

# 嵌入式系统原理及实验

---

[本页PDF](#)

## 嵌入式系统概论

---

### 嵌入式系统

- 嵌入式系统是一切非PC和大型机的计算机系统
- 嵌入式系统以**高性能、智能化**发展方向为主，且得益于**微电子技术、通信技术、感知测量技术**的发展
- 以**应用**为中心
- 具有**实时性、可靠性、功耗约束**

设计目标：从**高性能**转向**用户需求和资源约束的平衡**

MCU：微控制器单元，也叫做单片机，将内存、计数器等集成在一块芯片上，芯片级计算机

FPGA：现场可编辑门阵列，**半定制电路**，由逻辑功能块、输入输出块、布线资源组成

SoC：片上系统，系统级芯片

**计算的概念**：数值计算、通用信息处理、智能计算

### ARM应用的两种开发方式

- 直接在ARM芯片上进行应用开发
- 在ARM上运行操作系统

## 计算机架构

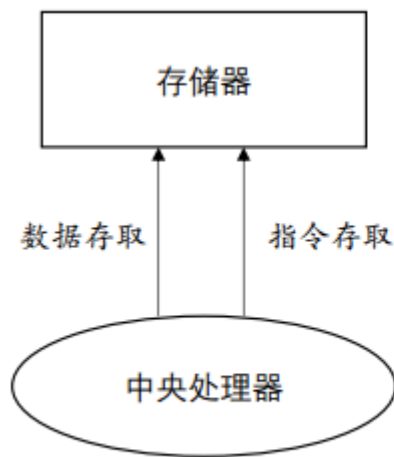
### 冯-诺伊曼架构

完整的计算机系统应该包含这五部分：存储器、运算器、控制器、输入设备、输出设备

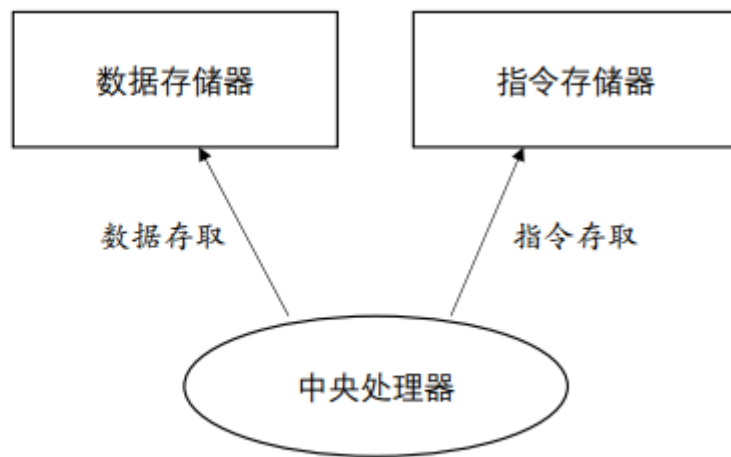
- 且由于**运算器**的数据吞吐能力有限，成为系统的瓶颈
- 后续以**存储器**为中心改进架构
- 内存存储器放置正在运行的代码或数据，外存储器存放断电期的数据

### 哈佛架构

对**指令存储器**和**数据存储器**进行了区分，分别设置**指令总线（I-Code）**和**数据总线（D-Code）**进行存取



冯·诺伊曼架构



哈佛架构

## 指令集体系结构

简称为ISA

- 定义了一台计算机可以执行的所有指令的集合
- 定义处理器上的软件如何构建
- 复杂指令集：CISC，包含x86指令集
- 精简指令集：RISC，

## RISC技术与CISC技术比较

| 指标    | CISC                                  | RISC                                      |
|-------|---------------------------------------|---|
| 价格    | 硬件结构复杂， <b>芯片成本高</b>                  | 硬件结构较简单， <b>芯片成本低</b>                     |
| 流水线   | 减少代码尺寸，增加指令的执行周期数，注重硬件执行指令的功能性        | 使用流水线 <b>降低指令的执行周期数</b> ，增加代码密度           |
| 指令集   | <b>指令长度不固定</b> ，大量的混杂型指令集，有专用指令完成特殊功能 | <b>指令长度固定</b> ，简单的单周期指令，不常用的功能由多个简单指令组合完成 |
| 功耗与体积 | 含有丰富的电路单元，功能强， <b>体积大，功耗大</b>         | 处理器结构简单， <b>体积小，功耗小</b>                   |
| 设计周期  | 长                                     | 短   |
| 应用范围  | 通用桌面机、高性能计算机                          | 嵌入式领域、移动设备                                |

