



高等学校电子信息类专业规划教材

电 路 分 析

常青美 主 编

许庆和 林继河 刘 明 编 著



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材

电 路 分 析

常青美 主编
许庆和 林继河 刘 明 编著

清 华 大 学 出 版 社
北 京 交 通 大 学 出 版 社
· 北 京 ·

内 容 简 介

本书依照教育部颁发的《电路课程教学基本要求》编写。

全书内容共分9章:电路的基本概念和基本定律、电阻电路的一般分析方法、电路定理、动态电路、正弦稳态分析、电路的频率响应和谐振现象、耦合电感和理想变压器、双口网络和简单非线性电阻电路的分析。各章均有适量的典型例题和一定数量的习题。另外附有法定单位、复数及其运算、专业词汇英汉对照表和部分习题参考答案4个附录。

本书对电路的基本理论、基本定律、基本概念及基本分析方法作了系统、详尽的阐述,力求内容完整、表述精确、通俗易懂。在例题的选择上,力争题型全面,结合多年的教学经验,对学生不易理解的内容,给出必要的解题思路,对于较难的例题,给出多种解法,以帮助学生掌握理论知识,提高实际应用能力。

本书可作为高等学校电子信息类和其他相近专业的本科和专科的“电路”或“电路分析基础”课程的教材,也可供从事上述专业的科研和工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂沫,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/常青美主编;许庆和、林继河、刘明编著. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2005.6

(21世纪高等学校电子信息类专业规划教材)

ISBN 7-81082-559-3

I. 电… II. ①常… ②许… ③林… ④刘… III. 电路分析-高等学校-教材
IV. TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第067253号

责任编辑:周益丹

出 版 者:清 华 大 学 出 版 社 邮 编:100084 电 话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮 编:100044 电 话:010-51686414

印 刷 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印 张:19.75 字 数:475千字

版 次:2005年7月第1版 2005年7月第1次印刷

书 号:ISBN 7-81082-559-3/TM·10

印 数:1~5 000册 定 价:28.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043,51686008;传真:010-62225406;E-mail: press@center.bjtu.edu.cn

前 言

随着电子技术飞速发展及高校教学改革的进一步深入,许多新兴专业应运而生。在这些专业的课程设置中,电类课程学时普遍较少,在开设电路分析课程时,很难选到合适的教材。如何在较短的学时内完成电路分析基本知识的学习,为后续课程打好基础,给电路分析课程的教学提出了更高的要求,需要在教学内容、教学方法和教学手段上不断改进以适应现实教学的需要。鉴于此,本书的编写原则是,在保证基本概念、基本定律和基本方法完整性的前提下,注意内容的新颖和实用,使之能满足培养创新型、实用型人才的要求。编写时,力求深入浅出,突出重点,叙述简明扼要,便于教和学。在内容的安排上,兼顾内容完整性的同时,精心挑选必讲和选讲内容。对于打“*”的选讲内容,教师在讲授时视专业的需要、学时的多少灵活掌握。本书主要作者均多年从事电子技术的教学和科研工作,有丰富的理论知识、课堂教学经验及科研实践体会。

全书共分9章。第1章作为电路分析的理论基础,介绍了电路模型、电路定律及电阻电路的等效变换方法。第2章介绍电阻电路的一般分析方法,主要介绍了支路分析法、网孔分析法和节点分析法。第3章重点介绍电路定理在电路分析中的应用。第4章介绍动态元件、动态电路的基本概念及一阶、二阶动态电路的分析方法。第5章介绍正弦稳态电路的相量分析法、正弦稳态电路的功率及对称三相电路的计算。第6章介绍电路的频率响应和谐振现象。第7章讲述了耦合电感和理想变压器。第8章介绍双口网络的基本内容。第9章介绍简单非线性电阻电路的分析。4个附录分别为法定单位、复数及其运算、专业词汇英汉对照表和部分习题参考答案。

