

高等学校通信教材

gaodeng xuexiao tongxin jiaocai

© 沈元隆 刘陈 编著

DIANLU
FENXI

电路分析

(修订本)

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等学校通信教材

电 路 分 析

(修订本)

沈元隆 刘 陈 编著

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/沈元隆,刘陈编著. —修订本. —北京:人民邮电出版社,2004.5

高等学校通信教材

ISBN 7-115-12163-X

I. 电... II. ①沈...②刘... III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 016272 号

内 容 提 要

本书系统地讲述电路理论中的基本概念、基本定理和基本分析方法。全书共 13 章,内容包括电路的基本概念、电路分析中的等效变换、线性网络的一般分析方法、网络定理,一阶电路分析、二阶电路分析、正弦稳态分析、耦合电感和变压器电路分析、电路的频率特性;大规模线性网络的分析方法,二端口网络、简单非线性电阻电路分析以及磁路和铁芯线圈。各章均配有与基本内容密切相关的例题和习题,书末附有部分习题答案。

本书可作为通信、电子、计算机和自动化等专业本科学生的教材,也可供有关科技人员学习参考。

高等学校通信教材

电路分析

(修订本)

◆ 编 著 沈元隆 刘 陈

责任编辑 潘春燕

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010-67194042

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 23.25

字数: 571 千字

2004 年 5 月第 2 版

印数: 12 501-17 500 册

2004 年 5 月北京第 4 次印刷

ISBN 7-115-12163-X/TP · 3902

定价: 29.80 元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话:(010) 67129223

修 订 说 明

随着高校办学规模的扩大和专业的增加,教材的内容也需要作相应的调整。为了能使《电路分析》教材在适合通信、信息类专业教学的同时,也能很好地适应诸如电力、电气类各强电专业的需要,在听取了教学指导委员会和新设置的相关专业教师的意见后,经过反复斟酌,教材内容作了部分增补和调整。

修订本在保留原版本体系的基础上,在第7章增加了复功率守恒、单相功率测量、不对称三相电路分析及三相电路功率测量等内容,并增加了第13章磁路和铁芯线圈的内容。上述增补的内容全部由沈元隆教授编写。考虑到与后续课程“电磁场理论”的衔接,未增加关于均匀传输线方面的内容。

在整个修改过程中,始终得到了南京邮电学院各级领导和电路与系统教研室全体教师的关心和支持,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免存在不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2004年3月

编者的话

“电路分析”是高等工科院校电气信息类专业本科生的一门重要专业基础课程。其内容是介绍非时变集总参数电路的基本理论和方法。通过本课程的学习使学生能够掌握电路分析的基本概念和基本原理,培养学生的电路分析与计算能力,为后续课程的学习奠定基础。

本教材根据高等院校电子信息类专业基础课教学指导委员会的“电路分析教学基本要求”编写而成。在内容选材上立足于“加强基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,并注意了与“高等数学”、“大学物理”等先修课程及“信号与线性系统”、“模拟电子电路”等后续课程的分工、衔接和配合,做到对先修课程巩固加深和为后续课程打好基础;在文字叙述上,力求突出重点、分散难点、由浅入深。同时,本教材还精心选编了大量例题和习题,并配备了习题参考答案,使之与正文有机结合,融为一体,便于更好地掌握基本内容,有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

本教材是在南京邮电学院电子工程系电路与系统教研室全体教师 20 余年教学经验积累的基础上编写而成的。全书由沈元隆教授和刘陈副教授合作编写,其中沈元隆教授编写了第 1、2、5、6、9、12 章和第 8 章 8.4~8.6 节,刘陈副教授编写了第 3、4、7、10、11 章和第 8 章 8.1~8.3 节;全书由沈元隆统稿。

在本教材的编写过程中,始终得到南京邮电学院各级领导和电路与系统教研室全体教师的热情鼓励和大力支持,其中梅杓春教授、王锁萍教授和蒋国平博士对本教材的出版给予了极大关心和帮助;我国电路与系统领域德高望重的前辈、中国科学院北京研究生院左垲教授详细审阅了本教材的全部原稿,并提出了许多宝贵的意见。在此对他们表示衷心的感谢。

