



新世纪高等学校规划教材·自动化系列

电 路

主 编◎王树文 尹立强

副主编◎王振玉 姜竹楠 王润涛



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

新世纪高等学校规划教材·自动化系列

电 路

DIANLU

主 编◎王树文 尹立强
副主编◎王振玉 姜竹楠 王润涛



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路/王树文,尹立强主编. —北京:北京师范大学出版社, 2017.5

新世纪高等学校规划教材·自动化系列

ISBN 978-303-21771-7

I. ①电… II. ①王…②尹… III. ①电路—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 298508 号

营销中心电话 010-62978190 62979006
北师大出版社科技与经管分社 www.jswsbook.com
电子信箱 jswsbook@163.com

出版发行:北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码:100875

印 刷:北京京师印务有限公司
经 销:全国新华书店
开 本:787 mm×1092 mm 1/16
印 张:19
字 数:395 千字
版 次:2017 年 5 月第 1 版
印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷
定 价:39.00 元

策划编辑:李 丹	责任编辑:李 丹
美术编辑:刘 超	装帧设计:刘 超
责任校对:赵非非	责任印制:赵非非

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话:010-58800697

北京读者服务部电话:010-58808104

外埠邮购电话:010-58808083

本书如有印装质量问题,请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话:010-58800825

前 言

电路是高等学校电气信息类专业的重要基础课,是电气工程学科和信息技术学科学生必备的知识基础,是所有强电专业和弱电专业的必修课。

学习本课程要求学生具备必要的电磁学和数学基础知识。电路这门课,以分析电路中的电磁现象、研究电路的基本规律及电路的分析方法为主要内容。电路理论严密、逻辑性强,有广阔的工程背景。

本书的编写,总结吸收了多所学校多年来的教学和教改经验,注重理论的系统性和实用性的结合,课堂教学和自学的结合,力求概念清楚、条理清晰,语言简练易懂,以培养学生分析和解决实际问题的能力为出发点。通过本课程的学习,学生可以掌握电路的基本定律定理及分析计算电路的基本技能。

全书共分 13 章,内容包括电路的基本概念和基本定律、简单电路的分析及等效变换、复杂电路的分析方法、电路定理、一阶电路分析、相量法、正弦稳态电路的分析、电路的谐振与互感、三相电路、非正弦周期电流电路分析、线性动态电路的复频域分析、电路方程的矩阵形式及二端口网络。每章后附有习题,以帮助学生复习巩固和加深对课程内容的理解。本课建议学时为 64~80 学时。

东北农业大学的王树文老师、河南科技学院的尹立强老师、石家庄铁道大学四方学院的王振玉老师、沈阳工程学院的姜竹楠老师、东北农业大学的王润涛老师参与了编写工作。

河北农业大学的邵利敏老师认真审读了全书,提出了很多有价值的修改意见,我们在此表示感谢。

本书编写过程中参阅了其他同类教材和相关的文献资料,我们对相关资料的编者、著者深表谢意。

由于编者水平有限,书中不妥和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2017 年 3 月

目 录

第 1 章 电路模型和定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路表征量	3
1.3 电功率和能量	5
1.4 理想电路无源元件	7
1.5 理想电路有源元件	12
1.6 受控源	14
1.7 基尔霍夫定律	15
小结	17
习题	17
第 2 章 简单电路分析及等效变换	21
2.1 引言	21
2.2 电路的等效变换	21
2.3 电阻的串联、并联及混联	22
2.4 电源的连接方式及等效变换	28
2.5 实际电源模型及其等效变换	29
2.6 受控源的等效变换	31
2.7 输入电阻和等效电阻	32
小结	33
习题	33
第 3 章 复杂电路的分析方法	37
3.1 电路的拓扑结构	37
3.2 支路电流法	42
3.3 网孔电流法	44
3.4 回路电流法	47

3.5 结点电压法	49
小结	54
习题	54
第4章 电路定理	59
4.1 叠加定理和齐性定理	59
4.2 替代定理	65
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	66
4.4 对偶原理	77
4.5 特勒根定理	78
4.6 互易定理	81
小结	83
习题	83
第5章 一阶电路分析	89
5.1 动态电路的方程及初始条件	89
5.2 一阶电路的零输入响应	94
5.3 一阶电路的零状态响应	99
5.4 一阶电路的全响应	107
5.5 一阶电路的阶跃响应	113
5.6 一阶电路的冲激响应	117
小结	119
习题	120
第6章 相量法	123
6.1 复数	123
6.2 正弦量	125
6.3 正弦量的相量表示法	128
6.4 电路定律的相量形式	130
小结	135
习题	135
第7章 正弦稳态电路	137
7.1 复阻抗、复导纳及其等效变换	137
7.2 电路的相量图	144
7.3 正弦交流电路中的功率	149

