

电 路 原 理

主 编 王 生 春

副 主 编 张 兢

重 庆 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《电路课程教学基本要求》,由西部高等院校协作组组织编写的。

本书的主要内容有:电路模型和电路定律,电阻电路的等效变换,电阻电路的一般分析方法,电路定理,含有运算放大器电路的电阻电路分析,一阶和二阶电路、相量法的基础,正弦稳态电路的分析,含有耦合电感的电路,三相电路,非正弦周期电流电路和信号频谱,拉普拉斯变换,网络函数,电路方程的矩阵形式,二端口网络,非线性电路简介,均匀传输线。附录:磁路和铁心线圈。书末附有部分习题答案。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理 王生春主编 重庆:重庆大学出版社,1995.11

电气工程及其自动化专业本科系列教材

陈日昇 陈日昇 陈日昇 陈日昇

I ①电...摇 II ①王...摇 III ①电路理论 原高等学校 原教材摇 IV ①电...摇

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1995)第 000000 号

电 路 原 理

主 编 王 生 春

副 主 编 张 摇 兢

责任编辑 周 摇 立 摇 彭 摇 宁

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

四川省自贡新华印刷厂印刷

*

开本 787mm×1092mm 1/32 印张 10.5 字数 250千字

1995年11月第1版 1995年11月第1次印刷

印数 1—5000

陈日昇 陈日昇 陈日昇 陈日昇 · 这摇定价 10.00元

前言

摇摇目前,国内外的一致意见认为电路课程的基本内容和范围大体上已趋稳定。本课程的主要任务是为后续课程和学生将来工作需要准备必要的基础知识。

根据教育部全国高校《电路课程教学基本要求》及电路原理课程在电类工程师培养过程中的地位和作用,本书在编写中既重视电路原理的基本内容和基本概念,但不过分强调电路原理学科本身的系统性和严密性;既重视电路的基本概念、基本方法和基本定律的应用,但不过分追求技巧;注重辩证思维和创新意识的培养;注意现代网络理论与基本内容的融合。

本书对基本内容、传统内容和新内容的协调予以充分的注意。为了适应学时数不断缩减的现实,除考虑到各部分内容的分量恰当外,删减了一些较繁琐和过分强调技巧的内容,而力图突出基本概念和基本原理,并采用比较有效和精练的方式把问题交代清楚。这样将更有利于培养学生在教师指导下的自学能力。

考虑到一些专业的需要,书末增加了有关磁路的内容作为附录。其他可以根据实际需求和学时情况作适当取舍,不一定都要讲授。

本书在编写中注意保留了传统《电路》教材特点,力求做到便于自学,使其更能适应启发式教学的需要。叙述力求清楚、准确,适当增加了例题数量,例题不片面追求难度和电路的复杂性。注意了正文、例题和习题的密切配合。

每章附有习题,书末还附有部分习题的参考答案,可供读者参考。全书统一采用国际单位制、国家统一的图形及文字符号标准。

书末列出了参考书目,既为读者提供了一些内容的出处

与依据,也为读者在选择参考书时提供便利。

本书可作为无线电、电子、通信、电气、自动控制等专业的本科教材,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

参加本书编写的有王生春(第员章、第远章、第怨章、第员冠章、第员贡章、第员颛章、第员猿章、第员远章、第员愿章),张兢(第猿章、第缘章、第员源章、第员缘章),何莉(第圆章、源章、第员颛章),陈新刚(第苑章、第愿章、附录粤)。主编王生春,副主编张兢。

由于编者的水平和经验所限,书中不足及错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者摇
圆园年苑月

第 1 章

电路模型和电路定律

内 容 简 介

本章介绍电路和电路模型,电压、电流及其参考方向的概念,功率的定义及计算,电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源和受控源的元件约束以及反映元件联结特性的电路理论的基本定律——基尔霍夫定律(拓扑约束)。

1.1 实际电路和电路模型

实际电路是根据工程需要,由具有不同电气性能及作用的电气设备、元器件按某些确定规则连接而成,具有传输电能、处理信号、测量、控制、计算等功能。在实际电路中,把能够提供电能或电信号的电路器件,如发电机、电池、信号发生器等称作电源,而把灯泡、电炉、电动机、显示器等用电设备称作负载。由于电路中的电压和电流是在电源作用下产生的,因此,电源又称作激励,而电压、电流则称作响应。根据激励与响应之间的因果关系,又把激励称作输入,把响应称作输出。

实际电路将因其所能完成任务的不同而不同。例如,电力系统就由电能的产生、传输、分配和转换形成了一个庞大而又复杂的电路。又如,已被广泛应用的集成电路,其芯片体积虽小,却包含了有成千上万个晶体管构成的复杂电路。当然也有仅含几个元器件的简单电路,手电筒就是一个很简单的电路,如图 1.1 所示。

