



电路基础

DIANLUJICHU

赵松杰 主编



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

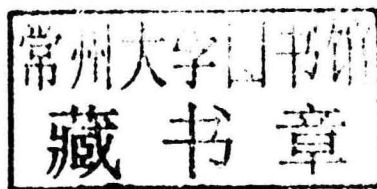


高职高专“十二五”规划教材

电路基础

DIANLUJICHU

马红奎	陈艳华	王秀芹	赵松杰	主 编
		叶进宝	兰 娜	副主编
			张益瑞	参 编



东北师范大学出版社

NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NNUP.COM

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/赵松杰主编. - 长春:东北师范大学出版社,2010.2

ISBN978-7-5602-5984-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 028923 号

版权所有,翻版必究。

内 容 提 要

本书内容包括电路基本概念和基本定律、电路的基本分析方法、电路基本定理和含运放电路的分析、动态电路的暂态分析、单相正弦交流电路和三相正弦交流电路稳态分析、非正弦周期电流电路分析、含耦合电感电路分析以及拉普拉斯变换法分析线性电路等内容。

本书编写中按照精选传统内容、严格把握深度和广度、体现理论基本够用、强化实践能力和创新意识、造就技术实用型人才的思路和原则,在注重保持知识连续性、系统性的基础上,重点提高学生的分析和计算能力,为后续课程打好基础。

本书可作为高职高专院校、成人高校电气工程、电子技术、计算机类专业技术基础课教材,也可作为相关工程技术人员参考用书。

电路基础

赵松杰 主编

出版·发行:东北师范大学出版社

电话:0431-85687213 0431-85691969(传真)

网址:<http://www.nenup.com>

地址:长春市金宝街118号,邮编:130117

经销:北京翀昊翔海有限公司

策划编辑:曹庆丰

封面设计:唐韵设计

责任编辑:李长顺

印刷:北京朝阳展望印刷厂

版本:2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷

开本:16开

印张:11.5

字数:280千字

定价:25.00元

(如有缺页或倒装,本社负责退换)

前 言

《电路基础》是电类专业的专业基础课,具有较强的理论性和实践性。本书针对高职高专院校、成人高校电气工程、电子技术、计算机类专业的教学需求,按照高职高专学生培养目标的要求和电类专业课程衔接的需要,精选传统内容,严格把握深度和广度,体现理论基本够用,强化实践能力和创新意识,造就技术实用型人才的思路 and 原则,力求做到“定位准确、结构合理、注重能力、内容创新、难易适中、通俗易懂”。

本书编写中在注重保持知识的基础性、连贯性、系统性的基础上,压缩、简化理论上的推导,重点提高学生的分析和计算能力,增加了一些实用性较强、与生产实际相近的实例。本书以掌握基本概念、基本定理、分析方法和强化应用为重点,注重为后读课程打好基础。

全书分为9章,内容包括电路基本概念和基本定律、电路基本分析方法、电路基本定理和含运放电路的分析、动态电路的暂态分析、单相正弦交流电路稳态分析、三相正弦交流电路稳态分析、非正弦周期电流电路分析、含耦合电感电路分析、拉普拉斯变换法分析线性电路等内容,课后附有参考答案。建议课程教学60~80学时,内容根据专业教学需要取舍。

本书由邯郸职业技术学院赵松杰担任主编,郑州工业安全职业学院马红奎,唐山科技职业技术学院陈艳华、王秀芹,邯郸职业技术学院兰娜、叶进宝,三门峡职业技术学院张益瑞担任副主编。本书具体编写分工如下:赵松杰编写本书大纲和第7章,并对全书统稿,马红奎编写第4章,陈艳华编写第1、2章,兰娜编写第5、6章,王秀芹编写第3章,叶进宝编写第8章,张益瑞编写第9章。

