

普通高等教育机电类规划教材

电工技术

(电工学 I)

第3版

高福华 常通义 主编



普通高等教育机电类规划教材

电 工 技 术

(电 工 学 I)

(第 3 版)

高福华 常通义 主编



机 械 工 业 出 版 社

本套教材是为适应教学和科技发展新形势的需要而编写的。分《电工技术》、《电子技术》两册出版。

《电工技术》共十一章，分别是：电路模型和电路的基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相电路、电路的频域分析、电路的时域分析、铁心线圈与变压器、电动机、电动机的继电器-接触器控制、电工测量、可编程序控制器。每章均有小结、习题。本书符号一律采用新的国家标准，并附有常用电工元器件的图形符号和文字代号新旧对照表以及常用电工元器件的技术数据和部分习题答案。

本书读者对象是机电类专业的大学生，亦可供其他非电专业的大学生使用，并可作为工程技术人员系统学习电工技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术(电工学 I) /高福华, 常通义主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2004.2

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-01681-5

I. 电... II. ①高...②常... III. ①电工学—高等学校—教材②电工技术—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 009494 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: 曾 红 版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 陈 沛 责任印制: 闫 焱

北京中加印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 4 月第 3 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·15.75 印张·390 千字

0 001—4 000 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、88379646

封面无防伪标均为盗版

《电工技术》、《电子技术》教材编审组成员

组 长:	高福华	吉林大学	教授
副组长:	罗会昌	合肥工业大学	教授
	刘朝阳	华北工学院	教授
	李秀芬	长春理工大学	教授
	常通义	河南科技大学	副教授
	周新云	江苏大学	副教授
	杨 杰	合肥工业大学	副教授
组 员:	范振铨	沈阳工业大学	教授
	陈正传	江苏大学	教授
	阎保定	河南科技大学	教授
	赵不贿	江苏大学	教授
	孙 强	西安理工大学	教授
	邵敏权	长春工业大学	教授
	王皖贞	太原重型机械学院	教授
	蒋 中	安徽建筑工业学院	教授
	陈万忠	吉林大学	副教授
	余琼芳	合肥工业大学	副教授
	赵敏玲	西安理工大学	副教授
	马红杰	合肥工业大学	副教授
	李炳彦	西安理工大学	副教授
	刘 春	合肥工业大学	副教授
	侯新科	甘肃工业大学	副教授
	杨晓萍	吉林大学	副教授
	戴 燕	长春理工大学	副教授
	黄知超	桂林电子工业学院	副教授
	陆茜宁	广东工业大学	副教授

前 言

《电工技术》是在原机械电子工业部部属高等院校电工技术、电子技术课程协作组组织与领导下编写的，并得到了原机械电子工业部高教司的支持与关怀。自1979年以来，协作组每隔一年或两年就举行一次学术年会，在每次年会上都把教材建设放在很重要的地位。1997年8月协作组又在张家界召开了《电工技术》、《电子技术》编审会议。会后对本教材进行了修订再版。为适应电工技术发展和21世纪教育改革的新形势，现在对本教材再次进行修订再版。由于原来的一些编审人员工作有所变动，经过协商，此次修订再版时，编审人员有一些调整。本书编写的指导思想、内容取舍及完整体系的建立都是由协作组组织各院校经过多次研讨和反复审核后确定的。因此，本书实际上是原机械电子工业部部内及部外多所高等院校电工技术课程教师的集体成果。

电工技术是一门重要的技术基础课。《电工技术》一书的使用对象是机电类专业的大学生及其他非电专业的大学生，亦可供工程技术人员学习使用。本书是按60~70学时（包括实验学时）类型编写的。对于授课学时较少的专业，可选择其中部分内容进行教学。讲授与实验的比例约为5:2。

本着“精选内容、打好基础、加强实验、培养能力”的宗旨，编者把教材的重点放在基本理论、方法、概念和电工元器件的外部特性及其应用知识等方面，并适当提高了起点，避免与物理学中的有关内容出现不必要的重复。为了兼顾不同专业的需要，尽量接近工程实际，并反映科技发展的新形势，书中编写了一些选修内容（标题前注*号），教学时可根据需要选用。本书的电路图形符号和文字代号均采用新的国家标准。

本书共分十一章。第一章由华北工学院刘朝阳编写；第二章由桂林电子工业学院黄知超编写；第三章由河南科技大学常通义编写；第四章由合肥工业大学马红杰编写；第五章由长春理工大学戴燕编写；第六章由吉林大学高福华编写；第七、十一章由吉林大学杨晓萍编写；第八章由长春工业大学邵敏权编写；第九章由广东工业大学陆茜宁编写；第十章由吉林大学丛玉良编写。全书由高福华担任第一主编，常通义担任第二主编。参加本书审稿的有武汉汽车工业大学李中年、北京机械工业学院毕绍光、沈阳工业大学范振铨、烟台海军航空工程学院杨德增、太原重型机械学院王皖贞、合肥工业大学余琼芳和吉林大学于枫等同志。全书由吉林大学陈万忠、长春理工大学李秀芬担任主审。主审和审稿者认真审阅了书稿，并提出了许多宝贵建议，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第一章 电路模型和电路的基本定律 1

