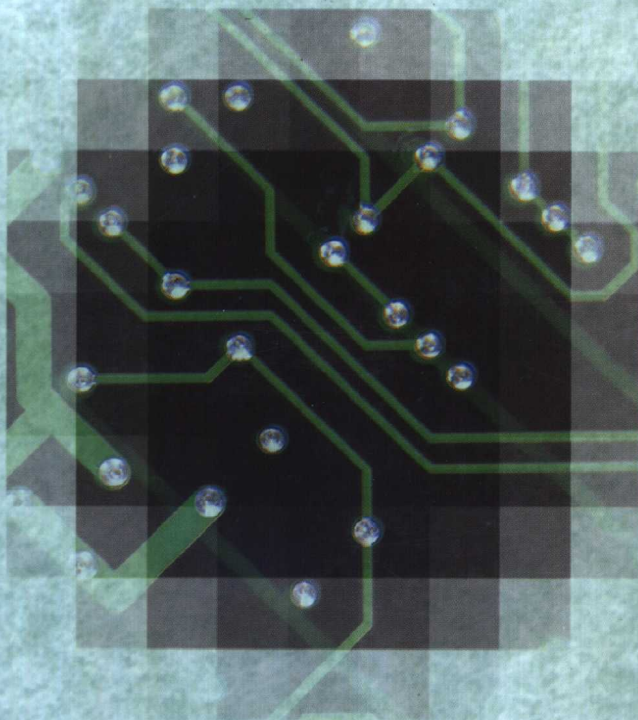




新世纪教改系列教材

电路分析

谭永霞 主编



西南交通大学出版社

电 路 分 析

谭永霞 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书是根据教育部颁布的“高等学校电路课程教学基本要求”编写的。全书较全面地阐述了电路分析的基本理论,内容共分十六章,主要包括:电路的基本概念与基本定律、电阻电路的等效变换、线性电路的基本分析方法、线性电路的基本定理、含有运算放大器电路的分析方法、正弦交流电路的稳态分析、含有互感的电路、三相电路的正弦稳态分析、非正弦周期电流电路、双口网络、一阶电路的时域分析、二阶电路的时域分析、拉普拉斯变换及其应用、状态变量法、非线性电阻电路、PSPICE 分析电路等。本书各章配有较丰富的典型例题和习题,书末附有答案。

本书适用面广,可作为高等学校电类(强、弱电,即电力、自控、通信、电子信息、计算机等)专业本科生、专科生,以及成人教育、高职高专学生的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据
电路分析 / 谭永霞主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2004.1
(新世纪教改系列教材)
ISBN 7-81057-690-9

I. 电... II. 谭... 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(2002)第 086109 号

电 路 分 析

谭永霞 主编

*

责任编辑 张华敏

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 27.375 字数: 481 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-690-9/TM·302

定价: 34.00 元

序 言

电路分析是高等工科院校电类专业的一门非常重要的技术基础课,对发展学生科学思维的能力,培养学生分析问题和解决问题的能力具有十分重要的作用。随着教学改革不断深入、现代化教学手段的普遍应用以及远程网络教育的开展,对教材的建设也提出了新的要求,为此,我们组织多年从事电工理论研究和教学的教师编写了这本《电路分析》教材。

在教材的编写过程中,力求做到深入浅出、通俗易懂,利于学生阅读和自学。在内容的编排上,则先易后难、先静态后动态,遵循人们普遍的认识规律,引导读者循序渐进、由浅入深。在内容的组织上,既注重基本知识和基本内容的全面性、完整性,同时对知识的关键点、难点也进行了较深入的分析和讨论。为提高读者应用计算机分析电路的能力,本教材还增加了用 PSPICE 分析电路的内容。

本教材共十六章,主要内容有电路的基本概念、基本定律、基本分析方法、基本定理、电路的稳态分析、动态电路的时域分析、复频域分析、状态变量分析、非线性电阻电路、PSPICE 分析电路等。在电路分析课程的讲授过程中,由于强电专业和弱电专业对该课程的要求不同,学时安排也有区别,所以各院校可根据具体的教学要求对以上教学内容作适当的调整或删减。