本书由常青美担任主编,负责编写提纲的制定、各章初稿的修改和统稿,并编写了第5章、第6章和第7章,许庆和编写了第1章和第2章,林继河编写了第4章和第9章,刘明编写了第8章、附录A和附录B,岳彩青编写了第3章并对例题和习题做了核算,李伟光、廖鹰编写了附录C和附录D并为本书做了许多具体工作。本书配有包含全部内容的课件,供大家选用,课件由常青美、岳彩青、李伟光和段琳琳等制作,如有需求,可在出版社网站上下载,网址见本书封面。本书在编写过程中,得到解放军信息工程大学的大力支持,沈建京、李祥臣、庞学民、朱忠义等教授和同仁给予了全力帮助。在此一并表示感谢。

由于时间仓促及作者水平有限,书中难免有欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者
2005年7月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路和电路模型	(1)
1.1.1 电路模型	(1)
1.1.2 集总参数电路	(2)
1.2 电流、电压、功率与能量	(2)
1.2.1 电流	(2)
1.2.2 电压	(3)
1.2.3 功率与能量	(4)
1.3 基尔霍夫定律	(5)
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	(6)
1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	(7)
1.4 电阻元件	(8)
1.4.1 二端电阻元件	(8)
1.4.2 电阻元件的功率和能量	(9)
1.4.3 开路和短路	(10)
1.5 电源	(10)
1.5.1 电压源	(11)
1.5.2 电流源	(12)
1.5.3 电路中的参考点	(13)
1.5.4 受控源	(15)
1.6 线性二端电路的等效	(17)
1.6.1 二端电阻电路及其等效	(17)
1.6.2 不含独立源电路的等效	(18)
1.6.3 含独立源电路的等效	(22)
习题 1	(26)
第 2 章 电阻电路的一般分析方法	(34)
2.1 支路分析法	(34)
2.1.1 KCL 和 KVL 的独立方程	(34)
2.1.2 支路电流法	(35)
2.2 网孔分析法	(38)
2.2.1 网孔电流	(38)
2.2.2 网孔分析法	(38)
2.3 节点分析法	(42)
2.3.1 节点电压	(42)

2.3.2 节点分析法	(43)
习题2	(48)
第3章 电路定理	(54)
3.1 叠加定理和齐次定理	(54)
3.1.1 叠加定理	(54)
3.1.2 齐次定理	(58)
3.2 替代定理	(59)
3.3 戴维南定理和诺顿定理	(61)
3.3.1 戴维南定理	(61)
3.3.2 诺顿定理	(64)
3.3.3 最大功率传输	(66)
*3.4 特勒根定理和互易定理	(68)
3.4.1 特勒根定理	(68)
3.4.2 互易定理	(71)
3.5 电路的对偶性	(74)
习题3	(75)
第4章 动态电路	(83)
4.1 动态元件	(83)
4.1.1 电容元件	(83)
4.1.2 电感元件	(90)
4.2 动态电路的方程及其解	(94)
4.2.1 一阶电路方程的建立	(94)
4.2.2 一阶微分方程的求解	(96)
4.2.3 一阶方程解的电路解释	(97)
4.3 一阶电路的三要素及三要素分析法	(100)
4.3.1 换路定律	(100)
4.3.2 稳态响应 $y_p(t)$ 的计算	(101)
4.3.3 时间常数 τ 的计算	(102)
4.3.4 初始值 $y(0_+)$ 的计算	(103)
4.3.5 一阶电路的三要素分析法	(107)
4.4 动态电路的响应	(111)
4.4.1 零输入响应	(112)
4.4.2 零状态响应	(113)
4.5 阶跃函数和阶跃响应	(115)
4.5.1 阶跃函数	(115)
4.5.2 阶跃响应	(116)
4.6 正弦激励下一阶电路的响应	(119)
4.7 二阶电路分析	(121)
4.7.1 二阶电路的方程及固有频率	(121)

