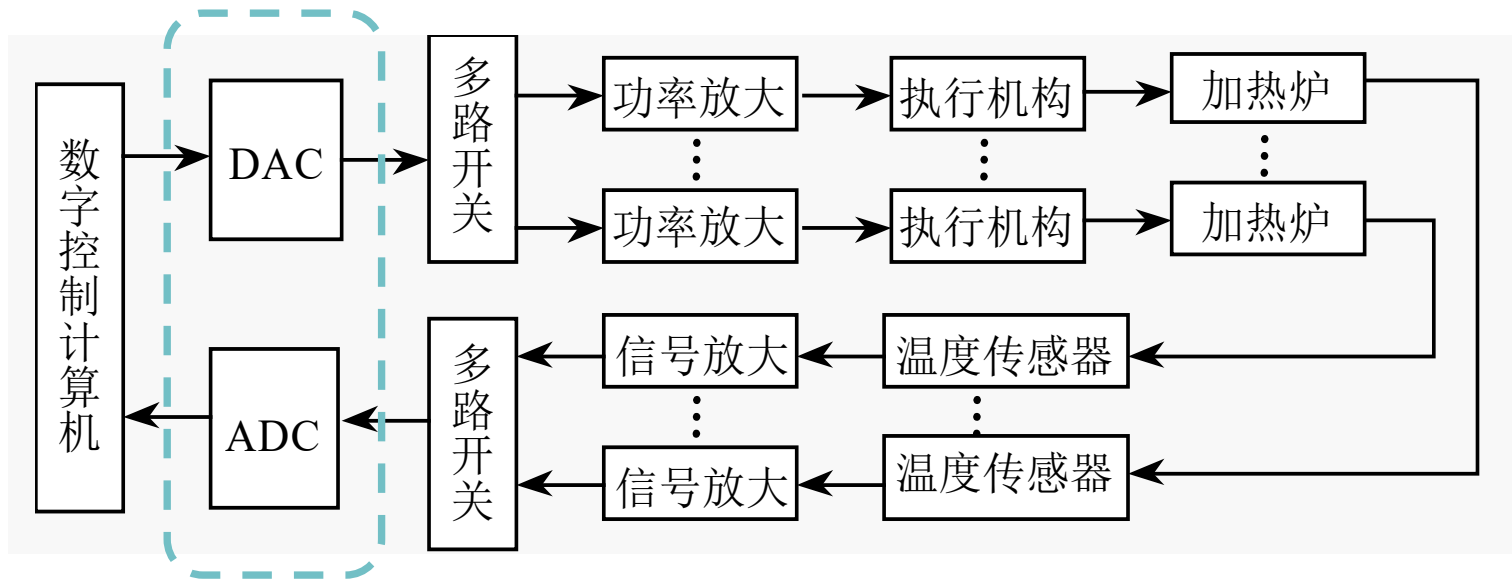


# 第九章 数模模数转换

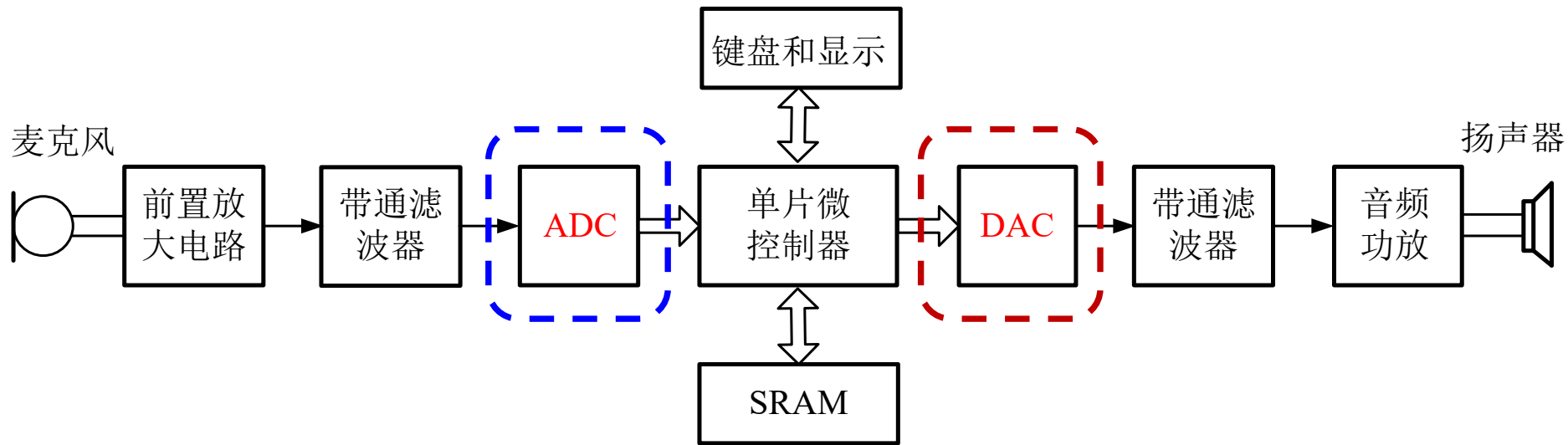
## Digital Analog Conversions

§9.1 数模转换电路 **DAC**

§9.2 数模转换电路 **ADC**



**典型加热炉闭环实时控制系统**



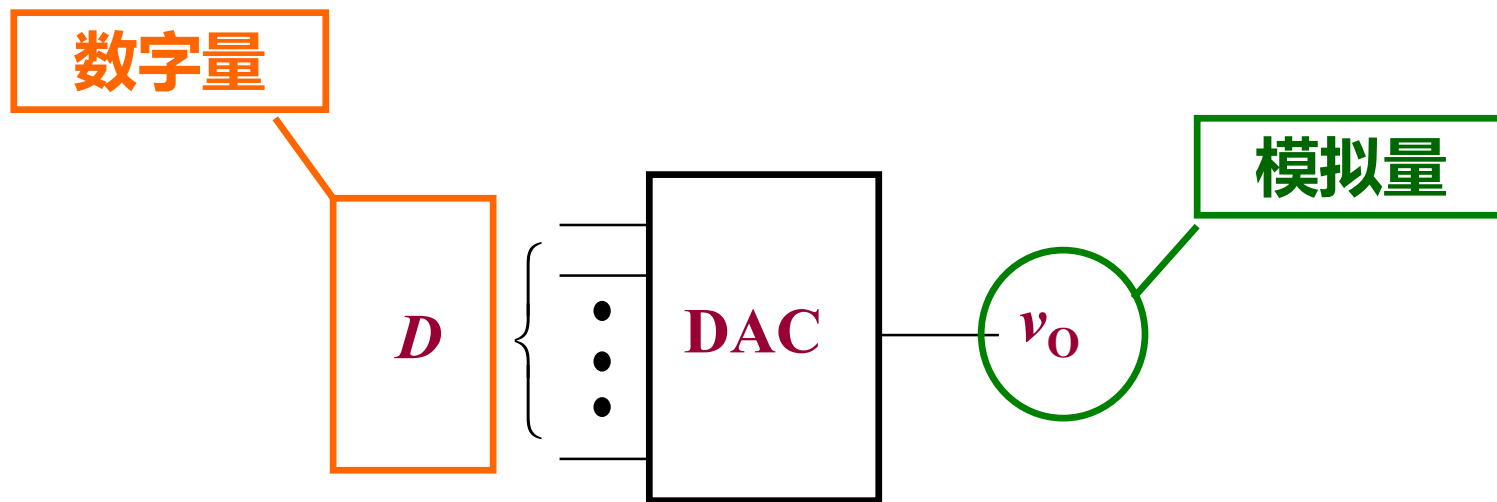
**典型电子系统——语音的存储与回放系统**

# § 9.1 数模转换电路

## (Digital Analog Converter, DAC)

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

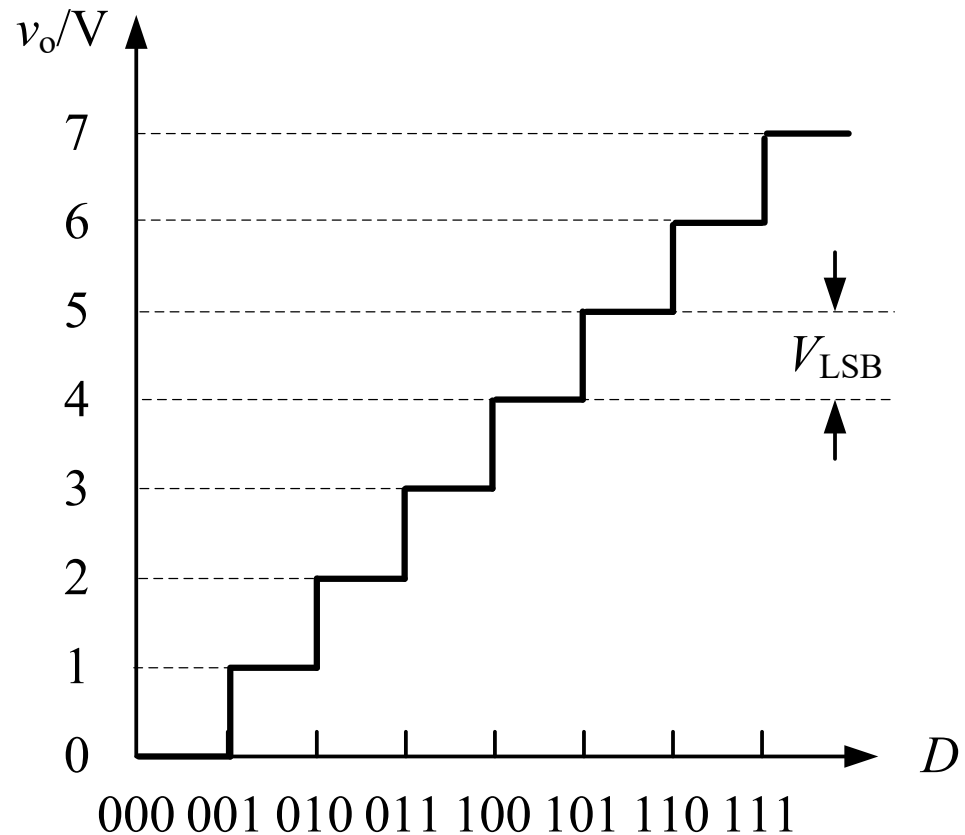
将**数字量**转化成与其成正比的**模拟量**



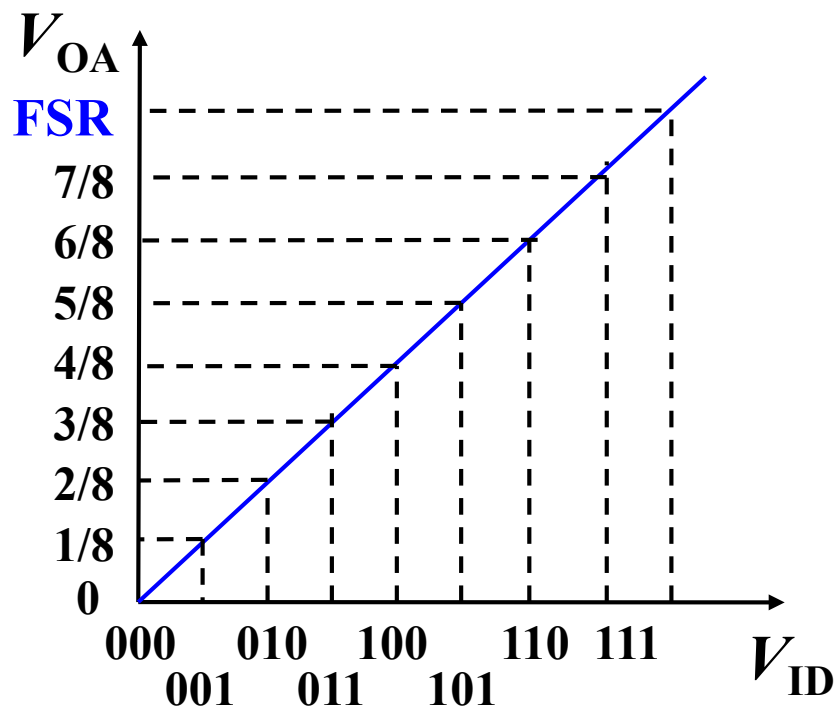
