



嵌 入 式 系 统

姚鑫骅（理论课）

Mobile: 13735815983

E-mail: yaoxinhua@zju.edu.cn

林志伟（实验课）

Mobile: 13588743905

E-mail: zjtzhylin1986@163.com

退出



课程目标

嵌入式系统是学习和掌握嵌入式系统原理和开发技术的入门课程：

- ☞ 理解嵌入式单片机STM32体系结构
- ☞ 掌握STM32嵌入式系统软件开发方法
- ☞ 了解计算机运行基本原理

目的：建立嵌入式系统的整体概念，形成嵌入式系统软硬件应用开发的初步能力。

退出



课程特点：

- 是重要的软、硬件基础课程
- 与C语言、数字电路技术关系密切
- 实践性、应用性强

学习方法：

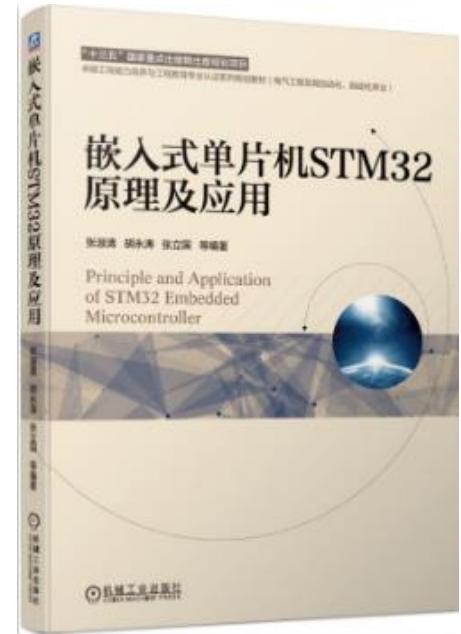
- 预习、复习、上课、作业、答疑
- 多动手（硬件、软件实验）★
- 多看参考书、查找网络上资源

退出



1) 教材

张淑清、胡永涛、张立国，嵌入式单片机STM32原理及应用，机械工程出版社，2020。



2) 参考书

卢有亮，基于STM32的嵌入式系统原理与设计，机械工程出版社，2017

黄克亚，ARM Cortex-M3嵌入式原理及应用：基于STM32F103微控制器，清华大学出版社，2020

3) 成绩评定

期末考试占60%；

平时成绩占40%：实验课成绩（含作业）30%，课堂表现10%。

* 平时免修申请：4.30前提出申请，由课程组老师组织统一答辩，通过后记平时成绩40分。

退出



课程内容

1. 嵌入式系统简介
2. 嵌入式单片机STM32硬件基础
3. 嵌入式单片机STM32软件开发基础
4. STM32通用输入输出GPIO
5. STM32单片机外部中断EXTI
6. STM32通用同步/异步通信USART
7. STM32通用定时器TIM
8. STM32直接存储器存取DMA

退出



第1章 嵌入式系统概述

1.1 什么是嵌入式系统

- 嵌入式系统的定义
- 嵌入式系统与通用计算机系统的比较
- 嵌入式系统的特点

1.2 嵌入式处理器ARM Cortex-M3

- ARM体系结构与特点
- ARM-Cortex处理器

1.3 STM32系列微控制器

[退出](#)



1.1 什么是嵌入式系统

计算机是21世纪最伟大的发明之一。计算机发展有两个方向：

一是，面向高速数据处理和海量数据存储的**通用计算机**系统。如：

386→486→586； P I →P II →P III →P IV； Core i3、 i5、 i7、 i9。

二是，以嵌入式系统的形式隐藏在各种装置、产品和系统中的，完成一定的运算和控制功能的**嵌入式计算机**系统。

如：8位单片机，16位单片机，ARM嵌入式系统等。



嵌入式系统的典型应用

- 在智能消费电子中的应用：智能手机、平板电脑等。
- 在工业控制中的应用：工业过程控制、数控机床、工业机器人、电网设备检测等。
- 交通领域的应用：汽车、信号灯、道闸系统。
- 在医疗设备中的应用：血糖仪、血氧计、人工耳蜗、心电监护仪等。
- 信息家电及家庭智能管理系统：智能冰箱和空调、远程自动抄表、安防监控、点菜器等。
- 在金融与销售中的应用：ATM、自动售货机等。
- 环境工程：水文资源实时监测、防洪体系及水土质量检测、堤坝安全、地震监测网等无人监测。

