

仪器仪表工人技术培训教材

电工仪器仪表及其线路

机械工业部仪器仪表工业局 统编



机械工业出版社

本书是为了适应电工仪器仪表工人技术培训的需要而编写的教材。书中首先介绍了测量方法及误差理论的基础知识，继而全面地、系统地介绍了磁电系、热电系、整流系、电磁系、电动系、感应系及静电系等仪表和仪用互感器、直流电阻仪器、交直流电阻仪器及精密电测装置等仪器的工作原理及其线路解析的技术知识。

本书由哈尔滨电表仪器厂主编，由方吉六、朱庆武、王铁华同志编写，曾庆德、余鹤栋、李自森同志参加审稿。

电工仪器仪表及其线路

机械工业部仪器仪表工业局 统编

★

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 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 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 13 · 插页 1 · 字数 286 千字

1986年3月北京第一版·1986年3月北京第一次印刷

印数 00,001—10,400 · 定价 2.50 元

★

统一书号：15033·5798

目 录

绪言	1
第一章 测量方法和误差理论	3
1-1 测量方法	3
1-2 测量误差	6
1-3 测量数据的处理	17
复习题	21
第二章 磁电系仪表	22
2-1 磁电系仪表的结构和作用原理	22
2-2 磁电系电流表线路与分流器	33
2-3 磁电系电压表线路与附加电阻	45
2-4 磁电系欧姆表及其线路	60
2-5 磁电系检流计	68
复习题	80
第三章 热电系仪表与整流系仪表	82
3-1 热电系仪表	82
3-2 整流系电流表和电压表	88
3-3 万用表	94
3-4 整流系频率表	98
3-5 整流系功率因数表	101
3-6 整流系功率表	104
复习题	107
第四章 电磁系仪表	108
4-1 电磁系仪表的测量机构和工作原理	108
4-2 电磁系仪表标度尺特性	112
4-3 电磁系电流表和电压表线路	115
4-4 电磁系电流表和电压表的误差分析	119

V

复习题	126
第五章 电动系仪表	127
5-1 电动系仪表的测量机构和工作原理	127
5-2 电动系仪表标度尺特性	134
5-3 电动系电压表线路	138
5-4 电动系电流表线路	143
5-5 电动系功率表	150
5-6 电动系相位表线路	163
5-7 电动系频率表线路	169
5-8 电动系法拉表线路	172
5-9 铁磁电动系仪表	174
复习题	180
第六章 感应系仪表	181
6-1 感应系仪表的测量机构和工作原理	181
6-2 感应系电度表的力矩	187
6-3 感应系电度表的负载曲线	197
6-4 感应系电度表的附加误差	204
6-5 三相电度表	210
6-6 电度表的调整校验方法	215
复习题	222
第七章 静电系仪表	223
7-1 静电系仪表的结构和工作原理	223
7-2 静电系仪表的性能和技术指标	226
复习题	229
第八章 仪用互感器	230
8-1 仪用互感器的结构和用途	230
8-2 电流互感器	236
8-3 电压互感器	243
8-4 仪用互感器的正确使用	249

复习题	251
第九章 直流电阻仪器	252
9-1 电阻箱和分压箱	252
9-2 直流单电桥	258
9-3 直流双电桥	262
9-4 三次平衡电桥	266
9-5 直流电流比较仪式电桥	273
9-6 直流电位差计	278
复习题	309
第十章 交流电阻仪器	310
10-1 交流电桥	310
10-2 交流补偿器	327
10-3 交直流比较仪	340
10-4 互感器校验仪	360
复习题	377
第十一章 精密电测量装置	378
11-1 直流电表校验装置	378
11-2 交直流电表校验装置	385
11-3 直流电阻测量装置	392
11-4 交流电桥装置	396
复习题	404

绪 言

“测量”是人类认识物质世界和改造物质世界的重要手段之一。通过测量，人们对客观事物获得了数量上的概念，做到心中有数。从对客观事物所作的大量测量当中，总结出一般的规律，建立起各种定理和定律。测量可以说是用来打开自然科学中“未知”宝库的一把钥匙，甚至有人说：“没有测量，就没有科学”。

由于电能已成为现代工业、现代农业和交通运输业的主要动力来源，在电能的生产、输送、控制和应用过程中，电工测量获得了广泛的应用。

利用电工仪器仪表进行测量具有准确度高、反应灵敏、动作迅速和测量方便等优点，它能够直接用来测量电流、电压、功率、频率、相位等电量，通过传感器并可用来测量温度、压力、湿度、速度等非电量。

