



# 数字电路与逻辑设计

## 第 10 章 数模与模数转换器

张江山

zhangjs@hust.edu.cn

信息工程系



1. 理解倒 T 形电阻网络和集成 D/A 转换器的工作原理
2. 理解并行比较、逐次比较、双积分 A/D 转换器的工作原理
3. 掌握 D/A 和 A/D 转换器的使用方法

### 概述



自然界中的物理量，例如温度、压力、位移等都是模拟量

数字系统只能处理数字信号

模数转换器：把模拟信号转换成数字信号的器件，简称 ADC

输入为模拟量，电压  $v_i$  或电流  $i_i$

输出为与模拟量成比例的  $n$  位二进制数： $D_{n-1}D_{n-2}\cdots D_1D_0$

数模转换器：把数字信号转换成模拟信号的器件，简称 DAC

输入为  $n$  位二进制数  $D$ ： $D_{n-1}D_{n-2}\cdots D_1D_0$

输出与二进制数  $D$  成比例模拟量，电压  $v_o$  或电流  $i_o$

### 10.1 D/A 转换器



$D$  与  $A$  之间的转换特性

理想转换特性  $A$  与  $D$  成正比

$$A = K \cdot D = K \cdot \sum_{i=0}^{n-1} D_i 2^i$$

比例系数  $K$  是常数

理想转换特性曲线， $K = 1$

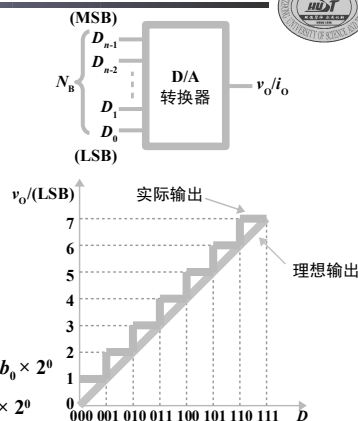
实现 D/A 转换器的基本思想

二进制数  $N_D = (11001)_B$

$$\begin{aligned} N_D &= b_4 \times 2^4 + b_3 \times 2^3 + b_2 \times 2^2 + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0 \\ &= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \end{aligned}$$

