传感器与检测技术应用

单振清 宋雪臣 田青松 主编

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

传感器与检测技术应用

主　编　单振清　宋雪臣　田青松
副主编　曹秀海　侯秀丽
　　宋凡峰　杨晓磊
主　审　郭庆强

安徽大学图书馆
藏书
www.lib.ahu.edu.cn

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书从实用角度出发，主要介绍常用传感器的工作原理、基本结构、信号处理及基本应用，并增加了传感器的技能实训。

全书共13个课题，内容主要包括经典传统传感器、传感器选用与标定、传感器抗干扰技术和微机接口技术等，还对当前比较先进的智能传感器做了简介。

本书内容丰富精炼，以传感器的应用为目的，避开了过深的理论分析和公式推导，突出了现代新型传感器及检测技术，给出了较多的应用实例。书中适当插入一些传感器实物照片，增加了内容的直观性和真实感。

本书既可以作为项目教学的参考教材，又可作为基于工作过程的校企合作教学的参考资料。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

传感器与检测技术应用/单振清，宋雪臣，田青松主编．—北京：北京理工大学出版社，2013.2

ISBN 978-7-5640-7378-7

Ⅰ.①传…　Ⅱ.①单…②宋…③田…　Ⅲ.①传感器-检测-高等学校-教材　Ⅳ.①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第019049号

出版发行／北京理工大学出版社
社　　址／北京市海淀区中关村南大街5号
邮　　编／100081
电　　话／(010)68914775(办公室)　68944990(批销中心)　68911084(读者服务部)
网　　址／http://www.bitpress.com.cn
经　　销／全国各地新华书店
印　　刷／北京国马印刷厂
开　　本／787毫米×1092毫米　1/16
印　　张／17.5
字　　数／410千字
版　　次／2013年2月第1版　2013年2月第1次印刷
印　　数／1～1500册
定　　价／45.00元

