

电子电路测量



江苏科学技术出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了测量电子电路常用参数和性能的基本原理,并对常用的典型电子仪器的构成原理作了仔细分析。

全书共分十六章,包括电子测量概论、信号源、电流测量、电压测量、功率测量、电路基本参数测量、电子示波器、频率测量、频率特性测量、调制参数测量、频谱分析与非线性失真测量、数字式测量仪器、半导体分立器件测试、集成电路测试、场强测量和微波测量。

本书可作高等院校电子测量课程的参考书,也可供从事电子技术的科技人员参考。

电 子 电 路 测 量

周光熊 主编

出版: 江苏科学技术出版社

发行: 江苏省新华书店

印刷: 淮阴新华印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 23.25 字数 560,000

1983 年 11 月第 1 版 1983 年 11 月第 1 次印刷

印数 1-7,100 册

书号 15196·116 定价 2.80 元

特约编辑 王谨之

前 言

随着科学技术的迅速发展，电子技术已经渗入国民经济的许多领域。而电子技术应用的日益广泛，又必然使电子测量技术的使用范围相应扩大。

当前，在大专院校的课程设置中，电子测量课程已不光是电子仪器制造和通信专业的专业课，而且也是应用电子类、技术物理类等有关专业的必修课或选修课。对于这些不同性质的专业，就其课程的内容和要求而言，是不尽相同的。多年来，很多同志希望有一本既着重阐述基本理论又能适应普遍需要的电子测量技术书籍，以供教学和从事测量工作人员之参考。为此，我们把为苏州大学物理系所开电子电路测量课的讲义，作了多次增删和改编，写成此书，以期实现上述愿望。

本书在内容安排上：针对电子电路常用主要参数，以讲解其基本测量原理为主，以分析常用的典型仪器的构成原理为辅。使读者读完全书后，能够掌握电子测量的基本技能：测量之前，根据需要选用仪器、正确设计完成测量项目的具体步骤；测量时，取得必要的数据；测量后，能分析数据、判断误差。

本书由周光熊主编。参加编写的有（以姓氏笔划为序）许民益、沈一诚、陈文虎和郭保清等同志。

本书承朱鸿鹄教授和王谨之同志审稿，提出不少有益意见；并由王谨之同志作了整理和修改，付出了辛勤的劳动。现特表示感谢。

在编写过程中，曾参考了国营前锋无线电仪器厂、扬中电子仪器厂、南京电讯仪器厂等单位的产品资料，承吴其中等同志热情帮助，徐志鹏等同志协助描绘插图，在此并致谢意。

由于水平所限，书中如有欠妥或错漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

一九八二年八月于苏州

目 录

第一章 电子测量概论	1	二、 锁相环的主要部件	52
§ 1-1 概述	1	三、 PO-12型频率合成器简介	56
一、 测量的发展	1	第三章 电流的测量	59
二、 测量与计量的基本概念	2	§ 3-1 概述	59
§ 1-2 测量方法的分类	2	§ 3-2 热电式电流表及其使用	60
§ 1-3 测量误差的分类	3	一、 热电式电流表	60
§ 1-4 误差的一般表示方法	4	二、 提高灵敏度的方法	61
一、 绝对误差	4	三、 减少误差的方法	63
二、 相对误差	5	四、 量程的扩大	64
§ 1-5 误差的基本性质	6	§ 3-3 数字式电流表的基本原理	65
一、 系统误差	6	第四章 电压的测量	67
二、 随机误差	9	§ 4-1 概述	67
§ 1-6 测量结果的处理	18	一、 电压的主要特征	67
一、 有效数字的处理	18	二、 交流电压的量值表示	68
二、 测量结果的数据处理	20	三、 电压测量原理概述	69
三、 测量结果的图形处理	21	§ 4-2 采用变换原理测量电压	71
第二章 信号源	24	一、 检波法及其仪器	71
§ 2-1 概述	24	二、 外差法及其仪器	80
§ 2-2 信号源的一般技术指标及其要求	24	三、 热偶法及其仪器	82
§ 2-3 低频信号发生器	26	四、 热电阻法及其仪器	84
一、 主要指标	26	§ 4-3 采用比较原理测量电压	87
二、 信号产生的基本原理	26	一、 电位差计原理	87
三、 XD-1型低频信号发生器简介	35	二、 电位差计式数字电压表	87
§ 2-4 高频信号发生器	37	§ 4-4 采用取样原理测量电压	89
一、 主要指标	37	一、 取样技术的基本原理	90
二、 信号产生的基本原理	37	二、 取样电压表实例	93
三、 XFG-7型高频信号发生器简介	43	第五章 功率的测量	95
§ 2-5 脉冲信号发生器	45	§ 5-1 概述	95
一、 主要指标	45	§ 5-2 直接测量法	95
二、 XC-15型脉冲信号发生器的基本工作原理	46	一、 基本原理	96
§ 2-6 合成信号发生器	48	二、 仪器实例	96
一、 频率合成的基本原理	48	§ 5-3 量热计测量法	97
		一、 基本原理	97

