

# 第 1 章 电路的基本概念和基本定律

## ■ 学习目的

1. 了解电路组成、电路的三种基本状态和各基本物理量及其方向。
2. 理解电流、电流强度、电位、电压、电阻、电动势、端电压的概念及相互之间的关系，掌握电路中各点电位及任意两点间电压的计算方法。
3. 掌握各种电路的欧姆定律、电源的外特性。
4. 理解电能和电功率的概念，了解电流的热效应。

## ■ 学习重点

电路的组成，电路中各基本物理量的概念，电路的三种基本状态和电路的欧姆定律。

## ■ 学习难点

电源外特性，全电路欧姆定律。

本章是“电工技术基础”的第 1 章，起承前启后的作用，把中学的物理知识和本课程联系起来，并为本课程后续学习打好基础。内容包括电路的基本物理量，基本定律、定理，以及电路分析的基本方法等。

本章有些内容虽已在中学物理课中学过，但本课程是从工程观点来阐述这些内容的，不是简单的重复，故可以达到温故知新的目的。

## 1.1 电路的基本概念

### 1.1.1 电路的组成和功能

电流所流通的路径称为电路，它是由一些电气设备和元器件按一定方式连接而成的。电路具有两个主要功能：一方面，在电路中随着电流的流动，它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（通过煤粉或油的燃烧）转换成电能，再通过变压器、输电线送到各用户，各用户再把它们转换为光能（照明）、热能（加热电器）和机械能（电动机）加以使用。另一方面，电路可以实现信号的传递和处理。通过电路可以把输入的信号变换或“加工”成其他所需要的输出。例如，一台半导体收音机或者电视机，其天线接收到的是一些很微弱的电信号，这些很微弱的信号必须通过调谐环节选择到需要的某个频率信号，再经过一系列的放大环节，最后从输出端重现能满足工作需要的信号（声音和图像）。

在生产和生活中遇到过许多电路，其中最简单的电路如图 1.1 (a) 所示。它是用一个灯泡由导线经过开关而连接到干电池上的照明电路。由图不难看出，电路主要由电源、负载和中间环节（包括开关、连接导线、控制和保护装置等）组成，它们是组成电路的“三要素”。其中，电源是提供能量的装置，它的功能是将其他形式的能量转换成电能；负载是消耗电能的装置，它的功能是将电能转换成为其他形式的能量；连接导线是用来传输和分配电能的导体。中间环节对外电路起着连接、传输、控制、保护、指示等作用。

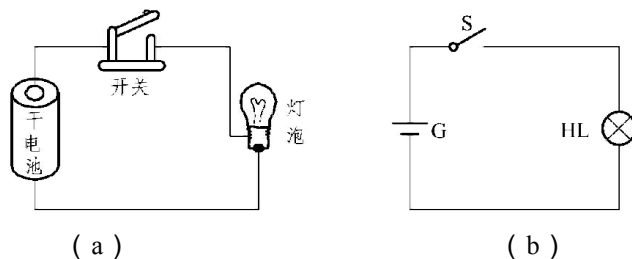


图 1.1 电路及电路图

电路分为外电路与内电路。从电源的一端经过负载再回到电源另一端的电路，叫作外电路。电源内部的通路，叫作内电路，如图 1.1 中电池内部两极之间的通路。根据电路的功能可将电路分为电力电路和信号电路。电力电路是对电能进行传输、转换和分配，如一般的照明电路和动力电路；信号电路是对信号进行处理和传递，如收音机、电视机、计算机网络和通信等电路。

### 1.1.2 电路模型和电路图

实际电路是由一些电工设备、器件和电路元件所组成的。为便于分析和计算，往往把这些器件和元件理想化，并用国家统一的标准符号来表示。这样，在电路原理图中的电工设备和器件，就成为一种用抽象的电路模型形式表示的电路元件，如图 1.1 ( b ) 所示。这种电路模型表征了这些设备在电路中所表现出的主要电气特性，所以，由电路模型构成的电路原理图能够代表实际电路图，从电路原理图中得到的分析结论能够适用于实际电路。这样，实际电路的分析就得到了简化。

