

第 1 章

直流电路



1. 理解电路的组成和作用。
2. 熟悉电路基本物理量的含义。
3. 理解电路基本定律,会利用基尔霍夫定律解决复杂电路问题。

1.1 电路的基本知识

1.1.1 电路的组成

电路,简单地讲就是电流流通的路径。它是由若干电气设备或元件按照一定方式用导线联结而成的,通常由电源、负载、导线和中间环节四个部分组成。

电源是将其他形式的能量转换为电能的装置,如发电机、干电池、蓄电池等将各种非电能(如热能、化学能、机械能、水能、原子能等)转换成电能。

负载是消耗电能的设备,它将电能转换成非电形态的能量并消耗掉。例如,电动机、照明灯、电炉等,它们可将电能转换成机械能、光能和热能。

中间环节包括变压器、控制开关和保护装置等,主要起控制、保护和测量等作用。

日常生活中使用的手电筒电路如图 1-1(a)所示,其中干电池是电源,灯泡是负载,筒体(包括开关)是中间环节。电路理论中,通常用电路原理图来表示实际电路。在电路原理图中,各种电器元件都不需要画出原有的形状,而是采用统一规定的图形符号来表示。图 1-1(b)就是手电筒的电路原理图。

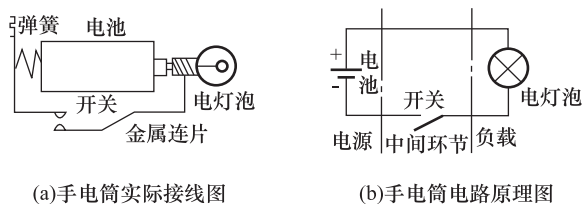


图 1-1 手电筒电路

1.1.2 电路的作用

电路种类繁多,从基本功能上分为两类。

一类是电力电路,其主要作用是电能的传输和转换,如把发电厂发电机组产生的电能,通过变压器、输电线路送到千家万户的电力系统。

一类是信号电路,其主要作用是信号的传输和处理,如各种物理量的测量电路、放大电路,声音、图像或文字处理电路。

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

电流是由带电粒子有规则的定向运动而形成的,其大小等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

大小或方向随时间变化的电流称交流电流,用小写字母 i 表示;不随时间变化的电流称直流电流,用大写字母 I 表示。

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。

在复杂电路的分析中,一段电路电流的实际方向很难预先判断出来,在电路中就无法标明电流的实际方向。为了便于分析和计算电路,人为地引入了电流参考方向的概念。所谓参考方向,就是任意选定一个方向作为电流的方向,这个方向就称为电流的参考方向,有时又称为电流的正方向。电流的参考方向一般用实线箭头表示。

如图 1-2 所示为某电路的一部分,其中长方框表示一个二端元件,流过这个元件的电流为 i ,其实际方向可能是从 A 到 B ,也可能是从 B 到 A 。在该图中用实线箭头表示电流的参考方向,它不一定与电流的实际方向一致。如果电流的实际方向是由 A 到 B ,如图 1-2(a)中

虚线箭头所示,与参考方向一致,则电流为正值,即 $i > 0$;在图 1-2(b)中,电流的参考方向由 B 到 A,电流的实际方向由 A 到 B,两者不一致,故电流为负值,即 $i < 0$ 。这样,在指定的电流参考方向的情况下,电流值的正和负就可以反映出电流的实际方向。

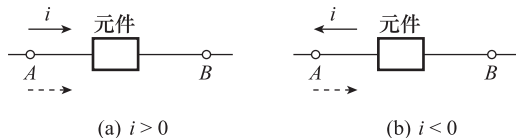


图 1-2 电流的参考方向与实际方向的关系

1.2.2 电压与电动势

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,引入“电压”这一物理量,并定义:电路中 a 、 b 两点间的电压,在数值上等于电场力把单位正电荷从电路中 a 点移动到 b 点所做的功,用 U_{ab} 表示。即

$$U_{ab} = \frac{dW_{ab}}{dq} \quad (1-2)$$

电压的实际方向规定为由高电位端指向低电位端,即指向电位降低的方向。

与电流一样,在较为复杂的电路中,往往无法事先确定电压的实际方向(或者极性)。因此,在电路图上所标出的也都是电压的参考方向。若电压的参考方向与实际方向一致,则其值为正;若电压的参考方向与实际方向相反,则其值为负。这样,在指定的电压参考方向的情况下,电压值的正和负就可以反映出电压的实际方向。如图 1-3 所示。

