

普通高等教育规划教材

电工学 I (电工技术)

王桂琴 主编
王汇平 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

电 工 学 I

(电 工 技 术)

主 编	王桂琴
副主编	王汇平
主 审	王 鼎

机 械 工 业 出 版 社

本书是根据教育部电工学课程指导组拟定的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革而编写的。全书共分十一章, 内容包括: 电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相交流电路、铁心线圈与变压器、电动机、继电—接触器控制、可编程控制器的原理及应用、电工测量、供电与安全用电。

本书可作为高等学校非电专业电工学课程的教材, 也可供其他工科专业选用和社会读者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学 I (电工技术) / 王桂琴主编. —北京: 机械工业出版社, 2004.1

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-13777-9

I. 电… II. 王… III. 电工学—高等学校—教材

IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 126160 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王保家 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张莉娟

封面设计: 陈 沛 责任印制: 闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·15.75 印张·385 千字

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据教育部电工学课程指导组拟定的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革并结合电工学教改实践而编写的,可供高等院校工科非电类大学本科、专科及工程技术人员使用。

本书编写遵循“教学改革服务于科教兴国”的准则,力争达到加强基础、精选内容、逐步更新、利于教学的要求,既注意教学内容的系统性与先进性,又突出教材的适用性与实践性,力求文字简练、说理透彻、注重实际应用。通过本课程的学习,使学生掌握电工技术必要的基本理论、基本知识和基本技能,为学习后续专业课程以及从事工程技术工作和科学研究打下理论和实践基础。

全书共分十一章,前五章内容侧重于基本概念和基本理论,第六、七、八、九章内容侧重于工程应用,最后两章给出了电工测量和安全用电的相关知识。本书可供有关专业 50~70 学时教学使用。

全书由吉林大学王桂琴担任主编,王汇平担任副主编,王鼎担任主审。第一、二、三、五章及第四章的第四、五、六节由王桂琴编写,第四章的第一节由常文秀编写,第四章的第二节由詹迪铎编写,第四章的第三节由王芳荣编写,第四章的第七、八节由王幼林编写、第九节由尹程秋编写,第六、七、八章由王汇平编写,第九、十、十一章由詹迪铎编写。

由于编者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,恳切希望使用本书的教师和读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第一章 电路的基本概念和