限于编者水平和时间的限制,书中不乏错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

最后,谨将此书献给曾经和正在为电路教学而辛勤工作的所有教师。

编者

2001 年 6 月

目 录

第 1 章 电路分析的基本概念	1
1.1 实际电路和电路模型	1
1.2 电路分析的变量	2
1.3 电路元件	6
1.4 基尔霍夫定律	13
习题	17
第 2 章 电路分析中的等效变换	20
2.1 单回路电路及单节偶电路分析	20
2.2 等效二端网络	21
2.3 电阻星形连接与三角形连接的等效互换	26
2.4 含独立电源网络的等效变换	29
2.5 含受控电源电路的等效变换	36
2.6 运算放大器	39
习题	44
第 3 章 线性网络的一般分析方法	51
3.1 支路分析法	51
3.2 网孔分析法	54
3.3 节点分析法	58
3.4 独立电路变量的选择与独立方程的存在性	62
3.5 回路分析法和割集分析法	65
3.6 电路的对偶特性与对偶电路	70
习题	72
第 4 章 网络定理	76
4.1 叠加定理	76
4.2 替代定理	79
4.3 戴维南定理和诺顿定理	81
4.4 特勒根定理	87
4.5 互易定理	90
习题	93
第 5 章 一阶电路分析	98
5.1 电容元件和电感元件	98
5.2 换路定则及初始值计算	107
5.3 一阶电路的零输入响应	110

5.4	一阶电路的零状态响应	116
5.5	一阶电路的全响应	120
5.6	一阶电路的三要素法	122
5.7	一阶电路的特殊情况分析	127
5.8	阶跃信号和阶跃响应	131
5.9	脉冲序列作用下的一阶电路分析	135
5.10	换路后指数函数与正弦函数激励下的一阶电路分析	139
	习题	141
第 6 章	二阶电路分析	150
6.1	RLC 串联电路的零输入响应	150
6.2	RLC 串联电路在恒定激励下的零状态响应和全响应	157
6.3	GCL 并联电路分析	160
6.4	一般二阶电路分析	162
	习题	164
第 7 章	正弦稳态分析	167
7.1	正弦量	168
7.2	正弦量的相量表示法	172
7.3	正弦稳态电路的相量模型	175
7.4	阻抗与导纳	180
7.5	正弦稳态电路的相量分析法	187
7.6	正弦稳态电路的功率	190
7.7	三相电路	197
7.8	非正弦周期电路的稳态分析	209
	习题	214
第 8 章	耦合电感和变压器电路分析	220
8.1	耦合电感	220
8.2	耦合电感的连接及其去耦等效	224
8.3	空芯变压器	229
8.4	理想变压器和全耦合变压器	232
8.5	含理想变压器电路的分析计算	235
8.6	一般变压器的电路模型	242
	习题	244
第 9 章	电路的频率特性	248
9.1	电路的频率特性与网络函数	248
9.2	RC 电路的频率特性	249
9.3	RLC 串联谐振	254
9.4	GCL 并联谐振	262
9.5	电源内阻及负载对谐振电路的影响	267
9.6	改善谐振特性的方法	275

9.7 LC 滤波器的概念	284
习题	290
第 10 章 大规模线性网络的分析方法	294
10.1 关联矩阵	294
10.2 基本回路矩阵	295
10.3 基本割集矩阵	296
10.4 矩阵 A 、 B 和 Q_l 之间的关系	297
10.5 大规模线性网络的分析方法	298
习题	303
第 11 章 二端口网络	305
11.1 二端口网络	305
11.2 二端口网络的方程与参数	306
11.3 二端口网络的等效电路	310
11.4 二端口网络的特性阻抗	312
11.5 二端口网络的连接	313
11.6 阻抗变换器	315
习题	316
第 12 章 简单非线性电阻电路	319
12.1 解析法	319
12.2 图解法	322
12.3 分段线性化法	324
12.4 小信号分析法	327
习题	330
第 13 章 磁路和铁芯线圈	333
13.1 磁场的主要物理量和基本性质	333
13.2 磁路的基本定律	336
13.3 铁磁物质的磁化过程	340
13.4 非线性恒定磁通磁路的计算	343
13.5 交流铁芯线圈的功率损耗和波形畸变	347
13.6 交变铁芯线圈的电路模型	351
习题	354
部分习题参考答案	357
参考文献	363