第一节 电路、系统和电路的模型 1

第二节 电路分析中的若干规定 3

第三节 电阻、电感和电容 6

第四节 电压源和电流源 11

第五节 基尔霍夫定律 14

第六节 电路中电位的计算 17

小 结 18

习 题 18

第二章 电路的分析方法 23

第一节 支路电流法 23

第二节 电压源与电流源的等效变换 24

第三节 弥尔曼定理 26

第四节 叠加原理 27

第五节 戴维南定理 29

* 第六节 Y - Δ 联结电路的等效变换 32

第七节 含受控源电路的分析 33

第八节 非线性电阻电路及分析方法

简介 35

小 结 37

习 题 37

第三章 正弦交流电路 41

第一节 正弦交流电的基本概念 41

第二节 正弦量的相量表示法 43

第三节 单一参数元件的正弦响应 46

第四节 R 、 L 、 C 串联电路的正弦

响应 52

第五节 复阻抗的串联和并联 56

第六节 功率因数的提高 60

第七节 相量图在电路分析中的

应用 62

第八节 复杂正弦交流电路的分析

方法 64

小 结 66

习 题 67

第四章 三相电路 70

第一节 三相电源 70

第二节 负载 Y 联结的三相电路 72

第三节 负载 Δ 联结的三相电路 76

第四节 三相电路的功率 79

第五节 安全用电技术 80

小 结 83

习 题 84

第五章 电路的频域分析 86

第一节 RC 电路的频域分析 86

第二节 谐振电路 89

第三节 非正弦周期信号的谐波分析 94

小 结 100

习 题 100

第六章 电路的时域分析 102

第一节 概述 102

第二节 初始值和稳态值的确定 104

第三节 RC 电路的时域分析 107

第四节 求解一阶电路的三要素法 113

第五节 RC 串联电路对矩形波电压的

响应 114

第六节 RL 串联电路的时域响应 118

* 第七节 拉普拉斯变换 121

* 第八节 运算法 125

小 结 131

习 题 132

第七章 铁心线圈与变压器 136

第一节 全电流定律和磁路的欧姆

定律 136

第二节 直流铁心线圈 140

第三节 交流铁心线圈 141

第四节 变压器 144

第五节 电磁铁 151

小 结 153

习 题 154

第八章 电动机 156

第一节 三相异步电动机的基本

构造 156

第二节 三相异步电动机的转动	
原理	157
第三节 三相旋转磁场	159
第四节 三相异步电动机的电磁转矩	
与机械特性	161
第五节 三相异步电动机的铭牌和	
技术数据	165
第六节 三相异步电动机的起动、	
反转、调速和制动	167
* 第七节 单相异步电动机	173
* 第八节 直流电动机	175
* 第九节 他励直流电动机的机械	
特性	176
* 第十节 他励直流电动机的起动、	
反转和调速	178
* 第十一节 电动机的选择	180
* 第十二节 控制电机	182
小 结	186
习 题	187
第九章 电动机的继电器-接触器	
控制	190
第一节 常用控制电器与电气图形	
符号	190
第二节 电动机的基本控制环节和	
保护环节	193
第三节 电动机的基本控制原则	196
第四节 电气原理图的阅读要点	200
小 结	201
习 题	201

第十章 电工测量	203
第一节 基本知识	203
第二节 磁电式测量机构和直流电流、	
直流电压的测量	205
第三节 电磁式测量机构和交流电流、	
交流电压的测量	206
第四节 电动式测量机构和功率的	
测量	207
第五节 万用表	210
第六节 电阻的测量	211
第七节 用电桥测量电阻、电感和	
电容	213
小 结	216
习 题	216
第十一章 可编程序控制器	217
第一节 可编程序控制器的基本	
结构	217
第二节 可编程序控制器技术性能	
介绍	218
第三节 可编程序控制器 FPI 的基	
本指令	221
第四节 可编程序控制器的基本	
应用	227
小 结	231
习 题	231
附 录	234
部分习题答案	239
参考文献	246

第一章 电路模型和电路的基本定律

电路理论是电工技术的理论基础，它着重研究电路的基本分析方法。为了系统地分析各种实际电路，必须先将实际电路进行科学的抽象处理，即将实际电路用电路模型来表示，从而通过对电路模型的分析，找出分析计算电路的一般性规律。电路分析的侧重点不是元件内部的物理过程而是其外部特性，即元件端口上的伏安关系和能量关系，以及由元件组成电路整体之后各部分电压、电流和能量间的约束关系。基尔霍夫电流定律（KCL）和电压定律（KVL）是分析电路的基本定律，深入理解这两个定律的内容并熟练掌握各种理想元件的特性，是学好电路分析方法的基础。从电路分析的需要，本章还将引入电流、电压的“参考方向”等一些新的概念。

第一节 电路、系统和电路的模型

一、电路与系统的概念

电路是由若干个电路元件或设备组成的，是能够传输能量、转换能量或者能够采集电信号、传递和处理电信号的有机整体。图 1-1a 所示的日光灯电路能把电能转换为光能；图 1-2 为用系统框图表示的一个复杂电路，它能把广播电台发送的无线电信号转换成声音重放出来，这些都是电路的实例。