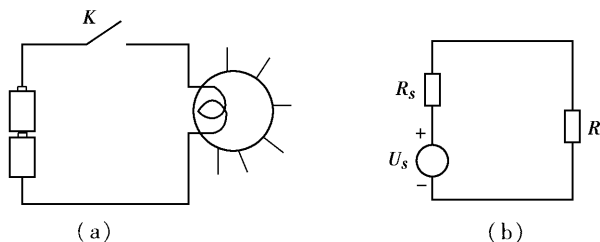


图 1.1 实际电路与电路模型

本书将主要介绍电路理论的基本内容,这些内容是学习电类各专业后续课程的基础。电路理论的基本物理量有电荷、电流、电压、磁通等,它主要研究发生在电路中的电磁现象,分析计算电路器件中的电流、端电压、功率及能量,一般不研究电路器件内部发生的物理过程。为便于表述和分析,本书中分析的电路并非实际电路,而是实际电路的电路模型。电路模型是由理想电路元件的相互连接而成,它是一种假想元件,每一种理想电路元件都具有某种特定的电磁性质,是一种理想化模型,具有精确的数学定义式。用理想电路模型及其某种组合就可模拟实际电路器件或电路的电磁特性。电路模型中的连接导线都是“理想的”。

图 1-1 是实际电路的电路模型。图中的电路元件 1 是灯泡的电路模型,称作电阻元件,电阻元件 2 和理想电压源的串联组合就是电池的电路模型,图 1-1 中连线的电阻为零。

上述这种用理想电路元件及其组合模拟实际器件及电路的过程,称为建立电路模型(简称建模)。建模是以工作条件和精度要求为依据的,电路模型是对实际电路器件的科学抽象与概括。若电路模型建立不当,则分析与计算结果就会与实际误差较大,或使分析与计算过于复杂。所以,建模问题需要专门研究,本书不做介绍。

今后,本书中给出的电路都是由理想电路元件(简称电路元件)构成的电路模型,即理想电路。根据端子数目,电路元件又可分为二端、三端、四端元件等。根据其特性,电路元件又可分为无源元件和有源元件,线性元件和非线性元件,时变元件和时不变元件等。

电路理论是研究电路分析和电路综合的一门工程学科,与近代系统理论有密切的关系。本书主要介绍电路分析的内容,建立电路的基本概念,探讨电路的基本定律、定理和计算方法,为学习电气工程、自动化、电子、通讯和信息技术等电类专业建立必要的理论基础。

1.1 电路中电流和电压的参考方向

为了分析某个电路,就必须对分析中可能涉及的电流和电压指定参考方向。其原因要么是电压和电流的实际方向未知,要么是无法确定,要么电压和电流就是随时间变化的。如图 1-2 所示的矩形就表示电路中的一个二端元件。在元件旁或连接导线上用实箭头表示电流的参考方向,并标记 i ; 电流的实际方向则用虚线箭头表示,其旁不得标记 i 。在图 1-2(a)中,电流的参考方向与实际方向选的一致,则在参考方向下电流 $i > 0$ 可见,根据电流在参考方向下的正负,即 $i > 0$ 或 $i < 0$ 就可判断电流的实际方向。电流参考方向的选择是任意的,也可用双下标表示,如图 1-2(b)就可表示为 i_{AB} 。

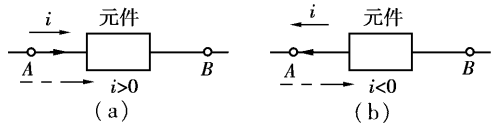


图 1-2 电流的参考方向

同理,对电路中某两点的电压也可以选择参考方向或参考极性。如图 1-3 给出了电压参考方向与参考极性之间的对应关系。如果图 1-3 中 A 点电位高于 B 点电位,即电压的实际方向是由 A 指向 B,二者方向一致,则 $u > 0$ 。当电压的实际方向是 B 点电位高于 A 点电位,二者方向相反,则 $u < 0$ 。图 1-3 中的电压参考方向也可

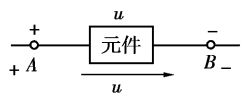


图 1-3 电压的参考方向

用双下标表示为 u_{AB} 。

同一个元件中的电流和电压的参考方向均可独立地任意选择。如果电流和电压的参考方向选得符合图 1-10(a) 的规定, 则把这种电流与电压的参考方向称作关联参考方向。否则, 称作非关联参考方向, 如图 1-10(b) 所示, 其中 N 为电路的一部分。

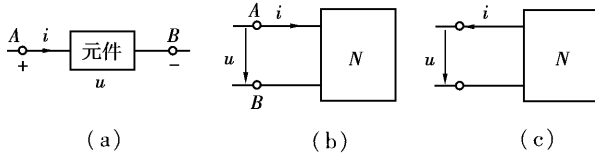


图 1-10 关联参考方向

在国际单位制 (SI) 中, 电流的单位为安培 (A), 电荷的单位为库仑 (C), 电压的单位为伏特 (V)。

1.3 电功率和能量

在电路理论中, 除电压和电流外, 电功率和能量则是另外两个重要的物理量, 电功率用 P 表示, 能量则用 W 表示。

设图 1-11(a) 可能是电阻、电源或其他元件的组合。其电流和电压选关联参考方向如图 1-11(a) 所示。设在 t_1 时间内, 由 A 点转移到 B 点的正电荷为 q 。根据参考方向, A 、 B 间电压降落为 u , 则元件吸收 (或电荷 q 失去) 的能量为

$$W = qu \quad (1-1)$$

而单位时间内电路元件吸收的电能就是它所吸收的电功率

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dq}{dt} u = i u$$

又因

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1-2)$$

所以

$$P = i u \quad (1-3)$$

就是电路或电路元件吸收的功率。

如果对式 (1-3) 从 t_1 到 t_2 积分, 则元件吸收的能量为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} i u dt \quad (1-4)$$

