

高等学校试用教材

电机测试技术

西安交通大学 何秀伟 主编

电机测试技术

西安交通大学 何秀伟 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $15 \frac{3}{4}$ ·字数 384 千字

1985 年 6 月北京第一版·1985 年 6 月北京第一次印刷

印数 70,001—9,500·定价 2.50 元

*

统一书号: 15033·5958

前 言

本书是根据 1983 年 5 月在杭州召开的高等工业学校电工技术教材编审委员会制订的《电机测试技术》教学大纲编写的。

全书共分十四章。前四章为误差分析及数据处理部分；第五章至十二章阐述了电机测试中应用的传感器、仪器，此外还介绍了若干较新或较深入的试验内容；最后两章介绍电机测试中的数据采样系统及微型计算机应用概况。本书在理论联系实际的同时，注意加强基础理论的阐述，并力求作到物理概念明确。结合我国当前电机测试的实际情况，并反映了国内外电机测试领域中的新技术、新动向的内容。

本书由西安交通大学何秀伟副教授主编，华南工学院潘观海教授主审。参加编写的有西安交通大学钟万勖副教授、徐云官、张宝琦、**沈官秋**、曾捷同志和西北纺织工学院潘曙先副教授。

书稿的分工如下：钟万勖同志编写第一、二、三、四章及附录；潘曙先同志编写第十三章的第一、八、九、十节及第十四章；徐云官同志编写第五、七章；沈官秋同志编写第六章的第一、三、四、五节及第八章；曾捷同志编写第六章的第二节及第十三章第二节；张宝琦同志编写第十三章的第三、四、五、六、七节；何秀伟同志编写第九、十、十一、十二章，并对全书作了统稿修改。

潘观海教授对本书进行了仔细的审阅，对全书的体系和许多具体问题提出了宝贵的意见。并在广州召开的审稿会上通过。参加会议的有华南工学院、机械部教材编辑室、上海电器科学研究所、广州电器科学研究所、机械部第八设计院、清华大学、华中工学院、天津大学、上海工业大学、沈阳机电学院等单位的代表，代表们对书稿提出了许多宝贵意见，编者在此谨向他们表示衷心感谢。

编写《电机测试技术》教材尚属初次尝试，由于编者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

本书为高等工业学校电机专业的试用教材，也可供有关工程技术人员参考。

1984年5月

主要符号表

a —— 加速度	L_w —— 声功率级
B —— 磁通密度	l —— 长度
B_δ —— 气隙磁通密度	l_{xx} —— x 的离差平方和
C —— 电容	l_{yy} —— y 的离差平方和
c —— 置信系数	l_{xy} —— x 和 y 离差乘积和
D —— 直径	M —— 互感系数
d —— 导线直径, 轴径	m —— 质量
E —— 电势, 交流电势有效值	N —— 脉冲数, 匝数, 响度
e —— 电势瞬时值, 系统不确定度	n —— 转速
F —— 力	n_0 —— 空载转速
f —— 频率	n_1 —— 同步转速
f_s —— 闪光频率	P —— 功率
G —— 剪切弹性模量, 噪声的方向性系数	P_1 —— 输入功率
g —— 重力加速度	P_2 —— 输出功率
GD^2 —— 飞轮矩	P_{em} —— 电磁功率
h —— 高度	p —— 损耗, 极对数, 声压
I —— 电流, 交流电流的有效值, 声强	p_{ad} —— 杂散损耗
I_m —— 交流电流最大值	p_{adl} —— 基频杂散损耗
I_{av} —— 电流平均值	p_{adh} —— 高频杂散损耗
I_ϕ —— 相电流	p_{mec} —— 机械损耗
I_N —— 额定电流	p_{cu} —— 铜损耗
i —— 电流瞬时值	p_{Fe} —— 铁损耗
K_o —— 运算放大器的开环放大系数	Q —— 无功功率, 残差 (剩余) 平方和
L —— 电感系数	R —— 电阻, 半径
L_σ —— 漏感系数	r —— 半径, 相关系数
L_l —— 声强级	S —— 面积
L_N —— 响度级	s —— 转差率
L_p —— 声压级	T —— 转矩, 时间常数, 周期, 绝对温度

