

全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

经典系列

自动检测与转换技术

苏家健 主 编
徐文文 张 磊 副主编

《第3版》



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

欢迎访问精品学习网站

全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

自动检测与转换技术

(第3版)

苏家健 主 编
徐文文 张 磊 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了常用传感器的工作原理、基本结构及相应的测量电路,并介绍了大量的应用实例。在取材上,强调理论够用、实用性和先进性,突出基本技能的培养,加强了实验的内容。

本书内容主要包括:检测技术的一般概念和测量方法、误差分析;电阻式、变磁阻式、电容式、热电式、霍尔式、光电式及压电式等常用传感器;新型的光纤传感器;数字式传感器、智能传感器和过程控制参数检测及检测装置的信号处理技术。

本次修订后,既保持原教材的特色、精选理论教学内容,适用够用,又重点突出,各章增加例题、习题和习题解答,以便更方便、更好地为教学服务。

本书可作为高职高专工业生产自动化技术、电气自动化技术、应用电子技术、机电一体化技术、计算机控制技术及相近专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

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

自动检测与转换技术/苏家健主编. —3版. —北京:电子工业出版社,2014.4
全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

ISBN 978-7-121-22714-1

I. ①自… II. ①苏… III. ①自动检测—高等职业教育—教材 ②传感器—高等职业教育—教材
IV. ①TP274 ②TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第056221号

策划编辑:王昭松

责任编辑:郝黎明

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:787×1 092 1/16 印张:18.75 字数:480千字

印 次:2014年4月第1次印刷

定 价:38.00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。

第3版前言

本书是在“淡化理论，够用为度，培养技能，重在运用，能力本位”的教学改革的指导思想下，对前2版的不足之处进行修改的情况下编写而成的。本书第3版在保持第2版的基本结构、基本内容不变的前提下，跟踪自动检测和传感器的新发展、新动向、新技术，对全书的内容做了调整和补充，使本书第3版内容更加翔实，编排更加合理，实例更加丰富，更有利于教学的组织及学生的自学阅读。

本书针对高职的特点，以岗位核心能力为目标，精选内容，力图使学生通过对本课程的学习，能掌握生产一线技术人员和运行人员必须具备的传感器和检测技术的基本知识和应用、操作技能。

本书于2013年被上海市教委列为高职市级精品课程，并建立了相应的网站，网址是 www.aurora-college.cn。

本书的主要特点如下。

(1) 更加注重理论适度够用，注重实例介绍，压缩大量的理论推导，突出教材的实用性。

(2) 增加传感器的应用实例，特别是日常生活中的应用。

(3) 在取材方面，既考虑了传感器和检测技术的数字化发展趋势和新技术的应用，又考虑高职学生的学习基础和特点，使本书既有一定的深度，又有一定的广度。

本书各章具有一定的独立性，在教学中，教师可以根据专业的方向和特点选用不同的章节。本书参考学时为48~80学时。其他有关专业（如数控、汽车等专业）可根据需要选用不同的章节，安排课时。

本书共有14章。第1章介绍检测技术的基本知识，第2~8章介绍各种常用的传感器，如电阻应变片、热电阻、气敏电阻、湿敏电阻、电感式、电容式、热电偶、压电式、光电式各种传感器，第9章介绍光纤传感器，第10章介绍过程参数的控制，第11章介绍检测装置的信号处理及接口技术，第12章介绍自动检测技术的综合应用，第13章介绍数字式传感器技术，第14章介绍自动检测技术的新发展。

本书由上海震旦职业学院苏家健任主编，上海震旦职业学院徐文文、上海不二越精密轴承有限公司张磊任副主编。

其中，苏家健编写了第1、5、7、8章并统稿，徐文文编写了第2、3、4、6、9、10、11章及附录A，张磊编写了第12、13、14章。

本书可作为高职高专工业自动化技术、电气自动化技术、应用电子技术、机电一体化技术、计算机控制技术及相近专业的教材，也可作为相关专业技术人员的参考书。

本书在编写过程中，参阅了许多专家的著作、论文和教材，还得到电子工业出版社和同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，对于在本版中存在的错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2014年1月

