



电 工 测 量

钱巨玺 张荣华 合编

天 津 大 学 出 版 社

电 工 测 量

钱巨玺 张荣华 合编

天津大学出版社

内 容 提 要

本书是天津大学电工原理教研室在对原“电路”课程进行改革取得一定经验的基础上，为增设“电工测量”课程编写的大学本科生教材。

全书共分五章：电工测量的基本知识；机电式直读仪表和基本电量的测定；比较式仪器和元件参数的测定；数字仪表、常用电子仪器和电路特性的测定；磁测量和考查实验等。各章都配有相适应的教学实验（共计20个），可供读者选用。

本书除可作为大学本科电类专业的教材外，也可作为不同类型大专班、中专班和各种专业培训班的教材。同时对电气工程人员也是一本有实用价值的参考书。

(津)新登字012号

电 工 测 量

钱巨玺 合编
张荣华

*

天津大学出版社出版
(天津大学内)
邮 编：300072
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店天津发行所发行

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：9¹/₂ 字数：237千字
1991年12月第一版 1994年7月第二次印刷

印数：4 001—9 000

ISBN 7-5618-0287-0
TM·15 定价：6.00元

前 言

自1982年以来,天津大学电工原理教研室已将原“电路”课程改革为“电路基础理论”、“电工测量”和“网络理论导论”三门课程。为适应此项教学改革的需要,实现教材配套,我们自编了《电工测量》教材。经过多年试用,反复修改,由天津大学出版社正式出版。

“电工测量”是一门以电工测量基本知识和基本电工测量技术为主体、讲授和实验并重的课程。本书是本着广泛取材、突出基础、加强实践和便于使用的原则编写的。我校“电工测量”课程一般安排在学生学完“电路基础理论”课之后、在第四学期内进行。课堂讲授和教学实验共计40学时左右。

全书共五章,包括:电工测量的基本知识;机电式直读仪表和基本电量的测定;比较式仪器 and 元件参数的测定;数字仪表、常用电子仪器 and 电路特性的测定;磁测量 and 考查实验。每章的基本知识之后,除配有一定数量的思考题 and 习题之外,都配有相适应的教学实验。全书共编入了20个教学实验供读者选用。包括:伏安特性的测定;系统误差的分析和计算;受控源特性的测定;交流电路参数的测定;互感的测量;三相电路;三相功率测量;直流电桥 and 交流电桥的使用;用直流电位差计校表;串联谐振曲线的测定;模拟电感和并联谐振曲线的测定;滤波电路的观测;时间常数和临界电阻的测定;阻容移相 and 选频网络的观测;冲激响应 and 相迹观测;恒定磁场的测定;磁滞回线 and 基本磁化曲线的观测;铁磁材料特性曲线的测定;综合实验——负阻抗变换器的特性 and 应用;自拟实验——小型变压器的研究。

在此书的编写过程中,考虑到电工测量技术对近代电气工程人员而言,是一门普及性的实用技术,因此该书中也适当选编了一些常用国产电工仪器仪表产品的规格、型号、主要技术数据 and 生产厂家,以供读者直接选用。

该书对不同层次的工程技术人员有着较为普遍的参考价值。经过对各章基本内容和教学实验的取舍,除可作为大学本科电类专业的教材外,还可作为不同专业的大专班、中专班 and 各种类型专科培训班的教材。同时也是一本电气工程人员的实用参考书。

本书的前两章由张荣华编写,后三章由钱巨玺编写。房朝晖同志担当了本书的计算机绘图工作。天津大学电工原理教研室的许多同志参加了本书原稿的讨论 and 试用,提供了不少素材 and 修改意见。实验室工作同志对本书的教学实验部分做出了很大贡献。在此一并表示感谢。在编写此书过程中,我们除参阅了参考文献中所列的书籍外,还参阅了许多兄弟院校的自编讲义 and 实验指导书,对此深表谢意。

