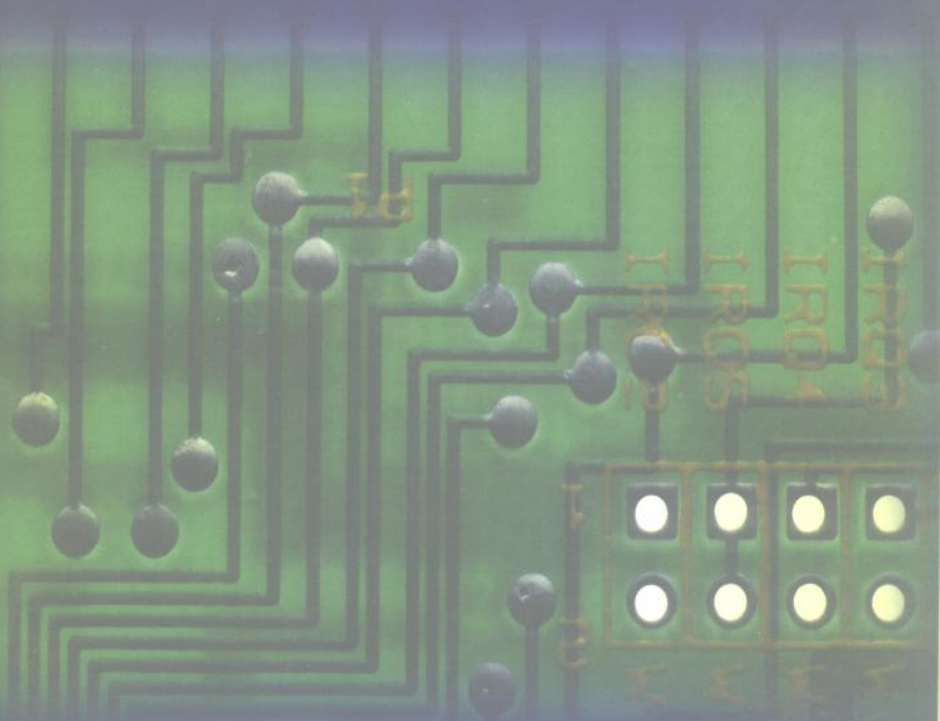


中国物资出版社

电路分析基础

黄经武 陈厚福 刘辉 编



电路分析基础

黄经武 刘 辉 编
陈厚福

中国物资出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/黄经武 陈厚福 刘辉编. - 北京:中国物资出版社,1999.2

ISBN 7-5047-1359-7

I. 电… II. ①黄…②陈… III. 电路分析-电路理论
IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 30998 号

中国物资出版社出版发行

(北京西城区月坛北街 25 号 邮编 100834)

全国新华书店经销

北京白河印刷厂印刷

开本:850×1168 毫米 1/32 15.25 印张 400 千字

1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月第 1 次印刷

印数:0001—3500 册

ISBN 7-5047-1359-7/TM·0030

定价:24.00 元

前 言

本教材是根据编者多年来在师范院校电子、计算机应用、电器、通信等专业教学中的经验体会,针对师范院校的特点,并参考国内外相关知识编写而成的。

本教材主要叙述电路分析的最基础知识。全书共十一章,首先叙述电路模型及电路变量的参考方向,元件特性方程及电路的基本定律,电路分析的最基本方法;其次阐述复杂电路、网络的若干重要定理及简化电路的分析方法;第三分析含动态元件电路在直流激励下的暂态过程,这是现代变流电路的分析基础知识,第四对含动态元件电路在正弦交流电源激励下的稳态分析作较详细的阐述。最后讨论双口网络、非线性电阻电路的分析方法,同时介绍了大规模集成电路的计算机辅助分析方法,它是近代电路分析的重要手段。

