



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

电路分析基础

俎云霄 李巍海 吕玉琴 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

电路分析基础

俎云霄 李巍海 吕玉琴 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍电路的基本概念、基本定律和定理及电路的基本分析方法。本书包含3大部分内容——直流电阻电路、直流动态电路和正弦交流稳态电路。直流电阻电路部分共4章,主要介绍电路的基本变量和几种基本元件,电路的基本分析方法、基本定律和定理,简单非线性电阻电路。直流动态电路部分有2章,主要介绍电容和电感这两种动态元件,分析由动态元件构成的一阶动态电路和二阶动态电路的瞬态过程。正弦交流稳态电路部分共6章,主要介绍正弦稳态电路、三相电路、非正弦周期稳态电路和有耦合的电感电路的分析,电路的频率特性和二端口网络。另外,本书的最后一章介绍了电路仿真软件——Multisim,给出了仿真示例。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,可作为高等院校理工科“电路”及相关课程的教材,也可供科研与工程技术人员自学参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/昝云霄,李巍海,吕玉琴编著. —北京:电子工业出版社,2009.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-07948-1

I. 电… II. ①昝…②李…③吕… 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(2008)第 192849 号

责任编辑:凌 毅

印 刷:

装 订: 北京牛山世兴印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张:21 字数: 538 千字

印 次: 2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价:29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

电路课程是电气信息类专业学生必修的学科基础课,也是学生接触的第一门学科基础课。通过本课程的学习,可使学生掌握电路的基本概念、基本理论、基本分析方法和基本的仿真分析方法,培养科学思维能力、分析计算能力和理论联系实际的工程观点,为后续课程的学习准备必要的电路知识。

基于以上理念和目标,本书在编写过程中注重以下几方面的问题:

(1)教学内容上符合教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电路分析基础”基本教学要求。在内容安排上,从符合普遍认知规律考虑,先介绍直流电阻电路,然后介绍直流动态电路,最后介绍正弦稳态电路。

(2)注意为后续课程——电子电路打好基础,在内容上适当介绍有关晶体管、MOS管的知识,以及电路知识在电子电路中的运用。

(3)注意理论知识与工程实际的结合。在每章的开始都简单介绍与本章内容相关的工程背景或知识背景,在每章的最后一节都介绍本章知识在实际工程中的应用,由此激发学生的学习兴趣,并让学生了解电路知识在各工程领域中的应用概况。

(4)引入计算机仿真。计算机仿真已经成为实验教学和科学研究有用且必要的手段,在教学中引入仿真不仅可以加强学生对问题的理解,而且还可激发学习兴趣,培养创新意识。本书在最后一章专门介绍了目前最常用的一种电路仿真软件——Multisim,除介绍其部分功能和基本仿真方法外,还给出了覆盖课程基本内容的14个仿真示例。

(5)注意学科新知识的引入。在介绍了常规的电阻、电容、电感3种基本电路元件后,介绍了第4种基本电路元件——忆阻器。忆阻器的概念首先是由美国的华裔科学家蔡少棠在1971年提出的,但直到2008年5月才由惠普实验室宣布找到了这种元件。

本书的编写工作由俎云霄、李巍海和吕玉琴完成。俎云霄编写了第2~7、10章和附录A,李巍海编写了第1、8、9、12、13章和附录B、C,吕玉琴编写了第11章,并对全书进行了审阅。

北京邮电大学电子工程学院电路与系统教研中心多年坚持的教学研讨对本书的内容结构形成起到了重要的作用。俎云霄在2006年秋赴英国伦敦帝国理工学院电气电子工程系进行的半年教学访问,也对本书的内容构成具有非常重要的帮助。在本书的编写过程中,清华大学的郑君里教授提出了许多宝贵意见和建议。在此向郑君里教授和伦敦帝国理工学院讲授“电路分析”的David Haigh博士表示衷心的感谢!

本书承北京邮电大学解月珍教授审阅,她对本书初稿提出了许多重要的修改意见,在此表示衷心的感谢!

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,得到了北京邮电大学电子工程学院和电子工业出版社的基金资助,特表谢意!

