

609602

507  
31417

中等专业学校试用教材

# 电气测量

福建机电学校 主编



成都科学技术大学图书馆

基本馆藏机械工业出版社

7  
17

中等专业学校试用教材

# 电 气 测 量

福建机电学校 主编



机械工业出版社

## 电 气 测 量

福建机电学校 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张14·字数339千字

1979年5月北京第一版·1980年7月北京第二次印刷

印数 56,001—86,000·定价1.05元

\*

统一书号: 15033·4809

## 编 者 的 话

本书是根据第一机械工业部一九七七年十二月在北京召开的中专教材座谈会及一九七八年一月在湘潭召开的一机部中专电类专业会议所拟定的《电气测量》教材编写大纲编写的。

在编写过程中，为使教材体现“立足发展、照顾现状”的原则，考虑到电子技术在测量技术中的广泛应用。试将电工仪表与电子仪器合编为一书。全书共分两篇：第一篇介绍电工测量仪表，第二篇介绍常用的电子仪器。在内容上增编了一些变换式电表和数字电表。为了照顾两个专业的需要，还增编了电机制造专业的专用内容。因此使用本教材时，两个专业必须根据各自的教学大纲，选择讲授。编写时力求重点突出、通俗易懂，以便学生自学。

本书可作为一机系统中专工业电气自动化和电机制造两个专业的试用教材。

本书由福建机电学校的陈立周同志担任主编。哈尔滨电机制造学校的王凤岐同志参加编写。参加本书审稿的有北京机械学校的曹策鏞同志、吉林机械工业学校的顾乃学同志、黑龙江机械制造学校的张义同志、内蒙古工业学校的胡尔查同志、西安航空工业学校的裴家度同志、哈尔滨电机制造学校的万方同志、福建机电学校的郑忠杰同志和黄荣生同志、福州电表厂的陈功镇同志。

由于编者水平有限，编写时间又十分仓促，书中一定会有不少缺点和错误。恳切希望广大师生提出批评和指正。

# 目 录

## 第一篇 电工仪表与测量

第一章 电工仪表与测量的基本知识	1
§ 1-1 电工仪表的分类	1
§ 1-2 指示仪表的组成和基本原理	2
§ 1-3 指示仪表的误差和准确度	5
§ 1-4 指示仪表的主要技术要求	7
§ 1-5 测量方法和测量误差	8
第二章 电流与电压的测量	10
§ 2-1 磁电系仪表的结构和原理	10
§ 2-2 磁电系电流表、电压表及其扩大量程的方法	13
§ 2-3 磁电系检流计	16
§ 2-4 电磁系仪表	19
§ 2-5 电动系仪表	22
§ 2-6 电流与电压的测量方法	26
§ 2-7 测量用互感器	28
§ 2-8 直流电位差计	34
第三章 万用表	36
§ 3-1 万用表的结构和原理	37
§ 3-2 500型万用表介绍	45
§ 3-3 万用表的使用和维护	49
§ 3-4 万用表电路的简单计算	50
第四章 功率和电能的测量	58
§ 4-1 电动系功率表	59
§ 4-2 低功率因数功率表	63
§ 4-3 三相功率的测量	64
§ 4-4 变换式交流功率表	67
§ 4-5 感应系电度表及电能的测量	69
§ 4-6 电度表的使用和主要技术特性	74
§ 4-7 三相有功电度表	75
§ 4-8 三相无功电度表	75
第五章 兆欧表、频率表和相位表	78
§ 5-1 兆欧表	78
§ 5-2 ZC30型晶体管兆欧表	82
§ 5-3 电动系频率表	84
§ 5-4 变换式频率表	86
§ 5-5 电动系相位表	88

<b>第六章 电路参数测量和电桥</b> .....	90
§ 6-1 电路参数测量的一般问题 .....	90
§ 6-2 用电压表、电流表测直流电阻 .....	91
§ 6-3 交流参数的测量 .....	93
§ 6-4 直流单臂电桥 .....	95
§ 6-5 直流双臂电桥 .....	97
§ 6-6 带电测温装置简介 .....	99
§ 6-7 交流电桥 .....	101
§ 6-8 产品介绍——WQ-5 型万用电桥 .....	102
§ 6-9 QJ-35 型变压比电桥 .....	106
§ 6-10 ZC-8 型接地电阻测量仪介绍 .....	110
<b>第七章 仪表的选择与校验</b> .....	112
§ 7-1 仪表的选择 .....	112
§ 7-2 仪表的校验 .....	117
<b>第二篇 常用电子仪器与测量方法</b>	
<b>第八章 电子管电压表和晶体管电压表</b> .....	121
§ 8-1 电子管电压表的结构和原理 .....	121
§ 8-2 电子管电压表的检波电路 .....	123
§ 8-3 交流放大-检波式的电子管电压表 .....	128
§ 8-4 检波-直流放大式的电子管电压表 .....	134
§ 8-5 电子管电压表的使用和维修 .....	141
§ 8-6 晶体管电压表 .....	143
<b>第九章 电子示波器</b> .....	151
§ 9-1 电子示波器的基本原理 .....	152
§ 9-2 示波管 .....	152
§ 9-3 简易示波器 .....	157
§ 9-4 通用示波器 .....	168
§ 9-5 示波器的应用 .....	178
§ 9-6 描绘特性曲线的专用示波器 .....	184
<b>第十章 数字式仪表</b> .....	189
§ 10-1 数字式仪表的特点 .....	189
§ 10-2 数字频率表 .....	190
§ 10-3 数字电压表 .....	193
<b>实验提纲</b> .....	195
<b>思考题与习题</b> .....	210
<b>附录一 电工仪表表盘的标记符号</b> .....	215
<b>附录二 万用表表头参数</b> .....	217

