

机电一体化工程专业电工学之一

# 电路基础

欧阳璘 主编



航空工业出版社

机电一体化工程专业电工学之一

# 电路基础

欧阳璘 主编



航空工业出版社

1993

420

(京)新登字161号

### 内 容 提 要

本书系机电一体化工程专业电工学之一,由原航空航天工业部所属七院校合编,它是为了适应机电一体化专业的教学需要编写的。按60学时编写,共约38万字。

全书共分10章,即:电路模型和电路基本定律、电阻电路的分析方法、单相正弦交流电路、三相正弦交流电路、具有互感的电路、周期性非正弦电路、线性电路的暂态过程、线性电路的复频域分析法、频率响应、二端口网络。本书内容紧密结合应用,易于阅读。可作为机械类机电一体化专业或其它有关专业的教材,也可作为工程技术人员的参考书。



欧阳琛 主编

航空工业出版社出版发行  
(北京市安定门外小关东里14号)  
一 邮政编码: 100029—  
全国各地新华书店经售  
煤炭工业出版社印刷厂印刷

1994年1月第1版      1994年1月第1次印刷  
开本: 787×1092 1/16      印张: 15.375  
印数: 1—3 000      字数: 380千字

ISBN 7-80046-690-6/G·127

定价: 7.40元

## 前 言

本教材由原航空航天工业部所属七院校合编,是为了适应机电一体化专业的教学需要经多次教学实践后编成的。其内容的深度和广度介于电路分析基础和电工学的电路理论之间。全书共分十章,和电工学的电路内容相比,增加了互感电路、线性电路的复频域分析、频率响应及二端口网络四章。内容的取舍主要考虑后续课程的需要,同时考虑为继续学习打基础,并给各类不同专业以选择余地,适当予以扩充。

全书按60学时编写,若舍弃部分内容,也可作为一般非电专业或其它专业的教材。

在取材和讲述方面,本教材具有如下几个特点:

1. 贯彻了启发式教学思想。凡基本概念、基本方法都力求讲深讲透,而由这些基本概念和方法可以导出的内容,只作启发式讲解,有的通过思考题或习题由同学自己完成。例如功率因数提高一节,在教材中被删去了,由同学通过习题来得出有关功率因数提高的若干结论。

2. 内容紧密结合应用。例题尽可能结合后续课程的需要,例如,含受控源的线性电路的解,主要是用在模拟电子电路中,因此在本教材中舍去了一些单纯从建立概念、掌握方法出发而拟的一些题目,加进了电子线路中实际用到的一些电路作为例题,这样既不会失掉理论应用的一般性,又对学习电子线路及缩小电子线路教材的篇幅十分有利。

3. 讲解过程中注意了内容的组织,从问题的提出到结论,力求做到符合思维规律,文字表达力求通俗易懂,概念清晰,因此便于自学。

参加本书编写工作的有南京航空航天大学欧阳磷(第一、二、三章)、哈尔滨工业大学许定喜(第四、五章)、西北工业大学魏纯修(第六、七、十章)、南京航空航天大学张恩枯(第八、九章),由欧阳磷同志担任主编,负责全书的组织和定稿。南京航空航天大学贡成雄同志参加了部分思考题、习题的选编工作。在出版工作中,杨文华老师也给予了大力支持。

本书由北京航空航天大学傅维潭教授主审,初稿经北京航空航天大学崔建宗同志审阅,他们提出了许多宝贵意见。

本书在编写过程中,还得到了南京航空航天大学电工教研室许多同志的关心和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于机电一体化专业的教材目前尚无全国性审定大纲,因此本教材在内容取舍方面无疑还存在许多不足之处。此外,由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,望读者提出宝贵意见,以利修正。