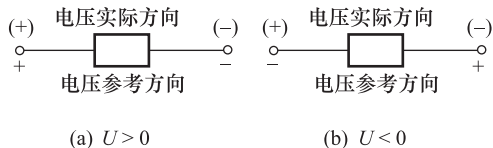


图 1-3 电压的参考方向与实际方向的关系

电动势是用来表示电源力移动单位正电荷做功本领的物理量。在图 1-4 中,电源的电动势,在数值上等于电源力把正电荷 q 从负极 b (低电位) 经由电源内部移到电源的正极 a (高电位) 所做的功 W_{ba} 。即

$$E = \frac{W_{ba}}{q} \quad (1-3)$$

由式(1-2)和式(1-3)可知:

$$U_{ab} = E \quad (1-4)$$

电压也称为两点间的电位差,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-5)$$

电源电动势的实际方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端,即电位升高的方向。

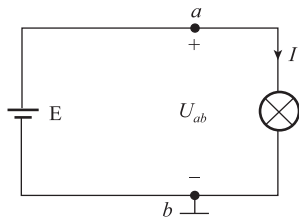


图 1-4 电动势 E 、电压 U 和电流 I 的关系

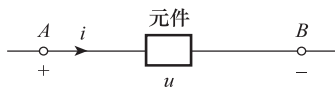


图 1-5 u 与 i 参考方向相关联

提醒

对于同一个元件或同一段电路上的电压和电流的参考方向的假定,原则上是任意的,但为了方便起见,习惯上常将电压和电流的参考方向设定为一致,称为关联参考方向。如图1-5所示。

1.2.3 电位

为了分析电路方便,常指定电路中任意一点为参考点。我们定义:电场力把单位正电荷从电路中某点移到参考点所做的功称为该点的电位,用大写字母 V 表示。电路中某点的电位即该点与参考点之间的电压。

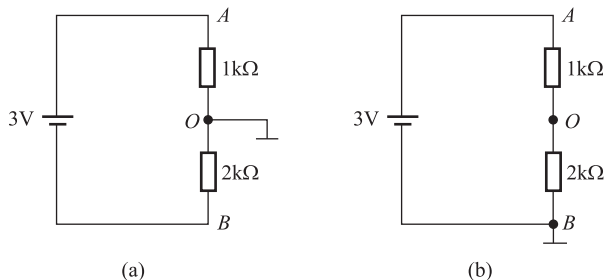


图 1-6 电位的计算示例

为了确定电路中各点的电位,必须在电路选取一个参考点。

(1)参考点的电位为零。如图 1-6(a)中, $V_O=0$ 。

(2)其他各点的电位为该点与参考点之间的电位差。如图 1-6(a)中 A 、 B 两点的电位分别为

$$V_A = V_A - V_O = U_{AO} = 1V$$

$$V_B = V_B - V_O = U_{BO} = -2V$$

(3)参考点选取不同,电路中各点的电位也不同,但任意两点间的电位差(电压)不变。如选取点 B 为参考点,如图 1-6(b)所示,则 $V_B=0$,

$$V_A = V_A - V_B = U_{AB} = 3\text{V}$$

但 A 、 B 两点间的电压不变,仍然为 $U_{AB} = 3\text{V}$ 。

由以上分析可知:电压是绝对的,电位是相对的。

(4)在研究同一电路系统时,只能选取一个电位参考点。电位概念的引入,给电路分析带来了方便,因此,在电子线路中往往不再画出电源,而改用电位标出。图 1-7 是电路的一般画法与电子线路的习惯画法示例。

