



第二章 电工测量



第一节 电工测量的基本知识

电工测量就是将被测的电量或电参数与同类标准量进行比较，从而确定出被测量大小的过程。

一、电工仪表的分类

电工仪表的种类很多，按结构和用途的不同，主要分为三类。

1. 指示仪表

(1) 按仪表的工作原理分，有磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表和、感应系式仪表。此外还有铁磁电动系仪表、整流系仪表、静电系仪表等。

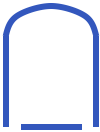
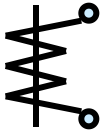
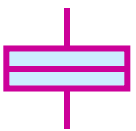
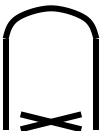
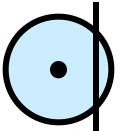
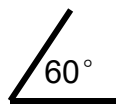
(2) 按使用方法分为安装式和可携式两种。

(3) 按测量对象的名称分，有电流表、电压表、功率表、电能表、功率因数表、频率表以及多种测量用途的万用表等。

(4) 按准确度等级分类有：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等七个等级



二、电工仪表的常用符号

符号	符号内容	符号	符号内容
	磁电式仪表		精度等级1.5级
	电磁式仪表		外磁场防护等级3级
	电动式仪表		耐压试验2KV
	整流磁电式仪表		水平放置使用
	磁电比率式仪表		垂直安装使用
	感应式仪表		倾斜60°安装使用



三、常用电工仪表简介

1. 磁电系仪表

(1) 磁电系测量机构的结构 (见图a)

1—永久磁铁, 2—极掌, 3—铁芯, 4—线圈, 5—游丝, 6—指针, 7—平衡锤, 8—转轴

(2) 磁电系仪表的工作原理

a. 转动转矩 T 的产生 (见图b和图c)

线圈通入电流 $I \rightarrow$ 电磁力 $F \rightarrow$ 线圈受到转矩 $T \rightarrow$ 线圈和指针转动,
线圈受到的转矩 $T = k_1 I$

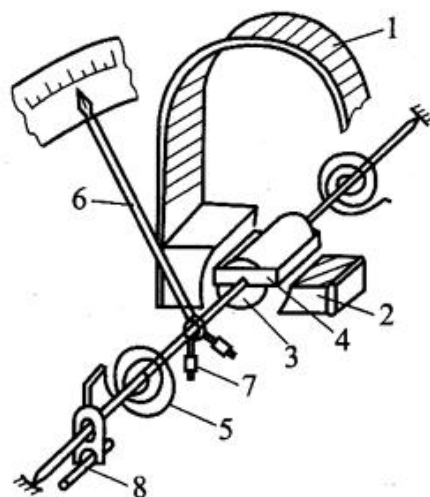
b. 阻转矩 T_c 的产生

在线圈和指针转动时, 螺旋弹簧被扭紧而产生阻转矩 T_c , 弹簧的 T_c 与指针的偏转角 α 成正比, 即 $T_c = k_2 \alpha$
当弹簧的阻转矩 T 与线圈受到的转矩 T_c 达到平衡时, 可动部分停止转动, 此时有 $T = T_c$ 。

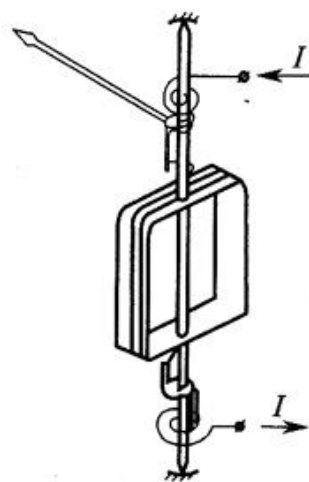
当弹簧阻转矩与转动转矩达到平衡即 $T_c = T$ 时, 可转动部分便停止转动, 即 $T = k_1 I$, $T_c = k_2 \alpha$ 。

即指针的偏转角

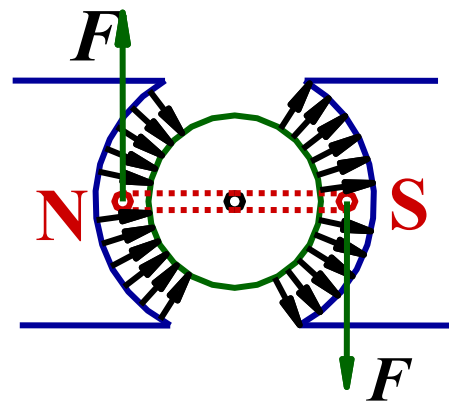
$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} I = k I$$



