

第八章 数—模和模—数转换电路

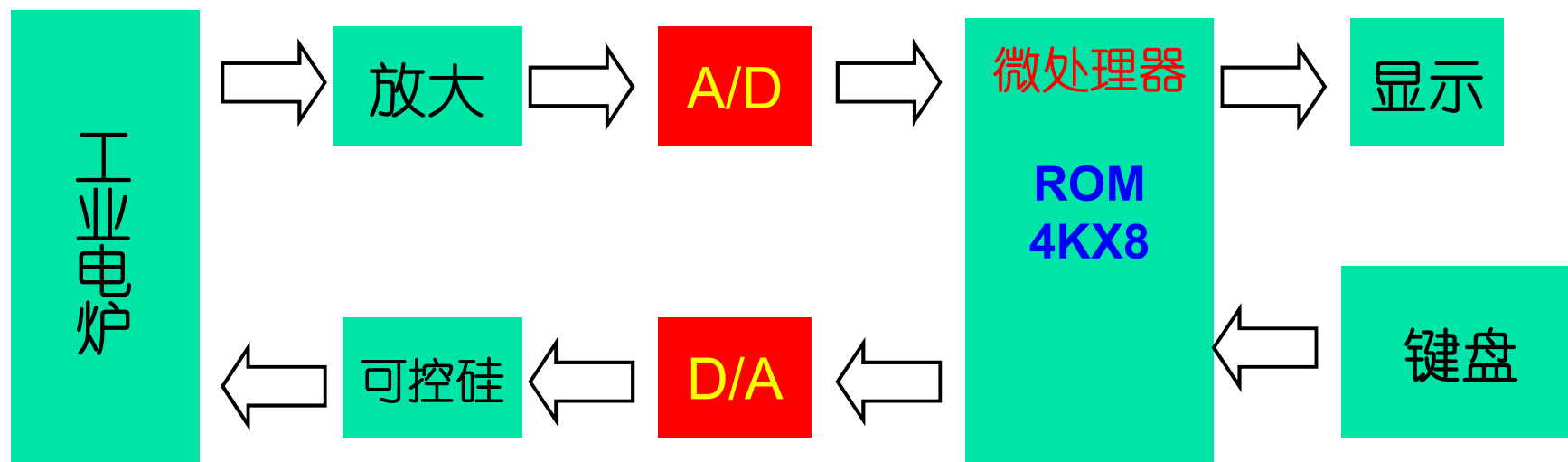


数字系统的特点：输入、输出都是数字量。



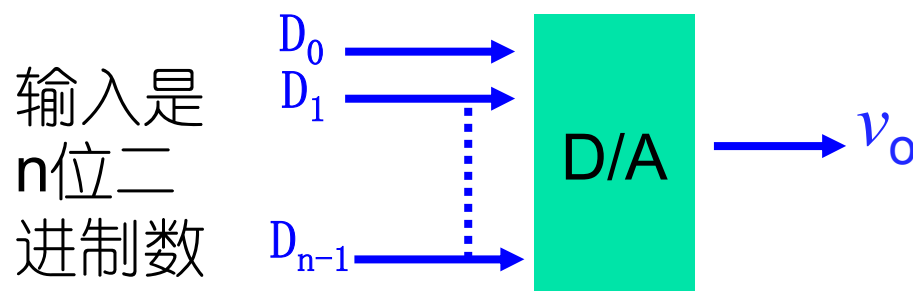
模拟量

模拟—数字转换 (Analog to Digital Convert) A/D } 转换精度
数字—模拟转换 (Digital to Analog Convert) D/A } 转换速度



第一节：D/A转换器

一、基本原理



各位按权值大小进行转换后，求和

$$v_O = k \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$

K：转换比例系数

$D_{n-1} D_{n-2} \dots D_0$ 为数字电压量， v_O 为模拟电压量。

输出模拟电压与输入数字量成正比关系。

$D_{n-1} D_{n-2} \dots D_0$ 取0或1，但各位权值不同，分别为：

2^{n-1} 、 2^{n-2} 、...、 2^0

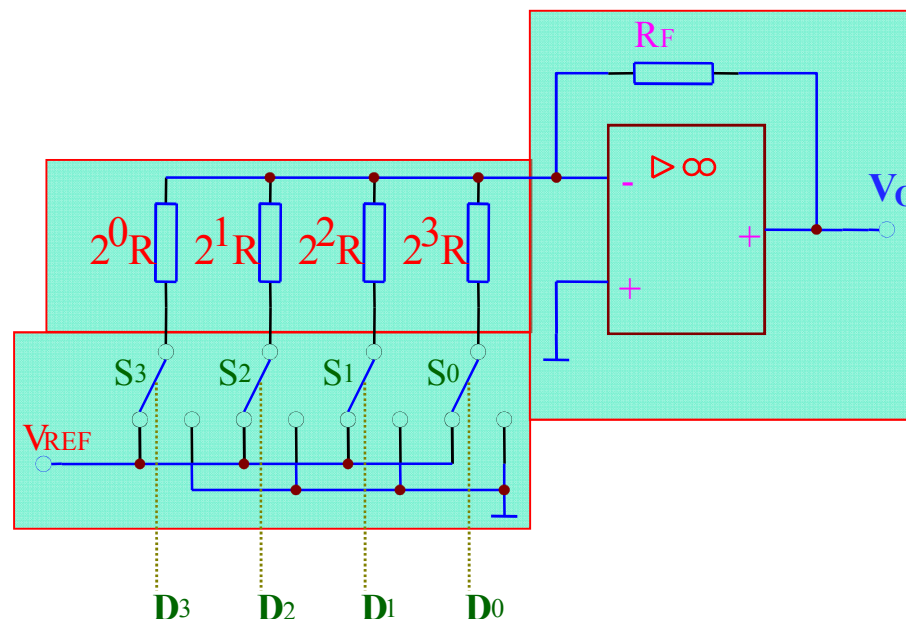
★ 权电阻网络D/A转换电路

★ 倒T形电阻网络D/A转换电路



二、权电阻网络D/A 转换电路

1、电路组成（以4位D/A为例）



☆ 表示各位是**0**或**1**的电路 —模拟电子开关**S**

$$D_i = 1, S_i = V_{REF} \quad D_i = 0, S_i = \text{GND}$$

☆ 权电阻网络：位权电阻分别为： 2^0R 、 2^1R 、 2^2R 、 2^3R

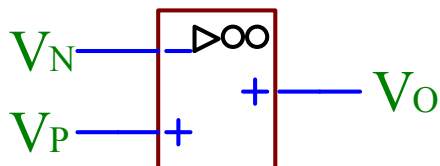
☆ 求和及I/V转换电路 —集成运算放大器



补充内容 理想运放具有虚短和虚断的特性

1、虚短

站在电压的角度



$$A_{vd} = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_O}{V_N - V_P} = \infty$$

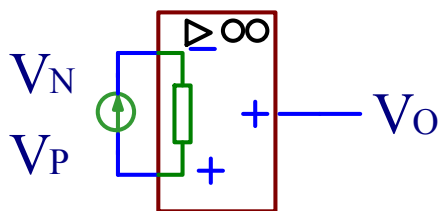
$$V_N \approx V_P = 0$$

成运放的放大倍数很大，而运放的输出有限 (**10~14V**)，因此差模输入电压不足**1mV**。两输入端电压近似相等，相当于短路。放大倍数越大，两输入端电压越接近相等。

在分析运放处于线性放大状态时，可把两输入端视为等电位，这一特性称为虚假短路（即**虚短**）。虚短不是真正短路。

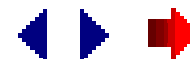
2、虚断

站在电流的角度



$$R_{id} \approx \infty, I_{id} \approx 0。$$

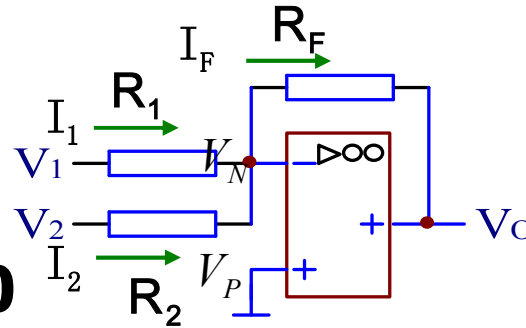
放差模输入电阻很大，一般运放输入电阻 $>1M\Omega$ ，流入运放的电流不足 $1\mu A$ ，所以通常可把两输入端视为开路。运放输入电阻越大，输入端越接近于开路，是虚假开路（**虚断**），不是真正开路。



求和放大器：

根据虚断：

流入运放的电流 $I_i \approx 0$



由于运放存在虚短

$$V_N \approx V_P = 0$$

N端称为虚地，不是真正接地。

根据叠加原理： $I_1 + I_2 = I_F$

$$\frac{V_1 - V_N}{R_1} + \frac{V_2 - V_N}{R_2} = \frac{V_N - V_O}{R_F} \quad \text{而N端虚地，} V_N = 0$$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} = \frac{-V_O}{R_F}$$

$$-V_O = \frac{R_F}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_F}{R_2} \cdot V_2$$

$$-V_O = V_1 + V_2$$

$$V_O = -(V_1 + V_2)$$

等式两边同乘以 R_F

当 $R_1 = R_2 = R_F$ 时

负号是由反向输入引起的

是加法运算表达式，可以扩展到多个输入电压相加，所以是求和放大器。



定量分析 (输出模拟电压和输入数字信号之间的关系)

$D_3D_2D_1D_0=1000$ 时: $I_3 = \frac{V_{REF}}{2^0 R}$
 S_3 接 V_{REF} ,其余接地

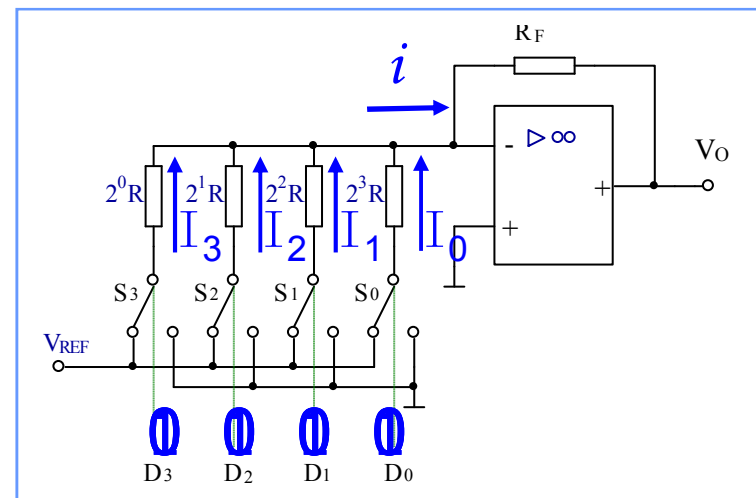
$D_3D_2D_1D_0=0100$ 时: $I_2 = \frac{V_{REF}}{2^1 R}$
 S_2 接 V_{REF} ,其余接地

