

周庭阳 江维澄 编著

电路原理

(上册)

(第二版)

浙江大学出版社

电 路 原 理

(第二版)

上 册

周庭阳 江维澄 编著

ND35/27

浙江大学出版社

内 容 提 要

全书分上、下册,共十一章:电路概述,电路分析的基本方法,电路的等效变换和定理,正弦电路的稳态分析,双口网络,信号分析和电路的频率特性,电路的过渡过程,网络的矩阵分析,均匀分布参数电路,非线性电路,电路的数值计算。

本书着重于基本概念,基本原理和基本方法的阐述。为帮助读者掌握基本方法,书中引有比较丰富的例题,各章的后面均附有多层次的习题供教学选用。

本书按高等学校工科电类各专业对《电路》的基本要求编写,也可作非电类专业高年级大学生、研究生及教师作参考书。

电 路 原 理

(第二版)

上 册

周庭阳 江维澄 编著

责任编辑 陈子饶

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

((E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

杭州富阳何云印刷有限公司印刷

浙江省新华书店发行

* * *

850mm×1168mm 32 开 12.25 印张 324 千字

1988 年 7 月第 1 版 1994 年 8 月第 2 版 1999 年 8 月第 3 次印刷

印数 10001—12000

ISBN 7-308-00124-5/TN·009 定价:12.50 元

再 版 前 言

本书第一版发行至今已六年多,满足了浙大以及部分兄弟院校电路课教学的需要,受到使用者欢迎,并被评为 1992 年度国家教委优秀教材二等奖。

本书编写时希望有较高的起点,较严密的系统,能符合认识规律、便于教学,能保持一定的深度和广度,处理好传统和新内容的关系等等。实践证明本书基本上达到上述目标,为了更好地满足教学需要,感到有必要修订再版。修订版主要变动有:

(1)加强了线性方程奇异情况的叙述;(2)配合后续课之需,较早提出负载线概念;(3)补充恒流源产生的实例;(4)加强对偶性的概念;(5)作为例子引进一般阻抗变换器和频变负阻的实例;(6)改用级联公式推导回转器的实践电路;(7)对称三相电路中高次谐波一节提前叙述;(8)补充了时域法求冲激响应的实例;(9)加强了网络函数零点的概念;(10)删去了用零极点图图解求系数的实例;(11)严密了关联矩阵秩的叙述;(12)增补了修正节点法一节;(13)增补了 2b 法一节;(14)加强了非线性电路稳定性分析;(15)严密了分布参数波过程的推导方法;(16)数值分析一章打上“*”号、学时不够整章可以不教。

修订本第一、二、三、五、七、八、十一章由周庭阳执笔;第四、六、九、十章由江维澄执笔。感谢本书第一版审稿人简伯敦教授给修订本写了序言。感谢长期使用此书的师生对本书提出了宝贵意见和建议。

水平所限、缺点错误难免,欢迎批评、指正。

编者

1994 年 4 月

再版序

电路理论是本科生接触到的第一门内容繁多、理论深广、头绪较多难以掌握的课程,因而学好这门课,殊非轻而易举的事。作者在他们数十年教学活动中,为改变上述情况,除了改进教学方法外,在编写教材的本身也做了大量的尝试。本书第一版能获得1992年国家教委优秀教材二等奖,绝非偶然的。

本书的特点是多方面的。总的说来,可以用下列几句话概括;即理论体系清楚,薄陈厚新,分散难点,概念与分析技巧并重。当然文字流畅,重点突出等等,也是起了很大作用的。

作者在静态电路中,介绍了电路的基本定律,使学生注意力得以集中。这些定律不但是电路理论的基础,也是由磁场和相近学科可以适用的,大大提高了学生的分析能力,也开阔了他们的视野。频域分析用了较多的篇幅,介绍了时域与频域的关系。在非周期信号方面,花了较多篇幅,而将传统的非正弦周期性部分作了相对压缩,以适应电子、电讯、图像等新科技领域的需要。这种薄陈厚新的思想,书中随处可见。又如状态变量、图论、激励与响应等等,在现代科技中占有重要位置。它们都安排得很适应,深度与广度,也控制得很好。本书内容的取舍和安排,都显示出作者的丰富教学经验和对新兴学科发展的趋势了解,具有卓见,因而颇受学生和读者的欢迎。