7.4	正弦稳态电路的分析	154
7.5	功率因数的提高	161
	小结	164
	习题	165
第8章	电路的谐振与互感	169
8.1	谐振电路	169
8.2	互感电路	174
8.3	互感电路的分析	177
8.4	变压器原理	181
8.5	理想变压器	183
	小结	186
	习题	186
第9章	三相电路	189
9.1	三相电源	189
9.2	三相负载	191
9.3	对称三相电路的计算	192
9.4	不对称三相电路分析	195
9.5	三相电路的功率	197
	小结	199
	习题	199
第10章	非正弦周期电流电路分析	203
10.1	非正弦周期信号的谐波分析	203
10.2	有效值、平均值和平均功率	207
10.3	非正弦周期电流电路的计算	208
	小结	212
	习题	212
第11章	线性动态电路的复频域分析	215
11.1	拉普拉斯变换	215
11.2	拉普拉斯变换的基本性质	217
11.3	拉普拉斯反变换	220
11.4	拉普拉斯变换电路图(运算电路)	224
11.5	运算法	227

11.6	网络函数	230
11.7	网络函数的极点和零点	231
	小结	231
	习题	232
第 12 章	电路方程的矩阵形式	233
12.1	图论概念	233
12.2	关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	234
12.3	矩阵 A 、 B_f 、 Q_f 之间的关系	240
12.4	电路方程的矩阵形式	241
	小结	249
	习题	250
第 13 章	二端口网络	253
13.1	二端口方程和参数	253
13.2	二端口的等效电路及其连接	260
13.3	二端口的转移函数	264
13.4	回转器和负阻抗变换器	266
	小结	268
	习题	268
附录	Simulink/SimPower System 工具箱及典型电路仿真	271
参考文献		293

第1章 电路模型和定律

主要内容

- ◆ 电路模型
- ◆ 电路元件
- ◆ 电压、电流参考方向
- ◆ 电路功率
- ◆ 基尔霍夫定律

学习重点

- ◆ 基尔霍夫定律

1.1 电路和电路模型

在日常工作和生活中，人们会遇到很多实际电路。实际电路是用导线将一些电路元件连接起来组成的。所谓的电路元件主要是指电阻、蓄电池、电容、电感、晶体管、变压器、集成电路等。

电路的作用主要有：

- 信号的传递和处理，例如电话线路、放大电路等；
- 提供能量，例如照明和供电电路；
- 测量电量，例如用来测量电压、电流和电阻等的万用表电路；
- 储存信息，例如计算机的存储器电路等。

因为要完成的功能不同，所以实际电路的组成是多种多样的，但通常都由电源（信号源）、负载和中间环节等三部分组成。其中，电源是工作时向电路提供电能量的装置，电源包括电压源和电流源；负载是工作时吸收电能并将电能转化为其他形式能量的装置，例如电阻、电感、电容、扬声器、电动机等；中间环节是传输、分配和控制电能的部分，它将电源和负载连接成闭合电路，如变压器、输电线、放大器等。

由于某些实际电路非常复杂，为了便于对实际电路进行分析，通常用理想电路元件或它们的组合来模拟实际器件，这个过程称为建立模型，简称建模。电路理论分析的对象是电路模型而不是实际电路。在电路模型中，隔离箱元件的端子是用理想导线连接起来的。根据元件对外端子的数目，理想电路元件可分为二端、三端、四端元件等。

图 1-1(a)所示为手电筒的实际电路，它由电池、开关、灯泡和导线组成。电池是

电源，能够向电路提供能量；灯泡是负载，当电流流过时能发热到白炽状态而发光；导线使电流形成了通路。建模时，将电池的内阻忽略不计，把它看作一个电压恒定的理想电压源；灯泡的电感效应极其微小，将它看作一个理想电阻元件；导线的电阻也完全忽略不计，视为理想导体；开关理想化时认为闭合时其电阻为零，断开时其电阻为无穷大。图 1-1(b)所示为其电路模型。



