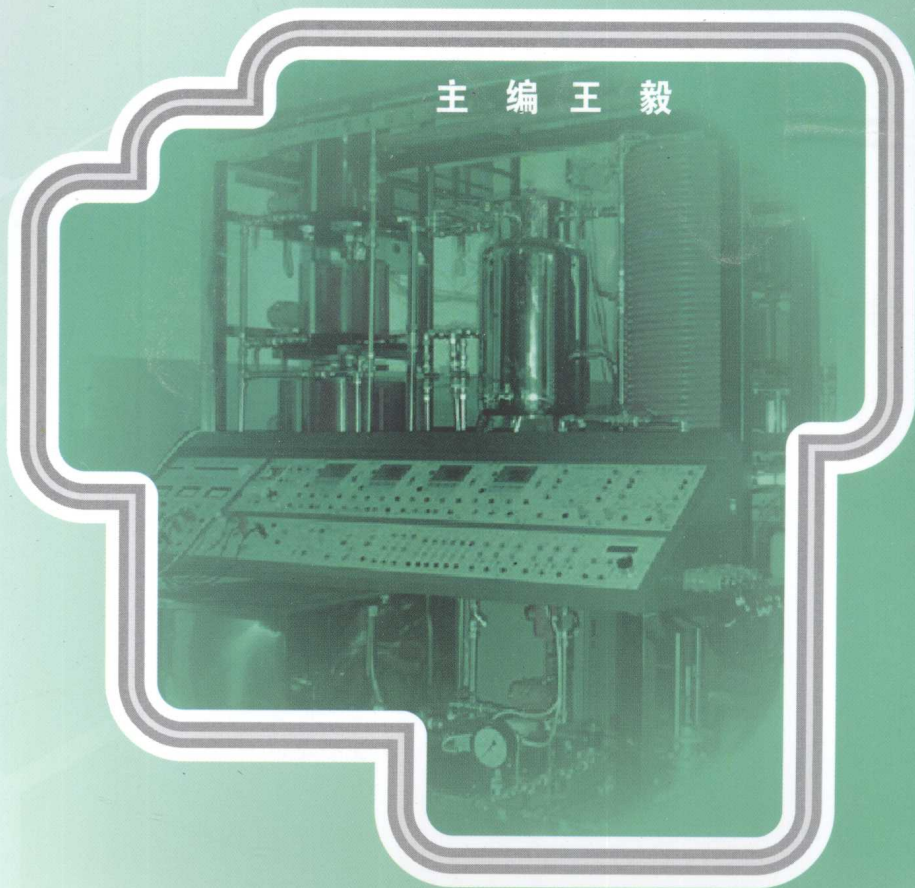




全国高等院校 **过程装备与控制工程** 专业系列规划教材

# 过程装备测试技术

主 编 王 毅



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材

# 过程装备测试技术

主 编 王 毅  
副主编 侯雄坡  
参 编 周 涛 艾小涛



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书从过程装备测试技术的实际应用出发,主要介绍了过程装备测试技术的基本知识、传感器的基本原理及结构,阐述了压力、温度、流量、液位、物质成分等常见参数的测量方法及所用仪器、仪表的结构、原理和应用,介绍了动态和静态设备的检测方法等内容,最后简要介绍了测试技术的新进展。

本书重点突出过程装备与控制工程专业的特点,并兼顾动设备与静设备的测试方法。

本书可作为高等工业院校过程装备与控制工程专业及其相关专业的本科教材,也可作为研究生和其他专业的使用教材,同时还可供从事过程设备与控制行业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

过程装备测试技术/王毅主编. —北京:北京大学出版社, 2010. 6

(全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材)

ISBN 978-7-301-17290-2

I. ①过… II. ①王… III. ①化工过程—化工设备—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 101401 号

书 名: 过程装备测试技术

著作责任者: 王 毅 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-17290-2/TH·0195

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26.75 印张 621 千字

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

过程装备测试技术是过程装备与控制工程专业的系列课程之一，是高等工业院校过程装备与控制工程专业的统编教材。

本书内容丰富，涉及面广。在各章中选编了一些实例，并附有习题与思考题，有利于对过程装备测试技术基础知识学习较少的读者掌握与应用。

本书突出过程装备与控制工程专业的特点，立足于实践与应用，力求使学生掌握测试技术的有关基础知识，同时强调其先进性。

本书是根据西安交通大学王毅教授的长期教学积累，参考或引用了一些国内外相关著作及文献资料编写而成的。编写中力求做到重点突出、内容新颖、难易适中，同时又照顾到了其他专业方向的特点。

本书包括四个方面的内容：(1)基础概念和理论，主要介绍过程检测技术的基本概念、仪器仪表的各种技术性能指标、基本误差知识，以及常用传感器的分类和基本原理等；(2)过程参数测试，主要针对流程性生产中遇到的温度、压力与压差、流量、液位、物质成分等过程参数的测试；(3)过程装备测试，主要介绍过程装备生产与运行中遇到的流速与流向、振动与噪声、转矩转速的测量，压缩机各种运动规律的测量，及设备质量检验技术；(4)计算机测试系统、检测领域新技术以及新进展。

