



普通高等教育“十一五”规划教材

电工技术

第2版

高有华 袁 宏 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”规划教材

电 工 技 术

第 2 版

主 编	高有华	袁 宏	
参 编	申永山	龚淑秋	李忠波
主 审	曹承志		



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据教育部电工学课程指导组拟订的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求和深化教学改革、培养素质型人才目标而编写的。可供高等理工院校本、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、经贸管理类、计算机类等相关专业使用,也可作为夜大、函授、电大、职工大学及相关专业技术人员的培训教材和自修教材。本书内容分为基础和应用两部分。基础部分共7章,供相关专业30~40学时教学使用。内容安排上以元件伏安特性、功率和能量关系为基础,以基本定律和基本分析方法为手段,按认识规律使课程内容逐步深化。应用部分共5章,供相关专业20~30学时教学使用。该部分内容力求满足不同专业的需要和反映科技发展的新成果。书中带“*”的内容可根据专业和学时情况取舍。

与本书配套将同时出版《电工技术试题题型精选汇编》(第2版),方便了广大学生学习和教师使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/高有华,袁宏主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2010.1
(2010.7重印)

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-28564-9

I. 电… II. ①高…②袁… III. 电工技术—高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第188282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 版式设计:霍永明

封面设计:姚毅 责任校对:申春香 责任印制:李妍

北京外文印刷厂印刷

2010年7月第2版第2次印刷

184mm×260mm·18.75印张·462千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28564-9

定价:32.00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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书自2002年11月出版发行以来,得到广大读者的支持与关爱。历时7年,已成为辽宁省精品课——电工学课程的使用教材,并于2007年被评为辽宁省普通高等学校精品教材。为了使该教材在论述的科学性、取材的广度性、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技术基础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再版。

由于电工技术课程是高等理工科院校非电类专业的学科基础课,因此该书的核心内容相对稳定,本书继续着重于电工技术的基本概念和基本定律,并兼顾非电类理工科不同专业的教学要求和人才培养需要,基础部分力求提高起点、加大跨度、通俗易懂、便于自学;应用部分力求满足不同专业的需要和反映科学技术发展的新成果。与第1版相比,修订后的教材在内容和结构上进行了一定的调整,以解决基础理论与新技术、传统教学模式与现代教学方法、课程内容多与讲授学时少等矛盾。具体修改内容为:删减了第2~5章原理性内容的详细介绍,重点突出原理的应用;在第5章中增加了 RL 电路的时域响应内容,删除了 RL 电路时间常数的求法;在第1、2、3、4、5、8章中增加了实际电路的仿真分析实例;将第10章10.2节修改为三相异步电动机的基本控制环节和基本保护环节;对全书每节后的练习与思考和章后的习题做了必要的增减,力求题型多样化,难度层次化。

修订后的《电工技术》内容分为基础和应用两部分,基础部分共7章,供相关专业30~40学时教学使用;应用部分共5章,供相关专业20~30学时教学使用。书中带“*”的内容可根据专业和学时情况取舍。与其配套的《电工技术试题题型精选汇编》(第2版),方便了广大学生学习和教师使用。

本书由沈阳工业大学高有华教授(编写第2、4、12章及附录)和袁宏教授(编写第1、5、9章)担任主编。李忠波教授编写第3章,申永山编写第6、8章,龚淑秋编写第7、10、11章。曹承志教授对本书进行了仔细审阅,提出许多修改意见,在此深表谢意。

本书可供高等理工科院校本、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、经贸管理类、计算机类等相关专业使用,也可作为夜大、函授、电大、职工大学及相关专业技术人员培训教材和自修教材。

由于编者水平有限,本书难免有不妥和错误之处,恳请读者提出批评与指正。

编者

2009年8月

第1版前言

本书是根据国家教育部电工学课程指导组拟订的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求和面向21世纪教育教学改革目标而编写的。可供高等工科院校大学本科、专科机械类、材料类、经贸管理类、化工类、建筑类、计算机类等有关专业教学使用。