图 1-1 手电筒实际电路图与电路模型

实际上各种元件都可以用其理想模型来近似表征其性能。所谓的“理想化”，指的是：假定器件的电场、磁场现象可以分别研究，从而可以用所谓的“集总参数元件”来构成模型，简称集总元件。每一种集总元件都只表示一种基本现象，并且可用数学方法精确定义。譬如理想电阻元件便是一种只消耗电能的元件，所以是一种集总元件。只表示存储电场能量的理想电容元件和只表示存储磁场能量的理想电感元件，它们也都是集总元件。由集总元件构成的电路模型称为集总电路。本书如无特别说明，所分析的电路及电路基本定理都是在集总的前提下进行的。

另外，建模时必须考虑工作条件，并按不同准确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象和功能表现出来。在不同的应用条件下，同一实际电路元件的电路模型可以有不同的形式。例如，一个线圈在不同工作条件下的建模就不一样：在直流情况下，线圈在电路中仅反映为导线内电流引起的能量消耗，因此它的模型就是一个电阻元件；在交流情况下，线圈电流产生的磁场会引起感应电压，对应电路模型除电阻元件外还应包含一个与之串联的电感元件；当交变电流频率较高时，还应考虑线圈导体表面的电荷作用，即电容效应，所以等效模型中还需要并联一个电容元件。其不同情况下的等效模型如图 1-2 所示。

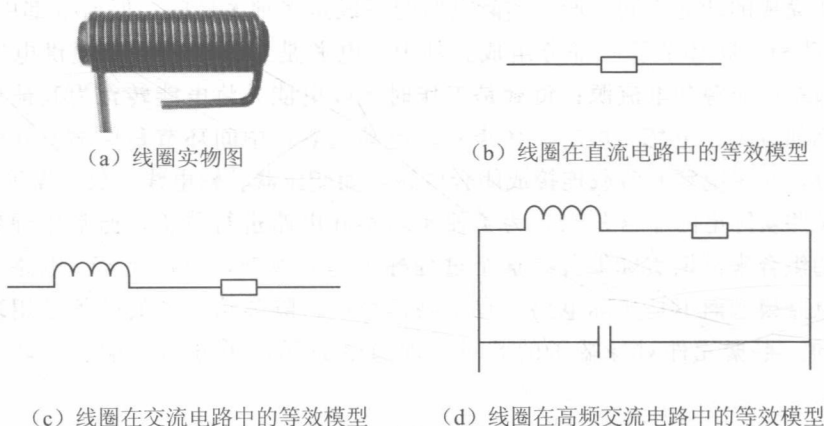


图 1-2 线圈实物图及在不同工作条件下的等效模型

1.2 电路表征量

电路中的主要物理量有电压、电流、电荷、磁链、能量、电功率等。在线性电路分析中,人们主要关心的物理量是电流和电压。

1.2.1 电流及电流的参考方向

电流是带电粒子有规则地定向运动形成的。通常把单位时间内通过导体某横截面的电量定义为电流强度,用以衡量电流大小,电流强度简称为电流,用符号 i 表示。如果 dt 时间内,通过导体横截面 S 的电量为 dq ,则

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

习惯上把正电荷的运动方向定义为电流的实际方向。大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流,或称直流电流(Direct Current),用大写字母 I 表示。

在国际单位制中,电流的单位是安培,中文代号为安,英文代号为 A。在计量大电流时,可以用千安(kA)作为单位;在计量小电流时,还可以用毫安(mA)和微安(μ A)作为单位,它们之间的关系为

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

$$1\text{mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

对于复杂电路或电路中的电流随时间变化时,电流的实际方向往往很难事先判断。为了解决这一问题,引入了参考方向这一概念。可以任意选定一个方向作为电流的参考方向,当电流的实际方向与参考方向相同时,电流的值为正;当二者相反时,电流的值为负。也就是说,在选定的电流参考方向下,根据电流的正负,可确定电流的实际方向。在图 1-3(a)中,电流参考方向与实际方向相同,所以电流 $i > 0$;在图 1-3(b)中,电流参考方向与实际方向相反,所以电流 $i < 0$ 。



图 1-3 电流的参考方向与实际方向

电流的参考方向可以任意指定,常用的表示方法有两种,分别为:用箭头表示,箭头的指向为电流的参考方向,如图 1-4(a)所示;另一种方法是用双下标表示,如 i_{AB} ,表示电流的参考方向由 A 指向 B,如图 1-4(b)所示。



