

供电中级工培训教材

电气仪表

东北电业管理局 教材编审委员会
供电中级工培训
辽宁省职工教育教材编审委员会

工人出版社

中国工程材料

电气仪表

中国工程材料
中国工程材料
中国工程材料
中国工程材料

编著者：刘浩清 唐贤琳

审稿者：邹承琯

责任编辑：腾 骧

责任校对：张宗源

东电供电中级工培训教材编委会

主任：张凤逸

副主任：胡恩喜 刘宗祥

编委：范克文 郭素容

郭嘉毅 冀升山

高 莉

供电中级工培训教材

电 气 仪 表

东北电管局供电中级工培训教材编审委员会

辽宁省职工教育教材编审委员会

工人出版社出版（北京安外六铺炕）

沈阳图书服务部发行

济南印刷三厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：13.375 字数：284千字

1986年4月第1版 1986年4月第1次印刷

印数：1—53,970册

统一书号：15007·24 定价：2.50 元

前 言

为适应电力工业中级工培训的需要，供电中级工培训教材和读者见面了。这套教材是根据水利电力部指示，由东北电业管理局供电中级工培训教材编审委员会组织东北电管局机关、供电企业、学校的高级工程师、工程师、讲师编写、校核、审定，由辽宁省职工教育教材编审委员会编辑、发行，工人出版社出版。全套教材包括：《数学》、《无机化学》、《有机化学》、《工程力学》、《机械制图》、《电工基础》、《电子技术基础》、《电气设备》、《变压器》、《高电压技术》、《继电保护自动装置》、《电气仪表》、《分析化学》、《绝缘油及监督》、《送电线路运行与检修》、《送电线路电气及机械计算》、《调相机》、《配电设备》、《高压并联电容器》、《带电作业》等，共二十种。供不同专业、工种选用。

这套教材适用于供电系统各主要技术工种、用电单位和企业电工、农村电工；部分教材也适用于水、火电厂、地方热电厂、企业自备电厂以及电力建设单位相应的技术工种；亦可作为有关技工学校、职业学校的参考教材。同时，可供从事电气运行、检修、安装的各级技术工人自学。

《电气仪表》由辽阳电业局工程师刘浩清主编，唐贤琳参编，由东北电力试验研究院工程师邹承琯审阅、校订。在编写过程中，得到了有关部门的领导和同志们的大力支持，在此致以衷心感谢。由于时间仓促和我们的水平所限，书中不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正，以便今后再做修改。

东北电业管理局
供电中级工培训教材编审委员会

辽宁省职工教育教材编审委员会

一九八六年四月

目 录

第一章 测量误差的基本知识

- 第一节 测量的定义和分类..... (1)
- 第二节 测量误差概述..... (3)
- 第三节 测量误差的分类..... (8)
- 第四节 消除系统误差的方法..... (11)
- 第五节 测量数据的处理..... (16)

第二章 电气测量仪表概论

- 第一节 电气测量仪表概述..... (22)
- 第二节 电气测量仪表的误差..... (35)
- 第三节 电气测量仪表的主要技术要求..... (38)

第三章 磁电系仪表

- 第一节 磁电系仪表的结构及工作原理..... (42)
- 第二节 磁电系仪表的温度补偿..... (47)
- 第三节 磁电系电流表..... (53)
- 第四节 磁电系电压表..... (59)
- 第五节 磁电系仪表的修调..... (61)
- 第六节 检流计..... (70)

第四章 电磁系仪表

- 第一节 电磁系仪表的结构及动作原理..... (83)
- 第二节 电磁系电流表和电压表..... (87)
- 第三节 附加误差产生原因及其补偿法..... (91)
- 第四节 电磁系仪表的调修..... (95)