目 录

第1章 检测技术的基础知识	1
1.1 测量的基本概念	1
1.1.1 测量	1
1.1.2 测量方法	1
1.2 测量误差及其分类	3
1.2.1 测量误差及其表示方法	3
1.2.2 测量误差的分类	5
1.3 测量误差的分析与处理	6
1.3.1 随机误差的统计特性	6
1.3.2 粗大误差	9
1.3.3 系统误差	9
1.3.4 直接测量数据的误差分析	10
1.4 传感器及其基本特性	12
1.4.1 传感器的定义及组成	12
1.4.2 传感器的分类	13
1.4.3 传感器的基本特性	15
1.4.4 传感器技术的发展趋势	19
1.5 弹性敏感元件	20
1.5.1 弹性敏感材料的弹性特性	20
1.5.2 弹性敏感元件的材料及其基本 要求	21
1.5.3 弹性敏感元件的变换原理	21
小结	25
思考与练习	26
第2章 电阻式传感器	28
2.1 电位器式传感器	28
2.1.1 线性电位器	28
2.1.2 电位器式传感器的应用	30
2.2 电阻应变式传感器	31
2.2.1 电阻应变片的种类与结构	31
2.2.2 电阻的应变效应	32
2.2.3 应变片测试原理	33
2.2.4 测量电路	34
2.3 电阻应变式传感器的应用	37
2.4 压阻式传感器	41
2.4.1 压阻效应与压阻系数	41
2.4.2 测量原理	41
2.4.3 温度补偿	42
2.4.4 压阻式传感器的应用	42
2.5 气敏电阻传感器	43
2.6 湿敏电阻传感器	46
小结	49
思考与练习	50
第3章 变磁阻式传感器	51
3.1 自感式传感器	51
3.1.1 基本自感式传感器	51
3.1.2 差动变间隙式传感器	52
3.1.3 螺管型自感式传感器	53
3.1.4 测量电路	53
3.2 变压器式传感器	55
3.2.1 螺线管式差动变压器	56
3.2.2 测量电路	57
3.3 电涡流式传感器	60
3.3.1 电涡流式传感器的工作原理	60
3.3.2 电涡流式传感器种类	60
3.3.3 测量电路	62
3.4 变磁阻式传感器的应用	64
3.4.1 自感式传感器的应用	64
3.4.2 变压器式传感器的应用	65
3.4.3 电涡流式传感器的应用	65
小结	67
思考与练习	67
第4章 电容式传感器	69
4.1 电容式传感器的工作原理	69

4.1.1 变面积式电容传感器	69	6.3.3 光电池的应用	116
4.1.2 变间隙式电容传感器	71	6.3.4 红外测温仪	117
4.1.3 变介电常数式电容传感器	73	6.4 光电开关和光电断续器	118
4.2 测量电路	76	6.4.1 光电开关	118
4.2.1 调幅型电路	76	6.4.2 光电断续器	119
4.2.2 差动脉冲宽度调制电路	77	6.5 CCD 图像传感器及应用	120
4.2.3 调频型电路	79	6.5.1 CCD 图像传感器的工作原理	120
4.3 电容式传感器的应用	79	6.5.2 CCD 图像传感器的分类	121
小结	81	6.5.3 CCD 图像传感器的应用	123
思考与练习	81	小结	123
第 5 章 热电偶传感器	83	思考与练习	124
5.1 热电偶工作原理和基本定律	83	第 7 章 霍尔传感器	125
5.1.1 热电偶工作原理	83	7.1 霍尔元件工作原理	125
5.1.2 热电偶的基本定律	85	7.2 霍尔元件的基本结构和主要特性参数	126
5.2 热电偶的材料、结构及种类	86	7.2.1 基本结构	126
5.2.1 热电偶材料	86	7.2.2 主要特性参数	127
5.2.2 热电偶结构	87	7.3 霍尔元件的测量电路及补偿	128
5.2.3 热电偶种类及分度表	88	7.3.1 基本测量电路	128
5.3 热电偶的冷端补偿	91	7.3.2 温度误差的补偿	128
5.4 热电偶测温线路	94	7.3.3 不等位电势的补偿	130
5.5 热电阻	95	7.4 霍尔集成电路	131
5.5.1 金属热电阻	95	7.5 霍尔传感器的应用	132
5.5.2 半导体热敏电阻	99	小结	134
5.5.3 集成温度传感器	99	思考与练习	135
小结	104	第 8 章 压电式传感器	136
思考与练习	104	8.1 压电效应	136
第 6 章 光电式传感器	106	8.1.1 石英晶体的压电效应	136
6.1 光电效应及光电器件	106	8.1.2 石英晶体的类型	138
6.1.1 光电效应	106	8.1.3 压电陶瓷的压电效应	138
6.1.2 光电管	106	8.1.4 压电陶瓷的类型	139
6.1.3 光敏电阻	107	8.2 压电材料	139
6.1.4 光敏晶体管	109	8.3 压电式传感器测量电路	139
6.1.5 光电池	111	8.3.1 压电器件的串联与并联	139
6.2 红外传感器	112	8.3.2 压电式传感器的等效电路	140
6.2.1 红外辐射	113	8.3.3 压电式传感器的测量电路	140
6.2.2 红外探测器	113	8.4 压电式传感器应用举例	142
6.3 光电式传感器应用举例	114	小结	145
6.3.1 光敏电阻传感器的应用	114	思考与练习	146
6.3.2 光敏晶体管的应用	115		