图 1-4 电流参考方向的表示方法

1.2.2 电压、电位及其参考方向

电场力将单位正电荷 q 从 a 点移动到 b 点所做的功, 称为 ab 两点之间的电压, 记作 u_{ab} , 即

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

电场内两点间的电压也称为两点间的电位差。电位指的是单位正电荷 q 从电路中一点移至参考点时电场力做功的大小, 通常规定参考点的电位值为零。即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-3)$$

如果正电荷由 a 点移动到 b 点是失去能量, 则 a 点为高电位, 即正极, b 点为低电位, 即负极; 如果正电荷由 a 点移动到 b 点是获得能量, 则 a 点为低电位, 即负极, b 点为高电位, 即正极。所以, 正电荷在电路中转移时能量的增加或降低表现为电位的升高或降落, 即电压升或电压降。

通常规定电压的实际方向是由高电位指向低电位。

大小和方向不随时间变化的电压称为恒定电压, 或者称为直流电压(Direct Voltage), 用大写字母 U 表示。

在国际单位制中, 电压的单位为伏特, 简称伏, 英文表示为 V 。为了计量方便, 还可以用千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)等作为单位, 它们之间的关系为

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

$$1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$$

$$1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

如同需要为电流规定参考方向一样, 电压也需要规定参考方向。在表示两点之间的电压时, 用正极性(+)表示高电位, 负极性(-)表示低电位, 电压的参考方向即为正极性指向负极性的方向。另外, 也可以用双下标来表示电压参考方向, 如表示 A 与 B 之间的电压 u_{AB} , 其参考方向为 A 指向 B 。指定电压参考方向后, 电压 u 就是一个代数量。当 A 点的电位确实高于 B 点的电位, 即电压的实际方向是由 A 到 B , 实际方向与参考方向一致, 则 $u > 0$; 反之, 如实际电位是 B 高于 A , 则 $u < 0$ 。

值得注意的是, 电路中电位参考点可任意选择。参考点一经选定, 电路中各点的电位值也就唯一确定。当选择不同的电位参考点时, 电路中各点电位值将改变, 但任意两点间电压保持不变。

例 1-1 已知, $4C$ 正电荷由 a 点均匀移动至 b 点电场力做功 $8J$, 由 b 点移动到 c 点电场力做功为 $12J$ 。

(1) 若以 b 点为参考点, 求 a 、 b 、 c 点的电位和电压 U_{ab} 、 U_{bc} ;

(2) 若以 c 点为参考点, 再求以上各值。

解: (1) 若以 b 点为参考点, 即 b 点电位 $\varphi_b = 0$ 时, 有

$$a \text{ 点电位 } \varphi_a = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{8}{4} = 2(\text{V})$$

$$c \text{ 点电位 } \varphi_c = \frac{W_{cb}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3(\text{V})$$

$$a、b \text{ 两点之间电压 } U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 2 - 0 = 2(\text{V})$$

b、c 两点之间电压 $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 0 - (-3) = 3(\text{V})$

(2)若以 c 点为参考点,即 c 点电位 $\varphi_c = 0$ 时,有

$$\text{a 点电位 } \varphi_a = \frac{W_{ac}}{q} = \frac{8+12}{4} = 5(\text{V})$$

$$\text{b 点电位 } \varphi_b = \frac{W_{bc}}{q} = \frac{12}{4} = 3(\text{V})$$

a、b 两点之间电压 $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 5 - 3 = 2(\text{V})$

b、c 两点之间电压 $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 3 - 0 = 3(\text{V})$

一个元件的电流或电压的参考方向是可以独立地任意指定的。当某一元件或电路端口所设定的电流参考方向是从参考电压的正极流到负极时,称电压和电流的参考方向对于该元件或电路是相关联的,否则为非关联参考方向。在图 1-5(a)中,N 表示电路的某一部分,它的两个端子与外电路相连,电流 i 的参考方向自电压 u 的正极流入电路,从电压的负极流出,两者参考方向一致,所以是关联参考方向;图 1-5(b)所示电流和电压的参考方向则是非相关联的。

