

高等院校教材

# 电路与电子技术

刘文豪 主编



科学出版社  
www.sciencep.com

高等院校教材

# 电路与电子技术

刘文豪 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书包括电路理论基础和电子技术基础两篇。本书的特点是以电路理论为基础,以电子技术为主干,二者紧密结合。电路理论篇,主要介绍电路分析的基本概念和方法,时域、频域分析,正弦稳态分析,磁路变压器和电机。本篇以电子电路模型为对象,研究电子电路的共性,使电路理论成为电路分析的重要组成部分。电子技术篇,主要介绍半导体器件,基本放大电路,反馈放大器,逻辑门电路及其综合,触发器与时序逻辑电路,可编程控制器及电气控制。本篇研究电子电路模型化的方法,使电子技术成为电路理论的进一步深化。本书突出了课程体系的系统性和完整性,既加强了电路理论,又使电子电路分析方法系统化。本书各章末尾有小结;每一节后都有思考题;各章均有习题,书末附有习题答案。

本书可作为高等院校工科非电类各专业本科和大专学生的电路与电子技术、电工技术、电子技术课程的教材和参考书,也可供工程技术人员自学使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术/刘文豪主编. —北京:科学出版社,2006  
高等院校教材  
ISBN 7-03-017212-4

I. 电… II. 刘… III. ①电路理论-高等学校-教材 ②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM13 ②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 045783 号

责任编辑:马长芳 潘继敏/责任校对:朱光光  
责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年8月第 一 版 开本:BS(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:32 1/4

印数:1—3 000 字数:622 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

## 前 言

本书是根据作者的《电路与电子技术》讲义改编而成的。原讲义编写于1982年,20多年来作者授课一直在使用,经过多次修改,内容不断更新,逐渐完善。

本书的改编是按教育部颁发的“高等学校工科本科电工技术(电工学Ⅰ)课程基本要求”和“高等学校工科本科电子技术(电工学Ⅱ)课程基本要求”进行的。本书内容包括电路理论基础和电子技术基础两部分,特点是以电路理论为基础,以电子技术为主干,两者紧密结合。

(1) 加强基础理论,引入现代电路理论和系统理论的新概念和新方法,突出动态特性分析。

(2) 以电子技术为主干内容,使电路理论与电子技术两部分内容紧密结合为一个整体。在电路理论部分,较多地以电子电路的模型(即模型化了的电子电路)作为对象,研究电子电路的共性,使电路理论成为电子电路分析的重要组成部分;在电子技术部分,研究电子电路模型化的方法,使电子技术电路理论进一步具体和深化,增强课程体系的系统性和完整性,既加强电路理论,又使电子电路分析方法系统化,并有效地节省了学时。

(3) 在整个体系中贯穿系统概念,突出分析方法的研究。

为便于教学,各章有本章内容概述,末尾有本章小结;配合每一节的内容,节后都有思考题;在各章的习题中,都包含较多的选择、判别等概念题。

本书中磁路、变压器部分由刘艳丽编写,安全用电和电动机部分由贾贵玺编写,其余部分由刘文豪编写。杨正瓴、刘艳丽、薛俊韬参加了新增选择题的编写工作。薛俊韬、刘艳丽、贾贵玺参加了全书的文字编辑和校对工作。

本书的原稿(讲义)曾得到原国家教委电工学课程指导小组成员电子科技大学(成都)尹可华和天津大学姚海彬两位教授的指导,在此表示衷心的感谢。原教材曾经有过两次出版的机会,一次由于某种原因错过了,一次作者自己放弃了;这一次,在科学出版社马长芳老师和天津大学自动化学院领导的大力支持下,在多位同事的热情帮助和参与下本书终于出版了,对此深表谢意。