该书在编写时,注意文字叙述深入浅出,内容编排循序渐进,便于教与学,每章均附有习题,引导学生思考和掌握该章主要内容。

本书由黄经武、陈厚福、刘辉编写。在本书编写过程中得到华南理工大学王定中先生的热忱帮助,他认真审阅全稿并为本书提出不少宝贵意见。湛毅协助书中插图的绘制工作。

本书可作为高等院校电子、计算机应用、电器、通信等专业本科学生的电路分析基础教材,略加删减也可作为专科学生的教材。

由于编者水平所限,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 电路分析导论	(1)
§ 1-1 电路变量的参考方向	(1)
§ 1-2 基本元件及其伏安特性	(5)
§ 1-3 基尔霍夫定律	(11)
§ 1-4 独立源	(14)
§ 1-5 受控源	(19)
§ 1-6 二端网络的功率	(24)
习 题 一	(26)
第二章 电阻电路的基本分析方法	(30)
§ 2-1 电阻串并联的等效变换	(30)
§ 2-2 二端网络的化简	(37)
§ 2-3 T型网络和 Π 型网络的互换	(39)
§ 2-4 支路电流法	(44)
§ 2-5 网孔分析法	(47)
§ 2-6 节点分析法	(56)
§ 2-7 含运算放大器的电路分析	(64)
§ 2-8 网络线图	(69)
§ 2-9 割集分析法	(72)
§ 2-10 回路分析法	(78)
习 题 二	(84)

第三章 网络定理	(92)
§ 3-1 叠加定理	(92)
§ 3-2 替代定理	(99)
§ 3-3 戴维南定理和诺顿定理	(103)
§ 3-4 最大功率传递定理	(116)
§ 3-5 特勒根定理	(119)
§ 3-6 互易定理	(125)
习 题 三	(130)
第四章 一阶电路分析	(136)
§ 4-1 换路定律及初始值的计算	(136)
§ 4-2 零输入响应	(139)
§ 4-3 零状态响应	(145)
§ 4-4 完全响应及三要素法	(150)
§ 4-5 微分电路和积分电路	(156)
§ 4-6 RC 耦合电路	(163)
§ 4-7 阶跃函数与阶跃响应	(164)
§ 4-8 冲激函数和冲激响应	(168)
§ 4-9 线性电路的任意输入响应 卷积积分	(174)
习 题 四	(177)
第五章 二阶电路分析	(181)
§ 5-1 RLC 串联电路的暂态过程	(181)
§ 5-2 RLC 并联电路的完全响应	(191)
§ 5-3 一般二阶电路分析	(196)
§ 5-4 二阶电路的冲激响应	(204)
习 题 五	(211)
第六章 正弦稳态分析	(214)

§ 6-1	正弦稳态响应的基本概念	(214)
§ 6-2	正弦信号的相量表示法	(218)
§ 6-3	基尔霍夫定律的相量形式	(227)
§ 6-4	基本元件伏安关系式的相量形式	(230)
§ 6-5	阻抗与导纳 相量模型	(236)
§ 6-6	正弦稳态响应的相量分析法	(241)
§ 6-7	相量图解法	(246)
§ 6-8	正弦稳态电路的功率	(249)
§ 6-9	正弦稳态最大功率传递定理	(258)
§ 6-10	三相电路	(262)
§ 6-11	不同频率正弦激励下电路的稳态响应	(271)
§ 6-12	非正弦周期波的有效值与功率	(275)
习 题 六		(278)
第七章 耦合电感与理想变压器		(290)
§ 7-1	耦合电感的伏安关系	(290)
§ 7-2	耦合电感的串联、并联	(295)
§ 7-3	空芯变压器电路分析	(300)
§ 7-4	耦合电感的 T 型去耦等效电路	(304)
§ 7-5	理想变压器	(308)
§ 7-6	实际变压器模型	(312)
习 题 七		(321)
第八章 电路的频率响应特性		(326)
§ 8-1	频率响应的基本概念	(326)
§ 8-2	RC 电路的频率响应	(333)
§ 8-3	RLC 串联谐振电路	(339)
§ 8-4	RLC 并联谐振电路	(345)

