

# 第9章 数—模和模—数转换

## 9.1 概述

**模拟电路：**处理连续变化信号的电路

**数字电路：**处理数字信号的电路

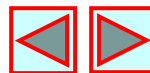
**模数转换（A/D转换）：**将模拟信号转换为数字信号

**数模转换（D/A转换）：**将数字信号转换为模拟信号

**模数转换举例：**

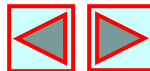
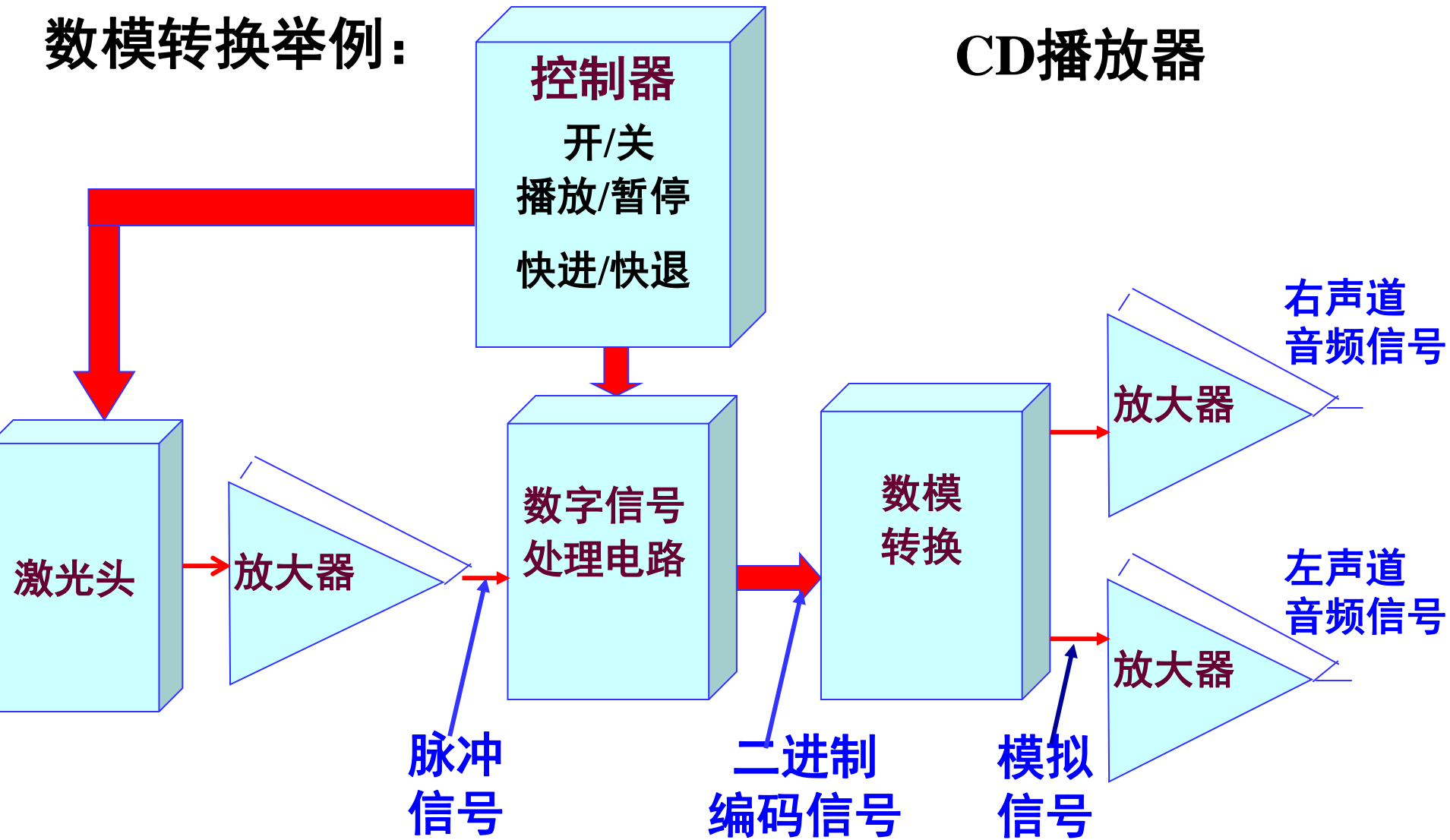


数字电压表



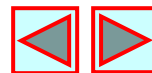
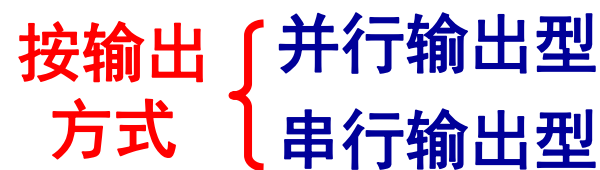
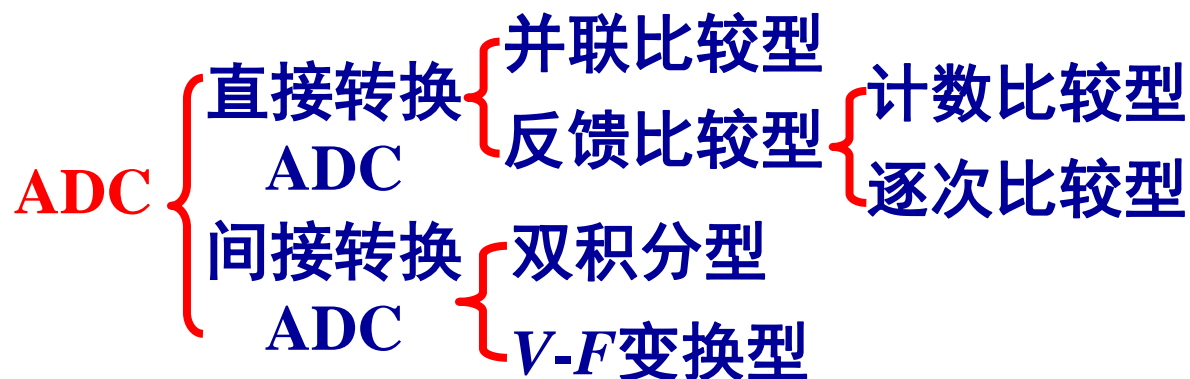
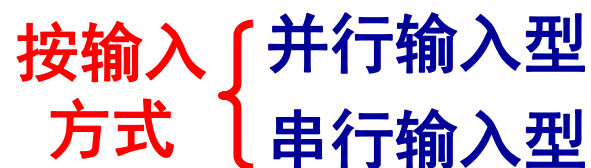
数模转换举例：

CD播放器



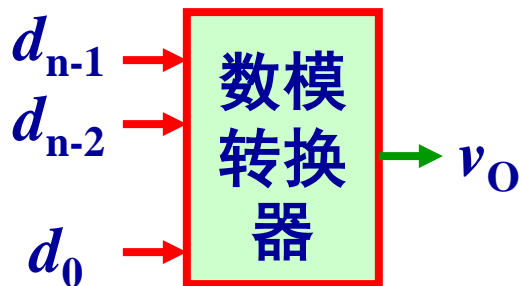
# 转换指标：转换精度和转换速度

## 分类：



## 9.2 D/A转换器

数模转换电路输入输出的关系



输入为二进制码，输出为模拟电压  
输出电压与输入的二进制码的值成正比

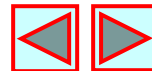
n位二进制数 $d_{n-1}d_{n-2}\dots d_0$ 的大小

$$D_n = d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \dots + d_02^0 = \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i$$

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

例：

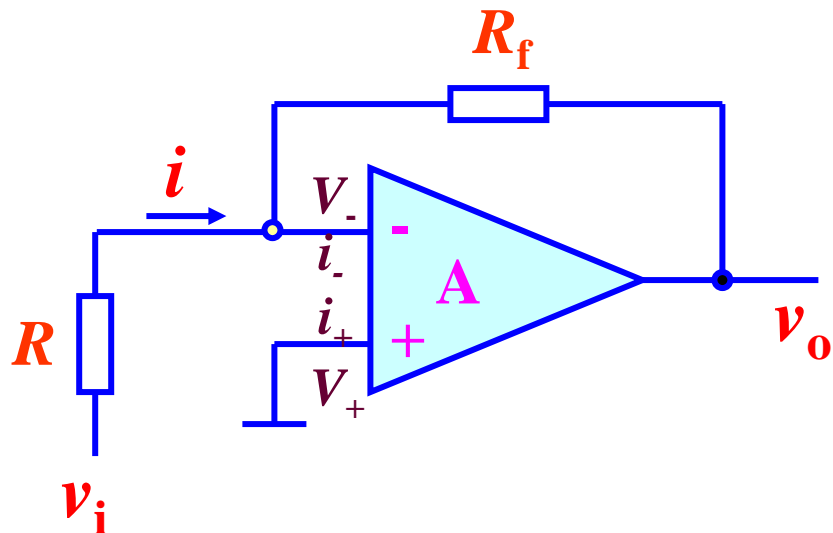
$D_3D_2D_1D_0$	$V_O$
0000	0V
0001	0.25V
0010	0.5V
0011	0.75V
0100	1V
0101	1.25V
0110	1.5V
0111	1.75V
1000	2V
1001	2.25V
1010	2.5V
1011	2.75V
1100	3V
1101	3.25V
1110	3.5V
1111	3.75V