基本定律 1

第一节 电路和电路模型 1

第二节 电路的基本物理量及其 参考方向 2

第三节 无源理想元件 5

第四节 电源 9

第五节 基尔霍夫定律 12

第六节 电路的工作状态及电气设备 的额定值 14

第七节 电路中的电位及其计算 16

习 题 17

第二章 电路的分析方法 21

第一节 支路电流法 21

第二节 叠加原理 22

第三节 电压源与电流源的等效变换 24

第四节 弥尔曼定理 26

第五节 戴维宁定理和诺顿定理 27

第六节 非线性电阻电路的分析 31

习 题 33

第三章 电路的暂态分析 37

第一节 暂态分析的基本概念与 换路定律 37

第二节 RC 电路的暂态过程 39

第三节 RC 电路对矩形脉冲的响应 47

第四节 一阶电路暂态分析的 三要素法 49

第五节 RL 电路的暂态过程 52

习 题 57

第四章 正弦交流电路 60

第一节 正弦交流电的基本概念 60

第二节 正弦交流电的相量表示法 64

第三节 单一理想元件的交流电路 67

第四节 RLC 串联的交流电路 72

第五节 阻抗的串联与并联 76

第六节 正弦交流电路的分析方法 78

第七节 功率因数的提高 83

第八节 正弦交流电路中的谐振 85

第九节 非正弦交流电路 91

习 题 98

第五章 三相交流电路 104

第一节 三相交流电源 104

第二节 负载星形联结的三相电路 106

第三节 负载三角形联结的三相电路 109

第四节 不对称三相电路 111

第五节 三相电路的功率 114

习 题 115

第六章 铁心线圈与变压器 118

第一节 磁 路 118

第二节 磁路的基本定律 120

第三节 铁心线圈 122

第四节 变压器 126

第五节 常用变压器简介 132

习 题 134

第七章 电动机 137

第一节 三相异步电动机的基本结构 137

第二节 三相异步电动机的工作原理 138

第三节 三相异步电动机的电磁转矩 与机械特性 141

第四节 三相异步电动机的使用 145

第五节 三相异步电动机的铭牌和 技术数据 150

第六节 单相异步电动机 154

第七节 三相同步电动机 155

第八节 直流电动机 155

第九节 控制电机 160

习 题 164

第八章 继电—接触器控制 166

第一节 常用的低压电器 166

第二节 电动机的基本控制电路和 保护环节 171

第三节 顺序控制	174	第十章 电工测量	224
第四节 行程控制	175	第一节 电工测量的基本知识	224
第五节 时间控制	176	第二节 常用电工仪表	228
第六节 速度控制	178	第三节 电流、电压和功率的测量	230
习 题	179	第四节 电阻的测量	234
第九章 可编程控制器的原理		第五节 电感和电容的测量	235
及应用	182	第十一章 供电与安全用电	238
第一节 可编程控制器的结构及		第一节 发电、输电概述	238
工作原理	182	第二节 配电设计基础	238
第二节 松下 FP1 可编程控制器介绍	188	第三节 触电形式和触电的预防	239
第三节 指令系统	194	第四节 保护接地和保护接零	241
第四节 常用控制环节的基本程序	207	第五节 静电防护和电气防火防爆	242
第五节 可编程控制器系统的应用	216	参考文献	244
习 题	220		

第一章 电路的基本概念和基本定律

第一节 电路和电路模型

一、电路

电路是为能够实现某种需要、由若干电工元器件按一定方式相互联接起来的组合。电气工程中会遇到各种各样的电路，有些比较简单，有些很复杂，通常把比较复杂的电路称为网络，电路与网络没有本质上的差异。

电路一般由电源（信号源）、负载和中间环节三部分组成，其中：

电源（信号源）是将其他形式的能量或信号转换为电能或电信号的装置，例如发电机将机械能转换为电能，传感器将非电量信号转换为电信号等。

负载是取用电能，将电能转换为其他形式能量的装置，例如电动机将电能转换为机械能，扬声器将音频信号转换为声音等。

联接电源与负载之间的中间环节是传送、控制电能或电信号的部分，它包括联接导线、控制电器和保护元件（开关、熔断器）等。

例如，图 1-1-1a 所示就是一个最简单的手电筒电路，电池将化学能转换为电能，是电源；灯泡将电能转换为光能，是负载；开关和导线是联接电池与灯泡的中间环节。

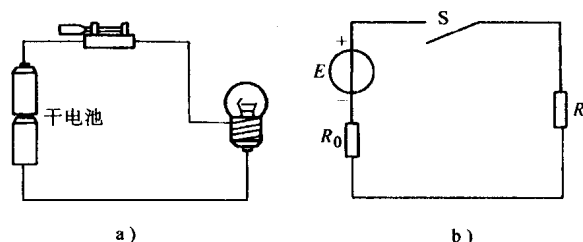


图 1-1-1 手电筒电路及其电路模型

a) 手电筒电路 b) 电路模型

电路的作用是：完成供电、通信、计算、测量和控制等方面的工作。就电路的功能而言，可以分为两类：一类是实现能量的传输、分配和转换，例如供电电路就是将电能转换为光能、热能、机械能等；另一类是信号的传递与处理，例如计算机将输入的数字信号加以运算、判断、处理，然后将新的数据输出显示。

二、电路模型

由于组成电路的电气设备和器件种类繁多，即使是很简单的电气设备或器件，在工作时所发生的物理现象也是很复杂的，这给电路分析带来了很大困难。但是，这些复杂的物理现象都是由一些基本的物理现象综合而成的，因此我们可以将电气设备或器件中每一种基本物理性质用一个对应的理想元件来表示。

电路分析的直接对象并不是那些由实际的电工器件构成的电路，而是分析从实际电路抽象出来的电路模型。这些电路模型是由表示实际器件的基本物理性质的理想元件组成的。

基本的理想元件有：电阻、电容、电感、电压源和电流源等，如图 1-1-2 所示。

图 1-1-1b 所示的电路即为图 1-1-1a 所示实际电路的电路模型，其中干电池用电压

源 E 和内电阻 R_0 这两个理想元件串联组合表示；消耗电能的灯泡用理想元件电阻 R 表示；联接电池与灯泡的开关 S 和金属导线的电阻都很小，可忽略不计，故作为没有电阻的理想开关和导体处理。

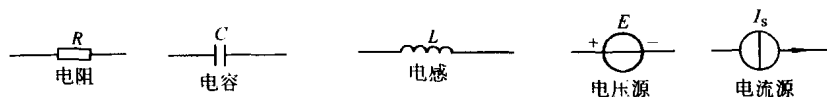


图 1-1-2 理想元件的电路模型

第二节 电路的基本物理量及其参考方向

一、电流及其参考方向

电荷在电场力作用下，做有规则的定向运动就是电流。我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度简称为电流，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

电流大小和方向随时间变化的这种电流称为交变电流，交变电流用小写字母 i 表示。有的电流其大小和方向不随时间变化，即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$ ，这种电流称为恒定电流，简称直流，直流电流用大写字母 I 表示。

