研究生教材

非 电 量 电 测 技 术

（第 2 版）

吴道悌　主编

西安交通大学出版社

内容提要

本书根据工科非电类专业硕士研究生对测试技术的培养要求，系统地阐述了非电量的电测技术。主要内容包括：测量的基本知识和误差；常用传感器的工作原理、特性、测量电路和应用实例；信号的放大、滤波、转换等调理电路；信号的分析和处理基础；测量系统与计算机的接口及虚拟仪器。本书在撰写和内容选取上力求针对工科非电类专业研究生的特点，侧重于应用，并注意反映近年来该领域中的新器件、新技术和发展趋势。

本书也可作为工科高等院校师生及从事检测技术和自动化工作的工程技术人员的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非电量电测技术/吴道悌编．—2版．—西安：西安交通大学出版社，2001.9
ISBN 7-5605-1425-1

Ⅰ.非… Ⅱ.吴… Ⅲ.非电量测量 Ⅳ.TM938.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第061851号

*

西安交通大学出版社出版发行
(西安市兴庆南路25号 邮政编码：710049 电话：(029)2668315)
陕西宝石兰印务有限责任公司印装
各地新华书店经销

*

开本：787 mm×1 092 mm 1/16 印张：22.25 字数：535千字
2001年9月第2版 2002年4月第2次印刷
印数：2001～4000 定价：30.00元

发行科电话：(029)2668357，2667874

前　言

《非电量电测技术》教材第一版于 1990 年由西安交通大学出版社出版，到 20 世纪 90 年代后期，已先后印刷三次。本书主要针对工科非电类专业硕士研究生的特点及其在测试技术方面的培养要求，同时也兼顾其他人员的需要而编写。

当今人类已进入信息时代，传感和测试技术的重要性已越来越被人们所认识和广泛采用。随着微电子技术和计算机技术的迅速发展，传感和测试技术也有了很大进展，因此本书第一版内容急需修改、充实和更新，第二版就是在此背景下问世的。

本书第二版仍保持第一版覆盖面较广，内容较为系统全面，侧重于原理和应用，不涉及设计制造方面的内容，以及尽量避免一些对介绍原理无关的数学推导等特点。增加了测量系统和计算机的接口、虚拟仪器、动态信号的分析和处理；并在不削弱传统传感器基本内容的前提下，增加了光纤传感器、CCD 图像传感器、光敏集成器件、集成霍尔器件、集成化测温器件及智能传感器等反映近代传感技术的新内容；又根据近 10 年的教学使用情况，对原教材内容也作了不少修改和增删。但限于篇幅和学时，有些内容如核辐射、化学、生物等传感器，仪表的抗干扰和测量结果的显示与记录等在第二版中仍未能介绍。

本教材共 16 章，分成三大部分。第一部分（1，2 章）为测量的基本知识和测量误差，介绍测量仪表的静、动态特性，测量误差的基本理论。第二部分（3～10 章）介绍各种传感器的工作原理、特性、测量电路和应用举例。第三部分（11～16 章）介绍信号的放大、滤波、转换等调理电路、传感器特性的线性化及温度补偿、信号的分析和处理基础、测量系统与计算机的接口及虚拟仪器等内容。

本书也可作为高等学校工科非电类专业本科生和有关的电类专业本科生的教材或参考书，对从事检测技术和自动化工作的工程技术人员也有参考价值。

本书第 1～10 章由西安交通大学吴道悌编写，第 11～15 章由西安交通大学刘晓晖编写，西安交通大学郑明编写第 16 章和光纤传感器、CCD 图像传感器。全书由吴道悌任主编。

本书由上海交通大学朱承高教授担任主审，对全书作了仔细的审阅，提出了许多宝贵意见；西安交通大学葛文运教授对全书进行了认真的初审，对本书的编写给予了很大的帮助；在编写过程中还得到西安交通大学王采堂教授的支持，在此一并表示衷心的感谢。本书部分内容参考了许多校、院、所等编写的教材及文献资料，在此也致以谢意。

