

中等专业学校試用教科书



电 工 計 量

郭善君 張步滋 編

中 國 工 業 出 版 社

本书系中等专业学校“发电厂、电网及电力系统”专业的“电工計量”試用教科书。内容包括：电工測量与測量仪表的基本概念，仪表的測定机构，电流、电压、功率、电能、頻率的測定，电阻、电感、电容以及磁的測定，仪用互感器，真空管电压表与阴极射綫示波器，自动記录仪器，远距离測定及非电量的电測法等共十四章。

本书也可供电力系统有关技术人員参考。

电 工 計 量

郭善君 張步滋 編

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯（北京阜外月坛南营房）

中国工业出版社出版（北京修麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{2}$ ·印張 $7 \frac{3}{8}$ ·字数160,000

1964年4月北京第一版·1964年4月北京第一次印刷

印数0001—15,150·定价(科四)0.80元

*

統一书号：K15165·2934(水电-401)

目 录

序

緒論.....	1
第一章 电工测量与测量仪表的基本概念	3
1-1 测量的概念	3
1-2 测量误差的概念	7
1-3 仪表的分类	9
1-4 机电类仪表概述	14
1-5 直讀仪表的基本要求	17
一、直讀仪表的灵敏度	18
二、直讀仪表的誤差	19
三、直讀仪表的标尺	22
四、直讀仪表的功率損耗	22
五、直讀仪表的阻尼時間	23
第二章 仪表的測定机构	24
2-1 概述	24
2-2 磁电式測定机构	24
2-3 电动式測定机构	29
2-4 电磁式測定机构	34
2-5 感应式測定机构	38
2-6 靜电式測定机构	43
2-7 热綫式測定机构	45
第三章 电流和电压的測定	48
3-1 概述	48
3-2 測量电流及电压时的方法誤差	48

3-3 直流电流和电压的测定	50
一、用磁电式仪表测量电流和电压	50
二、分流器和附加电阻	50
三、磁电式安培表和伏特表的温度补偿	55
3-4 交流电流和电压的测定	56
一、一般概念	56
二、整流式仪器	56
三、电磁式与电动式仪表测量交流电流和电压	60
四、静电式仪表测定交直流电压	60
3-5 电位计	62
一、直流电位计	63
二、交流电位计	67
3-6 检流计	74
一、磁电式检流计	74
二、冲击检流计	78
三、谐振检流计	79
第四章 功率的测定	81
4-1 概述	81
4-2 电动式功率表	81
4-3 单相无功功率的测定	84
4-4 三相交流电路内有功功率的测定	85
一、三相三线交流电路内有功功率的测定	85
二、三相四线交流电路内有功功率的测定	90
4-5 三相交流电路内无功功率的测定	91
一、三相四线交流电路内无功功率的测定	91
二、三相三线交流电路内无功功率的测定	92
第五章 电能的测定	96
5-1 概述	96
5-2 感应式电度表	96
一、构造	96

二、原理	97
三、误差与灵敏度	103
5-3 三相交流电路内有功电能的测定	108
5-4 三相交流电路内无功电能的测定	110
第六章 频率与相位的测定	113
6-1 概述	113
6-2 电动式相位表	113
6-3 电磁式相位表	115
6-4 电磁式同步指示器	118
6-5 振动式赫芝表	119
6-6 铁磁电动式赫芝表	120
第七章 仪用互感器	123
7-1 概述	123
7-2 电流互感器	124
7-3 电压互感器	130
7-4 仪用互感器的使用	133
一、电流及电压的测定	134
二、单相及三相交流电路内功率的测定	134
三、单相及三相交流电路内电能的测定	139
第八章 电阻的测定	140
8-1 电阻的分类	140
8-2 测量电阻时应注意事项	140
一、测量小电阻时应注意事项	140
二、测量大电阻时应注意事项	141
8-3 中等电阻的测定	144
一、安培表和伏特表法	144
二、单臂电桥测中等电阻	144
三、欧姆计法	146
8-4 小电阻的测定	152
一、安培表和毫伏表法	152

