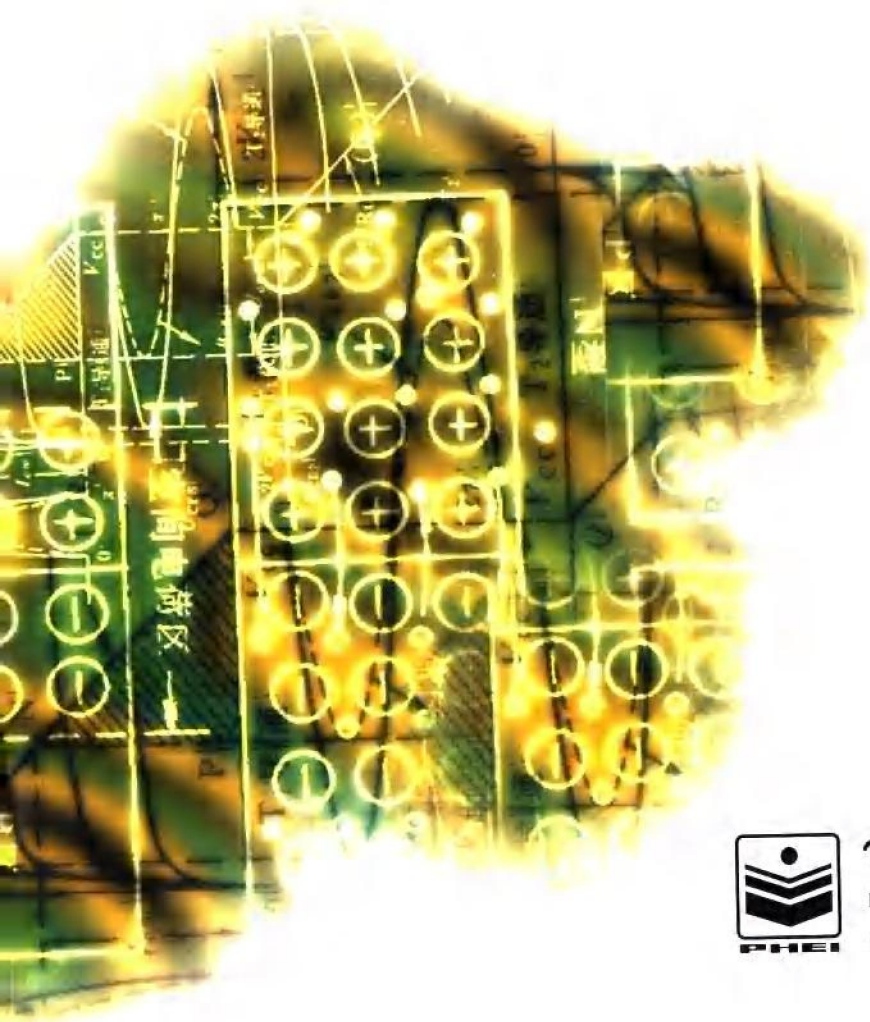


高等专科学校规划教材

中国计算机学会大专教育学会推荐出版

电路与电子学

姚国侬 谢小莉 王玫 袁晓宁 编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.co.cn>

高等专科学校规划教材

电路与电子学

姚国侬 谢小莉 编
王 玫 袁晓宁

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书分“电路分析”和“电子学”上、下两篇。上篇内容：电路的基本概念和基本定律，电阻电路的一般分析方法，电路定理，一阶电路的时域分析，正弦稳态电路的分析，耦合电感和理想变压器。下篇内容：半导体二极管和三极管，基本放大电路，集成运算放大器，负反馈放大电路，集成运放应用电路，直流稳压电源。本课程参考学时为120学时。

本书既可作为高等专科计算机类教材，也可供有关专业人员参考。

丛 书 名：高等专科学校规划教材

书 名：电路与电子学

编 者：姚国依 谢小莉 王 玫 袁晓宁

责任编辑：张凤鹏

特约编辑：侯维垣

印 刷 者：民族印刷厂

出版发行：电子工业出版社出版、发行 URL：<http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036 发行部电话 68214070

经 销：各地新华书店经销

开 本：787×1092 1/16 印张：27.25 字数：697.6千字

版 次：1998年1月第1版 1999年7月第3次印刷

书 号：ISBN 7-5053-4010-7
G·308

定 价：32.00元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责调换

版权所有·翻印必究

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的有关规定,在电子工业部教材办的组织与指导下,按照教材建设适应“三个面向”的需要和贯彻国家教委关于“以全面提高教材质量水平为中心、保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”的精神,大专计算机专业教材编审委员会与中国计算机学会教育专业委员会大专教育学会密切合作,于1986~1995年先后完成了两轮大专计算机专业教材的编审与出版工作,共出版教材48种,从而较好地解决了全国高等学校大专层次计算机专业教材需求问题。

为及时使教材内容更适应计算机科学与技术飞速发展的需要以及在管理上适应国家实施“双休日”后的教学安排;在速度上适应市场经济发展形势的需要,在电子工业部教材办的指导下,大专计算机专业教材编委会、中国计算机学会大专教育学会与电子工业出版社密切合作,从1994年7月起经过两年的努力制定了1996~2000年大专计算机专业教材编审出版规划。

