

21 世纪高等学校教材

电 工 技 术

袁宏 主编

DIAN GONG JI SHU (非电类专业)



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



● ISBN 7-111-10753-5/TM-993(课)

封面设计/电脑制作:张静

21 世纪高等学校教材

电工技术 袁宏 主编

电工技术试题题型精选汇编 高有华 李忠波 主编

电子技术

电子技术试题题型精选汇编

ISBN 7-111-10753-5



9 787111 107538 >

地址: 北京市百万庄大街22号

邮政编码: 100037

联系电话: (010) 68326294

网址: <http://www.cmpbook.com>

定价: 26.00 元 E-mail: online@cmpbook.com

21 世纪高等学校教材

电 工 技 术

(非电类专业)

主编 袁 宏

参编 高有华 李忠波

申永山 龚淑秋



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据教育部电工学课程指导组拟定的非电类电工、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。可供高等工科院校非电类大学本科、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师生使用。教材内容分基础和应用两部分。基础部分可供有关专业 30~40 学时教学使用。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。应用部分可供有关专业 30~40 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。

与该书配套的《电工技术试题题型精选汇编》一书与本书同时出版,以方便读者使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/袁宏主编. —北京:机械工业出版社, 2002.11

21 世纪高等学校教材. 非电类专业

ISBN 7-111-10753-5

I. 电… II. 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 (2002) 第 055421 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 张世琴 责任校对: 刘志文

封面设计: 张 静 责任印制: 付方敏

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·18.75 印张·463 千字

0001—5000 册

定价: 26.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677—2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据国家教育部电工学课程指导组拟定的非电类电工、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,樊淑秋编写第七、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

前言

第一篇 基础部分

第一章 电路的基本概念与定律	1	第一节 三相电动势的产生与三相电源的 联结	81
第一节 电路和电路模型	1	第二节 三相电路负载的联结	84
第二节 电路的基本物理量及其参考方向 ..	2	第三节 三相电路的功率	93
第三节 电阻、电感和电容	5	小 结	97
第四节 电压源和电流源	9	习 题	97
第五节 受控源	11	第五章 电路的时域分析	100
第六节 基尔霍夫定律	12	第一节 概述	100
第七节 电路中的功率和电位计算	16	第二节 RC 电路的时域分析	103
* 第八节 非线性电阻电路的分析	19	第三节 求解一阶电路的三要素法	110
小 结	21	第四节 RC 串联电路对矩形波电压的 响应	113
习 题	22	小 结	117
第二章 电路分析方法	26	习 题	117
第一节 电源等效变换法	26	第六章 电工测量与安全用电	121
第二节 支路电流法	29	第一节 测量误差与仪表准确度	121
第三节 节点电压法	32	第二节 电工仪表的类型	122
第四节 叠加原理	37	第三节 电流、电压和单相功率的测量 ..	125
* 第五节 替代定理	39	第四节 万用表和兆欧表	128
第六节 戴维宁定理和诺顿定理	40	第五节 电桥及电阻、电容和电感的 测量	130
小 结	44	第六节 安全用电常识	132
习 题	44	小 结	133
第三章 正弦交流电路	48	习 题	134
第一节 正弦交流电的基本概念	48	* 第七章 周期性非正弦电路	135
第二节 正弦量的相量表示法	51	第一节 非正弦周期信号的分解	136
第三节 电阻元件的正弦交流电路	53	第二节 非正弦周期量的有效值、平均值和 平均功率	138
第四节 电感元件的正弦交流电路	54	第三节 非正弦周期信号线性电路的谐波分 析法	142
第五节 电容元件的正弦交流电路	57	小 结	144
第六节 正弦稳态电路的分析	59	习 题	145
第七节 功率因数的提高	66		
* 第八节 正弦交流电路的频率特性	69		
第九节 谐振电路	70		
小 结	75		
习 题	76		
第四章 三相交流电路	81		

