

单元 1

电路与电路定律

教学导航



扫一扫
单元 1 教
学课件

教	知识重点	1. 电路的组成结构 3. 电路中电位的计算 5. 欧姆定律 7. 基尔霍夫定律及其应用	2. 电路中各物理量的参考方向 4. 电路的电功率与电能 6. 电源有载工作、开路与短路分析
	知识难点	1. 电源有载工作、开路与短路分析 2. 基尔霍夫定律及其应用	
	推荐教学方法	讲解例题与实例	
	建议学时	10 学时	
学	推荐学习方法	以小组讨论的学习方式为主	
	必须掌握的理论知识	1. 电路的组成结构 3. 电路中电位的计算 5. 欧姆定律 7. 基尔霍夫定律及其应用	
	必须掌握的技能	1. 常用电工导线认知、电工工具及仪表的使用 2. 物理量的测量方法	



扫一扫下载技能训练 1 直流电路中电压、电流的测量



扫一扫下载技能训练 2 基尔霍夫定律的验证



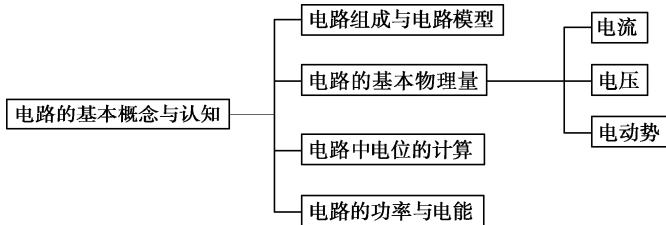
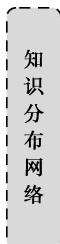
扫一扫下载
思考与练习题 1



扫一扫下载思
考与练习题 1
参考答案

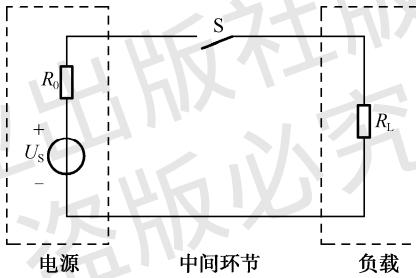


1.1 电路的基本概念与认知



1.1.1 电路组成与电路模型

电路是由电路器件(如晶体管)和电路元件(如电容、电阻等)按一定要求相互连接而成的，它提供了电流流通的路径。实际上，有些电路十分复杂，如通过发电机、变压器、输电线等完成电力产生、输送和分配的电路；有些电路十分简单，如手电筒电路，如图1.1所示。



扫一扫看电路
组成与电路模
型微课视频

扫一扫看电
路组成原理
动画

图1.1 手电筒电路

电路的结构无论简单还是复杂，电路必定是由电源、负载和中间环节三大部分组成的。

电源是将非电能转换成电能的装置，如将化学能转换成电能的电池。电源是推动电流运动的源泉。

负载是将电能转换成非电能的装置，如将电能转换成光能和热能的灯泡。负载是使用电能的装置。

中间环节是把电源与负载连接起来的部分，具有输送、分配、控制电路通断的功能。

由此可知，电路具有两个主要功能：其一，在电路中随着电流的流动能实现电能与其他形式能量的转换、传输和分配。例如，发电厂把热能（通过燃烧煤粉等）转换成电能，再通过变压器、输电线把电能送给各用户，各用户再把电能转换成光能、热能和机械能。其二，电路可以实现信号的传递和处理。例如，电视接收天线将含有声音和图像信息的高频电视信号通过高频传输线送至电视机，高频电视信号经过选择、变换、放大和检波等处理，恢复出声音和图像信息，在扬声器中发出声音，并在显示器上呈现图像。

实际上电路器件工作时的电磁性质是比较复杂的，不是单一的。例如，电阻炉在通电工作时能把电能转换成热能，具有电阻的性质，但因存在电压和电流，会产生磁场，故也具有存储磁场能量的性质，即电感的性质。在分析和计算时，若把该器件的所有电磁性质都考虑进去，则是十分复杂的。因此，为了表征电路中某一部分的主要电磁性能，以便进行定性、定



量分析,可以把该部分电路抽象成一个电路模型,即用理想的电路元器件来代替这部分电路。

那么,什么是理想的电路元器件呢?理想的电路元器件指的是突出该部分电路的主要电磁的性质,而忽略次要的电磁性质的假想元器件。因此,可以用理想的电路元器件及它们的组合来反映实际电路元器件的电磁性质。例如,电感线圈是由导线绕制而成的,既有电感量又有阻值,在实际分析时往往忽略它的电阻性质,突出它的电磁性质,把它表征为一个存储磁场能量的电感元件。又如,电阻丝是用金属丝一圈一圈绕制而成的,既有电感量又有阻值,在实际分析时往往忽略它的电感性质,突出它的电阻性质,把它表征为一个消耗电能的电阻元件。

下文将理想的电路元器件简称为电路元器件。电路元器件通常包括理想的电压源、电流源及电阻、电容、电感,前两种元器件是提供能量的,称为有源元件,后三种元件均不产生能量,称为无源元件。常见电路元器件符号如图 1.2 所示。

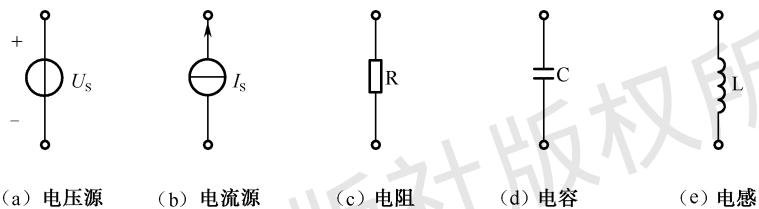


图 1.2 常见电路元器件符号

1.1.2 电路的基本物理量

1. 电流



扫一看看
电路中的基本物理量
微课视频



扫一看看
直流通路中的电流
走向动画

带电质点有规律运动的物理现象称为电流。带电质点在电介质中是指带正电荷或负电荷的正离子或负离子,在金属导体中是指带负电的自由电子。在电场的作用下,正电荷沿电场方向运动,负电荷沿逆电场方向运动。

电流大小等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。设在极短的时间 dt 内通过导体某一横截面的电荷量为 dq ,则通过该截面的电流为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

式(1.1)表明电流 i 是随时间变化的。若电流不随时间变化,即 $dq/dt = \text{常数}$,则称这种电流为恒定电流,简称直流,可写为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2)$$

电流是客观存在的物理现象,虽然看不见,摸不着,但可以通过各种效应来体现它的客观存在。日常生活中的开灯、关灯分别体现了电流的“存在”与“消失”。国际单位制(SI)规定,电流的单位是库[伦]/秒,即安[培],简称安(A);电荷的单位是库仑(C);时间的单位是秒(s)。电子电路中的电流都很小,常以毫安(mA)、微安(μ A)作为计量单位;而电力系统中的电流都比较大,常以千安(kA)作为计量单位,它们之间的换算关系是

$$1\text{kA}=10^3\text{A} \quad 1\text{A}=10^3\text{mA} \quad 1\text{mA}=10^3\mu\text{A}$$

在分析电路时,不仅要计算电流的大小,还应了解电流的方向。习惯上规定正电荷的移



动方向为电流方向(实际方向)。对于比较复杂的直流电路,往往不能确定电流的实际方向;对于交流电路,其中的电流方向是随时间变化的,难以判断。因此,为分析方便引入电流的参考方向这一概念。电流的参考方向可以任意设定,在电路中用箭头表示,并规定,当电流的参考方向与实际方向一致时,电流为正值,即 $i>0$,如图1.3(a)所示;当电流的参考方向与实际方向相反时,电流为负值,即 $i<0$,如图1.3(b)所示。

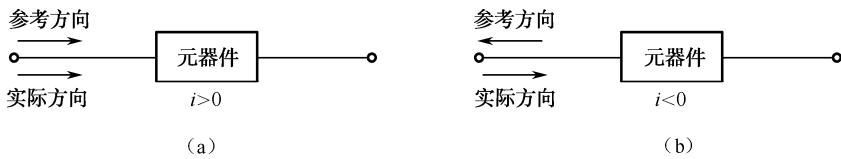


图1.3 电流的参考方向与实际方向的关系

有时还可以用双下标表示电流方向,如 I_{ab} 表示电流从 a 点流向 b 点, I_{ba} 表示电流从 b 点流向 a 点,即 $I_{ab}=-I_{ba}$ 。注意,负号表示与规定的方向相反。



提示:在分析电路时,要先假定电流的参考方向,并以此为标准进行分析计算,最后通过结果的正、负来确定电流的实际方向。

2. 电压

电荷在电路中运动必然受到电场力的作用,也就是说,电场力对电荷做了功。为了衡量其做功的能力,引出“电压”这一物理量。电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功称为 a 点、 b 点间的电压,即

$$u=\frac{dw}{dq} \quad (1.3)$$

式中, dq 为由 a 点移到 b 点的电荷量,单位为库[仑](C); dw 为电场力将正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,单位为焦[耳](J);电压的单位为伏[特](V),有时会使用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等作为计量单位,它们之间的换算关系是

$$1\text{kV}=10^3\text{V} \quad 1\text{V}=10^3\text{mV} \quad 1\text{mV}=10^3\text{\mu V}$$

在直流电路中,式(1.3)应写为

$$U=\frac{W}{Q} \quad (1.4)$$



提示:电路中任意两点间的电压仅与这两点在电路中的相对位置有关,与选取的计算路径无关。

习惯上规定电压的实际方向由高电位指向低电位。和电流一样,电路中两点间的电压可任意选定一个参考方向,并规定当电压的参考方向与实际方向一致时,电压为正值,即 $U>0$;当电压的参考方向与实际方向相反时,电压为负值,即 $U<0$ 。

电压的参考方向可用箭头表示;也可用正(+)-负(-)极性表示,如图1.4所示;还可用双下标表示,如 u_{AB} 表示 A 点、 B 点间的电压参考方向由 A 点指向 B 点。



(a) 箭头表示



(b) 极性表示

图 1.4 电压的参考方向

对于任意一个元器件的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。如果指定流过元器件的电流的参考方向是从电压正极性一端指向负极性一端，即两者的参考方向一致，就把电流和电压的参考方向称为**关联参考方向**，如图 1.5 (a) 所示；如果两者的参考方向不一致，就把电流和电压的参考方向称为**非关联参考方向**，如图 1.5 (b) 所示。

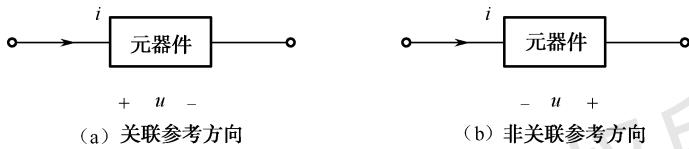


图 1.5 关联与非关联参考方向

3. 电动势

在电路分析中，常用到电动势这个物理量。

电源的电动势 E 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的负极经电源内部移到电源正极所做的功，也就是单位正电荷从电源负极到电源正极所获得的电能。

电动势的基本单位也是伏[特] (V)。习惯上规定电动势的实际方向是由电源负极（低电位）指向电源正极（高电位）。



提示：在电路分析中，常用电压源的电动势大小来表示端电压的大小。需要注意的是，电压源端电压的实际方向和电动势的实际方向是相反的。

从电压与电动势的定义可以得出结论：电场力把单位正电荷从电源的正极移到负极，而电源力把单位正电荷从电源的负极移到正极，这样该电荷实际上在电路中完整地绕行了一周。也就是说，电路中的电流从电源的正极流出经外电路再经电源负极流回电源正极。

【例 1.1】 如图 1.6 所示，电动势 $E_1 = 50V$ ， $E_2 = 30V$ ，参考方向已在图中标出，试求 U_{ab} 与 U_{ba} 的大小。

