



高等院校电子信息类规划教材

# 电工电子学

## 第二版

---

主编 王硕禾

魏英静

主审 高 蒙

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

---

高等院校电子信息类规划教材

# 电工电子学

第二版

主编 王硕禾 魏英静  
主审 高 蒙  
参编 王小平 石彦丛 马月辉

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

---

## 内 容 提 要

本书是河北省精品课程“电工电子学”的主教材,全面系统地阐述了电工电子技术理论。全书共分12章,其中第一~十章为电工技术部分,内容包括电路的基本概念与电路定理、动态电路分析、正弦交流电路与三相交流电路分析、变压器及三相交流异步电动机的工作原理与应用介绍、低压电器与继电接触控制电路分析、可编程控制器的原理及应用、建筑施工供电和安全用电及建筑防雷知识等。第十一章和第十二章为电子技术部分,内容包括半导体电子元件工作原理和特性、基本放大电路分析、集成运算放大电路分析、直流稳压电源的设计以及基本逻辑门电路分析、组合逻辑与时序逻辑电路的分析、555集成定时器的工作原理等。每章的后面都配有一定数量的习题。

本书适合作为所有非电类各专业少学时“电工学”、“电工电子技术”等课程的本科教材,也可作为上述专业的专科教材或教学参考书。特别是对于大土木各专业的学生,在加强现场知识配合讲授的同时,注重了与结构工程师、安装工程师等职称考试内容的接轨。故也可以作为相关复习考试的自学参考书和工程技术人员的现场施工参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工电子学/王硕禾,魏英静主编. —2版. —北京:中国铁道出版社,2007.8

高等院校电子信息类规划教材

ISBN 978-7-113-08037-2

I. 电… II. ①王…②魏… III. ①电工学-高等学校-教材  
②电子学-高等学校-教材 IV. TM1 TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第125276号

书 名:电工电子学·第二版

作 者:王硕禾 魏英静 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:李小军

责任编辑:李小军

编辑部电话:(010)83550579

封面制作:白雪

印 刷:北京市兴顺印刷厂

开 本:730×988 1/16 印张:18.75 字数:377千

版 本:2004年8月第1版 2007年8月第2版 2007年8月第3次印刷

印 数:6601~10600册

书 号:ISBN 978-7-113-08037-2/TM·72

定 价:26.00元

**版权所有 侵权必究**

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社计算机图书批销部调换。

发行部电话:(010)63549466

## 第二版前言

本书系《电工电子学》教材的修订本。修订本的内容基本符合教育部电工课程指导小组关于“面向 21 世纪电工课程内容要求”。2002 年,石家庄铁道学院的“电工电子技术”课程经过专家评估被列为河北省首批精品课程,在进行精品课程的建设中,编者总结多年的教学与实践经验,力求将教材的内容与学时设置更为合理,以求更广泛地适用于不同教学要求的各类工科专业学生学习。全书共分 12 章。

修订本保持了第一版教材内容设置的特点,对各章的内容和习题进行了部分调整和增减。为方便同学们学习,增加了各章习题的参考答案。考虑到教师授课的要求,专门制作了与教材相配套的多媒体教学软件,由中国铁道出版社免费提供或访问石家庄铁道学院精品课建设网站免费下载。

本书建议授课学时 60~80 学时,其中实验学时不少于 25%。

参加修订工作的有:王硕禾、魏英静、王小平、马月辉、石彦丛等。薛强、蔡承才、高静巧、刘宁宁等以及实验中心的老师们都对本书的修订给予了很大帮助。此外,采用第一版教材的院校老师提出了很多宝贵意见,在此致以衷心的感谢。

本书由高蒙教授主审,承天津大学万健如教授、西安电子科技大学樊来耀教授仔细审阅,并提出宝贵的修改意见。编者在此提出真挚的感谢!

