

高等学校教学用书

电路理论

孙玉琴 王安娜 主编

DIANLU
LILUN

冶金工业出版社

TM13
300

要 参 考 书

高等学校教学用书

电 路 理 论

孙玉琴 王安娜 主编

附赠 40 分钟自测题及补题

本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

北 京

冶金工业出版社

2003

内 容 提 要

全书共分7章,主要内容为电路模型和基本定律,线性电阻网络分析,线性动态电路暂态过程的时域分析,正弦电路的稳态分析,谐振电路与周期非正弦稳态电路,非线性电路,OrCAD/PSpice在电路理论分析中的应用。

本书符合教育部颁布的《电路课程教学基本要求》,内容紧密联系实际,引入了现代电路理论新技术知识。每章后习题紧扣所讲内容,题型归纳清楚,书后附有习题答案。

本书可作为高等院校计算机、电子信息等专业本、专科教材,亦可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论/孙玉琴,王安娜主编. —北京:冶金工业出版社,2003.8
高等学校教学用书
ISBN 7-5024-3293-0

I. 电… II. ①孙…②王… III. 电路理论-高等学校-教材 IV. TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第042465号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)
责任编辑 俞跃春 美术编辑 王耀忠 责任校对 符燕蓉 责任印制 李玉山
北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2003年8月第1版,2003年8月第1次印刷
787mm×1092mm 1/16; 17.25印张; 418千字; 269页; 1-4000册
30.00元
冶金工业出版社发行部 电话:(010) 64044283 传真:(010) 64027893
冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010) 65289081
(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本教材内容符合教育部颁布的《电路课程教学基本要求》，为东北大学“十五”规划教材。

《电路理论》是电类专业学生的一门技术基础课，也是一门必修课。目前，适合计算机、电子信息等专业的学时比较少的电路理论教材，为数不多，所以有必要编写一本适用于此类专业的电路理论教材。作者所在教研室曾多次编写了电路理论课程的教材，并在教学中不断完善、更新，取得了较好的效果。在编写过程中，我们吸取了上述有关教材的优点，并结合编者几十年的教学经验，根据专业的特点和实际，力求做到内容选取适当，突出电路中的基本概念、定理、定律；层次清晰；系统性强。同时，为紧密联系专业实际，跟踪学科前沿最新理论，引入 PSpice 在电路理论分析中应用的内容，以开阔学生的视野，保持教材的先进性。

本教材在习题选取安排上，力求紧扣所讲内容，做到由浅入深，注重习题的典型性、题型的归纳和分析。

本书由东北大学孙玉琴教授、王安娜教授担任主编。参加编写的还有贺立红副教授、吴建华副教授、李华副教授和王延明讲师。

由于编者水平所限，书中不妥之处，敬请读者、专家和同行们批评指正。

编 者
2003 年 6 月

目 录

1 电路模型和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流、电压、功率	2
1.3 电阻元件	5
1.4 独立电源	7
1.5 受控电源	8
1.6 基尔霍夫定律	9
1.7 电阻的连接及其等效变换	13
1.8 电源的连接及其等效变换	24
习题	30
2 线性电阻网络分析	33
2.1 支路电流法	33
2.2 回路电流法	36
2.3 节点电压法	40
2.4 替代原理	45
2.5 齐性定理和迭加定理	46
2.6 等效电源定理	50
习题	56
3 线性动态电路暂态过程的时域分析	60
3.1 动态元件	60
3.2 动态电路的暂态过程和初始条件的确定	65
3.3 一阶电路的零输入响应	68
3.4 一阶电路的零状态响应	74
3.5 解一阶电路的三要素法	77
3.6 一阶电路的阶跃响应	83
3.7 一阶电路的冲激响应	87
3.8 二阶电路的零输入响应	91
3.9 二阶电路的阶跃响应	99
习题	102
4 正弦电路的稳态分析	106

4.1 正弦量的基本概念	106
4.2 正弦量的相量表示法	110
4.3 电路基本定律的相量形式	113
4.4 复阻抗、复导纳及其等效变换	119
4.5 正弦稳态电路的功率	125
4.6 正弦稳态电路的计算	130
4.7 三相电路简述	137
4.8 含耦合电感电路的分析与计算	149
4.9 双口网络	159
习题	174
5 谐振电路与周期非正弦稳态电路	182
5.1 串联谐振电路	182
5.2 并联谐振电路	187
5.3 非正弦周期电流和电压	190
5.4 周期函数分解为傅里叶级数	192
5.5 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	198
5.6 周期非正弦稳态电路的分析与计算	200
5.7 滤波器的概念	204
5.8 傅里叶级数的指数形式	207
5.9 傅里叶积分和傅里叶变换	211
习题	213
6 非线性电路	218
6.1 非线性元件的特性	218
6.2 非线性电阻电路的图解分析法	220
6.3 非线性电阻电路的数值分析法	225
6.4 非线性电阻电路的小信号分析法	229
6.5 非线性电路的动态方程	233
习题	235
7 OrCAD/PSpice 在电路理论分析中的应用	237
7.1 概述	237
7.2 电路原理图的绘制	239
7.3 电路的仿真与分析	247
7.4 应用举例	258
习题答案	263
参考文献	269

