

# 数字电路分析与设计

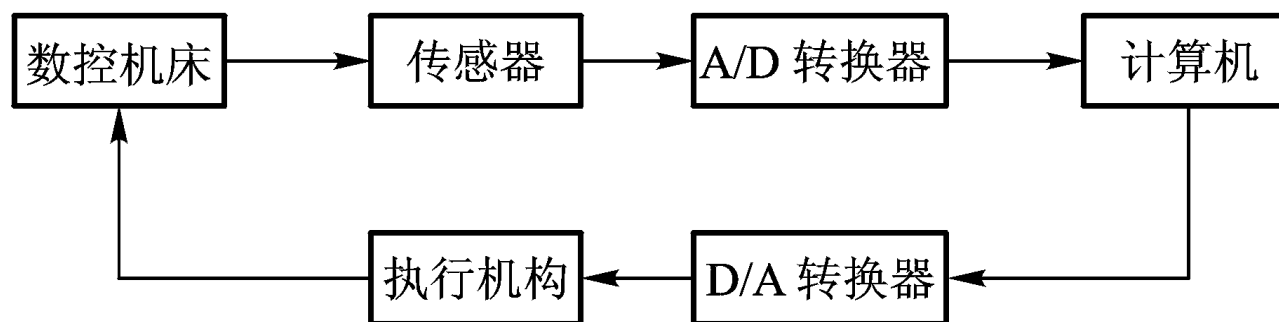
信号转换电路

(6.1 ~ 6.2)

## n 信号转换电路

ü 在计算机控制系统和智能化仪器仪表中，经常需要对信号进行转换：  
数字量 ~ 模拟量（D/A）、模拟量 ~ 数字量（A/D）。

ü 例，下图所示借助计算机实现数控机床自动控制的流程图。



传感器：将过程信号（如位移、压力、速度等）转换成模拟电信号；  
模/数转换器：将模拟电信号转换成计算机可接受的数字电信号；  
数/模转换器：将计算机信号还原成模拟信号，输出至执行机构；  
执行机构：实现对设备控制和调整。

## n 信号转换电路

ü 着重介绍数/模转换电路、模/数转换电路、电压/频率转换电路和频率/电压转换电路的基本工作原理、典型电路和主要性能指标。

✓ 数模转换电路（DAC）（6.2）

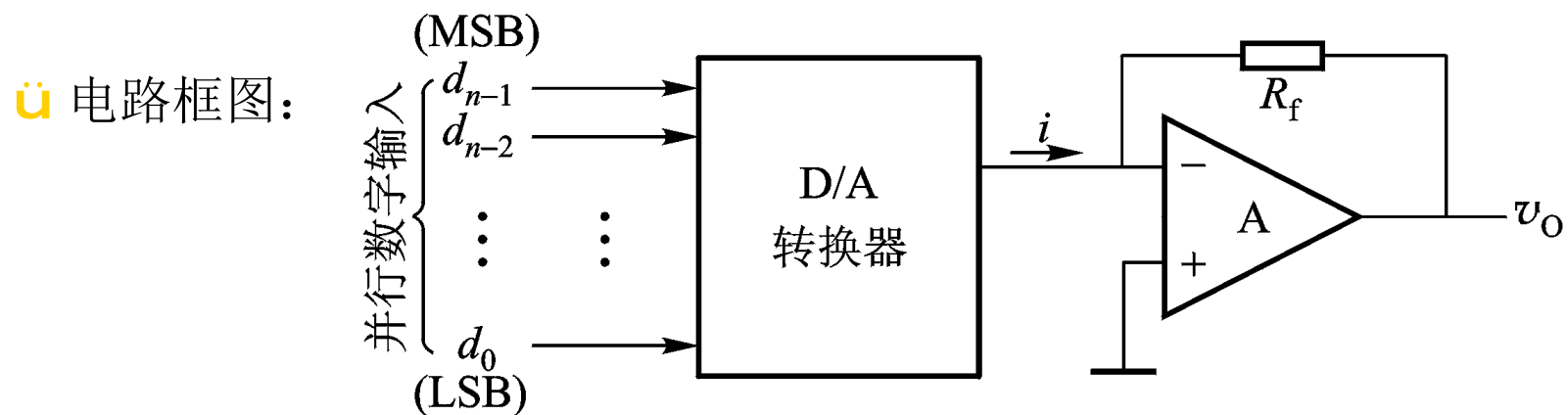
✓ 模数转换电路（ADC）（6.1）

## ✓ 数模转换电路（DAC）

ü 数模转换电路（DAC、Digital to Analog Converter）

ü 转换思路：

将二进制数按其位权的大小，转换成与之成正比的电流量；  
将电流量转换成模拟电压量输出。



$$i = K_I D_n = K_I (d_{n-1} \cdot 2^{n-1} + d_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \mathbf{L} + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) = K_I \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cdot 2^i$$

$$v_O = -i R_f = -K_I \cdot R_f \cdot D_n = -K \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cdot 2^i$$

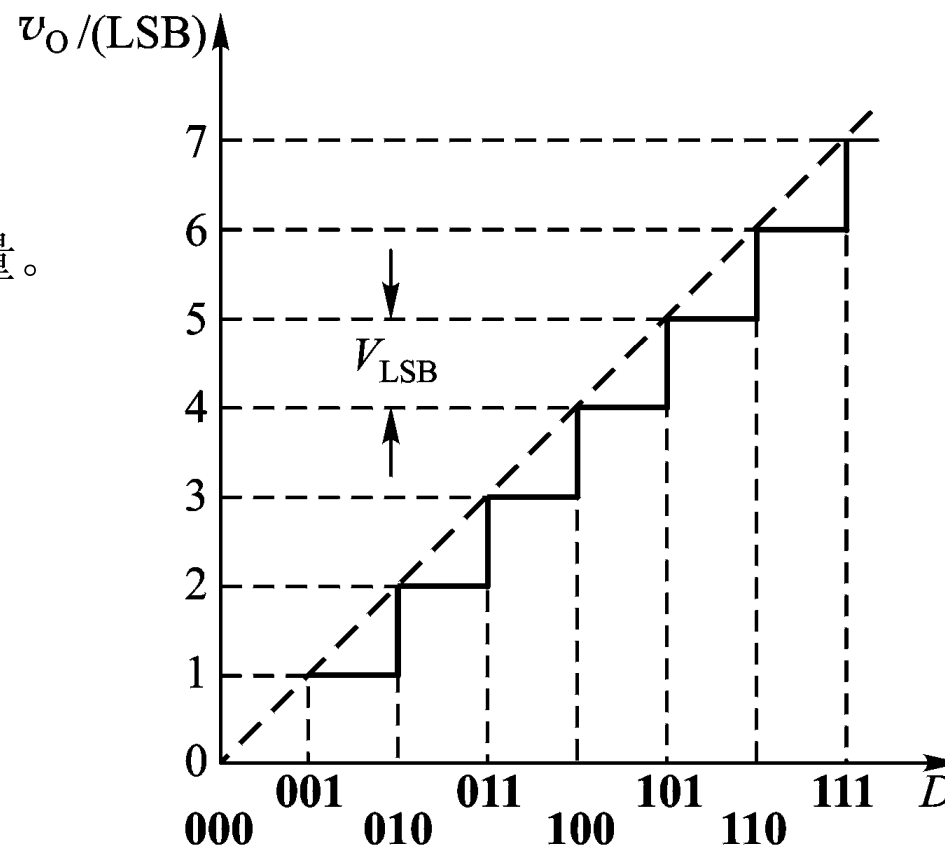
## Ø DAC（转换特性）

ü 右下图所示 3 位二进制 DAC 的转换特性。

ü 特点：（模拟量）阶梯状。

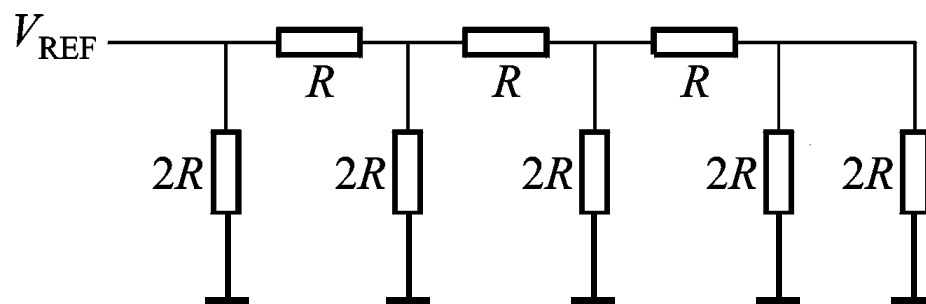
ü  $V_{\text{LSB}}$ ：输出模拟量的最小增量。

输入数字量中最低位变化时  
所引起的输出模拟电压变化值。



## Ø 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器

ü 下图所示倒 T 形电阻网络。

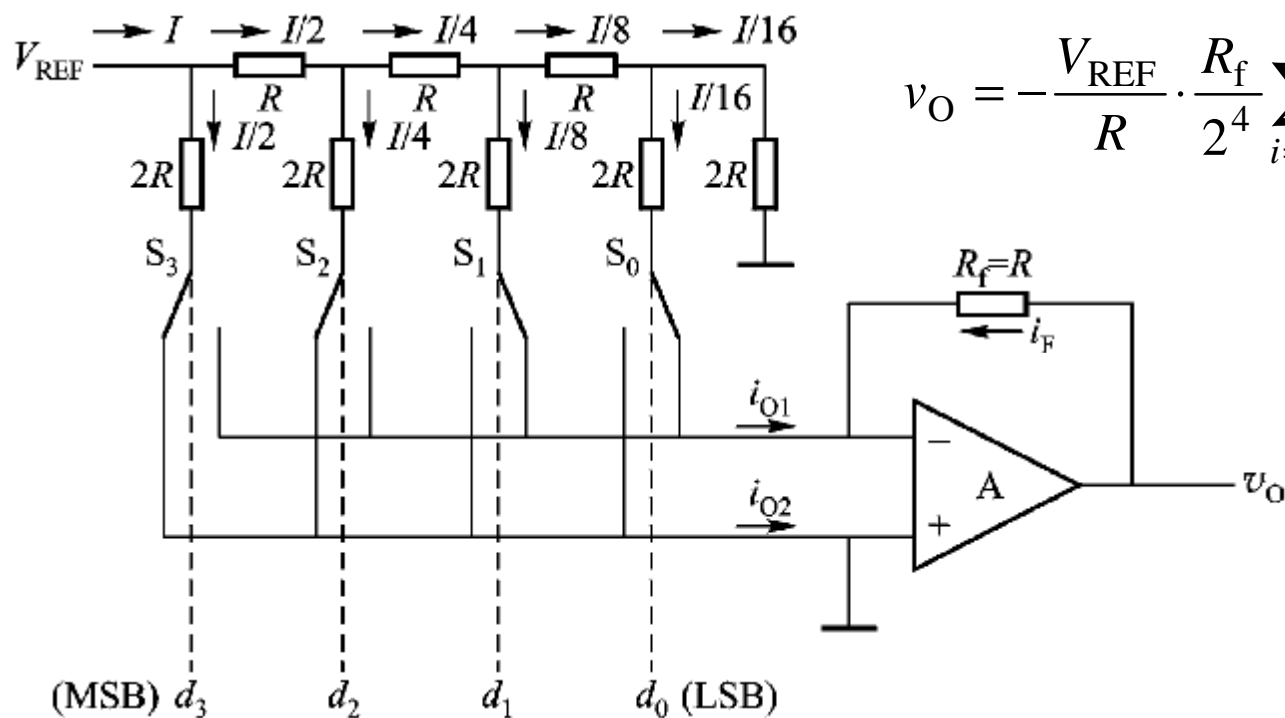


ü 显著特点：各支路电流按二进制变化。

其它：网络总电阻为  $R$ ；只有两种电阻（保障高精度）。

## Ø 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器

ü 右图所示 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器。



$$v_O = -\frac{V_{\text{REF}}}{R} \cdot \frac{R_f}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cdot 2^i$$

