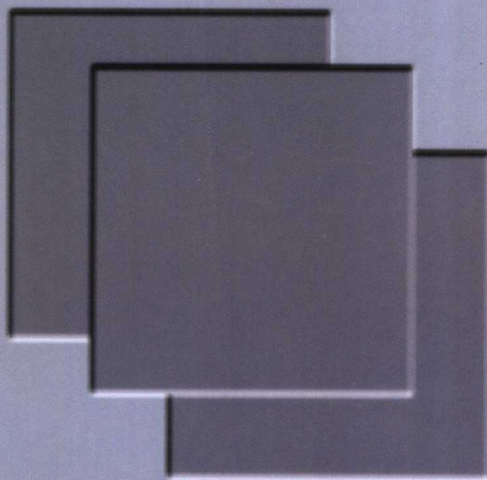




全国高职高专电气类精品规划教材

电工测量

主编 王剑平 李殊骁



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

全国高职高专电气类精品规划教材

电工测量

主 编 王剑平 李殊骁

副主编 章 或 王运娣 汶占武



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材共分 12 章。主要内容有: 电工测量的基本知识, 磁电系仪表, 电磁系仪表, 电动系仪表, 感应系仪表, 兆欧表, 直流电桥和交流电桥, 万用表, 电子式仪表, 电学量的测量, 电路元件参数的测量, 电能计量等。

本教材适合高等职业技术学院、高等工程专科学校的水电站机电设备、供用电、电力系统与自动化等专业使用, 也可供其他各类院校相关专业选用, 或供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工测量/王剑平, 李殊骁主编. —北京: 中国水利
水电出版社, 2004. 8
全国高职高专电气类精品规划教材
ISBN 7-5084-2241-4

I. 电... II. ①王... ②李... III. 电气测量—高等
学校: 技术学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 068681 号

书 名	全国高职高专电气类精品规划教材 电 工 测 量
作 者	主编 王剑平 李殊骁
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京安锐思技贸有限公司
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×960mm 16 开本 13 印张 254 千字
版 次	2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—5100 册
定 价	19.50 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

教育部在《2003-2007 年教育振兴行动计划》中提出要实施“职业教育与创新工程”，大力发展职业教育，大量培养高素质的技能型特别是高技能人才，并强调要以就业为导向，转变办学模式，大力推动职业教育。因此，高职高专教育的人才培养模式应体现以培养技术应用能力为主线 and 全面推进素质教育的要求。教材是体现教学内容和教学方法的知识载体，进行教学活动的基本工具；是深化教育教学改革，保障和提高教学质量的重要支柱和基础。因此，教材建设是高职高专教育的一项基础性工程，必须适应高职高专教育改革与发展的需要。

为贯彻这一思想，2003 年 12 月，在福建厦门，中国水利水电出版社组织全国 14 家高职高专学校共同研讨高职高专教学的目前状况、特色及发展趋势，并决定编写一批符合当前高职高专教学特色的教材，于是就有了《全国高职高专电气类精品规划教材》。

《全国高职高专电气类精品规划教材》是为适应高职高专教育改革与发展的需要，以培养技术应用为主线的技能型特别是高技能人才的系列教材。为了确保教材的编写质量，参与编写人员都是经过院校推荐、编委会答辩并聘任的，有着丰富的教学和实践经验，其中主编都有编写教材的经历。教材较好地反映了当前电气技术的先进水平和最新岗位要求，体现了培养学生的技术应用能力和推进素质教育的要求，具有创新特色。同时，结合教育部两年制高职教育的试点推行，编委会也对各门教材提出了

