

电工测量应试必读

——计量、测量200例

王铁华 宫克 编著

科学技术文献出版社

73.15
129

电工测量应试必读

——计量、测量200例

王铁华 富克 编著

31477/11

科学技术文献出版社

内 容 提 要

本书编写了电气技术人员及计量检定员所必需掌握和经常用到的电工测量及计量基础例题200个。通过对每一个例题的解答,系统地讲述了测量电流、电压、功率、电能、电阻、电感、电容、频率、相位和功率因数的工作原理、线路、方法及运算。同时,对测量中所用仪器仪表的检定、检定线路的确定、计量标准仪器的选用及测量误差的计算都做了详细的介绍,从而使读者能够全面了解电气测量与计量的理论、操作与运算技术。

本书可供工矿企业电工仪器仪表科研、生产、使用、检定和维修人员阅读,并可作为培训电工测量与计量人员的教学用书,也是提供电工测量与计量人员考工应试的自学用书。

电工测量应试必读

——计量、测量200例

王铁华 官克 编著

*

科学技术文献出版社

(北京复兴路15号 邮政编码 100033)

通县建新印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
787×1092毫米 32开本 14 印张 311 千字
1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数: 1—5,000册

科技新书目: 257—117

ISBN 7-5023-1541-1/TM·5

定 价: 7.80元

前 言

本书从解决实际问题出发,以围绕解答例题为中心,简捷地概述了有关电工测量和电工仪表仪器检定的基本原理,较好地將理论与实践结合起来,以期使读者尽快地熟悉和运用公式,掌握有关测量线路及计算方法、检定线路的确定、标准仪器的选择、误差分析和测量结果的处理。这是一本帮助电工测量及计量人员尽快掌握电工仪表仪器检定和测量技术的入门书,也是提供电工测量人员准备考工应试用的自学书。

本书共分五章。第一章通过不同类型的例题,简要地论述了测量误差的计算方法;第二章用典型例题较全面地介绍了电流和电压的测量方法、所用仪表仪器的工作原理,测量线路误差计算及其检定方法;第三章用各种类型的例题介绍了交直流功率和电能的测量方法、功率表和电度表的工作原理及其检定方法;第四章通过不同类型的例题介绍了电阻、电感、电容和阻抗的测量方法。交直流电桥测量线路误差计算和直流电桥的检定方法;第五章通过各种类型的例题介绍了频率、相位和功率因数的测量方法、频率表和相位表的工作原理及其检定方法。

本书承袁禄铭副教授审稿。在编写过程中,得到了董怀武、王殿君副教授的热情支持和董保申高级工程师热心指导,在此表示衷心感谢。

参加本书编写的还有韩春仁、王兴伟、韩春贵、王大伟。由于水平有限,书中难免有缺点和错误,请读者批评指正。

编 者

1991年6月

42202

目 录

第一章 测量误差的计算.....	(1)
第一节 直读测量仪表测量结果误差的计算.....	(5)
第二节 间接测量误差的计算.....	(13)
第三节 重复测量结果误差的计算.....	(22)
第二章 电流和电压的测量.....	(26)
第一节 电流表和电压表的应用.....	(26)
第二节 检流计的应用.....	(118)
第三节 电位差计的应用.....	(153)
第四节 运算放大器的应用.....	(190)
第五节 测量用互感器的应用.....	(207)
第三章 功率和电能的测量.....	(220)
第一节 功率表和比较仪的应用.....	(220)
第二节 电度表的应用.....	(260)
第三节 直流电路中功率和电能的测量.....	(272)
第四节 单相交流电路中功率和电能的测量.....	(280)
第五节 三相交流电路中的功率和电能的测量.....	(295)
第四章 电阻、电感、电容和阻抗的测量.....	(312)
第一节 欧姆表、亨利表和法拉表的应用.....	(312)
第二节 电桥的应用.....	(319)
第三节 电阻、电感和阻抗的间接测量.....	(361)
第四节 接地电阻的测量.....	(375)
第五节 直流电桥的检定.....	(383)
第五章 相位、功率因数和频率的测量.....	(405)
第一节 相位和功率因数的测量.....	(405)
第二节 频率的测量.....	(427)
参考文献.....	(442)

