



普通高等教育“十二五”规划教材

现代电工 电子技术

第2版

XIANDAI DIANGONG DIANZI JISHU

申永山 高有华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

现代电工电子技术

第2版

主编 申永山 高有华
参编 龚淑秋 李忠波 袁 宏



机械工业出版社

本书是根据教育部电工学课程指导小组拟订的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求编写的,由电路分析基础、模拟电子技术、数学电子技术三大部分组成,内容包括:电路的基本概念与定律、电路分析方法、线性电路的暂态分析、正弦交流电路、三相交流电路、变压器、常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大电路、直流稳压电源、逻辑函数及其化简、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路。

本书把先进的现代工具软件电子设计自动化(EDA)技术渗透到各章节,可以对分析、设计和研究方法等实现实例仿真。本书有配套的多媒体CAI课件。

本书可供高等理工科院校非电类本、专科的机械类、材料类、经济类、管理类、化工类、土建类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用,也可作为夜大、电大、函授等成人大学及从事与电工电子相关的工程技术人员的培训教材和自修教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代电工电子技术/申永山,高有华主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2014.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-46059-6

I. ①现… II. ①申…②高… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第040374号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 徐凡

版式设计:常天培 责任校对:陈延翔

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015年4月第2版第1次印刷

184mm×260mm·21印张·510千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46059-6

定价:43.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书自2007年1月出版发行以来,得到了各兄弟院校和广大读者的支持与关爱,历时7年,多次重印,已成为辽宁省精品课——电工学课程的使用教材。为了使该教材在论述的科学性、内容的合理性等方面更能适应高等教育迅速发展的需要以及高等理工科院校对电工电子技术课程深化教学改革的要求,编者在广泛吸收读者意见和建议的基础上进行修订。本次修订是在第1版基础上的总结和提高,在内容上做了精选、改写、调整和补充。

本次修订将深化电工电子技术课程的教学体系、教学内容、教学方法及教学手段等方面的改革,更加方便广大读者的学习和使用。

修订后的《现代电工电子技术》由原来的15章变为13章,结构紧凑。电路分析基础部分,调整了第3章线性电路的暂态分析的章节次序,并增加了第6章变压器。模拟电子技术部分,对第7章常用半导体器件的内容做了改动,更加直观和利于自修;第8章基本放大电路,增加了功率放大电路的内容;精简了反馈与振荡电路这一章内容,将其章节的部分内容并入第9章集成运算放大器中;第10章直流稳压电源增加了晶闸管和可控整流电路的内容,将整流电路由弱电的电子技术扩展到强电的电力电子技术。由于本课程的学时所限,数字电子技术部分,去掉了平时很少讲到的D/A与A/D转换器和半导体存储器与可编程逻辑部件这两章。

修订后的《现代电工电子技术》,对全书的例题及每节后的练习与思考和章后的习题做了必要的改动和增减,力求题型的多样化和难度的层次性。

本书是编者在多年教学实践中,经过多个教学过程,对课程体系、内容及教学方法和手段不断研究和总结,并广泛吸取兄弟院校有关教师的意见和建议编写的。本书共分3篇13章,可供56~80学时教学使用,书中带“*”号的内容,可根据专业和学时的情况进行取舍。电路分析基础篇(1~6章)可供20~30学时教学使用。模拟电子技术篇(7~10章)可供18~26学时教学使用。数字电子技术篇(11~13章)可供16~22学时教学使用。

本书由沈阳工业大学申永山(编写第5、6、8、10章)和高有华(编写第2、4、11、12章)担任主编。龚淑秋编写第1、3、9章,李忠波编写第13章和附录,袁宏编写第7章。

本书有配套的《电工技术试题题型精选汇编》、《电子技术试题题型精选汇编》和《电工电子技术实验及课程设计》等系列教材,可供高等理工科院校本科、专科的机械类、材料类、化工类、建筑类、经济类、管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用,也可作为夜大、电大、函授等成人大学及从事与电工电子技术相关工作的工程技术人员的培训和自修教材。

由于编者学识有限,本书难免有不妥和错误之处,恳请使用本书的读者提出批评指正。

编 者

第1版前言

本书是根据国家教育部电工学课程教学指导组拟定的电工电子技术课程教学基本要求和面向21世纪人才培养目标而编写的,是辽宁省2005年教学成果二等奖非电类理工科电工电子课程模块教学改革的研究与实践项目的一项研究成果,也是辽宁省精品课推出的精品教材。

本书是非电类专业的技术基础教程。通过本课程的学习,应使学生得到电工电子技术必要的基础理论、基本知识和基本技能,了解电工电子技术发展的概况,为培养学生工程实践素质、学习后续课程、从事有关的工程技术和科学研究工作打好理论和实践基础。

本书立足于电工电子课程教学的现代化,特点是内容及时反映科学技术发展的新成果;科学的模块教材体系;先进的教学手段;现代的分析、设计与研究方法,体现在以下几个方面:

