

裴留庆 编

电路理论基础

北京师范大学出版社

73.76

801

高等学校教学用书

电路理论基础

裴留庆 编



北京师范大学出版社

1110819

高等学校教学用书

电路理论基础

裴留庆 编

*

北京师范大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

一二〇一印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：28.5 字数：692千

1983年3月第一版 1983年4月第一次印刷

印数：1—18,000

统一书号：13243·25 定价：2.90元

前 言

近几年来，为适应电路课程革新的迫切需要，新的统编教材已出版了几部，在各校普遍采用，收到良好效果，为教师、学生和广大读者所欢迎。但是以综合性大学无线电专业为主要对象的电路教材还比较少。本书就是在教学实践基础上编写成的这类教材之一。它具有以下几点特色：

首先，本书把电路理论中的传统核心内容与伴随着电路器件创新、计算机广泛应用、以及大系统出现而产生的若干新概念和新分析方法，用统一观点组成一个整体，并注意到把信号、电路与系统有机地结合起来。

其次，考虑到作为电路课程的初级教科书，其主要任务应是给读者提供学科的基础内容，为学习网络理论与其他有关课程作准备。因此，本书着重介绍连续信号和线性电路的分析方法，而把离散信号、非线性电路、拓扑分析法、状态变量法以及电路的数值解法等重要内容，安排到其他课程中去，以避免内容过多，使初学者不易领会。

第三，书中概念准确，文字叙述流畅，表达简洁，每章末均有启发性的思考题。全书有丰富的例题与习题，不少例题具有典型性，以利于读者认识电路理论解决具体问题的思考方法。

全书分为三大部分。前三章是属于电路基本概念、基本定律和基本分析方法，为学习以后各章提供了基础。第二部分由第四章到第八章组成，这一部分是线性电路理论的基本内容，各章之间存在着内在联系。最后两章分别介绍双口网络与有源网络的特性和一般分析方法，并与电子线路课程中的有关内容相呼应。这样安排，使本书显得结构紧凑、循序渐进、重点突出，便于教学和阅读。

鉴于计算机作为一种运算手段和分析设计工具已渗入电子学各课程领域，而中小型数字计算机或微处理机在各校实验室多已配备，似应从第一门电路课就开始引入使用子程序，编写简单程序上机解题的练习。本书尚缺乏这方面的内容。如有条件，可作补充讲授或者安排为实验课题。

中国科学院研究生院

左 培

一九八二年夏

目 录

第一章 线性电路分析导论

§ 1-1 引 言	1
§ 1-2 电路模型和基本变量	1
1-2-1 电路模型化的必要性和可能性	1
1-2-2 基本变量以及参考方向	2
§ 1-3 功率和能量	4
§ 1-4 电路元件及其约束方程	4
1-4-1 电阻元件	5
1-4-2 电感元件	6
1-4-3 电容元件	8
1-4-4 电压源	10
1-4-5 电流源	10
1-4-6 单位制	12
§ 1-5 基尔霍夫定律	12
1-5-1 基尔霍夫电流定律(KCL)	13
1-5-2 基尔霍夫电压定律(KVL)	14
§ 1-6 单口与电路的等效变换	15
*§ 1-7 关于线性电路的几个概念	22
提要与思考	24
习 题	25

第二章 线性电路的基本分析方法

§ 2-1 引 言	30
§ 2-2 支路电流法	30
§ 2-3 网孔分析法	33
§ 2-4 节点分析法	38
*§ 2-5 未知变量的选择与独立方程的存在性	42
2-5-1 网络线图	42
2-5-2 割 集	43
2-5-3 未知变量的选择与独立方程的存在性	45
§ 2-6 线性电路基本分析方法的应用	47
§ 2-7 对偶性原理	51
提要与思考	53
习 题	54