第一章 测量误差的计算

测量是人类认识周围物质世界取得数量观念的一种工具。我们把“被测量”所具有的实际大小称之为真值。在一定的条件下，被测量的真值是一个客观存在的确定数值。但是在测量中，人们在通过各种试验方法求得被测量的真值时，由于对客观规律认识的局限性、试验环境条件未能完全符合规定、测量工具不够准确、测量方法不尽合理及测量工作中的疏忽或错误等原因，都会使测量结果与真值不符，造成一定的偏差。这种偏差就叫做测量误差。

在各种测量中，对测量误差的要求是不同的。但是，随着科学技术的发展，对减小测量误差的要求越来越迫切。对大量的测量工作来说，测量的重要意义在于逼近真值，获得可信的数据。如果测量误差超过所需要的数值，测量所得到的结果，不但没有价值，还会给工作带来极大的危害。因此，必须进行对测量误差的控制，分析测量误差的来源，研究减小测量误差方法，并根据误差理论合理地设计产品，正确地选用仪器仪表和测量方法，准确地进行测量。

一、测量误差的定义

测量误差就是测量结果与被测量真值的差别。测量误差一般可分为绝对误差和相对误差两种。

1. 绝对误差 Δ 是测量结果 x 与被测量真值 x_0 之间的差值，即

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

测量结果 x 就是被测量的测得值，也就是测量中仪器仪表的示值。

在规定的条件下，被测量的真值 x_0 虽然是客观存在的，但要准确地说出真值的大小是很困难的。在有些情况下，真值可由理论给出，或由计量权威部门做出规定。但就大多数情况而言，真值常常是只能尽量逼近，但很难完全确定。在一般测量工作中，通常是把由更高一级的标准仪器与计量基准器比对所测得的值来代替真值。只要标准仪器的误差与测量仪器的误差相比小于 $1/3 \sim 1/20$ ，则标准仪器给出的值就可代替真值。

为了得到被测量真值 x_0 ，而应加到测量结果示值 x 上的某一个数值 c ，称为修正值。修正值与绝对误差的绝对值相等，但符号相反，即

$$c = -\Delta = x_0 - x$$

在比较准确的仪器中，通常以表格、曲线或公式的形式给出修正值。在某些自动测量仪器中，修正值可以先编成程序储存在仪器中，在测量时，仪器可以对测量结果自动进行修正。修正值通常是在检定时给出。当测量时得到给出值 x 及修正值 c 以后，由上式就可以求出被测量的真值，也就是实际值。

2. 相对误差 γ ，是绝对误差 Δ 与该点被测量真值 x_0 的百分比（%），即

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_0} 100\% \quad (1-2)$$

如果绝对误差 Δ 很小，我们用式（1-2）求相对误差时，作为一种近似计算，可以用测得值 x 来代替公式中的真

值 x_0 ，但这种近似计算不适用于误差较大的情况。则关系式(1-2)可以写成

$$\gamma_r \approx \frac{\Delta}{x} 100\% \quad (1-3)$$

3. 引用误差 γ_R 是绝对误差 Δ 与该仪表测量上限 x_0 的百分比(%)，即

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

虽然相对误差可以较好地反映某次测量的准确程度。但是，在连续刻度的模拟式仪表中，用相对误差来表示在整个量限内仪表的准确程度，往往感到不便。因为使用这种仪表时，在某一测量量限内，被测量有不同的数值，若用公式(1-3)来计算相对误差，随着被测量的不同，式中的分母也在变化，求得的相对误差也将随着变化。因此，为了计算和划分准确度等级的方便，将公式(1-3)中的测得值 x 改为上量限 x_0 ，即满刻度值作为分母。但用引用误差 γ_R 表示仪表的准确等级，也应注意到仪表标度尺的起始部分，允许的绝对误差 Δ 是很大的。因此，在使用仪表时，尽量用到上量限，可以减小测量误差。

