

电 工 基 础

下 册

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

國防工業出版社

内 容 简 介

本书分上下两册。上册内容有直流电路、交流电路、互感、三相及周期性非正弦电路。下册内容有电路过渡过程、非线性直流电路、磁路、铁心线圈及变压器、网络拓朴、双口网络及状态变量方程。

书中较详尽地阐述了电路的基本概念及基本分析方法。叙述深入浅出,通俗易懂。例题及习题也较完整,且于书后附有习题答案。这是一本较便于自学的书籍。

本书可作为工科院校及七·二一工人大学电类专业的教学参考书,也可供工程技术人员自学之用。

电 工 基 础

(下 册)

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版 国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张12 318千字

1979年8月第一版 1979年8月第一次印刷 印数: 00,001—72,000册

统一书号: 15034·1862 定价: 1.50元

前 言

为了适应当前我院教学工作和部属厂办工人大学发展的需要,我们在总结历年教学实践的基础上,参考了一些院校的电工教材,编成这本《电工基础》。全书分两册。上册包括直流电路、交流电路及互感、三相、周期性非正弦电路等九章;下册包括线性电路过渡过程、非线性直流电路、磁路、铁心线圈及变压器、网路拓扑、双口网路及状态变量方程等八章。

本书删去了一些较陈旧的内容,增加了电路理论方面的新内容。编写时注意到理论与实际的联系,在数学推导的同时,加深了物理概念的阐述。为了切实加强基本理论的学习,提高分析问题解决问题的能力,本书注意到习题及例题的选配。按照教材要便于自学的要求,叙述力求详尽,深入浅出,通俗易懂;并在书末附以习题答案,便于自学时查阅。

编写过程中,第六机械工业部教育局组织了编写大纲的讨论及初稿的审查。参加讨论的单位有:上海交通大学、大连工学院、华中工学院、华南工学院、西北工业大学三系、镇江船舶工业学校及江南造船厂、沪东造船厂、红旗造船厂、汾西机械厂、九江仪表厂等厂办工人大学。讨论中各单位代表提出了大量宝贵意见。在此一并致以深切的谢意。

由于我们业务知识有限,加上时间仓促,书中错误在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

哈尔滨船舶工程学院电工教研室

目 录

第十章 线性电路中的过渡过程(一)——经典法	1
§ 10-1 换路定律与电路的初始状态	2
§ 10-2 RC 电路的充放电过程 经典法	9
§ 10-3 矩形波作用于 RC 电路的分析	27
§ 10-4 RL 电路的过渡过程	34
§ 10-5 一阶线性电路的过渡过程	45
§ 10-6 RC 和 RL 电路接通正弦电源	52
§ 10-7 RLC 串联电路的放电过程	58
§ 10-8 RLC 串联电路接通直流电源的充电过程	73
本章小结	77
习题	79
第十一章 线性电路中的过渡过程(二)——运算法	91
§ 11-1 拉普拉斯变换	91
§ 11-2 展开定理	102
§ 11-3 电路定律的运算形式 运算电路图	106
§ 11-4 运算法	110
§ 11-5 化归为零初条件的算法	115
§ 11-6 杜阿密尔积分	119
本章小结	125
习题	126
第十二章 非线性直流电路	129
§ 12-1 非线性电阻元件的伏安特性	129
§ 12-2 图解法(一)——曲线相加法	131
§ 12-3 图解法(二)——曲线相交法	137
§ 12-4 试探法	141

§ 12-5 图解解析法	142
§ 12-6 解析法——线性化法	143
§ 12-7 牛顿-拉夫逊法简介	145
本章小结	150
习题	151
第十三章 磁路	154
§ 13-1 磁场的基本物理量	154
§ 13-2 磁场的基本性质	157
§ 13-3 物质的磁性 铁磁材料的磁化曲线	159
§ 13-4 磁路及基本定律	164
§ 13-5 无分支磁路的计算	169
§ 13-6 有分支磁路的计算	178
本章小结	180
习题	183
第十四章 铁心线圈和变压器	187
§ 14-1 铁心的功率损耗	187
§ 14-2 电流及磁通波形的畸变	194
§ 14-3 铁心线圈的矢量图与等效电路	200
§ 14-4 变压器的用途与结构	208
§ 14-5 铁心变压器的基本原理	210
§ 14-6 铁心变压器的等效电路与矢量图	215
§ 14-7 变压器的参数测定	218
本章小结	222
习题	223
第十五章 网络拓扑及矩阵分析	226
§ 15-1 支路方程及理想电源的移位	227
§ 15-2 网络拓扑图及关联矩阵	232
§ 15-3 节点分析法	235
§ 15-4 网孔分析法	240
§ 15-5 网络拓扑图的基本定理	245
§ 15-6 回路分析法	251

