



高等职业技术学院教材

电工原理



劳动人事出版社

电 工 原 理

(电路与磁路)

主 编 康巨珍

副主编 万玉祥

劳动人事出版社

本书是高等职业技术师范院校、职工大学和函授大学教材。

本书共包括十四章，即电路的基本概念及基本定律、直流电路分析方法、正弦电路和相量法、互感电路、谐振电路、三相电路、非正弦电路、过渡过程的经典分析法、过渡过程的运算分析法、网络图论及状态方程、二端口网络、运算放大器、非线性电路、磁路。每章均有习题，书末有习题答案。

本书也适合参加其他成人教育学习的学生或工程技术人员阅读。

参加本书编写的同志有：康巨珍、万玉祥、康晓东、李人明、李树生、金颖达、丛一、孙碚，康巨珍任主编，万玉祥任副主编；张英儒、赵桂良审稿。

电 工 原 理

(电路与磁路)

主 编 康巨珍

副主编 万玉祥

责任编辑：金龄

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 21.5印张 534千字

1989年8月北京第1版 1989年8月天津第1次印刷

印数：4100册

ISBN 7-5045-0354-1/TM·021 定价：6.65元

前 言

为了适应高等职业技术师范教育事业发展的需要，我局组织编写了一批进行职业技术师资培训的大学教材，计有：《高等数学》（上、下册）、《物理学》、《理论力学》、《材料力学》、《机械零件设计》、《电工原理》。这些教材的主要适用对象为高等职业技术师范院校、职工大学和函授大学的学生。

在编写这些教材的过程中，考虑到培养师资和函授学习的特点，除保证教材的理论水平外，在论述上力求通俗易懂，并配以丰富的例题和习题，适宜于学生自学，以培养学生分析问题和解决问题的能力。同时，为使教材具有较强的适应性，编写时取材较为丰富，凡带（*）的部分，属于难度大或加宽知识面的内容，教师和学生可根据情况选修。

这些教材也适合参加其他函授教育、业余大学、夜大学、电视大学的学生使用。

参加这些教材编写工作的是一批教学经验丰富的教师，他们付出了辛勤的劳动，谨在此表示谢忱。对教材中存在的不足之处，敬请读者提出宝贵意见。

劳动部培训司

1988年7月

目 录

第一章 电路的基本概念及基本定律.....	1
§ 1—1 电路模型及电流、电压参考方向的指定.....	1
§ 1—2 功率.....	3
§ 1—3 三类基本元件及其约束关系.....	4
§ 1—4 基尔霍夫定律.....	10
§ 1—5 电源.....	12
本章小结.....	15
习题一.....	16
第二章 直流电路分析方法.....	20
§ 2—1 等效变换法.....	20
§ 2—2 系统化法.....	32
§ 2—3 迭加定理.....	41
§ 2—4 齐性定理.....	48
§ 2—5 置换定理.....	49
§ 2—6 戴维南定理.....	50
§ 2—7 诺顿定理.....	54
*§ 2—8 最大功率传输定理.....	55
*§ 2—9 对偶原理.....	57
本章小结.....	57
习题二.....	58
第三章 正弦电路和相量法.....	63
§ 3—1 概述.....	63
§ 3—2 正弦量的三要素及其表达形式.....	64
§ 3—3 相量法的基本概念.....	68
§ 3—4 三类基本元件电压、电流关系的相量表示法.....	74
§ 3—5 复阻抗.....	77
§ 3—6 复导纳.....	78
§ 3—7 复阻抗和复导纳的等效互换.....	79
§ 3—8 复阻抗(复导纳)串并联电路的计算.....	81
§ 3—9 正弦电路的功率.....	82
§ 3—10 正弦电路的稳态计算.....	90
本章小结.....	97
习题三.....	98