本书就是规划中配套教材之一。

这批书稿都是通过教学实践,从师生反映较好的讲义中经学校选报,编委会评选择优推荐或认真遴选主编人,进行约编的。广大编审者,编委和出版社编辑为确保教材质量和如期出版,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,编审与出版工作中的缺点和不足在所难免,望使用学校和广大师生提出批评建议。

**中国计算机学会教育委员会大专教育学会
电子工业出版社**

附:先后参加全国大专计算机教材编审工作和参加全国大专计算机教育学会学术活动的学校名单:

上海科技高等专科学校
上海第二工业大学
上海科技大学
上海机械高等专科学校
上海化工高等专科学校
复旦大学
南京大学
上海交通大学
南京航空航天大学
扬州大学工学院
济南交通专科学校
山东大学
苏州市职工大学
国营 734 厂职工大学
南京动力高等专科学校
南京机械高等专科学校
南京金陵职业大学
南京建筑工程学院
长春大学
哈尔滨工业大学
南京理工大学
上海冶金高等专科学校
杭州电子工业学院
上海电视大学
吉林电气化专科学校
连云港化学矿业专科学校
电子工业部第 47 研究所职工大学
福建漳州大学
扬州工业专科学校
连云港职工大学
沈阳黄金学院
鞍钢职工工学院
天津商学院
国营 738 厂职工大学

北京广播电视大学
天津职业技术师范学院
天津市计算机研究所职工大学
山西大众机械厂职工大学
河北邯郸大学
沈阳机电专科学校
北京燕山职工大学
国营 761 厂职工大学
山西太原市太原大学
大连师范专科学校
江苏无锡江南大学
上海轻工专科学校
上海仪表职工大学
常州电子职工大学
国营 774 厂职工大学
西安电子科技大学
电子科技大学
河南新乡机械专科学校
河南洛阳大学
郑州粮食学院
江汉大学
武钢职工大学
湖北襄樊大学
郑州纺织机电专科学校
河北张家口大学
河南新乡纺织职工大学
河南新乡市平原大学
河南安阳大学
河南洛阳建材专科学校
开封大学
湖北宜昌职业大学
中南工业大学
国防科技大学
湖南大学

湖南计算机高等专科学校
中国保险管理干部学院
湖南税务高等专科学校
湖南二轻职工大学
湖南科技大学
湖南怀化师范专科学校
湘穗电脑学院
湖南纺织专科学校
湖南邵阳工业专科学校
湖南湘潭机电专科学校
湖南株洲大学
湖南岳阳大学
湖南商业专科学校
长沙大学
长沙基础大学

湖南零陵师范专科学校
湖北鄂州职业大学
湖北十堰大学
贵阳建筑大学
广东佛山大学
广东韶关大学
西北工业大学
北京理工大学
华中工学院汉口分院
烟台大学计算机系
安徽省安庆石油化工总厂职工大学
湖北沙市卫生职工医学院
化工部石家庄管理干部学院
西安市西北电业职工大学
湖南邵阳师范专科学校

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1996~2000 年编审出版规划，由原大专计算机教材编审委员会组织征稿、评选并经部大专计算机专业教学指导委员会确定，推荐出版的。

本教材由南京有线电厂职工大学姚国依副教授担任主编，长春大学电子工程学院阎军副教授担任主审。责任编辑 顾藏知

本课程的参考学时为 120 学时。本教材上篇为“电路分析”，内容为：电路的基本概念和基本定律，电阻电路的一般分析方法，电路定理，一阶电路的时域分析，正弦稳态电路的分析，耦合电感和理想变压器。本教材下篇为“电子学”，内容为：半导体二极管和三极管，基本放大电路，集成运算放大器，负反馈放大电路，集成运放应用电路，直流稳压电源。

本教材以必需够用为度，注意基本概念及定理的阐述，紧密结合工程实际，并配有丰富的例题和习题，具有专科的特色。为了加强学生对所学知识的进一步理解，应根据具体情况，开设一定数量的实验。

本教材由南京有线电厂职工大学姚国依编写第一、二章，南京机械高等专科学校王玫编写第三、四、五、六章，南京动力高等专科学校谢小莉编写第七、八、九章，袁晓宁编写第十、十一、十二章。在教材编写中，王文章教授、王和勤高级工程师等提出了许多宝贵意见，在此谨表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1996 年 8 月

上 篇 电 路 分 析

第一章 电路的基本概念和基本定律

在现代化的生产、科研、国防和日常生活中,广泛应用电气或电子设备,这些设备中都具有将电气或电子器件通过各种方式连接而成的电路。

在各个电技术领域内,人们可以通过各种电路来完成多种任务。对于不同的电路,它们具有不同的功能。例如,整流电路可以将交流电变成直流电;滤波电路可以去除噪声,完成信息处理任务;计算机中的存储电路能存储数据,具有存储功能。电路种类及功能虽很多,但不论电路结构如何千差万别,最复杂的和最简单的电路之间却有着最基本的共性,遵循着相同的规律。