刘文豪

2006年1月于天津大学

# 目 录

<b>第一篇 电路理论基础</b> .....	1
<b>第 1 章 电路分析的基本概念</b> .....	1
1.1 电路及电路模型 .....	1
1.2 电路分析的基本物理量 .....	3
1.3 基尔霍夫定律 .....	5
1.4 理想无源元件 .....	8
1.5 理想电源元件 .....	11
1.6 受控源 .....	15
1.7 信号波形 .....	17
习题一 .....	24
<b>第 2 章 电路分析的基本方法</b> .....	30
2.1 网络化简 .....	30
2.2 支路电流法 .....	33
2.3 结点电压法 .....	36
2.4 叠加原理 .....	40
2.5 等效电源定理 .....	42
2.6 双口网络 .....	45
2.7 非线性电阻电路分析的基本方法 .....	50
习题二 .....	52
<b>第 3 章 时域分析</b> .....	60
3.1 时域响应和时域分析 .....	60
3.2 电路的初始状态 .....	62
3.3 一阶电路的自然响应 .....	65
3.4 一阶电路的全响应 .....	70
3.5 二阶电路的自然响应 .....	80
习题三 .....	84
<b>第 4 章 正弦稳态分析</b> .....	91
4.1 正弦量的相量表示 .....	91
4.2 电路约束的相量形式 .....	95
4.3 相量法 .....	101

4.4	无源二端网络的等效阻抗和等效导纳	105
4.5	复杂正弦稳态电路的分析	113
4.6	正弦稳态功率	118
4.7	谐振	125
4.8	三相电路	128
4.9	安全用电	134
	习题四	142
<b>第5章</b>	<b>频域分析</b>	<b>150</b>
5.1	网络函数与频率特性	150
5.2	对数频率特性与波特图	152
5.3	波特图的做法	156
5.4	典型网络的频率特性	161
	习题五	167
<b>第6章</b>	<b>磁路、变压器和电机</b>	<b>171</b>
6.1	磁路的概念和基本定律	171
6.2	直流和交流磁路	175
6.3	变压器	177
6.4	三相异步电动机	183
	习题六	196
<b>第二篇</b>	<b>电子技术基础</b>	<b>199</b>
<b>第7章</b>	<b>半导体器件</b>	<b>199</b>
7.1	PN结及其模型	199
7.2	半导体二极管及其应用	202
7.3	双极结型晶体管	213
7.4	场效晶体管	221
7.5	晶体管的小信号模型	229
	习题七	232
<b>第8章</b>	<b>基本放大电路</b>	<b>240</b>
8.1	放大器概述	240
8.2	单管放大电路	242
8.3	放大电路的图解分析法	248
8.4	放大电路的小信号模型分析法	255
8.5	射极跟随器	263
8.6	多级放大电路	268
8.7	差动放大电路	274

---

8.8 功率放大电路 .....	280
8.9 集成放大器 .....	283
8.10 放大电路的频率特性 .....	287
习题八 .....	293
<b>第9章 反馈放大器</b> .....	<b>303</b>
9.1 反馈的基本概念 .....	303
9.2 负反馈对放大器性能的影响 .....	313
9.3 深度负反馈放大器的分析 .....	315
9.4 模拟运算电路 .....	322
9.5 测量放大器 .....	329
9.6 信号处理电路 .....	331
9.7 正弦波振荡器 .....	338
习题九 .....	343
<b>第10章 逻辑门电路及其综合</b> .....	<b>357</b>
10.1 数字电路概述 .....	357
10.2 逻辑门电路 .....	359
10.3 逻辑代数基础 .....	371
10.4 组合逻辑电路的分析与综合 .....	383
10.5 中规模集成组合电路及应用 .....	389
习题十 .....	399
<b>第11章 触发器与时序逻辑电路</b> .....	<b>407</b>
11.1 双稳态触发器 .....	407
11.2 寄存器 .....	415
11.3 计数器和分频器 .....	418
11.4 同步时序电路 .....	430
11.5 中规模集成时序电路组件及应用 .....	436
11.6 单稳态触发器和无稳态触发器 .....	442
11.7 模-数和数-模转换 .....	447
习题十一 .....	451
<b>第12章 可编程控制器及电气控制</b> .....	<b>459</b>
12.1 PLC 概述 .....	460
12.2 继电-接触器控制系统 .....	467
12.3 PLC 程序设计 .....	478
习题十二 .....	487
<b>参考文献</b> .....	<b>492</b>
<b>部分习题答案</b> .....	<b>493</b>

