

工业电子

测量技术

蔡文彬 编著

重庆大学出版社

工业电子测量技术

蔡文彬 编著

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书共分六章，着重介绍以微型计算机作为数据和信号处理核心的智能化和数字化测量技术。主要内容有：最小二乘法在工程检测中数学模型的建立和在测量数据处理中的应用；常用传感器的工作原理；智能化测量仪器的组成特点和原理，并对一些有代表性的实用仪器进行了分析；对最常用的电压和频率的测量技术作了较详细的讨论；介绍了波形显示和测量技术。书末附有习题。

本书可作为大专院校工业自动化和计算机等专业的教材，并可作为从事工程检测、仪器仪表设计和生产等有关工程技术人员的参考书。

工 业 电 子 测 量 技 术

蔡 文 彬 编 著

责任编辑 曾 令 维

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆建筑工程学院印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：14.75 字数：368 千

1989年 1 月第 1 版 1989年 1 月第 1 次印刷

印数：1-4000

标准书号： ISBN 7-5624-0226-4 定价：2.95元
TN·4 (课)

前 言

本书是参照工业自动化专业和计算机专业关于电子测量技术和工程检测技术等课程的编写大纲，并结合编者从事电子测量技术教学和科研实践而编写的。

在工程实践中，不可避免地要对各种参数进行测量和控制，工业电子测量技术已成为工程技术人员不可缺少的基本技能。其内容十分广泛，包含检测技术、指示技术、信息处理技术、控制技术和测量仪器、仪表、数据处理和数学模型的建立等。因此，工业电子测量技术是一门知识密集、技术密集和跨学科的横向技术，是培养高级技术人员的一门重要技术基础课。

在编写本书时，力求概念清晰、加强基础、注重实践和反映当前工业电子测量技术的特点。主要包括下列几方面的内容。

(一) 测量数据处理的基本知识，最小二乘法在实用数学模型的建立和测量结果的评定中的应用。

(二) 常用传感器的工作原理和应用。

(三) 智能化测量仪器的组成、特点和原理。

(四) 电压和频率测量的原理，波形显示和测量技术。

在测量数据处理方面以最小二乘法为主导；在测量对象方面以非电量的测量为主；在测量方法上以智能化和数字化测量技术为重点。实践表明，这样选取教材内容有利于加强和提高学员的实践技能，适应当前工程实践中以微型计算机为核心的智能化和自动化测量技术的应用和发展的需要。同时，也不至于因内容过于庞杂而使学时太多。本书教学时数约为60左右。

本书可作为大专院校工业自动化专业和计算机专业的教材，也可作为从事自动检测、仪器仪表设计和生产等方面的工程技术人员的参考书。

本书由重庆大学无线电系副教授吕公赞同志主审，参加审阅的还有重庆大学无线电系老师蒋正义同志等。

在编写过程中，得到重庆大学出版社黄开植同志以及重庆建筑工程学院教务处、机电系的有关同志的大力支持和帮助，作者在此致以衷心的感谢。

重庆建筑工程学院基础科学系吴文英老师参加了本书的编写，并绘制了全书的插图和对全书的例题进行了计算。

由于编者的教学经验不足，水平有限，书中定有许多错误和不足，恳请读者批评指导。

编 者

1988年3月于重庆

目 录

绪 论	1
第一章 测量误差的基本概念	
§1-1 误差公理	4
§1-2 系统误差及其特性	5
§1-3 削弱系统误差的几种测量技术	7
§1-4 随机误差及其特性	10
§1-5 衡量精密度的常用指标	15
§1-6 系统误差与随机误差的关系	18
§1-7 系统误差存在的判别方法	20
第二章 估值理论基础及其应用	
§2-1 最大或然法与最小二乘法原理	26
§2-2 估计值质量的最优标准	28
§2-3 估计值的置信概率	31
§2-4 非同精度测量结果的估算	35
§2-5 统计相关量的估计值及积差定律	38
§2-6 回归分析及其应用	44
§2-7 应用最小二乘法建立数学模型	52
第三章 常用传感器及其应用	
§3-1 光电传感器	61
§3-2 热敏传感器	70
§3-3 力敏传感器	80
§3-4 位移传感器	94
§3-5 霍尔元件及其应用	95
§3-6 电容传感器	105
§3-7 流量的检测	113

§3-8	光纤传感器	118
§3-9	在检测技术中几种常用的放大器	121
第四章 智能式非电量测量仪		
§4-1	智能仪器的特点及其基本组成	127
§4-2	智能式激光表面光洁度测量仪	134
§4-3	智能含水率测量仪	138
§4-4	智能温度检测与控制仪	144
§4-5	应用微机的红外测温仪	151
§4-6	智能流量测控仪	156
第五章 电压和频率的测量		
§5-1	交流电压的表征及其测量	160
§5-2	交流电压真有效值的测量	169
§5-3	应用微机对交流电主要参数的综合测量	174
§5-4	数字电压表与数字万用表	179
§5-5	失真度的测量	189
§5-6	用计数器测量时间和频率的原理	194
§5-7	时间和频率的智能化测量	198
第六章 波形的显示和测量		
§6-1	电子示波器的基本组成和功能	204
§6-2	示波器显示波形的原理	209
§6-3	示波器在波形参数测量中的应用	218
§6-4	智能化示波器的特点	221
习题与思考题		226
主要参考文献		230