$D_3D_2D_1D_0=0010$ 时: $I_1 = \frac{V_{REF}}{2^2 R}$
 S_1 接 V_{REF} ,其余接地

$D_3D_2D_1D_0=0001$ 时: $I_0 = \frac{V_{REF}}{2^3 R}$
 S_0 接 V_{REF} ,其余接地

$D_3D_2D_1D_0=1111$ 时:
 $D_3D_2D_1D_0$ 全部接 V_{REF}

根据叠加原理求和放大器总输入电流为:



$$\begin{aligned}
 i &= I_3 + I_2 + I_1 + I_0 \\
 &= \frac{V_{REF}}{2^0 R} D_3 + \frac{V_{REF}}{2^1 R} D_2 + \frac{V_{REF}}{2^2 R} D_1 + \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_0 \\
 &= \frac{V_{REF}}{2^3 R} (D_3 2^3 + D_2 2^2 + D_1 2^1 + D_0 2^0) \\
 &= \frac{V_{REF}}{2^3 R} \sum_{i=0}^3 D_i 2^i \quad i = (0, 1, 2, 3)
 \end{aligned}$$



对于n位权电阻网络D/A转换器总电流为：

$$i = \frac{V_{REF}}{2^{n-1} R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$

求和放大器输出电压为：

$$v_o = -iR_f = -\frac{V_{REF} R_f}{2^{n-1} R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$
$$= -\frac{2R_f}{R} \frac{V_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$

输出模拟电压 V_o 的大小与输入的二进制数码的数值大小 $\sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$ 成正比，同时还与量化级 $\frac{V_{REF}}{2^n}$ 有关。

例1：设4位D/A转换器输入二进制数码 $D_3D_2D_1D_0=1101$ ，基准电压 $V_{REF}=-8V$ ， $R_f = R/2$ ，求输出电压 V_o 。

$$v_o = -\frac{2R_f}{R} \frac{V_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i = -1 \times \frac{-8}{2^4} \times (1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0)$$
$$= 6.5V$$



权电阻D/A转换器优点:

电路结构简单, 使用电阻数目少, n 位有 n 个电阻。

权电阻D/A转换器缺点:

➤ 电阻取值范围大。

如果 $n=8$, 取 $R=10\text{K}\Omega$, 那么 $2^7R=1.28\text{M}\Omega$

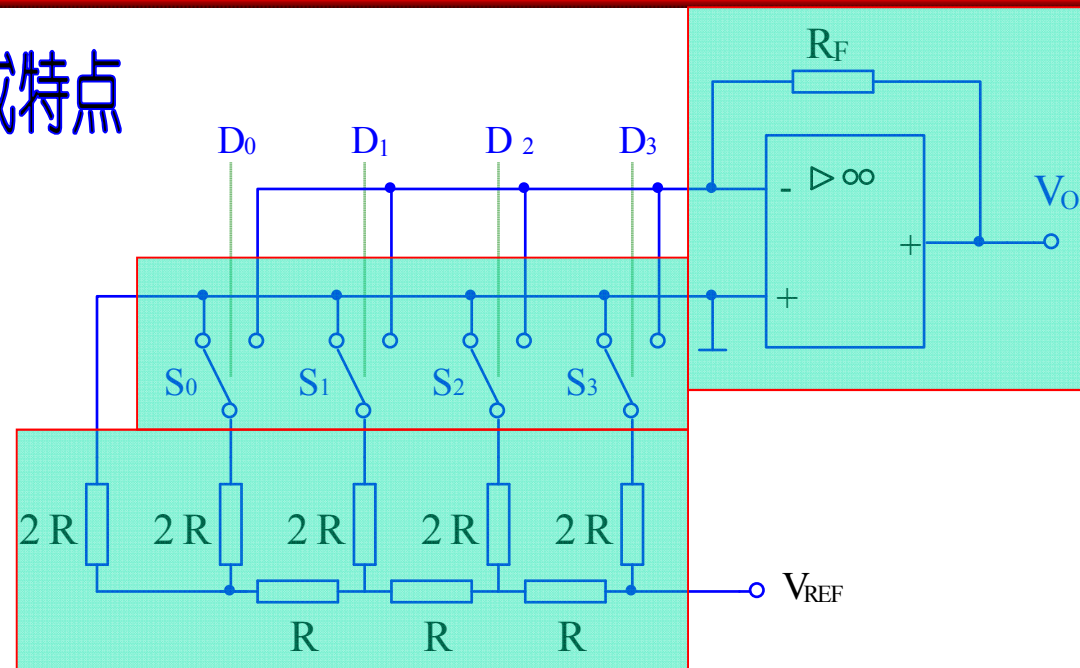
➤ 在比较宽阻值范围内要保证电阻的精度是十分困难的。

二、倒T型电阻网络D/A转换器



三、倒T型电阻网络D/A转换器

1、电路组成特点

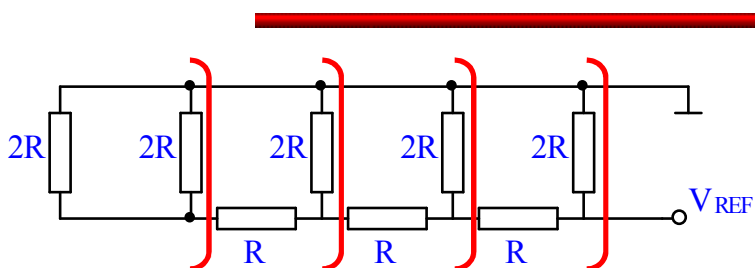


★并臂电阻为 $2R$,串臂电阻为 R

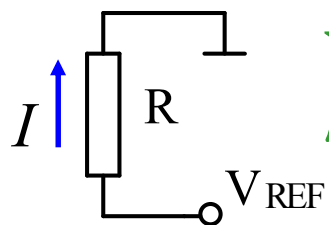
★ D_i 为1,并臂电阻接反相端; D_i 为0,并臂电阻接同相端。
由于运放反向输入端的电位始终接近于“0”电位（虚地），
所以无论开关接在那一边，都相当于接在“地”电位上。

★各节点上视、左视电阻都为 $2R$ 。





从等效电路向左看进去，
其等效电阻都是 R 。

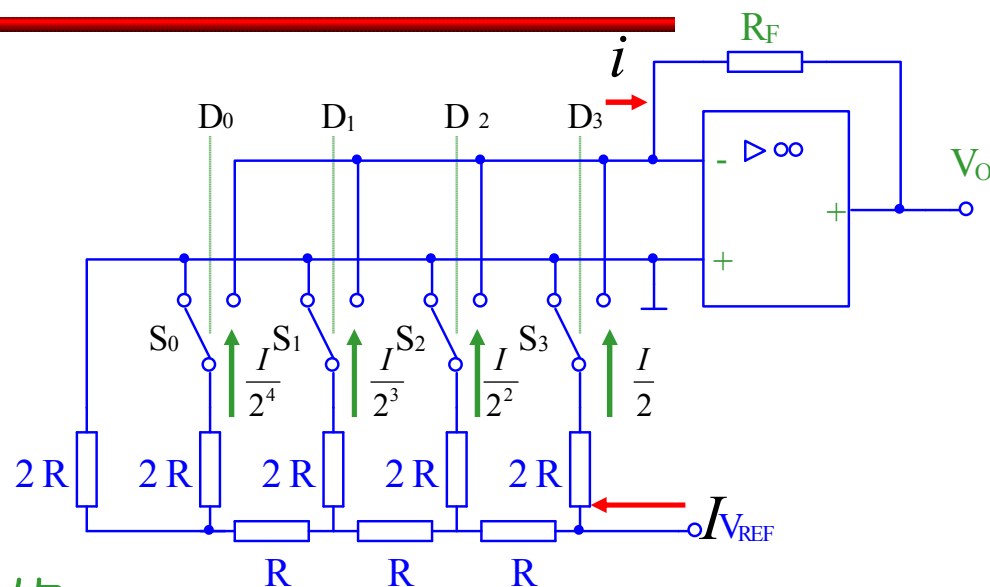


★流入电阻网络的
总电流为：

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

所以每条支路电流为：

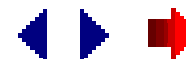
$$I_3 = \frac{I}{2}, I_2 = \frac{I}{2^2}, I_1 = \frac{I}{2^3}, I_0 = \frac{I}{2^4}$$



★电阻网络总电流每
流经一个节点，就二
等分一次。

★流向反馈电阻 R_f 的
总电流为：

$$i = I_3 + I_2 + I_1 + I_0$$



$$\begin{aligned}
 i &= I_3 + I_2 + I_1 + I_0 \\
 &= \frac{V_{REF}}{R} \left(\frac{1}{2} D_3 + \frac{1}{2^2} D_2 + \frac{1}{2^3} D_1 + \frac{1}{2^4} D_0 \right) \\
 &= \frac{V_{REF}}{R} \frac{1}{2^4} (D_3 2^3 + D_2 2^2 + D_1 2^1 + D_0 2^0) \\
 &= \frac{V_{REF}}{R} \frac{1}{2^4} \sum_{i=0}^3 D_i 2^i
 \end{aligned}$$