第 1 章 电路分析的基本概念

电路理论包括电路分析和电路综合两大方面内容。电路分析的主要内容是指在给定电路结构、元件参数的条件下,求取由输入(激励)所产生的输出(响应);电路综合则主要研究在给定输入(激励)和输出(响应)即电路传输特性的条件下,寻求可实现的电路的结构和元件的参数。本书仅限于学习电路分析方面的内容,且重点讨论线性非时变电路的基本理论和分析方法。

本章主要介绍电路分析的基本变量、电路基本定律——基尔霍夫定律和一些理想的电路元件。

1.1 实际电路和电路模型

实际电路是由各种电器按一定的方式互相连接而构成的电流的通路。它的主要功能是实现电能或电信号的产生、传输、转换和处理。

在通信技术、自动控制、电子计算机和电力等各个技术领域中,人们根据不同的需要用各种不同的电路来实现各自的任务。例如日常使用的收音机和电视机,能把接收到的微弱的无线电信号进行各种加工处理,变为人们能接收的声音和图像;又如计算机可对输入的数据进行指定的计算、储存和控制等。总之,实际电路种类繁多、千差万别,电路的各部分及其周围空间伴随着各种电磁现象和能量交换,从而形成一个复杂的物理系统。

电路理论是一门电的公共基础性的工程学科,电路理论是建立在理想化模型基础上的。电路理论的对象并不是实际电路,而是它们的数学模型——电路模型。电路模型是实际电路在一定条件下的科学抽象和足够精确的数学描述。电路理论中所说的电路,是指由各种理想电路元件按一定方式连接组成的总体。

理想电路元件是用数学关系式严格定义的假想元件。每一种理想元件都可以表示实际器件所具有的一种主要电磁性能。理想元件的数学关系反映实际电路器件的基本物理规律。

图 1-1 所示为 3 种基本理想电路元件的图形符号。其中,理想电阻元件仅表征消耗电能并转变成非电能的特征,理想电容元件仅表征储存或释放电场能量的特征,理想电感元件仅表征储存或释放磁场能量的特征。它们分别是实际电路中电阻器、电容器和电感器在一定条件下的近似化、理想化。

上述 3 种理想电路元件均具有两个端子,称为二端元件,又称单口元件。除二端元件外还有多端元件,以后还要讲到四端元件,如受控源、耦合电感和变压器等。

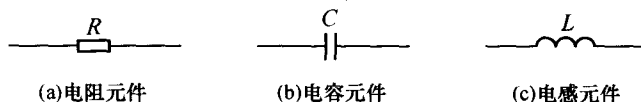


图 1-1 3 种基本电路元件的图形符号

由理想元件组成的电路称为电路模型。今后所提到的电路,除特别指明外均为电路模型,所提到的元件均为理想元件。

实际电路的模型化首先是实际器件的模型化。实际器件种类繁多,但其在电磁现象方面却有共同之处。任何一种实际器件,根据其不同的工作条件总可以用一个或几个理想元件的组合来近似表征它。用理想元件及其组合表征实际电路的每一个器件,可以得到该实际电路的电路模型。

应该指出,实际电路用电路模型来近似表示是有条件的。一种电路模型只有在一定条件下才是适用的,条件变了,电路模型也要作相应的改变。

理想元件是抽象的模型,没有体积和大小,其特性集中表现在空间的一个点上,称为集总参数元件。

由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路,简称集总电路。在集总电路中,任何时刻该电路任何地方的电流、电压都是与其空间位置无关的确定值。

本书只对集总参数电路进行分析,集总参数的条件即集总假设是电路分析的重要假设。当满足集总参数条件时,就可以采用由分立元件模型组成的集总参数电路模型。图 1-2 所示电路是一个手电筒电路的集总参数电路模型。图中电源元件 U_s 与电阻元件 R_s 的组合表示干电池,是提供电能的能源;电阻元件 r 表示手电筒金属壳体的电阻;电阻元件 R_L 表示灯泡,是用电设备,称为负载;图中连线为理想导线。

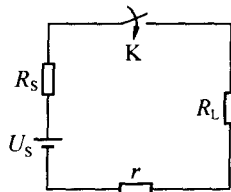


图 1-2 手电筒电路模型

应该指出,用集总电路来近似代替实际电路是有条件的:电路器件及其整个实际电路的尺寸 l 远小于电路最高工作频率所对应的波长 λ ,即

$$l \ll \lambda, \quad \lambda = c/f, \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s (光速)}$$