绪 论

测量是人类认识世界，分析事物的一种手段，与人类的生活和生产有着密切的关系。测量从古代就已开始，并积累了丰富的经验和取得显著的成果，为人类的进步作出了贡献。但是，作为一门精确的技术，不过是近百年来事。从天体运动到原子结构的探讨，从研究物理量之间的关系到化合物特性的分析，从遥感遥测到山河的测绘等等，都离不开测量，所以著名科学家门捷列夫指出“没有测量，便没有科学”，精辟地说明了测量的重要性。

从广义方面来说，测量是取得事物的某些数字特征的方法；从计量角度来讲，测量是把待测的物理量直接或间接地与另一个同类的已知量或标准量进行比较，并将已知量或标准量作为计量单位，进而定出被测量是该计量单位的若干倍或几分之几，亦即求出待测量与计量单位的比值作为测量结果。

测量学与其他科学技术有着紧切的关系，现代科学技术的发展为测量技术提供完善的测量原理和先进的测量仪器；先进的测量技术又为其他科学技术的发展提供有力的手段，正是由于精确的测量结果，为新理论的创立提供可靠而精确的数据，相辅相成推动着科学向前发展。

电子测量技术是指以电子技术为基本手段的测量技术。归纳起来可以分为两大类；一类是对电压、电流、阻抗等电量参数的测量，另一类则是运用一定的转换手段，把非电量（例如：压力、温度、流速等）转换为电量，然后进行测量。对于工业自动化来说，后一种情况是我们经常遇到的。将非电量转换为电量的器件，统称为传感器，在自动检测技术中占有极为重要的地位，在某些场合成为解决实际问题的关键。

以概率论为基础的误差理论，是测量数据处理的基础，无论是测量方案的制定和评价，或是测量仪器的检验，以及测量数据的分析处理，都可以借助于误差理论来进行。众所周知，几乎所有的测量都是要使用各种不同的仪器来进行的，不难想像，简陋的甚至不科学的仪器用于测量不会取得好的结果。电子测量技术的先进性正是主要表现在电子仪器的先进性方面。也正因为这样使电子测量技术具有一系列特点。

主要有：

（1） 精确度高

电子测量技术都是借助于电子仪器来进行的，现代的电子仪器有着相当高的精确度，例如：用谐振法原理制成的铯原子钟，以原子频标和原子秒作为基准，使测量时间的精确度优于 10^{-13} 量级，据最近的报导，又有了新的提高，精确度达到 10^{-13} s，是当前最精确的一个物理量。

（2） 频率范围宽

电子测量的频率低端已进入 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Hz的量级，而高端则已达到 10^{13} Hz左右，并且常常一台仪器就有相当宽的使用频率范围。

（3） 自动化程度高

以微型计算机为核心的智能化仪器已成为当前电子测量仪器发展的一个方向，由于使测量按照已编的程序进行，而使电子测量技术的自动化程度大为提高，不仅量程可以自动切

换，而且有自动打印和显示测量结果，输出控制信号和数据，指示操作错误等功能，可以使测量成为一个全自动的系统。

(4) 量程广

电子测量仪器与其他测量仪器相比，有着量程广的优点，如游标卡尺的量程仅是四个量级，大地测量用的钢钢尺也仅达五个量级。而普通的欧姆表则达六个量级，数字频率计的量程可达十七个量级以上。

