

第 1 章 直流电与电阻元件

在中学阶段，通过物理学我们对直流电路已有了一定的认识，建立了电压、电流、电阻的初步概念，并且能进行电压、电流的基本测量。本章首先通过“直流电压、电流表的安装与实验”实训课程来强化我们在电路中的动手能力，进一步熟悉电表的调整与校验及直流电相关量的测试方法。通过实训加深对电压、电流表内部电路的基本原理的理解。在中学物理的基础上，本章对电路变量、欧姆定律、基尔霍夫定律等作了更加深入的阐述。

实训 1 直流电压、电流表的安装与实验

1. 实训目的

- (1) 了解电路的基本概念。
- (2) 体验电路基本变量的相互关系。
- (3) 学会电路连接与测试的基本方法。
- (4) 学会电压、电流表的校准与使用。

2. 实训设备、器件与实训电路

(1) 实训设备与器件：直流稳压电源 1 台、数字万用表 2 块、 $100\ \mu\text{A}$ 表头 1 只、单刀双位开关 2 只、电阻若干。

(2) 实训电路与说明：实训电路如图 1-1 所示。其中 (a) 图为电压表电路，电路中虚框内部的作用是将 $100\ \mu\text{A}$ 的表头改装为量程为 $10\ \text{V}$ 的电压表。(b) 图为电流表电路。电路中虚框内部的作用是将 $100\ \mu\text{A}$ 的表头改装为量程为 $100\ \text{mA}$ 的电流表。图中， E 为电压可调的直流稳压电源， B_1 为数字万用表， B_2 为 $100\ \mu\text{A}$ 表头， r 为表头内部线圈的直流电阻，称为表头内阻。

3. 实训步骤与要求

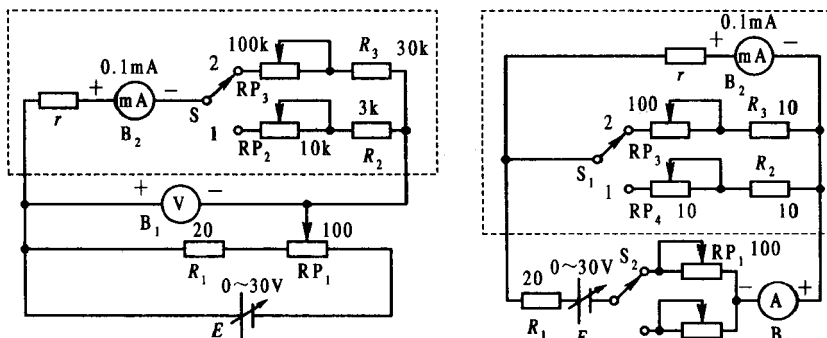
1) 电路连接

按图 1-1(a) 连接电路。注意电源与电表的极性不要接反。电路接好后不要打开稳压电源的电源开关。

2) 通电前准备

将数字万用表置直流电压 $20\ \text{V}$ 档。将开关 S 的中心头指向“2”。调节可变电阻 RP_3 的可变触点，使其电阻最大。调节稳压电源的输出控制旋钮，将其输出调到最小位置。

本步骤的目的是防止打开稳压电源开关时，流过 B_2 的电流超过其量程。



(a) 电压表实训电路 (b) 电流实训电路

图 1-1 实训电路图

(a) 电压表实训电路; (b) 电流实训电路

3) 标准电压产生

打开稳压电源的电源开关。缓慢调节输出旋钮，改变稳压电源的输出，使数字万用表的读数为 10 V。

至此，我们得到了一个 10 V 的标准电压输出，其准确度由数字万用表的精度决定。

4) 电压表调节

调节 RP_3 ，使电流表 B_2 的读数至满刻度。体会一下 RP_3 的变化与表头指针偏转的关系。

至此，通过调节并确定串接在表头上的电阻，我们将 $100 \mu A$ 的表头改装为满度值为 10 V 的电压表。可以看出，电压表实际上是由一个高灵敏度的电流表与电阻串接而成。改变串接的电阻，即改变了电压表的量程。

5) 刻度校准

调节稳压电源输出，使数字万用表的读数依次为 5 V、7.5 V、2.5 V。在此过程中，电流表的读数应依次为 $50 \mu A$ 、 $75 \mu A$ 、 $25 \mu A$ 。如果读数准确，将电流表的表盘改成电压表表盘，则电压表的安装与调试成功。

6) 测量表头内阻

从电路中取下数字万用表。调节稳压电源输出，使电压表读数为 10 V ($100 \mu A$)。将万用表置直流 200 mV 档，测量表头两端电压 U_{AB} 。万用表的读数乘以 10 (除以 0.1) 即为表头内阻 r 的欧姆数。

注意，不能用万用表的欧姆档直接测量表头的内阻。

7) 验证欧姆定律

将万用表置直流电压 20 V 档，用万用表测量电阻 $RP_3 + R_3$ 两端的电压，记下读数，设读数为 U 。将电阻 R_3 右端从电路中取下，用万用表欧姆档测量 $RP_3 + R_3$ 的电阻，记下读数，设读数为 R 。

我们可以发现， U 与 R 的比值恰等于电流表 B_2 的读数 I ($100 \mu A$)。

4. 实训总结与分析

(1) 按照图 1-1, 我们可以将各种设备与器件连接起来。在图 1-1 中, 稳压电源用一内阻为 0 的电压源来表示, 表头用一内阻为 0 的电流表与一内阻 r 表示, 导线的电阻为 0。开关闭合时电阻为 0, 断开时电阻无穷大。其实, 导线都有电阻, 表头的线圈具有电感, 但我们在给出的电路中都忽略了。因此, 图 1-1 是一种将实际电路中各种器件或设备理想化并用相关的参数予以表征以后画出的电路, 称为实际电路的理想模型。给出电路的理想模型可以方便地对实际电路进行分析和数学描述。按照电路模型连接实际应用电路、将实际应用电路等效成理想电路模型、通过数学描述对理想电路模型进行分析, 以上三方面是本门课程的重要学习内容。