第五章 电动系仪表

第一节	电动系仪表的构造、原理·····	(109)
第二节	电动系电流表·····	(115)
第三节	电动系电压表·····	(119)
第四节	电动系功率表·····	(121)
第五节	电动系仪表的调修·····	(128)
第六节	低功率因数功率表·····	(137)
第七节	铁磁电动系仪表·····	(141)
第六章 三相有功、无功功率测量及其仪表		
第一节	三相电路有功功率的测量·····	(149)
第二节	电动系三相两元件有功功率表·····	(154)
第三节	三相电路无功功率的测量·····	(165)
第四节	铁磁电动系三相两单元无功功率表·····	(169)
第七章 功率因数表		
第一节	电动系流比计(比率计)的结构原理·····	(178)
第二节	D3— φ 型单相功率因数表·····	(181)
第三节	D31— $\cos\varphi$ 型功率因数表·····	(187)
第四节	1D5— $\cos\varphi$ 型铁磁电动系三相功率 因数表·····	(191)
第五节	$\exists H\phi$ 型电磁系三相功率因数表·····	(195)
第八章 频率表		
第一节	电动系频率表·····	(199)
第二节	铁磁电动系频率表·····	(209)
第三节	自动记录式整流系频率表·····	(216)
第九章 同步表		
第一节	旋转磁场·····	(219)
第二节	电磁系同步表·····	(226)
第十章 直流电位差计		

第一节	工作原理及分类·····	(236)
第二节	直流电位差计·····	(238)
第三节	进位盘的结构原理·····	(246)
第四节	直流电位差计的修调·····	(258)
第十一章 直流电阻箱、分压箱、电桥		
第一节	直流电阻箱·····	(267)
第二节	直流分压箱·····	(270)
第三节	直流电桥·····	(273)
第四节	交流电桥·····	(280)
第五节	变压器比率臂电桥·····	(283)
第六节	变比电桥·····	(286)
第七节	电桥、电阻箱、分压箱的修调·····	(290)
第十二章 模拟电子电压表及数字电压表		
第一节	模拟电子电压表·····	(294)
第二节	数字电压表·····	(317)
第十三章 电子计数器		
第一节	电子计数器的测量原理·····	(338)
第二节	电子计数器的测量误差·····	(344)
第三节	E312型10MHz 电子计数式频率计·····	(349)
第十四章 示波器		
第一节	电子示波器·····	(354)
第二节	光线示波器·····	(375)
第十五章 电量变送器和变换器式仪表		
第一节	电量变送器·····	(383)
第二节	变换器式仪表·····	(396)

第一章 测量误差的基本知识

第一节 测量的定义和分类

人类在研究质和量的关系过程中，无论从事生产斗争还是科学实验，都离不开测量。如电能的生产、传输、分配和使用等各环节，唯有通过各种电气测量仪表（以下简称仪表）检测，才能对电能的质量、负荷等情况加以监视、控制，从而保证生产的安全和经济运行。

测量——就是通过物理实验的方法，将一个被测量与作为比较单位的同类标准量进行比较的过程。如电工测量就是将测量的电量或磁量与其同类标准电量或磁量进行比较的过程。从获得测量结果的方法分类，所有测量均可分为如下三类：

一、直接测量

直接测量是将被测量与标准量直接比较。或者，用预先按标准定度的测量仪器进行测量，从而直接由实验数据中求得被测量数值，称为直接测量。

直接测量时，测量目的和测量对象是统一的。例如：用尺测量长度，用电流表测量电流，用温度计测量温度，……等等，均属直接测量。

二、间接测量

首先直接测量出与被测量具有一定函数关系的几个量，然后通过函数关系式求得被测量数值，这种测量称间接测量。

例如：电阻系数 ρ 的数量，可通过直接测量求出电阻 R ，长度 L 及截面积 S ，然后按下面函数式计算电阻系数：

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

由于在许多情况用直接测量方法不能求得未知量数值，因此间接测量是用得最多的。

三、组合测量

组合测量又称总和测量。其结果是在直接测量或间接测量数值的基础上通过求解联立方程式组合后获得。例如测量标准电阻线圈的电阻温度系数 α 和 β ，即属组合测量的例子。

众所周知，标准电阻线圈的电阻与温度间的关系可用下述多项式表示：

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

$$R_t \approx R_{20} + R_a (t - 20) \alpha + R_n (t - 20)^2 \beta \quad (\Omega);$$