# 第一篇 电工仪表与测量

测量各种电量和各种磁量的仪器仪表统称为电工测量仪表。电工测量仪表的种类繁多，实用中最常见的是测量基本电量的仪表。其它电磁量则可通过基本电量值进行推算。或通过变换电路把它们转换为基本电量后进行测量。所以本篇不准备全面叙述各种电磁量的测量仪表，而把重点放在介绍基本电量（电流、电压、功率和电能）和主要电路参数（电阻、电感、电容）的测量仪器上。

电工测量的过程，是将被测的电量或磁量与同类标准量相比较的过程，根据比较的方法不同，测量的方法也不一样，所以在测量中除了应正确选择仪表和正确使用仪表之外，还要掌握正确的测量方法。

本篇通过介绍常见的磁电系、电磁系、电动系和感应系仪表的结构和工作原理，介绍基本的电量和电路主要参数的测量仪器和它们的测量方法。

## 第一章 电工仪表与测量的基本知识

在分别介绍各种电工仪表之前，为了能够对电工仪表有一个全面的了解，本章首先将电工仪表的分类和基本结构做一个概括的说明。

测量过程既然是一个比较的过程，不同的比较仪器和不同的比较方法，都难免要引进不同的误差。本章还要介绍一些有关误差的基本概念，只有掌握误差的基本概念之后，才能够正确处理测量的结果。

### § 1-1 电工仪表的分类

电工仪表的产品种类、规格数以百计、千计。它们的分类方法也各异，按仪表的结构和用途，大体可分为以下几类：

**一、指示仪表类。**包括各种安装式指示仪表，各种实验室及可携式的指示仪表，以及电度表等。

**二、比较仪器类。**包括直流比较仪器，例如电桥、电位差计、标准电阻箱等；也包括交流比较仪器，例如交流电桥、标准电感、标准电容等。

**三、数字式仪表和巡回检测装置类。**

**四、记录仪表和示波器类。**记录仪表和示波器是一种能测量和记录被测量随时间变化情况的仪表。例如X-Y记录仪就是一种记录仪器。这里所说的示波器不是电子示波器，而是指能够测量慢变化量的光线示波器。

**五、扩大量程装置和变换器。**扩大量程装置是指分流器、附加电阻、电流互感器、电压



互感器等。变换器是指将非电量，例如温度、压力等变换为电量的装置。

此外还有测量用的稳压源、稳流源、校验装置、测磁仪器等类。

尽管电工仪表种类如此之多，但应用最广、数量最大的要算指示式仪表。

所谓指示仪表，就是指将被测电量变换成仪表指针的机械角位移的一种电——机转换模拟式仪表。

指示仪表具有测量迅速、直接读数等优点，下面介绍它们分类情况：

### 一、按仪表工作原理可分成

1. 磁电系仪表：根据通电导体在磁场中产生电磁力的原理制成。

2. 电磁系仪表：根据铁磁物质在磁场中被磁化后产生电磁吸力（或排斥力）的原理制成。

3. 电动系仪表：根据两通电线圈之间产生电动力的原理制成。

此外，还有感应系仪表，整流系仪表以及静电系、热电系、电子系、铁磁电动系等仪表。

对于磁电系、电磁系、电动系等仪表又有比率型仪表，这种仪表的工作原理是基于仪表指针的偏转角决定于两线圈电流的比率，如第五章的兆欧表、频率表和相位表。

### 二、按测量对象的种类分为：

电流表（又分为安培表、毫安表、微安表）；电压表（又分为伏特表、毫伏表等）；功率表；欧姆表；电度表；频率表等。

### 三、按被测电流种类分为：

直流仪表，交流仪表，交直流两用仪表。

### 四、按使用方式分为：

安装式仪表和可携式仪表。

安装式仪表固定安装在开关板或电气设备的板面上，这种仪表准确度较低，但过载能力较强，造价低廉。

可携式仪表不作固定安装使用，有的可在室外使用（如万用表、兆欧表），有的在实验室内作精密测量和标准表用。这种仪表准确度较高，但过载能力较差，造价较贵。

### 五、按仪表的准确度分为：

0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 共七个等级，此外，还可按仪表使用条件、仪表对外磁场防御能力等分类。为了便于正确选择和使用仪表，上述讲到的仪表类型、测量对象、电流性质、准确度、放置方法、对外磁场防御能力等，均以符号形式标明在仪表的表盘上。使用时可参阅附录一。

