

5.4 模数与数模转换器

§ 1 概述

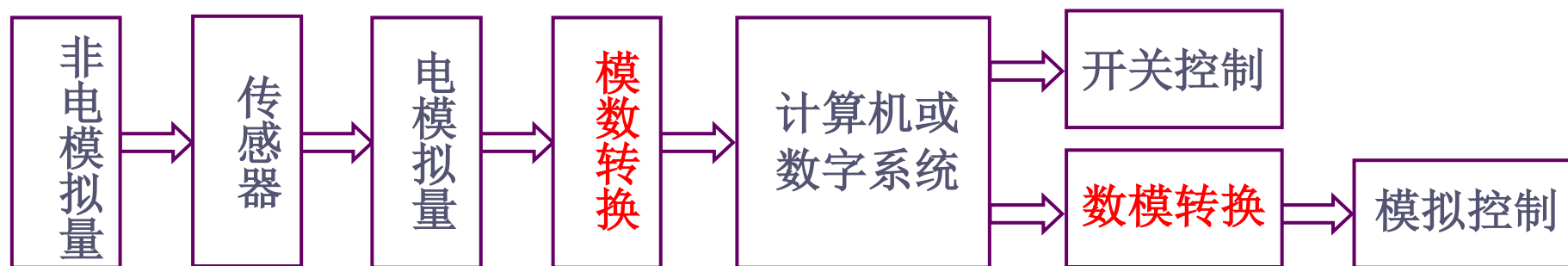
§ 2 模数转换器

§ 3 数模转换器

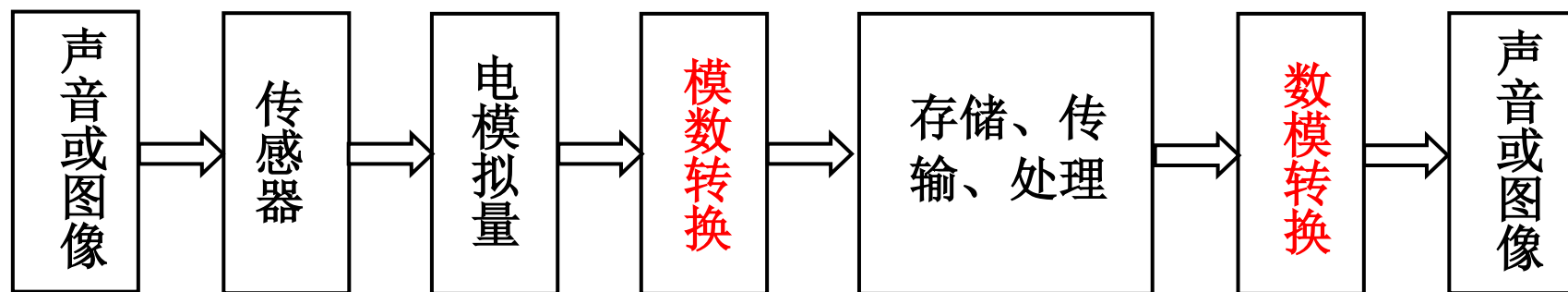
§ 1 概述

- ◆ **数模转换器（简称D/A转换器或DAC）**
能够将数字信号转换成模拟信号的电路。
- ◆ **模数转换器（简称A/D转换器或ADC）**
能够将模拟信号转换成数字信号的电路。

ADC和DAC是沟通模拟电路和数字电路的桥梁，也可称之为两者之间的接口，在各种系统中应用很广。



数字控制系统原理框图



数据传输系统原理框图

§ 2 模/数 转换器 (ADC)

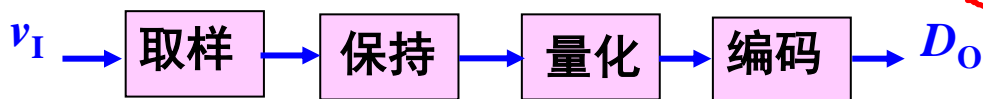
- 一、A/D转换原理
- 二、并联比较型ADC
- 三、逐次渐近型ADC
- 四、双积分型ADC
- 五、A / D 转换器的主要技术指标
- 六、集成ADC0809

一、A/D转换原理

在A / D转换中，因为输入的模拟量在时间上是连续的，而输出的数字信号是离散量， 所以进行转换时只能在一系列选定的瞬间对输入的模拟信号采样，然后再把这些采样值转换为输出的数字量 。

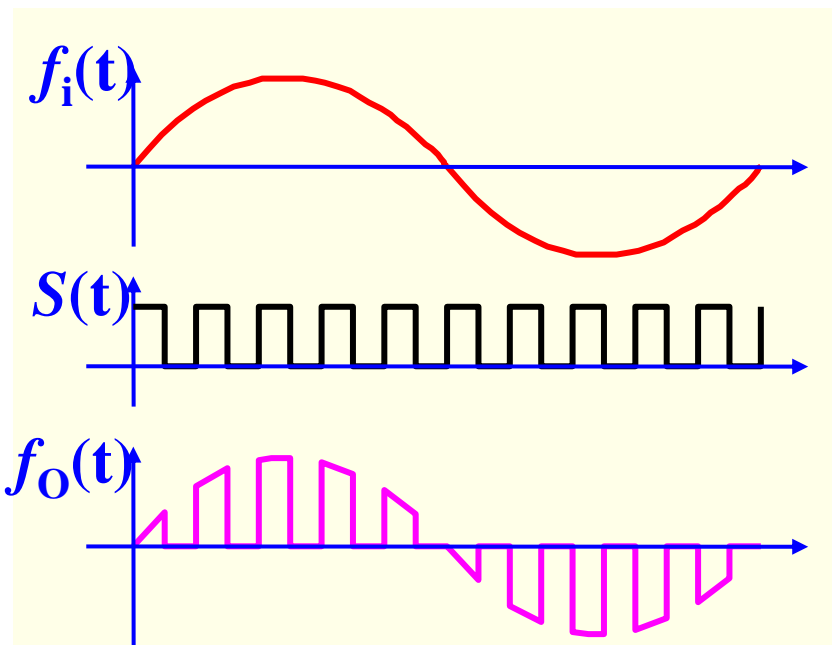
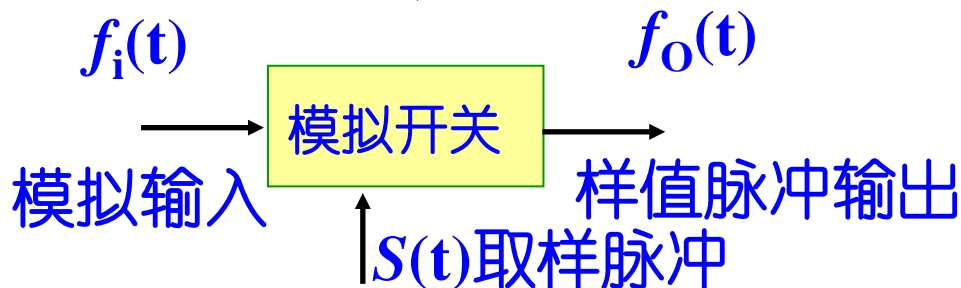
将取样得到的电压转换为相应的数字量需要一定的时间，所以取样后必须把取样电压保持一段时间，以保证完成A/D转换。

A / D 转换过程包括四个步骤：



1. 取样和保持

取样（也称采样）是将时间上连续变化的信号，**转换为时间上离散的信号**，即将时间上连续变化的模拟量转换为一系列等间隔的脉冲，脉冲的幅度取决于输入模拟量。



为了保证能从采样信号将原信号恢复，要求：

$$f_s \geq 2f_{\max} \quad \text{—— 采样定理}$$

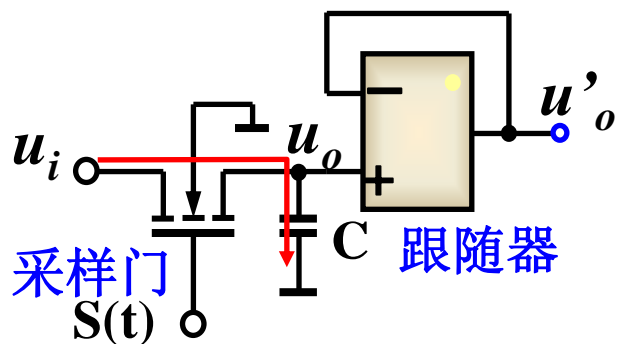
f_s : 采样频率；

f_{\max} : f_i 的最高频率分量。

在工程设计中通常取：

$$f_s = (3 \sim 5) f_{\max}$$

模拟信号经采样后，得到一系列**样值脉冲**。采样脉冲宽度 τ 一般是很短暂的，在下一个采样脉冲到来之前，应暂时保持所取得的样值脉冲幅度，以便进行转换。一般取样与保持过程都是同时完成的。



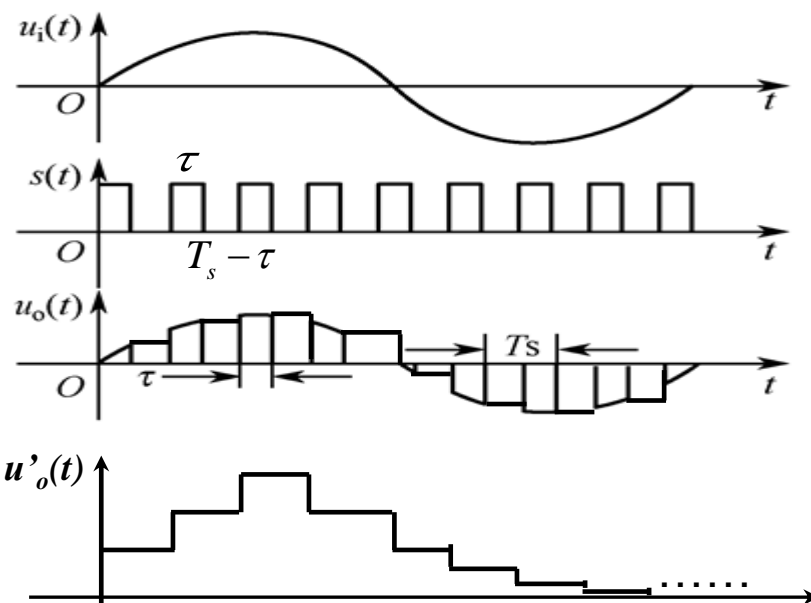
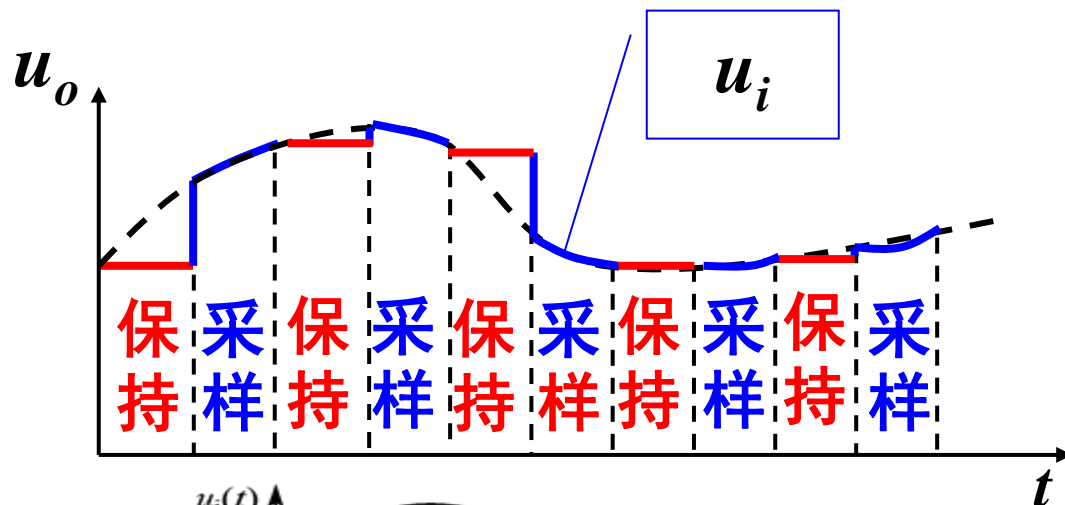
取样保持电路

①在采样脉冲 $S(t)$ 到来的时间 τ 内，VT导通， u_i 向电容C充电，假定充电时间远小于 τ ，则： $u_o(t) = u_i(t)$ 。

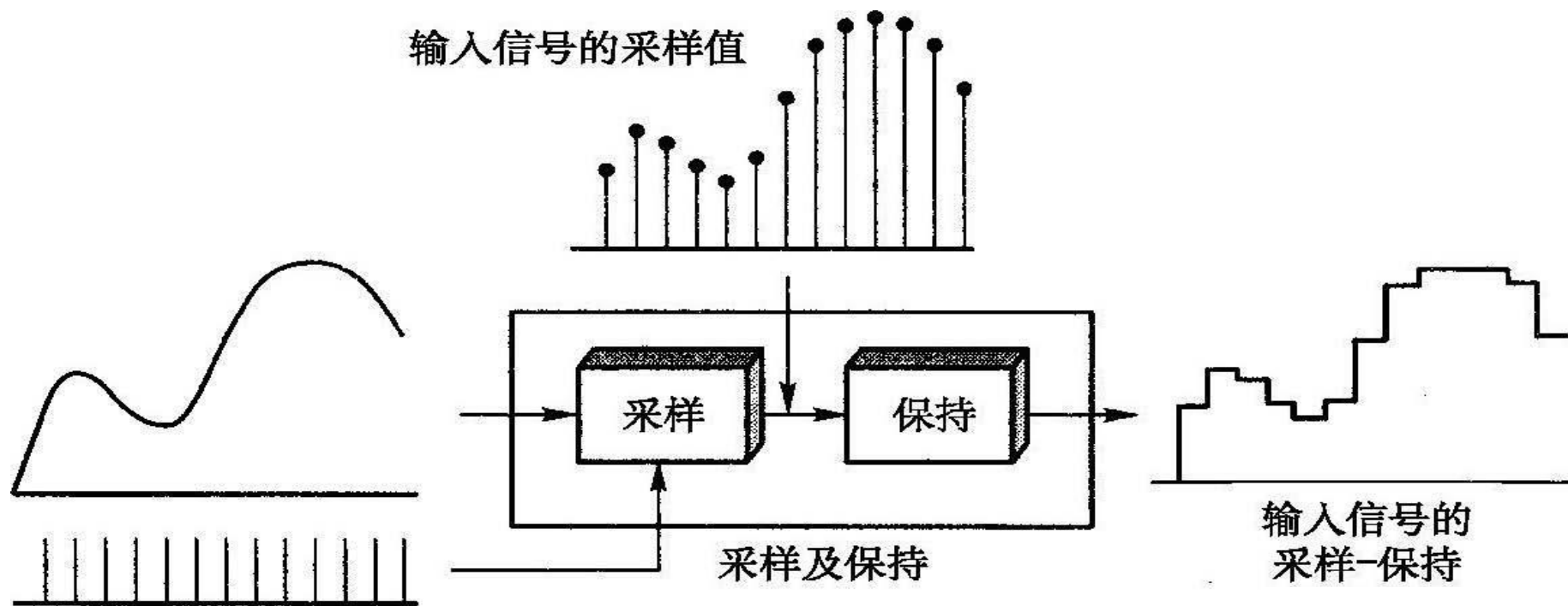
(采样)

②采样结束，VT截止，电容无放电回路，输出电压得以保持，直到下一个采样脉冲到来为止。

(保持)