第四章 互感电路	101
§ 4—1 互感概念	101
§ 4—2 变压器	105
§ 4—3 互感线圈的联接	112
§ 4—4 互感消去法	114
§ 4—5 互感电路的计算	116
本章小结	118
习题四	119
第五章 谐振电路	122
§ 5—1 串联谐振电路的基本特征及能量关系	122
§ 5—2 串联电路的谐振曲线和选择性	126
*§ 5—3 并联谐振电路	130
本章小结	134
习题五	135
第六章 三相电路	137
§ 6—1 三相电路的基本概念	137
§ 6—2 三相电路的联接	139
§ 6—3 对称三相电路的计算	144
§ 6—4 不对称三相电路的分析计算	146
§ 6—5 三相电路的功率及其测量	149
本章小结	152
习题六	153
第七章 非正弦电路	156
§ 7—1 概述	156
§ 7—2 非正弦周期讯号的傅氏展开	157
§ 7—3 非正弦周期讯号的近似算法	165
§ 7—4 傅里叶级数的指数形式与傅里叶积分	169
§ 7—5 非正弦周期讯号的有效值、平均值和平均功率	172
§ 7—6 非正弦电路的计算	176
*§ 7—7 滤波器	180
*§ 7—8 对称三相电路中的高次谐波	184
本章小结	187
习题七	188
第八章 过渡过程的经典分析法	191
§ 8—1 概述	191
§ 8—2 一阶网络分析	195
§ 8—3 二阶网络分析	207
本章小结	215
习题八	215

第九章 过渡过程的运算分析法	218
§ 9—1 概述	218
§ 9—2 拉普拉斯变换	220
§ 9—3 展开定律	229
§ 9—4 电路定律的运算形式	232
§ 9—5 运算法分析过渡过程	236
本章小结	240
习题九	241
第十章 网络图论及状态方程	244
§ 10—1 支路方程及理想电源移位	244
§ 10—2 网络拓扑图及关联矩阵	248
§ 10—3 节点分析法	249
§ 10—4 回路分析法与割集分析法	257
§ 10—5 状态方程	261
本章小结	267
习题十	269
第十一章 二端口网络	272
§ 11—1 概述	272
§ 11—2 二端口网络的方程和参数	273
§ 11—3 二端口网络的传递函数及其特性阻抗	280
§ 11—4 二端口网络的等效电路	283
§ 11—5 二端口网络的联接	285
本章小结	289
习题十一	290
第十二章 运算放大器	292
§ 12—1 多端元件及运算放大器	292
§ 12—2 含有运算放大器电路的分析	295
§ 12—3 回转器	298
本章小结	302
习题十二	302
第十三章 非线性电路	304
§ 13—1 非线性电路概述	304
§ 13—2 非线性电路方程的编写	309
§ 13—3 图解法与小讯号分析法	312
*§ 13—4 牛顿—拉夫逊法	318
本章小结	321
习题十三	322
*第十四章 磁路	324
§ 14—1 磁路概念及其基本定律	324

§ 14—2 磁路分析计算	327
本章小结	331
习题十四	331
习题答案	332

第一章 电路的基本概念 及基本定律

内容概要与基本要求

本章主要研究电路的基本概念与基本定律。基本要求是：

1. 了解电路和电路模型的概念，搞清电流、电压参考方向的含义；
2. 掌握三种基本元件的约束关系，理解独立源、受控源在电路中的作用及分析方法；
3. 了解基尔霍夫定律的实质，掌握该定律的具体应用。

§ 1—1 电路模型及电流、电压 参考方向的指定

一、电路及电路模型

为了研究电路的特性，了解和掌握电路的分析与计算方法，首先要建立电路及其模型图的概念。例如在手电筒里，按照要求装入干电池，合上开关后灯泡发光，关闭开关灯泡熄灭。这个装有干电池的手电筒就是电路，其中干电池是一种电源，它是供给电路电能的；电灯泡是把电能转化成其他形式能量（如光能）的一种用电设备，在电路中称做负载；电筒皮起导线的作用，联接电源、负载和开关。这种用导线把电源、负载和开关等联接起来的装置称做电器系统。

电路就是概括大量实际电器系统（如机床电路、收录机、电视机等）抽象出来的概念。电路又可概括为由不同元件与电源组成的网络。通常把电路称为线路。

电路的主要作用有：（1）转换能量，如电炉把电能转变成热能，电灯泡把电能转变成光能，电动机把电能转变成机械能等。（2）处理讯号，如放大电路把微弱讯号放大，调谐电路从各种不同讯号源中选出需要的讯号等等。

电路根据其组成、性质和作用有各种不同的分类，但就电路是否满足线性关系，主要分为两类。一类是线性电路，它是由线性元件组成的，描述这类电路的方程是线性方程；另一类是非线性电路，描述这类电路的方程满足非线性关系。不论是线性电路还是非线性电路，虽然组成实际电路、系统的元件形形色色、种类繁多，但从元件所反映的电路中的电磁现象来看，不外乎以下几种：（1）消耗电能，例如各种电阻器、电炉等，我们称为“电阻元件”，用符号“ R ”表示；（2）供给电能，如干电池、发电机等，我们称为“电源”，用符号“ G ”表示；（3）储存电场能，如电容器，用符号“ C ”表示；（4）储存磁场能，如各种线圈，用符号“ L ”表示。以上各类元件称为理想元件。

