

上篇



电工基础

第 1 章

电路的组成及其分析方法

电路理论是电工电子技术的基础,也是学习测量及控制的基础。本章从电路的组成及其分类出发,介绍了电路模型的概念、求解电路模型的基本定律、电阻元件、电源元件的联接方式及其特点;在此基础上进一步介绍电路分析的常用方法:如等效变换、支路电流、结点电压、叠加原理、戴维宁定理与诺顿定理等。

读者学习本章时应牢记:电路理论不是研究实际电路的理论,而是研究由理想元件构成的电路模型的分析方法的理论。

1.1 电路的组成及其模型

1.1.1 电路的组成

顾名思义,电路是指电流的通路,可结合实际电气设备的构成来理解电路的含义。

实际电气设备包括电工设备、联接设备两个部分,这些电工设备通过联接设备相互联接,形成一个电流通路便构成一个实际电路。如手电筒便是一个常见而又简单的实际电路;它由电池、筒体、筒体开关和小灯泡组成。筒体是联接设备,它将电池、筒体开关和小灯泡联接便构成手电筒这个实际电路。

实际电路种类繁多,形式和结构也各不相同,按电路的基本功能,有两大类:第一类为对信号的变换、传输和处理电路;第二类为对能量的转换和传输电路。

第一类的典型电路如图 1.1.1 的扩音机电路:输入语音或音乐经话筒变换为电信号以后再经放大传递到音箱,音箱将电信号还原为语音或音乐。

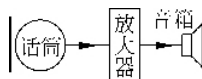


图 1.1.1 扩音机电路

在图 1.1.1 中,话筒是输入设备,它将输入语音或音乐变换为电信号。话筒产生的输入信号经放大器处理最终输出到音箱,称为**信号源**。音箱是接收和转换输入信号的设备,称为**负载**。因为话筒输出的电信号十分微弱,不足以直接驱动音箱,中间尚需用放大电路放大,所以,放大电路是话筒输出信号的**传递处理电路**。**信号源、传递处理电路、负载是信号处理电路的基本组成部分**。

第二类的典型电路如日常照明电路:发电厂发电机工作产生电能,经变压器升压传输到各变电站,经变电站变压器降压后送到各用户,从而点亮电灯。在上面的照明电路中,有 3 个关键设备:产生电能的发电机(**电源**)、**变压传输线路**、消耗电能的电灯(**负载**)。**电源、传输电路、负载是能量转换和传输电路的基本组成部分**。

在电路理论中,信号源(或电源)提供的电压或电流称为**激励**,由于激励在电路各部分产生的电压和电流称为**响应**。电路分析就是在已知电路的结构和元件参数的条件下,分析电路的激励与响应之间的关系。

1.1.2 电路模型

1.1.1 小节介绍了电路的组成,简单地说,电路是一个电流的通路。许多读者可能难以理解图 1.1.1 能形成一个电流通路。读者不要忘记:电路理论不是研究实际电路的理论,而是研究由理想元件构成的电路模型的分析方法的理论,因此学习电路理论首先应理解电路模型的含义。

实际的电路是由实际电子设备与电子联接设备组成。这些设备电磁性质较复杂,分析起来较难理解。**如果将实际元件理想化,在一定条件下突出其主要电磁性质,忽略其次要性质,这样的元件所组成的电路称为实际电路的电路模型(简称电路)**。不加说明,本书电路均指电路模型。

本书涉及的理想元件主要有:电阻元件、电容元件、电感元件和电源元件,这些元件可用相应参数和规定图形符号来表示,由此所得到的由理想元件构成的实际电路的联接模型便是实际电路的电路模型。每种理想元件均有其精确的数学定义形式,这就使得用数学方法分析电路成为可能。在本书中,若不加特别说明,均指理想元件。本书涉及的常见元件图形符号见表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 常见元件图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
开关		电阻		电压源	
导线		电感		电流源	
联接的导线		电容		电池	

建立电路模型是电路分析的基础,可通过一个实际例子来理解电路模型的建立方法。

【例 1.1.1】 手电筒电路模型的建立(手电筒实际电路略)。

解法

(1) 手电筒实际电路由电池、筒体、筒体开关、小灯泡组成；

(2) 将组成部件理想化：具体为将电池理想化，即将电池视为内阻为 R_0 ，电动势为 E 的电压源；忽略筒体的电阻，筒体开关视为理想开关；将小灯泡视为阻值为 R_L 的负载电阻；

