



# 电工测量

# 1 电工仪表的类型、误差和准确度

- 电工仪表是实现电工测量过程所需技术工具的总称。
- 电工仪表的测量对象主要是电学量与磁学量。电学量又分为电量与电参量。
- 通常要求测量的电量有电流、电压、功率、电能、频率等；电参量有电阻、电容、电感等。
- 通常要求测量的磁学量有磁感应强度、磁导率等。

# 1 电工仪表的分类

- 按测量方法可分为比较式和直读式两类。比较式仪表需将被测量与标准量进行比较后才能得出被测量的数量，常用的比较式仪表有电桥、电位差计等。直读式仪表将被测量的数量由仪表指针在刻度盘上直接指示出来，常用的电流表、电压表等均属直读式仪表。直读式仪表测量过程简单，操作容易，但准确度不可能太高；比较式仪表的结构较复杂，造价较昂贵，测量过程也不如直读法简单，但测量的结果较直读式仪表准确。
- 按被测量的种类可分为电流表、电压表、功率表、频率表、相位表等。
- 按电流的种类可分为直流、交流和交直流两用仪表。
- 按工作原理可分为磁电式、电磁式、电动式仪表等。
- 按显示方法可分为指针式（模拟式）和数字式。指针式仪表用指针和刻度盘指示被测量的数值；数字式仪表先将被测量的模拟量转化为数字量，然后用数字显示被测量的数值。
- 按准确度可分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5和5.0共7个等级。

## 常用电工仪表的符号和意义

分类	符号	名称	被测量的种类
电流 种类	—	直流电表	直流电流、电压
	~	交流电表	交流电流、电压、功率
	~	交直流两用表	直流电量或交流电量
	≏ 或 3~	三相交流电表	三相交流电流、电压、功率
测量 对象	Ⓐ ⓂⒶ ⓂⒶ	安培表、毫安表、微安表	电流
	Ⓥ ⓀⓋ	伏特表、千伏表	电压
	Ⓦ ⓀⓌ	瓦特表、千瓦表	功率
	ⓀⓌ·h	千瓦时表	电能量
	φ	相位表	相位差
	f	频率表	频率
	Ω ⓂΩ	欧姆表、兆欧表	电阻、绝缘电阻

## 常用电工仪表的符号和意义

工作原理		磁电式仪表	电流、电压、电阻
		电磁式仪表	电流、电压
		电动式仪表	电流、电压、电功率、功率因数、电能量
		整流式仪表	电流、电压
		感应式仪表	电功率、电能量
准确度等级	1.0	1.0 级电表	以标尺量限的百分数表示
		1.5 级电表	以指示值的百分数表示
绝缘等级		绝缘强度试验电压	表示仪表绝缘经过 2kV 耐压试验
工作位置	→	仪表水平放置	
	↑	仪表垂直放置	
	∠60°	仪表倾斜 60° 放置	
端钮	+	正端钮	
	-	负端钮	
	± 或 	公共端钮	
	⊥ 或 	接地端钮	

## 2 电工仪表的误差和准确度

电工仪表的**准确度**是指测量结果（简称示值）与被测量真实值（简称真值）间相接近的程度，是测量结果准确程度的量度。

**误差**是指示值与真值的偏离程度。准确度与误差本身的含义是相反的，但两者又是紧密联系的，测量结果的准确度高，其误差就小，因此，在实际测量中往往采用误差的大小来表示准确度的高低。

由于制造工艺的限制及测量时外界环境因素和操作人员的因素，误差是不可避免的。根据引起误差的原因不同，仪表误差可分为基本误差和附加误差。**基本误差**是在规定的温度、湿度、频率、波形、放置方式以及无外界电磁场干扰等正常工作条件下，由于仪表本身的缺点所产生的误差。**附加误差**是由于外界因素的影响和仪表放置不符合规定等原因所产生的误差。附加误差有些可以消除或限制在一定范围内，而基本误差却不可避免。

# 误差的表示方法

(1) 绝对误差:

$$\Delta A = A_x - A_o$$

$A_x$ : 示值

$A_o$ : 真值

(2) 相对误差:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_o} \times 100\%$$

$A_m$ : 满标度值即量限

$\Delta A_m$ : 最大绝对误差

示值误差:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\%$$

示值误差用于误差很小或要求不高的场合。

(3) 引用误差:

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\%$$

直读仪表的准确度用最大引用误差来分级，分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5和5.0共7个等级。如准确度为2.5级的仪表，其最大引用误差为2.5%。

仪表的准确度:

$$K = \frac{\Delta A_m}{A_m} \times 100\%$$

最大相对误差:

$$\gamma_m = \frac{\Delta A_m}{A_x} = \frac{\Delta A_m}{A_x} \times \frac{A_m}{A_m} = \frac{\Delta A_m}{A_m} \times \frac{A_m}{A_x} = K \times \frac{A_m}{A_x}$$

**例如：**用一量程为150V的电压表在正常条件下测某电路的两点间电压 $U$ ，示值为100V，绝对误差为1V。这时 $U$ 的真值为 $100-1=99\text{V}$ ，相对误差 $r=1\%$ 。如果示值为10V，绝对误差为 $-0.8\text{V}$ 。则其真值为10.8V，相对误差8%。如果已知该电压表可能发生的最大绝对误差为1.5V，则仪表的最大引用误差为：

$$K = \frac{\Delta A_m}{A_m} \times 100\% = \frac{1.5}{150} \times 100\% = 1\%$$

所以该仪表的准确度等级为1.0级。

**注意：**被测量比仪表量程小得越多，测量结果可能出现的最大相对误差值也越大。例如用1.0级量程为150V的电压表测量30V的电压，可能出现的最大相对误差为5%，而改用1.0级量程为50V的电压表测量30V的电压，可能出现的最大相对误差为1.67%。所以选用仪表的量程时应使读数在2 / 3量程以上。



## 2 指针式仪表的结构及工作原理

电工测量中常用的指针式仪表有磁电式、电动式、电磁式3种。这些仪表的结构虽然不同，但工作原理却是相同的，都是利用电磁现象使仪表的可动部分受到电磁转矩的作用而转动，从而带动指针偏转来指示被测量的大小。

