

数字与模拟转换

程晨闻

东南大学电气工程学院



➤ 内容概要

- 数字/模拟转换器DAC 的工作原理
- 模拟/数字转换器ADC的工作原理
- 电路板上的DAC操作

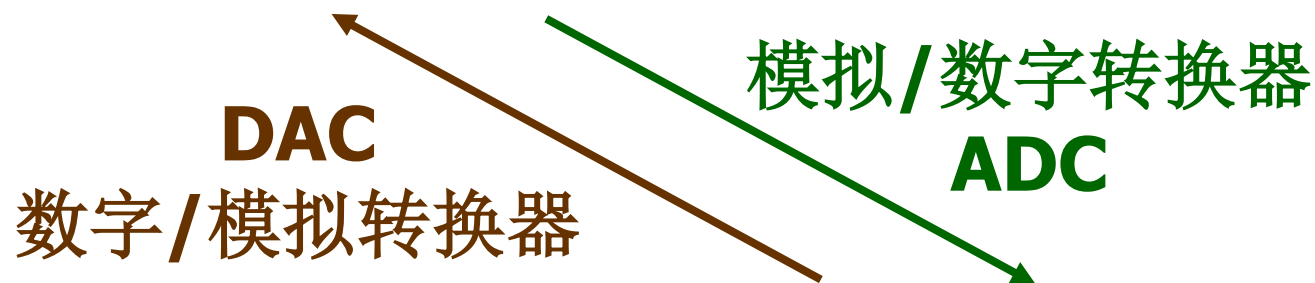


➤ 内容概要

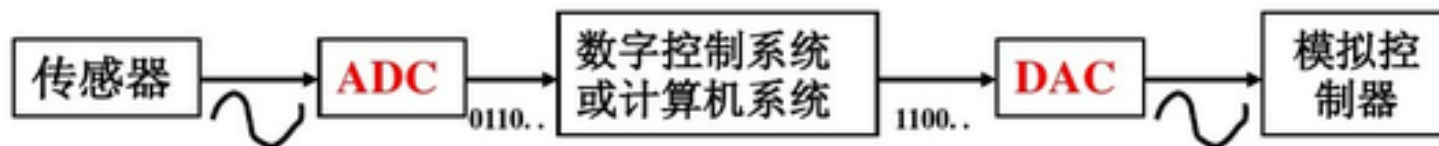
- 数字/模拟转换器DAC 的工作原理
- 电路板上的DAC操作
- 模拟/数字转换器ADC的工作原理



➤ 模拟量——连续变化的物理量

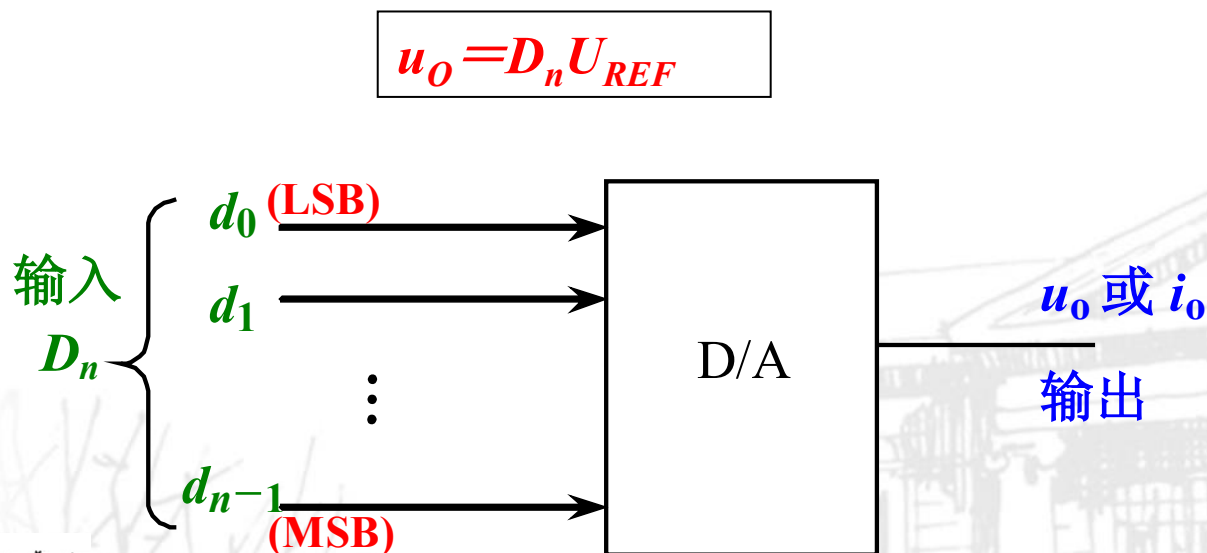


➤ 数字量——时间和数值上都离散的量



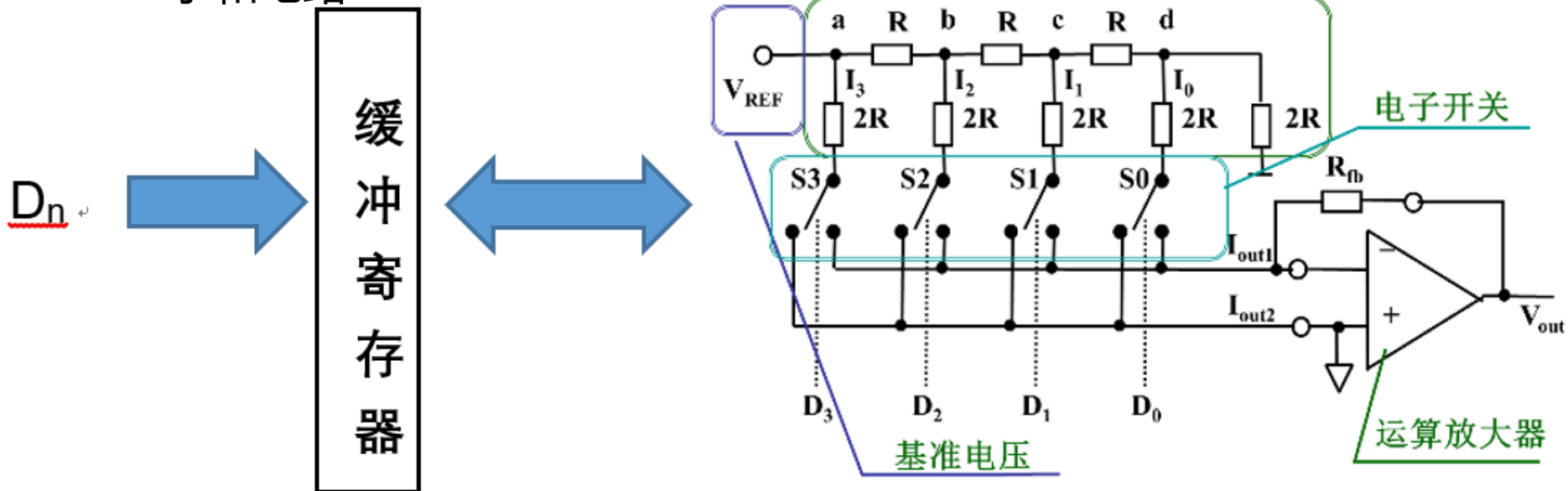
➤ DAC

- DAC是将数字量转换成模拟量输出的设备
- DAC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
- DAC可看作是一个**译码器**（解码器），提供了数字量到模拟量的映射功能
 - 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

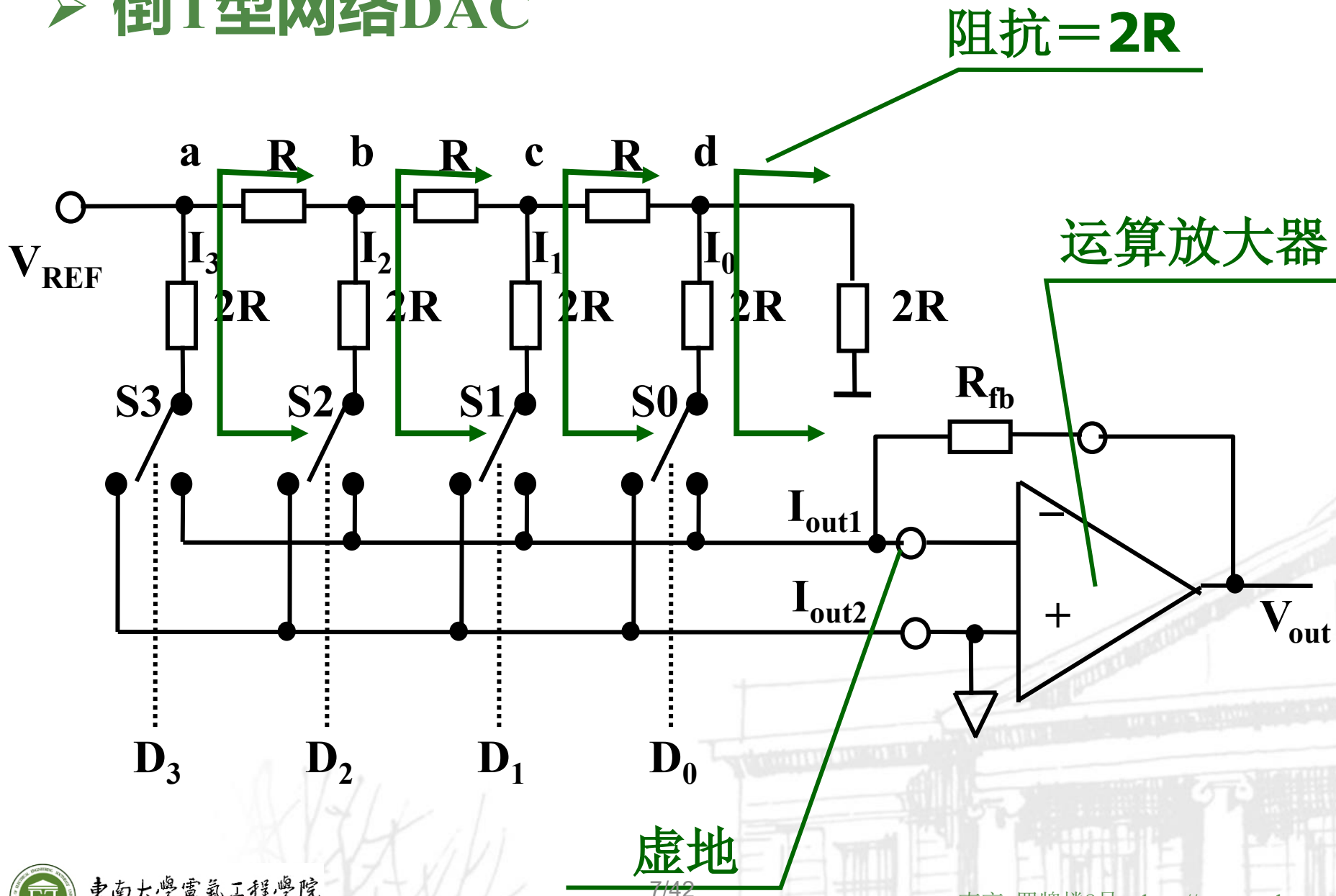


➤ DAC的组成 (倒T型网络DAC)

