

高等学校试用教材

姜卜香 高敦堂

电路与系统理论



高等教育出版社

内 容 提 要

本书根据国家教育委员会, 1983 年制定的《电路与系统理论教学大纲》编写而成。全书共分八章, 前六章介绍电路和系统的分析, 后两章介绍网络和滤波器的综合。每章附有练习题。适合于54学时教学。

本书适于无线电电子学专业和无线电物理学专业以及相近电类专业的本科生做为教材使用, 也可供工程技术人员参考。

责任编辑: 尹洪

高等学校试用教材

电路与系统理论

姜卜香 高教堂

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张14 字数351 000

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数 00 001— 4 145

ISBN 7-04-000005-9/TN·1

书号 15010·0883 定价 2.85 元

前 言

近三十年来,现代电子科学技术的发展突飞猛进,出现了许多新的电子器件和许多新的数学处理方法。现代“电路和系统理论”就是在这个过程中建立和发展起来的。“电路和系统理论”包括电路和系统的分析及电路和系统的综合两大部分:前者的任务是揭示电路和系统的内部或外部(端口)的特性,从而加以利用或实行控制;后者的任务则是获得预定特性的电网络或实现预定功能的系统以满足技术上的某种需要。因此“电路和系统理论”是从事无线电电子学和无线电工程等专业工作的理论基础。

本书是为无线电电子学和无线电物理专业以及相近的电类专业高年级学生而编写的教材。我们假定学生已经学过“高等数学”(包括应用数学)、“普通物理”及“模拟电子线路”等课程。本书将在此基础上进一步从电路元件模型的概念出发建立电路系统的一般方程,并讨论系统的反馈、稳定性及网络和滤波器的综合等。从而使读者在理论上有更深刻的认识,为从事有关的专业工作打下良好的基础。

本书力求反映近代电路和系统理论的新成就。在取材上对物理概念和数学方法是并重的,在讲清基本概念的前提下,把系统地介绍各种近代处理电路和系统问题的方法作为本书的重要任务,对频域和时域的分析方法,对无源和有源网络及滤波器的综合方法等均作了较全面的介绍,并讨论了有关的应用实例。为了不冲淡物理概念,本书不追求对纯数学公理的严格证明,而侧重物理概念的论述和基本方法的运用。

由于许多强非线性器件的出现,以及绝大多数最佳的和适应

式系统都是时变的和非线性的，使得对非线性的和时变的电路系统的研究成了目前电路和系统理论中最为活跃的分支，也是最有发展前途的一个部门。为了使读者尽早建立起时变的和非线性的概念，认识非线性特性，本书尽量做到把线性和非线性，时变和时不变等概念融会贯通。虽然本课程是以线性时不变电路系统为主的，但教材一开始就向读者展示了非线性和时变的概念，自始至终地把线性时不变电路系统作为一种特定情况来考虑。本书还专设一章讨论非线性电路的分析方法，进一步向读者介绍有关非线性系统中的一些特有的效应。

本书共分八章，第一章至第六章是关于电路和系统的分析，最后两章是关于网络和滤波器的综合。第一章讨论二端和多端电路元件的模型以及系统的描述和分类。第二章简单地阐述了网络图论的基本内容，导出了用图矩阵表示的克希霍夫电压定律和电流定律的一般方程，介绍了特勒根定理及其应用。第三章以网络图论为基础系统地介绍了包括节点分析，回路分析和割集分析在内的网络的一般分析方法。并讨论了含有受控电源的网络方程和正弦稳态情况下的电路方程，使同学具备分析大规模网络的能力。同时，在这一章中也简要地介绍了列写网络方程的视察法，提供了分析简单网络的捷径。第四、五章讨论了系统中的许多重要概念和方法。第四章讨论线性系统传递函数和各种响应，以及系统的反馈和稳定性等基本内容。第五章叙述状态变量表示法，主要介绍状态和状态变量的概念；列写状态方程的方法（包括非线性和时变的网络）；求状态方程的频域解、时域解等。还讨论了系统的稳定性，可控性和可观测性。并强调指出状态变量方法是建立非线性和时变系统方程、处理复杂系统的有效工具。第六章是专门讨论非线性电路分析的。讨论了非线性系统方程解的存在和唯一性问题；介绍了几种分析非线性系统的方法，包括迭代法、近似解的解析法和相平面方法，并以非线性无损电路的固有振荡为例，导出了