全书共分14章，第1章至第9章主要由王毅教授编写，参加编写的有周涛、艾小涛；第10章至第14章由侯雄坡编写。在编写过程中，得到了潘琦、段权、黄拯、李明杰等老师的帮助，张丽丽做了很多文字校对工作，在此深表感谢。

由于时间仓促，加之编者水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请各位专家和读者批评指正。

编 者

2010年3月

# 目 录

<b>第 1 章 测试技术基础</b> .....	1	2.3.1 磁电感应式传感器	41
1.1 测试技术概述	2	2.3.2 霍尔式传感器	42
1.1.1 测试的目的和意义	2	2.4 压电式传感器	43
1.1.2 测试系统的组成及特点	2	2.4.1 压电效应与压电材料	43
1.1.3 测量方法及其分类	3	2.4.2 压电式传感器	45
1.2 测量误差分析	4	2.5 光电式传感器	45
1.2.1 误差的基本概念	4	2.5.1 光电效应和光电器件	45
1.2.2 误差分类	6	2.5.2 光纤传感器	49
1.2.3 误差处理	6	2.6 其他传感器	52
1.3 测量不确定度及其评定	15	2.6.1 超声波传感器	52
1.3.1 测量不确定度的概念	15	2.6.2 红外传感器	53
1.3.2 测量不确定度的评定	16	2.6.3 半导体传感器	54
1.4 测量仪器仪表的技术指标	19	2.6.4 数字传感器	56
1.4.1 测量装置的基本性能	19	2.6.5 智能传感器	59
1.4.2 仪器的静态特性	20	思考与练习	60
1.4.3 仪器的动态指标	21	<b>第 3 章 温度测量</b> .....	61
1.5 实验数据处理	26	3.1 概述	62
1.5.1 列表法	26	3.1.1 温度的概念	62
1.5.2 图示法	26	3.1.2 温标	62
1.5.3 经验公式法	26	3.1.3 温度测量的方法	64
1.5.4 直线拟合	26	3.2 膨胀式温度计	66
思考与练习	29	3.2.1 玻璃液体温度计	66
<b>第 2 章 传感器</b> .....	30	3.2.2 压力式温度计	66
2.1 概述	31	3.2.3 双金属温度计	68
2.1.1 传感器	31	3.3 热电偶温度计	69
2.1.2 传感器的分类	31	3.3.1 热电偶工作原理	69
2.1.3 传感器的发展趋势	31	3.3.2 热电偶基本定律	71
2.2 电参数型传感器	32	3.3.3 热电偶冷端处理和补偿	73
2.2.1 电阻应变式传感器	32	3.3.4 热电偶的实用测温电路	75
2.2.2 电感式传感器	33	3.3.5 热电偶的检定和测温误差分析	76
2.2.3 电容式传感器	38	3.3.6 热电偶的选择、使用和安装	77
2.3 磁电式传感器	41		

3.4 热电阻温度计 .....	79	4.5 负荷式压力计 .....	114
3.4.1 测温原理 .....	79	4.5.1 活塞式压力计 .....	115
3.4.2 热电阻的特点 .....	80	4.5.2 浮球式压力计 .....	116
3.4.3 热电阻的分类 .....	80	4.6 其他压力检测方法 .....	117
3.4.4 热电阻的结构 .....	80	4.6.1 弹性振动式压力计 .....	117
3.4.5 金属热电阻温度计 .....	82	4.6.2 压磁式压力计 .....	118
3.4.6 热敏电阻 .....	83	4.6.3 真空计 .....	118
3.4.7 其他热电阻 .....	84	4.7 压力仪表的选择与安装 .....	118
3.4.8 热电阻的使用和误差 分析 .....	85	4.7.1 压力仪表的选择 .....	118
3.5 辐射测温技术及仪表 .....	85	4.7.2 压力仪表的安装和使用 .....	120
3.5.1 辐射基本概念 .....	86	4.8 压力仪表的标定 .....	121
3.5.2 辐射测温的基本方法 .....	87	思考与练习 .....	122
3.5.3 辐射测温仪表分类及 性能 .....	88	<b>第5章 流量测量</b> .....	124
3.6 其他测温技术 .....	89	5.1 概述 .....	125
3.6.1 光导纤维测温技术 .....	89	5.2 节流式差压流量计 .....	126
3.6.2 集成温度传感器测温 技术 .....	92	5.2.1 标准节流装置 .....	126
3.6.3 石英测温技术 .....	93	5.2.2 标准节流装置的流量 公式和参数 .....	133
3.6.4 超声波测温技术 .....	93	5.2.3 流量测量的不确定度 估计 .....	135
思考与练习 .....	94	5.3 转子式流量计 .....	138
附录 标准热电偶和热电阻 分度表 .....	94	5.3.1 工作原理与流量公式 .....	138
<b>第4章 压力测量</b> .....	99	5.3.2 转子流量计的示值 换算 .....	140
4.1 概述 .....	100	5.3.3 转子流量计的特性 .....	141
4.1.1 压力的定义与单位 .....	100	5.3.4 转子流量计的选择、 安装和使用 .....	142
4.1.2 压力测量的主要方法 .....	101	5.4 靶式流量计 .....	143
4.2 液柱式压力计 .....	102	5.4.1 工作原理和流量 方程式 .....	144
4.2.1 U形管压力计 .....	103	5.4.2 流量换算 .....	144
4.2.2 单管压力计 .....	103	5.4.3 影响流量系数的因素 .....	145
4.2.3 微压计 .....	104	5.4.4 靶式流量计的分类与 结构 .....	145
4.3 弹性式压力计 .....	104	5.4.5 靶式流量计的适用场合与 安装使用要求 .....	148
4.3.1 弹性元件和特性 .....	105	5.4.6 校验装置 .....	149
4.3.2 测量原理 .....	107	5.5 涡轮流量计 .....	149
4.3.3 弹性式压力计 .....	107	5.5.1 涡轮流量计的结构 原理 .....	150
4.3.4 弹性压力计的误差 .....	109		
4.4 电气式压力计 .....	109		
4.4.1 电阻式压力计 .....	109		
4.4.2 压电式压力计 .....	113		