由于本书涉及的学科众多，而作者学识有限，书中定有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编　者

2000 年 9 月

目　　录

绪论

第 1 章　测量的基本知识

1.1　测量方法及其分类 …… 5
1.1.1　概述 …… 5
1.1.2　直接测量、间接测量与组合测量 …… 5
1.1.3　偏差式测量法、零位式测量法与微差式测量法 …… 6
1.2　测量仪表的基本性能 …… 7
1.2.1　精确度 …… 7
1.2.2　稳定性 …… 8
1.2.3　仪表的输出-输入特性 …… 8
1.3　传感器的分类和性能指标 …… 14
1.3.1　传感器的分类 …… 14
1.3.2　传感器的性能指标 …… 16

第 2 章　测量误差

2.1　误差定义及分类 …… 17
2.1.1　误差定义 …… 17
2.1.2　误差的分类与来源 …… 19
2.1.3　系差和随差的表达式 …… 20
2.2　随机误差 …… 20
2.2.1　正态分布 …… 20
2.2.2　方均根误差 …… 22
2.2.3　误差概率的计算 …… 23
2.2.4　最佳值的确定 …… 23
2.2.5　算术平均值 $\bar{x}$ 的方均根误差 $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ …… 24
2.3　系统误差 …… 25
2.3.1　发现系统误差的方法 …… 25
2.3.2　削弱和消除系统误差的基本方法 …… 26
2.4　粗差 …… 28
2.4.1　拉依达准则 …… 29
2.4.2　格罗布斯准则 …… 30
2.5　测量结果的数据处理实例 …… 31
2.6　间接测量中误差的传递 …… 32
2.6.1　绝对误差和相对误差的传递 …… 33

2.6.2 标准差(方均根误差)的传递…… 34
2.6.3 误差传递公式在间接测量中的应用…… 34

第 3 章 电阻式传感器

3.1 线绕电位器式电阻传感器…… 36
3.1.1 工作原理…… 36
3.1.2 非线性误差…… 37
3.1.3 线绕电位器的结构和分辨力…… 37
3.2 应变式电阻传感器…… 38
3.2.1 应变效应和灵敏系数…… 38
3.2.2 电阻应变片的种类…… 40
3.2.3 测量电路…… 41
3.2.4 电阻应变片的温度误差及其补偿…… 49
3.2.5 电阻应变仪…… 50
3.3 电阻式传感器应用举例…… 52
3.3.1 电位器式压力传感器…… 52
3.3.2 半导体力敏应变片在电子皮带秤上的应用…… 52

第 4 章 电感式传感器

4.1 变气隙式自感传感器…… 54
4.1.1 工作原理…… 54
4.1.2 等效电路…… 55
4.1.3 特性…… 55
4.2 差动式自感传感器…… 57
4.2.1 结构和工作原理…… 57
4.2.2 输出特性…… 57
4.2.3 测量电路…… 58
4.3 差动变压器(互感式电感传感器)…… 59
4.3.1 结构与工作原理…… 59
4.3.2 等效电路…… 60
4.3.3 测量电路…… 61
4.4 应用举例…… 63
4.4.1 JGH 型电感测厚仪 …… 63
4.4.2 差压计…… 64
4.4.3 远传浮子液位测量…… 64
4.5 电涡流式传感器…… 65
4.5.1 基本原理…… 65
4.5.2 等效电路…… 66

4.5.3 测量电路…… 66
4.5.4 应用举例…… 67

第 5 章 电容式传感器

5.1 工作原理与结构形式…… 69
5.1.1 基本工作原理…… 69
5.1.2 结构形式…… 69
5.2 输出特性…… 70
5.2.1 变间隙式…… 70
5.2.2 变面积式…… 72
5.2.3 变介电常数式…… 72
5.3 测量电路…… 73
5.3.1 桥式电路…… 73
5.3.2 二极管不平衡环形电路…… 75
5.3.3 差动脉冲宽度调制电路…… 76
5.3.4 运算放大器式电路…… 78
5.3.5 调频电路…… 78
5.4 应用举例…… 79
5.4.1 电容式差压传感器…… 79
5.4.2 电容式液位计…… 80
5.4.3 电容测厚仪…… 80
5.4.4 利用电容量变化效应的温度传感器…… 81