$$v_O = -\frac{V_{\text{REF}}}{R} \cdot \frac{R_f}{2^4} \sum_{i=0}^3 d_i \cdot 2^i$$

ü 开关  $S_3 \sim S_0$  受数字量  $d_3 \sim d_0$  控制；

由运放的虚地特性，开关切换时各支路电流不变；

无过渡过程，转换快。

## Ø D/A 转换器的双极性输出

ü 正、负的数字量输入，必然要求有正、负的模拟量输出。

ü 在数字电路中，正、负数可以用补码表示；

问题：用补码输入的正、负数，如何转换成正、负的模拟量输出？

ü 3 位二进制例：

十进制数	补码	偏移码	减偏移量
+3	011	111	+3
+2	010	110	+2
+1	001	101	+1
0	000	100	0
-1	111	011	-1
-2	110	010	-2
-3	101	001	-3
-4	100	000	-4



## Ø D/A 转换器的双极性输出

ü 右图所示 D/A 转换器。

（补码输入，最高位求反，偏移电路，双极性输出）

ü 工作流程：

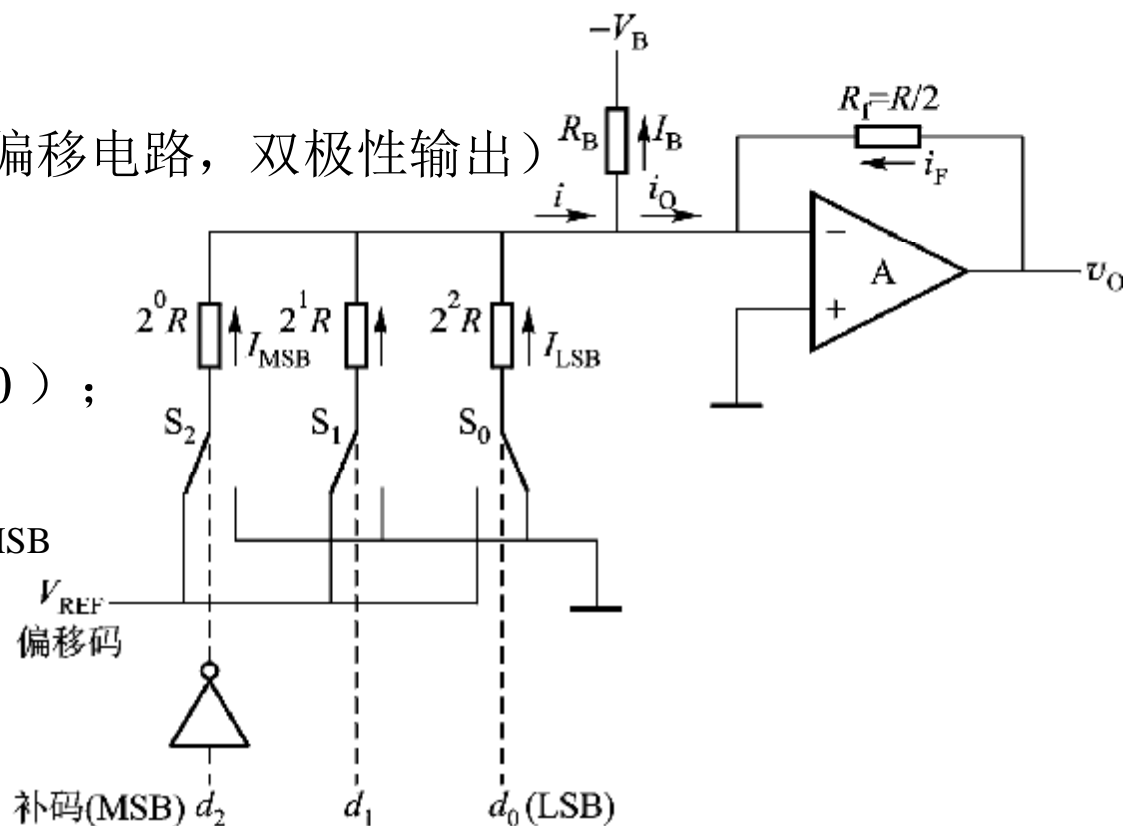
输入补码 000（偏移码 100）；

调节  $R_B$ ，使  $I_B = \frac{V_B}{R_B} = I_{MSB}$

此时： $i_O = 0, v_O = 0$

输入任意状态偏移码：

$$v_O = -(i - I_B)R_f = -(i - I_{MSB})R_f$$



ü  $n$  位双极型 D/A 转换器： $i_O = i - \frac{2^{n-1}}{2^n - 1} I_{\max}$ ， $v_O = -(i - \frac{2^{n-1}}{2^n - 1} I_{\max})R_f$

## Ø 集成 D/A 转换芯片特点与分类

ü 目前，电子线路中大多采用集成芯片形式的 D/A 转换器。

ü 随着集成电路技术的发展，D/A 转换芯片将一些外围器件集成到了芯片内部，使 D/A 转换器的结构、性能有了很大的变化。

ü 采用不同结构的集成 D/A 转换芯片，其接口电路也不相同。

ü 为了提高 D/A 转换器的性能、简化接口电路，应尽可能选择性能/价格比较高的集成芯片。

## Ø D/A 转换器主要技术指标与应用要点

### ü 技术指标:

分辨率（位数）；

线性度；

精度；

建立时间；

温度系数；

...

### ü 选型、应用要点:

性能指标；

输入特性；

输出特性；

参考基准；

...