本书虽然在原版本的基础上,根据各方面读者提出的建设性意见进行了一些改进,但不足之处在所难免,诚望广大读者予以批评指正。意见请寄石家庄铁道学院电工基础教研室或发送电子邮件到 [wangshuohe@yahoo.com.cn](mailto:wangshuohe@yahoo.com.cn)。

编者

2007 年 7 月

# 第一版前言

“电工电子技术”是工科类大学生一门重要的技术基础课。当前随着科学技术的不断发展,电子电工学已经深入渗透到国民经济生产和生活的各个领域之中。毋庸置疑,掌握一定深度和广度的电工电子学知识不仅仅是单纯的技能学习,更是现代工科大学生综合素质的培养和体现。

本书的内容以国家教育部电工课程指导小组关于面向 21 世纪电工课程教学内容改革的要求为基础,是编者多年进行电工电子技术教学内容和教学体系改革的结果。教材总结了编者多年的教学与实践经验,特别是注意到与工程现场的实际工况相结合,其内容与学时设置较为合理,适用于不同教学要求的各类工科专业学生学习。编写中除了**强调基础理论**之外,还注意了以下特色:首先**针对大土木类专业全国结构工程师考试中的电工电子学部分,给予了相应的教学要求和练习**,不仅便于在校学生的学习,而且**适合于职称考试的要求**。其次,结合现场施工技术的应用,突出了**现场建筑施工用电组织管理、设计、施工以及安全用电等技术的介绍**,以满足今后工程类同学现场施工的实际要求。与此同时,增加了**可编程控制器、变频器等新技术、新器件的原理和使用介绍**。

本书建议授课学时 70~90 学时,其中实验学时不少于 25%,考虑到学时压缩的情况,部分内容授课教师可以选讲。

本书共分十二章,由王硕禾编写第一、二、八、十章,魏英静编写第四、五、六、七章,马月辉编写第三章和第九章,王小平编写第十一章,石彦丛编写第十二章和第八章的部分例题;王硕禾和王小平编写附录。最后由王硕禾和魏英静对全书内容进行了统稿。蔡成才、薛强和王延忠负责部分插图的绘制工作。全书由高蒙教授担任主审。高教授对全书进行了严格的审阅,提出了许多宝贵的意见。在此,编者特表示诚挚的感谢!

在本书编写过程中得到了西安电子科技大学樊来耀教授、中国人民解放军军械工程学院孙履师教授、河北科技大学庄庆德教授、石家庄铁道学院教务处、电气分院领导以及电子工程实验中心诸位老师的大力支持和帮助。在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有错误和疏漏,恳请各位读者批评指正。

编者  
2004 年 7 月

# 目 录 ★★

## 第一章 电路的基本概念与基本定律

第一节 电路的作用与组成	1
第二节 电路模型与电压电流的参考方向	2
第三节 理想电路元件	3
第四节 电压源与电流源	7
第五节 基尔霍夫电流定律和电压定律	13
第六节 电位的概念与计算	17
习 题	18

## 第二章 电路的分析方法及电路定理

第一节 等效变换法分析电路	20
第二节 支路电流法	23
第三节 结点电压法	25
第四节 叠加定理	27
第五节 戴维南定理	30
习 题	33

## 第三章 动态电路分析

第一节 电路的初始状态	36
第二节 一阶电路的零输入响应	39
第三节 一阶电路的零状态响应	42
第四节 一阶电路的全响应	45
第五节 一阶线性电路暂态分析的三要素法	46
习 题	48

## 第四章 正弦交流电路

第一节 正弦交流电路的基本概念	50
第二节 正弦量的表示方法	53
第三节 单一参数的交流电路	58
第四节 电阻、电感与电容元件串联的交流电路	65
第五节 复杂正弦交流电路的分析方法	72
第六节 并联谐振及功率因数的提高	77
习 题	81

## 第五章 三相交流电路

第一节 三相电源 .....	83
第二节 负载星形联接的三相电路 .....	86
第三节 负载三角形联接的三相电路 .....	91
第四节 三相功率 .....	92
习 题 .....	94

## 第六章 变压器

第一节 变压器的分类、结构与额定值 .....	96
第二节 变压器的工作原理 .....	98
第三节 变压器的外特性及效率 .....	103
第四节 三相变压器 .....	104
第五节 特殊用途变压器 .....	106
习 题 .....	108

## 第七章 三相交流异步电动机

第一节 三相异步电动机的基本结构 .....	110
第二节 三相异步电动机的工作原理 .....	112
第三节 三相异步电动机的电路分析 .....	116
第四节 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性 .....	119
第五节 三相异步电动机的起动、制动与调速 .....	123
第六节 三相异步电动机的铭牌数据 .....	128
第七节 三相异步电动机的选择 .....	131
习 题 .....	133