1 电路模型和基本定律

内容提要:本章在物理电学基础上,引出了电流参考方向和电压参考极性(参考方向)的概念,并进一步研究电路的基本定律和简单直流电路的分析计算。

本章重点:充分理解和掌握电流的参考方向与电压的参考极性两个概念;明确电阻元件的电压与电流间的关系;熟练掌握基本定律,并做到灵活运用。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

电路是电流的通路。它是许多电气元件(或电气设备)为实现能量的传输和转换,或为了实现信息传递和处理而连接成的整体。在现代生产和生活中,随时随地可以见到电路。例如,纵横几百公里的电网系统和厂矿中各种电气控制系统等,它们的功能是实现电能的传输和转换;家用电器中的收音机、电视机,则主要是完成信号的传递和处理。总之,实际的电路是由各种电路器件组成的。按照它们在电路中所起的作用,这些器件可分为电源、负载和传输控制器件三大类。

(1) 电源。它是提供电能或发出电信号的设备,把其他形式的能量转换成电能,或把电能转换成另一种形式的电能或电信号。例如,电池把化学能转换成电能,发电机把机械能转换成电能,信号发生器则是把电能转换成一定的电信号。

(2) 负载。它是用电或接收电信号的设备,把电能转换成其他形式的能量。例如,白炽灯把电能转换成光能和热能,电动机把电能转换成机械能。

(3) 传输控制器件。它是电源和负载中间的连接部分。包括连接导线、控制电器(如开关)和保护电器(如熔断器)等。

1.1.2 电路模型

在电路分析中,为了研究问题方便,常把一个实际电路用它的电路模型来代替。图 1-1 就是手电筒的电路模型(称为电路图)。其中 R 代表小灯泡,电压源 U_s 和内阻 R_s 代表干电池,开关 K 为手电筒的开关。

组成电路模型的元件,都是能反映实际电路中的元件主要物理特征的理想元件,由于电路中实际元件在工作过程中和电磁现象有关,因此有三种最基本的无源理想电路元件:表示消耗电能的理想电阻元件 R ;表示贮存电场能的无源理想电容元件 C ;表示贮存磁场能的理想电感元件 L 。

对电路进行分析,主要是为了确定电路的工作状态,即各个元件上的工作电压与电流。电压、电流的大小和方向都不随时间变化的电路叫直流电路;电流、电压的大小和方向都随时间变化的电路叫变动电流电路。电路元件有多种,具有两个端钮的叫做二端元件,具有两

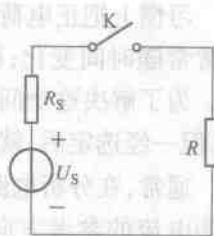


图 1-1 手电筒
电路模型

个以上端钮的叫做多端元件。电路参数又有线性与非线性之分。凡元件的参数不随其电流或电压的数值而变动的,属于线性元件,否则称为非线性元件。完全由线性元件连接起来的电路称为线性电路,否则便是非线性电路。工程上遇到的电路大部分可以作为线性电路来分析,即使是非线性电路,有时也可以用线性化的方法来处理。本书主要研究线性电路。

1.2 电流、电压、功率

描述电路性能的物理量可分为基本变量和复合变量两类。电流、电压是电路分析中最常用的两个基本变量,有时也用电荷、磁通(或磁链)作基本变量;复合变量包括功率和能量。一般它们都是时间的函数。

1.2.1 电流

电流是由电荷有规则的定向运动形成的。在金属导体中,电流是自由电子有规则地运动形成的;在半导体中,电流是由半导体中自由电子和空穴有规则地运动形成的;在电解质溶液中,电流则是正、负离子有规则地运动形成的。电流在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,定义为电流强度,即

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

式中, q 表示电荷量; dq 为微小的电荷量; dt 为极短的时间。

如果电流的大小和方向随时间变化,则称之为交变电流,简称交流,常用小写字母 i 表示。如果电流的大小和方向不随时间而变化,则这种电流称为恒定电流,常用大写字母 I 表示,所以,式(1-1a)可写为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1b)$$

式中, Q 为在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

在国际单位制中,电流的单位是安培,简称安,用 A 表示。常用的单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)等。

$$1kA = 10^3 A \quad 1A = 10^3 mA = 10^6 \mu A$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。但在具体电路中,电流的实际方向常常随时间变化;即使不随时间变化,某段电路中的电流的实际方向有时也难以预先断定。为了解决这个问题,我们引用了一个重要的概念——参考方向。参考方向可以任意选定,但一经选定后,就不要随意改变。