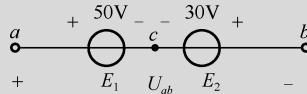


图 1.6 例 1.1 图

【解】 以 U_{ab} 的方向为参考，显然 U_{ac} 与 U_{cb} 的方向与 U_{ab} 的方向一致， a 、 b 两点间的电压是该支路上各段电压降的代数和。

$$U_{ab} = U_{ac} + U_{cb} = E_1 + (-E_2) = 50 - 30 = 20 \text{ (V)}$$

$$U_{ba} = -U_{ab} = -20 \text{ (V)}$$



1.1.3 电路中电位的计算

为了便于分析电路，常指定电路中任意一点为参考点0。根据电压定义，将电场力把单位正电荷 q 从电路中任意一点 a 移到参考点0时所做的功称为 a 点的电位，记为 V_a 。



提示：实际上电路中某点的电位就是该点与参考点之间的电压。

为确定电路中各点的电位，必须在电路中选取一个参考点，可归纳如下。

- (1) 参考点0的选取是任意的，其本身的电位为0，即 $V_0=0$ ，比参考点电位高的电位为正，比参考点电位低的电位为负。
- (2) 参考点选取不同，电路中各点的电位也不同。一旦选定参考点，电路中各点的电位就只能有一个数值。
- (3) 在电路中只要两点位置确定，不管参考点如何变更，两点之间的电压只有一个数值。
- (4) 在研究同一电路系统时，只能选一个电位参考点。



提示：参考点在电路中通常用接地符号“ \perp ”表示。在电子电路中常以多条支路汇集的公共点作为参考点；许多电气设备常把外壳接地，该外壳可以作为电位参考点。



注意：在电子学中常采用电位来分析问题，较少采用电压这一物理量。例如，在研究晶体管处于何种工作状态时，通过各个电极的电位高低来分析比较，从而确定晶体管的工作状态。

【例 1.2】 在如图1.7所示的电路中，分别以0点和B点为参考点，试求电路中各点的电位。

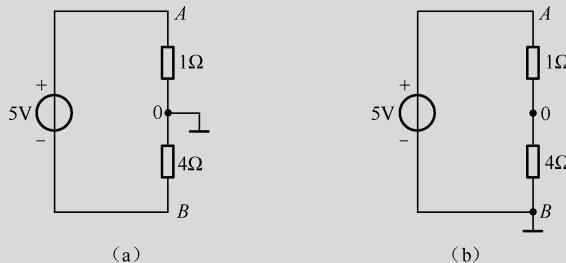


图 1.7 例 1.2 图

【解】 在电路中， $I = \frac{5}{1+4} = 1$ (A)。

若以0点为参考点[见图1.7(a)]，则有

$$V_0=0 \text{ (V)}, V_A=1\times 1=1 \text{ (V)}, V_B=-(1\times 4)=-4 \text{ (V)}$$

验算： $U_{AB}=V_A-V_B=1-(-4)=5$ (V)。

若以B点为参考点[见图1.7(b)]，则有

$$V_B=0 \text{ (V)}, V_A=[1\times(1+4)]=5 \text{ (V)}, V_0=(1\times 4)=4 \text{ (V)}$$

验算： $U_{AB}=V_A-V_B=5-0=5$ (V)。



单元 1 电路与电路定律

此电位的引入给电路分析带来了便利，在电子电路中往往不画出电源而改用电位标出。图 1.8 所示为电路的一般画法与电子电路中的习惯画法示例。

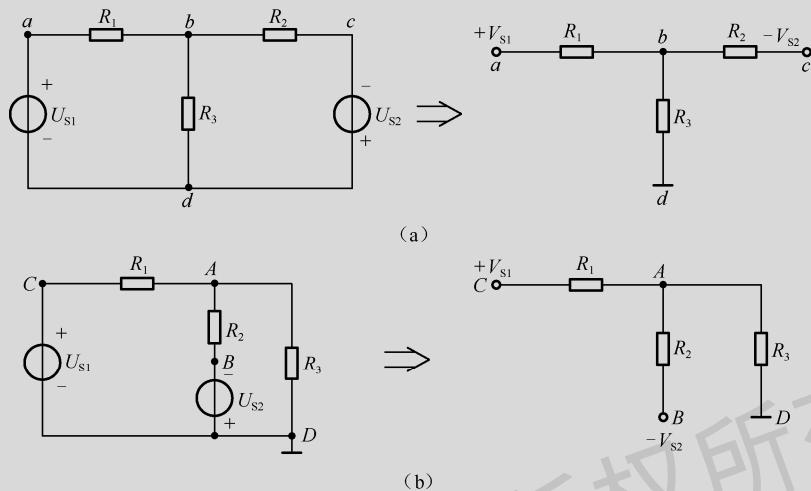


图 1.8 电路的一般画法与电子电路的习惯画法示例

【例 1.3】 在如图 1.9 所示的电路中，试求当开关 S 断开与闭合时 a 点的电位。

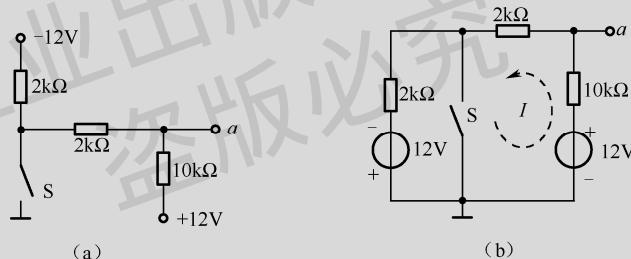


图 1.9 例 1.3 图

【解】 为便于分析，把如图 1.9 (a) 所示的电路改画成如图 1.9 (b) 所示的电路。

当开关 S 断开时，有

$$I = \frac{12+12}{(10+2+2) \times 10^3} \approx 1.7 \times 10^{-3} \text{ (A)}$$

则

$$V_a = -I \times 10 \times 10^3 + 12 = -1.7 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 + 12 = -17 + 12 = -5 \text{ (V)}$$

当 S 闭合时，有

$$V_a = \frac{12}{10+2} \times 2 = 2 \text{ (V)}$$

1.1.4 电路的电功率与电能



在电路的分析和计算中，能量和电功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下总伴随着电能与其他形式能量的相互交换；而且电气设备、电路部件本身都有电功率的限制，在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值。



在电气工程中，电功率简称功率，是衡量每单位时间内所消耗电能大小的。

在如图 1.10 所示的电路中， a 、 b 两点间的电压为 U ，流过的电流为 I 。根据电压的定义可知，当正电荷 q 在电场力的作用下通过电阻从 a 点移到 b 点时，电场力所做的功为

$$W = U \cdot q = U \cdot I \cdot t \quad (1.5)$$

这个功也就是电阻在 t 时间段内所吸收的电能。电阻吸收的电能全部转换成热能，其大小为 $W_R = U \cdot I \cdot t = RI^2 \cdot t$ 。在国际单位制中，电能、热能的单位都是焦[耳]，用字母 J 表示。电阻吸收的功率可定义为单位时间内能量的转换率，其表达式为

$$P = \frac{W_R}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = RI^2 \quad (1.6)$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦(W)，有时会使用 kW、mW、μW 作为计量单位，它们之间的换算关系为

$$1\text{kW}=10^3\text{W} \quad 1\text{W}=10^3\text{mW} \quad 1\text{mW}=10^3\mu\text{W}$$

在电路分析中不仅要计算能量和功率的大小，还要判别哪些电路元器件是电源，输出功率；哪些电路元器件是负载，吸收功率，对此，可进行如下归纳。

(1) 根据电压的实际方向、电流的实际方向可确定某一电路元器件是电源还是负载。

- ① 电源： U 和 I 实际方向相反。
- ② 负载： U 和 I 实际方向相同。

(2) 根据电压的参考方向、电流的参考方向和公式 $P=UI$ 可确定某一电路元器件是电源还是负载。

① 当某一电路元器件上的电压 U 和电流 I 为关联参考方向时： $P > 0$ ，电路元器件吸收功率，为负载； $P < 0$ ，电路元器件输出功率，为电源。

② 当某一电路元器件上的电压 U 和电流 I 为非关联参考方向时： $P > 0$ ，电路元器件输出功率，为电源； $P < 0$ ，电路元器件吸收功率，为负载。



提示：根据能量守恒定律，电源输出的功率和负载吸收的功率应该是平衡的。

【例 1.4】 在如图 1.11 所示的电路中有 5 个未知元器件，各电压、电流的参考方向均已设定，已知 $I_1=2\text{A}$, $I_2=1\text{A}$, $I_3=-1\text{A}$, $U_1=7\text{V}$, $U_2=3\text{V}$, $U_3=-4\text{V}$, $U_4=8\text{V}$, $U_5=4\text{V}$ 。试判别未知元器件是电源还是负载，功率是否平衡。

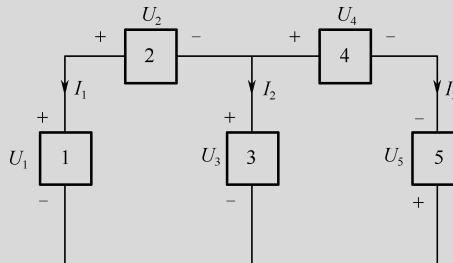


图 1.11 例 1.4 图

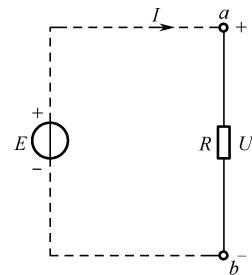


图 1.10 电阻吸收的功率



【解】 元器件 1、元器件 3、元器件 4 的电压、电流为关联参考方向:

$$P_1=U_1I_1=7\times 2=14 \text{ (W)} \text{ (吸收功率)}$$

$$P_3=U_3I_2=-4\times 1=-4 \text{ (W)} \text{ (输出功率)}$$

$$P_4=U_4I_3=8\times(-1)=-8 \text{ (W)} \text{ (输出功率)}$$

因此元器件 1 是负载，元器件 3 和元器件 4 是电源。

元器件 2、元器件 5 的电压、电流为非关联参考方向:

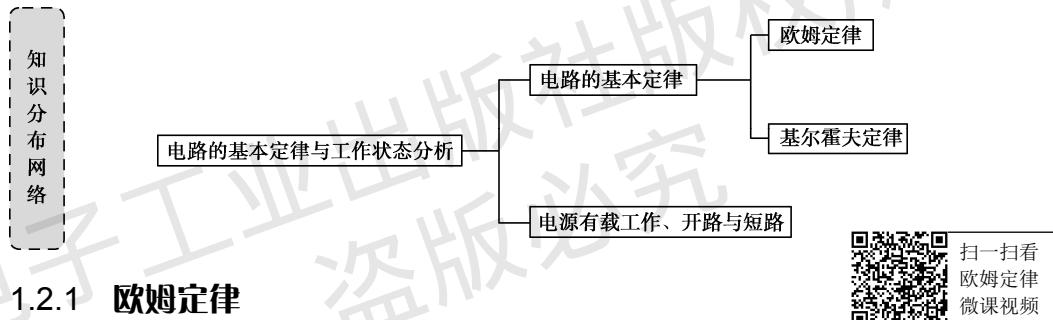
$$P_2=U_2I_1=3\times 2=6 \text{ (W)} \text{ (输出功率)}$$

$$P_5=U_5I_3=4\times(-1)=-4 \text{ (W)} \text{ (吸收功率)}$$

因此元器件 2 是电源，元器件 5 是负载。

电源输出的总功率为 $4+8+6=18 \text{ (W)}$ ，负载吸收的总功率为 $14+4=18 \text{ (W)}$ ，这说明功率平衡，符合能量守恒定律。

1.2 电路的基本定律与工作状态分析



1.2.1 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一，用来确定电路各部分电压、电流之间的关系，也称为电路的 VCR (Voltage Current Relation，电压电流关系)。

