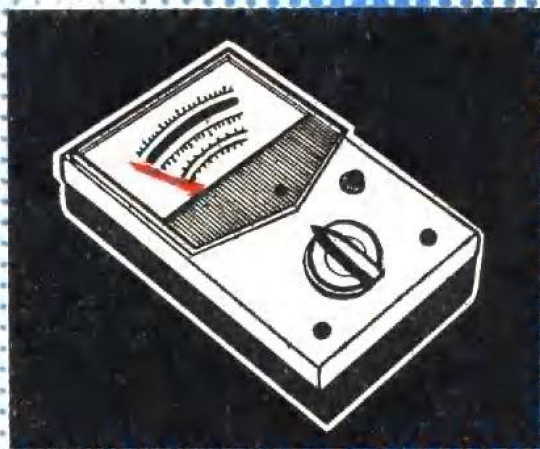


DIANGONGYIBIAO JI  
DIANZIYIBIAO

# 电工仪表及电子仪表

武汉铁路运输学校 于开键 主编



中国铁道出版社

**电工仪表及电子仪表**

武汉铁路运输学校 于开健 主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 印张：13 插页：1 字数：304千

1985年7月第1版 第1次印刷

印数：0001—20,000册 定价：2.10元

## 内 容 简 介

本书主要介绍铁路信号专业常用的电工测量仪表和电子测量仪表，内容包括磁电系电流表和电压表、万用表、交直流电桥、兆欧表、接地电阻测试仪、电子毫伏表、数字式仪表、低频信号发生器、通用示波器、晶体管图示仪等十种仪表的测量原理、电路结构及使用方法，并附有实验提纲。

本书作为铁路中等专业学校信号专业教材，亦可供电信专业的工作人员学习参考。

# 前 言

《电工仪表和电子仪表》一书，是根据铁道部教育局1982年组织制定的铁路中等专业学校信号专业教学大纲编写的。

书中叙述的大部分仪表型号是根据铁道部电务局1982年组织编写的《铁路信号设备电气特性测试方法》一书推荐使用的仪表选定的。

考虑到这门课开设在《电子线路》及《脉冲与数字电路基础》等技术基础课之后，所以书中对有关该方面的内容不再详细讲解。

本书由武汉铁路运输学校于开键主编，其中第十一章由洛阳电务工程学校陈其昌编写并主审全书。参加审稿的有南京铁路运输学校、柳州铁路运输学校、锦州铁路运输学校、兰州铁路机械学校、洛阳铁路电务工程学校及武汉铁路运输学校等单位。

由于编者水平有限、缺乏经验、编写时间又十分仓促，所以书中错误疏漏之处一定不少，恳切希望读者批评指正。

# 目 录

## 第一篇 电 工 仪 表

<b>第一章 电工仪表概论</b> .....	1
第一节 电工仪表的分类.....	1
第二节 电气测量指示仪表基本知识.....	2
复习思考题.....	14
<b>第二章 磁电系电流表和电压表</b> .....	15
第一节 磁电系仪表的测量原理.....	15
第二节 磁电系电流表.....	18
第三节 磁电系电压表.....	20
第四节 磁电系仪表主要技术特性.....	22
复习思考题.....	22
<b>第三章 万用表</b> .....	23
第一节 万用表的结构.....	23
第二节 直流电流测量原理.....	26
第三节 直流电压测量原理.....	29
第四节 交流电压测量原理.....	30
第五节 电阻测量原理.....	33
第六节 电平测量原理.....	37
第七节 万用表的使用.....	40
复习思考题.....	42
<b>第四章 兆欧表</b> .....	43
第一节 兆欧表的结构及测量原理.....	43
第二节 兆欧表的使用.....	46
复习思考题.....	48
<b>第五章 电 桥</b> .....	49
第一节 直流电桥.....	49
第二节 交流电桥.....	59
复习思考题.....	75
<b>第六章 接地电阻测量仪</b> .....	76
第一节 接地电阻测量原理.....	76
第二节 ZC-8型接地电阻测量仪.....	78
复习思考题.....	81

## 第二篇 电子仪表

<b>第七章 电子管电压表</b> .....	82
第一节 概    述.....	82
第二节 GB-9B型电子管毫伏表的工作原 理.....	83
第三节 GB-9B型 电子管毫伏表的使用.....	87
复习思考题.....	88
<b>第八章 信号发生器</b> .....	89
第一节 XFD-6型低频信号发生器工作原 理.....	90
第二节 XFD-6 型低频信号发生器的使用.....	95
复习思考题.....	96
<b>第九章 数字式仪表</b> .....	97
第一节 数字频率计测量原理.....	97
第二节 PB-2 型数字频率计.....	99
第三节 数字频率计的使用 .....	112
第四节 数字电压表 .....	118
复习思考题 .....	125
<b>第十章 电子射线示波器</b> .....	126
第一节 示波器的工作原理 .....	126
第二节 SBT-5型 示波器.....	134
第三节 SBT-5型示波器 的使用.....	157
复习思考题 .....	164
<b>第十一章 晶体管特性图示仪</b> .....	165
第一节 晶体管特性图示仪测量原理 .....	165
第二节 JT-1 型晶体管特性图示仪方框图 .....	165
第三节 基极阶梯波电源 .....	166
第四节 集电极扫描电源 .....	176
第五节 示波管的放大、控制电路及电源电路 .....	177
第六节 转换开关 .....	179
第七节 JT-1 型晶体管特性图示仪的使用 .....	182
复习思考题 .....	189
<b>附 录 实验提纲</b> .....	191
实验一 万用电表的使用 .....	193
实验二 电缆接地故障测试 .....	195
实验三 万用电桥的使用 .....	196
实验四 电子管电压表的使用 .....	197
实验五 示波器及数字频率计的使用 .....	197
实验六 晶体管特性图示仪的使用 .....	199

