

● 高等学校教材

电工技术

(电工学 I)

主 编 田 葳

副主编 孟庆端



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

电工技术

Diangong Jishu

(电 工 学 I)

主 编 田 葳

副主编 孟庆端



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本教材为适应普通高校教学和电工技术发展新形势而编写,内容符合新世纪电工技术课程教学改革要求。

本教材内容主要包括电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、电路的瞬态分析、正弦交流电路、三相电路、铁心线圈与变压器、电动机、电气控制系统及 Multisim 7 在电工技术中的应用、常用电工元器件参考资料。

本教材内容丰富,选材合理、适当,符合普通高校的教学实际;理论分析从简,叙述简练易懂;突出实际应用,强调理论联系实际,注重学生能力的培养;引入电工技术领域的创新技术,扩大学生的知识面,有利于学生素质的全面提高。

本教材适合作为高等学校工科非电类专业本专科学生的电工技术教材,也可供工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术. 电工学. 1/田葳主编. —北京:高等教育出版社,2010.11

ISBN 978-7-04-030331-5

I. ①电… II. ①田… III. ①电工技术-高等学校-教材②电工学-高等学校-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 198318 号

策划编辑 金春英 责任编辑 魏芳 封面设计 于文燕 责任绘图 尹莉
版式设计 王艳红 责任校对 王超 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com http://www.landaco.com.cn
印 刷	煤炭工业出版社印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2010年11月第1版
印 张	15.5	印 次	2010年11月第1次印刷
字 数	370 000	定 价	23.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30331-00

前 言

电工技术是非电专业的一门重要的技术基础课,其目的是培养学生掌握和运用电工技术的基本理论、基础知识和基本技能,为今后学习本专业课程以及从事本专业的工作打下良好的基础。通过本课程的学习,可以使學生掌握电工技术的基本理论和基础知识,包括直流电路和交流电路以及一阶电路瞬态过程的分析方法;熟悉常用电工仪器仪表的应用;理解变压器、三相异步电动机等电气设备的结构和工作原理,并能够正确使用;了解常用控制电器的结构和工作原理,学会分析常见的电气控制线路,掌握电工与电气设备及其控制等相关技术;了解电工技术的最新发展和应用情况。

本教材是编者在长期调查研究的基础上,充分考虑到我国高等学校的实际情况,为方便普通工科高校非电类专业的电工技术课程教学而编写的。因此,本教材在编写过程中,力争突出以下特色。

1. 适当提高起点,更新内容,引入当前科技发展的新成果和新技术,体现科学的、先进的理念,培养学生的科学思维方式。例如没有介绍学生在物理学中学过的电阻串并联以及很少使用的刀开关和空气式时间继电器等内容,而把可编程控制器作为常用控制电器加以阐述等。

2. 理论分析从简,叙述简练,易读易懂。例如在叙述一阶电路的瞬态分析时,根据本课程的要求,摒弃了传统的叙述方法,而是直接推导全响应,既容易理解,又节约了时间。

3. 突出实际应用,强调理论联系实际,注重学生能力的培养。例如收音机的选台功能,就是典型的串联谐振电路的应用。

4. 注意例题和习题与有关章节内容的配套,并在例题和习题中尽量引用工程应用实例,使学生的学习贴近工程实际。例如在电路的瞬态分析中引入测量电感线圈电压的实例,说明在工程测量中,用电压表测量电感线圈的电压时,在开关断开前必须将电压表去掉,以防过电压击穿电压表。

5. 教材内容的编排和叙述尽量有利于先进教学手段的应用,特别是将 EDA 技术引入电工教学,既开阔了学生的视野,又在一定程度上解决了内容多学时少的矛盾。

6. 各部分内容均以培养学生逻辑思维能力、分析解决问题能力、实际动手能力、自学能力为出发点,注重学生能力的培养和综合素质的提高。本教材编写体现知识的连续性,对学生后续课程的学习有实际的帮助。

