

清华大学机械工程基础系列教材

# 工程测试技术

Engineering Measurement  
Technology

● 王伯雄 王 雪 陈非凡 主编  
● Wang Boxiong Wang Xue Chen Feifan

清华大学出版社

清华大学机械工程基础系列教材

# 工程测试技术

## Engineering Measurement Technology

王伯雄 王 雪 陈非凡 主编  
Wang Boxiong Wang Xue Chen Feifan

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书是根据清华大学机械工程学院平台课“测试与检测技术基础”的教学大纲编写的一本有关测试技术理论与应用的教材。全书分两大部分,共12章。第一部分共7章,主要介绍测试技术的理论基础,内容包括:绪论,测试信号分析与处理,测试系统特性分析,被测量的获取,测试信号的转换与调理,信号的输出,虚拟测试系统。第二部分共5章,主要介绍力及其导出量、振动、温度、流量和声学的测量。

本书可作为高等院校机械、仪器、测控、自动化、信息等专业教材,也可作为工程技术人员的专业参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

工程测试技术/王伯雄,王雪,陈非凡主编. — 北京:清华大学出版社,2006.1

(清华大学机械基础系列教材)

ISBN 7-302-12044-7

I. 王… II. ①王… ②王… ③陈… 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(2005)第125198号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 张秋玲

印 刷 者: 北京密云胶印厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 35.75 字 数: 761千字

版 次: 2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-12044-7/TH·181

印 数: 1~5000

定 价: 49.00元

# “机械工程基础”系列教材编委会

顾 问 (按姓氏笔画序)

金国藩(中国工程院院士)

温诗铸(中国科学院院士)

主 任 李庆祥

副主任 丁天怀 贾惠波 申永胜

委 员 刘朝儒 陈 恩 王东生 王伯雄

毛文炜 郁鼎文 郝智秀 季林红

秘 书 冯 涓

# 序言

随着科学技术的发展和经济全球化,当今人类已进入知识经济社会和信息社会。我国经济体制将进一步由计划经济向社会主义市场经济接轨,经济的竞争性、变动性大大加强。过去在计划经济下形成的对口专业教育的观念,需要转向适应不断变化的社会需求,也就是说由对口性转向适应性。由于技术进步迅速发展,知识更新的周期缩短,现代教育观念将转变为终身教育。

认清当前教育改革的发展趋势,进一步转变教育思想和教育观念。需要培养“高层次、高素质、多样化、创新型”人才。高层次人才要具有良好的高素质,包括政治思想素质、业务素质和文化素质。通识教育给学生以宽广的知识面,为进一步深造和就业打下坚实的基础。

通识教育是当代学科发展趋势的需要,通过多学科的交叉和本硕统筹教育模式,把通与专结合起来,使学生既具有本学科的坚实基础,又通晓相关学科的发展趋势和知识;在综合学科的基础上,培养出多样化创新型的人才。我国当前国情与发达国家不尽相同,我国现状是工业化与知识化并存,所以不能照搬国外的培养模式。大学教育应成为提供高素质人才的基础,为我国的经济发展做出贡献。所以通过课程结构调整、教学内容更新和教学方法的改革,改善人才的知识结构才能创造出具有特色的一流人才培养模式。

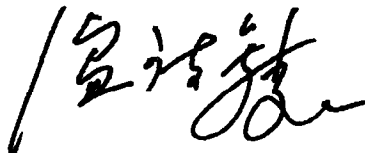
教材在培养人才中起着举足轻重的作用,是深化课程体系和教学内容的改革和教学方式改革成果的总结。清华大学精密仪器系组织编写的系列教材,主要涉及机械工程专业本科生课程中的基础课、专业课和实践课。本着“先进性、创新性、实用性”的宗旨,力争

