



普通高等教育“十二五”规划教材



电路与电子技术

张子萍 主 编

杨西珊 张全洲 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划

电路与电子技术

主 编 张子萍
副主编 杨西珊 张全洲
编 写 台 方
主 审 史建萍



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书阐述了电路基础和数字电路的基本概念和基本原理,并通过大量的实例介绍了电路基础的分析方法和数字电路的分析与设计方法。有关模拟电路的内容均放在数字电路的必要之处进行讲解。根据电路与电子技术教学的需要,在附录中引入了必要的复数、半导体、TTL与CMOS逻辑门电路的知识,以便读者参考。

本书适用于各类远程、函授和夜大等类型的高等院校及专业的电子技术课程,同时也可作为渴望掌握电子技术基础的自学者的指导书。

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术 / 张子萍主编. —北京: 中国电力出版社, 2013.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-4170-8

I. ①电… II. ①张… III. ①电路理论—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM13②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 045973 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 366 千字

定价 28.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

电路与电子技术是计算机及其相关专业的一门专业基础课。它研究电工技术与电子技术的理论和应用。电路与电子技术的发展十分迅速,应用非常广泛,现代一切新的科学技术都与电工电子技术有着密切的关系。

本教材的读者对象主要是面向夜大、函授和远程等大学本、专科学生。根据多年的教学经验,针对这些学生的特点,在编写中,为了使教材内容更符合“必需、实用、够用”的原则,力求做到“简明、易懂、适度、能用”的要求,在保证知识完整性的前提下,删繁就简,以够用为准,避免不必要的推导,以基本概念和基本方法为重点,注重基本技能的训练,力求将理论知识与实际相联系。为便于读者能更好地学习,在每一章均特别增加了学习指导,还配备了多种类型的习题,希望以此提高读者的思考问题和解决问题的能力。

本教材共分8章,讲述了电路的基本概念和简单电路、电路的等效化简、电路的一般分析方法、线性电路的定理、数字逻辑基础、门电路与逻辑代数、组合逻辑电路和时序逻辑电路。考虑到当今科技的发展,本教材只涉及极少的模拟电路的内容,并且分别安排到数字电路需要的地方进行介绍,使模拟电路与数字电路的联系更为紧密,还有些相关的知识在三个附录中予以介绍,以便读者参考查阅。

本教材由北京科技大学张子萍任主编,由首都师范大学杨西珊和河南省鹤壁市高级技工学校张全洲任副主编,北京科技大学的台方为参编。全书由张子萍统稿。

在本教材的编写过程中,参考了大量的文献,在此向各位文献作者致以真诚的谢意。

本教材由铁道部电子中心史建萍主审,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2013年1月



目 录

前言

1 电路基本概念和简单电路	1
1.1 基本概念	1
1.2 基本物理量	2
1.3 电阻元件	6
1.4 理想电源	7
1.5 受控源	8
1.6 基尔霍夫定律	9
1.7 简单电路	12
学习指导一	13
习题一	21
2 电路的等效化简	24
2.1 对外等效的基本概念	24
2.2 二端网络的等效化简	25
2.3 电路的等效化简	33
学习指导二	35
习题二	43
3 电路的一般分析方法	47
3.1 基本概念	47
3.2 网孔电流法	47
3.3 节点电压法	52
3.4 网孔电流法与节点电压法的比较	56
学习指导三	56
习题三	65
4 线性电路的定理	67
4.1 叠加定理	67
4.2 戴维南定理	70
4.3 诺顿定理	75
4.4 最大功率传输定理	80
学习指导四	81
习题四	90

5 数字逻辑基础	92
5.1 数字逻辑的基本概念	92
5.2 数字电路的发展和分类	94
5.3 数制及数制转换	95
5.4 二进制码	98
5.5 带符号位的二进制数	100
学习指导五	101
习题五	102
6 门电路与逻辑代数	103
6.1 半导体器件的开关特性	103
6.2 逻辑运算关系与逻辑门电路	104
6.3 逻辑代数的基本定律和规则	108
6.4 逻辑函数的变换与化简	111
学习指导六	118
习题六	122
7 组合逻辑电路	125
7.1 组合逻辑电路的分析	125
7.2 组合逻辑电路的设计	128
7.3 组合逻辑电路中的竞争冒险	130
7.4 常用组合逻辑功能器件	132
学习指导七	143
习题七	153
8 时序逻辑电路	155
8.1 触发器	155
8.2 时序逻辑电路	165
8.3 常用时序逻辑器件	173
学习指导八	188
习题八	195
 附录 A 复数	 203
附录 B 半导体基础知识	206
附录 C TTL 与 CMOS 逻辑门电路	214
习题参考答案	219
 参考文献	 234

