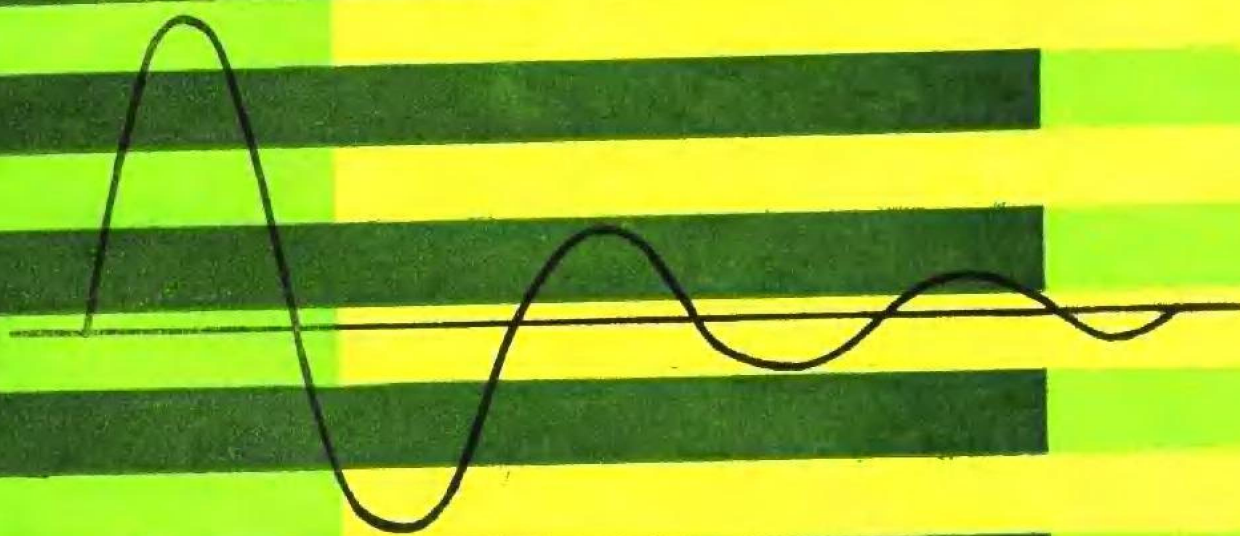


孙文卿 许鸿量

电路和电子技术



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书主要由“电路理论”、“电子器件”、“模拟电子电路”及“数字电子电路”等部分组成。在“电路理论”中,首先建立电阻、电容、电感元件的特性方程,继而在欧姆定律及克希荷夫定律的基础上建立电路的特性方程,论述网络定理,按合乎逻辑的步骤进行分析。同时讨论网络的稳态和动态响应。在“电路理论”部分尽可能与电子电路相呼应,为学习电子电路奠定一定的理论基础。“电子器件”内容中尽可能减少器件内部机理的讨论,强调外特性及其应用。“模拟电子电路”侧重集成电路的分析、减少分立元件电路的内容,加强集成运算放大器在运算、波形产生、变换及检测电路中的应用。“数字电子电路”内容得到加强,如增加了集成存储器、A/D及D/A转换,为学习数控和微机课程打好基础。

本书拟处理好以下三个关系,即数学基本要求和反映学科现代发展水平的关系;教学内容的继承与更新的关系;理论教学与实践环节的关系。当然还考虑到不同专业的通用性,使本书具有先进性和科学系统性。

电 路 和 电 子 技 术

出 版: 上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发 行: 新华书店上海发行所

印 刷: 上海交通大学印刷厂

开 本: 787×1092(毫米)1/16

印 张: 23.5

字 数: 580000

版 次: 1990年6月 第一版

印 次: 1990年7月 第一次

印 数: 1—6700

科 目: 219—260

ISBN7—313—00480—X/TN·710

定价: 4.60元



目 录

第一章 电路的基础知识	1
1-1 电路和电路图	1
1-2 电路的基本物理量	3
1-3 欧姆定律和一段有源电路的特性方程	6
1-4 克希荷夫定律	7
1-5 电路无源元件及其特性方程	10
1-6 电压源、电流源和受控源	17
第二章 电路分析方法	24
2-1 电路中的电位	24
2-2 电路的三种状态	26
2-3 电路的等效概念	28
2-4 电阻星形联接与三角形联接的等效变换 (Y- Δ 变换)	33
2-5 电路的分压和分流	35
2-6 支路电流法	36
2-7 叠加定理	37
2-8 节点电压法	39
2-9 戴维宁定理和诺顿定理	41
2-10 简单非线性电阻电路的分析	45
第三章 正弦交流电路	48
3-1 正弦交流电的基本概念	48
3-2 单一参数的正弦交流电路	57
3-3 电阻、电感和电容元件串联的交流电路	64
3-4 电阻、电感和电容元件并联的交流电路	70
3-5 复阻抗和复导纳的等效变换	72
3-6 正弦交流电路的分析和计算	73
3-7 三相电路	83
3-8 电路的频率响应	90
第四章 周期性非正弦电路	100
4-1 非正弦周期电流的产生	100
4-2 周期性非正弦量的分解	101
4-3 周期性非正弦量的有效值、平均值及功率	102
4-4 周期性非正弦电路的计算	104