欧姆定律表明流过线性电阻的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比。当流过电阻的电压和电流是关联参考方向时，欧姆定律可表示为

$$U=IR \quad (1.7)$$

由式 (1.7) 可知，当所加电压一定时，阻值 R 越大，电流 I 越小。显然，电阻具有阻碍电流作用的物理性质。

当电阻的电压和电流是非关联参考方向时，欧姆定律可表示为

$$U=-IR \quad (1.8)$$

电阻的单位是欧[姆]，用符号 Ω 表示。大电阻常以千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$) 为单位。电阻的大小与金属导体的有效长度 (l)、有效截面积 (S) 及电阻率 (ρ) 有关，它们之间的关系可写为

$$R=\rho \frac{l}{S} \quad (1.9)$$

电阻的倒数称为电导，用符号 G 表示，其单位是西[门子] (S)，即

$$G=\frac{1}{R} \quad (1.10)$$



若电阻的阻值是一个常数,与通过它的电流无关,则称这样的电阻为线性电阻,线性电阻上的电压、电流的关系遵守欧姆定律。若流过电阻的电流或电阻两端的电压变化,电阻的阻值也随之改变,则称这样的电阻为非线性电阻。显然,非线性电阻两端的电压和流过该电阻的电流不遵守欧姆定律。本书如无特殊说明均指线性电阻。

【例 1.5】 应用欧姆定律对如图 1.12 所示的电路列式子,并求阻值 R 。

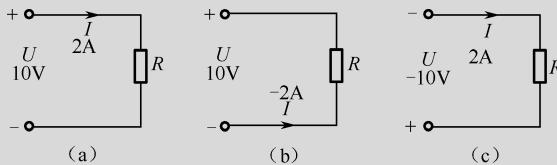


图 1.12 例 1.5 图

$$\text{【解】} \text{ 图 1.12 (a): } R = \frac{U}{I} = \frac{10}{2} = 5 \text{ } (\Omega) \text{。}$$

$$\text{图 1.12 (b): } R = -\frac{U}{I} = -\frac{10}{-2} = -5 \text{ } (\Omega) \text{。}$$

$$\text{图 1.12 (c): } R = -\frac{U}{I} = -\frac{-10}{2} = 5 \text{ } (\Omega) \text{。}$$

1.2.2 电源有载工作、开路与短路

电路在不同的工作条件下会处于不同的工作状态,也有不同的特点,充分了解电路不同的工作状态和特点对正确使用各种电气设备是十分有益的。

现以如图 1.13 (a) 所示的简单直流电路为例来分析电路的有载工作状态、开路状态、短路状态。在如图 1.13 (a) 所示的电路中, E 、 U 和 R_0 分别为电源的电动势、端电压和内阻阻值, R_L 为负载电阻阻值。



1. 有载工作状态

将图 1.13 (a) 中的开关 S 闭合,接通电源和负载,称此状态为电路的有载工作状态。电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1.11)$$

当 E 和 R_0 一定时,电流由负载电阻 R_L 的大小决定。

端电压为

$$U = E - IR_0 \quad (1.12)$$

由式 (1.12) 可知,电源端电压小于电动势,两者之差为电流通过电源内阻产生的压降 IR_0 。电流越大,电源端电压下降得越多。表示电源端电压 U 与输出电流 I 之间关系的曲线称为电源的外特性曲线,如图 1.13 (b) 所示。电源外特性曲线的斜率与电源内阻的阻值 R_0 有关。电源内阻一般很小,当 $R_0 \ll R$ 时, $U \approx E$ 。

式 (1.12) 中的各项乘以电流 I ,可得到功率平衡式为

$$\begin{aligned} UI &= EI - I^2 R_0 \\ P &= P_E - \Delta P \end{aligned} \quad (1.13)$$



单元 1 电路与电路定律

式中, P_E 为电源产生的功率, $P_E = EI$; ΔP 为电源内阻消耗的功率, $\Delta P = I^2 R_0$; P 为电源输出功率(负载消耗功率), $P = UI$ 。

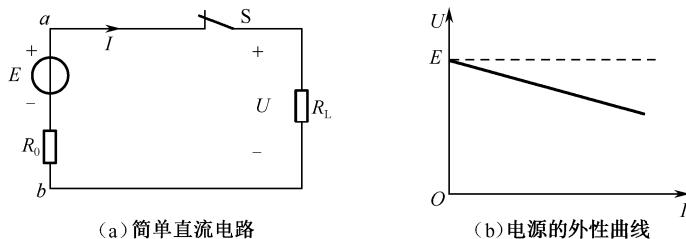


图 1.13 电源的外特性

式(1.11)、式(1.12)和式(1.13)分别表示电路有载工作状态时的电流、电压和功率三方面特征。

 提示: 用电设备通常并联在电源的两端, 并联的用电设备个数越多, 电源提供的电流越大, 电源输出的功率也越大。对于一个电源来说, 负载电流不能无限增大, 否则将会因电流过大而把电源烧坏。各个电源和各用电设备的电压、电流及功率都有规定的数据, 这些数据就是电源、用电设备的额定值。

额定值是设计和制造部门规定的电气产品的使用值, 通常用 U_N 、 I_N 、 P_N 表示额定电压、额定电流和额定功率。电气设备只有在额定值下工作, 才能保证安全可靠, 充分发挥电气设备的效用, 同时不缩短电气设备的使用寿命。大多数电气设备的使用寿命与绝缘强度有关。当通过电气设备的电流超过额定值较多时, 电气设备将会因过热而破坏绝缘, 或者因加速了绝缘材料老化而缩短使用寿命; 当电压超过额定值较多时, 绝缘材料会被击穿。所以, 在正常工作条件下, 若负载电流大于额定值, 则会出现超载情况; 同样, 若负载电流远小于额定值, 则会出现欠载情况。欠载情况下的电气设备的能力不能被充分利用。在工程上, 超载情况和欠载情况都是不允许出现的。

只有当负载电流与额定值相近, 趋于满载时, 设备的运行才能实现经济合理和高效率。

电气设备的额定值通常标在铭牌或使用说明书上, 在使用时, 必须仔细核对额定值的具体数据。

 提示: 在使用电气设备时, 电压、电流、功率的实际值不一定等于额定值。白炽灯、电阻炉等设备只要在额定电压下使用, 其电流和功率都能达到额定值。但是因为电动机、变压器等设备的实际值和设备的机械负荷的大小与电负荷的大小有关, 当其在额定电压下工作时, 实际电流和功率不一定与额定值一致, 有可能出现欠载或超载的情况, 在使用时必须加以注意。

2. 开路状态

在如图 1.13(a)所示的电路中, 将开关 S 断开, 则电路不通, 此时电路处于开路(空载或断路)状态, 如图 1.14 所示。在开路状态下, 电源不接负载, 此时外电路对电源来说, 负载电阻阻值 R_L 为无穷大(∞), 电流为零, 电源两端的端电压(开路电压或空载电压 U_0) 等于电源电动势 E , 电源不输出功率。

如上所述, 电路开路时的特征可用下列各式表示:





$$\begin{cases} I = 0 \\ U = U_0 = E \\ P = 0 \end{cases} \quad (1.14)$$



3. 短路状态

在如图 1.13(a) 所示的电路中, 当电源的两端 a 和 b 由于某种事故而直接相连时, 电源被短路, 如图 1.15 所示。当电源短路时, 外电路的电阻可视为 0, 电流不再流过负载电阻。因为在电流的回路中仅有很小的电源内阻阻值 R_0 , 所以电流很大, 此电流称为短路电流 I_S 。此时负载电阻两端的电压为 0, 电源不输出功率, 电源产生的电能全部被内阻消耗并转成热能, 电源的温度迅速上升, 从而损坏。

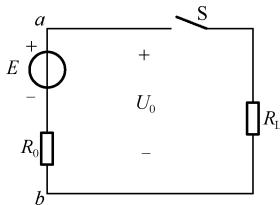


图 1.14 开路

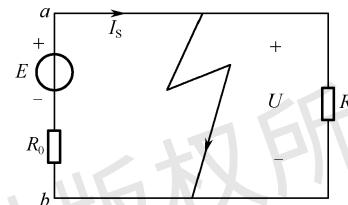


图 1.15 短路

如上所述, 电源短路时的特征可用下列各式表示:

$$\begin{cases} U = 0 \\ I = I_S = \frac{E}{R_0} \\ P_E = \Delta P = I_S^2 R_0, \quad P = 0 \end{cases} \quad (1.15)$$



提示: 短路可以发生在负载端或电路的任何位置。短路通常是一种严重事故, 应该尽力预防。产生短路的原因往往是绝缘损坏或接线不慎, 因此经常检查电气设备和电路的绝缘情况是一项很重要的安全措施。为了防止短路事故的发生, 通常在电路中接入熔断器或自动断路器, 以便在发生短路时迅速将故障电路自动切断。但是, 有时出于某种需要, 可以将电路中的某一段短路(常称为短接)或进行某种短路实验。

【例 1.6】 在如图 1.16 所示的电路中, 已知 $E=36V$, $R_1=2\Omega$, $R_2=4\Omega$ 。试在下列三种情况下, 分别求出电压 U_2 和电流 I 。

- (1) 电路正常工作。
- (2) $R_2=\infty$ (R_2 处断开)。
- (3) $R_2=0$ (R_2 处短接)。

【解】 (1) 在电路正常工作情况下:

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{36}{2 + 4} = 6 \text{ (A)}$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 6 \times 2 = 12 \text{ (V)}$$

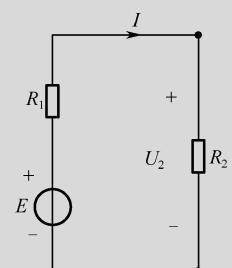


图 1.16 例 1.6 图

(2) 当 $R_2=\infty$ 时:

$$I = 0 \text{A} \quad U_2 = E = 36 \text{V}$$



(3) 当 $R_2=0$ 时:

$$I = \frac{E}{R_1} = \frac{36}{2} = 18 \text{ (A)} \quad U_2 = 0 \text{ (V)}$$

1.2.3 基尔霍夫定律及其应用

若干个电路元器件按一定方式连接构成电路后，电路中各部分的电压、电流必然受到两类约束。一类是元器件的特性造成的约束。例如，线性电阻的电压和电流必须满足 $u = Ri$ 的关系，这种关系称为元器件的组成关系或电压电流关系。另一类是元器件的相互连接对支路电流之间和支路电压之间带来的约束，有时称为“拓扑”约束，这类约束由基尔霍夫定律体现。基尔霍夫定律分为基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律，是分析电路的重要基础。

在介绍基尔霍夫定律之前先介绍几个名词。

(1) 支路: 单个电路元器件或若干个电路元器件串联，构成电路的一个分支称为支路。一条支路上流经的是同一电流，在如图 1.17 所示的电路中共有三条支路 ($b=3$)。

(2) 节点: 电路中三条或三条以上支路的会聚点称为节点。在如图 1.17 所示的电路中共有两个节点，即 a 点和 b 点 ($n=2$)。

(3) 回路: 电路中由支路组成的闭合路径称为回路。在如图 1.17 所示的电路中共三个回路 ($I=3$)。

(4) 网孔: 内部无支路的回路称为网孔。在如图 1.17 所示的电路中共两个网孔 ($m=2$)。

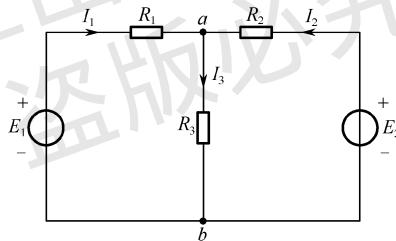


图 1.17 基尔霍夫电流定律示例



扫一扫看电
路中的术语
微课视频



扫一扫看基尔
霍夫电流定律
微课视频



扫一扫看基尔
霍夫电流定律
原理动画

1. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 反映了电路中任一节点各支路电流间的约束关系，反映了电流的连续性。该定律可叙述为：在任何时刻，对任一节点，流进该节点的电流代数和恒等于零，即

$$\sum I = 0 \quad (1.16)$$

规定流入节点的电流为“+”，流出节点的电流为“-”。对于如图 1.17 所示的电路中的 a 点，可列写：

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

可改写为

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.17)$$

由式 (1.17) 可看出对于任一节点，流入该节点的电流一定等于流出该节点的电流，即 $\sum I_{\lambda} = \sum I_{\text{出}}$ 。



