脉冲与数字电路

GAOZHIGAOZHUANJIAOCAI

（修订版）高职高专教材

王芳建 编

天津科学技术出版社

脉冲与
GAOZHIGAOZHUANJIAOCAI
数字电路

GAOZHI
GAOZHUAN
JIAOCAI

高职高专教材

脉冲与数字电路

（修　订　版）

王芳建　编

TJKJ 天津科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

脉冲与数字电路/王芳建编 .—修订版 .-天津:天津科学技术出版社,2005

高职高专学校教材

ISBN 7-5308-3530-0

Ⅰ.脉...　Ⅱ.王...　Ⅲ.①脉冲电路-高职高专-教材②数字电路-高职高专-教材　Ⅳ.①TN78②TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 073254 号

责任编辑:王定一

版式设计:雒桂芬

责任印制:张军利

天津科学技术出版社出版

出版人:胡振泰

天津市西康路 35 号　邮编 300051　电话(022)23332393

网址:www.tjkjcbs.com.cn

新华书店经销

天津市永源印刷有限公司印刷

开本 787×1092　1/16　印张 15.75　字数 373 000

2005 年 1 月第 3 版第 13 次印刷

定价:20.00 元

修 编 说 明

从本书第一版出版到现在，已有10余年。在这10余年里，数字电子技术取得到了长足的进步，集成电路技术迅速提高，大中规模集成电路得到了广泛的应用，同时，出现了许多新型器件。相比之下，本书第一版内容显得较为陈旧，不能适应当前数字电子技术的需要。为此，很有必要对本书进行修订。

与第一版相比，这次修订主要作了以下调整。

1. 在"门电路"一章，增加了增强型MOS管结构及CMOS电路部分内容，以弥补原书中CMOS电路内容偏少的不足。同时，考虑到数字电路的许多新型器件都是由MOS管改进而成的，增加MOS管结构介绍，不仅完善了CMOS电路内容，也为后面介绍这些器件作了必要的铺垫。

2. 删除"门电路"一章中TTL电路的T系列、CMOS系列的C000系列等陈旧内容。详细介绍了目前广泛采用的74系列TTL、74HC系列和CC4000系列CMOS等系列电路的主要技术参数及特点。

3. 在"半导体存储器"一节中增加了动态读写存储器DRAM和E^2PROM、FLASH ROM等电可擦只读存储器等内容，并介绍了在I^2C总线结构中的E^2PROM系列产品。希望读者通过学习这部分内容，能够了解半导体存储器的最新发展动态和电可擦只读存储器的基本工作原理。

4. 在"时序逻辑电路"一章中增加"可编程逻辑器件"一节。可编程逻辑器件是近期发展十分迅速的一种数字电路。考虑到这部分内容比较深奥，而且许多可编程逻辑器件都是大规模集成电路，讲解起来比较困难，所以，除了对"现场可编程逻辑阵列FPLA"作电路的逻辑分析外，其他可编程逻辑器件仅做文字叙述。

5. 介绍一些数字逻辑电路在实际电路中的应用。例如，D/A转换器作为"软件调节电位器"、移位寄存器作为单片机的输出端"扩充口"等内容。希望通过这些应用介绍，使读者了解数字电路的实际工作情况。

6. 考虑到逻辑符号国标曾作过变动，而且与国际上流行的不同，为方便读者，在本书附录中给出新旧国标及国际流行逻辑符号对照表。

编写出一本让读者满意、能反映当前数字电子技术水平的书，是编者对修订本书的期望。限于水平有限，加上时间仓促，修改过的《脉冲与数字电路》难免会存在漏错。不当之处，敬请读者批评指正。

王芳建

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全部高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986～1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断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组审定并推荐出版，责任编委为赵震初。