5.5.2 涡轮流量传感器的分类与应用	152	6.5.1 全反射型光纤液位计	180
5.5.3 涡轮流量计的特点和使用注意事项	153	6.5.2 浮沉式光纤液位计	181
5.6 电磁流量计	154	6.6 液位计的选择	182
5.6.1 电磁流量计的工作原理	154	思考与练习	183
5.6.2 电磁流量计的结构	155	<b>第7章 物质成分分析</b>	184
5.6.3 电磁流量计的特点和分类	158	7.1 氧含量测量	185
5.6.4 电磁式流量计的安装与使用	158	7.1.1 磁式氧分析仪	185
5.7 涡街流量计	160	7.1.2 氧化锆氧分析仪	191
5.7.1 工作原理	160	7.2 色谱法测量气体成分	194
5.7.2 结构与分类	161	7.2.1 色谱法概述	194
5.7.3 涡街流量计的特点	162	7.2.2 色谱法基本工作原理	194
5.7.4 涡街流量计的选型和安装使用	163	7.2.3 气相色谱仪	195
5.8 超声波流量计	165	7.2.4 色谱仪的使用注意事项	198
5.8.1 测量原理	165	7.3 红外光谱法测量气体成分	198
5.8.2 超声波流量计简介	168	7.3.1 理论基础	199
5.8.3 安装使用注意事项	170	7.3.2 红外线气体分析仪类型及工作原理	200
思考与练习	172	7.3.3 主要结构元件	202
<b>第6章 液位测量</b>	173	7.4 化学发光法测量氮氧化物浓度	204
6.1 概述	174	7.4.1 化学发光机理	205
6.2 差压式液位测量方法	174	7.4.2 氮氧化物的测量原理	205
6.2.1 工作原理	174	思考与练习	207
6.2.2 差压式液位计的安装方式	175	<b>第8章 气流速度和方向测量</b>	209
6.2.3 吹气式液位测量系统	175	8.1 测压管速度测量方法	210
6.3 电容式液位测量方法	176	8.1.1 测速原理	210
6.3.1 电容式液位计的基本原理	176	8.1.2 测压装置	211
6.3.2 导电液体的电容式液位计	176	8.1.3 动压管的标定	212
6.3.3 非导电液体的电容式液位计	177	8.2 热线风速仪	213
6.4 电阻式液位测量方法	178	8.2.1 基本构造	214
6.4.1 电接点液位计	178	8.2.2 工作原理与热线方程	214
6.4.2 热电阻液位计	179	8.2.3 热线风速仪的动态特性	217
6.5 光纤式液位测量方法	180	8.2.4 热线风速仪的方向特性	217
		8.2.5 热线风速仪的标定	218
		8.3 激光多普勒测速技术	219
		8.3.1 工作原理	219