我们身边的嵌入式系统





嵌入式系统的定义

- 目前嵌入式系统国内普遍认同的定义是：以计算机技术为基础，以应用为中心，软件硬件可剪裁，适合应用系统对功能可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专业计算机系统。

将微型计算机主要功能部件集成于一块芯片内，称为单片微型计算机，简称单片机，在国外通常称为微处理器，英文缩写：MCU。

一般认为，传统的8位单片机是较低级嵌入式系统，而基于ARM的32位单片机是较高级的嵌入式系统。

嵌入式系统的相关概念

- CPU (Central Processing Unit): 中央处理器，是计算机系统的运算和控制核心，是信息处理、程序运行的最终执行单元。CPU由运算器、控制器和寄存器及实现它们之间联系的数据、控制及状态的总线构成。
- MCU (Micro Control Unit): 微控制器，是指随着大规模集成电路的出现及其发展，将计算机的**CPU**、**RAM**、**ROM**、定时计数器和多种**I/O**接口集成在一片芯片上，形成芯片级的芯片。
- SoC (system on chip): 系统级芯片，也称为片上系统，意指它是一个产品，是一个有专有目标的集成电路，其中包含完整系统并嵌入软件的全部内容。
- MMU (Memory Management Unit): 内存管理单元，它是中央处理器（CPU）中用来管理虚拟存储器、物理存储器的控制线路。





嵌入式系统与通用计算机系统的比较

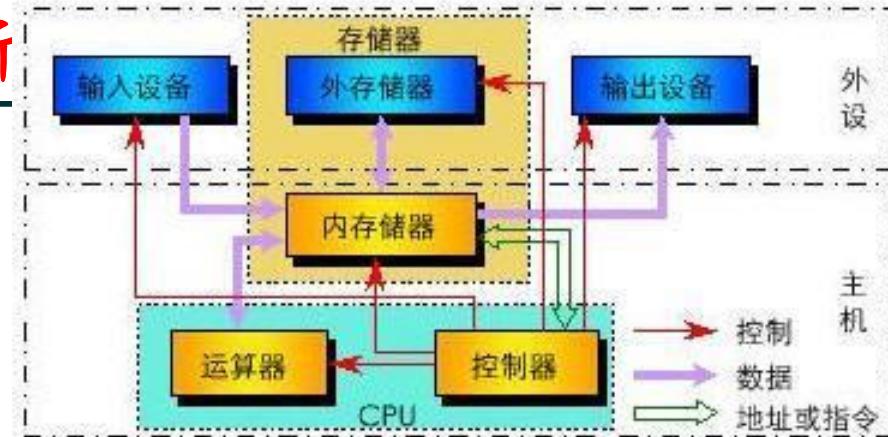
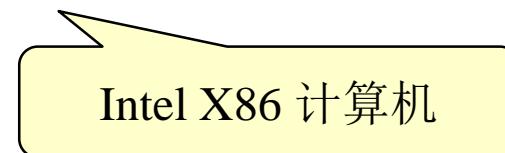
1) 嵌入式系统与通用计算机系统的共同点

嵌入式系统与通用计算机系统都属于计算机系统，从系统组成上讲，都是由硬件和软件构成的；二者有相同的工作原理。

(1) 计算机的体系结构

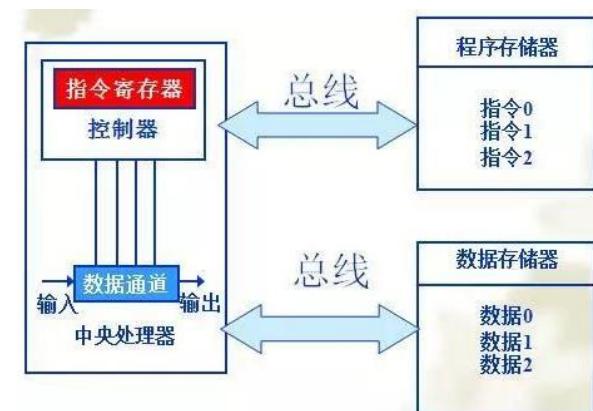
● 冯·诺依曼体系结构

1. 计算机由五大部件组成
2. 指令和数据以同等地位存于存储器，可按地址寻访
3. 指令和数据用二进制表示
4. 指令由操作码和地址码组成
5. 存储程序
6. 以运算器为中心