分析电路时，除了要计算电流的大小外，同时还要确定它的方向，习惯上把正电荷运动的方向（或负电荷运动的相反方向）作为电流的方向，这种方向称为电流的实际方向，简称电流的方向。

电流的实际方向，在简单情况下是可以直接确定的。如在图1-2-1所示的直流电路中，我们可以从电源给定的正负极性判断出电流的方向。但在实际问题中，往往难以凭直观判断电流的实际方向。如在交流电路中，电流的方向随时间交变，根本无法用一固定的箭头标出它的实际方向。另外，即使在直流电路中，当求解复杂电路时，也难以事先判断出电流的实际方向。因此，为了解决这一困难，我们引用参考方向这个概念。

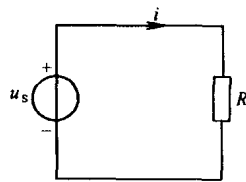


图 1-2-1 电流的实际方向

什么是电流的参考方向呢？我们知道，任何一段电路中的电流只有两种可能的流向，若任意选某一方向作为电流的方向，在电路图中用箭头表示，并以这个方向列电路方程、分析计算，那么这种人为规定的电流方向就称为电流的参考方向。

在规定参考方向后，电流可以用一个代数量表示，即它不仅含有数值，而且包含了正、负号。按参考方向分析电路得出的电流为正值 ($i > 0$)，表明电流的参考方向与实际方向相同。反之，若得出的电流为负值 ($i < 0$)，则表明电流的参考方向与实际方向相反。因此，只有参考方向选定之后，电流之值才有正负之分。如图 1-2-2 所示，实线箭头代表参考方向，虚线箭头代表实际方向。

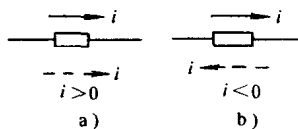


图 1-2-2 参考方向与实际方向

电流的参考方向标注方法有两种，一是在电路中，画一个实

线箭头,并标出电流名称。二是用双下标表示,如 I_{ab} 表示从 a 流向 b 的电流。

二、电压及其参考方向

电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,定义为 a、b 两点间的电压 u_{ab} 。

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-2-2)$$

电路中任意两点间的电压就是这两点间的电位差,即

$$u_{ab} = U_a - U_b \quad (1-2-3)$$

若 a 点为高电位, b 点为低电位,则 u_{ab} 为正值。电压的方向规定为由高电位指向低电位,即电位降低的方向。

在分析与计算电路时,同电流一样,电压也要任意选定其参考方向。按照所选定的参考方向分析电路,得出的电压为正值 ($u > 0$),表明电压的实际方向与参考方向一致。反之,若得出的电压为负值 ($u < 0$),则表明电压的实际方向与参考方向相反。

电路中表示电压的参考方向有三种, a、b 两点间电压的参考方向一一是用箭头表示;二是用“+”、“-”符号表示;三是书写时用双下标的 u_{ab} 表示,如图 1-2-3 所示。对一个元件或一段电路上的电压参考方向和电流参考方向可以独立地任意选定。若电压和电流的参考方向相同,则把电压和电流的这种参考方向称为关联参考方向,如图 1-2-4 所示。

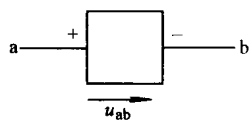


图 1-2-3

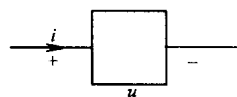


图 1-2-4

三、电动势及其参考方向

电动势在数值上等于非电场力把单位正电荷由负极经电源内部移到正极所做的功。显然,电动势的单位也是伏特 (V)。

通常规定电动势的实际方向是由电源的负极指向电源的正极。同电流和电压一样,在电路中所标出的电动势的方向也是它的参考方向。

注意,电源的端电压与电动势之间的关系如图 1-2-5 所示。

四、电能和电功率

当一个电路元件两端加上电压 $u(t)$, 流过电流 $i(t)$ 时,就会产生能量转换。从 t_0 到 t_1 的时间内,元件的电能可以根据电压的定义求得

$$w = \int u dq$$

在电压和电流的关联参考方向下,由于 $i = dq/dt$, 所以

$$w = \int_{t_0}^{t_1} u(t) i(t) dt$$

电能对时间的变化率就是电功率,简称功率

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

式中, u 和 i 都是时间的函数,是代数量,因此电能 w 和功率 p 也是时间的函数,也是代数量。

在国际单位制 (SI) 中,电压的单位是伏特 (V),电流的单位是安培 (A),电荷的单位是库仑 (C),时间的单位是秒 (s),电能的单位是焦耳 (J),功率的单位是瓦特 (W)。