二、 仪器实例.....99	二、 示波器的主要工作特性154
§ 5-4 测热电阻测量法.....100	§ 7-3 主机部分.....155
一、 基本原理100	一、 示波管155
二、 电桥电路101	二、 低压和高压电源简介160
三、 误差来源103	三、 校准信号161
§ 5-5 薄膜热电转换功率计.....104	§ 7-4 垂直系统.....164
一、 薄膜热电转换元件.....105	一、 概述164
二、 功率计的基本原理.....106	二、 输入电路164
三、 功率计的误差来源.....106	三、 Y轴前置放大器166
§ 5-6 功率测量中的阻抗匹配.....107	四、 延迟级167
一、 共轭匹配107	五、 Y轴后置放大器170
二、 负载匹配109	六、 电子开关171
三、 失配误差的不确定度109	§ 7-5 水平系统.....173
第六章 电路基本参数的测量111	一、 概述173
§ 6-1 概述.....111	二、 时基发生器174
§ 6-2 标准元件简介.....111	三、 触发电路181
一、 标准电阻111	四、 同步184
二、 标准电容112	五、 X轴放大器185
三、 标准电感112	§ 7-6 示波器的应用.....186
§ 6-3 伏-安计法113	一、 概述186
一、 电阻的测量113	二、 电压的测量186
二、 电容的测量114	三、 时间的测量187
三、 电感的测量114	四、 相位差的测量188
四、 互感的测量114	第八章 频率的测量190
§ 6-4 电桥法.....115	§ 8-1 概述.....190
一、 直流电桥115	§ 8-2 谐振法.....192
二、 低频电桥123	一、 基本原理192
三、 高频电桥133	二、 仪器实例198
§ 6-5 谐振法.....137	§ 8-3 电桥法.....198
一、 基本概念137	§ 8-4 示波器法.....199
二、 Q表的基本原理139	一、 李沙育图形法199
三、 应用举例142	二、 亮度调制法202
第七章 电子示波器151	§ 8-5 拍频法.....202
§ 7-1 概述.....151	§ 8-6 差频法.....204
一、 电子示波器的发展和功用151	一、 差频法原理204
二、 电子示波器的分类.....151	二、 内插法206
§ 7-2 电子示波器的组成原理和主要	三、 双重差拍法207
工作特性152	四、 仪器实例208
一、 电子示波器的组成原理152	§ 8-7 计数法.....209

一、	电容充放电计数测频法	209
二、	电子计数测频法	210
§ 8-8	频率标准	212
一、	概述	212
二、	石英晶体振荡器	213
三、	原子频率标准	215
第九章	扫频测量技术和扫频仪	219
§ 9-1	概述	219
§ 9-2	扫频测量的基本原理	220
一、	幅度-频率特性的测试	220
二、	相位-频率特性的测试	221
§ 9-3	扫频信号发生器概述	221
一、	基本要求	221
二、	基本原理	222
§ 9-4	扫频振荡器的扫频原理	222
一、	磁调制扫频振荡器	222
二、	电抗管扫频振荡器	224
三、	变容二极管扫频振荡器	225
四、	其他扫频振荡器简介	225
§ 9-5	频段展宽和频率标记	226
一、	频段展宽的方法	226
二、	频率标记	226
§ 9-6	扫频仪的基本原理	227
一、	基本组成和工作特性	227
二、	基本原理	228
第十章	调制参数的测量	230
§ 10-1	调幅系数的测量	230
一、	已调幅波的基本性质	230
二、	示波器法	232
三、	双重检波法	232
§ 10-2	频偏的测量	233
一、	已调频波的基本性质	233
二、	频偏测量原理	235
§ 10-3	调制系数测量仪实例	235
第十一章	频谱分析和非线性失真的测量	237
§ 11-1	概述	237
§ 11-2	频谱分析法	237

一、	图解法	237
二、	分离法	239
三、	外差法	239
四、	频谱分析仪实例	242
§ 11-3	非线性失真的测量	242
一、	测量原理	242
二、	失真仪举例	243
第十二章	数字式测量仪器	244
§ 12-1	概述	244
一、	模拟量转换成数字量	244
二、	数字式测量仪器的基本组成	245
三、	数字式测量仪器的特点	245
§ 12-2	通用电子计数器的基本原理	246
一、	电子计数器的分类	246
二、	通用计数器的基本原理	247
三、	通用计数器的基本组成部分	247
四、	通用计数器的基本逻辑关系	248
五、	通用计数器的测试功能	249
§ 12-3	模/数转换器	253
一、	模/数转换器的分类	253
二、	积分型模/数转换器	254
三、	比较型模/数转换器	261
§ 12-4	数字式测量仪器	271
一、	典型通用计数器实例	271
二、	数字电压表实例	279
第十三章	半导体分立器件的测试	283
§ 13-1	晶体二极管基本参数的测试	283
一、	正向电流	283
二、	正向压降	283
三、	反向漏电流	284
四、	反向击穿电压	284
§ 13-2	稳压二极管的测试	285
§ 13-3	变容二极管的测试	285
§ 13-4	晶体三极管基本参数的测试	286
一、	直流参数	287
二、	交流小信号参数	289
三、	频率特性参数	290
四、	综合参数	291