§ 15-7 割集分析法	256
§ 15-8 特勒根定理	269
本章小结	273
习题	274
第十六章 状态方程	279
§ 16-1 电路的状态和状态方程的概述	279
§ 16-2 状态方程的直观列写法	283
§ 16-3 状态方程的系统列写法	290
§ 16-4 齐次状态方程的解	296
§ 16-5 e^{At} 的解析算法	300
§ 16-6 非齐次状态方程的解	303
§ 16-7 输出方程的解	309
本章小结	311
习题	312
第十七章 双口网络	316
§ 17-1 双口网络及其端口条件	316
§ 17-2 双口网络方程(一)——短路导纳矩阵和开路阻抗矩阵	317
§ 17-3 双口网络方程(二)——混合、传输参数矩阵	322
§ 17-4 双口网络的级联	327
§ 17-5 双口网络的串并联	332
§ 17-6 双口网络的等效电路	336
本章小结	338
习题	339
附录 I 傅里叶积分法分析电路的过渡过程	344
附录 II 矩阵代数与线性方程组	352
答案	368

第十章 线性电路中的过渡过程(一)

——经典法

前几章所研究的电路,都是假定在相对稳定的情形下讨论的。直流电路在恒定电源作用下,电路各电压、电流都不随时间而变化;正弦交流电路在正弦电源作用下,电路中各电压、电流都按电源频率作正弦变化。这些工作状态称为电路的稳定状态,简称稳态。然而,电路还有另外一种状态,这就是本章要研究的过渡状态,简称暂态。分析过渡过程的方法很多,有经典法,运算法,杜阿密尔(Duhamel)积分法及状态变量法等。本章阐述经典法分析电路在过渡过程中各部分电压、电流的变化规律,以及能量转换的概念。至于运算法、杜阿密尔积分法将在第十一章介绍,状态变量法将在第十六章介绍。

本章首先介绍电路的换路定律和初始状态的确定。紧接着讨论 RC 电路的充放电过程,并引入时间常数的概念。时间常数是一个重要的物理量,我们可以用它来衡量电路过渡过程的快慢。通过对 RC 电路充放电的求解,总结出经典法求解电路过渡过程的步骤。为了紧密地与脉冲电路相结合,还进一步分析了矩形波电压(电流)通过 RC 电路的情形,介绍了微分与积分电路的概念。然后相应地介绍了 RL 电路。在讨论了这些单储能元件电路的基础上,我们又进一步总结出求解一阶电路过渡过程的快速公式,它在脉冲电路分析中得到了广泛的应用。此外,还介绍了单储能元件电路在接通正弦电源下过渡过程的特点。最后,我们讨论了 RLC 电路的放电过程和接通直流电源的情形,并对振荡与非振荡的放电过程作了较详细的论述。

§ 10-1 换路定律与电路的初始状态

通过以前的学习,使我们对电路有了一定的认识,但是这些认识还是不完全的。如按前面所学的知识,图 10-1(a) 所示的电路,在开关闭合后是不会有电流的。但实际上在开关刚闭合后的一小段时间内,我们发现电路是有电流的,然而此电流在逐渐减小,经过一小段时间后才趋近于零(即到达稳态值)。所以,认为图 10-1(a) 电路没有电流的认识是不完全的,而应当是从有电流过渡到没有电流;同样,当开关闭合后,电容器的端电压也不是马上就等于 E ,而是由零逐渐过渡到 E 。其电流、电压的变化规律如图 (b) 所示。可见,电路从原来的状态变化到另一个稳定状态是需要一个过程的,这个过程就称为电路的过渡过程。