## ✓ 模数转换电路（ADC）

ü 模数转换电路（ADC、Analog to Digital Converter）

ü 转换思路：

对连续变化的模拟量在一系列给定的时间瞬间进行采样；  
将采样值用二进制数表示出来。

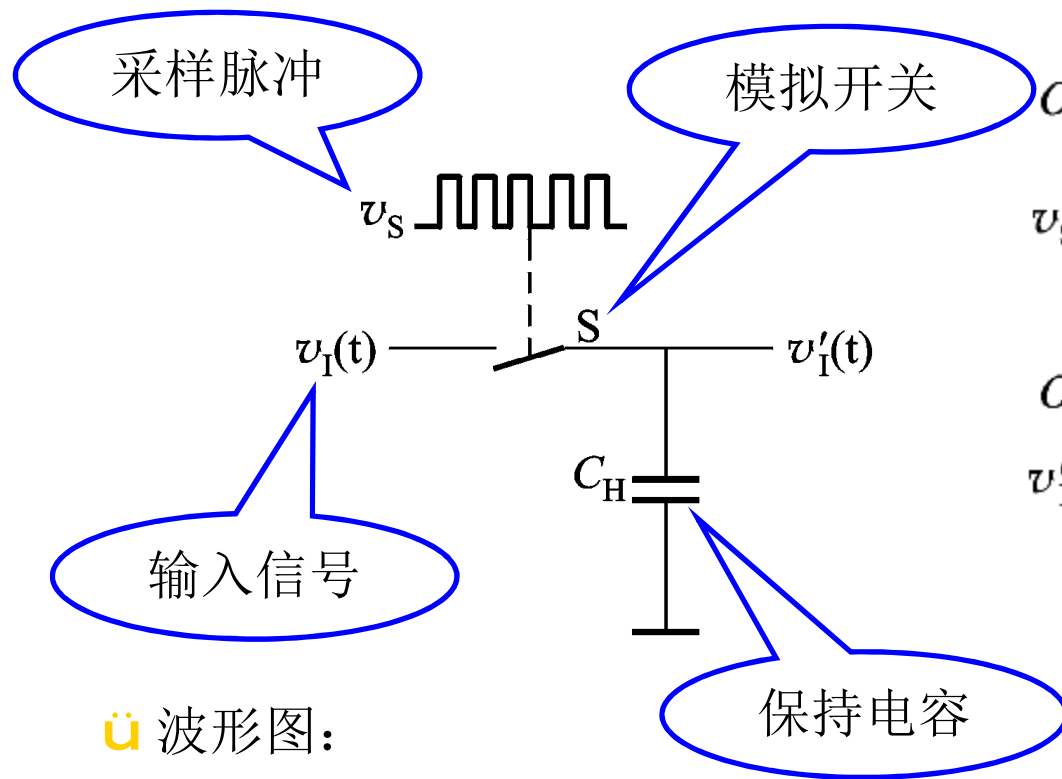
ü 将采样值用二进制数表示出来需要一定的时间；

因此，采样开始后的一段时间内，必须要保持被采样的模拟量。

ü A/D 转换步骤：采样、保持、量化、编码。

## Ø 采样保持

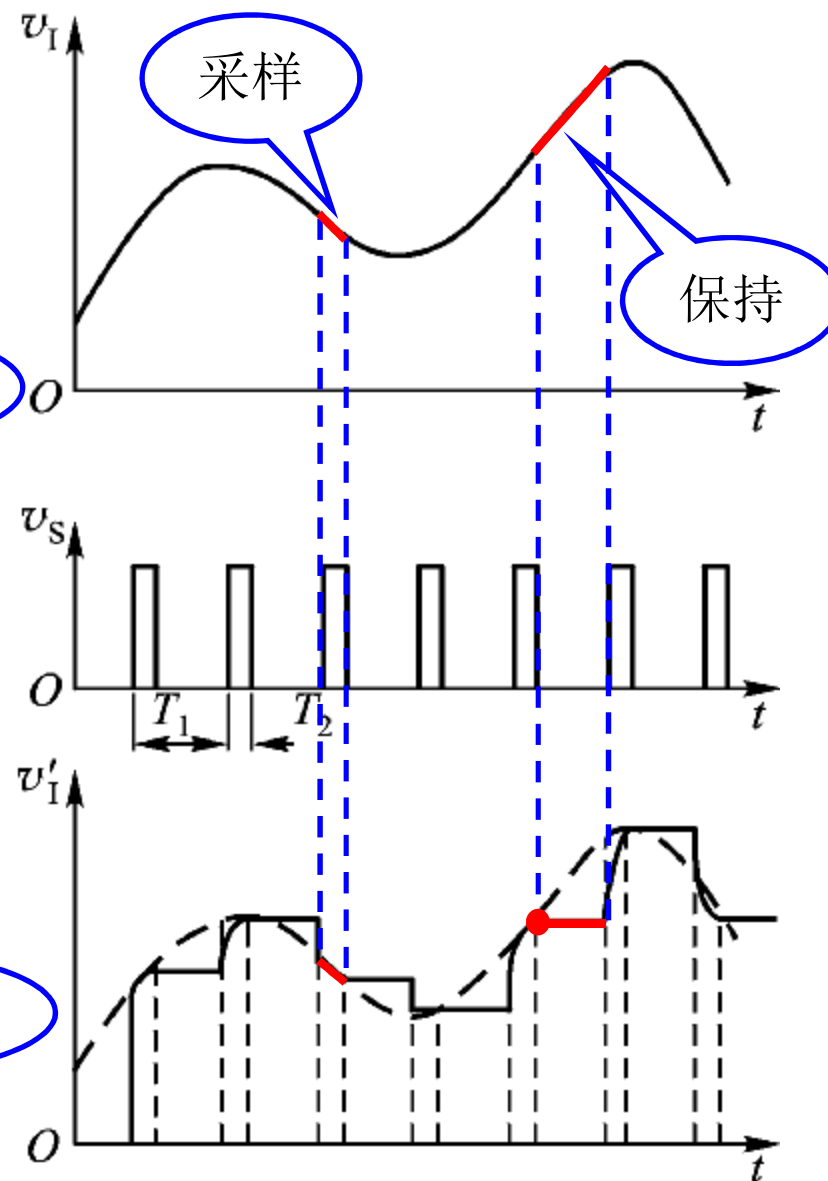
ü 下图所示采样保持 (S/H) 电路。



ü 波形图：

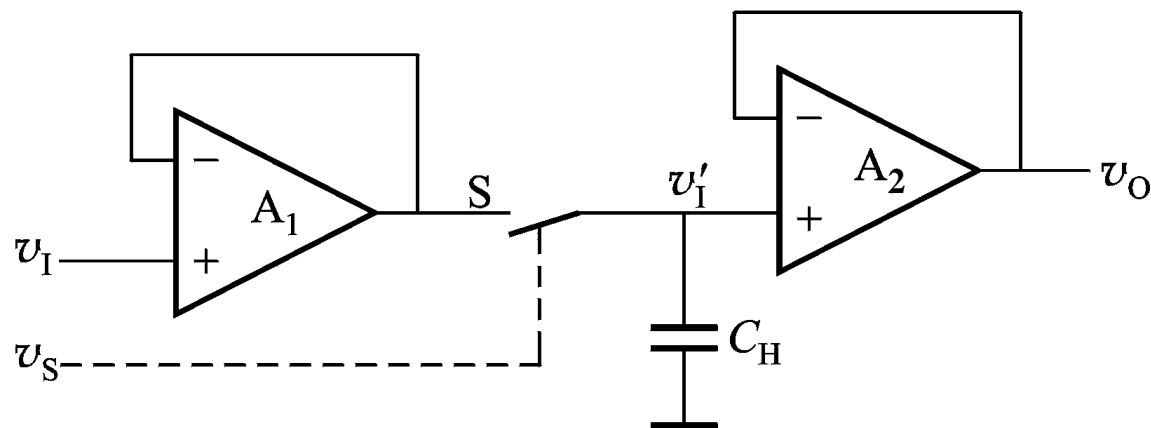
ü 采样保持定理：

为使采样后信号能不失真地再现原输入信号，要求： $f_s > 2f_I$ 。



## Ø 采样保持（实用电路）

ü 下图所示实用型采保电路。



ü 运算放大器采用电压跟随器形式，响应快；

$A_1$  输入高阻（对输入起隔离作用），输出低阻（时间常数小，可实现对保持电容的快速充电）；

$A_2$  输入高阻（当  $S$  断开后，保持电容的保持性能好）；

保持电容，要求选用高质量电容器（漏电很小），如聚苯乙烯电容。

## Ø 量化编码

ü 量化：将采样值取整。  
(用一最小单位的整数倍来表示采样值)

ü 舍尾取整法：

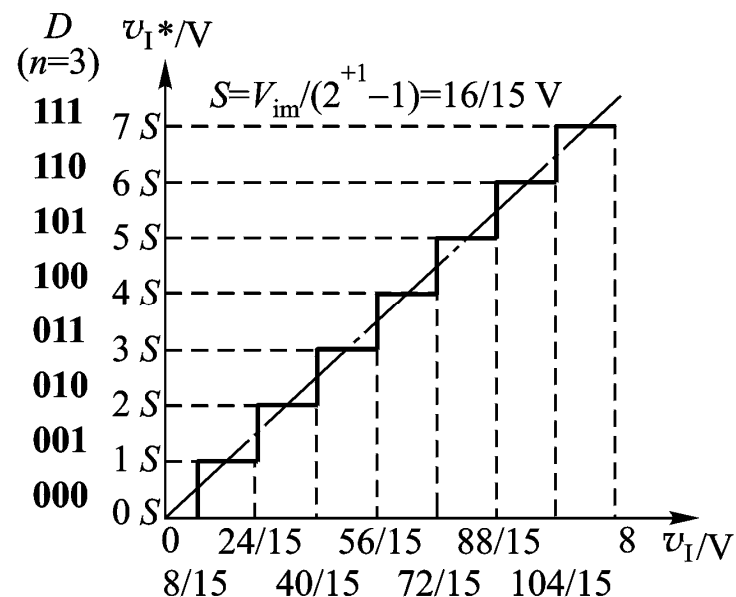
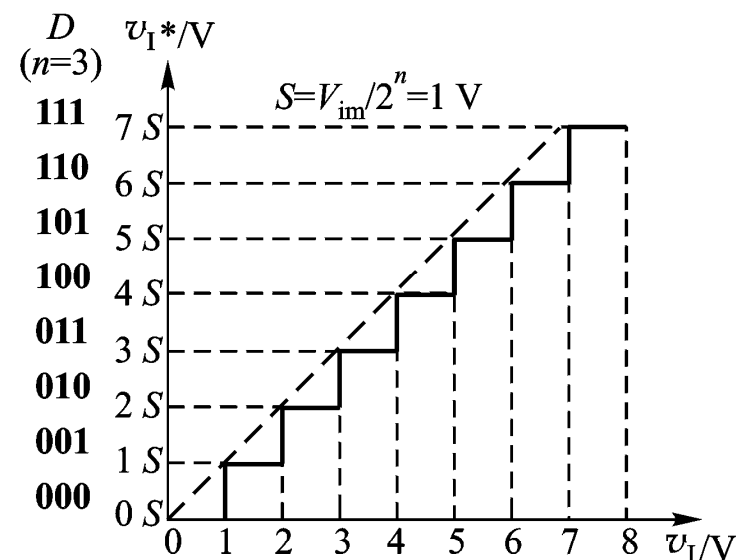
$$\text{量化单位: } S = \frac{V_{\text{im}}}{2^n}$$

$$\text{最大量化误差: } e_{\text{max}} = 1S$$

ü 有舍有入法：

$$\text{量化单位: } S = \frac{2V_{\text{im}}}{2^{n+1} - 1}$$

$$\text{最大量化误差: } e_{\text{max}} = \frac{1}{2}S$$



## Ø 量化编码

ü 编码：将量化后的数值用相应的数值代码表示。

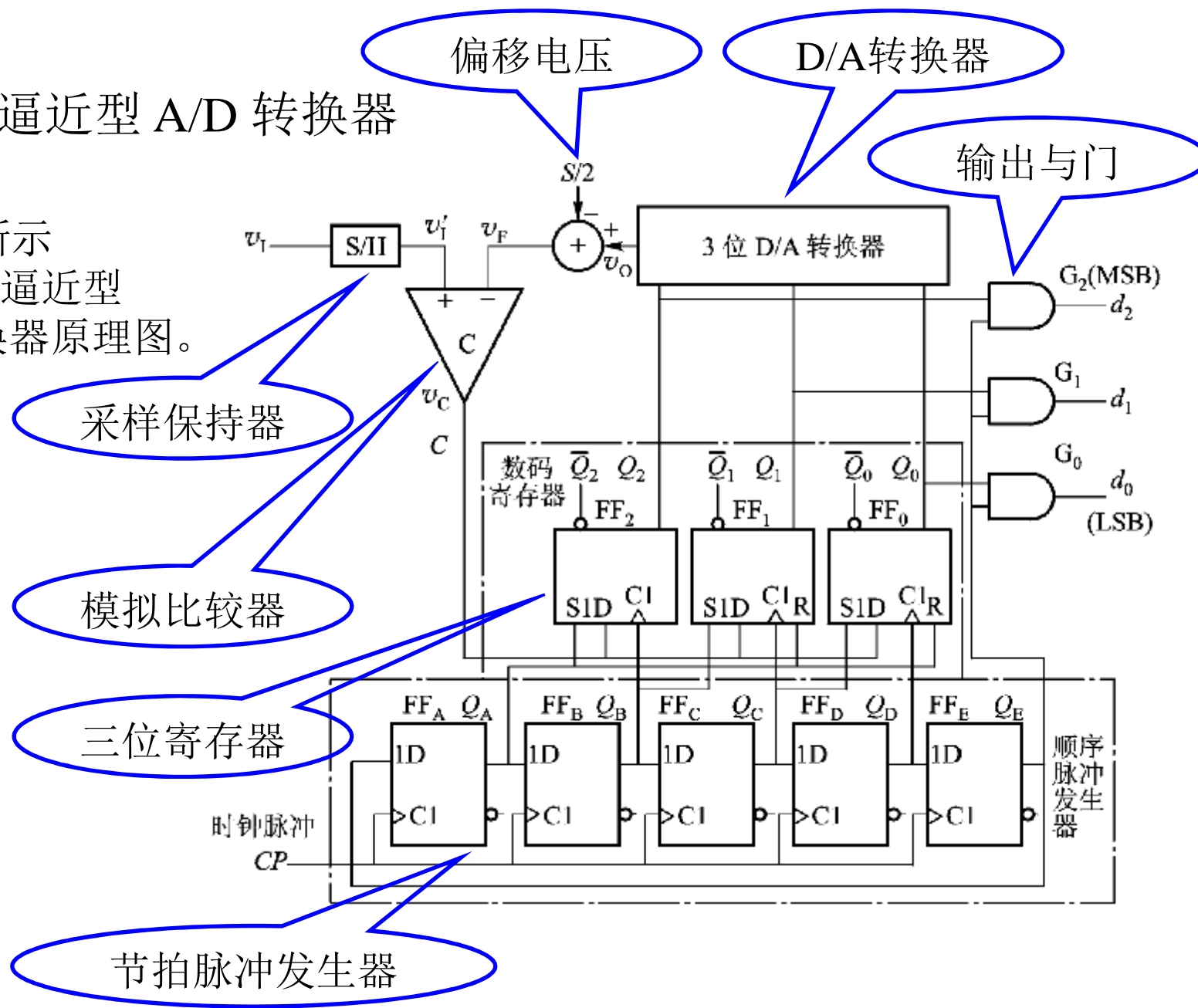
ü 前述各类二进制编码 ...



