



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电路分析 及磁路

韩肖宁 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电路分析 及磁路

主 编 韩肖宁
编 写 霍 龙 李瑞珍 李巧娟
主 审 刘耀年 唐 巍



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

本书共分十章, 主要内容包括: 电路模型和电路定律, 电阻电路的等效变换, 电路分析的网络方程法和电路定理, 正弦稳态电路的分析, 谐振和互感电路, 三相电路, 动态电路的时域分析, 动态电路的复频域分析, 双口网络, 磁路和铁心线圈等。

本书主要作为高等职业技术学院、高等专科学校和其他高等学校教材; 也可作为电力行业职业培训、培养技能型紧缺人才的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析及磁路 / 韩肖宁主编. —北京: 中国电力出版社, 2006
教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-4221-6

I. 电… II. 韩… III. ①电路分析-高等学校: 技术学校-教材
②磁路-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 031250 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 5 月第一版 2006 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 438 千字

印数 0001—3000 册 定价 26.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的,并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审,又列为全国电力职业教育规划教材,作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书的内容选编和编写特点为:

(1) 本书以线性电路的电阻电路、正弦稳态电路和电路的动态过程分析为主,介绍了电路分析中的基本概念、基本定律和基本分析方法。叙述通俗易懂,文字简练,便于学生学习理解。

(2) 在本书的编写过程中尽量降低对高等数学应用的要求。如将非正弦电流电路的分析放在了第四章正弦稳态电路的分析中,作为叠加原理的应用介绍给学生,而傅立叶级数的应用仅以谐波的概念给出。又如线性电路的动态分析以一阶电路三要素法求解的介绍为主,避免了微分方程的求解运算,便于学生掌握。

(3) 电路课程的学和教是密不可分的,学生要想学好这门课程就要认真掌握好基本概念和基本分析方法,同时应该做一定量的习题。本书在每一章的后面都附有本章复习提纲,它是以表格或填空的形式给出,需要学生亲自填写。本章复习提纲概括总结了该章的全部基本概念、常用公式和基本分析方法。同时本书还编有大量的习题,并附有习题答案。

(4) 本教材中还编入了一些打“*”号的内容,便于教师根据专业课要求选用。

本教材的编写大纲由太原电力高等专科学校韩肖宁副教授起草,太原电力高等专科学校李崇贺教授提出了指导意见。本教材第一、二、七章由韩肖宁编写,第三、八、九章由沈阳工程学院(原沈阳电力高等专科学校)霍龙编写,第四、五章由太原电力高等专科学校李瑞珍编写,第六、十章由太原电力高等专科学校李巧娟编写。全书由韩肖宁主编。

本教材承蒙东北电力大学刘耀年教授和中国农业大学唐巍教授仔细审阅,并提出了许多宝贵意见。本教材在编写过程中得到太原电力高等专科学校副校长石生教授的关心和指导,在此一并致以衷心的感谢。

虽然在本书的编写过程中,相关人员都付出了大量的劳动,但由于编者学识水平有限,难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2005.10

目 录

前言

第一章 电路模型和电路定律	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路中的基本物理量	3
第三节 电路元件	6
第四节 基尔霍夫定律	15
本章复习提纲	18
习题一	19
习题一答案	22
第二章 电阻电路的等效变换	23
第一节 等效电路和等效电阻的一般概念	23
第二节 无源电阻电路的等效变换	24
第三节 电源的等效变换	32
第四节 含受控源电路的等效电阻	34
本章复习提纲	36
习题二	37
习题二答案	40
第三章 电路分析的网络方程法和电路定理	41
第一节 支路电流法	41
第二节 节点分析法	44
第三节 网孔分析法	48
第四节 叠加定理	51
第五节 替代定理	55
第六节 戴维南定理和诺顿定理	56
本章复习提纲	62
习题三	64
习题三答案	70
第四章 正弦稳态电路的分析	71
第一节 正弦量	71
第二节 正弦量的相量表示	76
第三节 电路基本定律的相量形式	80
第四节 阻抗与导纳	86
第五节 正弦稳态电路的相量图分析	97