每位代码有不同的权值，将每位代码按其权的大小转换成相应的模拟量

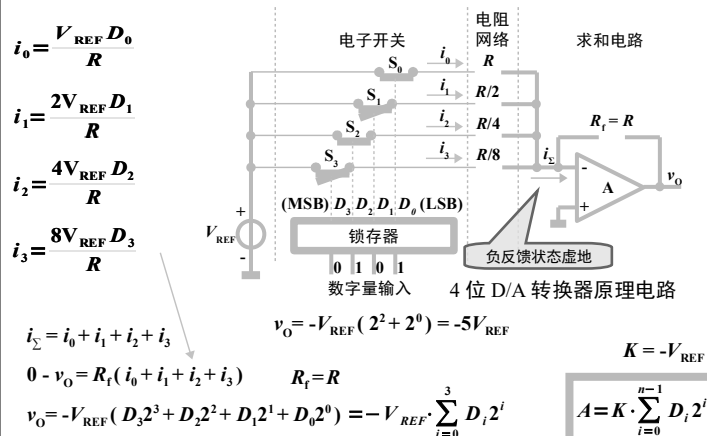
再将这些模拟量相加，即可得到与数字量成正比的模拟量



#### 10.1.1 D/A 转换的基本原理



##### 1. 实现 D/A 转换的基本原理

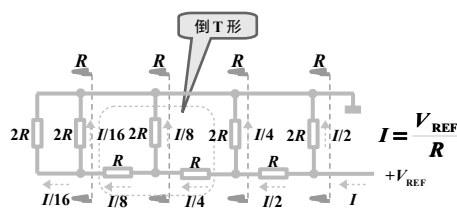


#### 10.1.2 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器



##### 1. 四位倒 T 形电阻网络 D/A 转换器

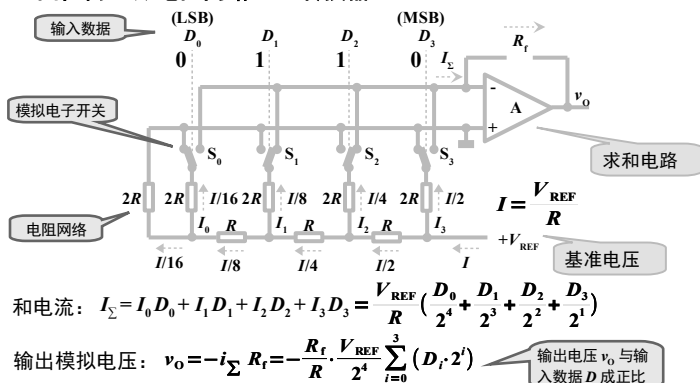
倒 T 形电阻网络



流入每个  $2R$  电阻的电流从高位到低位按 2 的整数倍递减

## 10.1.2 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器

### 1. 四位倒 T 形电阻网络 D/A 转换器

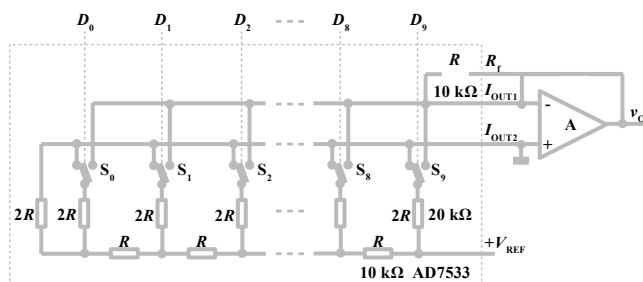


$n$  位倒 T 形电阻网络 D/A 转换器:  $v_o = -\frac{R_f}{R} \cdot \frac{V_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} (D_i \cdot 2^i)$

## 10.1.2 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器

### 2. 集成 D/A 转换器

(1) 10 位并行输入 CMOS 电流开关型 D/A 转换器 AD7533



AD7533 使用说明:

- ① 要外接运放
- ② 运放的反馈电阻可使用内部电阻, 也可采用外接电阻

## 10.1.4 D/A 转换器的输出方式

●DAC 的输出方式有: 单极性输出方式和双极性输出方式两种

●单极性输出: 输入自然二进制数, 输出只为正, 或只为负

设  $V_{REF} = +10 \text{ V}$

$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} (D_i \cdot 2^i)$$

$$V_{LSB} = \pm \frac{V_{REF}}{2^n}$$

$$v_o = V_{LSB} \sum_{i=0}^{n-1} (D_i \cdot 2^i)$$

8 位 DAC 单极性输出的输入 / 输出关系

数字量	模拟量	幅值
11111111	$255 \times V_{LSB}$	9.96 V
...	...	...
10000001	$129 \times V_{LSB}$	5.039 V
10000000	$128 \times V_{LSB}$	5 V
01111111	$127 \times V_{LSB}$	4.96 V
...	...	...
00000001	$1 \times V_{LSB}$	0.039 V
00000000	$0 \times V_{LSB}$	0 V

## 10.1.4 D/A 转换器的输出方式

●双极性输出:

- ◆输入数字量为有符号数
- ◆输入数字量为正时, 输出为正
- ◆输入数字量为负时, 输出为负

8 位 DAC 双极性输出的输入 / 输出关系  
十进制 2 进制补码 模拟量  $V_{REF} = \pm 5 \text{ V}$

127	01111111	$127 V_{LSB}$	4.96 V
126	01111110	$126 V_{LSB}$	4.92 V
...	...	...	...
1	00000001	$1 V_{LSB}$	0.039 V
0	00000000	$0 V_{LSB}$	0 V
-1	11111111	$-1 V_{LSB}$	-0.039 V
...	...	...	...
-127	10000001	$-127 V_{LSB}$	-4.96 V
-128	10000000	$-128 V_{LSB}$	-5 V

## 10.1.4 D/A 转换器的输出方式

采用双极性输出方式的思路:

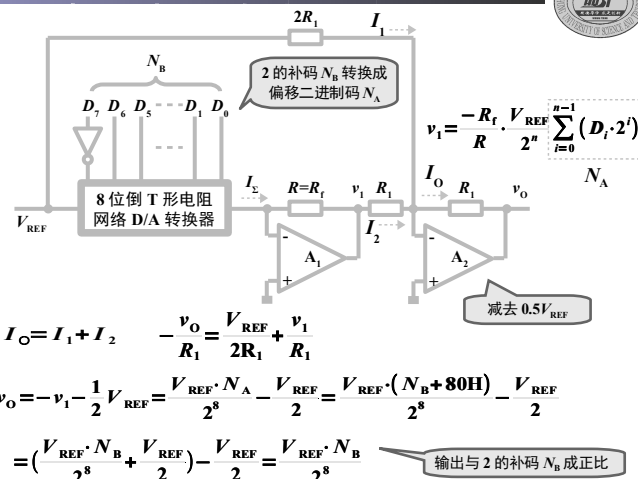
进行单极性 8 位 DA 转换

十进制 偏移二进制码  $N_A$   $V_{REF} = 10 \text{ V}$

十进制	2 的补码 $N_B$	偏移二进制码 $N_A$	模拟量
255	11111111	11111111	9.96 V
254	11111110	11111110	9.92 V
...	...	...	...
129	10000001	10000001	5.039 V
128	10000000	10000000	5 V
127	01111111	01111111	4.96 V
126	01111110	01111110	4.92 V
...	...	...	...
1	00000001	00000001	0.039 V
0	00000000	00000000	0 V
-1	11111111	11111111	-0.039 V
-2	11111110	11111110	-0.078 V
...	...	...	...
-127	10000001	10000001	-4.96 V
-128	10000000	10000000	-5 V

输出减去 80H 对应电压  $0.5 V_{REF}$   
方法: 采用模拟信号加法器

## 10.1.4 D/A 转换器的输出方式



## 10.1.5 D/A 转换器的主要技术指标



### 1. 分辨率

指 DAC 输出电压的等级数，比如  $n$  位 DAC 有  $2^n$  个等级的输出电压

D/A 转换器的位数越多，分辨率越高，实际应用中，往往用输入数字量的位数表示 D/A 转换器的分辨率

### 2. 转换误差

指对于给定的数字量，DAC 实际输出模拟信号与理论值之间的最大偏差

产生原因：由于 DAC 中各元件参数值存在误差，如基准电压不稳定、运放零漂等因素的影响

几种转换误差：比例系数误差、失调误差和非线性误差等

## 10.1.5 D/A 转换器的主要技术指标

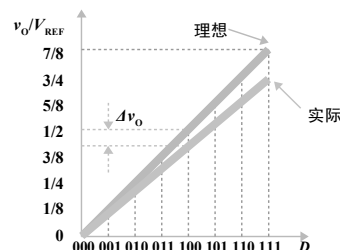


### (1) 比例系数误差

指实际转换特性曲线的斜率与理想特性曲线斜率的偏差

如： $n$  位倒 T 形电阻网络 D/A 转换器，当  $V_{REF}$  偏离标准  $\Delta V_{REF}$  时，在输出端会产生误差电压  $\Delta v_o$

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



## 10.1.5 D/A 转换器的主要技术指标

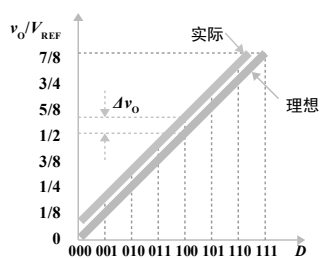


### (2) 失调误差

由运算放大器的零点漂移引起，使输出电压的转移特性曲线发生平移

### (3) 非线性误差

由模拟开关的导通电阻、电阻网络阻值变化引起的误差，一般用最大值表示



## 10.1.5 D/A 转换器的主要技术指标



### 3. 转换速度

当 D/A 转换器输入的数字量发生变化时，输出的模拟量并不能立即达到所对应的量值，它需要一定的延迟时间。通常用建立时间和转换速率两个参数来描述 D/A 转换器的转换速度

