

第 2 章 常用电测量仪表及仪器的使用

电工电子测量是电学实验的重要实践环节，也是理工科学生必须掌握的基本技能。本章主要介绍了常用电测量仪表及电子仪器设备的基本工作原理和使用方法。由于受篇幅限制，仪器仪表详细原理说明还需要读者参考其他书籍加以学习。

2.1 常用电测量仪表及其使用

在生产、科研与实验教学中，经常需要测量电流、电压、频率、电功率、功率因数、电阻、电感、电容等电参量，用来测量电参量的仪表习惯上称为电工仪表，也称为电测量仪表。

2.1.1 常用电测量仪表的分类与选用

电测量仪表的主要用途是借助它来比较被测量电量与测量单位的关系。使用电测量仪表测量具有下列优点：结构简单，使用方便，可根据实际测量环境选择足够精确度的电测量仪表测量，还可以将电测量仪表灵活地接入测量电路，并可实现远距离测量等。常用的电测量仪表是直读式仪表，常按下列几个方法分类。

1. 按照被测量电路参数的种类分类

电测量仪表按照被测量电路参数的种类来分，如表 2.1.1 所示。

表 2.1.1 按被测量电路参数种类分类的电测量仪表

序 号	被测量电路参数	仪表名称	符 号
1	电流	电流表	$\textcircled{\text{A}}$
2	电压	电压表	$\textcircled{\text{V}}$
3	电功率	功率表	$\textcircled{\text{W}}$
4	电能	电度表	kWh
5	相位差	相位表	$\textcircled{\varphi}$
6	频率	频率计	$\textcircled{\text{Hz}}$
7	电阻	电阻表	$\textcircled{\Omega}$

2. 按照被测量电路参数的性质分类

电测量仪表根据被测量电路参数的性质可以分为直流仪表、交流仪表、交直流两用表等。

3. 按照仪表的工作原理分类

电测量仪表根据其工作原理可以分为磁电式、电磁式、电动式、整流式等，如表 2.1.2 所示。

表 2.1.2 按工作原理分类电测量仪表

类 型	符 号	被测量电路参数	电流的种类与频率
磁电式		电流、电阻、电压	直流
电磁式		电流、电压	直流及工频交流
电动式		电流、电压、电功率、功率因数、电能	直流、工频及较高频率的交流
整流式		电流、电压	工频及较高频率的交流

4. 按照仪表的准确等级分类

根据电测量仪表基本误差的不同情况，国家标准规定电测量仪表的准确等级分七级，如表 2.1.3 所示。

表 2.1.3 电测量仪表的准确等级

准确等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
引用误差（%）	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

电测量仪表准确等级为 α ，则说明该仪表的最大引用误差不超过 $\alpha\%$ 。如某仪表的满刻度值为 X_N ，测量点为 X ，则该仪表在 X 点邻近处的示值误差：

$$\Delta X \leq X_N \times \alpha \times 100\%$$

测量误差（相对误差）：
$$\gamma \leq \frac{X_N}{X} \times \alpha \times 100\%$$

例如，有一准确度为 2.5 级的电压表，其最大量程为 50 V，用来测量 50V 的电压时，测量误差（相对误差）：

$$\gamma_1 \leq \frac{50}{50} \times 2.5\% \times 100\% = 2.5\%$$

用该表来测量 25V 时：
$$\gamma_2 \leq \frac{50}{25} \times 2.5\% \times 100\% = 5\%$$

用该表来测量 10V 时：
$$\gamma_3 \leq \frac{50}{10} \times 2.5\% \times 100\% = 12.5\%$$

因此，在测量时要根据被测量电路参数的大小选择合适量程的仪表。为充分利用仪表的准确度，被测量的值应大于其测量上限的 1/2。

此外，电测量仪表还有按对电场或磁场防御能力以及使用条件等来分类，请读者自己查阅相关资料，本文不再一一赘述。

在选用电测量仪表时应注意以下几点。

① 仪表的表头、刻度表标记：仪表的表头、刻度表上标记的不同符号代表仪表的使用条件不同，必须按仪表使用说明来选用。

② 仪表的正常工作条件：测量时要使仪表满足正常工作条件，否则会引起一定的附加误差。例如，使用仪表时，应按规定的位置放置，仪表要远离外磁场和外电场；使用前要使仪表指针指示零位置；对于交流仪表，波形要满足要求，频率要在仪表的允许范围内等。

③ 仪表的正确接线：仪表的接线必须正确，电流表要串联在被测支路中；电压表要并联在被测支路两端；直流表要注意正、负极性，电流从标有“+”端流入。

④ 仪表的量程：被测量量必须小于仪表的量程，否则容易烧坏仪表。为了提高测量的准确度，一般使指针偏转超过量程的 1/2 以上读取数据。如果无法预知被测量的大小，则必须先选用大量程进行测量，测出大概数值，然后逐步转换到小量程测量。

⑤ 读数：指针式仪表要做到“眼、针、影重合”。要根据所选用仪表量程和刻度的实际情况合理取舍读数的有效数字。

此外，在仪表上通常标有仪表的型号、准确等级、电流的种类及仪表的绝缘耐压强度和放置符号，其他常见符号如表 2.1.4 所示。

表 2.1.4 电测量仪表的表头常见符号及其意义

符 号	意 义	符 号	意 义
—	直流	 2kV	仪表绝缘试验电压 2000V
~	交流	↑	仪表直立放置
	交直流	→	仪表水平放置
3~或 	三相交流	∠60°	仪表倾斜 60°

2.1.2 磁电式、电磁式、电动式测量仪表

常用的电测量仪表是指针式测量仪表。指针式测量仪表的主要作用都是将被测电量变换成仪表活动部分的偏转角位移。任何电测量仪表都由测量机构和测量电路两部分组成。

（1）测量机构。

具有接受电量后就能产生转动的机构，称为测量机构，它是整个仪表的核心。测量机构由驱动装置、控制装置、阻尼装置三部分构成。

① 驱动装置：产生转动力矩，使活动部分偏转。转动力矩大小与输入到测量机构的电量成函数关系；

② 控制装置：产生反作用力矩，与转动力矩相平衡，使活动部分偏转到一定位置；

③ 阻尼装置：产生阻尼力矩，在可活动部分运动过程中，消耗其动能，缩短其摆动时间。

（2）测量电路。

测量机构根据电流、电压或者两个电量的乘积产生一定的偏转。但若被测量是其他参数，如功率、频率等，或者被测电流、电压过大或过小时，则不能直接作用到测量机构，必须将各种被测量转换成测量机构所能接受的电量，实现此类转换的电路被称为测量电路。不同功能的仪表，其测量电路也各不相同。

常用的电测量仪表根据其工作原理可以分为磁电式、电磁式、电动式。下列分别介绍这三类仪表的结构和工作原理。

1. 磁电式仪表

1) 磁电式仪表的结构和工作原理

磁电式仪表是根据通电线圈在永久磁场中受到电磁力作用的原理制成的。

磁电式仪表的构造如图 2.1.1(a)所示。磁电式仪表的固定部分包括马蹄形永久磁铁、极靴及圆柱形铁芯等；仪表的可动部分包括铝框、可动线圈、前后两根半轴、螺旋弹簧及指针等。极靴与铁芯之间的空隙宽度是均匀的，形成一个均匀的磁场。

