



第八章 数-模和模-数转换

本章目录

- 8.1 概述
- 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理
- 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度
- 8.4 A/D转换的基本原理
- 8.5 取样-保持电路
- 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理
- 8.7 A/D转换器的转换精度与转换速度

§ 8.1 概述



一、数-模转换

– 定义：从数字信号到模拟信号的转换称为数-模转换，简称为D/A转换。

– 实现D/A转换的电路称为D/A转换器，简称为DAC。

二、模-数转换

– 定义：从模拟信号到数字信号的转换称为模-数转换，简称为A/D转换。

– 实现A/D转换的电路称为A/D转换器，简称为ADC。

三、衡量DAC和ADC性能的指标

– 转换精度

– 转换速度



四、D/A转换器的分类

1 电流求和型

- 权电阻网络D/A转换器
- 倒T形电阻网络D/A转换器
- 权电流型D/A转换器

*2 分压器型

- 开关树型D/A转换器
- 权电容网络D/A转换器



五、A/D转换器的分类

1 直接A/D转换器

- 并联比较型A/D转换器
- 逐次逼近型A/D转换器

2 间接A/D转换器

- 双积分型A/D转换器
- V-F变换型A/D转换器

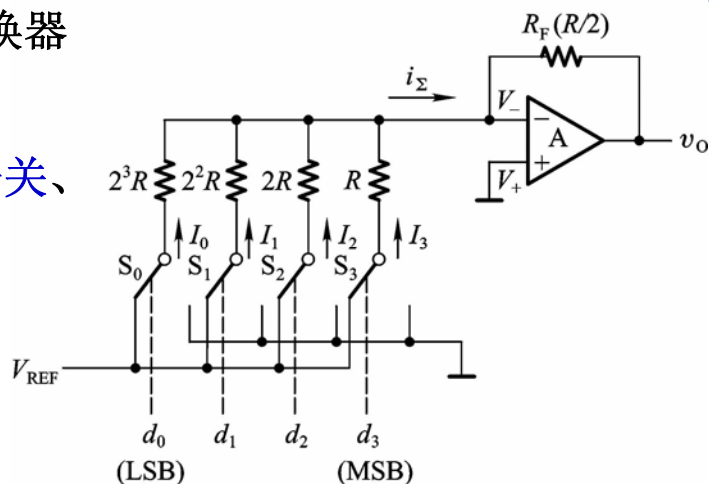
§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理



8.2.1 权电阻网络D/A转换器

一、电路结构

由权电阻网络、模拟开关、求和放大器组成



二、工作原理

权电流:

$$I_3 = \frac{V_{REF}}{R} d_3 \quad \left(d_3 = 1 \text{ 时 } I_3 = \frac{V_{REF}}{R}, d_3 = 0 \text{ 时 } I_3 = 0 \right)$$

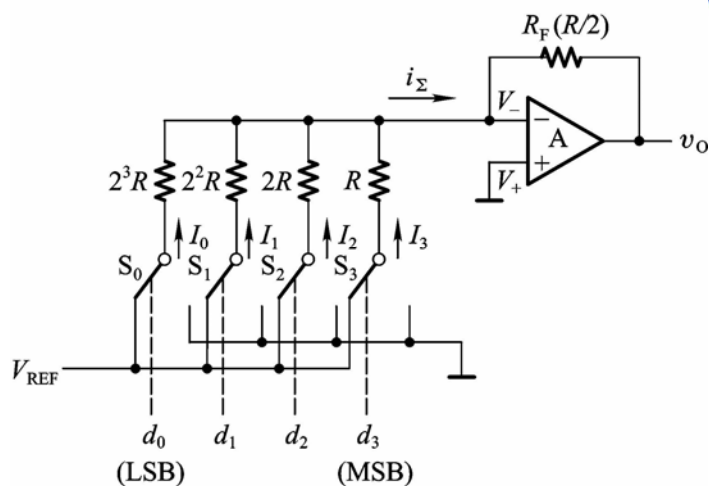
$$I_2 = \frac{V_{REF}}{2R} d_2; \quad I_1 = \frac{V_{REF}}{2^2 R} d_1; \quad I_0 = \frac{V_{REF}}{2^3 R} d_0$$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

5

§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理



输出电压:

$$\begin{aligned} v_O &= -R_F i_\Sigma \\ &= -R_F (I_3 + I_2 + I_1 + I_0) \\ &= -R_F \left(\frac{V_{REF}}{R} d_3 + \frac{V_{REF}}{2R} d_2 + \frac{V_{REF}}{2^2 R} d_1 + \frac{V_{REF}}{2^3 R} d_0 \right) \\ &= -\frac{V_{REF}}{2^4} (2^3 d_3 + 2^2 d_2 + 2^1 d_1 + 2^0 d_0) \end{aligned}$$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

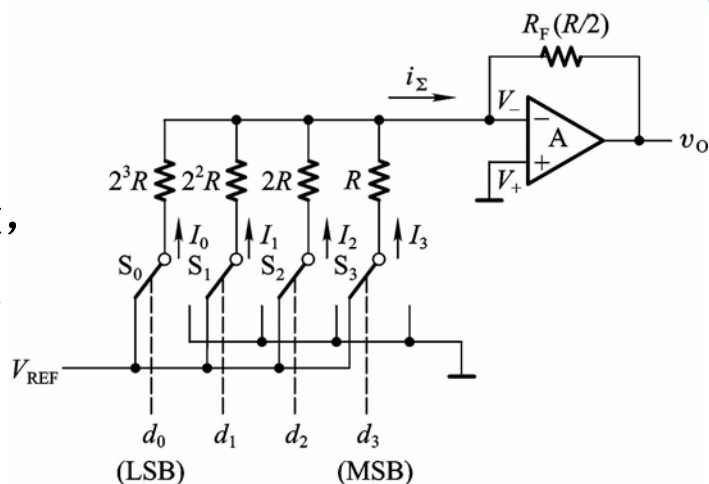
6

§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理



*优缺点:

- 1 优点: 结构简单
- 2 缺点: 电阻值相差大, 很难保证精度



对 n 位输入, 有

$$v_O = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \cdots + d_12^1 + d_02^0) = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n$$

$$D_n \text{ 范围为 } 0 \sim 2^n - 1, \quad v_O = 0 \sim -\frac{2^n - 1}{2^n} V_{REF}$$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

7

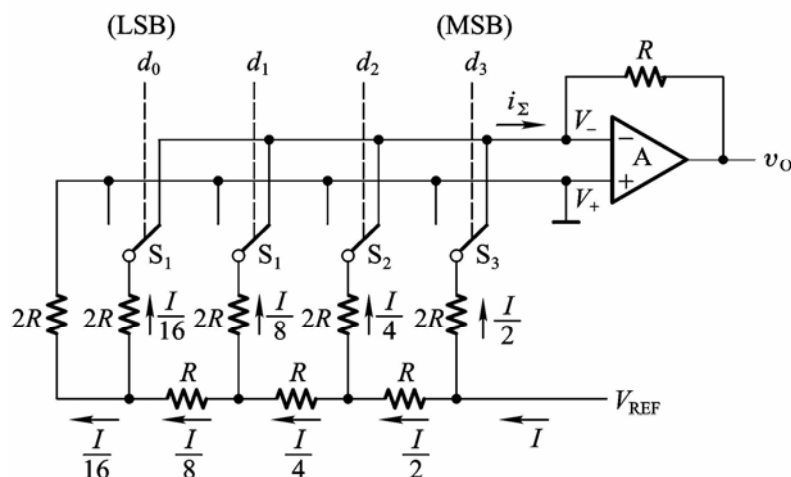
§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理



