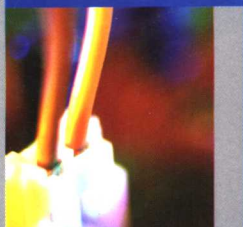


DIANLU YU MONIDIANZI
JISHU JICHU



电路与模拟电子 技术基础

林涛 林薇 顾樱华 编



科学出版社
www.sciencep.com

电路与模拟电子技术基础

林 涛 林 薇 顾樱华 编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书分两部分: 上篇(1~5章)为电路分析基础, 主要讲述电路原理的有关知识; 下篇(6~13章)为模拟电子技术, 主要讲述模拟电子技术基础的有关知识。每章前有内容提要和学习指导, 章末有本章小结及思考题和习题。

本书可作为高等院校计算机科学及应用专业的本科生教材, 也可供其他电子类专业学生及相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术基础/林涛, 林薇, 顾樱华编. —北京: 科学出版社, 2004

ISBN 7-03-012856-7

I. 电… II. ①林… ②林… ③顾… III. ①电路分析-高等学校-教学参考资料
②模拟电路-电子技术-高等学校-教学参考资料 IV. ①TM133②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 006826 号

责任编辑: 沈建彭斌 姚庆爽/责任校对: 柏连海

排版制作: 科学出版社编务公司/责任印制: 吕春珉

封面设计: 东方上林工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年6月第一版 开本: B5(720×1000)

2004年6月第一次印刷 印张: 26 3/4

印数: 1—4 000 字数: 530 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

前 言

随着计算机科学及其应用专业教学改革及教学内容的调整,课程设置变化较大,电路课程与模拟电子技术基础课程合并,原来的教材内容已不适应教学要求。为了适应“电路与模拟电子技术基础”课程教学的需要,特编写本教材。本教材的参考教学课时为 80 学时左右(适当配有实验课时)。

本教材编写的指导思想是:电路知识为讲述模拟电子技术打基础,元器件性能的介绍为电子电路的分析服务,重点在对于模拟电子技术知识的掌握。在内容安排上力求简练,突出基本概念、基本原理、基本分析方法和应用,部分内容通过例题和习题来介绍。

本书的第 1~5 章由顾樱华编写;第 6~9 章由林涛编写;第 10~13 章由林薇编写;林涛负责制定编写提纲和全书的统稿工作。

西安交通大学电工电子教学实验中心杨拴科教授审阅了全稿,并提出了许多建设性意见;长安大学陈根正教授审阅了书稿,也提出了相关建设性意见。特在此一并致以衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免会有缺点和错误,欢迎读者批评指正。

目 录

前言

上篇 电路分析基础

第 1 章 电路模型和电路定律	3
1.1 电路模型和集总假设	3
1.2 电流、电压和功率	4
1.3 电阻元件	6
1.4 电容元件	8
1.5 电感元件	10
1.6 电压源和电流源	12
1.7 受控源	13
1.8 基尔霍夫定律	14
第 2 章 电阻电路的等效变换	24
2.1 电阻的串联和并联	24
2.2 电阻的 Y 形连接与 Δ 形连接的等效变换	27
2.3 电压源和电流源的串联和并联	31
2.4 电源的等效变换	33
2.5 输入电阻	35
第 3 章 电阻电路的分析	41
3.1 方程的独立性	41
3.2 支路电流法	42
3.3 节点电压法	43
3.4 网孔电流法	47
3.5 叠加定理	50
3.6 戴维宁定理和诺顿定理	53
第 4 章 一阶电路分析	61
4.1 动态电路及其方程	61
4.2 电路的初始条件	61
4.3 一阶电路的零输入响应	63
4.4 一阶电路的零状态响应	67
4.5 一阶电路的全响应	70