第六节 正弦稳态电路的功率	102
第七节 正弦稳态电路的相量法分析	110
*第八节 最大功率传输	113
第九节 正弦稳态响应的叠加	115
本章复习提纲	119
习题四	120
习题四答案	124
第五章 谐振与互感电路	126
第一节 网络函数及其频率特性	126
第二节 谐振电路	131
第三节 含互感电路的分析	139
第四节 理想变压器	148
本章复习提纲	151
习题五	152
习题五答案	155
第六章 三相电路	156
第一节 三相电路	156
第二节 对称三相电路计算	161
第三节 不对称三相电路特点及分析	163
第四节 三相电路的功率	166
第五节 对称三相电路中的高次谐波	170
本章复习提纲	174
习题六	175
习题六答案	176
第七章 动态电路的时域分析	178
第一节 电路的动态过程	178
第二节 一阶电路解法通论(三要素公式)	179
第三节 电路的初始条件	183
第四节 一阶电路的时间常数及稳态分量	186
第五节 一阶电路的响应	189
第六节 一阶电路的阶跃响应	195
本章复习提纲	198
习题七	199
习题七答案	203
*第八章 动态电路的复频域分析	205
第一节 拉普拉斯变换及其基本性质	205
第二节 拉普拉斯反变换的部分分式展开	211
第三节 线性电路的复频域电路模型	215
第四节 线性电路的复频域分析	219

本章复习提纲	224
习题八	225
习题八答案	230
第九章 双口网络	232
第一节 双口网络的方程和参数	232
第二节 双口网络的等效电路	245
第三节 双口网络的级联	248
第四节 含双口网络的电路计算	250
本章复习提纲	253
习题九	254
习题九答案	258
第十章 磁路和铁心线圈	260
第一节 磁场的主要物理量及性质	260
第二节 铁磁物质的磁化曲线	262
第三节 磁路及磁路定律	265
第四节 恒定磁通磁路的计算	267
第五节 交流铁心线圈	272
本章复习提纲	277
习题十	278
习题十答案	279
参考文献	280

电路模型和电路定律

【主要内容】

本章介绍的主要概念有：电路模型，电压、电流及其参考方向，电功率及计算方法。还将介绍电阻、电容、电感、独立电源和受控源等电路元件。最后介绍基尔霍夫定律，该定律是集总参数电路分析的基础。

第一节 电路和电路模型

电在各个领域中具有广泛的应用，它是通过电路发挥作用的。电流的通路称为电路。实际电路是由电气元件或设备按一定方式连接起来的物理实体。电路的种类很多，其作用有两点：一是实现电能的传输和转换，如电力系统；二是实现电信号的传输、处理和存储，如广播电视系统、通信系统等。图 1-1 (a) 所示为一日光灯电路，是一种常见的实际电路。

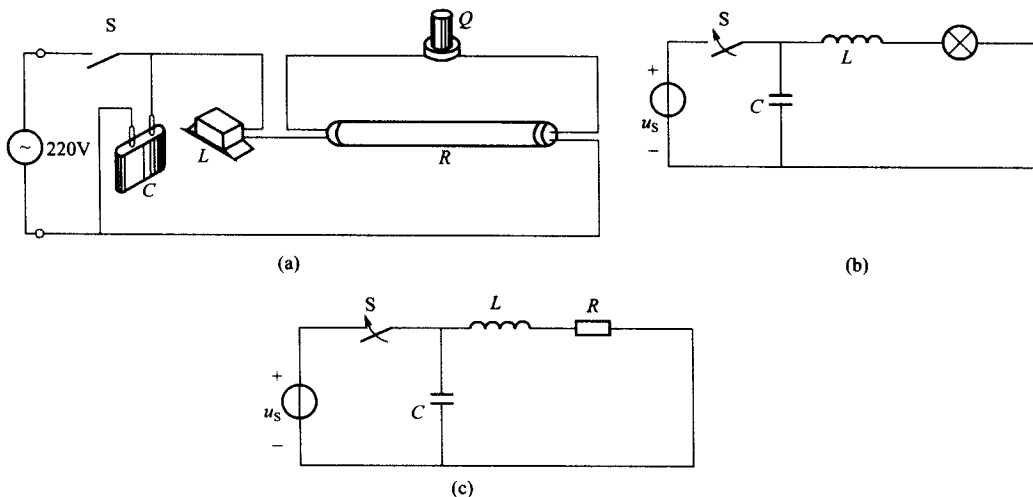


图 1-1 日光灯电路

(a) 实际电路；(b) 电原理图；(c) 电路模型 (日光灯电路正常工作时)

电路的分类方法很多，根据电路的几何尺寸 l 和工作频率所对应的波长 λ 的关系可分为集总参数电路和分布参数电路。满足 $l \leq \lambda$ 条件的电路为前者，反之为后者。大部分电路是集总参数电路，其特点是电路中的电压电流与电路的几何尺寸及空间位置无关。本书只讨论集总参数电路。