# 1 磁电式仪表

直流电流 $I$ 通过可动线圈时，线圈与磁场相互作用使线圈产生转动力矩，带动指针偏转。指针偏转后扭紧弹簧游丝，使游丝产生反抗力矩。当反抗力矩和转动力矩相平衡时，线圈和指针便停止偏转。由于在线圈转动的范围内磁场均匀分布，因此线圈的转动力矩与电流的大小成正比。又由于游丝的反抗力矩与线圈的偏转角度成正比，所以仪表指针的偏转角度与流过线圈的电流的大小成正比，即： $\alpha=KI$ 。可见磁电式仪表标尺上的刻度是均匀的。

磁电式仪表的**优点**：刻度均匀、灵敏度高、准确度高、消耗功率小、受外界磁场影响小等。

磁电式仪表的**缺点**：结构复杂、造价较高、过载能力小，而且只能测量直流，不能测量交流。

**使用注意事项**：电表接入电路时要注意**注意极性**，否则指针反打会损坏电表。通常磁电式仪表的接线柱旁均标有+、-记号，以防接错。

## 2 电磁式仪表

线圈通入电流时产生磁场，使其内部的固定铁片和可动铁片同时被磁化。由于两铁片同一端的极性相同，因此两者相斥，致使可动铁片受到转动力矩的作用，从而通过转轴带动指针偏转。当转动力矩与游丝的反抗力矩相平衡时，指针便停止偏转。

由于作用在铁心上的电磁力与空气隙中磁感应强度的平方成正比，磁感应强度又与线圈电流成正比，因此仪表的转动力矩与电流的平方成正比。又由于游丝的反抗力矩与线圈的偏转角度成正比，所以仪表指针的偏转角度与线圈电流的平方成正比，即： $\alpha = KI^2$ 。可见电磁式仪表标尺上的刻度是不均匀的。

推斥型电磁式仪表也可以测量交流，当线圈中电流方向改变时，它所产生磁场的方向随之改变，因此动、静铁片磁化的极性也发生变化，两铁片仍然相互排斥，转动力矩方向不变，其平均转矩与交流电流有效值的平方成正比。

### 3 电动式仪表

固定线圈中通入直流电流 $I_1$ 时产生磁场，磁感应强度 $B_1$ 正比于 $I_1$ 。如果可动线圈通入直流电流 $I_2$ ，则可动线圈在此磁场中就要受到电磁力的作用而带动指针偏转，电磁力 $F$ 的大小与磁感应强度 $B_1$ 和电流 $I_2$ 成正比。直到转动力矩与游丝的反抗力矩相平衡时，才停止偏转。仪表指针的偏转角度与两线圈电流的乘积成正比，即： $\alpha = KI_1I_2$ 。

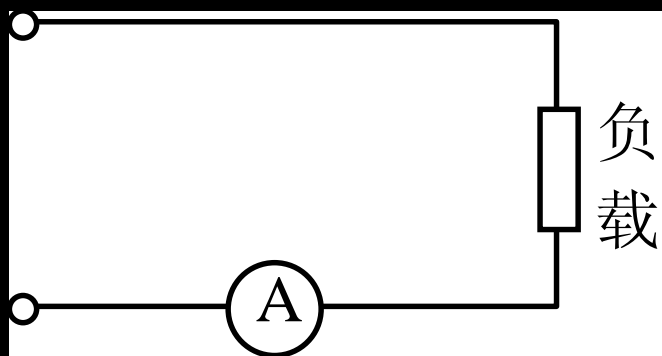
对于线圈通入交流电的情况，由于两线圈中电流的方向均改变，因此产生的电磁力方向不变，这样可动线圈所受到转动力矩的方向就不会改变。设两线圈的电流分别为 $i_1$ 和 $i_2$ ，则转动力矩的瞬时值与两个电流瞬时值的乘积成正比。而仪表可动部分的偏转程度取决于转动力矩的平均值，由于转动力矩的平均值不仅与 $i_1$ 及 $i_2$ 的有效值成正比，而且还与 $i_1$ 和 $i_2$ 相位差的余弦成正比，因此电动式仪表用于交流时，指针的偏转角与两个电流的有效值及两电流相位差的余弦成正比。即：

$$\alpha = KI_1I_2\cos\varphi。$$

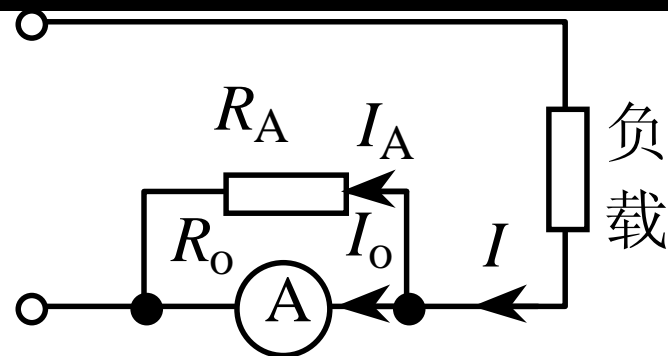
# 3 电流、电压、功率及电能的测量

## 1 电流的测量

测量直流电流通常采用磁电式电流表，测量交流电流主要采用电磁式电流表。电流表必须与被测电路串联，否则将会烧毁电表。此外，测量直流电流时还要注意仪表的极性。



(a) 直接测量电流

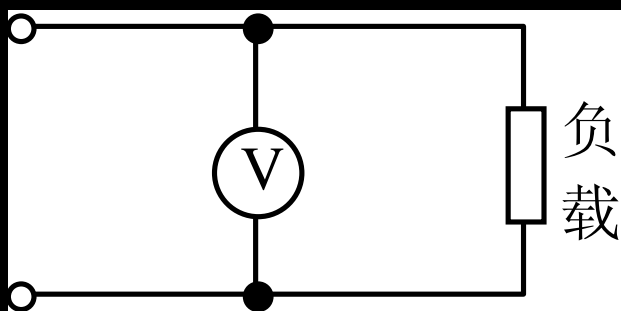


(b) 电流表量程的扩大

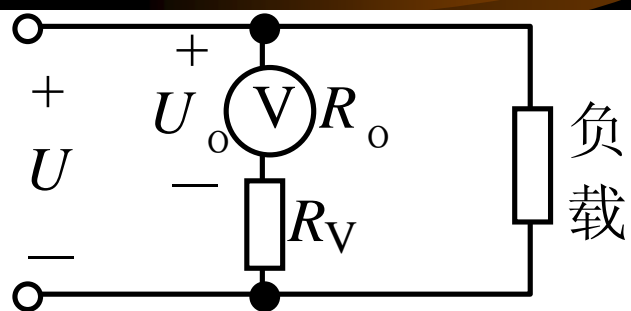
扩大量程的方法是在表头上并联一个称为分流器的低值电阻  $R_A$ ，分流器的阻值为： $R_A = R_0 / (n - 1)$ 。式中  $R_0$  为表头内阻， $n = I / I_0$  为分流系数，其中  $I_0$  为表头的量程， $I$  为扩大后的量程。