第9章 光纤传感器	147
9.1 光纤传感器的原理、结构及种类	147
9.1.1 光纤传感器的原理	147
9.1.2 光纤的结构	148
9.1.3 光纤的种类	148
9.2 光的传输原理	149
9.2.1 光的全反射定律	149
9.2.2 光纤的传光原理	150
9.3 光纤传感器的类型	150
9.3.1 光纤传感器的分类	150
9.3.2 功能型和非功能型光纤传感器	151
9.3.3 光纤传感器的主要部件	152
9.4 功能型光纤传感器	152
9.4.1 相位调制型光纤传感器	152
9.4.2 光强调制型光纤传感器	154
9.5 非功能型光纤传感器	155
9.5.1 遮断光路的光强调制型光纤 传感器	155
9.5.2 改变光纤相对位置的光强调 制型光纤传感器	156
9.6 光纤传感器的应用	157
9.6.1 光纤微位移测量传感器	157
9.6.2 光纤流量传感器	158
9.6.3 光纤图像传感器	159
小结	160
思考与练习	160
第10章 过程参数的控制	161
10.1 压力测量	161
10.1.1 弹簧管压力表	162
10.1.2 压力、差压变送器的基本原理	163
10.2 液位测量	164
10.2.1 浮力式液位仪表	165
10.2.2 光纤液位计	166
10.2.3 静压式液位计	168
10.2.4 电阻式液位计	171
10.3 流量测量	172
10.3.1 容积式流量传感器	173
10.3.2 差压式流量传感器	175
10.3.3 速度式流量传感器	183
10.3.4 流体阻力式流量传感器	190
小结	194
思考与练习	194
第11章 检测装置的信号处理及接口 技术	196
11.1 信号的放大与隔离技术	196
11.1.1 运算放大器	196
11.1.2 测量放大器	197
11.1.3 隔离放大器	198
11.1.4 程控测量放大器 PGA	200
11.2 信号变换技术	201
11.2.1 0~10mA 的电压/电流变换 (V/I 变换)	201
11.2.2 4~20mA 的电压/电流变换 (V/I 变换)	202
11.3 过程输入通道	202
11.3.1 模拟量输入通道	202
11.3.2 A/D 转换器及其与单片机的 接口	203
11.4 信号的非线性补偿技术	207
11.4.1 线性化处理办法	207
11.4.2 利用微机进行非线性化处理	210
小结	212
思考与练习	213
第12章 自动检测技术的综合应用	214
12.1 传感器的选用原则	214
12.2 综合应用举例	215
12.2.1 高炉炼铁自动检测与控制	215
12.2.2 蒸馏塔自动检测与控制	219
12.2.3 传感器在汽车中的应用	220
12.2.4 传感器在空气污染监测中的 应用	226
12.2.5 IC 卡智能水表的应用	227
12.2.6 传感器在全自动洗衣机中的 应用	229
12.2.7 传感器在电冰箱中的应用	229
12.2.8 传感器在空调器中的应用	231
12.2.9 传感器在厨具中的应用	232

12.2.10 传感器在燃气热水器中的 应用	233	14.1.1 智能传感器发展的历史背景 ...	264
12.2.11 传感器在家用吸尘器中的 应用	234	14.1.2 智能传感器的功能与特点 ...	264
12.2.12 家用电器中常用的部分国 产热敏电阻	235	14.1.3 智能传感器实现的途径	265
小结	236	14.2 虚拟仪器	268
思考与练习	236	14.2.1 虚拟仪器的定义	268
第 13 章 数字式传感器技术	237	14.2.2 虚拟仪器的应用	268
13.1 光栅传感器	237	14.2.3 虚拟仪器的特点	269
13.1.1 光栅的基本知识	237	14.2.4 虚拟仪器的产生	269
13.1.2 莫尔条纹及其测量原理	239	14.2.5 虚拟仪器的分类	270
13.1.3 光栅测量系统	241	14.2.6 虚拟仪器的体系结构	270
13.1.4 光栅测量系统的应用	245	14.2.7 虚拟仪器的发展趋势	273
13.2 磁栅传感器	246	14.3 微型传感器	273
13.2.1 磁栅及其分类	246	14.3.1 微机电系统 (MEMS)	273
13.2.2 磁头及其结构	247	14.3.2 微型传感器技术	275
13.2.3 信号处理方式	249	14.4 网络传感器	276
13.2.4 磁栅传感器的应用	251	14.4.1 基于现场总线技术的网络化 测控系统	277
13.3 数字编码器	252	14.4.2 面向 Internet 网络测控系统	278
13.3.1 接触式码盘编码器	252	14.4.3 网络化检测仪器与系统实例 ...	278
13.3.2 光电式编码器	254	14.4.4 无线传感器网络化测控系统 ...	279
13.3.3 光电编码传感器的应用	257	14.5 多传感器数据融合	281
13.4 感应同步器	258	14.5.1 工作原理	281
13.4.1 感应同步器的结构	258	14.5.2 多传感器数据融合的意义 ...	281
13.4.2 感应同步器的工作原理	260	14.5.3 融合方法	282
13.4.3 数字位置测量系统	261	14.5.4 多传感器信息融合的实例 ...	283
小结	262	14.6 软测量技术	284
习题与思考题	263	小结	285
第 14 章 自动检测技术的新发展	264	思考与习题	286
14.1 智能传感器	264	附录 A 思考与练习部分答案	287
		参考文献	291