4.7.2 RLC 串联电路的零输入响应	(122)
4.7.3 RLC 串联电路的阶跃响应	(126)
习题4	(127)
第5章 正弦稳态分析	(136)
5.1 正弦量	(136)
5.1.1 正弦量的三要素	(136)
5.1.2 正弦量的相位差	(138)
5.1.3 正弦量的有效值	(140)
5.2 相量法的基本概念	(141)
5.2.1 正弦量的相量表示	(141)
5.2.2 正弦量的相量运算	(142)
5.3 三种基本元件伏安关系的相量形式	(144)
5.3.1 电阻元件	(145)
5.3.2 电感元件	(146)
5.3.3 电容元件	(147)
5.4 基尔霍夫定律的相量形式	(149)
5.5 阻抗与导纳	(152)
5.5.1 阻抗	(152)
5.5.2 导纳	(154)
5.5.3 阻抗与导纳的等效	(157)
5.6 正弦稳态电路的计算	(159)
5.7 正弦稳态电路的功率	(165)
5.7.1 单口网络的瞬时功率	(165)
5.7.2 单口网络的平均功率、无功功率、表观功率和功率因数	(166)
5.7.3 复功率	(167)
5.8 最大功率传输	(171)
5.9 多频电路的计算	(174)
5.9.1 多频电路的稳态响应	(174)
5.9.2 非正弦周期电压、电流的有效值	(175)
5.9.3 多频电路的平均功率	(176)
5.10 三相电路	(176)
5.10.1 对称三相电源	(177)
5.10.2 对称三相电源Y形和 Δ 形连接	(178)
5.10.3 对称三相电路的计算	(179)
5.10.4 对称三相电路的功率	(181)
习题5	(185)
第6章 电路的频率响应和谐振现象	(194)
6.1 频率响应与网络函数	(194)
6.2 串联谐振电路	(198)

6.3 并联谐振电路	(201)
6.3.1 并联谐振	(201)
6.3.2 实用并联谐振电路	(202)
习题6	(206)
第7章 耦合电感和理想变压器	(209)
7.1 耦合电感电路	(209)
7.1.1 耦合电感	(209)
7.1.2 耦合电感的伏安关系	(210)
7.1.3 去耦等效电路	(214)
7.1.4 含空心变压器电路的分析	(217)
7.2 理想变压器	(220)
7.2.1 理想变压器的伏安关系	(220)
7.2.2 理想变压器的实现	(222)
7.2.3 理想变压器的阻抗变换特性	(224)
习题7	(226)
第8章 双口网络	(231)
8.1 双口网络的开路阻抗参数	(232)
8.1.1 开路阻抗参数	(232)
8.1.2 开路阻抗参数等效电路	(233)
8.2 双口网络的短路导纳参数	(235)
8.2.1 短路导纳参数	(235)
8.2.2 短路导纳参数等效电路	(237)
8.3 双口网络的混合参数	(239)
8.4 双口网络的传输参数	(240)
8.5 双口网络的连接	(243)
8.5.1 双口网络的串联	(243)
8.5.2 双口网络的并联	(245)
8.5.3 双口网络的级联	(246)
*8.5.4 双口网络连接的有效性	(247)
8.6 双口网络的网络函数	(250)
8.6.1 策动点函数	(251)
8.6.2 转移函数	(253)
习题8	(256)
第9章 简单非线性电阻电路的分析	(260)
9.1 非线性电阻元件	(260)
9.1.1 非线性电阻元件	(260)
9.1.2 二极管	(261)
9.1.3 理想二极管	(262)
9.2 非线性电阻电路的分析	(264)

9.2.1 含一个非线性电阻电路分析	(264)
9.2.2 非线性电阻的串联和关联	(266)
9.3 小信号分析	(268)
习题9	(271)
附录A 法定单位	(275)
附录B 复数及其运算	(276)
附录C 专业词汇英汉对照表	(282)
附录D 部分习题参考答案	(294)
参考文献	(304)

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路模型

为实现某种预期的功能,把一些电器设备或器件按一定方式连接起来构成电流的通路称为电路。

实际电路有的十分复杂,例如通信系统、计算机网络等;有的非常简单,例如手电筒电路;有的延伸到千里之外,例如电力系统;有的集中于方寸之间,例如集成电路。尽管电路形式多样,功能各异,但通常都是由电源、负载和中间环节三部分组成。