- T_0 ——空载转矩
 T_1 ——输入转矩
 T_2 ——输出转矩
 T_L ——负载转矩
 T_{st} ——起动转矩
 t ——时间, 温度
 $t_\alpha(k)$ —— t 分布置信系数
 U ——电压, 交流电压有效值, 必然事件
 U_m ——交流电压幅值
 U_N ——额定电压
 U_{av} ——电压平均值
 U_ϕ ——相电压
 u ——电压瞬时值
 V ——体积, 不可能事件
 v ——速度
 v_i ——第 i 点测量值的残差 (剩余误差)
 W ——功, 声功率
 W_n ——转速稳定度
 X ——电抗
 X_σ ——漏电抗
 $\bar{x}$ ——测定值 x 的算术平均值
 x_0 ——真值
 Z ——齿或槽数, 脉冲数/转
 α ——电阻温度系数, 衰减系数, 角度, 显著性水平或危险率
 β ——反馈系数, 置信概率
 γ ——相对真误差
 Δ_x ——测定值 x 的绝对真误差
 δ ——气隙长度, 随机误差, 厚度
 ε ——系统误差
 ξ_x ——测定值 x 的修正值
 η ——效率
 θ ——温升, 角位移, 功角
 θ_x ——测定值 x 的相对修正值
 Λ ——磁导
 $\lambda(\alpha, n)$ ——格拉布斯系数
 μ ——磁导率
 σ ——标准差
 $\hat{\sigma}$ ——标准差的估计值
 σ^2 ——方差
 Φ ——磁通
 Ψ ——磁链
 Ω ——机械角速度

目 录

主要符号表

绪论 1

第一章 误差基本概念 3

§ 1-1 误差公理及定义 3

§ 1-2 误差的来源与分类 6

§ 1-3 测量的精度及其提高的条件 9

§ 1-4 削弱系统误差的基本方法 10

第二章 随机误差 14

§ 2-1 概率 14

§ 2-2 随机误差的统计特性及其估计 18

§ 2-3 可疑观测值的舍弃 30

第三章 误差的传递及误差合成 33

§ 3-1 误差传递的一般公式 33

§ 3-2 方差和标准差的传递 35

§ 3-3 误差传递公式在间接测量中的应用 36

§ 3-4 误差合成简介 38

第四章 曲线拟合 42

§ 4-1 线性函数关系的拟合 42

§ 4-2 曲线的高次多项式拟合 47

§ 4-3 曲线的分段拟合 48

§ 4-4 指数函数的拟合 50

第五章 转速及转差率的测量 58

§ 5-1 测速用传感器 58

§ 5-2 数字测速 61

§ 5-3 瞬时测速装置 65

§ 5-4 转差率的测量 67

§ 5-5 计量光栅 69

第六章 电机转矩的测量 76

§ 6-1 测功机 76

§ 6-2 转矩仪 81

§ 6-3 电阻应变法 86

§ 6-4 磁致伸缩法 90

§ 6-5 用测量绕组或端点电量法测定交流电机转矩 91

第七章 温度的测量 95

§ 7-1 电阻法 95

§ 7-2 埋置检温计法 99

§ 7-3 温度计法 103

§ 7-4 转子温度的无线电测量 104

§ 7-5 红外测温 107

第八章 噪声和振动的测试 111

§ 8-1 噪声测量的基本量度 111

§ 8-2 噪声测试设备的基本原理 116

§ 8-3 振动测试设备的基本原理 118

§ 8-4 测试方法及允许标准 120

第九章 异步电动机转矩-转速曲线的测定 126

§ 9-1 根据电动机的起动试验测定 $T = f(n)$ 曲线 126

§ 9-2 利用可调参数的滤波器削弱 $T = f(n)$ 曲线中的纹波 134

§ 9-3 应用测功机或转矩仪测定机械特性 135

第十章 电机的损耗和温升 139

§ 10-1 异步机杂散损耗的测定 139

§ 10-2 间接法求异步电动机的温升 144

§ 10-3 用降压负载法求取异步电动机的工作特性 147

第十一章 电机参数的测定 150

§ 11-1 直流电机电枢回路电感系数的测定 150

§ 11-2 负载时同步电抗及功角的测定 152

§ 11-3 三相突然短路及电压恢复法试验测定同步电机的瞬变参数 153

§ 11-4 同步电机的频率特性 158

第十二章 电机中磁场的测定 169

§ 12-1 探测线圈法 169

§ 12-2 霍尔效应法 172

§ 12-3 磁通计法 174

§ 12-4 磁阻效应法及磁敏二极管简介 178

第十三章 电机测试中的数据采样

系统	180
§ 13-1 概述	180
§ 13-2 交直流电量变送器	181
§ 13-3 采样开关	193
§ 13-4 采样—保持电路	195
§ 13-5 采样多路器	196
§ 13-6 模—数转换器	197
§ 13-7 采样控制器	201
§ 13-8 电机运行状态的自动控制	202
§ 13-9 试验数据的输出	207
§ 13-10 电动机出厂试验自动检测装置	209

第十四章 电机测试中微计算机应用

介绍	213
§ 14-1 微计算机的特点及其基本结构	213
§ 14-2 微计算机的接口	219
§ 14-3 微计算机在电机测试中的应用	227
§ 14-4 计算机处理电机试验数据举例	231
附录	238
附录 I 数表	238
附录 II 互感器误差对测量结果的影响	240
附录 III 试验站的电源机组简介	243

