

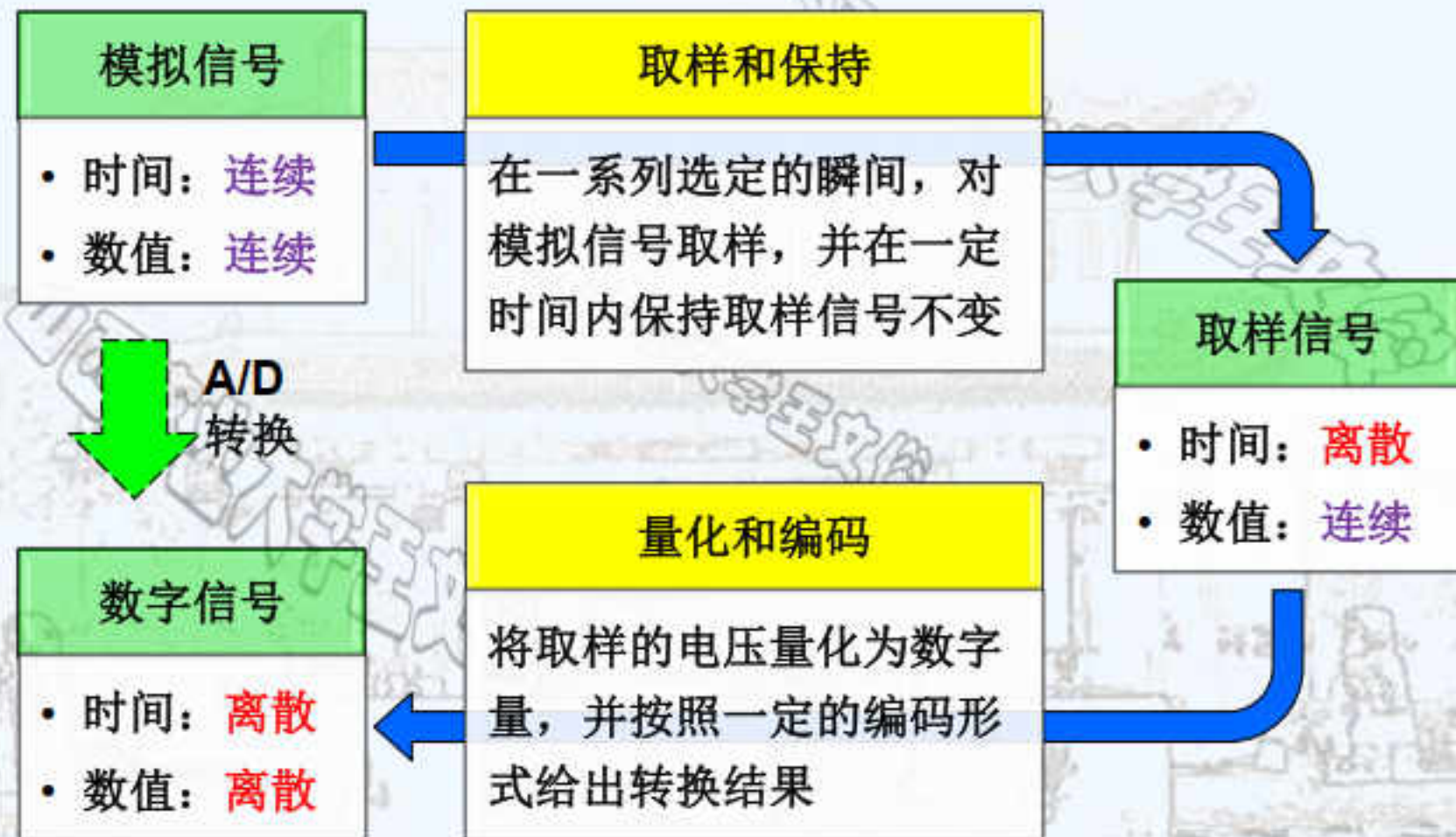
# 第八章 数-模和模-数转换（二）

——王文俊

山西农业大学

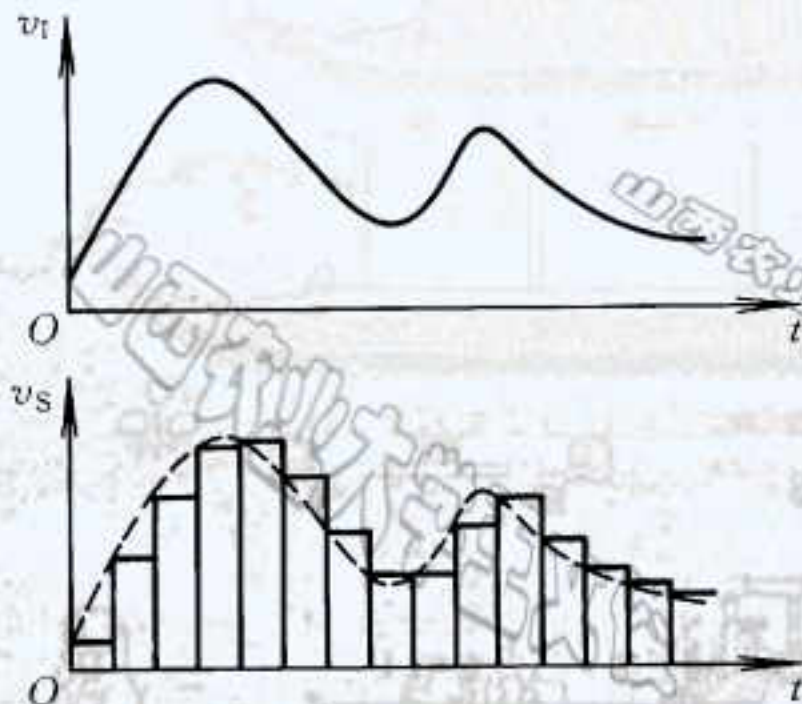
## 八、A/D转换的基本原理

### • 1、A/D转换的步骤



## • 2、取样

为了能正确无误的用**取样信号  $v_s$** 表示**模拟信号  $v_I$** ，取样信号必须有足够的频率；但考虑转换电路的工作速度，也不能无限提高取样频率。



### 取样定理

- 为保证能从取样信号将原来的被取样信号恢复，必须满足：

$$f_s \geq 2f_{i(\max)}$$

采样  
频率

输入模拟信号的最  
高频率分量的频率

一般情况下，通常取： $f_s = (3 \sim 5)f_{i(\max)}$



### • 3、量化和编码

#### 数字量

- 以最低有效位LSB的1为最小数量单位。
- 任何一个数字量的大小只能是该最小数量单位的整数倍。

#### 量化与量化误差

- 将连续的取样电压表示为最小数量单位的整数倍的过程，称为量化过程。
- 选取的最小数量单位称为量化单位，用 $\Delta$ 表示。
- 由于取样电压是连续的，并不一定能被 $\Delta$ 整除，因此量化过程中不可避免的会引入误差，该误差称为量化误差。

#### 编码

- 将量化的结果用代码表示出来，称为编码。

不同量化电平的分方法，对应的量化误差不同。

输入信号	代表的 模拟电压	二进制 代码
1V		
7/8V	$7\Delta = 7/8(V)$	111
6/8V	$6\Delta = 6/8(V)$	110
5/8V	$5\Delta = 5/8(V)$	101
4/8V	$4\Delta = 4/8(V)$	100
3/8V	$3\Delta = 3/8(V)$	011
2/8V	$2\Delta = 2/8(V)$	010
1/8V	$1\Delta = 1/8(V)$	001
0V	$0\Delta = 0(V)$	000

例：将0~1V的模拟电压信号转换成3位二进制代码

量化单位

$$\Delta = \frac{1}{8}V$$

最大量化误差

$$\Delta = \frac{1}{8}V$$



输入信号	代表的 模拟电压	二进制 代码
1V		
13/15V	$7\Delta = 14/15(V)$	111
11/15V	$6\Delta = 12/15(V)$	110
9/15V	$5\Delta = 10/15(V)$	101
7/15V	$4\Delta = 8/15(V)$	100
5/15V	$3\Delta = 6/15(V)$	011
3/15V	$2\Delta = 4/15(V)$	010
1/15V	$1\Delta = 2/15(V)$	001
0V	$0\Delta = 0(V)$	000

量化单位

$$\Delta = \frac{2}{15}V$$

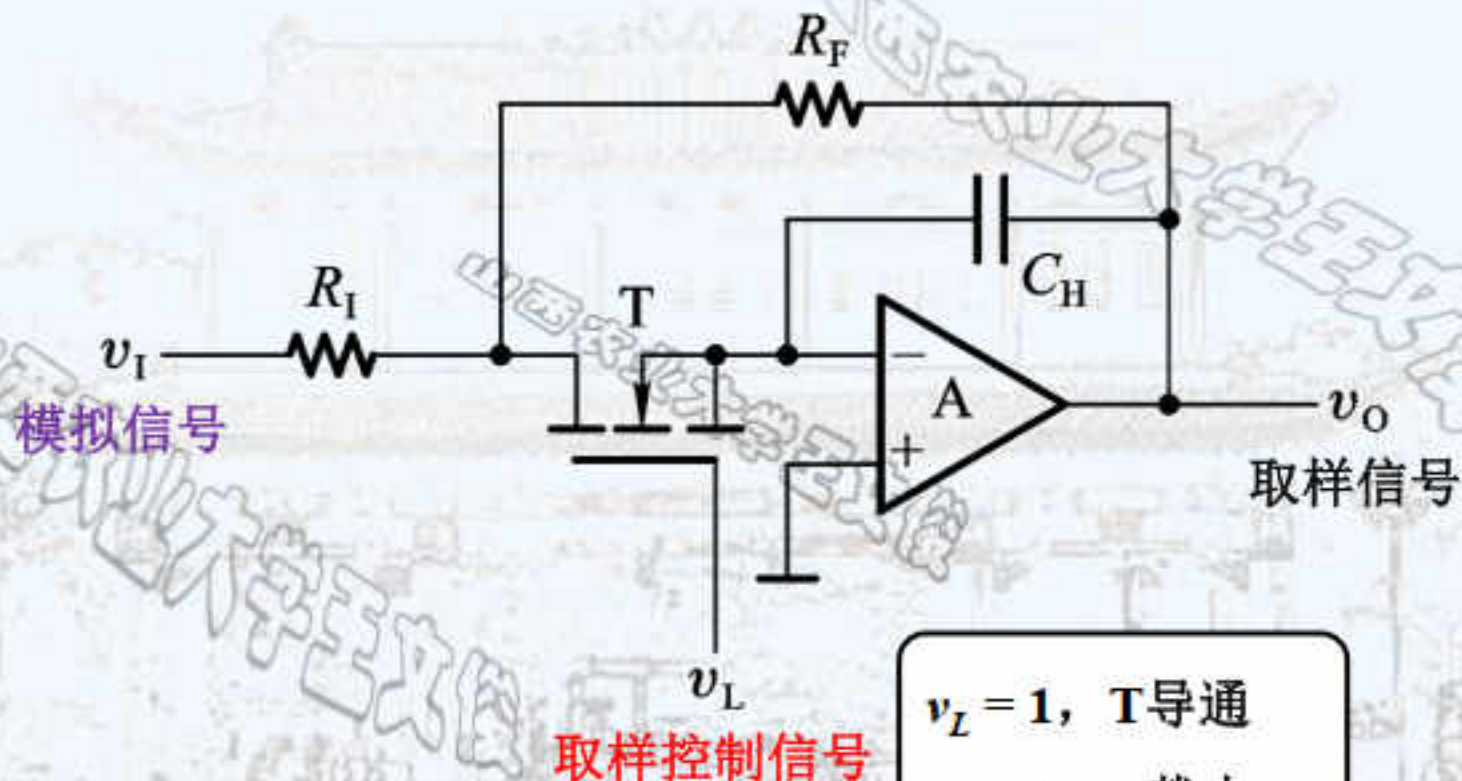
最大量化误差

$$\frac{1}{2}\Delta = \frac{1}{15}V$$

将输出二进制代码所表示的模拟电压值规定为对应模拟电压范围的**中间值**，则最大量化误差不会超过 **$1/2\Delta$** 。

## 九、取样-保持 (S/H) 电路

- 1、取样-保持电路的基本形式

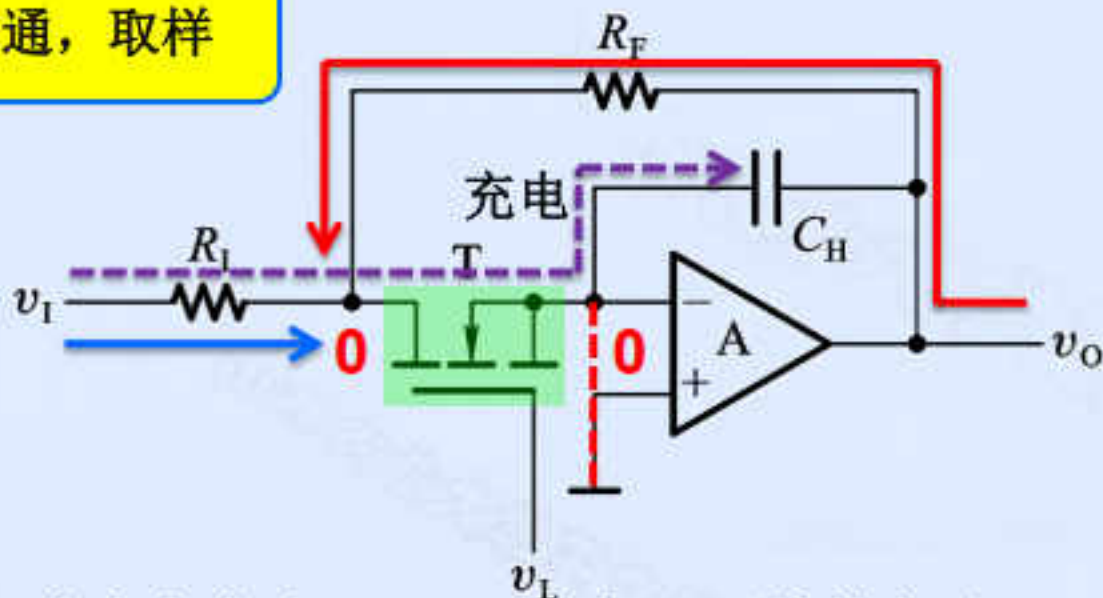


$v_L = 1$ , T导通

$v_L = 0$ , T截止

## • 2、取样-保持电路的工作原理

$v_L = 1$ , T导通, 取样



若  $R_F = R_I$  时, 充电完成后:

$$v_O = -\frac{R_F}{R_I} v_I = -v_I$$

电容  $C_H$  两端的电压:

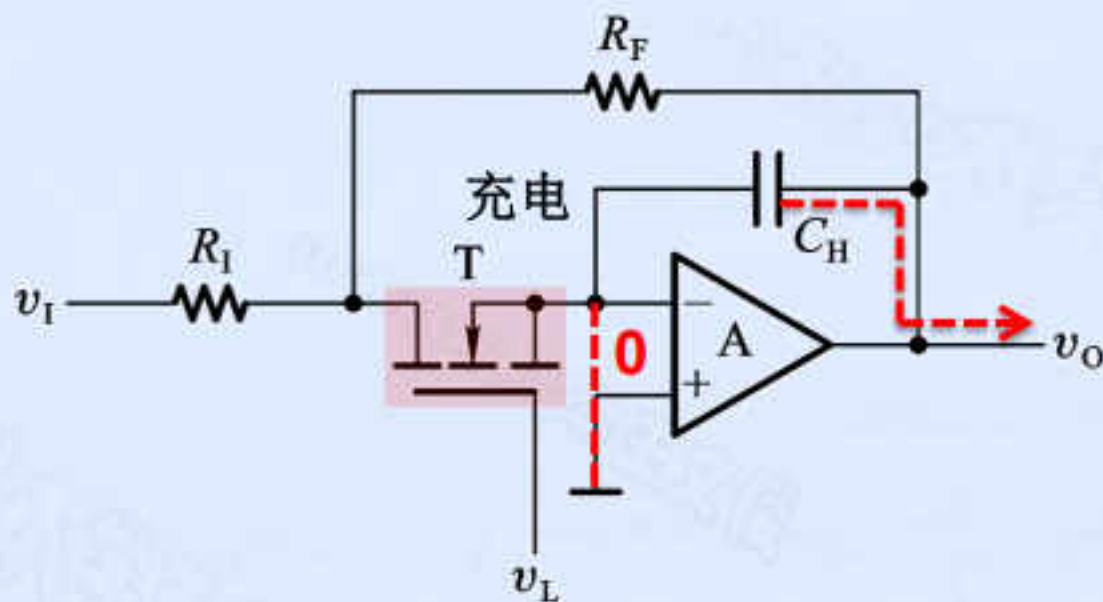
$$v_C = v_I$$

充电时间越短, 取样速度越快。充电时间取决于  $R_I$  的大小。

降低  $R_I$  能够提高取样速度, 但会降低电路的输入阻抗。

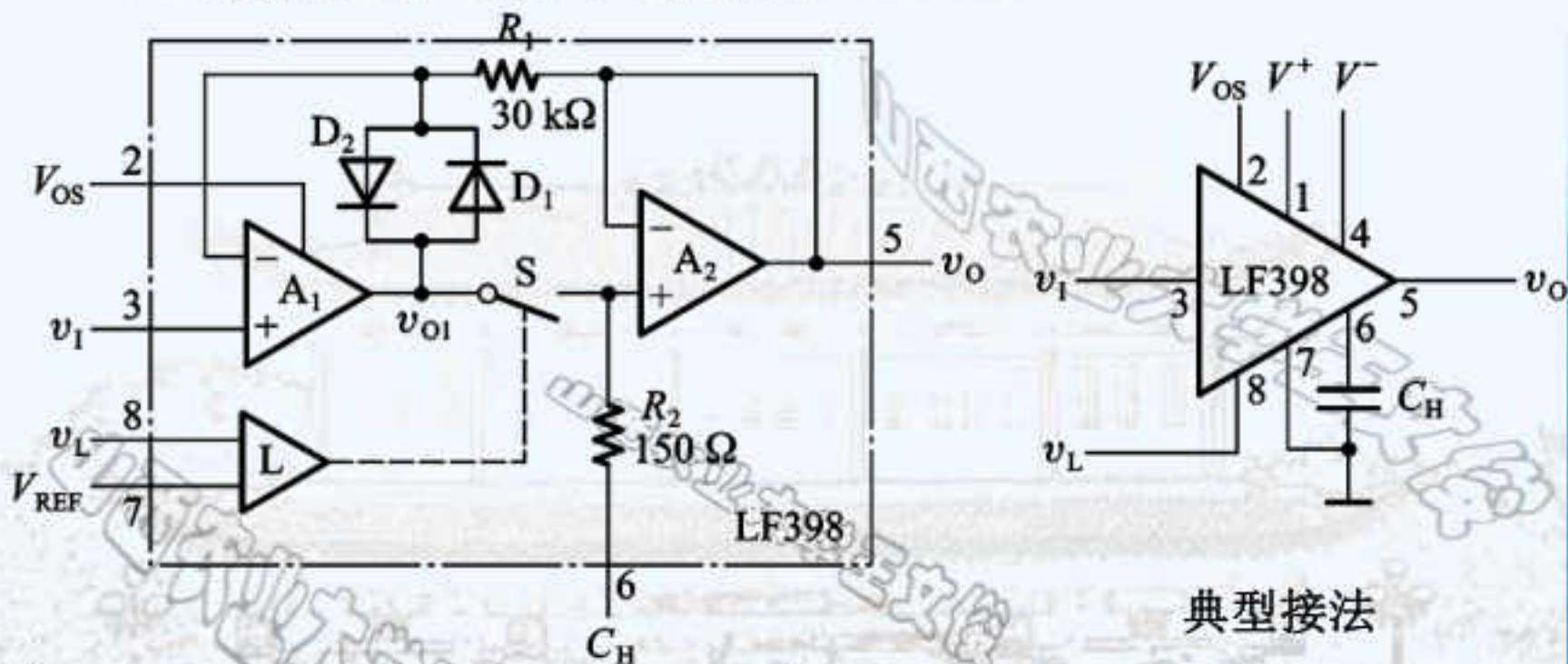


$v_L = 0$ , T截止, 保持



电容  $C_H$  两端电压一定时间内保持不变, 输出也保持不变。  
 $C_H$  漏电流越小, 运算放大器的输入阻抗越高, 保持时间越长。

### 3、集成取样-保持电路实例：LF398



①和④端分别为 $V_{CC}$ 和 $V_{EE}$ 电源端。

⑥端为接采样保持电容 $C_H$ 端。

②端为失调调零端。

⑦端为逻辑基准端（接地）。

③端为模拟量输入端。

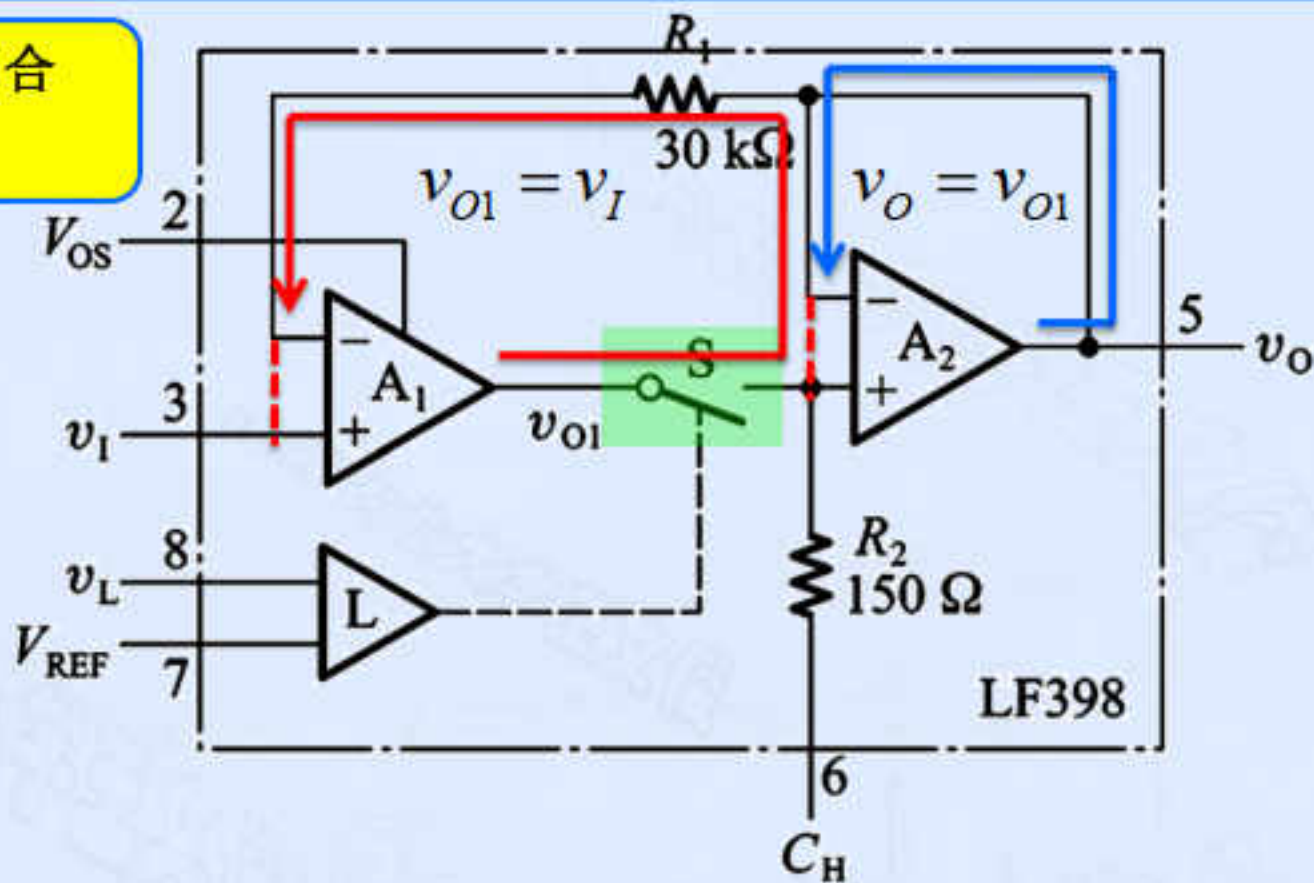
⑧端为逻辑输入控制端。

⑤端为输出端。

该端电平为1时采样，为0时保持。

#### • 4、LF398的工作原理

$v_L = 1$ , S 闭合  
取样



充电完成后:

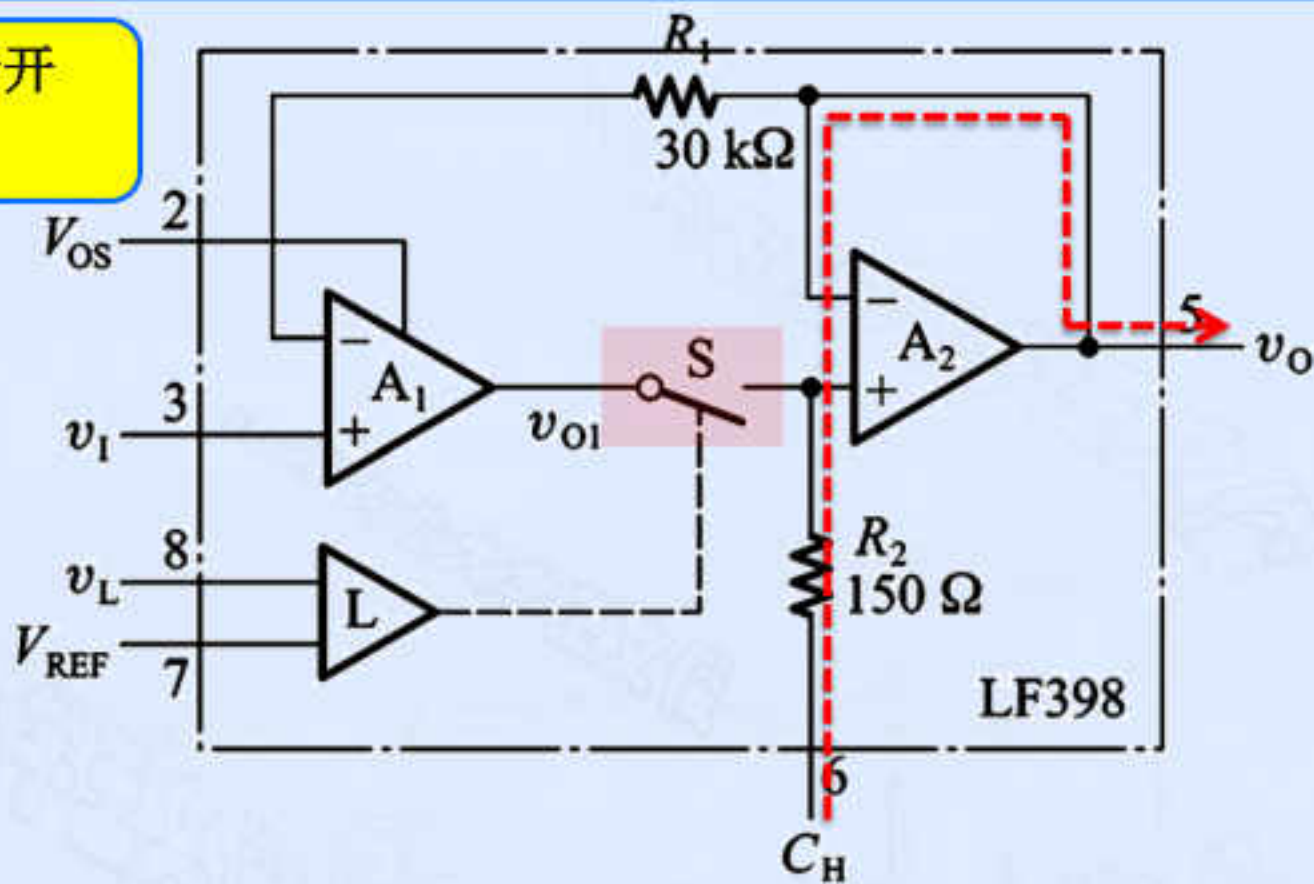
$$v_O = v_{O1} = v_I$$

电容  $C_H$  两端的电压:

$$v_C = v_I$$



$v_L = 0$ , S断开  
保持



电容  $C_H$  两端电压  $v_C$  一定时间内保持不变, 输出  $v_O = v_C$  也保持不变。

## • 5、S/H电路的两个最重要指标

### 获取时间

- 定义：取样过程中电容 $C_H$ 上电压到达稳态值所需的时间。
- LF398输入端的运算放大器的输入级采用双极型三极管电路，提高了电路工作速度。

### 保持阶段输出电压下降率 $\Delta v_o / \Delta T$

- LF398输出端的运算放大器的输入级采用场效应三极管，提高运算放大器的输入阻抗，减小了保持时间内 $C_H$ 上的电荷损失。

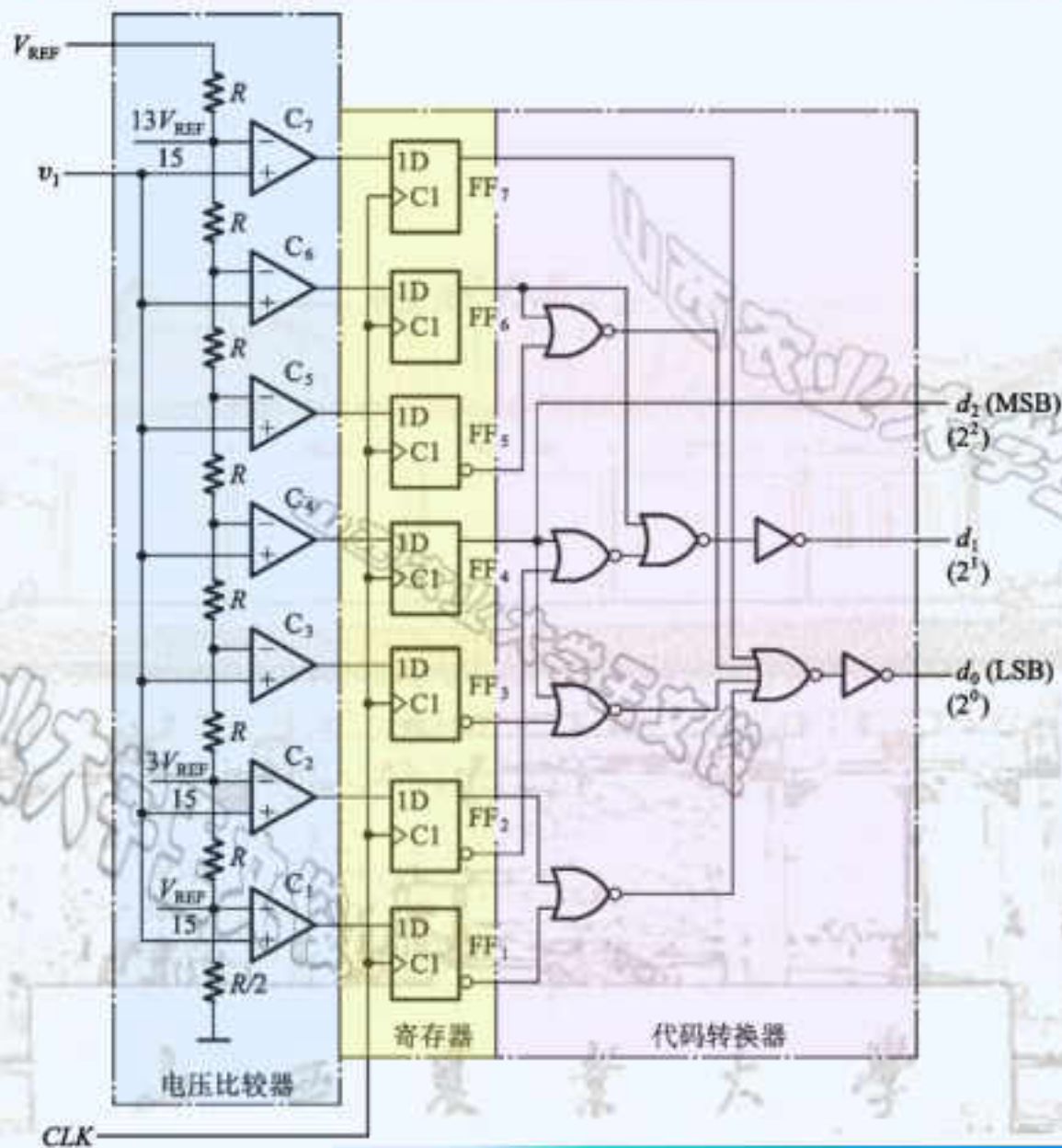
## 十、并联比较型A/D转换器

### • 1、电路结构

并联比较型A/D转换器属于**直接型**A/D转换器，能将输入模拟电压直接转换为输出的数字量而不需要经过中间变量。





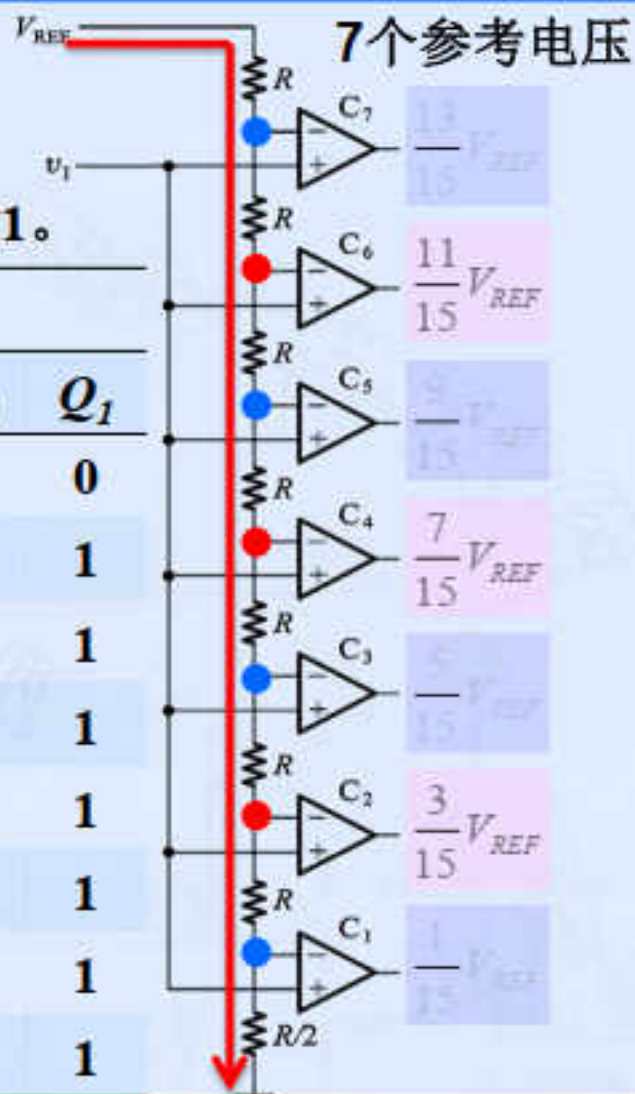


## 2、工作原理

### 电压比较器

当 $v_I$ 大于某参考电压时，对应比较器输出为1。

输入电压 $v_I$ ( $\times V_{REF}$ )	比较器的输出状态						
	$Q_7$	$Q_6$	$Q_5$	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
0~1/15	0	0	0	0	0	0	0
1/15~3/15	0	0	0	0	0	0	1
3/15~5/15	0	0	0	0	0	1	1
5/15~7/15	0	0	0	0	1	1	1
7/15~9/15	0	0	0	1	1	1	1
9/15~11/15	0	0	1	1	1	1	1
11/15~13/15	0	1	1	1	1	1	1
13/15~1	1	1	1	1	1	1	1



## 代码转换器

将电压比较器的输出状态，转换为3位二进制代码。

输入电压 $v_I$ ( $\times V_{\text{REF}}$ )	比较器的输出(代码转换器输入)							数字量输出		
	$Q_7$	$Q_6$	$Q_5$	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$d_2$	$d_1$	$d_0$
0~1/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1/15~3/15	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
3/15~5/15	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
5/15~7/15	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
7/15~9/15	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
9/15~11/15	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
11/15~13/15	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
13/15~1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

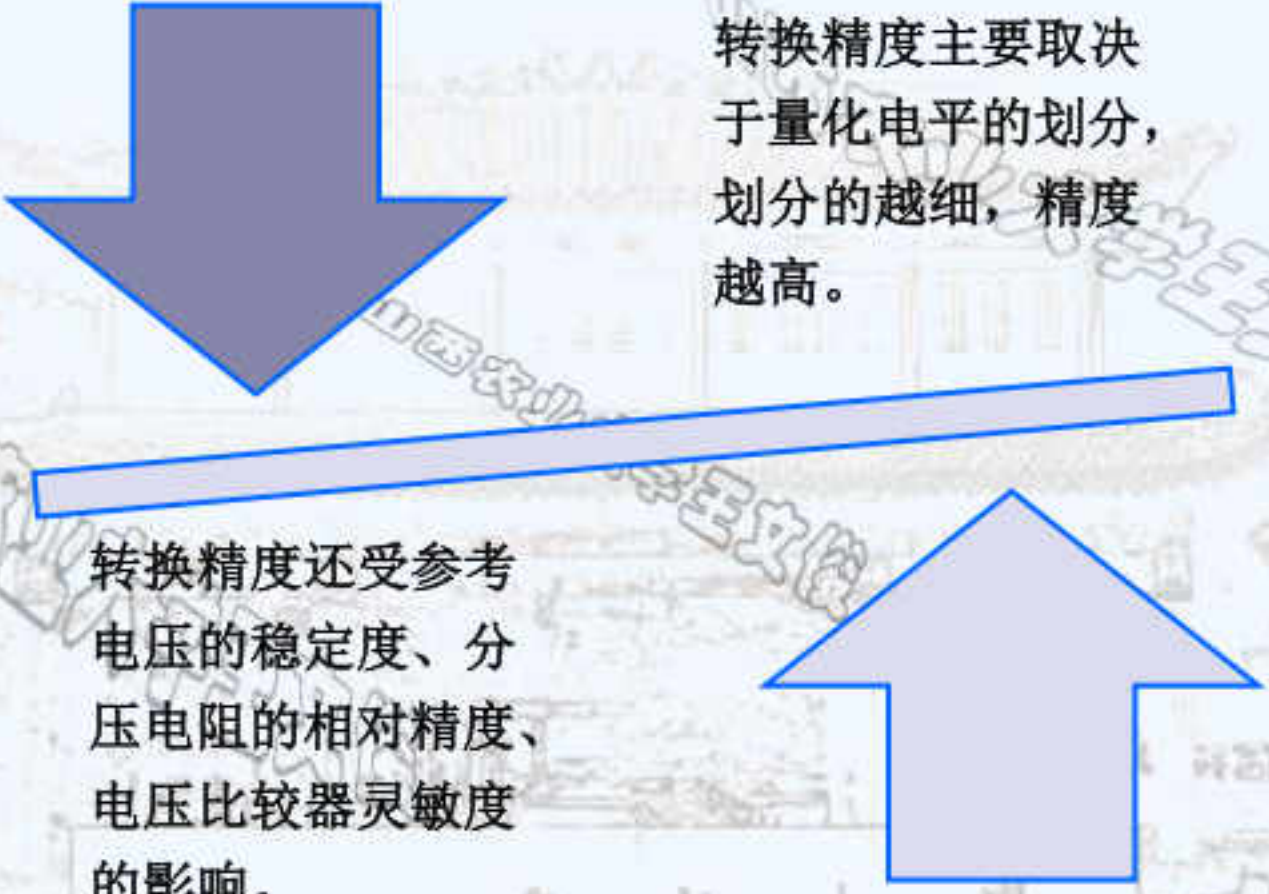
$$d_2 = Q_4$$

$$d_1 = Q_6 + Q_4 Q_2$$

$$d_0 = Q_7 + Q_6 Q_5 + Q_4 Q_3 + Q_2 Q_1$$



### • 3、并联比较型A/D转换器的转换精度



转换精度主要取决于量化电平的分划，分划的越细，精度越高。

转换精度还受参考电压的稳定度、分压电阻的相对精度、电压比较器灵敏度的影响。

#### • 4、并联比较型A/D转换器的特点

##### 优点

- 转换速度快，转换速度一般为几十纳秒，是所有A/D转换器中转换速度最快的一种。
- 当模拟信号加到电路输入端之后，只需经过电压比较器、触发器和代码转换电路的传输延迟时间即可完成一次转换。

