

高等学校规划教材

电路和电子技术

(上)

李燕民 主编



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校规划教材

电路和电子技术(上)

主编 李燕民

编者 张振玲 郜志峰 王勇



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是按照教育部(前国家教育委员会)1995年颁发的高等工业学校“电工技术(电工学Ⅰ)”课程的教学基本要求,根据作者多年的教学实践经验编写的。各章后均附有习题,以便于读者掌握本书的基本内容和分析方法。

本书共分为4章,分别为:直流电路,电路的暂态分析,正弦交流电路,三相交流电路。

本书可与《电路和电子技术(下)》及《电机与控制》教材配套使用,作为高等学校非电类本科生“电工和电子技术”(电工学)课程的教材,或供其他相关专业选用,也可作为有关的工程技术人员自学和参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电路和电子技术. 上/李燕民主编. —北京:北京理工大学出版社, 2004. 1

ISBN 7-5640-0096-1

I. 电… II. 李… III. ①电路理论—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM13②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 117103 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 689 12824(发行部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefedit@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地质印刷厂

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 · 1/16

印 张 / 11

字 数 / 260 千字

版 次 / 2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1~5000 册

责任校对 / 郑兴玉

定 价 / 15.50 元

责任印制 / 刘京凤

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

《电路和电子技术》分为上、下两册,是按照教育部(前国家教育委员会)1995年颁发的高等工业学校:“电工技术(电工学Ⅰ)”和“电子技术(电工学Ⅱ)”两门课程的教学基本要求,根据作者多年的教学实践经验编写的。

“电工和电子技术”课程是面向高等工科学校本科生非电类专业开设的电类技术基础课。根据目前高等学校对学生进行全面素质教育的要求,这门课程的改革势在必行且至关重要。几年来,我们对“电工和电子技术”课程内容、体系、方法及手段进行了改革与实践,并取得了一定的成效。通过多年来的教学实践,尤其是近几年的教学改革和探索,我们按照新的课程体系,编写了《电路和电子技术》(与《电机与控制》配套),作为“电工和电子技术”课程的教材。

“电工和电子技术”课程的总体框架是:电路基础—元件—线路—系统。《电路和电子技术》教材在实现以上教学思想方面作了一些尝试,本教材的特点是:

1. 打破了原“电工和电子技术”课程中电路、电子、电机与控制相对独立的格局,加强了电路、电子、电机与控制的内在联系,并突出了系统性。改变了通常将“电工和电子技术”课程分为“电工技术”和“电子技术”两大部分的作法,将电路基础部分的内容适当压缩,电子技术部分的内容提前,以便在电机和控制部分之后,能够增加系统的知识。我们将电工电子技术的新发展引入教学,如 CPLD 等新技术的基础知识,这是编写本套教材的宗旨。

2. “电工和电子技术”课程的新体系体现了一定的基础性和先进性。使学生通过本课程的学习,能够具有较为宽厚的基础理论和基础知识,具有可持续发展和创新的能力。为此,我们在《电路和电子技术》教材中强调了课程内容的基础性,以元件—线路—系统为脉络,集中给出基本电子元件及特性,在介绍基本单元电路的基础上,适当给出一些应用实例。以培养学生对新技术的浓厚兴趣,引导他们积极主动地学习。

3. 新体系的课程内容注重培养学生分析问题和解决问题的能力、综合运用所学知识的能力以及工程实践能力。《电路和电子技术》教材中加入了元器件的选择和性能比较,并举出一些较为综合的系统实例,帮助学生了解电工技术和电子技术在工程实际中的应用。并注意将经典的电路及电子的基础理论与电子技术的最新发展相结合,用 EDA 的设计方法去设计组

合逻辑电路和时序逻辑电路等。在第12章“PLD 技术及其应用”中,介绍了工程设计软件,使非电类学生具有一定的电子线路的设计能力。

4. 在选材和文字叙述上力求符合学生的认知规律,由浅入深、由简单到复杂、由基础知识到应用举例。本书配有丰富的例题和习题,并在书后给出了部分习题的参考答案。

《电路和电子技术》由北京理工大学信息科学技术学院的部分教师编写,其中,张振玲编写了第1、2章;郜志峰编写了第3章、第4章1~3节;王勇编写了4.4节,温照方编写了第5、8、11章;李燕民编写了6、7、9、10章;姜明编写了第12章。由李燕民担任主编,负责全书的统稿。

北京理工大学庄效桓副教授对本书进行了认真地、逐字逐句地审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议。此外,北京理工大学信息学院电工教研室的各位老师在本书编写过程中,也给予了很大的帮助。在此,一并表示衷心的感谢!