例如,我国电力系统照明用电的频率为 50Hz,其波长为 6000km。对于大多数用电设备来说,其尺寸与之相比可忽略不计,采用集总参数概念是合适的。而对远距离的通信线路和电力输电线路则不满足上述条件,就不能用集总参数来分析。又如在微波电路中,信号的波长 $\lambda = 0.1 \sim 10 \text{ cm}$,此时波长与元件尺寸属同一数量级,信号在电路中的传输时间不能忽略;电路中的电流、电压不仅是时间的函数,也是空间位置的函数;某一时刻从电路或器件一端流入的电流不一定等于另一端流出的电流。此时集总参数模型失效,应当采用分布参数或电磁场理论来分析。有关这部分内容将在后续课程中学习。

1.2 电路分析的变量

电流、电压、电荷、磁链、功率和能量是描述电路工作状态和元件工作特性的 6 个变量,一般都是时间的函数。其中电流和电压是电路分析中最常用的两个基本变量,本节着重讨论电流、电压的参考方向问题,以及如何用电流、电压表示电路功率和能量的问题。

1.2.1 电流及其参考方向

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,简称电流,用符号 i 表示,即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向都不随时间改变,则这种电流称为恒定电流,简称直流,用大写字母 I 表示。在这种情况下,通过导体横截面的电荷量 q 与时间 t 成正比,即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

在国际单位制(SI)中,电流、电荷和时间的单位分别为安[培](简称安,符号为 A)、库[仑](简称库,符号为 C)和秒(符号为 s)。1 安 = 1 库/秒。在通信和计算机技术中常用毫安(mA)、微安(μ A)作为电流单位。它们的关系是

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

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

在电路分析中,电流的大小和方向是描述电流变量不可缺少的两个方面。但是对于一个给定的电路,要直接给出某一电路元件中的电流真实方向是十分困难的,如交流电路中电流的真实方向经常在改变。即使在直流电路中,要指出复杂电路中某一电路元件的电流真实方向也不是一件容易的事,为此,引入电流参考方向的概念。

图 1-3 所示为连接电路 a、b 两点间的二端元件,流经它的电流 i 的参考方向用箭头表示,电流的参考方向可以任意选定。但一经选定,就不再改变。如经过计算其电流值为正值,表示参考方向与电流真实方向一致;如电流值为负值,表示参考方向与真实方向相反。

电流参考方向亦可用字符 i 的双下标表示。如对于图 1-3 来说可用 i_{ab} 表示电流参考方向由 a 指向 b。



图 1-3 电流的参考方向

电流是代数量,既有数值又有与之相应的参考方向才有明确的物理意义。只有数值而无参考方向的电流是没有意义的。所以在求解电路时,必须首先选定电流的参考方向。

今后,电路图中箭头所标电流方向都是电流的参考方向。电流的参考方向又叫电流的正方向。

1.2.2 电压及其参考方向

单位正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所做的功称为 a、b 两点间的电位差,即 a、b 间的电压,用符号 u 表示,即

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

习惯上把电位降落的方向(高电位指向低电位)规定为电压的方向。通常电压的高电位端标为“+”极,低电位端标为“-”极。

如果电压的大小和方向都不随时间改变,则这种电压称为恒定电压或直流电压。用大写

字母 U 表示。在这种情况下,电场力做的功与电荷量成正比,即

$$U = \frac{w}{q} \quad (1-4)$$

在国际单位制(SI)中,电压、能量(功)的单位分别为伏[特](简称伏,符号为 V)和焦[耳](符号为 J)。1 伏=1 焦[耳]/库。在通信和计算机技术中常用毫伏(mV)、微伏(μ V)作为电压的单位,它们的关系是

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

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

像需要为电流选定参考方向一样,电压也需要选定参考方向(也称参考极性)。在电路图上用“+”表示参考极性的高电位端,“-”表示参考极性的低电位端,如图 1-4(a)所示。电压的参考极性同样是任意选定的。如经过计算,电压值为正值,表示电压的参考极性与真实极性一致;如电压值为负值,则表示电压的参考极性与真实极性相反。