##### 缺点

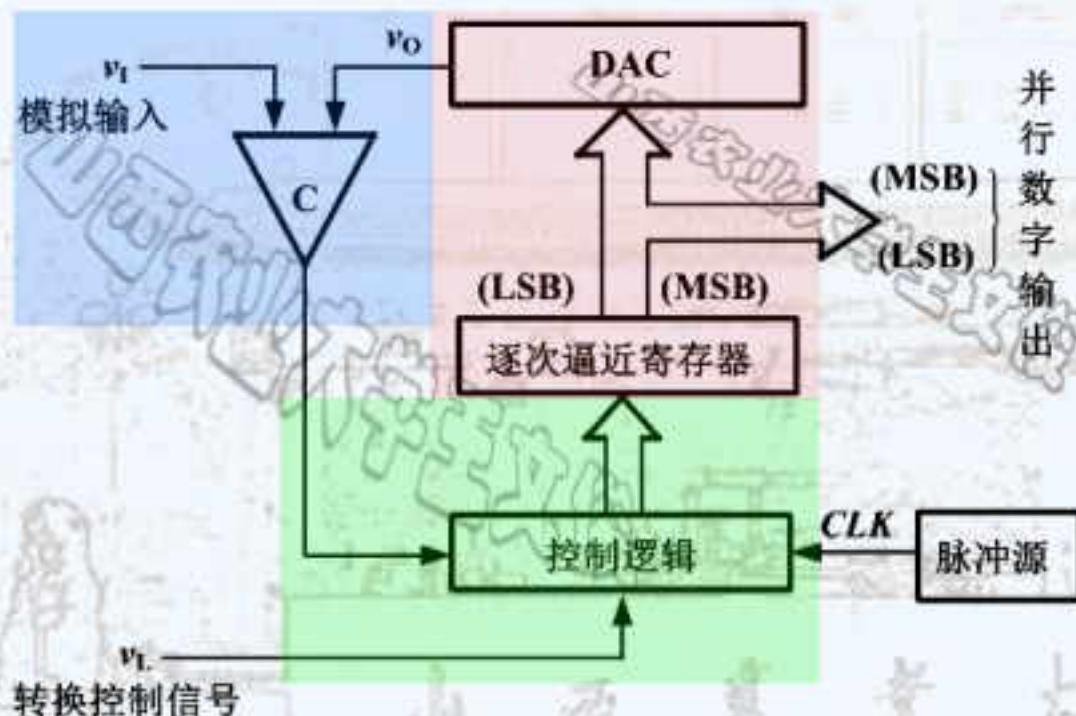
- 必须使用较多的电压比较器和规模较大的代码转换电路。
- 输出为  $n$  位的二进制代码转换电路，需要  $2^n - 1$  个电压比较器和相应的代码转换电路。随输出数字代码位数的增加，电路的规模将急剧膨胀。
- 目前常见的并联比较型A/D转换器产品输出多在8位以下。