满足这一发展需要的内容编写要求，可以说，这套教材既能适应三年制高职高专教育的要求，也适应两年制高职高专教育的要求。

《全国高职高专电气类精品规划教材》的出版，是对高职高专教材建设的一次有益探讨，因为时间仓促，教材可能存在一些不妥之处，敬请读者批评指正。

《全国高职高专电气类精品规划教材》编委会

2004年8月

前

言

本教材是根据 2003 年 12 月全国高职高专电气类精品规划教材厦门教材编写会的会议精神编写的。本教材适合高等职业技术学院电气类各专专业教学使用。

本教材的基本内容包括测量的基本知识,各种类型的测量仪表的结构、工作原理和使用方法,各种电学量的测量方法,各种电路元件参数的测量方法,电能计量的仪表及计量方法等。

本教材在编写过程中,考虑到高职院校教学的特点,力图做到理论联系实际,既注意测量仪表的原理,测量方法的原理的介绍,同时又强调仪表的使用方法和测量方法的掌握,注重知、会两方面的培养。

参加本教材编写工作的有:广东水利电力职业技术学院李殊骁(第 1 章、第 9 章);四川水利职业技术学院王剑平(第 2 章、第 5 章、第 12 章);南昌工程学院章彧(第 3 章、第 4 章);河北工程技术高等专科学校王运梯(第 6 章、第 8 章、第 10 章);杨凌职业技术学院汶占武(第 7 章、第 11 章)。全书由王剑平统稿。

在编写本教材时,查阅和参考了众多的文献资料,得到了很多教益和启发,在此向这些文献资料的作者致以诚挚的谢意。

限于编者水平有限,书中的不妥和错误在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者

2004 年 8 月

目 录

序

前言

第1章 测量的基础知识	1
1.1 测量	1
1.2 测量误差的分析	3
1.3 测量数据的处理	7
习题及思考题	10
第2章 磁电系仪表	11
2.1 磁电系测量机构	11
2.2 磁电系仪表	15
习题及思考题	25
第3章 电磁系仪表	27
3.1 电磁系测量机构	27
3.2 电磁系仪表	32
3.3 电磁系仪表的特点、使用及维护	36
习题及思考题	43
第4章 电动系仪表	44
4.1 电动系测量机构	44
4.2 电动系仪表	47
4.3 电动系仪表的特点、使用及维护	55
习题及思考题	59
第5章 感应系仪表	60
5.1 感应系测量机构	60
5.2 感应系仪表	65
5.3 感应系仪表的使用和校验	73
习题及思考题	76

第 6 章 兆欧表	77
6.1 兆欧表的结构	77
6.2 兆欧表的测量原理	78
6.3 兆欧表的使用方法	82
习题及思考题	84
第 7 章 电桥	85
7.1 直流电桥	85
7.2 直流双电桥	88
7.3 交流阻抗电桥	90
习题及思考题	92
第 8 章 万用表	93
8.1 万用表的基本组成	93
8.2 万用表的使用方法	103
习题及思考题	105
第 9 章 电子式仪表	106
9.1 电子式仪表简述	106
9.2 数字式电压表	108
9.3 数字万用表	122
9.4 电子示波器	128
习题及思考题	146
第 10 章 电学量的测量	149
10.1 电压的测量	149
10.2 电流的测量	152
10.3 电功率的测量	153
10.4 频率的测量	164
10.5 相位、功率因数的测量	168
习题及思考题	170
第 11 章 电路元件参数的测量	172
11.1 电阻的测量	172
11.2 电容及电感的测量	175
习题及思考题	179

第 12 章 电能计量	180
12.1 计量	180
12.2 电能计量器具	182
12.3 电能计量装置的接线检查	192
习题及思考题	193
参考文献	195

测量的基础知识

1.1 测 量

一、电工测量的意义

在我国电力工业大力发展的今天,电能的生产、传输、分配和使用都离不开电工测量,电气仪表随时都在准确无误地反映或积累电气量的各种变化值。例如,为了保证电能质量,在发电机并入系统时,要用各种电工仪表来测量和监视它的频率和电压等;为了保证电力系统安全经济运行,必须对电厂出力及用户负荷进行功率测量,以便对系统功率平衡作出调整;无论对发电机、变压器等各种电气设备的安装、调试、运行、检修,还是对电气产品进行检验、分析和鉴定都会遇到有关电工测量的技术问题。

