

第八章 数-模和模-数转换（一）

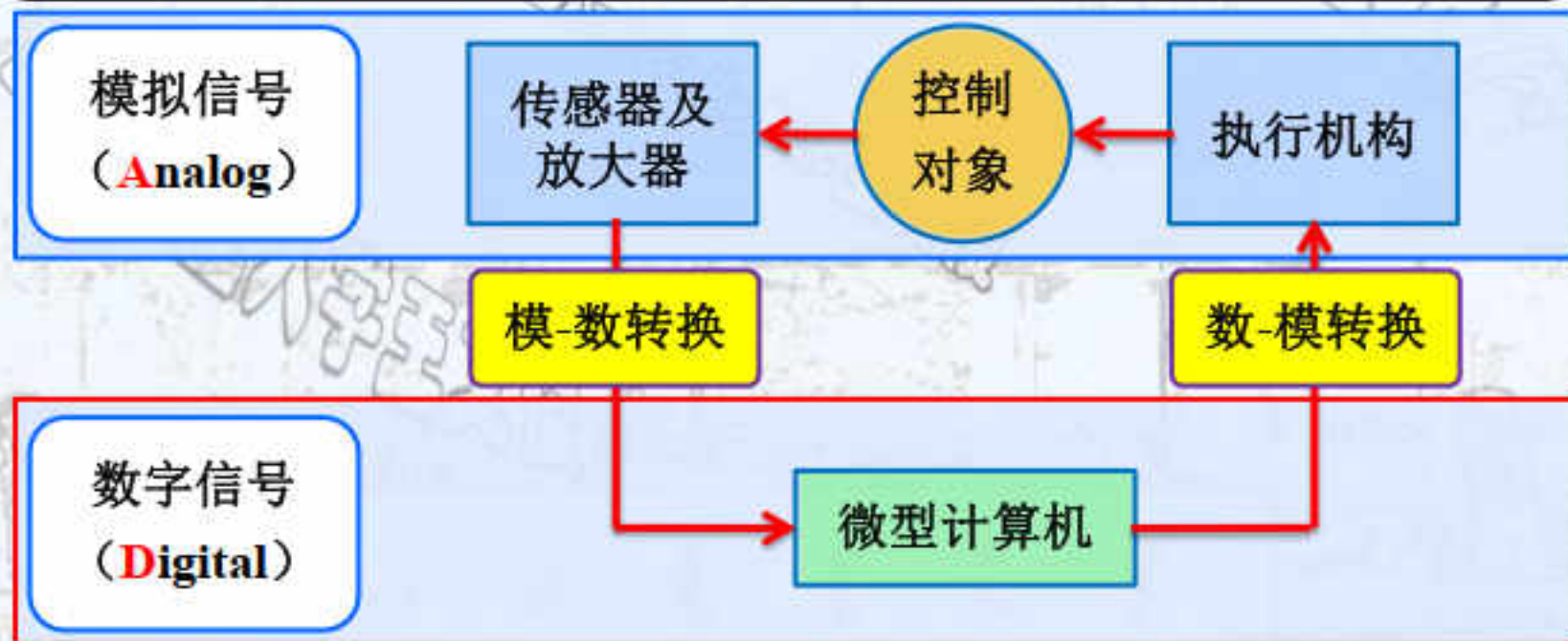
——王文俊

山西农业大学

一、数-模和模-数转换概述

• 1、数-模和模-数转换的基本概念

由于数字电子技术的迅速发展，尤其是计算机在信息处理、自动控制、自动检测以及许多其他领域中的广泛应用，用数字电路处理模拟信号的情况也更加普遍。



在实际应用中，常常需要进行模拟信号（**A**）和数字信号（**D**）间的相互转换。



• 2、数-模 (D/A) 转换器的分类

电流求和型

- ① 电路产生一组支路电流，支路电流间的比例与二进制数中每一位的权重成正比；
- ② 将二进制数取值为“1”的对应支路电流相加，得到一个与输入量成正比的输出电流信号；
- ③ 令电流流过一个电阻，将电流信号转换为电压输出信号。
- 如：权电阻型DAC、倒T形电阻网络DAC、权电流型DAC

分压器型

- 用输入数字量每一位控制分压器中的一个或一组开关，使接至输出端的电压恰好与输入的数字量成正比。
- 如：开关树型DAC、权电容网络DAC

• 3、模-数 (A/D) 转换器的分类

直接型

- 输入的模拟电压信号**直接**被转换为相应的数字信号
- 如：并联比较型ADC、逐次比较型ADC

间接型

- ① 输入的模拟信号首先被转换为**中间变量**（例如：时间 T 、频率 F 等）；
- ② 中间变量再被转换为输出的数字信号。
- 如： V - T 变换型ADC（与模拟信号成正比的**时间宽度**信号）
- 如： V - F 变换型ADC（与模拟信号电压成正比的**频率**信号）

• 4、转换器的关键参数

转换精度

- 为保证数据处理结果的准确性，**A/D转换器**和**D/A转换器**必须有足够的转换精度。

转换速度

- 为适应快速过程的控制和检测的需要，**A/D转换器**和**D/A转换器**必须有足够快的转换速度。

转换精度和**转换速度**是衡量**A/D转换器**和**D/A转换器**性能的主要标志。

二、权电阻型D/A转换器

• 1、电流求和型D/A转换器的原理

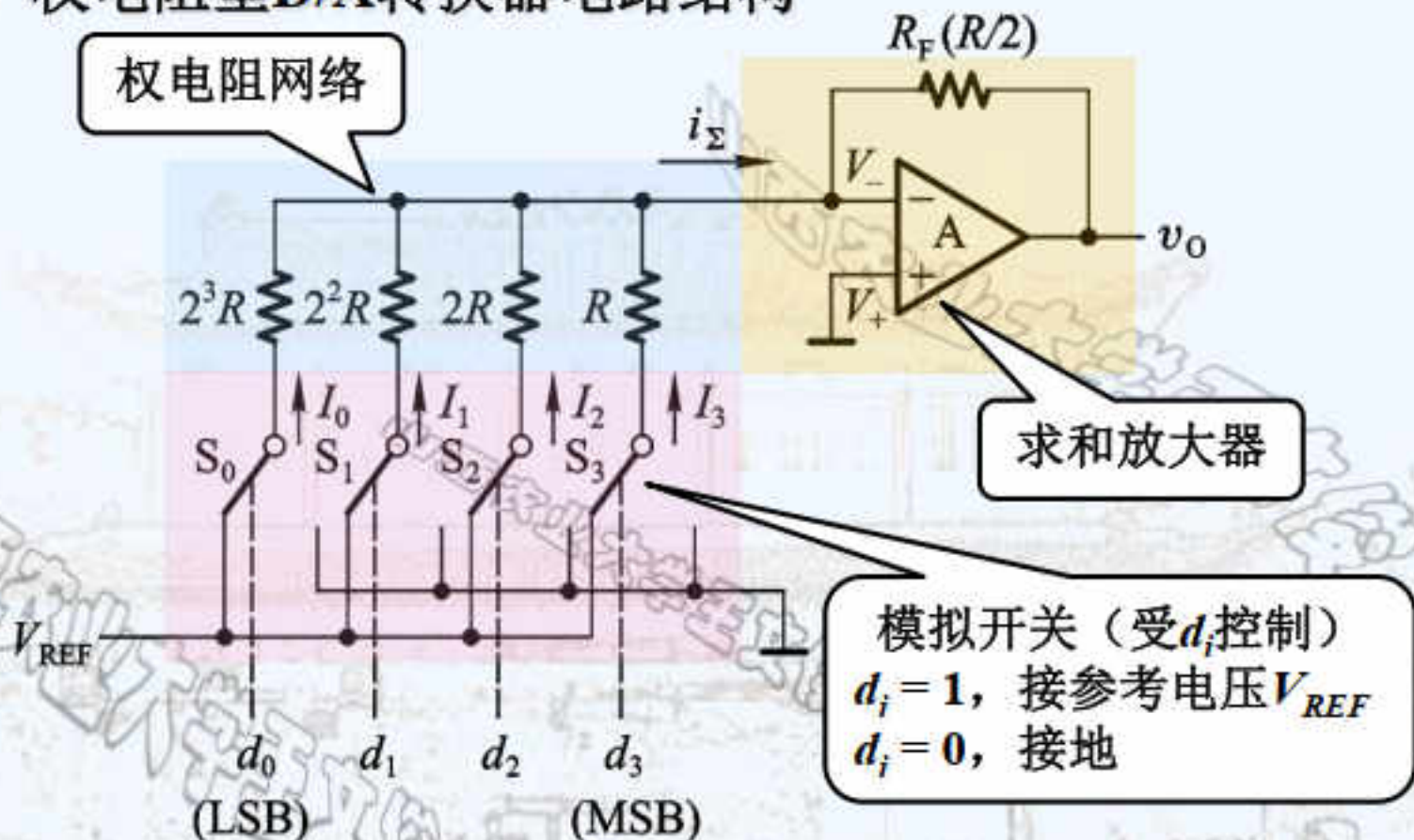
n 位二进制数	d_{n-1}	d_{n-2}	...	d_1	d_0
	<div> 最高位 (MSB)  最低位 (LSB) </div>				
权	2^{n-1}	2^{n-2}	...	2^1	2^0
转换为十进制数 D_n	$D_n = d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \dots + d_12^1 + d_02^0$				

电路实现



n 位二进制数	d_{n-1}	d_{n-2}	...	d_1	d_0
① 权电流 (与权成正比)	$k \cdot 2^{n-1}$	$k \cdot 2^{n-2}$...	$k \cdot 2^1$	$k \cdot 2^0$
② 电流求和 I	$I = k(d_{n-1}2^{n-1} + d_{n-2}2^{n-2} + \dots + d_12^1 + d_02^0) = kD_n$				
③ 输出电压 V_o (电流经过固定电阻)	$V_o = IR = kRD_n$				

2、权电阻型D/A转换器电路结构



理想的
负反馈
放大器

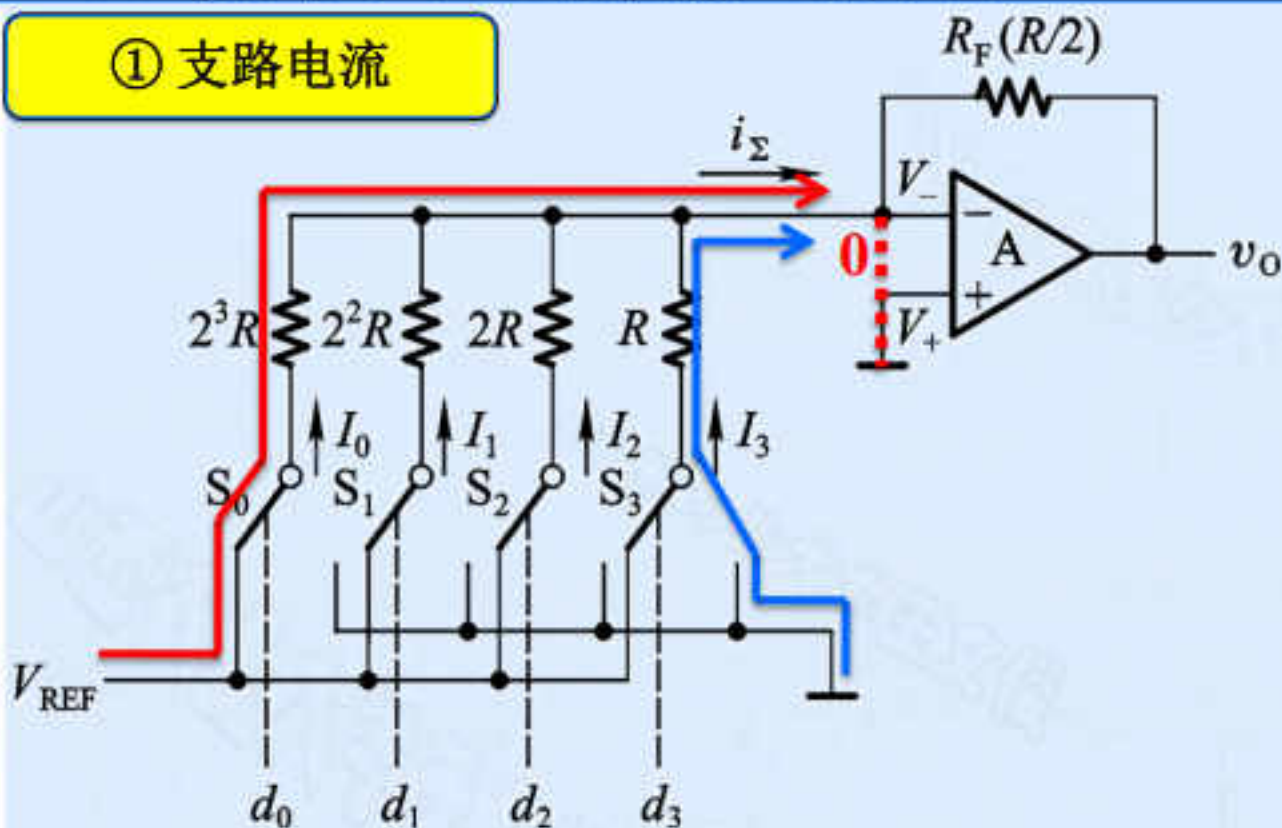
- 开环放大倍数 $A_V = \infty$
- 输入电阻 $R_i = \infty$, $i_I = 0$
- 输出电阻 $R_O = 0$