# 十一、逐次逼近型A/D转换器

## • 1、电路结构

逐次逼近型A/D转换器采用一种**反馈比较**型电路结构。

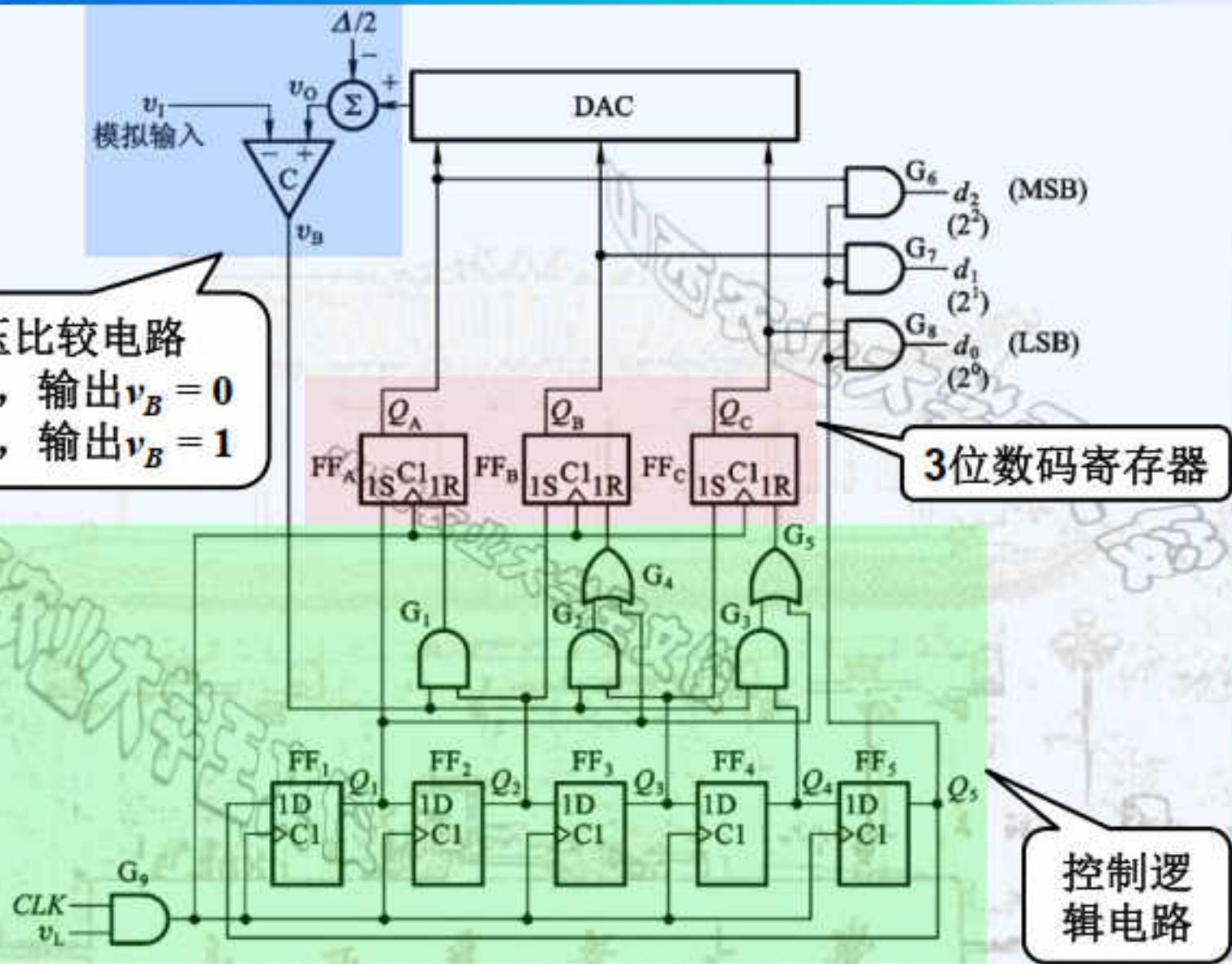


取一个数字量加到D/A转换器上，得到一个输出的模拟电压

将输出的模拟电压和输入的模拟电压比较

若不相等，则调整所取的数字量，直到两个模拟电压相等为止

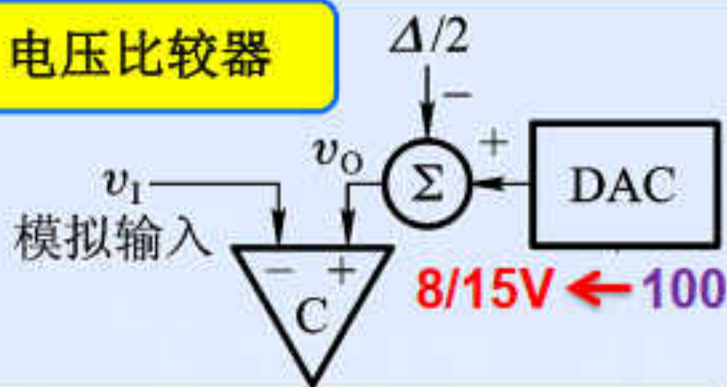




3位逐次逼近型A/D转换器的电路原理图

## • 2、工作原理

### 电压比较器

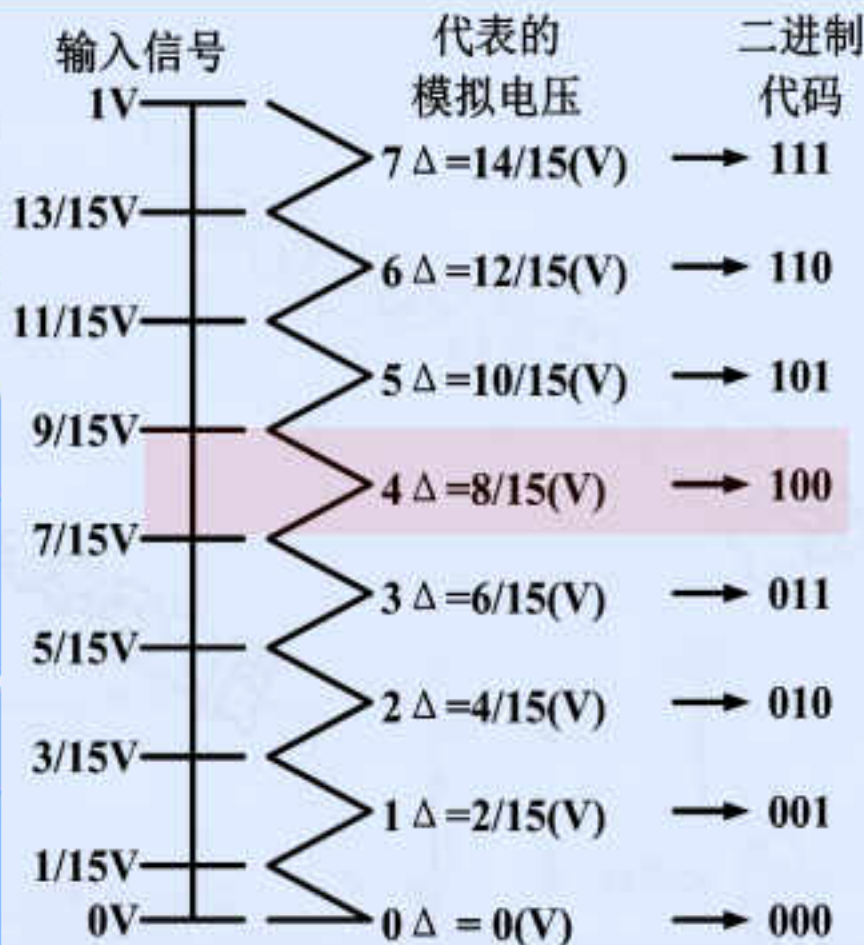


### 直接比较

- $v_I \geq 8/15V$ , 数字量  $\geq (100)_2$
- $v_I < 8/15V$ , 数字量  $< (100)_2$

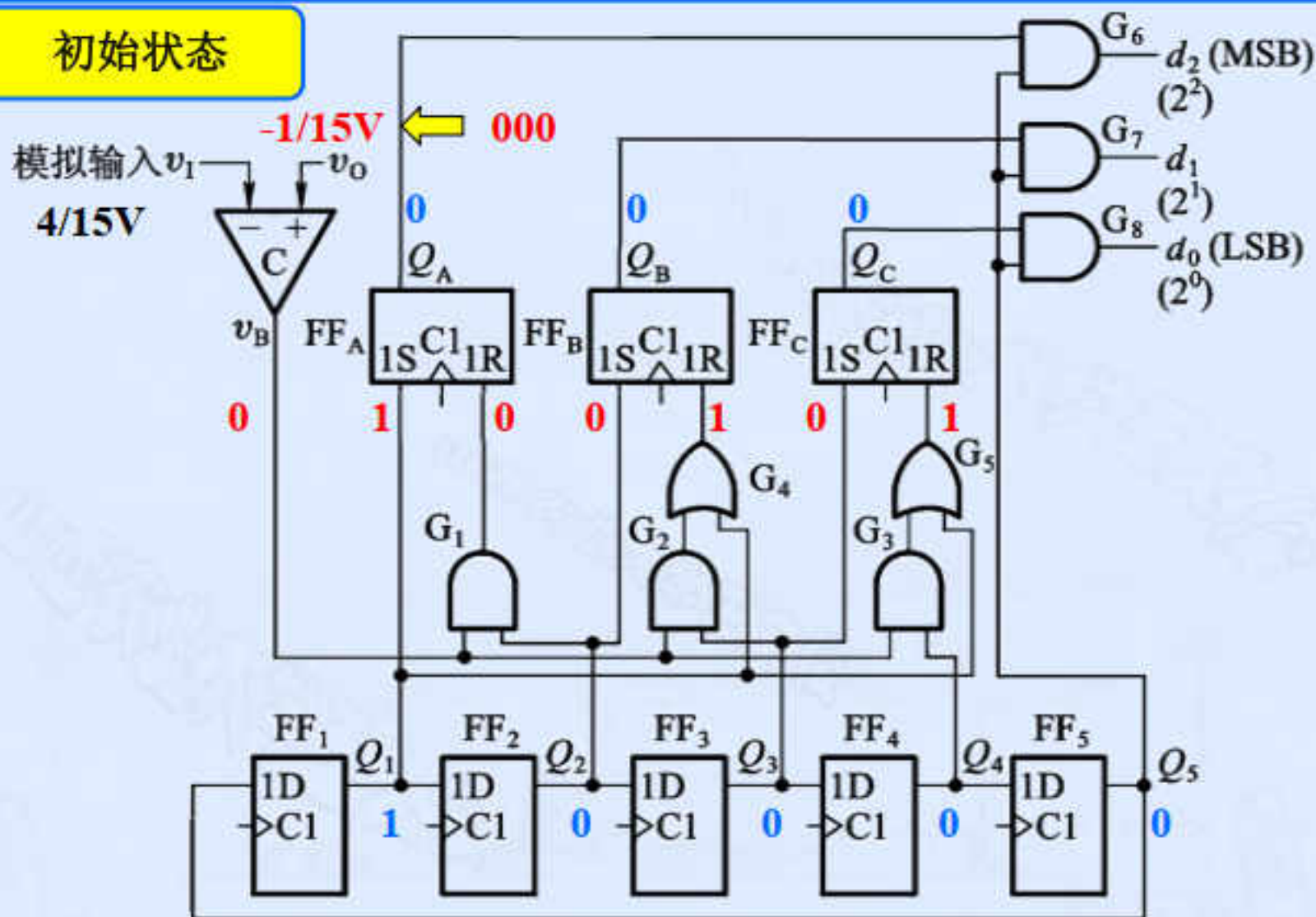
### 偏移 $-\Delta/2$ 后比较

- $v_I \geq 7/15V$ , 数字量  $\geq (100)_2$
- $v_I < 7/15V$ , 数字量  $< (100)_2$



令D/A转换器的输出产生 $-\Delta/2$ 的偏移量, 可以减小量化误差。

## 初始状态

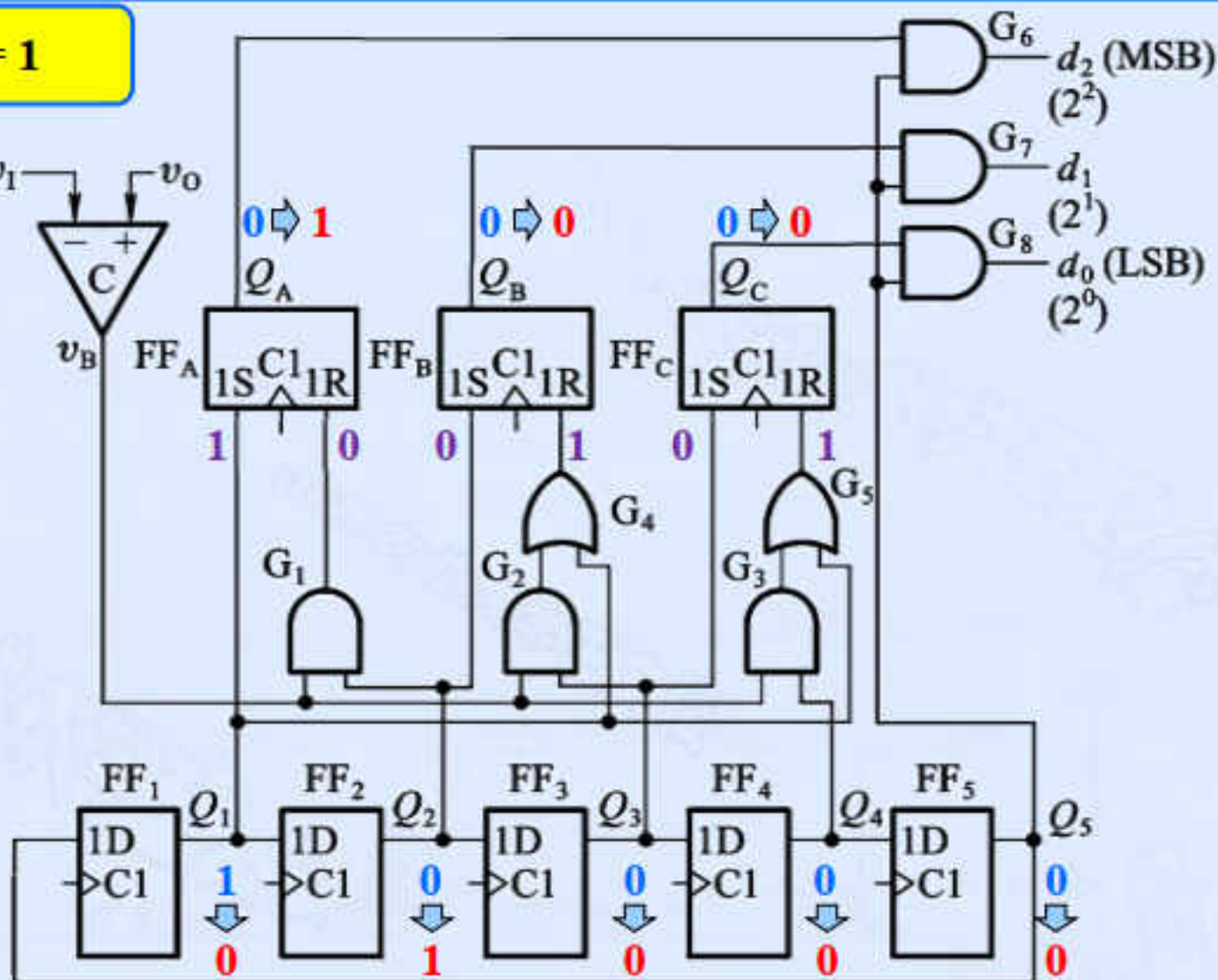


移位寄存器初始状态  $Q_1Q_2Q_3Q_4Q_5 = 10000$ 。

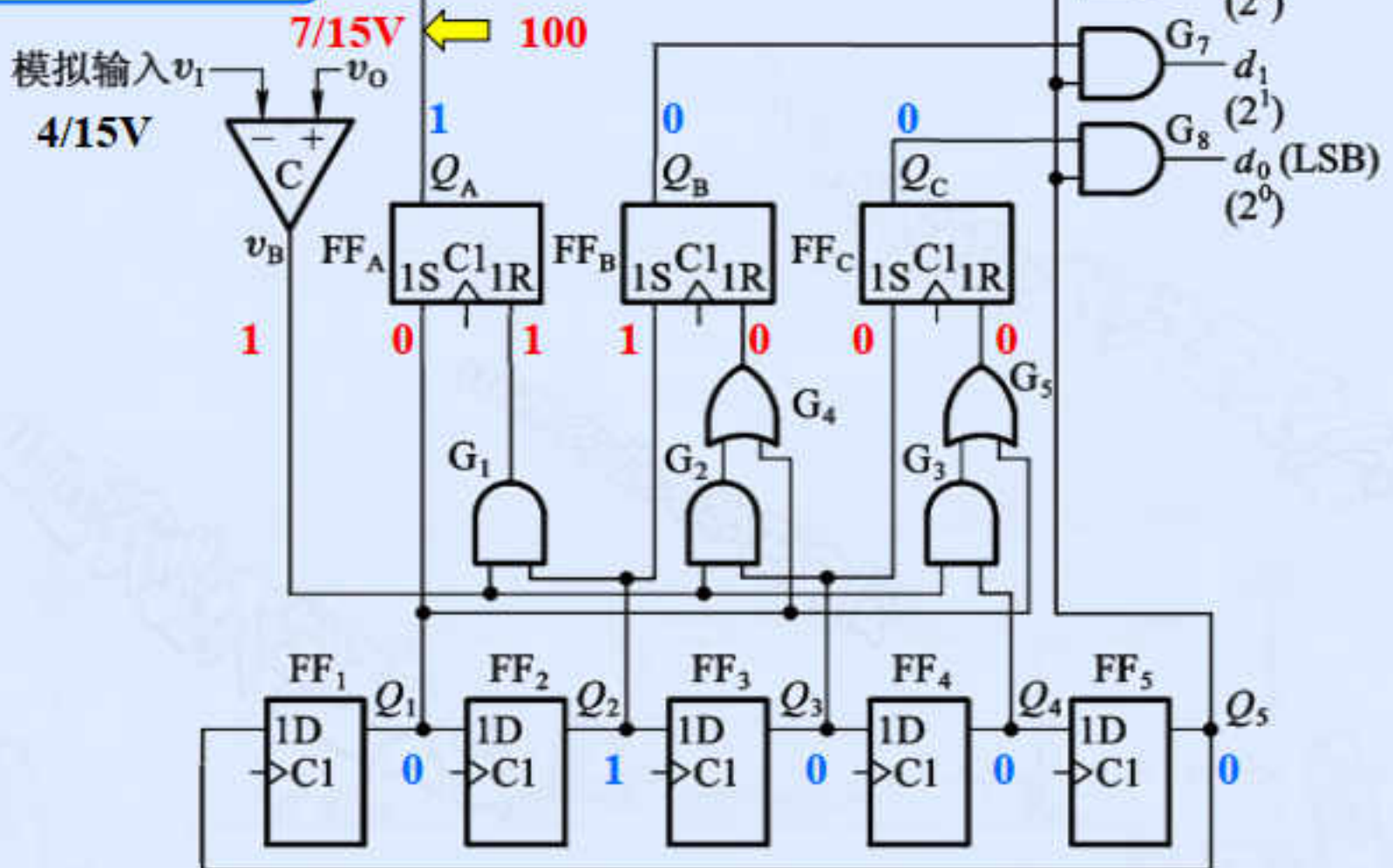


**CLK = 1**

模拟输入  $v_i$   
4/15V



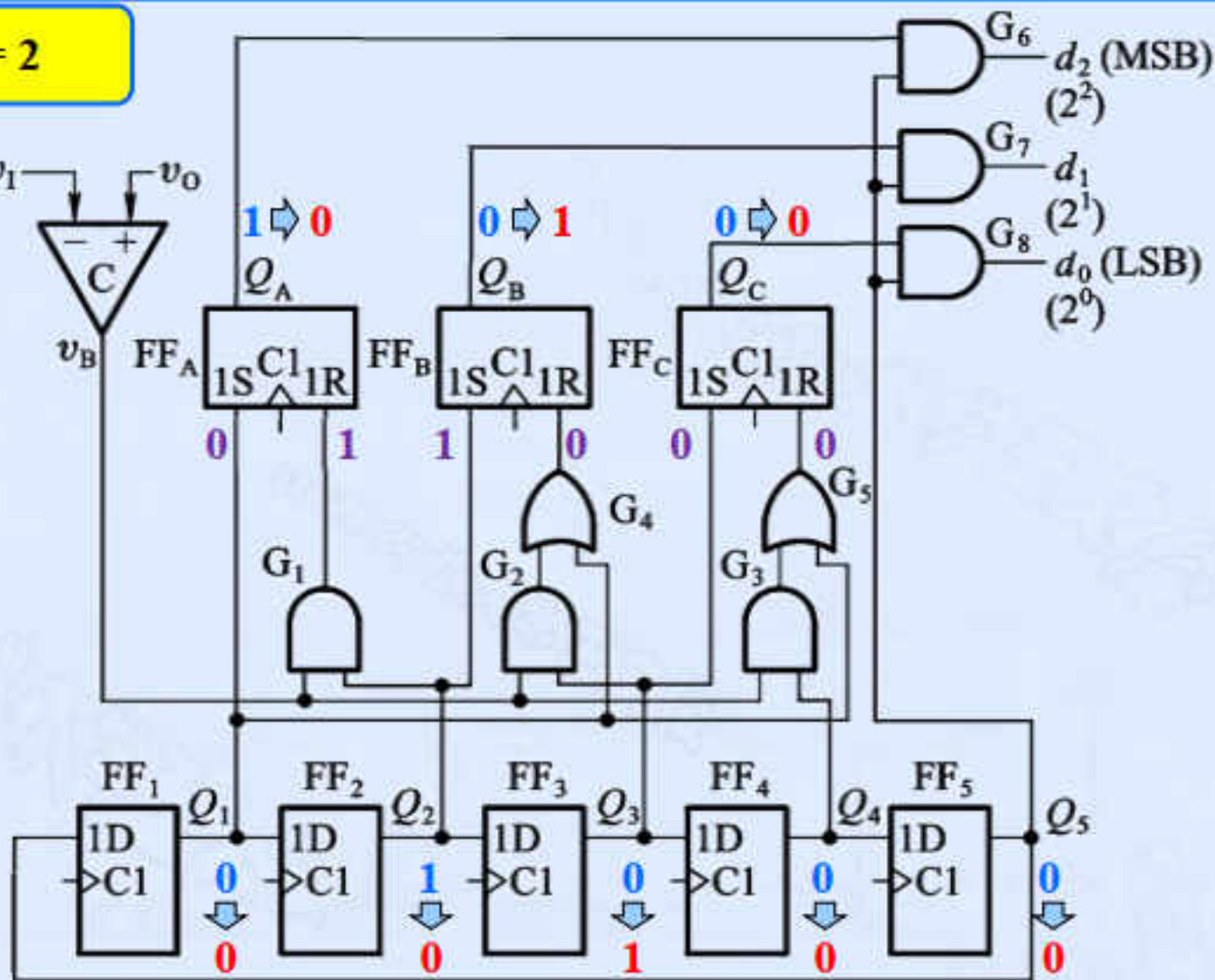
最高位置1，数码寄存器状态  $Q_A Q_B Q_C = 100$ 。

$CLK = 1$ 

模拟电压  $v_I < v_O$ , 数字量  $< (100)_2$ , 确定最高位为 0, 最高位需置 0。

$CLK = 2$

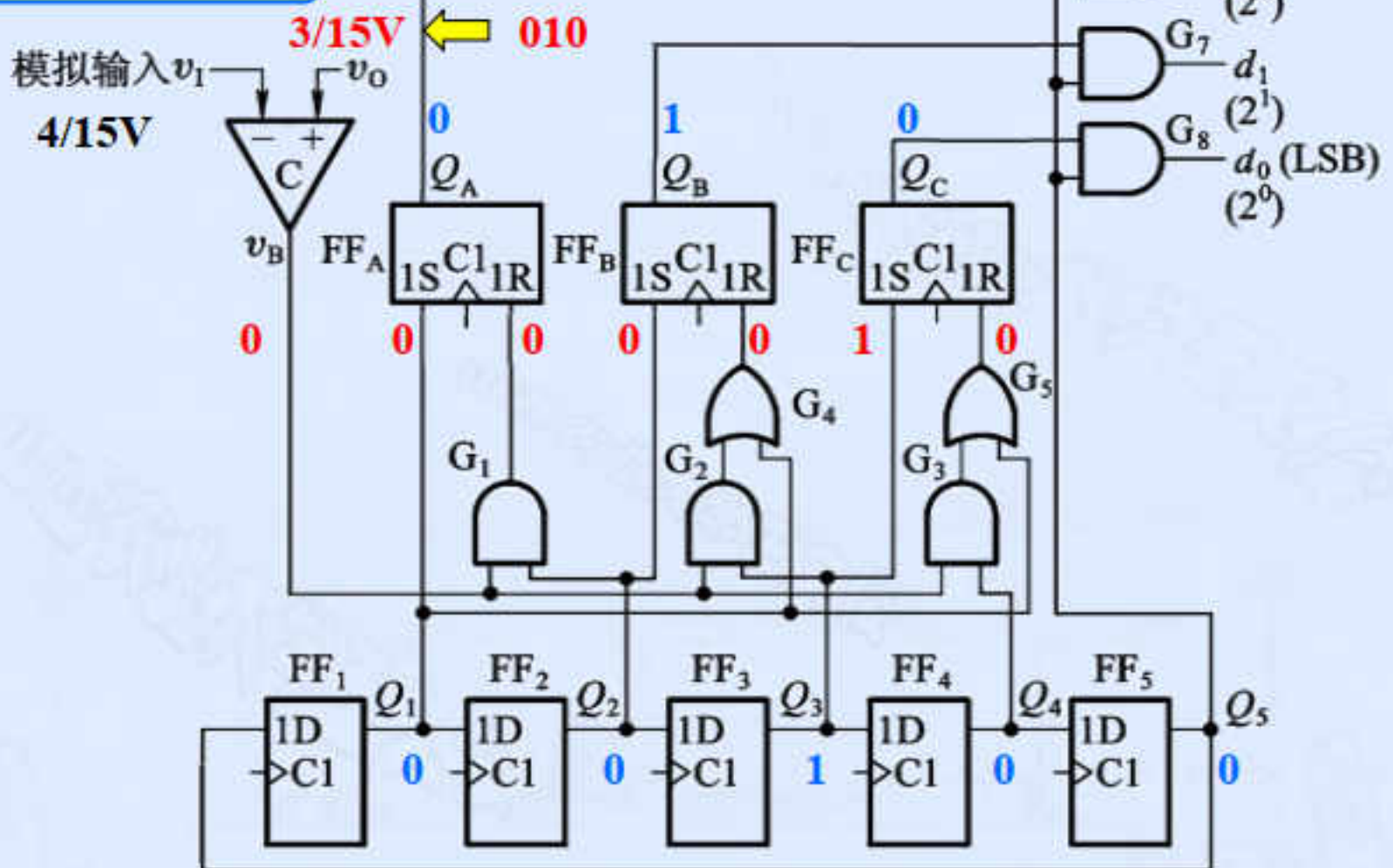