第一节 实际电路和电路模型

一般实际电路(如电视机、电子计算机)都是由电阻器、电感线圈、电容器、电源、半导体管、集成电路等电路的元、器件组成的。图 1-1-1(a)所表示的是一个手电筒电路的示意图。当开关闭合时,电流通过灯泡使其发光。灯泡是用电的器件,称为负载。

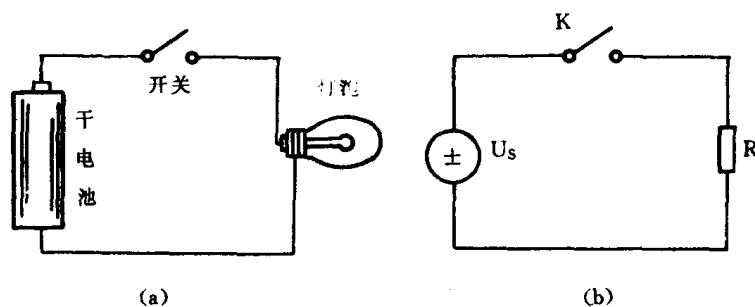


图 1-1-1 手电筒电路及其电路模型

在分析实际电路时,人们往往将实际的元、器件理想化,抓住其主要特性,忽略其他次要因素,这样就近似地表征了实际电路的性能。这种处理方法是必要的,它可使分析计算得以简化。对图 1-1-1(a)手电筒电路,由于干电池的内阻比灯泡的电阻小得多,故可将其看成一个电压恒定的理想电压源;灯泡的电感是很小的,故可把它当作一个理想电阻元件。各种理想电路元件(以后简称电路元件)组合起来就构成电路模型。图 1-1-1(b)就是图(a)的电路模型。电路理论的分析对象不是实际电路,而是电路模型。在本书中,凡称电路,均指电路模型。

需注意,一个实际元、器件或实际电路,根据计算精确度的不同要求,可以有不同的电路模型。例如,一个线绕电阻器就可能有图 1-1-2(a)、(b)、(c)三种电路模型。图(a)是直流时的电路

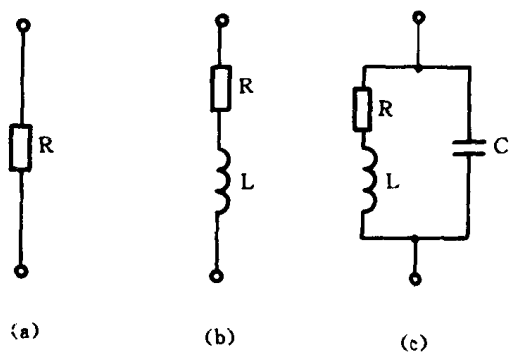


图 1-1-2 线绕电阻器不同的电路模型

模型, 仅由电阻元件 R 构成。图(b)是交流低频时的电路模型, 它由电阻元件 R 和电感元件 L 串联构成, 其中 L 反映线匝的电感效应。图(c)是交流高频下需要精确计算时的电路模型, 它与图(b)相比多了一个并联的电容元件 C , 它反映线匝间分布电容的效应。

本书涉及的物理量, 其单位全部采用国际制(SI)。如电流、电压、电阻的单位分别是安培(A)、伏特(V)、欧姆(Ω), 电感、电容、功率的单位分别是亨利(H)、法拉(F)、瓦特(W), 功和能量的单位是焦耳(J), 时间的单位是秒(S), 等等。

在实际计算中, 由于国际制单位有时嫌其过大或太小, 根据需要常引入辅助单位, 即在国际制单位前加上表 1-1 所示的词头。例如

$$2 \text{ 微安}(\mu\text{A}) = 2 \times 10^{-6} \text{ 安(A)}$$

$$5 \text{ 千瓦(kW)} = 5 \times 10^3 \text{ 瓦(W)}$$

表 1-1 部分国际制词头

词头中文名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	m	μ	n	p
因数	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

按此规定, 就不允许用两个词头并列而组成组合词头。如“毫微”应作“纳”, “微微”应作“皮”等。

第二节 电路中的基本描述量

在电路问题的分析中, 人们所关心的物理量是电流、电压和功率, 它们就是电路中的三个基本描述量。在本书中, 我们约定, 大写字母 I 、 U 、 P 表示直流情况下的电流、电压、功率*, 小写字母 i 、 u 、 p 表示任意随时间变动情况下的电流、电压、功率的瞬时值。有时为强调随时间变化的特征, 也可写为 $i(t)$ 、 $u(t)$ 、 $p(t)$ 。其他物理量均可据此类推。

一、电流

随着电流在电路中的流动, 进行着电能和其他形式能量之间的转换。电路中没有电流, 也

* 在交流情况下, I 、 U 、 P 分别表示电流有效值、电压有效值和平均功率, 详见本书第五章。

就没有能量的转换。

我们把带电粒子所带的电荷数叫做电量或电荷量。在国际单位制中,电量的单位是库仑(C)。1库仑的电量等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量。电荷常用 Q 或 q 表示。

为了从数量上来衡量电流的大小,引入电流强度这一物理量。电流强度简称电流,用 I 或 i 表示。单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