本教材可供高等学校工科非电类专业的本专科学学生使用,也可供工程技术人员学习和参考。本教材授课学时以 60~70 学时为宜。对于授课学时较少的专业,可选择其中部分内容进行教学。实验学时占总学时的 25%。

本教材由河南科技大学电工电子教研室组织编写,共分八章。第一、二章由栗素娟编写;第三、八章由孙向文编写;第四章由曲晓丽编写;第五章由李娜编写;第六、七章由田葳编写;附录部分由孟庆端编写;全书由田葳进行统稿。

本教材由江苏大学朱伟兴教授担任主审。主审认真审阅了书稿,并提出了许多宝贵建议。在本教材编写过程中,河南科技大学阎保定教授给予了认真的指导,并仔细地审阅了全部书稿,提出了建设性意见。本教材也得到了河南科技大学电工电子教研室同行的大力支持。在此谨向他们深表感谢。

在编写教材过程中,编者参考了部分优秀教材,谨对这些参考书的作者表示感谢。

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
于洛阳河南科技大学
2010.9

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真：(010)82086060

E - mail: dd@ hep. com. cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1	第六节 功率因数的提高	75
第一节 电路和电路模型	1	第七节 正弦交流电路的分析	78
第二节 电路元件	6	第八节 交流电路的频率特性	82
第三节 基尔霍夫定律	16	小结	91
第四节 电路中电位的概念及计算	19	习题	91
小结	22	第五章 三相电路	94
习题	22	第一节 三相电路	94
第二章 电路的分析方法	26	第二节 负载星形联结的三相电路	98
第一节 支路电流法	26	第三节 负载三角形联结的三相电路	102
第二节 弥尔曼定理	29	第四节 三相电路的功率	105
第三节 叠加定理	30	第五节 安全用电常识	107
第四节 戴维宁定理与诺顿定理	33	小结	110
第五节 含受控源的电阻电路的分析	36	习题	111
第六节 非线性电阻电路的分析	38	第六章 铁心线圈与变压器	113
小结	40	第一节 交、直流铁心线圈	113
习题	40	第二节 变压器	119
第三章 电路的瞬态分析	44	小结	132
第一节 概述	44	习题	132
第二节 初始值和稳态值的确定	45	第七章 电动机	134
第三节 一阶电路的瞬态分析	47	第一节 三相异步电动机的基本构造	134
第四节 一阶电路的三要素法	52	第二节 三相异步电动机的转动原理	135
第五节 瞬态过程的应用	54	第三节 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	140
小结	56	第四节 三相异步电动机的起动、调速和制动	143
习题	56	第五节 三相异步电动机的选用	148
第四章 正弦交流电路	59	第六节 单相异步电动机	151
第一节 正弦交流电的基本概念	59	第七节 直流电动机	152
第二节 正弦量的相量表示法	61	第八节 控制电机	155
第三节 电阻、电感和电容元件的交流电路	64	小结	157
第四节 RLC 串联的交流电路	69	习题	158
第五节 阻抗的串联和并联	72	第八章 电气控制系统	160

第一节	常用低压电器	160	第一节	Multisim 7 概述	197
第二节	可编程控制器	166	第二节	创建电路图的基本操作	200
第三节	继电器接触控制线路的基本 控制环节	174	第三节	电路基本分析方法	202
第四节	基于可编程控制器的电气 控制系统	180	第四节	Multisim 7 在电路分析中的应用 ...	214
小结	194	附录 II 常用电工元器件		
习题	194	参考资料		225
附录 I Multisim 7 在电工技术中 的应用		197	部分习题答案		234
			参考文献		238