## 计算机体系结构

指的是计算机的逻辑结构与功能特性

## ARM的体系结构

- 主要包括微处理器所支持的**指令集**和基于该体系结构下微处理器的**编程模型**
- 对于开发人员来说，体系结构最重要的部分是指此**微处理器提供的指令系统和寄存器组**

## Cortex-M3微处理器

---

- 由Cortex-M3内核和调试系统构成，哈佛架构，三级流水线
- 32位处理器，Thumb-2指令集

芯片级计算机=内核+外设

**Cortex-M3内核的组成部分：**

- Cortex-M3 core
- NVIC
- 系统时钟
- 存储器保护单元
- 总线矩阵
- 调试系统

## 流水线

主要步骤：**取指、译码、执行**

**吞吐率**(单位为指令/s，IPS)

$$\text{吞吐率} = \frac{\text{指令条数}}{\text{指令流水线所需时间}}$$

流水线执行n条指令所需时间

$$\text{所需时间} = \text{完成一条指令所需时间} + (n - 1) \times \text{时间最长的指令段}$$

**加速比**

完成一批任务不使用流水线时间和使用流水线所用时间之比

## 总线

各个部件之间传送信息的公共通路，包括：

- 数据总线
- 地址总线
- 控制总线

比较有代表性的总线接口：

- APB：高级外设总线，支持**一主多从**
  - APB1：连接低速外设
  - APB2：连接高速外设，频率更高
- AHB：高级高性能总线，低成本，低功耗，结构简单，支持**多主多从**