本书在编写过程中,参阅了许多专家的教材、著作和论文,在此一并表示衷心的感谢。

本书提供配套的电子课件,可登录电子工业出版社的华信资源教育网:[www. huaxin. edu. cn](http://www.huaxin.edu.cn) 或 [www. hxedu. com. cn](http://www.hxedu.com.cn),注册后免费下载。

由于作者水平所限,难免存在错漏之处,恳切希望同行专家、学者及读者提出宝贵意见,以便今后改进、提高。作者联系方式如下:

俎云霄:北京邮电大学 94 信箱,100876,zuyx@tsinghua. edu. cn

李巍海:北京邮电大学 94 信箱,100876,liweihai@gmail. com

吕玉琴:北京邮电大学 94 信箱,100876,lvyq@263. net

作 者

2008 年 12 月

目 录

第 1 章 电路模型和电路元件	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路变量	2
1.3 基尔霍夫定律	5
1.4 电阻元件	8
1.5 电压源	10
1.6 电流源	11
1.7 受控源	12
1.8 电阻的等效变换 输入电阻	15
1.9 电源的等效变换	20
1.10 工程应用——散热风扇的速度控制	23
本章小结	24
习题	24
第 2 章 电阻电路的基本分析方法	30
2.1 图论的初步知识	30
2.2 支路电流法	34
2.3 完备的独立电路变量	36
2.4 节点电压法	37
2.5 网孔分析法	42
2.6 回路分析法	47
2.7 运算放大器及其外部特性	48
2.8 含运算放大器的电阻电路	50
2.9 工程应用——模数和数模转换电路	52
本章小结	54
习题	54
第 3 章 电路的基本定理	58
3.1 齐性定理	58
3.2 叠加定理	59
3.3 替代定理	62
3.4 戴维南定理和诺顿定理	64
3.5 最大功率传输定理	71
3.6 特勒根定理	73
3.7 互易定理	76
3.8 对偶关系	78
3.9 工程应用——万用表内阻的确定	79

本章小结	81
习题	81
第 4 章 简单非线性电阻电路	86
4.1 非线性电阻电路	86
4.2 图解法	89
4.3 分段线性化法	90
4.4 小信号分析法	91
4.5 工程应用——限幅电路	96
本章小结	96
习题	96
第 5 章 一阶动态电路	99
5.1 电容元件	100
5.2 电感元件	104
5.3 忆阻元件	107
5.4 换路定则及初始值的确定	108
5.5 一阶电路的零输入响应	110
5.6 一阶电路的零状态响应	116
5.7 一阶电路的全响应	121
5.8 一阶电路的三要素法	123
5.9 一阶电路的阶跃响应	127
5.10 微分电路和积分电路	129
5.11 工程应用——瞬态分析在数字电路中的应用	131
本章小结	133
习题	133
第 6 章 高阶动态电路	137
6.1 二阶电路的微分方程	137
6.2 RLC 并联电路的零输入响应	137
6.3 RLC 并联电路的零状态响应和全响应	143
6.4 RLC 串联电路	145
6.5 一般二阶电路和高阶动态电路	148
6.6 工程应用——电火花加工电路	150
本章小结	152
习题	152
第 7 章 正弦稳态电路	154
7.1 正弦量	154
7.2 正弦量的相量 相量法	156
7.3 基尔霍夫定律和 R 、 L 、 C 元件 VCR 的相量形式	159
7.4 阻抗和导纳	161
7.5 正弦稳态电路的相量分析	164
7.6 正弦稳态电路的等效	168

7.7	正弦稳态电路的功率	170
7.8	复功率	175
7.9	正弦稳态最大功率传输定理	176
7.10	工程应用——功率因数的提高	178
	本章小结	180
	习题	180
第 8 章	三相电路	185
8.1	三相电源	185
8.2	对称三相电路的计算	187
8.3	不对称三相电路的概念	190
8.4	三相电路的功率	191
8.5	工程应用——三相电源相序的确定	193
	本章小结	194
	习题	194
第 9 章	非正弦周期稳态电路	197
9.1	非正弦周期信号 有效值 平均值	197
9.2	非正弦周期稳态电路的分析	198
9.3	非正弦周期稳态电路的功率	201
9.4	工程应用——适配器	203
	本章小结	205
	习题	205
第 10 章	电路的频率特性	207
10.1	网络函数及频率特性	207
10.2	RC 电路的频率特性	208
10.3	RLC 串联电路的谐振	211
10.4	RLC 并联电路的谐振	216
10.5	工程应用——按键式电话系统	221
	本章小结	223
	习题	223
第 11 章	耦合电感电路	227
11.1	互感 互感电压	227
11.2	耦合电感的电压、电流关系	229
11.3	耦合电感的去耦	231
11.4	含耦合电感电路的分析	234
11.5	线性变压器电路的分析	238
11.6	全耦合变压器	242
11.7	理想变压器的 VCR 及其特性	243
11.8	工程应用——全波整流电路	251
	本章小结	252
	习题	252