第三章 网络定理

§ 3-1 引 言	60
§ 3-2 迭加定理	60
3-2-1 迭加定理的一般表述及其证明	61
3-2-2 迭加定理应用举例	62

§ 3-3 替代定理	64
3-3-1 替代定理及其证明	65
3-3-2 替代定理应用举例	66
§ 3-4 戴维南定理和诺顿定理	68
3-4-1 戴维南定理和诺顿定理的证明	70
3-4-2 戴维南定理和诺顿定理应用举例	71
3-4-3 戴维南和诺顿等效网络的参数的计算方法	74
§ 3-5 特勒根定理	76
3-5-1 特勒根定理应用举例	78
*3-5-2 特勒根定理在灵敏度分析中的应用	80
§ 3-6 互易定理	85
3-6-1 互易定理及其证明	85
3-6-2 互易定理应用举例	88
提要与思考	90
习 题	91
第四章 一阶电路	
§ 4-1 引 言	96
§ 4-2 基本信号	96
4-2-1 基本信号及其波形	97
1. 常 数	97
2. 指数信号	97
3. 正弦信号	97
4. 单位阶跃信号	99
5. 单位冲激信号	101
4-2-2 奇异函数的物理模型及其相互关系	102
§ 4-3 一阶电路分析	107
4-3-1 动态元件的记忆特性	107
4-3-2 一阶电路的零输入响应	109
4-3-3 一阶电路的零状态响应	113
4-3-4 一阶电路的完全响应	116
4-3-5 一阶电路的三要素法	118
4-3-6 一阶电路的单位阶跃响应	119
4-3-7 一阶电路的单位冲激响应	121
§ 4-4 几种典型的 RC 电路	126
4-4-1 RC 微分电路	126
4-4-2 RC 积分电路	127
4-4-3 RC 耦合电路	129
4-4-4 加速电路	130
提要与思考	131
习 题	132
第五章 二阶和高阶电路	
§ 5-1 引 言	138
§ 5-2 二阶电路分析	138
5-2-1 RLC 串联电路的零输入响应	138
5-2-2 RLC 并联电路的零状态响应	144

1. 二阶电路的单位阶跃响应	145
2. RLC 并联电路的单位冲激响应	146
5-2-3 二阶电路的完全响应	148
5-2-4 二阶电路对正弦信号的零状态响应	152
§5-3 动态电路分析中几个问题的说明	154
5-3-1 动态电路的微分方程阶次与电路结构的关系	154
5-3-2 怎样选择未知变量	155
5-3-3 非齐次微分方程特解的计算	156
5-3-4 动态电路中初始值的计算	157
*§5-4 高阶电路分析	161
§5-5 卷积积分	167
5-5-1 卷积积分的导出	167
5-5-2 卷积积分的运算规则	170
5-5-3 卷积积分的几何解释	174
5-5-4 线性电路对任意输入的完全响应	176
提要与思考	178
习 题	179

第六章 正弦稳态分析

§6-1 引 言	188
§6-2 正弦稳态响应的基本概念和电路的相量模型	188
6-2-1 正弦稳态响应的基本概念	188
6-2-2 正弦信号的相量表示和相量的主要性质	189
6-2-3 基本电路元件上伏安关系的相量表示	193
6-2-4 电路的相量模型以及阻抗和导纳概念	195
§6-3 基尔霍夫定律的相量形式以及正弦稳态电路的相量分析法	197
6-3-1 基尔霍夫定律的相量形式	197
6-3-2 正弦稳态电路的相量分析法	199
6-3-3 正弦稳态电路的网孔方程组	201
6-3-4 正弦稳态电路的节点方程组	203
6-3-5 正弦稳态电路的相量图解法	206
§6-4 正弦传递函数和电路的频率特性	208
6-4-1 正弦传递函数	210
6-4-2 一阶低通和一阶高通电路	211
6-4-3 二阶带通电路	213
§6-5 含互感元件的电路	220
6-5-1 互感元件的伏安关系和同名端	220
6-5-2 互感耦合元件的串联和并联	223
6-5-3 含有互感元件的正弦稳态电路的分析	225
6-5-4 互感元件的 T 型等效电路	227
*6-5-5 含互感元件的双调谐电路	230
6-5-6 理想变压器和全耦合变压器	233
§6-6 正弦稳态电路的功率与能量	238
6-6-1 无源单口网络的功率	238
6-6-2 复功率和无功功率	240
*6-6-3 特勒根定理的复数形式及其意义	242