编 者

1993年8月

# 目 录

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 绪论                      | (1)  |
| 第一章 电路模型和电路基本定律         | (4)  |
| 1.1 电路及电路模型             | (4)  |
| 1.2 电流和电压的参考方向          | (5)  |
| 1.3 电阻元件、欧姆定律           | (7)  |
| 1.4 电容元件                | (9)  |
| 1.5 电感元件                | (10) |
| 1.6 电压源和电流源             | (12) |
| 1.7 受控源                 | (14) |
| 1.8 基尔霍夫定律              | (16) |
| 1.9 电路中电位的计算            | (23) |
| 小结                      | (24) |
| 习题                      | (25) |
| 第二章 电阻电路的分析方法           | (28) |
| 2.1 线性电阻星形联接和三角形联接的等效互换 | (28) |
| 2.2 电压源、电流源的等效互换        | (31) |
| 2.3 支路电流法               | (35) |
| 2.4 回路法                 | (37) |
| 2.5 节点法                 | (40) |
| 2.6 叠加定理                | (43) |
| 2.7 戴维南定理和诺顿定理          | (46) |
| 2.8 非线性电路分析             | (52) |
| 小结                      | (55) |
| 习题                      | (55) |
| 第三章 单相正弦交流电路            | (60) |
| 3.1 正弦交流电的基本概念          | (60) |
| 3.2 正弦量的矢量和相量表示法        | (63) |
| 3.3 正弦激励下电阻、电感、电容电路的分析  | (67) |
| 3.4 电阻、电感、电容串联电路的分析     | (72) |
| 3.5 复导纳及其与复阻抗的等效互换      | (80) |
| 3.6 并联及串并联电路分析          | (82) |
| 3.7 复杂电路分析              | (85) |
| 3.8 交流电路中的谐振            | (86) |
| 小结                      | (91) |
| 习题                      | (92) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| <b>第四章 三相正弦交流电路</b>     | (97)  |
| 4.1 三相交流电源              | (97)  |
| 4.2 负载为星形联接的三相电路        | (100) |
| 4.3 负载为三角形联接的三相电路       | (104) |
| 4.4 三相电路的功率             | (107) |
| 小结                      | (109) |
| 习题                      | (109) |
| <b>第五章 具有互感的电路</b>      | (112) |
| 5.1 互感及互感电压             | (112) |
| 5.2 含互感电路的计算            | (115) |
| 5.3 空心变压器               | (118) |
| 5.4 理想变压器               | (119) |
| 小结                      | (121) |
| 习题                      | (122) |
| <b>第六章 周期性非正弦电路</b>     | (124) |
| 6.1 周期性非正弦量的分解          | (124) |
| 6.2 周期性非正弦电路的计算         | (129) |
| 6.3 周期性非正弦量的有效值和平均功率    | (132) |
| 小结                      | (137) |
| 习题                      | (137) |
| <b>第七章 线性电路的暂态过程</b>    | (140) |
| 7.1 暂态过程和换路定则           | (140) |
| 7.2 电压、电流初始值及稳态值的计算     | (141) |
| 7.3 直流激励一阶线性电路的暂态响应     | (142) |
| 7.4 正弦激励下的一阶电路          | (150) |
| 7.5 阶跃函数、序列方波激励下的一阶RC电路 | (152) |
| 7.6 冲激函数、冲激响应           | (159) |
| 7.7 卷积                  | (163) |
| 7.8 RLC 串联电路的零输入响应      | (165) |
| 小结                      | (169) |
| 习题                      | (170) |
| <b>第八章 线性电路的复频域分析法</b>  | (174) |
| 8.1 拉普拉斯变换              | (174) |
| 8.2 拉普拉斯变换的基本性质         | (175) |
| 8.3 推求拉普拉斯反变换的部分分式展开法   | (180) |
| 8.4 电路基本定律的运算形式         | (184) |
| 8.5 利用拉普拉斯变换分析线性电路      | (187) |
| 8.6 网络函数                | (190) |
| 小结                      | (194) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 习题.....                  | (195) |
| <b>第九章 频率响应</b> .....    | (199) |
| 9.1 一阶低通、高通网络的频率响应 ..... | (199) |
| 9.2 波特图 .....            | (201) |
| 小结.....                  | (210) |
| 习题.....                  | (210) |
| <b>第十章 二端口网络</b> .....   | (212) |
| 10.1 二端口网络.....          | (212) |
| 10.2 二端口网络的方程和参数.....    | (213) |
| 10.3 二端口网络的等效电路.....     | (222) |
| *10.4 二端口网络的转移函数.....    | (226) |
| *10.5 二端口网络的特性阻抗.....    | (229) |
| *10.6 复合二端口网络的联接.....    | (231) |
| 小结.....                  | (235) |
| 习题.....                  | (235) |
| <b>主要参考资料</b> .....      | (238) |

## 绪 论

从19世纪下半叶开始,电能获得了广泛的应用,迄今为止,其应用已经渗透到工业、农业、医疗卫生、文化生活等各个领域。例如,工业上的各种生产机械(如机床、轧钢机、鼓风机、水泵等);飞机机翼操纵以及其它许多机载设备;家用电器中的电冰箱、洗衣机、录音机磁带等都是用电动机驱动的。在加工工艺方面,电能的应用也很广泛,如电镀、电焊、高频淬火、电解加工、电火花加工等。生产过程中所涉及的一些物理量(如长度、速度、压力、温度、形变、水位、流量等),往往需要显示或自动调节。因此,测量成为现代工业生产必不可少的技术。而采用电的方法进行测量,即通过各种传感器将非电量转换成电信号,然后经过处理(放大、整形、数字化等),最后由仪表或数码管显示,最为简便。在需要自动调节的场合,则可以加入执行元件和反馈电路来实现。电子计算机的计算、控制功能为设备自动化、智能化提供了强有力的手段。数控机床、柔性加工系统、机器人以及一些高档的家用电器都离不开电子计算机。在现代物质文化生活中,电能的应用更是众所周知的,如电话、电影、电视、录音、录像、无线电广播、X射线透视等都是电能的应用。