电工技术是理工科非电类专业的学科基础课程。通过本课程的学习，应使学生得到电工技术必要的基础理论、基本知识和基本技能，了解电工事业发展概况，为学习后续专业课程以及从事工程技术工作和科学研究工作打下理论和实践基础。

本教材是十几年教学改革实践的结晶，试用期间收到满意效果。本教材分基础和应用两部分。基础部分有七章，可供有关专业30~40学时教学使用。为适应教学改革和人才素质培养的需要，该部分力求作到提高起点、加大跨度、精炼内容和便于自学。内容安排上以元件模型的伏安关系、功率关系和能量关系为基础，以基本定律和基本分析方法为手段，以激励和响应为主线，按认识规律使课程内容逐步深化。为使学生掌握先进的分析、设计工具，促进教学手段的现代化，大部分章节后有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。在与该教材配套的《电工技术试题题型精选汇编》中有相关的引导性例题。应用部分有五章，可供有关专业30~40学时教学使用。该部分内容应力求满足不同专业的需要和反映科学技术发展的新成果。书中带*号的内容可根据专业和学时情况取舍，或在教师指导下由学生自学。

本书由沈阳工业大学袁宏担任主编，并编写其中的第一、五章，沈阳工业大学高有华编写第二、四章，李忠波编写第三、九、十、十二章和附录，申永山编写第六、八章，龚淑秋编写第七、十一章。范振铨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。