模拟输入  $v_i$   
4/15V



最高位置0，中间位置1，数码寄存器状态  $Q_A Q_B Q_C = 010$ 。



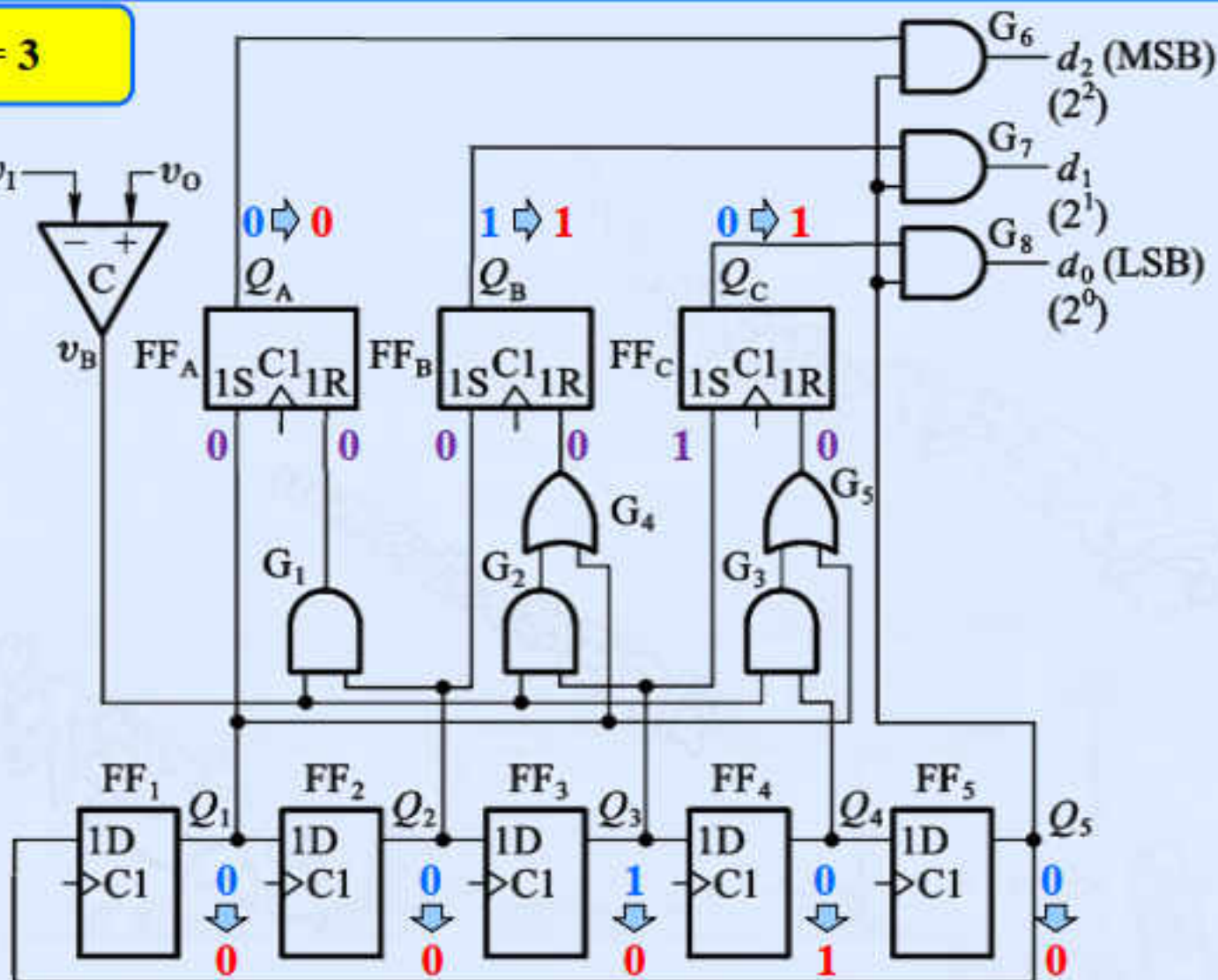
$CLK = 2$



模拟电压  $v_I > v_O$ , 数字量  $> (010)_2$ , 确定中间位为 1。

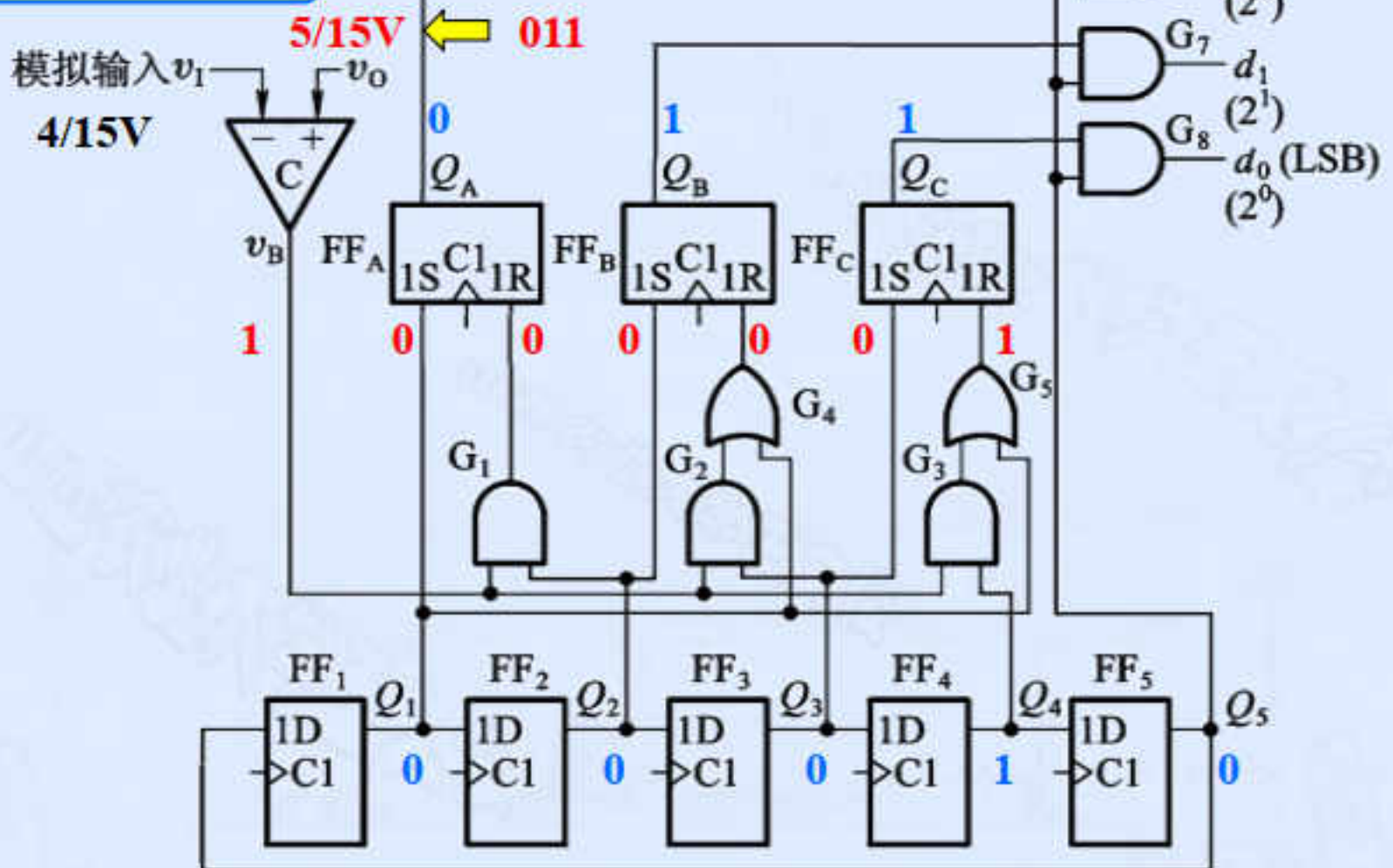
**CLK = 3**

模拟输入  $v_I$   
4/15V



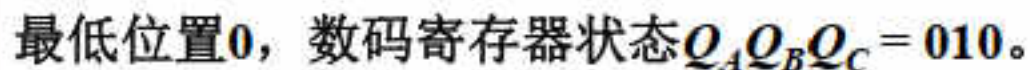
最低位置1，数码寄存器状态  $Q_A Q_B Q_C = 011$

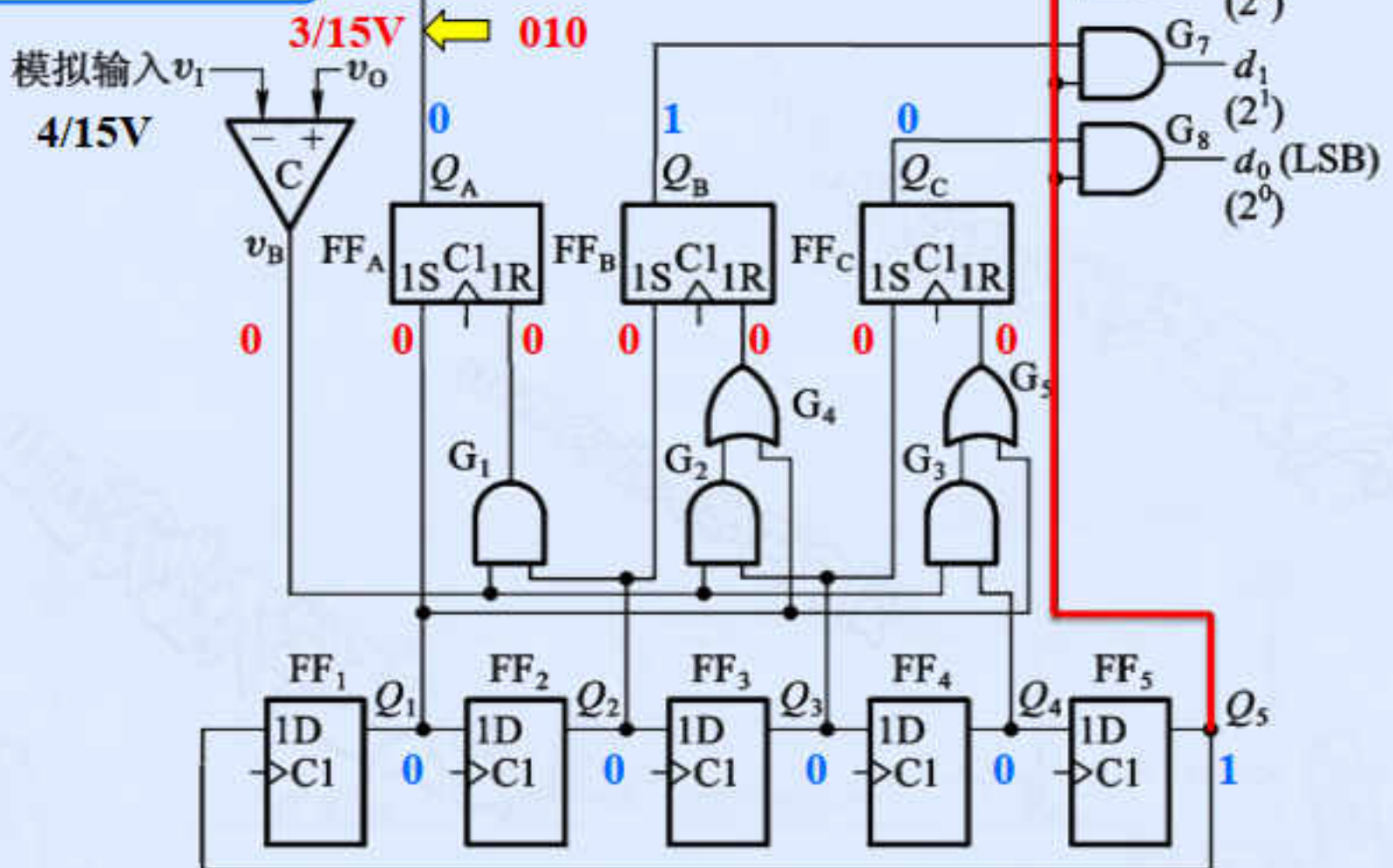
$CLK = 3$



模拟电压  $v_I < v_O$ , 数字量  $< (011)_2$ , 确定最低位为 0。最低位需置 0。



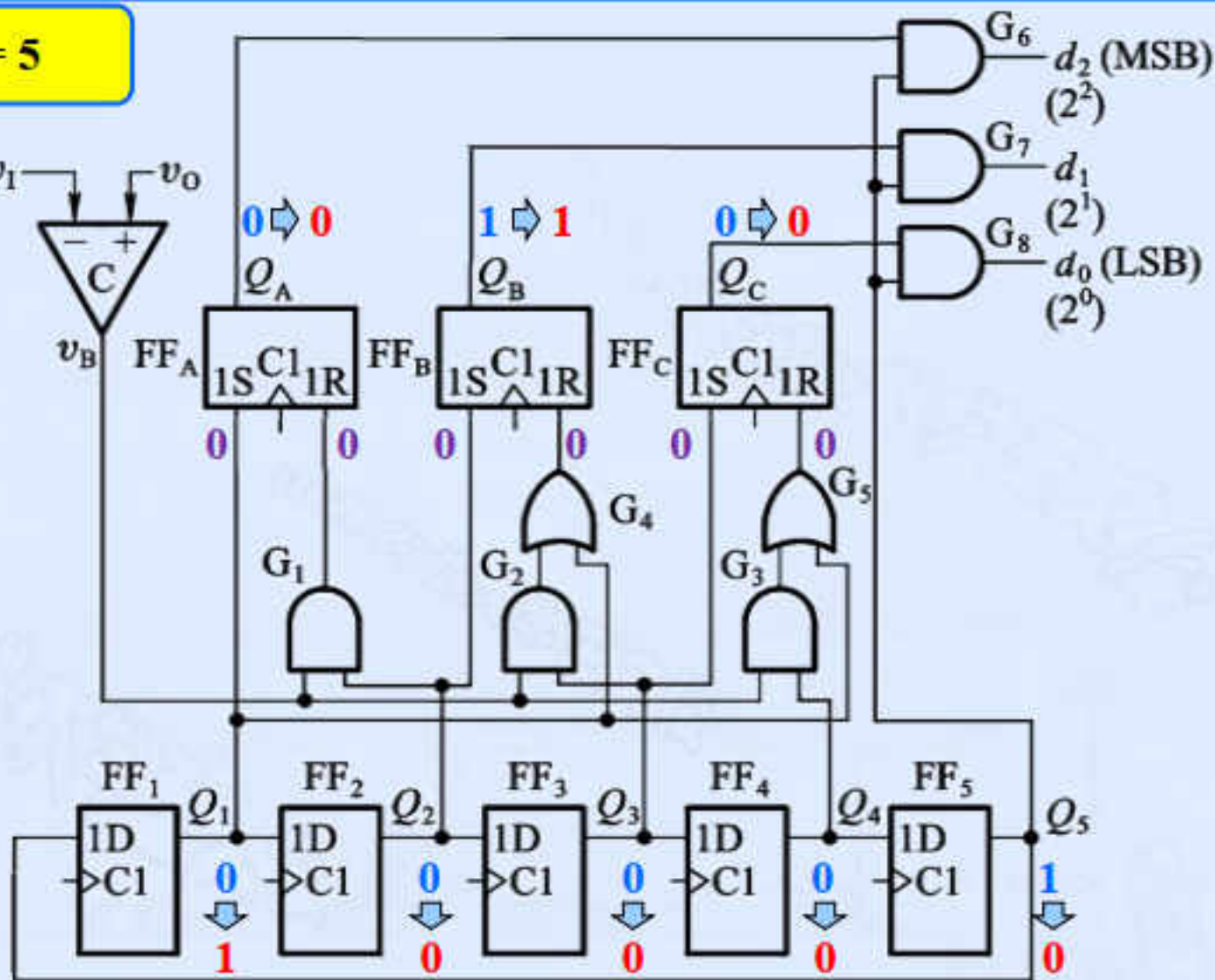


$CLK = 4$ 

输出数字量  $d_2 d_1 d_0 = 010$ 。

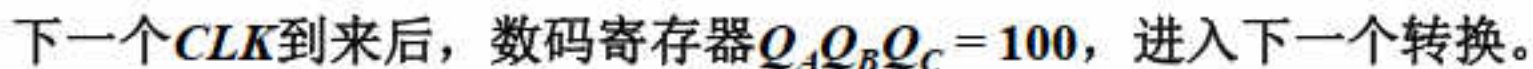
**CLK = 5**

模拟输入  $v_I$   
4/15V



移位寄存器回到初始状态  $Q_1Q_2Q_3Q_4Q_5 = 10000$ 。





## • 5、逐次逼近型A/D转换器的特点

### 转换速度

- $n$ 位输出的A/D转换器，需要  $n+2$ 个时钟信号周期的时间。
- $n$ 个时钟信号周期，从高到低确定每一位的数值；
- 1个时钟信号周期，输出确定后的数字信号；
- 1个时钟信号周期，回到初始状态。
- 逐次逼近型A/D转换器转换速度比并联比较型A/D转换器低。

### 电路规模

- 当输出位数较多时，逐次逼近型A/D转换器的电路规模比并联比较型小得多。
- 除了对转换速度要求特别高的场合，逐次逼近型A/D转换器是集成A/D转换器产品中用得最多的一种电路。