输入信号的采样值



2. 量化和编码

数字信号不仅在时间上是离散的，而且数值大小的变化也是不连续的。这就是说，任何一个数字量的大小只能是某个规定的最小数量单位的整数倍。

因此，在进行 A/D 转换时也必须把采样电压化为这个最小单位的整数倍。这个转化过程就叫做“量化”。

所取的最小数量单位叫做量化单位，用“ Δ ”表示。

显然，数字信号最低有效位的“1”代表的数量就等于 Δ 。

把量化的结果用代码（二进制或二—十进制）表示出来，称为“编码”，这些代码就是A/D转换的输出结果。

由于模拟电压是连续的，它不一定能被 Δ 整除，因而量化过程不可避免地会引入误差——“量化误差”。

量化误差为原理误差，是不可消除的，位数越大，误差越小。

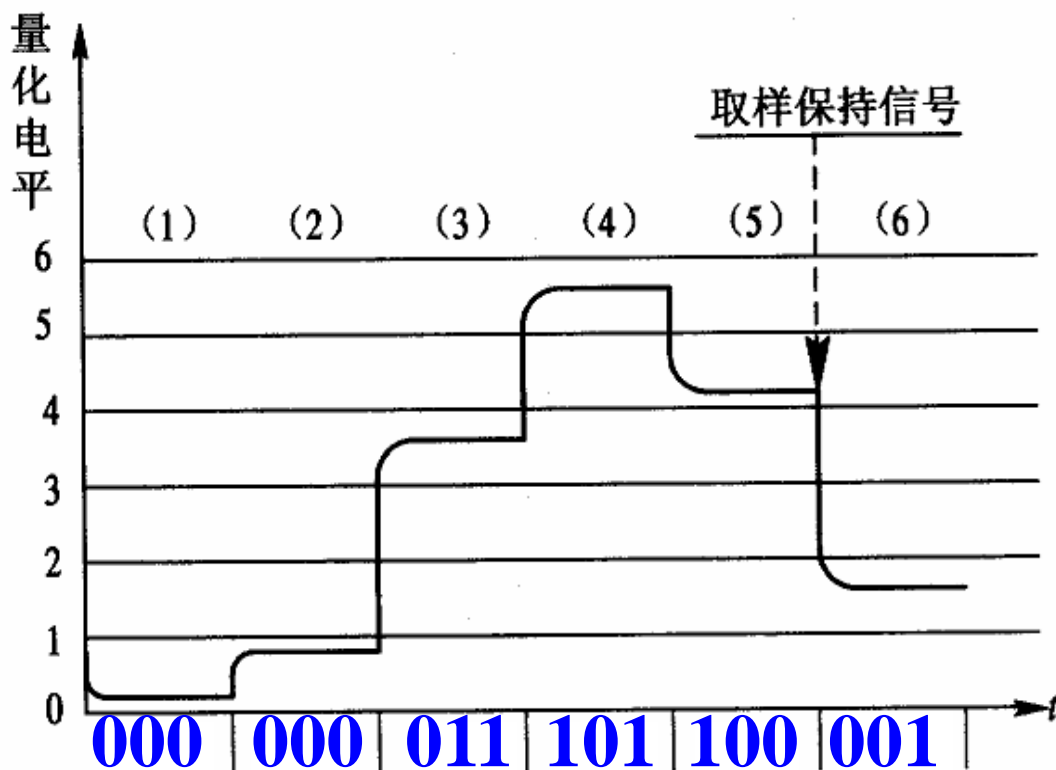
采用不同方法划分量化电平，会有不同的误差。

3. 量化的方法与量化误差

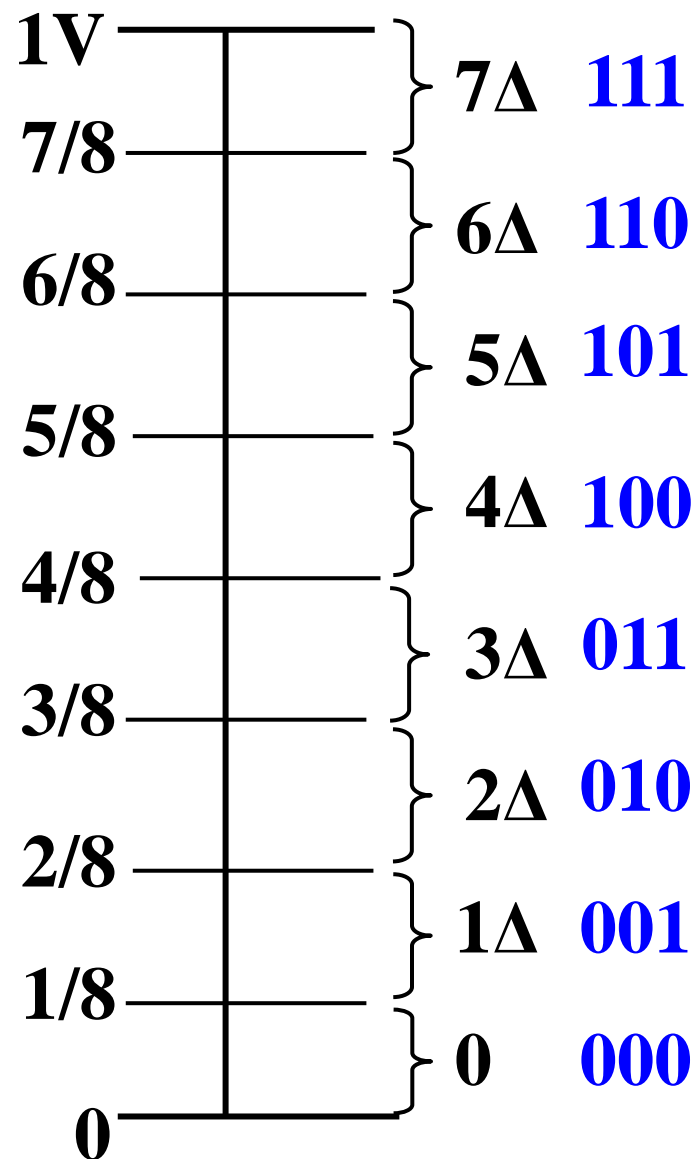
(1) 舍尾取整法

当 v_I 的尾数 $<\Delta$ 时，舍尾取整。

这种方法误差 $\varepsilon > 0$, $|\varepsilon_{\max}| = \Delta$



$$\Delta = 1/8V$$



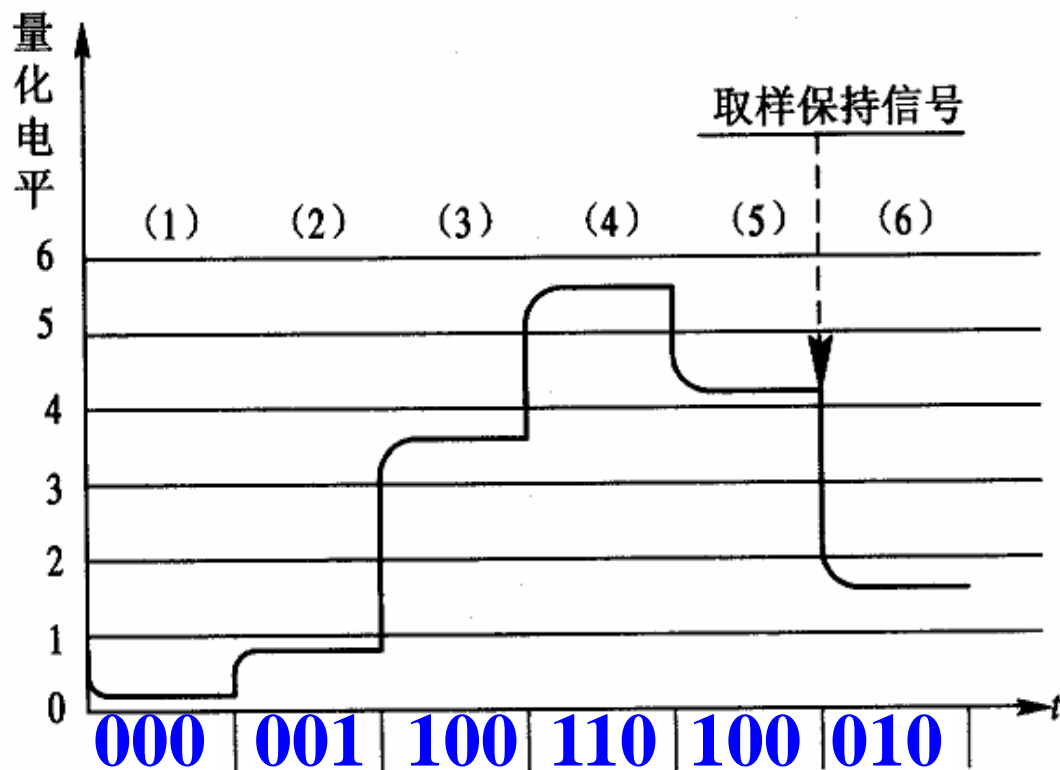
(2) 四舍五入法

当 v_I 的尾数 $< \Delta/2$ 时，舍尾取整。

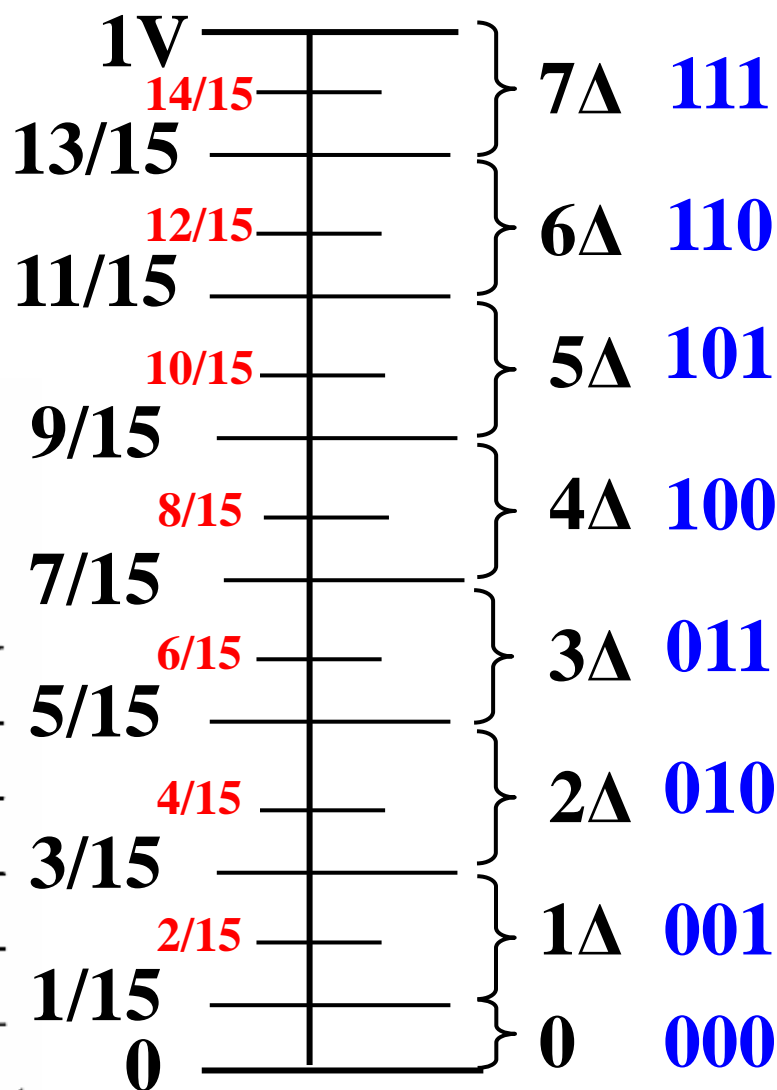
当 v_I 的尾数 $> \Delta/2$ 时，舍尾入整。

这种方法误差 ε 可正可负，

$$|\varepsilon_{\max}| = \Delta/2。$$



$$\Delta = 2/15V$$



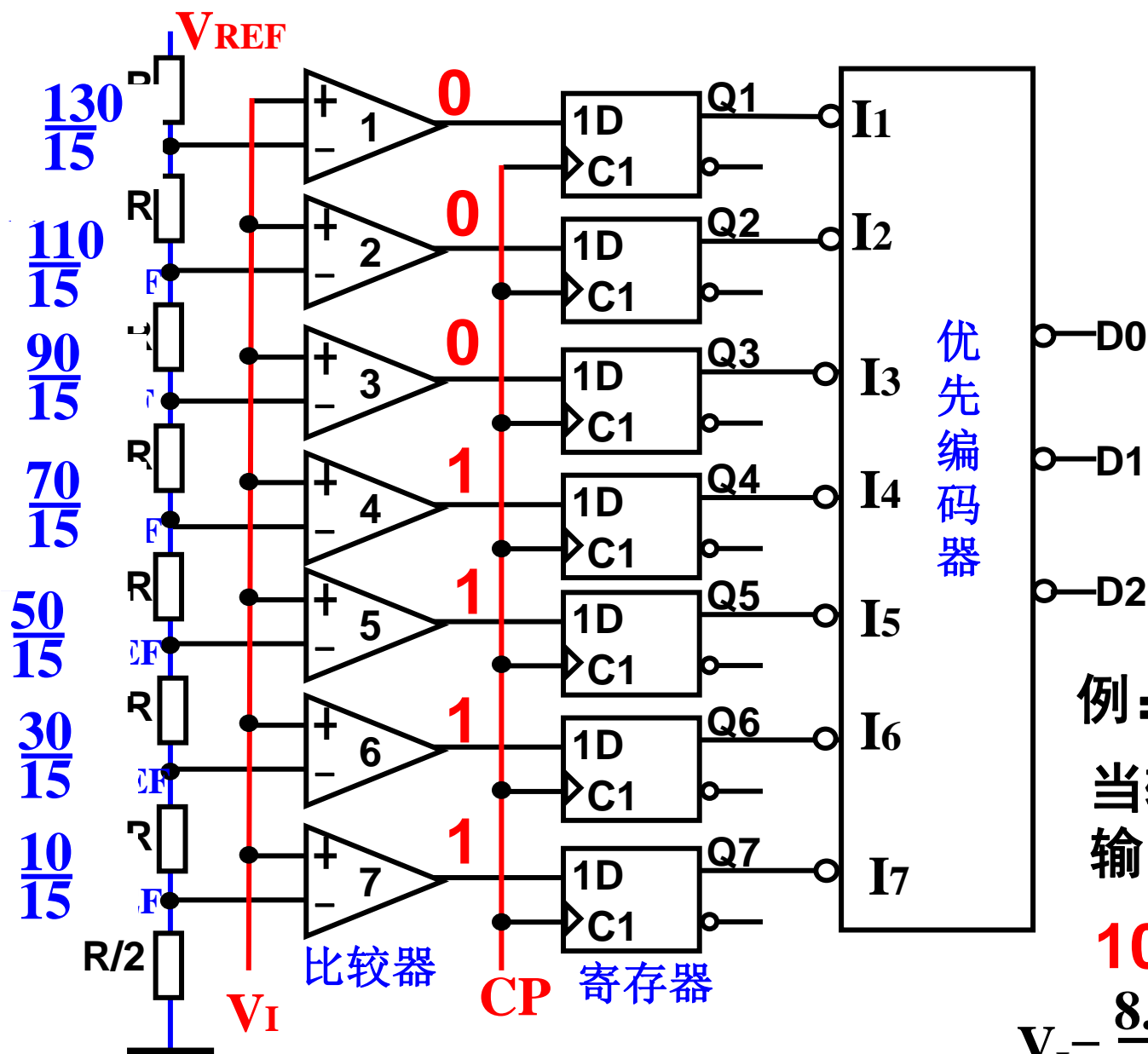
3、A/D转换器的主要电路形式

A/D转换器有直接转换法和间接转换法两大类。

直接法是通过一套基准电压与取样保持电压进行比较，从而直接将模拟量转换成数字量。其特点是工作速度快，转换精度容易保证，调准也比较方便。直接A/D转换器有并行比较型(闪速型)、逐次比较型等。

间接法是将取样后的模拟信号先转换成中间变量时间 t 或频率 f ，然后再将 t 或 f 转换成数字量。其特点是工作速度较低，但转换精度可以做得较高，且抗干扰性强。间接A/D转换器有单次积分型、双积分型等。

二、并行比较型ADC



$$\Delta = \frac{2}{15} V_{REF}$$

$$|\varepsilon_{\max}| = \frac{1}{15} V_{REF}$$

例：设 $V_{REF}=10V$ ，
当输入 V_I 为 $5.9V$ 时，
输出的数字量 = ?

