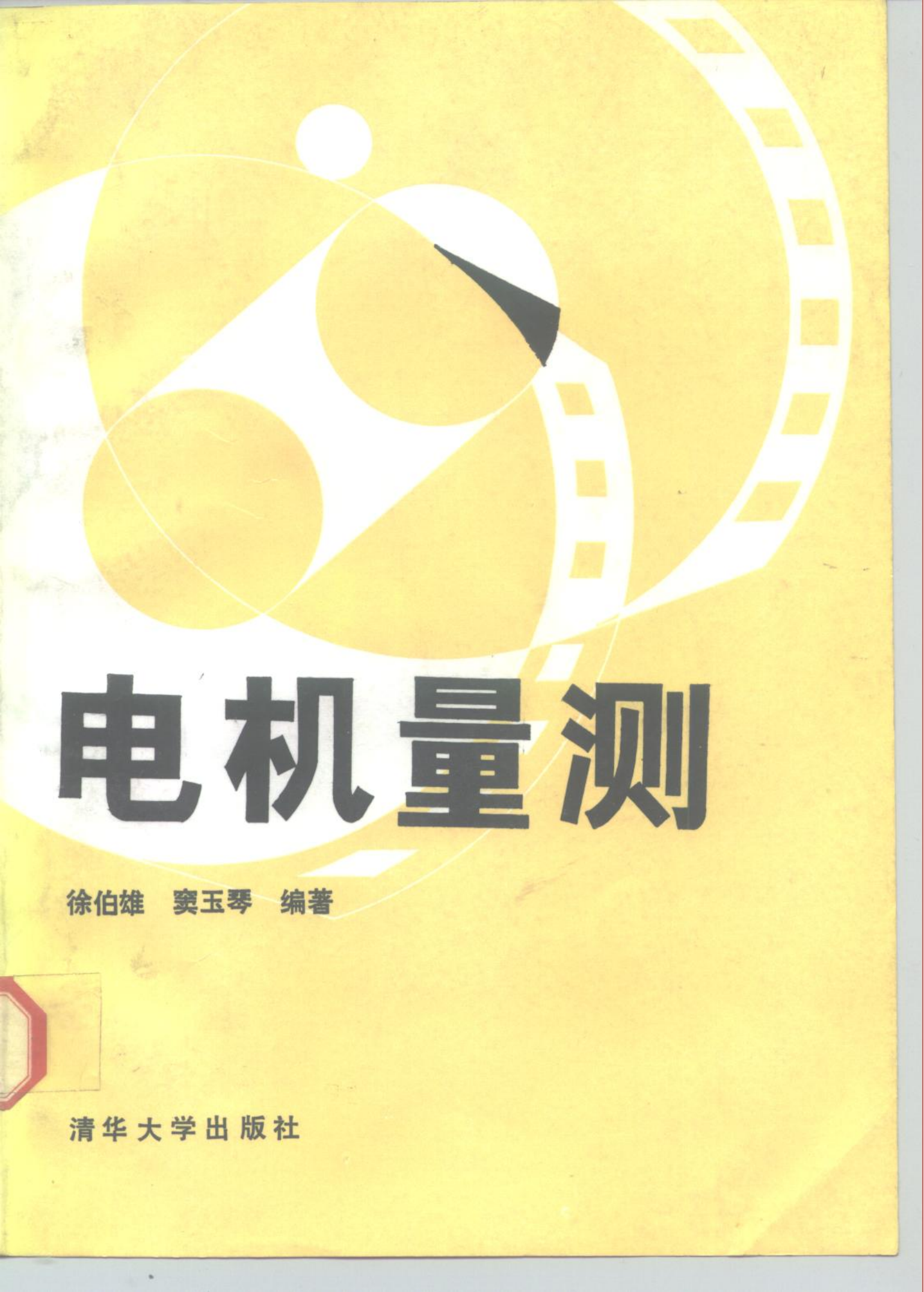




电机量测

徐伯雄 窦玉琴 编著

清华大学出版社

电机量测

徐伯雄 窦玉琴 编著



清华大学出版社

内 容 提 要

本书共分八章。第一章是误差的基本理论与实验数据处理,包括系统误差的削弱或消除、异常值的剔除、实验设计及曲线拟合等。第二章至第七章分别介绍了电机的转矩、温度、转速、噪声、磁场、杂散损耗、绕组的电感、转动惯量、时间常数及同步电机功角等的传感器、测量的基本原理、方法以及仪器的框图等。第八章介绍微型计算机在电机测试中的应用,包括变送器、采样保持、A/D及D/A、接口、应用举例、数据处理及干扰问题等。