§ 13-5	单结晶体管的测试	292
一、	概述	292
二、	主要参数	293
§ 13-6	场效应管的测试	294
一、	概述	294
二、	主要参数	294
§ 13-7	JT-1 型晶体管特性图示仪简介	295
一、	仪器概要	295
二、	晶体管的测试	298
第十四章 集成电路的测试		302
§ 14-1	概述	302
一、	集成电路的特点	302
二、	集成电路的分类	302
三、	集成电路的测试	303
§ 14-2	数字集成电路的测试	304
一、	基本逻辑电路简介	304
二、	TTL门电路的测试	308
三、	计数器直流参数的测试	314
四、	集成电路逻辑功能的测试	317
§ 14-3	线性集成电路的测试	320
一、	集成运算放大器的基本性能和主要参数	321
二、	集成运算放大器主要参数的测试方法	324
三、	测试实例	328

第十五章 场强的测量 333

§ 15-1	场强的测量	333
一、	场强测量原理	333
二、	用鞭状天线测量场强	334
三、	用环状天线测量场强	336
四、	用半波天线测量场强	337
§ 15-2	干扰的测量	338
一、	传导干扰的测量	339
二、	辐射干扰的测量	339
§ 15-3	干扰场强计实例	340
一、	RR-2 型干扰场强计的基本原理	340
二、	电路特点	341

第十六章 微波的测量 345

§ 16-1	概述	345
§ 16-2	基本参数的测量	346
一、	功率的测量	346
二、	频率的测量	347
三、	驻波的测量	349
四、	反射计简介	351
§ 16-3	其他参数的测量	352
一、	网络参数的测量	352
二、	衰减量的测量	355

附录

附录 I	误差函数表	358
附录 II	t 分布表	360
参考资料		361

第一章 电子测量概论

§1-1 概 述

一、测量的发展

在科学史上，测量技术和测量设备的发展是比较早的。在本世纪三十年代以前，为了进行测量，科学家研制出来的仪器都比较简单。由于仪器简单，操作就必然复杂。为获得预期的测试结果，操作人员就应当具有较高的操作技能，因此只有少数经过专门训练的人员或科学家自己才会使用。近五十年来，尤其是近三十年来，电子技术迅猛发展并取得了惊人的成果，使电子测量技术和电子仪器成为一门应用广泛的独立学科，并在科技领域里发挥着巨大的作用。

科学技术的发展，促进了测量技术的提高和测量设备的革新。如时间这样一个最基本的物理量的测定，在漫长的年代里，经历了两次大变革。最早人们用滴漏等极其粗略的方法来测定时间。后来，伽利略对摆的观察给人以启示，于是用周期性谐振系统取代了古老的滴漏方法。随着谐振系统的改进和测量技术的进步，时间标准的准确性也相应提高了，但长期来在基本原理上并没有改变。由于电子科学、原子科学和测量技术的迅速兴起、发展，目前人们使用铯原子谐振和氢原子谐振来测定时间，其准确度相当于三万年内误差不大于1秒钟。可以说，现在还没有其他物理量能这样精确地进行测量。

自六十年代后期起，由于计算技术和半导体技术在测量仪器中的广泛应用，国外开始出现一些采用电子计算机控制的高效率、多功能、高速度和高精度的自动测试系统，为测量仪器和测量技术开创了一个新局面。近几年来，微处理器直接应用于电子测量仪器中，又使仪器进入了一个新阶段。

科学技术和测量技术的发展是一个相互促进的连锁反应。测量技术、测量设备的发展反过来又推动科学技术、工农业生产的进一步发展。

在科学技术发展方面，每当一种新理论的诞生和新的定理、推论、假想的出现，往往都会经过许多争论，有时还十分激烈。只有通过试验和测定获得验证之后，争论才宣告结束。随之而来就是出现一次科学技术的大飞跃。

在生产技术方面，测量技术同样显示了重要性。从电子工业系统对整机厂的电子产品生产统计资料中，我们可以看到：在生产流程中使用电子测量仪器来测试产品所占的工时，要占总工时的40%以上。又如，大规模和超大规模集成电路的生产，每个单片上集成度达几千支到几万支晶体管。以一个单与非门电路为例，就需要测定十个参数（输入短路电路、输入交叉漏电流、开门电位、关门电路……）。如果用传统的电子测量仪器和测量方法来测试，最快也要5~10分钟才能测完一个单与非门。以集成度6000支晶体管的大规模集成电路说，以

测一单与非门用 5 分钟计, 则测一块就要用 3 万分钟。即: 如果要求在一天内测完, 则应安排 63 个熟练测试工。如果某厂生产这样的集成电路块, 日产量为 3 万块 (在自动化的工厂里, 这产量还不算大), 那末该厂就要安排 189 万个熟练工同时测量才能在当天测定完毕, 这里测试结果的分析和筛选时间还没有算在内。这就迫使科技人员研制具有高速度、高精度、多功能、节省劳力的自动化测试系统。目前, 这种测试系统是由电子计算机控制的, 否则这样的工厂就无法投产。

当前国外的测量技术正进行着巨大的变革, 传统仪器向高精度、高速、宽量程和小型化 (采用集成电路) 方面发展, 大量采用计算机、微处理机与接口技术制成新一代智能仪器。现阶段国内也有相应的变革, 但因经济能力和工业发展的现状等因素的限制, 变革速度较慢。

