

583

1-43
L936
1

电工电子学(上)

主 编 吕厚余
副主编 王生春 杨承志



A0963919

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括:电路的基本定律与基本分析方法;正弦交流电路;一阶电路暂态响应;半导体器件;简单放大器;负反馈放大器和集成运算放大器;组合逻辑电路;触发器和时序逻辑电路;数/模和模/数转换。

本书按新的教学体系:“电路—电子—电力电子—电机与控制—仪表及测量—安全用电”编写,适合工科院校非电类师生教学使用,也可供自学者及广大工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子学(上)/吕厚余主编. —重庆:重庆大学出版社,2001.7
ISBN 7-5624-2297-4

I. 电... II. 吕... III. ①电工学②电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 18187 号

电工电子学(上)

主 编 吕厚余

副主编 王生春 杨承志

责任编辑 谭 敏

*

重庆大学出版社出版发行

新 华 书 店 经 销

重庆科情印务有限公司

*

开本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:386 千

2001年5月第1版 2001年5月第1次印刷

印数:1—10,000

ISBN 7-5624-2297-4/TM·67 定价:36.00元(上、下册)

(本册定价:18.00元)

序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济已见端倪,综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争,归根结底是科技与人才的竞争。邓小平同志早已明确指出:科技是现代化的关键,而教育是基础。毫无疑问,高等教育是科技发展的基础,是高级专门人才培养的摇篮。我国高等教育在振兴中华、科教兴国的伟大事业中担负着极其艰巨的任务。

为了适应社会主义现代化建设的需要,在1993年党中央、国务院颁布《中国教育改革和发展纲要》以后,原国家教委全面启动和实施《高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》,有组织、有计划地在全国推进教学改革工程。其主要内容是:改革教育体制、教育思想和教育观念;拓宽专业口径,调整专业目录,制定新的人才培养方案;改革课程体系、教学内容、教学方法和教学手段;实现课程结构和教学内容的整合与优化,编写、出版一批高水平、高质量的教材。

地处巴山蜀水的重庆大学,是驰名中外的我国重要高等学府。重庆大学出版社是一个重要的大学出版社,工作出色,一贯重视教材建设。从90年代初期开始实施“立足西部,面向全国”的战略决策,针对当时国内专科教材匮乏的情况,组织西部地区近20所院校编写、出版机械类、电类专科系列教材,以后又推出计算机、建筑、会计类专科系列教材,得到原国家教委的肯定与支持。在1998年教育部颁布《普通高等学校本科专业目录》之后,重庆大学出版社立即组织西部地区高校的数十名教学专家反复领会教学改革精神,认真学习全国的教育改革成果,充分交流各校的教学改革经验,制定机械设计制造及其自动化专业的教学计划和各门课程的教学大纲,并组织编写、出版机械类本科系列教材。为了确保教材的质量,重庆大学出版社采取了以下措施:

- 发挥教育理论与教育思想的指导作用,将教学改革思想和教学改革成果融入教材的编写之中。
- 根据人才培养计划中对学生知识和能力的要求,对课程体系和教学内容进行整合,不过分强调每门课程的系统性、完整性,重在实现系列教材的整体优化。
- 明确各门课程在专业培养方案中的地位 and 作用,理顺相关课程之间的关系。
- 精选教学内容,控制教学学时数,重视对学生自主学习能力、分析解决工程实际问题能力和创新能力的培养。
- 增强CAD、CAM的内容,提高教材的先进性;尽可能运用CAI等现代化教学手段,提高传授知识的效率。
- 实行专家审稿制度,聘请学术水平高、事业心强、长期活跃在教学改革第一线的专家审稿,重点审查书稿的学术质量和是否具有特色。

这套教材的编写符合教学改革的精神,遵循教学规律和人才培养规律,具有明显的特色。

与出版单科教材相比,有计划地将教材成套推出,实现了整体优化,这富有远见。

经过几年的艰苦努力,这套机械类本科教材已陆续问世了。它反映了西部高校多年来教学改革与教学研究的成果,它的出版必将为繁荣我国高等学校的教材建设作出积极的贡献,特别是在西部大开发的战略行动中,起着十分重要的作用。

高等学校的教学改革和教材建设是一项长期而艰巨的工作,任重道远,不可能一蹴而就。我希望这套教材能够得到读者的关注与帮助,并希望通过教学实践与读者不吝指教,逐版加以修订,使之更加完善,在高等教育改革的百花园中齐花怒放!我深深为之祝愿。