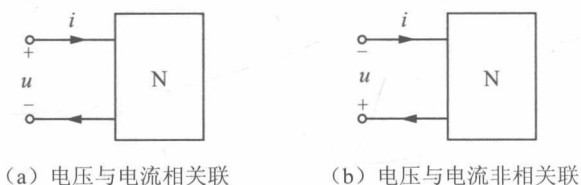


图 1-5 元件电压与电流参考方向的关系

在求解电路问题时,参考方向的意义非常重要,电路中所标的电流方向和电压极性均为参考方向和参考极性,它们不一定是电流的实际方向和电压的实际极性。今后本书电路中凡未同时标注电流、电压参考方向的,均视作关联参考方向。

1.3 电功率和能量

在电路的分析和计算中,功率和能量的计算是十分重要的。一方面,电路在工作状况下总伴随有电能与其他形式能量的相互转换;另一方面,电气设备、电路部件本身都有功率的限制,在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值,过载会使设备或部件损坏,或是不能正常工作。

1.3.1 电功率

电路中存在着能量的流动和转换,电功率指的是单位时间内元件吸收或发出的电能。假设在 dt 时间内,正电荷 dq 由 a 点转移到 b 点,且由 a 到 b 为电压降,其值为 u 。根据电压的定义可知在转移过程中 dq 失去的能量为

$$dw = u dq$$

电荷失去能量意味着该部分电路或者元件吸收能量,因此元件吸收能量的速率,即元件吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt}$$

因为

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

故

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

当电流单位为 A、电压单位为 V 时，功率的单位为瓦特，简称瓦(W)。

利用式(1-4)求功率时需要注意的是，如果指定了电压和电流的参考方向，若 u 、 i 为关联参考方向时，则 $p=ui$ 表示元件吸收的功率；当 $p>0$ 时，表示该元件确实吸收功率；当 $p<0$ 时，表示该元件实际发出功率。若 u 、 i 为非关联参考方向时，则 $p=ui$ 表示元件发出的功率；当 $p>0$ 时，表示该元件确实发出功率；当 $p<0$ 时，表示该元件实际吸收功率。

若一个元件吸收 10W 的功率，也可以说是它发出了 -10W 的功率；同理，若一个元件发出 10W 的功率，也可以说是它吸收了 -10W 的功率。

例 1-2 求图 1-6 所示电路中各方框所代表的元件吸收或产生的功率。已知： $U_1=1\text{V}$ ， $U_2=-3\text{V}$ ， $U_3=8\text{V}$ ， $U_4=-4\text{V}$ ， $U_5=7\text{V}$ ， $U_6=-3\text{V}$ ， $I_1=2\text{A}$ ， $I_2=1\text{A}$ ， $I_3=-1\text{A}$ 。

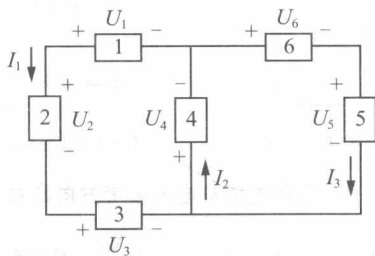


图 1-6 例 1-2

解：元件 1 电压和电流为非关联参考方向， $P_1=U_1 I_1=1 \times 2=2(\text{W})$ ，所以为发出功率；

元件 2 电压和电流为关联参考方向， $P_2=U_2 I_1=(-3) \times 2=-6(\text{W})$ ，为发出功率；

元件 3 电压和电流为关联参考方向， $P_3=U_3 I_1=8 \times 2=16(\text{W})$ ，为吸收功率；

元件 4 电压和电流为关联参考方向， $P_4=U_4 I_2=(-4) \times 1=-4(\text{W})$ ，为发出功率；

元件 5 电压和电流为关联参考方向， $P_5=U_5 I_3=7 \times (-1)=-7(\text{W})$ ，为发出功率；

元件 6 电压和电流为关联参考方向， $P_6=U_6 I_3=(-3) \times (-1)=3(\text{W})$ ，为吸收功率。

电路中，发出功率为 $P_1+P_2+P_4+P_5=2+6+4+7=19(\text{W})$ ，吸收功率为 $P_3+P_6=16+3=19(\text{W})$ ，可见吸收功率等于发出功率，即能量守恒。

1.3.2 电能

根据功率和电能的关系可知，在 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的能量为

$$W(t) = \int dW = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-5)$$

因为 u 、 i 都是代数量, 所以功率 p 和吸收的能量 W 也都是代数量。当 $p > 0$ 、 $W > 0$ 时, 表示元件确实吸收功率与能量; 当 $p < 0$ 、 $W < 0$ 时, 表示元件实际释放功率和能量。

