

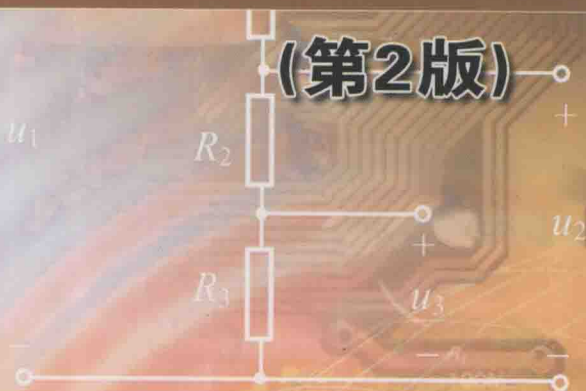


面向“十二五”高等学校精品规划教材

电路和电子技术

李燕民 主编
郜志峰 副主编

(第2版)

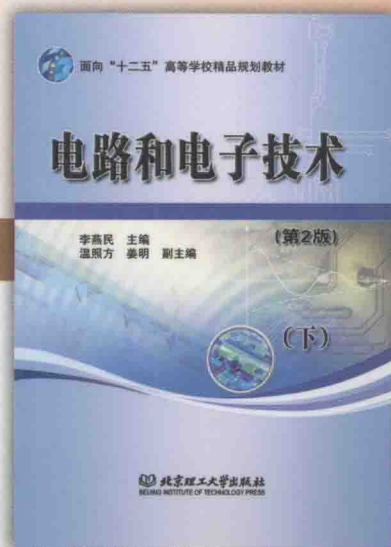
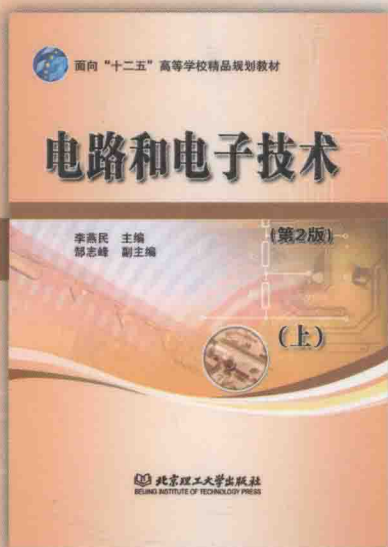


(上)



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

责任编辑: 陈莉华
封面设计: 七星工作室



定价: 20.00元

ISBN 978-7-5640-0096-7



9 787564 000967

01 >

面向“十二五”高等学校精品规划教材

电路和电子技术（上册）

（第2版）

李燕民 主 编
郜志峰 副主编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是在第1版基础上,根据教学改革的要求,经过调整、精练、补充、修订而成。各章后所附习题中增加了利用 Multisim 软件仿真的习题,以便于读者掌握本书各章基本内容的同时,加深对各部分知识及其分析方法的理解。

本书包含4章内容:电路的基本概念和分析方法,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)》(第2版)和《电机与控制》(第2版)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. —2版. —北京:北京理工大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-5640-0096-7

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. TM13 TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 219146 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) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 11

字 数 / 255千字

版 次 / 2010年1月第2版 2010年1月第3次印刷

印 数 / 7001~12000册

定 价 / 20.00元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

第2版前言

《电路和电子技术》第1版经过六年的使用,随着电工和电子技术的发展、理论课学时的一再压缩,教材的有些内容已经不能很好地适应现在的教学要求,因此我们对第1版教材进行修订。《电路和电子技术》(第2版)[与《电机与控制》(第2版)配套]仍是为“电工电子技术”课程编写的教材。

《电路和电子技术》(第2版)是按照教育部高等学校教学指导委员会2009年颁布的“电工学”课程教学基本要求,根据多年的教学实践经验和教学改革的需求,在《电路和电子技术》第1版的基础上,经过调整、精练、补充、修订而成。我校的“电工电子技术”课程仍沿用电路基础-元件-线路-系统的总体框架,内容和篇幅与第1版基本相同,但力求将一些新器件、新技术反映在新版教材中。在第2版中作了以下几个方面的修订。

1. 修订版在原来注重知识体系的基础性上,又进一步加强了应用性,精减了部分比较繁复的理论分析和概念性的叙述。例如适当简化了分立件放大电路的分析,删去了交流稳压电源和UPS电源简介,精简了A/D变换器内部电路的分析等。