第五章 电路的时域响应	108
5-1 时域响应的基本概念及换路定则	108
5-2 RC 电路的零输入响应	111
5-3 RC 电路的零状态响应	114
5-4 RC 电路的非零状态响应	116
5-5 RC 电路的应用实例	118
5-6 RL 电路的零输入响应	120
5-7 RL 电路的零状态响应	122
5-8 RL 电路的全响应	124
5-9 三要素法	125
5-10 RLC 电路的放电过程	128
第六章 半导体二极管和晶体管	132
6-1 半导体的导电特性	132
6-2 PN 结及其单向导电性	134
6-3 半导体二极管	136
6-4 硅稳压管	139
6-5 晶体三极管	141
6-6 场效应晶体管	149
第七章 二极管电路和三极管开关电路	156
7-1 二极管电路	156
7-2 晶体管开关电路	162
第八章 数字系统基础	165
8-1 逻辑代数和基本逻辑门	165
8-2 逻辑函数式的化简	171
8-3 逻辑函数应用举例	176
8-4 集成逻辑门电路	178
8-5 MOS 集成逻辑门	185
第九章 组合逻辑电路	189
9-1 编码器	189
9-2 译码器	192
9-3 全加器	195
9-4 组合逻辑电路设计举例	196
第十章 集成触发器	200
10-1 $R-S$ 触发器	200

10-2	R - S 、 J - K 、 D 、 T 触发器逻辑功能的描述	203
10-3	触发器的应用举例	211
10-4	MOS 触发器	212
10-5	单稳态触发器	213
10-6	无稳态触发器	215
第十一章 时序逻辑电路		217
11-1	同步计数器的分析方法	217
11-2	异步计数器的分析方法	220
11-3	同步计数器的设计方法	222
11-4	寄存器	224
*11-5	同步时序电路的分析与设计	226
第十二章 基本放大电路和多级放大电路		232
12-1	基本放大电路的组成和工作原理	232
12-2	基本放大电路的分析方法	235
12-3	静态工作点的稳定	244
12-4	场效应管放大电路	247
12-5	多级放大电路	251
第十三章 放大电路中的负反馈		256
13-1	反馈的基本概念与类型	256
13-2	负反馈对放大电路工作性能的影响	260
13-3	射极输出器	264
第十四章 正弦波振荡器		269
14-1	正弦波振荡的条件	269
14-2	LC 振荡电路	270
14-3	RC 振荡电路	273
第十五章 直接耦合放大电路与集成运算放大器		276
15-1	直接耦合放大电路及其特殊问题	276
15-2	差动放大电路	278
15-3	直接耦合功率放大器	286
15-4	集成运算放大器电路的组成及主要性能参数	290
15-5	集成运算放大器的三种基本接法	294
15-6	信号运算电路	298
15-7	电压比较器	300
15-8	有源滤波器	302

15-9	模拟量和数字量的转换.....	305
第十六章 直流稳压电源.....		311
16-1	整流电路.....	311
16-2	滤波器.....	315
16-3	串联型直流稳压电路.....	317
*16-4	晶体闸流管(晶闸管)整流电路.....	322
习题		333

第一章 电路的基础知识

1-1 电路和电路图

电路是由若干个电气器件或设备按照一定的要求和方式组成的总体，是电流的通路。电路中电流的流通，使电能的传输、分配和转换，以及各种电信号的传递和处理得以实现。

一、电路元件和电路模型

组成电路的电气器件或设备，如晶体管、电阻器、电容器、电感线圈以及变压器和发电机等等，统称为电路元件。电路元件虽然种类繁多，但在电磁现象上可以归纳为几个共同的方面：有些电气器件主要是消耗电能，如电阻器、电炉和电烙铁等，这些器件称为电阻元件；有些电气器件主要储存磁场能量，如各种电感线圈，称为电感元件；还有一些电气器件主要储存电场能量，如各种电容器，则称为电容元件。这些耗能或储能的电路元件，统称为无源元件。又如电池和发电机等电路元件，主要是供给电能的，称为电源元件。

事实上，一个实际的电阻器，当有电流流过时，除了对电流呈现阻力，消耗电能外，还会产生磁场并储存磁场能量，因而兼有电感的性质。电感线圈和电容器除了分别储存磁场能量和电场能量外，在电感线圈的导线中必然有些电阻，电容器的两极之间亦总会有些漏电，因此它们亦会兼有电阻的性质。一个实际的电源元件内部总有些电阻，使用时不可能保持其两端的电压不变。这样就往往给分析问题带来了困难。因此，我们必须在一定条件下，对实际的电气器件加以理想化，就是忽略其次要性质，而用一个足以表征其主要性能的模式来表示。也就是说为了便于对电路进行分析，需要建立一个实际电路的模型。电路模型由一些理想的电路元件组成，这些理想元件主要是电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件。

