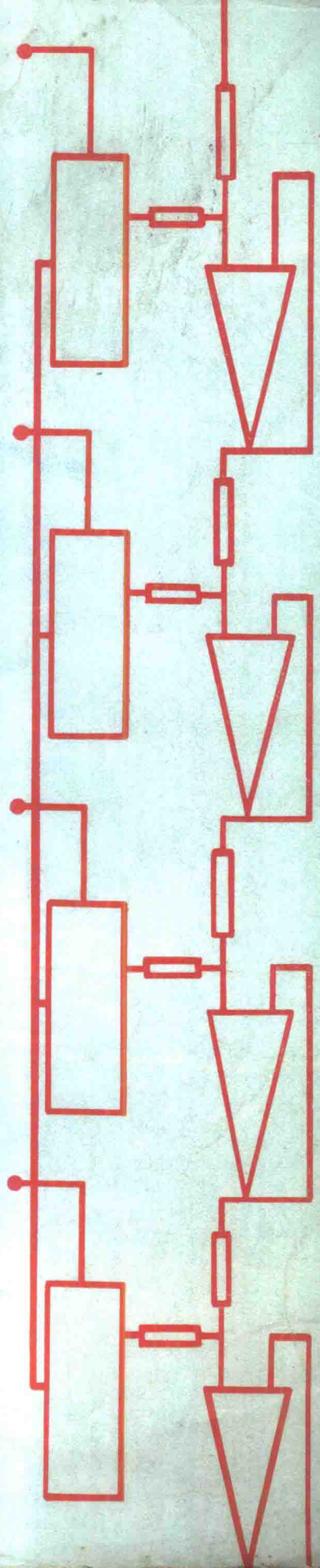


周化仁、潘学盈 王宗信 编

# 检测与转换技术

中国矿业大学出版社



高等学校教学用书

# 检测与转换技术

周化仁 潘学盈 王宗信 编

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

“检测与转换技术”是工业电气自动化专业本科生的教材，全书共13章，包括四部分内容：  
1. 介绍检测系统的组成原理，分析系统特性，讨论检测系统的设计原则；2. 介绍非电量转换成电量的基本方法，各种传感器的原理、特性和适用场合；3. 讨论检测用测量电路和测试技术及减弱干扰的方法；4. 介绍新型CMOS器件及微型计算机在检测技术中的运用情况。

本书还可作为从事有关工作的科技工作者参考。

责任编辑：胡玉雁

艺术设计：杜锦芝

责任校对：马景山

高等学校教学用书

检测与转换技术

周化仁 潘学盈 王宗信编

---

中国矿业大学出版社出版发行

江苏省新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 22.5 字数 537千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷

印数：1—3500册

---

ISBN 7-81021-185-4

TP, 10

定价：4.45元

# 前 言

随着科学技术的进步，微型计算机和自动控制系统正在深入国民经济各个领域，推动生产和科学技术向更高层次发展。为了适应不断发展的形势，作为工科院校的大学生和现场工程技术人员，必需系统地学习各种非电信息的获取、转换、传输及自动检测技术，为进一步掌握环境监控和生产监控打好基础。为此目的编写一本适用的检测与转换技术教材是非常必要的。

本书共 13 章，内容包括四个方面：

1. 介绍检测系统的组成原理，分析系统特性，从减小系统误差提高系统可靠性观点出发，讨论检测系统的设计原则；
2. 介绍非电量转换成电量或电参数的基本方法，讨论各类传感器的原理、特性和适用场合；
3. 讨论检测用测量电路和测试技术，以及实际检测过程中减弱干扰的各种方法；
4. 介绍新型 CMOS 器件及微型计算机在检测技术中的运用情况，以典型矿用仪器为例讨论矿井参数测试中的特殊性及其测试方法。

在编写上力争做到：

1. 既考虑到教材的系统性和理论完整性，又注意到全书的实用性和先进性。基础理论和基本测试技术部分独立成章，应用部分主要反映煤矿生产实况及近年来的科研成果；
2. 结合煤矿生产和科研需要的检测理论和技术组织教材内容。但是除专门反映矿井特殊要求的一部分内容外，大部分内容也同样适用于其它生产部门；
3. 在系统编排上先集中讨论电测系统的特点，再推广到整个检测系统，即先讲检测仪器用测量电路，再讲传感器原理和应用，这样便于读者掌握检测技术和装置的基本知识。

本书主要作为煤炭系统高校自动化专业本科生的基本教材，也可作为机械、冶金、采矿等专业的选修教材，还可供在现场和科研单位工作的工程技术人员参考。

本书由中国矿业大学周化仁主编，第四、五章及第十章第一节由淮南矿业学院潘学盈编写，第七、八、九章由河北煤炭建筑工程学院王宗信编写，其余由主编执笔。全书由中国矿业大学谢桂林教授主审。由于编者水平有限，错误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