第一章

电路的基本概念和基本定律

电路理论是学习电工技术的理论基础。本章主要讨论电路的基本概念和基本定律,主要包括电压、电流的参考方向、电路元件、基尔霍夫定律和欧姆定律、功率和电位的计算等。

第一节 电路和电路模型

一、电路的作用和组成部分

1. 电路的作用和组成部分

电路是电流流通的路径,是为了某种需要由电工设备或电路元件按一定方式组合而成的系统。

实际电路种类繁多,形式和结构也各不相同,按照电路的基本功能,可分为两大类:第一类实现电能的传输、分配与转换;第二类实现信号的变换、传递与处理。

第一类的典型电路是电力系统,其电路示意图如图 1-1 所示,包括电源、负载和中间环节三部分。

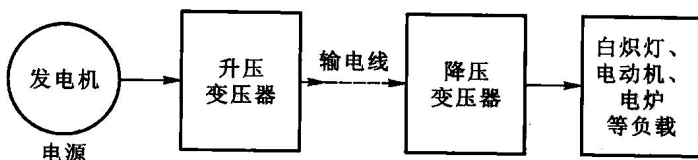


图 1-1 电力系统电路示意图

其中发电机是电源,在发电厂,它们把热能、水能、核能等转换为电能,供给用电设备。除发电机外,电池也是常用的电源。

白炽灯、电动机、电炉等都是负载,它们取用电能,分别把电能转换为光能、机械能、热能等。

变压器和输电线及开关等是中间环节,是连接电源和负载的部分,它们起传输、分配和控制电能的作用。

第二类的典型电路是如图 1-2 所示的扩音机电路,包括信



图 1-2 扩音机电路

号源、负载和信号传递处理电路(在这里起放大作用)三部分。

语音或音乐由话筒输入并变换为相应的电信号。由话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发音,因此中间要用放大器对电信号进行放大,而后经过电路传递到扬声器,把电信号还原为语音或音乐。

话筒是产生输入信号的设备,称为信号源。扬声器是接收和转换输出信号的设备,称为负载。放大器是放大输入信号并产生输出信号的电路,称为信号传递处理电路。

在电路理论中,电源或信号源提供的电压或电流称为激励,由激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。电路分析就是在已知电路结构和元件参数的条件下,分析电路的激励与响应之间的关系。

2. 电路模型

实际电路由一些按需要起不同作用的实际电路元件或器件组成,如发电机、变压器、电动机、晶体管、电池以及各种电阻器、电容器、电感器等,这些元件电磁性质较复杂,分析起来较为困难。如果将实际元件理想化,在一定条件下突出其主要的电磁性质,忽略掉其次要性质,把它近似地看作理想电路元件,则由这样的理想电路元件所组成的电路称为实际电路的电路模型,简称电路。它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。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。因此,学生一方面应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、理想电压源等。有了这些基础就可以为更多的实际电路建立模型,如用电流控制电流源来表示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,从而更好地掌握电路分析的方法。如果不加说明,本书中的电路均指电路模型。

手电筒实际上由电池、白炽灯、开关和筒体组成。如果将电池用理想的电源元件代替,其参数为电源的源电压 U_s 和内阻 R_0 ; 白炽灯主要具有消耗电能的性质,视为电阻元件,其参数为电阻 R ; 筒体用来连接电池和白炽灯,其电阻忽略不计,认为是理想导线; 开关用来控制电路的通断,则电路模型如图 1-3 所示。

本书涉及的理想电路元件(简称电路元件)主要有电阻元件、电容元件、电感元件和理想电压源、理想电流源等,每种理想电路元件都有精确的数学定义形式。这些元件可用相应的参数和规定的图形符号及文字符号来表示,并以一定的连接方式构成与实际电路对应的电路模型。

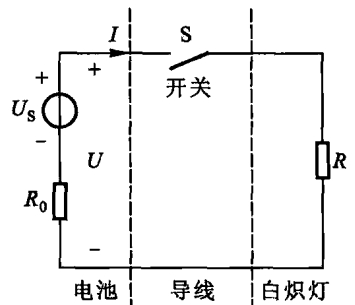


图 1-3 手电筒的电路模型

二、电流、电压的参考方向

电流、电压、电动势是描述电路的基本物理量。恒定的直流量用大写的斜体字母 I 、 U 、 E 表示; 随时间变化的瞬时电量用小写的斜体字母 i 、 u 、 e 表示。