第1章 检测技术的基础知识

在信息社会的一切活动领域中,检测是科学地认识各种现象的基础性方法和手段。现代化的检测手段在很大程度上决定了生产、科学技术的发展水平,而科学技术的发展又为检测技术提供了新的理论基础和制造工艺,同时对检测技术提出了更高的要求。检测技术是所有科学技术的基础,是自动化技术的支柱之一。

自动检测与转换技术是一门以研究检测系统中信息提取、转换及处理的理论和技术为主要内容的应用技术学科,本章是自动检测与转换技术的理论基础。

1.1 测量的基本概念

1.1.1 测量

测量是人们借助专门的技术和设备,通过实验的方法,把被测量与作为单位的标准量进行比较,以确定出被测量是标准量的多少倍数的过程,所得的倍数就是测量值。测量结果包括数值大小和测量单位两部分,数值大小可以用数字、曲线或图形表示。测量的目的是为了精确获取表征被测量对象特征的某些参数的定量信息。

检测是意义更为广泛的测量。在自动化领域中,检测的任务不仅是对成品或半成品的检验和测量,而且为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象并使之处于给定的最佳状态,需要随时检查和测量各种参量的大小和变化等情况。在不强调它们之间细微差别的一般工程技术应用领域中,测量和检测可以相互替代。

1.1.2 测量方法

对于测量方法,从不同的角度出发,有不同的分类方法。本节重点阐述按测量手段分类的直接测量、间接测量和联立测量,及按测量方式分类的偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

1. 按测量手段分类

(1) 直接测量。在使用测量仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算,就能直接得到测量的结果,称为直接测量。例如,用弹簧管式压力表测量流体压力就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速,缺点是测量精度不易达到很高。这种测量方法是工程上广泛采用的方法。

(2) 间接测量。在使用仪表进行测量时,首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,将测量值代入函数关系式,经过计算得到测量所需的结果,这种测量称为间接测

量。例如,导线电阻率 ρ 的测量就是间接测量,由于 $\rho = \frac{R\pi d^2}{4l}$,其中 R 、 l 、 d 分别表示导线的电阻值、长度和直径。这时,只有先经过直接测量得到导线的 R 、 l 、 d 以后,再代入 ρ 的表达式,经计算得到最后所需要的结果 ρ 值。在这种测量过程中,手续较多,花费时间较长,有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于科学实验中的实验室测量,工程测量中也有应用。

(3) 联立测量。在应用仪表进行测量时,若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,则这样的测量称为联立测量。在进行联立测量时,一般需要改变测试条件,才能获得一组联立方程所需要的数据。

对联立测量,其操作手续很复杂,花费时间长,是一种特殊的测量方法。它只适用于科学实验或特殊场合。

2. 按测量方式分类

(1) 偏差式测量。在测量过程中,用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的测量方法,称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具不装在仪表内,而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准;在测量时,输入被测量,按照仪表指针在标尺上的示值,决定被测量的数值。它是以间接方式实现被测量与标准量具的比较。例如,用磁电式电流表测量电路中某支路的电流,用磁电式电压表测量某电气元件两端的电压等,就属于偏差式测量法。采用这种方法进行测量,测量过程比较简单、迅速。但是,测量结果的精度低。这种测量方法广泛用于工程测量中。

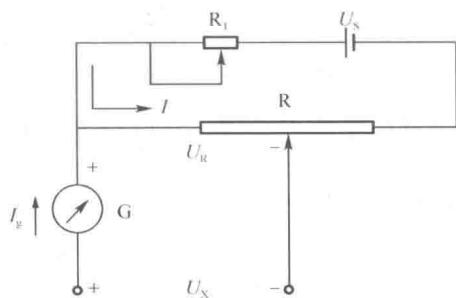


图 1.1 电位差计简化等效电路

(2) 零位式测量。在测量过程中,用指零仪表的零位指示检测测量系统的平衡状态。在测量系统达到平衡时,用已知的基准量决定被测未知量的测量方法,称为零位式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内,在测量过程中,标准量直接与被测量相比较,调整标准量,一直到被测量与标准量相等,即使指零仪表回零。如图 1.1 所示的电路是电位差计的简化等效电路。在进行测量之前,应先调 R_1 ,将回路工作电流 I 校准;在测量时,要调整 R 的活动触点,使检流计 G 回零,这时 $I_g=0$,即 $U_R=U_x$,这样,标准电压 U_R 的值就表示被测未知电压值 U_x 。

采用零位式测量法进行测量时,优点是可以获得比较高的测量精度,但是测量过程比较复杂。采用自动平衡操作以后,虽然可以加快测量过程,但它的反应速度由于受工作原理所限,也不会很高。因此,这种测量方法不适用于测量变化迅速的信号,只适用于测量变化较缓慢的信号。

(3) 微差式测量。微差式测量法是综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点而提出的测量方法。这种方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较,并取得差值后,用偏差法测得此值。应用这种方法测量时,标准量具装在仪表内,并在测量过程中标准量直接与被测量进行比较。由于两者的值很接近,因此在测量过程中不需要调整标准量,而只需要测量两者的差值。