本书由谭永霞主编,汤晓钟、马冰、王莉、郭爱参与编写。其中第一、二、三、四、六、七、十、十一、十二、十五章由谭永霞执笔,第八、九、十三章由汤晓钟执笔,第十四章由马冰执笔,第五章由王莉执笔,第十六章由郭爱执笔。在教材的编写过程中,我们参考了众多国内外的优秀教材,特别是李警路主编的《电路分析》教材使编者受益匪浅。另外,很多“电工理论”的前辈和同行也给予了我们很多关怀和支持,在此编者一并表示衷心的感谢。

由于编者学识有限,书中一定有很多疏漏和错误,殷切希望广大同行和读者批评指正。

编 者

2003 年 6 月

目 录

第一章 电路的基本概念及基本定律	1
§ 1-1 实际电路与电路模型	1
§ 1-2 基本物理量与参考方向	2
§ 1-3 电阻、电感和电容元件	4
§ 1-4 独立电源	9
§ 1-5 受控电源	12
§ 1-6 基尔霍夫定律	13
习题一	18
第二章 电阻电路的等效变换	21
§ 2-1 电阻的串联与并联	21
§ 2-2 电阻的三角形(Δ)连接与星形(Y)连接	25
§ 2-3 电源的串联、并联	30
§ 2-4 电源的等效变换	32
习题二	34
第三章 线性电路的基本分析方法	39
§ 3-1 支路电流法	39
§ 3-2 结点电压法	41
§ 3-3 网孔电流法	49
§ 3-4 网络图论基础	55
§ 3-5 回路分析法	60
§ 3-6 割集分析法	63
习题三	66
第四章 线性电路的基本定理	70
§ 4-1 叠加定理	70
§ 4-2 替代定理	74
§ 4-3 戴维南定理和诺顿定理	76
§ 4-4 特勒根定理	86

§ 4-5 互易定理	88
§ 4-6 对偶原理	93
习题四	95
第五章 含有运算放大器电路的分析方法	101
§ 5-1 运算放大器简介	101
§ 5-2 运算放大器的电路模型	101
§ 5-3 理想运算放大器	106
§ 5-4 含有理想运算放大器电路的分析	107
习题五	113
第六章 正弦交流电路的稳态分析	116
§ 6-1 正弦量	116
§ 6-2 相量法的基本知识	119
§ 6-3 基本定律与基本元件的相量形式	123
§ 6-4 阻抗与导纳	128
§ 6-5 正弦交流电路的功率	133
§ 6-6 功率因数的提高	137
§ 6-7 正弦交流电路的稳态分析	139
§ 6-8 最大功率传输	143
§ 6-9 串联电路的谐振	146
§ 6-10 并联电路的谐振	150
习题六	154
第七章 含有互感的电路	160
§ 7-1 互感与互感电压	160
§ 7-2 含有互感电路的分析计算	165
§ 7-3 空芯变压器	172
§ 7-4 全耦合变压器与理想变压器	175
习题七	180
第八章 三相电路的正弦稳态分析	185
§ 8-1 三相电路	185
§ 8-2 对称三相电路的计算	190
§ 8-3 不对称三相电路	195
§ 8-4 三相电路的功率及测量	199
习题八	205
第九章 非正弦周期电流电路	209
§ 9-1 非正弦周期电流及傅里叶级数	209
§ 9-2 具有对称性的波形	213