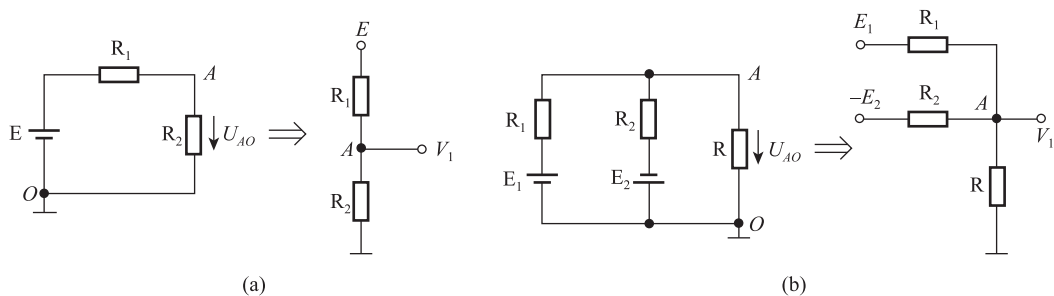


图 1-7 电路的一般画法与电子线路的习惯画法

1.2.4 功率

在直流电路中, a 、 b 两点间的电压为 U , 在 t 时间内电荷 Q 受电场力作用, 从 a 点移动到 b 点, 电场力所做的功为

$$W = UQ = UI t \quad (1-6)$$

若负载为电阻元件, 则在 t 时间内所消耗的电能为

$$W = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-7)$$

单位时间内消耗的电能为电功率(简称功率)。即

$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-8)$$

对于某一段电路, 在 U 和 I 取关联参考方向时, 功率 $P = UI$; 在 U 和 I 取非关联参考方向时, 功率 $P = -UI$ 。当 $P > 0$ 时, 表明元件吸收功率; 当 $P < 0$ 时, 表明元件释放功率。

如图 1-8(a)所示, U 和 I 取关联参考方向, 功率 $P = UI$ 。若 $P > 0$, 说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的, 元件吸收了功率, 是负载性质。

如图 1-8(b)所示, U 和 I 取非关联参考方向, 功率 $P = -UI$ 。若 $P < 0$, 则这段电路上电压和电流的实际方向不一致, 元件发出功率, 是电源性质。

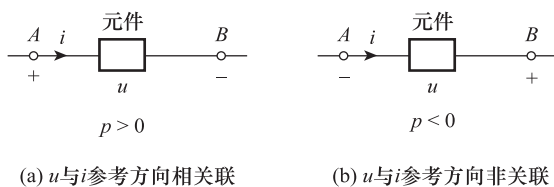


图 1-8 元件的功率

【例 1-1】 电路如图 1-8(a)所示, $U=12\text{V}$, $I=-2\text{A}$, 计算元件的功率。

解: 由电路可知, 电流和电压为关联参考方向, $P=UI=12 \times (-2) = -24\text{W} < 0$ 所以, 说明元件发出功率而不是吸收功率, 相当于电源。

1.3 电路的基本定律

1.3.1 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一, 它指流过电阻的电流与加在电阻两端的电压成正比, 与电阻成反比。

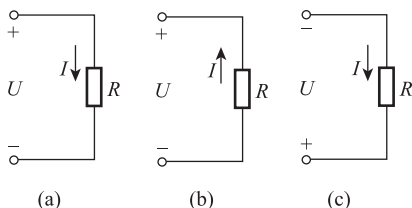


图 1-9 欧姆定律

对于图 1-9(a)所示电路, 欧姆定律可用下式表示:

$$U = IR \tag{1-9}$$

式(1-9)中, R 即为该段电路的电阻值。

由上式可知, 在电压 U 一定的情况下, 电阻 R 越大, 则电流 I 越小。可见, 电阻具有对电流起阻碍作用的性质。欧姆定律表示了线性电阻两端电压和电流的约束关系。因此, 欧姆定律的表达式也称为线性电阻元件约束方程。