绪 论

电机测试技术主要研究电机各种特性及参数的测试原理及方法,包括电机的工作特性、机械特性、热、声、磁场、电量及电参数的测试;误差分析和试验数据处理。

电机测试技术的发展与电机工业的发展是密切相关的。科学技术的发展对电机提出了越来越高的性能和质量指标。在新产品的研制过程中,除了必须对设计、工艺过程及理论分析方面进行研究外,还必须对产品或模型进行大量的试验验证,来探索改进的途径。例如,只有对电机的噪声和振动进行测试及分析以后,才能比较正确地判明引起噪声及振动的原因,从而改进设计及工艺以削弱之。又如,对某大型水轮发电机的温度测量发现,同一槽内线棒各导体间的最高温度与最低温度之差竟达三十多度。经分析,系换位不完善所引起,从而提供了改进设计的途径。此外,对电机转矩—转速特性曲线的测定、漏磁场的实测等等,都可起到类似的效果。

由于工农业生产发展的需要,电机的品种及产量越来越大,例行试验的工作量也随之不断增加;在大型电机的试验研究、工作情况的监视以及自动控制系统中都有大量的数据需要采集和处理。这些都对测试技术提出了新的要求,自动测试系统以及电子计算机在试验中应用等课题也提到了日程上来。近代电子技术的迅速发展又为提高电机试验的精度和速度、进行动态特性测试及采用新的测试方法提供了可能性,进一步推动了电机测试技术的发展。

本书包含下列三部分内容:

1. 第一章到第四章为误差理论及试验数据处理。
2. 第五章至第十二章介绍了电机中的非电量和电机特性及参数测量。
3. 第十三章及十四章为电机测试中的数据采样系统和微型计算机的应用简介。

测量工作的价值在于取得高精确度的测量结果,也就是减小测量结果的误差。测量精度不仅对产品质量起着监督和保证作用,而且往往是产品优劣的决定性因素。因此,对测量误差的深入研究,往往成为重大的科学新发现和带根本性的技术革新的前导,这就不难理解为什么测量误差问题一直受到人们极大的重视。本书简要地介绍了有关误差产生的原因、削弱系统误差和随机误差的方法、误差传递以及用曲线拟合处理试验数据的基本方法。这些内容对于一个实验工作者来说是基本的。

在第二部分中介绍了电机试验中转速、转矩、温度、噪声、磁场的测量以及电机特性和参数测定中应用的传感器和仪器,此外还介绍了若干较新的或较深入的试验内容。

由于电机容量的不断增长以及对电机性能指标的要求日益提高,有些常用的试验方法或受试验站电源容量及安装条件的限制;或因测试精度及速度不能满足要求,近年来国内外对试验中各非电量传感器、仪器的研制以及新的电机试验方法作了大量的工作,使测量的精度和速度有了显著的提高。例如,由于电子技术的飞跃发展,电机试验中已开始广泛采用各种数字式仪表及装置来检测各物理量。它能自动地将被测的量直接以数字形式显示、记录或输出。与一般的指针式仪表相比,数字式仪表显著地提高了测量的精度、灵敏度和速度,便于实行自动化测量。此外,数字式仪表还为新的测试方法提供了条件,如数字式转差率仪可以

直接显示异步电动机的转差率值。又如配合微型计算机系统可以测定电机的瞬时转速及转速稳定度等，解决了过去无法精确测定的问题，为研制和鉴定高精度、高性能的电机提供了必要的条件。近年来，对大型电动机的温升和工作特性试验出现了不少间接测定的方法，以解决试验站电源容量不足或试验时安装困难的问题。

近年来，微型计算机应用的大量推广为自动测试系统开拓了发展的新途径。微型计算机在自动测试系统中的功能为：（1）进行程序控制；（2）监视测试过程；（3）记录、整理并分析测试结果；即将测得的数据进行分析处理，最后以数字显示、打印，或绘制图表，也可以信息方式存储。因此，微型计算机在测试系统中已作为测试设备的一部分，充当一部分电子测量仪器的作用。由于微型计算机使用中具有高度灵活性和通用性，可以非常方便地实现多种方式的控制及测试功能，因此随着微型计算机价格的大幅度下降，它在电机测试中的应用具有广阔的前景。虽然，本教材只能简要地介绍一些最基本的概念，但希能引起读者对这方面工作的重视，在新的测试仪器、测试方法和微型计算机应用方面进行更多的研究和推广工作，以促进新技术在电机试验工作中的应用。