二、双臂电桥法	153
8-5 大电阻的测定	156
8-6 电缆故障地点的测定	159
一、莫氏回路法	159
二、瓦氏回路法	161
8-7 接地电阻的测定	163
一、接地电阻的基本概念	163
二、安培表和伏特表法	165
三、补偿法	166
四、用特种流比计的 direct 读数法	167
五、电桥法	170
第九章 电感与电容的测定	172
9-1 概述	172
9-2 交流电桥	172
9-3 用交流电桥测电感	173
9-4 用交流电桥测电容	175
第十章 真空管电压表与阴极射线示波器	179
10-1 概述	179
10-2 真空管电压表	179
一、二极管电压表	180
二、检波式真空管电压表	181
三、平衡电桥式真空管电压表	182
10-3 阴极射线示波器	185
一、阴极射线管的构造和工作原理	185
二、扫描和波的形成	189
三、电子示波器的组成	191
四、示波器的应用和使用时的注意事项	19
第十一章 磁的测定	1'
11-1 概述	1

11-2 磁通的測定	195
11-3 磁化曲綫与磁滯回綫	198
一、鋼环法	198
二、磁軛法	200
第十二章 自动記錄仪器	201
12-1 概述	201
12-2 連續自动記錄仪器	201
12-3 断續自动記錄仪器	204
第十三章 远距离測量	207
13-1 概述	207
13-2 远距离測量系統的分类	208
13-3 近程远距离測量系統	208
13-4 远程远距离測量系統	211
13-5 遙測总和的方法	214
第十四章 非电量的电測法	216
14-1 基本概念	216
14-2 参数式变换器	218
14-3 发电机式变换器	221
附录	224
附表 1 国际电单位	224
附表 2 絕對米千克秒安制电磁单位	225
附表 3 一些檢流計的技术数据	227
附表 4 各式仪表所耗功率的大概值	228

緒 論

測量技術對科學技術的發展起着重要的作用，因為通過測量更能認識客觀事物的現象和本質，從而掌握事物的變化規律。測量技術的日臻完善，促使科學技術得到新的發展，而科學技術上的新成就，又將促進測量技術的更加完善和創造出一些新的更精密的測量儀器。

通過電氣測量，不僅能研究電與磁的現象和本質，並且能保證發電廠、變電站及電力系統安全而經濟的運行。電力工業中的運行人員，依靠各種儀表，不僅掌握了所測電量的數值，而且能進一步掌握它們的質量。例如：通過電壓表和頻率表，既可了解電壓和頻率的數值，同時也可確定電的質量的好壞。因此，一般將電工儀表比作運行人員的“耳目”。這都說明電工計量在電力工業中所起的重要作用。

解放前，我國科學技術非常落后，電氣測量儀表大多從國外進口，全國沒有統一的标准和規定，沒有自制的标准器，測量标准極為混亂。解放十四年來，在黨的正確領導下，由於全國電業工人和科學技術人員的共同努力，電氣測量技術有了高速度發展，正向着世界先進水平邁進。

幾年前我國成立了國家計量局，各省市有了管理測量技術的專門機構，儀器的準確度等級已經統一。儀器製造方面：在第一個五年計劃期間，我國新建了具有新型設備的現代化儀表廠，並擴建了許多儀表廠，不僅生產了大量儀表供經濟建設的需要，並在提高技術水平上取得了很大的成績。

1958年以来，在党的总路线光辉照耀下，仪器制造工业掀起了巨大的技术革新和技术革命运动，成批地生产了优质的新产品，在我国电工仪器制造的发展史上展开了崭新的一页。这些事实都说明了党的领导的完全正确和社会主义制度的无比优越性。

我国发展国民经济的宏伟计划对电气测量技术及从事电力工业的工人和技术人员提出了重大的任务。由于电子技术的高度发展，使得电气测量技术能适应当前的需要；目前电气测量正向着遙测、遙控及生产过程自动化的新技术进展。

虽然电气测量技术和测量仪器已达到很高的水平，但它的基础仍然是测量仪器的基本原理和测量的基本方法。学习本课程的目的就在于使学生了解和掌握一般仪表的机构、原理、特性和各种主要电磁量的测量原理，并使学生掌握一般电磁量的测量方法和技能。

本課是一門专业課，学习本課以前应具备中等专业学校的物理学、电工基础及数学的基础知識。

第一章 电工测量与测量仪表的基本概念

1-1 测量的概念

测量是在自然科学领域中认识客观事物过程的一个重要环节。确定某一事物的量值后，即可进一步研究它的现象和本质，从而掌握事物的变化规律。测量技术的完善（表现在提高测量准确度及创造新的测量方法和仪表）会促使科学得到新的成就，而科学上的新发明又将促进测量技术的更加完善和创造出一批新的仪表。电工技术发展史本身就包括了电气测量的发展史。在目前电气测量技术对产品质量的改善及劳动生产率的提高起着很大的促进作用，而生产过程的自动控制与电气测量技术又有着密切的关系。因此，在国民经济的各个领域中，电气测量起了很重要的作用。作为一个电工技术人员，电气测量的知识和技能都是必须掌握的。