6-6-4 谐振电路品质因数 Q 的能量意义	244
6-6-5 最大功率传输	245
提要与思考	248
习 题	249
第七章 付里叶分析	
§ 7-1 引 言	260
§ 7-2 周期信号的付里叶级数和频谱	260
7-2-1 狄里克雷条件	261
7-2-2 正交函数系	261
7-2-3 付里叶系数的计算	262
7-2-4 周期信号的频谱	263
7-2-5 付里叶级数的指数形式	266
7-2-6 周期矩形脉冲的频谱	268
§ 7-3 周期信号的对称性和连续性与付里叶系数的关系	271
7-3-1 周期信号的对称性与付里叶系数的关系	271
一、偶函数和奇函数及其主要性质	271
二、纵轴对称信号	272
三、原点对称信号	273
四、半周期重迭信号	273
五、半周期镜像对称信号	274
7-3-2 周期信号波形的连续性与付里叶系数收敛性的关系	278
§ 7-4 付里叶积分和付里叶变换	279
7-4-1 付里叶变换	280
*7-4-2 帕塞伐尔定理	283
7-4-3 一些典型信号的付里叶变换	283
7-4-4 关于付里叶变换的性质	290
§ 7-5 线性电路的付里叶分析	291
7-5-1 线性电路对周期信号的响应	292
7-5-2 线性电路对非周期信号的响应	295
§ 7-6 信号通过线性电路而不失真的条件	299
7-6-1 线性电路的滤波特性	299
7-6-2 线性电路无失真传输的条件	300
7-6-3 理想滤波器和佩利——维纳准则	302
*§ 7-7 网络带宽与信号上升时间的关系	305
提要与思考	308
习 题	309
第八章 拉普拉斯变换	
§ 8-1 引 言	320
§ 8-2 拉普拉斯变换	321
8-2-1 拉普拉斯变换的定义	321
8-2-2 拉氏变换的存在条件	323
§ 8-3 拉普拉斯变换的基本性质	324
8-3-1 拉氏变换的基本性质	324
8-3-2 周期信号的拉氏变换	338
表 8-3-1 一些常用函数的拉氏变换	339

表 8-3-2 拉氏变换的基本性质	340
§ 8-4 拉普拉斯反变换	341
8-4-1 拉氏反变换的直接计算	341
8-4-2 亥维赛展开定理——部分分式法	341
§ 8-5 线性网络的 s 域分析	349
8-5-1 线性网络的复频域模型	349
8-5-2 线性网络的 S 域分析	351
§ 8-6 网络函数	358
8-6-1 网络函数的定义	359
8-6-2 网络函数的性质	361
8-6-3 网络函数的图解表示法	364
*8-6-4 网络函数的主导极点	367
§ 8-7 波特图	369
8-7-1 网络函数的极点和零点与频率响应曲线之间的关系	370
8-7-2 一阶极点或零点对频率响应的贡献	371
8-7-3 共轭复数极点或零点的波特图	374
§ 8-8 卷积定理	378
提要与思考	380
习 题	381

第九章 双口网络

§ 9-1 引 言	390
§ 9-2 双口网络的参数	391
9-2-1 短路导纳参数	392
9-2-2 开路阻抗参数	393
9-2-3 传输参数	394
9-2-4 混合参数	396
表 9-2-1 双口网络各组参数矩阵的互换关系	397
9-2-5 双口网络各组参数之间的关系	398
§ 9-3 双口电路元件	398
9-3-1 理想变压器	398
9-3-2 理想受控电源	399
9-3-3 回转器	400
9-3-4 负阻抗变换器	401
§ 9-4 双口的等效电路	402
9-4-1 双口的 Y 参数等效电路	402
9-4-2 双口的 Z 参数等效电路	403
9-4-3 双口的 H 参数等效电路	404
§ 9-5 双口网络的联接及其参数	405
9-5-1 并——并式联接	405
9-5-2 串——串式联接	406
9-5-3 双口的串——并式和并——串式联接	407
9-5-4 级联	408
§ 9-6 双口有效联接的判别方法	409
9-6-1 Brune 实验方法	410
9-6-2 实现有效联接的变压器隔离法	411

§ 9-7 双口网络的传递函数	412
提要与思考	414
习 题	414
第十章 有源网络	
§ 10-1 引 言	420
§ 10-2 含受控源网络的一般分析方法	420
10-2-1 等效变换方法	421
10-2-2 网孔法和节点法	422
§ 10-3 运算放大器和密勒定理	423
10-3-1 简单运算电路的分析	424
10-3-2 密勒定理	426
10-3-3 利用运算放大器实现受控电源的原理电路	428
*§ 10-4 有源滤波器	429
10-4-1 一阶有源滤波器	430
10-4-2 二阶有源滤波器	431
提要与思考	435
习 题	435
主要参考书目	440
〔附 记〕	440
部分习题答案	441