AHB-Lite协议

- 一主多从
- I-Code指令总线和D-Code数据总线使用的协议

存储器

暂存指令、数据和位址

使用模型：堆栈，由一块连续内存和一栈顶指针组成

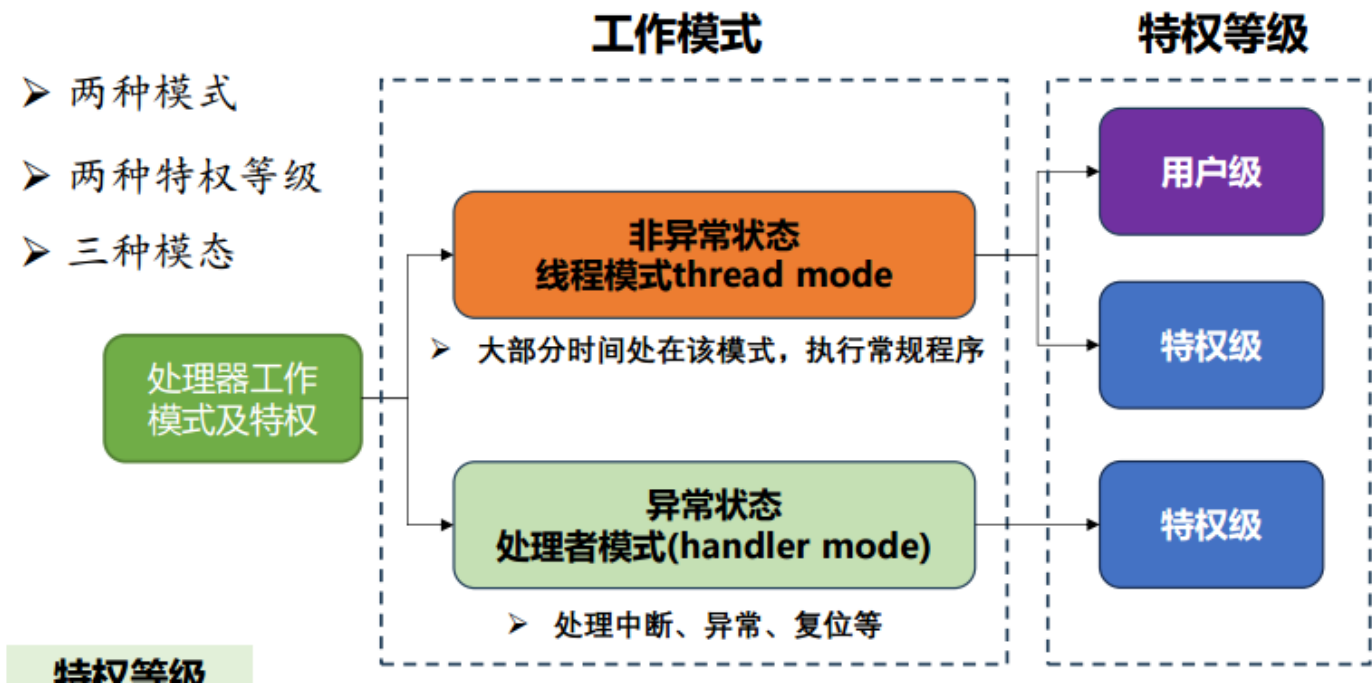
存储结构

Cortex-M3微处理器采用存储器与I/O设备（外设）统一编址

存储器映射：设置部分存储器地址范围用于外设的访问

工作模态

- 两种模式：非异常状态、异常状态
- 两种特权等级：用户级、特权级
- 三种模态



中断

中断响应过程：保存现场、取向量、更新寄存器

中断悬起

中断发生时，正在处理同级或高优先级异常，或者被掩蔽，中断不能立即得到响应

STM32最小系统

最小系统：用最少的元件组成微控制器可以工作的系统

STM32最小系统组成部分：微控制器、电源电路、时钟电路、复位电路、调试和下载电路

- 复位电路：有上电复位和手动复位
- 时钟电路：产生脉冲信号，晶振包括有源晶振（振荡器）和无源晶振（晶体），晶振频率越大，单片机运行速度越快，功耗越大

## STM32开发

开发环境：

- 嵌入式开发环境
- 集成开发环境

STM32微控制器开发模式：

- 寄存器开发方式
- 标准外设库开发方式
- HAL库开发方式

## 嵌入式C语言

`const`：定义全局、只读、必须初始化的变量

`static`：定义静态变量，只在定义该变量的源文件内有效

`volatile`：不让编译器优化，从内存中读写数据，不在寄存器读写数据

`extern`：声明此函数或变量定义在别的文件中

`typedef`：定义别名，编译阶段生效

```
typedef /*变量名*/ /*别名*/
```

`define`：宏定义，编译之前生效

```
#define /*宏名*/ /*替换文本*/
```

条件编译

- `#undef`：撤销定义的宏名
- `#ifdef`：判断某个宏是否未被定义
- `#elif`：类似 `else if`
- `else`：就是 `else` 的作用
- `#endif`：条件编译结束命令