1. 为适应新技术发展和教育教学改革的需要,本书在保证电工电子技术基础内容的前提下,加强了模拟集成电路和中、大规模数字集成电路的介绍、分析和应用。

2. 电工技术部分加强了基础理论、基本知识和基本技能的内容。删掉专业性较强的内容,如铁心线圈、变压器、电动机、电动机控制等内容,使这部分内容有更广泛的适应性。

3. 模拟电子技术部分分立元件内容更简练,方法更简捷,重点放在集成运算放大电路的分析和应用上。在直流稳压电源部分对电力电子技术的新发展作了概要介绍。

4. 数字电子技术部分充实了最新的数字电子器件和数字电子技术内容,加强了中、大、超大规模数字集成电路 MSI、LSI、VLSI 在组合逻辑电路和数字逻辑电路中的应用内容,例如, A/D 和 D/A 转换器、CC7555 型 555 定时器、可编程逻辑器件 PLD 等的分析和应用。

5. 本教材把先进的现代工具软件电子设计自动化(EDA)技术渗透到各章、节,使分析、设计和研究方法实现现代化,是对传统经典方法的补充和提升。

6. 与本教材配套的多媒体 CAI 课件是作者多年辛勤劳动的结晶,其中除了有系统的核心内容,还有大量的选择题(包括答案)和例题以及实际应用题的详解,便于多媒体教学和学生自学,可提高课堂教学的效率和效果。

7. 书中带*号内容属于加宽、加深内容,可由教师根据专业特点和学时多少决定取舍。为便于教学和学生自学,书中还编写了练习与思考、例题和习题。为使学生掌握先进的分析、设计工具,促进教学现代化,大部分章节后有利利用电子设计自动化(EDA)软件对教学内容进行分析、研究和设计的作业题。在《电工技术试题题型精选汇编》和《电子技术试题题型精选汇编》中有相关的引导性例题。

求新的内容和体系、现代的分析、设计方法和先进的教学手段、配套的系列教学参考书,必然提高读者的认知能力、分析与解决实际问题的能力和创新能力。书中个别图因软件仿真结果,故其中图形、文字符号不作改动。

本书是编者在多年教学实践中,经过多个教学过程,对课程体系、内容及教学方法和手段不断研究和总结,并广泛吸取兄弟院校有关教师的意见和建议的基础上编写的。本书共分

3 篇 15 章, 可供 56~80 学时教学使用。电路分析基础篇(第 1~5 章) 可供 20~26 学时教学使用。模拟电子技术篇(第 6~10 章) 可供 18~26 学时教学使用。数字电子技术篇(第 11~15 章) 可供 18~28 学时教学使用。

本书由沈阳工业大学申永山老师(编写第 4、10 章) 和李忠波教授(编写第 3、9、13、14、15 章和附录) 主编。沈阳工业大学袁宏教授编写第 1、6、7 章, 高有华编写第 2、11、12 章, 龚淑秋编写第 5、8 章。曹承志教授对本书原稿进行了仔细审阅, 提出许多修改意见, 在此深表谢意。

本教材有配套的《电工技术试题题型精选汇编》、《电子技术试题题型精选汇编》等系列教材。可供高等理工科院校大学本科、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、经济类、管理类、机电一体化类、计算机科学类等有关专业教学使用。也可供从事与电工电子相关工作的工程技术人员参考。

由于编者学识有限, 本书难免有不妥和错误之处, 恳请使用本书的读者提出批评指正。

编 者

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 篇 电路分析基础

第 1 章 电路的基本概念与定律	1	第 4 章 正弦交流电路	56
1.1 电路与电路模型	1	4.1 正弦交流电的基本概念	56
1.2 电路的基本物理量及其参考方向	2	4.2 正弦量的相量表示法	59
1.3 电阻、电感和电容元件特性	5	4.3 电阻元件的正弦交流电路	61
1.4 电压源和电流源	9	4.4 电感元件的正弦交流电路	63
1.5 基尔霍夫定律	11	4.5 电容元件的正弦交流电路	65
1.6 电功率的计算	14	4.6 正弦稳态电路的分析	68
1.7 电位的计算与仿真分析	16	4.7 功率因数的提高	75
小结	18	* 4.8 正弦交流电路的频率特性	77
习题	18	4.9 谐振电路	80
第 2 章 电路分析方法	21	4.10 正弦稳态电路的仿真分析	84
2.1 电源等效变换法	21	小结	88
2.2 支路电流法	24	习题	89
2.3 弥尔曼定理	26	第 5 章 三相交流电路	93
2.4 叠加原理	28	5.1 三相电动势的产生与三相电源	
2.5 戴维南定理	29	的连接	93
2.6 直流电路的仿真分析	32	5.2 三相电路负载的连接	96
小结	35	5.3 三相电路的功率	104
习题	36	5.4 三相对称电路的仿真分析	107
第 3 章 线性电路的暂态分析	39	5.5 安全用电技术	108
3.1 换路定律与初始值的确定	39	小结	110
3.2 RC 电路的时域分析	42	习题	111
3.3 一阶电路暂态分析的三要素法	47	第 6 章 变压器	113
3.4 RC 积分电路与微分电路	49	6.1 磁路	113
小结	52	6.2 变压器	119
习题	53	小结	127
		习题	127