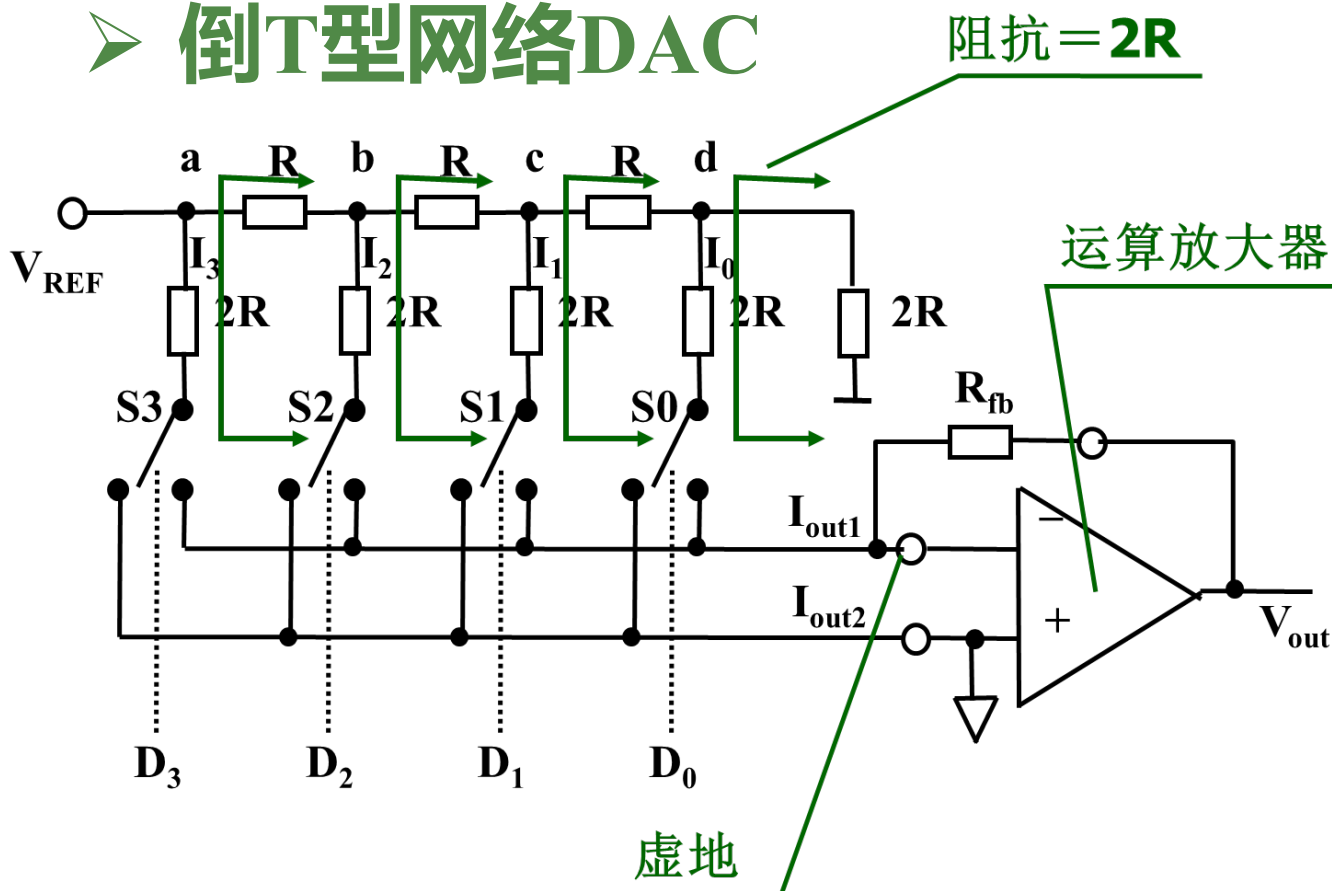
- 缓冲寄存器
- 模拟电子开关
- 参考电压
- 解码网络
- 求和电路



➤ 倒T型网络DAC



➤ 倒T型网络DAC



$$\begin{aligned} V_a &= V_{REF} \\ V_b &= V_{REF}/2 \\ V_c &= V_{REF}/4 \\ V_d &= V_{REF}/8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_0 &= V_d/2R = V_{REF}/(8 \times 2R) \\ I_1 &= V_c/2R = V_{REF}/(4 \times 2R) \\ I_2 &= V_b/2R = V_{REF}/(2 \times 2R) \\ I_3 &= V_a/2R = V_{REF}/(1 \times 2R) \end{aligned}$$

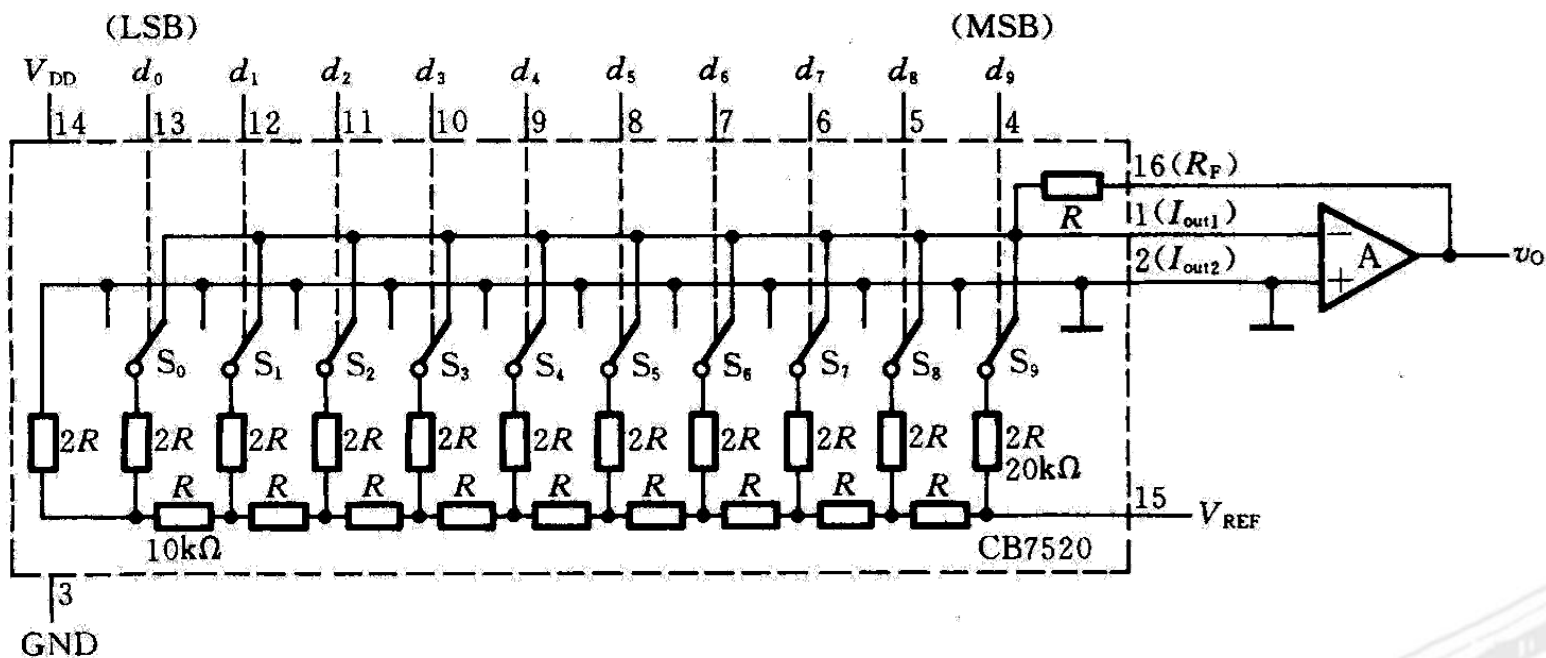
➤ 倒T型网络DAC

输入量Dn的每一位，控制一个电子开关

- $I_{out1} = Dn(0) \cdot I_0 + Dn(1) \cdot I_1 + Dn(2) \cdot I_2 + Dn(3) \cdot I_3$
- $= V_{REF}/2R \times (Dn(0) \cdot 1/8 + Dn(1) \cdot 1/4 + Dn(2) \cdot 1/2 + Dn(3) \cdot 1)$
- $V_{out} = -I_{out1} \times R_{fb}$
- 若 $R_{fb} = R$
- $V_{out} = -V_{REF} \times [(Dn(0) \cdot 2^0 + Dn(1) \cdot 2^1 + Dn(2) \cdot 2^2 + Dn(3) \cdot 2^3) / 2^4]$