由于我们的水平和能力有限,加之编写时间较为仓促,书中难免存在一些疏漏和错误之处,恳请读者批评指正,以便今后加以改进。

编 者

2003年8月

目 录

第 1 章 直流电路	(1)
1.1 电路的基本概念	(1)
1.1.1 电路的作用与组成	(1)
1.1.2 电路模型	(1)
1.1.3 电压、电流的参考方向	(2)
1.2 电路元件	(3)
1.2.1 电阻元件	(3)
1.2.2 电感元件	(5)
1.2.3 电容元件	(6)
1.2.4 电源元件	(8)
1.3 基尔霍夫定律	(9)
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	(9)
1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	(11)
1.4 电路的一般分析方法	(12)
1.4.1 支路电流法	(12)
1.4.2 结点电位法	(14)
1.5 叠加原理	(18)
1.6 无源二端网络的等效变换	(20)
1.6.1 等效二端网络的概念	(20)
1.6.2 电阻串联以及电阻并联电路的等效变换	(21)
1.6.3 电阻混联电路的等效变换	(22)
1.6.4 外加电源法求无源二端网络的等效电阻	(24)
1.7 电阻星形联接与三角形联接的等效变换	(25)
1.7.1 电阻三角形联接等效变换为星形联接	(26)
1.7.2 电阻星形联接等效变换为三角形联接	(26)
1.8 电源模型的等效变换	(27)
1.9 等效电源定理	(30)
1.9.1 戴维宁定理	(30)
1.9.2 诺顿定理	(34)
1.10 含受控源电路的分析	(35)
1.10.1 受控源的类型和符号	(35)

1.10.2 含受控源电路的分析	(37)
1.11 非线性电阻电路的分析	(40)
1.12 电器设备的额定值	(42)
习题	(43)
第 2 章 电路的暂态分析	(49)
2.1 换路定律与暂态过程初始值的确定	(49)
2.1.1 电路产生暂态过程的原因	(49)
2.1.2 换路定律	(50)
2.1.3 暂态过程初始值的确定	(51)
2.2 RC 电路的响应	(53)
2.2.1 RC 电路的零输入响应	(53)
2.2.2 RC 电路的零状态响应	(56)
2.2.3 RC 电路的全响应	(59)
2.3 RL 电路的响应	(61)
2.3.1 RL 电路的零输入响应	(62)
2.3.2 RL 电路的零状态响应	(63)
2.3.3 RL 电路的全响应	(64)
2.4 三要素法	(66)
2.5 序列脉冲作用下 RC 电路的响应	(70)
2.5.1 RC 微分电路	(70)
2.5.2 RC 积分电路	(71)
习题	(73)
第 3 章 正弦交流电路	(76)
3.1 正弦交流电的基本概念	(76)
3.1.1 正弦交流电的三要素	(76)
3.1.2 有效值	(78)
3.1.3 相位差	(79)
3.2 正弦交流电的相量表示法	(80)
3.3 单一参数的交流电路	(84)
3.3.1 电阻元件的交流电路	(84)
3.3.2 电感元件的交流电路	(86)
3.3.3 电容元件的交流电路	(88)
3.3.4 相量模型	(91)
3.4 正弦交流电路的分析	(92)
3.4.1 基尔霍夫定律的相量形式	(93)
3.4.2 串联交流电路	(94)
3.4.3 并联交流电路	(100)
3.5 正弦交流电路的功率	(104)
3.5.1 瞬时功率	(104)

3.5.2	有功功率、无功功率和视在功率	(105)
3.5.3	功率因数的提高	(108)
3.6	交流电路的频率特性	(111)
3.7	电路中的谐振	(116)
3.7.1	串联谐振	(116)
3.7.2	并联谐振	(121)
3.8	双口网络	(124)
3.8.1	双口网络及其端口条件	(125)
3.8.2	双口网络参数方程及其等效电路	(125)
3.9	非正弦周期信号电路	(132)
3.9.1	非正弦周期信号的分解	(132)
3.9.2	非正弦周期信号电路的谐波分析法	(135)
	习题	(137)
第 4 章	三相交流电路	(144)
4.1	三相电源	(144)
4.1.1	三相正弦交流电的产生	(144)
4.1.2	三相电源的星形联接	(145)
4.1.3	三相电源的三角形联接	(147)
4.2	三相交流电路的分析	(148)
4.2.1	负载的联接	(148)
4.2.2	负载星形联接的三相电路	(149)
4.2.3	负载三角形联接的三相电路	(153)
4.3	三相电路的功率	(155)
4.3.1	一般三相电路的功率	(155)
4.3.2	对称三相电路的功率	(155)
4.4	安全用电常识	(157)
4.4.1	触电的危害	(157)
4.4.2	触电方式	(157)
4.4.3	触电的预防	(158)
4.4.4	电气设备的保护接地和保护接零	(158)
4.4.5	静电的危害和防护	(161)
	习题	(161)
	部分习题参考答案	(164)
	参考文献	(168)