电源是提供电能或产生电信号的设备,负载是将电能转换为其他形式能量的设备,中间环节是将电源和负载连成通路的导线或控制、测量电路工作状态的开关、仪表等辅助设备。图 1-1(a)是按实物做出的手电筒电路的示意图,这是最简单的典型实际电路。它是由电源(干电池)、负载(小电珠)、中间环节(连接导线和开关)三部分组成的。

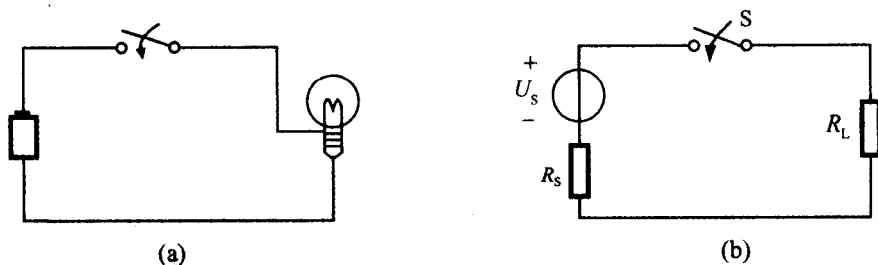


图 1-1 手电筒电路及其电路模型

电路的功能大致可概括为两个方面:一是完成电能的传输和转换,例如上述的手电筒电路就是干电池中的电能通过导线传输给小电珠转换为光能;二是实现信号的传递和处理,例如电话线路、计算机的存储电路等。

实际电路中的每种电器设备或器件工作时发生的电磁现象和能量转换关系一般都比较复杂。例如一个电阻器,当有电流流过时可将电能转换成热能而消耗,电流产生磁场,因而伴随着能量储存。一个实际的电源总有内阻,因而使用时在提供电能的同时还伴随着能量的消耗,这样就往往对电路的分析带来困难,因此,我们在分析和计算实际电路时,必须用理想电路元件或其组合来代替实际的电器设备和器件组成的实际电路。这种由理想元件组成的与实际电路器件相对应的电路就是实际电路的模型,或称模型电路。图 1-1(b)就是手电筒电路的电路模型。

所谓理想电路元件就是在一定条件下忽略实际器件的次要性能,突出其主要性能,将实

际器件抽象成具有确定电磁性质,并有精确数学定义的假想元件。

一个实际的器件可用理想电路元件或它们的组合近似模拟。例如一个线圈,它在直流情况下可用一个电阻元件作为它的模型;在低频情况下,就要用电阻元件和电感元件的串联组合模拟;在高频时还需考虑电容效应,所以,其模型还应包含电容元件。可见,同一器件在不同情况下应采用不同的模型。

本书讨论的是电路模型而不是实际电路,同时把理想电路元件简称电路元件。

1.1.2 集总参数电路

电路工作时存在着三种能量转换过程,即电能消耗、电场储能和磁场储能。电阻元件是反映电能消耗的电路参数,而电容元件和电感元件是分别反映电场储能和磁场储能的电路参数。严格说来,电路的任何部分都存在这三种参数,但是在电路中电压、电流频率不太高的情况下,也就是说当电路尺寸与电路中电压、电流的波长相比可忽略不计时,可近似认为电能消耗、电场储能和磁场储能这三种过程是分别集中在电阻元件、电容元件和电感元件中进行的。这种假定一个元件中只存在一种能量转换关系的元件称为集总参数元件,由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。本书以后所述的电路基本定律均是在集总参数电路中才成立的。

1.2 电流、电压、功率与能量

电路分析的任务是对给定的电路确定其电性能,而电路的电性能通常可以通过一组物理量来描述,这组物理量中最常用的便是电流、电压和功率。

1.2.1 电流

电荷的定向运动形成电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。

衡量电流大小的物理量称为电流强度,简称电流。电流强度的定义为:单位时间内通过导体横截面的电荷量。如果通过导体横截面的电荷量不随时间而变化,则电流强度为

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

一般情况下,不随时间变化的恒定物理量用大写字母表示,随时间变化的物理量用小写字母表示。因此,式(1-1)是恒定电流,即直流的表达式。

随时间变化的电流简称时变电流,其表达式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中, q 为通过导体横截面的时变电荷量; i 为时变电流。