如果已知流入导体横截面电流 i ,则在 t_1 至 t_2 时间间隔内进入导体横截面的总电荷 q 为

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i dt \quad (1-2-2)$$

上述两式中,电荷 q 的单位为库仑(C),时间 t 的单位为秒(S),电流 i 的单位为安培(A)。

历史上把正电荷运动方向规定为电流的方向,它与金属导体中自由电子运动方向正好相反。但在气体导电或电解液中,确实也存在正电荷的运动,故电流方向的定义一直沿用至今。

电路中电流有各种不同类型,如图 1-2-1 所示。图(a) i_1 表示不随时间而变化的直流电流,图(b) i_2 表示随时间按正弦规律变化的正弦电流,图(c) i_3 和图(d) i_4 分别是矩形电流和三角形电流。另外还有非周期变化的脉冲电流、指数电流等。

在一个较为复杂的电路中,我们经常难以判定电流的真实方向,故引入参考方向的概念。

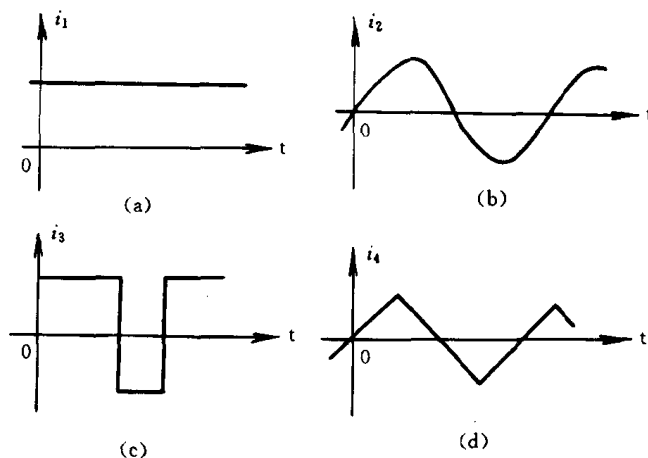


图 1-2-1 各种类型的电流

在电路图中,任意用箭头表示电流的方向,称为电流的参考方向,如图 1-2-2 所示。其中的方框,泛指电路元件或电路元件的各种组合。通过计算,若 i 为正值,说明电流的实际方向与参考方向相同;若 i 为负值,说明电流的实际方向与参考方向相反。必须指出,若不标出电流的参考方向,则电流的正负是毫无意义的。因而在分析和计算电路时,一定要首先标出电流的参考方向。

在直流电路中,测量电流要根据电流的实际方向将电流表串联接入待测支路里,如图 1-2-3 所示,两个直流电流表两旁所标“+”与“-”是电流表的极性。

二、电压

为了衡量电场力作功的大小,引入电压这个物理量。电压的定义是:电场力把单位正电荷

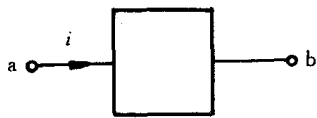


图 1-2-2 电流的参考方向

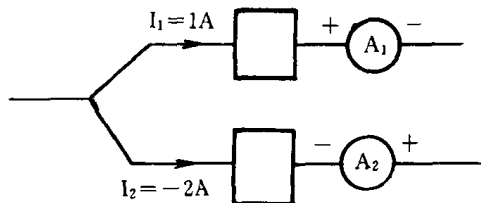


图 1-2-3 直流电流测量电路

从 a 点移到 b 点所做的功称为 a、b 两点间的电压。电压用 U 或 u 表示,即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2-3)$$

上式中, w 是电场力将正电荷从 a 点移至 b 点所做的功,单位是焦耳(J); q 是被移动的正电荷的电量,单位是库仑(C); u 是电路中 a、b 两点之间的电压,单位是伏特(V)。有时加上脚标,将电压 u 写成 u_{ab} 。

电压又称电位差,它总与电路中的两个点有关。电压和能量的关系十分密切,若正电荷从 a 点移至 b 点是失去能量,则 a 点是高电位,是正极,标“+”号, b 点是低电位,是负极,标“-”号, u_{ab} 是电压降,其值为正。反之亦然。

在电路中,通常难以事先确定电压的真实极性,也应像电流一样,标出电压的参考方向(此时是用“+”“-”极表示的参考极性),如图 1-2-4 所示。

电压的参考极性可任意假定,并按此假定进行计算。若得电压为正值,说明实际极性与参考极性相同;若得电压为负值,说明实际极性与参考极性相反。显然,不标出电压的参考极性,则电压的正负也是没有意义的。

综上所述,分析和计算电路时,都要假设电流、电压的参考方向,并据此进行计算。

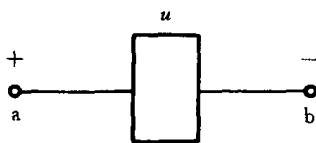


图 1-2-4 电压的参考极性

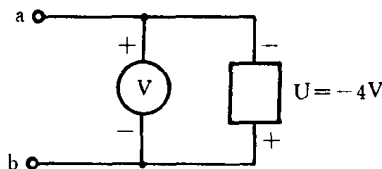


图 1-2-5 直流电压测量电路

在直流电路中,测量电压要根据电压的实际极性将电压表并联接于待测支路两端,如图 1-2-5 所示。直流电压表两旁所标“+”与“-”分别是正极性端与负极性端。

三、功率

电路的基本作用之一就是实现能量的传递。功率为做功的速率,用 p 或 P 表示,即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-2-4)$$