## § 1-2 指示仪表的组成和基本原理

### 一、指示仪表的组成

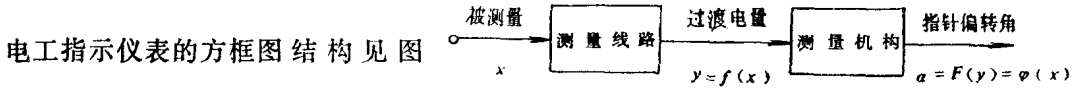
指示仪表，为了实现将被测电量变换成仪表活动部分指针的角位移，必须具有测量机构和测量线路两个部分。

测量线路的作用是将被测电量  $x$ （如电流、电压、功率等）变换成测量机构可接受的过渡电量  $y$ （如电流），并保持一定的比例关系。例如，分流器、附加电阻等都属于测量线路。近年来出现的变换式仪表，正是利用测量线路的变化，而只用磁电系测量机构实现对功率、



频率、相位等多种电量的测量。

测量机构的作用是将被测电量  $x$  (或过渡电量  $y$ ) 所产生的电磁力, 转换成仪表指针的角位移  $\alpha$ 。它是电工指示仪表的核心, 同一系列仪表, 通常采用相同的测量机构, 加上不同的测量线路, 就可构成测不同电量的仪表。



1-1。

## 二、测量机构的主要组成部分和它

图1-1 电工指示仪表方框图

### 的基本原理

指示仪表的测量机构是由固定部分和可动部分组成, 固定部分包括磁路系统、固定线圈等。可动部分则包括可动线圈, 可动铁芯、游丝、指针等。如按测量机构各元件的功用, 也可分成以下几个部分:

#### 1. 产生转动力矩 $M$ 的装置

要使指示仪表的指针偏转, 测量机构就必须产生一个转动力矩, 不同类型的仪表, 产生转动力矩的原理也不同, 例如磁电系仪表的转矩是由永久磁铁的磁场与通电流的可动线圈之间的电磁力产生。而静电系仪表的转矩则由可动电极与固定电极间施加电压后所形成的电场力产生。

电磁力矩的大小一般决定于电磁场的强弱以及它们的分布情况。如果被测电量  $x$  的大小不同, 电磁场的强弱不同, 则可动部分所受的电磁力就不同。同时, 可动部分所在的位置不同, 电磁力矩也不相同。所以像电磁系、电动系等仪表的转动力矩是被测电量  $x$  和偏转角  $\alpha$  的二元函数, 或表示为:

$$M = F(x, \alpha) \quad (1-1)$$

而磁电系仪表, 因为磁场是均匀的, 电磁力矩与可动线圈的位置无关, 所以磁电系仪表的电磁力矩只是被测电量  $x$  的函数, 或写成  $M = F(x)$ 。

#### 2. 产生反作用力矩 $M_a$ 的装置

如果指示仪表的测量机构只有作用力矩, 则不论被测量有多大, 活动部分都将在转动力矩的作用下偏转到尽头。好像不挂秤砣的秤一样, 不论被秤的重量多重, 都会使秤杆翘起到顶端。

为了使一定大小的被测量所产生的对应转矩使可动部分转到一定的偏转角, 测量机构就必须装置有与转动力矩方向相反又与偏转角有关的反作用力矩  $M_a$ , 或写成

$$M_a = F(\alpha) \quad (1-2)$$

反作用力矩通常是由盘形弹簧丝 (或称游丝) 产生, 游丝结构见图 1-2。

仪表在转动力矩作用下, 活动部分发生偏转并扭紧弹簧, 因此弹簧的反作用力矩随之增大, 在弹簧的弹性范围内, 反作用力矩与偏转角  $\alpha$  成线性关系, 即

$$M_a = D \cdot \alpha \quad (1-3)$$

式中  $D$  称为反作用力矩系数, 由弹簧的弹性所决定。

当反作用力矩增加到与转动力矩相等时, 活动部分将停止下来, 由于仪表的转矩与被测量有关, 而反作用力矩则与偏转角有关, 当  $M = M_a$  时, 活动部分达到平衡。因此一定的被测量对应于一定的偏转角, 即

