

高等学校教材

电 路 分 析

张永瑞 王松林 李小平

高等教育出版社

内容提要

本书是根据国家教育部修订的《高等工业学校电路分析基础基本要求》,并充分考虑各院校新教学计划时数及现代电子科技新的发展趋势,为电子信息类专业本科生编写的教材。全书由电路基本概念与定律、电阻电路一般分析法、电路定理、动态元件、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、频率特性、双口网络、非线性电阻电路、OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算等十一章内容组成。基本概念讲述透彻,基本分析方法归类恰当、思路清晰、步骤明确;举例类型多、结合工程实际;所介绍的 OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算,对读者学习、掌握现代电路分析的方法和工具,跟上电子科技发展的潮流非常有益。本书可作为通信工程、电子信息工程、信息工程、电子科学与技术、计算机科学技术等专业的本科生教材,对从事电子类专业的工程技术人员亦有重要的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析 / 张永瑞, 王松林, 李小平. —北京: 高等教育出版社, 2004. 10

ISBN 7-04-014530-8

I. 电... II. ①张... ②王... ③李... 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 094409 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16
印 张 26.75
字 数 480 000

版 次 年 月第 1 版
印 次 年 月第 次印刷
定 价 30.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号: 14530-00

前 言

加强基础、拓宽专业口径、培养通用型人才,适应社会对人才知识结构的需求,这是各高等院校新教学计划共同的培养目标之一。而改革课程体系,科学地整合课程内容,使用现代化的教学手段与方法,这是更深层次、具体的教育改革内容。本书就是基于这样的时代背景,并考虑进入 21 世纪电工电子系列课程改革趋势、潮流及取得的新成果,特为通信工程、电子信息工程、探测制导与控制、计算机科学与技术、测控技术与仪器等专业的本科生编写的。

本书编写的主要特点是:

(1) 加强基本概念,筛选经典内容,突出基本、常用的电路分析方法。

(2) 不追求理论上的系统、完整、方方面面一应俱全,也不回顾电路理论发展的历史,但注重基础理论的应用。举例力求联系工程实际,具有典型性。

(3) 讲述概念力求简练、准确、清晰,问题讨论重视从物理概念上讲清道理,多做定性分析,对于必需的定量数学推导,交代清楚思路,过程简捷,结论明确醒目。

(4) 注重教学方法。作为教材应使教师教学实施方便,学生容易自学,本书融入了编者几十年在本课程教学中的经验、心得和体会。在结构安排上注重逻辑性和条理性,文字表述方面力求通俗易懂。

(5) 引入先进的电路分析方法及工具软件。时代在前进,科学技术在日新月异地发展,人才培养的模式也应与之适应,现代电路与系统中使用 OrCAD/PSpice、MATLAB 工具软件非常普遍,在本书的第十章和第十一章安排了这两部分的内容,目的是使本科生在大学学习阶段就基本学会现代电路分析中先进的分析方法并会使用现代的工具软件,待毕业后走上工作岗位,能很快地适应现代电路分析、设计工作的需要。

本书由电路基本概念与定律、电阻电路一般分析法、电路定理、动态元件、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、频率特性、双口网络、非线性电阻电路、OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算等十一章内容组成。编写内

容与深浅度符合教育部教学指导委员会制定的电路分析基础课程的基本要求。张永瑞同志编写一、二章,王松林同志编写三、四、五、九、十、十一章,李小平同志编写六、七、八章,全书由张永瑞主编并负责统稿。本书承蒙国家教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、西北工业大学段哲民教授审稿,段教授仔细审阅并提出了许多宝贵的意见,谨致以衷心的感谢。在编写本书稿的过程中得到了作者同事们的许多帮助,在这里也一并表示衷心的感谢,还要感谢我们参阅的所有文献的作者们,是他们编著的好教材为我们提供了丰富的资料。