## 第八章 低压电器与继电接触控制

第一节 常用低压控制电器 .....	135
第二节 异步电动机继电接触控制电路 .....	144
第三节 异步电动机正反转控制电路 .....	148
第四节 行程控制 .....	150
第五节 典型建筑施工机械控制电路分析 .....	151
习 题 .....	159

## 第九章 可编程控制器原理及应用

第一节 概述 .....	160
第二节 可编程控制器程序的编制方法 .....	164
第三节 可编程控制器的应用示例 .....	168
习 题 .....	171

## 第十章 建筑施工供电与安全用电

第一节 电力系统概述 .....	172
------------------	-----

第二节	电力负荷的分类和计算	174
第三节	小型变电所的设计与施工	179
第四节	施工供电低压配电系统及配电线路	185
第五节	导线截面与熔断器的选择	189
第六节	建筑施工供电系统设计实例分析	194
第七节	安全用电技术	201
第八节	建筑工程防雷系统	207
	习 题	212
<b>第十一章 模拟电子技术基础</b>		
第一节	半导体二极管	213
第二节	半导体三极管	219
第三节	基本放大电路	223
第四节	集成运算放大器及其应用	239
第五节	直流电源	248
	习 题	253
<b>第十二章 数字电子技术基础</b>		
第一节	逻辑门电路	257
第二节	组合逻辑电路分析与设计	262
第三节	双稳态触发器	266
第四节	时序逻辑电路	270
第五节	555 集成定时器	273
	习 题	275
	习题参考答案	278
	参考文献	281
	附录 A	282



## 第一章

# 电路基本概念与基本定律

**【内容提要】** 本章主要介绍电路的基本概念,包括:电路模型的建立;电压、电流的实际方向与参考方向;基本电路元件;基尔霍夫定律以及电位的概念。

从 18 世纪末 19 世纪初电磁现象的启蒙研究到现在,人类已经掌握了大量的电工电子学知识,而且还在不断探索着。进入 21 世纪后,电能及电子技术应用已成为与人类生产生活关系最紧密、应用最普及、发展最迅速的学科之一,它的应用包含了从通信、能源、计算机到交通、机械、农业现代化乃至航天技术等多个领域。总之,电工电子技术已经深入到现代社会生活的方方面面。

电工电子技术的应用需要通过各种各样的电气设备来实现。电气设备的种类及功能虽然繁多,但是它们之间有着共同的原理和规律。要掌握这些规律和原理就需要掌握基本的电路概念以及电路计算分析方法。

## 第一节 电路的作用与组成

电路是电流流经的通路,它是为了某种实际需要由一些电气元件和电气设备按照一定方式组合连接而成的。实际电路所能完成的任务是多种多样的,包括电能的传输与转换、信号的处理与传输、测量、控制、计算等功能。

不论电路的结构有多么庞杂、功能如何复杂,就其基本作用而言,都可以概括为三个基本部分:电源、负载和连接电源与负载的中间环节。图 1-1 是普通的手电筒照明电路,其中电池是电源,灯泡是负载,中间环节包括开关和连接导线。电路中的电流和电压是在电源的作用下产生的,因此电源又称为激励,而由激励在电路中产生的电压和电流称为响应。

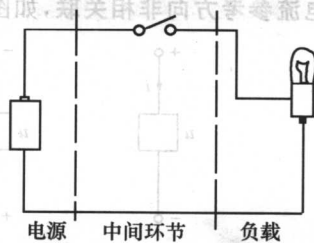


图 1-1 手电筒照明电路

对于电源而言,由负载和中间环节组成的电路称为外电路,电源内部的电流通路则称为内电路。

## 第二节 电路模型与电压电流的参考方向

在日常工作和生活中,会用到很多电器设备,这些设备都是由实现各种功能的电路、集成电路和电子元器件等组合而成的。当分析和计算这些实际电路时,需要把组成电路的元件抽象为具有某种特性的理想化电路元件模型,进而将实际电路抽象为由理想电路元件模型构成的电路模型,它是对实际电路电磁性质的科学抽象与概括。理想电路元件包括电阻、电感、电容和电源等。

