

脉冲与数字电路

蔡 谦 主编

電子工業出版社

内 容 简 介

本书为电子工业部统编教材之一，全书共分两大部分，即分立元件脉冲电路和数字电路。两部分具有相对的独立性。

分立元件脉冲电路共分五章： RC 电路、晶体管开关电路、张弛振荡器、锯齿波电压发生器和负阻器件脉冲电路。

数字电路共分八章：逻辑门、逻辑代数、组合逻辑电路、触发器、时序电路、用集成逻辑门组成的脉冲电路、 MOS 电路及数模转换。

本书除作为工科电子类中等专业学校教材外，还可作为有关工程技术人员自学参考书。

脉冲与数字电路

蔡 谦 主编

责任编辑：王昌喜

*

电子工业出版社出版（北京市万寿路）

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092 $1/16$ 印张：21.5 字数：496千字

1986年5月第1版 1986年6月第1次印刷

印数：15000册 定价：3.60元

统一书号：15290·324

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作，从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》，《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构、并制定了一九八二至一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题，在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由电子工业部中等专业学校《电子类专业》教材编审委员会《无线电技术》编审小组评选审定，并推荐出版。

该教材由北京无线电工业学校蔡谦同志担任主编，天津仪表无线电工业学校季世伦同志担任主审。编审者均依据无线电技术编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为200学时，其中讲课时数为142学时，实验占38学时，机动20学时，其主要内容为： RC 电路、晶体管开关电路（包括二极管开关电路及限幅、箝位电路）、张弛振荡器、锯齿波电压发生器和负阻器件脉冲电路，这些内容占全书内容三分之一。此外还有：逻辑门（包括用分立元件组成的逻辑门、常用的集成逻辑门）、数制（二、八、十、十六进制和它们的互换，原、反、补码）与逻辑代数、组合逻辑电路、触发器、时序电路、用集成逻辑门组成的脉冲电路、 MOS 电路及数模转换。这部分内容占全书内容的三分之二。

鉴于当前集成电路的飞速发展和广泛使用，本书对分立元件脉冲电路，只介绍基本概念和典型电路，而着重介绍数字集成电路，在数字电路中，每一种典型电路都介绍一、两种中规模电路以适应当前的需要。

考虑到中等专业学校的特点，本书着重讲清物理概念和基本原理，尽量避免繁琐的数学推导，在文字上力求简明扼要、通俗易懂、便于自学。各章都有小结和一定数量、深度的习题以巩固和加深所学知识。

本教材中分立元件脉冲电路部分由武汉无线电工业学校邓汉铨同志编写，数字电路部分由北京无线电工业学校蔡谦同志编写，并由蔡谦同志统编全稿。参加审阅工作的还有武汉无线电工业学校的祝惠芳同志、北京无线电工业学校的哈长富、魏岫崑、赵震初同志，他们为本书提出许多宝贵意见。北京无线电工业学校的和枫同志为本书描绘了全部插图，这里表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1985年4月

目 录

绪论	(1)
第一章 RC电路	(3)
§1-1 简单的RC串联电路	(3)
一 RC电路的过渡过程	(3)
二 时间常数	(4)
三 简单RC电路的分析方法	(5)
§1-2 RC电路的应用	(8)
一 微分电路	(8)
二 积分电路	(11)
三 分压电路	(12)
四 耦合电路	(14)
§1-3 RL电路	(16)
一 RL电路的过渡过程	(17)
二 RL电路的时间常数	(18)
三 RL电路与RC电路比较	(18)
本章小结	(18)
习题	(19)
第二章 晶体管开关特性	(21)
§2-1 晶体二极管开关特性	(21)
一 二极管开关特性	(21)
二 二极管限幅器	(24)
三 二极管箝位电路	(27)
§2-2 晶体三极管开关特性	(29)
一 三极管的三种工作状态	(29)
二 三极管的开关时间	(31)
三 利用加速电容改善开关时间	(34)
§2-3 反相器	(35)
一 反相器工作原理	(35)
二 反相器的饱和、截止条件	(35)
三 输出带有箝位电路的反相器	(36)
四 反相器的负载能力	(38)
本章小结	(38)
习题	(39)
第三章 张弛振荡器	(43)
§3-1 集-基耦合双稳态触发器	(43)
一 双稳态触发器的电路结构及工作原理	(43)
二 电路正常工作条件	(44)
三 电路的触发方式	(46)