在国际单位制(SI)(参看附录A)中,电荷量的单位为库[仑],简称库(C),时间的单位为秒(s),电流的单位为安[培],简称安(A)。

大型电力系统中的电流可达数百到上千安培,而电子电路中的电流往往只有千分之几安培。对于很小的电流可用毫安(mA)、微安(μ A)或纳安(nA)作单位,它们的关系是

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

上面提到正电荷运动的方向规定为电流的实际方向,但在对电路进行分析计算时,或因电路较复杂,预先往往难以判断电流的实际方向,或因电流随时间不停地变化,其实际方向无法在电路图中标出,故而引出参考方向的概念。参考方向是在电路图中用箭头任意标定的电流方向,当然它不一定是电流的实际方向。图1-2(a)是电路中的一个二端元件,流过该元件的电流为 i ,其参考方向如箭头所示,而其实际方向或由a到b,或由b到a。如果电流 i 的实际方向是由a到b,如图(a)中虚线箭头所示,它与参考方向一致,则电流为正值,即 $i > 0$;参考方向如图(b)中那样标定为由b到a,则电流参考方向与实际方向不一致,故电流为负值,即 $i < 0$ 。这样,在标定参考方向后,根据电流值的正负就可以确定电流的实际方向。显然,在未标定参考方向的情况下,电流值的正或负是没有意义的。

电流的参考方向又称为电流的正方向。在集总电路中,任何时刻流入二端元件一个端子的电流一定等于从另一端子流出的电流。



图1-2 电流的参考方向

1.2.2 电压

电路中电场力将单位正电荷从某点移到另一点所做的功定义为该两点间的电压,电压也称电位差。电压的实际方向是由高电位端指向低电位端的。不随时间变化的电压称为直流电压,其表达式为

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

随时间变化的电压,其表达式为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-4)$$

式中,功 W 的单位是焦[耳],简称焦(J);电压 U 的单位是伏[特],简称伏(V)。常用电压单位还有mV和 μV ,它们之间的关系为

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

如同为电流标定参考方向一样,在进行电路分析时也需对电压标定参考方向(也称参考极性)。图1-3(a)是电路中的一个二端元件,其电压 u 的参考方向可用“+”、“-”标注。“+”表示高电位端,“-”表示低电位端。由“+”端指向“-”端的方向就是电压 u 的参考方向。如果参考方向与实际方向一致,则 $u > 0$;反之,则 $u < 0$ 。在标定电压参考方向后,根据电压值的正或负就可确定电压的实际方向。在未标定参考方向的情况下,电压值的正或负是没有意义的。

电压的参考方向也可如图1-3(b)所示用箭头表示,还可用双下标表示,如 u_{ab} 表示电压的参考方向为从a点指向b点。

在集总电路中,任何时刻,两点间的电压是一个确定的量值,即电压具有单值性。一个二端元件或一段电路上的电流、电压的参考方向可以分别独立地任意标定,但为了方便,往往采用关联参考方向,即电流的参考方向和电压的参考方向一致,如图1-4(a)所示。在关



图 1-3 电压的参考方向

联参考方向下,在电路图上只需标明电流或电压参考方向中的一种即可。如果电流、电压的参考方向相反,则为非关联参考方向,如图 1-4(b)所示。



图 1-4 关联参考方向和非关联参考方向

【例 1.1】 图 1-5(a)中,标出了 5 个二端元件电流、电压的参考方向。已知 $I_1 = -2\text{ A}$, $I_2 = 1\text{ A}$, $I_3 = 3\text{ A}$, $U_1 = 20\text{ V}$, $U_2 = -14\text{ V}$, $U_3 = 12\text{ V}$, $U_4 = -8\text{ V}$, $U_5 = 2\text{ V}$,试标出各电流、电压的实际方向。

解: 因为 I_2, I_3, U_1, U_3, U_5 为正值,所以其实际方向与参考方向一致,而 I_1, U_2, U_4 为负值,表明其实际方向与参考方向相反。各电流、电压的实际方向如图 1-5(b)所示。

