



普通高等教育“十二五”机电类规划教材

精品推荐



MACHINERY



工程测试技术

郑艳玲 张登攀 主编

- 精品课程配套教材
- 采用最新国家标准
- 配套习题、答案、课件等丰富资源
- 教学资源请登录华信教育资源网 (www.hxedu.com.cn) 免费获取



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

工程测试技术

郑艳玲 张登攀 主 编
宋长源 李晓敏 付广春 副主编
李建伟 聂永芳

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地阐述了现代测试技术领域的传感器技术、信号处理技术、测试系统的构成和设计方法，并结合工程实际应用介绍了测试技术在现代工业生产中的应用。

书中内容的编写，着重拓宽基础知识面，加强工程背景知识，以培养学生创新能力和工程实践能力为原则，尽可能减少在理论和原理性内容上与先修课程的重复，通过对应用实例的分析提高学生创新实践能力。为帮助读者理解掌握各章内容，书中有针对性地设置一定量的习题。

本书力求叙述简洁，突出实践。通过本书的学习，读者可建立从测试技术理论到测试系统实践的整体架构，掌握测试技术领域的基础理论和专业知识。

本书可作为高等院校、职业技术学院测控技术与仪器、仪器仪表及机电一体化等专业的相关课程教材和教学参考书，建议学时为 48 学时，也可供广大相关工程技术人员自学和参考。

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。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程测试技术/郑艳玲, 张登攀主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.6
普通高等教育“十二五”机电类规划教材
ISBN 978-7-121-13489-0

I. ①工… II. ①郑… ②张… III. ①工程测试—高等学校—教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 084541 号

策划编辑: 朱清江

责任编辑: 徐 萍

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18 字数: 461 千字

印 次: 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 34.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

机电测试技术是机械、电子、计算机及物理等学科领域先进技术的高度综合，是信息时代科技进步的重要标志。机电测试技术担负着现代工业生产系统运行中的信息采集、处理、分析及相关仪器系统设计的任务，是设备安全、可靠运行的保证。本书是在结合多所院校机电一体化、仪器仪表等相关专业本科教学培养要求的基础上组织编写的。

本教材在编写过程中，参考了大量的相关书籍，内容安排上尽量结合专业培养目标，从创新的角度组织测试系统设计所需要的传感器技术、信号处理技术、测试系统设计技术等相关基础理论和实践环节等内容。教材编写力求具有创新性、实用性和先进性，并且通俗易懂、深入浅出，使读者通过学习获得测试领域专业技能及主动创新能力。

本书是理工类专业本科生的一门专业基础课，内容组织上重点围绕测试系统的设计能力培养，具体内容包括电量和非电量的检测技术、测试信号的获取与调理技术、信号处理与分析技术、计算机自动测试系统的设计与评价技术等，并进一步探讨了测试技术的发展方向。

全书共分9章。河南科技学院郑艳玲编写第1章和第4章的4.9节、4.10节，付广春编写第3章和第5章，李晓敏编写第2章的2.4节和第4章的4.11节，并同聂永芳联合完成第6章，聂永芳编写第7章，宋长源编写第4章的4.1节~4.5节；河南理工大学张登攀编写第2章的2.1节~2.3节和第8章；河南农业大学的李建伟编写第4章的4.6节~4.8节和第9章。

本书在编写过程中得到了华中科技大学何岭松教授的大力支持，同时也得到了相关参与编写本书的院校老师和领导的大力支持和关心。感谢所有给予本书以关心和帮助的朋友，以及所参阅的相关文献的作者。

尽管参与编写的全体作者尽心尽力，但疏漏和不足之处在所难免，恳请广大读者和专家、学者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 测试技术的作用.....	1
1.2 测试技术的基本概念.....	3
1.2.1 测量方法及其分类.....	3
1.2.2 测量误差.....	4
1.3 测试系统的组成.....	13
1.4 测试系统的发展.....	15
习题.....	16
第 2 章 测试信号的分析处理	17
2.1 信号的分类.....	17
2.1.1 按时间变量的取值方式分类.....	17
2.1.2 按信号随时间变化的规律分类.....	18
2.1.3 按信号的能量特征分类.....	20
2.1.4 从信号的可实现性分类.....	21
2.2 信号的描述与分析.....	21
2.3 信号频谱分析.....	23
2.3.1 周期信号的频谱分析.....	23
2.3.2 非周期信号的频谱分析.....	27
2.3.3 随机信号的频谱分析.....	32
2.4 数字信号处理.....	36
2.4.1 模拟信号的离散化.....	36
2.4.2 离散傅里叶变换.....	38
习题.....	40
第 3 章 测试系统的基本特性	42
3.1 测试装置与线性系统.....	42
3.2 测试系统的静态特性.....	44
3.2.1 静态传递特性与定度曲线.....	44
3.2.2 灵敏度.....	45
3.2.3 线性度.....	46
3.2.4 量程及测量范围.....	46