通常,在分析电路时,先指定某一方向为电流的参考方向,如图 1-2 中实线箭头所示。如果电流的实际方向与参考方向(虚线箭头)一致,则电流 i 为正值($i > 0$),如图 1-2(a)所示;如果电流的实际方向与参考方向相反,则电流 i 为负值($i < 0$),如图 1-2(b)所示。这样,在指定的电流参考方向下,电流值的正或负,

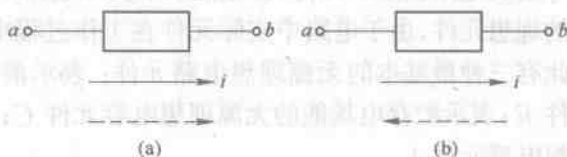


图 1-2 电流的参考方向

(a) $i > 0$; (b) $i < 0$

—— 参考方向
- - - 实际方向

就反映了电流的实际方向。显然,在未指定参考方向的情况下电流值的正或负是没有意义的。

电流的参考方向除了可以用箭头表示外,也可以用双下标表示。如图 1-2 中电流参考方向可表示为 i_{ab} 。

1.2.2 电压与电位

电压是表征电场性质的物理量之一,它反映了电场力移动电荷做功的本领。具体来讲,电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功称为 a 、 b 两点间的电压(或称电位差)。电压用 u 表示,即

$$u = \frac{dw}{dq} \tag{1-2a}$$

式中, dq 为由 a 点移到 b 点的电量; dw 为移动过程中电荷 dq 所获得或失去的能量。若电压 u 的大小和极性都随时间变化,则称之为交流电压。如果电压的大小和极性都不随时间变化,这样的电压就叫做直流电压,用符号 U 表示,即

$$U = \frac{W}{Q} \tag{1-2b}$$

如果正电荷由 a 点移到 b 点后获得能量,则 a 点为低电位,即为负极, b 点为高电位,即为正极。如果正电荷由 a 点移到 b 点后失去能量,则 a 点为高电位, b 点为低电位。正极指向负极的方向称电压降,负极指向正极的方向称电压升,如图 1-3 所示。

与为电流指定参考方向一样,也需要为电压指定参考方向(或参考极性),而电压实际方向要由其参考方向和电压数值的正、负一起判断。

图 1-4(a)电压 U 参考方向是从 a 指向 b ,若 $U = -3V$,说明电压实际方向与参考方向相反,即由 b 指向 a ;若 $U = 3V$,说明实际方向与参考方向一致,参考方向也常用“+”、“-”极性或双下标表示,如图 1-4(b),表示电压参考方向是由“+”极性指向“-”极性,也可用 U_{ab} 表示此参考方向。

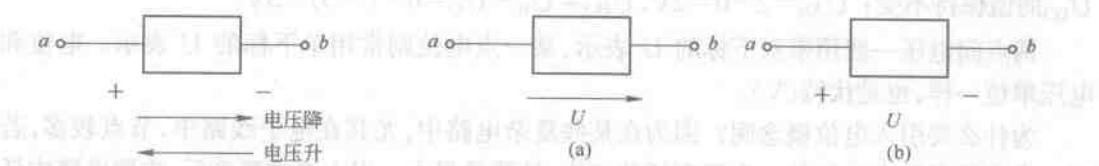


图 1-3 电压的升降

图 1-4 电压参考方向

分析电路时,电流和电压都要假设参考方向,而且可以任意假设,互不相关。但为了分析方便,我们常采用关联参考方向,即电压参考方向与电流参考方向一致,也就是电流从电压标“+”号的端钮流入,如图 1-5(a)所示。

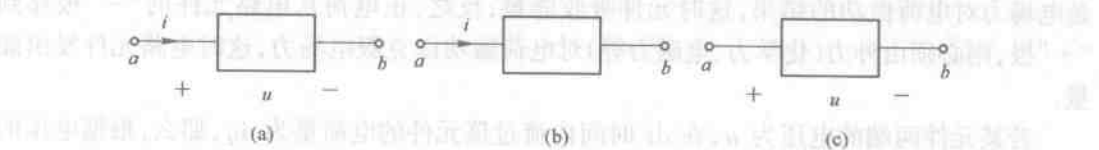


图 1-5 关联参考方向

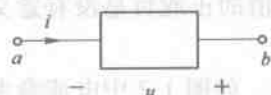


图 1-6 非关联参考方向

在采用关联参考方向的定义后,电路图上只需标出电流的参考方向或电压的参考极性中的任意一种即可,如图 1-5(b)或(c)所示。

如果电流、电压的参考方向相反,则为非关联参考方向,如图 1-6 所示。

若取电路中某一点为参考点,则任一点到参考点间的电压称为该点的电位,如图 1-7 所示。设 O 点为参考点,则 A 点到 O 点间电压 U_{AO} 称为 A 点电位,用 U_A 表示,即

$$U_A = U_{AO}$$

电位的参考点可任取,计算电路时常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。在一个连通的系统中只能选一个参考点。由参考点的定义可知,参考点的电位为零。