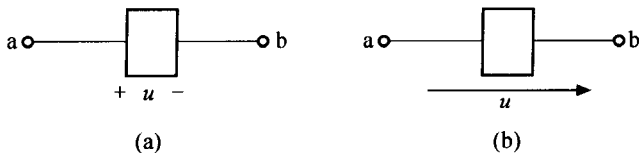


图 1-4 电压的参考方向

电压参考方向亦可用 u 的双下标表示,如对于图 1-4(a)来说,可用 u_{ab} 表示 a 点为参考正极性端“+”, b 点为参考负极性端“-”。当 $u > 0$ 时,从 a 到 b 为电位降或电压降;当 $u < 0$ 时,从 a 到 b 为电位升或电压升。

有时也可用箭头表示电压的参考方向。如图 1-4(b)所示箭头的方向是电位降落的方向。

与电流参考方向类似,不标注电压参考方向的情况下,电压的正负是毫无意义的。所以在求解电路时必须首先选定电压的参考方向。

1.2.3 关联参考方向

在电路分析中,电流与电压的参考方向是任意选定的,两者之间独立无关。但是为了方便起见,对于同一元件或同一段电路,习惯上采用“关联”参考方向。即电流的参考方向与电压参考“+”极到“-”极的方向选为一致,如图 1-5 所示。关联参考方向又称为一致参考方向。

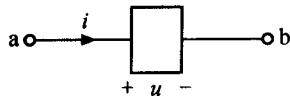


图 1-5 关联参考方向

当电流、电压采用关联参考方向时,电路图上只需标电流参考方向和电压参考极性中的任意一种即可。

1.2.4 功率和能量

电路的基本作用之一是实现能量的传输,能量对时间的变化率称为功率,用字符 p 表示,即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-5)$$

应用式(1-1)和式(1-5),得

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-6)$$

对于如图 1-6(a) 所示的二端电路, 当电压、电流采用关联参考方向时, 可用式 (1-6) 求取其吸收功率。若求出的功率值为正值, 表示该二端电路吸收了功率; 若求出的功率值为负值, 表示该二端电路供出了功率。

若二端电路的电压、电流采用非关联参考方向, 如图 1-6(b) 所示, 则可将电压或电流看成是关联参考方向时的负值, 故电路吸收功率的公式应改为

$$p = -u \cdot i \quad (1-7)$$

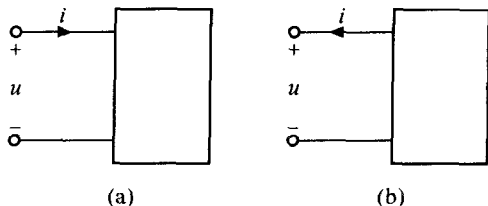


图 1-6 二端网络功率的计算方法

根据电压、电流是否为关联参考方向, 可选用相应的功率计算公式。但不论是式 (1-6) 还是式 (1-7) 都是按吸收功率进行运算的。若计算出功率为正值, 均表示吸收了功率; 若计算出功率为负值, 均表示供出了功率。