由于编者水平所限，书中难免有不妥和错误之处，恳请使用本书的教师、学生和广大读者提出批评指正。

编 者

目 录

第2版前言

第1版前言

第1篇 基础部分

第1章 电路的基本概念与定律 1

1.1 电路和电路模型 1

1.2 电路的基本物理量及其参考方向 2

1.3 电阻、电感和电容 4

1.4 电压源和电流源 8

1.5 受控源 11

1.6 基尔霍夫定律 12

1.7 电路中的功率和电位计算 16

*1.8 非线性电阻电路的分析 19

1.9 元件伏安特性的仿真分析 21

小结 24

习题 25

第2章 电路分析方法 29

2.1 电源等效变换法 29

2.2 支路电流法 32

2.3 节点电压法 35

2.4 叠加原理 40

*2.5 替代定理 42

2.6 戴维宁定理和诺顿定理 43

2.7 电路分析方法的仿真分析 47

小结 55

习题 56

第3章 正弦交流电路 59

3.1 正弦交流电的基本概念 59

3.2 正弦量的相量表示法 62

3.3 电阻元件的正弦交流电路 64

3.4 电感元件的正弦交流电路 65

3.5 电容元件的正弦交流电路 68

3.6 正弦稳态电路的分析 70

3.7 功率因数的提高 77

*3.8 正弦交流电路的频率特性 80

3.9 谐振电路 82

小结 87

习题 88

第4章 三相交流电路 93

4.1 三相电动势的产生与三相电源
的联结 93

4.2 三相电路负载的联结 96

4.3 三相电路的功率 105

4.4 三相电路的仿真分析 109

小结 114

习题 115

第5章 电路的时域分析 118

5.1 概述 118

5.2 一阶电路的时域分析 121

5.3 求解一阶电路的三要素法 129

5.4 RC串联电路对矩形波电压的响应 133

5.5 一阶电路的仿真分析 136

小结 140

习题 141

第6章 电工测量与安全用电 145

6.1 测量误差与仪表准确度 145

6.2 电工仪表的类型 146

6.3 电流、电压和单相功率的测量 149

6.4 万用表和兆欧表 151

6.5 电桥及电阻、电容和电感的测量 153

6.6 安全用电技术 155

小结 157

习题 158

*第7章 非正弦周期信号电路 159

7.1 非正弦周期信号的分解 160

7.2 非正弦周期量的有效值、平均值
和平均功率 163

7.3 非正弦周期信号线性电路的谐波

分析法	166	10.1 常用控制电器与电气图形符号	217
小结	169	10.2 三相异步电动机的基本控制和 基本保护环节	221
习题	170	小结	226
		习题	226
第 2 篇 应用部分			
第 8 章 铁心线圈与变压器	172	第 11 章 控制电机	228
8.1 磁路的基本概念和定律	172	11.1 伺服电动机	228
8.2 直流铁心线圈与直流电磁铁	176	11.2 步进电动机	237
8.3 交流铁心线圈与交流电磁铁	178	11.3 控制电动机的选用	241
8.4 变压器	181	小结	244
8.5 理想变压器的仿真分析	191	习题	244
小结	191	* 第 12 章 可编程序控制器	246
习题	192	12.1 PLC 的特点及应用场合	246
第 9 章 异步电动机	194	12.2 PLC 的基本结构及工作原理	247
9.1 三相异步电动机的构造及工作原理	194	12.3 MASTER - K30 PLC 的 I/O 配置及 内部软继电器	249
9.2 三相异步电动机的等效电路	199	12.4 MASTER - K30 的指令系统与 编程语言	251
9.3 三相异步电动机的电磁转矩与 机械特性	201	12.5 PLC 控制系统的应用举例	263
9.4 三相异步电动机的起动、调速 和制动	204	小结	266
9.5 三相异步电动机的选择	209	习题	266
* 9.6 单相异步电动机	212	附录	269
小结	214	附录 A 直流电动机	269
习题	215	附录 B 金星 MASTER - K30 PLC 简介	275
第 10 章 电动机的继电器控制	217	参考文献	292

第1篇 基础部分

第1章 电路的基本概念与定律

本章主要讨论电路和电路模型、电路的基本物理量及其参考方向、理想电路元件及其伏安特性、电路的基本定律、功率和电位的计算等，其目的是为电路和电子电路的分析与计算建立基础。

1.1 电路和电路模型

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相互连接而成。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3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（亦称话筒）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的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。

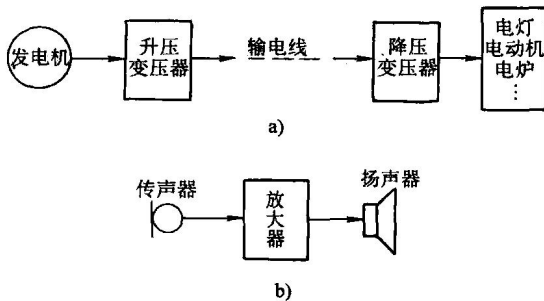


图1-1 电路示意图

a) 输配电电路 b) 扩音机电路

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；另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；由激励电路中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。

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。

为了便于用数学方法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。

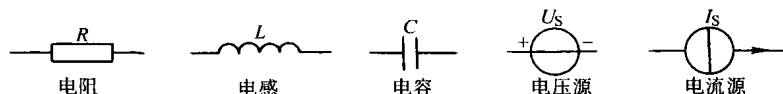


图 1-2 理想电路元件的图形与符号

例如常用的手电筒,是由干电池、灯泡、开关和筒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 ;筒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。

今后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。

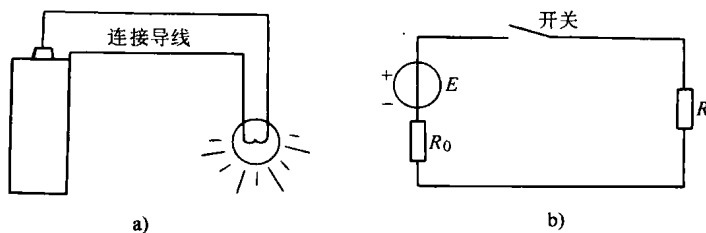


图 1-3 手电筒实际电路及其电路模型

a) 手电筒实际电路 b) 手电筒电路模型

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,称为

电流。或者说，电流 i 是电荷 q 对时间 t 的变化率，即

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

随时间而变化的电流，称为时变电流（通常称为交流电流），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。

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

通常规定正电荷移动的方向为电流的方向，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际方向一致时，电流为正值；反之，当电流的参考方向与其实际方向相反时，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。图1-5中示出了电流的参考方向与其实际方向之间的关系。