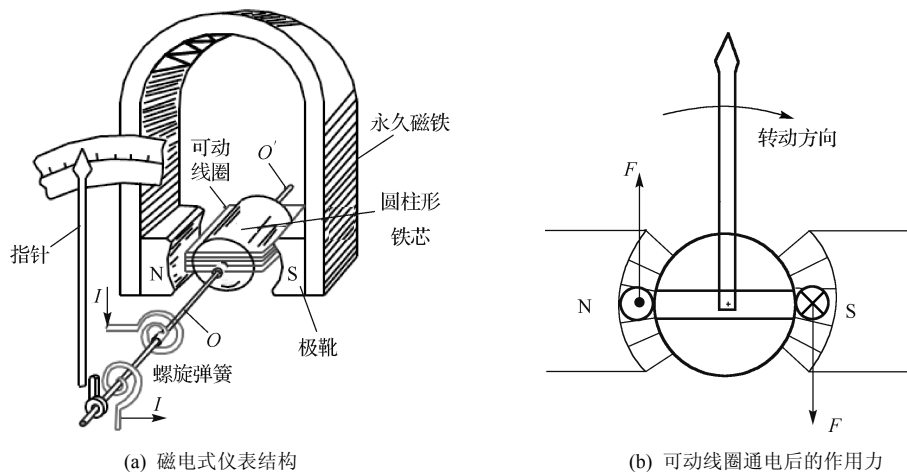


图 2.1.1 磁电式仪表结构

当可动线圈中通过电流 I 时，线圈电流和磁场相互作用而产生转动力矩，使可动线圈发生偏转，如图 2.1.1(b)所示。根据左手定则可判断，在可动线圈的每个侧边上，产生的作用力 F ，其大小为：

$$F = B l N I \quad (2.1.1)$$

式中， B 为极靴与铁芯之间的磁感应强度； l 为可动线圈每个受力边的有效长度； N 为可动线圈匝数； I 为通过可动线圈的电流。

在图 2.1.1(b)所示电流和磁场方向上，可动线圈按顺时针方向旋转，其转动力矩为：

$$M = 2 F r = 2 r B l N I \quad (2.1.2)$$

式中， r 为转轴中心到可动线圈有效边的距离。

对于一个成品仪表， N 、 B 、 l 、 r 均已固定，即 $2 r B l N = K$ 是常数，所以有：

$$M = 2 r B l N I = K \cdot I \quad (2.1.3)$$

因此，只要可动线圈通有电流，在转矩 M 作用下，仪表的可动部分将产生偏转，同时迫使与转动线圈固定在一起的游丝（螺旋弹簧）产生阻止线圈转动的阻力矩 M_α ，这个反抗转矩与转角 α 成正比，即：

$$M_\alpha = D \alpha \quad (2.1.4)$$

式中， D 为游丝（螺旋弹簧）的弹性系数。

当可动线圈处于平衡状态时，可动部分便停止转动。此时， $M = M_\alpha$ ，即：

$$\alpha = \frac{K}{D} I = K' I \quad (2.1.5)$$

由式 2.1.5 可知，仪表指针的偏转角 α 与通过可动线圈的电流 I 成正比。所以，磁电式仪表可用来测量电流，而且仪表尺上的刻度是均匀的。

2) 磁电式仪表的特性与应用

磁电式仪表的特性有以下几点。

① 因为表头结构中的固定部分是永久磁铁, 磁性很强, 故抗外磁性干扰能力强, 并且线圈中流过很小电流便可偏转, 所以灵敏度高, 可制成高准确度仪表, 如 0.1 级。

② 消耗功率小, 应用时对被测电路的影响很小。

③ 仪表尺上的刻度是均匀的。

④ 因游丝、可动线圈的导线很细, 所以仪表的过载能力不强, 易损坏。

⑤ 只能用来测直流。

由磁电式仪表的原理可知, 其测量机构可直接用来测量直流电流, 而不需增加测量线路。但因被测电流要通过的游丝、可动线圈的导线很细, 因而用磁电测量机构直接构成电流表只能测量很小的电流 (几十微安到几十毫安)。若要测量更大的电流, 就需要增加分流器来扩大量程。若要测量交、直流电压, 则需要采用附加电阻与测量机构相串联的方法, 既可以测量较高的电压, 又能使测量机构电阻随温度变化引起的误差得到补偿。

(1) 扩大电流表量程的电路。

分流器是扩大电流表量程的装置, 通常由电阻担当。如图 2.1.2 所示是一个电流表线路示意图, 分流器电阻 R 与测量机构并联 (内阻为 R_0), 允许被测电流的大部分通过, 则增加分流器后, 流过测量机构的电流为:

$$I_0 = \frac{R}{R_0 + R} I_x \quad (2.1.6)$$

因此被测电流可表示为:

$$I_x = \frac{R_0 + R}{R} I_0 = K_L I_0 \quad (2.1.7)$$

式 2.1.7 中, K_L 为分流系数, 它表示被测电流比可动线圈电流大了 K_L 倍。则对于某一个指定的仪表, 其分流电阻 R 的值是固定不变的, 即分流系数 K_L 是一个定值, 所以该仪表可以直接用被测电流 I_x 进行刻度, 这就是常见的直流安培表。如果一个表头配置多个不同的分流器, 如图 2.1.3 所示, 则可制成具有多量程的电流表。

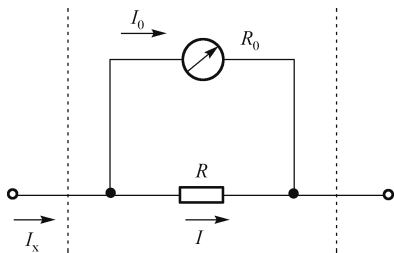


图 2.1.2 用分流电阻扩大电流表量程示意图

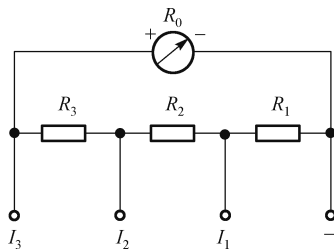


图 2.1.3 三量程直流电流表电路

(2) 交、直流电压表测量电路。

磁电系电压表是由磁电系测量机构和高值附加电阻串联构成的, 如图 2.1.4 所示。这时被测电压 U_x 的大部分压降由电阻 R 分担, 分配到测量机构上的电压 U_0 只是很小的一部分, 从而使通过测量机构的电流限制在允许的范围内, 扩大了电压的量程。串联附加电阻后, 测量机构中通过的电流为:

$$I_0 = \frac{U_x}{R_0 + R} = \frac{U_x}{R_V} \quad (2.1.8)$$

由于磁电系测量机构的偏转角度与流过线圈的电流成正比, 因此有:

$$\alpha = K'I_0 = K' \frac{U_x}{R_0 + R} = K_V U_x \quad (2.1.9)$$

式 2.1.9 中, K_V 为仪表对电压的灵敏度, $K_V = \frac{K'}{R_0 + R}$; K' 为仪表对电流的灵敏度。

如图 2.1.5 所示为单量程交流电压表。半波整流电路使得当 A、B 两测试端接入的电压 $U_{AB} > 0$ 时, 表头才有电流流过, 表头的偏转角与半波整流电压的平均值成正比。在工程和日常生活中, 常常需要测量正弦电压, 并用其有效值表示。因此, 交流电压表的标尺是按正弦电压的有效值标度的, 即标尺的刻度值为整流电压的平均值乘以一个转换系数 (有效值/平均值)。半波整流的转换系数为:

$$K = \frac{U}{U_{av}} = \frac{U_m / \sqrt{2}}{U_{av} / \pi} = 2.22 \quad (2.1.10)$$