求和放大器的输出电压为：

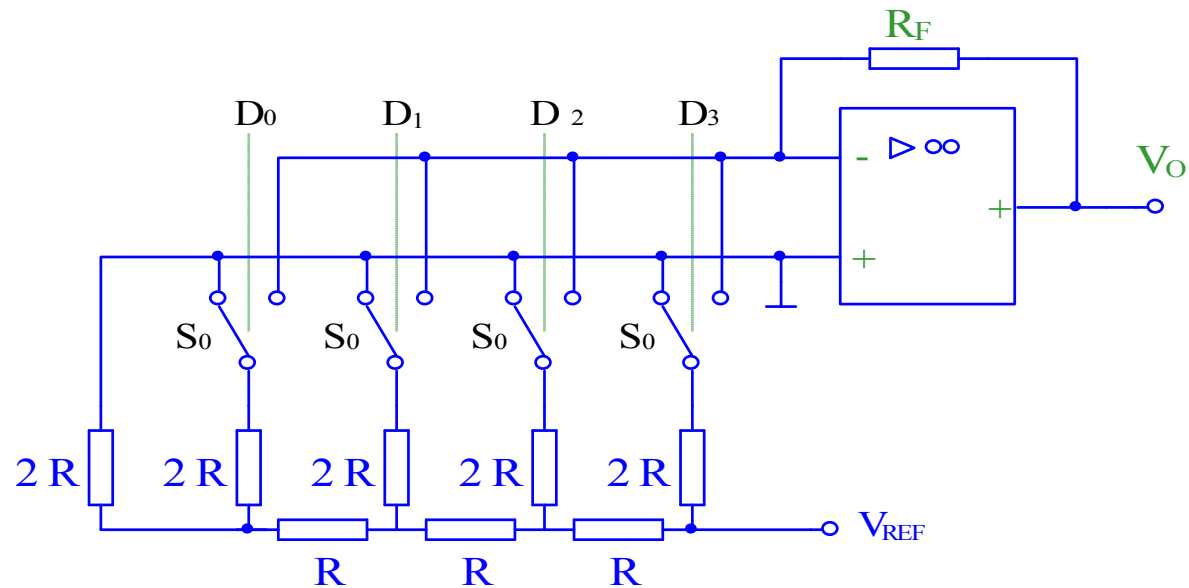
$$v_O = -iR_f = -\frac{R_f}{R} \frac{V_{REF}}{2^4} \sum_{i=0}^3 D_i 2^i$$

n位倒T型电阻网络D/A转换器的输出电压为：

$$v_O = -iR_f = -\frac{R_f}{R} \frac{V_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$



倒T型D/A特点:



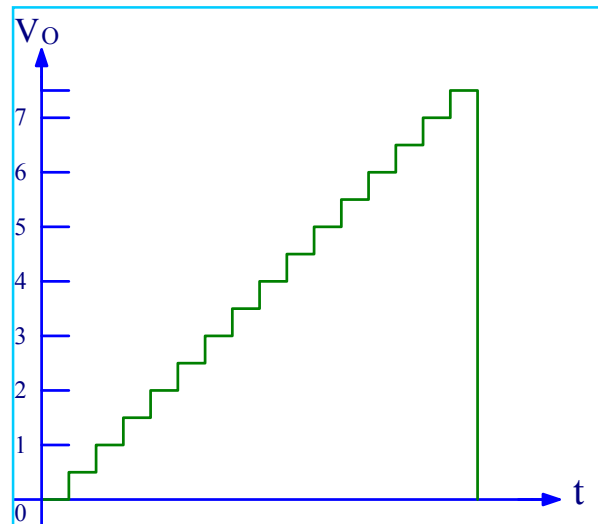
★ 每条支路电流直接流入运放输入端，不存在传输时间差，提高了工作速度。同时也有效防止动态过程中输出端可能出现的尖峰干扰脉冲。是目前**D/A**转换速度较快的一种，也是用的最多的一种**D/A**转换器。



例2：设4位倒T型D/A转换器输入二进制数码为0000~1111,基准电压 $V_{REF} = -8V, R_f = R$, 求输出电压 V_O 。并画出输出 V_O 波形。

$$v_o = -\frac{R_f}{R} \frac{V_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$

$$= -\frac{-8}{16} \times (8D_3 + 4D_2 + 2D_1 + 1D_0)$$



D_3	D_2	D_1	D_0	V_O
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0.5
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1.5
0	1	0	0	2
0	1	0	1	2.5
0	1	1	0	3
0	1	1	1	3.5
1	0	0	0	4
1	0	0	1	4.5
1	0	1	0	5
1	0	1	1	5.5
1	1	0	0	6
1	1	0	1	6.5
1	1	1	0	7
1	1	1	1	7.5



D/A输入、输出转换特性为：

D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	V _o
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0.5
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1.5
0	1	0	0	2
0	1	0	1	2.5
0	1	1	0	3
0	1	1	1	3.5
1	0	0	0	4
1	0	0	1	4.5
1	0	1	0	5
1	0	1	1	5.5
1	1	0	0	6
1	1	0	1	6.5
1	1	1	0	7
1	1	1	1	7.5

从转换特性表中看出：

★每一个二进制代码的数字信号，通过位数（位权值）的计算，都可以对应一个相应的十进制数。

★相邻两个数字信号转换出来的数值是不连续的，说明转换电路存在转换误差。这个误差也就是D/A转换电路所能分辨的最小量，通常称为**量化级**。



最小量化级（转换误差）和输入二进制位数有关。

转换误差 = $\frac{1}{2^n} \times \text{满值}$ (输入数字信号全1时的输出最大模拟电压) (例: 7V)

$$n = 3 \quad \frac{1}{2^3} \times 7V = 875mV$$

$$n = 4 \quad \frac{1}{2^4} \times 7V = 437mV$$

$$n = 10 \quad \frac{1}{2^{10}} \times 7V = 6.8mV$$

$$n = 12 \quad \frac{1}{2^{12}} \times 7V = 1.7mV$$

★ 输入二进制数码位数越多，量化级越小，D/A输出电压越接近模拟电压。转换的精度也就越高。



四、D/A转换器的转换精度与转换速度

1、转换精度

在D/A转换器中通常用分辨率和转换误差来描述转换精度。

☆ 分辨率：D/A转换器 理论上可以达到的精度

➤ 用输入二进制数码的位数表示

➤ 用D/A转换器能够分辨出来的最小电压（最低有效位为1时对应的电压 ΔV ）与最大输出电压 V_m 之比表示

$$\text{分辨率} = \frac{\Delta V}{V_m} = \frac{1}{2^n - 1}$$

说明D/A转换器对输入信号的分辩能力。

分辨率越高，转换时对输入量的微小变化的反应越灵敏。



1 转换精度

☆ 转换误差: 实际转换特性和理想转换特性之间的最大偏差。

- 用最低有效位**LSB**的倍数表示(绝对转换误差)
- 用输出电压满刻度**FSR**的百分数表示 (相对转换误差)

产生的原因: 基准电压的波动、运放零点漂移、模拟开关的导通内阻和导通压降、电阻网络中电阻阻值的偏差等

(1) 非线性误差

电子开关的导通内阻和导通压降, 电阻网络电阻阻值的偏差产生的误差电压非常数, 也不与输入数字量成正比。

(2) 比例系数误差

它是基准电压 V_{REF} 偏离标准值所引起的误差。

(3) 漂移误差

由集成运放的零点漂移所造成的误差。增益的改变也会引起增益误差。

要获得高精度的**D/A**转换器, 不能仅依靠提高输入数字量的位数, (位数越高, 其价格越贵)。还必须要有高稳定度的基准电压 V_{REF} 和低漂移的运放相配合, 才能获得较高的转换精度。



例如：转换误差为**1/2LSB**,表示输出模拟电压的绝对误差等于最低有效位输出模拟电压的一半。

如：对于满量程为10V，10位D/A转换器，量化单位 $\Delta=9.77\text{mV}$ ，则其绝对精度为 $(1/2)\Delta=4.88\text{mV}$ ，其相对精度为 $4.88\text{mV}/10\text{V}=0.048\%$

2、转换速度

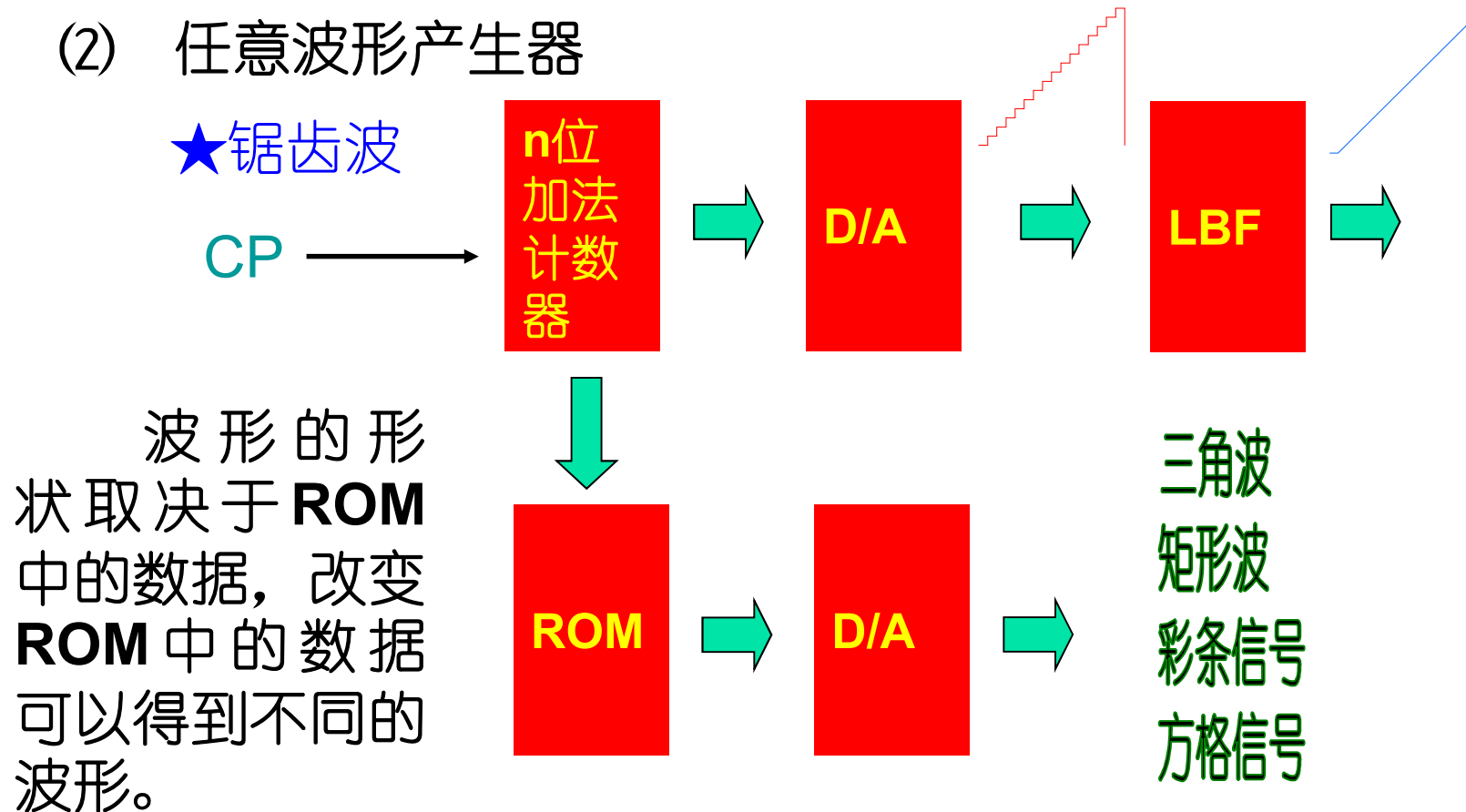
从数字信号输入**DAC**起，到输出电流（或电压）达到稳定值所需的时间称为建立时间。建立时间的大小决定了转换速度的快慢。