8.2.2 倒T形电阻网络D/A转换器

一、电路结构

由倒T形电阻网络、模拟开关、求和放大器组成



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

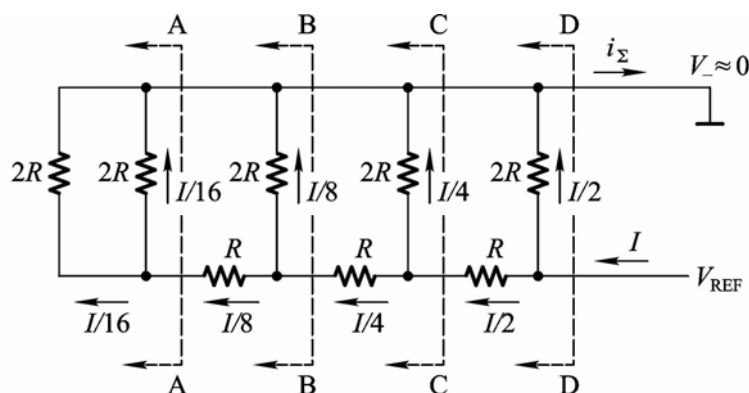
8

§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理



二、工作原理

计算倒T形电阻网络支路电流的等效电路



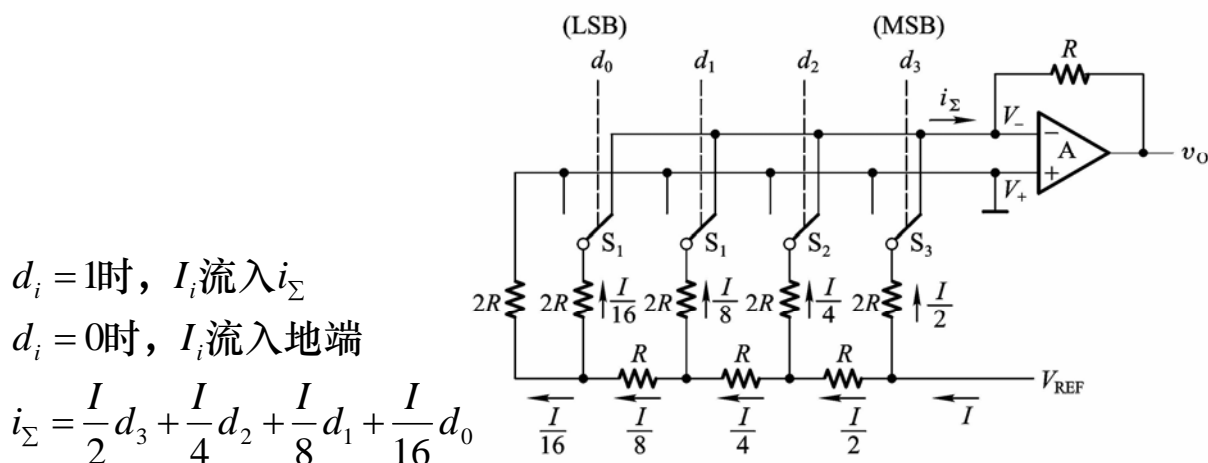
$$I = \frac{V_{REF}}{R}$$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

9

§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理



$d_i = 1$ 时, I_i 流入 i_Σ

$d_i = 0$ 时, I_i 流入地端

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

$$v_O = -Ri_\Sigma = -R \frac{V_{REF}}{R} \frac{1}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) = -\frac{V_{REF}}{2^4} D_4$$

对 n 位输入, 有

$$v_O = -Ri_\Sigma = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1} 2^{n-1} + d_{n-2} 2^{n-2} + \cdots + d_1 2^1 + d_0 2^0) = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n$$

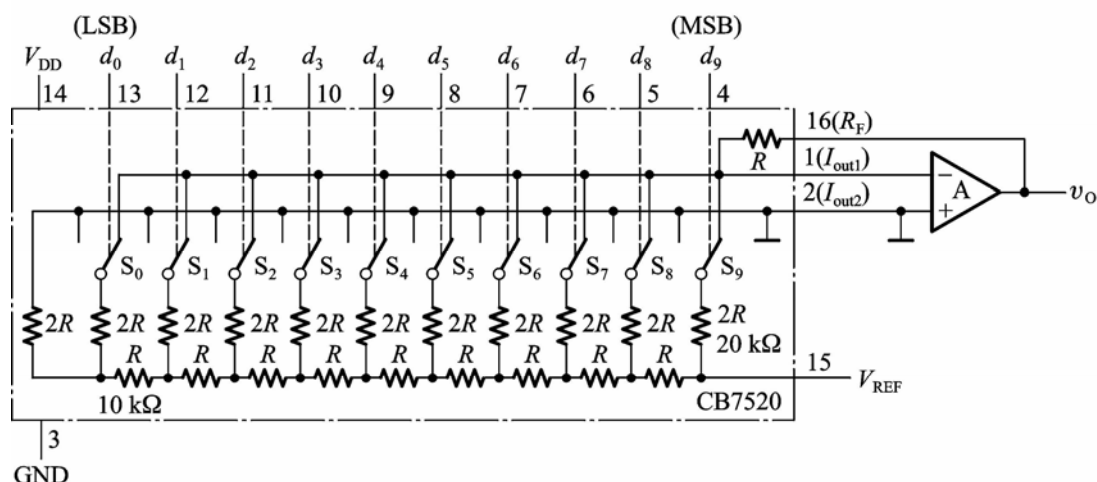
2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

10

§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理

实例：AD7520



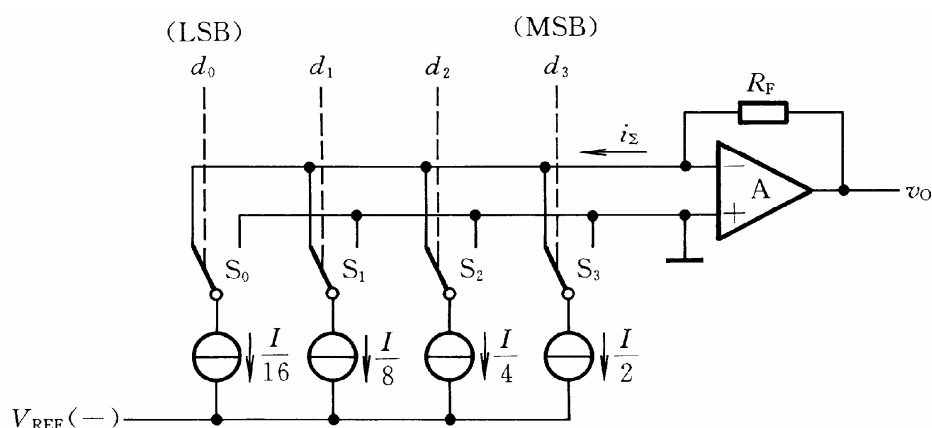
使用：(1)要外接运放；

(2) 运放的反馈电阻可使用内部电阻，也可外接电阻

选择 $R_F = R$, 输出电压为：
$$v_O = -\frac{V_{REF}}{2^{10}} (2^9 d_9 + 2^8 d_8 + \cdots + 2^1 d_1 + 2^0 d_0)$$

§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理

8.2.3 权电流型D/A转换器



$$\begin{aligned} v_O &= R_F i_\Sigma = R_F \left(\frac{I}{2} d_3 + \frac{I}{4} d_2 + \frac{I}{8} d_1 + \frac{I}{16} d_0 \right) \\ &= \frac{R_F I}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) \end{aligned}$$



§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理

8.2.6 具有双极性输出的DAC

一、基本原理

例：输入为3位二进制补码。最高位为符号位

补码输入			对应的 十进制数	要求的 输出电压	绝对值输入			无偏移时 的输出	偏移-4V 后的输出
d_2	d_1	d_0			d_2	d_1	d_0		
0	1	1	+3	+3V	1	1	1	+7V	+3V
0	1	0	+2	+2V	1	1	0	+6V	+2V
0	0	1	+1	+1V	1	0	1	+5V	+1V
0	0	0	0	0V	1	0	0	+4V	0V
1	1	1	-1	-1V	0	1	1	+3V	-1V
1	1	0	-2	-2V	0	1	0	+2V	-2V
1	0	1	-3	-3V	0	0	1	+1V	-3V
1	0	0	-4	-4V	0	0	0	0V	-4V

