第 1 章

数字电路基础知识

本章导读：

数字电路在现代电子技术中有着十分重要的地位。随着数字技术的发展，数字集成电路已广泛应用于工业、农业、军事、通信、医疗以及家用电器等各个技术领域。

本章主要介绍数字电路的概念及特点、数制和码制、逻辑代数的基础知识等，它们是数字电路的基础。

案例导入：

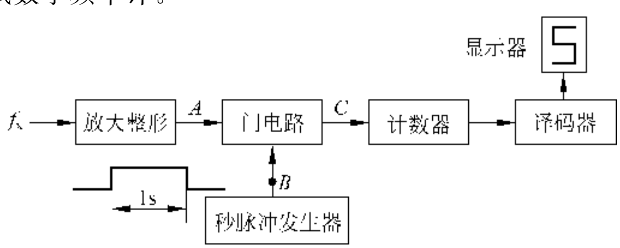
图 1-0 是数字频率计的原理框图及波形图，它包括信号的整形、脉冲的产生、门电路以及计数、译码、显示等。数字频率计的内容涵盖了数字电路绝大多数的单元电路。因此，数字频率计是一种典型的数字电路。

学完本章后，你将能够完成以下任务：

① 由图 1-0 数字频率计的原理框图画出数字频率计的原理电路图。

② 为数字频率计选用合适的芯片。

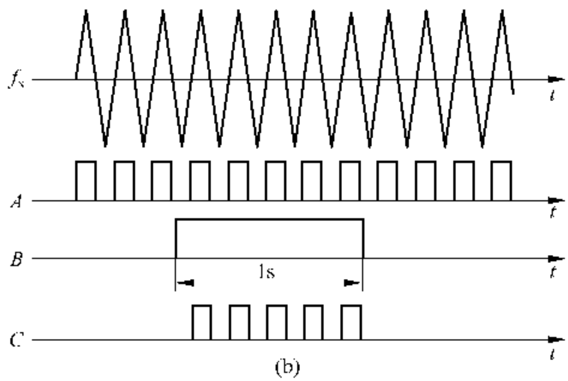
③ 组装并调试数字频率计。



(a)

图 1-0　数字频率计的原理框图及波形图

(a) 数字频率计的原理框图　(b) 各点信号的波形图



(b)

图 1-0 （续）

1.1 数字电路概述

1.1.1 数字信号和数字电路

电子电路所传递和处理的信号有两种类型：模拟信号和数字信号。

模拟信号是指在时间和数值上都连续变化的电信号。例如，正弦函数、指数函数等。图 1-1 表示几种常见的模拟信号波形。我们把传递、处理模拟信号的电路称为模拟电路。例如，电压放大电路、正弦波振荡电路等。

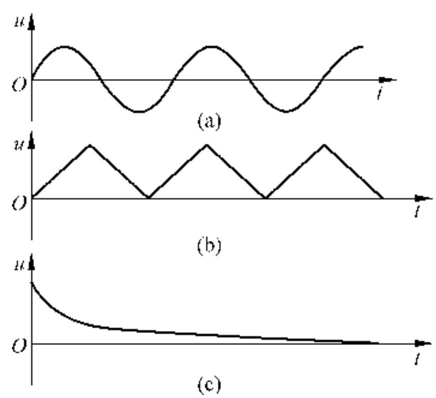


图 1-1 常见的模拟信号波形

（a）正弦波 （b）三角波 （c）指数衰减波

数字信号是指在时间和数值上都断续变化的电信号。例如，生产过程中自动记录零件个数的计数信号等。与模拟信号相比，数字信号也有周期性和非周期性之分，图 1-2 分别表示了这两类数字信号。

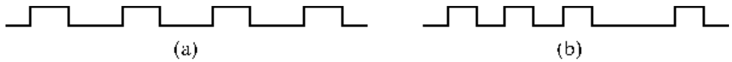


图 1-2　周期性和非周期性数字信号波形
(a) 周期性数字信号波形　(b) 非周期性数字信号波形

用于传递、处理数字信号的电子电路称为数字电路。

1.1.2　数字电路的特点

与模拟电路相比，数字电路主要有如下特点：

① 数字电路研究的是输入信号状态和输出信号状态之间的逻辑关系，以反映电路的逻辑功能。其分析的主要工具是逻辑代数。数字电路又称为逻辑电路。

② 工作可靠性高、抗干扰能力强。数字信号是用 0 和 1 表示的，不易受到噪声干扰，它的抗干扰能力很强。

③ 便于高度集成化。由于数字电路结构简单，又允许电路元件参数有较大的离散性，因此便于集成化。

④ 数字集成电路产品系列多、通用性强、成本低。

⑤ 数字电路不仅能完成算术运算，而且能进行逻辑运算。

数字电路在研究的对象和方法上与模拟电路有很大的不同，表 1-1 将它们作了对比。

表 1-1　模拟电路与数字电路的比较

内　容	模 拟 电 路	数 字 电 路
工作信号	模拟信号	数字信号
管子工作状态	放大	饱和或截止
研究对象	放大性能	逻辑功能
基本单元电路	放大器	逻辑门、触发器
分析工具	图解法、微变等效电路法	真值表、逻辑表达式等