● 哈佛结构

1. 使用两个独立的存储器模块，分别存储指令和数据
2. 使用独立的两条总线，分别作为CPU与每个存储器之间的专用通信路径





(2) 计算机的基本组成

● CPU的功能与组成

1. 控制器的功能

取指令

指令控制

分析指令

操作控制

执行指令，发出各种操作命令

时间控制

控制程序输入及结果的输出

处理中断

总线管理

处理异常情况和特殊请求

2. 运算器的功能

实现算术运算和逻辑运算



● CPU的功能与组成

指令集

CPU执行计算任务时都需要遵从一定的规范，程序在被执行前都需要先翻译为CPU可以理解的语言。这种规范或语言就是指令集（ISA, Instruction Set Architecture）。

RISC（精简指令集计算机）和CISC（复杂指令集计算机）是当前CPU的两种架构。

	RISC	CISC
指令系统	简单, 精简	复杂, 庞大
指令数目	一般小于100	一般大于200
指令格式	一般小于4	一般大于4
寻址方式	一般小于4	一般大于4
指令字长	等长	不固定
可访存指令	只有LOAD/STORE	不加限制
各种指令使用频率	相差不大	相差很大
各种指令执行时间	绝大多数在一个周期内完成	相差很大
优化编译实现	较容易	很难

特征	CISC			RISC	
	IBM 370/16 8	VAX 11/78 0	Intel 80486	SPARC	MIPS R4000
开发年份	1973	1978	1989	1987	1991
指令数量/条	208	303	235	69	94
指令长度/B	2~6	2~5	1~11	4	4
寻址方式	4	22	11	2	2
通用寄存器数/个	16	16	8	40~520	32
控制存储器大小/Kb	420	480	246	—	—
Cache大小/KB	64	64	8	32	128



● CPU的功能与组成

指令执行流程

① 取指

取指令（Instruction Fetch, IF）阶段是将一条指令从主存中取到指令寄存器的过程。

② 译码

在指令译码（Instruction Decode, ID）阶段，指令译码器按照预定的指令格式，对取回的指令进行拆分和解释，识别区分出不同的指令类别以及各种获取操作数的方法。