由于作者水平有限,加之时间仓促,内容难免有疏漏和错误之处,敬请各相关教学单位和读者在使用本书中给予关注并予以反馈,以便修订时及时改进,我们深表感谢。

编 者
2009年11月

目 录

第 1 章 电路基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路和电路模型	(1)
1.2 电流、电压及其参考方向	(3)
1.3 电功率及电能的概念和计算	(5)
1.4 电阻、电感和电容元件	(7)
1.5 独立电源和受控电源	(9)
1.6 基尔霍夫基本定律	(12)
第 2 章 电路的基本分析方法	(17)
2.1 等效变换的概念和电阻的串并联	(17)
2.2 Y 形与 Δ 形电阻电路等效变换	(21)
2.3 电压源与电流源的等效变换	(23)
2.4 受控电源的等效变换及输入电阻的概念	(26)
2.5 支路电流法	(28)
2.6 节点电压法	(30)
2.7 回路电流法	(34)
第 3 章 电路基本定理和含运放电路的分析	(41)
3.1 叠加定理	(41)
3.2 戴维南定理及诺顿定理	(44)
3.3 含运算放大器的电阻电路模型	(48)
3.4 含理想运放电路的分析计算	(50)
第 4 章 动态电路的暂态分析	(56)
4.1 换路定律与初始值的计算	(56)
4.2 一阶电路的零输入响应和零状态响应	(58)
4.3 一阶电路的全响应和三要素分析法	(65)
4.4 一阶电路的阶跃响应及冲击响应	(69)
4.5 二阶电路分析	(72)
第 5 章 正弦交流电路稳态分析	(77)
5.1 正弦交流电的概念	(77)

5.2	正弦交流电的相量表示	(80)
5.3	单一元件伏安关系的相量表示	(81)
5.4	基尔霍夫基本定律相量表示和相量图	(85)
5.5	复阻抗与复导纳的概念及等效变换	(87)
5.6	正弦电路稳态分析	(91)
5.7	正弦稳态电路功率和功率因数的提高	(93)
5.8	谐振电路	(97)
第6章	三相正弦交流电路	(105)
6.1	三相电源和三相电路的概念	(105)
6.2	线电压(电流)与相电压(电流)的关系	(107)
6.3	三相电路的分析计算	(110)
6.4	三相功率的概念和计算	(115)
第7章	非正弦周期电流电路	(120)
7.1	非正弦周期信号及其傅里叶级数展开	(120)
7.2	非正弦周期电流信号的基本参数	(124)
7.3	非正弦周期电流电路的分析计算	(128)
第8章	含耦合电感电路分析	(134)
8.1	磁路与铁芯线圈电路	(134)
8.2	互感和互感电压	(139)
8.3	含耦合电感电路分析计算	(143)
8.4	变压器	(151)
第9章	拉普拉斯变换分析法	(161)
9.1	拉普拉斯变换及主要性质	(161)
9.2	部分分式法进行拉普拉斯反变换	(164)
9.3	运算电路	(167)
9.4	应用拉氏变换法分析线性电路	(170)

第1章 电路基本概念和基本定律

知识要点

- 了解电路和电路模型的概念;
- 理解电流、电压和电功率,理解和掌握电路基本元件的特性;
- 掌握电位和电功率的计算,会应用基尔霍夫定律分析电路。

随着科学技术的飞速发展,现代电工电子设备种类日益繁多,规模和结构更是日新月异,但无论怎样设计和制造,几乎都是由各种基本电路组成的。所以,学习电路的基础知识,掌握分析电路的规律与方法,是学习电工学的重要内容,也是进一步学习电机、电器和电子技术的基础。本章的重点是阐明有关电路的基本概念、基本元件特性和电路基本定律。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的概念

(1) 电路及其组成

简单地讲,电路是电流通过的路径。实际电路通常由各种电路实体部件(如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器、仪表、二极管、三极管)组成。每一种电路实体部件都具有各自不同的电磁特性和功能,按照人们的需要,把相关电路实体部件按一定方式进行组合,就构成了一个个电路。当电路元器件数很多且电路结构较为复杂时,人们通常又把这些电路称为电网络。

手电筒电路、单个照明灯电路是实际应用中的较为简单的电路,而电动机电路、雷达导航设备电路、计算机电路、电视机电路是较为复杂的电路,但不管是简单还是复杂,电路的基本组成部分都离不开三个基本环节:电源、负载和中间环节。

电源是向电路提供电能的装置。它可以将其他形式的能量,如化学能、热能、机械能、原子能转换为电能。在电路中,电源是激发和产生电流的因素。负载是取用电能的装置,其作用是把电能转换为其他形式的能(如机械能、热能、光能)。在生产与生活中经常用到的电灯、电动机、电炉、扬声器等用电设备,都是电路中的负载。中间环节在电路中起着传递电能、分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节即开关和连接导线,一个实用电路的中间环节通常还有一些保护和检测装置,复杂的中间环节可以是由许多电路元件组成的网络系统。