(a) 测量机构



(b) 电流途径



(c) 磁电系仪表原理图

结论： 指针偏转的角度与流经线圈的电流成正比。

c. 阻尼作用的产生

当线圈通入电流而发生偏转时，铝框切割磁通，在框内感应出电流，其电流再与磁场作用，产生与转动方向相反的制动力，于是可转动部分受到阻尼作用，快速停止在平衡位置。

通过上述分析，可知磁电式仪表刻度均匀；灵敏度和准确度高；阻尼强；消耗电能小；受外界磁场影响小。但磁电式仪表只能测量直流；价格较高；不能承受较大过载。

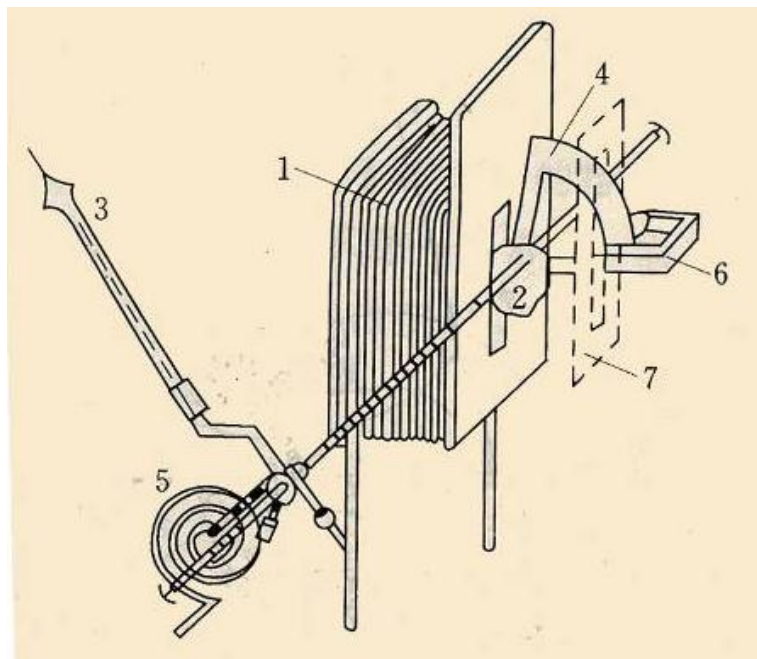
2. 电磁系仪表

目前安装式交流电流表、电压表大部分都采用电磁系测量机构。根据其结构型式不同，可分为吸引型和排斥型两类。

(1) 吸引型电磁系仪表

① 工作结构 (见右图所示)

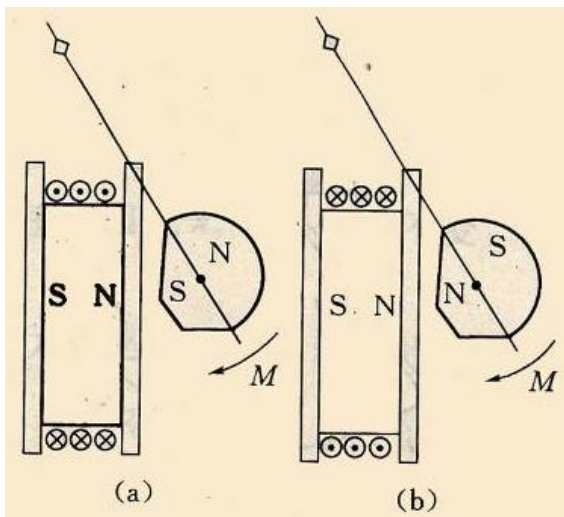
吸引型电磁系仪表主要由以下几部分组成：固定线圈 1 和偏心装在转轴的可动铁芯 2、转轴上还装有指针 3、阻尼翼片 4、游丝 5。



吸引型电磁系仪表结构

② 工作原理 (左图所示)

当线圈通有电流时，产生磁场，偏心铁片被磁化，而与固定线圈互相吸引，产生偏心力矩，而带动指针偏转。在线圈通有交流电流的情况下，由于两铁片的极性同时改变，所以仍然产生排斥力。



吸引型电磁系仪表原理

(2) 排斥型电磁系仪表

①工作结构（见右图所示）

主要部分是固定的圆形线圈、线圈内部有固定的铁片、固定在转轴上的可动铁片。

②工作原理

线圈通入电流 $I \rightarrow$ 磁场 $\rightarrow$ 固定和可动铁片均被磁化（同一端的极性是相同的） $\rightarrow$ 可动片因受斥力而带动指针转动。

仪表产生的转动转矩 $T=k_1 I^2$ ，弹簧的阻转矩 T_c 与指针的偏转角 α 成正比，即 $T_c=k_2 \alpha$ ，当 $T=T_c$ 时，可动部分停止转动。由此可推导出指针的偏转角

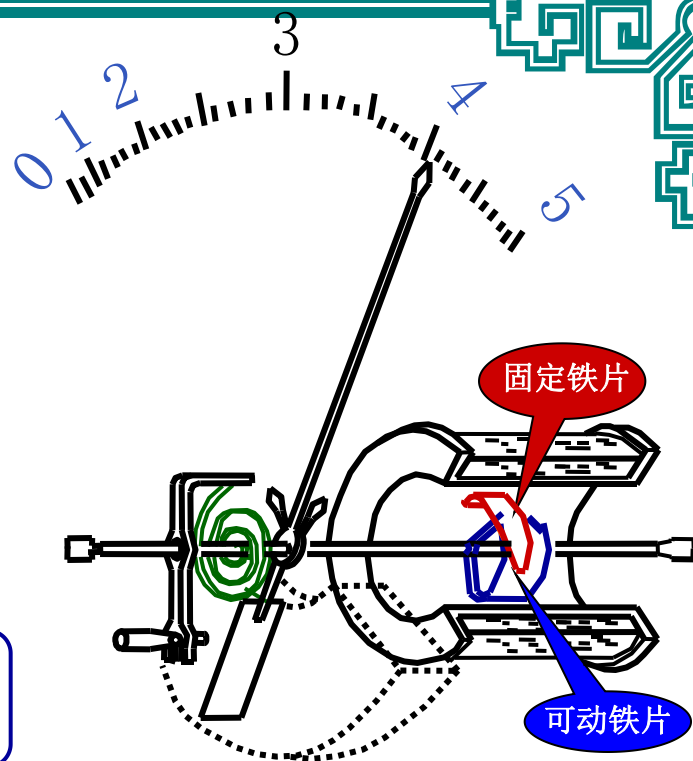
$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} I^2 = k I^2$$