责任编辑／张慧峰
责任校对／贾　苗
责任印制／王美丽

图书出现印装质量问题，本社负责调换

目录

Contents

课题1　传感器检测技术基础 …… 1

任务1　传感器检测技术与我们的生活息息相关 …… 1

任务2　测量与测量误差 …… 3

任务3　传感器的基本知识 …… 12

任务4　自动检测系统 …… 17

任务5　传感器检测技术发展趋势 …… 19

课题小结 …… 23

思考与训练 …… 23

课题2　电阻式传感器及其应用 …… 26

任务1　电位器电阻式传感器 …… 26

2.1.1　电位器传感器原理和结构 …… 27

2.1.2　电位器传感器负载特性 …… 27

2.1.3　电位器传感器的应用实例 …… 28

任务2　弹性敏感元件 …… 29

2.2.1　弹性敏感材料的弹性特性 …… 29

2.2.2　弹性敏感元件的材料及基本要求 …… 31

2.2.3　变换力的弹性敏感元件 …… 31

2.2.4　变换压力的弹性敏感元件 …… 33

任务3　电阻应变式传感器 …… 36

2.3.1　应变效应与应变片 …… 36

2.3.2　测量转换电路 …… 40

2.3.3　应变式传感器应用实例 …… 42

任务4　固态压阻式传感器 …… 46

2.4.1　半导体压阻效应 …… 46

2.4.2　扩散型压阻式传感器 …… 46

任务5　热电阻传感器 …… 47

2.5.1　金属热电阻传感器 …… 48

2.5.2　半导体热敏电阻和集成温度传感器 …… 52

任务6　气敏和湿敏电阻传感器 …… 56

2.6.1　气敏电阻传感器 …… 56

2.6.2 湿敏电阻传感器 …… 60
任务7 电阻式传感器项目实训——热敏电阻制作的电冰箱温度超标指示器 …… 63
课题小结 …… 64
思考与训练 …… 64
课题3 电容式传感器及其应用 …… 68
任务1 电容式传感器基本知识 …… 69
3.1.1 电容式传感器工作原理及结构 …… 69
3.1.2 电容式传感器的转换电路 …… 72
任务2 电容式传感器的应用 …… 76
任务3 电容式传感器知识扩展——电容器指纹识别 …… 78
任务4 电容式传感器项目实训——由集成电路制作的电容感应式控制电路 …… 79
课题小结 …… 80
思考与训练 …… 81
课题4 电感式传感器及其应用 …… 83
任务1 自感式传感器 …… 83
4.1.1 工作原理 …… 84
4.1.2 自感式传感器的测量电路 …… 86
4.1.3 自感式传感器应用实例 …… 89
任务2 差动变压器式传感器 …… 90
4.2.1 差动变压器工作原理 …… 90
4.2.2 差动变压器测量电路 …… 92
4.2.3 差动变压器式传感器应用实例 …… 95
任务3 电涡流传感器 …… 96
4.3.1 涡流传感器的工作原理 …… 96
4.3.2 涡流传感器基本结构和类型 …… 98
4.3.3 涡流传感器测量电路 …… 99
4.3.4 涡流传感器的应用 …… 101
任务4 知识扩展——一次仪表与4～20 mA二线制输出方式 …… 103
任务5 电感式传感器实项目实训——电感式接近开关 …… 104
课题小结 …… 105
思考与训练 …… 106
课题5 热电式传感器及其应用 …… 108
任务1 熟悉热电效应 …… 109
5.1.1 热电效应及基本概念 …… 109
5.1.2 热电偶基本定律 …… 110
任务2 认识热电偶基本结构 …… 113
5.2.1 热电偶基本结构类型 …… 114
5.2.2 热电偶材料 …… 115

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

5.2.3 常用热电偶 …… 115
任务3 热电偶实用测温线路和温度补偿 …… 117
5.3.1 热电偶实用测温线路 …… 117
5.3.2 热电偶的冷端迁移 …… 118
5.3.3 热电偶的温度补偿 …… 119
任务4 热电偶传感器的应用 …… 120
任务5 热电偶传感器项目实训——热电偶传感器测温 …… 122
课题小结 …… 124
思考与训练 …… 124
课题6 光电式传感器及其应用 …… 126
任务1 认识光电效应及光电元器件 …… 126
6.1.1 光源与光辐射体 …… 126
6.1.2 光电效应及分类 …… 128
6.1.3 光电管及基本测量电路 …… 129
6.1.4 光电倍增管及基本测量电路 …… 131
6.1.5 光敏电阻及基本测量电路 …… 133
6.1.6 光敏晶体管及基本测量电路 …… 135
6.1.7 光电池及基本测量电路 …… 138
6.1.8 光电耦合器件及基本测量电路 …… 141
6.1.9 光电式传感器的应用 …… 142
任务2 光纤传感器 …… 146
6.2.1 光纤传感器结构和原理 …… 146
6.2.2 光纤传感器的应用 …… 147
任务3 红外传感器 …… 149
6.3.1 红外辐射 …… 149
6.3.2 红外探测器 …… 150
6.3.3 红外传感器的应用 …… 152
任务4 光电式传感器知识扩展 …… 154
6.4.1 PLC 内部输入电路 …… 154
6.4.2 光电开关与 PLC 输入端连接 …… 155
任务5 光电传感器项目实训——光敏二极管在路灯控制器中的应用 …… 157
课题小结 …… 159
思考与训练 …… 159
课题7 霍尔式传感器及其应用 …… 162
任务1 熟悉霍尔效应及霍尔元件 …… 162
任务2 集成霍尔传感器 …… 168
任务3 霍尔传感器的应用 …… 169
任务4 知识扩展——其他磁敏传感器 …… 171