用这些理想元件组成的电路，即为实际电路的电路模型。

R 、 L 、 C 为电路的基本元件，其根源要追溯到电路的基本变量。众所周知，构成电路的基本变量有电压 $u(t)$ 、电流 $i(t)$ 、电荷 $q(t)$ 和磁通链 $\Psi(t)$ 。在这四个变量中， $u(t)$ 与 $\Psi(t)$ 、 $i(t)$ 与 $q(t)$ 分别遵循如下的变化规律，即

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \frac{d\Psi(t)}{dt} \\ i(t) &= \frac{dq(t)}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式(1-1)表明， $u(t)$ 与 $\Psi(t)$ 、 $i(t)$ 与 $q(t)$ 这四个变量并不都是独立的。换句话说， $u(t)$ 与 $\Psi(t)$ 、 $i(t)$ 与 $q(t)$ 两两分别为动态相关量。

若将以上四个变量中的每两个进行组合，构成变量偶，则四个变量有六种可能的组合形式，如图1-1所示。

在这六种可能的组合形式中，由于变量偶 (u, Ψ) 和 (i, q) 动态相关，所以只有 (u, i) 、 (i, Ψ) 、 (u, q) 和 (Ψ, q) 为动态无关。这四个变量偶的前三个，分别表征了大家熟知的三类基本元件，即电阻器 R 、电感器 L 和电容器 C 的特性。根据完全类似的理由，图

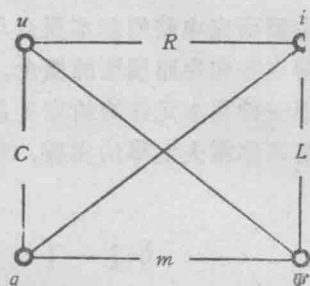


图1-1

1-1中 q 与 Ψ 也应代表一个确定的元件，这就是第四个基本电路元件，称做记忆电阻器，用符号“ m ”表示。这个元件的性质虽然还没完全被认识，但可以断言它是存在的。

二、电流、电压参考方向的指定

由物理学知，在所有电路中，自由电荷 q 在电源电场力作用下按照一定秩序的运动即形成电流。导体中的这种电流称做传导电流。衡量电流强弱的物理量是电流强度，电流强度等于单位时间内通过导体某横截面的电量。电流强度通常简称电流，用字母 i 表示，即式(1-1)。在国际单位制(SI)中，电流的单位是安培，简称安(A)；电荷的单位是库仑，简称库(C)；电压的单位是伏特，简称伏(V)；磁通链的单位是韦伯，简称韦(Wb)。

当通过导体任一横截面的电流随时间变动，则称为变动电流，用字母 i 表示。大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流，简称直流，用大写字母 I 表示。直流电流 I 与电量 Q 的关系为

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

当电流作为讯号通过电路时，欲求输入讯号和输出讯号之间的关系，首先应确定电路中讯号的方向。实际电路中讯号的方向通常有两种可能，如图1-2所示，即正电荷 q 从 A 流向 B ，或正电荷 q 从 B 流向 A 。电路中电流的方向到底是正电荷从 A 流向 B ，还是从 B 流向 A 呢？很难立即判断出来。有时电流的实际方向还在不断地改变。由于电流的实际方向一时不能确定下来，而分析计算电路又必须首先知道电流的方向，因此引入“参考方向”的概念，这丝毫不影响分析计算电路的正确性，却为电路的分析计算提供了极大的方便。

电流参考方向是任意指定的，通常用箭头表示，有时也用双下标表示，如 i_{AB} 表示电流从 A

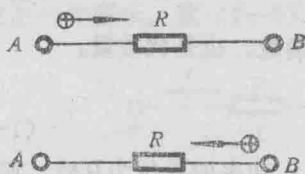


图1—2



图1—3

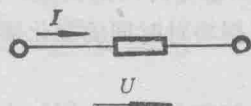


图1—4

流向B。

电压参考方向也是任意指定的，通常也用箭头表示，也可用“+”“-”极表示。正极指向负极的方向就是电压参考方向。图1—3表示电压参考方向是从A指向B，或从“+”极指向“-”极。