本书在编写过程中得到兄弟院校的大力支持，给我们提出了许多有益建议。朱建铭教授、谢桂林教授、谢寿炽高工、戴鸿仪副教授审议了本书大纲，提出了宝贵的修改意见，还为本书编写提供了难得的资料，在此特向他们表示感谢。

编 者

1988年8月

• 1 •

# 目 录

前言 .....	( 1 )
绪论 .....	( 1 )
<b>第一章 检测与转换系统的基本理论</b> .....	<b>( 5 )</b>
第一节 测量和误差 .....	( 5 )
第二节 实验数据处理 .....	( 15 )
第三节 测量系统的误差分配原则 .....	( 23 )
第四节 测量系统的静态特性 .....	( 23 )
第五节 测量系统的动态特性 .....	( 26 )
第六节 测量系统的稳定性及可靠性 .....	( 33 )
<b>第二章 电桥电路</b> .....	<b>( 38 )</b>
第一节 电桥概述 .....	( 38 )
第二节 不平衡电桥的工作特性 .....	( 40 )
第三节 提高不平衡电桥输出线性度的方法 .....	( 43 )
第四节 电桥调零及抗干扰问题 .....	( 45 )
第五节 交流不平衡电桥 .....	( 47 )
<b>第三章 自动平衡测量电路</b> .....	<b>( 50 )</b>
第一节 补偿测量法原理 .....	( 50 )
第二节 自动平衡补偿器 .....	( 53 )
第三节 动补偿测量电路 .....	( 55 )
第四节 多重复合电路 .....	( 58 )
<b>第四章 CMOS 数字集成电路及其应用</b> .....	<b>( 60 )</b>
第一节 MOS管的工作原理和特性 .....	( 60 )
第二节 MOS门电路 .....	( 64 )
第三节 CMOS门电路 .....	( 65 )
第四节 CMOS门电路的基本应用 .....	( 69 )
第五节 CMOS传输门和模拟开关 .....	( 74 )
第六节 CMOS数字电路 .....	( 80 )
第七节 CMOS存储器 .....	( 85 )
第八节 时基电路(定时器) .....	( 89 )
第九节 CMOS电路的接口方法 .....	( 94 )
<b>第五章 放大、转换和显示</b> .....	<b>( 97 )</b>
第一节 仪器放大器 .....	( 97 )
第二节 精密整流、相敏整流及信号源 .....	( 117 )
第三节 模数和数模转换 .....	( 121 )
第四节 锁相环 .....	( 145 )
<b>第六章 抗干扰技术</b> .....	<b>( 155 )</b>

第一节	概述	(155)
第二节	干扰的产生及传递	(155)
第三节	电路性干扰	(158)
第四节	常用抗干扰方法	(160)
第五节	串模干扰和共模干扰	(173)
<b>第七章</b>	<b>电参数型传感器</b>	(177)
第一节	电阻应变式传感器	(177)
第二节	热电阻	(197)
第三节	气敏传感器	(190)
第四节	湿敏传感器	(197)
第五节	光敏电阻	(201)
第六节	磁敏电阻	(203)
第七节	电容式传感器	(204)
第八节	电感式传感器	(209)
第九节	振弦式传感器	(220)
<b>第八章</b>	<b>发电型传感器</b>	(223)
第一节	光电传感器	(223)
第二节	热电式传感器	(233)
第三节	压电式传感器	(240)
第四节	磁敏传感器	(246)
第五节	电磁感应式传感器	(255)
<b>第九章</b>	<b>辐射与微波传感器</b>	(259)
第一节	核辐射检测	(259)
第二节	超声波检测	(263)
第三节	微波检测	(266)
第四节	红外辐射检测	(268)
第五节	激光检测	(270)
第六节	光纤传感器	(273)
<b>第十章</b>	<b>岩土力学及机械振动参数测试</b>	(276)
第一节	岩土力学参数测试	(276)
第二节	机械振动参数测试	(281)
<b>第十一章</b>	<b>矿井瓦斯监测</b>	(289)
第一节	瓦斯检测的基本方法	(289)
第二节	使用载体催化元件应注意的问题	(290)
第三节	瓦斯遥测报警仪	(291)
第四节	恒温检测原理	(299)
<b>第十二章</b>	<b>相关技术及其应用</b>	(304)
第一节	基础知识	(304)
第二节	自相关函数和互相关函数	(309)
第三节	相关技术的工程应用	(322)
<b>第十三章</b>	<b>微型计算机在测量中的应用</b>	(326)
第一节	微型计算机的组成	(326)

第二节 微处理器的结构和作用.....	( 328 )
第三节 微机在测量中的应用.....	( 335 )
附录 误差正态分布规律的实验证明及误差概率计算.....	( 343 )
参考文献.....	( 352 )