100

$$V_I = \frac{8.85}{15} V_{REF} = \frac{88.5}{15}$$

并行比较型A/D转换器的特点：

(1) 优点：转换速度很快，故又称高速A/D转换器。含有寄存器的A/D转换器兼有取样保持功能，所以它可以不用附加取样保持电路。

(2) 缺点：电路复杂，对于一个 n 位二进制输出的并行比较型A/D转换器，需 $2^n - 1$ 个电压比较器和 $2^n - 1$ 个触发器，编码电路也随 n 的增大变得相当复杂。且转换精度还受分压网络和电压比较器灵敏度的限制。

(3) 应用：适用于高速，精度较低の場合。

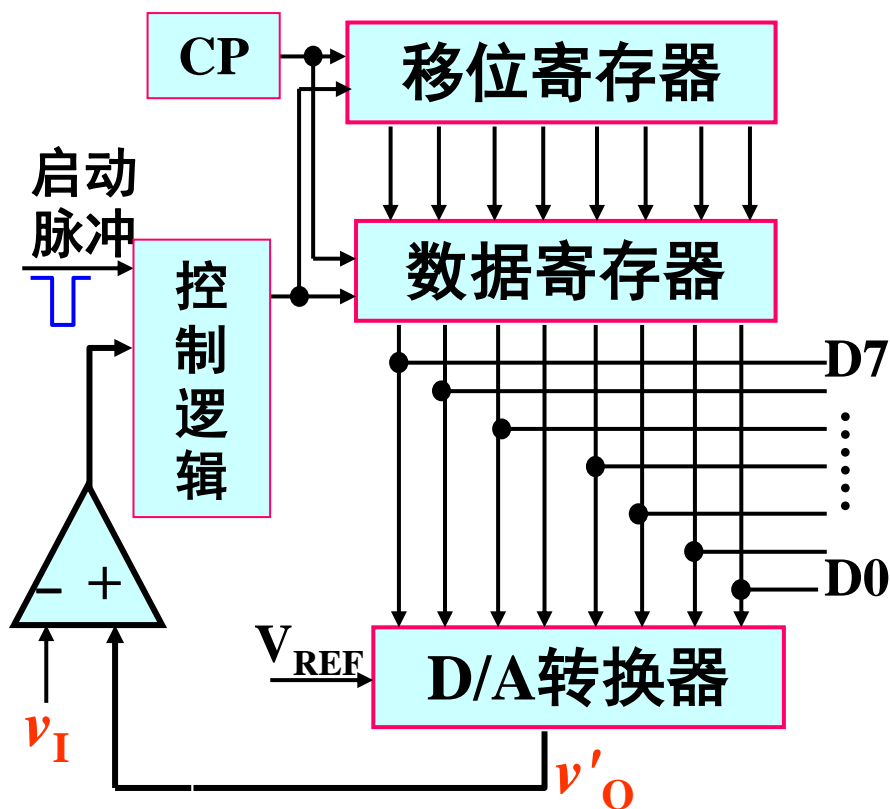
三、逐次比较型ADC

逐次比较型ADC的工作原理可用天平秤重过程来说明：
若有四个砝码共重15克，每个重量分别为 8、4、2、1克。
设待秤重量 $W_x = 13$ 克， 可以用下表步骤来秤量：

	砝码重	结 论	暂时结果
第1次	加8克	砝码总重 < 待测重量 W_x ，故保留	8 克
第2次	加4克	砝码总重 < 待测重量 W_x ，故保留	12 克
第3次	加2克	砝码总重 > 待测重量 W_x ，故撤除	12 克
第4次	加1克	砝码总重 = 待测重量 W_x ，故保留	13 克

三、逐次比较型ADC

(一) 电路组成

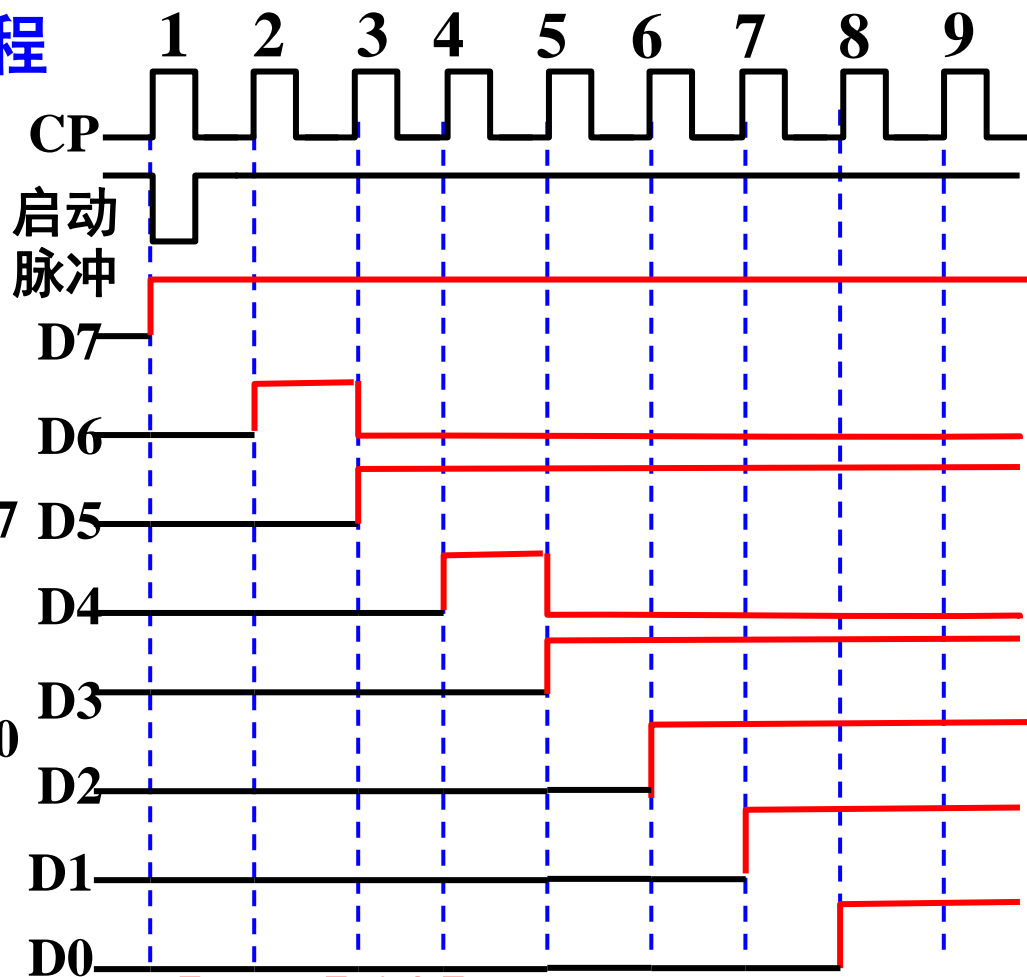
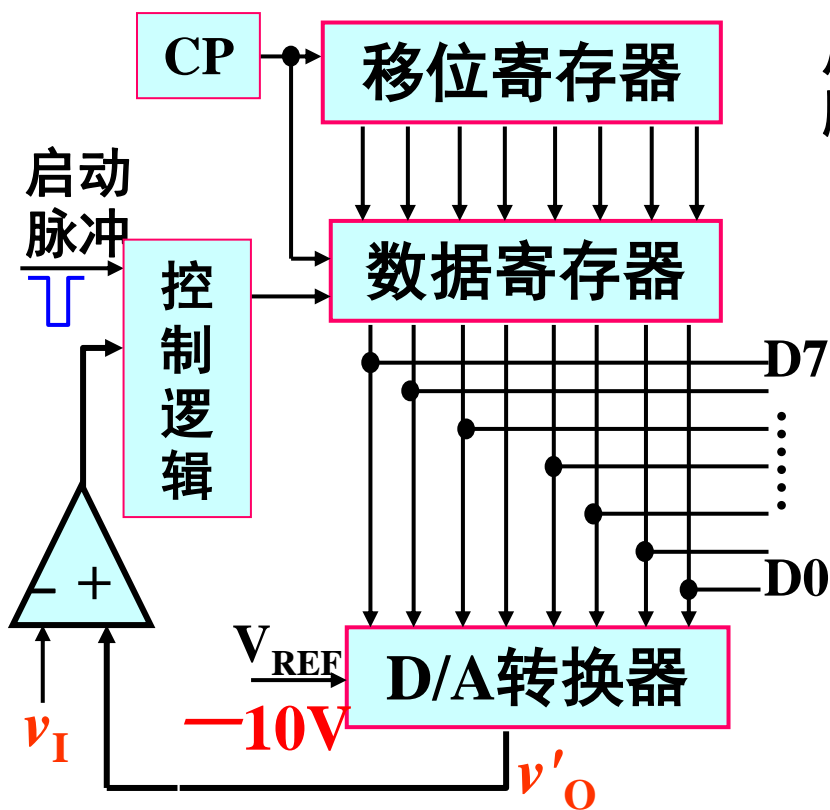


(二) A/D转换过程

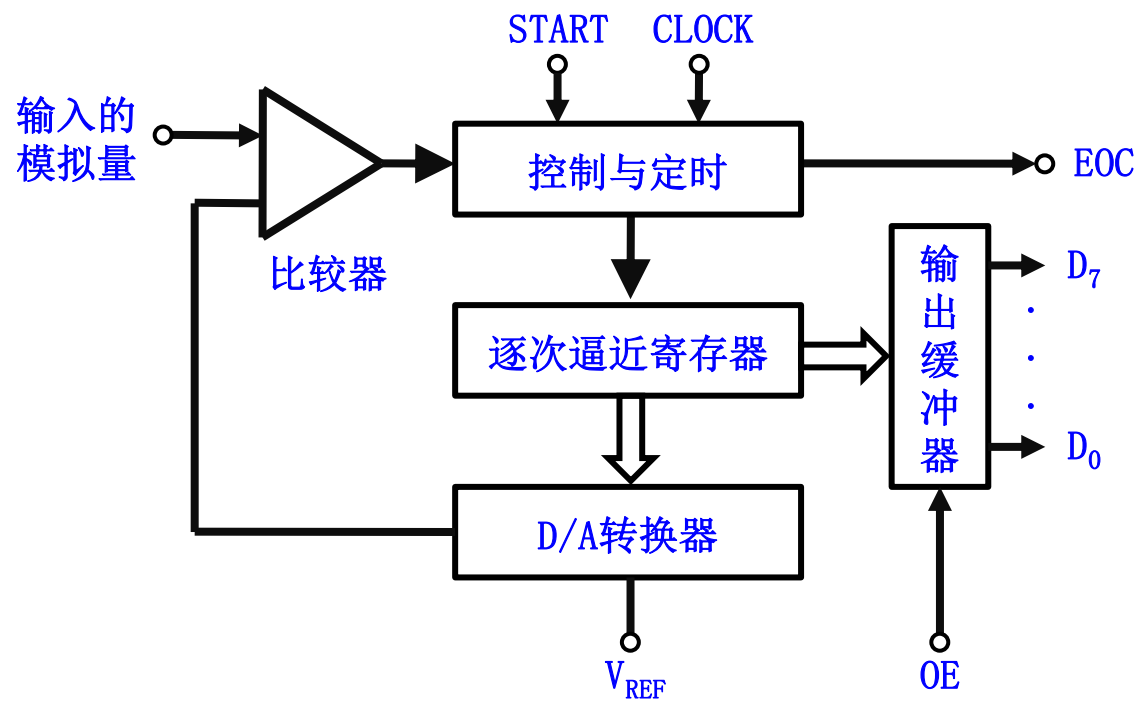
- ①转换前寄存器清零；
- ②将寄存器最高位置1；
输出数据为100...0，
该数码经DAC转换成 v'_o ，
将 v_I 与 v'_o 进行比较，
 $v'_o < v_I$ ，最高位的1保留；
 $v'_o > v_I$ ，最高位的1清除；
- ③将寄存器次高位置1；
输出数据为×10...0，重复②。
- ④比较完毕后，将寄存器中的数据送到输出端。
- ⑤复位，回到转换前的初始状态。