微差式测量法的优点是反应快,而且测量精度高,特别适用于在线控制参数的检测。

1.2 测量误差及其分类

1.2.1 测量误差及其表示方法

在一定条件下被测物理量客观存在的实际值,称为真值。真值是一个理想的概念。在实际测量时,由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响以及人们辨识能力所限等因素,使得测量值与其真值之间不可避免地存在着差异。测量值与真值之间的差值称为测量误差。

测量误差可用绝对误差表示,也可用相对误差和引用误差表示。

1. 绝对误差

绝对误差 Δx 是指测量值 x 与真值 L_0 之间的差值,即

$$\Delta x = x - L_0 \quad (1.1)$$

由于真值 L_0 的不可知性,在实际应用时,常用实际真值 L 代替,即用被测量多次测量的平均值或上一级标准仪器测得的示值作为实际真值 L ,故有

$$\Delta x = x - L \quad (1.2)$$

绝对误差是一个有符号、大小、量纲的物理量,它只表示测量值与真值之间的偏离程度和方向,而不能说明测量质量的好坏。

在实际测量中,还经常用到修正值 c 。所谓“修正值”是指与绝对误差数值相等但符号相反的数值,即 $c = -\Delta x = L - x$ 。修正值给出的方式可能是具体的数值、一条曲线、公式或数表,将测量值与修正值相加就可以得到实际真值。

2. 相对误差

相对误差常用百分比的形式来表示,一般多取正值。相对误差可分为实际相对误差、示值(标称)相对误差和最大引用(相对)误差等。

(1) 实际相对误差 γ : 是用测量值的绝对误差 Δx 与其实际真值 L 的百分比来表示的相对误差,即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% \quad (1.3)$$

(2) 示值(标称)相对误差 γ_x : 是用测量值的绝对误差 Δx 与测量值 x 的百分比来表示的相对误差,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.4)$$

在检测技术中,由于相对误差能够反映出测量技术水平的高低,因此更具有实用性。例如,测量两地距离为 1 000km 的路程时,若测量结果为 1 001km,则测量结果的绝对误差是 1km,示值相对误差为 1‰;如果把 100m 长的一匹布量成 101m,尽管绝对误差只有 1m,与前者 1km 相比较小很多,但 1% 的示值相对误差却比前者 1‰ 大得多,这说明后者测量水平较低。

(3) 引用(相对)误差:是指测量值的绝对误差 Δx 与仪器的量程 A_m 的百分比。引用误差的最大值称为最大引用(相对)误差 γ_m ,即

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% \tag{1.5}$$

由于式（1.5）中的分子、分母都由仪表本身所决定，因此在测量仪表中，人们经常使用最大引用误差评价仪表的性能。最大引用误差又称为满度（引用）相对误差，是仪表基本误差的主要形式，故也常称之为仪表的基本误差，它是仪表的主要质量指标。基本误差去掉百分号（%）后的数值定义为仪表的精度等级。精度等级规定取一系列标准值，通常用阿拉伯数字标在仪表的刻度盘上，等级数字外有一圆圈。我国目前规定的精度等级有 0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0 等。精度等级数值越小，测量的精确度越高，仪表的价格越贵。

由于仪表都有一定的精度等级，因此其刻度盘的分格值不应小于仪表的允许误差（绝对误差）值，小于允许误差的分度是没有意义的。

在正常工作条件下使用时，工业上常用的各等级仪表的基本误差不超过表 1.1 所规定的值。

表 1.1 仪表的精度等级和基本误差

精度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	4.0	5.0
基本误差	±0.1%	±0.2%	±0.5%	±1.0%	±1.5%	±2.5%	±4.0%	±5.0%

【例 1.1】 某温度计的量程范围为 0 ~ 500℃，校验时该表的最大绝对误差为 6℃，试确定该仪表的精度等级。

解：根据题意知 $|\Delta x|_m = 6^\circ\text{C}$ ， $A_m = 500^\circ\text{C}$ ，代入式（1.5）中

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% = \frac{6}{500} \times 100\% = 1.2\%$$

从表 1.1 中可知，该温度计的基本误差介于 1.0% ~ 1.5%，因此该表的精度等级应定为 1.5 级。

【例 1.2】 现有 0.5 级的 0 ~ 300℃ 和 1.0 级的 0 ~ 100℃ 的两个温度计，欲测量 80℃ 的温度，试问选用哪一个温度计好？为什么？

解：0.5 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80℃ 可能出现的最大示值相对误差分别为

$$\begin{aligned} |\Delta x|_{m1} &= \gamma_{m1} A_{m1} = 0.5\% \times (300 - 0) = 1.5 \\ \gamma_{x1} &= \frac{|\Delta x|_{m1}}{x} \times 100\% = \frac{1.5}{80} \times 100\% = 1.875\% \end{aligned}$$

1.0 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80℃ 时可能出现的最大示值相对误差分别为

$$\begin{aligned} |\Delta x|_{m2} &= \gamma_{m2} A_{m2} = 1.0\% \times (100 - 0) = 1 \\ \gamma_{x2} &= \frac{|\Delta x|_{m2}}{x} \times 100\% = \frac{1}{80} \times 100\% = 1.25\% \end{aligned}$$

