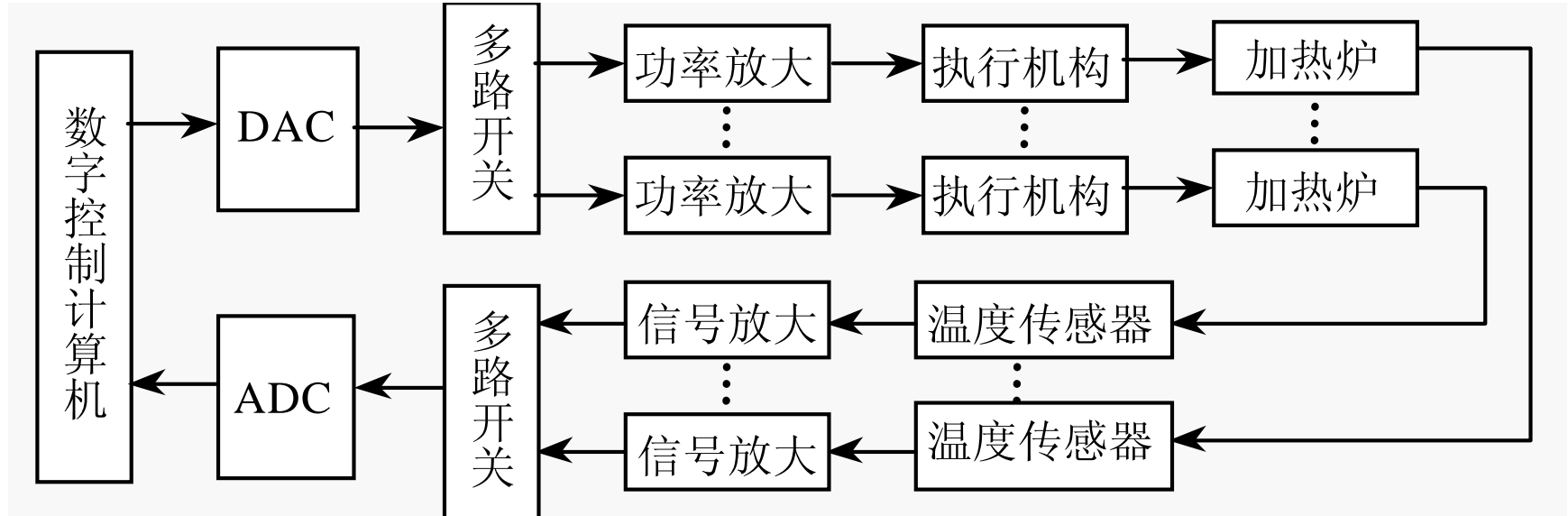


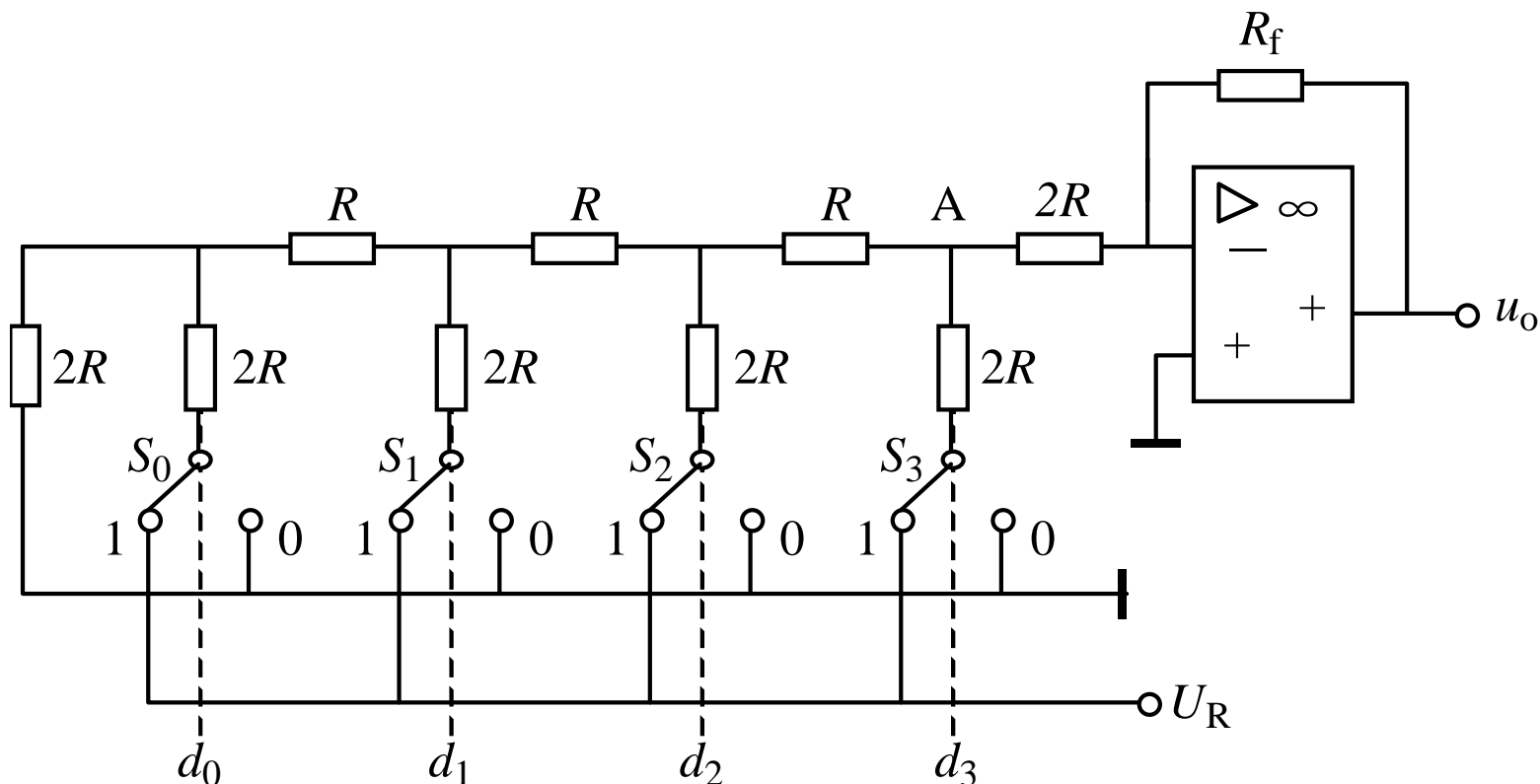
第13章 模拟量与数字量的转换

1 数模转换器

能将模拟量转换为数字量的电路称为模数转换器，简称A/D转换器或ADC；能将数字量转换为模拟量的电路称为数模转换器，简称D/A转换器或DAC。ADC和DAC是沟通模拟电路和数字电路的桥梁，也可称之为两者之间的接口。