提示: 在应用基尔霍夫电流定律时, 应该注意流入或流出都是针对假设的电流参考方向而言的。

基尔霍夫电流定律还可推广应用于电路中任一假设闭合面, 即通过电路中任一假设闭合面的各支路电流的代数和恒等于零。该假设闭合面被称为广义节点。

【例 1.7】 在如图 1.18 所示的电路中, $I_1 = -2\text{A}$, $I_2 = 3\text{A}$, 求电流 I_3 。

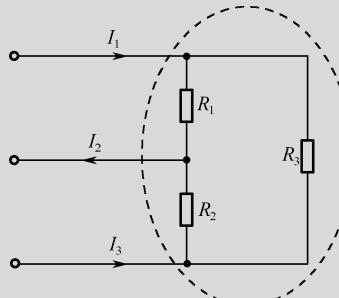


图 1.18 例 1.7 图

【解】 假设一闭合面如图 1.18 中虚线所示, 则

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

所以

$$I_3 = I_2 - I_1 = 3 - (-2) = 5 \text{ (A)}$$

2. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff Voltage Laws, KVL) 反映了电路中任一回路支路电压之间的约束关系。该定律可叙述为: 在任何时刻, 沿任一闭合回路所有支路电压的代数和恒等于零, 即

$$\sum U = 0 \quad (1.18)$$

规定在列写基尔霍夫电压定律方程时, 支路电压的参考方向与回路的绕行方向一致的电压为“+”, 支路电压参考方向与回路绕行方向相反的电压为“-”。

图 1.19 所示为某电路中的一个回路, 设其回路绕行方向为顺时针, 则有

$$U_1 + U_2 - U_3 - U_4 + U_5 = 0$$

提示: 在应用基尔霍夫电压定律时应该注意回路中的绕行方向是任意假定的。电路中两点间的电压大小与路径无关。

在如图 1.19 所示的电路中, 若按 a 、 b 、 c 方向计算 a 点和 c 点间的电压, 则有 $U_{ac} = U_1 + U_2$; 若按 a 、 e 、 d 、 c 方向计算 a 点和 c 点间的电压, 则有 $U_{ac} = -U_5 + U_4 + U_3$ 。两者结果应相等, 故有 $U_1 + U_2 - U_3 - U_4 + U_5 = 0$, 与上文结果完全一致。

基尔霍夫电压定律不仅适用于实际回路, 加以推广还适用于电路中的假想回路。在如

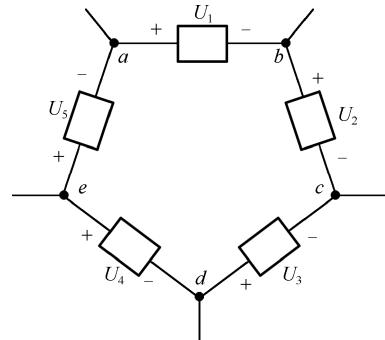


图 1.19 基尔霍夫电压定律示例



图 1.19 所示的电路中假想有 a 、 b 、 c 、 a 回路，绕行方向仍为顺时针，根据基尔霍夫电压定律，则有

$$U_1 + U_2 + U_{ca} = 0$$

由此可得

$$U_{ca} = -U_1 - U_2$$

即

$$U_{ac} = -U_{ca} = U_1 + U_2$$

图 1.20 所示为某电路的一部分，各支路电压的参考方向和回路的绕行方向已在图 1.20 中标出，应用基尔霍夫电压定律可列写：

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} = -E_1 + I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 + E_2 = 0$$

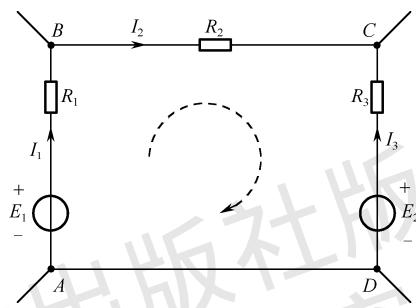


图 1.20 基尔霍夫电压定律示例

将上式进行整理可得

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 = E_1 - E_2$$

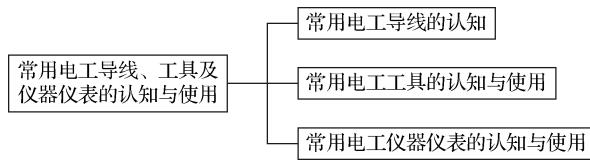
由上式可知，方程的右边是沿回路绕行方向闭合一周所有电动势的代数和，方程的左边是沿回路绕行方向闭合一周各电阻上电压降的代数和。

$$\sum RI = \sum E \quad (1.19)$$

式 (1.19) 是基尔霍夫电压定律的第二种表达形式，规定当电动势的参考方向与回路绕行方向一致时为“+”，反之为“-”；当电流的参考方向与回路绕行方向一致时，在电阻上产生的电压降为“+”，反之为“-”。

1.3 常用电工导线、工具及仪器仪表的认知与使用

知识分布网络



1.3.1 常用电工导线的认知

常用的电工导线一般可分为硬导线和软导线两大类。其中，硬导线又有单股、多股及多



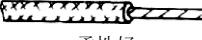
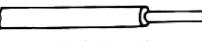
混合股之分。硬导线又可分为裸导线和包有绝缘层的绝缘线两大类。裸导线中又有截面为圆形的导线和截面为矩形、管形的母线的区别，其芯线一般为铝质和铜质材料。软导线多为绝缘线，其芯线是多股细铜丝。

铝导线的导电性能、耐腐蚀能力比铜导线差，但其质量小、价格便宜，故多用于架空线路、照明线路、母线。

铜导线的导电性能、焊接特性、机械强度、耐腐蚀能力比铝导线好，且使用寿命比铝导线长，故较重要的线路或可靠性要求较高的电气设备，如桥式起重机的动力线路、控制线路和照明线路及各种电动机、变压器的绕组，都采用铜导线。

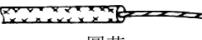
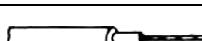
常用电工导线的种类如表 1.1 所示。

表 1.1 常用电工导线的种类

类别	名称	型号	截面积范围/mm ²	外形结构及说明
母线	铜硬母线	TMY	160~1000	 用于配电装置
	铝硬母线	LMY	160~1000	
裸绞线	铜绞线	TJ	10~400	 用于低压架空线
	铝绞线	LJ	10~600	
	钢芯铝绞线	LGJ	10~400	 用于高压架空线
	钢绞线	GJ	25~120	
橡皮绝缘线	铜芯橡皮线	BX	0.75~95	 室内外配线
	铝芯橡皮线	BLX	2.5~400	
	铜芯氯丁橡皮线	BXF	0.75~95	外形结构同铜、铝芯橡皮线，价格较便宜
	铝芯氯丁橡皮线	BLXF	2.5~95	
	铜芯软橡皮线	BXR	0.75~185	 柔性好
塑料绝缘线	铜芯塑料线	BV	0.2~185	 室内外配线
	铝芯塑料线	BLV	1.0~185	
	铜芯塑料护套线	BVV	0.75~10	绝缘好，可直接敷设
	铝芯塑料护套线	BLVV	2.5~10	
	铜芯软塑料线	BVR	0.75~50	 柔软线芯



续表

类别	名称	型号	截面积范围/mm ²	外形结构及说明
塑料绝缘线	铜芯耐热塑料线	BV-105	0.5~6	 耐高温
	铝芯耐热塑料线	BLV-105	2.5~10	
日用电线	铜芯塑料软导线	RV	0.12~6	 单芯
	铜芯橡皮软导线	RX	0.2~2.5	 圆芯
	并行塑料软导线	RVB	0.12~4	 2~3 芯
日用电线	绞形塑料软导线	RVS	0.12~4	 2 芯
	塑料护套软导线	RVV	0.12~6	 1~4 芯
	橡皮护套软导线	RXX	0.12~6	 1~4 芯
屏蔽安装线	塑料绝缘屏蔽线	AVP	0.12~0.75	 具有屏蔽作用，用于仪表，电讯设备安装接线
	塑料护套屏蔽线	AVVP	0.12~0.4	
	橡皮绝缘屏蔽线	AXP	0.12~0.75	
	橡皮护套屏蔽线	AXXP	0.12~0.4	

注：型号字母含义为 L—铝芯；T—铜芯或不表示；X—橡皮绝缘；V—塑料绝缘；M—母线；J—绞线；R—软导线；P—屏蔽线；A—安装线；B—布电线。

1.3.2 常用电工工具的认知与使用

电工在安装和维修各种供/配电电路、电气设备时，离不开各种电工工具。常用电工工具种类繁多，用途广泛，下面逐一对其进行介绍。

1. 测电笔

测电笔简称电笔，是用来检查低压导电设备外壳是否带电的辅助安全工具。电笔分为钢笔式和螺丝刀式两种形式，由笔尖、电阻、氖管、弹簧和笔身组成。弹簧与后端外部的金属部分相接，在使用时手应触及后端外部的金属部分。电笔结构示意图如图 1.21 所示。



(a) 螺丝刀式

(b) 钢笔式

图 1.21 电笔结构示意图



1) 电笔的工作原理

当用电笔测试带电体时,带电体、电笔、人体、大地形成通电回路,只要带电体与大地之间的电位差超过一定数值,电笔中的氖管就会发出红色辉光。

2) 使用注意事项

(1) 在用电笔测试带电体前,一定要先用电笔测试已知的带电的电源,以检查电笔中的氖管能否正常发光。

(2) 在明亮的光线下测试时,不易看清氖管发出的辉光,所以应当避光检测。

(3) 在大多数情况下电笔的金属探头会被制成螺丝刀形状,只能承受很小的扭矩,在使用时应特别注意,以防损坏。

2. 螺丝刀

螺丝刀是紧固或拆卸螺钉的专用工具,有一字形和十字形两种,如图 1.22 所示。

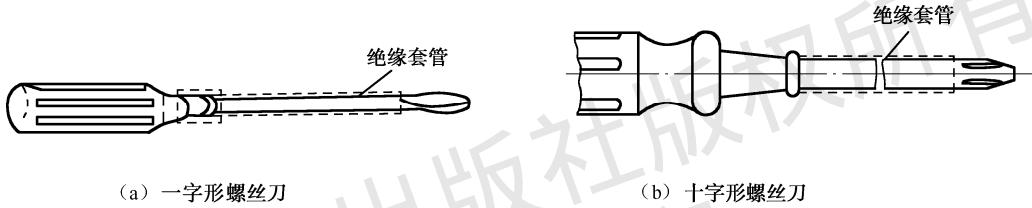


图 1.22 螺丝刀

电工必备的一字形螺丝刀有 50mm 和 150mm 两种型号;十字形螺丝刀常用的规格有 4 种: I 号(适用于直径为 2~2.5mm 的螺钉)、II 号(适用于直径为 3~5mm 的螺钉)、III 号(适用于直径为 6~8mm 的螺钉)、IV 号(适用于直径为 10~12mm 的螺钉)。在使用螺丝刀时,手握住螺丝刀顶部向所需方向旋转。注意,不可用金属杆直通柄顶的螺丝刀。

在使用螺丝刀紧固或拆卸带电的螺钉时,手不得触及螺丝刀的金属杆,以免发生触电事故。为了避免螺丝刀的金属杆触及皮肤或触及临近带电体,应在金属杆上穿套绝缘套管。螺丝刀的使用示意图如图 1.23 所示。