限于编者水平,书中定有不少缺陷和错误,敬请读者批评指正。

编者于西安电子科技大学

2004. 8

目 录

第一章 电路的基本概念与定律

1.1 电路模型

1.1.1 实际电路组成与功能

1.1.2 电路模型

1.2 电路变量

1.2.1 电流

1.2.2 电压

1.2.3 电功率

1.3 电阻元件与欧姆定律

1.3.1 电阻元件

1.3.2 欧姆定律

1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量

1.4 理想电源

1.4.1 理想电压源

1.4.2 理想电流源

1.5 基尔霍夫定律

1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

1.6 电路等效

1.6.1 电路等效的一般概念

1.6.2 电阻的串联等效与并联等效

1.6.3 理想电源的串联等效与并联等效

1.7 实际电源的模型及其互换等效

1.7.1 实际电源的模型

1.7.2 电压源、电流源模型互换等效

1.8 电阻 Δ 、Y 电路互换等效

1.8.1 Δ 形电路等效变换为 Y 形电路

- 1.8.2 Y形电路等效变换为 Δ 形电路
- 1.9 受控源及含受控源电路的等效
 - 1.9.1 受控源
 - 1.9.2 含受控源电路的等效
- 1.10 运算放大器概述
 - 1.10.1 理想运放的图形符号及电路模型
 - 1.10.2 理想运放三种输入方式与虚短路、虚断路的概念
 - 1.10.3 运放的两种典型运算

习题一

第二章 电阻电路的一般分析方法

- 2.1 图与电路方程
 - 2.1.1 网络(电路)的拓扑图
 - 2.1.2 回路、割集、树
 - 2.1.3 KCL和KVL的独立方程
- 2.2 $2b$ 法和 b 法
 - 2.2.1 $2b$ 法
 - 2.2.2 b 法
- 2.3 回路法与网孔法
 - 2.3.1 回路法
 - 2.3.2 网孔法
- 2.4 割集法与节点法
 - 2.4.1 割集法
 - 2.4.2 节点法

习题二

第三章 电路定理

- 3.1 齐次定理和叠加定理
 - 3.1.1 齐次定理
 - 3.1.2 叠加定理
- 3.2 替代定理
- 3.3 等效电源定理
 - 3.3.1 戴维宁定理
 - 3.3.2 诺顿定理
 - 3.3.3 等效电源定理应用举例
- 3.4 最大功率传输定理

3.5 特勒根定理

3.6 互易定理

习题三

第四章 动态元件

4.1 电容元件

4.2 电感元件

4.3 电容与电感的串、并联等效

4.4 耦合电感元件

4.4.1 耦合线圈

4.4.2 耦合电感的伏安关系

4.4.3 耦合电感的 T 形去耦等效电路

4.5 变压器

4.5.1 理想变压器

4.5.2 全耦合变压器的模型

4.5.3 实际变压器的模型

习题四

第五章 动态电路的时域分析

5.1 动态电路的方程及其解

5.1.1 动态电路方程的建立

5.1.2 微分方程的经典解法

5.2 电路的初始值

5.2.1 独立初始值

5.2.2 非独立初始值

5.3 一阶电路的零输入响应与时间常数

5.4 一阶电路的零状态响应

5.5 一阶电路的全响应——三要素公式

5.6 一阶电路的阶跃响应

5.6.1 阶跃函数

5.6.2 阶跃响应

5.7 二阶电路分析

5.7.1 零输入响应

5.7.2 阶跃响应

5.8 正弦激励下一阶电路的响应

习题五

第六章 正弦稳态电路分析

6.1 正弦量

6.1.1 正弦量的三要素

6.1.2 正弦量的有效值

6.1.3 相位差

6.2 正弦量的相量表示

6.2.1 正弦量与相量

6.2.2 正弦量的相量运算

6.3 电路定律的相量形式

6.3.1 无源元件 VAR 的相量形式

6.3.2 KCL 与 KVL 的相量形式

6.4 阻抗与导纳

6.4.1 阻抗与导纳

6.4.2 正弦稳态电路相量模型

6.5 正弦稳态电路的相量分析法

6.5.1 方程法

6.5.2 等效法

6.5.3 相量图的辅助解法

6.6 正弦稳态电路的功率

6.6.1 一端口电路的功率

6.6.2 最大功率传输条件

6.7 含耦合电感与理想变压器电路的正弦稳态分析

6.7.1 回路法分析

6.7.2 一次侧、二次侧等效电路

6.7.3 T 形去耦等效电路

6.8 三相电路

6.8.1 对称三相电源

6.8.2 Y-Y 电路分析

6.8.3 Y- Δ 电路分析

习题六

第七章 电路的频率响应

7.1 频率响应的基本概念

7.1.1 网络函数

- 7.1.2 频率响应
 - 7.2 一阶电路的频率响应
 - 7.2.1 RC 一阶低通电路
 - 7.2.2 RC 一阶高通电路
 - 7.2.3 RC 一阶全通电路
 - 7.3 RLC 二阶串联电路的频率响应
 - 7.3.1 RLC 二阶串联电路的频率响应
 - 7.3.2 RLC 串联谐振电路
 - 7.4 RLC 二阶并联电路的频率响应
 - 7.4.1 实用 RLC 并联谐振电路
 - 7.4.2 RLC 二阶并联电路的频率响应
- 习题七