二、测量误差的分类

测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差 就是在相同条件下重复测量同一量时，误差的绝对值和符号保持不变，或在条件变化时，按某种确定规律而变化的误差称为系统误差。

系统误差要受好多个因素影响，但试验条件一旦确定，系统误差就获得了一个恒定值，多次测量取平均值并不能改

变系统误差的影响。当试验条件改变时，一般地说系统误差是变化的，它的变化特点可以是周期性的、累进式的或按复杂规律变化的。这些规律一般可以用解析式、数据表格或曲线来表达。

产生系统误差的原因，主要有测量设备不完善、测量仪器不准以及安装、放置和使用不当引起的误差。如电表零点不准引起的误差；温度、湿度、电源电压变化，周围电磁场的影响带来的误差。也有测量方法不合理或者测量人员生理上缺陷造成的系统误差。不管是什么原因产生的系统误差，其特点是有一定的规律性。因此可以根据系统误差产生的原因，采取一定的方法，消除或减少系统误差的存在。

2. 随机误差 γ 在规定的相同条件下，多次测量同一量时，误差的绝对值及符号均以不可预知的方式发生变化的测量误差。

随机误差主要是由那些对测量值影响较微小，又不相关的多种因素共同造成的。如热骚动、噪声干扰、电磁场微变、空气波动、大地微振、测量人员感觉器官的各种无规律的微小变化等等。这些条件的变化一般是觉察不到的，因为测量条件没有变，仪器的准确程度相同，周围环境相同，测量人员工作状况没有变化，但是只要是测量仪器的灵敏度足够高，就会发现测量结果有上下起伏的变化，这种变化就是随机误差造成的。

随机误差一般不能准确地测量出来，但是，随机误差在多次测量的总体上服从统计规律。也就是说，在多次测量中随机误差的绝对值实际上不会超过一定界限；绝对值相等的正负误差出现的机会相同；随机误差的算术平均值随着测量次数的无限增加而趋近于零，就是说在多次测量中随机误差

有互相抵消的特性。因此，可以通过多次测量取测量值平均值的办法来消除随机误差对测量结果的影响。

由于随机误差一般不能准确地测量出来，在按着统计规律计算时，只能是设法估计出 $|y|$ 的上界值 U 。称 U 为测量结果的不确定度。当误差含有单项的系统误差分量时，也可以估计出误差的上界值和下界值，即

$$U_1 \leq y \leq U_2$$

置信概率 P 就是测量结果可信的程度。对于同一测量结果，如果估计一个较小的 U 值，则 $|y|$ 实际上不小于 U 的可能性就大，就将会冒着估计不足的风险；相反，若估计一个较大的 U 值，则 $|y|$ 不大于 U 就较为可信。如说误差 $|y| < \infty$ ，这当然就是 100% 的可信了。由此可见，置信限越宽，则置信概率也越大。置信概率多大才算合适，这取决于具体情况，一般习惯，置信概率可取 68%、90%、95%、99%、99.5%、99.73% 等数值，究竟取多少，根据具体要求及该项测量的重要性而定。

3. 粗大误差 在一定的测量条件下，测量值明显地偏离其真值时，所对应的误差称为粗大误差，又叫做粗差。

粗大误差的产生是由于读数错误、记录错误、测量方法不合理、操作方法不正确、计算错误等原因造成的。这种误差一般都明显地超出正常条件下的系统误差和随机误差。在测量中把粗大误差称为坏值，应把它在测量数据中剔除不用。