本书有错误 and 不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

1991年6月

目 录

第一章 电工测量的基本知识	(1)
§ 1-1 概论	(1)
§ 1-2 测量仪表的分类	(4)
§ 1-3 误差	(5)
§ 1-4 测量方法	(11)
思考题.....	(12)
习题.....	(12)
实验一 伏安特性的测定.....	(12)
实验二 系统误差的分析和计算.....	(14)
实验三 受控源特性的测定.....	(15)
第二章 机电式直读仪表和基本电量的测定	(19)
§ 2-1 磁电式仪表	(19)
§ 2-2 带变换器的磁电式仪表	(31)
§ 2-3 电磁式仪表	(36)
§ 2-4 电动式仪表	(40)
§ 2-5 感应式仪表	(45)
§ 2-6 电压、电流、功率和电能的测量	(48)
§ 2-7 电阻的测量	(53)
思考题.....	(56)
习题.....	(56)
实验四 交流电路参数的测定.....	(57)
实验五 互感的测量.....	(59)
实验六 三相电路.....	(61)
实验七 三相功率测量.....	(62)
第三章 比较式仪器和元件参数的测定	(65)
§ 3-1 标准器件	(65)
§ 3-2 直流电桥	(71)
§ 3-3 交流电桥	(76)
§ 3-4 直流电位差计	(86)
思考题.....	(95)
习题.....	(95)
实验八 直流电桥和交流电桥的使用.....	(95)
实验九 用直流电位差计校表.....	(98)
第四章 数字仪表、常用电子仪器和电路特性的测定	(100)
§ 4-1 数字频率计	(100)

§ 4-2 数字电压表	(103)
§ 4-3 数字万用表	(107)
§ 4-4 电子示波器	(111)
§ 4-5 信号发生器	(114)
§ 4-6 晶体管电压表	(116)
思考题	(117)
习题	(117)
实验十 串联谐振曲线的测定	(117)
实验十一 模拟电感和并联谐振曲线的测定	(119)
实验十二 滤波电路的观测	(121)
实验十三 时间常数和临界电阻的测定	(122)
实验十四 阻容移相和选频网络的观测	(124)
实验十五 冲激响应和相迹观测	(126)
第五章 磁测量和考查实验	(129)
§ 5-1 磁通和磁感应强度的测量	(129)
§ 5-2 磁场强度的测量	(131)
§ 5-3 铁磁材料磁性能的测定	(132)
思考题	(135)
习题	(135)
实验十六 恒定磁场的测定	(135)
实验十七 磁滞回线和基本磁化曲线的观测	(136)
实验十八 铁磁材料特性曲线的测定	(137)
实验十九 综合实验——负阻抗变换器的特性和应用	(139)
实验二十 自拟实验——小型变压器的研究	(144)
参考文献	(145)

第一章 电工测量的基本知识

§ 1-1 概 论

测量是人类对自然界客观事物取得数量概念的过程。在此过程中，借助测量设备（包括仪器、仪表、元件、器件及辅助设备等），通过实验的方法，求出用测量单位表示的未知量的数值大小。测量的实质是把被测量与取作单位的量进行比较，以确定被测量是单位量的多少倍。所以在测量结果中必须包括两部分：一是比较后的数值，一是用作比较的单位。例如用米尺测量某物的长度，求出被测物的长度是多少米，这是最简单的测量。

电工测量是根据电磁现象的基本规律，用电工仪表对各种电磁量进行测量。随着工农业生产电气化、自动化程度的不断提高，为了保证生产过程的合理操作、电气设备的正常运行，必须不断地对各种电磁量进行测量，以掌握足够的资料组织好生产。在科学研究方面，要求对所研究的对象提供数量上的依据，那就更离不开测量。所以电工测量在生产和科研中具有十分重要的作用。

电工测量有许多突出的优点，例如：电工仪表准确度高、测量范围广、体积小、重量轻、使用方便；电工测量容易实现遥测、遥控，便于进行连续测量和自动测量等等。许多非电量也通过一定的转换装置变成电量进行测量。所以电工测量的应用越来越广泛。

电工测量主要包括以下几个方面：

1. 基本电磁量的测量。如电流、电压、电功率、电能量和磁通量的测量。
2. 电路参数的测量。如电阻、电感、电容或复阻抗及品质因数等的测量。
3. 电信号特性的测量。如测量信号的波形、频率及相位等。

其他如受控源的控制系数等，都可通过以上基本量的测量推导出来。

实验是本课程的主要环节。通过实验要达到以下目的：掌握常用电工仪器、仪表的使用方法；进一步掌握电工测量的技能；培养实事求是、一丝不苟的科学态度；提高独立分析问题和解决问题的能力。为了使实验能达到理想的效果，并养成良好的实验习惯和作风，现将有关实验的问题作一简要介绍。

1. 实验前的准备

每次实验前须仔细阅读教材的有关内容，明确实验的目的、任务、实验设备、注意事项，对本次实验中应观察哪些现象、记录哪些数据等做到心中有数，并认真考虑思考题，然后写出预习报告。