# 第一篇 电路理论基础

## 第 1 章 电路分析的基本概念

电路分析是研究电路的基本性质和规律,本章介绍了电路分析的对象、实际电路的表达形式——电路模型的概念和构成电路模型的理想元件,还介绍了体现电路的两类约束关系的基尔霍夫定律和元件的电压电流关系(VCR),它们是电路分析的重要组成部分,也提供了电路分析的依据。最后介绍了电路中几种常见的电压、电流波形。

### 1.1 电路及电路模型

通常我们遇到的实际电路是由各种各样的电气设备和器件组合而成的。构成实际电路的电气设备和器件,都是一个个的物理实体,我们称之为实际元件。

电路的作用是多种多样的,一个重要作用是实现能量的传输和转换。电力系统是典型的例子:发电厂的发电机将各种形式的非电能(如燃料的化学能、流水的动能和势能、原子的核能等)转换为电能,通过输配电系统,将电能输送到分布在各地的用电部门。在那里,通过各种各样的用电器,又将电能转换成了声、光、热、机械等各种形式的非电能。在这样的电路中,发电机是电路的电源,用电器是电路的负载,而其余部分统称为中间环节。

电路的另一种作用是信号处理。在某些电路(如各种电子电路)中,电压、电流都携带着一定的信息,如电视信号就携带着图像和伴音信息。我们将这种携带一定信息的电压、电流叫作信号。电路的作用是将这些信号进行处理和加工,以满足某种特定的需要,如电视机电路的作用就是将电视信号接收下来,并将其进行适当的处理和加工,以适应显像管显示图像和扬声器放声的要求。在计算机控制系统中,是将采集到的反映现场情况的信号进行处理、运算,产生新的输出信号以进行实时控制等。

实际电路和电路元件种类繁多,性能各异,并且每一种元件都不可能做到仅仅具有一种主要的特性,如一台电炉,主要性能是变电能为热能,即消耗电能,但当电流流过电炉丝时,在它周围又必然建立起磁场,所以它又兼有储存磁场能量的特



性。另外,任何一种实际元件的特性,或多或少都是非线性的,如上述电炉,冷态电阻小于热态电阻,即电阻随电流而改变,再加上电路参数的分布性(将在下面讨论)等,所有这些实际电路的具体问题,都给我们对具体电路的研究造成了困难。为便于分析研究各种复杂电路的特性,我们必须将实际的电路和元件理想化,即仅考虑其主要的特性而忽略次要特性,并在一定条件下将其线性化,从而建立起一个能够近似地但足够准确地反映其主要电特性的所谓模型。对电路模型加以研究,即可了解实际电路的主要特性。上述电路模型在电路理论中叫作电路或网络,可见,电路理论中的电路和现实中的电路含意不同,后者对应着具体的物理实体,而前者仅仅是后者的抽象和概括。

无论是哪一种实际电路,在工作过程中,都与电磁现象有关,都伴随着电能和其他形式能的相互转换。在电源内部,进行着非电能到电能的转换。而当电源作为电路的负载(如蓄电池充电)时,又发生相反的能量转换,这种电源所共有的特性,可以用理想化的电源元件——理想电压源或理想电流源来描述;在电路负载中进行着电能向声、光、热、机械等形式的非电能的不可逆转换,正如在扬声器、白炽灯、电炉和电动机中进行的那样,这种能量转换是消耗电能的,为了表征这种耗能特性,引入理想化的耗能元件——理想电阻元件;另外,电路工作时,只要有电流,就有电场和磁场存在,为了反映电场储能和磁场储能特性,引入理想电容和理想电感元件。为了描述电路的其他特性,还需要引入其他理想元件,例如,为了描述电子器件内电压、电流间的依从关系,需要引入受控源等。理想元件的特性将在后面几节中详细研究。