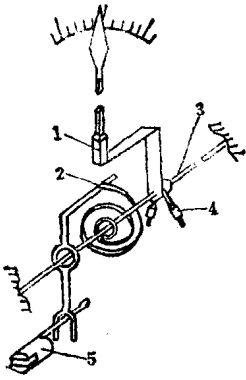


图1-2 用弹簧产生反作用力矩  
1—指针 2—弹簧 3—轴 4—平衡锤 5—调零器

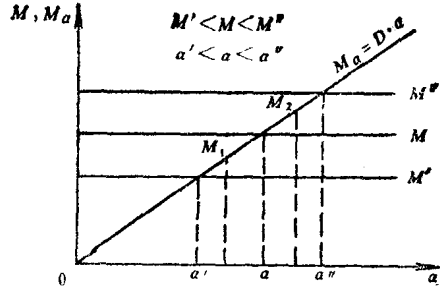


图1-3 转矩、反作用力矩与偏转角关系

$$M = M_a = D \alpha$$

$$\alpha = \frac{M}{D} \tag{1-4}$$

图 1-3 表示转矩、反作用力矩与偏转角之间的关系，由图可以看出，转矩  $M$  曲线与反作用力矩  $M_a$  曲线的交点就是可动部分的平衡点，不同平衡点对应不同偏转角，图中假设转动转矩与可动部分所在位置  $\alpha$  无关，所以它是一条平行线。而反作用力矩则随  $\alpha$  增大而增大，它是一条向上倾斜的直线。

反作用力矩也有用张丝、悬丝或重力产生的，还有用电磁力产生的（如比率表）。

当受外界因素影响（如振动）而使活动部分偏离平衡位置时，将使  $M \neq M_a$ ，从而产生差力矩  $M - M_a$ ，称之为定位力矩  $M_s$ 。

$$M_s = M - M_a \tag{1-5}$$

定位力矩的作用是力图使仪表活动部分返回原来的平衡位置，见图 1-3，但由于轴尖与轴承间存在摩擦，活动部分总是不会完全回到原来的平衡位置，从而造成仪表示数误差。可见摩擦误差是仪表误差的主要来源。

为了减少摩擦误差，一个办法是提高弹簧反作用力矩系数以增加定位力矩；另一个办法是设法减轻活动部分重量，提高制造精度以减少摩擦力矩。

### 3. 产生阻尼力矩的装置

上面讲了仪表的转矩和反作用力矩在平衡位置时的关系，但由于活动部分具有一定的转动惯量，故活动部分在  $M = M_a$  时不会立刻停在平衡位置上，将在读数位置来回摆动。

为了尽快读数，仪表测量机构中必须设有吸收这种振荡能量的装置即阻尼装置。用它产生与仪表活动部分运动方向相反的力矩——阻尼力矩。

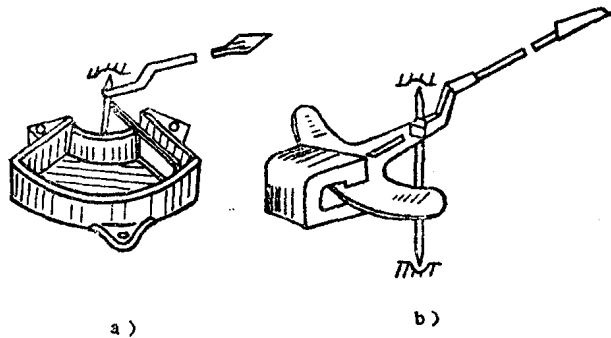


图1-4 阻尼器  
a) 空气阻尼器 b) 磁感应阻尼器

应当指出，阻尼力矩是一种动态力矩，即当活动部分完全稳定之后，它就不复存在。因此阻尼力矩并不改变由转矩和反作用力矩所确定的偏转角。

仪表中常用的阻尼力矩装置有两种：一种是空气阻尼器，利用活动部分运动时带动阻尼翼片使其在阻尼箱中运动所受到的空气阻力，作为阻尼力矩。它的结构如图 1-4 a 所示；另一种是磁感应阻尼器，利用活动部分运动时带动金属阻尼片，使之切割阻尼磁场的磁力线，从而使阻尼片产生涡流得到电磁阻尼力，它的结构如图 1-4 b 所示。

此外还有油阻尼，这种阻尼装置由于结构比较复杂，多采用在高灵敏度的张丝仪表中。

#### 4. 指示装置

指示装置可以是指针式的，也可以是光标指示。指针式的指示装置应包括指针与刻度盘，光标指示则包括光源、光路系统和刻度尺。

有了以上四个部分，就可以组成一个完整的测量机构。

### § 1-3 指示仪表的误差和准确度

#### 一、仪表误差的分类

无论制造工艺如何完美，仪表的误差总是客观存在的。仪表的误差是指仪表指示值与被测量实际值之间的差异，而准确度是指仪表指示值与实际值的接近程度。可见仪表准确度越高，则误差越小。