任务5 霍尔传感器项目实训——霍尔开关传感器测转速 …… 177
课题小结 …… 179
思考与练习 …… 180
课题8 压电式传感器及其应用 …… 182
任务1 认识压电效应及压电材料 …… 182
8.1.1 压电效应 …… 182
8.1.2 压电材料 …… 184
任务2 压电式传感器测量电路 …… 186
8.2.1 压电式传感器的等效电路 …… 186
8.2.2 压电式传感器测量电路 …… 187
任务3 压电式传感器的应用 …… 188
8.3.1 压电传感器的基本连接 …… 188
8.3.2 压电传感器的应用 …… 189
任务4 压电传感器项目实训——振动式防盗报警器 …… 191
课题小结 …… 192
思考与训练 …… 193
课题9 超声波传感器及其应用 …… 194
任务1 认识超声波及其物理性质 …… 194
任务2 超声波探头及耦合技术 …… 197
9.2.1 超声波探头 …… 197
9.2.2 超声波探头耦合剂 …… 199
任务3 超声波传感器的应用 …… 199
任务4 超声波知识扩展 …… 203
任务5 超声波传感器项目实训——超声波遥控电灯开关 …… 205
课题小结 …… 207
思考与训练 …… 207
课题10 数字式传感器及其应用 …… 209
任务1 认识常用数字式传感器 …… 209
10.1.1 栅式数字传感器 …… 209
10.1.2 数字编码器 …… 215
10.1.3 感应同步器 …… 219
10.1.4 频率式数字传感器 …… 225
任务2 数字式传感器的应用 …… 227
任务3 数字式传感器项目实训——光栅位移传感器在数控机床中的应用 …… 229
课题小结 …… 233
思考与训练 …… 233
课题11 智能传感器 …… 234
任务1 认识和了解智能传感器 …… 234

11.1.1 智能传感器的概念和特点 …… 234
11.1.2 智能传感器的基本结构 …… 235
任务2 智能传感器的应用 …… 238
课题小结 …… 241
思考与训练 …… 242
课题12 传感器选用与标定 …… 243
任务1 传感器选用原则 …… 243
任务2 传感器的标定与校准 …… 245
课题小结 …… 248
思考与训练 …… 248
课题13 抗干扰技术及微机接口技术 …… 249
任务1 抗干扰技术 …… 249
任务2 传感器与微机接口技术 …… 255
任务3 微机接口项目实训——数字式温度计的设计与制作 …… 262
13.3.1 数字温度传感器 DS18B20 …… 262
13.3.2 AT89C2051 单片机 …… 265
13.3.3 AT89C2051 与 DS18B20 组成的测温系统 …… 265
13.3.4 软件设计 …… 267
课题小结 …… 268
思考与训练 …… 269
参考文献 …… 270

课题 1

传感器检测技术基础

现代科学技术使人类社会进入了信息时代，来自自然界的物质信息都需要通过传感器进行采集才能获取。传感器不仅充当着计算机、机器人、自动化设备的感觉器官及机电结合的接口，而且已渗透到人类生产、生活的各个领域。传感器技术对现代化科学技术、现代化农业及工业自动化的发展起到基础和支柱的作用，已被世界各国列为关键技术之一。

【岗位目标】

测量仪表、检测系统的管理；仪表的选择和测量数据的处理等。

【能力目标】

通过本章的学习，要求了解检测技术在我们生活、生产、科研等方面的重要性；了解测量误差的概念，掌握误差的表达方式，能正确选择仪表进行测量；掌握自动检测系统的结构组成；了解自动检测技术的发展趋势。

【课题导读】

在现代工业生产中为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象，使它们处于所选工况最佳状态，就必须掌握描述它们特性的各种参数。以传感器为核心的检测系统就像神经和感官一样，源源不断地向人类提供宏观与微观世界的种种信息，成为人们认识自然、改造自然的有力工具。

“没有传感器就没有现代科学技术”的观点已为全世界所公认。检测技术作为信息科学的一个重要分支，与计算机技术、自动控制技术和通信技术等一起构成了信息技术的完整学科。为了学好检测技术，首先要了解检测技术的基本知识。

任务 1　传感器检测技术与我们的生活息息相关

检测技术几乎渗透到人类的一切活动领域，在国民经济中占有极其重要的地位。它不仅给人们带来巨大的经济效益，改善人们的生活质量，还不断推动着现代科学技术的进步，成为一些发达国家最重要的热门技术之一。