第一章 线性电路分析导论

§ 1-1 引言

电路理论目前已经发展成为具有丰富内容的一门科学，它的理论和方法在许多领域都得到了广泛应用。

电路理论主要有两个分支：其一，电路分析，它的核心内容是在已知电路结构及元件性质的条件下，找出输入(或激励)与输出(或响应)之间的关系；其二，电路综合，是在已知输入和输出的条件下，求得电路的结构。本书将要研究的只是电路分析的基础理论，具体电路只涉及到线性集中参数元件组成的非时变电路。在电路分析中，线性电路的分析是基础，大量工程实际问题往往能够用线性电路模型描述，而且线性电路分析的理论和方法比较成熟，所用的数学工具也比较完备；另外，非线性电路的分析往往可以用修正的线性电路分析方法去实现。在实际电路中，电磁运动的规律可能具有非线性的实质，线性分析方法只是一种近似。就电路理论的目前水平来说，非线性电路的分析正是人们需要致力研究的重要课题。作为初级电路理论，我们只涉及电路分析中比较基本的内容。

本章主要讨论电路分析中的基本概念和基本理论，有些内容在《电磁学》中可能已经涉及，但在电路理论中将有自己的处理方法和表达形式，对于初学者来说必须明确。本章将为整个课程提供理论基础。

§ 1-2 电路模型和基本变量

线性电路是概括大量实际电气系统抽象出来的概念，它是指用线性电路元件构成的电路模型。电路系统的实际装置包括各种设备(如电源、变压器、各种仪表、连接导线以及为实现某种特定要求的电路装置——将电能转换为热能电炉、照明用的电灯、自动控制的电子线路、光电转换装置等等)，为了研究复杂电路系统的特性，就必须进行科学抽象与概括，用一些模型来代表实际电路元件的外部功能，并用这些模型元件按一定规则进行组合，使之具有实际元件和装置的主要电磁性能。模型元件只是实际元件的近似模拟，并非实际元件本身。以模型元件及其组合作为电路理论的研究对象，就是电路模型理论。我们所说的模型元件可分为两类：其一，具有实际的电路元件与它对应，它只是实际电路元件的理想化，如电阻器 R 、电容器 C 、电感器 L 以及电压源、电流源等；其二，没有直接与它们对应的实际电路元件，但是它们的某种组合却能反映一些复杂电路元件的主要特性和外部功能，如受控电源元件。概括地说，模型元件应当是实际物理元件(或装置)的理想化，能反映实际元件的主要电磁性能；同时，在一定条件下，根据电路模型得出的数学关系能反映实际装置中的基本物理规律。正是这样，模型(或理想)元件往往是用数学定义的，理想电路元件也称为实际电路元件的数学模型。

1-2-1 电路模型化的必要性和可能性

任何一门自然科学都是以自然界客观事物的某种运动形式作为其研究内容的，而客观事

物之间存在着各种各样的联系，其各种物理性质并非孤立存在，只是在一定条件下，某种性质占主要地位。为了表示事物在一定条件下的主要物理性能，就必须以模型代替该事物，这一点前边已作了说明。其实，力学中的质点和刚体概念，就正是为了描述物体机械运动而建立的模型。

在实际电路系统中，各种装置的工作过程都与电路中的电磁现象有关，例如电阻器的电阻是由于电场和磁场的能量与其他形式(如热能等)能量的相互转换而形成的；电感线圈中的磁场能量的储存与变化，决定于电路中的磁场分布状态；电容器吞吐电场能量的情况，与电路中的电场分布密切相关；导线中电流变化时，周围就伴随有电磁场的变化。以上这些情况说明，任一实际电路元件及整个电气装置总是与其周围的电磁场相联系的。在分析具体电路时，若将所有元件的电磁性能交织在一起，必然使问题复杂化，甚至无法研究。因为电路分析只研究电路元件的外部功能，不讨论电磁场的具体分布状况，所以人们就把电路中的电场的外部功能用电容元件代表，电容器则是电荷及电场能量的集中储存者；将电路中磁场的外部功能用电感元件代表，电感线圈集中着磁场能量和磁链；将电路中电磁场能量同其他形式能量相互交换的功能用电阻元件代表；把导线只看作各种电路元件的连通器，其电阻为零，能够允许电流自由流过而不积聚电荷和能量。也就是说，导线本身不损耗电磁场能量，也不计其周围的电磁现象。实践证明，在一定条件下，建立这样的集中参数元件模型，是同实际情况符合的，是可行的。所谓集中参数元件，是一种假设，是指在似稳条件下，若电路元件的外部尺寸很小，它每个端钮上的电流和任意两个端钮之间的电压在任何时刻都有确定的值。也就是说，若实际电路的尺寸远小于电路正常工作时信号最高频率所相应的波长，则集中参数元件模型就能适用。对二端电路元件而言，若流入一个端子的瞬时电流等于从另一个端子流出的瞬时电流，该二端元件即可称为集中参数元件。否则，此类模型失效，后边将要引出的欧姆定律和基尔霍夫定律也不能适用。