(2) 在以上实训中, 我们学会了将一个读数较小的电流表, 改装为一个电压表或电流表。电压表是将一电阻与表头串联, 与之串联的电阻越大, 其测量的量程也越大。电流表是将一个较小的电阻与表头并联, 并联的电阻越小, 其测量的量程越大。其定量的关系, 是我们必须掌握的。读者在学习了本章后面的内容后可以自己分析。

(3) 如果将 R_1 视为电源的负载, 则测量 R_1 两端的电压时, 电压表与 R_1 并联, 测量流过 R_1 的电流时, 电流表与 R_1 串联。测电压并联测电流串联是电路测试必须遵守的基本原则。我们在今后的学习或工作中, 必须严格遵守这一原则, 违反这个原则将会产生严重后果。

(4) 表头内阻 r 是表头的重要参数, 如果事先知道了表头内阻, 在改装电表时, 可以直接计算出与之并联或串联的电阻。实训步骤 6) 中测量表头内阻 r 是通过测量其上的电压来间接得到, 测试原理依据的是中学就学过的欧姆定律。步骤 7) 通过测量电阻 $RP_3 + R_3$ 的阻值、两端的电压、流过其间的电流并找出它们之间的关系, 验证了欧姆定律。

在步骤 6) 中强调不能用万用表欧姆档直接测量表头内阻, 这是因为用万用表测量表头电阻时, 将有电流流过被测量的表头, 这个电流很可能超过表头的量程而使表头损坏。

通过以上操作, 我们接触了一个简单的应用电路, 对电路中的基本物理变量电压与电流有了初步的认识, 掌握了测量电压与电流的基本方法。读者可以根据前面的实训安排, 将图 1-1(a) 中的电流表改装成满度值为 1 V 的电压表。根据图 1-1(b) 将电流表扩展为满度值为 10 mA 与 100 mA 的电流表。实训前, 请事先编写好实训步骤。

5. 思考与讨论

- (1) 如要利用电流表来测量电阻的阻值, 电路应如何连接?
- (2) 要将电压表、电流表、欧姆表组合成一个三用表, 应考虑哪些问题?

1.1 直流电路

实训 1 中, 我们接触的电路都是直流电路。直流电路是指电路稳定以后, 电路中的电压与电流的大小与方向均不发生变化的电路, 或者说是只包含直流电源与电阻的电路。直流电路是电路的最基本形式, 直流电路中的一些基本定律与定理在其他应用电路中也是适用的。掌握直流电路的分析方法, 是研究其他电路的基础。

1.1.1 电路变量

电路中的基本变量包括电流、电压与电动势。我们对电路中的电流、电压等变量有了一定的认识，从定义、单位、量纲、方向、正负意义等几方面进一步深入认识电路变量，对分析电路有着重要的意义。

1. 电流

电流定义为电荷的定向移动。人们把单位时间内通过导体横截面的电荷定义为电流强度，用以衡量电流的大小，电流强度简称为电流，用符号 i 表式。

设在极短的时间 dt 内，通过导体横截面的电荷量为 dq 则电流为

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

在国际单位制中，时间 t 的单位为 s (秒)，电量 q 的单位为 C (库仑)，电流的单位为 A (安培)

一般情况下，在不同时刻， dq 与 dt 的比值不同， i 是时间 t 的函数。如果 dq 与 dt 的比值不随时间变化，即任意时刻，通过导体截面积的电量都是相等的且电荷流动的方向也不发生变化，则这种电流称为恒定电流，简称直流，其强度用 I 表示。显然

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

如果通过导体截面的电荷随时间变化，而电荷移动的方向不发生变化，这种电流称为脉动直流。如果电流的大小与方向都随时间变化，则称为交变电流，简称交流。

从图 1-2 中，可以看出直流、脉动直流与交流的区别。

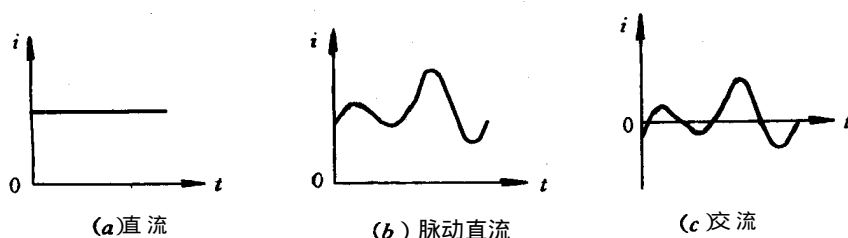


图 1-2 直流、脉动直流与交流
(a) 直流；(b) 脉动直流；(c) 交流

直流是电流的一种特殊形式，人们正是通过对直流电路的分析，找出分析一般电路的方法。

在导体中，任意时刻电荷的移动有确定的方向，人们规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。在分析电路时，电流的实际方向往往难以事先确定，为了解决这样的困难，人们可以根据需要任意假定某一方向为电流的正方向，或称为参考方向，并用箭头在电路中标示出来。当所标示的方向与电流实际方向一致时电流为正，与实际电流方向相反时为负。因此，只有在标出了电流的参考方向以后，电流的数值才有正负的区别。

2. 电位与电压

1) 电位

电荷在导体中运动是因为受到了存在于导体中的电场力的作用，显然，电场力要对电荷做功。如果在电路中任意确定一个电位参考点 0，人们定义空间某点 A 的电位 V_A 在量值上等于将单位正电荷从 0 点移到 A 点电场力所做的功。

在国际单位中，电位的单位为 V(伏特)

显然， V_A 是一个相对的量，它的量值与所选取的参考点有关。

2) 电压

电压与电位联系紧密。电路中任意两点间的电位差称为这两点间的电压。

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1.3)$$

显然，A、B 两点间的电压 U_{AB} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功。电压的单位与电位完全一样。电压与电位的根本区别是电压与参考点的选取无关。比如在图 1-3 中，选取电压源负端为电位 0 点，可以测得 A 点的电位 V_{A1} 为 7.5 V，B 点电位 V_{B1} 为 5 V，A、B 间电压 $U_{AB} = V_{A1} - V_{B1} = 5 \text{ V} - 2.5 \text{ V} = 2.5 \text{ V}$ 。如选取电压源正端为电位 0 点，可以测得 A 点电位 V_{A2} 为 -2.5 V，B 点电位 V_{B2} 为 -5 V，A、B 间电压 $U_{AB} = V_{A2} - V_{B2} = (-2.5 \text{ V}) - (-5 \text{ V}) = 2.5 \text{ V}$ 。选取的电位 0 点不同，A、B 点的电位发生变化，但 A、B 两点间的电压却不变。