深度
负反馈

- $V_- \approx V_+ = 0$
- $i_I = 0$

3、权电阻型D/A转换器工作原理

① 支路电流



$$d_i = 1$$

• S_i 接 V_{REF}

$$I_i = \frac{V_{REF}}{R_i} d_i$$

$$d_i = 0$$

• S_i 接地

$$I_i = \frac{V_{REF}}{R_i} d_i$$

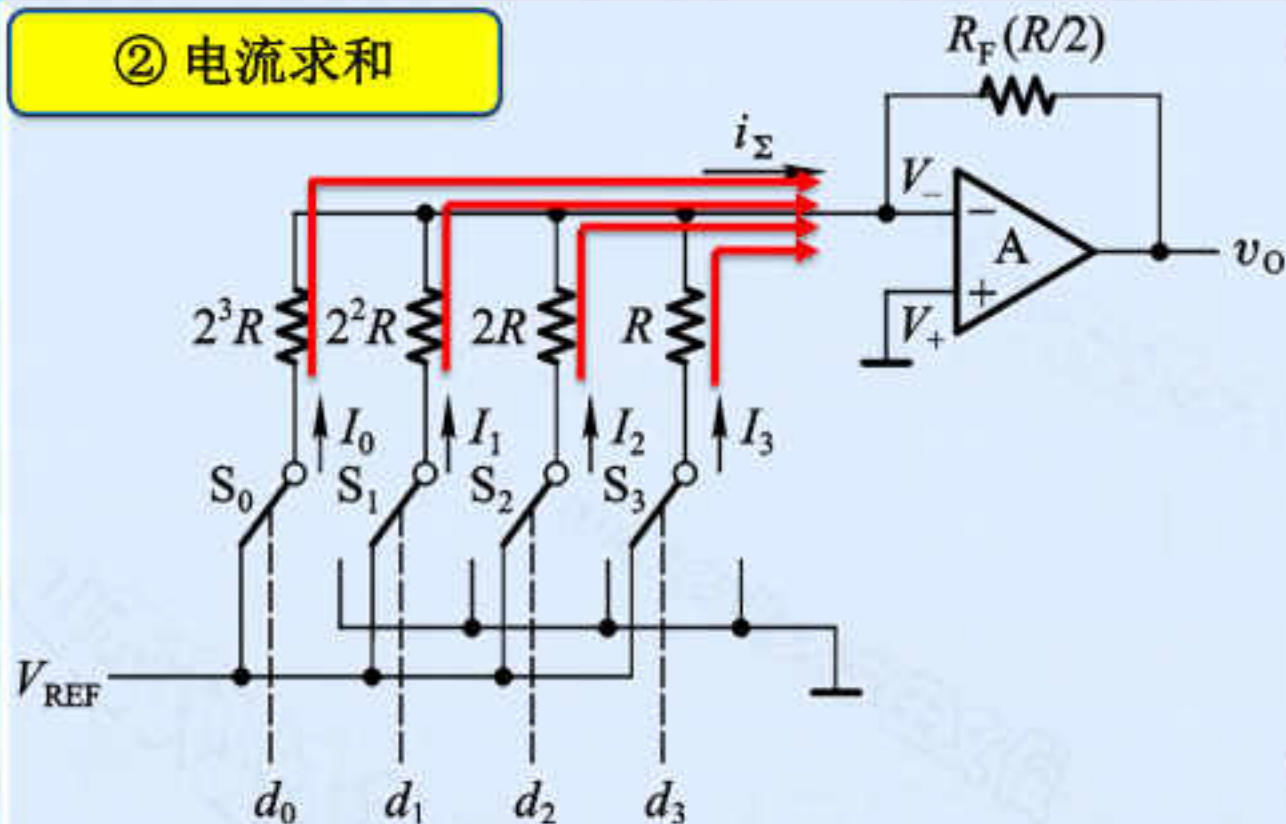
$$I_0 = \frac{V_{REF}}{2^3 R} d_0$$

$$I_1 = \frac{V_{REF}}{2^2 R} d_1$$

$$I_2 = \frac{V_{REF}}{2^1 R} d_2$$

$$I_3 = \frac{V_{REF}}{2^0 R} d_3$$

② 电流求和



$$I_0 = \frac{V_{REF}}{2^3 R} d_0$$

$$I_1 = \frac{V_{REF}}{2^2 R} d_1$$

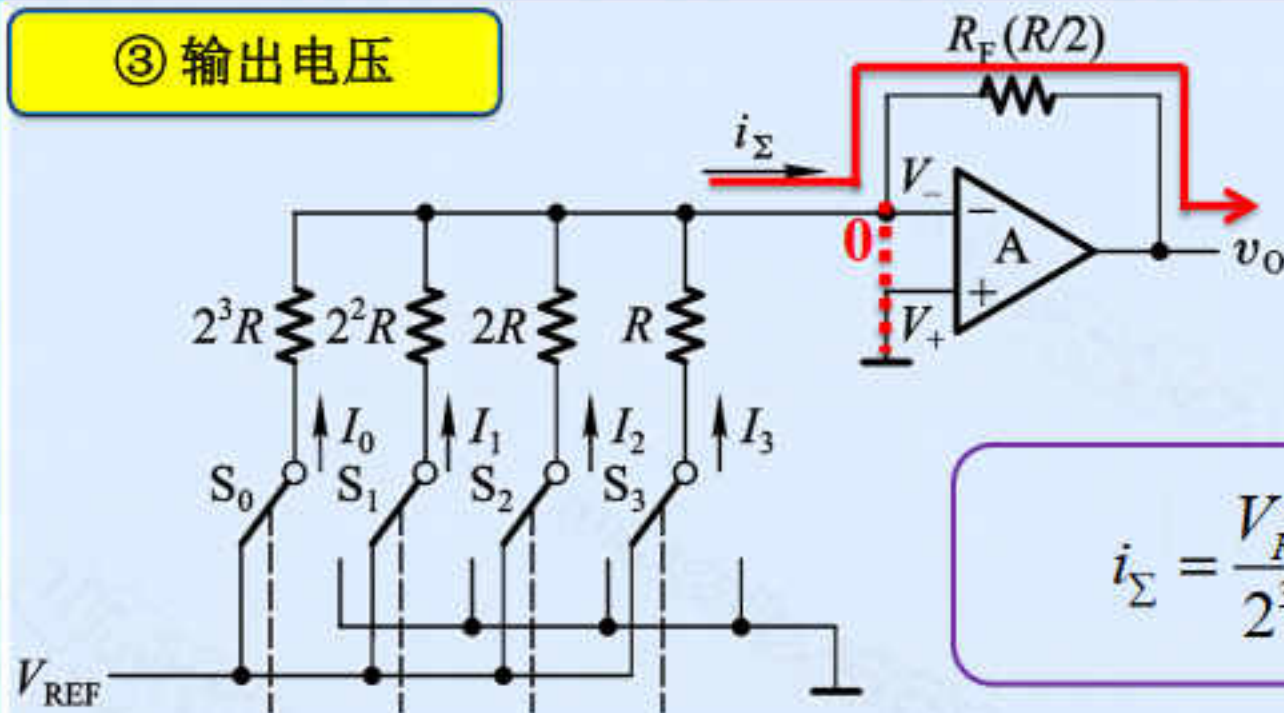
$$I_2 = \frac{V_{REF}}{2^1 R} d_2$$

$$I_3 = \frac{V_{REF}}{2^0 R} d_3$$

$$i_{\Sigma} = I_0 + I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V_{REF}}{2^3 R} d_0 + \frac{V_{REF}}{2^2 R} d_1 + \frac{V_{REF}}{2R} d_2 + \frac{V_{REF}}{R} d_3$$

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

③ 输出电压



$$i_\Sigma = \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_4$$

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

取 $R_F = R/2$, 则:

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

- 输出的模拟电压 V_O 正比于输入的数字量 D_n ，从而实现了从数字量到模拟量的转换。

4位权电阻网络D/A转换器

- 反馈电阻 $R_F = R/2$

$$V_O = -\frac{V_{REF}}{2^4} D_4$$



n 位权电阻网络D/A转换器

- 反馈电阻 $R_F = R/2$

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

输入数字量 D_n
的变化范围

- 二进制：从 00...00 到 11...11
- 十进制：从 0 到 $2^n - 1$

输出电压 V_O
的变化范围

- 从 0 到 $-\frac{2^n - 1}{2^n} V_{REF}$

• 4、权电阻型D/A转换器的电路特点

优点

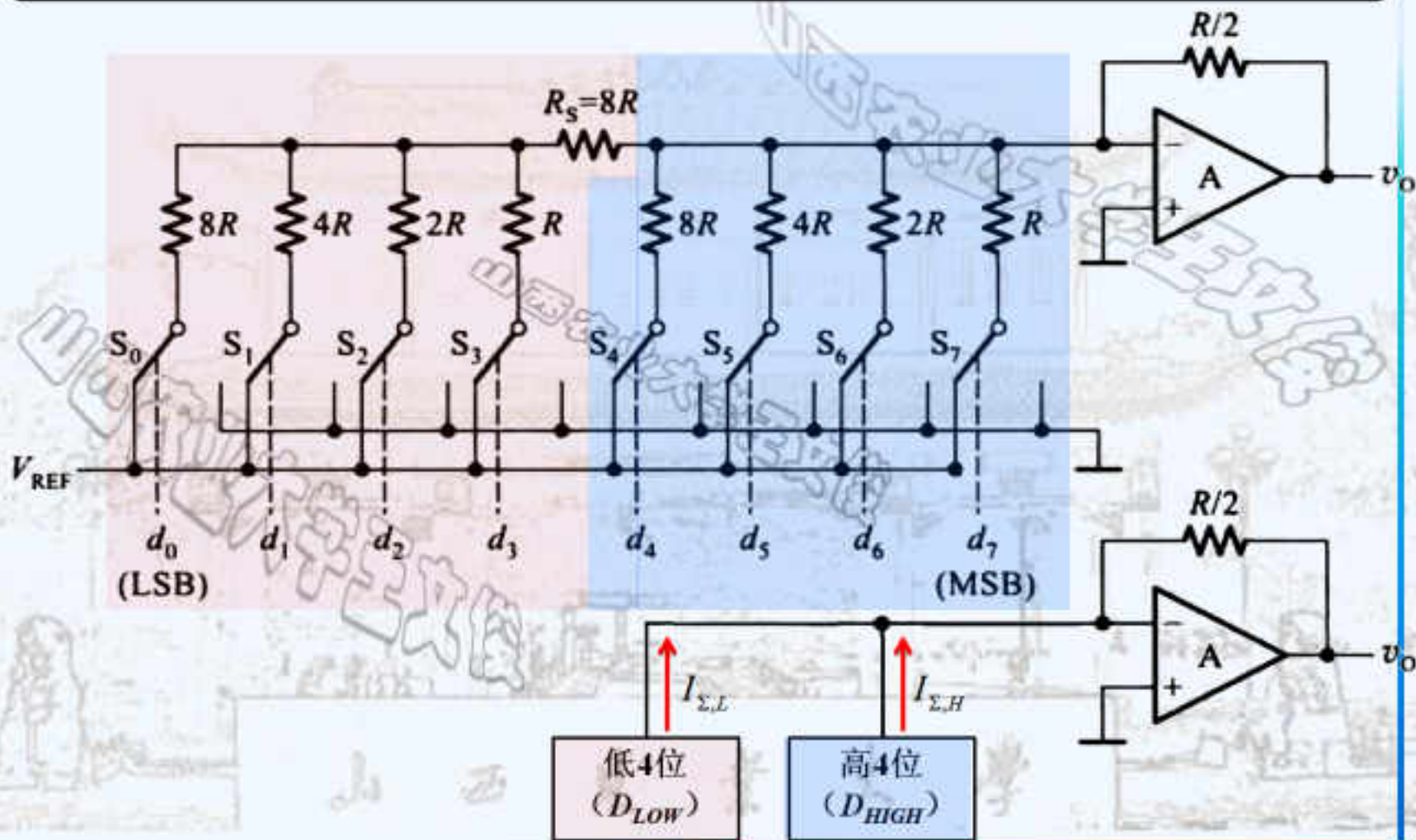
- 电路结构比较简单
- 所用的电阻元件数很少

缺点

- 各个电阻的阻值相差较大。尤其当输入信号的位数较多时，这个问题更为突出。（如8位权电阻网络，最大电阻为最小电阻的 $2^7 = 128$ 倍）
- 在极宽广的范围内难以保证很高的电阻精度，不利于制作集成电路。

• 5、双级权电阻网络D/A转换器

为解决阻值相差太大的问题，多位输入时常采用双级权电阻网络结构。



6、双级权电阻网络D/A转换器工作原理



低4位

 $d_i = 1$

$$I_i = \frac{V_{REF} - V_L}{2^3 R} 2^i d_i$$

低4位

 $d_i = 0$

$$I_i = -\frac{V_L}{2^3 R} 2^i (1 - d_i)$$

公式

合并

$$I_i = \frac{V_{REF} - V_L}{2^3 R} 2^i d_i - \frac{V_L}{2^3 R} 2^i (1 - d_i) = \frac{1}{2^3 R} (V_{REF} 2^i d_i - 2^i V_L)$$

公式
$$I_i = \frac{V_{REF} - V_L}{2^3 R} 2^i d_i - \frac{V_L}{2^3 R} 2^i (1 - d_i) = \frac{1}{2^3 R} (V_{REF} 2^i d_i - 2^i V_L)$$

$$I_0 = \frac{1}{2^3 R} (V_{REF} 2^0 d_0 - V_L 2^0)$$

$$I_2 = \frac{1}{2^3 R} (V_{REF} 2^2 d_2 - V_L 2^2)$$

$$I_1 = \frac{1}{2^3 R} (V_{REF} 2^1 d_1 - V_L 2^1)$$

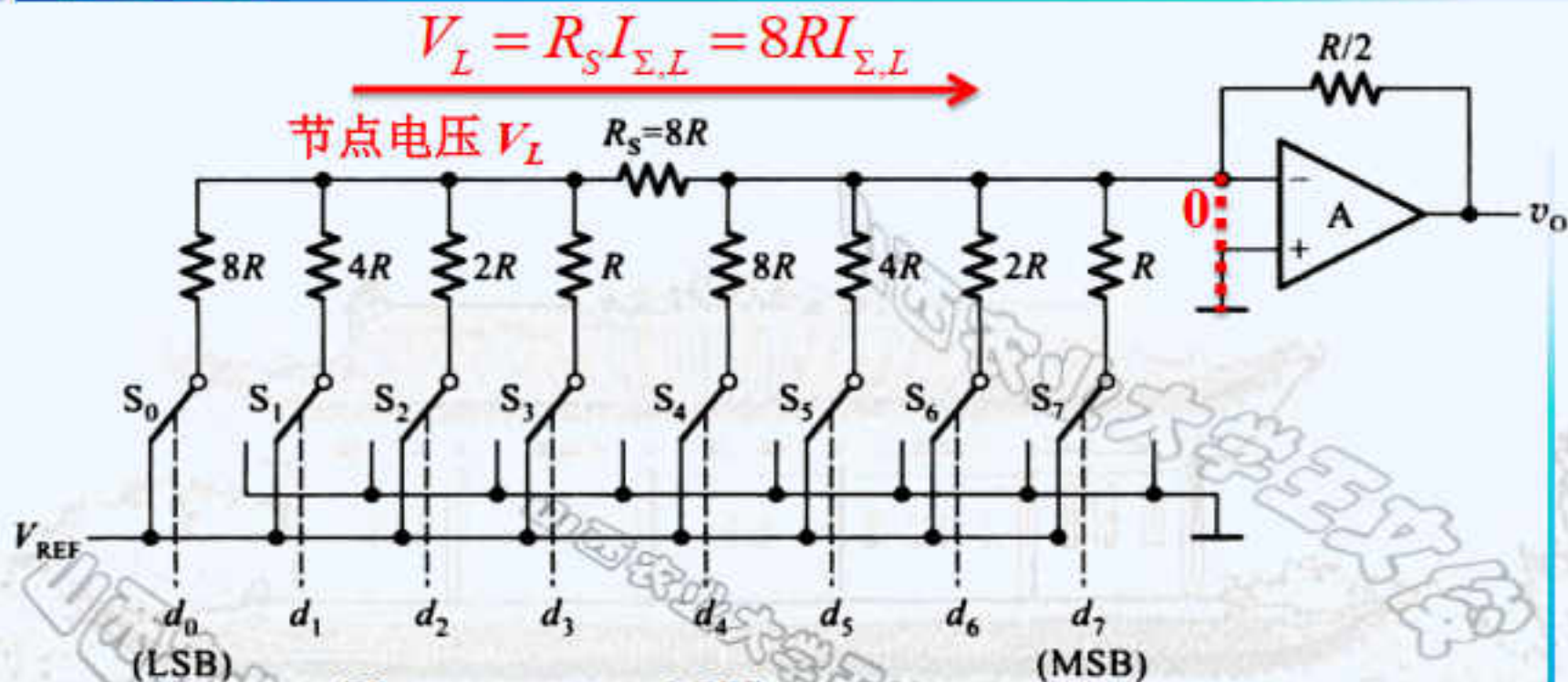
$$I_3 = \frac{1}{2^3 R} (V_{REF} 2^3 d_3 - V_L 2^3)$$

低4位 (D_{LOW}) 的总电流 $I_{\Sigma L}$ 为低4位各支路电流之和:

$$I_{\Sigma L} = I_0 + I_1 + I_2 + I_3$$

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

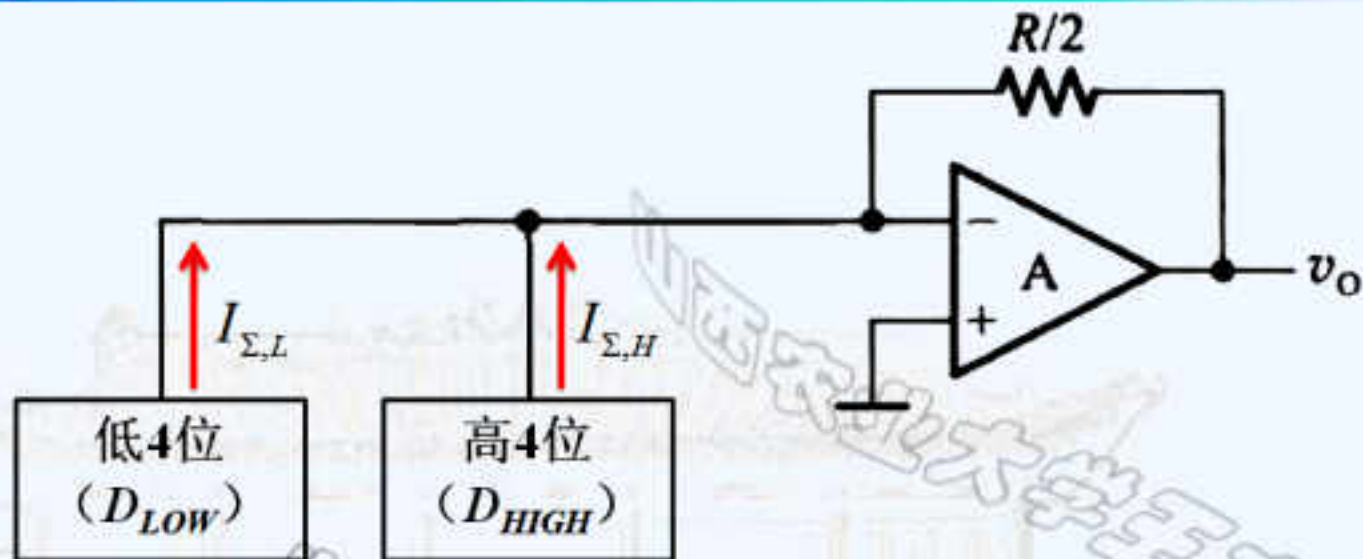
$$= \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{LOW} - \frac{15V_L}{2^3 R}$$



$$I_{\Sigma,L} = \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{LOW} - \frac{15V_L}{2^3 R}$$

$$I_{\Sigma,L} = \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{LOW} - \frac{15}{2^3 R} 8R I_{\Sigma,L} = \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{LOW} - 15 I_{\Sigma,L}$$

$$I_{\Sigma,L} = \frac{1}{16} \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{LOW}$$



$$I_{\Sigma,L} = \frac{1}{16} \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{LOW} \quad I_{\Sigma,H} = \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{HIGH}$$

总电流 I_{Σ}

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{16} \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{LOW} + \frac{V_{REF}}{2^3 R} D_{HIGH} = \frac{V_{REF}}{2^7 R} D_8$$

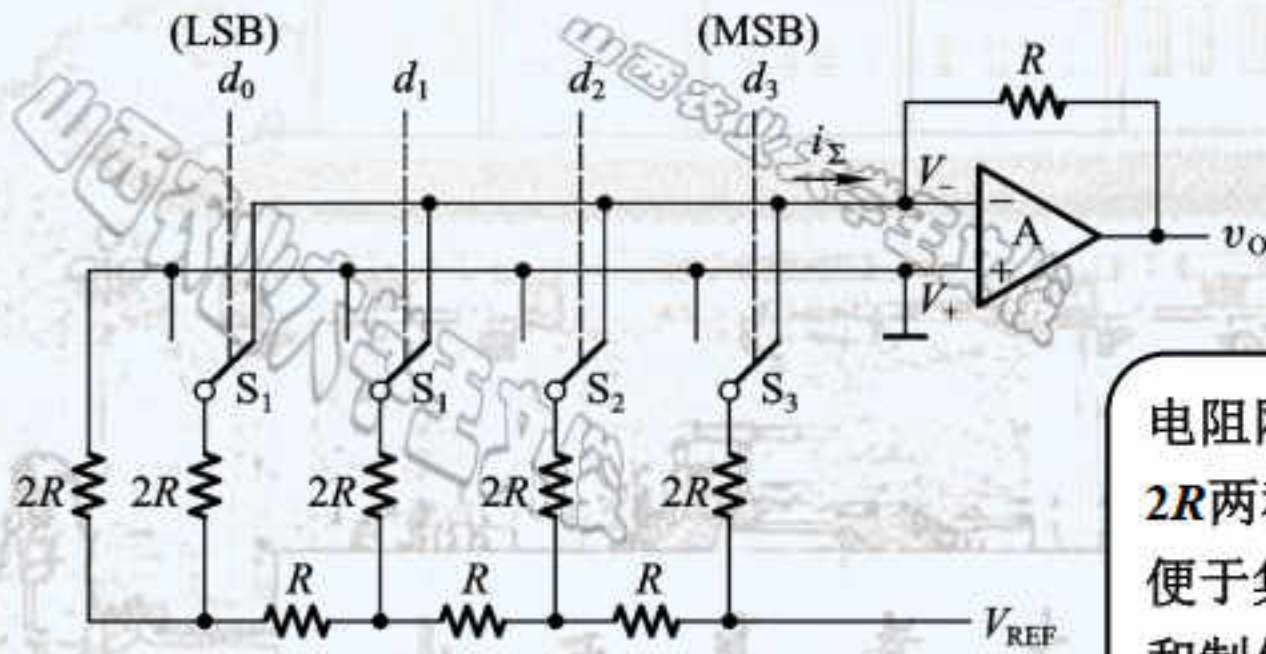
输出电压 V_O

$$V_O = -R_F I_{\Sigma} = -\frac{R}{2} \frac{V_{REF}}{2^7 R} D_8 = -\frac{V_{REF}}{2^8} D_8$$