# 第一篇 电工仪表

利用电工学手段测量电量或磁量的仪器仪表称为电工仪表。电工仪表的种类繁多。在铁道信号专业实际应用中，最常见的是测量基本电量（电流，电压等）和电路中主要元件的参数（电阻、电感、电容）的仪表。所以本篇将重点介绍这些常见仪表的测量原理、电路结构和它们的使用方法。

测量电气参数的方法很多。随着被测对象的性质、数量、测量条件以及所要求的准确程度的不同，就应选用不同的仪表，采用不同的测量方法。所以还将介绍如何正确选择和使用仪表，并简要介绍一些测量方法。

## 第一章 电工仪表概论

为了能对电工仪表有一个比较全面的认识，本章在介绍各种仪表之前，先讨论一下电工仪表的分类、基本结构、测量原理和仪表的基本特性以及使用注意事项。

### 第一节 电工仪表的分类

日常工作与生活中，经常需要进行各种不同的测量，例如用天平测质量、用万用表测量电阻等，进行这些测量时所使用的技术工具称为测量设备。测量设备有两种基本形式：一种是度量器，例如天平用的砝码、电气测量中用的标准电阻等，它们本身就是测量单位的复制实体；另一种是测量仪表。在电气测量仪表中，电工仪表占测量仪表中很重要的地位。

电工仪表按所用测量方法的不同，可分为两大类。

#### 一、指示仪表类

在测量过程中不需要度量器直接与被测量进行比较，而能由仪表预先刻度好的读数装置指示出被测量数值的仪表称指示仪表。如指针式电流表、电压表等都是指示仪表（利用电子计数器读数的仪表归于电子仪表类）。指示仪表具有制造容易、成本较低、使用方便等优点，因此在实际工作中得到广泛运用。

#### 二、较量仪表类

在测量过程中将被测量与已知标准量（度量器）进行比较从而确定被测量大小的仪表称为较量仪表。例如用天平测物体质量时，将物体与砝码的量进行比较，从而测定物体质量；在电工测量中，例如用标准元件（电阻、电感、电容）与被测元件进行比较而确定被测元件

参数的电桥等即属于较量仪表。很显然，这类仪表必须与度量器直接配合使用才能进行测量。

较量仪表的特点是准确度高。

## 第二节 电气测量指示仪表基本知识

测量电气参数（如电流、电压、电阻、电感、电容、相位等等）的指示仪表称为电气测量指示仪表。它是电专业实际工作中使用最广泛的仪表。在这一节中，将对电气测量指示仪表的概况做一介绍。

### 一、电气测量指示仪表的分类

电气测量指示仪表的种类繁多，分类方法也很多。了解电气测量指示仪表的分类，有助于认识它们所具有的特性，对我们了解电气测量指示仪表的概况也有一定的帮助。根据我国国家标准GB776—76《电气测量指示仪表通用技术条件》，下面介绍几种常见的电气测量指示仪表的分类方法：

#### 1. 按电气测量指示仪表的工作原理分类

主要有以下几种：磁电系；电磁系；电动系；感应系；整流系；静电系；热电系；电子系。

#### 2. 按被测量的名称（或单位）分类

电流表（安培表、毫安表、微安表）；电压表（伏特表，毫伏表）；功率表（瓦特表）；高阻表（兆欧表），欧姆表；电度表（瓦时表）；相位表（或功率因数表）；频率表以及多种用途仪表，如万用表，电压电流（伏安）表等等。

#### 3. 按使用方式分类

开关板式仪表（简称“板式表”）：通常固定安装在开关板或某一装置上。这种仪表一般误差较大，价格较低，但过载能力较强。

可携式仪表：这种仪表便于携带，其误差一般较小（即准确程度较高），但过载能力较差，价格较贵。

#### 4. 按仪表工作电流的种类分类

直流仪表；交流仪表；交直流两用仪表。

#### 5. 其他分类法

电气测量指示仪表还有其他分类方法，例如按仪表的准确度等级分类，可分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5级共七个等级；按仪表对电场磁场的防御能力分类，可分为I、II、III、IV级共四个等级；还可按仪表使用条件等等分类。

### 二、电气测量指示仪表的组成及测量原理

#### 1. 仪表的组成

在电气测量指示仪表中，被测量是转化为电磁量而被测量出来的。



图 1—1 为电磁式仪表简单原理图。图中线圈通电以后会产生电磁力从而吸引可动的铁片带动指针偏转。如果线圈通以较小电流就能吸引铁片带动指针偏转满偏度，而被测量数值又比较大，直接输入线圈后由于指针满度而不能指示出被测量数值时，应将被测量经电阻  $R_1$  和  $R_2$  分压，将被测量变成适合线圈测量的量。该电路中，我们称分压器  $R_1$  和  $R_2$  为测量电路，而其余部分称为测量机构。