第 2 篇 模拟电子技术

第 7 章 常用半导体器件	129	7.3 稳压管	134
7.1 半导体与 PN 结	129	7.4 其他二极管	136
7.2 二极管	132	7.5 晶体管	137

小结	141	9.3 放大电路中的负反馈	178
习题	142	9.4 集成运算放大器的线性应用	189
第 8 章 基本放大电路	144	9.5 集成运算放大器的非线性应用	195
8.1 放大电路的性能指标	144	9.6 使用 EWB 的分析与设计应用 实例	199
8.2 基本共射放大电路与仿真分析	145	9.7 使用集成运算放大器应注意的 问题	200
8.3 共集放大电路的特点与仿真分析	155	小结	202
8.4 多级放大电路的分析方法	158	习题	203
8.5 OCL 功率输出级的特点及仿真分析	160	第 10 章 直流稳压电源	209
* 8.6 绝缘栅场效应晶体管及其放大 电路	163	10.1 单相桥式整流电路	209
小结	166	10.2 滤波电路	212
习题	166	10.3 稳压电路	216
第 9 章 集成运算放大电路	169	* 10.4 晶闸管和可控整流电路	220
9.1 典型差动放大电路	169	小结	225
9.2 集成运算放大器的结构、原理、 符号及理想参数	174	习题	225

第 3 篇 数字电子技术

第 11 章 逻辑函数及其化简	227	13.7 脉冲分配器	290
11.1 逻辑函数及其公式化简法	227	13.8 脉冲信号的产生与整形	291
11.2 逻辑函数的卡诺图化简法	232	小结	301
小结	235	习题	303
习题	236	附录	311
第 12 章 门电路与组合逻辑电路	238	附录 A 半导体分立器件型号 命名方法	311
12.1 逻辑门电路	238	附录 B 常用半导体器件的参数	312
12.2 集成逻辑门电路的仿真 分析实例	241	附录 C 集成电路型号命名方法	316
12.3 组合逻辑电路的分析与实例仿真	243	附录 D 国内外部分集成运算放大器同类 产品型号对照表	318
12.4 常用集成组合逻辑电路	248	附录 E 几种国产集成运算放大器参 数规格表	319
* 12.5 组合逻辑电路的竞争冒险	255	附录 F 音频功率器件 D810 电路主要 技术指标的典型值	320
小结	256	附录 G 三端式集成稳压器性能参数	321
习题	256	附录 H 功率场控器件的主要参数	321
第 13 章 触发器与时序逻辑电路	261	附录 I 二进制逻辑单元新旧图形符 号对照表	322
13.1 RS 触发器	261	附录 J 555 定时器的主要性能参数	323
13.2 JK 触发器	266	参考文献	325
13.3 D 触发器	268		
13.4 触发器功能的转换	269		
13.5 寄存器	271		
13.6 计数器	278		

第1篇 电路分析基础

第1章 电路的基本概念与定律

本章首先介绍电路-电路模型-电路元件-电路基本物理量及其参考方向；然后给出基尔霍夫定律，包括电流定律和电压定律；最后介绍电位与电功率的一般计算方法。这些内容都是分析计算电路的基础。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路的组成及其基本功能

电路是电流流通的路径，它是由若干个电路元件或电工设备组成的有机整体。实际电路繁简不一，电路结构形式各异，但作为电路的基本组成必须具有电源（或信号源）、负载和中间环节三个部分。

在图 1-1a 给出的输配电电路中，发电机是电源，是提供电能的设备；电灯、电动机、电炉等是负载，是取用电能的设备；变压器和输电线是中间环节，是连接电源和负载的部分。而在图 1-1b 所示的扩音机电路中，传声器是输出信号的设备，称为信号源，相当于电源，但与上述发电

机这种电源不同，信号源输出的电信号其变化规律取决于所加的信息；扬声器是接受和转换信号的设备，称为负载；放大器是连接信号源与负载的部分，称为中间环节。

电路的基本功能按其所能完成的任务可分为两种：一种是实现电能的传输与转换，如输配电电路，先由发电机将热能、水能或原子能等转换为电能，经变压器和输电线将电能传输到负载，再由负载把电能转换为光能、热能、机械能等；一种是实现信号的传递与处理，如扩音机电路，先由传声器将声音信号转换为电信号，经放大器对输入的电信号进行放大处理后传递到扬声器，再由扬声器将电信号还原为声音。

无论是电能的传输与转换，还是信号的传递与处理，其中电源或信号源的电压或电流统称为激励，它将推动电路工作；由激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析，就是在已知电路结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。