建立时间：输入数字量发生变化时，输出电压达到规定误差范围所需要的时间

转换速率：指大信号工作状态下，输出模拟电压的最大变化率（V/μs）

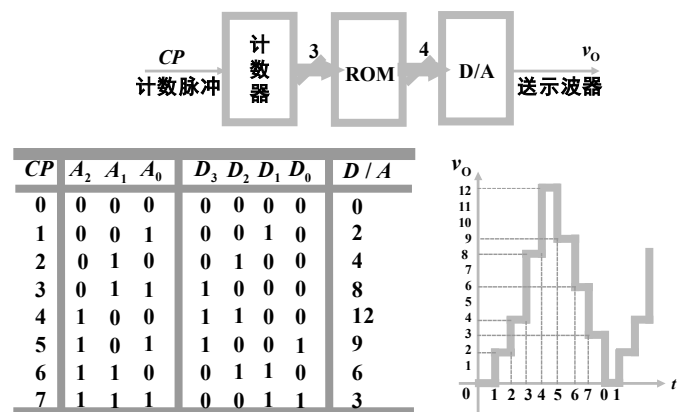
### 4. 温度系数

指输入不变的情况下，输出模拟电压随温度变化产生的变化量

## 10.1.6 集成 D/A 转换器的应用



### D/A 和 ROM 在波形发生器中的应用

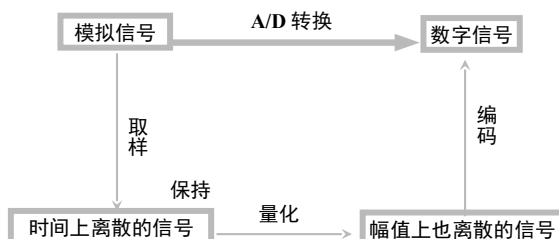


## 10.2 A/D 转换器



ADC 将连续变化的模拟量，转换为时间和幅值都离散的数字量

一般要经过取样，保持，量化及编码 4 个过程



## 10.2.1 A/D 转换的一般工作过程

### 1. 取样与保持

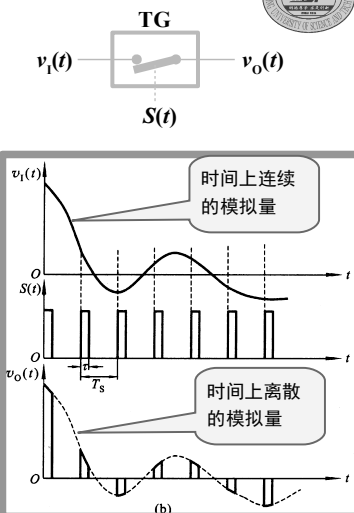
取样电路将随时间连续变化的模拟量转换为在时间离散的模拟量

传输门组成的取样电路

$S(t) = 1$  开关闭合;  $S(t) = 0$  开关断开

采样信号  $S(t)$  的频率愈高, 所采样信号愈能真实地复现输入信号

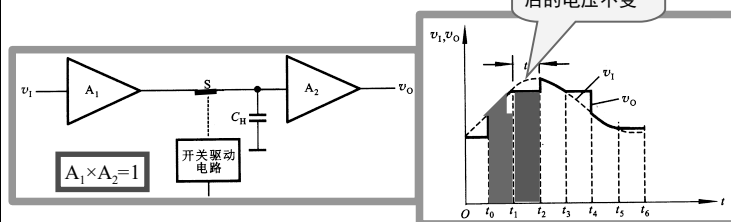
采样定理: 设采样信号  $S(t)$  的频率为  $f_s$ , 输入模拟信号  $v_i(t)$  的最高频率分量的频率为  $f_{\max}$ , 则必须满足下列关系:  
 $f_s \geq 2f_{\max}$