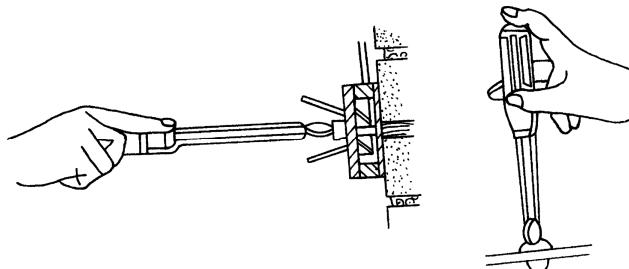


图 1.23 螺丝刀的使用示意图

3. 钢丝钳

钢丝钳是钳夹和剪切工具,由钳头和钳柄两部分组成。它的功能较多,钳口用来外绞或钳夹导线线头,齿口用来旋紧或起松螺母,刀口用来剪切导线或剖切导线绝缘层,铡口用来铡切电线线芯或钢丝、铝丝等较硬的金属。常用的钢丝钳规格有 150mm、175mm、200mm 三



单元 1 电路与电路定律

种。电工使用的钢丝钳的钳柄应套有耐压大于 500V 的绝缘套管。钢丝钳的外形示意图如图 1.24 所示。

4. 尖嘴钳

尖嘴钳头部尖细，因此可以在狭小的空间中进行操作，外形示意图如图 1.25 所示。

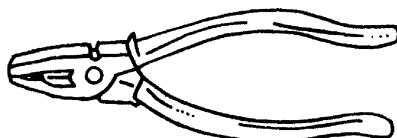


图 1.24 钢丝钳的外形示意图

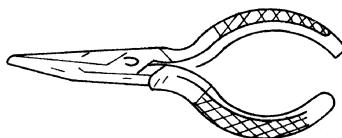


图 1.25 尖嘴钳的外形示意图

尖嘴钳的主要用途如下。

- (1) 刀口可以剪断细小的金属丝。
- (2) 夹持较小的螺钉、垫圈、导线等。
- (3) 在装接控制电路板时，将单股导线弯成带有一定圆弧的接线鼻子。

5. 活络扳手

活络扳手又称活络扳头，由头部和柄部组成。头部由呆扳唇、活络扳口、蜗轮和轴销构成。旋动蜗轮可以调节扳口大小。活络扳手常用的规格有 150mm、200mm、300mm 等。按照螺母大小选用规格合适的活络扳手。活络扳手的结构示意图如图 1.26 所示。

6. 剥线钳

剥线钳是用于剖削小直径导线绝缘层的专用工具。剥线钳外形示意图如图 1.27 所示。在使用剥线钳时，用标尺将要剖削的绝缘层长度定好，把导线放入相应的刀口，用手将钳柄握紧，导线的绝缘层即可被割破，并自动弹出。

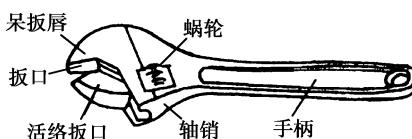


图 1.26 活络扳手的结构示意图

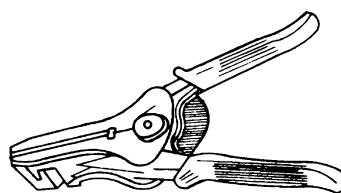


图 1.27 剥线钳外形示意图

7. 电工刀

电工刀用于剖削和切割电线绝缘层、绳索、木桩及软性金属。在使用电工刀时，刀口应向外剖削，用毕应将刀身折进刀柄。这里需提到的一点是，电工刀的刀柄不是用绝缘材料制成的，所以不能用电工刀剖削带电导线或器材，以防触电。电工刀按刀片长度分为大号（112mm）和小号（88mm）两种规格。电工刀外形示意图如图 1.28 所示。

8. 冲击钻

冲击钻外形示意图如图 1.29 所示。冲击钻可以用来在砖墙或混凝土墙上钻孔。需要注意的是，在使用冲击钻时若要调速或调挡（冲、锤），则应先停转。



图 1.28 电工刀外形示意图

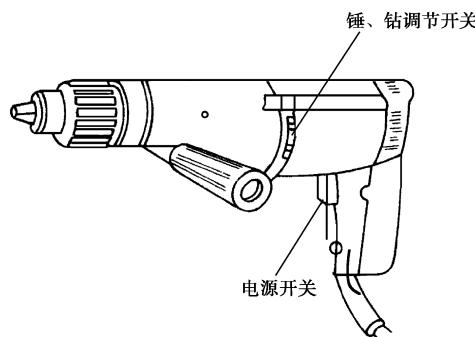


图 1.29 冲击钻外形示意图

9. 转速表

转速表用来测定电动机转轴、机床主轴和其他旋转轴类的转速，常用的是离心式手持转速表。在用转速表进行测量时，先将转速表的调速盘转到所要测定的转速范围内。若估计不出被测转轴的转速范围，则应将调速盘自高速挡向低速挡逐级调整，以找到合适的测量范围。切忌在测量过程中换挡和用低速挡测高速，以防转速表损坏。然后将转速表的测量轴与被测量轴轻轻接触，并逐渐增大接触力量，直至表针读数稳定。在测量过程中，尽量保持测量轴与被测轴在一条轴线上，以获得准确的读数。

随着科技的发展，出现了一种非接触式手持数字转速表，测速前只要在被测旋转物体上贴一块反射标记，使射出的可见光对准反射标记即可测得转速。非接触式手持数字转速表操作示意图如图 1.30 所示。

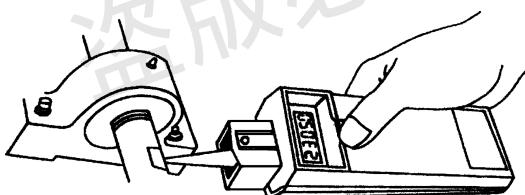


图 1.30 非接触式手持数字转速表操作示意图

10. 电烙铁

电烙铁是手工焊接的主要工具。选择合适的电烙铁并合理使用，是保证焊接质量的基础。

1) 电烙铁的结构

电烙铁主要由发热部分、储热部分、传热部分及手柄等组成。典型的电烙铁结构示意图如图 1.31 所示。

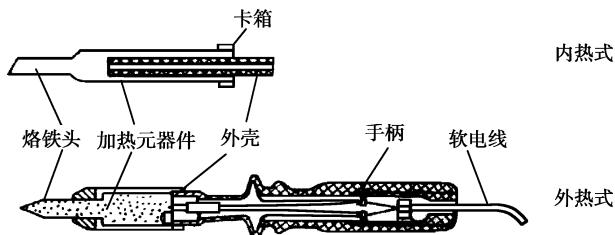


图 1.31 典型的电烙铁结构示意图



(1) 发热元器件。发热元器件是电烙铁中的能量转换部分，又称烙铁芯子。它通过将镍铬发热电阻丝缠绕在云母、陶瓷等耐热的绝缘材料上制作而成。发热元器件有内热式和外热式两种。

(2) 烙铁头。烙铁头作为能量存储和传递部件，一般由紫铜制成。

(3) 手柄。手柄由木料或胶木制成。

(4) 接线柱。接线柱位于发热元器件和电源线的连接处。在使用电烙铁时一定要分清相线、零线和保护线，并正确连接。

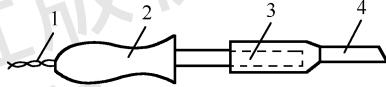
2) 电烙铁的种类

(1) 外热式电烙铁。发热元器件是通过将电阻丝缠绕在云母材料上构成的。此类电烙铁绝缘电阻小、体积较大、热效率低、升温慢，但结构简单、价格便宜，主要用于焊接导线、接地线和接地板。外热式电烙铁结构示意图如图 1.32 所示。

(2) 内热式电烙铁。发热元器件是通过将电阻丝缠绕在密闭的陶瓷上制作而成的，被插在电烙铁里面，直接对烙铁头加热。该类电烙铁绝缘电阻大、体积较小、热效率高、升温快，但制造工艺复杂，难维修，主要用于焊接印制电路板。内热式电烙铁结构示意图如图 1.33 所示。



1—电源线；2—后盖；3—木制手柄；
4—外壳；5—烙铁头固定螺钉；6—烙铁头。



1—电源线；2—手柄；
3—加热芯；4—烙铁头。

图 1.32 外热式电烙铁结构示意图

图 1.33 内热式电烙铁结构示意图

1.3.3 常用电工仪器仪表的认知与使用

电工测量是电工试验与实训中不可缺少的部分，它的任务是借助各种仪器仪表对电流、电压、功率、电能等进行测量，以了解各种电气设备的运行特性与情况。

电工测量方法可以被分为直读法和比较法。直读法是利用指示仪表直接读取被测电量的值。例如，用电压法直接测量电压。这种测量方法的准确度不高，但操作简单。比较法是将被测量和标准量在较量仪器中比较，以确定测量的值。例如，用电桥测量电阻等。这种测量方法的准确度较高，但操作较复杂，测量速度也较慢。

电工测量主要具有以下两个优点。

- (1) 电工仪表构造简单，测量结果准确、可靠。
- (2) 能进行远距离测量。

因此，正确掌握测量技术是十分必要的。

1. 电工仪表的分类

电工仪表种类很多，分类方法也很多，一般有四种分类方法：按准确度分类、按被测量的种类分类、按被测电流的种类分类、按工作原理分类。

1) 按准确度分类

根据国家统一规定，电工仪表可以分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级，这



些数字表明了电工仪表的最大引用误差值。电工仪表的准确度等级、最大引用误差及符号如表 1.2 所示。其中，0.1 级、0.2 级和 0.5 级的电工仪表常用来进行精密测量或作为校正表；1.5 级的电工仪表一般用于实验室测量；2.5 级和 5.0 级的电工仪表一般用于工程测量。

表 1.2 电工仪表的准确度等级、最大引用误差及符号

准确度等级	最大引用误差	符 号
0.1	±0.1%	0.1
0.2	±0.2%	0.2
0.5	±0.5%	0.5
1.0	±1.0%	1.0
1.5	±1.5%	1.5
2.5	±2.5%	2.5
5.0	±5.0%	5.0

不管仪表的质量如何，其指示值与实际值之间总有一定的差值，该差值称为误差。显然，仪表的准确度与其误差有关。误差有两种：一种是基本误差，是由仪表自身引起的，如弹簧永久变形或刻度不准确等造成的固有误差；另一种是附加误差，是由外加因素引起的，如测量方法不正确、读数不准确、电磁干扰等。仪表的附加误差是可以减小的，当使用者尽量让仪表在正常情况下进行测量时，可以近似认为仪表只存在基本误差。

仪表的准确度等级是根据仪表的最大引用误差来划分的。最大引用误差是指仪表在正常工作条件下测量时可能产生的最大基本误差 ΔA 与仪表的满量程 A_m 之比，习惯上用百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1.20)$$

由式 (1.20) 可以求得仪表的最大基本误差。例如，一个准确度等级为 1.0，量程为 10A 的电工仪表，可能产生的最大基本误差为

$$\Delta A = \gamma A_m = \pm 1.0\% \times 10 = \pm 0.1 \text{ (A)}$$

在正常工作条件下，仪表的最大基本误差（最大绝对误差）是不变的。要衡量测量值的准确度，必须使用相对误差。

相对误差是指最大基本误差 ΔA 与被测量真值 A_0 之比的百分数，即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1.21)$$

相对误差越小，测量结果的准确度越高。例如，用上述仪表分别测量 8A 和 2A 的电流，相对误差分别为 ±1.25% 和 ±5%。因此，在选用仪表量程时，应该使被测量的值尽量接近满标值。通常认为当被测量的值接近满刻度的 2/3 时，测量结果较为准确。

【例 1.8】 某待测电压为 8V，现用准确度等级为 0.5，量程为 0~30V 的电压表，以及准确度等级为 1.0，量程为 0~10V 的电压表进行测量，问：用哪个电压表测量获得的结果更准确？

【解】 用准确度等级为 0.5，量程为 0~30V 的电压表测量，可能产生的最大基本误差为



单元 1 电路与电路定律

$$\Delta A_1 = \gamma A_m = \pm 0.5\% \times 30 = \pm 0.15 \text{ (V)}$$

可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_1 = \gamma \frac{A_m}{A} = \pm 0.5\% \times \frac{30}{8} = \pm 1.875\%$$

