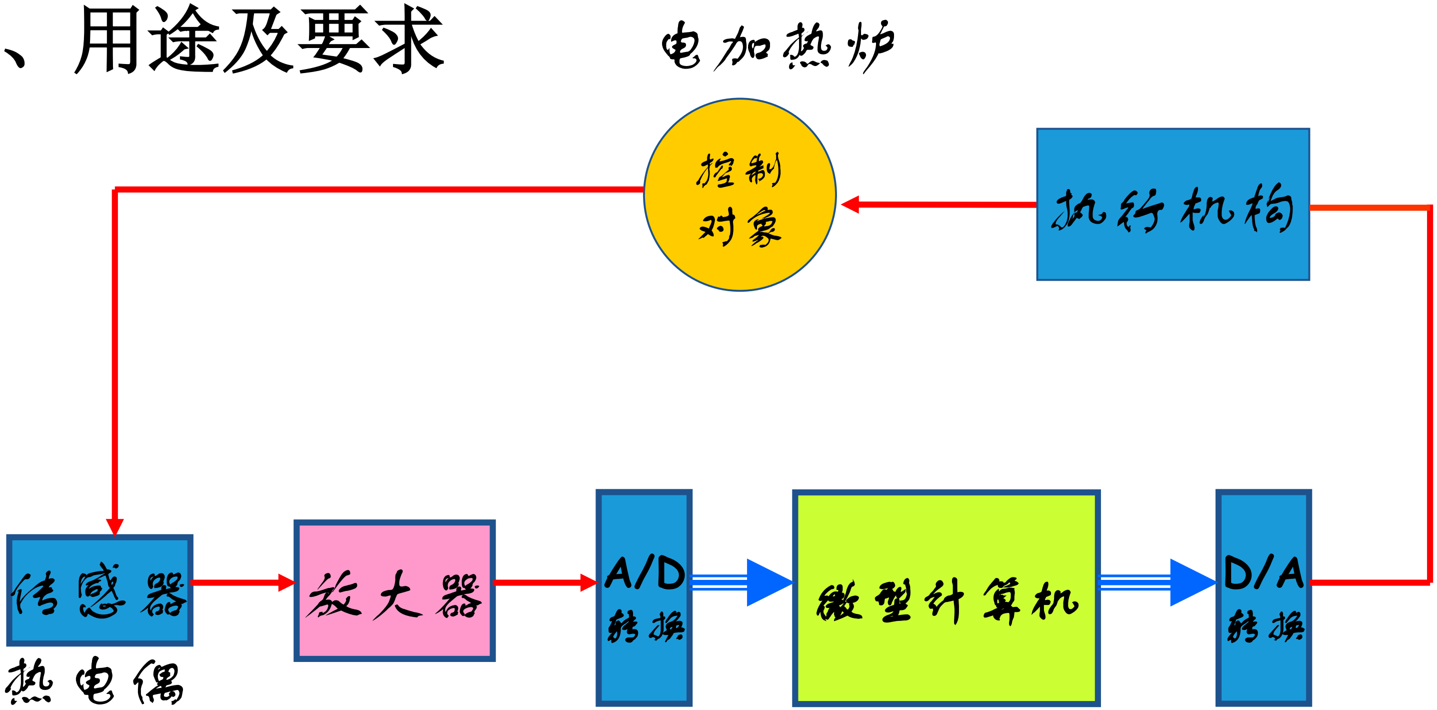
第八章
数-模（D/A）和模-数（A/D）转换

主 要 内 容

- 概述
- D/A转换器
- A/D转换器

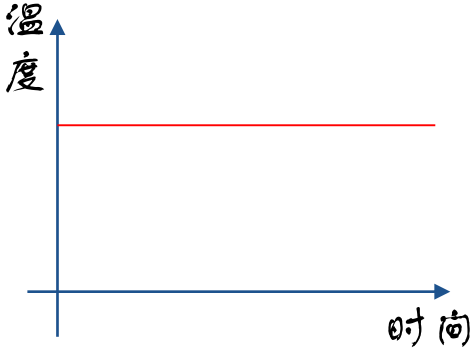
8.1 概述

一、用途及要求



! 转换精度

! 转换速度

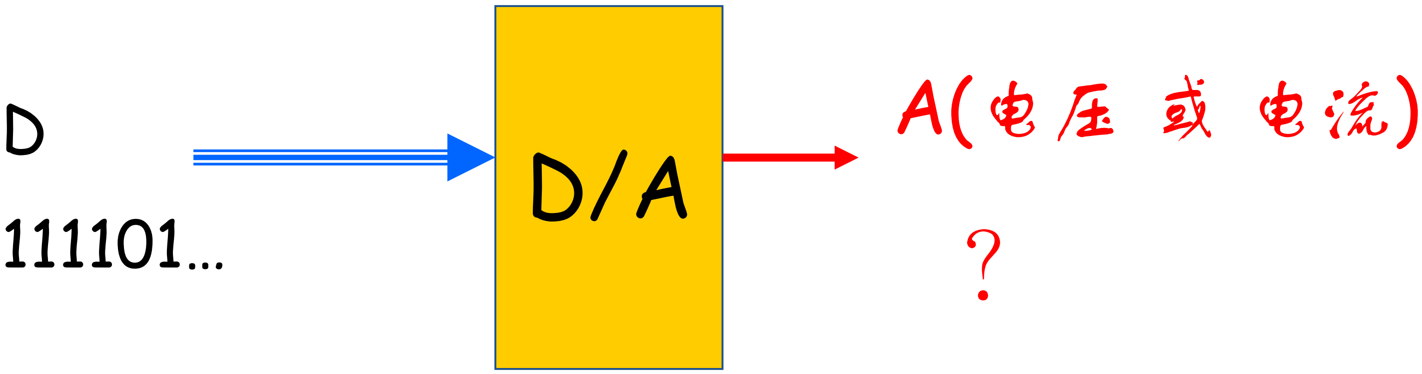


二、分类

D/A
- 权电阻网络DAC
- 倒T形电阻网络DAC
- 权电流型DAC
- 权电容网络DAC
- 开关树型DAC

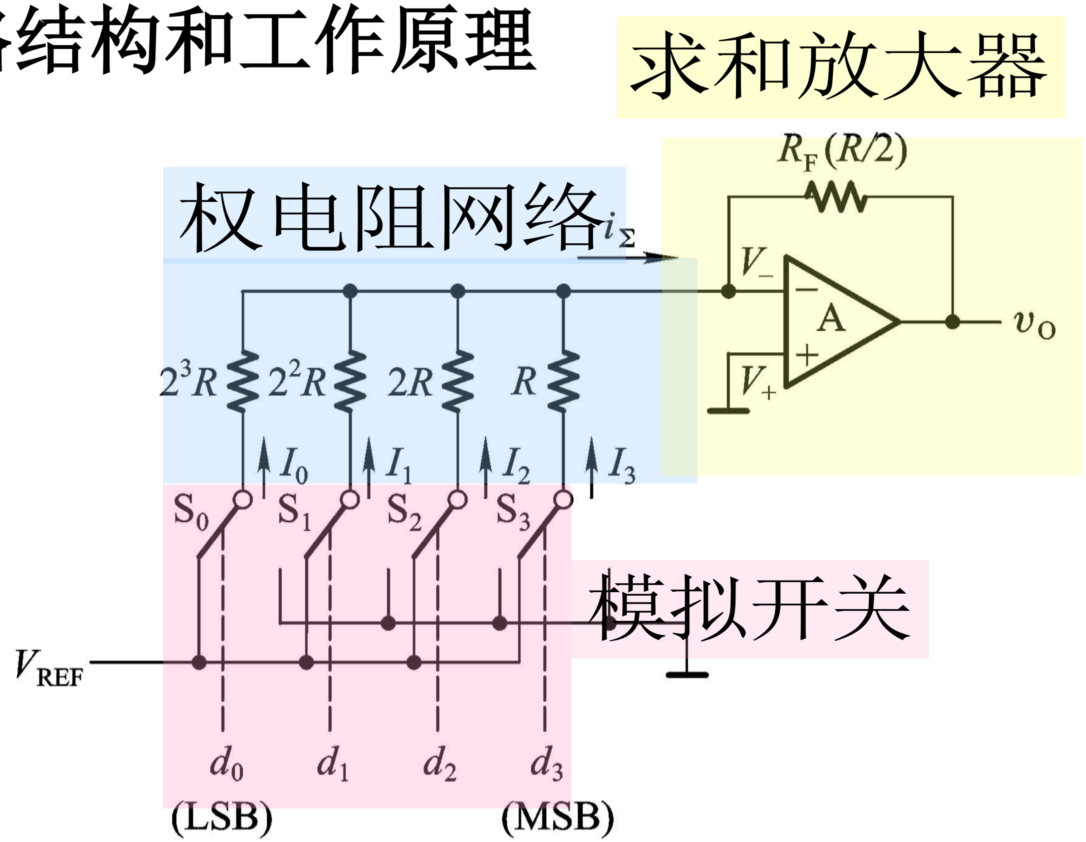
A/D
- 直接型
  - 并联比较型
  - 反馈比较型
- 间接型
  - $V-T$变换型
  - $V-F$变换型