# 放大器原理

A为运算放大器

与电阻配合构成反相比例运算电路



理想运放的两个特点：

虚短  $V_- = V_+$

虚断  $i_- = i_+ = 0$

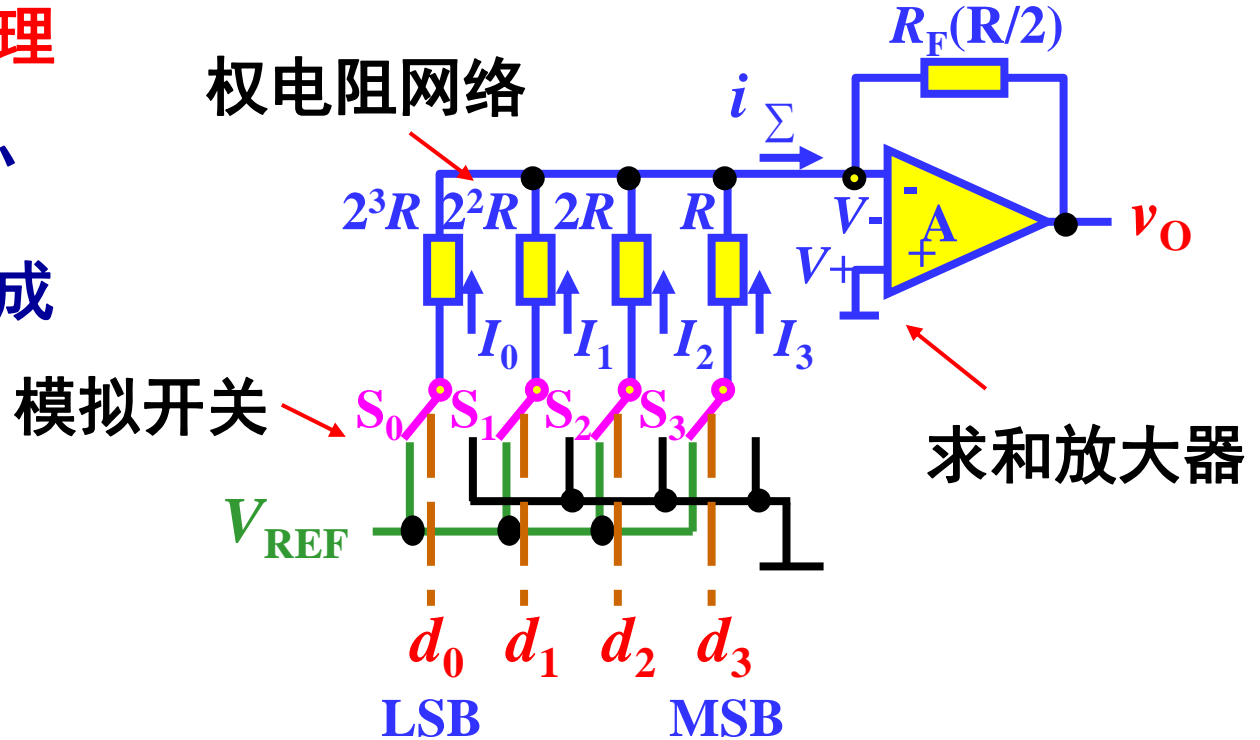
由此推出：  $V_- = V_+ = 0$

$$v_o = -iR_f = -\frac{V_i}{R} R_f$$

## 9.2.1 权电阻网络D/A转换器

### 一、电路及工作原理

由权电阻网络、  
模拟开关、  
求和放大器构成



模拟开关受每各位数码控制

权电阻网络确定每条支路电流的大小

求和放大电路把各支路电流求和并转换成电压

# 转换原理

$S_i$ :  $d=1$ 时接 $V_{REF}$ ,  $d=0$ 时接地

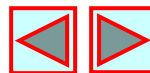
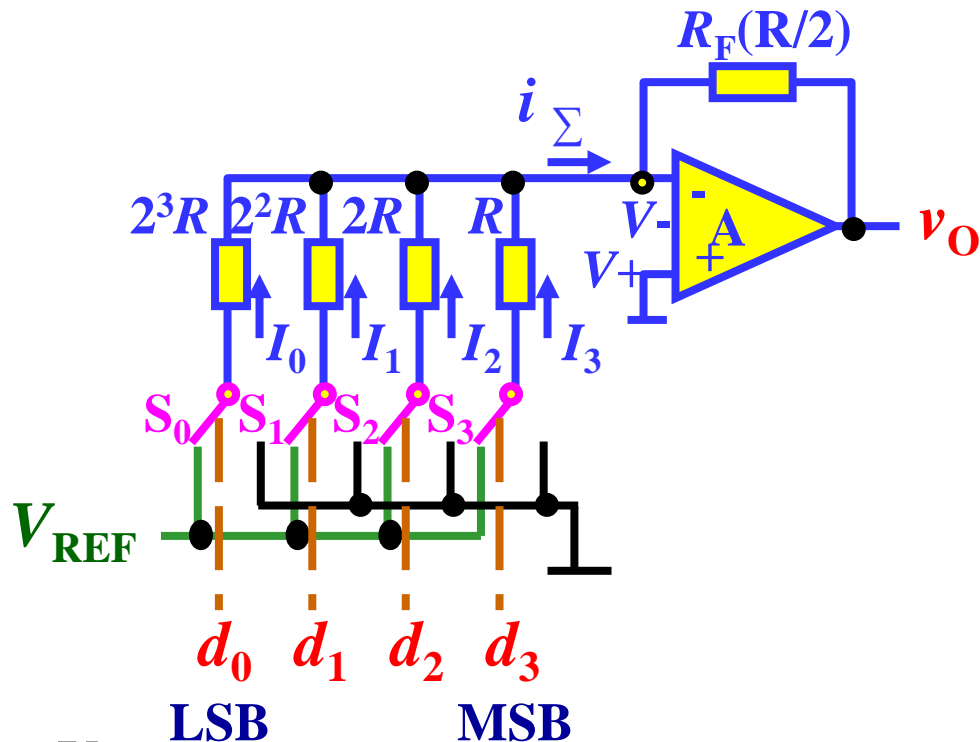
接 $V_{REF}$ 时支路有电流,  
接地时无电流

$$\therefore I_i = d_i \frac{V_{REF}}{R_i}$$

$$i_{\Sigma} = d_3 \frac{V_{REF}}{2^0 R} + d_2 \frac{V_{REF}}{2^1 R} + d_1 \frac{V_{REF}}{2^2 R} + d_0 \frac{V_{REF}}{2^3 R}$$
$$= \frac{V_{REF}}{2^3 R} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

$$v_O = -i_{\Sigma} R_F = -\frac{V_{REF}}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

此式即表明模拟输出与数字输入成正比。

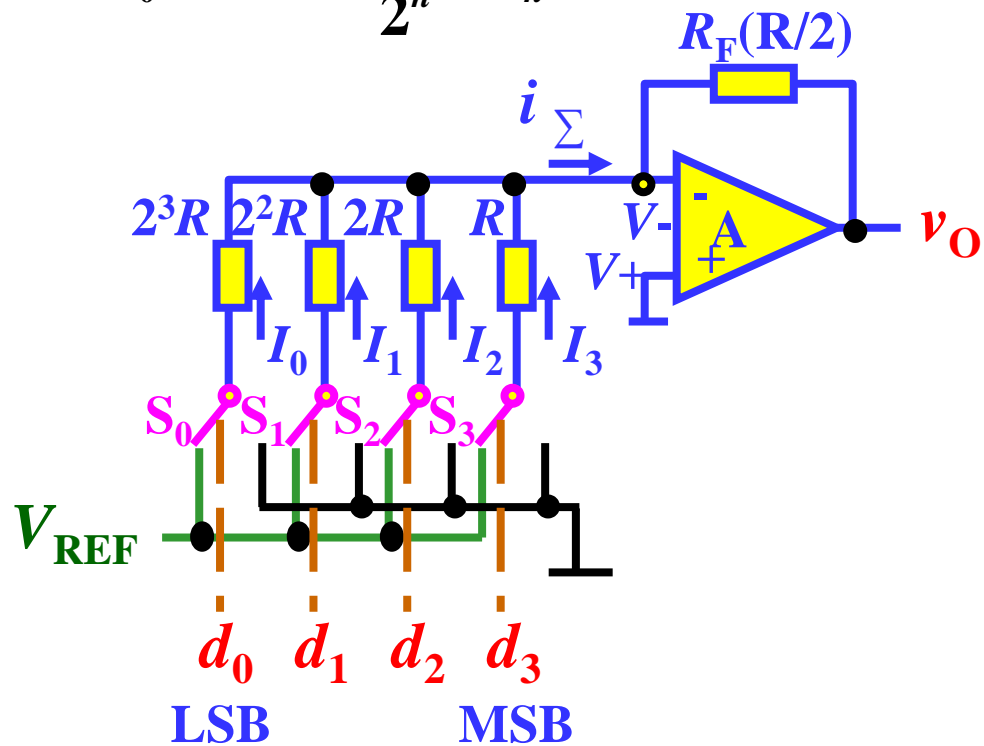


## 推广：n位数模转换器的输出

$$v_O = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \cdots + d_02^0) = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n \quad \star$$

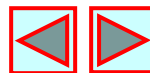
每条支路上的电阻反映了该位的权，故称权电阻网络。

$$I_i = d_i \frac{V_{REF}}{R_i}$$



改变 $R_F$ 可改变比例系数

**电路缺点：** 当位数较多时，阻值相差太大。



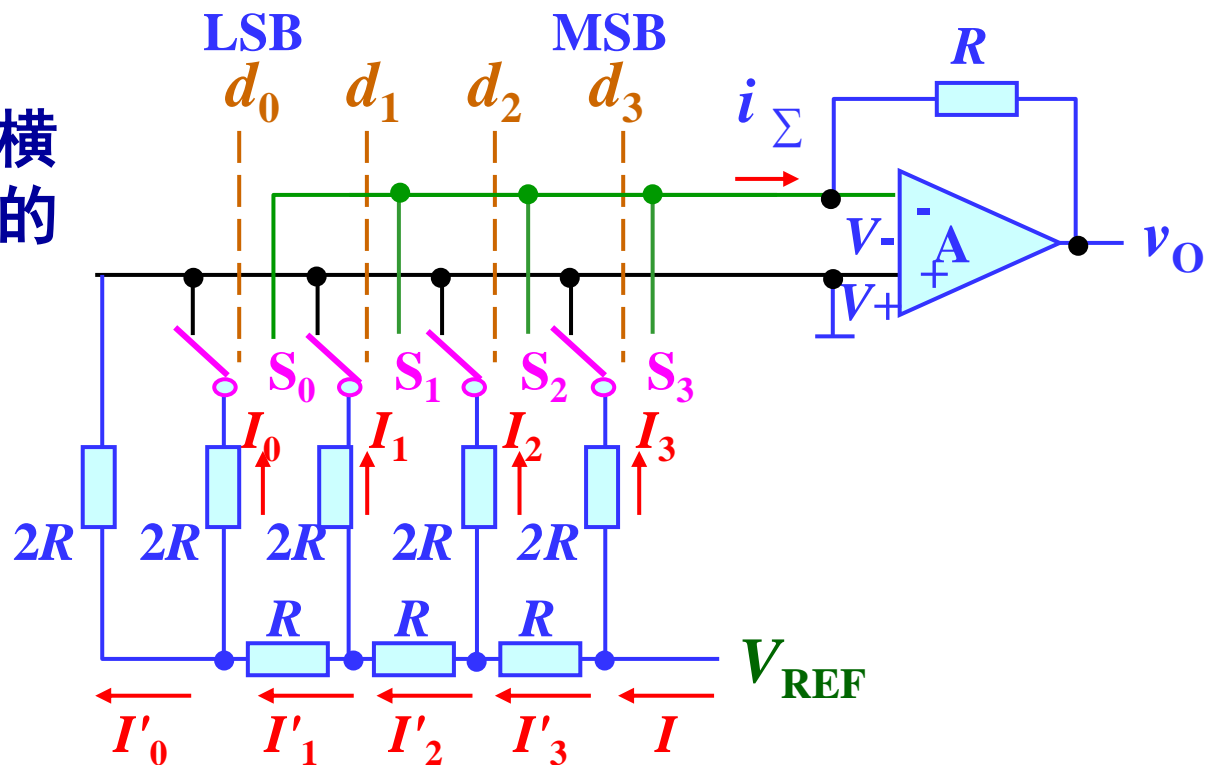


## 9.2.2 倒T型电阻网络D/A转换器

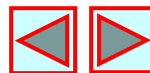
### 一、电路及工作原理

**基本思路：**将电阻放在横向支路上，越低位经过的电阻越多，电流越小

由图可知不管开关接左还是接右，支路电流都不变，只是接左流入地，接右流向R



$$\therefore i_{\Sigma} = d_0 I_0 + d_1 I_1 + d_2 I_2 + d_3 I_3$$



按接左求各支路电流：

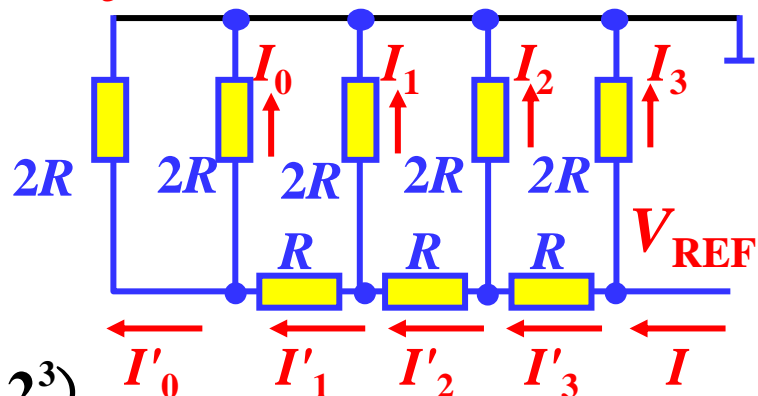
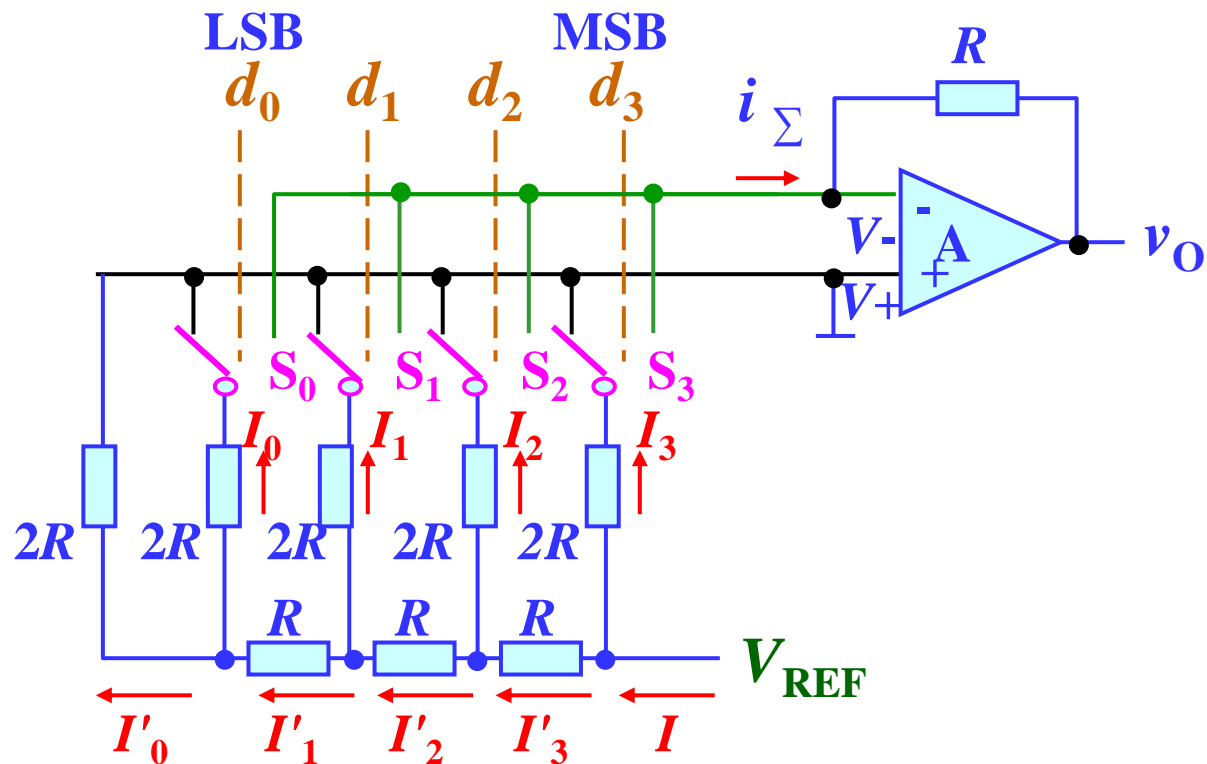
$$\left\{ \begin{aligned} I_0 &= I'_0 = \frac{I'_1}{2} = \frac{I}{16} \\ I_1 &= I'_1 = \frac{I'_2}{2} = \frac{I}{8} \\ I_2 &= I'_2 = \frac{I'_3}{2} = \frac{I}{4} \\ I_3 &= I'_3 = \frac{I}{2} = \frac{I}{2} \\ I &= \frac{V_{REF}}{R} \end{aligned} \right.$$

$$\therefore i_{\Sigma} = d_0 I_0 + d_1 I_1 + d_2 I_2 + d_3 I_3$$

$$\therefore i_{\Sigma} = \frac{I}{16} (d_0 + 2d_1 + 4d_2 + 8d_3)$$

$$v_O = -i_{\Sigma} R = -\frac{I}{2^4} R (d_0 2^0 + d_1 2^1 + d_2 2^2 + d_3 2^3)$$

$$= -\frac{V_{REF}}{2^4} (d_0 2^0 + d_1 2^1 + d_2 2^2 + d_3 2^3)$$



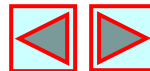
## 推广：n位数模转换器的输出

$$v_O = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \cdots + d_02^0) = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n \quad \star$$