本书力求理论结合实际,注意基本原理与物理概念的阐述,同时紧密结合国内外的实际介绍了有关仪器的原理、技术特性及测量方法等。在部分章节中介绍了作者的一些科研成果。

本书可作为工科大学电机及其控制、电机专业的教材或参考书,也可供从事电机试验、使用及控制的工程技术人员参考。

电 机 量 测

徐伯雄 姜玉琴 编著

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平振南排版厂排版

北京市联华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 410 千字

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数: 0001— 6000

ISBN 7-302-00500-1/TM·5

定价: 3.90 元

前 言

本书是根据近十年来对清华大学电机及其控制专业的学生进行教学及科研工作的经验与成果，在1981年及1983年所编的《电机量测》讲义的基础上加以充实修改，编写而成。

全书共分八章。第一章为误差的基本理论及实验数据处理。第二章至第七章阐述了电机的转矩、温度、转速及转差率、噪声及振动、磁场等的传感器、测量的基本原理、方法和仪器，以及电机的杂散损耗、转动惯量、时间常数、绕组的电感、同步电机的功角等参数的测量原理和方法。第八章介绍了微计算机在电机测试中的应用以及与其有关的变送器和数据采集等问题。

在编写过程中努力贯彻理论联系实际的原则，注意基本原理的阐述，力求物理概念明确；并结合目前我国生产及科学技术的实际情况，尽量反映近年来国内外在本学科领域内的新原理、新技术、新方法和新动向，介绍了若干较新的内容。

本书的第一、三、四、五、六、七章及第八章的第二节至第四节由徐伯雄同志编写，第二章及第八章的第一节及第五节至第十节由窦玉琴同志编写。徐伯雄副教授负责全书统编工作。

本书由清华大学唐统一教授主审，详细审阅了第一、二、三、四及六章，提出了许多重要而宝贵的意见。周汝潢副教授、魏平田副教授、俞鑫昌副教授和黄益庄副教授分别审阅了第七章、第一章、第五章及第八章的全部或部分内容，并提出了许多宝贵意见，编著者谨向他们表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中不妥或错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

本书可作为高等工科院校电机、电机及其控制专业的教材或参考书，也可供有关的工程技术人员参考。

编著者

1988年1月

主要符号表

a	加速度	K_0	运算放大器的开环放大倍数
a_x	数学期望	L	电感(自感)
ΔA	分贝误差	L_1	声强级
B	磁通密度	L_N	响度级
B_g	气隙磁通密度	L_p	声压级
c	置信系数	L_w	声功率级
C	电容; 电容量	l	长度
d	导线直径; 轴径; 厚度	L_d	绕组的动态电感
D	直径; 场效应管的漏极	M	互感
e	电势瞬时值	m	质量; 相数
E	电势; 交流电势有效值; 电场强度	N	匝数; 响度; 脉冲数
E_0	空载电势	n	转速
F	力	n_1	同步转速
f	频率; 力	n_0	空载转速
f_0	谐振频率	n_N	额定转速
f_c	中心频率	P	功率; 有功功率
G	切变模量; 噪声的方向性指数; 场效应管的栅极	P_1	输入功率
g	重力加速度	P_2	输出功率
h	高度	P_M	电磁功率
H	电机的中心高	P_m	机械功率
I	电流; 交流电流的有效值; 声强	p	损耗; 极对数; 声压
I_{av}	电流的平均值	p_{Cu}	铜损耗
I_m	交流电流最大值	p_{Fe}	铁损耗
I_N	额定电流	p_{fw}	机械损耗
I_0	空载电流	p_i	杂散损耗
I_f	励磁电流	p_{i1}	基频杂散损耗
I_a	电枢电流	p_{i2}	高频杂散损耗
i	电流的瞬时值	p_0	空载损耗
J	转动惯量	Q	残差的平方和; 无功功率; 电荷; 电量
		R, r	电阻; 半径
		S	面积; 场效应管的源极

s	转差率	Z	齿或槽数
T	转矩; 周期; 绝对温度; 时间常数	α	角度; 显著性水平或危险率
T_0	空载转矩	β	置信概率; 反馈系数
T_1	输入转矩	γ	相对误差
T_2	输出转矩	γ_n	引用误差
T_{st}	启动转矩	δ	随机误差; 气隙长度
T_e	电磁时间常数	ε	系统误差; 介电常数(电容率); 比辐射率
T_m	机械时间常数	ξ_x	测得值 x 的修正值
t	时间; 温度	η	效率
U	电压; 交流电压有效值	θ	温度; 角位移; 同步电机的功角
U_0	空载电压	$\Delta\theta$	温升
U_m	交流电压最大值	λ	随机不确定度, 波长
U_N	额定电压	λ_m	峰值辐射波长
U_{av}	电压的平均值	$\lambda(\alpha, n)$	格拉布斯系数
u	电压瞬时值	μ	磁导率
u_i	输入电压信号	ν_i	测得值 x_i 的残差
u_o	输出电压信号	ρ	电阻率
V	体积; 容积; 电位	σ	标准差, 斯蒂芬-玻尔兹曼常数
V_{REF}	基准电压	$\hat{\sigma}$	标准差的估计值
v	速度	σ^2	方差
W	功率, 声功率, 辐射功率	Φ	磁通
$W_{\lambda, T}$	光谱辐射功率	Ψ	磁链
W_n	转速稳定度	Ω	机械角速度
X	电抗	ω	角速度, 角频率
X_d	纵轴同步电抗	φ	相位差
X_q	横轴同步电抗		
x_0	真值		
$\bar{x}$	测得值 x 的算术平均值		