图1-4 电流的参考方向表示

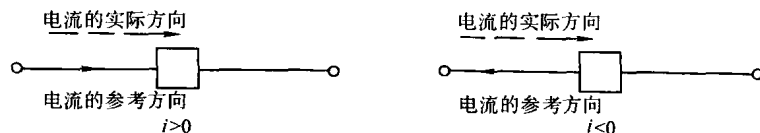


图1-5 电流的参考方向与其实际方向之间的关系

1.2.2 电压及其参考方向

为衡量电路元件吸收或发出电能的情况，在电路分析中引入了电压这一物理量。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（通常为交流电压），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，电压的单位是伏特（V）。当电场力把1库仑（C）的电荷量从一点移动到另一点所做的功为1焦耳（J）时，该两点间的电压为1伏特（V）。

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际方向一致时，电压为正值；反之，当电压的参考方向与其实际方向相反时，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。电压的参考方向表示以及参考方向与实际方向之间的关系如图 1-6a、b 所示。

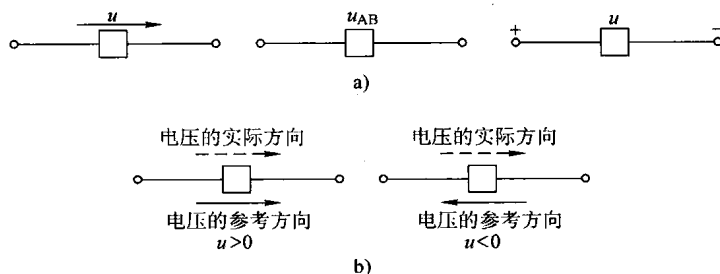


图 1-6 电压的参考方向表示以及参考方向与实际方向之间的关系

“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如图 1-7a 所示，反之，为非关联参考方向，如图 1-7b 所示。



图 1-7 电压和电流的关联、非关联参考方向

练习与思考

- 1-2-1 在图 1-8a 中， $U_{ab} = -10\text{V}$ ，试画出 a、b 两点的实际电压方向。
 1-2-2 在图示 1-8b 中， $U_1 = -6\text{V}$ ， $U_2 = 4\text{V}$ ，求 U_{ab} 等于多少伏？
 1-2-3 在图 1-9 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（ ）。

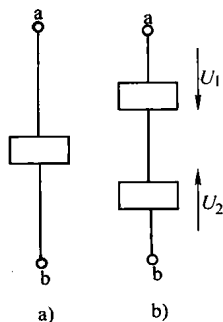


图 1-8 练习与思考 1-2-1、1-2-2 图

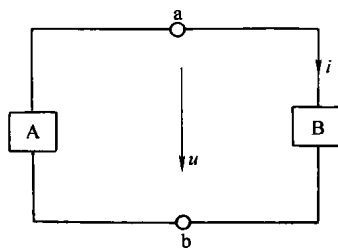


图 1-9 练习与思考 1-2-3 图

1.3 电阻、电感和电容

电阻、电感和电容是组成电路模型的理想电路元件。所谓理想电路元件，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征。电路分析中,人们最感兴趣的是元件的外部特性,其中最主要的就是元件端钮上的电压、电流关系,即伏安关系。本节将讨论电阻、电感和电容3种电路元件的伏安特性。

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1-10a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

$$i = \frac{u}{R}$$

或

$$u = iR \quad (1-3)$$

图1-10b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。

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。

在法定计量单位中,电阻的单位是欧姆(Ω)。电阻的倒数称为电导,用符号 G 表示,即

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

电导的单位是西门子(S)。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。当忽略线圈导线中的电阻时,它就成为一个理想的电感元件。

当电流 i 通过图1-11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1-11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链的变化率。当电流 i 增大时, $d\Phi/dt > 0$,