电路中任意两点,如图 1-7 中的 A, B , 由定义得

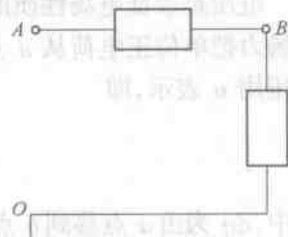


图 1-7 电位

$$U_A = U_{AO} = \frac{W_{AO}}{Q} = \frac{W_{AB} + W_{BO}}{Q} = U_{AB} + U_B$$

$$U_{AB} = U_A - U_B \quad (1-3)$$

式(1-3)说明,电路中任意两点间的电压等于这两点的电位之差。所以电压和电位一般可以认为意义相同。从式(1-3)还可看出,当 A 点电位高于 B 点电位时, U_{AB} 为正值,反之 U_{AB} 为负值,说明两点间电压的实际方向是从高电位指向低电位,或说电压的实际方向就是电位降落的方向。

应该注意,电路中参考点选定之后,各点电位是一个定值,若参考点改变,则各点电位随之改变,而任意两点电压不变。即任意一点的电位与参考点选择有关,任意两点间电压则与参考点的选择无关。例如图 1-7 中,若选 O 点为参考点($U_O = 0$),有 $U_A = 5V$, $U_B = 3V$ 时, $U_{AB} = 2V$, $U_{BO} = 3V$; 而改选 B 点为参考点时, $U_B = 0$, 则 $U_A = 2V$, $U_O = -3V$, 但 U_{AB} , U_{BO} 的值保持不变: $U_{AB} = 2 - 0 = 2V$, $U_{BO} = U_B - U_O = 0 - (-3) = 3V$ 。

两点间电压一般用带双下标的 U 表示,某一点电位则常用单下标的 U 表示。电位和电压单位一样,也是伏特(V)。

为什么要引入电位概念呢?因为在某些复杂电路中,尤其在电子线路中,节点较多,若逐一求出任意两点电压是一个很麻烦的工作,计算量很大。引入电位概念后,先取电路中任一点为参考点,这样只要求出各点电位,任意两点间电压很容易求出,便于很快分析出各元件的工作状态。另外,利用电位的概念还可以简化电路图的画法。

1.2.3 功率和能量

功率与电压和电流密切相关。当正电荷从电路元件上电压的“+”极经元件移到“-”极是电场力对电荷做功的结果,这时元件吸收能量;反之,正电荷从电路元件的“-”极移到“+”极,则必须由外力(化学力、电磁力等)对电荷做功以克服电场力,这时电路元件发出能量。

若某元件两端的电压为 u , 在 dt 时间内流过该元件的电荷量为 dq , 那么,根据电压的定义式(1-2a),电场力做的功 $dW(t) = u(t)dq(t)$ 。

在电流与电压为关联参考方向的情况下(这时,正电荷从电压“+”极移到“-”),由式(1-2a)可得在 dt 时间内电场力所做的功,即该元件吸收的能量为

$$dw(t) = u(t)i(t)dt \quad (1-4)$$

对式(1-4)从 t_0 (计时起点)到 t 积分,可求得从 t_0 到 t 的时间内元件吸收的能量为

$$\int_{w(t_0)}^{w(t)} dw = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi \quad (1-5)$$

式中,为了避免积分上限 t 与积分变量 t 相混淆,将积分变量换为 ξ 。

能量对时间的变化率称为电功率,用 $p(t)$ 或 P 表示。

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = u(t)i(t) \text{ 或 } P = \frac{W}{t} = UI \quad (1-6)$$

在国际单位制中,电流单位为安培(A),电压单位为伏特(V),功率单位则为瓦特(W),简称瓦。

根据电路元件电压、电流参考方向及所求出的功率的正负来确定该元件是吸收还是发出功率,是一个很关键的问题。需要注意的是,式(1-6)是在电压、电流为关联参考方向下推得的。如果 $p > 0$,表示元件吸收功率;如果 $p < 0$,表示元件吸收的功率为负值,实际上它将发出功率。如果电压、电流为非关联参考方向,则用 $p = ui$ 计算所得的功率 $p > 0$,表示发出功率;如果 $p < 0$,表示元件发出功率为负值,实际上它将吸收功率。

以上有关功率的讨论,同样也适合于任何一段电路或某一个二端网络,而不仅仅局限于某一个元件。

1.3 电阻元件

在电路理论中,经过科学抽象后,把实际元件用足以反映其主要电磁性质的一些理想元件替代。电路元件有无源元件(电阻、电感、电容)与有源元件(独立电源、受控源)之分,本节介绍无源电阻元件。

线性电阻元件在电路中的图形符号如图 1-8 所示。

如果把线性电阻元件的电压取为纵坐标(或横坐标),电流取为横坐标(或纵坐标),画出电压和电流的关系曲线,这条曲线称为该电阻元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线是通过坐标原点的直线,见图 1-9,元件上电压与元件中电流成正比。