上式中, w 是能量,单位是焦耳(J), t 是时间,单位是秒(S), p 是功率,单位是瓦特(W)。

电路中,人们感兴趣的是功率与电路中电流、电压之间的关系。现以图 1-2-6 电路加以讨论。电流参考方向设成从 a 点流向 b 点,顺着电流方向,电压的参考极性从“+”到“-”,即 a 点

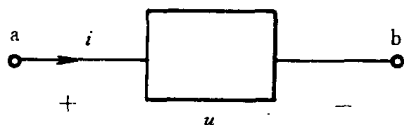


图 1-2-6 电流电压关联方向



图 1-2-7 电流电压非关联方向

为“+”，b点为“-”。这种情况称为电流、电压关联参考方向，简称关联方向。由于正电荷从a点移至b点，电位从高到低，说明电场力做的功为 $dw = u \cdot dq$ 。电场力做功表示电能损耗，损耗的这部分电能被 ab 这段电路(方框)所吸收。方框电路吸收的功率即为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1-2-5a)$$

其中电压、电流、功率单位分别是伏特(V)、安培(A)、瓦特(W)。在直流情况下

$$P = UI \quad (1-2-5b)$$

在关联方向时， $p > 0$ 表示电路实际为吸收(消耗)功率， $p < 0$ 表示电路实际为提供(产生)功率。

再看图 1-2-7 电路情况，设电流参考方向从 a 点流向 b 点，而电压的参考方向相反，即 a 点为“-”，b 点为“+”。这种情况称为电流、电压非关联参考方向，简称非关联方向。此时，计算电路吸收功率的公式应为

$$p = -ui \quad (1-2-6a)$$

或

$$P = -UI \quad (1-2-6b)$$

在非关联方向时， $p > 0$ 仍表示电路实际为吸收功率， $p < 0$ 仍表示电路实际为提供功率。

功率的计算是电路分析中经常遇到，且非常容易出错的问题。从上述分析可知，在电路已标出电流参考方向(简称电流方向)和电压参考极性(简称电压极性)的前提下，一是看此电路是关联方向还是非关联方向，二是看要求吸收功率还是提供功率，从而确定使用的公式。上面给出的公式(1-2-5)和(1-2-6)均为计算吸收功率，区别在于前者是对关联方向而言，后者是对非关联方向而言。如需计算电路提供功率，则上述公式中均应增加一个负号，即关联方向时

$$p = -ui \quad (1-2-7)$$

非关联方向时

$$p = ui \quad (1-2-8)$$

〔例 1-2-1〕 计算图 1-2-8(a)、(b)电路吸收的功率和图(c)电路提供的功率。

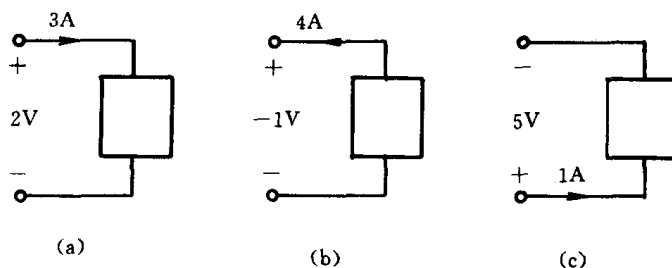


图 1-2-8

解 图(a)电路为关联方向,则吸收功率为

$$P=UI=2\times 3=6(\text{W})$$

图(b)电路为非关联方向,则吸收功率为

$$P=-UI=-(-1)\times 4=4(\text{W})$$

图(c)电路为关联方向,则提供功率为

$$P=-UI=-5\times 1=-5(\text{W})$$

〔例 1-2-2〕 对图 1-2-9 电路,说明各段电压的实际极性。

分析 电路中,箭头指向方框的,指吸收功率;箭头向外的,指提供功率。由此可见,方框 A 电路吸收 4W 功率,方框 B 电路提供 10W 功率,方框 C 电路吸收 6W 功率。电路总的吸收功率等于提供功率,满足功率平衡。