第八章 二端口网络

- 8.1 二端口网络的方程与参数
 - 8.1.1 Z 参数方程和 Y 参数方程
 - 8.1.2 A 参数方程
 - 8.1.3 H 参数方程
 - 8.1.4 各种参数之间的关系
 - 8.2 二端口网络的网络函数
 - 8.2.1 用 Z 参数表示网络函数
 - 8.2.2 用 A 参数表示网络函数
 - 8.2.3 特性阻抗
 - 8.3 二端口网络的等效
 - 8.3.1 二端口网络的 Z 参数等效电路
 - 8.3.2 二端口网络的 Y 参数等效电路
 - 8.4 二端口网络的级联
- 习题八

第九章 非线性电阻电路分析

- 9.1 非线性电阻元件
- 9.2 非线性电阻的串联和并联
 - 9.2.1 非线性电阻的串联
 - 9.2.2 非线性电阻的并联
- 9.3 非线性电阻电路分析
 - 9.3.1 图解法

9.3.2 分段线性化法

9.3.3 小信号分析法

习题九

第十章 OrCAD/PSpice 用于电路分析

10.1 OrCAD/PSpice 软件的功能

10.1.1 OrCAD 的组成

10.1.2 OrCAD/PSpice 的功能

10.2 OrCAD 中与 PSpice 配套使用的软件

10.3 PSpice 的有关规定

10.3.1 PSpice 中的数字

10.3.2 PSpice 中的单位

10.3.3 PSpice 中的运算表达式和函数

10.3.4 电路图中的节点编号和输出变量表达式

10.3.5 OrCAD/Capture 常用元器件符号库

10.4 模拟电路分析的基本过程

10.4.1 绘制电路原理图

10.4.2 设置电路分析类型及其参数

10.4.3 电路模拟分析

10.4.4 电路模拟结果分析

10.5 PSpice 用于电路分析举例

10.5.1 直流分析

10.5.2 时域(瞬态)分析

10.5.3 交流分析

第十一章 MATLAB 用于电路计算

11.1 MATLAB 语言简介

11.1.1 MATLAB 语言的特点

11.1.2 MATLAB 使用入门

11.1.3 MATLAB 基本语法

11.1.4 获得 MATLAB 在线帮助

11.2 MATLAB 用于电路计算举例

11.2.1 电阻电路计算

11.2.2 时域电路计算

11.2.3 正弦稳态电路计算

部分习题参考答案

参考文献

第四章

动态元件

前面几章所分析的电路只含电阻元件和电源元件。电阻元件的伏安关系是代数关系,即电阻上任一时刻的电压仅取决于该时刻电阻上的电流,故称电阻元件为即时元件(instantaneous element)。许多实际电路,除含电源和电阻元件外,还常常包含电容、电感、互感、变压器等元件。这些元件的电压、电流关系为微分或积分关系,称其为动态元件(dynamic element)。本章讨论这些动态元件的特性。

4.1 电容元件

理想电容元件(capacitor)是只储存电能的理想化元件,它是实际电容器的理想化模型。

最简单的电容器是用两片金属极板填充电介质构成的平行平板电容器,如图 4.1.1 所示。当接通电源后,会在极板上聚集电荷,电荷聚集的过程伴随着电场的建立,电场中储存有电能。如果忽略漏电等次要因素,则可用理想电容元件来反映电容器的这一储能特性。而电荷与电压之间的关系最能体现这种元件的储能特性。