中科院院士

杨叔子

2000年4月28日

前 言

我们都知道,电工科学是研究电磁现象及其应用的科学。电气技术是以电工科学的理论和方法为基础而形成的工程技术。电工学课程,是高等院校非电专业的一门重要的技术基础课,肩负着使学生获得电气技术必要的基本理论、基本知识和基本技能的任务。目前,国内使用的教材,大多分为“电工技术(上册)”与“电子技术(下册)”,电工技术与电子技术的内容相对独立。在过去相当长的时间,这是行之有效的教学体系。近年来,由于高新技术的迅速发展和向各技术领域的交叉渗透,使电气技术得到革新并取得向前发展的生命力。从1957年第一只晶闸管诞生以后,电子技术逐步形成了两个分支:以晶体集成电路为核心形成信息处理的信息电子技术;以晶闸管及其派生器件为核心形成对电能进行处理的电力电子技术。电力电子技术是强电(电力)与弱电(电子)相结合的交叉边缘技术,是电力、控制和电子的技术融合。电气技术发展到现在,传统的电工技术与电子技术越来越融合、交叉。这样,原有的体系给教学带来了诸多的不便。例如,上册在讲交流电机调速时,由于此时还没有讲授电力电子技术内容,因此,对变频调速不便展开讨论,而变频调速又是现代交流电机调速中非常重要的内容。仪表测量部分,也难于讲授数字仪表及智能仪表的内容。本教材基本上以“电路—电子—电力电子—电机及控制—仪表及测量—安全用电”这样的体系进行编写,并加强了内容的联系。例如,三相电路的内容就安排在电动机前讲授。从电气技术发展的趋势出发,调整了传统内容,新加了如可编程序控制器应用、可编程逻辑阵列等体现先进性的内容。再考虑到教学的安排,本教材定名为《电工电子学(上)》、《电工电子学(下)》,以便于使用单位灵活处理。《电工电子学(上)》包括电路的基本定律及分析方法、正弦交流电路、电路的暂态响应、半导体器件、简单放大器、负反馈放大器和集成运算放大器、组合逻辑电路、时序逻辑电路、数/模和模/数转换等内容;《电工电子学(下)》包括正弦波振荡器、直流稳压电源、变流技术、三相正弦交流电路、变压器、电动机、接触器继电控制、可编程序控制器、电工测量及仪表、安全用电等内容。

本书为《电工电子学(上)》,由重庆大学吕厚余教授主编,负责全书的组织、统稿和定稿。第一副主编是陕西工学院的王生春老师,第二副主编是昆明理工大学的杨承志老师,其中第1、2章由王生春编写,第3、5章由吕厚余编写,第7、8、9章由杨承志编写,重庆工学院的郭建华老师编写了第4、6章。

本书由侯振程教授主审,他认真负责地审阅了书稿,指出了缺点和不足之处,提出了许多宝贵意见,在此致以深切的谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在不少缺点和错误,敬请读者,特别是使用本书的老师和同学,积极提出批评和改进意见。

编 者

2000年10月

目 录

(带 * 号的章节为加深加宽内容)

第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法	1
1.1 电路的组成及作用	1
1.2 电路中电压电流的参考方向	2
1.3 电路元件及电路模型	3
1.4 电路的工作状态	9
1.5 基尔霍夫定律	13
1.6 电路中电位的计算	17
1.7 电源的等效变换	20
1.8 支路电流法	25
1.9 叠加原理	27
1.10 戴维南定理	29
习题	33
第 2 章 正弦交流电路	38
2.1 正弦交流电的基本概念	38
2.2 正弦量的相量表示法	41
2.3 单一元件的正弦响应	45
2.4 R 、 L 、 C 串联电路的正弦响应	52
2.5 正弦交流电路的频率响应	61
2.6 功率因数的提高	69
习题	71
第 3 章 一阶电路暂态响应	75
3.1 换路定则	75
3.2 一阶电路的暂态响应	78
3.3 一阶电路的矩形波响应	85
* 3.4 一阶电路的正弦响应	87
习题	88
第 4 章 半导体器件	91
4.1 半导体的基本知识	91
4.2 半导体二极管	94
4.3 半导体三极管	100
4.4 场效应管	104
习题	110

第 5 章 简单放大器	114
5.1 共射极放大器	114
5.2 射极输出器	122
5.3 互补对称功率放大器	124
5.4 场效应管放大器	128
习题	132
第 6 章 负反馈放大器和集成运算放大器	134
6.1 放大器中的负反馈	134
6.2 多级放大器及极间耦合	140
6.3 差动放大器	143
6.4 集成运算放大器	147
6.5 集成运放的应用	150
习题	163
第 7 章 组合逻辑电路	169
7.1 数制与码制	169
7.2 逻辑运算与逻辑门电路	171
7.3 逻辑代数的运算法则	180
7.4 逻辑函数的化简	182
7.5 简单组合逻辑电路的分析和设计	186
7.6 加法器和半加器	189
7.7 编码器	191
7.8 译码器和数字显示	193
习题	195
第 8 章 触发器和时序逻辑电路	199
8.1 双稳态触发器	199
8.2 计数器	208
8.3 寄存器	214
8.4 可编程逻辑器件	216
8.5 集成 555 定时器	221
习题	226
第 9 章 数/模和模/数转换	229
9.1 数/模转换器	229
9.2 模/数转换器	234
习题	238

第1章 电路的基本定律与基本分析方法

本章主要介绍电路的基本物理量,电路的基本定律,电路中电压和电流的参考方向,电路的工作状态。同时以电阻电路为例,介绍电路的几种分析方法:等效变换、支路电流法、叠加定理和戴维南定理。

1.1 电路的组成及作用

实际电路是根据某种需要由具有不同电气性能及作用的电气元件设备连接而成的电流的通路。电路的结构将依它所完成任务的不同而不同,可以简单到由几个元件构成,也可以复杂到由上千个甚至数万个元件构成。典型的例子是电力系统,电路如图 1.1.1 所示;手电筒组成了一个简单电路,如图 1.1.2 所示。从图 1.1.1 与图 1.1.2 所示电路可以看出,不管电路多么复杂,也不管电路多么简单,电路大都可以看成由以下三个部分组成:电源(电池、发电机等)、负载(灯泡、电动机等)、中间环节(开关、导线、变压器、放大器等)。