第 1 章 直流电路

本章在简要介绍电路的基本概念之后,着重讨论了电路元件的伏安特性和基尔霍夫定律,它们是分析电路的依据,然后,以直流电路为例介绍分析电路的方法。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的作用与组成

实际电路是由各种电气部件(如电池、电阻器、电容器、电感器、半导体器件等)为完成某些特定的功能按一定方式联接起来的电流流过的全部通路。

电路的功能很多,其中主要有两个,一个是输送、分配和转换电能,如电力系统;另一个功能是对信息进行传递、处理和运算,常见的例子有收音机、电视机、计算机等。

电路的结构是多种多样的,组成电路的电气部件更是种类繁多,电气部件中通常将能把其他形式的能量(如机械能、化学能等)转换为电能的设备称为电源,而将由电能转换为其他形式能量的设备称为负载。不同功能的电路,其基本组成部分有电源、负载和联接导线。为了实现对电路的接通、切断和各种保护措施,电路中还需要有一些辅助设备,如开关、熔断器等。

在电路中,把推动电路工作的电源或信号源产生的电压或者电流称为激励,而把由于激励的作用在电路中所产生的电压或电流称为响应。

电路中的电流、电压、电动势的大小和方向如果不随时间变化,则称它们为恒定电流、恒定电压和恒定电动势,分别用符号 I 、 U 、 E 表示,而用符号 i 、 u 、 e 来表示任意波形的电流、电压和电动势。

1.1.2 电路模型

讨论电路问题有两个方面,一是如何设计一个电路来达到某一特定要求;二是电路已经构成,如何分析计算电路中的电压、电流以及功率。前者属于电路设计范围的内容,本书电路部分只讨论后者,即电路分析的内容。

当电流流过实际的电气部件,电能的消耗与电磁能往往同时存在。例如手电筒电路,当有电流通过灯泡时,灯泡不仅发热到白炽状态发光消耗电能,而且还会产生磁场,因而灯泡不仅具有电阻的作用还兼有电感的性质;而电池两端的电压也只能当输出电流在某一范围内才近似为一定值,同时,导线上也有压降。因此,如果直接分析一个由实际部件组成的电路将是十分复杂的。为此,我们设想用理想元件来近似表征实际部件。所谓理想元件是指只显示单一电磁现象且可以用数学方法精确定义的电路元件。由于不可能制造出只具有单一性质

的部件，所以理想元件是不存在的。但是在一定的条件下，可以用理想元件近似表征实际部件。如在手电筒电路中，电池的内阻和灯丝的电阻相比是很小的，若可以忽略不计，就可以把电池看作是能够提供恒定电压的理想电压源；在联接导线的电阻与灯丝的电阻相比可以忽略不计时，则认为它是没有内阻的理想导线；当灯丝被认为只有阻碍电流通过的作用，是一个消耗电能的元件时，就可以用一个理想电阻元件来表示。这样，手电筒电路就可以用一个理想电压源、理想电阻和理想联接导线组成的电路来表示，如图 1.1.1 所示。

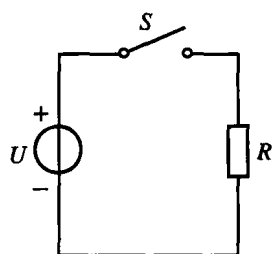


图 1.1.1 手电筒电路

由理想元件组成的电路称为电路模型。在一定条件下，模型能表征或近似表征实际电路表现出来的电磁现象，所以通过分析电路模型，就可以知道实际电路的性能。因此，本书所研究的电路都是由理想元件构成的电路模型。