交流为有效值

结论：指针偏转的角度与直流电流或交流电流有效值的平方成正比。

因指针的偏转角度与直流电流或交流有效值平方成正比，所以仪表标度尺上的刻度是不均匀的。

电磁系仪表构造简单；价格低廉，可用于交直流，能测量较大的电流，允许较大的过载。但由于刻度不均匀；易受外界磁场及铁片中磁滞和涡流（测量交流时）的影响，因此准确度不高。



排斥型电磁系仪表

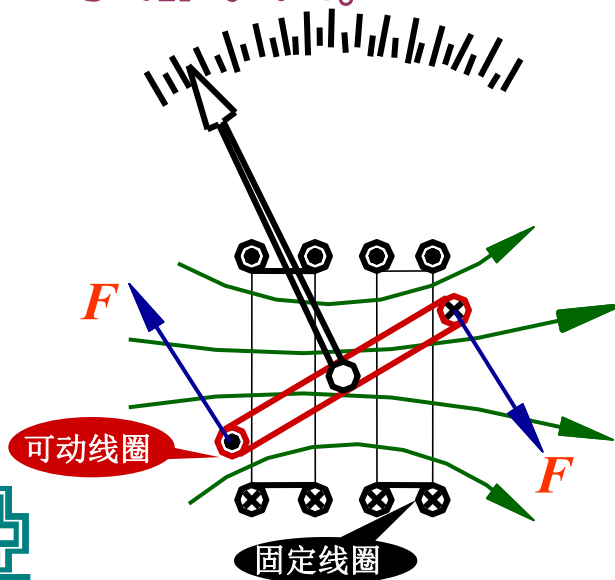
3. 电动系仪表

(1) 电动系仪表的结构 (如左图所示)

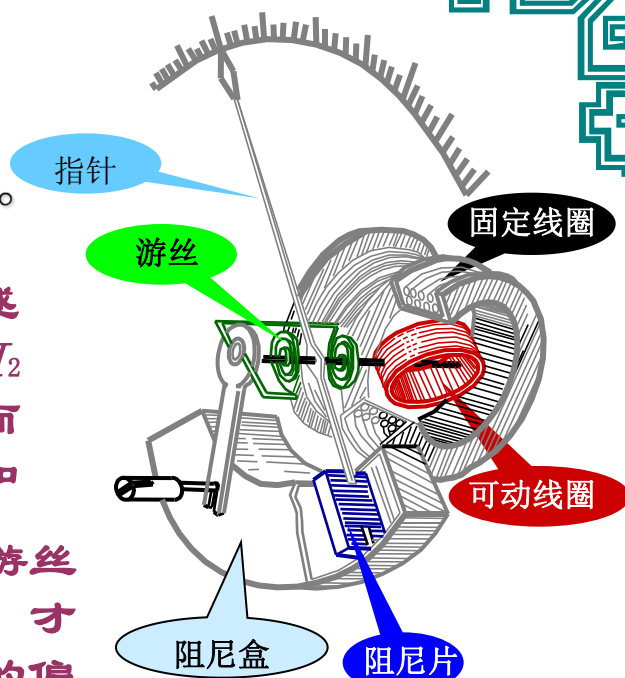
主要由固定线圈和可动线圈及其它部件组成。
可动线圈与指针及空气阻尼器的活塞都固定在轴上。

(2) 电动系测量机构工作原理 (见下图)

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。



电动系仪表原理



电动系仪表结构

直到转动力矩与游丝的反动力矩相平衡时，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： $\alpha = KI_1 I_2$ 。

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。

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： $\alpha = KI_1 I_2 \cos\varphi$ 。

电动系仪表适用于测量交直流电压、电流及功率，准确度较高；但受外界磁场影响大；不能承受较大过载。

4. 感应系仪表

感应系仪表主要用于做成电能表测量交流电能。

(1) 感应系电能表的结构

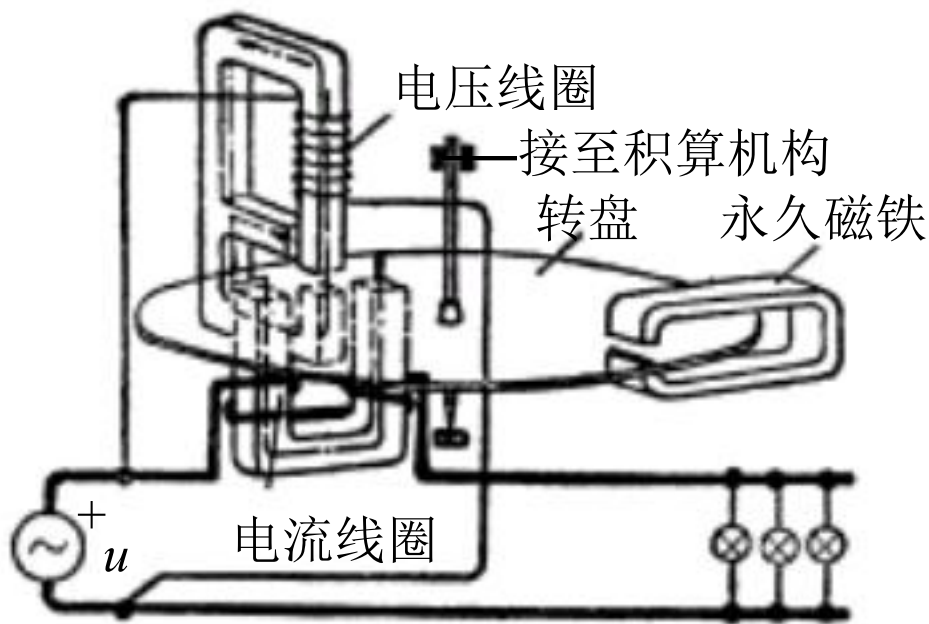
感应系电能表主要由驱动元件、转动元件、计算铝盘转数的计度器及产生制动力矩的制动元件等组成。