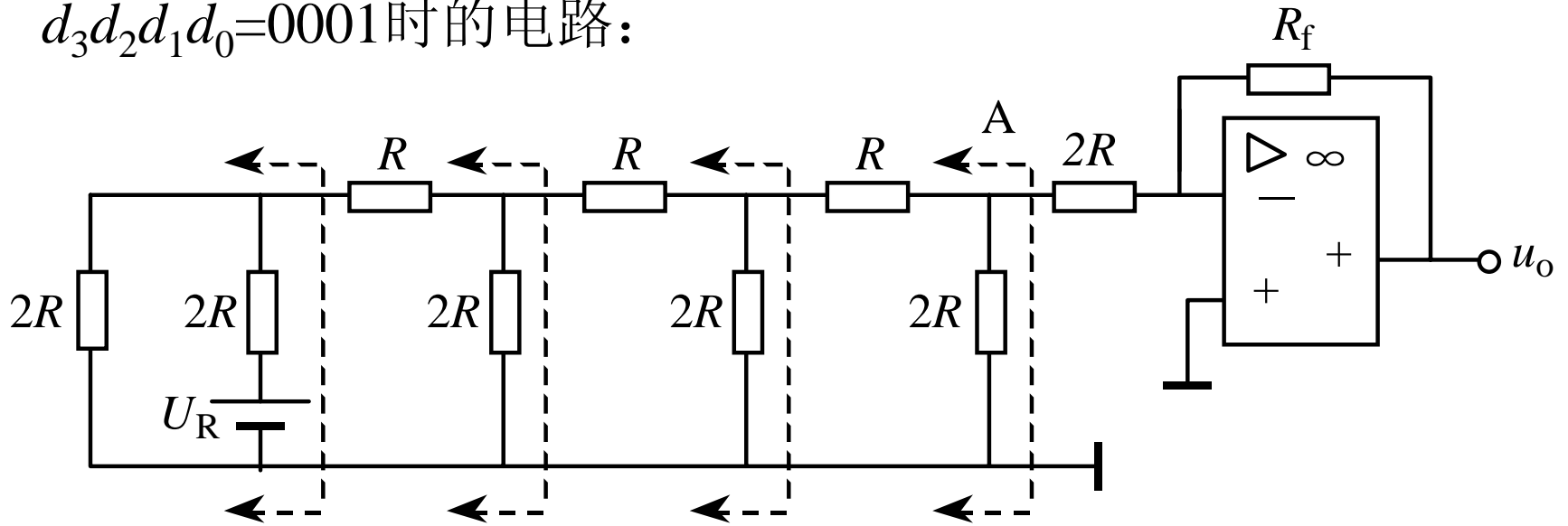


T型网络数模转换器

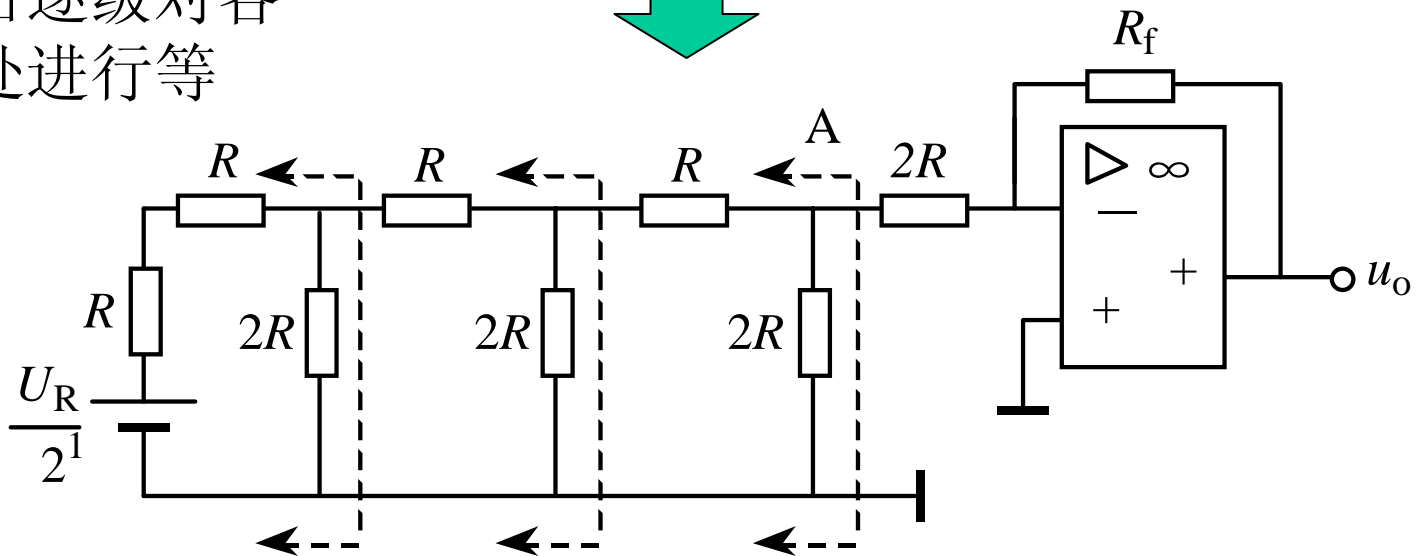
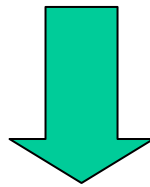