$$V_{out} = - (Dn / 2^n) \times V_{REF}$$

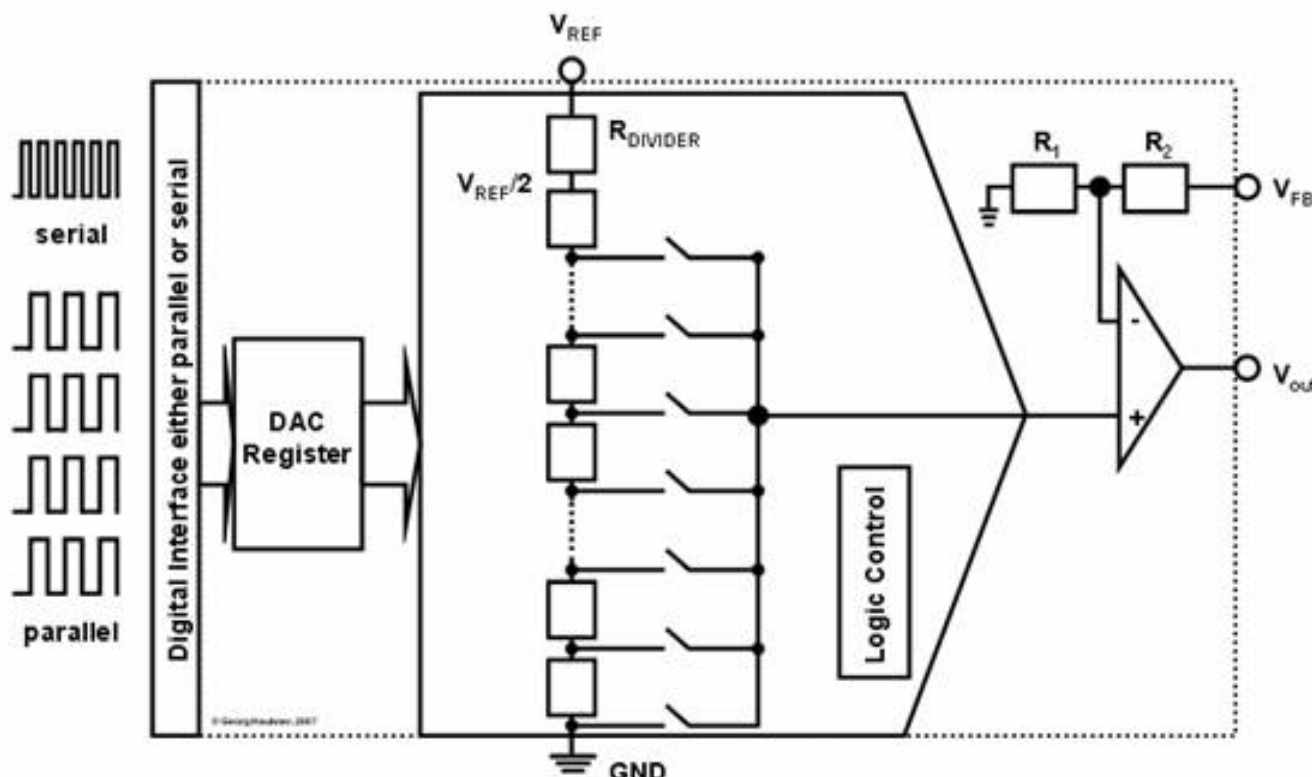
➤ 应用示例(10位DAC CB7520)



CB7520电路原理图

➤ 其他结构的DAC

- 倒T型网络DAC也被称作R2R 架构DAC
- 除此之外，常用的还有电阻串(R-String)结构的DAC



➤ D/A转换器的主要技术指标

1. 转换精度

输出模拟电压的实际值与理想值之差，也称最大静态转换误差

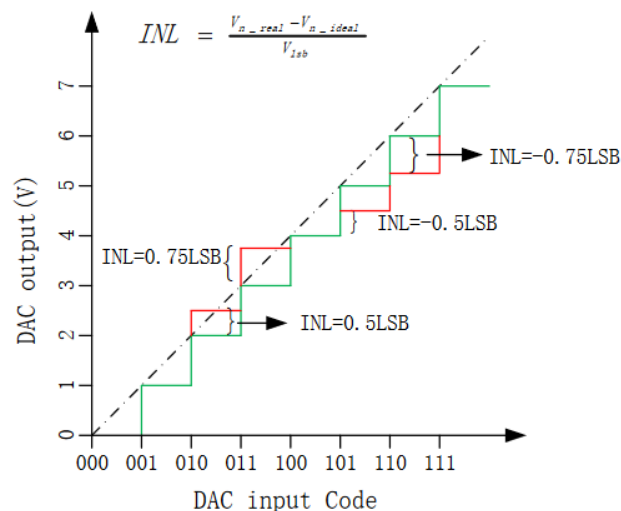
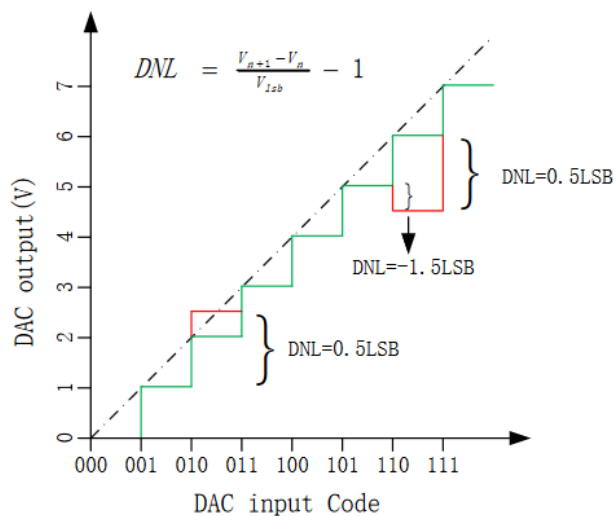
2. 分辨率

DAC模拟输出电压可能被分离的等级数；输入数字量位数越多，分辨率越高

3. 线性度

通常用非线性误差的大小表示DAC的线性度

DNL 是微分线性度；INL 是积分线性度

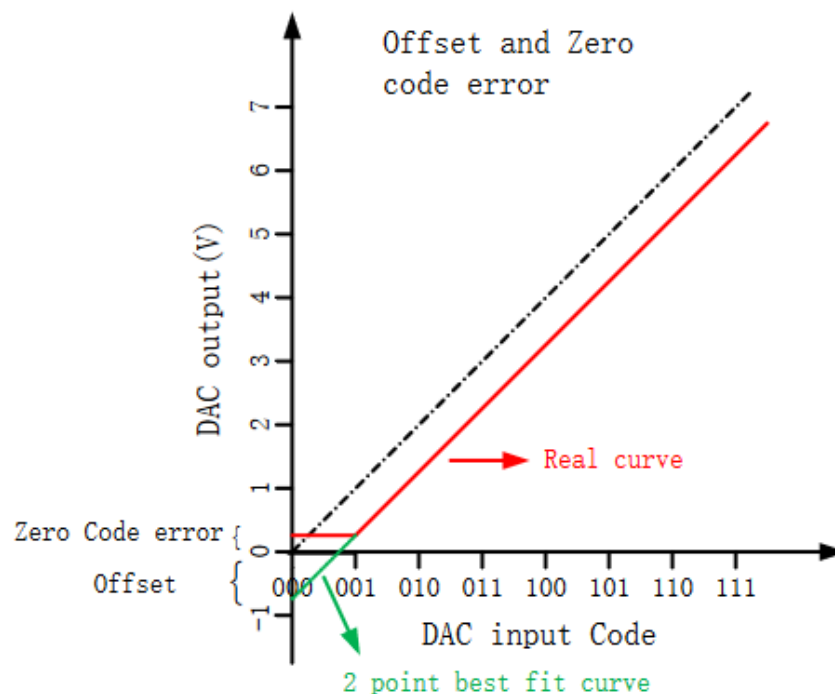
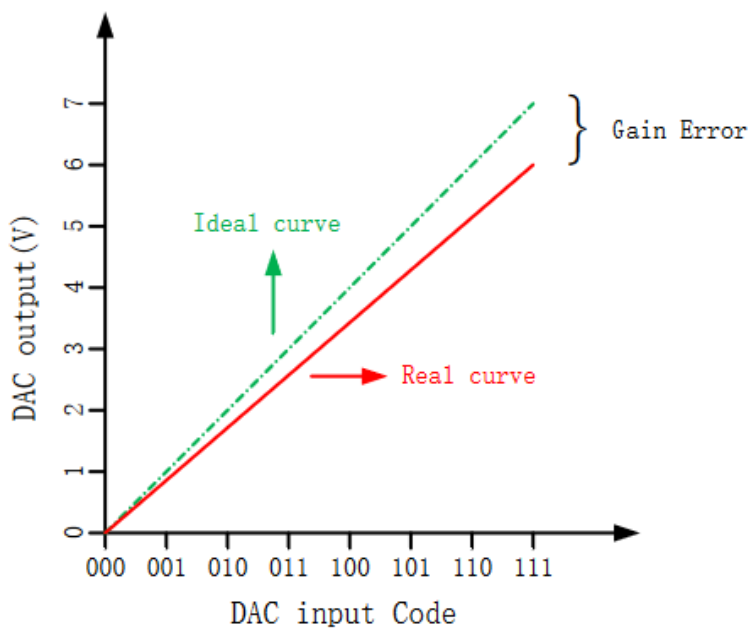


➤ D/A转换器的主要技术指标

4. 偏移

增益偏差

零位偏差



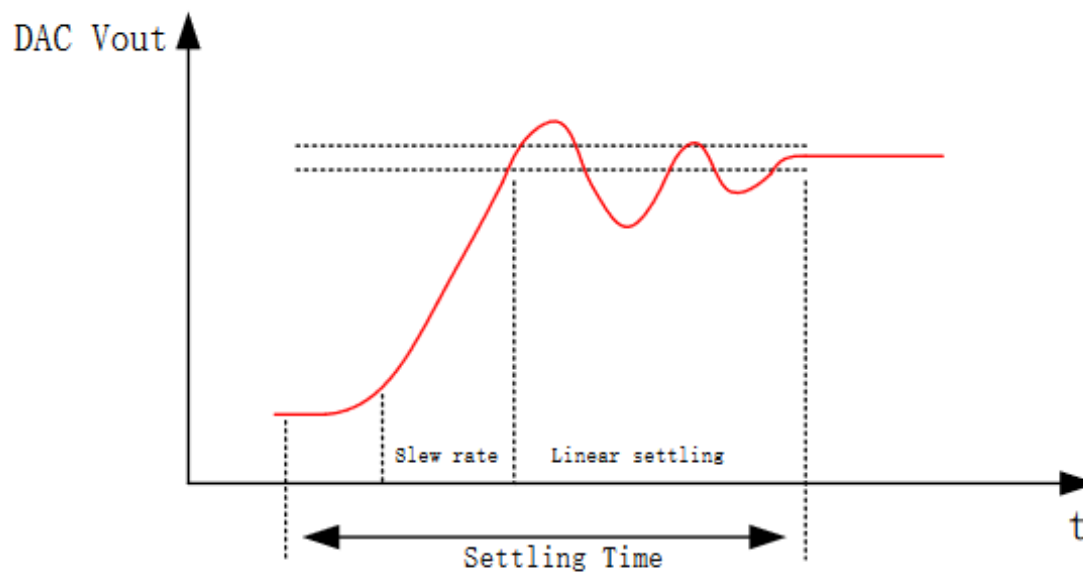
➤ D/A转换器的主要技术指标

5. 转换时间

建立时间 (Settling time)