*将符号位反相后接高位输入；将输出偏移 -4V

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

13



§ 8.2 D/A转换器的电路结构和工作原理

二、电路实现

*将符号位反相后接高位输入

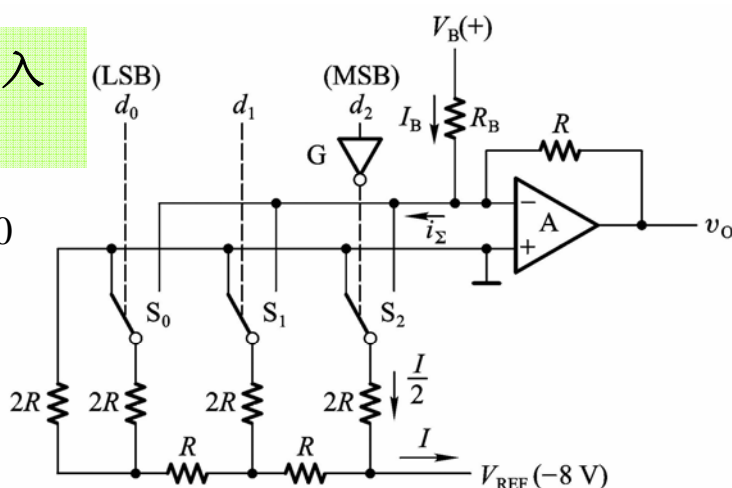
*将输出偏移 -4V

偏移 -4V, 输入为100时, $v_o = 0$

$$\therefore \text{输入100时, } i_{\Sigma} = \frac{I}{2} = \frac{|V_{REF}|}{2R}$$

$$I_B = \frac{V_B}{R_B}$$

$$\text{令 } I_B = i_{\Sigma}, \text{ 即 } \frac{V_B}{R_B} = \frac{I}{2} = \frac{|V_{REF}|}{2R}$$



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

14

§ 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度



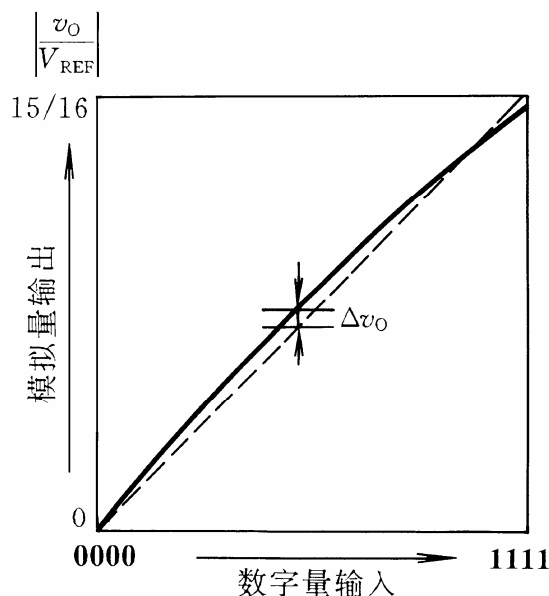
8.3.1 D/A转换器的转换精度

1. 分辨率（理论精度）

- 用输入二进制数码的位数给出
- n 位DAC,能区分出输入的 $00\cdots0$ 到 $11\cdots1$ 全部 2^n 个不同状态,给出 2^n 个不同等级的输出电压

2. 转换误差（实际精度）

- 实际的D/A转换特性和理想转换特性之间的最大偏差
- 用最低有效位的倍数来表示
- 有时也用输出电压满刻度FSR的百分数来表示



2022-9-9

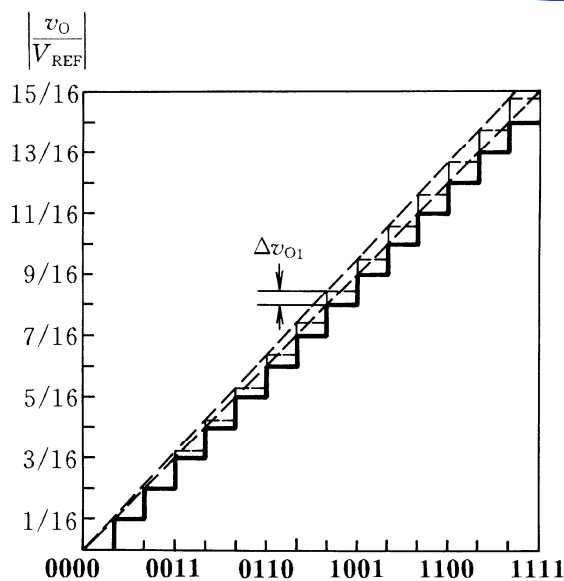
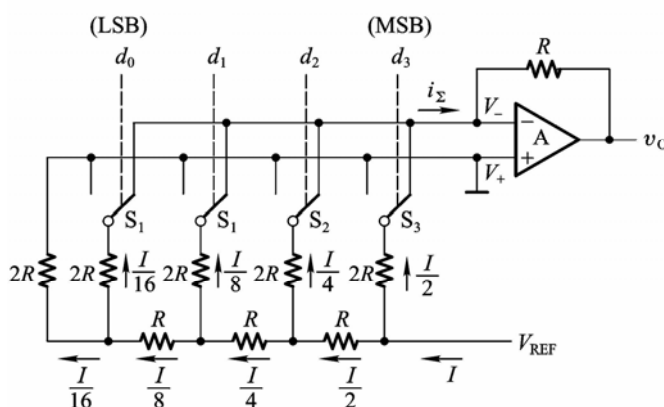
第八章 数-模和模-数转换

15

§ 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度



● 误差分析



(1) 比例系数误差

$$\Delta V_{REF} \text{ 引起的误差: } v_O = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n \Rightarrow \Delta v_{O1} = -\frac{\Delta V_{REF}}{2^n} D_n$$

2022-9-9

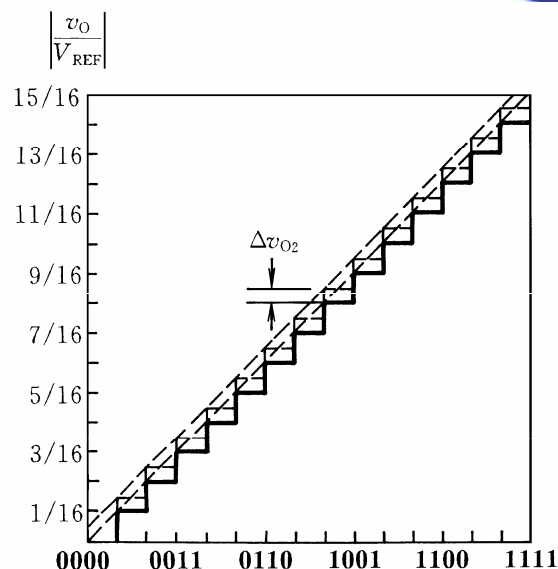
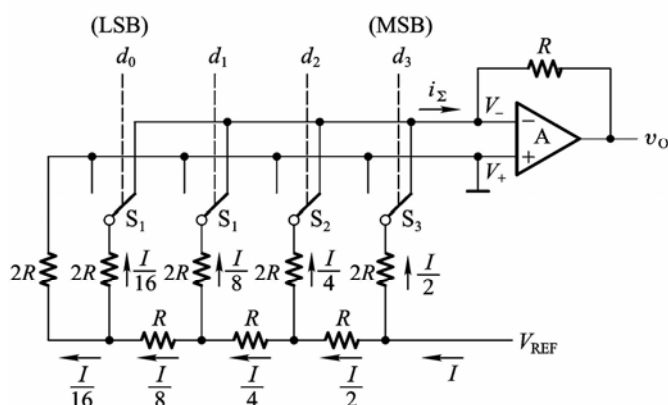
第八章 数-模和模-数转换

16

§ 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度



● 误差分析



(2) 漂移误差

由运放零点漂移导致的曲线漂移

2022-9-9

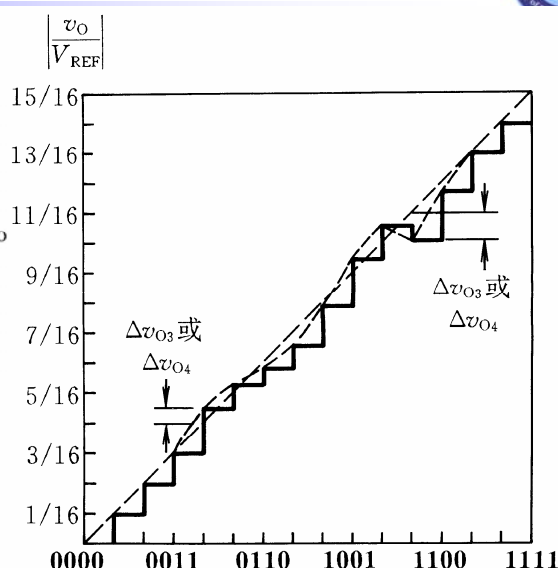
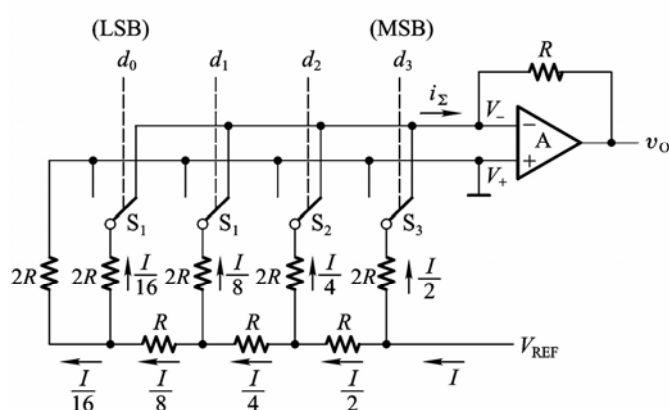
第八章 数-模和模-数转换