(2) 感应系电能表工作原理

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。



感应系仪表的结构

第二节 电流与电压的测量

一、电流的测量

1. 仪表型式和量程的选择

(1) 测量直流时，可使用磁电式、电磁式或电动式仪表，由于磁电式的灵敏度和准确度最高，所以使用最为普遍。

(2) 测量交流时，可使用电磁式、电动式或感应式等仪表，其中电磁式应用较多。

(3) 要根据待测电流的大小来选择适当的仪表，使被测的电流处于该电表的量程之内，在测量之前，要对被测电流的大小有个估计，或先使用较大量程的电流表来试测，然后，再换用一个适当量程的仪表。

2. 测量电流的接线

(1) 直流电流的测量

测量直流电流时，要注意仪表的极性和量程（如右图1）。

在用带有分流器（ R_A ）的仪表测量时（如右图2），应将分流器的电流端钮（外侧二个端钮）

接入电路中，电流表应接在分流器的电位端钮上。

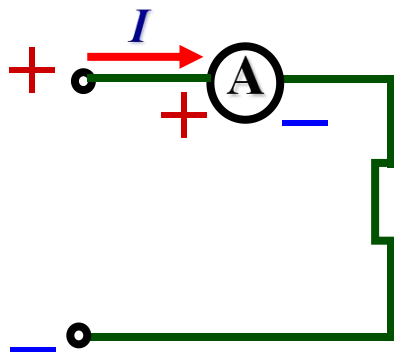


图1 直流电流表的接线

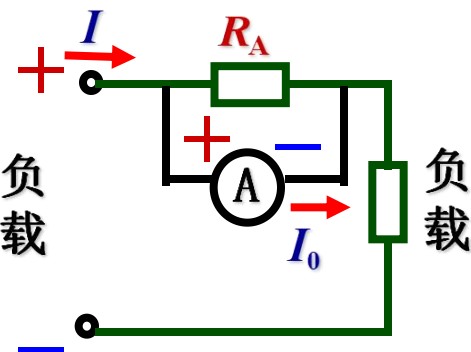


图2 带有分流器的接线

注意：在测量较高电压电路的电流时，电流表应串联在被测电路中的低电位端，以利于操作人员的安全。

(2) 交流电流的测量

测量单相交流电的接线如图3所示。在测量大容量的交流电时，常借助于电流互感器来扩大电表的量程，其接线方式如图4所示。电流表的内阻越小，测出的结果越准确

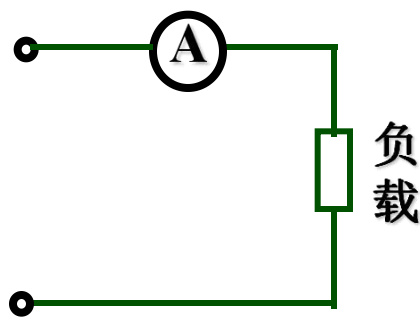


图3 交流电流表的接线

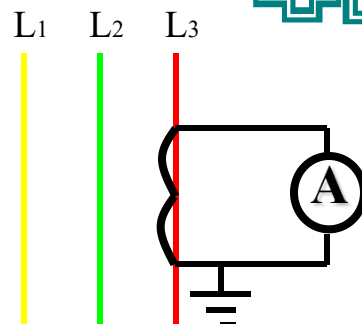


图4 交流电流表的接线

二、电压的测量

1. 电压表型式和量程的选择

和电流表在结构上基本上是一样的，只是仪表的附加装置和在电路中的接法有所不同。电压表的选择方式与电流表的选择方式相同，工厂内低压配电装置的电压一般为380 / 220V，所以，在进行测量时，应使用量程大于450V的仪表，如不当心，选用量程低于被测电压的仪表，就可能使仪表损坏。

2. 接线方式

测量电路的电压时，应将电压表并联在被测电压的两端，如图5所示。使用磁电式仪表测量直流电压时，还要注意仪表接线钮上的“+”“-”极性标记，不可接错。

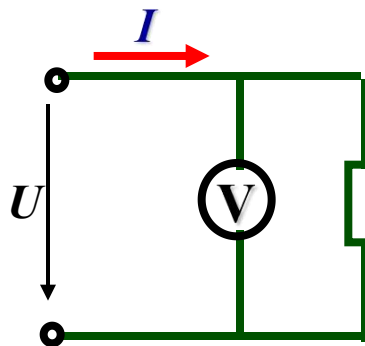


图5 电压表的接线

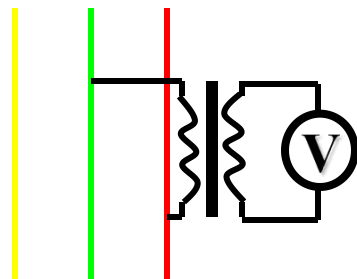


图6 交流电压表的接线

为安全起见，600V以上的交流电压，一般不直接接入电压表。工厂中变压系统的电压，均要通过电压互感器，将二次侧的电压变换到100V，再进行测量。其接线法如图6。电压表的内阻越大，所产生的误差越小，准确度越高。