在图 1-9(b)和(c)中, 电压和电流的参考方向非关联, 欧姆定律可用下式表示:

$$U = -IR \tag{1-10}$$

当元件的电压 U 和电流 I 之间的关系满足欧姆定律时, 称为线性器件; 当器件的电压 U 和电流 I 之间的关系不满足欧姆定律时, 称为非线性器件。

1.3.2 基尔霍夫定律

1. 电路中几个专用名词

支路: 电路中由一个元件或多个元件组成的一条路径, 可以流过独立电流时, 就称这条路径为一条支路。如图 1-10 所示的电路中, 有 $a-c-b$ (由 E_1 和 R_1 的串联组合而成)、 $a-d-b$ (由 E_2 和 R_2 的串联组合而成)、 $a-b$ (由单个元件 R_3 构成) 三条支路。

节点: 三条或三条以上支路的联结点称为节点。图 1-10 所示的电路中, 有 a 、 b 两个节点。

回路: 由若干条支路所组成的闭合路径称为回路。图 1-10 所示的电路中, 有 $a-d-b-c-a$ 、 $a-b-d-a$ 、 $a-b-c-a$ 三个回路。

2. 基尔霍夫第一定律——电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law, KCL)指出: 在任一时刻, 通过电路中任一节点的各支路电流的代数和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-11)$$

式(1-11)中各支路电流的正负号的规定如下:

- (1) 首先选定各支路电流的参考方向。
- (2) 流进节点电流为正, 流出节点电流为负。

在图 1-10 中, 对节点 a 有: $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

经变形得

$$I_1 + I_2 = I_3$$

可见, 基尔霍夫电流定律也可以表述为, 在任一时刻, 流入电路中任一节点的各支路电流的代数和等于流出该节点的各支路电流的代数和。即

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-12)$$

基尔霍夫电流定律充分体现了电路中, 电流的连续性和电荷的守恒性。

3. 基尔霍夫第二定律——电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, KVL)指出: 在任一时刻, 对电路中的任一闭合回路, 沿任意绕行方向一周所有支路电压的代数和等于零。即

$$\sum U = 0 \quad (1-13)$$

各支路电压的正负号确定方法如下:

- (1) 首先任意规定回路的绕行方向。
- (2) 标明各支路电压的参考方向。
- (3) 凡支路电压的参考方向与回路的绕行方向一致者, 此电压前面取“+”号; 反之, 此电压前取“-”号。

如图 1-11(a)所示的闭合电路中, 以 $ABCD$ 绕行方向为回路的绕行方向, 应用基尔霍夫电压定律有

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0$$

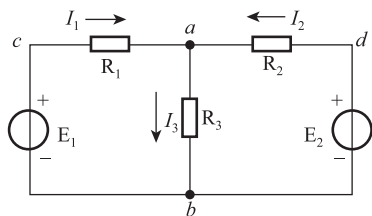


图 1-10 电路举例

其中 $U_{AB} = I_1 R_1, U_{BC} = I_2 R_2, U_{CD} = I_3 R_3 + E_3, U_{DA} = -I_4 R_4 - E_4$
 所以 $U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + E_3 - I_4 R_4 - E_4 = 0$
 若将电阻电压写在等式的一边, 电源电动势写在等式的另一边, 则有

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 = -E_3 + E_4$$

即

$$\sum IR = \sum E \tag{1-14}$$

这是基尔霍夫电压定律的另一种表达式。

按式(1-14)列 KVL 方程时, 应遵循以下几点规定。

- (1) 在图中标明各支路电流的参考方向, 并规定各回路的绕行方向。
- (2) 当支路电流的参考方向与回路的绕向一致时, 电阻电压取“+”号, 反之取“-”号。
- (3) 当电动势的方向与回路的绕向一致时, 电动势取“+”号, 反之取“-”号。