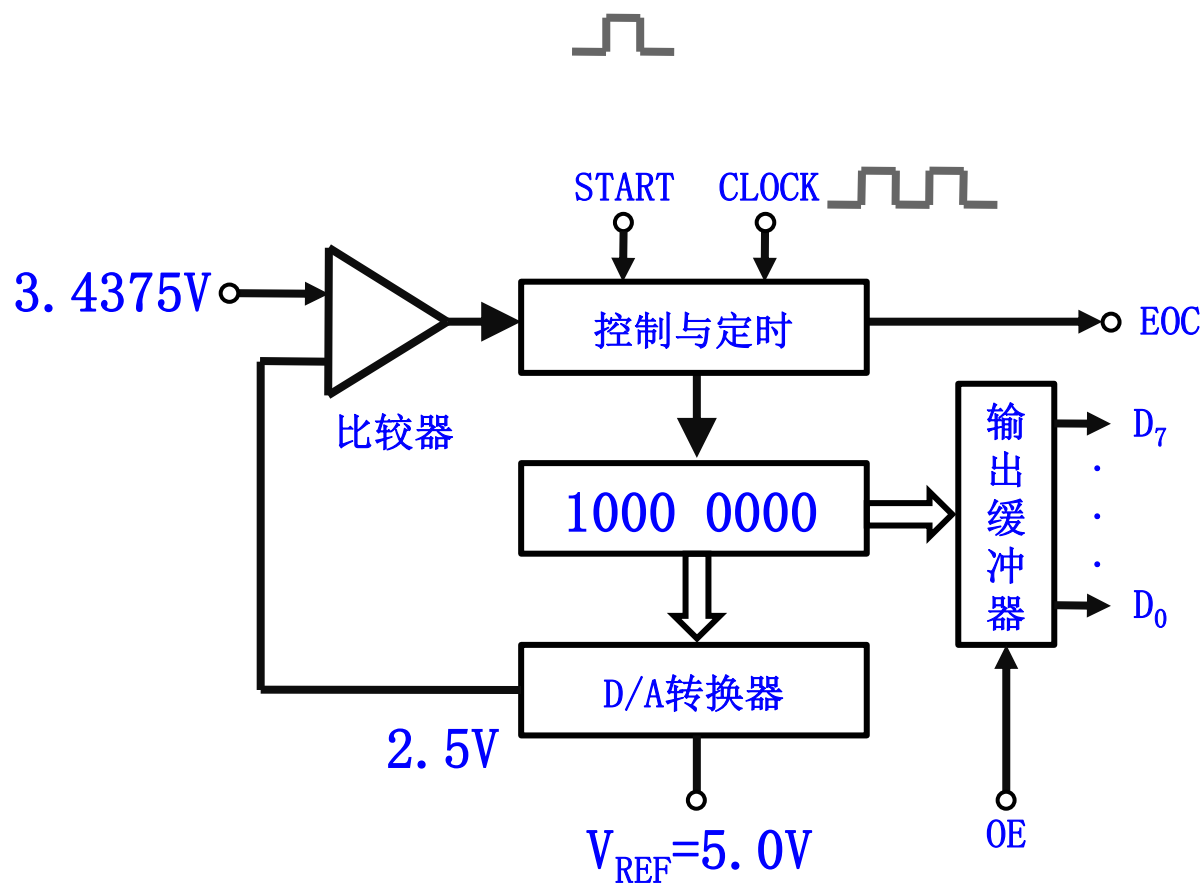
n 位ADC完成一次A/D转换所需的时间为 nT_{CP} 。

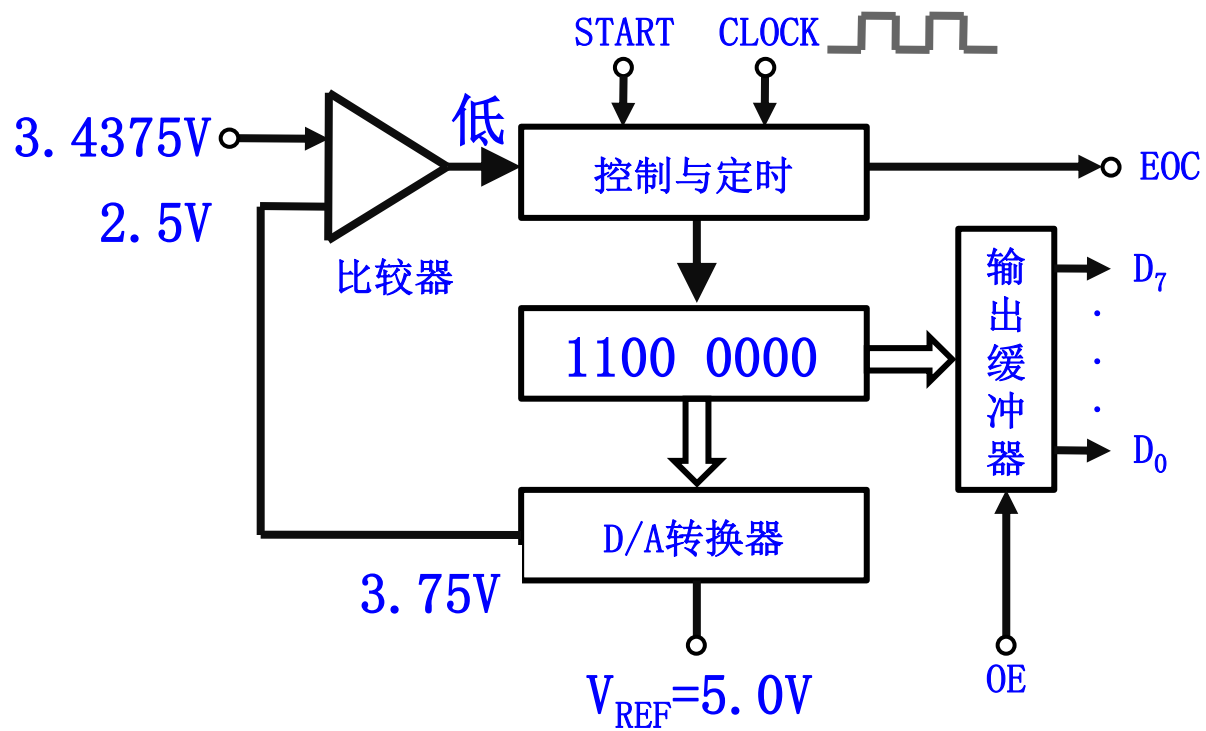
$v_I=6.84V$ 时的详细转换过程

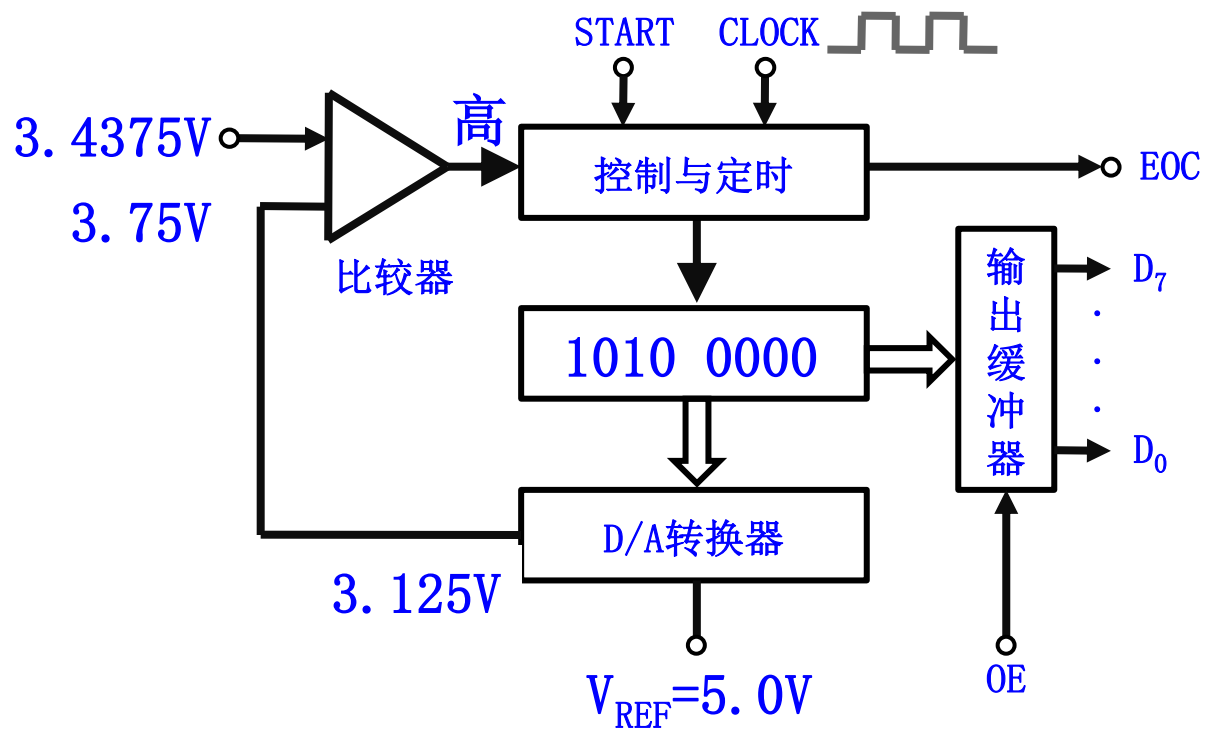


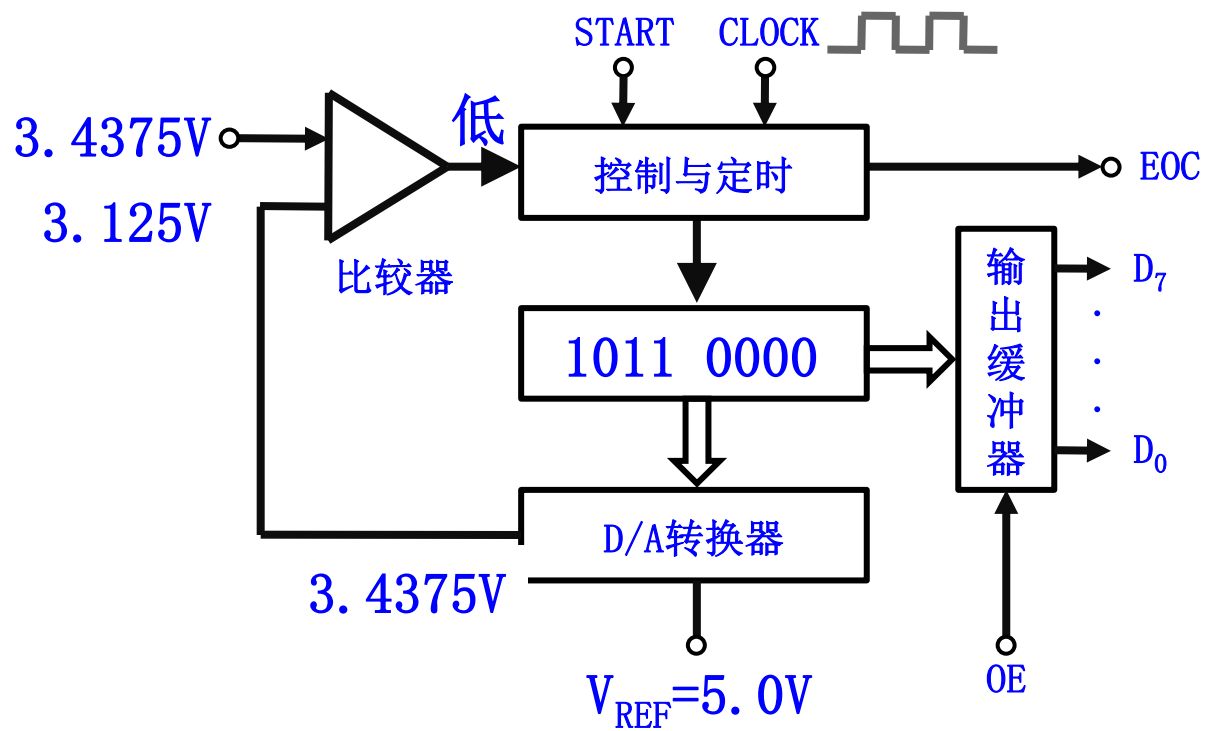
输出的数字量为：10101111。

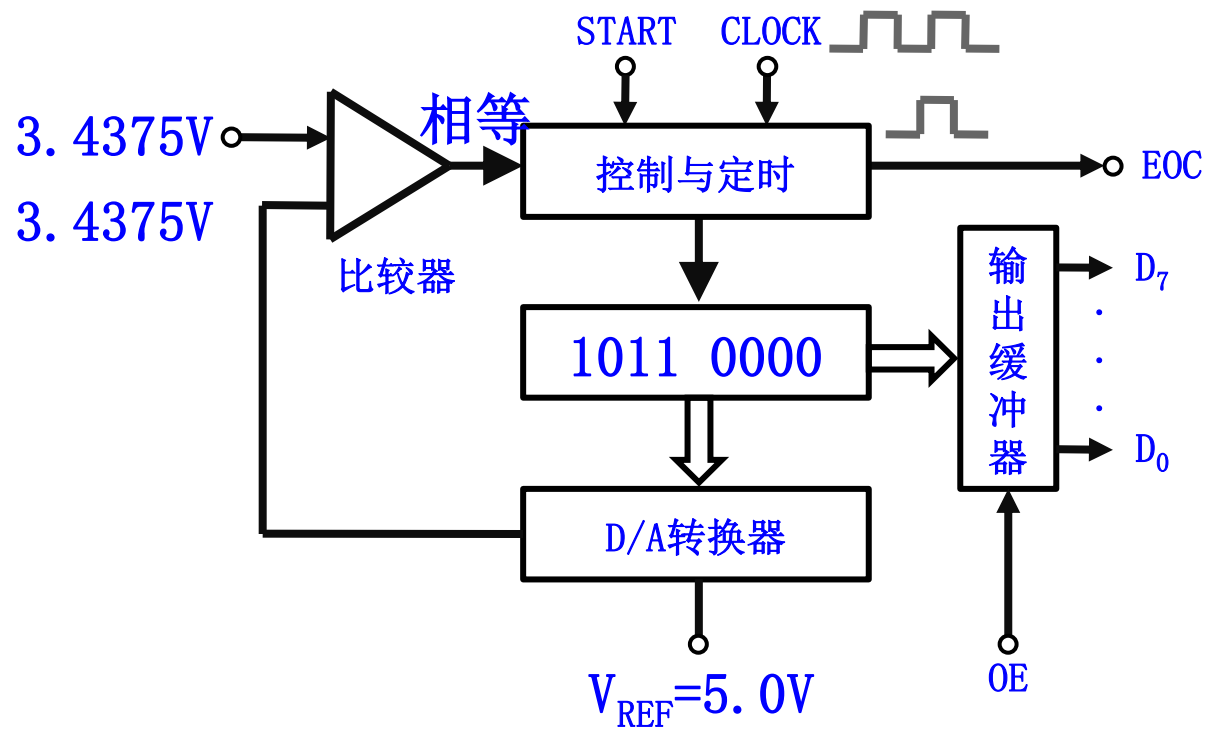


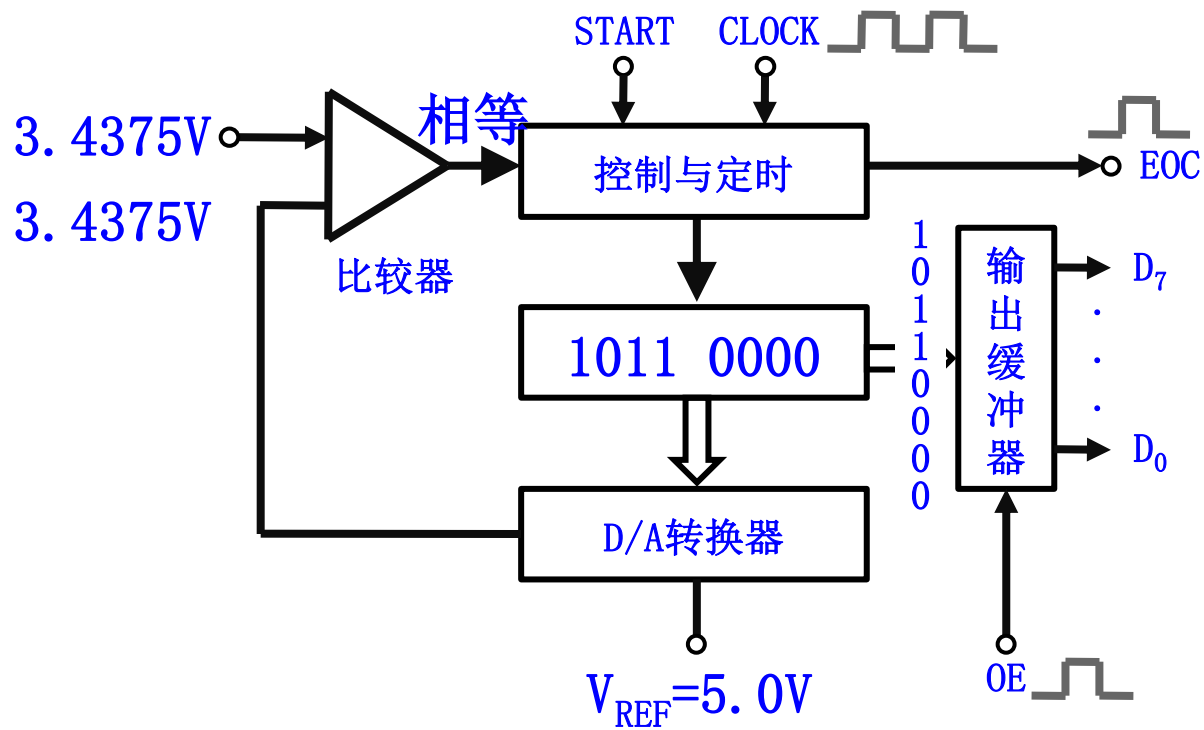










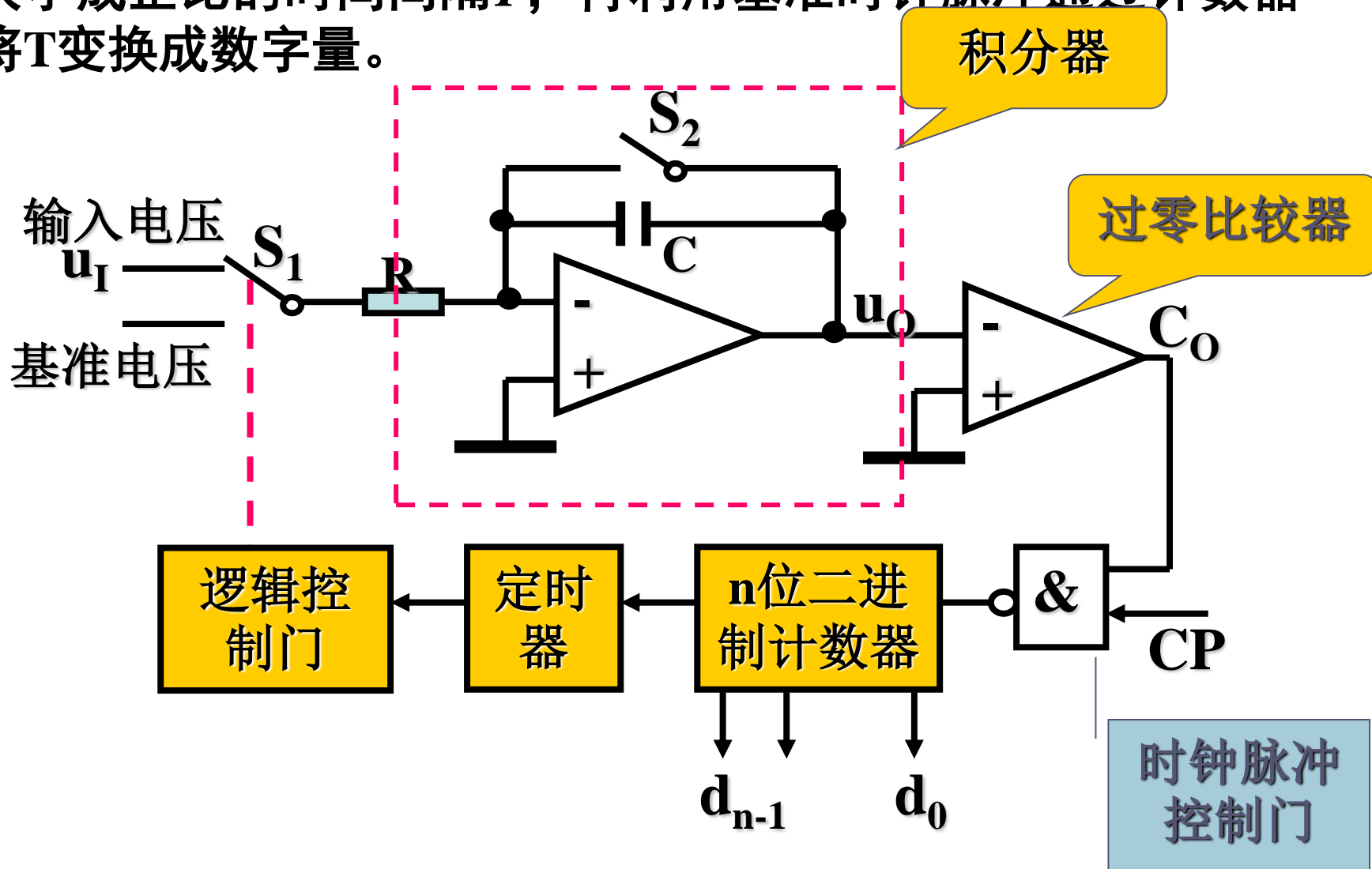


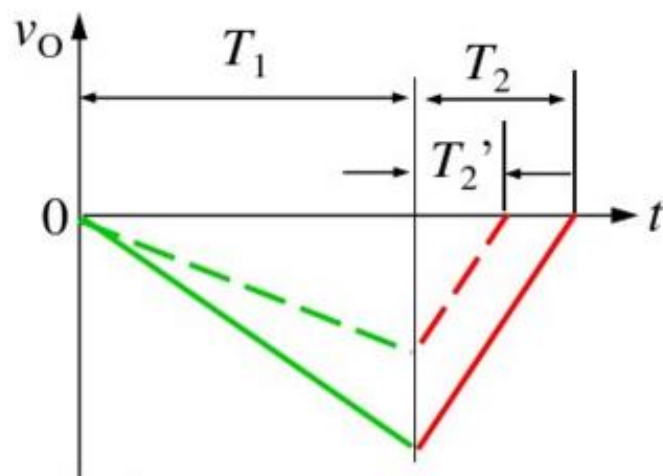
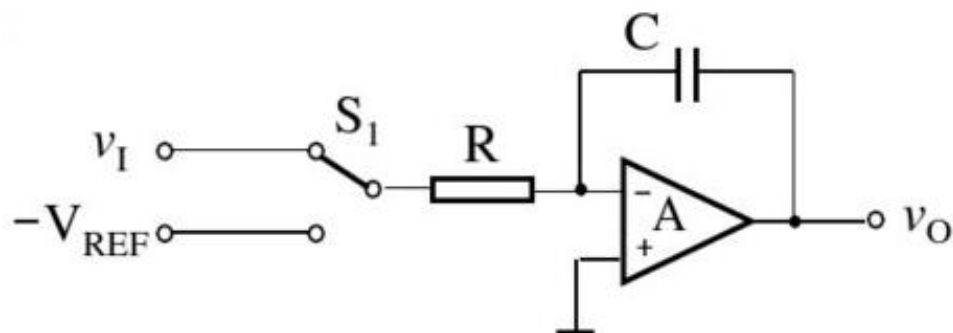
(三) 逐次比较型ADC的特点