三、倒T形电阻网络D/A转换器

• 1、电路结构

为克服权电阻网络D/A转换器中电阻阻值相差太大的缺点，研制出了倒T形电阻网络D/A转换器。

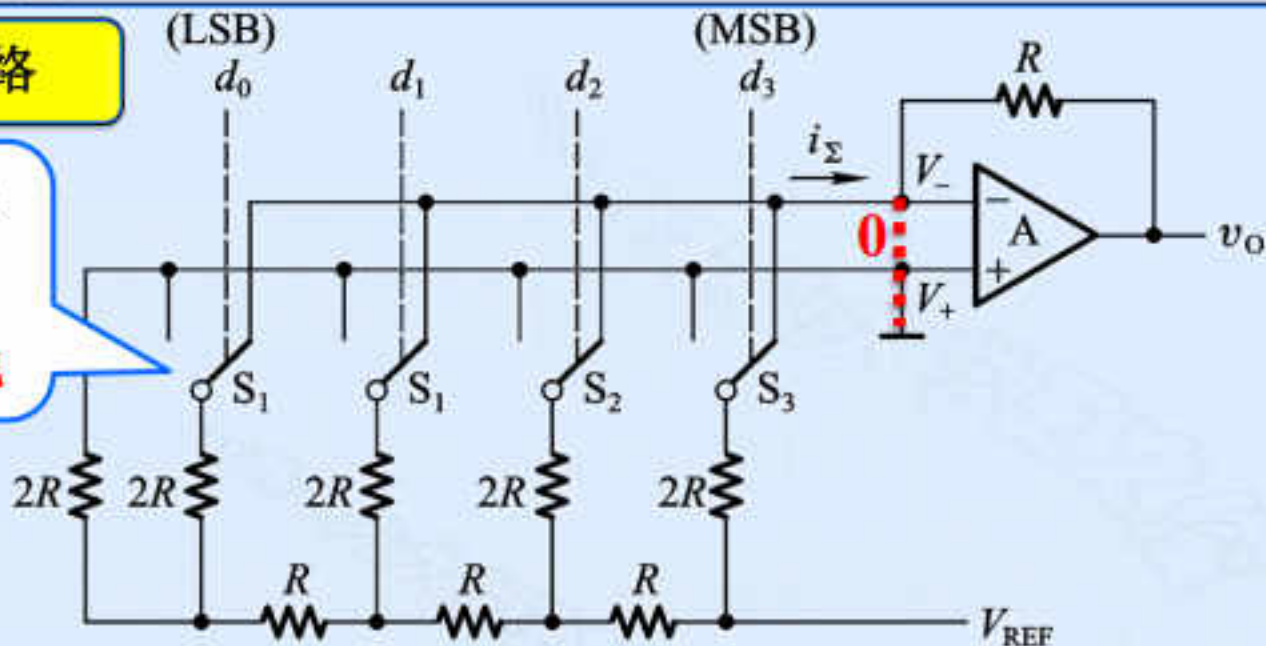


电阻网络中只有 R 、 $2R$ 两种阻值的电阻，便于集成电路的设计和制作。

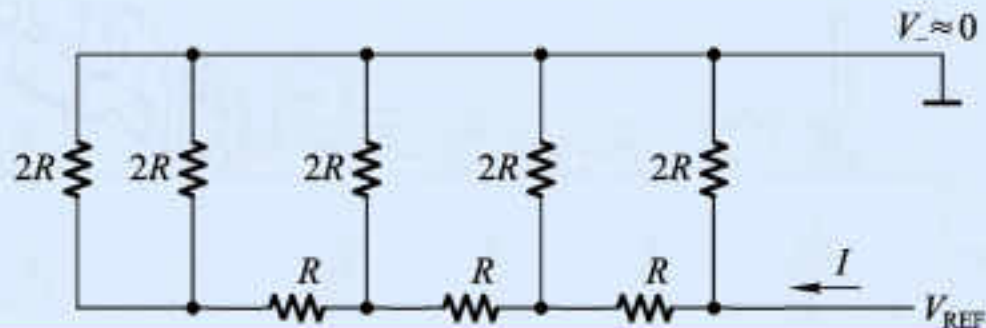
2、工作原理

等效电阻网络

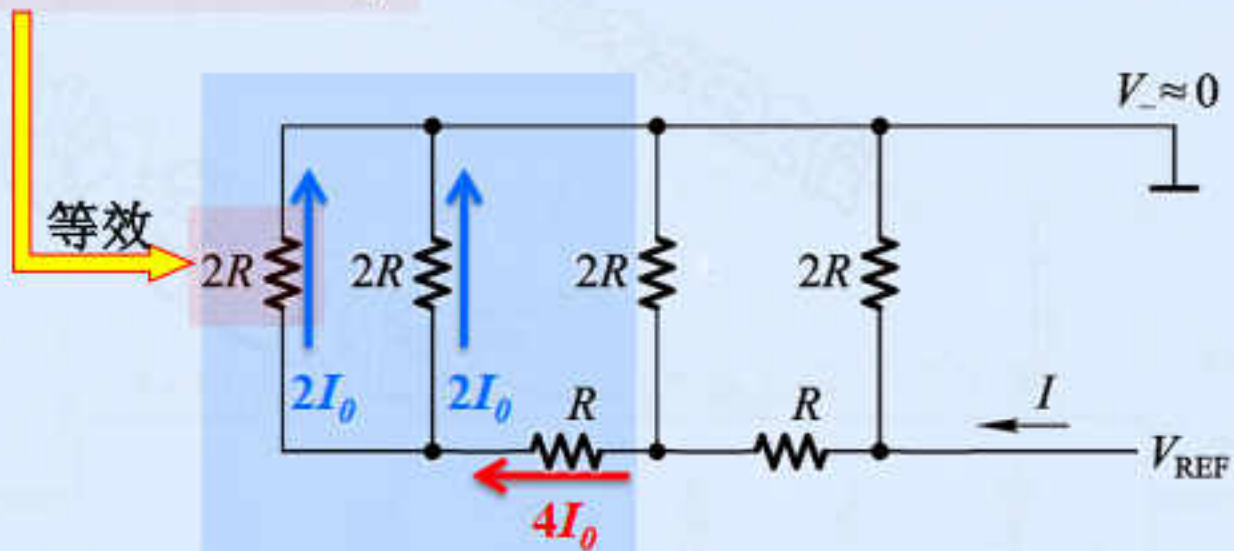
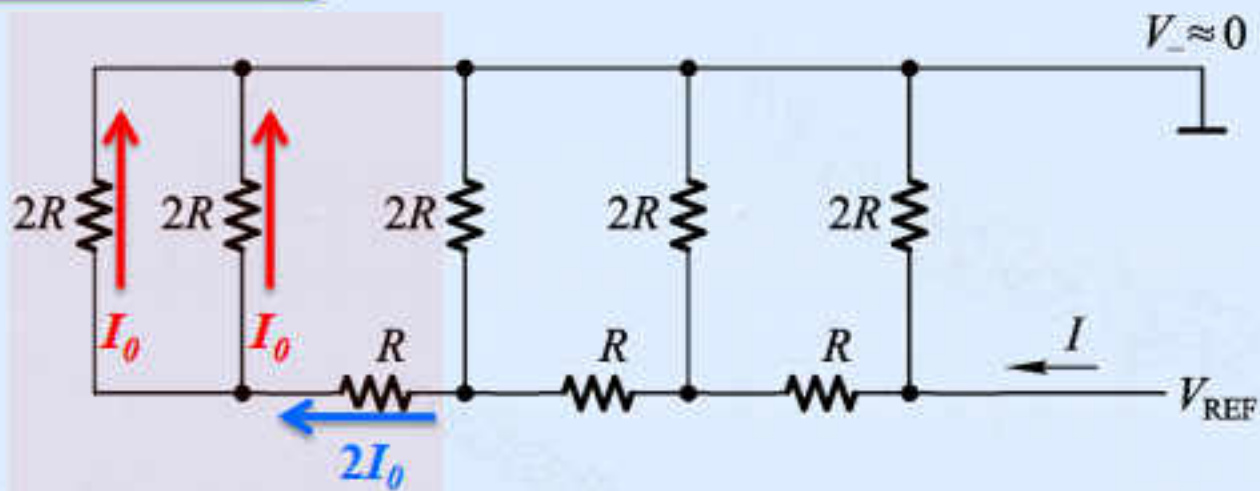
不论开关 S_i 合到哪一边，都相当于**接地**



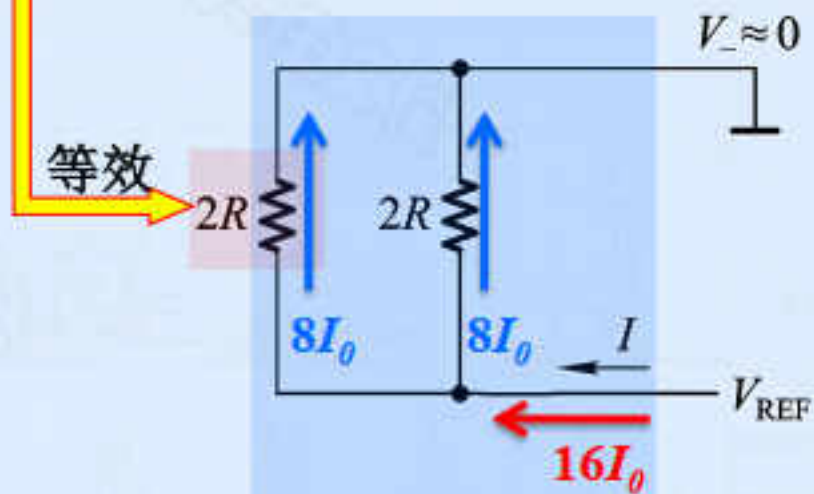
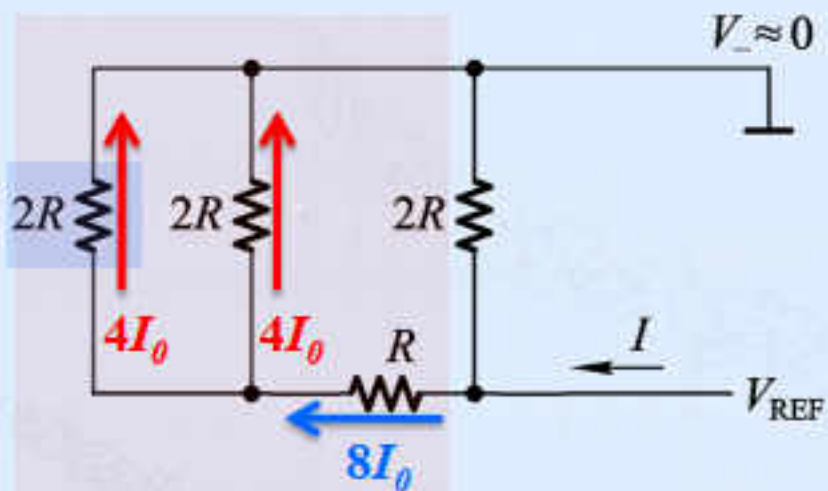
不论开关合状态如何，流过每个支路的电流始终保持不变。