1. 在工业检测和自动控制系统中的应用

为了保证生产过程能正常、高效、经济地运行，必须对生产过程的某些重要工艺参数（如温度、压力、流量等）进行实时检测与优化控制。例如陶瓷隧道窑温度、压力监测控制系统（如图 1－1 所示）、超声波探伤（如图 1－2 所示）、对容器液位的检测（如图 1－3 所示），等等。

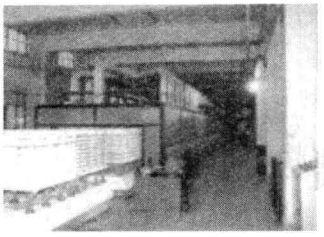


图1-1 陶瓷隧道窑温度、压力监测控制系统

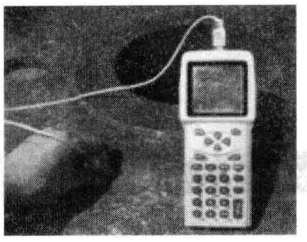


图1-2 超声波探伤

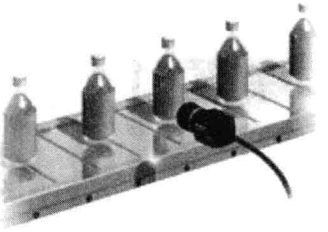


图1-3 容器液位的检测

2. 在交通运输中的应用

需要对车辆的速度、加速度、油料、发动机温度等基本参数进行检测，为了保证行驶安全还要装设安全气囊、防滑控制系统、防盗、防抱死系统，等等。如图1-4和图1-5所示。

3. 在现代医学领域中的应用

为了提高对病人病情的诊断水平，在现代医学领域中广泛采用了先进的检测设备，对人体温度、血压、心脑电波、内脏器官等精确检测。大大提高对疾病检查、诊断的速度和准确性，有利于争取时间，对症治疗，增加患者战胜疾病的机会。如图1-6和图1-7所示。

图1-4 安全气囊

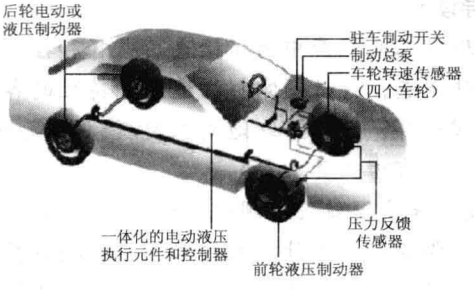


图1-5 防侧滑系统涉及的传感器

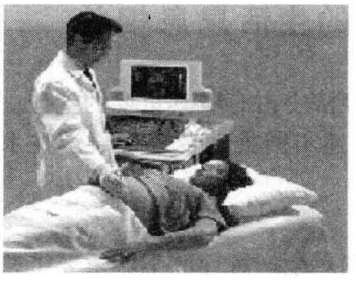


图1-6 超声波检测

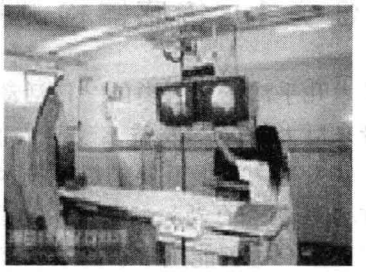


图1-7 大型医疗设备-C型臂

4. 在日常生活中的应用

在现代家庭中空调、电冰箱、洗衣机、煤气报警器、电饭煲、电磁炉等都离不开传感器。利用传感器实现对水温、空气温度、食物加热温度的控制，或通过对手的感测来实现对水龙头的出水控制，等等。如图1-8所示。

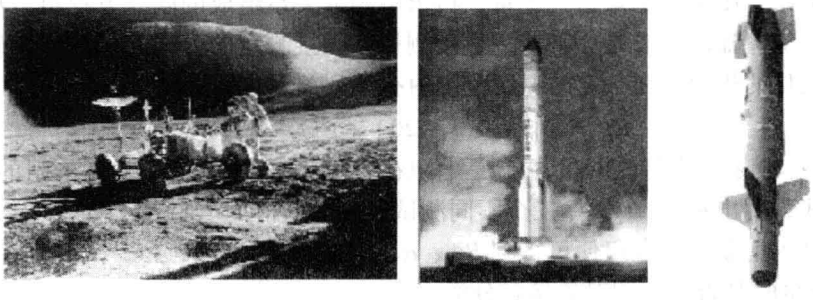
(a) (b) (c) (d)