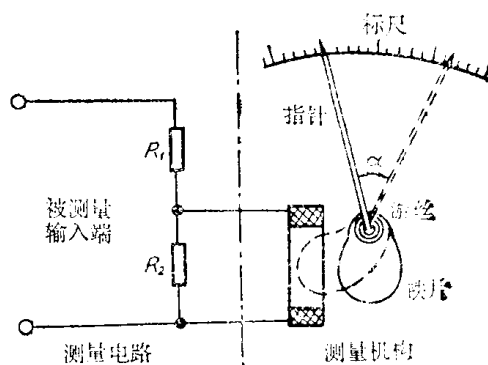


图 1—1 电磁式仪表简单原理图

通过上例可见：为了将被测量变换成仪表指针偏转的角位移，指示仪表应有测量机构和测量电路两个部分。

测量电路的作用是将被测量  $X$  通过一定比例变换成适合测量机构测量的电磁量  $Y = F(X)$ 。

测量机构是指示仪表的核心部分，其作用是将电磁量  $Y = F(X)$  产生的电磁力转换成仪表指针的角位移  $\alpha$

$$\alpha = \phi(Y)$$

于是，我们可以得出如下关系：

$$\alpha = \phi(Y) = \phi[F(X)] = f(X)$$

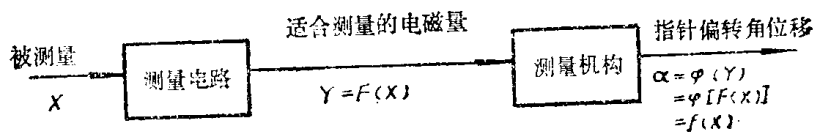


图 1—2 电气测量指示仪表的结构方框图

这种关系使我们可以根据仪表指针偏转角位移决定被测量的大小。一般电气测量指示仪表的结构方框图可用图 1—2 表示。

## 2. 测量机构的结构及工作原理

由图 1—1 电磁式仪表组成简单原理图中可以看出，测量机构由固定部分和活动部分构成。用以指示被测量数值的指针属于活动部分。

按测量机构各部分所起的作用，测量机构由以下几部分组成。

### (1) 产生转动力矩的装置

要使仪表指针产生角位移，测量机构内必须有转动力矩作用在仪表指针上。转动力矩一般是由磁场和电流的相互作用产生的。

常用的几种电气测量指示仪表转动力矩的产生方式如下：

#### 1) 磁电系（动圈式）仪表

这种仪表中有一个永久磁铁，磁铁磁极间有一个可以绕轴转动的线圈。当线圈中通过被测电流时，该电流与磁场相互作用而产生转动力矩（见第二章第一节）。

#### 2) 电磁系（动铁式）仪表

如图 1—1，这种仪表中有一个（或几个）固定线圈，线圈内部有一个（或几个）可以绕轴转动的软铁片。当线圈通过被测电流而产生磁场时，软铁片便被磁化，由于线圈磁场和软铁电磁场相互作用而产生转动力矩。

#### 3) 电动系仪表

这种仪表与磁电式仪表作用原理相同，但其中磁场不是由永久磁铁产生，而是由固定的载流线圈产生。

#### 4) 感应系仪表

感应系仪表主要用于计量电能。常见的如交流电度表，表内转动力矩由通有交流电流的固定线圈产生的磁场与在可动铝盘中感应的涡流相互作用而产生。

如图 1—3 为感应系交流电度表原理图。图中与负载串联的线圈是电流线圈，而与负载并联的线圈是电压线圈。线圈中通过交流电时，在铁心中将产生磁通，如图 (a) 中箭头所示。电流线圈产生的磁通在两个不同的地方穿过铝盘，这可以看成两个大小相等的磁通  $\phi_1$  和  $\phi_2$  以相反方向穿过铝盘。电压线圈产生磁通的一部分  $\phi_U$  也穿过铝盘。可见有三个磁通穿过铝盘，其强弱与方向将随着不同时刻电流的变化而变。

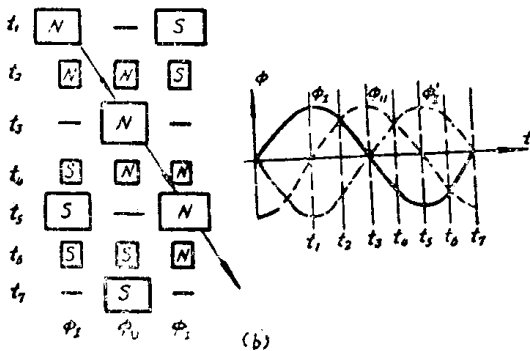
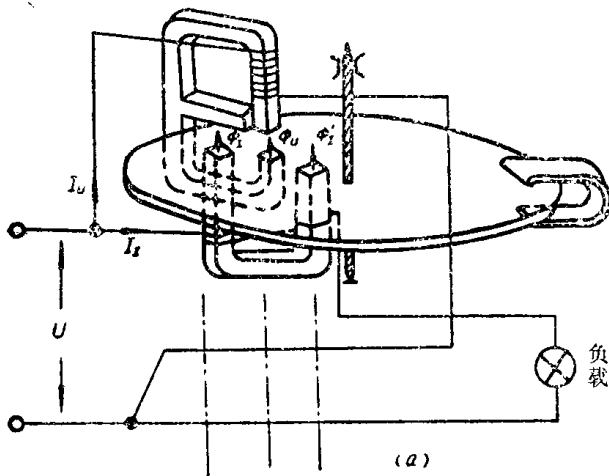