本教材由贵州无线电工业学校王芳建编写，福建机电学校郑慰萱高级讲师担任主审。

本教材参考学时数为100学时。全书共分九章，其中前七章为数字电路部分，后两章为脉冲电路部分。数字电路部分，介绍了常用数制及相互间的转换、晶体管开关特性、门电路、逻辑代数基础、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路和数模、模数转换等内容。着重讨论数字电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及各种逻辑部件的功能、外部特性、参数和应用。脉冲电路部分，介绍了脉冲电路的特点、限幅器、箝位器、锯齿波电压发生器、施密特触发器、单稳态触发器、多谐振荡器、集成定时器及其应用等内容，着重讨论脉冲电路的基本工作原理，了解脉冲波形的产生、变换过程。根据集成电路已经渗入国民经济各个应用领域、成为电子工业基石这一现状，本教材主要讨论集成电路，并提供了一些常用的集成电路型号及典型参数，以便于读者查阅。

在编写过程中，得到了贵州无线电工业学校领导及三专科同事们的热情帮助，刘兴国同志为本书绘制了插图。本书主审郑慰萱高级讲师对教材原稿进行了认真细致的审阅，参加审阅工作的吴承甲副教授、董传民讲师也对本书提出了许多宝贵意见，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

目　　录

绪　论

在电子电路中，按照所处理的信号形式，通常将电路分成两大类：模拟电路和数字电路。模拟电路处理的是模拟信号，数字电路处理的是数字信号。

模拟信号通常指的是模拟真实世界物理量的电压或电流。例如，模拟语音高低或图像各点亮暗变化的电压或电流，就是模拟信号。模拟信号的特点是电压或电流在时间上、数值上都是连续、平滑变化的，并可以在一定的范围内取任意值。

数字信号指的是在时间上、数值上都是离散的、不连续的电压或电流。一方面，它们的变化在时间上是不连续的，总是发生在一系列离散的瞬间；另一方面，它们的数值大小和增减变化，也是离散的。

在数字电路中，电压或电流通常只有两种状态：高电平或低电平，有电流或无电流。这样的两种状态可以用逻辑 1 和逻辑 0 表示。因此，实际应用的数字信号常以这样的 1、0 符号序列表示。数字电路输入、输出的 1、0 符号序列之间的逻辑关系就是数字电路的逻辑功能。因此，可以将数字电路看成是实现各种逻辑关系的电路。

数字电路通常由逻辑门、触发器以及其他逻辑部件组成。数字电路分析的重点是输入、输出之间的逻辑关系，主要的数学工具是逻辑代数。

数字电路与模拟电路相比，具有以下特点：

(1)由于只需要判别输入、输出信号是逻辑 1 还是逻辑 0，而不需要表明逻辑 1、逻辑 0 所表示的精确电压(或电流)值，因而具有很高的稳定性和可靠性。

(2)可用增加数字信号 0、1 序列的位数来提高所处理信号的精度。因此，处理信号的精度可以做得很高。

(3)由于数字集成电路主要采用 CMOS 工艺，其功耗可以做得很低。所以，数字集成电路的集成度远高于模拟集成电路。

(4)能对输入的数字信号进行各种算术和逻辑运算。所谓逻辑运算，就是按照人们预先设计好的程序，进行逻辑推理和逻辑判断。即数字电路不仅具有算术运算的能力，而且还具有逻辑推理和逻辑判断的能力，即人们常说的“智能”。

(5)利用存储器，可以很方便地将要处理或处理后的数字信息长期存储起来。

(6)便于与数字计算机连接，利用数字计算机进行数据处理，实行实时控制。

随着数字集成电路工艺的逐步完善和计算机技术的日益普及，数字电路的应用范围越来越广，它已经普遍用于通信、办公设备、自动控制、仪器仪表、家用电器以及其他许多领域。整个电子行业已经明显地呈现出“数字化”的趋势。数字电路在整个电子电路中所占比重越来越大。

脉冲电路与数字电路不同，脉冲通常指的是在短暂时间间隔内作用于电路的电压或电流，而这个时间间隔可以与电路的过渡过程所需要的时间相比拟。就广义来说，凡是不按正弦规律变化的电压或电流都可称为脉冲信号。