电工测量是以电磁规律为基础的测量技术,它不仅具有准确、灵敏、操作简便、反应迅速及容易进行遥测等优点,而且利用它还可以进行非电量(如温度、压力、机械量等)的测量,因此电工测量广泛应用于工农业生产、国防建设和科学研究等各个领域。

在电气测量技术发展的过程中,新一代的仪表不断出现,从最早的机械式模拟指示仪表,发展到电子式的模拟指示仪表,进而又有电子式的数字仪表、智能仪表及到现在的虚拟仪表都代表了科学技术的进步。然而新一代仪表的出现,并不是完全取代了旧式仪表,而是发挥各自的特点,应用在不同场合。

二、测量的定义

测量是将未知的被测量和已知的标准单位进行比较,从而得到被测量为某一数值的过程。比较的结果一般包括两个部分,一部分是数字值,另一部分是单位名称。



电工测量就是将被测量的电工量和作为测量单位的同类电量进行比较,确定其值大小的过程。测量单位的确定和统一是十分重要的。为了对同一个电量,在不用的时间和地点进行测量都能得到相同的结果,则必须采用一种公认而又不变的单位。

在测量的过程中,我们实际使用的测量单位是国际测量单位的复制体,把它称为度量器。例如:标准电池、标准电阻和标准电感等,它们分别是电动势、电阻和电感单位的复制体,单位分别是伏特、欧姆、亨利。度量器按精度和用途分有基准度量器和标准度量器。

三、分类

测量既然是一个比较过程,当然就可以用不同的方式和方法进行。如何选择合适的测量方法,首先取决于被测量的性质;其次要考虑测量条件以及对测量提出的要求。这些因素构成了测量方法分类的依据。

(一) 按测量方式分类

1. 直接测量

直接测量是不必进行辅助计算,从一次测量的实验数据中直接得到被测量值的一种方法。

这种测量可以从数字仪表或已标有被测量单位的指示仪表上直接读出被测量的数值,也可以使用度量器。如用电压表测电压,用电桥测电阻等。

2. 间接测量

如果被测量和另外一个(或 n 个)中间量存在一定的函数关系,通过对这一个(或 n 个)中间量的直接测量,再按函数关系计算得出被测量的大小,这样的方式称为间接测量。例如用伏安法测电阻,先测出被测电阻两端的电压和流过电阻电流,再利用欧姆定律,计算出电阻数值。

这种方法经常用于被测量不便于直接测量或当时缺少直接测量仪器仪表而对测量结果的准确度要求又比较低的场合。

3. 组合测量

若被测量与某个(或 n 个)中间量的函数关系式中还有其他未知数,那么对中间量的一次测量就无法求得被测量的值。这时可通过一系列的直接测量(对中间量),然后列出方程组,通过求解方程而获得测量结果的方法称为组合测量法。

组合测量法多用于科学实验和精密测量当中。

(二) 按测量方法分类

1. 直读法

直读法是根据仪表显示的数值直接读取被测量的数值。在这一过程中度量器并没



有直接参与测量，实际上该方法是一种与度量器进行间接比较的测量方法，因为仪表在预先的刻度标定时需要用度量器。这种方法的优点是简便迅速；缺点是测量准确度受仪表误差的限制。

2. 比较法

比较测量法是指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。根据比较方式的不同，比较法可分为三类：

(1) 零值法。这种方法是将被测量 X 与已知标准量 Z 进行比较。通过调节 Z ，使 X 、 Z 对仪器的作用相互抵消为零的方法（即使指零仪指零）。例如：用电差位计测量电势，用电桥测量电阻等都属于该方法。