1 电路基本概念和简单电路



本章需解决的问题:

- (1) 什么是关联参考方向?
- (2) 电路分析中为什么要使用关联参考方向?
- (3) 元件的约束(伏安特性)指的是什么?
- (4) 结构的约束指的是什么?
- (5) 哪种电路称为简单电路?可用什么方法进行分析?

1.1 基本概念

1.1.1 电路模型

人类在现实工作和生活中会接触到许许多多的电气设备,这些设备中都含有不同的电路。对这些电路进行分析,首先要掌握一系列的基本概念和基本方法。

例如,生活中最简单的电路——手电筒电路,如图 1-1 所示。图(a)为实际电路,图(b)为电路模型。其中电池用电压源符号表示,灯泡用电阻表示。无论是实际上还是理论上一般不用实际电路进行电路分析,为了便于分析计算,将实际电路转化为电路模型。在本教材中的电路图均为电路模型。

1.1.2 电路的分类

(1) 电路按其作用分为“强电”和“弱电”。所谓“强电”是指用来传输电能的电路,如各国均有的电力传输网络。所谓“弱电”是指传输控制信号的电路,如电视机、手机和各种复杂的控制电路。

(2) 电路按其工作状态分成稳态电路和暂态电路。电路处于稳定状态(稳态)时,电路中的电压、电流是不随时间变化的,或是有规律地随时间变化(规律是不变的),称其为稳态电路。而因为开关的闭合,或是电路中的某些参数变化的瞬间,使电路中的电压、电流发生随时间变化的电路称为暂态电路。

(3) 电路按其通流形式可分成直流电路和交流电路。所谓直流电,就是电路在稳定状态时,电路中的电压、电流的大小和方向都不随时间变化,如图 1-2(a)所示。而所谓交流电,即电路处于稳态,电路中的电压、电流的大小和方向是有规律地随时间变化,如图 1-2(b)、(c)所示。

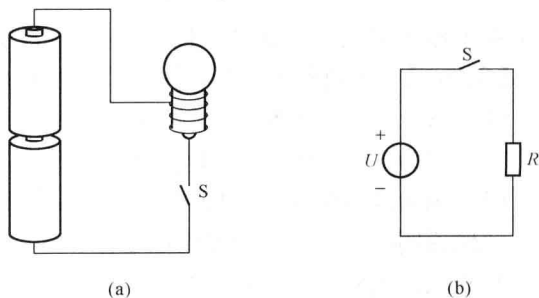


图 1-1 手电筒的实际电路与电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路模型

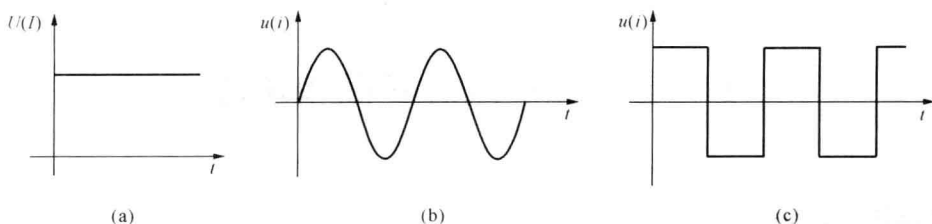


图 1-2 直流电与交流电

(a) 直流; (b) 交流正弦波; (c) 交流方波

1.2 基本物理量

1.2.1 电压

1. 电压的定义

电压又称为电位差。电压与电路中的两点有关。如图 1-3 所示电路中 a、b 两点间电压用 U_{ab} 表示。电压的单位是伏特，用字母“V”表示。

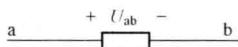


图 1-3 电压的表示

2. 电压的参考极性

在实际电路中电压的真实极性是不容易观察到的，在理论分析中更是不必要的。但是在电路的分析过程中电压若没有极性，则分析的结果是毫无意义的。为此，在电路中若需对电压进行分析，首先必须为电压假设一个极性，称其为参考极性（今后再见到的电压极性均为参考极性）。