- **分辨率较高**
- **转换误差较低**
- **转换速度较快 (比并行比较型慢)**
- **应用较为广泛**

四、双积分型ADC

双积分型ADC的转换原理是先将模拟电压 U_I 转换成与其大小成正比的时间间隔 T ，再利用基准时钟脉冲通过计数器将 T 变换成数字量。





开关 S_1 合到 v_I 一侧

$$v_o = \frac{1}{C} \int_0^{T_1} \left(-\frac{v_I}{R}\right) dt = -\frac{T_1}{RC} v_I$$

开关 S_1 接到 $-V_{REF}$ 一侧

$$v_o = -\frac{T_1}{RC} v_I + \frac{1}{C} \int_0^{T_2} \frac{V_{REF}}{R} dt = -\frac{T_1}{RC} v_I + \frac{V_{REF} T_2}{RC} = 0 \quad T_2 = \frac{T_1}{V_{REF}} v_I$$

$\because T_1$ 为常数, $\therefore T_2$ 与 v_I 成正比

在进行转换时, 有定时积分过程和定斜积分过程, 故称为双积分
通过计数器对定斜积分过程持续的时间 T_2 进行计数

固定时间积分, 到时结束
固定斜率积分, 过零结束

双积分型ADC的特点：

(1) 性能稳定，转换精度高。

其转换结果与时间常数RC无关，从而消除了由于斜波电压非线性带来的误差，允许积分电容在一个较宽范围内变化，而不影响转换结果。

(2) 电路简单，抗干扰能力强。

由于输入信号积分的时间较长，且是一个固定值 T_1 ，而 T_2 正比于输入信号在 T_1 内的平均值，这对于叠加在输入信号上的干扰信号有很强的抑制能力。

(3) 这种A/D转换器不必采用高稳定度的时钟源，它只求时钟源在一个转换周期（ T_1+T_2 ）内保持稳定即可。 这种转换器被广泛应用于要求精度较高而转换速度要求不高的仪器中。

五、ADC的主要技术指标

ADC的主要技术指标有转换精度和转换速度。

1、分辨率（精度）

分辨率指A/D转换器对输入模拟信号的分辨能力。从理论上讲，一个 n 位二进制数输出的A/D转换器应能区分输入模拟电压的 2^n 个不同量级，能区分输入模拟电压的最小差异为（满量程输入的 $1/2^n$ ）。

$$\text{分辨率（分解度）} = \frac{V_{\text{Imax}}}{2^n} = \Delta$$

例如，A/D转换器的输出为12位二进制数，最大输入模拟信号为10V，则其分辨率为：

$$\text{分辨率} = \frac{1}{2^{12}} \times 10V = \frac{10V}{4096} = 2.44mV$$

2. 转换误差

它表示A/D转换器实际输出的数字量和理论上输出的数字量之间的差别。常用**最低有效位的倍数**表示。

例如，转换误差 $\leq \pm \frac{1}{2} LSB$ 就表明实际输出的数字量和理论上应得到的输出数字量之间的误差小于最低位的半个字。

3、转换时间（速度）

转换时间是指A/D转换器从接到转换启动信号开始，到输出端获得稳定的数字信号所经过的时间。

A/D转换器的转换速度主要取决于转换电路的类型，不同类型A/D转换器的转换速度相差很大。

①双积分型ADC的转换速度**最慢**，需**几百毫秒**左右；

②逐次逼近式ADC的转换速度**较快**，需**几十微秒**；

③并行比较型ADC的转换速度**最快**，仅需**几十纳秒**。

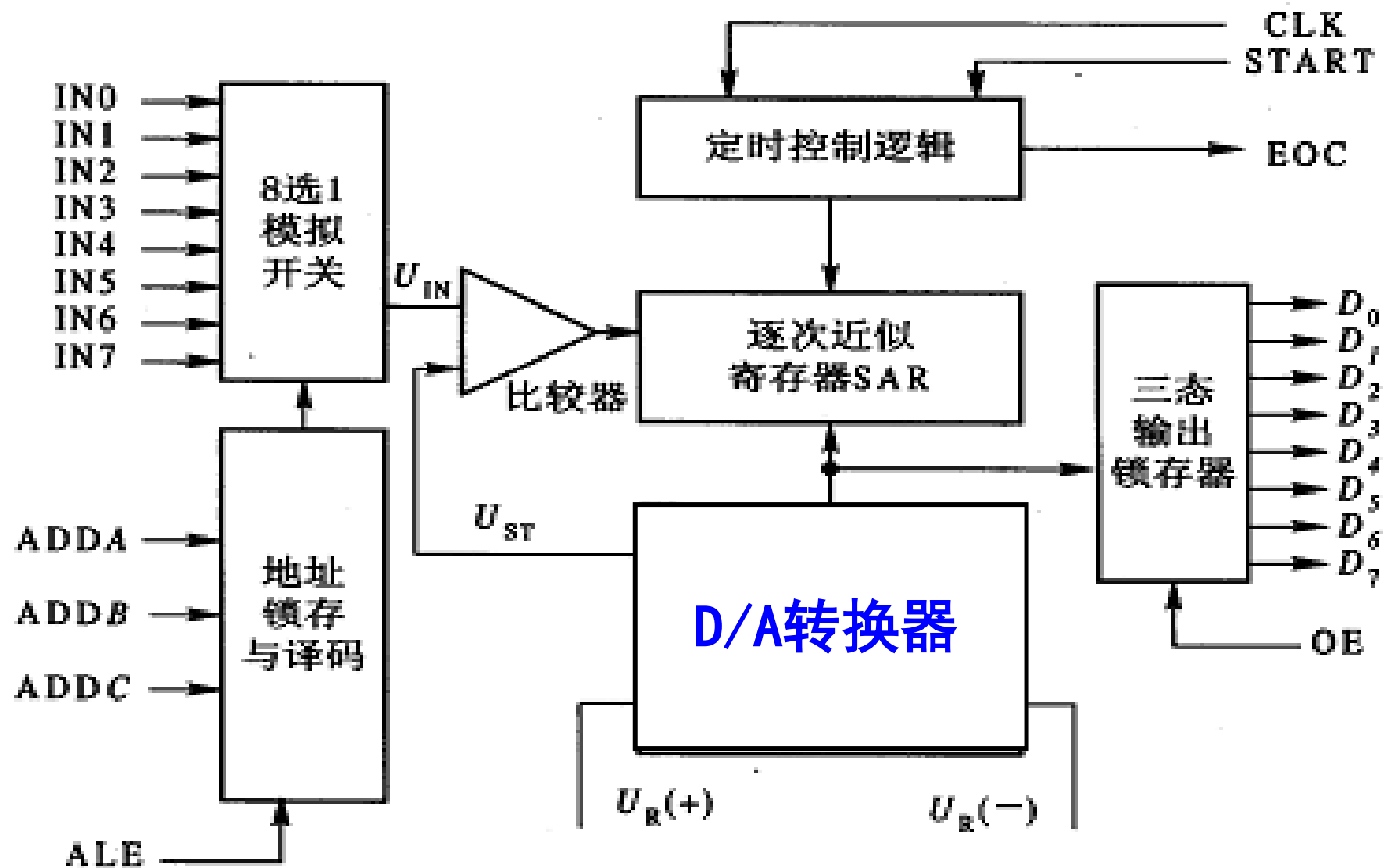
六、集成模数转换器——ADC0809

ADC0809是CMOS工艺制成的8位八通道逐次逼近型A/D转换器。

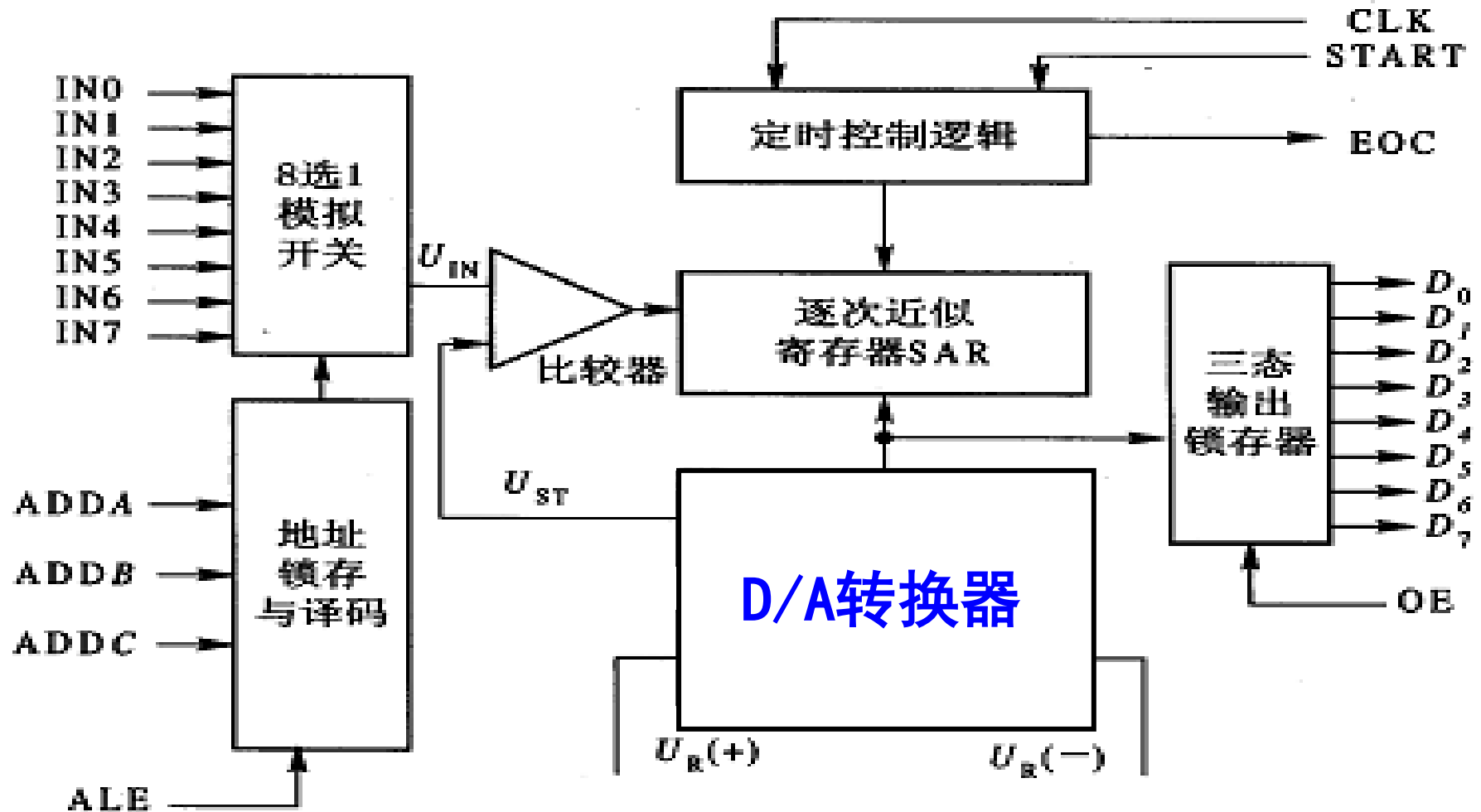
1.ADC0809特性参数

分辨率：	8位
精度：	8位
转换时间：	100 μ s
增益温度系数：	20ppm/ $^{\circ}$ C
输入电平：	TTL
功耗：	15mW

2. ADC0809引脚功能

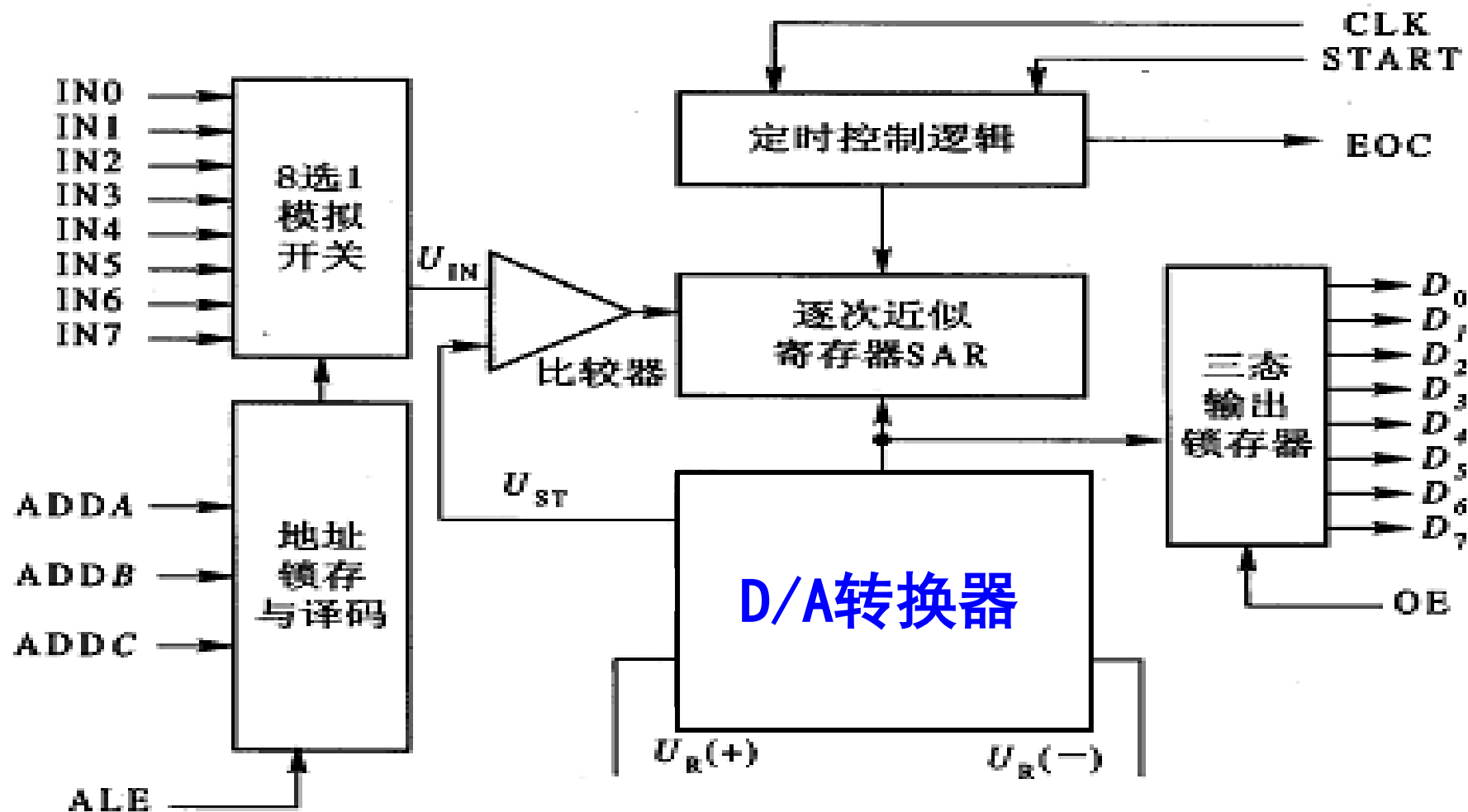


3. ADC0809工作原理



②发出A/D转换启动信号START，在START的上升沿将SAR清0，转换结束标志EOC变为低电平（表示转换正在进行BUSY），在START的下降沿开始转换；

3. ADC0809工作原理



③转换过程在时钟脉冲CLK的控制下进行；

④转换结束后，**EOC跳为高电平**，在OE端输入高电平，从而得到转换结果输出。

小 结

◆能够将模拟信号转换为数字信号的电路称为A/D转换器(ADC)

◆A/D转换包括四个步骤：取样——保持——量化——编码

◆ADC的电路结构形式主要有并行比较型、逐次比较型及双积分型。并行比较型ADC速度最快，转换精度最差；双积分型ADC速度最慢，转换精度最高。

◆ADC的主要技术为转换精度和转化速度

转换精度用分辨率表示；分辨率（分解度）= $\frac{V_{Imax}}{2^n} = \Delta$
转换速度用转换时间表示。

◆ADC的输出的数字量与输入的模拟电压成正比，其通式为：

$$N_B = \frac{v_I}{\Delta} \quad (\Delta \text{ 为量化单位, 也就是分辨率})$$

【例】 已知8位A/D转换器的基准电压 $V_{REF}=5.12V$ ，求当输入为 $V_I=3.8V$ 时的数字量输出。

$$\text{解: } \Delta = \frac{V_{Imax}}{2^n} = \frac{V_{REF}}{2^8} = \frac{5.12}{256} = 0.02(V)$$

$$\text{输出数字} = \frac{V_I}{\Delta} = \frac{3.8}{0.02} = (190)_{10} = (10111110)_2$$