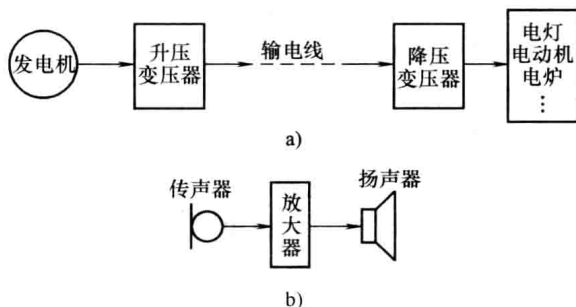


图 1-1 电路示意图
a) 输配电电路 b) 扩音机电路

1.1.2 电路模型

实际电路是由电磁性质较为复杂的实际电路元件或器件组成的。当电流通过一个实际电路元件时,该元件所呈现的物理性质即能量转换关系往往不是单一的。例如,当一个白炽灯通以电流时,除具有消耗电能即电阻的性质外,还会产生磁场,具有电感性质。由于电感很小,可忽略不计,于是可认为白炽灯是一电阻元件。

为了便于对实际电路进行分析与计算,需要将实际电路元件按其主要物理性质,用一些理想电路元件来替代。理想电路元件,就是只反映某一种能量转换关系的元件。如理想电阻元件,只反映电能转换成其他能量且能量转换不可逆的物理过程;理想电感元件只反映电能转换成磁场能量的物理过程;理想电容元件只反映电能转换成电场能量的物理过程。因为以上这些理想电路元件工作时都将电能转换成其他形式的能量,故称为理想负载元件。此外,还有一些理想电路元件工作时可以向电路提供电能,故称为理想电源元件。如理想电压源、理想电流源和理想受控源等。理想电路元件的电路图形与符号如图 1-2 所示。由理想电路元件组成的电路,就是实际电路的电路模型。它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。

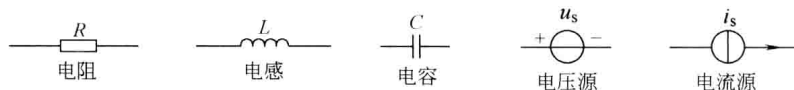


图 1-2 理想电路元件的电路图形与符号

例如常用的手电筒,是由干电池、灯泡、开关和导体等实际电路元件组成,如图 1-3a 所示。干电池是电源元件,可用一理想电压源和一个内电阻(简称内阻)的串联来替代,其参数为电动势 E 和电阻 R_0 ;灯泡消耗电能,可用一理想电阻元件替代,其参数为电阻 R ;导体和开关是连接干电池和灯泡的中间环节,其电阻忽略不计,可用一个无电阻的理想导体替代,由此构成了手电筒电路模型,如图 1-3b 所示。

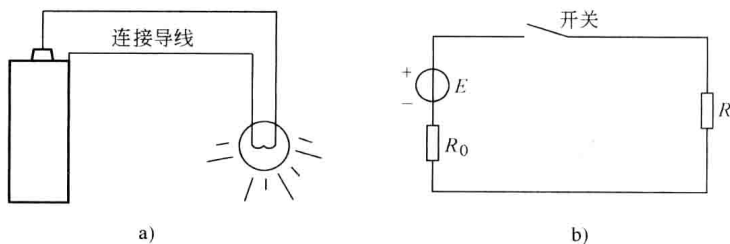


图 1-3 手电筒实际电路及其电路模型

a) 手电筒实际电路 b) 手电筒电路模型

今后我们所分析的都是电路模型,简称电路。而理想电路元件中的理想二字常略去不写,简称电路元件。

1.2 电路的基本物理量及其参考方向

1.2.1 电流及其参考方向

电流是由电荷的定向移动而形成的。单位时间内通过某一导体横截面积的电荷量,叫做电流强度,简称电流。如果在极短的时间 dt 内,通过导体横截面积的微小电荷量为 dq ,则

电流为

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

式(1-1)表示电流 i 是电荷 q 对时间的变化率。

随时间而变化的电流,称为时变电流(例如交流电流),用小写字母 i 表示;不随时间而变化的电流,即 $dq/dt = \text{常数}$,称为恒定电流,简称直流,用大写字母 I 表示。

在国际计量单位中,电流的单位是 A (安培)。如果 1s (秒) 内通过导体横截面的电量是 1C (库仑),导体中的电流就是 1A (安培)。

通常规定正电荷定向移动的方向或负电荷定向移动的反方向为电流的方向,也称电流的实际方向。在分析复杂的电路时,一般很难事先判断出电流的实际方向,而在列写方程、进行定量计算时,又必须已知其电流的方向为先决条件。为此,可先任意选定某一方向作为电流的方向,这个方向叫做电流的参考方向。当电流的参考方向与其实实际方向一致时,电流为正值;反之,当电流的参考方向与其实实际方向相反时,电流为负值。于是,在选定参考方向之后,电流值便成为代数量,有正负之分,由此可以判断出电流的实际方向。