1.1.3 电压、电流的参考方向

电路中能量的传递与转换，不仅与电流、电压、电动势的大小有关，还与它们的方向有关。习惯上，人们把正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向规定为电流的方向，电压的方向规定为由高电位指向低电位，而电动势的方向规定为由低电位指向高电位，即电位升的方向。上述电流、电压、电动势的方向又叫实际方向或真实方向。

由于在分析复杂的直流电路时，人们很难预先判断电路中电流、电压、电动势的实际方向，而在交流电路中，各电量的实际方向又随时间不断变化。为此，引入参考方向这一概念。在分析计算电路时，电流、电压、电动势的参考方向可以任意假定，在确定参考方向后，作如下规定：当实际方向与参考方向相同时，电流、电压、电动势的数值取正值，反之，其数值取负值。这样就可以利用电流、电压、电动势的正、负值，结合其参考方向来表示它们的实际方向。例如在图 1.1.2(a)中，箭头表示电流的参考方向，其值为 1A ，则表示电流的参考方向与实际方向相同，即电流的实际方向也是由 A 流向 B 。在图 1.1.2(b)中，若假定电压的参考方向由 A 指向 B ，则当 $U = -1\text{V}$ 时，表明电压的实际方向与参考方向相反，即 A 点电位低于 B 点电位 1V 。可见，如果离开了参考方向来谈电流、电压的正、负值是没有意义的。

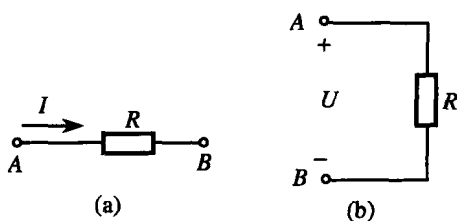


图 1.1.2 电压、电流参考方向

电压、电流的参考方向也叫正方向，在电路图中电流用箭头表示其参考方向，而电压或电动势除用符号“+”、“-”表示外，还可用双下标表示，如在图 1.1.2(b)中， U_{AB} 则指电压的参考方向为由 A 指向 B ，即 A 点的参考极性为“+”， B 点的参考极性为“-”。

电压、电流的参考方向原则上可以任意假定，但为了计算方便，在分析电路时，常采用关联参考方向，即把一段电路的电压、电流参考方向选取一致。

当一段电路（可以由一个或多个元件组成）两端的电压和电流取关联参考方向时，对其功率做如下规定：若 $P > 0$ ，该段电路是消耗功率或吸收功率的；若 $P < 0$ ，则该段电路是产生功率或提供功率的。这一点是很容易理解的，当一段电路两端的电压和电流取关联参考方向，而功率又大于零时，因为 P 是 U 与 I 的乘积，所以，一种可能是电压、电流的实际方向

与参考方向相同，即都为正值；另一种可能是电压、电流参考方向与实际方向相反，即都为负值，但无论哪种情况，电压和电流的实际方向是相同的。这就说明正电荷通过该段电路时是由高电位到低电位，即失去了电能，所以说该段电路消耗了电能，或者是将电能贮藏起来，转变为其他形式的能量，称它为吸收了电能。而当一段电路的电压、电流取关联参考方向，而功率又小于零时，说明这段电路的电压和电流的实际方向相反。也就是说，正电荷通过这段电路时，是由低电位向高电位移动的，因此正电荷获得了电能，表明在这段电路中外力克服电场力做功，因此说这段电路是产生功率或者说提供功率的。

例题 在图 1.1.3 中，方框 N 表示电路的一部分或一个元件。 N 两端的电压和电流参考方向如图 1.1.3 中所示。求当 (1) $U=1\text{ V}$, $I=1\text{ A}$, (2) $U=1\text{ V}$, $I=-1\text{ A}$ 时， N 的功率，并指出是消耗功率还是产生功率。

解 在图 1.1.3 中，电压、电流为关联参考方向。

由 $P=UI$ 得出

(1) 当 $U=1\text{ V}$, $I=1\text{ A}$ 时， N 的功率为

$$P=UI=1\times 1=1\text{ W}$$

因为 $P>0$ ，所以 N 是吸收功率。

(2) $U=1\text{ V}$, $I=-1\text{ A}$ 时， N 的功率为

$$P=UI=1\times (-1)=-1\text{ W}$$

因为 $P<0$ ，所以 N 是提供功率。

当一段电路两端的电压和电流取非关联参考方向时，如何判断它是提供功率还是吸收功率，请读者自行分析。

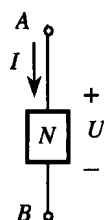


图 1.1.3 例题的图

1.2 电路元件

从能量转换的角度进行分析，电路中存在着电能的产生以及电能的消耗、磁场能量的存储和电场能量的存储。理想电压源和理想电流源是表征将其他形式能量转换为电能理想元件。而电阻元件、电感元件和电容元件则分别表征电能的消耗、磁场能量和电场能量的存储，简称电阻、电感和电容。