$$v_O = K \times D = K \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$$

以三位DAC为例，设 $K=1$ ，可得出 $v_O$ 和 $D$ 的关系

$D_2 D_1 D_0$	$v_O$
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**  $(2^n - 1)V_{\text{LSB}}$

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

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

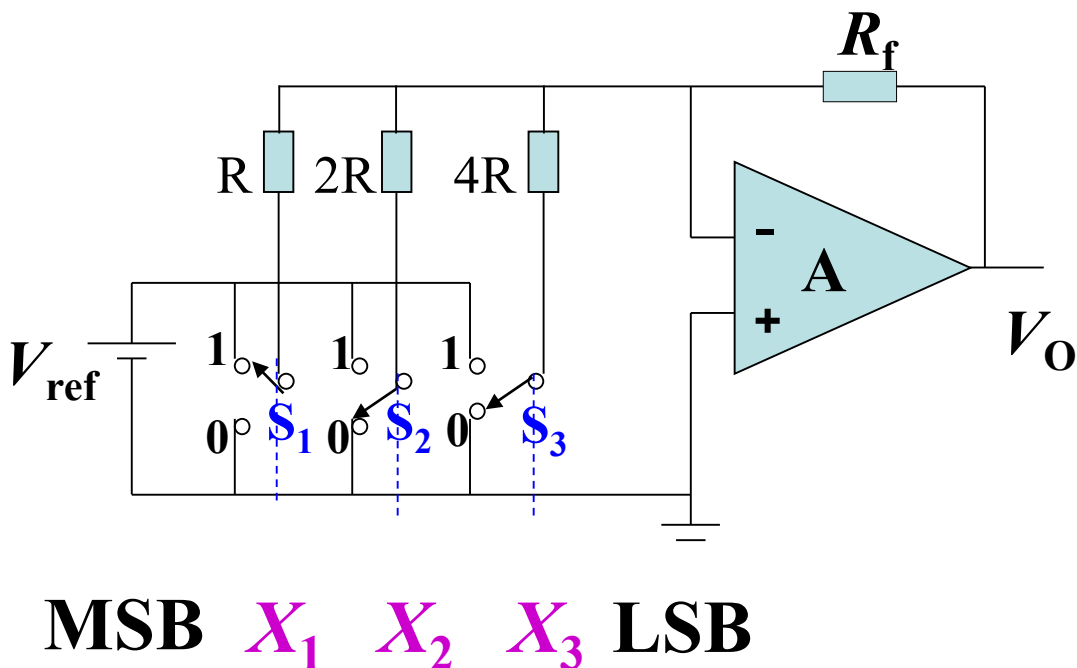
**3位数字量**  $\longrightarrow \frac{(\quad)}{2^3} \text{FSR}$       **001 对应**  $\frac{1}{2^3} \text{FSR}$

