



Ch10 (补充内容) 数模和模数转换

主要内容:

10.1 概述

10.2 数模转换器

10.3 模数转换器



10.1 概述

ADC和DAC的应用:

传感器
(温度、压力、流量等**模拟量**)

A/D

能够将模拟量转换为数字量的器件称为模数转换器，简称**A/D转换器或ADC**。

计算机
(**数字量**)

执行部件
(**模拟量控制**)

D/A

能够将数字量转换为模拟量的器件称为数模转换器，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。

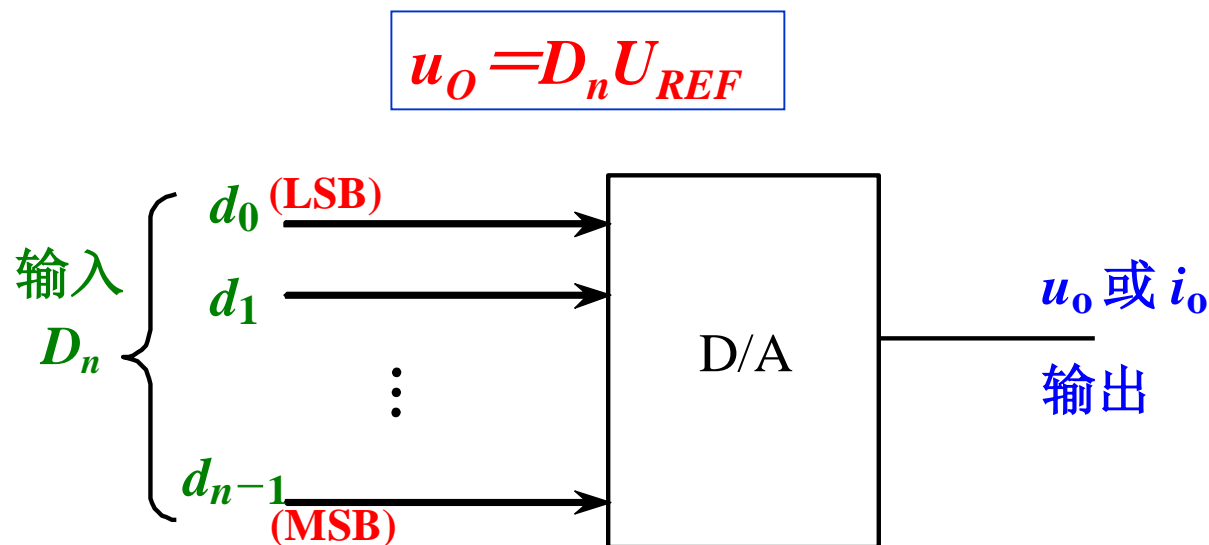


10.2 数模转换器

一、D/A转换器的基本工作原理

D/A转换器是将输入的**二进制数字量转换成模拟量**，以电压或电流的形式输出。

D/A转换器实质上是一个**译码器**（解码器）。一般常用的**线性**D/A转换器，其输出模拟电压 u_o 和输入数字量 D_n 之间成**正比关系**。 U_{REF} 为参考电压。





10.2 数模转换器

将输入的每一位二进制代码按其**权值**大小**转换**成相应的模拟量，然后将代表各位的**模拟量相加**，则所得的总模拟量就与数字量成正比，这样便实现了从数字量到模拟量的转换。

$$D_n = d_{n-1} \cdot 2^{n-1} + d_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \cdots + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i$$

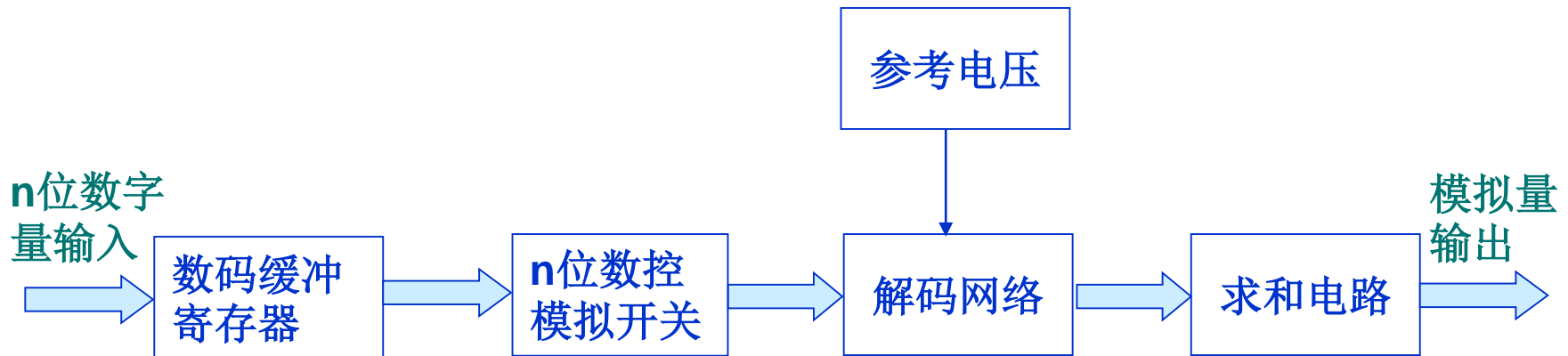
$$\begin{aligned} u_o &= D_n U_{REF} \\ &= d_{n-1} \cdot 2^{n-1} \cdot U_{REF} + d_{n-2} \cdot 2^{n-2} \cdot U_{REF} + \cdots + d_1 \cdot 2^1 \cdot U_{REF} + d_0 \cdot 2^0 \cdot U_{REF} \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i U_{REF} \end{aligned}$$

