

高等学校教材

# 电子测量原理

任庆 范懋本



电子科技大学出版社

## 内 容 提 要

本书主要介绍无线电测量技术的基本原理与基本方法，对测量技术作了非常详细的阐述，并着眼于通过误差分析来研究测量的方法。为了便于读者掌握误差分析的方法，本书用了一定的篇幅，介绍误差理论的基本概念与运用。

本书共分为14章，前4章主要介绍误差的基本理论。后面章节分别介绍测量方法，测量结果处理以及测量仪器。全书以电压的测量为主，对频率、周期和集中参数阻抗的测量也作了介绍。

本书内容丰富、充实，适用面广，是测量理论的概括和总结。

高等学校教材

## 电子测量原理

范懋本 任 庆

\*

电子科技大学出版社出版  
(中国成都市建设北路二段四号)  
成都军区空军印刷厂印刷  
四川省新华书店发行

\*

开本 787×1092 1/16 印张 24.875 字数 568千字  
版次 1989年11月第一版 印次 1989年11月第一次印刷  
印数 1—4800册

中国标准书号 ISBN 7—81016—154—7/TN·44

(15452·77) 定价：7.70元

# 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲议中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

# 前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编委会《仪表与测量》编审组评选审定、推荐出版,责任编辑孙圣和。

本教材由任庆(东南大学)、范懋本(南京邮电学院)两同志合编,任庆同志进行了统稿工作。哈尔滨工业大学孙圣和教授担任主审。

本教材的教学时数为60~80学时。本教材可作为“电子仪器与测量技术专业”、“无线电技术专业”的专业课教材。经过适当选择也可作为其他电类专业的专业基础课教材。

本教材内容广泛、丰富新颖,尽量反映当代测量技术新成就。为了结合国情,教材也侧重原理和误差分析。主要内容分为五部分:

误差理论与数据处理。侧重误差概念、来源、性质、估计方法及减小措施的介绍。并附有多个计算机估计误差、数据处理实例。

测试信号源。介绍连续波、脉冲波及噪声源、合成源。

信号分析。除信号参数(电压、频率、相位)等测量之外,侧重信号的时域和频域实验分析方法,及随机信号的统计分析方法的叙述。

系统分析。除介绍集中参数测量方法外,还较详细阐述网络的时域、频域分析方法,及相关测试法。

数据域测试。介绍数字系统故障检测的基本概念,及数据域测试仪器(逻辑分析仪、微机故障分析仪)的原理和组成。

“电子测量原理”教材具有较强的理论性与实践性。本教材的教学过程应与“电子测量实验教程”的教学密切配合,以达到理论联系实际的目的。

本教材从时域、频域和数域的角度阐述信号和系统特性及参数测量的基本方法和仪器,使读者在科学实验中能制定先进、合理的测试方案,正确选用仪器,严格处理数据,以获得最佳测试结果。

本教材第1、2、3、4、5、6、8、11、14章由任庆同志编写,第7、10、12、13章由范懋本同志编写,第9章由任庆、范懋本联合编写。本教材由哈尔滨工业大学孙圣和教授主审,孙教授极其认真地审阅了全稿,并提出了许多宝贵意见。东南大学陈永彬教授、田良副教授对本教材的编写也给予了帮助和指导,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1988年12月

# 目 录

## 绪论

### 第一章 基本概念

- § 1—1 研究误差的重要意义…………… (2)
- § 1—2 标准…………… (2)
- § 1—3 误差与修正值…………… (3)
- § 1—4 误差的分类…………… (4)
- § 1—5 精密度、正确度和准确度…………… (8)

### 第二章 随机误差

- § 2—1 随机误差的性质和特点…………… (9)
- § 2—2 随机变量的数字特征…………… (10)
- § 2—3 正态分布…………… (13)
- § 2—4 算术平均与标准误差…………… (16)
- § 2—5 标准偏差的估计…………… (17)
- § 2—6 非正态分布…………… (19)
- § 2—7 测量结果的置信度及表示法…………… (22)
- § 2—8 用统计学方法剔除异常数据…………… (26)
- § 2—9 等精度无系差测量的数据处理…………… (29)