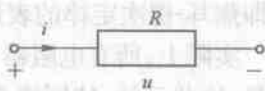


图 1-8 线性电阻符号

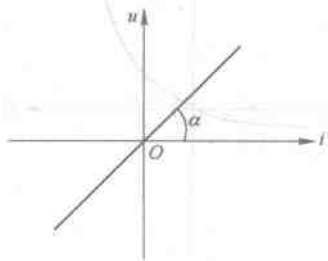


图 1-9 伏安特性

线性电阻元件是二端理想元件,在任何时刻,它两端的电压与其电流都服从欧姆定律。在电压和电流的关联方向下,欧姆定律可表示为

$$u = Ri \quad (1-7)$$

式中, R 为元件的电阻,它是联系电阻元件上电压和电流的一个参数。从图 1-9 中看出,电阻值可由

$$R = \frac{u}{i} = \tan \alpha$$

来确定,其中 α 乃伏安特性曲线与电流轴之间的夹角。可见,线性电阻元件的电阻是一个与电压 u 、电流 i 无关的常数。

令 $G = \frac{1}{R}$, 则式(1-7)变成

$$i = Gu$$

式中, G 为电阻元件的电导。

电阻的单位为欧姆 Ω , 简称欧; 电导的单位为西门子 S 。

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反, 如

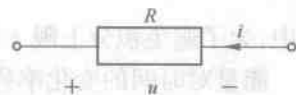


图 1-10。

$$u = - Ri$$

图 1-10 非关联参考方向

或

$$i = - Gu$$

所以, 欧姆定律的公式必须和参考方向配套使用。

由式(1-7)可知, 任何时刻线性电阻元件的电压(或电流)完全由同一时刻的电流(或电压)所决定, 而与该时刻以前的电流(或电压)的值无关。

在电压和电流的关联方向下, 任何时刻线性电阻元件吸取的电功率

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2$$

电阻 R 、电导 G 是正实数, 故功率 p 为非负值。功率既然不可能为负值, 说明任何时刻电阻元件都是吸收电能, 并将其全部转换成其他非电能量消耗掉或作为其他用途。所以线性电阻元件($R > 0$)不仅是无源元件, 并且还是耗能元件。

如电阻元件把吸收的电能转换成热能, 当热能的单位用焦耳时, 电阻元件发出的热量

$$Q = W$$

应用焦耳与卡之间的换算, 从 t_0 到 t 时间内, 电阻发出的热量为

$$Q = 0.239 W = 0.239 \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi$$

此即焦耳-楞次定律的表达式。

实际上, 所有电阻器、电灯、电炉等元件, 他们的伏安特性曲线或多或少都是非线性的。但是, 这些元件, 特别像金属膜电阻器、线性电阻器等, 在一定工作电流范围内, 它们的伏安特性近似为一直线, 所以可以作为线性电阻元件来对待。

与线性电阻元件不同, 非线性电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线, 元件的电阻将随其电压或电流的改变而改变。图 1-11 给出某二极管的伏安特性曲线。因为二极管是一个非线性电阻元件, 它的特性不再是一条通过原点的直线。其次应该指出, 像二极管这种非线性电阻元件的伏安特性还与其电压或电流的方向有关。当二极管两端施加的电压方向不同时, 流过它的电流完全不同。而前面所讨论

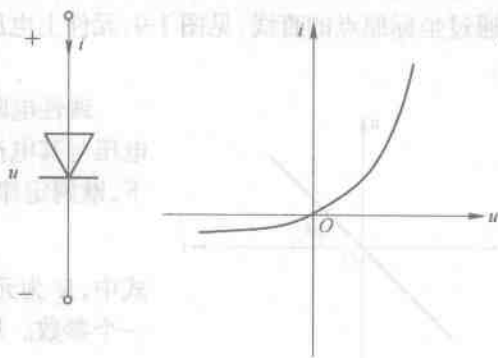


图 1-11 非线性电阻元件及伏安特性

的线性电阻元件的特性则与元件电压或电流的方向无关,因此,线性电阻是双向性的元件。

如果电阻元件的伏安特性不随时间改变,则称为非时变电阻元件;伏安特性随时间改变的,称为时变电阻元件。本书不讨论时变元件。

下面为叙述方便,把线性电阻元件简称为电阻。这样,“电阻”这个术语以及它相应的符号 R ,一方面表示一个电阻元件,另一方面亦表示这个元件的参数。

1.4 独立电源

电源是有源的电路元件,它是各种电能(电功率)产生器的理想化模型。电源可分为独立电源和非独立电源(受控源)两类。独立的理想化电源有理想电压源和理想电流源,简称为电压源和电流源。

1.4.1 电压源

电压源为一理想的二端元件。电压源输出的电压为一恒定值或给定的时间函数,与通过它的电流无关,其电路模型如图 1-12(a)和(b)所示。图 1-12(a)的模型可表示直流电压源或交流电压源,而图 1-12(b)只能表示直流电压源。其中长的一端为“+”极,短的一端为“-”极。图中的“+”、“-”均表示电压源的参考极性。