进入实验室后，不要急于接线，必须先检查所用的仪器设备是否齐全完好，熟悉它们的性能和使用方法，特别是它们的额定值。根据实验要求选好仪表量程，了解仪表刻度盘上的标尺每格代表的量值，并应检查仪表指针是否在零位。

2. 接 线

接线前应适当安排各设备和仪表的位置，一般以便于接线、操作和读数为原则。所有电源开关应在断开的位置。

接线时先接串联主回路，后接并联分支路。接线应安排得整齐清楚，每个接线柱上所接线头尽可能不多于两个。

线路接好后，应再仔细检查。确认无误后，方可准备通电实验。

3. 通电实验

接通电源前，先将电源的有关调节手柄或电位器调至零位，或置于实验要求的位置。合上电源开关后，缓慢调节电源的输出电压，注意观察各仪表的偏转是否正常。如有异常，要立即切断电源进行检查和处理。

实验过程中如果需要更换线路，应首先将电源电压调回零位，并切断电源。待更换完线路并经检查无误后，方可通电继续实验。

4. 数据和现象的观测、记录

观测并记录实验中的现象和数据是实验过程中最主要的步骤，必须集中精力认真仔细地进行。

为保证实验结果正确，接通电源后，先大致试做一遍。试做时不必仔细读取数据，主要观察各被测量的变化情况和出现的现象，可发现仪表量程是否合适，设备操作是否方便等，若有问题应在正式实验前加以解决。

试做无问题后即可开始读取数据。如果测量某一量的变化曲线，测量点的数目和间隔应适当选取。被测量如有最大值或最小值必须测出。在变化曲线较弯曲处取点应多一些，变化曲线较平滑处取点可少一些。取点应分布在需要研究的整个范围，不要只局限于某一部分。如图1-1所示。

从指针式仪表读取数据时，目光应正对指针。对有反射镜的仪表，看到指针与它在镜中的影象相重合时方可读数。一般指针式仪表可读出三位有效数字，末位数字由指针在小格中的位置来估读。

实验数据应记录在预习时制好的数据表格中，并注明被测量的名称和单位。保持定值的量可单独记录。经重测得到的数据，应记录在原数据旁或新数据表格中，不要涂改原数据，以便比较和分析。

实验过程中不要只埋头于读数，要注意出现的种种现象，例如仪器设备的发热、发光、声音及气味等。除了做必须的记录外，对于异常现象或发生事故均应立即断电停止实验，并保持事故现场以便分析原因。

5. 实验结束工作

实验结束时应先切断电源，待认真检查实验结果没有遗漏和错误后再拆线，并记录所用仪表的号码，以备有问题时便于查找原因。

全部实验结束后，应将所用仪器设备复归原位，将导线整理成束，清理实验桌面。

6. 总结报告的编写

实验课后应对实验结果进行整理、计算、分析和讨论，以巩固所学内容，完成实验报告。报告的内容如下：

- (1) 实验名称、日期、班级、实验者和同组实验者。
- (2) 实验线路图；简要步骤；使用的主要仪器设备及其型号、规格和号码。
- (3) 数据表格。
- (4) 观察到的现象；主要计算公式及计算结果；绘制曲线和相量图等。
- (5) 回答思考题及对实验结果的分析讨论，如实验结果是否达到预期目的，有何问题，通

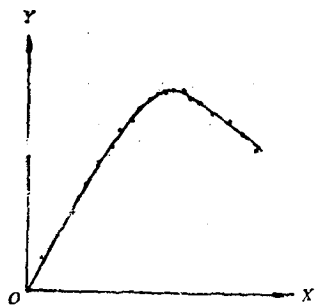
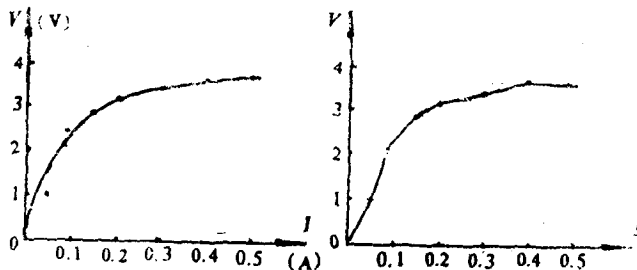