第 6 章 电动势式传感器

6.1 磁电式传感器…… 82
6.1.1 工作原理及结构…… 82
6.1.2 传感器的灵敏度和温度补偿…… 83
6.1.3 测量电路…… 84
6.1.4 应用举例…… 84
6.2 压电晶体传感器…… 86
6.2.1 压电效应…… 86
6.2.2 压电材料简介…… 88
6.2.3 压电传感器及其等效电路…… 90
6.2.4 压电传感器的测量电路…… 91
6.2.5 应用举例…… 94
6.3 霍尔传感器…… 96
6.3.1 霍尔元件的基本工作原理…… 96
6.3.2 霍尔元件的测量误差及其补偿…… 98

6.3.3 霍尔元件的使用 …… 100
6.3.4 集成霍尔器件 …… 102
6.3.5 霍尔元件在非电量电测技术中的应用举例 …… 103

第 7 章 热电传感器

7.1 热电偶 …… 106
7.1.1 热电偶测温原理 …… 106
7.1.2 热电偶的结构与种类 …… 113
7.1.3 热电偶的冷端温度补偿 …… 115
7.1.4 热电偶实用测温电路 …… 118
7.2 热电阻 …… 120
7.2.1 常用热电阻 …… 120
7.2.2 热电阻的测量电路与应用举例 …… 122
7.3 热敏电阻 …… 123
7.3.1 热敏电阻的电阻–温度特性 …… 124
7.3.2 主要技术参数 …… 125
7.3.3 热敏电阻的应用举例 …… 126
7.4 PN 结型和集成温度传感器 …… 130
7.4.1 分立元件 PN 结型温度传感器 …… 130
7.4.2 集成温度传感器 …… 132

第 8 章 光传感器

8.1 外光电效应和光电管、光电倍增管 …… 136
8.1.1 光电管 …… 136
8.1.2 光电倍增管 …… 138
8.2 内光电效应及相应的器件 …… 140
8.2.1 光导效应及光敏电阻 …… 140
8.2.2 光生伏特效应及光电池、光敏二极管、光敏三极管 …… 143
8.3 光电传感器的类型及应用举例 …… 148
8.3.1 类型 …… 148
8.3.2 应用举例 …… 148
8.4 光敏集成器件 …… 151
8.4.1 达林顿光敏管 …… 151
8.4.2 光电耦合器件 …… 151
8.5 光纤传感器 …… 153
8.5.1 光纤的结构和传光原理 …… 153
8.5.2 光纤的性能 …… 154
8.5.3 光纤传感器的工作原理及其组成 …… 155

8.5.4 光纤传感器的应用举例 …… 157
8.6 CCD 图像传感器 …… 159
8.6.1 CCD 的基本结构和工作原理 …… 159
8.6.2 电荷的注入和输出 …… 160
8.6.3 线型和面型 CCD 图像传感器 …… 162
8.6.4 CCD 的主要参数 …… 163
8.6.5 CCD 输出信号的特点及应用举例 …… 165

第 9 章 气敏及湿敏传感器

9.1 气敏传感器 …… 168
9.1.1 电阻型半导体气敏传感器的结构 …… 169
9.1.2 半导体气敏材料的气敏机理概述 …… 170
9.1.3 SnO_2 系列气敏器件 …… 171
9.1.4 应用举例 …… 172
9.2 湿敏传感器 …… 174
9.2.1 湿敏器件的特性参数 …… 175
9.2.2 湿敏器件的种类 …… 176
9.2.3 典型器件介绍 …… 178
9.2.4 应用举例 …… 181

第 10 章 数字式传感器

10.1 编码器 …… 183
10.1.1 码盘式编码器 …… 183
10.1.2 脉冲盘式编码器 …… 187
10.2 感应同步器 …… 188
10.2.1 直线式感应同步器的结构 …… 188
10.2.2 感应同步器的工作原理 …… 189
10.2.3 感应同步器输出信号的检测 …… 190
10.2.4 感应同步器位移数字显示装置(鉴相型检测系统) …… 191
10.3 计量光栅 …… 193
10.3.1 黑白透射型长光栅的结构和工作原理 …… 193
10.3.2 光电转换 …… 195
10.3.3 辨向与细分原理 …… 196
10.4 频率式数字传感器 …… 197
10.4.1 改变力学系统固有频率的频率传感器 …… 197
10.4.2 振荡器式频率传感器 …… 200
10.4.3 压控振荡器式频率传感器 …… 201
10.4.4 频率式传感器的基本测量电路 …… 201