1.1.3　数字电路的分类

1. 按电路结构分

按电路结构分，数字电路可以分为分立元件电路和集成电路两大类。

分立元件电路是将晶体管、电阻、电容等元器件用导线在线路板上连接起来的电路；集成电路则是将上述元器件和导线通过半导体制造工艺制作在一片硅片上而成为一个不可分割的整体电路。数字电路比模拟电路更容易高密度集成。

根据集成的密度不同，数字集成电路的分类如表 1-2 所示。

表 1-2 数字集成电路的分类

集成电路分类	集 成 度	电路规模与范围
小规模集成电路(SSI)	1～10 门/片,或 10～100 个元件/片	逻辑单元电路 包括：逻辑门电路、集成触发器
中规模集成电路(MSI)	10～100 门/片,或 100～1000 个元件/片	逻辑部件 包括：计数器、译码器、编码器、数据选择器、寄存器、算术运算器、比较器、转换电路等
大规模集成电路(LSI)	100～1000 门/片,或 1000～100000 个元件/片	数字逻辑系统 包括：中央控制器、存储器、各种接口电路等
超大规模集成电路(VLSI)	大于 1000 门/片,或 大于 10 万个元件/片	高集成度的数字逻辑系统 例如：各种型号的单片机,即在一片硅片上集成一个完整的微型计算机

2. 按电路所用的器件分

按电路所用的器件分,数字电路可以分为双极型电路和单极型电路。

以双极型晶体管(电子和空穴两种载流子均参与导电)作为基本器件的数字集成电路,称为双极型数字集成电路,如 TTL、ECL 等集成电路；以单极型晶体管(只有一种载流子参与导电：电子或空穴)作为基本器件的数字集成电路,称为单极型数字集成电路,如 NMOS、PMOS、CMOS 等集成电路。