目 录

第一章 误差及实验数据处理	1
第一节 误差的基本概念.....	1
第二节 系统误差的消除或削弱.....	9
第三节 随机误差.....	15
第四节 异常值的剔除.....	27
第五节 误差的传递.....	31
第六节 误差的综合及实验设计.....	35
第七节 曲线拟合.....	42
第二章 电机转矩的测量	53
第一节 静态转矩的测量.....	53
第二节 三相异步电动机转矩的间接测量.....	60
第三节 应力应变法测转矩.....	63
第四节 测角加速度法测转矩.....	67
第五节 磁弹性法测转矩.....	73
第六节 弹性轴法测转矩.....	76
第七节 用转矩转速测量仪及函数记录仪测取异步电动机的机械特性.....	86
第三章 电机中温度的测量	89
第一节 概述.....	89
第二节 电机试验中三种基本测温方法.....	90
第三节 交流电机定子绕组的带电测温.....	95
第四节 电机旋转部分温度的测量.....	103
第五节 红外测温.....	110
第六节 光纤测温.....	114
第七节 交流电动机温升试验方法.....	115
第四章 电机转速及转差率的测量	119
第一节 频闪法测量转速.....	119
第二节 光电数字测速.....	121
第三节 瞬时转速的测量.....	125
第四节 转差率的测量.....	128
第五章 电机噪声和振动的测量	131
第一节 噪声测量的基本知识.....	131
第二节 噪声测量仪器的基本原理.....	138

第三节	电机噪声的测试方法及限值标准.....	142
第四节	电机振动的测量及限值标准.....	152
第六章	电机中磁场的测量.....	157
第一节	霍尔效应法.....	157
第二节	感应法.....	163
第三节	冲击法.....	165
第四节	其它测磁方法.....	169
第七章	电机的损耗效率及部分参数的测量.....	175
第一节	电机中杂散损耗的测量.....	175
第二节	电机转子转动惯量的测量.....	180
第三节	电机绕组电感的测量.....	184
第四节	电动机时间常数的测量.....	189
第五节	同步电机功角及同步电抗的测量.....	195
第八章	微型计算机在电机测试中的应用.....	199
第一节	概述.....	199
第二节	交直流电量变送器.....	201
第三节	采样-保持电路.....	213
第四节	采样多路器.....	216
第五节	数-模转换器.....	217
第六节	模-数转换器.....	223
第七节	电机运行状态的自动控制.....	226
第八节	微型计算机的接口及应用.....	227
第九节	微型计算机在电机测试中的应用举例.....	244
第十节	干扰问题.....	259
习题与思考题		262
附录		267
参考文献		270

第一章 误差及实验数据处理

第一节 误差的基本概念

一、误差公理

人们在从事生产实践和科学实验的过程中，经常要进行各种测量，测量就是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。在测量实践中，无论使用多么准确的仪器或工具，采用多么完善的测量方法，测量者多么认真细心，在同一条件下多次测量同一个被测量，其测量结果往往存在差异，即每次测量结果只是被测量值的近似值。测量结果与被测量的真值之差异称为测量误差。误差始终存在于一切科学实验和测量之中，这就是为广大从事科学实验的人们所公认的误差公理。

二、误差的来源

按误差产生的原因可分为以下几类。

(一) 装置误差

计量装置是指为确定被测量值所必须的计量器具和辅助设备的总和。在电机试验和测量中，装置误差有如下几种。

1. 标准器误差 标准器是提供标准量值的器具，如标准电阻、标准电感、标准电池等。它们的标称值与其自身在一定条件下体现出来的客观量值之间有某些差异，在测量中所用的是标称值，故使测量结果产生误差。

2. 仪器误差 这是由于所使用的测量仪器(包括测量工具、电工仪表、电桥、温度计、秒表等)因为设计、制造工艺、结构、材料等方面的某些缺点所引起的误差。如指针式电表因表盘分度不准确所产生的误差。