表 1-1 列出了我国国家标准的部分图形符号。用这些符号可画出实际电路的电原理图。例如图 1-1 (b) 是用电气图形符号表示的日光灯电路的电原理图。

表 1-1

部分电气图用图形符号
(根据国家标准 GB 4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈, 绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		运算放大器		直流发电机	
电压表		电池		直流电动机	

实际电路的研究方法有测量的方法和理论分析计算的方法。本书主要介绍电路理论的入门知识, 该理论研究的对象是将实际电路抽象出的电路模型。电路模型是由理想电路元件组成的电路。它是实际电路的数学模型。理想电路元件是具有某种确定单一电磁性质的假想元件。它是实际电气元件主要电磁性质的科学抽象。例如定义理想电阻元件是一种只消耗电能(转换为热能、光能及其他形式能量)的元件, 对只储存电场能量的元件定义为电容元件, 对只储存磁场能量的元件定义为电感元件。理想电路元件分为理想电源元件、理想负荷元件和理想耦合元件。它们都有精确的数学定义。实际电路或实际的电气设备, 甚至实际的电气器件都可以通过理想电路元件或理想电路元件的组合即电路模型来模拟。通过电路理论可以设计出不同特性, 且性能良好的各种电路。表 1-2 为部分电路元件的图形符号。图 1-1(c) 为日光灯电路的电路模型。

表 1-2

部分电路元件的图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
独立电流源		理想导线		电容	
独立电压源		连接的导线		电感	
受控电流源		电位参考点		理想变压器 耦合电感	
受控电压源		理想开关		回转器	
电阻		开路		理想运放	
可变电阻		短路		二端元件	
非线性电阻		理想二极管		非线性电感	

需要指出的是, 同一实际电路精度要求不同或实际工作条件不同时, 其电路模型是不同的。

第二节 电路中的基本物理量

在电路分析中, 常常用物理量对电路特性进行描述。常用的物理量有电流、电压、功率和能量。

一、电流及其参考方向

电流是电荷的定向移动。电流的大小用电流强度表示。电流强度(简称电流)在数值上等于单位时间内穿过电路段任一截面的电荷量, 表示为

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

式中: q 为电荷, C(库[仑]); t 为时间, s; i 为电流, A(安[培])。以上均为国际单位制(SI)。

电流的辅助单位有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等, 它们的关系是

$$1\text{kA}=10^3\text{A} \quad 1\text{A}=10^3\text{mA} \quad 1\text{mA}=10^3\mu\text{A}$$

在电路理论中, 电流的方向有实际方向和参考方向两种。习惯上规定正电荷的移动方向为电流的实际方向。但在电路分析中, 往往无法确定各电流的实际方向, 主要原因是: 其一由于电路结构复杂, 很难判断出每段电路段电流的实际方向; 其二当电流的量值和实际方向随时间变化时, 无法在电路图上标出适合于任何时刻的电流实际方向。因此提出参考方向的概念, 参考方向可以任意选定, 在电路图中用箭头表示。规定: 若电流实际方向和参考方向一致时, 电流为正值; 若两者相反, 电流为负值。在分析电路时, 先人为选定各电流的参考方向, 用箭头标示在电路图上, 以该参考方向为依据, 进行分析计算, 其结果 $i > 0$, 表示电流实际方向与参考方向一致; $i < 0$, 表示电流实际方向与参考方向相反。显然, 在未标示参考方向的情况下, 电流的正负是无意义的。

例 1-1 图 1-2 中所示为一电路段, 当电流 i 参考方向如图 1-2(a) 所示时, $i=5\text{A}$, 指出 i 的实际方向。若改变 i 的参考方向如图 1-2(b) 所示, 如何表示 i ?

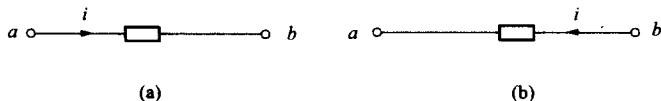


图 1-2 例 1-1 图

(a) i 参考方向由 a 至 b ; (b) i 参考方向由 b 至 a

解: (1) 图(a)中, $i=5\text{A} > 0$, 表示 i 的实际方向与其参考方向相同, 即实际方向为从 a 流向 b 。

(2) 图(b)中, i 的参考方向从 b 指向 a , 由于 i 的实际方向为 a 流向 b , 两者方向相反, 所以 i 应表示为

$$i = -5\text{A}$$

在本书中, 不特别指明时, 标示的电流方向均为参考方向。

二、电压及其参考方向

电荷的移动过程是能量的变换过程。单位正电荷由电路的一点移至另一点所获得或失去的能量,称为该两点间的电压。表示为

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

式中: u 为电压, V(伏[特]); W 为能量, J(焦[耳]); q 为电荷, C。

电压的辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等, 它们的关系是

$$1\text{kV}=10^3\text{V} \quad 1\text{V}=10^3\text{mV} \quad 1\text{mV}=10^3\mu\text{V}$$

