



高等职业教育“十一·五”规划教材  
高职高专机电类教材系列

李德尧 胡汉辉 / 主 编  
张宇驰 胡邦南 / 副主编  
谭耀辉 邱丽芳 / 主 审

# 传 感器技术及应用



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

---

● 高等职业教育“十一五”规划教材

---

高职高专机电类教材系列

# 传感器技术及应用

李德尧 胡汉辉 主 编

张宇驰 胡邦南 副主编

谭耀辉 邱丽芳 主 审

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是编者在多年从事“传感器技术及应用”课程教学改革的基础上编写而成的。作者在编写时充分研究了高职高专学生的特点及知识结构、教学规律和培养目标等内容,编写中吸取了部分学校教学改革、教材建设等方面取得的经验。

本书内容主要包括测量技术概述、参量传感器、发电传感器、物性传感器、数字式传感器、传感器信号处理技术、传感器技术的综合应用等。通过本书的学习,学生应能够根据工程需要选用合适的传感器,掌握实用测试系统设计、安装和调试方法。

本书可作为高职高专院校电气工程与自动化、机械设计制造及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器等专业的教材,也可供其他相关专业选用,还可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及应用/李德尧,胡汉辉主编. —北京:科学出版社,2009  
(高等职业教育“十一五”规划教材·高职高专机电类教材系列)

ISBN 978-7-03-023938-9

I. 传… II. ①李…②胡… III. 传感器-高等学校:技术学校-教材  
IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第008521号

责任编辑: 庞海龙 张雪梅 / 责任校对: 赵 燕  
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009年2月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—3 000 字数: 420 000

定价: 27.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62135793-8999 (VT03)

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

本书是编者在多年从事传感器技术及应用教学改革的基础上编写而成的。作者在编写时充分研究了高职高专学生的特点及知识结构、教学规律和培养目标等内容,编写中吸取了部分学校教学改革、教材建设等方面取得的经验。本书可作为高职高专院校、职工大学、业余大学电类专业的教材,也可供其他相关专业选用,还可供有关工程技术人员参考。

本教材具有以下几个特点:

1. 始终以高职高专培养目标和要求为指导思想,根据现代科学技术发展的需要,在内容取舍上以本课程基本知识、基本理论为主线,使基本理论与各种新技术有机结合起来,更好地激发学生的学习兴趣和创新意识。

2. 注重体现高职高专教育特色,以能力为本位,注意学生实践能力的培养,如在第7章安排了“传感器的选择,传感器在过程量检测、家用电器和现代汽车中的应用”等内容。

3. 注重引导学生掌握本课程的学习方法,理论讲授、练习等做到少而精,而且具有启发性、实用性、新颖性,使学生在探索中学习,在学习中得到收获。

4. 内容及结构方面,在兼顾知识相关性和连贯性的基础上灵活多样,具有开放性和弹性,在合理安排基本内容的基础上留有选择和拓展的空间,以满足不同专业、不同学生学习和发展的需要。

本书由李德尧编写第1章和第7章的第7.3~7.5节,胡汉辉编写第2章和第4章,张宇驰编写第3章,何其文编写第5章,胡邦南编写第6章,谢芳芳编写第7章的第7.1和7.2节。谭耀辉、邱丽芳主审时提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 测量技术概述</b> .....	1
1.1 测量的一般知识 .....	2
1.1.1 测量的基本概念 .....	2
1.1.2 测量方法 .....	3
1.2 测量误差及其分类 .....	5
1.2.1 误差的概念 .....	5
1.2.2 误差的分类 .....	5
1.2.3 测量误差的估计和校正 .....	9
1.3 传感器概述.....	12
1.3.1 传感器的基本概念 .....	12
1.3.2 传感器的组成 .....	12
1.3.3 传感器的分类 .....	13
1.3.4 传感器的作用、应用与地位 .....	14
1.3.5 传感器的发展方向 .....	16
1.4 传感器特性.....	17
1.4.1 静态特性.....	18
1.4.2 动态特性.....	19
小结 .....	20
习题 .....	21
<b>第 2 章 参量传感器</b> .....	23
2.1 电阻应变式传感器.....	25
2.1.1 工作原理.....	25
2.1.2 电阻应变片的类型、结构与粘贴技术 .....	26
2.1.3 电阻应变片的选择 .....	28
2.1.4 电阻应变片传感器测量转换电路 .....	28
2.1.5 温度补偿.....	30
2.1.6 电阻应变式传感器的应用.....	31