`union` 共用体：允许在相同的内存位置存储不同的数据类型

- 占用的内存应足够存储共用体中内存最大的成员
- 使用运算符 `.` 访问共用体成员

回调函数：系统函数调用用户定义的函数，被系统调用的函数为回调函数

# GPIO

---

通用输入输出，是微控制器（MCU）上的一种通用引脚，实现与外部设备的数字信号交互

STM32F103一共有7组GPIO，每一组的编号都为0-15，每组GPIO端口都由7个寄存器组成，负责控制该端口的16个引脚

GPIO端口由五个主要部分构成：

- 引脚缓冲电路
- 方向控制
- 输出驱动
- 输入控制
- 复用功能切换

## 八种工作模式

### 输出模式

**推挽输出（PP）**：两个MOS管受互补信号的控制，即一个导通另一个则截止。输出高电平P-MOS导通，输出低电平N-MOS导通

- 目的：增大输出电流，增加输出引脚的驱动能力，提高电路的负载能力和开关速度

**开漏输出（OD）**：只有下拉MOS管（N-MOS），漏极直接与I/O引脚相连，不与电源连接，**处于悬空状态**

- 功能：实现逻辑“与”，减少芯片内部驱动，只可**输出低电平**（外接上拉电阻可输出高电平）

**复用（AF）推挽/开漏输出**：一个引脚可以作为多个外设引脚使用，一个引脚某一时刻只能使用复用功能中的一个

### 输入模式

**上拉输入**：引脚内部有上拉电阻，默认输入高电平

**下拉输入**：引脚内部有下拉电阻，默认输入低电平

**浮空输入**：不接上拉、下拉电阻，通过施密特触发器输入I/O引脚的信号

**模拟输入**：施密特触发器关闭，不接上拉、下拉电阻，常用于A/D模拟

## 中断

---

中断的处理流程：**中断请求、中断响应、中断服务、中断返回**

- 中断请求：**会置位中断请求寄存器**，向CPU发起中断

中断向量表：定义在启动文件，是中断服务程序的入口地址，**每个向量（函数地址）占4字节**

Cortex-M3集成了一个外设：**NVIC（嵌套向量中断控制器）**，专门用于处理中断

STM32中的NVIC支持**16位优先级**（只有5种划分方式），因为只用到了Cortex-M3的8位优先级寄存器中的4位来配置中断优先级

中断的使用意义：

- 实时控制
- 故障处理

- 数据传输
- 不占用CPU

## 优先级

数值越小，优先级越高

抢占优先级 > 响应优先级 > 中断向量表顺序

## 外部中断/事件控制器 EXTI

STM32芯片之外的外设的中断由**EXTI**和**NVIC**共同负责

支持中断模式和事件模式：

- 中断模式：软件代码编写，需要CPU
- 事件模式：硬件触发执行，无需CPU

一共有19条外部中断线，其中0-15是对应IO引脚的外部中断

- 对应了每一个GPIO引脚都可以**配置成一个外部中断触发源**
- GPIO中断是以组为单位的，同组GPIO端口只能共用一条中断控制线
- 0-4有独立的中断服务函数，5-9共用一个中断服务函数，10-15公用一个中断服务函数

## 定时器

---

TIM2-7靠APB1控制，TIM1，8靠APB2控制

功能：**定时、计数、输入捕获、输出比较**

分类：

- 基本定时器：TIM6、7，支持16位向上计数
- 通用定时器：TIM2、3、4、5，支持16位向上、向下计数
- 高级定时器：TIM1、8，支持16位向上/向下计数