3.2.5	稳定性	46
3.3	测试系统的动态特性	47
3.3.1	典型信号的时域响应	47
3.3.2	传递函数	48
3.3.3	频率特性	49
3.4	不失真测试的实现条件	52
	习题	54
第4章	测试系统常用传感器介绍	55
4.1	传感器概述	55
4.1.1	传感器的基本概念和组成	55
4.1.2	传感器的分类	58
4.2	电阻式传感器	58
4.2.1	电阻应变式传感器	59
4.2.2	电位器式传感器	69
4.3	电容式传感器	76
4.3.1	电容式传感器的工作原理	76
4.3.2	电容式传感器的测量电路	80
4.3.3	电容式传感器的应用	83
4.4	电感式传感器	85
4.4.1	自感式传感器	85
4.4.2	互感式传感器	93
4.5	涡流式传感器	100
4.5.1	涡流式传感器的工作原理	100
4.5.2	涡流式传感器的测量电路	103
4.5.3	涡流式传感器的应用	104
4.6	压电式传感器	107
4.6.1	压电效应	107
4.6.2	压电元件的等效电路	110
4.6.3	压电式传感器的测量电路	111
4.6.4	压电式传感器的应用	115
4.7	磁电感应式传感器	117
4.7.1	恒定磁通式磁电传感器	117
4.7.2	变磁通式磁电传感器	118
4.7.3	磁电感应式传感器的测量电路	118
4.7.4	磁电感应式传感器的应用	119
4.8	霍尔式传感器	120
4.8.1	霍尔效应与霍尔元件的材料	120
4.8.2	霍尔元件的构造及测量电路	122

4.8.3	霍尔元件的类型	123
4.8.4	霍尔式传感器的应用	124
4.9	光电式传感器	125
4.9.1	光电效应	125
4.9.2	光电器件及其特征	126
4.9.3	光电式传感器的测量电路	132
4.9.4	光电式传感器的应用	136
4.10	热电式传感器	139
4.10.1	热电阻传感器	139
4.10.2	热电偶传感器	141
4.10.3	热敏电阻	148
4.11	光纤传感器	150
4.11.1	光纤传感器的原理和分类	150
4.11.2	光纤传感器的应用	158
	习题	161
第5章	测试信号调理电路	164
5.1	电桥电路	164
5.1.1	直流电桥	164
5.1.2	交流电桥	166
5.2	信号放大电路	167
5.2.1	基本放大电路	168
5.2.2	测量放大器	170
5.3	信号的调制与解调	170
5.3.1	信号的调幅与解调	171
5.3.2	信号的调频与解调	172
5.4	滤波器	174
5.4.1	模拟滤波器的原理与分类	175
5.4.2	滤波器的基本参数	176
5.4.3	RC 滤波器	177
5.4.4	数字滤波器	179
	习题	183
第6章	信号显示与记录仪表	184
6.1	概述	184
6.2	模拟式电压表	184
6.3	数字万用表	189
6.4	笔式记录仪	192
6.5	数字式存储示波器	193