2.2	热电阻传感器	34
2.2.1	热电阻	34
2.2.2	热敏电阻	38
2.3	气敏、湿敏电阻传感器	43
2.3.1	气敏电阻传感器	43
2.3.2	湿敏电阻传感器	47
2.4	自感式传感器	51
2.4.1	气隙型自感传感器	51
2.4.2	螺管型自感传感器	53
2.4.3	差动式电感传感器	53
2.4.4	测量转换电路	53
2.4.5	电感式传感器的应用	55
2.5	差动变压器式传感器	58
2.5.1	差动变压器传感器工作原理	58
2.5.2	测量转换电路	60
2.5.3	差动变压器传感器的应用	62
2.6	电涡流式传感器	65
2.6.1	电涡流式传感器的工作原理	65
2.6.2	电涡流式传感器的结构	66
2.6.3	测量电路	67
2.6.4	电涡流传感器使用须知	69
2.6.5	电涡流式传感器的应用	70
2.7	电容式传感器	71
2.7.1	电容式传感器的工作原理和结构	72
2.7.2	电容传感器的测量转换电路	75
2.7.3	电容式传感器的应用	79
	小结	82
	习题	83
<b>第3章</b>	<b>发电传感器</b>	<b>90</b>
3.1	压电式传感器	91
3.1.1	压电式传感器的工作原理	91
3.1.2	压电式传感器的测量转换电路	93
3.1.3	压电式传感器的应用	95
3.2	霍尔传感器	96
3.2.1	霍尔效应	97
3.2.2	霍尔元件	98

3.2.3 霍尔元件的特性参数 .....	98
3.2.4 集成霍尔电路 .....	100
3.2.5 零位误差与补偿 .....	103
3.2.6 温度特性及补偿 .....	104
3.2.7 霍尔传感器应用 .....	107
3.3 热电偶传感器 .....	110
3.3.1 热电偶传感器的工作原理 .....	110
3.3.2 热电偶的材料 .....	112
3.3.3 热电偶的种类及结构 .....	113
3.3.4 热电偶的冷端温度补偿 .....	114
3.3.5 热电偶的测量电路 .....	117
3.3.6 热电偶的应用 .....	118
小结 .....	121
习题 .....	121
<b>第4章 物性传感器</b> .....	<b>124</b>
4.1 超声波传感器 .....	125
4.1.1 超声波传感器的结构及工作原理 .....	125
4.1.2 耦合剂 .....	127
4.1.3 超声波传感器的应用 .....	127
4.2 光电传感器 .....	130
4.2.1 光电效应 .....	130
4.2.2 光电器件 .....	131
4.2.3 光电传感器的类型 .....	138
4.2.4 光电转换电路 .....	139
4.2.5 光电传感器的应用 .....	141
4.3 激光传感器 .....	145
4.3.1 激光的形成 .....	145
4.3.2 激光的特点 .....	146
4.3.3 激光传感器(俗称激光器) .....	146
4.3.4 应用实例 .....	147
4.4 光导纤维传感器 .....	151
4.4.1 光导纤维的结构和种类 .....	151
4.4.2 光纤传感器的工作原理和特点 .....	153
4.4.3 光纤传感器的类型 .....	153
4.4.4 光纤传感器的应用 .....	154
小结 .....	157

习题	158
<b>第 5 章 数字式传感器</b>	<b>160</b>
5.1 数字式角编码器	161
5.1.1 绝对式编码器	161
5.1.2 增量式编码器	162
5.1.3 角编码器的应用	163
5.2 光栅传感器	164
5.2.1 光栅的类型和结构	164
5.2.2 莫尔条纹形成原理及特点	165
5.2.3 莫尔条纹测量位移的原理	167
5.2.4 细分及辨向	167
5.2.5 光栅传感器的应用	169
5.3 感应同步器	171
5.3.1 感应同步器的类型与结构	171
5.3.2 感应同步器的工作原理	175
5.3.3 感应同步器的电气参数	175
5.3.4 感应同步器的信号处理方式	176
5.3.5 感应同步器的应用	177
小结	178
习题	179
<b>第 6 章 传感器信号处理技术</b>	<b>182</b>
6.1 信号的放大与隔离	183
6.1.1 运算放大器	183
6.1.2 测量放大器	184
6.1.3 程控测量放大器 PGA	189
6.1.4 隔离放大器	191
6.2 信号变换技术	195
6.2.1 电压/电流 (V/I) 变换	195
6.2.2 电压/频率 (V/F) 转换电路	197
6.3 信号非线性补偿技术	202
6.3.1 硬件校正法	202
6.3.2 软件校正法	203
小结	205
习题	207
<b>第 7 章 传感器技术的综合应用</b>	<b>208</b>
7.1 传感器在过程量检测中的应用	210