电流的参考方向是任意指定的,在电路中一般用箭头表示,也可用双下标表示,如图 1-4 所示。在图 1-5 中示出电流的参考方向与其实实际方向间的关系。



图 1-4 电流的参考方向表示

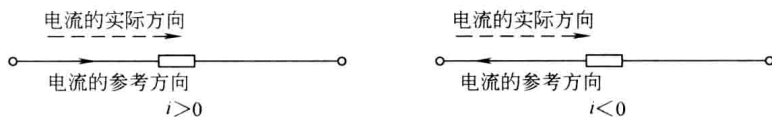


图 1-5 电流的参考方向与其实实际方向间的关系

1.2.2 电压及其参考方向

电路中 a、b 两点间的电压被定义为:电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功。如果 dq 为微小电荷量, dW 为电场力把微小电荷量从一点移动到另一点所做的功,则两点间的电压为

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

也可以将电压理解为:单位正电荷从高电位点移动到低电位点所失去的电能。

随时间而变化的电压,称为时变电压(例如交流电压),用小写字母 u 表示;大小和极性都不随时间而变化的电压,称为恒定电压,也称直流电压,用大写字母 U 表示。

在法定计量单位中,电压的单位是 V (伏特)。当电场力把 1C 的电荷量从一点移动到另一点所做的功为 1J (焦耳) 时,该两点间的电压为 1V。

电路中两点间电压的实际方向是由高电位点指向低电位点的方向,即电位降低的方向。与电流相同,在分析电路时,也要先为电压选定参考方向。当电压的参考方向与其实实际方向一致时,电压为正值;反之,电压为负值。在选定电压参考方向之后,可根据电压值的正负

来判断电压的实际方向。

电压的参考方向也是任意指定的, 可以用箭头表示; 也可以用双下标表示, 如 u_{AB} 表示 A 和 B 之间的电压参考方向是由 A 指向 B; 还可以用正 (+)、负 (-) 极性表示, 正极性端指向负极性端的方向是电压的参考方向。电压的参考方向的几种表示如图 1-6 所示, 电压的参考方向与其实际方向间的关系如图 1-7 所示。

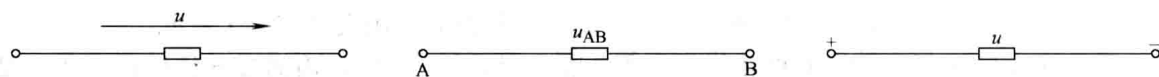


图 1-6 电压的参考方向的几种表示

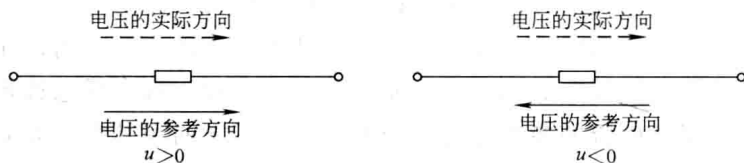


图 1-7 电压的参考方向与其实际方向间的关系

“参考方向”在电路分析中起着十分重要的作用。对于一段电路或一个元件上的电压和电流的参考方向, 原本可以独立无关地任意指定, 但为了方便起见, 通常指定电流的参考方向从标以电压参考“+”极性端流入, 从标以电压参考“-”极性端流出, 即电压与电流的参考方向一致, 把电压和电流的这种参考方向称为关联参考方向, 反之, 为非关联参考方向, 图 1-8a 中, 电压与电流为关联参考方向, 而图 1-8b 中, 电压与电流为非关联参考方向。

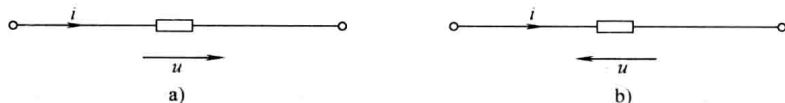


图 1-8 电压和电流的关联及非关联参考方向表示

练习与思考

1-2-1 在图 1-9a 中, $U_{ab} = -10V$, 试画出 a、b 两点的实际电压方向。

1-2-2 在图 1-9b 中, $U_1 = -6V$, $U_2 = 4V$, 求 U_{ab} 等于多少伏?

1-2-3 在图 1-10 中, 元件 B 的电压、电流参考方向为关联参考方向, 而对元件 A, 则是 ()。

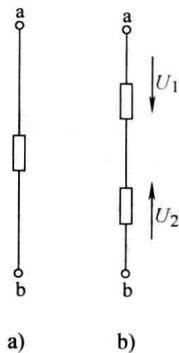


图 1-9 练习与思考 1-2-1、1-2-2 图

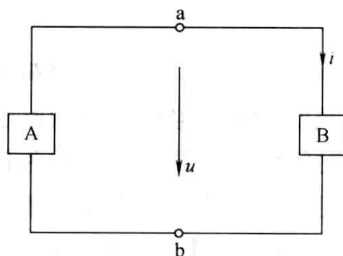


图 1-10 练习与思考 1-2-3 图

1.3 电阻、电感和电容元件特性

电阻、电感和电容是组成电路模型的理想电路元件。所谓理想，就是突出元件的主要物理性质，而忽略其次要因素。元件的主要物理性质是指当把它们接入电路时，元件内部将进行什么样的能量转换过程以及表现在元件外部的主要特性。电路分析中，主要研究的是元件的外部特性，即元件端钮上的电压与电流关系，也称伏安关系。本节将讨论电阻、电感和电容三种电路元件的伏安特性及仿真分析。