非线性系统固有振荡频率和振荡振幅之间的依赖关系；以二阶非线性电抗电路的受迫振荡为例，导出了滞后和跳跃现象等非线性效应；以自激振荡系统为例，讨论了非线性系统中的周期运动与相平面上的极限环的关系等。

第七、八两章是关于网络和滤波器的综合。第七章介绍线性时不变无源网络的综合，首先论述了正实函数和网络函数的可实现性问题，接着讨论可实现的单端口网络函数的性质和综合方法以及可实现的双端口网络传递函数的性质。最后介绍综合双端口网络的达林顿方法。第八章是关于无源和有源滤波器的综合设计，介绍有关滤波器综合设计的基础知识；各类滤波器的近似传递函数以及幅—频特性和相—频特性综合方法；阻抗和频率的归一化；滤波器的参量变换等。还讨论了几种常用的有源滤波器的结构和设计方法；并对灵敏度函数和开关电容滤波器作了简短的介绍。

本书作为大学本科生教材，预计在 72 学时内讲授，但教材内容的选取有一定的余地，使教师使用时有选择余地和便于灵活安排。本书除第一、二章为基础内容及第七、八章相互联系密切外，其余各章及第八章中有关小节，教师可以自行酌情处理，跳过其中的某些章节对学习其他章节影响不大，标有“*”号的章节更是如此。

本书各章备有练习题，以促进读者理解物理概念和数学方法，提高理论联系实际和解决问题的能力。

本书第一章至第六章由姜卜香同志执笔编写，第七、八两章由高敦堂同志执笔编写，最后由姜卜香同志定稿。徐慧芬同志为本书收集整理了一部分习题，陈金媛同志为本书绘制了全部插图。

原理科无线电教材编审委员会副主任委员凌燮亭教授在制订本书的编写大纲和编写过程中提出了许多宝贵的建议，编委吴培亨教授也给予了大力支持和许多指导，1985 年在兰州讨论本教材时，各校代表提出了许多可取的意见，在此一并致以诚挚的谢意。

由于水平限制,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编者

1986年8月于南京大学

目 录

前言

第一章 电路元件及系统的描述 (1)

§ 1.1 二端电阻器的数学描述 (1)

§ 1.2 其他二端元件 (5)

§ 1.3 多端网络元件 (10)

§ 1.4 系统的模型和分类 (23)

主要参考书 (32)

习题 (33)

第二章 网络图论和特勒根定理 (35)

§ 2.1 “网络图论”的基本术语 (36)

§ 2.2 网络线性图的矩阵表示及克希霍夫方程 (41)

§ 2.3 支路变量之间的关系 (51)

* § 2.4 特勒根定理及其应用 (54)

主要参考书 (58)

习题 (58)

第三章 线性时不变网络 s 域一般分析(拓扑矩阵方法) (63)

§ 3.1 线性时不变电路元件的 s 域模型 (63)

§ 3.2 节点分析法 (71)

§ 3.3 回路分析法 (75)

§ 3.4 割集分析法 (78)

* § 3.5 网络中含有受控电源时的电路方程 (81)

§ 3.6 正弦稳态情况下的电路方程 (87)

§ 3.7 列写网络方程的视察法 (91)

* § 3.8 对偶性原理 (98)

§ 3.9 线性时不变网络有唯一解的充分条件 (102)

主要参考书 (104)

习题 (105)

第四章 线性时不变网络的端口分析(s 域输入—输出分析法) (110)