① 支路电流

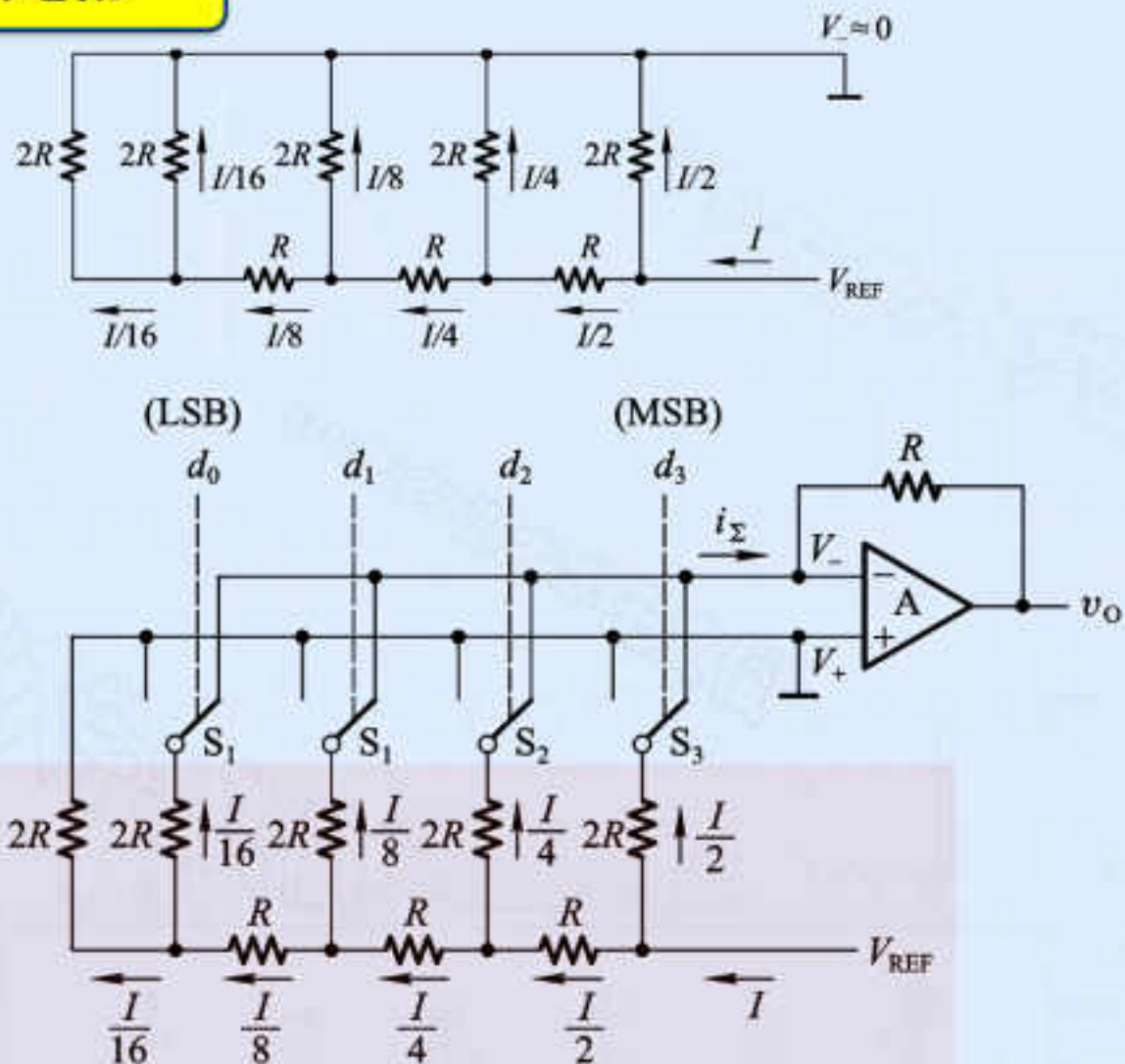


① 支路电流

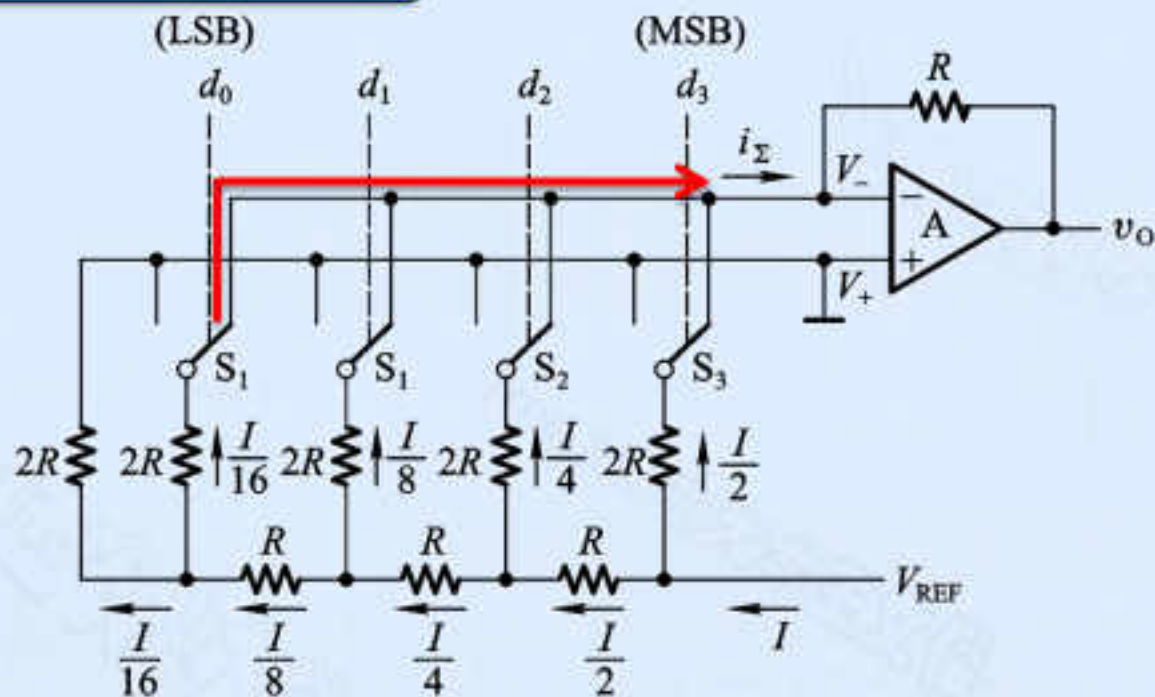


$$I = 16I_0 = \frac{V_{REF}}{R}$$

① 支路电流



② 电流求和



$$I_0 = \frac{I}{16} d_0$$

$$I_1 = \frac{I}{8} d_1$$

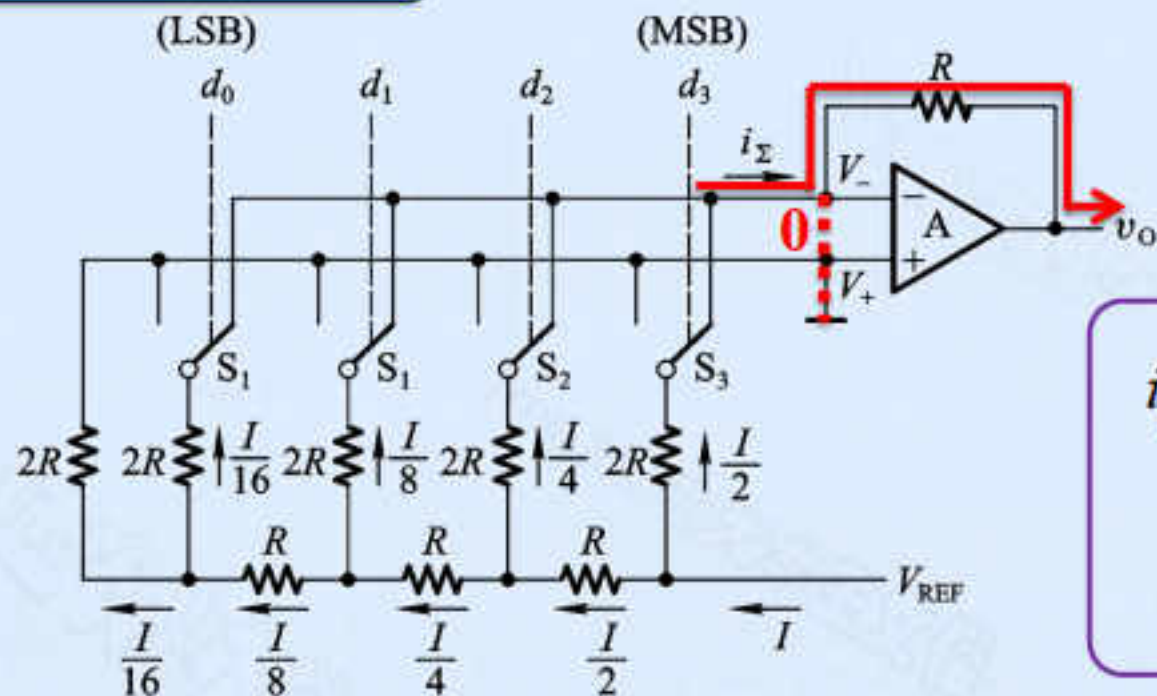
$$I_2 = \frac{I}{4} d_2$$

$$I_3 = \frac{I}{2} d_3$$

$$i_\Sigma = I_0 + I_1 + I_2 + I_3 = \frac{I}{16} d_0 + \frac{I}{8} d_1 + \frac{I}{4} d_2 + \frac{I}{2} d_3$$

$$= \frac{I}{16} (2^3 d_3 + 2^2 d_2 + 2^1 d_1 + 2^0 d_0) = \frac{I}{2^4} D_4$$

③ 输出电压



$$i_\Sigma = \frac{I}{2^4} D_4$$

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

$$V_O = -Ri_\Sigma = -R \frac{I}{2^4} D_4 = -\frac{V_{REF}}{2^4} D_4$$

- 输出的模拟电压 V_O 正比于输入的数字量 D_n ，从而实现了从数字量到模拟量的转换。

4位倒T形电阻网络D/A转换器

$$V_O = -\frac{V_{REF}}{2^4} D_4$$



n 位倒T形电阻网络D/A转换器

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

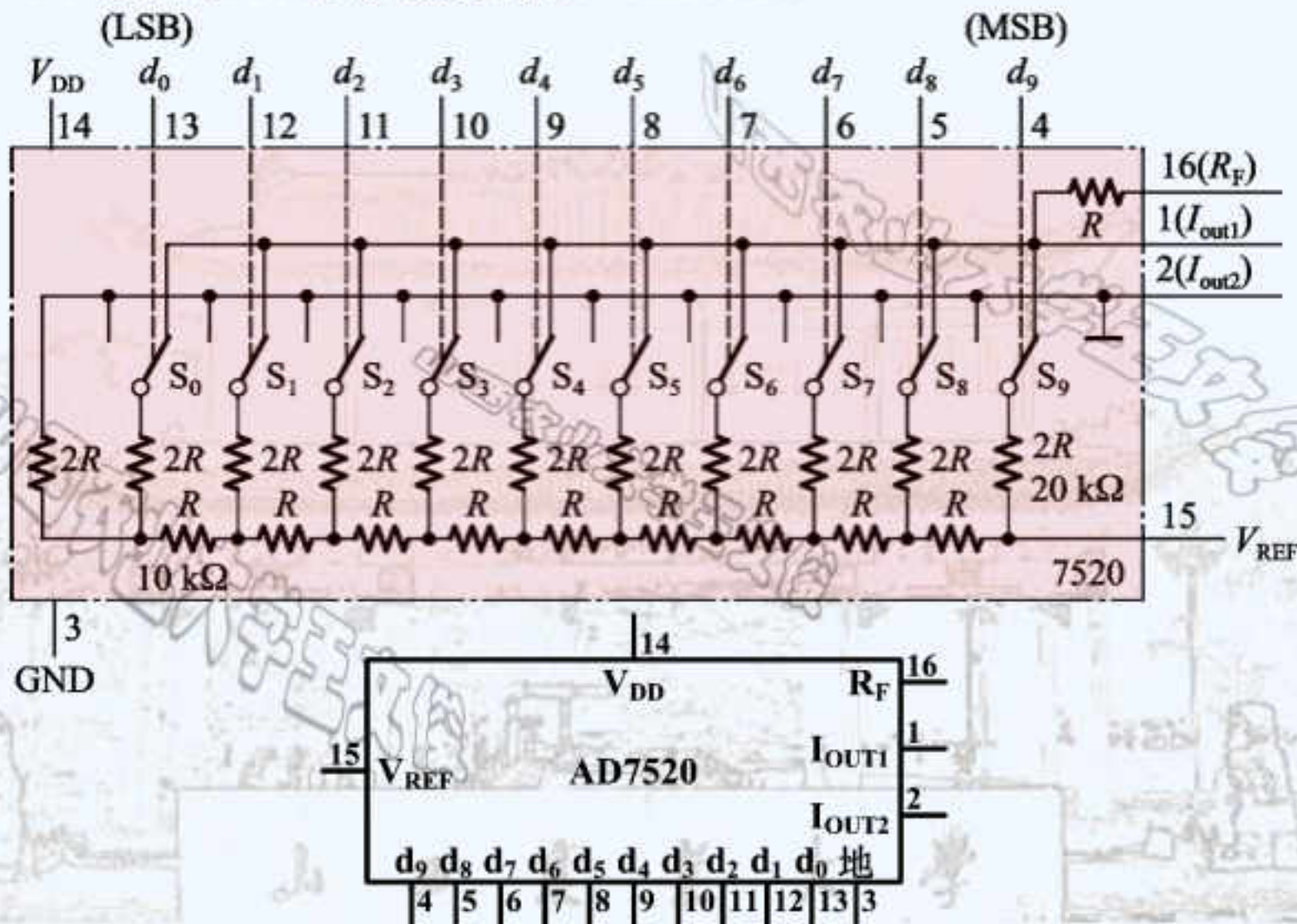
输入数字量 D_n
的变化范围

- 二进制：从 00...00 到 11...11
- 十进制：从 0 到 $2^n - 1$

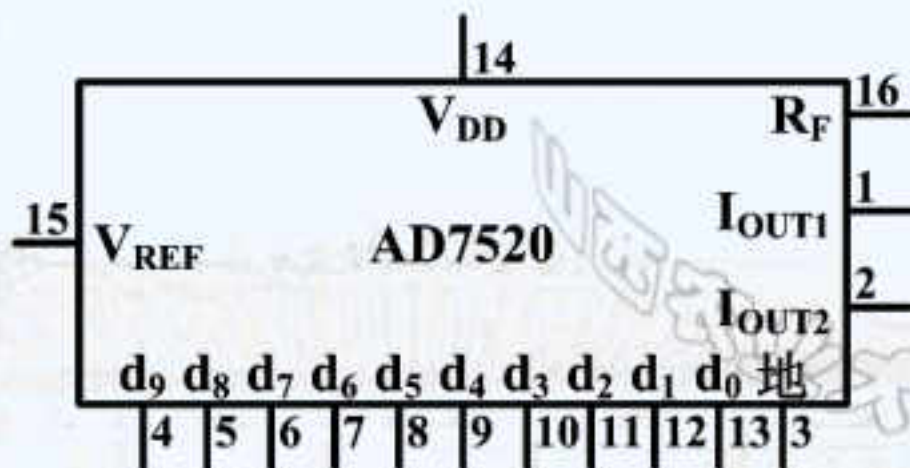
输出电压 V_O
的变化范围

- 从 0 到 $-\frac{2^n - 1}{2^n} V_{REF}$

3、集成D/A转换器实例：AD7520



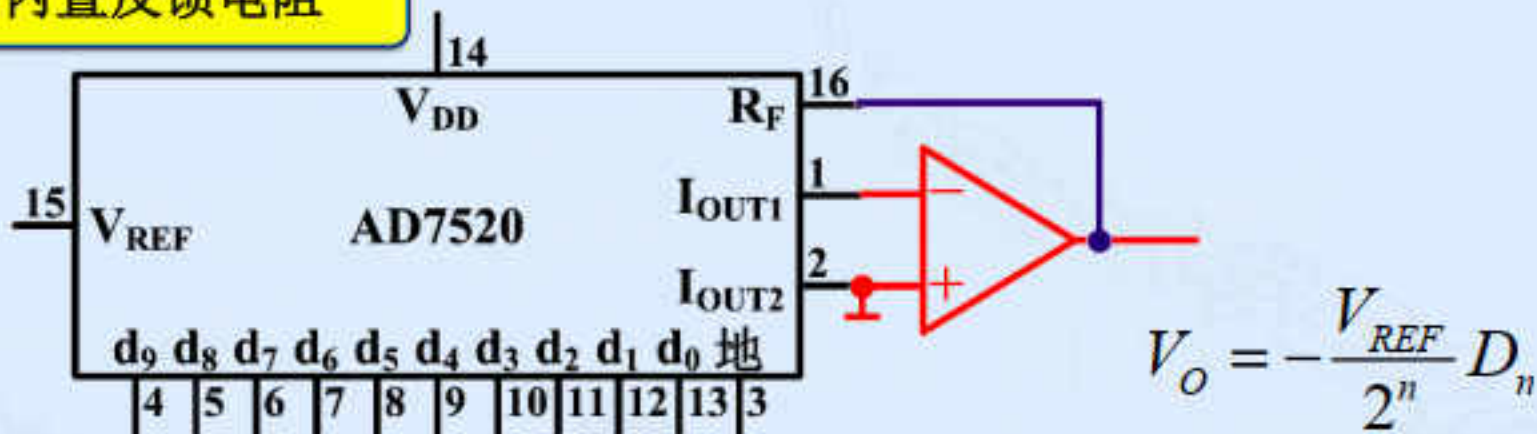
- 引脚功能:



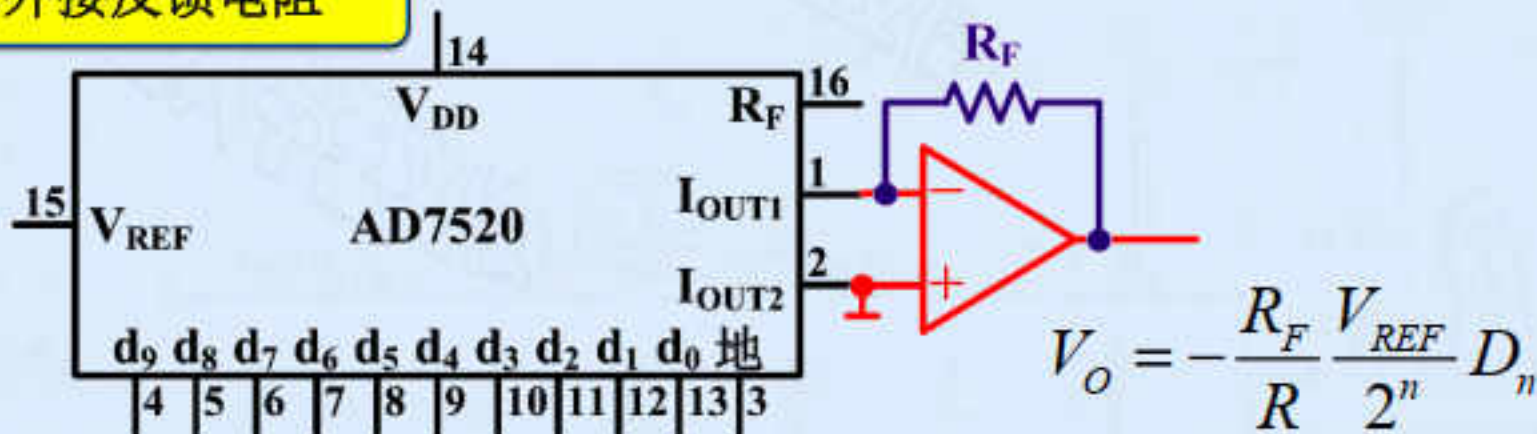
引脚	功能
1	模拟电流输出端，接运算放大器反相输入端
2	模拟电流输出端，一般接地
3	接地端
4~13	十位数字量的输入端
14	电源输入端
15	参考电压输入端
16	内置反馈电阻输入端