第二篇 应用部分

第八章 铁心线圈与变压器	148	第十一章 控制电机	204
第一节 磁路的基本概念和定律	148	第一节 伺服电动机	204
第二节 直流铁心线圈与直流电磁铁	151	第二节 步进电动机	214
第三节 交流铁心线圈与交流电磁铁	153	第三节 控制电动机的选用	218
第四节 变压器	157	小 结	221
小 结	166	习 题	222
习 题	166	* 第十二章 可程序控制器	223
第九章 异步电动机	169	第一节 PLC 的特点及应用场合	223
第一节 三相异步电动机的构造及原理	169	第二节 PLC 的基本结构及工作原理	224
第二节 三相异步电动机的等效电路	174	第三节 MASTER - K30PLC 的 I/O 配置及 内部软继电器	226
第三节 三相异步电动机的电磁转矩与机 械特性	177	第四节 MASTER - K30 的指令系统与编程 语言	228
第四节 三相异步电动机的起动、调速和 制动	179	第五节 PLC 控制系统的应用举例	240
第五节 三相异步电动机的选择	184	小 结	243
* 第六节 单相异步电动机	188	习 题	244
小 结	190	附 录	246
习 题	191	附录 A 直流电动机	246
第十章 电动机的继电器—接触器 控制	193	附录 B 金星 MASTER - K30PLC 简介	252
第一节 常用控制电器与电气图形符号	193	附录 C 均匀传输线	268
第二节 三相异步电动机的基本控制 系统	198	小 结	289
小 结	202	附录 D 电气原理图中常用新旧电气符号对 照表	291
习 题	202	参考文献	294

第一篇 基础部分

第一章 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。

第一节 电路和电路模型

一、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，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。

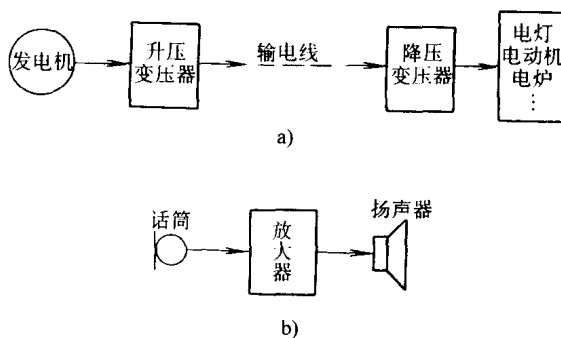


图 1-1 电路示意图

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；一种是实现信号的传递与处理，如扩音机电路，先由话筒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。

二、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它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它形式的能量，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。

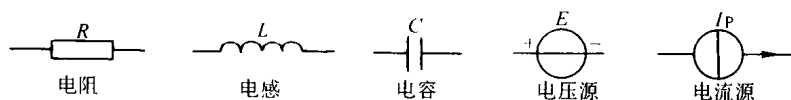


图 1-2 理想电路元件的图形与符号

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。

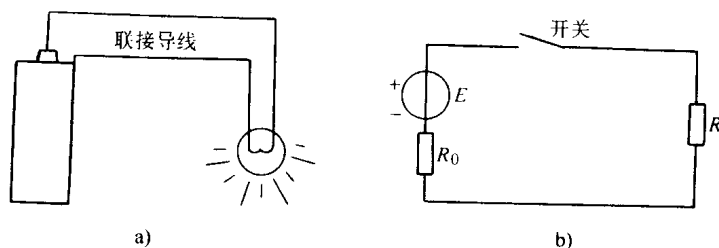


图 1-3 手电筒实际电路及其电路模型

a) 手电筒实际电路 b) 手电筒电路模型

第二节 电路的基本物理量及其参考方向

一、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

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

上式表示电流 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（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

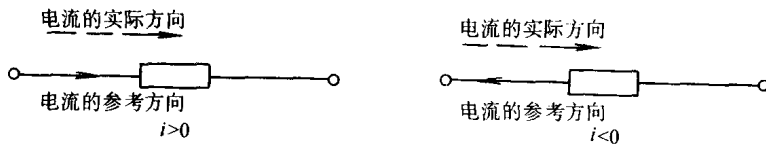


图 1-5 电流参考方向与其实实际方向间的关系

二、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。电压的参考方向几种表示以及参考方向与实际方向之间的关系如图 1-6 所示。