脉冲信号是一种模拟信号，处理脉冲信号的电路就是脉冲电路。在脉冲电路中，分析的重

点是脉冲波形的产生与变换，常用的数学工具是微分方程。

脉冲电路通常由开关电路和 R、L、C 组成的线性网络构成。在脉冲电路里，必须认真分析电路的过渡过程（例如，电容的充、放电过程）、输出和输入信号的形状、幅度及周期等。显然，脉冲电路与研究信号放大的模拟线性电路不同，也与研究输入输出之间逻辑关系的数字电路不同。

由于具有各种逻辑功能、性能优良、价格低廉的集成电路的出现，使得电子行业的技术人员用不着自己去设计数字电路，而只需要熟悉各种类型的集成电路的逻辑功能及外特性，利用逻辑分析方法选择适当的集成电路，将它们安装起来。因此，在数字电路部分，除了讨论逻辑分析方法外，主要的内容是介绍各种逻辑部件（如门电路、触发器、计数器、寄存器等）的逻辑功能及外特性。本教材以中小规模为主，同时也介绍大规模数字集成电路。

在脉冲电路部分，我们只讨论电路的工作原理，了解脉冲波形的产生与变换过程，而不对电路作过多的分析。由于脉冲电路也在朝着集成化的方向发展，因此，只要某一脉冲电路有相应的集成电路，我们都将讨论它的功能、参数及应用。同时，我们将介绍集成定时器及其在脉冲电路中的应用。

第一章　数字电路基础

在数字电路中常用二进制数，在日常生活中常用十进制数。因此，在学习数字电路以前，首先介绍一些常用数制及它们之间的相互转换，讨论二进制数的算术运算，然后分析晶体管的开关特性和数字电路中广泛应用的反相器。

第一节　几种常用数制及转换

一、几种常用数制

1. 十进制

十进制数是人们十分熟悉的计数体制。它用0~9十个数字符号，按照一定的规律排列起来，表示数值的大小。例如，2 563这个数可以写成

$2563 = 2\times10^3 + 5\times10^2 + 6\times10^1 + 3\times10^0$ 由该表达式，可以看出十进制数具有以下特点：

(1)每一个数位只能出现十个数字符号中的某一个。通常把这些符号的数目称为基数。十进制数的基数为10。

(2)从右向左是逢十进位的。

(3)同一数字符号在不同的数位代表的数值是不同的。

上例中四位十进制数的右边第一位为个位，记作10^0；第二位为十位，记作10^1；第三位为百位，第四位为千位，分别记作10^2和10^3。通常把10^0、10^1、10^2、10^3称为对应数位的权。每个数位对应的数字符号称为系数。某数位的数值等于该位的系数与权的乘积，即

$$\begin{aligned}[N]_{10} &= a_{n-1}\times10^{n-1} + a_{n-2}\times10^{n-2} + \cdots + a_1\times10^1 + a_0\times10^0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} a_i\times10^i \qquad (1\text{-}1)\end{aligned}$$

式中 a_i 为第 i 位的系数，它可以取0~9十个数字符号中的任意一个；10^i 为第 i 位数的权；$[N]_{10}$中下标10表示 N 是十进制数。

2. 二进制

二进制数中只有0和1两个数字符号，即它的基数为2。它是逢二进位，各位的权为2的幂。

一般说来，n 位二进制正整数$[N]_2$的表达式可以写成

$$\begin{aligned}[N]_2 &= a_{n-1}\times2^{n-1} + a_{n-2}\times2^{n-2} + \cdots + a_1\times2^1 + a_0\times2^0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} a_i\times2^i \qquad (1\text{-}2)\end{aligned}$$

式中 a_i 为第 i 位的系数，它只能取0或1中任意一个；2^i 为第 i 位数的权。

【例1-1】 有一个二进制数$[N]_2 = 101000$，试求出对应的十进制数。

解：由式(1-2)有

$$\begin{aligned}[101000]_2 &= [1\times2^5 + 0\times2^4 + 1\times2^3 + 0\times2^2 + 0\times2^1 + 0\times2^0]_{10} \\ &= [1\times32 + 1\times8]_{10} = [40]_{10}\end{aligned}$$