§ 4.1 网络函数的定义	(110)
§ 4. 双端口网络参数	(122)
§ 4.3 网络的冲击响应和阶跃响应	(130)
§ 4.4 网络函数的零、极点和系统的稳定性	(133)
§ 4.5 双端口网络的瞬态响应和稳态响应	(139)
§ 4.6 正弦稳态条件及正弦稳态响应	(141)
§ 4.7 线性系统的传递函数和反馈	(145)
§ 4.8 系统的稳定性判据	(150)
主要参考书	(167)
习题	(167)
第五章 线性时不变网络的时域分析(状态变量法)	(175)
§ 5.1 状态和状态变量	(176)
§ 5.2 列写状态方程的视察法	(180)
* § 5.3 列写状态方程的系统方法	(194)
§ 5.4 线性时不变状态方程的解析解	(203)
§ 5.4-1 状态方程的频域解	(204)
§ 5.4-2 矩阵 A 的特征值	(208)
§ 5.4-3 状态方程的时域解	(209)
* § 5.5 时域和 s 域的联系	(219)
* § 5.6 系统的可控性和可观性	(225)
主要参考书	(229)
习题	(230)
*第六章 简单非线性电路分析	(236)
§ 6.1 非线性电阻网络的分析(牛顿—拉夫森方法)	(237)
§ 6.2 求二阶非线性动态电路近似解的解析法	(243)
§ 6.2-1 二阶非线性动态电路方程	(243)
§ 6.2-2 微扰法	(245)
§ 6.2-3 缓变振幅法	(249)
§ 6.2-4 谐波平衡原理	(253)
§ 6.2-5 非线性电抗回路的受迫振荡	(254)
§ 6.3 二阶非线性动态电路的相平面定性分析	(259)
§ 6.3-1 相平面和相轨迹	(259)

§ 6.3-2 奇点的分类和平衡态的稳定性	(263)
§ 6.3-3 相平面上的作图方法	(271)
§ 6.3-4 自激振荡与极限环	(278)
主要参考书	(279)
习题	(280)
第七章 网络综合基础	(283)
§ 7.1 网络函数的可实现性	(283)
§ 7.2 LC 无损策动点函数的性质和综合	(285)
§ 7.3 RC 和 RL 策动点函数的性质和综合	(296)
§ 7.4 传递函数的可实现性	(303)
* § 7.5 RC 传递函数的梯形结构的综合	(310)
§ 7.6 LC 无损传递函数的综合	(317)
主要参考书	(335)
习题	(335)
第八章 滤波器的综合设计	(339)
§ 8.1 滤波器的分类与归一化	(339)
§ 8.1-1 滤波器的分类	(339)
§ 8.1-2 阻抗和频率的归一化	(342)
§ 8.2 幅频特性的设计	(344)
§ 8.2-1 巴特沃思滤波器	(344)
§ 8.2-2 切比雪夫滤波器	(354)
§ 8.3 相频特性的设计(贝赛尔滤波器)	(366)
§ 8.4 滤波器的参量变换	(373)
§ 8.5 有源滤波器综合简介	(385)
§ 8.5-1 概述	(385)
§ 8.5-2 有源滤波器的级联实现	(387)
* § 8.6 灵敏度函数	(406)
* § 8.7 开关电容滤波器简介	(415)
主要参考书	(421)
习题	(422)
附录一 常用函数的拉普拉斯变换	(425)
附录二 凯莱—哈密顿原理	(426)

附录三	关于矢量和矩阵的范数	(427)
附录四	归一化低通切比雪夫滤波器分母多项式 $D(s)$	(432)

第一章 电路元件及系统的描述

电子电路是由各种电路元件连接而成的。我们通常遇到的电路元件有二端元件(电阻器、电感器、电容器和独立电源等)和多端元件(理想变压器、晶体管、运算放大器等)。在我们分析和设计电路时,第一件重要的工作是把这些具体的物理元件抽象成模型,并给以数学上的描述。