2. 结合本课程的特点,适当增加了一些较新的器件,如发光二极管、光敏二极管、光电隔离器等。增加了电子技术在实际中应用的例子,如利用光电二极管、运算放大器在CD-ROM的激光拾音器中实现光电信号的转换,并增加了仿真例子及结果等。

3. 修订版教材体现了一定的先进性。在原来引入EDA技术的基础上,提高起点,删去早期可编程逻辑器件的介绍,将原书中可编程逻辑器件的开发环境MAX+PLUSII升级,改为Altera公司现在主推的Quartus II。它所提供的开发设计的灵活性和高效性、丰富的图形界面,辅之以完整的、可即时访问的在线文档等,使学生能够轻松、愉快地掌握PLD的设计方法。

4. 注重提高学生学习的自主性。为了使学生更好地使用现在非常流行的Multisim仿真设计软件,以便更深刻地理解和掌握电工电子的基础知识,在本书各章安排的习题后增加了仿真的习题,而且不仅提出了要求,还给出了分析方法的提示。引导学生结合各章内容的特点,由浅入深地了解工作界面,元器件库、常用仪器仪表,并能够逐步掌握瞬态分析、交流分析、参数扫描分析、傅里叶分析等分析方法的应用。

参与本书编写的教师:郜志峰修订了第1、2章,编写了第3章和第4章1~3节;王勇编写了4.4节;李燕民编写了1~4章后面的仿真习题。本书由李燕民担任主编,负责全书的统稿。

在本书第1版被评为北京市精品教材的过程中,北京工商大学孙骆生教授、北京理工大学刘蕴陶教授认真审阅了本书,给出了很高的评价,并提出了许多中肯的意见和宝贵的建议,也为我们修订第2版教材提供了很多有益的启发。电工教研室的庄效桓、吴仲、许建华、高玄怡、叶勤等老师在本书编写过程中,给予了很多帮助,在本书的使用以及与实验教学的有机结合方面,提出了很多建设性意见。在此,一并表示衷心的感谢!

由于我们的水平和能力有限,加之编写时间较短,书中难免存在一些疏漏、错误或不严谨之处,恳请读者批评指正,以便今后加以改进。

编 者

第1版前言

《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大学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

目 录

第1章 电路的基本概念和分析方法	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 理想电路元件	3
1.2.1 电阻元件	4
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	10
1.3.2 基尔霍夫电压定律	11
1.4 电路的一般分析方法	12
1.4.1 支路电流法	13
1.4.2 结点电位法	15
1.5 叠加原理	18
1.6 无源二端网络的等效变换	21
1.6.1 等效二端网络的概念	21
1.6.2 电阻串联和电阻并联电路的等效变换	22
1.6.3 电阻混联电路的等效变换	23
1.6.4 利用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	26
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	27
1.8 电源模型的等效变换	28
1.9 戴维宁定理和诺顿定理	31
1.9.1 戴维宁定理	31
1.9.2 诺顿定理	35
1.10 含受控源电路的分析	36
1.10.1 受控源的类型和符号	36
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	41