## 10.2.1 A/D 转换的一般工作过程

采样所得到的模拟信号转换为数字信号需要一定时间, 为了给后续的量化编码过程提供一个稳定的值, 取样电路的输出还需要保持一段时间。一般取样和保持过程都是同时完成的

取样和保持的原理图及输出波形如图所示



$t_0 \sim t_1$  时段开关  $S$  闭合, 电路处于取样阶段, 电容充电,  $v_o = v_i$

$t_1 \sim t_2$  时段开关  $S$  断开, 电路处于保持阶段,  $v_o$  保持不变

## 10.2.1 A/D 转换的一般工作过程

### 2. 量化与编码

量化: 数字量在数值上是离散的, 任何数字量只能是某个最小数量单位的整数倍。要实现 A/D 转换, 还必须将采样 - 保持电路的输出电压表示为最小数量单位的整数倍, 此过程叫量化。最小数量单位  $\Delta$  称为量化单位,  $\Delta$  是数字信号为 1 时所对应的模拟值, 即 1LSB

量化误差: 被取样电压是连续的, 其值不一定能被  $\Delta$  整除, 所以量化后一定存在误差, 称为量化误差, 用  $\epsilon$  表示。量化误差属原理误差, 无法消除。ADC 位数越多, 1LSB 所对应的  $\Delta$  值越小, 量化误差越小

量化的方法: 一般有舍尾取整法和四舍五入法

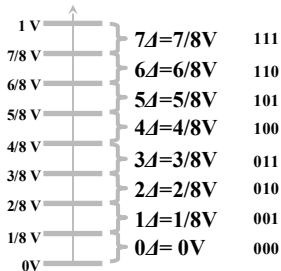
编码: 量化后的数值最后还需通过编码过程用一个代码表示出来。经编码后得到的代码就是 A/D 转换器输出的数字量

## 10.2.1 A/D 转换的一般工作过程

例: 将 0 ~ 1 V 电压量化为 3 位数字量, 量化单位  $\Delta = 1 \text{ LSB} = 1/8 \text{ V}$

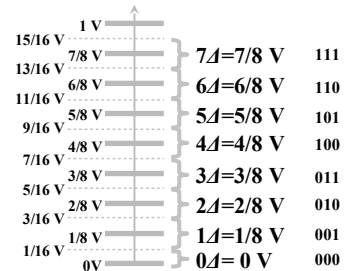
(1) 舍尾取整法

输入电压 量化单位的倍数 编码



(2) 四舍五入法

输入电压 量化单位的倍数 编码



最大量化误差为:  $|e_{\max}| = 1 \text{ LSB} = 1/8 \text{ V}$   $|e_{\max}| = 0.5 \text{ LSB} = 1/16 \text{ V}$