10.5 智能传感器简介…… 202
10.5.1 智能传感器的功能和特点…… 202
10.5.2 智能传感器实现的技术途径…… 203
10.5.3 智能传感器举例…… 203

第 11 章 信号的放大和调理电路

11.1 信号放大电路…… 205
11.1.1 理想运算放大器及其应用…… 205
11.1.2 实际运算放大器存在的问题…… 209
11.1.3 仪器放大器(测量放大器)…… 212
11.1.4 程控增益放大器…… 213
11.1.5 隔离放大器…… 215
11.1.6 调制型直流放大器…… 217
11.2 模拟滤波器…… 220
11.2.1 一阶无源滤波器…… 221
11.2.2 二阶有源滤波器…… 222
11.2.3 开关电容滤波器…… 224
11.2.4 集成电路滤波器…… 225
11.3 信号处理电路…… 227
11.3.1 绝对值转换电路…… 227
11.3.2 有效值转换电路…… 230
11.3.3 峰值保持电路(峰值检波器)…… 235

第 12 章 信号的转换

12.1 D/A 转换电路 …… 239
12.1.1 D/A 转换电路的工作原理 …… 239
12.1.2 D/A 转换电路的主要参数 …… 241
12.1.3 D/A 集成芯片 …… 241
12.2 A/D 转换电路 …… 243
12.2.1 转换原理…… 245
12.2.2 A/D 转换电路的主要参数 …… 247
12.2.3 A/D 集成芯片 …… 249
12.3 A/D 转换器的外围电路 …… 254
12.3.1 采样/保持电路 …… 254
12.3.2 多路模拟开关…… 256
12.4 U/F 转换电路 …… 259
12.4.1 U/F 转换电路的工作原理 …… 259
12.4.2 集成 U/F 转换器 …… 260

第 13 章　传感器特性的线性化及温度补偿

13.1　传感器非线性特性的线性化…… 262
13.1.1　模拟线性化…… 261
13.1.2　数字线性化…… 270
13.2　温度补偿…… 273
13.2.1　温度补偿原理…… 273
13.2.2　温度补偿方法…… 274

第 14 章　信号分析和处理基础

14.1　信号概述…… 277
14.1.1　周期信号…… 278
14.1.2　非周期性信号的频谱…… 280
14.1.3　随机信号…… 283
14.2　测试系统特性…… 286
14.2.1　测试系统特性的频域描述和频率响应函数…… 286
14.2.2　线性系统的脉冲响应…… 288
14.3　信号的采样和窗函数…… 289
14.3.1　采样定理与抗混迭滤波…… 289
14.3.2　窗口函数…… 292
14.4　数字滤波…… 294
14.4.1　数字滤波器的分类…… 295
14.4.2　数字滤波器的算法结构…… 296
14.5　相关检测…… 298
14.5.1　自相关检测…… 298
14.5.2　互相关检测…… 299
14.5.3　锁定放大器…… 300

第 15 章　计算机与测量系统的接口

15.1　微型计算机系统的基本结构…… 302
15.2　PC 机总线 …… 303
15.2.1　PC/XT 总线 …… 303
15.2.2　ISA 总线…… 305
15.2.3　PCI 局部总线…… 305
15.3　GPIB 通用接口总线 …… 307
15.3.1　GPIB 总线的结构 …… 308
15.3.2　三线挂钩原理…… 310
15.4　串行接口…… 312
15.4.1　串行通信的一般概念…… 312

15.4.2 串行通信的接口电路…… 314
15.4.3 RS—232C 接口 …… 315
15.5 现场总线…… 317
15.5.1 现场总线的特点…… 317
15.5.2 现场总线协议模型…… 318
15.5.3 PROFIBUS 总线 …… 320
15.5.4 基金会现场总线(FF) …… 321
15.5.5 LONWORKS 总线…… 323
15.6 数据采集接口…… 324
15.6.1 数字信号的采集…… 324
15.6.2 模拟信号的采集…… 326
15.6.3 地址译码电路…… 327