理想元件是某些实际元件的理想化,在一定条件下可以直接作为这些实际元件的模型,如理想电阻元件可以作为电阻器的模型。但大多数实际元件的模型需要若干种理想元件组合,如实际电源,不仅有将非电能转换为电能的特性,当电流流过时,也有一定的电能损耗,所以,要描述实际电源,就要用理想电源元件和理想电阻元件进行组合。同一个实际元件,在不同条件下,要用不同的模型来描述,例如,一个电感线圈在直流稳态电路中,可以仅考虑其内阻的耗能,即模型为理想电阻元件,但当电流变化时,则必须加进反映磁场储能特性的理想电感元件,而当电流变化很快时,还要增加反映电场储能特性的理想电容元件。此外,对电路分析精度要求不同,同一个实际元件的模型也不相同,精度要求越高,对实际元件的模拟就要越精确,模型也越复杂。

严格地说,当电流流过实际电路的任何一部分导体(如连接导线)时,都要产生电能的损耗,同时,在载流导体周围也必然建立起磁场,另外,电路中任何两点间的电压一般不会为零,而只要有电压,就会有电场存在,所以,电能的损耗及电磁场能量的储放,实际上存在于电路的各个部分,而描述这三种特性的理想元件(理想电阻、理想电感、理想电容)也必然沿着电路连续分布,即电路处处(包括一段导线)既

有电阻,又有电感,还有电容,这就是电路参数的分布性。但是,对某些电路,在一定条件(电路尺寸远小于电路工作的最高频率所对应的波长)下,电路参数的分布性对电路性能的影响可以忽略,而认为电路的性质集中体现在具体的电路元件上,电路的性质才可以用理想元件来描述,例如,照明电路的主要特性是电能的损耗,可以集中体现在白炽灯泡上,其他部分的损耗可以忽略不计,这样,电路的主要特性就可以用灯泡的模型即理想电阻来表征。在含有电容器和电感线圈的电路中,可认为电场储能和磁场储能分别集中在电容器和电感线圈中,电路的其他部分均无电磁场能量的储放,这样,分别描述电场储能和磁场储能的理想电容元件和理想电感元件,即可分别作为电容器和电感器的模型。通常,我们把这种电路称为集中参数电路,本教材仅讨论集中参数电路,以后若无特别说明,均指这种电路。

### 思考题

1. 什么是电路模型?它和实际电路有何区别?
2. 同一个电路元件在不同条件和要求下,模型是否相同?

## 1.2 电路分析的基本物理量

### 1.2.1 电流

在电场力的作用下,导体中的自由电荷做定向移动,在导体中即产生了电流。将电荷移动的速率定义为电流强度,用以量度电流的大小,并以  $i(t)$  表示

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

通常,电流强度简称为电流,所以,“电流”一词具有双重含意,既指电荷的定向移动这种物理现象,又指量度这种物理现象的物理量。

在国际单位制(SI)中, $q$  的单位为库仑(C), $t$  的单位为秒(s),则电流  $i$  的单位为安培(A)。

通常,电流  $i$  是时间  $t$  的函数,但若其大小和方向都不随时间而改变,则称为恒定电流或直流,式(1.2.1)可改写为

$$I = \frac{Q}{T} \quad (1.2.2)$$

习惯上将正电荷移动的方向或负电荷移动的相反方向作为电流的实际方向。

### 1.2.2 电压

电荷在电路中定向移动时,必然伴随着电位能的变化,我们将单位正电荷  $dq$  由电路中的某点  $a$  移到另一点  $b$  时的电位能的降低  $d\omega$ ,定义为  $a$ 、 $b$  两点间的电位

差或电压,以  $u(t)$  表示,通常也是时间  $t$  的函数

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.3)$$

在国际单位制(SI)中,能量  $w$  的单位为焦耳(J),电荷  $q$  的单位为库仑(C),电压  $u$  的单位为伏特(V)。

将电位能降低的方向规定为电压的实际方向。如果正电荷由  $a$  点移到  $b$  点,电位能降低,则  $a$  点电位高于  $b$  点,电压  $u_{ab}$  为正值,而  $u_{ba}$  为负值,即