计算结果 $\gamma_{x1} > \gamma_{x2}$ ，显然用 1.0 级温度计比 0.5 级温度计测量时，示值相对误差反而小。因此在选用仪表时，不能单纯追求高精度，而是应兼顾精度等级和量程，最好使测量值落在仪表满度值的 2/3 以上区域内。

【例 1.3】 现对一个量程为 60MPa 的压力表进行校准，测得仪表刻度值、标准仪表示值数据如表 1.2 所示。

表 1.2 测量数据

仪表刻度值/MPa	0	10	20	30	40	50	60
标准仪表示值/MPa	0.0	9.8	20.1	30.3	40.4	50.2	60.1
绝对误差/MPa	0	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.2	-0.1
修正值/MPa	0	-0.2	0.1	0.3	0.4	0.2	0.1

试将各校准点的绝对误差和修正值填入表 1.2 中, 并确定该压力表的精度等级。

解: 最大绝对误差为 0.4MPa

$$-\frac{0.4}{60} \times 100\% = -0.67\%$$

该压力表精度等级为 1 级

1.2.2 测量误差的分类

在测量过程中, 由于被测量千差万别, 影响测量工作的因素非常多, 使得测量误差的表现形式也多种多样, 因此测量误差有不同的分类方法。

1. 按误差表现的规律划分

(1) 系统误差。对同一被测量进行多次重复测量时, 若误差固定不变或者按照一定规律变化, 这种误差称为系统误差。

系统误差主要是由于测量系统本身不完备或者环境条件的变迁造成的。例如, 所使用仪器仪表的误差、测量方法的不完善、各种环境因素的波动, 以及测量者个体差异等原因。

系统误差反映了测量值偏离真值的程度, 可用“正确度”一词表征。

系统误差是有规律性的。按其表现的特点可分为固定不变的恒值系差和遵循一定规律变化的变值系差。系统误差一般可通过实验或分析的方法, 查明其变化的规律及产生的原因, 因此它是可以预测的, 也是可以消除的。

(2) 随机误差。对同一被测量进行多次重复测量时, 若误差的大小随机变化、不可预知, 这种误差称为随机误差。

随机误差是由很多复杂因素的微小变化引起的, 尽管这些不可控微小因素中的一项对测量值的影响甚微, 但这些因素的综合作用造成了各次测量值的差异。

随机误差反映了测量结果的“精密度”, 即各个测量值之间相互接近的程度。

对随机误差的某个单值来说, 是没有规律、不可预料的, 但从多次测量的总体上看, 随机误差又服从一定的统计规律, 大多数服从正态分布规律。因此可以用概率论和数理统计的方法, 从理论上估计其对测量结果的影响。

应该指出, 在任何一次测量中, 系统误差和随机误差一般都是同时存在的, 而且两者之间并不存在绝对的界限。

(3) 粗大误差。测量结果明显地偏离其实际值所对应的误差, 称为粗大误差或疏忽误差, 又称为过失误差。含有粗大误差的测量值称为坏值。

产生粗大误差的原因有操作者的失误、使用有缺陷的仪器、实验条件的突变等。

正确的测量结果中不应包含粗大误差。实际测量时必须根据一定的准则判断测量结果中是否包含有坏值, 并在数据记录中将所有的坏值都予以剔除。同时还可采取提高操作人员的

工作责任心, 以及对测量仪器进行经常性检查、维护、校验和修理等方法, 减少或消除粗大误差。

(4) 缓变误差。数值随时间而缓慢变化的误差称为缓变误差。

缓变误差主要是测量仪表零件的老化、失效、变形等原因造成的。这种误差在短时间内不易察觉, 但在较长的时间后会显露出来。

通常可以采用定期校验的方法及时修正缓变误差。

2. 按被测量与时间关系划分

(1) 静态误差。被测量稳定不变时所产生的测量误差称为静态误差。

(2) 动态误差。被测量随时间迅速变化时, 系统的输出量在时间上却跟不上输入的变化, 这时所产生的误差称为动态误差。例如, 用水银温度计插入 100°C 沸水中, 水银柱不可能立即上升到 100°C , 此时读数必然产生动态误差。

此外, 按测量仪表的使用条件分类, 可将误差分为基本误差和附加误差; 按测量技能和手段分类, 误差又可分为工具误差和方法误差。

1.3 测量误差的分析与处理

1.3.1 随机误差的统计特性

1. 随机误差的特征

随机误差就单次测量而言是无规律的, 其大小、方向均不可预知, 既不能用实验的方法消除, 也不能修正, 但当测量次数无限增加时, 该测量列中的各个测量误差出现的概率密度分布服从正态分布, 即