本章我们首先以二端电阻器为例,全面地讨论它的特性和数学描述,然后讨论其他二端元件。对于多端元件,我们只简单地讨论用得较多的几种。最后讨论系统及其分类。

§ 1.1 二端电阻器的数学描述

一个普通电阻器在电路中的符号如图 1.1-1(a)所示,电阻器的特性是用它两端的电压 $v(t)$ 和流过它的电流 $i(t)$ 来描述的。因此,关键性的概念是电阻器两端电压的瞬时值和流过它的电流的瞬时值所满足的代数关系式。即 $f(v(t), i(t), t) = 0$ 。这个关系式

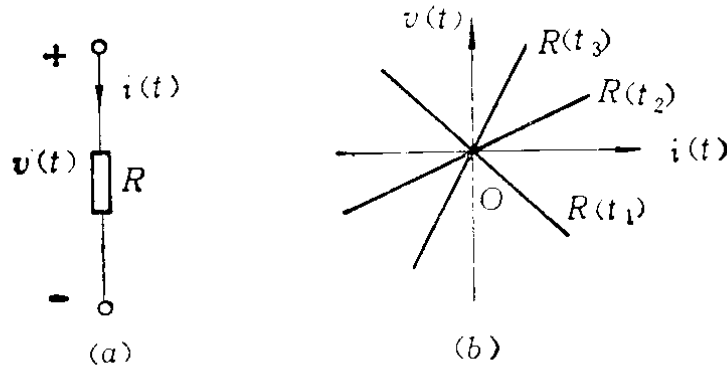


图 1.1-1
(a) 电阻器的符号; (b) 线性时变电阻器的特性

在 $v-i$ 平面内表现为一条曲线,即电阻在时刻 t 的特性曲线。我们可以根据 $v-i$ 平面内电阻的特性对电阻进行分类,并采用适当的数学表达形式。

(一) 时变与时不变电阻器

如果电阻器的 $v-i$ 特性不随时间变化,则称之为时不变电阻器。如果一个电阻器的特性随着时间 t 变化,则称之为时变电阻器。例如大家熟悉的电位计,当我们转动其轴使滑动触头的位置改变时,电阻值也随之改变,这就是线性时变电阻器的一个例子。图 1.1-1(b)表示了一个线性时变电阻器在几个不同时刻的特性曲线。