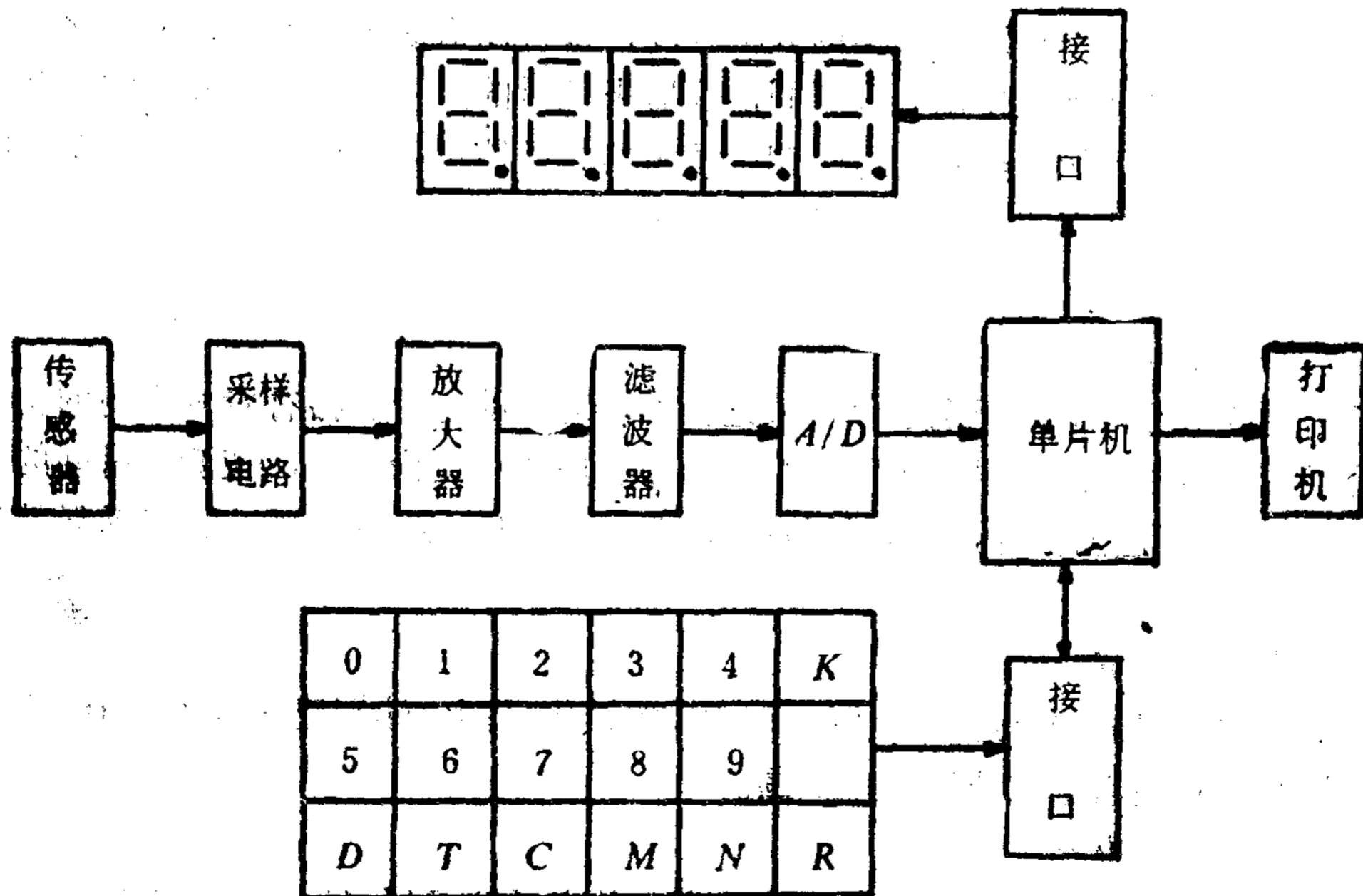
(5) 速度快并且可实现遥控遥测

由于电子测量是通过电磁波或电子运动来进行的，其传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，电子器件的开关速度也达 10^{-7} s 以上，因此，电子测量有很高的测量速度。同时便于实现遥控或遥测，这对于远距离或人体难于接近的地方进行测量具有特殊的意义。

电子技术的发展，尤其是微电子学和微型计算机的发展，把电子测量技术推向一个崭新的阶段，使电子测量无论精确度或自动化程度都有显著的提高，智能化的电子测量仪器的出现，不仅使仪器仪表具有许多新的特征，而且使原有的性能指标有了新的突破，不可避免地引起一场新的变革。

当前，以能源、信息和材料为三大支柱的新技术革命，正在世界范围内蓬勃兴起，作为感知、采集、转换、处理和传输各种信息必不可少的传感器，已成为与微型计算机同等重要的技术工具而得到迅猛的发展，以半导体传感器为主流，包括光纤、陶瓷、生物传感器在内的各种新型传感器不断问世，使传感器无论在精确度、灵敏度、响应速度、耐高温，寿命等方面都有显著提高，从而使工业电子测量技术向着更高的深度和广度发展。

最后，我们举例来说明本课程的主要内容。图（一）是一台智能含水率测量仪的方块图。该仪器是用来测量颗粒状物质的含水率（又称为水份）的，例如测定粮食、砂糖、药品等的含水率，精确度可达0.3%。



图（一）

被测物质置于传感器内，把含水率转换成电压，经放大后送到有源滤波器，以提高信噪比，直流电压由A/D变换器转化为相应的数字脉冲信号送到单片机8748进行处理，8748根据相应的数学模型，计算出含水率送到由五个LED数码管组成的显示器直接显示含水率。16个键盘中0~9为数字键，其余六个为命令键，可以实现对仪器输入不同的参数、检查当前仪器的状态和进行测量等，在软件支持下，该仪器还有操作错误警报指示、输出BCD码和外接打印机等功能。该仪器将在第四章详细介绍。

由此例可以看出，组成一个工业测量系统，至少包括传感器、放大电路、接口电路、数据处理部件（如计算机等）、指示电路和测量仪器。

因此，工业测量技术包含的内容相当广泛，有些文献指出测量技术是新技术综合应用的一个方面，是一门知识密集、跨学科的技术。诚然，我们不可能对测量技术所涉及的各个方面都进行深入的讨论，仅是对其中一些基础知识进行介绍，为读者进一步学习打下必要的基础。为此，本课程主要安排有：数据处理的基础——误差理论和估值理论，常用传感器的原理、测量仪器尤其是智能仪器原理，最后，对电压和频率的测量也进行了讨论。为了反映现代科学技术的发展，本书选取了相当数量的以微型计算机为核心的智能化测量技术的内容和应用实例。

第一章 测量误差的基本概念

§ 1-1 误差公理

人们对事物的认识总是从实践开始的，测量技术作为人们认识事物、改造自然的一种手段也是如此。为了对自然界所发生的现象进行研究，常常需要在定性分析的基础上进行定量的分析，这就必须进行精密的测量。当对某个量进行多次测量时，所测得的数据我们称为读数值或观测值，并以 l 表示，如果把这些观测值加以比较时，就会发现它们存在着一些差异，测量得越是精确，差异越是明显，也就是说测量总是不可避免地存在误差，误差自始至终存在于一切科学实验过程中，这一客观事实为人们所公认，因此，也称为误差公理。

那么，误差是多少呢？这就有一个标准问题。以被测量的真值作为标准是理所当然的。如果某量的真值为 A_0 ，对它进行了 n 次测量，读数值分别为 l_1, l_2, \dots, l_n ，我们定义

$$\Delta_i = l_i - A_0 \quad (i = 1, 2 \dots n) \quad (1-1)$$

为真误差。真误差的反号称为改正数，通常以 V 来表示。

因此
$$\Delta_i = -V_i = l_i - A_0 \quad (1-2)$$

误差既然是客观存在的事物，我们就必须去研究它，分析其规律。事实上测量误差早就为人们所重视，并逐步建立了整套误差理论，积累了极其丰富的经验。

研究误差理论的目的在于：

(1) 分析误差的来源和大小，确定误差的性质，使对误差的处理建立在坚实的理论基础之上，为科学处理测量成果，消除或减小误差提供依据，并建立切实可行的测量技术方案，正确评定结果的质量。