为了说明似稳条件的概念，讨论下边三种情况。我们知道，电磁波是以光速传播的，若以 c 代表光速， f 和 λ 分别表示电路中信号的频率和波长，在音频范围， $f=20\sim 25\text{KHZ}$ ，信号波长最小为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{25 \times 10^3} = 12 \text{ 千米}$$

这比实验室中的常用电路的尺寸要大得多，集中参数模型是适用的。在电子计算机中，最高频率约 500MHZ ，相应波长为 $\lambda=0.6$ 米，用集中参数元件模型分析这种电路，误差就相当大。在微波电路中，信号波长 $\lambda=0.1\sim 10$ 厘米，波长的值与空腔谐振器的尺寸属于同一数量级，这时就不能用集中参数模型代表空腔谐振器的外部特性了。一般说来，如果以 c 表示光速，电路的实际最大尺寸为 l ，其中信号的周期为 $T=\lambda/c$ ，并且定义 $\tau=l/c$ 为电磁波从电路一端传播到另一端的时间，当 $\tau \geq T$ 时，集中参数模型就不能适用了。我们在本书中将只讨论满足似稳条件的电路，所用的电路元件模型都是集中参数模型。

1-2-2 基本变量以及参考方向

在电路理论中为了定量地描述电路的状态或元件特性，一般选用电流和电压，或者电荷和磁链作为基本变量。所谓基本变量，是指能用它们方便地表示出电路中其他各种物理量。

电流，是指电荷在电场作用下的定向移动，其大小称为电流强度，用 $i(t)$ 表示。电流强度的定义：每单位时间内通过导体横截面的电量。若电量用 $q(t)$ 表示，则

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

电流强度简称为电流，习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的正方向或真实方向。电荷是电路理论中的物质实体，我们关心的是它的运动情况，电流作为一种物理量，它反映着电荷定向运动的强度，体现着电场作用在电路中的传递。

电流是个代数量，为了定量计算的需要，在电路元件上常常标出电流的方向，如图 1-2-1 所示，其中箭头即表示电流的正方向或参考方向。因为在分析电路时往往很难事先就确知电流的真实方向，所以正方向的选择和标定带有任意性，它本身并不能断定电路中的真实物理过程。然而，在选定正方向之后，若计算结果得出的电流数值为正，表示电流的真实方向与标定方向相同；若计算所得电流数值为负，表示电流的真实方向与标定正方向相反。可见，只有在标定了电流正方向，并根据计算结果的正、负数值，才能确定电流的真实方向。有了电流的标定方向，电流数值的正、负才具有明确的物理意义。若不标正方向，谈论电流的正、负是没有意义的。

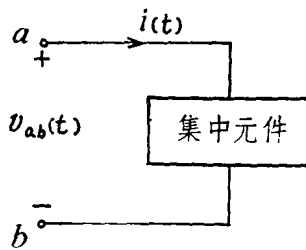


图 1-2-1

电压是电路理论中另一个基本变量，如图 1-2-1 所示， $v_{ab}(t)$ 是指单位正电荷由 a 移动到 b 的过程中，电场作的功。可见，电压从能量方面表示了电场的作功能力，它总是与电路中两点相联系。电压也是个代数量，但往往需要表明它的极性，例如图 1-2-1 中所示， a 点极性为正，称为高电位，并标以“+”号；而 b 点极性为负，称为低电位，并标以“-”号。习惯上把电压的真实方向规定为由高电位指向低电位。在电路图中用“+”“-”号表示各点电压极性的方法，与电流的标定正方向的作用类似，电压的“+”“-”极性并不能确定真实的物理状况，它的标定也具有任意性。在标定了各点电压的极性之后，两点之间的电压参考方向或正方向就是指由“+”到“-”的方向。若计算结果电压数值为正，表示电路中电压的真实极性与标定极性相同；若计算结果的电压数值为负，即表明电路中电压的真实极性与标定极性相反。这就是说，电压数值的正、负只有对应于电路图中的标定极性才有确切的物理含义。若不标电压的参考极性，谈论电压的正或负是没有任何意义的。