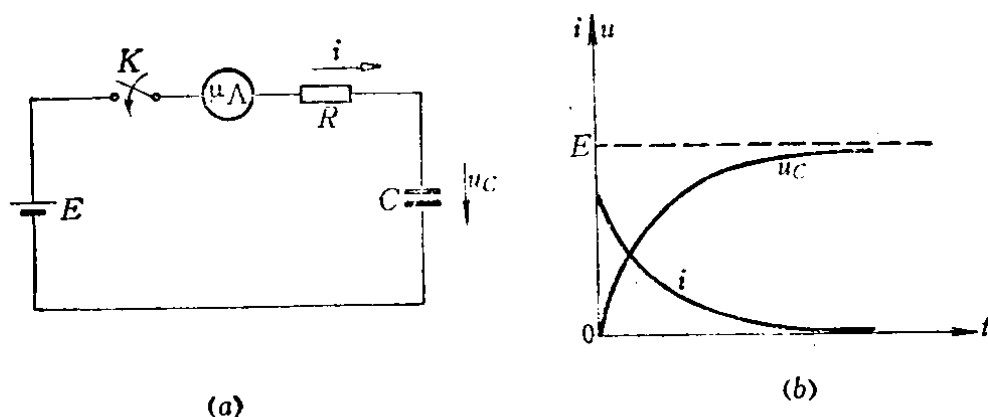


图 10-1

电路过渡过程所经历的时间,实际上是很短的(几毫秒甚至几微秒)。由于在过渡过程中,原来的状态被破坏,新的状态在建立,电路处于急剧的变化之中,它与稳定状态的物理现象有很大的差别。电路的过渡过程在工程中的应用是很广泛的,如示波器、电视和雷达的显示设备中,需要的锯齿波扫描电压就是利用 RC 电路的过渡特性获得的;在计算机、脉冲数字装置中,电路始终在过渡状态下工作;在控制设备中,也可利用电路的过渡特性来提高控制速度等。另一方面,由于在过渡过程中,电路某些部分的电压或电

流可能大于它的稳态值的好几倍,即可能出现过电压或过电流的现象。所以在设计电器设备时,必须考虑电路中的过渡过程,以保证它安全可靠地运行。因此,研究电路的过渡过程具有十分重要的意义。

电路工作状态的改变,是由电路的接通、断开、改接及参数或电源的突然变化所引起的,这些统称为电路的换路。

为什么电路换路后一般不能由原来的状态立刻到达新的稳定状态呢?众所周知,在日常生活中,烧开一壶水要一定的时间;正在运行的火车要停下来,也要一定的时间,这就说明热能的增加和动能的减小都是作连续变化的,也就是说能量不能跃变。在电路中也是如此,不管是电场能量或磁场能量都不能跃变。下面就以图 10-2 所示的三个电路为例逐一加以讨论。对于图 10-2(a) 的电路,当开关 K 未闭合时,电容端电压为零;若开关早已闭合,电路已达到稳定状态,由于电路中没有电流流动,则电容端电压为

$$u_C = E$$

如果没有过渡过程,开关闭合时电压 u_C 立刻由零跃变到 E ,则电容的电场能量就要由零跃变到 $\frac{1}{2}CE^2$,显然这与实际情况是不相符合的。因为假如能量能够跃变的话,则电路功率

$$p = \frac{dw_C}{dt} \rightarrow \infty$$

而在通常情况下,功率总是有限的,所以能量只能作连续变化。

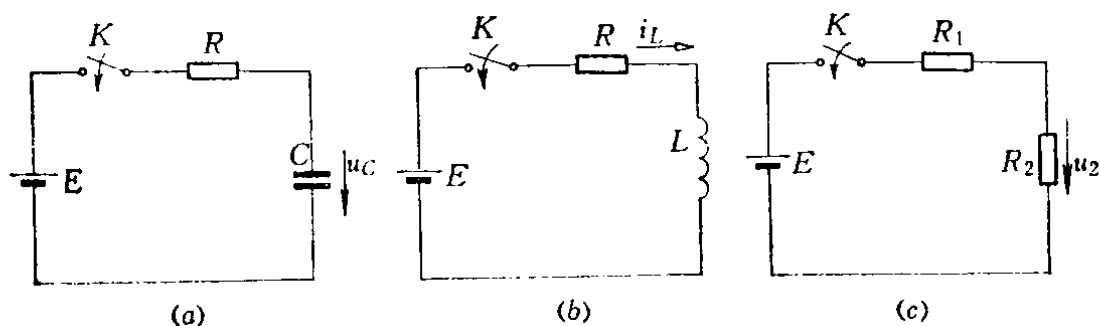


图 10-2

对于图 10-2(b) 的电路, 当开关未闭合时, 电流为零; 若开关早已闭合, 电路已达到稳定状态, 则电流

$$i = \frac{E}{R}$$

如果没有过渡过程, 开关闭合时电流 i 立刻由零跃变到 $\frac{E}{R}$, 则电感中的磁场能量就要由零跃变到 $\frac{1}{2} L \left(\frac{E}{R} \right)^2$, 这也会导致电路功率

