

普通高等教育电机与电器创新型规划教材

电机实验

徐永明 胡志强 〇 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育电机与电器创新型规划教材

电机实验

主编 徐永明 胡志强

参编 陶大军 吕德刚



机械工业出版社

本书是配合“电机学”课程所编写的,内容包括电机实验概述、电机实验中常用物理量的测量;在电机教学实验一章中给出了直流电机、变压器、异步电机、同步电机、异步电动机的起动与调速、异步电动机温升实验、单相异步电动机和双速异步电动机等实验 22 个;在电机专题实验一章中给出了 7 个实验;在控制电机实验一章中给出了 6 个实验。电机教学实验一章是重点,其中直流电机、变压器、异步电动机和同步发电机实验是必做的内容,其他实验可根据专业需要选做。电机专题实验和控制电机实验供电机专业方向学生选做。

本书可作为高等院校及高职学校电气工程及其自动化专业学生的实验教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机实验/徐永明,胡志强主编. —北京:机械工业出版社,2013.5
普通高等教育电机与电器创新型规划教材
ISBN 978-7-111-41797-2

I. ①电… II. ①徐…②胡… III. ①电机—实验 IV. ①TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 048842 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新

版式设计:潘蕊 责任校对:肖琳

封面设计:陈沛 责任印制:乔宁

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·11 印张·267 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41797-2

定价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

“电机实验”课程是学习电机理论的重要实践环节，其目的在于使学生通过实践，掌握电机实验的基本方法和基本技能，验证与理解所学的电机理论，培养他们严肃认真和实事求是的科学作风。

“电机实验”课程是“电机学”课程的重要组成部分，本书是配合《电机学》而编写的。在《电机学》中，对电机的原理阐述得很详尽，而在《电机实验》中，则是侧重于使学生掌握电机实验的方法，运用所学理论知识来分析研究电机实验中的各种问题，得出必要的结论，培养学生在电机学这门学科中具备分析问题和解决问题的初步能力。

《电机实验》中所论述的电机实验方法与工厂、科研单位所采用的方法是基本一致的，但又具有教学上的要求和特点。

《电机实验》的主要内容包括：电机实验概述和电机实验中常用物理量的测量。在电机教学实验一章中给出了直流电机、变压器、异步电机和同步电机等实验 22 个；电机专题实验一章中的 7 个实验是选做内容，有条件的可以选做；控制电机实验中的 6 个实验，供某些专业特殊需要，也可以选做。

本书可作为高等院校及高职学校电气工程及其自动化专业的电机实验教学用书；也可作为相关技术人员的参考书。

编写本书时参考了本校《电机实验》讲义、杭州求是教仪实验报告和国家标准等资料。本书由哈尔滨理工大学电机系徐永明、胡志强主编，陶大军、吕德刚参编。其中，徐永明编写第 1、2 章并对全书作了统稿修改，胡志强编写第 5 章，陶大军编写第 3 章的 3.1~3.18 节，吕德刚编写第 3 章的 3.19~3.22 节和第 4 章。

由于编者学识有限，时间仓促，书中缺点错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 电机实验概述	1
1.1 电机实验的基本要求	1
1.2 电机实验报告的编写	1
1.3 电机实验安全操作注意事项	2
1.4 误差的基本概念	3
1.5 有效数字及其运算	13
第2章 电机实验中常用物理量的 测量	15
2.1 绝缘电阻的测量	15
2.2 绕组直流电阻的测量	16
2.3 功率的测量	18
2.4 温度的测量	21
2.5 转速和转差率的测量	22
2.6 转矩的测量	26
2.7 测量高阻抗负载和低阻抗负载时 的电路和仪表的布置	31
第3章 电机教学实验	33
3.1 直流电机认识实验	33
3.2 直流发电机	36
3.3 直流并励电动机	41
3.4 直流串励电动机	45
3.5 直流电机的损耗与效率的测量	47
3.6 单相变压器	50
3.7 三相变压器	56
3.8 三相变压器的联结组和不对称短路	62
3.9 三相三绕组变压器	72
3.10 单相变压器的并联运行	74
3.11 三相变压器的并联运行	76