17

§ 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度



● 误差分析



(3) 非线性误差

模拟开关的导通内阻和导通压降不为0, 电阻网络阻值的偏差

* 总误差: $|\Delta v_O| = |\Delta v_{O1}| + |\Delta v_{O2}| + |\Delta v_{O3}| + |\Delta v_{O4}|$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

18

§ 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度



例：AD7520(10位倒T形DAC)中，外接参考电压 $V_{REF} = -10\text{V}$ ，为保证由 V_{REF} 偏差引起的误差 $< \frac{1}{2}LSB$ ，试求 V_{REF} 的相对稳定度 $(\frac{|\Delta V_{REF}|}{|V_{REF}|})$ 。

解：*由 ΔV_{REF} 产生的偏差 Δv_O ： $\Delta v_O = -\frac{\Delta V_{REF}}{2^n} D_n$ ，

最大误差时 $D_n = 2^n - 1$

最大误差： $|\Delta v_O| = \frac{2^{10} - 1}{2^{10}} |\Delta V_{REF}|$

* $\frac{1}{2}LSB$ 对应的输出电压：

$\because v_O = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n$ ， $\therefore D_n = 1$ 时， $v_O = -\frac{V_{REF}}{2^{10}}$

$\frac{1}{2}LSB$ 对应的输出电压绝对值为： $\frac{|V_{REF}|}{2^{11}}$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

19

§ 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度



例：AD7520(10位倒T形DAC)中，外接参考电压 $V_{REF} = -10\text{V}$ ，为保证由 V_{REF} 偏差引起的误差 $< \frac{1}{2}LSB$ ，试求 V_{REF} 的相对稳定度 $(\frac{|\Delta V_{REF}|}{|V_{REF}|})$ 。

要求 $\frac{2^{10} - 1}{2^{10}} |\Delta V_{REF}| \leq \frac{|V_{REF}|}{2^{11}}$

$\therefore \frac{|\Delta V_{REF}|}{|V_{REF}|} \leq \frac{1}{2^{11}} \frac{2^{10}}{2^{10} - 1} \approx \frac{1}{2^{11}} = 0.05\%$

允许参考电压的变化量为：

$|\Delta V_{REF}| \leq \frac{|V_{REF}|}{2^{11}} \times \frac{2^{10}}{2^{10} - 1} \approx 5\text{mV}$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

20

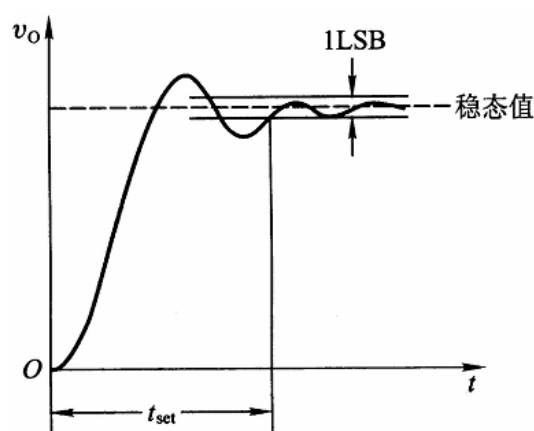
§ 8.3 D/A转换器的转换精度与转换速度

8.3.2 D/A转换器的转换速度

*用建立时间 t_{set} 定量描述D/A转换器的转换速度。

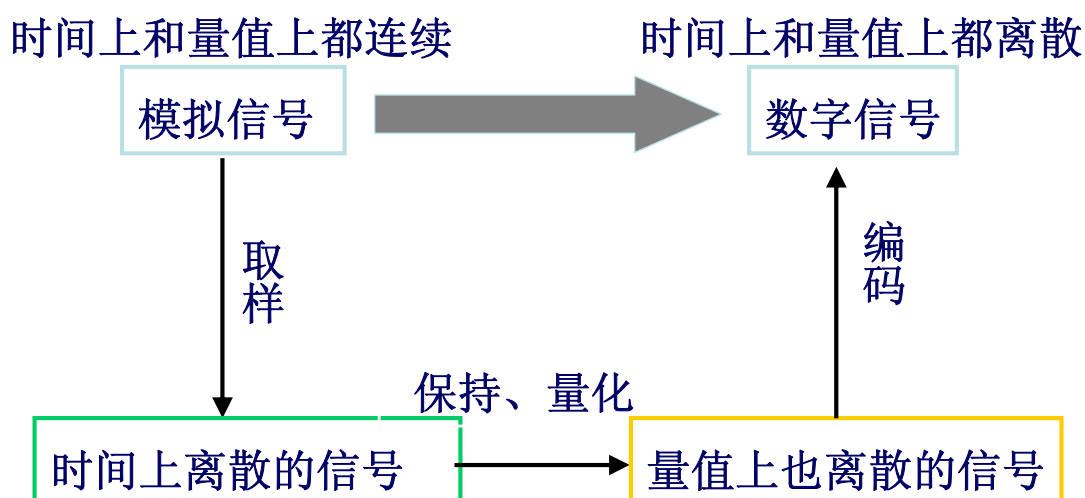
*建立时间 t_{set} :从输入的数字量发生突变开始,到输出电压进入与稳态值相差 $\pm \frac{1}{2}LSB$ 范围以内的时间。

*一般产品说明给出的是输入从全0跳变至全1(或从全1跳变至全0)时的建立时间。



§ 8.4 A/D转换的基本原理

A/D转换的一般过程



A/D转换一般要包括取样, 保持, 量化及编码4个过程。



§ 8.4 A/D转换的基本原理

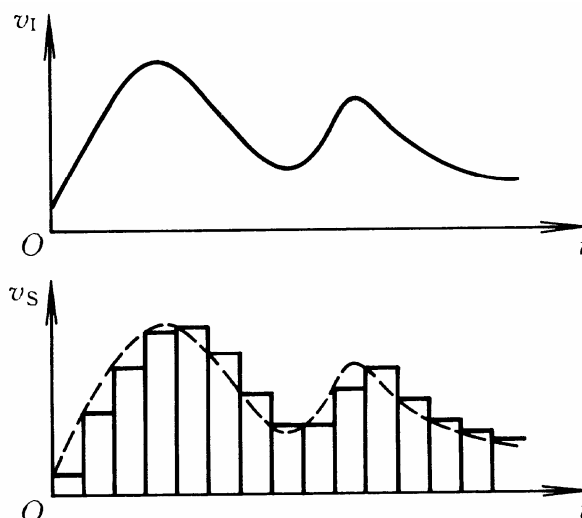
一、取样定理

采样是将随时间连续变化的模拟量转换为时间离散的模拟量。

采样信号的频率愈高，所采得信号愈能真实地复现输入信号。合理的采样频率由采样定理确定。

采样定理：设采样信号的频率为 f_s ，输入模拟信号 v_I 的最高频率分量的频率为 $f_{i(\max)}$ ，则 $f_s \geq 2f_{i(\max)}$

一般取 $f_s = (3 \sim 5)f_{i(\max)}$



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

23



§ 8.4 A/D转换的基本原理

二、量化和编码

1. 量化：将采样电压表示为最小数量单位 (Δ) 的整数倍
2. 编码：将量化的结果用代码表示出来 (二进制，二-十进制)
3. 量化误差：当采样电压不能被 Δ 整除时，将引入量化误差

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

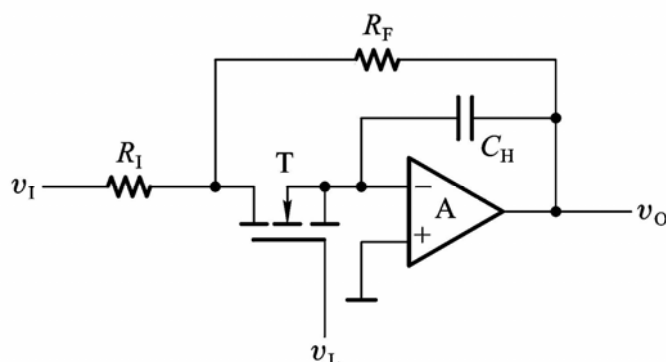
2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

