

高等院校教材

工程测试技术

(第二版)

孔德仁 朱蕴璞 狄长安 编著



科学出版社
www.sciencep.com

TB22
28
2009

TB22
28
2009

高等院校教材

工程测试技术

(第二版)

孔德仁 朱蕴璞 狄长安 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细介绍了工程测量的基础知识,工程信号及其可测性分析,测量系统的基本特性,计算机测试技术,测试结果及误差分析,信号调理电路及指示记录装置,应变电测技术,压电测量技术,光电测量技术,温度测量技术,噪声测量技术,压力测量技术,以及位移、速度、加速度测量,机械振动测试等。根据教学大纲要求,摘要编写了本课程的学习要点。

本书可作为机械设计制造及其自动化、武器系统与发射工程、地面武器机动工程、过程装备与控制工程、测控技术及仪器、精密仪器、机械及机械电子工程等专业的教材或参考书,也可供相关专业的研究生、教师以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程测试技术/孔德仁,朱蕴璞,狄长安编著.—2版.—北京:科学出版社,2009

高等院校教材

ISBN 978-7-03-022672-3

I. 工… II. ①孔… ②朱… ③狄… III. 工程测量-高等学校-教材
IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 116847 号

责任编辑:巴建芬 潘继敏 / 责任校对:赵燕珍

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敏

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 1 月第 二 版 印张:27 1/2

2009 年 1 月第五次印刷 字数:520 000

印数:9 001—13 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

前 言

不同的学科、专业,其测试目的和规模、试验研究的对象,以及使用的仪器设备都会有一定的差异。但是,不论是复杂的宇航实验还是常规的医疗血样化验,操作者所关心的问题和使用的方法都有很大的相似性,即都关心测试理论、测试方法、测试系统的架构、测试信号及实验数据的分析处理方法;都关心如何控制实验条件,减少干扰因素的影响;都关心如何合理选择测量系统,以获得较大的测试效费比,也即以较少的财力、人力和时间投入取得尽可能多的有用信息。

测试技术是各工科专业的一门技术基础课程。本书以静态、动态测试中构成信号流程的基本理论、基本方法及工程手段为线索,全面系统地介绍了测试的基本概念。针对测试工作中的共性问题展开系统讨论,以测试技术的经典内容为重点,同时兼顾了近几年来测试工作中发展的新技术、新内容,力求让读者较全面地理解和掌握测试理论、测试方法及最新发展。

本书是在作者编写并使用了多年的工程测试技术讲义的基础上,收集、参阅有关国内外测试技术教材、学术论文编写而成的。全书由孔德仁、朱蕴璞、狄长安撰写,其中朱蕴璞同志撰写了第5、6、7、11章,其余章节由孔德仁、狄长安合作完成。全书由孔德仁同志统稿,王昌明教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。感谢李永新教授、石晓晶高工、顾晓辉教授为原工程测试技术讲义所做的大量工作。