§ 9-3 周期非正弦量的有效值、平均值和功率	218
§ 9-4 非正弦周期电流电路的计算	222
§ 9-5 三相电路中的高次谐波	225
习题九	230
第十章 双口网络	236
§ 10-1 双口网络	236
§ 10-2 双口网络的四组方程及参数	237
§ 10-3 双口网络的等效电路	245
§ 10-4 回转器与负阻抗变换器	248
§ 10-5 双口网络的连接	251
习题十	254
第十一章 一阶电路的时域分析	258
§ 11-1 引 言	258
§ 11-2 初始条件的确定	259
§ 11-3 一阶电路的零输入响应	263
§ 11-4 一阶电路的零状态响应	269
§ 11-5 一阶电路的全响应	274
§ 11-6 一阶电路的三要素法	276
§ 11-7 一阶电路的阶跃响应	280
§ 11-8 一阶电路的冲激响应	283
§ 11-9 卷积积分法	289
习题十一	295
第十二章 二阶电路的时域分析	302
§ 12-1 二阶电路的零输入响应	302
§ 12-2 二阶电路的零状态响应和全响应	308
§ 12-3 二阶电路的阶跃响应和冲激响应	311
习题十二	314
第十三章 拉普拉斯变换及其应用	317
§ 13-1 拉普拉斯变换	317
§ 13-2 几个基本函数的拉氏变换	320
§ 13-3 拉普拉斯变换的基本性质	322
§ 13-4 拉普拉斯反变换	330
§ 13-5 电路定律的运算形式	336
§ 13-6 应用拉氏变换分析线性电路	342
§ 13-7 网络函数	351
§ 13-8 $H(s)$ 的零点、极点分析	354

习题十三	361
第十四章 状态变量法	368
§ 14-1 电路的状态变量与状态方程	368
§ 14-2 状态方程的建立	372
§ 14-3 状态方程的复频域解法	381
习题十四	385
第十五章 非线性电阻电路	387
§ 15-1 非线性电阻元件	387
§ 15-2 非线性电阻电路的图解法	388
§ 15-3 非线性电阻电路的分段线性化法(折线法).....	393
§ 15-4 非线性电阻电路的小信号分析法	399
习题十五	401
第十六章 PSPICE 分析电路	405
§ 16-1 电路仿真工具简介	405
§ 16-2 输入文件的一般规定	406
§ 16-3 文件描述语句	409
§ 16-4 分析和控制语句	410
习题十六	416
习题部分答案	418
主要参考文献	430

第一章

电路的基本概念及基本定律

·————— 内 容 提 要 —————·

本章主要介绍电路的基本概念及基本定律,内容包括:实际电路与电路模型;基本物理量与参考方向;电阻、电感和电容元件;独立电源;受控电源;基尔霍夫定律。

§1-1 实际电路与电路模型

实际电路是由电工设备和元器件组成的,大到庞大的电力供电系统,小到日常生活中使用的手电筒(其实际电路如图 1-1 所示)。而实际电路的形式和功能是多种多样的,各种元器件的性能千差万别,直接分析和计算这种电路就比较困难。为此,我们需要对实际的电路元件进行抽象化、理想化和近似化处理,用为数有限的理想电路元件表征种类繁多的实际器件,以便构成一个便于分析和计算的电路模型(以下简称电路)。如将图 1-1 所示的实际电路抽象化,即可得到如图 1-2 所示的电路模型。其中,提供电能的干电池,在其内电阻忽略不计的情况下,抽象为电压源 U_s ;作为用电设备的灯泡抽象为电阻 R ;在连接导线的电阻值与灯泡的阻值相比很小的情况下,连接导线的电阻值可以忽略不计,因此图 1-2 所示的导线只起连接作用,与其长短和形状无关。

本书分析的电路都是电路模型,模型中的元件都是理想元件。至于如何由实际电路抽象为电路模型,这不是本书要讨论的主要内容。

对于电路中元件的分类,根据描述角度的不同大致分为线性元件与非线性元件、二端元件与多端元件、静态元件与动态元件等。这些元件均会在后面的章节中详细讨论。

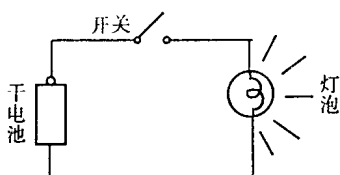


图 1-1 实际电路图

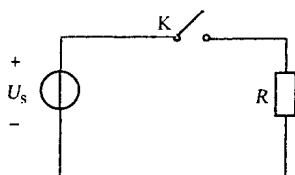


图 1-2 电路模型

还有一种常见的元件分类方法：集中参数元件与分布参数元件。当实际电路的尺寸远远小于电路工作频率所对应的波长时，该电路可以用集中参数模型来表示，否则只能用分布参数模型来表示。本书只讨论集中参数电路。