四 双稳态触发器的分频作用	(49)
§3-2 射极耦合双稳态触发器	(50)
一 基本电路及其工作原理	(50)
二 回差分析	(52)
三 射极耦合双稳态触发器的应用	(53)
§3-3 集-基耦合单稳态触发器	(55)
一 集-基耦合单稳态触发器的电路结构及其工作原理	(55)
二 电路的主要技术指标	(57)
三 集-基耦合单稳态触发器电路的改进	(58)
§3-4 射极耦合单稳态触发器	(59)
一 射极耦合单稳态触发器电路及其工作原理	(59)
二 电路工作状态的分析	(60)
三 电路的主要技术指标	(61)
四 单稳态触发器的应用举例	(62)
§3-5 自激多谐振荡器	(63)
一 基本电路及工作原理	(63)
二 主要技术指标	(65)
三 自激多谐振荡器的改进电路	(65)
§3-6 间歇振荡器	(67)
一 脉冲变压器	(67)
二 自激间歇振荡器	(70)
三 自激间歇振荡器的主要技术指标	(72)
§3-7 同步与分频	(73)
一 自激多谐振荡器的同步与分频	(73)
二 间歇振荡器的同步与分频	(74)
本章小结	(74)
习题	(75)
第四章 锯齿波电压发生器	(78)
§4-1 概述	(78)
§4-2 简单的锯齿波电压发生器	(79)
一 电路的工作过程	(79)
二 波形参数	(80)
§4-3 恒流源锯齿波电压发生器	(81)
一 电路的工作过程	(82)
二 影响锯齿波线性的因素	(82)
§4-4 自举式锯齿波电压发生器	(83)
一 自举电路的工作原理	(83)
二 自举电路非线性系数的分析和估算	(84)
三 电路的改进	(85)
§4-5 电容负反馈锯齿波电压发生器	(86)
一 电容负反馈补偿原理	(86)
二 简单的电容负反馈锯齿波发生器	(87)
三 非线性系数的估算	(88)

四 SBM-10示波器的扫描电路	(89)
§4-6 自激式锯齿波电压发生器	(90)
一 工作原理	(90)
二 电路稳定工作的条件	(91)
本章小结	(91)
习题	(92)
第五章 特殊器件脉冲电路	(93)
§5-1 隧道二极管及其脉冲电路	(93)
一 隧道二极管的伏安特性	(93)
二 隧道二极管静态工作点的稳定问题	(94)
三 整形电路和单稳态触发器	(94)
§5-2 单结晶体管及其脉冲电路	(97)
一 单结晶体管	(97)
二 单结晶体管构成的多谐振荡器	(99)
本章小结	(100)
第六章 逻辑门电路	(101)
§6-1 概述	(101)
§6-2 分立元件的门电路	(102)
一 二极管与门	(102)
二 二极管或门	(103)
三 非门电路	(104)
四 “与非”门、“或非”门	(105)
五 正逻辑和负逻辑	(106)
§6-3 三极管-三极管逻辑门(TTL)电路	(107)
一 TTL与非门的电路结构	(107)
二 TTL与非门的工作原理	(108)
三 TTL与非门的外特性	(109)
§6-4 TTL与非门的主要参数及其测试原理	(112)
一 功耗	(113)
二 输入短路电流	(113)
三 开门电压与高电平噪声容限	(114)
四 输出低电平	(114)
五 关门电压与低电平噪声容限	(114)
六 输出高电平	(115)
七 扇出系数	(115)
八 平均延迟时间 t_{pd}	(115)
§6-5 TTL与非门的改进	(117)
一 有源泄放TTL与非门	(117)
二 抗饱和TTL与非门(STTL)	(118)
三 LSTTL与非门	(118)
§6-6 TTL电路的其它类型	(120)
一 “与或非”门	(120)
二 “异或”门	(120)