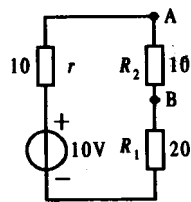


图 1-3

电流、电压与电位都是标量，为了分析问题的方便，电路中也规定电压的方向。如果规定电场力做功取正值，则电位降低的方向（正电荷在电场力作用下流动的方向）为电压的正方向。在电路中，我们可以根据需要任意选某一方向为电压的参考正方向，电压的数值为正时电压的实际方向与选取的参考正方向一致，数值为负时与选取的参考正方向相反。

3. 电动势

在图 1-3 中，为了维持电流的不断流动，并保持恒定，电源的存在是必不可少的条件。电源的作用是将高电位 A 点流至低电位 B 点的电荷通过非电场力的作用又从低电位搬运到高电位。人们用电动势这个物理量来衡量电源将正电荷从电源负端搬运到电源正端的这种能力。电源的电动势在量值上等于电源力将单位正电荷从电源的低电位端通过电源内部搬运到电源高电位端所做的功。显然，电动势的单位与电位或电压的单位完全相同。

在只有一个电源的电路中，正电荷在电源内部是从电源的负极流向正极，因此人们规定电源电动势的方向由电源负端指向正端，即从电源的低电位端指向高电位端。这样，在图 1-3 中，对于闭合回路来说，电流的方向与电动势的方向完全一致。

必须指出，电压与电动势虽然具有同样的量纲，但两者却有着本质的区别。电动势是描述电源的物理量，它可以离开具体电路独立存在。在恒流电路中，电压是电路中的变量，它随电路参数的改变而改变。

1.1.2 欧姆定律

流过电阻的电流通常与电阻两端的电压成正比，这是我们早已熟悉的欧姆定律，在实

训 1 中，我们验证了这一规律。

在电路中，当规定的电压正方向与电流正方向一致时，欧姆定律的数学表示式为

$$U = IR \quad (1.4)$$

在国际单位制中， R 的单位为 Ω 。当两者规定的正方向不一致时，欧姆定律的数学表示式为

$$U = -IR$$

例 1.1 列出图 1-4 中 4 个电路欧姆定律的数学表达式，并求电阻 R 。

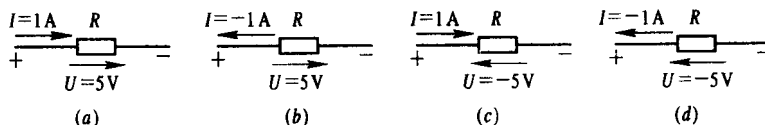


图 1-4 例 1.1 图

解 图 1-4(a) 中，电压与电流的规定方向一致，且与实际方向一致，为此有

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{1} = 5 \Omega$$

在图 1-4(b) 中，电压与实际方向一致，为正值，电流与实际方向相反，为负值。为此有：

$$R = \frac{U}{-I} = -\frac{5}{-1} = 5 \Omega$$

在图 1-4(c) 中，电压与实际方向相反，为负值，电流与实际方向一致，为正值。为此有：

$$R = \frac{-U}{I} = -\frac{-5}{1} = 5 \Omega$$

同理，对图 1-4(d) 有：

$$R = \frac{-U}{-I} = \frac{-5}{-1} = 5 \Omega$$

例 1.2 图 1-5 为实训 1 中电压表实验电路图。已知电流表处于满度状态，电源电压为 10 V，设电流表内阻为 500Ω ，求与电表串联的电阻 R 为多大，电阻耗散的功率是多少？如要将电压表的量程扩大至 100 V，与电流表串联的电阻为多大？

解 根据欧姆定律

$$r + R = \frac{E}{I} = \frac{10}{100 \times 10^{-6}} = 10^5 \Omega$$

所以

$$R = 10^5 - 500 = 99.5 \text{ k}\Omega$$

电阻耗散的功率为

$$P = I^2 R = (100 \times 10^{-6})^2 \times 99.5 \times 10^3 = 0.995 \text{ mW}$$

当量程扩大至 100 V 时

$$r + R = \frac{100}{100 \times 10^{-6}} = 10^6 \Omega$$

所以

$$R = 10^6 - 500 = 999.5 \text{ k}\Omega$$

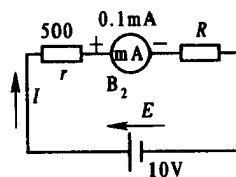


图 1-5 例 1.2 图

上面两个例题，电路中都只有一个环路，用欧姆定律可以方便地对电路变量进行分析与数学计算。如果电路出现如图 1-6 的节点（电路中，有 3 个以上支路相交的点，如图中的 B、D 两点），此时电路出现 ABCA、ABDA、BDCB 共 3 个环路，单纯用欧姆定律来分析就比较困难。这时候，我们可以应用下小节中的基尔霍夫定律。

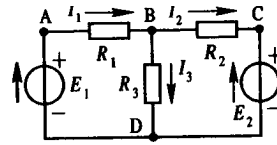


图 1-6 具有节点的多环路电路

1.1.3 基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫电流定律

为了深入认识基尔霍夫电流定律，我们来做一个实验。

图 1-6 中的电阻按图 1-7 取值，电源 E_1 与 E_2 由具有两路输出电压可调的稳压电源提供。

实验按如下步骤进行：

(1) 如图 1-7 所示，将图 1-6 中的节点 B 拆开，在每条支路中串入一只数字万用表，注意万用表的正负端不要接错。

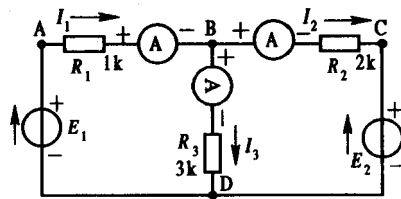


图 1-7 基尔霍夫定律实验电路图

(2) 将万用表置直流电流 20 mA 档。

(3) 打开稳压电源开关，将 E_1 调至 10 V， E_2 调至 5 V 档。

(4) 读出 3 个电流表的读数。 I_1 读数的正负符号不变，将 I_2 、 I_3 读数的正负符号颠倒（流进节点的电流取正，流出节点的电流取负），然后算出 3 个读数的代数和。