1.2.1 电阻元件

凡是对电流具有阻碍作用并把电能不可逆转地转换为其他形式的能量的二端元件称为电阻元件。

在电阻元件两端加上电压，则有电流通过。电阻元件两端的电压与通过它的电流之间的关系可在伏安平面上用一条曲线表示，该曲线称为电阻元件的 $V-A$ 特性曲线。

若电阻元件的伏安特性曲线通过坐标原点且为一条直线，如图 1.2.1 所示，则称该电阻元件为线性电阻元件。其电路符号如图 1.2.2 所示。

线性电阻的特点是电阻值为一常数，与通过它的电流和作用在它两端的电压大小无关。

线性电阻中通过的电流与它两端的电压成正比，即遵循欧姆定律。当 u 、 i 取关联参考方向时，见图 1.2.2，有

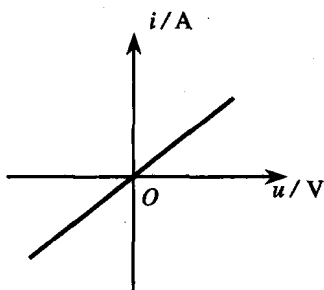


图 1.2.1 线性电阻元件 $V-A$ 特性曲线

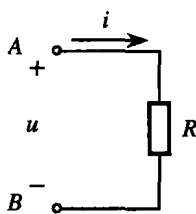


图 1.2.2 线性电阻元件的电路符号

$$u = iR \quad (1.2.1)$$

式中 u —— 电压单位为伏特 (V);

i —— 电流单位为安培 (A);

R —— 电阻单位为欧姆 (Ω)。阻值高的电阻可用 $k\Omega$ ($10^3 \Omega$) 或 $M\Omega$ ($10^6 \Omega$) 为单位。

若令 $G = 1/R$, 则式(1.2.1)可写成

$$i = uG \quad (1.2.2)$$

式中 G 称为电阻元件的电导, 其单位为西门子 (S), 简称西。

如果电阻元件两端电压与电流参考方向相反, 则欧姆定律写成

$$u = -iR$$

由式(1.2.1)可知电阻元件两端电压与通过它的电流总是同时存在的, 所以说它是一个“无记忆”元件, 即电阻元件中的电压 (或电流) 只由同一时刻的电流 (或电压) 所决定, 而与该时刻以前的电流 (或电压) 值无关。

若将式(1.2.1)两边同乘以 i , 得瞬时功率

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.2.3)$$

式中 p —— 瞬时功率 (W);

由于 p 与 i^2 或 u^2 成正比, 故电阻上的功率总是大于零, 这说明电阻是消耗电能的。在 0 到 T 这段时间内电阻消耗的电能

$$w = \int_0^T p dt = \int_0^T u i dt \quad (1.2.4)$$

$V-A$ 特性曲线不是直线的电阻元件称为非线性电阻元件, 其电路符号如图 1.2.3 所示。

非线性电阻元件的电压与电流之间的关系不遵循欧姆定律, 其阻值不是常数, 它随着电阻两端电压或电流值的不同而变动。

实际中用到的白炽灯、电阻炉、电阻器等, 虽然它们的用途、结构各不相同, 但在电路中表现出的电特性却是相同的, 即都具有阻碍电流通过的作用且消耗电能, 所以在一定条件下, 它们均可用电阻元件作为模型。

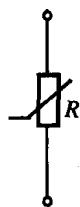


图 1.2.3 非线性电阻元件符号

今后本书中凡未加说明的电阻元件均指线性电阻元件。

1.2.2 电感元件

电感元件是存储磁场能量的电路元件，简称电感，它存储磁场能量的特性用电感 L 这一参数表示。

图 1.2.4 中，在线圈两端加电压 u ，线圈中将有电流 i 通过。若 u 、 i 为关联参考方向，线圈的匝数为 N ，电流通过每匝线圈产生的磁通为 Φ ，则乘积

$$\psi = N\Phi$$

称为线圈的磁链。由于 Φ 和 ψ 都是由线圈本身的电流产生的，故称为自感磁通和自感磁链。若磁通的参考方向与电流的参考方向符合右手螺旋定则，则磁链与电流的比值称为电感线圈的电感，即