图 1-1 测量点选择的例子



(a)较好的曲线 (b)不合要求的曲线
图 1-2 画曲线举例

过实验有何收获，对实验的改进意见等。

实验报告要认真地独立编写，书写要整齐清楚，绘制曲线必须用坐标纸，标明曲线名称和坐标的分度及单位，用小圆、十字叉等符号标出实验数据所对应的点。在实验结果有一定规律时，曲线应画得光滑，不要强求通过所有实验点（参看图1-2）。在同一坐标图上画几条曲线时可用不同的颜色绘制，或在各曲线旁用文字符号标明。

7. 有效数字及实验数据运算

仪表上读出的数值，其最末位数是估读的。例如图1-3所示用伏特表测某电压，表上的示值可读为7.71V、7.72V或7.73V，前两位数可从伏特表的刻度上读出，称确切数字，而末位数是测量者估计出来的，估读的结果因人而异，因此末位数称为存疑数字。两者合称有效数字，如上述电压测量值是三位有效数字。在电工测量中，指针式的直读仪表一般可读出三位有效数字。比较式仪表、数字仪表则可得到更多位有效数字。在记录数据时应注意以下几点：

(1) 有效数字的位数与小数点无关。例如368与3.68及0.124都是三位有效数字。

(2) “0”在数字之间或数字之末算作有效数字，而在数字之前的作用仅是定位，不算有效数字。例如2.03、3.40都是三位有效数字，而0.32、0.023等只有两位有效数字。应注意3.40与3.4的意义不同，前者中的4是确切数字，而后者中的4是存疑数字。

(3) 遇有很大的数，有效数字的记法采用指数形式。与10的方次相乘的数字代表有效数字。如 4.5×10^3 和 5.60×10^3 分别以4.5和5.60表示两位及三位有效数字，不能不顾有效数字而随意书写。同样，对很小的数，如0.00345可写作 3.45×10^{-3} ，表示三位有效数字。

对实验数据进行运算时，应注意只保留一位存疑数字，它后面的数字可以舍去。下面以两个具体例子说明实验数据的运算。

例1 $48.6V + 1.325V = ?$

式中的6和5都是存疑数字（在数字下面加一横表示），相加时

$$\begin{array}{r} 48.\underline{6} \\ + 1.\underline{325} \\ \hline 49.\underline{925} \end{array}$$

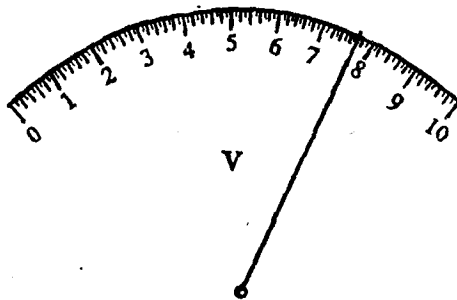


图 1-3 读有效数字举例

因为6是存疑的，所以6加3的结果9也一定是存疑的，而它后面的2与5没意义，应

当舍去。所以

$$48.6\text{V} + 1.325\text{V} = 49.9\text{V}$$

上例说明当几个数相加或相减时，哪个数的存疑数字的位数最高，就取那一位数作为存疑数字，它后面的数字均应舍去，但对存疑数字后一位数，采用四舍五入法。例如

$$325 + 18.72 = 344$$

$$87.1 - 1.562 = 85.5$$

$$3.50 \times 10^3 - 235 = 3.27 \times 10^3$$

例2 $12.34 \times 2.45 = ?$

$$\begin{array}{r} 12.34 \\ \times 2.45 \\ \hline 6170 \\ 4936 \\ 2468 \\ \hline 30.2330 \end{array}$$

因存疑数字5乘其它各数字，全为存疑数字，故在结果中最后四位都是存疑的，只可保留前一位，所以

$$12.34 \times 2.45 = 30.2$$

一般几个数相乘或相除时，其最后结果的有效数字位数与有效数字位数最少的那个数相同。

电工测量中，一般能测出三至四位有效数字，故在数据运算中每一步只保留三至四位有效数字。

§ 1-2 测量仪表的分类

电工测量仪表按测量方式的不同，可分为直读式仪表和比较式仪表两大类。

1. 直读式仪表

应用直读式仪表测量时，测量结果可直接由仪表的指示机构读出，测量过程中不需要对仪表进行调节。因此直读式仪表测量迅速、使用方便，是电工测量中使用最多的仪表。如安培表、伏特表、瓦特表等均属于此类。直读式仪表又可分为机电式（也叫指针式或模拟式）仪表和数字式仪表。

2. 比较式仪表

应用比较式仪表测量时，将被测量与某些标准量进行比较而测出其数值。如电桥、电位差计等即属此类。用比较式仪表进行测量比用直读式仪表复杂，仪表的价格也较高。但准确度高，因而常用于精确的测量。