电阻支路为倒T型，故  
名倒T型电阻网络DAC

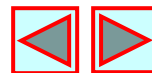
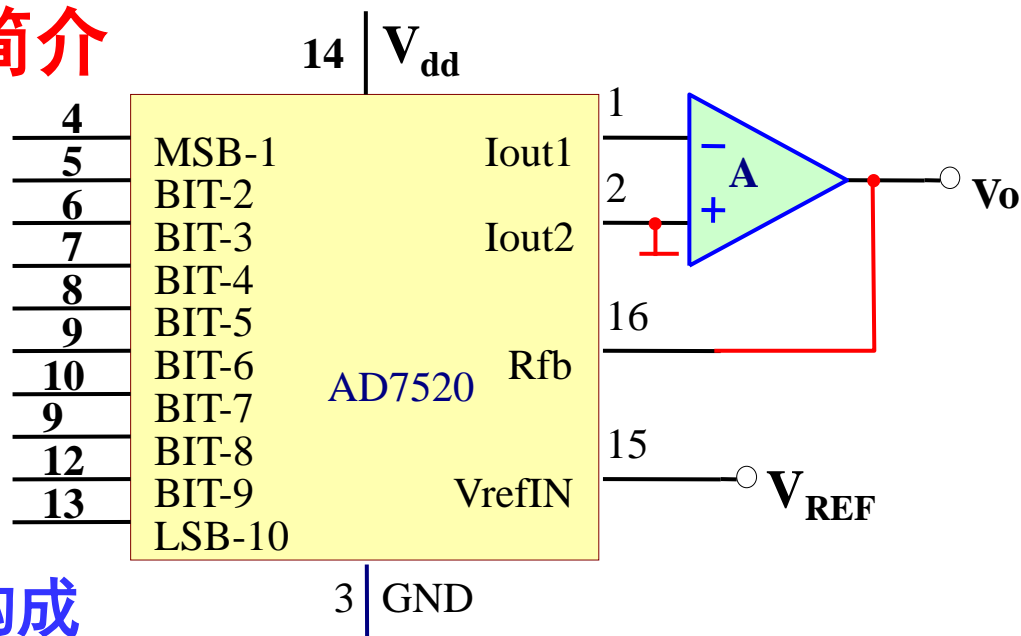
改变 $R_F$ 可改变比例系数

解决了阻值相差太大的问题



# 集成D/A转换器AD7520简介

- 10位数字输入，
- 模拟开关采用CMOS电路构成
- 需外接运放、参考电压；
- 反馈电阻可用内部电阻也可外接

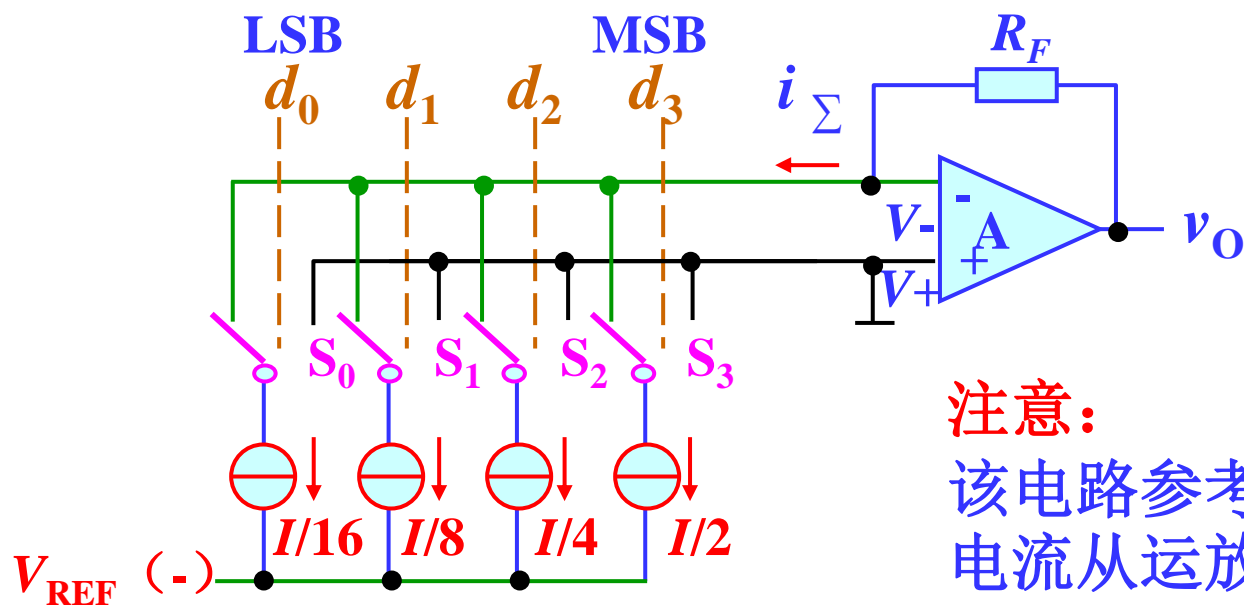


### 9.2.3 权电流型D/A转换器

模拟开关的问题：

若模拟开关的导通电阻不相等，则电流有误差，转换有误差。

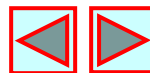
解决措施：将电阻换成恒流源。



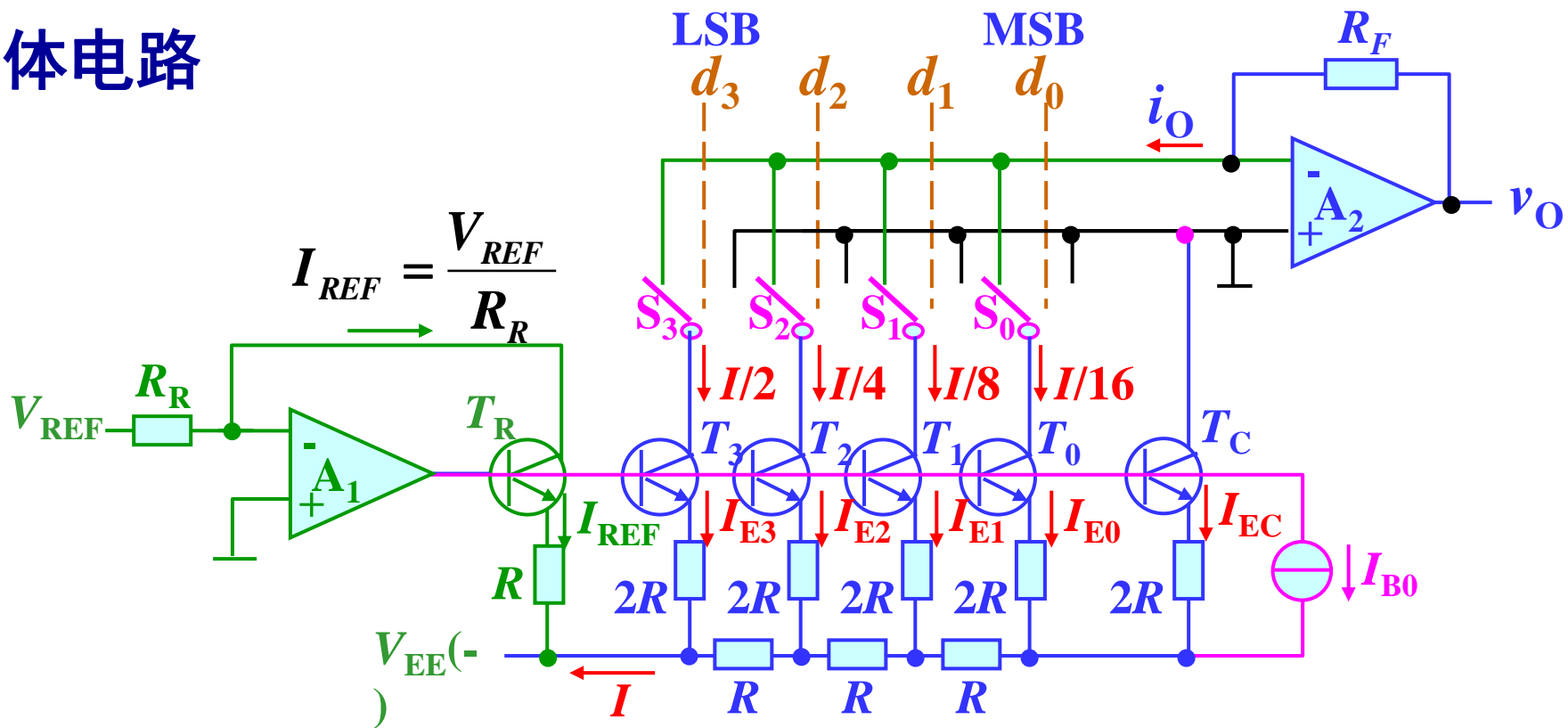
注意：

该电路参考电压为负值，  
电流从运放负极流出

恒流源的实现：三极管集电极电流。



# 具体电路

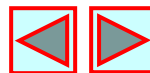


$A_1$ 与 $T_R$ 构成基准电流发生电路，产生  $I_{REF} = \frac{V_{REF}}{R_R}$

恒流源 $I_{B0}$ 用来为 $T$ 提供基极偏置电流，恒流源需要负电源 $V_{EE}$

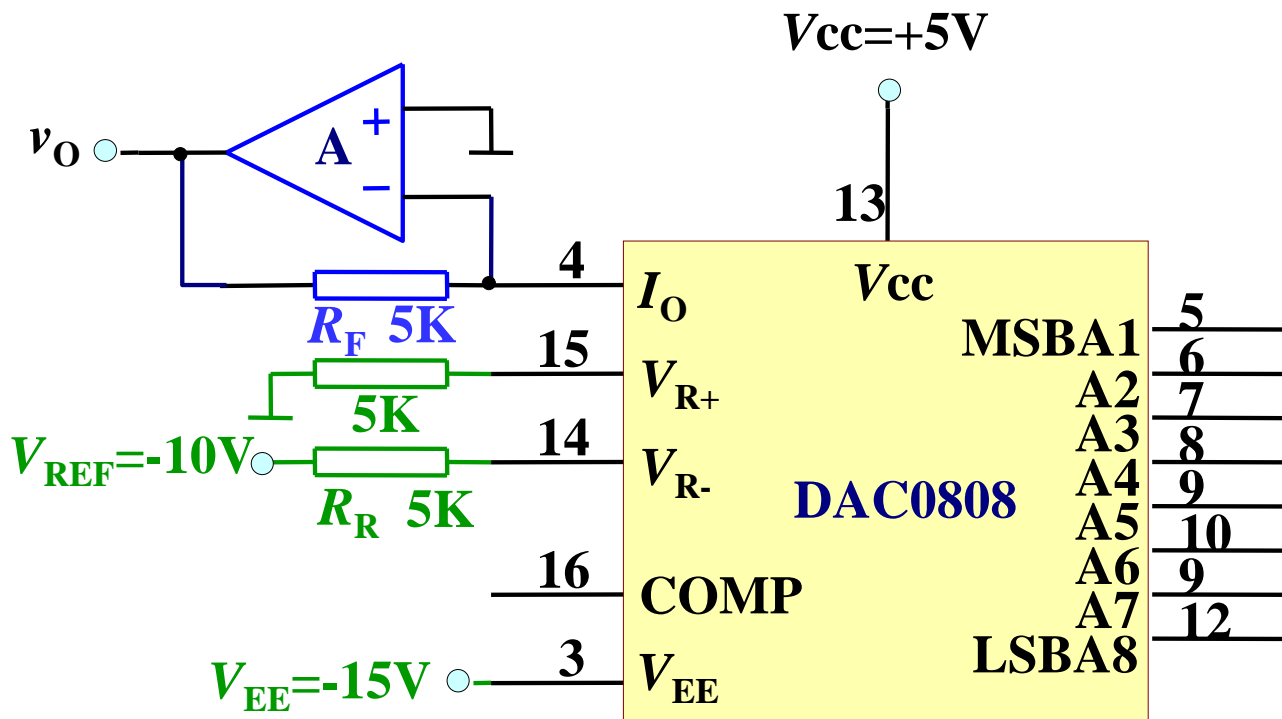
$$v_O = \frac{R_F V_{REF}}{2^4 R_R} (d_0 2^0 + d_1 2^1 + d_2 2^2 + d_3 2^3)$$