(3) 筒体是电池、开关、小灯泡的联接体，根据筒体可画出各理想部件的联接关系；

(4) 在图中标出电源电动势、电压及电流方向，便得到了如图 1.1.2 所示的手电筒电路模型。

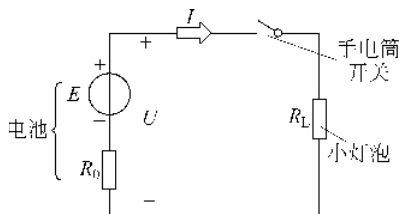


图 1.1.2 例 1.1.1 的图

1.2 电压和电流的方向

电流 I 、电动势 E 、电压 U 是电路的基本物理量，是具有方向的物理量，为此，必须首先理解电压、电流的方向（或称为极性）并在电路中标注，才能写出电路方程，进行正确分析，得到正确结果。

关于电压和电流的方向，有实际方向和参考方向之分，应加以区别。

1. 电压和电流的实际方向

带电粒子的规则运动形成电流。电流是客观存在的物理现象，人们虽然无法看见它，但可以通过热效应、光效应等来感受它。电流的方向是一种客观存在，这种客观存在的电流方向便是电流的实际方向。

对于电流的实际方向，习惯上规定：正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的实际方向。在图 1.2.1 中，若电压实际方向与图中标示方向一致，那么，正电荷运动的方向为从“+”端经过电阻 R_L 流向“-”端，即电流 I 的方向为从“+”端经过电阻 R 流向“-”端，也就是图中标示方向。

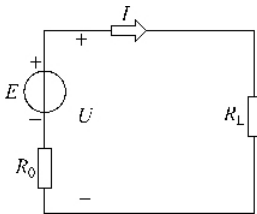


图 1.2.1 电压和电流方向

电压又称“电位差”，和电流一样，电压也具有方向。对于电压的方向，应区分端电压、电动势两种情况。

端电压的方向规定为高电位端（即“+”极）指向低电位端（即“-”极），即为电位降低的方向。电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位端（“-”极）指向高电位端（“+”极），即为电位升高的方向。

2. 电压电流的参考方向

虽然电压电流的方向是客观存在的，然而，在分析计算某些电路时，有时难以直接判断其方向，因此，常可任意选定某一方向作为其参考方向（不加说明，电路图中标的电压、电流、电动势的方向均为参考方向）。

电流的参考方向许多教材上用 $\rightarrow$ 来表示,在本书中,为更加醒目,用 $\Rightarrow$ 来表示电流参考方向。电压的参考方向一般用极性“+”、“-”来表示,也可用双下标表示。如 U_{ab} 表示其参考方向是a指向b,a点参考极性为“+”,b点参考极性为“-”。

在图1.2.1中,如果不假定电压实际方向与图中标示方向一致,那么,也就无法判断出电流的实际方向(因为电路图中所标的方向均为参考方向,又未给出代数值,故其实际方向不能确定)。

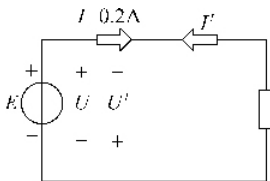


图 1.2.2 电压和电流参考方向

选定电压电流的参考方向是电路分析的第一步,只有参考方向选定以后,电压电流之值才有正负。当实际方向与参考方向一致时为正,反之,为负。

如图1.2.2所示电路中, $I=0.2\text{A}$,为正值,说明电流实际方向与电流 I 的参考方向一致。如果参考方向为 I' ,显然它与实际方向不一致,其值为负,所以, $I'=-0.2\text{A}$ 。

根据电流实际方向的含义,可判断出端电压的实际方向(端电压的实际方向为电位降低方向,即电流的实际流向方向)为 U 方向。电压 U 的参考方向与实际方向一致,所以 U 为正值;电压 U' 的参考方向与实际方向不一致, U' 为负值。同理可判断电动势 E 的实际方向为 E 方向,电动势 E 为正值。

3. 电压和电流的单位

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V),微小电压计量以毫伏(mV)或微伏(μV)为单位。电流的单位是安培(A),微小电流计量以毫安(mA)或微安(μA)为单位。

思考与练习

1.2.1 从电路模型的角度,一个功率为 1000W 的电炉与一个阻值为 48.4Ω 的电阻相同,这种说法是否正确,为什么?

1.2.2 电路如图1.2.3所示,请分析电动势 E 、端电压 U 的实际极性以及电流 I 、 I' 的方向以及电动势 E 、电压 U 的极性及代数值。

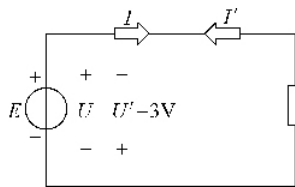


图 1.2.3 电压和电流参考方向

1.3 分析电路的三个基本定律

通过前面两节内容的学习,读者已经具备了分析电路最基本的知识,可以利用电路的基本定律来分析求解简单电路。分析计算电路最基本的定律主要有3个:欧姆定律、基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