7.1.1	温度测量	210
7.1.2	物位测量	216
7.1.3	流量测量	219
7.1.4	压力测量	227
7.1.5	成分分析	234
7.2	传感器在家用电器中的应用	238
7.2.1	传感器在电冰箱中的应用	238
7.2.2	传感器在厨具中的应用	241
7.2.3	传感器在洗涤电器中的应用	245
7.3	传感器在现代汽车中的应用	247
7.3.1	汽车结构及工作过程概述	247
7.3.2	传感器在汽车运行中的作用	249
7.4	传感器的选择	255
7.4.1	对传感器的要求	255
7.4.2	选择传感器的一般原则	255
7.5	超声波汽车尾部防撞探测器的设计	257
7.5.1	超声波传感器	257
7.5.2	超声波传感器的基本探测电路	258
7.5.3	超声波专用集成电路 LM1812	261
7.5.4	汽车倒车防撞报警器电路	262
7.5.5	调试	263
	小结	263
	习题	265
	附录 标准热电偶分度表	267
	部分习题参考答案	274
	主要参考文献	276

## ❖ 知识点

1. 测量的基本概念、方法、分类。
2. 误差的基本概念、分类、估计及校正。
3. 传感器的概念、用途、基本结构、分类和发展趋势。
4. 传感器的静特性和动特性。

## ❖ 要求

1. 掌握测量的基本概念、方法、分类。
2. 掌握传感器的概念、用途、基本结构和分类。
3. 掌握传感器静特性、动特性的概念和线性度、迟滞、灵敏度、分辨力等静态指标的概念及表示方法。
4. 了解传感器的发展趋势。
5. 了解动态特性的研究方法。

在人类社会的各项生产活动和科学实验中，为了了解和掌握整个过程的进展及其最后结果，经常需要对各种基本参数或物理量进行测量，从而获得必要的信息。测量得到的是定量的结果，可以作为分析、判断和决策的依据。人类生产力的发展促进了测量技术的进步。商品交换必须有统一的度量衡；天文、地理也离不开测量；17世纪工业革命对测量提出了更高的要求，如蒸汽机必须配备压力表、温度表、流量表、水位表等仪表。现代社会要求测量必须达到更高的准确度、更小的误差、更快的速度、更高的可靠性，测量的方法也日新月异。本章主要介绍测量的基本概念、测量方法、误差分类、测量结果的数据统计处理以及传感器的基本特性等内容，是传感器技术的理论基础。

## 1.1 测量的一般知识

### 1.1.1 测量的基本概念

测量是指人们用实验的方法，借助于一定的仪器或设备，将被测量与同性质的单位标准量进行比较，并确定被测量对标准量的倍数，从而获得关于被测量的定量信息。测量过程中使用的标准量应该是国际或国内公认的性能稳定的量，称为测量单位。

测量的结果包括数值大小和测量单位两部分。数值的大小可以用数字表示，也可以是曲线或者图形。无论表现形式如何，在测量结果中必须注明单位，否则测量结果是没有意义的。

一切测量过程都包括比较、示差、平衡和读数等四个步骤。例如，用钢卷尺测量棒料长度时，首先将卷尺拉出，与棒料平行紧靠在一起，进行“比较”；然后找出卷尺与棒料的长度差别，即“示差”；进而调整卷尺长度使两者长度相等，达到“平衡”；最后从卷尺刻度上读出棒料的长度，即“读数”。

测量过程的核心是比较，但被测量能直接与标准量比较的场合并不多，在大多数情况下是将被测量和标准量变换成双方易于比较的某个中间变量来进行的。例如，用弹簧秤称重，被测重量通过弹簧按比例伸长转换为指针位移，而标准重量转换成标尺刻度。这样，被测量和标准量都转换成位移这一中间变量，可以进行直接比较。