6.6	磁带记录仪	194
	习题	197
第7章	测试技术在机械工程中的应用	198
7.1	位移的测量	198
7.1.1	常用的位移传感器	198
7.1.2	位移传感器的应用——物位的测量	201
7.2	应变、力和扭矩的测量	202
7.2.1	应变的测量	202
7.2.2	力的测量	204
7.2.3	扭矩的测量	207
7.3	振动的测试	209
7.3.1	机械振动测试的主要内容	210
7.3.2	机械振动参数的测试	210
7.3.3	振动系统特性参数的测试	212
7.4	压力的测试	213
7.4.1	概述	213
7.4.2	常用的压力传感器	214
7.5	流量的测试	217
7.5.1	流量的表示方法	217
7.5.2	常用流量计	217
7.6	温度的测量	222
7.6.1	温度测量概述	222
7.6.2	测温方法与测温传感器的分类	223
7.6.3	常用测温计	223
7.7	转速测量	225
7.7.1	磁电式、光电式和霍尔式转速传感器	225
7.7.2	数字式频率计	227
7.7.3	机械式转速表	228
7.7.4	发电式转速表	229
	习题	230
第8章	计算机测试系统	231
8.1	概述	231
8.2	数据采集系统	233
8.2.1	多路模拟开关	233
8.2.2	采样/保持电路	237
8.2.3	模数转换器和数模转换器	241
8.2.4	数据采集系统的构成方式	246

8.3	自动测试系统	247
8.3.1	自动测试系统的结构及特点	247
8.3.2	自动测试系统的发展历程	248
8.3.3	自动测试系统的总线技术	251
8.4	智能仪器	253
8.4.1	智能仪器的组成	253
8.4.2	智能仪器的性能特点	254
8.4.3	智能仪器的典型功能	254
8.4.4	智能仪器的发展趋势	255
	习题	256
第 9 章	现代测试技术的发展方向	257
9.1	测试技术的发展方向	257
9.1.1	新型传感器不断出现	257
9.1.2	测试系统的小型化、微型化及集成化	258
9.1.3	虚拟仪器化	258
9.1.4	测试系统的智能化	258
9.1.5	测试系统的网络化	258
9.1.6	软测量技术的发展	260
9.2	虚拟仪器技术	261
9.2.1	虚拟仪器概述	262
9.2.2	虚拟仪器的构成	262
9.2.3	虚拟仪器的特点	265
9.2.4	虚拟仪器设计示例	266
	习题	274
	参考文献	275

第1章 概 论

测试技术是信息时代的一门基础和核心技术。随着科学技术的发展和生产力水平的提高,测量、检测问题也越来越广泛地存在于各行各业中,测试技术的重要性和必要性随之日益体现出来。因此,测试技术这门学科必然会有良好的发展前景和广泛的适用性,尤其在工程领域和先进制造技术中,自动化智能测试技术已成为重要的技术基础。本章将对测试技术做一个简单的基础性介绍,使读者初步了解测试技术的基本概念(包括测量的基本方法、测量误差的分类和测量数据的统计处理)及测试系统的基本组成和发展方向等,为后续章节的内容做铺垫。

1.1 测试技术的作用

人类在观察和研究自然界的各种现象时,需要借助一定的仪器或仪表组成检测系统。检测系统是人类感官极其重要的扩展和延伸,而自动化测试技术也已成为自动化科学技术的一个重要分支学科。测量和检测问题广泛地存在于各行各业,存在于生产、生活等领域,而且随着生产力水平与人类生活水平的不断提高,对测量和检测问题提出了越来越高的要求,除了要求能准确、迅速、可靠地完成检测任务之外,还要求能实现自动、智能化的检测。

1. 测试技术是信息技术发展的源泉

当今时代是信息时代,信息科技包括信息的获取、处理、传输、存储和执行。测试是科技生产领域获取信息的主要手段,在这个信息流中处于源头位置。处于源头的信息最微弱,而信息的准确性首先取决于源头信息,取决于测试。

2. 测试技术对于国防科技发展至关重要

在国防工业武器系统的研制中,测试工作贯穿于武器系统研制的全过程,所有的现代化武器都必须含有反应灵敏、精密度极高的仪器仪表。仪器仪表的测量控制精度决定了武器系统的打击精度;仪器仪表的测试速度、诊断能力决定了武器系统的反应能力。

3. 测试技术与人类生活密切相关

如今,测试技术已经进入人们的生活中,人们的衣食住行中都有测试技术的应用。便携式心电图可以随时捕捉到人的心电信号,为心脑血管病人提供安全保证;人工假肢通过测试正常人在小脑指挥下的神经系统机电运动的控制信号,利用电激励模拟神经刺激,恢复人类的肢体运动。可以说,测试技术的发展已经成为提高人们生活质量的一个重要保证。