## 2 电压的测量

测量直流电压通常采用磁电式电压表，测量交流电压主要采用电磁式电压表。电压表必须与被测电路并联，否则将会烧毁电表。此外，测量直流电压时还要注意仪表的极性。



(a) 直接测量电压



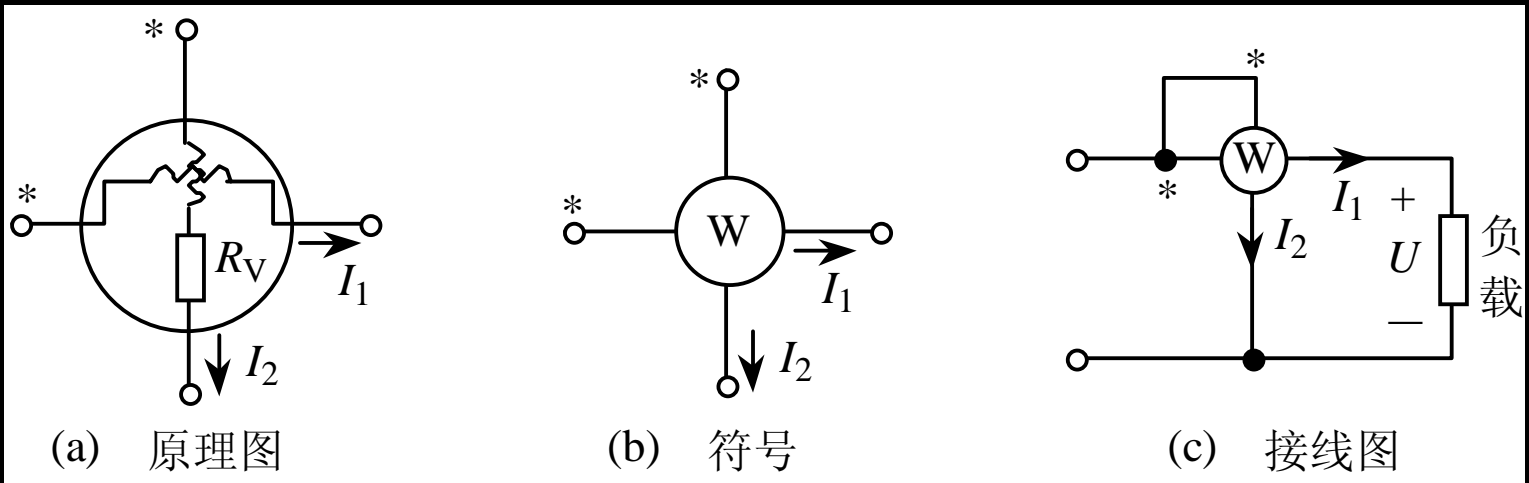
(b) 电压表量程的扩大

扩大量程的方法是在表头上串联一个称为倍压器的高值电阻 $R_V$ ，倍压器的阻值为： $R_V=(m-1)R_0$ 。式中 $R_0$ 为表头内阻， $m=U/U_0$ 为倍压系数，其中 $U_0$ 为表头的量程， $U$ 为扩大后的量程。

# 3 功率的测量

测量功率时采用电动式仪表。测量时将仪表的固定线圈与负载串联，反映负载中的电流，因而固定线圈又叫电流线圈；将可动线圈与负载并联，反映负载两端电压，所以可动线圈又叫电压线圈。

## 1. 直流和单相交流功率的测量



分格常  
数:

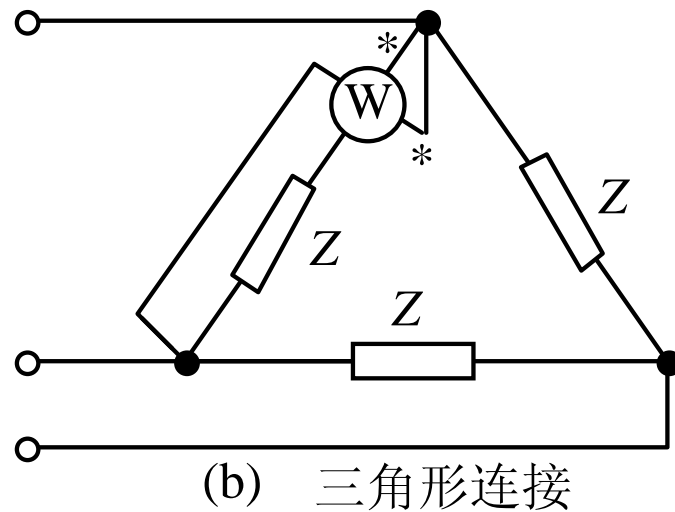
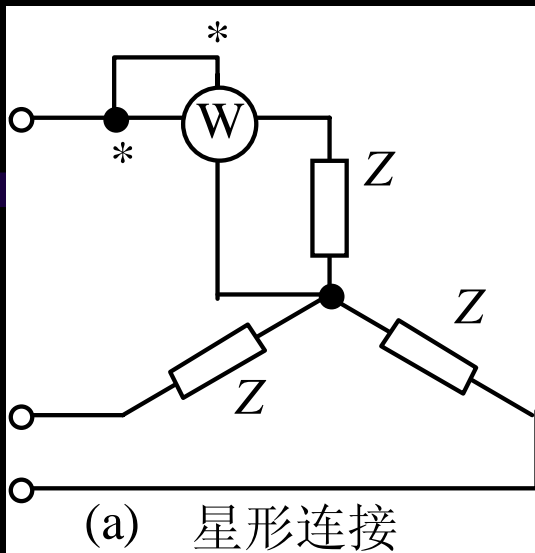
$$C = \frac{U_N I_N}{a_m} \text{ (W/div)}$$

被测功  
率:

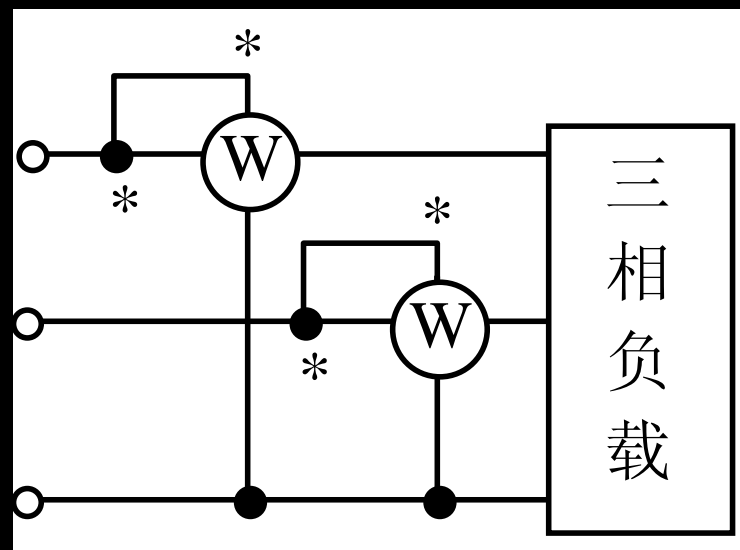
$$P = Ca$$

## 2. 三相功率的测量

**一表法：** 用一个单相功率表测得一相功率，然后乘以3即得三相负载的总功率。

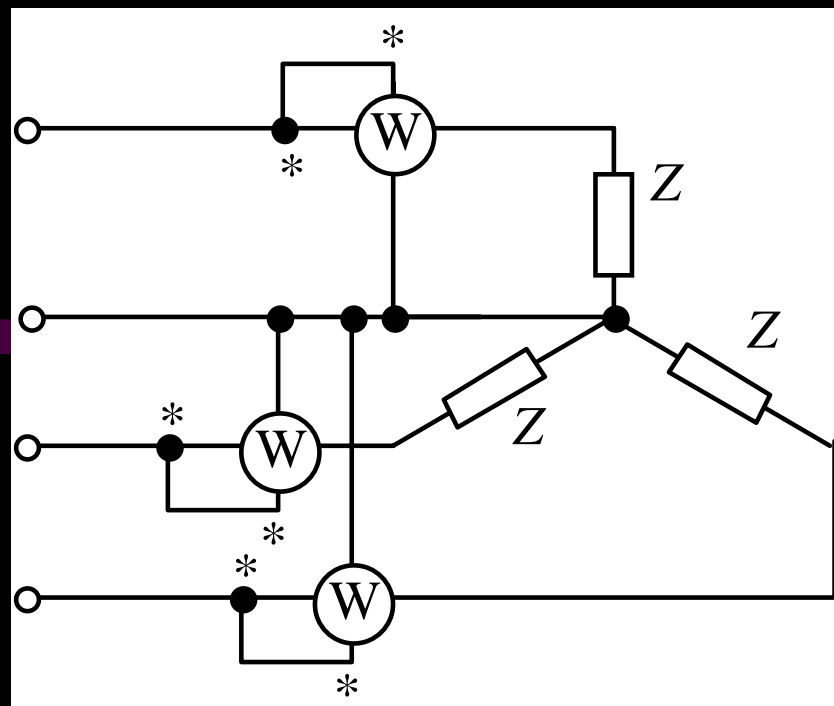


**二表法：** 用两只单相功率表来测量三相功率，三相总功率为两个功率表的读数之和。若负载功率因数小于0.5，则其中一个功率表的读数为负，会使这个功率表的指针反转。为了避免指针反转，需将其电压线圈或电流线圈反接，这时三相总功率为两个功率表的读数之差。

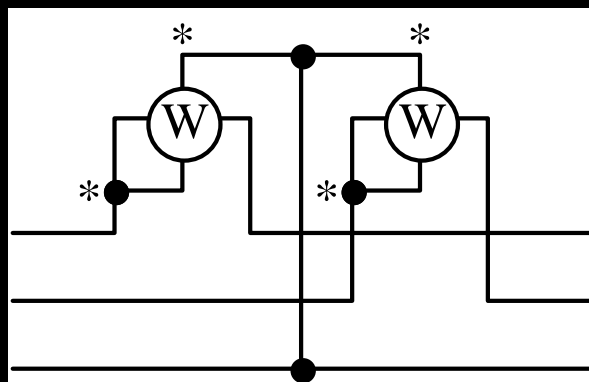




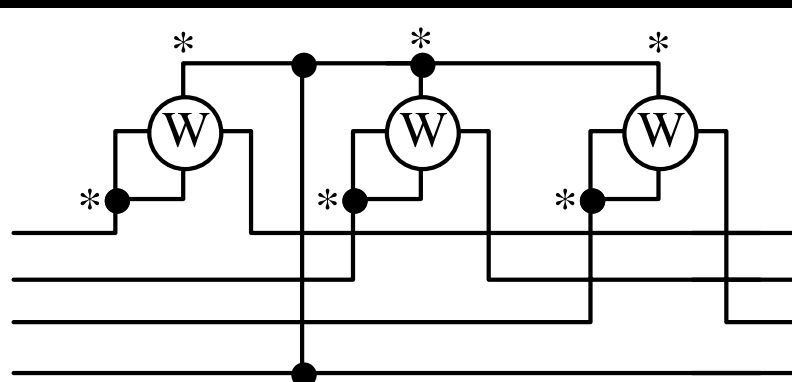
**三表法：**用3只单相功率表来测量三相功率，三相总功率为3个功率表的读数之和。