### 第三章 系统误差

- § 3—1 概述…………… (37)
- § 3—2 系统误差对测量结果的影响…………… (38)
- § 3—3 系统误差的判定…………… (39)
- § 3—4 系统误差消除的经典方法…………… (42)
- § 3—5 智能仪器中系统误差消除的方法…………… (46)

### 第四章 误差的合成与分配

- § 4—1 概述…………… (49)
- § 4—2 用误差传递公式合成误差…………… (49)
- § 4—3 用计算机合成误差…………… (51)
- § 4—4 系统误差的合成…………… (55)

§ 4—5	随机误差的合成	(55)
§ 4—6	不确定度的合成	(56)
§ 4—7	测量误差的分配	(60)
§ 4—8	最佳方案的选择	(62)

## 第五章 非等精度测量

§ 5—1	概述	(66)
§ 5—2	权的确定及加权平均值	(66)
§ 5—3	加权平均值的精密度及权	(68)
§ 5—4	间接测量中函数权的确定	(69)

## 第六章 测量结果的处理

§ 6—1	概述	(71)
§ 6—2	有效数字的处理	(71)
§ 6—3	等精度测量结果的数据处理	(73)
§ 6—4	测量结果的图解处理	(79)
§ 6—5	最小二乘方拟合(线性)的函数形式	(79)
§ 6—6	用计算机实现最小二乘方拟合	(81)
§ 6—7	加权最小二乘方	(87)
§ 6—8	非线性拟合	(89)
附录:	解线性代数方程组的高斯-赛德尔方法	(92)

## 第七章 测量用信号源

§ 7—1	概述	(96)
§ 7—2	正弦波信号源	(97)
§ 7—3	扫频信号发生器	(105)
§ 7—4	脉冲信号源与函数信号发生器	(108)
§ 7—5	噪声信号发生器	(114)
§ 7—6	频率合成器	(116)

## 第八章 电压测量

§ 8—1	电压测量的基本要求及电压测量仪器的分类	(131)
§ 8—2	平均值检波器	(133)
§ 8—3	峰值检波器	(141)
§ 8—4	脉冲电压表	(146)
§ 8—5	有效值检波器	(148)
§ 8—6	同步检波器	(150)

§ 8—7	取样式电压表	(151)
§ 8—8	数字电压表概述	(153)
§ 8—9	逐次比较型数字电压表	(155)
§ 8—10	电压反馈型V—F变换器	(157)
§ 8—11	双积分式DVM	(158)
§ 8—12	三斜积分式DVM	(169)
§ 8—13	脉宽调制式DVM	(171)
§ 8—14	带有微处理器的DVM	(172)
§ 8—15	数字电压表工作特性	(173)
§ 8—16	补偿式电压表	(177)
§ 8—17	测热电阻电桥	(179)

## 第九章 时间与频率的测量

§ 9—1	概述	(185)
§ 9—2	频率或时间标准	(187)
§ 9—3	电子计数器测量频率与时间	(197)
§ 9—4	频率与周期测量中的误差分析	(201)
§ 9—5	高精度频率源的质量指标	(208)
§ 9—6	频率稳定度的时域测量	(213)
§ 9—7	短期频率稳定度的频域测试技术	(220)

## 第十章 电子示波器和信号波形分析与测量

§ 10—1	概述	(229)
§ 10—2	示波器的基本组成	(229)
§ 10—3	双迹示波器和取样示波器及存储示波器	(250)
§ 10—4	信号的频域分析与分析仪	(263)
§ 10—5	信号波形非线性失真和已调波参数的测量	(273)

## 第十一章 集中参数阻抗的测量

§ 11—1	电桥法测阻抗	(289)
§ 11—2	谐振法测阻抗	(294)
§ 11—3	$\Omega$ 表测量法	(296)
§ 11—4	矢量阻抗法	(300)
§ 11—5	数字式自动Q表	(305)