8.3.2 激光多普勒测速光学系统 .....	220	10.3.3 转矩测量方法的选择 .....	284
8.3.3 激光多普勒测速信号处理系统 .....	224	思考与练习 .....	284
8.4 气流流动方向测量与复合测压管 .....	225	<b>第 11 章 压缩机运动规律测试</b> .....	286
8.4.1 平面气流方向的测量 .....	225	11.1 气阀运动规律的测试 .....	287
8.4.2 空间气流方向的测量 .....	228	11.1.1 概述 .....	287
思考与练习 .....	230	11.1.2 阀片位移的测量 .....	288
<b>第 9 章 振动和噪声测量</b> .....	231	11.1.3 测试中的其他问题 .....	294
9.1 概述 .....	232	11.2 压缩机指示图的录取 .....	297
9.2 振动测量 .....	233	11.2.1 概述 .....	297
9.2.1 振动理论基础 .....	233	11.2.2 压电式指示器 .....	298
9.2.2 振动的激励与激振器 .....	236	11.2.3 指示图的整理计算 .....	299
9.2.3 测振传感器及其应用 .....	239	思考与练习 .....	300
9.2.4 振动测量仪器 .....	245	<b>第 12 章 过程设备质量检验</b> .....	301
9.2.5 振动测试系统实例 .....	247	12.1 概述 .....	302
9.3 噪声测量 .....	248	12.1.1 过程设备质量与安全 .....	302
9.3.1 噪声测量的主要参数 .....	248	12.1.2 设备质量检验的依据 .....	302
9.3.2 噪声的分析与评价 .....	250	12.1.3 设备质量检验的方法 .....	304
9.3.3 噪声测量仪器 .....	254	12.1.4 设备质量检验的形式和期限 .....	305
9.3.4 噪声测量方法 .....	256	12.1.5 设备检验前的准备 .....	307
9.3.5 噪声测量实例 .....	260	12.2 设备残余应力的测量 .....	308
思考与练习 .....	260	12.2.1 残余应力的概念 .....	308
<b>第 10 章 转速、转矩和功率测量</b> .....	262	12.2.2 盲孔测试法 .....	309
10.1 基本概念 .....	263	12.2.3 X 射线衍射测试法 .....	311
10.1.1 转速 .....	263	12.2.4 其他测试法简介 .....	313
10.1.2 转矩 .....	263	12.3 无损检测技术 .....	315
10.1.3 功率 .....	264	12.3.1 无损检测概况 .....	315
10.1.4 机械特性和负载特性 .....	264	12.3.2 射线检测技术 .....	316
10.2 转速测量 .....	265	12.3.3 超声波检测技术 .....	328
10.2.1 概述 .....	265	12.3.4 磁粉检测技术 .....	339
10.2.2 模拟型转速计 .....	266	12.3.5 渗透检测技术 .....	345
10.2.3 数字型转速计 .....	268	12.3.6 涡流检测技术 .....	350
10.2.4 闪频测速计 .....	272	12.3.7 无损检测技术的选择和应用 .....	352
10.3 转矩测量 .....	273	12.4 压力容器的压力试验 .....	357
10.3.1 扭变传递法 .....	273	12.4.1 耐压试验 .....	357
10.3.2 力矩平衡法和能量平衡法 .....	280	12.4.2 泄漏试验 .....	359
		12.5 设备质量检验综合案例 .....	362



附录 常用无损检测技术标准一览表 ···	364	13.4.2 空压机性能综合测试系统 ·····	397
思考与练习 ·····	365	13.4.3 水泵性能综合测试系统 ·····	401
<b>第 13 章 计算机测试系统</b> ·····	<b>366</b>	思考与练习 ·····	403
13.1 计算机测试系统的结构 ·····	367	<b>第 14 章 检测领域新技术及其进展</b> ···	<b>404</b>
13.1.1 计算机测试系统中的“计算机” ·····	367	14.1 检测领域新概念 ·····	405
13.1.2 计算机在测试系统中的作用 ·····	369	14.1.1 软测量技术 ·····	405
13.1.3 计算机测试系统的体系结构 ·····	370	14.1.2 测试可视化 ·····	405
13.1.4 计算机测试系统的性能表征 ·····	373	14.2 传感器技术新进展 ·····	407
13.2 前向通道的组成 ·····	374	14.2.1 智能传感器 ·····	407
13.2.1 传感器信号调理 ·····	374	14.2.2 多传感器数据融合 ·····	408
13.2.2 多路信号的采样与保持 ·····	381	14.2.3 现场总线仪表 ·····	409
13.2.3 模数转换器 ·····	388	14.2.4 无线测量技术 ·····	410
13.3 信号的采样与截断 ·····	392	14.3 虚拟仪器技术 ·····	411
13.3.1 采样定理 ·····	392	14.3.1 虚拟仪器的硬件系统 ···	411
13.3.2 窗函数 ·····	394	14.3.2 虚拟仪器的软件系统 ···	412
13.4 计算机测试系统的设计 ·····	396	14.3.3 虚拟仪器的应用与发展 ·····	413
13.4.1 计算机测试系统设计方法 ·····	396	思考与练习 ·····	414
		<b>参考文献</b> ·····	<b>415</b>

# 第 1 章 测试技术基础

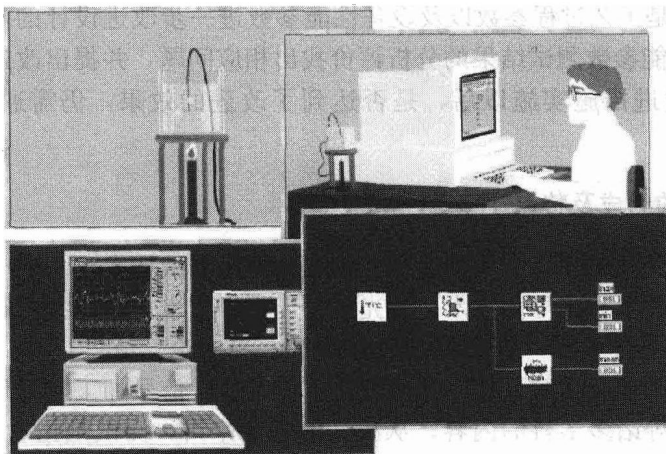
## 教学要求

知识要点	相关知识	能力要求
测试系统的组成和基本原理	测试技术的目的意义, 测试系统的特点、组成及原理, 基本方法和分类	理解
测量误差处理方法	误差的基本概念, 误差的分类以及各种误差的处理方法	掌握
测量不确定度的概念和评定	测量不确定度的概念和评定	理解
仪表的精度、静态特性和动态特性	测量仪表的基本性能和技术指标	掌握
直线拟合	实验数据的一些基本处理方法, 特别是线性拟合	掌握