# 绪 论

测量是探求、收集和整理表征事物本质及其相互关系的各种信息的过程。测量技术的发展与生产水平及生活水平的提高紧密相连。当生产和生活处于低水平时，只要求对某些物理量进行简单的测量，单一参数、精度不高的指示仪表就能满足测量要求。随着生产水平的迅速发展，测量仪器也从低级走向高级。在不长的时间内已从机械式仪表、电气指示仪表、电子仪表、数字化仪表发展到目前的智能化仪表阶段。

智能化仪器是测量技术与计算技术相结合的产物，它将数字化仪表与微处理器有机地结合在一起，使智能化仪表具有其它仪表无法比拟的优越性。它可以按预定程序自动进行操作，自选量程、自校自检；也可以按要求记录最大值和多次测量的平均值，对测量误差自动进行处理，实现几个 ppm (百万分之一) 的精度。在测量过程中，尚能自动考虑各种外界因素的影响，实现各类误差的补偿。另外，智能仪表还能自寻故障，即不但在仪器发生故障能及时报警，而且能靠微处理器的逻辑功能自行诊断出故障点，使操作人员能根据仪器内的发光二极管指示，立即找到发生故障的电路或元件。近年来正在发展具有自复能力的智能仪表，当仪表某一部分发生故障时能自动转换到备用电路上继续工作，这相当于自动更换了损坏元件。这种具有自复能力的仪表在一些不允许间断监控的系统中显得特别有价值。

## 一、检测与转换装置的组成

在讨论检测与转换装置的组成之前，先分析几个测量实例。

### 例 1 利用热电阻测量温度

图 0-1 是电阻温度计的原理性电路， $R_T$  为热电阻传感器，其电阻值随温度变化而变化，即  $R_T = f(T)$

对应于某一温度  $T_0$ ，热电阻阻值为  $R_T$ ，调节电桥平衡，即  $I = 0$ ， $\alpha = 0$ 。

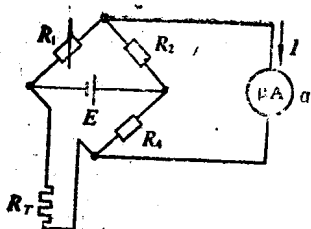


图 0-1 热电阻测温电桥

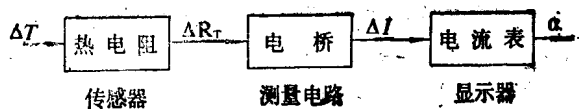


图 0-2 温度测量过程

当温度从  $T_0$  变化到  $T_0 + \Delta T$  时，热电阻的阻值亦从  $R_T$  变成  $R_T + \Delta R_T$ ，因而电桥失去平衡，产生电流  $I$ ，引起仪表指针偏转  $\alpha$ ，偏转角  $\alpha$  的大小反映出被测温度的变化情况，即  $\alpha = f(T)$ 。整个测量过程可用图 0-2 表示。

### 例 2 机械振动测试



图 0-3 是利用电容式传感器测量低频机械振动的原理图。振动体与电容传感器的动片相连，机械振动使电容从  $C_0$  变为  $C_0 \pm \Delta C$ ，振荡器输出频率从  $f_0$  变为  $f_0 \pm \Delta f$ ，此信号经电压放大，限幅后成为等幅调频信号，再经鉴频器将调频信号转变为反映机械振动的调幅信号，最后通过功率放大加至振子示波器进行记录，所得波形反映出机械振动的频率和幅值大小

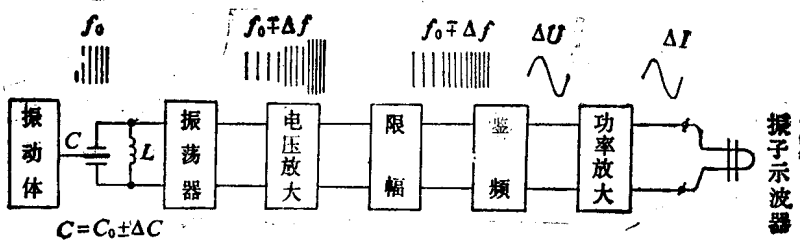
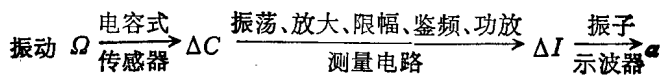


图 0-3 机械振动测量原理图

整个测量过程可表示为



所以

$$\alpha = f(\Omega)$$

在上面两个例子中，最后输出均用指示仪表或记录仪显示，这种方式只能反映输入信号(电网电压、被测温度、机械振动)的大小和变化情况。现代测量技术已不仅仅是测量某一量值的大小，而是与电子技术、计算技术、自动控制技术紧密结合。