目前**10~12**位单片集成**D/A**转换器（不包括运放）的建立时间可以在**1 μS** 以内。



五、D/A转换器应用举例

- (1) 数字系统和模拟系统的接口电路
- (2) 任意波形产生器



例题1: 对于一个8位D/A转换器:

- (1) 若最小输出电压增量为0.02V, 试问当输入代码为01001101时, 输出电压 V_0 为多少伏?
- (2) 若其分辨率用百分数表示, 则应是多少?
- (3) 若某一系统中要求D/A转换的精度小于0.25%, 试问这一D/A转换器能否应用?

$$\text{分辨率} = \frac{\Delta V}{V_m} = \frac{1}{2^n - 1}$$

题意分析:

本例题涉及转换器几个参数, 一是最小输出电压增量; 二是分辨率; 三是转换精度。

最小电压增量: 对应于输入最小数字量的输出模拟电压。
即指数字量每增加一个单位输出模拟电压的增加量。

分辨率: 定义为对最小数字量的分辨能力。一般用输入数字量的位数表示, 也可以用最小输出电压与最大输出电压之比的百分数表示。



转换精度：

用最低有效位的倍数表示。转换误差为 $1/2\text{LSB}$,表示输出模拟电压的绝对误差等于最低有效位输出模拟电压的一半。

解：(1) 当最小输出电压增量为 0.02V 时，输入代码为 01001101 时，所对应的输出电压 V_O 为：

$$V_O = 0.02 \times (2^6 + 2^3 + 2^2 + 2^0) = 1.54\text{V}$$

(2) 8位D/A转换器的分辨率百分数为：

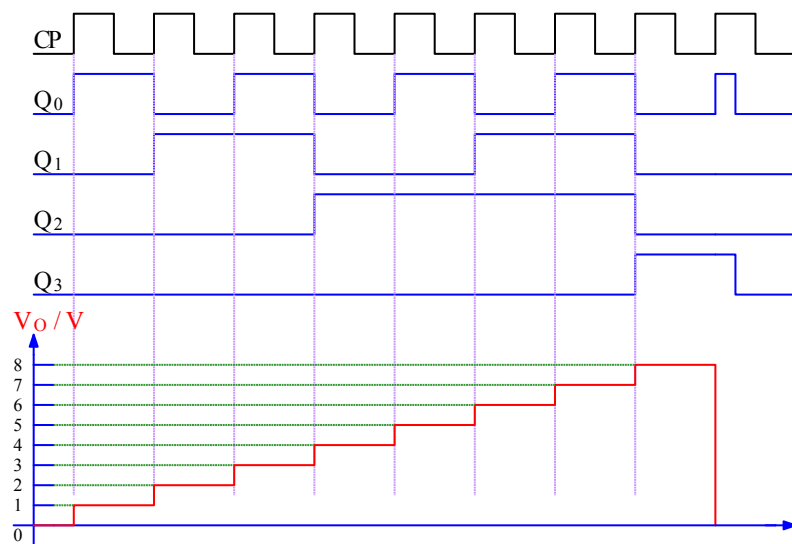
$$\frac{1}{2^8 - 1} \times 100\% = 0.3922\%$$

(3) 若要求精度小于 0.25% , 其分辨率应小于 0.5% 。例题8位D/A的分辨率为 0.3922% 满足系统对精度的要求。

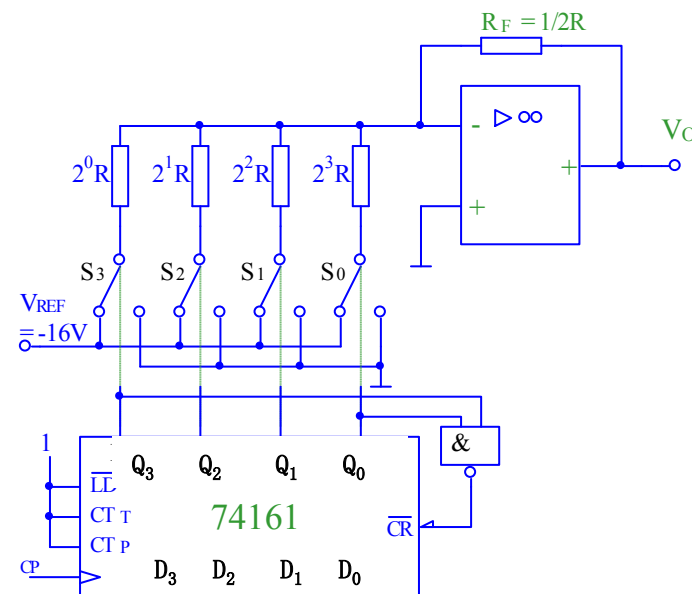


例题2: D/A转换器电路如图所示:

- (1) 推导出 V_O 和 $Q_3Q_2Q_1Q_0$ 之间的关系表达式。
- (2) 说明转换电路工作原理, 画出 V_O 和 $Q_0Q_1Q_2Q_3$ 的工作波形图。

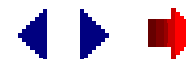


然后分析是模几计数器:



首先分析是那一种D/A转换电路?

$$\begin{aligned}
 v_0 &= -\frac{2R_f}{R} \cdot \frac{V_{REF}}{2^4} \sum_{i=0}^3 Q_i 2^i \\
 &= -\frac{R}{R} \cdot \frac{-16V}{2^4} \sum_{i=0}^3 Q_i 2^i \\
 &= Q_3 2^3 + Q_2 2^2 + Q_1 2^1 + Q_0 2^0
 \end{aligned}$$



第二节 A/D转换器

1、采样与保持

首先对模拟量进行离散化处理，即将时间上的连续变化的模拟量转换为时间上断续（离散）的模拟量。这一过程即为采样。

☆采样定理

为了能正确用采样输出信号表示输入模拟量，保证能从采样信号恢复成原信号，采样脉冲必须有足够高的频率。满足：

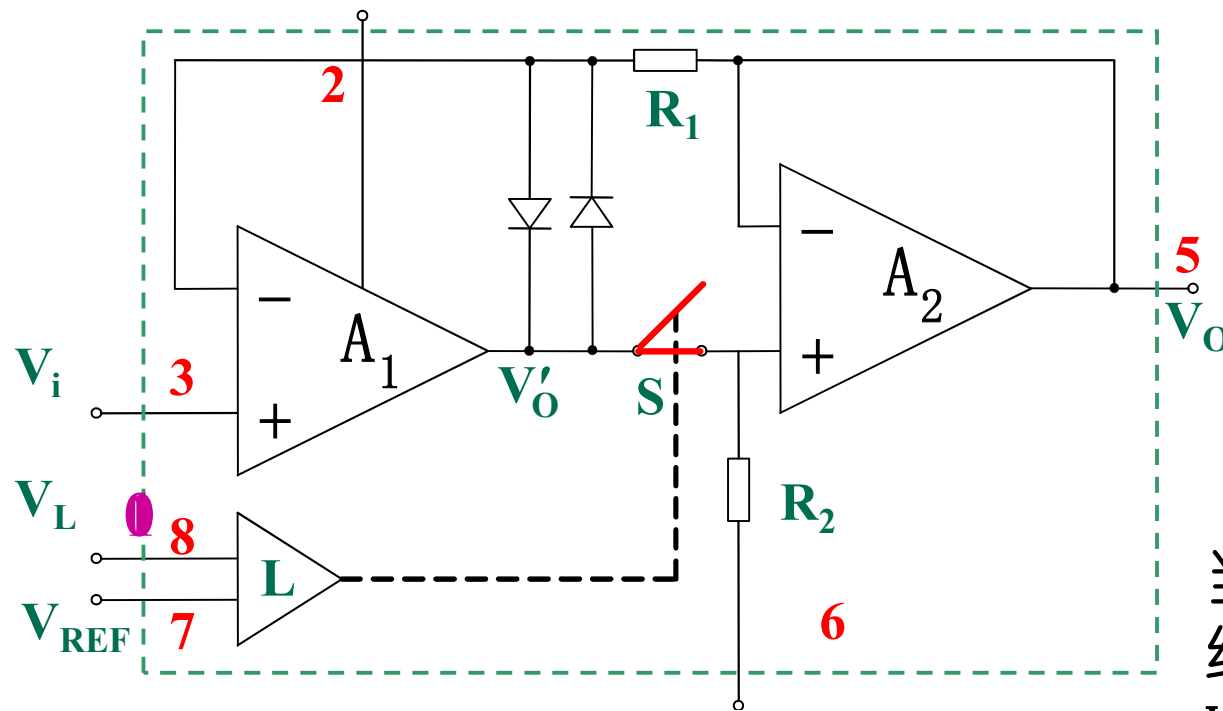
$$f_s \geq 2f_{i\max} \quad f_{i\max}: \text{为输入模拟信号 } f_i(t) \text{ 中的最高频率}$$

在工程设计中通常取： $f_s = (3 \rightarrow 5) f_{i\max}$

模拟信号经采样后，得到一系列样值脉冲，采样脉冲的宽度 t_w 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不变，以便进行转换。因此，在采样电路之后须加保持电路。



☆ 采样-保持电路

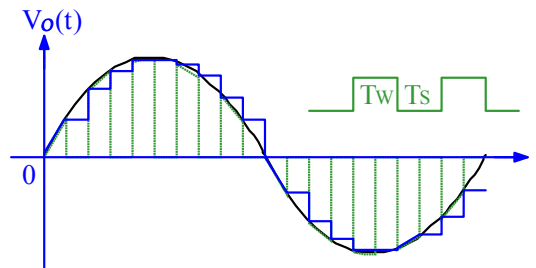
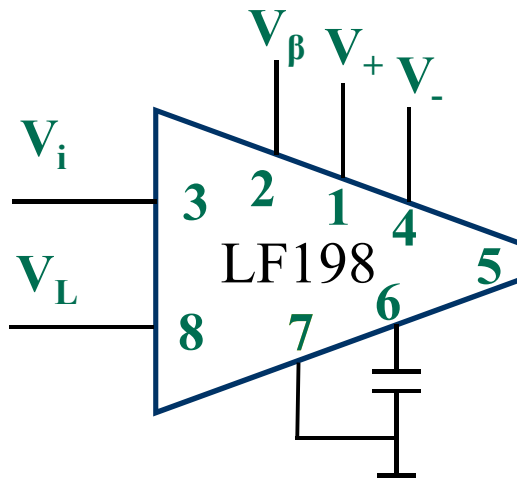