【例】某信号采集系统要求用一片A/D转换集成芯片在1s内对16个热电偶的输出电压分别进行A/D转换。已知热电偶输出电压范围为0~25mV（对应于0~450°C温度范围），需分辨的温度为0.1°C，试问应选择几位的A/D转换器？其转换时间为多少？

$$\text{分辨率} = \frac{V_{\text{Imax}}}{2^n} = \frac{450}{2^n} \leq 0.1$$

$$\Rightarrow 2^n \geq \frac{450}{0.1} = 4500 \Rightarrow n \geq 13$$

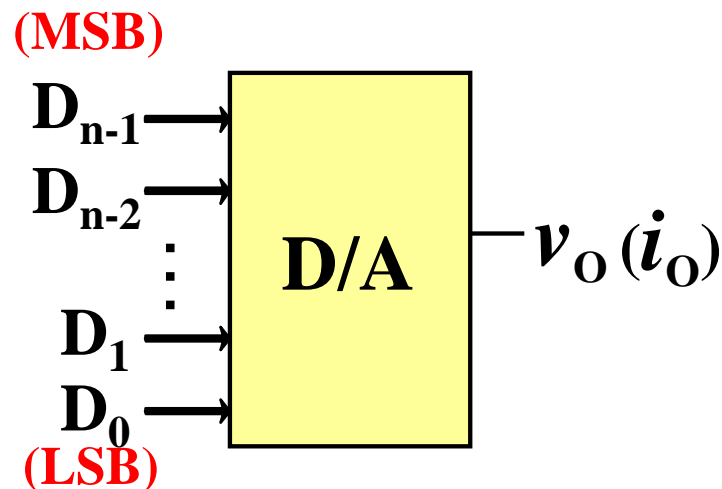
故需选用**13位**A/D转换器。

$$\text{转换时间} = \frac{1}{16} = 62.5\text{ms}$$

§ 3 D/A转换器

一、D/A转换器的基本工作原理

D/A转换器实质上是一个译码器（解码器），将输入的二进制数字量转换成模拟量，并以电压或电流的形式输出。



1、数/模转换方法：

$$N_B = D_{n-1} \cdot 2^{n-1} + D_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \cdots + D_1 \cdot 2^1 + D_0 \cdot 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$

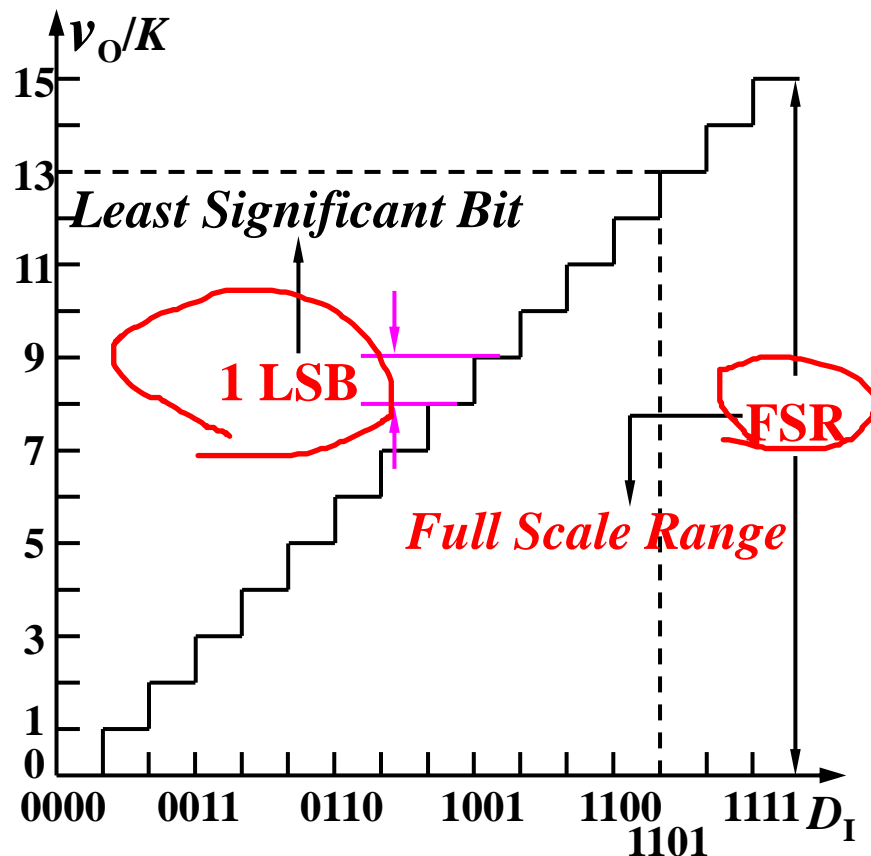
将输入的每一位二进制代码按其**权值**大小转换成相应的模拟量，然后将代表各位的**模拟量相加**，则所得的总模拟量就与数字量成正比，这样便实现了从数字量到模拟量的转换。

◆DAC的输出特性:

DAC输出模拟量的大小与输入数字量大小成正比:

$$v_O = K \times N_B$$

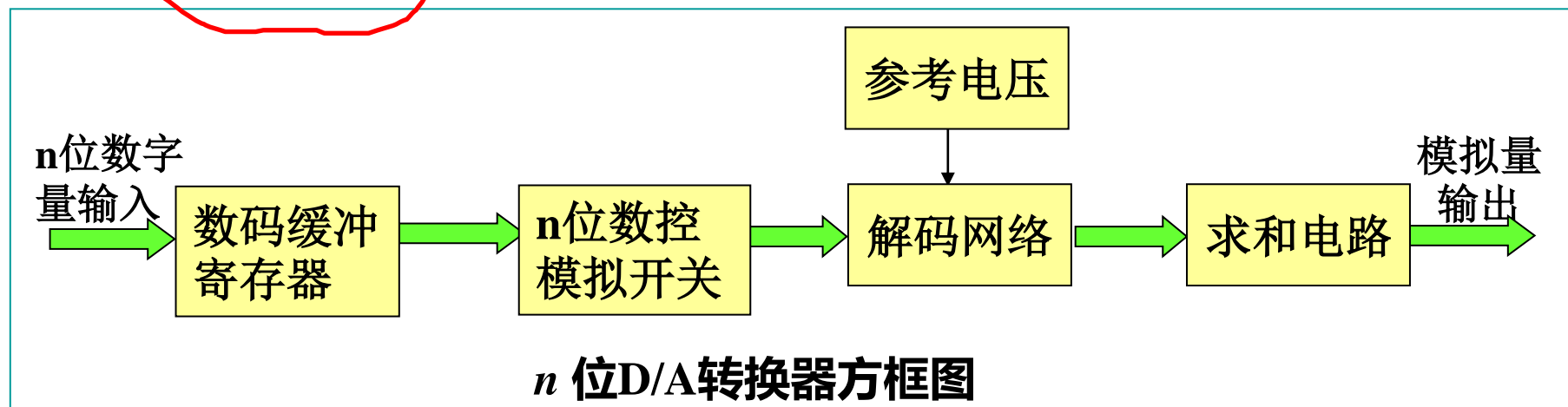
两个相邻数码转换出的电压值之间的差值, 是信息所能分辨的最小量(1 LSB); 最大输入数字量对应的输出电压值(绝对值)用FSR表示。



DAC输出特性

2、D/A转换器的一般构成

D/A转换器一般由数码缓冲寄存器、模拟电子开关、参考电压、解码网络和求和电路等组成。

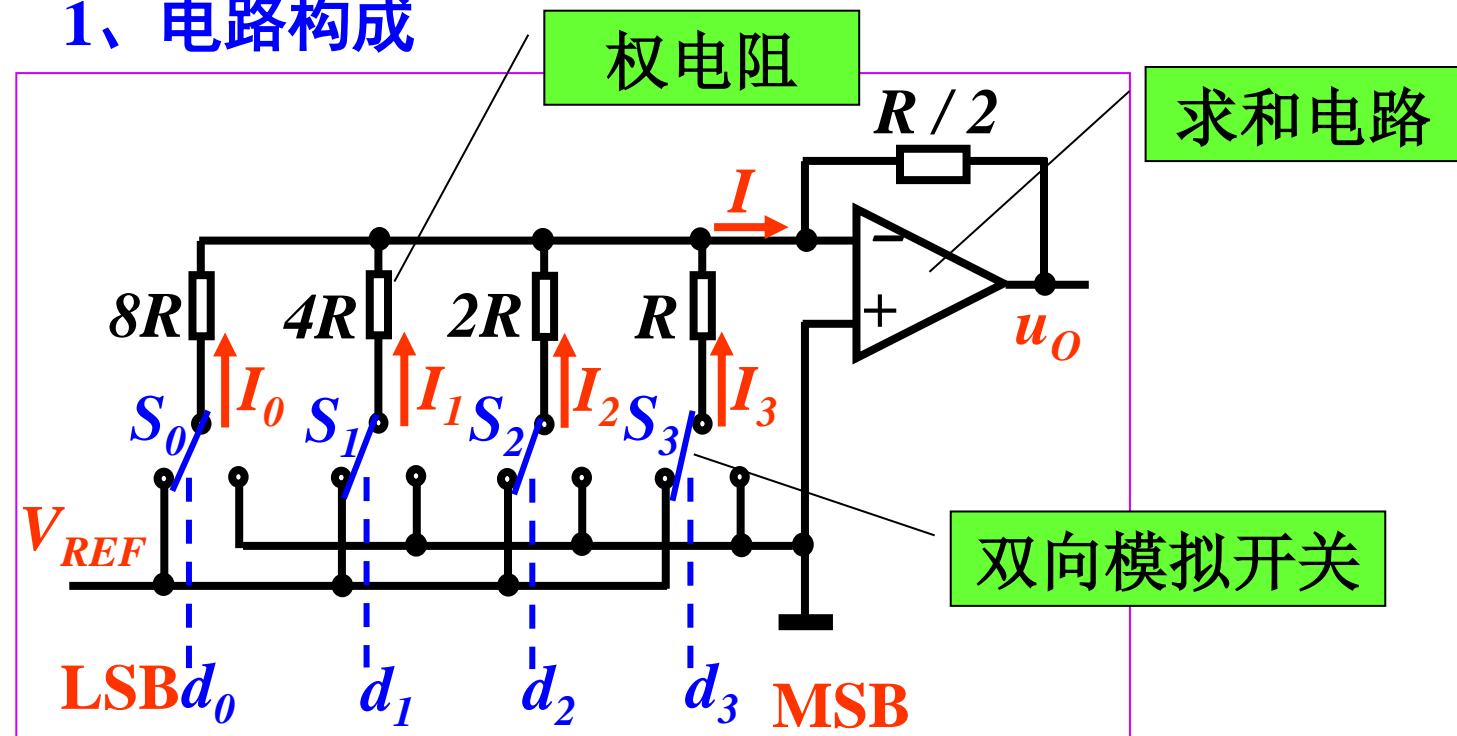


数字量以串行或并行方式输入，并存储在数码缓冲寄存器中；寄存器的输出驱动对应数位上的电子开关，将在解码网络中获得的相应数位的权值送入求和电路；求和电路将各位权值相加，便得到与数字量对应的模拟量。

按解码网络的结构不同，有权电阻网络DAC、倒T型电阻网络DAC、权电流型DAC等。

二、权电阻网络D/A转换器

1、电路构成



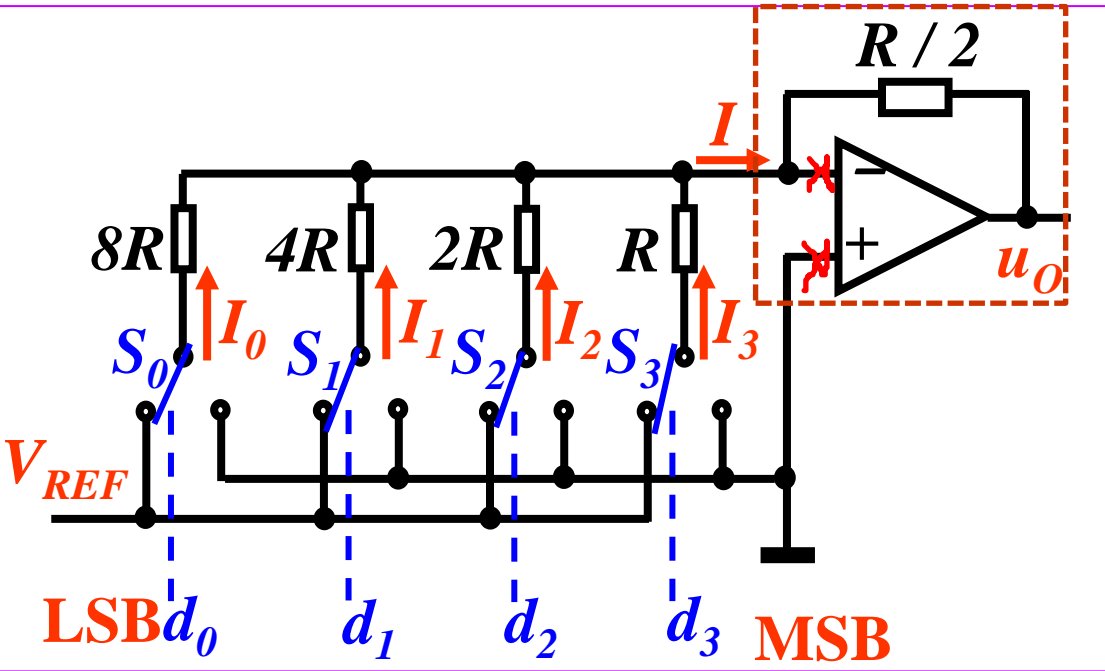
“权电阻”：电阻值的大小与对应数字量的权重密切相关。

“电子开关”： $d_i = 1$ 时， S_i 接 V_{REF} ； $d_i = 0$ 时， S_i 接地。

“求和电路”：运放组成反相求和电路实现各支路电流相加并转换成电压输出。

二、 权电阻网络D/A转换器

2、 工作原理



原理分析： 根据虚断、虚短可得

虚短是指在分析运算放大器处于线性状态时，可把两输入端视为等电位，这一特性称为虚假短路。
虚断是指在分析运算放大器处于线性状态时，可把两输入端视为等效开路，这一特性称为虚假开路。

对虚线框中的电路：

$u_- = 0$ (虚短) i_Σ 流过 R_f (虚断)

$$\frac{u_- - u_o}{R_f} = i_\Sigma \Rightarrow u_o = -i_\Sigma R_f$$

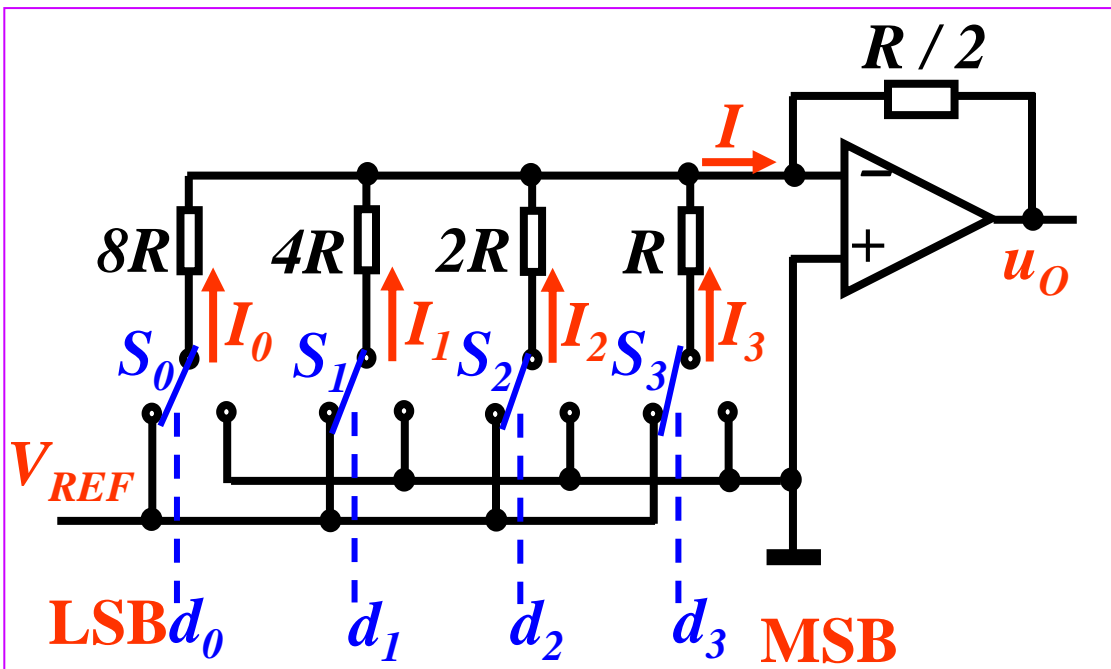
在认为运算放大器输入电流为零的条件下可以得到：

图中： $R_f = \frac{R}{2}$ ， i_Σ 即为图中的 I 。

$$u_o = -R_f i_\Sigma = -R_f (I_3 + I_2 + I_1 + I_0)$$

二、权电阻网络D/A转换器

2、工作原理



$$I = I_3 + I_2 + I_1 + I_0$$

$$I = \frac{V_{REF}}{8R} (8d_3 + 4d_2 + 2d_1 + d_0)$$

$$u_O = -\frac{R}{2} I = -\frac{V_{REF}}{16} (8d_3 + 4d_2 + 2d_1 + d_0) = -\frac{V_{REF}}{2^4} N_B$$