用二元功率表和三元功率表测量三相总功率，三相总功率均可直接从表上读出。



(a) 二元功率表



(b) 三元功率表

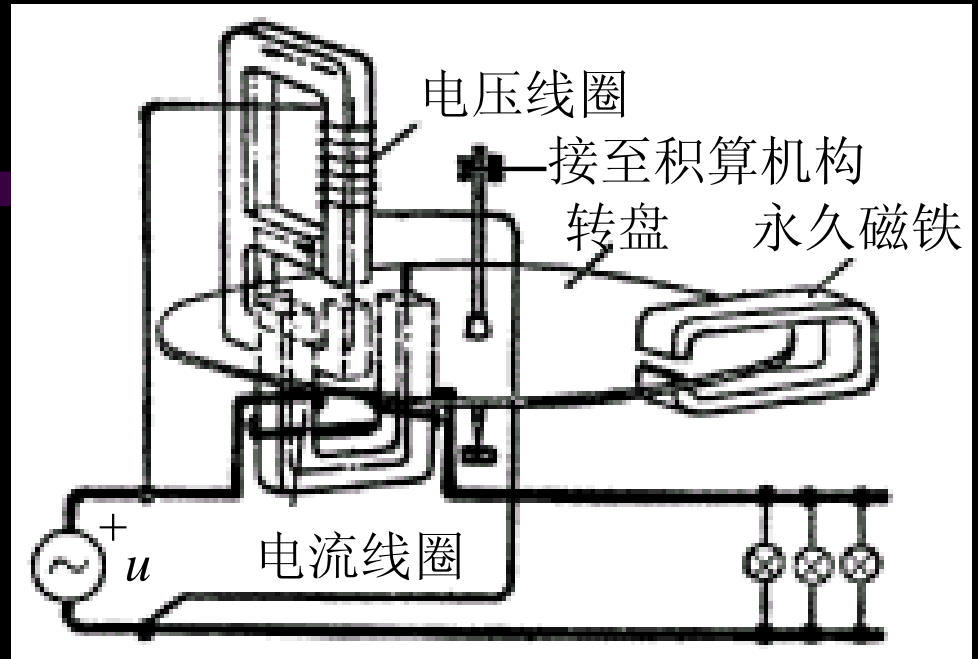
## 4 电能的测量

驱动机构用来产生转动力矩，包括电压线圈、电流线圈和铝制转盘。当电压线圈和电流线圈通过交流电流时，就有交变的磁通穿过转盘，在转盘上感应出涡流，涡流与交变磁通相互作用产生转动力矩，从而使转盘转动。

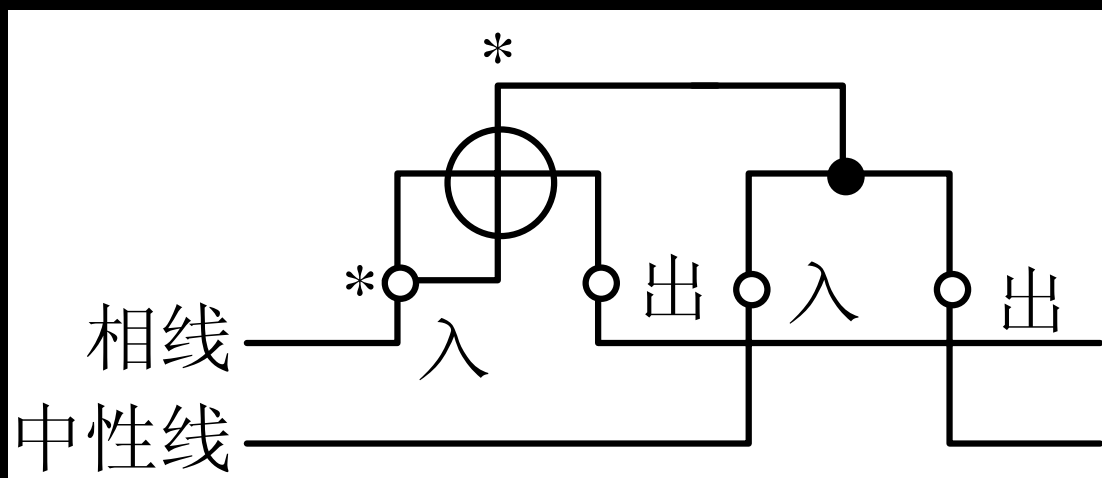
制动机构用来产生制动力矩，由永久磁铁和转盘组成。转盘转动后，涡流与永久磁铁的磁场相互作用，使转盘受到一个反方向的磁场力，从而产生制动力矩，致使转盘以某一转速旋转，其转速与负载功率的大小成正比。

积算机构用来计算电度表转盘的转数，以实现电能的测量和计算。转盘转动时，通过蜗杆及齿轮等传动机构带动字轮转动，从而直接显示出电能的度数。

电度表



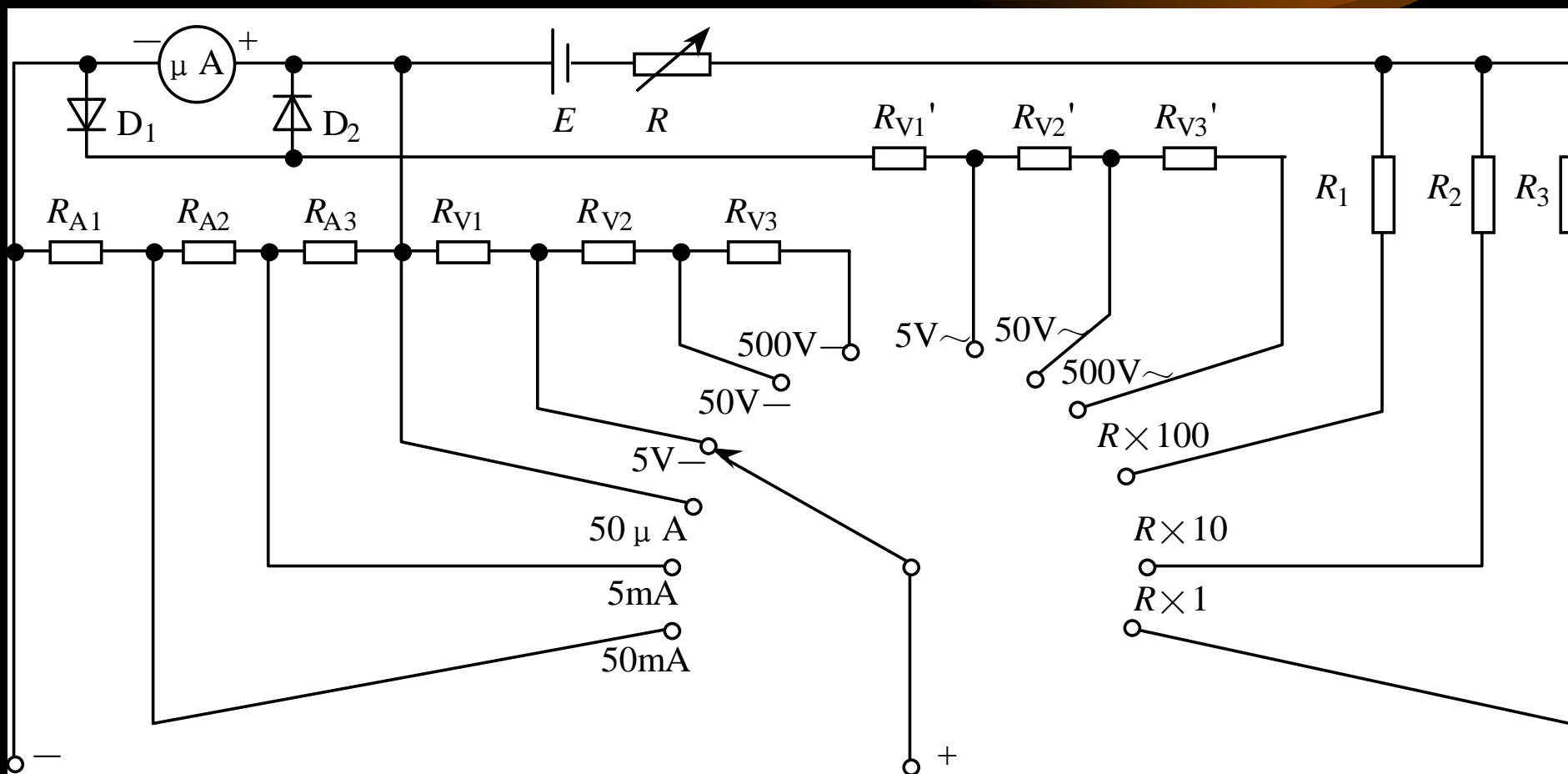
单相电度表接线时，电流线圈与负载串联，电压线圈与负载并联。单相电度表共有四根连接导线，两根输入，两根输出。电流线圈及电压线圈的电源端应接在相（火）线上，并靠电源侧。