图 1—3 感应系交流电度表原理图

电压线圈圈数很多其电抗远大于电阻，所以电流  $I_U$  滞后电压  $U$  接近  $90^\circ$ 。 $I_U$  产生的  $\phi_U$  视为与  $I_U$  同相位，所以  $\phi_U$  滞后电压  $U$  接近  $90^\circ$ 。若负载功率因数为 1（纯电阻负载），由于电流线圈匝数很少，可近似认为其电流  $I_I$  与电压  $U$  同相位。这样  $\phi_U$  比电流线圈产生的  $\phi_I$  滞后  $90^\circ$ 。图 1—3 (b) 反映了这种关系，假定  $t_1$  时刻  $\phi_U$  的相角为零度， $\phi_I$  的相角为  $90^\circ$ 。 $t_2$  时刻  $\phi_U$  的相角为  $45^\circ$ ， $\phi_I$  的相角为  $135^\circ$ ， $t_3$  时刻  $\phi_U$  的相角为  $90^\circ$ ， $\phi_2$  的相角为  $180^\circ$  等等。假定磁极在铝盘下边则可画出在不同时刻各磁通变化的情况，并用磁极面积大小代表磁极的强弱。由图可见，在  $t_1$  时向上的最大磁通在最左边一极处穿过铝盘；到  $t_3$  时，这个最大磁通移到中间磁极处；到  $t_5$  时，它又移到最右边一个磁极处。这相当于磁场由左向右移进，称为移进磁场。移进磁场在铝盘中会感应电动势，引起涡流。铝盘中这种涡流与磁场相互作用而会产生转矩，使铝盘向磁场移进的方向旋转。

(2) 产生反作用力矩的装置

如果电测量指示仪表仅有转动力矩作用在指针上，则不管被测量多大，只要指针一旦被驱动，就会一直偏转到刻度盘的尽头，直到不能再偏转为止，因而不能指示出被测量的大小。

为了使仪表指针对应一定大小的被测量只产生某一相应的偏转，就必须要有个反作用力矩  $M_F$  同时作用在指针上。反作用力矩应与转动力矩方向相反，而其值应随着指针偏转角位移  $\alpha$  的增大而增加，即

$$M_F = F(\alpha)$$

这样，当被测量小时，仪表产生的转动力矩也小，指针只要偏转一个小角度就可以使转动力矩和反作用力矩平衡而停下来，从而指示出被测量数值。当被测量变大时，仪表产生的转动力矩增加，指针只有偏转比较大的角度才能使转动力矩和反作用力矩平衡，从而指示出被测量的大小。

在电气测量指示仪表中，可以用不同的方法产生反作用力矩。

1) 利用机械力

很多仪表中，利用游丝（盘形弹簧丝）变形后所具有的恢复原状的弹力产生反作用力矩，如图 1—4。

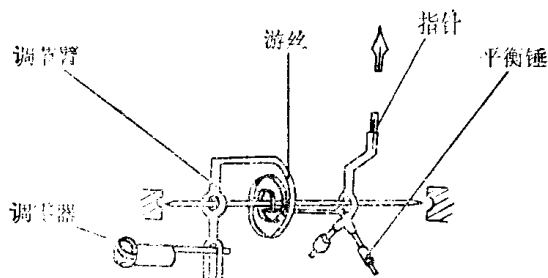


图 1—4 用游丝产生反作用力矩

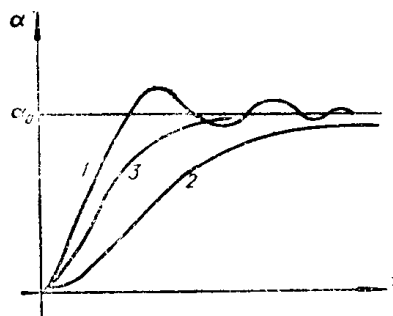


图 1—5 可动部分阻尼曲线

在转动力矩作用下，仪表活动部分偏转而扭紧游丝，使游丝产生反作用力矩。在游丝弹性范围以内，每盘游丝产生的反作用力矩与指针偏转角 $\alpha$ 之间存在如下关系：

$$M_F = \frac{bh^3E}{12L} \times \alpha \times 9.8 \times 10^{-5} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

式中  $b$  —— 游丝宽度，单位mm；  
 $h$  —— 游丝厚宽，单位mm；  
 $L$  —— 游丝总长度，单位mm；  
 $E$  —— 游丝材料的弹性系数。

当游丝给定之后， $b$ 、 $h$ 、 $L$ 、 $E$ 即为定值，于是：

$$\frac{bh^3E}{12L} = K_F$$

式中  $K_F$ 为常数，称为游丝的反作用系数。于是有

$$M_F = K_F \cdot \alpha$$

即游丝反作用力矩与指针偏转角成正比例关系。

另外，也可以用张丝（亦称拉丝），吊丝（又称悬丝），重力等产生反作用力矩。

### 2) 利用电磁力

和利用电磁力产生转动力矩的办法一样。有些仪表利用电磁力产生反作用力矩。此类仪表如兆欧表等（详见第四章）。

### (3) 产生阻尼力矩的装置

由于仪表活动部分惯性的影响，当利用仪表进行测量时，仪表指针不能立即停在平衡位置 $\alpha_0$ 上，而是在平衡位置附近作减幅振动，见图 1—5 曲线 1。

图中横轴代表时间，纵轴代表指针偏转角。这样一来，指针稳定就需要一段时间，即读数时需要较长时间。为了缩短读数时间，仪表应有阻尼装置，使仪表活动部分在运动过程中受到一个与运动方向相反的力矩——阻尼力矩。