第三节 钳形电流表

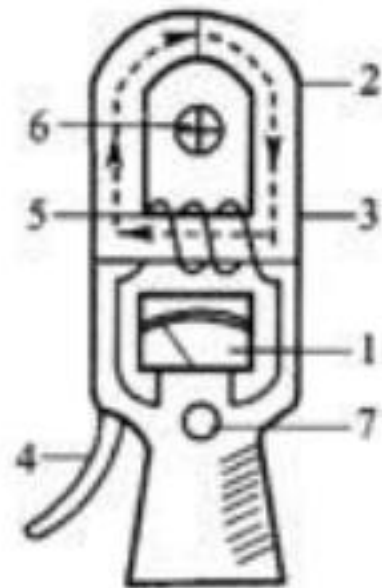
通常在测量电流时，需将被测电路断开，才能使电流表或互感器的一次侧串联到电路中去。而钳形电流表的最大优点是能在不停电的情况下测量电流，而且携带方便。

一、构造与原理

1. 互感器式钳形电流表（参见右图）

互感器钳形电流表由电流互感器和整流系电流表组成，包括1—电流表、2—电流互感器、3—铁芯、4—把手、5—二次绕组和6—被测导线等几个部分。

当握紧钳形电流表的把手时，其铁芯张开，将被测电流的导线放入钳口中，松开把手后铁芯闭合，通有被测电流的导线就成为电流互感器的原边，于是在副边就会产生感生电流，并送入整流系电流表进行测量。电流表的标度尺是按原边电流刻度的，所以仪表的读数就是被测导线中的电流值。



互感器式钳形电流表

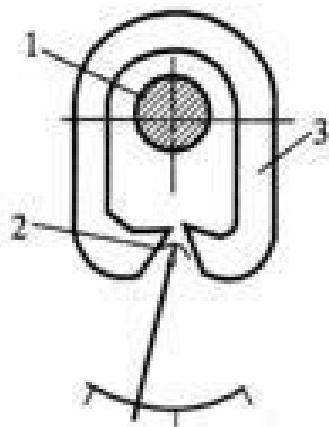
注意：互感器式钳形电流表只能测量交流电。

2. 电磁系钳形电流表

主要由电磁系测量机构组成（如右图），

1—被测电流导线、2—动铁片、3—磁路系统等几部分。处在铁芯钳口中的导线相当于电磁系测量机构中的线圈，当被测电流通过导线时，在铁芯中产生磁场，使可动铁片磁化，产生电磁推力带动指针偏转，指示出被测电流的大小。

注意：由于电磁系仪表可动部分的偏转方向与电流极性无关，因此可以交直流两用。



电磁系钳形电流表

二、钳形电流表的使用

1. 测量前先估计被测电流的大小，选择合适的量程。
2. 测量时应将被测载流导线置于钳口中央，以避免增大误差。
3. 钳口要结合紧密。
4. 测量5A以下较小电流，为使读数准确，条件许可情况下，可将被测导线多绕几圈放入钳口进行测量。
5. 测量完毕，一定要将仪表量程开关置于最大量程位置。

第四节 万用表

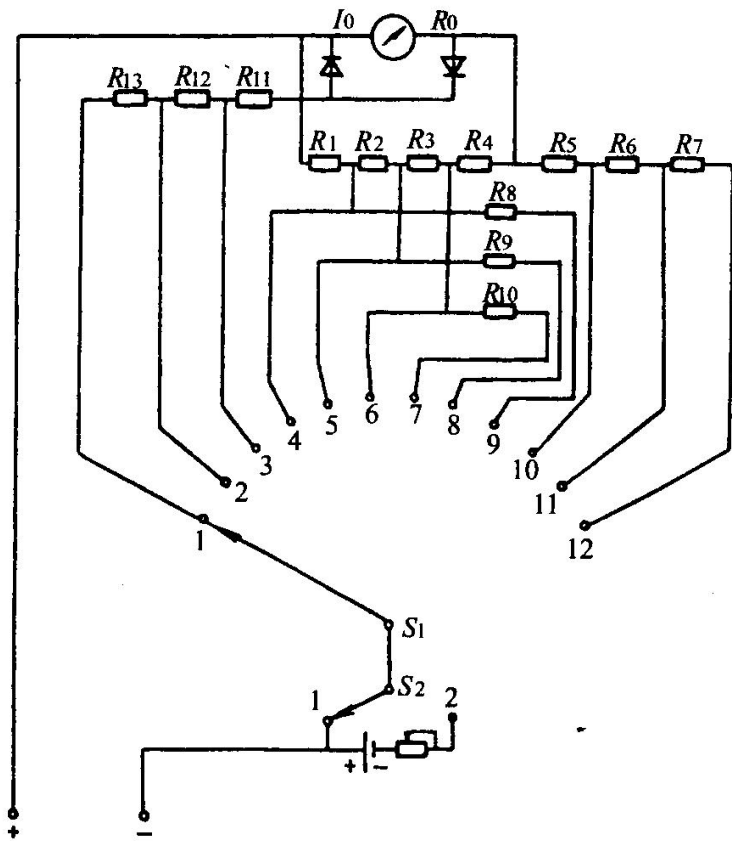
万用表是电工测量中常用的多用途、多量程的可携式仪表。它可以测量直流电流、直流电压、交流电压、电阻等电量，有的万用表还可以测量交流电流、电容量等。

一、万用表结构及工作原理

万用表的表头是一个磁电式测量机构，右图为一个最简单的万用表原理电路图。图中 S_1 是一个具有12个分接头的转换开关，用来选择测量种类和量程。 S_2 是一个单刀双投开关，测量电阻时， S_2 拨至“2”位，进行其他测量时， S_2 拨至“1”位。万用表的结构主要由测量机构（俗称表头）、测量线路、转换开关等部分组成。