图 1-1 所描述的手电筒照明电路的电路模型如图 1-2 所示,灯泡是电阻元件,其模型参数是  $R$ ; 电池是电源元件,其模型参数是电动势  $E$  和电源内阻  $R_0$ ; 中间环节电阻忽略不计,认为是无电阻的理想导体。

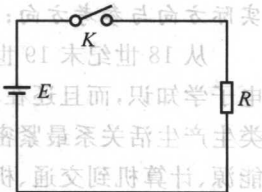


图 1-2 手电筒  
电路模型

在电场中,带正电的粒子(正电荷)在电场的作用下从高电位向低电位移动,而带负电的粒子(负电荷)在电场的作用下从低电位向高电位移动,这些带电粒子的定向移动就形成了电流。正电荷的移动方向就是电流的实际方向,或者说电流的实际方向与负电荷的移动方向相反。当已知电路中各点的电位时,就可以确定电流的实际方向。但在实际计算中,往往无法预先确定电路中各点的电位,因此,也就无法预先确定电流的实际方向。所以,可以先假设一个电流的方向,这个方向是人为设定的方向,称为**电流的参考方向**。而所谓**电压的参考方向**是指电路中设定的高电位端指向低电位端的方向,如假定电路中  $a$  点的电位高于  $b$  点的电位,参考方向可记做  $u_{ab}$ 。

任意二端元件当电压与电流的参考方向一致(电流由高电位指向低电位)时,称**电压与电流参考方向相关联**,如图 1-3 所示。当电压与电流的参考方向相反时,称**电压与电流参考方向非相关联**,如图 1-4 所示。

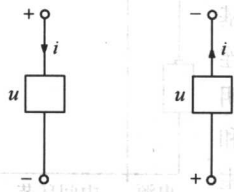


图 1-3 电压、电流参考方向相关联

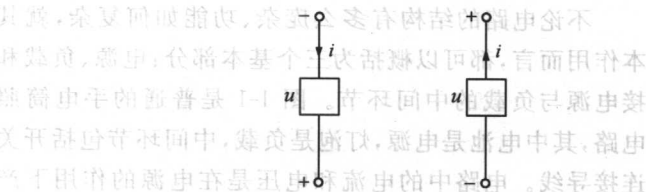


图 1-4 电压、电流参考方向非相关联

设定电流和电压的参考方向后进行电路分析的计算,如计算的电压或电流值大于零,则说明参考方向与实际方向一致;如计算的电压或电流值小于零,则说明参考方向与实际方向相反。

### 第三节 理想电路元件

#### 一、电阻元件

一个电器元件能够将电能转化为热能消耗掉,那么它的理想电路模型就可抽象为电阻元件,如白炽灯、电炉等的基本特性都可抽象为电阻元件。

##### (一) 电阻元件上的电压电流关系

电路元件上电压与电流的关系式也称为伏安特性,电阻元件上的电压和电流满足欧姆定律

$$u = R i \quad (1-1)$$

其中,电压  $u$  与电流  $i$  的参考方向相关联,电路模型如图 1-5 所示。如果  $u$  与  $i$  的参考方向非相关联,电路模型如图 1-6 所示,则欧姆定律形式为

$$u = -R i \quad (1-2)$$

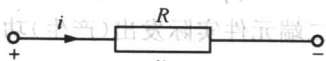


图 1-5 电阻的电路模型

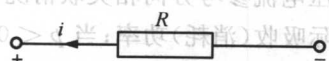


图 1-6 电阻非关联参考方向

由此可见,电压与电流的参考方向是否关联决定了欧姆定律的形式不同。电阻的伏安特性(元件两端电压与电流关系)曲线如图 1-7 所示。

当电压  $u$  的单位为伏特(V),电流  $i$  的单位为安培(A)时,电阻  $R$  的单位为欧姆( $\Omega$ )。

$$1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$$

令电阻的倒数为电导,用  $G$  表示电导,电导的单位为西门子(S)。

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

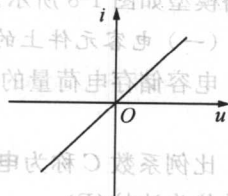


图 1-7 电阻的伏安特性曲线

##### (二) 电阻消耗的能量与功率

在关联参考方向下,电阻元件上消耗的功率为

$$p = u i = R i^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-3)$$

电阻元件在  $[t_0, t]$  时间段内消耗的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t R i^2(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t \frac{u^2(\xi)}{R} d\xi \quad (1-4)$$