第 12 章 二端口网络	257
12.1 二端口网络	257
12.2 二端口网络的 VCR 及参数	258
12.3 二端口网络各参数间的关系	264
12.4 互易二端口和对称二端口	265
12.5 二端口网络的等效电路	265
12.6 有端接的二端口网络	268
12.7 二端口网络的特性阻抗	272
12.8 二端口网络的互连	274
12.9 工程应用——双极型晶体管的等效电路	278
本章小结	279
习题	279
第 13 章 Multisim 使用指南及仿真应用	282
13.1 一个简单的例子	282
13.2 部分菜单栏简介	286
13.3 工具栏简介	289
13.4 常用仪器仪表的使用	291
13.5 仿真示例	294
本章小结	308
习题	308
附录 A 特勒根定理的证明	310
附录 B 复数及其运算	313
附录 C 常见信号的傅里叶级数展开	315
部分习题参考答案	318
参考文献	328

第 1 章 电路模型和电路元件

随着社会的发展,时代的进步,电在工农业生产、教学科研和人们的日常生活中的作用越来越重要。现今,无论人类生活、科学技术活动及物质生产活动都已离不开电。想象一下,如果没有了电,现代人们的生活将回到什么样的境地!本章就先从电路理论中最基本的知识开始讨论。

1.1 电路和电路模型

电的传输是通过电路进行的,而根据不同的用途和作用,电路的组成又有很大的差别,有的很复杂,有的很简单。电路的几何尺寸也相差很大,有的很大,有的很小。例如,传输电能的庞大且复杂的电力系统的几何尺寸很大,绵延几千米甚至几十、几百千米;而无线电收音机就是一个几何尺寸很小的电子设备,只有几十厘米甚至几厘米;集成电路芯片更小,只有几厘米或几毫米甚至更小,但其电路并不简单;手电筒电路则是一个非常简单的电路。无论电路简单与否,电路的几何尺寸大小如何,它们都由一些基本的元器件组成并完成一定的功能。实际电路是由电阻器、电感器、电容器、电源等部件(component)和晶体管等器件(device)相互连接而成的,具有传输、分配、控制、转换电能、处理信号等功能。例如,电力系统的作用就是完成电能的传输、分配,收音机就是进行信号的处理,手电筒则完成了能量转换的功能。

按照电路各部分的功能分,实际电路主要由电源、负载和连接设备组成。电源是提供能量的部件,如电池、发电机等。负载是消耗能量的部件,如电灯、喇叭、电炉等。连接设备起传输、分配和控制电能的作用,如导线、开关等。

由于实际电路的几何尺寸相差很大,实际元器件的性能也呈现多样性,并受周围环境的影响,所以,要对电路进行研究,必须抽象出其理想化的电路模型。当实际电路的几何尺寸远小于使用时其最高工作频率所对应的波长时(波长 λ 、电磁波的速度 v 和频率 f 三者之间的关系为: $\lambda=v/f$,真空中电磁波的速度与光速相同,即为 $3\times 10^8\text{m/s}$),电磁波通过电路的时间是非常短暂的,这种情况下可以忽略电场与磁场之间的相互作用,此时,可以由实际元件抽象出能反映其主要电磁特性的理想化模型,称为集总参数元件(lumped parameter element)或理想元件(ideal element)。二端集总参数元件用图 1-1 所示的符号表示。电路分析中常用的集总参数元件主要有电阻元件(R)、电感元件(L)、电容元件(C)、电压源(u_s)和电流源(i_s),其符号如图 1-2 所示。对理想元件来说,电阻元件只反映消耗电能的性质,电容元件只反映储存电场能量的性质,电感元件只反映储存磁场能量的性质,电压源和电流源则只反映提供能量的性质。