4. 测试技术是工程领域各项研究的技术支撑

在工程研究领域中,产品的设计及开发、产品质量控制、机械性能试验、生产线的自动化及智能化、机电设备状态监测、故障诊断等许多研究都要以先进的测试技术为技术支撑。

(1) 产品质量测量系统

以高精度零件表面无损检测和在线快速检测系统为例，其方框图如图 1-1 所示。该测量系统由光源、光学系统、光电转换和微型计算机系统组成。由半导体激光器发出的激光经过光学系统准直、聚焦后入射到被测工件表面，经表面反射、散射后用 TCD1206UD 型线阵 CCD 图像传感器采集被测工件图像，经二值化电路处理后，通过高速数据采集系统进入计算机，用做统计运算，最后数码管或打印机显示和打印出表面质量参数值。

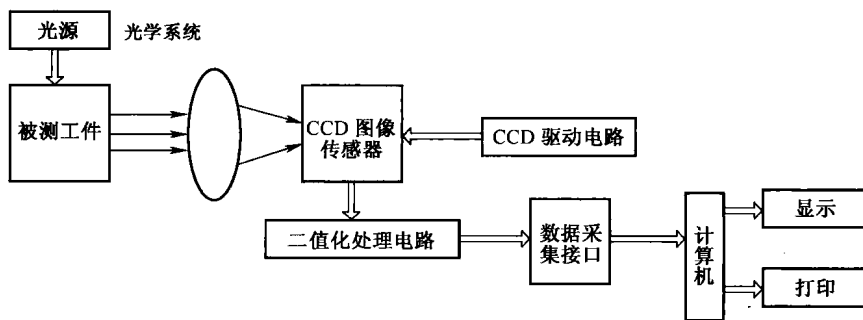


图 1-1 工件表面质量检测系统方框图

(2) 设备运行状态监控系统

在电力、冶金、石化、化工等众多行业中，某些关键设备的工作状态关系到整个生产线的正常流程，如汽轮机、燃气轮机、水轮机、发动机、电动机、压缩机、风机、泵、变速箱等。对这些关键设备运行状态实施 24 小时实时动态监测，可以及时、准确地掌握它们的变化趋势，为工程技术人员提供详细、全面的机组信息，是实现设备事后维修或定期维修向预测维修转变的基础。

(3) 家电产品中的传感器

在家电产品设计中，人们大量应用了传感器和测试技术来提高产品的性能和质量。例如，智能洗衣机以人们洗衣操作的经验作为模糊控制的依据，采用多重传感器将洗衣状态信息检测出来，并将这些信息送到单片机中，经单片机处理后，选择出最佳的洗涤参数，对洗衣全过程进行自动控制，以达到最佳的洗涤效果。其工作原理如图 1-2 所示。

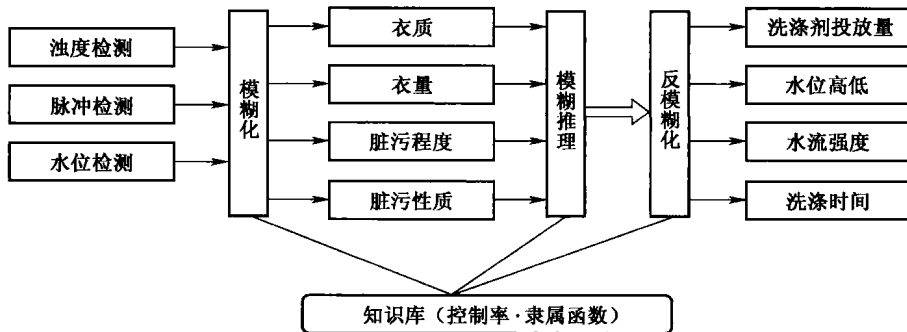


图 1-2 智能洗衣机模糊控制原理图

测试技术的先进程度已成为一个地区乃至一个国家科技发达程度的重要标志之一，可以肯定，测试技术的社会作用及地位在今后将更加重要和突出。

1.2 测试技术的基本概念

测量、计量和测试是三个含义相近的术语。测量 (Measurement) 是指以确定被测对象量值为目的的操作过程。实现单位统一和量值准确的测量一般称为计量。而测试 (Measurement and Test) 是带有试验性质的测量或者说是测量和试验的综合, 测试和检测一般也看做同义词。测试就是利用各种物理和化学效应, 选择合适的方法与装置, 将生产、生活或科研等各方面的有关信息, 通过测量与试验的方法获取被测量定性或定量结果的过程。