式中 R_t ——在 $t^\circ\text{C}$ 下电阻的实际值 (Ω) ；

R_{20} ——在 20°C 下电阻的实际值 (Ω) ；

α 和 β ——温度系数；

R_a ——标准电阻线圈名义值 (Ω) 。

为求得上式中的 α 、 β 和 R_{20} ，必须在给出的 t_1 、 t_2 及 t_3 三种温度下获得下列方程式，然后联立求解

$$R_{t_1} \approx R_{20} + R_a (t_1 - 20) \alpha + R_n (t_1 - 20)^2 \beta;$$

$$R_{t_2} \approx R_{20} + R_a (t_2 - 20) \alpha + R_n (t_2 - 20)^2 \beta;$$

$$R_{t_3} = R_{20} + R_{\alpha}(t_3 - 20)\alpha + R_{\beta}(t_3 - 20)^2\beta。$$

式中 R_{t_1} 、 R_{t_2} 、 R_{t_3} 和 t_1 、 t_2 、 t_3 均可通过直接测量或间接测量的方法获得。从而解出 α 、 β 、 R_{20} 作为常数代入式(1—1)，则在任何温度下的 R_t 均可据此求解。

组合测量方程式的数目至少应等于被测量的数目，也可以更多一些以提高精密度。

第二节 测量误差概述

当进行任何一个测量时，由于测量设备、测量方法、测量环境、人们对客观规律的认识等，均不可能完善无缺，这些因素致使测量结果受到歪曲和失真。其表现为我们对某一物理量，或某一被检量具或器具进行多次测量时，各次测量的结果并不完全一样，所测得的值并不就是被测量的真值，也就是说测量结果与被测量的真值之间存在一定的差值，这个差值就是测量误差。一切测量结果都带有误差，误差存在于测量的全过程之中。这个结论，在误差理论中，被称之为误差公理。因此，我们在给出一项测量结果的时候，必须同时指出其误差。否则，这个测量结果没有任何实际意义。

测量误差的表达方式有绝对误差、相对误差及引用误差三种。

1. 绝对误差

绝对误差是测得的值与其真值之差，即

$$\text{测量误差} = (\text{测得值}) - (\text{真值})$$

此误差是最为普遍和常见的误差。它可能是正值，也可能是负值，其符号取决于测得值的大小。显然测量误差的大

小决定了测量的准确程度。测量误差愈小，说明测量愈准确。

如以 ΔX 表示绝对误差， X 表示测得值，就是仪表、仪器或量具的示值，及其近似计算值等； X_0 表示真值，是某一时刻、某一位置或状态下，被测量的真实大小。其关系式为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-2)$$

例如今用1.0级电压表测一直流电压值为150.500V；若用准确度较高的0.02级数字电压表测此电压，测得的值为150.010V，相对而言，后者可视为真值，则前者电压表的测量误差为

$$\Delta X = 150.500 - 150.010 = 0.490 \text{ V}$$

例如某电压表刻度为0~60V，在示值50V处的实际值为49.95V，则仪表在示值50V处的绝对误差为

$$\Delta U = U - U_0 = 50 - 49.95 = 0.05 \text{ V}$$

又如标准电阻线圈的标称值为100Ω，其实际值却为100.01Ω时，则绝对误差为

$$\Delta R = R - R_0 = 100 - 100.01 = -0.01 \Omega$$

在实际测量中，常用修正值（又称更正值或校正值） C 这一术语，它与绝对误差等值反号，即

$$\text{修正值} = (\text{真值}) - (\text{测得值})$$

或 $C = -\Delta X = X_0 - X \quad (1-3)$

例如用某电流表测量电流示值为5A，该表5A刻度处的修正值是-0.005A，则被测电流的真值 $X_0 = X + C$ 为4.995A。

绝对误差、修正值及测得值具有相同量纲。绝对误差的大小与符号分别表示测得值偏离真值的程度和方向。

2. 相对误差

绝对误差表示法有它不足之处，不能确切地反映测量的精确度。例如测量两个频率， $f_1 = 50\text{Hz}$ ，具有绝对误差 $\Delta f = 0.1\text{Hz}$ ， $f_2 = 20000\text{Hz}$ ，绝对误差 $\Delta f_2 = 10\text{Hz}$ 。可以看出 f_1 的绝对误差 Δf_1 小于 f_2 的绝对误差 Δf_2 ，但不能由此得出频率 f_1 的测量准确度较频率 f_2 测量准确度高的结论。恰好相反，由于 f_1 的误差 0.1Hz 相对于 50Hz 占 0.2% ，测 f_2 的误差 10Hz 对 20000Hz 讲占 0.05% 。故 f_2 的测量准确度比 f_1 的测量准确度高。为能确切反映测量的准确度，提出了误差率的概念，即相对误差的概念。