(2) 在计量科学和实验工作中，必须保证量值的统一和正确传递，同时，各种计量标准是否统一，精度如何？所用的测量仪器的质量是否过硬等等，都需要一个统一的规定，制定这个规定就必须有一定理论依据，这个依据就是误差理论。

(3) 对于电子测量技术来说，误差理论的研究分析和应用，还在于使我们合理地选择测量技术方案，正确使用测量仪器，以取得优良的测量结果。

(4) 误差理论的研究和应用，对于电子仪器和电路设计也有重要的意义。一台仪器的结构，一个电路的设计，依据电子技术的理论自然是重要的，但是，这往往是不够的，如果能以误差理论进行分析研究，就有可能避免许多盲目性，使电路参数设计得更为合理，对仪器的技术指标的确定更加切合实际。

(5) 以概率论为基础的误差理论，不仅在测量技术中占有重要的地位，而且在信号的检测、自动控制系统中的最佳控制以及调整原理中都有着广泛的应用。可以说误差理论适用于各种不同的学科，是一门重要的技术基础课程。

误差理论的基础是概率论，后者是工程数学中的一个重要内容，因此，在这里我们不想重复工程数学的内容，而是从应用的角度来阐述误差理论的基本原理，为进一步学习准备必要的基本知识。

上面提到，误差是观测值与真值之差。那么，什么是真值呢？真值或称为理论值，或定义值，例如，平面三角形的内角和为 180° ，这是平面三角形内角和的真值。但是，在多数情况下，真值往往是不知道的，它只存在于理论之中。然而，任一被测之量，客观上总是存在着一个能代表其真正大小的数值，这个数值就称为该被测量的真值。

产生测量误差的原因归纳起来主要有三个方面，一是人的误差；二是测量仪器的误差；三是外界环境的影响。第一种是由于测量者的感觉器官不完善，或有固有习惯所引起的；第二种是由于测量仪器本身就只有一定的精确度所引起的；第三种则是由外界条件的影响，诸如电网电压的变化，环境温度的影响，干扰信号的影响等等。最后，还需要指出的是，测量原理的正确性和严密性对测量误差也有很大的影响，而且这是取得优质测量成果的前提，是测量者首先应当注意的。

根据误差的性质，误差可以分为系统误差、随机误差和粗差三种类型。这里所说的粗差并不是单纯指误差的数值大小，而是指由于测量者粗心大意，或是测量过程中出现故障所形成的误差，因此粗差又称为过失误差，是不允许的。至于系统误差和随机误差，通常是不可避免的，我们平常所说的测量误差就是指这两方面的误差。

§ 1-2 系统误差及其特性

为了更好地理解系统误差，我们先看几个实例。

例如，用一根标称长度为1米实只为98厘米的尺子去丈量距离，那么每量一米就有2厘米的误差，所量的距离愈长，误差愈大，误差与距离成正比，具有一定的规律性。

又例如，环境温度对电子测量常常有较大的影响，即使采取了温度补偿措施也在所难免。仪器的校正总是在一具体温度下（例如 20°C ）进行的，而该仪器用于测量时，环境温度则可能高于或低于 20°C ，这就带来了测量误差，这种误差也常表现为一定的规律性。

我们定义：在一定的条件下，对某量进行一系列测量，若误差的大小和符号保持一定，或作一定规律变化，则称这一类误差为系统误差，以 δ 表示。

系统误差的主要来源，一是测量仪器本身有缺点带来的，例如上述尺子就是如此，因此，我们必须定期检验并校正测量仪器，若不能校准，则应将检定的系统误差的数值和符号标定出来，以便使用时加以改正。

系统误差还可能是由于环境条件而引起的，例如，测量地点附近某处有一比较强大的恒定磁场，在它的影响下，使某些测量数据总是有一系统误差，因此，我们对测量环境应进行必要的调查和处理，尤其是在精密测量时更应如此，使我们在比较有利的环境下进行测量。

系统误差的来源还有人的误差，方法误差等等，都应给予重视，使系统误差在测量过程中削弱或消除。

系统误差的最大特点表现为有一定规律性，一旦掌握其规律，就可以通过改变测量方法或仪器的结构等技术途径加以消除或削弱。

由于系统误差对测量成果常有累积性的影响，上面量距的例子就是如此，距离愈长，误差愈大，因此，对系统误差必须予以重视，否则将对测量成果带来严重的影响。

从系统误差的定义我们可以看出，系统误差有两种类型，一是保持为同一符号，同一数值的系统误差，我们称为系统恒差，以 δ_0 表示。另一种则是依一定规律变化的系统误差，我