如图1-1所示的手电筒照明电路中,电池作为电源,灯作为负载,导线和开关作为中间环节将灯和电池连接起来。

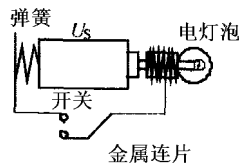


图1-1 手电筒照明实际电路

(2) 电路的种类及功能

工程应用中的实际电路,按照功能的不同可概括为两大类:一是完成能量的传输、分配和转换的电路。如图 1-1 中,电池通过导线将电能传递给灯,灯将电能转化为光能和热能。这类电路的特点是大功率、大电流。二是实现对电信号的传递、变换、储存和处理的电路。如图 1-2 是一个扩音机的工作过程,话筒将声音的振动信号转换为电信号,即相应的电压和电流,经过放大处理后,通过电路传递给扬声器,再由扬声器还原为声音。这类电路的特点是小功率、小电流。

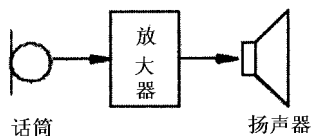


图 1-2 扩音机电路

1.1.2 电路模型

实际电路的电磁过程是相当复杂的,难以进行有效的分析计算。在电路理论中,为了便于实际电路的分析和计算,我们通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理,即忽略次要因素,抓住足以反映其主要功能的主要电磁特性,抽象出实际电路器件的“电路模型”。

例如,电阻器、灯泡、电炉,这些电气设备接受电能并将电能转换成光能或热能,光能和热能显然不可能再回到电路中,因此我们把这种能量转换过程不可逆的电磁特性称为耗能。这些电气设备除了具有耗能的电磁特性,当然还有其他一些电磁特性,但在研究和分析问题时,即使忽略其他这些电磁特性,也不会影响整个电路的分析和计算。因此,我们就可以用一个只具有耗能电磁特性的“电阻元件”作为它们的电路模型。

我们将实际电路器件理想化而得到的只具有某种单一电磁性质的元件,称为理想电路元件,简称为电路元件。每一种电路元件体现某种基本现象,具有某种确定的电磁性质和精确的数学定义。常用的有表示将电能转换为热能的电阻元件、表示电场性质的电容元件、表示磁场性质的电感元件及电压源元件和电流源元件等,其电路符号如图 1-3 所示。本章后面将分别讲解这些常用的电路元件。

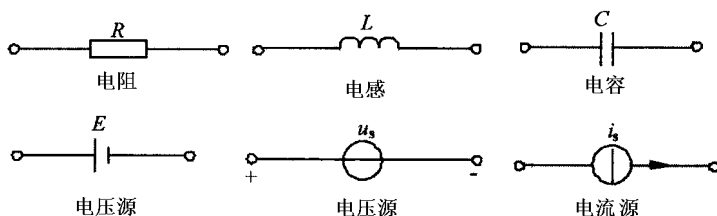


图 1-3 理想电路元件的符号

我们把由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型。如图 1-1 所示,电池对外提供电压的同时,内部也有电阻消耗能量,所以电池用其电动势 E 和内阻 R_0 的串联表示。灯除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,通电时还会产生磁场,具有电感性,但电感微弱,可忽略不计。于是,我们可认为灯是一电阻元件,用 R 表示。图 1-4 是图 1-1 的电路模型。

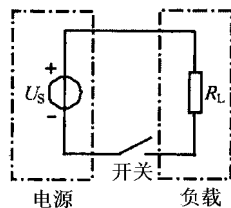


图 1-4 手电筒电路的电路模型

1.2 电流、电压及其参考方向

电路中的变量是电流和电压。无论是电能的传输和转换,还是信号的传递和处理,都是这两个量变化的结果。因此,弄清电流与电压及其参考方向,对进一步掌握电路的分析与计算是十分重要的。

1.2.1 电流及其参考方向

(1) 电 流

电荷的定向移动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量,电流强度亦简称为电流。其定义为:单位时间内通过导体横截面的电荷量,用公式表示为:

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

其中, i 表示随时间变化的电流, dq 表示在 dt 时间内通过导体横截面的电量。

在国际制单位中,电流的单位为安培,简称安(A)。实际应用中,大电流用千安(kA)表示,小电流用毫安(mA)表示或者用微安(μA)表示。它们的换算关系是:

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} = 10^6\text{mA} = 10^9\mu\text{A}$$

在外电场的作用下,正电荷将沿着电场方向运动,而负电荷将逆着电场方向运动(金属导体内是自由电子在电场力的作用下定向移动形成电流),习惯上规定:正电荷运动的方向为电流的正方向。

电流有交流和直流之分。大小和方向都随时间变化的电流称为交流电流,方向不随时间变化的电流称为直流电流,大小和方向都不随时间变化的电流称为稳恒直流。

(2) 电流的参考方向

简单电路中,电流从电源正极流出,经过负载,回到电源负极。在分析复杂电路时,一般难于判断出电流的实际方向,而列方程进行定量计算时需要对电流有一个约定的方向。对于交流电流,电流的方向随时间改变,无法用一个固定的方向表示,因此引入电流的“参考方向”。