电工仪器仪表随着科学技术领域不断的扩大和发展，已成为各种科学不可缺少的部分。可以说，电工仪器仪表的生产能力和技术水平是评价一个国家科学技术水平先进程度的一个重要标志。我国的电工仪器仪表自 50 年代以来得到迅速的发展，已能生产各种类型和不同精度级别的电工仪器仪表，广泛应用于国民经济的每个部门，成为实现四个现代化的一个重要组成部分。

电工测量中常用的仪器仪表有三大类：

1. 度量器 在测量中作为测量单位或测量单位的分数、整数倍的复制实体，就是度量器。在电工测量中，根据度量器在量值传递上的作用和不同的准确度，分为基准度量器（基准器）、标准度量器（标准器）和工作度量器三大类。基准度

量器是现代科学技术所能达到的最准确的度量器，它又分为主基准器、副基准器。标准度量器(标准器)是供计量部门对工作度量器进行检定或标定时使用，其准确度低于基准度量器，按其用途又分为一等标准器和二等标准器。工作度量器是专供日常测量中使用，按其准确度(或年稳定度)分若干级别，在电工测量中通用的标准电池、标准电阻、标准电容和标准电感等都属于此类。

2. 较量仪器 凡是将被测量与度量器进行比较后才能确定量值大小的仪器、若不与度量器共同使用，就无法达到测量目的的仪器，称为较量仪器，如电桥、电位差计等，测量精度或比较精度有 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.005, 0.001, 0.0005, 0.0002 级等。

3. 直读仪表 能直接读取被测量大小的仪表称为直读仪表。直读仪表可分为模拟式指示仪表和数字式仪表。模拟式指示仪表是利用电磁有关的物理现象(电磁的磁效应、热效应、化学效应等)作为结构基础的，所以按不同仪表的结构原理可分为：磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系、整流系、热电系……等。准确度级别一般分为 5.0, 2.5, 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1 级等。

近十几年来由于电子技术的发展，数字式指示仪表发展很快，测量精度和灵敏度都比模拟式指示仪表高很多，所以在电测量中已广泛应用。但是由于模拟式指示仪表成本低，维修方便等优点还不能完全被数字式仪表所代替，特别低精度的开关板仪表，绝大多数都是采用模拟式直读仪表。

本书着重介绍模拟式指示仪表和较量仪器的结构和线路分析。这些仪器仪表的理论结构和线路是电磁测量及其仪器仪表的基础。因此，掌握本课程理论基础对从事电工仪器仪表生产、维修与检定工作的技术工人是十分必要的。

第一章 测量方法和误差理论

1-1 测量方法

测量，通常是指通过物理试验方法，去测定一个未知量的大小，这个未知量叫做被测量。为了确定被测量，就要把它和作为测量单位的同类标准量进行比较，以确定被测量是这个测量单位的多少倍或多少分之一。简单地说，“测量过程”就是把被测量同测量单位进行比较的过程。例如，用尺去量布的长度，用电流表去测量电流强度等。

一个物理量的测量可以用不同方法来实现。在每一指定的情况下，这些方法的选择就与被测量的特性、测量条件以及对准确度的要求有关。测量方法可以根据各种不同的特征来分类。

由于具体条件的限制，在实现测量的过程中，有的被测量就是测量对象本身，而有的就不是。测量方法可分为三类。

一、直接测量

在直接测量时，测量结果是从一次测量的实验数据中得到的。在这种测量中，可以使用按相应测量单位刻度的直读仪表直接读出被测量数值的大小，也可以将度量器与较量器共同使用，直接比较而得出被测量的数值。因此，直接测量又可分为直读法和比较法两类。

1. 直读法 直读法就是用**直读**仪表直接读取被测量数值的测量方法。作为测量单位的复制实物的度量器并不直接参与测量。例如用欧姆表测量电阻，电压表测量电压等都属

8610712

于这类测量方法。

由于利用这种方法进行测量时，具有设备简单，实验方便等优点，因而得到广泛应用。其缺点是测量准确度受仪表准确度的限制而不高。

2. 比较法 与直读法相对应，凡是在测量过程中需要度量器直接参与、并通过比较仪器来确定被测量数值的方法，称为比较法。根据被测量与标准量（例如度量器之值）比较方式的不同，比较法又可分为以下三种：

（1）差值法 测出被测量与已知标准量的差值，从而确定被测量数值的方法称为差值法。差值法的优点是提高了测量准确度。例如两个量之差为1%，而这个差值是用准确度为0.2%的仪表测定的，那么，被测量的测量准确度便提高到了0.002%。