图 1-1 二端元件符号

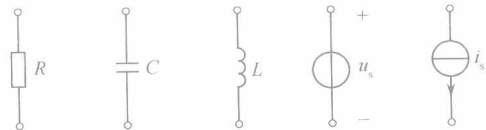


图 1-2 常用元件符号

实际的电路元件可用理想元件组成的模型表示。根据其应用场合不同,同一种电路元件有不同的表示模型。例如,一个用导线绕成的线圈,如果不考虑导线的电阻,则就用一个电感元件表示,如图 1-3(a)所示;在直流和低频情况下,可以用电阻元件和电感元件的串联组合表示,如图 1-3(b)所示;在高频情况下,还要考虑电容效应,用电阻元件、电感元件和电容元件的组合模型表示,如图 1-3(c)所示。

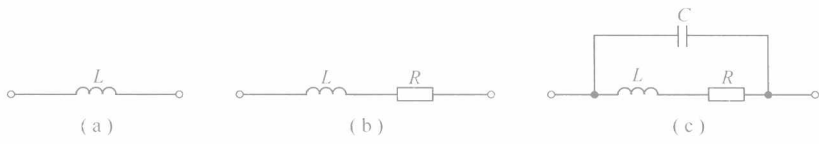


图 1-3 实际线圈的几种理想元件模型

由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。图 1-4(a)是实际手电筒电路的示意图,图 1-4(b)就是由此抽象出的电路模型。今后本书讨论的电路都是这种经过抽象的电路模型。

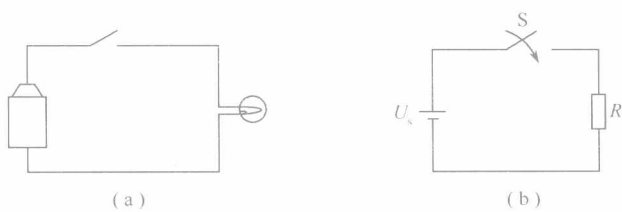


图 1-4 实际手电筒示意图和电路模型

与集总参数电路相对应的另一种电路是分布参数电路(distributed parameter circuit)。当实际电路的几何尺寸大于其最高工作频率所对应的波长或两者属于同一数量级时,就不能忽略电场与磁场之间的相互作用,这时就需要用分布参数的概念去分析。本书只讨论集总参数电路。

电路理论是一门研究网络(network)分析和网络综合的学科。网络分析是根据已知的电路结构、元件参数和电源(在系统理论中称为激励)求解电路中的某些物理量(在系统理论中称为响应),而网络综合是一个相反的过程,要求设计在给定激励下满足响应要求的电路。本书只讨论网络分析的基本内容。

1.2 电路变量

描述电路性能的物理量有电流、电压、电荷、磁通(或磁链)及电功率和电能量。本节主要介绍电路分析中最常用的电流、电压和功率 3 个物理量。

1. 电流及其参考方向

现实世界中存在两种带电粒子,一种是带有正电荷的质子(proton),另一种是带有负电荷的电子(electron)。带电粒子所带电荷的多少称为电量(quantity of charge),用符号 q 或 Q 表示(小写字母代表随时间变化的量,大写字母代表不随时间变化的量,以后出现的其他字母具有同样的意义,不再说明)。电量的单位是库仑,符号为 C。带电粒子的流动就形成了电流。

将单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,简称电流(current),并用符号 i 或

I 表示。即

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

电流的单位是安培,符号为 A。除此之外,还有毫安(mA)和微安(μ A)。

习惯上将正电荷流动的方向规定为电流的真实方向。电流方向的表示方法有两种,一种是箭头表示法,箭头所指的方向即为电流的方向,如图 1-5 所示;另一种是双下标表示法,对应图 1-5 所示的电流方向又可表示为 i_{AB} ,表明电流由 A 端流向 B 端,即由第一个下标所示点流向第二个下标所示点。



图 1-5 电流方向的表示

实际进行电路分析时,有时事先并不能确定电流的真实方向,而要对电路进行分析,必须已知电流的方向才能列方程进行求解,为此,引入参考方向的概念。参考方向(reference direction)是任意选定的方向,也称为正方向。根据计算结果可以判定电流的真实方向。