§ 1-2 基本物理量与参考方向

在电路分析中，常用的基本物理量（亦称基本变量）有：电流 i ，电压 u ，电量 q ，磁链 ψ ，能量 W 和功率 p 。通过这些物理量可以反映电路所具有的性能和特征。这些物理量的含义在物理学中已学过，这里不再赘述。

在电路中，最基本的量是电流和电压，它们都具有方向性，而且其方向的不同，直接影响到物理量之间的数学表达式和对分析结果的解释，因此电流和电压的方向十分重要。对于简单的电路来说，电流的实际流向（正电荷运动的方向）及电压的正、负极性是可以判断出来的，但对于复杂电路或方向不断变化（如日常用的 50 Hz 交流电）的交变信号来说，事先辨别出它们的方向是相当困难的。因此在分析电路之前就需要假设一个方向——参考方向。

图 1-3 是复杂电路中的某个元件，假设流过该元件的电流的参考方向如实线所示，即由 A 端流向 B 端。当然电流的实际方向（见图 1-3 中的虚线）是否与参考方向一致，这要根据电流 i 的正负进行判别。若解得 $i > 0$ ，则参考方向与实际方向相同；若解得 $i < 0$ ，则实际方向与参考方向相反。

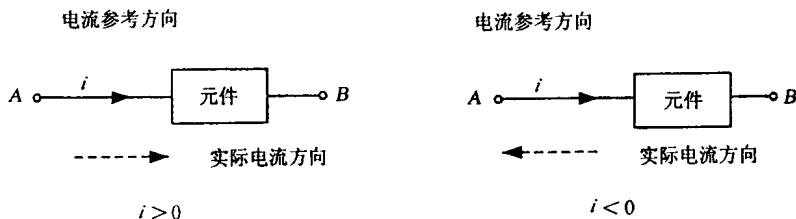


图 1-3 电流参考方向

电流的大小为单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

如果电流的大小为恒值,且方向不变,此时

$$i(t) = I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

电流的单位为安培,简称安(简称为 A)。电流常用的单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)及纳安(nA)等,且有

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}, \quad 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}, \quad 1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$$

同理,元件两端的电压也需要选定它的参考方向,又称参考极性。如图 1-4 所示,即假设 A 端电位高于 B 端电位(实线所示)。若 $u > 0$,则实际电压极性(虚线所示)与参考极性一致;若 $u < 0$,则实际极性(虚线所示)与参考极性相反。

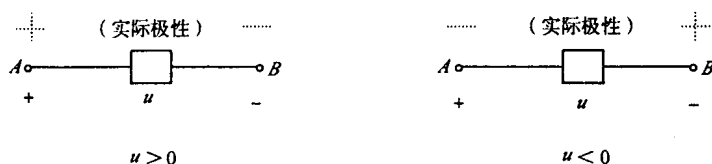


图 1-4 电压参考方向

电压的大小等于电场力对单位正电荷从 A 端移到 B 端所做的功,即

$$u_{AB} = \frac{dA}{dq} = \frac{W_A - W_B}{dq} = \frac{W_A}{dq} - \frac{W_B}{dq} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1-3)$$

式中, W_A 、 W_B 分别为电荷 dq 在 A 端、B 端的电能; φ_A 、 φ_B 分别为 A 端、B 端的电位。所以,电压也常被称为电位差或电压降。

电压的参考方向也可以用双下标表示,如 u_{AB} ,并认为 A 端为高电位,B 端为低电位。

电压的常用单位有伏特(V)、千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等。

对于一个元件来说,其电流和电压的参考方向可以独立设定,但如果电流的参考方向是从电压的“+”极性流入、从电压的“-”极性流出,则称它们的参考方向为关联参考方向,如图 1-5 所示;否则称为非关联参考方向,如图 1-6 所示。

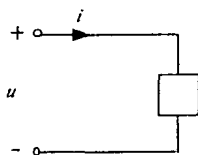


图 1-5 关联参考方向

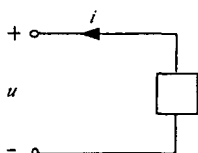


图 1-6 非关联参考方向

当元件的电压、电流取关联参考方向时(如图 1-5), 元件吸收的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