3. 装备及附件误差 测量中除仪器及标准器以外的其它辅助设备和附件，如电源的波形及频率不够标准，三相电源不很对称，以及测量用的连接线、开关、触点等所引起的误差。

(二) 环境误差

环境误差或称外界误差。这是由于外界环境因素(如温度、湿度、气压、电场、磁场等)与仪表所规定的使用条件有某些差别而引起的测量误差。如温度变化会引起电表读数随之有某些变化。所以，在使用电表或仪器时，要注意力求在其所规定的使用条件下进行，以尽量减小环境误差。

(三) 方法误差

方法误差或称理论误差。这是由于所采用的测量方法不完善(理论根据有某些缺点或采用了某些近似计算公式)所引起的误差。例如用电压表、电流表法测量电阻时，测

量电路如图1-1所示,若按 $R_x = \frac{U}{I_A}$ 计算 R_x 值,显然其中有方法误差。按图1-1(a)的线路所测量得的电压 U 中包含了电流表的内阻压降 $I_A r_A$,而在图1-1(b)中电流表的读数

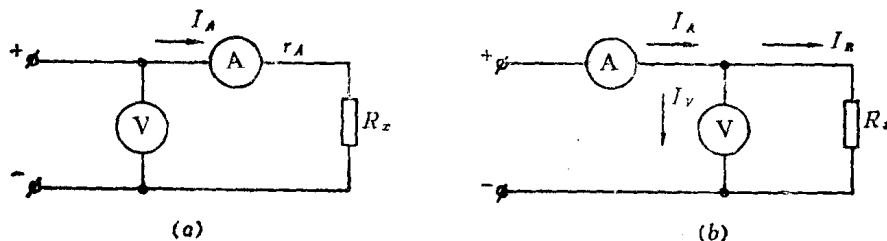


图 1-1 测量电阻的两种线路

I_A 中包含电压表中的电流 I_V , 所以必须结合不同的测量线路对上述计算公式作一定的修正,以消除其中的方法误差。此外,如测量装置及线路中的热电势、漏电、引线及接触电阻压降等因素的影响,在计算测量结果的表达式中,一般均未能得到反映,这也会引起一些方法误差。

(四) 人员误差

这是由于测量者感觉器官的生理变化、最小分辨力及反应速度快慢不同、各人固有的不同习惯及偏向等原因所引起的误差。这类误差往往因人而异,故常简称人差。例如测取某一随时间变化的信号时,测量者有超前或滞后的趋向,这种误差常表现为观测误差、视差、估读误差和读数误差等等。

应该指出,以上各种误差来源,有时是单独起作用,有时是联合起作用。在作误差分析时,若为几个误差来源联合起作用,可当作一个独立误差因素考虑,这就能使误差合成比较简化。

三、误差的分类

根据误差的不同特性,人们将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

(一) 系统误差

在偏离规定的测量条件或由于测量仪器、方法等问题多次测量同一量值时,绝对值和符号保持恒定或按某一确定规律变化的误差称为系统误差。

所谓按某一确定规律变化的含义是:这种误差为某一个因素或几个因素的函数,这种函数可用公式、曲线或数表来表达。例如某些电工仪表的示值为温度的函数;某些电量是频率的函数等等。根据变化规律的不同,系统误差可分为恒定系统误差和可变系统误差。前者包括恒正系统误差和恒负系统误差;后者又分为线性系统误差、周期性系统误差和复杂规律系统误差等。

从对系统误差掌握的程度又可分为如下两类:误差的绝对值和符号已确定的称为已定系统误差;误差的绝对值和符号未确定的称为未定系统误差。对于已定系统误差可以

进行修正,其余的系统误差不能修正,但可通过适当的测量方法来削弱或消除之。

如果测量结果中存在系统误差而人们还不知道,这将是危险的。在实际测量工作中,我们应尽可能预见并掌握各种系统误差的来源,并设法尽量削弱或消除它对测量结果的影响;或者设法确定或估算出未能被消除的系统误差值,以便进行必要的修正。

(二) 随机误差

在实际测量条件下,多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化着的误差称为随机误差,也叫偶然误差。随机误差是由于多种无一定变化规律的因素如大地微震、空气的扰动、电磁场的微变、气压或湿度的变化、电源的微小波动等等以及其它目前人们尚未完全认识的很多互不相关的独立因素对测量值的综合影响造成的误差。应该说随机误差的产生并不能完全归之于偶然原因,只不过由于变化的因素太多,各种因素的影响很微小、相互关系很复杂,以致于至目前为止人们尚未能完全认识和掌握其具体的变化规律。对于少数几次测量结果的随机误差是没有规律的,但用概率论和统计学的方法分析多次测量结果的随机误差,它是具有一定的统计规律的。有时候会出现几次测量的结果完全相同的情况,这并不能说明不存在随机误差,而往往是因所用的测量工具或仪表的灵敏度不够,测量不够精密,未能反映出随机误差而已。