## 第十二章 线性系统的正弦波、方波和脉冲波的测量

§ 12—1	概述	(308)
--------	----	-------



§12—2	线性系统的正弦波测量	(310)
§12—3	网络分析与网络分析仪	(323)
§12—4	线性系统的方波测试与脉冲测试	(332)
§12—5	时域反射计 (TDR) 与时域自动网络分析仪 (TDANA)	(340)

### 第十三章 随机过程与其特征值的测量

§13—1	概述	(347)
§13—2	随机过程的主要特征值	(348)
§13—3	平稳随机过程和各态历经过程	(350)
§13—4	平稳随机过程主要特征的测量	(355)
§13—5	非平稳随机过程参量的测量	(362)
§13—6	噪声的测量	(364)

### 第十四章 数据域测试

§14—1	引言	(374)
§14—2	逻辑状态分析仪	(376)
§14—3	逻辑时间分析仪	(385)
§14—4	微机故障诊断仪	(388)



# 绪 论

测量是科学实验中，对客观事物取得“数量”观念的重要手段。著名科学家门捷列夫曾说过“没有测量，就没有科学”，这一句话精辟地阐明了“测量”的重要意义。

当代科学技术的迅猛发展，极大地推动了测量技术的发展，同样测量技术的发展，也有效地促进了现代科学技术的发展。目前，由于传感器技术的发展，电子测量技术几乎渗透到科学技术与国民经济的所有部门。

电子测量具有以下几个明显特点：

- ① 测量频率范围宽，可从 $10^{-4}\text{Hz}$ ~ $100\text{GHz}$ 。
- ② 量程很广。如高灵敏度数字电压表，可测 $10\text{nV}$ ~ $14\text{kV}$ 电压。
- ③ 测量精度高，测量频率精度可达 $10^{-12}$ ~ $10^{-14}$ 量级，在一切电与非电测量中，频率测量已达最高测量精度。
- ④ 可进行遥测及快速测量。在国防尖端技术中，快速测量具有重要意义。
- ⑤ 易于实现测量过程的自动化，测量仪器的智能化。大规模集成电路和微型计算机在电子测量中的应用，将使测量仪器智能化，测量系统自动化。利用电子计算机作为媒介，可将计算机软件技术引入测量领域，从而提高测量的精度、广度（电→非电）及自动化程度。

电子测量技术的发展，与科学技术（特别是电子学）发展是相辅相成、相互促进、相互发展的。电子测量技术的发展为自然科学提供了实验、分析、研究的新条件。而自然科学的发展又为电子测量技术的发展，提供了新技术、新理论、新课题。所以，一个国家测量技术的水平，也在一定程度上反映了这个国家的科技水平。

本书力争反映国内外测量技术的新成就，使内容广泛、新颖。对一些传统的测量方案也给予足够重视。本书从时域、频域和数域的角度阐述信号和系统特性及参数测量的基本方法和仪器，使读者在科学实验中能制定先进、合理的测试方案，正确选用仪器、严格处理数据，以获得最佳测试结果。为达到上述目的，本书分为五部分：

- ① 误差理论与数据处理；
- ② 测试信号源；
- ③ 信号分析；
- ④ 系统分析；
- ⑤ 数据域测试。

本课程具有较强的理论性、实践性。读者可参考“电子测量实验教程”进行有关实验，也可自行设计实验。

# 第一章 基本概念

## 第一节 研究误差的重要意义

人们在不断地认识和改造自然的过程中，不断地探索和揭示着自然界的奥秘。其基本方法有两种：①是理论分析的方法，②是实验测量的方法。测量能使我们对事物的一些特性取得数字的表征，以供人们进行数学分析和综合，从而掌握事物内在的客观规律。著名的科学家门捷列夫说过“科学始于测量”。

科学研究的实践证明，每项实验都有误差，当我们对同一物理量进行多次重复测量时，经常发现测量结果并不一样。原因在于实验中设备不完善，周围环境不理想，实验人员技术水平不高，实验方法不完善等。这些都使实验结果和真实值之间有差异。这就是说，误差存在是普遍的。因而研究误差的来源及其规律性，减小和尽可能消除误差，以得到精确的实验测量结果是非常重要的。