注意该公式中无负号



# 权电流型集成D/A转换器DAC0808简介

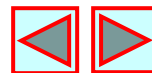
8位数字输入



需外接运放、反馈电阻、参考电压。

上述参数下：

$$v_O = \frac{R_F V_{REF}}{2^8 R_R} D_n = \frac{10}{2^8} D_n$$



## 9.2.7 D/A转换的转换精度与转换速度

### 一、转换精度

以四位DAC为例画出转换特性曲线

可以看出输出电压在幅值上是不连续的，一个级差为

$$1LSB = \left| \frac{V_{REF}}{2^4} \right|$$

转换精度的概念：

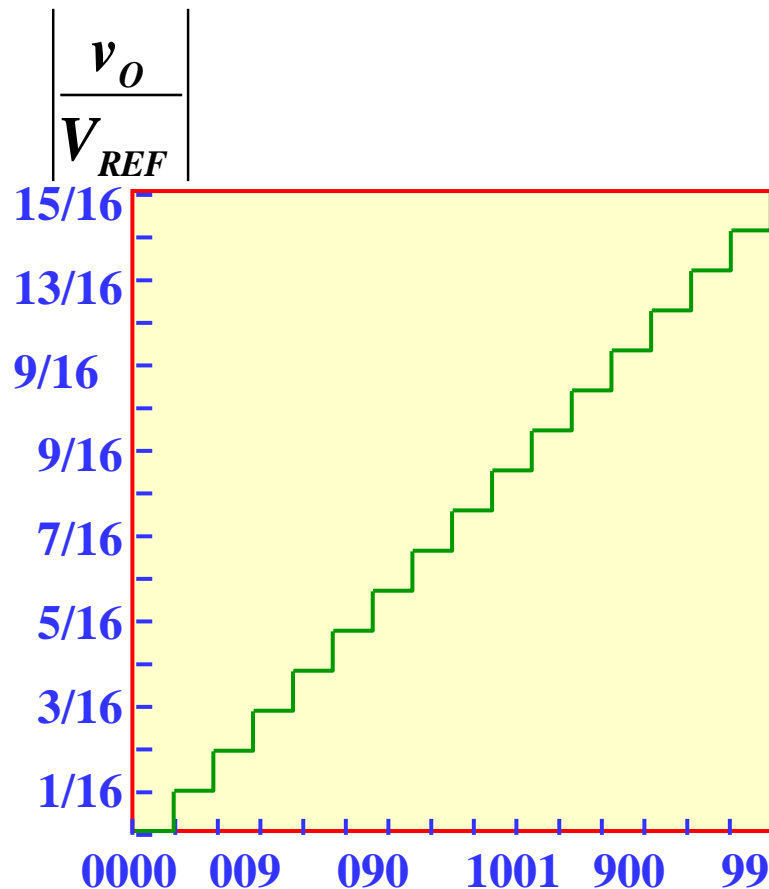
级差越小，转换精度越高，输出越接近于模拟（幅值上连续）信号；

n位DAC的  $1LSB = \left| \frac{V_{REF}}{2^n} \right|$ ，

n越大，转换精度越高。

用与n有关的量来表示转换精度，称之为分辨率

定义1:  $n$





**定义2:**  $\frac{1}{2^n - 1} \frac{1LSB}{\text{满刻度输出}} = \left| \frac{V_{REF} / 2^n}{V_{REF} (2^n - 1) / 2^n} \right| = \frac{1}{2^n - 1}$

最低位为1，其它位均为0时对应的输出电压称为**1LSB**，即

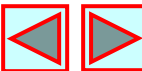
$d_{n-1}d_{n-2} \cdots d_1d_0 = 00 \cdots 01$ 时对应的输出，故： $1LSB = \left| \frac{V_{REF}}{2^n} \right|$

输入全为1时对应的输出电压称为满刻度输出，用**FSR**表示，即

$d_{n-1}d_{n-2} \cdots d_1d_0 = 11 \cdots 11$ 时对应的输出，故：

$$FSR = \left| \frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \cdots + d_12^1 + d_02^0) \right|$$

$$= \left| \frac{V_{REF}}{2^n} (2^n - 1) \right|$$



## 转换误差

分辨率只反映了理论精度，实际精度与误差有关（例正向偏差使级差加大，精度减小）。

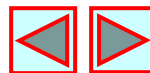
所谓误差即指输出电压的实际值与理论值的偏差。

定义1:  $\frac{\text{实际值与理论值的最大偏差}}{1LSB}$  单位: LSB

定义2:  $\frac{\text{实际值与理论值的最大偏差}}{FSR} \times 100\%$

误差的来源

- $V_{REF}$  的波动;
- $A$  的零漂,
- $S$  的导通电阻与压降;
- $R$  的阻值偏差



## 二、D/A转换器的转换速度

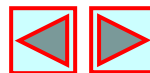
**指标：**建立时间 $t_{\text{set}}$

**定义：**从输入的数字量发生突变开始，直到输出电压进入与稳态值相差 $\pm 1/2\text{LSB}$ 范围内的时间称为建立时间。

不包含运放的DAC中， $t_{\text{set}}$ 可达 $0.1\mu\text{s}$

包含运放的DAC中， $t_{\text{set}}$ 可达 $1.5\mu\text{s}$

当需外加运放构成DAC时，应采用转换速率快的运放。

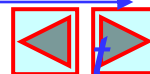
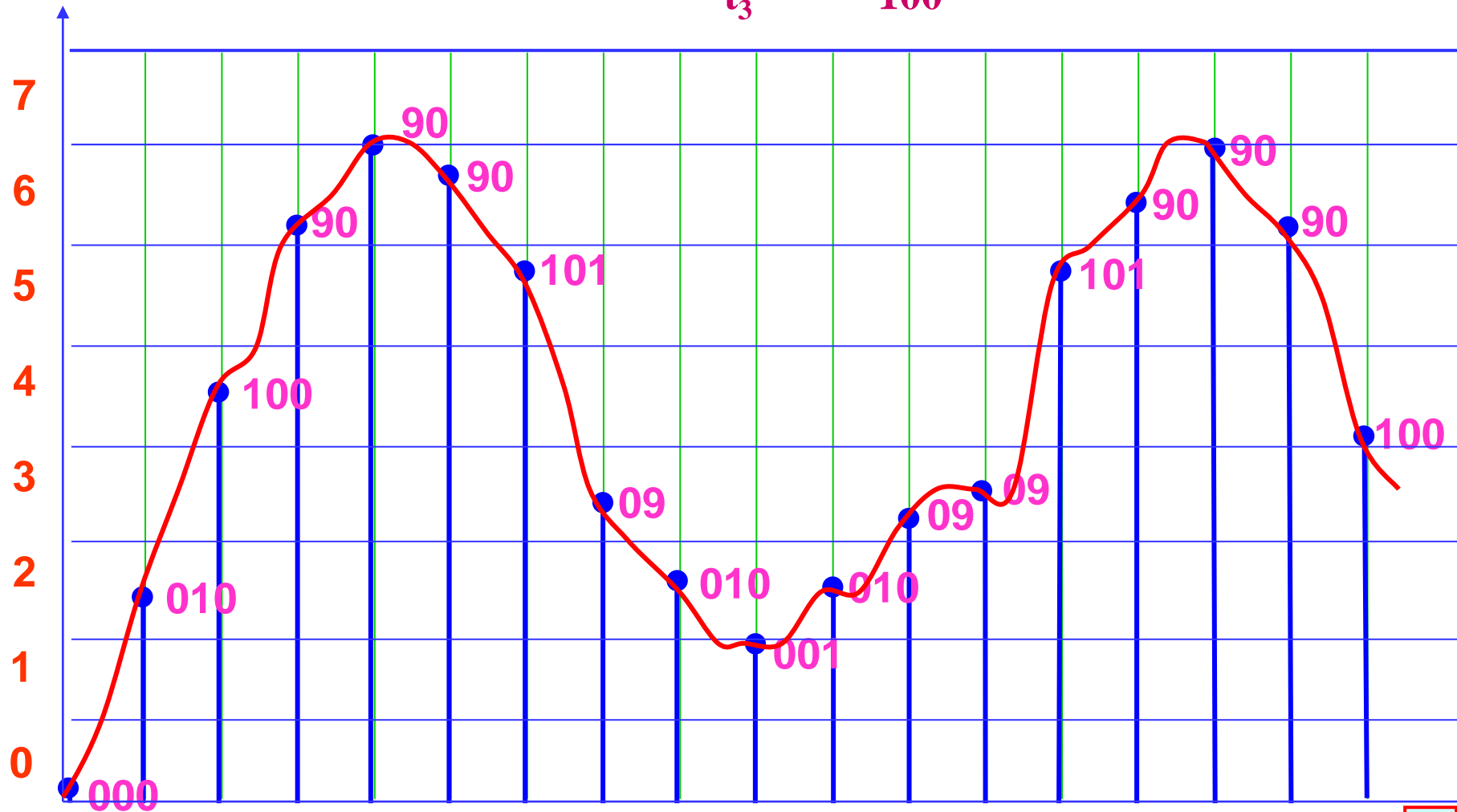
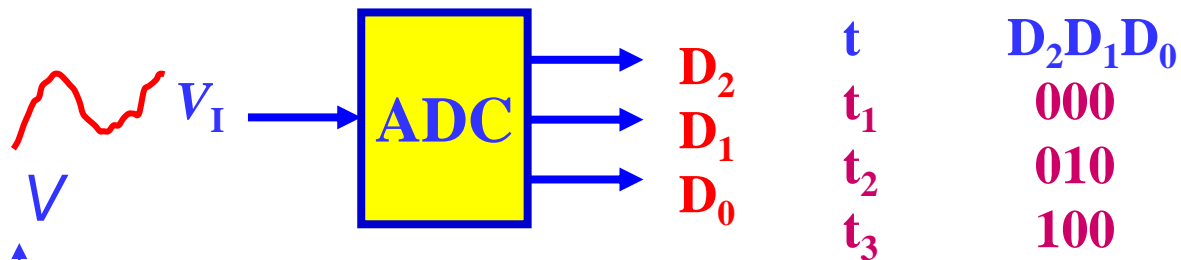