1.3.1 电阻元件

电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻两类，这里我们只讨论线性电阻。所谓线性电阻，是指电阻元件上的电压与通过的电流成线性关系，即电阻元件的阻值 R 为常数。在图 1-11a 中电压与电流取关联参考方向，由欧姆定律可得出线性电阻元件端钮伏安关系为

$$i = \frac{u}{R} \quad (1-3)$$

图 1-11b 为线性电阻的伏安特性曲线，它是一条通过坐标原点的直线。

图 1-12 为电阻的实物图片。

如果将式 (1-3) 两边乘以 i ，并对时间 t 取积分，则得

$$\int_0^t u i dt = \int_0^t i^2 R dt$$

上式表明，电能全部消耗在电阻上，并转换成热能而释放掉。可见，电阻元件中的能量转换是不可逆的。因此，电阻是耗能元件。

在国际计量单位中，电阻的单位是 Ω （欧姆）。电阻的倒数称为电导，用符号 G 表示，即

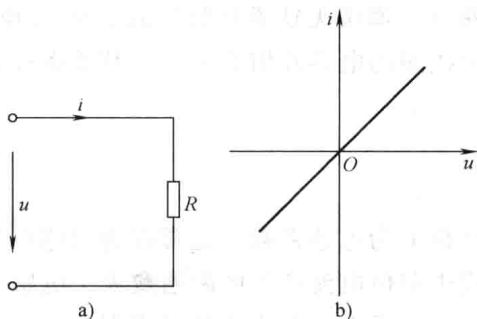


图 1-11 线性电阻元件符号及其伏安特性曲线

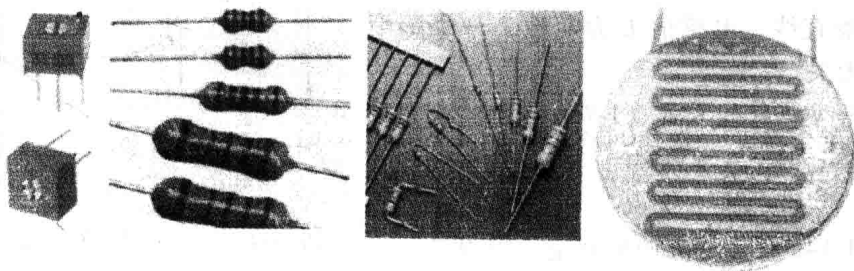


图 1-12 电阻元件的实物图片

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-4)$$

电导的单位是 S（西门子）。显然，欧姆定律还可表示为

$$i = Gu \quad (1-5)$$

1.3.2 电感元件

线圈是典型的电感元件。当忽略线圈电阻时,它就成为一个理想的电感元件。

当电流 i 通过图 1-13 所示的电感线圈时,线圈中会产生磁通 Φ 。若线圈匝数为 N ,则与 N 匝线圈相交链的磁通链为

$$\Psi = N\Phi \quad (1-6)$$

磁通 Φ 与电流 i 之间的方向符合右手螺旋定则。当磁通 Φ 发生变化时,线圈中要产生感应电动势。感应电动势 e_L 与磁通链 Ψ 的参考方向之间仍然符合右手螺旋定则。若线圈两端的电压 u 与通过它的电流 i 取关联参考方向,如图 1-13 所示,则感应电动势 e_L 为

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 表明,感应电动势的大小等于磁通链的变化率。当电流 i 增大时, $d\Phi/dt > 0$, 式 (1-7) 中的 e_L 为负值,感应电动势 e_L 将阻碍电流 i 的增加。同理,当电流 i 减小时, $d\Phi/dt < 0$, 则 e_L 为正值,感应电动势 e_L 将阻碍电流 i 的减小。

磁通链或磁通是由通过线圈的电流产生的,当线圈为空心线圈(线圈中无铁磁材料)时, Ψ 或 Φ 与 i 成正比,比例系数称为线圈的电感并用 L 表示。其关系式为

$$\Psi = N\Phi = Li$$

或

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i}$$

通常称 L 为电感系数,也常称为自感系数,是电感元件的参数。线圈匝数愈多,电感愈大;线圈中单位电流产生的磁通愈大,电感也愈大。当 Ψ 的单位是 Wb (韦伯),电流的单位是 A 时,电感 L 的单位是 H (亨利)。