二、电路参数

电路参数就是表示电路元件性质的物理量。电路元件的性能可以由它们相应的电路参数来表征。电阻就是用以反映电阻元件损耗能量的电路参数，以 R 表示；电容和电感则分别反映电容器和电感器的电场储能和磁场储能的电路参数，分别用 C 和 L 表示。

电源元件有电压源元件和电流源元件两种，前者的参数是电压源元件所具有的电压，用 u 表示；后者的参数是电流源元件所具有的电流，用 i 表示。

上述电路元件使用的符号如图1-1所示。

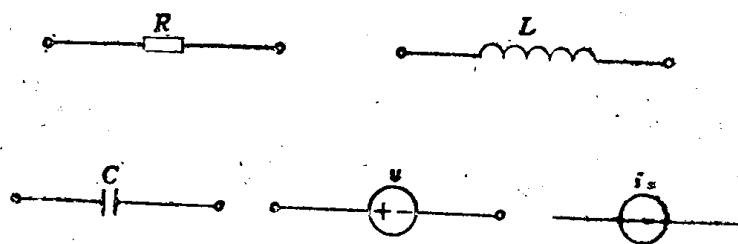


图 1-1 电路元件的符号

三、电路图

如上所述，实际电路是由各种电气器件组成的整体，有时亦称为网络。其实网络和电路并无严格的区别，一般地，网络是具有较多元件的复杂电路。在工程上我们常应用统一规定的符号来代表电路中的各个理想元件，利用这些元件符号，就可以把任意一个实际电路，画成一个由电路元件符号所组成的示意图形，称为电路图，以便于对电路的分析和运算。图1-2是一个实际的简单照明电路，图1-3是它的电路图。

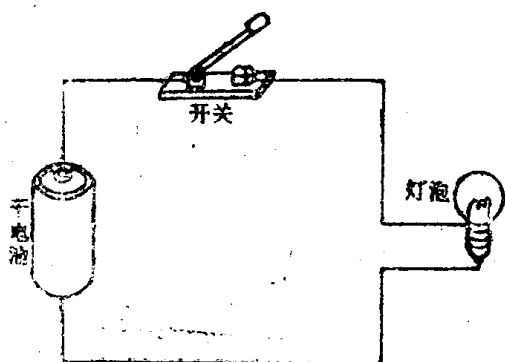


图 1-2 简单照明电路

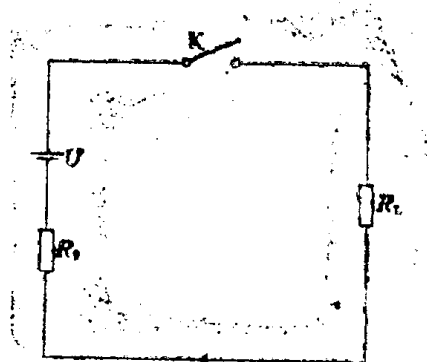


图 1-3 图 1-2的电路图

在电路图中，各元件的几何位置是无关紧要的，联接导线的形状和长短，一般说来也是不重要的，主要的是电路不论采取怎样画法，都要反映其本质；同时也应该尽可能将电路画成最简单的形式。图1-4 (a)是一种常见的电桥电路，它可以改画成(b)、(c)和(d)的形式，它们的本质是相同的，读者可以自行分析。

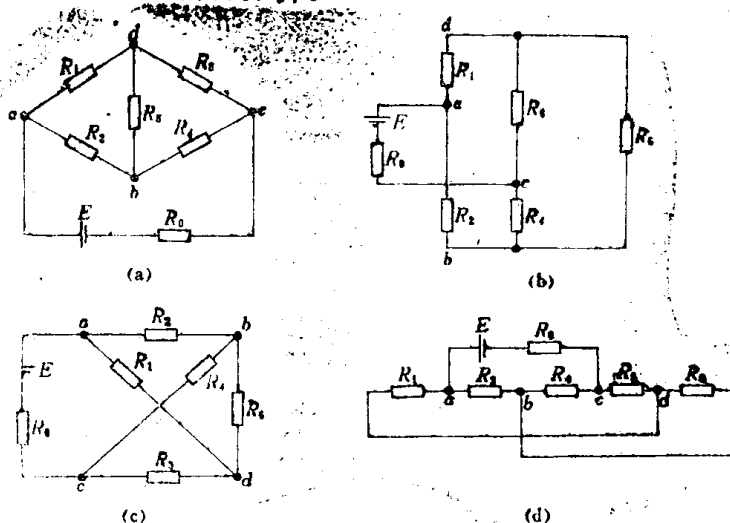


图 1-4 电桥电路的四种画

1-2 电路的基本物理量

一、电流及其参考方向

在电路中,随着电流的通过,进行着电能与其他形式能量的相互转换。因此,在分析电路时,我们特别关注电荷在电场作用下作定向运动而形成的电流。电流的大小用电流强度来衡量。电流强度定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度简称电流,用符号 i 表示,即