即：D/A转换器的输出电压 u_o ，等于所有代码为1的各位所对应的模拟电压之和。



10.2 数模转换器

D/A转换器一般由**数码缓冲寄存器**、**模拟电子开关**、**参考电压**、**解码网络**和**求和电路**等组成。



n 位D/A转换器方框图

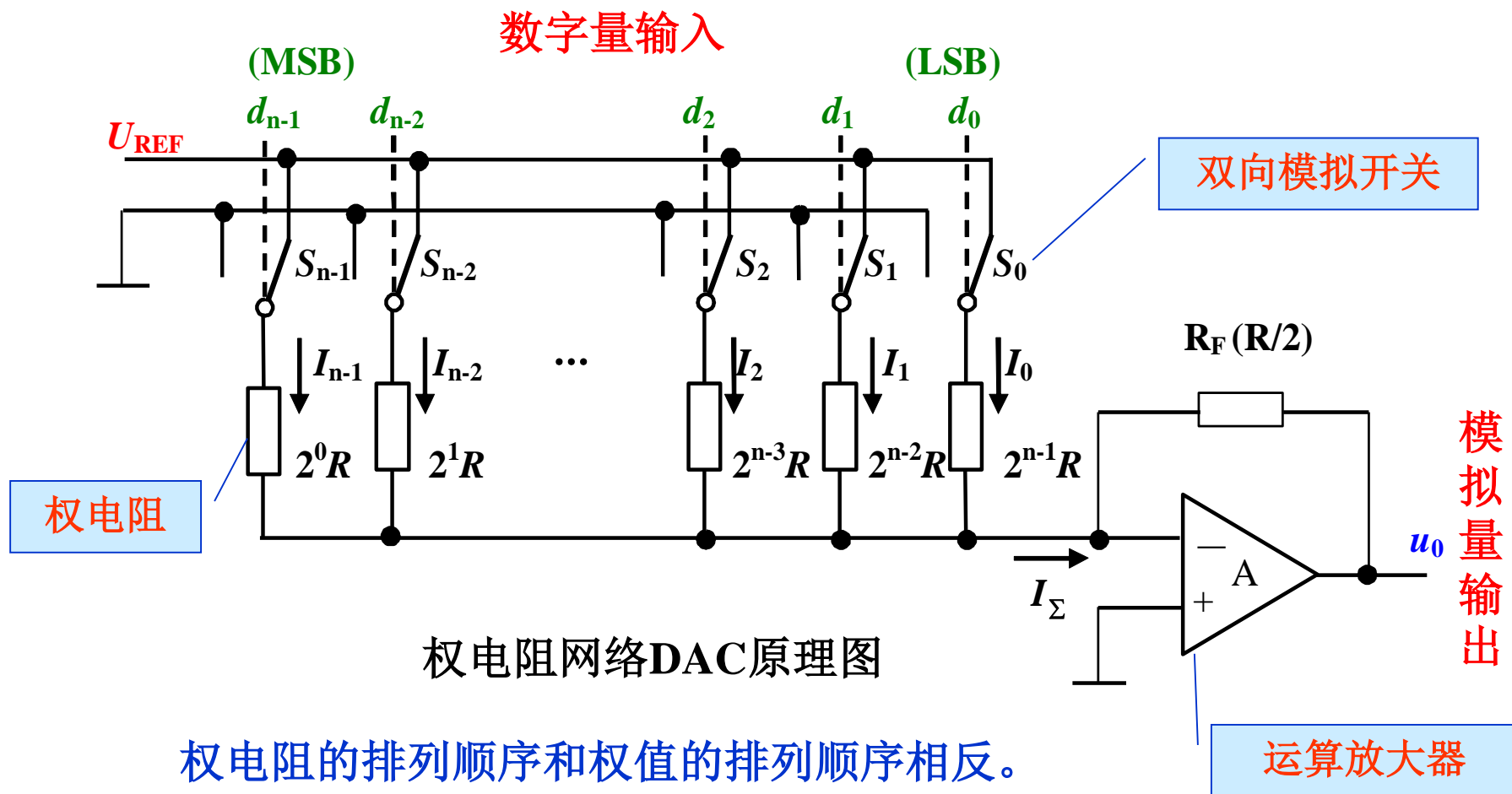
数字量以串行或并行方式输入，并存储在数码缓冲寄存器中；寄存器输出的每位数码驱动对应数位上的电子开关，将在解码网络中获得的相应数位权值送入求和电路；求和电路将各位权值相加，便得到与数字量对应的模拟量。



10.2 数模转换器

二、D/A转换器的主要电路形式

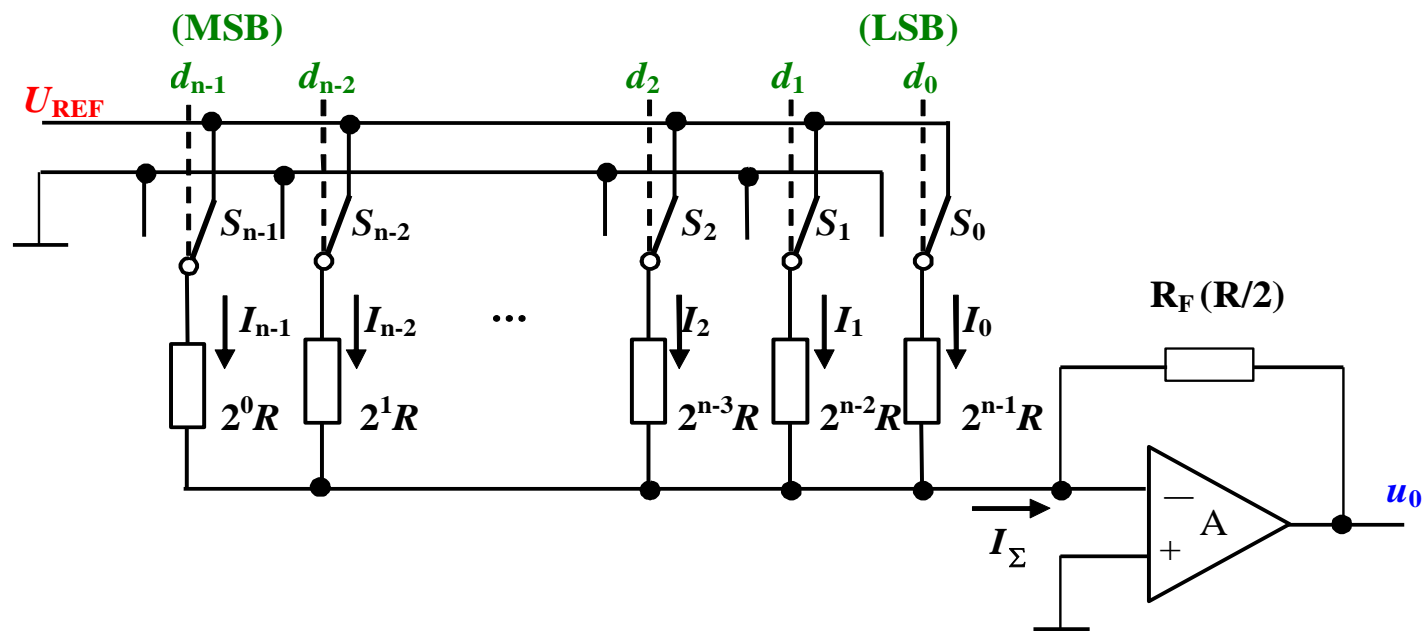
1. 权电阻网络D/A转换器





10.2 数模转换器

权电阻网络DAC的原理分析



开关 S_i 的位置受数据锁存器输出的数码 d_i 控制：当 $d_i=1$ 时， S_i 将对应的权电阻接到参考电压 U_{REF} 上；当 $d_i=0$ 时， S_i 将对应的权电阻接地。