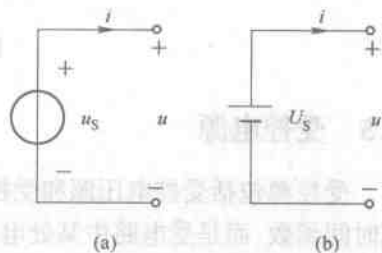


图 1-12 电压源符号

如果 u_S 是直流电压源 U_S (U_S 为常数),则电压源端口电压 u 与流过它的电流 i 的关系(即伏安特性)是一条位于 $u = U_S$ 且平行于电流轴的直线,如图 1-13(a)所示。如果 u_S 是随时间变化的,则平行于电流轴的直线也随之改变其位置,如图 1-13(b)所示。

如果电压源的电压 u_S 恒等于零,则其伏安特性与电流轴重合,该电压源相当于短路。

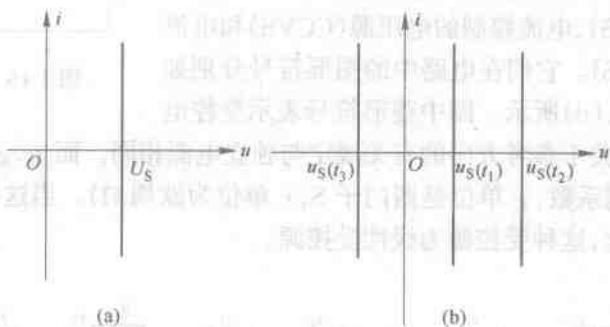


图 1-13 电压源的伏安特性

1.4.2 电流源

电流源的输出电流为一恒定值或给定的时间函数,而与其端口电压无关。电路模型如图 1-14 所示。箭头表示电流源电流的参考方向。

如果 i_S 是直流电流源 I_S (I_S 为常数),则伏安特性如图 1-15(a)所示。如果 i_S 是随时间变化的,其伏安特性如图 1-15(b)所示。如果 i_S 恒等于零,则其伏安特性与电压轴相重合,该电流源相当于开路。

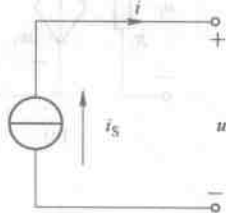


图 1-14 电流源符号



图 1-15 电流源的伏安特性

1.5 受控电源

受控源包括受控电压源和受控电流源,但受控电压源和受控电流源都不是给定的常数或时间函数,而是受电路中某处电压或电流控制的,因而受控源又称作非独立电源。例如,电子管输出的交变电压受输入交变电压的控制,晶体管集电极电流受基极电流的控制。这类电器元件的工作特性就可以用受控源来描述。

图 1-16 就是一个含受控电流源的直流电路,其中受控电源参数 $0.98I$ 叫做受控量, I 称为控制量,这类电源叫电流控制的电流源(简称为 CCCS)。控制量可以是电路中某处电压或电流,受控电源可以是电压源或电流源,所以受控电源共有四种:电压控制的电压源(VCVS)、电压控制的电流源(VCCS)、电流控制的电压源(CCVS)和电流控制的电流源(CCCS)。它们在电路中的图形符号分别如图 1-17(a),(b),(c),(d)所示。图中菱形符号表示受控电压源或受控电流源,关于参考方向的有关规定与独立电源相同。而 μ, g, r 和 β 叫做控制系数(其中 μ, β 为比例系数, g 单位是西门子 S, r 单位为欧姆 Ω)。当这些系数为常数时,受控量和控制量成正比,这种受控源为线性受控源。

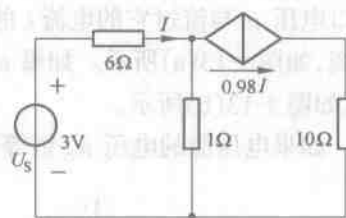


图 1-16 含受控源电路

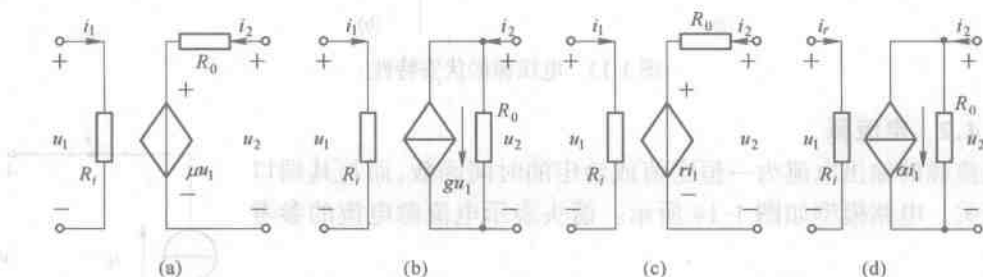


图 1-17 受控源的模型

必须指出,受控源与独立电源所不同的是,独立电源在电路中起激励作用,因为有了它,才能在电路中产生电压和电流;而受控源则不同,它的电压源或电流源反而受电路中其他支路电压或支路电流的控制。当这些控制量为零时,受控的电压源或电流源也就为零。因此,它不过是用来反映电路中某处的电压或电流,能控制另一处的电压或电流这一现象而已。