仪表误差分为两类：

1. 基本误差：仪表在正常的工作条件下（正常工作条件指：仪表使用在规定温度、规定的放置方式、没有外电场和外磁场干扰等），由于制造工艺限制，仪表本身所固有的误差。例如摩擦误差、标尺刻度不准确、轴承与轴尖间隙过大造成的倾斜误差等都属于基本误差范围。

2. 附加误差：仪表离开正常的工作条件时（非正常的工作条件指：温度改变、外磁场影响、波形为非正弦等）而引起的误差。仪表在非正常的工作条件下，除具有基本误差外，尚有附加误差。

#### 二、误差的表示方法

误差常用绝对误差、相对误差和引用误差表示。

##### 1. 绝对误差

测量值  $A_x$  与被测量实际值  $A_0$  之差称为绝对误差  $\Delta$

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-6)$$

绝对误差的单位与被测量的单位相同；绝对误差的符号有正负之分。

**例** 用一电压表测电压，读数为 201 伏，而标准表读数（认为是实际值）为 200 伏，求绝对误差。

**解** 由式 (1-6) 得

$$\Delta = A_x - A_0 = 201 - 200 = +1 \text{ 伏}$$

##### 2. 相对误差

用绝对误差很难衡量测量结果的误差大小，如上例中电压表测 200 伏电压时，绝对误差为  $\Delta_1 = +1$  伏，而另一电压表测 20 伏电压时，绝对误差为  $\Delta_2 = +0.5$  伏。显然，绝对误差是前者大于后者，但它们对测量结果的误差影响却是后者大于前者。衡量测量误差的大小，通

常用相对误差。

相对误差  $\gamma$ ，是指绝对误差  $\Delta$  与被测量实际值  $A_0$  之比，用百分数表示之

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

有时难于求得实际值，而测量值又与实际值相差不大，故式 (1-7) 中的  $A_0$  可用  $A_x$  代替，则相对误差表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-8)$$

**例** 求上面两例中测量结果的相对误差

**解** 对于第一只电压表

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{01}} \times 100\% = \frac{1}{200} \times 100\% = +0.5\%$$

对于第二只电压表

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{02}} \times 100\% = \frac{0.5}{20} \times 100\% = +2.5\%$$

可见，第一只电压表虽绝对误差大，但对测量结果误差的影响却小，即相对误差小。

### 3. 引用误差

仪表的准确度通常用引用误差表示。因为一台仪表的准确度，决定于仪表本身的性能，如用绝对误差或相对误差表示，都有其不足之处。

例如有二只电压表一只量程为 250 伏，在测量 200 伏电压时，其绝对误差为 1 伏，该处的相对误差  $\gamma$  为 0.5%。同一只电压表，测量 10 伏电压，由于仪表基本误差例如摩擦的影响基本保持不变，所以绝对误差相差不多，设 10 伏时的绝对误差为 0.9 伏，其相对误差  $\gamma$  达 9%。另一只量程为 100 伏，在测量 100 伏电压时，绝对误差为 1 伏，该处相对误差  $\gamma$  为 1%，在测量 10 伏电压时，绝对误差为 0.9 伏，该处相对误差  $\gamma$  为 9%。现在为了衡量这两台电压表的性能，如用最大的绝对误差比较，则两台的最大绝对误差皆为 1 伏，显然不能反映出两台电压表性能的优劣。如用相对误差表示，则被测值不同时，相对误差值又不相同，为此规定取上量限的相对误差，来表示一台仪表的准确度，则可以比较正确反映一台仪表的优劣。这种上量限的相对误差就叫做引用误差，如用  $\gamma_m$  表示引用误差则

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-9)$$

可见引用误差实际上也是一种相对误差。只是规定其分母为该表的测量上限值  $A_m$ 。因为仪表的绝对误差基本保持不变，所以知道了仪表的引用误差之后，可以根据上量限的绝对误差，算出不同量程的相对误差。

### 三、仪表的准确度

仪表的准确度是用仪表的最大引用误差表示，因为考虑到仪表各刻度位置上的绝对误差有一些小差别，为了能用引用误差概括仪表的基本误差全貌，就用最大绝对误差  $\Delta_m$  与测量上限值  $A_m$  的百分比来表示仪表的准确度：即

$$\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-10)$$

$K$  为准确度等级，它的百分数即表示仪表在正常的使用条件下最大引用误差的数值。仪表准

准确度越高，则最大引用误差越小，基本误差也就越小。

根据 GB-776-76《电气测量指示仪表通用技术条件》规定，仪表准确度等级分七级，即 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 级，它们所表示的基本误差见表 1-1。