假设 $t_1 = 0$, 即 $t_1 = 0$ 时, 认为元件还没来得及吸收能量。故式 (1-4) 又可写做

$$W = \int_0^{\infty} P dt = \int_0^{\infty} i u dt \quad (1-5)$$

可解释为, 元件从 t_1 到 t_2 吸收的能量, 就等于元件从 t_1 到 t_2 与 t_2 到 t_2 吸收的能量之和。如果令计时起点 $t_1 = 0$, 则上式又可写做

$$P = \int_{t_0}^{t_1} u i dt \quad (1.1.1)$$

式(1.1.1)中, u 和 i 都是时间的函数, 因是在参考方向下, 故为代数量。可见, P 也是时间的函数, 也是代数量。

应该强调指出: ①当 u, i 为关联参考方向时, 式(1.1.1)定义电路或电路元件吸收的功率; 当 $P > 0$ 时, 表示电路或元件吸收功率; 当 $P < 0$ 时, 与定义相反, 表示电路或元件发出功率。②当 u, i 为非关联参考方向时, 式(1.1.1)定义电路或元件发出的功率; 当 $P > 0$ 时, 表示电路或元件发出功率; 当 $P < 0$ 时, 表示电路或元件实际上在吸收功率。如说某电路或元件吸收功率 P , 则也可认为它发出功率 $-P$; 同理, 如说某电路发出功率 P , 也就可认为它吸收功率 $-P$ 。

在图 1.1.1 中, 如果已知 u, i 为关联参考方向, 因为 u, i 为关联参考方向, $P > 0$ 时, 表示电路吸收功率为 P 。在图 1.1.2 中, u, i 为同一电路, 只是 i 参考方向选的反, 故有 u, i 为非关联参考方向, 故 $P < 0$ 时, 表示电路发出功率为 $-P$, 实际上吸收功率为 P 。可见与图 1.1.1 中计算的结果相一致。

讨论上述电路物理量的实际意义有二, 一是电路中存在能量交换的速率问题, 二是电路中的电气设备、负载等均有额定值的问题。如果使用中电压、电流、功率超过额定值, 电气设备、负载等就有被损坏或不能正常工作的可能。

在国际单位制(SI)中, 功率的单位为瓦(瓦特), 能量的单位为焦耳, 时间的单位为秒。

主要电路变量, 在国际单位制(SI)中的单位前面已经给出, 但在工程应用中有时觉得其太大或太小, 使用不便。下面就介绍一些以瓦为底的辅助单位, 如

- 毫瓦 (mW)
- 微瓦 (μW)
- 纳瓦 (nW)
- 皮瓦 (pW)

基尔霍夫定律

基尔霍夫定律仅适用于集总参数电路, 由集总参数元件构成的电路就称作集总参数电路。集总参数元件假定: 在任何时刻流入二端元件的一个端子的电流一定等于另一个端子流出的电流, 元件两端子之间的电压为单值量。

基尔霍夫定律是集总参数电路的基本定律, 它包括电流定律和电压定律。除第 1 章外, 本书研究的电路都是集总参数的。

为了说明基尔霍夫定律, 先介绍几个概念: 简而言之, 把组成电路的每一个二端元件称作一条支路, 而把支路的连接点称作节点, 可见, 每条支路就恰好连接在两个节点之间。由支路构成的闭合路径就称作回路。图 1.1.3 所示电路由 n 个元件相互连接而成, 有 $n+1$ 个节点, 有 n 条支路, 支路、节点、元件标号如图 1.1.3 所示。应该提示初学者, 图 1.1.3 中虚线包括的部分只能当作一个节点①对待, 如图 1.1.4 所示。