1.6 基尔霍夫定律

在电路理论中,我们把元件的伏安关系称为元件的约束方程,这是元件的电压、电流必须遵守的规律,它表征了元件本身的性质。当各元件连接成一个电路以后,电路中的电压、电流除了必须满足元件本身的约束方程以外,还必须同时满足电路结构的约束。这种约束关系体现为基尔霍夫的两个定律,即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。基尔霍夫定律是任何集总参数都适用的基本定律。

电路若按对元件参数的处理不同,可分为集总参数电路和分布参数电路。若电路尺寸和电路工作频率对应的波长比很小,这时电压、电流都看作只是时间的函数。实际电路元件可用一个或几个理想元件的组合集总起来去表示,不会产生较大的误差,这类电路叫集总参数电路,简称集总电路。而若电路尺寸和电路工作频率所对应的波长相比不可忽略时,电压和电流即是时间的函数,又是空间的函数,也就是必须要考虑元件参数的分布性,这种电路叫分布参数电路。本书研究的均为集总参数电路。

1.6.1 电路中的几个专用名词

(1) 支路。一般地说,可以把电路中一个二端元件当做电路的一条支路。但为了分析和计算方便,往往把电路中通过同一个电流的每个分支叫支路。根据这种理解,在图 1-18 所示电路中, $a1b$ 、 $a2b$ 、 $a3b$ 都是支路。支路 $a1b$ 和 $a2b$ 中含有电源,称为含源支路;支路 $a3b$ 没有电源,称为无源支路。

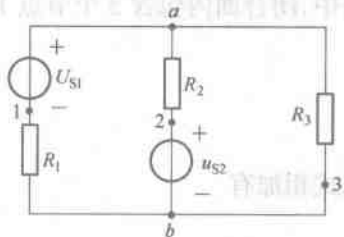


图 1-18 支路、节点、回路和网孔

(2) 节点。一般地说,支路的连接点称为节点。但传统电路理论以分支作为支路,把三条和三条以上支路的连接点叫做节点。这样图 1-18 电路图中则只含两个节点,即节点 a 和节点 b 。

(3) 回路。电路中的任一闭合路径称为回路,如图 1-18 中 $a3b2a$ 、 $a3b1a$ 都是回路,这个电路共有 3 个回路。

(4) 网孔。内部不包含支路的回路称为网孔。在图 1-18 中 $a3b2a$ 和 $a2b1a$ 都是网孔。

1.6.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law),缩写为 KCL,表述为:

在集总电路中,任何时刻流入或流出任一节点的所有支路电流的代数和等于零。

例如如图 1-19(a)所示的某电路的部分电路,对节点 a 应用 KCL,在给定的参考方向下,

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

或写成

$$\sum i = 0$$

(1-8)

此式说明,任何时刻,流入任意节点的支路电流之和必定等于流出该节点的支路电流之和。

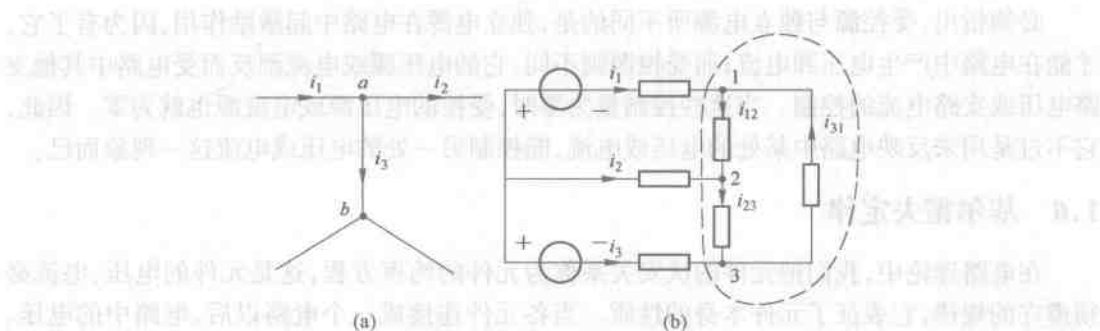


图 1-19 KCL 的应用

若流出节点的电流前面取“+”号,则流入节点的电流前面取“-”号。

这里应指出,KCL 中是按电流的参考方向来判断是流出还是流入节点的,式中的正、负号仅由参考方向而定,与电流的实际方向无关。总之,以后应用 KCL 时,均按参考方向来列方程,例如图 1-19(a)中,各电流的参考方向已指定,并已知 $i_1 = -5\text{A}$, $i_3 = 3\text{A}$,则按 KCL 有

$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad \text{则} \quad i_2 = i_1 - i_3 = -5 - 3 = -8\text{A}$$