若二端电路为直流电路, 则电路吸收功率亦不随时间而改变。式 (1-6) 和式 (1-7) 可分别改写为

$$P = UI \quad (1-8)$$

$$P = -UI \quad (1-9)$$

在国际单位制 (SI) 中, 功率的单位是瓦 [特] (简称瓦, 符号为 W)。1 瓦 = 1 焦 [耳] / 秒 = 1 伏 · 安。

【例 1-1】 图 1-7 所示二端电路, 某时刻端子上的电压、电流值已知, 求该时刻各电路的吸收功率。

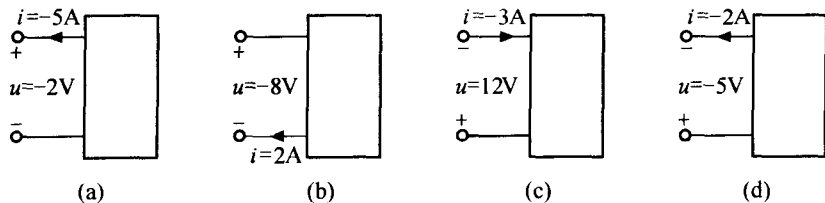


图 1-7 例 1-1 题图

解 图 (a) 电压、电流为非关联参考方向, 故用式 (1-7), 即

$$p = -u \cdot i = -(-2) \times (-5) = -10 \text{ W}$$

(a) 电路吸收 -10 W , 说明 (a) 电路供出 10 W 功率。

图 (b) 电压、电流为关联参考方向, 故用式 (1-6), 即

$$p = ui = (-8) \times 2 = -16 \text{ W}$$

(b) 电路吸收 -16 W , 说明 (b) 电路供出 16 W 功率。

图 (c) 电压、电流为非关联参考方向, 故用式 (1-7), 即

$$p = -ui = -12 \times (-3) = 36 \text{ W}$$

(c) 电路吸收 36 W 功率。

图 (d) 电压、电流为关联参考方向, 故用式 (1-6), 即

$$p = ui = (-2) \times (-5) = 10\text{W}$$

(d) 电路吸收 10W 功率。

对式(1-5)两边从 $-\infty$ 到 t 积分, 可得

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-10)$$

式(1-10)表示电压、电流为关联参考方向时, 从 $-\infty$ 到 t 时间内输入电路的总能量, 或称电路吸收的总能量。

1.3 电路元件

电路元件是组成电路模型的最小单元, 电路元件本身就是一个最简单的电路模型。在电路中电路元件的特性是由它端子上的电压、电流关系来表征的, 通常称为伏安特性, 记为 VCR (Voltage Current Relation), 它可以用数学关系式表示, 也可描绘成电压、电流的关系曲线——伏安特性曲线。

电路元件分为两大类: 无源元件和有源元件。

无源元件是指在接入任一电路进行工作的全部时间范围内总的输入能量不为负值的元件。用数学式表示为

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

或者

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \geq 0 \quad (1-12)$$

式中电压、电流采用关联参考方向, $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ 为输入该元件的功率。这个关系式对所有的 t , 对任何电压和由此电压引起的电流都必须成立。

任何不满足这个条件的元件即为有源元件。有源元件在它接入电路进行工作的某个时间 t , 上式 $w(t) < 0$, 即供出电能, 甚至任何时刻一直在供出电能。

本教材涉及的无源元件有电阻元件、电感元件、电容元件、互感元件和理想变压器元件。有源元件有独立电源、受控电源和理想运算放大器。本节将首先介绍电阻元件、独立电源和受控电源, 其余元件将在后面有关章节分别介绍。

1.3.1 电阻元件

电阻元件是无源二端元件, 是实际电阻器的理想化模型。

电阻元件按其伏安特性曲线是否为通过原点的直线可分为线性电阻元件和非线性电阻元件, 按其特性曲线是否随时间变化又可分为时变电阻元件和非时变电阻元件。因此, 电阻元件共有线性非时变、非线性非时变、线性时变、非线性时变 4 种类型。

1. 线性非时变(定常)电阻元件

通常所说的电阻元件, 习惯上指的是线性非时变电阻元件, 又简称电阻。其图形符号如图 1-8 所示。电压、电流在关联参考方向下, 其伏安特性曲线如图 1-9 所示。该特性曲线的数学描述为

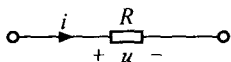


图 1-8 线性非时变
电阻元件的符号

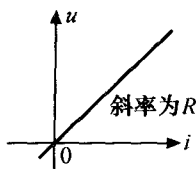


图 1-9 线性非时变电阻
元件的伏安特性曲线

$$u = R \cdot i \quad (1-13)$$

即欧姆定律,也称线性非时变电阻元件的约束方程。式中 R 的数值为该直线的斜率,是一个与电压、电流无关的常量,称为电阻元件的电阻量,简称电阻。式(1-13)表明在一定电压下电阻 R 的增大将使电流减小。可见电阻 R 是表征电阻元件阻碍电流能力大小的参量。电阻的单位为欧[姆](简称欧,符号为 Ω),1 欧=1 伏/安。

式(1-13)也可以用另一形式表示

$$i = G \cdot u \quad (1-14)$$

式中, G 称为电阻元件的电导量,简称电导。式(1-14)表明,在一定电压下,电导的增大将使电流增大,可见电导 G 是表征电阻元件传导电流能力大小的参量。电导的单位为西[门子](符号为 S),1 西[门子]=1 安/伏。

显然,电阻元件的电导与电阻之间有互为倒数的关系,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-15)$$

在电路分析中,究竟用电阻还是电导来表征电阻元件,应根据是否有利于表达式的简洁和运算方便来确定。

当电阻元件 $R \rightarrow \infty$ 或 $G=0$ 时,其伏安特性曲线与 u 轴重合,此时电阻元件相当于断开的导线,称为“开路”;当电阻元件 $R=0$ 或 $G \rightarrow \infty$ 时,其伏安特性曲线与 i 轴重合,此时电阻元件相当于一段理想导线,称为“短路”。