参考方向可以任意设定,如用一个箭头表示某电流的假定正方向,就称为该电流的参考方向。当电流的实际方向与参考方向一致时,电流的数值就为正值(即 $i > 0$),如图1-5(a)所示;当电流的实际方向与参考方向相反时,电流的数值就为负值(即 $i < 0$),如图1-5(b)所示。须要注意的是,未规定电流的参考方向时,电流的正负没有任何意义,如图1-5(c)所示。

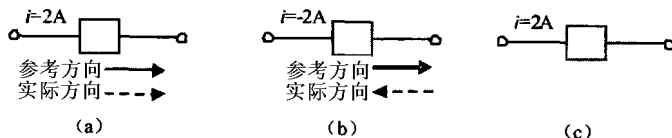


图1-5 电流及其参考方向

1.2.2 电压及其参考方向

(1) 电 压

如图1-6所示的闭合电路,在电场力的作用下,正电荷要从电源正极a经过导线和负载

流向负极 b (实际上是带负电的电子由负极 b 经负载流向正极 a), 形成电流, 而电场力就对电荷做了功。

电场力把单位正电荷从 a 点经外电路 (电源以外的电路) 移送到 b 点所做的功, 叫做 a、b 两点之间的电压, 记作 U_{ab} 。因此, 电压是衡量电场力做功本领大小的物理量。

若电场力将正电荷 dq 从 a 点经外电路移送到 b 点所做的功是 dW , 则 a、b 两点间的电压为:

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

在国际制单位中, 电压的单位为伏特, 简称伏 (V)。实际应用中, 大电压用千伏 (kV) 表示, 小电压用毫伏 (mV) 或者用微伏 (μV) 表示。它们的换算关系是:

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV} = 10^9\mu\text{V}$$

电压的方向规定为从高电位指向低电位, 在电路图中可用箭头来表示。

(2) 电压的参考方向

在比较复杂的电路中, 我们往往不能事先知道电路中任意两点间的电压, 为了分析和计算的方便, 与电流的方向规定类似, 在分析计算电路之前必须对电压标以极性 (正、负号), 或标以方向 (箭头), 这种标法是假定的参考方向, 如图 1-7 所示。如果采用双下标标记时, 电压的参考方向意味着从前一个下标指向后一个下标。图 1-7 元件两端的电压记作 u_{ab} , 若电压参考方向选点指向点, 则应写成 u_{ba} , 两者仅差一个负号, 即 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。

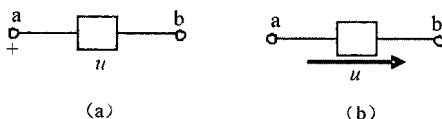


图 1-7 电压参考方向的表示方向

分析求解电路时, 先按选定的电压参考方向进行分析、计算, 再由计算结果中电压值的正负来判断电压的实际方向与任意选定的电压参考方向是否一致。若电压值为正, 则实际方向与参考方向相同, 电压值为负, 则实际方向与参考方向相反。

1.2.3 电位概念及其分析计算

为了分析问题方便, 人们常在电路中指定一点作为参考点。假定该点的电位是零, 用符号 “ $\perp$ ” 表示, 如图 1-6 所示。在生产实践中, 把地球作为零电位点, 凡是机壳接地的设备 (接地符号是 “ $\perp$ ”), 机壳电位即为零电位。有些设备或装置, 机壳并不接地, 而是把许多元件的公共点作为零电位点, 用符号 “ $\perp$ ” 表示。

电路中其他各点相对于参考点的电压即是各点的电位, 因此, 任意两点间的电压等于这两点的电位之差。我们可以用电位的高低来衡量电路中某点电场能量的大小。

电路中各点电位的高低是相对的, 参考点不同, 各点电位的高低也不同, 但是电路中任意两点之间的电压与参考点的选择无关。电路中, 凡是比参考点电位高的各点电位是正电位, 比参考点电位低的各点电位是负电位。