如果元件取非关联参考方向(如图 1-6), 则其吸收的功率为

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1-5)$$

并且, 当 $p > 0$ 时, 元件实际在吸收功率; 而当 $p < 0$ 时, 元件吸收的是负功率, 即元件实际在释放功率。功率的单位为瓦特, 简称瓦(W), 常用单位还有千瓦(kW)。

元件从时刻 t_0 到时刻 t 这一时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-6)$$

直流情况下, 元件吸收的电能为

$$W = P(t - t_0) \quad (1-7)$$

电能的国际标准单位为焦耳(J), 且 $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \times 1 \text{ s}$ 。另一个常用的单位是度, $1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (千瓦时)。

§ 1-3 电阻、电感和电容元件

电阻、电感和电容元件是电路分析中最基本的元件, 下面分别对这些元件进行讨论。

1. 电阻元件

电阻是反映能量损耗的电路参数。电阻元件是电阻器等耗能器件的抽象元件。电阻元件按其电压、电流的关系曲线(又称伏安特性)是否是过原点的直线而分为线性电阻元件(如图 1-7 所示)和非线性电阻元件(如图 1-8 所示); 按其特性是否随时间变化分为时变电阻元件和非时变电阻元件。本书如不特别指出, 均指非时变电阻元件。本节重点介绍线性电阻元件, 而非线性电阻元件将在第十五章的非线性电阻电路分析中介绍。

线性电阻元件是一个二端元件, 其端电压 $u(t)$ 和端电流 $i(t)$ 取关联参考方向时, 满足欧姆定律

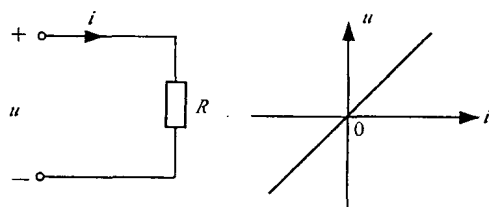


图 1-7 线性电阻

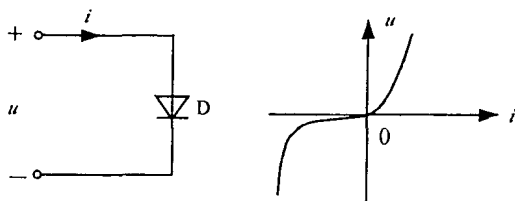


图 1-8 非线性电阻

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-8)$$

或 $i(t) = Gu(t) \quad (1-9)$

式中, R 为线性电阻元件的电阻; G 为线性电阻元件的电导, 二者均为常量, 其数值由元件本身决定, 并且

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-10)$$

电阻的单位为欧姆, 简称欧(Ω); 电导的单位为西门子(S)。

如果电阻元件的端电压和端电流取非关联参考方向, 其关系式为

$$u(t) = -Ri(t)$$

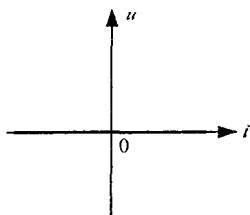
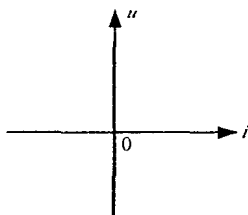
或 $i(t) = -Gu(t)$

由图 1-7 不难知道, 线性电阻的电阻值 R 就是线性电阻的伏安特性曲线的斜率。当电阻值 $R=0$ 时, 伏安特性曲线与 i 轴重合, 如图 1-9 所示, 此时不论电流 i 为何值, 端电压 u 总是为零, 称其为“短路”; 当电阻值 $R=\infty$ 时, 其伏安特性曲线与 u 轴重合, 如图 1-10 所示。此时不论端电压 u 为何值, 电流 i 总是为零, 称其为“开路”或“断路”。

在电阻元件取关联参考方向的情况下, 电阻吸收的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{u^2(t)}{R} = Gu^2(t) \quad (1-11)$$