应当指出, 单纯地或过分地突出自动测试系统的优点, 而不谈其缺点或存在的问题, 是不全面的。自动测试系统价格高昂, 需要技术水平相当高的技术人员才能使用与维修。正如数字式仪器不可能完全取代模拟式仪器一样; 自动测试系统也不可能完全取代传统的电子测量技术和仪器。特别是在国内现阶段中, 除复杂和大量重复的测量场合以外, 绝大部分场合还是使用经典线路组成的电子仪器和传统的测量技术。因此, 本书中不编入自动测试系统的内容。

二、测量与计量的基本概念

测量是人们通过专用的测试设备, 使用实验方法, 对客观事物获得认识的过程, 通过比较取得所需的数据来加深理解。在电子测量中, 测量的结果可能是一个或一组数据, 也可能是一条或一组曲线与图形。测量结果必须同时表明其单位, 否则这个结果将没意义。正如用尺才能量出单位为尺的长度一样, 测量实质上是一个比较的过程, 将比较的结果显示出来。

计量与测量, 是两个关系密切而概念与含意不同的学科。广义地讲, 计量学是一门专门研究和实施如何保证量值的统一和准确所必须的方法、技术、专用设备及政策的科学。计量学还具有一定的权威性和法律性。否则测量技术及仪器就没有依据, 无法统一。

§ 1-2 测量方法的分类

测量方法很多, 分类方式也各有不同。从测量的方法来说, 常分为: 直接测量、间接测量和组合测量。

直接测量, 是指用预先按标准量定度 (或校正) 的测量仪器对被测的量 (常简称被测量) 直接进行测量。要注意, 直接测量是指方法, 它可包括直接读数 (如电流表、电压表指示被测量值, 既是直接测量法, 又是直接读数), 也可以使用比较式仪器 (如用电桥测量电阻值, 它是直接测量, 但由比较法测知阻值的)。

间接测量, 是指对几个与被测的量有确切函数关系的物理量进行直接测量, 然后通过代表该函数关系的公式、曲线再推出被测量值。最显而易见的例子是已知 R 的阻值, 再测出 R 的端电压 U , 然后按欧姆定律 $I = U/R$ 求出电流 I , 这种方法就是间接测量。