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad (1.2.4)$$

为简化书写,常将时间函数表达式中的  $t$  略去,即  $i(t)$ 、 $u(t)$  可简写为  $i$ 、 $u$ ,但必须牢记,诸如  $i$ 、 $u$  一类的小写字母,通常代表时变量。

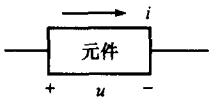


图 1.2.1

由于电压、电流通常都是时间的函数,方向并不固定,即使在直流电路中,在对电路求解之前, $u$ 、 $i$  的实际方向也难以确定。为便于电路分析,通常设定  $u$ 、 $i$  的方向,叫作正方向,或参考方向,其表示方法如图 1.2.1 所示。电压可用 +、- 号表示其参考极性。图 1.2.1 中,电压  $u$  和电流  $i$  的参考方向相同,称为关联的参考方向。

电压和电流的参考方向是任意设定的(但一旦设定即不再改变),并不表示其实际方向,若参考方向和实际方向相同,则取正值,否则取负值。在电路分析中,由电压电流的参考方向和分析结果的正负,即可确定它们的实际方向。可见,只有引入了参考方向的概念后,电压电流的正负才有意义,它们和时间的关系才可表示为某种确定的函数关系,或用函数图像——波形表示。在 1.9 节中将研究几种常见的电压电流波形。

### 1.2.3 功率

在图 1.2.1 中的电路元件上, $u$ 、 $i$  采用关联的参考方向,即认为正电荷沿电位降低之方向(即  $u$  之方向)通过元件,在此过程中,单位正电荷失去的能量可由式(1.2.3)求得

$$dw = u dq \quad (1.2.5)$$

这些能量全部为电路元件吸收,在单位时间内吸收的能量即为元件吸收的功率

$$p = \frac{dw}{dt}$$

将式(1.2.5)、(1.2.1)代入得

$$p = ui \quad (1.2.6)$$

若  $u$ 、 $i$  采用非关联的参考方向,则

$$p = -ui \quad (1.2.7)$$

在国际单位制(SI)中,电压、电流的单位分别为伏特(V)、安培(A),则功率的单位为瓦特(W)。

按式(1.2.6)或(1.2.7)计算元件吸收的功率,计算结果可正可负,正的结果表明  $u$ 、 $i$  的实际方向相同,电荷在通过元件时,电位能确实是降低的,而电路元件确实是吸收功率的;负的计算结果表明,  $u$ 、 $i$  实际方向不同,电荷在通过元件时电位能实际上是升高的,元件实际上不是吸收功率,而是供出功率。

上述计算功率的方法同样适用于部分电路,图 1.2.2 所示的左右两部分电路,左半部分  $u$ 、 $i$  参考方向相反,吸收功率

$$p_1 = -ui$$

右半部分  $u$ 、 $i$  参考方向相同,吸收功率

$$p_2 = ui$$

全电路吸收的总功率

$$p = p_1 + p_2 = -ui + ui = 0$$

上述结果表明,一个完整电路在任一瞬间吸收功率之代数和为零,即一部分电路若吸收一定量的功率,则另一部分电路必然供出相同数量的功率,此结论不难根据能量守恒原理由功率的定义直接导出,另外,此结论也是对功率计算结果是否正确的极好的验证。

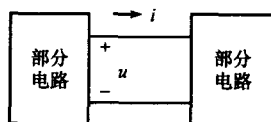


图 1.2.2

### 思考题

1. 电压和电流的参考方向和实际方向有何不同? 为什么要设定参考方向?
2. 什么是关联的参考方向?
3. 如何计算电路的功率? 功率计算与电压、电流的参考方向有何关系?
4. 为什么只计算电路消耗的功率? 其正、负有何物理意义?