§ 1-3 削弱系统误差的几种测量技术

由于系统误差的特点有一定的规律性，因此，在多数情况下是可以通过技术途径加以消除或削弱的。

下面，介绍几种消除或削弱系统误差的测量技术方案。

一、零示法

在测量时，使被测量的作用效应与已知量的作用效应互相抵消，以致总的效应减少到零，于是就可以肯定被测量等于这个已知量，这种比较法称为零示法。

例如图1-1所示，图中电压 U_x 为被测量， E_0 为标准电池， $R = R_1 + R_2$ 是标准分压器，调节 R ，使高灵敏度的检流计 G 的指示为0，则

$$U_x = U = \frac{R_2}{R} E_0 \quad (1-7)$$

式中， R 、 R_2 和 E_0 均为已知，从而可以确定 U_x 之值。由于标准电池 E_0 有相当高的精度，一般可达 10^{-8} 以上，从式(1-7)看出 U_x 的精度主要取决于标准分压器的精度，它也可以造得相当准确，而检流表 G 仅检查电路中是否有电流，并不要求准确，而只要求有足够的灵敏度。因此，此法不仅可以削弱系统误差，而且可以有相当高的精确度。精密的电位差计正是以这种原理设计的。

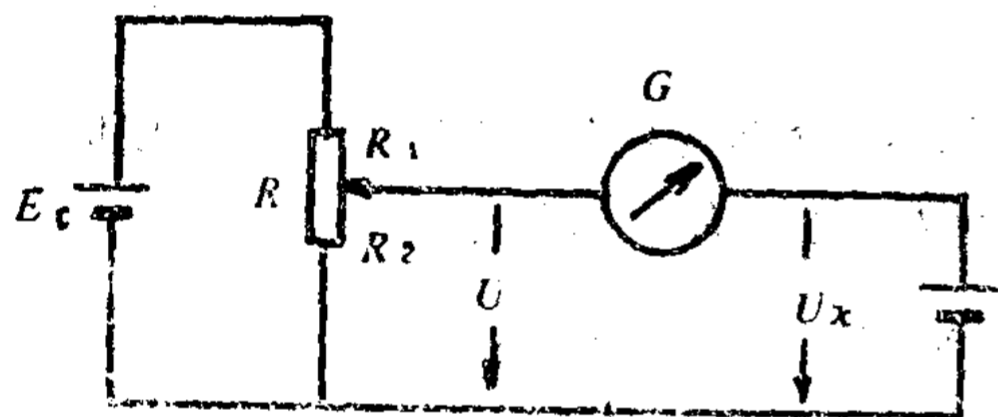


图 1-1

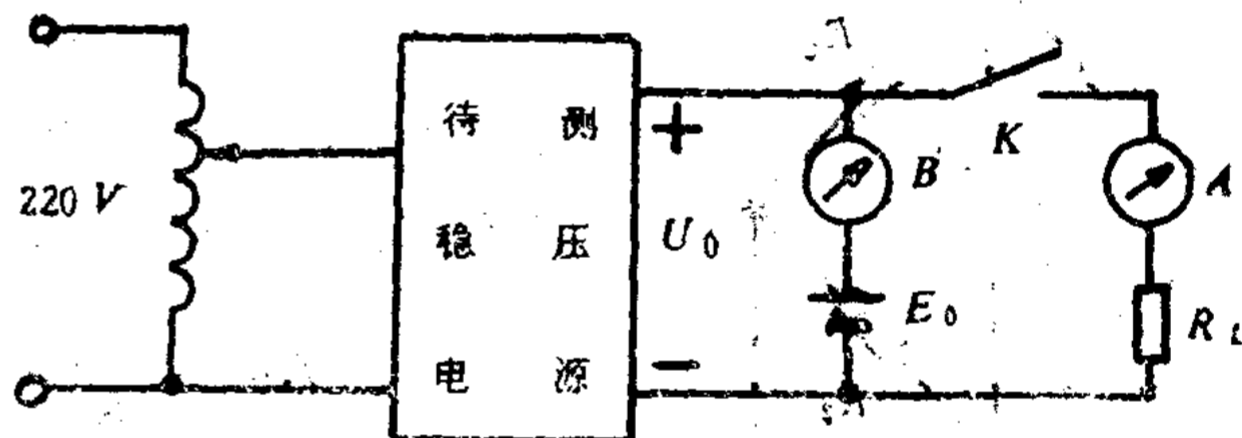


图 1-2

二、微差法

微差法是从零示法演变而来的。它的设计思想是，若被测量为 x ，取一个与其相差较小的标准量 N 进行比较，并测出它们的差 $(N-x)$ ，则被测量 $x = N - (N-x)$ 。差值 $(N-x)$ 越小，测量结果的精确度就越高。图1-2是应用微差法测试直流稳压电源的电路图。图中 E_0 为标准电池，它的电动势 E_0 与被测稳压电源的输出电压 U_x 相当接近， B 为毫伏表。显然， B 的读数 $U = E_0 - U_0$ ，或 $U_0 = E_0 - U$ ，于是得

$$\Delta U_0 = \Delta E_0 - \Delta U \quad (1-8)$$

由此有

$$\frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{\Delta E_0}{E_0} - \frac{\Delta U}{U} \cdot \frac{U}{U_0} \approx \frac{\Delta E_0}{E_0} - \frac{U}{U_0} \cdot \frac{\Delta U}{U} \quad (1-9)$$

令标准电池的相对误差为0.05%，相对微差 $\frac{U}{U_0}$ 为1%，毫伏表 B 的误差为 $\frac{\Delta U}{U} = \pm 5\%$ ，