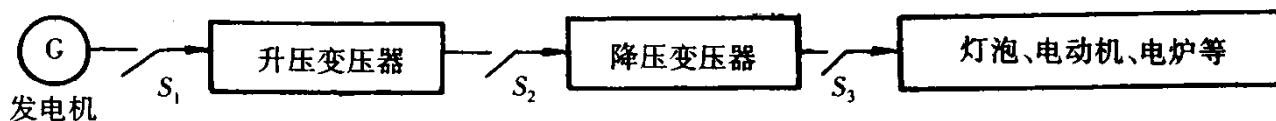


图 1.1.1 电力系统电路简示图

电源是供应电能的设备。在发电厂内可通过发电机把热能、水能或原子能等转换为电能。电池是一种常用的化学能电源。当然还有一些其他的电源。

负载是取用电能的设备,它可以把电能转换为其他形式的能,如光能、机械能、热能等。常见的负载有灯泡、电动机、电炉等。

中间环节是电源与负载之间必不可少的一个环节,它可以是导线、开关、控制环节、放大器、滤波器、传输线和变换环节等。

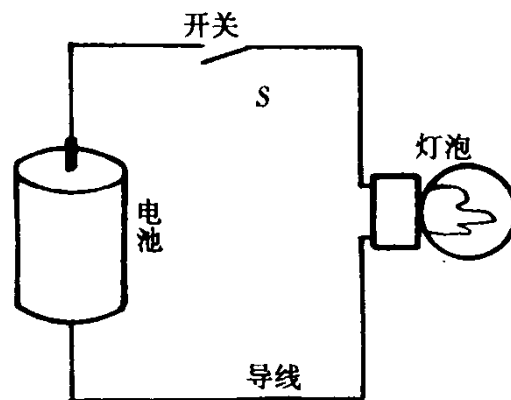


图 1.1.2 手电筒电路

当电路中有电流流经电气元件时,电路就可实现能量的转换、传输、分配以及信息的存取和信号处理等。像电力系统的变压器就主要承担电能的转换与分配,传输线则主要承担电能的传输。而电动机、灯泡、电炉、电视机、冰箱等,则主要承担电能的转换。像电子计算机中的 A/D、D/A 转换电路、滤波器、变频、分频、信息的存储、读写、运算电路等则主要承担信号的处理,等等。

在电路理论中,通常把电源或信号源称作激励,激励可以是电压激励,也可以是电流激励。激励源推动电路工作,电激励在电路中产生的电压和电流统称为响应。所谓电路分析,就是在已知电路的结构和元件参数的条件下,讨论电路在激励作用下的响应问题。

1.2 电路中电压电流的参考方向

1.2.1 电压、电流的实际方向

物理学中已讨论过电流、电压和电动势,这里不再重复。为了对电路进行分析和计算,本节引入参考方向的概念。在进行讨论之前,有必要对电流、电压和电动势的实际方向进行定义。

电流的实际方向定义为正电荷运动的方向,当然,负电荷运动的相反方向也是电流的实际方向。

电压的实际方向定义为高电位指向低电位的方向。也就是说,沿着电压的实际方向,电位是逐点降低的。

电动势的实际方向定义为电源内部电位升高的方向,恰恰与电压的实际方向相反。

1.2.2 参考方向

在分析和计算较复杂的电路时,电流的实际方向很难立即判断出来,对于交流电路,电流的实际方向还在随时间而改变。为了分析、计算的方便,引入了参考方向的概念。在分析、计算某段电路的电流时,可任选一个方向作为该段电路电流的参考方向,并在电路图导线上用带箭头的有向线段标出。计算时按参考方向列写方程。计算结果是正值,说明该段电流的实际方向与参考方向一致;计算结果为负值,说明该段电流的实际方向与参考方向相反。

在直流电路中,一旦电路确定了,电路中各支路电流的实际方向就确定了,它不受参考方向的影响。而参考方向的选择是任意的,参考方向是分析、计算电路的一种方法。参考方向一经选定,在分析、计算电路中就不能更改。按电路的定律、原理列写出的电路方程是以所选定的参考方向作为依据的;计算结果中电流的正或负也是相对参考方向而言的。换言之,如事先



图 1.2.1 电流参考方向的标注

不设定参考方向,则列写出的电路方程是没有依据的;而由这些方程求解出的电流的正或负也是无意义的。所以,在分析计算电路时,首先应确定电流的参考方向,并在电路图中标注出来。

电流的参考方向可以用有向线段标出,也可以用双下角标表示,如 I_{ab} 表示电流参考方向由 a 流向 b ,如图 1.2.1 所示。

例 1.2.1 电路如图 1.2.1 所示,如计算结果为 $I_{ab} = -2\text{A}$,试判断电流的实际方向。

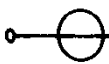
解: $I_{ab} = -2\text{A}$, $I_{ab} < 0$,表明该电流的实际方向与参考方向相反,该电流的实际方向由 b 流向 a 。

直流电流用大写字母 I 表示,交变电流用小写字母 i 表示。在国际单位制、即 SI 制中,电流的单位名称是安培,单位符号是 A。

同理,在分析、计算电路时,也应该设定电压的参考方向,两点间电压的参考方向的选择也是任意的。计算结果为正,表示电压实际方向与参考方向相同;计算结果为负,表示电压实际方向与参考方向相反。电压参考方向常用两种方式表示:“+”表示高电位,“-”表示低电位,电压参考方向从“+”指向“-”;用有向线段表示从高电位端指向低电位端。有时也用双下角

标表示,如 U_{ab} 表示电压参考方向由 a 指向 b 。

在分析、计算电路时,也应标出电压源电动势 E 的参考方向,或者标出电压源端电压 U_s 的参考方向,如图 1.2.2 所示。

图 1.2.2 中,符号  表示理想电压源,本章 1.7 节将作详细介绍。

例 1.2.2 电路如图 1.2.2 所示,各电量参考方向及数值如图上所注,试判断该电路电流的实际方向及 a 点与 b 点电位的高低。

解:题中 $E = 3V, E > 0$,实际极性与参考极性一致, a 点为高电位, b 点为低电位;