在非关联参考方向下,电阻元件上消耗的功率为

$$p = u i = -\frac{u^2}{R} = -R i^2 \quad (1-5)$$

**【例 1-1】** 已知:  $u = -2\text{V}$ ,  $R = 2\Omega$ , 试分别求出图 1-5 中和图 1-6 中电流  $i$  和功率  $p$ , 并指出电压和电流的实际方向。

**【解】** (1) 在图 1-5 中, 电压与电流为关联参考方向, 由欧姆定律

$$i = \frac{u}{R} = \frac{-2}{2} = -1\text{A}$$

由于  $u < 0, i < 0$ , 故电压与电流的实际方向与图中标出的参考方向相反。

在关联参考方向下, 功率  $p = ui = (-2)(-1) = 2\text{W}$ ,  $p > 0$ , 说明电阻消耗能量。

(2) 在图 1-6 中, 电压与电流为非关联参考方向, 由欧姆定律

$$i = -\frac{u}{R} = -\frac{-2}{2} = 1\text{A}$$

由于  $u < 0, i > 0$ , 所以电压的实际方向与图中标出的参考方向相反, 电流的实际方向与图中标出的参考方向相同。

在非关联参考方向下,  $p = ui = (-2) \times 1 = -2\text{W}$ ;  $p < 0$ , 说明电阻消耗功率。

可以进一步导出一个具有普遍意义的结论: 由线性元件组成的任意二端网络, 当其端口电压电流参考方向相关联情况下, 电路功率  $p = ui$ , 当  $p > 0$  时, 表明该时刻二端元件实际吸收(消耗)功率; 当  $p < 0$  时, 表明该时刻二端元件实际发出(产生)功率。当其电压电流采用非关联参考方向时, 则与此结论相反。

## 二、电容元件

电容是能够储存电荷及电场能量的元件, 理想电容元件的电路模型如图 1-8 所示。

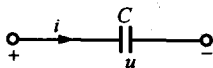


图 1-8 理想电容元件的电路模型

(一) 电容元件上的电压、电流关系

电容储存电荷量的多少与电容上所加电压的大小成正比, 即

$$q = Cu \tag{1-6}$$

比例系数  $C$  称为电容。当电压的单位为伏特(V), 电荷的单位为库仑(C)时, 电容的单位为法拉(F)。

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

电容上的电流是电容上的电荷在单位时间内的变化率, 即

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \tag{1-7}$$

式(1-7)即为理想电容元件上的电压电流关系表达式, 该式说明只有当电容两端的电压随时间变化时, 与电容相连的电路中才有电流通过; 当电容两端的电压不变时(如直流), 则通过电容两端的电流为零, 电容相当于开路。电容的这种性质, 称为动态性质, 电容元件又被称为动态元件。

由式(1-7)得到电容上的电压为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi \tag{1-8}$$

式中,  $t_0$  为计时起点时刻。令  $u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i d\xi$  为计时起点之前电容上已存在的电压, 称为电压的初始值。若在计时起点之前电容上存有电荷, 则电压的初始值不为零,  $u(t_0) \neq 0$ ; 若在计时起点之前电容未被充电, 则电压的初始值为零  $u(t_0) = 0$ 。这样, 电容上的电压在  $t$  时刻为

$$u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi \quad (1-9)$$

由此可见, 电容上的电压不仅与计时起点之后电容上储存的电荷有关, 而且与计时起点之前电容上的电荷有关。由于电容具有这种“记忆”过去状态的特性, 电容又被称为“记忆”元件。

## (二) 电容的功率与能量

在关联参考方向下, 电容上的功率为  $p = ui$ , 能量为

$$W_C = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0) \quad (1-10)$$

当电容在被使用前没有被充电, 即  $u(t_0) = 0$ , 则电容上的能量

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-11)$$

在  $[t_1, t_2]$  时间段内, 电容上的能量为

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2(t_2) - \frac{1}{2} Cu^2(t_1) = W_C(t_2) - W_C(t_1) \quad (1-12)$$