则得 $\left| \frac{\Delta U_0}{U_0} \right| \leq 0.1\%$ 。

由此可见，微差越小，测量精度越高，而且使用精度不太高（例如5%）的毫伏表，测量结果也可以达到较高的精度（例如0.1%）。

显然，微差法不能像零示法那样几乎全部消除指示仪器的误差，但也由于可以用小量程挡进行测量微差（ $N-x$ ），故仍然大大削弱指示仪器的误差。

微差法的优点在于不一定要用可调节的标准器，更重要的是可以利用指示仪器根据不同的用途，绘上不同的刻度，从而直接读得测量结果，而且可以有较高的精确度。许多专用测试设备就是这样构思而制成的，例如电阻、电容分选仪实际上就是一种应用微差法原理制成的直读式失衡电桥。

三、代替法

在一定的测量条件下，选择一个大小适当的已知量（通常是可调的标准器），使它在测量电路中代替被测量并且不改变原来的测量指示仪器的状态或数值，这样被测量与已知量相等，这种测量方法称为代替法。

由于代替法的两次测量中，仪器的状态及其示值都是相同的，被测量的大小又是由已知量确定，故测量仪器的精度对测量结果影响甚少，从而消除了测量结果中的仪器误差。当然，这里也要求仪器有较高的灵敏度。例如在图1-3中是一个用四臂电桥测量电阻 R_x 的原理图。当电桥平衡时有

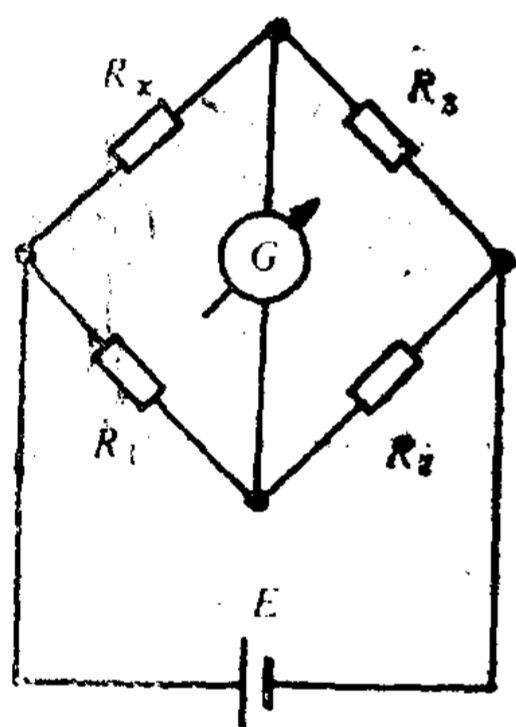


图 1-3

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad (1-10)$$

实际上， R_1 、 R_2 及 R_3 均有误差，分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 。相应的 R_x 有误差 ΔR_x ，对式(1-10)微分并以有限值表示得

$$\Delta R_x = \frac{R_3}{R_2} \Delta R_1 - \frac{R_1 R_3}{R_2^2} \Delta R_2 + \frac{R_1}{R_2} \Delta R_3$$

$$\text{或} \quad \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (1-11)$$

为了消除上述误差，以可调标准电阻 R_N 代替 R_x ，并调节 R_N 使电桥再次获得平衡。则有

$$R_N = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad (1-12)$$

于是由式(1-10)和式(1-12)得

$$R_x = R_N \quad (1-13)$$

如果 R_N 的误差为 ΔR_N ，则 $\Delta R_x = \Delta R_N$ ，由此可见，应用代替法可以消除 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 对测量结果的影响，测量结果的误差仅决定于 ΔR_N ，若 R_N 有相当的精确度，则 R_x 也有相应的精确度。

四、补偿法

补偿法是代替法的一种特殊应用，它是这样进行测量的：取一可调标准器令其数值为 N ，

用测量仪器对被测量 x 与 N 之和 ($x + N$) 进行测量, 在不改变测量仪器的状态情况下, 再单独对可调标准器测量一次, 并调节标准器使其值为 N' 时, 测量仪器的示值与前一次测量时完全相同, 于是得到被测量 $x = N' - N$ 。这样则可将系统恒差全部消除, 其余的系统误差也可以抵消一部份。

我们仍以四臂电桥测量被测电阻 R_x 来说明补偿法的优点。如图 1-4 所示。

电桥平衡: 由图 1-4 (a) 得

$$(R_x + R_N) = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad (1-14)$$

去掉 R_x (或短路) 如图 1-4 (b), 调标准电阻器使电桥重新得到平衡, 有

$$R'_N = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad (1-15)$$

由此得

$$R_x = R'_N - R_N \quad (1-16)$$

设 R_N 和 R'_N 的系统误差分别为: $\delta_N = \delta_0 + \delta_{iN}$ 和 $\delta'_N = \delta_0 + \delta_{iN}'$, 于是相应的 R_x 的误差为

$$\Delta_x = \delta'_N - \delta_N \quad \text{或} \quad \Delta_x = \delta_{iN}' + \delta_{iN} \quad (1-17)$$