电机测试技术为电机专业的专业课。通过对本课程的学习，使学生在电机的试验研究中对传感器、仪表、试验方案能进行合理的选择，并对试验中的误差有一定的分析能力。由于本课程涉及面广，实践性强，因此在教学过程中应尽量注意实践性环节，如习题、实验或示范实验的配合，以提高学生的实验技能和分析能力。课程内容可根据学时安排、实验条件等具体情况，选择有关部分进行教学。

第一章 误差基本概念

§ 1-1 误差公理及定义

一、误差公理

对自然界所发生现象的研究，常要通过各式各样的实验与测量来完成。在实际测量中，由于测量仪器、工具的不准确，测量方法的不完善以及各种因素的影响，实验中测得的值和它的真实值并不一致，这种矛盾在数值上的表现即为误差。随着科学水平的提高和人们的经验、技巧和专门知识的丰富，误差可以被控制得越来越小，但是不能使误差降低为零。误差产生的必然性，已为大量实践所证实，也为一切从事科学实验的人们所公认。因此得到下面的误差公理：

一切实验结果都具有误差，误差自始至终存在于一切科学实验的过程中。

二、误差定义

(一) 绝对真误差，简称真误差，它等于某量的给出值与它的真值之差，即

$$\text{绝对真误差} = \text{给出值} - \text{真值}$$

或用符号表示为

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

式中，给出值 x 包括测量值、标称值、近似值等；真值 x_0 是指在规定的时空内被测值的真实大小。

例如 真值为 6.12 A 的电流，在电流表的示值为 6.08 A，则电流表示值 6.08 A 的真误差为 -0.04 A；标称值为 10 Ω 的电阻器，其实际值为 9.998 Ω ，则该电阻器的真误差为 0.002 Ω ； π 的近似值取 3.14 时，其误差约为 -0.0016 等等。

一般说来，真值是未知的，因此真误差也是未知的。有些情况真值是可以知道的，又有些情况从相对意义上来说也是知道的。

真值可知的情况有如下几种：

1. 理论真值 例如平面三角形三角之和为 180°，一周的圆周角为 360°，同一量值之差为零，自身之比为 1，等等。其中 180°、360°、0、1 均为理论真值。

2. 计量学约定真值 国际计量大会决议定的单位，如长度、质量、时间、电流、温度、发光强度等单位。例如：

长度单位——m。1 m 等于氪 86 原子的 2 $p_{1/2}$ 和 5 $d_{5/2}$ 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1650763.73 倍。

质量单位——kg。1 kg 等于铂铱合金制成的国际千克原器的质量。

时间单位——s。1 s 是铯 133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁的辐射周期的 9192631770 倍的持续时间。

3. 标准器相对真值 高一级标准器的误差与低一级标准器或者普通仪器的误差相比，比值为 1/5 (或 1/3~1/20) 时，则可以认为前者是后者的相对真值。例如，0.1 级表可作为

0.5 级表的相对真值, 为校验用。

修正值 除上述的真误差外, 在实际测量中还常用到修正值这一概念, 它与真误差的数值相等、符号相反。即修正值

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

在高准确度的仪器仪表中, 常常给出修正值或修正曲线。因此, 当知道了给出值 x 及相应的修正值 ζ_x 以后, 即可求出被测量的真值 x_0 (这里是相对真值或实际值, 下同)

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

(二) 相对真误差

绝对真误差的表示方法有不足之处, 因为它不能确切地反映出测量的准确程度。例如测量两个电阻, 其中电阻 $R_1 = 10\Omega$, 绝对真误差 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$; 电阻 $R_2 = 1000\Omega$, 绝对真误差 $\Delta R_2 = 1\Omega$ 。从例中可以看到, 尽管 ΔR_1 小于 ΔR_2 , 但不能由此得出测量电阻 R_1 较测量电阻 R_2 的准确度为高的结论。因为 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$ 相对于 10Ω 来讲为 1% , 而 $\Delta R_2 = 1\Omega$ 相对于 1000Ω 来讲为 0.1% , 即 R_2 的测量比 R_1 的测量更准。由此, 又引出了相对误差或误差率的概念, 定义如下:

相对真误差 = (绝对真误差 ÷ 真值) $\times 100\% \approx$ (绝对真误差 ÷ 给出值) $\times 100\%$

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

例如 今有一只 $0 \sim 5\text{ A}$ 的 0.5 级电流表, 当指针指在 4.00 A 刻度时若电流的实际值为 4.02 A , 则该刻度的相对真误差为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% = \frac{4 - 4.02}{4.02} \times 100\% = -0.498\% \\ &\approx \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% = \frac{4 - 4.02}{4} \times 100\% = -0.5\% \end{aligned}$$

相对真误差通常用于衡量测量 (或量具及测量仪器) 的准确度。相对误差越小, 准确度越高。

与绝对修正值 ζ_x 相对应, 还有相对修正值 θ_x , 它与相对真误差等值反号, 即

$$\theta_x = -\gamma = -\frac{\zeta_x}{x_0} \approx -\frac{x_0 - x}{x} \quad (1-5)$$