3.12 三相笼型异步电动机的工作特性	78
3.13 三相异步电动机的起动与调速	85
3.14 异步电动机的温升实验	89
3.15 单相电阻起动异步电动机	91
3.16 单相电容起动异步电动机	94
3.17 单相电容运转异步电动机	97
3.18 双速异步电动机	99
3.19 三相同步发电机的运行特性	101
3.20 三相同步发电机的并联运行	106
3.21 三相同步电动机	111
3.22 三相同步发电机参数的测量	114
第4章 电机专题实验	118
4.1 直流他励电动机的机械特性	118
4.2 三相异步电动机在各种运行状态下 的机械特性	122
4.3 异步电动机 $M-s$ 曲线的测绘	125
4.4 三相异步电动机杂散损耗的测量	128
4.5 三相笼型异步电动机最小转矩的 测量	135
4.6 三相异步发电机	139
4.7 同步发电机瞬变参数的动态测量	145
第5章 控制电机实验	149
5.1 步进电动机	149
5.2 力矩式自整角机	153
5.3 控制式自整角机参数的测量	156
5.4 正余弦旋转变压器	158
5.5 交流伺服电动机	161
5.6 直流伺服电动机	165
参考文献	169

第1章 电机实验概述

1.1 电机实验的基本要求

电机实验的目的在于培养学生掌握基本的电机实验方法与操作技能,使学生能够根据实验目的,拟定实验线路,选择所需仪表,确定实验步骤,测量所需数据,分析数据,得出实验结论,从而提出实验报告。学生通过电机实验,可以进一步验证和深化所学的电机理论。在电机实验过程中,必须严肃认真按下列基本要求进行。

1. 实验前的准备

在进入实验室前应阅读有关实验室的规则和实验的安全要求。

2. 实验的进行

(1) 建立小组,合理分工并相互轮换,实验以小组为单位进行。在实验中,接线、调节负载、记录数据等应有分工,并且轮换,使每个人都能得到操作机会。

(2) 抄录铭牌,选择仪表量程。实验前应当首先熟悉被实验机组,记录电机及所用设备的铭牌和仪表量程,然后将仪表设备布置整齐,便于测取数据。

(3) 正确接线。接线时除应注意线路中的仪表量程和所用导线的粗细外,应力求线路简单、明了。接线的原则是,先接主电路,后接并联电路,即由电源开始连接主要的串联电路等(如电枢回路)。对于三相电路,一般都是三根导线一齐往下连接;对于单相电路,则是由电源某一极出发,连接主要电路所经过的各个设备、仪表,然后返回到电源的另一极,再在主电路的各段上分别加接并联支路。主电路和并联支路的线路最好选用不同颜色的导线连接。接线完毕后小组成员应互相校对。

(4) 起动电机。观察仪表工作是否正常(如是指针仪表则应看指针正、反向),并试起动一下,看是否能达到额定负载。初步运转正常后,再正式开始实验。

(5) 测量实验数据应该注意下列事项:

1) 要熟悉仪表的量程(如是指针式仪表应熟悉仪表的刻度并记下其倍率)。

2) 要预先考虑好需取几点数据(测绘一条曲线一般取5~7点即可)。

3) 记录数据时一定要在同一时间读数,测量完一个特性或做完一个实验后,应即时考虑数据的合理性。

4) 随时注意实验过程中所发生的现象和问题,运用已有的知识,在指导教师的帮助下,解释并解决这些问题。

5) 实验完毕,应将数据交指导教师审阅。指导教师认可后,方可拆线、整理实验台等。

1.2 电机实验报告的编写

实验报告是一个实验的全面总结,要用简明的形式将实验结果在实验报告中完整和真实

地表达出来。通过编写实验报告,学生可将实验过程中得到的实践知识,经过系统的总结、分析,提高到理性认识。经验表明,一份好的实验报告,在以后的工作中通常会有较高的参考价值。对实验报告的要求是,文理通顺,简明扼要,字迹端正,图表清晰,结论正确,分析合理,讨论深入。

1. 实验报告的内容

(1) 实验报告应包括姓名、专业班级、组别、同组同学姓名、实验日期、实验名称、实验目的、实验内容、实验线路、注意事项、数据及测试结果、绘制的图表曲线、计算举例和分析讨论等。

(2) 实验报告应列出被试电机的铭牌数据及使用仪表、仪器的型号、规格、数量及编号。

2. 编写实验报告要求

(1) 各项数据如系计算所得,必须列出所用公式,并以一组数据为例进行计算。其他相类数据可直接列入表格。

(2) 图表、曲线均应按工程要求绘制,曲线一律画在坐标纸上,比例要适当,坐标轴上应注明物理量的符号和单位、比例以及曲线的名称。曲线要用曲线板绘制,力求光滑,除有要求外,不要画成折线。