## 基本定时器

## 通用定时器

预分频器（PSC）

计数器（CNT）

自动装载寄存器（ARR）

## 高级定时器

## SysTick定时器

24位从重载值**向下计数**到0的计数器，是NVIC的一部分，由AHB **8分频**得到

功能：精确延时，任务切换

# USART

---

USART：全双工通用同步/异步串行收发器 UART：全双工通用异步串行收发器

通信按数据传输格式区分：

- 并行通信：多位数据用多条数据线传输
- 串行通信：通过**单条或者两条数据线**传输数据

按同步方式区分：

- 同步通信：发送方和接受方有统一时钟线
- 异步通信：发送方和接受方无统一时钟线

按数据传输方向区分：

- 单工：数据只能单向传输
- 半双工：数据可以双向传输，但不能同时进行
- 全双工：数据可以同时进行双向传输

波特率：每秒传输的二进制位数，单位为bit/s, bps

字符速率：每秒传输的字符数

$$\text{波特率} = \text{字符速率} \times \text{字符位数}$$

## UART模块

点对点通信

由TxD，RxD，GND三条线组成

- TxD：发送
- RxD：接收
- GND：信号地线

通讯协议：可分为**通信传输速率和数据帧格式**

### 异步串行通信协议

异步串行通信数据帧：

- 起始位：
- 数据位：
- 校验位：
- 停止位：
- 空闲位：1表示空闲

检验模式：

- 无检验：
- 偶检验：
- 奇检验：

RS-232是**串行通信物理接口标准**，为**异步串行通信接口**，电气标准为负逻辑，需要进行**电平转换**后和微控制器相连



## USART模块

在UART基础上支持同步

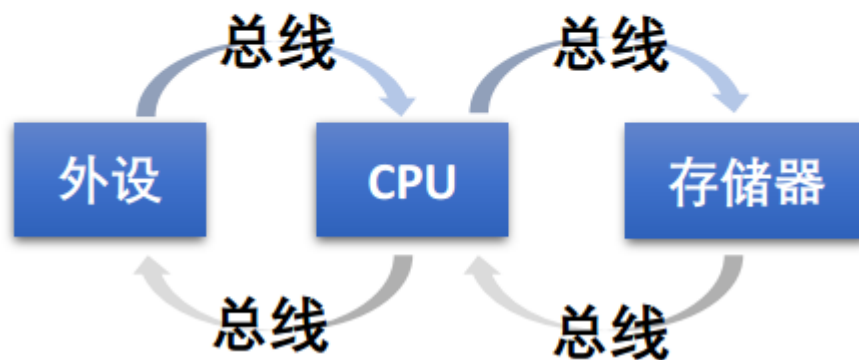
编程模式：

- 轮询
- 中断
- DMA（直接内存访问）

## DMA

嵌入式数据处理过程：

### 嵌入式芯片中的数据处理过程



直接内存访问，允许外部设备和存储器进行直接的数据交换，无需CPU的介入，每次只传输一个字节，一个DMA同一时刻只有1个请求有效

工作流程：**DMA请求、DMA响应、DMA传输、DMA结束**

运行机制：通过专用DMA控制器（DMAC）接管总线控制权，实现外设与存储器、存储器不同区域之间的高速数据搬运

优势：

- 解放CPU
- 提高传输效率
- 降低系统功耗

应用场景：

- 存储设备I/O
- 高速通信通道
- 数据采集系统
- 图像处理
- 多处理机系统

**DMAC的组成部分**

- 地址寄存器
- 状态寄存器
- 控制寄存器
- 字节计数器

STM32F103包含2个DMA控制器：DMA1，DMA2

- DMA1有7个传输通道
  - 包括外设：TIMx (x=1,2,3,4)、ADC1、SPI1、IICx (x=1,2)、USARTx (x=1,2,3)
- DMA2有5个传输通道
  - 包括外设：(TIMx (x=5,6,7,8)、ADC3、SPI/I2S3、USART4、DAC通道1、2和SDIO