#### 1. 电路的理想电路元件

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，即用理想的电路元件来代替这部分电路。因此，能表征电路的特征并且具有单一电磁性质的假想元件被称之为理想电路元件。用理想电路元件构成的电路叫作理想电路。所谓单一电磁性质是指突出该部分电路的主要的电或磁的性质，而忽略了次要的电或磁的性质。因此，可以用理想电路元件以及它们的组合来反映实际电路元件的电磁性质。例如，电感线圈是由导线绕制而成的，它既有电感量又有电阻值，在考虑其主要的电磁性质

时，往往忽略了线圈的电阻性质，而突出了它的电感性质，把它表征为一个储存磁场能量的电感元件。同样，电阻丝是由金属丝一圈一圈绕制而成的，那么，它既有电感量也有电阻值，在实际分析时往往忽略电阻丝的电感性质，而突出其主要的电阻性质，把它表征为一个消耗电能的电阻元件。

## 2. 理想电路元件的分类及符号

按经典电路理论，理想电路元件共有 5 种：电阻、电感、电容、电压源和电流源等。为了便于分析和计算，把电路中的元件用特定的图形符号来表示，这种电路称为电路原理图，简称电路图。例如图 1.1 ( a ) 所示的实物接线图，用图形符号可画成图 1.1 ( b ) 所示的电路图。按照国家标准，部分常用电工图形符号如表 1.1 所示。

表 1.1 部分常用电工图形符号 ( 摘自 GB 4728—84、85 )

名称	符号	名称	符号	名称	符号
电池		端子		电灯或信号灯	
直流发电机		开关	形式1	电阻器	
直流电动机			形式2		
理想电压源		连接导线		电位器	
理想电流源		不连接导线		电感器 ( 线圈 )	
电压表		接机壳或接地板		电容器	
电流表		接地		熔断器	

## 3. 电路工作的三种状态

### 1) 通路状态

将图 1.1 ( b ) 中开关 S 闭合，接通电池与灯泡，构成闭合回路，电路中有电流流过，灯泡发光，表示负载工作。

### 2) 开路状态

将电路中的开关 S 断开，或电路中某处被切断，电路中没有电流通过，灯泡熄灭，表示负载不工作。

### 3) 短路状态

在图 1.1 ( b ) 中，由于某种原因，电源的两端连接在一起，电池则被短路。电源被短路时，电源负载为零，电源内电路会出现很大的短路电流，极易烧毁电源。

## 思考题

1. 叙述电路的定义及其主要组成部分。
2. 举例说明，若按工作任务划分，电路的功能有哪两种？
3. 叙述电路模型及理想元件的定义，常见的理想元件有哪几种？

## 1.2 电路的基本物理量

### 1.2.1 电流与电流强度

#### 1. 电 流

电荷有规则的定向运动叫作电流。电流是一种客观存在的物理现象。如果金属内的自由电子或电解液内的离子受到一定方向的电场力的作用，电子或离子就会向一定的方向运动而

形成电流。由此可见，电流的产生需有两个必要条件：第一，导体内要有可以移动的自由电荷；第二，导体内要维持一个电场。这两个条件缺一不可。

## 2. 电流方向

电流是一个矢量，不仅有大小，还有方向。在电场力的作用下，电荷的定向移动有各种不同的形式，如带电体的机械位移，正负离子的对流等。按照电荷运动的形式，电流又分为传导电流和徙动电流。导体中的电流或电解质溶液中的电流叫作传导电流；带电粒子在真空中运动而形成的电流，如示波管、显像管中的电子流叫作徙动电流。尽管电荷运动的形式不同，但统一规定以正电荷定向移动的方向为电流方向。虽然在实际中金属导体中的电流是由带负电的自由电子逆电场方向运动而形成的，但其效果与等量正电荷顺电场方向运动完全相同。所以这种规定并不影响对电路的研究以及对电磁现象的解释。由此可知，导体中的电流方向与电子的定向运动方向相反，如图 1.2 所示。

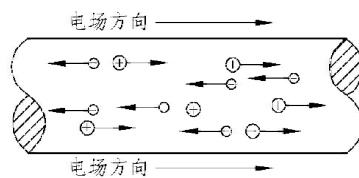


图 1.2 电荷的运动方向和电流方向

在分析或计算电路时，往往需要确定出电流的方向，这在简单的直流电路中容易确定，但在比较复杂的电路中，要确定出某段电路的电流方向是非常困难的。这时可先假定出一个电流的正方向（或称为参考方向），然后列方程求解。若解出的电流为正值，表明电流的实际方向与正方向相同；若解出的电流为负值，则说明电流的实际方向与正方向相反。