如果电流为正值,即 $i > 0$,表明参考方向与真实方向一致;否则,如果电流为负值,即 $i < 0$,则表明参考方向与真实方向相反。今后电路中所给定的方向如无特别说明,都表示参考方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,则称为直流电流(direct current),简称直流或简称为 DC,可用符号 I 表示,否则称为时变电流(time varying current)。如果电流的大小和方向都随时间做周期性变化,则称为交变电流(alternating current),简称交流或简称为 AC。

2. 电压及其参考方向

由物理学知,电荷在电场中移动需要电场力对其做功,电荷由此获得或失去能量。为了衡量电荷获得或失去的能量,引入电压(或电位差)的概念。定义单位正电荷在电场中由 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量为 a、b 两点间的电压(voltage)或电位差,并用符号 u 或 U 表示。即

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

电压的单位是伏特,符号为 V。除此之外,还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μ V)。式(1-2)中的 w 是能量的符号,单位为焦耳(J)。

电压的真实方向(或真实极性)定义为由高电位点到低电位点的方向,即电位降的方向。电压方向的表示方法有 3 种,分别是箭头、正负号和双下标。若用箭头表示,则箭头所指的方向就是电位降的方向;若用正负号表示,则正号表示高电位端,负号表示低电位端;双下标表示法则表明第一个下标所示点是高电位点,第二个下标所示点是低电位点。 u_{AB} 与如图 1-6 所示的两种表示法是一致的。

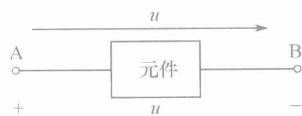


图 1-6 电压方向的表示

与电流类似,实际进行电路分析时,有时事先并不能确定电压的真实方向,而要对电路进行分析,必须已知电压的方向才能列方程进行求解,为此,引入参考方向的概念。参考方向是任意选定的方向,也称为正方向。根据计算结果可以判定电压的真实方向。

如果电压为正值,即 $u > 0$,表明参考方向与真实方向一致;否则,如果电压为负值,即 $u < 0$,则表明参考方向与真实方向相反。今后电路中所给定的方向如无特别说明,都表示参考方向。

如果电压的大小和方向都不随时间变化,则称为直流电压,可用符号 U 表示,否则称为时变电压。如果电压的大小和方向都随时间做周期性变化,则称为交流电压。

3. 关联参考方向

综上所述,在进行电路分析时,首先要选定电压、电流的参考方向。理论上电压、电流的参考方向可以任意选定,但为了分析方便,通常将电压、电流的参考方向选为一致,即电流从电压的正极性端流到电压的负极性端,如图 1-7(a)所示,并称这样选定的参考方向为关联参考方向(associated reference direction)。这样,在图中只需标出电压或电流参考方向的任何一种即可;否则就称为非关联参考方向,如图 1-7(b)所示。

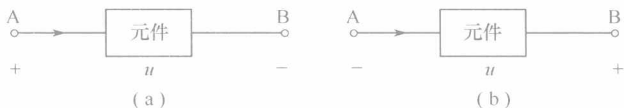


图 1-7 关联参考方向与非关联参考方向

在今后的学习中将会看到,元件的电压、电流是否取关联参考方向,决定了元件电压、电流关系式前的正、负号。

4. 功率

如前所述,电荷在电场中移动需要电场力对其做功,电荷由此获得或失去能量,为了衡量电荷获得或失去能量的速度,引入电功率的概念,简称功率(power),定义为单位时间内电荷获得或失去的能量,并用符号 p 或 P 表示。所以有

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

根据式(1-2)有

$$dw = u \cdot dq$$

所以

$$p = u \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-4)$$

上式是在电压和电流为关联参考方向下的功率计算式,如果电压、电流为非关联参考方向,则上式前加负号“—”,即

$$p = -u \cdot i$$

如果电压的单位为伏特,电流的单位为安培,则功率的单位就是瓦特,符号为 W。除此之外还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)和微瓦(μ W)。