8.2 D/A转换器



8.2.1 权电阻网络D/A转换器

一、电路结构和工作原理



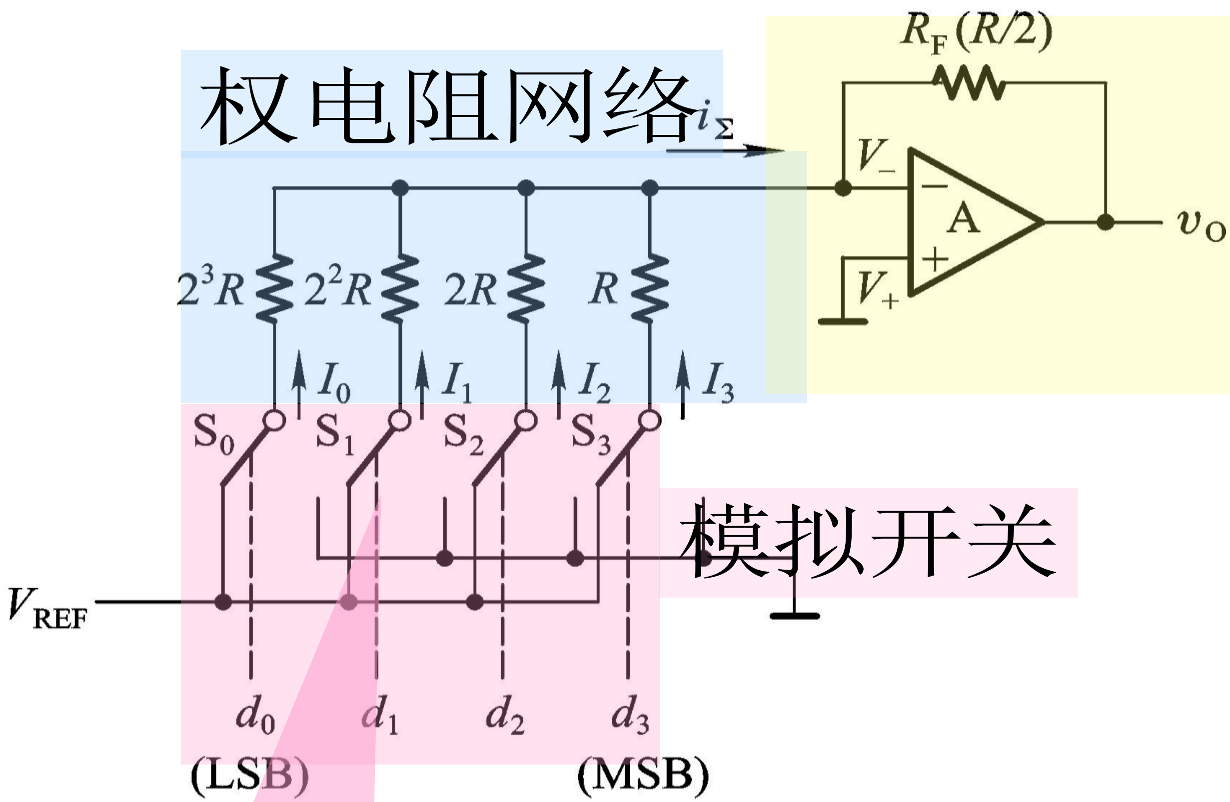
负反馈放大器：

设A为理想放大器，即$A_V = \infty, i_I = 0, R_O = 0$

当接成深度负反馈时，必有$V_- \approx V_+ = 0$，且$i_I = 0$

求和放大器

权电阻网络



模拟开关

权电流： $I_i = V_{REF} / R_i$

$$I_0 = V_{REF} / 2^3 R$$

$$I_1 = V_{REF} / 2^2 R$$

$$I_2 = V_{REF} / 2^1 R$$

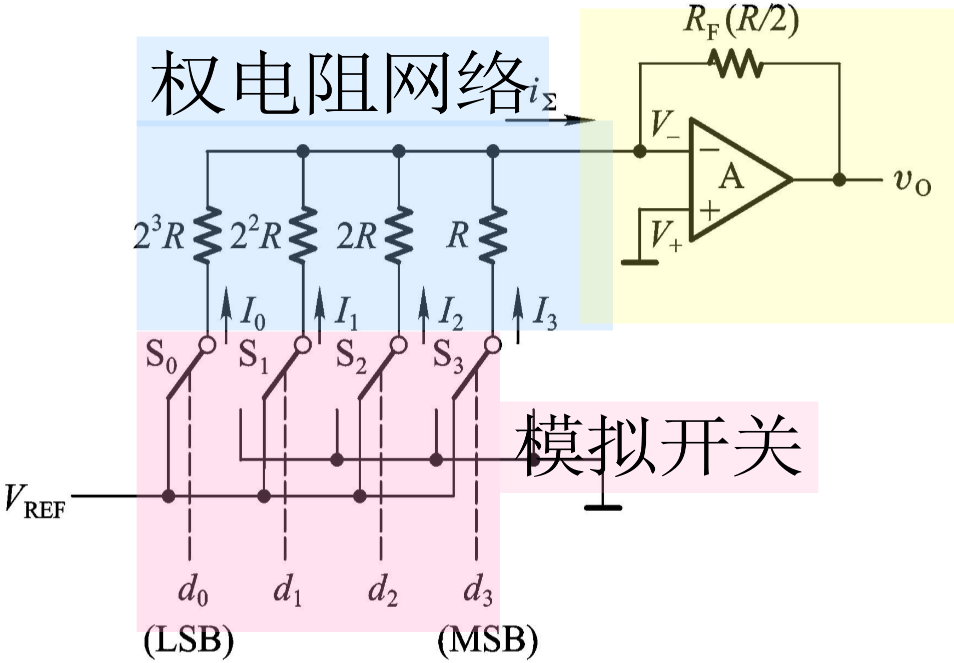
$$I_3 = V_{REF} / 2^0 R$$

$S_3 \sim S_0$受数字$d_3 \sim d_0$控制

$d_i = 0$时， $I_i = 0$

$d_i = 1$时， I_i流向$\sum$点

求和放大器



- **优缺点：**
- **1. 优点：简单**
- **2. 缺点：电阻值相差大，难于保证精度，且大电阻不宜于集成在IC内部**

输出电压：

$$v_O = -R_F i_\Sigma$$

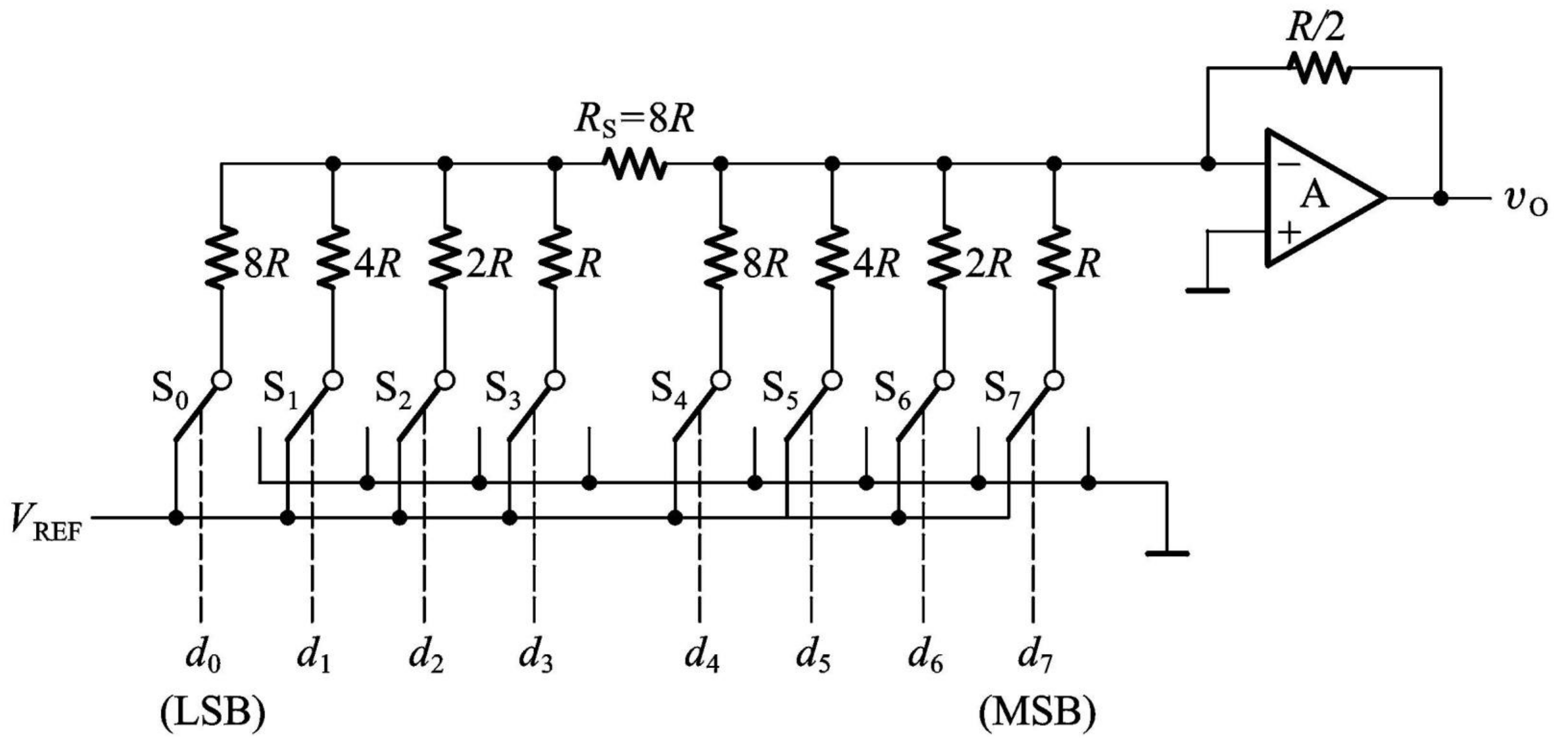
$$= -R_F(I_3 + I_2 + I_1 + I_0)$$

$$= -R_F\left(\frac{V_{REF}}{R}d_3 + \frac{V_{REF}}{2R}d_2 + \frac{V_{REF}}{2^2R}d_1 + \frac{V_{REF}}{2^3R}d_0\right)$$

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

$$R_F = R/2$$

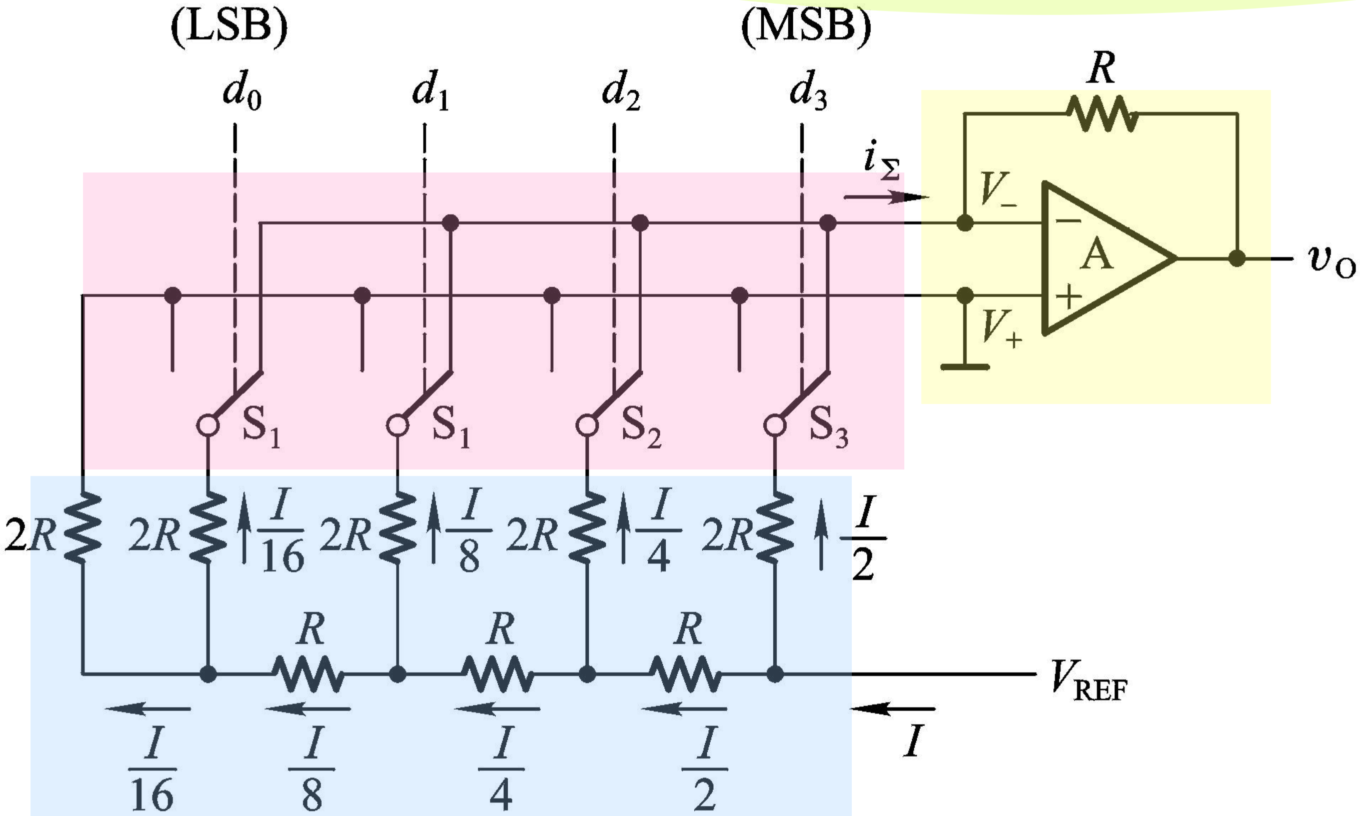
双级权电阻网络

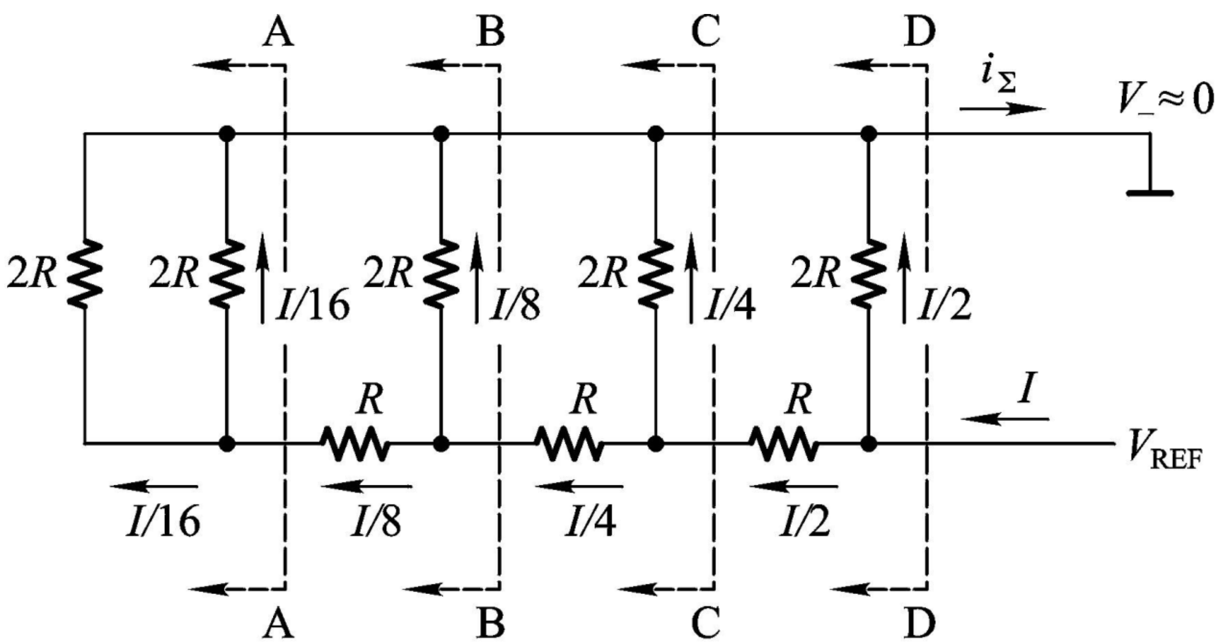


R/2
RS=8R
8R
4R
2R
R
8R
4R
2R
R
A
vO
S0
S1
S2
S3
S4
S5
S6
S7
VREF
d0
d1
d2
d3
d4
d5
d6
d7
(LSB)
(MSB)

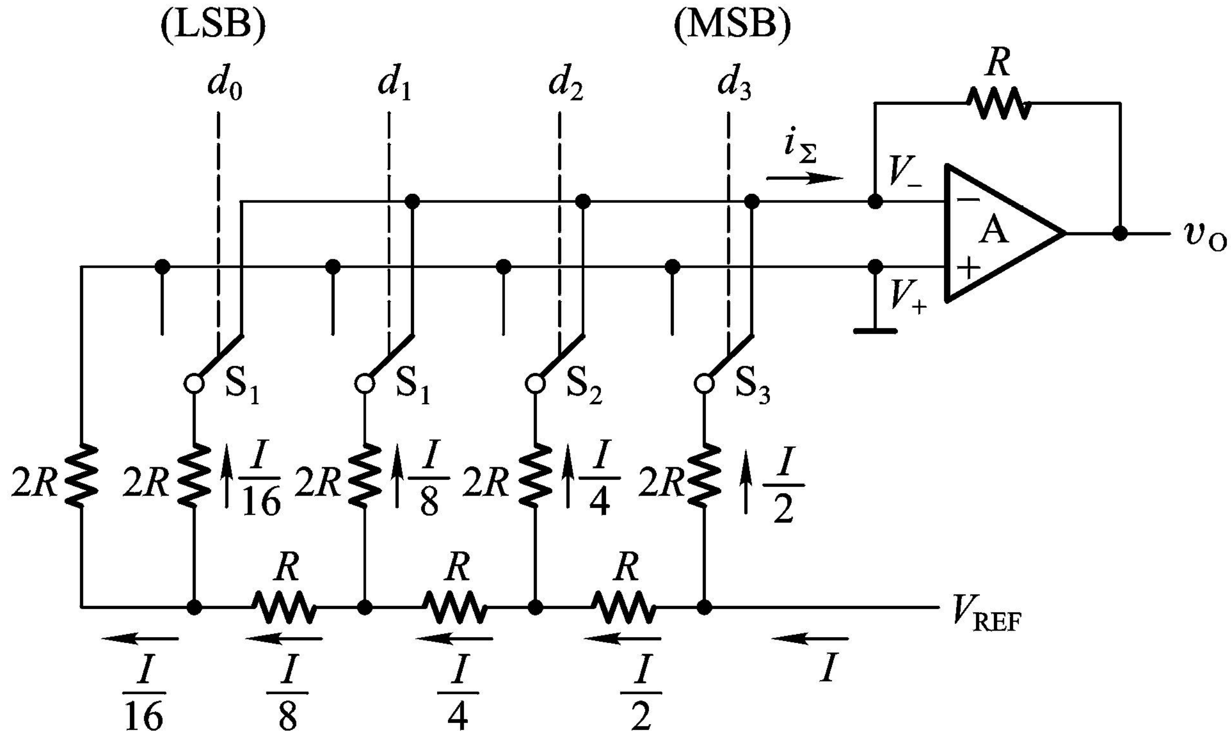
8.2.2 倒T形电阻网络DAC

希望用较少类型的电阻，仍然能得到一系列权电流




A
B
C
D
i_Σ
$V_- \approx 0$
2R
2R
I/16
2R
I/8
2R
I/4
2R
I/2
R
R
R
I
V_{REF}
I/16
I/8
I/4
I/2
A
B
C
D

R R R R



$$\left.\begin{array}{l} d_i = 1\text{时，}I_i\text{流入}i_\Sigma \\ d_i = 0\text{时，}I_i\text{流入地端} \end{array}\right\} \Rightarrow i_\Sigma = d_3\left(\frac{I}{2}\right) + d_2\left(\frac{I}{4}\right) + d_1\left(\frac{I}{8}\right) + d_0\left(\frac{I}{16}\right)$$