1. 直流电流的测量

测量直流电流时， S_1 可拨在4、5、6三个位置， S_2 拨在1位置。被测电流从“+”端流入，“-”端流出。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为并联分流电阻，拨动 S_1 可改变测量电流的量程，这和电流表并联分流电阻扩大量程原理是一样的。



2. 直流电压的测量

测量直流电压时， S_1 可拨在10、11、12三个位置， S_2 拨在1位置。被测电压加在“+”、“-”两端， R_5 、 R_6 、 R_7 为串联附加电阻，拨动 S_1 就可以得到不同电压测量量程，这和电压表串联附加电阻变换电压量程原理是一样的。

3. 电阻测量

测量电阻时， S_1 可拨在7、8、9三个位置， S_2 应拨在2位置，将表内电池接入电路。被测电阻接在万用表的“+”、“-”端，表头内就有电流通过，拨动 S_1 时，就可以得到不同的量程。如果被测电阻未接入，则输入端开路，表内无电流通过，指针不偏转，所以欧姆档标度尺的左侧是“ ∞ ”符号；如果输入端短路，则被测电阻为0，此时指针偏转角最大，所以标度尺的右侧是“0”。

万用表中的干电池使用久了或存放时间长了端电压就会下降。这时，如将输入端短接，指针并不指0，此时，可调节万用表头上的调零电位器，使指针回0。

4. 交流电压测量

测量交流电压时， S_1 可拨在1、2、3三个位置， S_2 在1位置。由于磁电式机构只能测量直流，故在测量交流电压时，需把交流变成直流后进行治疗。万用表原理图1中的两个二极管即为整流器，它使交流电压正半波通过表头，而负半波不通过表头，通过表头的电流为单相脉动电流。 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{13} 为串联附加电阻，拨动 S_1 可以得到不同的电压量程。

二、万用表使用方法及注意事项

1. 测量前应认真检查表笔位置，红色表笔应接在标有“+”号的接线柱上（内部电池为负极），黑色表笔应接在标有“-”号的接线柱上（内部电池为正极）。
2. 根据测量对象，将转换开关拨到相应档位。有的万用表有两个转换开关，一个选择测量种类，另一个改变量程，在使用时应先选择测量种类，然后选择量程。
3. 读数时，要根据测量的对象在相应的标尺读取数据。
4. 测量电阻时应注意以下事项：
 - (1) 选择适当的倍率档，使指针尽量接近标度尺的中心部分，以确保读数比较准确。
 - (2) 测量电阻之前，或调换不同倍率档后，都应将两表笔短接，用调零旋钮调零，调不到零位时应更换电池。
 - (3) 不能带电测量电阻，否则不仅得不到正确的读数，还有可能损坏表头。
 - (4) 用万用表测量半导体元件的正、反向电阻时，应用 $R \times 100$ 档，不能用高阻档，以免损坏半导体元件。
 - (5) 严禁用万用表的电阻档直接测量微安表、检流计、标准电池等类仪器仪表的内阻。

5. 测量电压、电流时注意事项：

- (1) 要有人监护，如测量人不懂测量技术，监护人有权制止测量工作。
- (2) 测量时人身不得触及表笔的金属部分，以保证测量的准确性和安全。
- (3) 测量高电压或大电流时，在测量中不得拨动转换开关，若不知被测量有多大时，应将量限置于最高档，然后逐步向低量限档转换。
- (4) 注意被测量的极性，以免损坏。

第五节 兆欧表

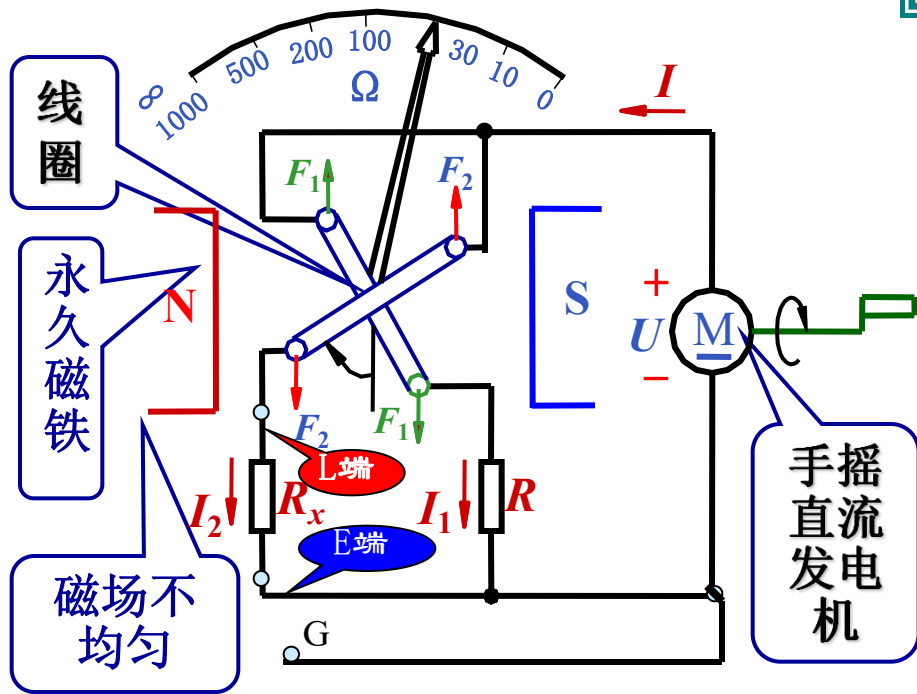
一、兆欧表的构造

一般的兆欧表只要由手摇直流发电机、磁电系比率表以及测量线路组成。磁比率表的主要构造是一个永久磁铁和两个固定在同一转轴且彼此相差一定角度的线圈（如右图所示）。一个线圈与电阻 R 串联，另一个线圈与被测电阻 R_X 串联，两者并联接于直流电源。