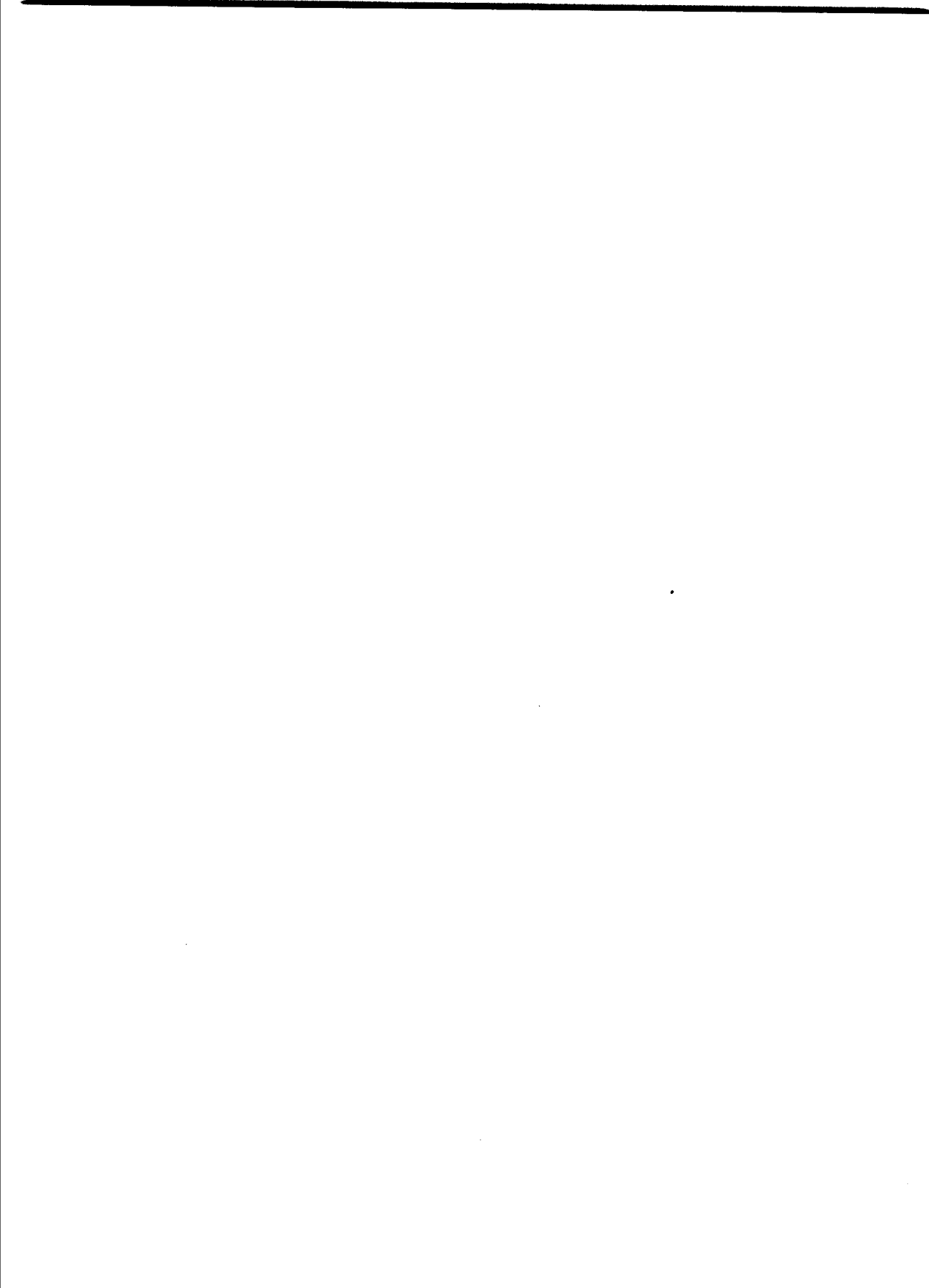
第 5 章 正弦稳态电路分析	80
5.1 正弦量.....	80
5.2 正弦信号的相量表示.....	83
5.3 正弦量的时域运算转换为相量运算.....	87
5.4 电路定律的相量形式.....	88
5.5 阻抗和导纳.....	90
5.6 相量分析法.....	93
5.7 正弦稳态电路的功率.....	95
5.8 谐振电路.....	100
5.9 互感电路.....	103