从 i_1, i_2, i_3 的正、负和它们的参考方向可看出, i_1, i_3 的实际方向是流出节点, i_2 的实际方向是流入节点,且流入和流出 a 点的电流之和约为 8A 。

KCL 不但适用于节点,对包围几个节点的闭合面也是适用的。例如图 1-19(b)所示电路中,闭合面内包含 3 个节点 1、2 和 3,在这些节点处分别有

$$i_1 = i_{12} - i_{31}$$

$$i_2 = i_{23} - i_{12}$$

$$i_3 = i_{31} - i_{23}$$

三式相加有

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

或

$$\sum i = 0$$

可见,通过任一闭合面的各支路电流代数总和总是等于零。或说,流出闭合面的电流等于流入闭合面的电流,这便是电流的连续性。所以基尔霍夫电流定律(也称基尔霍夫第一定律)是电流连续性的体现。

1.6.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kinchhoff's Voltage Law),缩写为 KVL,表述为:

在集总电路中,任何时刻,沿任一回路所有支路电压的代数和等于零。

$$\sum u = 0 \quad (1-9)$$

在写上式时,首先要指定一个回路绕行的方向。凡电压参考方向与回路绕行方向一致者,在式中该电压前面取“+”号;电压参考方向与回路绕行方向相反者,则电压前面取“-”号。

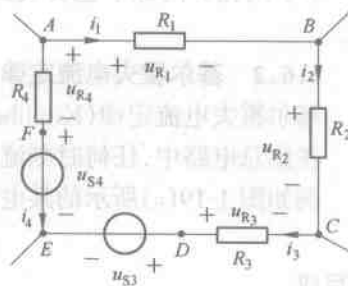


图 1-20 KVL 的应用

图 1-20 给出某电路的一个回路,取绕行方向为顺时针

针,按给定各元件电压的参考方向,式(1-9)可写为

$$u_{R1} + u_{R2} - u_{R3} + u_{S3} - u_{S4} + u_{R4} = 0 \quad (1-10)$$

或

$$u_{R1} + u_{R2} - u_{R3} + u_{S3} = u_{R4} + u_{S4} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明,电路中两点间电压(如 A 和 E)的值是确定的,不论沿哪条路径,两点间电压值都是相同的。所以基尔霍夫电压定律是电压与路径无关这一性质的体现。

若回路中的有源元件仅为电压源,无源元件均为电阻,把电阻元件的电压和电流关系代入式(1-10),整理后可得出

$$R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3 - R_4 i_4 = -u_{S3} + u_{S4}$$

或写成

$$\sum R_K i_K = \sum u_{SK} \quad (1-12)$$

式(1-12)指出:沿任一回路绕行一周,各电阻上电压的代数和等于电压源的代数和。其中, R 中电流参考方向与回路绕行方向一致者,该项电压前取“+”号,相反则取“-”号;电压源的电压参考方向与绕行方向一致者,其前面取“+”号,相反则取“-”号。

如图 1-21 的线性电阻电路,若设回路绕行方向与电流参考方向相同,按式(1-11)有

$$R_1 i + R_2 i = u_{S1}$$

图 1-21 KVL 的应用

或

$$i = \frac{u_{S1}}{R_1 + R_2}$$

上式为单回路欧姆定律表达式,它又可写为

$$u_2 = u_{S1} - R_1 i$$

上式为 a, b 左侧含源支路的端压、电流关系式,即 KVL 也适用于某一段电路。

KCL 规定了电路中任一节点处电流的约束关系,而 KVL 规定了电路中任一回路内电压的约束关系。这两个定律仅与元件的连接有关,而与元件本身无关。不论元件是线性还是非线性、时变还是非时变,只要是集总电路,KCL 和 KVL 总是成立的。

电路的问题大体上分两类:一类是给定电路的结构、元件及其参数值,求电路中的电压、电流等,这类问题称为电路分析(或称网络分析);另一类是给定电路输入端和输出端的关系,需要确定电路结构、元件及其参数值,这类问题称为电路综合(或称网络综合)。本书探讨的是电路分析,而在电路分析中,各元件电压和电流的约束关系以及 KCL 和 KVL 是研究问题的理论根据。

例 1-1 用 KCL 和 KVL 求图 1-22 中各元件电流和电压。

解 由 KCL,对节点 b: $I_4 = 4 - (-3) = 7\text{A}$

对节点 a: $I_3 = I_1 + I_2 + I_4$
 $= 2 + (-3) + 7 = 6\text{A}$

或由 c 点: $I_3 = 2 + 4 = 6\text{A}$

$$I_5 = -4\text{A}$$

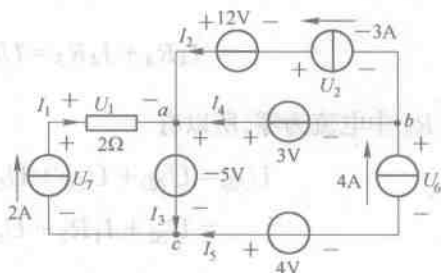


图 1-22 例 1-1