（2）零值法 这种测量方法和前面所述的差值法一样，是将被测量与标准量进行比较，使其差值为零，因此标准量必须是可变量。零差值由指零仪判断，因此，零值法的测量准确度决定于标准量的准确度和指零仪的灵敏度。例如用电位差计测电势，用电桥测电阻等都属于这一种方法。

（3）代替法 这种方法是将被测量和已知的标准量分别接入同一测量装置，如果维持仪器的读数不变，则此被测量即等于已知的标准量。例如用代替法去测量电阻，这是一种极其准确的测量方法。因为在将已知标准量代替被测量时，对于测量装置的作用及其状态均不引起变化。因此，由于其内部特性及各种外界因素（干扰）所引起的测量仪表示数的误差对测量结果不产生影响。

用比较法进行测量时，由于度量器直接参与，所以较之直读法有更高的准确度。但是，比较法对测量仪器和试验条

件的要求较高，操作也比较麻烦，所以通常只在要求高准确度测量时采用。

二、间接测量

这种测量在直接测出与被测量具有一定函数关系的几个量以后，通过解函数关系式来确定被测量的大小。例如：欲求导体的电阻系数 ρ 时，由于已知导体的电阻 R 和它的长度 l 、截面积 S 之间有以下函数关系：

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

因此，可以通过直接测量电阻 R ，长度 l 及截面积 S 之后，即可按下面函数式算出电阻系数

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

当被测量不能直接测量或测量很复杂，或者用间接测量比用直接测量能获得更精确的结果时，可采用间接测量。

三、组合测量

这种测量是在直接测量与被测量具有一定函数关系的某些量的基础上，通过联立求解各函数关系式来确定被测量的大小。例如，测量标准电阻温度系数 α 和 β ，可作为组合测量的例子。标准电阻线圈的电阻与温度之间具有如下关系

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2]$$

因此，可以在 20°C 、 t_1 及 t_2 三个温度下，分别测出三个电阻值 R_{20} 、 R_{t_1} 和 R_{t_2} ，便可列出两个联立方程式，求解可得电阻系数 α 与 β 的数值

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_{20} [1 + \alpha (t_1 - 20) + \beta (t_1 - 20)^2] \\ R_{t_2} = R_{20} [1 + \alpha (t_2 - 20) + \beta (t_2 - 20)^2] \end{cases}$$

所列方程式的数目应等于所求被测量的数目。

1-2 测量误差

一、误差的定义

在实际测量中, 由于测量工具不准、测量方法不完善以及各种因素的影响, 都会使测量结果失真。这种失真叫做误差。

关于误差的定义, 常见的有如下几种:

1. 绝对误差 指示值 A_x 和被测量的实际值 A_0 之间的差值叫做绝对误差, 以 Δ 表示, 即

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

在计算时可以用标准表(用来检定工作仪表的高准确度仪表)的指示值作为被测量的实际值。

在实际测量中还常用到更正值这一概念, 它与绝对误差等值反号, 以符号 c 表示, 即

$$c = -\Delta = A_0 - A_x \quad (1-2)$$

在测量中引进更正值后, 就可以对仪表指示值进行校正, 以消除其误差。

2. 相对误差 绝对误差 Δ 和实际值 A_0 之比的百分数叫做相对误差, 以符号 γ 表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{A_x - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

3. 引用误差 绝对误差 Δ 与仪表测量上限 A_n 之比的百分数叫做引用误差, 以符号 γ_n 表示, 即

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_n} \times 100\% = \frac{A_x - A_0}{A_n} \times 100\% \quad (1-4)$$

例如, 用一只标准电压表检定一只 1.5 级、0~250 伏

的电压表时，在被检表 200 伏那一点的标准表的指示值为 203 伏，则：

$$\text{绝对误差 } \Delta = A_x - A_0 = 200 - 203 = -3 \text{ 伏；}$$

$$\text{更正值 } c = -\Delta = A_0 - A_x = 203 - 200 = 3 \text{ 伏；}$$

$$\begin{aligned} \text{相对误差 } \gamma &= \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% = \frac{-3}{200} \times 100\% \\ &= -1.5\%； \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{引用误差 } \gamma_n &= \frac{\Delta}{A_n} \times 100\% = \frac{-3}{250} \times 100\% \\ &= -1.2\%。 \end{aligned}$$