1.3.1 欧姆定律

欧姆定律在中学物理中有过介绍,此处我们简单回顾一下欧姆定律的内容。

流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比,这便是欧姆定律。欧姆定律用公式表示为

$$R = U/I \quad (1.3.1)$$

电阻是构成电路最基本的元件之一。由欧姆定律可知, U 一定时,电阻 R 愈大,则电流愈小,因此,电阻 R 具有对电流起阻碍作用的物理性质。

在国际单位制中,电阻的单位是欧姆(Ω),计量高电阻时以千欧($k\Omega$)或兆欧($M\Omega$)为单位。

电压和电流是具有方向的物理量,同时,对某一个特定的电路,它又是相互关联的物理量。因此,选取不同的电压、电流参考方向,欧姆定律形式便可能不同。

在图 1.3.1(a)中,电压参考方向与电流参考方向一致^①,欧姆定律用公式表示为

$$U = RI \quad (1.3.2)$$

在图 1.3.1(b)、(c)中,电压参考方向与电流参考方向不一致,欧姆定律用公式表示为

$$U = -RI \quad (1.3.3)$$

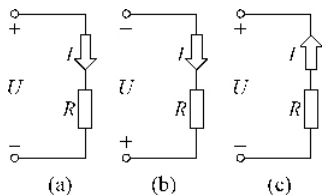


图 1.3.1 欧姆定律的形式

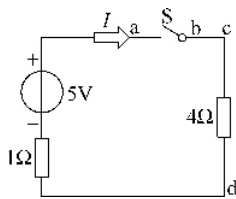


图 1.3.2 例 1.3.1 的图

【例 1.3.1】 请计算图 1.3.2 中开关 S 闭合与断开两种情况下的电压 U_{ab} 和 U_{cd} 。

解法

(1) 开关 S 断开, 电流 $I=0$, 根据欧姆定律, 1Ω 、 4Ω 上电压为 0, 得到

$$U_{ab} = 5V, \quad U_{cd} = 0V$$

(2) 开关 S 闭合, 根据欧姆定律有

$$I = U/R = 5/(1+4) = 1(A)$$

得到 $U_{ab} = 0V$, $U_{cd} = 4V$ 。

1.3.2 基尔霍夫电流定律

在任一瞬时, 流向某一结点的电流之和应该等于由该结点流出的电流之和, 即在任一瞬时, 一个结点上电流的代数和恒等于零, 这便是基尔霍夫电流定律。

^① 此时, 称电压电流取关联参考方向。在本书中, 若不加说明, 电压电流均取关联参考方向。

根据基尔霍夫电流定律,图 1.3.3 中结点 a 的结点方程为: $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ 。

基尔霍夫电流定律是用来确定联接在同一结点上的各支路电流关系的理论,可结合图 1.3.3 从以下几个方面理解基尔霍夫电流定律。

1. 支路

电路中的每一分支称为支路,一条支路流过同一个电流,称为支路电流。每一条支路只有一个电流,这是判别支路的基本方法。在如图 1.3.3 所示的电路中,共有 3 个电流,因此有 3 条支路,分别由 ab、acb、adb 构成。其中,acb、adb 两条支路中含有电源元件,称为有源支路;ab 支路不含电源元件,称为无源支路。

2. 结点

电路中 3 条或 3 条以上的支路相联接的点称为结点。

根据结点的定义,如图 1.3.3 所示的电路中共有 2 个结点 a 和 b,结点 a 示意图如图 1.3.4 所示。

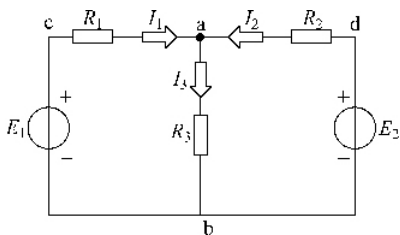


图 1.3.3 基尔霍夫电流定律

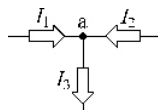


图 1.3.4 a 结点

3. 基尔霍夫电流定律的含义

对如图 1.3.4 所示的结点,其流入该结点的电流之和应该等于由该结点流出的电流之和,即

$$I_3 = I_1 + I_2 \quad (1.3.4)$$

将上式改写为如下形式:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\sum I = 0 \quad (\text{假定流入电流为正}) \quad (1.3.5)$$

可见,任一瞬时,一个结点上电流的代数和恒等于零。

4. 基尔霍夫电流定律的推广

基尔霍夫电流定律通常应用于结点,但也可以应用于包围部分电路的任一假设的闭合面。具体表述如下:在任一瞬时,通过任一闭合面的电流的代数和恒等于零或者说在任一瞬时,流向某一闭合面的电流之和应该等于由闭合面流出的电流之和。

可结合图 1.3.5 理解基尔霍夫电流定律的推广应用。

在如图 1.3.5 所示电路中,闭合面包围的是一个三角形电路。从结点定义出发,它有 A、B、C 3 个结点,分别应用基尔霍夫电流定律如下:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{AB} - I_{CA} \\ I_B &= I_{BC} - I_{AB} \\ I_C &= I_{CA} - I_{BC} \end{aligned} \right\}$$