【例 1-1】 试判断图 1-4 中各元件上电压的真实极性。

解 (1) 因为 $U=2V>0$ ，所以真实极性与参考极性同极性（上正下负）。

(2) 因为 $U=-2V<0$ ，所以真实极性与参考极性反极性（上负下正）。

(3) 因为没有标出电压的参考极性，所以无法判断电压的真实极性。

此例说明：在分析计算电路中的电压或要判断电压的真实极性时，必须首先标出电压的参考极性。若没有参考极性就进行计算，其结果是毫无意义的，电压的真实极性也是无法判断的。

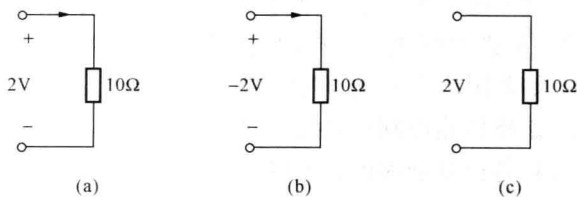


图 1-4 [例 1-1] 图

1.2.2 电流

1. 电流的定义

电路中各元件是由导线连接的，导线中的电子的流动形成了电流，如图 1-5 所示。电流的单位是安培，用字母“A”表示。

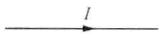


图 1-5 电流的表示

2. 电流的参考方向

在实际电路中电流的真实方向是不容易观察到的，在理论分析中也是不必要的。但是在电路的分析过程中电流若没有方向，则分析的结果也是毫无意义的。为此，在电路中若需要分析电流，首先必须为电流假设一个方向，称其为参考方向（今后再见到的电流方向均为参考方向）。

【例 1-2】 试判断图 1-6 中各元件上的电流的真实方向。

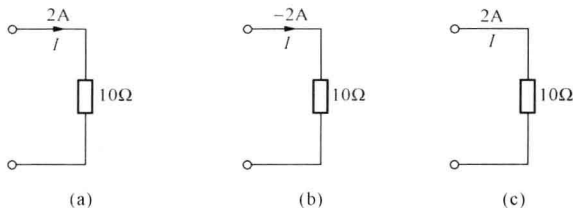


图 1-6 [例 1-2] 图

解 (1) 因为 $I = 2\text{A} > 0$, 所以真实方向与参考方向同向 (向下)。

(2) 因为 $I = -2\text{A} < 0$, 所以真实方向与参考方向反向 (向上)。

(3) 因为没有标出电流的参考方向, 所以无法判断电流的真实方向。

此例说明: 在分析计算电路中的电流或判断电流的真实方向时, 必须首先标出电流的参考方向。若没有参考方向就进行计算, 其结果是毫无意义的, 电流的真实方向也是无法判断的。

1.2.3 关联参考方向

当元件上的电压参考极性与电流参考方向同向时 (电压也有参考方向, 规定电压的参考方向是从参考极性的正极指向负极), 该元件的电压参考极性与电流参考方向称为关联参考方向, 如图 1-7 (a) 所示。否则称为非关联参考方向, 如图 1-7 (b) 所示。

在一般情况下 (绝大多数情况是未声明), 电路中的元件为关联参考方向。此时, 元件上只标有电压的参考极性, 或只标有电流参考方向, 如图 1-8 所示。



图 1-7 声明的情况

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向



图 1-8 关联参考方向 (未声明)

在关联参考方向下, 若标出了电压的参考极性, 也就有了电流的参考方向 (电流的参考方向如图 1-7 (a) 所示与电压的参考方向同向)。同理, 若标出了电流的参考方向, 也就有了电压的参考极性。使用关联参考方向, 可以简化电路图, 使电路图更加清晰简洁。