引用误差的表示多用于直读仪表中，直读仪表精度级别的数值就是容许的最大引用误差百分数。

二、测量误差的分类及计算

根据误差的性质和产生的原因，以及为了进一步研究消除它们的方法，可将测量误差分为三种。

1. 系统误差 在同样条件下多次测量同一量时，维持不变或按一定规律而改变的误差称为系统误差(又称规则误差)。其主要来源有：(1) 由于仪表分度不准、指针弯曲、机械平衡调得不好等原因引起的工具误差；(2) 由于环境或外界因素(如温度、电压、外磁场等)改变引起的环境误差；(3) 由于测量方法或依据的理论公式不完备而引起的方法误差。例如，用电压表和电流表测量电阻时，由于仪表内阻影响、引进的测量误差；(4) 由于实验者生理上的最小分辨力、感觉器官的生理变化、反映速度和固有习惯等因素引起的人员误差，例如有的实验人员读取的仪表读数总是偏高或偏低。

系统误差可以采取措旆予以消除或更正。例如，仪器仪

表经检验给出更正值或更正曲线，可以补偿工具误差；在规定的条件下使用仪器仪表或根据环境条件对仪表读数的影响进行更正可以消除环境误差；采用更加完善的方法或通过计算可以更正或补偿方法误差；用不同方法或由不同实验者对同一量进行测量，可以发现和补偿人员误差；此外，有时也采取特殊方法，如代替法消除系统误差。

2. 随机误差(又称偶然误差)在相同条件下多次测量同一量时，误差绝对值和符号均发生变化，其值时大时小，没有一定的变化规律，又不能事前预定的误差误称为随机误差。它是由各种影响所造成的。例如，电磁场的微变、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一些互不相关的独立因素，对测定值的综合影响均将造成随机误差。因此，在测量过程中尽管测量条件不变，并以同样细心进行多次重复的测量，都能发现各次测量结果都不会完全一样，其原因就是由于随机误差造成的。应该指出，如果各次测量结果完全一样，这绝不能说在测量中不存在随机误差，而只能说明测量装置的灵敏度还不足以发现随机误差、或者是装置的灵敏度还没有充分发挥出来。

随机误差服从统计规律，故可用概率论估算。

例如，对同一被测对象的多次测量结果，所得值为 A_1 、 A_2 、 A_3 、…… A_n ，则其算术平均值为

$$A_p = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \cdots + A_n}{n} \quad (1-5)$$

如果用算术平均值 A_p 代替实际值 A_0 ，则每次测量的误差为

$$\Delta_i = A_i - A_p \quad (1-6)$$

一般称 Δ_i 为剩余误差。

多次测量的测量精度可用均方根误差 σ 、极限误差 $\Delta_{\max}$ 或算术平均误差 α 表示。

根据误差理论可得

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \cdots + \Delta_n^2}{n-1}} \approx \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}} \quad (1-7)$$

$$\Delta_{\max} = 3\sigma \quad (1-8)$$

$$\alpha = \pm \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2| + |\Delta_3| + \cdots + |\Delta_n|}{n} = \pm \frac{\sum |\Delta_i|}{n} \approx 0.8\sigma \quad (1-9)$$

上述均方根误差 σ 或算术平均误差 α 的公式是用来估计对某一被测量多次重复测量的精确度的。而主要是估算测量结果(即算术平均值)的误差。根据误差理论可以证明, 几次测量结果平均值的误差分别为上述误差的 $1/\sqrt{n}$ 倍, 即平均值的均方根误差

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-10)$$

平均值的算术平均误差

$$T = \frac{\alpha}{\sqrt{n}} \quad (1-11)$$

平均值的最大可能误差

$$\lambda_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\sqrt{n}} \quad (1-12)$$

综合上述论述可简要归纳如下: (1) 对于精密测量来说必须进行多次测量(一般不低于10次), 在测量结果中有 $\Delta > 3\sigma$ 时, 应认为该次测量结果不可靠, 应舍弃掉; (2) 在消

除了系统误差的情况下，多次测量的算术平均值是最接近被测量的实际值；(3) 测量结果的误差可用平均值的均方根误差 s 、平均值的算术平均误差 T 或平均值的最大可能误差 $\lambda_{\max}$ 表示。误差有效值可以取至两位（一般用一位）。

例 设对一被测电阻进行十次测量，其值分别为 449.5, 450.0, 450.6, 449.9, 449.8, 449.7, 450.8, 451.0, 450.2 和 450.5 欧。试计算其测量结果。