③ 访存

根据指令地址码，得到操作数在主存中的地址，并从主存中读取该操作数用于运算。

④ 执行

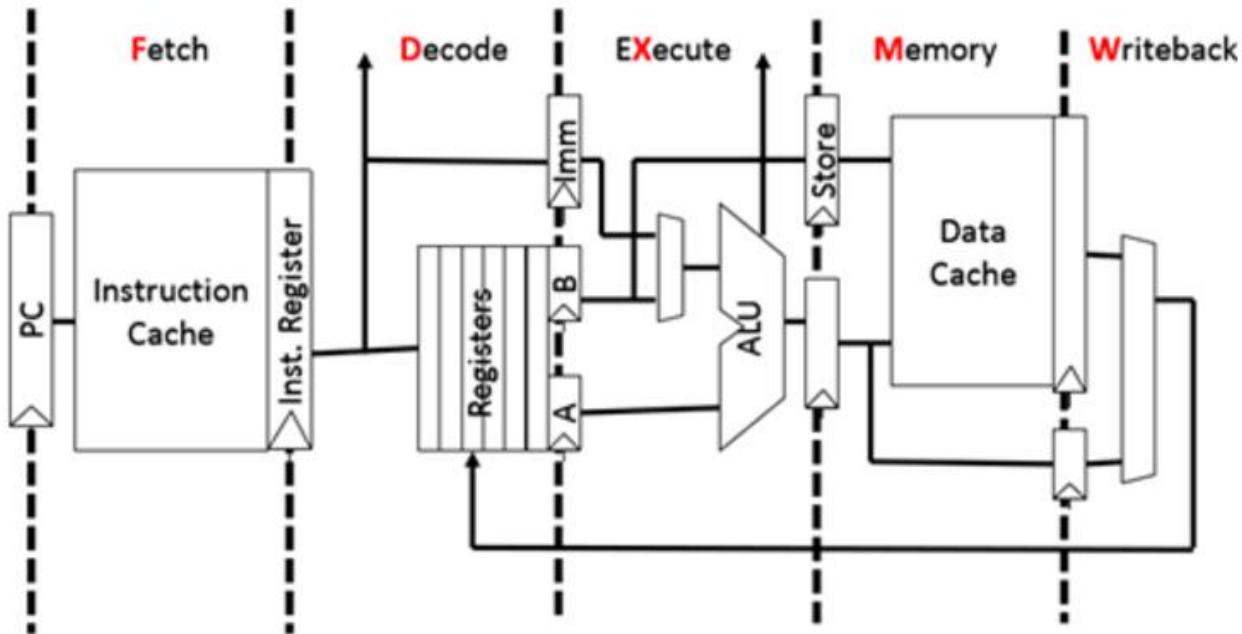
此阶段的任务是完成指令所规定的各种操作，具体实现指令的功能。

⑤ 写回

结果写回（Write back, WB）阶段把执行指令阶段的运行结果数据“写回”到某种存储形式：结果数据经常被写到CPU的内部寄存器中，以便被后续的指令快速地存取；在有些情况下，结果数据也可被写入相对较慢、但较廉价且容量较大的主存。

● CPU的功能与组成

指令执行流程



● CPU的功能与组成

指令流水线

流水线(Pipeline)技术是指程序在执行时候多条指令重叠进行操作的一种准并行处理实现技术。





● 存储系统

按存储介质分类

- 半导体存储器
 - 双极型存储器 **MOS**存储器
 - 速度快、功耗低
- 磁存储器
 - 磁芯、磁带、磁盘
 - 容量大，速度慢、体积大
- 激光存储器
 - **CD-ROM CD-RW CD-R**
 - **DVD-ROM DVD-RW DVD-R**
 - 便于携带，廉价，易于保存



- 存储系统

按读/写功能分类

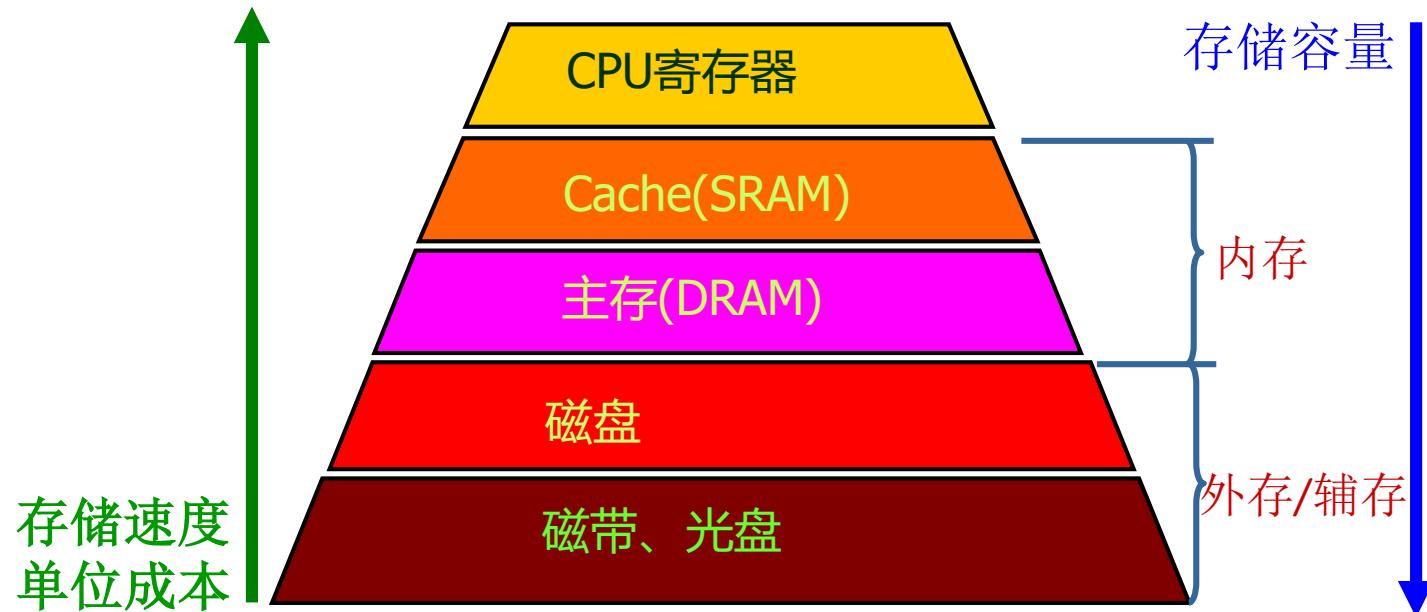
- 只读存储器 (**Read-Only Memory, ROM**)
 - 存储器内容是预置的，固定的，无法改写
- 读/写存储器
 - 既能读出也能写入的存储器
 - 随机存储器 (**random access memory, RAM**)