由式 (1-17) 可见, 采用补偿法后, 标准电阻器的系统恒差全被消除, 系统变差也被抵消一部份。

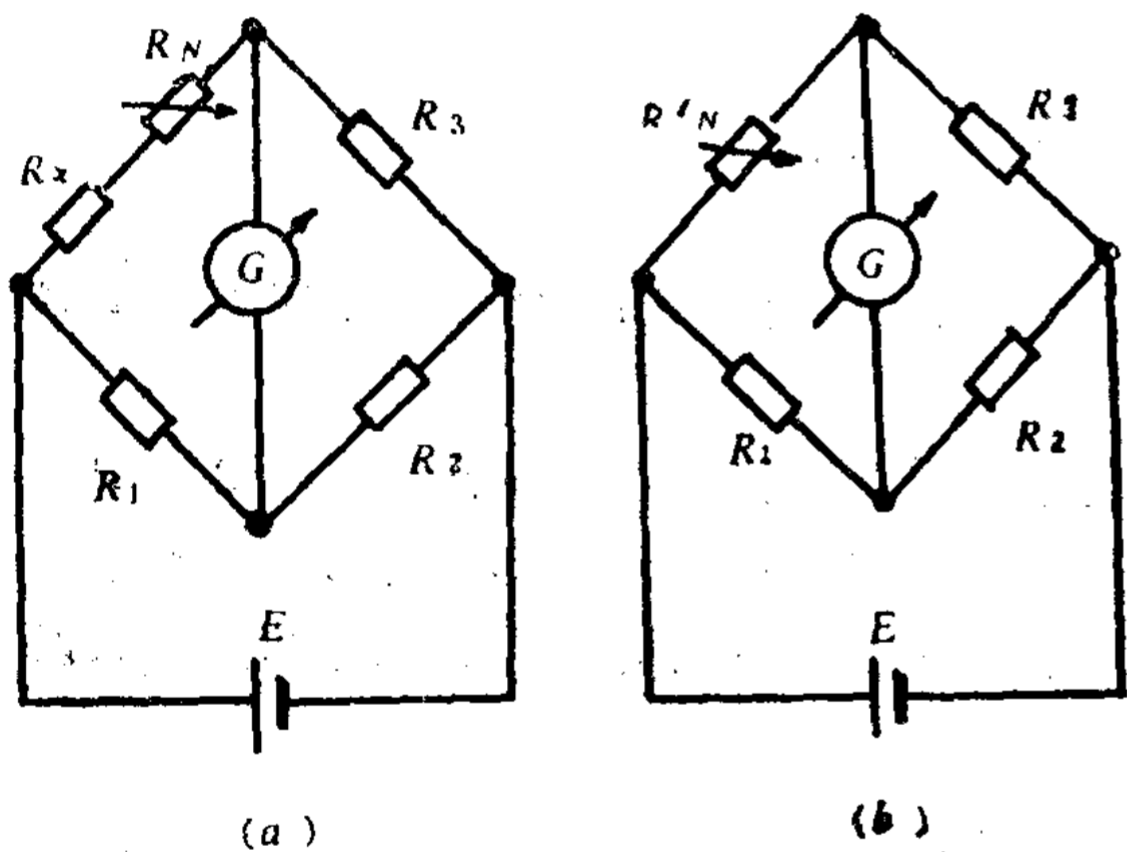


图 1-4

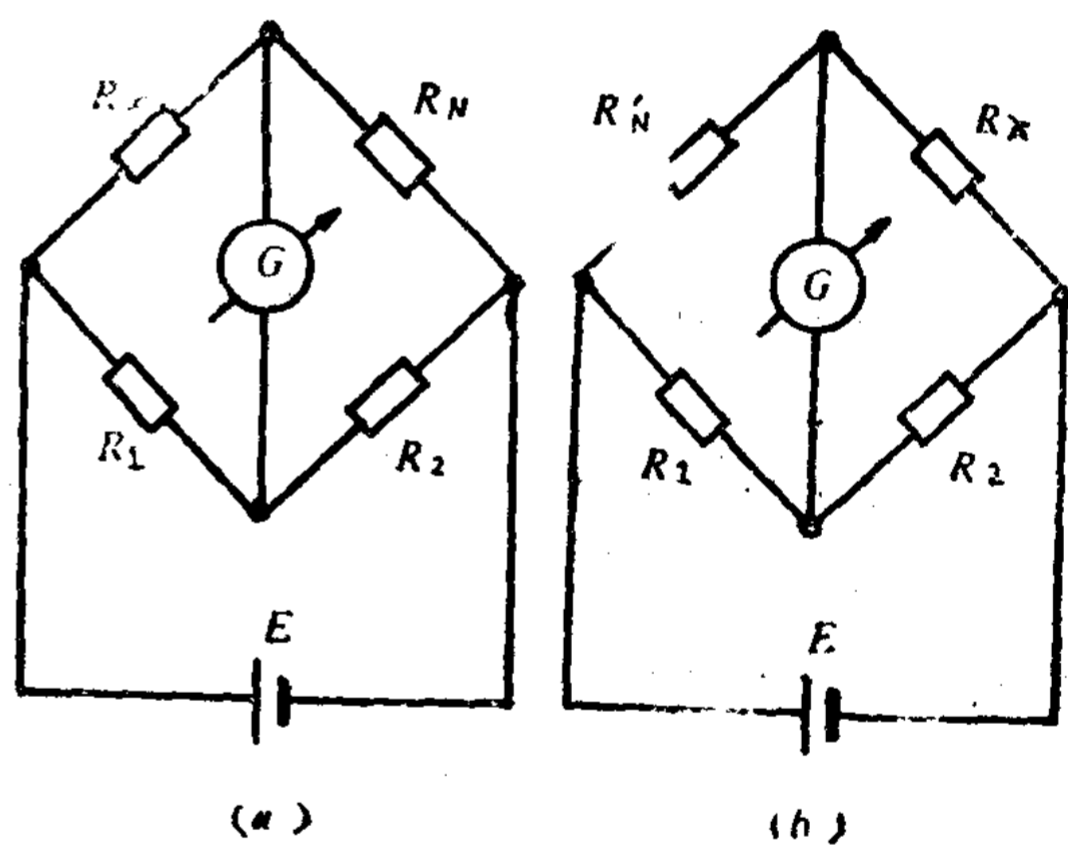


图 1-5

(五) 对照法

对照法又称为交换法, 是一种经常被采用的方法。以等臂电桥测量电阻 R_x 为例, 说明对照法消除电桥不对称的系统误差。如图 1-5 所示, 图中 R_1 、 R_2 在制造电桥时设计为 $R_1 = R_2$, 但是若 $R_1 \neq R_2$ 则存在系统误差。先按图 1-5 (a) 进行测量, 在电桥平衡时有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N \quad (1-18)$$