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

式中: t 的单位为秒(s), q 的单位是库仑(C), i 的单位是安培(A)。

电流的辅助单位有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)和纳安(nA),它们的关系如下:

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}, \quad 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}, \quad 1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}.$$

如果电流的大小和方向不随时间变化,称为恒定电流,简称直流(DC),其强度用符号 I 表示,如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流(AC)。

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。但在实际电路中,电流的真实方向难以在电路图中确定,给电路分析和计算带来了困难。譬如在一个电路元件较多的复杂电路中,就难以事先判断流过每个元件中电流的真实方向。又如在交流电路中,电流方向随时间变化,也很难用一个固定的箭头来表示其真实方向。为了解决这些困难,就引入参考方向这个概念。即在选定电流方向时,不必考虑其真实方向。参考方向在电路图中用箭头表示,如图1-5所示。图中方框表示某个电路元件。今后在电路图中用箭头表示的电流方向

都是参考方向,它不一定是电流的真实方向。如在图1-5中,

若电流的真实方向从 a 到 b , 与参考方向一致,则电流为正值。

若电流的真实方向由 b 到 a , 与图中所标参考方向相反,则电流

为负值。这样,我们就可以利用电流的正值或负值结合参考方向来确定电流的真实方向。



图 1-5 电流的参考方向

电流的参考方向又称为电流的正方向。

例 1-1 已知流过图1-5中所示元件的电流为2 A, (1) 若电流的流向为由 a 到 b , 试写出电流的表示式; (2) 若电流的流向相反, 由 b 到 a , 则电流的表示式又如何?

解: (1) 因为图中所标的电流 I 的参考方向和电流的真实方向一致, 所以

$$I = 2 \text{ A}.$$

(2) 因为图中所标的电流 I 的参考方向与真实方向相反, 所以

$$I = -2 \text{ A}.$$

二、电压及其参考方向

电路中的电荷在电场作用下作定向流动, 从而发生能量的交换。电荷从电源部分取得能量, 在电路的另外一些部分(指用电设备, 如电炉、电灯等, 统称为负载)则失去电能。单位

正电荷从电路中的这一点移动到另一点时能量变化量的绝对值,称为该两点间的电压。电压有时也称为电位差,用符号 u 表示,根据定义得电压的表达式为

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中: dq 为由一点移动到另一点的电量变化量,单位是库仑(C), dW 为电荷 dq 在移动过程中所取得或失去的能量,单位是焦耳(J)。电压的单位是伏特(V)。

电压的辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μ V)等。它们的关系是:

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, \quad 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}, \quad 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}.$$



图 1-6 电压的极性

在图 1-6 中,如果正电荷由 a 移动到 b ,失去能量,则 a 点为高电位,即为正极,用符号“+”表示, b 点为低电位,即为负极,用符号“-”表示。如果正电荷由 a 点移动到 b 点取得能量,则 a 点为低电位,即为负极“-”, b 点为高电位,即为正极“+”。

如果电压的大小和极性都随时间变化,称为交变电压;如果电压的大小和极性都不随时间变化,则称为恒定电压或直流电压,用符号 U 表示。

电压也有真实方向和参考方向(正方向)之分。电压的真实方向是由高电位点指向低电位点。电压的参考方向也称参考极性,也是任意选定的,它不一定代表电压的真实方向,可以由 a 到 b ,也可以由 b 到 a 。参考方向选定之后,如果电压的实际方向与参考方向一致,则电压为正值;如果电压的实际方向与参考方向相反,则电压为负值。

在电路图中,电压的参考方向有两种标法:一种用箭头表示,如图 1-7(a)所示;一种用极性“+”“-”表示,如图 1-7(b)所示。

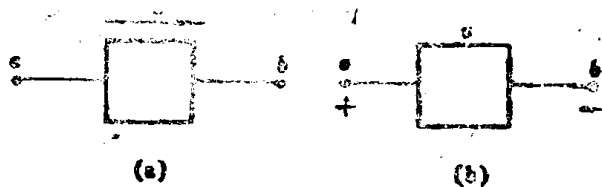


图 1-7 电压的参考方向

例 1-2 如图 1-8 所示已知元件两端的电压为 2V ,参考方向标在图上。(1)若正电荷由元件的 a 点移向 b 点获得能量;(2)若正电荷由元件的 b 点移向 a 点获得能量,试分别写出两种情况的电压表示式。