- 两类典型接法（使用时需外加运算放大器）

内置反馈电阻

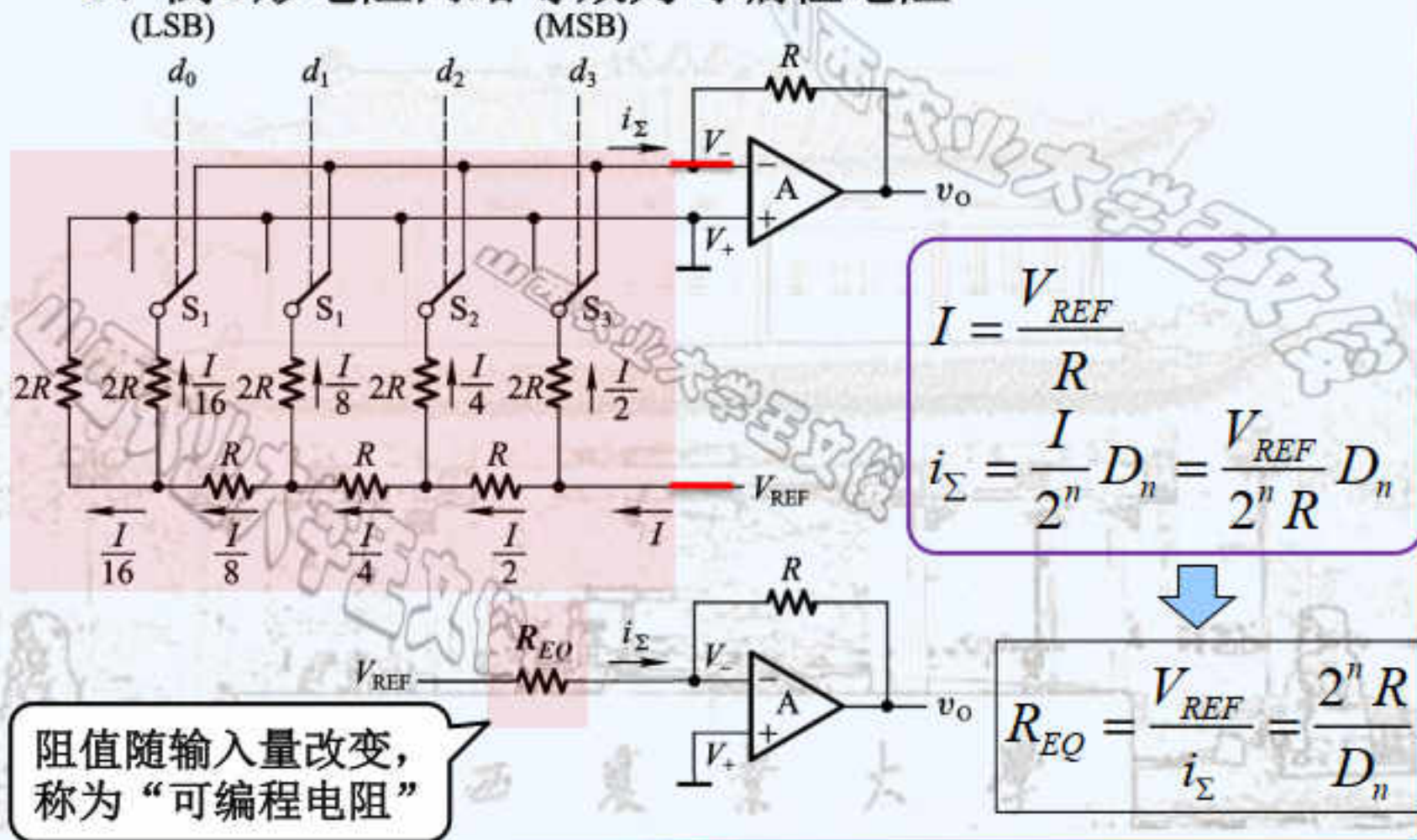


外接反馈电阻

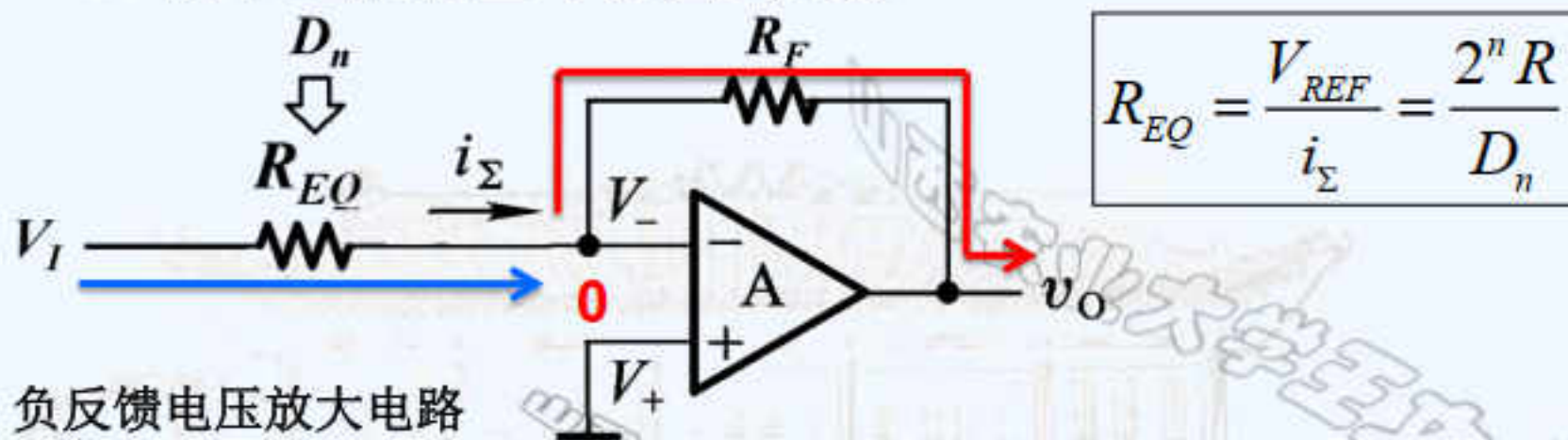


四、倒T形电阻网络D/A转换器的应用

1、倒T形电阻网络等效为可编程电阻



• 2、用于组成增益可编程放大器



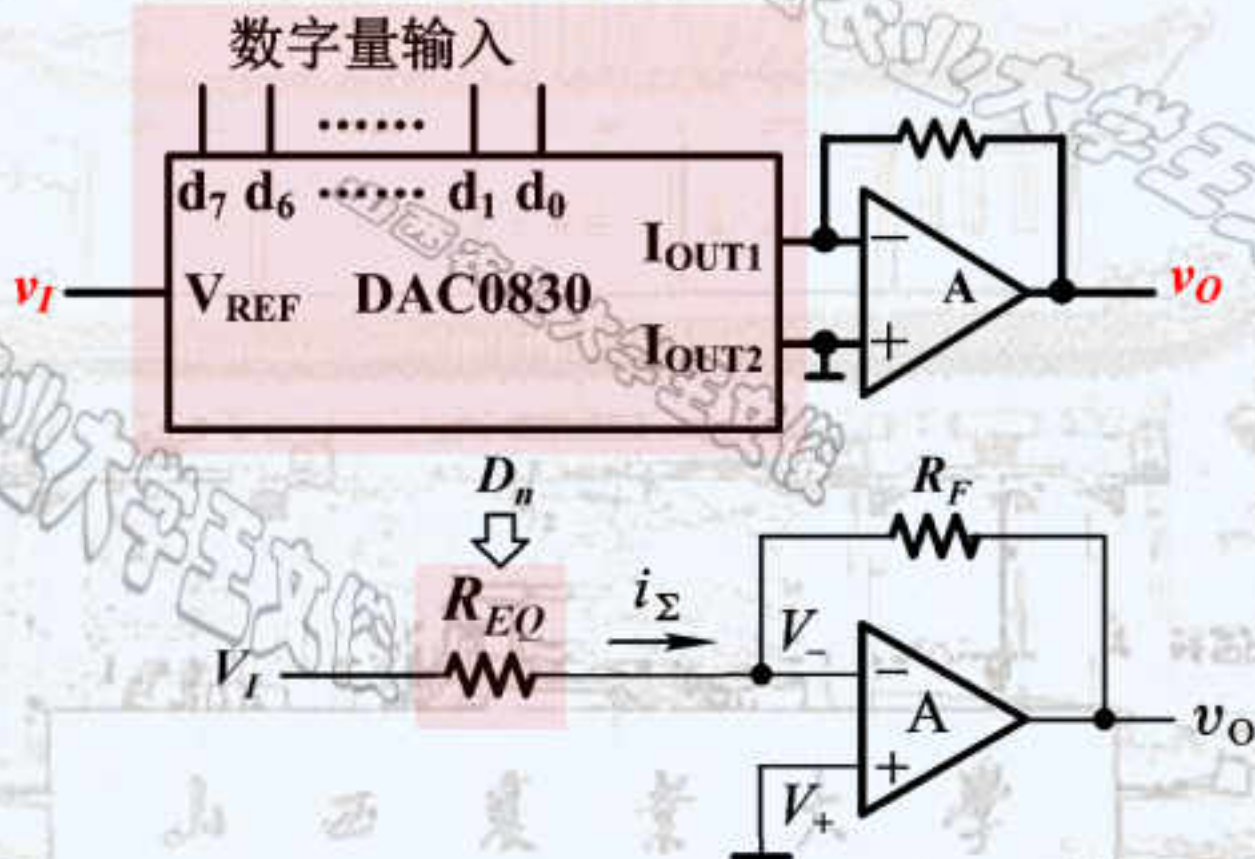
增益（电压放大倍数）

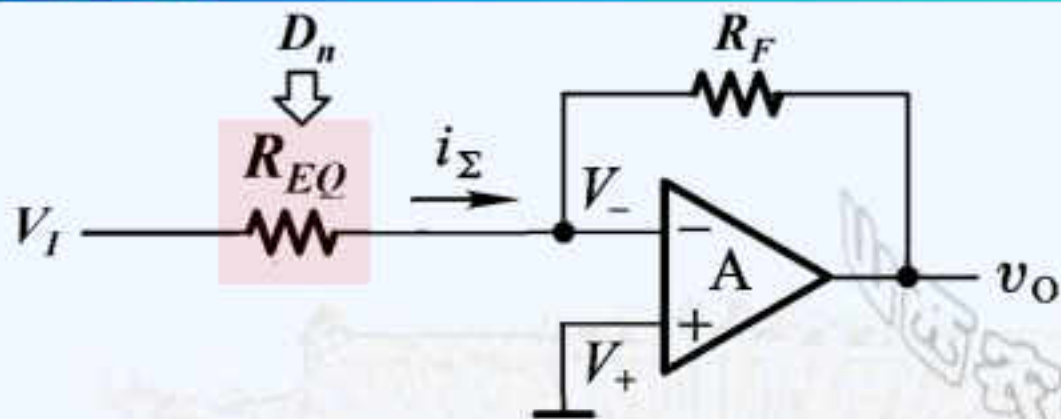
$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-R_F i_{\Sigma}}{R_{EQ} i_{\Sigma}} = -\frac{R_F}{R_{EQ}} = -\frac{R_F}{2^n R} D_n$$

通过编程的方式改变 R_{EQ} 或者 R_F ，就能够改变负反馈电压放大电路的电压放大倍数 A_V ，从而得到增益可编程的放大电路。

- 例1：试计算当D/A转换器的输入量从全0变到全1时，电压放大倍数的变化范围。

- 图中DAC0830是8位倒T形电阻网络D/A转换器
- 电阻网络中电阻 R 为 $15\text{k}\Omega$ ，外接反馈电阻 R_F 为 $150\text{k}\Omega$





$$R_{EQ} = \frac{V_{REF}}{i_{\Sigma}} = \frac{2^n R}{D_n}$$

电压放大倍数

$$A_V = -\frac{R_F}{R_{EQ}} = -\frac{R_F}{2^n R} D_n = -\frac{10}{2^8} D_n$$

当 D 全为0时

$$\bullet A_V = 0$$

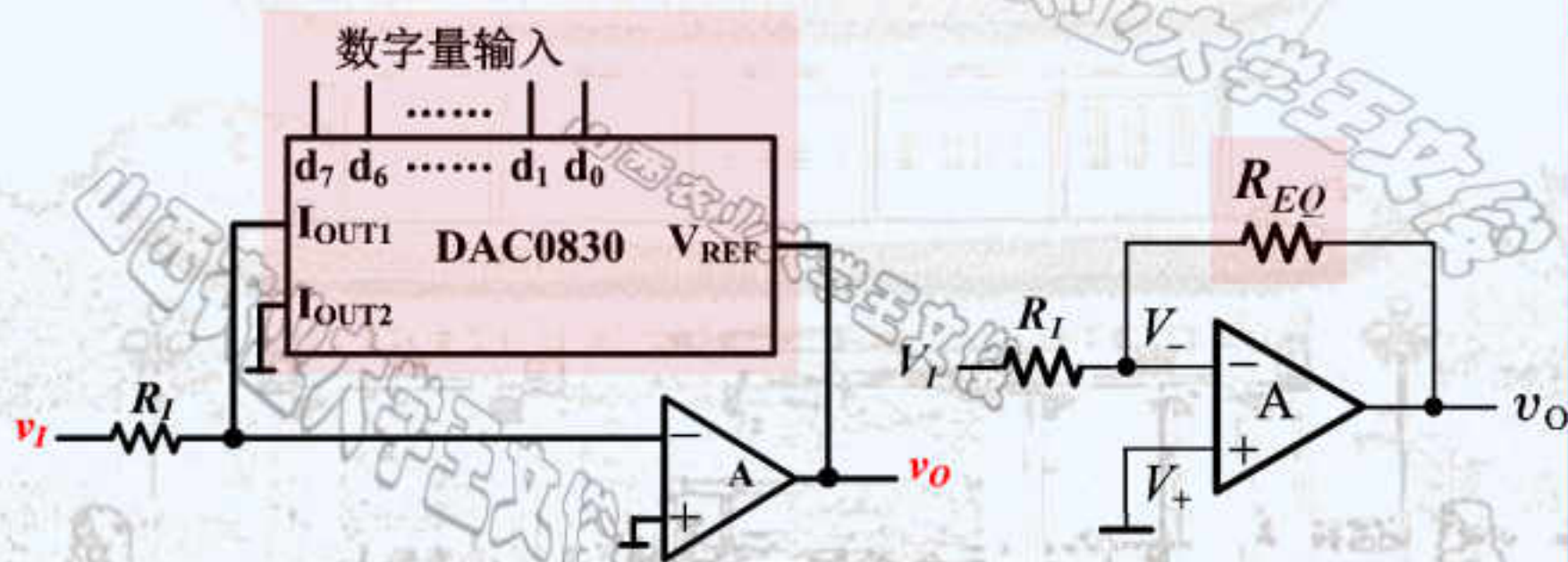
当 D 全为1时

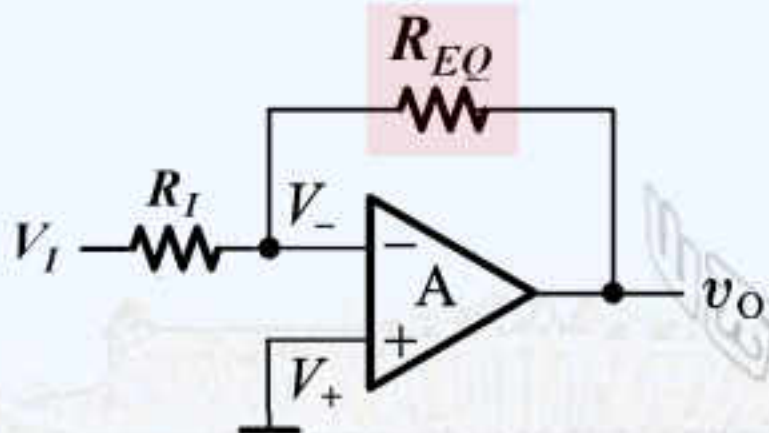
$$\bullet A_V = -0.039 \times 255 = -9.95$$

电压放大倍数变化范围

$$\bullet 0 \sim -9.95$$

- 例2：试计算当D/A转换器的输入量从全0变到全1时，电压放大倍数的变化范围。
 - 图中DAC0830是8位倒T形电阻网络D/A转换器
 - 电阻网络中电阻 R 为 $15\text{k}\Omega$ ，输入端电阻 R_I 为 $150\text{k}\Omega$





$$R_{EQ} = \frac{V_{REF}}{i_{\Sigma}} = \frac{2^n R}{D_n}$$

电压放大倍数

$$A_V = -\frac{R_{EQ}}{R_I} = -\frac{2^n R}{D_n R_I} = -\frac{2^8}{10D_8}$$

当 D 全为0时

$$\bullet A_V = -\infty$$

当 D 全为1时

$$\bullet A_V = -25.6/255 = -0.1$$

电压放大倍数变化范围

$$\bullet -0.1 \sim -\infty$$

五、权电流型D/A转换器

• 1、权电阻和倒T形电阻网络存在的问题

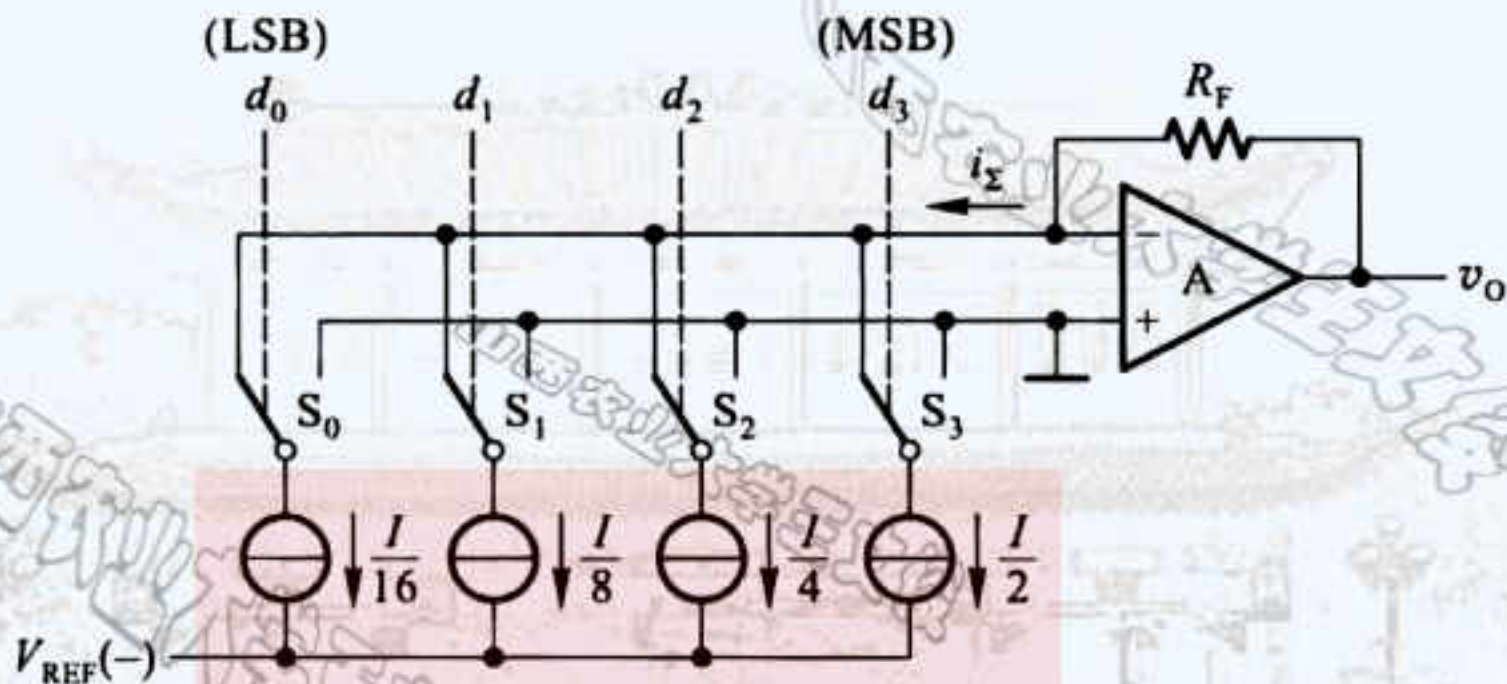
存在问题

- 权电阻网络和倒T形电阻网络把模拟开关当做**理想开关**（无导通电阻和导通压降）处理。
- **实际开关**存在导通电阻和导通压降；而且不同开关情况又不完全相同。由此引入了转换误差，降低了转换精度。