元件或电路获得能量还是失去能量可以根据计算出的功率的正、负确定。如果功率为正,即 $p > 0$,表示获得(或吸收、消耗)能量(或功率);否则,如果功率为负,即 $p < 0$,则表示失去(或提供)能量(或功率)。按照以上功率计算式,无论电压、电流是关联参考方向还是非关联参考方向,均用上述规则进行判断。

例 1-1 判断图 1-8 所示支路是吸收功率还是提供功率。

解 (a) $p = ui = 3 \times 1 = 3 \text{ W} > 0$, 吸收功率。

(b) $p = -ui = -3 \times 2 = -6 \text{ W} < 0$, 提供功率。

(c) $p = ui = 1 \times 2 = 2 \text{ W} > 0$, 吸收功率,电源处于充电状态。

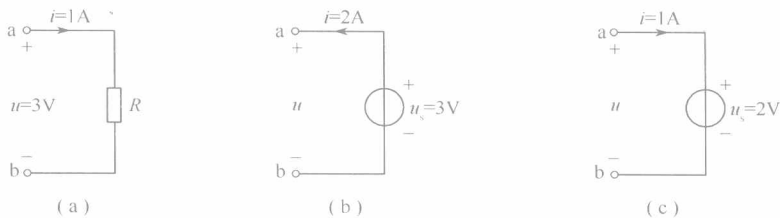


图 1-8 例 1-1 电路

5. 单位间的换算关系

前面介绍的一些物理量的单位——C、A、V、J、W——都是 SI 单位，即国际单位制单位。但在实际使用中，有时感到这些单位太小或太大，例如，在电力系统中，用安培和伏特来计量电流和电压就显得太小，而在电子电路中用安培和瓦特来计量电流和功率则显得太大，不便于使用。所以，常常在这些单位前加上词头，形成 10 的倍数（正幂次或负幂次）单位，如前所示。下面将一些常用词头及其倍数关系列表，如表 1-1 所示。

表 1-1 常用词头及其倍数关系

词头名称		符 号	倍 数
原文(法)	中文		
giga	吉	G	10^9
mega	兆	M	10^6
kilo	千	k	10^3
mili	毫	m	10^{-3}
micro	微	μ	10^{-6}
nano	纳	n	10^{-9}
pico	皮	p	10^{-12}

1.3 基尔霍夫定律

在集总参数电路中，电压和电流都要满足某种约束，这种约束称为拓扑约束，将这种约束以定律的形式给出，就是本节要介绍的基尔霍夫定律，它是集总参数电路普遍适用的定律，是电路的基本定律。在介绍该定律之前，首先引入几个电路名词。

1. 电路名词

支路：连接于电路中的每个二端元件就定义为一条支路(branch)。通过该支路的电流及该支路两端的电压则分别称为支路电流和支路电压。支路电流和支路电压是电路分析中的主要研究对象。

有时也将某些元件的串联、并联组合看作一条支路，这是一种标准复合支路，如图 1-9 所示。图中符号的意义今后会陆续介绍。在本书中，只使用电压源和电阻串联的复合支路及电流源和电阻并联的复合支路。

节点：电路中支路的连接点称为节点(node)。

根据上面介绍的支路和节点的定义，在图 1-10 所示电路中，共有 5 条支路、4 个节点。如

果将元件 1、3 和元件 2、5 分别看作一条复合支路,则就有 3 条支路、2 个节点。所以,支路的不同取法影响电路中的支路数和节点数,进而影响到电路的方程数,这在随后的学习中将体会到。

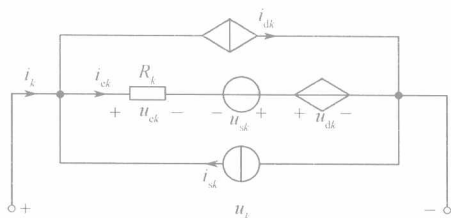


图 1-9 标准复合支路

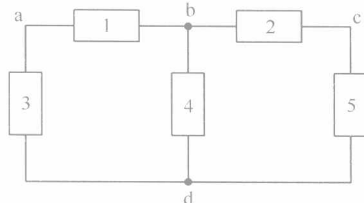


图 1-10 一个电路

回路:电路中任一闭合的路径称为回路(loop)。

网孔:内部不含支路的回路称为网孔(mesh)。

例如,在图 1-10 中,元件 1、3、4 和元件 2、4、5 分别形成一个回路,同时也是网孔,但元件 1、2、3、5 形成的就是回路而不是网孔,因为在这个回路中包含了一条支路,即元件 4 所构成的支路。因此,该电路中有 3 个回路、2 个网孔。