1.12 电气设备和元器件的额定值	42
习题	44
第2章 电路的暂态分析	51
2.1 换路定律与暂态过程初始值的确定	51
2.1.1 电路产生暂态过程的原因	51
2.1.2 换路定律	52
2.1.3 暂态过程初始值的确定	53
2.2 RC电路的响应	55
2.2.1 RC电路的零输入响应	55
2.2.2 RC电路的零状态响应	58
2.2.3 RC电路的全响应	60
2.3 RL电路的响应	63
2.3.1 RL电路的零输入响应	63
2.3.2 RL电路的零状态响应	64
2.3.3 RL电路的全响应	66
2.4 一阶电路暂态分析的三要素法	67
2.5 RC电路对矩形波激励的响应	71
2.5.1 RC微分电路	71
2.5.2 RC耦合电路	72
2.5.3 RC积分电路	73
习题	74
第3章 正弦交流电路	79
3.1 正弦交流电的基本概念	79
3.1.1 正弦交流电的三要素	79
3.1.2 有效值	81
3.1.3 相位差	82
3.2 正弦交流电的相量表示法	83
3.3 单一参数的交流电路	86
3.3.1 电阻元件的交流电路	86
3.3.2 电感元件的交流电路	88
3.3.3 电容元件的交流电路	90
3.3.4 相量模型	92
3.4 正弦交流电路的分析	94
3.4.1 基尔霍夫定律的相量形式	94
3.4.2 串联交流电路	95
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 电路中的谐振	111
3.6.1 串联谐振	111
3.6.2 并联谐振	115
3.7 交流电路的频率特性	118
3.7.1 低通滤波电路	119
3.7.2 高通滤波电路	120
3.7.3 带通滤波电路	121
3.8 双口网络	122
3.8.1 双口网络及其端口条件	123
3.8.2 双口网络参数方程及其等效电路	123
3.9 非正弦周期信号电路	129
3.9.1 非正弦周期信号的分解	130
3.9.2 非正弦周期信号电路的谐波分析法	132
习题	135
第4章 三相交流电路	142
4.1 三相电源	142
4.1.1 三相正弦交流电的产生	142
4.1.2 三相电源的星形联接	143
4.1.3 三相电源的三角形联接	145
4.2 三相交流电路的分析	145
4.2.1 负载的联接	145
4.2.2 负载星形联接的三相电路	146
4.2.3 负载三角形联接的三相电路	150
4.3 三相电路的功率	152
4.3.1 一般三相电路的功率	152
4.3.2 对称三相电路的功率	153
4.4 安全用电常识	154
4.4.1 触电的危害	154
4.4.2 触电方式	154
4.4.3 触电的预防	155
4.4.4 电气设备的保护接地和保护接零	156
4.4.5 静电的危害和防护	158
习题	158
部分习题参考答案	161
参考文献	165

第 1 章

电路的基本概念和分析方法

本章介绍了电路的基本概念,讨论了组成电路的各种元器件及其伏安特性,阐述了电路理论中的基本定律——基尔霍夫定律。以直流电路为例介绍了分析电路的一些基本方法和定理,主要有支路电流法、结点电位法、叠加原理、电路的等效变换、戴维宁定理和诺顿定理。讨论了含受控源电路的分析和非线性电阻电路的分析,介绍了电气设备和元器件的额定值。

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时,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,导线上也有电压降。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,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

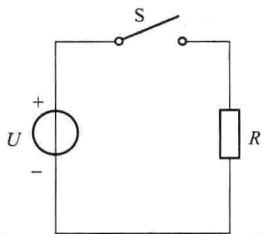


图 1.1 手电筒电路

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,就可以把电池看做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,则认为它是没有电阻的理想导线;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 所示。

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,作以下规定: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 1.2(a)中,箭头表示电流的参考方向,其值为 1 A,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 1.2(b)中,若假定电压的参考方向由 A 指向 B,则当 $U = -2 \text{ V}$ 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 2 V。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。

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 1.2(b)中, U_{AB} 则指电压的参考方向为由 A 指向 B,即 A 点为“+”,B 点为“-”。

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,对其功率做以下规定: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

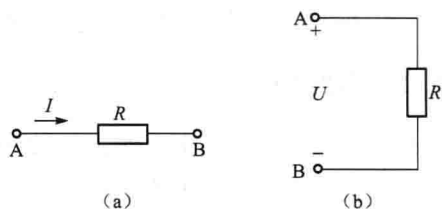


图 1.2 电压、电流参考方向

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都是相同的。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,或者是将电能储存起来,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,因此这段电路是产生功率或者说提供功率的。

例 1.1 在图 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 1.3 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。

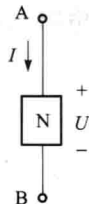


图 1.3 例 1.1 的图

解 在图 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) 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 是提供功率。

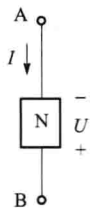


图 1.4 例 1.2 的图

例 1.2 在图 1.4 中,方框 N 的电压和电流的参考方向如图中所示。求:(1) 当 $U=4\text{ V}$, $I=2\text{ A}$ 时 N 的功率,并指出是吸收功率还是提供功率;(2) 当 $U=5\text{ V}$, $I=-3\text{ A}$ 时,再求(1)。