一个完整的测量，包括被测信号的测定，利用电工、电子技术将被测信号进行转换、传输，最后送给电子计算机进行处理，计算机经过判断处理后送出控制信号，控制整个生产过程。下面以煤矿瓦斯(以甲烷  $CH_4$  代表)监测系统为例分析此类系统的结构。

**例 3 煤矿瓦斯安全监测系统**

图 0-4 是监测系统的原理框图，该系统可实现以下功能：

- 当瓦斯浓度  $c < 1\%$  时——正常显示记录；
- 当  $1\% < c < 1.5\%$  时——显示、记录、报警；
- 当  $c > 1.5\%$  时——显示、记录、报警、工作面断电。

该系统的工作原理及各环节的作用将在本书最后部分讨论。

从以上三例可以看出，一个完整的测量系统，不论它多复杂，总可概括为四大部分：传感器，测量电路，显示、记录、处理装置及电源，如图 0-5 所示。

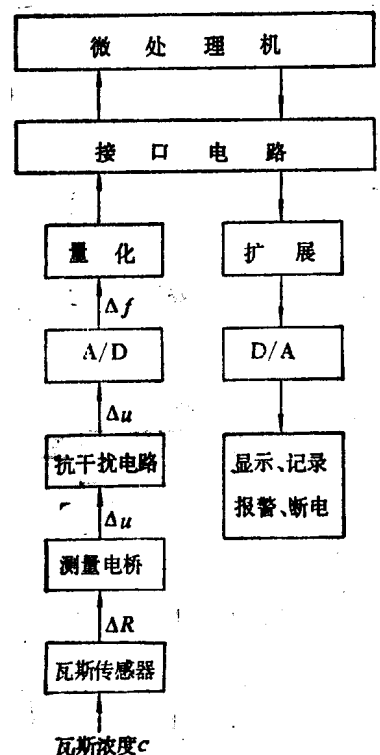


图 0-4 煤矿瓦斯安全监测系统

格，显示、记录、处理装置及电源，如图 0-5 所示。

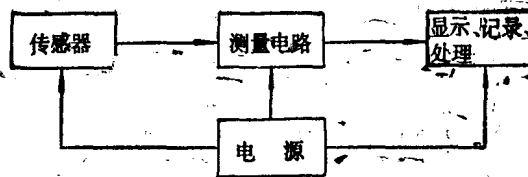


图 0-5 测量系统总框图

### 1. 传感器

传感器能将一个被测非电量转换成电量(电压、电流、电势、电荷、电功率等)或电参数(电阻、电感、电容、电频率等),因而它是获取信息的手段。传感器在检测系统中占有重要位置,它获取的信息正确与否,关系到测量系统的精度。如果传感器的误差很大,在后面各环节中又未进行补偿处理,那么测量电路设计得再好,显示器的精度再高也无法提高整个系统的精度。

### 2. 测量电路

测量电路将来自传感器的电信号转换成适合显示、记录、处理的电信号。测量电路因传感器的不同而各异,对于参数型传感器常采用电桥电路或谐振电路;对于发电型传感器则常使用调制、放大或电位差计电路。另外测量电路也因信号传输方式及环境条件的不同而改变型式。当传感器获取的信息能量微弱,又要进行远距离传输时(如井下测得的信号传到井上处理),除了要放大信号外,还要设法降低各种外界干扰的影响,以提高测量的可靠性。在某些情况下虽然测量点离被测对象不远,但也必须采用无线传输方式进行检测(如高速转动体上应力的检测),这时的测量电路就不同于有线传输。总之,测量电路是传感器和记录装置中间的桥梁,它的性能好坏,直接关系到整个系统的性能优劣。

### 3. 显示、记录、处理装置

为了将测量结果及时告诉观测者,或根据测量结果进行处理,必须将测量结果显示出来或记录下来。目前常用的显示方式有三类:模拟显示,数字显示和图象显示。模拟显示多半采用电气指示仪表(如微安表、毫伏表、流比计等)。数字显示可采用数字电压表、数字电流表、数字式欧姆表和数字式频率计,以及根据实际需要由各类数字显示器件(如发光二极管、荧光数码管、液晶显示器及等离子体显示板等)和相应数字显示电路构成的数字显示器。图象显示就是利用屏幕、胶片等显示被测信号的变化曲线。

有些被测量其数值变化不呈周期性,或者其变化速度极快无法用显示仪表指示时,就应采用记录仪将信号自动记录下来。自动记录仪的种类繁多,可按被测量的特点合理进行挑选。目前常用的自动记录仪有直动式记录仪(如连续记录型笔式记录仪,打点式笔记录仪,光线示波器等),自动平衡式记录仪(如自动平衡电桥,自动平衡电位差计, X-Y 记录仪等),磁记录仪及电传打字机等。

对于随机型动态信号的测试过程还必须进行数字处理。如复杂的波形要进行频谱分析,带有随机噪声干扰的信号要进行相关处理。属于这方面的仪器有频谱分析仪,波形分析仪,实时相关分析仪等等。