下篇 模拟电子技术

第 6 章 常用半导体器件	115
6.1 PN 结的形成及特性.....	115
6.2 半导体二极管.....	123
6.3 晶体管.....	132
6.4 场效应管.....	141
第 7 章 分立元件放大电路	156
7.1 基本共射极放大电路及放大电路的主要性能指标.....	156
7.2 放大电路的图解分析法.....	161
7.3 放大电路的等效电路分析法.....	172
7.4 放大电路的工作点稳定问题.....	182
7.5 共集电极放大电路与共基极放大电路.....	189
7.6 场效应管放大电路.....	196
7.7 多级放大电路.....	204
7.8 放大电路的频率响应.....	209
第 8 章 集成运算放大器电路	239
8.1 集成运算放大器概述.....	239
8.2 电流源电路.....	241
8.3 差动放大电路.....	247
8.4 集成运算放大器.....	261
8.5 集成运放的简单应用电路.....	267
第 9 章 放大电路中的反馈	274
9.1 反馈的基本概念与分类.....	274
9.2 负反馈放大电路的方框图及放大倍数的一般表达式.....	283
9.3 负反馈对放大电路性能的影响.....	286

9.4	负反馈放大电路主要性能指标的定量计算	295
9.5	负反馈放大电路的稳定性	302
第 10 章	信号运算与处理电路	314
10.1	基本运算电路	314
10.2	对数和反对数运算电路	322
10.3	有源滤波电路	323
10.4	集成运放应用举例	328
10.5	电压比较器	332
第 11 章	信号产生电路	344
11.1	正弦波振荡电路的组成及振荡条件	344
11.2	RC 正弦波振荡电路	347
11.3	LC 正弦波振荡电路	351
11.4	非正弦信号发生电路	362
第 12 章	功率放大电路	376
12.1	功率放大电路的一般问题	376
12.2	互补对称功率放大电路	378
12.3	集成功率放大电路	386
第 13 章	直流电源	391
13.1	直流稳压电源概述	391
13.2	单相整流电路	392
13.3	滤波电路	399
13.4	线性稳压电源	404
13.5	开关型稳压电源	411
	参考文献	419

上篇 电路分析基础



第 1 章 电路模型和电路定律

内容提要 实际电路是由电气元器件相互联结而构成的,认识电路从元件开始。在电气电子设备中,看到的是各种实际元器件,但在电路分析中,为了突出各种元器件的本质特性,常采用理想元件作为分析的依据。本章介绍的理想元件有电阻、电容、电感、电源(独立源及受控源)。电路中的电压与电流遵守一定的规律,本章介绍的基尔霍夫电压定律与基尔霍夫电流定律是电路的基本定律。

学习指导 明确电压、电流的参考方向是前提;掌握 R 、 L 、 C 及电压源、电流源的电压电流关系是关键;正确理解受控源及基尔霍夫定律的意义和应用,是进一步学习复杂电路的基础。

1.1 电路模型和集总假设

电在人们的日常生活、学习、工作中起着非常重要的作用。人们接触的是实际电路,一般实际电路都是由电源(如发电机、变压器、干电池等)、负载(如白炽灯、日光灯、电炉、电动机等)、导线、开关等组成。实际电路在工作中完成能量的传输和转换的任务。

图 1.1 是一个简单的照明电路,干电池在电路中作为电源,为电路提供能量,灯泡是负载,当开关闭合后,灯泡就会发光,从而将电能转换成光能。

实际电路是多种多样的,功能也各不相同,微电子技术、通信技术、计算机技术、自动控制系统等的高速发展,处理大量信息的电子电路千差万别。

在电路分析中,为了简化分析,人们将实际电路用电路模型替代。因为在实际电路中,各种电磁现象包括电能的消耗现象和电磁能的存贮现象都是同时存在,交织在整个电路中。电路模型,即实际元件的理想化。假设上述这些电磁现象可以分开研究,并且一种基本现象可以用一种理想元件来描述。例如将理想电阻元件用来只表示消耗电能的元件,将理想电容元件用来只表示存贮电场能量的元件,将理想电感元件用来只表示存贮磁场能量的元件。这些理想元件称为集总元件,这个假设称为集总假设。