基尔霍夫电流定律(KCL)可表述为: 在集总参数电路中, 在任何时刻, 对任何一个节点, 所

有流出节点的支路电流的代数和恒等于零。其解析表达式为

$$\sum i_{\text{支路}} = 0 \quad (1.1.1)$$

这里“支路电流代数和”是以连接在该节点上的支路电流的参考方向来判断是流出节点还是流入节点的。如果流出节点,则该支路的电流之前取“+”号,否则取“-”号。

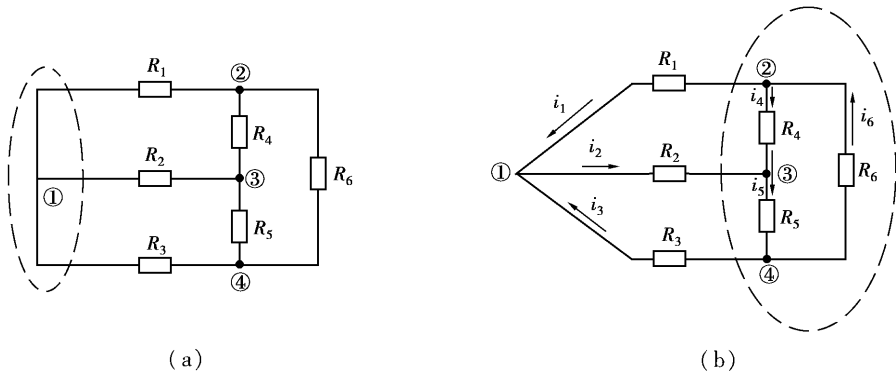


图 1.1.1 节点和支路

以图 1.1.1 电路为例,对节点 2 应用式(1.1.1),根据图 1.1.1 中支路电流的参考方向有

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

上式又可写作

$$i_1 = i_2 + i_3 - i_4$$

由此说明:流出节点 2 的支路电流的和就等于流入该节点的支路电流的和。由此,式(1.1.1)又可表述为:在任何时刻,对任何一个节点,流出节点的支路电流代数和就等于流入该节点的支路电流代数和。

可以证明,式(1.1.1)既适用于节点,也适用于包围几个节点的闭合面(广义节点)。对图 1.1.1 (b)所示电路,用虚线表示的闭合面包围了三个节点,即节点 2, 3, 4。对其中的每个节点应用式(1.1.1)分别有

$$\begin{aligned} i_1 - i_2 - i_3 + i_4 &= 0 \\ -i_2 + i_4 - i_5 &= 0 \\ -i_3 + i_5 - i_6 &= 0 \end{aligned}$$

把以上三式相加得

$$i_1 - i_6 = 0$$

其中, i_1 流出闭合面, i_6 流入闭合面。

这就说明,流过一个闭合面的电流代数和也恒等于零,或者说,这实际上是电流的连续性原理。同时也说明,式(1.1.1)是电荷守恒定律的具体体现。

基尔霍夫电压定律(式(1.1.2))可表述为:在集总参数电路中,在任何时刻,沿任一回路,所有支路电压的代数和恒等于零。其解析表达式为

$$\sum u_{\text{支路}} = 0 \quad (1.1.2)$$

应用式(1.1.2)求和时,必须首先任意指定一个回路的绕行方向,凡支路电压参考方向与回路绕行方向一致的,就在该电压前取“+”号,否则取“-”号。

在图 1.1.2 电路中,虚线箭头表示该回路的绕行方向,回路中各支路电压的参考方向如图

图 1-5 所示。对指定的回路应用 KVL 有

$$u_1 - u_2 + u_3 = 0$$

上式又可写作

$$u_1 - u_2 = -u_3$$

此式说明,节点 a 和 b 间的电压是单值的,即不管是沿支路 a-b 还是沿支路 a-d-c-b 构成的路径,这两个节点的电压都是同一个值,即

$$u_{ab} = u_1 - u_2 = -u_3$$

可见, KVL 是电压与路径无关特性的具体体现。

通过上述讨论可以看出:① KVL 在支路电流之间施加了线性约束关系;② KVL 则在支路电压之间施加了线性约束关系;③这两个定律仅与元件的相互连接有关,而与元件的性质无关,即无论元件是线性的还是非线性的,时变的还是非时变的;④ KVL 和 KCL 是集总参数电路的两个公式。

应该强调:在应用 KVL 求解电路时,首先必须对要涉及到的支路指定电流和电压的参考方向。通常把支路的电压和电流选做关联参考方向。

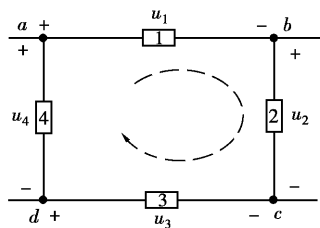


图 1-5 应用 KVL

例 1-1 图 1-6 为某复杂电路中的一个回路。

已知某时刻各元件的电压值为 $u_1 = 2V, u_2 = 4V, u_3 = 6V, u_4 = 8V, u_5 = 10V, u_6 = 12V$ 。求 u_7 。

解 根据支路电压的参考方向及回路的绕行方向,应用 KVL 有

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 + u_5 - u_6 + u_7 = 0$$

所以

$$u_7 = -u_1 + u_2 - u_3 + u_4 - u_5 + u_6$$

代入数据

$$u_7 = -2 + 4 - 6 + 8 - 10 + 12 = 6V$$

u_7 为正值,说明该元件两端电压的实际方向与其参考方向相反。

例 1-2 试计算图 1-6 电路中的 u_7 。

解 根据 KVL 有

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 + u_5 - u_6 + u_7 = 0$$

代入数据有

$$2 - 4 + 6 - 8 + 10 - 12 + u_7 = 0$$

当然,计算 u_7 还可沿另一路径

$$u_7 = -u_1 + u_2 - u_3 + u_4 - u_5 + u_6$$

$$= -2 + 4 - 6 + 8 - 10 + 12 = 6V$$

电阻元件

电路是由电路元件相互连接构成的,不同的电路元件可以用其端电压和电流的不同关系式定义。从本节开始将介绍这些元件。

线性电阻元件是实际电阻器类(如灯泡、电炉、电阻器等)器件在一定条件下的电路模型。它仅具有耗能这样一种特定的物理特性。当线性电阻元件的电压和电流选关联参考方向时,在任何时刻,其端电压 u 和电流 i 服从欧姆定律,