(3) 对实验结果进行理论分析,比较各种不同实验方法所得结果并指出其优缺点;有些实验结果与书本上的理论分析有所不同,其原因需要进行必要的说明。

(4) 实验报告应总结实验收获和心得体会。另外,对被试电机的特性应作出评价。

实验报告应在实验完毕后及时编写,并在下次实验前交给指导教师。

1.3 电机实验安全操作注意事项

为按时完成电机实验,确保实验时人身安全与设备安全,要严格遵守实验室的安全操作规程。一般电机实验的安全操作注意事项如下:

(1) 人体不可接触带电线路。

(2) 电源必须经过开关(或接触器)、熔断器接入电机,接线或拆线都必须在切断电源的情况下进行。

(3) 学生独立完成接线或改接线路后,必须经指导教师检查允许,在提示全组同学注意后,方可合上电源开关。实验中如发生事故,应立即切断电源,保护现场,并报告指导教师,待查清问题和妥善处理故障后,才能继续进行实验。

(4) 实验时应注意衣物及实验用接线等不得靠近旋转部分,以防卷入,更不得用手或脚去促使电机起动或停转,以免发生危险。

(5) 操作开关时,动作应迅速果断,以免产生电弧;调节电机负载时请注意换位后触点间不应有电弧。

(6) 电动机直接起动时,电流表应从线路中拆离,或经并联的开关将其短接。

(7) 电流互感器在使用时其二次侧不得开路,以免产生高电压,损坏仪器,危及人身安全。对连有匝数很多的线圈的线路,要小心断路时产生的高电压所引起的危险。电容器用完后必须进行放电。

(8) 进实验室后, 对与所做实验无关的设备不应乱动, 如随意扳动按钮、开关等。

1.4 误差的基本概念

1.4.1 误差公理及定义

1. 误差公理

对自然界所发生现象的研究, 经常需要通过各式各样的实验与测量来完成。在实验测量中, 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, 实验中测量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。虽然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, 误差已被控制得越来越小, 但是, 是不可能使误差降低为零的。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承认, 这就是下面的误差公理: 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。

2. 误差的定义

(1) 绝对误差 (也称绝对真误差或简称真误差) 绝对误差等于某量的给出值与它的真值之差, 即

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

或用符号表示为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-1)$$

式中 X ——给出值, 包括测量值、标称值、近似值等;

X_0 ——真值, 是指规定的时间空间内被规定值的真实大小。

例如, 真值为 6.12A 的电流, 在电流表的示值为 6.08A, 则电流表的示值为 6.08A 的绝对误差为 -0.04A ; 标称值为 10Ω 的电阻器, 其实际值为 9.98Ω , 则该电阻器的绝对误差为 0.002Ω ; π 的近似值取 3.14 时, 其误差约为 -0.0016 等。一般来说, 真值是未知的, 因此绝对误差也是未知的。

当然, 在有些情况下, 真值是可以知道的, 在有些情况下, 从相对意义上来说, 真值也是知道的。真值可知的情況有如下三种:

① 理论真值。例如, 平面三角形三个角之和为 180° , 一周的圆周角为 360° , 同一量值之差为零, 自身之比为 1 等。其中, 180° 、 360° 、0 和 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、发光强度等的单位。

长度单位 m。1m 等于氮 86 原子的 2P₁₆ 和 5d₅ 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1650763.73 倍。

质量单位 kg。1kg 等于铂铱合金制成的国际千克原器的质量。

时间单位 s。1s 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 $1/20 \sim 1/3$) 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，作为校验用表。

除上述绝对误差外，在实际测量中还常应用修正值这一概念。修正值与绝对误差的数值相等、符号相反。

在高精度的仪器仪表中，常常给出修正曲线。因此，当知道了给出值 X 及相应的绝对修正值 ξ_x 时，就可求出被测量的真值 X_0 （这里是相对真值或实际值，下同），即

$$X_0 = X + \xi_x \quad (1-2)$$

(2) 相对误差（也称相对真误差） 绝对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 $R_1 = 10\Omega$ ，绝对误差 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$ ；电阻 $R_2 = 1000\Omega$ ，绝对误差 $\Delta R_2 = 1\Omega$ 。从这个例子可以看出，尽管 $\Delta R_1 < \Delta R_2$ ，但不能由此得出测量电阻 R_1 比测量电阻 R_2 的准确度要高的结论。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：

$$\text{相对误差} = (\text{绝对误差} \div \text{真值}) \times 100\% \approx (\text{绝对误差} \div \text{给出值}) \times 100\%$$