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1.2.5)$$

式中 ψ 的单位用韦伯 (Wb)， i 的单位用安 (A)，则电感 L 的单位为亨利 (H)，亨利的千分之一为毫亨 (mH)。

L 为常数的电感称为线性电感，其电路符号如图 1.2.5 所示。

当通过电感的电流发生变化时，磁链 ψ 也要发生变化，根据电磁感应定律，电感元件中将会产生感应电动势 e 。楞次定律指出，感应电动势 e 总是阻碍磁通的变化。如果电流的参考方向与磁通的参考方向符合右手螺旋定则，而感应电动势的参考方向与磁通的参考方向也符合右手螺旋定则，则电流的参考方向与感应电动势的参考方向一致，如图 1.2.5 所示，感应电动势 e 的表达式为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1.2.6)$$

由上式可以计算出感应电动势 e 的大小，根据 e 的正、负值并结合其参考方向，可以确定感应电动势的实际方向。例如在某一瞬间，电流为正值且在增长，由式 (1.2.6) 可知 e 为负值，表明其实际方向与参考方向相反，也就是说此时 e 阻碍电流增长。

在图 1.2.5 中，有

$$u = -e$$

将式 (1.2.6) 代入上式，可得到电感电压与电流的关系为

$$u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (1.2.7)$$

式 (1.2.7) 表明某一时刻电感两端电压与电流的变化率成正比，而与该时刻电感中电流的大小无关，故称电感元件为“动态”元件。在直流电路中，由于电流变化率为零，所以电感两端电压等于零，故在直流电路中可将电感看成是一条短路线。

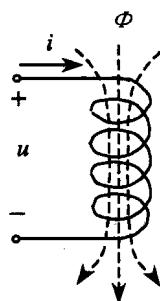


图 1.2.4 电感线圈

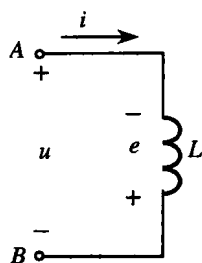


图 1.2.5 电感元件电路符号

如果用电感两端的电压表示电流, 可以将式 (1.2.7) 两边对时间积分。电压对时间的积分具有磁通的量纲, 为了包括电感中的全部磁通, 积分起始时间应从负无穷大开始, 即

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1.2.8)$$

式 (1.2.8) 说明任一时刻电感中的电流与初始电流 $i(0)$ 以及从 0 到 t 所有时刻的电压值有关, 所以有时也称电感为“有记忆”元件。

电感元件的瞬时功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.2.9)$$

上式中只要 i 的绝对值增大时, 则 $i \frac{di}{dt} > 0$, $p > 0$, 说明在此期间电感从外部输入电功率, 磁场能量增加, 即电感将电能转换为磁场能; 当 i 的绝对值减小时, 则 $i \frac{di}{dt} < 0$, $p < 0$, 说明在此期间电感向外部输出电功率, 磁场能量减少, 即电感将磁场能量转换为电能输送出去。由此可见, 当电感中有交变电流通过时, 电感存储磁场能量的过程是可逆的能量转换过程。

任一瞬间 t 存储于电感元件中的磁场能量, 应等于瞬时功率从 $-\infty$ 至该时刻的积分, 即

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t u i dt = L \int_{-\infty}^t i \frac{di}{dt} dt$$

若电感中的电流是从零增大到 t 时刻的 i , 则

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = L \int_0^i i di = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.2.10)$$

可见, 电感元件某一时刻存储的磁场能量仅与其参数 L 和该时刻的电流值有关。上式中若 L 的单位用亨 (H), i 的单位用安 (A), w 的单位则为焦耳 (J)。

L 不为常数的电感称为非线性电感元件。本书未加说明的电感均指线性电感元件。

实际的电感线圈当有电流通过时, 不仅具有存储磁场能量的特征, 而且还会消耗电能。如果导线电阻很小, 消耗的电能与存储的磁场能量相比小得多时, 就可以用理想电感元件作为实际电感线圈的模型。否则, 将需用电感元件与电阻元件的串联作为实际电感线圈的模型。