DMA控制器提供2个AHB主端口

- AHB存储器端口
- AHB外设端口

DMA关键配置参数：

- 传输方向
- 数据密度
- 地址递增
- 传输模式
- 中断能力

DMA传输模式：

- 单次模式
- 循环模式

DMA使用仲裁器对多个DMA请求进行优先级管理

- 分为4个优先级：最高优先级、高优先级、中等优先级、低优先级
- 如果2个请求有相同的软件优先级，则较低编号的通道比较高编号的通道有较高的优先权

DMA中断事件，分别对应三个中断标志：HTIF、TCIF、TEIF

- HT：传输一半
- TC：传输完成
- TE：传输错误

## SPI

---

串行外围设备接口

- 全双工
- 串行
- 同步
- 主从架构（一主多从）
- 使用单主设备通信协议
- 主设备：提供时钟
- 从设备：接收时钟

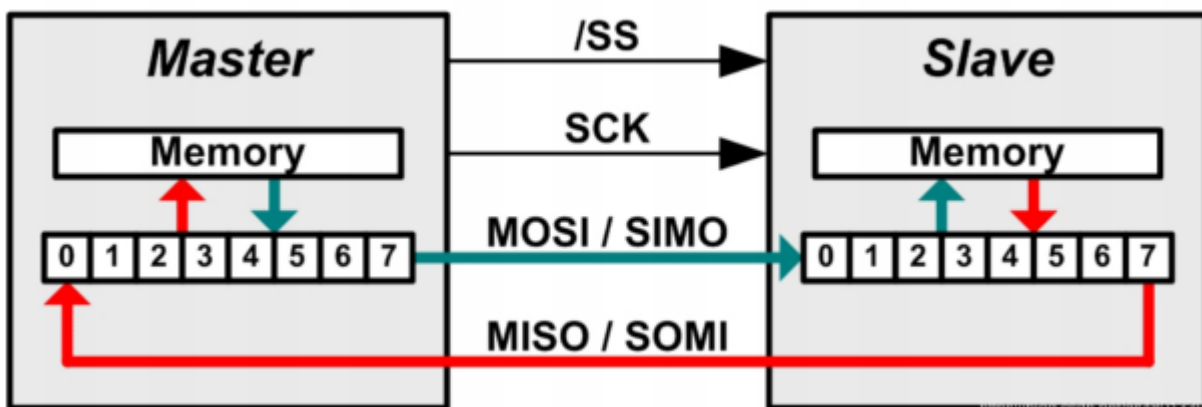
SPI接口使用四条信号线通信：

- MISO：串行输入数据线，主设备输入/从设备输出引脚
- MOSI：串行输出数据线，主设备输出/从设备输入引脚
- CS/SS：设备选择线，从设备片选信号，由主设备控制，有多个从机的话则不止一条，**低电平有效**
- SCLK：串行时钟信号，由主设备产生

## 工作原理

主机和从机都有一个**串行移位寄存器**

- 发送数据的时候，主机移位寄存器的最高位被推到MOSI，从机通过MOSI接收数据并放到自己移位寄存器的最低位
- 接收数据的时候，从机移位寄存器的最高位被推到MISO，主机通过MISO接收数据并放到自己移位寄存器的最低位
- 一个字节发送完后，主机和从机的移位寄存器的内容被交换



## 数据传输的时序模式

主从设备要调整成**相同的时序模式**！！

**CPOL（时钟极性）**：用来配置SCLK的空闲电平状态

- 0为低电平
- 1为高电平

**CPHA（时钟相位）**：定义数据的采集时间

- 0代表在时钟的第一个跳变沿（上升或下降）采样数据，在第二个跳变沿发送数据
- 1代表在时钟的第二个跳变沿（上升或下降）采样数据，在第一个跳变沿发送数据
- 第一个跳变沿是从空闲到非空闲的边沿
- 第二个跳变沿是从非空闲到空闲的边沿

一共有4种标准的SPI模式，由CPOL和CPHA的两个位的0/1组成

## I2C

串行、半双工、同步总线，是一种**多主机总线**，具备**冲突检测和仲裁**，抗干扰能力强

I2C总线由两根双向的信号线组成：

- SDA：用于收发数据
- SCL：用于通信双方时钟同步

每个连接到I2C总线上的器件都有一个唯一的地址（7bit），且每个器件都可以作为主机也可以作为从机（但同一时刻只能有一个主机）

## 具体阐述

通信步骤： 1. 主机发送起始信号启用总线 2. 主机发送一个字节数据指明从机地址和后续字节的传送方向 3. 被寻址的从机发送应答信号回应主机 4. 发送器发送一个字节数据 5. 接收器发送应答信号回应发送器 6. .... （循环步骤4、5） 7. 通信完成后主机发送停止信号释放总线

**起始信号：**SCL为高电平时，SDA由高变低

**停止信号：**SCL为高电平时，SDA由低变高

起始信号和停止信号都是由主机发出，从机只能被动应答

**空闲时，SCL和SDA都是高电平**

传输数据的最小单位是1个字节，主机发送起始信号后要发送1个字节的数据，该数据的高7位表示从机地址，最低位表示后续字节的传送方向

- 0：主机发送数据给从机
- 1：从机发送数据给主机

两种停止情况：

- 主机不想通信，发送停止信号
- 从机不想通信，不进行应答

I2C通信时一个数据帧一共有9位

- 发送时先发高位再发低位，每次发1个字节数据
- 发送方发送完数据后接收方要传回1位应答位回应发送方

**同步数据信号**

- SCL为高电平时，数据线SDA要保持稳定，不允许发生变化，接收方从数据线上读取1位数据
- SCL为低电平时，数据线SDA可以发生变化，此时发送方向数据线发送1位数据