阻尼力矩的大小要设计合适，如果阻尼过强，就会出现过阻尼状态，如图 1—5 中曲线 2 所示。这样，读数时间不但不会缩短，反而引起错误读数。因为阻尼过大时，仪表指针将在转动力矩作用下缓慢爬行，在指针爬行过程中，测量者可能误认为指针已达到平衡位置而过早地读数。临界阻尼状态是正确读数所须用读数时间最短的情况。如图 1—5 中曲线 3，但在实际中难以刚好确定临界阻尼状态。而往往做成稍欠阻尼状态。因为在这种状态下，仪表指针最后围绕平衡位置稍做摆动后即停止。这样既能很快读数，又能正确读数。电磁系仪

表常见的阻尼装置有：

1) 空气阻尼器

空气阻尼器中有一个封闭的小箱（阻尼盒），与仪表转轴联在一起的轻翼片（阻尼叶片）可以在阻尼盒中移动，见图1—6（a）所示。当轴旋转时，阻尼盒内阻尼叶片一边的空气受到压缩，另一边的空气则变得稀薄，于是盒内空气形成压力差。压力差与阻尼叶片运动方向相反，并与运动速度成正比，因而产生阻尼作用。

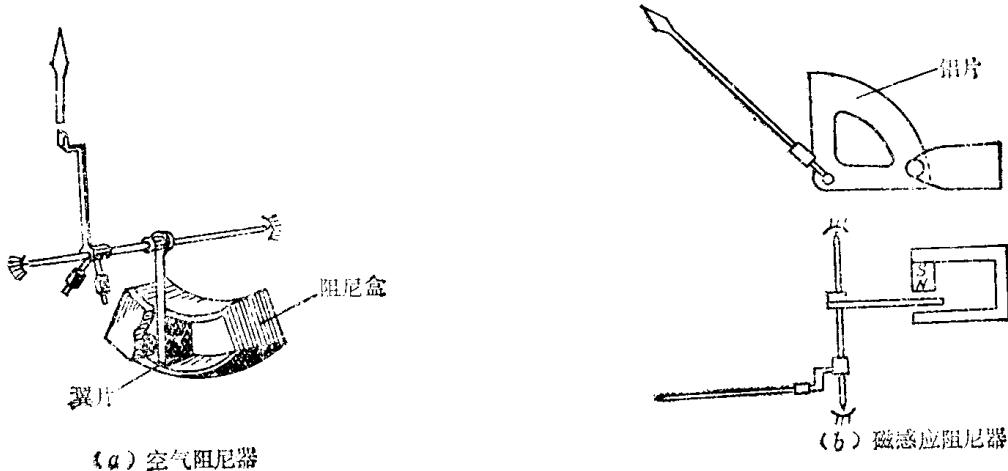


图1—6 常见的几种阻尼器

2) 磁感应阻尼器（又称涡流式阻尼器）

磁感应阻尼器中，当与转轴联接的铝片随转轴的转动而在永久磁铁的磁场中运动时，铝片内会感应出涡流。涡流与磁场相互作用便会产生阻尼作用，见图1—6（b）所示。

磁电系仪表没有专门的阻尼器，一般是利用绕有动圈的铝框架（或者在动圈上特意穿几匝短路线匝）来产生阻尼（详见第二章第一节）。

从上述分析可见，阻尼力矩只在指针活动的时候产生，当指针在平衡位置不动时，阻尼力矩也消失，因此阻尼力矩不影响仪表测量结果。

(4) 指示装置

指示装置可由指针与标度盘组成；也有的由光标指针与标度盘组成。

标度盘，又叫表盘或刻度盘。它是一个画有标度尺（或称标尺）和表示仪表型式，基本性能等标志符号的平面，如图1—7为信号专业DDY型大站电源屏中直流屏面板上的电压表标度盘。

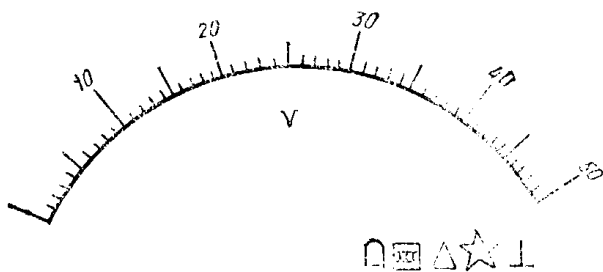


图1—7 电压表标度盘

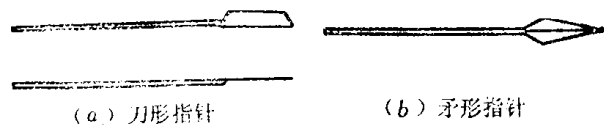


图1—8 仪表指针

标度盘根据标尺上分度线的刻度情况，可分为均匀刻度与不均匀刻度，单向和双向（零标在标尺中央），正向（零标在标尺左端）和反向（零标在标尺右端）等几种。

指针通常由铝合金或塑料等材料制成，轻而坚固。形状大体有刀形和矛形两种，如图1—8所示。

中、大型安装式仪表可采用矛形指针，以便远处能看清读数，小型安装式仪表及可携式仪表多采用刀形指针，以利于读数精确。

光标式指针如图1—9所示。

从灯光射出的光线经过光具组和光栏，经仪表偏转线圈上反射镜的反射，落在标尺上，使标尺上形成一个光斑，在光斑的背景上能清楚地显示出落在光栏孔中的矛形指针的影象，随着被测量大小的变化，活动线圈偏转引起光标指针沿标尺对应移位。这种指示方式相当于加长了仪表指针，从而提高了准确程度。