当电容被充电时总有  $|u_2| > |u_1|$ , 即  $W_C(t_2) > W_C(t_1)$ ,  $W_C(t) > 0$ , 电容吸收能量。反之, 电容放电时, 总有  $|u_2| < |u_1|$ , 即  $W_C(t_2) < W_C(t_1)$ ,  $W_C(t) < 0$ , 说明电容在释放能量。可见, 电容具有储存和释放电场能量的功能, 在这个过程中电容并不消耗能量, 所以, 电容只是储能元件而不是耗能元件。

**【例 1-2】** 图 1-8 所示电容元件的电容  $C = 200 \mu\text{F}$ , 电容上所加电压的波形如图 1-9 所示, 求: 流过电容的电流和电容的功率。

**【解】** 电容上电压的表示式为

$$u = \begin{cases} t & \text{当 } 0 \leq t < 2\text{s} \\ 4 - t & \text{当 } 2\text{s} \leq t \leq 4\text{s} \end{cases}$$

电容上电流为

$$i = C \frac{du}{dt} = \begin{cases} 2 \times 10^{-4} \text{ A} & \text{当 } 0 \leq t < 2\text{s} \\ -2 \times 10^{-4} \text{ A} & \text{当 } 2\text{s} \leq t \leq 4\text{s} \end{cases}$$

电容上功率的变化为

$$p = ui = \begin{cases} 2 \times 10^{-4} t \text{ W} & \text{当 } 0 \leq t < 2\text{s} \\ -2 \times 10^{-4} (4 - t) \text{ W} & \text{当 } 2\text{s} \leq t \leq 4\text{s} \end{cases}$$

由上式可见, 在时间段  $[0, 2\text{s}]$  内电容吸收能量, 在时间段  $[2\text{s}, 4\text{s}]$  内电容释放能量, 而且, 释放的能量与吸收的能量相等。

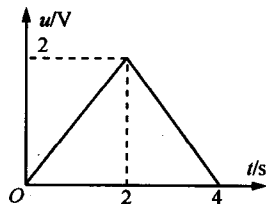


图 1-9 例 1-2 图

### 三、电感元件

日常生活中常会遇到带有线圈的电路元件,这些线圈内部有些是有铁心的,有些是空心的。把线圈的电阻忽略不计用理想导线绕制而成的线圈定义为理想电感元件。

当一个线圈中流过随时间变化的电流时,就会在这个线圈中产生一个随时间变化的磁场,这个磁场的大小由它的磁通  $\Phi$  的多少来定义,磁通  $\Phi$  越大磁场越强。由磁通  $\Phi$  和线圈匝数  $N$  可以定义与该线圈相交链的磁通链  $\Psi$  的大小

$$\Psi = N\Phi \quad (1-13)$$

该磁通和磁通链是由流过线圈本身的电流产生的,所以称为自感磁通和自感磁通链。线性电感元件的自感磁通链与产生它的电流的大小成正比

$$\Psi = L i \quad (1-14)$$

比例系数  $L$  称为电感,电感的单位为亨利(H),电感的电路模型如图 1-10 所示。

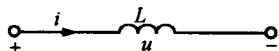


图 1-10 电感的  
电路模型

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$$

#### (一) 电感元件上的电压电流关系

在关联参考方向下,电感上的电压

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-15)$$

式(1-15)即为理想电感元件上的电压电流关系表达式,该式说明只有当流过电感的电流变化时,才能在电感的两端感应出电压,当电流不变时(如直流),电感两端的电压为零,此时,电感相当于短路。电感这种只有当电流变化才有电压出现的性质,称为电感的动态性质,所以电感也是一种动态元件。

电感上的电流与电压的关系式为

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \quad (1-16)$$

式中的  $t_0$  为计时起点的时刻,令  $i(t_0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi$  为计时起点时刻之前电感上流过的电流,称为电流  $i(t)$  的初始值。电流的初始值反映了电感在计时起点之前的储能状态。这样,电感上的电流也同样由两部分组成,即