四舍五入法量化误差小, 为大多数 A/D 转换器采用

## 10.2.2 并行比较 A/D 转换器

### 电路原理

3 位并行比较型 A/D 转换器

$$\Delta = \frac{1}{8} V_{\text{REF}}$$

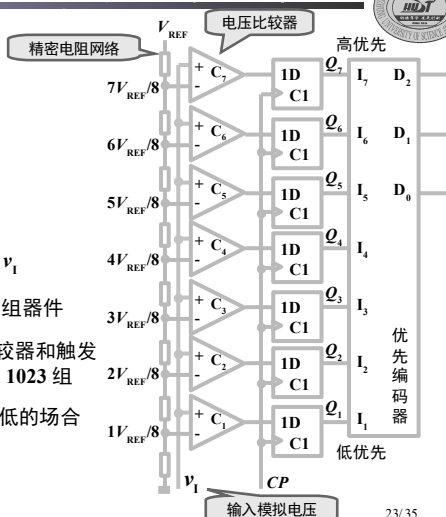
### 特点

速度快: 同时比较输入电压  $v_i$

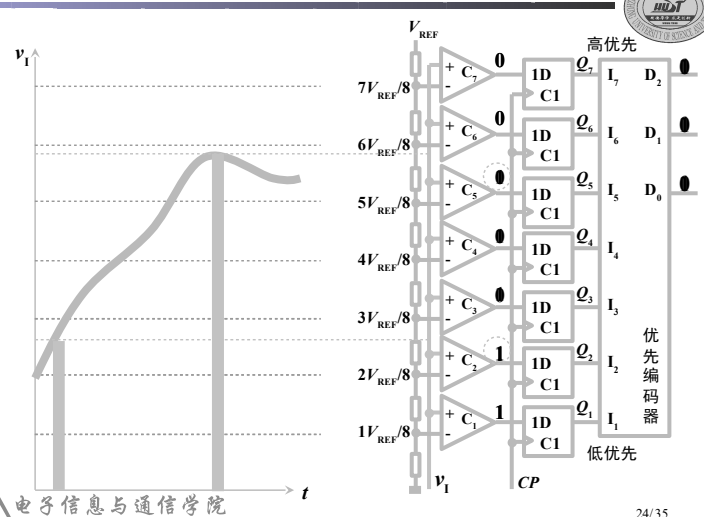
电路复杂:  $n$  位输出需  $2^n - 1$  组器件

如 3 位 ADC 需  $2^3 - 1 = 7$  组比较器和触发器等器件, 10 位 ADC 则需 1023 组

应用场合: 速度快, 分辨率低的场合



## 10.2.2 并行比较 A/D 转换器



10.2.3 逐次比较型 A/D 转换器

1. 转换原理

逐次逼近转换过程与用天平称物重非常相似  
所用砝码重量：8 克、4 克、2 克和 1 克  
设待称重量  $W_x = 13$  克

二分测重法：每次增减半数的剩余量程进行测重

次数	砝码重量	分析	结果
第 1 次	8 克	砝码总重 < 待测重量 $W_x$ ，8 克砝码保留	8 克
第 2 次	再加 4 克	砝码总重 < 待测重量 $W_x$ ，4 克砝码保留	12 克
第 3 次	再加 2 克	砝码总重 > 待测重量 $W_x$ ，2 克砝码撤除	12 克
第 4 次	再加 1 克	砝码总重 = 待测重量 $W_x$ ，1 克砝码保留	13 克

10.2.3 逐次比较型 A/D 转换器

1. 转换原理

$v_i = 6.84\text{ V}$ ， $V_{REF} = 10\text{ V}$

模拟量输入

$6.84\text{ V}$

$v_i$

$v_o$

电压比较器

启动脉冲

时钟

控制逻辑

移位寄存器

数据寄存器

$D_7$

$D_6$

$D_5$

$D_4$

$D_3$

$D_2$

$D_1$

$D_0$

数字量输出

$v_o/V$

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

转换时间：80 us

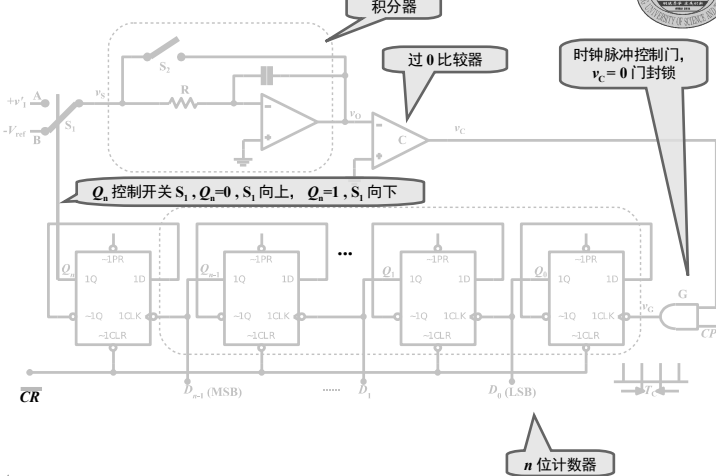
26/35

转换结果： $D = 10101111$

转换时间： $80\text{ us}$  ( $T_{CP} = 10\text{ us}$ )