表 1-1 仪表的基本误差

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

仪表使用在非正常工作条件下，其附加误差在《通用技术条件》中也有相应的规定。

## § 1-4 指示仪表的主要技术要求

国家标准 GB 776-76《电气测量指示仪表通用技术条件》，对电工仪表质量提出了全面的要求，归纳起来就是：准确度高、稳定性好、灵敏度（或分辨率）高、可靠性好、使用方便、测量时间短。具体要求包括以下几个方面：

### 一、有足够的准确度

即要求仪表在整个标尺分度线上，基本误差不超过仪表所标明的准确度等级。

### 二、变差要小

所谓变差，是指仪表在重复测量某一被测量时，由于摩擦等原因造成两次示数不相同，它们的差值称为变差。

对于指示仪表，重复测量被测量  $A_0$ ，当由零向上限值逐渐增加时，测量结果为  $A'_0$ ；而由上限值向零逐渐减少时，测量结果为  $A''_0$ ，则变差  $\Delta_0$  可表示为

$$\Delta_0 = A'_0 - A''_0 \quad (1-11)$$

对仪表的要求，变差不应超过基本误差的绝对值。

### 三、受外界影响要小

即仪表受温度、外磁（电）场等影响而引起的附加误差要尽量小。

### 四、仪表本身消耗的功率要尽量小

仪表在测量时，本身必然要消耗一定的功率。为了不改变电路的原来工作状态，要求仪表本身消耗的功率应尽量小。各种常见仪表的消耗功率数值见表 1-2。

表 1-2 各种仪表的消耗功率大概值

仪表类型	表 耗 功 率 (VA)	
	电流表或串联线圈(5A)	电压表或并联线圈(100V)
磁电系仪表	0.2~0.5	0.1~1
整流系仪表	0.2~0.5	0.1~1
电磁系仪表	1~2.5	4~6
电动系仪表	3.5~10	6~12
感应系瓦时计	1~2.5	1~4

### 五、要有良好的读数装置

要求仪表的标尺分度力求均匀，以便于读数。对于不均匀标尺，应标明读数的起始点，

并用“.”符号表示。一般规定标尺的工作部分（即读数范围）不小于标尺全长的85%。

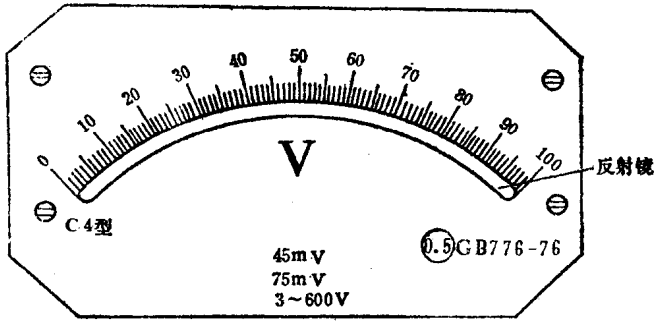


图1-5 精密仪表的标度尺

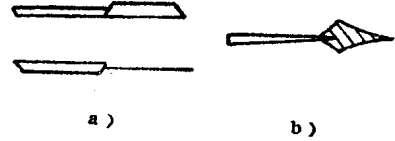


图1-6 指针的结构

a) 刀形 b) 方形

为了减少读数视差，实验室仪表的指针多采用刀形结构，并且标尺上附有镜面，如图1-5读数时应使眼睛、指针以及它在镜中的影像成一线。

对安装式仪表，为了便于读数，标尺分度线要醒目，经常读数的部分分度要细。指针多采用矛形结构，见图1-6。便于从远处观察。

### 六、要有合适的灵敏度

灵敏度是指仪表活动部分偏转角变化量  $\Delta\alpha$  与被测量变化量  $\Delta x$  的比值

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-12)$$

对于均匀标尺，则灵敏度为常数，

$$S = \frac{\alpha}{x} \quad (1-13)$$

可见灵敏度就是单位被测量所引起的偏转角。

对仪表灵敏度的要求要适中。灵敏度高，仪表固然能反映微小的被测量，但太高将造成读数困难（阻尼时间长）且仪表造价高。

### 七、阻尼良好

仪表阻尼良好指阻尼时间要短，所谓阻尼时间指接通电路开始到指针在读数位置左右摆动不超过标尺全长  $\pm 1\%$  的时间，这段时间一般要求不超过4秒，最多不超过6秒。

此外还要求仪表有良好的绝缘、过载能力强等。

## § 1-5 测量方法和测量误差

### 一、测量方法和分类

电工测量的过程就是被测量与同类单位量进行比较的过程。测量单位的复制体称为度量器。如标准电池、标准电阻、标准电感等就是电势、电阻、电感单位的复制体，度量器依精度和用途的不同，分为基准度量器和标准度量器。在测量过程中由于采用测量仪器的不同，度量器是否直接参与，以及测量结果如何取得，形成了不同的测量方法。测量方法一般可归纳成两大类：