由式(1-13)或图 1-9 可知,电阻元件有一个重要特性,就是在任一时刻,电阻端电压(或电流)由同一时刻的电流(或电压)所决定,而与过去的电压或电流无关。从这个意义上讲,电阻是一种无记忆元件或称即时元件。所谓无记忆是指过去的工作经历对现在的工作无丝毫影响。

应该指出,式(1-13)、式(1-14)是电阻元件的电压、电流采用关联参考方向下欧姆定律的两种形式。若电压、电流采用非关联参考方向,则欧姆定律应改为

$$u = -R \cdot i \quad (1-16)$$

$$i = -G \cdot u \quad (1-17)$$

当电压、电流采用关联参考方向时,应用式(1-6)、式(1-13),线性非时变电阻元件的瞬时输入功率为

$$p = ui = i^2 R = u^2 / R \quad (1-18)$$

上式表明电流通过电阻时要消耗能量。电阻元件($R>0$)是一种耗能元件。

作为理想元件,电阻元件上的电压、电流可以不受限制地满足欧姆定律。但作为实际的电阻器件如灯泡、电炉等,对电压、电流或功率却有一定的限额。过大的电压或电流会使器件过热而损坏。因此,在电子设备的设计中,必须考虑器件的额定电流、额定电压和额定功率以及

器件的散热问题。

【例 1-2】 图 1-10 中,已知电阻两端瞬时电压 $u=4\text{V}$,且 $R=2\Omega$ 。试求该瞬时流经电阻的电流 i 和电阻吸收的功率 p 。

解 在图 1-10 所示电路中,电压、电流采用非关联参考方向,欧姆定律应使用式(1-16),即

$$u = -Ri$$

$$\text{故 } i = -\frac{u}{R} = -2\text{A}$$

$$\text{由式(1-7),该瞬时吸收功率为 } p = -u \cdot i = -u \left(-\frac{u}{R}\right) = \frac{u^2}{R} = 8\text{W}$$

此例说明电阻元件电压、电流的实际方向永远是一致的。在任何情况下,电阻不可能供出功率。

2. 非线性非时变电阻元件

通常所说的非线性电阻元件,习惯上指的是非线性非时变电阻元件,又简称非线性电阻。其图形符号如图 1-11 所示。其伏安特性曲线不再是一条通过原点的直线,通过它的电流与加在它两端的电压不成正比关系,或者说加在它两端的电压与通过它的电流 i 之比不为常数。

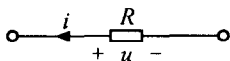


图 1-10 例 1-2 题图

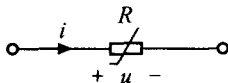
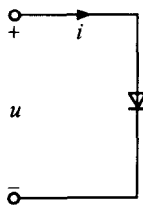


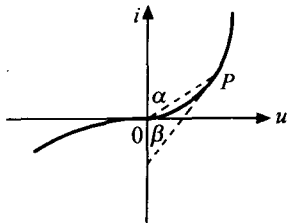
图 1-11 非线性非时变电阻元件的电路符号

半导体二极管如图 1-12(a) 所示,是一种非线性非时变电阻元件,其伏安特性曲线如图 1-12(b) 所示,数学关系式为

$$i = I_0(e^{u/U_0} - 1)$$



(a)



(b)

式中, I_0 、 U_0 都是常数,其值与给定的半导体二极管有关。显然,非线性电阻元件的电阻值随着电流或电压的大小、方向而改变。元件的特性要由整个伏安特性曲线来表征。

非线性电阻元件的电阻值有两种常见的表征方法: $u-i$ 曲线上某一点的比值 $R_s = u/i$,称为该点的静态电阻; $u-i$ 曲线上某一点的增量比值 $R_d = du/di$,称为动态电阻或增量电阻。显然,静态电阻和动态电阻都是电压(或电流)的函数。在图 1-12 中, P 点的静态电阻正比于 $\tan\alpha$, P 点的动态电阻正比于 $\tan\beta$ 。