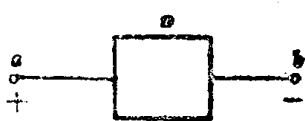


图 1-8 例 1-2 的电路图

解: (1) 正电荷由 a 点移向 b 点获得能量,电压的真实极性是 b 点为“+”, a 点为“-”。和图中所标参考方向相反,所以

$$u = -2 \text{ V}.$$

(2) 正电荷由 b 点移向 a 点获得能量,电压的真实极性是 a 点为“+”, b 点为“-”,和参考方向一致,所以

$$u = 2 \text{ V}.$$

三、电路中的功率

在图 1-9 所示的电路中,电压和电流的参考方向如图中所标。根据电流的定义得



图 1-9 电路中的功率

$$dq = i dt. \quad (1-3)$$

根据电压的定义得

$$dW = u dq. \quad (1-4)$$

由此得

$$dW = u i dt. \quad (1-5)$$

这就是电路元件从外部电路吸取的电能。单位时间内吸取的电能，即为此电路元件吸取的电功率，表达式是

$$p = \frac{dW}{dt} = ui. \quad (1-6)$$

在直流情况下

$$P = UI. \quad (1-7)$$

由上式可知，当电压和电流的参考方向一致时，电路吸取的电功率等于电压 u 和电流 i 的乘积。

必须指出，在计算功率时，若功率 p 为正值，表明此电路吸取功率；若计算所得的功率 p 为负值，则表明此电路产生功率。

假如在图 1-9 所示的电路中，电压和电流的参考方向相反，则此电路吸取功率的表达式为

$$p = -u i; \quad (1-8)$$

或

$$P = -UI. \quad (1-9)$$

显然，在这种情况下，当电压、电流的实际方向和参考方向一致时，此电路不是吸取功率，而是产生功率。

在国际单位制中，电压和电流的单位分别为伏 (V) 和安 (A)，功率的单位为瓦特 (W)。其辅助单位有千瓦 (kW) 和毫瓦 (mW) 等，它们的关系是：

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}, \quad 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}.$$

例 1-3 计算图 1-10 所示各元件吸取或产生的功率。

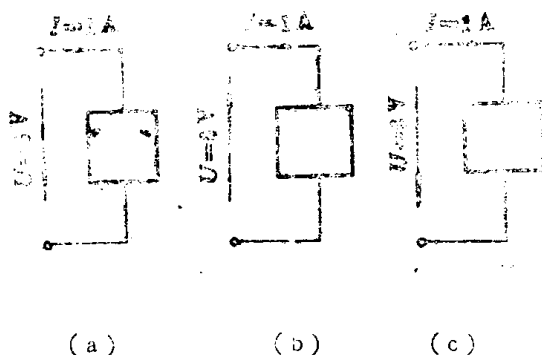


图 1-10 例1-3的电路图

解：图(a)：

$$P = UI = 6 \times 1 = 6 \text{ W (吸取)}.$$

图(b): $P = UI = 6 \times 1 = 6 \text{ W}$ (吸取)。

图(c): $P = -UI = -6 \times 1 = -6 \text{ W}$ (产生)。

1-3 欧姆定律和一段有源电路的特性方程

一、欧姆定律

欧姆定律是电路基本定律之一,它适用于线性电阻。所谓线性电阻就是电阻元件两端的电压和通过其中的电流具有线性关系,即电阻元件的 u 、 i 绘在 $u-i$ 平面上的曲线(称为元件的伏安特性曲线)是一条经过坐标原点的直线。线性电阻的符号及其伏安特性曲线如图 1-11 和图 1-12 所示。

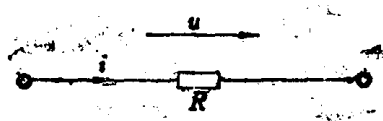


图 1-11 线性电阻
(u 与 i 的参考方向一致)

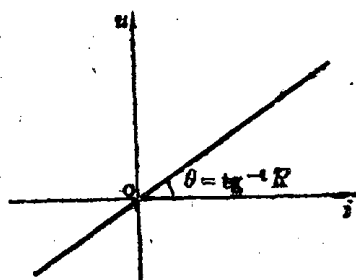


图 1-12 线性电阻的伏安特性

欧姆定律表明流过线性电阻的电流 i 和电阻两端的电压 u 成正比。在电压和电流的参考方向一致的情况下,这个比例关系的数学表达式为

$$u = Ri. \quad (1-10)$$

在直流情况下,可写成

$$u = RI. \quad (1-11)$$

式中:电压的单位为伏(V),电流的单位为安(A),电阻的单位为欧(Ω)。

如果电压和电流的参考方向相反,如图 1-13所示,则欧姆定律表达式应为

$$u = -Ri. \quad (1-12)$$

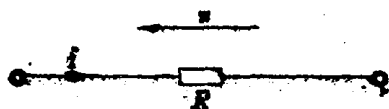


图 1-13 线性电阻
(u 与 i 的参考方向相反)