## Ø 逐次逼近型 A/D 转换器

ü 右图所示

3 位逐次逼近型  
A/D 转换器原理图。



## Ø 逐次逼近型 A/D 转换器（工作步骤 0）

ü 定义：

输入  $v_I = 4.65\text{V}$ ；

量化单位  $S = 1\text{V}$ 。

ü 转换开始前：

$Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E = 00001$ ；

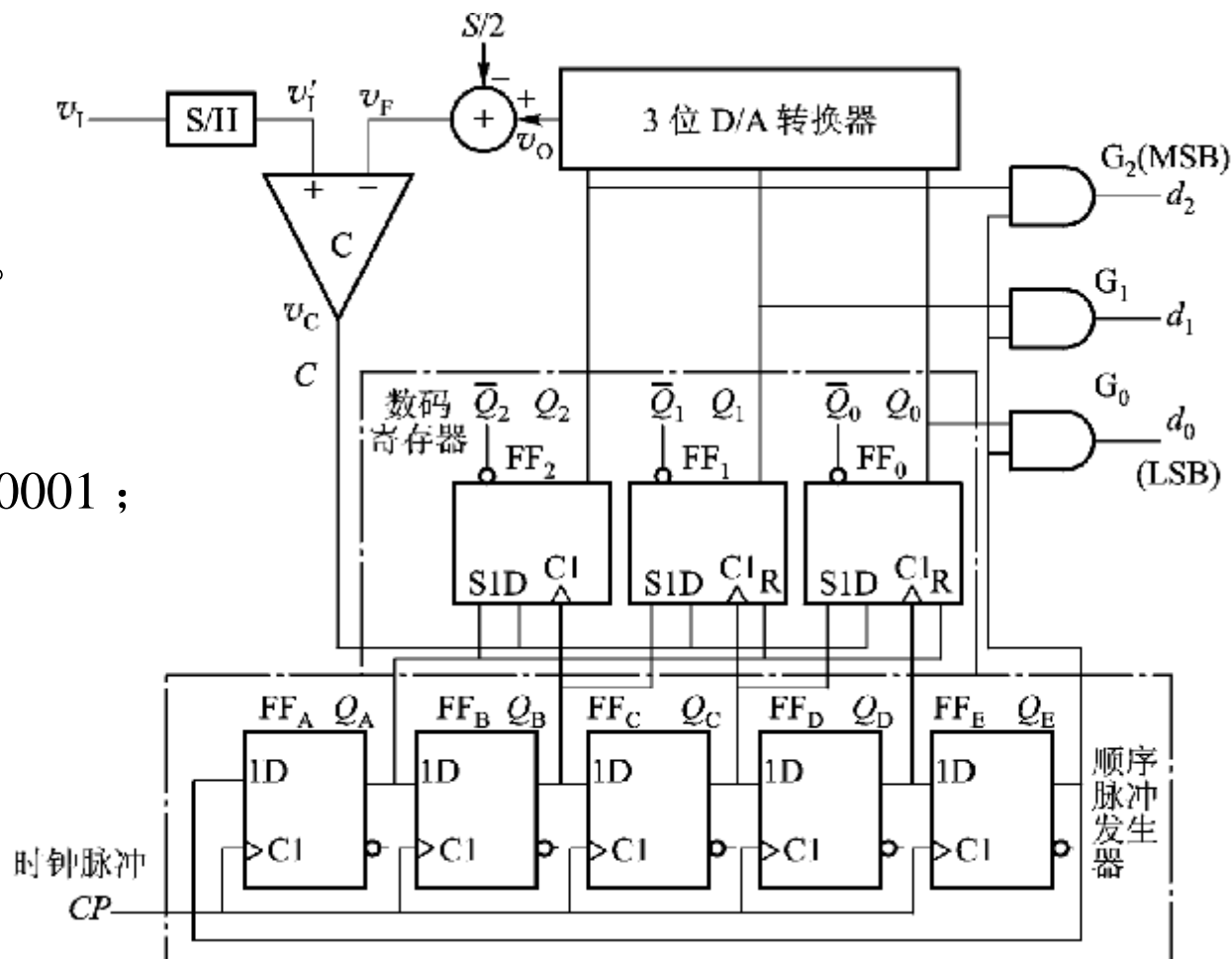
$Q_2 Q_1 Q_0 = 000$ ；

$d_2 d_1 d_0 = 000$ ；

D/A 输出  $0\text{V}$ ；

$v_F = -0.5\text{V}$ ；

比较器输出 1。



## Ø 逐次逼近型 A/D 转换器（工作步骤 1）

ü 定义：

输入  $v_I = 4.65\text{V}$ ；

量化单位  $S = 1\text{V}$ 。

ü 第一个  $CP$  脉冲：

$Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E = 10000$ ；

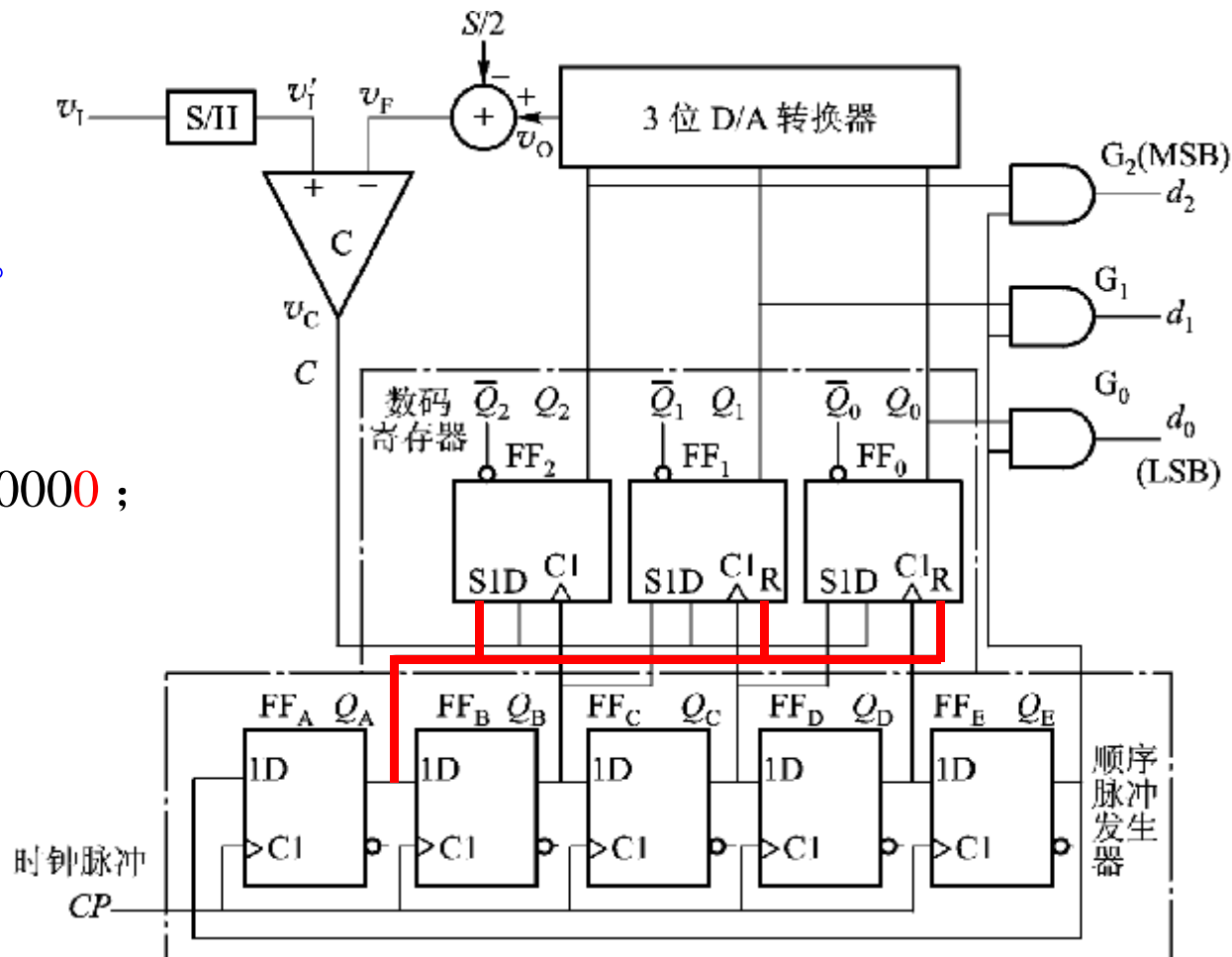
$Q_2 Q_1 Q_0 = 100$ ；

$d_2 d_1 d_0 = 000$ ；

D/A 输出  $4\text{V}$ ；

$v_F = 3.5\text{V}$ ；

比较器输出 1。



说明：  $Q_2 \sim Q_0$  不够大（ $Q_2$  应保留）