参考方向的概念在电路分析中是非常重要的，初学者对此要给以充分注意。

这里有一个问题，既然在电路中电流的参考方向和电压的参考极性在标定时都具有任意性，那么，二者之间有什么关系呢？就本来意义讲，二者是彼此独立的，没有任何限制，然而为了处理问题方便，常把二端电路元件上的电流参考方向与电压参考极性取为一致，称为关联参考方向，如图 1-2-1 所示的那样。在关联参考方向的情况下，二端元件上电位降的方向正好与该元件上电流的标定方向（即参考方向）相同。我们约定，本书中所有二端线性无源元件上的电流和电压都采用关联参考方向。在电流和电压采用关联参考方向的情况下，只要标出两者中的任一个的参考方向，另一个变量的参考方向也就同时给出了，可以省略不标出。这样不仅在确定电路元件的电压电流关系时便于写出数学表示式，而且物理概念也比较清楚。例如，由于图 1-2-1 中电压与电流取了关联方向，则

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

就表示在时刻 t 该支路元件吸收的功率。

应当指出：除了电流和电压之外，电荷 $q(t)$ 和磁链 $\Psi(t)$ 也可作为一对基本变量，在分

析时变电路或非线性电路时，后一对基本变量的优点表现得尤为突出。

§ 1-3 功率和能量

功率和能量在电路理论中是很重要的两个概念，因为从某种意义上说，电路的基本作用就是实现能量的传递。

假定图 1-3-1 中的 N 为线性单口电路，即流入一个端钮的电流 $i(t)$ 与从另一个端钮上流出的电流 $i'(t)$ 相等，习惯上称 $i(t) = i'(t)$ 为端口电流。 $v(t)$ 为端口电压，它与端口电流取关联参考方向。根据电压和电流的物理含义可知， t 时刻的瞬时功率 $p(t)$ 为

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1-3-1)$$

在一般情况下，若单口电路的端口电压和端口电流取关联方向时， $p(t) > 0$ ，表示该电路吸收功率；若 $p(t) < 0$ ，表示该电路向外提供功率。

时刻 t_0 时图 1-3-1 所示电路 N 得到的总能量为

$$w(t_0) = \int_{-\infty}^{t_0} v(t)i(t)dt \quad (1-3-2)$$

若 $w(t_0) > 0$ ，表明电路 N 从外界吸收了能量；若 $w(t_0) < 0$ ，表明电路 N 向外界提供了能量。对一个二端元件来说，若两个端钮之间的电压与其电流取关联方向，并且对于所有容许的电流和电压波形，满足条件

$$w(t_0) \geq 0, \quad \forall v(t); i(t) \quad (1-3-3)$$

则称该二端元件为无源元件。否则，称为有源元件。

如果二端元件满足条件

$$v(\infty) = v(-\infty) = i(\infty) = i(-\infty) = 0$$

就称它在时刻 $t = \infty$ 和 $t = -\infty$ 是处于松弛状态。对于松弛条件下的二端元件，当且仅当存在

$$w(\infty) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)i(t)dt = 0, \quad \forall v(t); i(t) \quad (1-3-4)$$

时，则称该二端元件为无损元件。

式(1-3-3)和式(1-3-4)中的符号 $\forall v(t); i(t)$ 的含义为：对所有容许的信号偶 $v(t)$ 和 $i(t)$ 而言。

§ 1-4 电路元件及其约束方程

前边曾经指出，本书中所研究的电路都是由模型化的理想元件构成的，每个电路元件都具有确定的物理性质和集中的参数，它们的适当组合能近似地描述实际电路元件或电路装置的外部特性。电路元件的参数表征着不同基本变量之间的相互关系，而且只决定于元件的性质。反映电路元件上电压与电流之间的关系的数学表示式，称为元件的伏安关系或元件的约束方程式。