图 1.2 是图 1.1 的电路模型,电池用电压源 U_S 和内阻 R_S 表示,负载用电阻 R_L 表示,导线上的电阻值很小,可以忽略不计,用理想导线表示。

因此电路模型是实际电路的理想化,忽略它的次要性质,用表征其主要性质的模型来表示。在电路分析中,研究的对象是电路模型而不是实际电路。

应该注意,在作上述集总假设时必须满足的前提条件:构成电路的器件以及

电路本身的尺寸应远小于电路工作时的电磁波所对应的波长。就实验室的电路设备来说，这个条件完全可以满足，因此实际电路可以用集总电路来做模型。

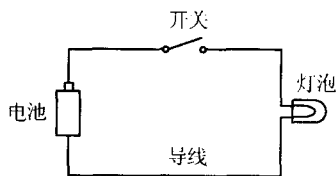


图 1.1 实际电路

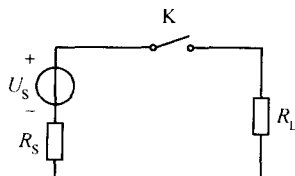


图 1.2 电路模型

今后，为简便起见，对集总电路，我们将省略“集总”二字；对理想元件，我们将省略“理想”二字。

1.2 电流、电压和功率

在电场的作用下，带电粒子的定向运动形成电流。我们把每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度，简称为电流，记为

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

在电路分析中，往往事先不能确定电流的实际方向，或者电流的实际方向是随时间改变的，为了方便起见，我们可以在电路中任意假设一条支路电流的方向为正方向，并称为参考方向。电流的实际方向并不一定与电流的参考方向一致。当电流的实际方向与参考方向一致时，则电流为正值；当电流的实际方向与参考方向相反时，电流为负值。在规定了参考方向的前提下，一条支路的电流可能为正值，也可能为负值，所以电流是一个代数量。图 1.3 表示了电流的参考方向。参考方向可以用箭头表示，也可以用双下标表示，例如 i_{AB} 表示电流的参考方向是从 A 到 B。

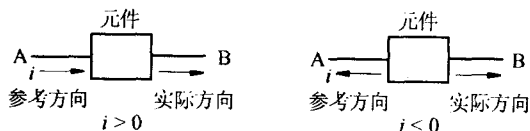


图 1.3 电流的参考方向

今后，电路图中所标的电流方向都是指参考方向。

例 1.1 图 1.4 所示电路，设通过电阻 R 的实际电流为 $1A$ ，方向从 A 至 B，在设定的参考方向下，试分别写出 I_1 和 I_2 。

解 图 1.4(a)中，电流的参考方向与实际方向一致，所以 $I_1=1A$ 。

图 1.4(b)中, 电流的参考方向与实际方向相反, 所以 $I_2 = -1\text{A}$ 。

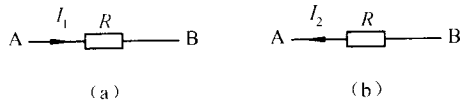


图 1.4 例 1.1 电路图

电荷的定向移动是在电场力的作用下实现的, 单位正电荷从 A 点移动到 B 点电场力所做的功可以用电压表示, 即: $u(t) = dW/dq$, $u(t)$ 表示了 A、B 两点之间的电位差, $u(t) = u_A - u_B$ 。

同电流一样, 我们也需要给电压假设参考方向, 电压的参考方向可以用“+”、“-”表示, 如图 1.5 所示。

如果 A 点的电位高于 B 点的电位, 即电压的实际方向与参考方向一致, 则 $u > 0$, 反之, $u < 0$ 。电压的参考方向还可以用双下标表示, 如 u_{AB} 表示电压的参考方向是 A 指向 B, 即假设 A 的电位比 B 的电位高。