## 引例

人们为了对被测对象所包含的信息进行定性的分析和定量的掌握操作, 必须采取一系列技术措施来完成。还要根据被测对象的特点, 选用合适的测量仪器仪表及测试方法, 通过测量、数据处理和误差分析, 得到被测量的数据, 为生产过程自动化和科学研究提供准确、可靠的数据。现代测试技术几乎应用了所有近代新技术和新理论, 如半导体技术、激光技术、光纤技术、声控技术、遥感技术、自动化技术、计算机应用技术等。

下面的图示就是一个典型的现代测试技术应用例子。本章的目的就是使读者对测试技术、测试系统的特点、组成及原理等有一个总体的了解和掌握, 并且能在该领域中领略先进的现代测试技术, 激发学习的兴趣。



虚拟仪器构成的液体温度测试系统

## 1.1 测试技术概述

### 1.1.1 测试的目的和意义

测试技术，就是利用现代测试手段对工程中各种物理信号进行检测、试验、分析，并从中提取有用信息的一门新兴技术。其测量和分析的结果客观地描述了研究对象的状态、变化和特征，并为进一步改造和控制研究对象提供可靠依据。

测试技术是三大信息技术(测试控制技术、计算机技术和通信技术)之一，是在科学实验和工业生产过程中，根据被测对象的特点，选用合适的测量仪器仪表及测试方法，通过测量、数据处理和误差分析，得到被测量的数据，为生产过程自动化和科学研究提供准确、可靠的数据的技术。科学技术的发展为测试技术提供了新的方法和途径，特别是新材料、新结构传感器的研制成功，以及微型计算机的广泛应用，给测试技术带来了巨大的变革，对提高检测系统的准确性、快速性、可靠性和抗干扰能力等方面发挥了显著的作用，扩大了测试技术的应用范围，同时也提出了新的课题。

近 30 年来，随着电子技术和计算机应用技术的飞速发展，传统的测试技术得到了较大的改进和发展，如测试准确度和灵敏度得到了提高，测试速度也变得更快，测试结果能连续实时地自动记录，并可用计算机对测试结果进行分析计算以及实时完成生产过程的自动控制等。在现代化生产中，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能试验等都离不开测试技术，尤其是在实现自动化生产过程中，所用的检测技术和装置是自动化系统的“感觉器官”。因此，测试技术已成为自动控制系统的重要组成部分。

在工程技术领域，测试技术的作用有如下几个方面。

(1) 通过检测生产过程中的相关工艺参数，对生产过程的运行情况进行监视，使之保持在最佳的工作状况；或者对生产设备在运转过程中的有关技术参数进行测量，并对测试结果进行分析，判断设备的工作状态。

(2) 将生产过程中各种工艺参数的测量结果与要求的数值进行比较，根据偏差的大小与范围要求进行反馈，并对工艺参数进行调整和控制，以保证生产过程的需求。

(3) 测试结果是工艺过程参数及设备性能参数进一步改进设计的基础。根据对工艺过程参数和设备性能参数测试结果的分析评价找出相应问题，并提出改进工艺过程和设备性能的措施。在改进措施实施以后，是否达到了改进的效果，仍需通过测试来分析和评定。

### 1.1.2 测试系统的组成及特点

测试技术是多种学科知识的综合运用。特别是现代测试技术，几乎应用了所有近代新技术和新理论，新技术如半导体技术、激光技术、光纤技术、声控技术、遥感技术、自动化技术、计算机应用技术等，新理论如数理统计、控制论、信息论等。从广义的角度来讲，测试工作的范围涉及试验设计、模型理论、传感器、信号加工与处理、控制工程、系统辨识、参数估计等诸多学科的内容；从狭义的角度来讲，测试是指对物理信号的检测、变换、传输、处理直至显示、记录或以电量输出测试结果的工作。本书主要是从狭义的角度来介绍测试工作的基本过程和基本原理。

### 特别提示

测试包括传统方法的测试(一般指模拟方法)和电量测试。本教材主要介绍电量测试的方法。

测试系统要完成对被测量的检测,首先必须要获得被测量的信息,并且根据被测量信息的物理学特性,将其转换成容易处理和传递的电量信号,然后将电量信号所表示的信息进行变换或放大,再用指示仪或记录仪将信息显示或记录下来。有的测试系统还需要对信息进行处理,以获得反映实际被测量数值大小的测试结果。一般的测试系统包括传感器(信息的获得)、测量电路、放大器(信息的变换和调理)、数据处理装置(信息的处理)、显示与记录装置(信息的显示)。它们之间的关系如图 1.1 所示。

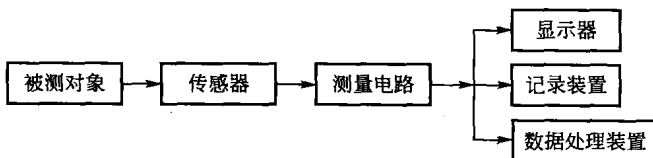


图 1.1 测试系统组成

传感器处于被测对象与测量电路之间。它是将被测量的非电信息转换成电信号的装置,因此是获得测试系统信号输入的重要元件。传感器直接从被测对象中提取被测量的信息,感受其变化并将其转换成便于测量的电量信号,例如将速率转换成电压,将应变转换成电阻等。因此,传感器获得信息的正确与否直接影响着整个测试系统的精度。传感器的工作原理涉及许多自然学科。从理论上讲,凡是具有确定因果关系的物理现象、化学现象、生物现象等,都能作为传感器的设计依据。