二、兆欧表的工作原理

测量时，两个线圈通过电流 I_1 和 I_2 ，分别受到磁场的作用，产生两个方向相反的转矩，仪表的可动部分在转矩的作用下发生偏转，直到两个线圈产生的转矩平衡。

注意：兆欧表表头与一般磁电式仪表不同，它是用电磁力代替游丝产生反作用力矩的仪表。另外，空气隙中的磁感应强度不均匀；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，因此兆欧表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。



兆欧表结构示意图

三、兆欧表的选择、使用与维护

1. 兆欧表的选择

(1) 额定电压一定要与被测电气设备或线路的工作电压相适应；

(2) 测量范围要与被测绝缘电阻的范围相符合，以免引起大的读数误差。

2. 兆欧表的接线

测量电气设备对地的绝缘电阻时，应将L端接到被测设备上，E端可靠接地。但测量

表面不干净或潮湿的电缆的绝缘电阻时，为了准确测量，就必须使用G端。G端的作用是屏蔽表面泄漏电流。

3. 兆欧表的检查

测量前，摇动手摇发电机到120转/分的额定转速，观察指针是否指向无穷大；再将L和E端端接，缓慢摇动手柄，观察指针是否回零，否则说明兆欧表有故障，必须检修。

4. 使用兆欧表的注意事项

测量过程中必须在被测设备和线路停电的状态下进行；连接导线不能采用双股绝缘线或绞线；摇动手柄应又慢渐快至额定转速；测量大电容设备的绝缘电阻，读数后不能立即停止摇动兆欧表，防止充电设备损坏兆欧表。

兆欧表的使用观看

第六节 电能的测量

一、电能表主要技术参数

单相电能表的额定电压多为220V。三相电能表的额定电压为380V（三相两元件）、380/220V（三相三元件）及110KV（高压计量用）。

电能表的额定电流有1A、2A、3A、5A、10A等很多等级。凡类似5（10）A标志者，括号外数字表示该电能表额定电流为5A；括号内数字表示该电表改变内部接线后其额定电流可扩大为10A。

电能表上都标志有电能表常数。电能表常数是每用电1kW·h对应的铝盘转数。

电能表电流线圈的直流电阻很小，而电压线圈的直流电阻约为1000—2000Ω。

二、电能表的安装接线

单相电能表的接线见图1，三相两元件电能表的接线见图2，三相三元件电能表的接线见图3。当被测电流太大时，应使用电流互感器接入。

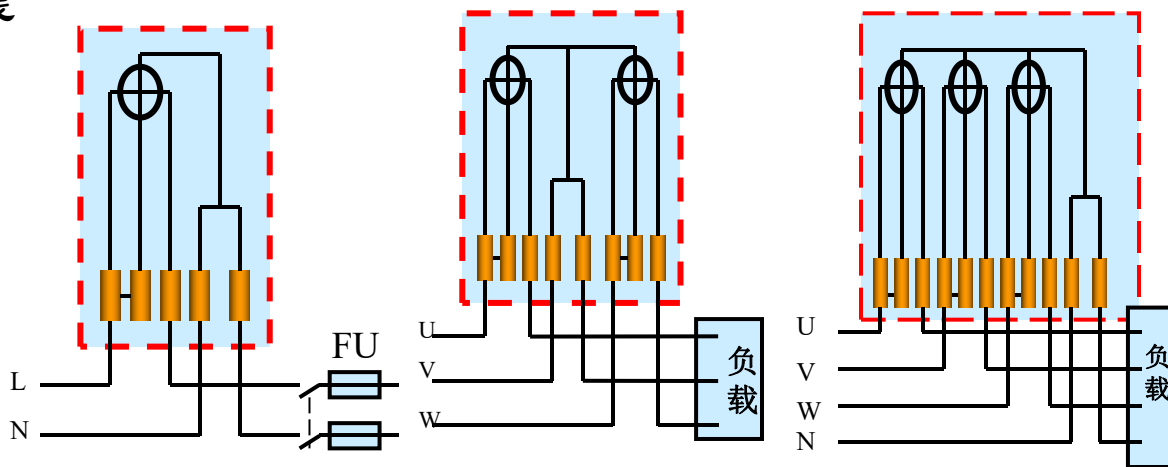


图1 单相电能表接线

图2 三相两元件电能表接线 图3 三相三元件电能表接线

电能表的安装要求：

1. 电能表接线时应注意分清各接线端子；三相电能表按正相序接线；经互感器接线者极性必须正确。
2. 电压线圈连接线应采用 1.5 mm^2 绝缘铜线、电流线圈连接线直入者应采用与线路导电能力相当的绝缘铜线（ 6 mm^2 以下者用单股线）、经电流互感器接入者应采用 2.5 mm^2 绝缘铜线。
3. 互感器的二次线圈和外壳应当接地（或接零）；线路开关必须接在电能表的后方。