有了电压的参考方向后, 电压就被看成是代数值。

为了计算方便, 在一条支路中, 我们通常假设电流的参考方向与电压的参考方向一致, 称电流电压取关联的参考方向, 如图 1.6 所示。

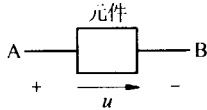


图 1.5 电压的参考方向

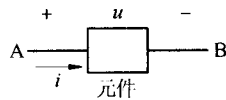


图 1.6 关联参考方向

例 1.2 图 1.7(a)所示电路, 电阻 R 的两端电压为 1V , 若正电荷从 A 移至 B 获得能量, 试说明电压的真实极性, 并为该电压选择参考方向, 写出相应的电压表达式。

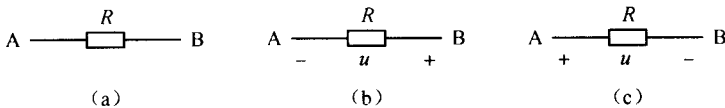


图 1.7 例 1.2 电路图

解 正电荷从 A 移至 B, 获得能量, 说明 B 点电位高, A 点电位低, 这是电压的真实极性。

选择参考极性时, 可以如图 1.7(b)所示, 此时参考极性与真实极性相同, 所以 $u = 1\text{V}$ 。

当参考极性如图 1.7(c)所示, 此时参考极性与真实极性相反, 所以 $u = -1\text{V}$ 。在电路的分析和计算中, 我们还需要讨论电路的能量和功率。电功率是指单

单位时间电场力移动正电荷所做的功，即 $p(t)=dW/dt$ 。在单位时间 dt 内，将单位正电荷 dq 从 A 移动到 B，电场力对电荷做功，这时元件吸收能量： $dW=udq$ ，吸收的功率为

$$p(t) = dW/dt = u(t)i(t) \quad (1.1)$$

当 $p(t) > 0$ 时，表示元件吸收功率；当 $p(t) < 0$ 时，表示元件发出功率。

上面讨论的是 $u(t)$ 和 $i(t)$ 取关联的参考方向。当 $u(t)$ 和 $i(t)$ 取非关联的参考方向时， $p(t) = u(t)i(t) > 0$ ，表示元件发出功率， $p(t) = u(t)i(t) < 0$ 时，表示元件吸收功率。在国际单位制(SI)中，电流的单位为安培(A)，电压的单位为伏特(V)，电荷的单位为库仑(C)，时间的单位为秒(s)，能量的单位为焦耳(J)，功率的单位为瓦特(W)。

例 1.3 如图 1.8(a)、(b)所示元件 A 和 B，若 $I_1=I_2=2A$ ，试求元件 A 和 B 的功率。

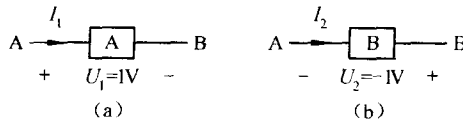


图 1.8 例 1.3 电路图

解 (1) 在图 1.8(a)中，电流、电压为关联参考方向

$$P_1 = U_1 I_1 = 1 \times 2 = 2 \text{ (W)} > 0$$

元件 A 吸收功率。

(2) 在图 1.8(b)中，电流、电压为非关联参考方向

$$P_2 = U_2 I_2 = -1 \times 2 = -2 \text{ (W)} < 0$$

元件 B 吸收功率。

1.3 电阻元件

电路元件是构成电路的最基本的单元，每一种电路元件都有明确的定义，因此可以确定每一种元件电压与电流之间的关系，即伏安关系(VAR)。电路元件可分为无源元件和有源元件，线性元件和非线性元件，时不变元件和时变元件。元件的伏安关系和元件的连接结构，构成了集总电路分析的基础。本节讨论电阻元件。

电阻元件是从实际的电热、电光等用电设备中抽象出来的理想化模型，在任何时刻加在电阻元件两端的电压和通过它的电流满足关系式

$$u = Ri \quad (1.2)$$

这就是欧姆定律。式中 R 称为元件的电阻值，单位是欧姆(Ω)，电路符号如图 1.9 所示。

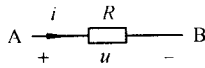


图 1.9 电阻元件

当电压与电流为非关联的参考方向时，满足 $u = -Ri$ ，式中的负号反映了电压与电流为非关联参考方向，并不代表一个负电阻。电阻的倒数称为电导， $G = \frac{1}{R}$ ，电导的单位为西门子(S)。