图1-8 常见家用电器

(a)感应水龙头；(b)电饭煲；(c)电热水器；(d)电冰箱

5. 在航天航空、遥感技术和军事方面的应用

在航天航空、遥感技术和军事方面需要传感器对飞机、火箭等飞行器的飞行速度、加速度、方向和姿态等参数进行检测；利用红外光电传感器、微波传感器探测气象、地质；利用压电陶瓷制成导弹引爆装置等。如图1-9所示。



(a) (b) (c)

图1-9 常见航天器、导弹

(a)月球车；(b)火箭；(c)自引爆炸弹

传感器和检测技术在其他方面的应用实例还有很多，通过上面几个实例能感觉到传感器与我们的生活息息相关，我们越来越离不开传感器和检测技术。

任务2 测量与测量误差

1. 测量的概念

测量是人们借助专门的技术和设备，通过实验的方法，把被测量与单位标准量进行比较，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。测量结果可用一定的数值表示，也可以用一条曲线或某种图形表示。但无论其表现形式如何，测量结果应包括两部分：比值和测量单位。测量过程的核心就是比较。

2. 测量方法

实现被测量与标准量比较得出比值的方法，称为测量方法。针对不同测量任务进行具

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

体分析以找出切实可行的测量方法，对测量工作是十分重要的。

对于测量方法，从不同角度，有不同的分类方法，下面介绍几种常用的分类方法。

(1)按测量时被测量与测量结果的关系分类

按测量时被测量与测量结果的关系不同可分为直接测量、间接测量和联立测量。

①直接测量。直接测量就是用预先标定好的测量仪表直接读取被测量的测量结果。例如用万用表测量电压、电流、电阻等。这种测量方法的优点是简单而迅速，缺点是精度一般不高，但这种测量方法在工程上广泛采用。

②间接测量。间接测量就是利用被测量与某中间量的函数关系，先测出中间量，然后通过相应的函数关系计算出被测量的数值。例如导线电阻率的测量就是间接测量，$\rho = \frac{R\pi d^2}{4l}$，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。

③联立测量。联立测量又叫组合测量。如果被测量有多个，而被测量又与其他量存在一定的函数关系，则可先测量这几个量，再求解函数关系组成的联立方程组，从而得到多个被测量的数值。显然，它是一种兼用直接测量和间接测量的方式。例如：在研究热电阻 R_t 随温度 t 变化的规律时在一定的温度范围内有下列关系式：

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

式中，R_{20}、α、β 是三个待测的量，R_{20}是电阻在20℃时的数值，α、β 是电阻的温度系数。依据此关系式，测出在 t_1、t_2、t_3 三个不同测试温度时导体的电阻 R_{t1}、R_{t2}、R_{t3}，得到联立方程组，通过求解联立方程组便可得到 R_{20}、α、β 的数值。

(2)按测量时是否与被测对象接触分类

根据测量时是否与被测对象相互接触而划分为接触式测量和非接触式测量。

①接触式测量。传感器直接与被测对象接触，承受被测参数的作用，感受其变化，从而获得信号，并测量其信号大小的方法，称为接触测量法。例如用体温计测体温等。

②非接触式测量。传感器不与被测对象直接接触，而是间接承受被测参数的作用，感受其变化，从而获得信号，并测量其信号大小的方法，称为非接触测量法。例如用辐射式温度计测量温度，用光电转速表测量转速等。非接触测量法不干扰被测对象，既可对局部点检测，又可对整体扫描。特别是对于运动对象、腐蚀性介质及危险场合的参数检测，它更方便、安全和准确。