### 1. 直接法

直接法指被测量与同一种类单位量相比较的一种方法，其测量结果可以从一次实验数据中求得。直接法按照度量器是否直接参与又可分为直接读数法和比较法两种。

直接读数法在测量过程中无需度量器直接参与，例如指示电表测量电流、电压都属于直接读数法。这种方法设备简单、操作方便，可直接读出被测量的数值。但它的准确度不高，测量误差决定于仪表的基本误差，一般最小可达 $\pm 0.05\%$ 。

比较法指测量过程中需要度量器直接参与比较的一种方法。根据比较方式不同又可分为零值法、较差法和代替法三种。

零值法是利用被测量对仪器的作用和已知量对仪器的作用使二者相消至零的办法（由指零仪判断），例如电位差计测电势，当被测电势与标准电池的的电势在电位差计中相消为零时，即可读出被测电势值。

较差法是利用被测量与已知量的差值，作用于测量仪器，从而实现测量的目的。如用不平衡电桥测电阻、温度等都属于这一种方法。

代替法是利用已知量代替被测量，如不改变测量仪器原来的读数状态，这时被测量和已知量一定相等。例如用代替法测电阻。

比较法的优点是准确度和灵敏度都比较高，测量的误差主要取决于标准度量器的精度以及指零仪的灵敏度，一般最小可达 $\pm 0.001\%$ 。比较法的缺点是设备复杂，操作麻烦。

### 2. 间接法

间接法是指被测量需要通过计算公式进行计算才能求出的一种方法，测量时只能测出与被测量有关的电量，然后通过计算间接求得被测量，例如用伏安法测电阻，先测得电压、电流值，然后利用欧姆定律公式间接算出电阻值。

间接法的测量误差比直接法大，但在某些场合又不得不采用间接法。

## 二、测量误差及其消除方法

无论是采用什么样的测量方法和测量仪器，由于仪器本身不够精确、测量方法不够完善以及实验者本人经验不足，感觉器官不够完善都会使测量结果与被测量的真实值存在差异。这种差异就称为测量误差。

测量误差可分为三类：

#### 1. 系统误差

这种误差遵循一定的规律，在测量过程中保持不变，所以称为系统误差。

造成系统误差的原因，主要是上面所说的仪表误差造成的，仪表误差包括基本误差和附加误差（见§1-3）而两者都是造成系统误差的主要原因。其次由于测量方法不完善，或者使用了近似计算公式，如用伏安法测电阻时，忽略了仪表内阻的影响造成的方法误差，也会带来系统误差。

#### 2. 偶然误差

这是一种大小和符号都不确定的误差。这种误差是由周围环境的偶发原因造成的，所以尽管在完全相同的条件下，同样仔细程度地对同一量进行多次测量，但测量结果仍不一致。例如外界的振动，电源频率的偶然变化都可能是偶然误差产生的因素。

#### 3. 疏失误差

这是一种严重歪曲了测量结果的误差，如实验者的疏忽造成的读数错误、记录错误等。



下面介绍一下这几种测量误差的消除和处理方法。

对于系统误差，首先要尽量减小误差来源。若做不到这点，则应削弱它对测量结果的影响，其消除方法有

1. 正负误差补偿法：为了消除系统误差，可对同一量反复测量两次。如果其中一次误差为正，另一次误差为负，则取它们的平均值，便可消除这种系统误差。如为了消除恒定外磁场对电流表读数的影响，可将电流表放置位置调转 $180^\circ$ ，再测量一次，取两次测量结果的平均值，即可消除外磁场带来的系统误差。

2. 代替法：这种方法是将被测量用已知量置换，置换时使测量仪表的状态保持不变。这样，由于仪表本身制造的不完善和外界因素对仪表的影响均对测量结果不发生作用，从而消除了系统误差。

如用代替法测电阻，先把被测电阻接在电桥电路中，调整电桥达到平衡，再用标准电阻（可调的）置换被测电阻，调整标准电阻使电桥恢复到平衡状态，则被测电阻大小就等于标准电阻大小。测量结果误差只与标准电阻的误差有关系，而与电桥本身和外界因素无关，消除了该种系统误差。

3. 引入校正值：若系统误差已知，则可在测量结果中引入校正值，以消除系统误差。如用标准表校过的仪表，为了确定被校表各刻度的精确读数，可引入校正值；又如为了消除仪表本身消耗功率对测量结果的影响，可从测量结果中将其除掉。

对于偶然误差则不能用系统误差的消除方法，即偶然误差不能在一次测量结果中消除。但测量多次，从偶然误差的总和中，可用概率论来指出偶然误差的可能的或然性较大的界限，这样就有可能衡量测量的准确程度以及确定测量结果和实际值的接近程度。