第一节 直读测量仪表测量结果误差的计算

用直读测量仪表测量时，测量结果直接显示在模拟或数字指示装置上，模拟装置是用一个在标度尺上移动的指示器

实现的；而数字装置是一个用机械、光学和电子方法实现的十进制数字显示器。

在规定的条件下，直读测量仪表显示的是基本误差，用引用误差 γ_R 或相对误差 γ_r 表示。任何一个量的改变对规定条件有影响时，都会引起一些附加误差。

在用引用误差 γ_R 表示基本误差的直读测量仪表测量时，与测量结果有关的相对误差 γ_r 用下式表示，即

$$\gamma_r = \gamma_R \frac{x_c}{x} \quad (1-5)$$

在用数字仪表测量时，除了基本误差和附加误差外，测量结果还受量子化误差的影响。这个误差是来自模数转换系统。

例题1.1.1 为了测量三相交流网路中220V的相电压，准备了几个电磁系电压表（见表1.1.1）。在保证同样测量条件的情况下，确定哪个仪表能以最小相对误差测量电压？

表 1.1.1

电压表	量 限	准确度等级
	(V)	
1	250	1.0
2	150	2.5
3	300	1.5
4	600	0.5

解 要减小测量中的相对误差，必须合理地选择电压表的量限。电压表2的量限为150V，不能测量200V电压。用其他电压表测量时，相对误差可按式(1-5)计算，但应注意到测量仪表准确度等级是用引用误差 γ_R 表示的，即用表1.1.1中的数据代入公式可得

$$\text{用电压表 1: } \gamma_{r1} = \gamma_R \frac{x_c}{x} = (\pm 1.0\%) \times \frac{250}{220} = \pm 1.14\%;$$

$$\text{用电压表 3: } \gamma_{r3} = (\pm 1.5\%) \times \frac{300}{220} = \pm 2.05\%;$$

$$\text{用电压表 4: } \gamma_{r4} = (\pm 0.5\%) \times \frac{600}{220} = \pm 1.37\%;$$

由以上三式可知，虽然电压表1准确度等级不是最高的，但由于量限合适，保证了以最小相对误差测量电压。电压表3和电压表4虽然准确度等级高，但因量限远大于“被测量”，使相对误差加大。由此可见，要想保证以最小的相对误差测量电压，只选用高准确度的电压表是不够的，还必须按着被测量接近电压表上量限的条件选用电压表，使电压表能工作在三分之二标尺以上。

例题1.1.2 用一个1.5V、6V、15V、30V、150V、300V和600V多量限1.5级的整流系电压表，在规定的条件下，测量0.3~600V的电压，并用曲线来表示相对误差。

解 为做出准确完整的相对误差曲线，必须考虑两种情况。一种是被测量 U 等于电压表上量限 U_c 时的相对误差，另一种是被测量小于电压表上量限很多时的相对误差。相对误差可根据公式(1-5)计算，即

$$\gamma_r = \gamma_R \frac{x_c}{x}$$

式中，已知 $\gamma_R = 1.5\%$ 是电压表的准确度等级。

第一种情况，已知 $U = U_0$ 时，将 γ_r 和 $U = 1.5V、6V、15V、30V、150V、300V$ 和 $600V$ 分别代入公式，得出同一结果为

$$\gamma_r = (\pm 1.5\%) \frac{U_0}{U} = (\pm 1.5\%) \times \frac{1.5}{1.5} = \pm 1.5\%$$

.....

计算出的电压表各量限，在测量中的相对误差均为 $\pm 1.5\%$ 。

第二种情况，已知 $U \ll U_0$ 时，将 γ_R 和 $U = 0.3V、1.5V、6V、15V、30V、150V、300V$ 分别代入公式，得

$$\gamma_r = (\pm 1.5\%) \times \frac{U_0}{U} = (\pm 1.5\%) \times \frac{1.5}{0.3} = \pm 7.5\%$$

.....