## 1.3 基尔霍夫定律

电路中的电压和电流都要受到两类相互独立的约束,一类约束取决于构成电路的各个元件自身的特性,称为元件约束,将在后面几节中研究;另一类约束仅仅取决于电路的结构,即所有元件以什么样的方式连接起来构成电路整体与各元件特性无关,这类约束称为结构约束或拓扑约束,本节讨论的基尔霍夫定律即是这种约束的反映。电路分析的主要任务,就是在给定电路结构、元件特性及独立源的电压或电流的情况下,求出各元件上的电压和电流,所以,基尔霍夫定律必然是电路分析的最基本的定律。

在介绍基尔霍夫定律之前,先介绍电路分析中的几个术语。

在一个电路中,由单个元件或多个元件的串联组合构成了电路的一个个分支,

这些分支称为支路,而将三个或三个以上支路的汇集点称为结点,将由支路构成的电路中的任一闭合路径称为回路,网孔是回路的特殊形式,是指内侧不包含支路的回路。如在图 1.3.1 电路中,元件 1、2,元件 3 及元件 4、5 分别构成了三条支路,而三条支路汇集到 a、b 两个结点,元件 1、2、3,元件 3、4、5 及元件 2、1、4、5 分别构成了三个回路,其中前两个又可称为网孔。

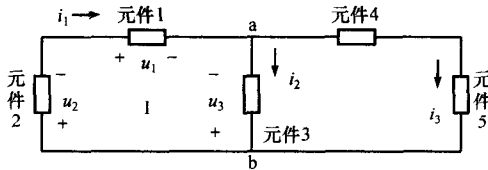


图 1.3.1

### 1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

在任一时刻,流入(或流出)电路中任一结点的所有支路电流的代数和为零,即

$$\sum i = 0 \quad (1.3.1)$$

把 KCL 应用到某一结点时,首先必须设定各支路电流的参考方向,在代数和中,可以约定流入结点的电流为正,流出结点的电流为负,也可以作相反的约定。

将 KCL 应用于图 1.3.1 电路的结点 a 可得到

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0 \quad (1.3.2)$$

式(1.3.2)可改写为

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (1.3.3)$$

该式给出了 KCL 的另一种描述形式,即:在任一时刻,流入任一结点的电流之和,恒等于流出该结点的电流之和。

由电荷守恒原理很容易理解 KCL 的正确性,因为电荷既不能创生,也不能消灭,在结点处又不可能有电荷的积累,所以,单位时间内流入结点的电荷量(即流入结点的电流之和)必然等于流出该结点的电荷量(即流出结点的电流之和)。

由式(1.3.2)或(1.3.3)可知,对于结点 a 的三个支路电流,只要确定了其中的两个,第三个则唯一确定,可见,结点 a 的电流方程对汇集到该结点的各支路电流施加了线性约束。

**例 1.3.1** 在图 1.3.1 电路中,设  $i_1 = 3\text{A}$ ,  $i_2 = 5\text{A}$ , 求  $i_3$ 。

解:由结点 a 的电流方程得

$$i_3 = i_1 - i_2 = 3 - 5 = -2(\text{A})$$

-- 负的结果表明  $i_3$  的实际方向与所设参考方向相反。

### 1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

在任一时刻,沿电路中的任一回路循行一周,回路内各元件(或支路)上的电压之代数和为零,即

$$\sum u = 0 \quad (1.3.4)$$

在应用KVL时,同样必须先设定各元件或支路上电压的参考方向,并且约定,若电压参考方向与循行方向一致,在代数和取正值,相反则取负值,当然也可作相反的约定。

对图1.3.1电路中的I回路,若沿顺时针方向循行,在 $u_1$ 、 $u_2$ 为关联的参考方向下,可列出

$$u_1 + u_2 - u_3 = 0 \quad (1.3.5)$$

若沿逆时针方向循行,则可列出

$$u_3 - u_2 - u_1 = 0 \quad (1.3.6)$$

不难发现,两式实际上是相同的,可见,回路电压方程与循行方向无关。

由式(1.3.5)或(1.3.6)不难理解,KVL给回路中的各电压施加了线性约束,正像KCL给汇集到任一结点的各支路电流施加了线性约束一样。

KVL由能量守恒原理很容易得到验证,因为当一个电荷由电路中的某点出发,沿某一回路循行一周时,尽管在路途中电位能有升有降(分别对应负的电压值和正的电压值),但回到出发点时,电位能仍保持原数值,即电位能的总降低值(即电压之代数和)为零。