将上面 3 式相加, 便得

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (\text{请注意 } I_A, I_B, I_C \text{ 均为流入电流})$$

可见, 任一瞬时, 通过任一闭合面的电流的代数和恒等于零。

5. 计算实例

【例 1.3.2】 结点示意图如图 1.3.6 所示, $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = -3\text{A}$, 请求 I_3 的值。

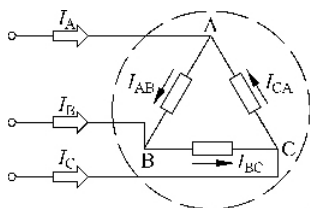


图 1.3.5 基尔霍夫电流定律的推广

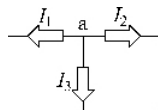


图 1.3.6 例 1.3.2 的图

解法

依照基尔霍夫电流定律, 有

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

代入 I_1 和 I_2 的值:

$$2 - 3 + I_3 = 0$$

得

$$I_3 = 1\text{A}$$

1.3.3 基尔霍夫电压定律

在任一瞬时, 沿任一回路循行方向(顺时针方向或逆时针方向), 回路中各段电压的代数和恒等于零, 这便是基尔霍夫电压定律。

根据基尔霍夫电压定律, 如图 1.3.7 所示回路中的电压方程为:

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

基尔霍夫电压定律是用来确定回路中各段电压间关系的理论, 可结合图 1.3.7 从以下几个方面理解基尔霍夫电压定律。

1. 回路

回路是一个闭合的电路。在如图 1.3.7 所示电路中, E_1 、 R_1 、 R_2 、 E_2 构成一个回路。在如图 1.3.3 所示电路中, E_1 、 R_1 、 R_3 构成一个回路; R_3 、 R_2 、 E_2 也构成一个回路。

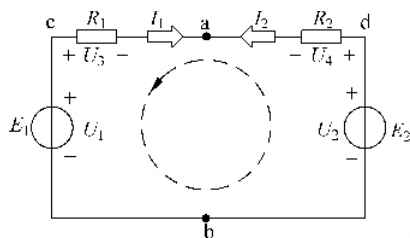


图 1.3.7 基尔霍夫电压定律

2. 回路电压关系

在任一时刻,某一点电位是不会变化的,因此,从回路任一点出发,沿回路循行一周(回到原出发点),则在这个方向上的电位降之和等于电位升之和。

回路可进一步分为许多段,在如图 1.3.7 所示电路中, E_1 、 R_1 、 R_2 、 E_2 构成一个回路,因而也可分为 E_1 、 R_1 、 R_2 、 E_2 4 个电压段。从 b 点出发,依照虚线所示方向循行一周,其电位升之和为 $U_2 + U_3$,电位降之和为 $U_1 + U_4$; 由回路电压关系可得

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3$$

上式可改写为

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

即

$$\sum U = 0 \quad (\text{假定电位降为正}) \quad (1.3.6)$$

这便是基尔霍夫电压定律:回路中各段电压的代数和为零。

如图 1.3.7 所示电路由电源电动势和电阻构成,因此,式(1.3.6)可改写为

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

即

$$\sum E = \sum (RI) \quad (1.3.7)$$

这便是基尔霍夫电压定律在电阻电路中的另一种形式。

3. 基尔霍夫电压定律的推广

基尔霍夫电压定律不仅可应用于回路,也可以推广应用于回路的部分电路。下面结合图 1.3.8 予以解释。

在如图 1.3.8 所示电路中,可想象 A、B 两点间存在一个如图所示方向的电动势,其端电压为 U_{AB} ,则 U_A 、 U_B 、 U_{AB} 构成一个回路,对想象回路应用基尔霍夫电压定律,有

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

这便是基尔霍夫电压定律的推广应用。

4. 计算实例

【例 1.3.3】 如图 1.3.9 所示电路,各支路元件任意, $U_{AB} = 5\text{V}$, $U_{BC} = -4\text{V}$, $U_{AD} = -3\text{V}$,请求:(1) U_{CD} ; (2) U_{CA} 。

解法

(1) 在如图 1.3.9 所示电路中,有一个回路,要求 U_{CD} 、 U_{CA} ,可用基尔霍夫电压定律求解。

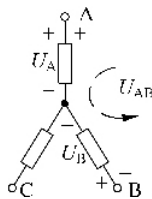


图 1.3.8 基尔霍夫电压定律的推广

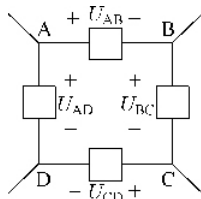


图 1.3.9 例 1.3.3 的图