在关联参考方向下进行分析计算并得到结果后, 电压的真实极性或电流的真实方向也就可以判断了。

【例 1-3】 试判断图 1-9 中各元件上的电压、电流是否为关联参考方向。

解 (1) 图中因为只标出了电压的参考极性, 所以电压、电流为关联参考方向。

(2) 图中因为只标出了电流的参考方向, 所以电压、电流为关联参考方向。

(3) 图中电压的参考极性和电流的参考方向都标出了 (声明的情况), 电路分析时必须进行人工判断。因为电压的参考极性和电流的参考方向同向, 所以为关联参考方向。

(4) 图中电压的参考极性和电流的参考方向都标出了, 所以必须进行人工判断。其结果为非关联参考方向。

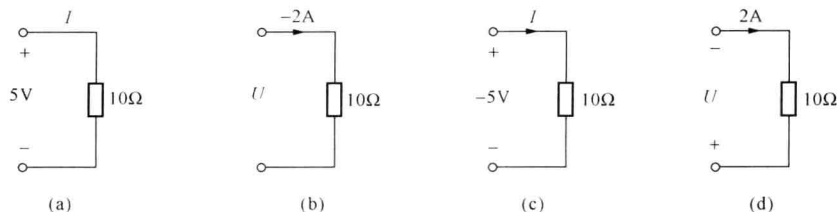


图 1-9 [例 1-3] 图

此例说明: 在分析计算电路中的电流或电压时, 必须判断是否为关联参考方向。图 1-9 (a)、图 1-9 (b) 中元件上只标出了电压的参考极性, 或只标出了电流的参考方向 (绝大多数情况), 这肯定是关联参考方向 (不必判断)。而图 1-9 (c)、图 1-9 (d) 中两元件上既标出了电流的参考方向, 又标出了电压的参考极性, 就必须人工进行判断。

判断是否为关联参考方向, 只要看电压的参考极性和电流的参考方向, 而与电压、电流数值的正、负无关。图 1-9 (b)、图 1-9 (c) 中的电压、电流虽然有小于是零的情况, 但是这与判断是否为关联参考方向无关。

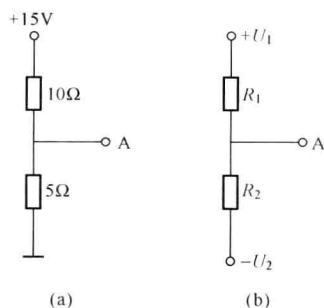


图 1-10 电路中的电位

1.2.4 电位

1. 电位的概念

电路中某个点相对于参考点的电压称为该点的电位 (电位是一种特殊的电压)。只要涉及电位, 电路中就一定有参考点 (无论电路图中是否标出) 如图 1-10 所示。

电位用字母 “V” 表示, 单位是伏特, 用字母 “V” 表示。

在图 1-10 (a) 中明显地标出了参考点。在图 1-10 (b) 中虽然见不到参考点的标记, 但是该电路一定有参考点, 只是没有标明。

前述已谈到, 电压又称为电位差, 即

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

或

$$V_a = U_{a0}$$

U_{a0} 为 A 点到参考点的电压, 可见电压与电位的关系。

2. 电位的计算

【例 1-4】 电路如图 1-10 所示, 试求 (a), (b) 图中电路 A 点的电位。

解 (1) 图中 A 点视为开路, 故两个电阻为串联关系。利用串联分压 (串联分压将在第 2 章讲述) 可得

$$V_a = U_{a0} = \frac{5}{10+5} \times 15 = 5(\text{V})$$

(2) 图中 A 点也视为开路, 故两个电阻仍为串联关系。还利用串联分压求解, 如图 1-11 所示。

$$V_a = U_{a0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (U_1 + U_2) - U_2$$