本书共15章。

第1章绪论。阐明了测试的任务及测试的发展方向,介绍本书的特点及教学目的。

第2章测量的基础知识。介绍测量的基础知识及现代测量系统的组成,并简单介绍了国际单位制标准。

第3章工程信号及其可测性分析。介绍信号的分类及描述方法,重点讨论周期信号及瞬态信号的分解与频谱分析方法,为信号的可测性提供依据。

第4章测量系统的基本特性。针对动态测试的特点,分析测量系统的基本特性,并对动态误差修正方法作初步探讨。

第5章计算机测试技术。简要介绍现场总线、智能传感器、计算机辅助测试系统及虚拟仪器技术等。

第6章测试结果及误差分析。介绍实验数据的表示方法、回归分析方法及误差分析方法,并详细讨论了不确定度的评定方法。

第7章信号调理电路及指示记录装置。讨论常用的信号调理电路及常用指示

记录仪器的工作原理与特性。

第8章应变电测技术。介绍应变片的工作原理、种类、材料、安装连接方法及调理电路,应变片测量时的温度误差及补偿技术,以及常见的应变片传感器及其应用技术。

第9章压电测量技术。介绍压电式传感器的工作原理及信号调理电路、压电式传感器的应用,并对压电传感器的测量误差作初步探讨。

第10章光电测量技术。介绍光电测量的基础知识、光电器件的特性、常用光电传感器及其应用,重点介绍光纤传感器测量技术。

第11章温度测量技术。介绍测温的分类方法及常用的仪器设备,重点讨论热电偶测温及其动态误差的修正方法。

第12章噪声测量技术。介绍噪声测试的物理学基本知识、人对噪声的主观量度、常用的测量仪器,并讨论了噪声的测试方法。

第13章压力测量技术。介绍压力测量的基本知识、塑性测压法、弹性测压法,讨论管道效应对动态压力测量的影响,并详细探讨了常用测压系统标定方法。

第14章位移、速度、加速度测量。介绍了位移、速度、加速度的测量原理、方法,以及常见的测量系统。

第15章机械振动测试。概要地介绍振动测试系统的组成、合理选择测试系统的方法及系统使用注意事项,深入地讨论了振动系统特性测试方法、机械阻抗测试及振动分析方法。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 测试工作的任务	2
1.3 测试技术的发展	2
1.4 本书的特点及目的	3
习题与思考题	4
第 2 章 测量的基础知识	5
2.1 测量	5
2.1.1 直接测量	5
2.1.2 间接测量	6
2.2 标准	6
2.2.1 SI 的构成	6
2.2.2 SI 基本单位	6
2.3 非电量电测系统的组成	8
习题与思考题	12
第 3 章 工程信号及其可测性分析	13
3.1 概述	13
3.2 工程信号的分类	13
3.2.1 确定性信号	14
3.2.2 随机信号	15
3.3 周期信号描述	16
3.3.1 周期信号的分解和频谱	16
3.3.2 周期信号的可测性分析	23
3.4 时限信号(瞬态信号)描述	26
3.4.1 时限信号的分解和频谱	26
3.4.2 时限信号的可测性分析	29
3.5 随机信号描述	29
3.5.1 随机信号的特征参数	30
3.5.2 随机信号的特征估计	34

3.6 典型激励信号描述	38
3.6.1 冲激函数及其谱分析	39
3.6.2 单位阶跃信号及其谱分析	41
3.6.3 单位斜坡信号及其频谱	43
习题与思考题	44
第4章 测量系统的基本特性	45
4.1 概述	45
4.1.1 测量系统的基本要求	45
4.1.2 测量系统的线性化	46
4.2 测量系统的静态标定与静态特性	47
4.2.1 静态标定	48
4.2.2 灵敏度	49
4.2.3 量程及测量范围	50
4.2.4 非线性	51
4.2.5 迟滞性	51
4.2.6 重复性	52
4.2.7 准确度	53
4.2.8 分辨率	53
4.2.9 漂移	53
4.3 测量系统动态特性	54
4.3.1 动态参数测试的特殊问题	54
4.3.2 测量系统动态特性的分析方法及主要指标	55
4.3.3 测量系统的数学模型	56
4.3.4 传递函数	56
4.3.5 频率响应函数	58
4.3.6 冲激响应函数	60
4.4 测量系统的动态特性分析	60
4.4.1 典型系统的频率响应	60
4.4.2 典型激励的系统瞬态响应	64
4.4.3 相似原理	66
4.5 测量系统无失真测试条件	68
4.6 测量系统的动态特性参数获取方法	69
4.7 动态误差修正	72
4.7.1 频域修正方法	72
4.7.2 时域修正方法	72

4.8 数字测量系统的基本特性	73
4.8.1 采样	73
4.8.2 量化	75
习题与思考题	76
第5章 计算机测试技术	79
5.1 概述	79
5.2 现场总线与智能传感器	80
5.2.1 现场总线	80
5.2.2 智能传感器	90
5.2.3 智能传感器的集成技术	94
5.2.4 智能传感器系统智能化功能的实现方法	95
5.3 自动测试系统	96
5.3.1 自动测试系统的基本概念	96
5.3.2 自动测试系统的发展概况	96
5.3.3 通用接口总线	97
5.3.4 VXI 总线	103
5.3.5 PXI 总线	108
5.4 虚拟仪器系统	111
5.4.1 概述	111
5.4.2 虚拟仪器的结构及特点	111
5.4.3 虚拟仪器的系统组成	113
5.4.4 VXIplug&play	114
5.4.5 虚拟仪器软件开发平台	115
5.4.6 虚拟仪器在自动测试中的应用	118
习题与思考题	120
第6章 测试结果及误差分析	121
6.1 概述	121
6.2 实验数据的表示方法	121
6.2.1 表格法	121
6.2.2 图解法	122
6.2.3 经验公式	123
6.2.4 有效数字及数据修约	123
6.3 回归分析及其应用	123
6.3.1 一元线性回归	123
6.3.2 多元线性回归	127