3. 按电路逻辑功能分

按电路逻辑功能分,数字电路可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。

1.1.4 矩形脉冲的主要参数

1. 常见的脉冲波形

数字信号又称脉冲信号。“脉冲”是脉动和短促的意思,是持续时间极短的跃变信号,通常用毫秒(ms)、微秒(μs),甚至纳秒(ns)来计算。

脉冲波形的种类很多,如矩形波、尖峰波、锯齿波、阶梯波等。图 1-3 为两种常见的脉冲波形。

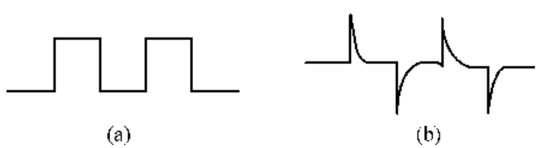


图 1-3 常见的脉冲波形
(a) 矩形波 (b) 尖峰波

2. 脉冲的主要参数

在数字电路中，加工和处理的都是脉冲波形，而应用最多的是矩形脉冲。下面以图 1-4 所示实际矩形脉冲来描述脉冲波形的主要参数。

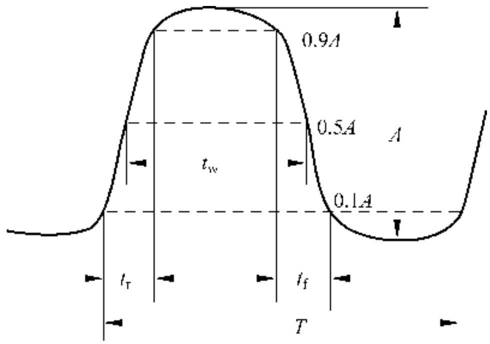


图 1-4　矩形脉冲的主要参数

① 脉冲幅度 A：脉冲的最大变化幅度，也就是脉冲的波底到波顶之间的值。

② 脉冲上升时间 t_r：脉冲从 0.1A 上升到 0.9A 所需的时间。

③ 脉冲下降时间 t_f：脉冲从 0.9A 下降到 0.1A 所需的时间。脉冲上升时间 t_r 和脉冲下降时间 t_f 越短，越接近于理想的矩形脉冲。

④ 脉冲宽度 t_w：脉冲上升沿 0.5A 到下降沿 0.5A 所需的时间。

⑤ 脉冲周期 T：在周期性脉冲中，相邻两个脉冲波形重复出现所需的时间。

⑥ 脉冲频率 f：每秒钟脉冲变化的次数，$f=\dfrac{1}{T}$。

⑦ 占空比 q：脉冲宽度 t_w 与脉冲周期 T 的比值，$q=\dfrac{t_w}{T}$。它是描述脉冲波形疏密的参数。

脉冲信号有正脉冲和负脉冲之分。若脉冲信号跃变后的值比初始值高，称为正脉冲，如图 1-5(a)所示；反之，为负脉冲，如图 1-5(b)所示。

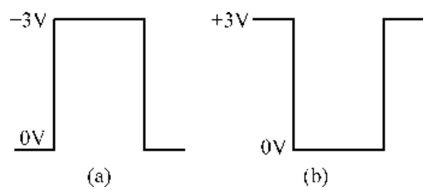


图 1-5　正脉冲和负脉冲
(a) 正脉冲　(b) 负脉冲

1.2　数制和码制

1.2.1　数制

所谓数制就是计数的方法。在实际生产中，人们经常使用位置计数法，即把表示数字的数码从左到右排列起来。常用的有十进制、二进制、八进制、十六进制等。

通常，十进制用$(N)_{10}$或$(N)_D$表示，二进制用$(N)_2$或$(N)_B$表示，八进制用$(N)_8$或$(N)_O$表示，十六进制用$(N)_{16}$或$(N)_H$表示。

1. 十进制

所谓十进制就是以 10 为基数的计数体制。十进制有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个数码，其计数规律是“逢十进一”。

任何一个十进制数都可表示为

$$(N)_{10}=\sum_{i=-\infty}^{\infty}K_i\times 10^i$$

式中，i 为数字中各数码 K 的位置号，为正负整数，小数点前第一位 $i=0$(0 号位)，第二位 $i=1$(1 号位)，依此类推；小数点后第一位 $i=-1$(-1 号位)，第二位 $i=-2$(-2 号位)。式中，10^i 为第 i 位的位权，其中：个位的位权为 10^0，十位的位权为 10^1，百位的位权为 10^2，依此类推。

十进制的位权关系表列于表 1-3。

表 1-3 十进制的位权关系表

位号	$n-1$	$n-2$	…	2	1	0	小数点	-1	-2	…	$-m$
位权	10^{n-1}	10^{n-2}	…	10^2	10^1	10^0	•	10^{-1}	10^{-2}	…	10^{-m}

K_i 为基数“10”的第 i 次幂的系数。系数 K_i 与对应的位权的乘积，称为加权系数。每个十进制数的数值为各位加权系数的和。

【例 1-1】 试用位权来表示十进制数$(555.55)_{10}$。

解：将数码与位权相乘，然后相加，得到数的按权展开式。

$$(555.55)_{10}=5\times10^2+5\times10^1+5\times10^0+5\times10^{-1}+5\times10^{-2}$$

从数字电路的角度来看，采用十进制是不方便的，因而在数字电路中一般不直接采用十进制，而采用二进制。

2. 二进制

二进制是以 2 为基数的计数体制。二进制用 0 和 1 两个数码表示，其计数规律是“逢二进一”，即 $1+1=(10)_2$(读为“壹零”)，注意：这里的“10”与十进制数的“10”是完全不同的，它不代表“十”，右边的“0”表示 0 个 2^0，左边的“1”表示 1 个 2^1，也就是$(10)_2=1\times2^1+0\times2^0$。二进制数的位权可用 2 的乘幂依次表示，如图 1-6 所示。

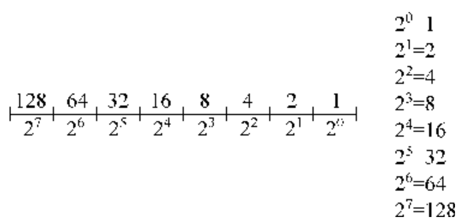


图 1-6 二进制数的位权图

根据十进制表达式的描述方法可写出二进

制的表示方法：

$$(N)_2 = \sum_{i=-\infty}^{\infty} K_i \times 2^i$$

式中，K_i 为基数“2”的第 i 次幂的系数。

【例 1-2】 试将二进制数$(1011.11)_2$转换为十进制数。

解：将每 1 位二进制数乘以位权，然后相加便得到相应的十进制数。

$$\begin{aligned}(1011.11)_2 &= 1\times 2^3 + 0\times 2^2 + 1\times 2^1 + 1\times 2^0 + 1\times 2^{-1} + 1\times 2^{-2}\\ &= 8+0+2+1+0.5+0.25\\ &= (11.75)_{10}\end{aligned}$$