## 3. 电流强度

电流强度是衡量电流大小的物理量。单位时间内通过导体横截面的电量，叫作电流强度，用字母  $I$  表示。若在时间  $t$  (s, 秒) 内通过导体横截面的电量是  $Q$  (C, 库仑)，则电流强度  $I$  为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.1)$$

电流强度的单位是安培，简称安，用字母 A 表示。若在 1 s 内通过导体横截面的电量为  $I$  C，则电流强度就是  $I$  A。除安培外，常用的电流强度单位还有 mA (毫安)、 $\mu$ A (微安)。在电力工程中还常用到 kA (千安)。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A} = 10^{-3} \text{ mA} = 10^{-6} \text{ A}$$

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

电流强度通常简称电流，是电学中的一个重要物理量。

如果电流的大小和方向都不随时间而改变，这样的电流叫作稳恒电流，又叫直流电流。直流电流的电流强度与时间的关系波形如图 1.3 (a) 所示。如果电流的大小随时间变化，而方向不随时间变化，这样的电流叫作脉动电流，波形如图 1.3 (b) 所示。如果电流的大小和方向都随时间变化，这样的电流叫作交变电流，也叫交流电流，其波形如图 1.3 (c) 所示。

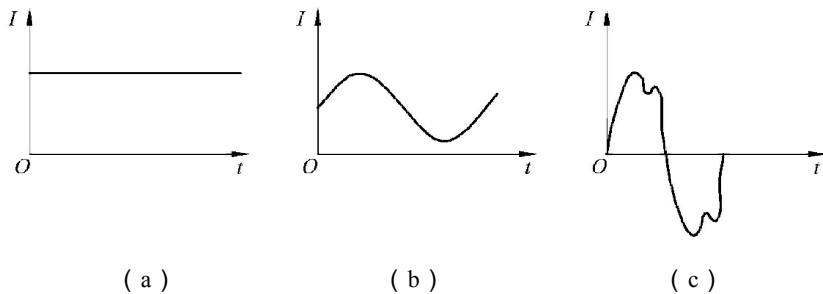


图 1.3 电流强度与时间的关系

脉动电流和交流电流的大小虽然随时间而变化，但可以在一个极短的时间内研究它们的大小，此时的电流强度称为瞬时电流强度，用  $i$  表示。若在  $\Delta t$  的时间内，导体横截面的电量变化是  $\Delta q$ ，则瞬时电流强度  $i$  为

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

在实际工作中，有时需要选择导线的粗细（或截面积， $S$ ），这就要用到电流密度这一概念。通过导体单位横截面积的电流，叫作电流密度，用字母  $J$  表示。若电流在导体横截面上均匀分布，则

$$J = \frac{I}{S} \quad (1.3)$$

常用的电流密度单位是  $A/mm^2$ 。截面积不同的导线所允许通过的电流不同。当导线中通过的电流值超过允许值时，导线将发热，严重时甚至会烧毁。

## 1.2.2 电位与电压

### 1. 电 位

电位是衡量单位正电荷在电场中某点所具有的电位能大小的物理量。其物理意义为：单位正电荷在电场中某点所具有的电位能称为该点的电位，用字母  $\varphi$  表示，即

$$\varphi = \frac{A}{q} \quad (1.4)$$

式中  $A$ ——功（电位能），单位为 J（焦耳，简称焦）；

$q$ ——电荷的电量，单位为 C； (a) (b) (c)

$\varphi$ ——电位，单位为 V。



为了比较电场中不同点电位值的大小，需要指定一个参考点，通常令参考点的电位为零。

把各不同点的电位与参考点作比较，即可确定出各不同点的电位值。

这里应当特别指出的是：参考点不同，电路中各点的电位有不同的数值，只有确定了参考点之后，各点电位才有确定的数值。一般将接地点作为电位参考点。

## 2. 电 压

电压是衡量电场做功能力大小的物理量，用字母  $U$  表示。若电场力把单位正电荷从  $a$  点移至  $b$  点时，所做的功为  $A_{ab}$ ，则两点间的电压  $U_{ab}$  为