如果不仅要测量信号,还要按一定要求控制信号,那就需要再增加控制环节和执行

机构，近代则是利用微型计算机实现检测监控系统，本书最后一章将进行这部分内容的讨论。

#### 4. 电源

电源用来供给系统各部分所需要的能源。

检测系统四大部分的性能和质量决定了整机的性能和质量。电源和显示记录装置可以按整机性能要求进行选择，传感器和测量电路则要根据被测对象、使用环境进行选择和设计制做。由于被测对象的千差万别，虽然现在已有了上千种传感器产品，有时还得自行设计制做。对于测量电路已经有了较深入的研究，某些专用电路已集成化了，但怎样结合具体使用条件，合理选配、组合电路是每一测量工作者必须认真对待的。在某些情况下还必须自行设计电路参数，或提出具有特殊性能的电路。

#### 二、煤炭生产对检测仪表和检测技术的要求

煤炭生产的条件劣于其他生产部门。在煤炭生产中，人们工作在井下，对象是岩石，煤层，依靠的工具是各种机械，威胁人们安全的是周围环境，特别是沼气、涌水、矿压、自燃等等。为了提高产量和确保安全，以及为了科研和设计的需要，在矿井下需要测量的数据和监视的状态是很多的：顶板下沉量，下沉速度和水平位移；顶板裂隙与离层；顶板周期来压；顶板冒落面积和冒落高度；掘进定向，巷道断面，钻孔测斜，锚喷厚度，含水层及溶洞探测，支架主要部件载荷，顶梁及底梁的比压及载荷分布，采煤机和输送机的起动过程及负载情况，滚筒受力状态；电动机的温升和功率，输送机链条张力及刮板的载荷，胶带输送机的速度和运煤量，胶带张力及跑偏和打滑程度，胶带磨损及温升；提升机的载荷，缆绳受力和损坏情况，提升机速度、加速度、定位，提升机的安全监控；煤仓中的煤位；电机车和内燃机车的速度、牵引力；掘进机或钻机的推力、刀具受力状态；电气设备的绝缘、供电网的电压和电流，电网电压的谐波干扰，供电网及电话网的特性参数；漏泄电流，地电流，接地电阻，接触电阻，电缆故障点；巷道内沼气含量，氧气含量，一氧化碳含量，风速，通风量，煤尘含量，温度、湿度、噪声等等。总之为了确保煤炭的安全生产，需要检测的参数是很多很多的。

为了测量上述参数，需要有不同量程的应力、应变、位移、速度、转矩、载荷、温度、风速、气体分析、以及电压、电流、功率等等种类的仪表和记录仪器。

对于矿井机电设备维修人员，则需要维修机械设备、电工设备、电子设备所需要的诊断仪表和无损探伤仪器，以及井下联络、通信所需各类通信的检测仪器。

煤矿仪表和检测技术的发展比较缓慢，其原因是多方面的。煤矿仪表所处环境恶劣，要求仪表防爆、防潮、防震，并且井下运输困难，维修不便，要求仪表轻便耐用，多功能，这些都增加了煤矿仪表生产的困难。由于矿井技术装备落后，技术力量薄弱，在一定程度上也限制了矿用仪表和检测技术的发展。

# 第一章 检测与转换系统的基本理论

## 第一节 测量和误差

测量就是采用各种手段将被测量与同类标准量进行比较,从而确定出被测量大小的方法。测量的目的在于求出被测量的真值。但是,由于测量仪器设备的精度、外界因素的影响及测量技术水平的限制,测得结果不可能和被测量的真值完全一致,两者总存在着差别,此差别就称为测量误差。

理论上讲没有误差的测量是不存在的(无需与标准量进行比较的测量除外,如可数量的测量等)。不过,人们还是不断努力来减小测量误差,以提高测量的精确度。测量精度的提高,既是生产和科学技术发展的需要,又能促进后者的发展。测量精度应与实际要求相适应,决不能不问场合一味追求高测量精度,造成不必要的浪费。例如,没有必要用精密电桥测定炭膜电阻的阻值;也无必要用0.1级电压表测量市电电压。总之,要从实际出发提出合理的测量精度要求。

### 一、测量方法的分类

#### 1. 直接测量、间接测量和组合测量

根据获得测量结果的方法不同,可以分为直接测量、间接测量和组合测量。

直接测量是从仪表上直接读出被测量的大小而无需经过任何运算。例如,用交流电压表直接测出电网电压,用光学瓦斯计直接读出甲烷浓度等等。这种测量方法的优点是简单、迅速,但测量精度受测试仪表精度的限制。直接测量法是工程上普遍采用的方法,随着测量仪器精度的提高(如采用数字式仪表),这种测量方法的优点将更加显著。