由于机电式直读仪表价格便宜，能指示被测量变化的方向，因此是目前最常用的仪表。为了便于选用，下面介绍机电式直读仪表的两种主要分类方法：

(1) 按被测量的种类可分为：电流表、电压表、瓦特表等，见表1-1。









(2) 按作用原理可分为：磁电式、电磁式、电动式、感应式等，见表1-2。

在直读仪表的刻度盘上，除了有上述的符号外，还标有适用于直流还是交流、耐压能力、

表 1-1 按被测量种类分类

被测量的种类	仪 表 名 称	符 号
电 流	电流表(安培表、毫安表、微安表)	A、mA、 μ A
电 压	电压表(伏特表、毫伏表)	V、mV
电 功 率	功率表(瓦特表)	W
电 能 量	电 度 表	kWh
相 位 差	相 位 表	ϕ
频 率	频 率 表	Hz
电 阻	欧 姆 表	Ω
绝缘电阻	兆 欧 表	M Ω

表 1-2 按作用原理分类

型 式	符 号	用 途
磁 电 式		直流电流、电压
整 流 式		工频及较高频的正弦交流电压、电流
热 偶 式		工频及高频电流
电 磁 式		直流及工频电压、电流
电 动 式		直流及交流电压、电流、功率、功率因数
铁磁电动式		工频交流电流、电压、功率
感 应 式		交流电能表
静 电 式		直流及交流高电压

仪表准确度等级等符号。常见的符号见表1-3。

表1-3中的工作环境等级，表明仪表应在何种环境中使用，分为A、B、C三组，见表1-4。通常属于A组使用条件的仪表，表盘上不再标明使用条件。

§ 1-3 误 差

1. 测量误差

任何测量，不论是直接测量还是间接测量，都是为了得到某一物理量的真值，但由于受测量工具准确度的限制、测量方法的不完善、测量条件的不稳定以及经验不足等原因，任何物理量的真值是无法得到的，测量所能得到的只是其近似值，此近似值与真值之差称为误差。

已测得的被测量之值A与其实际值(即真值 A_0)之差值称为测量的绝对误差 ΔA ，即

表 1-3 常见的仪表符号


符 号	所 代 表 的 意 义
—	直 流
~	交 流
⋈ (或 3~)	三相交流
⋈	交直流两用
(或 ⊥)	仪表垂直放置
— (或 —)	仪表水平放置
	与水平成 30° 放置
0.5	准确度 0.5 级 (以量限百分数表示的准确度等级)
⚡ 2 kV 或 ☆	本仪表绝缘经 2 kV 耐压试验
⤿	调 零 器
I II III IV	仪表防外磁场等级
B C	工作环境等级
✳	多量限仪表的公共端钮
⏚	接地用的端钮(螺钉或螺杆)
⏚	与外壳相连接的端钮
⊙	与屏蔽相连接的端钮

表 1-4 仪表的使用环境

使用条件 \ 组别	A	B	C
温度°C	0 ~ +40	-20 ~ +50	-40 ~ +60
相对湿度	85% 以下	85% 以下	95% 以下

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

但绝对误差 ΔA 不能说明测量结果的好坏。测量结果的好坏应看此绝对误差 ΔA 占实际值的比例大小。因此，一般用绝对误差 ΔA 与被测量的实际值 A_0 之比来表示，称为相对误差 γ ，即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0}$$

相对误差的数值一般用百分数表示。由于实际值在事先是不知道的，而测量值与实际值往往相差不大，因此上式中 A_0 可直接用 A 代替，即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0} \approx \frac{\Delta A}{A} \quad (1-2)$$

2. 误差的分类

根据误差的性质，测量误差可分为三大类：系统误差、偶然误差和疏失误差。

(1) 系统误差：指在相同条件下多次测量同一量时，误差的大小和符号均保持不变，在条件改变时，按某一确定规律变化的误差。这种误差是由于测量工具误差、环境影响、测量方法不完善或测量人员生理上的特点等造成的。根据产生误差的原因，系统误差又可分为：