解决方法

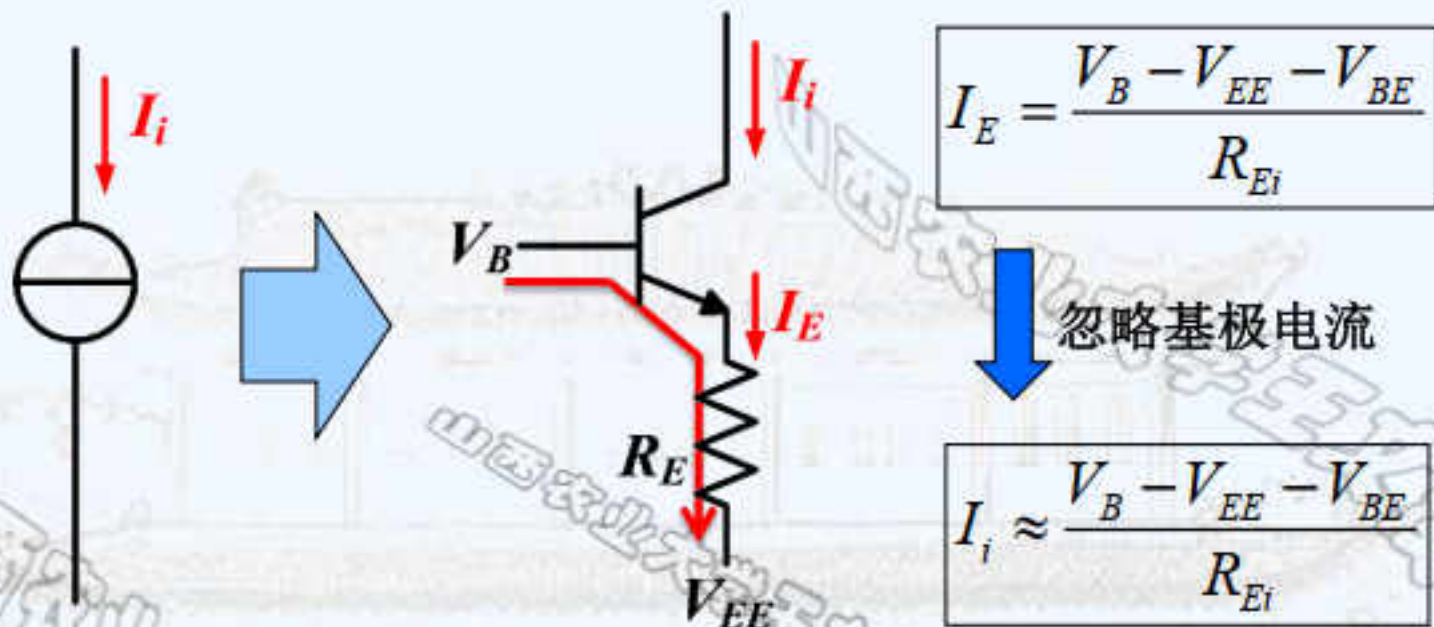
- 支路电流用**恒流源**来实现。（权电流型D/A转换器）
- 由于采用恒流源，支路电流不受开关内阻和压降的影响，从而降低了对开关电路的要求。

• 2、电路结构



支路电流通过**恒流源**来实现

• 3、恒流源电路

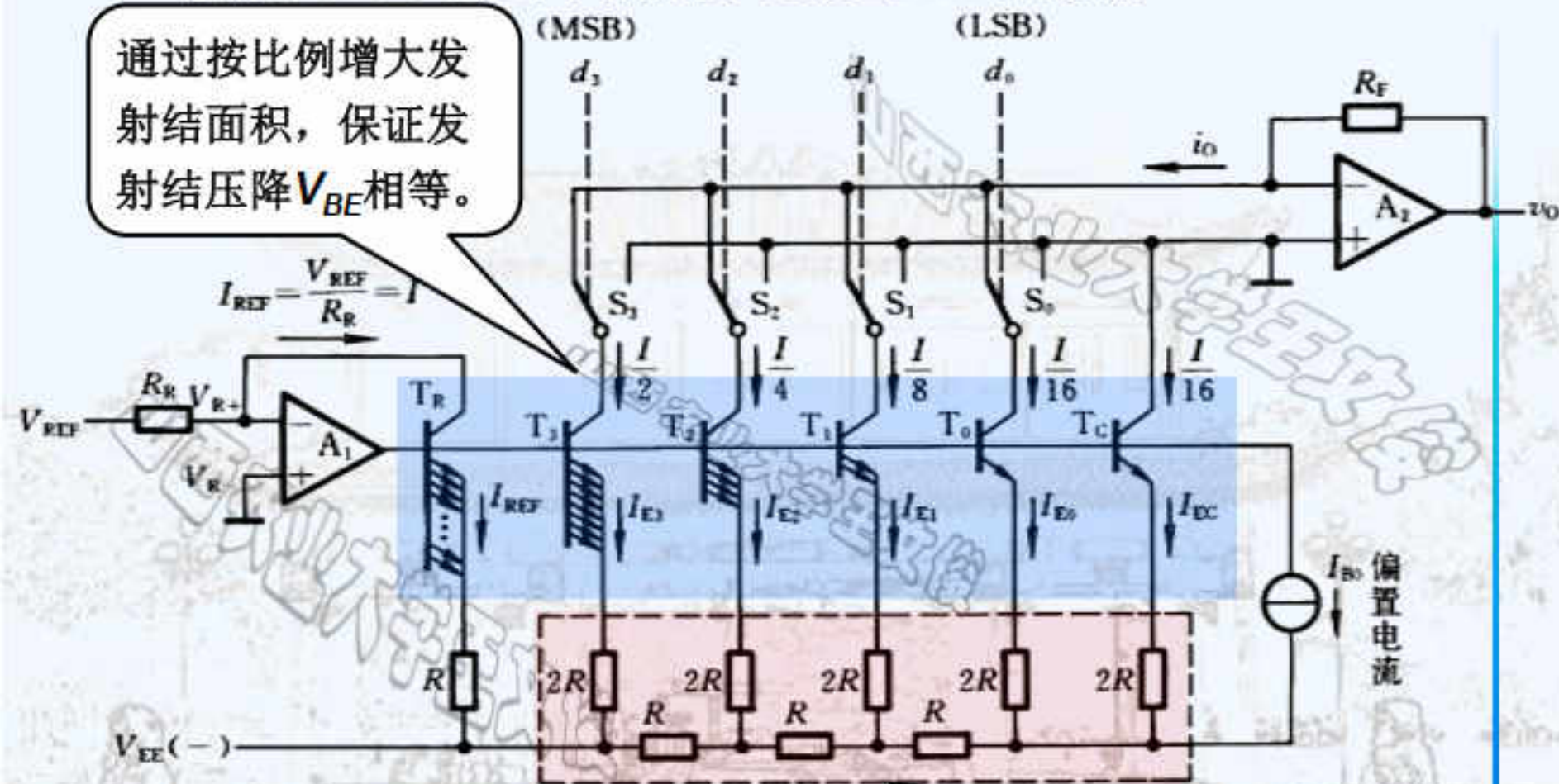


只要保证 V_B 和 V_{EE} 稳定不变，三极管的集电极电流 I_i 即可不受开关内阻的影响，而保持恒定不变。

在相同的 V_B 和 V_{EE} 取值下，保证发射结压降 V_{BE} 相等，通过给定不同的阻值的电阻 R_{Ei} ，来产生不同的支路电流。

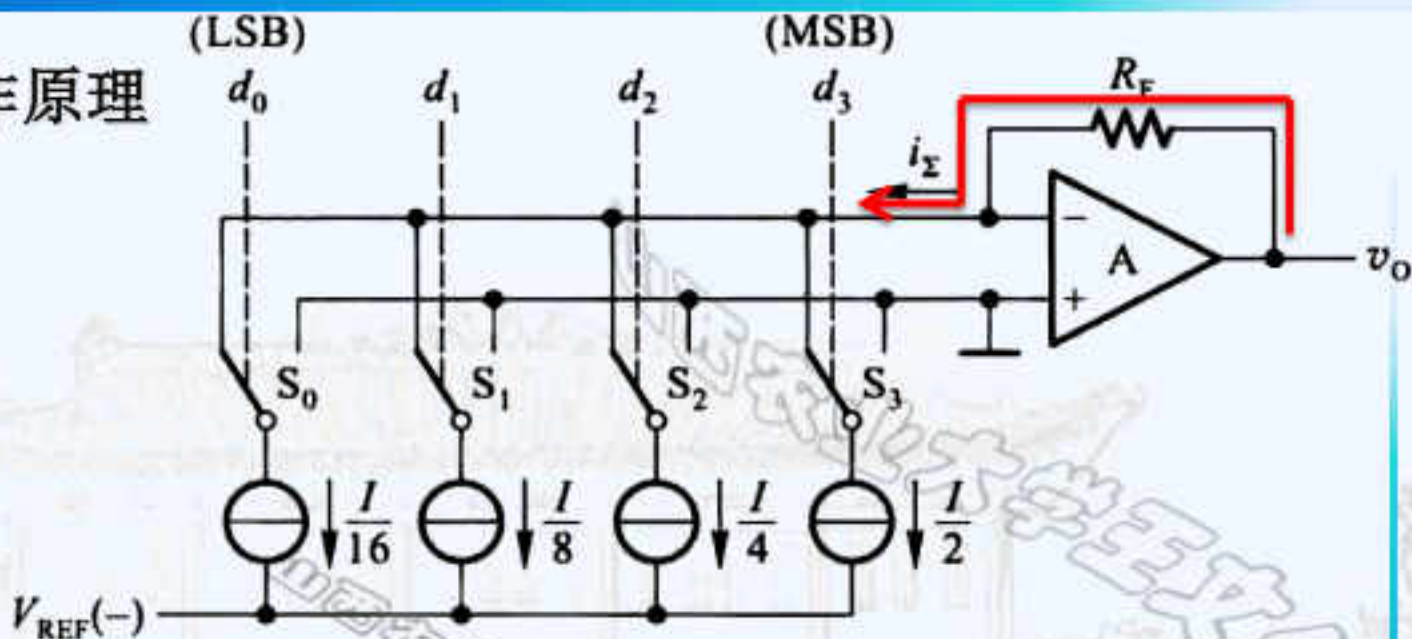
利用倒T型电阻网络的权电流型D/A转换器

通过按比例增大发射结面积，保证发射结压降 V_{BE} 相等。



为减小阻值的种类，用倒T形电阻网络的分流作用产生一组恒流源

3、工作原理



总电流 I_Σ

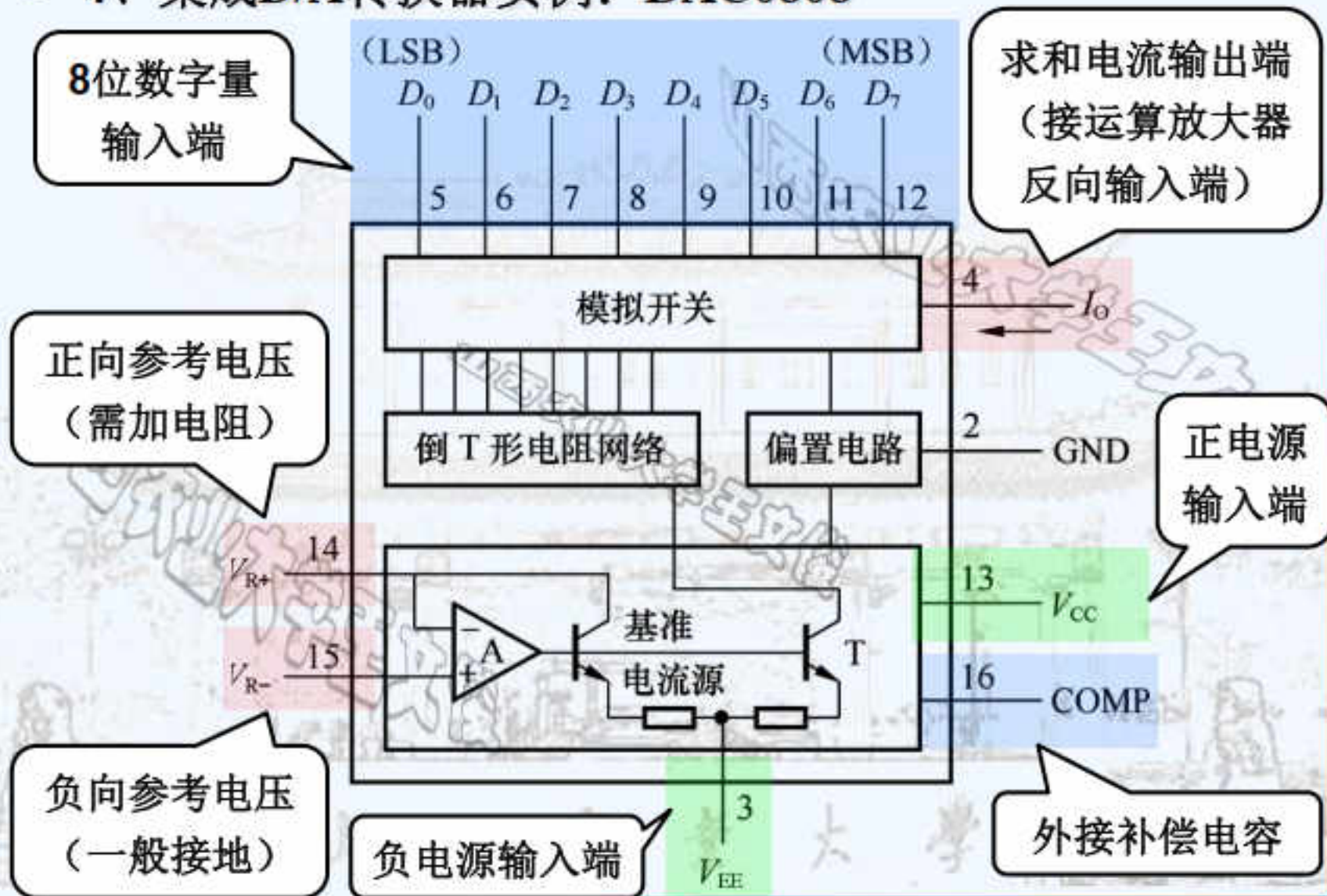
$$i_\Sigma = \frac{I}{16}d_0 + \frac{I}{8}d_1 + \frac{I}{4}d_2 + \frac{I}{2}d_3$$