由此, 可求出被测量的实际值为

$$x_0 = x (1 + \theta_x) \quad (1-6)$$

相对真误差 (或相对修正值) 只有大小、符号, 而无量纲。

(三) 引用误差

引用误差是一种简化的和实用方便的相对误差, 常在多档和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表可测范围不是一个点, 而是一个量程。这时若按式 (1-4) 计算, 由于分母的改变, 所以计算很烦。为了计算和划分准确度等级的方便, 通常取该仪器仪表量程中的测量上限 (满刻度值) 作为分母。由此引出定义:

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{满刻度值}} \times 100\%$$

用符号表示为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x_N} \times 100\% \quad (1-7)$$

例1-1 满刻度为 5 A 的电流表在示值为 4 A 时的实际值为 4.02 A, 则此电流表在一点的引用误差为 -0.4%。

通常电工仪表精度等级 ($\alpha\%$) 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。一般说来, 如果仪表为 α 级, 则仅说明该仪表的最大引用误差不超过 $\alpha\%$, 而不能认为它在各刻度点上的示值误差都具有 $\alpha\%$ 的精度。设某电表的满度值为 x_N , 测量点为 x , 则该电表在 x 点邻近处的示值误差应为

$$\begin{aligned} \text{绝对真误差} &\leq x_N \times \alpha\% \\ \text{相对真误差} &\leq \frac{x_N}{x} \times \alpha\% \end{aligned} \quad (1-8)$$

一般, $x \leq x_N$, 故当 x 越接近于 x_N 时, 其测量精度越高, x 离 x_N 越远时, 其测量准确度越低。这就是为什么当使用这类仪表测量时, 尽可能在仪表满度值的 2/3 以上量程内进行测量的原因。在选择仪表作测量时, 要注意到这一情况。

例1-2 某待测的电压约为 80 V, 现有 0.5 级 0~300 V 和 1.0 级 0~100 V 两个电压表, 试问用哪一个电压表测量较好?

解 用 0.5 级 0~300 V 电压表测量 80 V 时的最大相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{x_N}{x} \times \alpha\% = \frac{300}{80} \times 0.5\% \approx 1.9\%$$

用 1.0 级 0~100 V 电压表测量 80 V 时的最大相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{x_N}{x} \times \alpha\% = \frac{100}{80} \times 1.0\% = 1.25\%$$

此例说明, 如果量程选择恰当, 用 1.0 级仪表进行测量时的精度也会比用量程选择不恰当的 0.5 级仪表为高。因此, 在选用仪表时, 要避免单纯追求精度等级“越高越好”的倾向, 而应根据被测量的大小, 兼顾仪表的级别和测量上限合理地选择。

(四) 分贝误差

在无线电、声学等计量中, 常用分贝误差来表示相对误差。因此, 分贝误差实质上是相对误差的另一种表示方式。

设两个电压的比值为

$$\alpha = U_2/U_1 \quad (1-9)$$

在工程上有时采用对数的形式来表示, 即

$$A = 20 \log \alpha \quad (1-10)$$

A 的单位为 dB。在式 (1-10) 中, 如果比值 α 产生了一个误差 $\Delta\alpha$, 则对应 A 产生一个误差 ΔA , 故有

$$A + \Delta A = 20 \log(\alpha + \Delta\alpha) \quad (1-11)$$

式 (1-11) 减去式 (1-10), 得

$$\Delta A = 20 \log \left(1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \quad (1-12)$$

该式给出了比值的相对误差 $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ 与分贝误差 $\Delta A(\text{dB})$ 之间的关系。由于

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

当

$$\Delta \ll 1 \text{ 时, } \ln(1 + \Delta) \approx \Delta$$

从式 (1-12) 得

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &\approx 8.686 \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \\ \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) &\approx 0.1151 \Delta A \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

例1-3 某一电压表测得电压为 220 V, 用标准表测得为 223 V, 求分贝误差。

解 真误差 $\frac{\Delta x}{V} = 220 - 223 = -3 \ominus$

相对误差 $\gamma = -3/220 \approx -1.4\%$

分贝误差 $\Delta A = 8.686 \times (-1.4\%) \approx -0.12$

例1-4 已知某量的分贝误差为 0.34dB, 求相对误差。

解 相对误差 $\approx 0.1151 \times 0.34 = 3.9\%$

注意: 由于功率比的分贝定义为 $A = 10 \log \alpha$, $\alpha = P_1/P_2$, 故求功率比的分贝误差时, 式 (1-12) 及式 (1-13) 将改为