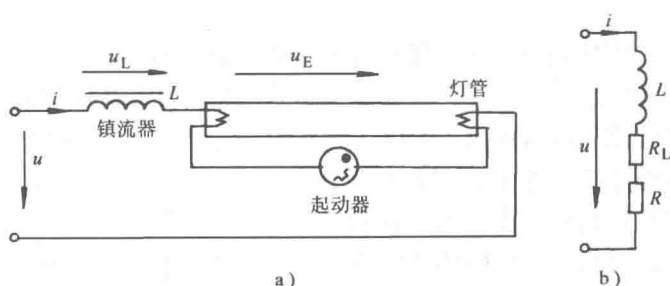


图 1-1 日光灯电路图

传输能量或传输信号的区别在于所达到的目的不同。当然，传输信号也伴随着能量的传送，但它以获取信息为主要目的。

电路繁简不一，然而作为电路的基本组成部分则必须具有电源（或信号源）、负载和中间环节。最简单的中间环节是两根连接导线，但图 1-2 所示的收音机线路，其中间环节就比较复杂。

用现代电路理论来分析电路时，常将具有一定功能的电路视为

一个系统。从一般的意义上讲，系统是由若干互相关联的单元或设备所组成，并用来达到某种目的的有机整体。例如由发电、输电、配电、用电等多种设备组成的电网可视为一个系

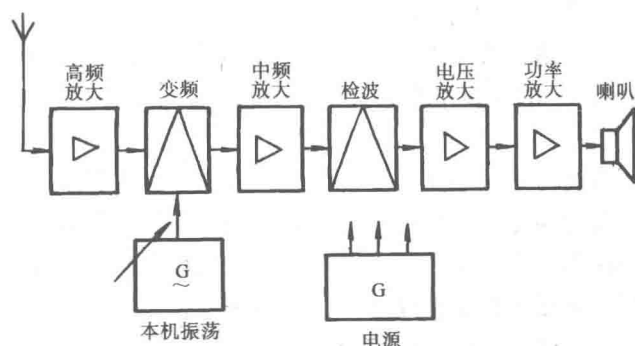


图 1-2 半导体收音机电路的框图

统。图 1-1a、图 1-2 所示的电路也可视为系统。图 1-3 是利用电桥平衡原理来测量温度的线路图,其中 R_1 、 R_2 为电桥的比例臂, R_3 为标准电阻, R_θ 为热敏电阻。当在某一温度下把电桥调节平衡后,如果温度发生变化,则 R_θ 的阻值发生变化,电桥失去平衡,在对角线上输出电压信号,这个电压的极性和大小就反映出温度的升降数值。该电路就是一个温度检测系统,也称为温度信号变换系统,因为它能把温度的改变变换成相应的电信号。

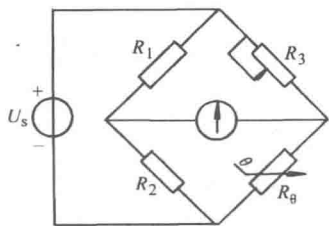


图 1-3 用电桥构成的温度检测系统

对一个系统而言,电源(或信号源)的作用称为**激励**,由激励引起的结果(如某个元件上的电流、电压)称之为**响应**。激励和响应的关系就是作用和结果的关系,它往往对应着输入与输出的关系。一个系统可用图 1-4 所示的框图来描述,其中的 $e(t)$ 为激励, $r(t)$ 为响应。分析一个系统或一个电路的任务通常是在已知激励、电路结构和参数的情况下求其响应。

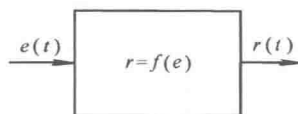


图 1-4 系统的框图表示

二、电路模型

电路模型是将实际电路中的各种元件按其主要物理性质分别用一些理想电路元件来表示时所构成的电路图。电路元件的物理性质是指电流通过元件时进行着什么样的能量转换。

理想的电路元件是指只进行某一种能量转换的元件。例如,电阻 R 是将电能转换为热能的理想电路元件,凡是当电流通过某元件发生电能转换为热能,而别的能量转换可以忽略时,该元件就可用一个电阻元件 R 来表示。除了理想电阻元件之外,还有理想电感元件 L 、理想电容元件 C 以及理想电源等。图 1-5 是它们的电路模型图形符号。这些理想元件称为电路结构的基本模型,由这些基本模型构成电路的整体模型。



图 1-5 电路的基本模型

例如图 1-1 中的日光灯电路,就其灯管的性质而言,可近似用一个电阻 R 来表示,而镇流

器接入电路时将发生电能转换为磁场能量及电能转换为热能两种过程,所以用一个电感 L 和电阻 R_L 的串联组合来表示。这样就可画出图 1-1a 日光灯电路的电路模型,如图 1-1b 所示。

由此可见,电路模型就是实际电路的科学抽象。采用电路模型来分析电路,不仅使计算过程大为简化,而且能更清晰地反映该电路的物理本质。这种研究问题的方法,实际上早已运用在物理学中了,只是没有提出“模型”这个概念而已。现在突出电路模型的概念是为了更自觉地运用科学抽象的方法来解决复杂的实际电路问题。为此,我们一方面将深入地研究物理学中已学过的一些理想电路元件的性质,另一方面还要学习一些新的理想电路元件,如理想电流源、理想受控源等。有了这些基础就可以为更多的实际电路建立模型,如用电压控制电流源来表示一个晶体管的电流放大作用;用电压控制电压源来表示运算放大器等等,从而使我们能更好地掌握电路分析的方法。