式中, U_{av} 为半波整流电压的平均值。

注意: 当被测量为非正弦波形时, 其转换系数不是 2.22。

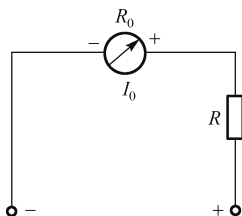


图 2.1.4 单量程直流电压表示意图

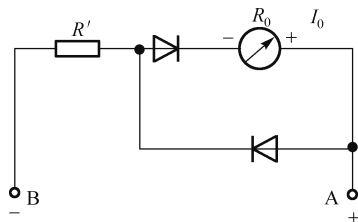


图 2.1.5 单量程交流电压表示意图

当电压表的量程为 U_N 时, 表头指针满偏时的整流电流的平均值为 I_{av} , 则分压电阻值为:

$$R_N = \frac{U_N}{2.22} \times \frac{1}{I_{av}} - R_0 \quad (2.1.11)$$

多量程直流、交流电压测量电路如图 2.1.6 与 2.1.7 所示。

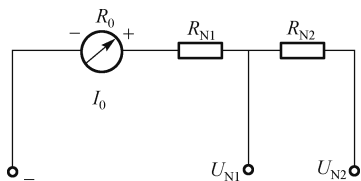


图 2.1.6 多量程直流电压表电路

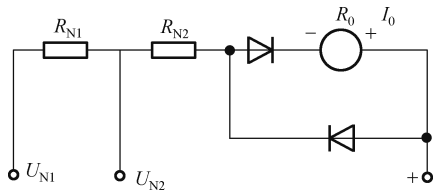


图 2.1.7 多量程交流电压表电路

3) 实验室常用磁电式仪表简介——C31 型直流毫安表

如图 2.1.8 所示为实验室常用的一款磁电式直流电流测量仪表——C31 型直流毫安表的面板图, 其精确等级为 0.5 级, 可测量直流电流, 共有“100~200~500~1000mA”四个量程挡。C31 直流毫安表的表盘刻度均匀, 在面板上有 5 个接线柱: “-” “100” “200” “500” “1000”, 使用时, 必须选择“100” “200” “500” “1000” 四个接线柱中的某一个作为直流电流流入, 选择“-” 作为流出。

C31 型直流毫安表的使用方法如下。

① 将电流表（直流毫安表）与负载共同串联在被测电路中。

② 选择合适的量程挡。若被测电流强度未知，则选择最大量程挡位开始测量，再根据实际测量值确定是否要更换到小量程挡（被测电流使指针偏转超过表盘刻度 1/2 以上方可读数）。

③ 读数时要做到“眼、针、影重合”。要根据所选用仪表量程和刻度的实际情况合理取舍读数的有效数字。例如，指针偏转指示在 70 格处，如当前量程挡选择为 200mA，则读取的被测电流值应该是 140.0mA；如当前量程挡选择为 500mA，则读取的被测电流值应该为 350.0mA；

④ 注意：在使用直流毫安表时应该注意正、负极性，即电流从如图 2.1.8 所示“100~200~500~1000mA”四个量程挡中某一接线柱流入，从标有“-”的接线柱流出；由于电流表的内阻很小，所以绝对不允许不经过负载而将电流表直接连接到电源的两极上！

2. 电磁式仪表

1) 电磁式仪表的结构和工作原理

电磁式仪表的测量机构是利用一个或几个载流线圈的磁场对一个或几个铁磁元件的作用制成的，其结构形式最常见的有吸引型和推斥型两种，实际应用中常采用推斥型结构，如图 2.1.9 所示。

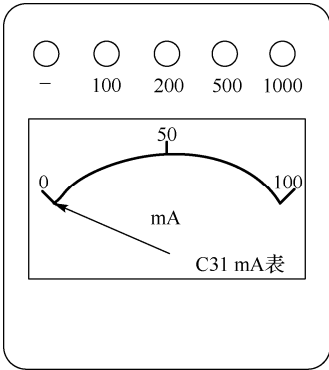


图 2.1.8 C31 型直流毫安表

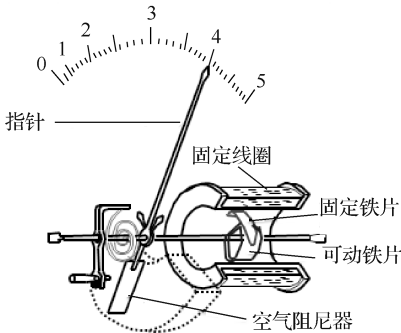


图 2.1.9 推斥式电磁式仪表的构造

推斥式电磁式仪表的主要组成部分是：固定的圆形线圈、线圈内部的固定铁片、固定在转轴上的可动铁片。

当固定线圈通有直流电流时，线圈内部产生磁场，固定铁片、可动铁片同时被磁化且同一端的极性相同，因而产生了相互排斥的转动力矩 M ，可动铁片因受斥力而带动指针偏转。

当固定线圈内通入交流电流时，则磁场是交变的，两铁片的极性也是交变的，但相应端的极性总是一致的，所以两者仍然产生排斥力。转动力矩 M 的方向不变，可动铁片仍受斥力作用而带动指针偏转。

在排斥力的作用下，可动铁片带动指针转动，同时转轴上的螺旋弹簧将产生相应的阻转矩 M_R 。当动转矩与阻转矩达到平衡时（即 $M_R = M$ ），可动部分停止转动，指针在表盘刻度标尺上的位置指示出被测数据。仪表的指针偏转角度大小决定于转动力矩的平均值，而平均转动力矩的值正比于线圈中电流有效值的平方。下面简要分析仪表指针的偏转角度与线圈中通过的电流的关系。

设某一瞬间线圈中的电流值为 i (有效值为 I)，瞬时转动力矩为 m ， B_2 为固定铁片被磁化后的磁感应强度， B_3 为可动铁片被磁化后的磁感应强度，则：

$$B_2 \propto i \quad B_3 \propto i \quad m \propto B_2 B_3$$

因此，有

$$m \propto i^2$$

则平均转动力矩 M 的大小为：

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt \propto \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = I^2$$

所以

$$M \propto I^2$$

设 K 为比例系数， K 与线圈的匝数、固定铁片、可动铁片的形状及相对位置有关，则：

$$M = KI^2$$

电磁仪表中的反抗力矩由转轴上的螺旋弹簧产生，其值与弹簧的弹性系数 D 有关，即：

$$M_R = D\alpha$$

当平均转动力矩 M 与阻转矩 M_R 相等时，力矩平衡，指针稳定指示出当前电流值。即：

$$M = M_R$$

$$KI^2 = D\alpha$$

$$\alpha = \frac{K}{D} I^2$$

因此，电磁式仪表的偏转角度与线圈中通入的电流的有效值的平方成正比，因而表头上的刻度尺是不均匀的。但是，若将固定铁片和可动铁片制作为特定的形状，可使仪表刻度的后半段接近均匀。

2) 电磁式仪表的特性与应用

电磁式仪表的特性有以下几点。

- ① 仪表指针的偏转角 α 与被测电流的有效值的平方成正比，仪表刻度是不均匀的。
- ② 电磁式仪表可测交流，也可测直流，常作为交直流两用表。这种仪表结构简单，成本低，应用较广。
- ③ 由于被测电流直接通入线圈，不经游丝或弹簧，所以过载能力较强。
- ④ 仪表的灵敏度不高，因为固定线圈必须通过足够大的电流时，所产生的磁场才能使可动铁片偏转，仪表本身的功率损耗比较大。
- ⑤ 由于采用铁磁元件，受元件的磁滞、涡流影响，频率误差较大。