可见,原图中表面上看不见参考点,但是实际上肯定是有参考点的。为了计算电位,可如图 1-11 所示加上相应的电压源。

【例 1-5】 电路如图 1-12 所示,试求图中各点的电位。

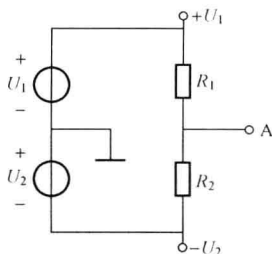


图 1-11 [例 1-4] 图

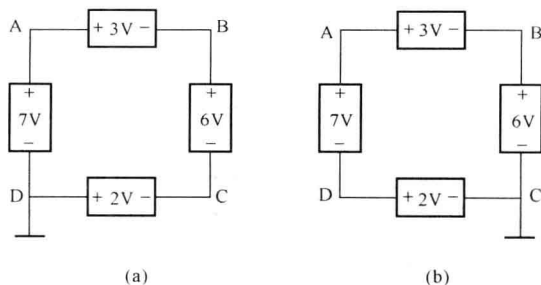


图 1-12 电位的计算

解 (1) 图中 D 点为参考点, 即

$$V_D = 0V$$

则

$$V_A = U_{AD} = 7V$$

$$V_B = V_A - U_{AB} = 7 - 3 = 4(V)$$

$$V_C = U_{CD} = -2V$$

(2) 图中 C 点为参考点, 即

$$V_C = 0V$$

则

$$V_B = U_{BC} = 6V$$

$$V_D = U_{DC} = 2V$$

$$V_A = U_{AB} + V_B = 3 + 6 = 9(V)$$

或

$$V_A = U_{AD} + V_D = 7 + 2 = 9(V)$$

由此题可见,参考点将影响各点电位的数值。同时还说明了,电路中的电压与参考点无关。因此可以说:电位是“相对”的,而电压是“绝对”的。

1.2.5 电功率

电功率(简称功率)是电路分析中的一个重要物理量。功率用字母 P 表示,单位是瓦特,用字母“W”表示。

在计算功率之前,必须正确判断所要计算功率的元器件上的电压、电流是否为关联参考方向。若是关联参考方向,则

$$P = U \times I \quad (1-2)$$

否则

$$P = -U \times I \quad (1-3)$$

计算出功率后,若 $P > 0$, 则所针对的元器件在电路中的作用是负载。若 $P < 0$, 则所针

对的元器件在电路中起到电源的作用。

【例 1-6】 试求图 1-13 各元器件的功率，并说明该元器件在电路中的作用。

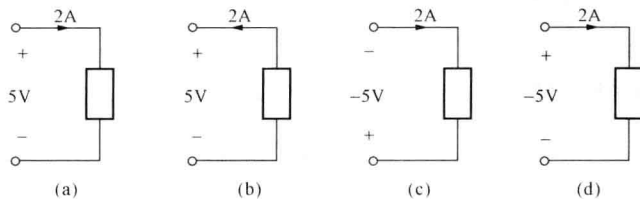


图 1-13 [例 1-6] 图

解 (1) 因电压、电流为关联参考方向，故 $P = U \times I = 5 \times 2 = 10(\text{W})$ ，该元件为负载。

(2) 因电压、电流为非关联参考方向，故 $P = -U \times I = -5 \times 2 = -10(\text{W})$ ，该元件为电源。

(3) 因电压、电流为非关联参考方向，故 $P = -U \times I = -(-5) \times 2 = 10(\text{W})$ ，该元件为负载。

(4) 因电压、电流为关联参考方向，故 $P = U \times I = (-5) \times 2 = -10(\text{W})$ ，该元件为电源。

注意：(1) 判断关联与否，应该从电压的参考极性和电流的参考方向上判断，不要受电压、电流数值正、负的影响。

(2) 只需要在计算元件的伏安特性和功率时判断是否为关联参考方向。

1.3 电 阻 元 件

电阻元件有线性电阻与非线性电阻之分，本教材只讨论线性电阻元件，关于非线性电阻元件的内容，有兴趣的读者可以查阅相关的书籍。

电阻元件的电路符号为 “ $\boxed{R}$ ”，R 表示电阻。

1.3.1 电阻的定义

线性电阻的阻值是电阻上的电压值与电流值之比，就是中学物理中已经讲过的欧姆定律。但是在今后的学习中欧姆定律应纳入伏安特性的范畴。无论何时，只要使用该伏安特性（欧姆定律），必须首先判断是否为关联参考方向。在关联参考方向下，应使用