图 1-14 给出了线性电感元件的电路符号和韦安特性曲线。线性电感元件的韦安特性曲线是通过原点的一条直线,电感值 L 为常数,与电感中电流的大小无关。

将磁通链 $\Psi = Li$ 代入式 (1-7), 得

$$e_L = -L\frac{di}{dt} \quad (1-8)$$

根据图 1-14a 中参考方向的规定,可得

$$u + e_L = 0$$

将式 (1-8) 代入上式得

$$u = L\frac{di}{dt} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 说明线性电感元件两端的电压 u 与流过它的电流的变化率 di/dt 成正比,比例系数即为电感 L 。

当线圈中通过不随时间而变化的恒定电流时, $di/dt = 0$, 则 $u = 0$, 这说明电感对直流电

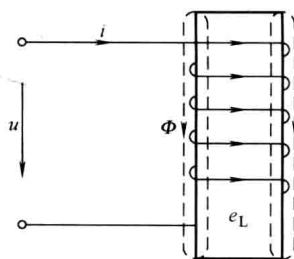


图 1-13 电感元件

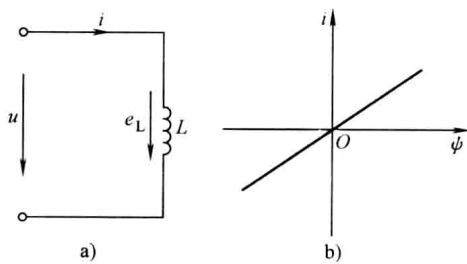


图 1-14 线性电感元件及其韦安特性曲线

流没有阻力,故电感元件对直流电流可视作短路;当线圈中通过随时间而变化的电流时, $di/dt \neq 0$,则 $u \neq 0$,这说明电感对交流电流具有一定的阻力。由此得出结论:电感元件是一种动态元件。

电感元件的实物图片如图 1-15 所示。



图 1-15 电感元件的实物图片

式 (1-9) 是电感元件上的电压与其中电流的微分关系式。若将其两边积分,便可得出电感元件上的电压与其电流的积分关系式,即

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1-10)$$

式中, i_0 是初始值,即在 $t=0$ 时电感元件中通过的电流。若 $i_0=0$, 则

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1-11)$$

如果将式 (1-9) 两边乘以 i , 并积分之, 则得

$$\int_0^t u i dt = \int_0^t L i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-12)$$

式 (1-12) 说明当电感元件中的电流增大时, 磁场能量增大, 在此过程中电能转换为磁场能量, 即电感元件从电源取用能量。式 (1-12) 中的 $\frac{1}{2} L i^2$ 就是磁场能量。当电感元件中的电流减小时, 磁场能量减小, 磁场能量转换为电能, 即电感元件向电源返还能量。

1.3.3 电容元件

在电力系统和电子装置中常用的电容器就是典型的电容元件。电容元件的电路符号及电压、电流的参考方向如图 1-16a 所示。

电容器极板 (由绝缘材料隔开的两个金属体) 上所储存的电量 q 与其上所加电压 u 成正比, 比例系数为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-13)$$

式 (1-13) 中, C 称为电容量, 是电容元件的参数。线性电容的电容量 C 是常数。图 1-16b 给出了线性电容元件的库伏特性曲线。

当电荷的单位是 C, 电压的单位是 V 时, 电容量的单位是 F (法拉)。由于法拉的单位太大, 工程上多采用 μF (微法) 或 pF (皮法)。 $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$, $1\text{pF} = 10^{-6}\mu\text{F} = 10^{-12}\text{F}$ 。

在图 1-16a 所示的电压、电流参考方向下, 当电压为正值时, 上极板上储存的是正电荷, 下极板上储存的是等量的负电荷。当极板上的电量 q 或电压 u 发生变化时, 电路中产生

的电流为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \tag{1-14}$$

式(1-14)说明电容中的电流与其两端电压的变化率成正比，比例系数是电容量C。

当电容两端所加的电压是不随时间而变化的恒定电压（即直流电压）时， $du/dt = 0$ ，则 $i = 0$ ，这说明电容具有隔直作用，故电容元件对直流电流可视为开路；当电容两端所加电压是随时间而变化的电压时， $du/dt \neq 0$ ，则 $i \neq 0$ ，这说明电容允许交流电流通过。因此得出结论：电容元件也是一种动态元件。电容元件的实物图片如图 1-17 所示。