线性电阻元件也可以用另一个参数——电导来表征,其符号为 G 。其值为电阻的倒数,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-13)$$

电导的单位为西门子(S)。

二、一段有源电路的特性方程

图 1-14 所示为一段有源电路,由一个具有电动势 e 的理想电压源和一个电阻 R 串联而成。图中方框内是由任意元件组成的电路。根据图中所示电压和电流的参考方向, a 、 b 两点间电压

$$u = u_{ab} = u_{ac} + u_{cb}. \quad (1-14)$$

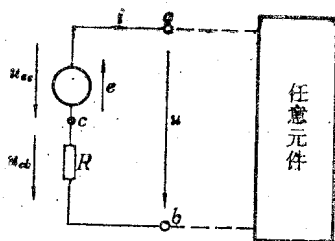


图 1-14 一段有源电路 (u 的参考方向与 e 和 i 的参考方向相反)

因为 $u_{ac} = e$ 及 $u_{cb} = -Ri$, 所以

$$u = u_{ab} = e - Ri; \quad (1-15)$$

或

$$i = \frac{e - u}{R}. \quad (1-16)$$

在直流情况下,

$$U = E - RI; \quad (1-17)$$

或

$$I = \frac{E - U}{R}. \quad (1-18)$$

这就是图 1-14 所示一段有源电路的特性方程, 也常称为一段有源电路的欧姆定律。

必须指出, 一段有源电路的特性方程中的正、负符号, 取决于电压、电流和电动势的参考方向, 任意一个参考方向改变, 体现在特性方程中相应项的符号也随之改变。如图 1-15 所示, 其中电流的参考方向改变了, 于是

$$u = e + Ri; \quad (1-19)$$

或

$$i = \frac{u - e}{R}. \quad (1-20)$$

在直流情况下

$$U = E + RI; \quad (1-21)$$

或

$$I = \frac{U - E}{R}. \quad (1-22)$$

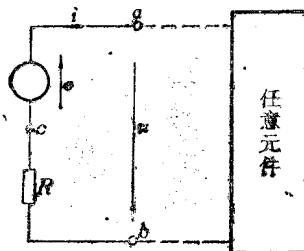


图 1-15 一段有源电路
(e 的参考方向与 u 和 i 的参考方向相反)

1-4 克希荷夫定律

一、几个常用术语

电路的分析和运算, 除了欧姆定律外, 克希荷夫电流定律和电压定律亦是分析电路的基本定律。克希荷夫电流定律适用于电路中的任意一个节点; 克希荷夫电压定律适用于电路中的任何一个回路。下面先介绍电路中的几个常用术语。

1. 支路

电路中的每一个分支, 称为支路。图 1-16 中有三条分支 acb 、 ab 和 adb , 即有三条支路。各条支路中的元件上流过相同的电流, 称为支路电流。在支路 acb 中含有电源, 称为有

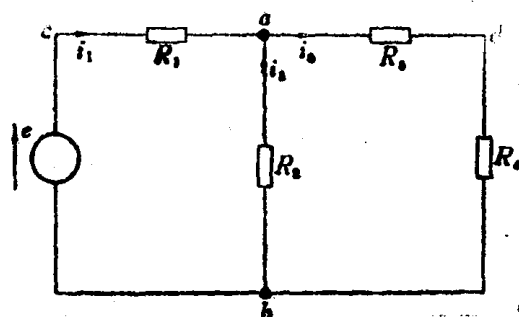


图 1-16 电路的节点、支路和回路

源支路；支路 ab 和 adb 中没有电源，称为无源支路。

2. 节点

三条或三条以上支路的联结点，称为节点。在图1-16所示电路中，有 a 和 b 两个节点。支路跨接在两个节点之间，是联接两个节点的一段电路。

显然，两个节点之间可以联接多个电路，即有多条支路，每条支路都有各自的支路电流，但是两个节点之间只有一个电压，即两个节点之间的电位差只有一个，所以两个节点间各条支路两端的电压是相同的。

3. 回路

由若干支路所组成的任一闭合路径，称为回路。图1-16所示的电路中，有 $cabc$ 、 $adba$ 和 $cadbc$ 三个回路。

4. 网孔

若回路内部不能再分出其他回路，即回路内部不包含不属于此回路的其他支路，则此回路称为网孔。图1-16的电路中，有 $cabc$ 和 $adba$ 两个网孔。

二、克希荷夫电流定律

克希荷夫电流定律确定了与某节点联接的各条支路中电流之间的关系。该定律指出：在任一瞬间，流向任一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。克希荷夫电流定律就其实质来说，是电流连续性原理在电路中的表现形式，即节点上的电荷不可能积累，流入节点的电荷必然等于流出节点的电荷。