# 4 电阻的测量

## 1 万用表

### 1、磁电式万用表



(1) 直流电流的测量。转换开关置于直流电流档，被测电流从+、-两端接入，便构成直流电流测量电路。图中 $R_{A1}$ 、 $R_{A2}$ 、 $R_{A3}$ 是分流器电阻，与表头构成闭合电路。通过改变转换开关的档位来改变分流器电阻，从而达到改变电流量程的目的。

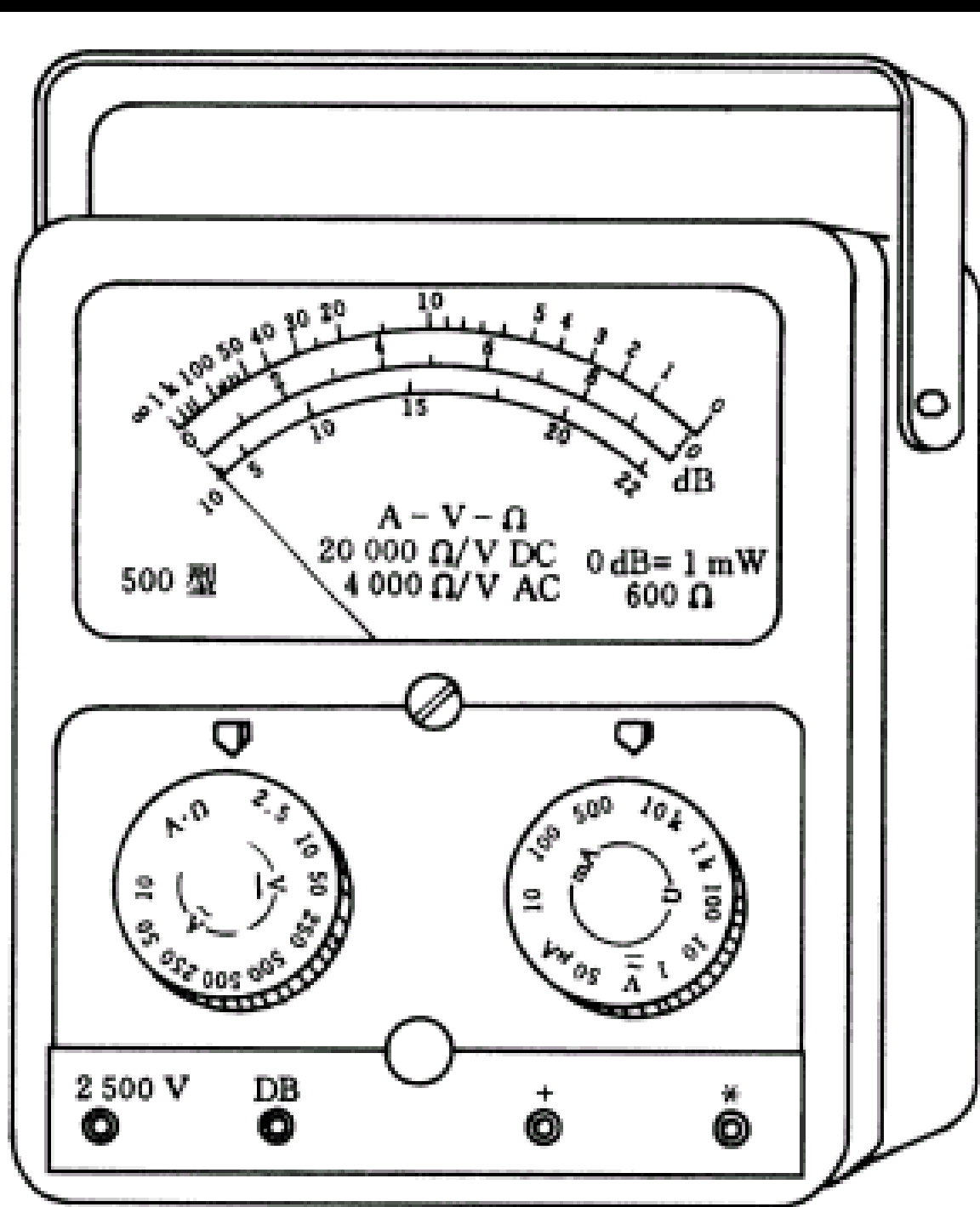
(2) 直流电压的测量。转换开关置于直流电压档，被测电压接在+、-两端，便构成直流电压的测量电路。图中 $R_{V1}$ 、 $R_{V2}$ 、 $R_{V3}$ 是倍压器电阻，与表头构成闭合电路。通过改变转换开关的档位来改变倍压器电阻，从而达到改变电压量程的目的。