§ 8-5 双调谐电路	(349)
习 题 八	(354)
第九章 双口网络	(358)
§ 9-1 双口网络方程	(359)
§ 9-2 双口网络参数间的关系	(371)
§ 9-3 双口网络的等效电路及双口元件	(374)
§ 9-4 有端接的双口网络分析	(381)
§ 9-5 双口网络的联接	(383)
习 题 九	(394)
第十章 简单非线性电阻电路分析	(400)
§ 10-1 非线性电阻元件及其伏安特性	(400)
§ 10-2 图解法	(402)
§ 10-3 非线性电阻的串联、并联和混联	(406)
§ 10-4 理想二极管	(409)
§ 10-5 小信号分析	(411)
习 题 十	(415)
第十一章 大规模电路分析方法简介	(420)
§ 11-1 基尔霍夫定律的矩阵形式	(420)
§ 11-2 标准支路及其方程	(428)
§ 11-3 回路分析法	(430)
§ 11-4 割集分析法	(434)
§ 11-5 节点分析法	(438)
§ 11-6 线性电路的直流分析程序	(450)
习题十一	(465)
参考文献	(469)
部分习题答案	(470)

第一章 电路分析导论

本章主要叙述电路变量的参考方向,电路基本元件及其特性,电路的基本定律——基尔霍夫定律。

§ 1-1 电路变量的参考方向

1-1.1 电路的模型

电路是电能传输和转换的电流通路,主要由电源(提供电能),负载(取用电能的设备)及连接电源与负载之间能量传送的导线等组成。由于电路的设计目的、任务有多种多样,电路所使用的实际元件也有多种多样,如发电机、电池、变压器、电热器……等等。因此,实际电路的设计与构成一般来说是较为复杂的。为了便于对电路进行分析、计算、归纳电路的共性、规律,我们引入纯电阻、纯电感、纯电容、电压源、电流源等等理想元件,以它们的组合来表示实际元件、表示实际电路。由这些理想元件表示的电路,便是电路的模型。例如一个灯泡,当我们研究它从电源吸取多少电能时,在50Hz的交流电作用下,完全可以用一个消耗电能的电阻来表示它。因为它几乎不存在电感、不储存磁场能量、也几乎不存在电容、不储存电能。又如一个导线绕成的线圈,导线的长度不长,在交变电流的电路中,其主要表现是电感,其电阻可忽略不计,看成一个纯电感。诸如此类的近似表示方法,在不影响分析问题的精确度的情况下,大大地简化了问题的分析过程。

一个实际电路以什么模型表示,这与电路的工作条件、元器件

的性质有关,同时与问题分析的要求有关。例如前述的线圈,如果分析问题的精度要求较高时,就不能忽略导线的电阻,必须用电阻与电感的串联来表示。如果在工作频率很高的情况下,则必须考虑线圈匝间的分布电容。本教材所讨论的电路模型是集总参数模型,即假设元件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长。

用理想化元件建立实际电路模型,对电路模型进行分析,掌握电路的性能,是我们学习电路分析的主要内容。

1-1.2 电路变量的参考方向

对电路(模型)进行分析,是根据电路的已知参数(如电源、电阻等值)分析、计算电路的电流、电压、电功率等物理量,这些电量称为电路变量。其中电流、电压是电路中最基本的变量,是我们研究分析的主要对象。因为如果电路中各部分的电流、电压是已知的,则其电性能是确定的。