1.2.1 测量方法及其分类

测量方法有很多的分类方式。根据测量条件, 可以分为等精度测量和非等精度测量; 根据被测量在测量过程中是否随时间变化, 可以分为静态测量和动态测量; 按获得测量结果的方法分类, 可分为直接测量、间接测量和组合测量; 按测量方式分类, 可分为直读法、零值法、较差法和替代法等。

1. 直接测量

直接测量就是用预先标定好的测量仪器或工具, 对某一未知量进行直接测量, 从而得到未知量的数值。例如, 用弹簧管压力表测量压力, 用直流电桥测量电阻, 用温度计测温度, 用玻璃水位计测量水箱中的水位等。

直接测量的优点是测量过程简单而迅速, 它是工程技术中应用最为广泛的一种测量方法, 但是测量精度不高。

2. 间接测量

间接测量是指不直接测量被测量, 而是对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, 求出被测量的大小。例如, 在测量直流电路中的负载功率时, 先直接测量流过负载的电流 I 和负载两端的电压 U , 然后根据功率与电压、电流之间的函数关系式 $P = UI$, 求得负载消耗的电功率, 伏安法测电阻也是一种间接测量方法。

间接测量方法较为烦琐, 花费的时间较多, 一般在采用直接测量法不方便、误差较大或缺乏直接测量所需仪器等场合才会采用。

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。在组合测量中, 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 α 和 β , 可利用电阻值与温度间的关系式:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-1)$$

式中 α, β ——电阻的温度系数;
 R_{20} ——电阻在 20°C 时的阻值;
 t ——测试时的温度。

为了测出电阻的 α 和 β 值, 可以采用改变测试温度的方法, 在三种温度 t_1 、 t_2 及 t_3 下, 分别测得对应的电阻值 R_1 、 R_2 及 R_3 , 然后代入式 (1-1), 即可得到一组联立方程, 求解此方程组便可求得 α 、 β 和 R_{20} 。

组合测量的测量过程比较烦琐, 花费时间较多, 但精度较高, 因此被认为是一种特殊的测量方法, 一般用于精密测量、智能仪表、实验室和科学研究中。

正确选择合适的测量方法直接关系到测量工作的可行性及是否符合规定的技术要求, 因此, 必须根据不同的测量任务和测量要求, 确定切实可行的测量方法。

1.2.2 测量误差

在实际测量中, 由于测量仪器的不准确、测量方法的不完善, 以及测量环境、测量人员本身等各种因素的影响, 会使实验中测得的值和它的真实值之间造成差异, 即产生测量误差。随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高, 虽可将误差控制得越来越小, 但始终不能完全消除它。对测量误差进行研究, 其目的就是能够确切地了解测量误差的大小范围, 把测量误差控制在能够满足需要的程度, 并能以误差理论为依据对测量结果做出科学、合理的评定。

1. 测量误差

测量值与真值之间的差值称为测量误差 (Measuring Error)。测量误差常分为以下三类。

(1) 绝对误差

绝对误差指给出值与被测量真值 (即被测量的真实大小) 之差。设被测量真值为 A_0 , 给出值 (包括测量值、示值、标称值、近似值等) 为 A_x , 则绝对误差 ΔA 为:

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1-2)$$

由于真值 A_0 一般是无法得知的, 所以在实际应用中, 常以高一级标准仪器的指示值 A 作为被测量的真值, 则绝对误差为:

$$\Delta A = A_x - A \quad (1-3)$$

【例 1-1】 某电路中的电流为 15A , 用甲、乙两块电流表同时测量, 甲表读数为 14.8A , 乙表读数为 15.5A , 求两次测量的绝对误差。

解: 由式 (1-2) 可得, 用甲表测量的绝对误差为:

$$\Delta I_{\text{甲}} = I_{\text{甲}} - I_0 = 14.8 - 15 = -0.2\text{A}$$

用乙表测量的绝对误差为:

$$\Delta I_{\text{乙}} = I_{\text{乙}} - I_0 = 15.5 - 15 = 0.5\text{A}$$

在实际应用中会发现, 高准确度的仪器仪表通常会给出修正值 c , 修正值用于修正测量中的误差, 从而得到准确度更高的给出值。修正值与绝对误差大小相等, 符号相反, 即

$$c = -\Delta A = A_0 - A_x \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可知, 测量值加上修正值就是被测量的真实值, 这就是修正值的意义所在。