$$U = RI \quad (1-4)$$

如果为非关联参考方向，则应使用

$$U = -RI \quad (1-5)$$

电阻元件的伏安特性还可以用特性曲线来表示，如图 1-14 所示。该曲线是一条通过坐标原点的直线。

电阻阻值的单位是欧姆，用符号 “ Ω ”、“ $\text{k}\Omega$ ” 或 “ $\text{M}\Omega$ ” 表示。

1.3.2 电阻的伏安特性

将式 (1-4) 改写为式 (1-6)，

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-6)$$

由电阻的定义和式 (1-6) 可知，一旦线性电阻的阻值确定之后，电阻上的电压与电流的关系也就唯一地确定了。因此，电阻元件的伏安特性属于元件约束的范畴。

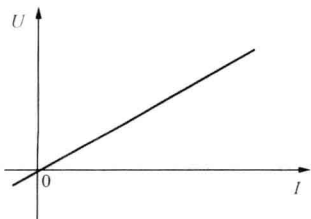


图 1-14 电阻的伏安特性曲线

1.4 理想电源

在电路分析中, 实际电源均用理想电源替代。理想电源只有两种: 一是理想电压源; 二是理想电流源。

1.4.1 理想电压源

1. 理想电压源的电路符号

理想电压源的电路符号如图 1-15 所示。

2. 理想电压源的伏安特性

该电压源之所以称其为理想电压源, 是因为理想电压源的端钮电压是恒定的, 不会受外电路影响, 即

$$U = U_s$$

而端钮电流则取决于外电路。其伏安特性曲线如图 1-16 所示。

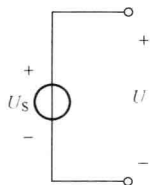


图 1-15 理想电压源

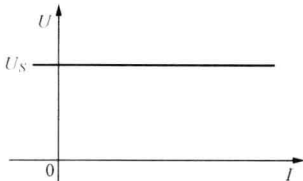


图 1-16 理想电压源的特性曲线

为了便于掌握和记忆, 该伏安特性可用简单的八个字表示: 电压“恒定”, 电流“任意”。

同时, 该伏安特性也告诉了我们, 计算电压源电流的方法。这就是一定要根据电压源之外的电路计算电压源的电流。

1.4.2 理想电流源

1. 理想电流源的符号

理想电流源的电路符号如图 1-17 所示。

2. 理想电流源的伏安特性

根据对偶性^❶原理, 理想电流源的伏安特性是: 理想电流源的端钮电流是恒定的, 不会受外电路影响, 即

$$I = I_s$$

而端钮电压则取决于外电路。其伏安特性曲线如图 1-18 所示。

为了便于掌握和记忆, 该伏安特性也可用简单的八个字表示: 电流“恒定”, 电压“任意”。

同时, 该伏安特性也告诉我们, 计算电流源电压的方法。这就是一定要根据电流源之外的电路计算电流源的电压。

【例 1-7】 试求图 1-19 中的电压源电流和电流源电压。

其中: i_s 为电压源电流, i_R 为电阻电流; u_s 为电流源电压, u_R 为电阻电压。

❶ 所谓对偶性即具有相同的表示形式, 但含义却截然相反的两个概念或方法等。如电压源电流源的伏安特性。

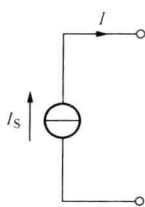


图 1-17 理想电流源

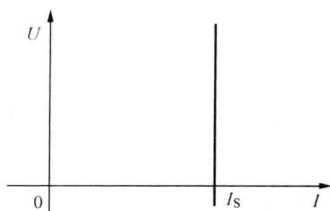


图 1-18 理想电流源的特性曲线

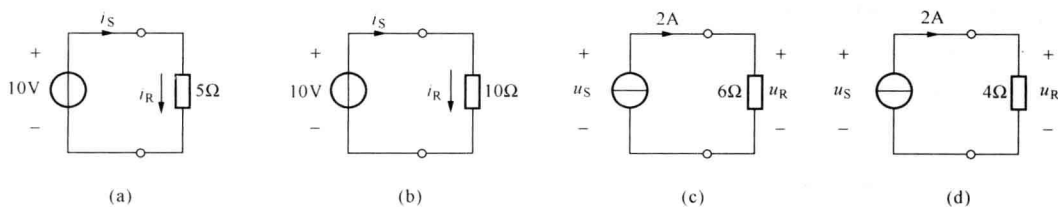


图 1-19 [例 1-7] 图

解 (1) 因 $i_R = \frac{10}{5} = 2(\text{A})$, 故 $i_S = i_R = 2\text{A}$ 。

(2) 因 $i_R = \frac{10}{10} = 1(\text{A})$, 故 $i_S = i_R = 1\text{A}$ 。

(3) 因 $u_R = 6 \times 2 = 12(\text{V})$, 故 $u_S = u_R = 12\text{V}$ 。

(4) 因 $u_R = 4 \times 2 = 8(\text{V})$, 故 $u_S = u_R = 8\text{V}$ 。

可见: 电压源电压“恒定”, 其电流取决于外电路; 电流源电流“恒定”, 其电压取决于外电路。此例中, 电阻元件均为关联参考方向(欧姆定律均为正), 电源均为非关联参考方向。