$U = 3V, U > 0$,实际极性与参考极性相同,亦是 a 点为高电位, b 点为低电位;

$U' = -3V, U' < 0$,实际极性与参考极性相反,亦是 a 点为高电位, b 点为低电位。

$I = 0.28A, I > 0$,电流的实际方向与参考方向一致,从 a 经灯泡流向 b ,或从 b 经电源流向 a 。

参考方向也称为正方向。

直流电压用大写字母 U 表示,交变电压用小写字母 u 表示;直流电动势用大写字母 E 表示,交变电动势用小写字母 e 表示。在 SI 单位制中,它们的单位名称是伏特,单位符号是 V。

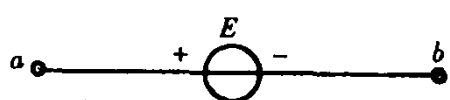


图 1.2.3 例 1.2.3 图

例 1.2.3 已知电压源电动势如图 1.2.3 所示,试分析 U_{ab} 、 U_{ba} 与 E 的关系。

解:从图中可知,电动势 E 的参考方向选定 a 点为高电位, b 点为低电位。电压 U_{ab} 选定的也是 a 点为高电位, b 点为低电位,两者一致,因此有 $E = U_{ab}$ 。而 U_{ba} 选定 b 点为高电位, a 点为低电位,与电动势 E 设置的极性相反,因此应有 $E = -U_{ba}$ 。

1.2.3 电压、电流的关联参考方向

同一元件电压与电流参考方向的选择是任意的,可以相同,也可以相反。为了分析问题的方便,常将电压与电流的参考方向选得相同,称为关联参考方向。例如,对于图 1.2.1,如电压参考方向为 U_{ab} ,则电流与电压为关联参考方向;如电压参考方向为 U_{ba} ,则电流与电压为非关联参考方向。采用关联参考方向可以简化参考方向的标注,只标出电压或电流的参考方向,另一个电量的参考方向由关联一致来确定。本书在分析、计算电路时,如未作特殊声明均采用关联参考方向。

1.3 电路元件及电路模型

1.3.1 理想电路元件及电路模型

实际电路中的电磁性质都是较为复杂的,即使用灯泡构成的电路,当其中有电流时,它不

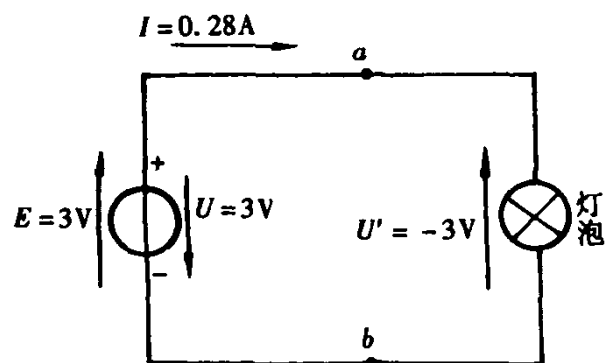


图 1.2.2 例 1.2.2 图

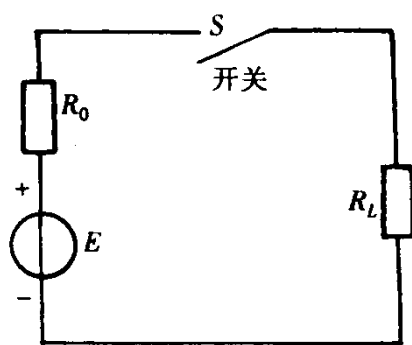


图 1.3.1 手电筒电路模型

仅具有消耗电能这样一种主要的电磁特性,而且还具有储存磁场能这样一种次要的电磁特性。为便于电路的分析和计算,将实际元件理想化,即在一定的条件下,只考虑其主要的电磁性质,而忽略其次要的电磁性质,把实际元件近似地看成只是一种电磁性质的理想电路元件。如果某实际电路元件的几种电磁性质都应考虑,那么就可用几种不同性质及参数的理想电路元件的某种组合电路来表示,这种组合电路就称作这一实际电路元件的电路模型。电路模型是对实际电路元件及电路的科学抽象与概括。

如图 1.1.2 的手电筒电路,可用图 1.3.1 所示电路模型表示。其中电阻 R_L 表示电珠, E 表示干电池电动势,电阻 R_0 表示干电池内阻,用 E 、 R_0 串联电路表示干电池的电路模型,开关 S 表示手电筒开关,把这些元件串联起来,就构成了手电筒这一实际电路的电路模型,连线表示手电筒筒体(其电阻认为已计入电阻 R_L 中)。

在电路理论中,无源理想电路元件(今后如无特殊说明,理想二字均省略)主要有:电阻元件、电容元件、电感元件。下节将分别加以介绍。

1.3.2 电阻、电容、电感元件的特性方程及参数

下面将主要介绍电阻、电容、电感这三个电路最基本的元件的特性方程及参数。

1. 电阻元件与欧姆定律

理想电阻元件就是只具有消耗电能这样一种电磁性质(电阻性)的一个元件。如果这个理想电阻元件的参数为常数,则称作线性电阻,并用 R 表示。特性方程的定义为 $u = f(i)$ 或 $i = f(u)$ 。当电压 u 和电流 i 为关联参考方向,如图 1.3.2 所示,则电阻元件的特性方程为