#### IV 工程测试技术

---

反映当代机械科学技术的基本内容和发展趋势,尽可能地将最新的生产和科研成果纳入教材。在编写中力图符合教学特点和学生的认识规律,全面提升教材质量,创出新的教学体系。

中国科学院院士



2003年2月24日

# 前言

测试技术是对客观世界的信息进行感知的基本技术,是信息技术的基础,具有任何技术不可替代的作用,在当今社会的发展中起着举足轻重的作用。

现代科学技术和生产的发展极大地促进了工程测试技术的发展,对各种物理量的测量提出了越来越广泛的要求,同时对测试技术人员的需求也变得越来越迫切。在高等教育领域,测试技术课程的教学已经得到越来越多的重视和普及。清华大学是全国最早开设测试技术课程的高校之一,测试技术被列为机械类专业本科生必修的一门专业基础课。近年来,在清华大学“211”工程和“985”项目的支持下,又对原有的测试技术课程体系进行了改革,统筹机类各专业测试技术课程的教学大纲。本书根据清华大学机械工程学院平台课“测试与检测技术基础”的新教学大纲进行编写,旨在提供一本适合于本科生教学的有关工程测试技术基础理论知识的教材。

本书内容按照如下主线展开:信号理论—测试系统特性—信号传感—信号调理—信号输出。在阐述基本测试理论、测试手段和方法的基础上,结合工程实际应用例子,介绍测试技术发展的新方向和学科前沿知识。

全书共分两大部分共12章。第一部分共7章,主要介绍有关工程测试技术的理论基础。其中第1章为绪论,介绍测试技术的发展、意义及内容,测量标准和国际单位制。第2章介绍信号理论、测试信号的分析与处理。第3章介绍测试系统特性描述的方法与理论。第4~6章分别涉及测试信号的传感、调理和输出的理论及应用。虚拟仪器技术的发展为现代测试技术开辟了一个新的领域,本书第7章介绍虚拟测试技术的概况。另外,微纳米技术及微型传感器技术的发展给传感器领域带来了新的活力,4.16节介绍微型传感器的知识。第二部分内容共5章,介绍典型测试技术的工程应用,主要介绍5种常见物理量的测试与检测:振动(位移、速度、加速度)、力(压力)、温度、流量和声学。使读者在学习第一部分内容的基础上,进一步掌握综合利用测试技能进行不同物理量测试的知识。本书可作为本科机械类不同专业“测试技术”及相关课程的教学用书,课时适用于48~64学

时。在安排教学时,对第二部分内容可根据不同的专业和教学对象来加以取舍。本书每章末尾均附有习题,供学生练习用。书中标有“\*”号的部分为选学内容。

本书第6章由陈非凡副教授编写,4.15节和第7章由王雪副教授编写,2.3.6节和全书的习题由罗秀芝高级工程师编写,其余各章节由王伯雄教授编写,全书由王伯雄教授统稿,由装甲兵工程学院的胡仲翔教授主审。本书内容的录入与整理由陈华成、朱从锋、刘振江完成。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2005年6月于清华园



# 目录



## 第一部分 测试技术的理论基础

<b>1</b>	<b>绪论</b> .....	<b>3</b>
1.1	测试技术的发展与研究的内容 .....	3
1.2	测量的本质和基本前提 .....	6
1.3	标准及其单位 .....	7
1.3.1	国际单位制及其基本单位 .....	7
1.3.2	国际单位制的导出单位 .....	8
1.3.3	单位的十进制倍数和小数 .....	10
	习题 .....	11
<b>2</b>	<b>测试信号分析与处理</b> .....	<b>12</b>
2.1	信号与测试系统 .....	12
2.2	信号描述 .....	13
2.2.1	信号的定义 .....	14
2.2.2	信号的分类 .....	15
2.2.3	信号的时域和频域描述方法 .....	20
2.2.4	周期信号的频域描述 .....	21
2.2.5	周期信号的功率 .....	30
2.2.6	非周期信号的频域描述 .....	33
2.2.7	随机信号描述 .....	65
2.3	数字信号处理 .....	88