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \quad (1-17)$$

由于电感上的电流具有“记忆”计时起点之前的状态的性质,电感元件也被称为“记忆”元件。

#### (二) 电感的功率与能量

在关联参考方向下,电感上的功率为

$$p = u i = L i \frac{di}{dt} \quad (1-18)$$

电感在时刻  $t$  储存的能量为

$$W_L(t) = \int_{t_0}^t L i \, di = \frac{1}{2} L i^2(t) - \frac{1}{2} L i^2(t_0) \quad (1-19)$$

当  $i(t_0) = 0$ , 则电感在  $t$  时刻的能量为

$$W_L(t) = \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (1-20)$$

在时间段  $[t_1, t_2]$  内, 电感吸收的能量为

$$W_L(t) = \frac{1}{2} L i^2(t_2) - \frac{1}{2} L i^2(t_1) = W_L(t_2) - W_L(t_1) \quad (1-21)$$

当  $W_L(t_2) > W_L(t_1)$  时,  $W_L(t) > 0$ , 电感吸收能量, 电感将电能转化为磁场能量储存起来; 当  $W_L(t_2) < W_L(t_1)$  时,  $W_L(t) < 0$ , 电感将磁场能量转化成电能释放给电路。由此可见, 理想电感元件并不消耗能量, 只是把吸收的电能转化为磁场能量储存起来, 或者将磁场能量转化为电能释放出来。所以, 电感元件是一种储能元件, 而不是耗能元件。

## 第四节 电压源与电流源

### 一、独立电压源与独立电流源

工程实际中的电源有发电机、电池、信号源等, 它们的特点是能够不断地提供能量给电路, 称之为独立源。独立源的电路模型有两种: 独立电压源和独立电流源。

#### (一) 独立电压源模型

独立电压源有两种电路模型: 理想电压源和实际电压源模型。

##### 1. 理想电压源

理想电压源的电路模型如图 1-11 所示。理想电压源的端电压  $u(t)$  为一个给定的时间函数, 不随流过电压源的电流的大小而变化, 即

$$u(t) = u_s(t) \quad (1-22)$$

当  $u(t) = u_s(t) = U_s$ ,  $U_s$  为恒定值时, 称为恒压源。恒压源的伏安特性曲线如图 1-12 所示。

##### 2. 实际电压源

实际电压源的电路模型是理想电压源和它的内阻串联组成的, 如图 1-13 所示。

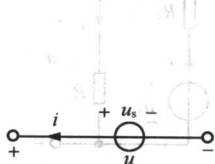


图 1-11 理想电压源的电路模型

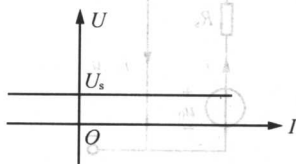


图 1-12 恒压源的伏安特性

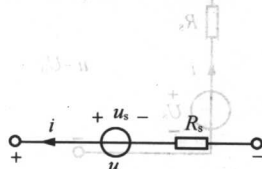


图 1-13 实际电压源的电路模型

实际电压源的伏安特性为

$$u(t) = u_s(t) - R_s i(t) \quad (1-23)$$

当  $u_s = U_s$  ( $U_s$  为常数) 且电路中只有直流量时, 伏安特性为

$$U = U_s - R_s I \quad (1-24)$$

式(1-24)的伏安特性曲线如图 1-14 所示。

在非关联参考方向下, 电压源发出的功率为

$$p = u(t) i(t) \quad (1-25)$$

当  $i(t) > 0$  时,  $p > 0$ , 电源向外电路提供能量; 当  $i(t) < 0$  时,  $p < 0$ , 电源作为负载从电路中吸收能量, 如蓄电池的充电过程。

当电路中的电压和电流都为直流量时, 由式(1-24)可得功率平衡方程式为

$$p = p_s - p_o \quad (1-26)$$

$p_s$  为电压源产生的功率,  $p$  为电压源的输出功率,  $p_o$  为电压源内阻上消耗的功率。

### 3. 电压源的工作状态

电压源有开路、短路和有载三种状态。

#### (1) 电压源的空载状态

如图 1-15 所示, 电压源的空载状态又称为空载状态。电压源处于开路状态时其端电压  $u$  又称为开路电压, 记做  $U_0$ 。开路电压等于理想电压源的端电压, 此时电压源的输出电流为零, 输出功率也为零。