第 16 章 虚拟仪器

16.1 虚拟仪器的产生…… 330
16.2 虚拟仪器的结构及特点…… 331
16.2.1 虚拟仪器的结构…… 331
16.2.2 虚拟仪器的特点…… 331
16.2.3 虚拟仪器性能优点…… 332
16.3 虚拟仪器的分类…… 332
16.3.1 PC 总线-插卡式虚拟仪器…… 332
16.3.2 并行口式虚拟仪器…… 332
16.3.3 GPIB 总线方式的虚拟仪器 …… 333
16.3.4 VXI 总线方式的虚拟仪器 …… 333
16.3.5 PXI 总线方式的虚拟仪器…… 333
16.4 虚拟仪器的系统组成…… 333
16.4.1 GPIB 总线 …… 334
16.4.2 VXI 总线 …… 335
16.4.3 VXIplug & play …… 336
16.5 虚拟仪器软件开发平台…… 337
16.5.1 Lab VIEW 软件开发平台 …… 337
16.5.2 Lab Windows/CVI 软件开发平台 …… 339
16.6 虚拟仪器技术的应用实例…… 340
16.6.1 汽车发动机检测系统…… 340
16.6.2 陶瓷产品的检验…… 340

绪　论

在工农业生产、科学研究、国防建设及国民经济的各部门中，经常需要检测各种参数和物理量，获取被测对象的定量信息，以便进行监视和控制，使设备或系统处于最佳运行状态，并保证生产的安全、经济及高质量。在现代科学研究和新产品设计中，为了掌握事物的规律性，人们必须测试许多有关参数，用以检验是否符合预期要求和事物的客观规律性。

在被测物理量中，非电量占了绝大部分，例如压力、温度、湿度、流量、液位、力、应变、位移、速度、加速度、振幅等等，虽然对它们的测量可以用机械、气动等方法，但是电测技术具有一系列明显优点，尤其随着微电子技术和计算机技术的飞速发展，更显示出其突出的优势，所以许多非电量的测量广泛应用电测技术。

电测技术具有下列主要优点：

• 测量的准确度和灵敏度高，测量范围广。

• 由于电磁仪表和电子装置的惯性小，测量的反应速度快，具有比较宽的频率范围，不仅适用于静态测量，亦适用于动态测量。

• 能自动连续地进行测量，便于自动记录，并能根据测量结果，配合调节装置，进行自动调节和自动控制。

• 采用微处理器组成智能化仪器，可与微型计算机一起构成测量系统，实现数据处理、误差校正、自监视和仪器校准等功能。

• 可以进行远距离测量，从而能实现集中控制和遥远控制。

• 从被测对象取用功率小，甚至完全不取用功率，并可以进行无接触测量，减少对被测对象的影响，提高测量精度。

1. 非电量电测系统的组成

非电量电测技术的任务，就是把待测的非电量，通过一种器件或装置，把非电量变换成与它有关的电信号（电压、电流、频率等等），然后利用电气测量的方法，对该电信号进行测量，从而确定被测非电量的值。

非电量电测系统的结构框图如图 0－1 所示。它由传感器、信号调理、信号分析与处理或微计算机等环节组成，或经信号调理环节后，直接显示和记录。

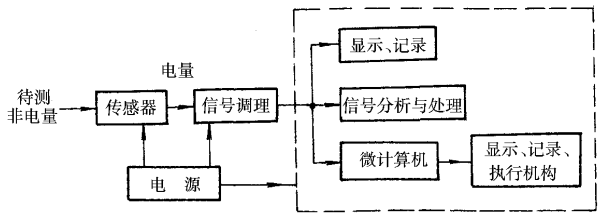


图 0－1　非电量电测系统结构框图

传感器是将外界信息按一定规律转换成电量的装置，它是实现自动检测和自动控制的首要环节。目前除利用传统的结构型传感器外，大量物性型传感器被广泛采用。结构型传感器是以物体(如金属膜片)的变形或位移来检测被测量的；物性型传感器是利用材料固有特性来实现对外界信息的检测，它有半导体类、陶瓷类、光纤类及其它新型材料等。