3. 八进制和十六进制

由于使用二进制数位数很多，不便于书写和记忆，因此在计算机中常采用十六进制数或八进制数来表示二进制数。上述十进制数和二进制数的表示法可以推广到十六进制和八进制。

所谓八进制就是以 8 为基数的计数体制。八进制有 0、1、2、3、4、5、6、7 八个数码，其计数规律是“逢八进一”，各位的权为 8 的幂。

十六进制是以十六为基数的计数体制。它采用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F 十六个数码，其计数规律是“逢十六进一”。各位的权为 16 的幂。

1.2.2　不同数制之间的相互转换

1. 非十进制转换为十进制

要将非十进制数转化为十进制数，只要将非十进制数按位权展开，再按十进制运算即可得到十进制数。

【例 1-3】 将二进制数$(1011.101)_2$转换为十进制数。

解：
$$\begin{aligned}(1011.101)_2 &= 1\times 2^3 + 0\times 2^2 + 1\times 2^1 + 1\times 2^0 + 1\times 2^{-1} + 0\times 2^{-2} + 1\times 2^{-3}\\ &= 8+0+2+1+0.5+0+0.125\\ &= (11.625)_{10}\end{aligned}$$

【例 1-4】 将八进制数$(136.52)_8$转换为十进制数。

解：
$$\begin{aligned}(136.52)_8 &= 1\times 8^2 + 3\times 8^1 + 6\times 8^0 + 5\times 8^{-1} + 2\times 8^{-2}\\ &= 64+24+6+0.625+0.03125\\ &= (94.65625)_{10}\end{aligned}$$

【例 1-5】 将十六进制数$(3DF.B8)_{16}$转换为十进制数。

解：
$$\begin{aligned}(3DF.B8)_{16} &= 3\times 16^2 + 13\times 16^1 + 15\times 16^0 + 11\times 16^{-1} + 8\times 16^{-2}\\ &= 768+208+15+0.6875+0.03125\\ &= (991.71875)_{10}\end{aligned}$$

2．十进制转换为非十进制

将十进制数转换为非十进制数，需将十进制数的整数部分和小数部分分别进行转换，然后将它们合并起来。

（1）十进制整数转换成 R 进制数

十进制整数转换成 R 进制数采用除以基数 R，倒取余数的方法：

① 将给定的十进制整数除以基数 R，余数作为 R 进制的最低位（LSB）。

② 把前一步的商再除以 R，余数作为次低位。

③ 重复步骤②，记下余数，直至商为零，最后的余数即为 R 进制的最高位（MSB）。

（2）十进制纯小数转换成 R 进制数

十进制纯小数转换成 R 进制数，采用小数乘以 R，取整数的方法如下：

① 将给定的十进制纯小数乘以 R，乘积的整数部分作为 R 进制小数的最高位。

② 把步骤①乘积的小数继续乘以 R，乘积的整数作为 R 进制小数次高位。

③ 重复步骤②，直到乘积的小数为 0 或达到一定的精度为止。

【例 1-6】 把十进制数$(25)_{10}$转换为二进制数。

解：因为二进制基数为 2，所以逐次除以 2，倒取余数：

$$
\begin{array}{r|l}
2 & 25 \quad \cdots\cdots \text{余}1 \\ \hline
2 & 12 \quad \cdots\cdots \text{余}0 \\ \hline
2 & 6 \quad \cdots\cdots \text{余}0 \\ \hline
2 & 3 \quad \cdots\cdots \text{余}1 \\ \hline
2 & 1 \quad \cdots\cdots \text{余}1 \\ \hline
 & 0
\end{array}
$$

即

$$(25)_{10} = (11001)_2$$

【例 1-7】 将十进制数$(157)_{10}$分别转换为八进制数、十六进制数。

解：将十进制数$(157)_{10}$转换为八进制数，由于基数为 8，逐次除以 8，倒取余数：

$$
\begin{array}{r|r}
8 & 157 \quad \cdots\cdots \text{余}5 \\ \hline
8 & 19 \quad \cdots\cdots \text{余}3 \\ \hline
8 & 2 \quad \cdots\cdots \text{余}2 \\ \hline
 & 0
\end{array}
$$

即

$$(157)_{10} = (235)_8$$

将十进制数$(157)_{10}$转换为十六进制数，由于基数为 16，逐次除以 16，倒取余数：

$$
\begin{array}{r|r}
16 & 157 \quad \cdots\cdots \text{余}13 \\ \hline
16 & 9 \quad \cdots\cdots \text{余}9 \\ \hline
 & 0
\end{array}
$$