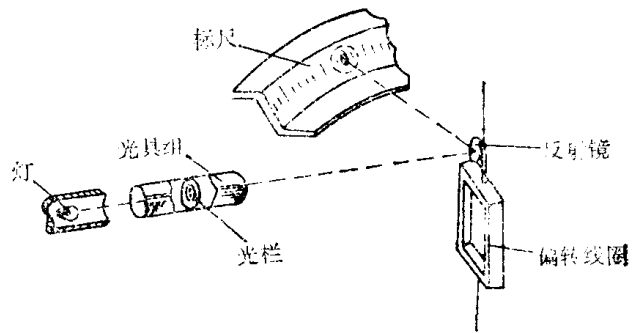


图1—9 光标式指针

仪表指针平时应该指零，这可以由调零器调节实现。如图1—4，调零器是一个带有偏心杆的轴与固接在游丝外端的调节臂组成。当旋动露在仪表外壳表面的调节轴时，调零器偏心杆将拨动调节臂带动游丝使指针产生偏转，从而达到调零的目的。

### 三、电气测量指示仪表主要技术特性

技术特性是衡量仪表质量的主要依据。不同型号，不同用途的仪表所应具备的技术特性在国家标准里都有明确规定，仪表技术特性内容很多，下面仅介绍其主要内容：

#### 1. 仪表灵敏度和仪表常数

仪表指针偏转角度 $\alpha$ （或偏转格数）对被测量 $X$ 的导数叫作仪表对被测量 $X$ 的灵敏度 $S_x$ ，

即 
$$S_x = \frac{d\alpha}{dx}$$

灵敏度是指对某一种被测量而言的。所以在提到灵敏度时，应该说明是电流灵敏度（一般用 $S_I$ 表示），还是电压灵敏度（一般用 $S_U$ 表示）或者是其他什么灵敏度。

当仪表标度尺为均匀刻度时，则有：

$$S_x = \frac{\alpha}{X}$$

此时 $S_x$ 为常数，其值为指针偏转角 $\alpha$ （或指针偏转格数）与输入仪表的被测量之比。

灵敏度 $S_x$ 的倒数定义为仪表常数，通常用 $C_x$ 表示：

$$C_x = \frac{1}{S_x} = \frac{X}{\alpha}$$

即仪表常数的值等于被测量 $X$ 与指针偏转角 $\alpha$ （或指针偏转格数）之比。

仪表灵敏度和仪表常数可根据仪表分度线上注明的被测量数值和分度线格数算出。

例：某仪表分度线上注明能测量的电流极限值（称仪表量限或上量限）为5A，而标尺分度线共100格，则该仪表电流灵敏度为：

$$S_I = \frac{\alpha}{I} = \frac{100}{5} = 20 \text{ (格/安)}$$

仪表电流常数为：

$$C_I = \frac{1}{S_I} = \frac{1}{\alpha} = \frac{5}{100} = 5 \times 10^{-2} \text{ (安/格)}$$

灵敏度是电工仪表的重要技术特性之一，其值  $S_x$  越大，说明仪表灵敏度越高。

## 2. 仪表准确度

由于种种原因，任何一个仪表在测量时都有误差。仪表指示值总是被测量的近似值。而仪表准确度就是说明仪表指示值与被测量真实值之间的近似程度。准确度是用误差来表示的。所谓误差，是说明仪表指示值与被测量真实值之间差异程度的。因此，仪表准确度越高，其近似程度越高，误差越小。

为了便于理解误差和准确度的概念，下面介绍几种常用的误差表达形式。

### (1) 误差的表达形式

#### 1) 绝对误差

仪表指示值  $X$  与被测量真实值  $X_0$  的差值  $\Delta X$  叫绝对误差，即

$$\Delta X = X - X_0$$

由于被测量的真实值通常是未知的，所以测量技术中往往把标准仪表的读数当作真实值  $X_0$ 。绝对误差可以为正值，亦可以为负值。例如，某电流表测量时指示值  $X = 4.65 \text{ A}$ ，而用标准电流表测量出来的值（认为是真实值）为  $X_0 = 4.63 \text{ A}$ ，则绝对误差为

$$\Delta X = X - X_0 = 4.65 - 4.63 = 0.02 \text{ (A)}$$

又如测某线圈电阻，某仪表指示值为  $X = 1000 \Omega$ ，而真实值  $X_0 = 1000.5 \Omega$ ，则绝对误差为：

$$\Delta X = X - X_0 = 1000 - 1000.5 = -0.5 \text{ (}\Omega\text{)}$$

绝对误差的单位与被测量单位相同。

绝对误差不能确切反映出测量的准确程度。例如，测两个电阻，其中电阻  $R_1 = 10 \Omega$ ，绝对误差  $\Delta R_1 = 0.1 \Omega$ ；而电阻  $R_2 = 10000 \Omega$ ，绝对误差  $\Delta R_2 = 1 \Omega$ 。尽管测量电阻  $R_1$  时的绝对误差  $\Delta R_1$  小于测量电阻  $R_2$  的绝对误差  $\Delta R_2$ ，但这不能说对电阻  $R_1$  的测量比对电阻  $R_2$  的测量准确。因为实际上测  $R_1$  时的绝对误差  $0.1 \Omega$  相对于  $10 \Omega$  而言占  $1\%$ ，而测  $R_2$  时的绝对误差  $1 \Omega$  相对于  $10000 \Omega$  而言却只占  $0.01\%$ ，所以应该说对  $R_2$  的测量比对  $R_1$  的测量准确。