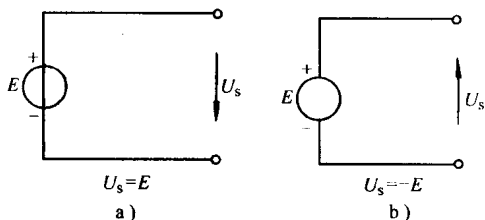


图 1-2-5

元件上的电能与电功率有发出和吸收两种可能。进行电路分析时,电压和电流采用的是参考方向,两者之间可能是关联参考方向,也可能是非关联参考方向。这种情况下,怎样确定元件是发出功率还是吸收功率,可作如下规定:

- 1) 在电压和电流的关联参考方向下

$$p = u(t)i(t)$$

- 2) 在电压和电流的非关联参考方向下

$$p = -u(t)i(t)$$

在此规定下,将按参考方向计算出来的电压、电流代入到计算功率的公式中,如果计算结果 $p > 0$,表示电压与电流的实际方向相同,元件吸收功率,是负载;反之,若计算结果为 $p < 0$,表示电压与电流实际方向相反,元件发出功率,是电源。

【例 1-2-1】图 1-2-6 是一个含有电压源和负载的闭合电路。电压源电压 $U_s = 24\text{V}$, 内阻 $R_s = 0.5\Omega$, 负载电阻 $R = 7.5\Omega$ 。求:

- (1) 电路中的电流。

- (2) 负载端电压。

- (3) 各元件的功率。

解: (1) 电路中的电流

$$I = \frac{U_s}{R_s + R} = \frac{24}{0.5 + 7.5} \text{A} = 3\text{A}$$

- (2) 负载端电压

$$U = IR = 3\text{A} \times 7.5\Omega = 22.5\text{V}$$

- (3) 各元件的功率

$$P_s = -U_s I = -24\text{V} \times 3\text{A} = -72\text{W} \quad (\text{电源产生的功率})$$

$$P = UI = 22.5\text{V} \times 3\text{A} = 67.5\text{W} \quad (\text{负载消耗的功率})$$

$$\Delta P = I^2 R_s = 3^2 \times 0.5\text{W} = 4.5\text{W} \quad (\text{电源内阻消耗的功率})$$

【练习与思考】

1-2-1 在图 1-2-7 中, 已知 $U = -10\text{V}$, $I = 1\text{A}$ 。试问:

- (1) 电压 U 与电流 I 的实际方向是什么? a、b 两点哪一点电位高?

- (2) 该元件的功率是多少? 它是产生功率还是消耗功率?

1-2-2 某白炽灯的电压为 220V , 功率是 60W , 问流过灯泡的电流是多少? 灯泡的电阻是多少?

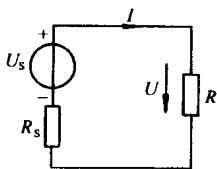


图 1-2-6 例 1-2-1 电路

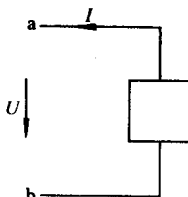


图 1-2-7

第三节 无源理想元件

电路在实现其功能的过程中,除了在电源中产生电能的过程外,还普遍地存在着三种基本的能量转换过程,即电能的消耗、磁场能量的储存和电场能量的储存。我们用三个电路参数来分别表征电路中上述三种物理特性。表示电路中电能消耗性用电阻(R)参数;表示电路中磁场储存特性用电感(L)参数;表示电路中电场储存特性用电容(C)参数。

仅具有上述中的一种参数的电路元件分别称为理想电阻元件、理想电感元件和理想电容元件,通常简称为电阻、电感和电容。任何一个实际的电路都可以抽象成由理想元件组成的电路模型。为深入研究电路的功能,下面对组成电路的无源理想元件中电压与电流的一般关系和能量转换进行分析讨论。