电压也有实际方向和参考方向之分。图 1-3(a)所示为一 a 、 b 电路段, 设正电荷由 a 端移向 b 端, 在此移动过程中, 若获得能量, 则 b 点电位高于 a 点电位; 若失去能量, 则 a 点电位高于 b 点电位。电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点, 即正电荷流经电路段时失去能量的方向。电压的参考方向可以任意选定。在电压参考方向选定后, 分析计算出的 $u > 0$ 时表示电压实际方向与参考方向一致; $u < 0$ 时, 则两者方向相反。电压参考方向的标示法有两种, 一种为极性标示法, 用“+”“-”符号表示, 如图 1-3(b)所示; 另一种用箭头表示, 如图 1-3(c)所示。

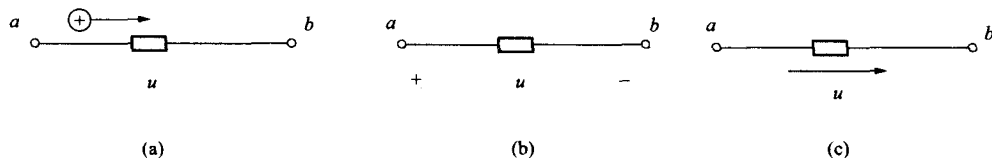


图 1-3 电压的方向

(a) 电荷移动示意图; (b) 极性标示法; (c) 箭头标示法

取电路中某一点为参考点, 则电路中某点 a 到参考点的电压称为 a 点的电位, 表示为 V_a 。其单位与电压相同, 为 V。参考点的电位为零。工程上常选大地或设备的机壳作为参考点(又称为接地点)。电位的参考方向规定为从某点指向参考点, 因此电位可正可负, 当 $V_a < 0$ 时, 表示 a 点电位低于参考点电位; 当 $V_a > 0$ 时, 表示 a 点电位高于参考点电位。电压 u_{ab} 与 a 点、 b 点电位的关系为

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

电动势 e 的实际方向规定为从电源的负极指向正极, 与电压实际方向的规定相反, 而两者的参考方向可任意选定。在图 1-4 所示电动势参考方向和电压参考方向的关系下, 其关系式应满足图 1-4(a)、(b)为 $u=e$, 而图 1-4(c)为 $u=-e$ 。

三、电压和电流的关联参考方向

同一段电路的电压电流参考方向原则上讲可以各自任意选定, 对于二端元件来讲, 电压电流参考方向的选择有四种可能, 如图 1-5 所示。这四种情况又可以分为两类: 一类是电压电流参考方向为一致的方向, 如图 1-5(a)、(d)所示, 称为电压电流取关联参考方向; 另一类是电压电流

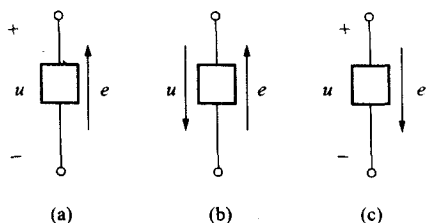


图 1-4 电压和电动势的参考方向

(a)、(b)两者参考方向相反; (c)两者参考方向相同

参考方向为不一致的方向,如图 1-5(b)、(c)所示,称为电压电流取非关联参考方向。若已确定对一二端元件电压电流参考方向的选择为以上两类中一种时,该二端元件可以只标出电流参考方向,或只标出电压参考方向。

关于电压和电流的参考方向,有几点说明:

(1)原则上讲电压电流参考方向可以任意选择,习惯上对于无源二端元件一般选关联参考方向,对于有源二端元件一般选非关联参考方向。

(2)电压电流参考方向一经确定,在电路的分析计算过程中不得更改。

(3)对电路进行分析计算时,应选定参考方向,再进行计算。今后电路图中所标出的方向均为电压电流的参考方向,而不是实际方向。

四、电功率和电能

1. 电功率

如图 1-6 所示一段电路,电压电流取关联参考方向,该电路吸收的功率为单位时间内电路吸收的能量。表示为

$$p = \frac{dW}{dt}$$

由式(1-1)和式(1-2)可得 $dt = \frac{dq}{i}$, $dW = udq$

代入式(1-4)中得

$$p = ui \quad (1-5)$$

式中: u 为电压, V; i 为电流, A; p 为功率, W(瓦[特])。

功率的辅助单位有兆瓦(MW)、千瓦(kW)、毫瓦(mW), 它们的关系是

$$1\text{MW}=10^3\text{kW} \quad 1\text{kW}=10^3\text{W} \quad 1\text{W}=10^3\text{mW}$$