电能之所以能获得如此广泛的应用,是因为它具有便于转换、便于输送、便于控制三大优点。电能可以方便地由水能(水力发电)、热能(火力发电)、原子能(原子能发电)转换而来。通过各种传感器也可以将其它形式的能量转换成电的信号(电能)。热电偶便是一例,它是将温度转换为电信号的一种传感器。同时,电能也可以方便地转换为其它形式的能,如通过电动机将电能转换为机械能;电灯、电炉则是由电能转换为光能、热能的设备;超声波发射头则是将电能转换为声能的器件。电能可以通过高压输电线输送到很远的地方而损失甚微,效率极高,且分配方便。数控机床是利用电能实现控制的典型例子,其运动将按照加工需要,通过事先编制好的程序,由计算机控制而自动完成。用红外线发射、接收或超声波发射、接收来实现遥控已经是很寻常的事了,电视、电灯、电风扇的遥控产品比比皆是。

电能应用的迅速发展无疑是与有关理论研究工作者的贡献分不开的。1785年,库仑(C·A. Coulomb)首先确定了电荷间的相互作用力,电荷的概念开始有了定量的意义。1820年,奥斯特(H. C. Oersted)发现了电流对磁针的作用,揭开了电学理论新的一页。同年,安培(A. M. Ampere)确定了通有电流的线圈的作用与磁铁相似,这就揭示了磁现象的本质。1827年,欧姆(G. S. Ohm)确立了反映电流、电压关系的欧姆定律。实际上,早在46年以前,英国的H. Cavendish就已经发现了这一关系。1831年,法拉第(M. Faraday)发现的电磁感应现象成为电工技术的重要理论基础。在电磁现象的理论及实用问题的研究上,楞次(З. Х. Ленц)起了巨大的作用,他在1833年确定感应电流方向的定则(楞次定则)。其后,他致力于电机理论的研究,并阐明了电机的可逆性原理。楞次在1844年还与英国物理学家焦耳(J. P. Joule)分别独立地确定了电流热效应定律(楞次-焦耳定律)。随着电工、电子技术的不断发展,在电器理论方面提出了许多新的课题,在这之后的几十年间,许多科学家做出了卓越的贡献,创建了许多电路定律的概念,如1845年的基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)定



律, 1853年的等效电源定理 (Helmholtz), 1833年的戴维南 (M.L.Thevenin) 定理以及以后的诺顿 (E.L.Norton) 定理, 1888年, 多里沃-多勃罗沃尔斯基 (М.О.Доливо-Добровольский) 创造了三相系统, 1894年, 复数理论应用于电路 (Steinmetz), 1999年的 $\Upsilon$ - $\Delta$ 变换 (Kennelly), 1904年的对偶原理 (Russel), 1911年的阻抗概念 (Heaviside), 1918年的电气滤波器概念 (Baltimore) 和对称分量法 (Fortescue), 1920年的理想变压器概念 (Campbell) 和滤波器实现 (Wagner), 1921年的四端网络和黑盒子概念 (Breisig), 1924年的电抗定理 (Foster), 1926年的瞬态响应概念 (Küpfmüller) 等。由于电路理论研究成果不断丰富以及科学技术飞速发展的需要, 于本世纪30年代, 电路理论作为一门独立的学科建立起来了。之后, 又有不少科学家为这门学科的发展做出了贡献。随着电子计算机的诞生以及一大批新型电路元件的涌现, 电路理论产生了巨大的变革。受控电源、网络拓扑等就是在这种形势下产生的。随着科学技术的不断发展, 许多新的课题又展现在电路理论研究者的面前。

电路理论不细致分析一些具体的电工设备, 只是就它们的模型探讨其共有的内部规律。具体说, 其任务是研究电路在激励 (电源、信号源) 作用下的响应 (电流、电压、功率等)。激励的种类是多样的, 有直流、正弦交流、周期性非正弦交流、指数时间函数等。研究不同激励下电路的响应, 将相应地采用不同的方法。如正弦激励下可采用相量图法或相量法; 周期性非正弦激励下可采用傅氏级数分解的方法; 复频域分析则是各种激励作用下的通用方法。在同一种激励下, 分析计算的方法也是多样的。不同的电路结构特点, 不同的求解需要, 可以选用适当的方法以便简化求解过程。响应也可分成稳态响应和暂态响应两种。稳态响应是电路条件稳定情况下的响应, 而暂态响应是指换路 (电源参数变化、电路结构改变等) 后一段时间内的响应。实际工作中, 这两种响应的分析都是十分重要的。