三 “同或”门	(121)
四 集电极开路“与非”门(OC门)	(122)
五 三态门(TSL门)	(125)
§6-7 射极耦合逻辑门(ECL电路)	(126)
一 ECL电路的基本结构	(126)
二 ECL电路的工作原理	(126)
三 ECL电路的基本特性	(128)
本章小结	(131)
附录一 TTL使用注意事项	(131)
附录二 集成电路型号命名法	(132)
附录三 TTL门新旧符号对照表	(136)
习题	(136)
第七章 数制与逻辑代数	(143)
§7-1 数制	(143)
一 数制及数的表示方法	(143)
二 二进制与十进制的相互转换	(144)
三 八进制数	(148)
四 十六进制数	(149)
五 二十进制码	(150)
六 正负数的表示	(151)
§7-2 逻辑代数	(153)
一 逻辑代数中的三种基本运算	(153)
二 逻辑函数及其表示法	(154)
三 逻辑代数的基本公式与定律	(157)
四 逻辑函数的公式化简法	(161)
五 逻辑函数的卡诺图化简法	(163)
本章小结	(174)
习题	(175)
第八章 组合逻辑电路	(179)
§8-1 概述	(179)
§8-2 译码器与编码器	(179)
一 译码器	(180)
二 编码器	(183)
§8-3 显示器件及显示电路	(185)
一 辉光数码管	(186)
二 荧光数码管	(188)
三 磷砷化镓数码管	(191)
四 液晶显示器	(192)
五 MSI BCD-七段译码器	(193)
§8-4 基本运算器	(195)
一 二进制加法运算	(195)
二 二十进制加法原理	(199)
§8-5 比较器	(201)

一 一位数码比较器	(201)
二 四位数码比较器	(201)
§8-6 奇偶检验电路	(203)
§8-7 数据选择器	(206)
§8-8 组合逻辑电路中的竞争-冒险问题	(208)
一 组合逻辑电路的竞争-冒险	(208)
二 竞争-冒险现象的发现与消除	(209)
本章小结	(210)
附录 常用的组合逻辑电路型号	(211)
习题	(211)
第九章 集成电路触发器	(214)
§9-1 触发器的基本类型	(214)
一 基本 $R-S$ 触发器	(214)
二 钟控 $R-S$ 触发器	(216)
三 D 触发器	(218)
四 $J-K$ 触发器	(219)
五 T 触发器	(220)
六 触发器的空翻现象	(221)
§9-2 维持阻塞触发器	(221)
一 维持阻塞 D 触发器	(222)
二 集成维持阻塞 D 触发器	(222)
三 D 触发器的脉冲工作特性	(223)
§9-3 主从触发器	(224)
一 主从 $J-K$ 触发器	(224)
二 集成主从 $J-K$ 触发器	(225)
三 主从 $J-K$ 触发器的脉冲工作特性	(226)
*§9-4 边沿触发器	(227)
本章小结	(228)
习题	(228)
第十章 时序逻辑电路	(234)
§10-1 概述	(234)
§10-2 寄存器	(234)
一 数码寄存器	(235)
二 单向移位寄存器	(236)
三 双向移位寄存器	(238)
四 IC 移位寄存器	(239)
五 移位寄存器的应用举例	(241)
§10-3 计数器	(241)
一 异步计数器	(241)
二 MSI 2- N -16可变进制计数器 $T213$	(250)
三 同步计数器	(251)
四 同步计数器与异步计数器的比较	(257)
五 MSI 二-五-十进制计数器 $CT1290$	(257)

六 分频器	(257)
§10-4 时序电路的分析方法	(260)
一 同步模10累加计数器的分析	(261)
二 异步模10累加计数器的分析	(262)
§10-5 节拍分配器与脉冲分配器	(266)
一 计数型节拍分配器	(266)
二 移位型节拍分配器	(267)
三 脉冲分配器	(267)
本章小结	(268)
附录 常用的寄存器、计数器型号	(269)
习题	(269)
第十一章 集成门组成的脉冲电路	(274)
§11-1 脉冲信号发生器	(274)
一 简易多谐振荡器	(274)
二 对称多谐振荡器	(275)
三 环形振荡器	(277)
四 石英晶体振荡器	(279)
§11-2 脉冲波形变换电路	(280)
一 微分电路与积分电路	(280)
二 单稳态触发器	(281)
§11-3 脉冲幅度的鉴别	(284)
一 用TTL“与非”门组成的施密特电路	(285)
二 其它电路形式	(286)
三 用施密特电路鉴别脉冲幅度和宽度	(286)
本章小结	(287)
习题	(287)
第十二章 金属氧化物半导体集成电路	(292)
§12-1 概述	(292)
一 MOS管	(292)
二 NMOS管的结构及开关特性	(293)
三 NMOS管的静态伏安特性	(294)
四 NMOS管的主要参数	(295)
§12-2 NMOS反相器	(296)
一 NMOS反相器的电路结构	(296)
二 NMOS反相器的工作原理	(297)
三 NMOS反相器的性能	(297)
§12-3 CMOS反相器	(298)
一 CMOS反相器的电路结构	(298)
二 CMOS反相器的工作原理	(299)
三 CMOS反相器的电压传输特性	(299)
§12-4 常用的MOS门	(300)
一 NMOS门电路	(300)
二 CMOS门电路	(301)