1. 电压和电流的实际方向

带电粒子的规则运动形成电流。电流是客观存在的,电流的方向也是一种客观存在,这种客观存在的电流方向就是电流的实际方向。

物理学中规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的实际方向。同样,规定

电压的实际方向为由高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降低的方向;规定电动势的实际方向为在电源内部由低电位(“-”极性)端指向高电位(“+”极性)端,即为电位升高的方向。

如图 1-4 所示,电阻 R_3 的电流的实际方向是由 A 流向 B 还是由 B 流向 A? 利用物理学的内容很难判断。因此为了系统化地进行电路分析,必须引入参考方向的概念。

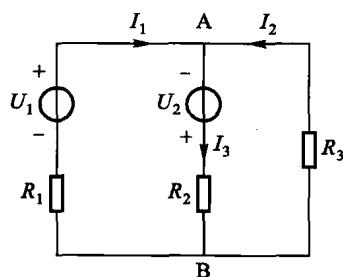


图 1-4 电流的参考方向图

2. 电压和电流的参考方向

电压和电流的参考方向就是任意标出的电压和电流的方向。

图 1-4 中所标的电压、电流的方向均为参考方向。

当按参考方向来分析电路时,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,负值则表示两者相反。

引入参考方向之后,电压、电流变成了具有正、负号的代数量,如果脱离参考方向,就没有任何意义了。一般来说,参考方向的假设是任意的。但应注意:一个电路一旦假设了参考方向,在电路的整个分析过程中就不允许再作改动。

3. 参考方向的表示方法

如图 1-5 所示,电流的参考方向可以用箭头表示,也可以用双下标表示。例如: I_{ab} 是指电流 I 的参考方向由 a 指向 b 。电压的参考方向除了可以用“+”、“-”极性表示外,也可以用双下标表示,例如 a 、 b 两点间的电压 U_{ab} ,它的参考方向由 a 指向 b ,也就是说 a 点的参考极性为“+”, b 点的参考极性为“-”。如果参考方向选为由 b 指向 a ,则电压为 U_{ba} , $U_{ab} = -U_{ba}$ 。电动势参考方向的表示方法与电压类同。



图 1-5 电压、电流参考方向的表示方法

我国法定的计量单位是以国际单位制(SI)为基础的。在国际单位制中,电流的单位为 A(安[培])。当每秒钟通过导体横截面的电荷为 1 C(库[仑])时,电流为 1 A。电流的较小单位是 mA(毫安)和 μ A(微安),电流的较大单位是 kA(千安)。

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}, 1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

在国际单位制中,电压的单位是 V(伏[特])。当电场力将 1 C 的电荷从一点移到另一点所做的功为 1 J(焦[耳])时,这两点间的电压为 1 V。电压的较小单位是 mV(毫伏)和 μ V(微伏),电压的较大单位是 kV(千伏)。电动势的单位也是 V(伏[特])。

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}, 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}, 1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

4. 参考方向的关联性及欧姆定律

当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时,称它们为关联参考方向,如图 1-6(a)所示。此时,欧姆定律表示为 $U=RI$ 。如果电压和电流都是时变量,则欧姆定律写成 $u=$

Ri 。电流、电压参考方向相反时,称它们为非关联参考方向,如图 1-6(b)所示。此时,欧姆定律表示为 $U = -RI$ 或 $u = -Ri$ 。在分析电路元件上的电流与电压关系时,一般采用关联参考方向。

这里应注意,表达式中有两套正负号,式前的正负号由电压和电流参考方向的关系确定,电压和电流本身还有正值和负值之分,它说明了实际方向与参考方向之间的关系。

例 1-1: 图 1-6(a)中, $U = 8 \text{ V}$, $I = 2 \text{ A}$, 求电阻 R ; 图 1-6(b)中 $U = 8 \text{ V}$, $I = -2 \text{ A}$, 求电阻 R 。