集成运算放大器，作为**求和**权电阻网络的缓冲，并将电流转换为电压输出。

$$\left. \begin{array}{l} \text{虚短} \quad d_i = 1 \text{ 时, } I_i = \frac{U_{REF}}{2^{n-1-i} R} = \frac{U_{REF}}{2^{n-1} R} 2^i \\ \quad \quad d_i = 0 \text{ 时, } I_i = 0 \end{array} \right\} \quad I_i = d_i \frac{U_{REF}}{2^{n-1-i} R} = d_i \frac{U_{REF}}{2^{n-1} R} 2^i$$



10.2 数模转换器

运算放大器总的输入电流为

$$\begin{aligned} I_{\Sigma} &= I_{n-1} + I_{n-2} + \cdots + I_2 + I_1 + I_0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} I_i = \sum_{i=0}^{n-1} d_i \frac{U_{REF}}{2^{n-1-i} R} = \frac{U_{REF}}{2^{n-1} R} \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i \end{aligned}$$

虚断 运算放大器输出电压为

$$u_o = -R_F I_{\Sigma} = -R_F \frac{U_{REF}}{2^{n-1} R} \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i$$

令 $R_F = R/2$ ，则

$$u_o = -\frac{U_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i = -\frac{U_{REF}}{2^n} D_n$$

即：输出的模拟电压 u_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。



10.2 数模转换器

$$\begin{cases} \text{当 } d_n=d_{n-1}\dots=d_0=0 \text{ 时, } u_o=0; \\ \text{当 } d_n=d_{n-1}\dots=d_0=11\dots1 \text{ 时, } u_o = -\frac{2^n-1}{2^n}U_{REF}。 \end{cases}$$