§12-5 用MOS门组成的触发器	(303)
一 基本 R - S 触发器	(304)
二 NMOS钟控 R - S 触发器	(304)
三 CMOS主从 D 触发器	(305)
§12-6 MOS电路与TTL电路的连接	(306)
一 CMOS电路与TTL电路的连接	(306)
二 使用MOS电路注意事项	(307)
本章小结	(307)
附录 常用的MOS电路型号	(308)
习题	(310)
数字电路综合作业——数字钟的设计参考资料	(311)
第十三章 数字与模拟量的相互转换	(316)
§13-1 概述	(316)
§13-2 数-模(D/A)转换	(316)
一 几个基本概念	(316)
二 基本的DAC电路	(317)
三 R - $2R$ 梯形网络	(320)
四 电流驱动的 R - $2R$ 梯形DAC	(321)
五 倒置梯形DAC	(322)
六 模拟开关	(322)
§13-3 模-数(A/D)转换	(323)
一 几个基本概念	(323)
二 并行比较型ADC	(326)
三 计数型ADC	(328)
四 逐位比较型ADC	(329)
本章小结	(330)
习题	(331)
参考文献	(332)

绪 论

近年来计算机的应用十分普遍，计算机可以快速准确地处理各种信息。但它必须先将信息变换成某种“信号”才能进行处理。正象人们打电报一样，必须把要表达的语言文字变成电码，然后用“嘀嘀”“哒哒”的信号进行传送。所以现代信息的处理最终是对“信号”的处理。

“信号”是用某种物理量（如电的、光的、声的、机械的……）的数值大小来表示的。

“信号”一般可分为模拟信号和数字信号两大类。

模拟信号的特点是：它在某个数值范围内连续变化，如气温可在 $-50^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 之间连续变化，若将它变换成电信号，则是光滑而连续的电流或电压，某个时刻电流或电压的数值大小（幅度）与该时刻的气温成正比关系。

数字信号的特点是：在时间上和数值上都是不连续的。其数值大小（幅度）只表示两个不同状态作为二进制的两个数码“0”和“1”，故称为数字信号。通常用二进制“0”和“1”组合的代码序列来表示一个物理量的大小或别的什么信息。若将数字信号转换成电信号则是一连串的脉冲波形。

处理以上两种信号的电路分别叫做模拟电路和数字电路。

目前数字电路的应用极其广泛，如话音和图象的传送已实现了数字化，雷达的数据处理也都采用数字形式，生产过程的自动控制都离不开数字电路。之所以如此，是因为数字电路具有特殊的优越性，现分述如下：

〈1〉 抗干扰能力强。数字信号在传送时；用脉冲的有无、脉宽及脉冲的重复周期或频率来表示。而“干扰”信号，一般只影响脉冲的幅度。所以，数字信号能稳定可靠的传送。

〈2〉 精度高。数字信号的精度可达百万分之几，其精度与数字位数有关，增加数字的位数就能达到很高的精度。

〈3〉 功耗低。数字器件由于工作于开关状态，功耗都较低，一般为mW数量级。随着集成度的不断提高，大规模电路、超大规模电路的出现，体积愈来愈小，所以其功耗也相应的愈来愈低。