解: 图 1-6(a)中, $U = RI$, 则 $R = \frac{U}{I} = \frac{8}{2} \Omega = 4 \Omega$ 。

图 1-6(b)中, $U = -RI$, 则 $R = -\frac{U}{I} = -\frac{8}{-2} \Omega = 4 \Omega$ 。

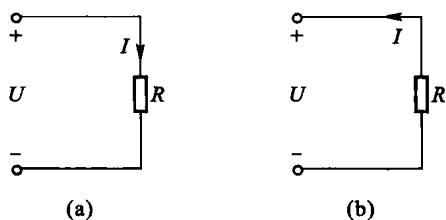


图 1-6 参考方向的关联性

三、元件的功率

物理学中介绍过,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,则瞬时功率写成 $p = ui$ 。国际单位制中,功率的单位为 W(瓦[特])。1 s 内转换 1 J 的能量,则功率为 1 W。

元件上的电功率有吸收和发出两种可能,用功率值的正负相区别,以吸收功率为正,发出功率为负。在进行电路分析时,电压和电流采用的都是参考方向,其中有关联参考方向,也有非关联参考方向。在这种情况下,应该如何计算功率呢? 可作如下处理。

① 当电压、电流取关联参考方向时

$$P = UI \text{ 或 } p = ui \quad (1-1)$$

② 当电压、电流取非关联参考方向时

$$P = -UI \text{ 或 } p = -ui \quad (1-2)$$

在此规定下,电压和电流的正负号应如实代入公式(这里表达式中也有两套正负号)。如果计算结果 $P > 0$ (或 $p > 0$), 表示元件吸收功率,它是负载(或起负载作用);反之,如果计算结果为 $P < 0$ (或 $p < 0$), 表示元件发出功率,它是电源。

例 1-2: 图 1-7 是一蓄电池电路,其中电压 $U_s = 20 \text{ V}$, 蓄电池电动势 $E = 12 \text{ V}$, $R = 4 \Omega$, 求此时的充电电流 I 和各元件的功率,并说明是吸收功率还是发出功率。

解: 首先选定电流的参考方向并标于图中,电路中的电流

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

电流为正值,说明电流参考方向与实际方向一致。

根据前面的规定,即根据式(1-1)和式(1-2)可得电源功率为

$$P_s = -U_s I = -20 \text{ V} \times 2 \text{ A} = -40 \text{ W} (< 0)$$

蓄电池功率为

$$P_E = EI = 12 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 24 \text{ W} (> 0)$$

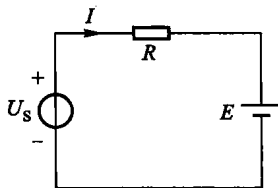


图 1-7 例 1-2 图

电阻 R 的功率为

$$P_R = U_R I = (U_s - E) I = 8 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 16 \text{ W} (>0)$$

计算结果表明,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。

由这个例子可以看出:电源发出的功率等于各个负载吸收的功率之和,即

$$40 \text{ W} = 24 \text{ W} + 16 \text{ W}$$

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

$$\sum P = 0 \text{ 或 } \sum p = 0 \quad (1-3)$$

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。

例 1-3: 在图 1-8 所示电路中,方块 3 表示未知元件。已知 $I_1 = 3 \text{ mA}$, $I_2 = 1 \text{ mA}$, $I_3 = -2 \text{ mA}$, $U_1 = 30 \text{ V}$, $U_2 = 80 \text{ V}$, $U_3 = 60 \text{ V}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$, 试说明电路中方块 3 及其他各元件是电源还是负载,并校验整个电路的功率是否平衡。

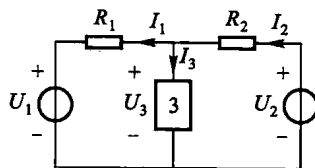


图 1-8 例 1-3 图

解: 电路中各元件的功率分别为

$$P_1 = U_1 I_1 = (30 \times 3) \text{ mW} = 90 \text{ mW} > 0, \text{ 为负载}$$

$$P_2 = -U_2 I_2 = -(80 \times 1) \text{ mW} = -80 \text{ mW} < 0, \text{ 为电源}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = [60 \times (-2)] \text{ mW} = -120 \text{ mW} < 0, \text{ 为电源}$$

$$P_{R1} = I_1^2 R_1 = (3^2 \times 10) \text{ mW} = 90 \text{ mW} > 0, \text{ 为负载}$$

$$P_{R2} = I_2^2 R_2 = (1^2 \times 20) \text{ mW} = 20 \text{ mW} > 0, \text{ 为负载}$$