## 十二、双积分型A/D转换器

### • 1、转换思路

双积分型A/D转换器是一种**间接型**A/D转换器。

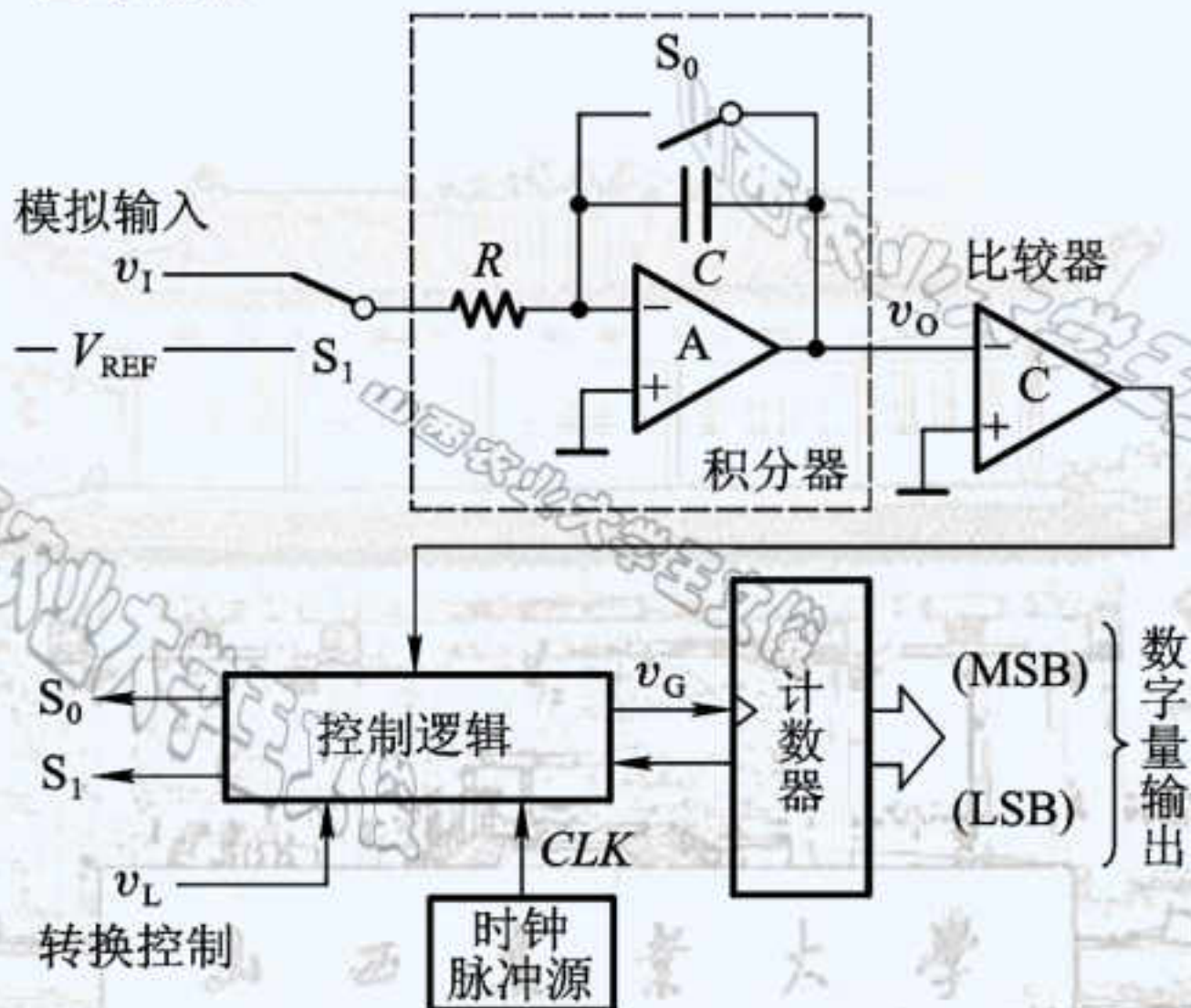
将输入的模拟电压信号转换为与之成正比的**时间宽度**信号

在这个时间宽度内对**固定频率的时钟**进行计数

计数结果就是正比于输入模拟电压的数字信号

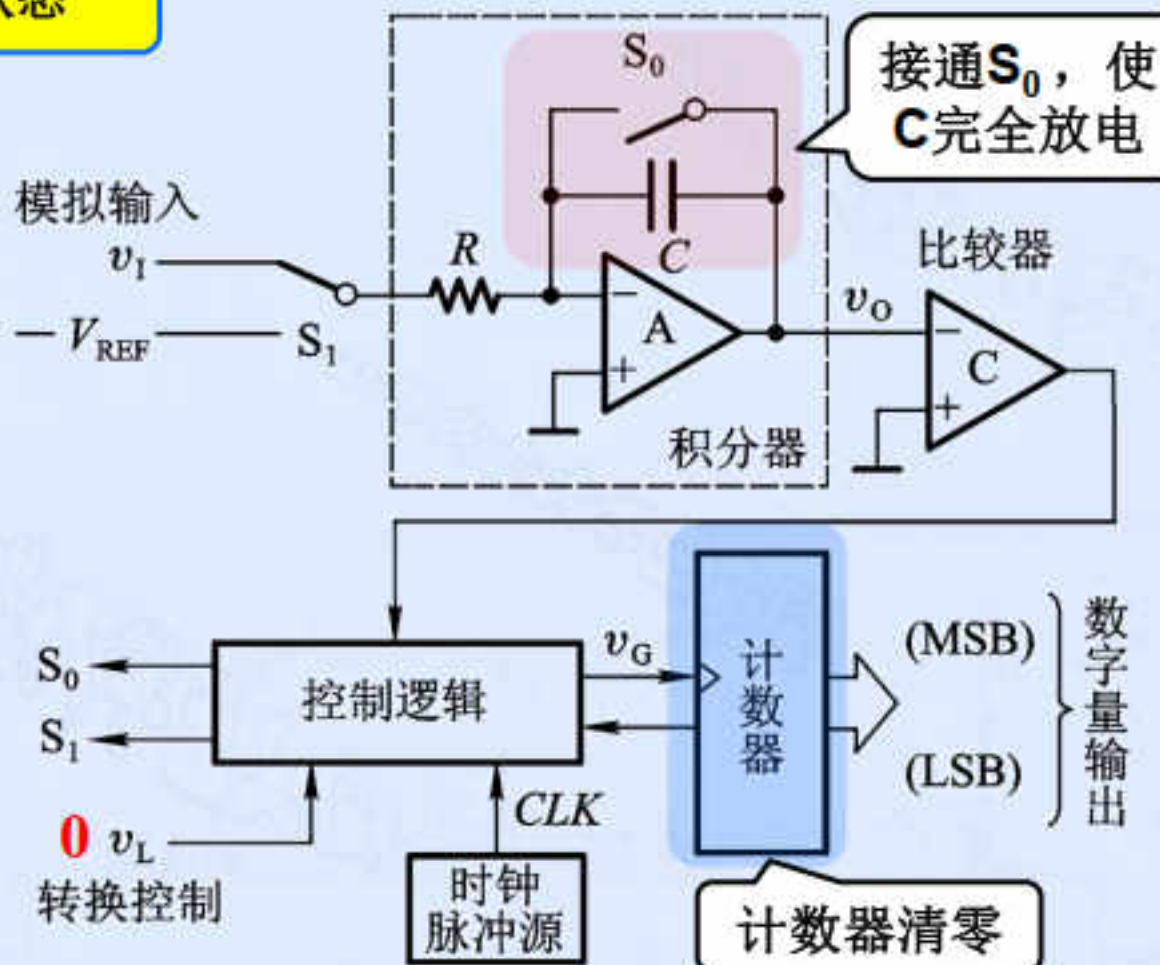


## • 2、电路结构

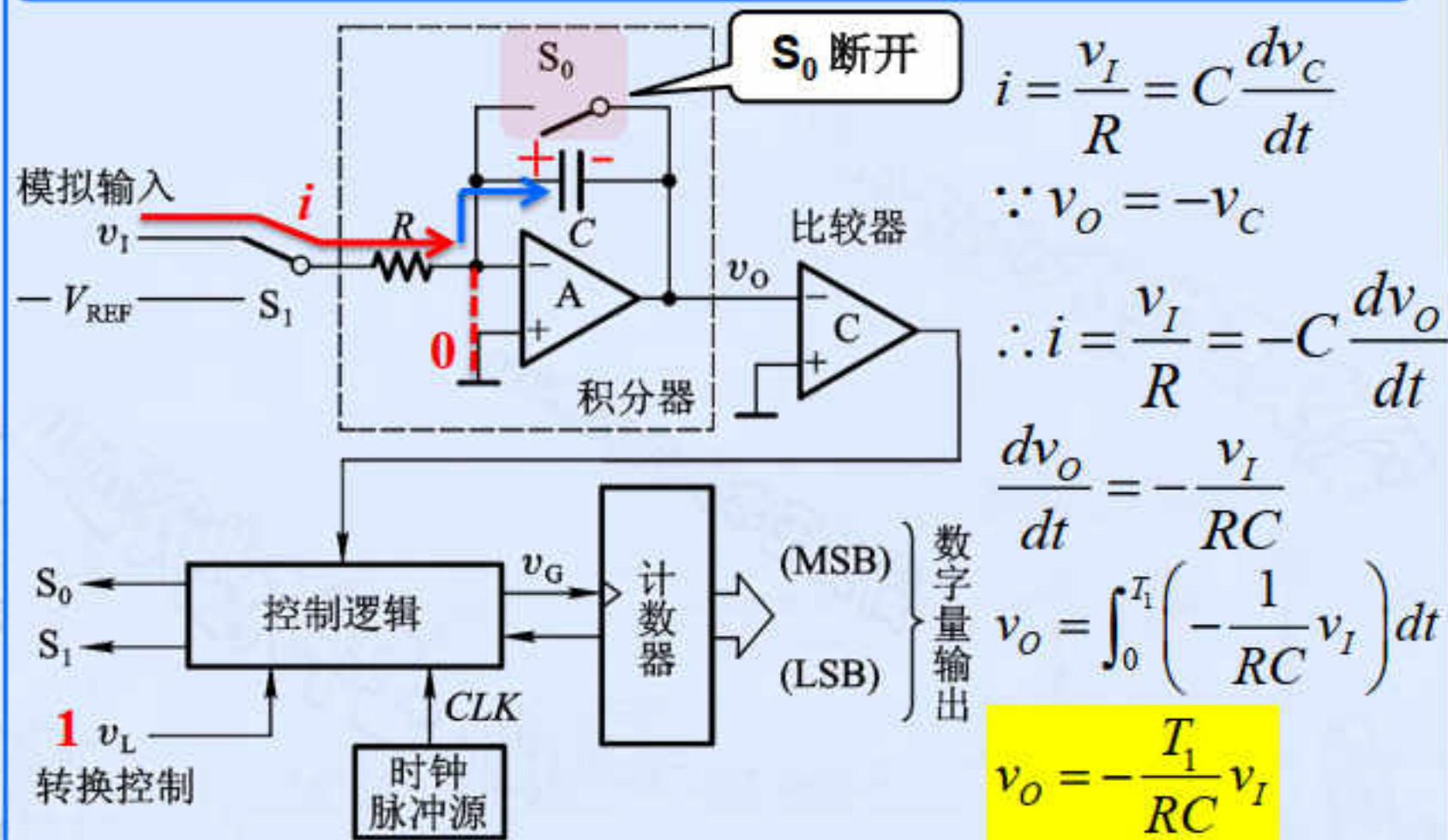


### 3、工作原理

#### 初始状态



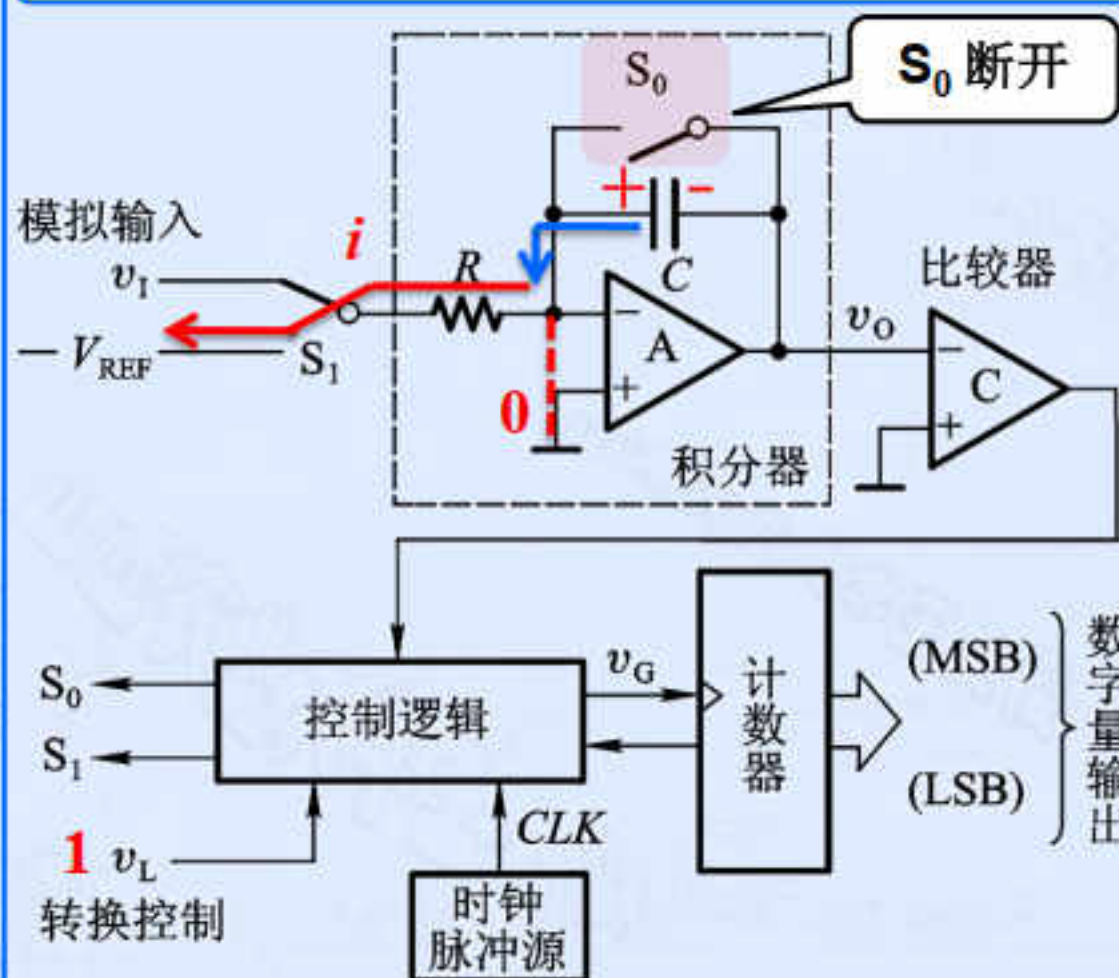
① 正向积分： $S_I$  接输入  $v_I$ ，对  $v_I$  进行固定时间  $T_I$  的积分



固定时间  $T_I$  做积分，输出电压  $v_O$  与输入电压  $v_I$  成正比。



② 反向积分： $S_1$  接输入  $-V_{REF}$ ，令输出  $v_o$  回到0，设持续时间  $T_2$



$$i = -\frac{V_{REF}}{R} = C \frac{dv_C}{dt}$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{V_{REF}}{RC}$$

$$\int_0^{T_2} \frac{V_{REF}}{RC} dt = \frac{v_I}{RC} T_1$$

$$\frac{V_{REF}}{RC} T_2 = \frac{v_I}{RC} T_1$$

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

反向积分的持续时间  $T_2$  与输入电压  $v_I$  成正比。

③ 在反向积分持续时间 $T_2$ 内，对**固定频率**的时钟脉冲**计数**。

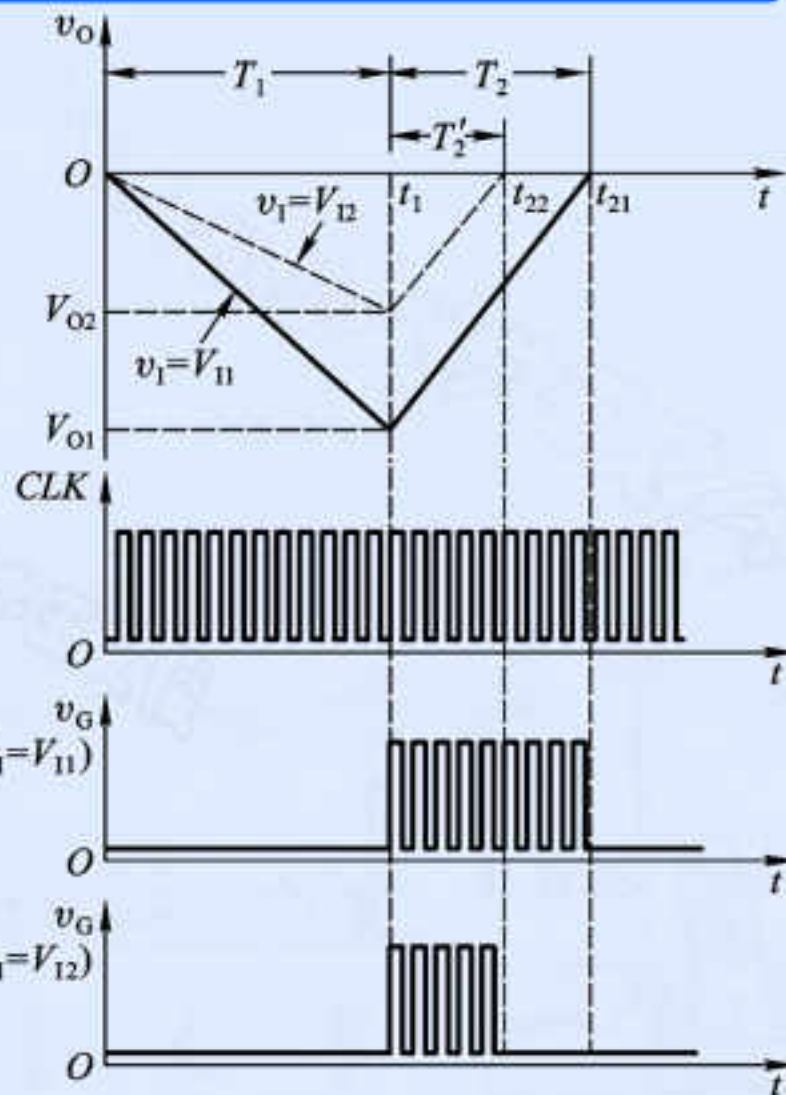
假设：固定频率 $f_c$ ，周期 $T_c = 1/f_c$ ，  
则计数结果（输出的数字量）：

$$D = T_2 f_c = \frac{T_1}{T_c V_{REF}} v_I$$

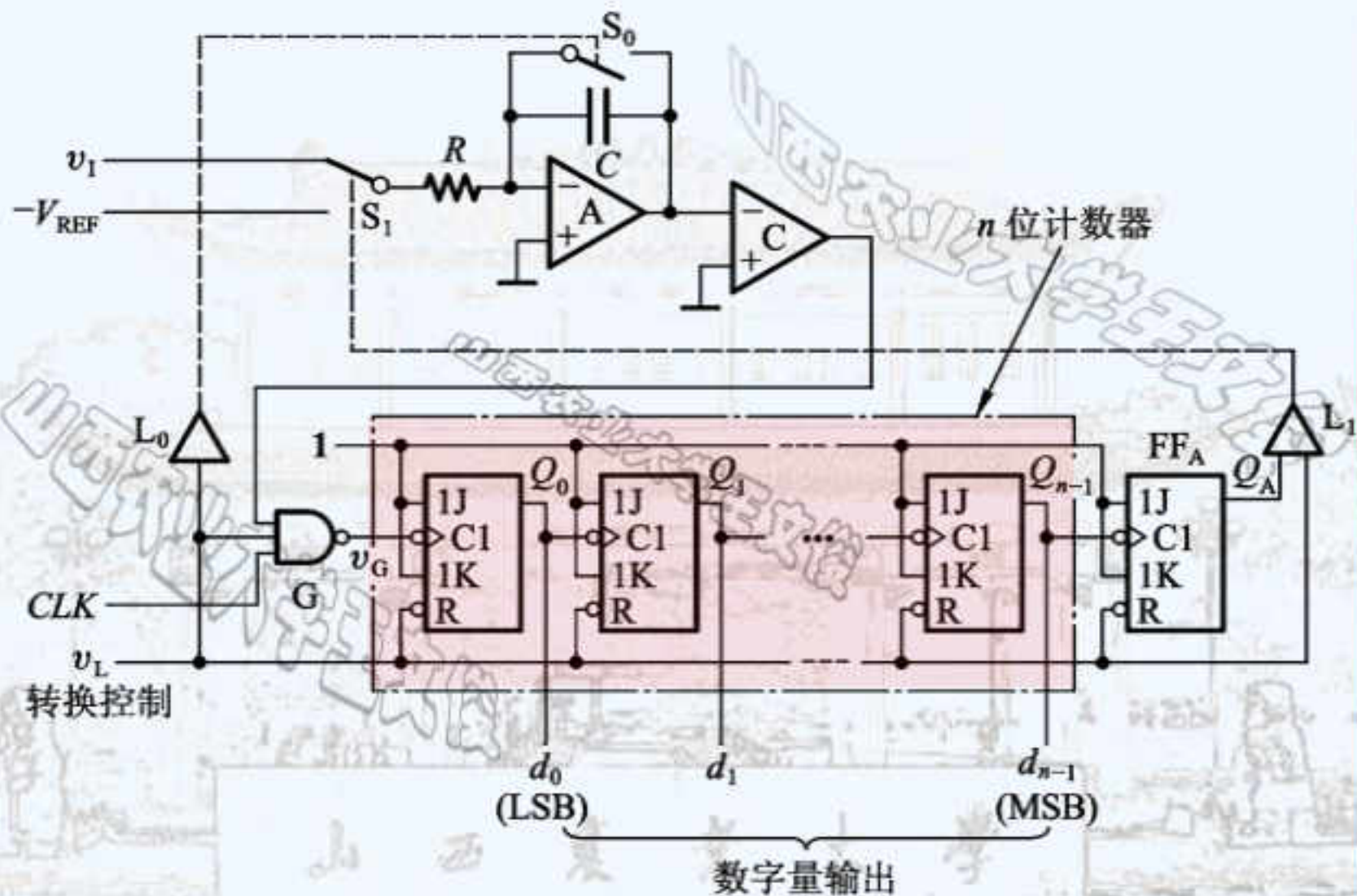
若 $T_1$ 为 $T_c$ 的整数倍，即 $T_1 = NT_c$ ，  
则计数结果（输出的数字量）：