(三) 粗大误差

超出在规定条件下预期的误差,称为粗大误差,也称寄生误差。这种误差是由于测量人员的粗心大意、错误读取示值,使用了有缺陷的测量器具,不正确的操作或实验条件的短时突变等因素所引起的。它明显地歪曲了测量结果。粗大误差是毫无规律的,但只要认真细致地操作,多方面加以注意,一般是可能避免的。含有粗大误差的测量结果称为坏值或异常值。正确的测量结果中不应包含粗大误差,在进行实验数据的整理时,要通过适当的方法将坏值判别出来并舍弃。

还应指出:系统误差与随机误差之间的关系并不是一成不变的,在一定条件下它们是可以相互转化的。随着人们对各种误差来源及其变化规律的认识不断加深和发展,有可能把过去对其没有认识而归之为随机误差的某种误差明确为系统误差;反之,由于认识不足或实验条件的限制等,也会把某种系统误差视为随机误差。另外,有的误差在某种条件下为随机误差,而换到另一种情况下则为系统误差。例如指针式电表的表盘分度误差,对电表制造厂来说,因其有随机性质,属于随机误差;而对于电表的使用者来说,由于某个分度的不准确而造成的测量误差则应为系统误差。人们也常常利用这一点来减小测量结果的误差。当条件稳定而对系统误差又已掌握时,可尽量保持在相同条件下测量,以便修正系统误差;而对某些系统误差尚未完全掌握时,有时可用不断改变实验条件做多次测量的方法使误差变为随机误差,从而获得正负误差相互抵消的测量结果。

四、不确定度及其分类

由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度称为不确定度。它是指测量结果不能肯定的误差范围,被测量的真值就在此范围之内。不确定度是对测量结果而言,因为在测量中总存在着误差,对已定系统误差作了修正后,还存在随机误差和未定系统误差,故每个测量结果中总存在着不确定度。例如某电压的测量结果为 $(220 \pm 1.1) \text{V}$ 说明

实际的电压值在221.1~218.9V之间,而 $\pm 1.1\text{V}$ 为不确定度。

按照误差性质的不同,不确定度可分为系统不确定度和随机不确定度,前者是由于未定系统误差引起的,后者是由于随机误差所造成的。

国际计量委员会在关于表述不确定度的建议中提出:按估计或推测其数值的不同方法,将不确定度分为A、B两类分量。多次重复测量,用统计方法计算出来的标准偏差称为A类分量,用其它方法估计出近似的“标准偏差”称为B类分量。

五、误差的表示方式

按不同表示方式误差可分为绝对误差和相对误差。后者则包括相对误差、引用误差及分贝误差三种,分别介绍如下。

(一) 绝对误差

绝对误差也称为绝对真误差或真误差。它等于测量结果与被测量真值之差,用符号 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中 x 为测量值, x_0 为真值,它是指在规定的时间及空间内被测量值的真实大小。严格地说,在一般情况下真值是无法求得的。因为从理论上说,某量的真值应是在无系统误差的条件下作无限多次重复测量,取其结果的平均值。实际上这是不能实现的。但是在有些情况下真值又是可知的或在相对意义上说是可知的,例如:

1. 一周的圆周角为 360° ,平面三角形的三内角之和为 180° 等,这里的 360° 、 180° 称为理论真值。

2. 计量学约定真值,国际计量大会决议所规定的长度、质量、时间、电流、温度等量的国际标准单位。如1kg等于用铂铱合金制成的国际千克基准的质量。

3. 在实际测量中常用被测量的实际值(其定义为满足规定准确度的、用来代替真值使用的量值)或已修正过的算术平均值来代替真值使用。通常在检定工作中,把高一等级的计量标准所测得的量值称为实际值,代替真值使用。例如,0.2级电表的读数可作为1.0级电表的相对真值。