解 (1) 对方框 A 电路,电流 I 与电压 U_{ab} 为关联方向,吸收功率 $P_A=U_{ab}I$,则

$$U_{ab}=\frac{P_A}{I}=\frac{4}{0.5}=8(\text{V})$$

说明 a、b 两点间电压的实际极性是 a 点“+”、b 点“-”。

(2) 对方框 B 电路,电流 I 与电压 U_{bc} 为关联方向,提供功率 $P_B=-U_{bc}I$,则

$$U_{bc}=-\frac{P_B}{I}=-\frac{10}{0.5}=-20(\text{V})$$

说明 b、c 两点间电压的实际极性是 b 点“-”、c 点“+”。

(3) 对方框 C 电路,电流 I 与电压 U_{ca} 为关联方向,吸收功率 $P_C=U_{ca}I$,则

$$U_{ca}=\frac{P_C}{I}=\frac{6}{0.5}=12(\text{V})$$

说明 c、a 两点间电压的实际极性是 c 点“+”、a 点“-”。

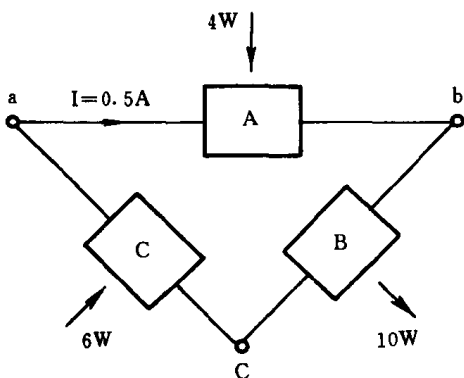


图 1-2-9

第三节 电路元件

前已阐述,电路元件的组合就构成了电路模型,简称电路。因此,正如七巧板可以搭成各种图形一样,电路元件也可以组成多种多样的电路。常用电路元件有八种,即:电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源、受控源、耦合电感、理想变压器。前五种因为只有两个端钮,故称为二端元件;后三种因有多个端钮,故称为多端元件。各种电路元件都有确切的定义。本节先介绍五种二端元件。

一、电阻元件

电阻元件是电路基本元件之一。通常我们把对电流呈现阻力的元件叫做电阻元件。在物理课中我们已熟悉了服从欧姆定律的电阻元件,但在工程中有许多电子器件,它们并不完全服从欧姆定律,然而却有类似的性质。这就需要从更广泛的观点来定义电阻元件。

如果一个二端元件在任一瞬间 t 的电压 u 和电流 i 两者之间的关系可用 u 、 i 平面上一条

曲线来表示,则此二端元件称为电阻元件。这条表示元件电压、电流关系的曲线称为元件的伏安特性曲线,简称伏安特性。不同的电阻元件其伏安特性是不同的。

电阻元件的符号见图 1-3-1。显然,此图所标电流、电压为关联方向。

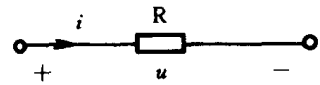


图 1-3-1 电阻元件的符号

(一) 线性电阻元件

一个电阻元件,若其伏安特性如图 1-3-2 所示,它是通过原点的一条直线,称为线性电阻元件,简称电阻。线性电阻元件受欧姆定律约束,在关联方向时

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

其中 u 为电阻元件两端的电压,单位是伏特(V); i 为流过电阻元件的电流,单位是安培(A); R 为电阻,单位是欧姆(Ω)。欧姆定律表明了线性电阻元件的特性:当电流通过时,要消耗电能,沿电流方向两个端钮上出现了电压降,此电压降与流过的电流大小成正比,比例常数为 R ,它就是该元件的电阻值。

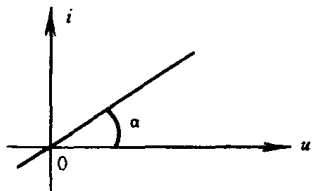


图 1-3-2 线性电阻元件的伏安特性

公式(1-3-1)的另一种形式 $R = u/i$,而从图(1-3-2)可见 $R = \text{ctg}\alpha$,它说明线性电阻元件的电阻值 R 是不随电压 u 、电流 i 的大小及方向变化的,是常数。

在如图 1-3-3 所示的非关联方向时,注意欧姆定律的表达形式应为

$$u = -Ri \quad (1-3-2)$$

电阻元件既有阻止电流通过的一面,又有允许电流通过的一面,这就是它的电导特性。电导用 G 表示,它与电阻互为倒数关系,即

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

在国际单位制中,电导的单位是西门子(S)。

当用电导表示欧姆定律时,在关联方向情况下,欧姆定律可表示为

$$u = \frac{i}{G} \quad (1-3-3)$$

电阻元件吸收的功率应为

$$p = i^2 R = \frac{i^2}{G} \quad (1-3-4)$$

或

$$p = \frac{u^2}{R} = u^2 G \quad (1-3-5)$$

可见不论电流、电压的正负,均为 $p \geq 0$,电阻元件总是消耗功率的。对于一个实际电阻器,使用时均不能超过所标明的功率,否则会烧坏。因此,各种电器设备如灯泡、电炉和电阻器都规定了额定功率、额定电流(或额定电压)。

【例 1-3-1】有一个 200Ω 、 $\frac{1}{8}\text{W}$ 的碳膜电阻,使用时电流不得超过多大数值? 它能承受的最大电压是多少?