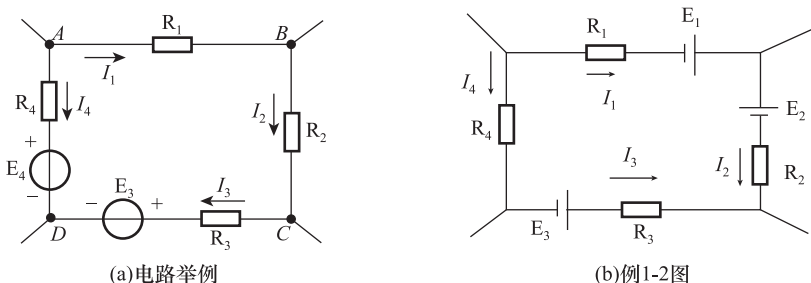


图 1-11

基尔霍夫电压定律充分体现了电路中, 能量的守恒性和任意一点电位的单值性。

【例 1-2】 如图 1-11(b) 所示电路, 根据所标出的电流方向, 用 KVL 定律列出回路电压方程。

解: 设回路绕行方向为顺时针, 根据 $\sum IR = \sum E$ 得:

$$E_1 - E_2 - E_3 = I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4$$

1.4 支路电流法

支路电流法是以支路电流为未知量, 应用基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL), 列出与未知量数目相等的独立方程, 然后解出未知的支路电流。

支路电流法的解题步骤为:

- (1) 在电路中标明各支路电流的参考方向, 以各支路电流为未知量。
- (2) 如果电路中有 n 个节点, b 条支路, 按 KCL 列出

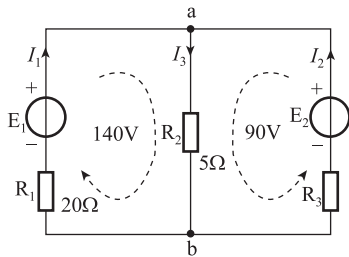


图 1-12 支路电流法

$(n-1)$ 个独立节电流方程。

(3) 选取回路并选定回路的绕行方向,按 KVL 列出 $b-(n-1)$ 个独立的回路电压方程。

(4) 联立求解所列方程组,即可计算出各支路电流。

图 1-12 电路中有三条支路,但仅有一个独立节点和两个平面回路。所以只需列出一个电流方程式和两个电压方程式。

对节点,有
$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad \text{①}$$

左边回路的电压方程为
$$E_1 - I_1 R_1 = I_3 R_3 \quad \text{②}$$

右边回路的电压方程为
$$E_2 - I_2 R_2 + I_3 R_3 \quad \text{③}$$

联立①、②、③式可求出各支路电流分别为: $I_1 = 4\text{A}$, $I_2 = 6\text{A}$, $I_3 = 10\text{A}$ 。

【例 1-3】 在图 1-13 所示的电路中,已知 $U_{S1} = 12\text{V}$, $U_{S2} = 12\text{V}$, $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 3\Omega$, $R_4 = 4\Omega$ 求各支路的电流。

解:选择各支路电流的参考方向和回路绕行方向如图 1-13 所示,列出节点电流和回路电压方程如下;

上节点方程
$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

左回路方程
$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - U_{S1} = 0$$

中回路方程
$$R_1 I_1 - R_2 I_2 - U_{S3} + U_{S2} = 0$$

右回路方程
$$R_2 I_2 + R_4 I_4 - U_{S4} = 0$$

代入已知数据,得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0 \\ I_1 + 2I_2 - 12 = 0 \\ I_1 - 2I_2 - 12 + 12 = 0 \\ 2I_1 + 4I_4 - 12 = 0 \end{cases}$$

解得 $I_1 = 4\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$, $I_3 = 4\text{A}$, $I_4 = 2\text{A}$ 。