(3) 交流电压的测量。转换开关置于交流电压档，被测交流电压接在+、-两端，便构成交流电压测量电路。测量交流时必须加整流器，二极管 $D_1$ 和 $D_2$ 组成半波整流电路，表盘刻度反映的是交流电压的有效值。 $R_{V1}'$ 、 $R_{V2}'$ 、 $R_{V3}'$ 是倍压器电阻，电压量程的改变与测量直流电压时相同。

(4) 电阻的测量。转换开关置于电阻档，被测电阻接在+、-两端，便构成电阻测量电路。电阻自身不带电源，因此接入电池 $E$ 。电阻的刻度与电流、电压的刻度方向相反，且标度尺的分度是不均匀的。

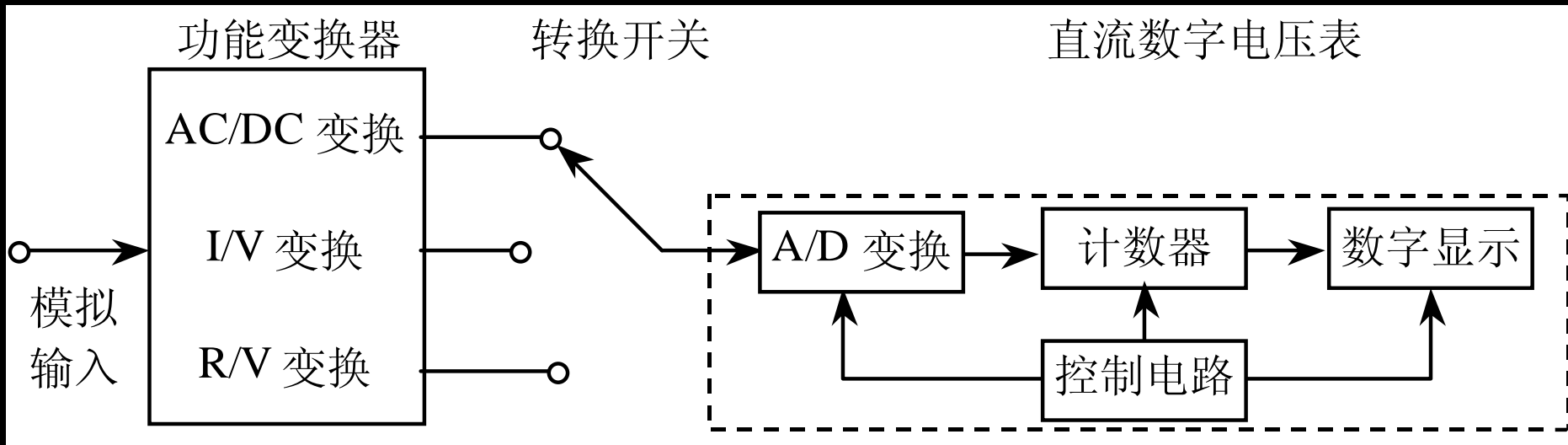
## 500型万用表

有两个“功能/量程”转换旋钮，每个旋钮上方有一个尖形标志。利用两个旋钮不同位置的组合，可以实现交、直流电流、电压、电阻及音频电平的测量。如测量直流电流，先转动左边的旋钮，使“A”档对准尖形标志，再将右边旋钮转至所需直流电流量程即可进行测量。使用前注意先调节调零旋钮，使指针准确指示在标尺的零位置。

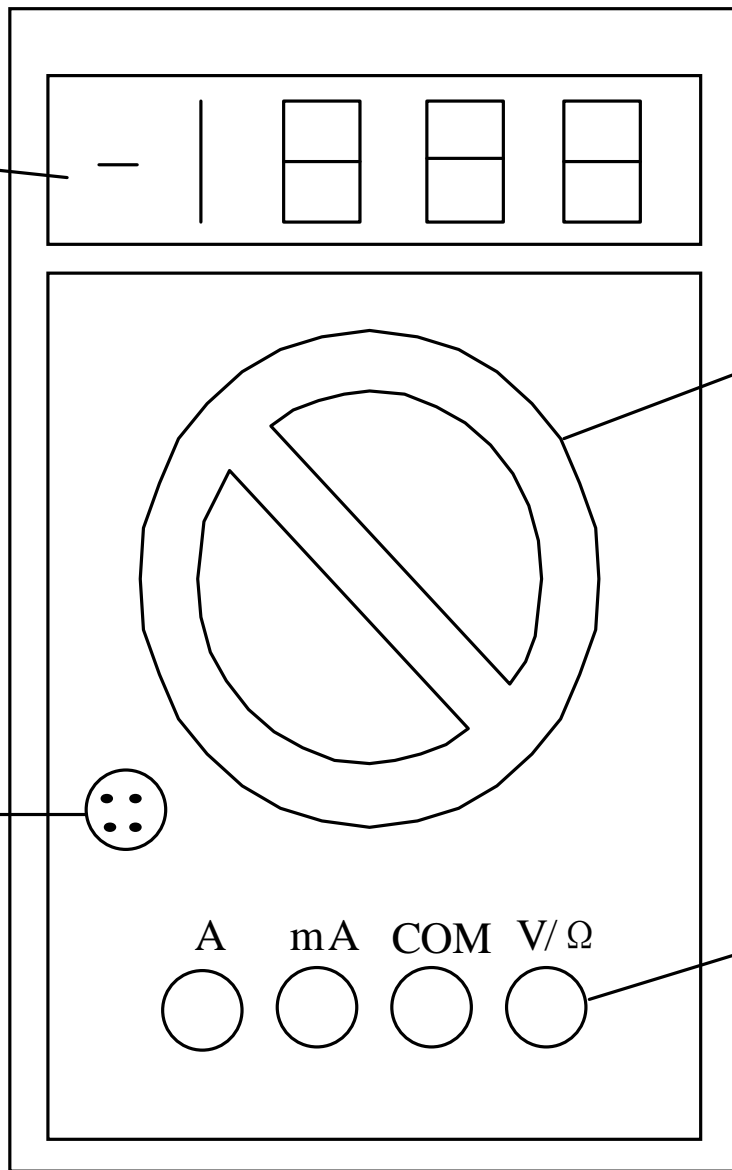


## 2、数字式万用表

数字式万用表由功能变换器、转换开关和直流数字电压表3部分组成，其原理框图如图所示。直流数字电压表是数字式万用表的核心部分，各种电量或参数的测量，都是首先经过相应的变换器，将其转化为直流数字电压表可以接受的直流电压，然后送入直流数字电压表，经模 / 数转换器变换为数字量，再经计数器计数并以十进制数字将被测量显示出来。