一、电阻元件

线性电阻元件在电路中的图形符号如图 1-3-1 所示。

在电压和电流的关联参考方向下,按欧姆定律线性电阻元件的电压、电流关系为

$$i = \frac{u}{R}$$

上式中 R 称为元件的电阻,是一正实常数,当电压用伏特(V),电流用安培(A)表示时,电阻的单位为欧姆(Ω)。

若电阻元件的电压和电流是非关联参考方向(见图 1-3-2),则欧姆定律应写为

$$i = -\frac{u}{R}$$

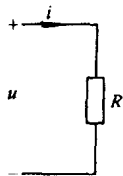


图 1-3-1 电阻电路

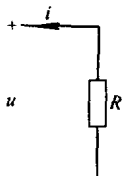


图 1-3-2 u 与 i
参考方向相反

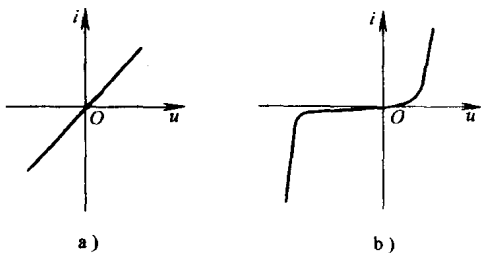


图 1-3-3 电阻元件的伏安特性

a) 线性电阻的伏安特性 b) 晶体
二极管的伏安特性

电阻元件的特性常用元件两端的电压与通过它的电流之间的关系曲线 $u = f(i)$ 或 $i = f(u)$ 来表示,这种曲线称为伏安特性,它可以通过实验作出。

若电阻值不随电压、电流变化而变化,则称此电阻为线性电阻。常用的电阻器可视为线性电阻元件。线性电阻的伏安特性是通过坐标原点的一条直线,如图 1-3-3a 所示。

阻值随着电压、电流变化而变化的电阻则称为非线性电阻,例如常用的晶体二极管、三极管就是非线性电阻元件。非线性电阻的伏安特性是一条曲线,如图 1-3-3b 所示。

线性电阻中通过的电流与两端电压成正比。

在电压和电流的关联参考方向下,任何时刻电阻元件吸收的功率

$$p = ui = Ri^2$$

电阻 R 是正实常数, 电阻元件吸收的功率总是大于零, 其吸收的能量常以热的形式消耗掉, 所以线性电阻元件不仅是无源元件, 还是耗能元件。

从初始时刻 t_0 到任意时刻 t 期间, 电阻元件消耗的电能为

$$W_R = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi$$

如果电阻元件的伏安特性不随时间变化, 则称为非时变电阻元件。

二、电感元件

1. 电感

在电工技术中, 由导线绕制而成的线圈能够产生比较集中的磁场, 如图 1-3-4a 所示。在忽略很小的导线电阻条件下, 可以认为线圈只有电感参数, 是一理想电感元件。

当线圈两端加上电压 u , 便有电流 i 通过, 线圈即产生磁场, 若穿过一匝线圈的磁通为 Φ , 则与 N 匝线圈交链的总磁通为 $N\Phi$ 。总磁通 $N\Phi$ 通常称为磁链 Ψ , 即 $\Psi = N\Phi$ 。当 u 电流增大时, Ψ 亦增大; 电流减少, Ψ 亦减小。因此磁链是电流的函数。为了衡量线圈产生磁场的的能力, 取线圈的磁链与电流的比值, 即

$$L = \frac{\Psi}{i}$$

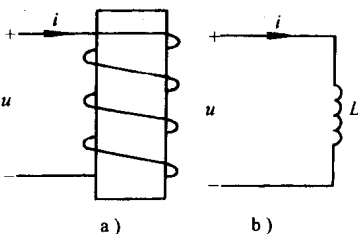


图 1-3-4 电感电路

式中, L 称为自感系数, 简称电感。当磁链的单位是韦伯 (Wb), 电流的单位是安培 (A) 时, 则电感的单位是亨利, 简称亨 (H)。电感在电路中的符号如图 1-3-4b 所示。

电感的大小与线圈的尺寸、匝数以及周围介质的导磁性能有关。若电感线圈周围介质为非铁磁物质 (如空心线圈) 时, 磁链 Ψ 与电流 i 成正比, L 为常数, 则电感元件称为线性电感元件, 其韦安特性如图 1-3-5 所示。带有铁心的线圈, L 不是常数, 则属于非线性电感元件。

2. 自感电动势

当线性电感元件中的电流发生变化时, 穿过线圈的磁通也相应地发生变化, 根据电磁感应定律, 则在线圈两端产生自感电动势 e_L 。在图 1-3-4 所示电路中, 若电流 i 与电压 u 的参考方向相同, 磁链 Ψ 与电流 i 的参考方向符合右手螺旋定则, 自感电动势 e_L 与磁链 Ψ 的参考方向也符合右手螺旋定则, 在上述规定参考方向的条件下, 自感电动势为

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

当电流增大时, $\frac{di}{dt} > 0$, e_L 为负值, 说明自感电动势的实际方向与电流的方向相反, e_L 要阻止电流的增大; 当电流减小时, $\frac{di}{dt} < 0$, e_L 则为正值, 说明自感电动势的实际方向与电流的方向相同, e_L 要阻止电流的减小。所以自感电动势总是要阻碍电流的变化。

3. 电压与电流关系

考虑到电压的参考方向规定为由高电位指向低电位, 而电动势参考方向的规定与之相反, 因此有

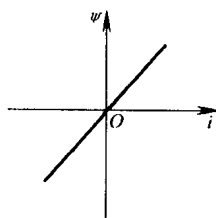


图 1-3-5 线性电感元件的韦安特性

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt}$$

这就是电感元件的特性方程,它说明:

电感元件两端电压与电流的变化率成正比。电流变化快,感应电压高,电流变化慢,感应电压低。若电感元件中通过的电流是不随时间变化的直流时, $i = I$, $\frac{di}{dt} = 0$, 所以电感元件对直流相当于短路。电感是一个动态元件。

如果给定电压 u , 在图 1-3-4 所示的关联参考方向下, 电感中的电流

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi \\ &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi \\ &= i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi \end{aligned}$$

上式说明:任何时刻电感的电流 $i(t)$ 与初始值 $i(0)$ 以及从 0 到 t 的所有电压有关, 电感元件有记忆电压的作用, 所以电感元件又是一种“记忆”元件。

4. 能量转换

在电压和电流的关联参考方向下, 电感元件的瞬时功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

上式表明:电流增大时, $\frac{di}{dt} > 0$, 则 $p > 0$, 说明电感元件吸收电能转换为磁场能量, 随着电流增大, 磁场能量增加。当电流减小时, $\frac{di}{dt} < 0$, 则 $p < 0$, 说明电感元件中磁场能量减少, 转换为电能送回到电源去。所以电感元件只储存能量而不消耗能量, 是一种储能元件。

从初始时刻 t_0 到任意时刻 t 期间, 电感元件吸收的电能为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Li(\xi) \frac{di(\xi)}{d\xi} d\xi \\ &= L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) \end{aligned}$$

它等于电感元件在 t 和 t_0 时刻的磁场能量之差。

如果在 t_0 时刻电感的初始电流 $i(t_0) = 0$, 这时电感元件没有磁通, 其磁场能量为零。则电感元件在任意时刻 t 所储存的磁场能量 $W_L(t)$ 将等于它所吸收的电能, 为

$$W_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t)$$

如果电感元件的韦安特性不随时间变化, 则称为非时变电感元件。

三、电容元件

1. 电容

任何两块金属导体在中间隔以绝缘介质, 就构成一个电容器。忽略很小的漏电损失, 可以认为电容器只具有电容参数, 是理想电容元件。当电容器两端加上电压后, 它的两块金属板上就会聚集起等量而异号的电荷, 如图 1-3-6a 所示。电压愈高, 聚集的电荷愈多, 产生的电场愈强, 储存的电场能量愈多。为了衡量电容器储存电荷的能力, 取电容器储存的电荷量与电压

的比值,即

$$C = \frac{q}{u}$$

式中, C 为电容器的电容量, 简称电容。当电荷的单位是库仑 (C), 电压的单位是伏特 (V) 时, 则电容的单位是法拉 (F)。电容在电路中的符号如图 1-3-6b 所示。

电容的大小与电容器本身的几何尺寸及其极板间的绝缘介质的性能有关。若电容器储存的电荷与所加电压成正比, C 为常数, 这样的电容元件称为线性电容元件, 如图 1-3-6c 所示。否则就是非线性电容元件。

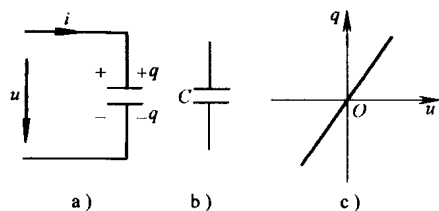


图 1-3-6 线性电容元件

2. 电压与电流的关系

当加在电容两端的电压发生变化时, 极板上的电荷量 $q = Cu$ 也相应地发生变化, 根据电流的定义, 电路中就会产生电流, 在电压 u 和电流 i 参考方向相同的情况下, 即有

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

这就是电容元件的特性方程, 它说明:

电容中的电流 i 与两端电压 u 的变化率成正比, 电压变化快, 电容电流大; 电压变化慢, 电容电流小。若电容两端电压是不随时间变化的直流电压时, $u = U$, $\frac{du}{dt} = 0$, 则 $i = C \frac{du}{dt} = 0$, 即电容元件对直流相当于开路。所以电容是一个动态元件。

如果给定电流 i , 则在图 1-3-6a 所示的 u 与 i 关联参考方向下, 电容电压

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \\ &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \\ &= u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \end{aligned}$$

上式说明, 任何时刻 t 电容电压 $u(t)$ 与初始值 $u(0)$ 以及从 0 到 t 的所有电流有关, 电容元件有记忆电流的作用。所以, 电容元件又是一种“记忆”元件。