三、电流、电压的实际方向

电流的实际方向是指正电荷的净流量从A端流入，并从B端流出，习惯上就认为电流是从A端流向B端；反之，则认为电流是从B端流向A端（如图1—2所示）。

电压的实际方向是指两点之间的高电位点指向低电位点的方向。

四、参考方向与实际方向的关系

对电流来讲，如果电流的参考方向和实际方向一致，则计算出的电流值为正值（ $i > 0$ ）；反之，若电流的参考方向和实际方向相反，则计算出的电流值为负值（ $i < 0$ ）。因此，当指定电流的参考方向时，可由电流值的正或负来确定电流的实际方向。

对电压来讲，当电压的参考方向与实际方向一致时，电压为正值（ $u > 0$ ）；反之，当电压参考方向与实际方向相反时，电压为负值（ $u < 0$ ）。

必须指出，对一段电路或一个元件来说，其电压的参考方向和电流的参考方向可以独立地任意指定。若指定电流从标以电压“+”极性的一段流入，并从“-”极性一段流出，即电流的参考方向与电压的参考方向一致，则称这种参考方向为电压电流的关联参考方向，如图1—4所示。

今后，任何瞬间的电流和电压用 $i(t)$ 、 $u(t)$ 表示，有时写成 i 、 u ；当用大写字母 I 、 U 时，则表示直流。

§1—2 功 率

一、功率概念

电荷在电路中移动时，伴随着能量转换，所以研究电路中各部分能量关系及计算方法非常重要。

图1—5示出正电荷 q 从 t_0 到 t 时间内，由A到B所做的功

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq \quad (1-3)$$

在电压和电流关联参考方向下，由式（1—1）得

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-4)$$

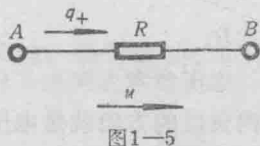
式中 u 和 i 都是时间的函数，且是代数量，因此，功也是时间的函数，也是代数量。

根据功对时间的变化率就是功率，并用 p 表示，即得

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

在国际单位制(SI)中，功的单位为焦耳，简称焦(J)；功率的单位为瓦特，简称瓦(W)。比瓦大的单位有千瓦(kW)，比瓦小的单位有毫瓦(mW)，其关系为

$$\begin{aligned} 1 \text{ kW} &= 10^3 \text{ W} \\ 1 \text{ mW} &= 10^{-3} \text{ W} \end{aligned}$$



式(1-5)是计算功率的最基本公式。

二、功率的吸收与释放

对于式(1-5)，如果取电流 i 的参考方向是从电压的参考“+”极流入，则 p 为正值($p > 0$)时表示这部分电路吸收(消耗)功率，而 p 为负值($p < 0$)时表示这部分电路发出(供给)功率；如果取电流 i 的参考方向从电压 u 的参考“-”极流入，则 $p > 0$ 表示该电路发出功率，而 $p < 0$ 表示吸收功率。图1-6 a、b中 p 的箭头分别表示元件吸收和发出功率。



图1-6

§ 1-3 三类基本元件及其约束关系

一、电阻元件

电阻元件分线性电阻元件和非线性电阻元件。

线性电阻元件，是指通过元件的电流与元件两端电压满足线性关系，或者说描述该元件的数学表达式是一次式。

线性电阻元件是二端理想元件，它是由实际元件抽象出来的数学模型，它能反映实际元件的主要电磁性质。在任何时刻，它两端的电压与其电流关系均服从欧姆定律。在电压和电流关联参考方向下，欧姆定律可表示成

$$u = Ri \quad (1-6)$$

式中 R 是联系电阻上电压和电流的电气参数，并且与电压和电流无关，是一个常数，单位为欧姆(Ω)，如图1-7所示。若令 $G = \frac{1}{R}$ ，则式(1-6)变为 $i = Gu$ ，其中 G 为电阻元件的电导，单位为西门子(S)。