按照不同的方法，电路元件可分为不同的类型。例如，从元件的能量特性看，有无源和有源两类，其中无源元件包括双向和单向两种。所谓双向元件，是指其同外电路相联接的端钮互换时，不改变整个电路的工作状态，象二端电阻器 R 、电容器 C 和电感器 L 等即属此种元件；不具有上述性质的元件称为单向元件，象 PN 结二极管等。有源元件包括独立电源

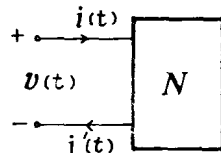


图 1-3-1

和受控电源两种。另外，若按外部端钮的数目分类，有二端元件和多端元件(或者单口元件和多口元件)两类。关于受控电源和多端元件的概念，我们将在第九章和第十章中详细介绍，本节只讨论二端电阻器、电感器、电容器、独立电压源和独立电流源等元件的概念及其它们的约束方程。

1-4-1 电阻元件

电阻器的概念是德国物理学家欧姆在 1826 年提出的。当电阻上的电压与电流取关联方向时，如图 1-4-1(a)所示，欧姆用实验证明

$$v(t) = Ri(t) \quad (1-4-1)$$

在 $v-i$ 平面上，这个关系为过原点的一条直线。这就是欧姆定律，它说明：在线性电阻上，电流和电压成正比。伏安关系满足式(1-4-1)的二端电阻元件，其伏安特性曲线如图 1-4-1(b)所示，若该伏安曲线的斜率不随时间变化，就称为线性定常(或非时变)电阻器。

电阻元件上的伏安关系也可表示为

$$i(t) = \frac{1}{R}v(t) = Gv(t)$$

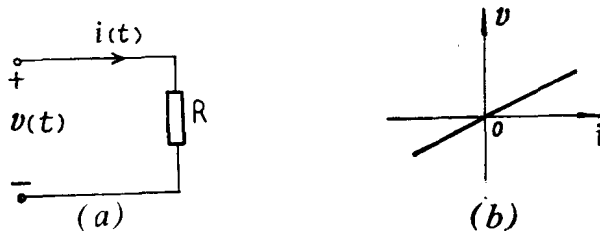


图 1-4-1

式中电阻 R 的单位为欧姆(Ω), G 为电导, 其单位是西门子(S)。

电阻元件的功率, 在电压和电流取关联方向时为

$$p = vi = i^2R = \frac{v^2}{R}$$

随着电路理论的发展, 电阻元件的概念也有所发展。如果一个二端元件在任意时刻 t , 其电压与电流的关系由 $v-i$ 平面上的一条曲线确定, 则该元件就称为电阻器, 它对应的曲线称为该电阻的伏安特性曲线。欧姆定律只是概括了线性定常电阻的伏安关系, 本书中所说的电阻即此类电阻器。根据电阻元件的一般定义, 电阻器上电压的瞬时值和电流瞬时值之间总是存在着一种代数关系, 即 $f(v, i, t) = 0$, 因此电阻元件称为瞬时元件或无记忆元件, 电阻器的这种伏安特性是十分有用的。

一个电阻元件, 若它的伏安特性曲线是过原点的直线, 则称为线性电阻; 如果线性电阻的伏安曲线的斜率不随时间变化, 就称为线性定常电阻。如果电阻元件的伏安特性曲线是非线性的, 就称为非线性电阻。非线性电阻元件在电子线路中大量存在, 作为例子, 我们给出 PN 结二极管和隧道二极管的伏安特性曲线, 分别如图 1-4-2(a), (b)所示。

如果一个二端非线性电阻元件的伏安特性曲线为 $v-i$ 平面上由负电压轴与正电流轴组成, 则该元件称为理想二极管。图 1-4-3(a), (b)分别表示出理想二极管的电路符号与伏安曲线。

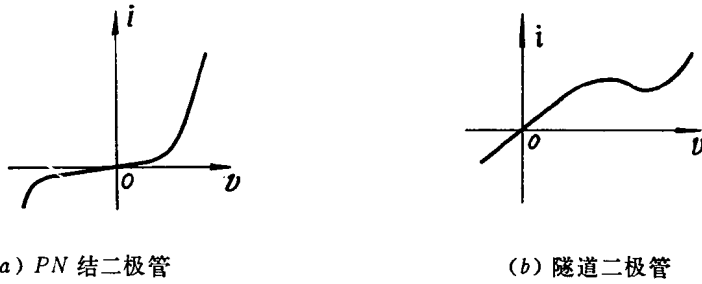


图 1-4-2 非线性电阻的伏安特性举例



图 1-4-3 理想二极管特性

由理想二极管伏安特性曲线可以看出，当它正向连接时，电路处于导通状态，二极管电阻为零；当它反向连接时，电路处于断开状态，二极管电阻为无穷大。在数字电路或自动控制电路中，二极管的这种性质得到了广泛应用。