如电阻元件取非关联参考方向, 电阻吸收的功率为

图 1-9 $R=0$ 的伏安特性图 1-10 $R=\infty$ 的伏安特性

$$p(t) = -u(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{u^2(t)}{R} = Gu^2(t) \quad (1-12)$$

由式(1-11)、式(1-12)知,无论电阻元件采用何种参考方向,任何时刻电阻吸收的功率都不可能为负值,也就是说电阻元件为耗能元件。

在时刻 t_0 到时刻 t 这一时间范围内,电阻消耗的能量如下

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt \quad (1-13)$$

2. 电感元件

1) 电 感

电感是一种储存磁场能量的元件。如图 1-11 所示,当线圈流过电流 i_L 时,该电流在线圈中产生磁通 ϕ 。若线圈的匝数为 N ,且通过每匝的磁通量均为 ϕ ,则通过线圈的磁链

$$\psi = N\phi \quad (1-14)$$

磁通与磁链的单位均为韦伯(Wb)。如果磁链 ψ 与电流 i_L 的特性曲线(又称韦一安特性)是过原点的一条直线,如图 1-12 所示,则对应的电感元件称为线性电感,否则为非线性电感,如图 1-13 所示。

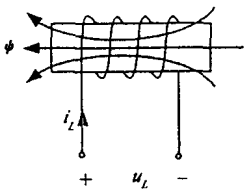


图 1-11 电感线圈

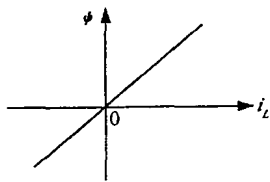


图 1-12 线性电感

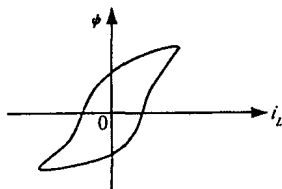


图 1-13 非线性电感

线性电感的电路符号如图 1-14 所示,且定义

$$L = \frac{\psi}{i_L} \quad (1-15)$$

式中, L 称为线性电感的电感量或电感值,为常数。电感的单位为亨利,简称

亨(H), 常用的还有毫亨(mH)、微亨(μH)等。

2) 电感电压与电感电流的关系

当磁链变化时, 在电感线圈的两端会产生感应电压。对于线性电感元件, 当线圈两端的电压 u_L 与电流 i_L 取关联参考方向时, 根据法拉第和楞次定律, 有

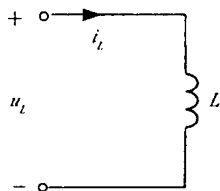


图 1-14 线性电感的符号

$$u_L(t) = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li_L)}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-16)$$

即电感电压与电感电流的变化率成正比。

如果电感电压为 u_L , 则电感电流

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L(\tau) d\tau = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u_L(\tau) d\tau + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\tau) d\tau \\ &= i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-17)$$

其中, $i_L(0)$ 是电感电流的初始值。

式(1-17)说明, t 时刻的电感电流 i_L 不仅与 0 到 t 这段时间内的电感电压有关, 而且还与整个电路过去的历史有关, 所以电感元件具有记忆功能。因此电感元件是记忆元件。

当电压 u_L 与电流 i_L 取非关联参考方向时, 有

$$u_L(t) = -L \frac{di_L}{dt} \quad (1-18)$$

当流过电感元件的电流为直流时, 由式(1-16)、式(1-18)知, 电感两端电压为零, 所以在直流电路中, 电感元件相当于短路; 当电流变化比较剧烈时, 电感两端会出现高电压, 有可能破坏电感线圈的绝缘, 故应尽可能避免电感电流的突变。但是电感元件的这种特征也被广泛应用, 如日光灯的点燃等。

3) 功率和能量

在关联参考方向下, 电感吸收的功率为

$$p = u_L i_L = L \frac{di_L}{dt} i_L \quad (1-19)$$

即任何时刻电感吸收的功率不仅与该时刻的电流有关, 而且还与该时刻电流的变化率有关。当 $p > 0$ 时, 表明电感在吸收能量; 而 $p < 0$ 时, 说明电感在释放能量。所以电感元件是一种储存磁场能量的元件。