$$u = Ri \quad (1.1.1)$$

图 1.1.1 中的矩形是电阻元件的电路符号,它既表示这是一个线性电阻元件,同时又表示这个线性电阻元件的参数是电阻 R 。式(1.1.1)中,当 $i > 0$ 时,电阻 $R > 0$ 。式(1.1.1)又可写做

$$i = \frac{u}{R} \quad (1.1.2)$$

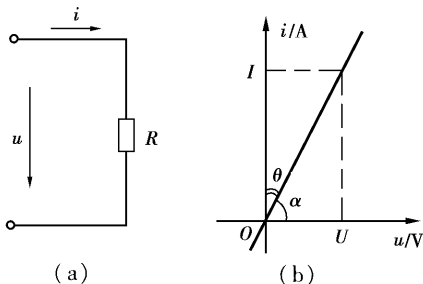


图 1.1.1

如果取电压为横坐标,标尺为 u_0 ^①(或纵坐标),电流取作纵坐标(或横坐标),标尺为 i_0 ^②。根据式(1.1.1)便可给出 $u-i$ 平面上的曲线,称作电阻元件的伏安特性曲线,如图 1.1.1 所示,它是通过坐标原点的一条直线。直线的斜率与元件的电阻 R 有关,可根据直线上的任意一点计算电阻 R 或电导 G

$$R = \frac{u}{i} = \frac{u_0 \cdot \frac{1}{i_0}}{\frac{1}{i_0} \cdot \frac{u}{u_0}} = \frac{u_0}{i_0} \cdot \frac{u}{u_0}$$

$$G = \frac{i}{u} = \frac{\frac{1}{i_0} \cdot \frac{i}{i_0}}{\frac{1}{u_0} \cdot \frac{u}{u_0}} = \frac{u_0}{i_0} \cdot \frac{i}{u}$$

如果电阻元件的电压、电流为非关联参考方向,则有

$$u = -Ri \quad (1.1.3)$$

$$i = -\frac{u}{R} \quad (1.1.4)$$

注意:电路中的解析式或方程都与参考方向配套使用。

从式(1.1.1)和式(1.1.2)均可看出,在任何时刻,线性电阻的电压(或电流)是由同一时刻的电流(或电压)决定的,这就是说,线性电阻是“无记忆”元件。

在关联参考方向下,电阻元件消耗的功率为

$$P = ui = Ri^2 \quad (1.1.5)$$

可见,在 $R > 0$ 的情况下,电阻元件确实具有耗能的特性,即 $P > 0$,电阻元件也是一个无源元件。注意:式(1.1.5)中的 i 必须是流过 R 的电流, u 必须是 R 两端的电压。从 t_1 到 t_2 的时间内电阻元件吸收的电能为

① u_0 为横坐标上每单位长度代表的电压值。

② i_0 为纵坐标上每单位长度代表的电流值。

$$P = UI$$

(员源园)

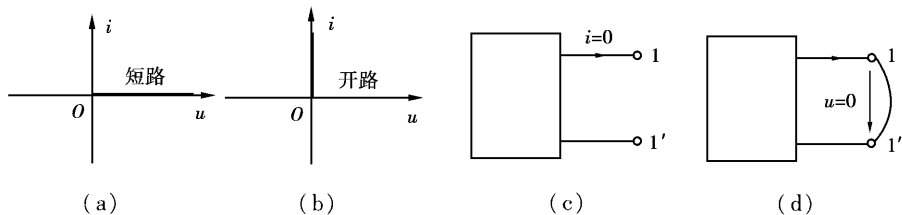
电阻元件把吸收的电能一般都转换成热能而消耗掉了。

如果电阻元件的电阻值是时间的函数,就称作线性时变电阻。由于它是线性的,因此也服从欧姆定律,即在关联参考方向下仍有

$$U = RI$$

在关联参考方向下,线性电阻元件的伏安特性位于第一、三象限。如果一个线性电阻元件的伏安特性位于第二、四象限,则此元件的电阻值就为负值,即线性负电阻已是一个有源元件,可发出电能,实现这个元件将在第章中介绍。

当施加在线性电阻元件两端的电压值不论为何值时,流过它的电流却恒为零,把电阻元件的这种工作状态就称作“开路”。开路时的伏安特性与电压轴重合,相当于或,如图员所示。当流过线性电阻元件的电流不论为何值时,其端电压恒为零,这种工作状态就称作“短路”。短路时的伏安特性与电流轴重合,相当于或,如图(员)所示。上述定义及特性均可推广至电路中的任何一对端子之间,如图员(员)所示。



图员 开路和短路及其伏安特性

例员有一金属膜电阻,用于直流电路,试求其额定电流及端电压上限值。

解对于实际的电气设备及电器元件,为保证其正常工作及相应的使用寿命,厂家都在电气产品铭牌上标出使用电压、电流、功率额定值及电源频率。根据

$$I \leq I_N, U \leq U_N$$

$$P \leq P_N$$

这就是说,使用中流过此电阻的电流不得超过,或电压不得超过。

电容元件

电容元件也是一个理想电路元件,它具有储存电场能量这样一种特定的电磁性质,它是各种实际电容器的理想电路模型。

线性电容元件的电路符号如图员所示,电压、电流取关联参考方向,正极板电荷为

择越悦怎

(员源员)