支路电流法是求解复杂电路最基本的方法,在需要求解电路中全部支路电流时,可采用此法。但如果只需要求出某一条支路电流时,用支路电流法计算就会比较繁琐。

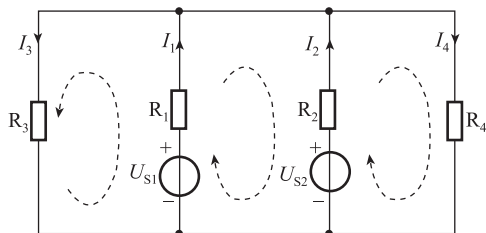


图 1-13 例 1-3 图

1.5 戴维南定理

1.5.1 二端网络

我们可以把一组元件连接成的电路作为一个整体来看,这个整体就是电路网络。任何电路网络无论是简单还是复杂,只要它有两个引出端与外部电路相连,且从一个端子流入的

电流等于从另一端子流出的电流,则称这一电路结构为二端网络,二端网络也称单口网络,如图 1-14 所示的电路中,电路结构 N 称为二端网络, I 称为端口电流, U 为端口电压。

通常把二端网络分为两类,即无源二端网络和有源二端网络。内部不含电源的二端网络叫做无源二端网络,如图 1-15 所示;内部含有电源的二端网络叫做有源二端网络,如图 1-16 所示。

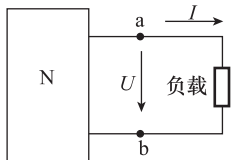


图 1-14 二端网络

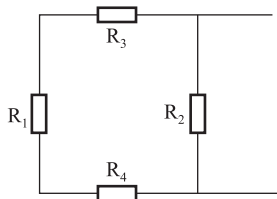


图 1-15 无源二端网络

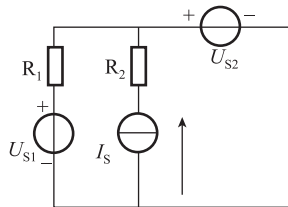


图 1-16 有源二端网络

1.5.2 戴维南定理

在线性电路分析中,当电路结构较为复杂,且仅仅需要计算某条支路的电压和电流,而不必对所有支路进行分析时,就可以利用戴维南定理简化处理,最后利用结构简单的等效电路来解决问题。

任何一个有源二端线性网络,都可以用一个电动势为 E 的理想电压源和内阻 R_0 串联的电压源来等效代替,如图 1-17(b) 所示。等效电压源的电动势 E 是有源二端网络图 1-17(a) 的开路电压 U_{ab} ,即将负载断开后 a 、 b 两端的电压。内阻 R_0 是将有源二端网络变成(将理想电压源短路,理想电流源开路)无源二端网络中时从 a 、 b 两端向网络看进去的内阻。这就是戴维南定理。

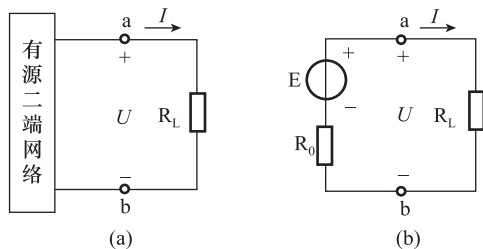


图 1-17 戴维南定理

图 1-17(b) 所示的电路是一个最简单的电路,其中电流可由下式计算

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \tag{1-15}$$

等效电压源的电动势 E 和内阻 R_0 也可经过测量或计算得出。

用戴维南定理解题步骤:

- (1) 画出把待求支路从原电路中移去后的有源二端网络。
- (2) 求有源二端网络开路电压 U_{ab} 。
- (3) 求有源二端网络内部所有独立电源作用为零时(理想电压源短路,理想电流源开路)的等效电阻 R_0 。
- (4) 画出戴维南等效电路,将待求支路接入等效电路,求出未知量。

【例 1-4】 用戴维南定理计算图 1-18(a) 中的支路电流 I_3 , 已知: $E_1 = 140\text{V}$, $E_2 = 90\text{V}$, $R_2 = 5\Omega$, $R_1 = 20\Omega$