即
$$(157)_{10}=(9D)_{16}$$

【例 1-8】 将十进制数$(25.875)_{10}$转换为二进制数。

解：把一个带有整数和小数的十进制数转换为 R 进制数时，只要将整数部分和小数部分分别进行转换，然后将结果合并起来即可。

因为整数部分是例 1-6 的结果：$(25)_{10}=(11001)_2$，所以只要将小数部分进行转换

$$0.875\times2=1.750\cdots\cdots1\qquad \text{MSB}$$
$$0.750\times2=1.500\cdots\cdots1$$
$$0.500\times2=1.000\cdots\cdots1\qquad \text{LSB}$$

即
$$(0.875)_{10}=(0.111)_2$$

由此可得，十进制数$(25.875)_{10}$对应的二进制数为
$$(25.875)_{10}=(11001.111)_2$$

3. 二进制与八进制之间的转换

(1) 二进制数转换为八进制数

八进制数的基数 $8=2^3$，故每位八进制数用 3 位二进制数构成。二进制数转换为八进制数的方法是：整数部分从低位开始，每 3 位二进制数为一组，最后不足 3 位的，则在高位加 0 补足 3 位为止；小数点后的二进制数则从高位开始，每 3 位二进制数为一组，最后不足 3 位的，则在低位加 0 补足 3 位，然后用对应的八进制数来代替，再按顺序排列写出对应的八进制数。

(2) 八进制数转换为二进制数

将每位八进制数用 3 位二进制数来代替，再按原来的顺序排列起来，便得到了相应的二进制数。

【例 1-9】 把二进制数$(110100.001000101)_2$转换为八进制数。

二进制数	$\underline{110}$	$\underline{100}$	.	$\underline{001}$	$\underline{000}$	$\underline{101}$
八进制数	6	4	.	1	0	5

$$(110100.001000101)_2=(64.105)_8$$

4. 二进制与十六进制之间的转换

(1) 二进制数转换为十六进制数

十六进制数的基数 $16=2^4$，故每位十六进制数用 4 位二进制数构成。二进制数转换为十六进制数的方法是：整数部分从低位开始，每 4 位二进制数为一组，最后不足 4 位的，则在高位加 0 补足 4 位为止；小数部分从高位开始，每 4 位二进制数为一组，最后不足 4 位的，在低位加 0 补足 4 位，然后用对应的十六进制数来代替，再按顺序写出对应的十六进制数。

(2) 十六进制数转换为二进制数

将每位十六进制数用 4 位二进制数来代替，再按原来的顺序排列起来，便得到了相应

的二进制数。

【例 1-10】 把二进制数$(110100.001000101)_2$转换为十六进制数。

二进制数	11	0100	.	0010	0010	1000
十六进制数	3	4	.	2	2	8

$$(110100.001000101)_2=(34.228)_{16}$$

几种常用数制之间的关系对照如表 1-4 所示。

表 1-4 常用数制之间的关系对照表

计数体制基数 R	数码表示方法															
$R=16$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10
$R=2$	0	1	10	11	100	101	110	111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111	10000
$R=10$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$R=8$	0	1	2	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14	15	16	17	20

1.2.3 码制

将特定含义的输入信号(数字、文字、符号等)转换为二进制代码的过程称为编码。

数字电路中,十进制数除了转换为二进制数参加运算外,还可以直接用十进制数进行运算。其方法是用 4 位二进制代码来表示一位十进制数,这种编码称为二-十进制编码,也称 BCD 码。由于 4 位二进制数有 16 种不同的组合状态,用于表示十进制中的 10 个数码时,只需选用其中 10 种组合。因此,BCD 码有多种形式,表 1-5 中列出了常用的几种代码。

表 1-5 常用 BCD 码的几种编码方式

BCD 码 / 十进制数码	8421 码	5421 码	2421 码	余 3 码(无权码)	格雷码(无权码)
0	0000	0000	0000	0011	0000
1	0001	0001	0001	0100	0001
2	0010	0010	0010	0101	0011
3	0011	0011	0011	0110	0010
4	0100	0100	0100	0111	0110
5	0101	1000	1011	1000	0111
6	0110	1001	1100	1001	0101
7	0111	1010	1101	1010	0100
8	1000	1011	1110	1011	1100
9	1001	1100	1111	1100	1000

将十进制数转换为 BCD 码就是分别将十进制数中的每 1 位按顺序写为 4 位二进制码。例如,一个 3 位十进制数 473 用 8421BCD 码可写成