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &= 10 \log \left(1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \\ \Delta A &\approx 4.343 \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \\ \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) &\approx 0.2303 \Delta A \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

§ 1-2 误差的来源与分类

一、误差的来源

误差按来源分类, 即根据其产生的原因可分为

(一) 装置误差 根据电机测试的情况, 装置误差又可分为

① 按1983年颁布施行的国家标准《有关量、单位和符号的一般原则》(GB3101-82)规定, 量和单位严格表达应为

$$A = \{A\} \cdot [A]$$

即

$$\text{物理量} = \text{数值} \times \text{单位}$$

运算中可采用下列三种方式之一,

如

$$v = \frac{l}{t}, \quad l = 6 \text{ m}, \quad t = 2 \text{ s}$$

①

$$v = \frac{6 \text{ m}}{2 \text{ s}} = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

②

$$\frac{\text{m}}{(\text{m/s})} = \frac{6}{2} = 3$$

③

$$\{v\} \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{6}{2} = 3$$

推荐用②方式较好。

1. 标准器误差 标准器是提供标准量值的器具, 如标准电池, 标准电阻等, 它们本身的标称值都有误差。

2. 仪表误差 也称工具误差或简称仪差。这是由于测量所用的工具本身不完善而产生的误差, 如电工仪表、电桥、温度计和秒表等的误差。

3. 装备、附件误差 这里指的是电源的波形、三相电源的不对称度, 各种测量附件如转换开关、触点、接线引起的误差以及测试设备和电路的安装、布置或调整不完善等而产生的误差。

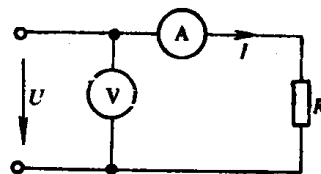


图 1-1

(二) 方法误差

方法误差也称为理论误差, 这种误差是由于测量方法本身的理论根据不完善或采用了近似公式所造成。例如, 采用图 1-1 的线路测量电阻, 用式 $R = \frac{U}{I}$ 来进行计算, 没有考虑电流表上的压降; 用反转法测定异步电机的杂耗等等, 都会产生方法误差。对前者的方法误差进行修正, 可减少或消除方法误差, 而对后者就困难了。此外, 一般在推导测量结果的表达式中没有得到反映的一些影响量所引起的误差, 如测量装置中的漏电、热电势、引线及接触电阻的压降、平衡电路中的灵敏度阈等等, 都能引起方法误差。

(三) 人员误差

人员误差简称人差, 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。例如记录一个信号时, 测量者有滞后或超前的趋向而产生的影响; 读表时, 人员位置偏差而产生的误差等等。这类误差往往因人而异, 并与个人当时的生理与心理状态密切相关。

(四) 环境误差

这是由于测量环境的影响量 (如温度、湿度、气压、电磁场等) 偏离规定值时而产生的误差。

二、误差的分类

根据误差的性质, 测量误差可分为系统误差、随机误差与过失误差三类。

(一) 系统误差

在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号保持不变, 或在条件改变时, 按某一确定规律变化的误差称为系统误差, 简称系差。例如标准器量值的不准确, 仪器示值的不准确而引起的误差。

在一个测量中, 如果系统误差很小, 那么测量结果就可以是相当准确的。测量的准确度由系统误差来表征, 系统误差越小, 则测量的准确度越高。如果存在着某项系统误差而人们却不知道, 这是危险的, 因为不一定能通过对测量数据的统计处理来发现它是否存在。特别是系统恒差, 即当试验条件变化, 仍保持恒定的系统误差, 仅凭数据的统计处理是既不能发现, 也不能消除的。

(二) 随机误差

随机误差又称偶然误差, 简称随差。在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号均发生变化, 其值时大时小, 其符号时正时负, 没有确定的变化规律, 也不能事先预定, 但是具有抵偿性的误差。

随机误差主要是由于各种影响量, 例如电源的波动、磁场的微变、热起伏、空气扰动、

气压及湿度的变化、测量人员感觉器官的生理变化等一些互不相关的独立因素对测定值的综合影响所造成的。因此,在测量过程中,尽管测量条件“不变”,并仔细地进行多次重复测量,就能发现各次测量结果不完全一样,其原因就是由于各种随机因素造成的。如果各次测量结果完全一样,这只能表明所用的测量装置灵敏度不够,不足以发现随差吧了。单次测量的随机误差没有规律,但多次测量的总体却是服从统计规律的。通过对测量数据的统计处理,将尽可能消除这种影响。

系统误差与随机误差之间并不存在不可逾越的鸿沟。随着人们对误差来源及其变化规律认识的加深,往往有可能把以往认识不到而归为随机误差的某项误差予以澄清而明确为系统误差。反之,当认识不足,测试条件有限时,也常把系统误差当作随机误差,并在数据处理时进行统计分析处理。