此时我们可以发现，3 个电流的代数和为 0。

(5) 改变稳压电源 E_1 与 E_2 的输出电压值，重复步骤(4)，此时每个电流表的读数均发生变化，但其代数和为 0 的结论并不改变。

为此我们得出，在任意瞬间，流入节点的电流，恒等于流出节点的电流。如果取流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，则一个节点上电流的代数和恒等于 0。

(6) 按图 1-8 连接电路。

图 1-8 中，圆环包围了 A、B、C 共 3 个节点。如果把圆环看成是一个闭合面，则该面外共有 3 条支路。其中， I_1 为流入闭合面的电流， I_2 与 I_3 为流出闭合面的电流。我们来看看它们之间遵循什么关系。

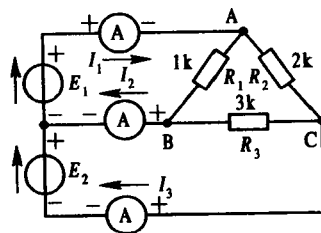


图 1-8 基尔霍夫实验图 2

(7) 重复步骤 2)、(3)、(4)、(5) 可以得到这样的结论 电路中 流入任意闭合面的电流, 恒等于从闭合面流出的电流。

通过上述实验, 我们得出: 电路中, 对任意节点或闭合面来说, 流入节点或闭合面的电流, 恒等于流出节点或闭合面的电流。这就是基尔霍夫电流定律, 也称为基尔霍夫第一定律。

如果将流入节点的电流取正, 流出节点的电流取负, 则基尔霍夫定律的数学表示式为

$$\sum I = 0 \quad (1.5)$$

2. 基尔霍夫电压定律

为了认识基尔霍夫电压定律, 我们进行如下实验:

(1) 按图 1-9 连接电路。

(2) 打开稳压电源 E_1 与 E_2 的开关并使它们的输出在 (5~10)V 之间。

(3) 用数字万用表测量回路 ABDA 中每两点间的电压 U_{AB} 、 U_{BD} 、 U_{DA} 。测量时, 表笔的正端置于电压角标的第一个字母在电路中对应的测试点, 表笔负端置于电压角标第二个字母在电路中对应的点。将测量值填入表 1-1 中。

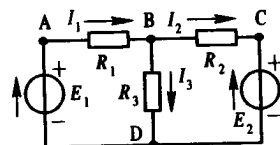


图 1-9 基尔霍夫电压定律实验图

表 1-1 基尔霍夫电压定律实验测量数据表

	相临两点间电压				$\sum U$
	U_{AB}	U_{BD}	U_{DA}		
环路 ABDA	U_{AB}	U_{BD}	U_{DA}		
环路 ABCDA	U_{AB}	U_{BC}	U_{CD}	U_{DA}	
环路 BDCB	U_{BD}	U_{DC}	U_{CB}		

(4) 按步骤 3) 的方法与要求再依次测量回路 ABCDA 与回路 BDCB 中相临两点间的电压, 并将测量值填入表 1-1。

(5) 分别将 3 个环路相临两点间的电压求代数, 我们发现, 它们的值均为 0。

通过以上演示, 我们得出如下结论: 在任意瞬间, 在任意闭合回路中, 沿任意环行方向 (顺时针或逆时针), 回路中各段电压的代数和恒等于 0。这就是基尔霍夫电压定律。其数学表达式为

$$\sum U = 0 \quad (1.6)$$

在分析电路时, 为了正确写出 (1.6) 式, 可按如下方法进行:

(1) 规定环路的绕行方向 (顺时针或逆时针)

(2) 规定每条支路电流的参考方向。

(3) 沿绕行方向确定环路上电阻两端电压的正负符号, 如果标注的流过电阻的电流方向与绕行方向一致时, 则电阻上的电压取正值 (电位降取正), 相反则取负值。

(4) 沿绕行方向确定电源电压的正负符号。如果电动势的方向与环路方向一致则取负 (电位升取负) 值 相反则取正值。

例 1.3 写出图 1-9 中, ABDA、ABCDA、BCDB 3 个环路的基尔霍夫电压定律等式。

解 取顺时针方向为环路绕行方向，各支路电流参考方向如图 1-9 所示。

对 ABDA 环路有

$$U_{R_1} + U_{R_3} - E_1 = 0$$

或

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 - E_1 = 0$$

对 ABCDA 环路有

$$U_{R_1} + U_{R_2} + E_2 - E_1 = 0$$

或

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + E_2 - E_1 = 0$$

对 BCDB 环路有

$$U_{R_2} + E_2 - U_{R_3} = 0$$

或

$$I_2 R_2 + E_2 - I_3 R_3 = 0$$

基尔霍夫定律不仅应用于闭合电路，也可推广应用于回路的部分电路。比如在图 1-10 中， E 为电源电动势， r 为其内阻，A、B 为与电源连接的外部电路的两点。无论 A、B 与什么连接，根据基尔霍夫定律我们均可列出电压等式：

设 E 、 r 支路与 A、B 两点右端构成如图虚线所示环路，A、B 两点间的电压为 U_{AB} 取顺时针绕向，为此有

$$U_{AB} - E + Ir = 0$$

$$U_{AB} = E - Ir \quad (1.7)$$

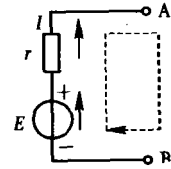


图 1-10 基尔霍夫用于一段支路

式 (1.7) 就是一段有源电路的欧姆定律的表达式。

由式 (1.5) 与 (1.6) 表示的基尔霍夫二定律在电路分析中有着重要的意义。虽然这两个定律我们是通过直流电路予以验证的，实验证明，基尔霍夫定律具有普遍性，它适合任何元件组成的电路，适合任何变化的电流与电压。