组合测量, 是指上述直接测量法与间接测量法的组合, 然后通过公式、函数来求得所需的被测量值。

如果根据测量状态来分, 常可分为静态测量与动态测量。

§ 1-3 测量误差的分类

在测量过程中，使用任何类型的测量仪器，即使使用基准或标准，测量的结果总不可能完全准确地等于被测量值的真实值。这里，真实值是指被测量值的真实数值，简称真值。

随着测量技术的发展，为获得准确的测量结果，对误差的研究越来越细致。表示误差的方法与形式也越来越多。为建立一个系统的概念，先了解误差的分类是有益的。

误差的一般表示方法如图 1-1 所示。

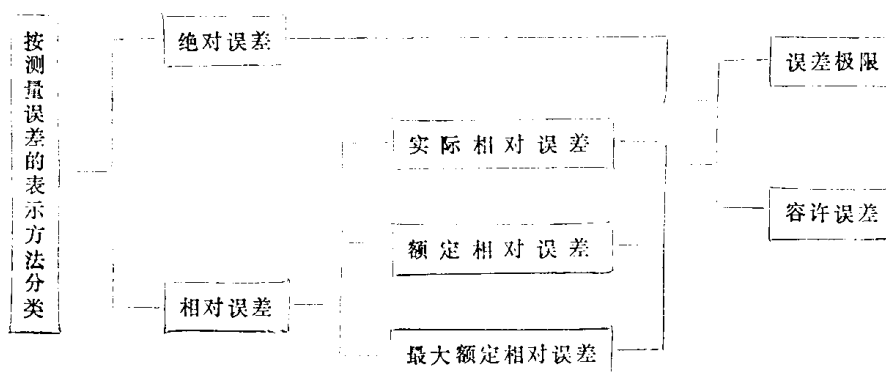


图 1-1 误差的一般表示方法

按测量误差的性质来分，可用图 1-2 来表示。

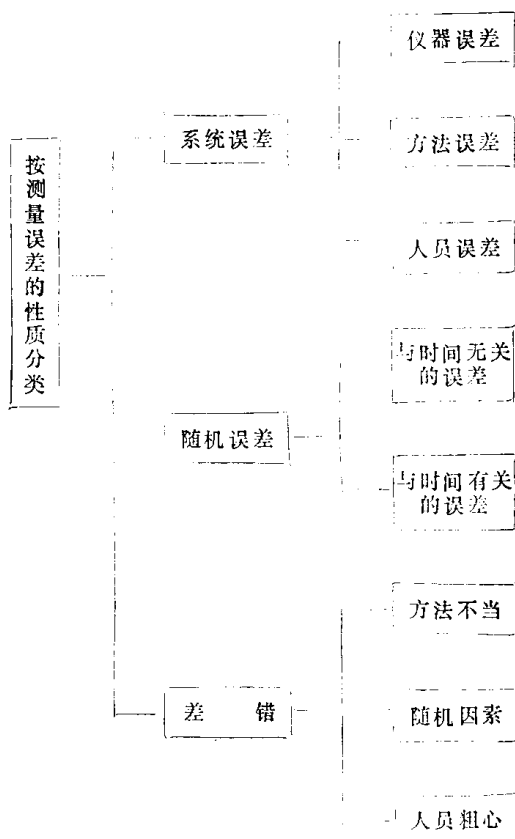


图 1-2 按性质区分的误差分类表

按测量误差的来源来分, 可用图 1-3 来表示。

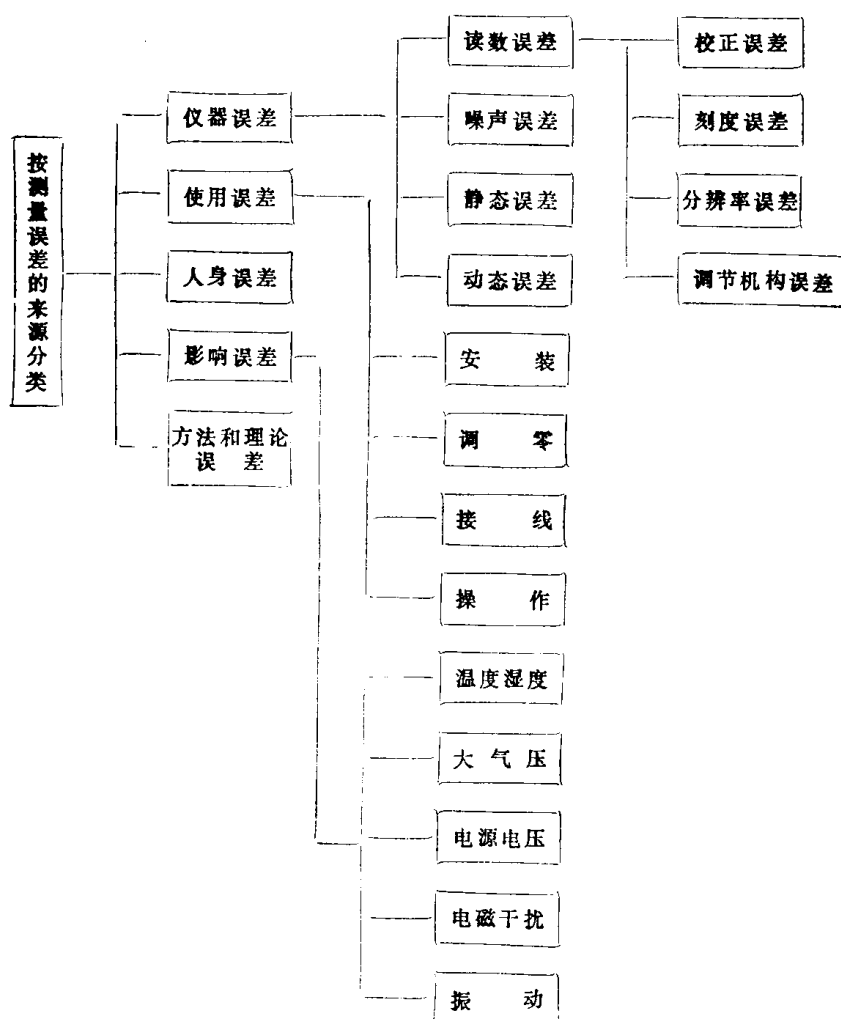


图 1-3 按来源区分的误差分类表

§ 1-4 误差的一般表示方法

测量误差不论其性质与来源, 总要用一定的形式表示出来。一般的表示方法有两种, 绝对误差和相对误差。下面分别加以讨论。

一、绝对误差

设 A_0 为待测物理量的真实值, 亦有用 μ 来表示的, x 为该物理量的测得值, 则测量的绝对误差为:

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

然而, 真实值 A_0 是无法取得的。但可选用等级标准高一级的仪器来测出其近似值 A 代替 A_0 。 A 中也存在误差, 只不过小一些, 得

$$\Delta x' = x - A \quad (1-2)$$

这里 $\Delta x'$ 称为示值误差。

由于式(1-1)和(1-2)是表示误差的绝对值大小与符号,故称为绝对误差。与绝对误差值大小相等,符号相反的量,称为修正值,用 C 表示。

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

例 用频率计测1MHz的标准频率,所得测得值为1.001MHz,则绝对误差为

$$\Delta x = 1.001 - 1 = 0.001\text{MHz} = 1\text{kHz}$$

那么,修正值为

$$c = -\Delta x = -1\text{kHz}$$

绝对误差值的大小表示测得值与示值(近似的真实值)两者间的差距。两者差距愈大,则误差的绝对值愈大。绝对误差的正负号是表示测得值比示值大还是小。因为绝对误差仅是一个差值,没有表示出与被测得值本身大小的关系,所以用绝对误差来表征测量的精确程度,常感不足。

二、相对误差

绝对误差与示值的比值,称为仪器的相对误差。表示相对误差有三种方式:

1. 实际相对误差

$$r_A = \frac{\Delta x}{A} \quad (1-4)$$

或

$$r_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\%$$

例 测得的电压数值是101V,而示值(近似的真实值)为100V,则

$$r_A = \frac{101 - 100}{100} \times 100\% = 1\%$$

2. 示值相对误差

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

例 测得的电阻数值是1000Ω,而示值为1010Ω,则

$$r_x = \frac{1000 - 1010}{1000} \times 100\% = -1\%$$

3. 最大相对误差

$$r_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

其中 x_m 是测量仪器的满度值。

在测量仪表中,为了表示仪表的质量,并用以估计测量结果的可靠程度,直接引入一个仪表精度的等级概念。仪表的精度等级是以一系列数字表示的。这个数字的大小表示仪表在规定使用条件下,最大相对误差的极限值。

电工仪表精度的等级分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5和5.0七级。0.1~0.5级范围的仪表属于标准级,通常用它来校验比它低一级的仪表。

例如，某一电流表的精度为2.5级，量程为100mA。在进行检定中，如指针指在50mA时，标准表的读数为52mA，则测量的绝对误差值为

$$\Delta x = 50\text{mA} - 52\text{mA} = -2\text{mA}$$

最大相对误差为

$$r_m = \frac{-2}{100} \times 100\% = -2\%$$

因此，该电流表在50mA刻度上是合格的。

从以上的分析可以看出，相对误差能更确切地反映出测量的精确程度，因为相对误差的大小除和绝对误差的大小有关外，还和待测定值的数值大小有关。

在测量工作中往往会遇到容许误差。例如在仪器说明书上所标明的常是容许误差，它是用相对误差加上绝对误差来表示的。

例如，PJD-5型电子计数式频率计的测量精度为：当环境温度在15℃时，开启电源30分钟后的容许误差为 $\pm 2 \times 10^{-5} \pm 1\text{Hz}$ 。前者为相对误差，后者为绝对误差。

§ 1-5 误差的基本性质

按照误差的基本性质和特点，可以把误差分为三类：系统误差、随机误差和差错。

差错是由于测量过程中操作错误而造成的。它是指那些在一定条件下测量结果显著地偏离其实际值时所对应的误差。通常，这种误差比较大，故又称为粗大误差，简称粗差；也有称为巨差的。含有差错的测量结果是不能用的，应予剔除。差错，正因为有显著偏离的特点，很容易找出来，所以没有作性质上分析的必要。关于系统误差和随机误差，它们在性质上是完全不同的两类误差，故处理方法也各不相同。下面对这两类误差的来源及其基本处理方法分别地加以讨论。

必须强调指出，系统误差和随机误差通常总是同时存在的。这给分析和处理带来一定困难。

一、系统误差

如果测量结果中所包含的误差是恒定不变的，或者是遵循一定规律变化的，这种误差称为系统误差，简称系差。

在一定条件下，如果误差数值保持不变的，称为恒定系统误差，简称恒差。如一只标准电感经多次测定均为10mH，经检定其实际值为10.03mH，则其恒定系统误差为 $\Delta L = 10 - 10.03 = -0.03\text{mH}$ 。

在一定条件下，如果误差数值按某一确切规律变化的，称为变值系统误差，简称变差。变值系统误差按其变化规律又可分为累进性的、周期性的和按复杂规律变化的变差。

1. 系统误差的来源

系统误差的来源大致上有下列五种：

A. 仪器误差 这是由于测量时所用的测量手段（即仪器、仪表、量具等）不完善所引起的误差。如进一步追查，可能来自仪器校准后残存的误差、刻度不完善（例如，电表中

游丝不可能每一条的转动特性完全一样，又不可能对不同游丝用不同刻度，只能采用统一刻度，就要产生刻度误差）、分辨率、调节机构不完善、量化误差（只有数字式仪器才有量化误差，详见第十二章）等各种来源。

B. 使用误差 这是由于测量时所用的设备、仪器、电路等安装、布置、调整、接线等原因而造成的误差。

C. 人身误差 人身误差，又称为个人误差。这是由于测量人员的感觉器官和运动器官不完善而产生的误差。这类误差因人而异，并与个人当时的生理和心理状况密切相关。

D. 外界误差 外界误差，又称环境误差或影响误差。这是由于外界环境，如温度、湿度、电磁场、大气压、电源波动、机械振动等原因，所造成的误差。

E. 方法误差 方法误差，又称理论误差。这是由于测量方法本身形成的误差，或者是由于测量所依据的理论本身不完善等原因而导致的误差。有时，可能由于对被测之量定义不明确而形成的一种理论误差。

2. 系统误差的检查

要研究和解决系统误差所带来的影响，必须先检查测量结果中是否含有系统误差。检查方法很多，下面根据恒定系统误差和变值系统误差分别介绍几种常用的检查方法。

A. 恒定系统误差的检查 恒定系统误差的检查常用方法有校对、改变测量条件和理论计算等三种。

因为系统误差的主要来源是测量手段（指仪器等），故必须保证仪器的准确度符合要求。仪器应定期送到计量部门去作检定，给出校正的修正值。修正值可用一系列数据数值来表示，也可能用曲线表示，也可推导成计算公式和表格。