即 $$[101000]_2=[40]_{10}$$

二进制数只有两个数字符号，不仅进行算术运算简单，而且在电路上实现起来比较容易。所以数字系统广泛采用二进制。同时由上述例题也可看出，二位十进制数$[40]_{10}$，用了六位二进制数$[101000]_2$表示，如果数值再大些，位数就更多。这既不便于书写，也容易出错，因此，在数字系统中，也经常使用八进制和十六进制。

3. 八进制和十六进制

(1)八进制　在八进制中，有 0、1、2、3、4、5、6、7 八个数字符号，基数为 8。它是逢八进位，各数位的权是 8 的幂。n 位八进制正整数的表达式可以写成

$$[N]_8=a_{n-1}\times 8^{n-1}+\cdots+a_0\times 8^0$$
$$=\sum_{i=0}^{n-1}a_i\times 8^i \tag{1-3}$$

【例 1-2】 求八进制数$[N]_8=[221]_8$所对应的十进制数。

解：由式(1-3)有

$$[221]_8=[2\times 8^2+2\times 8^1+1\times 8^0]_{10}$$
$$=[2\times 64+2\times 8+1\times 1]_{10}$$
$$=[145]_{10}$$

(2)十六进制　十六进制有 0～9、A、B、C、D、E、F 十六个数字符号。它是逢十六进位，各数位的权是 16 的幂。n 位十六进制正整数的一般表达式为

$$[N]_{16}=\sum_{i=0}^{n-1}a_i\times 16^i \tag{1-4}$$

【例 1-3】 求十六进制数$[3BF]_{16}$所对应的十进制数。

解：由式(1-4)有

$$[3BF]_{16}=[3\times 16^2+11\times 16^1+15\times 16^0]_{10}=[959]_{10}$$

为了表示以上各种进制数之间的数值关系，列出表 1-1 所示的常用计数进制。

表 1-1　　常用计数进制表

十进制	二进制	八进制	十六进制
0	0	0	0
1	1	1	1
2	10	2	2
3	11	3	3
4	100	4	4
5	101	5	5
6	110	6	6
7	111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10

二、不同数制间的转换

1. 二进制及其他进制数转换成十进制数

二进制数、八进制数和十六进制数转换为十进制数的方法和例题，在介绍这些数制时已经讨论过了，这里不再赘述。

2. 十进制数转换成二进制数

要将十进制数转换成二进制数，用下列等式：

$$[N]_{10} = [a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \cdots + a_1 2^1 + a_0 2^0]_2$$
$$= [2(a_{n-1}2^{n-2} + a_{n-2}2^{n-3} + \cdots + a_1 2^0) + a_0]_2.$$

将等式两边同除以 2，两边的商和余数必然相等。所得的商为$[a_{n-1}2^{n-2} + a_{n-2}2^{n-3} + \cdots + a_1]_2$，所得的余数为 a_0，a_0 的取值只能是 1 或 0。同理，可将所得的商写成

$$\frac{[N]_{10} - a_0}{2} = [2(a_{n-1}2^{n-3} + a_{n-2}2^{n-4} + \cdots + a_2) + a_1]_2$$

上式两边也同除以 2，所得的余数即为 a_1。依次类推，不断地用 2 去除所得十进制数的商，直到商为 0 时止，每次所得的余数从后向前排列就是转换后的二进制数。

【例 1-4】 将$[204]_{10}$转换成二进制数。

解：

2	204	余 0，即 $a_0 = 0$
2	102	余 0，即 $a_1 = 0$
2	51	余 1，即 $a_2 = 1$
2	25	余 1，即 $a_3 = 1$
2	12	余 0，即 $a_4 = 0$
2	6	余 0，即 $a_5 = 0$
2	3	余 1，即 $a_6 = 1$
2	1	余 1，即 $a_7 = 1$
	0	