此外，为了提高测量精度，并且能够对变化快、持续时间短的动态量进行测量，通常将被测量转换为电压或电流信号，利用电子装置完成比较、示差、平衡和读数的测量过程。这种测量方法叫非电量电测法。非电量电测法的主要优点有：

- 1) 能够连续、自动地对被测量进行测量和记录。
- 2) 电子装置精度高、频率响应好，不仅能适用于静态测量，选用适当的传感器和记录装置还可以进行动态测量甚至瞬态测量。
- 3) 电信号可以远距离传输，便于实现远距离测量和集中控制。
- 4) 电子测量装置能方便地改变量程，因此测量的范围广。

5) 可以方便地与计算机相连, 进行数据的自动运算、分析和处理。

### 1.1.2 测量方法

测量方法是实现测量过程所采用的具体方法, 应当根据被测量的性质、特点和测量任务的要求来选择适当的测量方法。按照测量过程的特点可以将测量方法分为直接测量和间接测量; 按照获得测量值的方式可以将测量方法分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量; 此外, 根据是否与被测对象直接接触, 可将测量方法分为接触式测量和非接触式测量; 而根据被测对象的变化特点又可将测量方法分为静态测量和动态测量等。

#### 1. 直接测量与间接测量

##### (1) 直接测量

用事先分度或标定好的测量仪表, 直接读取被测量测量结果的方法称为直接测量。例如, 用温度计测量温度, 用电压表测量电压等。

直接测量是工程技术中大量采用的方法, 其优点是直观、简便、迅速, 但不易达到很高的测量精度。

##### (2) 间接测量

首先, 对和被测量有确定函数关系的几个量进行测量, 然后再将测量值代入函数关系式, 经过计算得到所需结果, 这种测量方法属于间接测量。例如, 测量直流电功率时, 根据  $P=IU$  的关系, 分别对  $I$ 、 $U$  进行直接测量, 再计算出功率  $P$ 。在间接测量中, 测量结果  $y$  和直接测量值  $x_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ ) 之间的关系式可用下式表示, 即

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots)$$

间接测量手续多、花费时间长, 当被测量不便于直接测量或没有相应直接测量的仪表时才采用。

#### 2. 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

##### (1) 偏差式测量

在测量过程中, 利用测量仪表指针相对于刻度初始点的位移 (即偏差) 来决定被测量的测量方法称为偏差式测量。在使用这种测量方法的仪表内并没有标准量具, 只有经过标准量具校准过的标尺或刻度盘。测量时, 利用仪表指针在标尺上的示值读取被测量的数值。它以间接方式实现被测量和标准量的比较。

偏差式测量仪表在进行测量时, 一般利用被测量产生的力或力矩, 使仪表的弹性元件变形, 从而产生一个相反的作用, 并一直增大到与被测量所产生的力或力矩相平衡时, 弹性元件的变形就停止了, 此变形即可通过一定的机构转变成仪表指针相对标尺起点的位移, 指针所指示的标尺刻度值就表示了被测量的数值。例如, 电流表测量电流就是偏差式测量。

偏差式测量简单、迅速, 但精度不高, 这种测量方法广泛应用于工程测量中。

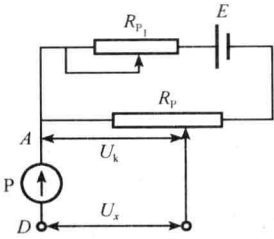


图 1.1 电位差计原理示意图

(2) 零位式测量

用已知的标准量去平衡或抵消被测量的作用，并用指零式仪表来检测测量系统的平衡状态，从而判定被测量值等于已知标准量的方法称做零位式测量。

用天平测量物体的质量就是零位式测量的一个简单例子。用电位差计测量未知电压也属于零位式测量，图 1.1 所示的电路是电位差计的原理示意图。

图中  $E$  为工作电池的电动势，在测量前先调节  $R_{P1}$ ，校准工作电流使其达到标准值，接入被测电压  $U_x$  后，调整电位器的活动触点，改变标准电压的数值，使检流计  $P$  回零，达到  $A$ 、 $D$  两点等电位，此时标准电压  $U_k$  等于  $U_x$ ，从电位差计读取的  $U_k$  的数值就表示了被测未知电压  $U_x$ 。