电能的单位为焦耳, 简称“焦”(J), 它表示功率为 1W 的设备在 1s 时间内转换的电能。工程上常采用千瓦时(kW·h)作为电能的单位, 俗称 1 度电, 它等于功率为 1 千瓦的设备在 1 小时内所转换的电能。

1.4 理想电路无源元件

电路元件是电路中最基本的组成单元。电路元件通过其端子与外部连接, 元件的特性通过与端子有关的电路物理量描述。每种元件通过端子的两种物理量反映一种确定的电磁性质。

1.4.1 电阻元件

电阻元件就是将电阻、白炽灯、电炉等在一定条件下进行抽象而得到的理想模型。在中学物理中, 已学过由欧姆定理定义的电阻元件 R

$$u = Ri \quad (1-6)$$

式(1-6)中, u 为电阻元件两端的电压, 单位为伏(V); i 为流过电阻元件的电流, 单位为安(A); R 为电阻元件的参数, 称为元件的电阻, 单位为欧姆, 简称欧(Ω)。电阻的符号如图 1-7 所示。式(1-6)只有在关联参考方向的前提下才成立, 若为非关联参考方向, 则

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

电阻元件也可以用电导这一参数来表征, 电导用符号 G 表示, 其定义为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-8)$$

在国际单位制中, 电导的单位为西门子, 简称西(S)。用电导表征电阻元件时, 欧姆定理为

$$u = \frac{1}{G}i \quad (1-9)$$

可以将电阻元件的定义加以推广。如果一个二端元件, 在任一时刻的电压 u 与其电流 i 的关系由 u - i 平面上一条曲线确定, 则此二端元件称为二端电阻元件, 其数学表达式为

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

对应于该函数的曲线称为电阻的特性曲线。它表明了电阻电压与电流间的约束关系, 称为伏安关系(Voltage Current Relationship, VCR)。

电阻可以分为线性电阻与非线性电阻。如果电阻的特性曲线为通过坐标原点的直线, 则称为线性电阻; 否则为非线性电阻。图 1-8 所示为线性电阻元件的伏安特性曲线。

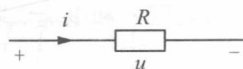


图 1-7 电阻的符号

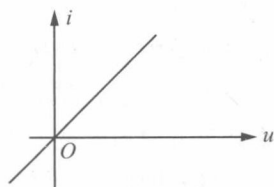


图 1-8 线性电阻的伏安特性曲线

从图 1-8 可以看出, 线性电阻元件任意时刻的电压(电流)大小完全由该时刻的电

流(电压)决定。也就是说,线性电阻的电压(电流)不能“记忆”电流(电压)在“历史”上起过的作用,所以电阻元件是无记忆的。

当电阻两端电压无论为何值,电流恒等于零时,称电阻为“开路”,开路的特性曲线与 u 轴重合,是 $R=\infty$ 或 $G=0$ 的特殊情况,如图 1-9(a)所示;当流过电阻的电流无论为何值,电压恒等于零时,称电阻为“短路”,短路的特性曲线与 i 轴重合,是 $R=0$ 或 $G=\infty$ 的特殊情况,如图 1-9(b)所示。

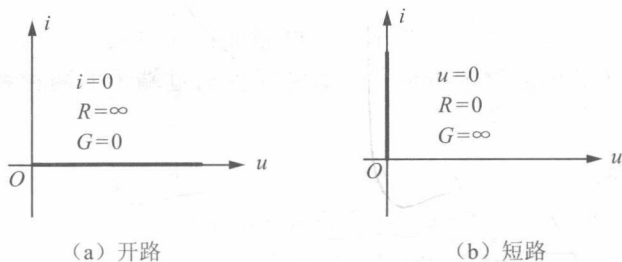


图 1-9 开路和短路时的伏安特性曲线

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时,电阻元件消耗的功率为

$$p=ui=i^2R=\frac{u^2}{R}=Gu^2=\frac{i^2}{G} \quad (1-10)$$

如果 $R>0$ 或 $G>0$, 则 $p>0$ 。因此,电阻元件是一种耗能元件。通常我们遇到的电阻,大都属于这种情况。

根据电阻元件的一般定义,在 $u-i$ 平面上用一条斜率为负的特性曲线来表征的元件也属于电阻元件,这种元件称为负电阻元件,即 $R<0$ 。因为 $R<0$, 所以由式(1-10)计算得到的功率 $p<0$, 也就是说,负电阻是产生功率的。一般来说,其特性曲线落入闭合的一、三象限的电阻为正电阻,特性曲线落入闭合的二、四象限的电阻为负电阻。