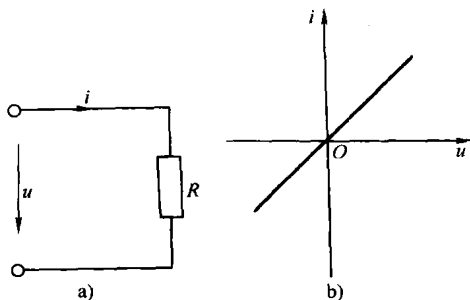


图1-10 线性电阻元件符号及伏安特性曲线

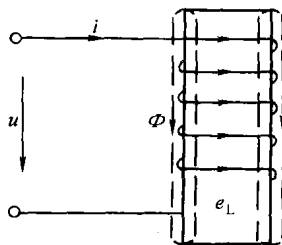


图1-11 电感元件

式(1-7)中的 e_L 为负值,即其实际方向与图1-11中选定的参考方向相反,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,即其实际方向与参考方向一致,感应电动势 e_L 将阻碍电流 i 的减小。

磁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 的单位是韦伯(Wb),电流的单位是安培(A)时,电感 L 的单位是亨利(H)。

图1-12a、b给出了线性电感元件及韦安特性曲线。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。

将磁链 $\Psi = Li$ 代入式(1-7),则得

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

根据图1-12a中参考方向的规定,可得

$$u + e_L = 0$$

或

$$u = -e_L = -\left(-L \frac{di}{dt}\right) = L \frac{di}{dt}$$

即

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

式(1-9)表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,欲使交流电流通过电感,必须在电感两端加电压。由此得出结论:电感元件是一种动态元件。

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)表明,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

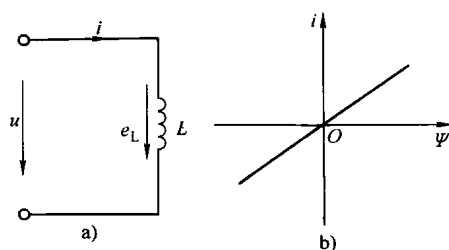


图1-12 线性电感元件及韦安特性曲线

为磁场能量,即电感元件从电源取用能量。式(1-12)中的 $\frac{1}{2}Li^2$ 就是磁场能量。当电感元件中的电流减小时,磁场能量减小,磁能转换为电能,即电感元件向电源放还能量。

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。图1-13a给出了电容元件的电路符号及电压、电流的参考方向。

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

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

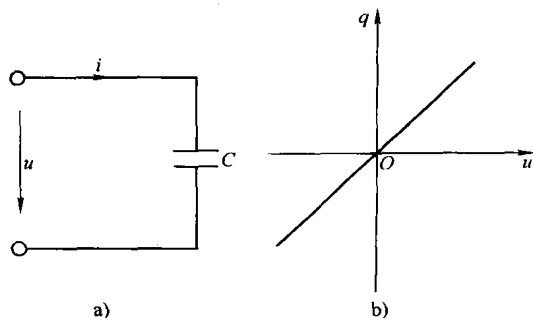


图1-13 电容元件

a) 电路符号及电压、电流参考方向 b) 库伏特性曲线

式中, 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1-13b给出了线性电容元件的库伏特性曲线。

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

在图1-13a所示的电压、电流参考方向下,当电压为正值时,上极板上储集的是正电荷,下极板上储集的是等量的负电荷。当极板上的电量 q 或电压 u 发生变化时,电路中要产生电流

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-14)$$

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。

式(1-14)是电容元件伏安关系的微分形式。若将其两边积分,便可得出电容元件伏安关系的另一种形式,即

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-15)$$

式中, u_0 是初始值,即在 $t=0$ 时电容元件上的电压。若 $u_0 = 0$ 或 $q_0 = 0$,则

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-16)$$

如果将式(1-14)两边乘以 u ,并积分之,则得

$$\int_0^t u i dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-17)$$

式(1-17)表明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,即电容元件从电源取用能量(充电)。式(1-17)中的 $\frac{1}{2}Cu^2$ 就是电容器极板间的电场能量。

当电压降低时, 电场能量减小, 电场能转换成电能, 即电容元件向电源放还能量 (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

特 征 \ 元 件	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	$\int_0^t i^2 R dt$	$\frac{1}{2} Li^2$	$\frac{1}{2} Cu^2$