$$p = \frac{d\omega_L}{dt} \rightarrow \infty$$

的不切合实际的结论。所以, 也是不可能的。由此看来, 电路换路时, 就有可能引起过渡过程。但是对图 10-2(c) 电路, 当开关未闭合时, 电路电流为零, 电阻 R_2 的端电压也为零。开关刚一闭合, 电路电流和电阻 R_2 的端电压为

$$i = \frac{E}{R_1 + R_2}, \quad u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

恰好是它们的稳态值。也就是说, 这种电路在换路后没有过渡过程, 而是立刻达到稳定状态。虽然电阻的电流和电压都发生跃变, 但其热能 w_R 仍是连续的, 这是因为

$$w_R = \int_0^t p dt = \int_0^t w i dt$$

说明电阻消耗的热能是随时间积累的, 并没有随电流、电压的跃变而跃变。

然而当电路具有 L 、 C 这样的储能元件, 同时又进行电路换接时, 是否就一定会产生过渡过程呢? 例如在图 10-2(a) 中, 若开关未闭合前, 电容 C 已带有电荷, 且其电压 $u_{C0} = E$, 则在此情况下, 虽将开关闭合, 电路也不发生过渡过程。只有在 $u_{C0} \neq E$ 时, 将开关闭合才会有过渡过程。具有电感的电路, 也有类似情况。由此可见, 过渡过程必须对具有储能元件的电路进行换路, 并且当换接前后电路的电场或磁场能量不相等时才会产生。

下面我们对换路定律加以叙述。为了简便起见,认为在 $t=0$ 时换路,把换路前的终了时刻记为 $t=0^-$,把换路后的初始时刻记为 $t=0^+$ 。这样,电场能量 w_C 和磁场能量 w_L 不能跃变的关系可记为

$$w_C(0^+) = w_C(0) = w_C(0^-)$$

$$w_L(0^+) = w_L(0) = w_L(0^-)$$

大家知道,线性电路依据基尔霍夫定律列出的电压、电流的方程是常系数线性微分方程,确定它的解需要知道初条件。但在分析电路过渡过程时,我们知道的往往是换路前电路的状态,而初条件却是换路后的初始值,因此,必须研究电路在换路前后瞬间各电压、电流的关系。

下面就根据能量不能跃变,导出常用的电容端电压 u_C 和电感中的电流 i_L 在 $t=0^+$ 时的表达式。

对于电容,由于电容中储存的电场能量为

$$w_C = \frac{1}{2C} q^2 = \frac{1}{2} C u_C^2$$

则功率

$$p_C = \frac{dw_C}{dt} = \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} = C u_C \frac{du_C}{dt}$$

在通常含有电容的实际电路中,功率是有限的,故电场能量不能跃变,由上式可见,电量 q 不能跃变,电压 u_C 不能跃变[⊖],即

$$q(0^+) = q(0) = q(0^-) \quad (10.1)$$

$$u_C(0^+) = u_C(0) = u_C(0^-) \quad (10.2)$$

式(10.1)和式(10.2)表明 $q(t)$ 和 $u_C(t)$ 包括换路瞬间都是连续的。

对于电感,由于电感中储有的磁场能量为

$$w_L = \frac{1}{2L} \Psi^2 = \frac{1}{2} L i_L^2$$

⊖ 以后会碰到“强迫跃变”的情形,即近似地认为 u_C 与 i_L 可以跃变,留待以后再作讨论。

则功率

$$p_L = \frac{dw_L}{dt} = \frac{\Psi}{L} \frac{d\Psi}{dt} = L i_L \frac{di_L}{dt}$$