对于高准确度的仪器仪表，常给出修正值，利用修正值可求出被测量的实际值。修正值给出的方式不一定是具体的数值，也可以是一条曲线、公式或数表。在某些智能化仪器中，修正值已预先被编制成相关程序，存储于仪器中，所得测量结果已自动对误差进行了修正。

(2) 相对误差

当被测量不同时，绝对误差不能确切地反映出测量的准确程度。例如，测量两个电压，其中 $U_1 = 20\text{V}$ ，测量误差 $\Delta U_1 = 0.2\text{V}$ ； $U_2 = 200\text{V}$ ，测量误差 $\Delta U_2 = 1\text{V}$ ，尽管 $\Delta U_1 < \Delta U_2$ ，但不能由此得出测量电压 U_1 比测量电压 U_2 的精确度要高的结论。因为 $\Delta U_1 = 0.2\text{V}$ ，相对于 20V 来讲是 1% ；而 $\Delta U_2 = 1\text{V}$ ，相对于 200V 来讲是 0.5% ，所以结论是 U_2 的测量比 U_1 的测量更准确。因此，引入了相对误差的概念。相对误差 γ 是绝对误差与被测量的真值之比。与前述同理，实际测量中通常用标准表的指示值作为被测量真值，近似用绝对误差与标准表示值之比作为相对误差，通常用百分比表示：

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

【例 1-2】 用电压表甲测量 10V 电压，指示值为 10.5V ，用电压表乙测量 50V 电压，指示值为 51V 。请比较哪只表的测量准确度更高。

解：由式 (1-2) 可得，用甲表测量的绝对误差为：

$$\Delta U_{\text{甲}} = U_{\text{甲}} - U_{\text{甲0}} = 10.5 - 10 = 0.5\text{V}$$

由式 (1-5) 可得，用甲表测量的相对误差为：

$$\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta U_{\text{甲}}}{U_{\text{0甲}}} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\%$$

用乙表测量的绝对误差为：

$$\Delta U_{\text{乙}} = U_{\text{乙}} - U_0 = 51 - 50 = 1\text{V}$$

用乙表测量的相对误差为：

$$\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta U_{\text{乙}}}{U_{\text{0乙}}} \times 100\% = \frac{1}{50} \times 100\% = 2\%$$

故用乙表比用甲表测量更准确。

(3) 引用误差

对于同一只仪表，测量不同大小的被测量，其绝对误差变化不大，但相对误差却有很大变化。被测量越小，相对误差就越大。所以，通常的相对误差不能反映出仪表的准确性能，一般用引用误差来表示仪表的准确性能。引用误差就是绝对误差与仪表量限 A_m （满刻度值）的百分比：

$$\gamma_m = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

引用误差实际上就是仪表最大读数时的相对误差。由式 (1-6) 还可以得到仪表最大引用误差 K 的表达式：

$$\pm K\% = \frac{\Delta A_{\text{max}}}{A_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

最大引用误差为仪器仪表划分准确度等级提供了方便。电工仪表就是按最大引用误差 γ_m 的值进行分级的。我国的电工仪表共分 7 级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0。如果仪表准确度为 K 级，则表示该仪表的最大引用误差不会超过 $K\%$ ，即 $|\gamma_m| \leq K\%$ 。

【例 1-3】 用 1.5 级、量程 20A 的电流表甲和 0.5 级、量程 150A 的电流表乙分别测量某电流，读数皆为 10A，试比较两次测量结果的准确度。

解：甲表的最大绝对误差：

$$\Delta I_{m甲} = \pm K\% \cdot I_{m甲} = \pm 1.5\% \times 20 = \pm 0.3A$$

甲表测量的最大相对误差：

$$\gamma_{\max甲} = \frac{\Delta I_{m甲}}{I} \times 100\% = \frac{\pm 0.3}{10} \times 100\% = \pm 3\%$$