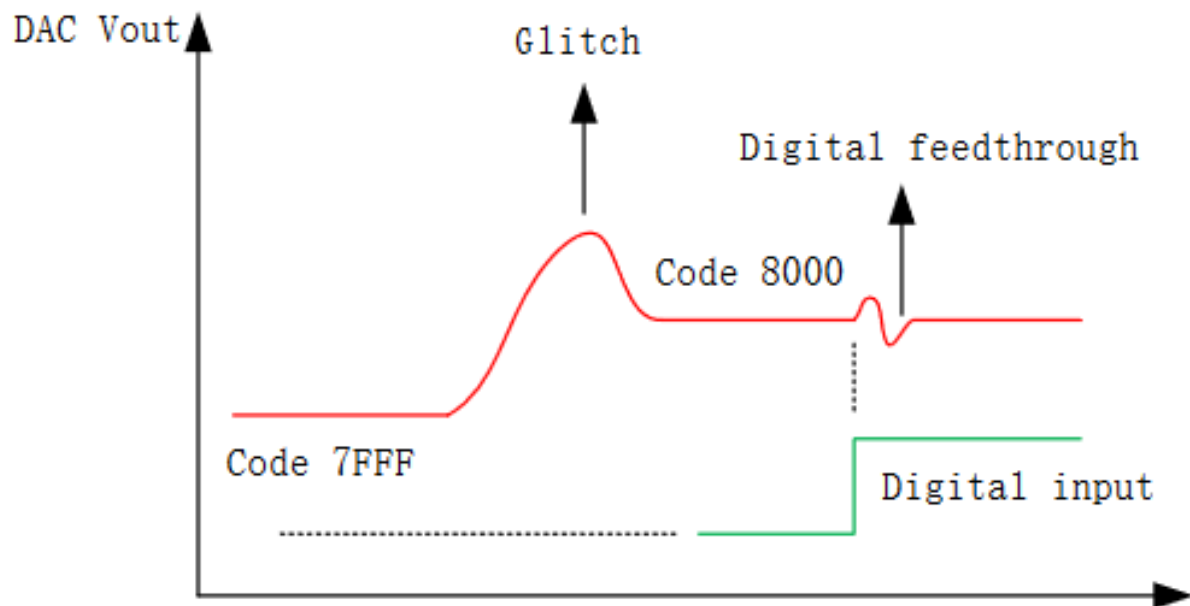
压摆率 slew rate

线性稳定时间 linear settling



➤ D/A转换器的主要技术指标

6. 毛刺



➤ D/A转换器的主要技术指标

7. 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。
- 单位为**PPM**，即温度上升或者下降1摄氏度时，输出的变化为百万分之几



➤ 内容概要

- 数字/模拟转换器DAC 的工作原理
- **电路板上的DAC操作**
- 模拟/数字转换器ADC的工作原理

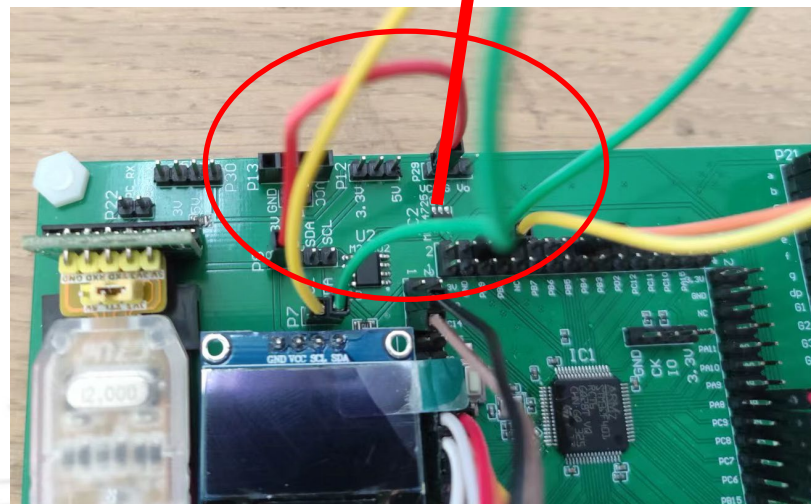
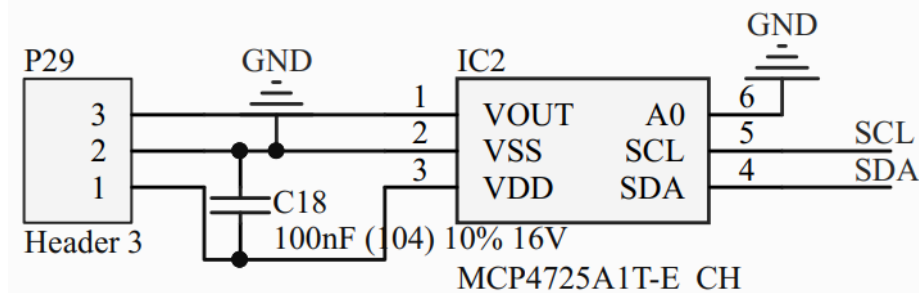
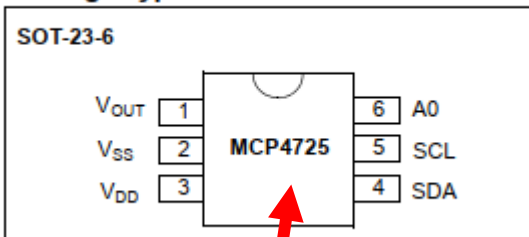


➤ 使用I2C发送DAC数据

– 2. 线路连接

- 将PB8连接到SCL
- 将PB9连接到SDA
- 将P29的VCC连接至P8的3.3V插针

Package Type

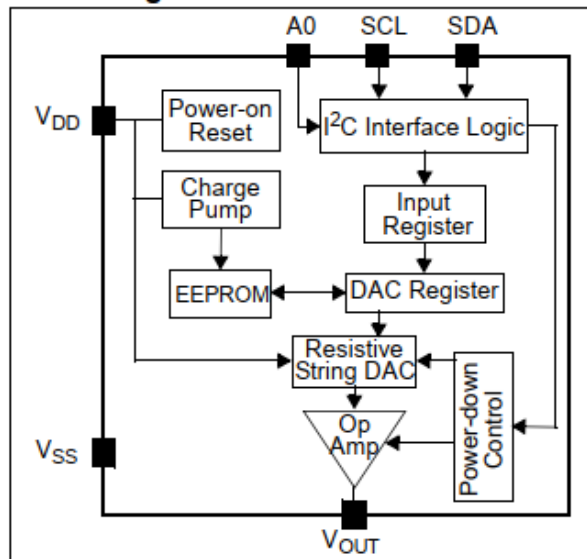


➤ 使用I2C发送DAC数据

– 1. MCP4725芯片

- 12bitDAC芯片
- EEPROM存储
- I2C接口 (8个可选地址, 100kbps/400kbps/3.4Mbps)
- 工作为从机模式
- LSB

Block Diagram



EQUATION 4-1:

$$LSB_{Ideal} = \frac{V_{REF}}{2^n} = \frac{(V_{Full\ Scale} - V_{Zero\ Scale})}{2^n - 1}$$

Where:

- V_{REF} = The reference voltage = V_{DD} in the MCP4725. This V_{REF} is the ideal full scale voltage range
- n = The number of digital input bits. ($n = 12$ for MCP4725)

➤ 使用I2C发送DAC数据

– 2. MCP4725芯片—工作模式 (PD0、PD1)

- Normal mode
- Power-down mode
 - 低功耗模式，关闭除了I2C接口的其他电路
 - 没有数据转换
 - Vout没有输出
 - 输出从运放的输出转换为阻性负载

TABLE 5-2: POWER-DOWN BITS

| PD1 | PD0 | Function |
|-----|-----|--|
| 0 | 0 | Normal Mode |
| 0 | 1 | 1 kΩ resistor to ground ⁽¹⁾ |
| 1 | 0 | 100 kΩ resistor to ground ⁽¹⁾ |
| 1 | 1 | 500 kΩ resistor to ground ⁽¹⁾ |

Note 1: In the power-down mode: V_{OUT} is off and most of internal circuits are disabled.

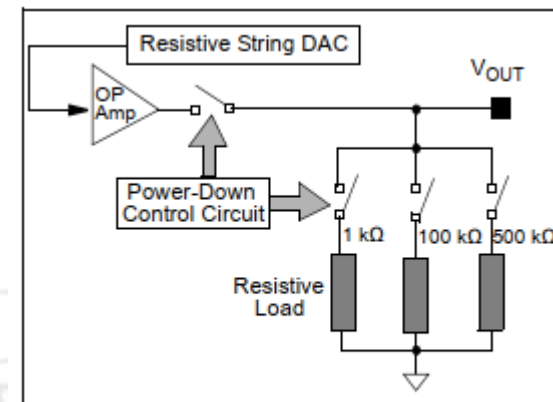


FIGURE 5-1: Output Stage for Power-Down Mode.