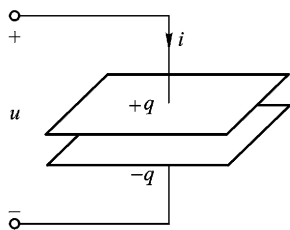


图 4.1.1 平板电容器

电容元件定义为:一个二端元件,如果在任意时刻 t ,其储存的电荷 $q(t)$ 与其端电压 $u(t)$ 之间的关系能用 $q-u$ 平面上的一条曲线所确定,则称此二端元件为电容元件,简称电容。

电容元件分为时变的和时不变的,线性的和非线性的,本书主要涉及线性时

不变电容,其电路模型符号如图 4.1.2(a)所示。如无特殊说明,本书中后面所提“电容”一词均指这类电容。

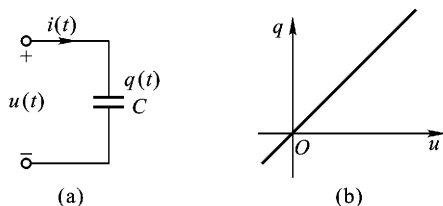


图 4.1.2 线性时不变电容元件

线性时不变电容的特性曲线是 $q-u$ 平面上一条通过原点的直线,且直线斜率不随时间而变,如图 4.1.2(b)所示,即

$$q(t) = Cu(t) \quad (4.1.1)$$

式中,斜率 C 称为电容元件的电容量,为了纪念英国科学家法拉第[Michael Faraday(1791—1867)] ,其单位定为法(F)。

实际电容器除具有储存电能特性外,还会存在漏电现象,这是由于电介质不完全绝缘造成的。因此,电容器的模型中除上述电容元件外,通常还应增加一漏电阻元件与之并联,如图 4.1.3 所示。

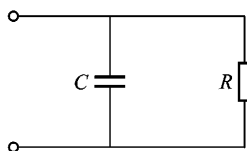


图 4.1.3 实际电容器模型

一个电容器,除标出它的电容量外,还需标出其额定电压值,因为每个电容器允许承受的电压是有限制的,电压过高,介质就会被击穿,从而丧失电容器的作用。

电路分析中,最关心的是电容元件的伏安关系。下面推导电容元件的伏安关系。

设电容上的电压、电流取关联参考方向,如图 4.1.2(a)所示。当电容两端电压发生变化时,电容上电荷 $q = Cu$ 也相应发生变化,从而导致连接电容的导线上有电荷移动,即有电流流过,考虑到 $i = \frac{dq}{dt}$ 故有

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (4.1.2)$$

上式常称为电容伏安关系的微分形式。它表明 ① 某一时刻电容的电流与该时刻电容电压的变化率成正比。当某一时刻 t 的电容电流 i 为有限值时, $\frac{du}{dt}$ 也为有限值,根据微分学原理,电压 $u(t)$ 在该时刻 t 必然连续。电容电压的这一连续性常归结为“电容电压不能发生跃变”。这一结论在动态电路分析中经常用

到。注意这一结论的应用必须以电容电流有限为前提条件。② 如果电压不随时间变化, 则 $\frac{du}{dt}$ 为零, 此时虽有电压, 但电流为零, 电容相当于开路, 因此, 电容具有隔直流的作用。

对式(4.1.2)从 $-\infty$ 到 t 进行积分, 并设 $u(-\infty)=0$, 可求得

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \quad (4.1.3)$$

上式常称为电容伏安关系的积分形式。它表明: 某一时刻 t 电容的电压值取决于从 $-\infty$ 到 t 所有时刻的电流值, 即电容电压“记忆”了电容电流已往的全部历史, 所以称电容是记忆元件(memory element)。

如果只想分析某一初始时刻 t_0 (通常取 $t_0=0$) 以后电容电压的情况, 可将式(4.1.3)改写为

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \\ &= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad t \geq t_0 \end{aligned} \quad (4.1.4)$$

式中

$$u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau \quad (4.1.5)$$

称为电容的初始电压(initial voltage)。它包含了电容电流在 t_0 以前的全部历史情况。式(4.1.4)表明: 如果已知由初始时刻 t_0 开始作用的电流 $i(t)$ 以及电容的初始电压 $u(t_0)$, 就能确定 $t \geq t_0$ 时的电容电压 $u(t)$ 。