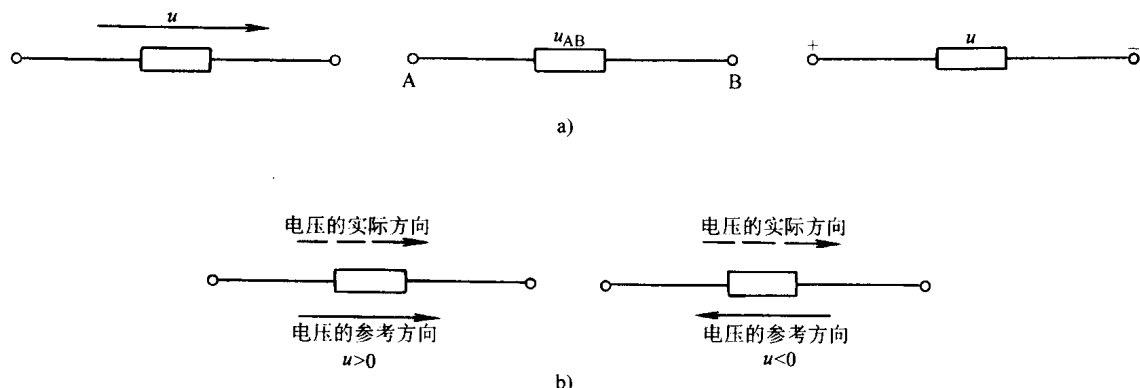


图 1-6 电压的参考方向表示及电压参考方向与实际方向间的关系

“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, 如图 1-7 所示。

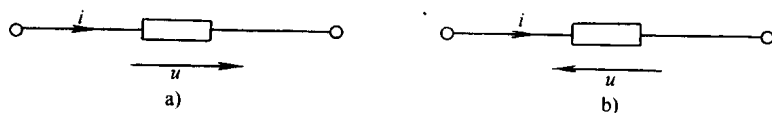


图 1-7 电压和电流的关联、非关联参考方向

练习与思考

1-2-1 在图 1-8a 中, $U_{ab} = -10V$, 试画出 a、b 两点的实际电压方向。

1-2-2 在图示 1-8b 中, $U_1 = -6V$, $U_2 = 4V$, 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 ()。

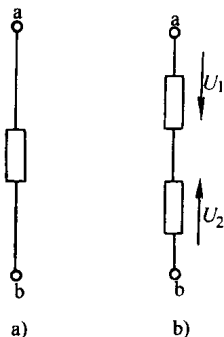


图 1-8 练习与思考 1-2-1、1-2-2 图

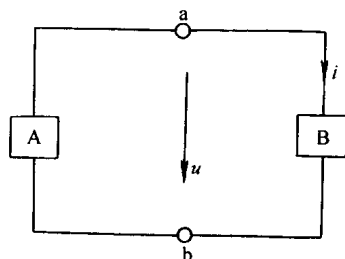


图 1-9 练习与思考 1-2-3 图

第三节 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，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，我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、电感和电容三种电路元件的伏安特性。

一、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1-10a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

$$u = iR$$

(1-3) 图1-10 线性电阻元件符号及伏安特性

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(1-3)式两边乘以 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

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

二、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

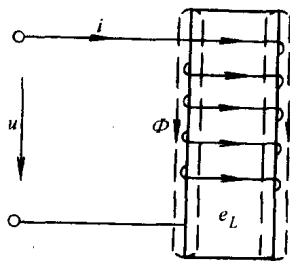
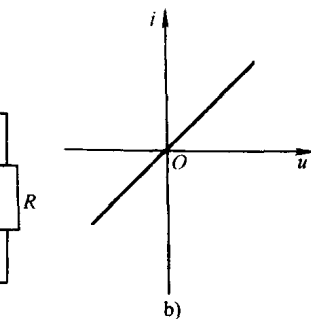


图1-11 电感元件

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

上式表明, 感应电动势的大小等于磁链的变化率。当电流 i 增大时, $d\Phi/dt > 0$, 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 1-12 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) 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

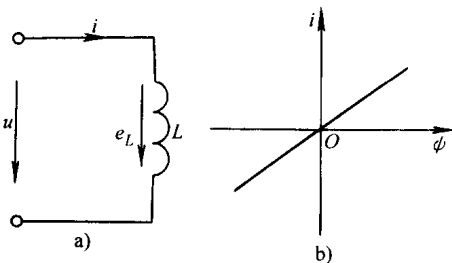


图 1-12 线性电感元件及其韦安特性曲线

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

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, 磁能转换为电能, 即电感元件向电源放还能量。

三、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 1-13a 所示。

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

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

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。

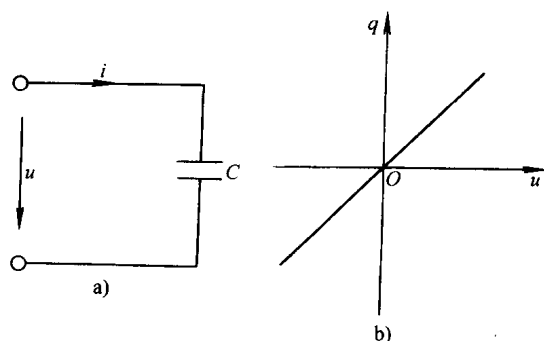


图 1-13 线性电容元件及库伏特性曲线

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) 说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) 三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 。