6.3.3	非线性回归	129
6.3.4	回归分析应用举例	130
6.4	误差的定义及分类	131
6.4.1	误差的概念	131
6.4.2	误差的分类	132
6.4.3	误差的表示方法	133
6.4.4	表征测量结果质量的指标	134
6.5	不确定度评定的基本知识	134
6.5.1	有关不确定度的术语	135
6.5.2	产生测量不确定度的原因和测量模型	135
6.6	标准不确定度的 A 类评定	138
6.6.1	单次测量结果试验标准差与平均值试验标准差	138
6.6.2	测量过程的合并样本标准差	140
6.6.3	规范测量中的合并样本标准差	141
6.6.4	极差	142
6.6.5	最小二乘法	143
6.6.6	不确定度 A 类评定的独立性	144
6.6.7	A 类不确定度评定的自由度和评定度	145
6.7	标准不确定度的 B 类评定	145
6.7.1	B 类不确定度评定的信息来源	145
6.7.2	B 类不确定度的评定方法	146
6.7.3	B 类标准不确定度评定的流程	150
6.8	合成标准不确定度的评定	150
6.8.1	输入量不相关时不确定度的合成	150
6.8.2	输入量相关时不确定度的合成	152
6.8.3	合成标准不确定度的自由度	153
6.8.4	合成不确定度的计算流程	153
6.9	扩展不确定度的评定及报告形式	154
6.9.1	扩展不确定度的评定	154
6.9.2	测量不确定度的报告与表示	155
	习题与思考题	157
第 7 章	信号调理电路及指示记录装置	161
7.1	滤波器	161
7.1.1	滤波器分类	161
7.1.2	理想滤波器	162

7.1.3 实际滤波器	165
7.1.4 模拟滤波器的应用	170
7.2 调幅解调	173
7.2.1 调幅与解调原理	173
7.2.2 调幅波的波形失真	175
7.2.3 典型调幅波及其频谱	176
7.3 调频解调	178
7.3.1 调频波及其频谱	178
7.3.2 直接调频与鉴频	180
7.3.3 应用举例	182
7.4 记录仪器	183
7.4.1 磁带记录仪	183
7.4.2 瞬态波形记录分析仪	187
习题与思考题	190
第8章 应变电测技术	191
8.1 电阻应变片	191
8.1.1 电阻应变片的结构和工作原理	191
8.1.2 电阻应变片的种类、材料和参数	195
8.1.3 应变片的粘贴	199
8.2 电阻应变片的温度误差及补偿	201
8.2.1 温度误差及其产生原因	201
8.2.2 温度补偿方法	202
8.3 电阻应变片的信号调理电路	203
8.3.1 直流电桥	204
8.3.2 交流电桥	206
8.3.3 等臂对称电桥的加减特性	208
8.4 固态压阻式传感器	210
8.4.1 概述	210
8.4.2 压阻式压力传感器	211
8.4.3 压阻式加速度传感器	212
8.5 电阻应变仪	212
8.5.1 电阻应变仪的分类及其特点	212
8.5.2 载波放大式应变仪的组成及工作原理	213
8.5.3 电标定及电标定桥	214
8.5.4 常用电阻应变仪主要电路的特点	215

8.6 测量中应变片的排列与连桥	216
8.6.1 应变式传感器	216
8.6.2 各种载荷测量中应变片的排列和连桥	217
8.7 应力与应变测量	221
8.7.1 单向应力状态	221
8.7.2 主应力方向已知的平面应力状态	222
8.7.3 主应力方向未知的平面应力状态	222
习题与思考题	225
第9章 压电测量技术	228
9.1 压电式传感器的工作原理	228
9.1.1 压电效应	228
9.1.2 压电常量和表面电荷的计算	230
9.1.3 压电元件的基本变形	231
9.2 压电材料	233
9.2.1 石英压电晶体	233
9.2.2 压电陶瓷	234
9.2.3 压电元件常用的结构形式	235
9.3 压电式传感器的等效电路	237
9.4 压电式传感器的信号调节电路	238
9.4.1 电压放大器(阻抗变换器)	238
9.4.2 电荷放大器	242
9.5 压电式传感器的应用	244
9.5.1 压电式测力传感器	244
9.5.2 压电式加速度传感器	246
9.5.3 压电阻抗头	248
9.6 引起压电式传感器测量误差的因素	248
9.7 奇石乐公司常用压电测量仪器简介	250
9.7.1 5011B 型电荷放大器	251
9.7.2 拉力、压力的石英力传感器	251
9.7.3 三分量力传感器	252
9.7.4 K 剪切式压电晶体加速度计	252
9.7.5 压电梁式加速度计	253
习题与思考题	254