测量任何一个量就是将它和同类的被选为单位的另一个量进行比较，测量结果用比较出的数值（若干倍或若干分之一）和单位名称合成表示，因此，各量的单位应统一规定。目前每个国家都订有统一的单位，而国际范围内的单位由各国协商决定。

有了测量单位，还不能实现测量的任务，而应将测量单位复制成实物作为根据，才能对各量进行测量。这个复制成测量单位（或测量单位的倍数和分数）的实物叫做度量。目前最高准确程度的度量叫做标准器。用来把被测的量和测量单位进行比较的设备叫做测量仪表。

在实际测量过程中，不可能每次都使用最精确的度量和

測量仪表，这样将会降低設備的准确程度。因此，将度量和測量仪表制成范型的与运用的两种：前者有較高的准确度，以复制和保存单位及檢驗和校准各种度量和測量仪表为目的；后者准确度較范型的稍低，但它仍表示着度量及測量

仪表的质量，是經過严格审查而确定的。一般使用的标准电阻、标准电感和标准电容等都属于后一种。下面是几种在电工計量實驗室中常用的几种度量器。

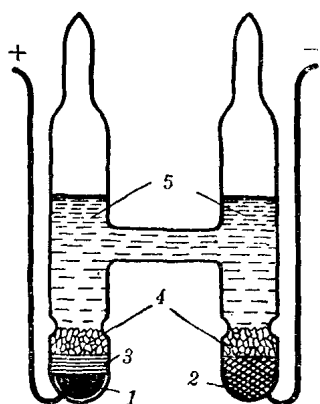


图 1-1 标准电池的結構

1—汞；2—鎘汞合金；3—糊膏；
4—硫酸鎘晶块；5—硫酸鎘飽和溶液。

1. 标准电池 对标准电池的要求是：电池的電势在恆定温度下具有稳定的数值（20°C 时为 1.0185~1.0187 绝对伏特）；温度变动时電势变动非常微小；随温度变动的電势数值按已知規律变动，容易进行补偿。它的构造如图 1-1 所示，

电池由 H 形封閉玻璃管組成，正电极为純汞，負电极为鎘汞合金（Cd—12.5%，Hg—87.5%），負电极上放硫酸鎘晶块（ $\text{CdSO}_4 + 8/3\text{H}_2\text{O}$ ），正电极上放硫酸汞和硫酸鎘的糊（ HgSO_4 和 CdSO_4 ），再在上面放硫酸鎘晶块，晶块上放硫酸鎘的飽和溶液。这种电池称为飽和标准电池。标准电池電势随温度改变的方程式为

$$E_t = E_{20} - 0.0000406(t - 20). \quad (1-1)$$

式中 E_t ——温度 $t^\circ\text{C}$ 时的電势；

E_{20} ——温度 20°C 时的電势。

还有一种准确度較低的未饱和标准电池，它的构造与饱和标准电池相同，只是在温度为 20°C 时溶液为未饱和状态（硫酸鎘晶体不存在）。

使用标准电池时应注意：电池不能受到震动和倒置；通入和取自标准电池的电流不能大于一微安；放置电池处的温度应在 $4^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

2. 标准电阻 对标准电阻的要求是：电阻数值应不随时间而改变；温度和其它因素对它的影响非常小。标准电阻的构造如图1-2所示，它是在黄铜圆柱上繞以絕緣錳銅綫制成。为了减小电感，采用双綫繞法。錳銅綫的两端焊接在硬橡胶盖上的銅軸 δ 、 δ 上。綫圈有两对接头， I 、 I 用来将綫圈接入电路，称为电流接头； U 、 U 用来測量綫圈上的电压，称为电位接头。上海电表厂生产的BZ1型标准电阻共有0.001、0.01、0.1、1、10、100、1000欧七級，准确度皆为 $\pm 0.01\%$ 。