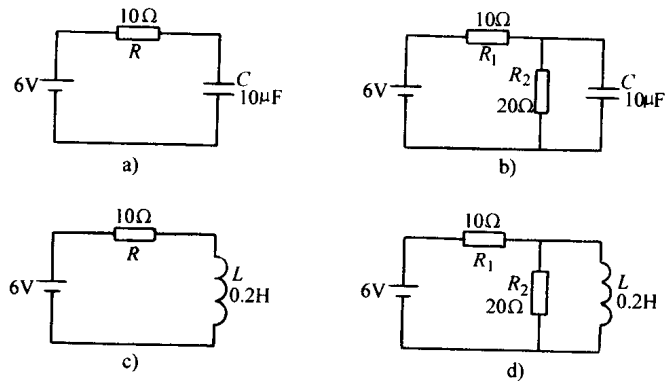


图 1-14 练习与思考 1-3-1 图

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?

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

第四节 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。

一、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。

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， $I = 0$ ， $U = U_\infty = E$ ， U_∞ 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。

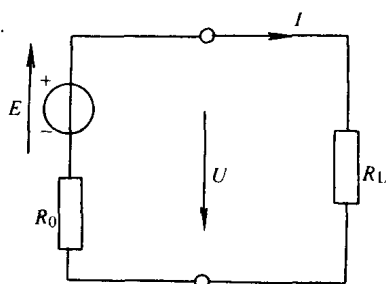


图 1-15 电压源电路模型

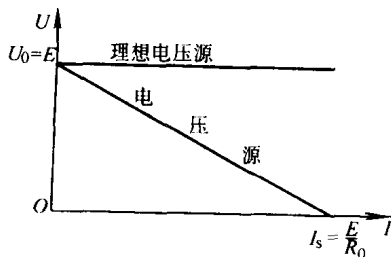


图 1-16 电压源和理想电压源外特性曲线

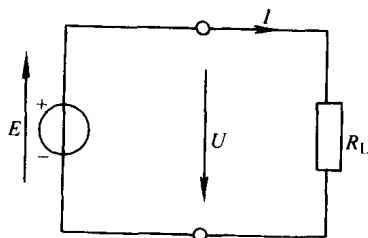


图 1-17 理想电压源电路

二、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 I_s 是电流源的源电流，通常称为电激流 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：

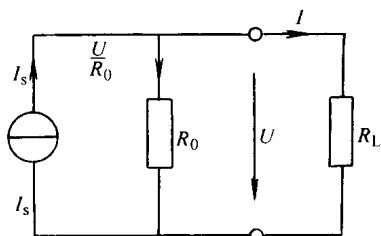


图 1-18 电流源电路

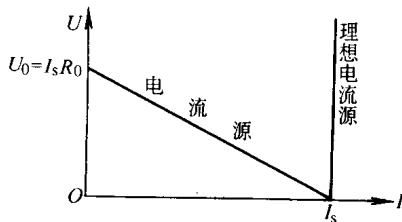


图 1-19 电流源和理想电流源的外特性

- 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，输出电压 U 随输出电流 I 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（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。

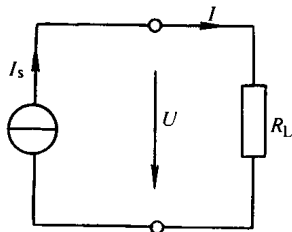


图 1-20 理想电流源电路

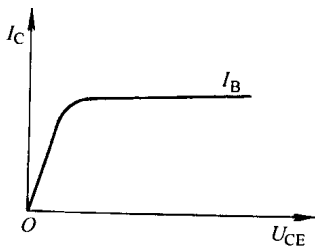


图 1-21 晶体管的输出特性

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