第二节 电路分析中的若干规定

一、关于电路参数及变量的文字符号

在电路模型中 R 、 L 、 C 的值是影响电路响应的电路结构因素，称其为电路的参数。而电流、电压、电动势等则称为电路分析中的变量。所以描述电路性态的数学模型是由电路参数与变量组成的代数方程或微分方程。例如电阻元件的伏安关系就是一个代数方程 $U = RI$ 。

进行电路分析时必须遵守一些规定。对电路参数的文字符号必须用大写斜体字母表示。变量的文字符号规定为：恒定的直流量用大写斜体字母表示，时变量用小写斜体字母表示。小写的斜体字母也表示广义变量，即所描述的数学模型对直流和时变量都适用时，也用它来表示。在一些特殊情况下变量还有特殊的规定。

变量与参数的单位都必须用国际上通用的文字符号而不准用汉字。单字母表示的单位必须用大写正体字母表示，如 A、V 等。复合字母表示的单位其第一个字母用大写正体，第二个及以后的字母必须小写，如 Hz、Wb 等。

二、电流、电压的参考方向

电流、电压、电动势的方向在物理学中已作过明确的规定，即电路中电流的方向是指正电荷流动的方向，电路中两点之间电压的方向是从高电位指向低电位的方向，电动势的方向是在电压源内由低电位指向高电位的方向。图 1-6a 电路中分别标出了电流、电压、电动势的方向。

电流、电压的参考方向是人为假设的方向。为了区别起见，我们把物理学中定义的电

流、电压的方向称为电流、电压的实际方向。

为什么要假设参考方向呢？因为在分析复杂电路时往往不能预先确定某段电路上电流、电压的实际方向。如图 1-6b 的电路，在 $U_{s1} \neq U_{s2}$ 、 $R_{01} \neq R_{02}$ 的情况下是否可以肯定 I_1 、 I_2 都是由电源正极流出的呢？否！不作具体的分析计算是不能给出确切答案的。但是分析计算电路又必须已知其电流的方向为先决条件。为解决这一矛盾，就采用事先假设电流参考方向的办法。在图 1-6b 电路中所标注的电流 I_1 、 I_2 、 I 及电压 U 的方向就是假设的参考方向。

当按参考方向来分析、计算电路时，得出的电流、电压值可能为正，也可能为负。正值表示所设电流、电压的参考方向与实际方向一致，负值则表示二者方向相反。

一般来说，参考方向的假设完全可以是任意的。但应注意：一个具体电路一旦假设了参考方向之后，在电路的整个求解过程中就不允许再作改动。

参考方向除了如图 1-6a 中用箭头表示的标注方法以外，电压还可以用“+”、“-”号标示。如图 1-6b 中的电源端源电压 U_{s1} 、 U_{s2} ，其中“+”表示高电位，“-”表示低电位。也可以用给电流、电压加注脚的方法来表示，如图 1-7 中的电压 U_5 也可表示为 U_{bd} ，电流

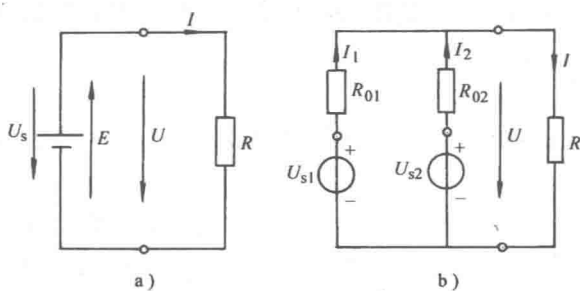


图 1-6 U 、 I 、 E 的实际方向与参考方向图

I_5 也可表示为 I_{bd} 等。

在交流电路中, 电流、电压的方向在周期性地改变, 应以标注的参考方向为正。

当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时, 则称它们为关联的参考方向, 如图 1-8a 所示。在分析电路时, 尤其是分析电阻、电感、电容等元件上的电流、电压关系时, 经常采用关联参考方向。例如, 在图 1-8a 中, 电流和电压间采用了关联的参考方向, 这时端电压为

$$U = RI$$

若采用非关联参考方向, 如图 1-8b 所示, 则电阻 R 两端的电压为

$$U = -RI$$

其他物理量如电动势、电位、磁通等, 在进行电路分析计算时, 也要选定参考方向。

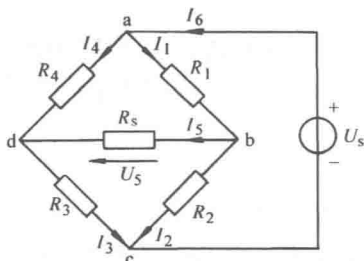


图 1-7 参考方向的表示法

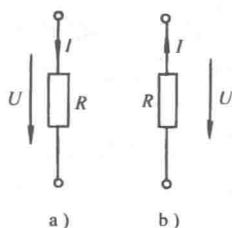


图 1-8 参考方向的关联性

三、功率计算的规范化方法

从物理学中我们已经知道, 一个元件上的电功率等于该元件两端的电压与通过该元件电流的乘积, 即

$$P = UI$$

如果电压和电流都是时变量时, 则瞬时功率写成

$$p = ui$$

由于小写斜体字母亦表示广义变量, 则式 $p = ui$ 也可以是广义的, 因此 $P = UI$ 也可以看成是 $p = ui$ 中 u 和 i 都是恒定直流的特殊情况。当电压的单位为伏特 (V)、电流的单位为安培 (A) 时, 功率的单位为瓦特 (W)。