**例 1.3.2** 在图1.3.1电路中,设 $u_1 = 3\text{V}$ , $u_2 = 2\text{V}$ ,求 $u_3$ 。

解:由I回路的电压方程可得

$$u_3 = u_1 + u_2 = 3 + 2 = 5(\text{V})$$

正的结果说明 $u_3$ 的实际方向与设定的参考方向相同。

在上述讨论中,并未涉及电路中各元件的性质,可见,KCL、KVL仅仅取决于电路的连接方式,而与构成电路的元件性质无关。

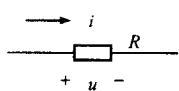
#### 思考题

1. 解释名词术语:支路、结点、回路、网孔。
2. 说明电路中电压、电流之间的约束关系。
3. 基尔霍夫电流定律对结点电流施加了怎样的线性约束?
4. 基尔霍夫电压定律对回路电压施加了怎样的线性约束?

## 1.4 理想无源元件

### 1.4.1 理想电阻元件

为了反映电路和电路元件的耗能特性,引入理想的耗能元件——理想电阻元件。理想的含义为元件上仅有能量的损耗,而无电磁场能量的储放。根据元件上电压、电流的关系(VCR),可分为线性和非线性两种。



理想线性电阻元件用图 1.4.1 所示的电路符号表示。在任何时刻,元件上的电压和电流都服从于欧姆定律,即在关联的参考方向下,电压、电流关系可表示为

$$u = Ri \quad (1.4.1)$$

而在相反的参考方向下,为

$$u = -Ri \quad (1.4.2)$$

式中的  $R$  是描述元件特性的参数,叫作电阻元件的电阻,在国际单位制(SI)中, $R$  的单位为欧姆( $\Omega$ ),通常,电阻元件简称为电阻,此时,电阻具有双重含义。

理想线性电阻元件的特性也常用另一种参数——电导( $G$ )来描述,即

$$G = \frac{i}{u} = \frac{1}{R} \quad (1.4.3)$$

在国际单位制(SI)中, $G$  的单位为西门子(S)。在关联的参考方向下以电导表示的元件的 VCR 为

$$u = \frac{i}{G} \quad (1.4.4)$$

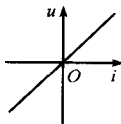


图 1.4.2

将理想电阻元件的 VCR 用  $u$ 、 $i$  坐标系下的曲线表示,叫作元件的伏安特性曲线,线性电阻元件的伏安特性曲线为过原点且斜率为  $R$  的直线,如图 1.4.2 所示。即  $u$ 、 $i$  成线性关系,故  $R$ 、 $G$  是一个与  $u$ 、 $i$  无关的常数。

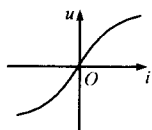


图 1.4.3

非线性电阻元件的伏安特性不是过原点的直线。图 1.4.3 示出了一个作为非线性电阻元件的白炽灯泡的伏安特性, $u$ 、 $i$  为非线性关系,即  $R$ 、 $G$  不是常数,随  $u$  或  $i$  的改变而改变。

理想线性电阻元件可作为电阻器、电阻炉等以耗能特性为主的实际元件的近似模型,对于典型的非线性电阻元件白炽灯,在额定状态下工作时,也可以用理想线性电阻元件作为模型。

在关联的参考方向下,理想线性电阻元件上的功率

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1.4.5)$$

因为  $R, G$  都是正实数, 所以必有  $p \geq 0$ , 即理想电阻元件为纯粹的耗能元件。

在以后的讨论中, 为简便计, 将理想线性电阻元件简称为电阻元件。

### 1.4.2 理想电容元件

引入理想电容元件是为了反映电路的电场储能特性。按照所储电荷和电压的关系, 可分为线性电容元件和非线性电容元件, 本教材仅讨论线性电容元件, 为简便计, 省略线性二字。