即 $$[204]_{10} = [11001100]_2。$$

值得注意的是，最先除得的余数是最低位，而最后除得的余数为最高位。

3. 二进制与八进制、十六进制的相互转换

因为 8 和 16 都是 2 的整次幂，所以二进制正整数与八进制、十六进制正整数之间的相互转换是比较容易的。

(1)二进制与八进制之间的相互转换　因为三位二进制数正好表示 0～7 八个数字，所以二进制正整数要转换成八进制数时，可以从最低位开始，每三位一组，一组一组地转换成对应的八进制数。若最后不足三位，也看成一组，然后按原来的顺序排列就得到转换后的八进制数。

例如，将$[11110100010]_2$ 转换为八进制数时，有

$$\begin{array}{cccc} 11 & 110 & 100 & 010 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 6 & 4 & 2 \end{array}$$

即 $$[11110100010]_2=[3642]_8$$

反之，如果要将八进制正整数转换成二进制数，只需将每位八进制数写成对应的三位二进制数，再按原来的顺序排列就行了。

例如，将$[473]_8$转换为二进制数，可用三组二进制数表示

$$\begin{array}{ccc} 4 & 7 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 100 & 111 & 011 \end{array}$$

即 $$[473]_8=[100111011]_2$$

(2)二进制与十六进制之间的相互转换　因为四位二进制正整数正好可以表示 0 ~ F16 个数字，所以转换时可从最低位开始，每四位二进制数一组，对应进行转换。具体方法与前面介绍的八进制的转换相同。

例如，将$[1111010011000]_2$转换成十六进制数时

$$\begin{array}{cccc} 1 & 1110 & 1001 & 1000 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 1 & \mathrm{E} & 9 & 8 \end{array}$$

即 $$[1111010011000]_2=[1E98]_{16}$$

反之，若将$[3FDA]_{16}$转换为二进制数，有

$$\begin{array}{cccc} 3 & \mathrm{F} & \mathrm{D} & \mathrm{A} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 11 & 1111 & 1101 & 1010 \end{array}$$

即 $$[\mathrm{3FDA}]_{16}=[11111111011010]_2。$$

如果要将十进制数转换为八进制或十六进制数，可先将十进制数转换为二进制数，然后每三位或每四位一组再转换成对应的八进制或十六进制数。

第二节　二进制数的算术运算

一、二进制加法

二进制加法和十进制加法一样，从最低位开始对应位相加。因为二进制数的基数为 2，在本位和等于 2 时向高位进 1。其规则为

$$0+0=0,\qquad 0+1=1,$$
$$1+1=10$$

例如，两个二进制数 1101 和 111 相加，其计算过程为

$$\begin{array}{lr} \text{被加数} & 1\ 1\ 0\ 1 \\ \text{加　数} & 1\ 1\ 1 \\ \text{加位数）} & 1\ 1\ 1\ \ \ \\ \hline \text{和} & 1\ 0\ 1\ 0\ 0 \end{array}$$

其计算方法与十进制数加法方法基本相同，不同之处在于二进制加法是逢二进位。

二、二进制减法

二进制减法可以按十进制减法的方法进行，但在数字系统中，总是把减法转换成加法，从而使电路简单。在二进制数相减时，是通过被减数加减数的补数，使减法转换成加法的。

下面我们通过一个实际例子，看怎样才能将减法运算转换成加法运算。

假如你在早晨六点发现手表停在十一点上。要把手表拨到六点，有两种拨法：一种是往回拨五个小时，即 $11-5=6$；另一种是往前拨七个小时，虽然 $11+7=18$，但是表盘刻度的最大数是 12，超过 12 后又从 0 开始计数，所以表针的位置为 $18-12=6$，同样拨回到了六点。这就说明，在所表示的数的最大值为 12 的条件下，$11-5$ 和 $11+7$ 所得结果是一样的。即减法运算转换成了加法运算。