目前, 绝大多数的产品都是多门学科的综合成果。前面关于电能应用的例子无不如此。例如数控机床, 除机械部分以外, 计算机技术、电子技术、电力传动、测试技术、自动控制等电类学科都要涉及到。因此, 机械类专业和电的关系日益密切, 设计人员需要同时掌握机、电知识, 开阔思路, 设计出先进而又实用的产品。为适应这种需要, 培养机电兼顾的通用人才日益受到重视。近几年来各类机电一体化专业应运而生, 教学计划作了相应调整, 在原有教学计划的基础上, 增设了多门电类课程。电路基础、模拟电子电路、数字电路、电机及电力传动将作为主干课程列入计划。除此以外, 有的学校还开设了微机原理、自控原理、电气测试等课程。电路基础作为一门技术基础课, 其地位显得十分重要, 它是学习各门后续课程所必不可少的。同时, 对电路的分析能力将直接关系到实际工作中问题的分析和解决。电路知识掌握得愈好, 学习后续课程的困难就愈小, 对问题的理解就会愈深透, 解决实际问题的能力就愈强。因此, 需要倍加重视。

要学好这门课程, 首先要认识到电气事业和社会主义建设的关系。列宁曾经说过, “共产主义就是苏维埃政权加全国电气化”。可见, 电气事业在社会生产力的发展中起着何等重要的作用。我国社会主义建设的实践证明, 电工、电子技术水准是现代化的一个重要标志。要发展高技术产品, 离开了电工、电子技术是不可想象的。认识到这一点, 才会有强烈的进取心和责任感, 以坚强的毅力和决心学好这门课程。其次是对本门课程地位的重要性以及本门课程的任务、目的有深刻的了解, 真正从思想上重视起来。这样, 才能学得主动、积极。第三是掌握好物理学中的电磁学基础。本课程是以物理学中的基本电磁理论为基础, 按照工

程需要加以适当发展。在讲授中不可能过多地重复物理学中的内容。最后是要重视基本概念的树立，并熟练掌握基本方法及一些基本关系。电路问题的求解无非是这些基本方法和关系的灵活运用。只有“熟练”才可能“灵活”。独立思考、独立完成作业是达到这一目的的必经之路，从学习一开始就必须牢记这一点，其它捷径是没有的。基本概念的树立非常重要，否则就会缺乏分辨力而在解题过程中不能正确运用这些基本方法和关系，以致张冠李戴、大谬不然。

# 第一章 电路模型和电路基本定律

本章主要讨论电路的作用、模型及基本定律。电路的基本物理量已在物理学中详细论述过，所以本课程不再作过多重复，只是根据电路分析的需要，将其中某些内容作进一步说明。

## 1.1 电路及电路模型

简单地说，电路就是电流的通路，它是为了某种需要由某些电工设备或元件按一定方式组合起来的。

电路的形式是多种多样的，其作用之一是实现能量的传输和转换。体现这种作用的典型例子是电力系统，其电路示意图如图1-1(a)所示，其中包含电源、负载和中间环节三个组成部分。

发电机是电源，是供给电能的设备，它把热能、水的重力势能或原子能转换为电能。除此之外，在其它许多电路中，电池也是常用的电源，它把化学能转换为电能。

电灯、电动机、电炉等是取用电能的设备，统称之为负载，它们分别把电能转换为光能、机械能和热能。

变压器和输电线是中间环节，是联接电源和负载的部分，起着传输和分配电能的作用。

电路的另一种作用是传递和处理信号，体现这种作用的例子有扩音机，其电路示意图如图1-1(b)所示。

话筒将语言或音乐转换为相应的电压和电流，即电信号。这个信号是很微弱的，不足以推动扬声器发声。放大器将这个微弱的信号放大，即对信号进行处理。放大后的信号传递给扬声器，把电信号还原成语言或音乐。其音量较输入音量大，因此这种设备称为扩音机。

电路的例子是很多的，这里不一一列举。不论电能的传输和转换或者信号的传递和处理，都要涉及电流、电压和电动势等物理量。电路分析的任务就是要分析计算电路中的电压、电流以及它们所形成的电功率。

为了便于分析，用一些单一电磁性质的、理想化的电路元件或其组合来代替实际的电路元件，以反映实际元件的主要电磁特性。这种表示实际元件的理想电路元件称为实际元件的模型。由元件的模型通过各种不同的联接方式组合而成的电路称为电路模型。

例如，由电池通过电位器给灯泡供电的电路模型如图1-2所示。图中具有电动势 $E$ 的电压源及内阻 $R_0$ 构成电池的模型。一个实际电池的两极存在电压，通电时内部伴随有电能转换为热能的过程，所以用电压源及电阻元件 $R_0$ 来反映这两个特性。电位器和电灯用电阻元件作为模型，因为电阻元件反映了它们把电能转换为热能等的主要特性。实际上，通电的电位器和电灯周围多少有一些电场和磁场，但其作用极其微弱，可忽略不计，所以模型中没有反映这种特性。模型只是一种反映实际元件主要电磁特性的理想化电路元件。同样，当联接导线比较短的情况下，耗能很少，可认为电阻为零，因此电路模型中只用线段来表示这种理想导体。