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1.5)$$

在研究电路问题时，有时需要研究两点之间的电位关系，这就要用到电位差的概念。若电场力把单位正电荷  $q$  由  $a$  点移至参考点，则电场力所做的功为

$$A_a = q\varphi_a$$

若把单位正电荷  $q$  由  $b$  点移至参考点，电场力所做的功即为

$$A_b = q\varphi_b$$

显然，电场力把单位正电荷  $q$  从  $a$  点移至  $b$  点，电场力所做的功就是

$$A_{ab} = A_a - A_b = q(\varphi_a - \varphi_b)$$

$$\frac{A_{ab}}{q} = U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

可见，电压就是电场或电路中两点之间的电位差。

若选  $b$  点为参考点，则  $\varphi_b = 0$ 。 $a$ 、 $b$  两点间的电压为

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \varphi_a - 0 = \varphi_a$$

因此也可以说，电位就是电场中某点与参考点之间的电压。电压的单位也是 V。常用的单位还有 kV ( 千伏 )、mV ( 毫伏 )、 $\mu\text{V}$  ( 微伏 )，它们之间的换算关系为

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1 \mu\text{V} = 10^{-3} \text{ mV} = 10^{-6} \text{ V}$$

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

当导体两端加有电压时，导体两端就有电位差，导体内的自由电子就要受到电场力的作用，做有规则的定向移动而形成电流。所以，导体内产生电流的必要条件是，导体两端要有电位差，即电压。

### 3. 电压的方向

电压和电流一样，不仅有大小，而且有方向。电压的方向规定为由高电位指向低电位。电压使用双下标标记法，表明电压的方向是从第一个下标指向第二个下标。如  $U_{ab}$ ，表示电压方向是从  $a$  点指向  $b$  点，即  $\varphi_a > \varphi_b$ 。

电压也是个矢量，有正值和负值。在图 1.4 中，电场力  $F$  把单位正电荷  $q$  从  $a$  点移至  $b$  点所做的功是电场提供的能量，电压为正值。若在外力  $F'$  的作用下，逆电场方向把单位正电荷由  $b$  点移至  $a$  点，电场力阻碍电荷移动而做负功，电场吸收能量，则电压为负值。外力所做的功和电场力所做的功大小相等、方向相反，即

$$U_{ab} = -U_{ba}$$

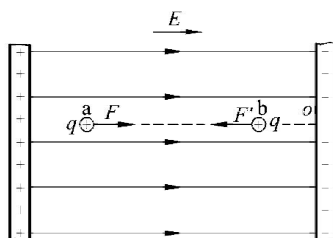


图 1.4 电场力、外力对电荷做功的性质

电压的数值也可通过电压表来测量，测量时应使电压表的正、负极和被测电压正、负极一致，并连接在电路两端。

例 1.1 电路如图 1.5 所示，已知  $U_{ac} = 3 \text{ V}$ ， $U_{ab} = 2 \text{ V}$ 。试求：分别以  $a$ 、 $c$  两点作为参考点时， $b$  点的电位和  $b$ 、 $c$  两点间的电压。

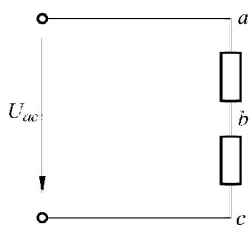


图 1.5 例 1.1 电路

解 (1) 以  $a$  点为参考点，则  $\varphi_a = 0$ 。已知  $U_{ab} = 2 \text{ V}$ ，

即 
$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 2 \text{ V}$$

则 
$$\varphi_b = \varphi_a - U_{ab} = 0 - 2 = -2 \text{ ( V )}$$

已知 
$$U_{ac} = 3 \text{ V}$$

即 
$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 3 \text{ V}$$

则 
$$\varphi_c = \varphi_a - U_{ac} = 0 - 3 = -3 \text{ ( V )}$$

$b$ 、 $c$  两点间的电压：

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = (-2) - (-3) = 1 \text{ ( V )}$$