(三) 过失误差

过失误差又称粗差,是一种显然与事实不符的误差。它主要是由于粗枝大叶、过度疲劳、操作不正确或匆忙实验等引起。例如,读错刻度、记录错误、计算错误等。含有粗差的测量结果称为坏值或异常值。正确的结果不应包含粗差,即所有坏值都应该剔除(详见§2-3)。所以,在作误差分析时,要估计的误差只有系统误差与随机误差两类。

误差的归类不是绝对的,一个具体的误差可以归入这一类,有时也可能归入另一类。

三、系统误差和随机误差的定义

设对某被测量进行了等精度(其定义见§2-2)、独立的 n 次测量,得值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,则测定值的算术平均值 $\bar{x}$ 被定义为

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

式中 $\bar{x}$ 又可称为取样平均值、抽样平均值或样本平均值。

当测量次数 n 趋于无穷($n \rightarrow \infty$),则取样平均值的极限被定义为测定值的数学期望 a_x ,即

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

式中 a_x 又称为测定值的总体平均值。

测定值的数学期望 a_x 与测定值真值 x_0 之差被定义为系统误差 ε ,即

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

n 次测量中各次测定值 x_i ($i = 1 \sim n$)与其数学期望 a_x 之差,被定义为随机误差 δ_i ,即

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

将式(1-17)和式(1-18)等号两边分别相加,得

$$\varepsilon + \delta_i = (a_x - x_0) + (x_i - a_x) = x_i - x_0 = \Delta x_i \quad (i = 1 \sim n) \quad (1-19)$$

式中 Δx_i ($i = 1 \sim n$)为各次测定值的真误差。式(1-19)说明,各次测定值的真误差等于系统误差 ε 和随机误差 δ_i 的代数和。

§ 1-3 测量的精度及其提高的条件

一、精度、准确度、精密度和精确度

精度一词在这里暂作为泛指性的广义名词。例如，实验相对误差为 0.01%，则可笼统地说其精度为 10^{-4} 。如欲进一步分清系差和随差，则“精度”一词可分为

1. 准确度 反映系差大小的程度。
2. 精密度 反映随差大小的程度 (precision)。
3. 精确度 反映系差和随差合成大小的程度 (accuracy)。