在零位式测量中，标准量具处于测量系统中，它提供一个可调节的标准量，被测量能够直接与标准量相比较，测量误差主要取决于标准量具的误差，因此可获得比较高的测量精度。另外，指零机构愈灵敏，平衡的判断愈准确，愈有利于提高测量精度。但是这种方法需要平衡操作，测量过程较复杂，花费时间长，即使采用自动平衡操作，反应速度也受到限制，因此只能适用于变化缓慢的被测量，而不适于变化较快的被测量。

(3) 微差式测量

这是综合零位式测量和偏差式测量的优点而提出的一种测量方法。基本思路是将被测量  $x$  的大部分作用先与已知标准量  $N$  的作用相抵消，剩余部分即两者差  $\Delta = x - N$ ，这个差值再用偏差法测量。微差式测量中，总是设法使差值  $\Delta$  很小，因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量之。即使差值的测量精度不高，但最终结果仍可达到较高的精度。

例如，测定稳压电源输出电压随负载电阻变化的情况时，输出电压  $U_0$ ，可表示为  $U_0 = U + \Delta U$ ，其中  $\Delta U$  是负载电阻变化所引起的输出电压变化量，相对  $U$  来讲为一小量。如果采用偏差法测量，仪表必须有较大量程以满足  $U_0$  的要求，因此对  $\Delta U$  这个小量造成的  $U_0$  的变化就很难测准。当然，可以改用零位式测量，但最好的方法是采用如图 1.2 所示的微差式测量。

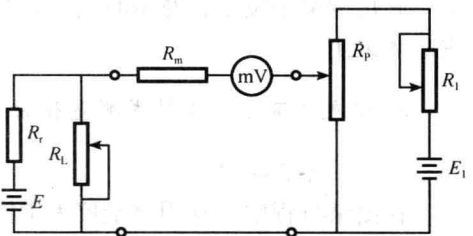


图 1.2 微差式测量

图 1.2 中使用了高灵敏度电压表——毫伏表和电位差计， $R_i$  和  $E$  分别表示稳压电源的内阻和电动势， $R_L$  表示稳压电源的负载， $E_1$ 、 $R_1$  和  $R_w$  表示电位差计的参数。在测量前调整  $R_1$ ，使电位差计工作电流  $I_1$  为标准值。然后，使稳压电源负载电阻  $R_L$  为额定值。调整电位器的活动触点，使毫伏表指示为零，这相当于事先用零位式测量出额定输出电压  $U$ 。正式测量开始后，只需增加或减小负载电阻  $R_L$  的值，负载变动所引起的稳压电源输出电压  $U$  的微小波动值  $\Delta U$  即可由毫伏表指示出来。根据  $U_0 = U + \Delta U$ ，稳压电源输出电压在各种负载下的值都可以准确地测量出来。

微差式测量法的优点是反应速度快、测量精度高，特别适合于在线控制参数的测量。微差式测量装置在使用时要定期用标准量校准（包括调零和调满度），才能保证其测量精度。

## 1.2 测量误差及其分类

### 1.2.1 误差的概念

#### 1. 真值的概念

测量的目的是希望通过测量求取被测量的真值。所谓真值，是指在一定条件下被测量客观存在的实际值。在测量之前，真值是未知的，但可以有以下几种情况：理论真值、约定真值、相对真值。例如：一个平面四边形的四个内角之和为  $360^\circ$ ，这种真值称为理论真值；在标准大气压下，水的冰点和沸点分别为  $0^\circ\text{C}$  和  $100^\circ\text{C}$ ，这种真值称为约定真值；凡精度高一级或几级的仪表的测量值可以认为是精度低的仪表的相对真值。相对真值在误差测量中的应用最为广泛。

#### 2. 误差的概念

在检测过程中，被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会受到各种变动因素的影响，而且对被测量的转换，有时也会改变被测对象原有的状态，这就造成了测量结果和被测量的客观真值之间存在一定的差别，这个差值称为测量误差。误差公理告诉我们：任何实验结果都是有误差的，误差自始至终存在于一切科学实验和测量之中，被测量的真值是永远难以得到的。尽管如此，我们仍然可以设法改进检测工具和实验手段，并通过对检测数据的误差分析和处理，使测量误差处在允许的范围之内，或者说达到一定的测量精度。这样的测量结果就被认为是合理的、可信的。