24

§ 8.5 取样-保持电路

取样-保持电路的基本形式



$v_L = 1$ 时 T 导通， v_I 经 R_I 和 T 向 C_H 充电，

若 $R_I = R_F$ ，充电结束后， $v_O = v_C = -v_I$

$v_L = 0$ 时 T 截至， C_H 上电压在一段时间内基本保持不变， v_O 也保持不变。

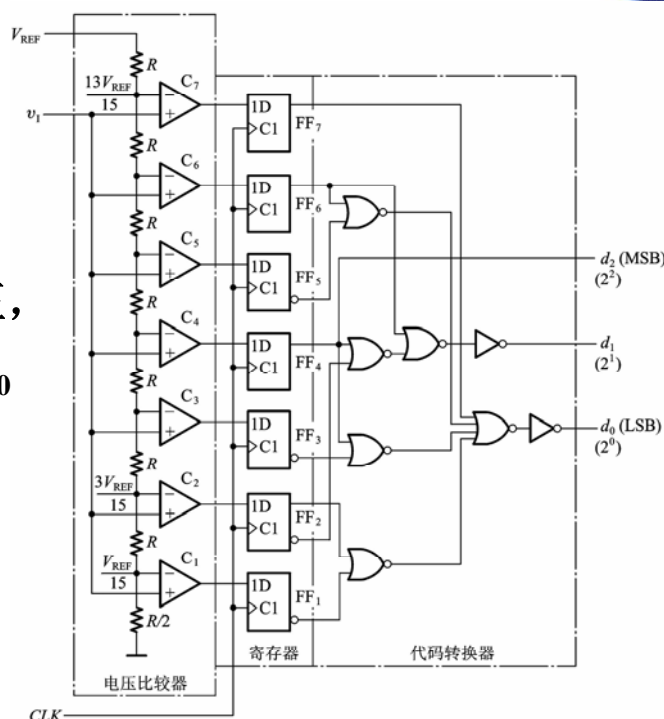
§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

8.6.1 并联比较型A/D转换器

一、电路结构

由电压比较器、寄存器和代码转换电路组成

输入为 $0 \sim V_{REF}$ 间的模拟电压，
输出为3位二进制代码 $d_2 d_1 d_0$

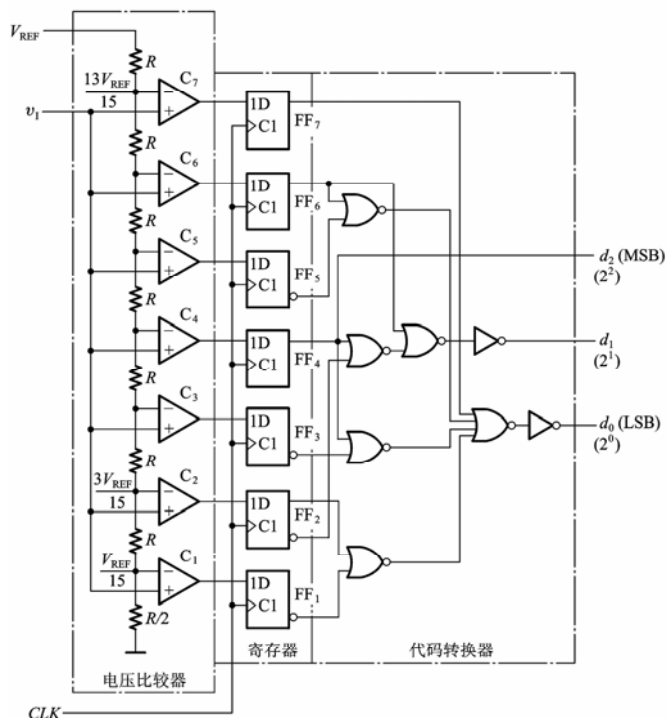


§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



三、电路特点

- 1 精度：主要取决于量化电平的划分；受参考电压、分压电阻等因素影响
- 2 速度快，转换时间只需几十纳秒
- 3 电路规模大， n 位需要 2^n-1 个比较器和相应的代码转换电路



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

29

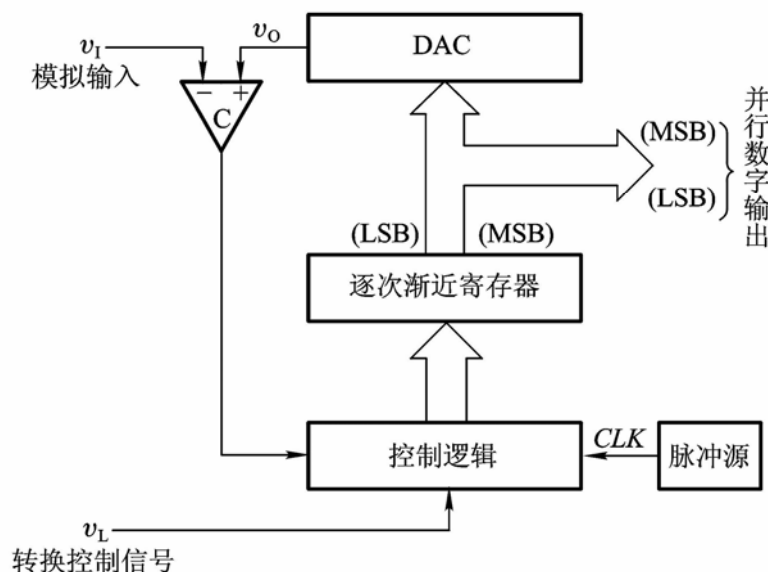
§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



8.6.3 逐次逼近型A/D转换器

一、电路框图

由比较器、DAC、寄存器、时钟脉冲源和控制逻辑5个部分组成



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

30

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

二、工作原理

1. $v_L = 0$, 将寄存器清零

2. $v_L = 1$, 开始转换

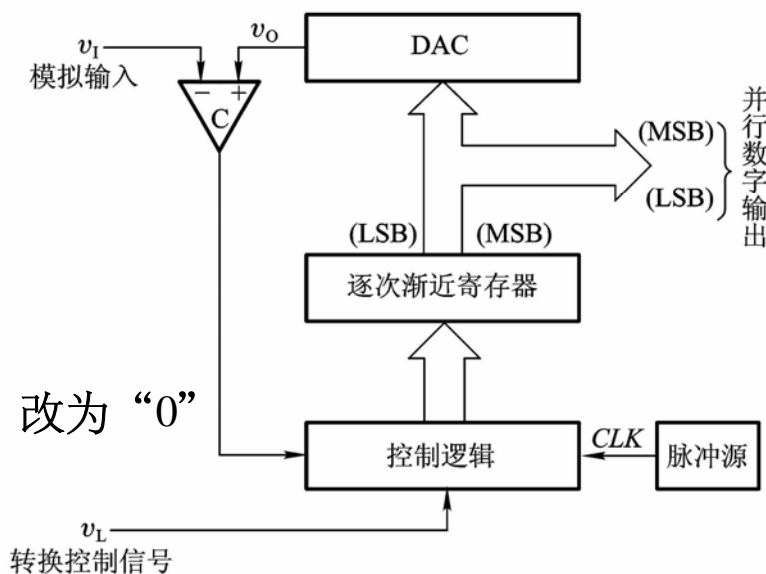
(1) 寄存器高位先置 “1”

若 $\begin{cases} v_O < v_I, \text{则保留“1”} \\ v_O > v_I, \text{则去掉“1”, 改为“0”} \end{cases}$

(2) 再将次高位置 “1”

若 $\begin{cases} v_O < v_I, \text{则保留“1”} \\ v_O > v_I, \text{则去掉“1”, 改为“0”} \end{cases}$

.....