元件上的电功率有吸收和发出两种可能, 用功率计算值的正负相区别, 以吸收功率为正。我们进行电路分析时, 电流和电压采用的都是参考方向, 其中有关联的参考方向, 也有非关联的参考方向。在这种情况下, 应该怎样计算功率呢? 可作如下处理:

(1) 当电流、电压取关联的参考方向时

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \\ p &= ui \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

(2) 当电流、电压取非关联参考方向时

$$\left. \begin{aligned} P &= -UI \\ p &= -ui \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

在此规定下, 电流和电压的正负号如实代入公式, 如果计算结果为 $P > 0$ (或 $p > 0$) 时, 表示元件吸收功率, 它是负载; 反之, 当 $P < 0$ (或 $p < 0$) 时, 表示元件发出功率, 它

是电源。

现在以图 1-9 所示的蓄电池充电电路为例进行说明。图中的 U_s 为理想电压源的源电压。

【例 1-1】 已知蓄电池充电电路如图 1-9 所示, 其中, $U_s = 20\text{V}$, 求当蓄电池端电压 $U_2 = 12\text{V}$ 时的充电电流 I 和各元件的功率, 设电阻 $R = 2\Omega$ 。

解 首先选定电流参考方向并标于图中, 电路中的电流

$$I = \frac{U_s - U_2}{R} = \frac{(20 - 12)\text{V}}{2\Omega} = 4\text{A} (> 0)$$

电流为正值, 说明电流参考方向与实际方向一致。

根据前面对计算功率时的规定, 即根据式 (1-1) 和式 (1-2), 可得

$$\text{电源功率} \quad P_s = -U_s I = -20\text{V} \times 4\text{A} = -80\text{W} (< 0)$$

$$\text{蓄电池功率} \quad P_2 = U_2 I = 12\text{V} \times 4\text{A} = 48\text{W} (> 0)$$

$$\text{电阻功率} \quad P_R = I^2 R = (4\text{A})^2 \times 2\Omega = 32\text{W} (> 0)$$

$$\text{或} \quad P_R = U_R I = (U_s - U_2) I = 8\text{V} \times 4\text{A} = 32\text{W} (> 0)$$

计算表明, 电源发出功率, 电阻和蓄电池吸收功率, 即电阻和蓄电池是电路的负载, 这与蓄电池处于充电状态的事实相符合。

由这个例子还可以看到: 电源发出的功率等于各个负载吸收的功率之和, 即

$$80\text{W} = 48\text{W} + 32\text{W}$$

按照能量守恒定律, 对所有的电路来说, 上述结论均成立, 记为

$$\begin{aligned} \Sigma P &= 0 \\ \text{或} \quad \Sigma p &= 0 \end{aligned} \quad (1-3)$$

即任一瞬间电路中各元件上功率的代数和均等于零。式 (1-3) 称为功率平衡方程式。

式 (1-1) 和式 (1-2) 也适用于具有两个出线端的局部电路的功率, 不管所述的局部电路内有电源或没有电源都正确。

【例 1-2】 在图 1-10 所示的电路中, 已知 $U_1 = 14\text{V}$, $I_1 = 2\text{A}$, $U_2 = 10\text{V}$, $I_2 = 1\text{A}$, $U_3 = -4\text{V}$, $I_4 = -1\text{A}$, 求各方框电路中的功率, 并说明是吸收功率还是发出功率。

解 直接按式 (1-1)、式 (1-2) 计算功率

$$\text{方框 1 功率} \quad P_1 = -U_1 I_1 = -14\text{V} \times 2\text{A} = -28\text{W}$$

$$\text{方框 2 功率} \quad P_2 = U_2 I_2 = 10\text{V} \times 1\text{A} = 10\text{W}$$

$$\text{方框 3 功率} \quad P_3 = -U_3 I_1 = -(-4\text{V}) \times 2\text{A} = 8\text{W}$$

$$\text{方框 4 功率} \quad P_4 = -U_2 I_4 = -10\text{V} \times (-1\text{A}) = 10\text{W}$$

结果表明, 方框 1 中所代表的局部电路是发出功率, 其余均为吸收功率。

最后, 我们来验算一下是否满足功率平衡, 有

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = (-28)\text{W} + 10\text{W} + 8\text{W} + 10\text{W} = 0$$

满足 $\Sigma P = 0$, 说明计算结果无误。

验证功率是否平衡是验证计算结果正误的有效方法, 不满足功率平衡, 就肯定有错。

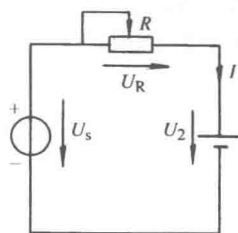


图 1-9 例 1-1 图

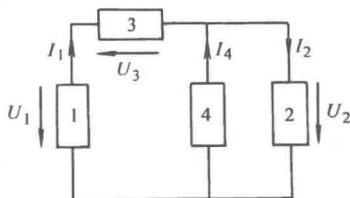


图 1-10 例 1-2 图

〔练习与思考〕

1-2-1 某白炽灯的电压为220V，功率是100W，问此时电流是多大？电阻是多大？

1-2-2 图1-6a中，如果电阻上 U 、 I 选用非关联参考方向时，计算结果电流应该是正值还是负值？这时功率应该怎么计算？

1-2-3 在图1-7的电路中，设 $I_5 = 1\text{A}$ ，则 $I_{\text{db}} = (\quad)$

a. $+1\text{A}$; b. -1A

第三节 电阻、电感和电容

电阻 R 、电感 L 和电容 C 是三种具有不同物理性质的电路元件，也称电路结构的基本模型。

元件的基本物理性质是指当把它们接入电路时，在元件内部将进行什么样的能量转换以及表现在元件外部的特征。从电路分析的角度看，我们最感兴趣的是元件的外部特性，而其中最主要的就是元件端点上的伏安关系和能量关系。