液晶显示器





$\beta$  插座

功能和量程  
选择开关

输入端插孔

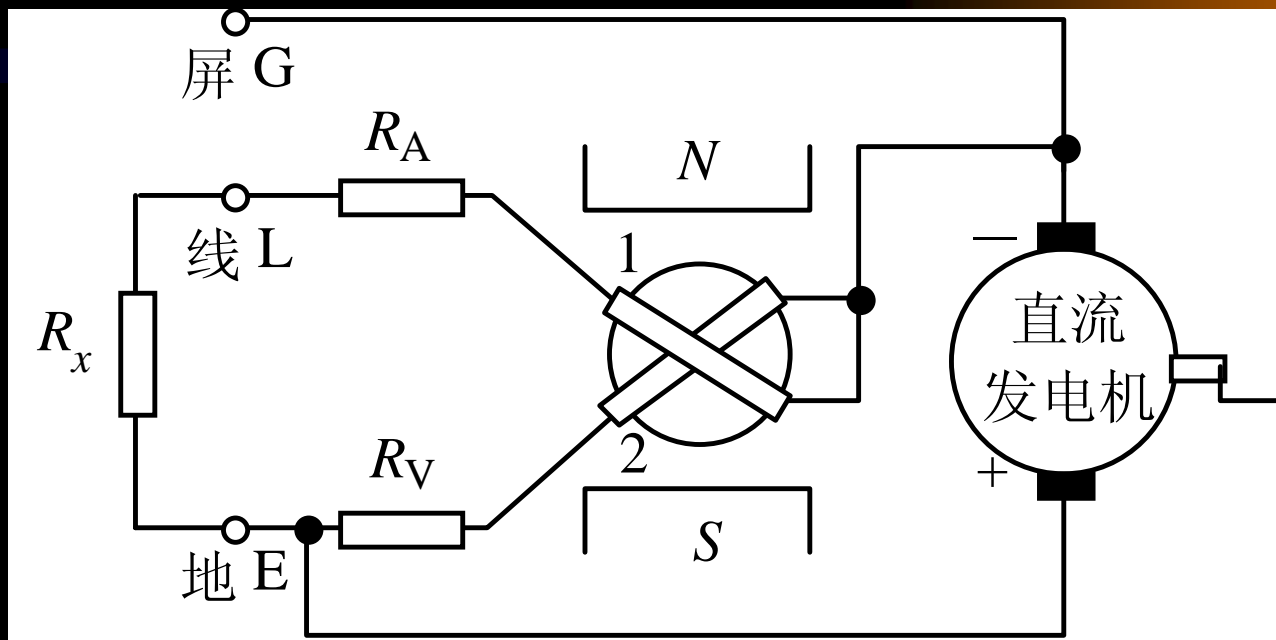


(1) 输入端插孔：黑表笔总是插“COM”插孔，测量交直流电压、电阻、二极管及通断检测时，红表笔插“V/ $\Omega$ ”插孔，测量 200mA 以下交直流电流时，红表笔插“mA”插孔，测量 200mA 以上交直流电流时，红表笔插“A”插孔

(2) 功能和量程选择开关：交、直流电压档的量程为 200mV、2V、20V、200V、1000V，共 5 档。交、直流电流档的量程为 200  $\mu$  A、2mA、20mA、200mA、10A，共 5 档。电阻挡的量程为 200  $\Omega$ 、2k  $\Omega$ 、20k  $\Omega$ 、200k  $\Omega$ 、2M  $\Omega$ 、20M  $\Omega$ 、200，共 7 档，其中 200 档用于判断电路的通、断。

(3)  $\beta$  插座：测量三极管的  $\beta$  值，注意区别管型是 NPN 还是 PNP。

## 2 兆欧表



兆欧表俗称摇表，是测量绝缘体电阻的专用仪表，主要由磁电式流比计与手摇直流发电机组成。

流比计是用电磁力代替游丝产生反作用力矩的仪表。它与一般磁电式仪表不同，除了不用游丝产生反作用力矩外，还有两个区别：一是空气隙中的磁感应强度不均匀；二是可动部分有两个绕向相反且互成一定角度的线圈，线圈1用于产生转动力矩，线圈2用于产生反作用力力矩。

被测电阻接在L（线）和E（地）两个端子上，形成了两个回路，一个是电流回路，一个是电压回路。电流回路从电源正端经被测电阻 $R_x$ 、限流电阻 $R_A$ 、可动线圈1回到电源负端。电压回路从电源正端经限流电阻 $R_V$ 、可动线圈2回到电源负端。由于空气隙中的磁感应强度不均匀，因此两个线圈产生的转矩 $T_1$ 和 $T_2$ 不仅与流过线圈的电流 $I_1$ 、 $I_2$ 有关，还与可动部分的偏转角 $\alpha$ 有关。当 $T_1=T_2$ ，可动部分处于平衡状态，其偏转角 $\alpha$ 是两个线圈电流 $I_1$ 、 $I_2$ 比值的函数（故称为流比计），即：

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

因为限流电阻 $R_A$ 、 $R_V$ 为固定值，在发电机电压不变时，电压回路的电流 $I_2$ 为常数，电流回路电流 $I_1$ 的大小与被测电阻 $R_x$ 的大小成反比，所以流比计指针的偏转角 $\alpha$ 能直接反映被测电阻 $R_x$ 的大小。

流比计指针的偏转角与电源电压的变化无关，电源电压 $U$ 的波动对转动力矩和反作用力矩的干扰是相同的，因此流比计的准确度与电压无关。但测量绝缘电阻时，绝缘电阻值与所承受的电压有关。摇手摇发电机时，摇的速度须按规定，而且要摇够一定的时间。常用的兆欧表的手摇发电机的电压在规定的转速下有500V和1000V两种，可根据需要选用。因电压很高，测量时应注意安全。

兆欧表的接线端钮有3个，分别标有“G（屏）”、“L（线）”、“E（地）”。被测的电阻接在L和E之间，G端的作用是为了消除表壳表面L、E两端间的漏电和被测绝缘物表面漏电的影响。在进行一般测量时，把被测绝缘物接在L、E之间即可。但测量表面不干净或潮湿的对象时，为了准确地测出绝缘材料内部的绝缘电阻，就必须使用G端，图示为测量电缆绝缘电阻的接线图。