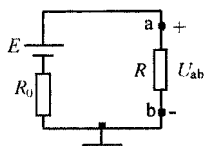


图 1-6 定义电压示意图

【例 1-1】求图 1-8 中 a 点的电位。

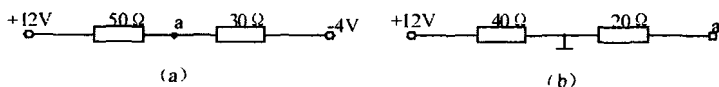


图 1-8 例 1-1 电路

解 对于图 1-8(a) 有

$$U_a = -4 + \frac{30}{50 + 30} \times (12 + 4) \text{ V} = 2 \text{ V}$$

对于图 1-8(b), 因 20Ω 电阻中电流为零, 故

$$U_a = 0$$

【例 1-2】电路如图 1-9 所示, 求开关 S 断开和闭合时 A、B 两点的电位 U_A 、 U_B 。

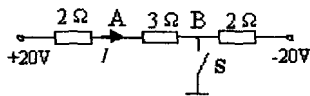


图 1-9 例 1-2 电路

解 设电路中电流为 I , 如图 1-9 所示。

开关 S 断开时:

$$I = \frac{20 - (-20)}{2 + 3 + 2} = \frac{40}{7} \text{ A}$$

因为

$$20 - U_A = 2I$$

所以

$$U_A = 20 - 2I = 20 - 2 \times \frac{40}{7} = \frac{60}{7} \text{ V}$$

同理

$$U_B = 20 - (2 + 3)I = 20 - 5 \times \frac{40}{7} = -\frac{60}{7} \text{ V}$$

开关 S 闭合时:

$$I = \frac{20 - 0}{2 + 3} = 4 \text{ A}$$

$$U_A = 3I = 3 \times 4 = 12 \text{ V}$$

$$U_B = 0 \text{ V}$$

1.3 电功率及电能的概念和计算

1.3.1 电功率

电流通过电路时传输或转换电能的速率, 即单位时间内电场力所做的功, 称为电功率, 简称功率。数学描述为:

$$p = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

其中, p 表示功率。国际单位制中, 功率的单位是瓦特(W), 规定元件 1 秒钟内提供或消

耗 1 焦耳能量时的功率为 1W。常用的功率单位还有千瓦(kW), $1\text{kW} = 1000\text{W}$ 。

将式(1-3)等号右边分子、分母同乘以 dq 后,变为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

可见,元件吸收或发出的功率等于元件上的电压乘以元件上的电流。

为了便于识别与计算,对同一元件或同一段电路,人们往往把它们的电流和电压参考方向选为一致,这种情况称为关联参考方向,如图 1-10(a)所示。如果两者的参考方向相反,则称为非关联参考方向,如图 1-10(b)所示。



图 1-10 电压与电流的方向

有了参考方向与关联的概念,则电功率计算式(1-4)就可以表示为以下两种形式:

当 u, i 为关联参考方向时

$$p = ui \quad (\text{直流功率 } P = UI) \quad (1-5a)$$

当 u, i 为非关联参考方向时

$$p = -ui \quad (\text{直流功率 } P = -UI) \quad (1-5b)$$

无论关联与否,只要计算结果 $p > 0$,则该元件就是在吸收功率,即消耗功率,该元件是负载;若 $p < 0$,则该元件是在发出功率,即产生功率,该元件是电源。

根据能量守恒定律,对一个完整的电路,发出功率的总和应正好等于吸收功率的总和。

【例 1-3】 计算图 1-11 中各元件的功率,指出是吸收功率还是发出功率,并求整个电路的功率。已知电路为直流电路, $U_1 = 4\text{V}$, $U_2 = -8\text{V}$, $U_3 = 6\text{V}$, $I = 2\text{A}$ 。

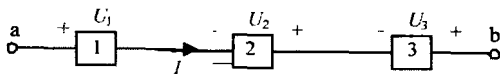


图 1-11 例 1-3 电路

解:在图中,元件 1 电压与电流为关联参考方向,由式(1-5a)得

$$P_1 = U_1 I = 4 \times 2 = 8\text{W}$$

故元件 1 吸收功率。

元件 2 和元件 3 电压与电流为非关联参考方向,由式(1-5b)得

$$P_2 = -U_2 I = -(-8) \times 2 = 16\text{W}$$

$$P_3 = -U_3 I = -6 \times 2 = -12\text{W}$$

故元件 2 吸收功率,元件 3 发出功率。

整个电路功率为:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 8 + 16 - 12 = 12\text{W}$$

本例中,元件 1 和元件 2 的电压与电流实际方向相同,二者吸收功率;元件 3 的电压与电流实际方向相反,发出功率。由此可见,当电压与电流实际方向相同时,电路一定是吸收功率,反之则是发出功率。实际电路中,电阻元件的电压与电流的实际方向总是一致的,说明电阻总在消耗能量;而电源则不然,其功率可能正也可能为负,这说明它可能作为电源提供电能,发出