电容是一个储存电能的元件。下面讨论电容的储能情况。

在电容电压、电流取关联参考方向的情况下, 任一时刻, 电容元件吸收的功率

$$p(t) = u(t)i(t) = Cu(t) \frac{du(t)}{dt}$$

从而电容在 t 时刻的储能为

$$\begin{aligned} w(t) &= \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = C \int_{-\infty}^t u(\tau) \frac{du(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &= C \int_{u(-\infty)}^{u(t)} u du = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty) \end{aligned}$$

若设 $u(-\infty)=0$, 则

$$w(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (4.1.6)$$

上式表明: 电容在某一时刻 t 的储能只与该时刻 t 的电容电压有关, 即电容电压

反映了电容的储能状态,可见电容是动态电路元件。电容电压的连续性与记忆性正是电容储能本质的体现。

必须指出,电容的伏安关系式(4.1.2)、式(4.1.3)和式(4.1.4)要求电容上的电压、电流取关联参考方向。若电容上的电压、电流取非关联参考方向,如图4.1.4所示,则式(4.1.2)、式(4.1.3)和式(4.1.4)应改为

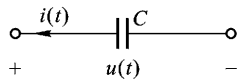


图4.1.4 电容上电压、电流取非关联参考方向

$$i = -C \frac{du}{dt}$$

$$u(t) = -\frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi$$

$$u(t) = u(t_0) - \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad t \geq t_0$$

而电容的储能公式(4.1.6)不变。

例4.1.1 图4.1.5(a)中的电容 $C = 0.5\text{F}$,其上电流 $i_C(t)$ 的波形如图4.1.5(b)所示。求电容电压 $u_C(t)$ 、功率 $p(t)$ 和储能 $w_C(t)$ 。

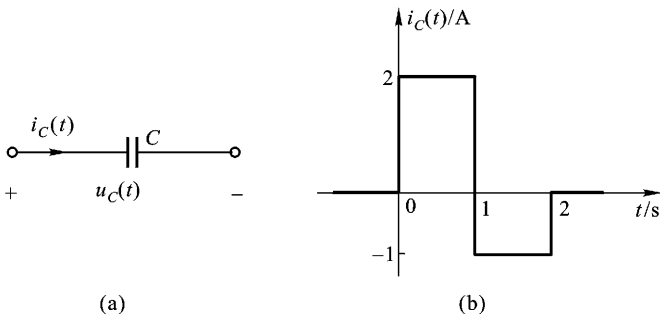


图4.1.5 例4.1.1用图

解: 根据图4.1.5(b),写出电流 $i_C(t)$ 的表达式

$$i_C(t) = \begin{cases} 0 & -\infty < t \leq 0 \\ 2 \text{ A} & 0 < t \leq 1 \text{ s} \\ -1 \text{ A} & 1 < t \leq 2 \text{ s} \\ 0 & t > 2 \text{ s} \end{cases}$$

当 $t \leq 0$ 时,由于 $i_C(t) = 0$,由式(4.1.3)得 $u_C(t) = 0$,显然 $u_C(0) = 0$ 。

当 $0 < t \leq 1 \text{ s}$ 时, $i_C(t) = 2 \text{ A}$,根据式(4.1.3),令 $t_0 = 0$,得

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t 2 d\xi = 4t$$

$$u_C(1) = 4 \text{ V}$$

当 $1 < t \leq 2$ s 时 $i_C(t) = -1$ A, 根据式 (4.1.3), 令 $t_0 = 1$, 得

$$u_C(t) = u_C(1) + \frac{1}{C} \int_1^t (-1) d\tau = 4 - 2(t-1) = 2(3-t)$$

$$u_C(2) = 2 \text{ V}$$

当 $t > 2$ s 时 $i_C(t) = 0$, 根据式 (4.1.3), 令 $t_0 = 2$, 得

$$u_C(t) = u_C(2) + \frac{1}{C} \int_2^t 0 d\tau = 2 \text{ V}$$

即

$$u_C(t) = \begin{cases} 0 & -\infty < t \leq 0 \\ 4t \text{ V} & 0 < t \leq 1 \text{ s} \\ 2(3-t) \text{ V} & 1 < t \leq 2 \text{ s} \\ 2 \text{ V} & t > 2 \text{ s} \end{cases}$$