(二) 线性与非线性电阻器

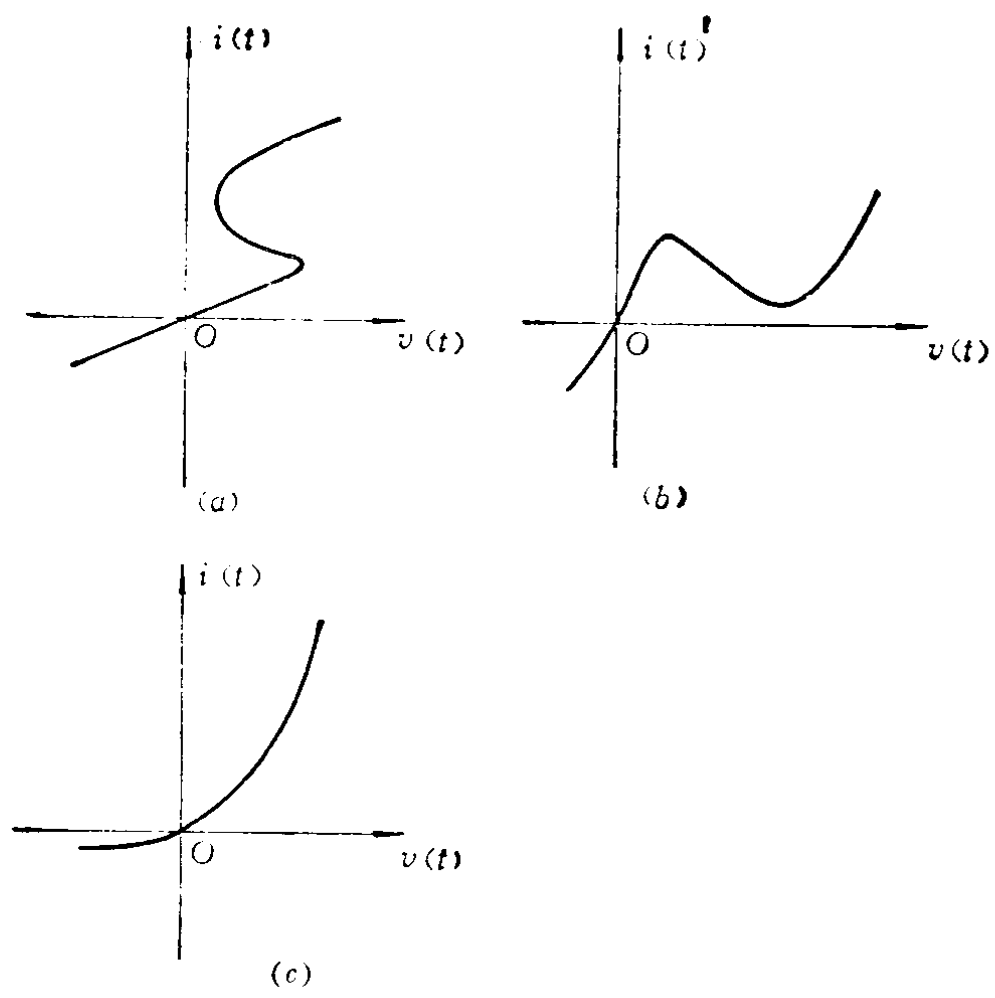


图1.1-2 非线性电阻器特性
(a) 充气二极管;(b) 隧道二极管;(c) p-n结型二极管

如果电阻器的特性是 $v-i$ 平面上通过原点的直线, 则称此电阻器为线性电阻器。如果电阻器的特性在 $v-i$ 平面上不是通过原点的直线, 则称之为非线性电阻器。一些非线性电阻器的特性如图 1.1-2 所示。

非线性电阻器的特性曲线有各种各样的形状, 在图 1.1-2(a) 中, 充气二极管两端的电压 $v(t)$ 是流过它的电流 $i(t)$ 的单值函数, 即

$$v(t) = f(i(t), t) \quad (1.1-1)$$

对于任意一个时刻 $t \geq 0$, 在函数 $f(\cdot, t)$ 的定义域中的每一个 i 值, 最多只有一个 v 值与之对应, 故称此类电阻器为流控电阻器。

在图 1.1-2(b) 中, 流过电阻器的电流是它的两端电压的单值函数。即

$$i(t) = g(v(t), t) \quad (1.1-2)$$

故称此类电阻器为压控电阻器。压控电阻器在电子电路中有广泛的应用。隧道二极管就是压控电阻器的例子。

在图 1.1-2(c) 中, 通常用的 p-n 结型二极管的特性是单调的, 故它既可称为压控电阻器, 也可称为流控电阻器。

时变的和非线性的电阻器在电子线路中常用作检波器、倍频器、调制器、限幅器等。在“模拟电子线路”课程中大家已学过有关内容, 这里不再赘述。

实际电阻器的特性是复杂的, 是非线性的和时变的, 其 $v-i$ 关系式一般地可以表示为:

$$v(t) = f(i(t), t) \quad (1.1-3)$$

对于 $t \geq 0$, $f(\cdot, t)$ 是可逆函数, 其逆函数用 $g(\cdot, t)$ 表示。式(1.1-3)可写作:

$$i(t) = g(v(t), t) \quad (1.1-4)$$

如果一个电阻器的特性不明显地随时间变化, 则可将此电阻

器看作时不变电阻器,此时(1.1-3)式简化为:

$$v(t) = f(i(t)) \quad (1.1-5)$$

若电阻器的特性曲线可以近似地看作为通过原点的直线,即 $f(\cdot, t)$ 是 i 的线性函数,则此类电阻器为线性时变电阻器, (1.1-3)式简化为:

$$v(t) = R(t)i(t) \quad (1.1-6)$$

若电阻器的特性既是线性的又不随时间变化,此时电阻器称为线性时不变电阻器,它的 $v-i$ 关系式为:

$$v(t) = Ri(t) \quad (1.1-7)$$

电阻值 R 是一个常数. 实际上,线性时不变电阻器是不存在的. 但是根据实际使用需要,在一定的电压和电流范围内,许多普通电阻器可以近似地看作是线性的和时不变的.