## Ø 逐次逼近型 A/D 转换器（工作步骤 2）

ü 定义：

输入  $v_I = 4.65\text{V}$ ；

量化单位  $S = 1\text{V}$ 。

ü 第二个  $CP$  脉冲：

$Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E = 01000$ ；

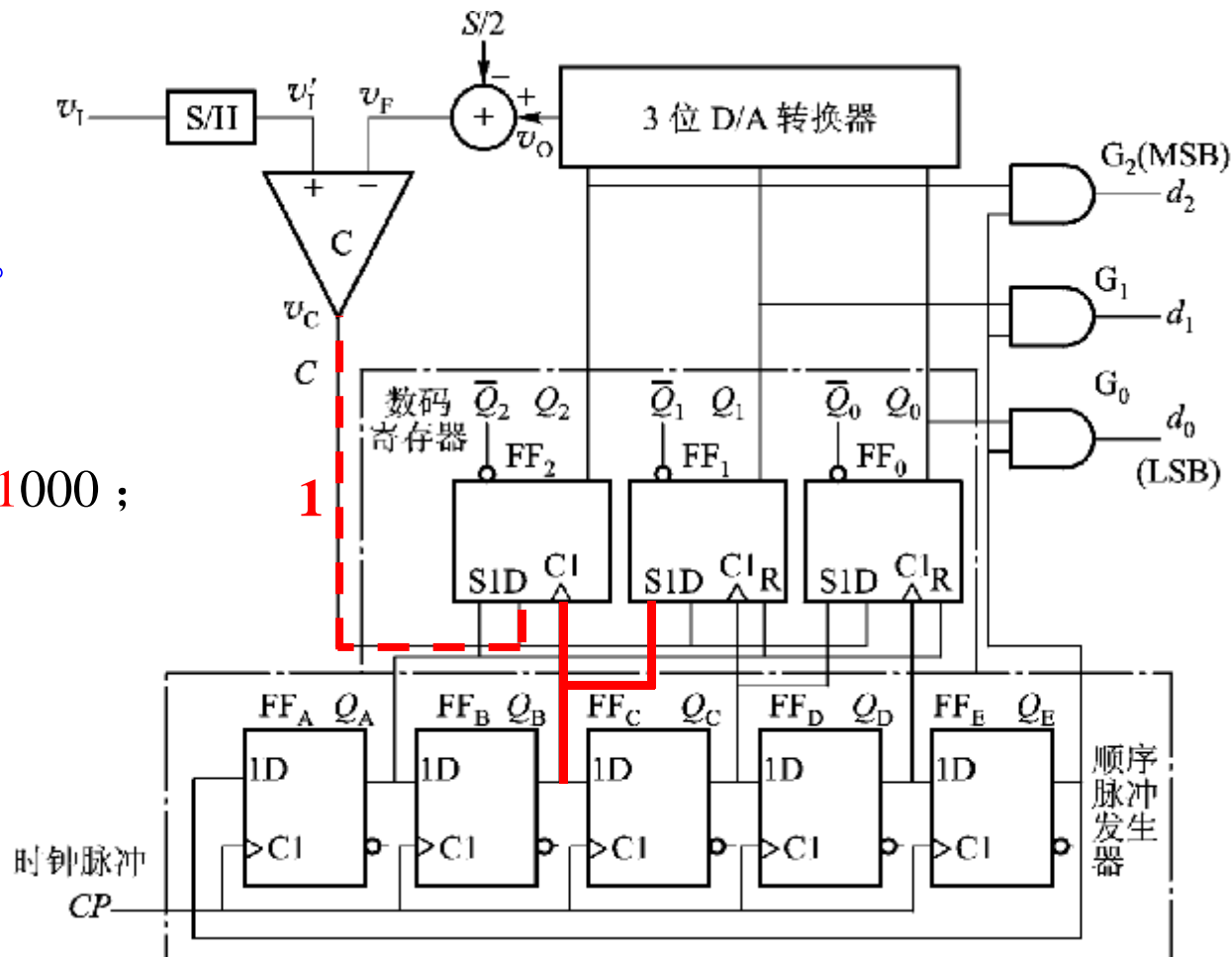
$Q_2 Q_1 Q_0 = 110$ ；

$d_2 d_1 d_0 = 000$ ；

D/A 输出  $6\text{V}$ ；

$v_F = 5.5\text{V}$ ；

比较器输出  $0$ 。



说明：  $Q_2 \sim Q_0$  太大（ $Q_1$  应舍弃）

### ④ 逐次逼近型 A/D 转换器（工作步骤 3）

ü 定义:

输入  $v_I = 4.65\text{V}$ ;

量化单位  $S = 1V$ 。

ü 第三个  $CP$  脉冲:

$$Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E = 00100 ;$$

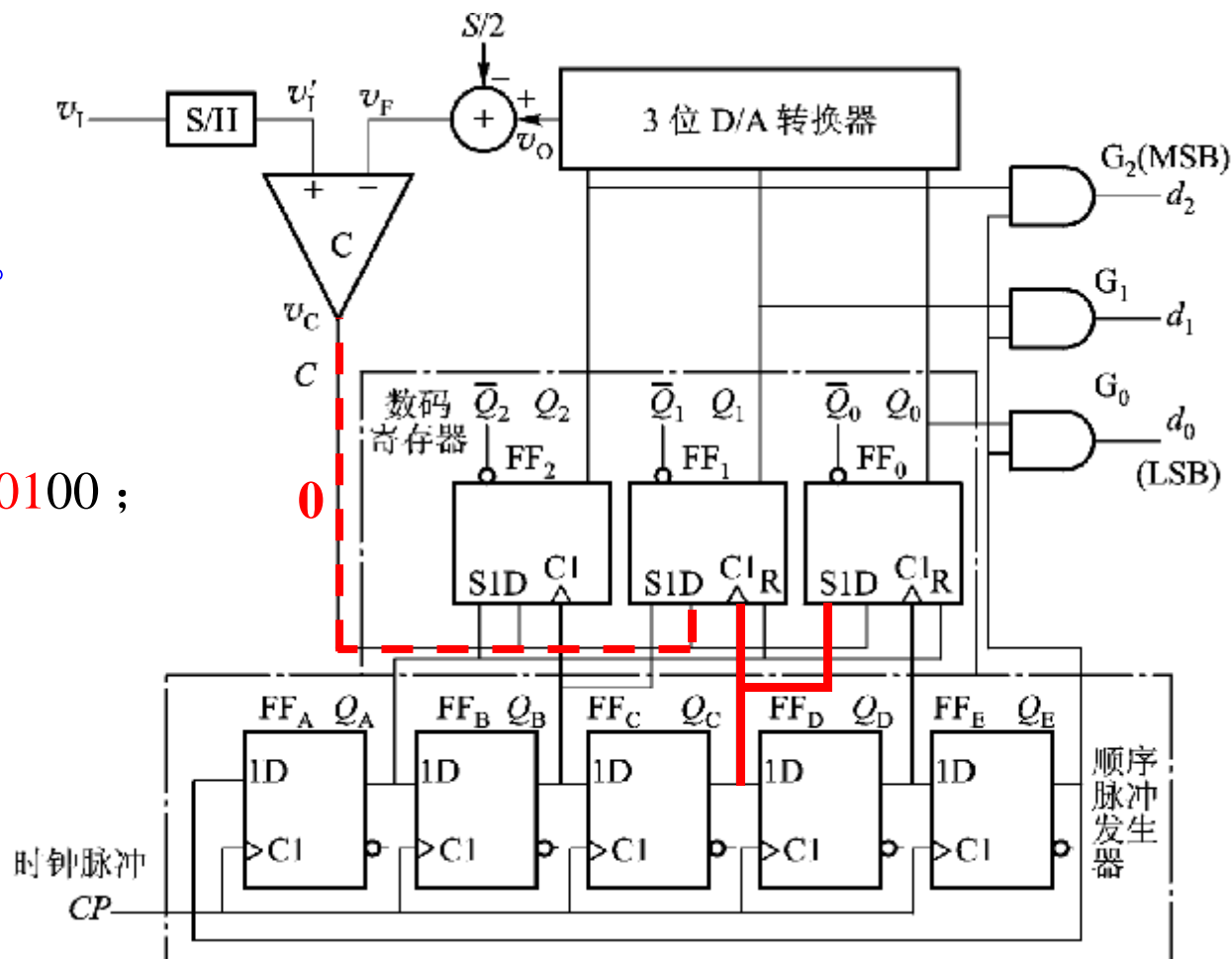
$$Q_2 Q_1 Q_0 = 101 \text{ ;}$$

$$d_2d_1d_0 = 000 \text{ ;}$$

D/A 输出 **5V** ;

$$v_F = 4.5\text{V} ;$$

比较器输出 **1**。



说明:  $Q_2 \sim Q_0$  不够大 ( $Q_0$  应保留)