3. 能量转换

电容元件的瞬时功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

上式表明: 电容两端电压 u 增大时, $\frac{du}{dt} > 0$, 则 $p > 0$, 说明电容元件吸收电能转为电场能量, 随着电压增大, 电场能量增加; 当电压减小时, $\frac{du}{dt} < 0$, 则 $p < 0$, 说明电容元件中电场能量减少, 转换为电能送回到电源去。所以电容元件只储存能量而不消耗能量, 也是一种储能元件。

从初始时刻 t_0 到任意时刻 t 期间, 电容元件吸收的电能为

$$\begin{aligned}
 W_C &= \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi \\
 &= C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi) = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0)
 \end{aligned}$$

它等于电容元件在 t 和 t_0 时刻的电场能量之差。

如果在 t_0 时刻电容的初始电压 $u(t_0)=0$, 这时电容元件处于未充电状态, 其电场能量为零。则电容元件在任意时刻 t 所储存的电场能量 $W_C(t)$ 将等于它所吸收的电能, 为

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

如果电容元件的库伏特性不随时间变化, 则称为非时变电容元件。

【例 1-3-1】一电容器 $C=0.2\text{F}$, 从 $t=0$ 开始通入 5A 恒定电流, 求 $t=10\text{s}$ 时, 电容器电压及其储能是多少? 设电容器电压 $u_C(0)=0$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{解: } u_C(t) &= u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i d\xi \\
 &= 0 + \frac{1}{0.2} \int_0^t 5 d\xi = \frac{5}{0.2} \xi \Big|_0^t = 25t
 \end{aligned}$$

当 $t=10\text{s}$ 时, $u_C(10)=250\text{V}$

$$W_C = \frac{1}{2} Cu_C^2(10) = \frac{1}{2} \times 0.2 \times 250^2 \text{J} = 6250\text{J}$$

下面将电阻元件、电感元件及电容元件在几个方面的特征列于表 1-3-1 中。

注意: 表中的伏安关系是在 u 、 i 关联参考方向下得出的, 否则式中应有负号; 三个元件都是线性元件, R 、 L 、 C 都是常数, 即相应的 u 与 i , Ψ 与 i 及 q 与 u 之间都是线性关系。

表 1-3-1 电阻、电感和电容元件的特征

特征 \ 元件	电阻元件	电感元件	电容元件
伏安关系	$u = iR$	$u = L \frac{di}{dt}$	$i = C \frac{du}{dt}$
参数意义	$R = \frac{u}{i}$	$L = \frac{\Psi}{i}$	$C = \frac{q}{u}$
能 量	$\int_0^t i^2 R dt$	$\frac{1}{2} Li^2$	$\frac{1}{2} Cu^2$

【练习与思考】

1-3-1 当线圈两端电压

为零时, 其储能是否也一定等于零? 如果通过电容器的电流为零, 其储能是否也一定等于零?

1-3-2 一电容接通恒定直流电压瞬间, 其电流应是多大?

第四节 电 源

电源是电路的重要组成部分, 不论它是以电能形式输入或是以电信号形式激励, 其共同点是向电路提供电压和电流。因此, 在电路模型中, 电源分别用电压源和电流源两种模型表示。

一、电压源

电压源有理想电压源和实际电压源之分。理想电压源又称为恒压源, 它是从实际电压源

抽象出来的一种理想元件。

1. 理想电压源 (恒压源)

理想电压源的电路模型如图 1-4-1a 所示。

它具有以下两个性质：

- 1) 电源的端电压 U 恒等于电源的电动势 E ，与流过它的电流无关。
- 2) 流过恒压源的电流是任意的，由负载电阻和电动势 E 确定。

理想电压源的上述性质可以用图 1-4-1b 所示的伏安特性曲线来表征。

2. 实际电压源

事实上，理想电压源是不存在的，因为任何实际电压源都有内阻，所以当有输出电流时，内阻上就会产生压降，并且消耗一定的能量。

实际电压源的电路模型是用恒压源与内阻的串联表示，如图 1-4-2a 所示。

实际电压源的端电压与电流的关系可表示为

$$U = E - IR_0$$

其伏安关系如图 1-4-2b 所示。由此可知，当输出电流增加时，输出电压下降，并且内阻越大，输出电压的变化也越大。

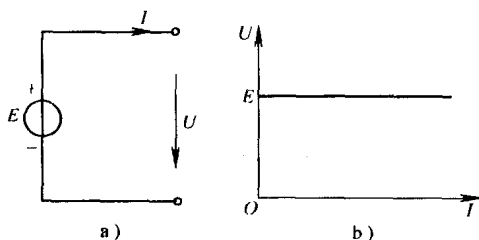


图 1-4-1 理想电压源

a) 电路模型 b) 伏安特性

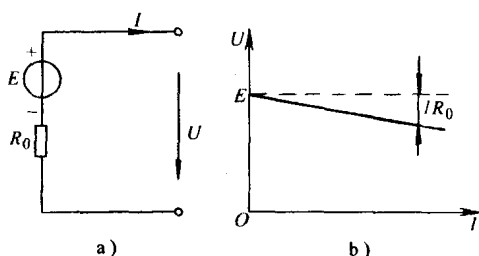


图 1-4-2 实际电压源

a) 电路模型 b) 伏安特性

二、电流源

电流源也有理想电流源和实际电流源之分，理想电流源又称恒流源。

1. 理想电流源 (恒流源)