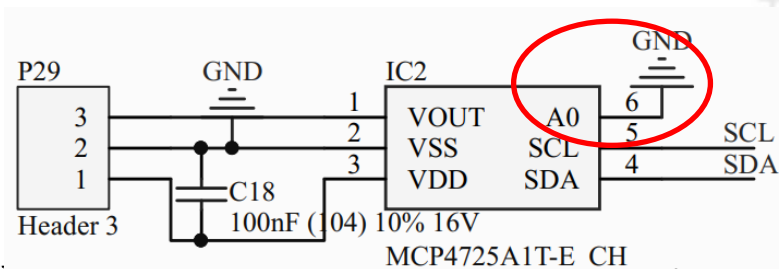
➤ 使用I2C发送DAC数据

– 2. MCP4725芯片

• 器件地址

- ✓ Device code + address bits + R/W bit
- ✓ Device code is always **1100**
- ✓ Three address bits: A2, A1, A0; A2 and A1 are **01**; A0 bit is determined by the logic state of A0 pin (**0** in this design)
- ✓ Thus, the address of MCP4725 chip is 1100010b

| Part Number | Address Option | Code |
|-----------------|----------------|------|
| MCP4725A0T-E/CH | A0 (00) | AJNN |
| MCP4725A1T-E/CH | A1 (01) | APNN |
| MCP4725A2T-E/CH | A2 (10) | AQNN |
| MCP4725A3T-E/CH | A3 (11) | ARNN |



Block Diagram

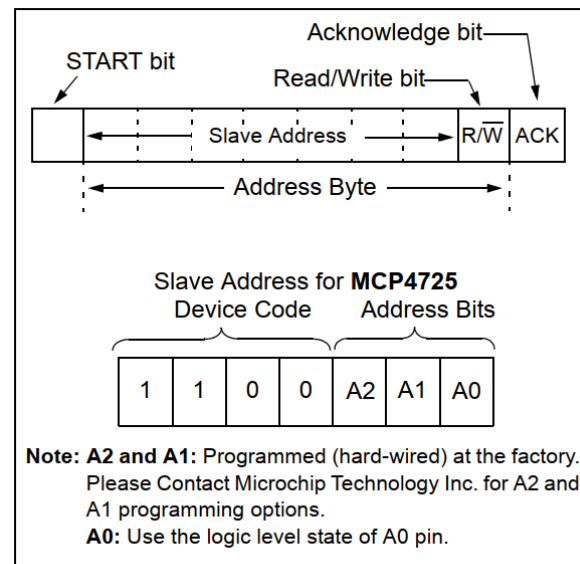
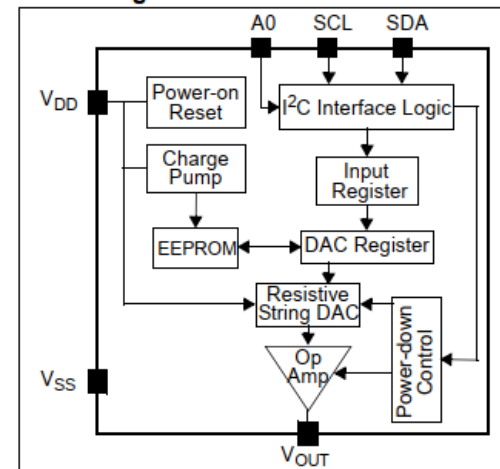


FIGURE 7-1: Device Addressing.

➤ 使用I2C发送DAC数据

– 2. MCP4725芯片

- 写操作：Fast mode (C2, C1=0, 0)
- ✓ 用于改变DAC寄存器，EEPROM不受影响
- ✓ 升级下电模式选择位 (PD1和PD0)，以及DAC寄存器中的12位输入数据

Block Diagram

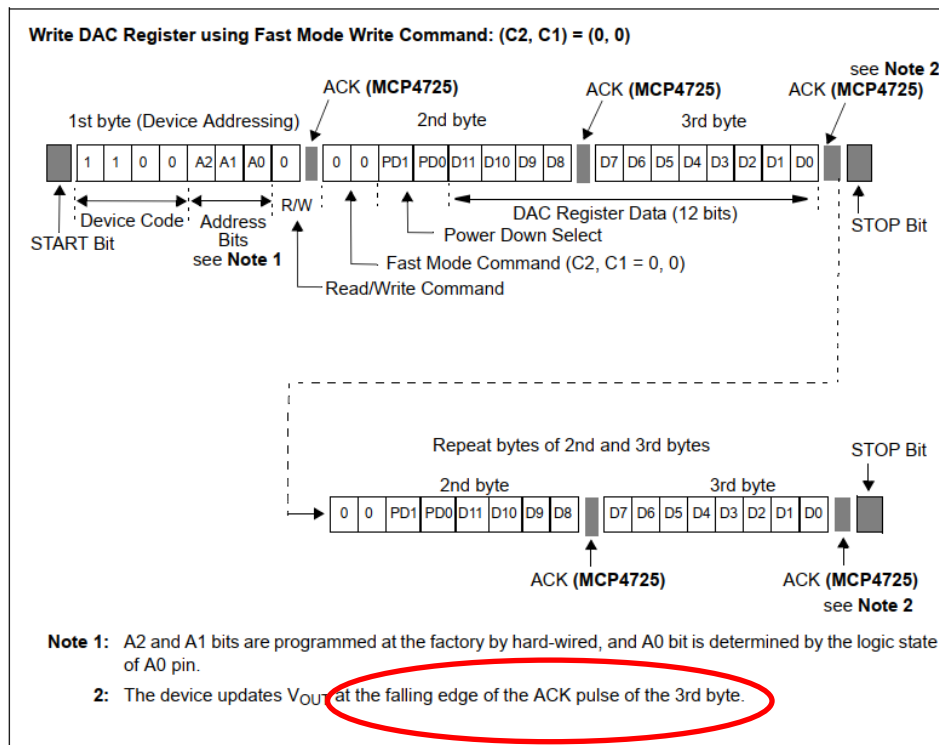
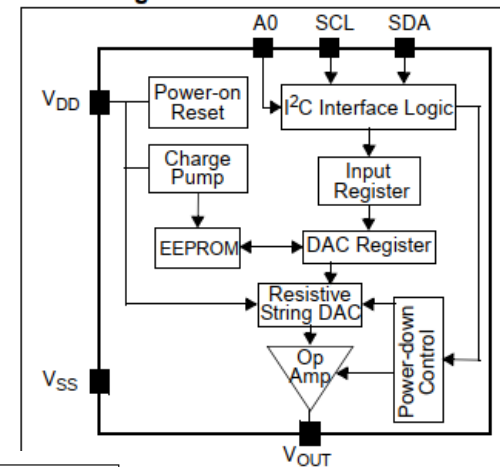
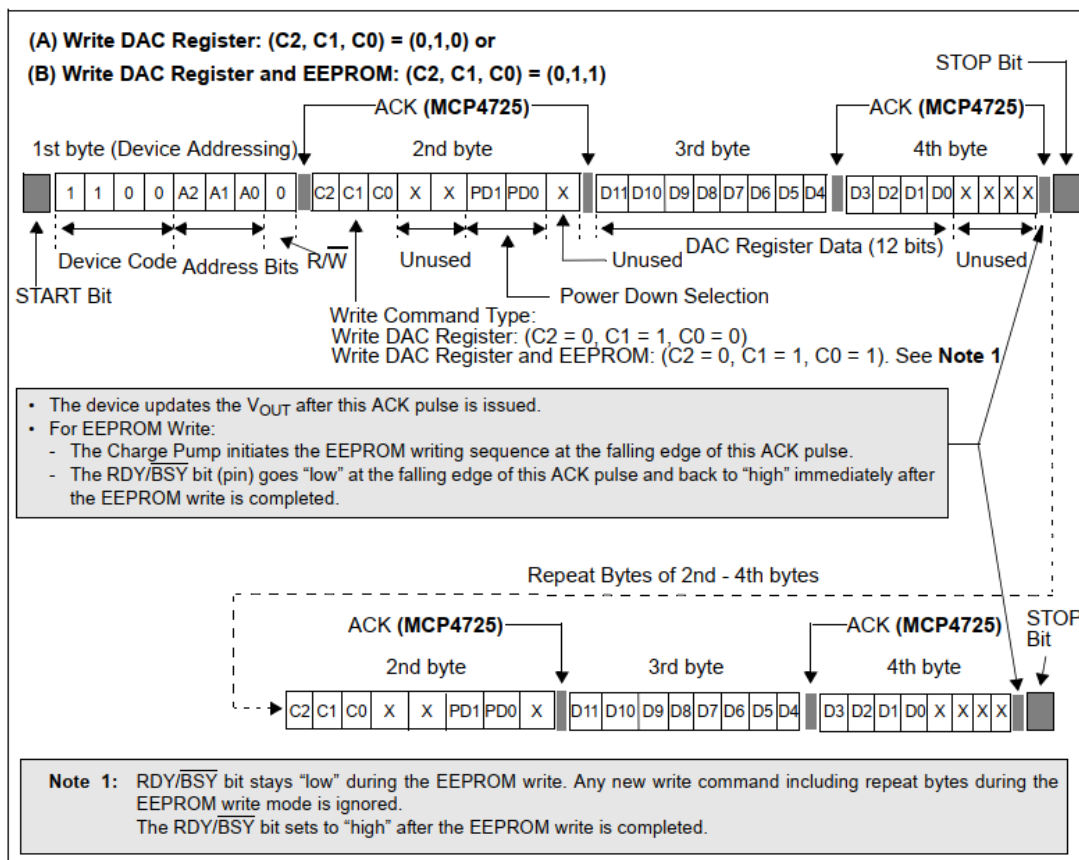


FIGURE 6-1: Fast Mode Write Command.

➤ 使用I2C发送DAC数据

– 2. MCP4725芯片

- 写操作：写DAC寄存器、EEPROM
(C2, C1=0, 1)



Block Diagram

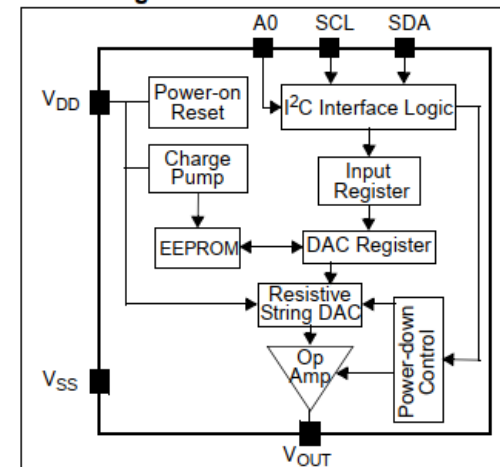


FIGURE 6-2: Write Commands for DAC Input Register and EEPROM.