电感元件在 0 到 t 时刻这段时间内吸收的能量为

$$\begin{aligned} W &= \int_0^t p d\tau = \int_0^t u_L i_L d\tau = \int_0^t L i_L \frac{di_L}{d\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{2} L i_L^2(t) - \frac{1}{2} L i_L^2(0) \end{aligned} \quad (1-20)$$

电感元件在 t 时刻所具有的能量为

$$W = \frac{1}{2} L i_L^2(t) \quad (1-21)$$

3. 电容元件

1) 电 容

电容是一种储存电场能量的元件, 其电路符号如图 1-15 所示。

当加在电容两端的电压 u_C 增加时, 电容器极板上的电荷量 q 也增加, 若二者成正比关系(特性曲线如图 1-16 所示), 即为线性电容; 否则为非线性电容(如图 1-17 所示的特性曲线)。电荷 q 的单位为库仑, 反映电容特性的曲线又被称为库—伏特性曲线。

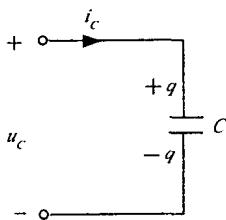


图 1-15 线性电容的符号

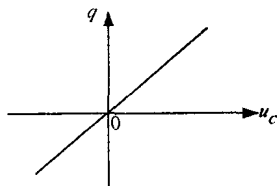


图 1-16 线性电容

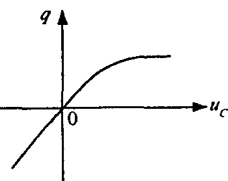


图 1-17 非线性电容

对于线性电容器, 其电容量(简称电容) C 定义为

$$C = \frac{q}{u_C} \quad (1-22)$$

C 实际上是图 1-16 所示的库—伏特性曲线的斜率, 此时 C 为常数。电容的单位为法拉, 简称法(F), 常用单位还有微法(μF)、纳法(nF)和皮法(pF), 它们的关系为

$$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^9 \text{ nF} = 10^{12} \text{ pF}$$

2) 电容电压与电容电流的关系

若电压 u_C 与电流 i_C 取关联参考方向, 则

$$i_C(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu_C)}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (1-23)$$

即流过电容的电流与电容两端的电压变化率成正比。电容电压与电容电流关系的另一表达式为

$$\begin{aligned} u_C(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C d\tau = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i_C d\tau + \frac{1}{C} \int_0^t i_C d\tau \\ &= u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C d\tau \end{aligned} \quad (1-24)$$

其中, $u_C(0)$ 是电容电压的初始值。式(1-24)表明, 任何时刻的电容电压 $u_C(t)$ 与该时刻以前电路的整个过去有关, 所以电容也是记忆元件。

当电容电压 u_C 与电容电流 i_C 取非关联参考方向时

$$i_C(t) = -C \frac{du_C}{dt} \quad (1-25)$$

当电压为恒值时, 电容电流为零, 所以在直流电路中电容相当于开路; 当电容电压变化时, 电容电流才有值。

3) 功率和能量

关联参考方向下, 电容吸收的功率为

$$p = u_C i_C = C \frac{du_C}{dt} u_C \quad (1-26)$$

即任何时刻电容吸收的功率不仅与该时刻的电压有关, 而且还与该时刻电压的变化率有关, 其数值有可能为正, 也可能为负。当 $p > 0$ 时, 电容吸收能量; 当 $p < 0$ 时, 电容释放能量。

0 到 t 时刻这段时间内电容吸收的能量为

$$W = \int_0^t p d\tau = \int_0^t C u_C \frac{du_C}{dt} dt = \frac{1}{2} C u_C^2(t) - \frac{1}{2} C u_C^2(0) \quad (1-27)$$

电容在 t 时刻具有的能量为

$$W = \frac{1}{2} C u_C^2(t) \quad (1-28)$$

§ 1-4 独立电源

独立电源是一个二端元件, 它作为电路的激励信号(又称激励源)向电路提供能量。由激励源引起的支路电压、电流等被称为响应。独立电源分为独立电压源和独立电流源两种类型, 简称电压源和电流源。下面分别予以介绍。