各电源发出的功率

$$\sum P_{\text{发}} = P_2 + P_3 = (80 + 120) \text{ mW} = 200 \text{ mW}$$

各负载吸收的功率

$$\sum P_{\text{吸}} = P_1 + P_{R1} + P_{R2} = (90 + 90 + 20) \text{ mW} = 200 \text{ mW}$$

$$\sum P_{\text{发}} = \sum P_{\text{吸}}$$

所以,整个电路的功率是平衡的。

由上例可见,还可根据电压和电流的实际方向确定某一元件是电源还是负载,即:

若 U 、 I 实际方向相反,电流从“+”端流出,说明电路发出功率,是电源。

若 U 、 I 实际方向相同,电流从“-”端流出,说明电路吸收功率,是负载。

[练习与思考]

1-1-1 U_{ab} 是否表示 a 端的电位高于 b 端的电位?

1-1-2 图 1-9(a) 所示是一电池电路,当 $U = 3 \text{ V}$, $E = 5 \text{ V}$ 时,该电池作电源(供电)还是作负载(充电)用?

图 1-9(b) 也是一电池电路,当 $U = 5 \text{ V}$, $E = 3 \text{ V}$ 时,电池作电源还是负载用?

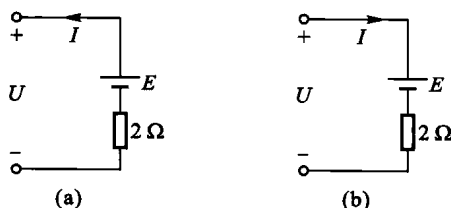


图 1-9 练习与思考题 1-1-2 图

1-1-3 某白炽灯的电压为 220 V,功率为 100 W,问该白炽灯电阻是多大? 此时电流是多大?

1-1-4 根据日常观察,白炽灯在深夜时要比黄昏时亮一些,为什么?

第二节 电路元件

一、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,也称为电路结构的基本模型。

元件的基本物理性质是指当它们接入电路时,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。从电路分析的角度来看,最关注的是元件的外部特性,而其中最主要的就是元件端钮上的伏安关系(亦称为元件两端的电压 u 与通过它的电流 i 的关系)和能量关系。

1. 电阻元件

把电能转换成热能的耗能元件称为电阻元件。电阻丝、白炽灯等能把电能转换成热能,具有耗能性质,所以用理想元件——电阻来表示这种性质。

电阻有线性电阻和非线性电阻之分。

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

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

含线性电阻元件的电路如图 1-10(a) 所示。

如果在直角坐标系中纵坐标以 V(伏[特])为单位表示电压,横坐标以 A(安[培])为单位表示电流,则可以绘出一条表示电压和电流之间关系的曲线,这是一条通过坐标原点的直线,称为线性电阻的伏安特性曲线,如图 1-10(b) 所示。

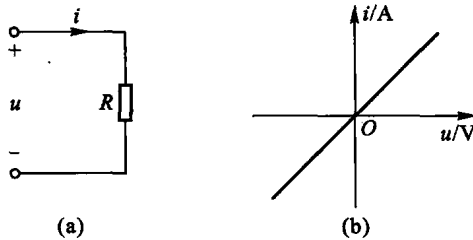


图 1-10 含线性电阻元件的电路及其伏安特性曲线

式(1-4)可改写为

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

称为电阻,单位为 Ω (欧[姆]),它具有对电流起阻碍作用的物理性质。电阻的倒数称为线性电阻元件的电导,用 G 表示,即 $G=1/R$ 。

电导的单位是 S(西[门子]),在电路理论中, R 、 G 也用来表示电阻元件的参数。

如果电阻不是一个常数,而是随着电压或电流变动,那么,这种电阻就称为非线性电阻。二极管就是一种典型的非线性电阻。非线性电阻两端的电压与其中电流的关系不遵循欧姆定律,一般不能用数学式表示,而是用电压和电流的关系曲线 $u=f(i)$ 或 $i=f(u)$ 来表示,称为伏安特性曲线,如图 1-11(a)所示。伏安特性曲线可以通过实验作出。图 1-11(b)为非线性电阻元件的电路符号。