(2) 差值法。这种方法是直接读取被测量 X 和已知 Z 的差值 δ ，然后通过简单的计算求得被测量。即

$$X = Z + \delta \quad (1-1)$$

这种方法实际上是一种不彻底的零值法。

(3) 替代法。这种方法是用已知的标准量 Z 代替被测量 X 并且通过改变 Z 使仪表的指示值又重新恢复到原来状态，故

$$X = Z \quad (1-2)$$

此种方法是一种极其准确的测量方法，准确度完全取决于标准量具的准确度。

1.2 测量误差的分析

一、测量误差的分类

测量的目的是获得被测量的真实值，然而由于受到测量工具的不准确，测量手段的不完善，周围环境的影响等因素，将使测量值与真值之间总是存在差异。这种差异就称为测量误差。这种误差在测量过程中始终都存在着。

既然测量误差在整个测量过程中始终存在，如何减小误差将非常重要。为了尽量减少测量误差，首先需要充分认识测量误差的规律性。测量误差按性质和特点可分为三类。

(一) 系统误差

在相同的测试条件下，多次测量同一被测量时，大小和符号都保持恒定或按一定规律变化的误差，称为系统误差。

系统误差产生的原因主要有以下几个方面。



1. 工具误差

所谓工具误差就是指所用仪器、仪表本身不准确而引起的误差。由于技术水平和生产制造条件的限制,任何仪器、仪表都存在误差,使用这种仪器仪表测量时,就会直接造成测量误差。

2. 方法误差

是指测量中采用的测量方法没有充分考虑到各种因素对测量结果的影响或测量所用的理论依据不够充分引起的误差。

3. 影响误差

指仪器仪表在使用时受周围环境的影响而产生的误差,如:温度、湿度、气压、电场、磁场等影响而产生的误差。

4. 人员误差

指由于测试操作人员的操作水平、个人感官及固有习惯不同等所造成的误差。

(二) 随机误差

随机误差又叫偶然误差,是指在相同条件下,对同一被测量进行多次测量时,误差值的大小和符号均发生变化,时大时小,没有任何确定的规律。

单次测量的随机误差没有规律,不可预料也不可控制,但在同样条件下,对同一量进行多次测量时,却可以发现它总体服从统计规律。

随机误差的产生是由于实验中许多独立因素的微小变化而引起的。例如:电流电压或频率的波动,温度、湿度、电磁场等的微小变化都会对测量结果产生不可测知的影响。

(三) 粗大误差

粗大误差又叫疏忽误差,是指在规定条件下,测量结果显著地偏离实际值时所对应的误差。

粗大误差主要是由于在测量时操作者操作不当、读取数据有误,或是计算有误等原因造成的。因为它明显地歪曲了测量结果,所以该测量值称为“坏值”,坏值应该从测量结果中剔除。

二、误差的表示方式

如前所述,每次测量中总是存在误差的。误差的存在要影响测量结果的准确度。为了反映误差对测量结果准确度的影响大小,就需要将误差用一定的方式表示出来。误差的表示方法有以下几种。

(一) 绝对误差

被测量的测得值(仪表的读数)与被测量的真实值之差称为绝对误差。用 X_0 表示



真实值, X 表示测得值, 则绝对误差可表示为:

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

绝对误差有正、负之分, 正误差表示指示值比实际值偏大, 负误差表示指示值比实际值偏小, 同时还应标明与被测量相同的单位。当测量同一个量时, 可以用绝对误差的绝对值来说明不同仪表的准确程度, $|\Delta|$ 愈小的仪表, 测量结果就愈准确。

通常情况下, 被测量的真实值是很难得到的, 只能尽量地逼近, 在一般的测量中都是用标准表的读数代替真实值, 因此被测量的真实值可表示为:

$$X_0 = X - \Delta = X + C \quad (1-4)$$

式中, $C = -\Delta$, 称为校正值。校正值和绝对误差大小相等而符号相反。引入校正值后, 就可以对仪表读数进行校正, 以消除其误差。

【例 1-1】 某电路的电流为 10A, 用甲电流表测量时的读数为 9.8A, 用乙电流表测量时读数为 10.3A, 试求两次测量的绝对误差, 并由此判断哪只表更准确。