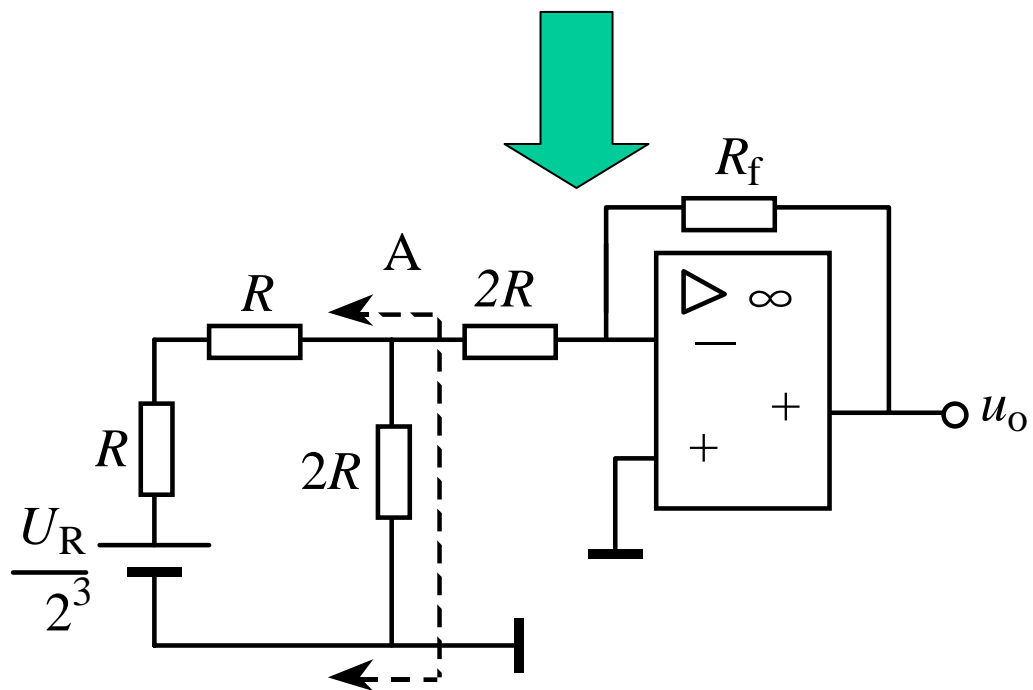
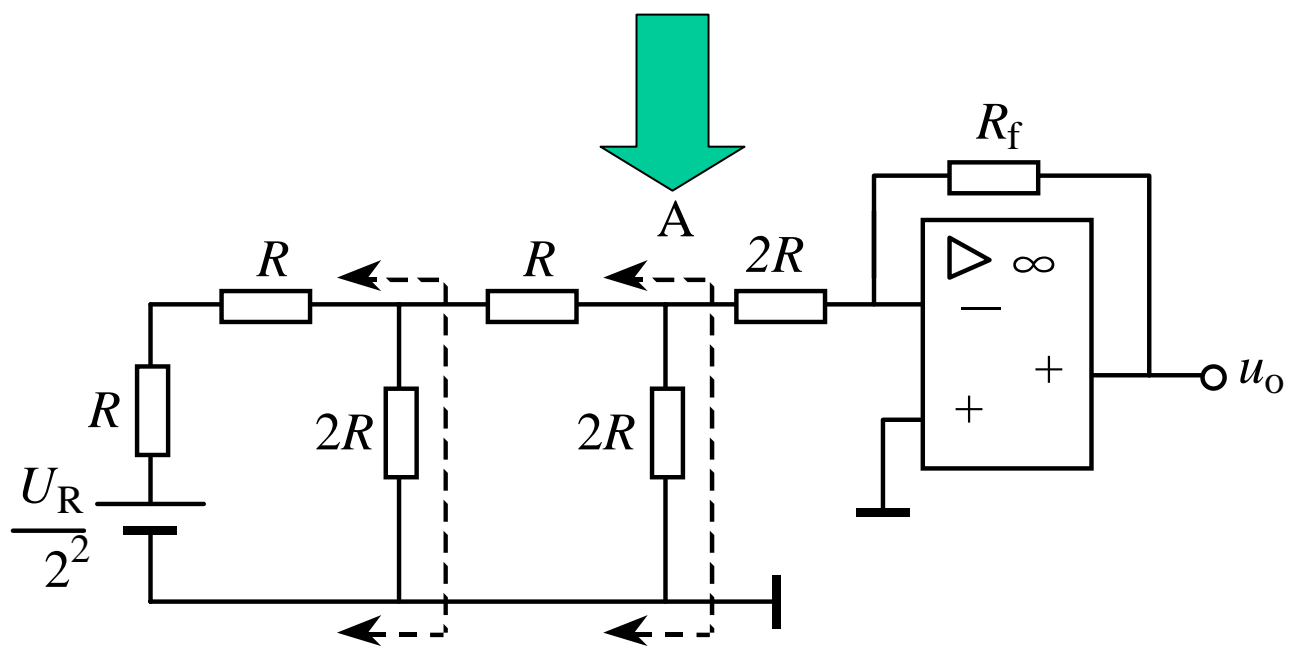
数码 $d_i=1$ ($i=0、1、2、3$)，即为高电平时，则由其控制的模拟电子开关 S_i 自动接通左边触点，即接到基准电压 U_R 上；而当 $d_i=0$ ，即为低电平时，则由其控制的模拟电子开关 S_i 自动接通右边触点，即接到地。

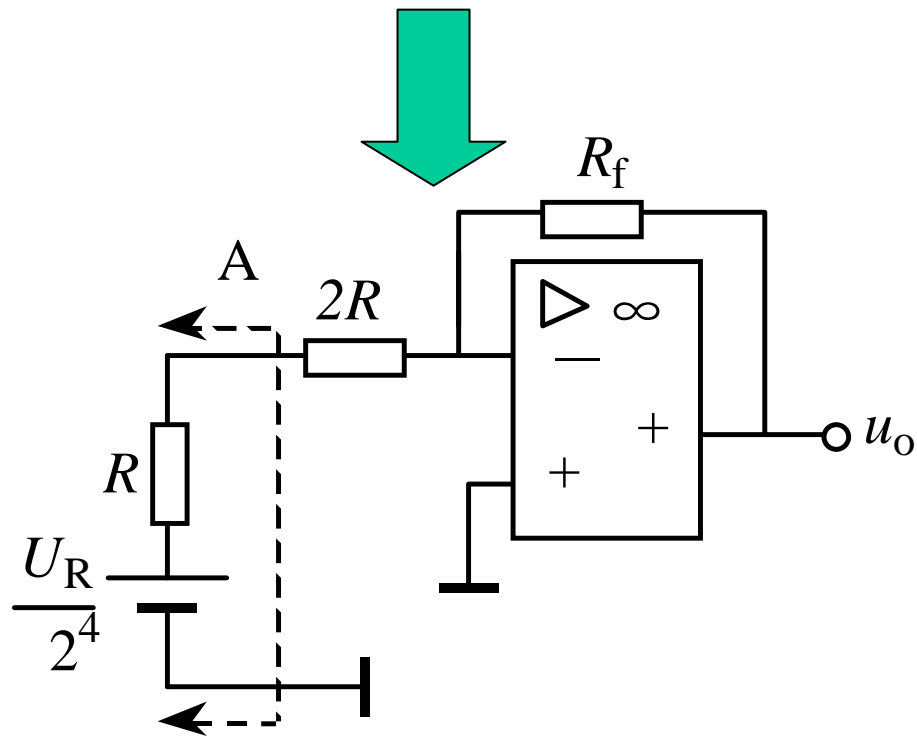
$d_3d_2d_1d_0=0001$ 时的电路:



用戴维南定理从
左至右逐级对各
虚线处进行等
效。







由图可得输出电压为：

$$u_{o0} = -\frac{R_f}{R + 2R} \cdot \frac{U_R}{2^4} = -\frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^4}$$

由于 $d_0=$ 、 $d_3=d_2=d_1=0$ ，所以上式又可写为：

$$u_{o0} = -\frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^4} d_0$$

同理，当 $d_3d_2d_1d_0=0010$ 时的输出电压为：
$$u_{o1} = -\frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^3} d_1$$

当 $d_3d_2d_1d_0=0100$ 时的输出电压为：
$$u_{o2} = -\frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^2} d_2$$

当 $d_3d_2d_1d_0=1000$ 时的输出电压为：
$$u_{o3} = -\frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^1} d_3$$

应用叠加原理将上面4个电压分量叠加，即得T形电阻网络数模转换器的输出电压为：

$$\begin{aligned} u_o &= u_{o0} + u_{o1} + u_{o2} + u_{o3} \\ &= -\frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^4} d_0 - \frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^3} d_1 - \frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^2} d_2 - \frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^1} d_3 \\ &= -\frac{R_f U_R}{3R \cdot 2^4} (d_3 \cdot 2^3 + d_2 \cdot 2^2 + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) \end{aligned}$$

当取 $R_f=3R$ 时，则上式成为：

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

括号中的是 4 位二进制数按权的展开式。可见，输入的数字量被转换为模拟电压，而且输出模拟电压 u_o 与输入的数字量成正比。当输入信号 $d_3d_2d_1d_0 = 0000$ 时，输出电压 $u_o = 0$ ；

当输入信号 $d_3d_2d_1d_0 = 0001$ 时，输出电压 $u_o = -\frac{1}{16}U_R$ ， \dots ，

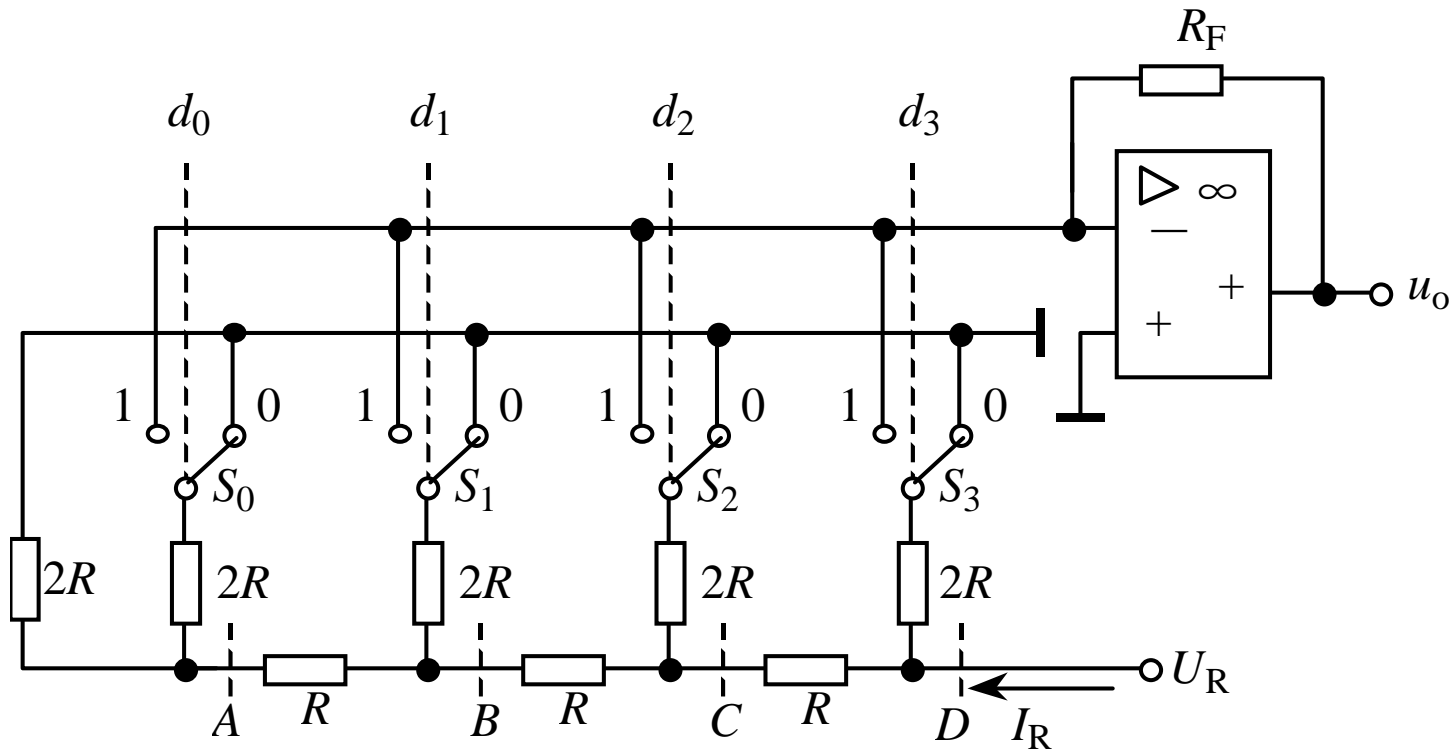
当输入信号 $d_3d_2d_1d_0 = 1111$ 时，输出电压 $u_o = -\frac{15}{16}U_R$ 。