测量误差的主要来源可以概括为工具误差、环境误差、方法误差和人员误差等。

### 1.2.2 误差的分类

为了便于对误差进行分析和处理，人们通常把测量误差从不同角度进行分类。误差按照表示方法可以分为绝对误差和相对误差；按照误差出现的规律可以分为系统误差、随机误差和粗大误差；按照被测量与时间的关系可以分为静态误差和动态误差等。

#### 1. 绝对误差与相对误差

##### (1) 绝对误差

绝对误差  $\Delta$  是仪表的指示值即测量值  $A_x$  与被测量的真值  $A_0$  之间的差值，即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1.1)$$

绝对误差有符号和单位，它的单位与被测量相同。在实验室和计量工作中，常用修正值  $\alpha$  表示。修正值又称校正量，它与绝对误差的数值相等，但符号相反，即

$$\alpha = -\Delta = A_0 - A_x \quad (1.2)$$

引入绝对误差和修正值后，被测量真值可以表示为

$$A_0 = A_x - \Delta = A_x + \alpha \quad (1.3)$$

测量值加上修正值之后，可以消除误差的影响。在计量工作中，通常采用加修正值的方法来保证测量值的准确可靠。仪表送上级计量部门检定，其主要目的就是获得一个准确的修正值。例如，得到一个测量值修正表或修正曲线。

## (2) 相对误差

绝对误差愈小，说明指示值愈接近真值，测量精度愈高，但这一结论只适用于被测量值相同的情况，而不能说明不同值的测量精度。例如，某测量长度的仪器，测量 10mm 的长度，绝对误差为 0.001mm。另一仪器测量 200mm 长度，绝对误差为 0.01mm。这就很难按绝对误差的大小来判断测量精度高低了。这是因为后者的绝对误差虽然比前者大，但它相对于被测量的值却显得较小。为此，人们引入了相对误差的概念。相对误差百分比的形式表示一般多取正值。相对误差可分为：

1) 实际相对误差  $\gamma_A$ 。实际相对误差  $\gamma_A$  是测量值的绝对误差  $\Delta$  与被测量真值  $A_0$  的百分比，即

$$\gamma_A = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1.4)$$

2) 示值（标称）相对误差  $\gamma_x$ 。示值（标称）相对误差  $\gamma_x$  是测量值的绝对误差  $\Delta$  与被测量值  $A_x$  的百分比，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1.5)$$

3) 满度（引用）相对误差  $\gamma_m$ 。满度（引用）相对误差  $\gamma_m$  是测量值的绝对误差  $\Delta$  与仪器满度值  $A_m$  的百分比，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1.6)$$

相对误差比绝对误差能更好地说明测量的精确程度。在上面的例子中显然，后一种长度测量仪表更精确。

## (3) 仪表精度等级

引用相对误差中，当绝对误差  $\Delta$  取最大值  $\Delta_m$  时，引用相对误差常被用来确定仪表的精度等级  $S$ ，即

$$S = \left| \frac{\Delta_m}{A_m} \right| \times 100 \quad (1.7)$$

根据精度等级  $S$  及量程范围，可以推算出仪表可能出现的最大绝对误差  $\Delta_m$ 。精度等级  $S$  规定取一系列标准值。我国电工仪表中常用的模拟仪表的精度等级有下列七种：0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 5。它们分别表示对应仪表的满度相对误差所不超过的百分

比。等级数值越小，仪表价格越贵。从仪表面板上的标志可以判断出仪表的精度等级。

根据精度等级  $S$  可以求出仪表的最大绝对误差。例如，量程为  $10\text{V}$  的电压表，精度等级  $S$  为  $1.0$ ，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% = 1.0\%$$

则有

$$\Delta_m = 10 \times 1.0\% = 0.1\text{V}$$

这就是说无论指示在该度的哪一点，其最大绝对误差  $\Delta_m$  不超过  $0.1\text{V}$ 。

**【例 1.1】** 某电压表精度为  $0.5$  级量程为  $0\sim 300\text{V}$  和  $1.0$  级量程为  $0\sim 100\text{V}$  的两个电压表。要测量  $80\text{V}$  的电压，问：采用哪个电压表好？

**解** 用  $0.5$  级量程为  $0\sim 300\text{V}$  的电压表测量时，可能出现的最大示值相对误差  $\gamma_{m1}$  为

$$\gamma_{m1} = \frac{\Delta_{m1}}{A_{m1}} \times 100\% = \frac{300 \times 0.5\%}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