间接测量是先直接测出与被测量有确定函数关系的几个物理量,再通过函数运算求出被测量大小。例如,电阻率 $\rho$ 与导线电阻 $R$ 、导线长 $l$ 、导线直径 $d$ 的关系为

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4l}$$

只要先测出 $R$ 、 $l$ 、 $d$ 大小,再代入 $\rho$ 表达式就能求出 $\rho$ 的大小。显然,这种测量过程手续较多,花费时间较长,但是利用误差补偿方法有可能比直接测量得到更高的精度。在无法实现直接测量的场合必须采用间接测量方法。

组合测量又称联立测量,即被测物理量必须经过求解联立方程组才能最后得出结果。在进行联立测量时,一般尚需改变测试条件,才能获得一组联立方程所需的数据。例如,金属电阻丝的电温度系数 $\alpha_r$ 与电阻值间的关系可近似表示为

$$R_r = R_0(1 + \alpha_r T)$$

式中  $R_0$ ——0℃时的电阻值;

$R_r$ —— $T$ ℃时的电阻值。

当取不同的室温 $T_1$ 、 $T_2$ ,分别测出电阻值 $R_{r1}$ 及 $R_{r2}$ ,即可列出一组联立方程。

$$\begin{cases} R_{r1} = R_0(1 + \alpha_r T_1) \\ R_{r2} = R_0(1 + \alpha_r T_2) \end{cases}$$

从而解出  $\alpha_r$  及  $R_0$ 。

这种测量方法操作手续复杂，费时多，但测量精度较高，为了进一步减小误差，可以测量更多温度下的电阻值  $R_{T1}, R_{T2}, \dots$  然后利用最小二乘法进行处理，这样得到的  $\alpha_r$  及  $R_0$  将更加准确可靠。

## 2. 等精度测量和不等精度测量

根据测量条件相同与否，可以分成等精度测量和不等精度测量。

等精度测量是指在测量过程中，影响测量误差的各种因素不改变。例如，在相同的条件下，由同一个测试人员，在同样的仪器装备下，采用同样的方法对被测量进行重复测量，就是等精度测量。工程中遇到的大多数是等精度测量。只有在科学研究、精密测量或鉴定中，为了判断测量的可靠性，才改变测试条件和测试方法进行不等精度测量。

## 3. 其它测量方法

测量方法除了以上分类以外，还可分为差值测量法和平衡测量法；接触测量和非接触测量；静态测量和动态测量等等，在本书中将会遇到这些测量方法。

## 二、真值与平均值

测量的目的在于寻求被测量的真值。由于测量仪器的误差，测量技术的不完善及人们观察力的限制，测量结果总是与被测量的真值有区别。随着科学技术的进步，测量结果可以越来越接近真值，但永远达不到真值。因此在科学实验中，我们通常以平均值代替真值。

### 1. 算术平均值 $\bar{X}$

设  $X_1, X_2, \dots, X_n$  代表各次的观测值， $n$  为测量次数，则平均值定义为

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1-1)$$

由式(1-1)可得

$$\sum_{i=1}^n X_i - n\bar{X} = 0 \quad (1-2)$$

算术平均值是最常用的一种平均值，当误差服从正态分布规律时，可以证明算术平均值最接近被测量的真值。

### 2. 几何平均值 $X_g$

$$X_g = \sqrt{X_1 X_2 \dots X_n} \quad (1-3)$$

### 3. 均方根平均值 $X_r$

$$X_r = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n}} \quad (1-4)$$

## 三、测量误差的分类

所谓误差就是指测量结果与真值的差别。由于我们无法知道真值，因此，误差是按测量结果与平均值之差进行计算的。

从不同角度考虑, 误差有不同的分类方法。

### 1. 按误差产生的原因分

#### 1) 系统误差(又称恒定误差)

系统误差是指在测试过程中, 由未发觉或未确认的某些固定因素或按一定规律变化的因素所引起的误差。其影响是使测量结果永远向一个方向或按某一固定规律变化, 其大小及符号在同一实验中完全相同。

系统误差又可分为两类

##### (1) 恒定系统误差(简称恒定系差)

恒定系差是指在一定条件下, 大小及符号都保持不变的系统误差。例如某电流表由于指针零点未在零位, 使用前已有 0.5mA 的指示, 故每次测量结果总比读数小 0.5mA。另外由于仪表灵敏度不够, 或由于摩擦等原因使得仪表在某一量值(如仍设为 0.5mA)前, 虽有信号但仪表无示值(指示仍在零值处), 这种误差又称为阈值误差, 它使测量结果总比读数偏大一个阈值。

##### (2) 变值系差

是指在一定条件下, 按某一确定规律变化的系统误差。依其变化规律不同又可分为三种情况:

##### A. 累进性系差

是指在整個测量过程中误差的数值逐渐向一个方向变化的系统误差。例如, 蓄电池在使用过程中因放电造成电动势不断下降, 形成累进性系差。

##### B. 周期性系差

是指在测量过程中误差的数值呈周期性变化的系统误差。例如, 由于时钟位置放得过高, 在进行读数时, 只有在垂直位置时指针读数才是正确的, 在其它位置, 因为视差的影响, 读数偏高。这种误差是周期性的。

##### C. 按复杂规律变化的系差

这种误差的变化规律很复杂, 一般用表格、曲线或经验公式来表示。例如标准电池的电动势与室温的关系为

$$\Delta E = E_{20} - E_T$$

$= [39.94(T - 20) + 0.929(T - 20)^2 - 0.0092(T - 20)^3 + 0.00006(T - 20)^4] \times 10^{-6} \text{V}$   
式中  $E_{20}$ ——20℃时标准电池的电动势, 约为 1.0183V,

$E_T$ ——T℃时标准电池的电动势, V。

产生系统误差的原因大致有以下几种:

- (1) 仪器不良 如仪器零点未调准、刻度不准、阈值太大等;
- (2) 测试环境的变化 如外界温度、湿度、压力变化或存在电磁干扰等;
- (3) 安装不当;
- (4) 测试人员的习惯偏向 如读数偏高、偏低、偏快等;
- (5) 测量的方法不当 由于对被测对象认识不足, 可能会采用不合适的测量方法, 就会带来系统误差。特别是当采用完全新的测量方法或将某一有效方法进行简化时, 不细心就会造成系统误差。

#### 2) 随机误差

随机误差的特点是在一定的测量条件下做多次重复测量，误差出现的数值和正负号没有明显的规律。这类误差产生的原因是由许多复杂因素微小变化的总合引起的，分析比较困难。对于某一次具体的测量，误差的大小、方向事先是无法估计的，因而在测量过程中设法把它清除。但是，人们通过长期反复的实践，认识到随机误差具有随机变量的一切特点，在多次测量中服从统计规律，故可用概率论和数理统计的方法对所获得的测量数据进行分析和处理，以确定出最可靠的测量结果。

随机误差表现了测量结果的分散性。在误差分析时，常用精密度表示随机误差的大小。随机误差愈小，精密度愈高。而系统误差则用准确度表示。如果测量结果既精密又准确，则说明测量的精确度高。

下面以打靶为例说明精密度、准确度、精确度三者间的区别。如图 1-1 所示，射击的目标是靶心，图中 *a* 表示既不精密，又不准确；*b* 表示精密度很高但准确度不高；只有 *c* 才是既精密又准确。

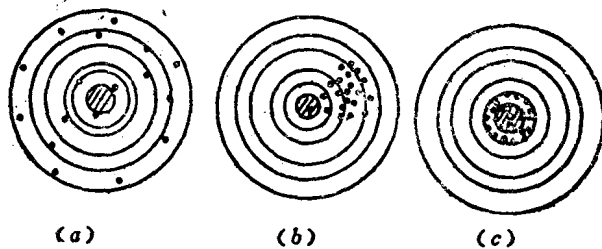


图 1-1 精密度与精确度

在实际测量中没有靶心，只有设想中的真值，进行测量就是力图接近真值。

### 3) 疏失误差

又称过失误差或粗大误差，简称“粗差”。疏失误差是一种显然与事实不符的误差。一般是由于测量人员的粗心或过度疲劳造成的。例如测量人员看错量程或将微安误读成毫安，或等显示值过去一段时间后方开始读数等均会导致过失误差。

过失误差无规律可寻，但只要测量人员集中精力仔细操作是可以避免的。

具有过失误差的测量值称为“坏值”，在实际计算中应该舍弃。但是，测量者决不能轻易将某些测定值宣布为坏值而随意丢弃。除非有充分理由判断出某一测量值确系有疏失误差，甚至能找出产生该误差的原因后才能将该测量数据舍弃，否则有可能将一些很重要的信息漏掉。如测放大器的幅频特性时发现在某一频率处有超量的输出，则很可能在该点放大器产生自激，并非一定是过失误差。

## 2. 按误差表示方法分类

### 1) 绝对误差

绝对误差是指观测值(仪表示值)与被测量真值之差。

$$\Delta X = X - A_0 \quad (1-5)$$

式中  $X$ ——观测值，

$A_0$ ——被测量的真值。

由于真值  $A_0$  是无法知道的，故式(1-5)并无使用价值。通常是以高出使用表一级或两级的仪表(标准表)的示值  $A$  代替真值  $A_0$ ，因为标准表的读数比被校表的读数更接近真值。