1.5 受 控 源

在电路理论中, 相对于独立源而言, 还有一类“电源”叫做受控源。

1.5.1 受控源的类型和符号

受控源共有四种类型, 如图 1-20 所示。其中: VCVS 称为电压控电压源, 如图 1-20 (a) 所示; VCCS 称为电压控电流源, 如图 1-20 (b) 所示; CCVS 称为电流控电压源, 如图 1-20 (c) 所示; CCCS 称为电流控电流源, 如图 1-20 (d) 所示。

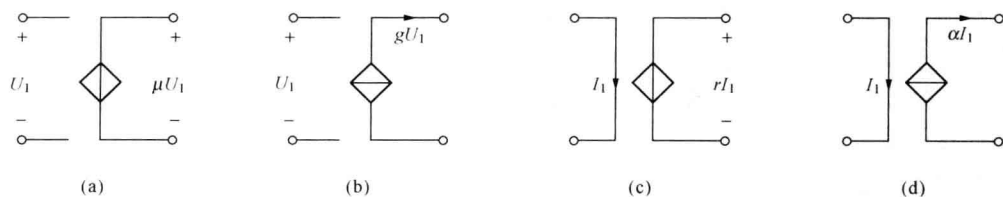


图 1-20 受控源的类型与符号

(a) VCVS; (b) VCCS; (c) CCVS; (d) CCCS

顾名思义,受控源的输出电压或电流要受到另一个电压或电流的控制。受控源的输出电压或电流称为被控制量,如 μU_1 、 $g U_1$ 、 $r I_1$ 和 αI_1 等,而起到控制作用的电压或电流称为控制量,如 U_1 和 I_1 。

1.5.2 受控源的伏安特性

受控源的输出电压或电流(被控制量)受到控制量的控制,一旦控制量确定了,被控制量也就唯一地确定了。因此,在控制量确定以后,受控电压源的伏安特性与理想电压源的相同,即电压“恒定”,电流“任意”。受控电流源的伏安特性与理想电流源的相同,即电流“恒定”,电压“任意”。

电路中含有受控源时,被控制量一般就在受控源符号的旁边,而控制量却可能离得较远。由于受控源的存在,增加了电路分析计算的复杂性。

【例 1-8】 试求图 1-21 中的电压 U 。

解 注意到该电路中含有受控源,需求的电压在右侧回路中,有

$$U = 2 \times 2u_1$$

u_1 为控制量,在左侧回路中。求解上式需补充方程

$$u_1 = 5 \times 3 = 15(\text{V})$$

解得

$$U = 2 \times 2 \times 15 = 60(\text{V})$$

在此题中,受控源是当做电源看待的。

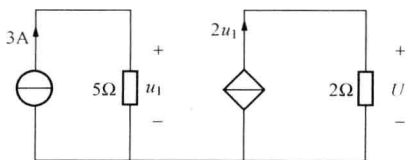


图 1-21 [例 1-8] 图

1.6 基尔霍夫定律

在对各种电路进行分析时,不仅要考虑元件的伏安特性,还要考虑电路中各元件的具体连接情况对电路的影响。这就要用到电路结构的约束,即基尔霍夫定律。

1.6.1 几个基本概念

1. 支路

流过同一电流的多个元件构成的路径称为支路。图 1-22 电路中共有 5 条支路。如从 a 点经元件 1 到 c 点是一条支路,从 a 点经元件 2 到 c 点是第二条支路,从 a 点经元件 3 到 b 点是第三条支路,从 b 点经元件 4 到 c 点是第四条支路,从 b 点经元件 5 和 6 到 c 点是第五条支路。

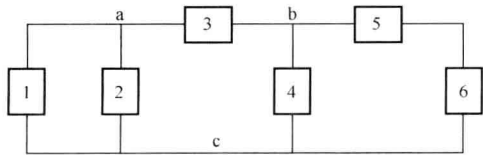


图 1-22 电路结构示意图

2. 节点

电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。如图 1-22 所示电路中共有 a、b (三条支路的连接点) 和 c (四条支路的连接点) 三个节点。元件 5 和 6 之间的连接点不是节点。

3. 回路

由多条支路构成的闭合路径称为回路。如 $a \rightarrow 3 \rightarrow b \rightarrow 4 \rightarrow c \rightarrow 2 \rightarrow a$ 是一个回路。该电路共有 6 个回路。