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

或

$$i = Gu \quad (1.3.2)$$

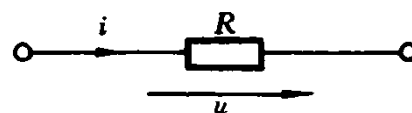


图 1.3.2

以上两式即为欧姆定律的解析式。 R 为电阻元件的参数,单位为欧姆(Ω), $G = \frac{1}{R}$ 称作电导,单位为西门子(S)。应该指出:式(1.3.1)是通过实验得出的,根据实验数据 u 、 i ,就可以作出

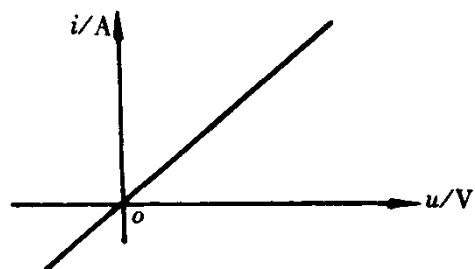


图 1.3.3 线性电阻伏安特性

图 1.3.3 的伏安特性曲线。如果式(1.3.1)两边乘以 i ,得到线性电阻元件所消耗的功率:

$$p = ui = Ri^2 \quad (1.3.3)$$

对式(1.3.3)两边同时取时间 t 的积分,线性电阻元件所消耗的能量为

$$W = \int p dt = \int u i dt = \int Ri^2 dt \quad (1.3.4)$$

如果为直流电路,则

$$W = Pt = UIt = RI^2t \quad (1.3.5)$$

2. 电容元件

理想电容元件就是只具有储存电场能量这样一种电磁性质(电容性)的一个元件。如果电容元件参数为常数,且用 C 标记,公式 $q = Cu$ 反映了电容极板上的电量 q 与其上的电压 u 之

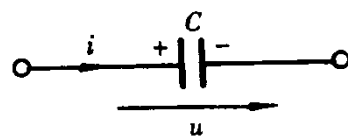
间的线性关系。当 u, i 参考方向为关联, 如图 1.3.4 所示, 则

$$i = \frac{dq}{dt}$$

将 $q = Cu$ 代入上式有

$$i = C \frac{du}{dt}$$

(1.3.6) 图 1.3.4 电容元件



上式中, 若 $\frac{du}{dt} > 0$, 则 $i > 0$, 电容处于充电状态; 若 $\frac{du}{dt} < 0$, 则 $i < 0$, 电容处于放电状态; 若 $\frac{du}{dt} = 0$, 则 $i = 0$, 电压不随时间变化, 即电压为直流电压, 说明电容 C 在直流电路中有隔直作用, 相当于开路。式(1.3.6)表明, 在任一瞬间, 流经线性电容的电流的大小与它两端电压的变化率成正比。

如果给式(1.3.6)两边同时乘以 u , 则电容元件吸收的瞬间功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1.3.7)$$

给上式两边积分, 电容元件吸收的能量为

$$W = \int p dt = \int u i dt = \int C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1.3.8)$$

此式说明, 当电容电压增高时, 电场能量增大, 在此过程中, 电容 C 从电路中吸收能量(充电过程)。当电压降低时, 电场能量减少, 电容 C 向电路释放能量(放电过程)。

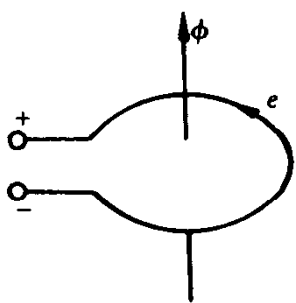
给式(1.3.6)两边积分, 得到线性电容元件电压电流关系的另一种表达式

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

电容 C 在(SI)单位制中为法拉(F), 也常用微法($1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$)和皮法($1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$)。

3. 电感元件

理想电感元件定义为只具有储存磁场能量这样一种电磁特性(电感性)的一个元件。设有一匝线圈, 当通过它的磁通发生变化时, 线圈中要产生感应电动势。由实验得知, 感应电动势 e 的大小等于磁通对时间的变化率, 即



$$|e| = \left| \frac{d\phi}{dt} \right|$$

其中, 电动势的单位为 V, 时间 t 的单位为 s, 磁通 ϕ 的单位为韦伯(Wb)。电动势的方向则取决于磁通的变化情况(增大或减少)。如果把感应电动势的参考方向选得与磁通的参考方向符合右手螺旋关系(如图 1.3.5), 则上式为

图 1.3.5 感应电动势与磁通的参考方向

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1.3.9)$$

如果线圈有 N 匝, 电流为 i , 则有

$$e = - N \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1.3.10)$$

$$\psi = N\phi = Li \quad \text{或} \quad L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\phi}{i}$$

式中 L 称为线圈的电感, 也常称自感, 反映了磁通 ϕ 与产生它的电流 i 之间的线性关系, 它是理想电感元件的参数。将 $\psi = Li$ 代入式(1.3.10)中, 则有