除了送计量部门检定外，还可用仪器内部的自校准系统，数字式仪器（如数字式计数器）就有“自检系统”。当无法通过计量部门进行检定、也无自校准装置的情况下，还可以通过多台同类或相近的仪器进行互相对比，观察测量结果的差异，以便提供其一致性的参考数据。这种对比法不仅可用来观察恒定系统误差，也可用来观察变值系统误差。它在新的测量方法的探讨中常被采用的。

其次是改变测量条件。在某一测量条件下为某一确定不变的误差值，而当测量条件改变时，可为另一确定的误差值。利用这一特点，可以有意改变测量条件（如换人、换方法和换场地等）。分别测出几组数据，然后比较其差异，便可判断出有否恒定系统误差，同时还可设法消除其系统误差。例如，测量某一弱电流，如怀疑周围有强电磁场可能对测量结果有恒定影响而产生恒定系统误差，则可旋转一定角度再测定。

对于因测量方法或测量原理引入的恒定系统误差，可通过理论计算和分析的方法来修正。例如，用谐振法测量小电感量时，由于分布电容带来误差，就可以通过理论计算分析在相当程度上加以修正。

B. 变值系统误差的检查 变值系统误差就是误差数值按某一确切函数关系而变化的误差。因此，只要有意识地改变测量条件或分析测量数据变化的规律，便可判明是否存在变值系统误差。

累进性系统误差的特点就是其数值随时间（或其他因素）而不断增加（或减小）。因此，必须进行多次等精度测量，观察数据或相应的残差变化规律。前面已提到，随机误差常与系统误差陪伴着一起产生。如果累进性系统误差比随机误差大得多，则可明显地看出其上升或

下降的趋势。如果进性系统误差不是比随机误差大很多,就不易从数据直接看出来。这时应把数据画在坐标系统中,并画出近似中心线,就可看出其趋势,加以改善。

在随机误差比较显著时,对整个误差分布规律的估计就不大可能搞的比较准确。而且估计的平均中心线究竟倾斜多少才可认为存在系统误差,没有一定的界限。测量工作中常用马利科夫 (М.Ф.Маликов) 准则来判断。

将某一物理量进行等精度地测定 n 次,测得值按先后顺序为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$, 算术平均值 $\bar{x}$ (详见式(1-31)的推导过程) 为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-7)$$

第 i 次测定的数据 x_i 与 $\bar{x}$ 之差称为残差,它又称剩余误差或统计偏差(简称偏差)。用下式表示,

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-8)$$

各次测量的相应残差,分别为 $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n$ 。将所有残差分成前后两部分,并求出其差值 M 为

$$M = \sum_{i=1}^k v_i - \sum_{k+1}^n v_i \quad (1-9)$$

这里有两种情况, n 为偶数和奇数。

当 n 为偶数时, $k = \frac{n}{2}$; n 为奇数时, $k = \frac{(n+1)}{2}$ 。马利科夫提出:式(1-9)近似等于零,则说明测量数列中不含累进性系统误差;若式(1-9)显著不等于零,即与 v_i 值相当或更大,则说明测量数列中存在累进性系统误差。以上方法,就是马利科夫准则。

下面再说一下周期性系统误差的检查。

如果测量误差中的随机误差不大,而且周期性系统误差又是误差的主要成分,那末周期性系统误差是不难从测量数据或残差的变化规律中察觉出来的。但是,如随机误差比较显著,周期性规律便不易被发现。在误差理论的研究中,曾提出过不少不同的判断准则,被采用较为普遍的是阿卑-赫梅特 (Abbe-Helmert) 准则。令

$$A = \left| \sum_{i=1}^{n-1} v_i v_{i+1} \right| = |v_1 v_2 + v_2 v_3 + \dots + v_{n-1} v_n| \quad (1-10)$$

$$\text{当 } A > \sqrt{n-1} \sigma^2 \quad (1-11)$$

则认为测量结果中含有周期性系统误差。这就是阿卑-赫梅特准则。这里 σ 为标准偏差,可从贝塞尔公式计算出来,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{\frac{1}{n-1}}} \quad (1-12)$$

3. 系统误差的削弱或消除

要全部消除系统误差是相当困难的。但可利用某些典型的测量技术,能够在相当程度上削弱甚至基本上消除系统误差的影响。下面列举几种常用方法加以扼要地介绍。

A. 零示法 零示法属于比较方法。它是一种把被测量值与作为计量单位的标准值（已知量）进行比较，使其效应相互抵消。当总效应为零时，测量仪器或测量装置达到平衡，指示器读数最小或零。这种方法广泛用于电位差计、各类阻抗电桥、比较法测频技术（见第十二章）等。

B. 替代法 替代法，又称置换法。在一定的测量条件下，选择一个适当大小的标准已知量去替代测量电路中原来接入的被测量的量值，做到仪器的指示值相同，于是被测量的数值就等于该标准已知量，这种方法就是替代法。最典型的例子就是电桥，电桥的某桥臂上放被测元件，测定出结果后用标准元件替代并使其读数一样。

C. 交换法 交换法，又称为对照法。它属于用改变测量条件的方法来消除恒定系统误差。最典型的例子是等臂电桥（即比较电桥）。

设电桥的相等桥臂分别为 R_1 、 R_2 ，读数桥臂为 R_s ，被测臂为 R_x 。当电桥调平衡后，为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_s \quad (1-13)$$