测量电路又称中间转换器,它的作用是将传感器输出的电信号进行传输、放大和转换等。测量电路的种类根据传感器的类型而定,如电阻式传感器需采用一个电桥电路把电阻值的变化转换成电流或电压的变化输出,所以它等于测试信号的转换电路。由于测量电路的输出信号一般都比较小,不能直接驱动显示或记录装置工作,故常常需将信号加以放大,因此在测量电路中通常具有放大器。为了使测量信号易于传输和处理,测量电路中有时还具有调制与解调器、模数转换器等。

测试结果的显示通常有三种方式,即模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示是利用指针相对于标尺的位置来读数;数字显示是用数字的形式来显示测试结果的数值大小;图像显示是用屏幕显示读数或者被测参数的变化曲线。在实际调试过程中,有时不仅要读出被测量的具体数值,而且还要了解它的变化过程,特别是在动态测试过程中,测试结果随时变化,无法用显示仪器指示,在这种情况下,就必须将测量信号送入记录装置中自动记录下来。目前常用的自动记录装置有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪以及阵列式记录仪等。

以计算机为基础,配备部分外设装置组成的被测参数的记录和处理系统,是近年来测试系统的发展趋势。测试系统中的计算机既可以完成测试结果的记录或显示,同时又能对测试结果进行计算处理。对测试结果的分析处理方式可根据测试者的要求编写不同的程序,完成不同的任务。

### 1.1.3 测量方法及其分类

测量方法分为直接测量、间接测量和组合测量三种。

### 1. 直接测量

采用按照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，这类测量称为直接测量。例如，用温度计测量温度，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刻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，是工程技术中广泛采用的测量方法。

### 2. 间接测量

首先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繁琐，花费时间也较多，一般在直接测量很不方便、误差较大或缺乏直接测量的仪器等情况下采用。这类方法大多用在实验室中，但工程中也有使用。

### 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，这类测量称为组合测量，又称联立测量。组合测量中，未知量与被测量存在着已知的函数关系(表现为方程组)。

组合测量的测量过程比较复杂，花费时间较多。但容易得到较高精度，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。

## 1.2 测量误差分析

### 1.2.1 误差的基本概念

#### 1. 真值

真值即真实值，是指被测量在一定条件下客观存在的、实际具备的量值。真值通常是个未知量。一般所说的真值是指理论真值、规定真值和相对真值。

理论真值：又称为绝对真值，即在严格的条件下、按照一定的理论，由定义确定的数值。理论真值实际上是测不到的，如平面三角形三个内角之和恒为  $180^\circ$ 。

规定真值：又称为指定真值或代替真值。即用约定的办法来确定真值，解决测量中的真值问题。例如，第 17 届国际计量大会将“米”定义为：光在真空中  $1/299\,792\,458$  秒的时间间隔内行程的长度。这个米基准就被当作计量长度的规定真值。

相对真值：又称为传送真值，即计量器具按精度不同分为若干等级，上一等级的指示值即为下一等级的真值。例如，对于测力计而言，用二级标准测力计校准三级标准测力计，此时二级标准测力计的指示值即为三级标准测力计的相对真值。

## 2. 误差

测量误差是指测量结果与被测量真值之间的差别。测量误差通常表示为绝对误差和相对误差两种形式。绝对误差是指被测量的测得值与被测量的真值之差，用计算公式表示为

$$\delta = x - A \quad (1-1)$$

式中： $\delta$ 为绝对误差； $x$ 为被测量的测得值； $A$ 为被测量的真值。

例如真值为  $30.2 \mu\text{A}$  的电流，测得为  $30.4 \mu\text{A}$ ，则绝对误差为  $0.2 \mu\text{A}$ ；又如当  $\pi$  值近似取  $3.14$  时，其绝对误差约为  $-0.0016$ 。

### 特别提示

通常用测量精度高一级以上的标准仪器或测量基准所得测量值来代替真值(相对真值)，称为实际值。只要标准仪器的误差与测量仪器的误差之比在  $1/3 \sim 1/20$  范围内，实际值就可以替代真值。例如，一个一级的仪表至少应使用  $0.3$  级的仪表来标定，才有意义。

相对误差是指绝对误差与被测真值的比值，常用百分数表示，即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{被测真值}} \times 100\%$$

用符号  $\gamma$  表示，即

$$\gamma = \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

### 特别提示

对于不同的测量值，用测量的绝对误差往往很难评定其测量精度的高低，通常用相对误差来评定。

例如，测量一个电压  $U_1 = 1000 \text{ V}$ ，绝对误差  $\delta_1 = 1 \text{ V}$ ；另一个电压  $U_2 = 10 \text{ V}$ ，绝对误差  $\delta_2 = 0.1 \text{ V}$ 。尽管  $\delta_1 > \delta_2$ ，但不能直观地认为  $U_2$  的测量比  $U_1$  的测量准确。

其相对误差分别为

$$\gamma_1 = \frac{\delta_1}{A_1} = \frac{\delta_1}{U_1} = \frac{1}{1000} \times 100\% = 0.1\%$$

$$\gamma_2 = \frac{\delta_2}{A_2} = \frac{\delta_2}{U_2} = \frac{0.1}{10} \times 100\% = 1\%$$

显然，测量  $U_1$  比测量  $U_2$  准确。

仪表的引用误差就是指仪表在整个量程内的相对误差，定义为

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_M} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中： $\gamma_n$ 为引用误差； $\Delta X$ 为绝对误差； $X_M$ 为仪表的满度值。

我国仪表分为  $0.1$  级、 $0.2$  级、 $0.5$  级、 $1.0$  级、 $1.5$  级、 $2.5$  级和  $5.0$  级共  $7$  级。

### 特别提示

级别数值表示仪表的引用相对误差的最大值(百分数)。如使用  $s$  级的仪表进行测量，那么任何一次测量可能存在的绝对最大误差为

$$\Delta X \leq X_M \times s\%$$

测量的相对误差为

$$\gamma_n \leq \frac{\Delta X_{\max}}{X_M} = \frac{X_M \times s\%}{X}$$

### 1.2.2 误差分类

按测量误差的性质和特点, 测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

#### 1. 系统误差

在相同条件下, 多次测量同一物理量时, 误差的绝对值和符号在测量过程中恒定不变, 或按一定规律变化的误差就称为系统误差。

系统误差又可分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指数值和符号已经确定的系统误差; 未定系统误差或称为变值系统误差, 是指误差数值或符号变化不确定或按照一定规律变化的误差。未定系统误差根据它不同的变化规律, 又可分为线性变化的、周期性变化的、按复杂规律变化的误差等。

系统误差产生的原因, 主要是由于使用的测量方法不完善, 测量人员有限的分辨能力及固有的读数习惯, 采用了存在缺陷的测量原理, 采用了近似公式等原因产生的, 例如, 用铂电阻测量环境温度所产生的非线性读数误差, 就是一种系统误差。系统误差可通过实验的方法找出, 并予以消除或加修正值对测量结果予以修正。

#### 2. 随机误差

随机误差又称偶然误差, 是指在相同条件下, 多次测量同一量值时所出现的绝对值和符号均不定的误差。随机误差小, 则说明测量精密度高。

随机误差在单次测量中, 其绝对值和符号是以不可预计的方式变化。误差的出现是无规律可循的。但是, 如果进行多次重复测量, 这些误差作为整体来看, 则服从一定的统计规律。

随机误差是测量过程中未加控制的多种因素造成的, 如测量时温度的波动、测量力不稳定、油膜带来的停滞现象、视差等。

随机误差可以通过改善测量方法使其减少并用概率统计方法估计误差范围, 但不能将其消除或校正。

#### 3. 粗大误差

明显歪曲测得值的误差称为粗大误差。这类误差是由于操作错误、读数错误、记录错误等原因造成的, 又叫疏失误差。粗大误差由于误差数值明显, 容易从测量结果发现。一经发现粗大误差, 可以认为该次测量无效, 测量数据作废, 即可消除它对测量结果的影响。

### 1.2.3 误差处理

#### 1. 系统误差的处理

在测量过程中产生系统误差的因素是复杂的, 有多种因素。在测量数据中如何发现进而消除或减少系统误差, 是提高测量精确度的一个重要问题。

##### 1) 系统误差的发现

##### (1) 已定系统误差的发现

由于已定系统误差的大小和方向不变, 对测量结果的影响也是一定值。因此它不能从

一系列测得值的处理中揭示，而只能通过实验对比方法去发现，即通过改变测量条件进行不等精度测量来揭示系统误差。例如，在相对测量中，用量块作标准件并按其标称尺寸使用时，对于量块的尺寸偏差引起的系统误差可用高精度的仪器对量块实际尺寸进行测量来发现它，或用更高精度的量块进行对比测量来发现。

## (2) 未定系统误差的发现

未定系统误差可以从一系列测量值的处理和分析观察中发现，方法有多种。常用的方法有残余误差观察法，即将测量系列按测量顺序排列(或作图)观察各残余误差的变化规律，如图 1.2 所示。若残余误差大体正负相同，无显著变化，则不存在变值系统误差，如图 1.2(a)所示；若残余误差有规律地递增或递减，其趋势始终不变，则可认为存在线性变化的系统误差，如图 1.2(b)所示；若残余误差有规律地增减交替，形成循环重复时，则认为存在周期性变化的系统误差，如图 1.2(c)所示。

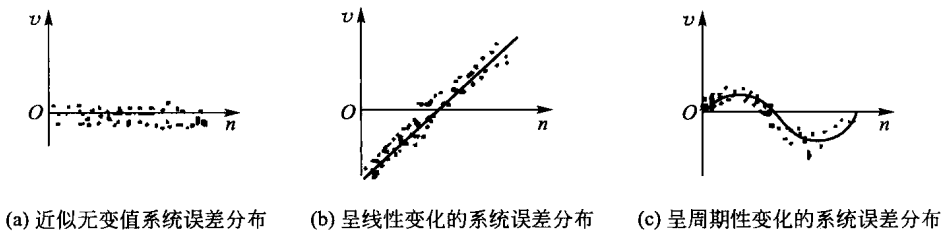


图 1.2 未定系统误差的发现

## 2) 系统误差的消除

(1) 误差根除法。从产生误差的根源上消除，这是消除系统误差的最根本方法。为此，在测量之前，应对测量过程中可能产生系统误差的环节作仔细分析，找出产生系统误差的根源并加以消除。例如，为了防止测量过程中仪器零位的变动，测量开始和结束时都需检查仪器零位；又如，为了防止仪器因长期使用磨损等因素而降低精度，要定期进行严格的检定与维修。

(2) 误差修正法。这种方法是预先检定出计量器具的系统误差，以该误差数值的相反数作为修正值，加到实际测得值上，即可得到不包含该系统误差的测量结果。

(3) 误差抵消法。根据具体情况拟定测量方案，进行两头测量，使得两次测量读数时出现的系统误差大小相等、方向相反；再取两次测得值的平均值作为测量结果，即可消除系统误差。例如，测量螺纹零件的螺距时，分别测出左、右牙面螺距。然后进行平均，则可抵消螺纹零件测量时安装不正确引起的系统误差。

系统误差的消除除以上几种方法外，还有对称消除法、微差法和比较消除法等。

## 2. 随机误差的处理

### 1) 随机误差的统计特性及概率分布

**【例 1-1】** 用立式测长仪对同一零件的同一部位的尺寸重复测量 200 次，得到 200 个测值，将测值分组，列入表 1-1 第 2、3 列中，测量次数为  $N$ 。统计每组出现的次数  $n_i$ ，算出各组出现的频率  $n_i/N$ ，列入表 1-1 第 4、5 列中。以横坐标表示尺寸的测值，纵坐标表示频率，将这些数据画成直方图，如图 1.3 所示。连接各组的中值的纵坐标值得一折线，称为测值的实际分布曲线。



表 1-1 测量结果及数据处理

组序 $i$	测值 $x$ 的范围 (mm)	各组的中值 $x_i$ (mm)	出现次数 $n_i$	频率 $n_i/N$	误差 $\delta_i = x_i - \bar{x}$
1	7.998 25~7.998 75	7.998 5	2	0.01	-0.02
2	7.998 75~7.999 25	7.999 0	4	0.02	-0.001 5
3	7.999 25~7.999 75	7.999 5	16	0.08	-0.001
4	7.999 75~8.000 25	8.000 0	38	0.19	-0.000 5
5	8.000 25~8.000 75	8.000 5	78	0.39	0
6	8.000 75~8.001 25	8.001 0	40	0.20	+0.000 5
7	8.001 25~8.001 75	8.001 5	18	0.09	+0.001
8	8.001 75~8.002 25	8.002 0	3	0.015	+0.001 5
9	8.002 25~8.002 75	8.002 5	1	0.005	+0.002
$\Sigma$	—	—	$N = \sum_{i=1}^9 n_i = 200$	$\sum_{i=1}^9 \frac{n_i}{N} = 1$	$\sum_{i=1}^9 n_i \delta_i = 0$
$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^9 n_i x_i \approx 8.000 5$			$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i \delta_i^2}{N}} \approx 0.64 \mu\text{m}$		

如果将上述实验的测量次数  $N$  无限增大 ( $N \rightarrow \infty$ ), 分组间隔  $\Delta x$  无限减小 ( $\Delta x \rightarrow 0$ ), 则得到如图 1.4 所示的光滑曲线。根据概率论原理可知, 符合上述特性的分布为正态分布。大量实验表明, 多数随机误差都符合正态分布规律, 只有少数随机误差不符合正态分布规律。

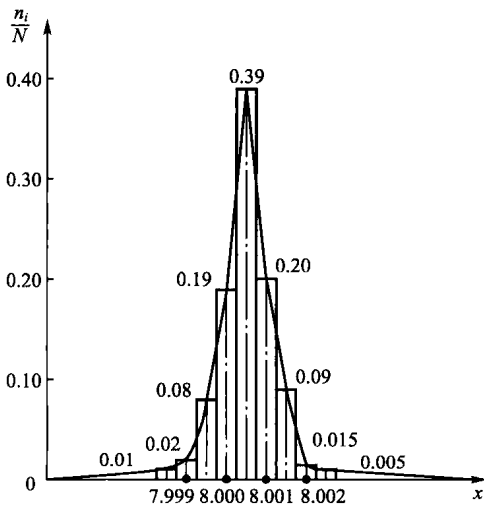


图 1.3 大量重复测量直方图

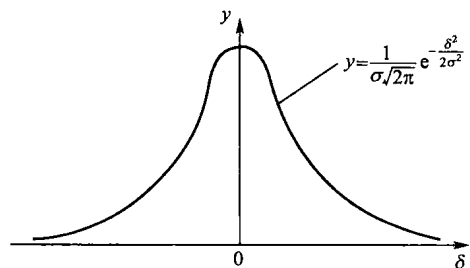


图 1.4 随机误差分布

大量测量实践的统计分析表明, 随机误差的分布曲线多呈正态分布。正态分布曲线如图 1.4 所示。由此可归纳出随机误差具有以下几个分布特性。