(3)按被测信号的变化情况分类

根据被测信号的变化情况不同分为静态测量和动态测量。

①静态测量。静态测量是测量那些不随时间变化或变化很缓慢的物理量。如超市中物品的称重属于静态测量，温度计测气温也属于静态测量。

②动态测量。动态测量是测量那些随时间而变化的物理量。如地震仪测量振动波形则属于动态测量。

(4)按输出信号的性质分类

根据输出信号的性质不同分为模拟式测量和数字式测量。

①模拟式测量。模拟式测量是指测量结果可根据仪表指针在标尺上的定位进行连续读取的测量方式，如指针式电压表测电压。

②数字式测量。数字式测量是指以数字的形式直接给出测量结果的测量方式，如数字式万用表的测量。

(5)按测量方式分类

按测量方式不同可分为偏差式测量、零位式测量与微差式测量。

①偏差式测量。用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的量值，这种测量方法称为偏差式测量。应用这种方法测量时，仪表刻度事先用标准器具标定。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。如指针式电压表测电压，指针式电流表测电流。这种方法测量过程比较简单、迅速，但测量结果精度较低。

②零位式测量。用指零仪表的零位指示检测测量系统的平衡状态，在测量系统平衡时，用已知的标准量决定被测量的量值，这种测量方法称为零位式测量。在测量时，已知标准量直接与被测量相比较，已知量应连续可调，指零仪表指零时，被测量与已知标准量相等。例如物理天平、电位差计等。零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度，但测量过程比较复杂，费时较长，不适用于测量迅速变化的信号。

③微差式测量。微差式测量是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。它将被测量与已知的标准量相比较，取得差值后，再用偏差法测得此差值。应用这种方法测量时，不需要调整标准量，而只需测量两者的差值。例如：设 N 为标准量，x 为被测量，Δx 为二者之差，则 $x = N + \Delta x$。由于 N 是标准量，其误差很小，因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量 Δx，即使测量 Δx 的精度较低，但因 Δx 值较小，它对总测量值的影响较小，故总的测量精度仍很高。微差式测量的优点是反应快，而且测量精度高，特别适用于在线控制参数的测量。

3. 测量误差及表达方式

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认识能力所限等因素，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，也可用相对误差表示。

(1)绝对误差

绝对误差是指测量值与真值之间的差值，它反映了测量值偏离真值的多少，即

$$\Delta x = A_x - A_0 \tag{1-1}$$

式(1-1)中 A_0 为被测量真值，A_x 为被测量实际值。由于真值的不可知性，在实际应用时，常用实际真值(或约定真值)A 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，故有

$$\Delta x = A_x - A \tag{1-2}$$

(2)相对误差

相对误差能够反映测量值偏离真值的程度，用相对误差通常比其绝对误差能更好地说明不同测量的精确程度。它有以下三种常用形式：

①实际相对误差。实际相对误差是指绝对误差 Δx 与被测量真值 A_0 的百分比，用 γ_A

表示，即

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \tag{1-3}$$

②示值(标称)相对误差。示值相对误差是指绝对误差 Δx 与被测量实际值 A_x 的百分比，用 γ_x 表示，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{A_x} \times 100\% \tag{1-4}$$

③引用(满度)相对误差。引用相对误差是指绝对误差 Δx 与仪表满度值 A_m 的百分比，用 γ_m 表示，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{A_m} \times 100\% \tag{1-5}$$

由于 γ_m 是用绝对误差 Δx 与一个常量 A_m(量程上限)的比值所表示的，所以实际上给出的是绝对误差，这也是应用最多的表示方法。当 $|\Delta x|$ 取最大值时，其满度相对误差常用来确定仪表的精度等级 S，精度等级数值就是取 γ_m 绝对值并省略百分号得到的。例如，若 $\gamma_m = 1.5\%$，则精度等级 $S = 1.5$ 级。为统一和方便使用，国家标准 GB 776－76《测量指示仪表通用技术条件》规定，测量指示仪表的精度等级 S 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级，这也是工业检测仪器(系统)常用的精度等级。例如用 5.0 级的仪表测量，其绝对误差的绝对值不会超过仪表量程的 5%。满度相对误差中的分子、分母均由仪表本身性能所决定，所以它是衡量仪表性能优劣的一种简便实用的方法。