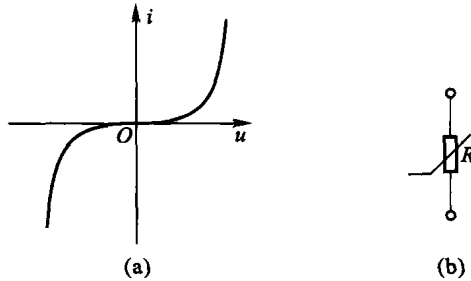


图 1-11 非线性电阻元件的伏安特性曲线及电路符号

实际上并没有绝对的线性电阻,如果能基本上遵循欧姆定律,就可以认为是线性的,可以用电路符号加以区别。

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,不可能再转换为电能回到电源。由此可见,电阻中的能量转换过程是不可逆的。电阻上的功率 $P= Ri^2 \geq 0$,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。设在 $t=0$ 时刻对电阻加电压,则电阻消耗的能量为

$$W = \int_0^t u i dt = \int_0^t R i^2 dt \geq 0 \quad (1-6)$$

上式表明电能全部消耗在电阻元件上,转换成热能。

如果电阻炉、白炽灯、电子电路中的电阻元件以及用导线(具有一定的电阻值)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电流过大,会因发热导致温度过高,电气设备就有被烧坏的危险。为了保证设备的工作温度不超过规定的容许值而能安全可靠地工作,厂家都在电气设备或元件的铭牌上或其他说明中标上电压、电流或功率的限额,例如一盏白炽灯的电压为 220 V,功率为 60 W。这些限额称为额定值,额定值是产品在给定的正常工作条件下正常运行的正常容许值。当所加电压超过额定值过多时,电气设备的绝缘材料可能被击穿。反之,如果电压和电流远低于其额定值,则不仅得不到正常合理的工作情况,而且也不能充分利用设备的能力。

因此,厂家在制定产品的额定值时,要全面考虑使用的经济性、可靠性以及产品的寿命等因素。在使用时应充分考虑额定数据。额定电压、额定电流和额定功率分别用 U_N 、 I_N 和 P_N 表示。

需要注意的是:电气设备使用时的电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值。

2. 电感元件

(1) 定义

储存磁场能量的元件称为电感元件。

当电感线圈中有电流流过时,线圈中就会建立磁场,具有储存磁场能量的性质,当内阻很小可以忽略不计时,可以用理想的储能元件——电感来表示这种性质,用 L 表示。在电路理论中, L 也用来表示电感元件的参数——电感量,简称为电感。

理想的电感线圈(内阻 $R=0$,无漏磁)如图1-12(a)所示。其上电压为 u ,当通过电流 i 时,将产生磁通 Φ ,电流通过 N 匝线圈产生磁通链 $\Psi=N\Phi$,并储存磁场能量,定义电感线圈电感

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} \quad (1-7)$$

L 又称自感系数或电感系数, L 的单位是 H(亨[利]),磁通 Φ 的单位是 Wb(韦[伯])。线圈的匝数 N 越多,其电感越大;线圈中单位电流产生的磁通越大,电感也越大。

若电感值 L 是个常数,与电感中电流的大小无关,则这种电感称为线性电感元件,空心线圈就是一种实际的线性电感元件。若电感 L 随电流 i 的大小而变化,则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元件,当不加说明时,“电感”一词就是指线性电感元件。

(2) 自感电动势与伏安关系

讨论电感元件的特性时,有关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、自感电动势 e_L 与磁通 Φ 之间的参考方向均符合右手螺旋定则,如图1-12所示, u 与 i 之间则取关联参考方向。