信号调理环节是对传感器输出的电信号进行加工，如将信号放大、调制与解调、阻抗变换、线性化、将电阻抗变换为电压或电流等等，原始信号经这个环节处理后，就转换成符合要求、便于输送、显示、记录、转换以及可作进一步后续处理的中间信号。这个环节常用的模拟电路是电桥电路、相敏电路、测量放大器、振荡器等；常用的数字电路有门电路、各种触发器、A/D 和 D/A 转换器等。信号调理环节有时可能是许多仪器的组合，有时也可能仅有一个电路，甚至仅是一根导线。

对于动态信号的测量，即动态测试，在现代测试中已占了很大的比重。它常常需要对测得的信号进行分析、计算和处理，从原始的测试信号中提取表征被测对象某一方面本质信息的特征量，以利于对动态过程作更深入的了解。这个领域中采用的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换仪等，但计算机技术在信号处理中已被广泛应用。

整个测试系统中还必须包括电源，在一些便携式仪器中，一般采用电池供电。

图 0-1 所示的测量系统是目前常用的。图 0-2(a)所示的是由两块芯片组成的测试系统，一块芯片是传感器件与信号调理电路为一体的集成敏感器件，另一块芯片是带 A/D 转换的微处理器。图 0-2(b)是包括上述全部功能的单一芯片测试系统，这是今后的发展方向。

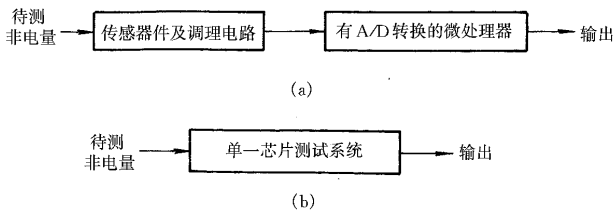


图 0-2　由芯片构成的测试系统示意图

2. 传感器的发展趋势

在非电量电测系统中，如果没有传感器对原始信息进行精确、可靠的捕获和转换，则一切测量和控制都是不可能实现的。当前与计算机处理信息的能力相比，传感器检测信息的能力，无论在数量、质量和功能上都远不适应社会多方面发展的需要。因此，传感器技术的发展，目前正处在方兴未艾状态，世界上先进国家都把传感器技术列为核心技术。传感器发展的趋势有以下几方面：

(1)研究开发新原理、新材料。测量领域不断扩大，测量对象不断增加，如空间技术、海洋开发、环境保护、生命科学等，原有的传感器已远不能适应这种需要，因此需研究开发新原理、新材料的新型物性型传感器。例如利用约瑟夫逊效应的热噪声温度传感器，可测量 10^{-6}K 的超低温；利用光子滞后效应，出现了响应速度极快的红外传感器。硅材料及其它派生物是目前最成熟和应用研究最广的材料，许多微型传感器都是基于硅材料上形成的；其它陶瓷材料、高

分子材料也对新传感器的研究和开发起了很大的推动作用。

(2)集成化和多功能化。传感器集成化即是将多个相同传感器配置在同一平面上,形成一维、二维或三维阵列,甚至能加上时序,变单一信息检测为多信息检测。

传感器的多功能化是指一个传感器可检测两种或两种以上的参数,或者将传感器件与调理、补偿等电路集成一体化,意味着传感器自身不仅有检测功能,还具有信号处理和其它功能。近年来,已研制多种能检测两个以上不同物理量的传感器,例如利用特殊陶瓷能分别检测湿度和气体、温度和湿度的多功能传感器也已经迈向实用化。

(3)智能化。传感器与微处理器集成在同一芯片上,组成智能传感器,不仅具有信号检测、转换功能,同时还具有记忆、存储、解析、统计处理和自诊断、自校准、自适应等功能。虽然目前尚处于研究开发阶段,但已出现了一些实用的产品,如美国霍尼韦尔公司生产的 ST—3000 系列智能变送器等。

(4)开发仿生传感器。现代工业生产已进入计算机自动控制时代,各种各样的机器人大量问世,而作为感官器官的传感器进展比较慢,使电脑机器人的使用受到很大程度的限制。

生物的感官性能,是当今传感器技术所望尘莫及的,所以研究许多生物活性物质的机理,开发仿生传感器也是发展方向之一。

3. 智能仪器的发展

自从 1971 年世界上出现了第一种微处理器以来,电子计算机从过去的庞然大物缩小到可以置于测量仪器之中,所以发展了智能仪器。智能仪器是计算机技术与测量仪器相结合的产物,它具有对数据的存储、运算、逻辑判断及自动化操作等智能作用,对于传统仪器的改进和开辟新的应用领域都取得了巨大的成就。