在通常含有电感的实际电路中,功率是有限的,故磁场能量不能跃变,因此磁链 Ψ 不能跃变,电流 i_L 不能跃变 $\ominus$,便有

$$\Psi(0^+) = \Psi(0) = \Psi(0^-) \quad (10.3)$$

$$i_L(0^+) = i_L(0) = i_L(0^-) \quad (10.4)$$

式(10.3)和式(10.4)表明 $\Psi(t)$ 和 $i_L(t)$ 总是连续的。

上述诸式就称为电路的换路定律,而式(10.2)和式(10.4)是常用的。

在零初条件下,即 $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 0$ 和 $i_L(0^+) = i_L(0^-) = 0$, 电路在换路时的初瞬间,电容相当于短路,而电感相当于开路。这与稳定状态下的性质是截然不同的。在非零初条件下,由于 $u_C(0^+) = u_C(0^-)$,所以在 $t=0^+$ 时,电容相当于电压源 $u_C(0^-)$; 而 $i_L(0^+) = i_L(0^-)$, 故在 $t=0^+$ 时,电感相当于电流源 $i_L(0^-)$ 。

若电路在某一时刻 t_1 进行换路,则式(10.2)和式(10.4)可改写成

$$u_C(t_1^+) = u_C(t_1) = u_C(t_1^-) \quad (10.5)$$

$$i_L(t_1^+) = i_L(t_1) = i_L(t_1^-) \quad (10.6)$$

式(10.5)和式(10.6)表明电容端电压和电感中电流在任何时刻都应是连续变化的。

根据换路定律可求出电路换路时电容电压和电感电流的初始值,而电路其它部分的电压、电流的初始值还要依据基尔霍夫定律进行计算。现举例如下。

〔例1〕图10-3的电路原已稳定。求开关刚闭合时电容电压、电感电压及各支路电流的初始值。

〔解〕先假定 u_C 、 u_L 及各电流的参考方向,如图中所示。

$\ominus$ 同前页注 $\ominus$ 。

当 $t=0^-$ 时, 开关未闭合, 而电路原已稳定, 所以 $u_C(0^-)=0$, $i_L(0^-)=0$ 。
当 $t=0^+$ 时, 开关刚闭合, 根据换路定律得

$$u_C(0^+)=u_C(0^-)=0$$

$$i_L(0^+)=i_L(0^-)=0$$

再根据基尔霍夫电压定律, 有

$$i_C(0^+)R+u_C(0^+)=E$$

即
$$i_C(0^+)=\frac{E-u_C(0^+)}{R}=\frac{E}{R}$$

而
$$i(0^+)=i_C(0^+)+i_L(0^+)=\frac{E}{R}$$

$$u_L(0^+)=E-i_L(0^+)r=E$$

以上解答说明, 在通常情况下电容电压 u_C 和电感电流 i_L 不能跃变, 而流经电容的电流 i_C 和电感的电压 u_L 是可以跃变的。

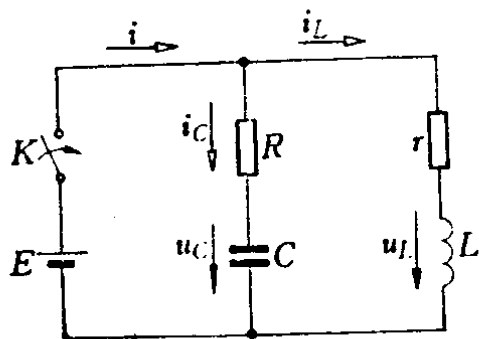


图 10-3

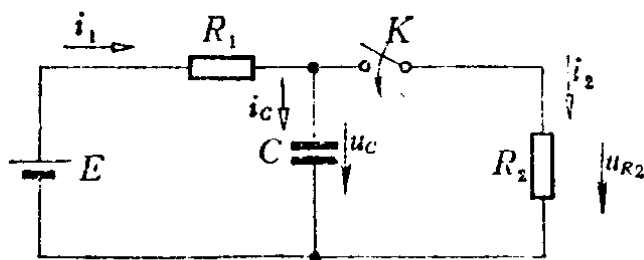


图 10-4

〔思考题〕 图 10-3 电路, 当到达新稳态后, 其结果如何?