在图1-16所示的电路中，根据克希荷夫电流定律，对于节点 a 可以写出

$$i_2 + i_3 = i_1; \quad (1-23)$$

或

$$i_2 + i_3 - i_1 = 0;$$

亦即

$$\sum i = 0. \quad (1-24)$$

在直流情况下

$$\sum I = 0. \quad (1-25)$$

上式可以表达为：在任一瞬间，流入（或流出）某一节点的电流的代数和为零。

运用克希荷夫电流定律列写某一节点的支路电流关系式 1-24 或式 1-25 时，应该注意各支路电流的参考方向。如果规定参考方向为流入节点的电流取正号，则流出节点的就取负号。

例1-4 在图 1-17 中，虚线闭合面内有三个节点 1、2、3。若已知 I_{12} 、 I_{23} 和 I_{31} ，求 I_1 、 I_2 和 I_3 的表示式。

解：根据图中所示电流的参考方向，由克希荷夫电流定律列出：

$$\begin{aligned}\text{节点 1} \quad I_1 &= I_{12} - I_{31} \\ \text{节点 2} \quad I_2 &= I_{23} - I_{12} \\ \text{节点 3} \quad I_3 &= I_{31} - I_{23}\end{aligned}$$

若将上面三个式子相加得

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0。$$

由此可见，通过任何一个闭合面的电流的代数和也总是等于零。显然， I_1 、 I_2 和 I_3 这三个电流不能都是正的（或负的），其中至少有一个电流是流出（或流入）闭合面。

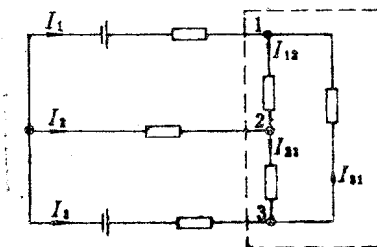


图 1-17 例 1-6 的电路图

二、克希荷夫电压定律

克希荷夫电压定律确定了电路某一回路中各电压间的关系。它指出：电路中的任一回路，在任一时刻，回路各支路的电压降的代数和等于零。其数学表示式为

$$\sum u = 0; \quad (1-26)$$

$$\text{或} \quad \sum U = 0。 \quad (1-27)$$

列写上式时，一般要规定一个回路的循行方向，若支路电压降的参考方向与回路的循行方向一致，则此电压降取正号；否则取负号。

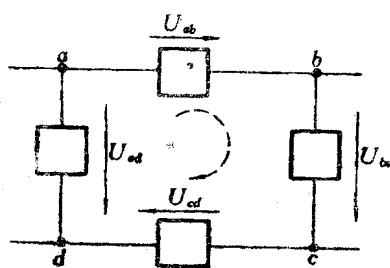


图 1-18 例1-5的电路图

例 1-5 图1-18为一个复杂直流电路中的一个回路，已知各元件的电压为： $U_{ab}=10\text{V}$ ， $U_{bc}=3\text{V}$ ， $U_{bc}=-2\text{V}$ 。

试求 U_{cd} 。

解：选择回路循行方向如图中虚线所示，根据各电路元件上电压的参考方向，得

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} - U_{ad} = 0。$$

式中：凡参考方向与循行方向一致的电压降取正号，否则

取负号。

将已知数据代入，得

$$(3) + (-2) + U_{cd} - (10) = 0。$$

于是

$$U_{cd} = 9\text{V}。$$

必须指出，上面所介绍的克希荷夫电流定律和电压定律的两种表示式，适用于由各种不同元件所组成的电路，同时也适用于恒定的电压和电流或者任何变动的电压和电流。

如果图 1-18 所示的电路的各支路元件是由电阻和电压源组成的，如图 1-19 所示，那末运用欧姆定律，可以把克希荷夫电压定律的表示式加以改写。根据电路中所示电压和电流的参考方向，得

$$U_{ab} = R_1 I_1, \quad U_{bc} = R_2 I_2, \quad U_{cd} = E_2 - R_3 I_3, \quad U_{ad} = E_1 + R_4 I_4。$$

应用克希荷夫电压定律，得

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 + (E_2 - R_3 I_3) - (E_1 + R_4 I_4) = 0，$$

整理后得

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

或

$$\sum RI = \sum E。$$

(1-28)

这是克希荷夫电压定律的扩展形式，表述为在任一回路内，电阻上电压降的代数和等于电动

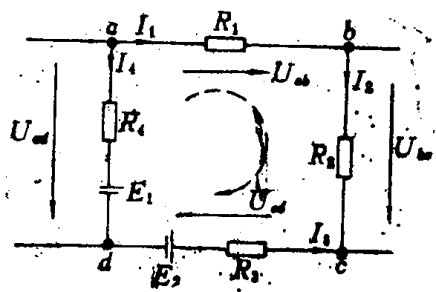


图 1-19 电阻和电压源组成的回路

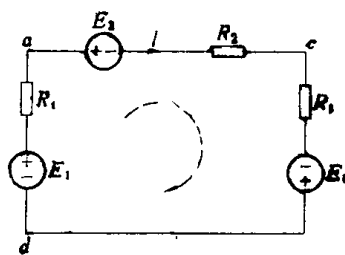


图 1-20 例1-6的电路图

势的代数和。应该注意，在式 1-28 中，若电阻上电流的参考方向与回路循行方向一致，则电压降取正号，否则取负号；电动势的参考方向与回路循行方向一致，则取正号，否则取负号。