(A) 工具误差（基本误差）：由于测量工具本身不完善所致。

(B) 附加误差：是由于测量时的条件与校正时的条件不同所致。如在 20°C 校准的仪表在其他温度下使用或应“平”放的仪表测量时“立”放了等。

(C) 方法误差：由于间接测量时所用公式是近似的，或测量方法的不完善而造成。如未考虑电表的内阻对测量的影响等。

(D) 个人误差：是由于实验者的习惯或生理缺陷所致。

系统误差越小，测量结果越准确，系统误差的大小可用准确度来反映。

(2) 偶然误差：亦称随机误差，是由于某些偶然因素造成的。例如电磁场微变、热起伏、空气扰动、大地微震、测量人员感觉器官的生理变化等，因这些互不相关的独立因素产生的原因和规律无法掌握，因此，即使在完全相同的条件下进行多次测量，实验结果不可能完全相同。否则，只能说明仪器的灵敏度不够，不能说明偶然误差不存在。

一次测量的偶然误差没有规律，但在多次测量中偶然误差是服从统计规律的。因此可以通过统计学的方法来估计其影响。欲使测量结果有更大的可靠性，应把同一种测量重复多次，取多次测量值的平均值作为测量结果。

偶然误差的大小用精密度反映。偶然误差越小，测量结果的精密度就越高。

(3) 疏失误差：是由于实验者的粗心大意造成的。此结果不可取用，应舍去。

为了更直观地了解上述三种误差，常以打靶为例来说明。三种误差对射击结果的影响如图1-4所示。

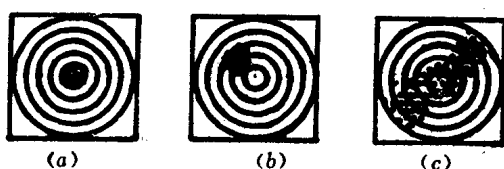


图 1-4 误差对射击结果的影响

图1-4(a)中，弹着点都密集于靶心，说明只有偶然误差而不存在系统误差，在靶角上的点是由疏失误差造成的。图1-4(b)中，弹着点密集之处偏于靶心的一边，这是系统误差存在的结果。图1-4(c)中，弹着点中心不断有规律地变化，这是变化的系统误差造成的。

从图1-4还可看出，一个精密度高（相当于弹着点非常密集）的测量结果，有可能是错误的（未消除系统误差）。只有消除了系统误差之后，精密测量才能获得正确的结果。

综上所述，要进行精确测量，必须消除系统误差；剔除含有疏失误差的坏值；采用多次重复测量取平均值来消除偶然误差的影响，从而得到测量结果的最可信赖值。

3. 系统误差的消除方法

如前所述，系统误差有规律可循，在相同条件下进行测量时是不变的。因此可采用一些

办法将此恒定因素的影响消除，保证测量结果的准确性。在工程上，当系统误差被减小到可以忽略时，通常可认为它已被消除。

消除系统误差的方法有以下几种：

(1) 正负误差补偿法：进行两次测量使测量结果中的系统误差一次为正、一次为负，取其结果的算术平均值，则此恒定的系统误差即可消除。例如，在测量通过直流电流线圈的磁场强度时，由于外界恒定磁场（例如地磁场）叠加到被测磁场上，使测量结果产生了系统误差（附加误差）。如果将电流反向或将线圈转180°，则被测量的符号改变，但由于外界恒定磁场不变，因此测量结果中系统误差将改变其符号，两次测量结果中的系统误差一次为正一次为负，故取两次测量结果的算术平均值即可消除外界恒定磁场的影响。

(2) 替代法：用可变的标准量去置换被测量，而使其产生的效果与置换前相同。这样，由已知标准量的数值便可求得被测量。置换时应使其他条件保持不变，则由于装置特性而产生的误差即被消除。

(3) 引入校正：若已知系统误差的特性和大小，例如已知直读仪表的校正曲线，则可将相应的校正值引入测量结果中，从而得到可靠的测量结果。

以上仅是常用的几种方法，对于每个具体的测量问题，应仔细分析其具体条件后，才能采取相应的措施。另外，在测量之前，必须仔细检查全部测量仪表的调整和安放情况，以便尽可能地消除产生误差的根源。

4. 机电式直读仪表的误差及准确度等级

仪表存在着基本误差和附加误差。基本误差指仪表在规定的正常条件下测量时所具有的误差；附加误差是由于工作条件不正常而产生的误差。

(1) 引用误差：当仪表在规定的正常条件下工作时，仪表指示值的绝对误差 ΔA 与仪表量程 A_m 之比称为引用误差 r_s ，一般用百分数表示，即

$$r_s = \frac{\Delta A}{A_m} 100\% \quad (1-3)$$

(2) 仪表等级：由于仪表标度尺各点的引用误差各不相同，所以规定用全量程可能出现的最大引用误差 r_{sm} 来表示仪表的准确度等级，即

$$r_{sm} = \frac{\Delta A_{max}}{A_m} 100\% \quad (1-4)$$

我国国家标准规定，机电式直读仪表的准确度等级分七级，如表1-5所示。仪表的等级数就是其最大引用误差值（它反映的是仪表的基本误差）。

表 1-5 仪表准确度等级

仪表等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差(%)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