用准确度等级为 1.0, 量程为 0~10V 的电压表测量, 可能产生的最大基本误差为

$$\Delta A_2 = \gamma A_m = \pm 1.0\% \times 10 = \pm 0.1 \text{ (V)}$$

可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_2 = \gamma \frac{A_m}{A} = \pm 1.0\% \times \frac{10}{8} = \pm 1.25\%$$

相对误差越小, 测量结果越准确, 显然用准确度等级为 1.0, 量程为 0~10V 的电压表测量获得的结果更准确。

例 1.8 说明, 为了获得较准确的测量结果, 除选用准确度等级较高的仪表外, 还要注意选择合适的量程。

2) 按被测量的种类分类

按被测量的种类电工仪表可以被分为电流表、电压表、欧姆表、功率表、频率表、电度表、相位表等, 如表 1.3 所示。

表 1.3 电工仪表按被测量的种类分类

序号	被测量	仪表名称	符号	序号	被测量	仪表名称	符号	
1	电流	电流表	(A)	2	4	功率	功率表	
2	电压	电压表	(V)		5	频率	频率表	
					6	电能	电度表	
3	电阻	欧姆表	(Ω)	7	相位差	相位表	(φ)	
					—	—	—	

3) 按被测电流的种类分类

按被测电流的种类电工仪表可被分为直流表、交流表及交、直流两用表, 如表 1.4 所示。

表 1.4 电工仪表按被测电流的种类分类

被测电流	仪表名称	符号
直流	直流表	—
交流	交流表	~
交流、直流	交、直流两用表	≈

4) 按工作原理分类

按工作原理电工仪表可被分为磁电式仪表、电磁式仪表、电动式仪表、整流式仪表, 如表 1.5 所示。



表 1.5 电工仪表按工作原理分类

工作原理	仪表类型	符号
永久磁铁对载流线圈的作用	磁电式仪表	□
通电线圈对铁片的作用	电磁式仪表	螺旋形线圈
两个通电线圈的相互作用	电动式仪表	平行线
磁电式测量机构和整流电路共同作用	整流式仪表	□+□

仪表的表面通常标有仪表类型、准确度等级、所通电流种类、绝缘耐压强度、放置位置等,如表 1.6 所示。

表 1.6 某电工仪表上的符号

符号	意义	符号	意义
1.0	准确度等级为 1.0	∠60°	仪表倾斜 60° 放置
~	交流表	(A)	电流表
↑	仪表垂直放置	⚡ 2kV	仪表绝缘耐压强度为 2kV

2. 电压表

用来测量电压的仪表称为电压表。根据被测电压的大小,电压表可分为毫伏表、伏特表和千伏表。

在测量某段电路的电压时,应将电压表并联在被测电路的两端,电压表的端电压等于被测电压,如图 1.34 所示。电压表并入电路必然会分掉原来支路的电流,影响电路的测量结果,为了尽量减小测量误差,不影响电路的正常工作状态,电压表的内阻应远大于被测支路的电阻,但电压表自身电阻不大,因此在电压表中都串联了一个阻值很大的电阻。

在测量直流电压时,一般使用磁电式电压表。要扩大仪表的量程,应该在测量机构中串联分压电阻,此分压电阻称为倍压器,如图 1.35 所示。此时,测量机构所测电压为被测电压的一部分,即

$$U_0 = U \frac{R_0}{R_0 + R_V}$$

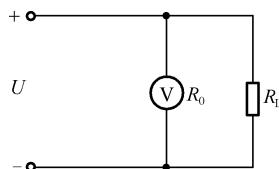


图 1.34 测量电压的电路

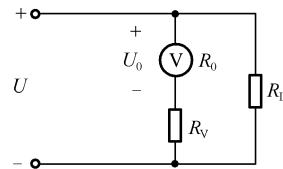


图 1.35 具有倍压器的测量电压的电路

由上式可知分压电阻为



$$R_V = R_0 \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) \quad (1.22)$$

可以看出，电压表要扩大的量程越大，测量机构串联的倍压器的阻值越大。多量程的电压表内部具有多个倍压器，不同的量程串接不同阻值的倍压器。

【例 1.9】 一个磁电式电压表的量程为 50V，内阻为 2000Ω ，现想将其量程改为 200V。问：应串联阻值多大的倍压器？

【解】 应串联的倍压器的阻值为

$$R_V = R_0 \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) = 2000 \left(\frac{200}{50} - 1 \right) = 6000 (\Omega)$$

在测量交流电压时，一般采用电磁式电压表；在进行精密测量时，一般采用电动式电压表。要想扩大交流电压表的量程，可以采用线圈串、并联的方法实现，也可以采用在电磁式电压表内部串联倍压器的方法实现。当测量 600V 以上的电压时，应先使用电压互感器把电压降低，再进行测量。

3. 电流表

用来测量电流的仪表称为电流表。根据被测电流的大小，电流表可分为微安表、毫安表和安培表。

当测量某支路的电流时，只有被测电流流过电流表时，电流表才能指示其结果，因此电流表应串联在被测量电路中，如图 1.36 所示。因为电流表有一定电阻，当把它串入电路后不应该影响电路的测量结果，所以电流表的内阻必须远小于电路的负载电阻。

一般用磁电式电流表测量直流电流。磁电式电流表的测量机构只能通过几十微安到几十毫安的电流，要测量较大电流，应该在测量机构中并联一个阻值较低的电阻以进行分流，此分流电阻称为分流器，如图 1.37 所示。这样电流表测得的电流是被测电流的一部分，它们之间有如下关系：

$$I_0 = I \frac{R_A}{R_A + R_0}$$

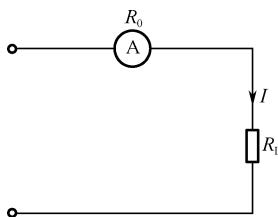


图 1.36 测量电流的电路

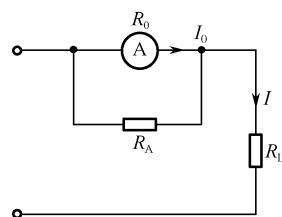


图 1.37 具有分流器的测量电流的电路

可得出分流器的阻值为

$$R_A = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1} \quad (1.23)$$

可以看出，想要扩大的仪表量程越大，并联的分流器的阻值应越小。多量程的电流表内



部具有多个分流器，不同量程并联阻值不同的分流器。

【例 1.10】 一磁电式电流表的量程为 10mA，内阻为 10Ω ，现要将其量程改为 1A。问：应并联阻值为多大的分流器？

【解】 应并联的分流器的阻值为

$$R_A = \frac{R_0}{I - I_0} = \frac{\frac{10}{1}}{\frac{10 \times 10^{-3}}{1} - 1} \approx 0.1 (\Omega)$$

在测量交流电流时，一般采用电磁式电流表；在进行精密测量时，一般采用电动式电流表。由于所测的是交流电流，因此测量机构中既有电阻又有电感，要想扩大量程就不能单纯地并联分流器，而应将固定线圈绕组分成几段，采用线圈串联、并联及混联的方法来实现量程的扩大。

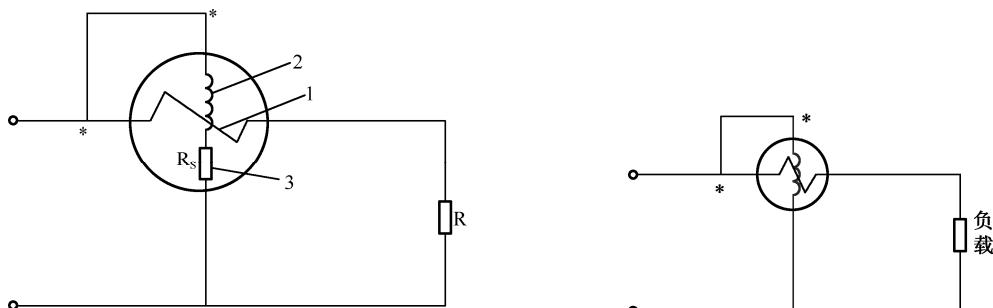
当被测电流很大时，可以利用电流互感器来扩大量程。

4. 功率表

除需要测量电气设备的电压、电流外，有时还需要测量功率。通常用功率表直接测量平均功率。

1) 功率表的构造

大多功率表采用的是电动系测量结构，其中两个线圈的接线如图 1.38 所示。在图 1.38 中，1 是固定线圈，它与负载串联，线圈中通过的是负载电流，作为电流线圈，它的匝数较少，导线较粗；2 是可动线圈，线圈串联附加电阻后，与负载并联，线圈上承受的电压正比于负载电压，作为电压线圈，它的匝数较多，导线较细；3 是阻值很大的附加电阻。指针偏转角的大小取决于负载电流和负载电压的乘积。在测量功率时，功率表上的标度尺可以直接指示出被测平均功率的大小。功率表的图形符号如图 1.39 所示。水平线圈为电流线圈，垂直线圈为电压线圈。电压线圈和电流线圈上各有一端标有“*”号，表示电源端钮，表示电流应从这一端流入线圈。



1—电流线圈；2—电压线圈；3—附加电阻。

图 1.38 功率表结构原理示意图

图 1.39 功率表的图形符号

2) 功率表的使用注意事项

(1) 正确选择功率表的量程。选择功率表的量程实际上是选择功率表的电流量程和电压量程，务必使电流量程能允许通过负载电流，电压量程能承受负载电压，不能只从功率角度考虑。例如，有两个功率表，量程分别为 300V、5A 和 150V、10A。显然，它们的功率量程



单元 1 电路与电路定律

都是 1500W。若要测量一个电压为 220V、电流为 4.5A 的负载功率，则应选用量程为 300V、5A 的功率表；量程为 150V、10A 的功率表因电压量程小于负载电压，不能使用。一般在测量功率前，应先测出负载的电压和电流，以便在选择功率表时可做到心中有数。

(2) 正确读出功率表的读数。便携式功率表一般都是多量程的，标度尺上只标了分度格数，没有标瓦特数。在读数时，应先根据所选电压量程、电流量程及标度尺满度时的格数，求出每格瓦特数（又称功率表常数），再用每格瓦特数乘以指针偏转的格数，即可得到所测功率的瓦特数。图 1.40 所示为多量程功率表的外形示意图及内部接线图。

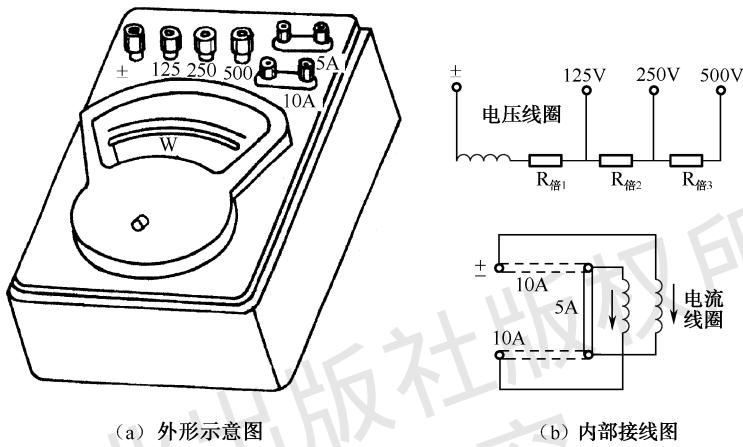


图 1.40 多量程功率表的外形示意图及内部接线图

例如，用一个电压量程为 500V、电流量程为 5A 的功率表测量功率，标度尺满偏时为 100 格，在测量时指针偏转了 60 格，则每格瓦特数为

$$\frac{500 \times 5}{100} = 25 \text{ (W/格)}$$

被测功率为

$$25 \times 60 = 1500 \text{ (W)}$$

(3) 功率表的正确接线。功率表指针转动的偏转方向和两个线圈中的电流方向有关，如果改变其中一个线圈中的电流方向，指针就会向反方向转。为了在电路中接对功率表，接线时必须使电流线圈和电压线圈的电源端钮接到同一极性处，以保证两个线圈的电流都从标有“*”号的电源端钮流入，而且从“+”极流向“-”极。满足这种要求的接线方法有两种，如图 1.41 所示，图 1.41 (a) 所示为电压线圈前接法；图 1.41 (b) 所示为电压线圈后接法。