解 由 $P = I^2 R$ 得

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{8 \times 200}} = \frac{1}{40} (\text{A}) = 25 (\text{mA})$$

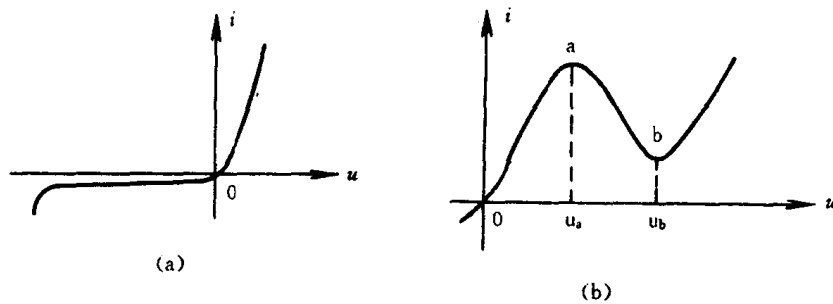
由 $U = RI$ 得

$$U = 200 \times \frac{1}{40} = 5 (\text{V})$$

即在使用时电流不得超过 25mA, 它能承受的最大电压为 5V。

(二) 非线性电阻元件

在电子电路中也常用到各种非线性电阻元件, 它们的共同特点是, 其伏安特性不是通过原点的直线。比较典型的非线性电阻元件有半导体二极管和隧道二极管, 其伏安特性见图 1-3-4 (a) 和 (b)。



(a) 半导体二极管

(b) 隧道二极管

图 1-3-4 非线性电阻的伏安特性

从图(a)半导体二极管的伏安特性可见:当 $u > 0$ 时(即半导体二极管加上正向电压),二极管电流 $i > 0$ (称为正向电流),此电流随 u 的增大迅速增大(一般为毫安级),这种情况称做二极管处于导通状态。当 $u < 0$ 时(即半导体二极管加上反向电压),二极管电流 $i < 0$ (称为反向电流),此电流极小(一般为微安级),它在一段区间内不随反向电压的增大而明显变化,这种情况称做二极管处于截止状态。当反向电压增至某值时,反向电流突然大增,这种情况称做二极管处于击穿状态。半导体二极管的电阻值 R 是随外加电压 u 变化而改变的,不是固定的常数, $R = du/di$ 。

从图(b)隧道二极管的伏安特性可见:当 $0 < u < u_a$ 及 $u > u_b$ 时,随着外加电压 u 的增大,电流 i 也随之增大,电阻值 R 不是常数,但 $R > 0$,为正电阻。当 $u_a < u < u_b$ 时,随着外加电压 u 的增大,电流 i 反而减小,电阻值 R 不是常数,但 $R < 0$,为负电阻。 $u_a < u < u_b$ 的区域,称为负电阻区,此时隧道二极管不是消耗功率,而是提供功率。

凡是电阻元件(包括线性、非线性电阻元件),它任何时刻的电流(或电压)只与该时刻的电压(或电流)有关,而与过去的电压(或电流)无关。此性质称为无记忆性,故电阻元件是无记忆元件。

另外,有时为了强调是电阻元件上的电流、电压,可加脚标表示。如线性电阻元件在关联方向下欧姆定律表达式,即公式(1-3-1),亦可写为

$$u_R = Ri_R \quad (1-3-6)$$

电路元件电压、电流之间的关系式,通常称为元件的伏安关系式(简称伏安关系)。公式(1-

3-1)或(1-3-6),就是线性电阻元件在关联方向下的伏安关系。请读者注意“伏安特性”与“伏安关系”的区别。

二、电感元件

在骨架上用导线绕制成线圈,如图 1-3-5 所示,便构成了电感线圈。当一个匝数为 N 的线圈通过电流 i_L 时,在线圈内部和周围建立磁场,形成磁通 ϕ_L ,称为自感磁通。磁通主要集中在圈的内部,若与线圈 N 匝相交链,则定义自感磁链 ψ_L 为 $\psi_L = N\phi_L$,单位是韦伯(Wb)。随着电感线圈上电流 i_L 的增大, ϕ_L 、 ψ_L 亦随之增大,说明它具有储存磁场能量的本领。忽略线圈导线电阻、匝间电容的影响,电感线圈可用一个电感元件作为它的模型。

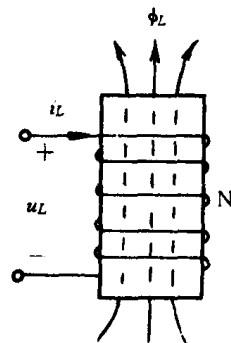


图 1-3-5 电感线圈

电感元件具有储存磁场能量的功能,它任一时刻所储存的磁场能量,取决于自感磁链的大小,而自感磁链的大小又与通过它的电流大小有关。因此,电感元件的定义为:如果一个二端元件在任一瞬间 t 的自感磁链 ψ_L 和电流 i_L 两者之间的关系可用 ψ_L 、 i_L 平面上一条曲线来表示,则此二端元件称为电感元件,简称电感。电感元件的符号见图 1-3-6。

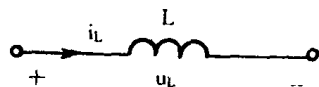


图 1-3-6 电感元件的符号

若电感元件的 ψ_L 和 i_L 的关系是 ψ_L 、 i_L 平面上通过原点的一条直线,如图 1-3-7 所示,则称为线性电感元件,直线的斜率是一正值常数 L ,称为电感量,即

$$L = \frac{\psi_L}{i_L} \quad (1-3-7)$$

其中 ψ_L 单位是韦伯(Wb), i_L 单位是安培(A), L 单位是亨利(H)。实用中的空芯线圈在一般情况下,可用线性电感元件作为它的电路模型。

若电感元件的 ψ_L 和 i_L 的关系不是 ψ_L 、 i_L 平面上通过原点的一条直线,则称非线性电感元件。铁磁性材料(主要指铁、镍、钴等物质及它们的合金)做成铁芯的线圈,其电路模型属于此列。