如在检定某一1.0级的电压表时,当其读数为100.0V时,同时用一块0.2级的标准表测得同一电压之值为100.8V,此值即为相对真值。则此电压表在刻度为100V的绝对误差为

$$\Delta U = U - U_0 = 100.0 - 100.8 = -0.8\text{V}$$

必须注意绝对误差与误差的绝对值之区别。在上例中,误差的绝对值为: $|-0.8| = 0.8\text{V}$ 。

在实际工作中,有时还用到修正值(又称更正量或改正量)的概念。其定义是与绝对误差的符号相反,绝对值相同。以符号 ζ_x 表示,即

$$\zeta_x = -\Delta x = x_0 - x \quad (1-2)$$

有些准确度较高的电表常附有各个主要分度的修正值或修正曲线,使用时可根据下式求出其相对真值。

$$x_0 = x + \zeta_x \quad (1-3)$$

(二) 相对误差

相对误差也称相对真误差。其定义是测量的绝对误差与被测量的真值之比，通常用百分数表示，故其只有绝对值和符号，而没有量纲。

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

因一般情况下真值是不可测得的，当 $\Delta x \ll x$ 时，在 (1-4) 式中可以用 x 代替 x_0 ，则有

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

在上面所举检定电压表的实例中，相对误差为

$$\gamma_u = \frac{\Delta U}{U_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta U}{U} \times 100\% = \frac{-0.8}{100} \times 100\% = -0.8\%$$

与绝对误差相比，相对误差能更准确地反映测量结果的准确程度，其值越小，表明测量结果的准确度越高。例如测量两个电阻，其中 $R_1 = 100\Omega$ ，绝对误差 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$ ， $R_2 = 10000\Omega$ ， $\Delta R_2 = 1\Omega$ ，它们的相对误差计算如下：

$$\gamma_{R_1} = \frac{0.1}{100} \times 100\% = 0.1\%$$

$$\gamma_{R_2} = \frac{1}{10000} \times 100\% = 0.01\%$$

可见 R_2 的绝对误差虽然比 R_1 大，但其相对误差却比 R_1 小得多，说明其测量的准确度较高。

(三) 引用误差

为了便于计算及划分电工仪表的准确度等级，通常用仪表的测量范围上限值作为计算相对误差的分母，而有所谓引用误差的概念。其定义是绝对误差与测量范围上限值或量程之比值，以百分数表示。则

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

式中 γ_x 为引用误差， x_n 为仪表的测量范围上限值。

电工仪表的准确度等级通常分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。若仪表的准确度等级为 a 级，即说明其各个分度点的引用误差绝对值上限不大于 $a\%$ ，即

$$|\gamma_{xm}| = \frac{|\Delta x_m|}{x_n} \times 100\% \leq a\% \quad (1-6)$$

式中 γ_{xm} ——引用误差的最大值；

Δx_m ——绝对误差的最大值；

x_n ——仪表的测量范围上限值。

由 (1-6) 式显然可见仪表各个分度点上示值的相对误差并不都具有 $a\%$ 的准确度。设某电表的测量范围上限值为 x_n ，测得值为 x ，则电表在该点示值的误差应为绝对误差

$$\Delta x \leq x_n \times \pm a\% \quad (1-7)$$

相对误差

$$\gamma \leq \frac{x_n}{x} \times \pm a\% \quad (1-8)$$

由上式可知,测量结果准确度的高低不仅仅决定于所用仪表的准确度等级,而且也与所选仪表的量程是否合适有关。

一般情况下,电表的准确度等级是已知的,按(1-7)及(1-8)式,可以估计测量结果的误差限。

例1.1 在一台单相变压器的空载试验中,被测电压为220V。现有量程为600V的0.5级电压表和250V的1.0级电压表,问选用哪一种表测量较好?

解 用600V电压表测量时,最大相对误差为

$$\gamma_{0.1} = \pm a\% \times \frac{x_n}{x} = \pm 0.5\% \times \frac{600}{220} = \pm 1.4\%$$

用250V电压表测量时最大相对误差为

$$\gamma_{0.2} = \pm a\% \times \frac{x_n}{x} = \pm 1.0\% \times \frac{250}{220} = \pm 1.1\%$$

上例说明,若仪表量程选择不恰当,0.5级电压表测量结果的相对误差限有可能比用量程合适的1.0级电压表更大。所以在科学实验的测量中,选择仪表量程时,要尽可能使被测定值不小于仪表满刻度值的2/3,至少也不得小于1/3。否则就不能充分发挥所用仪表准确度的潜力。这是在选用仪表量程时必须注意的一点。

(四) 分贝误差

在声学及电子学测量中,常用分贝误差作为相对误差的另一种表示方式。

设某放大电路的输入电压和输出电压的测得值分别为 U_1 及 U_2 ,其比值称为增益 a ,即

$$a = \frac{U_2}{U_1} \quad (1-9)$$

当用对数形式来表示时,则

$$A = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg a \quad (\text{dB}) \quad (1-10)$$

A 的单位为分贝,以dB表示。在(1-10)式中,若电压比值 a 中存在一个误差 Δa ,则对应的 A 中也有一个误差 ΔA ,即有

$$A + \Delta A = 20 \lg(a + \Delta a) \quad (\text{dB}) \quad (1-11)$$

式(1-11) - 式(1-10),得分贝误差

$$\Delta A = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta a}{a} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1-12)$$