4. 网孔

网孔是内部不含支路的回路。如 $a \rightarrow 2 \rightarrow c \rightarrow 1 \rightarrow a$ 是一个网孔。一般网孔都比较直观, 该电路只有 3 个网孔。

1.6.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律由基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律两条定律组成。

(1) 基尔霍夫电压定律 (KVL)。

KVL 指出, 在任意时刻, 对电路的任一回路中的所有电压的代数和恒为零。即

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \quad (1-7)$$

如图 1-23 所示电路 (部分电路), 按顺时针方向有

$$U_2 - U_3 - U_4 = 0$$

或按逆时针方向有

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

经比较可知, 两式是等价的。也就是说, 列 KVL 方程可以任意确定绕行方向。为了避免使用代数和, 可以改变方程的列写方法。

KVL 方程的另一种表达式为

$$\sum U_{升} = \sum U_{降} \quad (1-8)$$

针对图 1-23 电路有

$$U_2 = U_3 + U_4$$

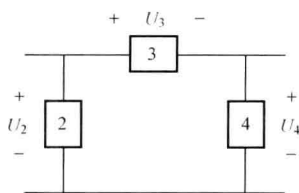


图 1-23 电压定律

(2) 基尔霍夫电流定律 (KCL)。KCL 指出, 在任意时刻, 对流入任一节点的所有电流的代数和恒为零。即

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (1-9)$$

如图 1-24 所示电路 (部分电路), 设流入为正。针对 a 点有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

或设流出为正, 有

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

两式仍然是等价的。同理为避免使用代数和, 则

$$\sum I_{流入} = \sum I_{流出} \quad (1-10)$$

针对 a、b 两点分别有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_3 = I_4 + I_5$$

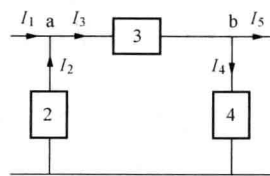


图 1-24 电流定律

【例 1-9】 电路如图 1-25 所示, 试列写全部的 KCL 和 KVL 方程。

解 列 KCL 方程

a 节点

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

b 节点

$$I_3 + I_4 - I_6 = 0$$

c 节点

$$I_2 + I_5 + I_6 = 0$$

d 节点

$$I_1 + I_4 + I_5 = 0$$

列 KVL 方程

abda 回路 (网孔)

$$U_3 + U_4 - U_5 - U_2 = 0$$

acba 回路 (网孔)

$$U_6 - U_7 - U_4 = 0$$

bcd b 回路 (网孔)

$$U_7 - U_6 - U_1 + U_5 = 0$$

acda 回路

$$U_8 - U_6 - U_1 - U_2 + U_3 = 0$$

等等, 共可以列出 7 个 KVL 方程。实际解题时应根据需要列出这些方程中的几个即可。

基尔霍夫定律的推广:

(1) 虚拟回路的 KVL。

如图 1-26 所示即为虚拟回路。借助于端钮电压仍然可以列写 KVL 方程, 有

$$U_2 - U_3 - U_4 = 0$$

或

$$U_4 = U_2 - U_3$$

有时利用虚拟回路列方程是很方便的。

(2) 广义节点的 KCL。

如图 1-27 所示为部分电路, 用一个封闭面将电路中的一部分圈起来, 将其看作一个节点, 此节点称为广义节点。

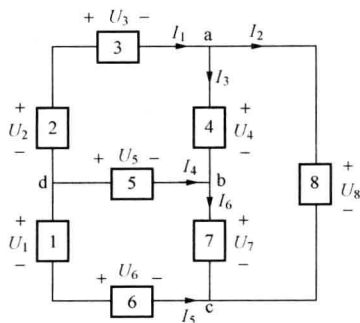


图 1-25 [例 1-9] 图

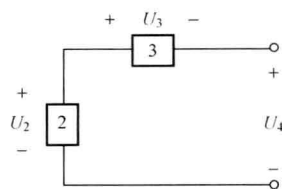


图 1-26 虚拟回路

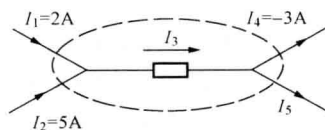


图 1-27 广义节点

不考虑广义节点时, 为求得电流 I_5 , 需列两个方程, 对左节点有

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2 + 5 = 7(\text{A})$$

对右节点有