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad (1.3.11)$$

e 称作自感电动势。电感的单位为亨利(H), 或毫亨利(mH)。线圈的电感量与其尺寸、匝数及其附近介质的导磁性有关, 表达式为:

$$L = \frac{\mu S N^2}{l} \quad (1.3.12)$$

其中 μ ——介质磁导率(H/m), S ——线圈截面积(m^2), N ——线圈匝数, l ——线圈长度(m)。

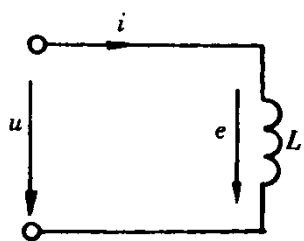


图 1.3.6 理想电感及 u 、 i 、 e 的参考方向

图 1.3.6 为理想电感的电路符号(仅具有电感), 图中电压 u , 感应电动势 e , 电流 i 的参考方向均示于图中。根据 KVL 及电动势参考方向的定义有

$$u + e = 0$$

所以

$$u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (1.3.13)$$

由上式可知, 当电流 $i > 0$, 且增大时, 即 $\frac{di}{dt} > 0$ 时, $e < 0$, 即感应电动势的实际方向与电流方向相反, 这时 e 将阻碍电流的增大。同理, 当电流 $i > 0$, 且减少时, 即 $\frac{di}{dt} < 0$ 时, 则 $e > 0$ 。其实际方向则与电流方向一致, 这时 e 将阻碍电流的减小。可见, 自感电动势具有阻碍电流变化的特性, 所以外施电压 u 要平衡线圈中的感应电动势。

当线圈中流过直流电流时, 则 $\frac{di}{dt} = 0$, 即 $u = 0$, 电感线圈 L 在直流电路中相当于短路。从式(1.3.13)可知, 线性电感端电压的大小与流经电流的变化率成正比。

将式(1.3.13)两边同乘以 i , 得到电感元件瞬时功率表达式

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.3.14)$$

对上式积分, 线性电感吸收的能量为

$$W = \int u dt = \int ui dt = \int Li dt = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.3.15)$$

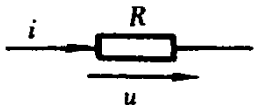
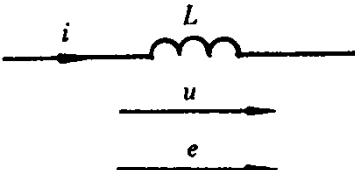
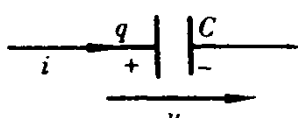
说明电感中电流增大时, 磁场能量增大, 在此过程中, 是电能转换为磁场能; 当电流减小时, 磁场能量减小, 磁能转换为电能。

给式(1.3.13)积分得到线性电感元件电压电流关系的另一种表达式

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

电阻、电容、电感元件最基本的特性方程和参数如表 1.1 所示。

表 1.1 R 、 L 、 C 元件的特性关系式

类别 \ 元件	电阻 R	电感 L	电容 C
电路符号			
电压电流关系式	$u = Ri$	$u = L \frac{di}{dt} \quad e = -L \frac{di}{dt}$	$i = C \frac{du}{dt}$
参数定义	$R = \frac{u}{i}$	$L = \frac{N\Phi}{i} = \frac{\psi}{i}$	$C = \frac{q}{u}$
电压电流的另一种关系式	$i = Gu$	$i = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u dt$	$u = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt$
能量关系式	$W = \int Ri^2 dt$	$W = \frac{1}{2} Li^2$	$W = \frac{1}{2} Cu^2$

例 1.3.1 图 1.3.7(a) 所示电感元件 $L = 0.1 \text{ H}$, i 波形如图 1.3.7(b) 所示, 试求电感元件中产生的感应电动势 e 及其端电压 u 的波形。