运放工作在线性区，
虚地， $U_- = 0$ 。

若 $d_i = 0$ ， $\rightarrow S_i$ 接地， $\rightarrow I_i = 0$

若 $d_i = 1$ ， $\rightarrow S_i$ 接 V_{REF} ，

$$I_0 = \frac{V_{REF}}{8R} \quad I_1 = \frac{V_{REF}}{4R}$$

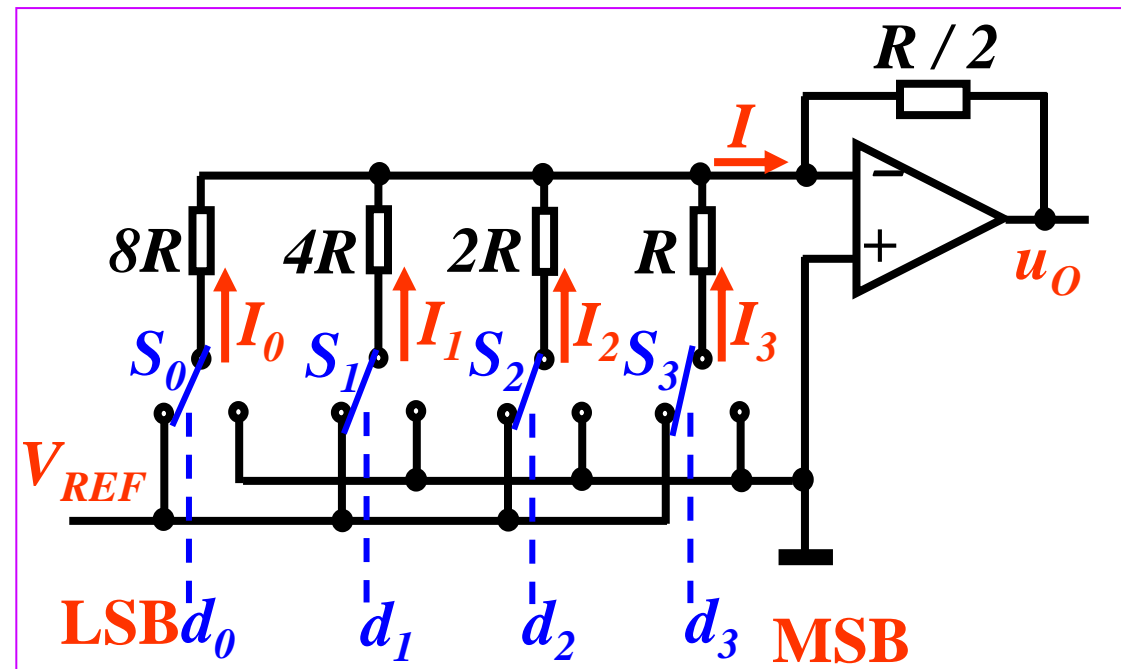
$$I_2 = \frac{V_{REF}}{2R} \quad I_3 = \frac{V_{REF}}{R}$$

输入的
数字量

$$N_B$$

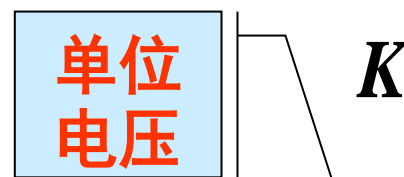
二、权电阻网络D/A转换器

2、工作原理



3、电路特点：

- (1) 结构简单；
- (2) 电阻的阻值相差较大，在位数多时，很难保证精度。



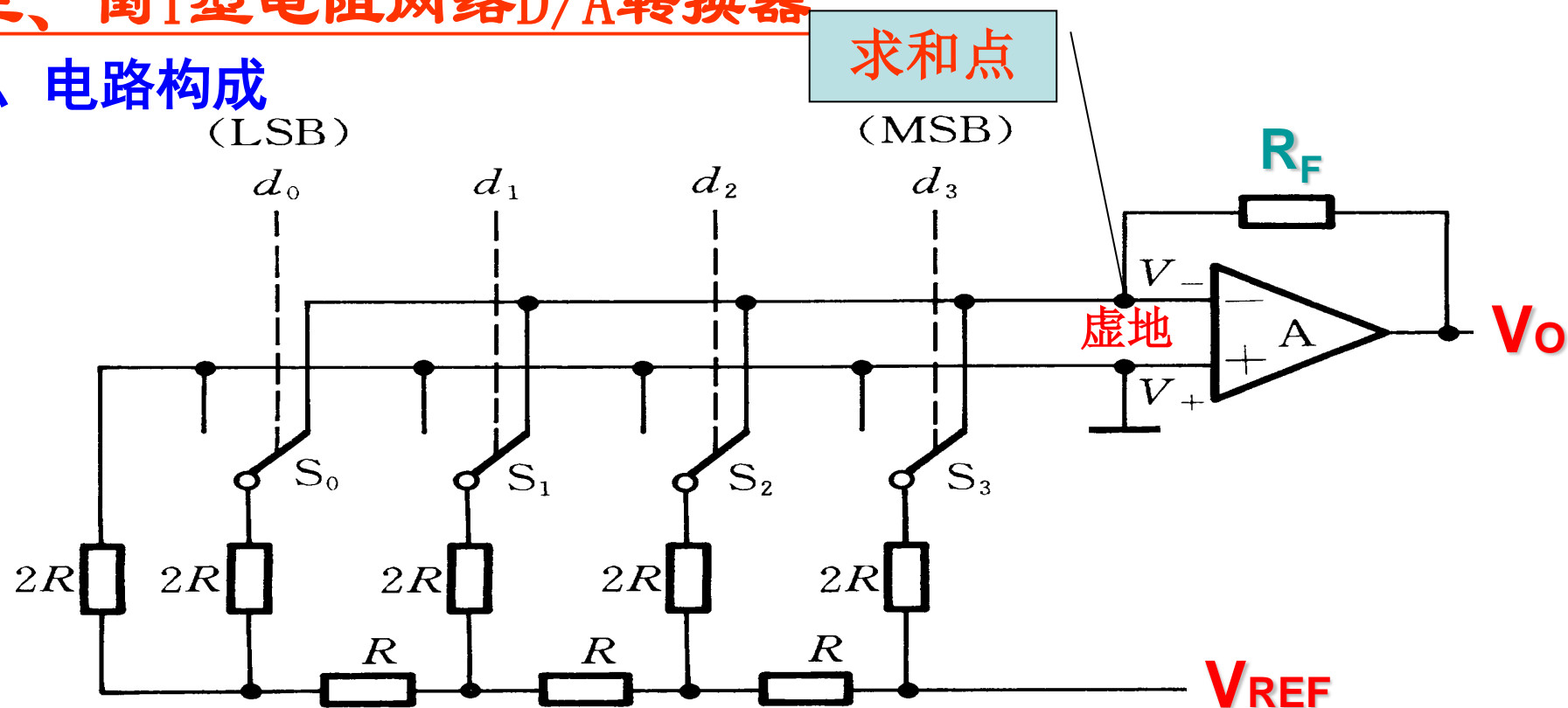
对于n位的DAC，输出电压的计算式为： $u_O = -\frac{V_{REF}}{2^n} N_B$

输出电压的范围： $0 \sim -\frac{2^n - 1}{2^n} V_{REF}$ 极性与参考电压相反。

$$u_O = -\frac{R}{2} I = -\frac{V_{REF}}{16} (8d_3 + 4d_2 + 2d_1 + d_0) = -\frac{V_{REF}}{2^4} N_B$$

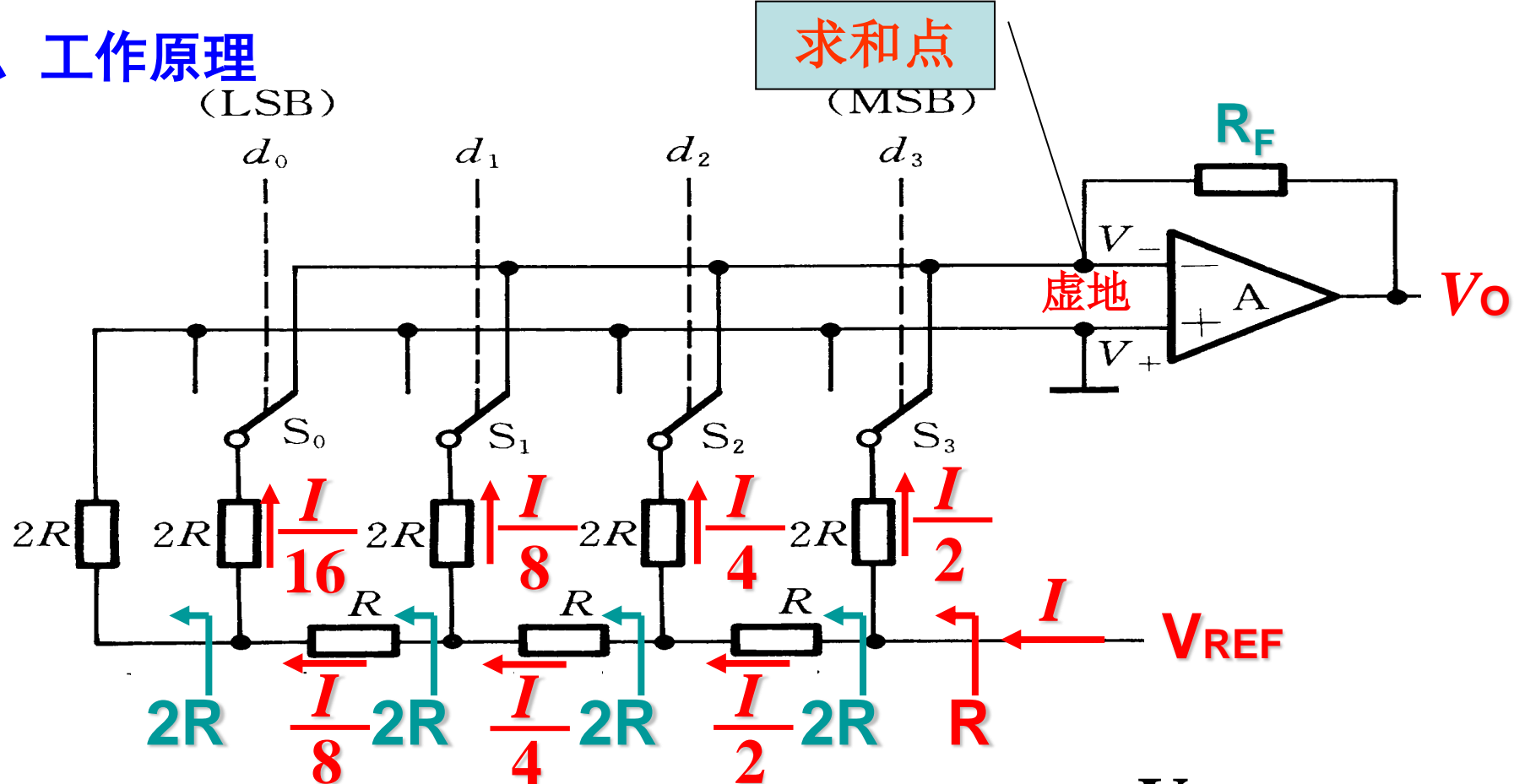
三、倒T型电阻网络D/A转换器

1、电路构成



解码电路中，电阻只有 **R 和 $2R$** 两种，并构成倒T型电阻网络。当 $d_i=1$ 时，相应的开关 S_i 接到求和点；当 $d_i=0$ 时，相应的开关 S_i 接地。但由于**虚短**，求和点和地相连，所以不论开关如何转向，电阻 **$2R$ 总是与地相连**。流经 $2R$ 电阻上的支路电流与开关状态无关。

2、工作原理



从每个节点向左看，等效电阻均为 $2R$ ；
整个网络的等效输入电阻为 R 。

$$I = \frac{V_{REF}}{R}$$

流入求和点的各支路电流为：
$$I_i = d_i \frac{I}{2^{n-i}} = \frac{V_{REF}}{2^n R} (d_i \times 2^i)$$

流入求和点的电流为：

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{n-1} I_i = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{V_{REF}}{2^n R} (d_i \times 2^i) = \frac{V_{REF}}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} (d_i \times 2^i)$$

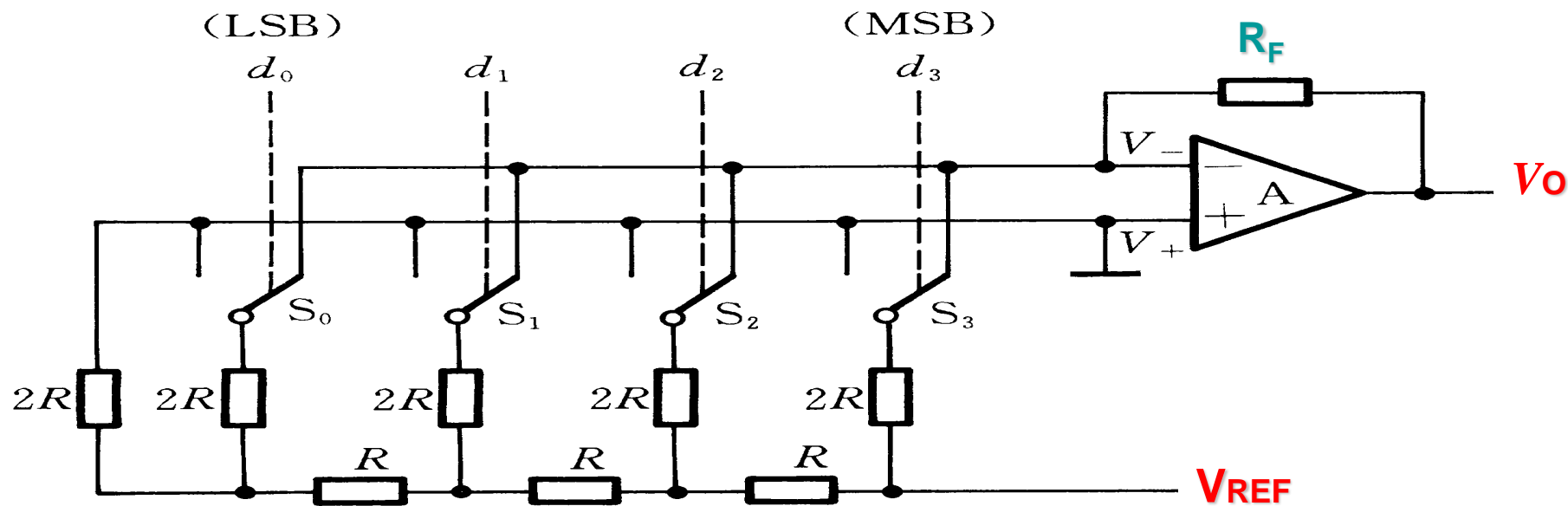
运算放大器的输出电压为：

$$v_O = -R_F I_{\Sigma} = -\frac{V_{REF}}{2^n} \cdot \frac{R_F}{R} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} d_i \times 2^i = KN_B$$

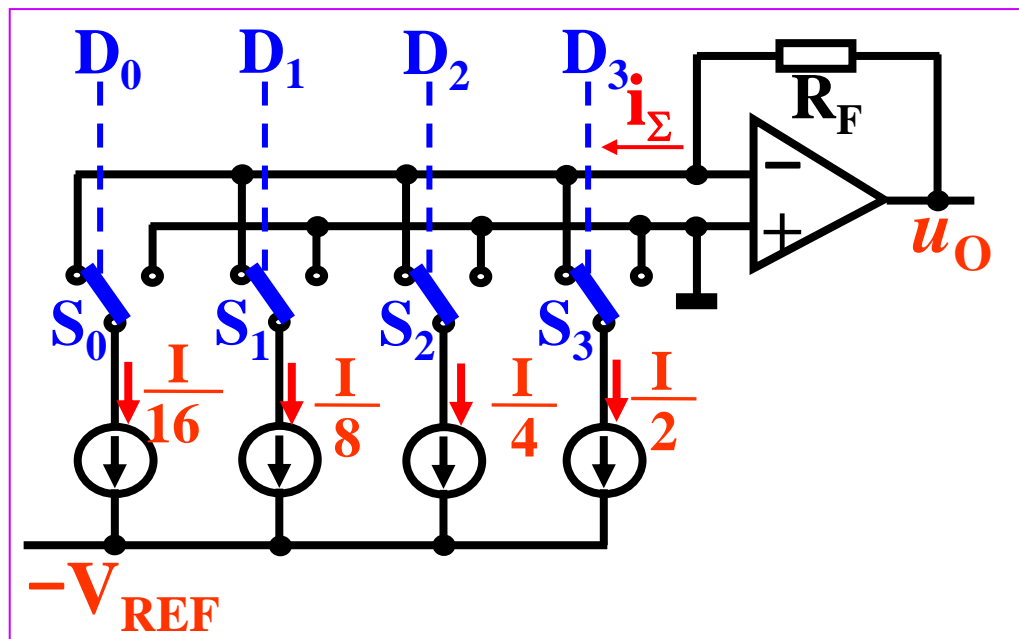
即输出的模拟电压 u_O 正比于输入的数字量 N_B ，从而实现了从数字量到模拟量的转换。