相对误差等于绝对误差值与真值的比值，用百分数表示即

$$\begin{aligned}\text{相对误差} &= \frac{\text{绝对误差值}}{\text{真 值}} (100\%) \\ &\approx \frac{\text{绝对误差值}}{\text{测得值}} (100\%) \end{aligned}$$

用 γ 表示相对误差则

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} (100\%) \approx \frac{\Delta X}{X} (100\%) \quad (1-4)$$

例如一只量限为 $0 \sim 5\text{A}$ 的 0.2 级电流表，当仪表示值在 3A 时，该示值处的真值为 2.99A ，其相对误差为

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{I - I_0}{I_0} 100\% = \frac{3 - 2.99}{2.99} 100\% = 0.335\% \\ &\approx \frac{I - I_0}{I} 100\% = \frac{3 - 2.99}{3} 100\% = 0.333\% \end{aligned}$$

相对误差是只有大小和符号而无量纲的量。它不仅可反

映测量结果的准确度，而且也便于对不同测量方法进行比较。

修正值C与被测量真值之比叫做相对修正值 K_c ，它与相对误差大小相等，符号相反，即

$$K_c = -\gamma = \frac{C}{X_0} 100\% \approx \frac{X_0 - X}{X} 100\% \quad (1-5)$$

由此可求出被测量的真值为

$$X_0 = X(1 + K_c) \quad (1-6)$$

例如电阻线圈的标称值 $R = 100 \Omega$ ，其相对修正值 $K_c = 0.01\%$ ，则线圈电阻的真值为

$$R_0 = R(1 + K_c) = 100(1 + 0.01\%) = 100.01 \Omega$$

3. 引用误差

上述相对误差虽然可较好地反映测量仪器及量具准确度，但是如用相对误差表示仪表整个量限的准确度，则有许多不便之处。由于仪表在各量限内各刻度点，所测的量是不同的数值，引起式(1-4)的分母相应改变，因此各点测出的相对误差也随之改变。为了能方便地计算和划分测量仪表的准确度级别，在用式(1-4)求相对误差时，将分母的数值选为仪表的测量上限(满刻度)值，从而导出了引用误差的概念。

引用误差被定义为电气测量仪表指示值的绝对误差值与其测量上限值之比，用百分数表示即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差值}}{\text{测量上限值}} 100\%$$

用符号表示为

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_n} 100\% \quad (1-7)$$

由于仪表各示值的绝对误差值是不相等的，其值有大有小，符号有正有负。为了应用方便起见，仪表的准确度级别 $a\%$ ($a = \pm 0.1、\pm 0.2、\pm 0.5、\pm 1.5、\pm 2.5、\pm 5.0$)，采用最大引用误差（允许误差）来标明级别的。它是仪表各示值中最大的绝对误差值与仪表测量上限值的百分比，即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta X_m}{X_n} 100\% \leq a\%$$

式中 γ_{nm} ——仪表的引用误差；

ΔX_m ——仪表各指示值中最大的绝对误差值；

X_n ——仪表的测量上限值。

引用误差用以判别仪表是否合格。如检定一只量限为5 A的电流表，在指示值3 A处的误差最大，误差值为100 mA，试求仪表的准确度级别？

根据式（1—7）可求得仪表的引用误差为

$$\gamma = \frac{0.1}{5} \times 100\% = 2\%$$

此表属于2.5级。

另外，假定测量某处150 V左右的电压，用了1.5级的量限为450 V和2.5级的量限为200 V的两块电压表分别去测量此电压，问哪块表的最大相对误差较小？

解 用1.5级450 V量限的电压表测量时的最大相对误差为

$$\gamma_{m1} = \frac{X_{m1}}{X} \times a_1\% = \pm \frac{450}{150} \times 1.5\% = \pm 4.5\%$$

式中 X_{m1} ——仪表的最大测试值（满限值）。

而用2.5级200 V量限的电压表测量时的最大相对误差为

$$\gamma_{m2} = \frac{X_{m2}}{X} \times a_2 \% = \pm \frac{200}{150} \times 2.5 \% = \pm 3.33 \%$$