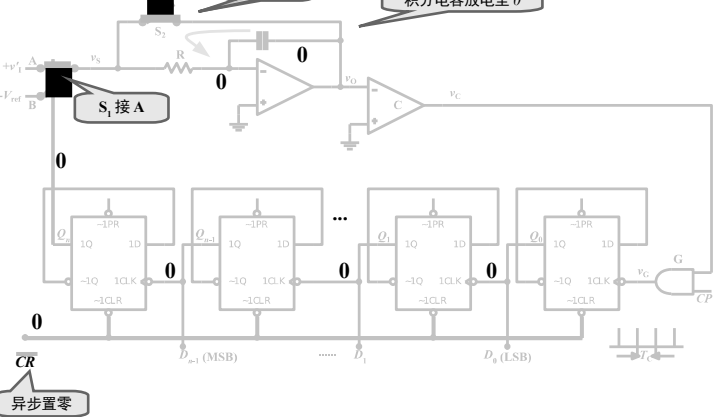
$n$  位输出转换一次需  $n$  个时钟周期

10.2.4 双积分式 A/D 转换器



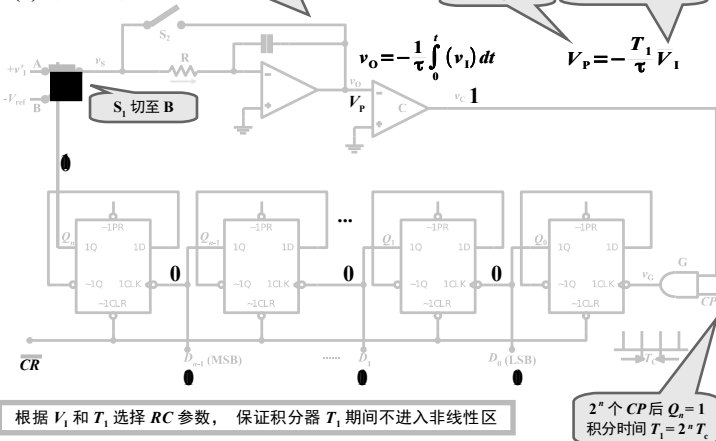
10.2.4 双积分式 A/D 转换器

(1) 准备阶段



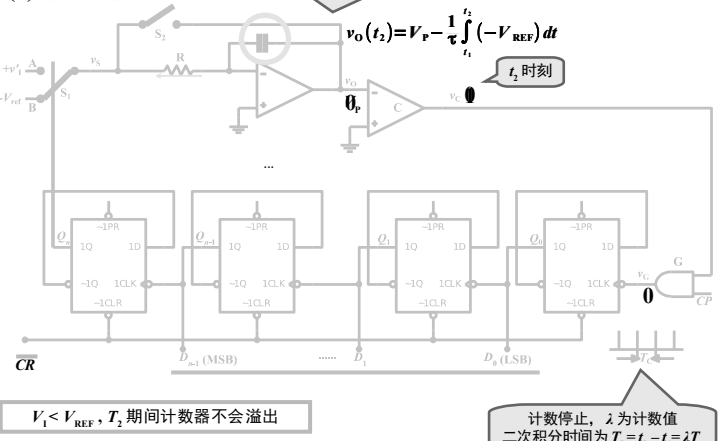
10.2.4 双积分式 A/D 转换器

(2) 第一次积分阶段



10.2.4 双积分式 A/D 转换器

(3) 第二次积分阶段





## 10.2.4 双积分式 A/D 转换器

第一积分时间  $T_1 = 2^n T_C$   $V_P = -\frac{T_1}{T} V_1$

第二积分时间  $T_2 = \lambda T_C$ ， $\lambda$  为计数值

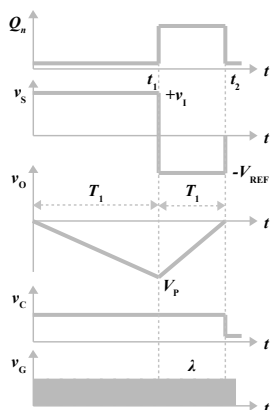
$$v_O(t_2) = V_P - \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (-V_{REF}) dt = 0$$

$$V_P = -\frac{V_{REF} T_2}{T} - \frac{T_1}{T} V_1 = -\frac{V_{REF} T_2}{T}$$

$$V_1 T_1 = V_{REF} T_2 \quad V_1 = \frac{T_2}{T_1} V_{REF}$$

$T_2$  与  $V_1$  成正比， $V_1$  转换成了时间间隔  $T_2$

$$V_1 = \frac{\lambda}{2^n} V_{REF} \quad \text{读出 } \lambda, \text{ 则计算出 } V_1$$