1.2 电阻元件

导体同时具有电阻、电感与电容的性质，这些性质是导体本身固有的，与电路无关。在不同的电路中，人们根据需要，突出导体的某种性质，由此就有电阻器、电感器、电容器等各种器件的区别。接入电路中的电阻、电感与电容会对电路的参数带来影响。在直流电路中，我们只考虑导体的电阻特性。

1.2.1 线性电阻与非线性电阻

1. 导体的电阻

电阻就是导体对电流的阻碍作用，这种阻碍作用与导体的长度成正比，与导体的截面积成反比，并且与导体材料的性质有关。材质均匀、线径一致的导体，其电阻的数学表达式为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1.8)$$

式中, L : 导体的长度, 单位为 m

S : 导体的截面积, 单位为 m^2 。

ρ : 导体的电阻率, 与导体的材料有关, 单位为 $\Omega \cdot m$ 。

2. 线性电阻与非线性电阻

1) 线性电阻

在欧姆定律中, 流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比。如果用电压作为横坐标, 电流作为纵坐标, 则电压与电流的关系曲线 ($V-I$ 曲线 如图 1-11(a) 所示) 为一条过原点的倾斜直线。

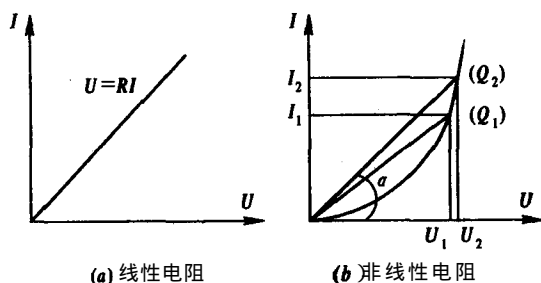


图 1-11 电阻的 $V-I$ 曲线

$V-I$ 曲线为一条直线的电阻, 或者说满足欧姆定律的电阻称为线性电阻。在图 1-11(a) 中 直线的斜率恒等于电流 I 与电压的比值, 即

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R} = G \quad (1.9)$$

G 是电阻的倒数, 它也是由导体的性质决定的, 显然, G 越大, 导体对电流的阻碍作用越小, 因此 G 称为电导, 单位为 S (西门子)。在分析电路时, 有时采用电导更方便。

对由线性器件组成的电路, 称为线性电路, 线性电路中, 电阻的值与流过它的电流或加在它上面的电压无关, 电压与电流的关系遵循欧姆定律, 可以用数学方法来分析, 求解电路比较方便。

2) 非线性电阻

将器件 $V-A$ 曲线显示出来的仪器称为 $V-A$ 特性曲线测试仪。一般的晶体管特性测试仪均能显示器件的 $V-A$ 曲线。如果用仪器观测二极管 $V-A$ 特性, 我们可以得到如图 1-11(b) 所示的曲线。在 (b) 图中, 曲线的斜率随电压的改变而改变, 显然, 加在二极管两端的电压与流过二极管的电流不再遵循欧姆定律, 其电阻特性是非线性的。除二极管外, 还有一些器件也呈现非线性电阻特性。

由于非线性电阻的阻值是随着电压或电流而变动的, 计算它的电阻时就必须指明它的工作电流或工作电压, 例如在图 1-11(b) 中 在工作点 U_1, I_1 与在工作点 U_2, I_2 处 电阻的阻值不同。

非线性电阻元件的电阻有两种表示方式。一种称为静态电阻或直流电阻, 其倒数称为静态电导或直流电导, 静态电阻等于工作点 (一般用 Q 表示) 的电压与电流 I 的比值, 即该

点到原点连线斜率的倒数。在图 1-11(b)中, $\frac{U_1}{I_1}$ 为 Q_1 点的静态电阻, $\frac{U_2}{I_2}$ 为 Q_2 点的静态电阻。

另一种称为动态电阻或交流电阻, 其倒数称为动态电导或交流电导, 动态电导等于 $V-A$ 曲线上工作点 Q 处的斜率, 即 $g = di/du$ 。对非线性电阻而言, 直流电导与交流电导都是电压 u 的函数。

由于非线性电阻的阻值不是常数, 其 $V-A$ 特性很难用数学式准确表示。在分析与计算非线性电路时, 一般都采用图解法。如果电压或电流的变化范围较小, 可以把对应曲线看成是直线, 按线性电阻来处理。

必须指出, 非线性器件在电路中不遵循欧姆定律, 但含有非线性器件的电路同样遵循基尔霍夫电流、电压定律。

1.2.2 电阻的串联与并联

在实际电路中, 电阻的连接具有多种多样的形式。比如在电压表的改装中, 电流表与电阻的连接为串联, 在电流表的改装中, 电阻与电流表的连接称为并联。串联与并联是最简单的连接方式, 掌握串、并联电路的特点是分析复杂电路的前提。

1. 电阻的串联

为了理解电阻串联在电路中的应用, 我们首先来解决两个实际问题。

实例 1 发光二极管正常工作时, 电流为 5 mA , 两端电压为 2 V 如何将其接入 5 V 直流电源中?

如果将二极管直接并入 5 V 直流电源, 由于电压过高, 电流会很大, 将会损坏发光二极管, 因此应限制发光二极管的电流, 解决的方法是将一电阻与发光二极管串联然后再接入直流电源中, 如图 1-12 所示。

下面我们来计算电阻 R 的取值。

由于发光二极管正常工作时两端电压维持在 2 V , 根据基尔霍夫定律有

$$IR + U_D - E = 0$$

为此有

$$R = \frac{E - U_D}{I} = \frac{5 - 3}{5} = 0.6\text{ k}\Omega$$

在这一实例中, 电阻串联在电路中的作用是限流, 我们常将其称为限流电阻。

实例 2 如图 1-13 所示, 已知直流电源电压为 5 V , 现要为电路提供 1 V 的参考电压, 如何获得?