〈4〉 速度高。数字电路具有很高的工作速度。如计算机的工作速度每秒可达百万次甚至上亿次，而且可靠性高，存贮量很大，因此使用数字电路可大大节省空间、时间和费用。

因此学习和掌握数字电路的基本知识和应用是非常重要的。

数字信号是靠数字电路产生脉冲来实现的，所以在研究数字电路之前，先要研究脉冲电路。

1. 脉冲电路

脉冲电路是产生与变换脉冲信号波形的电路。“脉冲”含有脉动和短促的意思。脉冲信号（电脉冲）一般指在很短时间内出现的电压或电流。它们具有突变的特点。

在脉冲电路中常见的脉冲波形有：矩形波、尖峰波、锯齿波、三角波……，如图0-1所示。虽然这些波形不同，但它们都具有“脉动”和“突变”的特点，都是脉冲波。

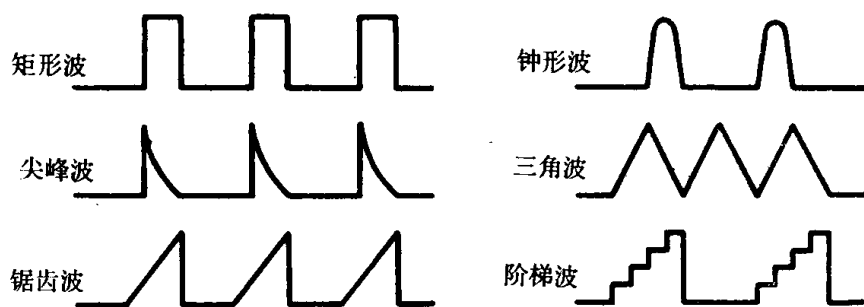


图0-1 几种常用的脉冲波形

2. 脉冲信号参数

为了对脉冲信号进行定量分析，常使用一些物理量来表示脉冲信号的特征，这些物理量可称为脉冲信号的参数。下面以实际的矩形脉冲电压波形（图0-2为例）来定义其参数。

〈1〉脉冲幅度 U_m ：表示脉冲信号强弱的参数。在数值上等于脉冲信号的静态值（ U_o ）与峰值（ U_M ）之差的绝对值，即 $U_m = |U_M - U_o|$ 。若 $(U_M - U_o) > 0$ 则称该信号为正脉冲；反之为负脉冲。

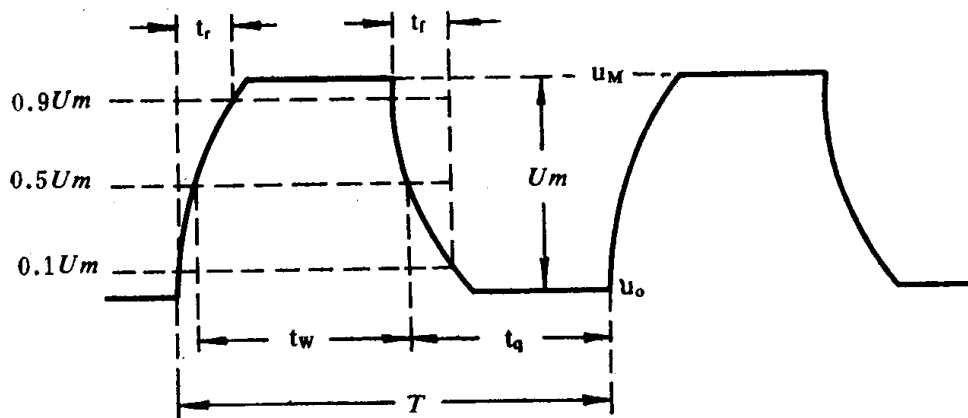


图0-2 实际的矩形波

〈2〉脉冲前沿 t_r ：脉冲电压从 $0.1U_m$ 上升到 $0.9U_m$ 所需要的时间，也称脉冲上升时间。单位为秒（s）， t_r 一般为纳秒（ns）数量级。

注： $1s(\text{秒}) = 10^3ms(\text{毫秒}) = 10^6\mu s(\text{微秒})$
 $= 10^9ns(\text{纳秒})$

〈3〉脉冲后沿 t_f ：脉冲电压从 $0.9U_m$ 下降到 $0.1U_m$ 所需要的时间，也称脉冲下降时间。 t_f 一般为ns数量级。

〈4〉脉冲宽度 t_w ：由脉冲前沿的 $0.5U_m$ 到脉冲后沿 $0.5U_m$ 的时间，也称脉的持续时间。一般 t_w 在几十纳秒~几毫秒之间。

〈5〉脉冲间隔 t_g ：表示上一个脉冲后沿的 $0.5U_m$ 到下一个脉冲前沿 $0.5U_m$ 之间的时间，也称脉冲的休止期。

〈6〉脉冲重复周期 T ：表示两个同向脉冲信号重复出现一次所需要的时间，简称脉冲周期。

$$T = t_w + t_g$$

〈7〉空度系数 Q ：脉冲周期 T 与脉冲宽度 t_w 之比，即 $Q = T/t_w$ ，当矩形脉冲的 $Q = 2$ 时，则称为方波。

第一章 RC 电路

脉冲电路一般有两个组成部分：一个是开关部分；另一个是惰性电路部分。在分立元件脉冲电路中，通常利用电容和电感的惰性来形成电路的过渡过程。晶体管通常作为开关元件，利用开关的通断来改变电路的工作状态。由此可知，深刻了解惰性电路和晶体管的开关特性，对于掌握脉冲电路是十分重要的。它是学好脉冲电路的基础和关键。常用惰性电路有RC电路、RL电路。本章重点介绍RC电路。