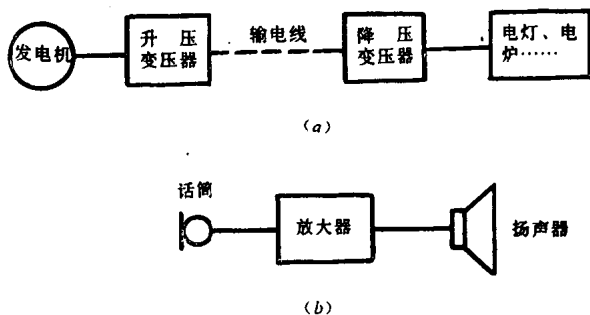


图 1-1

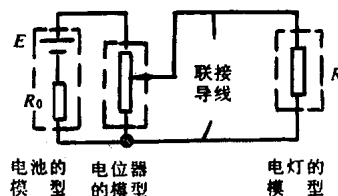


图 1-2

我们认为理想电路元件的电磁过程都是集中在元件内部进行的，因此在任何时刻，从具有两个端钮的理想元件的某一端流入的电流恒等于从另一端流出的电流，元件两端的电压完全由该元件中的电流及元件的参数所确定。这种元件被称为集总参数元件，简称集总元件。由集总元件联接起来的电路称为集总电路。在集总电路中，除集总元件以外，不再考虑其它的电磁过程。本书仅限于讨论集总电路\*。

## 1.2 电流和电压的参考方向

在物理学中，导线或元件中电流的实际方向习惯上是指正电荷净流量的方向。电路中某两点间电压的实际方向是从高电位点指向低电位点。电动势的实际方向则是在产生电动势的设备或元件中，从低电位点指向高电位点。

在电路分析时，往往知道其中的某些量，而另一些是待求的。例如电路中已知各电动势及元件的参数，要求各部分的电流。通过电路分析，不仅要求得各电流的大小，而且要确定它们的实际方向。如果电路比较简单，这一点是容易做到的，但是当电路比较复杂或者电流的实际方向还在不断改变，要判断它们的实际方向就困难了，因此要引入电流“参考方向”的概念。

参考方向实际上是人为假定的一个方向。当电流的实际方向和参考方向一致时，则认为电流是正值 ( $i > 0$ )，反之，则认为电流是负值 ( $i < 0$ )，所以参考方向又叫参考正方向或正方向。

作电路计算时，首先要假定各部分的电流方向，即要在电路图中标出各部分电流的参考方向，然后根据电路理论进行计算，如果算得  $i$  为正，则说明它的实际方向和假定的参考方向一致；反之，若  $i$  为负，则说明它的实际方向和假定的参考方向相反。这样，根据  $i$  的正负就可以判断电流的实际方向了。

当表示某一已知电流时，除给出电流的数值外（正或负），一般还应标明它的参考方向，这样才能根据数值的正或负说明它的实际方向。数值和电路图中的参考方向是相互依存的，脱离了参考方向，数值的正、负就毫无意义了。

上述关于参考方向的论述，对电压和电动势同样适用。

电流的参考方向一般用箭头表示。电压的参考方向可用箭头表示，也可用正 (+) 负

\* 具有分布参数的电路在电磁场课程中讨论。

(-) 极性表示, 还可用双下标表示, 如图1-3所示, 图 (b)、(c)、(d) 中电压参考方向的标法含意是一致的。

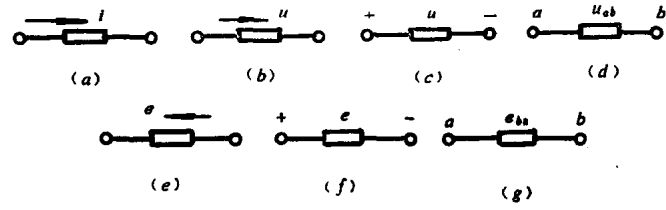


图 1-3

电动势参考方向的标法与电压的相同, 唯一应该注意的是, 电动势的参考方向是从参考“-”极性端指向参考“+”极性端, 如图 (e)、(f)、(g) 中所示。

在正弦交流电路中, 参考方向就显得更重要了。图1-4 (a) 表示电路中电流的参考方向, 图 (b) 表示电流随时间变化的波形, 前半周期中  $i$  的值为正, 意味着前半周期电流的实际方向和参考方向相同。后半周期则相反。如果将参考方向反过来标, 同一电流的变化波形应如图1-4(c)所示。这称电流的相位翻转了 $180^\circ$ , 这一概念在交流电路分析中常会遇到。