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

## § 9.1.2 权电阻型DAC Binary-Weighted DAC

### Weighted-Resistance DAC

#### 电路 (3 位)



$V_{\text{ref}}$  : 参考电压

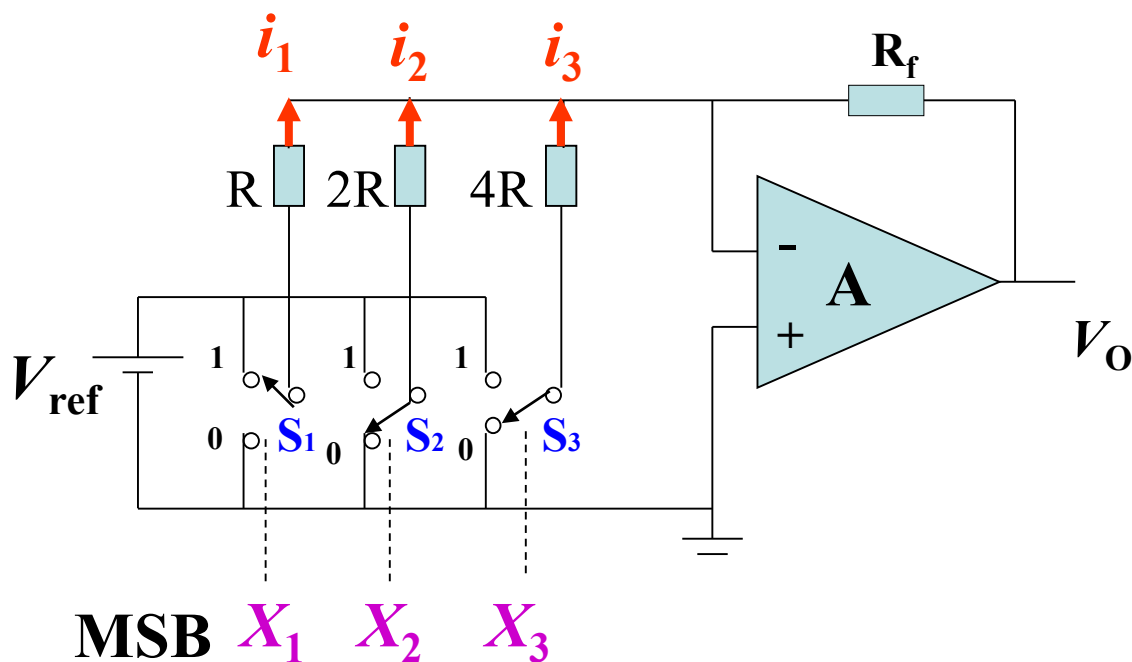
$S_i$  : 模拟开关

$X_i$  : 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:

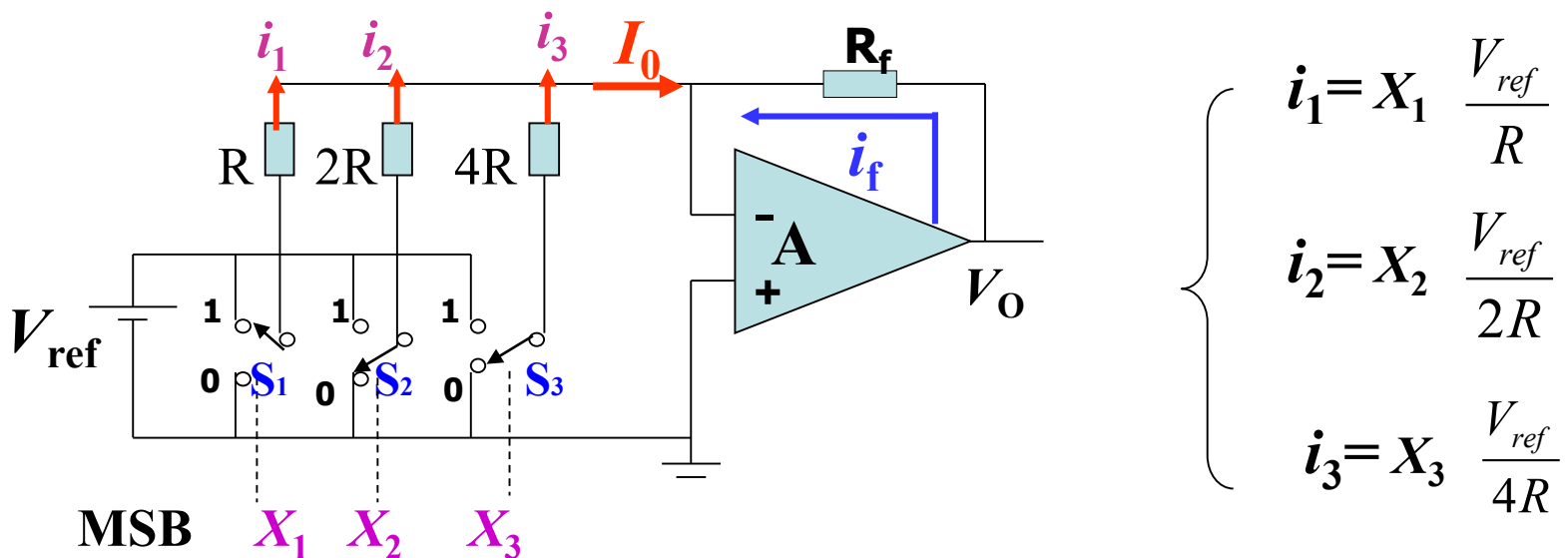
$2^0R, 2^1R, 2^2R \dots$

$R_f$  反馈电阻

分析: 输入数字量  $X_1X_2X_3$   $\longrightarrow$  输出模拟量  $V_0$

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  $\longrightarrow$   $\frac{(\quad)}{2^3}$  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  $V_O$