一、电阻

电阻有线性电阻和非线性电阻之分，我们这里只讨论线性电阻。

所谓线性电阻，是指电阻元件的阻值 R 是个常数，加在该电阻元件两端的电压 u 和通过该元件中的电流 i 之间成正比例，即

$$u = Ri \quad (1-4)$$

如果在直角坐标系中纵坐标以伏特 (V) 为单位表示电压，横坐标以安培 (A) 为单位表示电流，则电阻上的电压和通过它的电流之间的伏安特性曲线如图 1-11b 所示，这是一条通过坐标原点的直线，线性电阻的名称即由此而来。图 1-11c 还画出了一种非线性电阻的伏安特性。

公式 (1-4) 可改写成

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

就是说，线性电阻两端的电压与电流的比值是常数，这就是**欧姆定律**。从式 (1-4) 或式 (1-5) 中都可看出，电阻具有阻碍电流的作用。

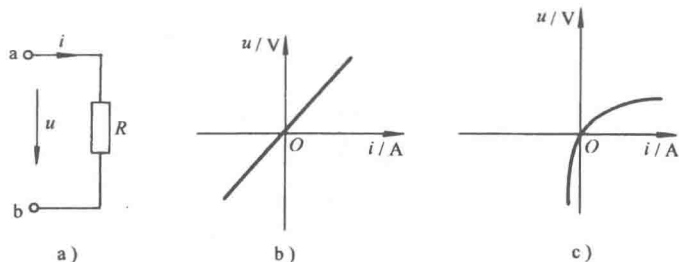


图 1-11 电阻元件及其伏安特性曲线

电流通过电阻要产生热效应，即在电阻元件里电能会转换成热能。而热能向周围空间散去，不可能再直接转换为电能回到电源。可见，电阻中的能量转换过程是不可逆的。电阻上的功率 $P = Ri^2$ ，只能是正值。因此，电阻是耗能元件。

电阻元件中流过电流时会因为消耗电能而发热。电阻炉、白炽灯、电子电路中的电阻元件以及用导线（具有一定电阻值）绕制而成的变压器、电动机等用电设备或元器件，在使用过程中，如果电流过大，发热使温度过高，就有被烧坏的危险。为了保证它们安全可靠地工作，制造厂都给它们标上了电压、电流或功率的限额，如某电阻炉为 220V、1kW 等等。这些**限额称为额定值**，是使用时的根据。

由于电阻元件两端的电压变化时，其中的电流将立即随之按同样规律变化（反之亦然），

故称电阻元件为“即时”元件。图 1-12 表示当电压 u 作阶跃变化时, 电流 i 也随之作阶跃变化的情况。在这里, 作阶跃变化的电压、电流称为阶跃电压和阶跃电流。

二、电感

线圈是典型的实际电感元件。当忽略线圈导线的电阻时, 它就成为一个理想的电感元件。

当有电流 i 通过线圈时, 线圈中就会建立磁场。设磁通为 Φ , 线圈匝数为 N , 则与线圈相交链的磁链 ψ 为

$$\psi = N\Phi \quad (1-6) \quad \text{图 1-12 线性电阻元件上的阶跃电压和阶跃电流}$$

讨论电感元件的特性时, 有关时变量的参考方向通常按下述原则选取: 磁通 Φ 与电流 i 之间、自感电势 e_L 与磁通 Φ 之间的参考方向均由右手螺旋定则确定, 如图 1-13 所示; u 与 i 之间则取关联的参考方向。

电感线圈中的电流与磁链之间的关系用韦安直角坐标系中的曲线表示, 简称为韦安特性。电感 L 定义为

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1-7)$$

L 又称自感系数或电感系数。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 1-14 画出理想电感元件的电路符号和它的韦安特性曲线, 其中 i 、 u 、 e_L 的参考方向标注与图 1-13 的规定一样。在电感的符号图中不反映线圈的绕向, 一切计算根据电压、电

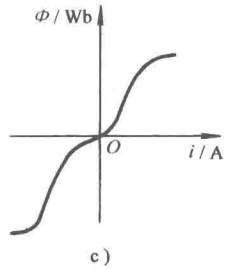
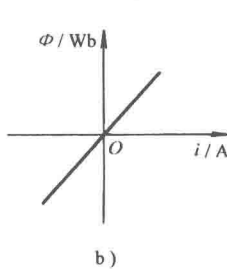
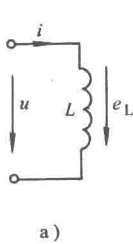
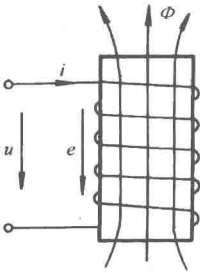
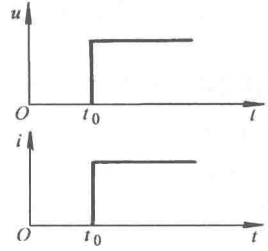