如果输入的是 n 位二进制数，

则

$$u_o = -\frac{U_R}{2^n} (d_{n-1} \cdot 2^{n-1} + d_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0)$$

倒T型电阻网络数模转换器

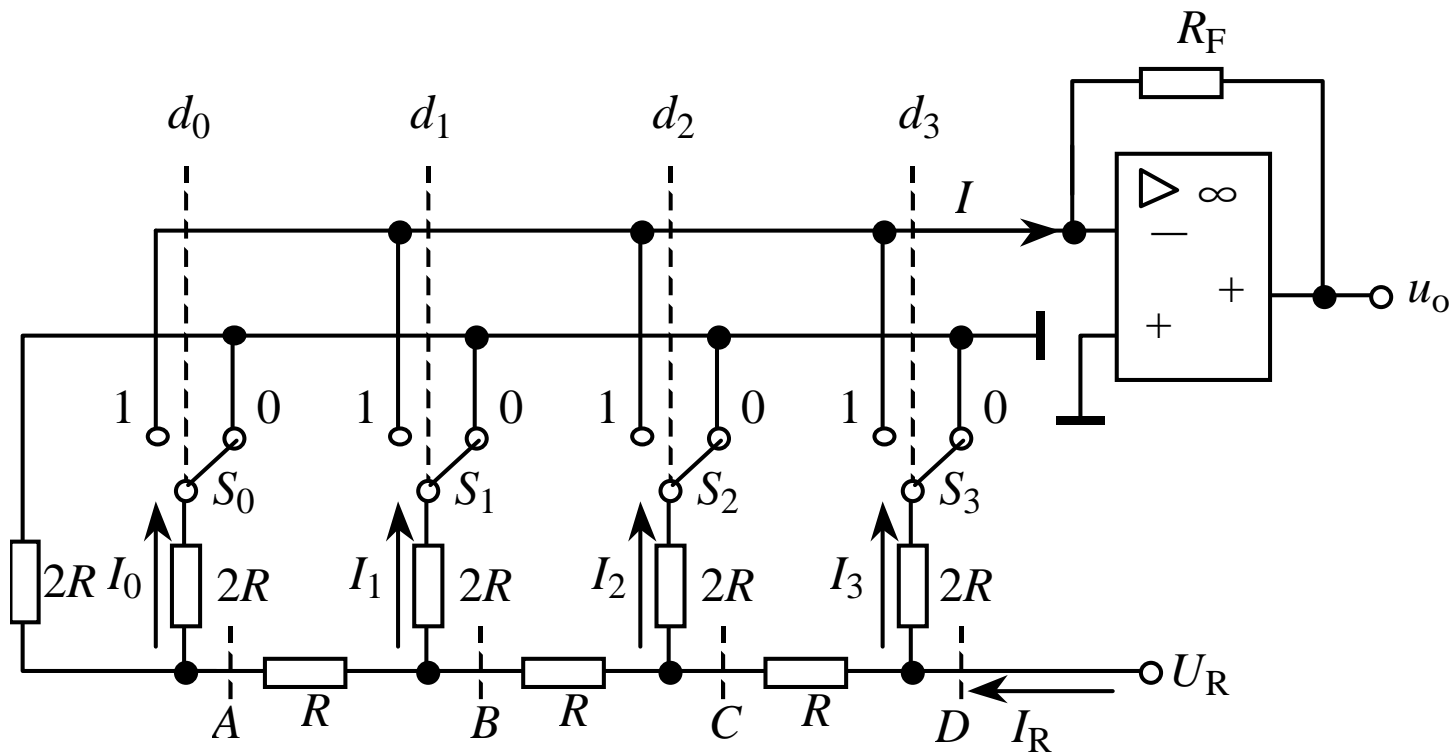


①分别从虚线A、B、C、D处向左看的二端网络等效电阻都是 R 。

②不论模拟开关接到运算放大器的反相输入端（虚地）还是接到地，也就是不论输入数字信号是1还是0，各支路的电流不变。

从参考电压 U_R 处输入的电流 I_R 为：

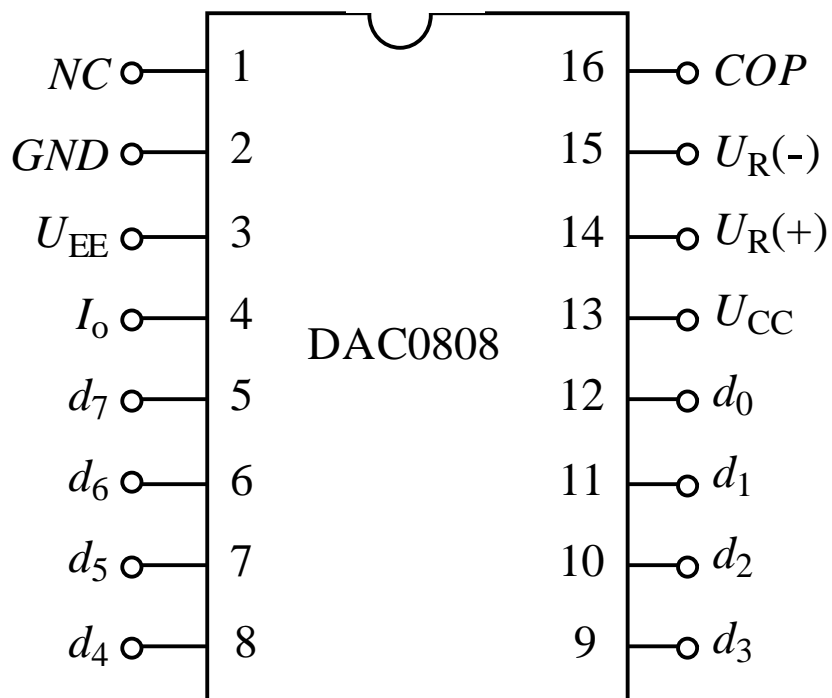
$$I_R = \frac{U_R}{R}$$



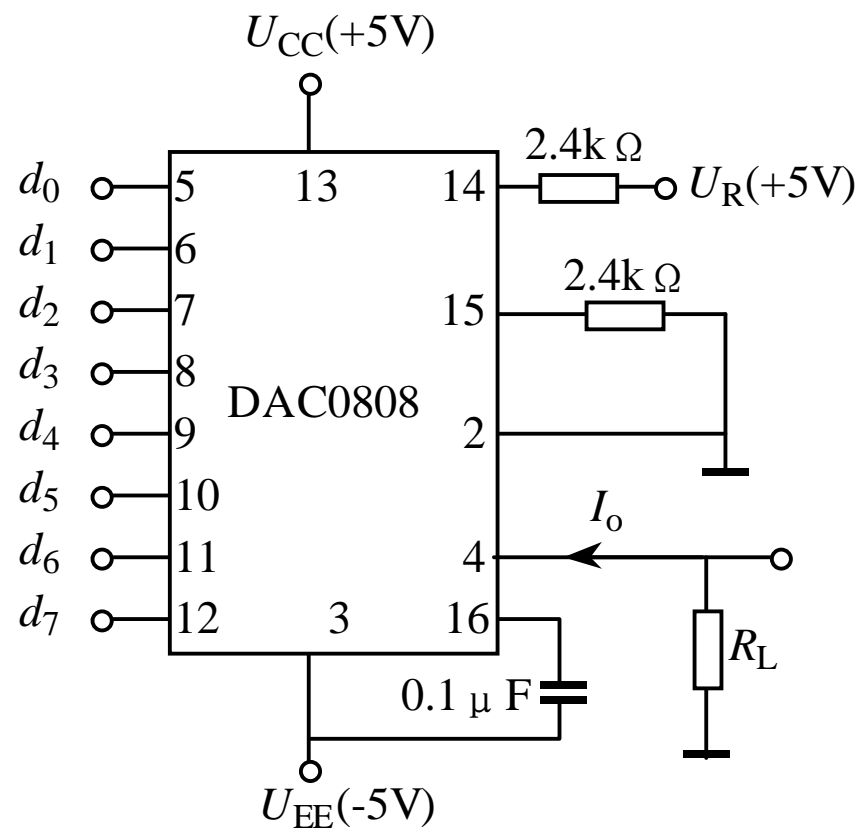
$$\begin{aligned}
 I &= I_0 d_0 + I_1 d_1 + I_2 d_2 + I_3 d_3 \\
 &= \frac{U_{REF}}{2^4 R} (d_3 \cdot 2^3 + d_2 \cdot 2^2 + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0)
 \end{aligned}$$

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

集成数模转换器及其应用



(a)



(b)

10.1.4 数模转换器的主要技术指标

(1) 分辨率

分辨率用输入二进制数的有效位数表示。在分辨率为 n 位的D/A转换器中，输出电压能区分 2^n 个不同的输入二进制代码状态，能给出 2^n 个不同等级的输出模拟电压。