著名科学家伽利略，在研究物理实验的精确性上，做了大量的工作。法国数学家朗德和德国数学家、测量学家高斯，在天体运行轨道的理论研究中，都提出了用最小二乘法来处理观测结果，奠定了误差理论基础。

由于实验测量技术和误差处理方法的不断改进，对科学技术的发展和物理定律的发现起了很大推动作用。我国科学家吴有训与美国科学家康普顿，通过对X射线散射角和波长改变的精密测定，奠定了光量子的能量守恒定律。吴剑雄教授的测定，证实了杨振宁博士和李政道博士的宇称不守恒定律，推翻了宇称守恒定律。

随着实验测量技术的改进，实验中的误差可以逐渐减小，但实验工作始终不能做到没有误差。在要求极高的科学实验中，我们要尽一切努力使测量值更接近于真实值。在某些情况下，则要考虑其是否必要和合算，因为减小误差要化费大量的人力和物力。研究误差与数据处理的内容和意义是：

① 合理地、正确地处理实验数据，充分利用数据信息，以便在给定的条件下得到更接近于真实值的最佳结果。

② 合理地选取所得结果的误差，既不要将误差算得过分小，以免对生产造成危害；也不能将误差算得过分大，以免对人力、物力造成浪费。

③ 合理地选择实验仪器、条件、方法，以便在成本低，时间短的情况下得到预期结果。

## 第二节 标 准

测量，实际上是把待测之量直接或间接与一个同类已知量相比较，而拿这个已知量作为计量单位，定出被测量是该单位的若干倍或几分之几。所以在测量过程中，必须要

有标准，以便将被测量去同这个参考标准比较。这种参考标准，可以有三种类型：

### 一、真值 $A_0$ 。

真值 $A_0$ 也可叫做理论值或定义值。例如电流的计量标准是理论安培，其定义为，若在真空中有两根截面无限小的相距2米的无限长平行导体，在其上流过1安培的恒定电流时，则在两导体间产生 $10^{-7}$ 牛顿/米的相互作用力。

这样的参考标准实际上是不存在的，它只存在于纯理论之中。若要测量这样的标准，又要定义新的标准作为参考，这样就形成了“无穷循环”。所以绝对的真值是不可能知道的，但随着科学技术的向前发展，我们可以越来越逼近它。

### 二、指定值 $A$ 。

由于绝对真值是不可知的，所以国家一般设立各种尽可能不变的实物基准和标准器，指定以它的数值作为参考标准。例如频率标准就是以国家计量局的铯射束原子频率标准中，铯原子的基态超精细能级中跃迁频率的平均值作为9192631770Hz。

### 三、实际值 $A$

在实际测量中，不可能都直接与国家标准相对比。因此建立了多级计量网来进行一系列逐级对比。在每一级对比中，常以上一级的标准器的量值 $A$ 作为近似真值，我们称其为“实际值”。

## 第三节 误差与修正值

科学研究的实践证明，测量过程总存在误差。即使在同一条件下，同一人对同一物理量反复进行多次测量也会得到不同结果。这是由于在测量过程中，有无数因素在影响测量的过程，如环境、人身、设备、测试方法等。而且这些影响因素，还经常不断地变化。此外从能量观点看，待测电路必然要供给测量仪器能量，才能使测量仪器反映其面貌，这也就改变了待测电路的原有状态。而当测量的精度和分辨率不断提高时，最后必会观察到电子的无规则起伏，则在不同瞬间测到的结果也不同。