0.1和0.2级仪表通常作为标准表以校正其它仪表。实验室一般用0.5~1.5级仪表。生产部门作监视生产过程的仪表一般为1.0~2.5级。

在校准仪表时，最常用的方法是用被校表和标准表同时测量某个量（电压、电流等），标准表的读数认为是实际值，被校表的读数与标准表的读数之差即为绝对误差 ΔA ，找出在

全量程上绝对误差的最大值 ΔA_{\max} ，从而可算出最大引用误差 r_{\max} 。根据最大引用误差确定出被校表的准确度等级。

例 1 有一量程为100V的电压表，用一标准电压表与之相比较，结果如下：

被校表读数 (V)	0	20.0	40.0	60.0	80.0	100
标准表读数 (V)	0	19.0	40.5	58.0	79.0	101

其中以60V处的绝对误差最大，表的量程为100V，故其最大引用误差为

$$\frac{2.0}{100} \times 100\% = 2.0\%$$

对照国家规定的标准这只表的等级属于2.5级。

例 2 有两只毫安表，量程分别为 $I_{1m}=100\text{mA}$ ， $I_{2m}=50\text{mA}$ ，两表均为1.0级，用来测量40mA的电流，求测量结果中可能出现的最大相对误差。

解

(i) 用量程为 I_{1m} 的毫安表测量时，可能产生的最大绝对误差 ΔI_{1m} 为

$$\Delta I_{1m} = \pm 1.0\% \times 100 = \pm 1.0\text{mA}$$

故用此表测40mA电流时可能产生的最大相对误差为

$$r_{1\max} = \frac{\pm 1.0}{40} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

(ii) 用量程为 I_{2m} 的毫安表测量时，可能产生的最大绝对误差 ΔI_{2m} 为

$$\Delta I_{2m} = \pm 1.0\% \times 50 = \pm 0.5\text{mA}$$

故用此表测40mA电流时，可能产生的最大相对误差为

$$r_{2\max} = \frac{\pm 0.5}{40} \times 100\% = 1.25\%$$

由以上计算结果可看出，用100mA的毫安表测40mA电流比用50mA的毫安表所测得的结果具有更大的最大相对误差。因此，量程选择对测量结果的准确度有很大影响，应尽量使被测量的值接近于满刻度值。一般应使被测量的值超过满刻度值的一半以上。

5. 系统误差的计算

测量中的误差不可能完全消除，为了估计测量结果的准确程度，往往要计算误差的大小。工程上的一般测量，其误差主要指系统误差，因为偶然误差对整个测量过程影响较小，一般可忽略不计。

直接测量。在仪表的正常工作条件下，测量结果中的误差即是所使用仪表本身的基本误差。可以根据仪表的准确度等级计算。例如仪表测量时的读数为 A_x ，仪表量程为 A_m ，准确度等级为 K ，则测量结果可能出现的最大相对误差为

$$r_{\max} = \pm \frac{K\% A_m}{A_x} \times 100\%$$

若测量条件不满足仪表的正常工作条件，则须考虑附加误差。这时测量结果的最大误差应是仪表的基本误差和附加误差之和。关于附加误差的计算方法可查阅国家标准的有关规

定, 本书从略。

间接测量。需进行几次不同量或不同数值的测量, 然后根据它们所共同遵循的公式计算出最后结果。每次测量的误差, 都将对最后结果有所影响。

设被测量 y 与直接测量诸量 x_1, x_2, \dots, x_n 之间的函数关系为

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

令 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别代表测量 x_1, x_2, \dots, x_n 时的误差, Δy 代表由 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 引起的被测量 y 中的误差, 则

$$y+\Delta y=f(x_1+\Delta x_1, x_2+\Delta x_2, \dots, x_n+\Delta x_n)$$

将上式右端按泰勒级数展开, 并略去高阶导数项后, 得

$$f(x_1+\Delta x_1, x_2+\Delta x_2, \dots, x_n+\Delta x_n) \approx f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n$$