A_1A_2 为单位增益的电压跟随器。 S 为电子开关， L 为开关驱动电路，采样脉冲从 V_L 加入， V_i 加入模拟信号。

工作过程：

当 $V_L=1$ ， S 闭合。 V_i 经 A_1A_2 的跟随使
 $V_o=V_i$ ——采样

当 $V_L=0$ ， S 断开。 A_1 接收新的输入信号， A_2 靠 C 的存储功能输出。 ——保持



2、量化与编码

在采样脉冲 t_w 期间， $V_O=V_I$ ，在两次采样的间隔时间时间内， V_O 保持不变。这段时间供量化和编码。

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。因此，任何一个数字量的大小只能表示某个规定的最小数量单位的整数倍。

什么是量化？

在进行**A/D**转换时，必须将采样－保持电压表示为某个最小数量单位的整数倍，这个过程称为量化。所取的最小数量单位叫做**量化单位**，用 Δ 表示。

什么是编码？

把量化的结果用代码（二进制、二－十进制数等）表示出来，称为编码。这些代码就是**A/D**转换的输出结果



➤ **A/D** 转换器是将模拟信号转换为数字信号，转换过程通过**采样、保持、量化和编码**四个步骤完成。

量化误差:

由于模拟信号在时间、数值大小都是连续的，不一定被最小量化单位 Δ 整除，所以在量化过程中就可能引入量化误差。

如果数字信号的位数越多，量化的误差就越小。

例如**10位A/D**最小量化单位:

$$\Delta = \frac{1}{2^{10}} = \frac{1}{1024} = 0.1 \%$$

把输入信号分为1024层，输入信号分层越多，量化误差越小。即，数字量位数越多，量化等级越细。



☆A/D转换器有两种量化方法

只舍不入法：

是将取样保持信号 V_o 不足一个量化单位 V_q 的尾数舍去，取其原整数。

有舍有入法：

当取样保持信号 V_o 的尾数 $< V_q/2$ 时，用舍尾取整法得其量化值。

当取样保持信号 V_o 的尾数 $\geq V_q/2$ 时，用舍尾入整法得其量化值。

例：假设最小量化单位为 V_q ，用两种量化方法求其输入、输出关系。



只舍不入法：最大量化
误差为 V_q

有舍有入法：最大量化误差
为 $\pm V_q/2$

输 入	输出编码
$0 \leq V_I < V_q$	0 0 0
$V_q \leq V_I < 2V_q$	0 0 1
$2V_q \leq V_I < 3V_q$	0 1 0
$3V_q \leq V_I < 4V_q$	0 1 1
$4V_q \leq V_I < 5V_q$	1 0 0
$5V_q \leq V_I < 6V_q$	1 0 1
$6V_q \leq V_I < 7V_q$	1 1 0
$7V_q \leq V_I < 8V_q$	1 1 1

输 入	输出编码
$0 \leq V_I < 0.5V_q$	0 0 0
$0.5V_q \leq V_I < 1.5V_q$	0 0 1
$1.5V_q \leq V_I < 2.5V_q$	0 1 0
$2.5V_q \leq V_I < 3.5V_q$	0 1 1
$3.5V_q \leq V_I < 4.5V_q$	1 0 0
$4.5V_q \leq V_I < 5.5V_q$	1 0 1
$5.5V_q \leq V_I < 6.5V_q$	1 1 0
$6.5V_q \leq V_I < 7.5V_q$	1 1 1



二、A/D转换电路

A/D转换电路一般分为两大类：

直接法	$v_I \rightarrow D$
间接法	$v_I \rightarrow T(F) \rightarrow D$

直接法：

- ★计数型A/D转换器
- ★逐次渐进型A/D转换器

直接法A/D转换器特点：

工作速度快，调整方便，但转换精度比间接法低。

间接法：

- ★双积分型A/D转换器

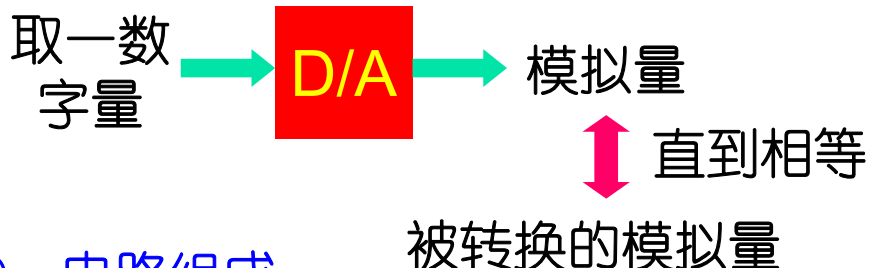
间接法A/D转换器特点：

工作速度比较低，但转换精度比较高，抗干扰能力强，一般在测试仪表中用的较多。



1、计数型A/D转换器

转换思路：



①、电路组成：

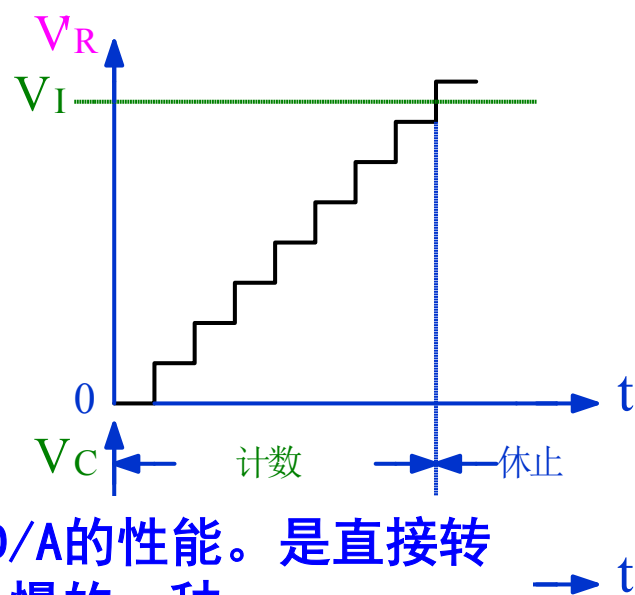
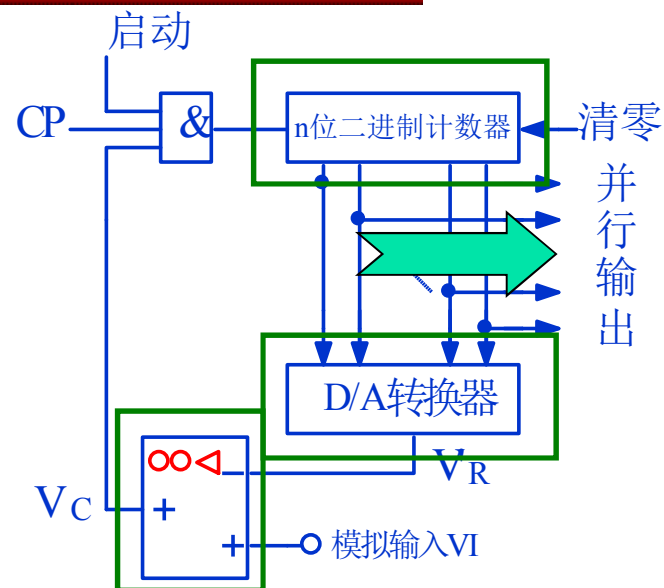
- ★ 二进制计数器
- ★ D/A转换器
- ★ 电压比较器

②、工作原理：

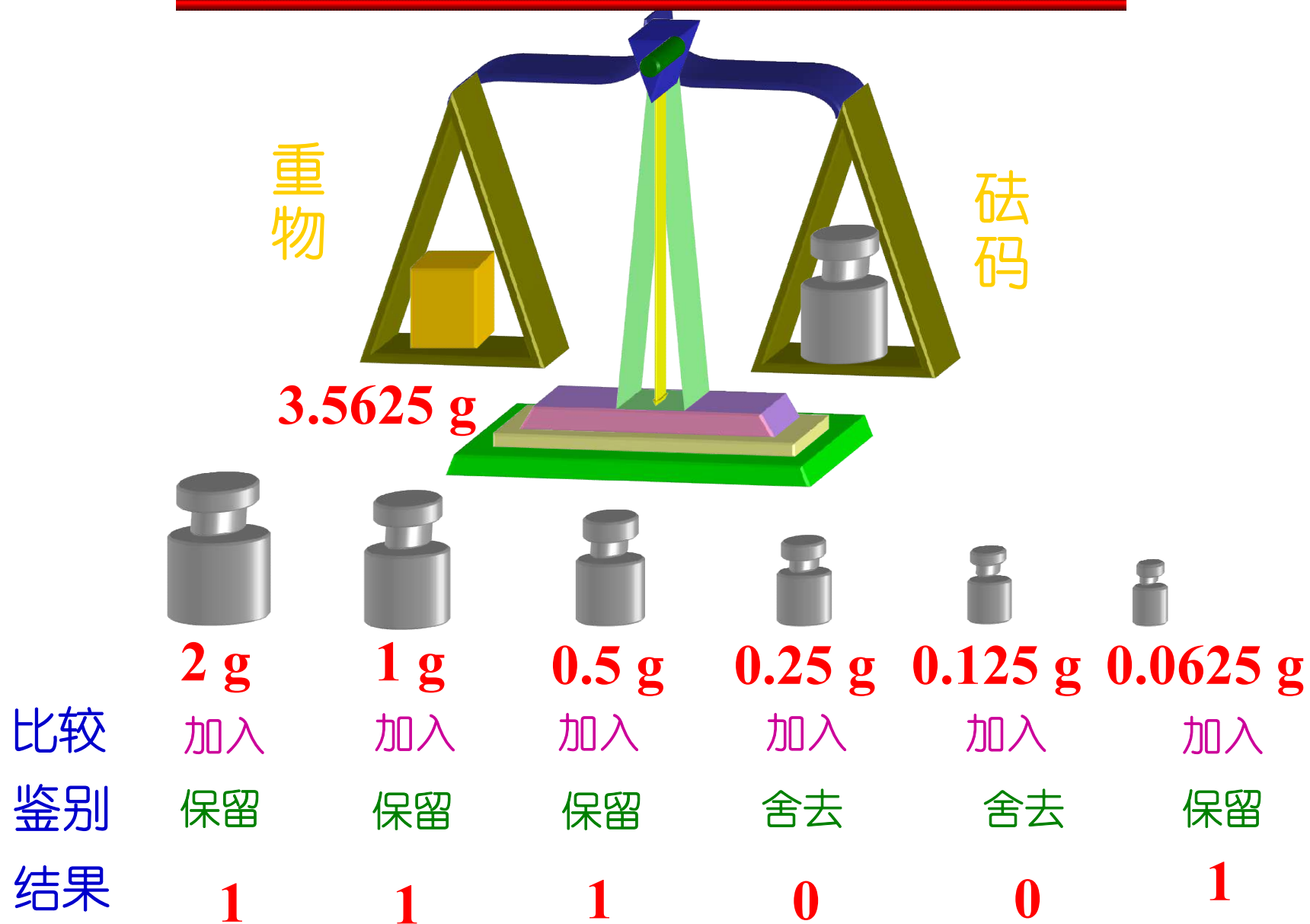
当 $V'_R < V_I$ 时， $V_C = 1$ ，与门开放，CP脉冲加到计数器，计数器计数。