上述说明仪表量限选用合适，用准确度级别低的仪表反而比用准确度级别高的仪表测量准确。为此，在测量中选用仪表时，不能一味追求高准确度，应根据被测量大小和要求精度，考虑仪表的测量上限和级别。一般应使被测量的示值指示在仪表满刻度值的三分之二以上。

第三节 测量误差的分类

在误差理论中，根据测量过程产生误差的性质、来源及对测量结果的影响，并从研究其消除方法出发，一般将测量误差分为三类——系统误差、偶然误差和疏失误差。

一、系统误差

在相同条件下多次重复测量同一量时，误差的大小和符号始终不变；或条件改变时按某一确定规律而变化，即误差的值或者偏大，或者偏小，或者是某一变量（如温度或时间等）的函数。这类误差，或者说具有上述特征的误差均称为系统误差。前者为已定系统误差；后者为未定系统误差。更确切地说，系统误差可定义为在偏离测量规定条件或因测量方法所引入的因素，按某确定规律所引起的误差。引起系统误差的原因可归纳如下：

（1）在测量过程中所使用的标准仪器或设备制造上就不十分精确，存在一定的误差。由于它是因所用工具或仪器不准引起的，故称为工具误差或称仪器误差。

（2）如由于某种原因，对某些仪器或设备，在进行测量

之前未按其要求调好零位，使仪器就呈现一初始值，而给测量结果带来误差。通常称此项误差为零位误差，或简称零差。

(3)未按使用条件规定放置的某些仪器或设备；未按正确方法接地或屏蔽，或者未用专用连接导线的某些电磁测量和无线电测量的仪器或设备等，均会给测量结果带来误差，它常被称为装置误差。

(4)测量时的客观环境，如温度、湿度、压力、电、磁场、频率及重力加速度等影响量发生变化，致使仪器、设备的结构参数发生变化给测量结果带来误差，此项误差通常称为环境误差。

(5)测量时采用的方法不完善或引用的理论根据有缺点，或者引入一些近似公式，这也会给测量结果带来误差。它常叫作方法误差或理论误差。

(6)在测量中，测量人员感觉器官的生理缺陷和固有习惯使反映速度和最小分辨力受到限制，这也会给测量结果带来误差，通常称之为人员误差。

系统误差就本身来说是规律性的误差，它的发现和消除，对测量工作具有头等重要的意义。此项误差应引入相应的修正值和采用完善的测量方法尽可能使其减小或消除。

系统误差表明了测量结果偏离被测量真值的程度，它决定了测量的准确度。系统误差越小，测量结果也就越准确。

二、偶然误差

偶然误差又叫随机误差。所谓随机误差是指具有下述特征的误差，即在相同条件下多次测量同一被测量，每次测量含有的误差忽大忽小，可正可负，没有确定的变化规律可

循，不能控制也不能用实验方法加以消除的误差。

引起偶然误差的原因，主要是由许多互不相关的独立因素引起的微量变化所致。例如测量过热状态的微量变化，机械状况的微变，空气的扰动，空间杂散电磁场的微变，测量者本身生理性变化，等等。

从表面上看，一次测量的偶然误差没有什么规律性，不能预料，也不能估计，但是在测量次数增多的情况，它在总体上仍遵循一定的规律，这个规律就是统计学规律。而且测量次数愈多，这种规律表现的愈明显。其规律性表现在如下四个方面：

(1) 在一定的测量条件下，偶然误差的绝对值不会超过某一界限。此特性说明误差出现的范围（偶然误差是有界的）。

(2) 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多。这一特性指出了误差大小的规律性（所谓单峰性）。另外还提供了绝对值较大的误差出现很少的理论根据。

(3) 绝对值相等符号相反的误差出现的机会均等。它表明偶然误差具有误差符号的规律性（所谓对称性）。

(4) 以相等的精度测量某一物理量时，其偶然误差的算术平均值随着测量次数的无限增多，而越来越接近于零。这个规律指明了偶然误差在多次重复测量中，有互相抵消的特性（所谓抵偿性）。

偶然误差的特性可用图 1—1 的曲线来描述，该曲线就是通常所说的随机误差正态分布曲线，如以偶然真误差 ΔX 为横坐标，以同一数值的误差出现的次数为纵坐标，曲线能直观地反映了偶然误差的上述四大特性。由图可见，曲线是有界的，左右对称，中间高，若两边一平均，则因左右对