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.6)$$

式中, $\Delta x = x - L$ 为测量值的绝对误差; σ 为分布函数的标准误差。图 1.2 示出了相应的正态分布曲线。

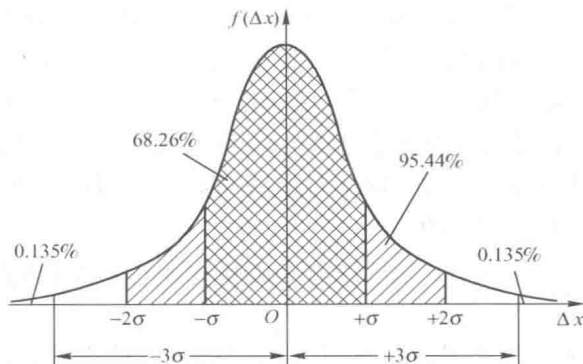


图 1.2 随机误差的正态分布曲线

测量结果符合正态分布曲线的例子非常多, 例如, 某校男生身高的分布, 交流电源电压的波动等。由式 (1.6) 和图 1.1 不难看出, 具有正态分布的随机误差具有以下 4 个特征。

- (1) 对称性: 绝对值相等的正、负误差出现的概率大致相等。
- (2) 单峰性: 绝对值越小的误差在测量中出现的概率越大。
- (3) 有界性: 在一定的测量条件下, 随机误差的绝对值不会超过一定的界限。
- (4) 抵偿性: 在相同的测量条件下, 当测量次数增加时, 随机误差的算术平均值趋向于零。

2. 正态分布随机变量的数字特征

随机变量的统计规律性由概率密度函数进行了全面的描述, 而数字特征则通过一些简单的数据来反映随机变量的某些关键特征。

(1) 算术平均值。由上述正态分布的抵偿性可得

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x}$$

式中, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ 为算术平均值。

上式表明, 当等精度测量次数无穷增加时, 被测量的真值就等于测量值的算术平均值, 即算术平均值是被测量真值的最佳估计值。

(2) 方差和标准偏差。在实际应用中, 不仅要考虑如何由测量值来对被测量值的真值进行最佳估计, 还应注意测量值偏离真值的程度。前一个问题通过算术平均值来解决, 而后一个问题则由方差或由标准偏差来衡量。

方差就是当等精度测量次数无穷增加时, 测量值与真值之差的平方和的算术平均值, 用于 σ^2 表示, 即

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta^2}{n} \quad (1.7)$$

方差的正平方根称为标准偏差, 用 σ 表示, 即

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta^2}{n}} \quad (1.8)$$

符合正态分布的随机误差, 其概率密度函数的数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.9)$$

式中, $\delta = x - \mu$ 。

概率密度函数曲线的形状取决于 σ 。首先, σ 是曲线上拐点的横坐标值。其次, σ 值越小, 则分布曲线越陡, 随机误差的分散程度越小, 这是人们所希望的; σ 值越大, 则分布曲线越平坦, 随机误差越分散。标准偏差 σ 的意义如图 1.3 所示。

若随机变量 X 具有形式为式 (1.9) 的概率密度函数, 则称 X 服从参数为 μ 、 σ^2 的正态分布, 记为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

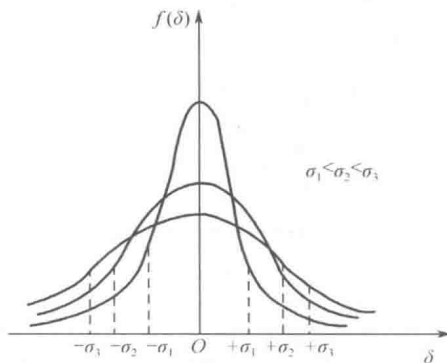


图 1.3 标准偏差 σ 的意义

利用式（1.8）计算标准偏差是在真值已知且测量次数 $n \rightarrow \infty$ 的条件下定义的，在实际中无法使用。因此 σ 的精确值是无法得到的，只能求得其最佳估计值 $\hat{\sigma}$ 。

数理统计的研究表明， $\hat{\sigma}$ 可由贝塞尔公式计算

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \tag{1.10}$$

式中， $v_i = x_i - \bar{x}$ 为第 i 次测量值的残差。

3. 置信区间与置信概率

被测量的测量值是一个随机变量 X ，显然，随机误差 $\delta = X - \mu$ 也是一个随机变量，通常需要确定 δ 落入某一区间 $(a, b]$ 的概率有多大。由式（1.6）和式（1.9）可知

$$P\{a < \delta \leq b\} = \int_{-\infty}^b f(\delta) d\delta - \int_{-\infty}^a f(\delta) d\delta = \int_a^b f(\delta) d\delta = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \tag{1.11}$$

随机变量 δ 的取值范围 $(a, b]$ 称为置信区间，而随机变量在置信区间内取值的概率 $P\{a < \delta \leq b\}$ ，则称为置信概率。由于概率密度函数 $f(\delta)$ 曲线具有对称性，并且其形状取决于 σ ，因此置信区间一般以 σ 的倍数 $\pm k_p \sigma$ 表示，其中 k_p 称为置信系数。

在式（1.11）中，设 $\delta/\sigma = Z$ ，则置信概率可表示为

$$P\{-k_p \sigma < \delta \leq +k_p \sigma\} = \int_{-k_p}^{+k_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{Z^2}{2}} \sigma dZ = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+k_p} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \tag{1.12}$$