图 1-13 电感线圈

图 1-14 电感元件及其韦安特性曲线

流、自感电动势的参考方向进行。图 1-14b 的韦安特性是一条过原点的直线, 具有这种特性的电感元件称为**线性电感元件**, 其电感值 L 是个常数, 与电感中电流的大小无关。空心线圈是一种实际的线性电感元件。图 1-14c 所示韦安特性曲线不是过原点的直线, 电感 L 随电流 i 的大小而变化, 称之为**非线性电感元件**。带有铁心的线圈就是一种常见的非线性电感元件。本书主要讨论线性电感, 当不加说明时, “电感”一词指的就是线性电感。

当电感 L 中的电流 i 发生变化时, 由它建立的磁链 ψ 也随之变化。根据电磁感应定律, 磁链随时间变化就要在电感线圈中引起感应的电动势 e_L , 而且 e_L 总是阻碍电流 i 的变化。按照图 1-14a 所规定的 u 、 i 和 e_L 的参考方向, 电磁感应定律的数学表达式是

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-8)$$

这样, 当电流 i 减小时, 磁链 ψ 也减小, ψ 的变化速率 $d\psi/dt$ 为负, e_L 为正, 即感应

电动势 e_L 的方向与电流 i 的方向一致, 有阻碍电流减小的作用; 当电流 i 增大时, 磁链也增大, ψ 的变化速率 $d\psi/dt$ 为正, e_L 为负, 即 e_L 与 i 的方向相反, 有阻碍电流增大的作用。

在电路分析中, 我们更关心的是元件的伏安关系, 即元件两端的电压 u 与通过它的电流 i 的关系。对于电感元件来说, 按照图 1-14a 参考方向的规定, 可以发现, 当 u 为正时 (线圈两端上正、下负), e_L 恰好为负; 反之, 当 e_L 为正时 (线圈两端下正、上负), u 恰好为负, 故有

$$e_L = -u$$

由 $e_L = -u$, 并考虑式 (1-8) 及式 (1-7), 即可导出电感元件的伏安关系式

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

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

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速率 di/dt 成正比, 而与当时的电流数值大小无关。这个比例系数就是电感 L 。只有当电流有变化时, 电感两端才有电压, 因此说电感是一种动态元件。当把电感 L 接到直流电路中时, 因为 $di/dt = 0$, 所以不管通过的电流有多大, 电感 L 两端的电压一定是零, 即 $u = 0$ 。可见, 电感对直流电流没有阻力, 电感元件对直流电可视为短路。在时变电路中, 电流 i 随时间变化, 因而 $u = L \frac{di}{dt} \neq 0$ 。这就是说, 欲使交流电流通过电感 L , 必须在 L 两端加上电压, 电感 L 对交流电流 i 具有一定的阻力, 有限制交流电流的作用。

由式 (1-9) 又可得出

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d(\xi) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\xi) d(\xi) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d(\xi) \\ &= i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d(\xi) \end{aligned} \quad (1-10)$$

即 t 时刻的电流值不仅与当时的电压值有关, 而且与该时刻以前的所有电压值有关, 这称为电感有记忆功能。

电流通过电感时没有发热现象, 即电能没有转换为热能, 在电感里进行的是电能与磁场能量的转换。设 $t=0$ 时 $i=0$, $t=0$ 时开始对电感加电压, 到 t_1 时刻电感中的能量为

$$W_M(t_1) = \int_0^{t_1} u i dt = \int_0^{t_1} \left(L \frac{di}{dt} i \right) dt = \int_0^{i(t_1)} L i di = \frac{1}{2} L i^2(t_1)$$

$$\text{即} \quad W_M = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-11)$$

这就是线圈中电流 i 建立的磁场所具有的能量, 即磁场能量。任一时刻电感中这一能量的大小与当时电流的平方成正比。

电感中的磁场能量反过来也可以转换成电能。据图 1-14a, 当 $di/dt > 0$ 时, u 为正, 瞬时功率 $p = ui > 0$, 说明此时电感吸收能量, 即电流增大时磁场能量增加; 而当 $di/dt < 0$ 时, u 为负, $p = ui < 0$, 说明此时电感放出能量, 即电流减小时磁场能量也减小。放出的能量通过自感电动势转换成电能归还电源。这个结果说明电感不是耗能元件而是储存磁场能量的储能元件。

〔例 1-3〕 已知电感 $L = 3\text{H}$, 当通过的电流 $i = 2[1 - \exp(-0.5t)]\text{A}$ 时, 求电感两端的电压 u , 并画出 i 、 u 的波形图。

解 依据 $u = L \frac{di}{dt}$, 代入电流得

$$u = 3 \times \frac{d}{dt} 2[1 - \exp(-0.5t)]\text{V} = 3\exp(-0.5t)\text{V}$$

i 和 u 的波形如图 1-15 所示。

三、电容

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 1-16b 是电容元件的电路符号。其电流、电压一般选取关联的参考方向如图。