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 $|\Delta x|_m = 6℃$，$A_m = 500℃$，代入式(1－5)中可得

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

该温度计的基本误差介于 1.0% 与 1.5% 之间，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和测量 80℃ 可能出现的最大示值相对误差分别为

$$|\Delta x|_{m1} = \gamma_{m1} \cdot A_{m1} = 0.5\% \times (300 - 0) = 1.5(℃)$$

$$\gamma_{x1} = \frac{|\Delta x|_{m1}}{A_x} \times 100\% = \frac{1.5}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

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

$$|\Delta x|_{m2} = \gamma_{m2} \cdot A_{m2} = 1.0\% \times (300 - 0) = 1(℃)$$

$$\gamma_{x2} = \frac{|\Delta x|_{m2}}{A_x} \times 100\% = \frac{1}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

根据计算结果，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。

对于同一仪表，所选量程不同，可能产生的最大绝对误差也不同。而当仪表准确度等

级选定后，测量值越接近满度值时，测量相对误差越小，测量越准确。因此，一般情况下应尽量使指针处在仪表满度值的2/3以上区域。但该结论只适用于正向线性刻度的一般电工仪表。对于万用表电阻挡等这样的非线性刻度电工仪表，应尽量使指针处于满度值的1/2左右的区域。

4. 测量误差的分类

(1)按误差表现的规律划分

根据测量数据中的误差所呈现的规律，将误差分为三种，即系统误差、随机误差和粗大误差。这种分类方法便于测量数据的处理。

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。例如，标准量值的不准确及仪表刻度的不准确而引起的误差。

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。随机误差是测量过程中，许多独立的、微小的、偶然的因素引起的综合结果。

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。

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，又叫过失误差。这类误差是由于测量者疏忽大意或环境条件的突然变化而引起的。例如，测量人员工作时疏忽大意，出现了读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等。另外，测量方法不恰当，测量条件意外的变化，也可能造成粗大误差。

含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。坏值应从测量结果中剔除。

(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量的变化，这时所产生的误差称为动态误差。

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等。

5. 测量误差的分析与处理

从工程测量实践可知，测量数据中含有系统误差和随机误差，有时还会含有粗大误差。它们的性质不同，对测量结果的影响及处理方法也不同。在测量中，对测量数据进行处理时，首先判断测量数据中是否含有粗大误差，如有，则必须加以剔除。再看数据中是否存在系统误差，对系统误差可设法消除或加以修正。对排除了系统误差和粗大误差的测量数据，则利用随机误差性质进行处理。总之，对于不同情况的测量数据，首先要加以分析研究，判断情况，分别处理，再经综合整理以得出合乎科学性的结果。

(1)随机误差的分析与处理

在测量中，当系统误差已设法消除或减小到可以忽略的程度时，如果测量数据仍有不稳定的现象，说明存在随机误差。在等精度测量情况下，得 n 个测量值 x_1，x_2，…，x_n，设只含有随机误差 δ_1，δ_2，…，δ_n。这组测量值或随机误差都是随机事件，可以用概率数理统计的方法来研究。随机误差的处理任务是从随机数据中求出最接近真值的值(或称真值的最佳估计值)，对数据精密度的高低(或称可信赖的程度)进行评定并给出测量结果。

具有正态分布的随机误差如图 1－10 所示，它具有以下四个特征：

①对称性。绝对值相等的正、负误差出现的机会大致相等。

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。

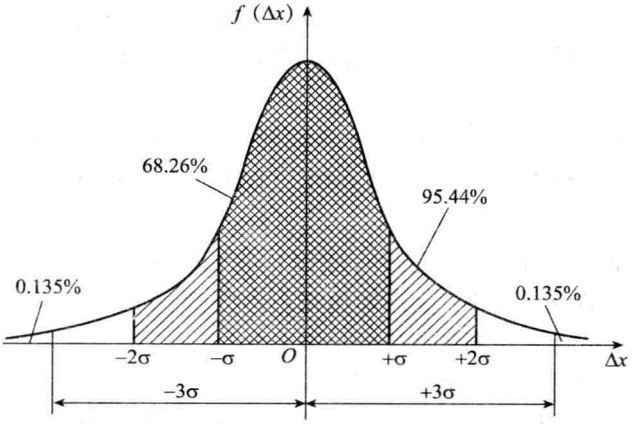


图 1－10　随机误差的正态分布曲线

在实际测量时，真值 A_0 不可能得到。但如果随机误差服从正态分布，则算术平均值处随机误差的概率密度最大。对被测量进行等精度的 n 次测量，得 n 个测量值 x_1，x_2，…，x_n，它们的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1-6}$$