乙表的最大绝对误差：

$$\Delta I_{m乙} = \pm K\% \cdot I_{m乙} = \pm 0.5\% \times 150 = \pm 0.75A$$

乙表测量的最大相对误差：

$$\gamma_{\max乙} = \frac{\Delta I_{m乙}}{I} \times 100\% = \frac{\pm 0.75}{10} \times 100\% = \pm 7.5\%$$

由【例 1-3】可以看出，乙表的准确度虽然高，但是测量结果的误差反而增大了。这是因为仪表准确度一定时，量程越大的仪表最大绝对误差越大。所以，在选择仪表量程时，应根据被测量的大小，兼顾仪表的准确度等级和量程，不可片面地追求高准确度仪表。一般要使其工作在不小于满度值 2/3 以上的区域。

2. 按误差来源分类

误差根据来源可分为系统误差、随机误差和疏失误差三类。

(1) 系统误差

在相同条件（人员、仪器及工作环境等条件）下，多次测量同一量时，所出现误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时，与某一个或几个因素成函数关系的有规律的误差，称为系统误差。

系统误差的产生原因主要有以下几个方面。

- ① 仪器误差：由于仪器制造本身存在缺陷所致。如结构设计、安装调试等方面不完善所致。
- ② 零位误差：由于使用仪器时，仪器零位未校准所产生。
- ③ 理论误差：实验所依据的理论不完善，或测量模型在一定条件下带有近似造成的误差。
- ④ 环境误差：由于测量仪器的使用条件达不到规定所产生，如温度误差。
- ⑤ 观测者感官误差：由于观测者在测量过程中主观判断不当所引起，如测量人员的不良读数习惯等。

系统误差决定了测试系统的正确度，说明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度。系统误差越小，测量就越准确，所以，经常用系统误差来表征测量准确度的高低。

(2) 随机误差

随机误差又称偶然误差，是指那些服从统计规律的误差。在相同条件下，对某一被测量进

行重复测量时，每次测量的结果或大或小，或正或负，是不可预知的，即单次测量的随机误差没有规律，但是多次测量时，误差的总体却服从统计规律。通过对测量数据的统计处理，就能在理论上估计随机误差对测量结果的影响。

产生随机误差的原因很多且很复杂，如温度、磁场、电源频率的微变，零件的摩擦、间隙，热起伏，空气扰动，气压及湿度的变化，测量人员感官分辨本领的限制等，都有可能引起随机误差。就每个因素个体而言无规律可循，但众多因素的总体却服从统计规律。在了解随机误差的统计规律后，还是有办法控制和减少随机误差对测量结果的影响。

随机误差表明了测量结果的分散性，反映了测量的精密度，随机误差越小，精密度就越高，反之则精密度越低。

(3) 疏失误差

疏失误差又称粗大误差，这是一种与实际值明显不符的误差。通常由操作、读数、记录和计算等方面的人为差错或是实验条件未达到预定要求而匆忙实验等原因引起，含有疏失误差的测量结果称为坏值或异常值。

3. 误差的发现与消除

1) 系统误差的发现及消除

测量误差是不可能绝对消除的，但要尽可能减小误差对测量结果的影响，使其减小到允许的范围內。

(1) 系统误差的发现

在消除系统误差前，必须掌握发现系统误差的方法。发现系统误差的方法主要有实验对比法、剩余误差（残差）观察法和剩余误差校核法。

① 实验对比法。

实验对比法就是通过改变测量条件，比如更换测量人员、改变测量方法和环境等，对测量数据进行比较，从而发现系统误差的方法。此方法需要高精度测量仪器和较好的测量条件，适用于发现恒定系统误差。

② 剩余误差（残差）观察法。

剩余误差（残差）观察法就是按照测量的次序，依次将每次测量时的剩余误差作图或列表进行观察，以判断是否存在系统误差及系统误差的类型，如图 1-3 所示。

图 1-3(a)中，剩余误差在总体上正负抵消，无明显变化规律，这种情况可认为不存在系统误差；图 1-3(b)中，剩余误差落在正弦曲线附近，这种情况可认为存在周期性的系统误差；图 1-3(c)中，剩余误差呈线性递增（或递减），这种情况表明存在线性变化的系统误差；图 1-3(d)中，剩余误差的变化无明显的规律性，怀疑同时存在线性变化的系统误差和周期性系统误差。剩余误差（残差）观察法主要适用于发现有规律性的系统误差。