即

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-3)$$

例如，今有一只 0~5A 的 0.5 级电流表，当指针指在 4.00A 刻度时，若电流的实际值为 4.02A，则该刻度的相对误差为

$$\gamma = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% = \frac{4 - 4.02}{4.02} \times 100\% = -0.498\%$$

相对误差通常用于检验测量（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 ξ_x 相对应，还有相对修正值 Q_x ，它与相对误差等值、反号，即

$$Q_x = -\gamma = \frac{\xi_x}{X} \approx \frac{X_0 - X}{X} \quad (1-4)$$

由此，可求出被测量的实际值为

$$X_0 = X(1 + Q_x)$$

相对误差（或相对修正值）只有大小和符号，其量纲为一。

(3) 引用误差 引用误差 $Q = -\gamma = \frac{\xi_x}{X} \approx \frac{X_0 - X}{X}$ ，是一种简化的使用方便的相对误差，常在多挡和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表的可测范围不是一个点，而是一个量程，这时若按式 $\gamma_n \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$ 计算，分母的改变会使计算很复杂。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）作为上式的分母，由此引出引用误差的定义如下：

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{相对误差}} \times 100\%$$

用符号表示为

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

例如,满刻度为5A的电流表在示值为4A时的实际值为4.02A,此电流表在这一点上的引用误差为-0.4%。

通常电工仪表准确度等级 $\alpha\%$ 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 $\alpha\%$ 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 $\alpha\%$ 的准确度。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如下:

$$\text{绝对误差} \leq X_N \times \alpha\% \quad (1-6)$$

$$\text{相对误差} \leq \frac{X_N}{X} \times \alpha\% \quad (1-7)$$

一般地, $X \leq X_N$,故当 X 越接近于 X_N 时,其测量准确度越高; 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。在选择仪表测量时,要注意到这一情况。

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

解:用0.5级0~300V电压表测量80V时的最大相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{X_N}{X} \times \alpha\% = \frac{300}{80} \approx 3.75\%$$

用1.0级0~100V电压表测量80V时的最大相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{X_N}{X} \times \alpha\% = \frac{100}{80} \approx 1.25\%$$

例1-1说明,如果量程选择恰当,用1.0级仪表进行测量时的精度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。

(4) 分贝误差 在无线电和声学等级中,常用分贝误差表示相对误差。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

$$\alpha = U_2/U_1$$

在工程上有时用对数的形式来表示,即

$$A = 20\lg\alpha \quad (1-8)$$

式中 A ——单位为dB。

在式 $A = 20\lg\alpha$ 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

$$A + \Delta A = 20\lg(\alpha + \Delta\alpha)$$

将式 $A = 20\lg\alpha$ 与 $A + \Delta A = 20\lg(\alpha + \Delta\alpha)$ 相减,得

$$\Delta A = 20\lg\left(1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) \quad (1-9)$$

式(1-9)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。由于当 $\Delta \leq 1$

时, $\lg(1 + \Delta) \approx \Delta$,因此从式 $\Delta A = 20\lg\left(1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)$ 得

$$\Delta A \approx 8.686 \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)$$

$$\left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \approx 0.1151 \Delta A$$

例 1-2 某一电压表测量值为 220V，用标准表测得为 223V，求分贝误差。

解：绝对误差

$$\Delta X = (220 - 223) \text{V} = -3 \text{V}$$

相对误差

$$\gamma = -3/220 \approx -1.4\%$$

分贝误差

$$\Delta A = -1.4\% \times 8.686 \text{dB} \approx -0.12 \text{dB}$$

例 1-3 已知某量的分贝误差为 0.34dB，求相对误差。

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

注意：由于功率比的分贝定义为 $A = 10 \lg \alpha$ ， $\alpha = P_1/P_2$ ，因此求功率比的分贝误差时，式

$$\Delta A = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)$$

$$\Delta A \approx 8.686 \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)$$

$$\left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \approx 0.1151 \Delta A$$

将改为

$$\Delta A = 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)$$

$$\Delta A \approx 4.343 \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)$$

$$\left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \approx 0.2303 \Delta A$$