我们把某一物理量的测定值 $X$ 与其真值 $A_0$ 之差称为误差，或绝对误差 $\Delta X$ 即

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

由于真值 $A_0$ 一般无法求得，故式(1-1)只有理论上的意义，我们常常以实际值 $A$ 代替 $A_0$ ， $A$ 并不等于 $A_0$ ，但比 $X$ 更接近于 $A_0$ 。

$$\Delta X = X - A \quad (1-2)$$

与绝对误差绝对值相等，但符号刚好相反之值称为修正值，一般用 $C$ 表示

$$C = -\Delta X = A - X \quad (1-3)$$

通过检定，可以由上一级标准给出受检仪器的修正值。利用修正值便可求出该仪器的实际值

$$A = X + C$$

例如，某电流表的量程为1mA，通过检定可得出其修正值为-0.02mA。如用这只电流表测某一未知电流，其测定值（示值）为0.83mA，则被测电流的实际值为

$$A = 0.83 + (-0.02) = 0.81 \text{ (mA)}$$

修正值给出方式不一定是具体数值，也可以是一条曲线、公式或数表。在智能仪器中，修正值事先编制成有关程序，储存于仪器中，所得测量结果，已自动对误差进行修正。

## 第四节 误差的分类

误差从不同角度出發，可以有不同的分类方法。

### 一、按表示方法分

按表示方法来分，可分为绝对误差与相对误差。

为了说明测量精度的高低，一般采用相对误差形式。相对误差就其所取的相对参考值（测定值 $X$ 、实际值 $A$ ，满刻度值 $X_{m.s.}$ ），又可分为

#### （一）实际相对误差

实际相对误差，是用绝对误差 $\Delta X$ 与被测量的实际值 $A$ 的百分比值来表示的相对误差，记为：

$$\gamma_a = \frac{\Delta X}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

#### （二）标称相对误差

标称相对误差，是用绝对误差 $\Delta X$ 与仪器的测定值 $X$ 的百分比值来表示的对相误差，记为：

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-5)$$

#### （三）满度相对误差

满度相对误差又称满度误差，是用绝对误差 $\Delta X$ 与仪器的满度值 $X_m$ 来表示的相对误差，记为：

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

由于 $\gamma_m$ 是用绝对误差 $\Delta x$ 与一个常数 $X_m$ 之比来表示的，故实际上给出的是绝对误差的大小。电工仪表正是按 $\gamma_m$ 之值来进行分级的，例如1.5级的电表，就表明其 $\gamma_m \leq 1.5\%$ ，并在其面板上标以1.5的符号。如果该电表同时有几个量级，则所有量程均有 $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$ 。显然，各量程的绝对误差不一样。一般对准确度级别在0.2级以下的磁电式电表，当表头偏转到不同位置时，因磁场分布、机械摩擦、游丝扭矩等的不均匀性皆可忽略不计，故在一个量程内可认为 $\Delta X$ 是常数。对于0.2级以上的电表，上述各因素的不均匀性便较为突出， $\Delta X$ 将不是常数，可参见图1-1。

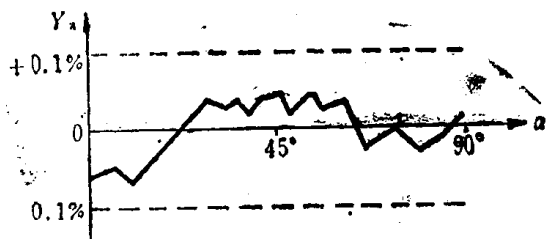


图 1-1 0.1级电流表的误差

我国电工仪表共分七级：0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5及5.0级。

比较式(1-5)及式(1-6)可以看出：为了减少测量中的示值误差，在选择量程时应使指针尽可能接近于满度值。一般应在不小于满度值2/3以上的区域。

**例 1** 检定2级量程100V的电压表，在40V刻度上标准电压表读数为39V，试问此表是否合格？

$$A = 39 \text{ (V)} \quad X = 40 \text{ (V)} \quad X_n = 100 \text{ (V)}$$

$$\Delta X = X - A = 40 - 39 = 1 \text{ (V)}$$

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_n} \times 100\% = 1\% < 2\%$$

则此表在40V点上是合格的。

#### (四) 分贝误差

在无线电和声学测量中，常用分贝(dB)来表示误差。设两个电压的比值为

$$\alpha = V_2 / V_1$$

则分贝的表达式为

$$A = 20 \lg \alpha \text{ (dB)}$$

若 $\alpha$ 产生了误差 $\Delta\alpha$ ，则相应地也产生了一个误差 $\Delta A$

$$A + \Delta A = 20 \lg(\alpha + \Delta\alpha) \text{ (dB)}$$

$$\Delta A = 20 \lg \left( 1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \text{ (dB)} \quad (1-7)$$

$$\lg \left( 1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) = 0.4343 \ln \left( 1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)$$

$$\ln \left( 1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \approx \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \quad \left( \text{当 } \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \ll 1 \text{ 时} \right)$$

$$\Delta A \approx 8.69 \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \text{ (dB)} \quad (1-8)$$