电磁式电压表是在电磁式测量机构上串接电阻形成的，与直流电压表的形成相同；电磁式电流表多为双量程，不宜采用分流器，而是采用两组规格和参数均相同的线圈串联或并联来改变量程。例如，T19-A 交流电流表，就是通过改变面板上的量程插头位置来改变电流表的量程。

(3) 实验室常用电磁式仪表简介——T19-A 交流电流表与 T19-V 交流电压表。

如图 2.1.10 与图 2.1.11 所示为实验室常用的电磁式交流测量仪表面板图，两个仪表的精确等级均为 0.5 级，且两个仪表的表盘刻度都不均匀。

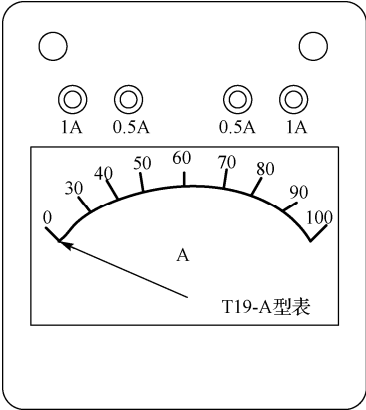


图 2.1.10 T19-A 交流电流表面板

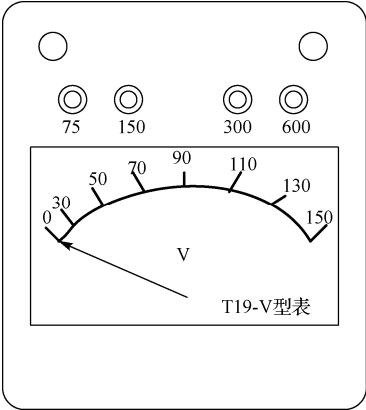


图 2.1.11 T19-V 交流电压表面板

如图 2.1.10 所示为 T19-A 交流电流表，该表面板上共有 2 个接线柱和 4 个插孔。2 个接线柱用于将交流电流表串联接入电路中；标注为“1A”“0.5A”“0.5A”“1A”的 4 个插孔，可在使用时同时插入两个量程插头，方便地选择 1A 与 0.5A 两个量程。

T19-A 交流电流表的使用方法如下。

- ① 将交流电流表与负载共同串联在被测电路中。
- ② 通过量程插头选择合适的量程挡（0.5A 和 1A 两挡，选择方法：**用两个量程插头共同选择 1A 或者 0.5A**）。若被测电流强度未知，则选择 1A 量程挡位开始测量，如被测电流使仪表指针偏转未超过表盘刻度 1/2，则换 0.5A 量程挡测量。
- ③ 读数时要做到“眼、针、影重合”。要根据所选用仪表量程和刻度的实际情况合理取舍读数的有效数字。例如，指针偏转指示在 70 格处，如当前量程挡选择为 1A，则读取的被测电流的有效值应该是 0.700A；如当前量程挡选择为 0.5A，则读取的被测电流的有效值应该为 0.350A。

④ 注意：在使用交流电流表时，接线柱并无正、负极性之分；交流电流表为电磁式仪表，其刻度不均匀，在使用该表测量交流电流有效值时，应使指针偏转超过表盘刻度 1/2 以上方可读数；由于电流表的内阻很小，所以绝对不允许不经过负载而将电流表连接到电源的两极上！

如图 2.1.11 所示为 T19-V 交流电压表，该表面板上共有 2 个接线柱和 4 个插孔。2 个接线柱用于将交流电压表并联接入电路中；标注为“75”“150”“300”“600”的 4 个插孔，可在使用时插入一个量程插头，方便地选择 75、150、300、600V 四个电压量程。

T19-A 交流电压表的使用方法如下。

- ① 将交流电压表并联在被测电路两端。
- ② 通过量程插头选择合适的量程挡（75V、150V、300V 和 600V 四挡，选择方法：**用一个量程插头选择四个量程挡中一个**）。若被测电压未知，则选择 600V 量程开始测量，如被测电压使仪表指针偏转未超过表盘刻度 1/2，则逐步更换至小一级的量程挡测量。
- ③ 读数时要做到“眼、针、影重合”。要根据所选用仪表量程和刻度的实际情况合理取舍读数的有效数字。例如，指针偏转指示在 110 格处，如当前量程挡选择为 600V，则读取的被测电压的有效值应该是 440.0V；如当前量程挡选择为 75V，则读取的被测电压的有效值应该为 55.0V。

④ 注意：在使用交流电压表时，接线柱并无正、负极性之分；交流电压表为电磁式仪表，其刻度不均匀，在使用该表测量交流电压有效值时，应使指针偏转超过表盘刻度 1/2 以上方可读数。

3. 电动式仪表

1) 电动式仪表的结构和工作原理

电动式仪表的工作原理是基于两个带电线圈间的相互作用。仪表的构造如图 2.1.12 所示。

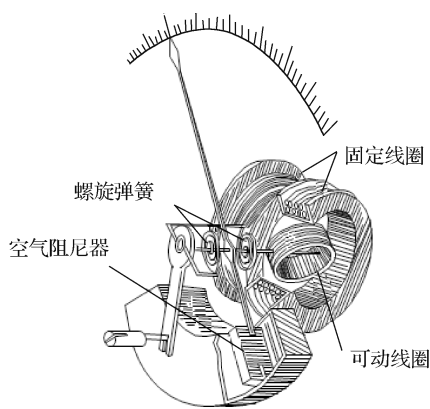


图 2.1.12 电动式仪表的构造

电动式仪表内部有两个线圈：固定线圈（为了获得较均匀的磁场且便于改换电流线圈量限）和可动线圈。固定线圈由粗导线绕成；可动线圈由细导线绕成，可在固定线圈内绕转轴自由转动。可动线圈、指针、空气阻尼器等都固定在转轴上。反作用力由游丝（螺旋弹簧）产生，游丝同时又是引导电流的元件。仪表的阻尼由空气阻尼器产生。

设固定线圈与可动线圈分别通过电流 I_1 与 I_2 时，固定线圈所产生的磁场与可动线圈中的电流相互作用，使可动线圈产生偏转，设比例系数为 K (K 的大小取决于线圈的匝数、几何尺寸及相对位置等)，其转矩和流经两线圈的电流的乘积成正比，即：

$$M = KI_1I_2$$

阻转矩由游丝（螺旋弹簧）产生，设其弹性系数为 D ，则阻转矩与活动线圈的偏转角 α 成正比，即：

$$M_R = D\alpha$$

当 $M = M_R$ 时，可动部分静止，此时：

$$\alpha = \frac{K}{D}I_1I_2 = K'I_1I_2$$

电动式仪表可以交、直流两用。测量直流时，仪表的偏转角与流经两线圈电流的乘积成正比；而测量交流时，仪表的偏转角取决于一周期内转矩的平均值，即取决于流经两个线圈的交流电流的有效值及两个电流间相位差 φ 的余弦，即：

$$\alpha = K'I_1I_2 \cos \varphi$$

电动式仪表可以制成交、直流的电流表、电压表和功率表。电动式电流表、电压表主要作为交流标准表（0.2 级以上）用，电动式的功率表则应用得较为普遍。

2) 电动式仪表的技术特性与应用

交、直流两用是电动式仪表的优点，同时由于没有铁芯，因而可以制成灵敏度和准确度均较高的仪表，它的准确等级可达 0.1 级。但是电动式仪表本身磁场弱、转矩小，易受外磁场影响，且过载能力差。

电动式功率表的设计思想是在两个固定线圈（电流线圈）输入负载电路的电流，同时将串有附加电阻 R 的活动线圈（电压线圈）并接于负载两端，使活动线圈电流 I_V 与负载电压成正比（ $I_V \propto U$ ），如图 2.1.13 所示。虚线方框部分为电动式功率表的测量电路。