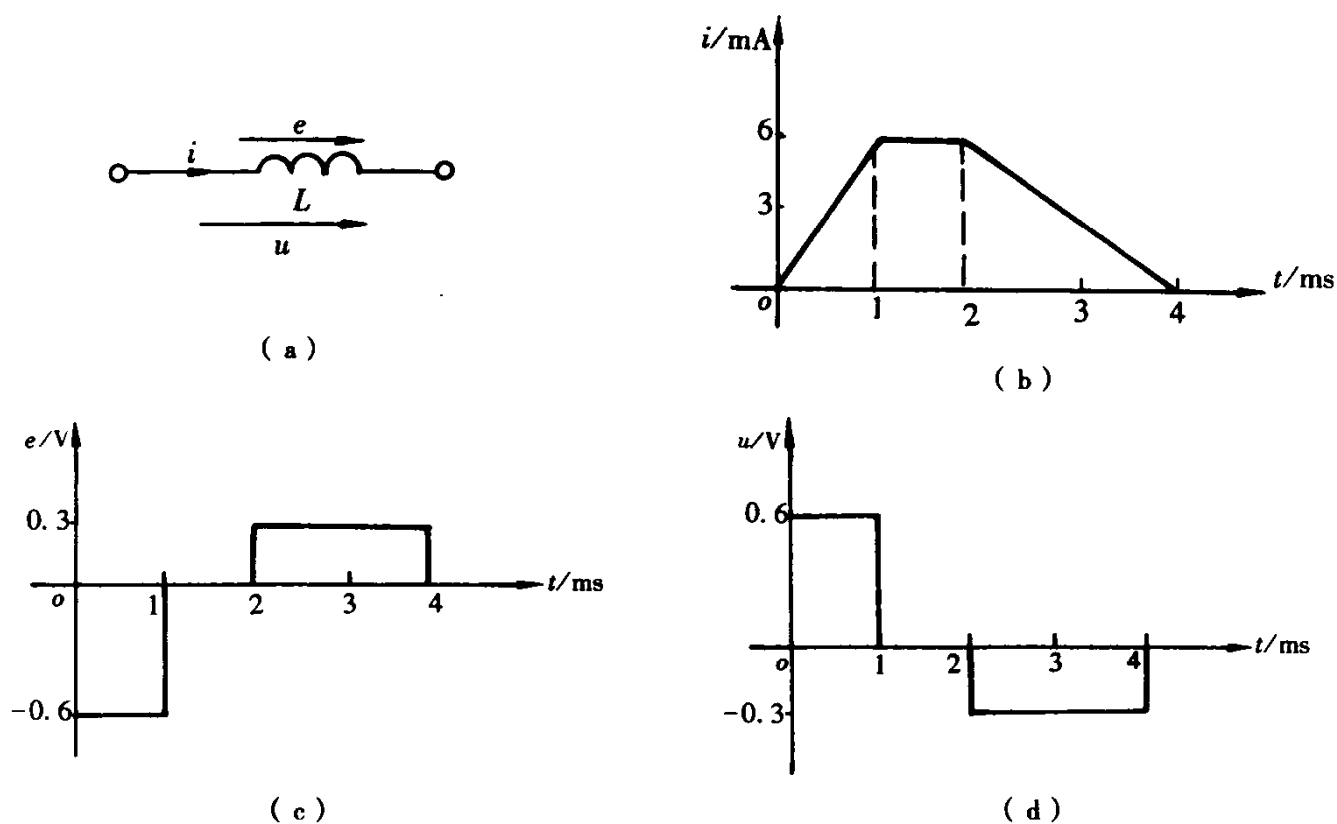


图 1.3.7 例 1.3.1 图

解: 当 $0 \leq t \leq 1 \text{ ms}$ 时

$$i = 6t \text{ mA}$$

$$e = -L \frac{di}{dt} = -0.6\text{V}$$

$$u = -e = 0.6\text{V}$$

当 $1\text{ms} \leq t \leq 2\text{ms}$ 时

$$i = 6\text{mA}$$

所以

$$e = 0\text{V}$$

$$u = 0\text{V}$$

当 $2\text{ms} \leq t \leq 4\text{ms}$ 时

$$i = -3t\text{mA}$$

所以

$$e = -L \frac{di}{dt} = 0.3\text{V}$$

$$u = -e = -0.3\text{V}$$

e 和 u 的波形如图 1.3.7(c)、(d) 所示。由图可见：电流增大时， $e < 0$ ；电流减小时， $e > 0$ ；电流为恒定值时， $e = 0$ 。

(1) 电流变化率 $(\frac{di}{dt})$ 小时，则 e 小；电流变化率大时，则 e 也大。

(2) 从波形中也可看出电压与电动势在数值上相等。

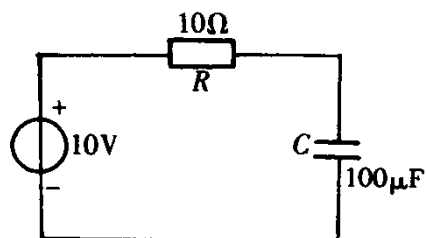
例 1.3.2 试计算上例中电流增大过程中电感元件吸收的能量和电流减小过程中电感释放的能量。

解：从电流波形图中可以看出，电流增大过程中电感吸收的能量恰与电流减小过程中释放的能量相等，即： $t = 2\text{ms}$ 时，电感中存储的磁能

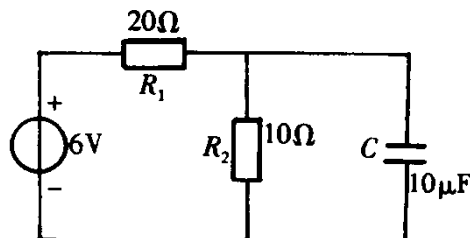
$$W = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times (6 \times 10^{-3})^2 \text{J} = 18 \times 10^{-7} \text{J}$$

思考与练习

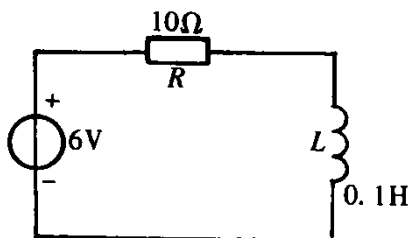
1.3.1 在图 1.3.8 所示的电路中，试确定各元件的端电压及其中流过的电流。



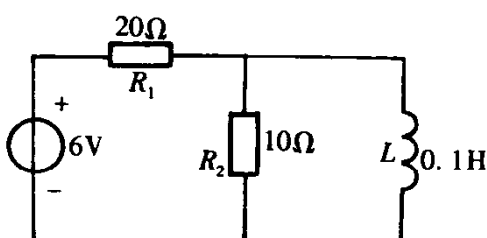
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1.3.8 题 1.3.1 图

1.3.2 绕线电阻是用电阻丝绕制而成的,它除具有电阻外,一般还有电感。如果我们需要一个无感的绕线电阻,试问如何绕制?

1.3.3 如果一个电感元件在某时刻的端电压为零,能否肯定该时刻电感元件的储能也一定为零? 如果一个电容元件在某时刻的电流为零,能否肯定该时刻电容元件的储能也一定为零?

1.3.4 在直流电路中,电感元件相当于短路,是否此时电感的值就为零? 电容在直流电路中,相当于开路,是否此时电容 C 的值为无穷大?