$$\Delta X = X - A \quad (1-6)$$

从式(1-6)中得到的绝对误差称为示值误差，实用中就是以示值误差表示绝对误差。

与 $\Delta X$ 大小相等但符号相反的数值，称为修正值，常用 $C$ 表示。

$$C = -\Delta X = A - X \quad (1-7)$$

当仪表、仪器被鉴定后，即可得到修正值 $C$ ，利用修正值可求出被测量的实际大小。

$$A = X + C \quad (1-8)$$

式(1-8)表示仪表读数 $X$ 加上该处对应的修正值 $C$ 就是被测量的实际值。利用修正值法可以消除仪表刻度不准带来的系统误差。

绝对误差特征：

- (1) 是有名数，与被测量单位相同；
- (2) 其大小与所取单位有关，如 $\Delta X = 1\text{mA} = 1000\mu\text{A} = 10^{-3}\text{A}$ ；
- (3) 能反映误差的大小和方向；
- (4) 不能反映测量的精细程度。如已知手表的 $\Delta t = 1\text{s}$ ，并不能表示该表的好坏。若是一天内差 $1\text{s}$ ，则质量很好；若 $1\text{min}$ 差 $1\text{s}$ 则质量很差。

## 2) 相对误差

绝对误差与被测量真值之比称为相对误差。实用中相对误差又有下列几种形式：

### (1) 实际相对误差

绝对误差 $\Delta X$ 与被测量的实际值 $A$ 之比值称为实际相对误差，以符号 $\gamma_A$ 表示

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A} \times 100\% \quad (1-9)$$

### (2) 示值相对误差

绝对误差 $\Delta X$ 与仪表指示值 $X$ 之比值，记作 $\gamma_x$

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-10)$$

### (3) 引用相对误差

绝对误差 $\Delta X$ 与仪表满刻度值 $X_m$ 之比值，记作 $\gamma_m$

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

指示仪表通常都是按 $\gamma_m$ 进行分类的，例如电工仪表按引用误差 $\gamma_m$ 大小分为7级，0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0级

值得注意的是，被测量只有工作在接近仪表满刻度处才能有最小的相对误差。当被测量工作在仪表较小刻度处时，相对误差就会增加。因为，对指示仪表而言，其基本误差取决于仪表本身的性能，对已定级别的仪表其绝对误差 $\Delta X$ 约为一个常数( $\Delta X = X_m \gamma_m$ )，不随刻度变化。例如，满刻度为 $100\text{V}$ 、 $\gamma_m = 2.5\%$ 的电压表。其绝对误差 $\Delta X = \gamma_m X_m = 2.5\% \times 100 = 2.5\text{V}$ ，如果被测量工作在 $25\text{V}$ 处，其相对误差

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X} = \frac{2.5}{25} = 10\%$$



显然这时的  $\gamma_s$  超过引用误差  $\gamma_n$  四倍，如果工作在更低刻度处相对误差会更大。因此在使用电工仪表进行测量时，一定要选择合适的量程，一般要求被测量工作在不小于满度值  $2/3$  的区域，不要选用大量程电表去测量很小的电量。

相对误差有以下特征：

- (1) 比值大小与被测量单位无关；
- (2) 能反映误差的大小和方向；
- (3) 能反映测量工作的精细程度。

$\gamma_A$ 、 $\gamma_s$ 、 $\gamma_n$  间存在下列关系：

$$\gamma_A - \gamma_s = \gamma_s \gamma_n \quad (1-12)$$

$$\gamma_s = \gamma_A / (1 + \gamma_A) \quad (1-13)$$

$$\gamma_A = \frac{\gamma_s}{(1 - \gamma_s)} \quad (1-14)$$

$$\gamma_s = \frac{X_n}{X} \gamma_n \quad (1-15)$$

### 8. 算术平均误差

算术平均误差是表示误差的一种较好方式，它反映了误差的最大值，是最保守的估计，故具有最大的安全性，其定义为

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |v_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (1-16)$$

式中  $n$ ——观测次数；

$\bar{X}$ ——观测值  $X_i$  的算术平均值。

$v_i = X_i - \bar{X}$  为被测量  $X_i$  与算术平均值  $\bar{X}$  间的绝对误差，称为残余误差，简称残差。残余误差有两个重要性质：

- 1) 一组测量值残差的代数和等于零

$$\sum_{i=1}^n v_i = 0 \quad (1-17)$$

(证)

$$v_1 = X_1 - \bar{X}$$

$$v_2 = X_2 - \bar{X}$$

$$\vdots$$

$$v_n = X_n - \bar{X}$$

将上列各残差求代数和得

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n v_i &= v_1 + v_2 + \cdots + v_n \\ &= (X_1 - \bar{X}) + (X_2 - \bar{X}) + \cdots + (X_n - \bar{X}) \\ &= (X_1 + X_2 + X_3 + \cdots + X_n) - n\bar{X} \\ &= \sum_{i=1}^n X_i - n\bar{X} \end{aligned}$$

由算术平均值的特性式(1-2)进一步得出