因而 u_o 的变化范围是 $0 \sim -\frac{2^n-1}{2^n}U_{REF}$

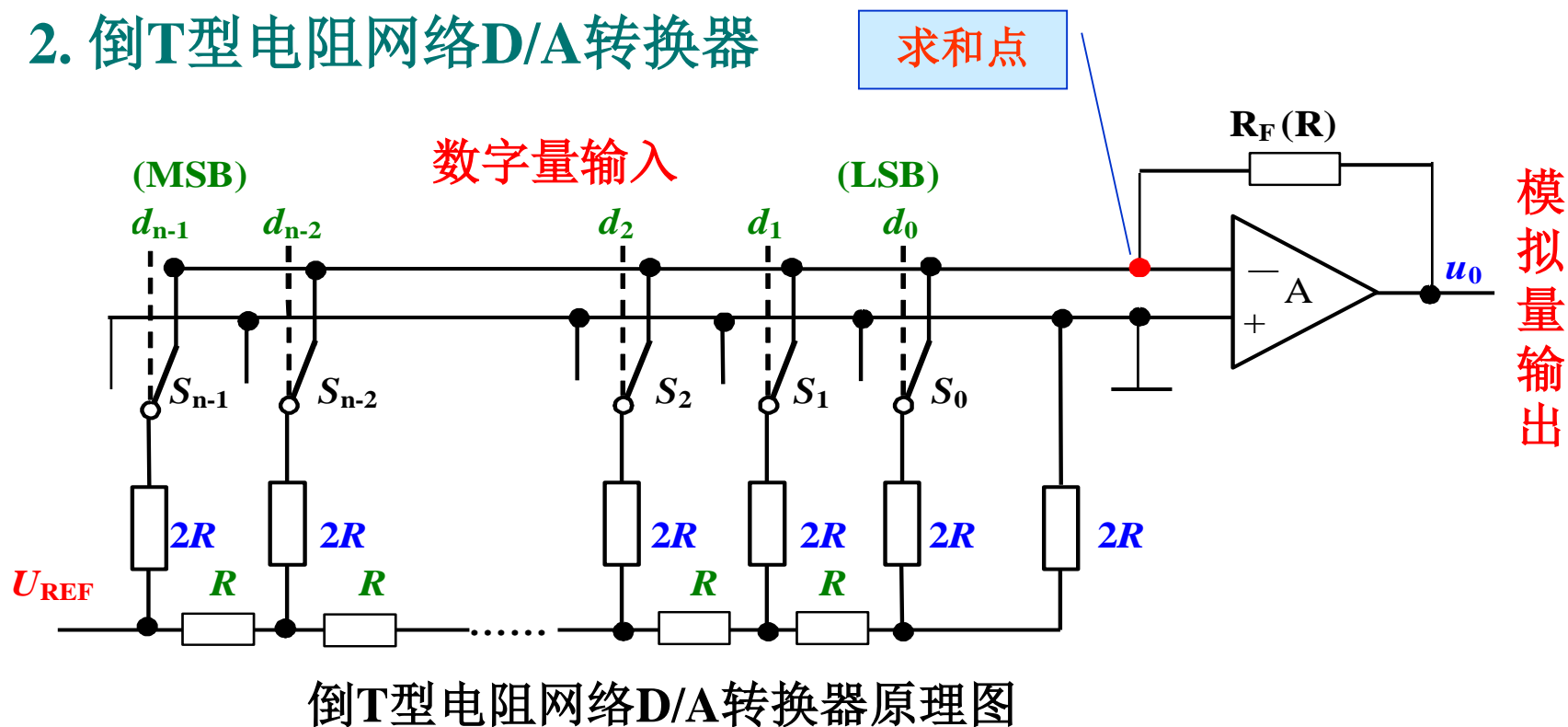
权电阻网络D/A转换器的特点

- ①优点：结构简单，电阻元件数较少；
- ②缺点：阻值相差较大，制造工艺复杂。



10.2 数模转换器

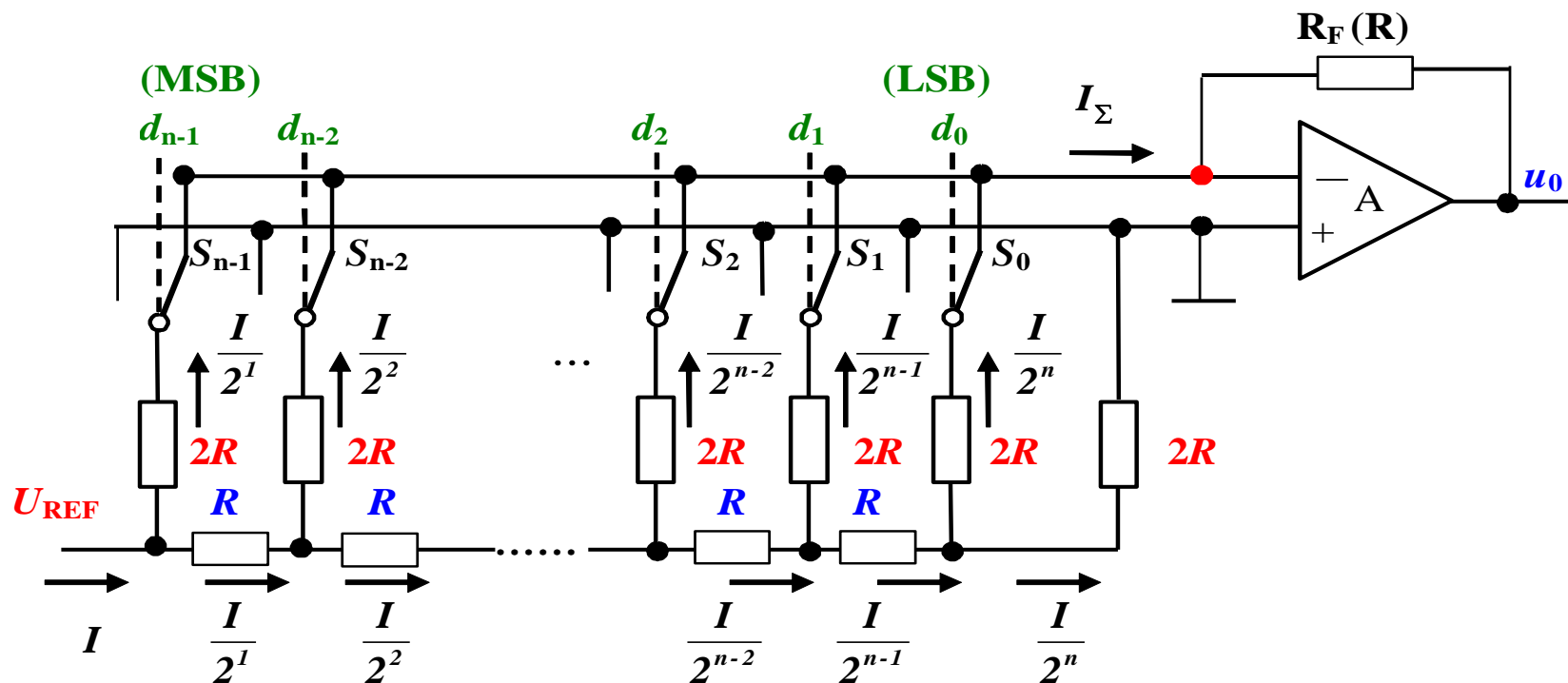
2. 倒T型电阻网络D/A转换器



电阻解码网络中，电阻只有 R 和 $2R$ 两种，并构成倒T型电阻网络。当 $d_i=1$ 时，相应的开关 S_i 接到求和点；当 $d_i=0$ 时，相应的开关 S_i 接地。但由于虚短，求和点和地相连，所以不论开关如何转向，电阻 $2R$ 总是与地相连。这样，倒T型网络的各节点向上看和向右看的等效电阻都是 $2R$ ，整个网络的等效输入电阻为 R 。



10.2 数模转换器



参考电压 U_{REF} 提供的总电流为: $I = \frac{U_{REF}}{R}$

分流: 流入求和点的各支路电流为:

$$\left. \begin{array}{l} d_i = 1 \text{ 时, } I_i = \frac{I}{2^{n-i}} = \frac{U_{REF}}{2^n R} 2^i \\ d_i = 0 \text{ 时, } I_i = 0 \end{array} \right\} I_i = d_i \frac{I}{2^{n-i}} = d_i \frac{U_{REF}}{2^n R} 2^i$$



10.2 数模转换器

流入求和点的电流为：

$$\begin{aligned} I_{\Sigma} &= I_{n-1} + I_{n-2} + \cdots + I_1 + I_0 \\ &= d_{n-1} \frac{I}{2^1} + d_{n-2} \frac{I}{2^2} + \cdots + d_1 \frac{I}{2^{n-1}} + d_0 \frac{I}{2^n} \\ &= \frac{I}{2^n} (d_{n-1} 2^{n-1} + d_{n-2} 2^{n-2} + \cdots + d_1 2^1 + d_0 2^0) \\ &= \frac{I}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i = \frac{U_{REF}}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i \end{aligned}$$

虚断，运算放大器的输出电压为：

$$u_O = -R_F I_{\Sigma} = -R_F \frac{U_{REF}}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i$$



10.2 数模转换器

令 $R_F=R$, 则

$$u_o = -\frac{U_{REF}}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} d_i 2^i = -\frac{U_{REF}}{2^n} D_n$$