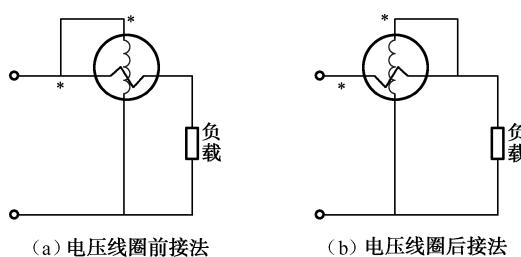


图 1.41 功率表的接线方法



当负载电阻远远大于电流线圈的内阻时,应采用电压线圈前接法。这时,电压线圈所测电压是负载电压和电流线圈电压之和,功率表反映的是负载和电流线圈共同消耗的功率。此时,可以忽略电流线圈分压造成的功率损耗,测量值比较接近负载的实际功率值。

当负载电阻远远小于电压线圈支路的电阻时,应采用电压线圈后接法。这时,电流线圈中的电流是负载电流和电压线圈支路电流之和,功率表反映的是负载和电压线圈支路共同消耗的功率。此时,可以忽略电压线圈支路分流造成的功率损耗,测量值比较接近负载的实际功率值。

如果被测功率本身较大,不需要考虑功率表的功率损耗对测量值的影响,那么两种接线法可以任意选择,但最好选用电压线圈前接法,因为功率表中电流线圈支路的功率损耗一般小于电压线圈支路的功率损耗。

在测量功率时,如果出现接线正确而指针反偏的现象,就说明负载侧实际上是一个电源,负载支路不是消耗功率而是发出功率。这时,通过对换电流端钮上的接线使指针正偏。如果功率表上有极性开关,那么也可以通过操作极性开关,实现指针正偏。此时,应在功率表读数前加上负号,以表明负载支路是发出功率的。

5. 万用表

万用表是一种多用途的仪表,可以用来测量交流电压、直流电压、直流电流、直流电阻等,在电气设备的安装、维修、检查等工作中应用极为广泛。

MF-30型万用表的面板图如图1.42所示。

1) 万用表的构造

万用表主要由以下三个部分组成。

(1) 表头。通常采用磁电式测量机构作为万用表的表头。这种测量机构的灵敏度和准确度较高,满刻度偏转电流一般为几微安到数百微安。满刻度偏转电流越小,万用表的灵敏度越高,表头特性越好。

(2) 测量电路。万用表的测量电路由多量程直流电流表、多量程直流电压表、多量程交流电压表及多量程欧姆表组成,个别型号的万用表还有多量程交流挡。实现这些功能的关键是,通过测量电路把被测量转换成磁电系统能接受的直流电流,这是万用表的核心部分。先进的测量电路,有利于仪表的功能多样性、操作便捷性。

(3) 转换开关。转换开关是用来实现不同被测量和不同量程切换的元器件。转换开关中有固定接触点和活动接触点,当活动接触点和固定接触点闭合时,就可以接通一条测量电路。

2) 万用表的工作原理

(1) 直流电流的测量。图1.43所示为用万用表测量直流电流的电路原理图。在测量直流电流时,将转换开关调到直流电流挡,将万用表串联在被测电路中,电流从“+”端流入,从“-”端流出。直流电流挡有5个量程,由图1.43可以看出,不同量程对应阻值不同的分流器,改变转换开关的位置实际上是改变了其分流器的阻值,从而改变了量程。例如,当选择5mA挡时,分流器的阻值为 $R_{A1} + R_{A2} + R_{A3}$,其余分流器与表头串联。当指针偏转时,应该按照表盘上的第二条线读数。需要注意的是,量程与满刻度值之间的关系。

在实际使用时,如果不了解被测电流的大小,就应该先用最大量程来测量,再根据指针



单元 1 电路与电路定律

的偏转程度选用合适的量程，以减小误差。当转换量程时，要注意不可带电转换。

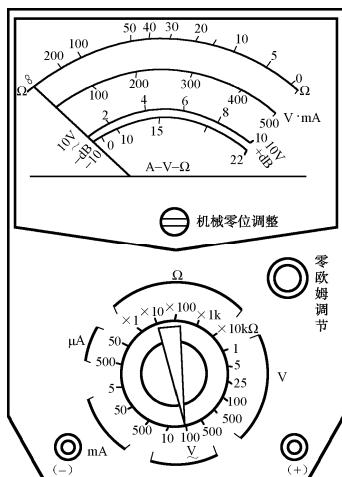


图 1.42 MF-30 型万用表的面板图

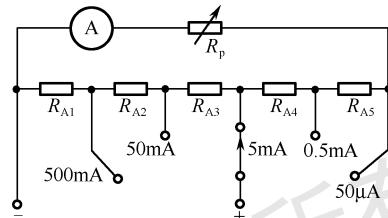


图 1.43 用万用表测量直流电流的电路原理图

(2) 直流电压的测量。在测量直流电压时，万用表的转换开关需要调到直流电压挡，将万用表并联在被测电路两端，其电路原理图如图 1.44 所示。直流电压表由直流电流表串联不同电阻构成，串联的电阻的阻值越大，电压表的量程越大。

电压表的内阻越大，它从测量电路分到的电流越小，被测电路受到的影响越小。通常用仪表的灵敏度来表示这一特征。仪表的灵敏度为总内阻与电压表量程的比值。若 MF-30 型万用表的 500V 挡的总内阻为 $2500\text{k}\Omega$ ，则灵敏度为 $2500/500=5 (\text{k}\Omega/\text{V})$ 。

(3) 交流电压的测量。由于磁电式仪表只能测直流，所以在测交流电压时需要在测量电路中增加整流装置。用万用表测量交流电压的电路原理图如图 1.45 所示。电路中设置了整流二极管 VD_1 和 VD_2 。

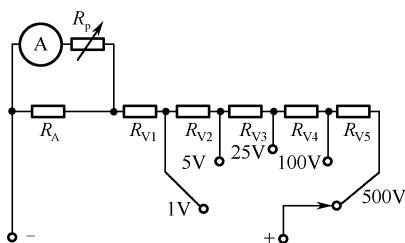


图 1.44 用万用表测量直流电压的电路原理图

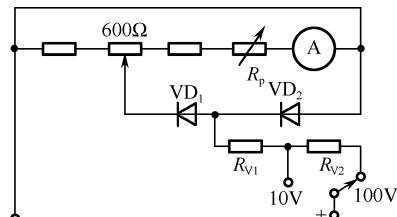


图 1.45 用万用表测量交流电压的电路原理图

在测量交流电压时，在正弦交流电的正半周， VD_1 导通， VD_2 截止，这时电路与用万用表测量直流电压时的电路相同；在正弦交流电的负半周， VD_2 导通， VD_1 截止，表头被短接，没有电流通过万用表。因此，在使用万用表测交流电压时，测的是正弦波正半周的电流平均值，而正半周的电流平均值与交流电压的有效值之间有一定的比例关系，因此可以直接用万用表来测量正弦交流电压的有效值。一般用万用表测量的交流电的频率为 $45\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ ，只能用于测正弦交流电的电压。

交流电压挡改变量程的原理与直流电压挡改变量程的原理相同，灵敏度比直流电压挡低。

(4) 电阻的测量。在测量电阻时，万用表的转换开关需要调到电阻挡。把待测电阻分别



与万用表的两个表笔相接触，待测电阻与万用表内的干电池、调节电阻、表头形成闭合回路。万用表面板上的“+”端接内部电源的负极，“-”端接内部电源的正极，回路中产生电流，指针偏转，指示被测阻值。用万用表测量电阻的电路原理图如图 1.46 所示。

从图 1.46 中可以看出，被测电阻的阻值越大，回路中的电流越小，指针偏转角度越小。当被测电阻的阻值为 0 时，指针偏转角度最大；当被测电阻的阻值为无穷大时，指针偏转角度为 0。因此，在测量电阻时，万用表的电阻挡刻度刚好与电压挡刻度、电流挡刻度方向相反。表盘上的刻度与量程挡之间成比例，如对于 $\times 10$ 挡，指示值乘以 10 就是当前所测电阻的阻值。

在实际测量时，首先要将万用表调零，方法是将万用表调到电阻挡，两个表笔短接，若指针偏转后停在零刻度处，则说明该万用表不需要调零；否则应转动零欧姆调节旋钮，使指针指到零刻度处。每换一个量程，都需要进行一次调零。如果在调零时指针调不到零刻度处，则说明万用表电池电量不足或接触不良，需要更换电池或进行维修。

为了提高测量电阻的准确性，应尽量使用刻度盘的中间段，因此需要选择合适的量程。

在使用电阻挡测量电阻时，应特别注意不要带电测量，以免外电路电压在测量电路中产生电流，烧坏万用表。在测量阻值较小的电阻时，应注意表笔要接触电阻；在测量阻值较大的电阻时，应注意不要与人体形成并联电路。测量结束后，应将转换开关转到高电压挡，以免浪费电池的电量。

6. 兆欧表

1) 用途

兆欧表又称摇表，主要用于测量绝缘电阻，以判定电动机、电气设备和电路的绝缘性能是否良好，判定结果关系到这些设备能否安全运行。受热、受潮、被污染、老化等原因会使绝缘材料阻值降低、泄漏电流增大，甚至绝缘损坏，从而造成漏电和短路等事故，因此必须定期检查设备的绝缘电阻。各种设备的绝缘电阻有具体要求。一般来说，设备的绝缘电阻越大，其绝缘性能就越好。

2) 结构

兆欧表主要由两部分组成：磁电式比率表和手摇发电机。手摇发电机能产生 500V、1000V、2500V 或 5000V 的直流高压，可与被测设备的工作电压相对应。有的兆欧表采用的是晶体管直流变换器，可以将电池的低压直流转换成高压直流。图 1.47 所示为兆欧表的外形示意图，L、E、G 是它的三个接线柱，一个为电路端 (L)，另一个为接地端 (E)，还有一个为屏蔽端 (G)。转动手柄，手摇发电机发电，表盘指针指示电阻的阻值。

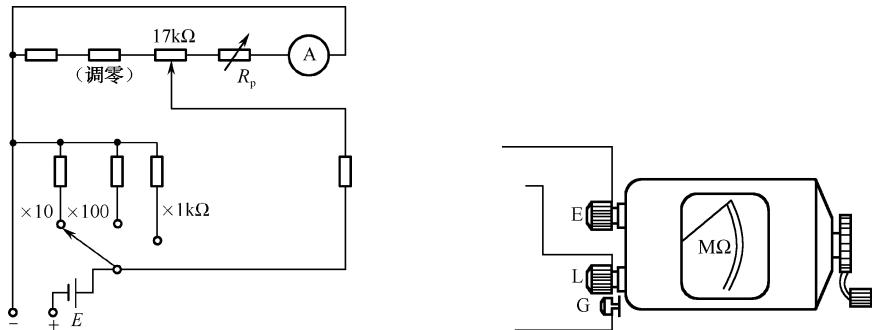


图 1.46 用万用表测量电阻的电路原理图

图 1.47 兆欧表的外形示意图



3) 兆欧表的使用

(1) 兆欧表的选用。在选用兆欧表测试绝缘电阻时，其额定电压一定要与被测电气设备或电路的工作电压相对应；兆欧表的测量范围也应与被测绝缘电阻的阻值范围吻合。一般在测量低压设备及电路时选用 500~1000V 的兆欧表；在测量 1000V 以下的电缆时选用 1000V 的兆欧表；在测量 1000V 以上的电缆时选用 2500V 的兆欧表。在测量高压设备的绝缘电阻时，必须选用电压高的兆欧表（一般选用 2500V 以上的兆欧表才能测量），否则测量结果不能反映设备在工作电压下的绝缘电阻。同时要注意，不能用电压过高的兆欧表测量低压设备的绝缘电阻，以免设备的绝缘性能受到损坏。