1.4.2 误差的来源与分类

1. 误差的来源

误差按来源，即根据其产生的原因可分为以下几类。

(1) 装置误差 根据电机测量的情况又可分为三种：

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

2) 仪表误差。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。装备、附件误差指的是电源的波形、三相电源的不对称度造成的误差，各种测量附件如转换开关、触点、接线引起的误差，以及测量设备和电路的安装、布置或调整不完善等而产生的误差。

(2) 方法误差 方法误差也称理论误差,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 所示测量电阻的接线测量电阻,用式 $R = \frac{U}{I}$ 来计算实验结果,而没有考虑电流表上的电压降,或者用反转法去测量异步电动机的杂散损耗等,都会产生方法误差。对于前者,进行相应的修正,可以减少或消除方法误差,而对于后者,方法误差的修正就困难了。此外,在推导测量结果的表达式中没有得到反映的一些影响所引起的误差,如测量装置的漏电、热电动势、引线与接触电阻上的电压降、平衡电路中的灵敏度等,也都能引起方法误差。

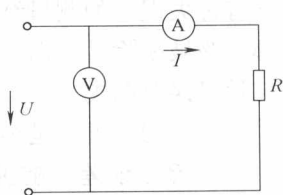


图 1-1 测量电阻的接线

(3) 人员误差 人员误差简称人差,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。这类误差往往因人而异,并与个人当时的生理与心理状况密切相关。

(4) 环境误差 环境误差是由于测量环境的影响(如温度、湿度、气压、电磁场等)偏离规定值而产生的误差。

2. 误差的分类

根据误差的性质,测量误差可分为系统误差、随机误差和过失误差三类。

(1) 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,或仪器示值的不准确而引起的误差等,就是系统误差。在一个测量中,如果系统误差很小,那么测量结果就可以说是相当准确的,也就是说,测量的准确度可以由系统误差来表征,系统误差越小,则测量的准确度越高。应当强调的是,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,即当实验条件变化时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。

(2) 随机误差 随机误差又称偶然误差,简称随差。随机误差是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量,如电源的波动、磁场的微变、热的起伏、空气的扰动、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”,并仔细地进行了多次重复测量,但仍发现各次测量结果不完全一样,其原因就可能是各种随机因素的影响。而如果各次测量结果完全一样,则只能表明所用的测量装置灵敏度不够,不足以发现随机误差罢了。单次测量的随机误差没有规律,但多次测量的随机误差的总体却是服从统计规律的,因此,可以通过对测量数据的统计处理,尽可能地消除这种影响。

系统误差与随机误差之间并不存在不可逾越的鸿沟,随着人们对误差的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,并把它明确为系统误差,进行分析处理。

(3) 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, 如读错刻度、记录错误、计算错误等。含有过失误差的测量结果称为坏值或异常值。正确的结果不应包含过失误差, 即所有的坏值都应该被剔除。所以, 在作误差分析时, 是不包括过失误差的, 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。

3. 系统误差和随机误差的定义

设对某被测量进行了等精度独立的 n 次测量, 测得值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则测量值的算术平均值定义为

$$X = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-10)$$

式中 X ——抽样平均值, 抽样平均值的极限定为测量值 α_x , 即

$$\alpha_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-11)$$

式中 α_x ——称为测量值的总体平均值。

测量值 α_x 与测量值真值 x_0 之差定义为系统误差 ε , 即

$$\varepsilon = \alpha_x - x_0 \quad (1-12)$$

n 次测量中各次测量值 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 与 α_x 之差, 定义为随机误差 δ , 即

$$\delta_i = x_i - \alpha_x \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-13)$$

将式 (1-12) 与式 (1-13) 等号两边分别相加, 得

$$\varepsilon + \delta_i = (\alpha_x - x_0) + (x_i - \alpha_x) = x_i - x_0 = \Delta x_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-14)$$

式中 $\Delta x_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——各次测量值的绝对误差。

式 (1-14) 说明, 各次测量值的绝对误差等于系统误差 ε 与随机误差 δ_i 的代数和。

1.4.3 测量的精度及其提高的条件

1. 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词。例如, 实验相对误差为 0.01% , 可笼统地说其精度为 10^{-4} , 如欲进一步分清系统误差和随机误差, 则精度一词可分为以下三种:

- (1) 准确度。反映系统误差大小的程度。
- (2) 精密度。反映随机误差大小的程度。
- (3) 精确度。反映系统误差和随机误差合成大小的程度。

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。下面用图 1-2 所示打靶中靶示意图来说明。

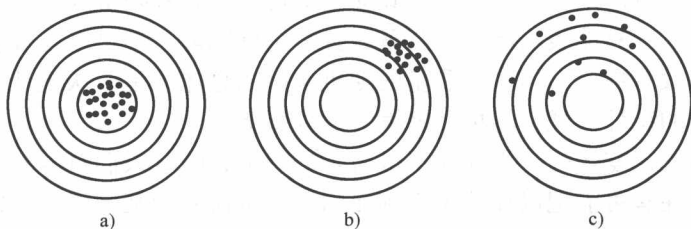


图 1-2 打靶中靶示意图

图 1-2 中, 最里面的小圆圈表示靶心。图 1-2a 表示精确度好, 即系统误差和随机误差都小; 图 1-2b 表示精密度好, 但准确度不好, 即存在较大的系统误差; 图 1-2c 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。

2. 提高测量精度的条件

为了提高测量精度, 必须进一步理解过失误差、系统误差和随机误差的关系。图 1-3 列举了上述三种误差对测量结果的影响。凡是各测量值 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 与真值 x_0 不重合的点均具有测量误差, 绝对误差 Δx_i 的大小可以用 x_i 与 x_0 的差值来确定。图 1-3a 表示各测量值没有系统误差的情况, 真值 x_0 与数学期望值 α_x 相重合, 测量值密集在 α_x 的两侧。各 x 点与 α_x 的差值是由随机误差造成的。随机误差的极限 λ 称为随机不确定度。图 1-3a 中远离真值 x_0 的点 k , 其误差 $\delta_k > \lambda$, 这是由过失误差造成的, 故 x_k 是含有过失误差的坏值。图 1-3b 表示有恒定系统误差 ε 的情况, 这时各 x 点密集于 α_x 的周围, 但偏于 x 的一边。由图 1-3b 可以看出, 绝对误差 Δx 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 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。

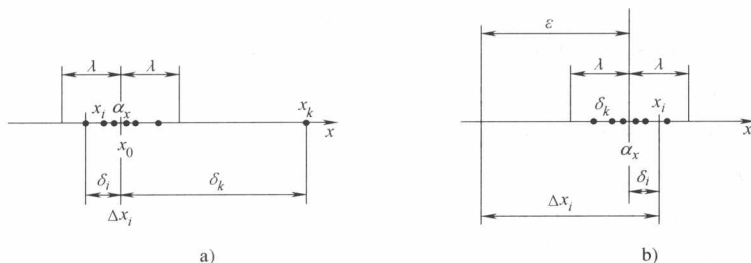


图 1-3 过失误差、系统误差和随机误差对测量结果的影响

从图 1-3 还可以看出, 随机误差 δ_i 在多次测量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量及数学处理来削弱它们的影响。对于系统误差 ε , 特别是对于恒定系统误差来说, 数学处理的效果要差, 甚至毫无效果, 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。另外, 在精确测量中不应含有过失误差。因此, 实现精确测量必须采取下列措施:

- (1) 剔除含有过失误差的坏值。
- (2) 尽可能消除或削弱系统误差。
- (3) 进行多次测量以削弱随机误差的影响。

1.4.4 削弱系统误差的基本方法

上面提到, 进行精确测量的条件之一是尽可能消除或削弱系统误差。系统误差常不易被人们发现而存在于测量过程中, 这是最可怕的。系统误差不像随机误差那样可以通过统计处理而削弱, 由于它来源多, 甚至有的还不易被发觉, 因此消除或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。

由于消除或削弱系统误差的办法主要是针对不同的误差来源进行处理的, 因此在测量之

前必须分析所有可能产生系统误差的来源。

1. 仪器仪表误差和装置误差的削弱

仪器仪表的误差往往是电机测量误差的主要来源。因此,在测量之前应将全部量具和仪器仪表进行检定并确定它们的修正值,以便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,对结果进行修正。下面举一个对仪器仪表的误差进行修正的例子。

例 1-4 对某异步电动机进行短路实验。

P_{A-AB} 的测量接线如图 1-4 所示(图中未标出 P_{C-CB} 、 I_B 、 I_C 等测量接线),求 P_{A-AB} 的功率(所用仪表规格、读数及相应的修正值见后)。

所用仪表规格如下:

功率表 W (I_A , U_{AB}): 0.5 级,满度为 125

格, 500W。

电压线圈: 500V, 内阻为 16667 Ω 。

电流线圈: 5A。

电流表 A (I_A): 0.5 级, 满度为 100 格, 5A。

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

电流互感器 TA: 0.5 级, 20% 为 50A/5A。

各仪表的读数及相应经检定的误差如下:

功率表: 读数为 10 格, 该点的误差为 -16W。

电流表: 读数为 80 格, 该点的误差为 -0.01A。

电压表: 读数为 380V, 误差为 0。

电流互感器: 一次电流为额定电流的 80% 时, 电流比误差为 -0.06%, 相角误差为 -30'。

解: 功率表读数未修正时为 $10 \times \frac{500W}{125} = 400W$, 修正后的值为 $40W + 1.6W = 41.6W$ 。

功率表读数为 $40W + 1.6W = 41.6W$, 电流表读数为 $80 \times \frac{5A}{100} = 4A$, 修正后的电流值为 $4A + 0.01A = 4.01A$ 。电压表读数为 380V, 据题意, 修正值为 0。

电流互感器电流比误差的修正。电流互感器的电流比为

$$K_I = K_N (1 - \gamma_I)$$

式中 K_N ——标称电流比, 本例 $K_N = 50/5 = 10$;

γ_I ——比差, 以%表示。

本例中

$$K_I = K_N (1 - \gamma_I) = 10 (1 + 0.006) = 10.06$$

故经比差修正后为

$$I_A = 4.04A \times 10.06 = 40.34A$$

功率值应为

$$41.6W \times 10.06 = 418.5W$$

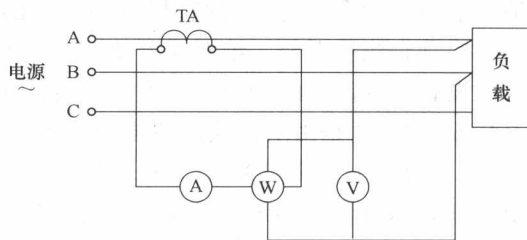


图 1-4 异步电动机短路实验的接线

互感器相角误差的修正。当电流互感器二次电流超前一次电流时,相角误差定义为正值,本例中,未经相角误差修正时电流 I_A 和电压 U_{AB} 间的相角为

$$\arccos \frac{418.5}{40.34 \times 380} = 88.436^\circ$$

修正后的相角为

$$88.436^\circ - 30' = 87.935^\circ$$

修正后的功率因数为

$$\cos 87.936^\circ = 0.036023$$

经相角误差修正后的功率值为

$$40.34\text{A} \times 380\text{V} \times 0.036023 = 552.2\text{W}$$

仪表吸收功率的修正。从图 1-4 上可以看到电压表和功率表的电压线圈跨接在负载的接端上,它们消耗的功率也包括在功率表读数之内,故负载吸收的功率应当从功率表读数中扣除仪表消耗的功率。

功率表电压线圈消耗的功率为

$$P_w = \frac{380^2}{6330}\text{W} = 22.8\text{W}$$

最后结果为

$$P_{A-AB} = 552.2\text{W} - (8.7 + 22.8)\text{W} = 520.7\text{W}$$

本例中,误差修正的总量为 $520.7\text{W} - 400\text{W} = 120.7\text{W}$,各单项修正值如下:

功率表读数误差修正值: $+16\text{W}$

电流互感器电流比误差修正值: $+2.6\text{W}$

电流互感器相角误差修正值: $+133.7\text{W}$

仪器仪表功率消耗修正值: -31.5W

其中,最大的一项为互感器相角误差修正值为 $+133.7\text{W}$,达到被测量的 25%,这么大的误差,主要是由于被测的相角接近 90° 的缘故。在这种情况下,相角误差修正对精度有要求的测量来说是不可少的。其次,仪表本身的功率消耗及功率表读数的误差修正也是不可忽略的,特别是当被测功率较小时,仪表损耗将占很大的比重。

由例 1-4 可见,经过基本误差修正以后的值,精度是提高了,但受仪器仪表检定所得的修正值本身精度的限制,修正后的值仍有一定的误差。

仪器仪表除了基本误差之外,还有附加误差,应当尽量满足仪器仪表的使用技术条件以减少附加误差的影响。要仔细检查全部仪器仪表的调定和安放情况,如仪器仪表的零位调整、仪器仪表安放位置的调整、防止测量仪器仪表的相互干扰、要尽量避免环境温度变化及电磁场干扰的影响等;此外,还要注意仪器仪表在使用过程中的零点漂移,以及实验电源电压的波动、对称度和频率变化的影响等。