即：输出的模拟电压 u_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。

倒T型电阻网络D/A转换器的特点：

①优点：电阻种类少，只有**R**和**2R**，提高了制造精度；而且支路电流流入求和点不存在时间差，提高了转换速度。

②应用：它是目前集成**D/A**转换器中转换速度较高且使用较多的一种，如**8位D/A转换器DAC0832**，就是采用**倒T型电阻网络**。



10.2 数模转换器

三、D/A转换器的主要技术指标

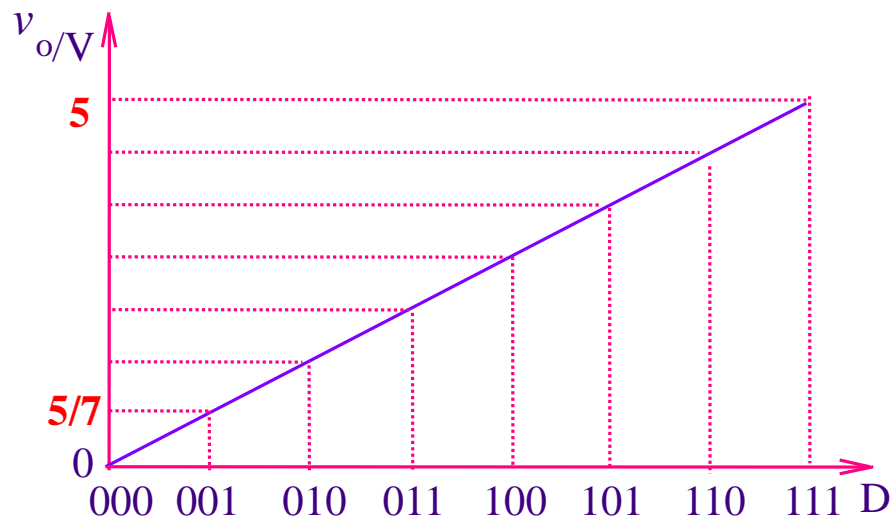
1. 分辨率

分辨率用于表征D/A转换器对输入微小量变化的敏感程度。

①D/A转换器模拟输出电压可能被分离的等级数——可用输入数字量的位数 n 表示D/A转换器的分辨率；

②可用D/A转换器的最小输出电压与最大输出电压之比来表示分辨率。

$$\text{分辨率} = \frac{\Delta U}{U_m} = \frac{1}{2^n - 1}$$



分辨率越高，转换时对输入量的微小变化的反应越灵敏。

而分辨率与输入数字量的位数有关， n 越大，分辨率越高。



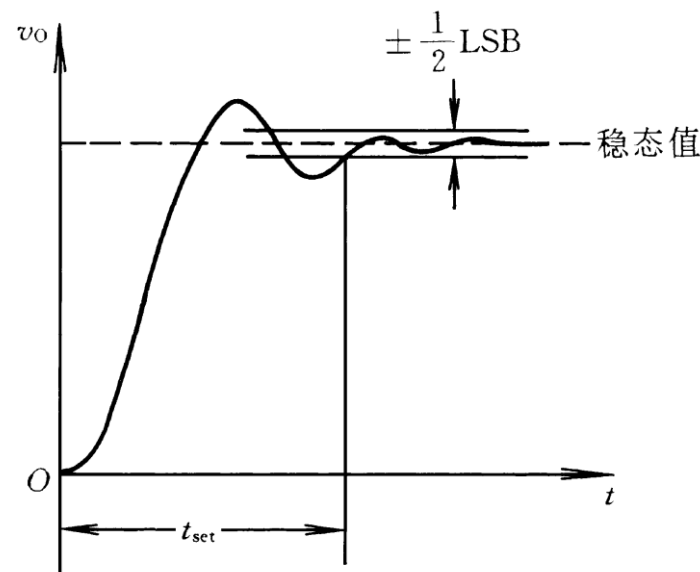
10.2 数模转换器

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. 转换速度

从输入的数字量发生突变开始，到输出电压进入与稳定值相差 $\pm 0.5\text{LSB}$ 范围内所需要的时间，称为**建立时间** t_{set} 。目前单片集成D/A转换器（不包括运算放大器）的建立时间最短达到0.1微秒以内。



4. 温度系数

在输入不变的情况下，输出模拟电压随温度变化产生的变化量。一般用满刻度输出条件下温度每升高 1°C ，输出电压变化的**百分数**作为温度系数。



例1：有一个8位单极性输出的DAC，其满度输出电压为 $V_{om}=25.5V$ ，当输入数字量为11101101时，输出电压是多少？

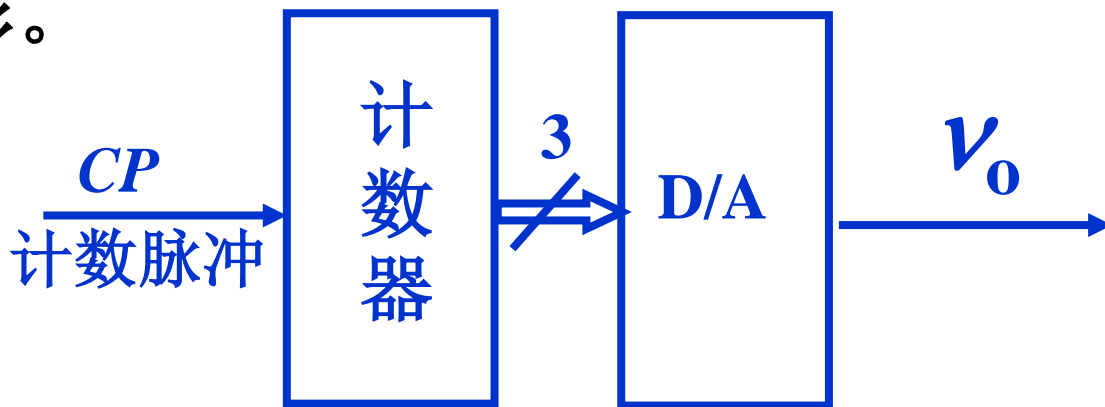
Solution:

8bit DAC的数字量范围0-255，而最大输出电压为 $V_{om}=25.5V$ ，所以，1LSB对应的电压为 $25.5V/255=0.1V$ 。

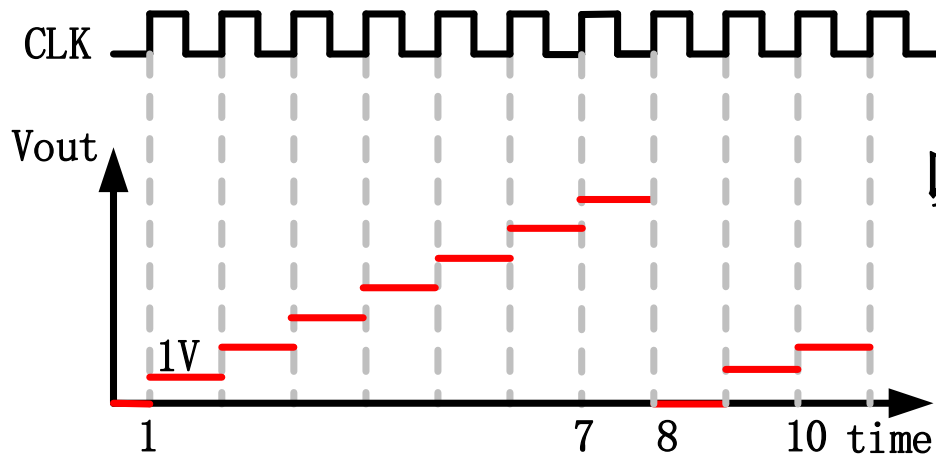
则输入数字量为11101101时，输出电压是 $237 \times 0.1 = 23.7V$ 。



例2: 有一个**3位单极性输出DAC**，其最小可分辨电压 $\Delta=1V$ ，电路连接如下图所示。其中的计数器是上升沿触发的，试画出对应时钟信号**10个脉冲**的输出电压 V_O 的波形。