## Ø 逐次逼近型 A/D 转换器（工作步骤 4）

ü 定义：

输入  $v_I = 4.65V$ ；

量化单位  $S = 1V$ 。

ü 第四个  $CP$  脉冲：

$Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E = 00\mathbf{010}$ ；

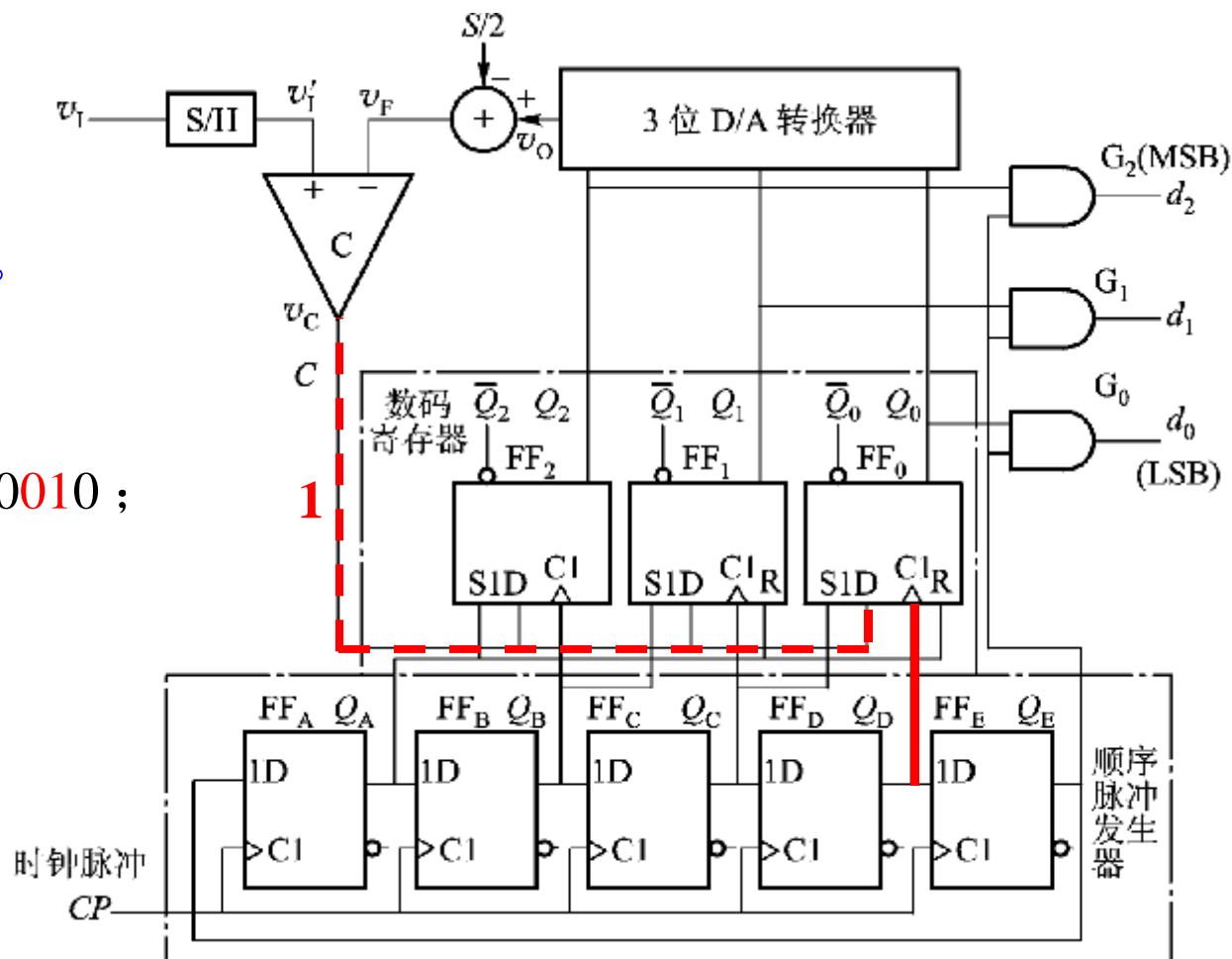
$Q_2 Q_1 Q_0 = 101$ ；

$d_2 d_1 d_0 = 000$ ；

D/A 输出  $5V$ ；

$v_F = 4.5V$ ；

比较器输出 1。



说明： $Q_2 \sim Q_0$  不够大（ $Q_0$  应保留）

## ⊘ 逐次逼近型 A/D 转换器（工作步骤 5）

ü 定义:

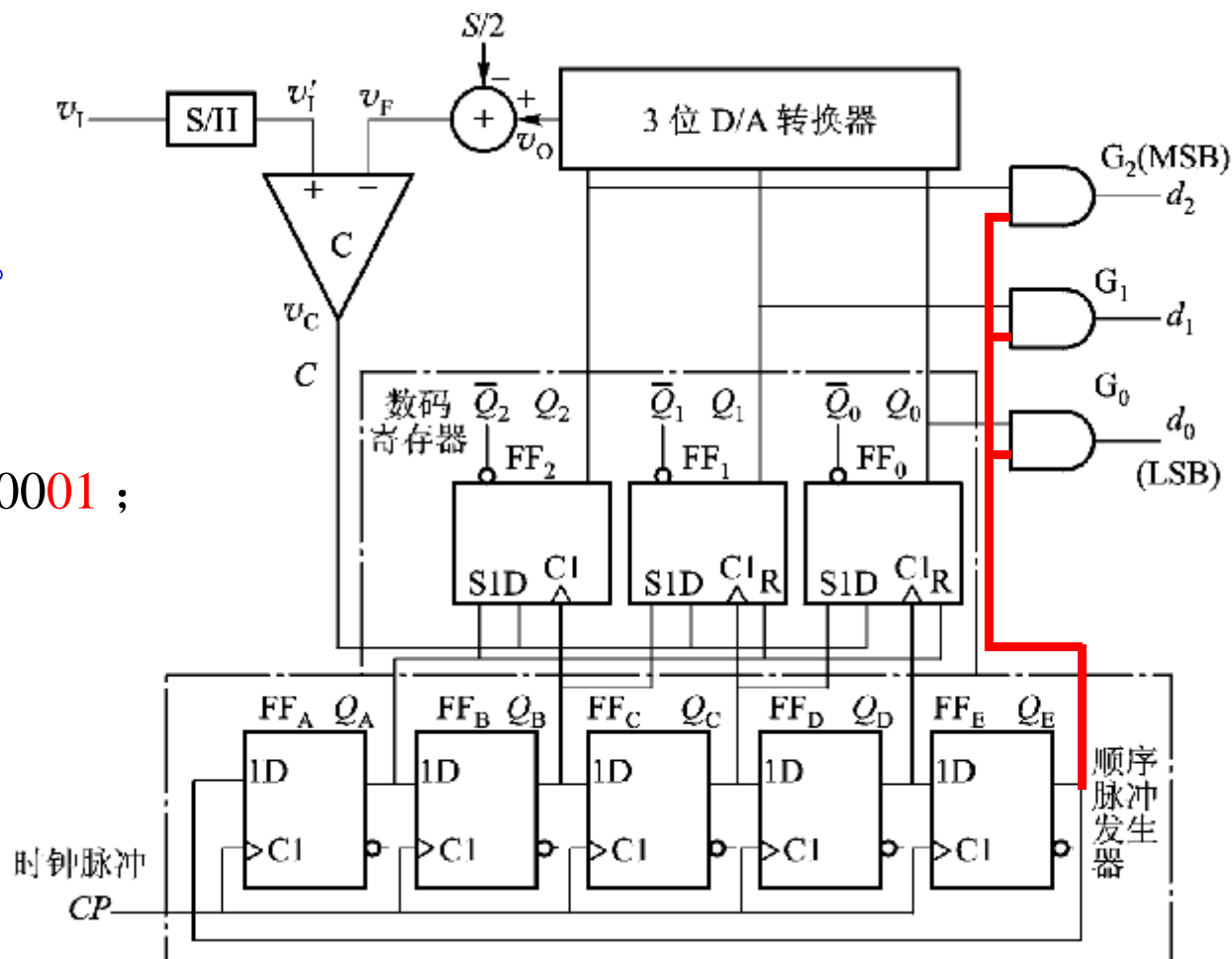
输入  $v_I = 4.65V$ ;  
量化单位  $S = 1V$ 。

ü 第五个  $CP$  脉冲:

$$Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E = 0000\mathbf{01} ;$$

$$Q_2 Q_1 Q_0 = 101 \text{ ;}$$

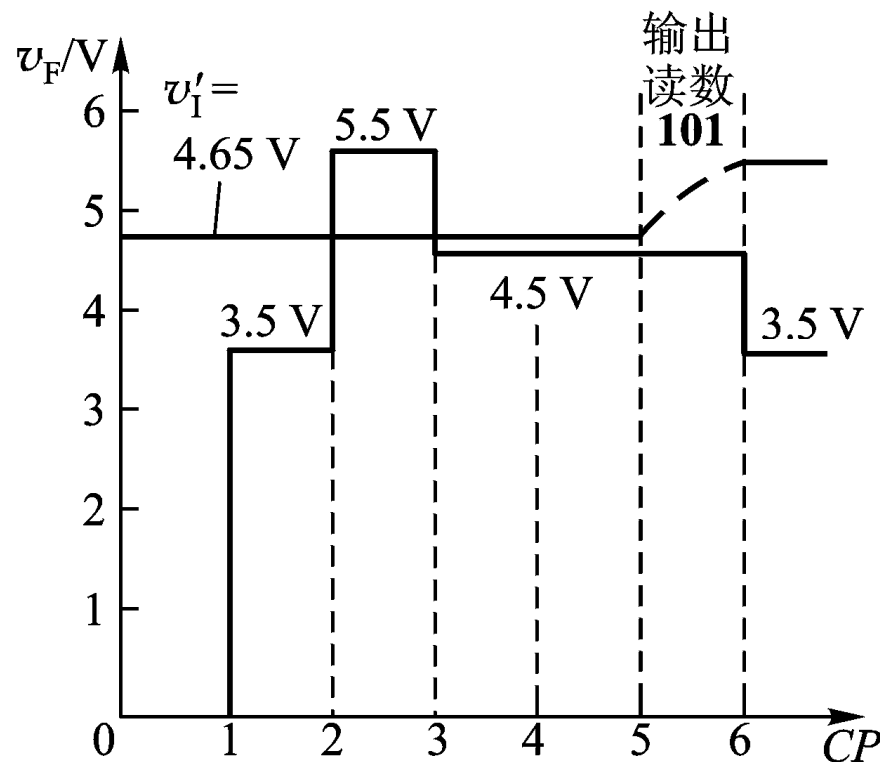
$$d_2d_1d_0 = \mathbf{101} \ ;$$



## 转换结果输出

## Ø 逐次逼近型 A/D 转换器

ü 右图所示整体逼近波形。  
(二分法)



ü 特点:

转换速度较快, 对  $n$  位 A/D 转换器, 转换一次的时间为:  $T = (n + 2)T_{CP}$   
易与 8 位微机连接;

转换精度主要决定于其中的 D/A 转换器的位数、线性度、电子开关压降、参考电压稳定度, 以及模拟电压比较器的灵敏度等;