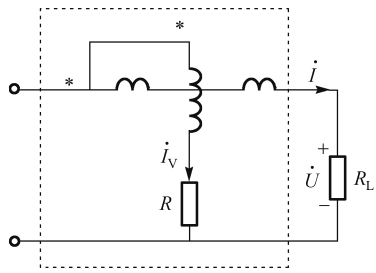


图 2.1.13 电动式功率表电路

当负载电流 I 通过两个固定的电流线圈时, 在线圈内会产生磁场 B , 活动电压线圈中的电流 I_V 在磁场 B 的作用下, 产生电磁力 F , 使活动线圈带动指针偏转。电磁力 F 的大小与磁场强度 B 及活动线圈电流 I_V 的乘积成正比, 即:

$$F = k_0 I_V I = k_1 UI$$

当测量正弦交流电路负载的功率时, 若:

$$u = U_m \sin \omega t \quad i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

则瞬时值为:

$$F = k_1 U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1.12)$$

其平均值为:

$$F = k_1 UI \cos \varphi \quad (2.1.13)$$

又因指针偏转的同时, 游丝发生形变, 产生的弹力为:

$$F_C = D\alpha \quad (2.1.14)$$

式 2.1.14 中, D 为游丝的弹性系数, α 为指针的偏转角。当两力平衡时 ($F = F_C$), 指针静止, 因此:

$$\alpha = \frac{k_1}{D} UI \cos \varphi = k UI \cos \varphi \quad (2.1.15)$$

在式 2.1.15 中, φ 为 U 和 I 的相位差角, 即为负载的功率因数角; α 为指针的偏转角, 其大小即反映了被测负载有功功率 ($UI \cos \varphi$); k 为仪表常数, 也称为仪表的功率因数, 常在仪表的表头上标注为 $\cos \varphi_N$ 。例如, $\cos \varphi_N = 1$ 的普通功率表称为高功率因数功率表; 而 $\cos \varphi_N = 0.2$ 的 D34 型功率表称为低功率因数表。

电动式功率表指针的偏转方向取决于转动力矩的方向, 而转动力矩的方向又取决于电流线圈的磁场方向和电压线圈中的电流方向。如电流线圈的电流方向与电压线圈中的电流方向同时改变, 则力矩方向不变; 如果只有其中一个线圈的电流方向改变, 则力矩的方向就会反向, 即指针偏转方向反向。因此, 在使用功率表时, 电流应该从两个线圈的同名端 (用 “*” 或 “±” 表示) 流入, 或从两个线圈的同名端流出, 且 $\varphi < |90^\circ|$, 此时仪表指针正向偏转, 否则指针会反向偏转。

由于电动式功率表是在固定的电流线圈与可动的电压线圈通入电流后, 二者相互作用, 推动指针偏转, 指示待测电路有功功率的仪表, 所以在使用电动式功率表时应注意如下几点。

① 接线时, 电流线圈要与负载串联, 电压线圈要与负载并联。

② 电压线圈与电流线圈的接线柱中各有一个标记 “*”, 称为同名端。接线时需将同名端连接在一起, 并且一定要接在电源端, 否则会产生测量误差, 正确的接线图如图 2.1.13 所示。如功率表指针反偏, 无法读数, 则把功率表上的极性开关由 “+” 换为 “-” (或由 “-” 换为 “+”)。

③ 电流线圈的电流及电压线圈的电压都不能超过规定值。测量时, 应在电路中接入电流表和电压表以监测电路中的电流和电压;

④ 功率表所测量的值等于指针所指的分格数 (刻度) 乘以仪表的常数 c , 即: 实际测量值 = $c \times$ 指针刻度。普通功率表常数为:

$$c = \frac{U_N I_N}{\alpha_m} (\text{W/div}) \quad (2.1.16)$$

式 2.1.16 中, U_N 和 I_N 是功率表的电压和电流量限, α_m 是仪表满偏格数。由于其 $\cos \varphi_N = 1$, 普通功率表又称为高功率因数功率表。

当负载功率因数较低时，有功功率 $P=UI\cos\varphi$ 很小，如果使用普通功率表测量，指针会指示在刻度盘的起始端，相对误差太大。因此要采用低功率因数功率表。低功率因数功率表常数为：

$$c = \frac{U_N I_N \cos\varphi_N}{\alpha_m} (\text{W/div}) \tag{2.1.17}$$

式 2.1.17 中， $\cos\varphi_N$ 为仪表功率因数（常数），其值在仪表盘上已标明。例如，D34 型低功率因数瓦特表的 $\cos\varphi_N=0.2$ 。

注：低功率因数功率表上标明的 $\cos\varphi_N$ 并非被测负载的功率因数，而是制造该仪表的一个参数，即在额定电流、额定电压下使指针满偏时的功率因数。

3）实验室常用电动式仪表简介——D34 型低功率因数瓦特表

如图 2.1.14(a)所示为电动式有功功率测量仪表——D34 型低功率因数瓦特表（ $\cos\varphi_N=0.2$ ）的面板图，其精确度等级为 0.5 级，仪表表盘的刻度均匀。该表有 4 个电压线圈接线柱（*U、75、150、300），其中“*U”为公共端（与“*I”共为同名端），可选择 75V、150V、300V 三个量程。该表还有 4 个电流接线柱，没有标明量程，需要通过对 4 个接线柱的不同连接方式改变电流线圈的量程，即：通过活动连接使两只 0.5A 的电流线圈串联或并联，得到 0.5A 或者 1A 的量程，如图 2.1.14(b)、(c)所示。

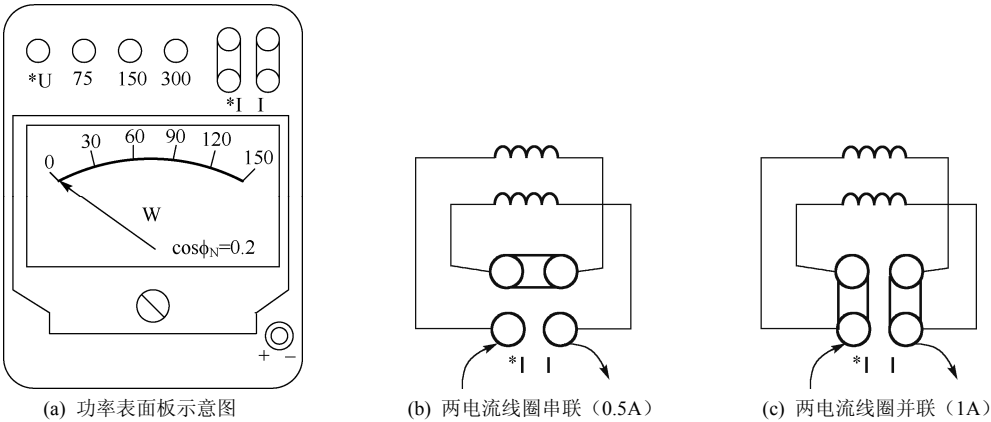


图 2.1.14 D34 型低功率因数瓦特表

该表的使用方法为：

- (1) 将“*U”与“*I”两个同名端共同连接到待测电路的电源端（相线）。
- (2) 选择功率表电压线圈的量程，如选择 300V 量程挡，将“300”接线柱接入待测量电路中。
- (3) 选择功率表的电流线圈量程挡，如图 2.1.14(c)所示为 1A 量程连接方式（图 2.1.14(b)所示为 0.5A 量程连接方式），将“*I”与“I”接线柱串联接入待测量电路中。
- (4) 如图 2.1.15(a)所示为功率表选择电压量程 150V、电流量程 0.5A 时的功率表接线图；图 2.1.15(b)所示为功率表选择电压量程 300V、电流量程 1A 时的功率表接线图。
- (5) 注意：检查电流是否是从同名端（“*U”与“*I”）流入，确认电路无误后，闭合电源，观察功率表指针偏转角度。如仪表指针偏转未超过表盘刻度的 1/2，则根据被测电路中的电流与端电压状况，更换电压线圈或电流线圈的量程，直到仪表指针偏转超过表盘刻度的 1/2。
- (6) 根据测量时电压线圈与电流线圈的连接方式，根据公式 2.1.17 计算出瓦特表常数 c ，读出功率表所测有功功率。