功率,也可能被充电,吸收功率。

1.3.2 电 能

电路在一段时间内消耗或提供的能量称为电能。根据式(1-4),电路元件在 t_0 到 t 时间内消耗或提供的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-6a)$$

直流时

$$W = P(t - t_0) \quad (1-6b)$$

在国际单位制中,电能的单位是焦耳(J)。1J 等于 1W 的用电设备在 1s 内消耗的电能。通常电业部门用“度”作为单位测量用户消耗的电能,“度”是千瓦时(kW·h)的简称。1度(或1千瓦时)电等于功率为1千瓦的元件在1小时内消耗的电能,即

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

如果通过元件的电流过大,会由于温度升高使元件的绝缘材料损坏,甚至使导体熔化;如果电压过大,会使绝缘击穿,所以必须加以限制。

电气设备或元件长期正常运行的电流容许值称为额定电流,其长期正常运行的电压容许值称为额定电压,额定电压和额定电流的乘积为额定功率。通常电气设备或元件的额定值标在产品的铭牌上:如一白炽灯标有“220V、40W”,表示它的额定电压为 220V,额定功率为 40W。

1.4 电阻、电感和电容元件

电阻元件、电感元件、电容元件都是理想的电路元件,它们均不发出电能,称为无源元件。它们有线性与非线性之分。线性元件的参数为常数,与所施加的电压和电流无关。本节主要分析讨论线性电阻、电感、电容元件的特性。

1.4.1 电阻元件

电阻是一种最常见的、用于反映电流热效应的二端电路元件。电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻两类,如无特殊说明,本书所称电阻元件均指线性电阻元件。在实际交流电路中,像白炽灯、电炉、电烙铁,均可看成线性电阻元件。图 1-12(a)是线性电阻的符号,在电压、电流关联参考方向下,其端钮伏安关系为:

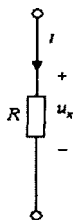
$$u = Ri \quad (1-7a)$$

式中, R 为常数,用来表示电阻及其数值。

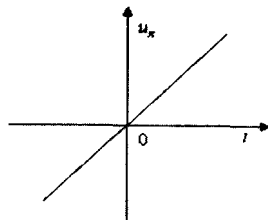
式(1-7a)表明,凡是服从欧姆定律的元件即是线性电阻元件。图 1-12(b)为它的伏安特性曲线。若电压、电流在非关联参考方向下,伏安关系应写成:

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

在国际单位制中,电阻的单位是欧姆(Ω),规定当电阻电压为 1V、电流为 1A 时的电阻值为



(a) 电阻元件



(b) 伏安特性曲线

1Ω。此外,电阻的单位有千欧(kΩ)、兆欧(MΩ)。电阻的倒数称为电导,用符号 G 来表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-8)$$

电导的单位是西门子(S),或 1/欧姆(1/Ω)。

电阻是一种耗能元件,当电阻通过电流时会发生电能转换为热能的过程,而热能向周围扩散后,不可能再直接回到电源而转换为电能。电阻吸收并消耗的电功率可由式(1-5a)和式(1-7a)计算得到:

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-9)$$

一般地,电路消耗或发出的电能可由以下公式计算:

$$W = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-10)$$

在直流电路中:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

$$W = UI(t - t_0)$$

1.4.2 电感元件

电感元件是实际的电感线圈,即电路元件内部所含电感效应的抽象,它能够存储和释放磁场能量。空心电感线圈常可抽象为线性电感,用图 1-13 所示的符号表示。

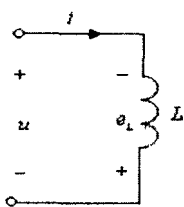


图 1-13 电感元件

其中

$$u = -e_1 = L \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明,电感元件上任一瞬间的电压大小,与这一瞬间电流对时间的变化率成正比。如果电感元件中通过的是直流电流,因电流的大小不变,即 $di/dt = 0$,那么电感上的电压就为零,所以电感元件对直流可视为短路。

在关联参考方向下,电感元件吸收的功率为:

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$

则电感线圈在(0~t)时间内,线圈中的电流由 0 变化到 I 时,吸收的能量为:

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t Li di = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-13)$$

即电感元件在一段时间内储存的能量与其电流的平方成正比。当通过电感的电流增加时,电感元件就将电能转换为磁能并储存在磁场中;当通过电感的电流减小时,电感元件就将储存的磁能转换为电能释放给电源。所以,电感是一种储能元件,它以磁场能量的形式储能,同时电感元件不会释放出多于它吸收或储存的能量,因此,它也是一个无源的储能元件。