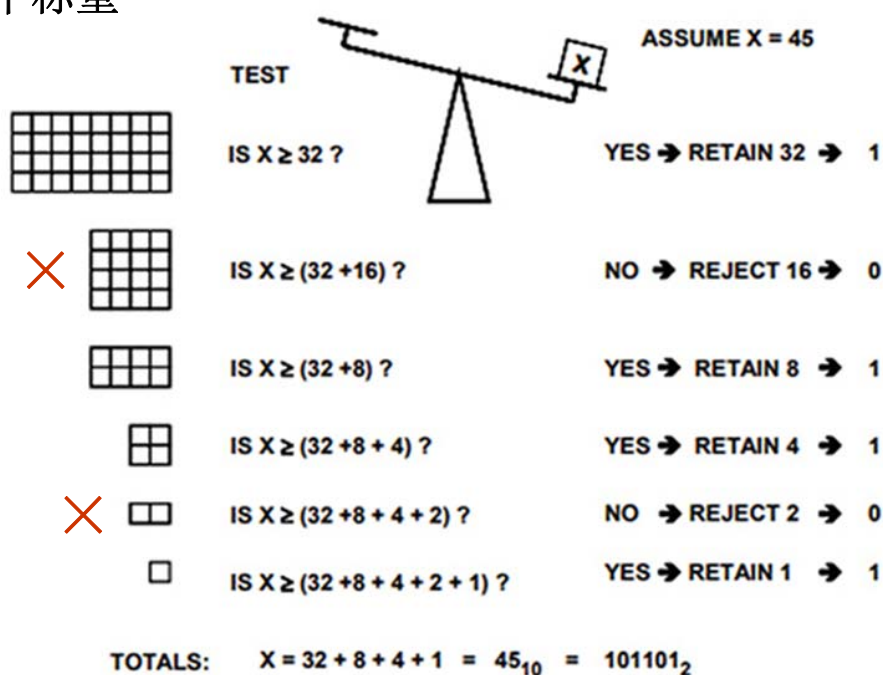
2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

31

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

例：天平称重



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

32

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



三、电路实现

1. $v_L = 0$: $Q_A Q_B Q_C = 000$,

$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 = 10000$

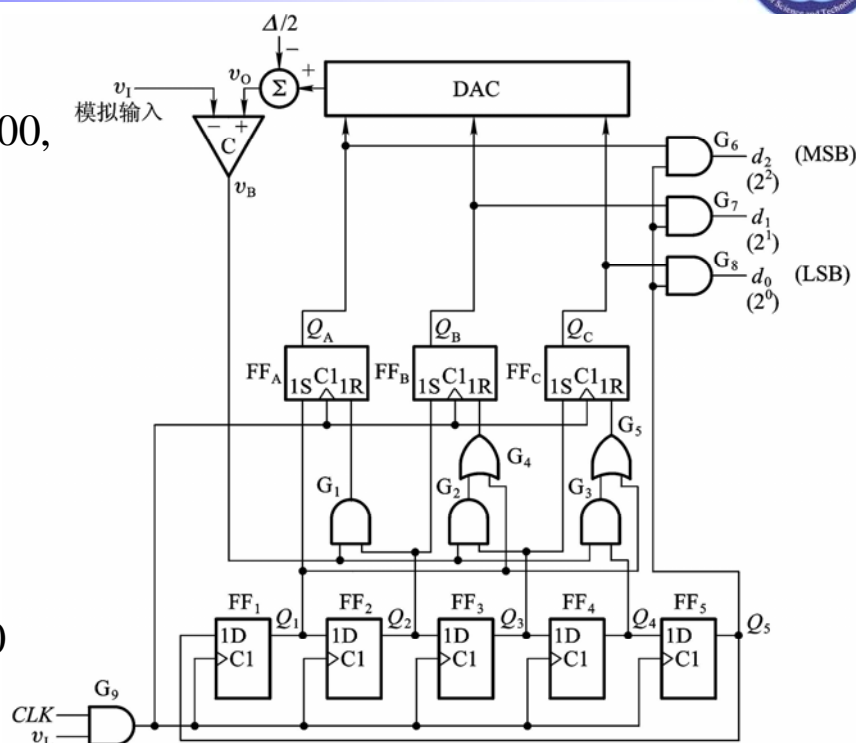
2. $v_L = 1$: 开始转换

(1) 第一个 $CLK \uparrow$ 后

$Q_A = 1$

若 $\begin{cases} v_I > v_O, v_B = 0 \\ v_I < v_O, v_B = 1 \end{cases}$

$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 = 01000$



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

33

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



(2) 第二个 $CLK \uparrow$ 后

$Q_B = 1$

若 $\begin{cases} v_B = 1, Q_A = 0 \\ v_B = 0, Q_A \text{ 保持} \end{cases}$

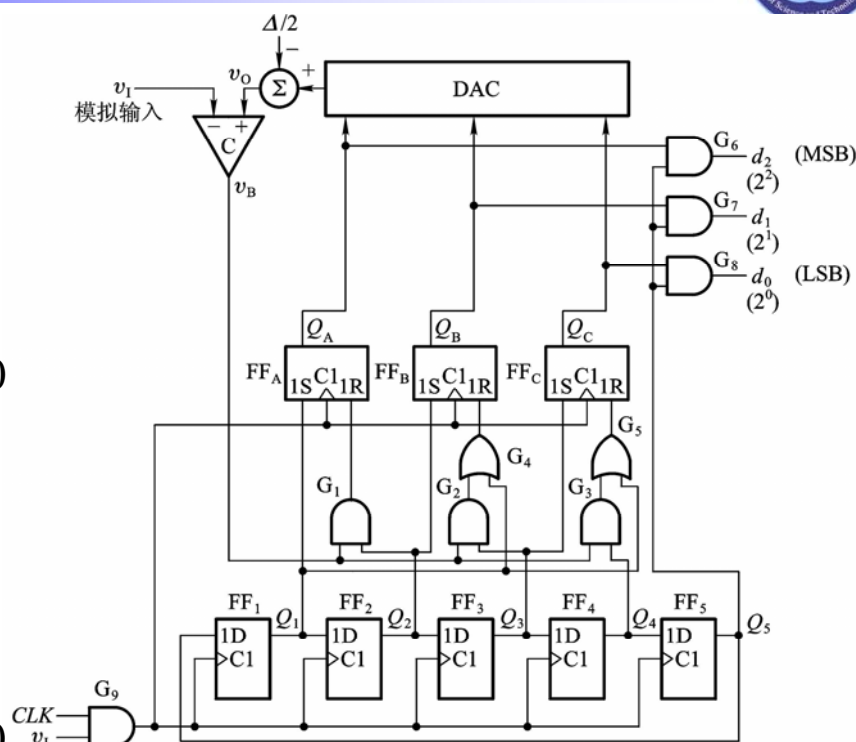
$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 = 00100$

(3) 第三个 $CLK \uparrow$ 后

$Q_C = 1$

若 $\begin{cases} v_B = 1, Q_B = 0 \\ v_B = 0, Q_B \text{ 保持} \end{cases}$

$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 = 00010$



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

34

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



(4) 第四个CLK ↑ 后

若 $\begin{cases} v_B = 1, Q_C = 0 \\ v_B = 0, Q_C \text{ 保持} \end{cases}$

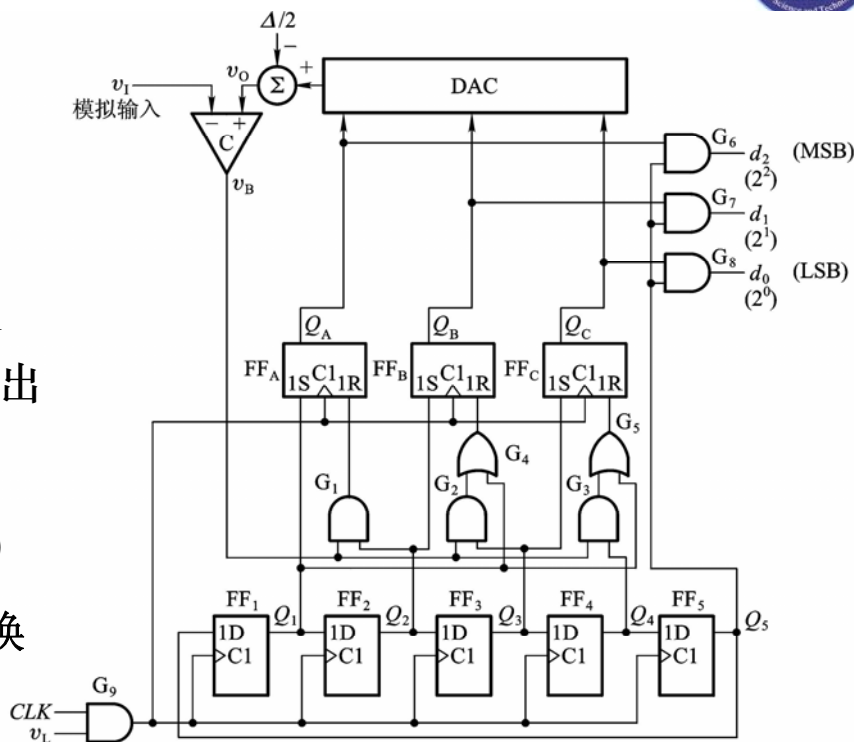
$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 = 00001$