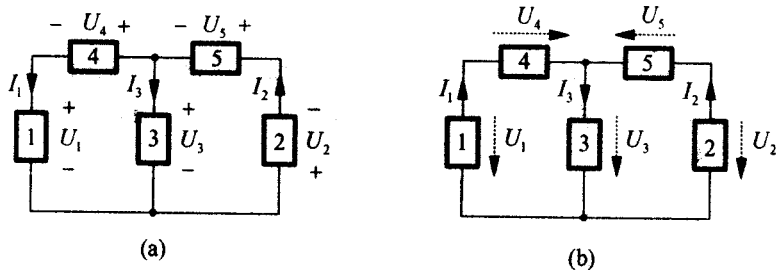


图 1-5 例 1.1 图

1.2.3 功率与能量

电路在工作过程中总伴随着电能与其他形式能量间的相互转换。比如,当正电荷从元件的高电位端运动到元件的低电位端时,电场力对电荷做了功,此时元件吸收电能;反之,正电荷从元件的低电位端运动到元件的高电位端时,是外力克服电场力对电荷做了功,也可以说是电场力做了负功,此时元件释放电能。

电功率简称功率,是衡量这种能量转换速率的物理量。元件吸收的功率定义为单位时间内电场力所做的功。直流功率的表达式为

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-5)$$

瞬时功率表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-6)$$

式中, dw 为 dt 时间内电场力所做的功。功率的单位是瓦(W),电场力每秒做功 1 焦,则功

率为1 W,即 $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ 。

在电路分析中,我们更关注的是功率与电压、电流的关系。根据电压、电流的定义不难得出其关系为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dt} \frac{dq}{dq} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-7)$$

即元件吸收的功率等于其电压与电流的乘积。需要指出的是:上述功率与电压、电流的关系是在电压、电流取关联参考方向下得出的。若元件的电压、电流为非关联参考方向时,元件吸收功率为

$$p = -ui \quad (1-8)$$

这样,由于式(1-7)和式(1-8)计算的都是吸收功率,所以,当 $p > 0$ 时,表明元件确实吸收功率;当 $p < 0$ 时,表明元件实际发出功率。

从 t_0 到 t 的时间内,元件吸收的电能为功率对时间的积分,即

$$W = \int_{t_0}^t p d\xi \quad (1-9)$$

一个二端元件(或一段电路),如果对所有的时刻 t 都有 $W = \int_{t_0}^t p d\xi \geq 0$,则称该元件(或该段电路)是无源的,否则称其为是有源的。

【例1.2】 计算图1-5(a)中各元件的功率,并验证是否满足功率平衡。

解:

$$P_1 = U_1 I_1 = 20 \times (-2) = -40 \text{ W}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = -14 \times 1 = -14 \text{ W}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 12 \times 3 = 36 \text{ W}$$

$$P_4 = U_4 I_1 = -8 \times (-2) = 16 \text{ W}$$

$$P_5 = U_5 I_2 = 2 \times 1 = 2 \text{ W}$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 0$$

在一个完整的电路中,各部分功率的代数和等于零,即在任何时刻产生的功率与吸收的功率总是相等的,这称为功率平衡。这是能量守恒的必然结果。

1.3 基尔霍夫定律

集总电路是由集总元件通过理想导线相互连接而成。电路中的一个二端元件称为一条支路,但通常我们把若干二端元件相串联的一段电路视为一条支路。支路的连接点称为节点。由若干支路构成的闭合路径称为回路。平面电路中,内部不含其他支路的回路称为网孔。

图1-6是由6条支路组成的电路。

该电路共有4个节点(a、b、c、d),由支路(1,2),(2,3,4,6),(4,5),(1,3,4,6),(2,3,5,6),(1,3,5,6)构成6个回路,其中由支路(1,2),(2,3,4,6),(4,5)构成的3个回路称为网孔。