思考: 对**4bit**计数器（比如**74x163**）而言，如果不是自由运行状态的计数方式，则输出波形可能会有什么不同？



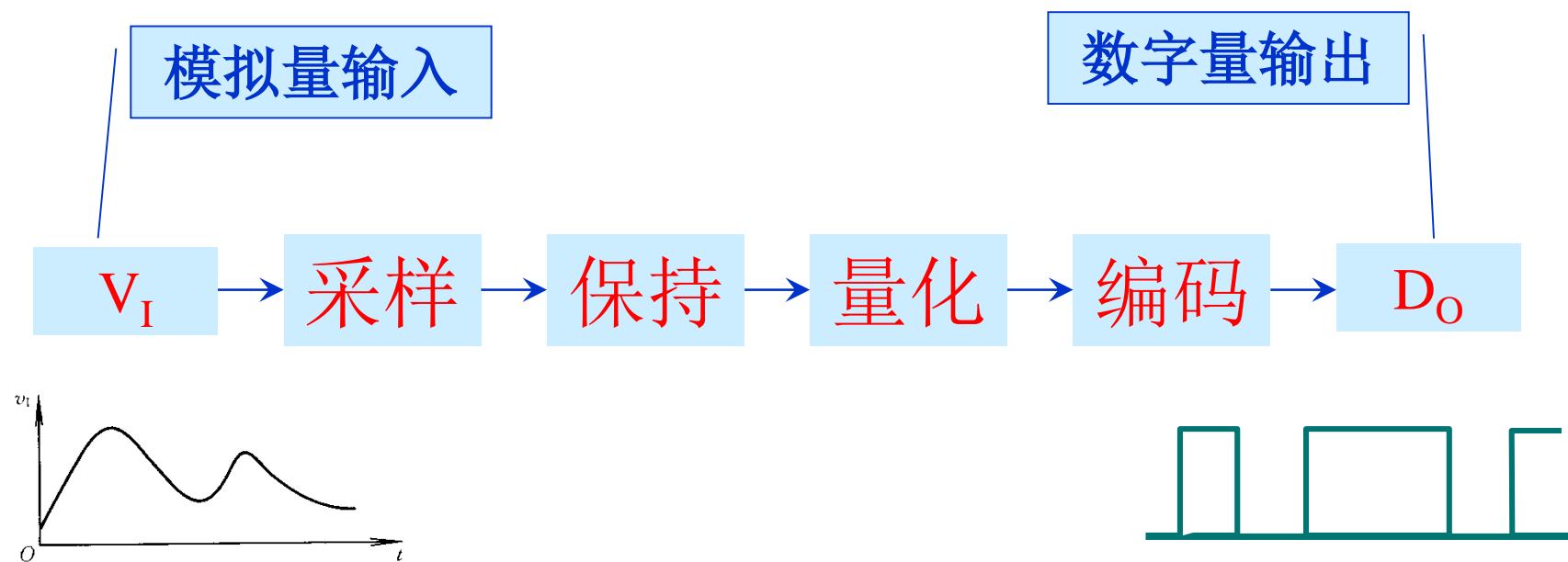
以**3bit**计数器为例，画出对应前**10个脉冲**输出信号



10.3 模数转换器

一、A/D转换器的基本工作原理

A/D转换是将模拟信号转换为数字信号，转换过程通过**采样、保持、量化和编码**四个步骤完成。





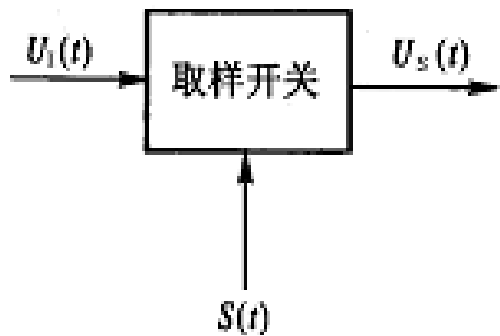
10.3 模数转换器

1. 采样和保持

采样是将时间上连续变化的信号，**转换为时间上离散的信号**，即将时间上连续变化的模拟量转换为一系列等间隔的脉冲，脉冲的幅度取决于输入模拟量。

采样过程

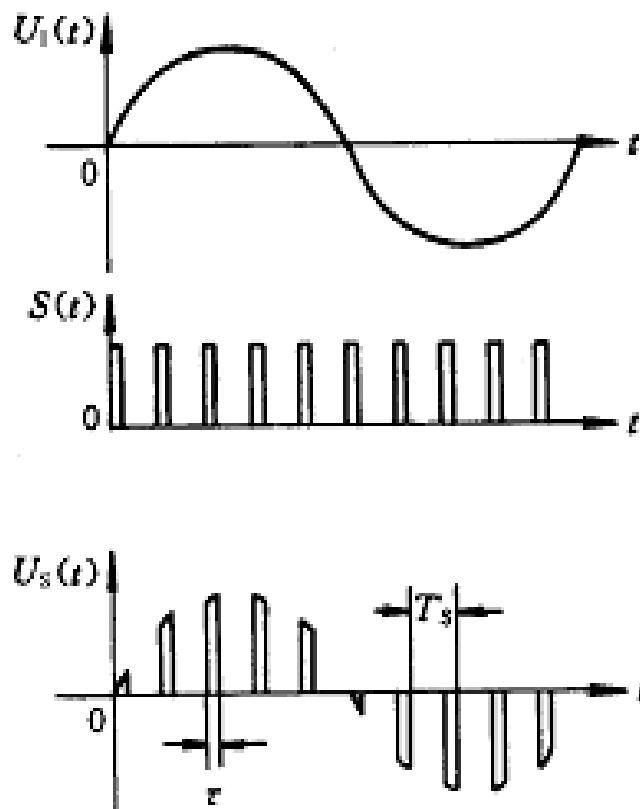
输入模拟信号



采样输出信号

采样脉冲

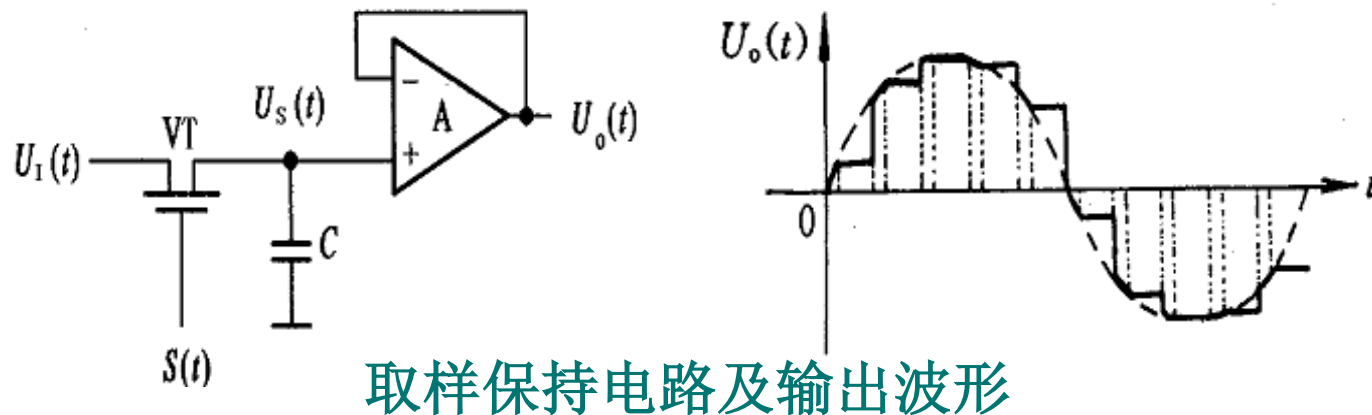
$$f_s \geq 2 f_{\max}$$





10.3 模数转换器

模拟信号经采样后，得到一系列**样值脉冲**。采样脉冲宽度 τ 一般是很短暂的，在下一个采样脉冲到来之前，应暂时保持所取得的样值脉冲幅度，以便进行转换。因此，在取样电路之后须加**保持电路**。



取样保持电路及输出波形

场效应管VT为**采样门**，电容C为**保持电容**，运算放大器为**跟随器**，起缓冲**隔离**作用。