计算出电压表各量限，在测量小电压时的相对误差分别为 $\gamma_r = \pm 7.5\%、\pm 6\%、\pm 4\%、\pm 3\%、\pm 7.5\%、\pm 3\%$ 和 $\pm 3\%$ 。

按着计算结果画出相对误差 γ_r 与电压表测量的电压值 U 的关系曲线，如图1.1.1所示。可以看出，在确定该电压表测量电压的相对误差时，不是只将被测电压等于电压表上量限时相对误差引入曲线中，而是用曲线表示出测量各种电压值时，相对误差的变化情况。因为在实践中经常出现的一些电压值是 $6V、12V、24V、110V、127V、220V$ 和 $380V$ ，测量这些电压时的相对误差是不同的。当被测电压 U 等于电压表上量限 U_0 时，这时相对误差为最小，即 $\pm 1.5\%$ ；在不改变电压表量限的情况下，随着被测电压的减小而相对误差逐渐加大，最大可达到 $\pm 3\%$ 。相对误差的加大，是用引用误差表示准确度等级的结果。因为这种表示方法，说明电压

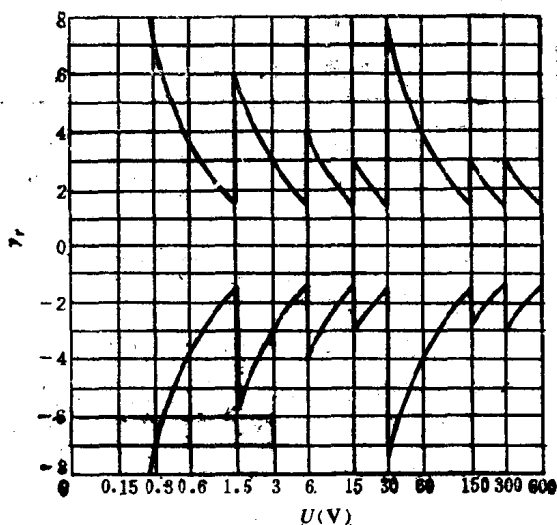


图 1.1.1

表每个刻度上的允许绝对误差是一样的，然而，电压表用在下量限测量电压时，由于被测量小就使得该刻度上的绝对误差和被测电压之比变大了。即相对误差加大了。

例题1.1.3 一个量限为250V、1.5级，垂直工作的开关板电磁系电压表，装在倾斜45°的操作台上。已知操作台的环境温度在24°C和30°C之间。指出在这种条件下，测量210V电压时的相对误差是多少？

解 规定的条件是垂直工作、环境温度20°C。此时，基本误差（引用）是 $\gamma_R = \pm 1.5\%$ 。已知倾斜偏离规定条件产生的附加误差 $\pm 1.5\%$ 和极限温度的附加误差 $\pm 1.5\%$ ，所以，测量210V电压时，相对误差是

$$\gamma_r = \pm (1.5 + 1.5 + 1.5)\% \times \frac{250}{210} = \pm 5.36\%$$

例题1.1.4 在检定一个1.5级的磁电系电流表时，得到表1.1.2的数据：

表 1.1.2

被检电流表 I_t	(A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
标准电流表(上升) I_e	(A)	0.21	0.43	0.64	0.82	0.99
标准电流表(下降) I_e	(A)	0.18	0.39	0.61	0.78	0.97

1. 指出标准电流表的准确度等级；
2. 做出被检磁电系电流表的绝对误差曲线图；
3. 确定被检电流表的误差是否符合1.5级的要求。

解 1. 按照检定规程，标准电流表的准确度等级应比被检电流表的准确度等级至少高5级，即

$$\frac{1.5}{5} = 0.3$$

因此，标准电流表的准确度等级应为0.1或0.2；

2. 绝对误差用式(1-1)计算，即

$$\Delta = I_t - I_e$$

得出的结果见表1.1.3；

表 1.1.3

I_t	(A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Δ (上升)	(A)	-0.01	-0.03	-0.04	-0.02	0.01
Δ (下降)	(A)	0.02	0.01	-0.01	0.02	0.03