解: 由公式可得:

甲表测量的绝对误差为:

$$\Delta_1 = X_1 - X_0 = 9.8 - 10 = -0.2 \text{ A}$$

乙表测量的绝对误差为:

$$\Delta_2 = X_2 - X_0 = 10.3 - 10 = 0.3 \text{ A}$$

由此可见甲表比乙表更准确。

(二) 相对误差

当被测量不是同一个值时, 绝对误差的大小不能反映测量的准确度, 这时应该用相对误差的大小来判断测量的准确度。相对误差的表达式为:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

因为在实际测量中很难得到真实值, 所以用测量值代替真实值, 即有:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X} \times 100\% \quad (1-6)$$

在实际测量中都用相对误差来评价测量结果的准确性。

【例 1-2】 用甲表测量 10V 电压时, 绝对误差为 0.5V, 用乙表测量 100V 电压时, 绝对误差为 1V, 试求它们的相对误差, 并比较哪一只电压表测量准确度高。

解: 由公式可得:

甲表测量的相对误差为:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{X_0} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\%$$



乙表测量的相对误差为：

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{X_0} \times 100\% = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\%$$

显然，乙表比甲表测量更准确些。

由[例 1-2]可知，虽然甲表测量的绝对误差比乙表小，但相对误差却是乙表比甲表小。说明实际上乙表比甲表的测量准确度高。

(三) 引用误差

相对误差可以描述测量结果的准确度，但却不足以说明仪表本身的准确性能。所以一般用引用误差来表示仪表的准确性。

若用 γ_n 表示引用误差， A_m 表示仪表的测量上限(即仪表的满刻度值)，则：

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

由于仪表的测量上限是产品的固定数，而仪表的绝对误差又大体保持不变，所以可以用引用误差来表示仪表的准确度。

三、仪表的准确度

指示仪表的准确度，是用仪表的最大引用误差来表示的。指示仪表在测量值不同时，其绝对误差多少有些变化，为了使引用误差能包括整个仪表基本误差，工程上规定以最大引用误差来表示仪表的准确度。准确度用百分数来表示：

$$\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% = \gamma_{\max} \quad (1-8)$$

式中 K ——仪表的准确度；

Δ_m ——仪表绝对误差的最大值；

A_m ——仪表的测量上限；

$\gamma_{\max}$ ——引用误差的最大值。

显然，准确度表明了仪表基本误差最大允许范围，国家标准 GB776—76 中规定各个准确度等级的仪表，在规定的使用条件下测量时，其基本误差不应超过表 1-1 中的规定值。

表 1-1

仪表的准确度等级及其基本误差

准确度等级	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

我国生产的电工仪表的准确度等级根据国家标准 GB776—76 的规定共分为七个等级。即：0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。





【例 1-3】 准确度为 0.5 级，量限为 5A 的电流表，在规定的条件下测量某一电流，读数为 1.0A，求测量结果的准确度。

解：求测量结果的准确度就是求测量结果的相对误差。应用准确度为 0.5 级，量限为 5A 的电流表测量时，可能出现的最大绝对误差为：

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 0.5\% \times 5 = \pm 0.025(\text{A})$$

故测量结果可能出现的最大相对误差为：

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{X} \times 100\% = \frac{\pm 0.025}{1} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

【例 1-4】 用上例电表测量另一电流，读数为 5A，求测量结果的准确度。

解：求测量结果的准确度就是求测量结果的相对误差。应用准确度为 0.5 级，量限为 5A 的电流表测量时，可能出现的最大绝对误差为：

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 0.5\% \times 5 = \pm 0.025(\text{A})$$