3、倒T型电阻网络DAC的特点：

- ①优点：电阻种类少，只有 R 和 $2R$ ，提高了制造精度；而且支路电流同时流入求和点，不存在时间差，因而提高了转换速度。
- ②应用：它是目前集成D/A转换器中转换速度较高且使用较多的一种，如8位D/A转换器DAC0832，就是采用倒T型电阻网络。



四、权电流型D/A 转换器



各支路恒流源的大小与对应数字量的权重成正比。

若 $D_i=0$, $\rightarrow S_i$ 接地,
 $\rightarrow I_i$ 不能加到运放输入端

若 $D_i=1$, $\rightarrow S_i$ 将对应的恒流源加到运放输入端

$$\Rightarrow I_i = \frac{I}{16} [D_i \times 2^i]$$

$$i_\Sigma = \sum I_i = \frac{I}{16} (2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

$$u_O = i_\Sigma R_F = \frac{IR_F}{2^4} (2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0) = \frac{IR_F}{2^4} N_B$$

$$\text{对于 } n \text{ 位的DAC: } u_O = \frac{IR_F}{2^n} N_B = K \cdot N_B$$

五、D/A 转换器的主要技术指标

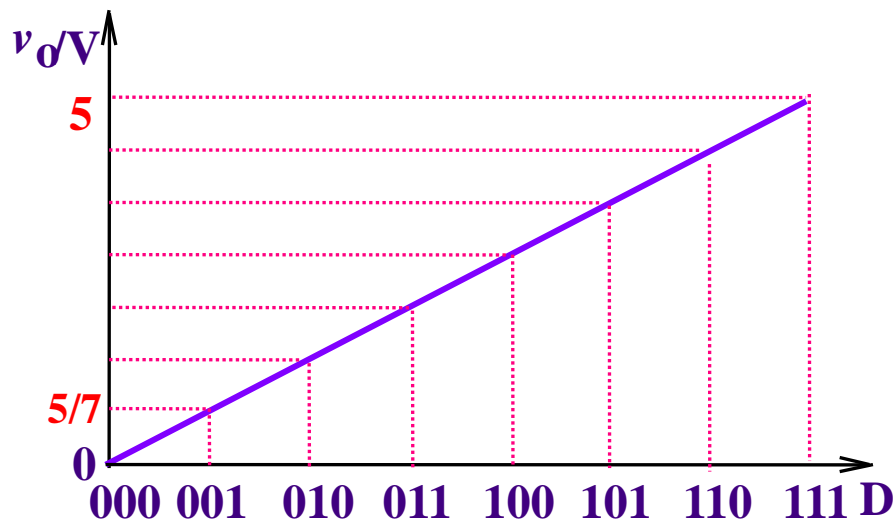
DAC的主要技术指标有：转换精度、转换速度。

DAC的转换精度通常用分辨率、转换误差来描述。

1、分辨率

分辨率用于表征D/A转换器对输入微小量变化的敏感程度。定义为D/A转换器的模拟输出电压可能被分离的等级数。

n位DAC有 2^n 个不同的模拟量输出值，即分辨率为 2^n ，
实际中通常用输入数字量的有效位数表示DAC的分辨率，如10位、8位等。显然位数越多，分辨率越高。



另外也用DAC的最小非零输出电压与最大输出电压之比来表示分辨率：

$$\text{分辨率} = \frac{V_{o\min}}{V_{o\max}} = \frac{1}{2^n - 1}$$

2、转换误差

转换误差——指输出模拟电压的**实际值与理想值之差**的最大值。

(1) 造成转换误差的主要原因：

参考电压 V_{REF} 的波动 —— 比例系数误差

运算放大器的零点漂移 —— 失调误差

模拟开关的导通内阻和导通电压
电阻网络中的电阻值偏差等 } —— 非线性误差

(2) 转换误差的表示方法：

① 用最低有效位的倍数表示。

如：某个DAC的转换误差为 **$1/2\text{LSB}$** ，

表示输出模拟电压与理论值之间的绝对误差小于等于输入数字代码为00.....1时输出电压的一半。

② 用输出电压满刻度的百分数表示。

如： **1% (FSR)**

3、转换速度

当DAC输入的数字量发生变化时，输出的模拟量需要延迟一段时间后才能达到对应的稳态值，如图示。

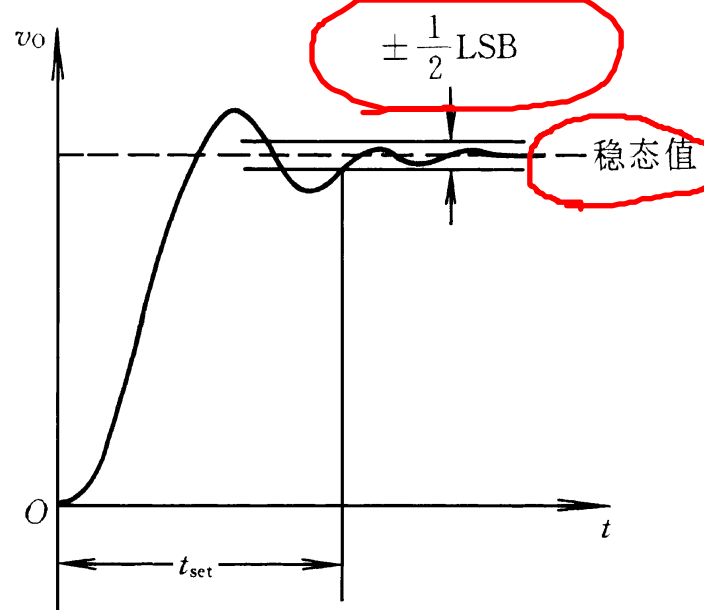
①建立时间 t_{Set} :

输入由全0变为全1，输出电压与稳态值相差 ($\pm \text{LSB}/2$) 所需的时间。

这个参数的值越小越好，一般DAC的 $t_{\text{set}} < 0.1\mu\text{s}$ 。

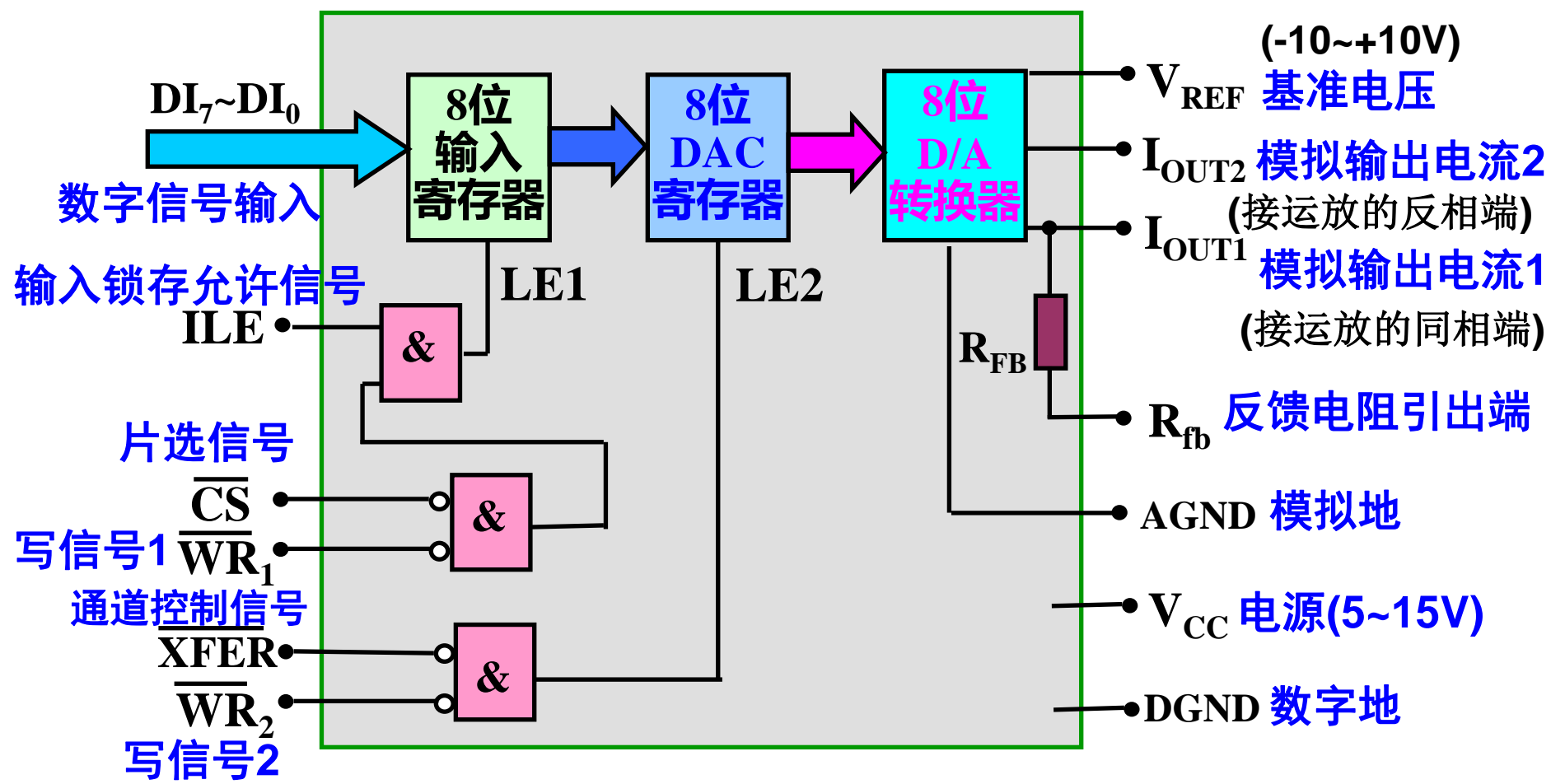
②转换速率 :

在大信号工作状态下，模拟输出电压的最大变化率。



六、集成DAC0832（采用CMOS工艺制成的双列直插式8位D/A转换器）

1. DAC0832结构框图



它由一个**8位输入寄存器**、一个**8位DAC寄存器**和一个**8位D/A转换器**三大部分组成，D/A转换器采用了**倒T型电阻解码网络**。

2. DAC0832使用说明

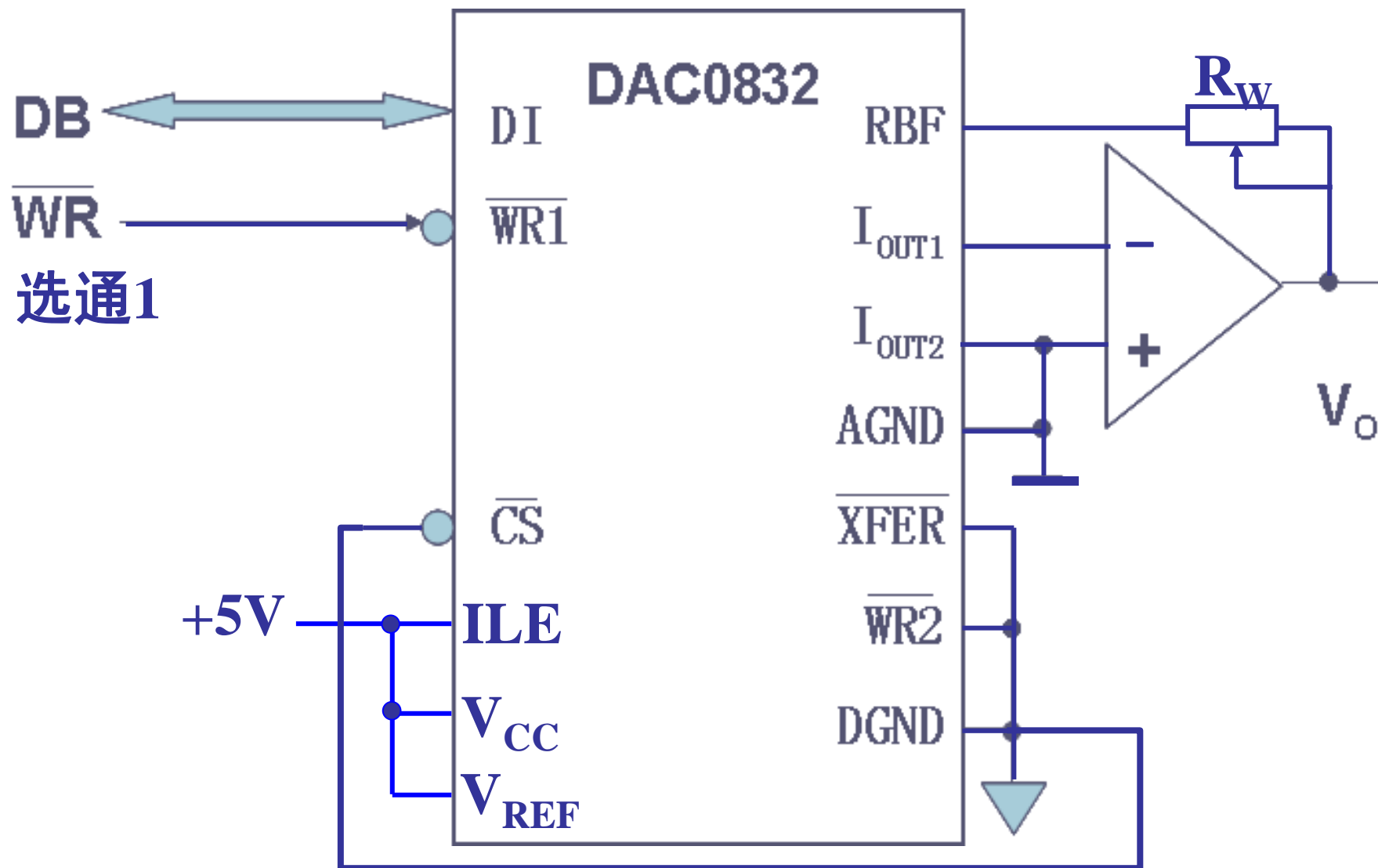
当ILE、CS和 WR_1 同时有效时，输入数据 $DI_7 \sim DI_0$ 进入输入寄存器；并在 WR_1 的上升沿实现数据锁存。当 WR_2 和XFER同时有效时，输入寄存器的数据进入DAC寄存器；并在 WR_2 的上升沿实现数据锁存。八位D/A转换电路随时将DAC寄存器的数据转换为模拟信号（ $I_{OUT1} + I_{OUT2}$ ）输出。

DAC0832 的有双缓冲器型、单缓冲器型两种工作方式。

(1) 双缓冲方式：输入数据先存放在寄存器1，输出的模拟值由寄存器2的数据决定；当数据由寄存器1转存到寄存器2后，寄存器1可以接收新的数据而不影响输出。便于多路DAC同时工作。

(2) 单缓冲方式：适于单个ADC工作。寄存器2作数据通道，此时只需一次写操作，就开始转换。

DAC0832采用单缓冲器方式工作



小 结

- ◆能够将数字信号转换为模拟信号的电路称为D/A转换器(DAC)
- ◆DAC的电路结构形式主要有权电阻型、倒T型电阻网络及权电流型，目前TTL产品多为权电流型（精度高、速度快），CMOS产品多采用倒T型电阻网络（功耗低）。
- ◆DAC的模拟输出电压与输入的二进制数成正比，其通式为：

$$V_O = K \times \sum_{i=0}^{n-1} (D_i \times 2^i) = K \times N_B$$

- ◆DAC的主要技术为转换精度和转化速度

转换精度用分辨率和转换误差表示；

转换速度用建立时间和转换速率表示。

【例1】 已知某8位D/A转换器的输入为11010001时，输出 $V_O=2.09V$ ，求输入为00111100时的输出电压值。

解： DAC的模拟输出电压的通式为：
$$V_O = K \times \sum_{i=0}^{n-1} (D_i \times 2^i)$$

$$K = \frac{V_{O1}}{\sum_{i=0}^{n-1} (D_i \times 2^i)} = \frac{2.09}{(11010001)_2} = 0.01V$$

$$V_{O2} = K \times \sum_{i=0}^{n-1} (D_i \times 2^i) = 0.01 \times 60 = 0.6V$$



⊕ Plexers

Facing	East
Output?	No
Data Bits	1
Three-state?	No
Pull Behavior	Unchanged
Label	
Label Location	West
Label Font	SansSerif Plain 12

.....

这是《上海城市总体规划(2003-2020)》中提出的“三轴”之一。

.....

这是一个直接的异或电路

[illegible]