由式 (1-18) 知, 若 $R_1 = R_2$ 则 $R_x = R_N$, 若 $R_1 \neq R_2$ 则 $R_x \neq R_N$; 如果认为 $R_x = R_N$, 则结果存在因 $R_1 \neq R_2$ 带来的系统误差。令 $R_1 = R_2 + \Delta R$, 则有

$$R_x = \left(1 + \frac{\Delta R}{R_2} \right) R_N \quad (1-19)$$

式中, $\frac{\Delta R}{R_2} R_N$ 就是由于 $R_1 \neq R_2$ 引起的系统误差。

这时如果把 R_x 和 R_N 的位置交换一下, 再测量一次, 如图 1-5 (b) 所示, 当电桥平衡时有

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R'_N \quad (1-20)$$

以 $R_2 = R_1 - \Delta R$ 代入式 (1-20) 得

$$R_x = \left(\frac{R_1 - \Delta R}{R_1} \right) R'_N = \left(1 - \frac{\Delta R}{R_1} \right) R'_N \quad (1-21)$$

由式 (1-19) 和式 (1-20) 得

$$R_x = \frac{R_N + R'_N}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R}{R_2} R_N - \frac{\Delta R}{R_1} R'_N \right) \quad (1-22)$$

由式 (1-22) 看出: 这样交换位置测两次, 然后以两次测量数值取平均值, 则可大为削弱由于 $R_1 \neq R_2$ 所产生的系统误差。

从以上介绍的五种消除或削弱系统误差的典型测量技术中, 我们知道, 这些方法的一个共同点是利用系统误差有规律性的特点, 使在测量结果最后取值时两次测量的系统误差成为相减的关系, 或是使测量仪器仅作指示而不读取数据。这样则可使系统误差大为减少, 以至全部消除。这类方法还很多, 读者可以参阅有关著作。

§ 1-4 随机误差及其特性

在概率论中, 我们学习过随机变量及其分布。在本节中, 将应用这些规律来研究测量误差。

如果对一系列测量误差进行分析时, 我们会发现除了系统误差之外, 尚存在另一类误差, 这种误差时大时小, 时正时负, 具有偶然性。当我们对这类误差进行统计分析时, 会发现它仍有一定的规律性, 而且这种规律性随着测量次数的增加愈来愈明显。这类误差称为随机误差, 以 ε 表示。

从概率论的中心极值定理得知, 测量的随机误差 ε 服从于正态分布。

设在相同条件下对某一真值为 A_0 的量进行 n 次无系统误差的测量, 其读数值分别为 l_1, l_2, \dots, l_n , 则由式 (1-1) 得真误差 Δ 为

$$\begin{cases} \Delta_1 = \varepsilon_1 = l_1 - A_0 \\ \Delta_2 = \varepsilon_2 = l_2 - A_0 \\ \dots \dots \dots \\ \Delta_n = \varepsilon_n = l_n - A_0 \end{cases} \quad (1-23)$$

则 ε 的概率密度 $P(\varepsilon)$ 为

$$P(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (1-24)$$

$n \rightarrow \infty$

浪费。

第二种方法是采用单束示波管和应用电子开关能同时显示两个被测信号波形的双踪示波器。这种示波器电路结构与单踪示波器也相似，只是多了一个电子开关，并且有两套输入电路和Y轴前置放大器。电子开关的工作方式可分为交替和断续两种。所谓交替工作方式，就是把输入信号的两个波形轮流地显示在屏幕上。当扫描电路第一次扫描时，示波管显示出第一个波形；第二次扫描时，显示出第二个波形；以后的各次扫描，只是轮流地重复显示这两个被测信号波形。由于交替显示速度很“快”，所以当第一个波形的光迹还没有消失的时候，后一次扫描已显示出后一个波形，这样人眼所看到的波形似乎是一直显示在屏幕上的；所谓断续工作方式，就是在一次扫描的第一个瞬间显示出第一个被测信号波形的某一段，在第二个瞬间显示出第二个被测信号波形的某一段，以后各个瞬间，轮流地显示出这两个被测信号波形的其余各段。经过这样若干次断续转换过程，屏幕上就可显示两个完整的波形。由于断续转换频率很高，显示的光点靠得很近，因此人眼看到的波形仍然是连续的。为了削弱开关噪声对显示波形的影响，电子开关应工作在较高的信号电平上，通常都将电子开关放在Y轴前置放大器的后面。图(1—5)示出双踪单时基示波器电路组成。

与双线示波器相比，双踪示波器主要是不适用于观测两个同时出现的快速单次信号。因为，不管是交替工作方式，还是断续工作方式，所显示的波形实际上都是不连续的。然而，这种示波器不需要构造复杂的双枪示波管，也不需增设一整套垂直系统，整机尺寸、重量和耗电量都有显著减小。因此，通常情况下都广泛使用双踪示波器。

图(1—5)中同时示出双踪单时基示波器中所增加部分的控制作用。

表(1—3)中列出双踪单时基示波器中所增加部分的电路作用。表(1—4)中列出所增加的控制件作用。