一段电路或一个元件上, 电压的参考方向和电流的参考方向可以独立地任意假定, 如果电流的参考方向和电压的参考方向一致, 如图1-5所示, 则称为关联标法。反之, 称为非关联标法。不同标法将给它们之间的关系式带来差异, 这在以后的分析中将会看到。

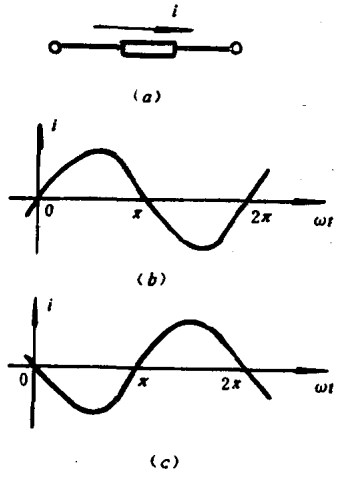


图 1-4

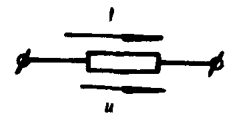
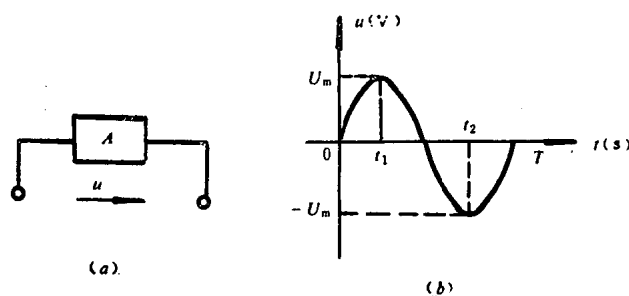


图 1-5

顺便指出, 电压、电流、电动势可以是直流 (其值不随时间变化), 也可以是随时间按任意规律变化的。对直流电压、电流、电动势分别用大写字母  $U$ 、 $I$ 、 $E$  表示, 而随时间变化的, 则用小写字母  $u$ 、 $i$ 、 $e$  表示。

**思考题**

1-2-1 思考题图1-2-1中, 已知方框A两端电压  $u$  的波形如图 (b) 所示 (方框表示由某一组电路元件组成的部分), 试分别标出时刻  $t_1$  和  $t_2$  方框A两端电压  $u$  的实际极性。



思考题图 1-2-1

### 1.3 电阻元件、欧姆定律

前已述及,在电路分析中,实际元件要用足以反映其主要电磁性质的一些理想元件替代。电阻元件是常用的理想元件之一。

电阻元件可分为线性的和非线性的两种。

线性电阻元件在电路中的图形符号如图1-6 (a) 所示,图中电压和电流的参考方向采用关联标法。将一个元件两端的电压和元件中的电流之间的关系用图形表示,称为该元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线,即元件上的电压和元件中的电流成正比,见图1-6 (b)。也就是说,线性电阻元件的电压电流关系是服从欧姆定律的,可表示为

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

式中  $R$  为比例系数,称为元件的电阻,是电阻元件的电气参数。

令  $G = \frac{1}{R}$ , 则式 (1-1) 变成

$$i = Gu \quad (1-2)$$

$G$  称为电阻元件的电导。

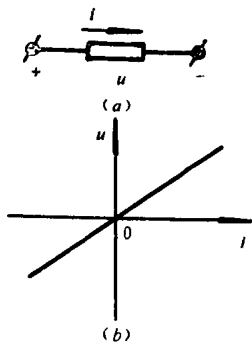


图 1-6

电阻的单位为欧姆 ( $\Omega$ ), 简称欧。电导的单位为西门子 (S), 简称西。

如果电阻元件上电压的参考方向与电流的参考方向标向相反 (非关联标法), 如图1-7 所示, 则欧姆定律应写成:

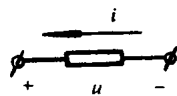


图 1-7

$$u = -Ri \text{ 或 } i = -Gu$$

式中出现了一个负号。因为在电阻元件中, 电压的实际方向和电流的实际方向总是一致的,

在图1-7所标定的参考方向下, 若 $u > 0$ , 必有 $i < 0$ ; 若 $u < 0$ , 必有 $i > 0$ , 所以欧姆定律表达式中必须引入一个负号。