1.2.3 电容元件

电路中凡是有电荷聚集的场合, 在其周围就会产生电场。电容元件是存储电场能量的元件。

电容元件简称电容, 它存储电场能量的特性用电容 C 这一参数表示。电容元件的电路符号如图 1.2.6 所示。

图 1.2.6 中 $+q$ 和 $-q$ 是电容极板上的电荷, 电容电压的参考方向如图 1.2.6 中所示, 则 q 与 u 之间有如下关系

$$C = \frac{q}{u} \quad (1.2.11)$$

式中比值 C 是一个大于零的数值, 称为电容元件的电容量, 亦称为电容。当 q 的单位用库仑 (C), u 的单位用伏 (V), 则 C 的单

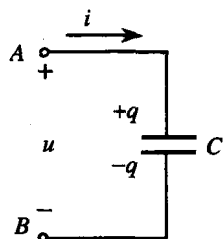


图 1.2.6 电容元件电路符号

位为法拉，简称法，用 F 表示。由于实际电容的数值很小，常用微法（ μF ）或皮法（ pF ）做单位。

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

如果 C 是常数，则电容元件是线性的。 C 不为常数的电容称为非线性电容元件，本书未加说明的电容均指线性电容元件。

图 1.2.6 中，若 u 、 i 取关联参考方向，当 u 发生变化时，电容极板上的电荷量相应发生变化，在与电容极板相联的导线中将出现电流为

$$i = \frac{dq}{dt}$$

将式 (1.2.11) 代入上式，即得

$$i = \frac{dCu}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.2.12)$$

式 (1.2.12) 表明，在某一时刻流过电容的电流正比于电容两端电压的变化率，而与该时刻电容两端电压的大小无关。电容两端的电压的变化率越大，则电流也越大，所以有时称电容是动态元件。在直流电路中，由于电容的两端电压是恒定不变的，所以电流为零，这时电容相当于开路，即电容有隔断直流的作用。

如果将式 (1.2.12) 两边对时间积分，可以得到用通过电容的电流表示其两端电压的表达式，即

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1.2.13)$$

电容元件的瞬时功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1.2.14)$$

由式 (1.2.14) 可知，当 u 的绝对值增大时，则 $u \frac{du}{dt} > 0$ ， $p > 0$ ，说明在此期间电容从外部输入电功率，电场能量增加，即电容将电能转换为电场能；当 u 的绝对值减小时，则 $u \frac{du}{dt} < 0$ ， $p < 0$ ，说明在此期间电容向外部输出电功率，电场能量减少，即电容将电场能量转换为电能输送出去。由此可见，当电容中有交流通过时，电容存储电场能量的过程是可逆的能量转换过程。

任一时刻 t 存储于电容元件中的电场能量，应等于从 $-\infty$ 至该时刻瞬时功率 p 的积分，即

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t u i dt = C \int_{-\infty}^t u \frac{du}{dt} dt$$

若电容两端的电压是从零增大到 t 时刻的 u ，则

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = C \int_0^u u du = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1.2.15)$$

可见，电容元件任一时刻存储的电场能量仅与其参数 C 和电压在该时刻的值有关。上式中若 C 的单位用法 (F)， u 的单位用伏 (V)， w 的单位则为焦耳 (J)。

如果忽略实际电容器的漏电现象，则可用理想电容元件作为它的模型。

1.2.4 电源元件

电源元件有理想电压源（恒压源）和理想电流源（恒流源）两种。

1. 理想电压源

在电路中提供一个定值电压的电源叫理想电压源，又称恒压源。其电路符号如图 1.2.7 所示。 u_s 为理想电压源的电压，“+”、“-”号为其电压的参考极性。

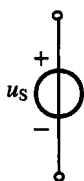


图 1.2.7 理想电压源电路符号

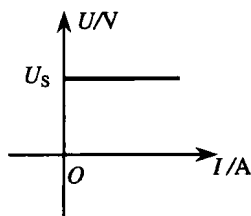


图 1.2.8 直流理想电压源 $V-A$ 特性

由理想电压源定义可知，它具有如下两个特点：其一是理想电压源的电压始终保持一个定值或是一定的时间函数，与通过它的电流大小无关；其二是流过理想电压源的电流是由与之相联的外电路决定的。直流理想电压源伏安特性如图 1.2.8 所示，在 $U-I$ 平面上它是一条与横坐标轴平行的直线，表明其端电压与通过它的电流大小无关，随着外电路中电阻数值的不同，理想电压源可以提供任意的电流和功率。