为弥补绝对误差这一表达形式的不足，因而提出相对误差，即误差率的概念。

#### 2) 相对误差

绝对误差  $\Delta X$  与被测量真实数值  $X_0$  的比值叫相对误差，其符号为  $\gamma$ ，通常用百分数表示：

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\%$$

相对误差根据  $\Delta X$  的值可能为正，也可能为负，无单位。

例如用某仪表测电流，当指针指在  $5 \text{ A}$  刻度时，若被测真实值为  $5.02 \text{ A}$ ，则仪表该刻度相对误差为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% = \frac{X - X_0}{X_0} \times 100\% \\ &= \frac{5 - 5.02}{5.02} \times 100\% = -0.3989\% \end{aligned}$$

相对误差通常用于评价测量结果的精确程度或衡量测量结果的误差。由于相对误差给出了测量误差的清晰概念，便于对不同测量结果的测量误差进行比较，所以它是对测量结果的误差进行分析计算中最常用的一种误差表达形式。

### 3) 引用误差 (又称满度误差)

相对误差虽然可以评价测量结果的精确程度,但不能用来评价仪表的准确度。

例如一只量程为0~250 V 的电压表,刻度200 V 处的绝对误差为2 V,则该刻度的相对误差为 $\gamma_1=1\%$  ( $\gamma_1=\frac{2}{200}\times 100\%=1\%$ ),电工仪表本身构造和制作质量等原因(轴承摩擦,标尺分度不精确等等)而产生的绝对误差在不同刻度处是基本不变的,所以在刻度10 V 处绝对误差也接近2 V,设为1.8 V。这样,该刻度处的相对误差 $\gamma_2=18\%$  ( $\gamma_2=\frac{1.8}{10}\times 100\%=18\%$ )比较 $\gamma_1$ ,和 $\gamma_2$ 可以看出 $\gamma_1$ 与 $\gamma_2$ 在数值上差别很大。这是因为做为相对误差表达式中分母的被测量在很大范围内变化(第一次测值为200 V,第二次测值为10 V),而作为其分子的绝对误差却在仪表标度尺的全长上变化较小,(在200 V 刻度处为2 V,而在10 V 刻度处为1.8 V)。这样,随着被测量减小,相对误差却增加,并有增加到无限大的趋势。显然,这样反映不了仪表的准确度。为了确定仪表的准确度,划分仪表准确度等级,通常采用仪表测量上限(即满刻度值)做分母的相对误差,即引用误差这样一种表达形式。

可见,引用误差 $\gamma_n$ 就是仪表指示值的绝对误差 $\Delta X$ 与仪表测量上限 $X_m$ 的比,

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$$

仪表不同刻度处的绝对误差不完全相等,如果将上式中的分子取仪表标度尺工作部分所出现的最大绝对误差 $\Delta X_m$ 而得到的引用误差叫最大引用误差 $\gamma_{n,m}$ 或称仪表允许误差。

$$\gamma_{n,m} = \frac{\Delta X_m}{X_m} \times 100\%$$

## (2) 仪表的基本误差及准确度

### 1) 基本误差

在规定的正常工作条件下,由于仪表本身的结构和制作质量方面的原因(如活动部分轴承摩擦和划分刻度不精密等等)而引起的误差叫基本误差。正常工作条件又称刻度条件,它是指仪表在进行刻度时所规定的条件:如规定的温度,工作位置(垂直、水平或倾斜某一角度),规定的波形、频率及除地磁场外没有外界磁场、电场影响等条件。

基本误差就是刻度条件时的引用误差但在利用引用误差表达式 $\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$ 计算基本误差时,仪表的标度尺不同,则该式中分母代入的 $X_m$ 值也不相同。国家标准规定:单向标度尺仪表应代入标度尺工作部分上量限值;双向标度尺仪表,应代入标度尺工作部分两个上量限绝对值之和等等。

### 2) 仪表准确度

由于基本误差只是由仪表结构本身引起的误差,它是仪表本身固有的,所以可用它表示仪表结构上所能保证的准确度。故定义在标度尺工作部分的全部分度线上可能出现的最大基本误差为仪表的准确度等级 $K$ 的百分数,即

$$\pm K\% = \frac{\Delta X_m}{X_m} \times 100\%$$

可见,仪表准确度等级的百分数也就是表示该仪表在规定正常工作条件下使用时所允许的最大引用误差数值。

根据国家标准规定,目前我国生产的电气测量指示仪表准确度等级分为七级,即0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0级。我国旧标准规定准确度最后一级为4.0级,所以目前产品目录中4.0级和5.0级都有,由于仪表工业的发展,目前已出现准确度为0.05级指示仪表。

准确度为不同等级的指示仪表在规定条件下使用时，基本误差在标度尺工作部分所有分度线上不许超过表 1—1 所规定的值。

各级仪表的基本误差

表 1—1

仪表准确度等级	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

仪表准确度等级符号通常在仪表标度盘上表示出来，其表示方法可参看表 1—2。

3) 用仪表准确度估计测量误差

在用指示仪表直接进行测量时，可以根据仪表准确度等级估计测量结果的误差。

以常用的单向标度尺仪表为例说明，设仪表准确度等级为  $K$ ，则根据准确度表达式：

$$\pm K\% = \frac{\Delta X_m}{X_m} \times 100\%$$

可知，仪表在规定条件下测量时，测量结果中可能出现的最大绝对误差为：

$$\Delta X_m = \pm K\% \cdot X_m$$

那么，用该仪表进行测量时，如果得到的读数为  $X$ ，则测量结果可能出现的最大相对误差为：

$$\begin{aligned} \gamma_m &= \frac{\Delta X_m}{X - \Delta X_m} \times 100\% \\ &= \pm \frac{K\% \cdot X_m}{X - \Delta X_m} \times 100\% \end{aligned}$$