③ 剩余误差校核法。

剩余误差校核法主要基于马利科夫准则和阿贝—赫梅特准则。

a. 马利科夫准则：此准则适用于发现线性系统误差。假设对被测量进行 n 次测量，这 n 个测量结果的剩余误差依次为 v_1, v_2, \dots, v_n ，将它们按先后次序排列好，对序列中前 k 个剩余误差求和，与后 $n-k$ 个剩余误差之和相减可以得到 M 的表达式：

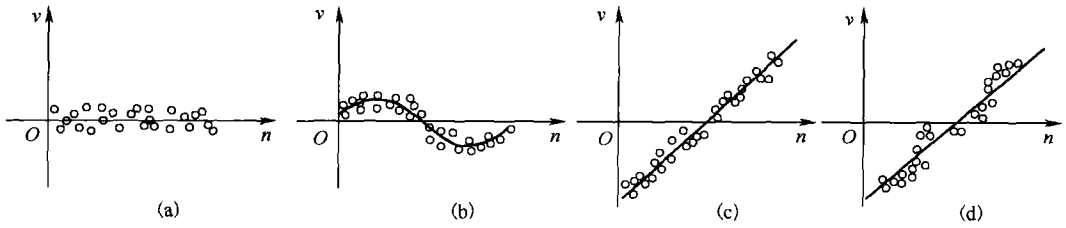


图 1-3 系统误差的判断

$$M = \sum_{i=1}^k v_i - \sum_{j=k+1}^n v_j \quad (1-8)$$

当测量次数 n 为奇数时, 取 $k = (n+1)/2$; 当 n 为偶数时, 取 $k = n/2$ 。

如果 M 近似为零, 则说明上述测量结果中不含线性系统误差; 如果 M 显著不为零 (与 v 值相当或更大), 则说明测量结果中存在着线性系统误差。

b. 阿贝—赫梅特准则: 此准则可有效地发现周期性系统误差。假设有一等精度测量结果序列, 且它们的剩余误差序列为 v_1, v_2, \dots, v_n 。当测量误差中周期性系统误差为主要成分, 且相邻两剩余误差的差值 ($v_i - v_{i+1}$) 符号出现周期性的正负变化, 则可判断测量结果中存在周期性系统误差; 当测量误差中周期性系统误差不是主要成分时, 不能由差值 ($v_i - v_{i+1}$) 的符号变化来判断是否存在周期性系统误差。此时, 应依据统计准则进行判断, 令

$$u = \left| \sum_{i=1}^{n-1} v_i v_{i+1} \right| = |v_1 v_2 + v_2 v_3 + \dots + v_{n-1} v_n| \quad (1-9)$$

若 $u > \sigma^2 \sqrt{n-1}$ (式中, σ 为标准差), 则说明测量结果中含有周期性系统误差。

(2) 系统误差的消除

- 对度量器、测量仪器进行校正、引入修正值; 预先将测量仪器的系统误差检定出, 并做出误差表格和误差曲线, 然后取与误差数字大小相同而符号相反的值作为修正值, 与指示值相加, 即可得到基本上不含系统误差的测量结果, 该法适用于工程测量。
- 消除产生误差的根源, 即正确选择测量方法和测量仪器, 改善仪器安装质量和配线方式, 尽量使测量仪表在规定条件下工作, 消除各种外界因素造成的影响。
- 采用特殊的测量方法。具体来说, 针对恒定的系统误差, 主要有替代法和正负误差补偿法; 针对可变的系统误差, 主要有等时距对称观测法和组合测量法。

① 替代法。

替代法就是指在相同的测量条件下, 先对被测参量进行测量, 再用同等量的标准量替换被测参量, 采用差值法、指零法或重合法等获得被测参量。替代法的测量误差决定于标准量的准确度等级, 而几乎与测量装置的准确度等级无关, 可降低对测量装置准确度等级的苛求。

② 正负误差补偿法。

对测量做适当安排, 使恒定系统误差在两次测量中以相反符号出现, 从而相互抵消, 这种方法称为正负误差补偿法。

③ 等时距对称观测法。

当测量系统由于某种原因随时间产生线性漂移造成测量误差时, 可以用在相等的时间间隔