因此，测量结果可能出现的最大相对误差为：

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{X} \times 100\% = \frac{\pm 0.025}{5} \times 100\% = \pm 0.5\%$$

通过上面例子可以看出：

(1) 仪表的准确度对测量结果的准确度影响很大。准确度高，最大绝对误差小，则测量结果可能出现的最大相对误差也就小。

(2) 仪表的准确度并不等于测量结果的准确度，它与被测量的大小有关。只有仪表运用在满刻度偏转时，测量结果的准确度才等于仪表的准确度。因此，绝不能将仪表的准确度与测量结果的准确度混为一谈，这一点应特别注意。为了充分利用仪表的准确度，在选择仪表的量限时，应该将测量结果指示在仪表量限的一半以上，最好在 2/3 以上。所以在选择仪表时，不应片面追求仪表的级别“越高越好”，而应兼顾被测量的大小和仪表的测量上限进行合理选择。

1.3 测量数据的处理

测量的任务是获取被测量的数据。如何从所得到的原始数据中求出被测量的最佳估计值，并计算其精度，这就是测量数据的处理。被测量的结果可以用数字表示，也可以用图表表示或将其归纳成公式表示，这里主要讨论用数字方式表示。

一、有效数字的处理

1. 有效数字

因为测量都是有误差的，所以由测量数据及测量数据计算出的结果也都是近似



值,那么近似值应取多少位,这是应该弄清楚的。通常测量数据的最后一位数字,是靠估计得来的。例如,在一个0~5V量程的电压表上,读出4.43V的数值,其中4.4是靠刻度线读出的,而最后一位数是靠指针在两刻度线间的位置估计出来的,通常称4.43V具有三位有效数字,称最后一位估计数字为欠准数字。

任何一个测量数据如果是以正确的形式给出,在没有特殊说明时,它的最后一位数字都是欠准数字,其不可靠程度是这一位数字的 ± 1 个单位。例如:电流值为2.35A,表明该电流在2.34A和2.36A之间,其可靠程度为0.01A。由此可见决定有效数字位数的标准是误差,多写则夸大了测量准确度,少写则带来附加误差。

2. 有效数字的舍入规则

测量结果中多余的有效数字应删除,因为过多的有效数字没有意义,同时也会给计算带来麻烦。它的舍入规则与普通的四舍五入法略有不同。以保留数字的末位为单位,其后面的最高位大于5就入,小于5就舍,而恰好等于5时,5后面只要有非零数字就进1;若5后面没有数字或全为数字零,则5前的末位为奇数时加1,为偶数时不变采用偶数法则。

【例1-5】 对下列数据进入舍入处理,使其只保留两位小数:

$$48.6750 \rightarrow 48.68$$

$$20.4850 \rightarrow 20.48$$

$$37.2051 \rightarrow 37.21$$

$$56.1470 \rightarrow 56.15$$

采用上述舍入规则后,舍入误差不会超过保留数据末位一个单位的一半。称之为0.5误差原则。

二、测量结果的表示

测量结果的数字表示方法有测量值加不准确度法、有效数字法、有效数字和安全数字法三种。

1. 测量值加不准确度法

这是一种最常用的表示方法,特别适合于表示最后的测量结果。

例如,测量一个电阻器的结果表示为 $X = 1.00048 \pm 0.00012 \Omega$ 。其中1.00048称为测量值, $\pm 0.00012 \Omega$ 称为不确定度。

这种方法的优点是明确地给出了误差范围,缺点就是作为中间运算结果时,运算麻烦。

2. 有效数字法

这种方法是由第一种方法演变而来,它使测量值更便于计算,因此比较适合表示中间结果,同样在没有特殊说明的情况下,一般有效数字的最末一位是欠准数字。例如:28.432 $\pm$ 0.051V,因误差大于0.01V而小于0.1V所以可改写成28.4V(三位有