分辨率也可以用D/A转换器的最小输出电压与最大输出电压的比值来表示。10位D/A转换器的分辨率为：

$$\frac{1}{2^{10} - 1} = \frac{1}{1023} \approx 0.001$$

(2) 转换精度

D/A转换器的转换精度是指输出模拟电压的实际值与理想值之差，即最大静态转换误差。

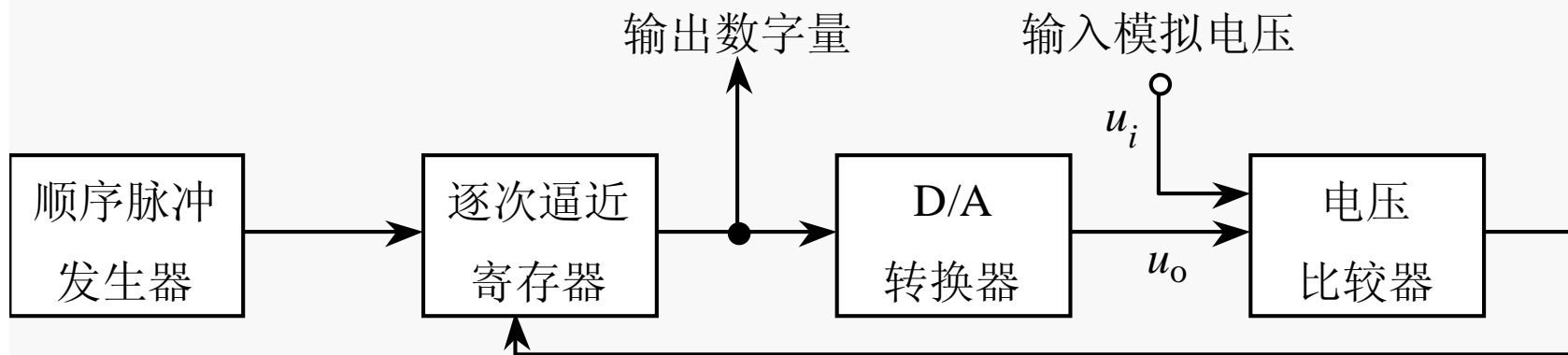
(3) 输出建立时间

从输入数字信号起，到输出电压或电流到达稳定值时所需要的时间，称为输出建立时间。

2 模数转换器

逐次逼近型模数转换器

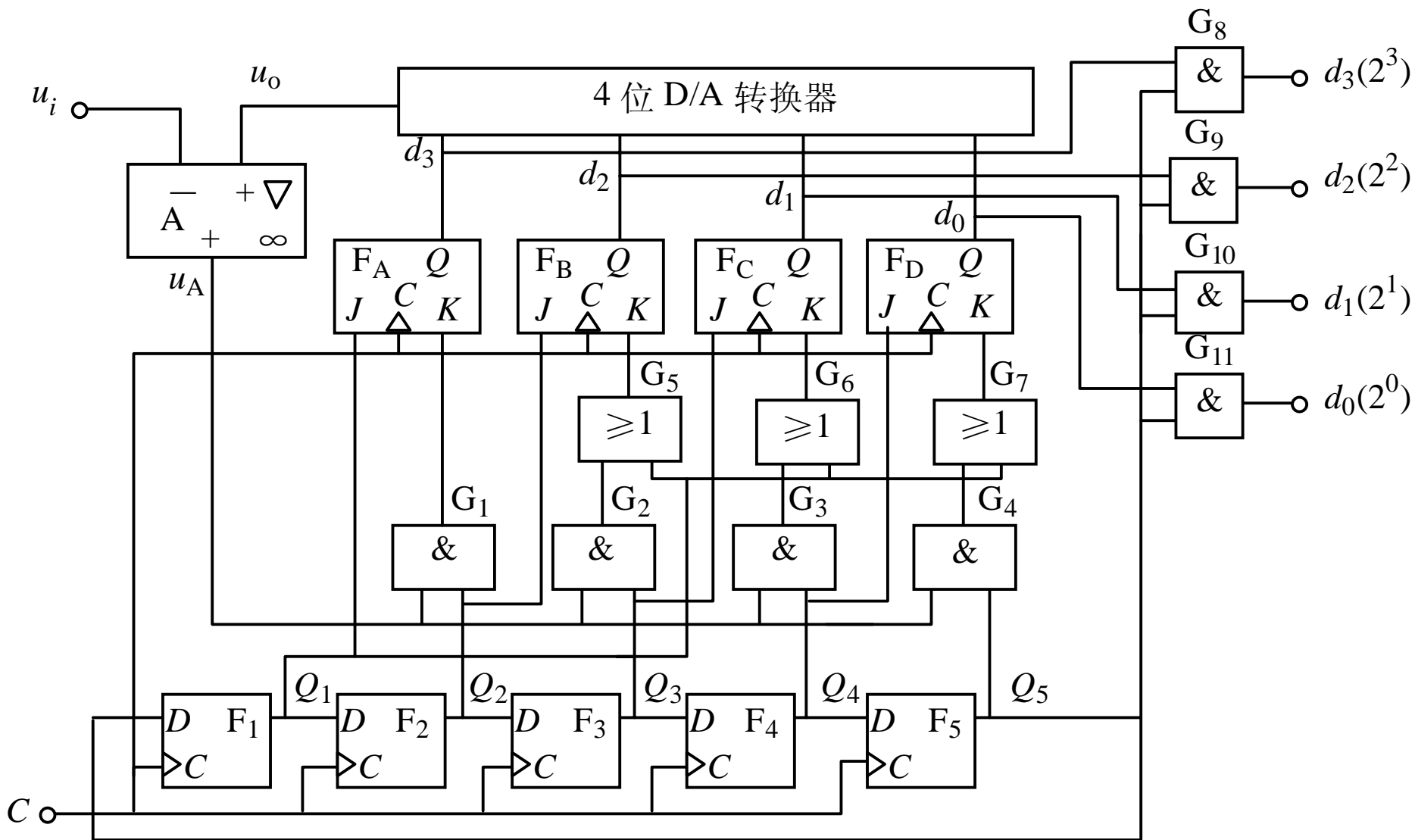
原理框图



基本原理

转换开始前先将所有寄存器清零。开始转换以后，时钟脉冲首先将寄存器最高位置成1，使输出数字为100...0。这个数码被D/A转换器转换成相应的模拟电压 u_o ，送到比较器中与 u_i 进行比较。若 $u_i > u_o$ ，说明数字过大了，故将最高位的1清除；若 $u_i < u_o$ ，说明数字还不够大，应将这一位保留。然后，再按同样的方式将次高位置成1，并且经过比较以后确定这个1是否应该保留。这样逐位比较下去，一直到最低位为止。比较完毕后，寄存器中的状态就是所要求的数字量输出。

4位逐次逼近型A/D转换器



工作原理

为了分析方便，设D/A转换器的参考电压为 $U_R=8V$ ，输入的模拟电压为 $u_i=4.52V$ 。

转换开始前，先将逐次逼近寄存器的4个触发器 $F_A \sim F_D$ 清0，并把环形计数器的状态置为 $Q_1Q_2Q_3Q_4Q_5=00001$ 。

第1个时钟脉冲 C 的上升沿到来时，环形计数器右移一位，其状态变为10000。由于 $Q_1=1$ ， Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 均为0，于是触发器 F_A 被置1， F_B 、 F_C 和 F_D 被置0。所以，这时加到D/A转换器输入端的代码为 $d_3d_2d_1d_0=1000$ ，D/A转换器的输出电压为：

$$u_o = \frac{U_R}{2^4} (d_3 \cdot 2^3 + d_2 \cdot 2^2 + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) = \frac{8}{16} \times 8 = 4 \text{ V}$$

u_o 和 u_i 在比较器中比较，由于 $u_o < u_i$ ，所以比较器的输出电压为 $u_A=0$ 。