注意到式(1-5)的使用条件为 u 、 i 取关联参考方向时, p 为电路吸收的功率, 即当 $p > 0$ 时, 表明电路实际吸收功率; 当 $p < 0$ 时, 表明电路实际发出(产生)功率。若 u 、 i 取非关联参考方向, 用式(1-5)求出的 p 为电路产生的功率。

2. 电能量

设图 1-6 所示电路, 在 t_0 到 t 一段时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-6)$$

式中: p 为功率, W; t 为时间, s; W 为能量, J。

实际生活中常用到多少度电表示用电量(电能)的大小。1度电为 1 千瓦时(kW·h)。

例 1-2 求图 1-7 电路中各元件上的功率, 并判断其实

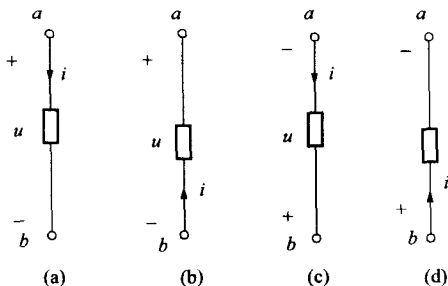


图 1-5 二端元件电压电流的参考方向

(a)、(d) 关联参考方向; (b)、(c) 非关联参考方向

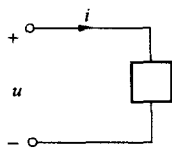


图 1-6 电路的功率 (1-4)

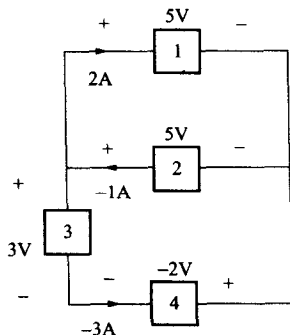


图 1-7 例 1-2 图

实际是吸收还是发出。

解：元件 1 吸收的功率

$$p_1 = 2 \times 5 = 10\text{W} > 0 \text{ 实际吸收了 } 10\text{W}$$

元件 2 发出的功率

$$p_2 = 5 \times (-1) = -5\text{W} < 0 \text{ 实际吸收了 } 5\text{W}$$

元件 3 吸收的功率

$$p_3 = 3 \times (-3) = -9\text{W} < 0 \text{ 实际发出了 } 9\text{W}$$

元件 4 发出的功率

$$p_4 = (-2) \times (-3) = 6\text{W} > 0 \text{ 实际发出了 } 6\text{W}。$$

又可判断出该电路中各元件吸收的功率和等于发出的功率和。

第三节 电路元件

电路元件是组成电路的基本单位，它是理想元件。电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端、三端、四端元件等。按其是否向外输出功率可分为无源元件和有源元件。电路元件还可分为线性元件和非线性元件，时变元件和时不变元件。在本节中将介绍几个最基本的电路元件。

一、电阻元件

电阻元件的一般概念为：由 $u-i$ 平面的一条曲线确定的二端元件在任一时刻的电压电流关系，此二端元件称为二端电阻元件，表示为

$$f(u, i) = 0$$

该曲线称为电阻的特性曲线或伏安特性曲线。

根据电阻的特性曲线，电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻、时变电阻和时不变电阻，如图 1-8 所示。若电阻元件的伏安特性曲线是过原点的直线，称为线性电阻，否则为非线性电阻。若电阻的伏安特性曲线不随时间变化，称为时不变电阻，否则为时变电阻。