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

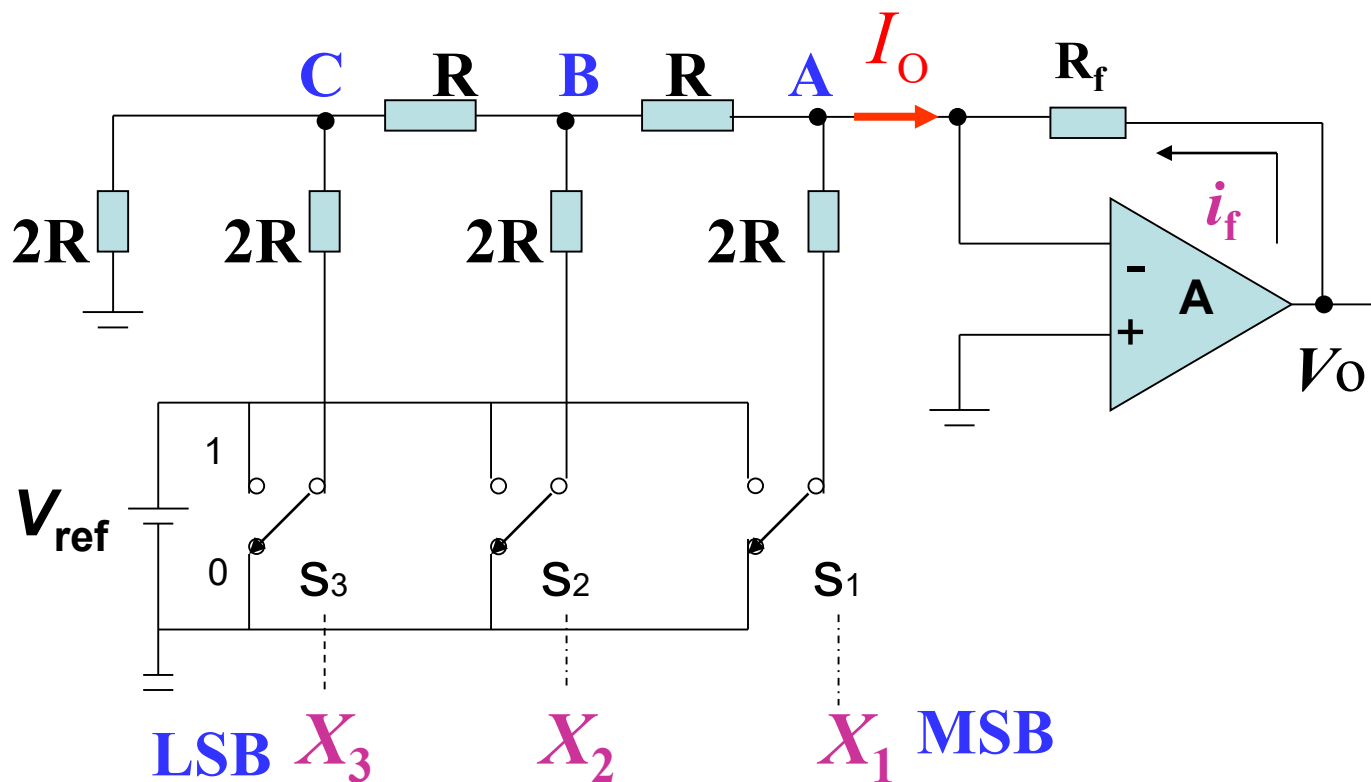
FSR

优点: 简单 直观

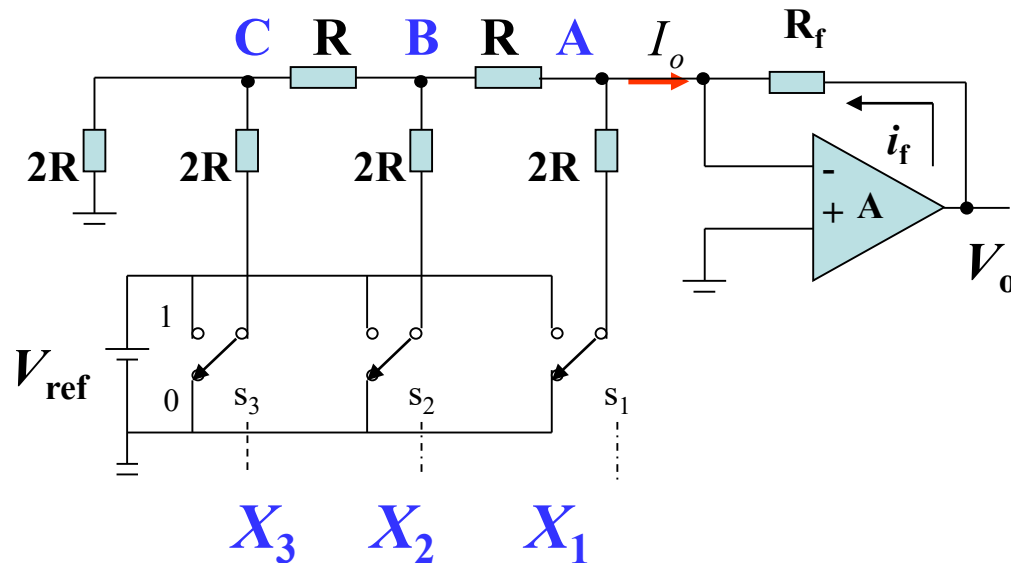
缺点: 电阻值太多不易准确

## §9.1.3 R-2R 梯形DAC (Ladder)

电路



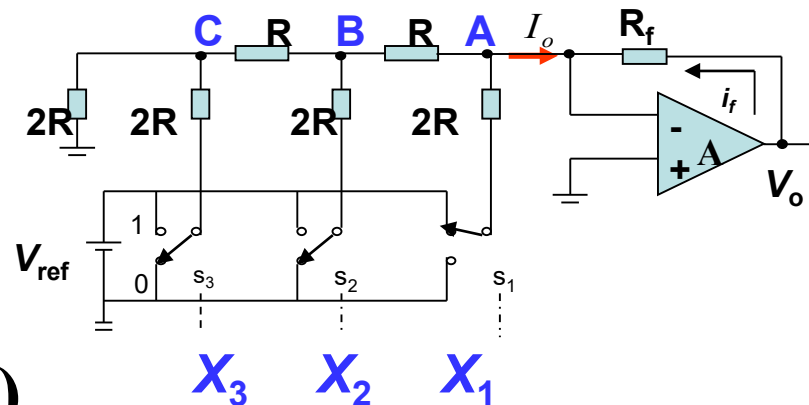
$X_1$  MSB     $X_3$  LSB    位置与权电阻相反



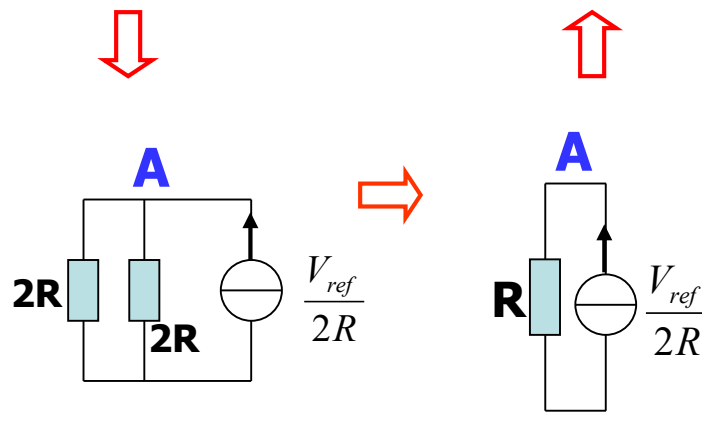
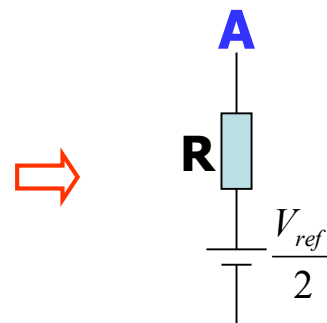
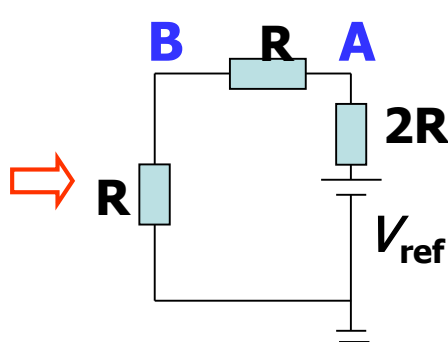
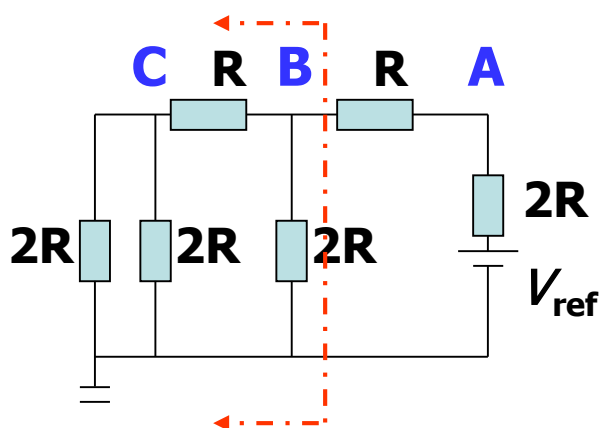
## 特点:

- 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  $R$ 。

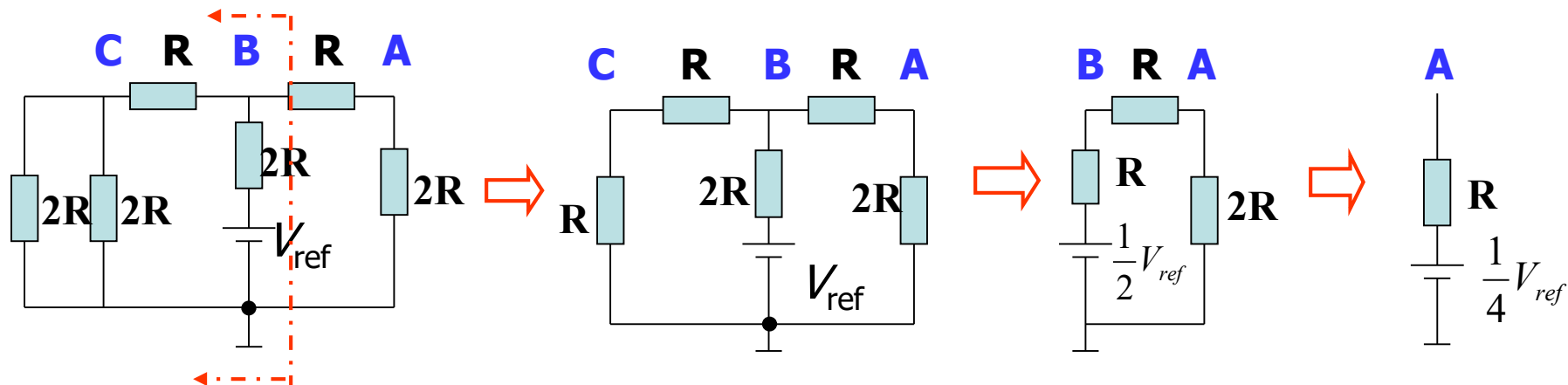
# 分析



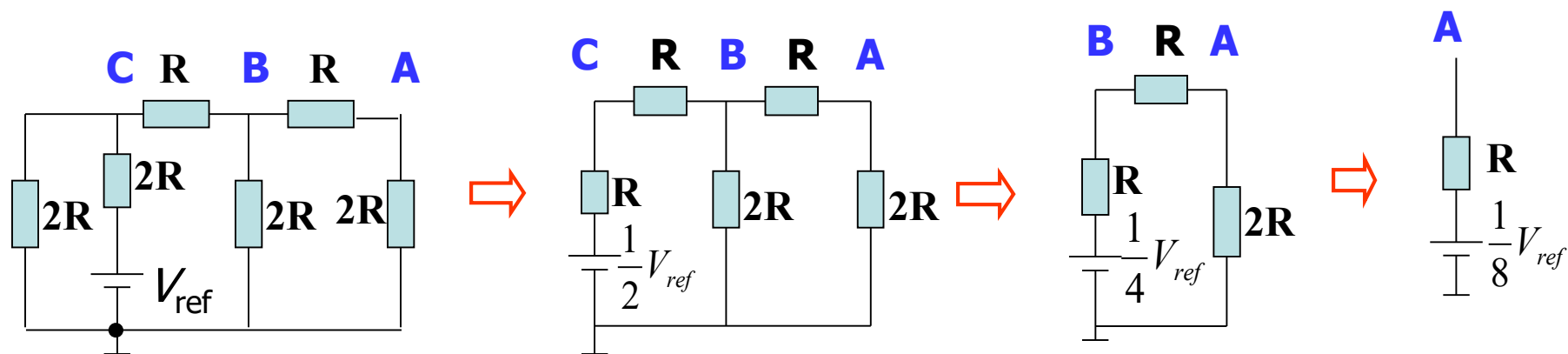
$X_1$  单独作用 ( $X_1 X_2 X_3 = 100$ )



**$X_2$  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

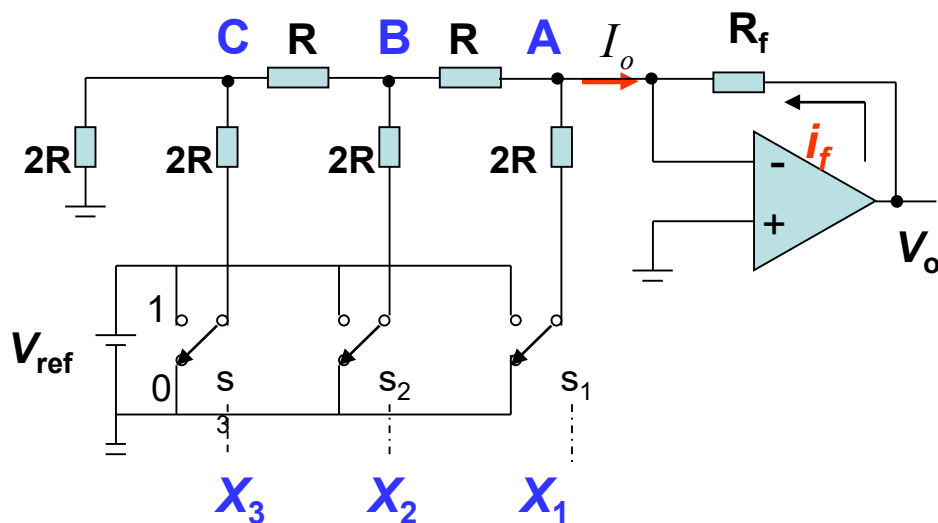
$$V_i = X_1 \frac{V_{ref}}{2} + X_2 \frac{V_{ref}}{4} + X_3 \frac{V_{ref}}{8} = V_{ref} \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3}$$

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:

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

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

FSR

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

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

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

## **R-2R 梯形 DAC 优点:**

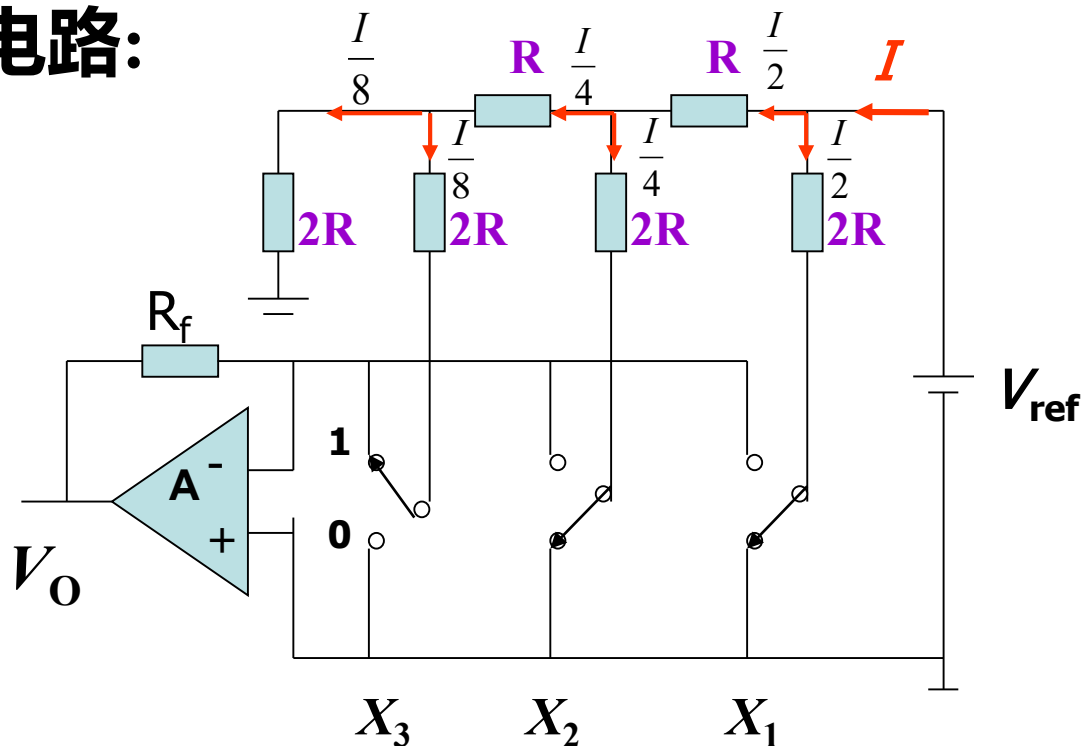
**与权电阻DAC比, 电阻种类少, 易集成;开关工作条件相同。**

**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:

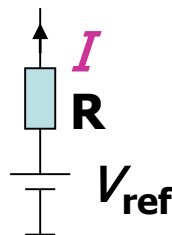


R-2R 梯形 DAC

$V_{ref} \longleftrightarrow$  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