## 9.3 A/D转换器

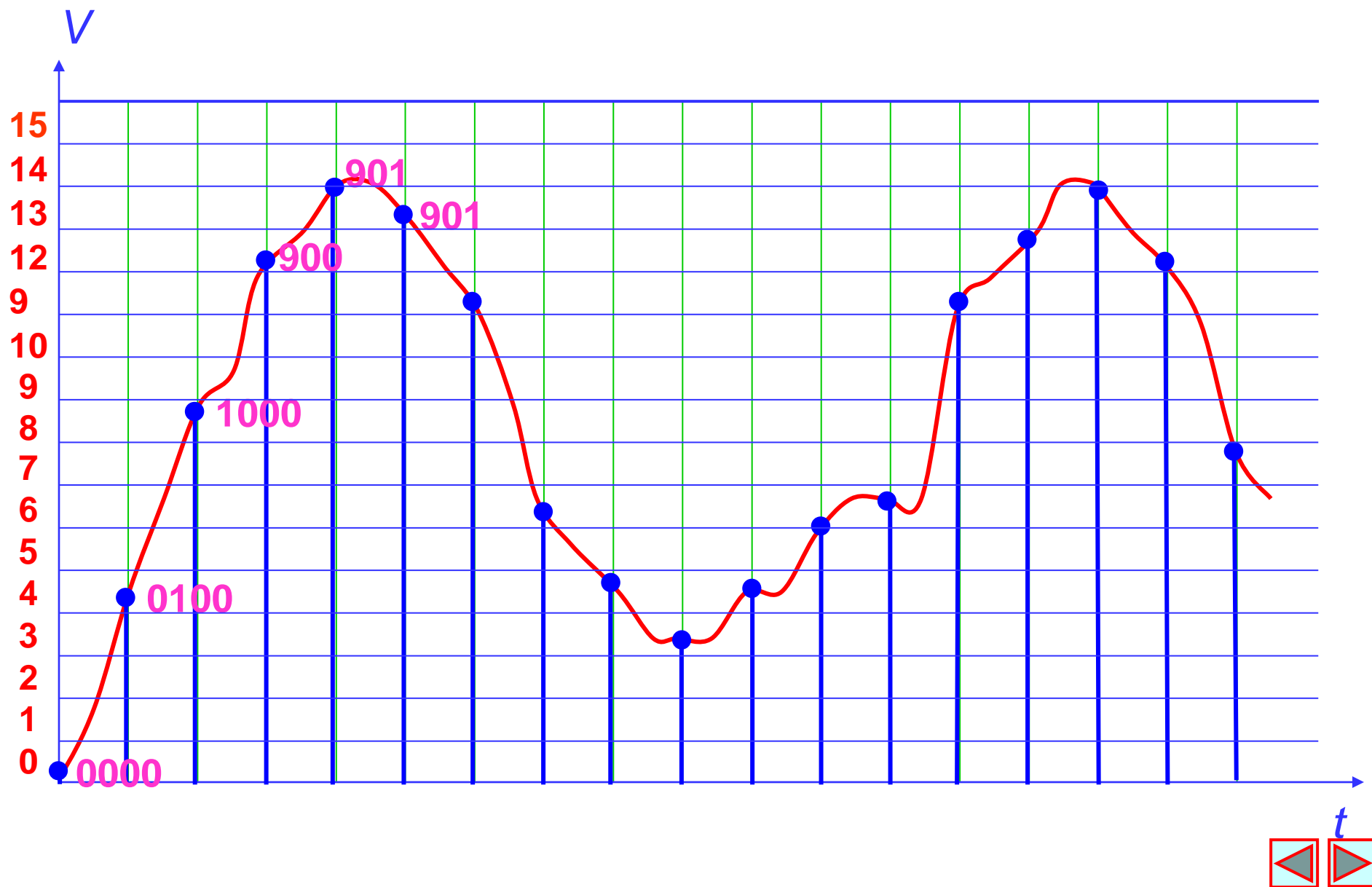
● 采样保持

● 量化

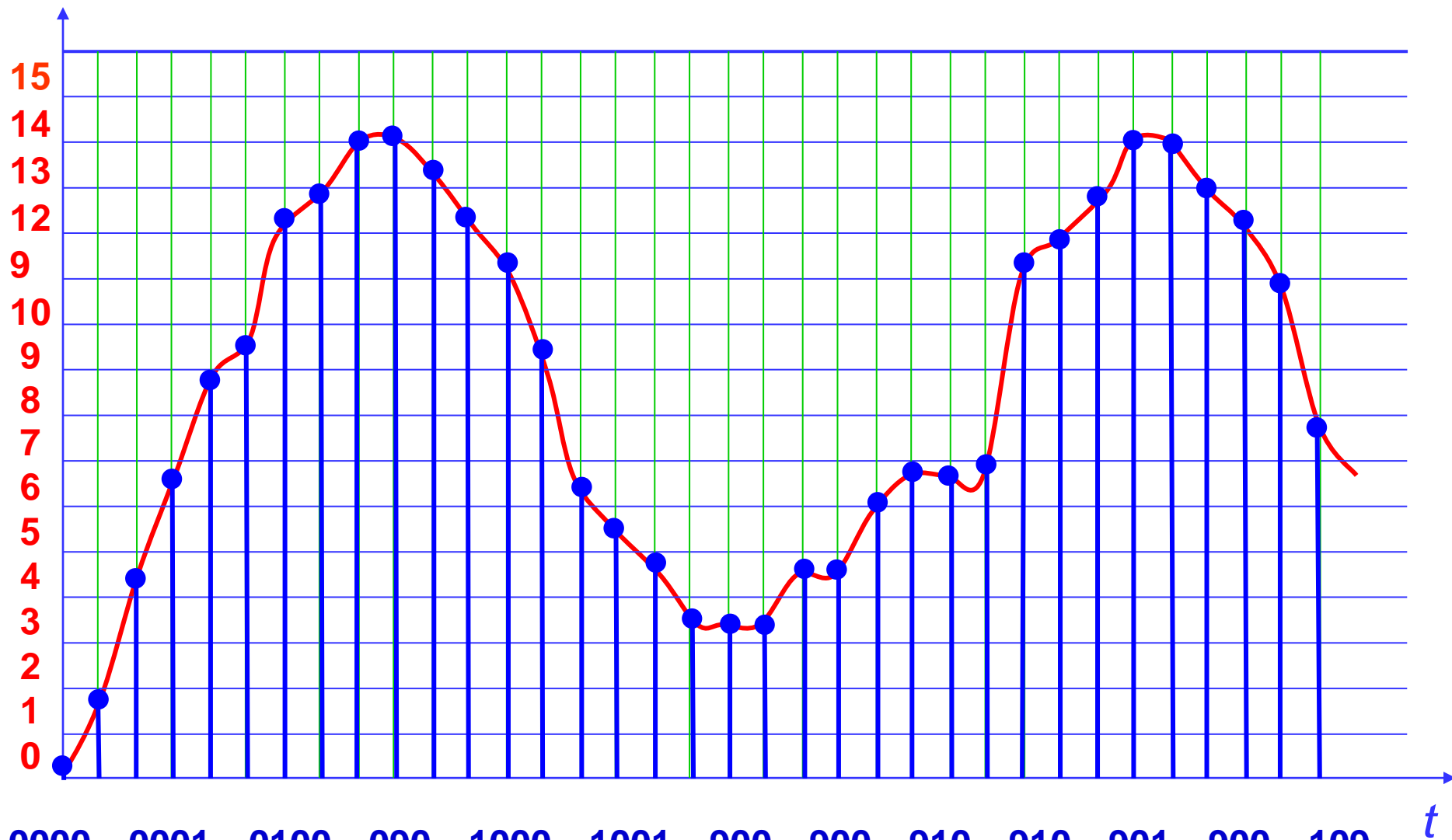
● 编码



● 量化细一些，提高转换精度



$V$  ● 采样再细一些，更准确地反应变化规律



0000, 0001, 0100, 090, 1000, 1001, 900, 900, 910, 910, 901, 900, 109,  
 1001, 090, 0101, 0100, 009, 009, 009, 0100, 0100, 090, 090, 090, 090,  
 109, 109, 900, 910, 910, 901, 900, 109, 091。



### 9.3.1 A/D转换的基本原理

A/D转换过程要经过采样保持，量化编码2个步骤

#### 一、采样保持

**采样：**即在不同的时间点上把信号采样下来，从而将在时间上连续的模拟信号转换成在时间上离散的信号。

**保持：**每次采样完毕要保持一段时间，以供ADC将采样下来的信号进行转换。

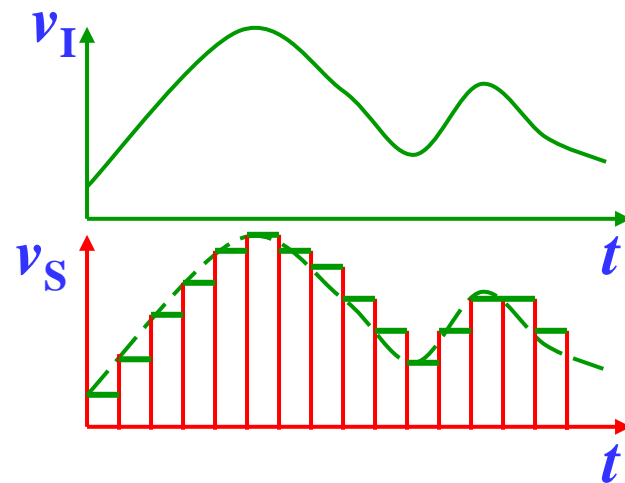
**对采样频率的要求：**

过低，不能反映原始信号的变化规律。

**采样定理：**  $f_s \geq 2f_{i(\max)}$

过高，保持时间短，不能保证ADC可靠转换

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

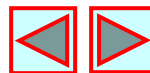


## 二、量化和编码

采样后的信号在数值上还是连续的，而数字信号在数值上是离散的，**量化**即是将数值上连续的信号变成数值上是离散的信号。

量化即把采样信号表示为最小单位的整数倍，此最小单位叫做**量化单位**，用 $\Delta$ 表示。

把量化结果用代码表示出来，称为**编码**，这些代码的输出就是A/D转换的输出结果。





**例：**把0~1V的模拟电压转换成3位二进制代码，即用000~91表示0~1V的电压

**解：方法一**

取最小量化单位为 $1/8\text{ V}$ ，即 $\Delta = 1/8\text{ V}$   
 并规定：0~ $1/8\text{ V}$ 为0  $\Delta$ ，  
 $1/8\sim 2/8\text{ V}$ 为1  $\Delta$ ， ...

则最大量化误差为1  $\Delta = 1/8\text{ V}$ 。

输入信号	二进制代码	代表的模拟电压
1V	91	$7\Delta = 7/8\text{ V}$
$7/8\text{ V}$	90	$6\Delta = 6/8\text{ V}$
$6/8\text{ V}$	101	$5\Delta = 5/8\text{ V}$
$5/8\text{ V}$	100	$4\Delta = 4/8\text{ V}$
$4/8\text{ V}$	09	$3\Delta = 3/8\text{ V}$
$3/8\text{ V}$	010	$2\Delta = 2/8\text{ V}$
$2/8\text{ V}$	001	$1\Delta = 1/8\text{ V}$
$1/8\text{ V}$	000	$0\Delta = 0\text{ V}$
0V		

**方法二**

取最小量化单位为 $2/15\text{ V}$ ，即 $\Delta = 2/15\text{ V}$ ，  
 并规定：0~ $1/15\text{ V}$ 为0  $\Delta$ ，  
 $1/15\sim 3/15\text{ V}$ 为1  $\Delta$ ，  
 $3/15\sim 5/15\text{ V}$ 为2  $\Delta$ ，  
 ...

则最大量化误差为 $1/2\Delta = 1/15\text{ V}$ 。

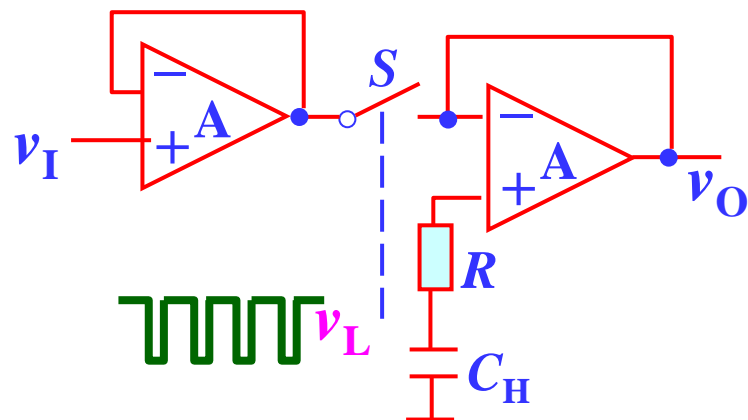
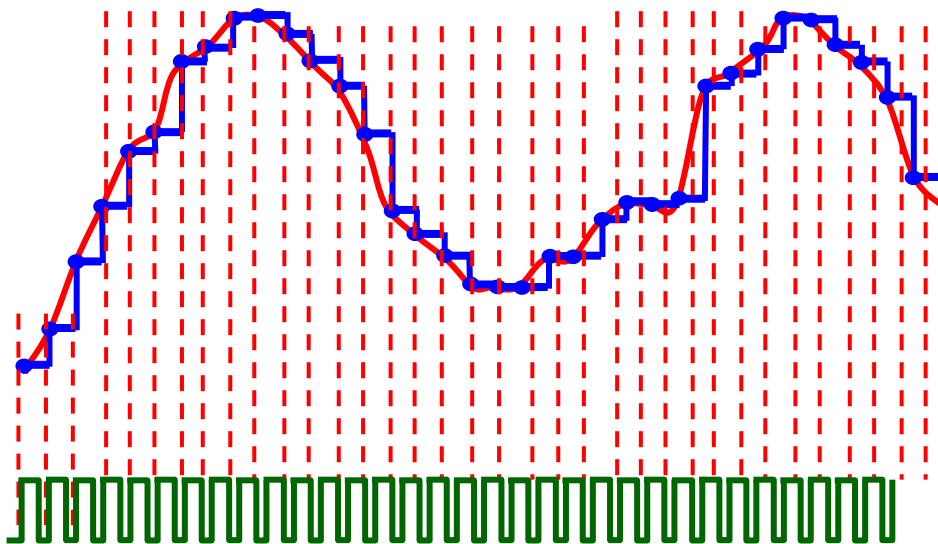
输入信号	二进制代码	代表的模拟电压
1V	91	$7\Delta = 14/15\text{ V}$
$13/15\text{ V}$	90	$6\Delta = 12/15\text{ V}$
$9/15\text{ V}$	101	$5\Delta = 10/15\text{ V}$
$9/15\text{ V}$	100	$4\Delta = 8/15\text{ V}$
$7/15\text{ V}$	09	$3\Delta = 6/15\text{ V}$
$5/15\text{ V}$	010	$2\Delta = 4/15\text{ V}$
$3/15\text{ V}$	001	$1\Delta = 2/15\text{ V}$
$1/15\text{ V}$	000	$0\Delta = 0\text{ V}$
0V		