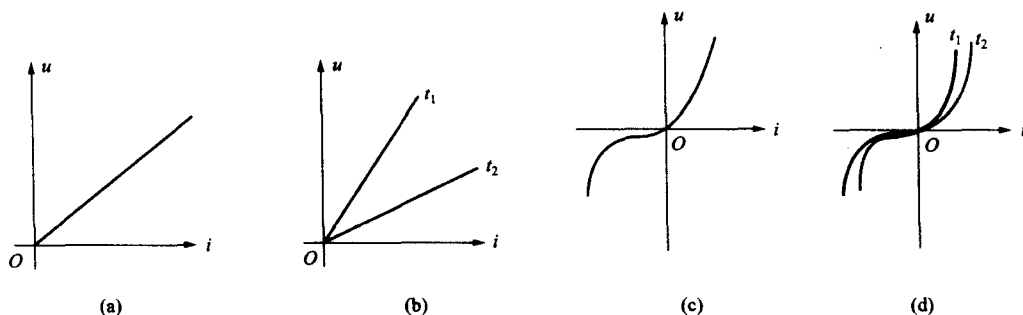


图 1-8 电阻元件伏安特性曲线

(a) 线性时不变电阻；(b) 线性时变电阻；(c) 非线性时不变电阻；(d) 非线性时变电阻

本节主要介绍二端线性时不变电阻元件，简称线性电阻元件或电阻元件。

1. 线性电阻元件

线性电阻元件的电路符号如图 1-9 所示。在电压电流取关联参考方向的条件下，线性时

不变电阻元件的伏安特性曲线是过原点的一条不随时间变化的直线,如图 1-10 所示。其数学表达式为

$$u = Ri \quad (1-7)$$

或

$$i = Gu \quad (1-8)$$

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

式中: R 为电阻, Ω (欧姆); G 为电导, S(西门子)。

电阻的辅助单位还有 $M\Omega$ (兆欧)、 $k\Omega$ (千欧)等,它们的关系是

$$1M\Omega = 10^3k\Omega \quad 1k\Omega = 10^3\Omega$$

式(1-7)、式(1-8)又称为欧姆定律, u 与 i 取非关联参考方向时,式(1-7)、式(1-8)为

$$u = -Ri \quad i = -Gu$$

当电阻元件的端电压不论为何值时,流过的电流恒为零的情况下,称为“开路”,伏安特性在 $u-i$ 平面上与 u 轴重合,相当于 $R=\infty$ 或 $G=0$ 。当流过电阻元件的电流不论为何值时,其端电压恒为零的情况下,称为“短路”,伏安特性在 $u-i$ 平面上与 i 轴重合,相当于 $R=0$ 或 $G=\infty$ 。线性电阻元件的开路和短路状态可分别用将电阻元件两端断开和用理想导线(电阻为零)将电阻元件两端短接来代替。

2. 电阻元件消耗的功率和能量

根据上一节任意一段电路吸收的功率计算公式可知,当电阻元件上电压电流取关联参考方向时,电阻元件吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-9)$$

式中: u 为电压, V; i 为电流, A; R 为电阻, Ω ; G 为电导, S。

实际的电阻元件电压电流的实际方向总是一致的,且总是在消耗功率,不会发出功率,由式(1-9)可知, $R > 0$ 称为正电阻,但通过一些电路也可以实现负电阻,即 $R < 0$ 。它可以向外发出功率。正电阻为无源元件,负电阻为有源元件。

由式(1-6)可知,电阻元件吸收的能量为

$$W_R = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt = \int_{t_0}^t Gu^2 dt \quad (1-10)$$

当电阻元件中通入直流时, $u=U$, $i=I$, $p=P$, 则上式可表示为

$$W_R = P(t - t_0) = RI^2\Delta t = GU^2\Delta t \quad (1-11)$$

式中: $\Delta t = t - t_0$ 为指电阻消耗电能所用的时间。

理想电阻元件用于表示将电磁能量转化为其他形式的能量。实际电阻器件的电路模型常用电阻元件表示,如图 1-11(a)所示。但在交流条件下,可用图 1-11(b)所示电路模型表示。由于电阻元件上电压电流同时存在或消失,所以称其为非记忆元件。

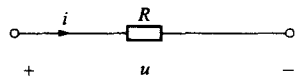


图 1-9 线性电阻的电路符号

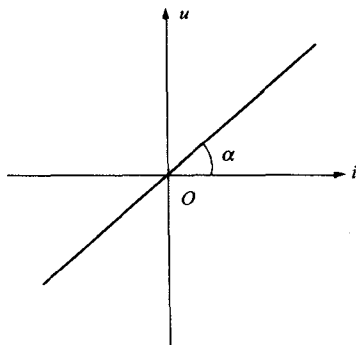


图 1-10 电阻元件的伏安特性

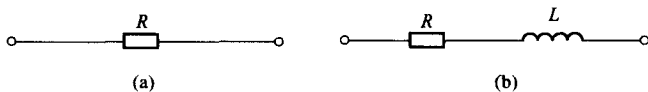


图 1-11 实际电阻器的电路模型

(a) 直流条件下; (b) 交流条件下

例 1-3 有一个 220V、40W 的白炽灯，在额定电压 220V 下工作时电流、电阻为多少？该灯泡消耗 1kW·h 电需用多长时间？

解：

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} = 0.18(\text{A})$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} = 1210(\Omega)$$

$$\Delta t = \frac{W_R}{P} = \frac{1000}{40} = 25(\text{h})$$

实际电阻元件一般标有标称电阻值和额定功率 P_N ，可使用式(1-9)计算出额定电压 U_N 和额定电流 I_N 的值。一般情况下，电阻器的实际工作电压、电流和功率均应小于额定值，否则会使电阻元件过热而损坏。