1.4 电路的工作状态

电路的工作状态有三种,即负载工作状态、开路工作状态和短路工作状态。以图 1.4.1 所示简单直流电路为例,分别讨论这三种工作状态下的电压、电流和功率。

1.4.1 电路的负载工作状态

在图 1.4.1 中,开关 S 闭合,接通电源与负载,这就是电路的负载工作状态。电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1.4.1)$$

其中, E ——电源电动势; R_0 ——电源内阻; U ——电源端电压或负载的端电压。

$$U = IR \quad (1.4.2)$$

把(1.4.2)代入(1.4.1)得

$$U = E - IR_0 \quad (1.4.3)$$

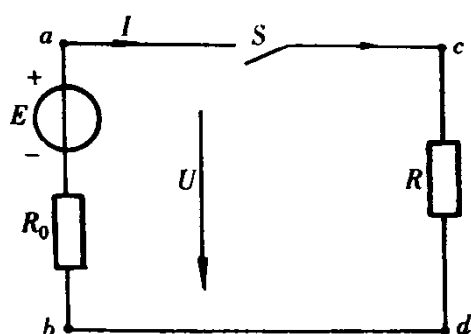


图 1.4.1 简单直流电路

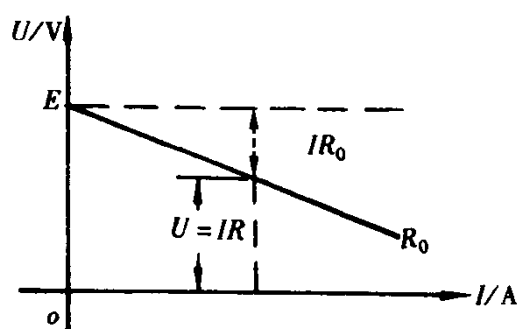


图 1.4.2 电源外特性

可见电源的端电压在电源负载状态下,小于电源电动势,且电流 I 越大,则电源端电压下降得越多。表示电源端电压 U 与输出电流 I 之间关系的曲线称为电源的外特性曲线,如图 1.4.2 所示,其斜率由 R_0 决定。电源内阻一般都很小,当 $R \gg R_0$ 时, $U \approx E$,即在此条件下,电流(负载)变动时,电源的端电压变动不大。

给式(1.4.3)两边同时乘以 I ,得功率平衡方程式:

$$UI = EI - I^2 R_0 \quad (1.4.4)$$

$$P = P_E - \Delta P$$

式中 $P_E = EI$ 为电源发出的功率;

$P = UI$ 为负载消耗(电源输出)的功率;

$\Delta P = I^2 R_0$ 为电源内阻上消耗的功率。

由上式可以看出,电源发出的功率与消耗在内阻和负载上的功率之和相平衡。

在电路中,判断元件是电源还是负载可通过下述方法:

在关联参考方向下,元件的功率计算式为:

$$P = UI$$

当 $P = UI > 0$ 时,元件吸收功率,元件是负载;当 $P = UI < 0$ 时,元件发出功率,元件是电源。

在非关联参考方向下,元件的功率计算式亦为:

$$P = UI$$

当 $P = UI > 0$ 时,元件发出功率,元件是电源;当 $P = UI < 0$ 时,元件吸收功率,元件是负载。

例 1.4.1 计算图 1.4.3 所示电路元件的功率,并判断元件是吸收还是发出功率。

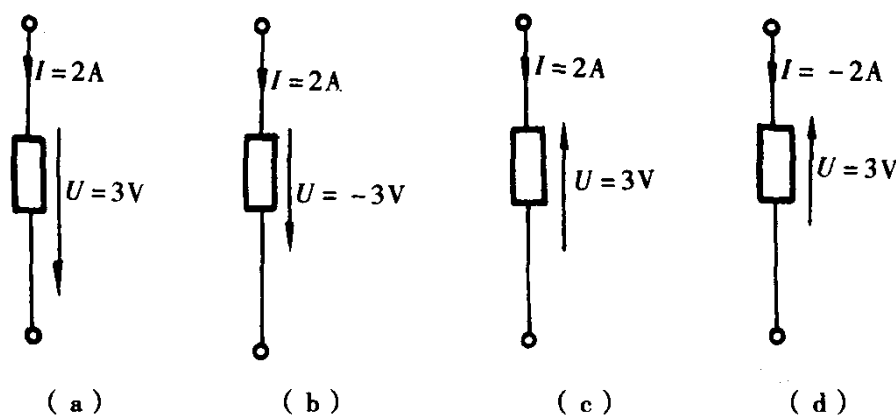


图 1.4.3 例 1.4.1 图

解:(1) U 、 I 为关联参考方向

所以 $P = UI = 3 \times 2 \text{ W} = 6 \text{ W} > 0$ 元件吸收功率

(2) U 、 I 为关联参考方向

所以 $P = UI = -3 \times 2 \text{ W} = -6 \text{ W}$ 元件发出功率

(3) U 、 I 为非关联参考方向

所以 $P = UI = 3 \times 2 \text{ W} = 6 \text{ W} > 0$ 元件发出功率

(4) U 、 I 为非关联参考方向

所以 $P = UI = 3 \times (-2) \text{ W} = -6 \text{ W} < 0$ 元件吸收功率

元件是吸收功率或是发出功率也可用如下方法判断:在分析计算电路时,结合参考方向和计算出的电压、电流的正负,即可判断出电压、电流的实际方向。当实际的电流从元件的实际正端流出(电压与电流的实际方向相反),元件发出功率;如实际的电流从元件实际的正端流入(电压与电流的实际方向相同),元件吸收功率。当然,功率的大小仍用公式 $P = UI$ 计算。读者不妨用此方法对例 1.4.1 进行判断。

供电电源的电压都是给定的,所以当电源所带负载越大,则负载的电流也就越大。可见电源的输出功率取决于负载的大小。

任何一个电气设备或元件都有一个标准使用规格问题,在电工技术中称为额定值。额定值是制造厂家对产品的使用规定。按额定值使用电气产品能安全、可靠、经济、合理地工作,并能保证一定的使用寿命。电气设备或元件额定值有好几项,不同的设备或元件有自己特殊的额定值(如电动机的额定转速、晶闸管有额定门极触发电压、电流等),但所有的电气设备或元件都规定了额定电压、额定电流或额定功率。