解 在图 1.4 中,电压、电流为非关联参考方向,可由 $P=-UI$

求得功率。

(1) 当 $U=4\text{ V}$, $I=2\text{ A}$ 时, N 的功率为

$$P=-UI=-4\times 2=-8(\text{W})$$

因为 $P<0$, 所以 N 是提供功率。

(2) 当 $U=5\text{ V}$, $I=-3\text{ A}$ 时, N 的功率为

$$P=-UI=-5\times (-3)=15(\text{W})$$

因为 $P>0$, 所以 N 是吸收功率。

图 1.3 和图 1.4 中,方框 N 表示电路的一部分或一个元件,这部分电路有 A、B 两个端钮和其他电路相联接,所以,方框 N 所表示的这部分电路又称为二端网络。

1.2 理想电路元件

从能量转换的角度进行分析,电路中存在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的理想元件。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。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的理想电路元件。

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 $u-i$ 平面上用一条曲线表示,该曲线称为电阻元件的伏安(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 1.5 所示,则称该电阻元件为线性电阻元件。其电路符号如图 1.6 所示。

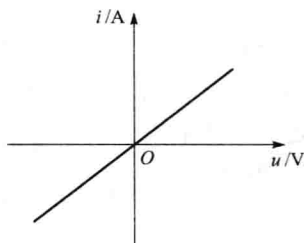


图 1.5 线性电阻元件 V-A 特性曲线

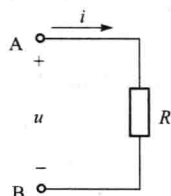


图 1.6 线性电阻元件的电路符号

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电压的大小无关。

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 1.6,有

$$u = iR \quad (1.1)$$

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(1.1)可写成

$$i = uG \quad (1.2)$$

式中 G ——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(1.1)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(1.1)两边同乘以 i ,得瞬时功率

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.3)$$

式中 p ——瞬时功率,其单位为瓦(W)。

由于 p 与 i^2 或 u^2 成正比,故电阻上的瞬时功率 $p \geq 0$,这说明电阻元件是消耗电能的。在 $0 \sim T$ 这段时间内电阻消耗的电能为

$$w = \int_0^T p dt = \int_0^T u i dt \quad (1.4)$$

伏安特性曲线不是通过坐标原点的直线的电阻元件称为非线性电阻元件,其电路符号如图 1.7 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。

今后本书中凡未加说明的电阻元件均指线性电阻元件。

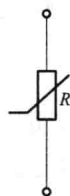


图 1.7 非线性电阻元件符号

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。

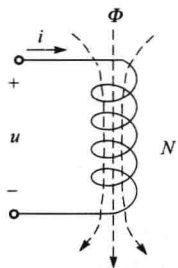


图 1.8 电感线圈

图 1.8 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

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1.5)$$

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)或毫亨(mH)。

L 为常数的电感称为线性电感,其电路符号如图 1.9 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(电动势的参考方向是由“-”端指向“+”端),如图 1.9 所示,感应电动势 e 的表达式为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1.6)$$

由式(1.6)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(1.6)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 1.9 中,有

$$u = -e$$

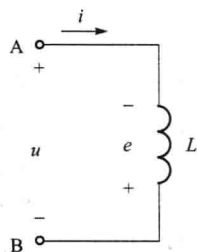


图 1.9 电感元件电路符号

将式(1.6)代入上式,可得到电感电压与电流的关系为

$$u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (1.7)$$

式(1.7)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。

如果用电感两端的电压表示电流,可以将式(1.7)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

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1.8)$$

式(1.8)说明任一时时刻电感中的电流与初始电流 $i(0)$ 以及从 $0 \sim t$ 所有时刻的电压值有关,所以有时也称电感为“有记忆”元件。

当电感的电压和电流为关联参考方向时(如图1.9所示),电感元件的瞬时功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.9)$$

式(1.9)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

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

若从0增大到 t 时刻,电感中的电流为 i ,则

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = L \int_0^i i di = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.10)$$

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。式(1.10)中若 L 的单位用亨(H), i 的单位用安(A),则 w 的单位为焦耳(J)。

L 不为常数的电感元件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,就可以将理想电感元件作为实际电感线圈的模型;否则,需要将理想电感元件与理想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1.10所示。

图1.10中, $+q$ 和 $-q$ 是电容极板上的电荷,电容电压

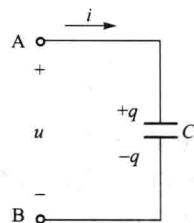


图1.10 电容元件电路符号