第 10 章 光电测量技术	256
10.1 光电测量基本知识	256
10.1.1 光源	256
10.1.2 光电效应及器件	257
10.2 光电器件的特性	261
10.2.1 光照特性	261
10.2.2 光谱特性	262
10.2.3 响应时间	263
10.2.4 温度特性	263
10.2.5 伏安特性	264
10.3 常用光电传感器及其应用	264
10.3.1 光电式传感器的类型	264
10.3.2 光电式传感器的应用	266
10.4 光纤传感器	267
10.4.1 光纤传感器的基础	267
10.4.2 光纤传感器的应用实例	270
习题与思考题	273
第 11 章 温度测量技术	275
11.1 概述	275
11.2 测温法分类及仪器设备	275
11.3 热电偶	276
11.3.1 热电效应及测温原理	277
11.3.2 热电回路的基本定律	279
11.3.3 热电偶的种类	281
11.3.4 热电偶的冷端温度补偿	283
11.3.5 热电偶的实用测温电路	285
11.3.6 温度测量的动态误差修正	287
11.4 热电阻温度计	288
11.4.1 金属丝热电阻	289
11.4.2 热敏电阻	291
11.5 热辐射测温	292
11.5.1 全辐射高温计	293
11.5.2 比色高温计	293
11.5.3 红外辐射测温仪	294
习题与思考题	297

第 12 章 噪声测量技术	299
12.1 噪声测试的物理学基本知识	299
12.1.1 声波、声速和波长	299
12.1.2 声波、声场和波阵面	300
12.1.3 声压、声强和声功率	301
12.1.4 声级和分贝	301
12.2 人对噪声的主观量度	303
12.2.1 响度与响度级	303
12.2.2 声级计的计权网络、A 声级	304
12.2.3 等效连续声级	305
12.2.4 噪声评价曲线	306
12.3 噪声测量仪器	307
12.3.1 传声器	307
12.3.2 声级计	308
12.3.3 噪声分析仪	311
12.4 噪声测量方法	312
12.4.1 测试环境对噪声的影响	312
12.4.2 噪声级的测量	312
12.4.3 声功率级测试	315
12.4.4 声强的测试	316
习题与思考题	317
第 13 章 压力测量技术	319
13.1 概述	319
13.1.1 压力的定义	319
13.1.2 压力的计量单位	319
13.1.3 压力测量分类	320
13.2 塑性测压法	320
13.2.1 概述	320
13.2.2 铜柱测压法	321
13.2.3 铜球测压法	323
13.3 弹性测压法	325
13.3.1 应变式压力传感器	325
13.3.2 压阻式压力传感器	329
13.3.3 压电式压力传感器	330
13.4 动态压力测量时的管道传输效应	333

13.4.1 传感器的安装	333
13.4.2 测量系统动态特性分析	333
13.5 测压系统的标定	335
13.5.1 测压系统的静态标定	335
13.5.2 测压系统的动态标定	336
习题与思考题	343
第 14 章 位移、速度、加速度测量	344
14.1 位移测量	344
14.1.1 电感式位移测量系统	344
14.1.2 电容式位移测量系统	351
14.1.3 电涡流式位移测量系统	355
14.1.4 光电位置敏感器件	357
14.2 速度测量	363
14.2.1 微积分电路法	363
14.2.2 平均速度法	363
14.2.3 瞬时速度法	366
14.2.4 转速测量	369
14.3 加速度测量	372
14.3.1 惯性式加速度计	372
14.3.2 应变式加速度计	374
14.3.3 压电加速度计	375
14.3.4 压电加速度计的标定	378
习题与思考题	380
第 15 章 机械振动测试	382
15.1 概述	382
15.2 测振系统的组成及合理选择	382
15.2.1 测振系统的组成	383
15.2.2 振动系统的合理选用	385
15.2.3 传感器的安装	386
15.3 振动系统特性测试	388
15.3.1 激振方式	388
15.3.2 机械结构参数的估计	393
15.4 机械阻抗测试	397
15.4.1 机械阻抗的基本概念	397
15.4.2 几种典型的机械导纳定义	397

15.5 振动分析方法及仪器·····	398
习题与思考题·····	402
参考文献·····	404
附录 A 热电偶分度表·····	406
附录 B 热电阻分度表·····	418
附录 C 本课程学习要点·····	420