用  $1.0$  级量程为  $0\sim 100\text{V}$  的电压表测量时，可能出现的最大示值相对误差  $\gamma_{m2}$  为

$$\gamma_{m2} = \frac{\Delta_{m2}}{A_{m2}} \times 100\% = \frac{100 \times 1.0\%}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果表明：用  $1.0$  级量程为  $0\sim 100\text{V}$  的电压表比用  $0.5$  级量程为  $0\sim 300\text{V}$  的电压表示值相对误差反而小，所以更合适。

上例说明，在选用仪表时应兼顾精度等级和量程，一般使其最好能工作地不小于满该度值  $2/3$  的区域。

## 2. 系统误差、随机误差和粗大误差

### (1) 系统误差

在相同的条件下，多次重复测量同一量时，误差的大小和符号保持不变，或按照一定的规律变化，这种误差称为系统误差。其误差的数值和符号不变的称为恒值系统误差，反之称为变值系统误差。变值系统误差又可分为累进性的、周期性的和按复杂规律变化的几种类型。

检测装置本身性能不完善、测量方法不完善、测量者对仪器使用不当、环境条件的变化等原因都可能产生系统误差。例如，某仪表刻度盘分度不准确，就会造成读数偏大或偏小，从而产生恒值系统误差。温度、气压等环境条件的变化和仪表电池电压随使用时间的增长而逐渐下降，则可能产生变值系统误差。

系统误差的特点是可以通过实验或分析的方法，查明其变化规律和产生原因，通过对测量值的修正，或者采取一定的预防措施，就能够消除或减少它对测量结果的影响。

系统误差的大小表明测量结果的正确度。它说明测量结果相对真值有一恒定误差，存在着按确定规律变化的误差。系统误差愈小，则测量结果的正确度愈高。



## (2) 随机误差

在相同条件下，多次测量同一量时，其误差的大小和符号以不可预见的方式变化，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。或者这种在任何一次测量中，只要灵敏度足够高，随机误差总是不可避免的。而且在同一条件下，重复进行的多次测量中，它或大或小，或正或负，既不能用实验方法消除，也不能修正。但是利用概率论的一些理论和统计学的一些方法，可以掌握看似毫无规律的随机误差的分布特性，确定随机误差对测量结果的影响。

随机误差的大小表明测量结果重复一致的程度，即测量结果的分散性。通常，用精密度表示随机误差的大小。随机误差大，测量结果分散，精密度低；反之，测量结果的重复性好，精密度高。

精确度是测量的正确度和精密度的综合反映。精确度高意味着系统误差和随机误差都很小。精确度有时简称为精度。图 1.3 形象地说明了系统误差、随机误差对测量结果的影响，也说明了正确度、精密度和精确度的含意。

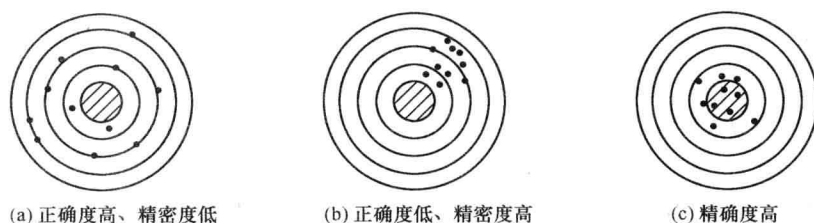


图 1.3 正确度、精密度和精确度示意图

图 1.3 (a) 的系统误差较小，正确度较高，但随机误差较大，精密度低。图 1.3 (b) 的系统误差大，正确度较差，但随机误差小，精密度较高。图 1.3 (c) 的系统误差和随机误差都较小，即正确度和精密度都较高，因此精确度高。显然，一切测量都应当力求精密而又正确。

## (3) 粗大误差

明显歪曲测量结果的误差称做粗大误差，又称过失误差。粗大误差主要是人为因素造成的。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、测量条件意外的突然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。在实际测量工作中，由于粗大误差的误差数值特别大，容易从测量结果中发现，一经发现有粗大误差，可以认为该次测量无效，测量数据应剔除，从而消除它对测量结果的影响。

坏值剔除后，正确的测量结果中不包含粗大误差。因此，要分析处理的误差只有系统误差和随机误差两种。