电荷守恒和能量守恒是自然界的基本法则,它们在集总电路中的体现就是基尔霍夫电流定律和电压定律。

2. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law),简称 KCL,是对集总参数电路中节点处电流的约束,其内容为:

在集总参数电路中,任一瞬间,流入(或流出)任一节点的电流代数和恒等于零。其数学表示为

$$\sum i = 0 \quad (1-5)$$

根据电荷守恒原理,电荷既不能创造也不能消失,但可以存储,而节点只是支路的汇合点,并不是一个电路元件,不能存储电荷,所以节点处的电荷不能堆积,即 $\frac{dq}{dt} = \sum i = 0$ 。这也表明了电流的连续性。

因为式(1-5)表示的是电流的代数和,所以就有正、负之分。通常规定:流出节点的电流为正,流入节点的电流为负。当然也可以规定流入节点的电流为正,流出节点的电流为负。这对节点的 KCL 方程没有影响。

根据 KCL,对图 1-11 所示部分电路有

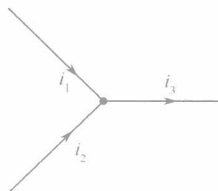


图 1-11 电路中的某个节点

$$i_3 - i_2 - i_1 = 0 \quad \text{或} \quad i_3 = i_1 + i_2$$

由此可得出如下关系

$$\sum i_{\text{出}} - \sum i_{\text{入}} = 0 \quad \text{或} \quad \sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}} \quad (1-6)$$

根据上式,得到 KCL 的另一种表述,即:在集总参数电路中,任一瞬间,流出任一节点的电流恒等于流入该节点的电流。

KCL 不仅应用于节点,也可以推广应用于一个闭合面(可称其为广义节点)。即:在集总参数电路中,任一瞬间,流入(或流出)任一闭合

面的电流代数和恒等于零。

下面以图 1-12 电路为例进行说明。对图示闭合面中的两个节点 c、d 分别列 KCL 方程,有

$$\text{节点 c: } i_6 - i_3 - i_1 = 0$$

$$\text{节点 d: } i_4 - i_5 - i_6 = 0$$

上面两式相加得

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

此式恰好是虚线所示闭合面的 KCL 方程。

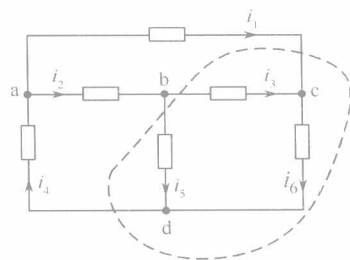


图 1-12 KCL 的推广

3. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law),简称 KVL,是对集总参数电路的回路中电压的约束,其内容为:

在集总参数电路中,任一瞬间沿任一回路各支路电压的代数和恒等于零。其数学表示为

$$\sum u = 0 \quad (1-7)$$

由 1.2 节有关电压的描述可知,电荷沿回路移动会失去或获得能量,根据能量守恒原理,失去和获得的能量必然相等,所以回路中的电位升等于电位降,即回路中各支路电压的代数和等于零。

因为式(1-7)表示的是电压的代数和,所以也有正、负之分。KVL 方程中电压的正、负与回路的绕行方向有关,所以,在列写 KVL 方程之前,要先规定回路的绕行方向(顺时针或逆时针)。如果支路的电压参考方向与回路绕行方向一致,则为正,否则为负。

根据 1.2 节中关于电压的介绍可知,如果支路的电压参考方向与回路绕行方向一致,即表明沿回路该支路电压为电位降;如果支路的电压参考方向与回路绕行方向相反,则表明沿回路该支路电压为电位升,据此,又可得出 KVL 的另一种表述形式,即:

在集总参数电路中,任一瞬间,任一回路中支路电位降等于电位升。其数学表示为

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

在图 1-13 所示电路中,回路 1 和回路 2 的 KVL 方程分别为

$$-u_3 + u_4 - u_5 + u_9 - u_6 = 0 \quad \text{或} \quad u_4 + u_9 = u_3 + u_5 + u_6$$

$$u_4 + u_8 - u_7 = 0 \quad \text{或} \quad u_4 + u_8 = u_7$$

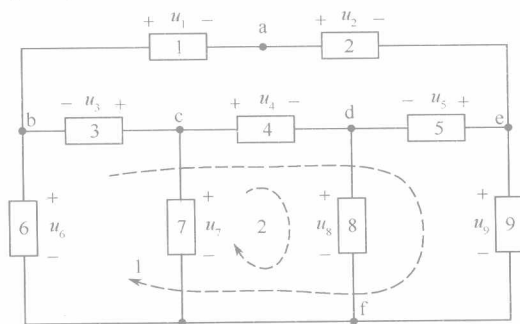


图 1-13 一个电路

KVL 不仅应用于闭合回路,也可推广应用于闭合的节点序列,即:在集总参数电路中,任一瞬间,沿任何闭合节点序列,前一节点与后一节点之间的全部电压的代数和恒等于零。

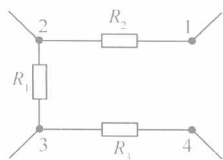


图 1-14 某电路中的一部分

例如,对于图 1-14 所示某电路中的一部分,元件 R_1 、 R_2 、 R_3 并不形成闭合回路,但节点 $(1, 2, 3, 4, 1)$ 是一个闭合节点序列。此时,可设节点 1、4 之间的电压为 u_{14} ,则 KVL 同样适用于此闭合节点序列,即有

$$u_{12} + u_{23} + u_{34} - u_{14} = 0$$

通过前面的讨论可以看出,KCL 描述了电路的任一节点处电流应该服从的约束关系,KVL 描述了电路的任一回路中电压应该服从的约束关系,它们只涉及电路的拓扑结构(拓扑是指电路的连接性质),与组成电路的元件性质无关,所以称为电路的拓扑约束。无论是线性电路还是非线性电路、时变电路还是非时变电路,只要是集总参数电路,节点处的电流都服从 KCL、回路中的电压都服从 KVL。所以,KCL 和 KVL 是集总参数电路的基本定律。

在列写 KCL、KVL 方程时,需要和两套符号打交道。一套是方程中各项前的正、负号,对 KCL 来说,这取决于支路电流是流入节点还是流出节点,对 KVL 来说,这取决于支路电压参考方向与回路绕行方向是一致还是相反;另一套是电压、电流本身数值的正、负号,这由具体电路给出。

在求解电路中的电压、电流时,除了要知道电路的拓扑约束外,还需要知道元件本身的电压、电流的约束关系,称为元件约束,下面就讨论几种电路元件及其电压、电流的约束关系。

1.4 电阻元件

电阻元件是由实际电阻器(resistor)抽象而来的理想化二端元件,只反映电阻器对电流呈现阻力的性质,其数学定义为:在任意时刻,如果二端元件的电压 u 和电流 i 之间存在代数关系 $f(u, i) = 0$,即为 $u-i$ 平面上的一条曲线,则称此二端元件为电阻元件(resistor)。

电阻元件分线性和非线性、时变和非时变,本书主要讨论线性、非时变电阻元件,今后就简称线性电阻元件或电阻元件。对非线性、非时变电阻元件只做简单介绍。

线性电阻元件(linear resistor)的符号如图 1-15 所示,其电压、电流关系,简称 VCR(Voltage Current Relation)服从欧姆定律。在图 1-15 所示的电压、电流参考方向下有

$$u = Ri \quad (1-9)$$

如果电压、电流为非关联参考方向,则其 VCR 为

$$u = -Ri$$

由式(1-9)可得

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-10)$$

将 R 称为电阻器的电阻(resistance)。习惯上, R 既表示电阻器的电阻,也表示电阻元件,今后二者不加区别。

如果电压的单位为伏特,电流的单位为安培,则电阻的单位就是欧姆,其符号表示为 Ω 。比欧姆更大的常用单位还有千欧($k\Omega$)和兆欧($M\Omega$)。

将电阻的倒数称为电导,并用符号 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R}$$

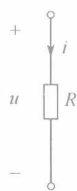


图 1-15 线性电阻元件的符号