2.3.1	离散傅里叶变换 .....	89
2.3.2	离散傅里叶变换的性质 .....	95
2.3.3	采样定理 .....	96
2.3.4	泄漏与加窗处理 .....	99
2.3.5	栅栏效应 .....	102
2.3.6	快速傅里叶变换 .....	105
	习题 .....	114
<b>3</b>	<b>测试系统特性分析 .....</b>	<b>118</b>
3.1	概述 .....	118
3.2	测量误差 .....	119
3.3	测试系统的静态特性 .....	120
3.4	测试系统的动态特性 .....	123
3.4.1	线性系统的数学描述 .....	123
3.4.2	用传递函数或频率响应函数描述系统的传递特性 .....	125
3.5	测试系统实现精确测量的条件 .....	148
3.6	测试系统的负载效应 .....	151
3.6.1	负载效应 .....	151
3.6.2	一阶系统的互联 .....	153
3.6.3	二阶系统的互联 .....	155
	习题 .....	159
<b>4</b>	<b>被测量的获取 .....</b>	<b>161</b>
4.1	被测量获取的基本概念 .....	161
4.2	传感器的分类 .....	162
4.3	电阻式传感器 .....	165
4.3.1	工作原理 .....	165
4.3.2	滑动触点式变阻器 .....	165
4.3.3	应变式传感器 .....	168
4.4	电阻式温度计 .....	176
4.5	热敏电阻 .....	178
4.6	电感式传感器 .....	179
4.6.1	自感式 .....	180
4.6.2	互感式 .....	188

4.6.3	磁弹性测力传感器	193
4.6.4	压磁式互感传感器	195
4.7	电容式传感器	196
4.7.1	间隙变化型	196
4.7.2	面积变化型	198
4.7.3	介质变化型	200
4.8	压电传感器	205
4.8.1	压电效应	205
4.8.2	压电传感器工作原理及测量电路	210
4.8.3	压电传感器的应用	215
4.9	磁电式传感器	222
4.9.1	动圈式和动铁式传感器	223
4.9.2	磁阻式传感器	226
4.9.3	涡流-磁电式相对加速度传感器	227
4.10	光电传感器	227
4.10.1	外光电效应	228
4.10.2	内光电效应	231
4.10.3	光生伏打效应	236
4.10.4	光电器件的应用	237
4.11	气敏传感器	239
4.12	红外辐射检测	242
4.12.1	红外辐射	242
4.12.2	红外探测器	243
4.12.3	红外检测应用	244
4.13	固态图像传感器	249
4.14	霍尔传感器	254
4.14.1	作用原理	254
4.14.2	霍尔效应的应用	256
4.15	光纤传感器	259
4.15.1	光纤基本原理	259
4.15.2	光纤传感器结构及特性	265
4.16	微型传感器	269
4.16.1	MEMS技术与微型传感器	269
4.16.2	压阻式微型传感器	271

4.16.3	电容式微型传感器	277
4.16.4	电感式微型传感器	281
4.16.5	热敏电阻式微型传感器	282
4.16.6	隧道效应式传感器	283
习题		285
<b>5</b>	<b>测试信号的转换与调理</b>	<b>288</b>
5.1	电桥	288
5.1.1	直流电桥	288
5.1.2	交流电桥	292
5.1.3	变压器式电桥	295
5.1.4	电桥使用中应注意的问题	296
5.2	调制与解调	299
5.2.1	幅值调制与解调	300
5.2.2	频率调制与解调	310
5.3	滤波	316
5.3.1	概述	316
5.3.2	滤波器的一般特性	320
5.3.3	滤波器类型	324
5.3.4	滤波器的综合运用	332
5.3.5	其他种类的滤波	341
5.4	模拟/数字转换器	342
5.4.1	量化	342
5.4.2	A/D 转换器	343
5.4.3	抗混滤波器	347
5.4.4	数字/模拟(D/A)转换器	349
习题		351
<b>6</b>	<b>信号的输出</b>	<b>354</b>
6.1	概述	354
6.2	信号输出的形式及分类	355
6.3	显示和指示类信号输出	355
6.3.1	模拟指示	356
6.3.2	数码显示	358