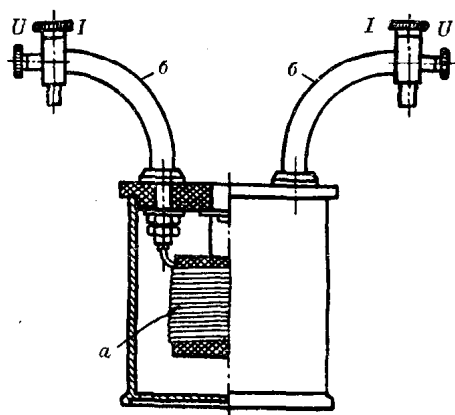


图 1-2 标准电阻的结构

a —錳銅綫圈； δ —銅軸； I —电流接头； U —电位接头。

3. 标准电感 对标准电感的要求是：电感数值应不随时间而改变；匝间电容应尽可能地小；匝间绝缘良好。它的构造如图 1-3 所示。标准电感是由多股漆包铜线经过浸蜡处理后绕在瓷架或大理石架上而成。因为线圈的芯子由非磁性材料制成，所以电感与通入线圈的电流值无关。使用时应注意防止线圈电流过载。上海电表厂生产的 BS1 型标准电感共有 0.001、0.01、0.1、1 四级，准确度皆为 $\pm 0.1\%$ 。

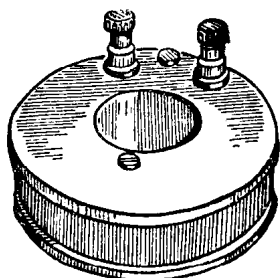


图 1-3 标准电感线圈

4. 标准电容 对标准电容的要求是：电容值恒定；温度系数小；介质损耗低；频率的影响小；绝缘电阻及绝缘强度应有较高的数值。它可分为以空气和云母作介质的两种。前者能满足上述各项要求，但由于介电系数低，故电容的数值

较小。后者采用优良云母和金属箔交互重迭放在金属板中，再用强压力压制而成，它的电特性不及前者，损耗和温度系数都比较大，但电容值较高，通常更为合用。图 1-4 所示为

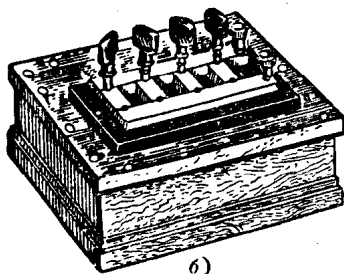
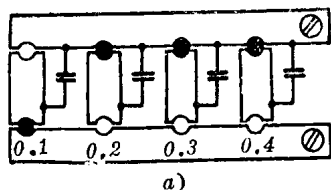


图 1-4 电容箱
a) 电路；b) 外形。

集成成套的云母电容器，放在一公共箱內，称为电容箱。箱盖固定着黃銅片，各电容器与黃銅片連接。利用略帶圓錐形的插头插入銅片的插口內，可将所需电容接入电路。上海电表厂生产的BR1型标准电容共有0.001、0.01、0.1、1 微法四級，准确度皆为 $\pm 0.1\%$ 。

有了度量和測量仪表，就可进行測量。但由于各物理量之間存在不同关系，故測量的方法有所不同。如测电阻可直接用欧姆計，也可测出电流及电压后用欧姆定律来确定。前者称为直接法，后者称为間接法。