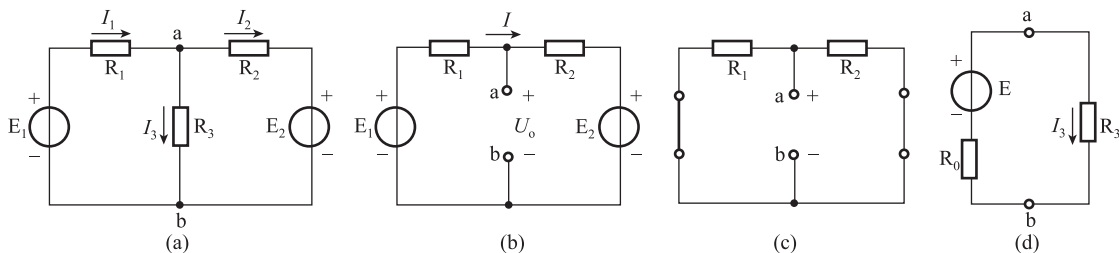


图 1-18 例 1-4 图

解(1) 先求开路电压 U_{ab} : 将电阻 R_3 从图(a)中断开, 见图(b)。

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{140 - 90}{20 + 5} = 2(\text{A})$$

所以

$$E = U_{ab} = E_1 + R_1 I = 140 - 20 \times 2 = 100(\text{V})$$

或

$$E = U_{ab} = E_2 + R_2 I = 90 + 5 \times 2 = 100(\text{V})$$

(2) 求等效电压源的内阻 R_0 : 由图(c)可得

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \times 5}{20 + 5} = 4(\Omega)$$

(3) 由图(d)戴维南等效电路, 得到求电流的表达式。

$$I_3 = \frac{E}{R_0 + R_3} = \frac{100}{4 + 6} = 10(\text{A})$$

1.6 车用直流电源——蓄电池

1.6.1 蓄电池的结构

车用蓄电池(如图 1-19)是一种直流可逆电池, 工作时可以把电能转变为化学能储存起来, 也可以把化学能转变为电能释放出来。

1. 蓄电池的主要用途

(1)在启动发动机期间,它为启动系统、点火系统、电子燃油喷射系统和汽车的其他电气设备供电。

(2)当发动机停止运转或低怠速运转时,由它给汽车用电设备供电。

(3)当出现用电需求超过发电机供电能力时,蓄电池也参加供电。

(4)蓄电池起到了整车电气系统的电压稳定器的作用,能够缓和电气系统中的冲击电压,保护汽车上的电子设备。

(5)在发电机正常工作时,蓄电池将发电机发出多余的电能存储起来——充电。

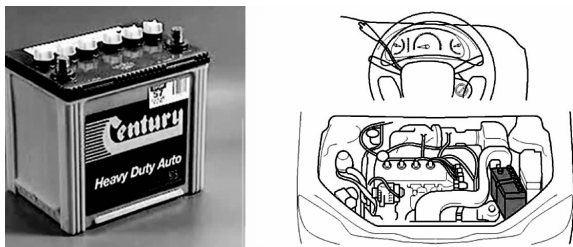


图 1-19 蓄电池外形图

2. 蓄电池的结构

汽车蓄电池由单个的单格电池组成。单格电池由正极板、负极板、隔板、电解液、电池盖板、加液孔塞和电池外壳组成。

(1)极板。蓄电池极板由栅架和活性物质组成,活性物质填充在铅锑合金的栅架上。

极板是蓄电池的核心部分,它分正极板和负极板。正极板上的活性物质是深棕色二氧化铅(PbO_2),负极板上的活性物质是青灰色海绵状铅(Pb)。在蓄电池充放电过程中,电能和化学能的相互转换,就是依靠极板上活性物质和电解液中硫酸的化学反应来实现的。 PbO_2 和 Pb 形成的原电池的电动势大约为 $2V$ 。