$$D = \frac{T_1}{T_c V_{REF}} v_I = \frac{N}{V_{REF}} v_I$$

输出的数字量 $D$ 与输入电压 $v_I$   
成**正比**。



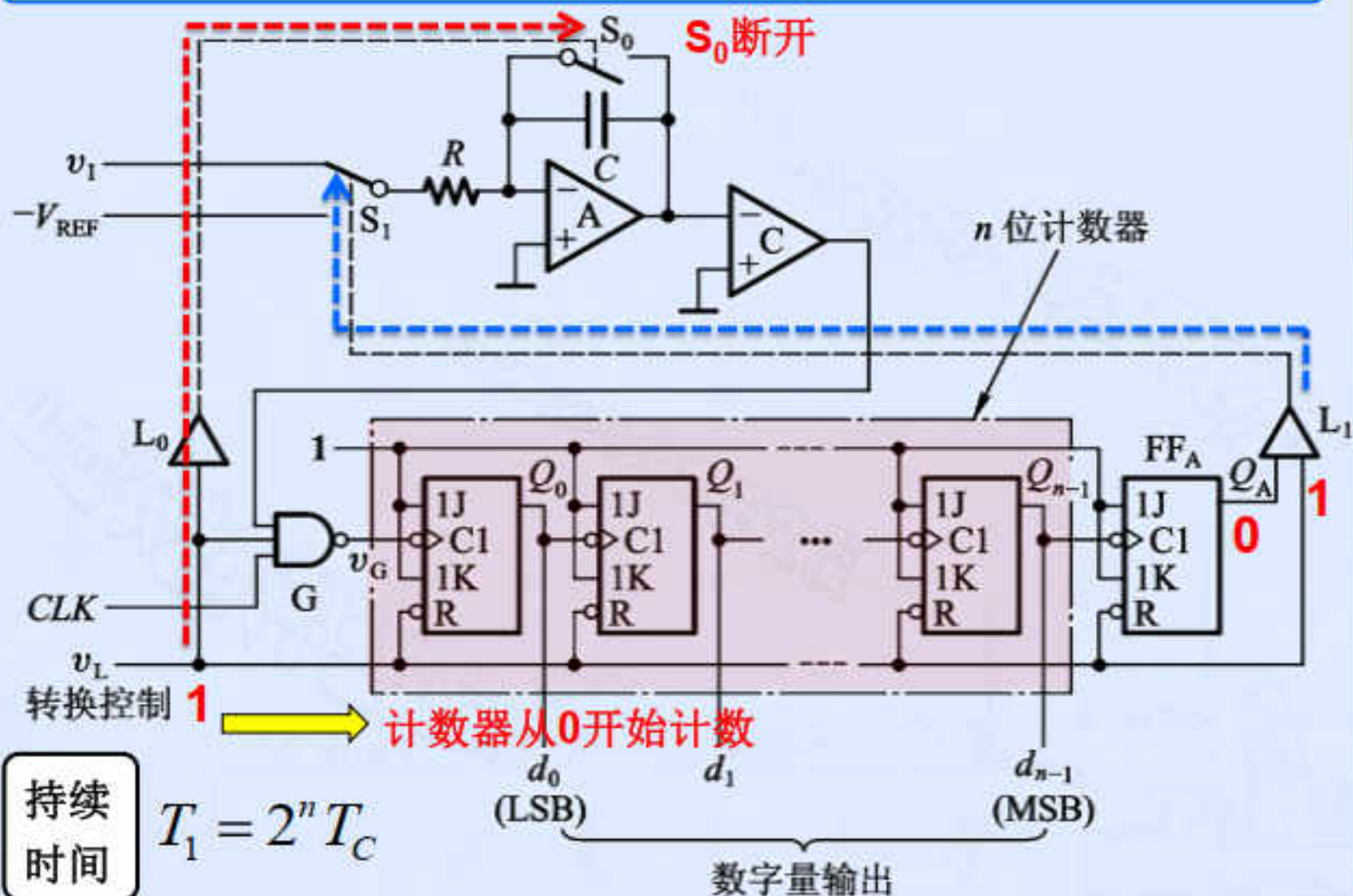
## • 4、电路实现



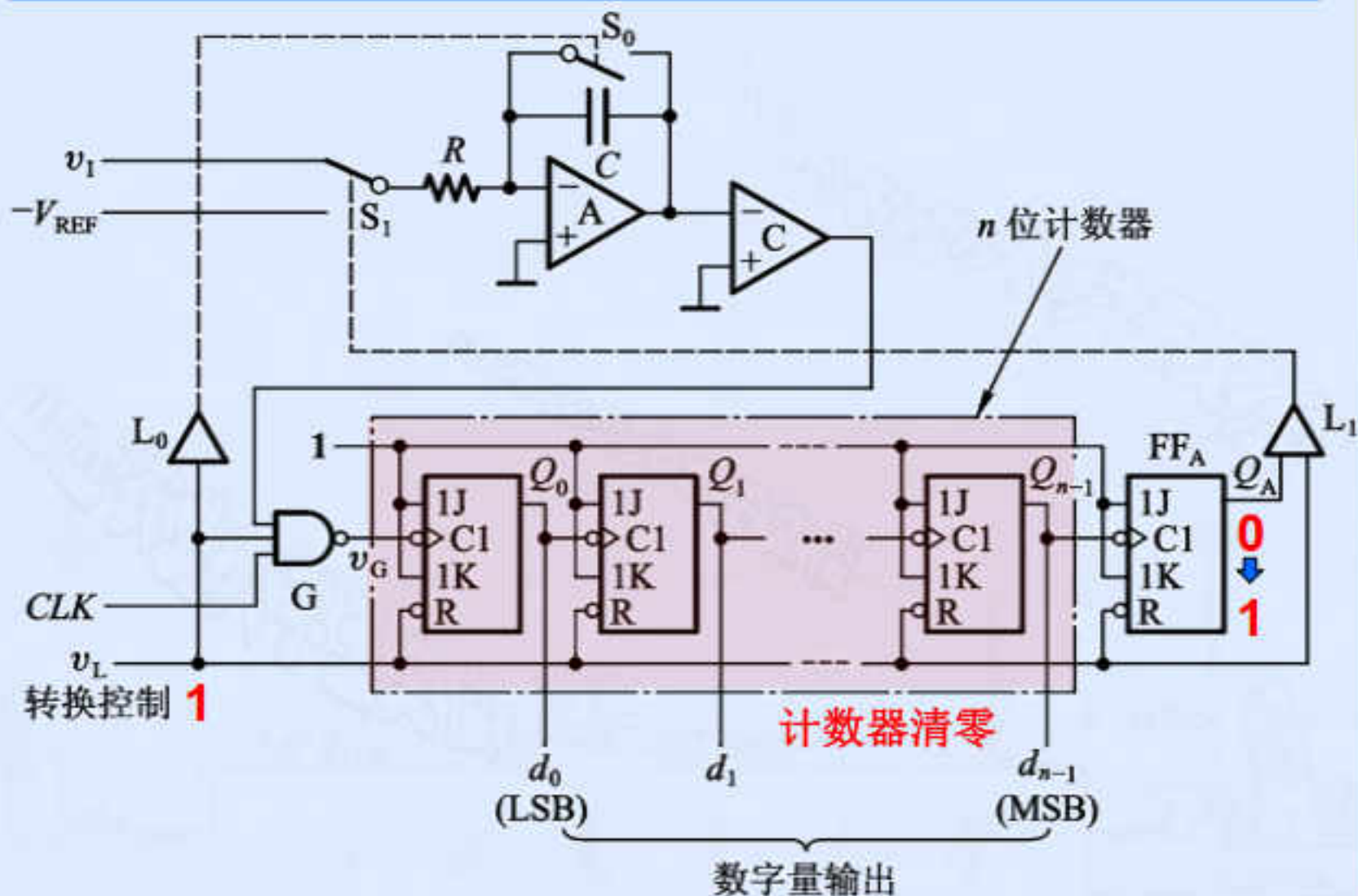




① 正向积分：转换控制信号  $v_L = 1$ ,  $S_I$  接输入  $v_I$

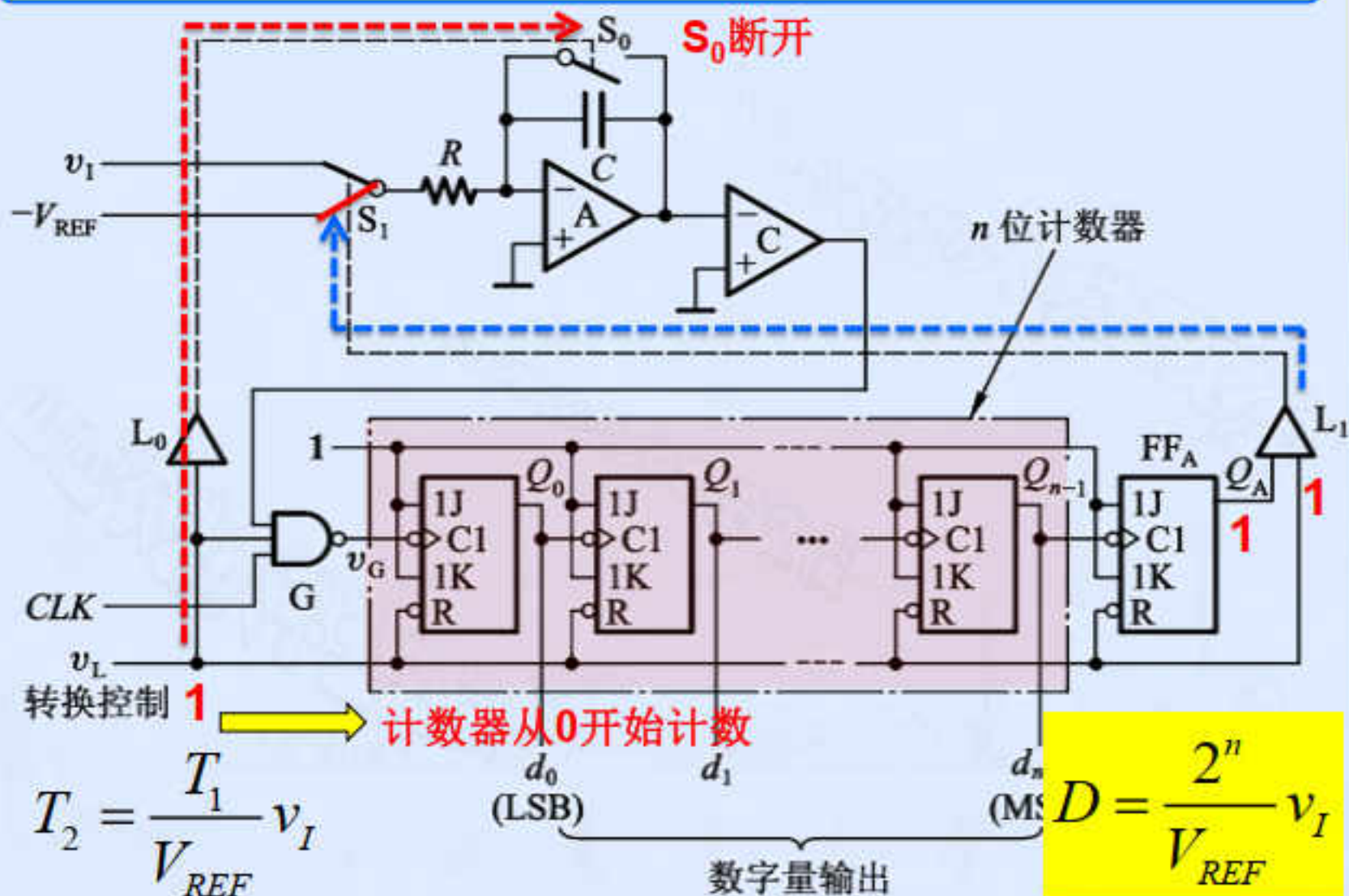


当计数器计数满  $2^n$  个脉冲后，自动返回全0状态，产生进位输出





② 反向积分：  $S_1$  接输入  $-V_{REF}$ ，令输出  $v_o$  回到0，持续时间  $T_2$



## • 5、双积分型A/D转换器的特点

### 优点

- 工作性能比较稳定。只要两次积分期间 $R$ 、 $C$ 的参数相同，则转换结果与 $R$ 、 $C$ 的参数无关。因此可以用精度较低的元器件制成精度很高的双积分型A/D转换器。
- 抗干扰能力强。转换器的输入端使用了积分器，对平均值为零的各种噪声具有很强的抑制能力。

### 缺点

- 工作速度低。对于 $n$ 位转换器，完成一次转换所需时间应不小于 $2T_1 = 2^{n+1}T_C$ 。
- 在对转换速度要求不高的场合，双积分型A/D转换器应用非常广泛。