其波形如图 4.1.6(a) 中实线所示, 可见, 电容电压不会发生跃变。

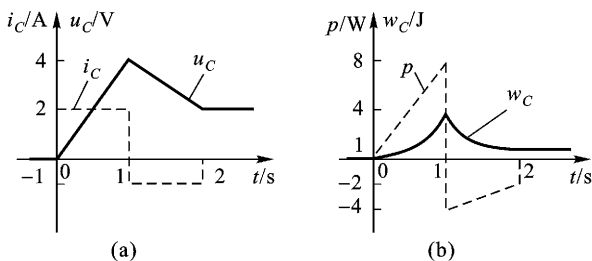


图 4.1.6 例 4.1.1 的解

电容吸收的功率为

$$p(t) = u_C i_C = \begin{cases} 0 & -\infty < t \leq 0 \\ 8t \text{ W} & 0 < t \leq 1 \text{ s} \\ 2(t-3) \text{ W} & 1 < t \leq 2 \text{ s} \\ 0 & t > 2 \text{ s} \end{cases}$$

其波形如图 4.1.6(b) 中虚线所示。

根据式 (4.1.6), 得电容的储能为

$$w_C(t) = \frac{1}{2} C u_C^2(t) = \begin{cases} 0 & -\infty < t \leq 0 \\ 4t^2 \text{ J} & 0 < t \leq 1 \text{ s} \\ (3-t)^2 \text{ J} & 1 < t \leq 2 \text{ s} \\ 1 \text{ J} & t > 2 \text{ s} \end{cases}$$

其波形如图 4.1.6(b) 中实线所示。

由图 4.1.6(a)、(b) 可见, 电容上的吸收功率有时为正, 有时为负, 功率为正时

表明电容吸收能量,以电场能量的形式储存在电容中,为负时表明电容释放原先存储的能量。但电容上的能量总是非负的。由式(4.1.6)可知,能量非负对任何工作状态下的线性正电容($C > 0$)都成立。可见,电容仅是一个能量存储器,它既不能提供额外的能量,也不消耗能量。所以电容属于不耗能的无源电路元件。

4.2 电感元件

理想电感元件(inductor)是只储存磁能的理想化元件。它是实际电感线圈(coil)的理想化模型,有时也称自感元件。

工程上,常用各种电感线圈建立磁场,储存磁能。图4.2.1为实际电感线圈的示意图。当电流 $i(t)$ 通过电感线圈时,将产生磁通(flux) $\Phi(t)$ (其方向与电流符合右手螺旋法则),并在线圈中建立磁场(magnet field),磁场中储存有磁能。与线圈交链的总磁通称为磁链,记为 $\Psi(t)$ 。若线圈密绕,且有 N 匝,则磁链 $\Psi(t) = N\Phi(t)$ 。如果忽略导线耗能等次要因素,则可用理想电感元件来反映电感线圈的这一储能特性。而磁链 $\Psi(t)$ 与电流 $i(t)$ 之间的关系最能体现这种元件的储能特性。

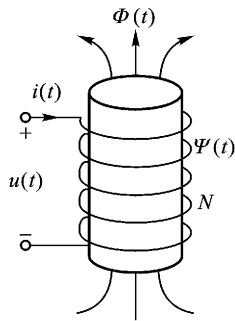


图 4.2.1 电感线圈

电感元件定义为:一个二端元件,如果在任意时刻 t ,其磁链 $\Psi(t)$ 与电流 $i(t)$ 之间的关系能用 $\Psi-i$ 平面上的一条曲线所确定,则称此二端元件为电感元件,简称电感。

电感元件也分为时变的和时不变的,线性的和非线性的,本书主要涉及线性时不变电感,其电路模型符号如图4.2.2(a)所示。

线性时不变电感的特性曲线是 $\Psi-i$ 平面上一条通过原点的直线,且直线斜率不随时间而变,如图4.2.2(b)所示,即

$$\Psi(t) = Li(t) \quad (4.2.1)$$

式中,斜率 L 称为电感元件的电感量,为了纪念美国科学家亨利[Joseph Henry (1797—1878)] ,其单位定为亨(H)。磁通和磁链的单位为韦(Wb)。

实际电感线圈除具有储存磁能的特性外,还会有一些能量损耗。这是由于绕制线圈的导线耗能所引起的。因此,电感线圈的模型中除上述电感元件外,通常还应串联一小电阻 R ,如图4.2.3所示。