➤ 使用I2C发送DAC数据

– 2. MCP4725芯片

- 写操作
- ✓ 输入数值和输出电压对应关系如下表
- ✓ 高位先发送

Block Diagram

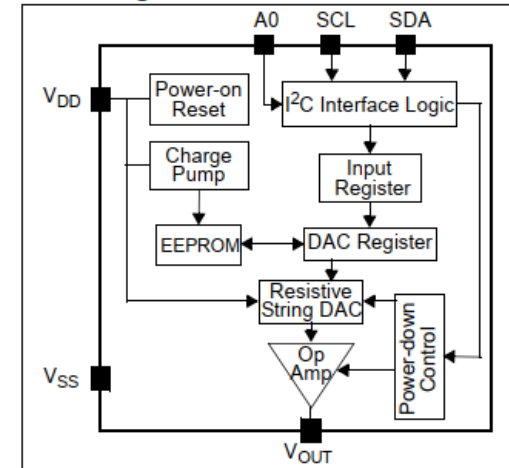


TABLE 6-1: INPUT DATA CODING

| Input Code | Nominal Output Voltage (V) |
|---------------------|----------------------------|
| 111111111111 (FFFh) | $V_{DD} - 1 \text{ LSB}$ |
| 111111111110 (FFEh) | $V_{DD} - 2 \text{ LSB}$ |
| 000000000010 (002h) | 2 LSB |
| 000000000001 (001h) | 1 LSB |
| 000000000000 (000h) | 0 |

➤ 使用I2C发送DAC数据

- 3. 使用STM32F401芯片操作MCP4725芯片
 - 配置PB8为SCL，配置PB9为SDA

The image shows the STM32CubeMX software interface. On the left, the 'Connectivity' tab is selected, and 'I2C1' is highlighted. The main window displays the 'I2C1 Mode and Configuration' settings. The 'Mode' is set to 'I2C'. The 'Configuration' section shows 'Reset Configuration' and 'Parameter Settings' (checked). The 'Master Features' section shows 'I2C Speed Mode' as 'Standard Mode' and 'I2C Clock Speed (Hz)' as '100000'. The 'Slave Features' section shows 'Clock No Stretch Mode' as 'Disabled', 'Primary Address Length' as '7-bit', 'Dual Address Acknowledge' as 'Disabled', 'Primary slave address' as '0', and 'General Call address' as 'Disabled'. On the right, the 'Pinout view' shows the pin configuration for the I2C1 interface. The pins are labeled: VBAT, VSS, PB9 (I2C1_SDA), PB8 (I2C1_SCL), B8, B7, B6, B5, and PB5. The pin list on the right includes: Reset_State, I2C1_SDA, I2S2_WS, SDIO_D5, SPI2_NSS, TIM11_CH1, TIM4_CH4, GPIO_Input, GPIO_Output, GPIO_Analog, EVENTOUT, and GPIO_EXTI19.

➤ 使用I2C发送DAC数据

– 3. 使用STM32F401芯片操作MCP4725芯片

```
void WriteMCP4245(uint32_t val){
```

```
    uint32_t MCP4245Addr;
```

```
    MCP4245Addr=0x62;
```

```
    uint8_t dacData[2];
```

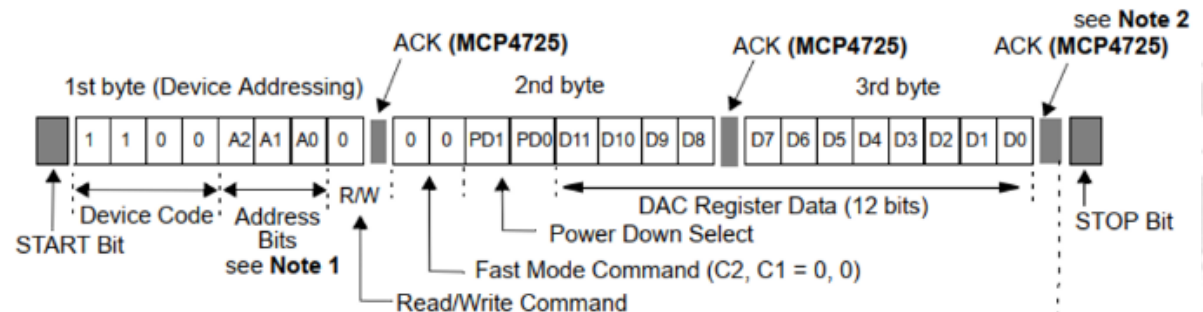
```
    dacData[0]=val>>8;
```

```
    dacData[1]=val&0xff;
```

```
    HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1,MCP4245Addr<<1,dacData,2,100);
```

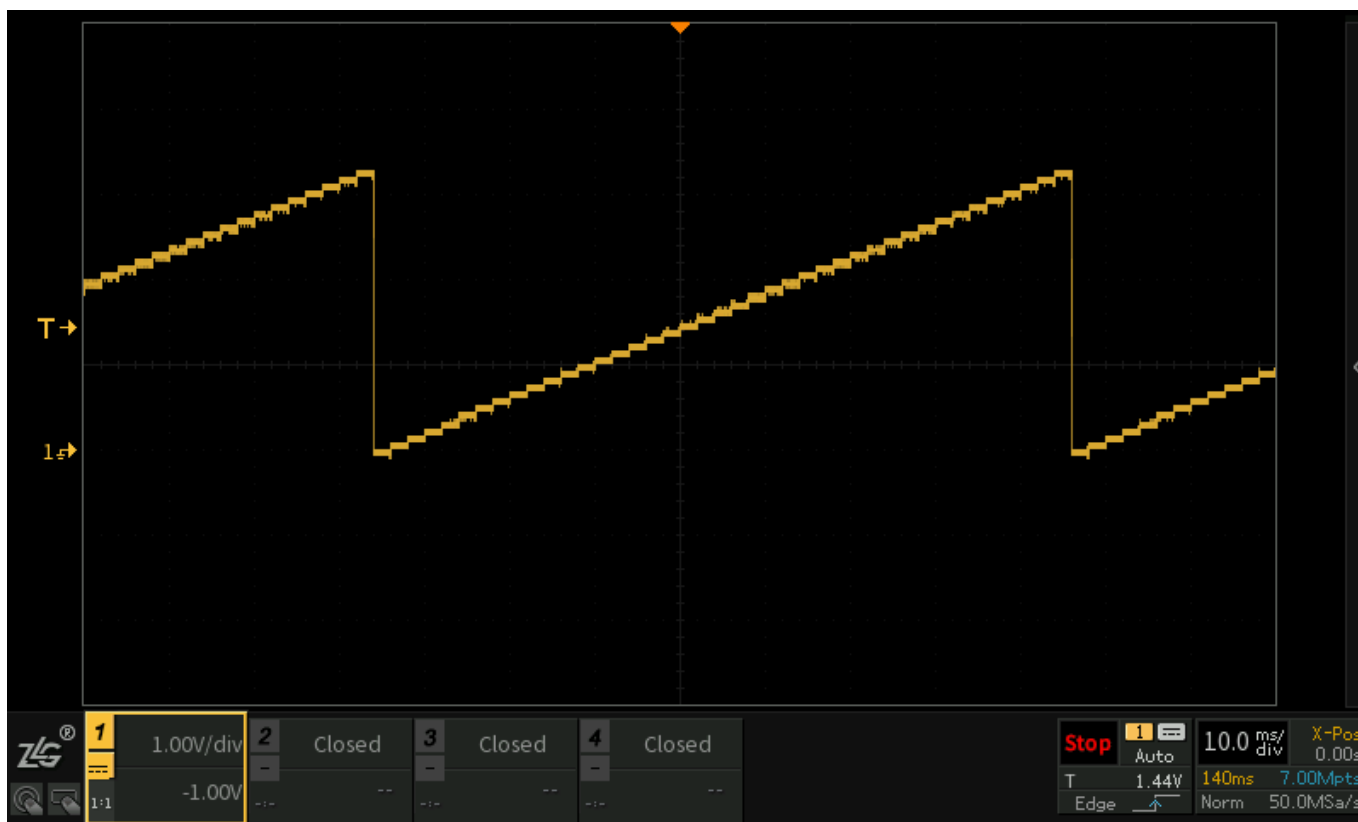
```
}
```

Write DAC Register using Fast Mode Write Command: (C2, C1) = (0, 0)



➤ 使用I2C发送DAC数据

- 3. 使用STM32F401芯片操作MCP4725芯片
 - 向DAC芯片发送一个递增变量（三角波）
 - 用示波器观察DAC输出



➤ 内容概要

- 数字/模拟转换器DAC 的工作原理
- 电路板上的DAC操作
- **模拟/数字转换器ADC的工作原理**



模拟量



模拟/数字转换器
ADC



数字量



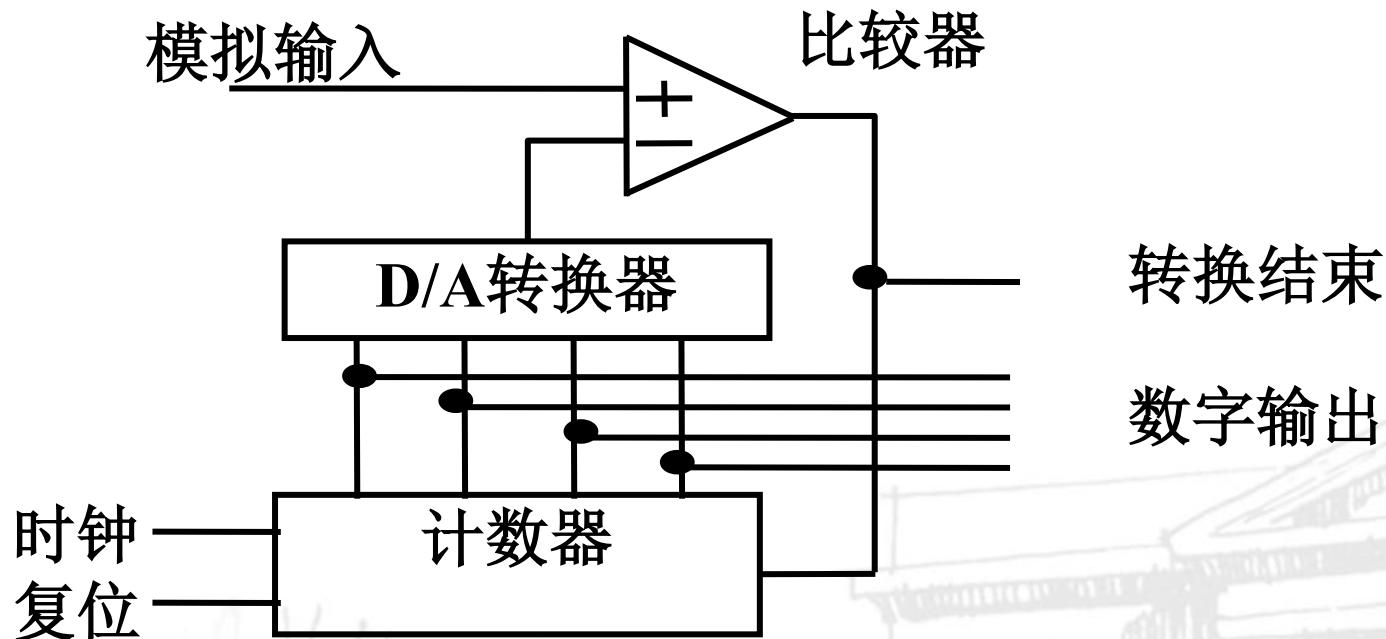
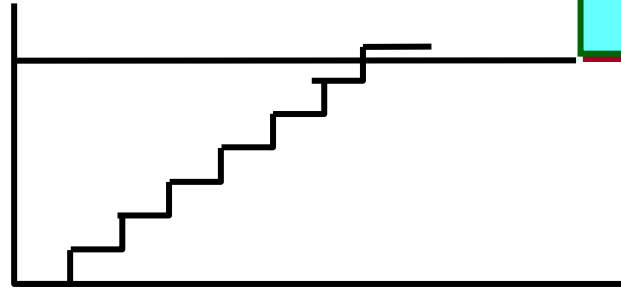
➤ A/D转换技术分类