各种型号的兆欧表，除了有不同的额定电压，还有不同的测量范围，如 ZC11-5 型兆欧表的额定电压为 2500V，测量范围为 0~10000MΩ。选用的兆欧表的测量范围，不应过多地超出被测绝缘电阻，以免读数误差过大。有些兆欧表的标尺不是从零开始的，而是从 1MΩ 或 2MΩ 开始的，这类兆欧表不宜用来测量绝缘电阻低的设备。

(2) 兆欧表的接线方法。一般在测量时，应将被测绝缘电阻接在 L 接线柱和 E 接线柱之间。在测量电缆芯线的绝缘电阻时，L 接线柱要接芯线，E 接线柱要接电缆外皮，G 接线柱要接电缆绝缘包扎物。

① 照明及动力电路对地绝缘电阻的测量。如图 1.48 (a) 所示，将兆欧表接线柱 E 可靠接地，接线柱 L 与被测电路连接。按顺时针方向由慢到快摇动兆欧表的手柄，兆欧表指针稳定后指示的数值就是被测电路的对地绝缘电阻。

② 电动机绝缘电阻的测量。拆开电动机绕组的星形或三角形连接的连线，兆欧表的 E 接线柱和 L 接线柱分别接电动机两相绕组，如图 1.48 (b) 所示。以 120r/min 的转速均匀摇动兆欧表手柄，兆欧表指针稳定后指示的数值就是被测电动机绕组相间的绝缘电阻。图 1.48 (c) 所示为电动机绕组对地绝缘电阻的测量接线，E 接线柱接电动机机壳上的接地螺钉或机壳（勿接在有绝缘漆的部位），L 接线柱接电动机绕组，摇动兆欧表手柄，兆欧表指针稳定后指示的数值就是被测电动机绕组的对地绝缘电阻。

③ 电缆绝缘电阻的测量。如图 1.48 (d) 所示，E 接线柱接电缆外皮，G 接线柱接电缆线芯与外皮之间的绝缘层，L 接线柱接电缆线芯，摇动兆欧表手柄，兆欧表指针稳定后指示的数值就是被测电缆线芯与外皮之间的绝缘阻值。

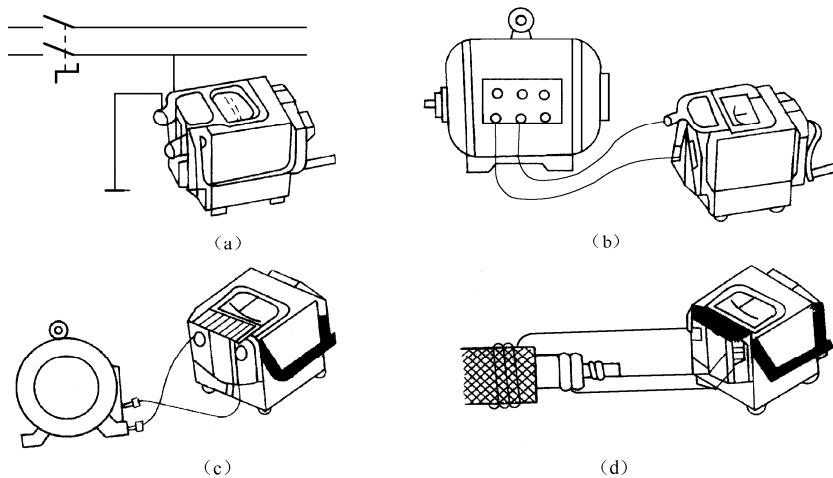


图 1.48 兆欧表测量绝缘电阻的接法示意图



(3) 兆欧表的使用注意事项。在使用兆欧表测量设备和电路的绝缘电阻时，必须在设备和电路不带电的情况下进行；测量前应先将电源切断，并使被测设备充分放电，以排除被测设备感应带电的可能性。

在使用兆欧表前必须进行检查。检查方法如下：将兆欧表平稳放置，先使 L 接线柱、E 接线柱开路，摇动兆欧表手柄并使转速达到额定值，这时指针应指向标尺的“ ∞ ”处；再把 L 接线柱、E 接线柱短接，再缓缓摇动兆欧表手柄，指针应指在“0”位。若指针不指在“ ∞ ”或“0”位，则必须对兆欧表进行检修。

在进行一般测量时，应将被测绝缘电阻接在 L 接线柱和 E 接线柱之间。若测量电路的对地绝缘电阻，则将被测端接到 L 接线柱，并将 E 接线柱接地。

在接线时，应选用单条导线分别连接 L 接线柱和 E 接线柱，不可以将导线绞合在一起，因为绞线间的绝缘电阻会影响测量结果。

在测量电解电容的介质绝缘电阻时，应按电容的耐压高低选用兆欧表，并需要考虑极性。电解电容的正极接 L 接线柱，负极接 E 接线柱，不可接反，若接反则会使电容击穿。在测量其他电容的介质绝缘电阻时可不考虑极性。

在测量绝缘电阻时，兆欧表手柄应由慢向快摇动。若兆欧表的指针指在“0”位，则说明被测绝缘物有短路现象。此时不能继续摇动兆欧表手柄，以防兆欧表因线圈发热而损坏。摇动兆欧表手柄的速度一般规定为 120r/min，切忌忽快忽慢，以免指针摆动加大引起误差。在兆欧表没有停止转动和被测物没有放电之前，不可用手触及被测物的测量部分，尤其是在测量大电容设备的绝缘电阻之后，必须先将被测物对地放电，再停止转动兆欧表手柄，以防兆欧表因电容放电而损坏。

7. 直流单臂电桥

直流电桥有很多种类，根据结构不同，直流电桥可分为单臂电桥、双臂电桥和单双臂电桥。单臂电桥适合测量中值电阻 ($1 \sim 10^6 \Omega$)；双臂电桥适合测量低值电阻 (1Ω 以下)。这里仅介绍用于测量直流电阻的直流单臂电桥。

1) 工作原理

直流单臂电桥是由阻值为 R_1 、 R_2 、 R 的三个标准电阻和被测电阻组成四边形 $ABCD$ 的桥式电路， AB 、 BC 、 CD 、 DA 四条支路称为桥臂。直流单臂电桥原理图如图 1.49 所示。在电桥的 A、C 两端接入直流电源 E 和开关 S_B ，在 B、D 两端接入一个检流计 G 和开关 S_G 作为指零仪。在用直流单臂电桥测量电阻时，先闭合开关 S_B ，接通电源；再闭合开关 S_G ，接通检流计。这时检流计的指针可能向左或向右偏转，调整 R_1 、 R_2 和 R ，使检流计的指针停在中间的零点，电桥达到平衡。此时 $I_G = 0$ ，B 端和 D 端的电位相等， $U_{AB} = U_{AD}$ ， $U_{BC} = U_{DC}$ ，即

$$I_x R_x = IR, \quad I_1 R_1 = I_2 R_2$$

两式相除，有

$$\frac{I_x R_x}{I_1 R_1} = \frac{IR}{I_2 R_2}$$

由于 $I_G = 0$ ，所以 $I_x = I_1$ ， $I = I_2$ ，代入上式可得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R \quad (1.24)$$



单元 1 电路与电路定律

直流单臂电桥中的 R 称为电桥的比较臂， R_1 、 R_2 称为电桥的比例臂， $\frac{R_1}{R_2}$ 称为电桥比例臂的倍率。此时用比较臂的阻值乘以比例臂的倍率，就可以得到被测电阻的阻值 R_x 。由于阻值为 R_1 、 R_2 、 R 的电阻都是高精度的标准电阻，检流计的灵敏度也很高，因此直流单臂电桥的测量精度很高。比例臂的倍率分为 7 挡，分别为 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 、1、 10 、 10^2 、 10^3 。可通过倍率转换开关选择倍率。比较臂 R 由 4 组可调电阻串联而成，每组有 9 个阻值相同的电阻，第一组为 9 个 1Ω 电阻，第二组为 9 个 10Ω 电阻，第三组为 9 个 100Ω 电阻，第四组为 9 个 1000Ω 电阻。可通过比较臂转换开关调节比较臂 R 。面板上的 4 个比较臂转换开关构成了个位、十位、百位和千位，比较臂 R 为 4 组读数的和。图 1.50 所示为直流单臂电桥面板示意图。

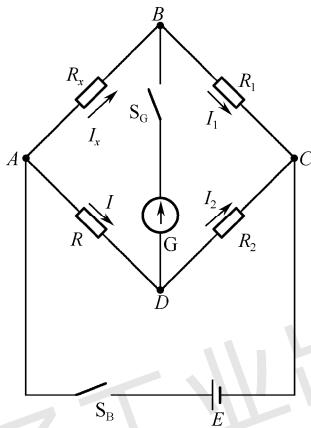


图 1.49 直流单臂电桥原理图

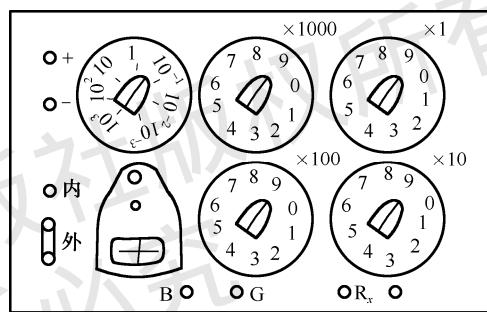


图 1.50 直流单臂电桥面板示意图

2) 使用步骤

- (1) 将检流计锁扣打开，调节机械调零旋钮，使指针位于“0”位。
- (2) 将被测电阻 R_x 接在接线端钮上，根据 R_x 的阻值范围选择合适的比例臂的倍率，使比较臂的 4 组电阻都被用上。
- (3) 在调节平衡时，先闭合开关 S_B ，再闭合开关 S_G ；测量完毕后，先断开开关 S_G ，再断开开关 S_B ，以防被测对象产生的感应电势损坏检流计。
- (4) 按下按钮后，若指针向“+”侧偏转，应增大比较臂的阻值；若指针向“-”侧偏转，则应减小比较臂的阻值。调平衡过程中不要完全闭合开关 S_G ，待电桥接近平衡时，才可完全闭合开关 S_G ，进行细调；否则，检流计指针可能会因为猛烈撞击而损坏。
- (5) 被测电阻 R_x 的正确读数（单位为 Ω ）可按下式计算：

$$R_x = \text{倍率} \times \text{比较臂的读数}$$

- (6) 在测量结束后，应锁上检流计锁扣，以免检流计因振动而损坏。

知识梳理与总结

- (1) 电路是由电源、负载和中间环节三部分组成的电流路径，可实现电能的输送和转换，以及电信号的传递和处理。



(2) 电流、电压、电动势是电路的主要物理量，它们的参考方向是任意假定的，当其与实际方向一致时为正，反之为负。

(3) 电路中某点的电位等于该点与参考点之间的电压。若改变参考点，则各点的电位也随之变化，但两点间的电压不变。

(4) 电路中功率的表达式有 $P = \frac{W_R}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = \frac{U^2}{R} = RI^2$ 。根据电压和电流的实际方向，可确定某一电路元器件是电源还是负载；根据电压、电流的参考方向和公式 $P=UI$ ，也可确定某一电路元器件是电源还是负载。根据能量守恒定律，电源输出的功率和负载吸收的功率应该是平衡的。

(5) 欧姆定律适用于线性电阻。

(6) 电路分为有载、开路、短路三种工作状态。在使用电路元器件时应注意其额定值，有时应防止电气设备发生短路。

(7) 基尔霍夫定律分为基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。基尔霍夫电流定律反映了电路中任一节点各支路电流之间的约束关系，其基本含义是：在任何时刻，对任一节点，流进该节点的电流代数和恒等于零，即 $\sum I = 0$ 。基尔霍夫电压定律反映了电路中任一回路支路电压之间的约束关系，其基本含义是：在任何时刻，沿任一闭合回路，所有支路电压的代数和恒等于零，即 $\sum U = 0$ 。