描绘元件电压、电流关系的曲线称为元件的伏安特性。线性电阻元件的伏安特性曲线，是一条通过原点的直线，如图 1.10 所示。

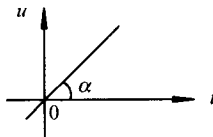


图 1.10 线性电阻元件的伏安特性

应该注意，线性电阻有两种特殊情况——开路和短路。当一个电阻元件不论其端电压 u 是多大，流过它的电流 i 恒等于零，则此电阻元件称为开路，即 $R = \infty$ 或 $G = 0$ ，如图 1.11(a)所示。类似地，当一个电阻不论其电流 i 是多大，它的端电压 u 恒等于零，则此电阻元件称为短路，即 $R = 0$ 或 $G = \infty$ ，如图 1.11(b)所示。

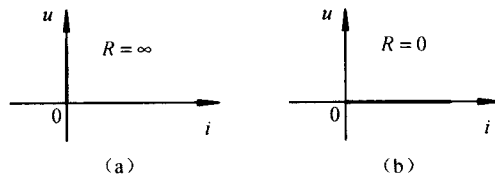


图 1.11 开路和短路的伏安特性

元件电阻值的大小体现了元件对电流阻力的大小。当电压、电流取关联的参考方向时，电阻元件吸收的功率

$$P = ui = u^2 / R = Ri^2 \quad (1.3)$$

表明线性电阻元件吸收的功率为非负值，因此线性电阻元件不仅是无源的而且是耗能的。

从 $t_0 \sim t$ 时间内，电阻元件吸收的电能为

$$W_R = \int_{t_0}^t P(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t \frac{u^2(\xi)}{R} d\xi$$

一般电阻元件把吸收的电转换成其他形式的能量而消耗掉，如热能、光能等。

例 1.4 有一碳膜电阻为 100Ω ，功率为 $1W$ ，在直流电路中使用，问在使用时电流、电压不得超过多大的数值？

解 $|I| = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{100}} = 0.1(A) = 100(mA)$

$$|U| = R|I| = 100 \times 0.1 = 10(V)$$

因此，在使用中，电流不能超过 $100mA$ ，电压不能超过 $10V$ 。

1.4 电容元件

一般的电容器都是由两块金属板构成，在金属板中间充以电介质(绝缘物质)。当在电容器两极加电压后，两极板上分别聚集等量的异性电荷，这时在两极板间的介质中建立电场，贮存电场能量。当电源移去后，由于介质的存在，极板上的电荷不能中和，电荷仍停留在极板上，电场继续存在。

因此，电容器是一种能存贮电荷的器件。电子线路中常用的有纸介电容器、云母电容器、电解电容器、陶瓷电容器和空气电容器等。

对于线性电容元件，两极板间贮存的电荷与两极板间的电压 u 满足关系式

$$q(t) = Cu(t) \quad (1.4)$$

式中， C 称为电容元件的电容量，在国际单位中，它的单位是法拉(F)。图 1.12(a)、(b)分别给出了线性电容元件的电路符号和线性电容元件的库伏特性。

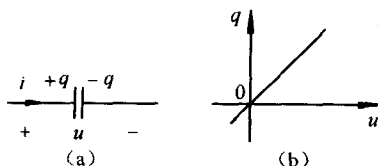


图 1.12 线性电容元件和它的库伏特性

电路分析中，人们往往关心的是元件的伏安关系。对于电容元件，当电压发生变化，意味着极板上贮存的电荷也随着变化，因此有电流通过电容元件。在电压电流取关联的参考方向下有

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} \quad (1.5)$$

表明电流与该时刻电压的变化率成正比。如果电压不改变,是恒定值,则 $\frac{du(t)}{dt} = 0$, 所以此时 $i_c = 0$, 电容相当于开路, 因此电容有隔直的作用。

$$\text{式(1.5)也可以表示成: } u(t) = \frac{1}{C} \int_{-x}^t i(\xi) d\xi。$$

如果只对某一时刻以后的电容电压感兴趣, 则上式写为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-x}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad (1.6)$$