第七节 直流电桥

一、直流单臂电桥的构造及工作原理

直流单臂电桥适用于测量电阻（ $1—10^8\Omega$ ），用它测量各种电机、变压器及各种其他电器的直流电阻。

直流单臂电桥的工作原理如右图所示。

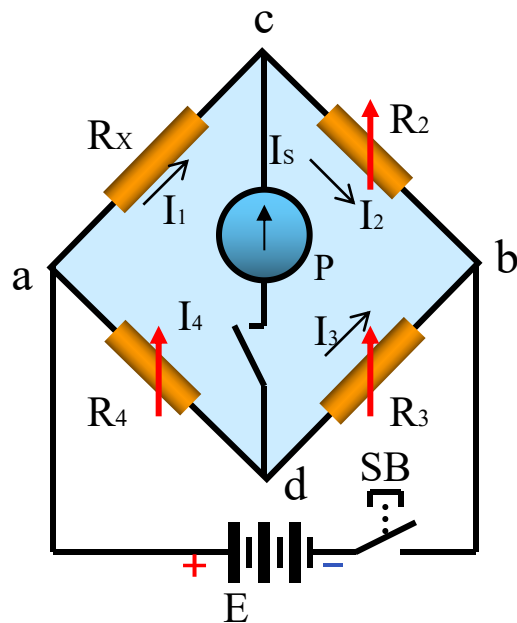
被测电阻 R_x 和标准电阻 R_2 、 R_3 和 R_4 组成电桥的四个臂，接成四边形，在四边形顶c d点间接入检流计P，在另一对顶点ab间接入电池E。

在测量时按下按钮SB接通电源，调节标准电阻 R_2 、 R_3 和 R_4 ，使检流计指示为0，则有 $I_1 = I_2$ ， $I_3 = I_4$ ，而且c点电位和d点电位相等，因此

$$U_{ac} = U_{ad} \quad \text{即} I_1 R_x = I_4 R_4;$$

$$U_{cd} = U_{db} \quad \text{即} I_2 R_2 = I_3 R_3$$

两式相比得 $R_x = R_2 R_4 / R_3$



直流单臂电桥工作原理图

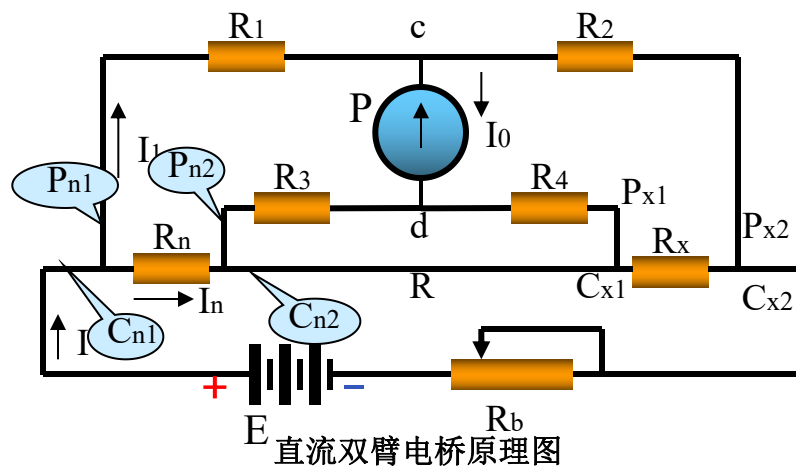
电阻 R_2 和 R_3 的比值通常配成固定的比例，称为电桥的比率臂，电阻 R_4 称为比较臂。在测量时，首先选取一定的比率臂，然后调节比较臂使电桥平衡，则比率臂倍率和比较臂读数值的乘积就是被测电阻的数值。

二、直流单臂电桥的使用

1. 使用前先将检流计的锁扣打开，调零。
2. 接入被测电阻应采用较粗较短导线，并将接头拧紧。
3. 使用前先将检流计的锁扣打开，调零。
4. 当测量电感线圈的直流电阻时，应先按下电源按钮，再按下检流计按钮；测量完毕，应先松开检流计按钮，后松开电源按钮。
5. 电路接通后，调节检流计指针。
6. 电桥使用完毕，应先切断电源，然后拆除被测电阻。
7. 发现电池电压不足时，应及时更换。

三、直流双臂电桥的结构和工作原理

双臂电桥可以消除接线电阻和接触电阻的影响，是一种测量小阻值电阻的电桥，其原理接线见右图。测量时，调节有关电阻，使检流计P指示为0，此时电桥处于平衡状态，c点和d点电位相等，设连接 R_n 和 R_x 的电阻为 R ，利用电桥平衡原理，同样可求得被测电阻。



为了消除接线电阻和接触电阻的影响，连接 R_x 和 R_n 都有两对端钮，即电流端钮 C_{x1} 、 C_{x2} 和 C_{n1} 、 C_{n2} 以及电位端钮 P_{x1} 、 P_{x2} 和 P_{n1} 、 P_{n2} ，并且都用电位端钮接入桥臂。桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 都是大于 $10\ \Omega$ 的标准电阻，而且采用机械联调装置，使电桥在调节平衡的过程中，被测电阻 R_x 只取决于桥臂电阻 R_1 和 R_2 以及标准电阻 R_n ，而和接线电阻 R 无关， R_2/R_1 的比值称为双臂电桥的比率或倍率。双臂电桥可以较好地消除接线电阻和接触电阻的影响

三、直流双臂电桥的结构和工作原理

使用方法与单臂电桥基本相同，但还要另外注意以下两点：

1. 被测电阻有电流端钮和电位端钮时，要与电桥上相应的端钮相连接。要注意电位端钮总是在电流端钮的内侧，且两电位端钮之间就是被测电阻。如果被测电阻没有电流端钮和电位端钮，则应自行引出电流端钮和电位端钮，并注意其接线应尽量用粗短的导线，接线间不得绞合，并要接牢。
2. 直流双臂电桥工作时电流较大，所以测量时动作要迅速，以免电池耗电量过大。