$$= \frac{I}{16}(2^3d_3 + 2^2d_2 + 2^1d_1 + 2^0d_0) = \frac{I}{2^4}D_4$$

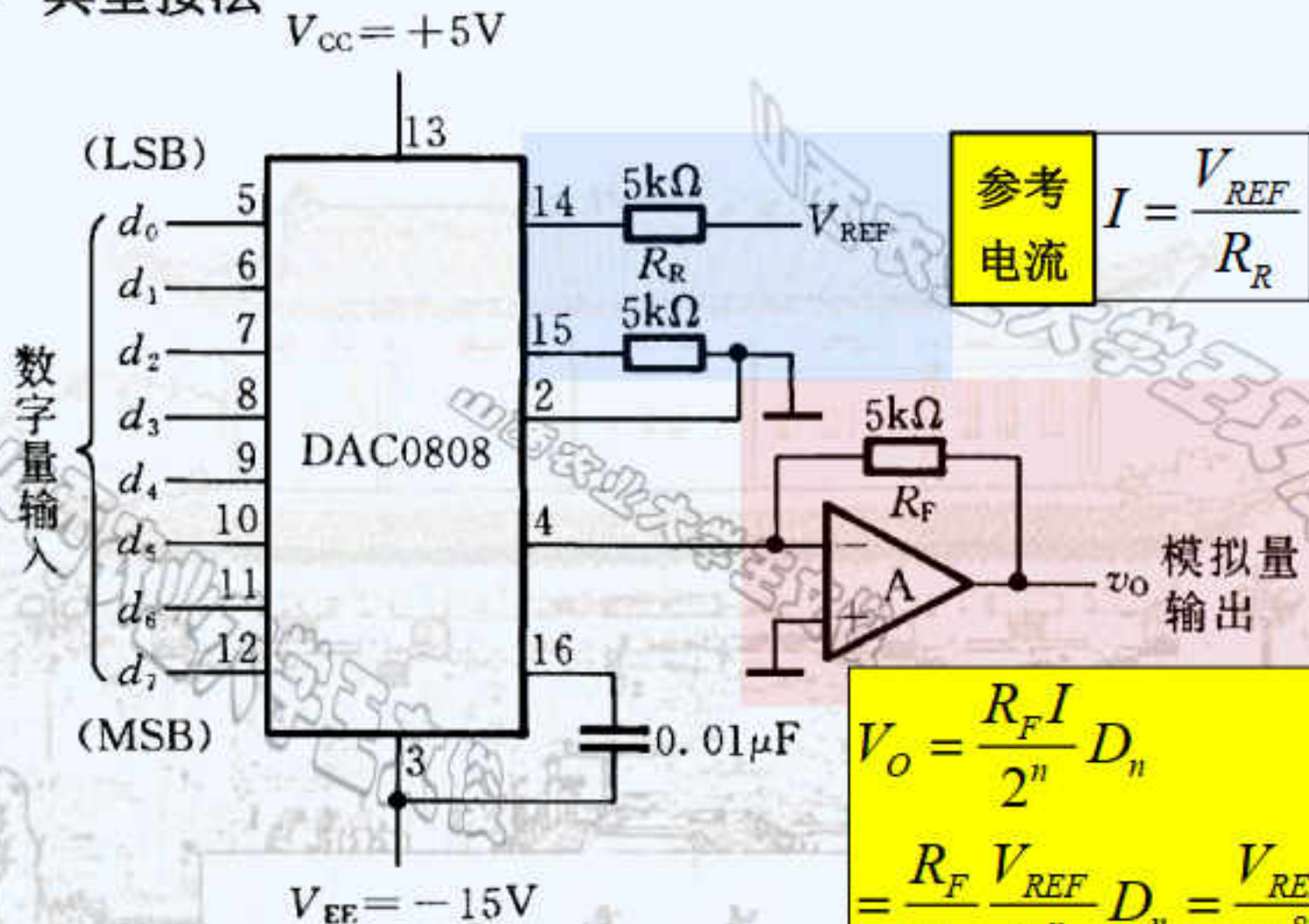
输出电压 V_o

$$V_o = R_F I_\Sigma = \frac{R_F I}{2^4} D_4$$

4、集成D/A转换器实例：DAC0808



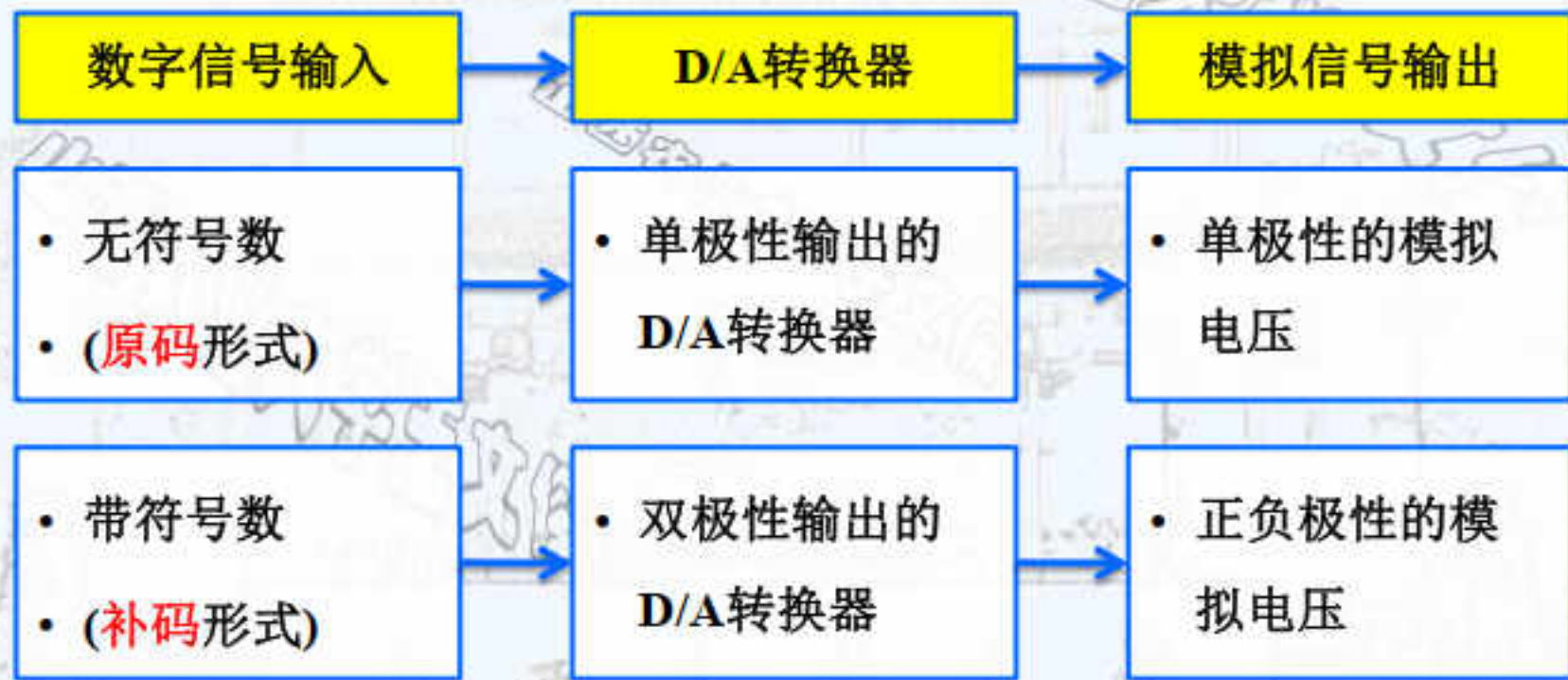
典型接法



六、双极性输出的D/A转换器

• 1、背景

二进制算术运算中通常都将带符号的数值表示为补码的形式。



• 2、转换原理

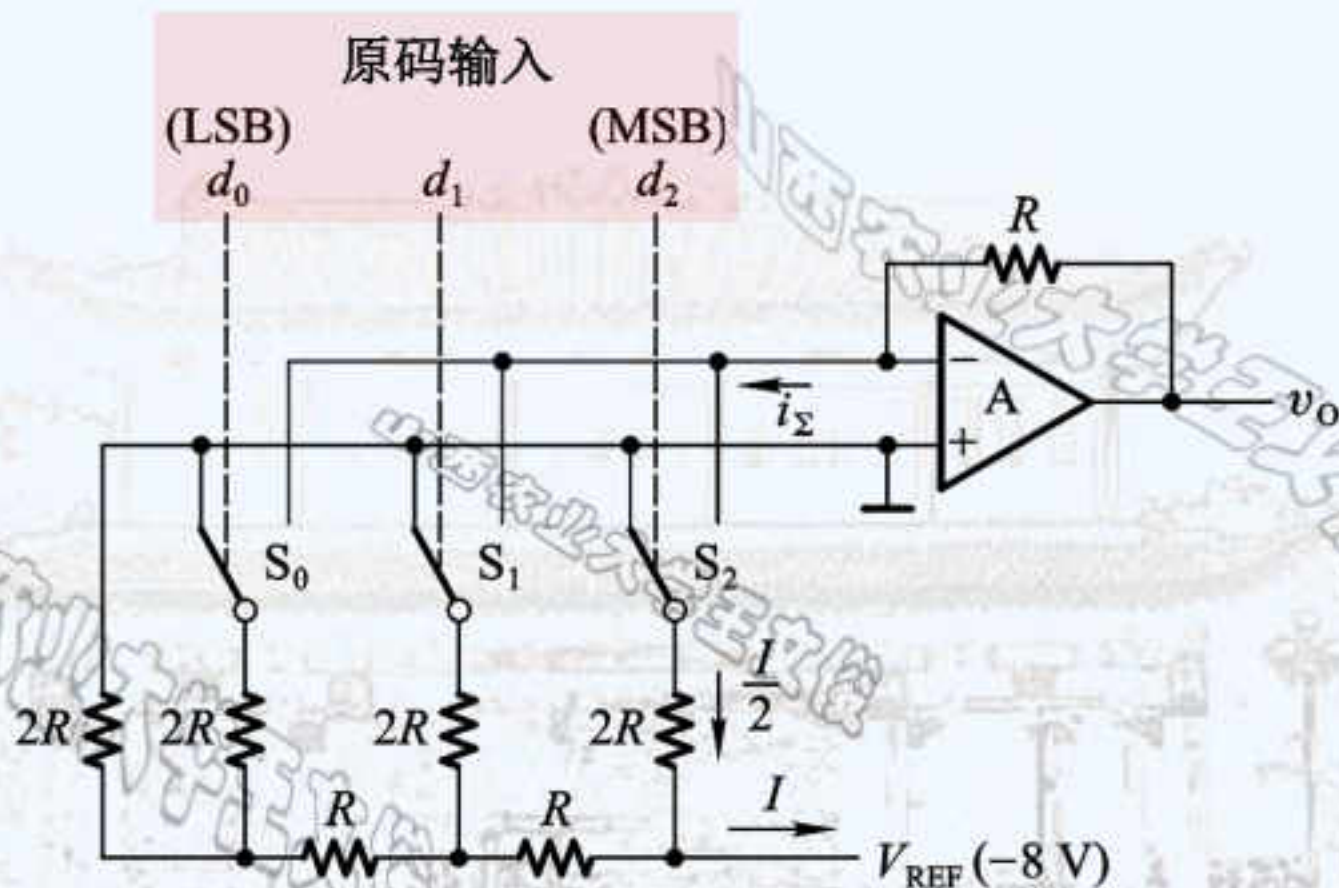
将单极性输出的D/A转换器改为双极性输出的D/A转换器。

原码输入			对应的 输出	补码输入			对应的 十进制	要求的 输出
D_2	D_1	D_0		D_2	D_1	D_0		
1	1	1	+7V	0	1	1	+3	+3V
1	1	0	+6V	0	1	0	+2	+2V
1	0	1	+5V	0	0	1	+1	+1V
1	0	0	+4V	0	0	0	0	0V
0	1	1	+3V	1	1	1	-1	-1V
0	1	0	+2V	1	1	0	-2	-2V
0	0	1	+1V	1	0	1	-3	-3V
0	0	0	0V	1	0	0	-4	-4V

符号位反相

输出电压偏移 -4V

• 3、电路实现

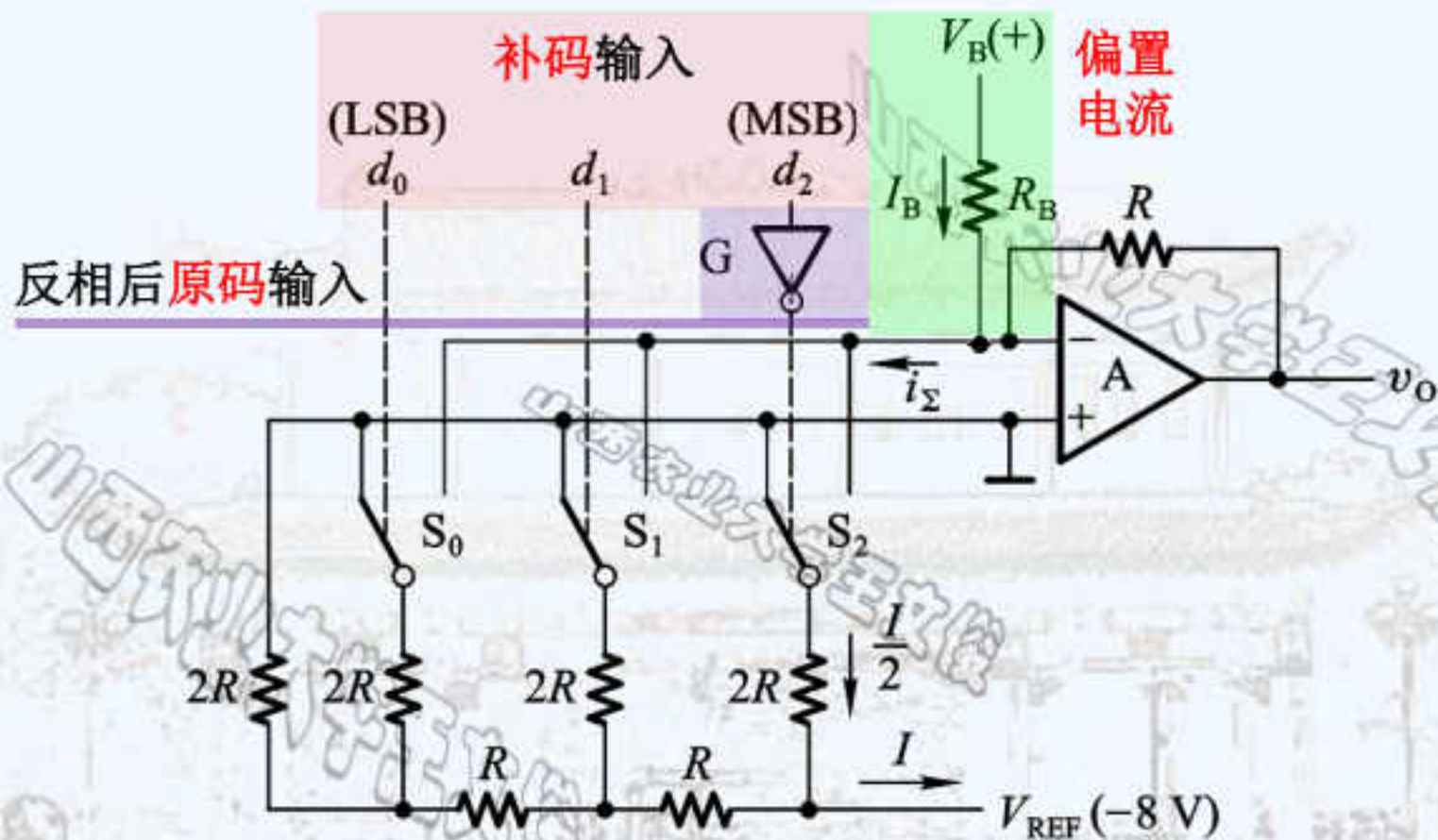


参考
电流

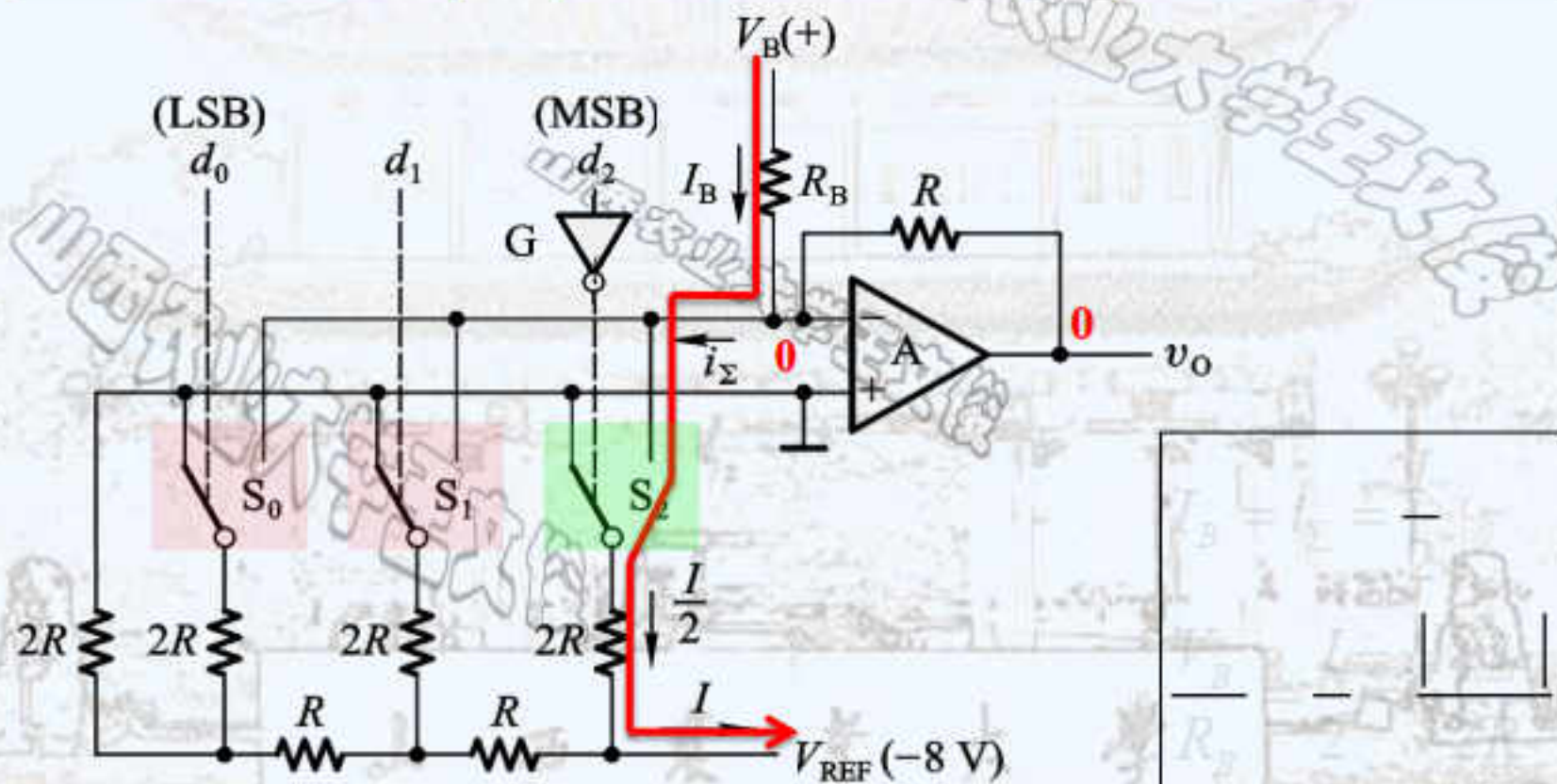
$$I = \frac{|V_{REF}|}{R}$$

输出
电压

$$v_O = -\frac{V_{REF}}{2^3} = -\frac{V_{REF}}{8}$$



偏置电流



• 4、双极性输出D/A转换器的一般构成方法

参考电压 V_{REF} 取负

- 输入正数时输出正的模拟电压；
- 输入负数时输出负的模拟电压

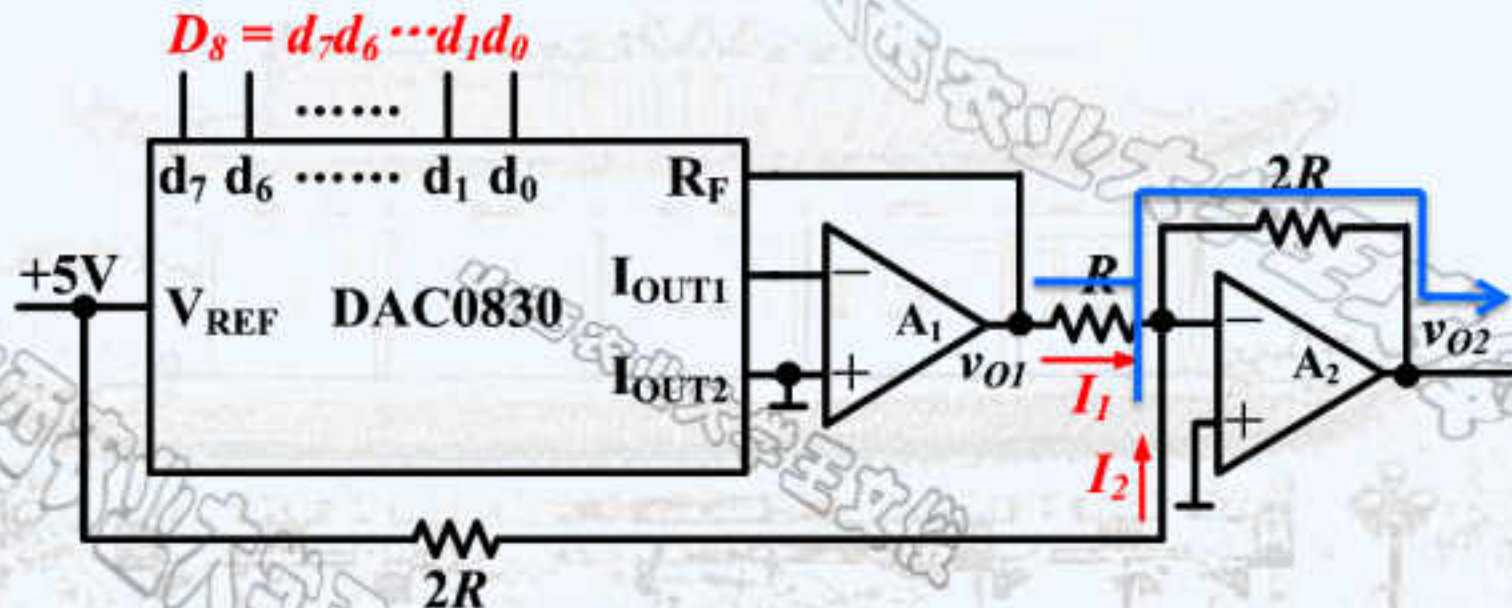
补码输入符号位反相

- 补码输入的符号位反相后接单极性输出的D/A转换器的输入端

加偏置电流

- 在求和放大器的反相输入端接入一个偏置电流。
- 令：补码输入**00...0**，反相后原码**10...0**时，输出电压为0。

- 例3：图为用DAC0830接成的D/A转换电路。
 - DAC0830为8位二进制输入的倒T型电阻网络D/A转换器。
 - 若 $V_{REF} = 5V$ ，试写出输出电压 v_{O2} 的计算公式。



$$v_{O1} = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n$$

$$v_{O2} = -2R(I_1 + I_2) = -2R\left(\frac{v_{O1}}{R} + \frac{V_{REF}}{2R}\right) = \frac{V_{REF}}{2^{n-1}} D_n - V_{REF}$$