当 $V'_R \geq V_I$ 时， $V_C = 0$ ，与门关闭CP脉冲不能加到计数器，计数器停止计数。此时计数器的输出即为输入信号 V_I 的数字量代码。

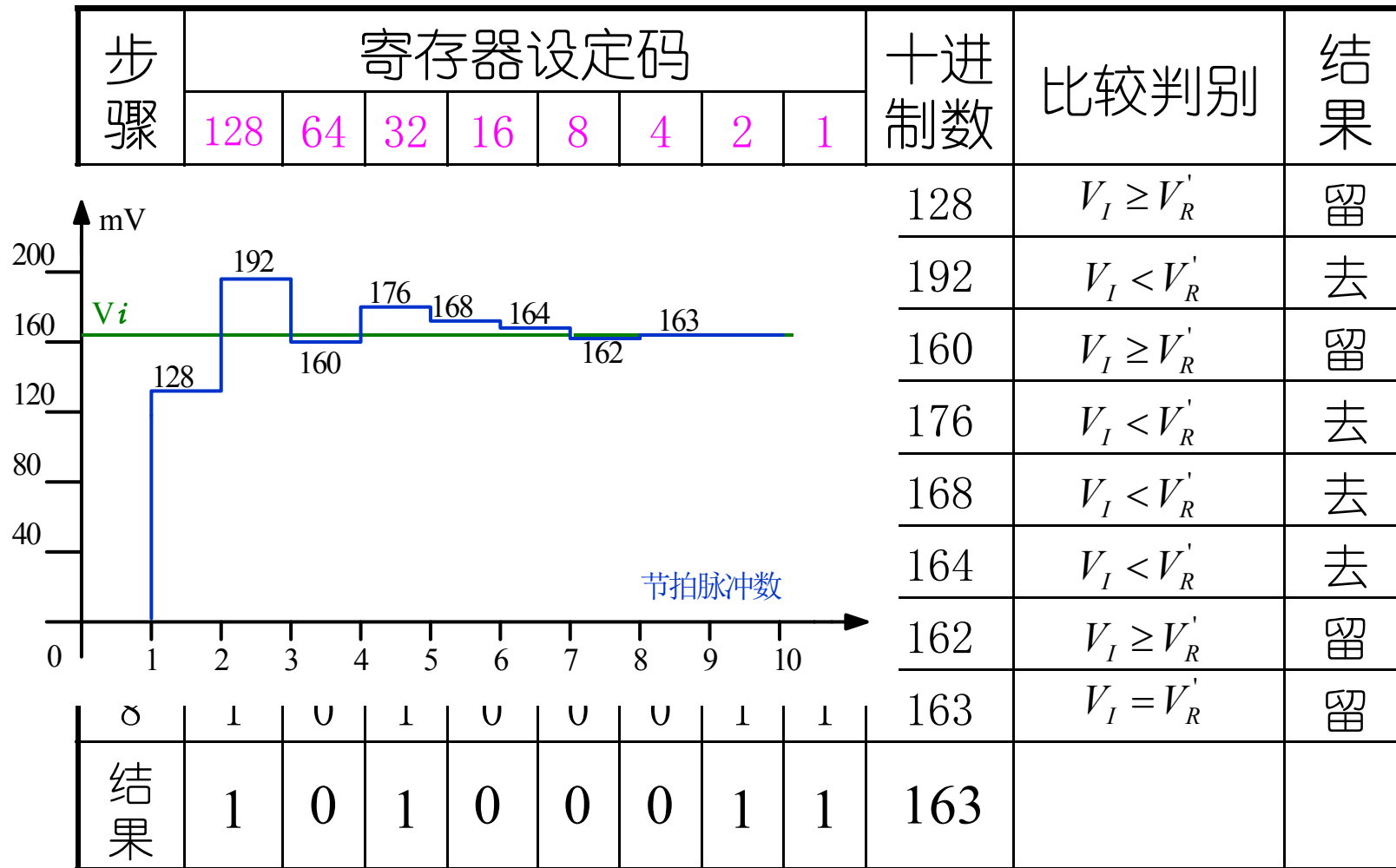
这种A/D转换器的精度取决于比较器和D/A的性能。是直接转换方式最简单的一种电路。也是转换速度最慢的一种。



2、逐次逼近型A/D转换器



例：一个待转换的模拟电压 $V_I = 163\text{mV}$, 逐位逼近寄存器的数字量为八位，整个比较过程如下：



逐次比较 **A/D** 的数码位数越多，转换结果越精确。 ◀ ▶ ➡

4位逐次逼近型A/D

电路组成:

1.D/A转换器

★ 根据 $Q_D \sim Q_A$ 不同的组数值不同的参考电压

2.比较器 (天平)

$$V_R' > V_I \text{ 时, } F = 0 \quad F = J$$

$$V_R' < V_I \text{ 时, } F = 1 \quad \overline{F} = K$$

3.时序分配器

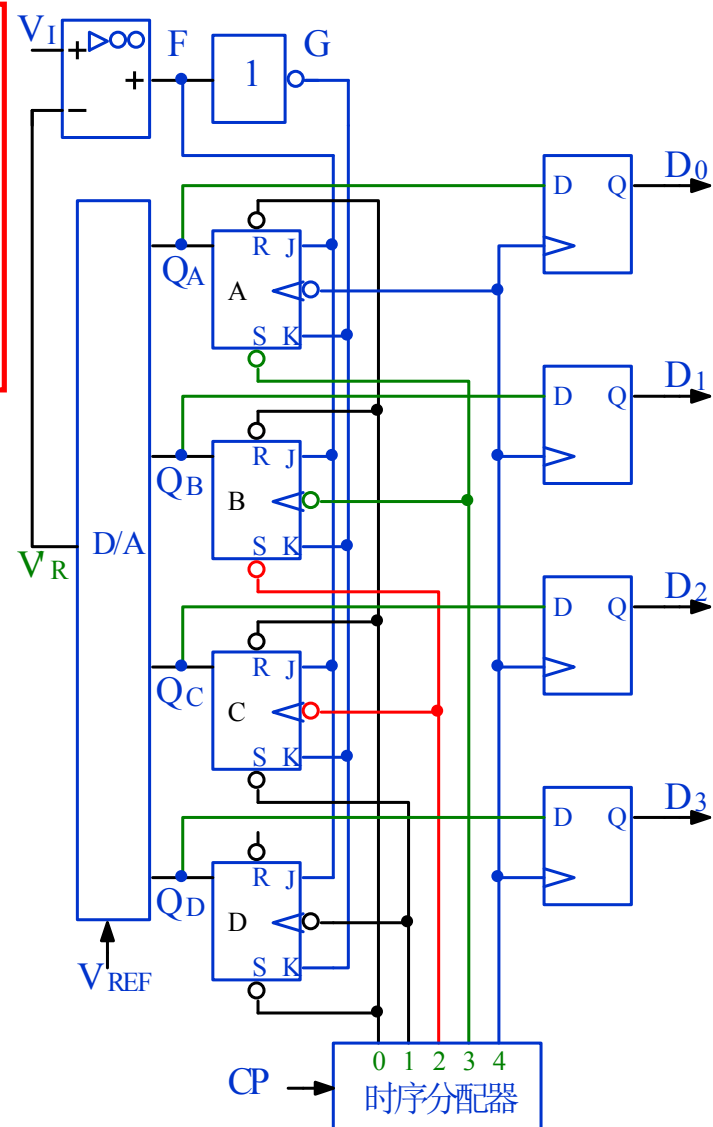
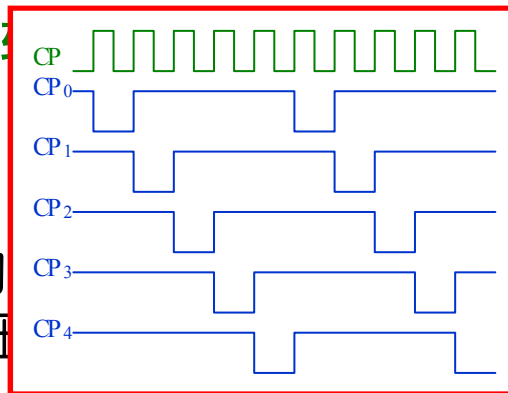
★产生比较用的节拍脉冲, 控制电路从高位按节拍逐次比较。

4.JK触发器

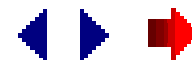
★在节拍脉冲 $CP_0 \sim CP_4$ 的 \downarrow 作用下, 记忆每次比较的结果, 同时给D/A转换器提供输入二进制代码。