1.4.3 电容元件

电容器种类很多,但从结构上都可看成是由中间夹有绝缘材料的两块金属极板构成的。电容

元件是实际的电容器,即电路器件的电容效应的抽象,用于反映带电导体周围存在电场,能够储存和释放电场能量的理想化的电路元件。它的符号及规定的电压和电流参考方向,如图1-14所示。

当电容接上交流电压 u 时,电容器不断被充电、放电,极板上的电荷也随之变化,电路中出现了电荷的移动,形成电流 i 。若 u 、 i 为关联参考方向,则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-14)$$

式(1-14)表明,电容器的电流与电压对时间的变化率成正比。如果电容器两端加直流电压,因电压的大小不变,即 $du/dt = 0$,那么电容器的电流就为零,所以电容元件对直流可视为断路,因此电容具有“隔直通交”的作用。

在关联参考方向下,电容元件吸收的功率为:

$$p = ui = uC \frac{du}{dt} = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-15)$$

则电容器在 $(0 \sim t)$ 时间内,其两端电压由0增大到 U 时,吸收的能量为:

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t C u du = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1-16)$$

式(1-16)表明,对于同一个电容元件,当电场电压高时,它储存的能量就多;对于不同的电容元件,当充电电压一定时,电容量大的储存的能量多。从这个意义上说,电容 C 也是电容元件储能本领大小的标志。

当电压的绝对值增大时,电容元件吸收能量,并转换为电场能量;电压减小时,电容元件释放电场能量。电容元件本身不消耗能量,也不会放出多于它吸收或储存的能量。因此,电容元件也是一种无源的储能元件。

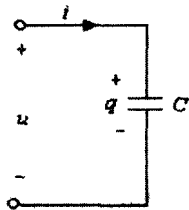


图1-14 电容元件

1.5 独立电源和受控电源

在组成电路的各种元件中,电源是提供电能或电信号的元件,常称为有源元件,如发电机、电池和集成运算放大器。电源中,能够独立地向外电路提供电能的电源,称为独立电源;不能向外电路提供电能的电源称为非独立电源,又称为受控电源。本节介绍独立电源,它包括电压源和电流源。

1.5.1 独立电源

一个电源可用两种不同的电路模型表示。用电压形式表示的,称为电压源;用电流形式表示的,称为电流源。

(1) 电压源

理想电压源是实际电源的一种抽象。它的端钮电压总能保持某一恒定值或时间函数值,而与通过它们的电流无关,也称为恒压源。图1-15(a)为理想电压源的一般电路符号,图1-15(b)是理想电池符号,专指理想直流电压源。理想电压源的伏安特性可写为:

$$u = u_s(t) \quad (1-17)$$

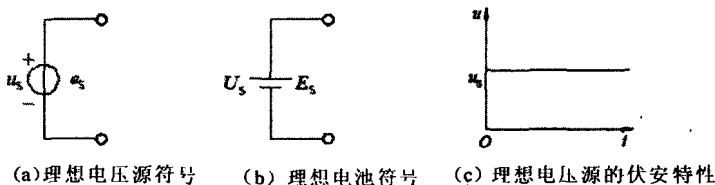


图 1-15 理想电压

理想电压源的电流是任意的,与电压源的负载(外电路)状态有关。图 1-15(c)为理想电压源的伏安特性曲线。

实际的电源总是有内部消耗的,只是内部消耗通常都很小,因此,我们可以用一个理想的电压源元件与一个阻值较小的电阻(内阻)串联组合来等效,如图 1-16(a)虚线部分所示。

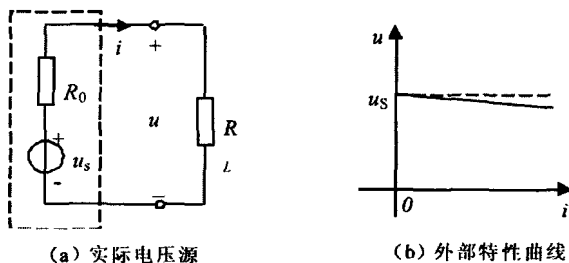


图 1-16 实际电压源模型及其外部特性曲线

电压源两端接上负载 R_L 后,负载上就有电流 i 和电压 u ,分别称为输出电流和输出电压。在图 1-16(a)中,电压源的外特性方程为:

$$u = u_s - iR_0 \quad (1-18)$$

由此,我们可画出电压源的外部特性曲线,如图 1-16(b)的实线部分所示,它是一条具有一定斜率的直线段,因内阻很小,所以外特性曲线较平坦。

电压源不接外电路时,电流总等于零值,这种情况称为“电压源处于开路”。当 $u_s(t) = 0$ 时,电压源的伏安特性曲线为 $u-i$ 平面上的电流轴,输出电压等于零,这种情况称为“电压源处于短路”,实际中是不允许发生的。