二、电容元件

电容元件的一般概念为：由 $q-u$ 平面的一条曲线确定的二端元件，表示为

$$f(q, u) = 0$$

该曲线称为电容的库伏特性曲线或 $q-u$ 特性曲线。

与电阻元件的分类相类似，根据电容的库伏特性，电容元件可分为线性时不变电容、线性时变电容、非线性时不变电容和非线性时变电容。下面主要介绍线性时不变电容，简称线性电容或电容元件。

1. 线性电容元件

线性电容元件的电路符号如图 1-12(a) 所示。线性时不变电容是指在 q 与 u 取关联参考方向的条件下，即选电压参考方向为正电位的极板上电荷也为正，在任何时刻其库伏特性为一条过原点的直线的二端元件。如图 1-12(b) 所示，其数学表达式为

$$q = Cu \quad (1-12)$$

式中： C 为电容系数，简称电容，F(法拉)。

电容的辅助单位有 μF (微法)、 pF (皮法)等。它们的关系为

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} \quad 1\mu\text{F} = 10^6 \text{pF}$$

2. 电容元件电压电流关系

如图 1-13 所示，电容元件电压电流取关联参考方向，由任一段电路中的电流定义可知

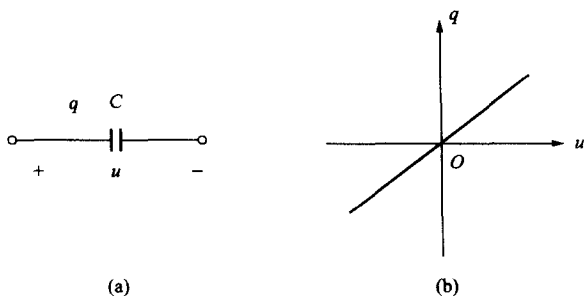


图 1-12 线性电容元件

(a) 电容元件电路符号; (b) 电容元件 $q-u$ 特性

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

将式(1-12)代入上式可得

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

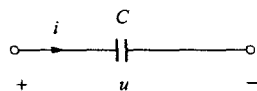


图 1-13 电容元件及电压
电流参考方向

上式为电容元件电压电流的关系式(VCR)。式(1-13)中 i 、 u 、 t 、 C 的单位分别为 A、V、s 和 F。

需要指出的是电容元件的电流正比于电压对时间的变化率，而不是电压，即当电压随时间变化时，由式(1-12)可知电容元件极板上的电荷也变化，这意味着电容元件的两个端头有电流流动。这就是为什么电容器两极板间有绝缘物质，但仍存在电容电流的原因。当电容电压不随时间变化时，电容极板上的电荷也不变化，即电容电流为零，此时电容元件相当于开路，因此电容有阻隔直流的作用。

式(1-13)的另一种形式为

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt + \frac{1}{C} \int_t^0 i dt = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-14)$$

上式选 $t=0$ 为起始时间， $u(0)$ 为 $t=0$ 时的电容电压。当 $u(0)=0$ 时，式(1-14)可写为

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-15)$$

式(1-14)表明：任一时刻 t 的电容电压为从 $-\infty$ 到 t 所有时刻电流的积分。而 $u(0)$ 反映了电容元件的历史情况，这里将 $t=0$ 视为研究问题的起始点，因此电容元件又称为记忆元件。

3. 电容的电场能量

电容元件电压电流取关联参考方向，由式(1-6)可知电容元件从 0 到 t 所吸收的能量为

$$W_C = \int_0^t u i dt = \int_0^t C u \frac{du}{dt} dt = C \int_{u(0)}^{u(t)} u du = \frac{1}{2} C [u^2(t) - u^2(0)] \quad (1-16)$$