图 1-13 和图 1-14 分别给出了充气二极管和隧道二极管的伏安特性曲线,它们都可用非线性电阻模拟。前者的端电压 u 可以表示成端电流 i 的单值函数,即 $u=f(i)$,称为电流控制型非线性电阻;后者的端电流 i 可以表示成端电压 u 的单值函数,即 $i=g(u)$,称为电压控制型非线性电阻。

图 1-13 和图 1-14 分别给出了充气二极管和隧道二极管的伏安特性曲线,它们都可用非线性电阻模拟。前者的端电压 u 可以表示成端电流 i 的单值函数,即 $u=f(i)$,称为电流控制型非线性电阻;后者的端电流 i 可以表示成端电压 u 的单值函数,即 $i=g(u)$,称为电压控制型非线性电阻。

3. 时变电阻元件

上面介绍的电阻元件均为非时变电阻元件。时变电阻元件有两类:线性时变电阻元件和非线性时变电阻元件。图 1-15 和图 1-16 分别画出了它们在电压、电流在关联参考方向下伏

安特性曲线的示意图。

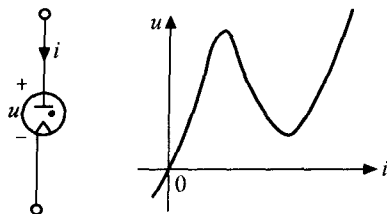


图 1-13 充气二极管及其伏安特性曲线

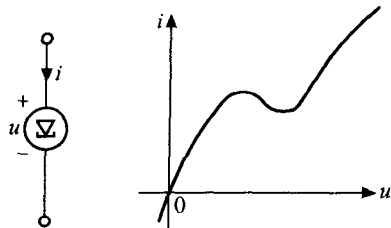


图 1-14 隧道二极管及其伏安特性曲线

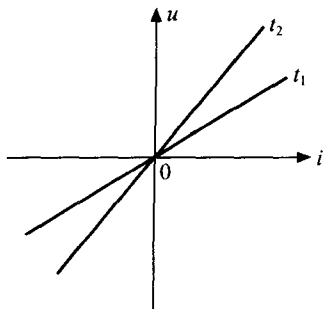


图 1-15 线性时变电阻元件伏安特性曲线

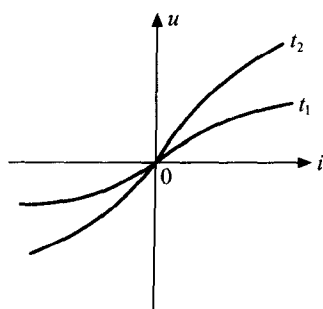


图 1-16 非线性时变电阻元件伏安特性曲线

最后指出,电阻元件就其伏安特性曲线是否对称于原点又可分为双向元件和非双向元件。一切线性电阻元件都是双向元件。双向元件接入电路时,它的两个外接端子可以互换而不影响电路工作。大多数非线性电阻元件是非双向元件,半导体二极管就是一种非双向元件。在接入电路时要注意其极性不可接错,以免影响电路正常工作。

1.3.2 独立电源

独立电源是有源元件,分为独立电压源和独立电流源。

1. 电压源

一个二端元件接到任一电路中,不论流过它的电流是多少,其两端的电压始终保持给定的时间函数 $u_s(t)$ 或定值 U_s ,该二端元件称为独立电压源,简称电压源。

电压源是实际电压源忽略其内阻后的理想化模型。具有如下特性:

- (1) 电压源的端电压由元件本身确定,与流经元件的电流无关;
- (2) 流经电压源的电流由与电压源相连接的外电路确定;

(3) 端电压保持定值 U_s 的电压源称为直流电压源,端电压保持给定时间函数 $u_s(t)$ 的电压源称为时变电压源。

电压源在电路图中的符号如图 1-17(a)所示,符号中的“+”“-”表示电压的参考极性。直流电压源也可以用图 1-17(b)所示图符表示,长横线表示电压的参考正极性,短横线表示参考负极性。一般为计算方便,常取电流参考方向与电压参考方向为非关联参考方向(参见图1-17)。

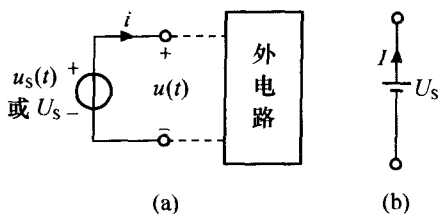


图 1-17 电压源图形符号