式（1.12）中的函数称为概率积分函数（或拉普拉斯函数），并将其表示为

$$\phi(Z = k_p) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+k_p} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \tag{1.13}$$

表 1.3 列出了置信系数 k_p 取不同值时 $\phi(Z)$ 的数值。

表 1.3 正态分布下概率积分函数数值表

Z	$\phi(Z)$	Z	$\phi(Z)$	Z	$\phi(Z)$	Z	$\phi(Z)$
0	0.00000	0.9	0.63188	1.9	0.94257	2.7	0.99307
0.1	0.07966	1.0	0.68269	1.96	0.95000	2.8	0.99489
0.2	0.15852	1.1	0.72867	2.0	0.95450	2.9	0.99627
0.3	0.23585	1.2	0.76986	2.1	0.96427	3.0	0.99730
0.4	0.31084	1.3	0.80640	2.2	0.97219	3.5	0.999535
0.5	0.38293	1.4	0.83849	2.3	0.97855	4.0	0.999937
0.6	0.45149	1.5	0.86639	2.4	0.98361	4.5	0.999993
0.6745	0.50000	1.6	0.89040	2.5	0.98758	5.0	0.999999
0.7	0.51607	1.7	0.91087	2.58	0.99012	∞	1.000000
0.8	0.57629	1.8	0.92814	2.6	0.99068		

例如， $P\{-\sigma < \delta < \sigma\} = \phi(1) = 0.68269$ ，说明随机误差落入区间 $(-\sigma, \sigma]$ 的概率为 68.26%。

4. 仅包含随机误差测量结果的表示

算术平均值虽然是被测量真值的最佳估计值，但仍存在误差。如果把在相同条件下对同

一被测量进行的等精度测量分为 m 组, 每组重复进行 n 次测量, 则各组测量值的算术平均值也不尽相同。数理统计学的研究表明, 这种误差也符合随机误差的性质, 并有如下定理:

若随机变量 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 则 $\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right)$ 。

显然, X 的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.14)$$

在实际中采用 $\sigma_{\bar{x}}$ 的最佳估计值 $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$, 并且

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1.15)$$

式中, $\hat{\sigma}$ 可由式 (1.10) 的贝塞尔公式求出。

设测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 相对被测量真值的误差为 $\delta_{\bar{x}} = \bar{x} - \mu$, 则因为

$$P\{-\hat{\sigma}_{\bar{x}} < \delta_{\bar{x}} \leq +\hat{\sigma}_{\bar{x}}\} = P\{\bar{x} - \hat{\sigma}_{\bar{x}} \leq \mu < \bar{x} + \hat{\sigma}_{\bar{x}}\} = 0.68269$$

即 μ 落入置信区间 $[\bar{x} - \hat{\sigma}_{\bar{x}}, \bar{x} + \hat{\sigma}_{\bar{x}})$ 内的置信概率可达 68.269%, 所以一般就将被测量 x 的测量结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (1.16)$$

1.3.2 粗大误差

当置信系数 k_p 取 3, 即置信区间设定为 $(-3\sigma, +3\sigma]$ 时, 相应的置信概率为

$$P\{-3\sigma < \delta \leq +3\sigma\} = \phi(3) = 0.99730$$

说明测量误差在 $(-3\sigma, +3\sigma]$ 范围内的概率达 99.73%, 超出 $(-3\sigma, +3\sigma]$ 范围的概率仅为 0.27%, 即一般情况下测量误差的绝对值大于 3σ 的可能性极小。因此, 如果某次测量结果出现了这一小概率情况, 就认为该测量结果存在粗大误差, 应予以剔除, 以消除其对测量结果的影响。

实际使用中常采用拉依达准则, 即当测量次数足够多时, 如果

$$|v_i| = |x_i - \bar{x}| > 3\hat{\sigma} \quad (1.17)$$

那么第 i 次测量值 x_i 就存在粗大误差。

1.3.3 系统误差

已经知道, 在相同条件下对同一个量进行的多次等精度测量中, 如果仅存在随机误差, 那么可用多次测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 作为被测量真值 μ 的最佳估计, 即认为 $\bar{x}$ 就是被测量的约定真值 x_0 。这时某次测量值的绝对误差

$$\Delta x_i = x_i - x_0 = x_i - \bar{x} = v_i \quad (1.18)$$

可见, 如果仅存在随机误差, 残差 v_i 就是该次测量的随机误差。但是, 在许多测量中发现, $\bar{x}$ 与 x_0 之间存在明显的偏差, 并且这种偏差常常保持为常数, 或按某一确定的规律变化。

显然, 这是与随机误差性质不同的另一类误差。分析表明, 造成这类误差的原因可能是测量仪器不准确, 测量方法不完善, 或环境因素影响等。这种性质的误差就称为系统误差。

对式 (1.18) 进行如下变换

$$\Delta x_i = x_i - x_0 = (x_i - \bar{x}) + (\bar{x} - x_0) = v_i + \varepsilon \quad (1.19)$$

式中, 残差 v_i 是每次测量的随机误差, 而 ε 就是在多次等精度测量中出现的系统误差。