基于集成电路制造工艺的完善, A/D 转换器的精度已可达  $\pm 0.005\%$ 。



## Ø 双积分型 A/D 转换器

### ü 转换步骤:

将输入的模拟信号转换成中间变量（如时间  $T$ ）；

将时间  $T$  转换成数字量输出。

（间接 A/D 转换器）

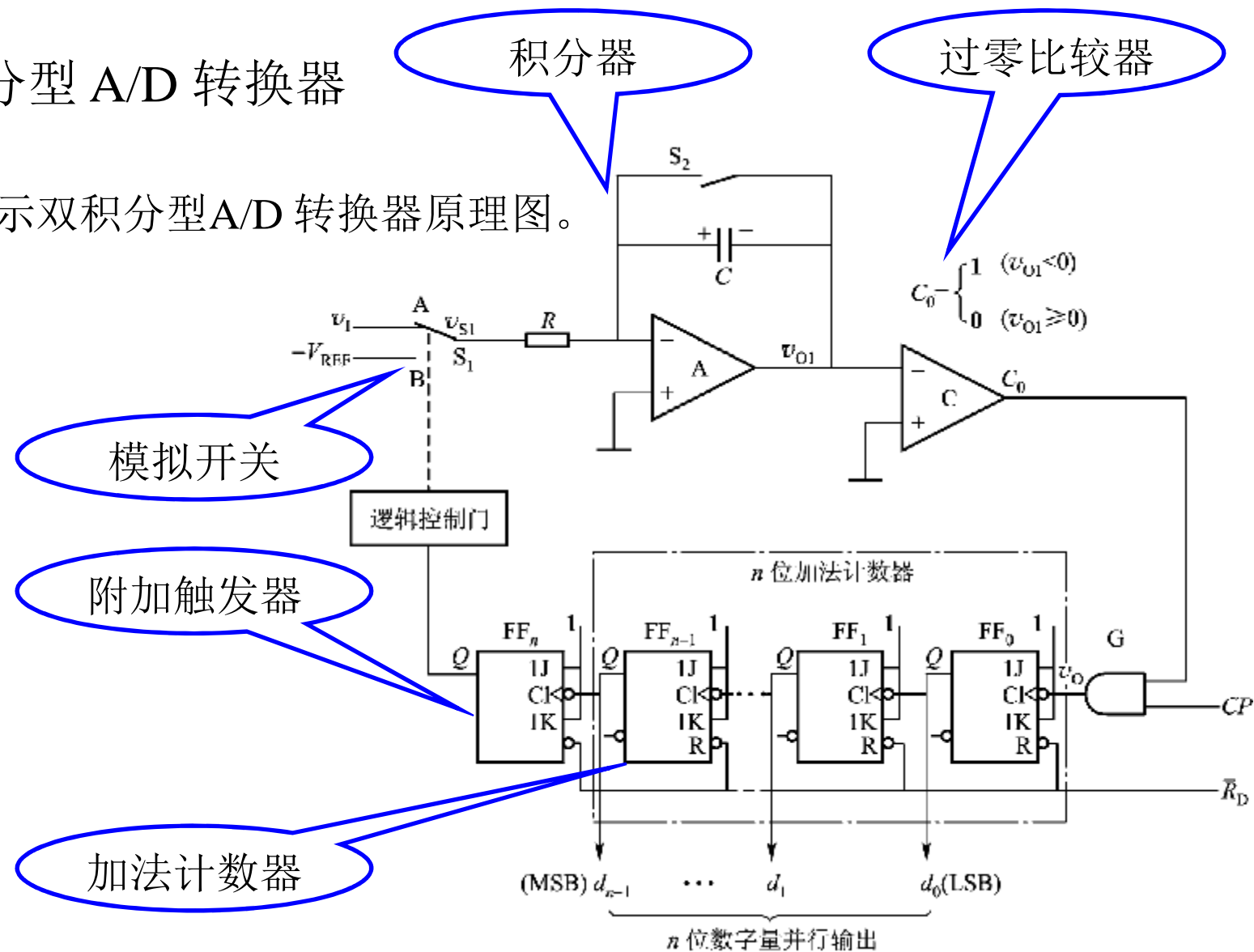
### ü 转换特点:

分两次积分，产生两条积分斜率。

（双斜率 A/D 转换器）

## Ø 双积分型 A/D 转换器

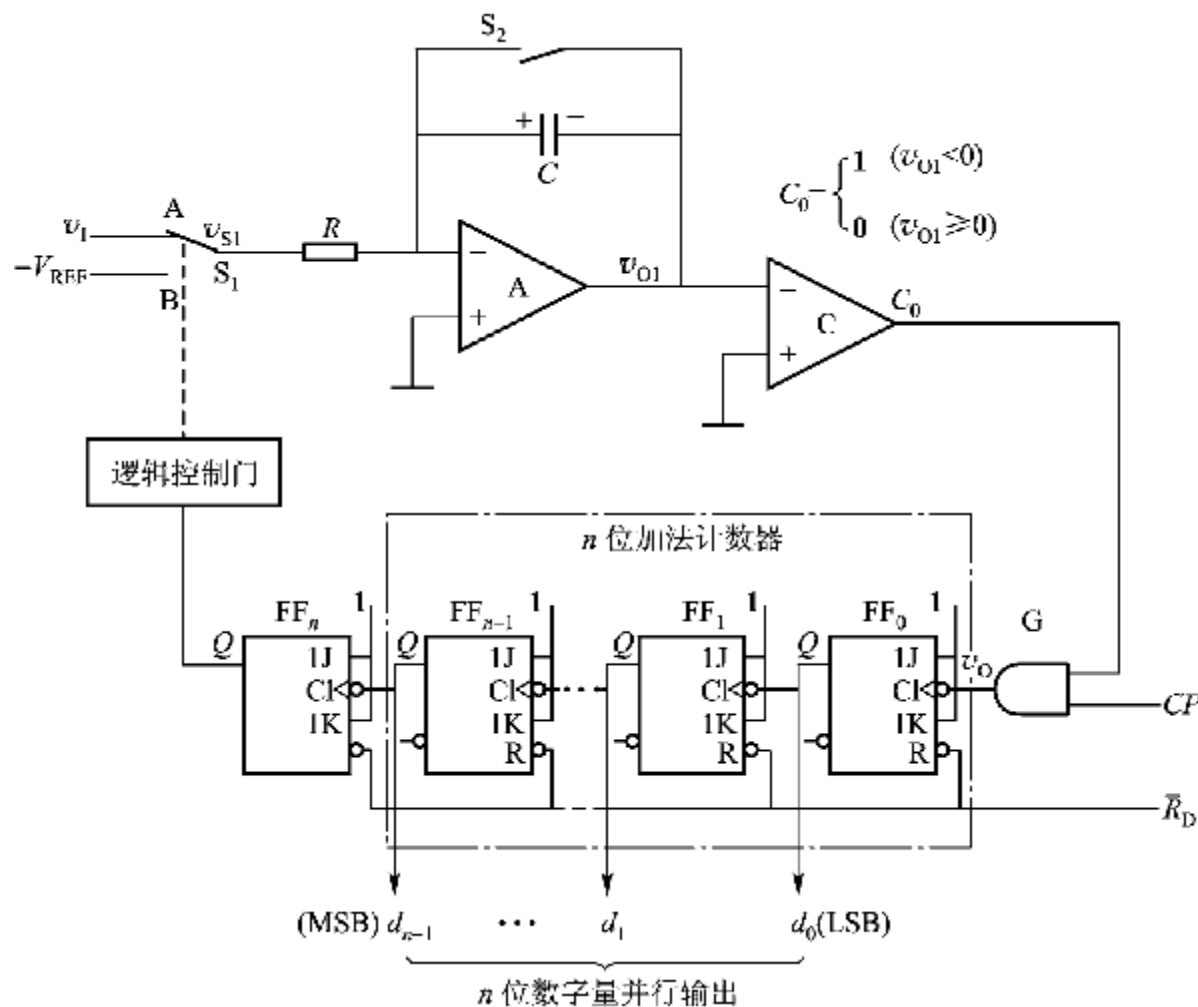
ü 右图所示双积分型A/D 转换器原理图。



## ❌ 双积分型 A/D 转换器（工作步骤 0）

假设输入  $v_I$  为正值。

转换开始前：  
 $S_1$  接通 A， $S_2$  闭合；  
 $C$  充分放电；  
 积分器输出 0V；  
 比较器输出 0；  
 与门（CP）封锁；  
 计数器、触发器清零；  
 $d_{n-1} \sim d_0 = 00 \dots 00$

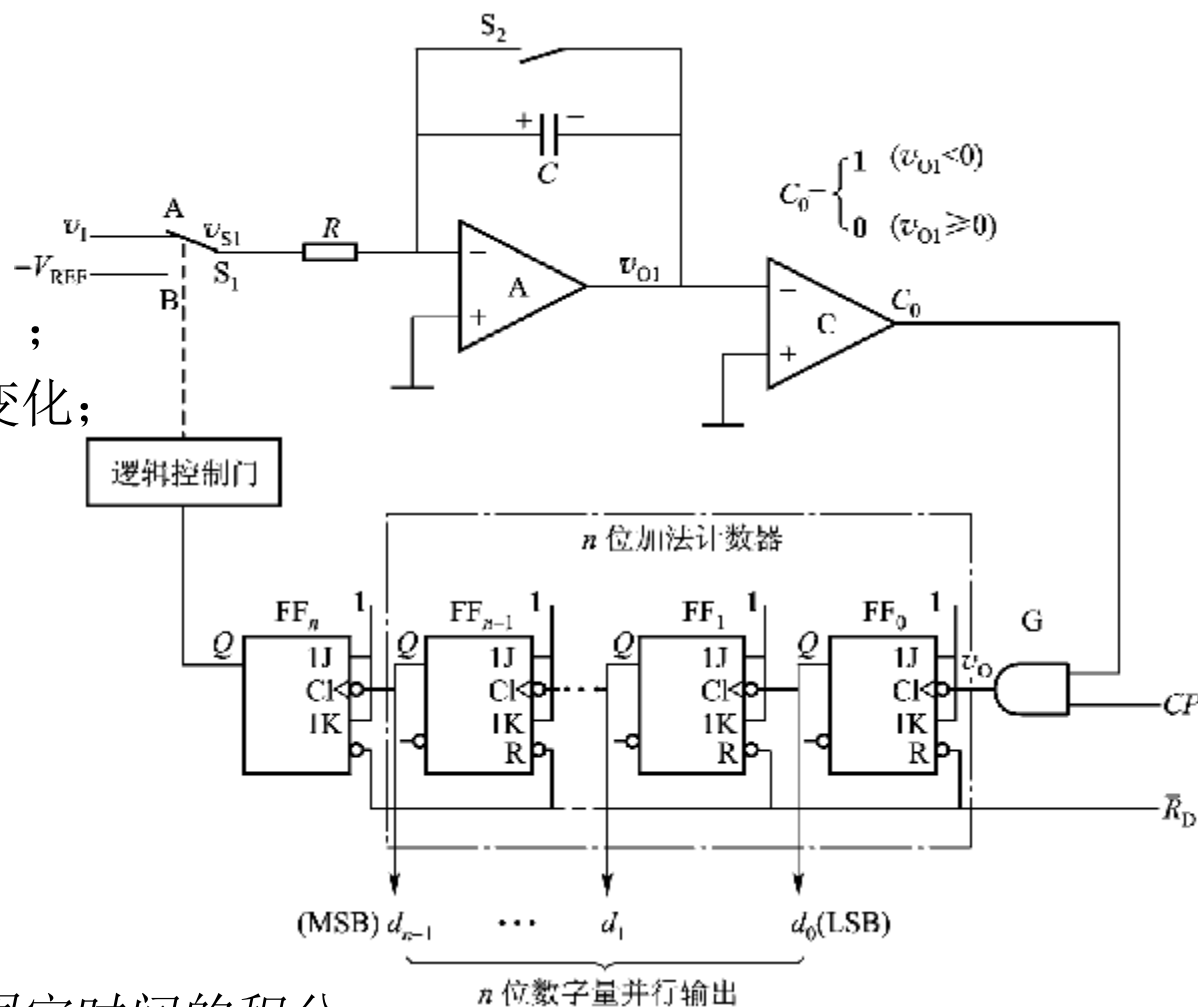


## ❖ 双积分型 A/D 转换器（工作步骤 1）

ü 假设输入  $v_I$  为正值。

ü 第一阶段：

$S_2$  打开（积分器工作）；  
积分器输出负向线性变化；  
比较器输出 1；  
与门（ $CP$ ）开放；  
计数器计数；  
...  
附加触发器输出 1；  
积分停止；



积分器对输入信号进行固定时间的积分

## ❌ 双积分型 A/D 转换器（工作步骤 2）

ü 假设输入  $v_I$  为正值。

ü 第二阶段：

$S_1$  接通 B（积分器反向）；

积分器输出正向线性变化；

...