理想电容元件用图 1.4.4 的电路符号表示。元件所储电荷与端电压间的关系可表示为

$$q = C u \quad (1.4.6)$$

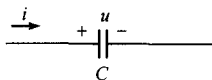


图 1.4.4

式中  $C$  为描述元件特性的参数, 叫作理想电容元件的电容量, 简称为电容, 在国际单位制(SI)中,  $C$  的单位为法拉(F), 因法拉单位太大, 在实用中常采用微法拉( $\mu\text{F}$ )和皮法拉( $\text{pF}$ )

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}, \quad 1\text{pF} = 10^{-6}\mu\text{F} = 10^{-12}\text{F}$$

为方便计, 常把电容元件简称为电容, 故电容二字也具有双重含义。

当理想电容元件上的电压变化时, 所储电荷随之改变, 在电容中将产生电流, 在关联的参考方向下

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.4.7)$$

式(1.4.7)即理想电容元件的 VCR, 即任意时刻, 流过理想电容的电流仅与该时刻电容上的电压的变化率成正比, 而与该时刻电压的大小和建立过程无关, 可见, 电容元件具有动态特性, 为动态元件。若  $u, i$  的参考方向相反, 则 VCR 为

$$i = -C \frac{du}{dt} \quad (1.4.8)$$

理想电容元件 VCR 的另一形式为

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1.4.9)$$

式(1.4.9)表明, 任意时刻, 理想电容上的电压不仅与即时的电流有关, 且与电容上电压的初始值  $U_0$  有关,  $U_0$  记录了电流  $i$  的全部过去的历史, 即电容有记忆作用, 为记忆元件。

实际的电容元件即电容器, 在介质损耗和介质漏电可以略去时, 可直接用理想电容元件作为模型, 但在介质损耗和介质漏电必须考虑时, 模型中还要增加电阻元件。



### 1.4.3 理想电感元件

引入理想电感元件以反映电路的磁场储能特性。理想电感元件可理解为由无阻的理想导线绕成的线圈。

给上述理想线圈即理想电感元件通以电流,在线圈内即产生磁通 $\phi$ ,设 $\phi$ 与全部线匝交链,则将磁通 $\phi$ 与线匝 $N$ 的乘积叫作磁链,以 $\psi$ 表示

$$\psi = N\phi$$

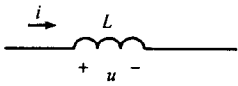


图 1.4.5

根据 $\psi$ 与电流 $i$ 的关系,理想电感元件可分为线性和非线性两种,在此,仅讨论线性电感元件,电路符号如图 1.4.5 所示,磁链与电流 $i$ 成正比关系

$$\psi = Li \quad (1.4.10)$$

式中 $L$ 称为理想线性电感元件的电感量,简称电感,是描述元件特性的参数,在国际单位制(SI)中, $L$ 的单位是亨利(H)。

当流过电感元件的电流改变时,必将引起磁链的改变,根据电磁感应定律,在元件两端必然产生感应电压,在关联的参考方向下,感应电压

$$u = \frac{d\psi}{dt} \quad (1.4.11)$$

对线性电感元件,以 $\psi = Li$ 代入得

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.4.12)$$

式(1.4.12)表明,任意时刻,理想线性电感元件上的电压仅与该时刻元件中的电流的变化率成正比,而与该时刻电流的大小和建立过程无关,即电感元件具有动态特性,属于动态元件。若 $u$ 、 $i$ 参考方向相反则

$$u = -L \frac{di}{dt} \quad (1.4.13)$$

式(1.4.12)、(1.4.13)即理想线性电感元件的 VCR,其另一形式为

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1.4.14)$$

式(1.4.14)表明,任意时刻元件中的电流不仅与该时刻元件上的电压有关,且与电流的初始值 $I_0$ 有关, $I_0$ 记录了电压过去的全部历史,即电感元件也是记忆元件。

实际电感元件即电感器,在绕线电阻可以略去时,可直接以理想电感元件作为模型,当必须考虑绕线电阻时,模型中还要增加理想电阻元件。

以后的讨论一般不涉及实际电路元件,为叙述方便,将三种理想的线性无源元件分别简称为电阻元件、电容元件、电感元件。

三种无源元件的 VCR 给电路中的电压、电流施加了另一类约束——元件约束。