在表1.1.3结果的基础上，做了被检磁电系电流表的绝对误差曲线图，如图1.1.2；

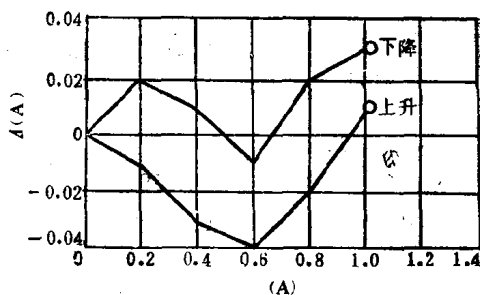


图 1.1.2

3. 由于最大极限额定值 $I_c = 1\text{A}$, 根据式 (1-4) 可确定极限引用误差的数值, 被检磁电系电流表的基本误差是

$$| \gamma_R | = \frac{|\Delta|_{\max}}{I_c} \times 100\% = \frac{0.04}{1} \times 100\% = 4\% > 1.5\%$$

所以, 被检电流表的准确度等级大于1.5级, 不符合1.5级仪表的误差要求。

例题1.1.5 用一个量限为 $U_0 = 1.2\text{V}$, 五位数的0.05级数字电压表测量电压 $u = 0.8593\text{V}$, 确定测量相对误差。

解 根据式 (1-5), 确定的测量相对误差是

$$(\pm 0.05\%) \frac{1.2}{0.8593} = \pm 0.0698\%$$

数字电压表的第五位数字, 决定的量子化绝对误差为 $\pm 10^{-4}\text{V}$ 。根据式 (1-3), 量子化相对误差是

$$\pm \frac{10^{-4}}{0.8593} \times 100\% = \pm 0.0116\%$$

因此, 测量相对误差是

$$(\pm 0.0698\%) + (\pm 0.0116\%) = \pm 0.0814\%$$

该数字电压表选择五位数字是合理的。如果选择四位数字，那么，测量相对误差是

$$\begin{aligned} & (\pm 0.05\%) \frac{1.2}{0.8593} + \left(\frac{10^{-8}}{0.8593} \times 100\% \right) \\ & = (\pm 0.0698\%) + (\pm 0.116\%) = \pm 0.1858\% \end{aligned}$$

选择四位数字电压表，虽然价格低，但却增大了测量误差中量子化误差的比例。

如果选择六位数字的，那么，测量相对误差是

$$\begin{aligned} & (\pm 0.05\%) \frac{1.2}{0.8693} + \left(\pm \frac{10^{-8}}{0.8693} \times 100\% \right) \\ & = (\pm 0.0698\%) + (\pm 0.00116\%) = \pm 0.07096\% \end{aligned}$$

在这种情况下，数字电压表的价格高，结构复杂了，但测量误差实际上并没有减小。

所以，还是选择五位数字的合理。

例题1.1.6 一个额定电压为 $U_r = 380V$ 、标定电流为 $I_b = 20A$ 、最大电流 $I_{max} = 80A$ 、其准确度为1级的三相四线电度表，在电压 $u = 418V$ ，电流 $i = 24A$ 和功率因数 $\cos\varphi = 0.5$ （感性）的平衡负载下工作，电度表的测量相对误差是多少？

解 在额定电压为 U_r 、负载电流在标定电流 I_b 和最大电流 I_{max} 之间、功率因数 $\cos\varphi = 0.5$ （感性）的平衡负载下工作时，1.0级的三相交流电度表的相对误差是 $\pm 1\%$ ；由于被测电压比标准规定的电压高10%，所以测量误差中应加入 $\pm 1\%$ 的附加误差，则电度表测量有功电能的相对误差是

$$(\pm 1\%) + (\pm 1\%) = \pm 2\%$$