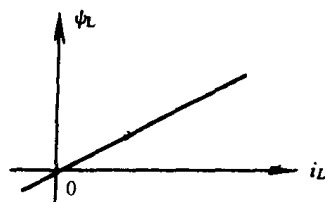


图 1-3-7 线性电感元件的特性

(一) 线性电感的伏安关系

若在电感元件中通过随时间变化的电流 i_L ,则磁链 ψ_L 也随时间变化。在关联方向时,根据法拉第电磁感应定律,则电感元件上电压为

$$u_L = \frac{d\psi_L}{dt}$$

将公式(1-3-7)代入上式,可得线性电感的伏安关系式

$$u_L = \frac{d(Li_L)}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-3-8)$$

公式(1-3-8)表明:任一时刻 t 电感电压 u_L 取决于电感电流的变化率 di_L/dt ,而与该时刻电感电流本身的数值无关。如电感电流为不随时间变化的直流电流,电流的变化率为零,此时

电感电压为零值,电感元件相当于短路。与此相反,若在某一时刻电感电流为零值,而电流的变化率不为零,此时电感电压并不为零。

由于电感电压取决于电感电流的变化率,也就是说电流在动态情况下才能有电感电压,故电感元件称为动态元件。

公式(1-3-8)还表明:若任一时刻电感电压皆为有限值,则电感电流不能跃变,而只能是连续变化。因为,电感电流若可以跃变,则 di_L/dt 就趋于无穷大,即 $u_L \rightarrow \infty$,显然是不可能的。

对公式(1-3-8)从 $-\infty$ 到 t 积分,便可得出电感元件的另一种伏安关系,即

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L d\tau \quad (1-3-9)$$

公式(1-3-9)表明:某一时刻 t 的电感电流,取决于电感电压从 $-\infty$ 到 t 的积分,即与电感电压过去的全部情况有关。这说明电感元件有记忆电压的作用,故又称为记忆元件。

公式(1-3-9)还可写为

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u_L d\tau + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L d\tau \\ &= i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L d\tau \end{aligned} \quad (1-3-10)$$

式中 t_0 为任意选定的初始时刻, $i_L(t_0)$ 是 t_0 时刻的电感电流,称为初始电流,它是电感电压从 $-\infty$ 到 t_0 的时间积分,反映了 t_0 之前电感电压的全部情况。

综上所述,电感元件是储能、动态、记忆元件。

〔例 1-3-2〕 如图 1-3-8(a)所示电路,电感电流 i_L 波形如图(b)示,绘出电感电压 u_L 的波形。

解 电感电流分段表达式为

$$i_L = \begin{cases} -2t & (\text{A}) & (0 \leq t \leq 1\text{S}) \\ 2t-4 & (\text{A}) & (1 \leq t \leq 3\text{S}) \\ -2t+8 & (\text{A}) & (3 \leq t \leq 4\text{S}) \\ 0 & (\text{A}) & (t \geq 4\text{S}) \end{cases}$$

按公式(1-3-8)分段计算得

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \begin{cases} -0.2 & (\text{V}) & (0 \leq t \leq 1\text{S}) \\ 0.2 & (\text{V}) & (1 \leq t \leq 3\text{S}) \\ -0.2 & (\text{V}) & (3 \leq t \leq 4\text{S}) \\ 0 & (\text{V}) & (t \geq 4\text{S}) \end{cases}$$

由此,可画出电感电压 u_L 的波形,见图 1-3-8(c)。

〔例 1-3-3〕 如图 1-3-9(a)所示电路,电感电压 u_L 波形如图(b)示,且 $i_L(0) = -1(\text{A})$,绘出电感电流 i_L 的波形。

分析 此题要求绘出电感电流 i_L 的波形,可有两种解法。一是先写出电感电压分段表达式,根据公式(1-3-10)积分运算,再由此画出电感电流波形,称为积分运算法。二是根据定积分的几何意义,它是曲

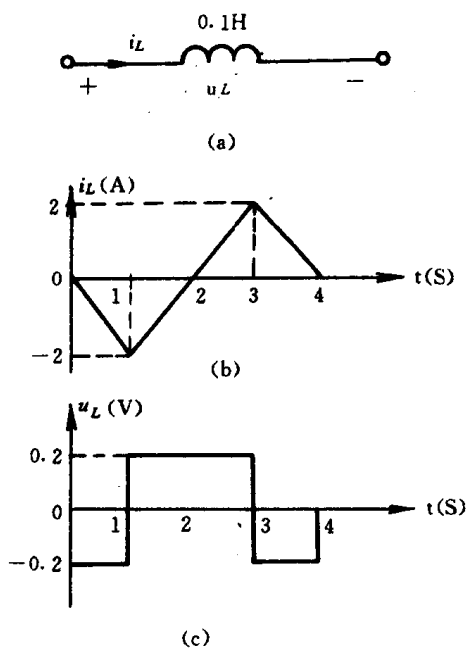


图 1-3-8