## 9.3.2 采样保持电路

### 基本形式

$v_L=0$ , S闭合, C充电 ( $\tau=RC_H$ ),  $v_O=v_I$ , 采样。

$v_L=1$ , S打开, C无放电回路,  $v_O$ 保持。



集成采样保持器LF198

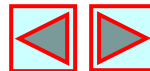
### 9.3.3 直接A/D转换器

输入的模拟电压直接转换为输出的数字量，不需要中间变量。

#### 一、并联比较型

**思路：**用比较器实现量化，编码器实现数字量输出。

**电路：**



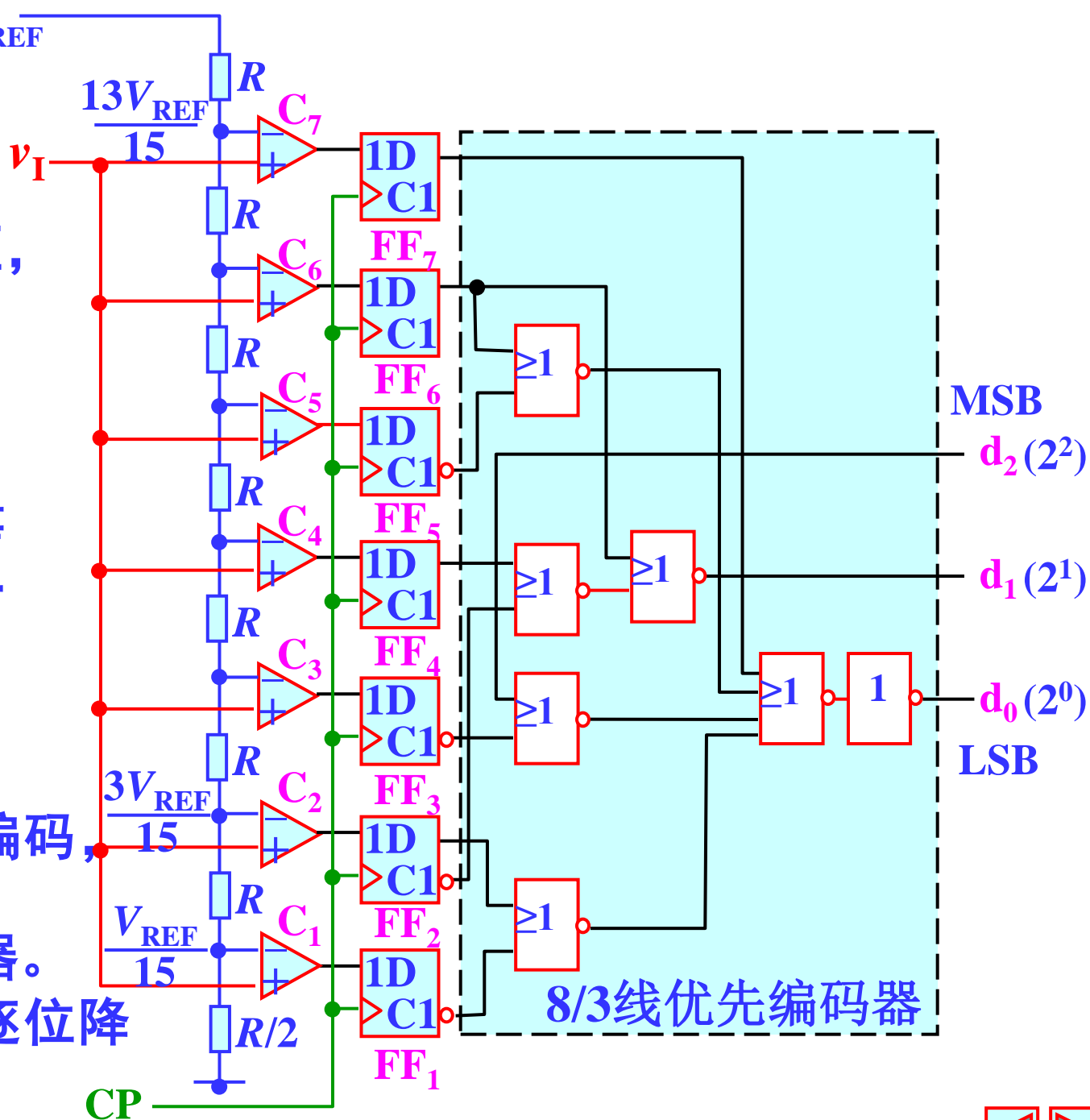
**比较器 $C_1 \sim C_7$ :**  
同相输入端接 $v_I$   
反相端接参考电压,  
参考电压的大小由  
电阻分压得到。

**寄存器 $FF_1 \sim FF_7$ :**  
暂存量化结果, 等  
待时钟到来, 统一  
送编码器编码。

$$Q^{n+1} = D^n$$

**编码器:**

将量化结果进行编码,  
实现数字量输出。  
为8/3线优先编码器。  
优先权自上而下逐位降  
低。高电平有效。



## 工作原理:

当 $v_I < V_{REF}/15$ 时,

$C_1 \sim C_7 = 0$

编码:  $d_2d_1d_0=000$

当 $V_{REF}/15 < v_I < 3V_{REF}/15$ 时,

$$C_2 \sim C_7 = 0$$

**C<sub>1</sub>=1**

编码:  $d_2d_1d_0=001$

当 $3V_{REF}/15 < v_I < 5V_{REF}/15$ 时,

$$C_3 \sim C_7 = 0$$

$C_1 \sim C_2 = 1$

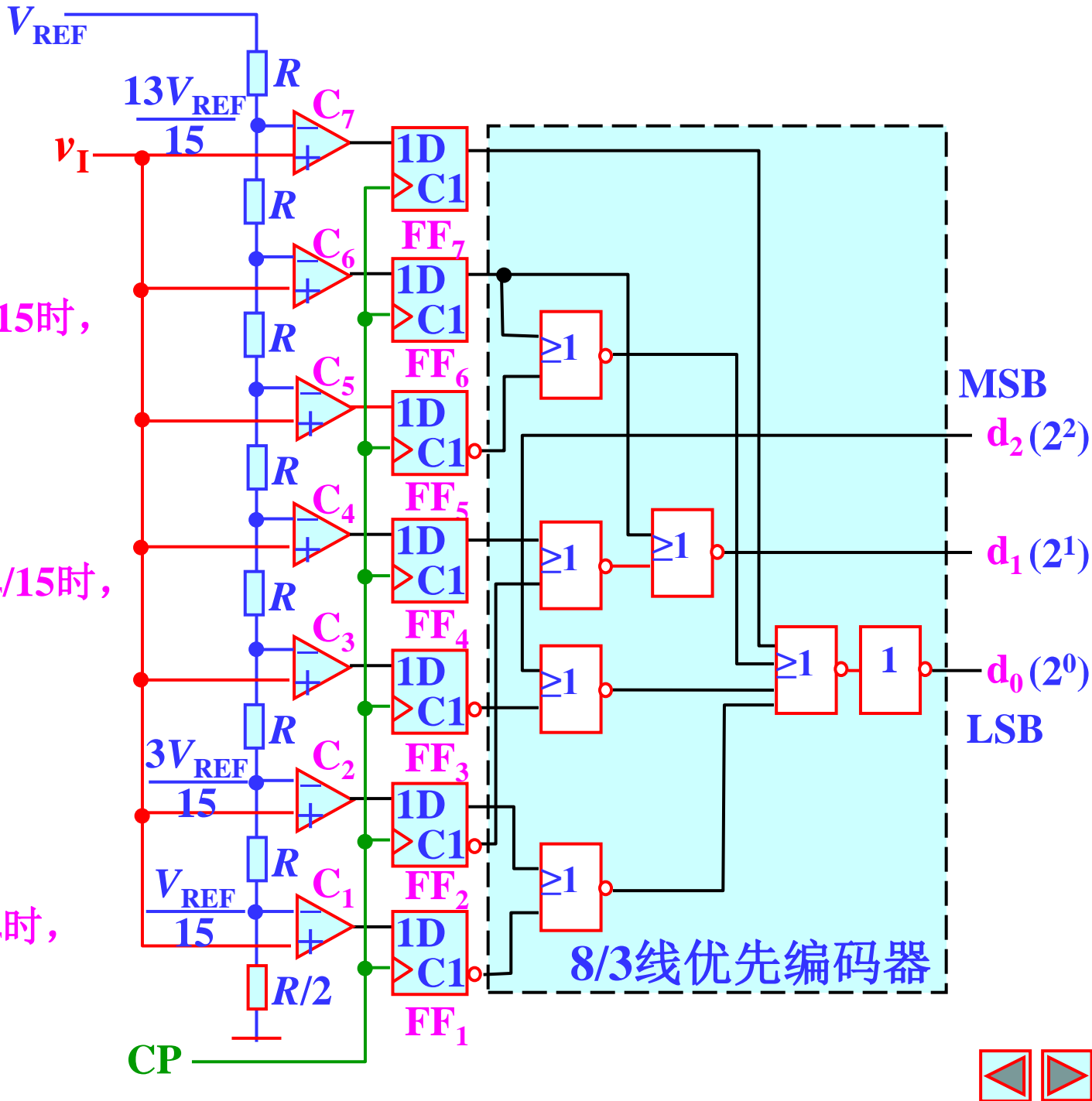
编码:  $d_2d_1d_0=010$

以此类推

当 $13V_{REF}/15 < v_I < V_{REF}$ 时,

$C_1 \sim C_7 = 1$

编码:  $d_2d_1d_0=91$



$v_I$	$C_7C_6C_5C_4C_3C_2C_1$	$d_2d_1d_0$
$(0 \sim 1/15)V_{REF}$	0000000	000
$(1/15 \sim 2/15)V_{REF}$	0000001	001
$(2/15 \sim 3/15)V_{REF}$	0000009	010
$(3/15 \sim 4/15)V_{REF}$	0000091	09
$(4/15 \sim 5/15)V_{REF}$	00099	100
$(5/15 \sim 6/15)V_{REF}$	00991	101
$(6/15 \sim 13/15)V_{REF}$	0999	90
$(13/15 \sim 1)V_{REF}$	9991	91

- 特点：
- 速度快
- 不用附加采样保持电路
- 所用器件多， $n$ 位D/A转换需 $2^n-1$ 个比较器和触发器

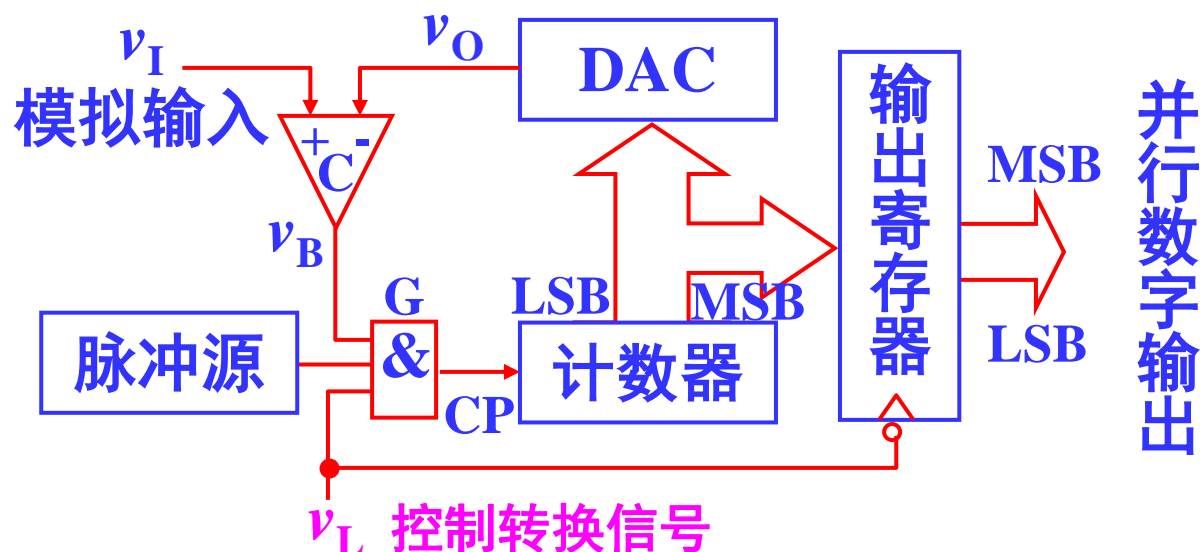


## 二、反馈比较型ADC

**基本思路：**取一个数字量加到D/A转换器上，于是得到一个对应的输出模拟电压。将这个模拟电压和输入的模拟信号电压相比较，如果两者不相等，则调整所取得的数字量，直到两个模拟电压相等为止，最后所取得的数字量就是所求的转换结果。

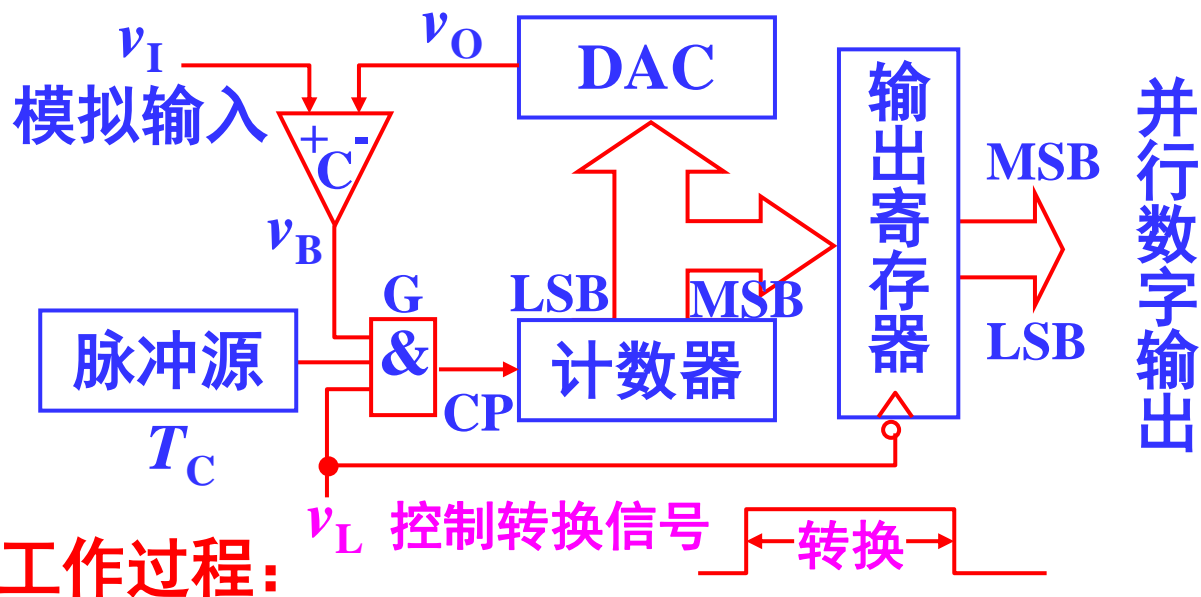
### 1.计数型ADC

#### 方框图



#### 基本原理：

计数器对脉冲源计数，其输出为数字量，该数字量送入DAC，转换为模拟信号 $v_O$ ，与 $v_I$ 比较，若 $v_O < v_I$ ，则计数器继续计数， $v_O$ 增加，直至 $v_O = v_I$ ，计数停止，此时的计数值就是A/D转换结果。