其中, C 既表示线性电容元件, 又表示电容量为 C 。在国际 (SI) 单位制中, 电容的单位为 法拉 (简称法)。如果取 u 为横坐标, 取 q 为纵坐标, 则线性电容的伏库特性也是通过坐标原点的一条直线, 如图 1-10 所示。

根据电流的定义式及 (1-9), 可得线性电容元件的电压电流关系式

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 说明, 电流与电压对时间的变化率成正比。

当 $\frac{du}{dt}$ 大时, i 则大; 当 $\frac{du}{dt}$ 小时, i 则小; 当 $\frac{du}{dt} = 0$ 时, 即电压不随时间变化 (为直流电压) 时, $i = 0$ 。故电容在直流电路中, 其端电压为定值, 相当于开路, 或者说, 电容具有隔直作用。从式 (1-10) 还可看出: 电容元件的电流与电压具有动态关系, 因此, 电容元件是一个动态元件。

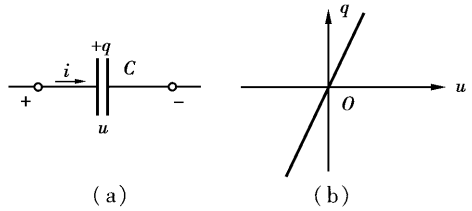


图 1-10 电容元件及其伏库特性

对式 (1-10) 从 t_0 到 t 进行积分, 有

$$q = \int_{t_0}^t i dt + q(t_0) \quad (1-11)$$

$q(t)$ 是 t 时刻电容所带的电荷量。式 (1-11) 说明: 电容在任意时刻 t 所带电量就等于 t 时刻所带电荷量加上从 t_0 到 t 时间间隔内所增加的电荷量。如果把 t_0 选作计时起点, 并令 $t_0 = 0$, 则式 (1-11) 可写作

$$q = \int_0^t i dt + q(0) \quad (1-12)$$

根据式 (1-12) 可得电容端电压表达式

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + u(0) \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 可知, t 时刻的电容电压不但与 t_0 到 t 的电流值有关, 而且还与 $u(0)$ 值有关, 因此, 电容元件是一种有“记忆”的元件。

在关联参考方向下, 电容元件吸收的功率为

$$p = ui = C u \frac{du}{dt}$$

从 t_0 到 t 时刻, 电容元件吸收的电场能为

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t C u \frac{du}{dt} dt = \int_{u(t_0)}^{u(t)} C u du = \frac{1}{2} C [u^2(t) - u^2(t_0)] \quad (1-14)$$

在式 (1-14) 的讨论中, 已经认为 $u(t_0) = 0$, 即在 t_0 时刻, 电容元件尚未来得及充电, 所以 $u(t_0) = 0$ 。这样, 电容元件在任何时刻 t 储存的电场能量 $W(t)$ 就等于它吸收的能量, 可表示为

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

式(1-10)又称作电容元件的储能公式。从时间 t_0 到 t 电容元件吸收的能量为

$$W = \int_{t_0}^t u i dt = \int_{t_0}^t u \frac{dq}{dt} dt = \int_{q_0}^q u dq \quad (1-11)$$

讨论:当电容元件充电时,它吸收能量,建立电场;当电容元件放电时,它释放能量。如果电容原来并未充电,则在充电时吸收并储存起来的能量一定又会在放电完毕时全部释放,它不消耗能量。故电容元件是一个储能元件,当然,它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。

工程中广泛应用的各种实际电容器,因其除具有储能特性外,尚有耗能特性,故其电路模型必然由电容元件和电阻元件的组合构成。由实验可知,电容器消耗之功率与外施电压直接相关,故用并联组合较好。

电感元件

实际电感线圈是由导线绕制而成的一个二端器件。若线圈中流过电流,则必产生磁通,且与匝数成正比,并形成封闭回路。其磁通链为

$$\psi = N \Phi$$

单位为韦伯。由于都是由流过线圈本身的电流产生的,故称作自感磁通或自感磁通链。 ψ 与 i 符合右螺旋关系,如图1-11所示。当通以时变电流或 ψ 随时间变化时,线圈二端子间必产生感应电压。如果感应电压的参考方向与 ψ 符合右螺旋关系,则根据电磁感应定律有