当然,可以按照“有源性”和“无源性”对元件加以分类。如果元件在所有 $t>-\infty$ 时间内,吸收的能量 $w(t)$ 为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi)d\xi \geq 0 \quad (1-11)$$

则称此元件为无源元件,否则称为有源元件。正电阻属于无源元件,吸收的能量转化为热能而散失,负电阻则属于有源元件。

如果一个电阻元件的电压和电流仍满足线性关系,但比例系数是随时间变化的,则称为时变电阻元件。

非线性电阻元件的伏安特性曲线不再是一条通过原点的直线,其电阻值随着电压或电流的大小甚至方向而改变,不再是常数。如以后学到的二极管的伏安特性曲线如图 1-10 所示。

由于电子器件制作材料的电阻率和温度有关,严格来讲,电阻元件带有非线性因素,但

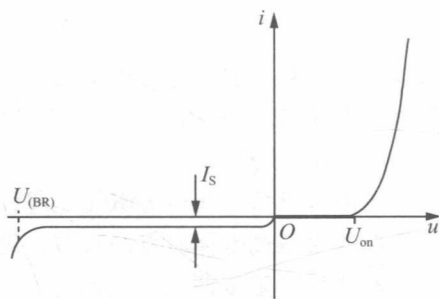


图 1-10 二极管的伏安特性曲线

在正常工作条件下,电子设备中常用的金属膜电阻、绕线电阻、碳膜电阻等可以用线性电阻作为它们的模型。在本书后续章节中,如无特殊说明,一般所说的电阻均指线性时不变电阻。

1.4.2 电感元件

通常把导线绕成的线圈称为电感,又叫电感线圈。在电子电路中,常用的有空心或带有铁芯的高频线圈,变压器中也含有在铁芯上绕制的线圈。电感元件就是电感的理想化模型。

电感元件的定义如下:对于一个储存磁场能的两端元件,任何时刻,其特性可用 $\Psi-i$ 平面上的一条曲线来进行描述,则称此两端元件为电感元件。如果 $\Psi-i$ 平面上的特性曲线是一条过原点的直线,且不随时间的变化而变化,则称此电感元件为线性非时变电感元件,即

$$\Psi = Li \quad (1-12)$$

电感元件的符号如图 1-11 所示。在国际单位制中,磁通和磁通链的单位为韦伯(Wb)。当电流的单位为 A 时,电感的单位为亨利,简称亨(H)。

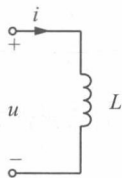


图 1-11 电感元件符号

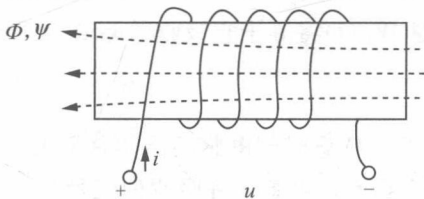


图 1-12 磁通链与感应电压

当通过电感线圈的电流发生变化时,在线圈中就会产生感应电压。图 1-12 所示为一个线圈,其中的电流 i 产生的磁通 Φ 与 N 匝线圈交链,所以磁通链 $\Psi = N\Phi$ 。根据电磁感应定律,感应电压等于磁通链的变化率。当电压的参考方向与磁通链的参考方向符合右手螺旋关系时,可得

$$u = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-13)$$

将式(1-12)代入式(1-13)可得

$$u = \frac{dLi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-14)$$

这就是电感元件的 VAR。需要注意的是,式(1-14)是在电压和电流参考方向一致时才成立的。

由式(1-14)可以看出,电感在某一时刻的电压取决于该时刻电流的变化率,所以电感元件是动态元件。电感元件电流变化越快,即 $\frac{di}{dt}$ 越大,电压就越大;当电流不变时,即 $\frac{di}{dt}$ 为零,这时虽有电流,但电压为零,所以电感元件对直流起着短路的作用。

式(1-14)的逆关系为

$$i = \frac{1}{L} \int u dt \quad (1-15)$$