**特点：**  
 电路简单，所用器件不多；  
 转换速度慢， $n$ 位ADC最长的转换时间为  $(2^n - 1)T_C$

**工作过程：**

转换前， $v_L = 0$ ，门G被封锁，计数器不工作，输出为0， $v_O < v_I$ ， $v_B = 1$ 。

转换开始， $v_L = 1$ ，门G打开，计数器计数，计数值增加， $v_O$ 增加。

当 $v_O \geq v_I$ 时， $v_B = 0$ ，门G被封锁，计数器停止计数，这时计数器中所存数字就是所求的输出数字信号。

由于在转换过程中，计数器输出在不停地变化，所以不能将计数器的输出直接作为输出信号，为此，在输出端设置了输出寄存器，在每次转换完成后，用转换信号的下降沿将计数器的输出置入输出寄存器中，而以寄存器的状态作为最终的输出信号。



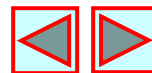


## 2.逐次渐近型ADC

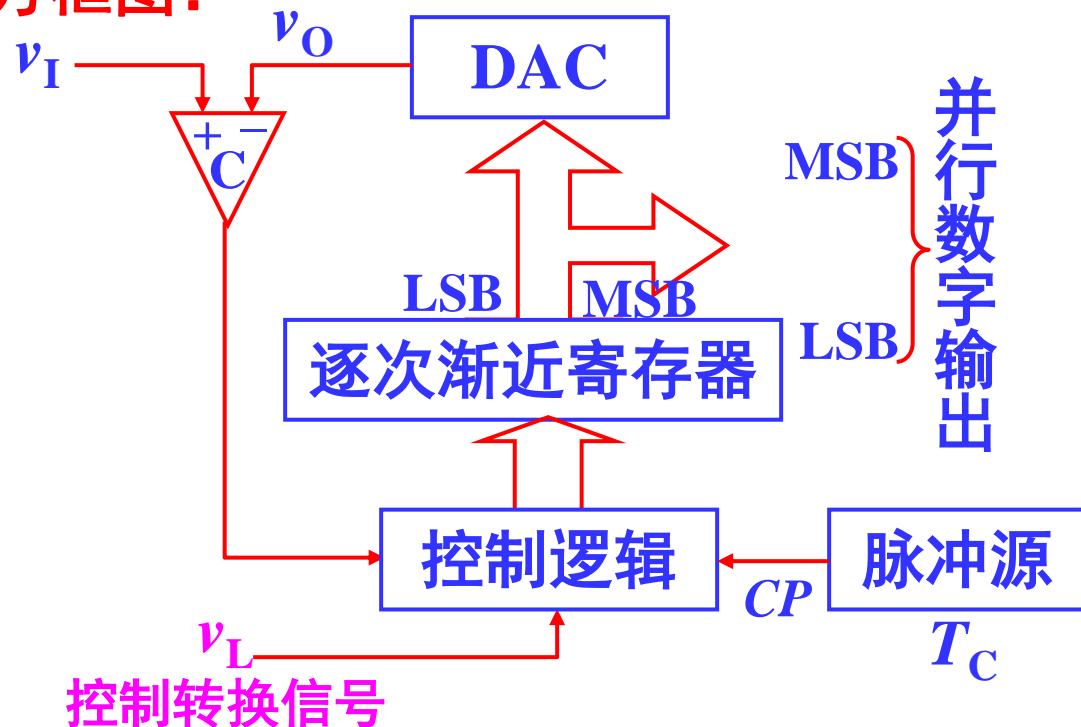
### 基本原理：电平称重

设 $v_I=5.3V$ ,		DAC输入		DAC输出	
最高位置1		100		4V	<5.3V
保留最高位1, 第二位置1		90		6V	>5.3V
去掉第二位1, 第三位置1		101		5V	<5.3V
保留第三位1					

转换结果：101



方框图：



转换时间  $(n+2)T_C$

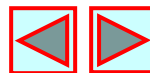
特点：

速度比并联型慢，比计数比较型快。

电路比并联型简单，比计数比较型复杂。

目前使用最多。

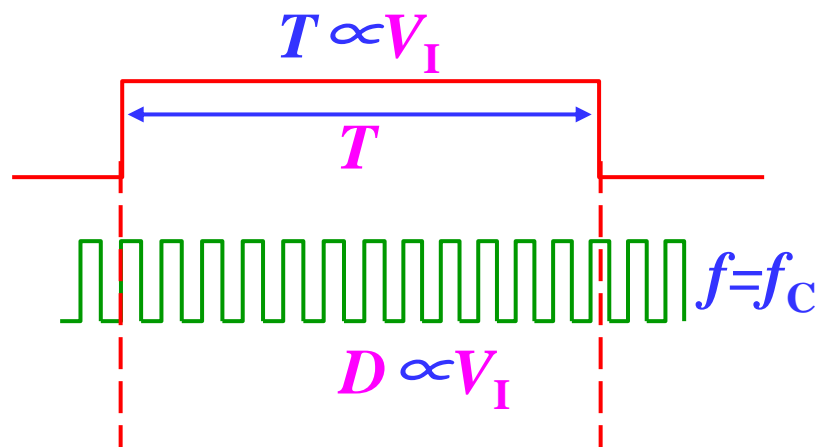
**基本原理：**逐次渐近寄存器在  $v_L$ 、 $CP$  的控制下先输出1000（以四位为例），经D/A转换后输出  $v_O$ ，若  $v_O > v_I$ ，则C输出控制信号使寄存器输出0100；若  $v_O < v_I$ ，则C输出控制信号使寄存器输出900；再经D/A转换后输出  $v_O$ ，若  $v_O > v_I$ ，则C输出控制信号使寄存器去掉第二位1，并使第三位置1，若  $v_O < v_I$ ，则C输出控制信号使寄存器保留第二位1，并使第三位置1，以此类推。



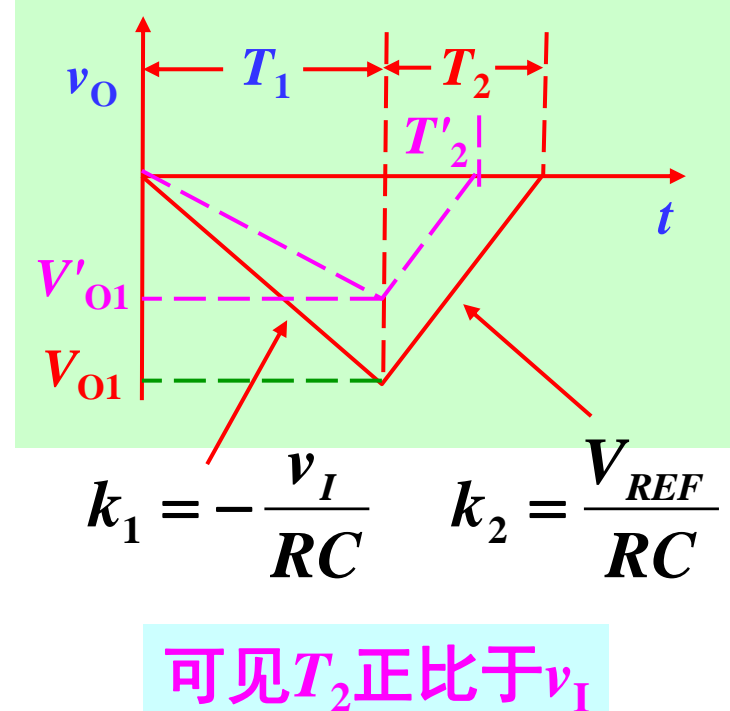
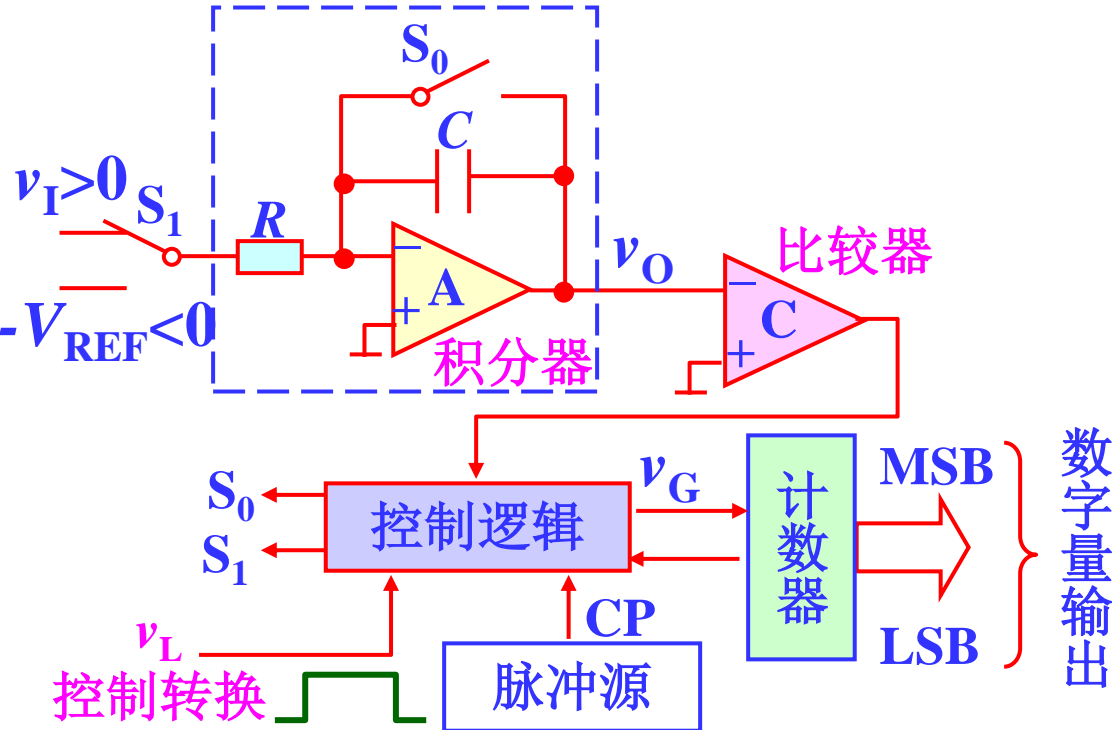
### 9.3.4 间接A/D转换器