一般情况下  $X \gg \Delta X_m$

$$\therefore \gamma_m \approx \pm \frac{K\% \cdot X_m}{X} \times 100\%$$

分析上式可知，当仪表准确度给定，被测量  $X$  越小，测量结果的相对误差越大，仪表所测量的值  $X$  越接近测量上限  $X_m$ ，则测量误差就越接近仪表准确度等级的百分数。

**例：**如果被测电压是 100 V，采用单向标度尺的 0.5 级，量限为 0~300 V 和 1.0 级，量限为 0~100 V 的两个电压表分别测量，求测量的最大可能的相对误差各是多少。

**解：**用 0.5 级，量限为 0~300 V 电压表测量时最大可能的相对误差为

$$\gamma_{m1} = \pm K_1\% \cdot \frac{X_{m1}}{X} \times 100\%$$

式中  $K_1 = \pm 0.5$ ； $X_{m1} = 300$  V； $X = 100$  V

所以 
$$\gamma_{m1} = \pm 0.5\% \times \frac{300}{100} \times 100\% = \pm 1.5\%$$

采用 1.0 级，量限为 0~100 V 电压表测量时最大可能的相对误差为：

$$\gamma_{m2} = \pm K_2\% \cdot \frac{X_{m2}}{X} \times 100\%$$

式中  $K_2 = \pm 1.0$ ； $X_{m2} = 100$  V  $X = 100$  V

所以 
$$\gamma_{m2} = \pm 1.0\% \times \frac{100}{100} \times 100\% = \pm 1.0\%$$

从例中可以看出，仪表准确度等级  $K$  对测量结果的准确度影响很大。但是仪表准确度等级并不就是测量结果的准确度，因为后者不仅与仪表准确度等级有关，还与仪表的量限有



关。只有在测量时仪表运用于满量限时，测量结果的准确度才等于仪表准确度。因此，决不能把仪表准确度和测量结果准确度混为一谈。根据这个理由，选用仪表时，要纠正单纯追求其准确度等级越高越好的错误认识。而应该根据被测量数值的大小以及对测量结果准确度的要求，兼顾仪表准确度等级和测量上限值进行合理的选择。为了充分利用仪表准确度，被测量的值应大于仪表测量上限的三分之二，这时仪表可能出现的最大相对误差为：

$$\gamma_x = \pm K\% \cdot \frac{X_m}{X} \times 100\%$$

因为

$$X = \frac{2}{3} X_m$$

所以

$$\begin{aligned} \gamma_x &= \pm K\% \cdot \frac{X_m}{\frac{2}{3} X_m} \times 100\% \\ &= \pm 1.5K\% \end{aligned}$$

即测量误差不会超过仪表准确度等级数值百分数的1.5倍。

### (3) 仪表的附加误差

仪表不在规定的正常工作条件下使用时，除了产生基本误差以外，还会由于各种外界因素（例如温度，放置位置，外界磁场等等）影响而产生的误差叫附加误差。附加误差的表示方法与基本误差相同。影响仪表指示值的上述外界因素称为影响量。在国家标准中具体规定了各种影响量变化时所引起附加误差的要求。附加误差越小，说明仪表受外界影响越小。

### 3. 仪表的阻尼

电气测量指示仪表应该有良好的阻尼特性，当仪表接入电路后，指针在平衡位置附近摆动时间应该尽可能短，以便迅速读数。从仪表接入电路时起到指针摆幅不大于标尺全长的1%止的一段时间定义为仪表的阻尼时间。一般仪表阻尼时间规定不应超过4s。

### 4. 仪表的功率损耗

在测量过程中，仪表本身要消耗一定的能量。希望仪表的功率损耗越小越好。否则，当被测电路功率很小时，如果仪表消耗功率很大，将使电路工作状态发生变化，因而引起误差。

### 5. 仪表的过载能力

如果逐渐使仪表的负载增加到额定值以上，并使仪表在过负载情况下延续一段时间，则过大的负载电流将引起仪表有关部分温升过高。这种过载称为热过载或延时过载。如果仪表质量差，则温升过高可能使仪表损坏。

如果突然使仪表负载超过额定值，则在测量机构很大转矩作用下，仪表可动部分将迅速冲向极限位置，发生机械撞击。这种过载叫机械过载或短时过载。如果仪表质量差，短时过载可能引起内部元件机械损坏（如指针撞弯）。

在实际使用中，由于某些原因使仪表过载是难免的，所以各种仪表均应具备一定的过载能力。

### 6. 其他性能

在国家标准《电气测量指示仪表通用技术条件》中，对仪表质量提出了比较全面的要求，如升降变差要小（当被测量由零向上限方向平稳增加与由上限向零方向平稳减少时，对应于同一个分度线的两次读数的被测量真实值之差称为升降变差。例如测量电压时，被测电压由零平稳增加，使仪表指针指示5V时，被测电压真实值为4.9V，而被测电压由上限向零平稳减少，使仪表指针同样指示5V时，被测电压真实值为4.8V，则4.9V与4.8V之差称为升