图1-12(b)给出了理想电感元件的图形符号。在电感的图形符号中不反映线圈的绕向,一切计算根据电压、电流、自感电动势的参考方向进行。

当电感元件中磁通 Φ 或电流 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1-12所规定的 u 、 i 和 e_L 的参考方向,则在电感元件中产生的感应电动势为

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

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 Ψ 也增大, Ψ 的变化速率 $d\Psi/dt$ 为正, e_L 为负,即感应电动势 e_L 的方向与电流 i 的方向相反,有阻碍电流增大的作用。

对于电感元件来说,按照图1-12所示参考方向,可写出

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

上式表明在任一时刻,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 成正比例,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,所以说电感是一种动态元件。当 di/dt 很大时, u 很大;当 di/dt 很小时, u 很小;当 di/dt

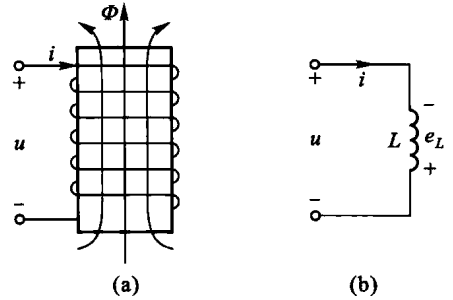


图 1-12 电感

dt 为零 (i 为直流电流情况) 时, u 为零, 电感元件相当于短路。

(3) 电感元件的储能

在电压 u 和电流 i 的关联参考方向下, 电感元件吸收的功率为

$$p = ui$$

电感元件吸收的磁场能量为其瞬时功率 p 对时间的积分, 即

$$\begin{aligned} W &= \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t \left[L \frac{di(\xi)}{d\xi} \right] i(\xi) d\xi \\ &= \int_{i(-\infty)}^{i(t)} Li(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(-\infty) \end{aligned}$$

电感元件吸收的能量以磁场能量形式储存在元件的磁场中。可以认为在 $t = -\infty$ 时, $i(-\infty) = 0$, 其磁场能量必为零, 则上式可以写为

$$W(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-10)$$

上式表明, 电感元件在任一时刻的储能, 只取决于该时刻电感元件的电流值而与电感元件的电压值无关。这就是说, 只要电感电流存在, 它就存在储能。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能, 即电感元件从电源取用能量, $\frac{1}{2} Li^2$ 就是电感元件中的磁场能量。当电流减小时, 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。可见, 电感元件不消耗能量, 它只是一种储能元件。

从时间 t_1 到 t_2 , 电感元件吸收的磁能为

$$W = L \int_{i(t_1)}^{i(t_2)} i(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t_2) - \frac{1}{2} Li^2(t_1) = W(t_2) - W(t_1) \quad (1-11)$$

例 1-4: 有一电感元件, $L = 0.2 \text{ H}$, 电流 i 如图 1-13(a) 所示, 求电感元件中产生的自感电动势 e_L 和两端电压 u , 并画出其波形。

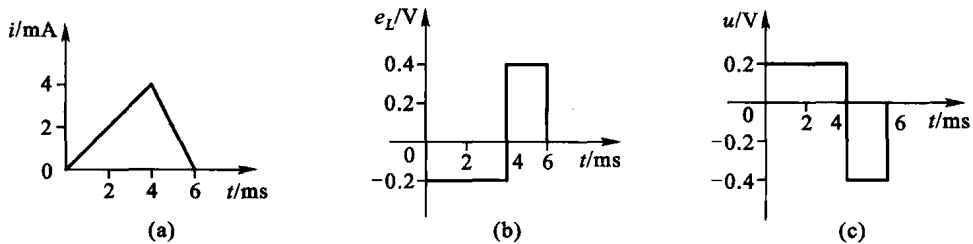


图 1-13 例 1-4 图

解: 当 $0 \leq t \leq 4 \text{ ms}$ 时

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

则

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -0.2 \text{ V}$$

所以