1-2 測量誤差的概念

在測量过程中，由于仪表的准确程度、測量的客观条件影响、实验者的經驗不足等会引起測量結果不真实，而造成誤差。所以对測量誤差的概念应先加以了解。

1. 測量誤差 分为絕對誤差与相对誤差两种。

(1) 絕對誤差 仪表讀数 X 与它的实际值 X_0 的差值称为絕對誤差，用 ΔX 代表：

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

与絕對誤差大小相等符号相反的值称为补值，用 C 代表：

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

上式說明：被測量的实际值等于被測出的数值与补值之和。同时，絕對誤差可能为正值也可能为負值。但絕對誤差只能表示测出某值实际差若干，而不能表示被測量的准确程度。

(2) 相对誤差 絕對誤差与被測量的实际值的比值称为相对誤差，用 γ 表示：

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

相对误差一般用百分数表示。由于被测量的实际值 X_0 不易测得，但它与测得数值 X 相差不大，因此 X_0 可以用 X 代替，则 1-4 式变为：

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

例1-1 测量电阻时得出它的值 $r_1 = 202$ 欧，电阻的实际值 $r_0 = 200$ 欧。求它的测量绝对误差和测量的相对误差。

〔解〕 绝对误差 $\Delta r = r_1 - r_0 = 202 - 200 = 2$ 欧，

$$\text{相对误差 } \gamma = \frac{2}{200} \times 100\% = 1\%.$$

若用 r_1 代替 r_0 ，则得

$$\gamma = \frac{2}{202} \times 100\% = 0.93\%.$$

从上例中可以看出：用 r_1 代替 r_0 时相对误差仅差 0.07%。所以这样代替是完全可以的。

相对误差正确反映了测量的准确程度。如测电阻的被测值为 5 欧，绝对误差 $\Delta r = 0.1$ 欧。若测另一电阻值为 50 欧，而绝对误差 Δr 仍为 0.1 欧。尽管两个绝对误差值相等，而后者的准确度显然要比前者高。

有时对误差的估计，用被测量的实际值和测量的读数的比值表示，称为校正系数，用 K_c 代表：

$$K_c = \frac{X_0}{X} \quad (1-6)$$

2. 测量误差的分类 误差是由仪表的质量、测量工作人员的情况与测量的方法等各方面所引起的。根据产生误差的原因，可以分为以下三类：

(1) 有规则误差(系统误差) 重复测量同一量时维持不

变或依一定规律而变的误差。属于这类的误差有下面四种：

1)工具误差(基本误差) 仪表因结构上和制造上存在的缺点而出现的误差。例如标尺不准和指针弯曲所造成的误差。这类误差可用补值进行修正。

2)附加误差 各种外界因素的变动引起仪表读数的误差。例如在某些电工仪表近旁有较强的磁场或电场，使仪表的读数产生误差。

3)人身误差 由实验者的个性、习惯和生理上的缺陷等引起的误差。例如用电桥和耳机测定液体电阻时，因为实验者的听觉较差而产生的误差。

4)方法误差(理论误差) 测量方法有缺点或理论上不够正确而产生的误差。例如用安培表和伏特表测量电阻时，对伏特表测出的电压和安培表测出的电流未进行具体分析，将仪表的读数简单地用欧姆定律求出电阻值时所引起的误差。

(2)偶然误差 没有任何规律而是由偶然因素引起的误差。例如温度、湿度、磁场或电场的骤然变化所引起的误差。处理的办法是在同样条件下使用同样仪表进行多次测量，然后取它的平均值，结果可近似地等于实际值。

(3)疏失误差 由实验者的粗心大意所造成歪曲测量结果的误差。例如由于读错了仪表标尺上的数字所致的误差。这时必须重新测量，加以纠正。

1-3 仪表的分类

仪表按照测量方法的不同、转换能量形式的不同、测量电流种类的不同、测量参数的不同等进行分类。兹分述如下：

1.按测量方法的不同，分为：

(1) 直讀仪表 能直接指示被测数值的仪表。它的标尺分度是与度量預先比較做成。如伏特表及安培表等。

(2) 較量仪表 将被测量与度量作比較来测出数值的仪表。在測量中它必須使用标准器，如直流电位計等。

发电厂及变电站常用直讀仪表，因为它的讀数迅速而方便，不过准确度較差一些。較量仪表測量时花費時間較多，有时还需要計算，但由于准确度較高，故一般多作为實驗室中檢驗仪表用。

直讀仪表用得較多，将在第二章中对它們的原理和特性作比較詳細的介紹。較量仪表将在測量电流、电压及电阻各章中分別加以闡述。

2. 依照轉換能量形式的不同进行分类：

直讀仪表主要由測量机构和測量綫路两部分組成。由于它給出直接讀数，所以在机构中分为固定部分与能动部分，利用能动部分的偏轉来指示被测的数值。無論被测量为何种形式的能量，用直讀仪表測量时，必須轉变为电磁能或其它能量，然后通过測量机构轉变为机械能，才能使能动部分偏轉。由于轉換能量形式的不同，仪表可分为以下四类：

(1) 机电类仪表 在这类仪表中，被測量先变为电磁能，然后轉变为机械能，使它的能动部分偏轉，如磁电式仪表等。

(2) 电热类仪表 在这类仪表中，被測量先变为热能，然后轉变为机械能，使能动部分偏轉，如热綫式仪表等。

(3) 电子类仪表 利用被測量变为电場或磁場以使电子改变运动，从而测出結果或繪出图样，如阴极射綫示波器等。

(4) 电化类仪表 利用被測量变为化学能，将电解液电