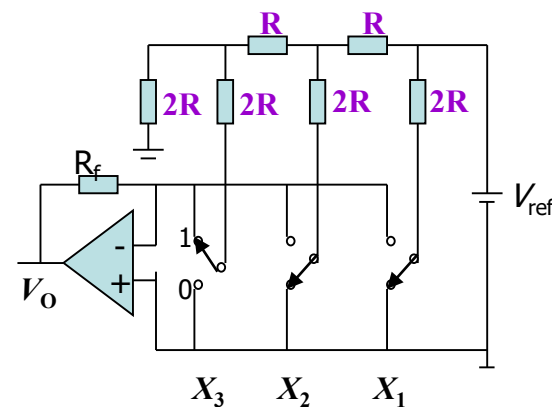
所有节点等效电阻为R, 等效于



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

**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**

## § 9.1.6 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

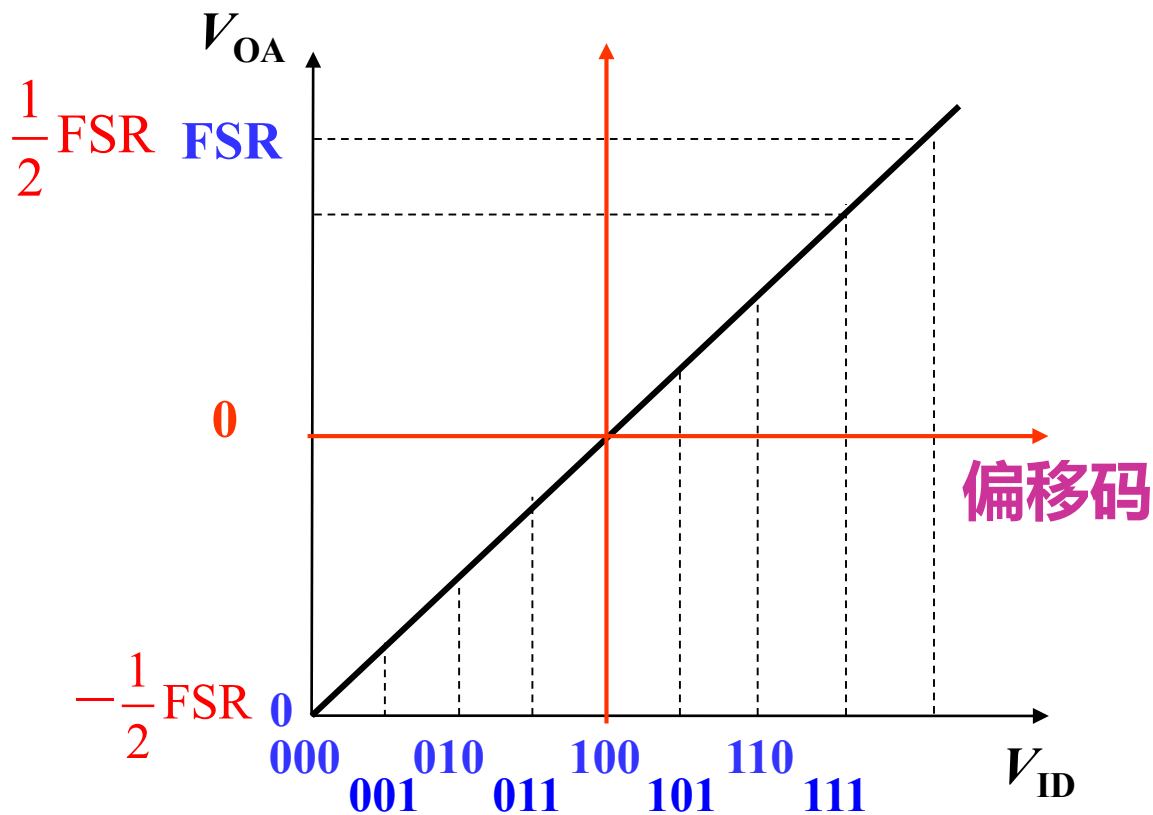
单极性码:  $0 \sim 10V$ ,

双极性码:  $-5 \sim +5V$ .

双极性码:

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

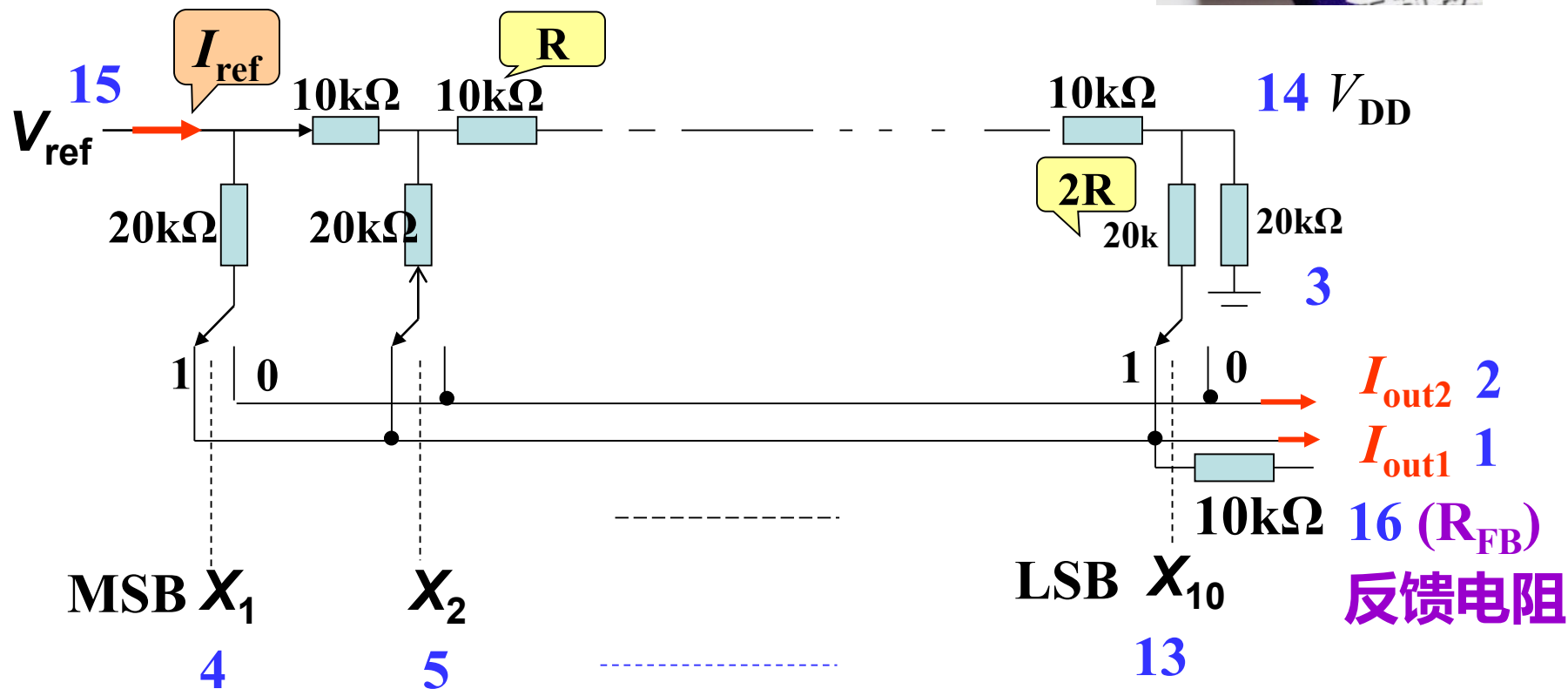
用双极性码时, 满刻  
度值为单极性输出时  
的  $1/2$



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

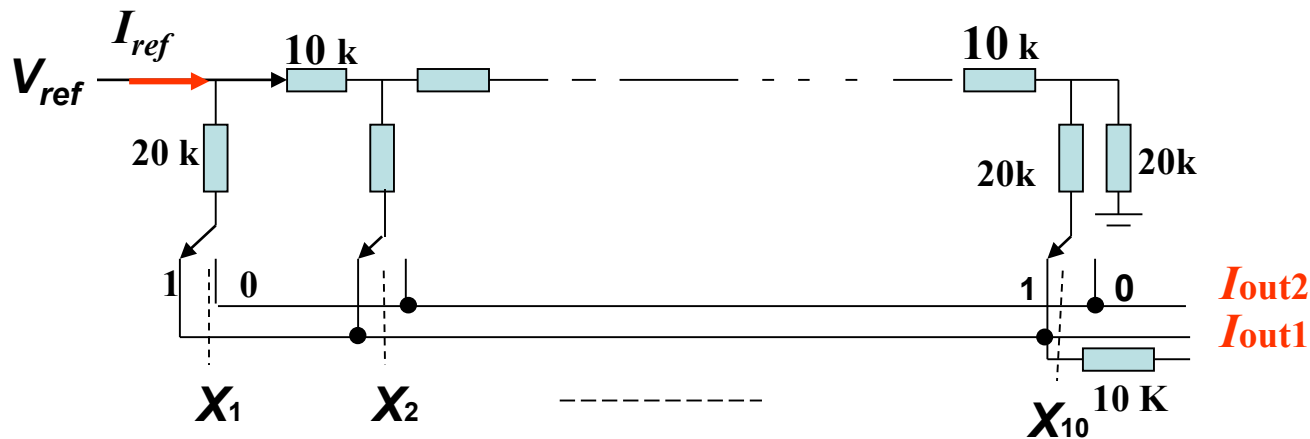
# 10位 CMOS集成DAC — AD7533

## 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 k $\Omega$ )



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

AD7533: 两个互补电流输出  $I_{out1}$  和  $I_{out2}$

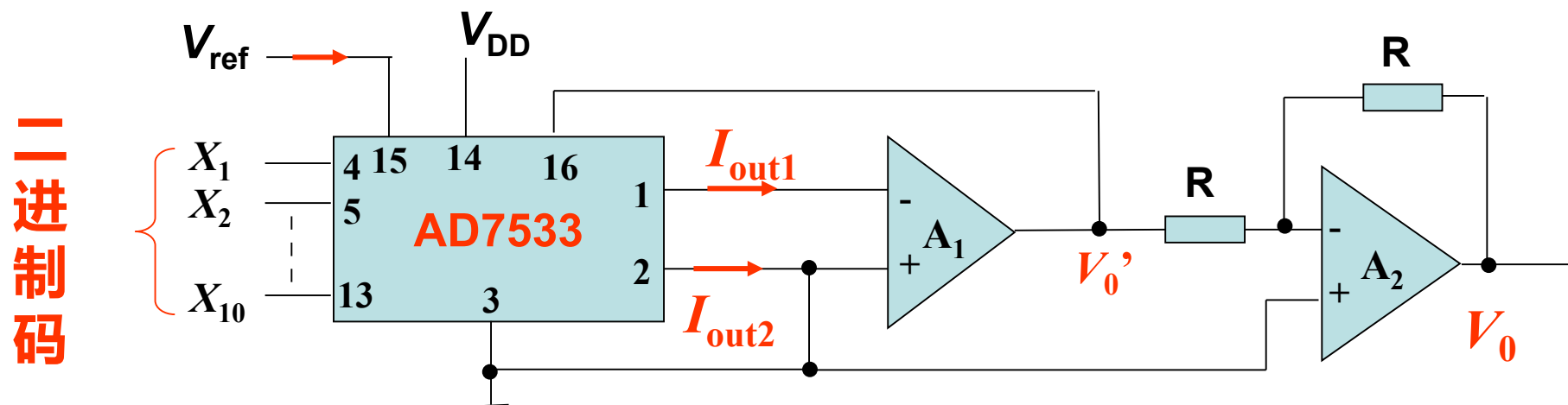
$X_i=1$ , 开关向左侧,  $I_{out1}$  
$$I_{out1} = X_1 \frac{I_{ref}}{2} + X_2 \frac{I_{ref}}{2^2} + \dots + X_{10} \frac{I_{ref}}{2^{10}}$$