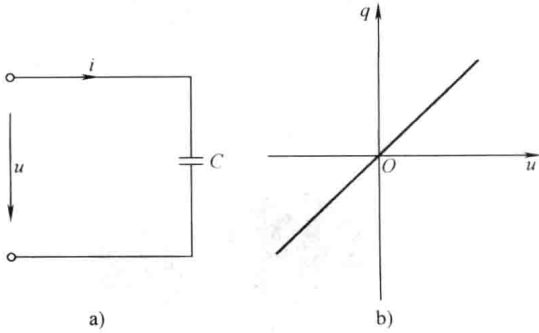


图 1-16 线性电容元件的库伏特性曲线

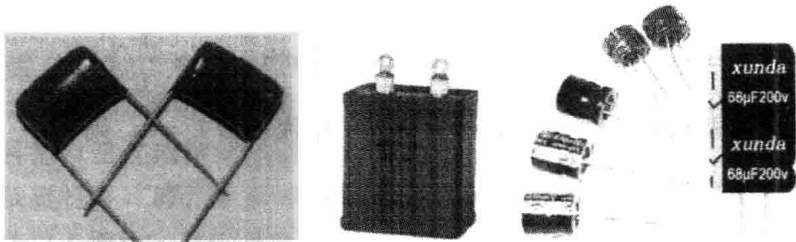


图 1-17 电容元件的实物图片

当电容元件上的电压增高时，电场能量增大，在此过程中电能转换为电场能量，即电容元件从电源取用能量（充电）。电场能量为 $\frac{1}{2}Cu^2$ 。当电压降低时，电场能量减小，电场能量转换成电能，即电容元件向电源返还能量（放电）。

下面将电阻元件、电感元件和电容元件在几个方面的特征列于表 1-1 中，以方便比较。

表 1-1 电阻元件、电感元件和电容元件的特征

元 件 特 征	电阻元件	电感元件	电容元件
伏安关系式	$u = iR$	$u = L \frac{di}{dt}$	$i = C \frac{du}{dt}$
参数意义	$R = \frac{u}{i}$	$L = \frac{N\Phi}{i}$	$C = \frac{q}{u}$
能量	$\int_0^t i^2 R dt$	$\frac{1}{2} Li^2$	$\frac{1}{2} Cu^2$

练习与思考

- 1-3-1 在图 1-18 所示的 4 个电路中，试分别确定电路中的电压 u_c 和电流 i_L 。
- 1-3-2 将一线圈串联一个电阻通过开关接在电池上，试分析在下列三种情况下，线圈中感应电动势的方向：1) 开关闭合瞬间；2) 开关闭合较长时间后；3) 开关断开瞬间。
- 1-3-3 如果一个电感元件两端电压为零，其储能是否也一定等于零？如果一个电容元件中的电流为零，其储能是否也一定等于零？

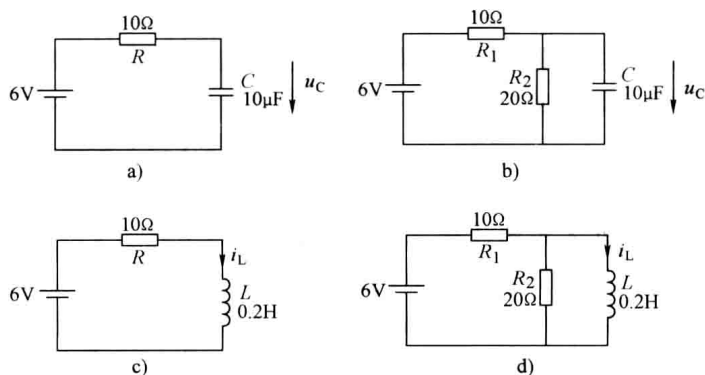


图 1-18 练习与思考 1-3-1 图

1-3-4 电感元件中通过直流电流时可视为短路，是否此时电感 L 为零？电容元件两端加直流电压时可视为开路，是否此时电容 C 为无穷大？

1.4 电压源和电流源

电源是将非电能转换为电能的元件或装置，它的作用是给外电路提供电能或电信号。干电池、蓄电池、发电机和电子稳压、稳流装置等都是常见的实际电源。

任何一个电源可以用两种不同的电路模型来表示。一种是用电压的形式来表示，称为电压源；一种是用电流的形式来表示，称为电流源。

1.4.1 电压源

电压源是实际电源的一种抽象，它能向外电路提供较为稳定的电压（时恒量或时变量）。电压源的电路模型是电动势 E 和内阻 R_0 的串联，如图 1-19 所示。图中 U 是电源端电压（即向外电路提供的电压）， R_L 是负载电阻， I 是负载电流。

由图 1-19 所示电路可得

$$U = E - IR_0 \quad (1-15)$$

即电压源输出端口上的伏安关系式，称为电压源的外特性方程。由此可作出电压源的外特性曲线，如图 1-20 所示。根据图 1-20 和式 (1-15) 可以得出电压源的特点：

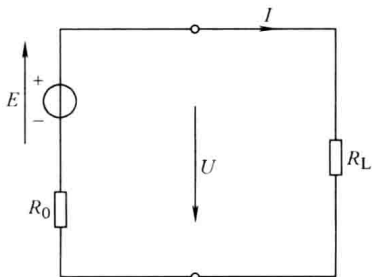


图 1-19 电压源电路模型

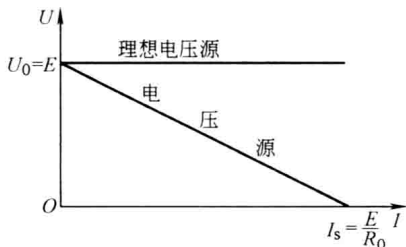


图 1-20 电压源和理想电压源外特性