(1-12)式表达了比值 a 的相对误差与分贝误差 ΔA 之间的关系。因为

$$\lg(1 + \Delta) = 0.4343 \ln(1 + \Delta)$$

而且当 $\Delta \ll 1$ 时, $\ln(1 + \Delta) \approx \Delta$

故(1-12)式可改写成

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &\approx 8.686 (\Delta a/a) \quad (\text{dB}) \\ (\Delta a/a) &\approx 0.1151 \Delta A \quad (\text{dB}) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

或

由于功率比的分贝定义为

$$A_P = 10 \lg a_P = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{dB})$$

故在计算功率比的分贝误差时, (1-12) 及 (1-13) 式应改写为

$$\left. \begin{aligned} \Delta A_P &= 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta a_P}{a_P} \right) \quad (\text{dB}) \\ \Delta A_P &\approx 4.343 (\Delta a_P / a_P) \quad (\text{dB}) \\ (\Delta a_P / a_P) &\approx 0.2303 \Delta A_P \quad (\text{dB}) \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

例1.2 用电流表测得某电流值为9.51A, 用标准表测量该电流示值为9.45A, 求分贝误差。

解 绝对误差 $\Delta I = 9.51 - 9.45 = 0.06\text{A}$

相对误差 $\gamma_I = \frac{0.06}{9.45} \approx 0.6\%$

分贝误差 $\Delta A = 8.686 \times 0.6\% = 0.05\text{dB}$

例1.3 已知测量某功率的分贝误差为-0.12dB, 求其相对误差。

解: 按公式 (1-14), 功率测量结果的相对误差为

$$\gamma_P = 0.2303 \times \Delta A_P = 0.2303 \times (-0.12) = -2.8\%$$

六、测量的准确度及其提高途径

(一) 精密度、正确度和准确度

按照误差概念, 表示测量误差大小的主要名词有下列三个:

1. 精密度 (Precision)

代表随机误差大小的程度, 简称精度。表征多次测量结果彼此间符合的程度 (即分散性), 也称符合度或弥散度。精密度高并不一定表明测量结果与真值很接近, 当存在一个恒定系统误差时即是这样。

2. 正确度 (Correctness)

代表系统误差大小的程度。测量结果的正确度高, 需要有一定的精密度来保证, 但是, 测量的精密度高, 正确度不一定也高。

3. 准确度 (Accuracy)

或称精确度。综合反映测量中系统误差和随机误差大小、测量结果与真值之间相一致的程度。如某一测量中, 随机误差和系统误差都很小, 即精密度与正确度都高, 测量结果与真值十分接近, 则称为准确度高。

在多次重复测量中, 测量结果与真值相互接近的情况可表示如图1-2。 x_0 为真值, (a) 图表示精密度高而正确度不高, (b) 图表示精密度和正确度都不高, (c) 图表示准确度高。

在科学实验中, 人们当然希望得到准确度高的测量结果。而如何才能提高测量的准确度呢? 这就要进一步分析系统误差、随机误差和粗大误差三者之间的关系以及它们对测量结果的影响。

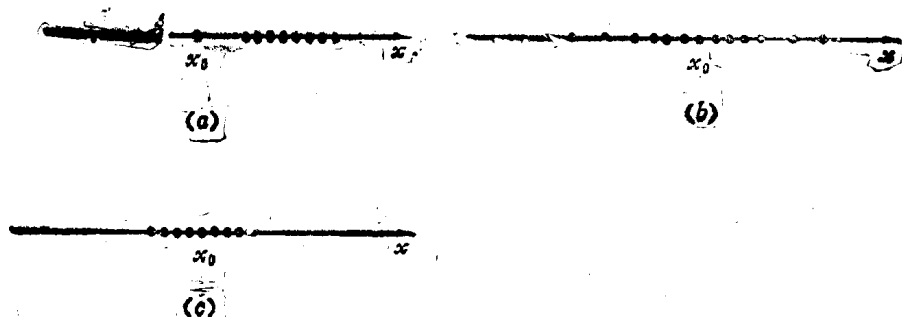


图 1-2 测量结果的三种分布情况

(二) 提高测量准确度的途径

为了分析随机误差、系统误差和粗大误差之间的关系，并用数轴来表示，让我们先对随机误差和系统误差给以数学的定义。设对某量进行 n 次等精密度、独立测量，测得值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-15)$$

