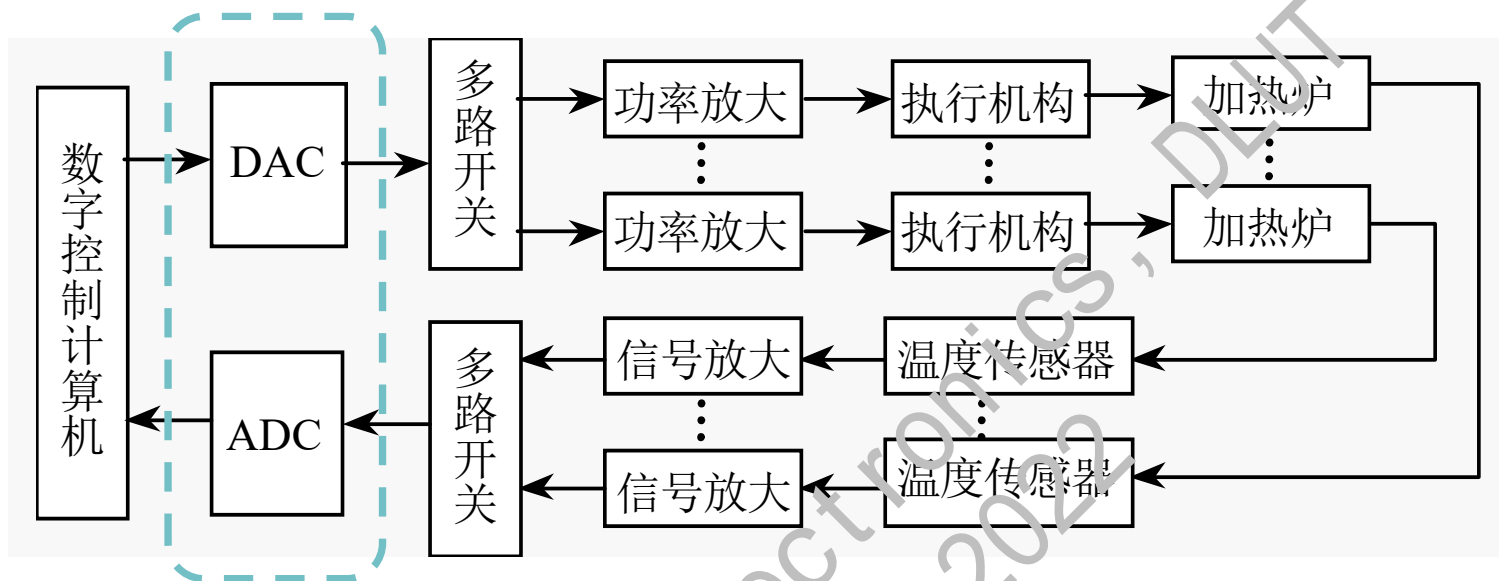


第九章 数模模数转换

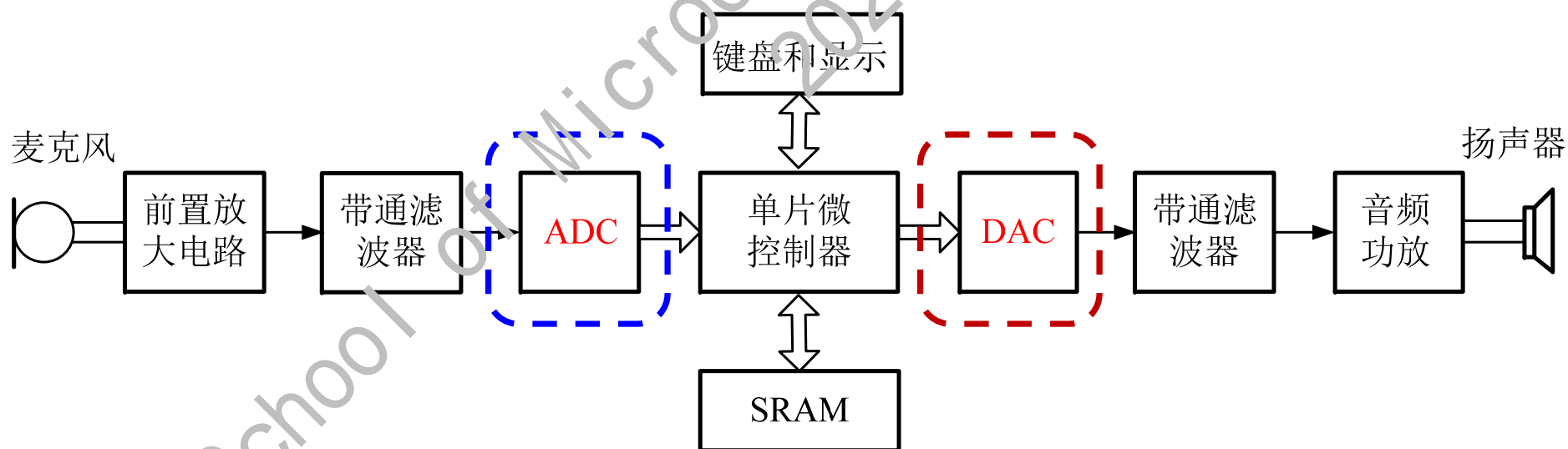
Digital Analog Conversions

§9.1 数模转换电路 **DAC**

§9.2 模数转换电路 **ADC**



典型加热炉闭环实时控制系统



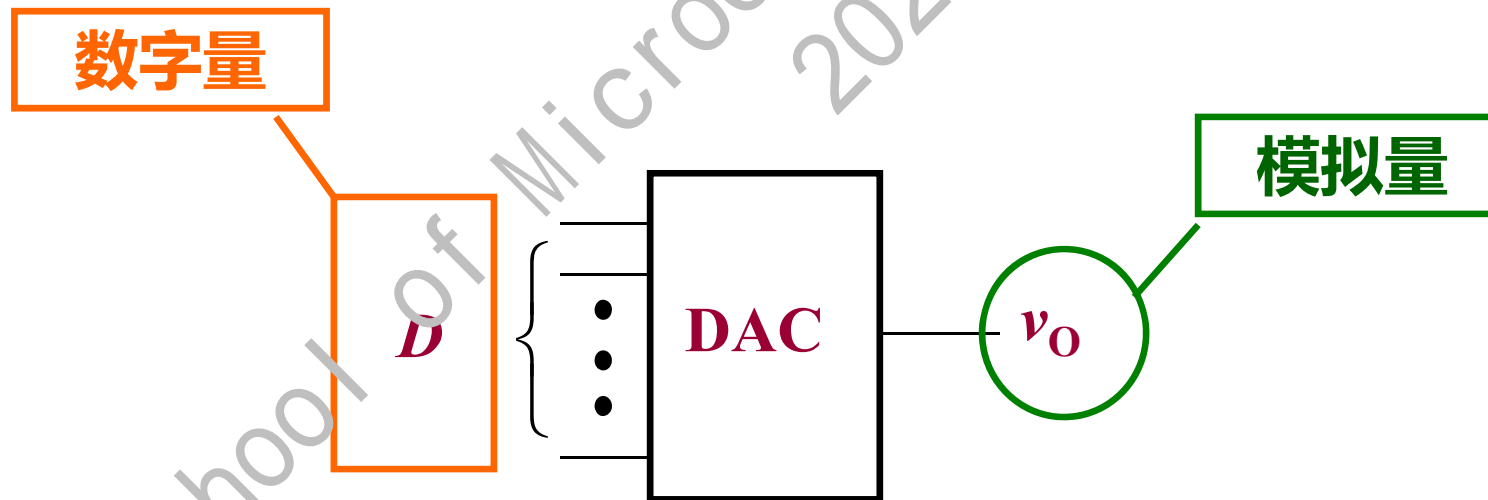
典型电子系统——语音的存储与回放系统

§ 9.1 数模转换电路

(Digital Analog Convertor, DAC)

§ 9.1.1 D/A 转换关系 Relationships of D/A conversions

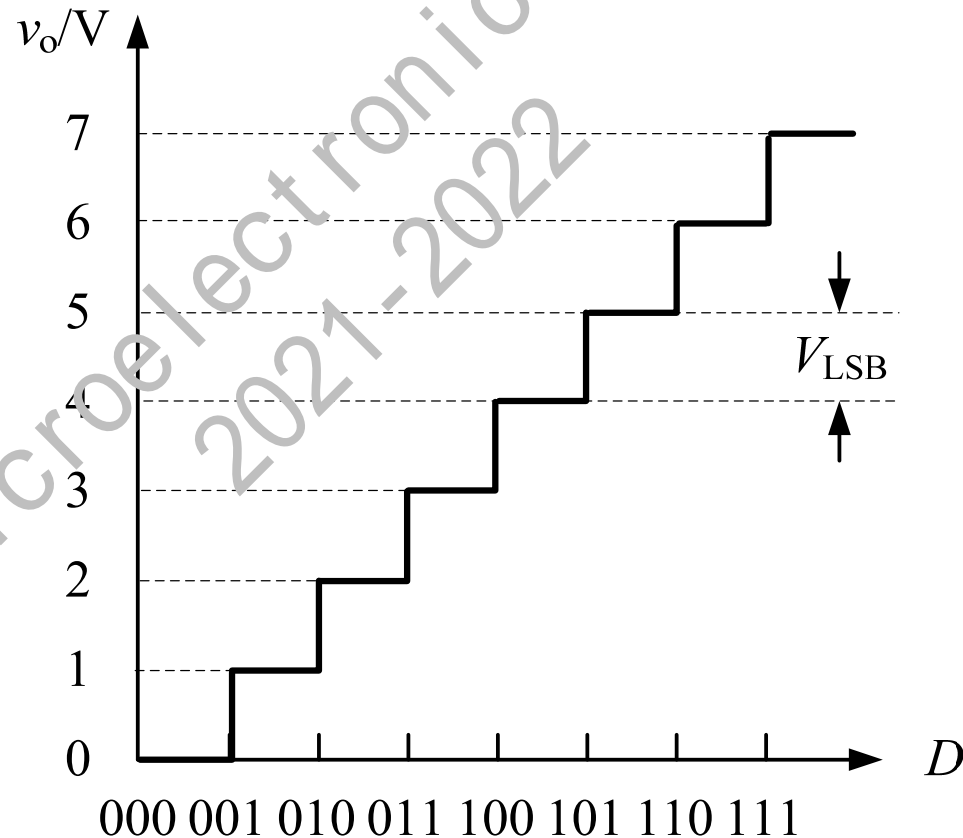
将**数字量**转化成与其成正比的**模拟量**



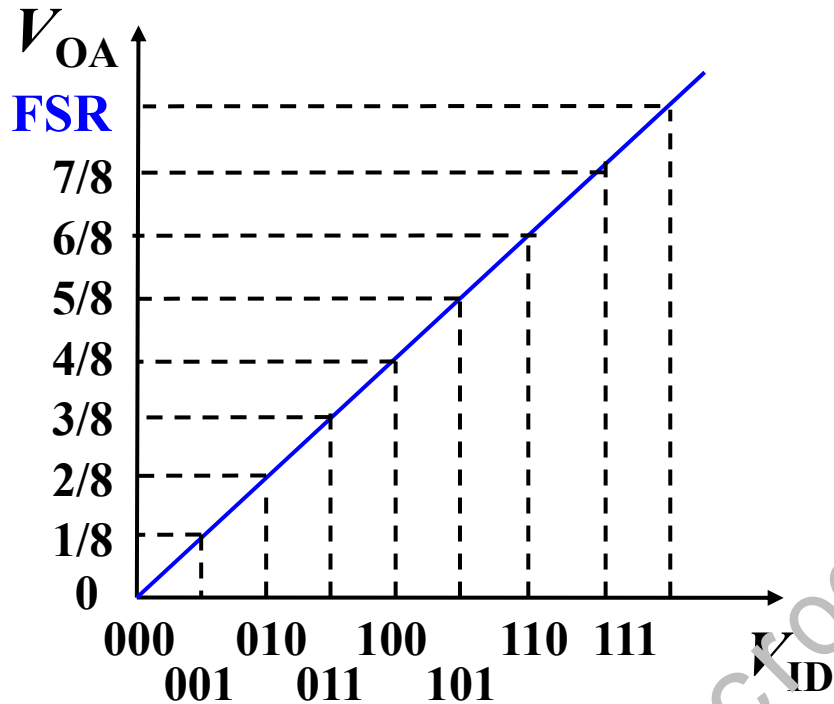
$$v_O = K \times D = K \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$$

以三位DAC为例，设 $K=1$ ，可得出 v_O 和 D 的关系

$D_2D_1D_0$	v_O
0 0 0	0 V
0 0 1	1 V
0 1 0	2 V
0 1 1	3 V
1 0 0	4 V
1 0 1	5 V
1 1 0	6 V
1 1 1	7 V



最小分辨率电压 V_{LSB} ：两个相邻数码转换输出的电压差，可用**最低有效位1LSB**表示



最大输出电压 $(2^n - 1)V_{LSB}$

将数字量表示成满量程（Full Scale Range, FSR）电压的分数

$$V_{LSB} = \frac{1}{2^n} \text{FSR}$$

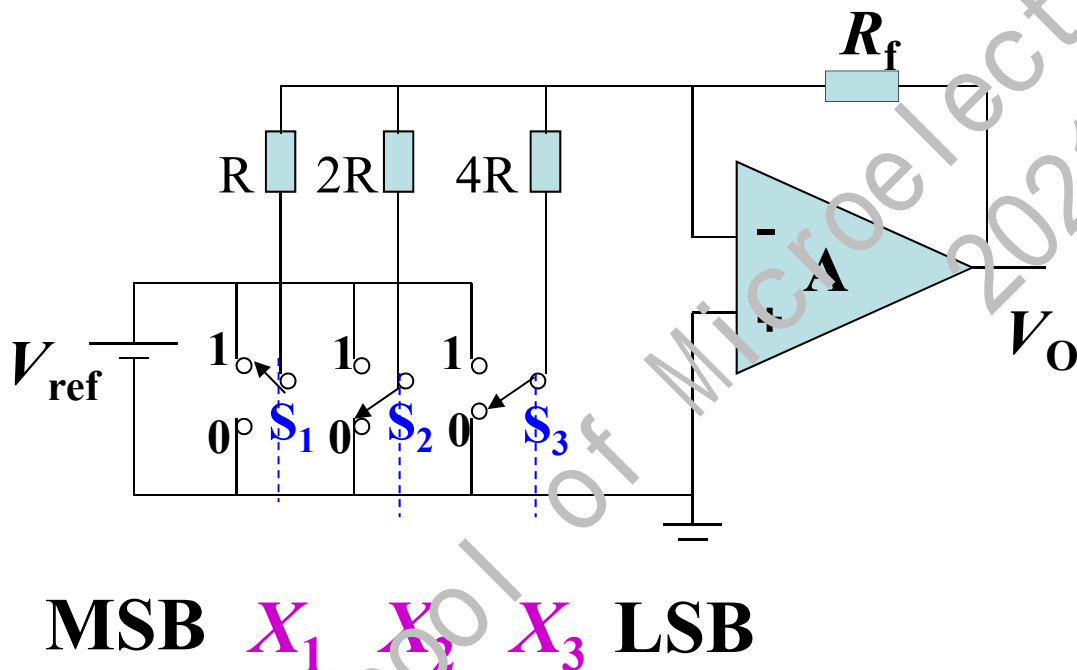
3位数字量 $\rightarrow \frac{(\quad)}{2^3} \text{FSR}$ **001 对应** $\frac{1}{2^3} \text{FSR}$

练习: 1001 $\rightarrow \frac{9}{2^4} \text{FSR}$ 0011 $\rightarrow \frac{3}{2^4} \text{FSR}$

§ 9.1.2 权电阻型DAC Binary-Weighted DAC

Weighted-Resistance DAC

电路 (3 位)



V_{ref} : 参考电压

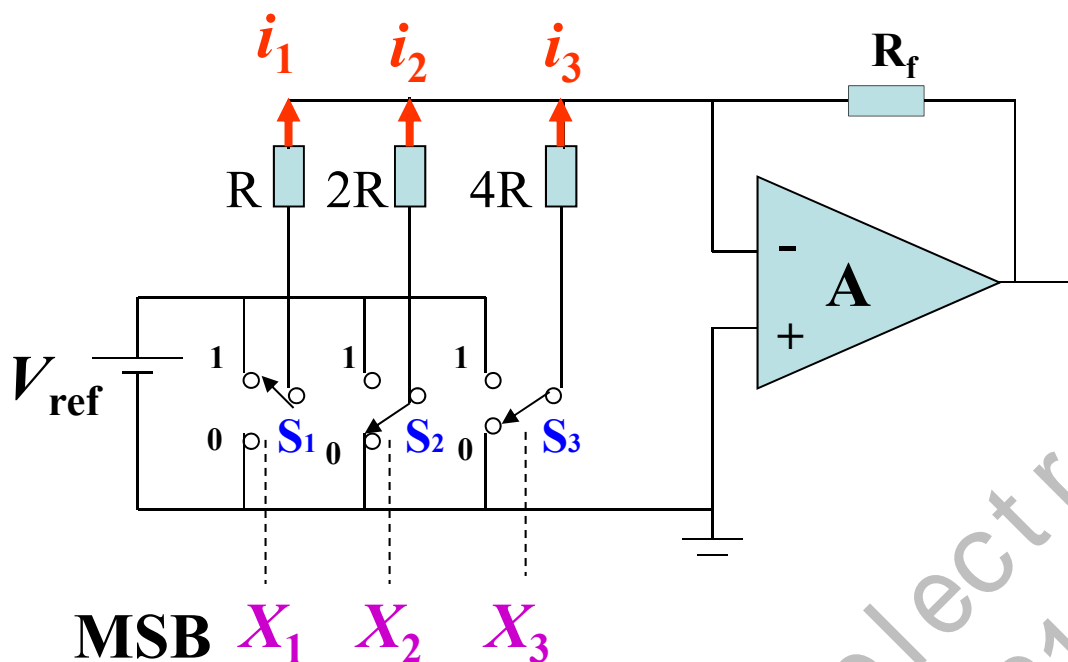
S_i : 模拟开关

X_i : 3位数字

S_i 由 X_i 决定

$X_i = 1$, $S_i \rightarrow V_{\text{ref}}$

$X_i = 0$, $S_i \rightarrow \text{地}$



支路电阻值:

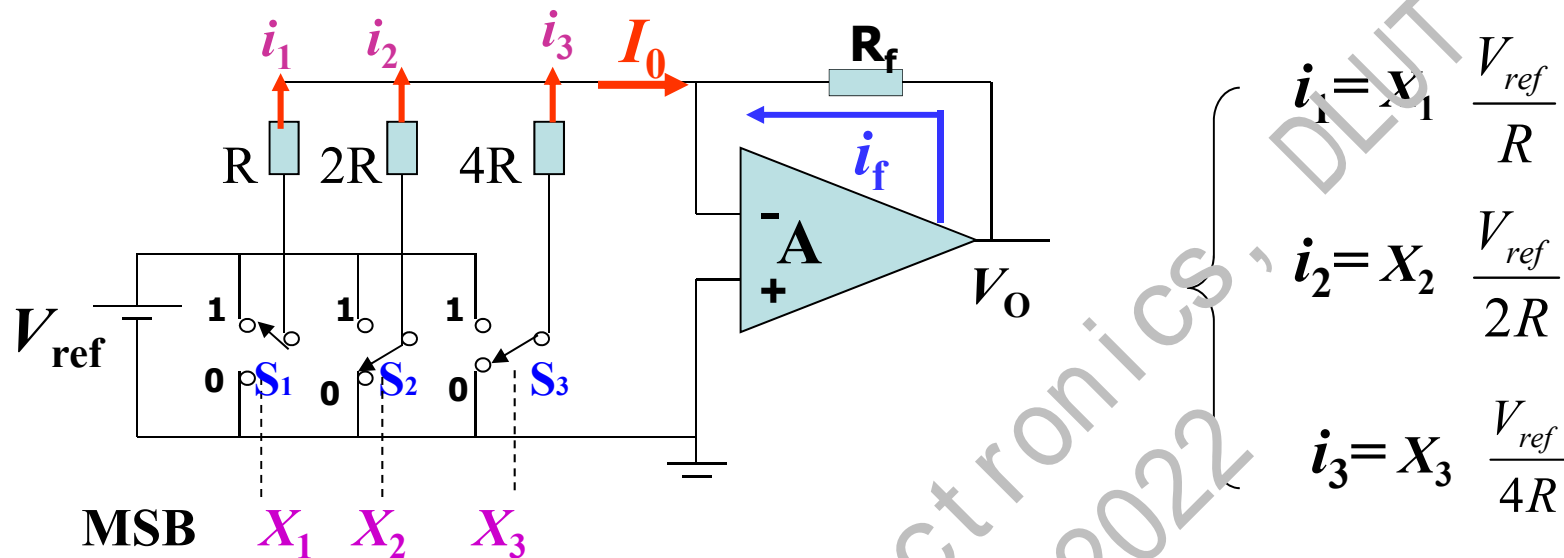
$2^0R, 2^1R, 2^2R \dots$

R_f 反馈电阻

分析: 输入数字量 $X_1X_2X_3$ \longrightarrow 输出模拟量 V_o

叠加定理

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 \text{ 单独作用 } (X_1=1, X_2=X_3=0) : i_1 = X_1 \frac{V_{ref}}{R} \\ X_2 \text{ 单独作用 } (X_2=1, X_1=X_3=0) : i_2 = X_2 \frac{V_{ref}}{2R} \\ X_3 \text{ 单独作用 } (X_3=1, X_1=X_2=0) : i_3 = X_3 \frac{V_{ref}}{4R} \end{array} \right.$$



输出总电流: $I_0 = i_1 + i_2 + i_3 =$

$$X_1 \frac{V_{ref}}{R} + X_2 \frac{V_{ref}}{2R} + X_3 \frac{V_{ref}}{4R} = \frac{2V_{ref}}{R} \cdot \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3}$$

X_1 的权是 X_2 的2 倍, 与二进制数的权相对应, 称为权电阻网络

模拟输出电压: $V_O = i_f R_f = -I_0 R_f$

$$V_O = -\frac{2V_{ref}}{R} R_f \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3}$$

$$V_O \propto X_1 X_2 X_3$$

3位数字量 $\longrightarrow \frac{(\quad)}{2^3} \text{FSR}$

$$V_o = - \underbrace{\frac{2V_{ref}}{R} R_f}_{\text{FSR}} \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3}$$

反向

分子：二进制数按权展开的十进制数

分母： 2^3 (3位)

n 位 权电阻 DAC 模拟输出电压 V_o

$$V_o = - \underbrace{\frac{2V_{ref}}{R} R_f}_{\text{FSR}} \frac{X_1 2^{n-1} + X_2 2^{n-2} + \dots + X_n 2^0}{2^n}$$

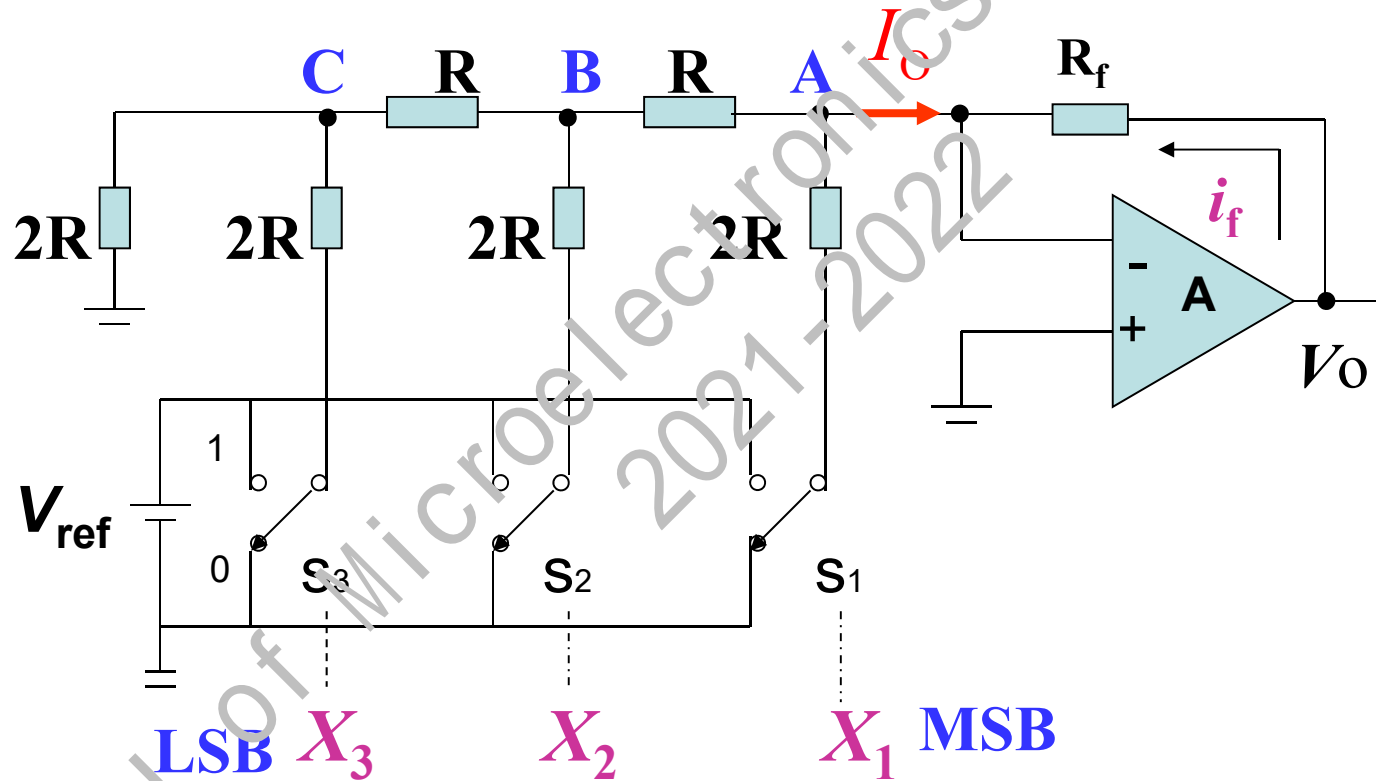
FSR

优点：简单 直观

缺点：电阻值太多不易准确

§9.1.3 R-2R 梯形DAC (Ladder)

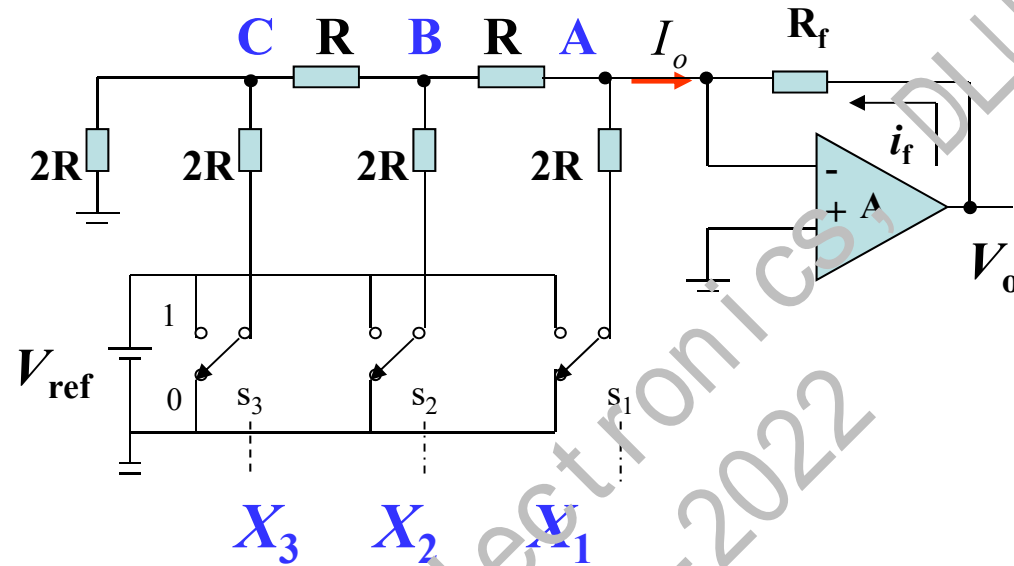
电路



X_1 MSB

X_3 LSB

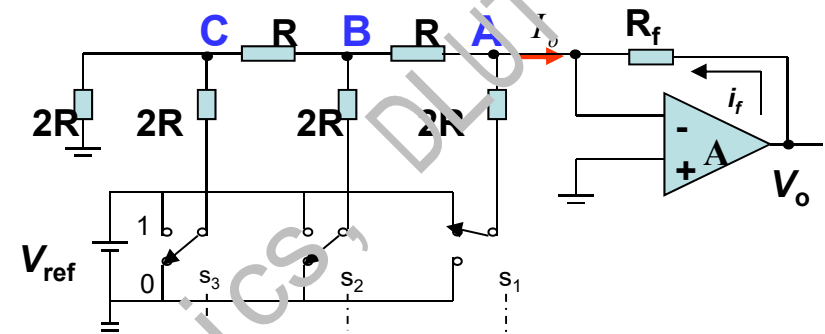
位置与权电阻相反



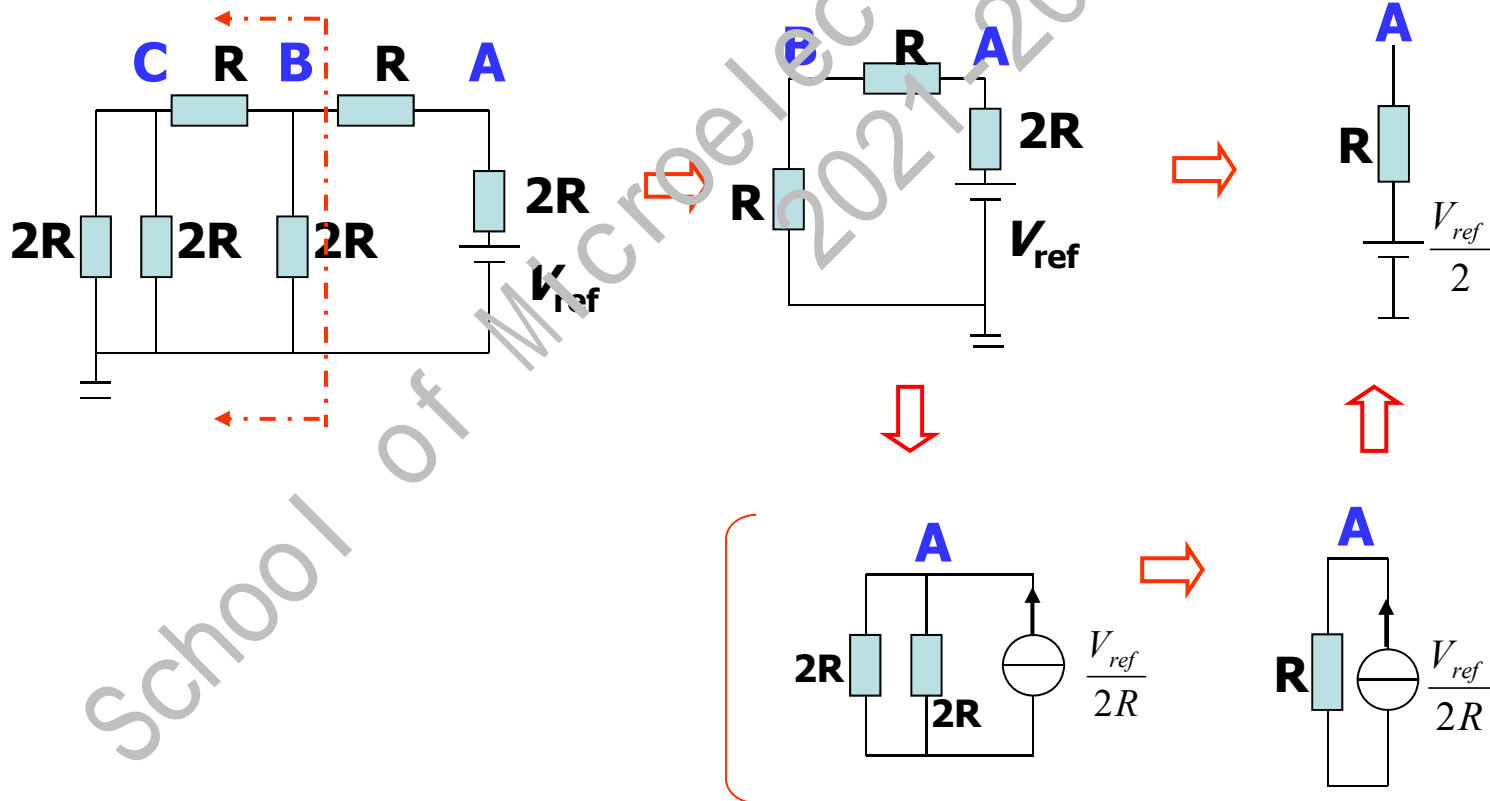
特点:

- 1) 整个网络只有 2 种电阻。网络由相同的电路环节组成, 每节有 2 个电阻, 一个开关, 每节对应二进制一位数。
- 2) 每个节点 (C, B, A) 对地等效电阻都是 R 。

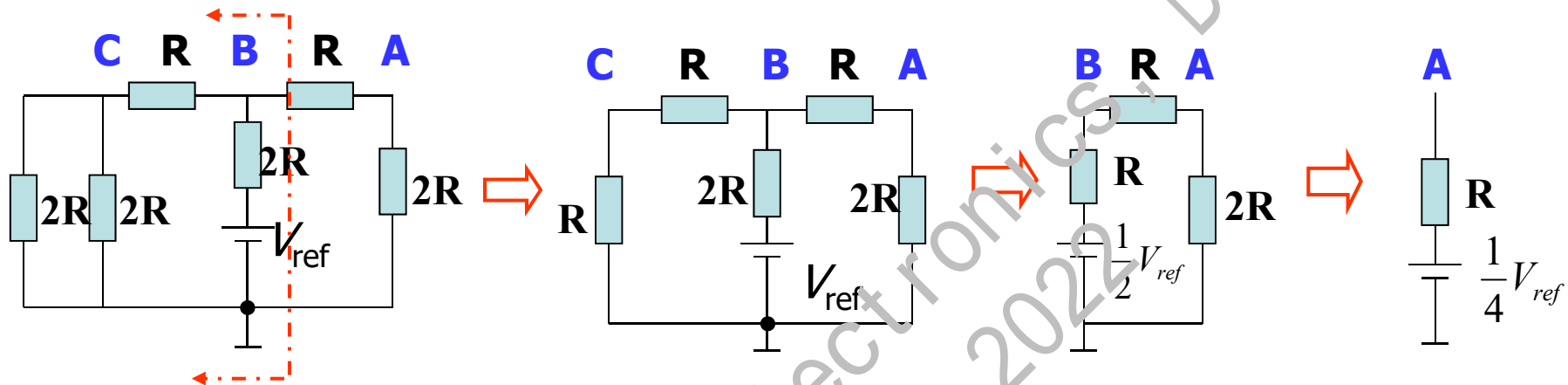
分析



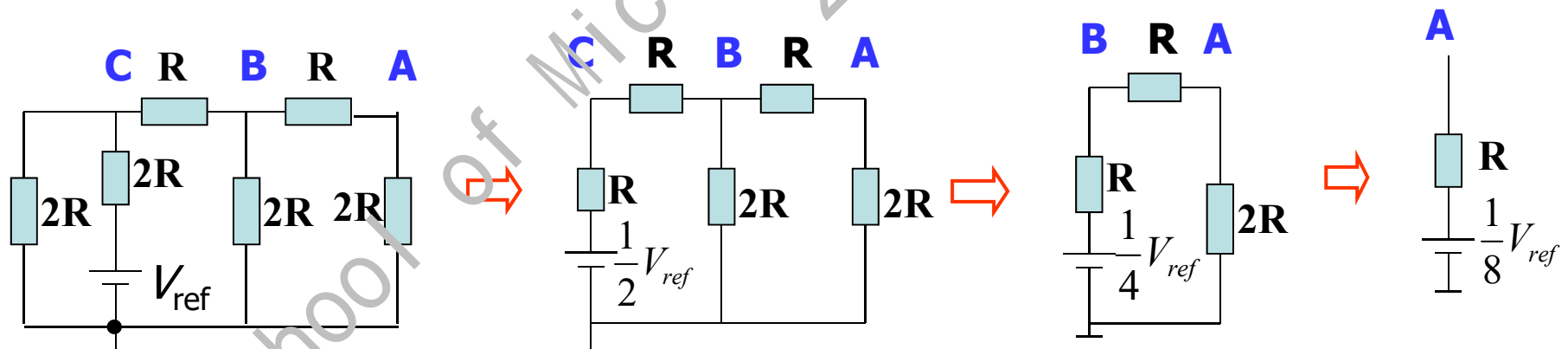
X_1 单独作用 ($X_1 X_2 X_3 = 100$)



X_2 单独作用: ($X_1X_2X_3=010$)



X_3 单独作用: ($X_1X_2X_3=001$)



叠加:总电压

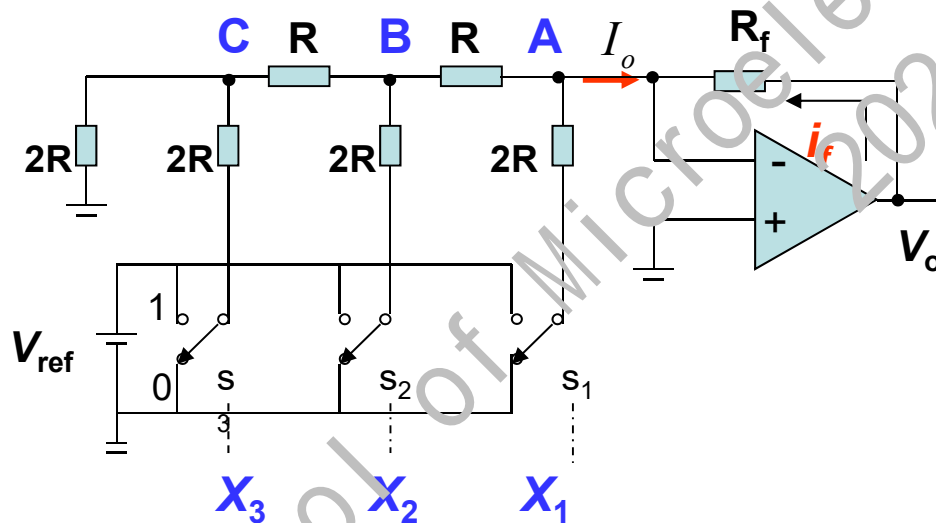
$$V_i = X_1 \frac{V_{ref}}{2} + X_2 \frac{V_{ref}}{4} + X_3 \frac{V_{ref}}{8} = V_{ref} \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3}$$

从图中有

$$I_0 = -i_f$$

$$\frac{V_i}{R} = -\frac{V_o}{R_f}$$

$$\therefore V_o = -\frac{V_i}{R} R_f$$



R-2R 梯形 DAC 模拟输出电压:

$$V_o = - \underbrace{\frac{V_{ref}}{R} R_f}_{FSR} \cdot \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3}$$

FSR

FSR

$$FSR = \frac{V_{ref}}{R} R_f$$

最大值

$$V_{o\max} = - \frac{V_{ref}}{R} R_f \cdot \frac{7}{2^3} = - \frac{7}{2^3} FSR$$

最小值

$$V_{o\min} = - \frac{V_{ref}}{R} R_f \cdot \frac{1}{2^3} = - \frac{1}{2^3} FSR$$

分辨率

$$s = |V_{o\min}| = \frac{1}{2^3} FSR$$

$$\therefore V_o = - \frac{V_i}{R} R_f$$

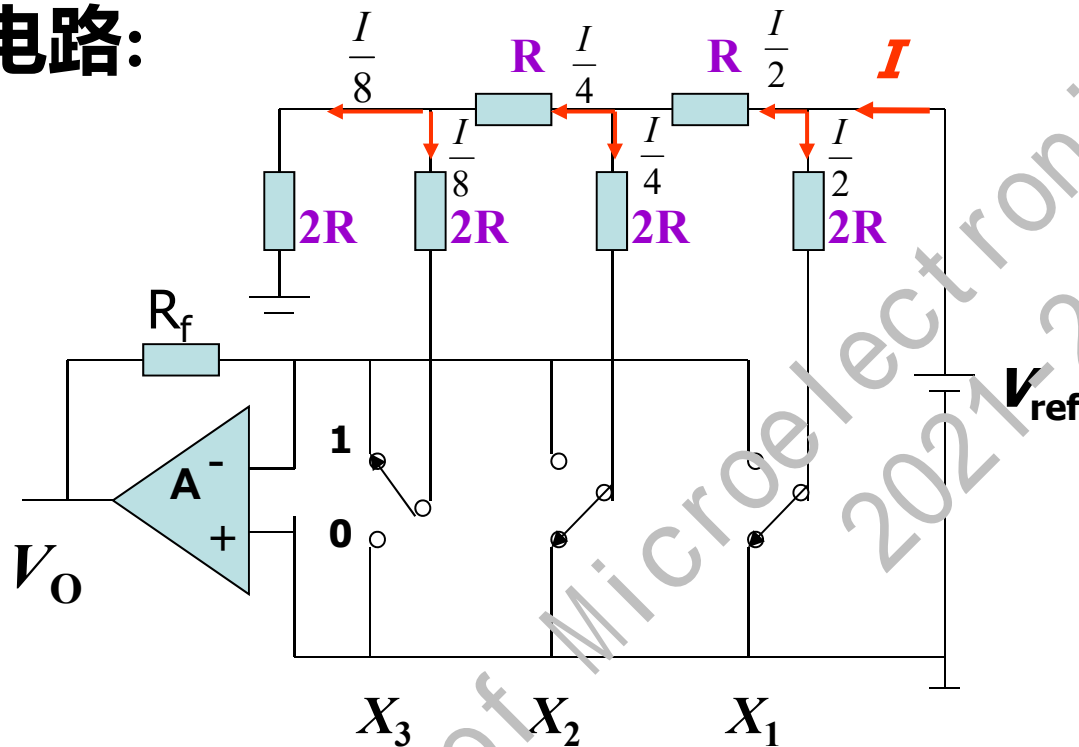
R-2R 梯形 DAC 优点:

与权电阻DAC比, 电阻种类少, 易集成; 开关工作条件相同。

缺点: 开关接1、0换向时, 有动态尖峰电流, 影响工作速度

§ 9.1.4 R-2R 倒梯形DAC (Inverted Ladder)

电路:

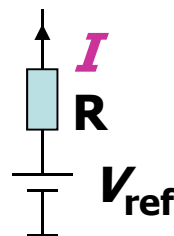


R-2R 梯形 DAC

$V_{ref} \longleftrightarrow$ 运放A
换位

此网络是电流输出型, 开关1 端经运放和 R_f , 把电流转换成电压输出

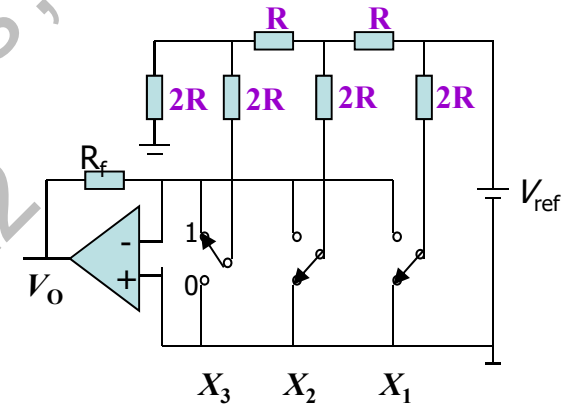
所有节点等效电阻为R, 等效于



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

倒梯形网络和梯形网络在工作原理,
模拟输出电压公式, 分辨率等都相同

$$V_o = -\frac{V_{ref}}{R} R_f \cdot \frac{X_1 2^{n-1} + X_2 2^{n-2} + \dots + X_n 2^0}{2^n}$$



优点: 动态尖峰电流小, 转换速度快

缺点: 忽略模拟开关的导通电阻, 产生转换误差

§ 9.1.5 集成 DAC (Integrated DAC)

3种 DAC: 二进制有权码 单极性 $V_o > 0$

有的物理量需要表示方向, 即正负, 需要双极性码。

正数: $+13 \rightarrow 0, 1101$

负数:

-13 { 原码表示 1, 1101
反码表示 1, 0010
补码表示 1, 0011

另一种常用的双极性码为偏移码

实际应用中偏移码是最容易实现的双极性码

常用的双极性码表（三位）

FSR	十进制分数	原码表示	补码表示	偏移码表示
$+\frac{1}{2}FSR$	$+3/4$	0 11	0 11	1 11
	$+2/4$	0 10	0 10	1 10
	$+1/4$	0 01	0 01	1 01
	$+0$	0 00	0 00	1 00
$-\frac{1}{2}FSR$	-0	1 00	(0 00)	(1 00)
	$-1/4$	1 01	1 11	0 11
	$-2/4$	1 10	1 10	0 10
	$-3/4$	1 11	1 01	0 01
	$-4/4$		1 00	0 00

偏移码的构成：补码的符号位取反

偏移码是自然加权二进制码偏移而得名

用偏移码时, 输出
模拟电压的动态范
围不变=FSR

V_O : 动态范围

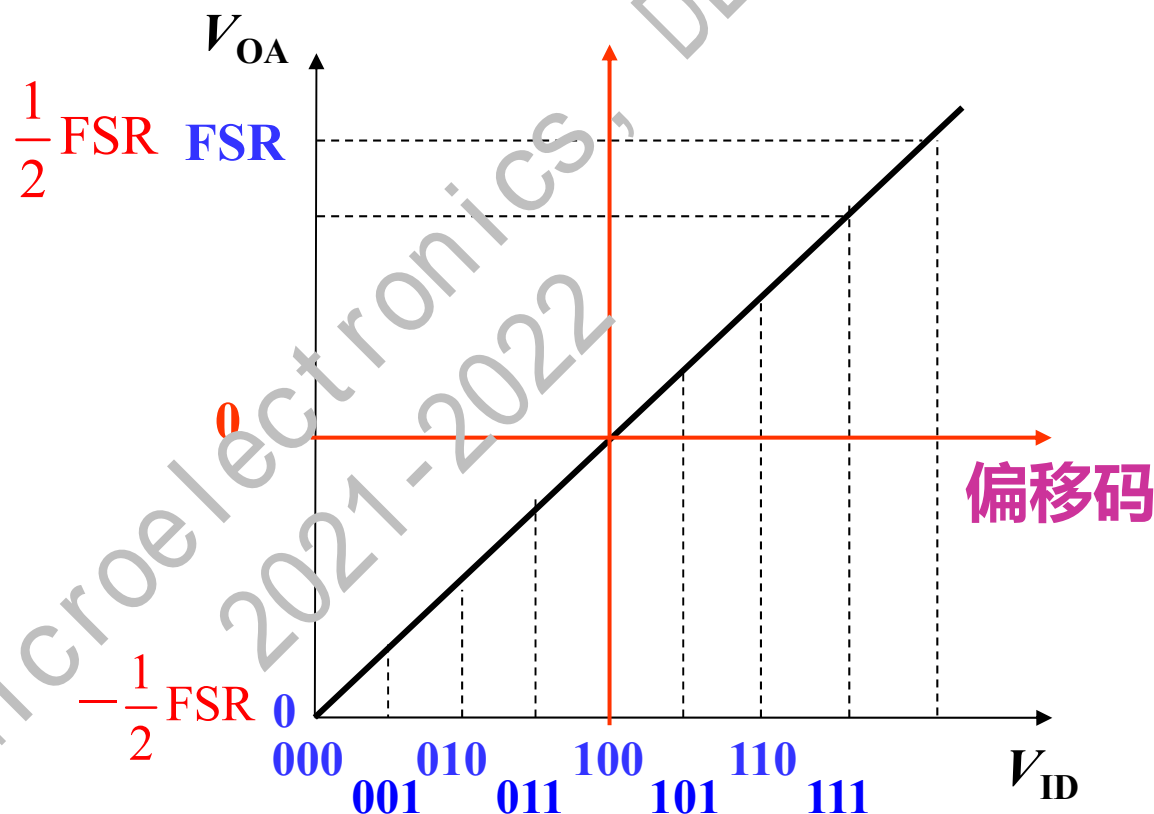
单极性码: $0 \sim 10V$,

双极性码: $-5 \sim +5V$.

双极性码:

$$FSR_{(bi)} = \frac{1}{2} FSR_{(mono)}$$

用双极性码时, 满刻
度值为单极性输出时
的 $1/2$



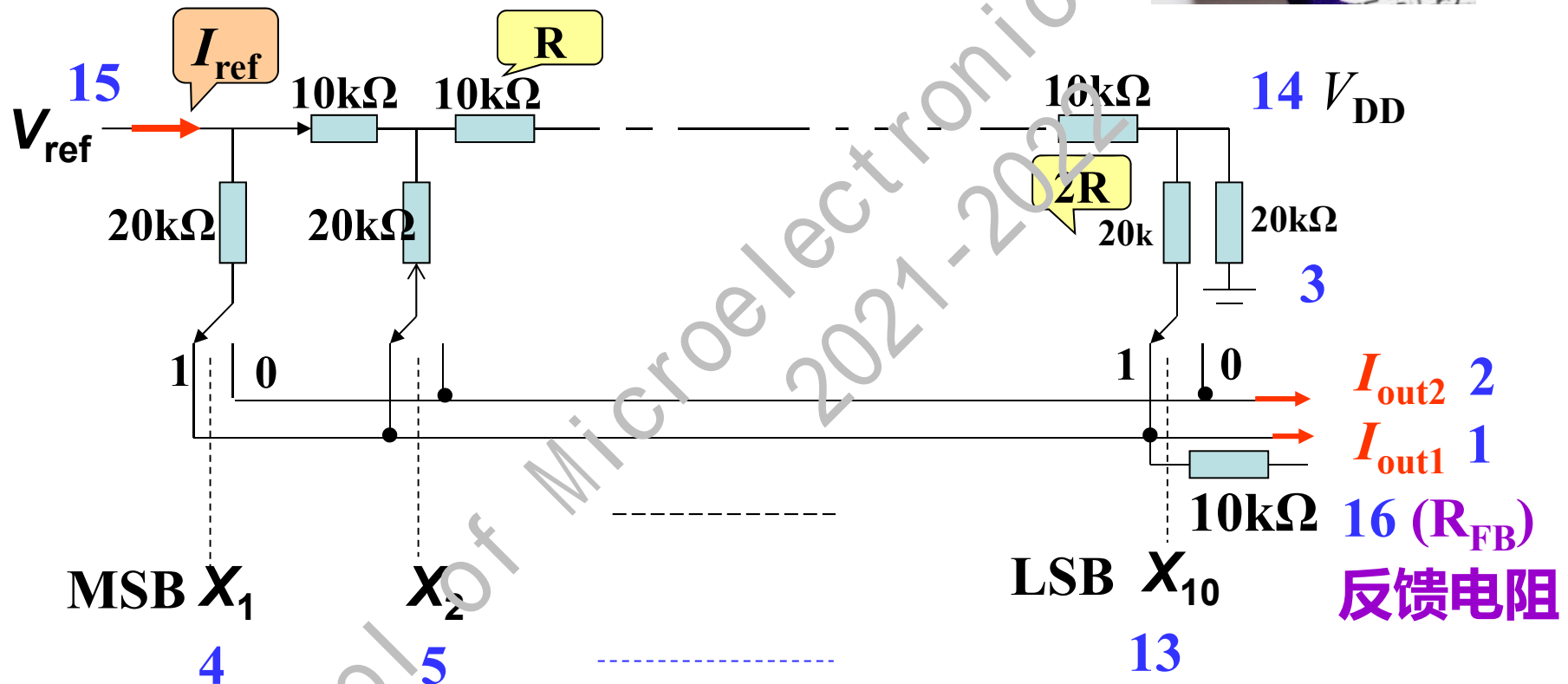
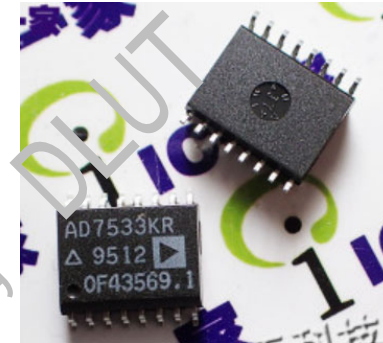
数字量 $00\dots0$, 输出为 $-\frac{1}{2}FSR$,

数字量 $11\dots1$, 输出为 $(\frac{1}{2}FSR - LSB)$,

数字量 $10\dots0$, 输出为 0

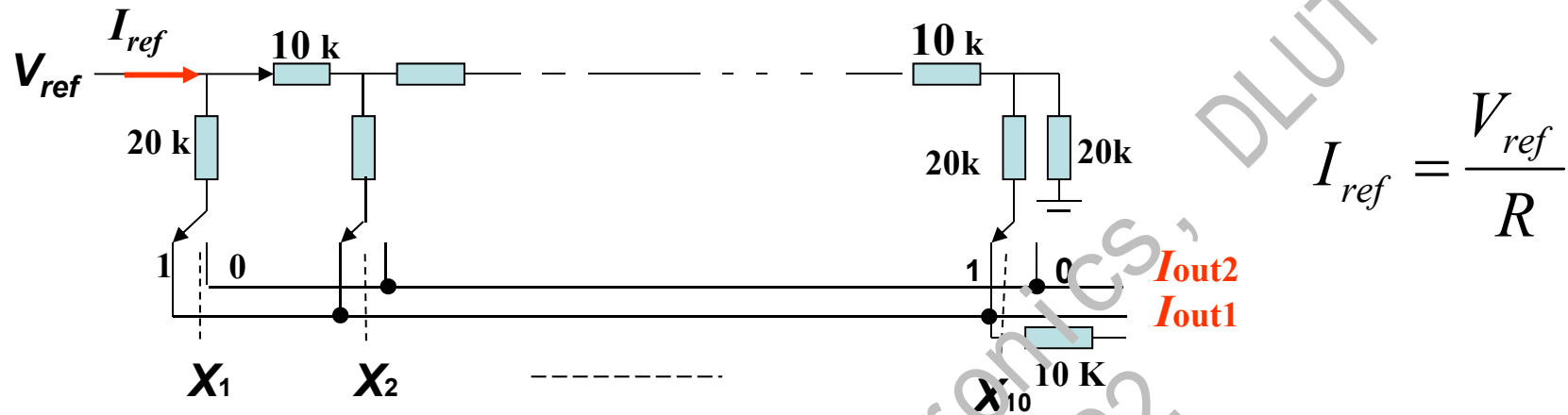
10位 CMOS集成DAC — AD7533

1. AD7533结构



10位数字量: $X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10}$

等效电阻 R (10 kΩ)



AD7533: 两个互补电流输出 I_{out1} 和 I_{out2}

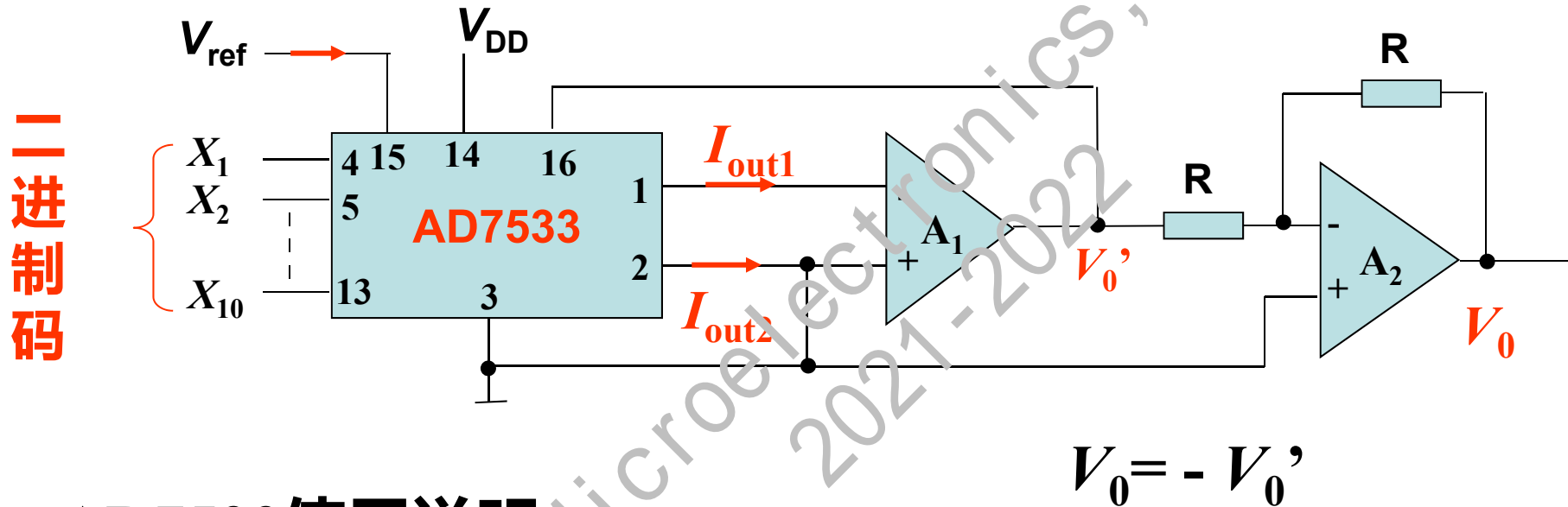
$X_i=1$, 开关向左侧, I_{out1} $I_{out1} = X_1 \frac{I_{ref}}{2} + X_2 \frac{I_{ref}}{2^2} + \dots + X_{10} \frac{I_{ref}}{2^{10}}$

$X_i=0$, 开关向右侧, I_{out2} $I_{out2} = \bar{X}_1 \frac{I_{ref}}{2} + \bar{X}_2 \frac{I_{ref}}{2^2} + \dots + \bar{X}_{10} \frac{I_{ref}}{2^{10}}$

$$I_{out1} + I_{out2} = \frac{I_{ref}}{2^1} + \frac{I_{ref}}{2^2} + \dots + \frac{I_{ref}}{2^{10}} = I_{ref} \frac{2^{10} - 1}{2^{10}} = \frac{1023}{1024} I_{ref} \approx I_{ref}$$

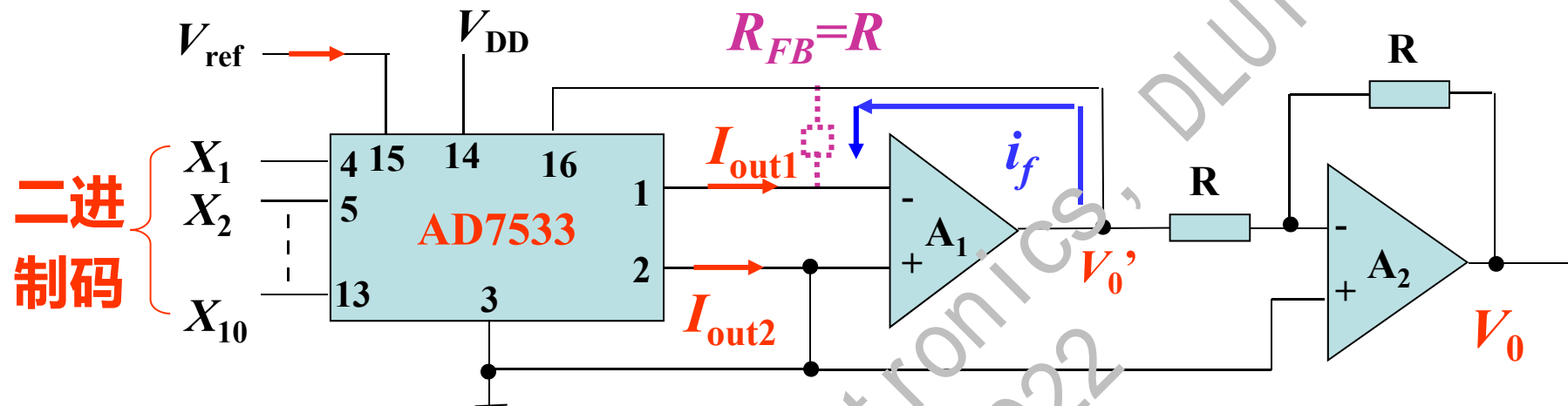
灌入电流 I_{ref}

2. AD7533 接收自然加权二进制码（单极性应用）



AD7533使用说明:

- 1) I_{out1} 和 I_{out2} 可以用一个或两个, 使用一个时, 另一端接地
- 2) 通过接运放, 可得到模拟输出电压 V_0



$$V_0' = i_f R_{FB} = -I_{out1} R = -\left(X_1 \frac{I_{ref}}{2} + X_2 \frac{I_{ref}}{2^2} + \dots + X_{10} \frac{I_{ref}}{2^{10}}\right) R$$

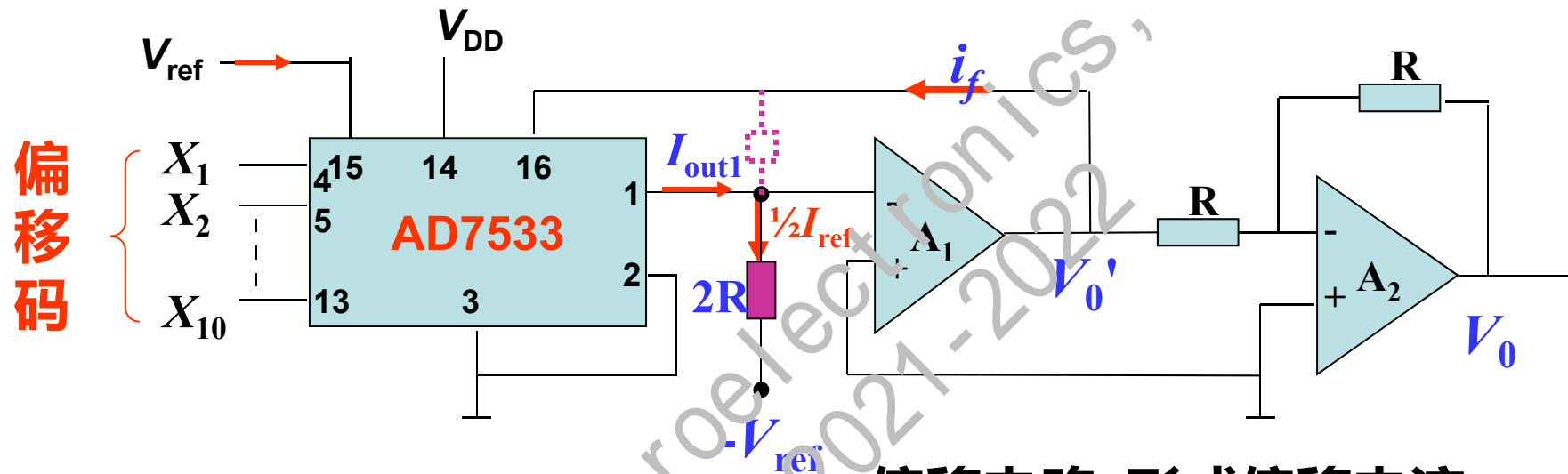
$$= -I_{ref} R \frac{X_1 2^9 + X_2 2^8 + \dots + X_{10} 2^0}{2^{10}}$$

AD7533接收自然加权二进制码的模拟输出电压

$$V_0 = -V_0' = V_{ref} \frac{X_1 2^9 + X_2 2^8 + \dots + X_{10} 2^0}{2^{10}}$$

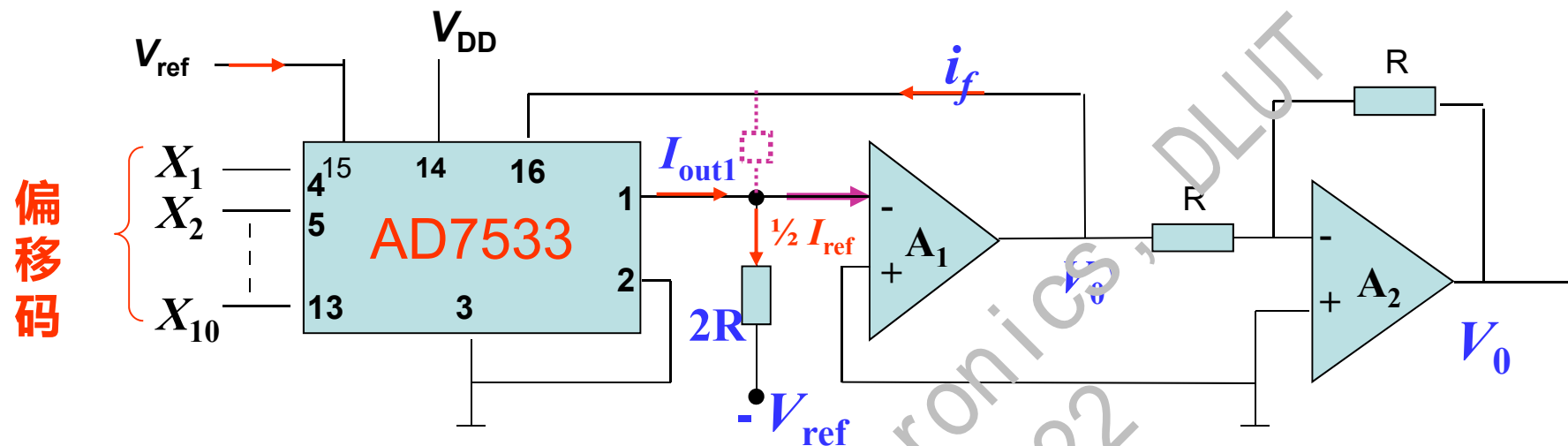
$$V_{ref} = I_{ref} R = FSR$$

3. AD7533 接收偏移码电路（双极性应用）



偏移电路：

外接一个负参考电源，产生一个与最高权电流数量相等，极性相反的电流 ($I_{\text{ref}} / 2$)。由运放得到双极性模拟输出。



$$V_0' = i_f R_{FB} = -\left(I_{out1} - \frac{I_{ref}}{2}\right) R_{FB} = -\left(I_{out1} - \frac{I_{ref}}{2}\right) R$$

$$V_0 = -V_0' = \left(I_{out1} - \frac{I_{ref}}{2}\right) R = \left(X_1 \frac{I_{ref}}{2} + X_2 \frac{I_{ref}}{2^2} + \dots + X_{10} \frac{I_{ref}}{2^{10}} - \frac{I_{ref}}{2}\right) R$$

AD7533 接收偏移码:

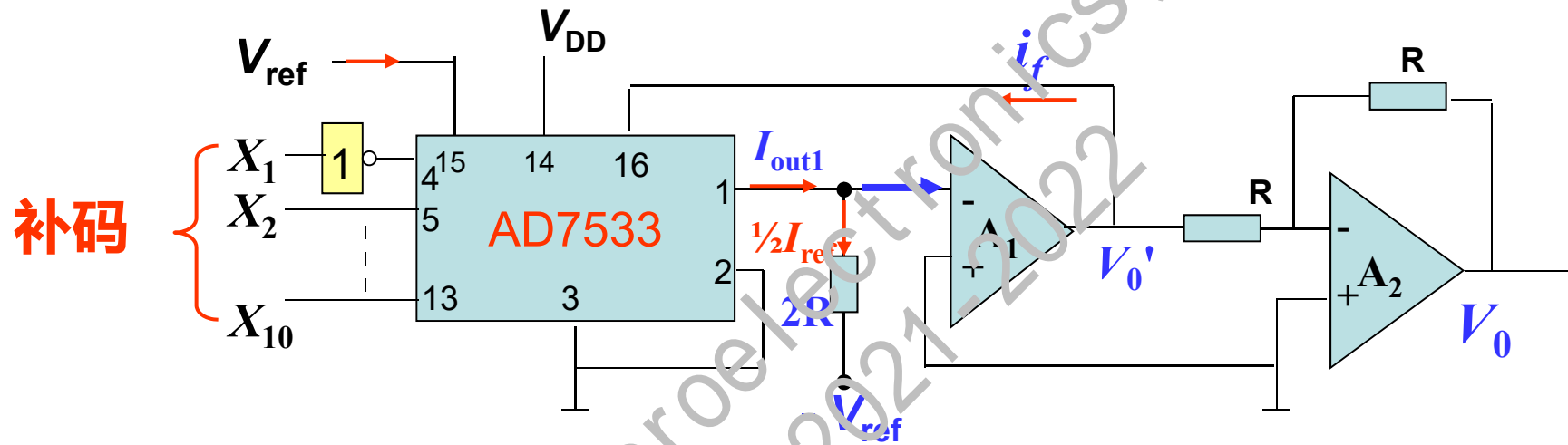
$$V_0 = V_{ref} \frac{X_1 2^9 + X_2 2^8 + \dots + X_{10} 2^0 - 2^9}{2^{10}}$$

$$V_{ref} = I_{ref} R$$

分子前部分是十位二进制数按权展开，不再考虑符号位(已在偏移电流中考虑了)。

4. AD7533 接收补码（双极性应用）

将偏移码电路的符号位取反，就可以接收补码。



$$V_0 = V_{ref} \frac{\bar{X}_1 2^9 + X_2 2^8 + \dots + X_{10} 2^0 - 2^9}{2^{10}}$$

注意: \bar{X}_1

主要技术参数

1.最小分辨电压 V_{LSB}

数字量变化一个单位时，输出电压的变化量。

2.分辨率：最小分辨电压与最大输出电压的比值来表示；也常用最小分辨电压 V_{LSB} 表示。

$$F = \frac{V_{\text{LSB}}}{V_{\text{FSV}}} = \frac{1}{2^n - 1}$$

3.转换精度

转换误差：稳态工作时，实际模拟输出值和理想输出的最大偏差，通常用 V_{LSB} 的倍数表示。

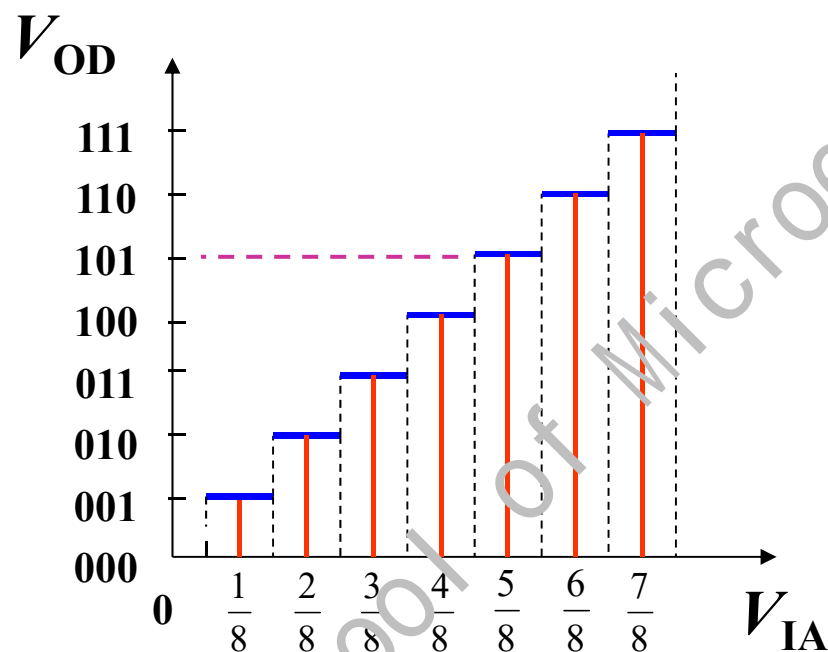
4.转换速度

建立时间：从输入数据改变到输出进入规定的误差范围内所需的最大时间。

§ 9.2 模数转换电路 ADC

模数转换关系

3位ADC



ADC 特点

1) 不——对应:

一段连续量 \rightarrow 一个数

$$\left(\frac{1}{8} \pm \frac{1}{2} LSB \right) \longrightarrow 001$$

$$\left(\frac{5}{8} \pm \frac{1}{2} LSB \right) \longrightarrow 101$$

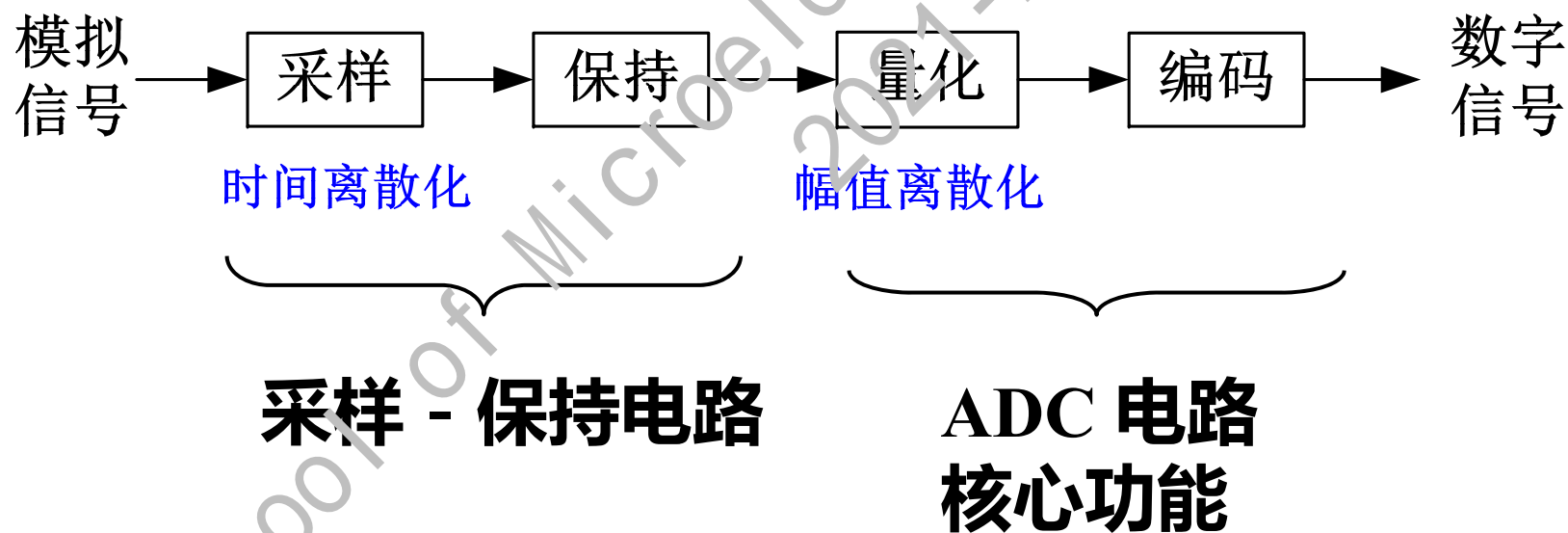
有舍
有入

2) 转换误差:

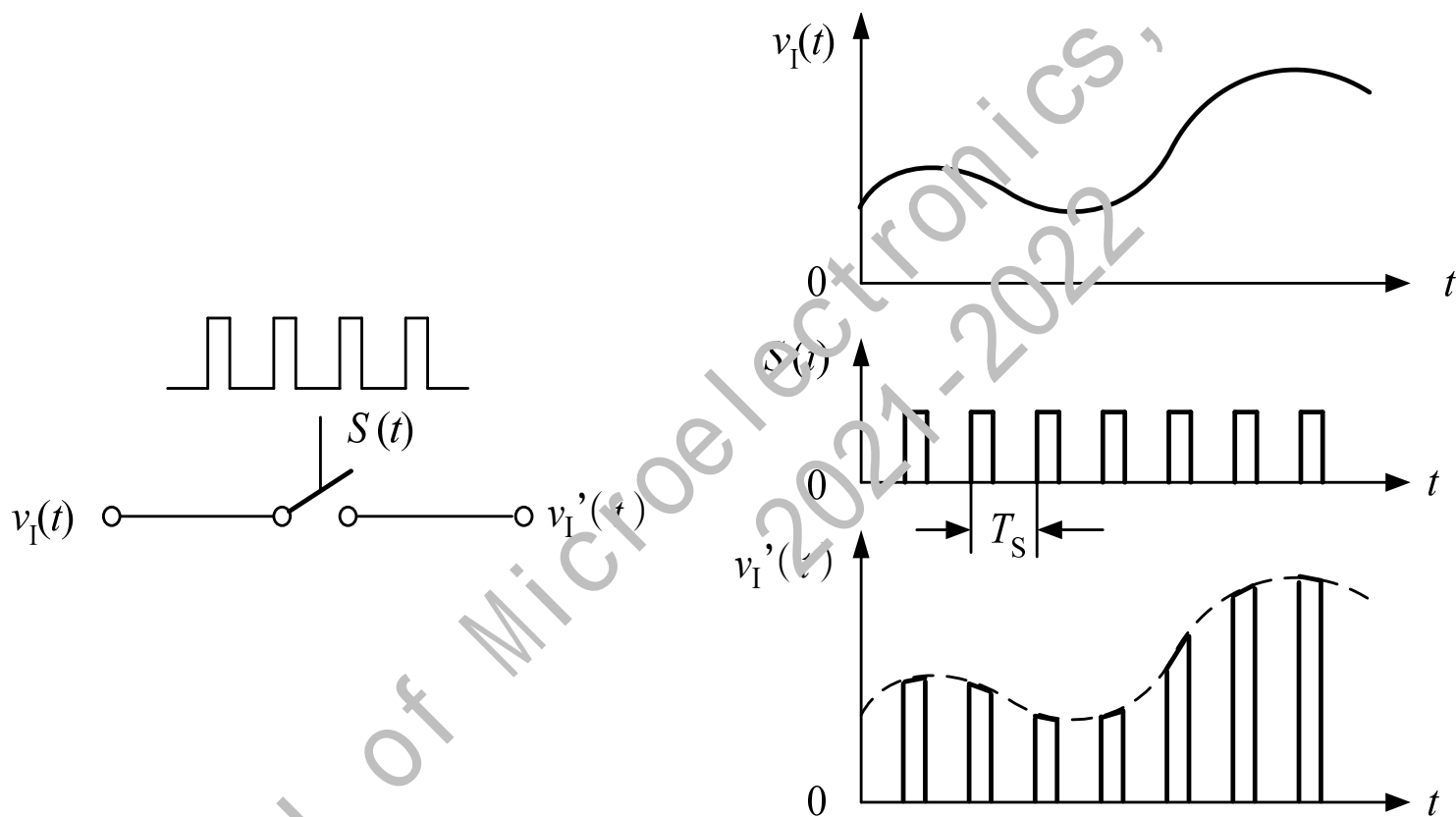
也称固有误差

9.2.1 ADC 工作原理 ADC Operation

模拟量转化为数字量一般要经过四个步骤，分别称为**采样、保持、量化、编码**。



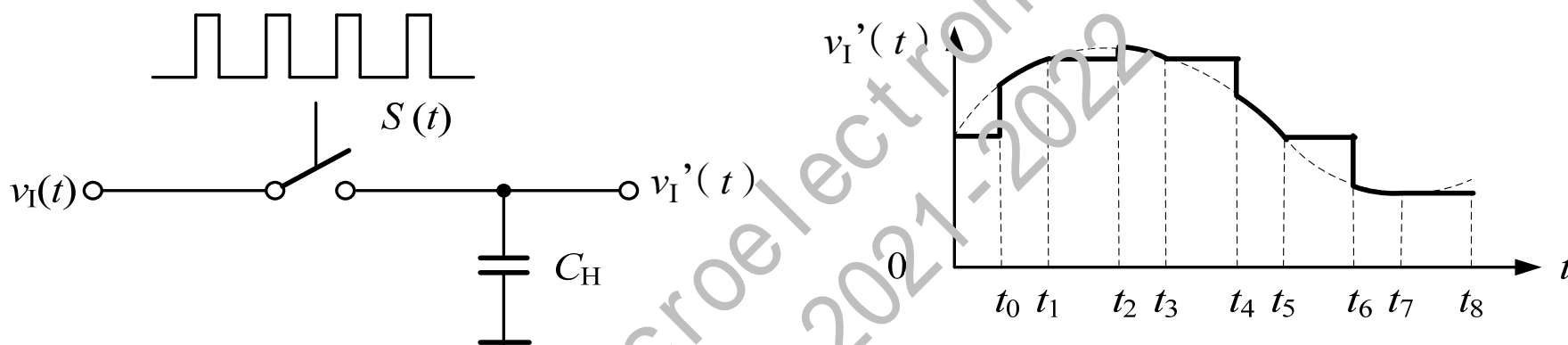
采样(Sampling)



如何保证采样后信息不丢失（即信号能完全恢复）？

要满足香农采样定理： $f_s \geq 2f_m$

保持(Holding)



在 $t_0 \sim t_1$ 阶段，电路处于采样阶段。

在 $t_1 \sim t_2$ 阶段，电路处于保持阶段。

量化 (Quantization) : 将采样—保持后的信号幅值转化成某个最小数量单位 (量化阶梯/间隔) 的整数倍。

编码 (Encoding) : 量化后的数值用代码表示出来。

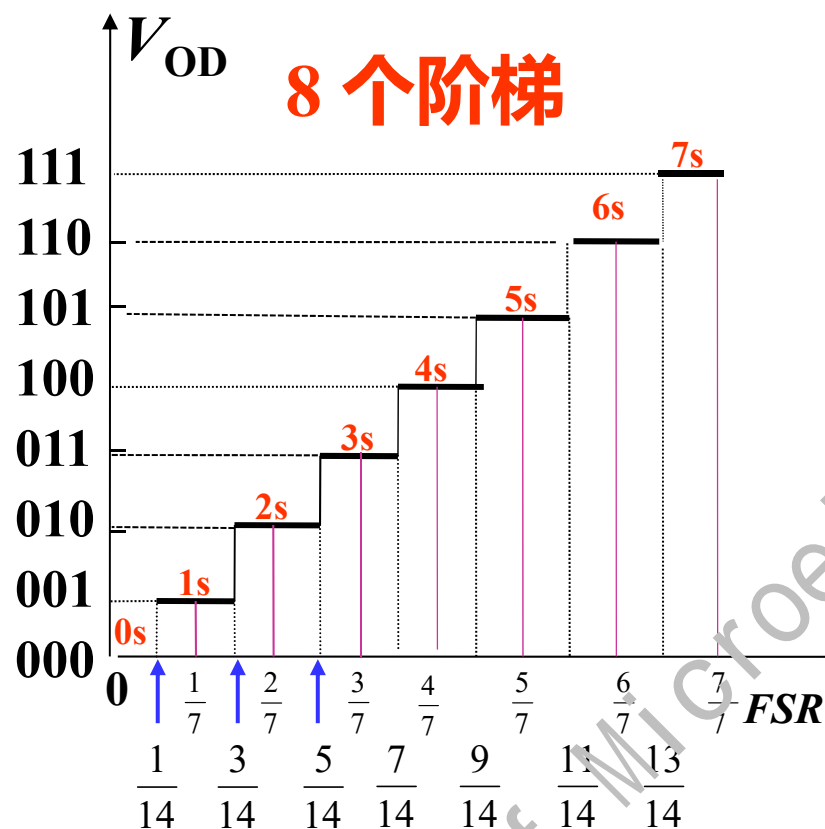
量化: { 量化阶梯 s : 量化过程中所采取的最小数量单位,
量化误差: 量化方式不同, 误差不同。

量化方式有两种:

{ 四舍五入方式 (舍入式) Rounding-off

{ 只舍不入(截断式) No-carry

1. 四舍五入法 (误差小)



$2^3 = 8$ 量化阶梯 (0s ~ 7s).

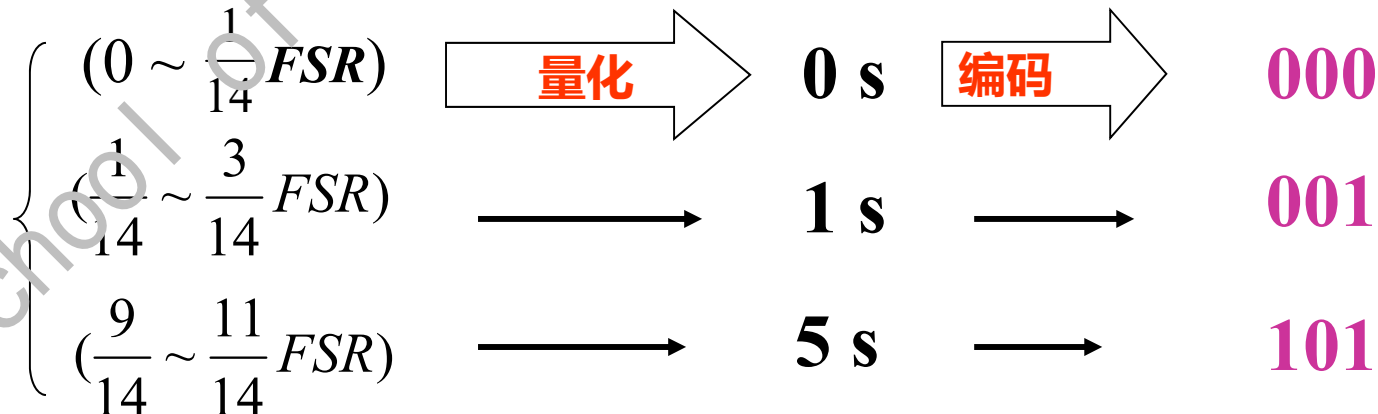
阶梯:

$$\Delta = \frac{1}{2^n - 1}$$

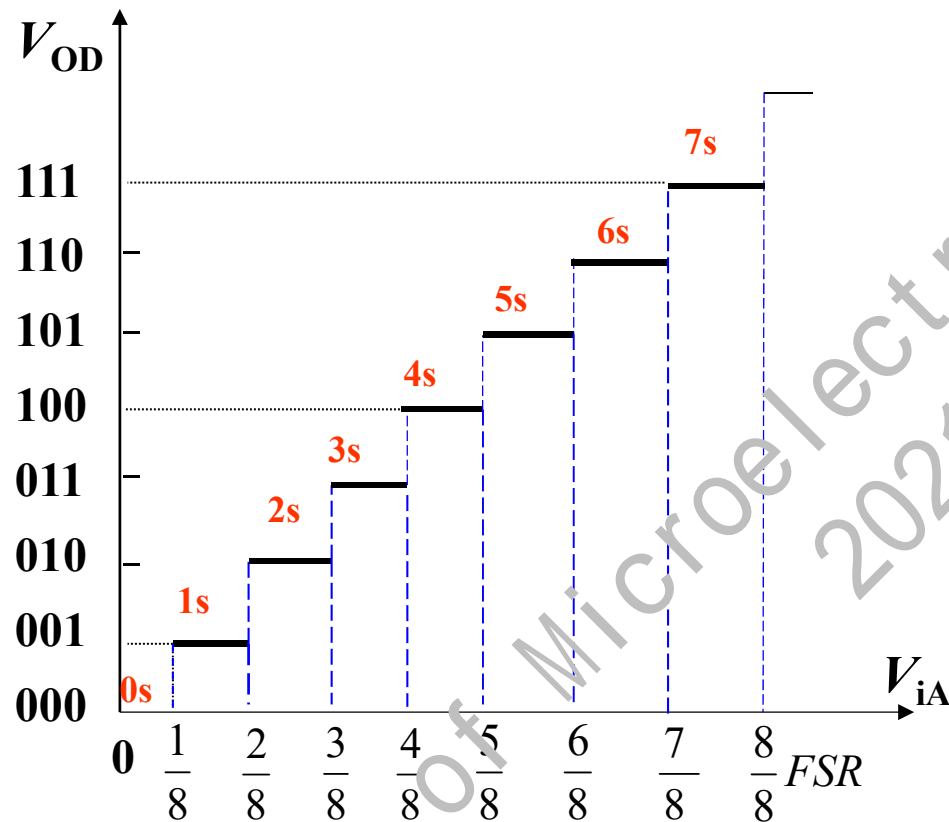
两阶梯之间为比较电平:

$$\frac{1}{14}, \frac{3}{14}, \dots, \frac{13}{14} FSR$$

模拟
电压值



2. 只舍不入方式 (误差大)



$2^3 = 8$ 个量化阶梯。

阶梯:

$$S = \frac{1}{2^n}$$

模拟输入

{	$(0 \sim \frac{1}{8} FSR)$	→	0 s	→	000	}	只舍不入
	$(\frac{1}{8} \sim \frac{2}{8} FSR)$	→	1 s	→	001		