(2) 电流源

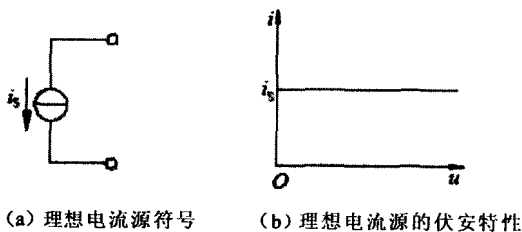


图 1-17 理想电流源

理想电流源也是实际电源的一种抽象。它提供的电流总能保持恒定值或时间函数值,而与它两端所加的电压无关,也称为恒流源。图 1-17(a)为理想电流源的一般电路符号。理想电流源的伏安特性可写为

$$i = i_s(t) \quad (1-19)$$

理想电流源两端所加电压是任意的,与电流源的负载(外电路)状态有关。图 1-17(b)为理想电流源的伏安特性曲线。

实际的电源总是有内部消耗的,只是内部消耗通常都很小,因此,我们可以用一个理想的电流源元件与一个阻值很大的电阻(内阻)并联组合来等效,如图 1-18(a)虚线部分所示。

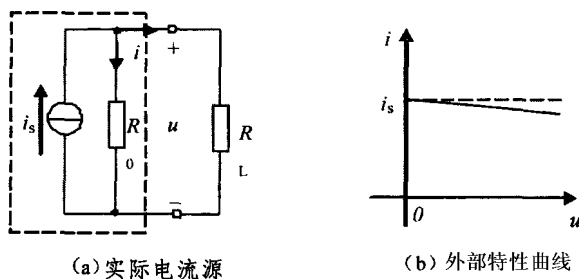


图 1-18 实际电流源模型及其外部特性曲线

电压流两端接上负载 R_L 后,负载上就有电流 i 和电压 u ,分别称为输出电流和输出电压。在图 1-18(a)中,电流源的外特性方程为:

$$i = i_s - \frac{u}{R_0} \quad (1-20)$$

由此,我们可画出电流源的外部特性曲线,如图 1-18(b)的实线部分所示,它是一条具有一定斜率的直线段,因内阻很大,所以外特性曲线较平坦。

电流源两端短路时,端电压等于零值, $i(t) = i_s(t)$,即电流源的电流为短路电流。当 $i_s(t) = 0$ 时,电流源的伏安特性曲线为 $u-i$ 平面上的电压轴,相当于“电流源处于开路”。实际中,“电流源开路”是没有意义的,也是不允许的。

一个实际电源在电路分析中,可以用电压源与电阻串联电路或电流源与电阻并联电路的模型表示,采用哪一种计算模型,依计算繁简程度而定。

【例 1-4】计算图 1-19 中各电源的功率。

解 对 30V 的电压源,电压与电流实际方向关联,则

$$P_{U_s} = 30 \times 2 = 60\text{W} \text{ (恒压源吸收功率)}$$

对 2A 的电流源,电压与电流实际方向非关联,则

$$P_{I_s} = -(30 \times 2) = -60\text{W} \text{ (恒流源释放功率)}$$

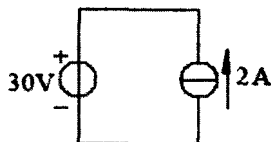


图 1-19 例 1-4 图

1.5.2 受控电源

上一节中提到的电源如发电机和电池,因能独立地为电路提供能量,所以被称为独立电源。而有些电路元件,如晶体管、运算放大器、集成电路,虽不能独立地为电路提供能量,但在其他信号控制下仍然可以提供一定的电压或电流,这类元件可以用受控电源模型来模拟。受控电源的输出电压或电流,与控制它们的电压或电流之间有正比关系时,称为线性受控源。受控电源是一个二端口元件,由一对输入端钮施加控制量,称为输入端口;一对输出端钮对外提供电压或电流,称为输出端口。

按照受控变量的不同,受控电源可分为四类,即电压控制的电压源(VCVS)、电压控制的电流源(VCCS)和电流控制的电压源(CCVS)、电流控制的电流源(CCCS)。

为区别于独立电源,用菱形符号表示其电源部分,以 u, i 表示控制电压、控制电流,则四种电源的电路符号如图 1-20 所示。四种受控源的端钮伏安关系,即控制关系为:

$$\text{VCVS:} \quad u_1 = \mu u \quad (1-21)$$