由上例可以看到：$5+7=12$，恰好等于表盘刻度的最大值。我们把 12 称为模，并说 7 是 5 的以 12 为模的补数。因此，在一定模数的条件下，减去某数等于加上该数的补数。而求某数的补数只要从模数中减去该数便可得到。例如，9 以 12 为模的补数是

$$[9]_{补}=12-9=3$$

同样，利用求补的方法可以将二进制减法转换为加法。

为了求出二进制数的补数，首先要确定它的模。一般说来，n 位二进制数的模就是 2^n。如四位二进制数的模为 $2^4=[10000]_2$。对四位二进制数来说，最高位 1 已经溢出，在四位二进制数中不会出现，因此可以认为 2^4 和 0 是一样的。在知道模数以后，就可以利用前面介绍的方法求二进制数的补数，从而将减法转换为加法。

【例 1-5】 若 $x=1001$，$y=1100$，试求 $y-x$。

解：首先求 x 的补数。因为 x、y 都是四位二进制数，故取模为 $2^4=10000$，则

$$[x]_{补}=模-x=10000-1001=111$$

用直接相减和加其补数的两种方法求 $y-x$：

$$\begin{array}{r} 1100 \\ -)\ 1001 \\ \hline 11 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 1100 \\ +)\ \ 111 \\ \hline \boxed{1}\ 0011 \end{array}$$

溢出

两种计算方法结果一样，即二进制数相减，可以用被减数与减数补数相加实现。

因为在求补数时，仍然要做减法，所以还没有完全解决用加法代替减法的问题。

为了能用加法实现求二进制数的补数，首先要求出二进制数的反：每位求反，即 1 变 0，0 变 1。例如，若 $x=1001$，则其反为 $[x]_{反}=0110$。由〔例 1-5〕可知，$[x]_{补}=0111$，即补数与该数反的关系为

$$[x]_{补}=[x]_{反}+1 \tag{1-5}$$

因此求二进制数的补数顺序为：先求出该数的反，然后在最低位加 1。简称为求反加 1。

【例 1-6】 若 $x=110011$，$y=011010$，求 $x-y$。

解：

$$
\begin{aligned}
x-y &= x+[y]_{补} = x+[y]_{反}+1 \\
&= 110011+100101+1 \\
&= \boxed{1}\,011001 = 011001
\end{aligned}
$$

溢出

三、二进制乘法

在数字系统中，都是将乘法作为连续的加法来执行。其中，自身相加的数为被乘数，相加的次数为乘数。例如

$$1010\times11=1010+1010+1010=11110$$

读者可以自己证明，如果用一般的乘法规则，所得结果与上式完全相同。

四、二进制除法

除法可以归结为连续的减法。即从被除数中不断地减去除数，所减的次数是相除的商，而剩下的值则是相除的余数。

因为减法可以转换为加法，所以除法也能转换成加法。这样，二进制数的加、减、乘、除四则运算都可以转换为加法运算，实现了数字系统运算形式的单一化，使得实现这些运算的电路非常简单。

第三节　晶体管的开关特性

在脉冲数字电路中，二极管、三极管和 MOS 管通常都工作在开关状态。本节将讨论这些器件的开关特性。考虑到近期发展起来的许多新型器件都是由 MOS 管改进而成的，所以，在本节专门介绍了增强型 MOS 管的结构和工作原理。为在后续章节中介绍这些器件作必要的准备。

一、二极管的开关特性

在电路中，理想的开关应具有以下特点：开关闭合时，不管流过开关的电流多大，它两端的电压总是 0；开关断开时，无论它两端所加电压多高，流过开关的电流均为 0；另外，开关状态的转换能在瞬间完成。当然，这样的开关实际上并不存在。