电阻元件中某一瞬时的电流值, 相应于同一瞬时的电压值, 与这一瞬时以前的情况没有关系, 所以电阻是一种无记忆元件。

电阻上电压的实际方向和电阻中电流的实际方向总是相同的, 表明在电阻中是电场力推动电荷做功, 是消耗电能的, 所以电阻是耗能元件。它将电能转换为其他形式的能量。

从全过程来看, 电阻只能吸收电能, 不能提供电能。具有这种性质的元件, 称为无源元件。电阻属于无源元件。

在关联参考方向下, 任何时刻电阻上消耗的功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-3)$$

如果电阻元件吸收的电能只转换为热能, 则在 $t_0$ 到 $t$ 的时间内, 电阻中产生的热量为

$$Q = 0.239 \int_{t_0}^t i^2 R dt \text{ (卡)} \quad (1-4)$$

此即焦耳-楞次定律的表达式。

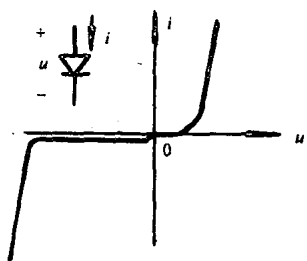


图 1-8

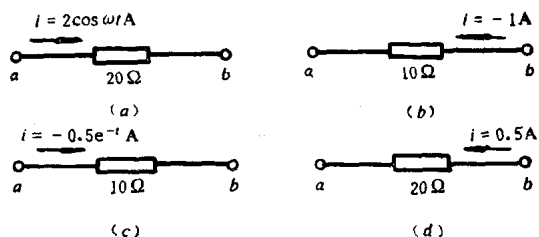
与线性电阻元件不同, 非线性电阻元件的伏安特性曲线不是通过坐标原点的直线, 所以其伏安关系不服从欧姆定律。图1-8给出了某二极管的伏安特性曲线。显然, 二极管是非线性电阻元件。位于第一象限的曲线称为二极管的正向特性曲线; 位于第三象限的称为反向特性曲线。晶体三极管的发射结和集电结和晶体二极管的结构是相同的, 因此和晶体二极管具有相似的特性。

实际上, 电阻器、电炉等元件的伏安特性或多或少都是非线性的, 但在一定的工作电流范围内, 把它们的伏安特性近似为一直线按线性电阻元件处理, 可以得出令人满意的结果。

实际的电阻器上, 除标明阻值外, 还标有额定功率。例如 $510\Omega$ 、 $5W$ 。额定功率是指电阻器工作时容许消耗的最大功率, 当实际消耗的功率超过其额定值时, 将使电阻器过热而烧毁。因此在选用或使用电阻器时应特别注意。根据阻值和额定功率值, 可以由式(1-3)算得电阻器的额定电压和额定电流, 即保证电阻器上消耗的功率不大于额定功率时其两端容许施加的最大电压或其中容许通过的最大电流。

### 思考题

1-3-1 求图示各电阻两端的电压 $u_{ab}$ 和消耗的功率。



思考题图 1-3-1

1-3-2 在电路里需要一个能通过0.3A的100Ω的电阻, 现有下列电阻器: 100Ω、5W; 100Ω、7.5W; 100Ω、10W, 试问应选用哪个电阻器? 这时该电阻器消耗的功率是多少?

## 1.4 电容元件

工程中, 电容器应用极为广泛。电容器虽然品种和规格很多, 但就其构成原理来说, 都是由两块金属极板之间隔以介质(如云母、绝缘纸、电解质等)所组成。当在电容器两极板间加上电压以后, 极板上就分别聚集起等量异号电荷, 于是在介质中建立起电场、储存电场能量。所以电容器是一种能够储存电场能量的元件。此外, 当电容器上电压变化时, 在介质中也往往引起一定的功率损耗, 称为介质损耗。并且介质不可能完全绝缘, 多少还有一些漏电流。质量优良的电容器的介质损耗和漏电流都很微弱, 可以忽略不计。这样, 就可以用一个只储存电场能量的理想元件——电容元件作为它的模型。

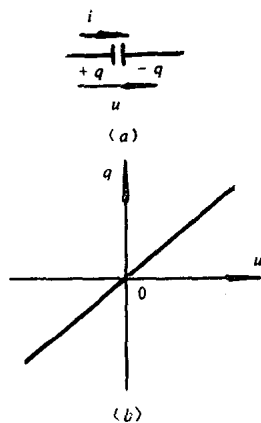


图 1-9

线性电容元件的图形符号及其库伏特性分别示于图1-9 (a) 和 (b)。图 (a) 中标有电压  $u$  的参考方向,  $+q$  和  $-q$  是电容器正极板和负极板上的电荷量,  $q$  是代数量, 当  $u$  为正时,  $q$  为正; 当  $u$  为负时,  $q$  亦为负。任何时刻  $q$ 、 $u$  之间的关系可表示为

$$q = Cu \quad (1-5)$$

式中  $C$  作为电容元件的参数, 称为该电容元件的电容, 是一个正实常数[参看图1-9 (b)]。当  $q=1$  库仑 (C)、 $u=1$  伏特 (V) 时,  $c=1$  法拉, 法拉简称法, 用  $F$  表示。实际电容器的电容往往比 1 法拉小得多, 因此常采用微法 ( $1\mu F=10^{-6}F$ ) 和皮法 ( $1pF=10^{-12}F$ ) 作为电容的单位。