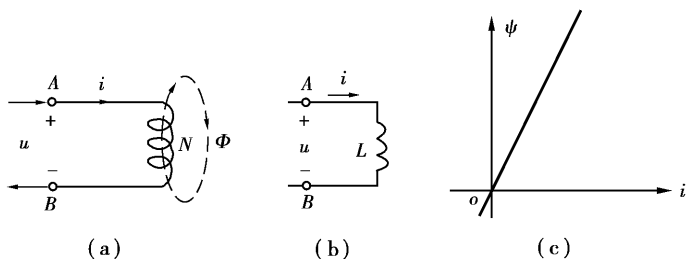


图1-11 实际电感线圈、电感元件及其安韦特性

感应电压的实际方向可用楞次定律^①判断。

$$u = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-12)$$

电感元件是仅具储存磁场能量这样一种电磁特性的理想元件,它是各种实际电感线圈的理想化模型。线性电感元件的电路符号如图1-12所示。线性电感元件中的 ψ 与流过其中的电流成比例,即

$$\psi = Li \quad (1-13)$$

① 楞次定律指出,由线圈中磁通或磁通链变化产生的感应电动势,在其实际方向下产生的电流总是企图阻止原磁通的变化。在图1-11中,当 i 增大时,使 ψ 增大,由式(1-12)可知 $u < 0$,即端子A的电位高于端子B的电位,此时,若将A、B端子与外电路接通,则必有感应电流自A通过外电路流回B,再经线圈回到A(与 i 的方向相反),显然,这一电流产生的磁通确实阻止了原 ψ 的增长,与楞次定律相符。对 i 减小的情况,请读者自行分析之。

比例系数 称为自感(系数)或电感,单位为 亨利,简称亨), 为一个正常数。

线性电感元件的安培特性是 平面上通过坐标原点的一条直线,如图 所示。把式()代入式(),可得线性电感元件的电压电流关系式

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (4.1)$$

式中, 为关联参考方向,且与 成右螺旋关系。对式()从 到 积分得

$$\int_{t_0}^t u dt = L \int_{i_0}^i \frac{di}{dt} dt = L(i - i_0) \quad (4.2)$$

或

$$\psi = L i \quad (4.3)$$

可以看出,电感元件是动态元件,也是记忆元件。在关联参考方向下,线性电感元件吸收的功率为

$$p = u i = L i \frac{di}{dt} \quad (4.4)$$

从上述讨论中可知,由于 时 越,所以 越。因此,从 到 时间内电感元件吸收的磁场能量

$$\begin{aligned} W &= \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t L i \frac{di}{dt} dt = L \int_{i_0}^i i di = \frac{1}{2} L (i^2 - i_0^2) \\ &= \frac{1}{2} L i^2 - \frac{1}{2} L i_0^2 \quad (4.5) \end{aligned}$$

式()即为电感元件在任意时刻的储能公式。从 到 时间内,线性电感吸收的磁场能为

$$W = \frac{1}{2} L (i^2 - i_0^2) \quad (4.6)$$

讨论:当电流 增加时, 约,元件吸收能量;当电流 减小时, 约,元件释放能量。电感元件并不消耗能量,只是把吸收的能量以磁场能的形式储存在磁场中,故电感元件是一种储能元件。当然,它也不会释放出多于它吸收或储存的能量,可见,它又是一个无源元件。

实际线圈的电路模型一般均可用理想电感元件与理想电阻元件的串联组合来表示。空心线圈的电路模型用线性电感与线性电阻的串联组合更合适。

4.3 电压源和电流源

前面几节已经涉及到了元件的无源性问题,这里将给出更一般的定义。

如果某个电路元件或电路获得的或由电路其余部分供给的能量始终为非负值,则该电路或电路元件称作无源元件或电路。根据式()有

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt \geq 0 \quad (4.7)$$

根据定义式可以证明,前面已经介绍的电阻元件、电容元件、电感元件均为无源元件。

如果电路元件或电路不能在整个时间范围内满足式(),那么这个元件或电路就是有源

源的。像发电机、电池及一些电子器件都是有源元件。

电压源和电流源是实际电源的电路模型,都是二端有源元件。

电压源是一个理想电路元件,其电路符号如图 1-1-1 所示。其端电压

按给定的规律变化,与流过电压源的电流无关,电压源中流过电流的大小由

外电路决定。当端电压为恒定值时,则称为直流电压源或恒定电压源,有时也用图 1-1-2 (b) 电路符号表示,且有

图 1-1-1 为电压源与外电路相连接的情况,端电压不受外电路的影响。

把式 (1-1-1) 在 $u-i$ 平面上进行标绘,对于不同的时刻就对应一条平行于 i 轴的直线,如图 1-1-2 (a) 所示直线,即为时刻 t_1 电压源的伏安特性,它不通过坐标原点。图 1-1-2 (b) 是直流电压源的伏安特性,它不随时间变化。