我为此书被评为国家教委优秀教材,能产生好的教学效果以及社会效益,而为作者感到高兴,并祝愿他们能够做出更大的贡献。

简柏敦

1994年4月于杭州

前 言

本书为电类专业本科生教材,也可以作为非电类专业高年级大学生、研究生及电工教师的教学参考书。本书的初稿完成于1979年,自1978届开始,即1980年以来浙江大学的大多数电类专业均采用此教材,一些兄弟院校也选用过。使用至今已修改过三次,目前出版的为第四稿。

《电路原理》的内容适应国家教委电工教学指导委员会电路及信号分析课程指导小组制订的基本要求;符合原电路教学大纲的需要。

为了便于教学,力求将难点分散。在体系上按先静态,后稳态、再动态的安排,对于网络定理能在直流静态情况下讲述的,尽可能放在直流电路章节中。例如对特勒根定理、互易定理等等都放在前面章节。先讲授特勒根定理还便于证明无功功率的平衡。对非线性电路、数值分析等较复杂的内容集中放在后面章节叙述,以免初学者时时面对许多难点,不利于基本概念의掌握。低学时专业使用本书时可以将这些章节去掉。

图论的概念较早提出,使理论系统更加严密。但是考虑到课程间的配合,矩阵方程还是另列一章放在较后面叙述,作为网络方程的再论也有利于基本概念的巩固。

目前国内多数教材中将一阶、二阶电路的动态分析放在正弦稳态之前进行,这样在分析正弦稳态时具有全响应的概念。本教材将动态过程的时域分析,频域分析和状态变量分析合并于一章,且放在正弦稳态之后讲授,便于教学,符合由浅入深的原则,也节省学时。而在第一章对全响应的概念作一简要的交待,避免了对正弦稳态电路理解的片面性。

本教材对某些用较少篇幅即能更深入分析的问题作了适当的延伸和扩充。便如星网变换, n 端口网络、灵敏度分析等等。这些内容不一定讲授,可作学生参考。

其次,书中有较丰富的例题、习题,其中一些是基本例题,还有一些属于深入性的综合题,有利于提高学生分析问题、解决问题和抽象思维的能力。

本书第一、二、三、五、七、八、十一章由周庭阳执笔;第四、六、九、十章由江维澄执笔。姚仲兴、阮元珍、陈永祥、祝其本教师负责过部分初稿的执笔,其中:姚仲兴负责第二章;阮元珍负责第六章;陈永祥负责第七章;祝其本负责第十章。陈效国教师对本书的体系、文字等提出许多宝贵的意见;吕品老师承担过部分上机例题计算。浙江大学电工基础教研室全体老师多年使用此教材,并提出过许多宝贵意见,在此一并致谢。

《电路原理》承蒙简柏敦教授精心审阅,并提出许多宝贵意见,对此表示深切的谢意。

由于水平有限,缺点和错误在所难免,望读者批评指正。

编 者

1987年12月

目 录

第一章 电路概述	(1)
§ 1-1 电路和电路元件	(1)
§ 1-1 电阻元件、电容元件、电感元件	(2)
§ 1-3 独立电源	(7)
§ 1-4 受控源	(9)
§ 1-5 电流、电压的参考方向	(11)
§ 1-6 基尔霍夫定律	(14)
习题一	(19)
 第二章 电路分析的基本方法	(23)
§ 2-1 网络图论的概念	(23)
§ 2-2 支路电流法	(30)
§ 2-3 回路电流法	(35)
§ 2-4 节点电压法	(41)
§ 2-5 割集电压法	(47)
§ 2-6 含受控源电路的分析	(51)
习题二	(55)
 第三章 电路定理和等效变换	(61)
§ 3-1 叠加定理	(61)
§ 3-2 戴维南定理	(66)
§ 3-3 诺顿定理	(74)
§ 3-4 替代定理	(76)
* § 3-5 补偿定理	(78)
§ 3-6 星网变换	(80)

§ 3-7 特勒根定理	(87)
§ 3-8 互易定理	(90)
* § 3-9 灵敏度计算	(92)
§ 3-10 含受控源电路的分析	(100)
习题三	(111)

第四章 正弦交流电路的相量分析..... (121)

§ 4-1 正弦交流电量的基本概念	(121)
§ 4-2 周期信号的有效值	(125)
§ 4-3 正弦量的相量表示	(127)
§ 4-4 正弦交流电路中的电阻元件	(130)
§ 4-5 正弦交流电路中的电感元件	(132)
§ 4-6 正弦交流电路中的电容元件	(138)
§ 4-7 基尔霍夫定律的相量表示	(143)
§ 4-8 无源一端口网络的阻抗、导纳和等效电路	(148)
§ 4-9 正弦电路的功率	(158)
§ 4-10 电路的谐振现象	(168)
§ 4-11 复杂正弦交流电路的计算	(175)
§ 4-12 电路的对偶性质	(184)
§ 4-13 电路参数改变时的电路分析	(189)
§ 4-14 互感耦合的电路	(194)
§ 4-15 理想变压器和实际变压器的等效电路	(209)
§ 4-16 对称三相电路	(215)
§ 4-17 不对称三相电路的计算	(226)
§ 4-18 三相电路的功率及其测量	(229)
习题四	(235)

第五章 双口网络..... (257)

§ 5-1 双口网络	(257)
------------------	-------

§ 5-2	短路参数	(258)
§ 5-3	开路参数	(262)
§ 5-4	传输参数	(265)
§ 5-5	混合参数	(270)
§ 5-6	无源双口网络的等效电路	(272)
§ 5-7	对称双口网络的特征阻抗和传播系数	(274)
§ 5-8	双口网络的级联	(279)
§ 5-9	双口网络的并联、串联、混联	(285)
§ 5-10	含受控源的双口网络	(291)
习题五		(304)
第六章 信号分析和电路的频率特性		(309)
§ 6-1	周期信号和傅里叶级数及其频谱	(309)
§ 6-2	周期性非正弦信号激励下线性电路的稳态分析	(321)
§ 6-3	对称三相电路中的高次谐波	(329)
§ 6-4	非周期信号的傅里叶变换与连续频谱	(334)
§ 6-5	单位阶跃函数和单位冲激函数及其频谱	(342)
§ 6-6	电路的频率特性	(346)
§ 6-7	滤波器	(355)
§ 6-8	有源滤波电路	(361)
习题六		(364)

第一章 电路的概述

提 要

本章介绍电阻、电容、电感、独立电压源,受控源等各种元件;阐明电流,电压的参考方向,电路的基本定律——基尔霍夫定律以及电路分析的任务。

§ 1-1 电路和电路元件

凡是用电工部件(或元件)以任意方式联接成的总体都称为电路,通常电路提供电流的通路。实际电路可以是延伸数千公里的电力网;可以是一平方毫米内部就包含很多部件的集成电路;也可以是人体生物电流的通路,电路的例子不仅各个工业部门举不胜举,就是在日常生活中也屡见不鲜。

本书的研究对象是电路的基本理论,所有实际电路部件都要抽象为各种理想化的模型,并称这种模型为电路元件。通常电路元件只体现实际电路部件的某一方面的电磁特性。具有二个端点的电路元件称为二端元件,如电阻、电感、电容、独立电压源、独立电流源等等。具有二个以上端点的电路元件称为多端元件,如受控源、理想变压器等等。随着电路理论的发展,电路元件的种类也更加多样化了,某些场合,不是将电路分解为最简单的元件,而是引进象回转器、零值器、泛值器、频变负阻器等等之类的特性较为复杂的二端或多端元件作为电路元件之一来处理。但由于本书的目标是讲授最基本的电路理论,所以今后一般将不牵涉到这些变异元件。本章下面几节将分别介绍最主要的几种电路元件以及它们的符号图。

对于如何从实际电路部件抽象为电路元件,即建模问题这里不

可能给予过多地重视,否则将超出本书的范围。本书只是在个别例题或习题中,为了联实际而分析一些实际电路。

此外,电路这个术语和电网络这些术语很难严格区分,它们可以是同一实体的不同称呼,今后对这些术语的使用将不作限制。

§ 1-2 电阻元件、电容元件、电感元件

电阻元件是体现电能转化为其它形式能量的二端元件,简称为电阻,用字母 R 表示。图 1-1 所示的长方块即代表电阻元件的符号

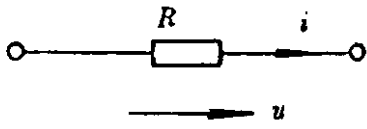


图 1-1

图。电阻的单位是欧姆,可用字母“ Ω ”表示,也可用千欧 ($1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$)、兆欧 ($1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$) 等表示。电阻的倒数称为电导,用字母 G 表示。电导的单位是西门子,可用字母“ S ”表示。电导的符号

图和电阻是一样的,只需将字母 R 改为 G 。一个 10Ω 的电阻也可以说它是 $0.1S$ 的电导。

如前所述,这里的电阻是电路元件,并不是指市场上所能买到的炭膜电阻之类的实际电阻器。实际电阻器在一定条件下可以看作为理想的电阻元件。一个实际电工部件,其中只要有电能转化为别种能的过程就可以抽象出一个电阻元件(或其组合)。电阻元件的端电压 u 和通过它的电流 i 满足欧姆定律。当电压和电流的方向*选为一致(图 1-1)时,则有关系式

或
$$\left. \begin{aligned} u &= iR \\ i &= uG \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

由此也可以认为,凡是端电压和端电流有着确定关系的元件便是电阻元件。式(1-1)中电压和电流成正比,称为线性电阻。

如果二端元件的端电压和端电流成一定的函数关系。例如: $u =$

* 关于参考方向问题请参阅 § 1-5。

$10i + 0.1i^3$ 则此元件也是电阻,称为非线性电阻。对于非线性电阻,除了用电压与电流的关系式表示外,也可以用关系曲线表示,通称它们为伏安特性。画电流和电压的关系曲线图时,可用电压为纵坐标,电流为横坐标,或反之。图1-2中,曲线3、2分别代表炭棒和二极管的伏安特性。线性电阻的伏安特性是通过原点的一条直线,如图1-2中的斜线1。图1-3所示为非线性电阻的符号图。

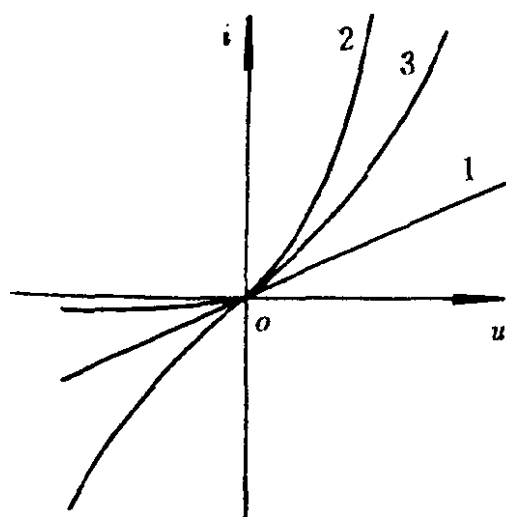


图 1-2

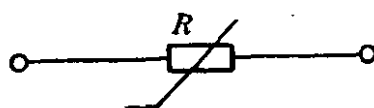


图 1-3

非线性电阻的阻值随所通过的端电流大小而变,只能用伏安特性才能充分表征,而不能用一个确定的电阻值来表示。实际上,绝对的线性电阻是不存在的,但在大多数场合下,电压、电流往往只在一定范围内变动,仍可以作为线性处理。

根据焦尔 - 楞次定理,电阻元件上消耗的功率

$$p = ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-2)$$

此外,电阻元件还有时变和非时变之分,时变电阻的阻值或其伏安特性是按一定的时间规律变化的。非时变电阻的伏安特性不随时间变化,也称它为定常电阻。时变和非线性二者概念是不一样的,不能混淆起来。时变电阻还可以分为线性时变电阻和非线性时变电阻,前者阻值本身按确定的时间规律变化,后者伏安特性按确定的时间规律变化。

最后尚需指出：电阻元件不限于两个端点，象晶体管等元件的模型可以是具有多个端点，即所谓多端电阻。多端电阻的端电流和端点间电压应有确定的代数关系式。

电容元件是体现电场能量的二端元件，简称为电容，用字母“C”表示，符号图如图 1-4 所示，其单位是法拉 (F)、微法 (μF) 或微微法 (pF)。任一电工部件只要具有必需考虑电场储能的过程，就可以抽象出一个电容元件(或其组合)。

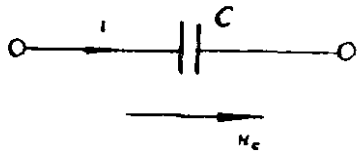


图 1-4

根据普通物理学知识，电容 C 上储存的电荷

$$q = Cu \tag{1-3}$$

式中： q 的单位为库伦； C 和 u 的单位分别为法拉和伏特。由此可以认为，凡是端电压和电荷有着确定关系的元件便是电容元件。若式 (1-3) 中电容 C 是常数，则为线性电容；若 C 的大小与 u 或 q 有关，即 u 和 q 成函数关系，则为非线性电容。非线性电容用库 - 伏特性来表征。若电容 C 或库伏特性随时间变化，则称为时变电容。

电容中的电流等于电荷的变化率。当电压和电流选取同一方向 (图 1-4) 时，则

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu_c)}{dt} \tag{1-4}$$

对于线性，非时变电容，式 (1-4) 又可写为：

$$i = \frac{d(Cu_c)}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \tag{1-5}$$

在恒定直流的情况下，电压 u 的变化率为零，所以电流 i 为零，也即平常所谓直流电不能通过电容。

由式 (1-4) 可得 $\int_{q_0}^q dq = \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$ ，即

$$q(t) = q_0(t_0) + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \tag{1-6}$$

对于线性非时变电容，将式 (1-6) 除以 C 后得

$$\begin{aligned} u_c(t) &= \frac{q_0(t_0)}{C} + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \\ &= u_0(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-7)$$

若选 $t_0 = 0$, 则有

$$u_c(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1-8)$$

式(1-8)表明电容电压除与充电电流有关外,与初始电压也有关,即具有记忆性,称其为记忆元件。相反,上述电阻元件只反映即时电压、电流关系,称之为非记忆元件。

当电容上电压为 u_c 时,在电容中储存电荷 dq , 储能为 $u_c dq$, 所以充电过程中电容吸收的能量为:

$$W_c = \int_{q_0}^q u_c dq = C \int_{u_{c0}}^{u_c} u_c du_c = \frac{C}{2} (u_c^2 - u_{c0}^2) \quad (1-9)$$

当初始电压为零时,吸收的能量全部储于电容,所以电容的储能为:

$$W_c = \frac{1}{2} q u_c = \frac{1}{2} C u_c^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \quad (1-10)$$

电感元件是体现磁场能量的二端元件,简称电感,用字母“ L ”表示。图 1-5 所示为电感的符号图。电感的单位的是亨利(H),毫亨(mH)或微亨(μ H)。任一电工部件只要有必需考虑的磁场储能过程就可以抽象出一个电感元件(或其组合)。

根据普通物理学知识可知,与电感 L 交链的磁通链

$$\psi = Li \quad (1-11)$$

式中 ψ 单位为韦伯(Wb)。所以,凡是端电流和磁通链有着确定关系的元件便称作电感元件。对于非线性电感,可用韦安特性表示,线性电感的韦安特性是通过原点的直线。

电感上的感应电压(这里将感应电势看成是感应电压)等于磁通链的变化率。当电压和电流选取同一方向(图 1-5)时,有如下关系:

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

对于线性、非时变电感,式(1-12)又可写为

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-13)$$

在恒定直流的情况下,电流的变化率为零,则感应电压为零,即对于恒定直流来说,一个非时变电感相当于一理想($R = 0$)的导线。

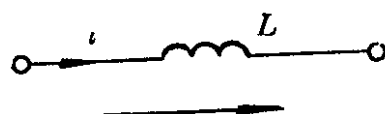


图 1-5

仿照式(1-6)-(1-8)可推得

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L(\tau) d\tau \quad (1-14)$$

当 $t_0 = 0$ 时,有

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(t) d\tau \quad (1-15)$$

同理,可推得电感中储存的磁场能量为

$$w_m = \frac{i\psi}{2} = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \frac{\psi^2}{L} \quad (1-16)$$

多个线圈绕在一起时存在互感电势,关于互感的问题将在第四章讨论。

电阻 R 、电容 C 、电感 L 是电路中三个最基本的元件,它们内部均不包含电源,所以习惯上就称它们为无源元件。

如果电路中 R 、 L 、 C 元件全部为线性的,则称该电路为线性电路;包含有非线性的 R 、 L 、 C 元件的电路就称为非线性电路。本书前面九章都是叙述线性电路,因为多数工程问题可以近似地作为线性处理,而且非线性电路的分析方法在一定程度上也是建立在线性电路分析方法的基础上的。

同理,不包含时变元件的电路称为非时变电路,包含有时变元件的电路称为时变电路。此外,凡能用有限个数的 R 、 L 、 C 元件来表征其电磁性能的电路称为集中参数电路,而这有限个 R 、 L 、 C 元件可称为集中参数元件或简称为集中参数。与此相反,某些情况下,实际的电工部件的电磁特性是不可能用有限个数的 R 、 L 、 C 元件来体现,而

只能用无限个数的、值为无限小的 R 、 L 、 C 元件所表示,这些元件是均匀分布在电路中,而不是集中于电路的某些点,它们的参数是分布的,称为分布参数。有关分布参数将在第九章叙述。

最后必须指出, R 、 L 、 C 、还可能出现负值。负值电阻将消耗负的能量,即发出能量;负值的电感和电容将储存负的能量,在储存的时候发出能量,所以负值元件应属于有源元件。

§ 1-3 独立电源

实际有源元件可以是上百万千瓦的发电机,可以是各种电池、各种电子电源,也可以是极其微弱的电信号。不管是真正提供能源的电源,或只是一个电信号,都可以称为电源。在电路分析中,实际电源均被抽象为理想电源,即电压源和电流源。通常,也可以称源为激励,相应地称所研究的电压、电流为响应。本书对有关这方面的名称是兼用的。

一个端电压恒定或具有确定时间函数的电源称为电压源,也可称为电势源,定势源,定压源等等,本书将称为电压源。图 1-6(a)、(b)、(c),所示为各种教材中常用的电压源符号图,以图(a)所示的符号为最常用,英美教材中基本上采用此符号。高教出版社出版书籍中采用图(b)所示的符号。图(c)符号是沿用早年电池组的符号。图中, u_s 为电压源正负极间的电压,也可以用字母 e 代替 u_s ,表示负、正极间有 e 伏的电位升。

电压源是一个理想的电源,如图 1-6(a) 所示,正极 a 点的电位始终比负极 b 点高 u_s 。不管电流大小、方向如何,也不管外电路的情况作什么变动(除却短路), ab

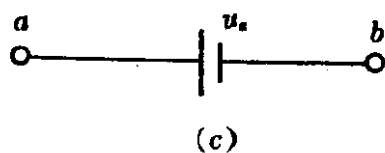
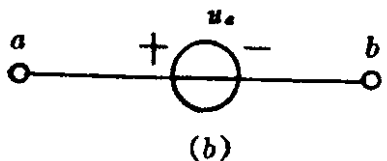
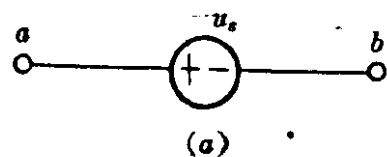


图 1-6