- 计数器式
- 逐次逼近式
- 双积分式
- 并行式
- Delta-Sigma



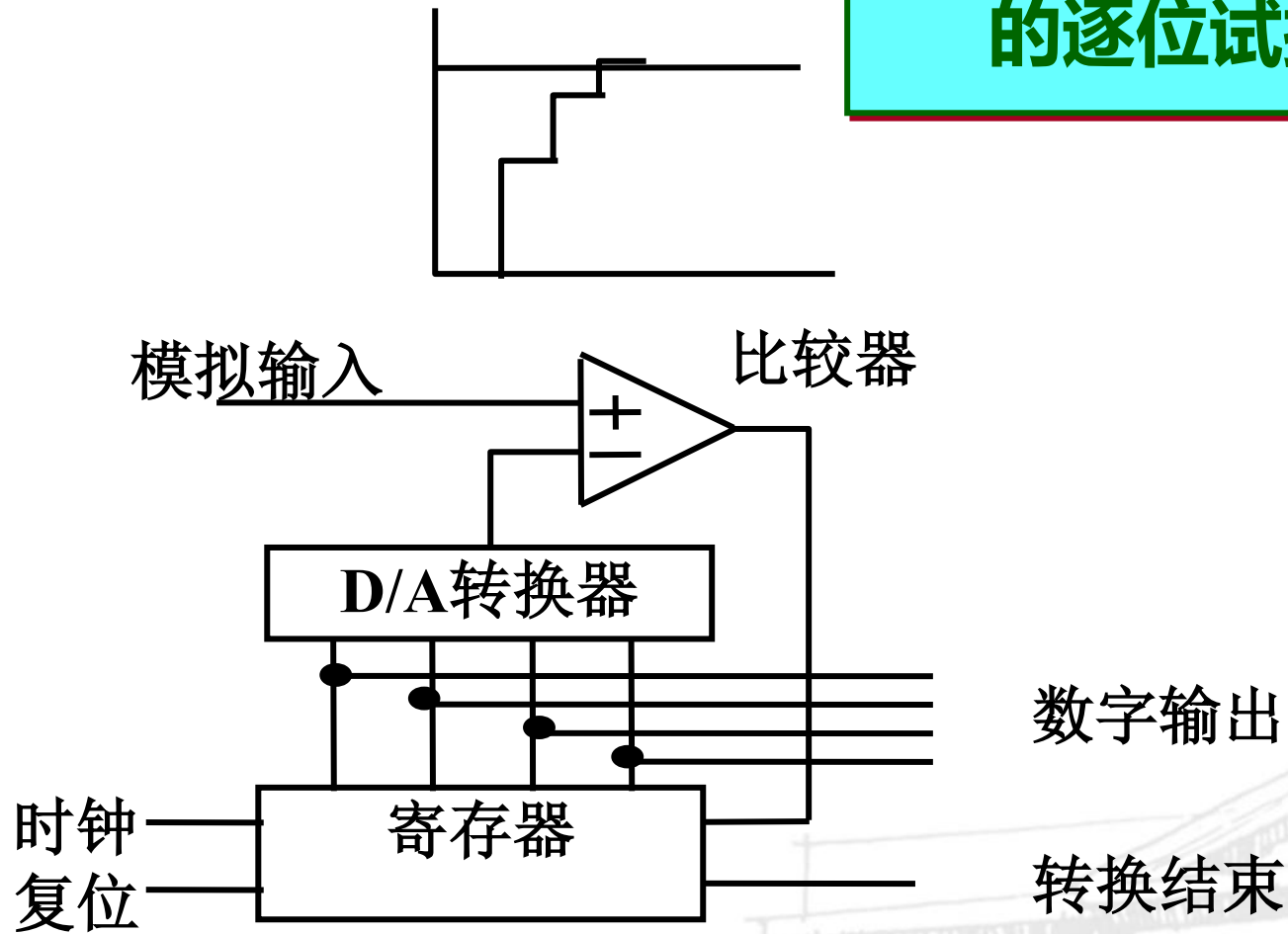
➤ 计数器式A/D转换器

以最低位为增减量
单位的逐步计数法



➤ 逐次逼近式A/D转换器

从最高位开始的
逐位试探法



➤ 逐次逼近式A/D转换器

– 其工作原理可用天平秤重过程作比喻

- 若有四个砝码共重15克
- 每个重量分别为8、4、2、1克
- 设待秤重量 $W_X = 13$ 克

| 顺 序 | 砝 码 重 | 比 较 判 断 | 暂时结果 |
|-----|-----------------|--------------------------------|------|
| 1 | 8 g | $8\text{g} < 13\text{g}$, 保留 | 8 g |
| 2 | 8 g + 4 g | $12\text{g} < 13\text{g}$, 保留 | 12 g |
| 3 | 8 g + 4 g + 2 g | $14\text{g} > 13\text{g}$, 撤去 | 12 g |
| 4 | 8 g + 4 g + 1 g | $13\text{g} = 13\text{g}$, 保留 | 13g |

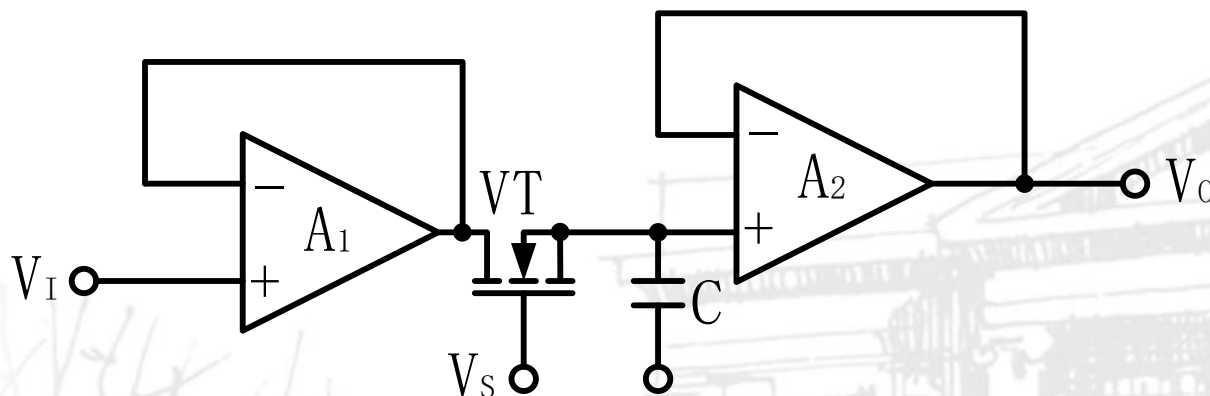
➤ 逐次逼近式A/D转换器

- DAC为4位
- 参考电压 $V_{\text{REF}} = 8\text{V}$
- 输入电压 $U_i = 5.52\text{V}$

| 顺 序 | d_3 | d_2 | d_1 | d_0 | $U_A(\text{V})$ | 比 较 判 断 | “1”留否 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------------------|-------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4V | $U_A < U_I$ | 留 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 6V | $U_A > U_I$ | 去 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 5V | $U_A < U_I$ | 留 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 5.5V | $U_A \approx U_I$ | 留 |