2. 人员的误差的削弱

对于实验的人员,要努力提高个人的实验工作能力,除了实验的合理设计和安排外,主要是实验的操作能力,如减小仪表的读数误差、实验时操作必须准确(包括次序、调节方向)、恰当的调节速度以及操作的熟练程度等。实验人员之间的相互配合以及实验人员的状态等因素,也往往会给实验的结果带来相当大的影响。

3. 方法误差或理论误差的消除

因测量方法本身不够完善所引起的误差,能够修正的,就应当加以修正。例如,图 1-1 所示的用电流表和电压表法测电阻,由电流表的压降所造成的误差,例 1-4 中,电压表及功率表电压线圈接至电机出线端所吸收的功率等,这些误差都应当加以消除。

4. 采用特殊的测量方法消除或削弱误差

一般来说,测量方法可分为两大类:直接测量和间接测量。在直接测量中,一般又有两种取数的方法:① 直读法,用仪器仪表直接读出被测值;② 比较法,将被测的量与同类已知值(标准值)相比较。比较法手续较复杂,要使用标准器,但精度较高,因此常用于严格的测量。根据不同的比较方式,比较法又可分为零示法、微差法、替代法、换位误差抵消法或对照法等,这些方法广泛地用于各种仪器的测量领域。下面简单地介绍一下零示法和微差法消除误差的原理。

5. 零示法

在测量时,使被测量的作用效应与已知量(标准器或量具)的作用效应相抵消或平衡,使总的效应减小到零,于是被测量即等于已知量,这种比较方法就是零示法。图 1-5 所示为零示法的接线。图中, U_x 为被测量, E 为标准电池, $R = R_1 + R_2$ 为标准分压器。调整分压器的分压比,使指零检流计 G 指示为 0。图 1-5 所示方法,从原理上讲,当 A、B 两点间有微小的电位差时,若指零检流计灵敏度不够高,则虽然实际上 A、B 两点电位并不完全相等,但仪器仍是指 0,这将造成一定的误差,提高指零检流计的灵敏度可削弱这种误差。一般常用的单电桥测电阻就是零示法的一种典型运用,当采用灵敏度高的指零检流计指 0 时,被检电阻的误差值与桥臂标准电阻的误差有关,而与指零仪器的误差无关。

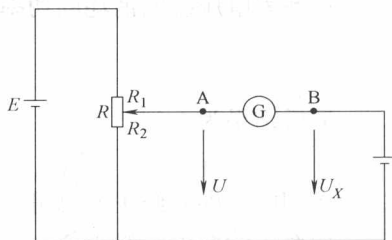


图 1-5 零示法的接线

6. 微差法

微差法也可以说是一种不彻底的零示法。例如在图 1-5 中,虽然 A、B 两点电位不等,但只要测得 U_{AB} ,也能求出 U_x 。微差法的基本方法是,只要用适当的手段测量出被测量 X 与一个数值相近的标准量 N 之间的差值($N - X$),就可得出 $X = N - (N - X)$ 。在电桥电路中,微差法称为失衡电桥法或不平衡电桥法,在非电量的电测方面用得较多。

微差法的优点是,即使差值的测量精度不高,但最终测量的结果仍然可以达到较高的精度,而且 N 与 X 相差越小,测量的精度越高。例如在图 1-5 中,若差值 $U_{AB} \approx 0.01 U_x$,而 U_{AB} 的相对测量误差 $\Delta U_{AB}/U_{AB} = \pm 5\%$,则 U_x 最终测量结果的相对误差为

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{|\Delta U| + |\Delta U_{AB}|}{U_x} = \frac{|\Delta U|}{U_x} + \frac{|0.05 \Delta U_{AB}|}{U_x} \approx \frac{|\Delta U|}{U} + 0.05 \times \frac{|0.01 U_x|}{U_x} = |\gamma_U| + 0.05\% \quad (1-15)$$

式中 ΔU ——标准器电压 U 的误差。

若标准器的相对误差 $\gamma_0 < 0.05\%$,则最终测量结果的相对误差 γ_U 可小于 0.1% 。这里指示器的精度为 5% ,而测量结果的精度却达到 0.1% 以内。

与零示法相比较,微差法的优点在于不一定要使用可调的标准,而且还有可能在指示仪上直接以最终测量结果来标度,从而成为一种较高精度的直读法,简化了测量手续。