**时钟同步**

是通过I2C总线上SCL的线与功能实现的

- 如果有多个主机同时产生时钟，那么只有所有主机都发送高电平时，SCL上才表现为高电平
- 否则SCL都表现为低电平

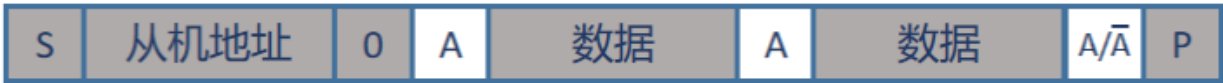
**仲裁**

- 总线仲裁：当所有主机在SDA上都写1时，SDA的数据才是1，否则是0
- 主机每发送1bit数据，**在SCL为高电平时**，就检查SDA的电平和自己发送的数据是否一致，若不一致说明自己输掉了仲裁，然后**停止向SDA写数据**

**典型时序**

# (1) 主机向从机发送数据

阴影：由主机向从机传送数据  
无阴影：从机向主机发送数据。



# (2) 从机向主机发送数据



# (3) 主机先向从机发送数据，从机再向主机发送数据



S: 起始信号

P: 终止信号

A: 应答信号, 表示成功接收数据

$\bar{A}$ : 非应答信号, 表示接收失败或不再接收数据

## ADC

模数转换器，将模拟信号转换为数字信号

主要过程包括：采样、保持、量化、编码

参考电压：进行模拟到数字转换时，ADC所能测量的最大模拟输入电压

### 香农采样定理

采样频率应该不小于模拟信号频谱中最高频率的2倍

常用的四种ADC

- 单端输入
- 差分输入
- 伪差分输入
- 全差分输入

## 主要技术参数

### 分辨率

A/D转换器对输入模拟量微小变化的分辨能力，通常用二进制数的有效位表示

$$\text{分辨率} = \frac{\text{参考电压}}{2^{\text{有效位}}}$$

### 量化误差



有限分辨率而引起的误差，反映A/D转换器实际输出数字量和理想输出之间的差异

通常为1个或半个最小数字量的模拟变化量，表示为1LSB、1/2LSB

### 转换时间

指从转换控制信号到ADC输出端得到稳定的数字量所需要的时间

转换时间=采样保持时间+量化编码时间 = 1 / 转换速率

采样频率应小于等于ADC芯片的最高转换速率

## STM32的ADC

集成有三个12位逐次逼近型的A/D转换器

转换结果是12位二进制数，可以**左对齐/右对齐**存储在16位的数据寄存器中

有18个通道，可以实现16个外部模拟输入通道和2个内部信号源的AD转换

各个通道的AD转换可以采用**单次、连续、扫描、间断**模式执行

### 流程

- 信号输入
- 触发信号
  - 软件触发或EXTI外部触发或定时器触发
  - 硬件触发源分为规则通道和注入通道
- AD转换
- 数据保存

## 总结

:::tabs @tab:active 概论 嵌入式系统是什么 发展方向是什么 得益于什么的发展 以什么为中心 有什么特性

嵌入式系统的设计目标

计算的概念

MCU FPGA SoC的定义

ARM应用的两种开发方式

冯诺依曼架构的组成部分 系统的瓶颈是什么 为什么 后续如何改进的 内外存储器存放什么

哈佛架构对什么进行区分 设置了什么进行存取

ISA是什么 有什么用 有哪两种指令集

计算机体系架构是什么

ARM的体系架构 对于开发人员来说体系架构的重要部分是什么

@tab Cortex-M3微处理器 Cortex-M3微处理器由什么构成 是什么架构 什么流水线 多少位处理器 什么指令集

芯片级计算机由什么组成

Cortex-M3内核的组成部分

流水线的主要步骤

吞吐率怎么算

指令流水线执行时间怎么算

加速比怎么算

总线是什么 包括哪些总线

有代表性的总线接口和他们的特性

APB1和APB2的区别

AHB-Lite协议的特点 什么总线使用了这个协议

存储器的作用 它的模型 它的组成部分

存储结构是什么 存储器映射是什么

有几种模式 分别是什么 几种特权等级 分别是什么 几种模态 分别是什么

中断的响应过程

中断悬起是什么

@tab STM32最小系统

最小系统是什么