D34 型低功率因数瓦特表常数如表 2.1.5 所示。

表 2.1.5 D34 型低功率因数瓦特表常数

电流量限	电压量限		
	75V	150V	300V
	0.5A	0.1	0.2
1A	0.1	0.2	0.4

【例 1】 已知 D34 功率表连接方式如图 2.1.15 所示，问：

- (1) 图(a)所示功率表常数是_____W/div；当前测量所得有功功率为_____W。
- (2) 图(b)所示功率表常数是_____W/div；当前测量所得有功功率为_____W。

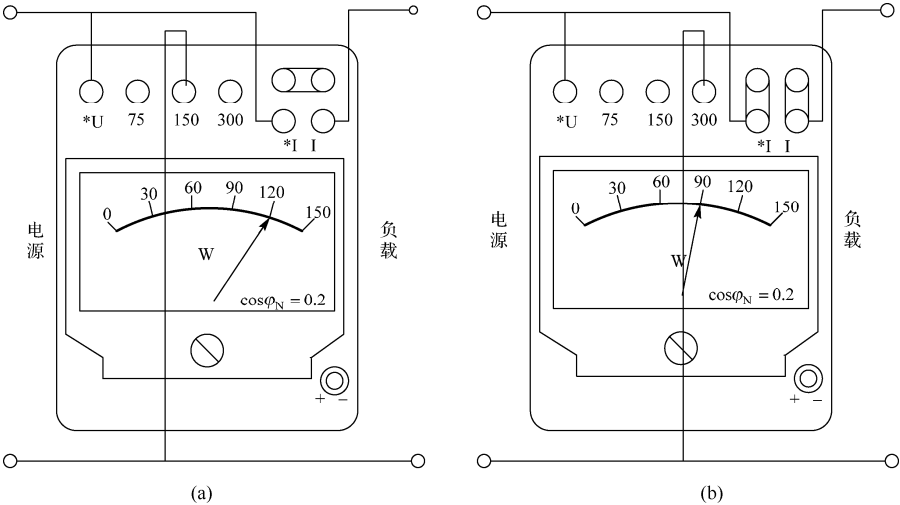


图 2.1.15 D34 低功率因数功率表连接示例

2.1.3 万用表

万用表(即三用表)是一种多功能的便携式仪表，其特点是用途广、量限多、使用简单、携带方便。它是从事电气维修、试验和研究人員必备和必須掌握的測量工具之一。万用表根据測量结果显示方式的不同，可以分为模拟式(指针式)和数字式两大类，其结构特点都是以表头(模拟式)或液晶显示器(数字式)来指示读数，使用转换器件、转换开关来实现各种不同測量目的的转换。

1. 模拟式万用表

模拟式万用表主要由表头、转换装置和測量电路三部分组成。表头一般都采用灵敏度高的磁电式微安表头，其作用是指示被測量的大小；转换装置是用来选择測量对象和量限的；測量电路则用来把各种被測量转换成适合表头測量的微小电流。如图 2.1.16 所示是 MF-47 型万用表的面板图。现将各部分电路分述如下。

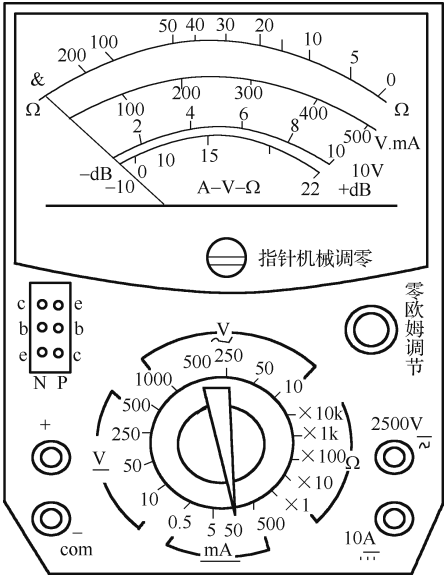


图 2.1.16 MF-47 型万用表面板

(1) 直流电流的测量。

测量直流电流的原理电路图如图 2.1.17 所示。被测电流从“+”端流入，从“-”端流出。 $R_{A1} \sim R_{A5}$ 是分流器电阻，它们和微安表头连成一闭合电路。量程越大，分流器电阻越小。改变转换开关的位置，就改变了分流器的阻值，从而改变了电流的量程。

(2) 直流电压的测量。

测量直流电压的原理电路图如图 2.1.18 所示。被测电压加在“+”“-”两端。 R_{V1} 、 R_{V2} 、 $\cdots$ 是分压电阻。量程越大，分压电阻也越大。改变转换开关的位置，就改变了分压电阻的阻值，从而改变了电压的量程。

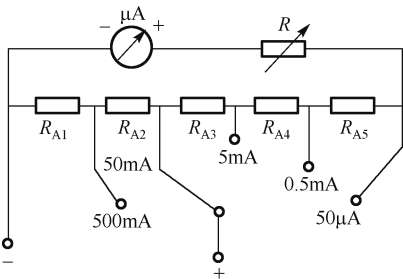


图 2.1.17 直流电流测量原理图

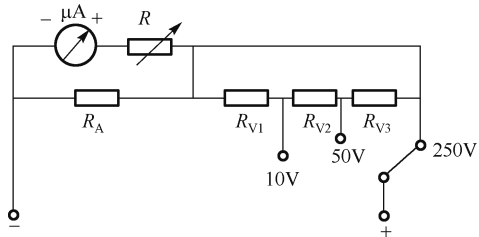


图 2.1.18 直流电压测量原理图

(3) 交流电压的测量。

测量交流电压的原理电路如图 2.1.19 所示。磁电式仪表只能测量直流，如果要测量交流必须附有整流元件，即图 2.1.19 中的半导体二极管 VD_1 和 VD_2 。二极管只允许一个方向的电流通过，反方向的电流不能通过。被测交流电压加在“a”“b”两端，在正、负半周分别经过二极管 VD_1 、 VD_2 整流后，通过微安表头的电流变为半波电流，读数为该电流的平均值，所以指示的读数是正弦电压的有效值。普通万用表只适用于测量频率为 $45 \sim 1000\text{Hz}$ 的正弦交流电压。

(4) 电阻的测量。

测量电阻的原理电路如图 2.1.20 所示。测量电阻时，电路中必须要接入电池，被测量电阻 R_x 接在“a”“b”两端。被测电阻越小，电流越大，则指针偏转角越大。测量前应将“a”“b”两端短接，看指针是否偏转最大且指在零处（刻度的最右处），否则应转动“零欧姆调节”电位器 R 进行校正。