对于表 1-1 有两点需要注意:

1) 表 1-1 中列出的伏安关系式是在 u 和 i 取关联参考方向下得出的; 否则, 式中应有负号。

2) 3 个电路元件都是线性元件, R 、 L 和 C 都是常数, 即相应的 u 与 i 、 Φ 与 i 及 q 与 u 之间都是线性关系。

练习与思考

1-3-1 在图 1-14 所示的四个电路中, 试分别确定电路中的电压 u_C 和电流 i_L 。

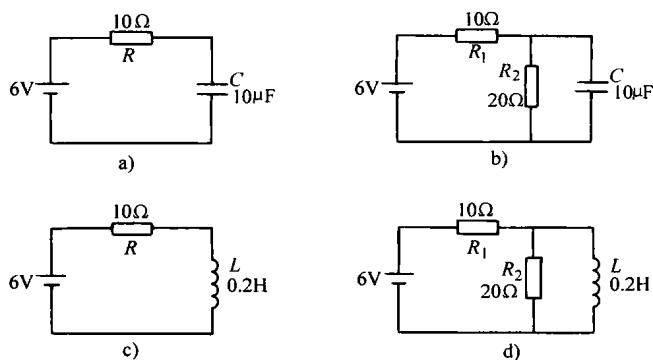


图 1-14 练习与思考 1-3-1 图

1-3-2 将一线圈通过开关接在电池上, 试分析在下列 3 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?

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 1-15 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。

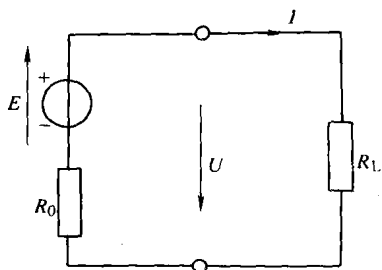


图 1-15 电压源电路模型

由图 1-15 所示电路，可得

$$U = E - IR_0 \quad (1-18)$$

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 1-16 所示。根据图 1-16 和式 (1-18) 可以得出电压源的特点：

- 1) 当电压源开路（空载）时， $I=0$ ， $U=U_{oc}=E$ ， U_{oc} 称为开路电压。
- 2) 当电压源有负载时， $U < E$ ，其差值是内阻上的电压降 IR_0 。显然，当负载增加，即外电路的电阻（负载电阻）减小时，输出电压 U 将下降。 R_0 愈小，输出电压 U 随负载电流增加而降落的愈少，则外特性曲线愈平。
- 3) 当电压源短路时， $U=0$ ， $I=I_{sc}=E/R_0$ ， I_{sc} 称为短路电流。短路电流通常远远大于电压源正常工作时提供的额定电流。
- 4) 当 $R_0=0$ （相当于电压源的内阻 R_0 短路）时，电压 U 恒等于电动势 E ，而其中的电流 I 是任意的，由负载电阻 R_L 和电动势 E 确定。这样的电压源称为理想电压源或恒压源，其电路如图 1-17 所示。理想电压源的外特性曲线是与横轴平行的一条直线，如图 1-16 所示。如果一个电源的内阻远小于负载电阻，即 $R_0 \ll R_L$ ，则内阻上的压降 $IR_0 \ll U$ ，于是 $U \approx E$ ，基本上恒定，可以认为该电源为理想电压源。通常用的稳压电源可以近似看作理想电压源。

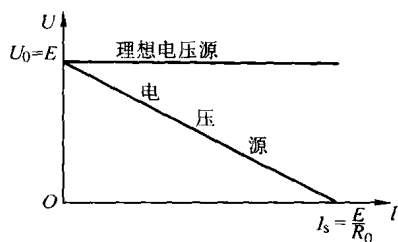


图 1-16 电压源和理想电压源外特性曲线

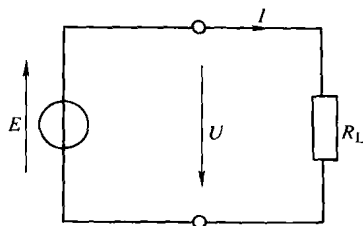


图 1-17 理想电压源电路

1.4.2 电流源

电流源也是实际电源的一种抽象，它能向外电路提供较为稳定的电流（时恒量或时变量）。电流源的电路模型是电激流 I_s 和内阻 R_0 的并联，如图 1-18 所示。图中 U 与 I 分别是电源的端电压和负载电流。