当电压与电流参考方向相反，则欧姆定律可表示成

$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-7)$$

如图 1—8 所示。式 (1—6)、(1—7) 即为电阻元件约束关系。分析这两个式子可得：

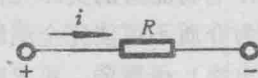


图1—7

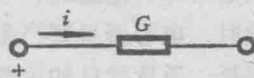


图1—8

(1) 公式与参考方向配套使用。

(2) 任何时刻，线性电阻元件上电压（或电流）完全由同一时刻的电流（或电压）所决定，而与该时刻之前的电流（或电压）的各种值无关。

(3) 在电压和电流关联参考方向下，线性电阻元件吸收的功率

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-8)$$

因为 R 、 G 是正的实常数，故功率恒为正值。这说明在任何时刻，电阻元件绝不可能发出电能，也就是说，电阻元件吸取的电能全部转换成其他形式能量而消耗掉或作其他用途。从而得，线性电阻元件 ($R > 0$) 不仅是无源元件，而且是耗能元件。但对于 $R < 0$ ，即负阻元件则不然，它可以发出能量，故有负阻放大器之称。

(4) 线性电阻元件的伏安特性为通过原点的直线，如图 1—9 所示。

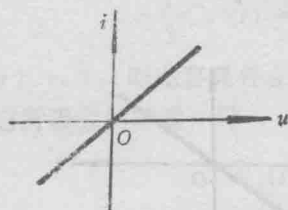


图1—9

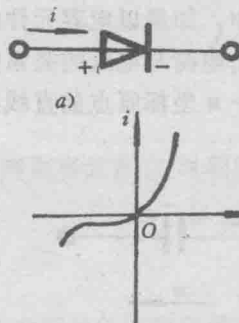


图1—10

非线性电阻元件，是指元件两端电压与通过元件的电流不满足线性关系，即描述该元件的数学表达式为非一次式，这种元件称为非线性电阻元件，如图 1—10 所示。

非线性电阻元件上的电压和电流之间不满足欧姆定律，元件的电阻值将随电压或电流的改变而改变，不是常数。例如某二极管的伏安特性不是直线，如图 1—10b 所示。由此可见，二极管是非线性电阻元件。

特别指出，象二极管这类非线性电阻元件，其伏安特性还与电压或电流的方向有关，即分别给二极管两端施加相同电压时，流过它的电流并不相同。当给二极管两端施以正向电压时，只要该电压大于二极管的管压降，二极管导通，电流很快增长，如图 1—10b 第一象限特性曲线所示，称为正向导电；相反，当给二极管两端施以反向电压时，虽然该电压值同前，但电流很小（增长很慢），如图 1—10b 第三象限特性曲线所示，称为反向导电。所以说，二极管有单向性之称，而线性元件为双向性。

以上所研究的电阻元件，其伏安特性都不随时间改变，故称为时不变电阻元件；假若元件的伏安特性随时间改变，则称为时变电阻元件。

二、电容元件

在工程技术上，电容器应用很广，品种和规格也很多，其组成都是在两块金属板间隔以不同的介质（如云母、绝缘纸、电介质等）。它是一种储存电场能量的实际元件。当电容器上的电压变化时，电容器总要产生漏电流（很小），这是因为介质不可能完全绝缘而造成的，因而有介质损耗。质量优良的电容器，其介质损耗（如漏电流）很微弱，可忽略不计，因此可用理想的电容元件作为它的模型。

当给电容器极板上储存数量相等的正负电荷（ $+q$ 和 $-q$ ）时，其两端电压与所储存的电荷满足

$$q = cu \quad (1-9)$$

若规定电容元件上电压的参考方向由正极指向负极，并指定电流的参考方向为流进正极板的方向，如图1—11所示，这时如果把式（1—9）代入式（1—1），则得电容器的约束关系为

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

其中 C 为电容器的电容。在大多数情况下，电容的大小与它上面的电荷、电压无关，即 C 是一个常量，这种电容叫作线性电容。

在直角坐标系中，如果以电容元件的电荷 q 为纵坐标（或横坐标），电压 u 为横坐标（或纵坐标），画出电荷与电压的关系曲线，则称为电容元件的库伏特性。线性电容元件的库伏特性是通过 $q \sim u$ 坐标原点的直线，如图1—12所示。