6.3.3 图视显示	364
6.4 记录类信号输出	375
6.4.1 硬拷贝记录	376
6.4.2 模拟记录	380
6.4.3 数字记录	389
习题	392
<b>*7 虚拟测试系统</b>	<b>393</b>
7.1 概述	393
7.2 虚拟仪器的概念	394
7.3 虚拟仪器的演变与发展	395
7.3.1 计算机是动力	395
7.3.2 软件是关键	396
7.4 VI的构成	397
7.5 虚拟仪器图形化语言 LabVIEW	398
7.5.1 LabVIEW 应用程序	399
7.5.2 LabVIEW 操作模板	400
7.6 基于 Web 的虚拟仪器	405
7.6.1 基于 Web 的 VI 概述	405
7.6.2 主要软件技术	406
7.6.3 Web 服务器	407
7.6.4 实例	408
习题	409

## 第二部分 典型测试技术的应用

<b>8 力及其导出量的测量</b>	<b>413</b>
8.1 概述	413
8.2 基本测力方法	414
8.3 测力传感器	417
8.3.1 弹性力传感器	417
8.3.2 应变片力传感器	419
8.3.3 电感式力传感器	424

8.3.4	电容式力传感器	425
8.3.5	磁弹性力传感器	426
8.3.6	压电力传感器	427
8.3.7	振弦式力传感器	428
8.4	转矩测量	429
8.4.1	应变片转矩传感器	429
8.4.2	电感式转矩传感器	430
8.4.3	振弦式转矩传感器	430
	习题	431
<b>9</b>	<b>振动测量</b>	<b>432</b>
9.1	概述	432
9.2	机械振动的电测法及测试系统的构成	433
9.3	单自由度系统的受迫振动	435
9.3.1	作用在系统质量块上的力引起的受迫振动	435
9.3.2	由系统的基础运动引起的受迫振动	437
9.4	测振传感器	439
9.4.1	磁电式速度传感器	440
9.4.2	涡流位移传感器	440
9.4.3	电感式振动传感器	441
9.4.4	电阻式振动传感器	442
9.4.5	电容式加速度传感器	443
9.4.6	压电加速度传感器	444
9.4.7	磁致伸缩式振动传感器	444
9.4.8	激光速度传感器	445
9.4.9	频闪测速法	446
9.5	激振器	447
9.5.1	力锤	447
9.5.2	机械惯性式激振器	447
9.5.3	电动力式激振器	448
9.5.4	液压式激振台	451
9.6	测振仪器的校准	452
9.6.1	绝对校准法	452

9.6.2 相对校准法	456
习题	457
<b>10 温度的测量</b>	<b>458</b>
10.1 温标的定义	458
10.2 温标的复制	460
10.2.1 水的冰点	460
10.2.2 水的三相点	460
10.2.3 水的沸点	461
10.3 温度传感器	462
10.3.1 接触式温度计	462
10.3.2 辐射式温度计	481
习题	487
<b>11 流量的测量</b>	<b>489</b>
11.1 流体的特征	489
11.2 不同的流量测量方法及仪器	491
11.2.1 节流式流量计	491
11.2.2 可变面积式流量计(转子流量计)	497
11.2.3 涡轮式流量计	499
11.2.4 磁流量计	501
11.2.5 椭圆轮流量计	502
11.2.6 旋转活塞式气体流量计	503
11.2.7 叶轮流量计	505
11.2.8 涡流式流量计(卡尔曼涡街,涡频流量计)	505
11.2.9 流速的测量	507
11.2.10 超声波流量测量	516
11.2.11 哥氏力质量流量测量法	520
习题	522
<b>*12 声学的测量</b>	<b>524</b>
12.1 概述	524
12.2 声音的特征	526

12.3	基本声学参数	529
12.3.1	声压	529
12.3.2	声压级	530
12.3.3	声功率、声强和声功率级	531
12.3.4	声压级的合成	532
12.4	心理声学关系	534
12.5	声音的测量	537
12.5.1	传声器(麦克风)	537
12.5.2	声级计	543
12.5.3	声音信号的频谱分析	544
12.6	工业和环境噪声的测量与分析	545
12.6.1	等效声级 $L_{eq}$	545
12.6.2	声强的测量	547
12.6.3	声压的测量	548
12.7	声学测量中应注意的几个问题	550
12.8	声学测量仪器的标定	551
12.9	结束语	553
	习题	553
	参考文献	555





# 第一部分

## 测试技术的理论基础

---