(2) 以  $c$  点为参考点，则  $\varphi_c = 0$ 。

因 
$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 3 \text{ V}$$

则 
$$\varphi_a = \varphi_c + U_{ac} = 0 + 3 = 3 \text{ ( V )}$$

又因  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 2 \text{ V}$

所以  $\varphi_b = \varphi_a - U_{ab} = 3 - 2 = 1 \text{ ( V )}$

$b$ 、 $c$  两点间的电压：

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 1 - 0 = 1 \text{ ( V )}$$

通过以上的计算可以看出，参考点改变，电位的值也改变，但两点间的电压不变，即两点间的电压与参考点的选择无关。

### 1.2.3 电源与电动势

#### 1. 电 源

电源是将非电能转换成电能的装置。每个电源都有正、负两个电极。电源内部的能量能维持这两个电极保持一定的电位差，并使正极的电位高于负极电位，也就是电源的两极总保持一定的电位差。

电源的种类很多，常用的电源有电池和发电机。电池是把化学能转换为电能的装置，而发电机是把机械能转换为电能的装置。

#### 2. 电动势

在电池和发电机这两种电源中，产生电位差的原因是不同的。在电池中是由于电解液和极板之间的化学反应而产生电位差，而在发电机中则是由机械能通过电磁感应，在发电机内部的线圈中产生的（电磁感应原理将在第 6 章中讨论）。但是，它们有一个共同点，就是能把电源内部导体中的正、负电荷分别推向两个电极，使得一个电极具有一定数量的正电荷，另一个电极具有相等数量的负电荷，于是在两极之间就形成了电场，出现了一定的电位差。我

们把电源内部这种推动电荷移动的作用力称为电源力。

现以发电机中的一段导体为例，分析电源内部的情况。导体的内部有大量的自由电子，在电源力  $F'$  的作用下，电子向导体的一端运动，使这段导体的一端出现电子积累，而另一端则因缺少电子而出现正电荷的累积，如图 1.6 ( a ) 所示。

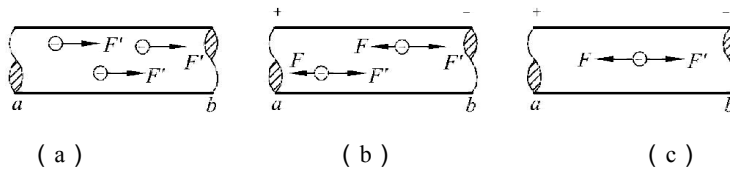


图 1.6 电动势的产生过程

这样，由于电源力使导体中的正、负电荷分离，内部就出现了电场。这时，电荷除受电源力作用外，又受到电场力的作用。电场力  $F$  和电源力  $F'$  的方向恰好相反，如图 1.6 ( b ) 所示。当  $F' > F$  时，自由电子继续向一端移动，促使正、负电荷在导体两端的积累增加，电场力  $F$  增大。当导体两端电荷积累到一定程度时， $F' = F$ ，如图 1.6 ( c ) 所示。自由电子就停止定向移动，导体两端电荷的积累处于稳定状态，出现了一定的电位差。

电位差的产生是电源力移动电荷的结果，即电源力对电荷做了功。电源力将单位正电荷从电源负极经电源内部移动到正极所做的功，叫作电源的电动势，用字母  $E$  表示。如果被移动的电荷量用  $q$  表示，用  $A_{ab}$  表示电源力把  $q$  从  $a$  端移送到  $b$  端所做的功，则有

$$E = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1.6)$$

式中，功  $A_{ab}$  的单位为 J，电量  $q$  的单位为 C，则电动势  $E$  的单位为 V。

由以上分析可知，电源的电动势在数值上等于电极两端的电位差，即端电压。但两者的方向相反：电动势的方向（或极性）是由电源的负极指向正极（由低电位指向高电位），是电

位升的方向；而电压的方向是由正极指向负极（由高电位指向低电位），是电位降的方向。电源的电动势与端电压的方向表示以及电源的常用画法如图 1.7 所示，其中图 (a) 是电池符号，其长划表示电池正极，短划表示电池负极。电动势的方向由负极指向正极，而端电压则由正极指向负极。一般的直流电源可用图 (b) 表示。

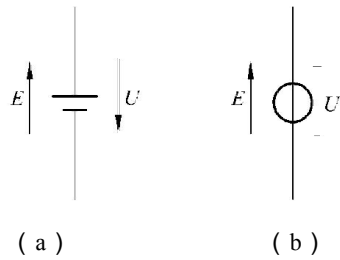


图 1.7 电源的电动势与电压方向