〔例 2〕 图 10-4 的电路原已稳定, 求开关刚闭合时的电容电压及各支路电流。

〔解〕 设电容电压及各支路电流的参考方向如图所示。当 $t=0^-$ 时, 开关未闭合, 故 $u_C(0^-)=E$, 当 $t=0^+$ 时, 根据换路定律得

$$u_C(0^+)=u_C(0^-)=E$$

又因为
$$u_{R_2}(0^+)=u_C(0^+)=E$$

所以
$$i_2(0^+)=\frac{u_{R_2}(0^+)}{R_2}=\frac{E}{R_2}$$

根据基尔霍夫电压定律, 有

$$i_1(0^+)R_1+u_C(0^+)=E$$

则
$$i_1(0^+)=\frac{E-u_C(0^+)}{R_1}=0$$

再根据基尔霍夫电流定律, 即得

$$i_O(0^+) = i_1(0^+) - i_2(0^+) = -\frac{E}{R_2}$$

〔例 3〕 图 10-5 的电路原已稳定, 若 $U=100(\text{V})$, $R=20(\Omega)$, $L=20(\text{H})$, 电压表内阻 $R_V=10^4(\Omega)$, 求开关断开瞬间电压表的端电压。

〔解〕 当 $t=0^-$ 时, 开关未断开,

$$i_L(0^-) = \frac{U}{R} = 5(\text{A})$$

当 $t=0^+$ 时, 根据换路定律得

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) = 5(\text{A})$$

这时电压表的端电压为

$$i_L(0^+)R_V = 5 \times 10^4(\text{V})$$

值得注意的是, 加到电压表两端的电压那么高, 其极性又与原来相反, 电压表将被烧坏, 因此在扳断开关前应先将电压表拆除。

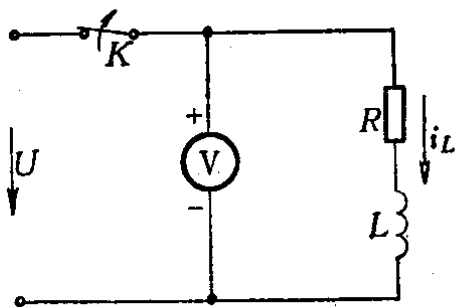


图 10-5

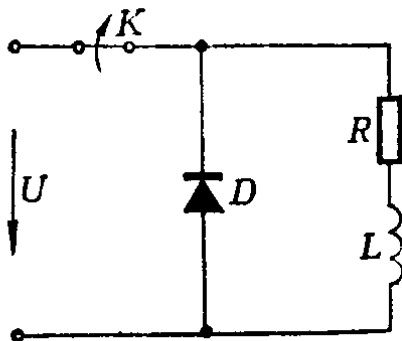


图 10-6

对于电机的激磁绕组, 犹如图 10-5 中的 R 、 L , 当开关断开后迫使电流立刻急剧下降, 此时线圈中将出现很高的感应电压, 同时开关触点间也出现很高的电压, 这就很可能致使线圈间的绝缘击穿以及开关的触点受损。因此在工程上, 采用图 10-6 所示的电路, 在激磁绕组上并联一个半导体二极管 D , 其极性与电源相反。当开关未扳断前, 二极管不导通, 对激磁回路无影响; 开关断开后, 二极管立即导通, 为激磁绕组提供了放电回路, 避免了在绕组两端产生高电压。这种二极管, 常称为续流二极管。

〔例 4〕 图 10-7 的电路原已稳定, 求开关闭合瞬间各电容电压和流经开关处的电流。

〔解〕 假定各电压、电流的参考方向, 如图中所示。

当 $t=0^-$ 时, 开关未闭合, 电路原先稳定, 故

$$i_L(0^-) = \frac{E}{R}$$

$$u_{C_1}(0^-) + u_{C_2}(0^-) = E \quad ①$$

又因为 C_1 与 C_2 串联, C_1 上的电量与 C_2 上的电量应相等, 从而得

$$C_1 u_{C_1}(0^-) = C_2 u_{C_2}(0^-) \quad ②$$

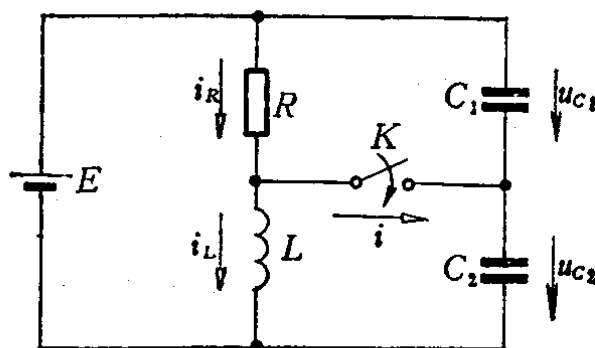


图 10-7

联立式①、②解得

$$u_{C_1}(0^-) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} E, \quad u_{C_2}(0^-) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} E$$