电容元件极板上有电荷就有电场，而电场是能量场，因此 W_C 称为电场能量。电容吸收的能量用于建立电场，表明电容为储能元件。若 $u(0)=0$ ，电容元件在 t 时刻所具有的电场能量为

$$W_C(t) = \frac{1}{2} C u^2(t) \quad (1-17)$$

由于电容电压电流的实际方向可能相同，也可能不相同，从式(1-16)可知

$$W_C = \int_0^t u i dt = \int_0^t p dt$$

功率 p 可能为正，也可能为负，这就意味着，电容元件可以吸收能量，也可以放出能量。

例 1-4 图 1-14 所示为一实际电容器的电路模型，试确定电容电流 i_C ，电容中储存的最大能量及在 $0 \leq t \leq 1s$ 期间中电阻消耗的能量。

$$\begin{aligned} \text{解: } i_R &= \frac{u}{R} = \frac{100 \sin 100\pi t}{2 \times 10^6} \\ &= 5 \times 10^{-5} \sin 100\pi t (\text{A}) \end{aligned}$$

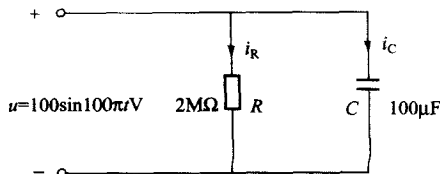


图 1-14 例 1-4 图(电容器的电流模型)

$$i_c = C \frac{du}{dt} = 100 \times 10^{-6} \frac{d}{dt} (100 \sin 100\pi t) \\ = \pi \cos 100\pi t (\text{A})$$

$$W_c = \frac{1}{2} C u^2 = \frac{1}{2} \times 100 \times 10^{-6} \times 10^4 \sin^2 100\pi t = 0.5 \sin^2 100\pi t (\text{J})$$

当 $\sin 100\pi t = 1$, 即 $t = \frac{1}{200} \text{s}$ 时, W_c 有最大值

$$W_{c\max} = 0.5 (\text{J})$$

$$W_R = \int_0^1 p_R dt = \int_0^1 i_R^2 R dt = \int_0^1 25 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^{-6} \sin^2 100\pi t dt = 2.5 (\text{mJ})$$

由 $W_{c\max} = 0.5 \text{J}$ 和 $W_R = 2.5 \text{mJ}$ 可知, 实际电容器上最大储能的 0.5% 在 0 到 1s 内损失了。一般小容量的电容器有低损耗, 而大容量的电容器则损耗也较大。

三、电感元件

电感元件的一般概念为: 由 $\Psi-i$ 平面的一条曲线确定的二端元件, 表示为

$$f(\Psi, i) = 0$$

该曲线称为电感元件的 $\Psi-i$ 特性曲线。

与电阻元件和电感元件的分类相似, 由电感元件的 $\Psi-i$ 特性, 电感元件可分为线性时不变电感、线性时变电感、非线性时不变电感和非线性时变电感。在这里主要介绍线性时不变电感元件, 简称线性电感或电电感元件。

1. 线性电感

线性电感元件的电路符号如图 1-15(a) 所示。线性时不变电感元件定义为: 当 Ψ 与 i 的参考方向满足右手螺旋定则时, 在任时刻其磁链 Ψ 正比于电流 i 的二端元件。如图 1-15(b) 所示, 其表达式为

$$\Psi = Li \quad (1-18)$$

式中: Ψ 为磁链, Wb (韦伯); L 为电感系数, 简称电感, H (亨利)。

电感的辅助单位有 mH (毫亨)、 μH (微亨) 等。它们的关系为

$$1\text{H} = 10^3 \text{mH} \quad 1\text{mH} = 10^3 \mu\text{H}$$

2. 电感元件电压电流关系

图 1-16(a) 所示为一电感线圈, 当线圈中通入电流 i 时, 产生磁通 Φ , 线圈各匝磁通的总和称为线圈的磁链 Ψ , 设磁通穿过线圈的各匝, 则 $\Psi = N\Phi$ 。当电流 i 随时间变化时, 磁链也随之变化, 从而在线圈两端产生感应电动势 e 。由电磁感应定律可知

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

当 e 与 i 参考方向取一致方向时, 如图 1-16(a) 所示, 称 e 与 Ψ 满足右螺旋定则, 有

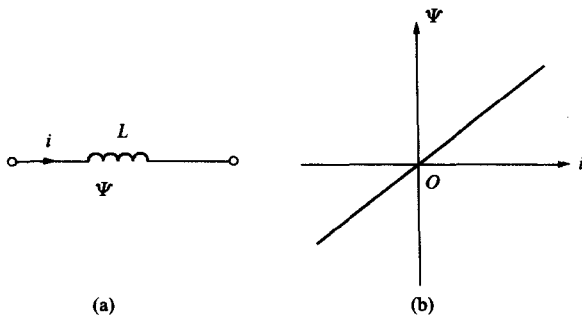


图 1-15 线性电感元件

(a) 电感元件电路符号; (b) 电感元件的 $\Psi-i$ 特性