第2个时钟脉冲 C 的上升沿到来时，环形计数器又右移一位，其状态变为01000。这时由于 $u_A=0$ ， $Q_2=1$ ， Q_1 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 均为0，于是触发器 F_A 的1保留。与此同时， Q_2 的高电平将触发器 F_B 置1。所以，这时加到D/A转换器输入端的代码为 $d_3d_2d_1d_0=1100$ ，D/A转换器的输出电压为：

$$u_o = \frac{U_R}{2^4} (d_3 \cdot 2^3 + d_2 \cdot 2^2 + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) = \frac{8}{16} \times (8 + 4) = 6 \text{ V}$$

u_o 和 u_i 在比较器中比较，由于 $u_o > u_i$ ，所以比较器的输出电压为 $u_A=1$ 。

第3个时钟脉冲 C 的上升沿到来时，环形计数器又右移一位，其状态变为00100。这时由于 $u_A=1$ ， $Q_3=1$ ， Q_1 、 Q_2 、 Q_4 、 Q_5 均为0，于是触发器 F_A 的1保留，而 F_B 被置0。与此同时， Q_3 的高电平将触发器 F_C 置1。所以，这时加到D/A转换器输入端的代码为 $d_3d_2d_1d_0=1010$ ，D/A转换器的输出电压为：

$$u_o = \frac{U_R}{2^4} (d_3 \cdot 2^3 + d_2 \cdot 2^2 + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) = \frac{8}{16} \times (8 + 2) = 5 \text{ V}$$

u_o 和 u_i 在比较器中比较，由于 $u_o > u_i$ ，所以比较器的输出电压为 $u_A=1$ 。

第4个时钟脉冲 C 的上升沿到来时，环形计数器又右移一位，其状态变为00010。这时由于 $u_A=1$ ， $Q_4=1$ ， Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_5 均为0，于是触发器 F_A 、 F_B 的状态保持不变，而触发器 F_C 被置0。与此同时， Q_4 的高电平将触发器 F_D 置1。所以，这时加到D/A转换器输入端的代码为 $d_3d_2d_1d_0=1001$ ，D/A转换器的输出电压为：