①在采样脉冲 $S(t)$ 到来的时间 τ 内，VT导通， $U_I(t)$ 向电容C充电，假定充电时间常数远小于 τ ，则有： $U_O(t) = U_S(t) = U_I(t)$ 。——**采样**

②采样结束，VT截止，而电容C上电压保持充电电压 $U_I(t)$ 不变，直到下一个采样脉冲到来为止。——**保持**



10.3 模数转换器

2. 量化和编码

输入的模拟电压经过取样保持后，得到的是**阶梯波**。而该阶梯波仍是一个可以连续取值的模拟量，但 n 位数字量只能表示 2^n 个数值。因此，用数字量来表示连续变化的模拟量时就有了一个类似于**四舍五入的近似问题**。

将采样后的样值电平归化到与之接近的离散电平上，这个过程称为**量化**。指定的离散电平称为**量化电平** U_q 。用二进制数码来表示各个量化电平的过程称为**编码**。两个量化电平之间的差值称为**量化单位** Δ ，位数越多，量化等级越细， Δ 就越小。取样保持后未量化的 U_o 值与量化电平 U_q 值通常是不相等的，其差值称为**量化误差** ε ，即 $\varepsilon = U_o - U_q$ 。

量化的方法一般有两种：**只舍不入法**和**有舍有入法**。



10.3 模数转换器

二、A/D转换器的主要电路形式

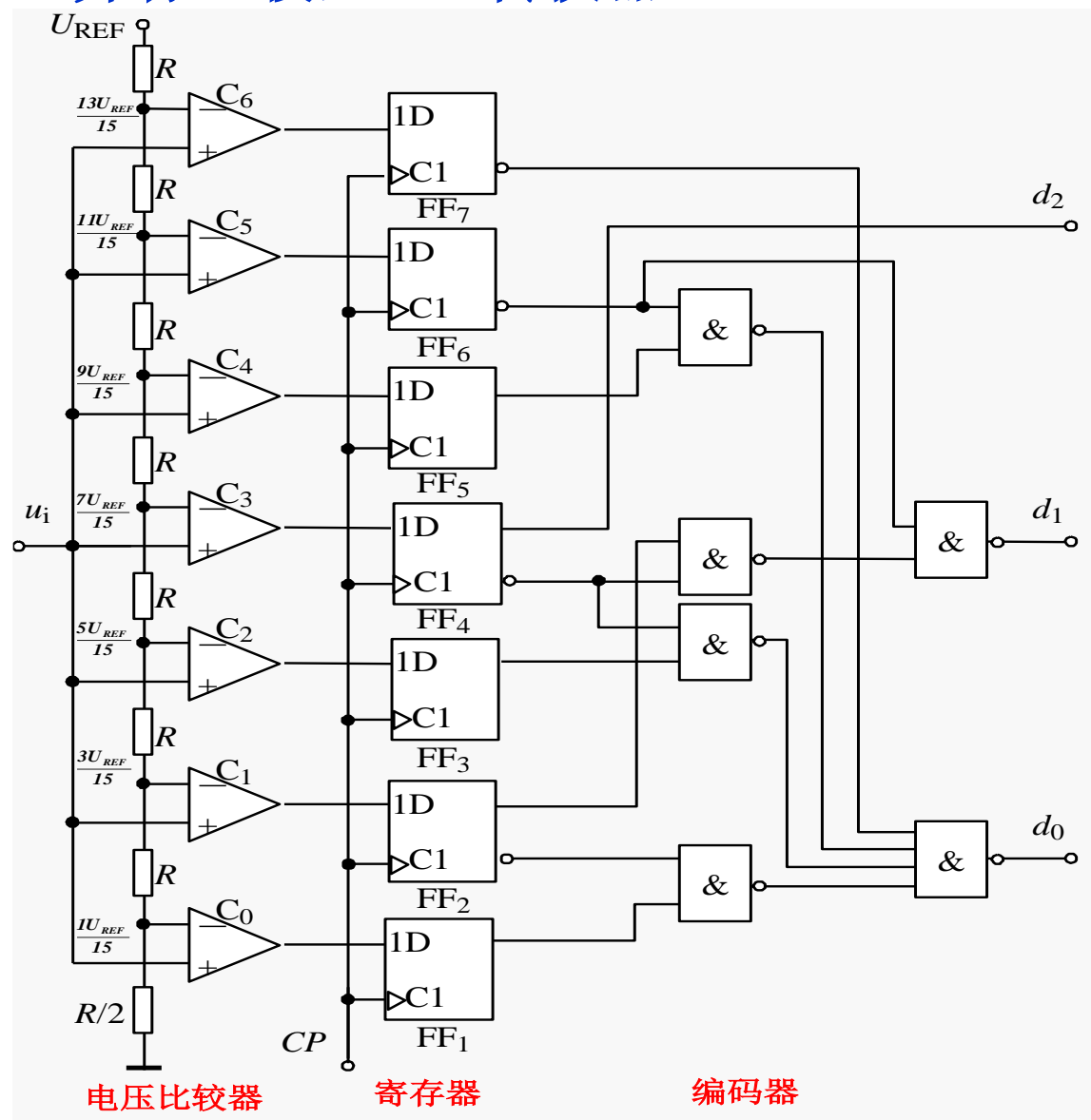
A/D转换器有直接转换法和间接转换法两大类。

直接法是通过一套基准电压与取样保持电压进行比较，从而直接将模拟量转换成数字量。其特点是工作速度高，转换精度容易保证，调准也比较方便。直接A/D转换器有逐次比较型、并行比较型等。