由图 1-18 所示电路, 可得

$$I_s = \frac{U}{R_0} + I \quad (1-19)$$

即电流源输出端口上的伏安关系式, 称为电流源的外特性方程。由此可作出电流源的外特性曲线, 如图 1-19 所示。根据图 1-19 和式 (1-19) 可以得出电流源的特点:

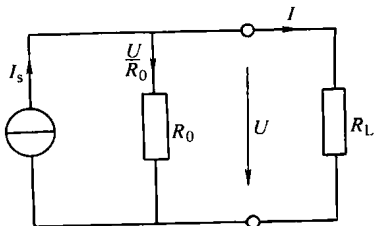


图 1-18 电流源电路

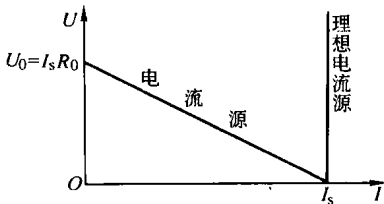


图 1-19 电流源和理想电流源的外特性

- 1) 当电流源开路时, $I=0$, $U=U_{oc}=I_s R_0$, 电激流全部流过内阻 R_0 。
- 2) 当电流源有负载时, I_s 分成两部分: 一部分供给负载, 一部分在其内阻中通过。当负载电阻增加时, 负载分得的电流减小, 输出电压将随之增大。 R_0 愈大, 输出电流 I 随输出电压增大而减小得愈少, 则外特性愈陡。
- 3) 当电流源短路时, $U=0$, $I=I_{sc}=I_s$, 电激流全部成为输出电流。
- 4) 当 $R_0=\infty$ (相当于电流源的内阻 R_0 断开) 时, 电流 I 恒等于电流 I_s , 而其两端的电压 U 是任意的, 由负载电阻 R_L 和电流 I_s 确定。这样的电流源称为理想电流源或恒流源, 其电路如图 1-20 所示。如果一个电流源的内阻远大于负载电阻, 即 $R_0 \gg R_L$, 则输出电流 $I \approx I_s$, 基本上恒定, 可以认为该电流源为理想电流源。晶体管可以近似地认为是一个理想电流源。因为从它的输出特性 (见图 1-21) 可见, 当基极电流 I_B 为某一定值并 U_{CE} 超过一定值时, 集电极电流 I_C 基本上不随管压降 U_{CE} 的变化而变化。

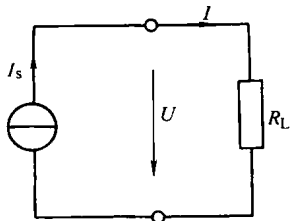


图 1-20 理想电流源或恒流源电路

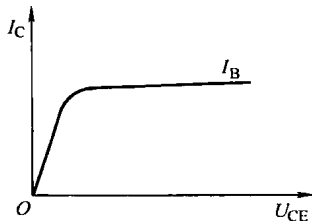


图 1-21 晶体管的输出特性

练习与思考

- 1-4-1 理想电压源能否短路? 理想电流源能否开路? 为什么?
- 1-4-2 一个理想电压源向外电路供电时, 若再并联一个电阻, 这个电阻是否会影响理想电压源对原来外电路的供电情况?
- 1-4-3 一个理想电流源向外电路供电时, 若再串联一个电阻, 这个电阻是否会影响理想电流源对原来外电路的供电情况?
- 1-4-4 在图 1-22 所示的两个电路中, 1) R_1 是不是电源内阻? 2) R_2 中的电流 I_2 及其两端的电压 U_2 各等于多少? 3) 改变 R_1 的阻值, 对 I_2 和 U_2 有无影响? 4) 理想电压源中的电流 I 和理想电流源两端