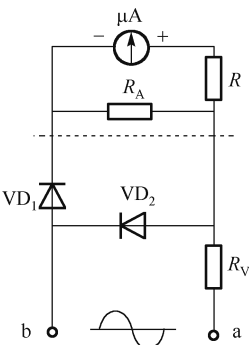


图 2.1.19 交流电压测量原理图

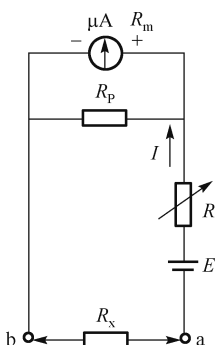


图 2.1.20 电阻测量原理图

(5) 万用表的正确使用。

指针式万用表的结构比较复杂，类型较多，表的面板各有差异，因此在使用万用表时应注意以下几点：

① 万用表在使用之前应检查表指针是否指示零位,若不指示零位,可以用小螺丝刀调节表头上的“指针机械调零”旋钮,进行机械调零。

② 万用表面板上的插孔都有极性标记,测量直流电时,注意正、负极性。使用电阻挡判别二极管极性时,注意“+”插孔是表内电池的负极,而“-”插孔(或“*”插孔)是表内电池的正极。

③ 测量电流或电压时,如果无法预知被测电流、电压的大小,应先调整到最大量程上试测,防止打坏表针。然后再调整到合适的量程上测量(指针偏转在表头刻度 $\frac{1}{2}$ 以上),以减小测量误差。注意不能带电转换量程开关。

④ 测量电阻时,首先要选择适当的分辨率挡,然后将表笔短接,调节“零欧姆调节”旋钮,使表指针指示零位,以确保测量的准确性。如“零欧姆调节”电位器不能将表针调整到零位,说明电池电压不足,需要更换新电池,或者内部接触不良需修理。但是不能带电测电阻,以免损坏万用表。测量大阻值电阻时,不要用双手分别接触电阻两端,以免人体电阻与被测电阻并联而产生误差。每转换一次量程,都需要重新调零。不能使用电阻挡直接测量微安表表头、检流计、标准电池等仪器仪表的内阻。

⑤ 表盘上有许多条刻度尺,要根据不同的被测量对象来读数。测量直流量时读取“DC”或“—”刻度尺,测量交流量时读取“AC”或“~”刻度尺,测量电阻时读取“ Ω ”刻度尺。

⑥ 每次测量完毕,将转换开关拨到电压最高挡,或者拨到“OFF”挡,防止他人误用而损坏万用表。万用表长期不用时,应取出电池,防止电池液腐蚀损坏万用表的内部零件。

2. 数字式万用表

数字式万用表是采用集成电路模/数(A/D)转换器和液晶显示器,将被测量的数值直接以数字形式显示出来的一种电子测量仪表。

现以优利德(UNI-T) UT39A型数字万用表为例,说明其使用方法。UT39A型数字万用表是一种用电池驱动三位半数字万用表,可以进行交流电压、直流电压、交流电流、直流电流、电阻、二极管、晶体管 h_{FE} 、带声响的通断等测试,并具有极性选择、量程显示及全量程过载保护等特点。

UT39A型数字万用表面板结构如图2.1.21所示。使用万用表测试前,注意如下事项:

① 先按下“POWER”键,检查液晶屏显示状态。如在屏上显示“”,则说明电池电压不足,应打开后盖,更换9V层叠电池。如在屏上显示“”,则说明显示屏右下方“HOLD”键被按下,数据保持显示不变。

② 测试前应将功能开关置于所需的量程上,将表笔按测试需要接入输入插孔。一般将黑色表笔接入“com”端,红色表笔根据测量对象选择不同的插孔。

③ UT39A型万用表具有休眠模式,当仪表工作约15分钟后,电源将自动切断,仪表进入休眠模式,此时若要重新开启电源需重复按两次“POWER”开关。

UT39A型数字万用表各项测试功能使用方法简介如下。

(1) 测量直流电压。

将量程开关拨至“DCV”范围内的合适量程,红表笔接“V/ Ω ”插孔,黑表笔接“com”。

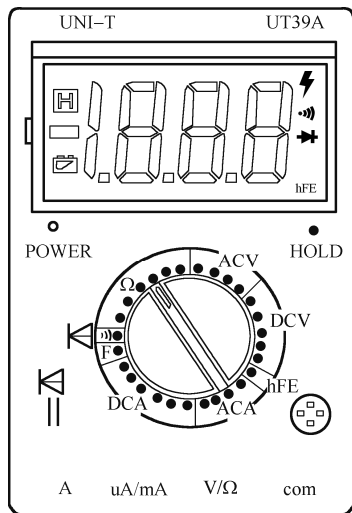


图 2.1.21 UT39A 型数字万用表面板

将测试表笔接入被测源两端，显示屏将显示被测电压值。当显示值前有“—”号时表示黑表笔测试端为高电位，红表笔测试端为低电位。如无“—”号时，表示黑表笔测试端为低电位，红表笔测试端为高电位。如果显示屏只显示“1”，表示超量程，应将量程开关置于更高的量程（以下测量同此）。

（2）测量交流电压。

将量程开关拨至“ACV”范围内的合适量程，表笔接法同（1），将测试表笔接入被测源两端，显示屏将显示被测电压的有效值（无正负之分）。

（3）测量直流电流。

将量程开关拨至“DCA”范围内的合适量程，黑表笔接“com”插孔。当待测量小于 200mA 时，红表笔接“ $\mu\text{A}/\text{mA}$ ”插孔；当测量值大于 200mA，小于 10A 时，红表笔接“A”插孔。将测试表笔串入被测电路，当显示值前有“—”号时，表示电流是从黑表笔流入，红表笔流出。

（4）测量交流电流。

将量程开关拨至“ACA”范围内的合适量程，表笔接法同（3），将测试表笔串入被测电路，显示值为被测交流电流的有效值。

（5）测量电阻。

将量程开关拨至“ Ω ”范围内合适量程，红表笔接“V/ Ω ”插孔，黑表笔接“com”插孔（注：此时红表笔极性为“+”，与指针式万用表相反）。将表笔连接到被测电路上，显示屏将显示被测电阻值（注：显示值的单位是 Ω 、k Ω 、M Ω 取决于当前选择的量限）。

（6）二极管检测。

将量程开关拨至“ K ”位置，表笔接法同（5），当红表笔接二极管正端，黑表笔接二极管的负端时，二极管正向导通（注：与指针式万用表不同），显示值为二极管的正向压降。当二极管反接时则显示过量程“1”。

（7）带声响的通断测试。

将量程开关拨至“ b ”（与二极管测试挡相同），表笔接法同（5）。将测试表笔分别接至被检电路（被检电路需断开电源）两端，如果被检电路的电阻在 20 Ω 以下，则表内蜂鸣器发声。

（8）晶体管放大系数 h_{FE} 的测试。

根据三极管是 NPN 或 PNP 型，将量程拨至“ h_{FE} ”，将三极管直接插入“e、b、c”各个相应插孔，即可直接读出其电流放大倍数。

2.1.4 其他电测量仪表

1. 钳形电流表

用普通电流表测量电流时，必须将被测电路断开，把电流表串入被测电路，操作很不方便。采用钳形电流表，可以测量正在运行的电气线路电流大小，可以在不断电的情况下测量，使用非常方便。

钳形电流表简称钳形表，如图 2.1.22 所示为数字式钳形电流表外形。钳形电流表的工作部分主要由一只电磁式电流表和穿心式电流互感器组成。穿心式电流互感器的铁芯制成活动开口，且成钳形，故名钳形电流表。穿心式电流互感器的原边绕组为穿过互感器中心的被测导线，副边绕组则缠绕在铁芯上与整流电流表相连。旋钮实际上是一