#### 一、双积分型

**基本思路：**将电压 $V_I$ 转换成与之成正比的时间 $T$ ，并在此时间内对固定频率的脉冲进行计数，则计数结果 $D$ (正比于电压 $V_I$ )即为转换结果。



例如1V    1ms, 5KHz, 0101  
          2V    2ms, 5KHz, 1010



转换前， $v_L=0$ ，计数器清零， $S_0$ 闭合， $C$ 放完电， $v_o=0$ 。

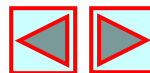
转换开始， $v_L=1$ ， $S_0$ 打开

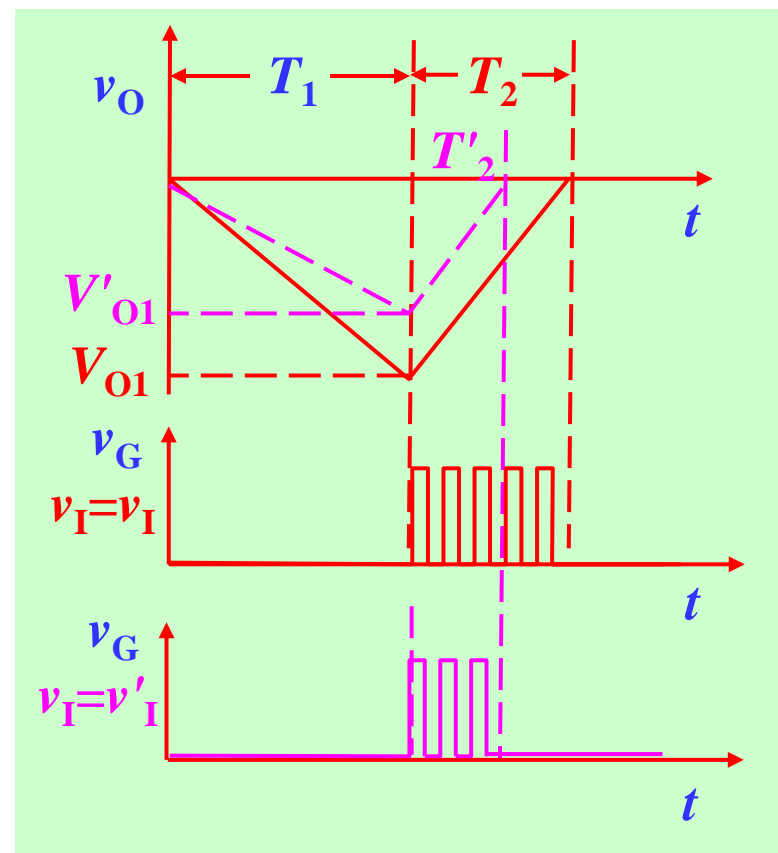
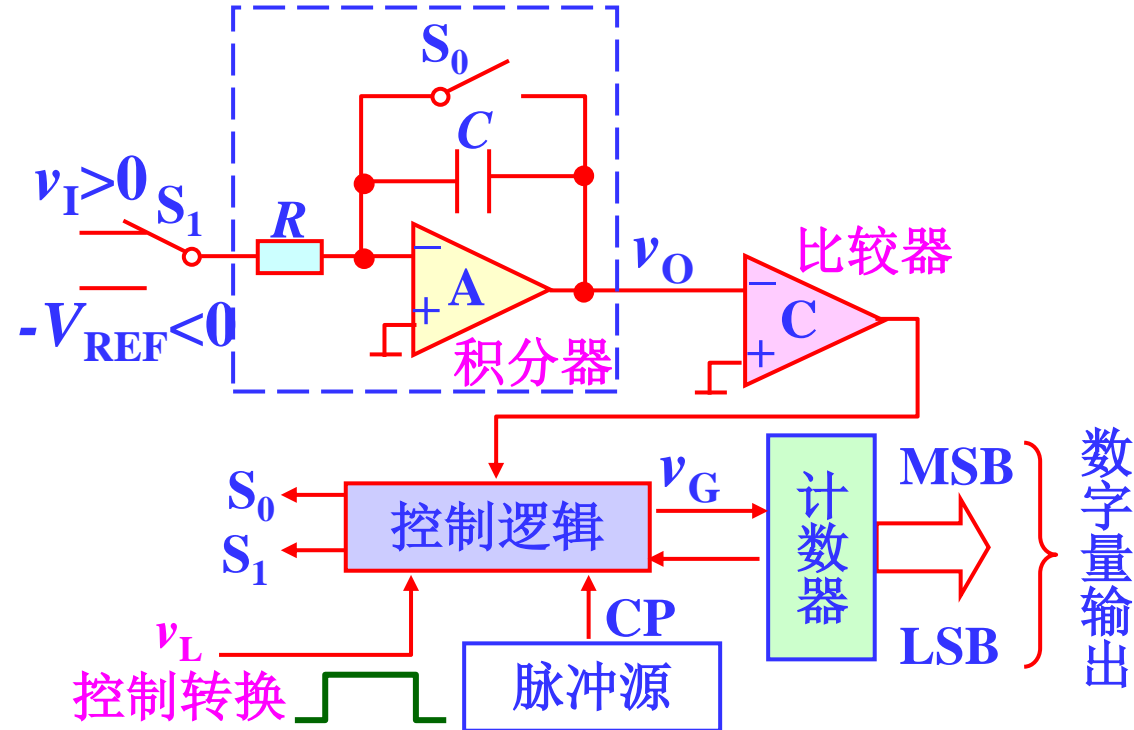
**第一步**， $S_1$ 接 $v_I$ ，积分器对 $v_I$ 积分， $v_o$ 下降，积分时间为固定值 $T_1$

**积分结束：**  $V_{O1} = -\frac{v_I T_1}{RC} \propto v_I$

**第二步**， $S_1$ 接 $-V_{REF}$ ，积分器对 $-V_{REF}$ 积分， $v_o$ 增加， $v_o=0$ 时，比较器输出0，积分结束。

$$T_2 = \frac{|V_{O1}|}{\frac{V_{REF}}{RC}} = \frac{v_I T_1}{RC} \frac{RC}{V_{REF}} = \frac{T_1}{V_{REF}} v_I \propto v_I$$





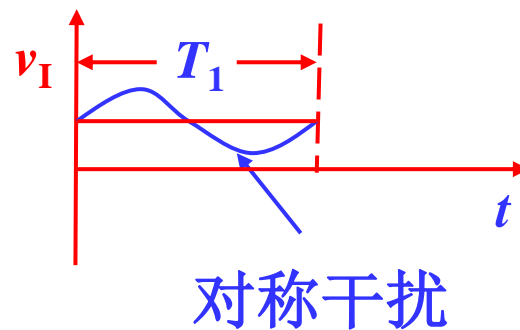
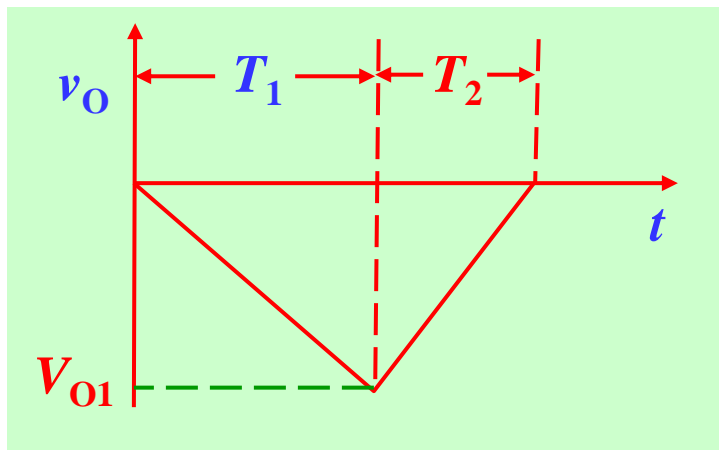
令计数器在 $T_2$ 时间里对频率为 $f_C$ 的脉冲进行计数，

计数值： 
$$D = \frac{T_2}{T_C} = \frac{T_1}{T_C V_{REF}} v_I$$
 可见计数值 $D$ 正比于 $v_I$

若取 $T_1$ 为 $T_C$ 的整数倍，即 $T_1 = NT_C$ ，则 
$$D = \frac{N}{V_{REF}} v_I$$



$$D = \frac{2^n}{V_{REF}} v_I$$



特点:

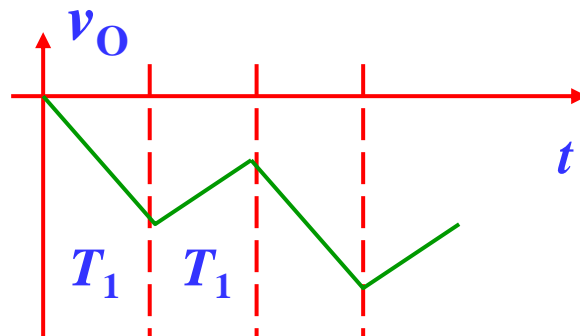
**稳定**  $R$ 、 $C$ 、 $T_C$ 的变化不会影响转换结果

**抗干扰性强** 若 $v_I$ 引进对称干扰, 在 $T_1$ 期间积分值为0, 故 $V_{O1}$ 不变, 转换结果不变。

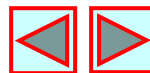
常见干扰为50Hz干扰, 故应取 $T_C$ 为0.02s的整数倍。

**速度慢** 最长积分时间:  $2T_1 = 2^{n+1}T_C$

由此也可得出该电路要求:  $v_I < V_{REF}$

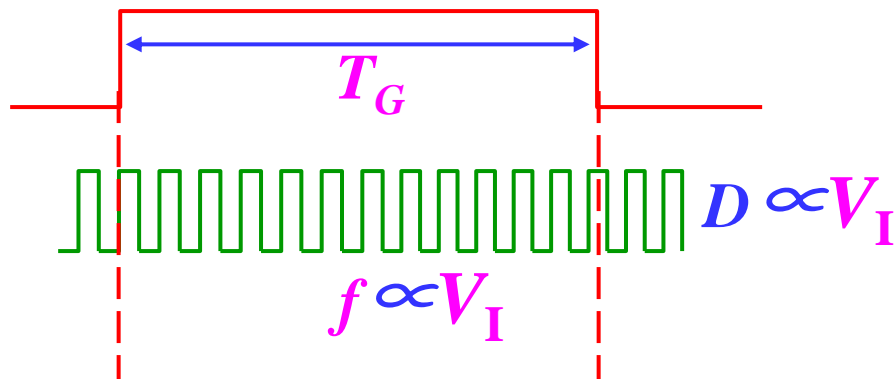
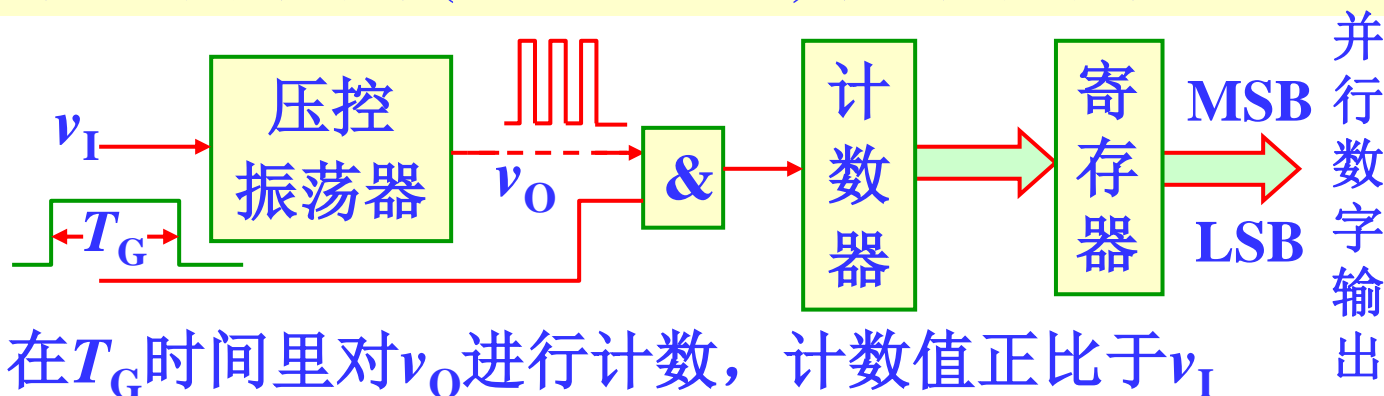


否则计数器计满值时,  $v_O$ 也不会上升到0, 转而又对 $v_I$ 积分



## 二、 $V$ - $F$ 变换型ADC

**基本思路：**将电压 $V$ 转换成与之成正比的频率信号，并在固定时间内对其进行计数，则计数结果(正比于电压 $V$ )即为转换结果。



**特点：**适于遥控遥测系统中，因 $v_O$ 为调频信号，易于远距离传输

转换速度慢

### 9.3.5 A/D转换的转换精度与转换速度

#### 一、转换精度

也采用分辨率和转换误差描述转换精度。

**1.分辨率** 含义：对输入信号的分辨能力。

**定义1：**  $n$

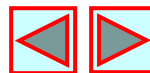
**例：**输入0~5V。

若用**3位**ADC，则输出有8种状态，能分辨出的输入电压的最小差异为 **$5/2^3=0.625\text{V}$** ；

若用**10位**ADC，则输出有1024种状态，能分辨出的输入电压的最小差异为 **$5/2^{10}=0.00488\text{V}$** ；

故 **$n$** 越大，分辨率越高。

**定义2：**  $\frac{FSR}{2^n}$  含义：能分辨出的输入电压的最小差异。

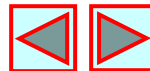




## 2.转换误差

定义1:  $\frac{\text{实际值与理论值的最大偏差}}{1LSB}$

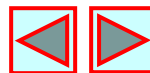
定义2:  $\frac{\text{实际值与理论值的最大偏差}}{FSR} \times 100\%$



## 本章小结

学习本章，应能达到下列要求：

- (1) 掌握下列概念：采样保持，量化编码，分辨率。
- (2) 掌握DAC的分类、组成原则、原理和特点。
- (3) 掌握ADC的分类和特点，掌握并联比较型、计数反馈型、逐次渐近型ADC的组成原则，掌握双积分型ADC的原理和特点
- (4) 了解转换精度和转换速度的概念。



### 9.3.2 取样保持电路

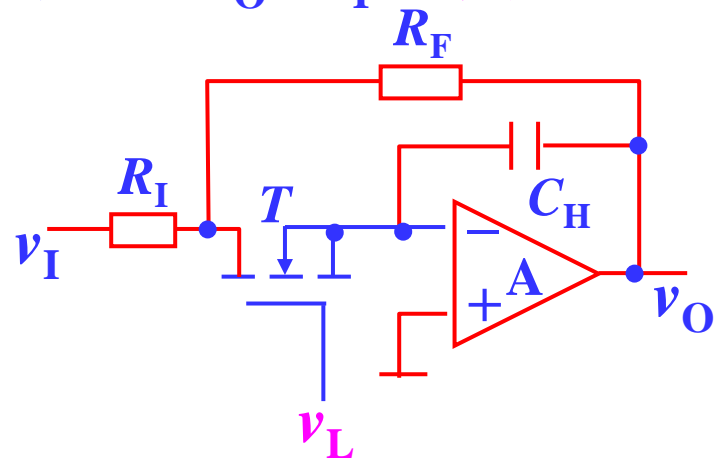
#### 基本形式

$v_L=1$ , T导通, C充电 ( $\tau=R_I C$ ), 充电结束后,  $v_O=-v_I$ , 采样。

$v_L=0$ , T截止, C无放电回路,  $v_O$ 保持。

缺点: 充电速度慢, 限制了采样频率。

改进: 降低 $R_I$ , 并加电压跟随器隔离。



$v_L=1$ , S闭合, C充电 ( $\tau=RC$ ), 充电结束后,  $v_O=v_I$ , 采样。

$v_L=0$ , S打开, C无放电回路,  $v_O$ 保持。

#### 集成采样保持器LF198