§ 1-1 简单的RC串联电路

一、RC电路的过渡过程

1. 电容器充电过程

设电容器在充电前两端电压 $u_c = 0$ ，当接上电源时，如图1-1所示，开关K由“2”接到“1”，则RC电路接上电源电压 E 。由于电容器的惰性，开始的瞬间 u_c 仍为0，而电路中的电流：

$$i_c = \frac{E - u_c}{R}$$

因 $u_c = 0$ ，则 $i_c = E/R$ ，所以开始时 i_c 最大。随着时间的延续， u_c 逐渐上升， i_c 逐渐下降。当 $u_c = E$ 时， $i_c = 0$ ，充电过程结束。电路进入稳定状态。 u_c 及 i_c 的变化规律，在电工课程中已讨论过，现将结论直接写出。电容器两端电压：

$$u_c = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (1-1)$$

充电电流：
$$i_c = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-2)$$

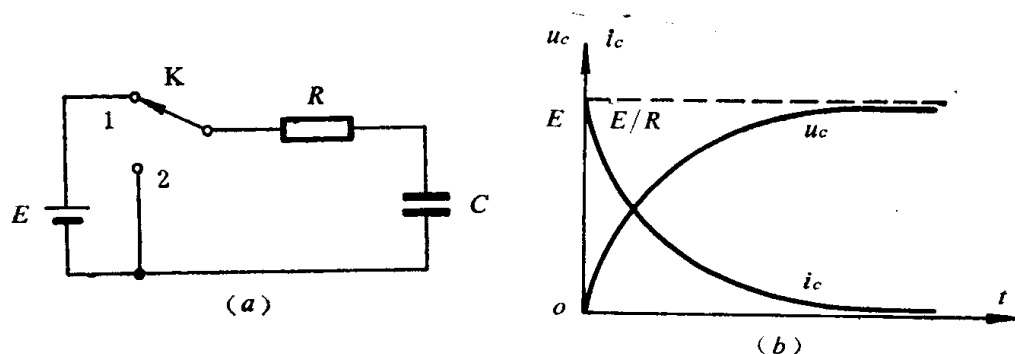


图1-1 RC串联电路及充电时 u_c 、 i_c 变化曲线

由公式(1-1)，(1-2)可见 u_c 、 i_c 是按指数规律变化的，其曲线如图1-1(b)所示。

表1-1给出了指数函数的一些常用数值。由表可见，经过(3~5)RC时间后，电路基本进入稳态。理论上在 $t = \infty$ 时才完成这一过渡过程。

表1-1 指数函数表

t/RC	0	0.5	1	2	2.3	3	4	5
$e^{-\frac{t}{RC}}$	1	0.607	0.368	0.135	0.100	0.050	0.018	0.007
$1 - e^{-\frac{t}{RC}}$	0	0.393	0.632	0.865	0.900	0.950	0.982	0.993

2. 电容器放电过程

当电容器充电结束，将图1-1的开关K从“1”突然接到“2”，此时电容器通过电阻R放电，放电电流*i_c*及电容上电压*u_c*逐渐下降，直至衰减到零为止。*u_c*、*i_c*的变化可用下式表示。

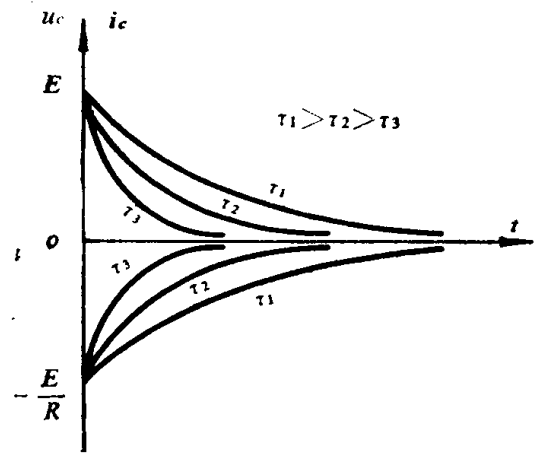


图1-2 不同RC值的放电曲线

$$u_c = E e^{-\frac{t}{RC}} \tag{1-3}$$

$$i_c = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \tag{1-4}$$

式 (1-4) 中负号表示放电电流方向与充电电流方向相反。放电时*u_c*、*i_c*曲线如图 1-2 所示。图中还表示了不同*RC*值时曲线变化情况，*RC*愈大，*u_c*、*i_c* 的变化速度愈慢，即它们达到稳态值所需时间愈长，反之亦然。