31/35

## 10.2.4 双积分式 A/D 转换器

### 双积分型 A/D 转换器的基本原理小结

- 是间接 A/D 转换器，采用积分电路，转换速度慢
- 将输入信号的平均值变换为成正比的时间间隔，故有很强的抗工频干扰能力
- 在此时间间隔内计数，得到数字量，故结果与 RC 值无关，避免非线性误差
- 第 1 次积分：积分器初值为 0，对  $v_1$  积分，积分时间为  $T_1 = 2^n T_C$   
 $v_1$  的平均值  $V_1$  越大，积分电压  $V_P$  越大
- 第 2 次积分：积分器初值为  $V_P$ ，对  $-V_{REF}$  积分，至积分器为 0，在积分过程中进行计数，输出计数值  $\lambda$   
 $v_1$  的平均值  $V_1$  越大， $V_P$  越大，第 2 次积分时间越长， $\lambda$  越大，即  $\lambda$  与  $v_1$  的平均值  $V_1$  成正比

32/35

## 10.2.5 A/D 转换器的主要技术指标

### 1. 转换精度

由分辨率和转换误差决定

分辨率：A/D 转换器对输入信号的分辨能力，以输出数字量的位数表示

转换误差：A/D 转换器实际输出的数字量和理论值之间的差异

### 2. 转换时间

指 A/D 转换器从转换控制信号有效开始，至输出稳定的数字信号的用时

A/D 转换器的转换时间与转换电路的类型有关

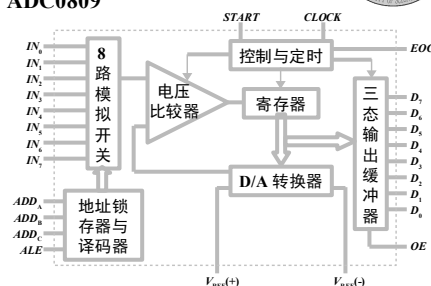
并行比较 A/D 转换器 (8 位)	< 50ns	速度最快
逐次比较型 A/D 转换器	10 ~ 50us	速度适中
间接 A/D 转换器	10ms ~ 1000ms	速度最慢

33/35

## 10.2.6 集成 A/D 转换器及其应用

### 8 位并行输出 A/D 转换芯片 ADC0809

- $IN_0 \sim IN_7$ ，8 路模拟电压输入端
- $ADD_A \sim ADD_C$  模拟输入通道地址线
- $ALE = 1$  地址输入有效
- $CLK$  时钟脉冲输入端
- $D_7 \sim D_0$ ，8 位数据输出端
- $V_{REF(+)}$ ， $V_{REF(-)}$  参考电压



- $START \uparrow$  将内部寄存器清 0，下降沿开始进行 A/D 转换
- $OE$  输出允许端  $OE = 1$ ，打开三态输出缓冲门，输出转换数据
- $EOC$  转换结束输出信号

34/35

## 10.2.6 集成 A/D 转换器及其应用

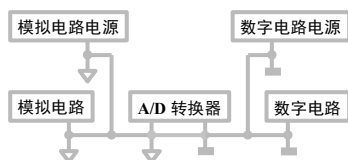
### 应用注意事项

- (1) 各信号的时序配合
- (2) 零点和满刻度调节
- (3) 参考电压的调节
- (4) 接地

模数混合电路中要注意正确连接地线，否则干扰严重

A/D，D/A 及采样保持芯片都提供了独立的模拟地 (AGND) 和数字地 (DGND)

在线路中必须将所有器件的模拟地和数字地分别相连，仅在一处将其相连



35/35