所以

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (1-6)$$

$$\text{令 } \Delta_1 = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1, \quad \Delta_2 = \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2, \quad \dots,$$

$$\Delta_n = \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n$$

则 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ 分别代表各直接测量误差在测量结果中所引起的绝对误差。故有

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (1-7)$$

在最不利的条件下, 结果中的各项误差同号, 因此可能出现的最大误差

$$\Delta y_{\max} = \pm \sum_{i=1}^n |\Delta_i| \quad (1-8)$$

下面以两种常见的函数为例说明之。

(1) 被测量 y 与直接可测的诸量 x_1, x_2, x_3 之间的函数关系为

$$y=x_1+x_2+x_3$$

则

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3$$

最大绝对误差

$$\Delta y_{\max} = |\Delta x_1| + |\Delta x_2| + |\Delta x_3|$$

最大相对误差

$$\gamma_{\max} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + |\Delta x_3|}{x_1 + x_2 + x_3}$$

若被测量是两个量的差时, 即 $y=x_1-x_2$, 则

$$\gamma_{\max} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2|}{x_1 - x_2}$$

当 x_1 与 x_2 的值很接近时,将出现极大的间接测量误差,所以在间接测量中应尽量避免求两个读数差的计算。

(2)被测量 y 与直接可测量 x_1, x_2, x_3 之间的函数关系为

$$y = x_1^m \cdot x_2^n \cdot x_3^p$$

则

$$\Delta y = mx_1^{m-1}x_2^n x_3^p \Delta x_1 + x_1^m n x_2^{n-1} x_3^p \Delta x_2 + x_1^m x_2^n \cdot p x_3^{p-1} \Delta x_3$$

$$\frac{\Delta y}{y} = m \frac{\Delta x_1}{x_1} + n \frac{\Delta x_2}{x_2} + p \frac{\Delta x_3}{x_3}$$

上式中的 $\frac{\Delta y}{y}$ 和 $\frac{\Delta x_1}{x_1}, \frac{\Delta x_2}{x_2}, \frac{\Delta x_3}{x_3}$ 分别是被测量和直接可测诸量的相对误差 $r, r_1,$

r_2, r_3 , 即

$$r = mr_1 + nr_2 + pr_3$$

最大相对误差

$$r_{\max} = |mr_1| + |nr_2| + |pr_3|$$

由此可见若函数是相乘或相除的形式(如本节(2)),则先计算其相对误差比较容易。若要求其绝对误差,只要用相对误差乘以被测量本身数值即可。如果函数关系是相加或相减的形式(如本节(1)),则先计算其绝对误差较方便。

例 有一电阻,其值测出为 $20.00 \pm 0.20 \Omega$,通过的电流为 $1.00 \pm 0.01 A$,求电阻所消耗功率的相对误差和绝对误差。

解 因为功率 P 和电流 I 、电阻 R 的函数关系为 $P = I^2 R$,所以最大相对误差为

$$r_{P_{\max}} = \left| \frac{2\Delta I}{I} \right| + \left| \frac{\Delta R}{R} \right| = 2 \times \frac{0.01}{1.00} + \frac{0.20}{20.00} = 3\%$$

最大绝对误差

$$\Delta P_{\max} = r_{P_{\max}} \cdot I^2 R = 0.6 W$$

§ 1-4 测量方法

对同一物理量的测量,可采用不同的方法。如测量某一线性电阻的方法:用欧姆表直接测得;用电压表、电流表测出其电压、电流,再根据欧姆定律计算出来;也可用电桥测出。根据获得结果的方法不同,测量方法可分为:

1. 直接测量:未知量的测量结果直接由实验数据获得。例如用电流表测电流,电压表测电压,用欧姆表或电桥测电阻等。
2. 间接测量:先测量几个与被测量有关系的量,然后根据它们的关系式计算出被测量。例如用电流表、电压表测电阻。
3. 组合测量:测量中,使各个未知量以不同的组合形式出现(或改变测量条件来获得这种不同的组合),由直接测量或间接测量所得的数据,通过求解联立方程组以求得未知量的数值。例如标准电阻的阻值与温度的关系,可用公式 $R_t = R_{20}(1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2)$ 表示,式中 R_t 为在 $t^\circ C$ 下电阻的实际值, R_{20} 为在 $20^\circ C$ 下电阻的实际值, α 和 β 是温度系数。为了求得在任意温度下的 R_t 值,需先测出三种不同温度 t_1, t_2, t_3 状态下的电阻值 $R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}$,分别代入上述公式联立解出三个未知数 R_{20}, α, β ,然后将它们作为已知数代入上述