**例 2** 某一电流表测出电流值为88 $\mu$ A，标准表测出为90 $\mu$ A，试求其误差。

$$\text{绝对误差 } \Delta X = 88 - 90 = -2 \text{ (}\mu\text{A)}$$

$$\text{实际相对误差 } \gamma_A = \frac{\Delta X}{A} = \frac{-2}{90} \times 100\% = -2.2\%$$

$$\text{分贝误差 } \Delta A \approx 8.69 \times (-2.2\%) = -0.19 \text{ (dB)}$$

## 二、按来源分

若按照误差来源，误差可以分为：

### (一) 设备误差

由于仪器的设计、制造和装配校正等方面引起的测量误差。如仪器设计时简化机构所产生的设计误差，刻尺的刻度误差，度盘的装配偏心，以及仪器调整校正后的残留误差。又如提供标准量值的标准器（标准电池，标准电阻等）产生的误差。

## （二）条件误差

在测量过程中，测量条件的变动引起的测量误差。如工作环境、温度、气压、电磁场、机械震动、声音、光照、放射性等的影响产生的误差。

根据四机部标准SJ 944-75《电子测量仪器环境要求及其试验方法》的规定，所有电子测量仪器按环境条件分为三组，每组有相应的“额定使用范围”。电子测量仪器必须在规定的使用范围内工作，才能保证各项技术指标的准确。例如温度的使用范围，第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ组仪器分别规定为 $+10\sim+35^{\circ}\text{C}$ ， $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$ ， $-40\sim+55^{\circ}\text{C}$ 。

## （三）人身误差

由测量者造成的误差。由于测量者在生理上的最小分辨力，感觉器官的生理变化引起的估读误差、瞄准误差等。为了减小人身误差，目前测量仪器采用数字显示，或电子计算机打印等客观读数方法。

## （四）方法误差

由于测量者使用的测量方法不妥当，根据的测量理论不严格，或对某些测量理论尚未完全掌握，对经典的测量公式不适当简化，甚至对测量定义不明确所产生的误差。

如并联谐振时，谐振频率的测量公式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

若考虑回路中的电感 $L$ 及电容 $C$ 之串联损耗电阻 $\gamma_L$ 及 $\gamma_C$ 时，谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi LC} \sqrt{\frac{1 - \gamma_L^2 C/L}{1 - \gamma_C^2 C/L}}$$

于是便产生了理论误差。

## 三、按基本性质和特点分

误差除按上述分类方法外，还可按照误差的基本性质和特点，把误差分成三大类：系统误差，随机误差和粗差。粗差是由于测量过程中操作错误而造成的，经常表现为巨大的误差。粗差的测量结果是完全错误的，应弃而不用。至于系统误差和随机误差，因其性质不同，处理方法也不同。

### （一）系统误差

测量过程中所产生的误差，若其值恒定不变，或按某一函数规律变化，就称这种误差为系统误差。恒定不变的误差称为恒差。按某一规律变化的误差为系统变差，或变值系统误差，变值系差又可分为下面几种类型。

#### 1. 累进性系差

累进性系差是指在整个测量过程中，误差的数值在逐渐增加，或逐渐减小的系统误差。例如用电位差计测量电压，测量工作进行一段较长时间后，蓄电池电压因放电而减

小，工作电流也减小，从而产生误差。

## 2. 周期性系差

周期性系差是指在测量过程中误差的数值发生周期性变化的系统误差。例如在24小时内重复测量时，由于温度变化而产生的系统误差就是周期性系差。

## 3. 按复杂规律变化的系差

无法用简单的数学解析式表示的系统误差为变化规律复杂的系统误差。图1-1所示0.1级电流表的误差曲线即属于按复杂规律变化的误差。

系统误差表示了一个测量结果偏离真值或实际值的程度，有时又称为系统偏差或简称偏移。在误差理论中还经常用正确度一词来表征系统误差的大小。二者在数学上具有倒数关系：系统误差越小，正确度越高，系统误差越大，正确度越低。