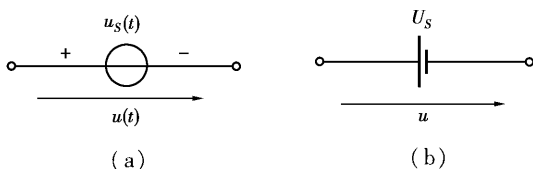


图 1-1-1 电压源

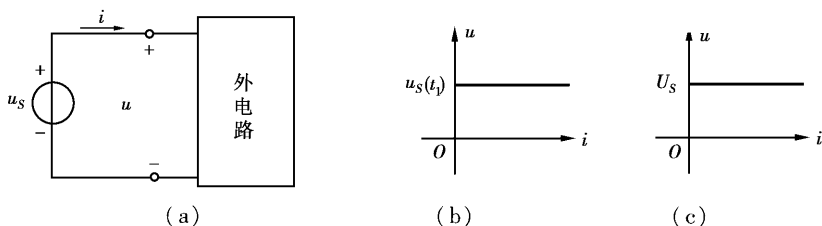


图 1-1-2 电压源的伏安特性

由图 1-1-1 可知,电压源的端电压 u 与其中的电流 i 为非关联参考方向,所以,电压源发出的功率为

$$P = ui$$

这也是外电路吸收的功率(对外电路而言, u 与 i 为关联参考方向)。

如果电压源与外电路断开,则 $i=0$,就说“电压源处于开路”。如果 $u=0$,则说“电压源处于短路”,则电压源已不存在。

电流源也是一理想化电路元件,其电路符号如图 1-1-3 所示,其电流

按给定的规律变化,与端电压无关,电流源的端电压由外电路决定。如果

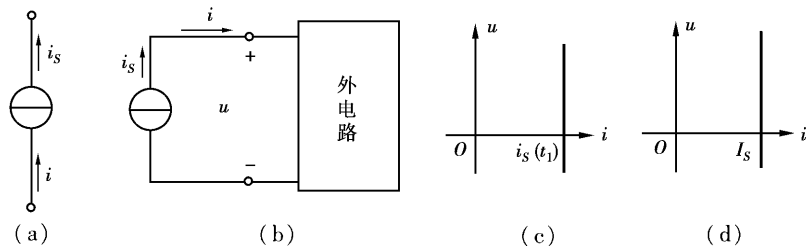


图 1-1-3 电流源及其伏安特性

按给定的规律变化,与端电压无关,电流源的端电压由外电路决定。如果为恒定值,则称作直流电流源或恒流源。

把电流源 i_s 与外电路相连接,如图 4-10 所示,电流源不受外电路的影响。把式 (4-1) 在 i_s 平面上进行标绘,对同一时刻 i_s 就对应一条平行于 u 轴的直线,图 4-11 对应于 t 时刻的电流源 i_s 的伏安特性,它不通过坐标原点。图 4-12 为直流电流源 I_s 的伏安特性,它不随时间变化。

由图 4-10 可知,电流源的电压、电流为非关联参考方向,所以,电流源发出的功率为

$$P = u i_s$$

它也为外电路吸收的功率。

如果电流源的端电压 u 越负,则说“电流源处于短路”。如果电流源的电流 $i_s = 0$, 则电流源已不存在。

像发电机、蓄电池这种实际电源,其工作机理比较接近电压源,电路模型用电压源与电阻的串联组合表示。而像光电池这一类器件,工作时的特性比较接近电流源,所以,其电路模型用电流源与电阻的并联组合表示。

4.3 受控电源

上节介绍的电压源的电压和电流源的电流按给定规律变化,不受外电路的影响,因此称作独立电源。但还有一类电源,因其电压源的电压和电流源的电流却受外电路电压和电流的控制,因此称作受控电源(简称受控源)。与独立源对应,受控源可称作非独立源。

受控源是为描述电子器件的电路模型应运而生的,例如,要描述晶体管的集电极电流受基极电流控制以及运算放大器的输出电压受输入电压控制的电路现象,就要用到受控源。

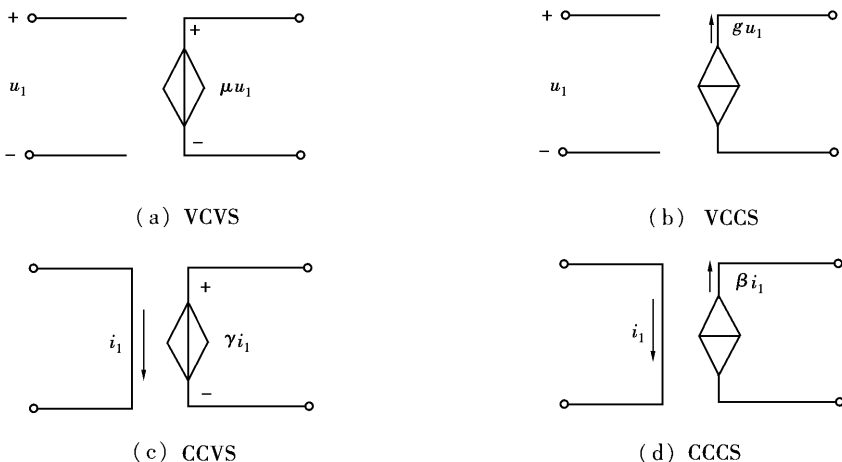


图 4-13 受控电压源

受控电压源是其端电压受控于电路中其他电压和电流的一个电源。它又分为电压控制的电压源(受控电压源)和电流控制的电压源(受控电压源)。受控电流源则是其电流受控于电路中其他电压和电流的一个电源。它又分为电压控制的电流源(受控电流源)和电流控制的电流源(受控电流源)。其电路符号用菱形表示,以区别于独立源,如图 4-13 所示。其中 μ 、 β 、 γ , 早称作受控源的控制系数。当这些系数为常数时,被控制量(受控电压或电流)与控制量成比例,这种受控源就称