20 世纪 80 年代个人计算机仪器(PCI)问世,它是给个人计算机(PC)配上不同的模拟通道,使之符合测量仪器的要求。PCI 的优点是可方便地利用 PC 机已有的磁盘、打印机及绘图仪等获得硬拷贝,其数据处理功能强,内存容量较大,因而可以用于复杂的、高性能的信息处理,还可以利用 PC 机本身已有的各种软件包,将仪器的面板及各种操作按钮的图形生成在 CRT 上,得到‘软面板”,在软面板上可以用鼠标或触摸屏操作 PCI。

一个以 PC 机为基础的仪器,采用不同的软件,可以做成不同功能的测量仪器,并用软面板去适应不同仪器的要求。这种灵活多样的虚拟仪器技术,只是在 PCI 之后才真正得以实现。它使用户可以根据自己的需要去设计或组合自己的专用仪器(或系统),从而得到从传统仪器中无法比拟的效果。

近几年来,以 PCI 为硬件平台的虚拟仪器已受到各方面的关注,但设计及使用虚拟仪器,软件是关键。为了节省仪器的开发时间,提高工作效率,不少公司为自己的虚拟仪器提供了图形编程语言,如 NI 的 LabVIEW,HP 的 VEE 等,为测试技术开辟了一个崭新的局面。

4. 本书的特点与要求

测试技术是一门边缘的信息学科,它所涉及的学科范围较广,而且发展极为迅速。新型的传感技术、新的测试方法、新的信号分析和处理理论、功能更为完善的信号调理电路、新的测试仪器等层出不穷,编者只能在有限的篇幅中介绍这一学科主要的、有代表性的方面及其发展方向,形成系统的内容,为读者学习本学科的更广泛和更新内容打下一定的基础,培养一种开拓创新能力。

理工科院校非电类专业的硕士研究生在学习本课程后,能提出合理的测试方案,选择合适

的传感器，掌握信号调理电路的原理和接口技术，并能正确选用和组合这些环节构成一个测试系统。学会测试系统的误差和静、动态特性的分析方法，以及对所测信号的基本分析和处理方法。

本课程的实践性很强，所以学习过程中应尽可能提供相应的实验，以利于提高学生测试技术的能力和掌握常用仪器仪表和现代先进测试仪器的使用方法。

与本课程直接有关的基础课程有：物理学、电工技术、电子技术、微机原理与应用等。

第 1 章　测量的基本知识

1.1　测量方法及其分类

1.1.1　概述

测量是在有关理论的指导下,用专门的仪器或设备,通过实验和必要的数据处理,求得被测量的值。在工业生产中,测量的目的是为了在限定时间内,尽可能准确地收集被测对象的未知信息,以便掌握被测对象的参数,进而控制生产过程,例如在电厂中对锅炉水位的检测 ;钢厂中对热风炉风温的检测等。

测量方法的正确与否是十分重要的,它直接关系到测量工作是否能正常进行,能否符合规定的技术要求。因此,必须根据不同的测量任务要求,找出切实可行的测量方法,然后根据测量方法选择合适的测量工具,组成测量装置,进行实际测量。如果测量方法不合理,即使有高级精密的测量仪器或设备,也不能得到理想的测量结果。

测量方法的分类有多种多样,例如,根据在测量过程中,被测量是否随时间变化,分为静态测量和动态测量 ;按测量手续分类,可分为直接测量、间接测量和组合测量 ;按测量方式分类,可分为偏差式测量法、零位式测量法和微差式测量法等。除了上述分类外,还有另外一些分类方法,例如按测量敏感元件是否与被测介质接触,可分为接触式测量与非接触式测量 ;按测量系统是否向被测对象施加能量,可分为主动式测量和被动式测量 ;按被测量性质,可分为时域测量、频域测量、数据域测量和随机测量等。