## 十三、 $V$ - $F$ 变换型A/D转换器

### • 1、转换思路

$V$ - $F$ 变换型A/D转换器是一种**间接型**A/D转换器。

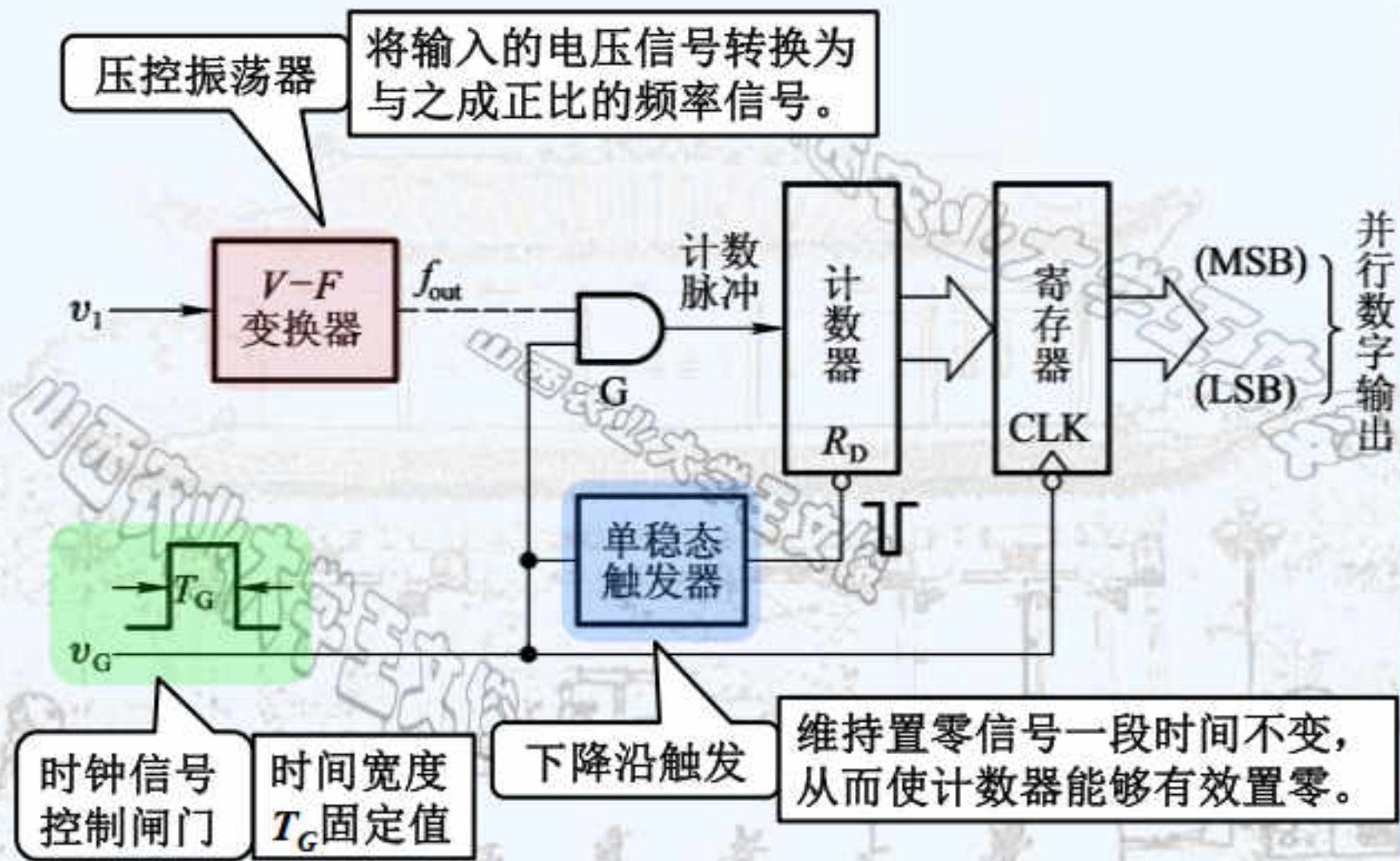
将输入的模拟电压信号转换为与之成正比的**频率**信号

在一个**固定的时间宽度**内对得到的**频率信号计数**

计数结果就是正比于输入模拟电压的数字信号

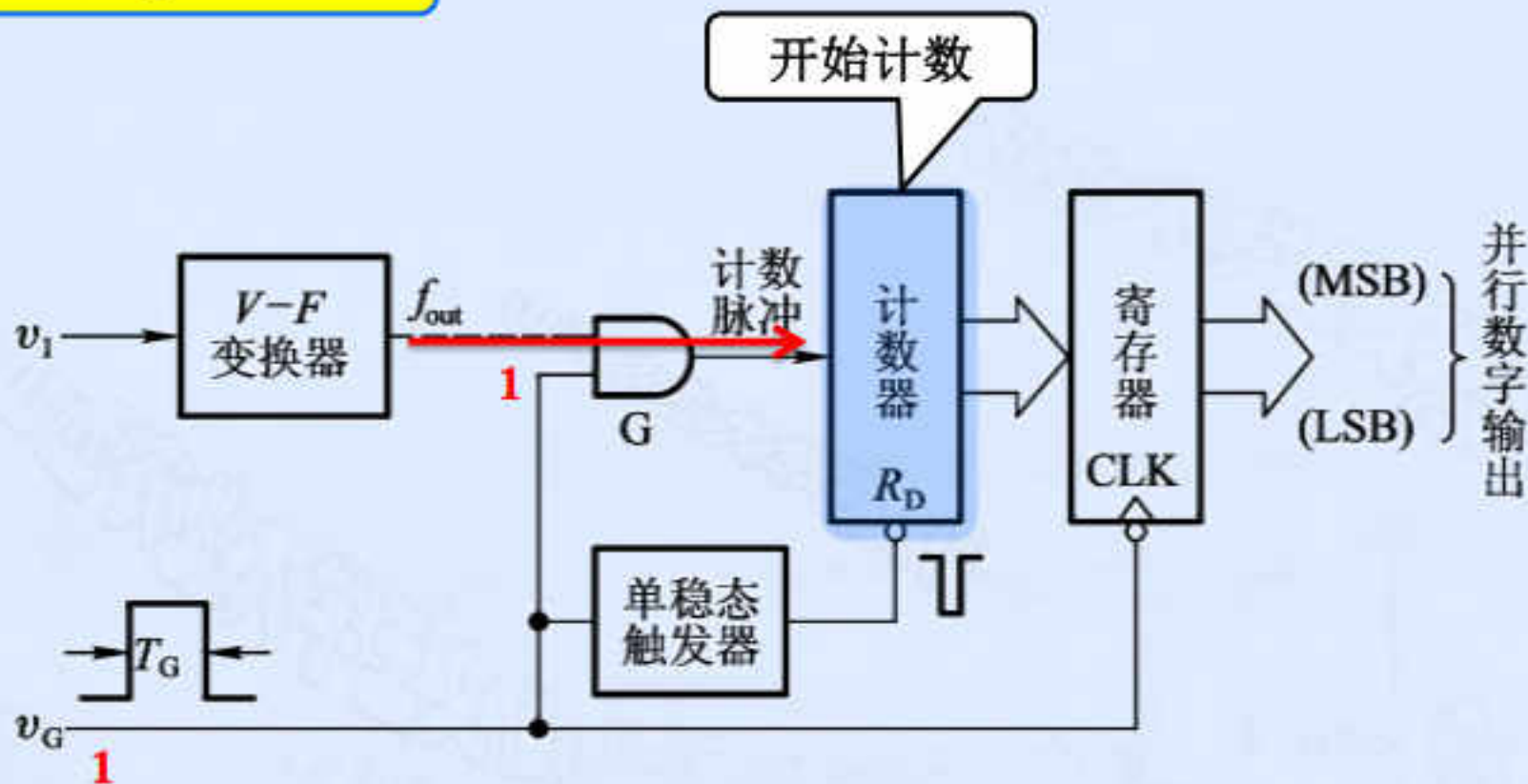


## 2、电路结构

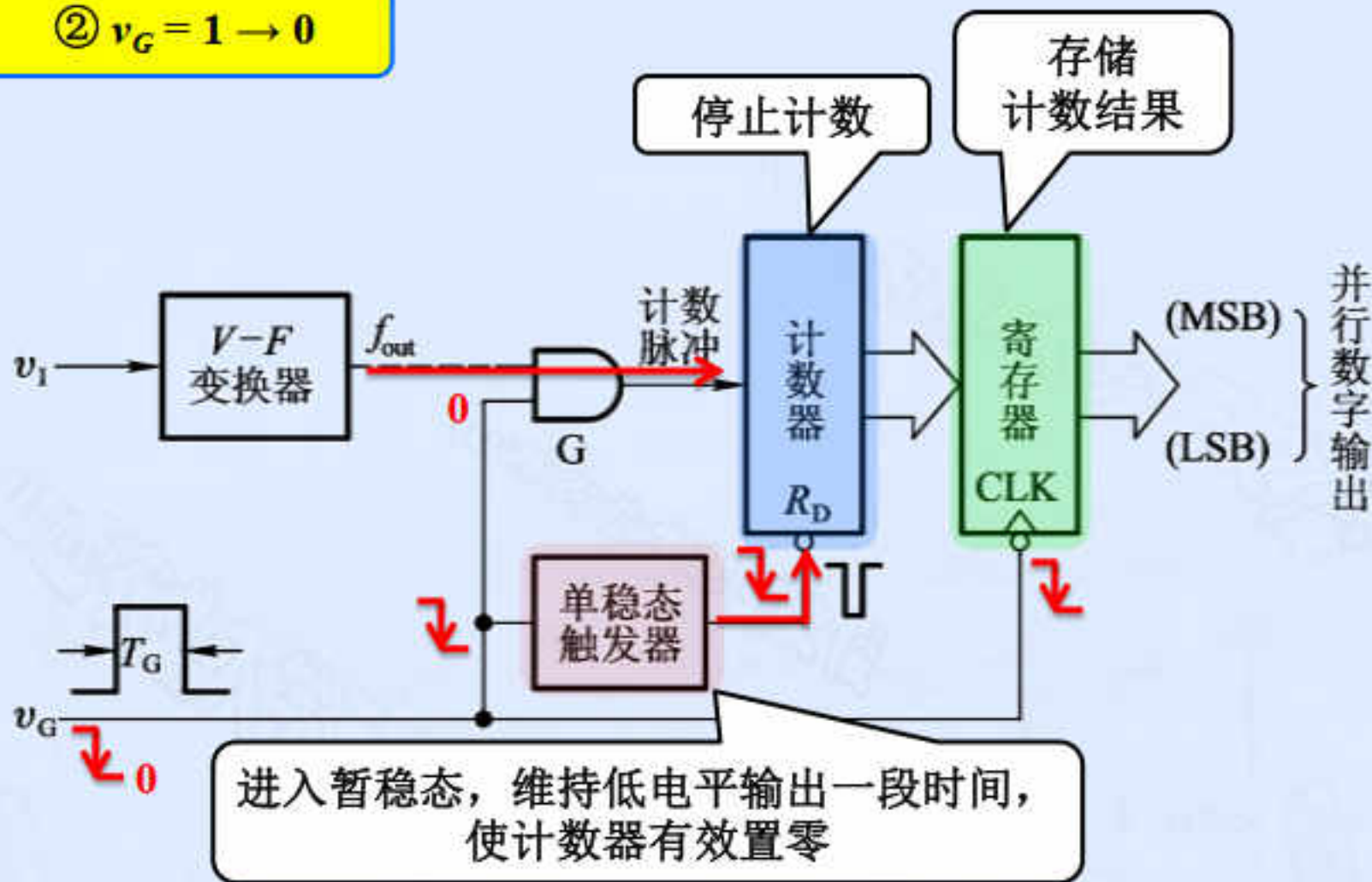


### • 3、工作原理

①  $v_G = 0 \rightarrow 1$



在固定时间宽度  $T_G$  内，计数器对频率信号  $f_{out}$  进行计数。

②  $v_G = 1 \rightarrow 0$ 

$v_G$  的下降沿到达后, 输出计数结果, 同时计数器清零。

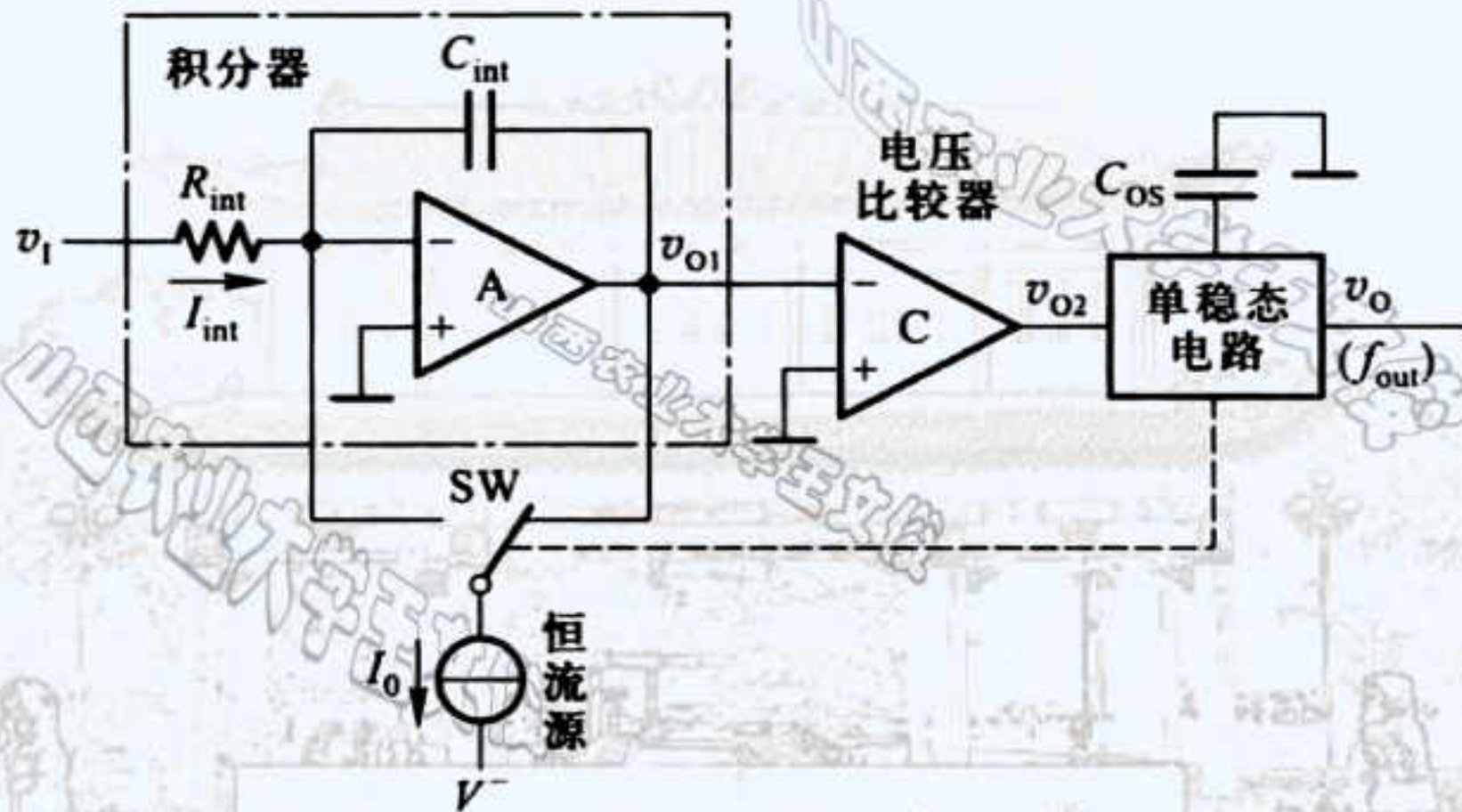


#### • 4、 $V$ - $F$ 变换器（压控振荡器）

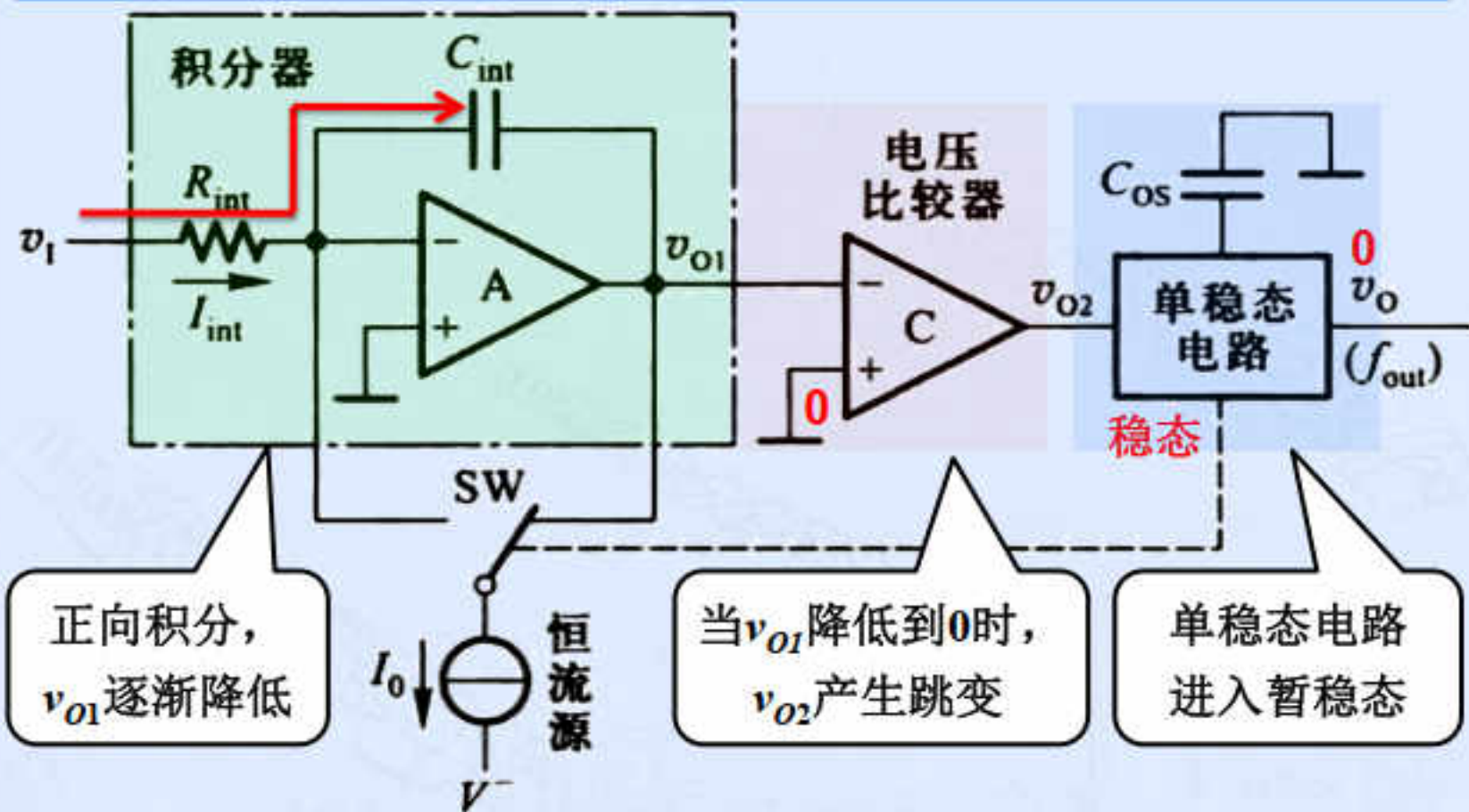
$V$ - $F$ 变换器的输出是一种调频信号，易于传输和检出，且具有很强的抗干扰能力，因此 $V$ - $F$ 变换型A/D转换器非常适用于遥测、遥控系统。



## • 5、电荷平衡式V-F变换器



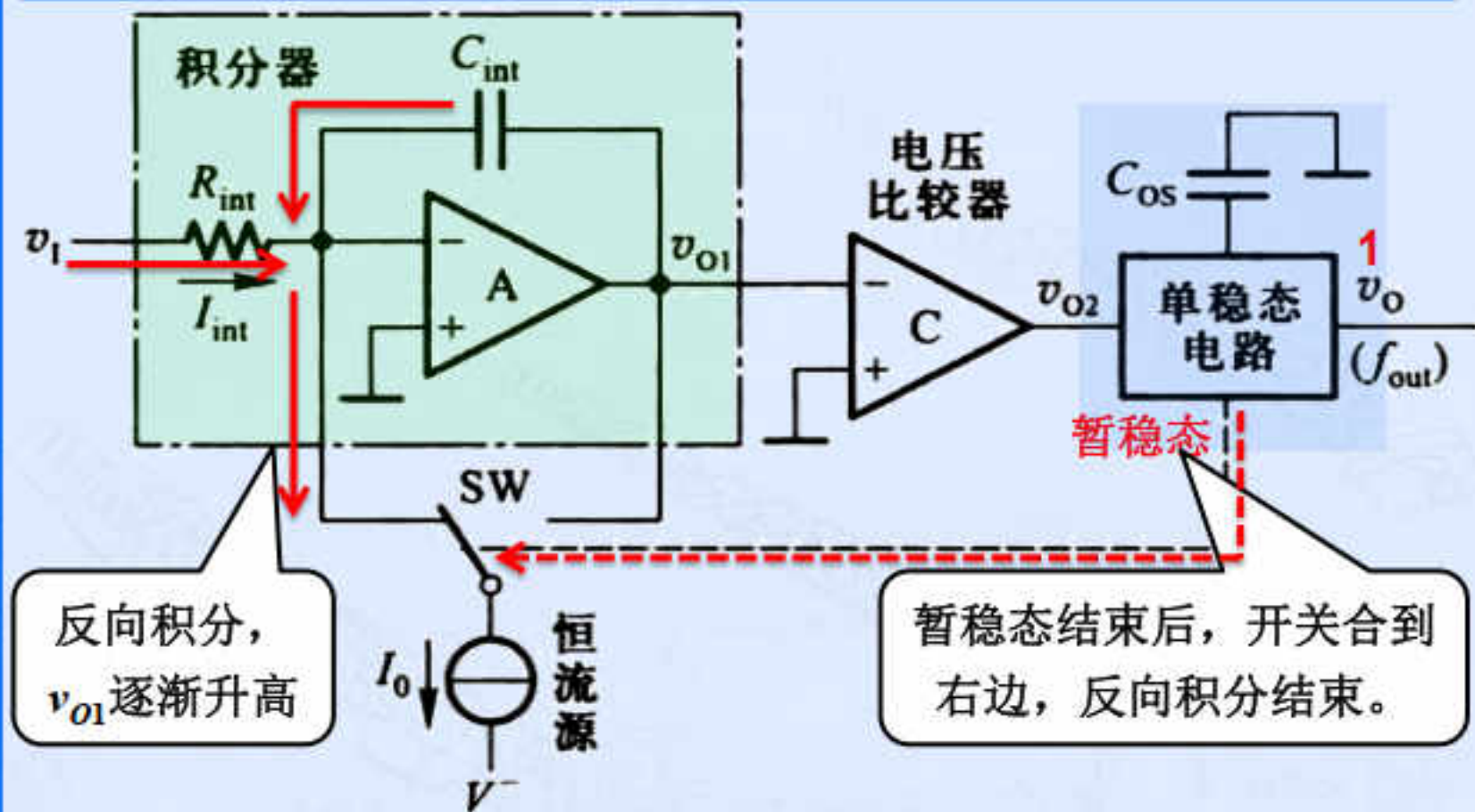
# ① 正向积分：单稳态电路处于稳态，开关合到右边



对于周期性触发的单稳态电路，正向积分时间等于稳态持续时间。



## ② 反向积分：单稳态电路处于暂稳态，开关合到左边



反向积分持续时间等于单稳态电路暂稳态持续时间。

## 正向积分

- 持续时间:  $t_{\text{int}}$  (稳态时间)
- 积分电流:  $I_{\text{int}} = v_I / R_{\text{int}}$
- 电荷变化量:  $I_{\text{int}} t_{\text{int}}$

## 反向积分

- 持续时间:  $t_W$  (暂稳态时间)
- 积分电流:  $I_0 - I_{\text{int}}$
- 电荷变化量:  $(I_0 - I_{\text{int}}) t_W$

正向、反向积分的  
电荷变化量相同

$$I_{\text{int}} t_{\text{int}} = (I_0 - I_{\text{int}}) t_W$$

$$t_{\text{int}} + t_W = \frac{I_0 t_W}{I_{\text{int}}} = \frac{I_0 t_W R_{\text{int}}}{v_I}$$

$T_{\text{out}} = t_{\text{int}} + t_W$   
为输出脉冲周期

$$f_{\text{out}} = \frac{1}{T_{\text{out}}} = \frac{1}{I_0 t_W R_{\text{int}}} v_I$$

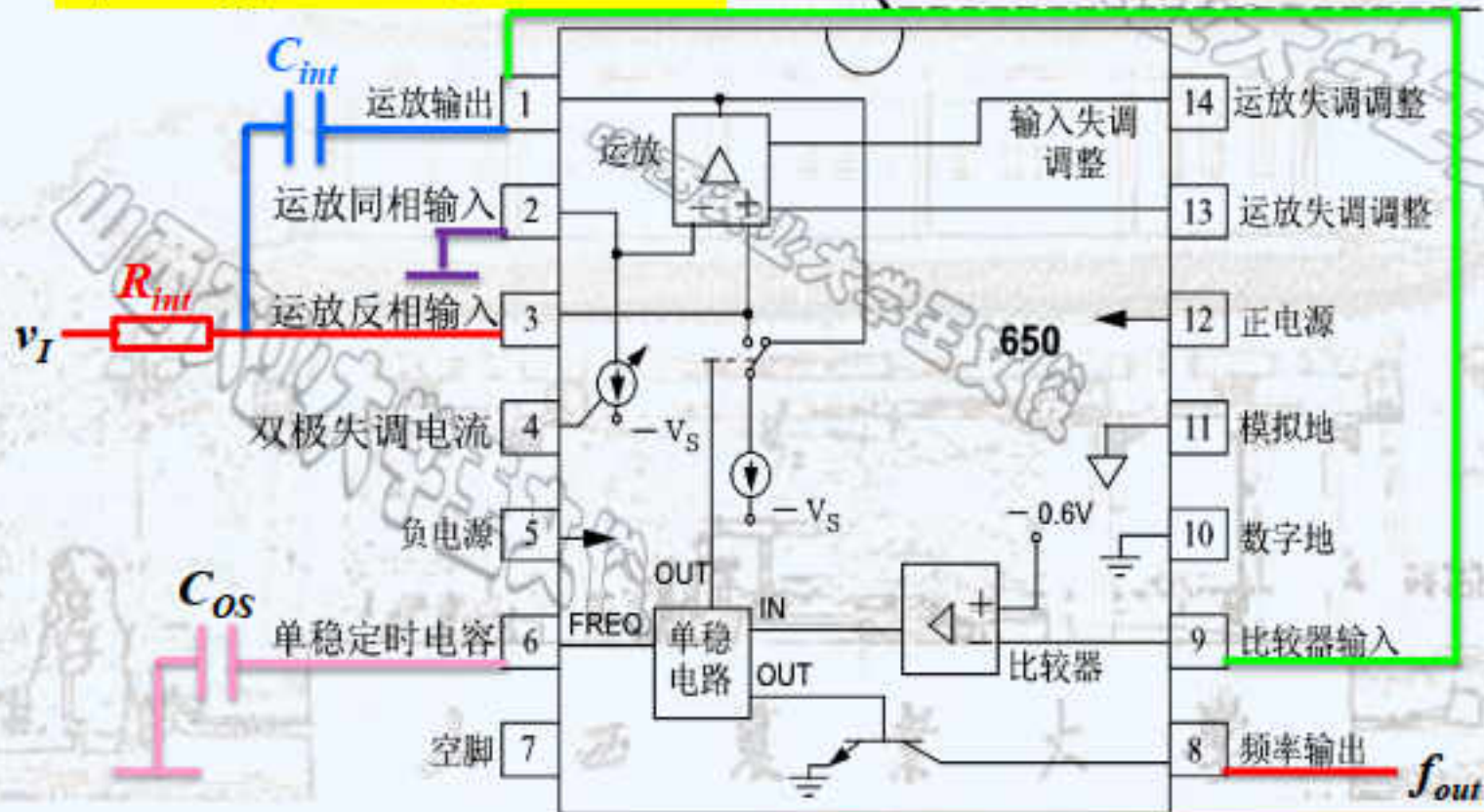
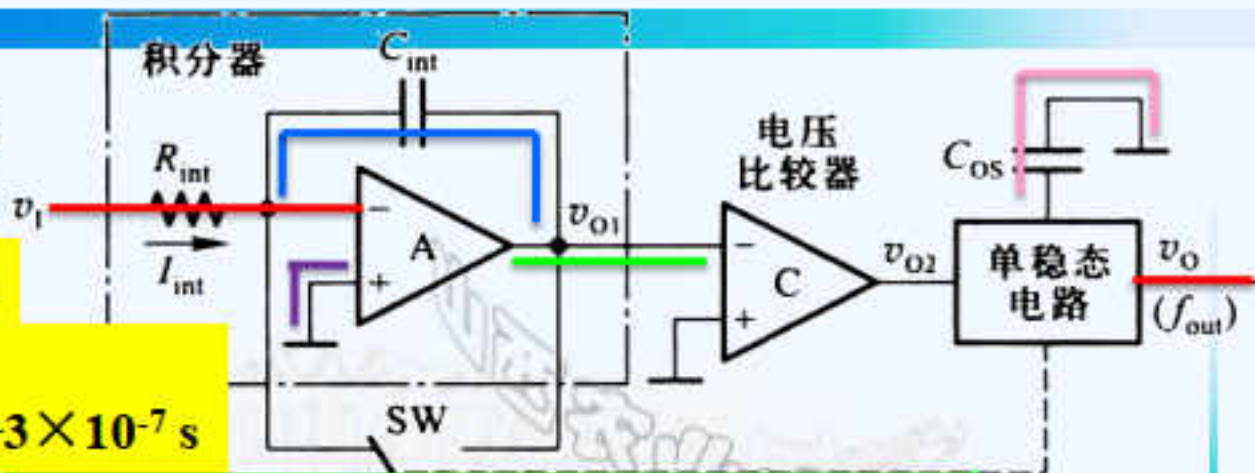
V-F变换器输出脉冲的频率与输入的模拟电压成**正比**。

# 实例：AD650

➤ 恒流源  $I_0 = 1\text{mA}$

➤ 脉冲宽度：

$$t_w = C_{OS}(6.8 \times 10^3) + 3 \times 10^{-7} \text{ s}$$





## • 6、V-F变换型A/D转换器的特点

### 优点

- 抗干扰能力强。 $V-F$ 变换器的输出是一种调频信号，易于传输和检出，且具有很强的抗干扰能力，因此 $V-F$ 变换型A/D转换器非常适用于遥测、遥控系统。

### 缺点

- 工作速度低。每次转换都需要在 $T_G$ 时间内令计数器计数，而计数脉冲的频率一般不可能很高，计数器的容量又要求足够大，所以计数时间 $T_G$ 一般都较长，转换速度较慢。

## 十四、A/D转换器的转换精度和转换速度

### • 1、理论转换精度——分辨率及其表示方法

分辨率表示A/D转换器理论上可以达到的精度。

表示方法：输出二进制或十进制的位数

- $n$ 位二进制输出的A/D转换器，能区分输入模拟电压的 $2^n$ 个不同等级大小，能区分输入电压的最小差异为满量程输入的 $1/2^n$ 。
- 例如：A/D转换器输出为10位二进制数，最大输入信号为5V，那么转换器能区分出输入信号的最小差异为 $5/2^{10} = 4.88 \text{ mV}$ 。

## • 2、实际转换精度——转换误差及其表示方法

实际的转换精度由转换误差来决定。转换误差一般以输出误差**最大值**的形式给出，表示实际输出的数字量和理论上应有的输出数字量之间的差别。

### 最低有效位的倍数

- 如：转换误差 $< \pm 1/2\text{LSB}$ ，表示实际输出的数字量和理论上应有的输出数字量之间的误差小于LSB的一半。

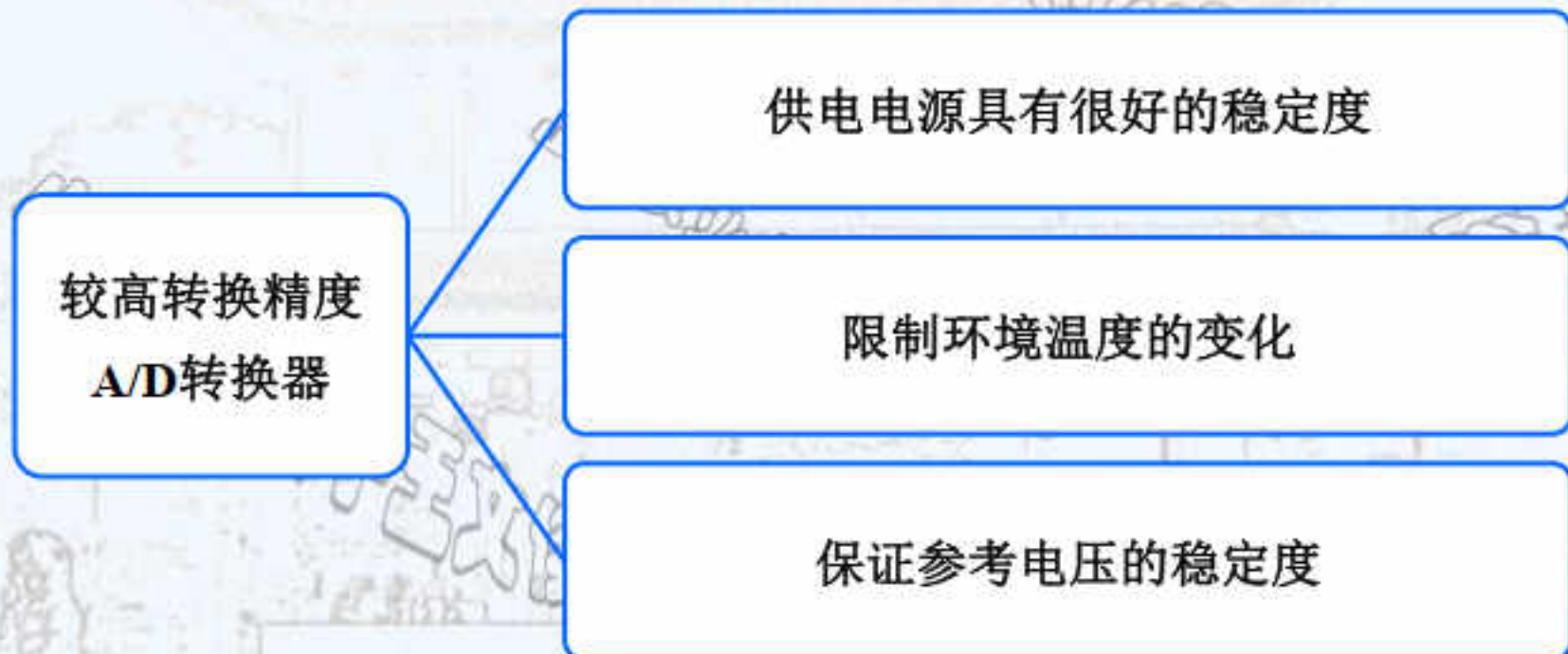
### 满量程输出的百分数

- 如：转换误差为 $\pm 0.005\%\text{FSR}$ 。



### • 3、提高转换精度

通常手册上给出的转换精度，都是在一定的电源电压和环境温度下得到的数据。这些条件的改变，会引起附加的转换误差。



#### • 4、转换速度及其表示方法

A/D转换器转换速度主要取决于转换电路的类型。

不同类型A/D转换器的工作原理不同，转换速度相差极大。



山西农业大学

### 并联比较型

- 转换速度最快，纳秒级，通常在几十到几百纳秒范围内。
- 用于对转换速度要求特别高的场合。

### 逐次逼近型

- 转换速度次之，微秒级，通常在几到几十微秒范围内。
- 价格低廉，满足绝大多数应用场合，应用最为广泛。

### 双积分型、V-F型

- 转换速度很慢，毫秒级，通常在几到几十毫秒范围内。
- 抗干扰能力强，价格低廉，用于低速的应用系统。