式中, $u(t_0)$ 为初始时刻的电压。式(1.6)表示电容元件是一种有“记忆”的元件。式(1.5)和式(1.6)表示电容元件是一个动态元件, 它的伏安关系具有动态关系, 两式分别称为电容元件伏安关系的微分形式和积分形式。

例 1.5 电路如图 1.13(a)所示, 已知电容 $C=0.1\mu\text{F}$, 电压源波形如图 1.13(b)所示, 试做出电容电流 $i_c(t)$ 的波形图。

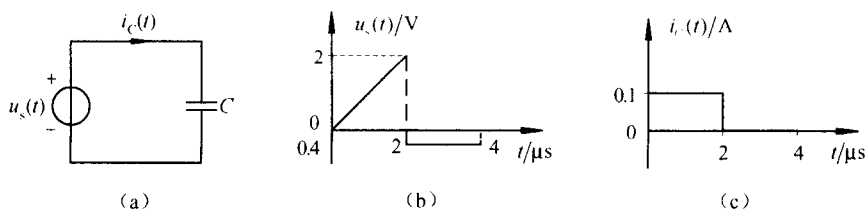


图 1.13 例 1.5 电路图

解 电源电压分段表示为

$$u_s(t) = \begin{cases} t & 0 \leq t < 2\mu\text{s} \\ -0.4 & 2 \leq t \leq 4\mu\text{s} \end{cases}$$

当 $0 \leq t < 2\mu\text{s}$ 时, 电压的变化率为

$$\frac{du}{dt} = \frac{2}{2 \times 10^{-6}} = 10^6$$

所以

$$i_c(t) = C \frac{du}{dt} = 0.1 \times 10^{-6} \times 10^6 = 0.1(\text{A})$$

当 $2 \leq t < 4\mu\text{s}$ 时, 电压等于常数, 即电压的变化率为 $\frac{du}{dt} = 0$, 有

$$i_C(t) = C \frac{du}{dt} = 0$$

$i_C(t)$ 的波形图见图 1.13(c)。

电容器充电后, 电容元件吸收的能量以电场能量的形式储存在元件的电场中, 在电压和电流取关联的参考方向下, 线性电容元件吸收功率为

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

吸收的电场能量为

$$W_C = \int_0^t p(\xi) d\xi = \int_0^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi = C \int_{u(0)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi) = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(0)$$

设 $u(0) = 0$, 则

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1.7)$$

此式即为电容贮能公式。电容电压反映了电容的贮能状态。

当电容元件充电时, 元件吸收能量, 电容元件放电时, 元件释放电能。若元件原来没有充电, 则在充电时将吸收并储存起来的能量又会在放电完毕时全部释放, 它不消耗能量, 所以电容元件是一种储能元件。同时, 电容元件也不会释放出多于它吸收或储存的能量, 所以它又是一种无源元件。

一般的电容器除了有储能的作用外, 也会消耗一部分电能, 这时电容器的模型应该是电容元件和电阻元件的组合。

1.5 电感元件

一般的电感线圈都是用导线绕制而成的, 当导线中有电流时, 线圈周围就会建立磁场, 磁场中存储有磁场能, 因此电感线圈是一种能够存储磁场能量的器件。收音机的天线线圈, 高频扼流圈均属电感线圈。图 1.14 给出了一个线圈, 通以电流 i 后, 会产生磁通, 磁通与磁通链的关系为 $\psi = N\Phi$, 其中 N 为线圈的匝数。

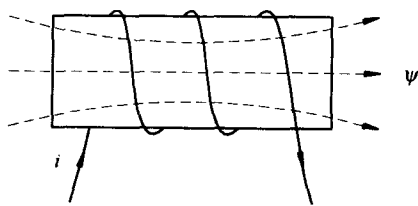


图 1.14 电感线圈与磁通链