STM32最小系统的组成部分 复位有几种类型 晶振包括什么 晶振频率和单片机的关系

STM32有什么开发环境

STM32微控制器有什么开发模式

@tab 嵌入式c语言

const static volatile extern typedef define有什么作用

什么是回调函数

共用体是什么 如何访问共用体成员

@tab GPIO

GPIO的全称是什么

STM32F103有几组GPIO，每一组的编号是多少到多少，每组GPIO端口由几个寄存器组成

GPIO端口由哪五个主要部分构成

GPIO由几种输入输出模式

推挽输出的特性，输出高电平谁导通，输出低电平呢，目的是什么

开漏输出的特性，功能是什么

复用输出的定义

上拉输入默认输入什么电平，下拉输入呢

浮空输入接电阻吗，会通过什么器件

模拟输入常用于什么情况，有通过什么器件吗

@tab 中断 中断的处理过程

中断请求如何执行

中断向量表是什么 每个向量占几个字节

NVIC的名称是什么

STM32中的NVIC支持几位优先级，为什么

中断的使用意义

如何比较优先级

优先级的类型和他们的优先顺序

EXTI的名称是什么

外设的中断由谁共同负责

EXIT支持哪两种模式 具体有什么区别

EXTI有几条外部中断线 IO引脚的外部中断线有几条，编号是多少

GPIO中断是以什么为单位的

EXTI中断服务函数是怎么分配给IO引脚的

@tab 定时器 定时器的基本功能（四个）

基本定时器、通用定时器、高级定时器是TIM几，他们支持几位，如何计数

通用定时器的核心

使用通用定时器计数的周期的公式

通用定时器实现计数功能的三个组件是什么 说出名字和缩写

谁接在APB1 谁接在APB2

通用定时器和高级定时器可以有几路的PWM输出

什么是占空比

在PWM中，谁控制频率，谁控制占空比

CRR的中文名称是什么

SysTick定时器是几位的 向上还是向下计数 功能是什么 怎么得到的

@tab USART USART和UART的定义

可以有哪三种方式划分通信方式，他们分别可以分成什么类，每个类的定义

波特率是什么，单位是什么 字符速率是什么 波特率和字符速率的转换公式

通讯协议由什么组成



异步串行通信数据帧的组成部分

数据检验模式的分类和他们的定义

UART由哪三根线组成，它们定义分别是什么

USART模块的三个组成部分

波特率时钟频率和波特率的转换公式

USART的编程模式有哪三种

RS-232是什么，电气标准是什么，微控制器的标准是什么，它们俩之间是否要进行电平转换

@tab DMA

DMA的名称 DMAC的名称，作用

DMA的工作流程 优势 应用场景 运行机制

DMAC的组成部分

STM32F103包含几个DMA控制器 各自有几个通道

DMAC提供几个AHB主端口 分别是什么

DMA的关键配置参数

DMA的传输模式

DMA使用什么进行优先级管理 有几个优先级 优先级相同时怎么办

DMA有几个中断事件 分别是什么意思 对应什么中断标志

@tab SPI SPI的名称 特性 使用了什么协议

SPI使用几条信号线通信 分别是什么 有什么功能

SPI的工作原理是什么

有几种标准的SPI模式

主从设备的时序模式要相同吗

用什么来配置SCLK的空闲电平状态 具体是什么

用什么来定义数据的采集时间，具体是什么

@tab I2C I2C的特性 具备什么功能 是什么总线

I2C总线由什么组成 有几条信号线 分别是什么 有什么用

同一时刻只能有一个主机吗

从机的地址是几位的

通信步骤是什么

起始信号和停止信号是什么

空闲的时候SCL和SDA是什么电平

传输数据的最小的单位是什么 主机发送起始信号后发送的1个字节的数据的组成部分 最低位具体代表什么意思

有哪两种通信的停止情况

I2C通信时一个数据帧的组成情况

同步数据信号的做法

时钟同步是什么

仲裁是什么

@tab ADC