5.寄存器

★在 $CP_4 \uparrow$ 作用下, 将JK触发器记忆的比较结果并行送入四D触发器锁存及输出。

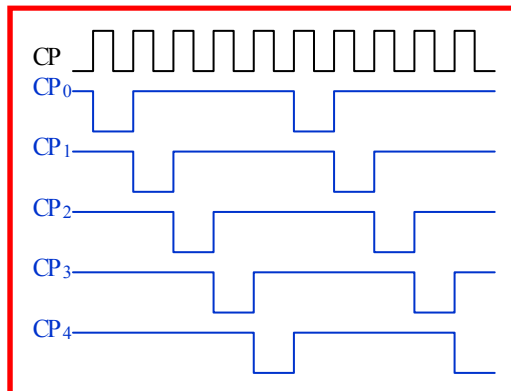


比较的结果要存入触发器

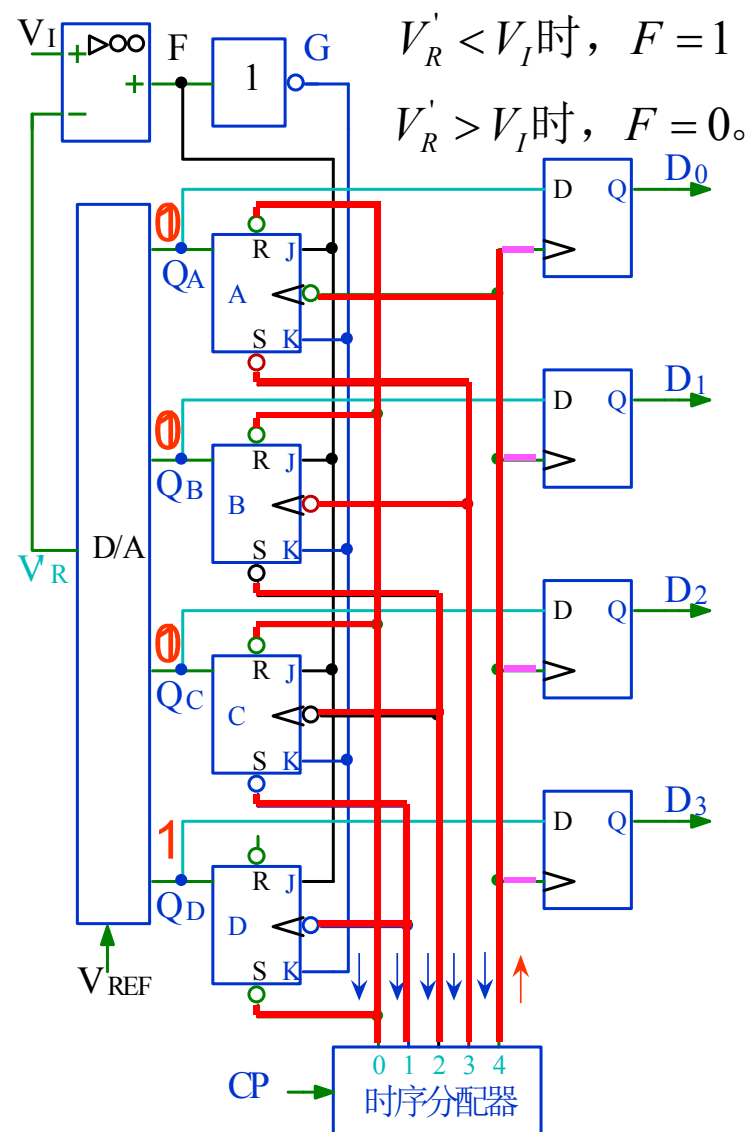


假设D/A转换器基准电压 $V_{REF}=8V$ 。
输入电压 $V_I=6.55V$

在 $CP_0 \downarrow$ 作用下:

[illegible]

$$V'_R = \frac{V_{REF}}{2^n} (8Q_D + 4Q_C + 2Q_B + 1Q_A) = 4V$$

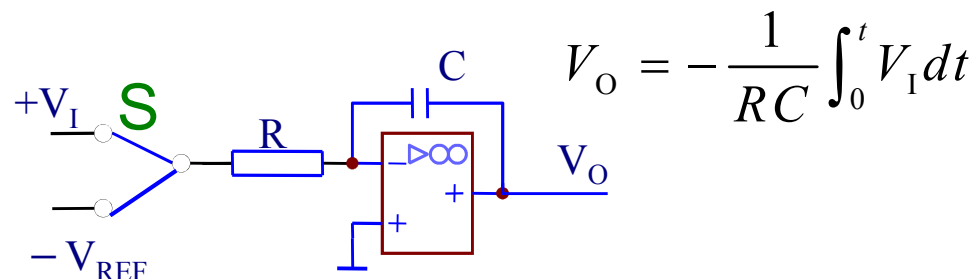
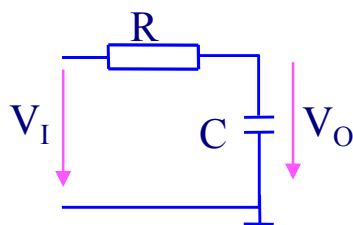


同相输入大于基准输出为1

基准电压 V'_R

3、双积分式A/D转换器

1) 积分电路:



2) $V_I \rightarrow T$ 转换:

- ♠ 第一次积分：对所有被转换模拟电压在**同一时间** T_1 内进行积分，使得积分器输出电压的大小代表输入模拟电压的大小。

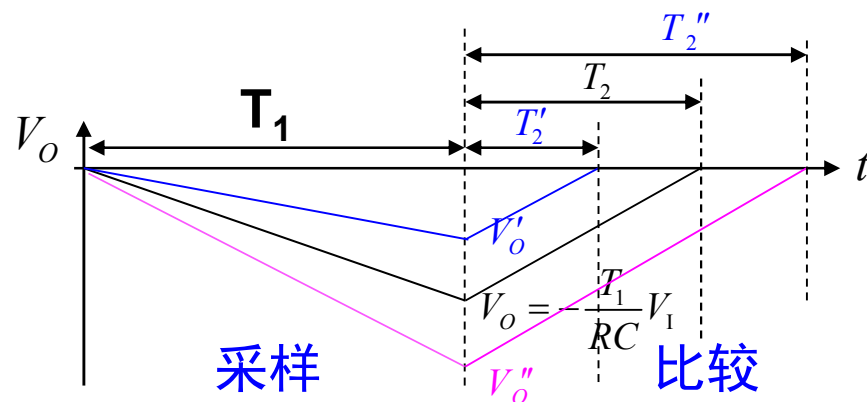
若 $V'_I < V_I < V''_I$

则： $V'_O < V_O < V''_O$

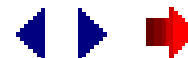
积分器输出为**0**时：

$$T'_2 < T_2 < T''_2$$

$$T_2 = \frac{T_1}{V_{REF}} V_I$$



- ♠ 第二次积分：将 V_I 从积分器的输入端断开，然后接入一个与 V_I 极性相反的基准电压（ $-V_{REF}$ ），进行积分。



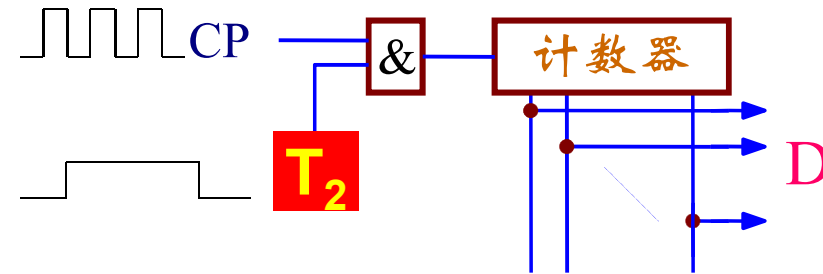
3、双积分式A/D转换器

3) T→D转换:

计数器在 T_2 时间内对周期为 T_C 的时钟脉冲计数。

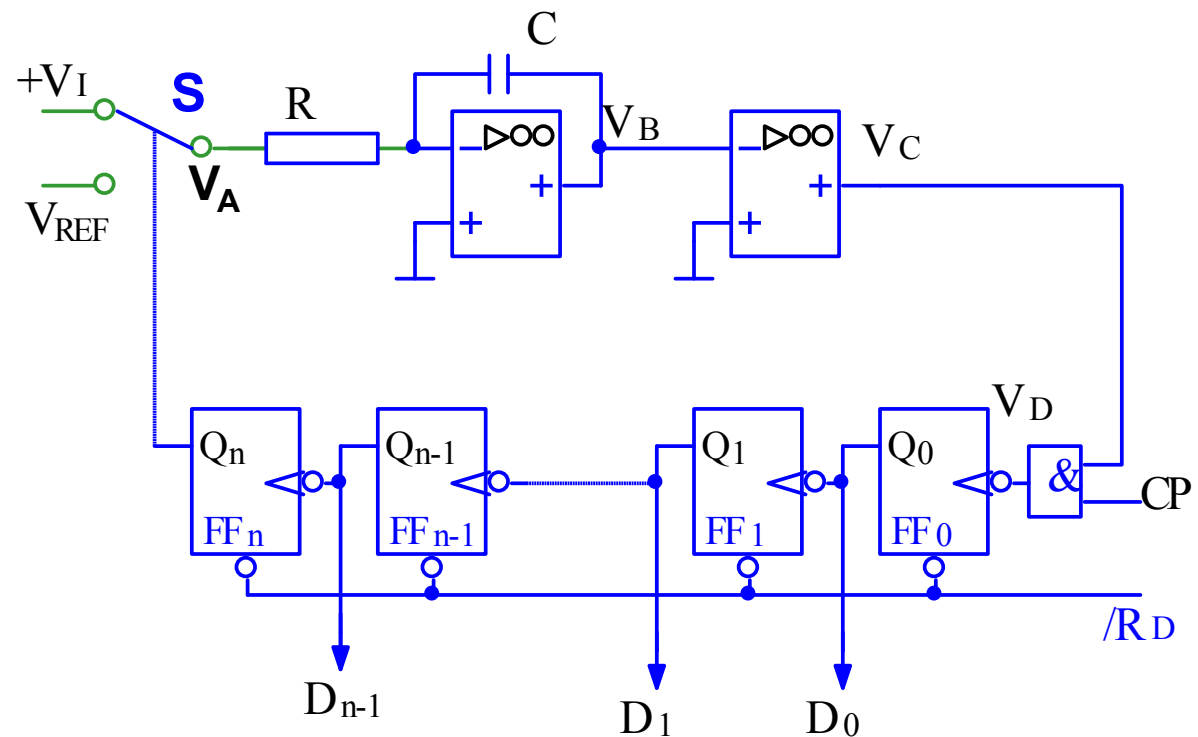
若计数结果为 D ，则：

$$T_2 = D T_C$$
$$D = \frac{T_1}{T_C V_{REF}} V_I$$

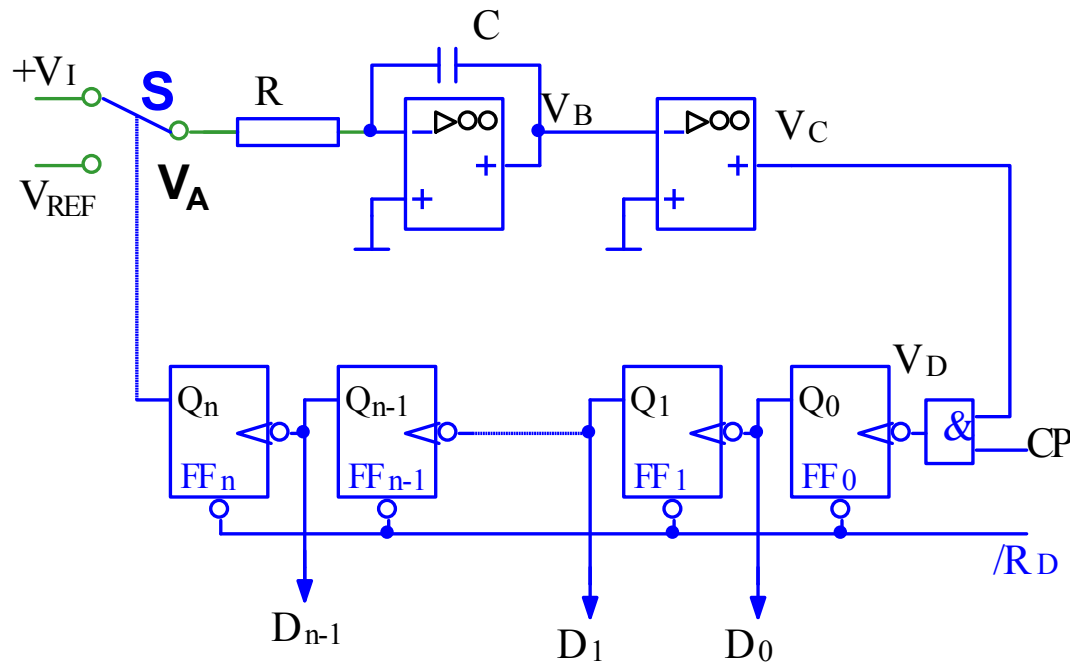


4) 电路结构:

- ☆ 积分器
- ☆ 过零比较器
- ☆ 控制逻辑电路
- ☆ 计数器



3、双积分式A/D转换器



n级计数器

Q_n	Q_{n-1}	...	Q_1	Q_0
0	0	...	0	0
0	0	...	0	1
...
0	1	...	1	1
1	0	...	0	0
1	0	...	0	1
...
1	D_{n-1}	...	D_1	D_0

以正极性 V_I 为例，定量说明双积分A/D工作过程。
工作过程分为两个阶段。

一、采样阶段：



3、双积分式A/D转换器

★在启动脉冲的作用下，全部触发器置0，由于 $Q_n=0$ ，开关S接 V_I ，积分器对 V_I 进行积分。

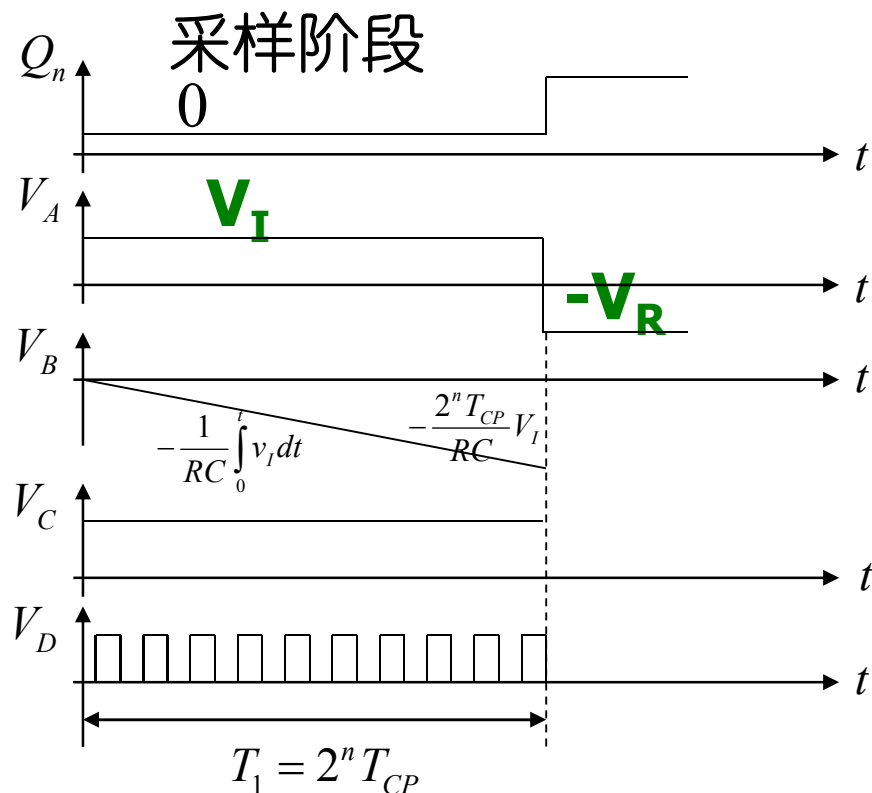
★由于 $V_B < 0$ ，零值比较器输出 $V_C=1$ ，CP通过与门加到计数器， n 位二进制计数器从0开始计数，一直计到 2^n 个脉冲后：

$t = T_1 = 2^n T_{CP}$ T_{CP} :标准时钟周期

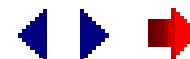
★ n 位计数器又全部返回到0，定时触发器 Q_n 由0→1，使开关S接基准电压 V_{REF} ， $V_{REF} = -V_R$ ，采样结束。

★采样结束时的积分电压为：

$$V_B = V_{BO} = -\frac{1}{RC} \int_0^{T_1} V_I dt = -\frac{T_1}{RC} V_I = -\frac{2^n T_{CP}}{RC} V_I$$



采样结束时：积分器输出电压 V_B 和输入模拟电压 V_I 成正比关系。



二、比较阶段

★由于采样结束时： $Q_n=1$ ，开关S接 $-V_R$ ，积分器对 $-V_R$ 进行积分。（积分器负向积分）积分电压为：

$$\begin{aligned} V_B &= V_{BO} - \frac{1}{RC} \int_{T_1}^t (-V_R) dt \\ &= -\frac{2^n T_{CP}}{RC} V_I + \frac{V_R}{RC} (t - T_1) \\ &= -\frac{2^n T_{CP}}{RC} V_I + \frac{V_R}{RC} T_2 \end{aligned}$$

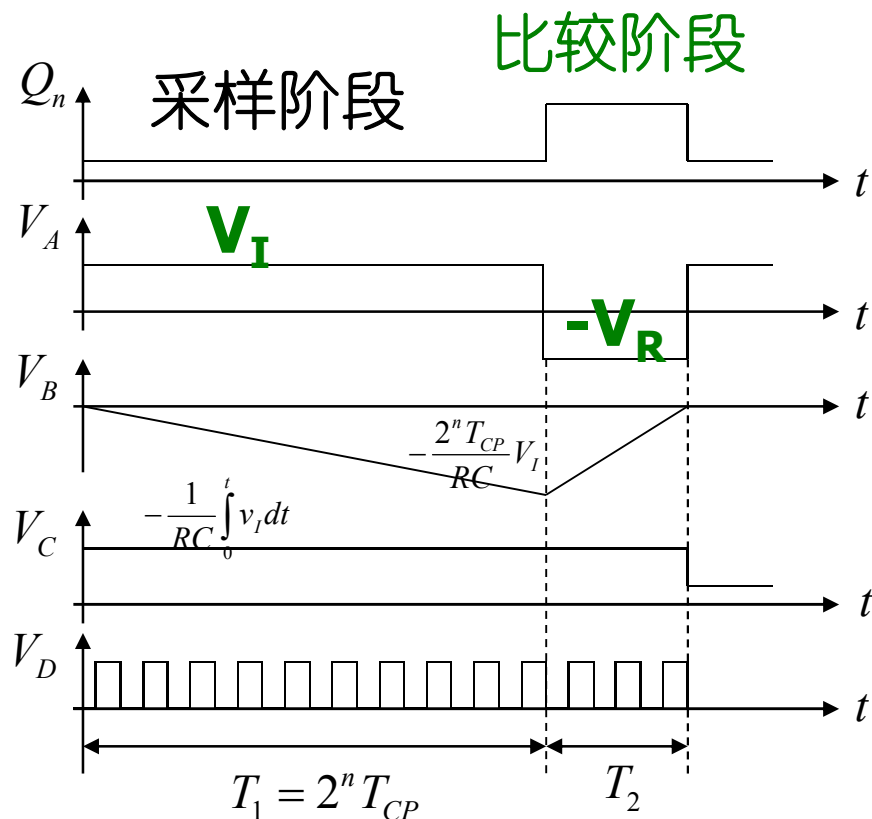
★当 V_B 积分电压逐步上升至：

$V_B \geq 0$ ，过零比较器 $V_C=0$ ，与门封锁，计数器停止计数。

★假设二次积分时，计数器记录了 M 个脉冲： $T_2 = MT_{CP}$

★二次积分结束时， $V_B=0$ ，代入二次积分电压表达式：

$$V_B = -\frac{2^n T_{CP}}{RC} V_I + \frac{V_R}{RC} T_2 = 0$$



$$-\frac{2^n T_{CP}}{RC} V_I + \frac{V_R}{RC} MT_{CP} = 0 \quad M = \frac{2^n}{V_R} V_I$$

可见 M 个脉冲和 V_I 成正比， M 所对应的二进制码即为数字量输出，这样通过二次积分实现了对输入信号的A/D转换。

某双积分**A/D**转换器中计数器由四片十进制集成计数器组成，它的最大计数容量 **$D=(5000)_{10}$** 。计数脉冲的频率 **$f_{cp}=25\text{KHz}$** ，积分器 **$R=100\text{K}\Omega$** ， **$C=1\mu\text{F}$** ，输入电压范围 **$V_I=0\sim 5\text{V}$** 。试求：

- 1、第一次积分时间 **T_1** ；
- 2、积分器的最大输出 **$|V_{OMAX}|$** ；
- 3、当 **$V_{REF}=|10|\text{V}$** ，若计数器的计数值 **$M=(1740)_{10}$** 时，表示输入电压 **V_I** 为多大？



1、第一次积分时间 T_1 ;

$T_1 = 2^n T_{CP}$ 其中 2^n 表示计数器计满值的情况,
即最大计数容量 $D=(5000)_{10}$

$$T_{CP} = \frac{1}{f_{CP}} = \frac{1}{25KHz} = 40\mu S \quad \text{表示1个脉冲周期}$$

第一次积分共计了 $2^n=5000$ 个计数脉冲

所以: $T_1 = 5000 \times 40 \times 10^{-6} = 0.2S$



2、积分器的最大输出 $|V_{OMAX}|$ ；

积分器最大输出电压 V_{BO} 值时当计数为**5000**时，输入为**5V**时，积分器的输出值。

$$V_{BOMAX} = \left| \frac{2^n T_{CP}}{RC} V_I \right| = \frac{0.2}{100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} \times 5 = 10V$$

3、当 $V_{REF} = |10|V$ ，若计数器的计数值 $M = (1740)_{10}$ 时，表示输入电压 V_I 为多大？

$$M = \frac{2^n}{V_{REF}} V_I$$

$$V_I = \frac{MV_{REF}}{2^n} = \frac{1740 \times 10}{5000} = 3.48V$$