对于实验来说，精密度高的准确度不一定高，准确度高的精密度也不一定高。但精确度高的则准确度与精密度都高。下图用打靶的例子来说明。

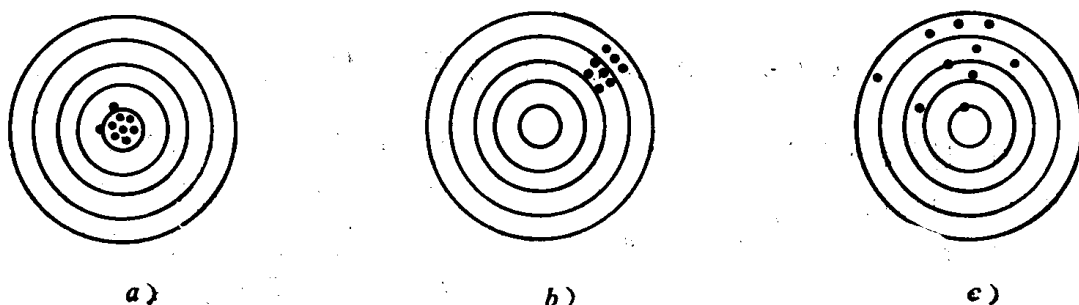


图 1-2

图中最里面的小圆圈表示靶心。图 a 表示精确度好，即系差和随差都小。图 b 表示精密度好，但准确度不好，即存在较大的系统误差。图 c 表示精密度和准确度都不好。

在科学实验中，人们希望得到精确度高的结果。

二、提高测量精度的条件

为了提高测量精度，必须进一步理解粗差、系统误差和随机误差的关系。图 1-3 列举了

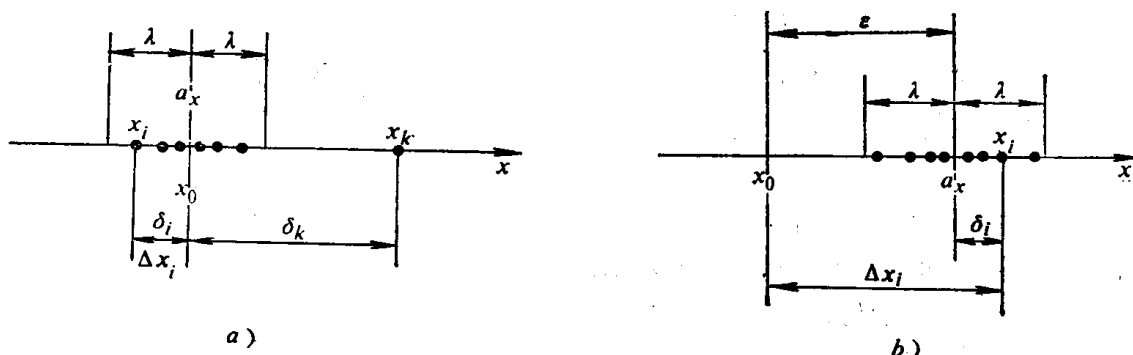


图 1-3

上述三种误差对测量结果的影响。凡是各测定值 x_i ($i = 1 \sim n$) 与真值 x_0 不重合的各点均具有测量误差，真误差 Δx_i 的大小可以用 x_i 与 x_0 的差值来确定。图 a 表示各测定值没有系统误差的情况，真值 x_0 与数学期望值 a_x 相重合，测定值密集在 a_x 的两侧。各 x_i 与 a_x 的差值是由随机误差造成的。随机误差的极限值 λ 称为随机不确定度。图中远离 x_0 的点 x_k ，其误差 δ_k 大于 λ ，这是由粗差造成的，故 x_k 是含有粗差的坏值。图 b 表示有恒定系统误差 ϵ 。

的情况。这时各 x_i 密集于 α_i 的周围, 但偏于 x_0 的一边。从图可以看出, 真误差 Δx_i 等于恒定系统误差 ε 和随机误差 δ_i 的代数和, 系统误差越小, 测量越准确。随机误差 δ_i 的极限值 λ 决定了测量的精密度。测量数据越离散, 则测量精密度越低; 反之越高。

从图中还可以看出, 随机误差 δ_i 在多次测定中汇集于数学期望值的附近, 即 δ_i 有正有负, 这就有可能通过多次测定及数学处理来削弱它们的影响。但是对系统误差, 特别是对恒定系统误差来说, 数学处理的效果要差得多或毫无效果。因此, 只有在消除或大大削弱了系统误差之后, 精密测量才有意义。一个既精密又准确的测量称为精确测量。显然, 在精确测量中不应含有粗差。因此, 实现精确测量必须采取下列措施:

1. 剔除含有粗差的坏值;
2. 尽可能消除系统误差;
3. 进行多次测量以削弱随机误差的影响。

§ 1-4 削弱系统误差的基本方法

上节提到, 进行精确测量的条件之一是消除或尽量削弱系统误差。系统误差常不易被人们发觉而存在于测量过程中, 这是最可怕的。系统误差不象随机误差那样可以通过统计处理而削弱, 它由于来源多, 甚至有的系统误差还不易发觉。因此削弱系统误差要针对具体情况来分析、进行处理。这在很大程度上取决于实验者的经验、学识和技巧。

消除或削弱系统误差的主要办法是, 针对不同的误差来源进行处理。因此, 在测量之前必须分析所有可能产生系统误差的来源, 并设法削弱它们的影响。

一、仪器误差和装置误差的削弱

仪器仪表误差往往是电机测试误差主要的来源。因此, 在测量之前应将全部量具和仪器进行鉴定并确定它们的修正值, 在数据处理过程中进行误差修正。此外, 还应尽量检查各种影响量如温度、湿度、电磁场等对仪器仪表表示值的影响, 确定各种修正公式、曲线或表格, 以便对结果进行修正。下面举一个对仪器仪表读数的基本误差进行修正的例子。

例1-5 对某异步电机进行短路试验,

W_{A-AB} 的测量接线如图 1-4 所示 (图中未示出 W_{C-CA} 、 I_B 、 I_C 等的测量接线)。所用仪器仪表规格、仪表读数及相应的修正值见后。求 W_{A-AB} 的功率。

所用仪器仪表的规格如下:

功率表 (I_A , U_{AB}) 0.5 级, 满度 125 格, 500W; 电压线圈 500 V, 内阻 16667 Ω ; 电流线圈 5 A

电流表 (I_A) 0.5 级, 满度 100 格, 5 A

电压表 (U_{AB}) 0.5 级, 满度 600 V, 内阻 6330 Ω

电流互感器 0.5 级, 量程为 50 A/5 A

各仪表的读数值及相应经检定的误差如下:

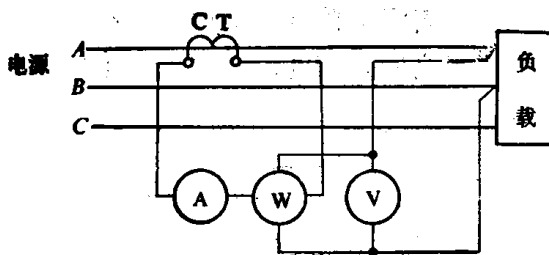


图 1-4