图中 U_c 就是我们要获得的参考电压, 即电阻 R_2 上的电压。电阻 R_1 与 R_2 串联。在参考电压接口不接负载的情况下, 根据基尔霍夫定律可以得到:

$$IR_1 + IR_2 - E = 0$$

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

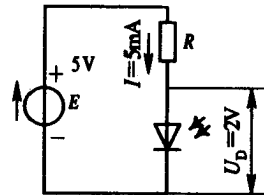


图 1-12 串联电阻的限流作用

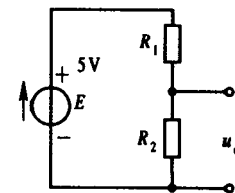


图 1-13 串联分压

$$U_{R_2} = IR_2 = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} \quad (1.10)$$

在(1.10)中, $E=5\text{ V}$, 若取 $R_2/R_1=1/4$, 则 $U_{R_2}=1\text{ V}$ 。

因此, 为获得某一电压, 当采用电阻串联时, 只要合适选取两电阻的比值即可。在保证比值的前提下, R_2 与 R_1 取值的大小, 由从参考电压接口流出的电流大小决定, 从接口流出的电流越小, R_2 与 R_1 的取值可以越大。其原因请读者自己分析。

同理, 我们可以得到

$$U_{R_1} = IR_1 = \frac{ER_1}{R_1 + R_2} \quad (1.11)$$

$$\frac{U_{R_1}}{U_{R_2}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1.12)$$

可以看出, 串联电路上, 电压的分配与电阻成正比。

式(1.11)与(1.12)称为分压公式。它适应两个电阻串联的情况。

从以上分析中, 我们可以得出串联电路的如下特点。

- (1) $I_1=I_2=\dots=I$ 串联电路中, 流过支路的电流处处相等。
- (2) $R=R_1+R_2+\dots$ 串联电路两端的总电阻, 等于各电阻之和。
- (3) $U=U_1+U_2+\dots$ 串联电路两端的总电压, 等于各电阻上电压之和。

2. 电阻的并联

如果电路中两个节点上连接了两个或两个以上的电阻, 这种情况称为电阻的并联。电阻并联的实例很多, 比如家庭中, 所有的用电器均接在 220 V 的市电上, 它们之间的连接即为并联。

下面以一个实例来说明电阻并联的应用并分析电路的特点。

实例 3 在实训 1 电流表改装实训中, 为了扩大表头量程, 需在表头上并联一个电阻, 其电路如图 1-14 所示, 如何确定并联电阻的大小?

实例分析 图中, I_2 为表头的满载电流, 设为 0.1 mA ; R_2 为表头内阻, 设为 $500\ \Omega$; 电流 I 为表头扩展量程后的电流, 设为 10 mA 。在电路中, 如果不并联 R_1 , 则电流 I 全部流过表头, 将会损坏表头。 R_1 并联在表头两端, 它分摊了大部分电流, 使总电流为 10 mA 时, 流过表头的电流恰为 0.1 mA 。因此, R_1 称为表头的分流电阻。

在图 1-14 中, 由于 R_1 与 R_2 接在相同的两个节点上, 因此

$$U_{R_1} = U_{R_2} = U$$

根据基尔霍夫电流定律有

$$I = I_1 + I_2$$

设两个电阻并联后的等效电阻为 R 则有

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

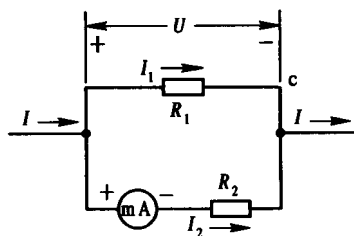


图 1-14 利用电阻并联扩大电流表量程

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.13)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{IR_2}{R_1 + R_2} \quad (1.14)$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{IR_1}{R_1 + R_2} \quad (1.15)$$

将 $I=10$ 、 $I_2=0.1$ 、 $R_2=500$ 带入式 (1.15) 得, $R_1=4.95 \Omega$ 。

从式 (1.14) 与 (1.15) 可得

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1.16)$$

可以看出, 并联电路上, 电流的分配与电阻成反比。式 (1.14)~(1.16) 称为并联电路分流公式, 它适应两个电阻并联的情况。

从上面的分析我们可以总结出并联电路的如下特点:

- (1) $G=G_1+G_2+\dots$ 并联电路的总电导, 等于各支路电导之和。
- (2) $I=I_1+I_2+\dots$ 并联电路总电流等于各支路电流之和。
- (3) $U=U_1=U_2=\dots$ 并联电路电压处处相等。

熟悉了串联电路与并联电路的特点, 在此基础上, 我们可以分析更加复杂的电路。

例 1.4 图 1-15(a) 为一串并联混联电路, 求电路中 A、B、C、D 各点对电源负端的电位。

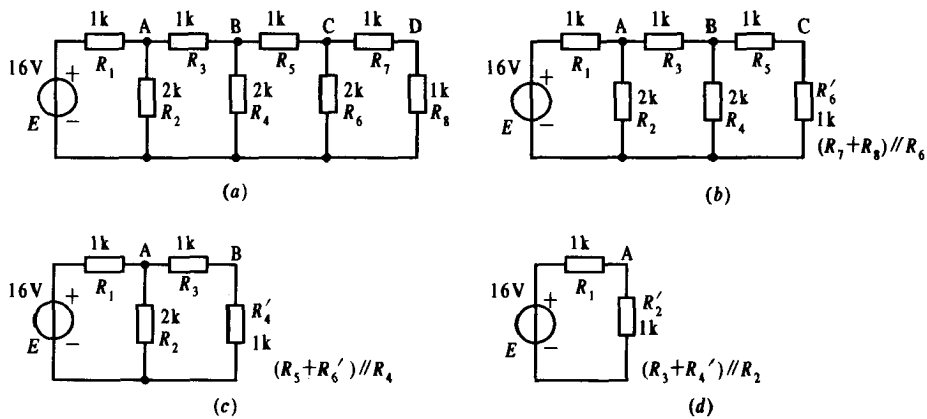


图 1-15 例 1.4 图

解 根据电阻串并联特点, 对电路中 C 点而言, 可以等效成图 (b) 的电路, 对 B 点可以等效成图 (c) 的电路, 对 A 点可以等效成图 (d) 的电路。