$X_i=0$ , 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  $I_{ref}$

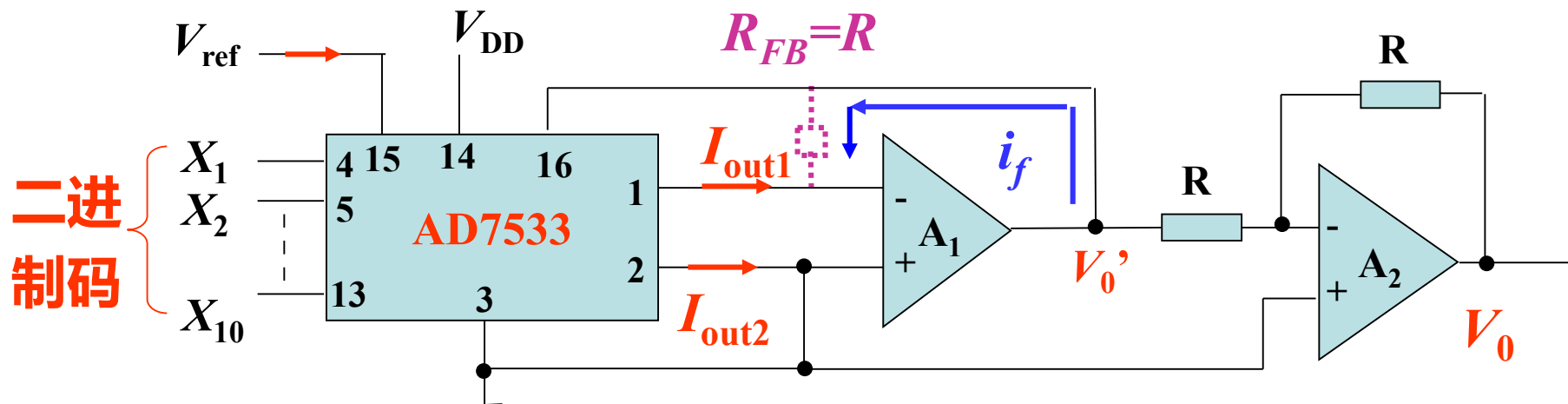
## 2. AD7533 接收自然加权二进制码（单极性应用）



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  $V_0$





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

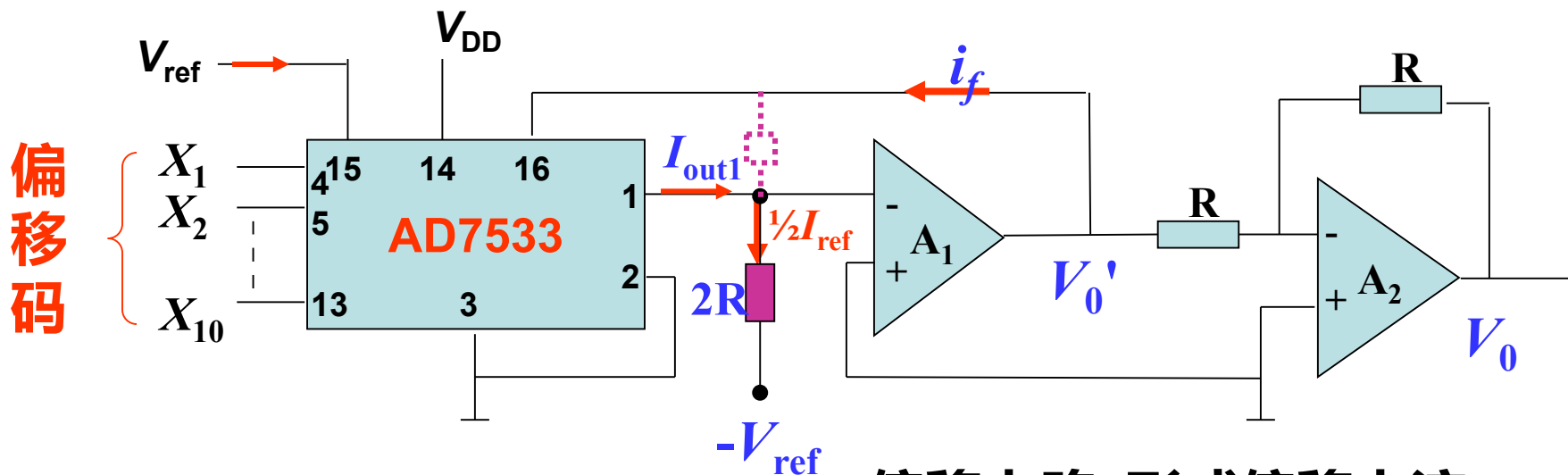
$$= -I_{ref} R \frac{X_1 2^9 + X_2 2^8 + \dots + X_{10} 2^0}{2^{10}}$$

**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)

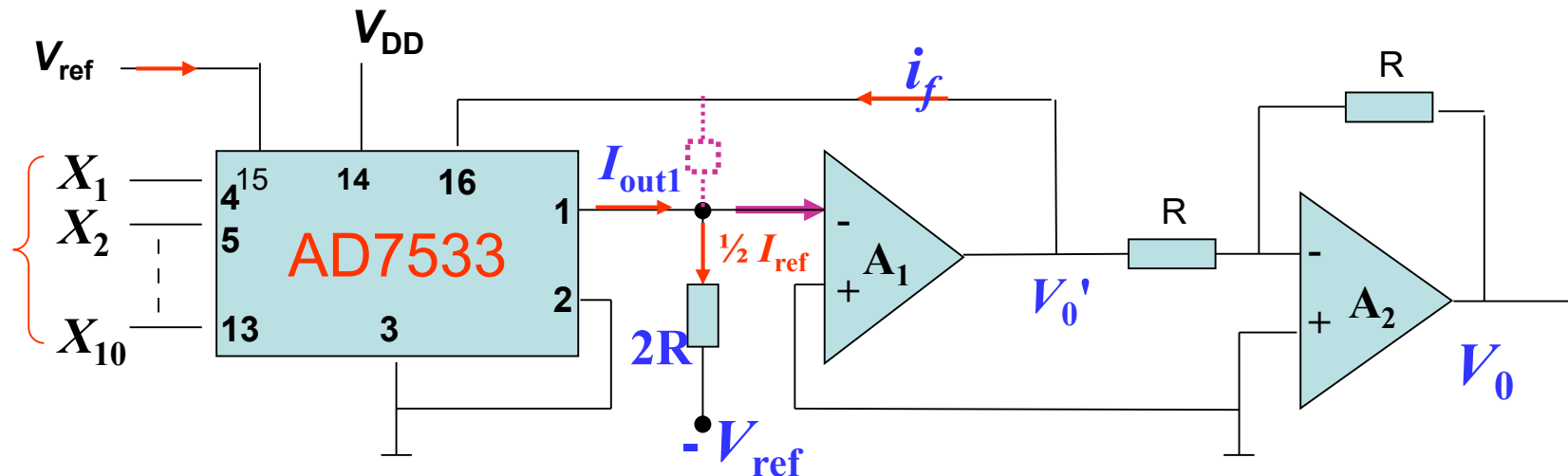


偏移电路, 形成偏移电流,  
可直接接收偏移码

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 ( $I_{ref} / 2$ ). 由运放得到双极性模拟输出.

偏移码



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

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

AD7533 接收偏移码:

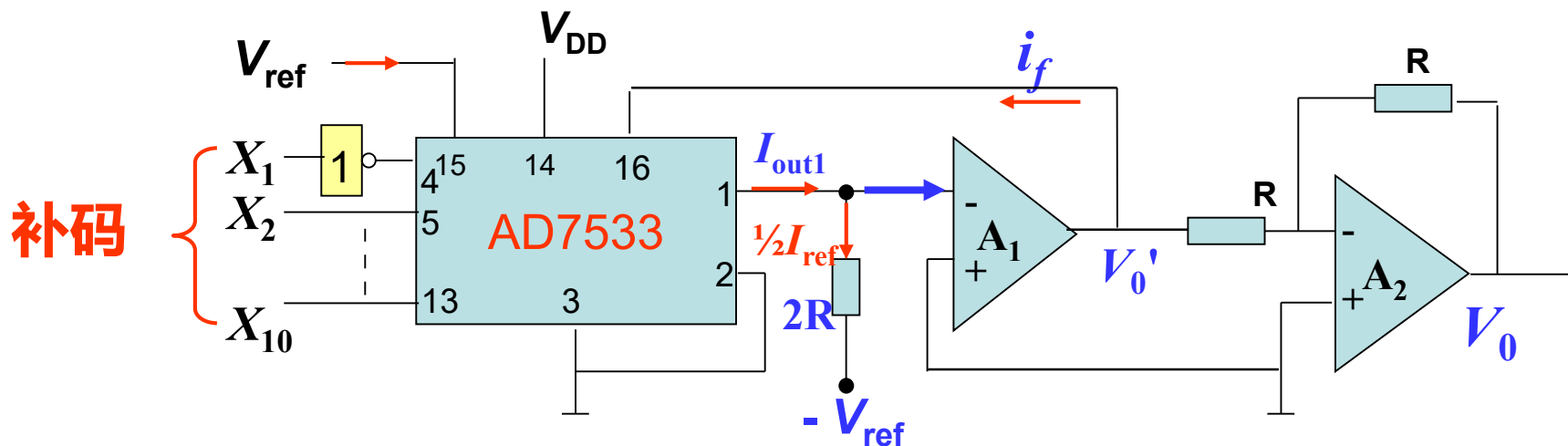
$$V_0 = V_{ref} \frac{X_1 2^9 + X_2 2^8 + \cdots + X_{10} 2^0 - 2^9}{2^{10}}$$

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

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。



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

注意:  $\overline{X_1}$

# 主要技术参数

## 1.最小分辨电压 $V_{\text{LSB}}$

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 $V_{\text{LSB}}$ 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 $V_{\text{LSB}}$ 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。