例 1-6 图 1-20 为单回路直流电路，已知 $E_1=9V$ ， $E_2=6V$ ， $E_3=3V$ ， $R_1=1k\Omega$ ， $R_2=2k\Omega$ ， $R_3=3k\Omega$ 。试求(1) 电路中的电流 I ；(2) a ， d 两点间的电压 U_{ad} 。

解：设回路的循行方向和电流的参考方向如图中所示。

(1) 根据 $\sum RI = \sum E$ 得

$$R_1 I + R_2 I + I R_3 = E_1 - E_2 + E_3。$$

$$\therefore I = \frac{E_1 - E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{9 - 6 + 3}{(1 + 2 + 3) \times 10^3} = 10^{-3} A = 1 \text{ mA}。$$

$$(2) U_{ad} = E_2 + R_2 I + R_3 I - E_3 = 6 + 2 \times 10^3 \times 10^{-3} + 3 \times 10^3 \times 10^{-3} - 3 = 8V。$$

$$\text{或 } U_{ad} = E_1 - R_1 I = 9 - 1 \times 10^3 \times 10^{-3} = 8V。$$

1-5 电路无源元件及其特性方程

电路是由电路元件联接组成的，而各个电路元件都有其固有的性能。了解电路的运用情况及其工作规律，必须先分析电路元件，了解元件的性能。本节将分析电路的一些基本无源元件的性能及其特性方程。

一、电阻元件

电阻元件是从损耗电能的实际电气器件中抽象出来的理想化模型，表征其性能的参数为电阻 R ，因此电阻元件亦称电阻。

根据欧姆定律 $u = Ri$ ；若 R 为常数，则 u 与 i 成正比。此时，由欧姆定律定义的电阻元件称为线性电阻元件，欧姆定律的表示式亦称线性电阻的特性方程。 u 和 i 可以是时间 t 的函数，也可以是常量（直流）。

长直金属导体的电阻值可由下式计算：

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

式中 l 是导体长度, S 是导体截面积, ρ 是导体的电阻率。在国际单位制中, 电阻率的单位是欧-米 ($\Omega \cdot \text{m}$)。

电阻元件在电路中要吸取功率。当电压和电流的参考方向一致时, 电阻元件吸取的功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-29)$$

在直流情况下

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-30)$$

由于在电阻元件中, 电压 u 和电流 i 的实际方向总是一致的, 因此 p 总是正值, 表示电阻 R 总是消耗电能, 所以电阻元件称为耗能元件。为此, 可以利用电能转换成热能而制成所需的电气设备, 如电炉、电熨斗等电热器。但是如果使用不当, 电流过大, 则发热更甚, 将会烧毁设备。因此在电气设备的铭牌上都标有它们的电流、电压或功率的限额, 称为额定值。如电阻元件除标明它的电阻值外, 还标有额定功率。

例 1-7 有一个 200Ω 、 0.5W 的金属膜电阻, 接在直流电路中。使用时, 试问电阻上的电流和电压不应超过多大的数值。

解: $I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.5}{200}} = \frac{1}{20} \text{A} = 50\text{mA},$

$$U = RI = 200 \times 50 \times 10^{-3} = 10\text{V}$$

或 $U = \sqrt{PR} = \sqrt{0.5 \times 200} = 10\text{V}。$

二、电容元件

电容元件是实际电容器的理想化模型。电容元件的符号如图 1-21 所示。表征电容元件性能的参数为电容 C 。

电容元件上积累的电荷 q 与其上的电压 u 的关系为

$$q = Cu; \quad (1-31)$$

或 $u = q/C, \quad (1-32)$

式中: 电容 C 为常数, 即电容元件上的电荷与电压成正比。

当 $q=1$ 库伦(C), $u=1$ 伏(V)时, $C=1$ 法拉(F)。电容的辅助单位有微法 (μF)、纳法 (nF) 和皮法 (pF)。它们的关系为

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}, 1\text{nF} = 10^{-9}, 1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}。$$

平板电容器的电容量 C 可以由下式计算:

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-33)$$

式中: S 为平板面积 (m^2), d 为板间距离 (m), ϵ 为介电常数 (F/m)。

如果电容器的极板间电压过高, 极板间绝缘体就会被击穿, 因此使用电容器时, 必须使

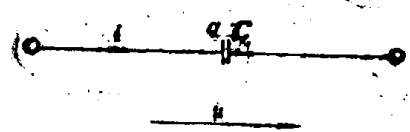


图 1-21 电容元件的符号