从物理学的知识知道,由电荷有序的运动而形成电流,我们规定正电荷的运动方向就是电流的方向。但在电路的分析过程中,电流的真实方向往往难以在电路上表示出来,如交流电流,其方向是随时间而变化的,不能在电路图上用一固定的箭头表示它的真实方向。在分析复杂电路时,也往往不知电流的真实方向。为了简洁而准确地描述电流的真实方向,我们采用参考方向与代数式相配合的描述方法。在电路图中任选一方向,称为参考正方向,简称参考方向,在图中以一箭头表示,如果电流的真实方向与参考方向一致的,电流以正值表示;如果电流的真实方向与参考方向相反的,则电流以负值表示。例如某一段电路 ab 间,电流的大小是 5 安培,电流的真实方向由 a 流向 b ,如图 1-1-1(a)所示,选取的参考方向是由 a 指向 b ,则电流 $i = 5$ 安培,如果选取的参考方向是由 b 指向 a ,如图 1-1-1(b)所示,则电流应表示为 $i = -5$ 安培。对于交变电流也采用此方法表示,当交流电的值为正时,实际方向与参考

方向一致;当交流电的值为负时,实际方向与参考方向相反。如图 1-1-2(a)所示的某一交流电流 i , 在 AB 支路中流通, 其参考方向由 A 指向 B, 其表达式为:

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-1-1)$$

这意味着在 $\omega t = 0 \sim \pi$ 的期间 ($t = 0 \sim \frac{T}{2}$)

电流 i 是从 A 流向 B 的, 在 $\omega t = \pi \sim 2\pi$ 期

间 ($t = \frac{T}{2} \sim T$), 电流 i 是从 B 流向 A 的。因为这时 i 是负值, 电流的实际方向与参考方向相反。如果是同一交变电流, 即实际方向在 $0 \sim \frac{T}{2}$ 期间是由 A 流向 B, 在 $\frac{T}{2} \sim T$ 期间是由 B 流向 A, 但参考方向选取由 B 指向 A, 如图 1-1-2(b)所示, 则电流 i 的表达式应为:

$$i = -I_m \sin \omega t$$

$$\text{或:} \quad i = I_m \sin(\omega t - \pi) \quad (1-1-2)$$

因为在 $\omega t = 0 \sim \pi$ ($t = 0 \sim \frac{T}{2}$) 期间, $\sin \omega t$ 为正值, 而电流的实际方向是由 A 流向 B, 与参考方向相反, 故应加一负号。同样在 $t = \frac{T}{2} \sim T$ 期间 $\sin \omega t$ 为负值, 但这时实际的电流方向与参考方向是一致的, 应为正值。因此式中出现负号。我们从(1-1-1)、(1-1-2)式还可知道, 对交流电, 由于选取参考方向不同, 其波形图可以不同, 表

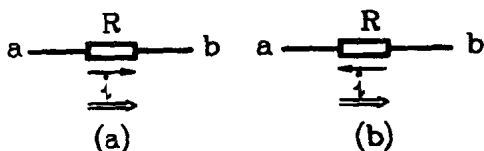


图 1-1-1

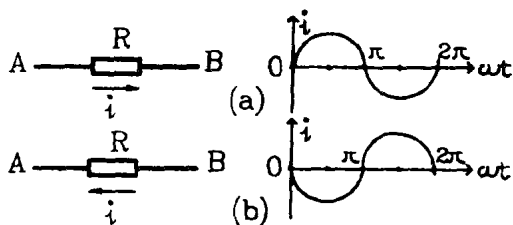


图 1-1-2

达式也会不同,它们相差 π 的位相。

电压是电路中的基本变量,从物理学知识已知道,如果某正电荷从电路中的 a 点移至 b 点,需外力做功,则 a 点的电位低于 b 点,反之若正电荷从 a 点移至 b 点,其电能减少,电场力做功,则 a 点的电位高于 b 点,二点之间的电位差即为 ab 间的电压。电路中电压方向的描述方法同样采用一参考方向与代数值来表示。设某段电路 ab, a 点的电位高于 b 点 5 伏,当用图 1-1-3(a)的参考方向时, $U=5V$, 因为实际电压降方向与参考方向相同;若用图 1-1-3 (b)的参考方向,则 $U=-5V$ 。