第1章 绪 论

1.1 引 言

人类对自然界的认识与改造均离不开对自然界信息的获取,因此获取信息的活动是人类最基本的活动之一。

在日常生活中,人类可通过感觉器官获取满足生活的大量信息。但在浩瀚的科学技术领域中,欲获取揭示事物内在规律的信息,无论在获取信息的幅值上,还是时间、空间上,或在分辨信息的能力方面,人类的感覺和大脑功能是十分有限的。测试作为定量地获取事物信息的一种手段,已成为现代科学技术研究的一个重要领域。

人类对客观世界的认识和改造总是以测试工作为基础的。人类早期在从事生产活动时,就已经对长度(距离)、面积、时间和重量进行了测量,其最初的计量单位或是和自身生理特点相联系(如长度),或是与自然环境相联系(如时间)。秦始皇在建立了统一的中央政府以后,立即建立了统一的度量衡制度,说明恰当的测试工作对发展生产和进行社会交往的重要性。在测试技术发展史中,应该着重提一下伽利略的功绩。伽利略不满足古代思想家对宇宙进行哲理性的定性描述,主张根据观测和实验对自然界的现象和运动规律进行定量描述,开创了实验科学,从而开创了近代意义的自然科学。

测试技术是测量技术及试验技术的总称。定量地描述事物的状态变化和特征总离不开测试。简言之,测试是依靠一定的科学技术手段定量地获取某种研究对象原始信息的过程。这里所讲的“信息”是指事物的状态或属性,如火炮膛内的燃气压力、温度、燃速是其膛内的基本信息。

工程技术的研究对象往往十分复杂,许多问题至今还难以进行完善的理论分析和计算,需通过实验研究来解决。测试工作需要一定的测试设备,而测试系统是一种将被测参数转换成可直接观测指示或等效信息的测试设备,其中关键单元是传感器。传感器是指由敏感元件直接感受被测量,并将被测量转变为可用电量的一套完整的测量装置。信息本身不具备传输、交换的功能,只有通过信号才能实现这种功能,因此测试技术与信号密切相关。信息、信号、测试系统之间的关系可表述为:获取信息是测试的目的,信号是信息的载体,测试是得到被测参数信息的技术手段。

1.2 测试工作的任务

测试工作的基本任务是,通过测试手段,对研究对象中的有关信息量作出比较客观、准确的描述,使人们对其有一个恰当的全面的认识,并达到进一步改造和控制研究对象的目的。研究对象所包含的信息是相当丰富的,在实践中,人们总是根据要求测出所感兴趣的有限的信息,而不是全部信息。

信号是信息的载体,某些信息是可直接检测的,而有些信息是不容易直接检测的,需通过对其相关的信息进行加工处理才能获得。一般来说,测试工作总是采用最简捷的方法来获得与研究任务相联系的、最有用的、能表征研究对象特征的有关信息,而不能也不可企图获取该事物的全部信息。

现代测试技术的一大特点是采用非电量的电测法,其测量结果通常是随时间变化的电量,亦即电信号。在这些电信号中,包含着有用信息和大量不需要的干扰信号。干扰的存在给测试工作带来了麻烦,测试工作中的一项艰巨的任务就是要从复杂的信号中提取有用的信号或从含有干扰的信号中提取有用的信息。应该指出的是所谓“干扰”是相对的,在一种场合中,被认为是干扰信号,在另一种场合中却可能是有用信号。

人类早就进行测试工作了,但是迄今还很难给测试规定一个明确的定义及工作范围。测试是为了获取有用的信息,而信息是以信号的形式表现出来的。根据一个研究对象如何估计它的模型结构,如何设计试验方法,以最大限度地突出所需要的信息,并以比较明显的信号形式表现出来,这无疑也是测试工作的一部分。由此可见,测试工作是一件非常复杂的工作,需要多种学科知识的综合运用。当然,根据所测任务的繁简和要求的不同,并不是每项测试工作都要经历相同的步骤。如用天平和砝码就可以称重,用一根尺子就可以量布。但测定自动武器自动机的运动或研究机床的动态特性所进行的测试应是相当复杂的。

从广义的角度来讲,测试工作涉及试验设计、模型试验、传感器、信号加工与处理(传输、加工和分析、处理)、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容。因此,测试工作者应当具备这方面的相关知识。从狭义的角度来讲,测试工作是指在选定激励方式下,所进行的信号的检测、变换、处理、显示、记录及电量输出的数据处理工作。本书从狭义的范围来讨论动态测试技术中的基础知识。

1.3 测试技术的发展

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,同样,拥有高水平的测试系统又会促进新科技成果的不断发现和创新。两者之间是相辅相