电路分析的基本任务是对于给定的电路确定各元件的电压和电流。而各元件的电压、电流无一不遵循两类约束:一类是由元件的连接关系带来的约束,称为拓扑约束,这类约束由基尔霍夫定律体现;另一类是由元件特性,即元件的电压、电流关系,简称伏安关系

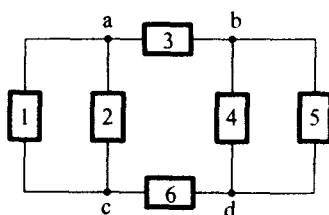


图 1-6 支路、节点、回路和网孔

(VCR)形成的约束,称为元件约束。这里先讨论拓扑约束。

1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律可表述为:在集总电路中,任何时刻,对任一节点,流出该节点的各支路电流的代数和恒等于零。记作

$$\sum i = 0 \quad (1-10)$$

这里,所谓电流的“代数和”是指:流出节点的电流取“+”,流入节点的电流取“-”。电流是流出还是流入节点均根据电流的参考方向判定。

例如,图 1-7 是某电路中的一个节点 p,根据 KCL,有

$$i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

上式可改写为

$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5$$

此式表明,流出节点 p 的支路电流之和等于流入该节点的支路电流之和。所以,KCL 也可表述为:在任何时刻,流出任一节点的支路电流之和等于流入该节点的支路电流之和。

KCL 通常用于节点,但对包围几个节点的封闭面(又称广义节点)也是适用的。

例如图 1-8(a)所示电路,对封闭面 S,有

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

若两部分电路只有一条支路相连,如图 1-8(b)所示,对封闭面 S,据广义节点概念可知: $i=0$ 。流出封闭面的电流必等于流入同一封闭面的电流。这是电流连续性的体现。

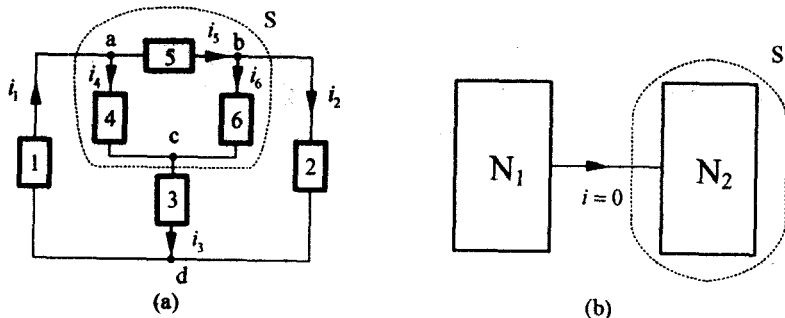


图 1-8 基尔霍夫电流定律

【例 1.3】图 1-8(a)所示电路中,已知 $i_1 = 5 \text{ A}$, $i_2 = 1 \text{ A}$, $i_6 = 2 \text{ A}$,求 i_3 。

解:对节点 b,根据 KCL,有

$$i_5 = i_2 + i_6 = 1 + 2 = 3 \text{ A}$$

对节点 a, 据 KCL 有

$$i_4 = i_1 - i_5 = 5 - 3 = 2 \text{ A}$$

对节点 c, 据 KCL 有

$$i_3 = i_4 + i_6 = 2 + 2 = 4 \text{ A}$$

或者, 对封闭 S, 据 KCL 有

$$i_3 = i_1 - i_2 = 5 - 1 = 4 \text{ A}$$

1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律可表述为: 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恒等于零。记作

$$\sum u = 0 \quad (1-11)$$

这里, 所谓支路电压的代数和是指: 凡支路电压的参考方向与任意指定的回路绕行方向一致者, 该电压取“+”, 反之取“-”。

图 1-9 是某电路中的一个回路。对该回路据 KVL 有

$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 + u_5 = 0$$

电路分析中, 经常需要计算两节点间的电压, 如图 1-9 中节点 a、b 间的电压 u_{ab} 。由上式移项可得

$$u_1 + u_2 - u_3 = -u_5 + u_4$$

上式等号左端是按支路 1、2、3 构成的路径计算所得 a、b 两节点间的电压, 即 $u_{ab} = u_1 + u_2 - u_3$ 。等号右端是按支路 5、4 构成的路径计算所得 a、b 间的电压, 即 $u_{ab} = -u_5 + u_4$ 。这说明电路中两节点间电压与路径无关。KVL 是电压单值性的反映。

