输入信号并测定出与其对应的输出量,将输入与输出数据绘制成散点图,再用统计法求出一条输入与输出的关系曲线。标准量的精度应比被标定系统的精度高一个数量级。

1.2.2 静态传递特性

根据标定曲线便可以分析测试系统的静态特性。描述测试系统静态特性的参数主要有灵敏度、线性度和回程误差。

1) 灵敏度

对测试系统输入一个变化量 Δx , 就会相应地输出另一个变化量 Δy , 如图 1.5(a)所示, 则测试系统的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.6)$$

对于线性系统, 由式(1.6)可知

$$S = \frac{a_0}{b_0} = \text{Const} \quad (1.7)$$

即线性系统的测量灵敏度为常数。

无论是线性系统还是非线性系统, 灵敏度 S 都是系统特性曲线的斜率。若测试系统的输出和输入的量纲相同, 则常用“放大倍数”来代替“灵敏度”, 此时, 灵敏度 S 无量纲, 但输出与输入是可以具有不同量纲的。例如, 某位移传感器的位移变化 1mm 时, 输出电压的变化为 300mV, 则其灵敏度 $S = 300\text{mV/mm}$ 。

此外, 系统灵敏度还可以是系统能够检测出的最小量。例如, 电阻应变片的灵敏度为 10^{-6} , 则表示该应变片能够检测出的最小应变等于 $1\mu\epsilon$ 。这时的灵敏度为测量系统有确切读数时所对应的被测值, 因而它是在测量下限表示输出与输入之间的关系。

2) 线性度

标定曲线与理想直线的接近程度称为测试系统的线性度, 如图 1.5(b)所示。它是指系统的输出与输入之间是否保持理想系统那样的线性关系的一种度量。由于系统的理想直线无法获得, 在实际中, 通常用一条反映标定数据的一般趋势而误差绝对值为最小的直线来代替理想直线。