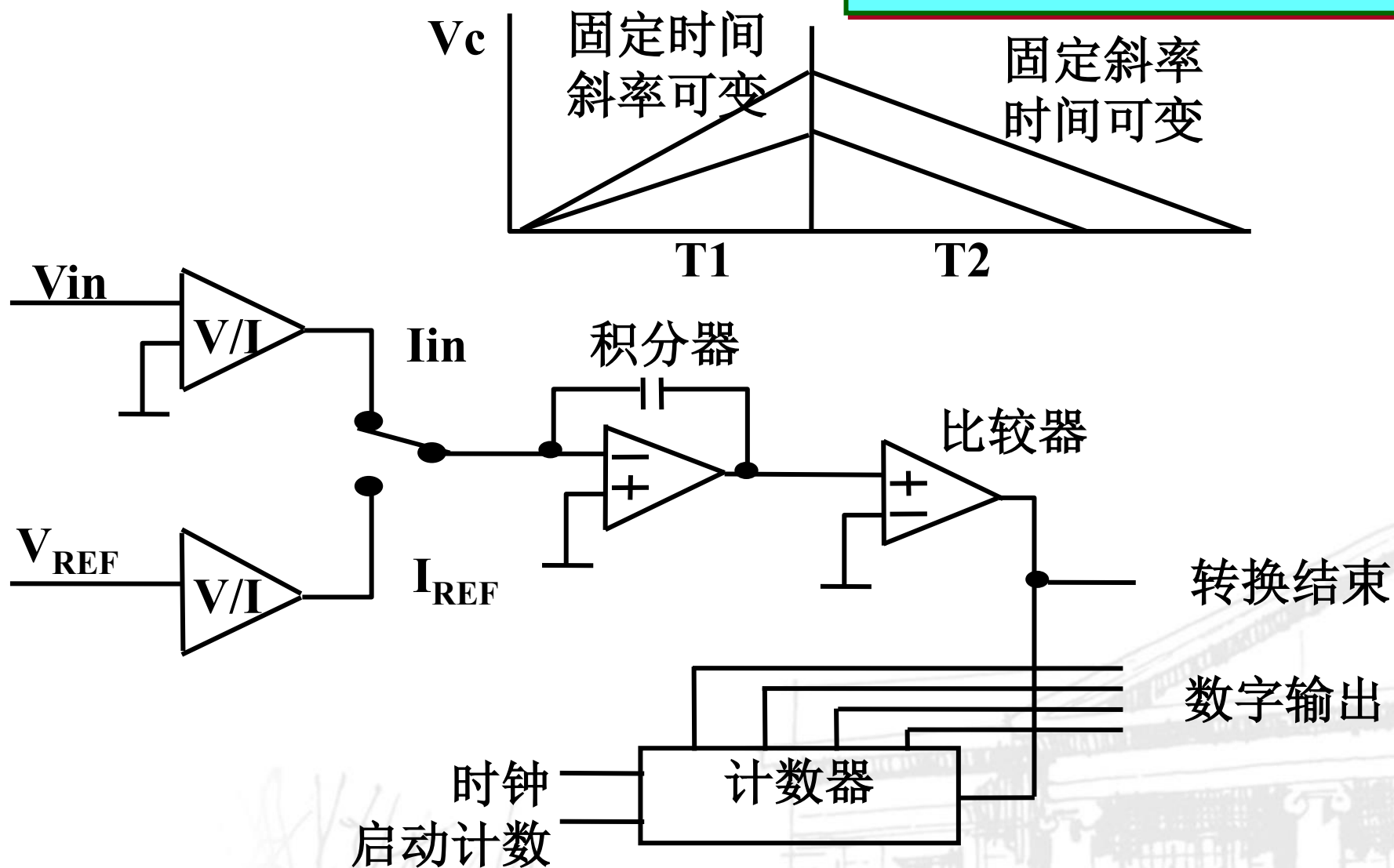
➤ 逐次逼近式A/D转换器——采样和保持

- 逐次逼近式ADC转换过程中，需要多次比较才能得到最终结果。
- 在比较的过程中，输入电压 U_i 需要保持不变
- ADC的模拟-数字转换需经过四个步骤：采样、保持、量化、编码
- 一般前两步由采样-保持电路完成，量化和编码由ADC完成



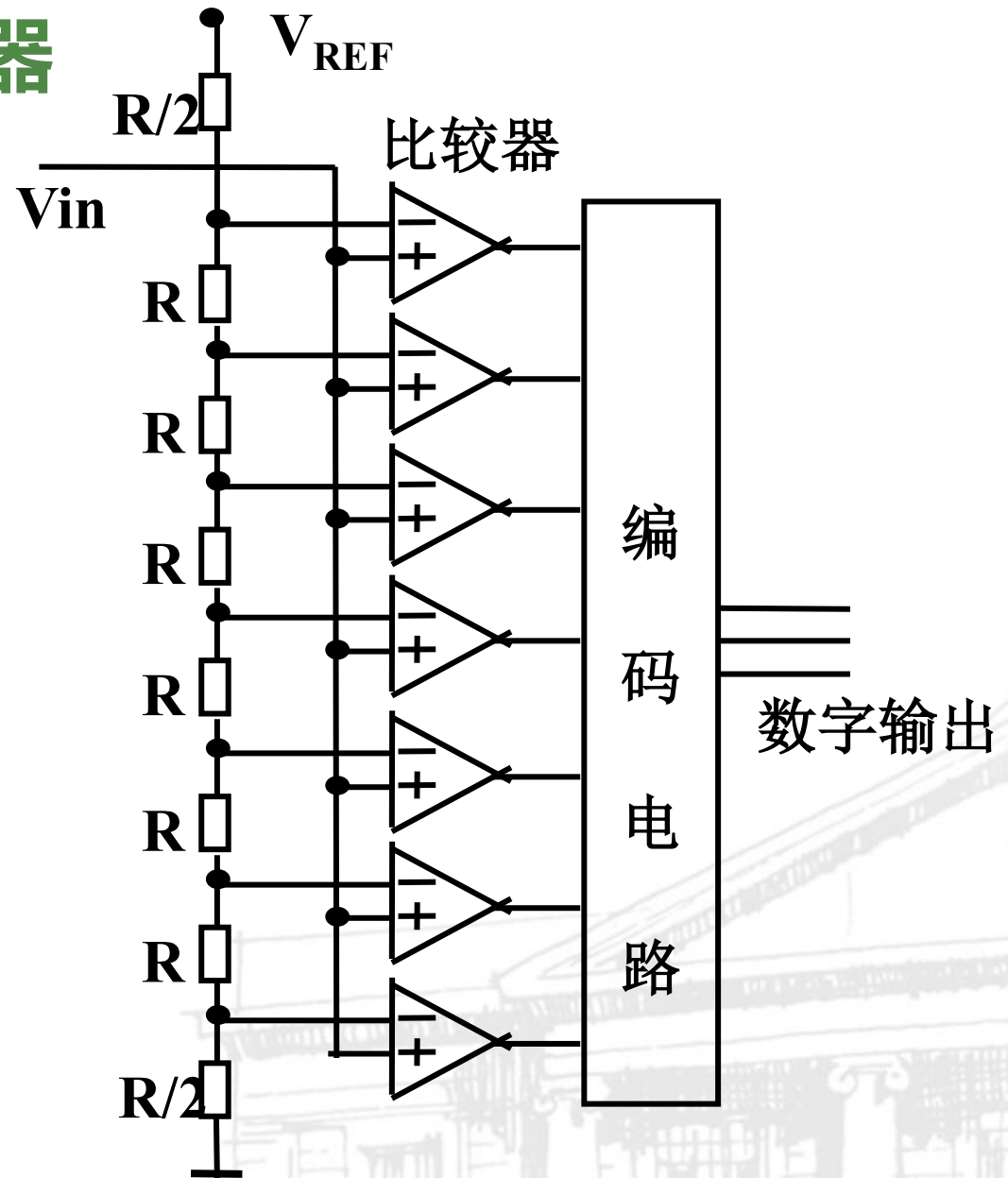
两个积分阶段
实质是电压/时间变换

➤ 双积分式A/D转换器

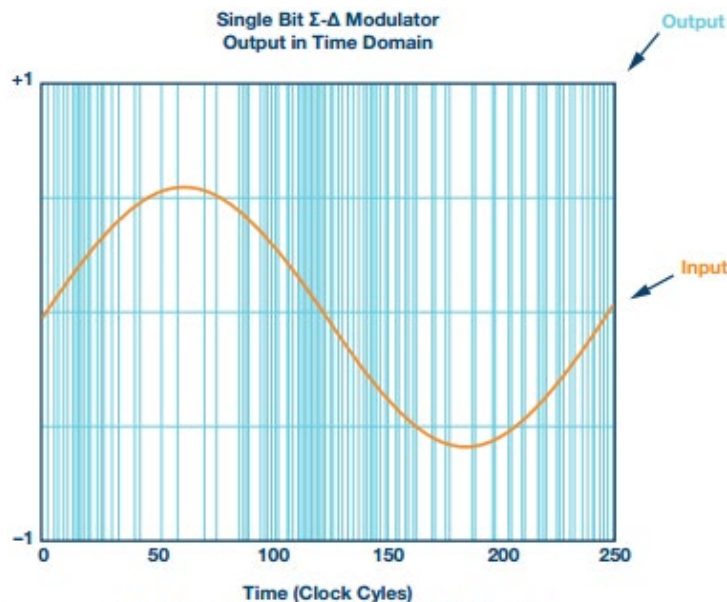
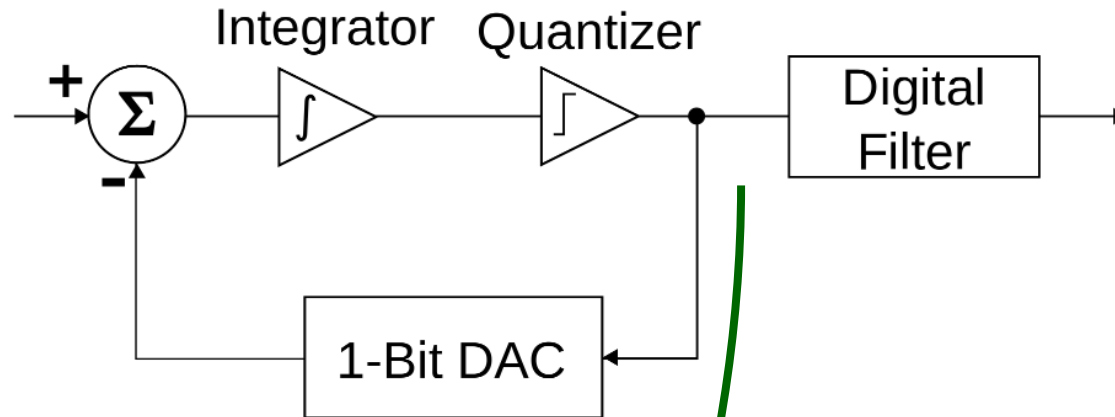


➤ 并行式A/D转换器

速度快
成本高
直接比较法



➤ Delta-Sigma转换器



- 高采样频率（**过采样**）+ **低通滤波器**
- **低分辨率**的ADC完成了**高分辨力**AD变换
- 把高比特清晰度低频率信号用**脉冲密度调制**编码为低比特清晰度高频信号的一种方法

➤ A/D 转换器的主要技术指标

1. 分辨率

以输出二进制数的位数表示分辨率。位数越多，误差越小，转换精度越高。

2. 转换速度

完成一次A/D转换所需要的时间，即从它接到转换控制信号起，到输出端得到稳定的数字量输出所需要的时间。

3. 精度

精度是反映转换器的实际输出接近理想输出的精确程度的物理量。实际转换值和理想特性之间的最大偏差。

4. 量化误差 (Quantizing Error)

由于AD的有限分辨率而引起的误差，即有限分辨率AD的阶梯状转移特性曲线与无限分辨率AD（理想AD）的转移特性曲线（直线）之间的最大偏差。通常是1个或半个最小数字量的模拟变化量，表示为1LSB、1/2LSB。

5. 偏移误差(Offset Error)

输入信号为零时输出信号的值。

6. 满刻度误差(Full Scale Error)

满度输出时对应的输入信号与理想输入信号值之差。

7. 线性度(Linearity)

实际转换器的转移函数与理想直线的最大偏移。



➤ 作业

- 如果12位逐次逼近ADC的参考电压为3.3V，转换的结果为0x101，那么输入电压是多少伏？



谢谢!