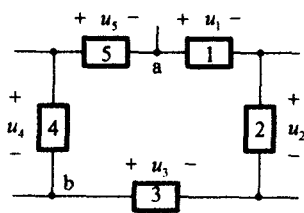


图 1-9 KVL 用于回路

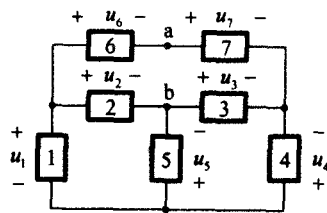


图 1-10 例 1.4 图

【例 1.4】 图 1-10 所示电路, 已知 $u_1 = 10 \text{ V}$, $u_2 = 3 \text{ V}$, $u_4 = -2 \text{ V}$, $u_7 = 2 \text{ V}$, 求 u_5 、 u_6 及 u_{ab} 。

解: 对由支路 1、2、5 构成的回路, 应用 KVL 有

$$u_5 = -u_1 + u_2 = -10 + 3 = -7 \text{ V}$$

对由支路 1、4、7、6 构成的回路, 应用 KVL 有

$$u_6 = u_1 + u_4 - u_7 = 10 - 2 - 2 = 6 \text{ V}$$

按支路 6、2 构成的路径计算 u_{ab} 有

$$u_{ab} = -u_6 + u_2 = -6 + 3 = -3 \text{ V}$$

或按支路 7、4、5 构成的路径计算 u_{ab} 有

$$u_{ab} = u_7 - u_4 + u_5 = 2 + 2 - 7 = -3 \text{ V}$$

KCL 和 KVL 是集总电路的基本定律。KCL 是对集总电路中与任一节点相连系的各支路电流间建立的线性约束关系;KVL 是对与任一回路相连系的各支路电压间建立的线性约束关系。这类约束称为拓扑约束,因为它只与元件的连接关系有关,而与元件特性无关。正因此,KCL 和 KVL 适用于任何线性、非线性、时变、非时变的集总电路。

1.4 电阻元件

电路元件是构成电路的基本单元。按元件的引出端子数目可分为二端、三端、四端元件等。对集总参数元件通常只关心其端子上的特性,而不涉及其内部情况。电路元件还可分为无源元件和有源元件、线性元件和非线性元件、非时变元件和时变元件、耗能元件和储能元件等。本节讨论电阻元件。

1.4.1 二端电阻元件

二端电阻元件是耗能型元件。电阻器、灯泡、电炉等在一定条件下可用二端电阻元件作为其模型。

二端电阻元件定义为:一个二端元件,如果在任一时刻,其两端电压 u 与流经它的电流 i 之间的关系可用 $u \sim i$ 平面上的一条曲线来确定,则该元件就称为二端电阻元件,简称电阻元件。

由于电压的单位是伏(V),电流的单位是安(A),因此电阻元件的特性称为伏安特性或伏安关系。如果电阻元件的伏安关系不随时间变化,则称其为非时变电阻,否则称为时变电阻;如果其伏安关系是通过原点的一条直线,则称其为线性电阻,否则称为非线性电阻。今后所说电阻,如不加说明均指伏安特性位于一、三象限的线性、非时变电阻。其图形符号和伏安特性分别如图 1-11(a)、(b)所示^①。在电压、电流取关联参考方向的条件下,电阻元件的伏安关系为

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

这就是大家熟悉的欧姆定律。式中的 R 称为元件的电阻。当电压单位为伏(V),电流单位为安(A)时,电阻的单位为欧[姆],简称欧(Ω)。

令 $G = \frac{1}{R}$, 式(1-12)可写为

$$i = Gu \quad (1-13)$$

^① 电阻元件的伏安特性如果位于第二、四象限,则称为负电阻,即 $R < 0$ 。负电阻是供能元件,实际是某些对外提供电磁能量的电子器件的理想化模型。