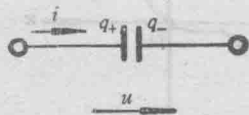


图1—11

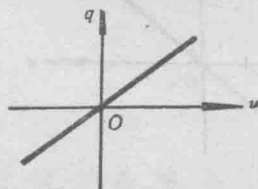


图1—12

式（1—10）指出，当 $u > 0$ ，且 $\frac{du}{dt} > 0$ 时， $i > 0$ ，这说明电流的实际方向指向正极板，因此正极板上电荷 q （ $q > 0$ ）增多，即电容充电；当 $u > 0$ ，但 $\frac{du}{dt} < 0$ 时， $i < 0$ ，这说明电流的实际方向指向负极板，因此正极板上电荷 q （ $q > 0$ ）减少，即电容放电；当 $u < 0$ ，且 $\frac{du}{dt} < 0$ 时， $i < 0$ ，这表明正极板上电荷 q （ $q < 0$ ）的绝对值增加，即电容反向充电；当 $u < 0$ ，但 $\frac{du}{dt} > 0$ 时， $i > 0$ ，这说明正极板上电荷 q （ $q < 0$ ）的绝对值减少，即电容反向放电。由于电容元件的电压不断变动，电容不停地充电或放电，电容器电路中形成电流。当元件上电压发生剧变（即 $\frac{du}{dt}$ 很大）时，电流很大；当电压不随时间变化时，则电流为零，这时电容元件相当于开路，故有隔直流作用，俗称开路效应。

在图 1—11 所示的电流参考方向和电压参考下, 由 $i = \frac{dq}{dt}$, 可得电容中电荷 q 与电流 i 的积分关系为:

$$\int_{q(t_0)}^{q(t)} dq = \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$

$$\text{即 } q(t) = q(t_0) + \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$

若设 t_0 为计算时间的起点, 并取为零, 则上式变换为 $q(t) = q(0) + \int_0^t i(\xi) d\xi$ 。

对于线性电容元件, 其电压为

$$u(t) = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

在电压和电流关联参考方向下, 线性电容元件所吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-11)$$

从 $t = 0$ 到 t 时间内, 电容元件吸收的电能为

$$\begin{aligned} W_c &= \int_0^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_0^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi \\ &= C \int_{u(0)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi) \\ &= \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(0) \end{aligned}$$

若取 $u(0) = 0$, 即电容元件在 $t = 0$ 时未充电, 则电容元件在 t 时刻所储存的电场能量 $W_c(t)$ 等于它所吸收的能量, 即

$$W_c(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-12)$$

如果计算时间从 t_1 开始, 且 $u(t_1) \neq 0$, 则从 t_1 到 t_2 电容元件所吸收的能量就等于元件在 t_2 和 t_1 时刻的电场能量之差, 即

$$\begin{aligned} W_c &= C \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} u du = \frac{1}{2} Cu^2(t_2) - \frac{1}{2} Cu^2(t_1) \\ &= W_c(t_2) - W_c(t_1) \end{aligned}$$

上式告诉我们, 电容充电时, $|u(t_2)| > |u(t_1)|$, $W_c > 0$; 电容放电时, $|u(t_2)| < |u(t_1)|$, $W_c < 0$ 。因此电容是储能元件, 且是无源元件。

值得注意的是, 电容与电容器既有联系又不相同。电容器是指具有一定大小电容的特制元件, 而电容则是在许多场合都存在的一种物理量。在国际单位制 (SI) 中, 电容的单位是法拉 (F)。比法拉小的单位是微法拉 (μF), 比微法拉小的单位是微微法拉 (pF)。它们的关系是

$$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F}$$

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

三、电感元件

若在无阻导线绕成的线圈中通以电流 i , 则在元件内部将产生磁通 Φ_L 。当磁通 Φ_L 与线

圈 N 匝都交链, 那么磁通链 $\Psi_L = N\Phi_L$ 。

当 Φ_L 、 Ψ_L 均由线圈本身的电流产生时, 称为自感磁通和自感磁通链。如果磁通 Φ_L 和磁通链 Ψ_L 的参考方向与电流 i 的参考方向满足右螺旋关系时, 称为关联参考方向, 如图1—13a所示。

在关联参考方向下, 任何时刻电感元件的自感磁通链 Ψ_L 与元件中电流 i 的比值满足

$$\frac{\Psi_L}{i} = L \quad (1-13)$$

式中 L 称为元件的自感或互感系数, 在国际单位制(SI)中, 其单位为亨利, 简称亨(H)。

当线圈附近没有铁磁材料时, 电感 L 的数值是一个常数, 这种电感称为线性电感。假若在线圈中放入铁磁材料, 则式(1—13)的比值 L 就不是常数了, 这种电感称为非线性电感。对于非线性电感元件, 如果铁心中含有较大的空气隙, 或者在铁磁材料非饱和状态下工作, 仍可近似地当作线性元件处理。