$Q_A Q_B Q_C$ 状态送至输出

(5) 第五个CLK ↑ 后

$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 = 10000$

返回初始状态, 转换
输出信号消失



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

35

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



四、电路特点

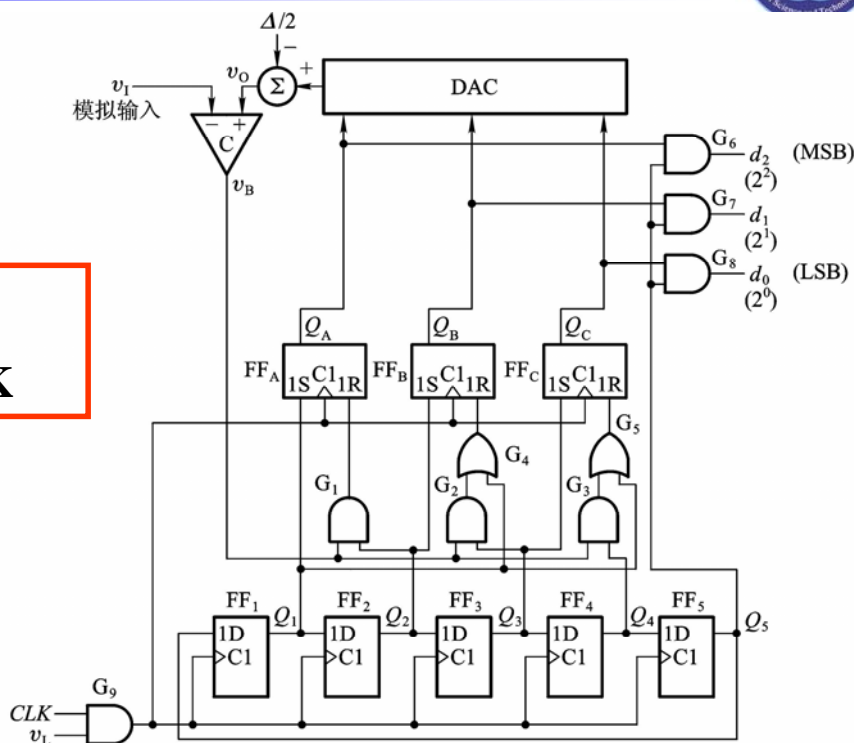
1 速度较快

转换时间:

3位: 5个CLK

n位: (n+2)个CLK

2 电路不太复杂



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

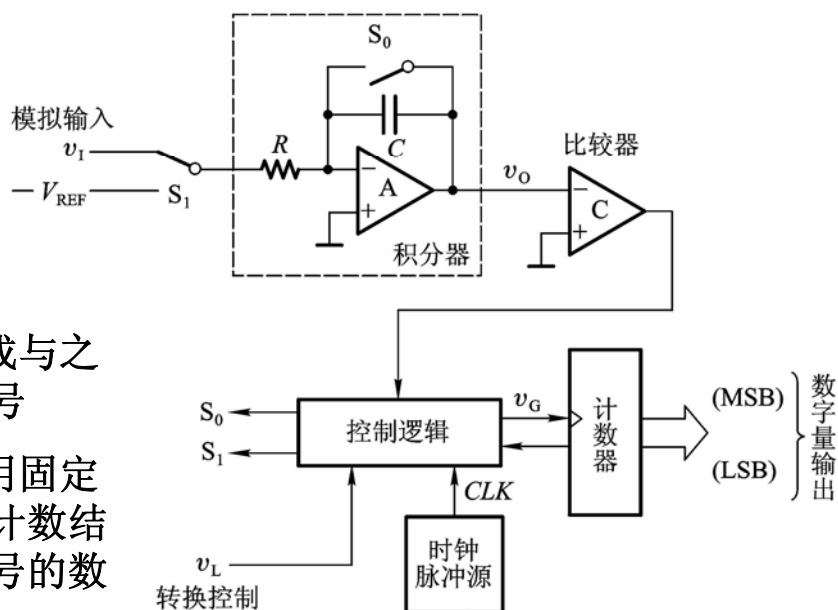
36

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

8.6.4 双积分型A/D转换器

一、电路框图

由积分器、比较器、计数器、控制逻辑和时钟信号源组成



➤先将输入信号转换成与之成正比的时间宽度信号

➤然后在这个时间内用固定频率时钟脉冲计数，计数结果就是正比于输入信号的数字信号

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

二、工作原理

1. 起始状态:

$v_L = 0$, 计数器清零;

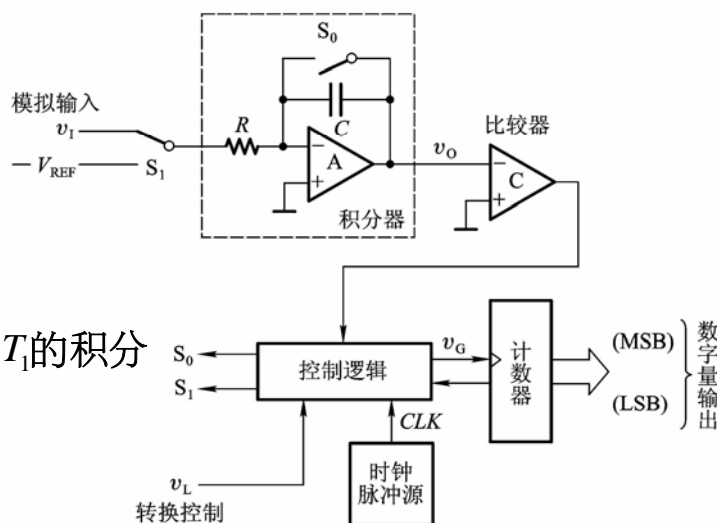
S_0 接通, C 完全放电

2. $v_L = 1$, 转换开始(S_0 断开)

(1) $S_1 \rightarrow v_I$, 积分器作固定时间 T_1 的积分

$$v_O = \frac{1}{C} \int_0^{T_1} -\frac{v_I}{R} dt = -\frac{T_1}{RC} v_I$$

$$\therefore v_O \propto v_I$$



§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

(2) $S_1 \rightarrow -V_{REF}$, 积分器

反向积分至 $v_o = 0$

$$v_o = \frac{1}{C} \int_0^{T_2} \frac{V_{REF}}{R} dt - \frac{T_1}{RC} v_I = 0$$

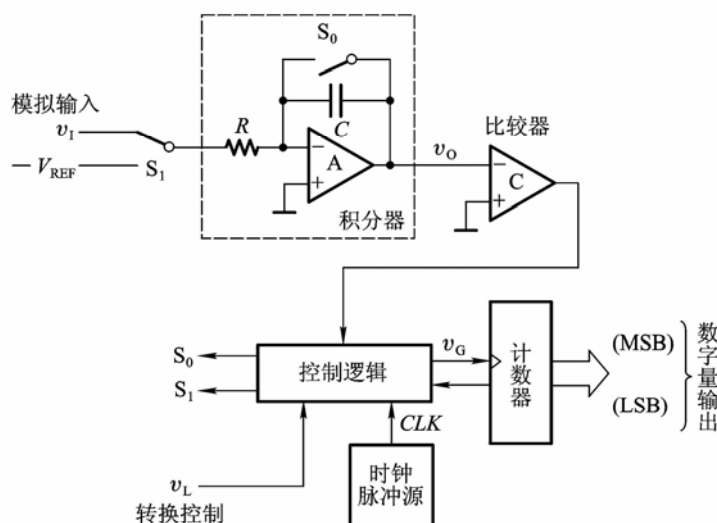
$$\frac{T_2}{RC} V_{REF} = \frac{T_1}{RC} v_I \Rightarrow T_2 = \frac{T_1}{V_{REF}} v_I$$