当 $t=0^+$ 时, 根据换路定律, 得

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) = \frac{E}{R}$$

$$u_{C_1}(0^+) = u_{C_1}(0^-) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} E$$

$$u_{C_2}(0^+) = u_{C_2}(0^-) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} E$$

又因为 R 与 C_1 是并联, 所以

$$i_R(0^+) = \frac{u_{C_1}(0^+)}{R} = \frac{C_2}{R(C_1 + C_2)} E$$

再根据基尔霍夫电流定律, 得

$$\begin{aligned} i(0^+) &= i_R(0^+) - i_L(0^+) \\ &= \frac{C_2}{R(C_1 + C_2)} E - \frac{E}{R} = -\frac{C_1 E}{R(C_1 + C_2)} \end{aligned}$$

〔思考题〕 图 10-7 的电路到达新稳态后其结果如何?

§ 10-2 RC 电路的充放电过程 经典法

电路换路后的初始状态在上节已作讨论, 到达新稳态后的情

形完全可由以前各章所学的方法确定。从这节开始,就要研究电路从初始状态演变到新稳态的规律。本着由简单到复杂,由认识个别的和特殊的事物,逐步的扩大到认识一般的事物的原则。本节以分析简单的 RC 电路为例,介绍分析电路过渡过程的经典法。

(一) RC 电路的放电过程

在图 10-8 电路中,开关未闭合时,电容电压已充至 U_0 , 极性

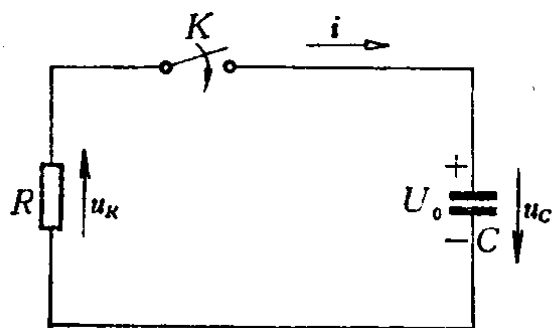


图 10-8

如图所示。开关刚合上,由于电容端电压不能跃变,电压 u_C 仍为 U_0 , 此时电阻电压要平衡电容电压, 即 $u_R(0^+) = -U_0$, 所以电阻电压由零跃变到 $-U_0$, 这时

电路电流也要由零跃变到 $-\frac{U_0}{R}$

(因为电流的参考方向与实际放电电流的方向相反,所以是负值)。放电开始后,电容就不断地释放电荷,电压也就随之减小,电阻电压与放电电流的绝对值也相应减小。直到电容器极板上的电荷释放完,电压 u_C 也减至零,放电结束,电路到达新稳态。此时,电压 u_C 、 u_R 及电流 i 均变为零。

设开关在 $t=0$ 时闭合,电路换路后,根据基尔霍夫电压定律可得

$$u_C + u_R = 0$$

而

$$u_R = iR, \quad i = C \frac{du_C}{dt}$$

代入上式,经整理后得

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

上式是线性常系数齐次微分方程。从数学中知道它的通解形式为

$$u_C = Ae^{\lambda t} \quad (10.7)$$

其中 p 为特征根, A 为待定的积分常数。现将 $u_C = Ae^{pt}$ 代入微分方程, 得

$$RC \frac{dAe^{pt}}{dt} + Ae^{pt} = 0$$

$$RCpAe^{pt} + Ae^{pt} = 0$$

消去公因式 Ae^{pt} , 即得特征方程

$$RCp + 1 = 0$$

由此解得特征根

$$p = -\frac{1}{RC}$$

接着就要确定积分常数 A , 它是由微分方程的初条件(即电路的初始值)来确定的。当 $t=0$ 时,

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) = U_0$$

代入式(10.7)得

$$U_0 = Ae^{-\frac{0}{RC}} = A$$

因此解得电容电压

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (10.8)$$

电阻电压

$$u_R = -u_C = -U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (10.9)$$

放电电流

$$i = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (10.10)$$

图 10-9 画出了电压 u_C 、 u_R 和电流 i 随时间变化规律的曲线。

无论从图 10-9 或式(10.8)、式(10.9)和式(10.10)都可清楚地看出, 电压 u_C 、 u_R 和电流 i 都是按同样的指数规律变化的。由于 $p = -\frac{1}{RC}$ 是负值, 所以随着时间的增长, 它们的绝对值都是衰