1-4-2 电感元件

电感器的概念是英国物理学家法拉第在 1831 年首先提出的。电感器是电感线圈的模型，电流通过电感器时必然建立起磁场，在电感器中也必然储存有磁场能量。电感器的符号及关联方向如图 1-4-4(a) 所示。如果一个二端元件，在任意时刻 t ，它的磁链 $\psi(t)$ 与它的电流 $i(t)$ 之间的关系，能够用 $i-\psi$ 平面上的一条曲线确定，则该元件就称为电感元件。本书中的电感器，是指线性定常电感，其特性曲线满足方程

$$\psi(t) = Li(t) \quad (1-4-2)$$



图 1-4-4

式中 L 为常数，特性曲线为过 $i-\psi$ 平面原点的一条确定直线，斜率即 L ，如图 1-4-4(b) 所示。当式(1-4-2)中 ψ 、 L 、 i 的单位分别为韦伯(Wb)、亨利(H)和安培(A)，电感上的电压与电流取关联方向时，则有

$$v(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1-4-3)$$

上式表明, 某一时刻电感上的电压与该时刻电流的变化率成正比, 与该时刻电流的大小以及电流建立的历史过程都没有关系。可见, 电感具有动态特性, 属于动态元件。

在一般情况下, 电感元件的约束方程为 ψ, i 之间的代数关系, 即

$$f(\psi, i, t) = 0 \quad (1-4-4)$$

或将其约束方程写为

$$v(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (1-4-5)$$

图 1-4-5(a), (b) 分别给出了两种典型的 $i-\psi$ 关系曲线。

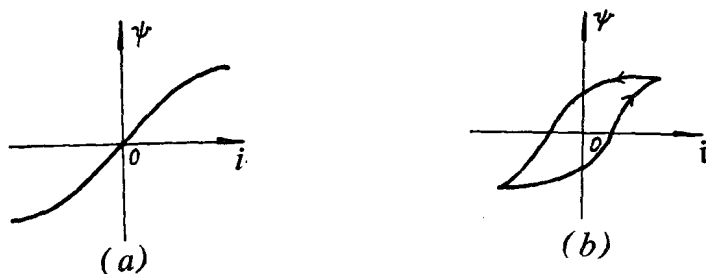


图 1-4-5 非线性 $i-\psi$ 曲线

由式(1-4-3)和式(1-4-5)可知, 若电感元件两端的电压为有限值, 则电感中的电流或磁链不能发生跃变, 即电感上的电流 $i_L(t)$ 或磁链 $\psi(t)$ 为时间的连续函数。这是线性电感元件的重要特性, 在确定含有电感元件电路的初始条件时, 这个特性非常有用。

电感元件的伏安关系也可表示为

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} v(\tau) d\tau + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \\ &= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-4-6)$$

此式表明: 任一时刻 t , 电感元件上的电流不仅决定于 $[t_0, t]$ 时间间隔内的所有电压值, 并且与初始时刻 (t_0) 的电流 $i(t_0)$ 有关系, 而 $i(t_0)$ 与 t_0 以前电感电压的“历史”情况有关。可见, 电感对它的电压具有“记忆”能力, 它属于记忆元件。式(1-4-6)指出, 只有当电感值 L 和初始电流 $i(t_0)$ 均给定时, 一个线性定常电感元件才算完全确定。这个结论今后将经常应用。

在电压电流取关联方向时, 任意时刻电感元件上的功率为

$$p = v i = L i \frac{di}{dt}$$

当电流为常数时, $p=0$, 这表明当电流通过电感时, 只要 $\frac{di(t)}{dt}=0$, 它就不储存能量; 若 $\frac{di}{dt} > 0$, 则 $p > 0$, 它将储存能量; 若 $\frac{di}{dt} < 0$ 时, $p < 0$, 它将释放能量。正由于此, 电感器也称为储能元件。

电感元件在某一时刻储存的总磁场能量为