理想电流源的电路模型如图 1-4-3a 所示。

它具有以下两个性质：

- 1) 输出电流恒等于 I_s ，与其端电压无关。
- 2) 恒流源两端的电压是任意的，由负载电阻和电流 I_s 确定。

理想电流源的上述性质可用图 1-4-3b 所示的伏安关系来表征。

2. 实际电流源

实际电流源的电路模型是用理想电流源和一个内阻 R_0 并联的组合表示，如图 1-4-4a 所示。

实际电流源的伏安关系表示为

$$I = I_s - \frac{U}{R_0}$$

如图 1-4-4b 所示。可见，实际电流源输出的电流是随着输出电压的增加而减小的。

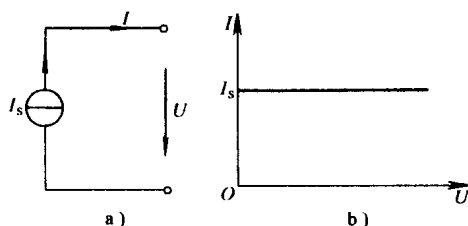


图 1-4-3 理想电流源

a) 电路模型 b) 伏安特性

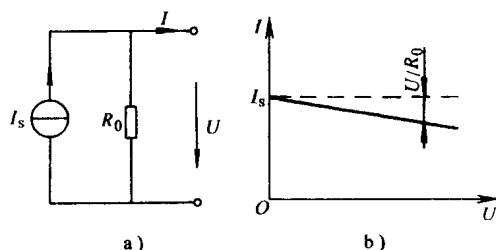


图 1-4-4 实际电流源

a) 电路模型 b) 伏安特性

三、受控源

在电路分析中，我们还常常遇到另外一种类型的元件——受控源。受控电压源的电压和受控电流源的电流都不是给定的时间函数，而是受某一支路电流或电压控制的，因此受控源为非独立电源。

为了和独立电源区别，我们把受控源的电路符号用菱形来表示。

根据控制量是电压还是电流，受控的是电压源还是电流源，受控源共有四种：电压控制电压源（VCVS）、电压控制电流源（VCCS）、电流控制电压源（CCVS）、电流控制电流源（CCCS），它们在电路中的图形符号如图 1-4-5 所示，图中控制量 u_1 为电路中某二点的电压， i_1 为电路中某支路的电流。

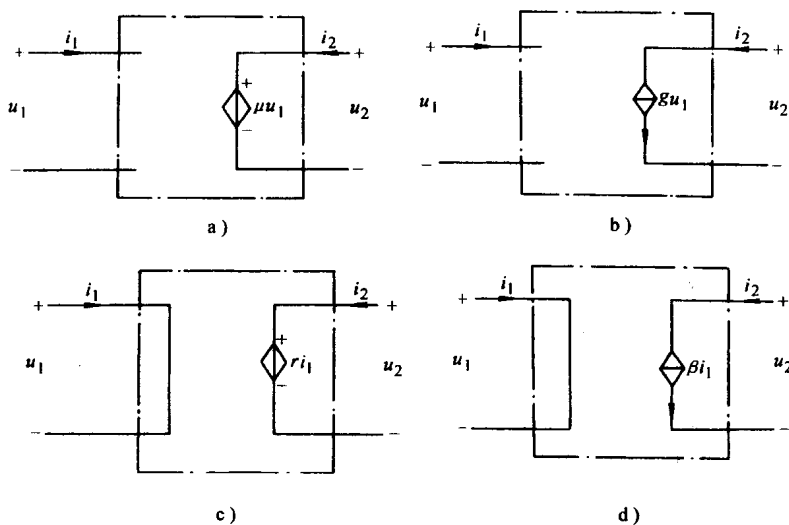


图 1-4-5 受控源

a) VCVS b) VCCS c) CCVS d) CCCS

四种受控源的伏安关系为

$$\text{VCVS} \quad u_2 = \mu u_1$$

$$\text{VCCS} \quad i_2 = g u_1$$

$$\text{CCVS} \quad u_2 = r i_1$$

$$\text{CCCS} \quad i_2 = \beta i_1$$