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

$$= -\frac{V_{REF}}{2^4}D$$

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

$$= -\frac{V_{REF}}{2^4}D$$

对n位输入时，应有

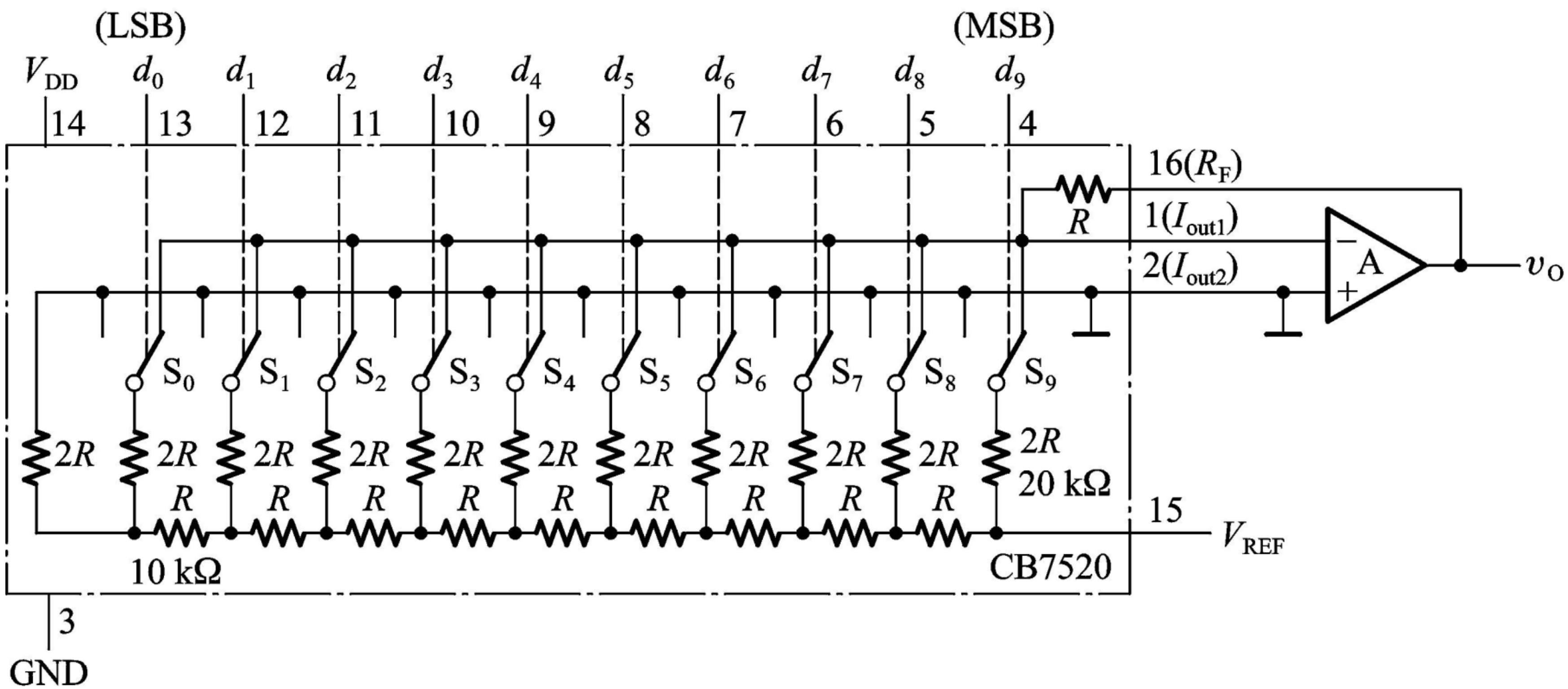
$$V_O = -Ri_\Sigma = -R\frac{V_{REF}}{R}\frac{1}{2^n}(d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \cdots + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

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

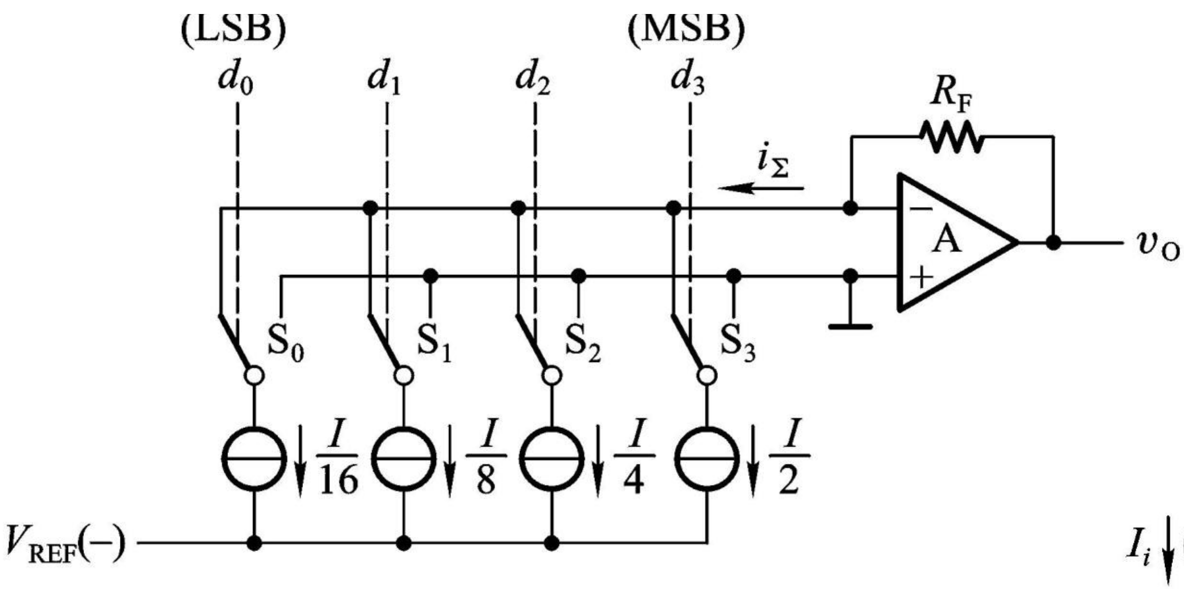
D_n范围为$0 \sim 2^n - 1$，$V_O = 0 \sim -\frac{2^n - 1}{2^n}V_{REF}$

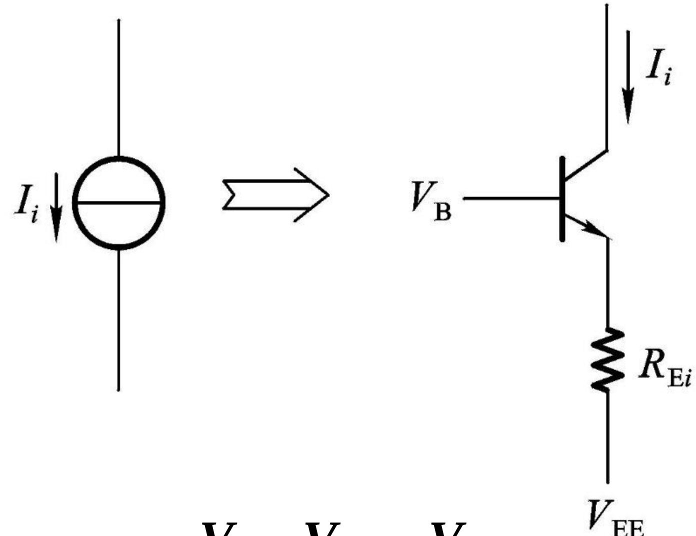
V_{REF}取“负”则得V_O为“正”

实例：*CB*7520


(LSB)
(MSB)
V_{DD}
d_0
d_1
d_2
d_3
d_4
d_5
d_6
d_7
d_8
d_9
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
16(R_F)
R
1(I_{out1})
2(I_{out2})
A
v_O
S_0
S_1
S_2
S_3
S_4
S_5
S_6
S_7
S_8
S_9
2R
20 kΩ
15
V_{REF}
10 kΩ
CB7520
3
GND

8.2.3 权电流型DAC





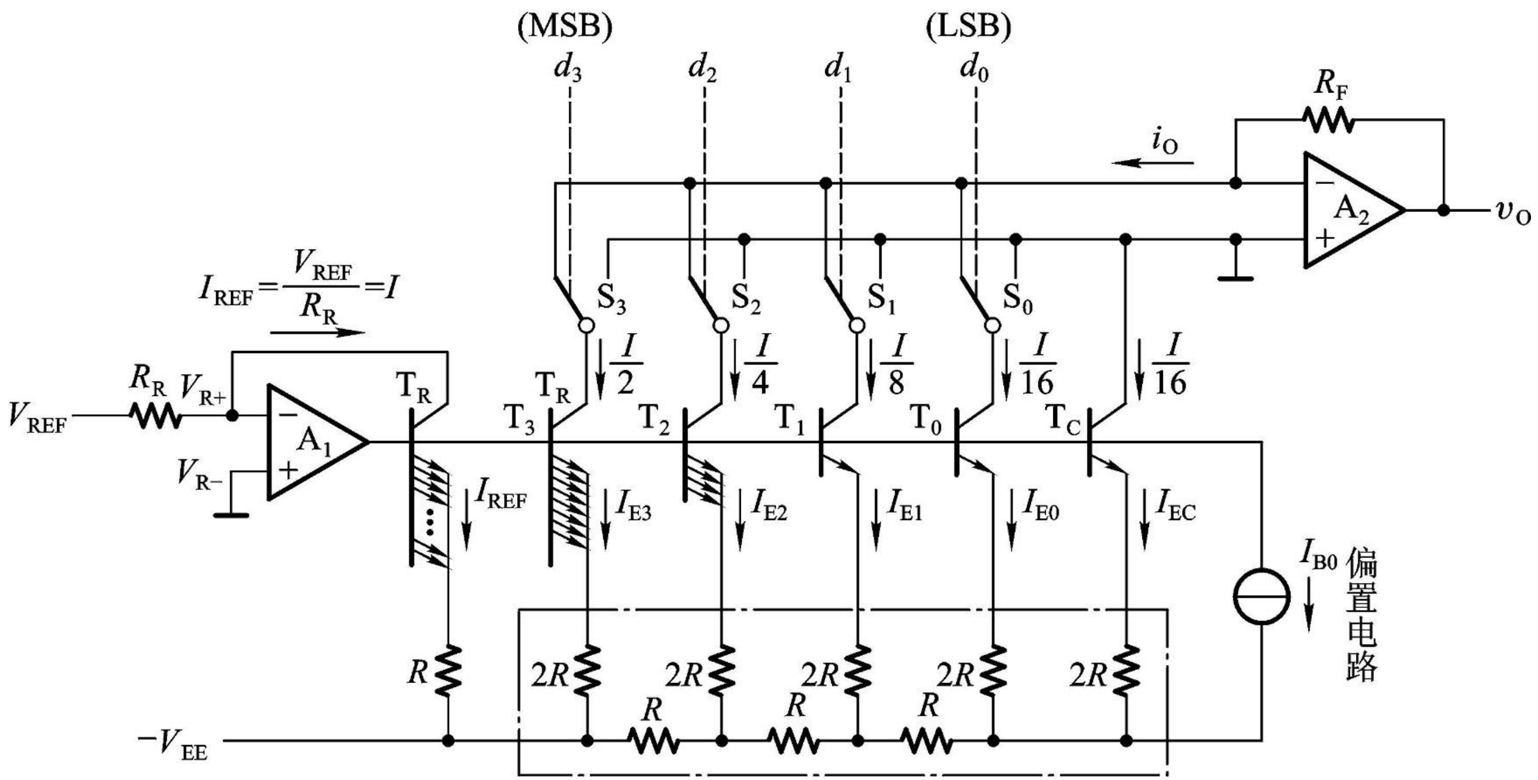
输出电压：$v_O = R_F i_\Sigma$

$$= R_F(\frac{I}{2}d_3 + \frac{I}{2^2}d_2 + \frac{I}{2^3}d_1 + \frac{I}{2^4}d_0)$$

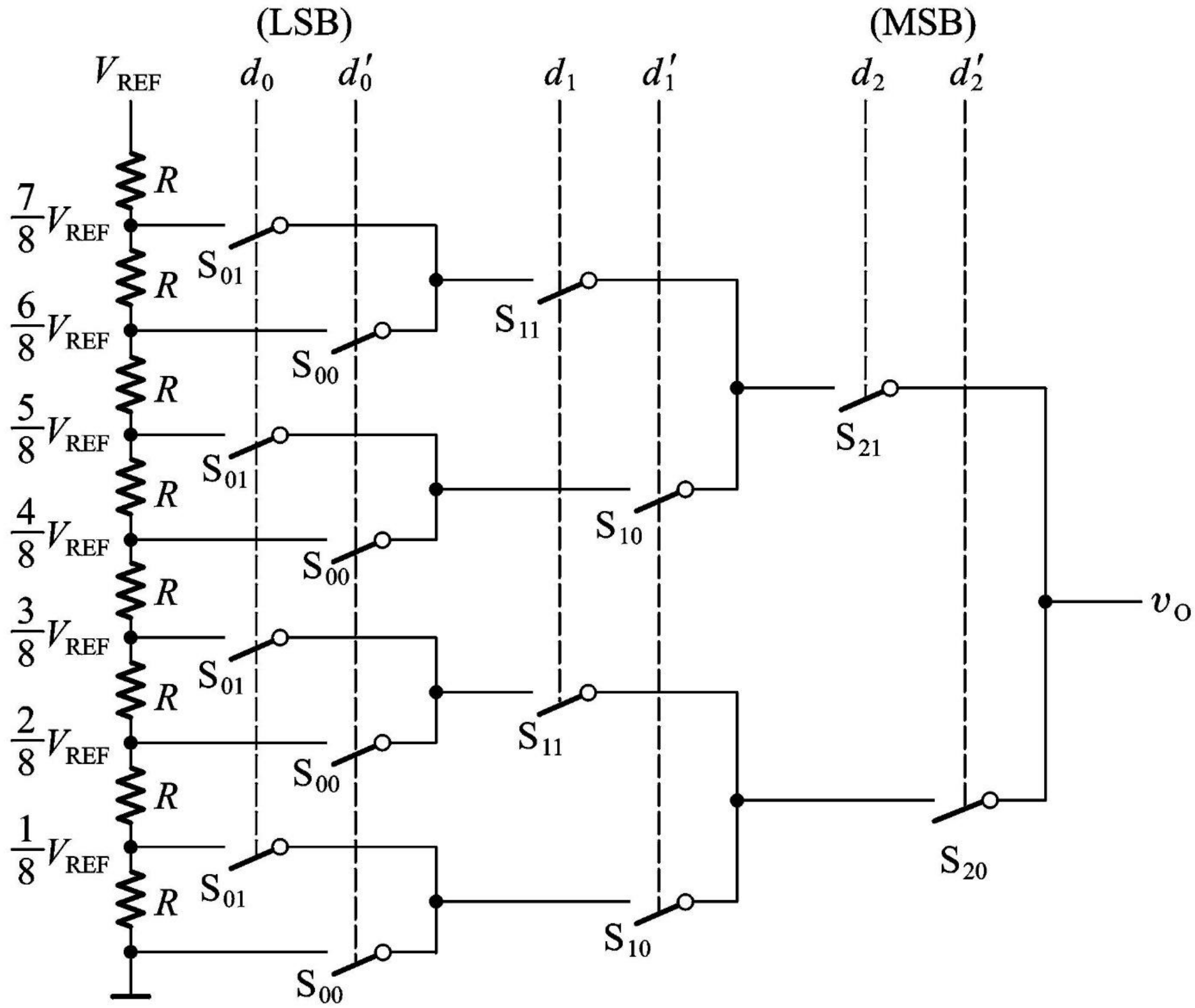
$$= \frac{R_F I}{2^4}(2^3 d_3 + 2^2 d_2 + 2^1 d_1 + 2^0 d_0)$$

$$I_i \approx \frac{V_B - V_{EE} - V_{BE}}{R_{Ei}}$$

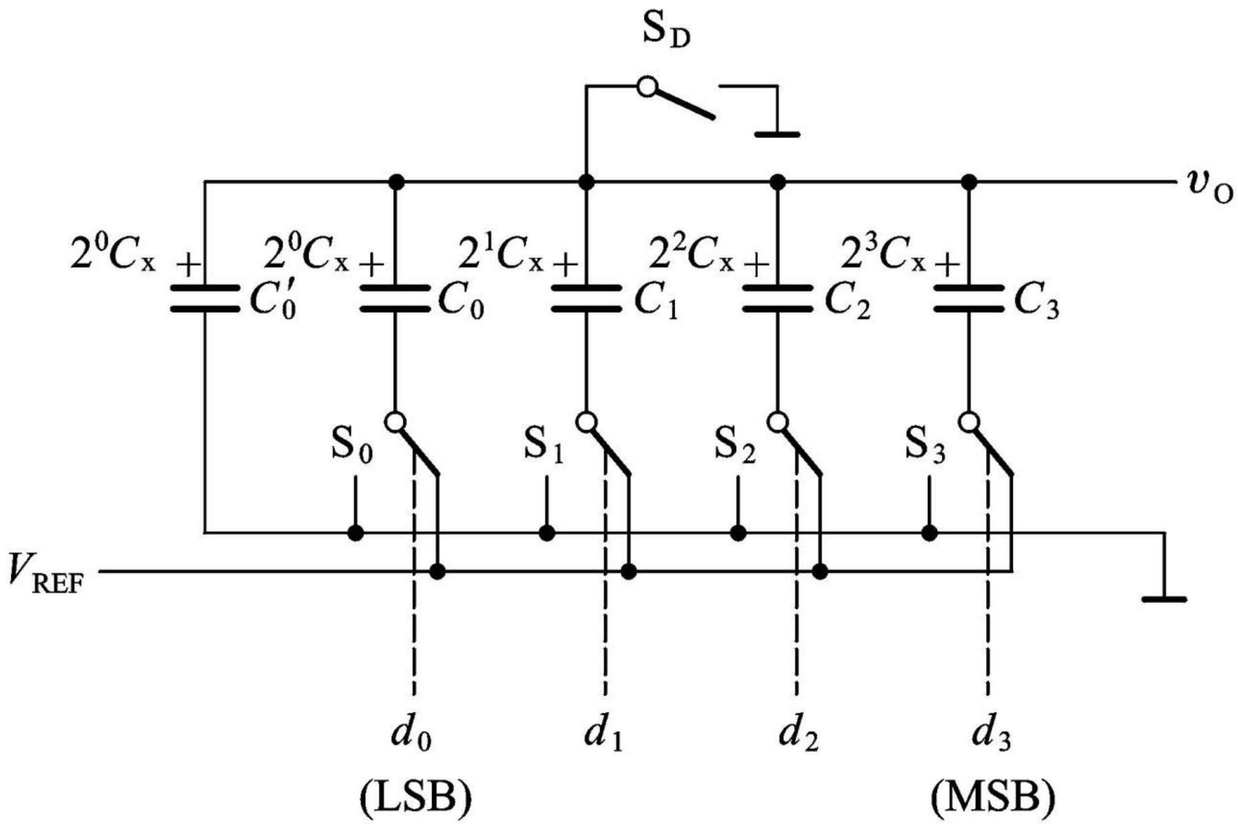
倒T形电阻网络的权电流型DAC



8.2.4 开关树形DAC


(LSB)
(MSB)
V_{REF}
d_0
d_0'
d_1
d_1'
d_2
d_2'
R
$\frac{7}{8}V_{REF}$
$\frac{6}{8}V_{REF}$
$\frac{5}{8}V_{REF}$
$\frac{4}{8}V_{REF}$
$\frac{3}{8}V_{REF}$
$\frac{2}{8}V_{REF}$
$\frac{1}{8}V_{REF}$
S_{01}
S_{00}
S_{11}
S_{10}
S_{21}
S_{20}
v_O

8.2.5 权电容网络DAC



8.2.6 具有双极性输出的DAC

当输入数字量有±极性时，希望输出的模拟电压也对应为±。

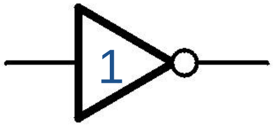
一、原理

例：输入为3位二进制补码。最高位为符号位，正数为0，负数为1

补码输入			对应的十进制	要求的输出
D2	D1	D0		
0	1	1	+3	+3V
0	1	0	+2	+2V
0	0	1	+1	+1V
0	0	0	0	0V
1	1	1	-1	-1V
1	1	0	-2	-2V
1	0	1	-3	-3V
1	0	0	-4	-4V

补码输入			对应的十进制	要求的输出
D2	D1	D0		
0	1	1	+3	+3V
0	1	0	+2	+2V
0	0	1	+1	+1V
0	0	0	0	0V
1	1	1	-1	-1V
1	1	0	-2	-2V
1	0	1	-3	-3V
1	0	0	-4	-4V

原码输入			对应的输出
D2	D1	D0	
1	1	1	+7V
1	1	0	+6V
1	0	1	+5V
1	0	0	+4V
0	1	1	+3V
0	1	0	+2V
0	0	1	+1V
0	0	0	0V



*将符号位反相后接至高位输入

*将输出偏移使输入为100时，输出为0

二、电路实现

*将符号位反相后接至高位输入

*将输出偏移使输入为100时，输出为0

1. $V_{REF} = -8V$

则$V_O = \frac{8}{2^3}(d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$

则$d_2 d_1 d_0 =$

$000 \rightarrow V_O = 0V$

$001 \rightarrow V_O = 1V$

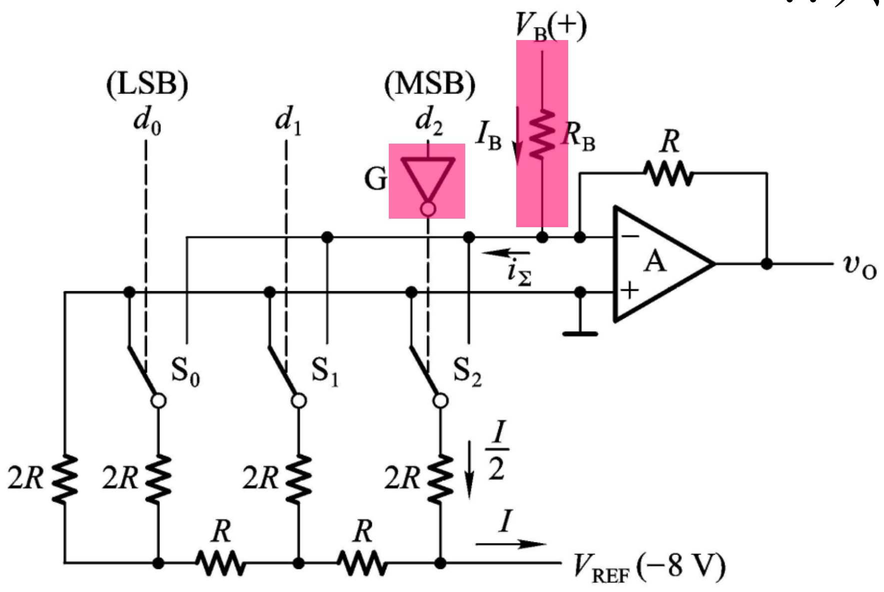
$111 \rightarrow V_O = 7V$

$100 \rightarrow V_O = 4V$

2.偏移$-4V$，使输入100时，$V_O = 0$

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

$\therefore$ 只需令$I_B = i_\Sigma \rightarrow \frac{V_B}{R_B} = \frac{I}{2} = \frac{|V_{REF}|}{2R}$即可

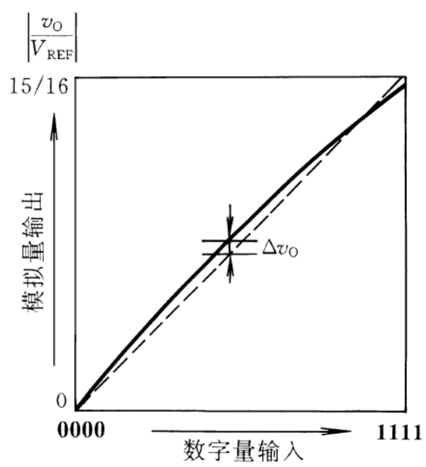


8.3 DAC的转换精度与速度

8.3.1 转换精度

1. 分辨率（理论精度）

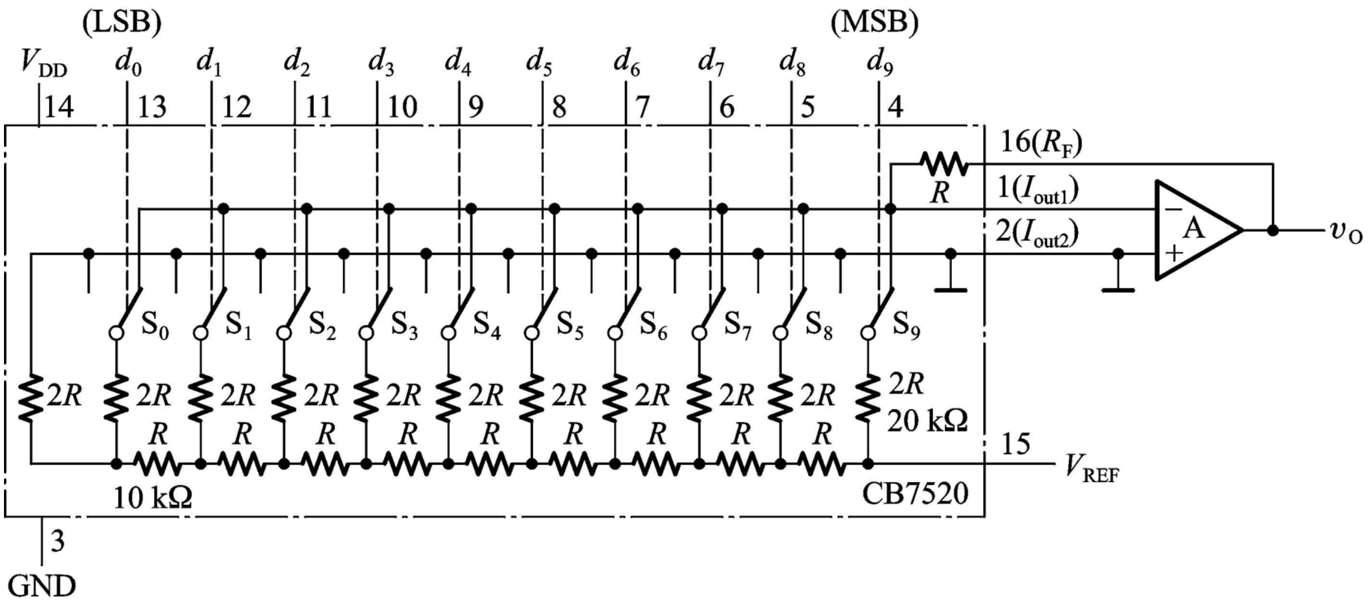
- 用输入数字量的二进制数码位数给出
- *n*位DAC,应能输出0 ~ 2^{n-1}个不同的等级电压，区分出输入的00 ··0到11 ··1， 2^{n-1}个不同状态
- 也可以最小输出电压和最大输出电压之比表示



2. 转换误差（实际精度）

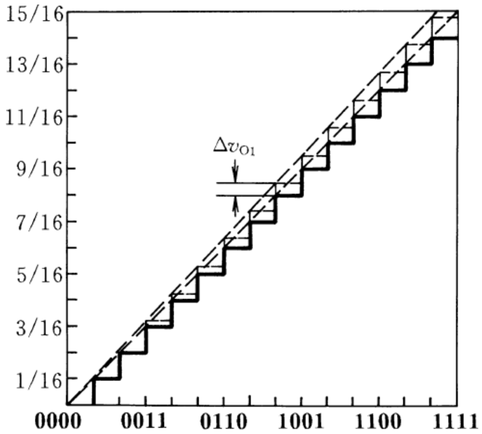
- 用最低有效位的倍数来表示
- 有时也用输出电压满刻度的百分数来表示

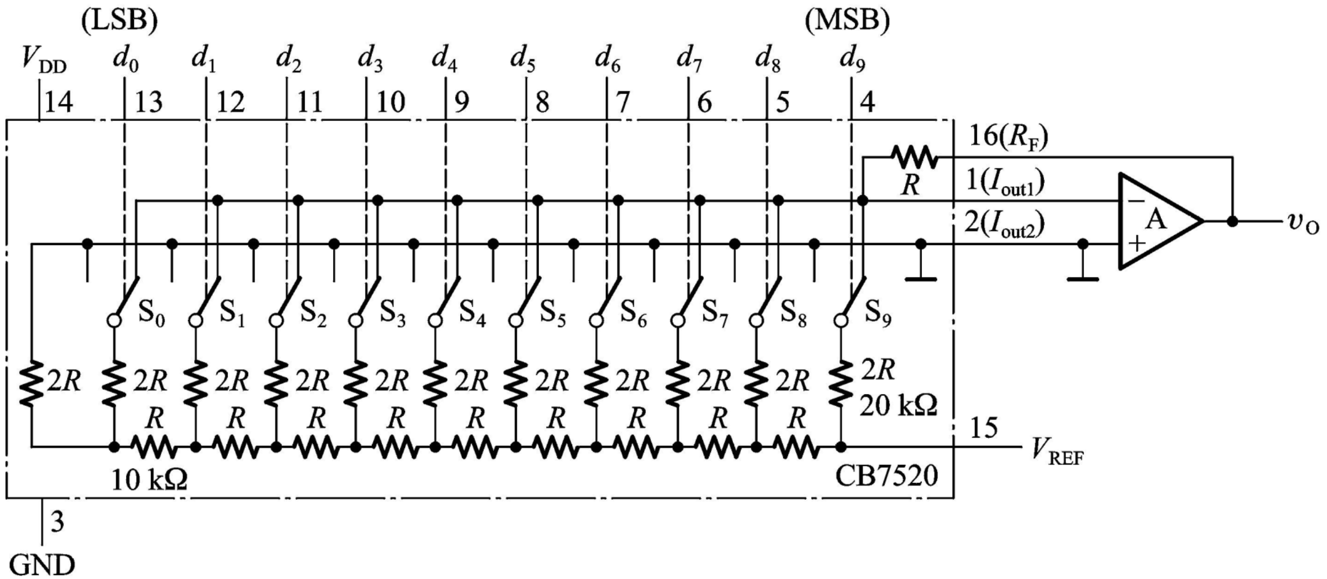
误差分析

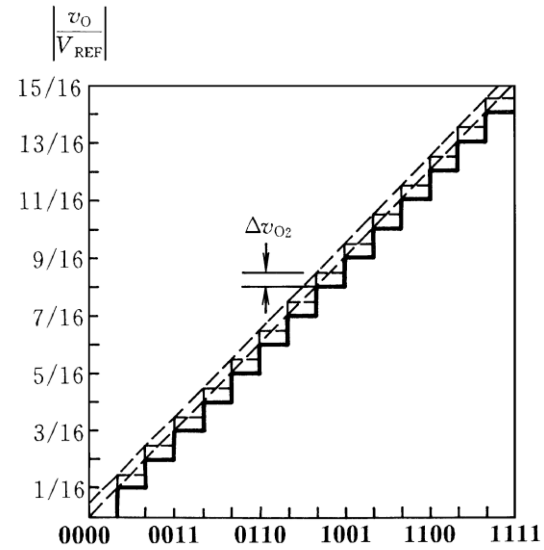


1. ΔV_{REF}引起的误差

$$V_O = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n \Rightarrow \Delta V_O = -\frac{\Delta V_{REF}}{2^n} D_n$$





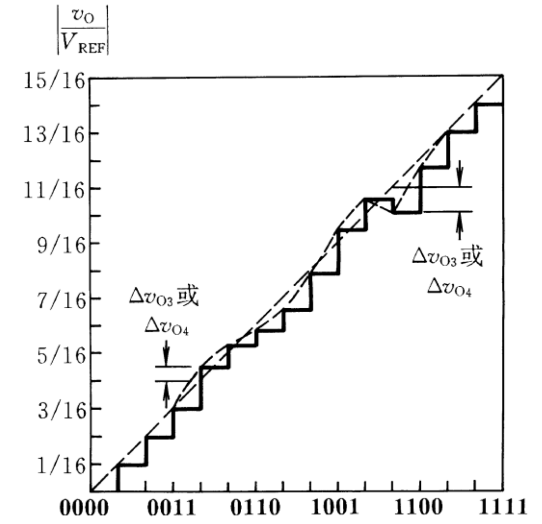


2.漂移误差

由运算放大器零点漂移导致的曲线漂移

3.非线性误差

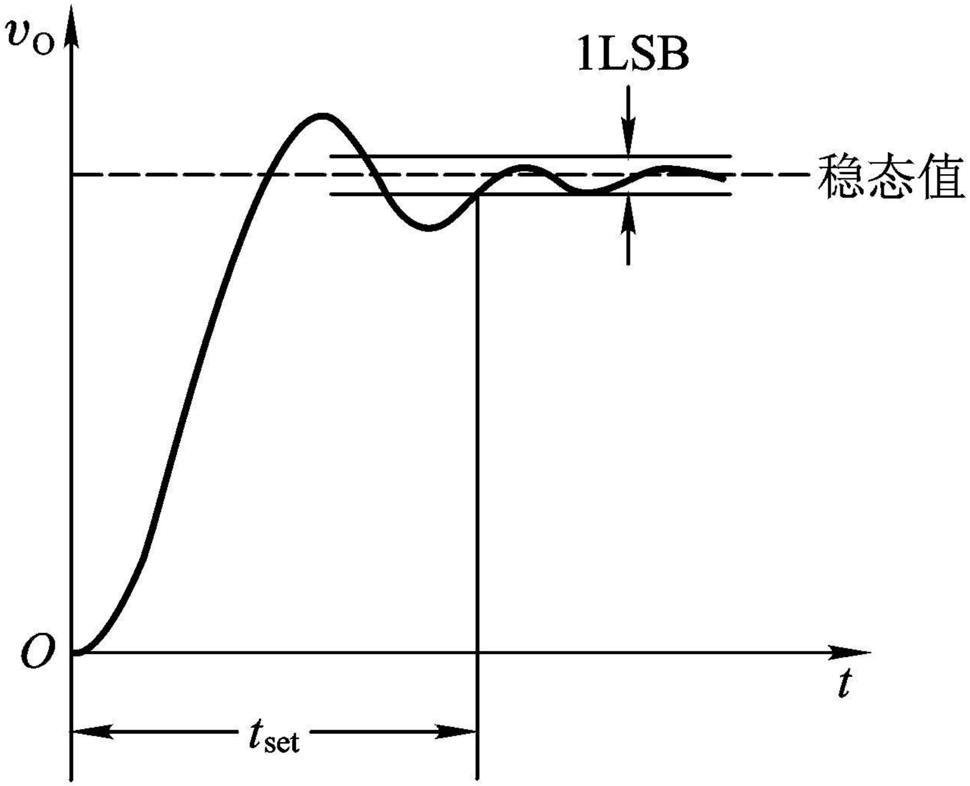
模拟开关的导通内阻不为0，电阻网络的偏差引起



***总误差：几种误差的绝对值相加**

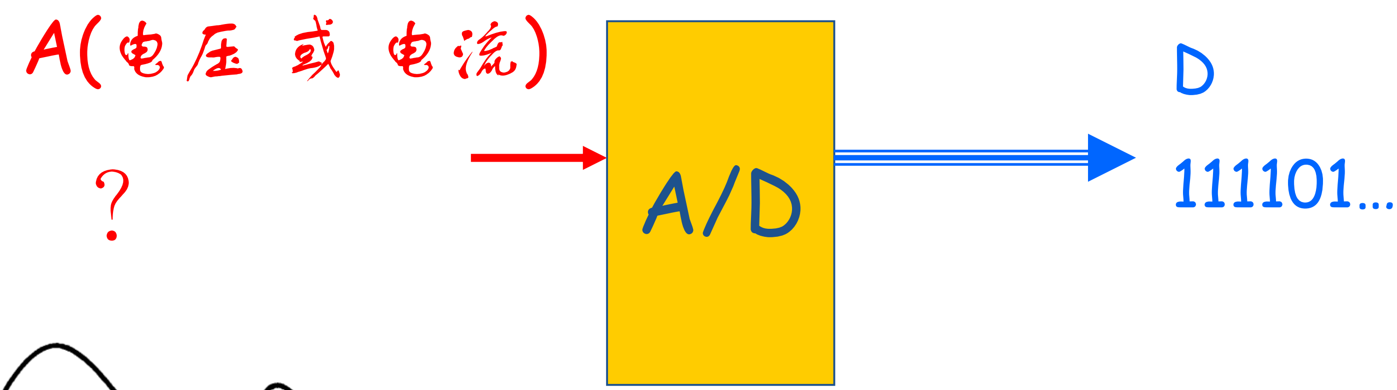
8.3.2 转换速度

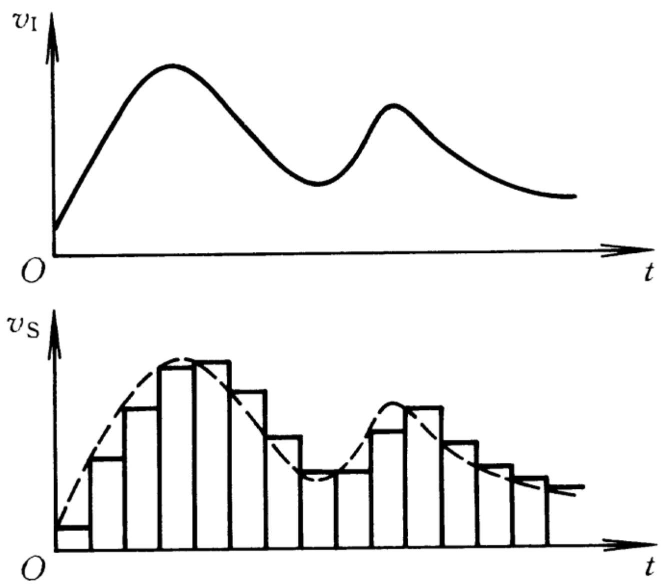
建立时间t_{set}



8.4 A/D转换的基本原理

输入连续变化电压，输出为不连续的数字量



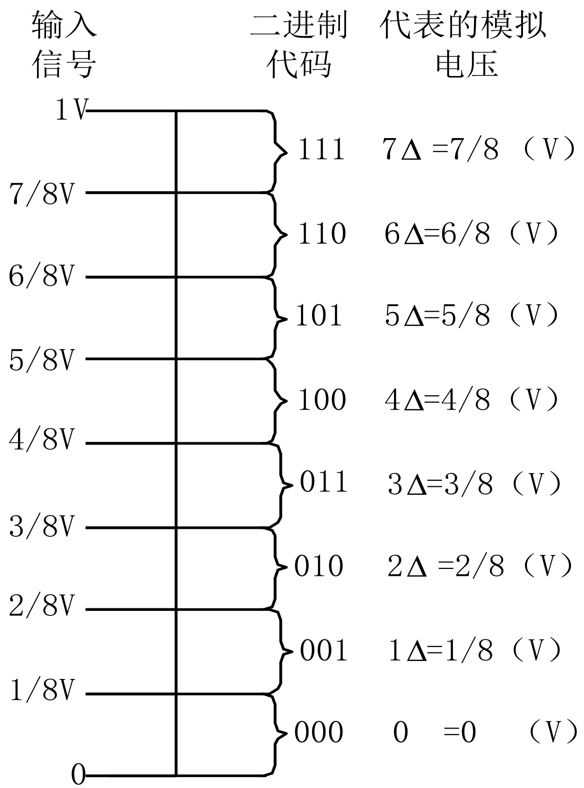


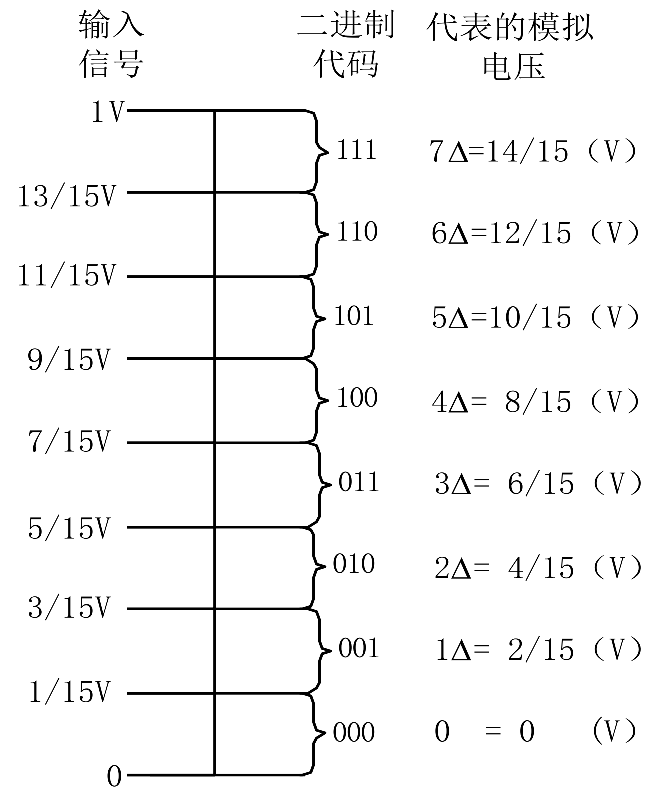
一、取样定理

$$f_S \geq 2f_i(\max), \text{一般取} f_S = (3\sim5)f_i(\max)$$

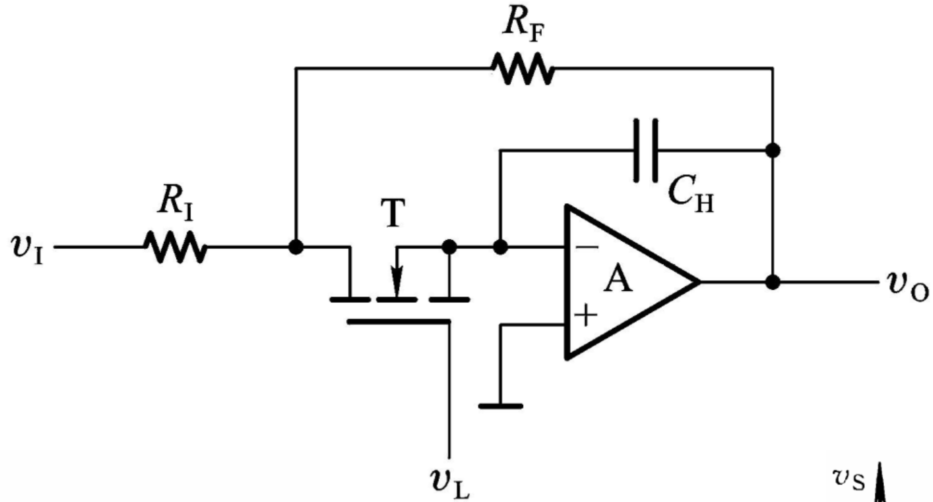
二、量化和编码

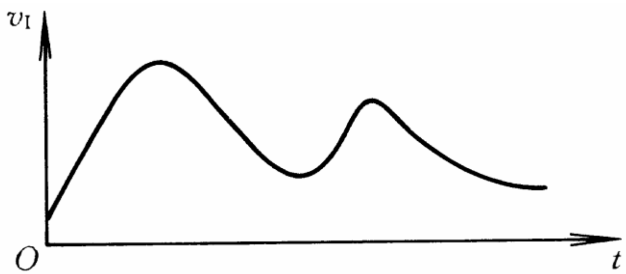
1. 量化：将采样电压表示为最小数量单位（Δ）的整数倍
2. 编码：将量化的结果用代码表示出来（二进制，二-十进制）
3. 量化误差：当采样电压不能被Δ整除时，将引入量化误差

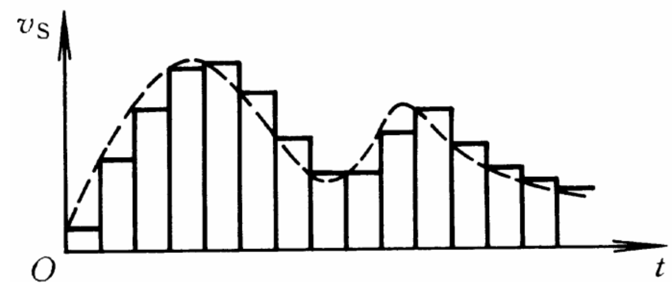




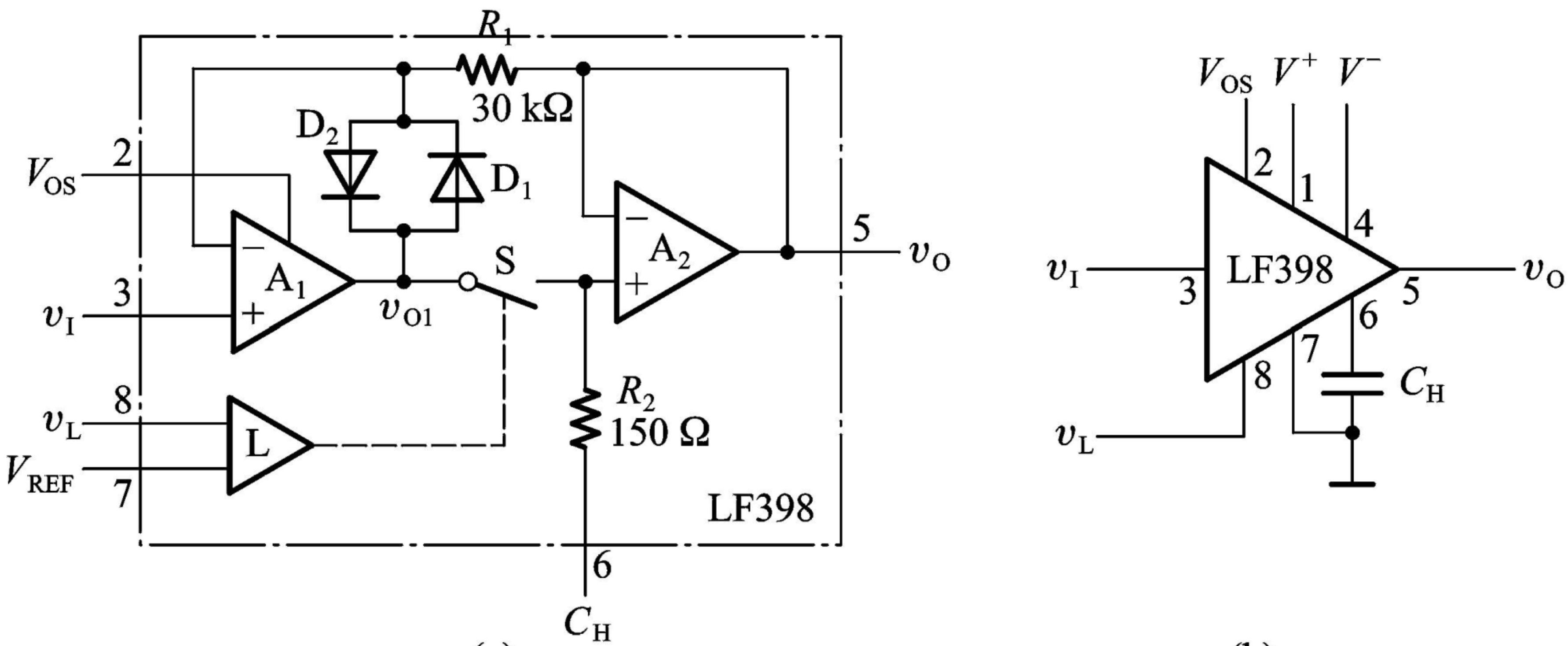
8.5 取样-保持电路







- 加大输入电阻
- 减小输出电阻
- Av=1


R1
30 kΩ
D2
D1
VOS
2
A1
S
A2
5
vO
3
vI
vO1
8
vL
L
R2
150 Ω
VREF
7
LF398
6
CH
V+
V−
1
4
LF398

(a) (b)

8.6 AD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

并联比较型

量化

$$\frac{13}{15}V_R \sim \frac{15}{15}V_R \rightarrow 1111111$$

$$\frac{11}{15}V_R \sim \frac{13}{15}V_R \rightarrow 0111111$$

$$\frac{9}{15}V_R \sim \frac{11}{15}V_R \rightarrow 0011111$$

$$\frac{7}{15}V_R \sim \frac{9}{15}V_R \rightarrow 0001111$$

$$\frac{5}{15}V_R \sim \frac{7}{15}V_R \rightarrow 0000111$$

$$\frac{3}{15}V_R \sim \frac{5}{15}V_R \rightarrow 0000011$$

$$\frac{1}{15}V_R \sim \frac{3}{15}V_R \rightarrow 0000001$$

$$0 \sim \frac{1}{15}V_R \rightarrow 0000000$$

$\frac{13}{15}V_R$

$\frac{11}{15}V_R$

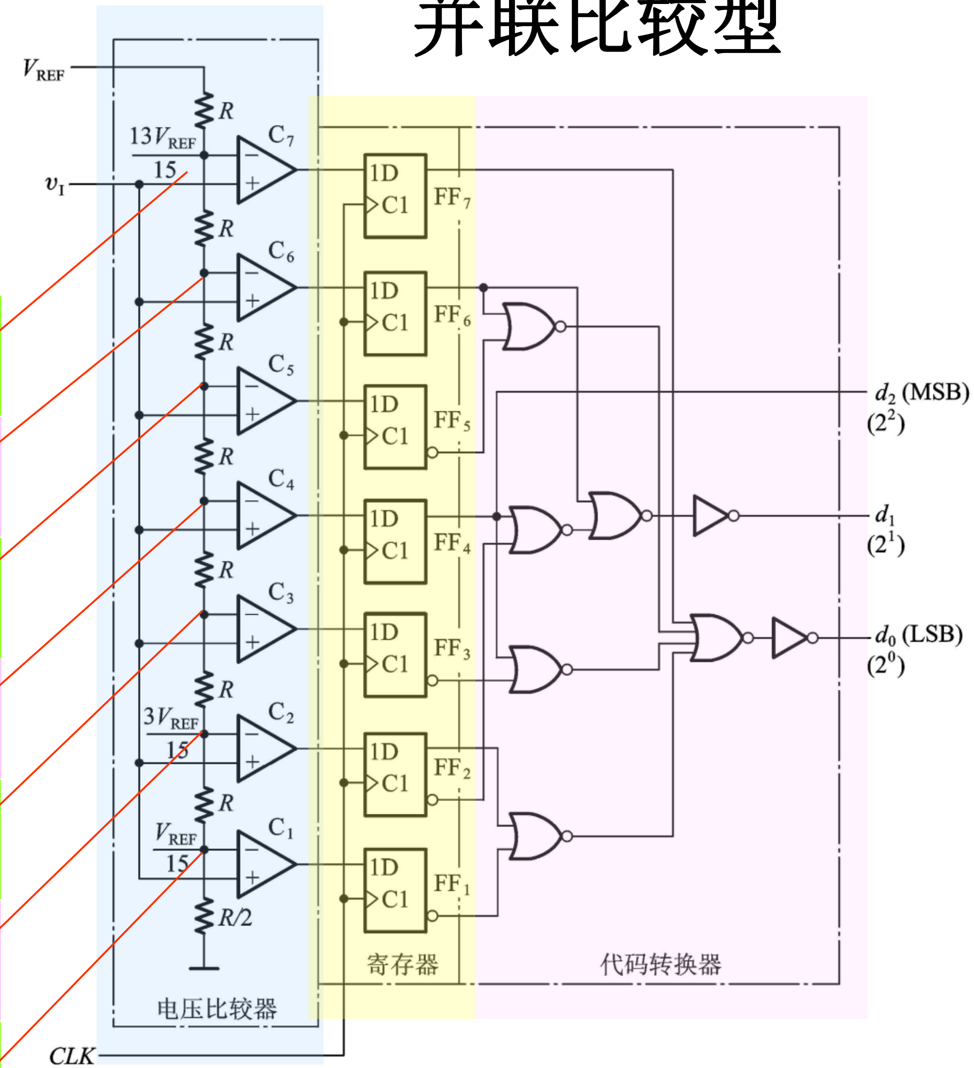
$\frac{9}{15}V_R$

$\frac{7}{15}V_R$

$\frac{5}{15}V_R$

$\frac{3}{15}V_R$

$\frac{1}{15}V_R$



输入→量化→编码

$\frac{13}{15}V_R \sim \frac{15}{15}V_R \rightarrow 1111111$ → 111

$\frac{11}{15}V_R \sim \frac{13}{15}V_R \rightarrow 0111111$ → 110

$\frac{9}{15}V_R \sim \frac{11}{15}V_R \rightarrow 0011111$ → 101

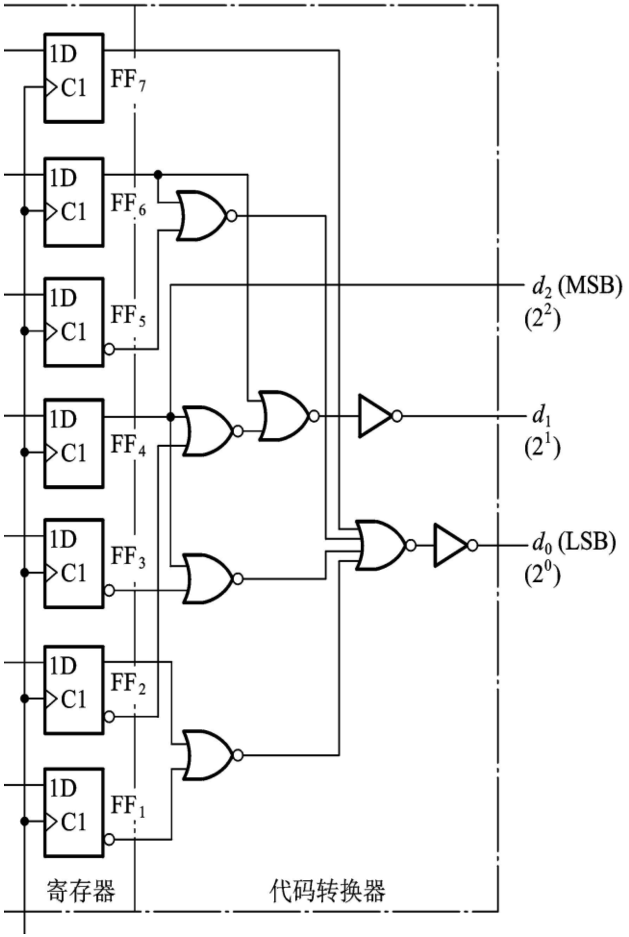
$\frac{7}{15}V_R \sim \frac{9}{15}V_R \rightarrow 0001111$ → 100

$\frac{5}{15}V_R \sim \frac{7}{15}V_R \rightarrow 0000111$ → 011

$\frac{3}{15}V_R \sim \frac{5}{15}V_R \rightarrow 0000011$ → 010

$\frac{1}{15}V_R \sim \frac{3}{15}V_R \rightarrow 0000001$ → 001

$0 \sim \frac{1}{15}V_R \rightarrow 0000000$ → 000



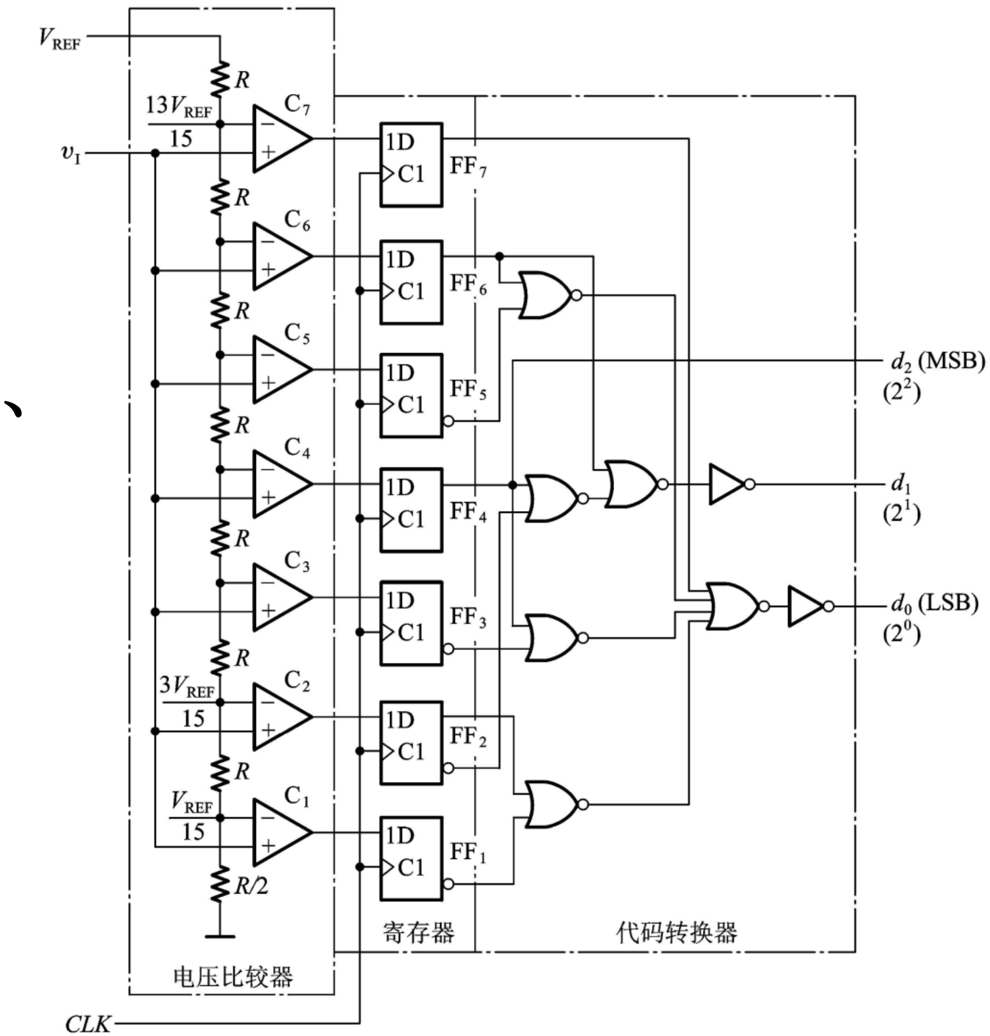
2、特点

*快，CLK触发信号到达到输出稳定建立只需几十纳秒

*精度，受参考电压的稳定度、分压电阻相对精度、电压比较器灵敏度等因素影响

*有存储器，不需要抽样/保持电路

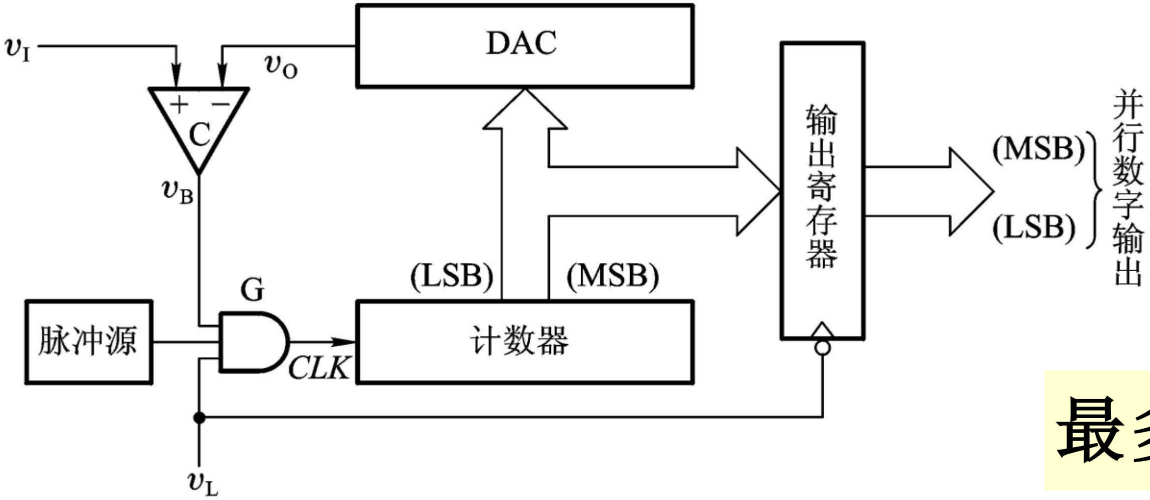
*电路规模，n位需要2^n-1比较器，触发器



8.6.3 逐次逼近型A/D转换器

1. 计数型

基本原理：取一个“D”加到DAC上，得到模拟输出电压，将该值与输入电压比较，如两者不等，则调整D的大小，到相等为止，则D为所求值



！简单

！慢

最多需要 $(2^n - 1)\ T_{CLK}$

2、逐次渐近型

1.高位先置“1”

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

2.再将次高位置“1”

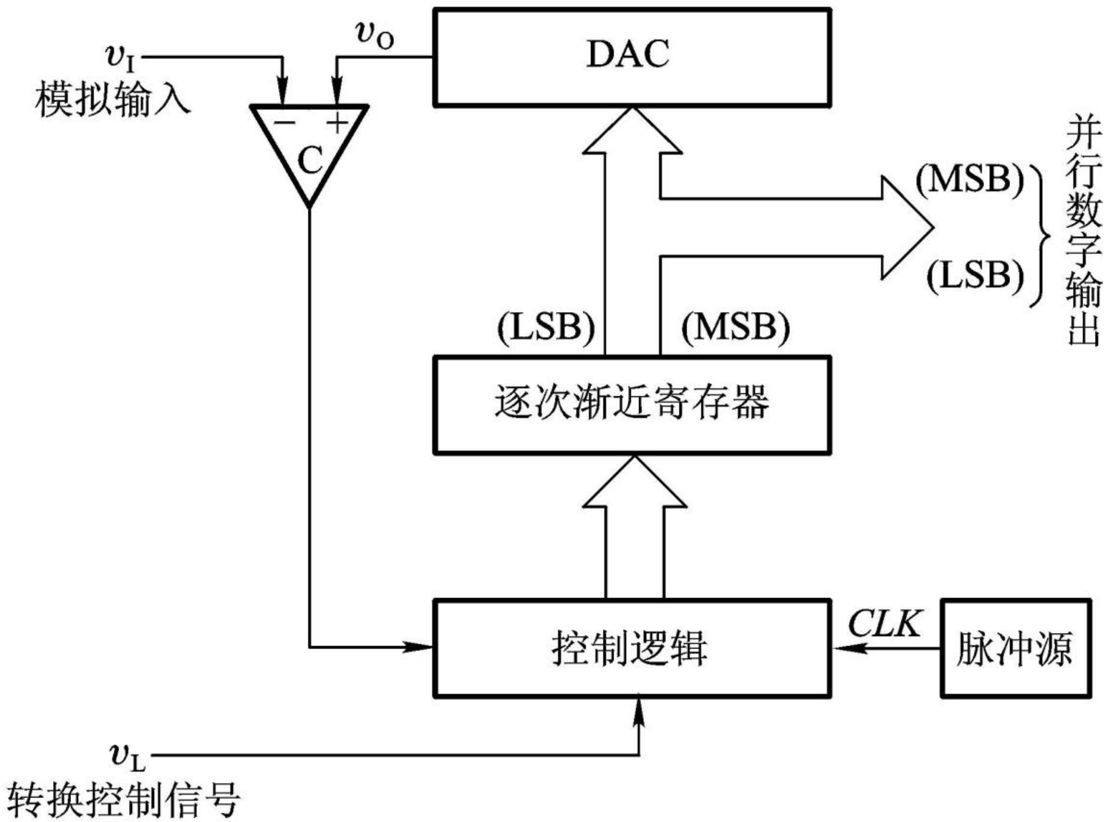
⋮

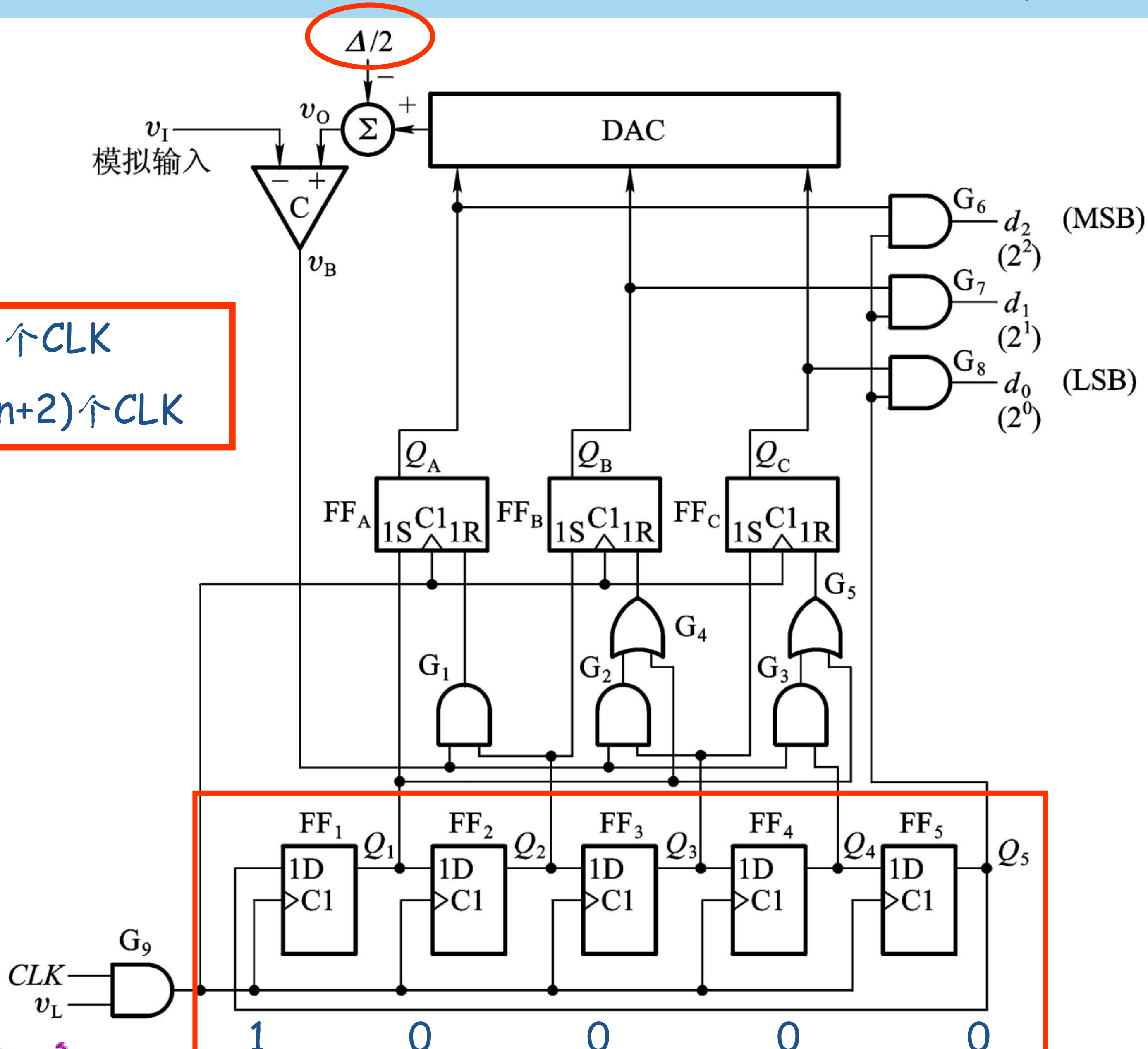
n….

只要比较n次就够了

！ 电路不太复杂

！ 较快





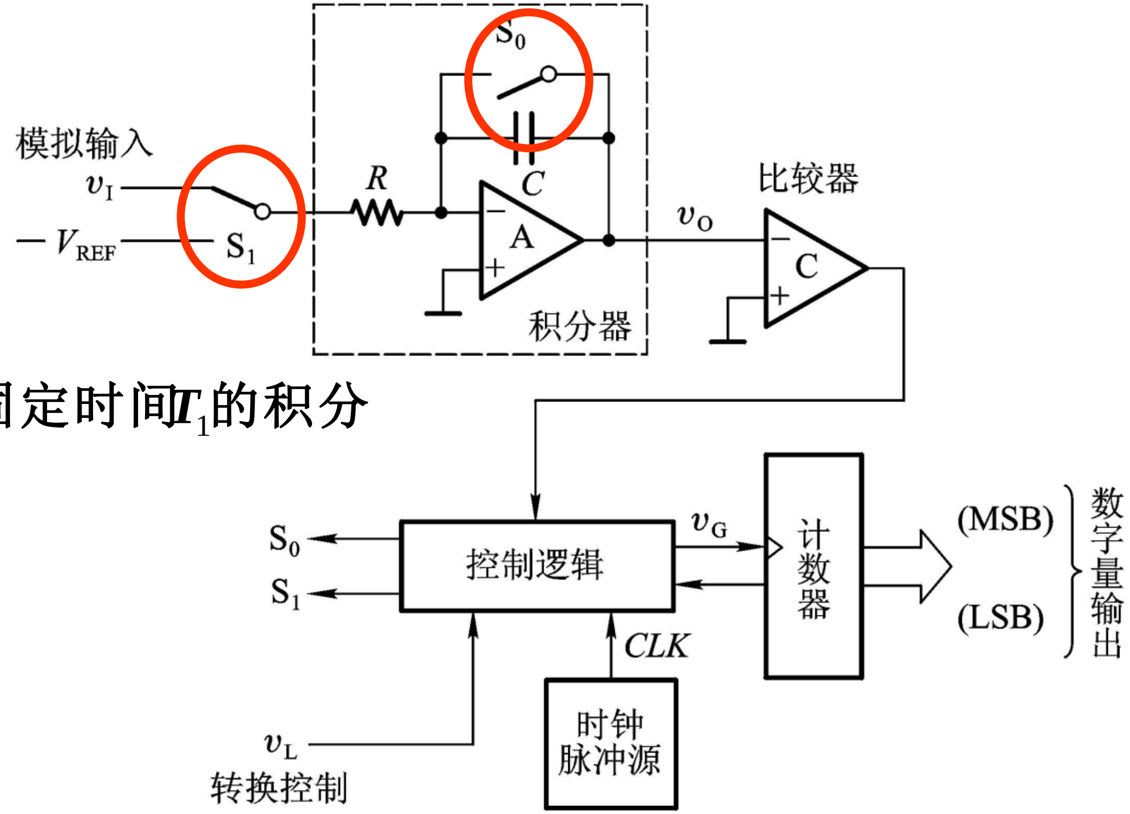
3位：5个CLK

N位：(n+2)个CLK

8.6.4 双积分型A/D转换器

双积分型（V-T变换型）

先将V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脉冲计数



1.起始状态：计数器清零

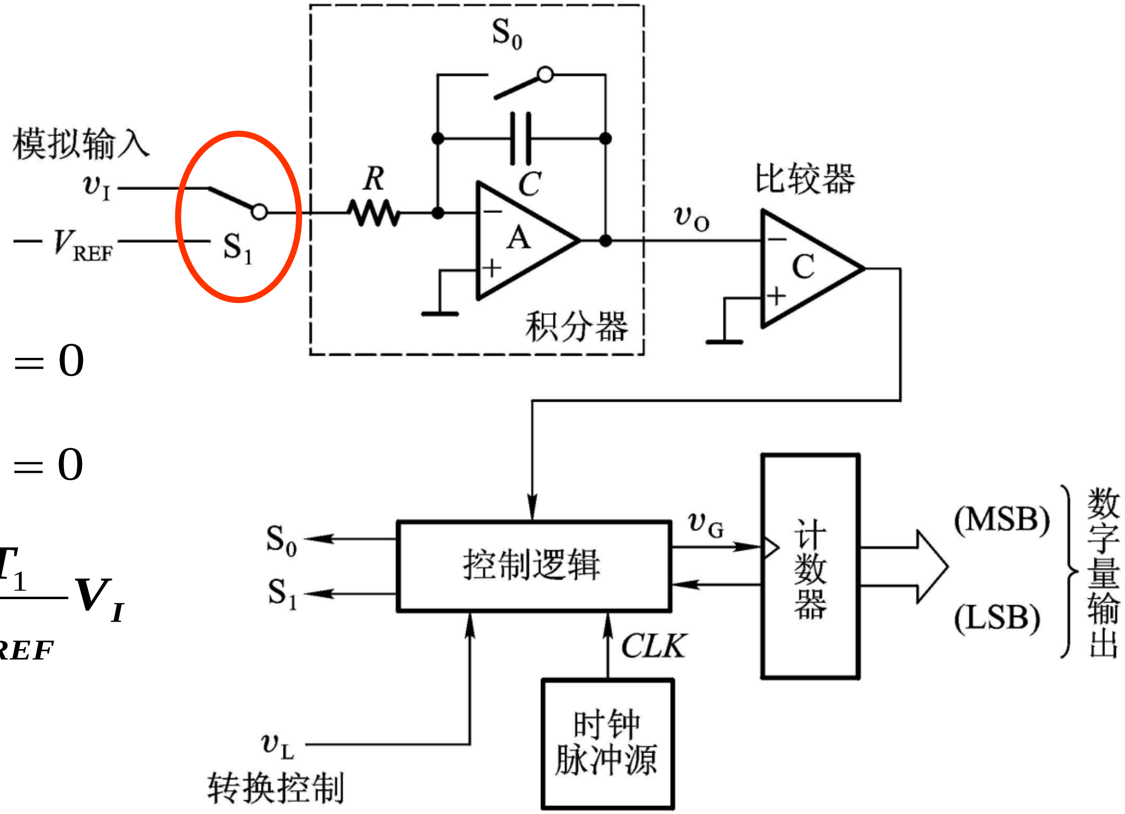
2.$V_L=1$,转换开始(S_0断开)

第一步，$S_1\rightarrow V_I$，积分器作固定时间T_1的积分

T_1期间V_I不变

$$V_O=\frac{1}{C}\int_0^{T_1}-\frac{V_I}{R}dt=-\frac{T_1}{RC}V_I$$

所以$V_O\propto V_I$



第二步：$S_I \to -V_{REF}$

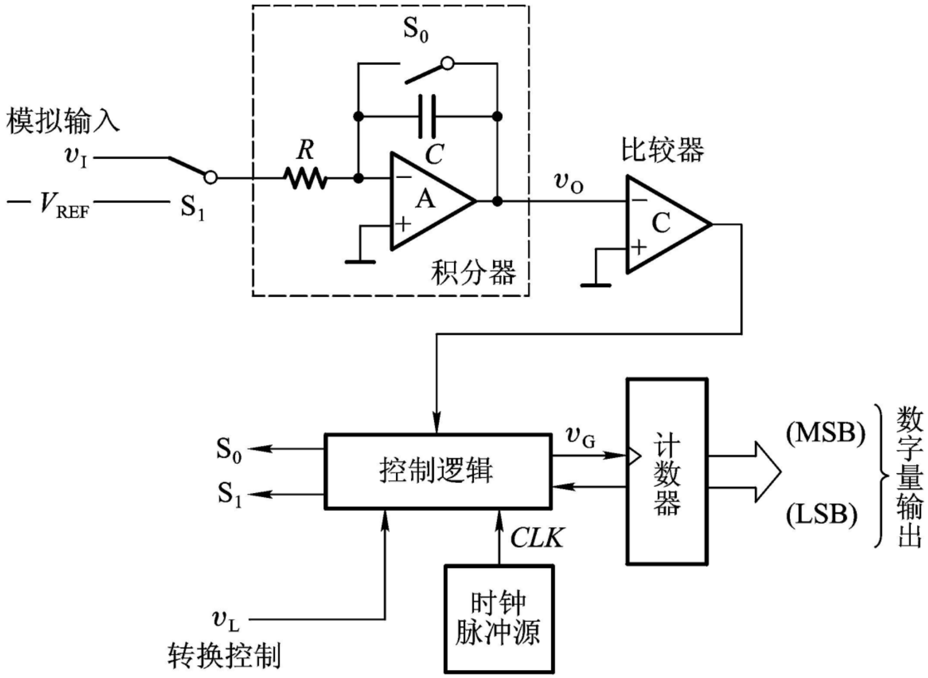
积分器作反相积分，至$V_O = 0$

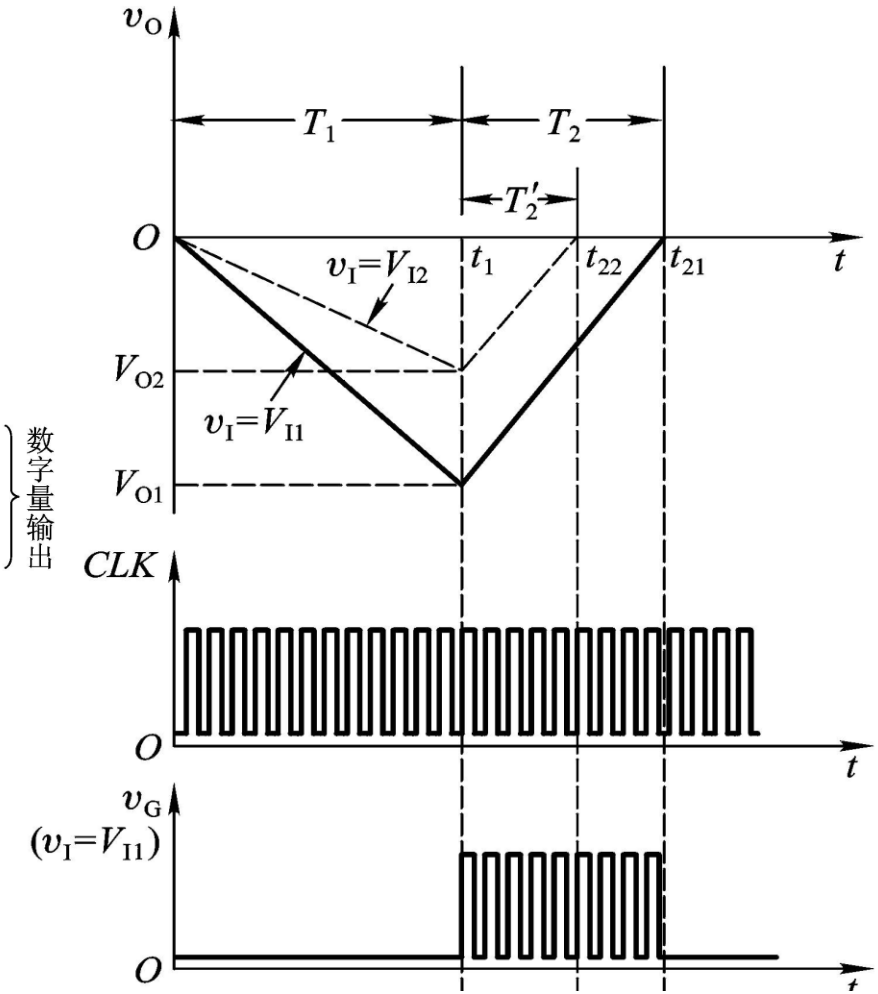
$$V_O = \frac{1}{C}\int_0^{T_2} \frac{V_{REF}}{R} dt - \frac{V_I}{RC} T_1 = 0$$

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

令计数器在T_2期间用固定的频率f_C $(T_C = \frac{1}{f_C})$脉冲计数，

则 $$D = T_2 f_C = \frac{T_1}{T_C V_{REF}} V_I$$

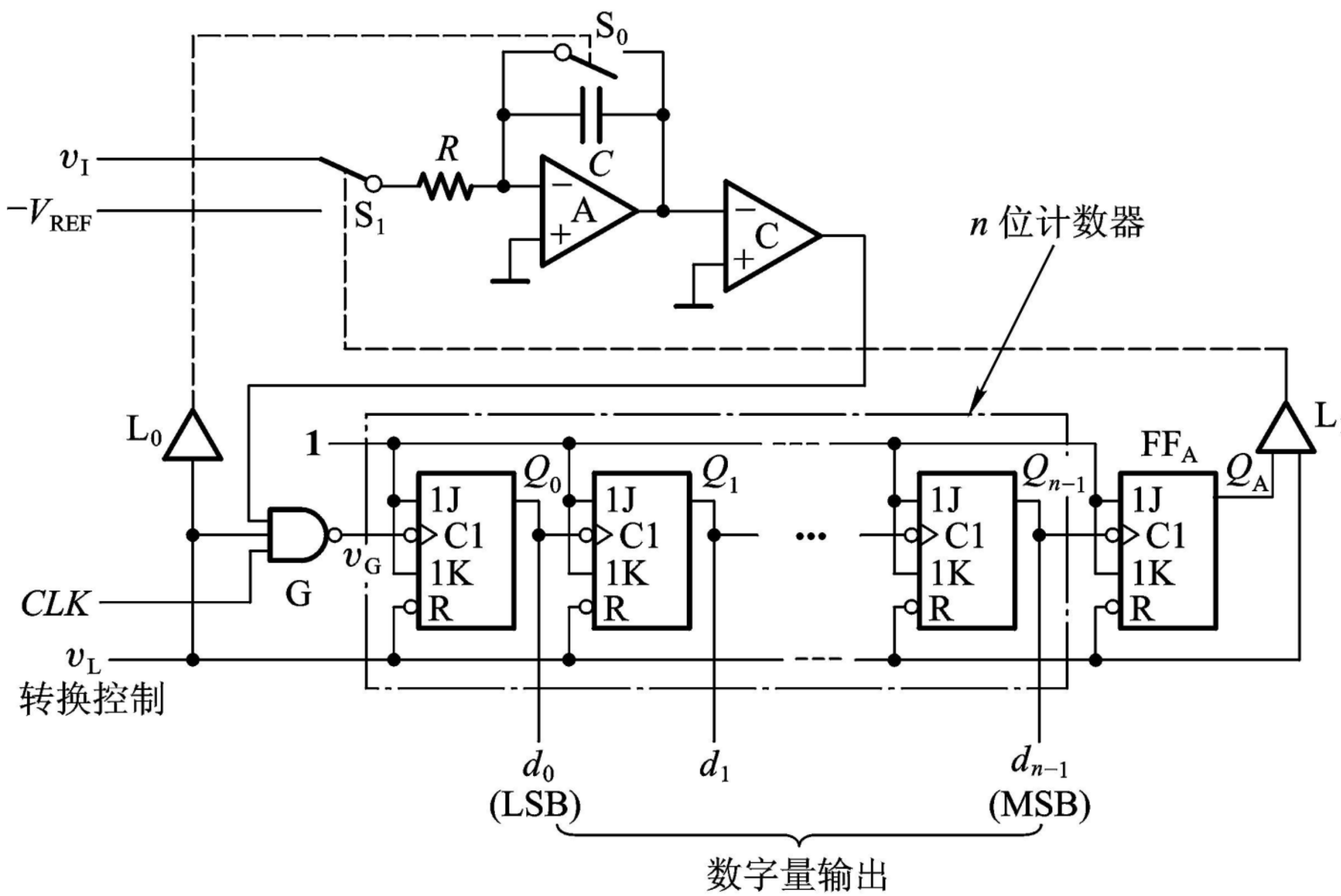




$$D = T_2 f_C = \frac{T_1}{T_C V_{REF}} V_I$$

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

电路实现



若$\boldsymbol{T}_1 = 2^n \boldsymbol{T}_C$，$\boldsymbol{D} = \dfrac{2^n}{\boldsymbol{V}_{REF}} \boldsymbol{V}_I$

双积分型A/D转换器优缺点：

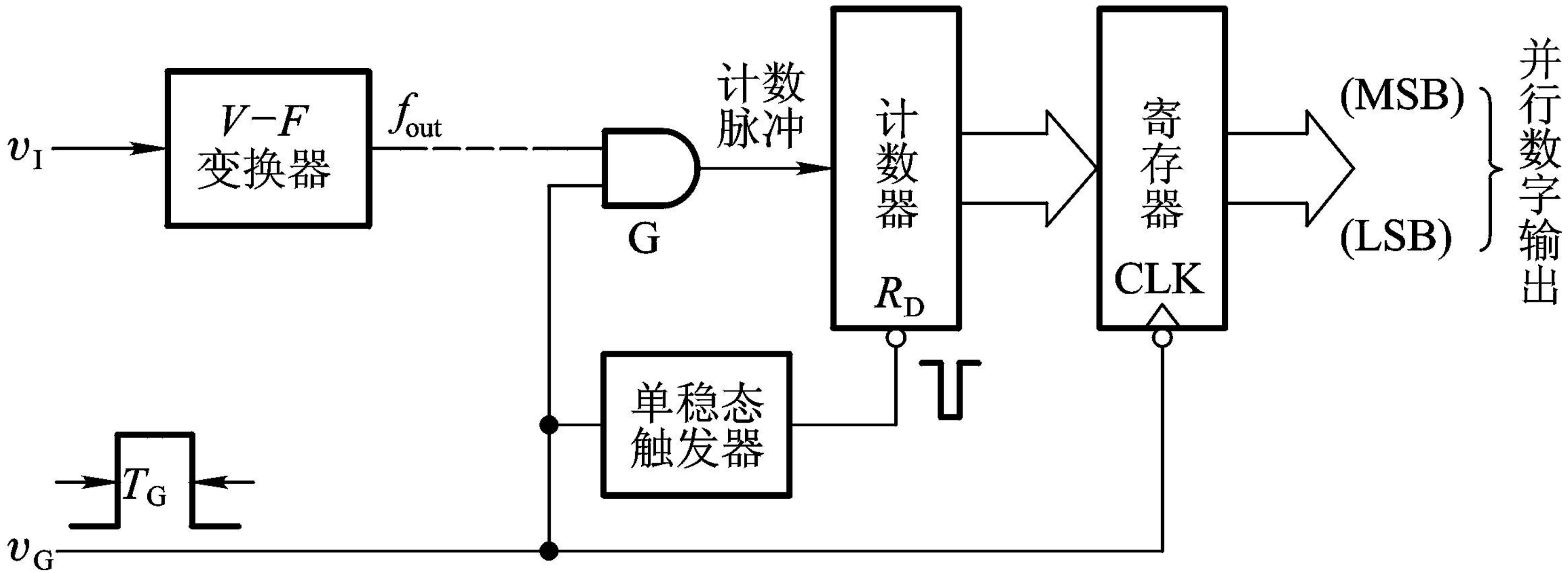
优点：

1. 工作性能比较稳定：转换结果与R、C的参数无关
2. 转换结果可以与时钟信号周期无关
3. 抗干扰能力比较强

缺点：

工作速度低

8.6.6 V-F变换型A/D转换器



8.7 ADC的转换速度与转换精度

8.7.1 转换精度

1. 分辨率：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：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。

8.7.2、速度取决于电路结构类型

并联比较型：<1微秒

逐次渐近型：10~100微秒/次

双积分型：几十毫秒/次