算术平均值是诸测量值中最可信赖的，它可以作为等精度多次测量的结果。

上述的算术平均值是反映随机误差的分布中心，而方均根偏差 σ 则反映随机误差的分布范围。方均根偏差愈大，测量数据的分散范围也愈大，所以方均根偏差 σ 可以描述测量数据和测量结果的精度。

方均根误差 σ 可由下式求取

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - A_0)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2}{n}} \tag{1-7}$$

由于得不到真值 A_0，可用 n 次测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 代替，则方均根误差为

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{1-8}$$

算术平均值的方均根误差(标准误差)$\bar{\sigma}$ 为

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1-9}$$

测量结果通常表示为

$$x = \bar{x} \pm 3\bar{\sigma} \ (P = 99.73\%) \tag{1-10}$$

式(1-10)中3为置信系数，P 为置信概率(或置信度)。测量结果的置信区间(或置信限)一般表示为$[-k\sigma, k\sigma]$，其中 k 为置信系数。根据正态分布的概率积分可知，对于不同的 k 值，对应不同的置信概率，见表1-1。由表1-1可以看出，对一组既无系差又无粗差的等精度测量，当置信区间取 $\pm 2\delta$ 或 $\pm 3\delta$ 时，误差值落在该区间外的可能仅有5%或0.3%。因此，人们常把 $\pm 2\delta$ 或 $\pm 3\delta$ 值称为极限误差，又称值随机不确定度。记为 $\Delta = 2\sigma$ 或 3σ，它随置信概率取值不同而不同。

表1-1 置信系数与置信度的关系

k	1	1.96	2	2.58	3
P	0.6827 (68%)	0.95 (95%)	0.9545 (95%)	0.99 (99%)	0.9973(99.7%)

(2)系统误差的分析与处理

由于系统误差的特殊性，在处理方法上与随机误差完全不同。减小或消除系统误差的关键是如何查找误差根源，这就需要对测量设备、测量对象和测量系统作全面分析，明确其中有无产生明显系统误差的因素，并采取相应措施予以修正或消除。由于具体条件不同，在分析查找误差根源时并无一成不变的方法，这与测量者的经验、水平以及测量技术的发展密切相关。但我们可以从以下几个方面进行分析考虑。

①所用传感器、测量仪表或组成元件是否准确可靠。比如传感器或仪表灵敏度不足，仪表刻度不准确，变换器、放大器等性能不太优良，由这些引起的误差是常见的误差。

②测量方法是否完善。如用电压表测量电压，电压表的内阻对测量结果有影响。

③传感器或仪表安装、调整或放置是否正确合理。例如：没有调好仪表水平位置，安装时仪表指针偏心等都会引起误差。

④传感器或仪表工作场所的环境条件是否符合规定条件。例如环境、温度、湿度、气压等的变化也会引起误差。

⑤测量者的操作是否正确。例如读数时的视差、视力疲劳等都会引起系统误差。

发现系统误差一般比较困难，下面只介绍几种发现系统误差的一般方法。

①实验对比法。这种方法是通过改变产生系统误差的条件从而进行不同条件的测量，以发现系统误差。这种方法适用于发现固定的系统误差。例如，一台测量仪表本身存在固定的系统误差，即使进行多次测量也不能发现，只有用精度更高一级的测量仪表测量，才能发现这台测量仪表的系统误差。

②残余误差观察法。这种方法是根据测量值的残余误差的大小和符号的变化规律，直接由误差数据或误差曲线图形判断有无变化的系统误差。图1-11把残余误差按测量值先

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com