令计数器在 T_2 期间对固定

频率 f_c ($T_c = \frac{1}{f_c}$) 的脉冲计数,

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

$$\text{若 } T_1 = NT_c \Rightarrow D = \frac{N}{V_{REF}} v_I$$



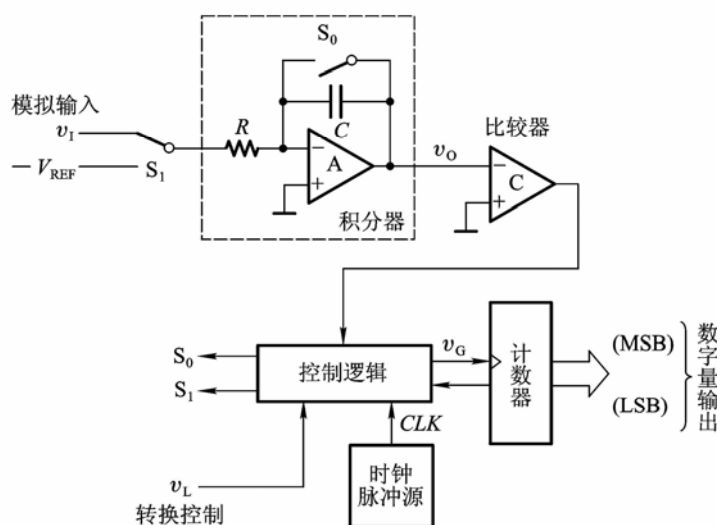
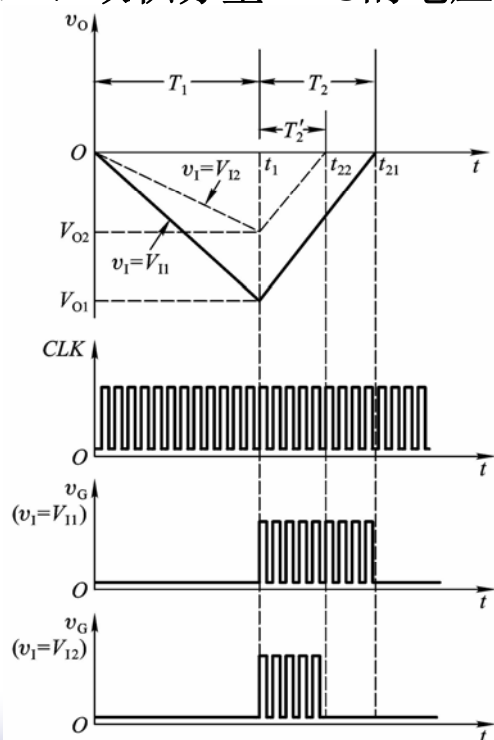
2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

39

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

三、双积分型ADC的电压波形图



2022-9-9

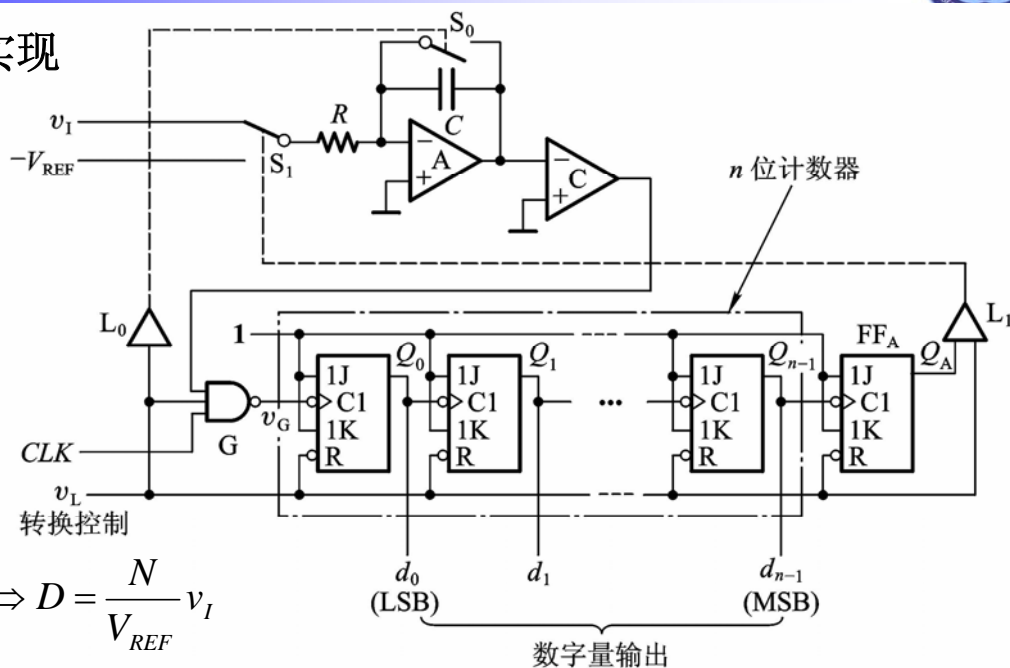
第八章 数-模和模-数转换

40

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



四、电路实现



$$\text{若 } T_1 = NT_C \Rightarrow D = \frac{N}{V_{REF}} v_I$$

$$\therefore T_1 = 2^n T_C, \therefore D = \frac{2^n}{V_{REF}} v_I$$

2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

41

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理



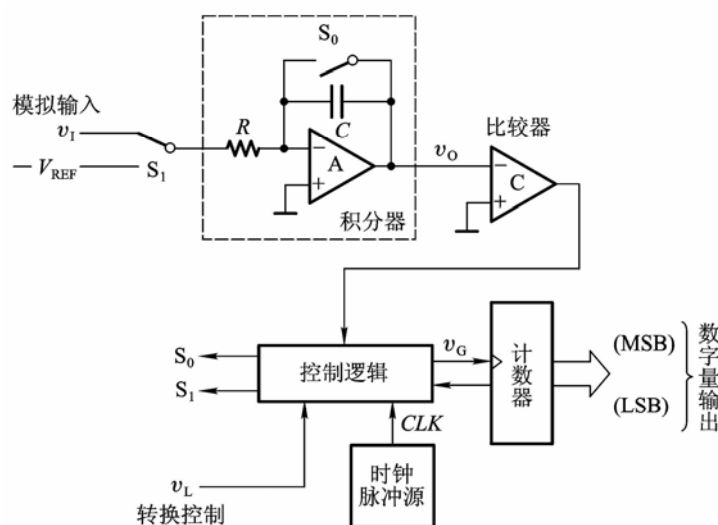
五、电路特点

1 优点

- (1) 工作性能稳定
- (2) 抗干扰能力强

2 缺点

工作速度慢。



2022-9-9

第八章 数-模和模-数转换

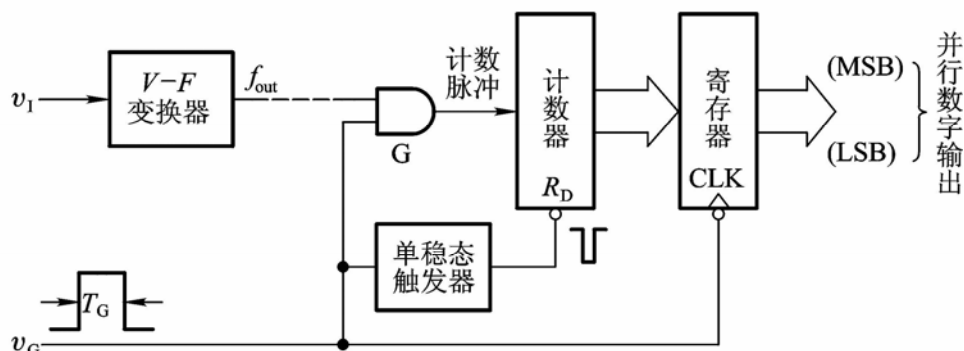
42

§ 8.6 A/D转换器的电路结构和工作原理

8.6.6 V-F变换型A/D转换器

一、电路结构

由V-F变换器、计数器、时钟信号控制闸门、寄存器、单稳态电路组成



二、工作原理

- 1 首先将输入信号转换成与之成正比的频率信号；
- 2 然后在固定时间内对频率信号计数，计数结果即正比于输入信号的数字量。

§ 8.7 A/D转换器的转换精度与转换速度

8.7.1 ADC的转换精度

1. 分辨率（理论精度）：以输出二进制或十进制的位数表示，说明A/D转换器对输入信号的分辨能力。
2. 转换误差（实际精度）：通常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。

注意：手册上给出的转换误差都是在一定电源电压和环境温度下得到的数据。



8.7.2 ADC的转换速度

用转换时间或转换速率描述。

转换时间：完成一次转换所需要的时间。

转换速率：单位时间内能够完成的转换次数。

转换速度取决于**电路结构类型**：

并联比较型：<1微秒/次

逐次逼近型：10~100微秒/次

双积分型、V-F变换型：几十毫秒/次