#### (2) 电压源的短路状态

如图 1-16 所示, 实际电压源处于短路状态, 电压源的电压全部加在内阻上, 端电压为零。由于电压源的内阻较小, 将产生很大的短路电流  $I_s$ 。电压源发出的功率全部消耗在内阻上, 有可能对电压源造成损坏。

**【例 1-3】** 某干电池的开路电压  $U_0 = 3 \text{ V}$ , 短路电流  $I_s = 10 \text{ A}$ , 则内电阻为多少?

**【解】** 电池的电源电压为

$$U_s = U_0 = 3 \text{ V}$$

电池的内电阻为

$$R_s = \frac{U_0}{I_s} = 0.3 \Omega$$

#### (3) 电压源的有载工作状态

电压源接有负载时的状态称为有载工作状态, 如图 1-17 所示。图中负载电阻  $R$  的

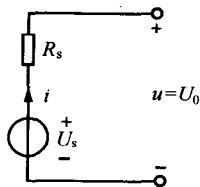


图 1-15 电压源的开路状态

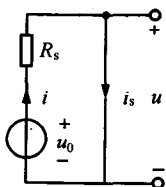


图 1-16 电压源的短路状态

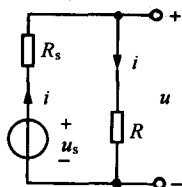


图 1-17 电压源有载工作状态

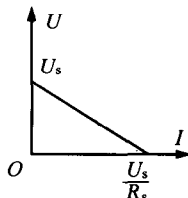


图 1-14 实际电压源的直流伏安特性



大小直接影响到电压源输出电流  $i$  的大小。由欧姆定律得

$$i = \frac{u_s}{R_s + R} \quad (1-27)$$

电压源的输出电压称为端电压。

$$u = u_s - R_s i = Ri \quad (1-28)$$

电压源的输出功率

$$p = ui = Ri^2 = u_s i - R_s i^2 \quad (1-29)$$

独立电压源的输出电流  $i$  的大小决定了输出功率的大小。当输出电流大时,独立电压源的输出功率也大,称电压源带负载较重;反之,当输出电流小时,独立电压源的输出功率也小,称带负载较轻。不同的电气设备在正常工作时对电压、电流和功率的要求不同,这些要求反映在它的额定值上。额定值是电气设备长期正常运行时的容许值。如果电气设备在高于额定值的环境下运行,它的耐热和绝缘性能都要受到损坏,从而使电气设备的运行寿命缩短。如果电气设备在低于额定值的环境下运行,它的工作效率很低,有些设备将无法正常运行。

**【例 1-4】** 将标有 40W、220V 和 100W、220V 的两个电灯并联接入 220V 的电源上,它们的电阻各为多少? 电流各为多少? 若将它们串联接入 220V 的电路中,哪个灯更亮? 并分别计算并联和串联两种情况下电源的输出功率。

**【解】** (1) 并联时,由式(1-3)和欧姆定律

$$P = UI = \frac{U^2}{R}$$

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1} = \frac{220^2}{40} = 1210 \Omega \quad I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{P_1}{U} = \frac{40}{220} = 0.18 \text{ A}$$

$$R_2 = \frac{U^2}{P_2} = \frac{220^2}{100} = 484 \Omega \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{P_2}{U} = \frac{100}{220} = 0.45 \text{ A}$$

由于并联时电路中的电压满足电灯的额定电压,所以电灯消耗额定功率,100W 的灯亮于 40W 的灯。

并联时,电源的输出功率为

$$P = P_1 + P_2 = 140 \text{ W}$$

当 40W 和 100W 的灯串联时,总电阻为

$$R = R_1 + R_2 = 1210 + 484 = 1694 \Omega$$

电路中的总电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{1694} = 0.13 \text{ A}$$

两个电灯上的电压分别为

$$U_1 = R_1 I = 1210 \times 0.13 = 157.3 \text{ V}$$

$$U_2 = R_2 I = 484 \times 0.13 = 62.92 \text{ V}$$

显然,40W 电灯上的电压大于 100W 电灯上的电压,它们的功率分别为