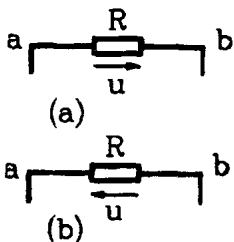


图 1-1-3

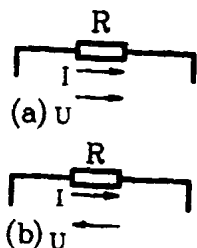


图 1-1-4

综上所述,有了电路变量的参考方向,就可以用代数式描述该电量,变量的参考方向的选取是任意的,但它会影响该变量的代数表达式,参考方向改变时,该量的代数表达式需改变符号。如果一些公式中含有该变量,将影响公式的正负符号,例如大家所熟悉的欧姆定律。某一电阻的端电压 U , 电流 I , 当采用图 1-1-4(a)的参考方向时(称为关联的参考方向), 则

$$U = IR$$

因为正的电压降表示 a 电位高于 b 的电位, 电流真实方向是由 a 流向 b。若采用图 1-1-4(b) 的参考方向(称为非关联的参考方向), 则有

$$U = -IR$$

因为当 u 为正时, 表示电压降的实际方向由 a 向 b, 这时电流的实际方向应由 a 流向 b, 与 I 的参考方向相反, 所以应加一负号。

电流、电压的参考方向除了用箭头标出表示的方法之外, 还常采用双下标记法, 如 I_{ab} 表示电流的参考方向由 a 流向 b。 u_{ab} 表示由 a 点到 b 点的电压降。在分析电路时, 对电压的参考方向还常用参考极性表示, 在电路元件两端标出“+”、“-”极性, “+”号表示高电位, “-”号表示低电位, 当元件端电压 U 为正值时, 表明该电压的真实极性与参考极性一致, U 为负值时, 表明该电压的真实极性与所标极性相反。

§ 1-2 基本元件及其伏安特性

本节只讨论线性电阻、线性电感和线性电容的伏安特性(或称伏安关系, 简称为 VAR)。

1-2.1 电阻元件

电阻元件有阻碍电流流动的特性, 电流流经电阻元件要消耗能量, 电阻元件两端的电压 u 与流经它的电流 i 之间的关系是满足欧姆定律。如图 1-2-1 所示, 习惯选取关联的 u, i 参考方向, 则有

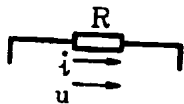


图 1-2-1

$$u = Ri \quad (1-2-1)$$

电阻的单位是欧姆(Ω), 电流的单位是安培(A), 电压的单位是伏特(V)。如果电阻的阻值 R 不随 u, i 而变, 是一恒值, 则称它为线

性电阻。线性电阻的端电压与流经它的电流的关系,在 $u-i$ 坐标平面上的图形——称伏安特性曲线,是一条直线。如图 1-2-2 所示。若电阻 R 的值随 u, i 而变化,则称它为非线性电阻,其伏安特性曲线将不是一直线。图 1-2-3 是半导体二极管的伏安特性曲线,是一种典型的非线性元件。

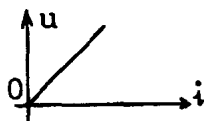


图 1-2-2

电阻元件的特性还可以用另一参数电导来表示。电导 G 是电阻的倒数,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-2-2)$$

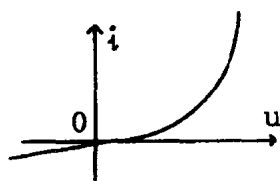


图 1-2-3

电阻越大,电导越小,该电阻的导电能力弱;电阻越小电导越大,该电阻的导电能力强。 G 的单位是西门子,以 S 表示。用电导表示电阻的电流与其端电压的关系是:

$$i = Gu \quad (1-2-3)$$

电阻是耗能元件。设某段电路 ab , 其电压 u , 电路的电流为 i , 在 dt 时间内将 dq 的正电荷从 a 点移至 b 点, 这时电场力所做的功:

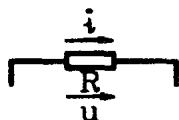


图 1-2-4

功率

$$\begin{aligned} dw &= udq \\ p &= \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} \\ p &= ui \end{aligned} \quad (1-2-4)$$

式(1-2-4)是某段电路的功率计算公式,对于图 1-2-4 所示电阻电路 $u = Ri$

$$p = \frac{u^2}{R} = i^2 R \quad (1-2-5)$$

(1-2-5)式是表示阻值为 R 的电阻元件所消耗的功率。

1-2.2 电感元件

用导线绕成线圈,忽略导线的电阻,它就是一个纯电感元件。当线圈通入交变电流时,线圈会产生自感电动势,自感电动势的大小和方向与电流的变化率有关,选取图 1-2-5 中表示的线圈端电压 u_L 、电流 i_L 、自感电动势 e_L 的参考方向,则它们之间的关系为:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1-2-6)$$

L 是线圈的电感,若 L 值是不随 u 或 $\frac{di}{dt}$ 而变化的恒值,则称为线性电感。单位是亨,用 H 表示。式(1-2-6)的正确性可以任取某一时刻的电流变化状态加以验证。设电

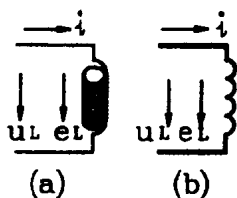


图 1-2-5

流为正,且在增大, $\frac{di}{dt}$ 为正值,而根据自感电动势阻碍电流变化的规律,可判断自感电动势 e_L 的实际方向是与 i 的方向相反,也即与图中 e_L 的参考方向相反,因而加一负号,反之,若 i 为正值,且在减少, $\frac{di}{dt}$ 为负值, e_L 的实际方向与参考方向相同, e_L 应为正值。

电感线圈的端电压与自感电动势间的关系有:

$$u_L = -e_L$$

所以 $u_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-2-7)$

这是电感元件的端电压与其电流之间的关系(VAR)式。它表明电感元件的端电压取决于该时刻电流的变化率。对于直流电流 I ,是恒定不变,因而不产生自感电动势,也不产生电压降($u_L = 0$)。

对于交变电流,若变化很快, $\frac{di}{dt}$ 很大, u_L 也就越大。在电路中,元

件的端电压只能是有限值,不能是无穷大,因此 $\frac{di}{dt}$ 也只能是有限值。这说明电感元件中电流不能突变。在以后分析电感电路时,常用到这一结论。

由(1-2-7)式可得电感的电流与端电压的关系另一表示形式:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L dt + i(t_0) \quad (1-2-8)$$

电感元件是一个储能元件,其瞬时功率为

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

$t_0 \sim t$ 期间储存的能量为

$$W_L = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u_L i dt$$

将 $u_L = L \frac{di}{dt}$ 代入上式得

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{i(t_0)}^{i(t)} L i di \\ &= \frac{1}{2} L [i^2(t) - i^2(t_0)] \end{aligned} \quad (1-2-9)$$

如果电感元件的初始电流 $i(t_0) = 0$, 则

$$W_L = \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (1-2-10)$$

若 t 时刻电流强度为 $i(t) = I$, 则 $W_L = \frac{1}{2} L I^2$, 式中电流强度为安培(A), 电感单位为亨(H), 磁场能 W_L 的单位为焦耳(J)。

例 1-2-1 电感线圈的电感 $L = 2H$, 忽略其电阻, 通以交变电流 $i(t)$ 的波形如图 1-2-6 所示, 求(1)电感的端电压波形图。(2) $t = 1$ 秒, $t = 2.5$ 秒时, 电感贮存的能量。

解: 选取 u_L 、 i 、 e_L 的参考方向与图 1-2-5 中相同。

(1) 根据式(1-2-7) $u_L = L \frac{di}{dt}$ 可求得结果。

在 $0 \sim 1$ 秒间 $i(t) = 10t$