若 R_1 与 R_2 无误差，并且相等，即 $R_1 = R_2$ ，则

$$R_x = R_s \quad (1-14)$$

如果 R_1 、 R_2 有误差，分别为 ΔR_1 和 ΔR_2 ，必然造成 R_x 有一误差，即

$$R_x = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} \right) R_s \approx R_s \quad (1-15)$$

现在，将 R_x 与 R_s 两臂上的电阻交换位置，重新调平衡，读数为 R'_s ，则

$$R_x = \left(\frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + \Delta R_1} \right) R'_s \quad (1-16)$$

解式(1-15)和(1-16)，则

$$R_x = \sqrt{R_s R'_s} \approx \frac{1}{2} (R_s + R'_s) \quad (1-17)$$

由此可知，交换法消除了恒定系统误差 ΔR_1 和 ΔR_2 的影响。

二、随机误差

在同一条件下，对同一待测量进行多次反复测量，并尽力消除或改正一切明显的系统误差后，再仔细观察测量结果，仍会发现一些无规则的随机性变化。必须强调指出，若测量的灵敏度和分辨力不是足够高，测量次数又很少，那末这种变化是不会观察到的。在现阶段，人们对这种随机性变化的原因与根源还认识不足，就把这种不明原因的起伏变化（或正或负，或大或小）称为随机误差。所谓随机，就是偶然，故亦可称为偶然误差。

在任何一次测量中，随机误差都是不可避免的。事实上，在同一条件下，对同一个物理量进行多次重复测量（即等精度测量），随机误差总是要产生的，虽然原因还不清楚，但总是存在某些共性，即具有一定的统计规律。使用概率论的一些理论和统计学的一些方法，就可以掌握这种不规则的随机误差的规律。使用概率论和统计方法来研究的目的是要确定随机误差对测量结果的影响，并通过对测量结果的处理，尽可能消除这种影响。

总之，随机误差的处理主要依靠概率统计方法。下面将用概率统计方法进行分析。

1. 随机误差的正态分布

概率论中的李雅普诺夫 (Ляпунов) 定理已证明: 如果随机变量是由大量微小的随机变量共同作用的结果, 那末, 只要这些微小随机变量是相互独立 (或弱相关) 的, 且均匀地小 (即对总和的影响彼此差不多), 不管它们各自服从于什么分布, 其总和必然近似于正态分布。因此, 正态分布是其他许多分布的极限。事实证明, 随机误差只不过是随机变量的一种具体形式。所以, 随机误差的出现绝大多数是遵循正态分布律的。从理论上说, 这正是概率论的中心极限定理的一个必然结果。

设在一定条件下, 对某一值 (其真实值为 A_0 , 这里用 μ 表示) 进行 n 次测量, 得一系列数据:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$$

各个数据出现的概率密度分布, 可用下列的正态分布函数来表达,

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-18)$$

正态分布, 又称高斯分布 (C.F. Gauss)

如果令真误差 (即测得值 x 离开真值的偏差) 为

$$\xi = x - A_0 = x - \mu \quad (1-19)$$

此式, 即前面所叙述的式 (1-1)。为与概率论中所用符号一致起见, 故用式 (1-19) 表示。

根据式 (1-19), 则式 (1-18) 可改写为

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-20)$$

这里, $\exp[z] = e^z$ 表示自然数 e 的 z 次幂; 参数 σ 称为标准偏差, 即 x 的方差的平方根, 并可用下式表示:

$$\sigma = \langle \xi^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = \langle (x - \mu)^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \quad (1-21)$$

这里用尖括号 $\langle z \rangle$ 表示 z 的统计平均, 即无穷多抽样值的平均, 也就是

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \xi^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (x_n - \mu)^2} \quad (1-22)$$

σ 是一个正数, 其数值取决于具体的测量条件。函数 $p(x)$ 或 $p(\xi)$ 的图解曲线, 如图 1-4 所示。

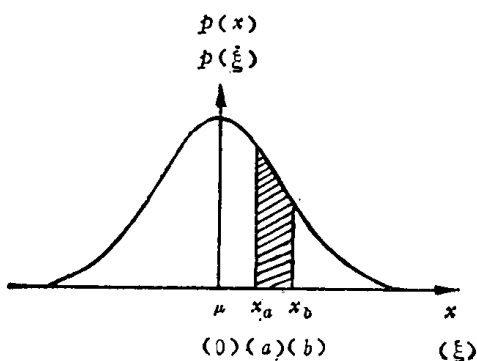


图 1-4 正态分布曲线

这条曲线又称为正态分布曲线, 或高斯曲线。

测得值 x 出现在区间 $x_a \sim x_b$ 之内的概率, 亦即真误差 ξ 之值出现在区间 $a \sim b$ 之内的概率, 为

$$\begin{aligned} P\{x_a < x \leq x_b\} &= \int_{x_a}^{x_b} p(x) dx = P\{a < \xi \leq b\} \\ &= \int_a^b p(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1-23)$$

它等于图 1-4 中阴影部分的面积。显然, 因为 $-\infty < x \leq \infty$ 和 $-\infty < \xi \leq \infty$ 都是必然事件。

由图 1-4 可知, 正态分布总结了随机误差具有下列四个特性: