

周庭阳 江维澄 编著

电路原理

(下册)

(第二版)

浙江大学出版社

电 路 原 理

(第二版)

下 册

周庭阳 江维澄 编著

浙江大学出版社

内 容 提 要

全书分上、下册,共分十一章: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)

下 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

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 10.25印张 276千字

1988年7月第1版 1994年11月第2版 1999年8月第3次印刷

印数 10001—12000

ISBN 7-308-00125-3/TN·010 定价:10.50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载的实例;(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,对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,也是对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。例如星网变换, 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:姚促兴负责第二章;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教师多年使用此教材,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

第七章 电路中的过渡过程	1
§ 7-1 概述	1
§ 7-2 换路定则与初始条件	2
§ 7-3 RC 电路中的过渡过程	8
§ 7-4 RL 电路中的过渡过程	22
§ 7-5 RLC 电路的过渡过程	29
§ 7-6 拉普拉斯变换	45
§ 7-7 拉普拉斯变换的基本性质	48
§ 7-8 推求拉普拉斯反变换的展开定理	54
§ 7-9 运算电路	61
§ 7-10 网络函数	72
§ 7-11 网络函数的极点和零点	77
§ 7-12 叠加积分	84
§ 7-13 状态方程	88
习题七	94
 第八章 网络的矩阵方程	110
§ 8-1 概述	110
§ 8-2 关联矩阵	110
§ 8-3 回路矩阵	113
§ 8-4 割集矩阵	115
§ 8-5 回路矩阵和割集、关联矩阵的关系	117
§ 8-6 矩阵形式的基尔霍夫定律	122
§ 8-7 节点电压方程	129

§ 8-8 割集电压方程	143
§ 8-9 回路电流方程	146
§ 8-10 修正节点法	149
§ 8-11 支路法(2 <i>b</i> 法)	153
习题八	155
第九章 分布参数电路	159
§ 9-1 分布参数电路概述	159
§ 9-2 分布参数电路的正弦稳态解	161
§ 9-3 均匀传输线中的行波	167
§ 9-4 无反射的均匀传输线	171
§ 9-5 无畸变的传输线	174
§ 9-6 无损耗的均匀传输线	176
§ 9-7 均匀传输线与双口网络的等效替换	184
§ 9-8 传输线中的过渡过程	186
习题九	200
第十章 非线性电路	205
§ 10-1 概述	205
§ 10-2 直流非线性电阻电路	209
§ 10-3 交流非线性稳态电路	213
§ 10-4 小信号分析法	218
§ 10-5 非线性特性的分段线性近似表示法	222
§ 10-6 非线性电路中的自激振荡过程	230
§ 10-7 非线性电路平衡状态的稳定性	232
§ 10-8 状态变量法	235
§ 10-9 相平面法	242
习题十	250

第十一章 电路的数值分析	258
§ 11-1 概述.....	258
§ 11-2 节点法解电阻网络的程序.....	259
§ 11-3 正弦稳态计算的程序.....	265
§ 11-4 牛顿法解非线性电路.....	269
§ 11-5 非线性电阻的线性化模型.....	271
§ 11-6 电阻模型法解过渡过程.....	276
§ 11-7 系统法建立状态方程.....	281
§ 11-8 状态方程的数值解.....	290
习题十一.....	291
附 录	293
1. 矩阵乘法子程序框图.....	293
2. 复数矩阵乘法子程序框图.....	293
3. 高斯主元消去法的子程序框图.....	294
4. 复数线性代数方程的解法.....	298
5. 高斯约当法求逆矩阵的程序框图.....	298
6. 复数矩阵求逆.....	301
7. 欧拉法解状态方程的程序框图.....	302
8. 龙格库塔法的程序框图.....	304
习题答案	307

第七章 电路中的过渡过程

提 要

本章讨论线性电路从一种稳定状态转变到另一种稳定状态所发生的物理过程。采用的分析方法主要是经典法、拉普斯变换法以及叠加积分,并简要地叙述状态变量分析法。

§ 7-1 概 述

第二、三章曾讨论了电阻性电路。根据基本定律对这种电路列出的方程是代数方程,任一时刻的响应完全由同一时刻的激励所决定,以前的激励并不影响当前的响应,响应是即时跟随的,是无记忆的。第四章讨论了正弦交流稳态电路,电路中含有动态元件(亦称为储能元件) L 与 C ,根据基本定律写出的方程是微分方程。当时由于只求解电路的强制状态,就是微分方程的特解,这种状态反映电路处于某种状态结构已经有相当时间,引入激励也历时已久,因此过渡状态已消失,响应随时间的变化规律与激励相同。§ 1-6 曾指出,当激励为恒定或随时间作周期性改变时则特解所表达的强制状态称为稳定状态,简称稳态。以前各章所讨论的电路问题均为稳态。

本章讨论电路中的过渡过程。从数学角度而言,它是求微分方程的全解;从物理意义来说,即是论述响应随时间变化的全过程。按照分析方法的不同,内容可分为四部分:

经典法(电路时域分析):直接求解微分方程,着重讨论简单电路(R - C , R - L 及 R - L - C 电路),说明经典法解题的一般步骤及动态电路所能得到的响应形式,借以理解和掌握一阶及二阶电路接通和断开时的物理现象。

运算法(电路的复频域分析):应用拉普拉斯变换求解线性非时变电路的微分方程,并介绍网络函数、零极点分析的概念等。正如 § 1-6 所述,第二、三章讨论过的网络定理及分析方法完全可以引伸到电路过渡过程的分析。

叠加积分:应用卷积积分和杜阿美尔积分,在时域中直接求零状态响应。

状态变量分析:简要地讨论状态的概念以及状态方程的编写和频域解。在本书最后一章将论及状态方程的系统编写法和数值解(计算机辅助解)法。

§ 7-2 换路定则与初始条件

电路的接通或断开、各种类型的改接、激励的骤然变化等,统称为换路。电路进行换路所延续的时间常常忽略不计,认为换路是突然完成的。然而,实际上电路工作状态的改变,一般需要经历一段时间。例如,图 7-1 所示,已充电的电容 C 通过电阻 R 放电的电路,最终状态应该是电荷放尽,电压 u_c 为零,但过渡到这一状态却需要一段时间。又如图 7-2 所示,将一个电感线圈与恒定电压源 U_s 接通的电路,最终状态应该是线圈中通过电流 $I = U_s/R$,但电流从零到 U_s/R 也是不可能即时完成的。这是因为对应于电路的每一种状态,电场和磁场能量的储存是一定的,向新状态的过渡要涉及场能的增加或减少。在电路模型中,电场能量 W_e 储存于电容 C 中, $W_e = 1/2(Cu_c^2) = q^2/(2C)$; 磁场能量 W_m 储存于电感 L 中, $W_m = 1/2Li_L^2 = \psi^2/(2L)$ 。场能只可能渐变(连续变动),而不可能跃变。如果场能跃变,将导致功率 $p = dw/dt$ 为无限大,无限大的功率必又导致电压 u 或电流 i 为无限大,一般说来,这将违背基尔霍夫定律。或者直接从电压、电流说明,对于线性、非时变电感 L , u_L 与 i_L 的参考方向一致时,有

$$u_L = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (7-1)$$

若某瞬间 i_L (或 ψ) 可以突变, 则该瞬间 u_L 必为无限大, 一般情况下也将违背基尔霍夫电压定律。例如图 7-2 所示的电路, 若 u_L 某瞬时为无限, 而 u_R 和 u_s 均为有限量, 将使 $\Sigma u = 0$ 遭到破坏。

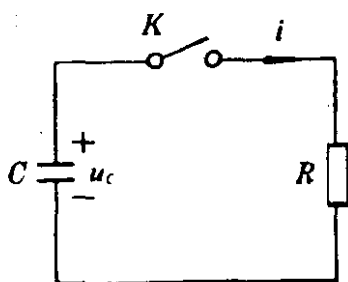


图 7-1

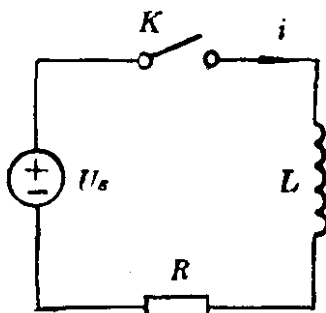


图 7-2

同理, 对于电容 C , 当 u_C 与 i_C 的参考方向一致时, 有

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (7-2)$$

若 u_C (或 q) 某瞬间可以突变, 则该瞬间电流 i_C 必为无限大, 同样会使基尔霍夫电流定律遭到破坏。

综上所述, 能量不能突变体现在电路变量中是电感中的电流不能突变和电容上的电压不能突变。这就是所谓换路定则。如果把发生换路的时刻选为 $t = 0$, 并以 $t = 0^-$ 表示换路前的瞬间, $t = 0^+$ 表示换路后的瞬间。也即“ 0^- ”是 t 由负值趋近于零的极限, “ 0^+ ”表示 t 由正值趋于零的极限。则换路定则可表示为:

$$i_L(0^-) = i_L(0^+) \quad (7-3)$$

$$u_C(0^-) = u_C(0^+) \quad (7-4)$$

换路定则也可以表示为电感中的磁链和电容上的电荷不能突变, 即

$$\psi(0^-) = \psi(0^+) \quad (7-5)$$

$$q(0^-) = q(0^+) \quad (7-6)$$

式(7-5)、(7-6)更具有一般性, 但 ψ 和 q 往往不作为电路的主要变量, 所以一般情况下仍以式(7-3)、(7-4)作为换路定则的数学表示。

换路定则是分析过渡过程的重要依据。可以认为, 换路定则是引起过渡过程的内因(如果换路本身作为引起过渡过程的外因)。正因

为这些储能元件上的电压、电流(或能量)在换路瞬间不能突变,才导致过渡过程。如果对纯电阻进行换路,将不会出现过渡过程。

按换路前的电路状况,根据换路定则即可确定换路后电容电压和电感电流的初始值。连同基尔霍夫定律还可以推出换路瞬间任一支路的电流和电压。具体计算时可作图 7-3 所示的等效电路。因为在该瞬间所有电感电流和电容电压是确定的,可以用直流电流源或电压源替换。对于时变的激励源可用即时时间代入,也有确定值。因而可得全部由电阻和直流源组成的瞬间等效电路,根据二、三章的电路定理,必能算出任一支路的电流或任二点间电压的初始值。

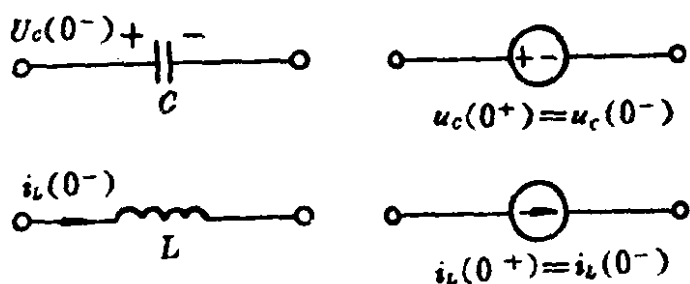


图 7-3

$i_L(0)$ 和 $u_C(0)$ 称为独立初始条件,其余电压、电流的初始值可以根据独立初始条件推出。显然,其余电压、电流是可以突变的,它们只受基尔霍夫定律的约束,而没有不能突变的约束。此外,通过电路方程还可以推出变量各阶导数的初始值,它们是求解高阶微分方程时所必需的。

例 7-1 图 7-4 所示的电感是一台发电机的励磁线图,已知 $L = 0.4\text{H}$, $R = 0.2\Omega$, 直流电压 $U_s = 40\text{V}$, 伏特表的量程为 50V , 内阻 $R_v = 5\text{k}\Omega$ 。电路闭合已久,试求开关 K 断开瞬间伏特表的电压?

【解】
$$i_L(0^+) = i_L(0^-) = \frac{U_s}{R} = \frac{40}{0.2} = 200 \text{ (A)}$$

开关断开瞬间伏特表电压

$$\begin{aligned} u(0^+) &= i_r(0^+)R_v = -i_L(0^-)R_v \\ &= -10^6 \text{ (V)} \end{aligned}$$

这样高的电压将导致设备的击穿、毁坏,所以工程上切断电感线圈时必须小心对待,通常需要以电阻、二极管等构成放电回路,降低放电电压。

例 7-2 图 7-5(a) 所示电路,开关 K 闭合已久。在 $t = 0$ 瞬间断开开关 K 。试求 $u_C(0^+)$ 、 $i_L(0^+)$ 、 $u_L(0^+)$ 、 $i_C(0^+)$?

【解】 换路前电路已稳,直流源作用

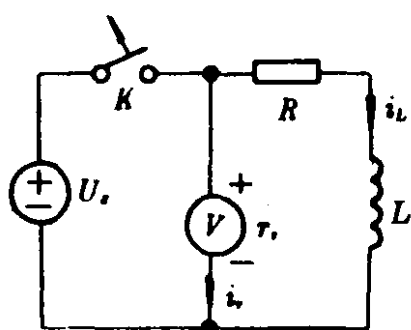
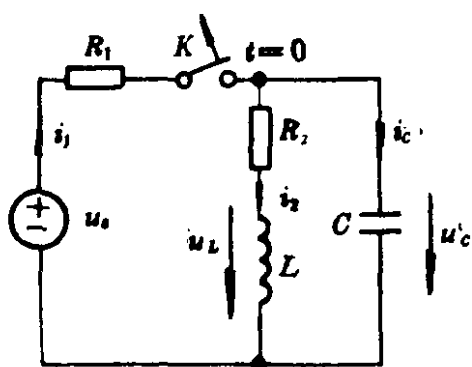
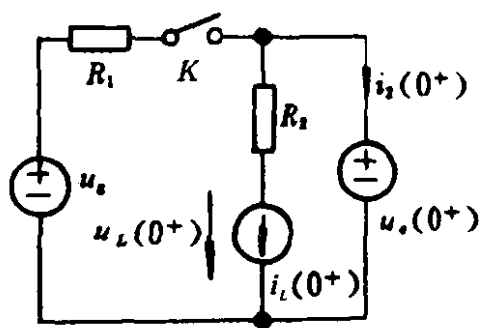


图 7-4



(a)



(b)

图 7-5

下电感相当于导线,电容相当于开断。故得

$$u_C(0^-) = U_s \frac{R_2}{R_1 + R_2}, i_L(0^-) = \frac{U_s}{R_1 + R_2}$$

$t = 0^+$ 瞬间可作图 7-5(b) 所示等效电路,得

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) = \frac{U_s}{R_1 + R_2}$$

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) = \frac{U_s}{R_1 + R_2} R_2$$

$$i_C(0^+) = -i_L(0^+) = \frac{-U_s}{R_1 + R_2}$$

$$u_L(0^+) = u_C(0^+) - R_2 i_L(0^+)$$

$$= \frac{U_s}{R_1 + R_2} R_2 - \frac{U_s}{R_1 + R_2} R_2 = 0$$

例 7-3 图 7-6(a) 所示电路中,已知 $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 5\Omega$, $L =$

$1\text{H}, C = 1\mu\text{F}, U_s = 6\text{V}$ 。开关 K 在 $t = 0$ 瞬间合上, 开关闭合前电路未充过电。试求: $i_1(0^+), i_2(0^+), \frac{di_1}{dt}(0^+), \frac{di_2}{dt}(0^+)$ 和 $\frac{d^2i_2}{dt^2}(0^+)$ 。

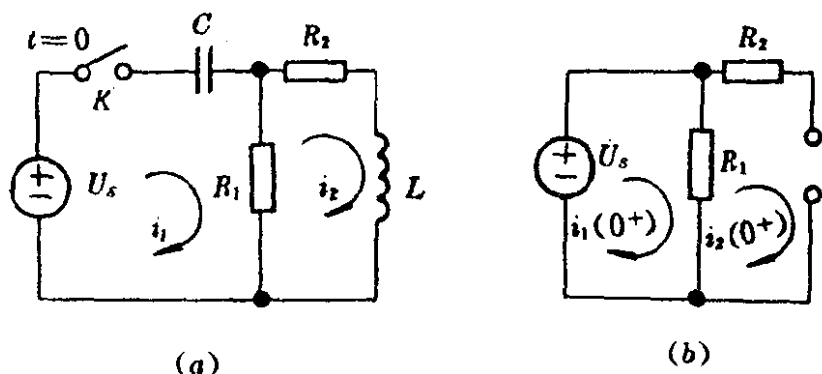


图 7-6

【解】 作等效电路如图 7-6(b) 所示, 得

$$i_1(0^+) = U_s/R_1 = 0.6 \text{ (A)}, i_2(0^+) = 0$$

对图 7-6(a) 的回路 2 列方程, 得

$$R_1(i_2 - i_1) + R_2i_2 + L \frac{di_2}{dt} = 0$$

即
$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L}[R_1i_1 - (R_1 + R_2)i_2] = 10i_1 - 15i_2$$

得
$$\frac{di_2}{dt}(0^+) = 10 \times 0.6 - 15 \times 0 = 6 \text{ (A/s)}$$

对图 7-6(a) 的回路 1 列方程, 得

$$u_C + R_1(i_1 - i_2) = U_s$$

方程两边对时间 t 求一次导数, 并经整理后得

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} - \frac{i_1}{R_1C} = \frac{di_2}{dt} - 10^5i_1$$

故得
$$\frac{di_1}{dt}(0^+) = 6 - 0.6 \times 10^5 = -59994 \text{ (A/s)}$$

再对 $\frac{di_2}{dt}$ 求一次导数并以 $\frac{di_1}{dt}(0^+), \frac{di_2}{dt}(0^+)$ 值代入, 得

$$\begin{aligned} \frac{d^2i_2}{dt^2}|_{t=0^+} &= 10 \frac{di_1}{dt}|_{t=0^+} - 15 \frac{di_2}{dt}|_{t=0^+} \\ &= -600030 \text{ (A/s}^2\text{)} \end{aligned}$$

依次类推,可求 i_1 及 i_2 在 $t = 0^+$ 瞬间的各阶导数之值。

除了上述一般情况之外,在某些理想化的特殊情况下,将使代表换路定则的关系式(7-3)、(7-4)失效。例如电压源接通纯电容或电流源接通纯电感,均会强迫电容上电压或电感中电流发生突变,这是基尔霍夫定律约束的必然结果。

两个电压初始值不等的电容并联接通,或两个电流初始值不等的电感串联接通,也会出现电容电压或电感电流被迫突变的情况。实际上,凡是接通一个纯电容(或部份电压源)回路,或接通一个纯电感(或部份电流源)割集,都可能出现此类强迫 u_C 或 i_L 突变的情况,这是基尔霍夫定律所要求的。那末在这些强迫突变的情况下如何确定 $u_C(0^+)$ 和 $i_L(0^+)$ 呢?对于电容通常可以根据两(或多个)电容端结点的总电荷不能突变的原则确定。例如图 7-7(a) 所示二电容并联接通,在接通瞬间,总电荷不能突变,否则在该瞬间将有无限大电流通过电阻 R ,就违背了基尔霍夫定律。此外,并联后总电容为 $(C_1 + C_2)$,电压 $u_1(0^+) = u_2(0^+)$,故有

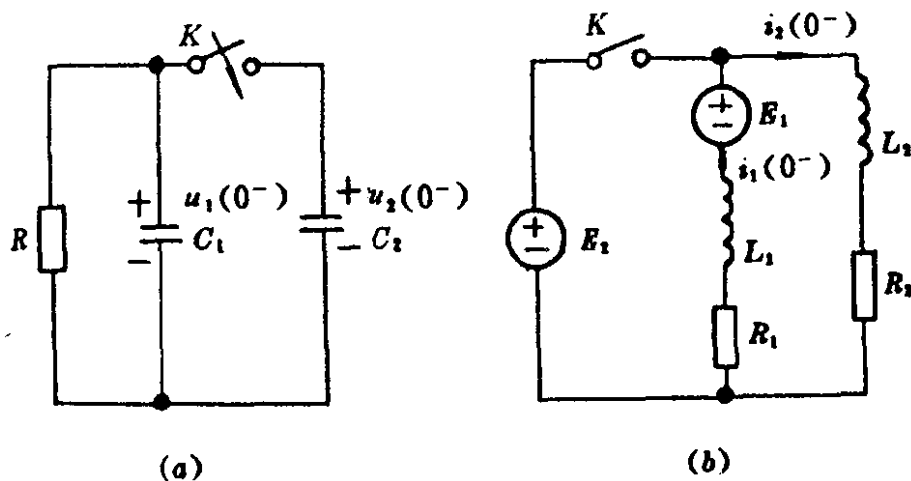


图 7-7

$$\begin{aligned} (C_1 + C_2)u_1(0^+) &= q(0^+) = q(0^-) = q_1(0^-) + q_2(0^-) \\ &= C_1u_1(0^-) + C_2u_2(0^-) \end{aligned}$$

$$\text{或} \quad u_2(0^+) = u_1(0^+) = \frac{C_1u_1(0^-) + C_2u_2(0^-)}{C_1 + C_2} \quad (7-7)$$