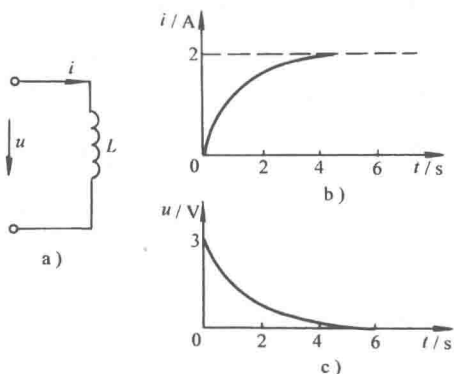


图 1-15 例 1-3 图

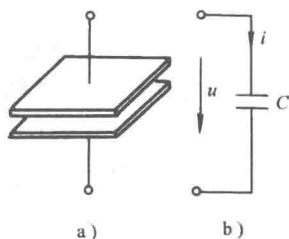


图 1-16 电容器及其符号

在电容器两端, 即两极板之间加上电压 u , 电容器即被充电并建立电场。设极板上所带的电荷为 q , 则电容的定义为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-12)$$

电容也分为线性电容与非线性电容两类, 线性电容的电容量 C 是个常数, 不随电压变化; 非线性电容的电容量则是一个随电压的变化而变化的量。本书只讨论线性电容。

当电荷 q 的单位是库仑, 电压 u 的单位为伏特时, 电容量 C 的单位是法拉 (F)。因为实际电容器的电容量都很小, 所以电容 C 的单位通常用微法 (μF) 或皮法 (pF) 表示

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

根据电流的定义

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-13)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-13), 得出在关联参考方向下电容两端电流、电压的关系式

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

式 (1-14) 说明, u 增加时, q 也增加, 电容器被充电, i 为正; u 减小时, q 也减少, 电容器放电, i 为负。电容电流是与它两端电压的变化率成正比的, 只有电压变化时引线中才会有电流 i 流过。因此电容也是一种动态元件。

在直流稳态电路中, 电压 u 为恒定值, $du/dt = 0$, 因此始终没有电流, 即 $i = 0$ 。由此

可见, 在直流电路里电容可视为开路。

当电容两端加上一个随时间变化的电压时, 则有时变电流流过, 也就是说, 时变电流可以通过电容器。但同样大小的电压变化率, 电容量 C 不同时, 电流的大小也不一样。可见, 不同的电容量对时变电流的制约能力也是不同的。

由式 (1-14) 可以导出电容上电压 u 的表达式

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

由此可见, 电容上的电压值, 不仅与当时的电流值有关, 而且与过去所有时刻的电流值都有关, 即电容 C 有记忆功能。

电容上施加一电压 u , 则电容被充电并建立电场, 可以证明, 其电场能量为

$$W_E = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-16)$$

即电容也是一种储能元件, 储能大小与电压的平方成正比。

【例 1-4】已知电容 $C=1\text{F}$, 电流波形如图 1-17b 所示, 电容上的初始电压 $u(0)=0$, 求电压 u , 并画出波形图。

解 首先按电流波形写出电流 i 的表达式

$$i = \begin{cases} 3\text{A} & (0\text{s} \leq t < 2\text{s}) \\ -3\text{A} & (2\text{s} < t \leq 4\text{s}) \end{cases}$$

根据式 (1-15), 采取分段积分的方法计算 u

(1) $0\text{s} \leq t < 2\text{s}$ 时

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \\ &= u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \\ &= 0 + \frac{1}{1} \int_0^t 3 d\xi = 3t \text{ V} \end{aligned}$$

当 $t=2\text{s}$ 时, $u(2)=6\text{V}$ 。

(2) $2\text{s} < t \leq 4\text{s}$ 时

$$\begin{aligned} u(t) &= u(2) + \frac{1}{C} \int_2^t -3 d\xi \\ &= 6 - 3\xi \Big|_2^t \\ &= 6 - 3t + 6 = 12 - 3t \text{ V} \end{aligned}$$

当 $t=2\text{s}$ 时, $u(2)=6\text{V}$; 当 $t=4\text{s}$ 时, $u(4)=0\text{V}$ 。

电压波形如图 1-17c 所示。

最后, 我们来比较一下电感与电容的特性, 当把 L 换成 C , u 换成 i , i 换成 u 时, 表征电感特性的式 (1-9)、式 (1-10) 就变成了表征电容特性的式 (1-14)、式 (1-15) 的形式。这种特性称为对偶性。利用对偶性, 可帮助我们更好地去掌握电感与电容的性质, 加深对它们的理解。

〔练习与思考〕

1-3-1 1 个 $40\text{k}\Omega$ 、 1W 的电阻器, 正常使用时最高应加多少伏电压? 能允许通过多大的电流?

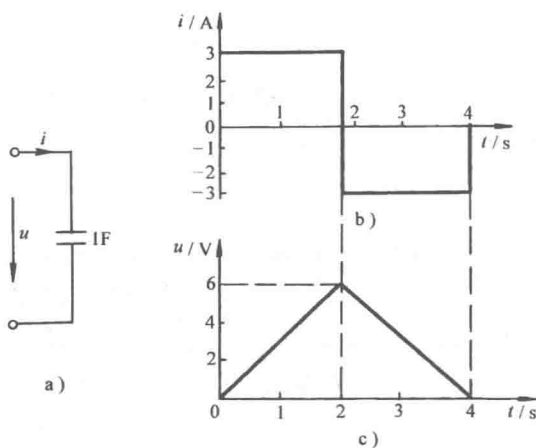


图 1-17 例 1-4 图