理想电压源实际上并不存在，给出它的目的是建立实际电源的电路模型。一个实际电源，如电池，其端电压随着输出电流的增大而减小，伏安特性曲线如图 1.2.9 所示，因此，可以用一个理想电压源与电阻串联的有源支路作为实际电源的电压源模型，见图 1.2.10。

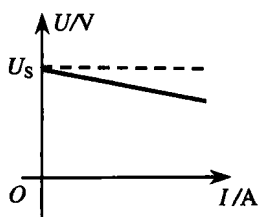


图 1.2.9 直流实际电源 $V-A$ 特性曲线

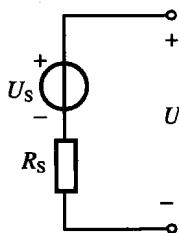


图 1.2.10 电源的电压源模型

由于一些实际电源，如稳压电源、新的电池等，其内阻很小，所以在一定电流范围内其端电压随电流变化不大，因此也可以用理想电压源作为它们的电路模型。

2. 理想电流源

与理想电压源相对应，在电路中，提供一个定值电流的电源称为理想电流源或称恒流源，其电路符号如图 1.2.11 所示。图中 i_s 表示理想电流源的电流，箭头所指的方向为 i_s 的参考方向。

由理想电流源的定义可知，它有两个特点：其一是理想电流源的电流始终是一个定值或是一定的时间函数，与它两端的



图 1.2.11 理想电流源电路符号

电压无关；其二是理想电流源两端的电压是由与之相联的外电路决定的。 i_s 为常数的理想电流源称为直流理想电流源，其伏安特性如图 1.2.12 所示。

理想电流源实际上也是不存在的，但利用它可以构成实际电源的另一种电路模型，如图 1.2.13 所示，这个模型称为实际电源的电流源模型（简称电流源），其 $V-A$ 特性曲线与图 1.2.9 所示特性完全相同。

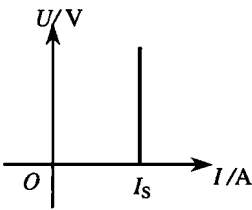


图 1.2.12 直流理想电流源 $V-A$ 特性曲线

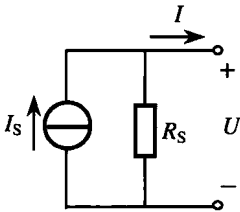


图 1.2.13 电源的电流源模型

1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是分析电路的基本依据之一，为了便于学习，先以图 1.3.1 为例介绍电路中几个有关的名词术语。

支路——电路中由一个或多个元件串联组成的一段没有分支的电路叫做支路。如图 1.3.1 中 acb 、 ab 和 adb 三条支路。其中 acb 、 adb 两条支路内含有电源，故称为有源支路；而 ab 支路内不含电源，称为无源支路。每一条支路内流过相同的电流。

结点——电路中三条或三条以上支路的连接点叫做结点。在图 1.3.1 中有 a 和 b 两个结点。从图中可以看出，每一条支路都是连接在两个结点之间的。

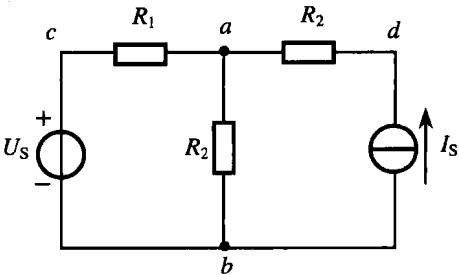


图 1.3.1 电路图

回路——电路中任一闭合的路径叫做回路。通常回路是由若干支路将一些结点连接起来构成的。在图 1.3.1 中有 $abca$ 、 $adba$ 和 $cadbc$ 三个回路。最简单的电路是只有一个回路构成的电路，这种电路叫做单回路电路。

网孔——没有支路穿过和回路。在图 1.3.1 中有 $abca$ 和 $adba$ 两个网孔。

网络——网络一般是指含元件较多、结构比较复杂的电路。实际上，电路和网络这两个名词并无明显区别，一般可以混用。

基尔霍夫定律包含两个内容，其一是应用于结点的基尔霍夫电流定律，其二是应用于回路的基尔霍夫电压定律，它们的英文缩写分别为 KCL 和 KVL。

1.3.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律确定了联结在同一结点上各支路电流之间的相互关系。它指出在任一时刻，流入一个结点的电流总和等于从该结点流出电流的总和。该定律是电流连续性原理的体现，即电路中任一点（包括结点）均不能堆积电荷。