由于单片极板上的活性物质数量少,所存储的电量少,为了增大蓄电池的容量,通常将多片正、负极板分别并联,用横板焊接,组成正、负极板组,如图 1-20 所示。

横板上联有极桩,各片间留有空隙。安装时正、负极板相互嵌和,中间插入隔板。在每个单格电池中,负极板的数量总比正极板多一片。

(2)隔板。为了减小蓄电池的内阻和尺寸,蓄电池内部正、负极板应尽可能地靠近,但为了避免彼此接触造成短路,正、负极板之间要用隔板隔开。

隔板材料应具有多孔性且化学性能稳定,以便电解液渗出,并具有良好的耐酸性和抗氧化性。常见的隔板

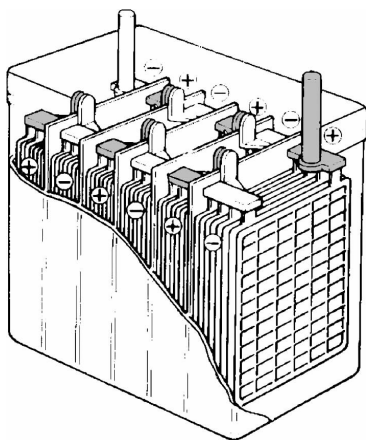


图 1-20 极板组

有木制隔板、微孔塑料隔板、微孔橡胶隔板和玻璃纤维隔板等。

(3) 电解液。电解液是蓄电池内部发生化学反应的主要物质,由化学用纯硫酸和蒸馏水按一定的比例配制而成。水的密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$,硫酸的密度为 $1.83\sim 1.84\text{g}/\text{cm}^3$,两者以不同的比例混合后形成不同密度的电解液。

蓄电池电解液的密度一般为 $1.24\sim 1.31\text{g}/\text{cm}^3$,使用中密度应根据地区、气候条件和制造厂的要求而定。

(4) 外壳。蓄电池的极板组、隔板、电解液装在外壳中,外壳应耐酸、耐热、耐震动冲击。蓄电池有硬橡胶外壳和聚丙烯塑料外壳两种,如图 1-21 所示。

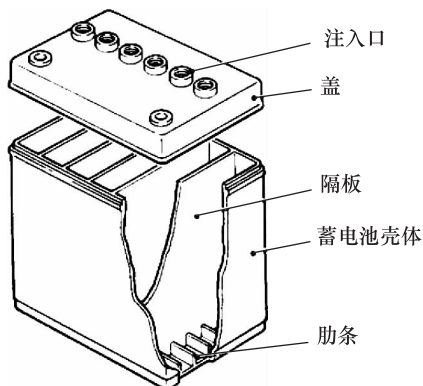


图 1-21 蓄电池外壳

蓄电池的正负极板所能产生的电动势大约为 2V ,为了获得更高的电动势,通常要将多个 2V 的蓄电池单元串联起来。为此,在制造蓄电池外壳时,将一个整体的外壳分成若干个单格,一般是将整个外壳分成 3 个或 6 个互不相通的单格,安装 3 组或 6 组极板组,形成 6V 或 12V 的蓄电池。

外壳的每个单格的底部制有凸起的肋条用来搁置极板组。肋条之间的空隙可以积存极板脱落的活性物质,防止正、负极板短路。蓄电池各单格电池之间均用铅质联条串联。联条安装在盖上是一种传统的连接方式,不仅浪费材料,而且还使蓄电池内阻增大,所以此种连接方式正在被穿壁式连接所取代。采用穿壁连接方式连接单格电池时,所用联条尺寸很小,并安装在蓄电池内部。

每个单格电池都有一个加液孔,旋下加液孔盖,可以加注电解液或检测电解液密度;旋入孔盖便可防止电解液溅出。孔盖上设有通气孔,该小孔应保持畅通,以便随时排出蓄电池内化学反应放出的氢气(H_2)和氧气(O_2),防止外壳胀裂和发生事故。

蓄电池盖有硬橡胶盖和聚丙烯耐酸塑料盖两种,前者与硬橡胶外壳配用,盖子与外壳之间的缝隙用沥青封口剂填封;后者与聚丙烯耐酸塑料外壳配用,其盖子为整体结构,与外壳之间采用热接合工艺黏合。蓄电池外壳上还有正负极桩。