限于篇幅，本书不讨论偶然误差的处理方法。

对于疏失误差的处理方法：因疏失误差严重歪曲了测量结果，故采取摒弃的方法。

## 第二章 电流与电压的测量

电流和电压的测量，是电气测量中的一种最基本的测量，应用极广。电流表和电压表的种类繁多，就其测量机构来分，有磁电系、电磁系、电动系等。本章将以磁电系为主，以电磁系、电动系为辅介绍各种仪表的结构和工作原理以及各式电流表和电压表。

本章还将介绍电流和电压的测量方法及其量程扩大方法。

另外，还介绍了检流计和电位差计，供有关专业选择使用。

### § 2-1 磁电系仪表的结构和原理

磁电系仪表广泛用于直流电流和电压的测量，如与整流器配合，又可测量交流电流和电压，与变换线路配合，则可测量交流功率、频率、相位等电量。磁电系仪表是问世最早的一种仪表，使用中具有一系列优点，近年来由于磁性材料的性能不断改善，使这种仪表发展有了更广阔的前途。

## 一、结构

磁电系仪表根据磁路形式的不同，分为外磁式、内磁式和内外磁结合式三种结构。

1. 外磁式结构：图 2-1 为外磁式测量机构的结构图，由于永久磁铁放在可动线圈的外面，所以称之为外磁式。整个结构分为二大部分，即固定部分和活动部分。

固定部分是由永久磁铁 1、极掌 2 以及固定在支架上的圆柱形铁心 3 所构成。磁铁是用强磁性材料例如镍铝合金制成，极掌和铁心一般用导磁良好的软铁制成，圆柱形铁心放在极掌之中，铁心与极掌间可形成一个磁场辐向均匀的环形气隙。

仪表的活动部分由绕在铝框架上的活动线圈 4、线圈二端装的二个半轴 5，与转轴相连的指针 7，平衡锤 6 以及弹簧游丝 8 所组成。整个活动部分支承在轴承上，线圈位于环形气隙之中。

当活动线圈通以电流后，在永久磁铁的磁场作用下，就会产生力矩使线圈转动。反作用力矩则由弹簧游丝产生，磁电式仪表的游丝一般有两个，并且两个游丝的绕向相反，游丝一端固定在转轴上，另一端则固定在支架上，它的作用既是产生反作用力矩，同时又是将电流引进活动线圈的引线。

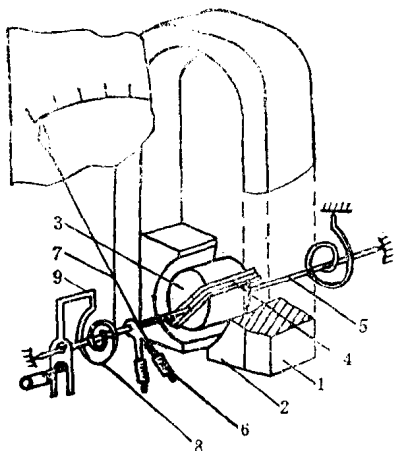


图2-1 外磁式磁电系测量机构的结构示意图

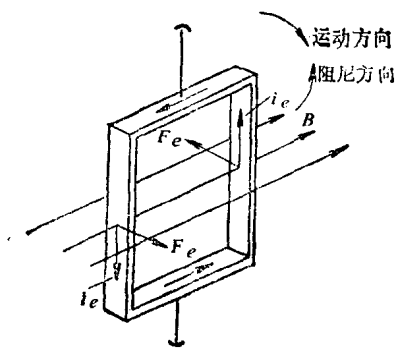


图2-2 铝框产生的阻尼力矩

阻尼力矩则由绕制线圈的铝框架产生的，其原理见图 2-2。

当铝框在磁场中运动时，闭合的铝框割切磁力线将产生感应电流  $i_e$ ，这个涡流与磁场相互作用可产生一个电磁阻力矩  $M_e$ ，显然阻尼力矩的方向与铝框架的运动方向相反，因此能够使指针平稳地停在读数位置上。

2. 内磁式结构：图 2-3 a 是内磁式的测量机构结构图，它与外磁式相比，最大区别在于永久磁铁不在动圈之外而是在动圈之内将铁心和磁极合而为一，为使工作气隙能产生一个均匀的磁场，在磁铁外面要被复或压嵌一个扇形断面的磁极，如图 2-3 b 所示。磁力线穿过气隙后，经导磁环闭合，磁极和导磁环均采用导磁良好的软铁制成。采用这种结构之后，由导磁环形成一个完整的闭合磁路，故漏磁小磁感应强度大、仪表防御外磁场的能力强，且对外界的磁敏感元件的干扰小。而且结构紧凑，与外磁式相比零部件大量减小，成本降低，所以是一种比较先进的结构。

内磁式的活动部分与外磁式基本相同，为了提高内磁式仪表的灵敏度，有时采用张丝结