## (二) 随机误差

一次测量某一量时，其误差可大可小，可正可负，没有一定规律。但如多次测量后，其平均值趋于零，误差整体服从统计规律，这种误差则称为随机误差。

由于随机误差服从统计规律，故研究随机误差，必须进行多次测量。为了使测量结果仅反映随机误差的影响，应设法消除系统误差或将其影响减到最小。为了使各次测量的随机误差服从同一分布规律，测量过程应保持各影响量以及测量仪器、方法、人员不变，即保持等精度测量的条件。又由于随机误差一般很小，故测量的灵敏度应足够高。处理随机误差的方法主要是概率统计法。

在测量过程中，如果数值小的随机误差出现的机会多，而数值大的随机误差出现的可能性甚小，则测量结果是相当精密的。测量的精密度是随机误差离散程度的表征。

如果一个测量结果的随机误差和系统误差均很小，则表明测量既精密又正确。

## (三) 粗差

测定值明显地偏离实际值时所对应的误差称为粗差。粗差主要是由于测量过程中操作错误而造成的，如测错、读错、记错等都会带来粗差。此外，随机因素也会产生粗差，这是一种出现概率极小而绝对值又很大的随机误差。例如，测量过程中供电电源的瞬时跳动，仪器中某个元器件的突然跳火，外界偶然的电磁干扰等，都可能产生粗差。

在测量和数据处理过程中，当发现某测量结果所对应的误差特别大时，应认真判断该误差是否属于粗差。通常，经过理论分析，增加测量次数，或重新进行测量，改变测量条件或人员，利用统计学方法等，是可以在一定程度上作出判断的。

## (四) 系统误差和随机误差的辩证关系

在测量过程中，系统误差，随机误差总是伴随存在，并同时影响测量结果的，它们之间并不存在严格的界限。随着人们对误差来源、变化规律认识的加深，原来认为是随机误差的误差就有可能变为系统误差。相反，也有可能把应确定为随机误差的误差，错化为系统误差。也有可能把大数值的随机误差、系统误差当作粗差处理。所以在测量过程中，要加以鉴别。当发现系统误差远大于随机误差的影响时，应按系统误差处理。如测晶体振荡器的日稳定度时，误差主要由老化引起，此时噪声等随机因素的影响可忽略不计。但若测秒、毫秒级稳定度时，误差主要由各种噪声引起，故应视其为随



机误差。

对于成批生产的器件，只能给出系统误差可能的取值范围，因此把系统误差的范围或系统误差的上限，称为系统不确定度。

不确定度一词，也可用来表征随机误差的可能范围，此范围称为随机不确定度。当同时存在随机误差和系统误差时，则用测量不确定度来表征总的误差范围。

## 第五节 精密度、正确度和准确度

在分析测量误差时，精密度、正确度和准确度经常容易混淆。

①精密度：表示测量结果中随机误差大小的程度。精密度通常用随机不确定度表示，如  $3\sigma$ 。

②正确度：表示测量结果中，系统误差大小的程度，可用系统不确定度表示。

③准确度：测量结果中，系统误差与随机误差的综合。表示测量结果与真值的一致程度，可用测量不确定度表示。

### 习 题

1. 检定2.5级量程为100V的电压表，在50V点刻度上标准电压表读数为48V，试问此表是否合格？

2. 0.5级5A的安培表，在3A和4A两点上允许的绝对误差为多少？

3. 检定某一信号源的功率输出，信号源刻度盘读数为 $90\mu\text{W}$ 。其允许误差为 $\pm 30\%$ ，检定时用标准功率计去测量信号源的输出功率，正好为 $75\mu\text{W}$ 。问此信号源是否合格？