1.1.2　直接测量、间接测量与组合测量

1. 直接测量

用按已知标准标定好的测量仪器,对某一未知量直接进行测量,得出未知量的数值,这类测量称直接测量。例如,用弹簧管压力表测量压力,用磁电式电表测量电压或电流等。

直接测量并不意味着就是用直读式仪表进行测量,许多比较式仪器例如电桥、电位差计等,虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量的值,但因参与测量的对象就是被测量本身,所以仍属于直接测量。

直接测量的优点是测量过程简单而迅速,是工程技术中采用得比较广泛的测量方法。

2. 间接测量

对几个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后通过已知函数关系的公式、曲线或表格,求出该未知量,这类测量称为间接测量。例如,在直流电路中,直接测出负载的电流 I 和电压 U,根据功率 $P = IU$ 的函数关系,便可求得负载消耗的电功率。

间接测量方法手续较烦,花费时间也较多,一般在直接测量很不方便、误差较大及缺乏直接测量的仪器等情况下才采用。这类方法大多数用在实验室,但工程中有时也用。

3. 组合测量

在测量中，使各个未知量以不同的组合形式出现（或改变测量条件来获得这种不同的组合），根据直接测量和间接测量所得到的数据，通过解一组联立方程而求出未知量的数值，这类测量称组合测量，又称联立测量。组合测量中，未知量与被测量存在已知的函数关系（表现为方程组）。

例如，为了测量电阻的温度系数，可利用电阻值与温度间的关系公式

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$$

式中 α，β——电阻的温度系数；

R_{20}——电阻在 20℃ 时的阻值；

t——测试时的温度。

为了测出电阻的 α 与 β 值，采用改变测试温度的办法，在三种温度 t_1，t_2 及 t_3 下，分别测得对应的电阻值 R_{t1}，R_{t2} 及 R_{t3}，然后代入上述公式，得到一组联立方程，解此方程组后，便可求得 α，β 和 R_{20}。

组合测量的测量过程比较复杂，花时较多，但易达到较高精度，因此被认为是一种特殊的精密测量方法，一般适用于科学实验或特殊场合。

1.1.3 偏差式测量法、零位式测量法与微差式测量法

1. 偏差式测量法

在测量过程中，用仪表指针相对于刻度线的位移（偏差）来直接表示被测量，这种方法称为偏差式测量法，它的测量过程比较简单、迅速，但测量的精确度较低，被广泛用于工程测量。

图 1-1 所示的压力表就是偏差式测量仪表。由于被测介质压力的作用使弹簧变形，产生一个弹性反作用力，当被测介质压力产生的作用力与弹簧变形反作用力相平衡时，活塞达到平衡，这时指针偏移在标尺上对应的刻度值，就表示被测介质压力值。显然，压力表的指示精度取决于弹簧质量及刻度校准情况，由于弹簧变形力不是力的标准量，必须用标准重量校准弹簧，因此这类仪表一般精确度不高于 0.5%。

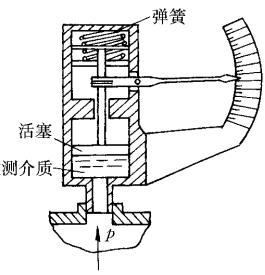


图 1-1 压力表

2. 零位式测量法

零位式测量法（又称补偿式或平衡式测量法）是在测量过程中，用指零仪表的零位指示来检测测量系统是否处于平衡状态，当测量系统达到平衡时，用已知的基准量决定被测未知量的量值。例如用电位差计测量待测电势。

图 1-2 是直流电位差计简化等效电路。测量前先将被测电路开断，在电势 E 的作用下，调节电位器 RP_1，校准回路的工作电流 I，从而在电阻 RP 上可得某一基准电压 U_k。测量时调整 RP 的活动触点，使检流计 G（作为零示器）回零（$I_g = 0$），则 $U_k = U_x$，这样，基准电压 U_k 的值就表示被测未知电压值 U_x。

只要零示器的灵敏度足够高，零位式测量法可以获得较高的测量精度，因为它主要取决于标准量的精度。但此法在测量过程中要进行平衡操作，费时较多，所以不适宜测量变化迅速的信号，只适用于测量变化较缓慢的信号。它在工程实践和实验室中应用很普遍。