当极板间电压  $u$  变化时, 极板上的电荷量  $q$  也随着改变, 于是电容器电路中出现电流, 因为在  $dt$  时间内极板上的电荷增量  $dq$  与通过导线截面的电荷量相等, 所以在图示的参考方向下, 有

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明, 电容电路中的电流与该时刻电压的变化率成正比。当电压不随时间变化时,  $i=0$ , 相当于电容电路开断, 所以电容元件有隔断直流 (简称隔直) 的作用。

根据式1-6及图1-9 (a) 中标定的参考方向可以确定电流  $i$  的实际方向, 只要算得  $\frac{du}{dt}$   $>0$ , 则  $i>0$ ;  $\frac{du}{dt}<0$ , 则  $i<0$ 。例如,  $u>0$  且  $\frac{du}{dt}>0$ , 表明正极板上正电荷增多, 电容元件被充电, 由式 (1-6) 算得  $i>0$  是符合实际的; 又如  $u<0$  且  $\frac{du}{dt}<0$ , 表明负极板上正电荷增多, 电容元件被反向充电, 由式 (1-6) 算得  $i<0$  也是符合实际的, 等等。



由式(1-6)可导出任一时刻 $t$ 电容两端电压的表达式:

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + u_0$$

式中 $u_0$ 表示 $t=0$ 时刻电容两端的电压值。

由物理学知道, 电容元件在任何时刻 $t$ 所储存的电场能量 $w_C(t)$ 为

$$w_C(t) = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-7)$$

与电容两端电压 $u$ 的平方成正比。当 $|u|$ 增加, 电容器吸收电能转换为电容器中的电场能, 当 $|u|$ 减小, 电容器中的电场能量释放出来, 传输给电路的其它部分。

电容元件不消耗能量, 只是一个储能元件。同时, 电容元件也不会释放出多于它所吸收或储存的能量, 因此它又是一个无源元件。

应该指出, 因为实际电容器的介质中有少量漏电流, 当其端电压变化时还有少量介质损耗, 所以通电时仍然要消耗少量电能。

实际的电容器上除标明电容值外, 还标有额定电压值, 它是保证电容器不被击穿而容许在电容器两端施加的最高电压。选用电容器时应注意, 电容器实际承受的电压值不应大于它的额定电压。

电容器是为了获得一定大小的电容而特意制成的元件, 但是电容效应在许多场合都存在。例如晶体二极管的内部存在结电容; 晶体三极管内部存在发射结和集电结电容; 变压器的原、副绕组间存在电容; 一个线圈的各匝之间也存在电容等等。在某些场合这些电容的效应不显著, 因而可以忽略, 但在另一些场合就不能忽略了。例如晶体管的电容效应, 在低频情况下可以不考虑, 但在高频情况下就不能不考虑。

### 思考题

1-4-1 已知电容器的容量为 $0.5\mu\text{F}$ , 两端电压为 $u(t) = 150(1 - e^{-2t})\text{V}$ , 试求:

- (1) 流过电容的电流 $i(t)$ ;
- (2) 当 $t = 0.05\text{s}$ 时, 电容储存的电场能量。

## 1.5 电感元件

工程中, 电感线圈的应用也很多。当线圈通电流时, 线圈中就会产生磁场, 所以电感线圈是一种能够储存磁场能量的元件。如果电感线圈是空心线圈, 并且假设线圈导线的电阻可以忽略, 则可以用一个储存磁场能量的理想元件——电感元件作为它的模型。

线性电感元件的图形符号及其韦安特性分别示于图1-10(a)和(b)。线圈中的自感磁通 $\Phi_L$ 或自感磁通链 $\Psi_L$  ( $\Psi_L = N\Phi_L$ ,  $N$ 为线圈匝数)的参考方向与电流 $i$ 的参考方向之间符合右螺旋法则。在这种关联的参考方向下, 任何时刻, 自感磁链 $\Psi_L$ 与电流 $i$ 之间的关系可表示为

$$\Psi_L = L i \quad (1-8)$$

式中 $L$ 作为电感元件的参数, 称为该元件的电感或自感, 为一正实常数[参看图1-10(b)], 当电流为1安培(A), 产生的磁链为1韦伯(Wb), 则电感为1亨利(H), 简称亨。有时还采用毫亨( $\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$ )和微亨( $\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$ )作为自感的单位。

当电流 $i$ 变化时, 线圈中将产生自感电动势 $e_L$ , 假定其参考方向和电流的参考方向一致, 即与磁通的参考方向之间符合右螺旋法则(见图1-10(a)), 则自感电动势 $e_L$ 可表示为