4. 用图1-2中(a)、(b)两种测量电路，测量电阻 $R_x$ 。设电流表内阻为 $R_A$ ，电压表内阻为 $R_V$ 。求这两种测量电路中， $R_x$ 的绝对和相对误差是多少？并对两种测量电路作出评价。

5. WQ-1型精密万用电桥在 $f = 1\text{kHz}$ 时，测 $0.1\text{pF} \sim 110\text{pF}$ 电容，其误差为 $\pm 1.0\%$ （读数值） $\pm$ 满量程的 $0.01\%$ ，求该电桥测 $1\text{pF}$ ， $10\text{pF}$ ， $100\text{pF}$ 时的绝对误差和相对误差，并对误差数值进行讨论。

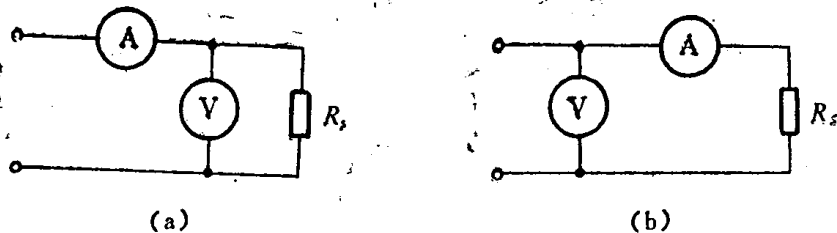


图 1-2

### 参 考 资 料

[1] 肖明耀：《误差理论与应用》，计量出版社，1985。

[2] 张世箕：《测量误差及数据处理》，科学出版社，1979。

## 第二章 随机误差

### 第一节 随机误差的性质和特点

在进行测量时，由于各种偶然因素的影响，使得我们在同样条件下，以同样的仔细程度，用同一方法对同一未知参量重复地进行多次测量，每次所得数据，总会有差异。这一事实说明测量结果中存在随机误差。对一次测量来说，随机误差的大小和符号都是不确定的，即没有规律性。但在进行多次测量后，随机误差还是呈现出某些规律性。例如：对某一电阻重复进行了15次测量，每次所得数据见表2.1第二列。

表 2.1

$N_0$	$R_1 (\Omega)$	$V_1$ $=R_1 - \bar{R}$	$N_0$	$R_1 (\Omega)$	$V_1$ $=R_1 - \bar{R}$	$N_0$	$R_1 (\Omega)$	$V_1$ $=R_1 - \bar{R}$
1	85.30	+0.09	6	85.24	+0.03	11	85.19	-0.02
2	85.71	+0.50	7	85.36	+0.15	12	85.35	+0.14
3	84.70	-0.51	8	84.86	-0.35	13	85.21	0.0
4	84.94	-0.27	9	85.21	0.0	14	85.16	-0.05
5	85.63	+0.42	10	84.97	-0.24	15	85.32	+0.11

测量值的算术平均值  $\bar{R} = \frac{\sum R_1}{15} = 85.21 (\Omega)$ 。

由  $R_1$  和  $\bar{R}$  求出残差  $V_1$  (表中第3列)。

由于电阻的真值  $R$  不知道，随机误差 ( $= R_1 - \bar{R}$ ) 是无法求出的。但当多次测量后，残差的性质就反映了随机误差的性质。

从上表中，可以看出以下几点：

① 正误差出现了7次，负误差出现了6次，两者基本相等，即正负随机误差出现的概率基本相等。随机误差具有对称性。

② 误差的绝对值介于  $[0, 0.1]$  的有6个，介于  $[0.1, 0.2]$  的有3个，介于  $[0.2, 0.3]$  的有2个，介于  $[0.3, 0.4]$  的有1个，介于  $[0.4, 0.5]$  的有2个，大于0.5的有1个。

由此可见，绝对值小的随机误差出现的概率大，而绝对值大的随机误差出现的概率小。

③ 正误差之和 = 1.44，而负误差之和 = -1.44。即当测量次数无限增大时，正负随机误差可以相互抵消。也就是当多次测量后，随机误差有相互抵消的可能，具有抵偿性。