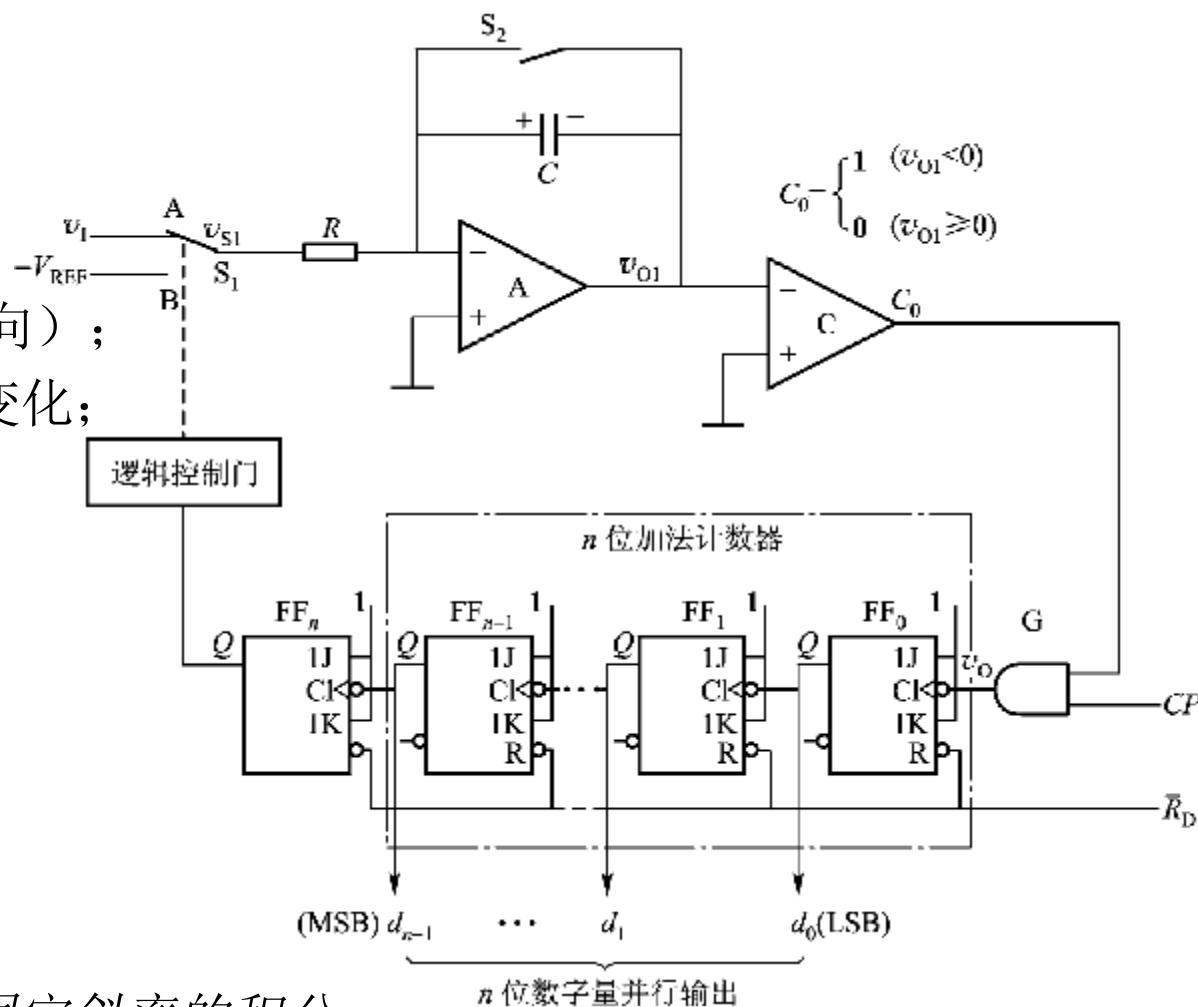
积分器输出零值；

比较器输出 0；

与门（CP）封锁；

计数器停止；

积分停止；



积分器对基准信号进行固定斜率的积分

## Ø 双积分型 A/D 转换器

ü 右图所示整体工作波形。

ü 阶段一：对输入信号进行固定时间积分。

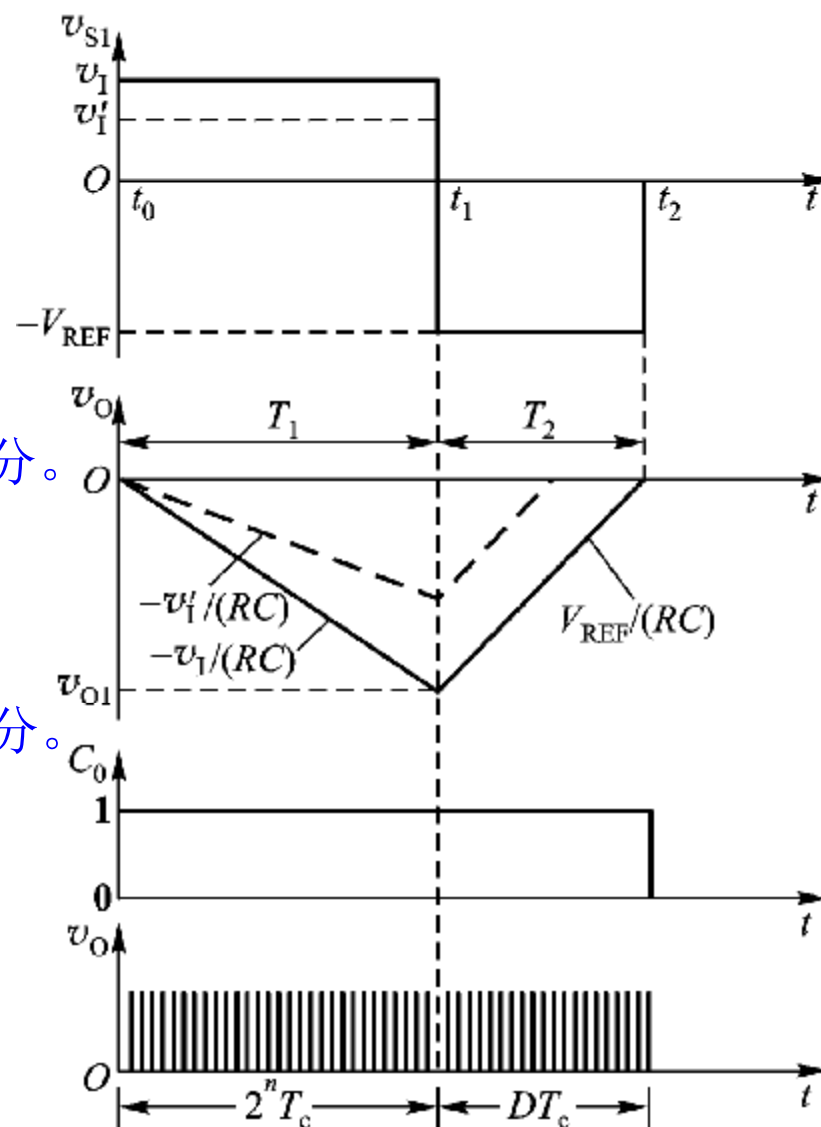
$$v_{O1}(t_1) = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} v_I dt = -\frac{v_I}{RC} T_1$$

ü 阶段二：对基准信号进行固定斜率积分。

$$\begin{aligned} v_{O1}(t_2) &= v_{O1}(t_1) - \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} (-V_{REF}) dt \\ &= -\frac{v_I}{RC} T_1 + \frac{V_{REF}}{RC} T_2 \end{aligned}$$

ü 当  $t = t_2$  时,  $v_{O1} = 0$ , 则:

$$T_2 = \frac{v_I}{V_{REF}} \cdot T_1 = \frac{v_I}{V_{REF}} \cdot 2^n T_C \Rightarrow D = \frac{T_2}{T_C} = \frac{v_I}{V_{REF}} \cdot 2^n$$



## Ø 双积分型 A/D 转换器（特点）

ü 采用了积分器，抗干扰能力强；

若固定积分时间为工频周期的整数倍，理论上可完全消除工频干扰。

ü 两次积分采用同一个积分器，输出结果与积分参数无关，精度高。

ü 应用：精度要求高，而速度要求相对慢的数字测试设备和仪表中。

## Ø A/D 转换器主要技术指标与应用要点

### ü 技术指标:

分辨率（位数）；

精度误差（量化、偏移、增益、非线性）；

转换时间；

...

### ü 选型、应用要点:

技术指标；

工作电压、基准电压；

转换量程、极性；

...



## Ø 集成 A/D 转换芯片特点与分类

Ü A/D转换芯片品种繁多，按转换原理分，主要有并行比较型，逐次逼近型和双积分型等几种。

Ü 并行比较型是目前所有 A/D 转换器中速度最高的一种（ns 级）；  
适用于低分辨率、高转换速度的应用场合。

Ü 逐次逼近型是目前种类最多、数量最大，应用最广的 A/D 转换器；  
具有较高的转换速度（ $\mu\text{s}$  级）；  
适用于对速度要求不是特别高的应用场合。

Ü 双积分型的转换时间较长（ms 级）；  
对交流干扰信号具有很强的抑制能力；  
适用于精度要求高而转换速度慢的数字测量设备和仪表。

## ✓ 本节作业

ü 习题 6 (P290)

7、9。

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。