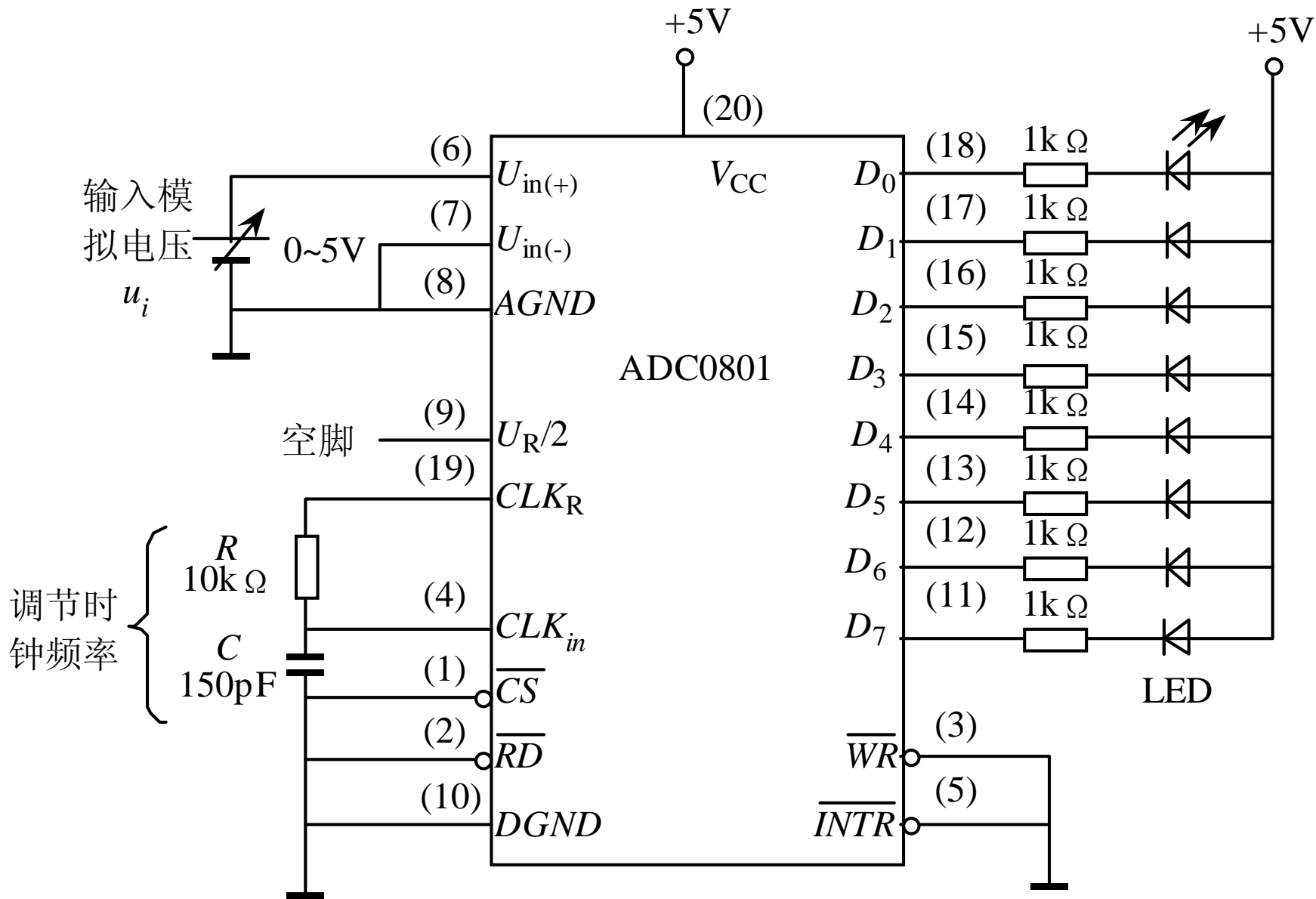
$$u_o = \frac{U_R}{2^4} (d_3 \cdot 2^3 + d_2 \cdot 2^2 + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) = \frac{8}{16} \times (8+1) = 4.5 \text{ V}$$

u_o 和 u_i 在比较器中比较，由于 $u_o < u_i$ ，所以比较器的输出电压为 $u_A=0$ 。

第5个时钟脉冲 C 的上升沿到来时，环形计数器又右移一位，其状态变为00001。这时由于 $u_A=0$ ， $Q_5=1$ ， Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均为0，于是触发器 F_A 、 F_B 、 F_C 、 F_D 的状态均保持不变，即加到D/A转换器输入端的代码为 $d_3d_2d_1d_0=1001$ 。同时， Q_5 的高电平将门 $G_8 \sim G_{11}$ 打开，使作为转换结果通过门 $G_8 \sim G_{11}$ 送出。这样就完成了一次转换。转换过程如表所示。

顺序脉冲	d_3	d_2	d_1	d_0	u_o/V	比较判断	该位数码 1 是否保留
1	1	0	0	0	4	$u_o < u_i$	保留
2	1	1	0	0	6	$u_o > u_i$	除去
3	1	0	1	0	5	$u_o > u_i$	除去
4	1	0	0	1	4.5	$u_o < u_i$	保留

集成模数转换器及其应用



模数转换器的主要技术指标

(1) 分辨率

A/D转换器的分辨率用输出二进制数的位数表示，位数越多，误差越小，转换精度越高。例如，输入模拟电压的变化范围为 $0\sim 5\text{V}$ ，输出8位二进制数可以分辨的最小模拟电压为 $5\text{V}\times 2^{-8}=20\text{mV}$ ；而输出12位二进制数可以分辨的最小模拟电压为 $5\text{V}\times 2^{-12}\approx 1.22\text{mV}$ 。

(2) 相对精度

在理想情况下，所有的转换点应当在一条直线上。相对精度是指实际的各个转换点偏离理想特性的误差。

(3) 转换速度

转换速度是指完成一次转换所需的时间。转换时间是指从接到转换控制信号开始，到输出端得到稳定的数字输出信号所经过的这段时间。