图 2.1.22 数字式钳形电流表

个量程选择开关，扳手的作用是开/合穿心式互感器铁芯的可动部分，以便在其内钳入被测导线。

测量电流时，按动扳手，打开钳口，将被测载体导线置于穿心式电流互感器的中间，当被测导线中有交流电流通过时，交流电流的磁通在互感器副边绕组中感应出电流，该电流通过电磁式电流表的线圈，使指针发生偏转，在表盘刻度尺上显示出被测电流值。

2. 兆欧表

兆欧表，又称摇表，是一种检查电气设备、测量高电阻的仪表，通常用来测量电路、电机绕组、电缆等绝缘电阻。兆欧表大都采用手摇发电机供电，其刻度以兆欧（ $M\Omega$ ）为单位。

兆欧表的原理图与外形如图 2.1.23 所示，它主要由手摇发电机、磁电式流比计、接线柱（L、E、G）组成。如测量电气设备的对地绝缘电阻时，“L”用单根导线连接设备的待测部位，“E”用单根导线连接设备外壳，如测量电气设备内两绕组间的绝缘电阻时，“L”和“E”分别连接两绕组的接线端，如测量电缆绝缘电阻时，“L”接线芯，“E”接外壳，“G”接线芯与外壳之间的绝缘层，以消除表面漏电产生的误差。

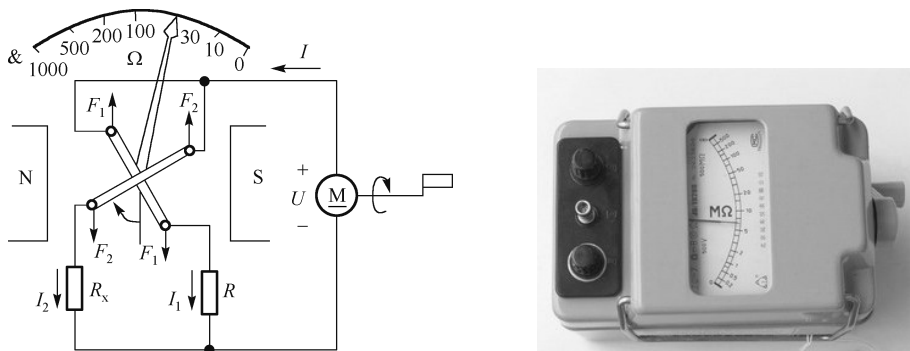


图 2.1.23 兆欧表的原理图和外形

使用兆欧表时摇动手柄，转速控制在 $120r/min$ 左右，允许有 $\pm 20\%$ 的变化，但不得超过 25% 。通常在摇动 $1min$ 后，待指针稳定下来再读数。如被测电路中有电容时，摇动时间要长一些，等电容充电完成，指针稳定下来再读数。测完后先拆接线，再停止摇动。测量中，若发现指针归零，应立即停止摇动手柄。

兆欧表未停止转动前，切勿用手触及设备的测量部分或摇表的接线柱。测量完毕，应对设备充分放电，避免触电事故。

3. 电度表

电度表（也称电能表）是专门测量交流电能的仪表。电能表分为感应式和电子式两大类。感应式电能表采用电磁感应的原理把电压、电流、相位转变为磁力矩，推动铝制圆盘转动，圆盘的轴（蜗杆）带动齿轮驱动计度器的齿轮转动，转动的过程即是时间量累积的过程。因此感应式电能表的好处就是直观、动态连续、停电不丢数据。

电子式电能表运用模拟或数字电路得到电压和电流向量的乘积，然后通过模拟或数字电路实现电能计量功能。由于应用了数字技术，分时计费电能表、预付费电能表、多用户电能表、多功能电能表逐渐走向市场，进一步满足了科学用电、合理用电的需求。

感应式电能表的生产工艺早已成熟和稳定，其测量机构转矩大、成本低，因而广泛用于电力、工农业生产及家庭用户。如图 2.1.24 所示，分别为感应式电能表及其内部结构示意图。

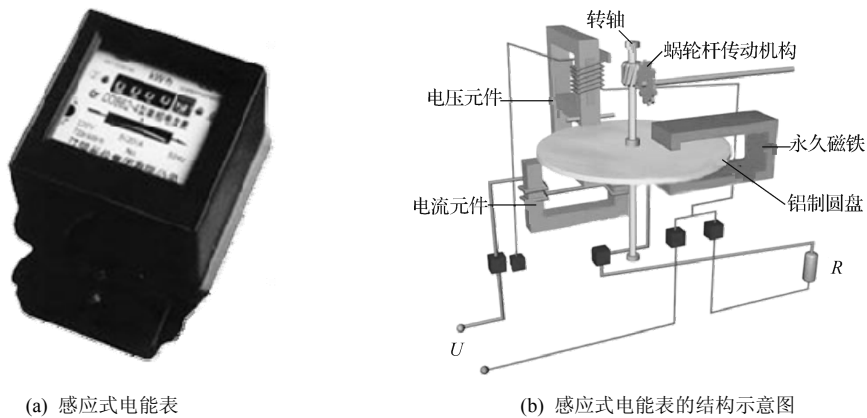


图 2.1.24 感应式电能表

感应式电能表的工作原理为：当把感应式电能表接入被测电路时，电流元件和电压元件中就有交变电流流过，这两个交变电流分别在它们的铁芯中产生交变的磁通；交变磁通穿过铝制圆盘，在铝盘中感应出涡流；涡流又在永久磁场中受到力的作用，从而使铝盘得到转矩（主动力矩）而转动。负载消耗的功率越大，通过电流线圈的电流越大，铝盘中感应出的涡流也越大，使铝盘转动的力矩就越大，也即转矩的大小跟负载消耗的功率成正比。功率越大，转矩越大，铝盘转动越快。铝盘转动时，又受到永久磁铁产生的制动力矩的作用，制动力矩与主动力矩方向相反；制动力矩的大小与铝盘的转速成正比，铝盘转动得越快，制动力矩越大。当主动力矩与制动力矩达到暂时平衡时，铝盘将匀速转动。因此，负载所消耗的电能与铝盘的转数成正比。铝盘转动时，由蜗轮杆传动机构带动计数器，把所消耗的电能指示出来。

2.2 常用电子仪器及其使用

在电路实验中，常用的电子仪器、仪表有直流稳压电源、单相调压变压器、信号发生器、交流毫伏表、示波器和数字万用表等。直流稳压电源、单相调压变压器、信号发生器属于电路中的“源”，它们为电路提供正常工作的能量或激励信号，其输出阻抗都很小。交流毫伏表、示波器和数字万用表等作为测量仪器，为减小对被测电路的影响，通常输入阻抗都很大。各实验仪器与实验电路之间的关系如图 2.2.1 所示。其中各电子仪器的作用简述如下：

- 直流稳压电源：为电路提供直流可调电压。
- 函数信号发生器：为电路提供不同波形、频率和幅度的输入信号。
- 示波器：观测、显示被测电压信号的波形（幅度、频率、周期、相位等参数）。

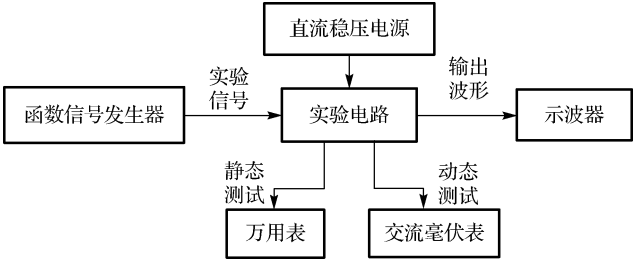


图 2.2.1 电子技术实验中测量仪器、仪表连接图