解 将所测得数值列表，并分别计算出其剩余误差及其平方值，见表 1-1。

表 1-1 测量和计算结果数据

测量次数 No	测量结果 R_i (欧)	剩余误差 (欧) $\Delta_i = R_i - R_p$	$\Delta_i^2 = (R_i - R_p)^2$
1	449.5	-0.7	0.49
2	450.0	-0.2	0.04
3	450.6	+0.4	0.16
4	449.9	-0.3	0.09
5	449.8	-0.4	0.16
6	449.7	-0.5	0.25
7	450.8	+0.6	0.36
8	451.0	+0.8	0.64
9	450.2	0	0
10	450.5	+0.3	0.09
计算结果	$R_p = 450.2$	$\sum \Delta_i = 0$	$\sum \Delta_i^2 = 2.28$

均方根误差

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}} = \pm \sqrt{\frac{2.28}{10-1}} \approx \pm 0.5 \text{ 欧}$$

算术平均误差 $\alpha \approx 0.8\sigma = \pm 0.4 \text{ 欧}$;

最大可能误差 $\Delta_{max} = 3\sigma = \pm 3 \times 0.5 = \pm 1.5$ 欧。测量记录中 Δ_i 值均小于 1.5 欧, 故均可采用。并进一步计算出,

$$\text{平均值的均方根误差 } s = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm 0.16 \text{ 欧};$$

$$\text{平均值的算术平均误差 } T = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm 0.13 \text{ 欧};$$

$$\text{平均值的最大可能误差 } \lambda_{max} = \pm \frac{\Delta_{max}}{\sqrt{n}} = \pm 0.48 \text{ 欧}。$$

故最终测量结果若用均方根误差表示, 可写为 $R = 450.2 \pm 0.2$ 欧; 在最坏的情况下 $R = 450.2 \pm 0.5$ 欧。

3. 疏失误差 也称粗差, 这种误差是指由于实验者的粗心或测量条件突然变化引起的。例如用了有毛病的仪器, 读错、记错、算错数据等引起的。这些误差均大于最大可能误差 Δ_{max} 。在进行试验记录处理时, 这种误差应从试验记录中除掉。

三、间接测量结果的误差

前面已提到间接测量方法, 例如, 测量电阻时, 用电压表测出电压 U , 用电流表测出电流 I , 然后用公式 $R = U/I$ 计算电阻。又如用电桥测量电阻时, 已知电桥的三个臂的电阻分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 , 然后用公式 $R_x = R_1 R_3 / R_2$ 来计算未知电阻 R_x 等等。由于变量 U 、 I 和 R_1 、 R_2 以及 R_3 等本身都包含有误差, 故这些误差都直接影响计算结果。如何来估算计算结果的综合误差? 今讨论如下。

1. 间接测量的系统相对误差和最大可能误差

设 x , u , v 是几个直接被测量, 与间接测量的未知量 y 有下列函数关系

$$y = f(x, u, v) \quad (1-13)$$

若 x' , u' , v' 是实际测得值, 则有

$$y' = f(x', u', v')$$

将式(1-13)两边取对数并微分, 得

$$\frac{dy}{y} = \frac{df(x, u, v)}{y}$$

因 $x' - x = \pm \Delta x'$, $u' - u = \pm \Delta u'$, $v' - v = \pm \Delta v'$, 而 $\Delta x'$ 、 $\Delta u'$ 和 $\Delta v'$ 很小, 故可写成

$$\gamma = \pm \frac{\Delta y'}{y'} = \frac{\Delta f(x', u', v')}{y'} \quad (1-14)$$

式中 γ 是测量结果的相对误差。

(1) 间接测量的未知量是几个直接被测量之和

例如, 求 $\cos \varphi = 1$ 时, 两个单相功率表测量三相功率时的误差, 则三相功率的读数 α 等于 A 、 C 两相两个功率表的读数 α_A 与 α_c 之和, 即

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_c$$

将上式两边取对数并微分, 得

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{d\alpha_A + d\alpha_c}{\alpha_A + \alpha_c} \quad (1-15)$$

故系统相对误差为

$$\frac{\Delta \alpha'}{\alpha'} = \frac{\Delta \alpha_A' + \Delta \alpha_c'}{\alpha_A' + \alpha_c'} \quad (\alpha_A' \text{ 和 } \alpha_c' \text{ 是实际读数})$$

若用仪表满分格为150格, $\alpha_A' = 100$ 格, 误差 $\Delta \alpha_A' = +0.5$ 格, $\alpha_c' = 50$ 格, 误差 $\Delta \alpha_c' = +0.4$ 格。分别代入上式得系统相对误差为

$$\frac{\Delta \alpha'}{\alpha'} = \frac{0.5 + 0.4}{100 + 50} = 0.6\%$$