下面，我们从二极管的伏安特性出发，分析二极管的开关情况。由于常用硅管，所以以硅二极管为例进行讨论。

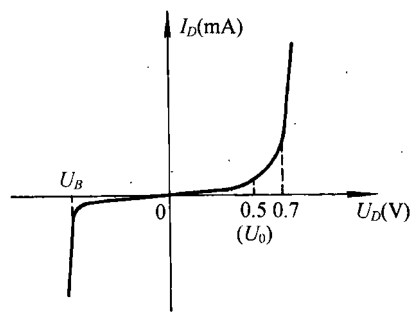

图 1-1　二极管伏安特性

1. 导通条件及导通时的特点

由图 1-1 可知，当二极管外加电压 U_D 大于 U_0(死区电压，约 0.5V)时，二极管开始导通。此后电流 I_D 随 U_D 增加而急剧增大，在 $U_D=0.7$V 时，特性曲线很陡，即 I_D 在一定范围内变化，而 U_D 基本保持在 0.7V 不变。因此，在分析电路时，常把 $U_D\geqslant0.7$V 看成硅二极管的导通条件。一旦二极管导通以后，就认为 U_D 保持在 0.7V 不变，如同一个具有 0.7V 压降的闭合了

的开关。其近似直流等效电路见图 1-2。

2. 截止条件及截止时的特点

由二极管伏安特性可知，当 $U_D < U_0$ 后，I_D 很小，且在 U_D 为 $U_B \sim U_0$ 范围内，I_D 都很小。因此，在电路分析中，常把 $U_D \leqslant 0.5V(U_0)$ 作为硅二极管的截止条件。而且一旦截止以后，就近似认为 $I_D \approx 0$，如同开关断开。其近似直流等效电路见图 1-3。

3. 反向恢复时间

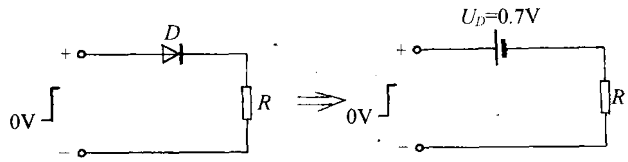

图 1-2　正向时近似直流等效电路

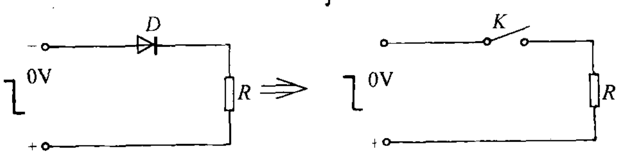

图 1-3　反向时近似直流等效电路

在图 1-4(a)所示的电路中，输入电压波形如图 1-4(b)所示。如果二极管 D 的开关转换能在瞬间完成，则电流 i 就应该具有图 1-4(c)所示的波形，正向电流 $I = \dfrac{U_1 - 0.7}{R_L}$，反向电流 $I_R \approx 0$。但实际电流波形却如图 1-4(d)所示，正向电流 $I = \dfrac{U_1 - 0.7}{R_L}$，$u_i$ 负跳变瞬间，反向电流 $I_R \approx -\dfrac{U_2}{R_2}$，说明二极管仍然导通，只有经过一段反向恢复时间 t_{re} 后，D 才进入截止状态，反向电流才趋于 I_R。t_{re} 定义为从 u_i 负跳变开始，到二极管 D 的反向电流下降到最大反向电流的 $\dfrac{1}{10}$ 时所需要的时间，一般称为二极管的反向恢复时间。

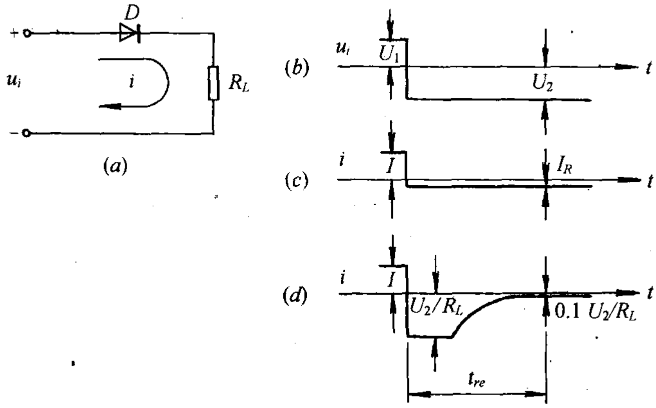

图 1-4　二极管开关过渡过程

(a)电路图　(b)、(c)、(d)波形图

显然，当输入电压的频率很高，以至于它的负半周宽度小于 t_{re} 时，二极管将失去单向导电