七、D/A转换器的转换精度和转换速度

• 1、理论转换精度——分辨率及其表示方法

分辨率表示D/A转换器理论上可以达到的精度。

输入二进制数码的位数

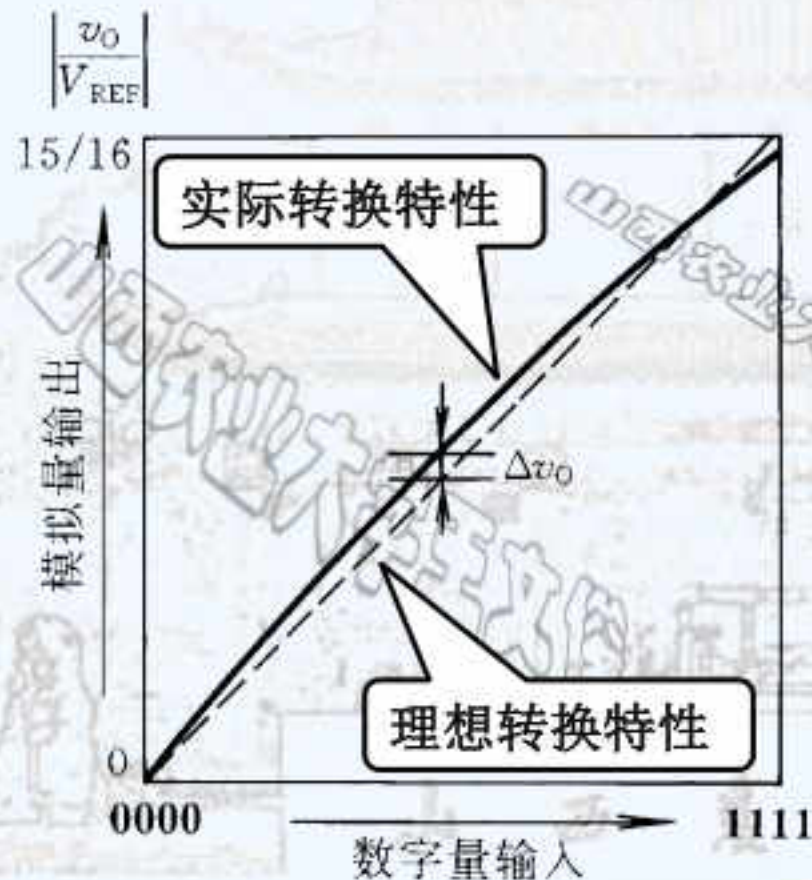
- 对于分辨率为 n 位D/A转换器，应能输出 $0 \sim 2^n - 1$ 个不同的等级电压，区分出输入的 $00 \cdots 0$ 到 $11 \cdots 1$ 共 2^n 个不同状态。

能够分辨出的最小电压与最大输出电压之比

- 能够分辨出的最小电压：输入为 $00 \cdots 01$ 时的输出电压
- 最大输出电压：输入为 $11 \cdots 11$ 时的输出电压
- 对于 n 位的D/A转换器，分辨率为：
$$\frac{1}{2^n - 1}$$

• 2、实际转换精度——转换误差及其表示方法

由于D/A转换器的各个环节在参数和性能上不可避免的存在误差，因此实际的转换精度由转换误差来决定。



转换误差表示实际的D/A转换特性与理想转换特性之间的最大偏差。

最低有效位的倍数

- 如：1/2LSB 表示绝对误差小于等于输入为00.....01时的输出电压的一半

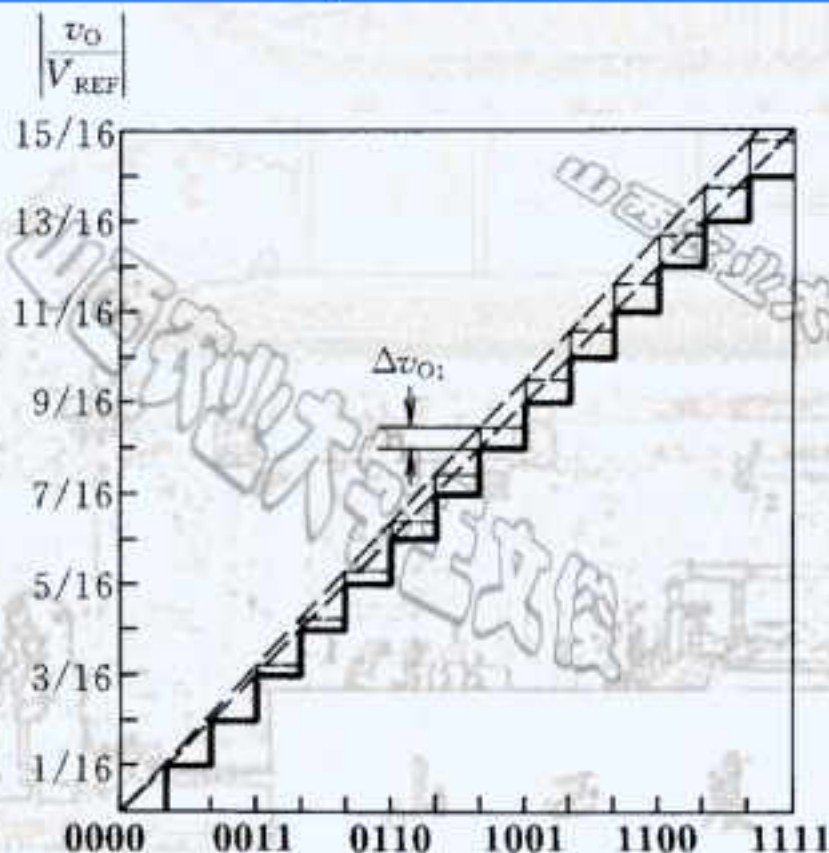
输出电压满刻度FSR的百分数

• 3、三类转换误差

① 比例系数误差 Δv_{O1}

误差来源

• V_{REF} 偏离标准值 ΔV_{REF} 产生的误差 Δv_{O1}



$$v_{O1} = -\frac{V_{REF}}{2^n} D_n$$

$$\Rightarrow \Delta v_{O1} = -\frac{\Delta V_{REF}}{2^n} D_n$$

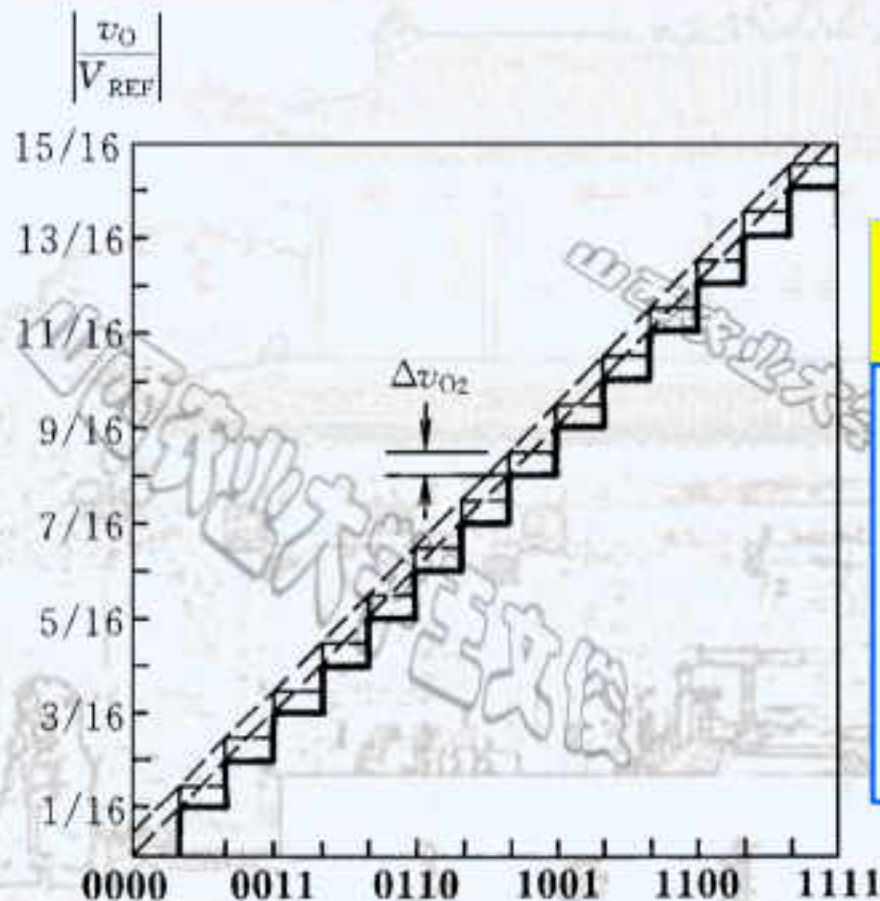
误差特点

- 误差电压与输入数字量的大小成正比，称为比例系数误差

② 漂移误差 Δv_{02}

误差来源

- 运算放大器**零点漂移**所造成的



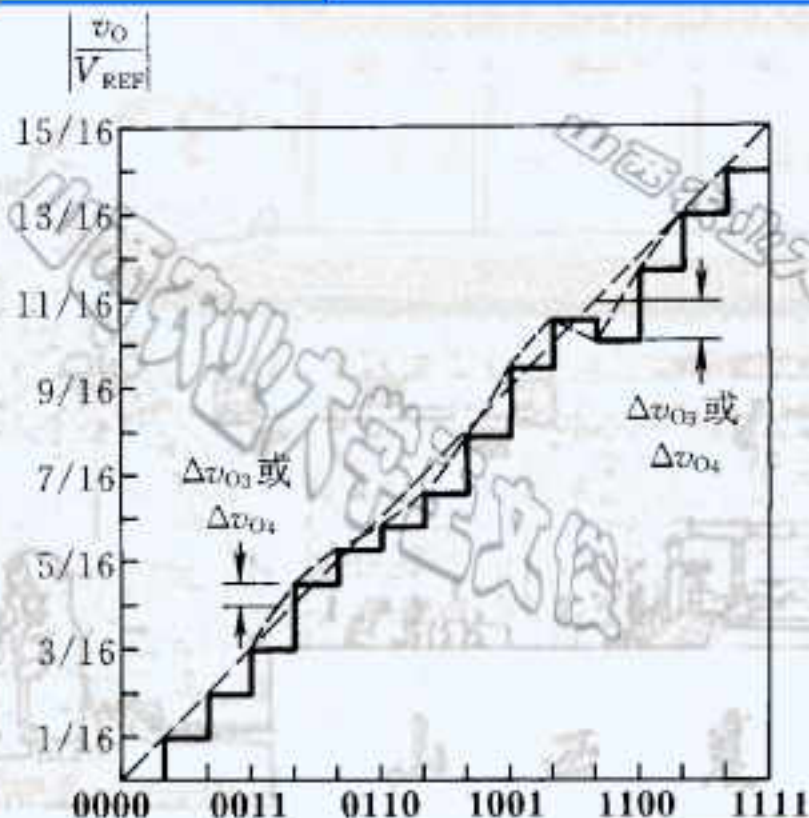
误差特点

- 误差电压为常数，而与输入数字量的大小无关
- 输出电压的特性曲线发生平移，因此称为漂移误差或平移误差

③ 非线性误差 Δv_{O3} 、 Δv_{O4}

误差来源

- 模拟开关的导通电阻和导通压降不可能真正为零，它们的存在必将在输出产生误差电压。 Δv_{O3}
- 倒T型电阻网络中电阻阻值的偏差。 Δv_{O4}



误差特点

- 误差电压既非常数，又不与输入数字量成正比。没有一定变化规律。
- 由于误差与输入数字量之间无线性关系，称为非线性误差

- 总的误差电压

这几种误差电压之间不存在固定函数关系，因此在最坏的情况下，输出的总的误差电压为所有误差电压的**绝对值相加**。

$$|\Delta v_o| = |\Delta v_{o1}| + |\Delta v_{o2}| + |\Delta v_{o3}| + |\Delta v_{o4}|$$

高精度的
D/A转换器

高分辨率的D/A转换器

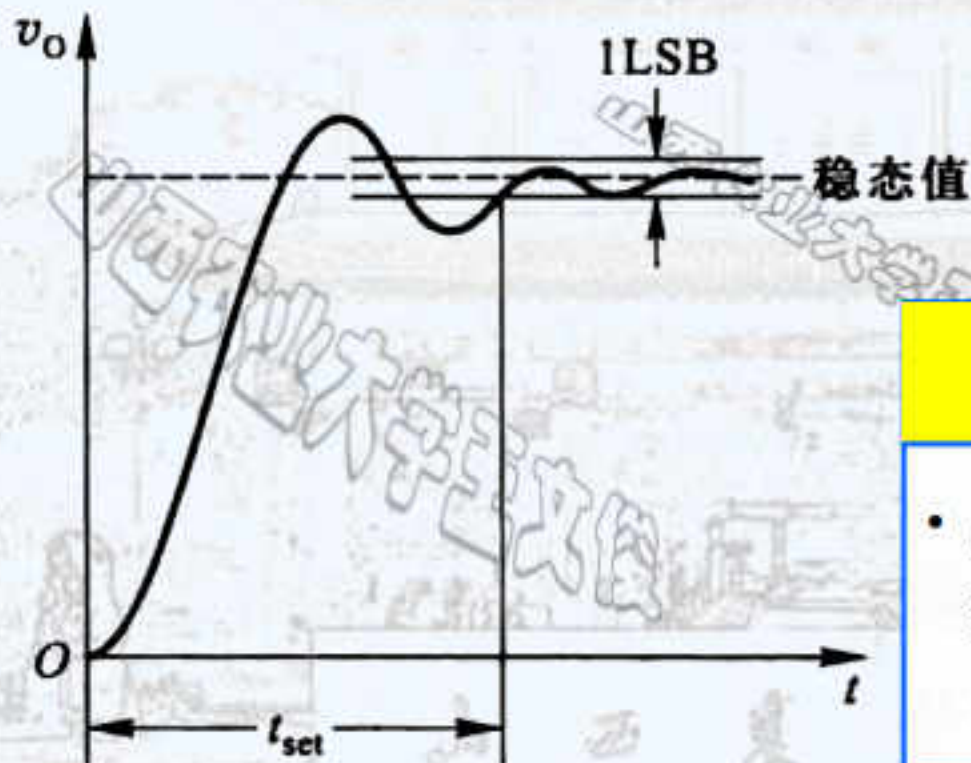
高稳定度的参考电压源

低漂移的运算放大器

• 4、转换速度

转换速度的 影响因素

- 电路开关元件状态的转换需要一定的时间；
- 电路寄生电容充放电需要一定的时间；
- 输出端的运算放大器本身也存在一个建立时间。



通常用建立时间 t_{set} 来定量描述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相差 $\pm 1/2 \text{ LSB}$ 范围以内的这段时间

- 例4: 在10位倒T型D/A转换器中, 外接参考电压 $V_{REF} = -10V$, 为保证 V_{REF} 偏离标准值所引起的**误差小于1/2LSB**, 试计算 V_{REF} 相对稳定度应为多少?

输出电压 V_O

$$v_O = -\frac{V_{REF}}{2^{10}} D_{10}$$

1 LSB的
输出电压

$$v_O = -\frac{V_{REF}}{2^{10}}$$

1/2 LSB的
输出电压绝对值

$$\frac{1}{2} \times \frac{|V_{REF}|}{2^n} = \frac{|V_{REF}|}{2^{n+1}} = \frac{|V_{REF}|}{2^{11}}$$

输入数字量最大时,
电压误差最大

$$|\Delta v_O| = \frac{2^n - 1}{2^n} |\Delta V_{REF}| = \frac{2^{10} - 1}{2^{10}} |\Delta V_{REF}|$$

要求: $|\Delta v_O| \leq \frac{|V_{REF}|}{2^{11}}$

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

相对稳定度

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