在 (d) 图中, 根据串联分压原则, A 点的电位恰为电源电压的一半, 因此, $V_A=8 \text{ V}$ 。同理可以得出, 在 (c) 图中, B 点的电位恰为 V_A 的一半, 因此, $V_B=4 \text{ V}$; 在 (b) 图中, C 点的电位恰为 V_B 的一半, $V_C=2 \text{ V}$; 在 (a) 图中, D 点的电位恰为 V_C 的一半, $V_D=1 \text{ V}$ 。该电路按照 2 的倍数降低电位, 在数字电路中具有很大的实用性。

例 1.5 求图 1-16 中的总电流 I 。

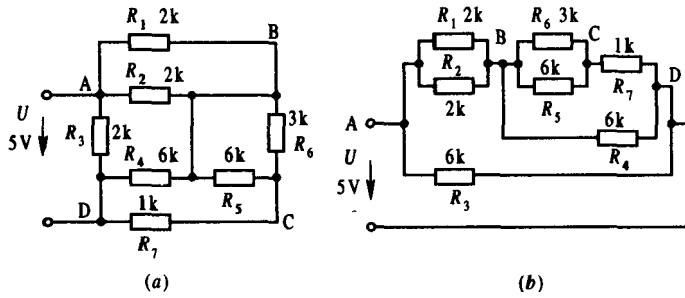


图 1-16 例 1.5 图

解 图 1-16(a)中, 4 个节点 A、B、C、D 如图所示, 根据每个电阻与上述节点的连接状况, 可以将 a) 图等效为 (b) 图。

从 (b) 图中可以看出, 回路总电阻可用下式表示:

$$R = [R_1 // R_2 + (R_6 // R_5 + R_7) // R_4] // R_3$$

式中

$$R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2 \times 2}{2 + 2} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_6 // R_5 = \frac{R_6 R_5}{R_6 + R_5} = \frac{3 \times 6}{3 + 6} = 2 \text{ k}\Omega$$

$$(R_6 // R_5 + R_7) // R_4 = \frac{(2 + 1) \times 6}{(2 + 1) + 6} = 2 \text{ k}\Omega$$

为此

$$R = [R_1 // R_2 + (R_6 // R_5 + R_7) // R_4] // R_3 = \frac{(1 + 2) \times 6}{(1 + 2) + 6} = 2 \text{ k}\Omega$$

总电流 I 为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ mA}$$

求解电阻混联电路的关键是将看起来连接关系不清楚的电路改画成串并联关系十分清楚的电路, 即将图 1-16 中的 (a) 图等效成 (b) 图。在实际工作中, 我们往往要将各种电器或器件的实物连接通过查找绘出电路图, 开始绘出的电路可能没有什么规律, 必须将其改绘成人们熟悉的标准形式, 这对电器或电路工程师来说是一项十分重要的工作。

1.3 电 源

电源是电路中产生电流的动力, 在日常生活中, 我们接触过电池、市电、稳压电源和各种信号源等多种电源。本节讨论表示电源的两种不同方式——电压源与电流源及两种方式之间的等效变换。

1.3.1 电压源

下面的实验可以帮助我们认识电压源。

实验电路如图 1-17 所示。图中，左边为一节用过一段时间的干电池。

实验按如下步骤进行：

(1) 按图将电路连接好。

(2) 闭合开关之前，读出电压表与电流表读数，填入表 1-2 中。

(3) 将开关 S 闭合，改变可变电阻 RP 的阻值，观察电流表与电压表的变化。我们可以看到。随着电流的增大或减小，电压表的读数减小或增大。干电池两端的电压不是恒定的。

(4) 依次使电流表的读数为 50 mA、100 mA、150 mA、200 mA 读出电压表对应的读数 填入表 1-2 中。

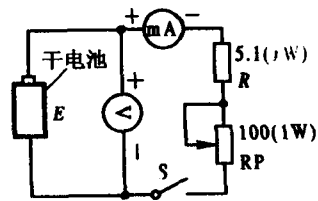


图 1-17 电源实验电路

表 1-2 实验测试数据

I (mA)	0	50	100	150	200
U (V)					

(5) 以电压为纵坐标，电流为横坐标，在直角坐标系中，画出电压电流关系曲线。该曲线即干电池的 $V-A$ 曲线。其形状如图 1-18 所示，为一条右端向下倾斜的直线。

从图中可以看出，干电池的端电压随着负载电流的增大而下降，它反映了干电池不是一个恒压源，电源内部存在电压降，内部电压降在电源的内电阻上。为此，电源可以看成是一个电动势为 E 的恒压源与内阻 r 串联而成。我们把这种电源称为电压源。其 $V-A$ 特性可以用

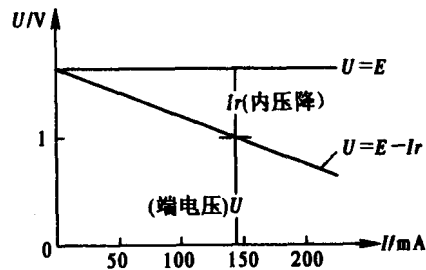


图 1-18 干电池的 $V-A$ 特性

$$U = E - Ir \quad (1.17)$$

来表示。其等效电路与外特性曲线如图 1-19 所示。

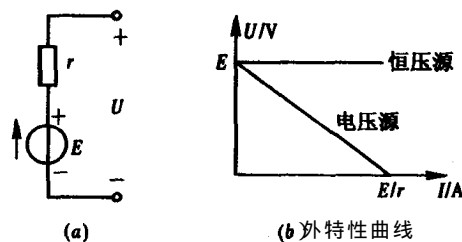


图 1-19 电压源电路及其外特性曲线

电源内阻 r 的存在，使电源的端电压随负载的变化而变化，且限制了电流的输出。当端电压为 0 时电池可以输出的电流最大，称为短路电流 I_s ， $I_s = E/r$ 。干电池在使用了一段时间以后，其内阻逐渐变大，所能输出的电流越来越小。有些电池用电压表测量电压正常，但却不能点亮灯泡或使收音机工作，原因就在于此。

实验室的稳压电源，其内阻很小，其端电压几乎不随负载的大小变化。人们把内阻为 0 的电压源称为理想电压源或恒压源。理想电压源 $U = E$ ，端电压与电流无关，其外特性曲线如图 1-19 所示，为一条与电流轴平行的直线。