二、时间常数

从上面讨论可知，*RC*电路充放电时间的长短仅决定于*R*、*C* 的乘积，该乘积具有时间量纲称为时间常数，通常用式 $\tau = RC$ 表示。如果*R*的单位用欧姆 (Ω)，*C*的单位用法拉(F)，则：

$$\begin{aligned} [R] \times [C] &= [\text{欧}] \times [\text{法}] = \frac{[\text{伏}]}{[\text{安}]} \times \frac{[\text{库}]}{[\text{伏}]} = \frac{[\text{伏}]}{[\text{安}]} \\ &\times \frac{[\text{安}][\text{秒}]}{[\text{伏}]} = [\text{秒}] \end{aligned}$$

可见τ的单位是秒。

若将式 (1-1) 对*t*求导得：

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{E}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{E}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

在*t* = 0 时

$$\tau = \frac{E}{\left. \frac{du_c}{dt} \right|_{t=0}} \tag{1-5}$$

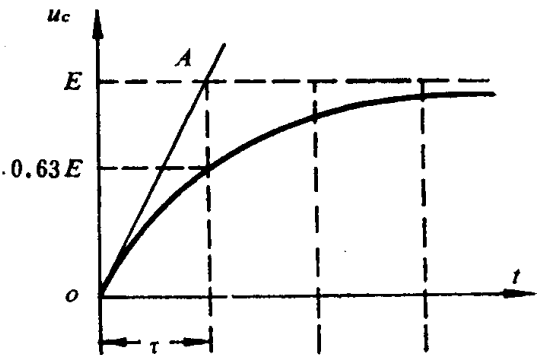


图1-3 时间常数几何表示法

式(1-5)中 E 代表电容器充电的稳态值, $\left[\frac{du_c}{dt}\right]_{t=0}$ 代表 u_c 起始充电速度。因此电路的时间常数 τ 在数值上等于以 u_c 为零时的电压变化速度, 匀速变化到 u_c 为稳态值所需的时间。在几何图形上, 相当于从起点 O 作一条切线, 它与稳态值的交点为 A , 如图1-3所示, OA 之间所对应的时间就是时间常数 τ 。

三、简单RC电路的分析方法

1. 开关定理

电容器充放电时, 其两端电压不能突变, 即在开关动作后的一瞬间, 将保持开关动作前所具有的数值。

设开关在 $t=0$ 时动作, 用 $t=0^-$ 表示开关动作前的一瞬间, 此时电容两端电压用 $u_c(0^-)$ 表示; $t=0^+$ 表示开关动作后的一瞬间, 此时电容两端电压用 $u_c(0^+)$ 表示。开关定理的数学表示式为:

$$u_c(0^-) = u_c(0^+) \quad (1-6)$$

2. 电容器充放电的一般解析式

在公式(1-1)和(1-2)中, 均设初始电压 $u_c(0^+) = 0$, 如果 $u_c(0^+) \neq 0$ 则式(1-1)应表示为:

$$u_c = [u_c(\infty) - u_c(0^+)](1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + u_c(0^+)$$

$u_c(\infty)$ 表示对应于 $t=\infty$ 的值, 即稳态值, $u_c(0^+)$ 亦可用 $u_c(0)$ 表示。上式经整理后为:

$$u_c = [u_c(0) - u_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} + u_c(\infty) \quad (1-7)$$

式(1-7), 更一般的形式为:

$$f(t) = [f(0) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} + f(\infty) \quad (1-8)$$

式中 $f(t)$ 可表示充、放电电压或电流的瞬时值。

3. 简单RC电路的解法

对于简单RC电路, 只要确定 $f(0)$ 、 $f(\infty)$ 和 τ 三个基本参量, 然后代入式(1-8)便可得出电路中电压或电流的变化规律, 这种方法称为“三要素”法。“三要素”法是分析RC电路的基本方法, 必须熟练掌握。现举例如下:

〔例一〕电路如图1-4, 设 $t=0^-$ 时 $u_c(0^-) = 0$ 。若将开关K由“1”突然置于“2”, 试画出 u_c 曲线。

解: 应用“三要素”法先求出三个基本参量。

已知 $u_c(0^-) = 0$, 根据 $u_c(0^+) = u_c(0^-)$ 的关系得: $u_c(0^+) = 0$

当 $t=\infty$ 时充电结束, 电容C相当于开路, 电容两端电压等于电阻 R_2 的两端电压, 于是

$$u_c(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = \frac{10}{20} \times 10 = 5(\text{V})$$

τ 的求法: 电路有两个电阻, 其等效电阻为: $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 则

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \times C = \frac{10 \times 10}{20} \times 100 \times 10^{-12} \\ &= 0.5 \times 10^{-9}(\text{s}) = 0.5\text{ns}\end{aligned}$$

将 $u_c(0)$ 、 $u_c(\infty)$ 、 τ 代入式(1-7)得出:

$$u_c(t) = 5(1 - e^{-\frac{t}{0.5}}) = 5(1 - e^{-2t})$$

将 $t = 0.5(\tau)$ 、 $1(2\tau)$ 、 $1.5(3\tau)$ 、 $\dots$ 代入上式可求出对应的 u_c 值分别为: 3.16、4.325、4.75 $\dots$, 由此可描出 u_c 曲线。

式(1-7)不仅可求任意时刻的电压值, 还可用来求从初始值到某指定电压所需时间 T_k , 现将式(1-7)改为如下的形式。

$$T_k = \tau \ln \frac{u_c(\infty) - u_c(0)}{u_c(\infty) - u_c(t)} \quad (1-9)$$

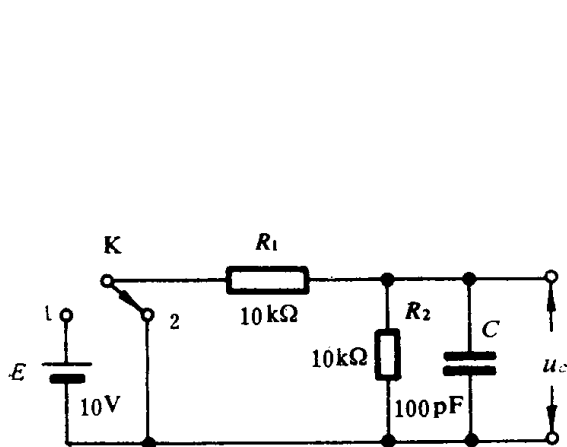


图1-4 [例一] 电路图

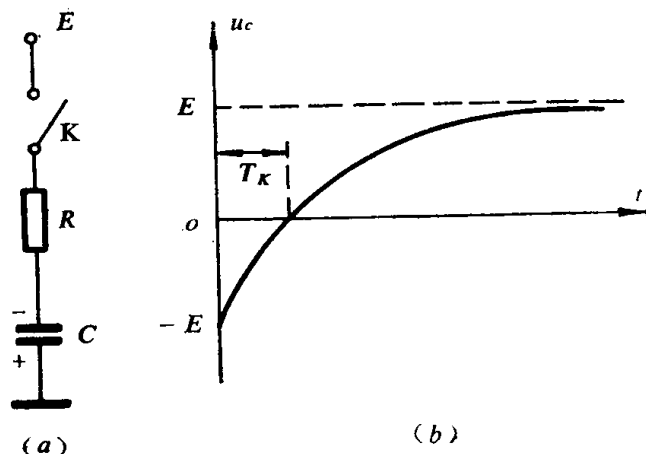


图1-5 [例二] 电路及 u_c 曲线

〔例二〕 某 RC 电路如图1-5(a)所示, 开关闭合前电容两端电压 $u_c(0^-) = -E$, 开关闭合后, RC 电路接通电源 $+E$ 。试画出电容电压 u_c 的曲线, 并求出从开关闭合到电压 $u_c = 0$ 所需的时间 T_k 。

解: 已知 $u_c(0^+) = u_c(0^-) = -E$, 开关闭合后 $u_c(\infty) = +E$,

电路时间常数 $\tau = RC$ 代入式(1-7) 则 $u_c(t) = E - 2Ee^{-\frac{t}{\tau}}$

其曲线如图1-5(b)所示。

设开关闭合后, 当 $u_c = 0$ 时的时间为 T_k , 根据式(1-9)得:

$$T_k = \tau \ln \frac{u_c(\infty) - u_c(0)}{u_c(\infty) - u_c(T_k)}$$