当测量次数 n 趋近于 ∞ 时，则算术平均值的极限值称为测得值的数学期望，以 a_x 表示，即

$$a_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-16)$$

a_x 又称为测得值的总体平均值。数学期望与其真值之差为系统误差，以 ε 表示，即

$$\varepsilon = a_x - x_0 \quad (1-17)$$

各次测得值 $x_i (i=1 \sim n)$ 与其数学期望之差为随机误差，以 δ_i 表示

$$\delta_i = x_i - a_x \quad (1-18)$$

将式 (1-17) 与 (1-18) 相加，得

$$\varepsilon + \delta_i = (a_x - x_0) + (x_i - a_x) = x_i - x_0 = \Delta x_i$$

式中 Δx_i 为各次测得值的绝对真误差，由上式可见，绝对误差等于系统误差与随机误差的代数和。

图 1-3(a) 表示各测得值中 $\varepsilon=0$ 的情况，真值 x_0 与数学期望相重合，各次测得值 x_i 密

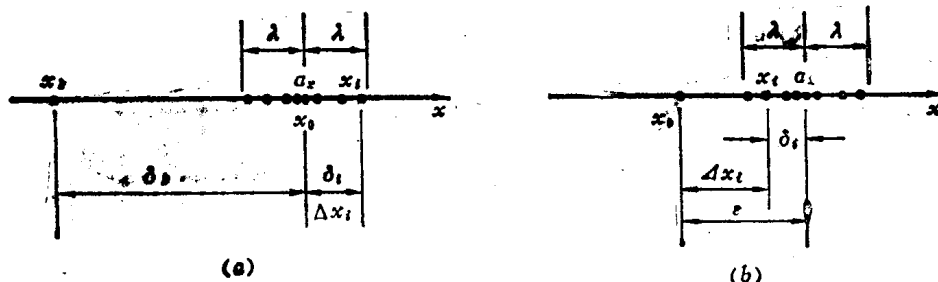


图 1-3 用数轴表示各种误差

布在 x_0 的两侧， x_i 与 a_x 的差值即随机误差。随机误差的极限值称随机不确定度，以 λ 表示。图中远离 x_0 的点 x_k ，因其误差远大于 λ ，是由粗大误差造成的，故 x_k 为坏值。

当测得值中包含已定系统误差 ε 时，如图1-3(b)所示。各测得值偏于 x_0 的一边，而密布于 a_x 的两侧。由图可见，系统误差 ε 值越小，测量的正确度越高，随机不确定度的大小决定测量精密度的高低。

由图1-3还可看到，各测得值密布于 a_x 的两侧， δ_i 有正有负，故有可能通过多次测量和数学处理的方法削弱随机误差的影响，而对于系统误差，尤其是已定系统误差，用上述数学处理的方法则收效甚微。因此，必须在消除或大大削弱了系统误差后，提高测量的精密度才有价值，同时还不允许含有粗大误差。总之，要提高测量的准确度，应采取以下几方面措施：

1. 测量时力求不产生粗大误差或对测量结果进行坏值的剔除。
2. 采取各种措施尽可能削弱或消除系统误差。
3. 条件允许时，应进行多次重复测量以减小随机误差的影响。

第二节 系统误差的消除或削弱

前面已提到消除或削弱系统误差是提高测量准确度应采取的措施之一。系统误差产生的原因是多方面的，它广泛存在于测量过程中。如果有系统误差而没有被人们发觉，就会严重影响测量结果的准确度。但在多数情况下，系统误差的存在也是有一定规律，并能够被人们所认识和掌握的。因此，可以通过各种不同的方法加以消除或者将它的影响大大削弱。

由于系统误差与随机误差的性质不同，一般来说不能用概率统计的方法来解决。对于系统误差的处理，一般地说是属于实验者的测量技巧以及实验数据的修正等方面的问题。不可能有一个普遍适用的方法，只能针对不同的具体情况进行分析，采取不同的措施加以消除或削弱。

概括起来，消除或削弱系统误差的基本方法有以下几方面。

一、在实验和测量过程中，尽力消除产生系统误差的一切因素

实验前根据实验的内容与测量要求，细致分析可能产生系统误差的各种因素，以便采取不同的方法来加以消除或削弱。对于装置与仪器误差，首先要选择规格、量程都合适的仪器仪表，并在实验前作必要的检定，确定其误差和修正值；注意各种仪表使用的技术条件和正确的使用方法，如测量时，很多仪器仪表的放置必须调到水平位置，使用前必须预热、进行零位调整；注意各种仪器仪表的布置是否合适，能否防止互相干扰；注意各种环境因素（如温度、湿度、大气压、电场、磁场等）的影响，以及仪器使用过程中的零位漂移与温度漂移；电源电压的波形、三相对称度、电压波动以及频率变化的影响等等。对于人员误差，首先要努力提高测量人员的实验技术水平，要明确实验过程中的注意事项，如各个量之间合理的调节顺序、调节方向和恰当的调节速度；测量时应严格保持的状态等；实验中全体人员要做到互相密切配合，保持精力高度集中和良好的