间接法是将取样后的模拟信号先转换成中间变量时间 t 或频率 f ，然后再将 t 或 f 转换成数字量。其特点是工作速度较低，但转换精度可以做得较高，且抗干扰性强。间接A/D转换器有单次积分型、双积分型等。

10.3 模数转换器

1. 并行比较型A/D转换器



量化电平依据有舍有入划分为7个电平。

量化单位为

$$\Delta = (2/15)U_{REF}$$

量化误差为

$$|\epsilon_{\max}| = (1/15)U_{REF}$$

电压比较器

$$\begin{cases} U_+ \geq U_- \text{ 时, } C_i = 1; \\ U_+ < U_- \text{ 时, } C_i = 0. \end{cases}$$

10.3 模数转换器

并行比较型A/D转换器真值表

输入模拟电压	寄存器状态 (编码器输入)							数字量输出 (编码器输出)		
u_I	Q_6	Q_5	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	d_2	d_1	d_0
$(0 \sim \frac{1}{15})U_{REF}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$(\frac{1}{15} \sim \frac{3}{15})U_{REF}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$(\frac{3}{15} \sim \frac{5}{15})U_{REF}$	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
$(\frac{5}{15} \sim \frac{7}{15})U_{REF}$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
$(\frac{7}{15} \sim \frac{9}{15})U_{REF}$	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
3. 6V~4. 4V $(\frac{9}{15} \sim \frac{11}{15})U_{REF}$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
$(\frac{11}{15} \sim \frac{13}{15})U_{REF}$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
$(\frac{13}{15} \sim 1)U_{REF}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

例如： $u_I=4.2V$ ， $U_{REF}=6V$ 。
则数字量输出 $d_2d_1d_0=101$ 。

相当于： $u_I/U_{REF}=4.2V/6V=10.5/15$ ，
即 $u_I=10.5/15U_{REF}$ 。

8.3 模数转换器

并行比较型A/D转换器的特点：

①优点：转换速度很快，故又称**高速A/D转换器**。含有寄存器的A/D转换器兼有取样保持功能，所以它可以**不用附加取样保持电路**。

②缺点：电路复杂，对于一个 n 位二进制输出的并行比较型A/D转换器，需 $2^n - 1$ 个电压比较器和 $2^n - 1$ 个触发器，编码电路也随 n 的增大变得相当复杂。且转换精度还受分压网络和电压比较器灵敏度的限制。

因此，这种转换器适用于**高速**， **精度较低**的场合。



10.3 模数转换器

三、A/D转换器的主要技术指标

1. 分辨率

分辨率指A/D转换器对输入模拟信号的分辨能力。从理论上讲，一个 n 位二进制数输出的A/D转换器应能区分输入模拟电压的 2^n 个不同量级，能区分输入模拟电压的最小差异为

$$\frac{1}{2^n} U_{Im} \quad (\text{满量程输入的} 1/2^n)。$$

例如，A/D转换器的输出为12位二进制数，最大输入模拟信号为10V，则其分辨率为

$$\text{分辨率} = \frac{1}{2^{12}} \times 10V = \frac{10V}{4096} = 2.44mV$$



10.3 模数转换器

2. 转换时间

转换时间是指A/D转换器从接到转换启动信号开始，到输出端获得稳定的数字信号所经过的时间。

A/D转换器的转换速度主要取决于转换电路的类型，不同类型A/D转换器的转换速度相差很大。

- ①双积分型A/D转换器的转换速度最慢，需几百毫秒左右；
- ②逐次逼近式A/D转换器的转换速度较快，需几十微秒；
- ③并行比较型A/D转换器的转换速度最快，仅需几十纳秒时间。



10.3 模数转换器

3. 转换误差

它表示A/D转换器实际输出的数字量和理论上输出的数字量之间的差别。常用**最低有效位的倍数**表示。

例如，转换误差 $\leq \pm \frac{1}{2} LSB$ ，就表明实际输出的数字量和理论上应得到的输出数字量之间的误差小于最低位的半个字。

例：某信号采集系统要求用一片A/D转换集成芯片在1s内对16个热电偶（工业上常用的一种测温元件）的输出电压进行A/D转换。已知热电偶输出电压范围为0~25mV（对应于0~450℃温度范围），需分辨的温度为0.1℃，试问应选择几位的A/D转换器？其转换时间为多少？

解：分辨率= $\frac{0.1}{450} = \frac{1}{4500}$ 假设选用12位ADC的分辨率= $\frac{1}{2^{12}} = \frac{1}{4096}$

故需选用**13位**A/D转换器。

转换时间= $\frac{1}{16} = 62.5 ms$



随堂练习:

1. An 8-bit DAC with an output voltage range of 0 to 10 volts will have a resolution of () mV. (keep two digits after the decimal point 保留两位小数)
2. A D/A converter's input(Binary) and output are shown as the graph below. When the input is 010 , the output voltage is (), and when input is 011 , the output voltage is ().

Binary	Output Voltage	Binary	Output Voltage
001	-1.25 V	000	-0.00 V
011	()	010	()
101	-6.25 V	100	-5.00 V
111	-8.75 V	110	-7.50 V

$$\text{分辨率} = \frac{\Delta U}{U_m} = \frac{1}{2^n - 1}$$

解析：考查要点，补充的是AD/DA部分的内容。

参考答案： 1. $10\text{V}/255=39.22\text{mV}$; 2. -2.5V ; -3.75V



1. When an 8-bit DAC's input is 10110010, its output is (), provided that the reference voltage is 10.0V.

解析：考查要点，补充的是AD/DA部分的内容。

$10110010_2 = 178_{10}$ ，量化台阶 $\Delta = 10/256$ ，

所以，输出为 $178 \times 10/256 = 6.953125V$

2. A temperature test system whose temperature measurement range is $-45^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$. If the A/D converter in the system needs to recognize a temperature change of 0.1°C , an A/D converter with () bits is required at least.

A. 10 B. 11 C. 12 D. 13

B 解析：总量化级数 $M = [125 - (-45)]/0.1 = 1700$ ，
所以，需要至少需要 $2^{11} = 2048 > 1700$