线性时不变电阻器的两个极端情况是开路和短路. 如果一个两端元件,无论它两端的电压是什么值,它所具有的支路电流都等于零,则称之为开路. 开路特性曲线是 $v-i$ 平面上的 v 轴,如图 1.1-3(a)所示. 这个特性曲线具有无限大的斜率,也就是 $R = \infty$. 相反,如果一个两端元件无论流过它的电流是什么值,它两端的电压都等于零,则称之为短路. 短路特性曲线是 $v-i$ 平面上的 i 轴,如图 1.1-3(b)所示. 这个特性曲线的斜率为零,也就是 $R = 0$.

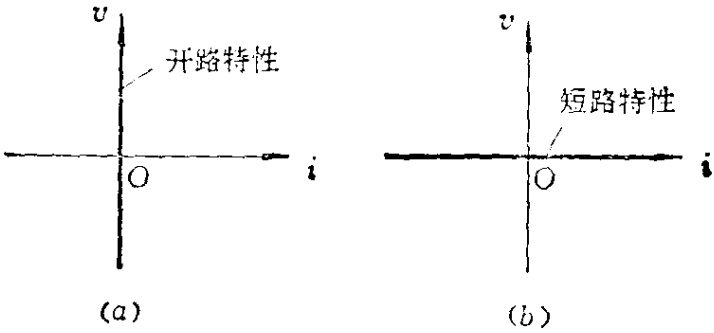


图 1.1-3
(a) 开路特性; (b) 短路特性

(三) 有源的和无源的电阻器

根据电阻器是否从外界吸取能量，又可将电阻器分为有源的和无源的。如果一个电阻器总是从外电路吸取能量，则称为无源电阻器。如果一个电阻器有时能向外电路释放能量，则称为有源电阻器。例如当我们在 t_0 时刻将信号加到电阻器两端，则在 t_0 到 t 的时间间隔里电阻器所吸收的能量为：

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t v(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1.1-8)$$

其中 $v(t)$ 是电阻器两端的电压， $i(t)$ 是电阻器中流过的电流。

若对于任意的初始时刻 t_0 ，任意的 $t \geq t_0$ ，以及所有的 $v(t)$ 、 $i(t)$ 对，均有 $W(t_0, t) \geq 0$ ，则说此电阻器是无源的。相反，若对于某些 t_0 ，某些 $t \geq t_0$ 和某些 $v(t)$ 、 $i(t)$ 对，有 $W(t_0, t) < 0$ ，则说此电阻器是有源的。

§ 1.2 其他二端元件

二端电容器和二端电感器的特性可以用与二端电阻器相类似的方式来描述。所不同的是电容器的特性是用它所储存的电荷 $q(t)$ 和它两端的电压 $v(t)$ 之间所满足的代数关系式描述的，这个关系式在 $v-q$ 平面上表现为一条曲线；而电感器的特性是用它的磁通 $\phi(t)$ 和流过它的电流 $i(t)$ 之间的代数关系式描述的，它在 $i-\phi$ 平面上表现为一条曲线。因此，可以根据这些特性曲线的形状及是否随时间变化而把电容器和电感器分为线性的和非线性的，时变的和时不变的。包含定片和随时间旋转的动片的平行板电容器就是时变电容器，而变容二极管可模拟为非线性电容器。时变电容器和非线性电容器常作为电调谐器件，还被用作参量放大器和振荡器等。

电容器在电路中常用图1.2-(a)的符号表示。几乎所有的普通电容器的特性都如图1.2-1(b)所示，曲线单调上升，因此它既

是压控的,又是荷控的. 电容器的 v - q 关系式可以表示为:

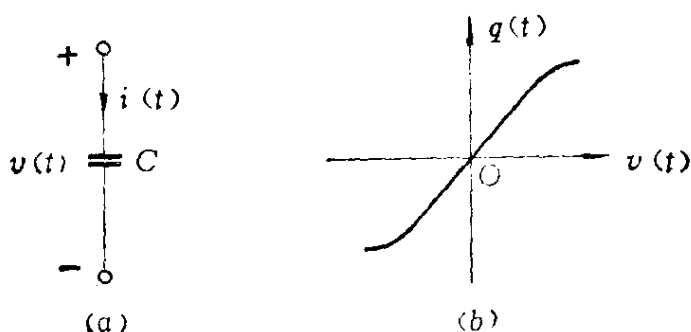


图 1.2-1
(a) 线性电容器符号; (b) 普通电容器的特性

$$v(t) = h(q(t), t) \quad (1.2-1)$$

或
$$q(t) = f(v(t), t) \quad (1.2-2)$$

函数 $h(\cdot, t)$ 和 $f(\cdot, t)$ 是可逆的.

根据 $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$, 我们可以得到各类电容器的 v - i 关系式.

对于非线性时不变电容器, $q(t) = f(v(t))$

$$i(t) = \frac{df}{dv} \frac{dv}{dt} \quad (1.2-3)$$

对于线性时变电容器, $q(t) = C(t)v(t)$

$$i(t) = C(t) \frac{dv(t)}{dt} + v(t) \frac{dC(t)}{dt} \quad (1.2-4)$$

对于线性时不变电容器, $q(t) = Cv(t)$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (1.2-5)$$

其中 C 是常数. 它是普通电容器在 i 和 v 有限的取值范围内的近似情况. 将式(1.2-5)积分, 得:

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1.2-6)$$

此式中隐含了电容器在 $t = -\infty$ 时的初始条件为零, 这种表示法在

以下的章节中都采用而不再加说明. 式(1.2-6)也可写成下面的形式:

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \\ &= v(t_0) + v(t_0, t) \end{aligned} \quad (1.2-7)$$

其中:
$$v(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau \quad (1.2-8)$$

$$v(t_0, t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (1.2-9)$$

$v(t_0)$ 代表时刻 t_0 电容器两端的电压, $v(t_0, t)$ 代表区间 $[t_0, t]$ 上电流波在电容器上产生的电压. 由此可见, 电容器两端的电压 $v(t)$ 在 t 时刻的值依赖于它的初始值 $v(t_0)$ 和区间 $[t_0, t]$ 上所有的电流值. 因此, 我们说“电容器有记忆力”, 并且常把这样的元件称为动态元件, 或记忆元件.

电感器符号如图 1.2-2(a).

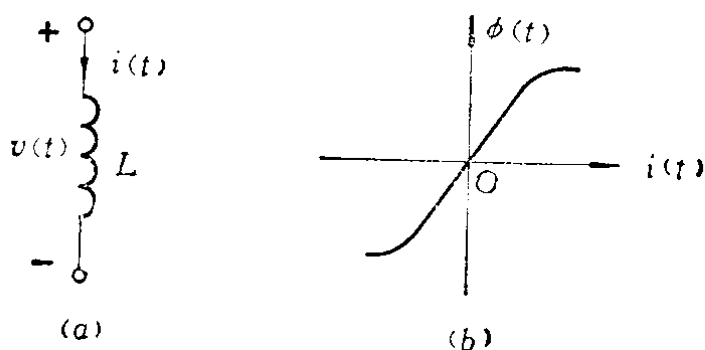


图 1.2-2

(a) 线性电感器符号; (b) 单调电感器的特性

图 1.2-2(b)所示的电感器特性是单调的. 因此既可看作是磁控的, 也可看作是流控的. 其特性关系式可以表示为:

$$i(t) = h(\phi(t), t) \quad (1.2-10)$$

或
$$\phi(t) = f(i(t), t) \quad (1.2-11)$$

由法拉第电磁感应定律, $v(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$, 可直接求得流控电感器的 $v-i$ 关系式. (其中 ϕ 的单位是韦伯, v 的单位是伏特).