1.3.2 电流源

电源除用电动势 E 与内阻 r 串联的电路模型来表示外，还可以用电流源来表示。将式(1.17)两边除以 r 得

$$\frac{U}{r} = \frac{E}{r} - I = I_s - I$$

即

$$I_s - \frac{U}{r} = I \quad (1.18)$$

式中， $I_s = E/r$ 是电源的短路电流， I 仍是负载电流， U/r 是与电源内阻及端电压有关的电流。式(1.18)可用图 1-20 所示的电路表示。其外特性曲线如图 1-21 中的斜线所示。

从图 1-20 可以看出，电源内部两条支路并联，其中电流分别为 I_s 和 U/r ，与图 1-19 电压源比较，电源外部负载电阻上的电压 U 与电流 I 均未改变。

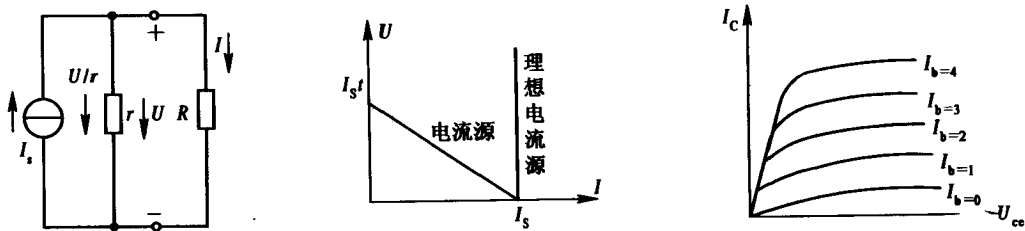


图 1-20 电 流 源 图 1-21 电 流 源 与 理 想 电 流 图 1-22 三 极 管 的 输 出 特 性 源 的 外 特 性

从图 1-21 中可以看出，当电流源开路时， $I = 0$ ， $U = I_s r$ ；当电流源短路时， $U = 0$ ， $I = I_s$ 。 r 越大，则斜线越陡，不同的输出电流对应不同的输出电压，与电压源没有区别。但当 $r = \infty$ 时，外特性曲线变为一条与电流轴垂直的直线。此时，电流 I 恒等于电流 I_s ，为一定值，而其两端的电压则是任意的，由负载电阻 R 及电流本身确定。这样的电源称为恒流源，或理想电流源。如果一个电源的内阻远远大于负载电阻，即 $r \gg R$ 时，流过 R 的电流 I 近似于 I_s 。在这种情况下，可以将电源看成是理想电流源。晶体三极管的输出特性如图 1-22 所示，当 I_b 一定， U_{ce} 超过一定值时，三极管工作在放大区，曲线近似与电流轴垂直，此时，三极管可以看成是一个恒流源。

1.3.3 电压源与电流源的等效变换

前两节我们介绍了电压源与电流源两种电源的模型。实际上，电压源就是电动势为 E 的理想电压源与内阻 r 串联的电路，电流源就是电流为 I_s 的理想电流源与内阻 r 并联的电路。对于一个实际电源，我们没有必要先确定它是电压源还是电流源，因为它们对外电路是完全等效的。对外电路来说，任何一个有内阻的电源，都可以用电压源或电流源来表示，不必追究哪种模型更能反应电源内部的情况，因为电路分析关心的是电源端钮上的表现，而不是它的内部情况。电源之间对外电路的等效变换可以使我们在分析实际电路时更方便，将电源看成是电压源还是电流源由分析实际电路时的需要所决定。

电压源与电流源之间的等效关系如图 1-23 所示。

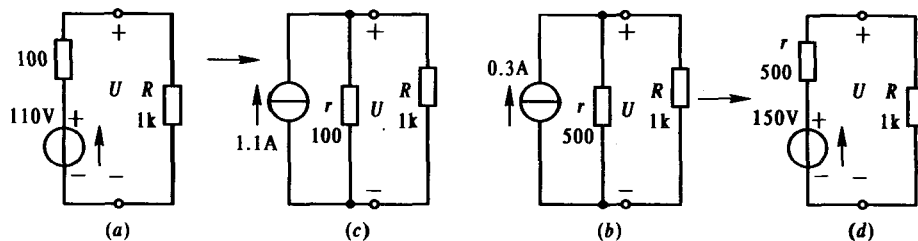


图 1-23 电压源与电流源的等效变换

图 1-23(a) 是将电动势为 E 、内阻为 r 的电压源等效为电流源，方法是将电压源的内阻 r 与一恒流源并联，恒流源的电流等于电压源的电动势除以电源内阻 r ，即

$$I_s = \frac{E}{r} \quad (1.19)$$

恒流源的方向与电动势的方向一致。图 1-23(b) 是将电流为 I_s 、内阻为 r 的电流源等效为电压源，方法是将电流源的内阻 r 与一恒压源串联，恒压源的电动势等于电流源的电流 I_s 与内阻 r 的乘积，即

$$E = I_s r \quad (1.20)$$

上述电压源与电流源的等效变换可以进一步理解为含源支路的等效变换，即一个电压源与电阻串联的组合可以等效为一个恒流源与一个电阻并联的电流源，一个电流源与电阻并联的组合可以等效为一个恒压源与电阻串联的电压源。必须注意，此时的电阻不再是电源的内阻。

显然，恒流源与恒压源之间不能等效。因为恒压源的内阻为 0，等效成电流源则电流无限大，恒流源的内阻无限大，等效成电压源则电压无限大，无限大电流与无限高的电压都是不存在的。

必须强调，电压源与电流源的等效变换只是对外电路等效，当我们对电路的分析涉及到电源内部（比如电源内部耗散的功率）时，是不能进行等效的。

例 1.6 将图 1.24(a) 中的电压源等效为电流源。(b) 中的电流源等效为电压源，设负载电阻为 $1\text{ k}\Omega$ ，分别算出电源的端电压、流过负载的电流及等效前后电源内阻 r 耗散的功率。

解 图 1-24(a) 所示电路中， $E=110\text{ V}$ 、 $r=100\ \Omega$ ，故得其等效电流源模型中的电