空心线圈是线性元件。通常用线性电阻元件和线性电感元件的串联组合作为空心线圈的模型。

在直角坐标系中, 如果以电感元件的自感磁通链 Ψ 为纵坐标(或横坐标), 电流 i 为横坐标(或纵坐标), 画出磁通与电流的关系曲线, 称为电感元件的韦安特性。线性电感元件的韦安特性是通过 $\Psi \sim i$ 坐标原点的直线, 如图1—13b所示。

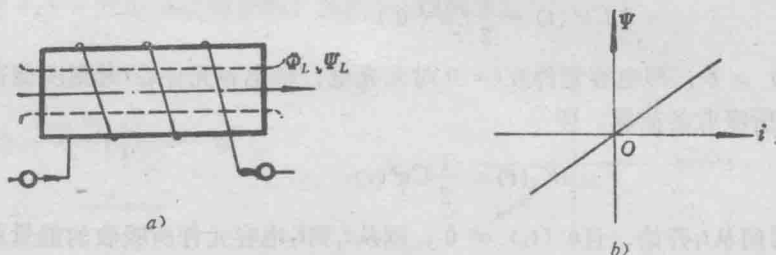


图1—13

当通过电感元件的电流 i 随时间发生变化时, 磁通链 Ψ_L 也随之改变, 于是在元件两端感应出电压, 称做感应电压。此感应电压等于磁通链的变化率。把式(1—13)代入式(1—1)得

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-14)$$

式(1—14)表明, 任何时刻线性电感元件上的电压与这一时刻电流的变化率成正比。电流变化越快, 感应电压越大; 电流变化越慢, 感应电压越小。当电流不随时间变化时, 感应电压等于零, 这时元件相当于短路。式(1—14)即为电感元件的约束关系。

当电压和电流取关联参考方向时, 电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-15)$$

因此从 t_0 到 t 时间内, 电感吸收的电能为

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

若取 $i(t_0) = 0$ ，则

$$W_L = \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (1-16)$$

对于从任意时间 t_1 到 t_2 ，线性电感元件吸收的能量为

$$\begin{aligned}
 W_L &= L \int_{i(t_1)}^{i(t_2)} i di = \frac{1}{2} L i^2(t_2) - \frac{1}{2} L i^2(t_1) \\
 &= W_L(t_2) - W_L(t_1)
 \end{aligned}$$

当电流 i 增加时， $W_L(t_2) > W_L(t_1)$ ，即 $W_L > 0$ ，电感元件吸收能量；当电流 i 减小时， $W_L(t_2) < W_L(t_1)$ ， $W_L < 0$ ，电感元件释放能量。因此，电感是储能元件，且是无源元件。

如果有两个线圈 N_1 ， N_2 ，如图1-14所示，当在载流线圈 N_1 附近放置线圈 N_2 时，则载流线圈 N_1 中变化的电流 i_1 所产生的磁通 Φ_{11} ，可在 N_2 中产生自感电压，故 Φ_{11} 称为自感磁通。 i_1 所产生的磁通将有一部分 Φ_{21} 穿过线圈 N_2 ，并引起 N_2 产生感应电压，这部分磁通 Φ_{21} 称为互感磁通。

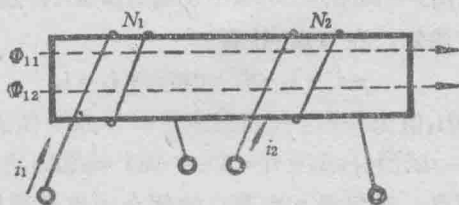


图1-14

线圈中互感磁通链与产生它的另一线圈中的电流之比，定义为两线圈间的互感系数，即

$$\left. \begin{aligned}
 M_{12} &\triangleq \left| \frac{\Psi_{12}}{i_2} \right| \\
 M_{21} &\triangleq \left| \frac{\Psi_{21}}{i_1} \right|
 \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

对线性电感线圈， $M_{12} = M_{21} = M$ ，与电流无关。在线性电感线圈中，互感磁通链随时间变化将引起互感电压，即

$$\left. \begin{aligned}
 u_{12} &= \frac{d\Psi_{12}}{dt} = \pm M \frac{di_2}{dt} \\
 u_{21} &= \frac{d\Psi_{21}}{dt} = \pm M \frac{di_1}{dt}
 \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

式中“+”、“-”的取值见第五章所述。