按信息的可保存性分类

- 易失性存储器
 - 断电后信息消失
 - SRAM (**Static Random-Access**) 、 DRAM (**Dynamic Random-Access**)
- 非易失性存储器
 - 断电后仍能保存信息
 - 磁存储器、激光存储器



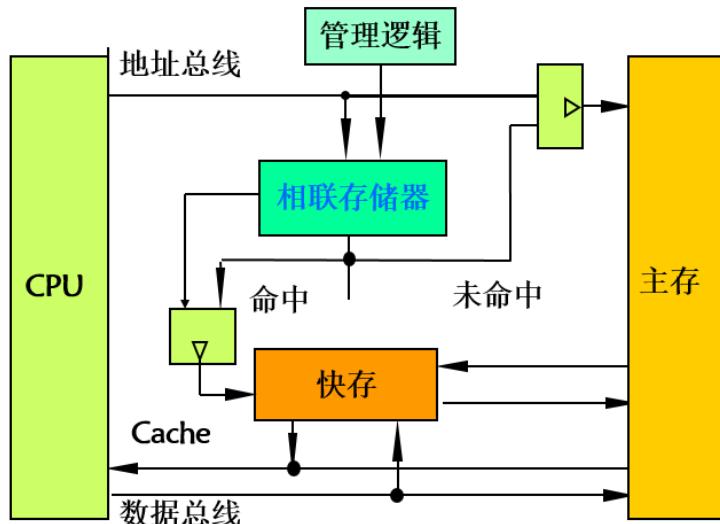
● 存储系统



型号	步进	核心线程	主频	加速频率	二级缓存	三级缓存	TDP	插槽	DMI总线	内存支持
core i7-3 820	C1	四核心八线程	3.6GHz	3.8GHz	4×256KB	10MB	130W	LGA20 11	2.5GT/s	DDR3-1600 四通道
Core i7-3 930K	C1	六核心十二线程	3.2GHz	3.8GHz	6×256KB	12MB	130W	LGA 20 11	2.5GT/s	DDR3-1600 四通道
Core i7-3 960X	C1	六核心十二线程	3.3GHz	3.9GHz	6×256KB	15MB	130W	LGA20 11	2.5GT/s	DDR3-1600 四通道

● 存储系统

cache 系统读过程



- CPU给出内存地址
- 利用该地址为关键字查找相联存储器
- 如命中表明数据在cache中，访问cache读出数据
- 否则表示数据缺失直接访问主存
- 同时将数据调入cache
- 更新相联存储器，记录当前数据块地址，便于下次访问



- 总线

总线(BUS) 基本概念

总线是系统部件间传送信息的公共通路。

- 内部总线（CPU内各功能单元间的连线）
- 系统总线（系统内各部件间的连线）
- I/O总线（I/O设备间的连接总线）



● 总线

总线特性

- 物理特性：尺寸、根数，插头、座的形状、引线的排列方式
- 功能特性：地址、数据、控制总线三类
- 电气特性：单/双向，电平高有效/低有效及范围
- 时间特性：信号的时序关系



● 总线 总线标准

总线标准	数据线	总线时钟	带宽
ISA	16	8 MHz (独立)	33 MBps
EISA	32	8 MHz (独立)	33 MBps
VESA (VL-BUS)	32	32 MHz (CPU)	133 MBps
PCI	32 64	33 MHz (独立) 64 MHz (独立)	132 MBps 528 MBps
AGP	32	66.7 MHz (独立) 133 MHz (独立)	266 MBps 533 MBps
RS-232	串行通信 总线标准	数据终端设备（计算机）和数据通信设备（调制解调器）之间的标准接口	
USB	串行接口 总线标准	普通无屏蔽双绞线 带屏蔽双绞线 最高	1.5 Mbps (USB1.0) 12 Mbps (USB1.0) 480 Mbps (USB2.0)



● 总线

总线带宽

□ 总线带宽：总线本身所能达到的最高传输速率。单位：Byte/s

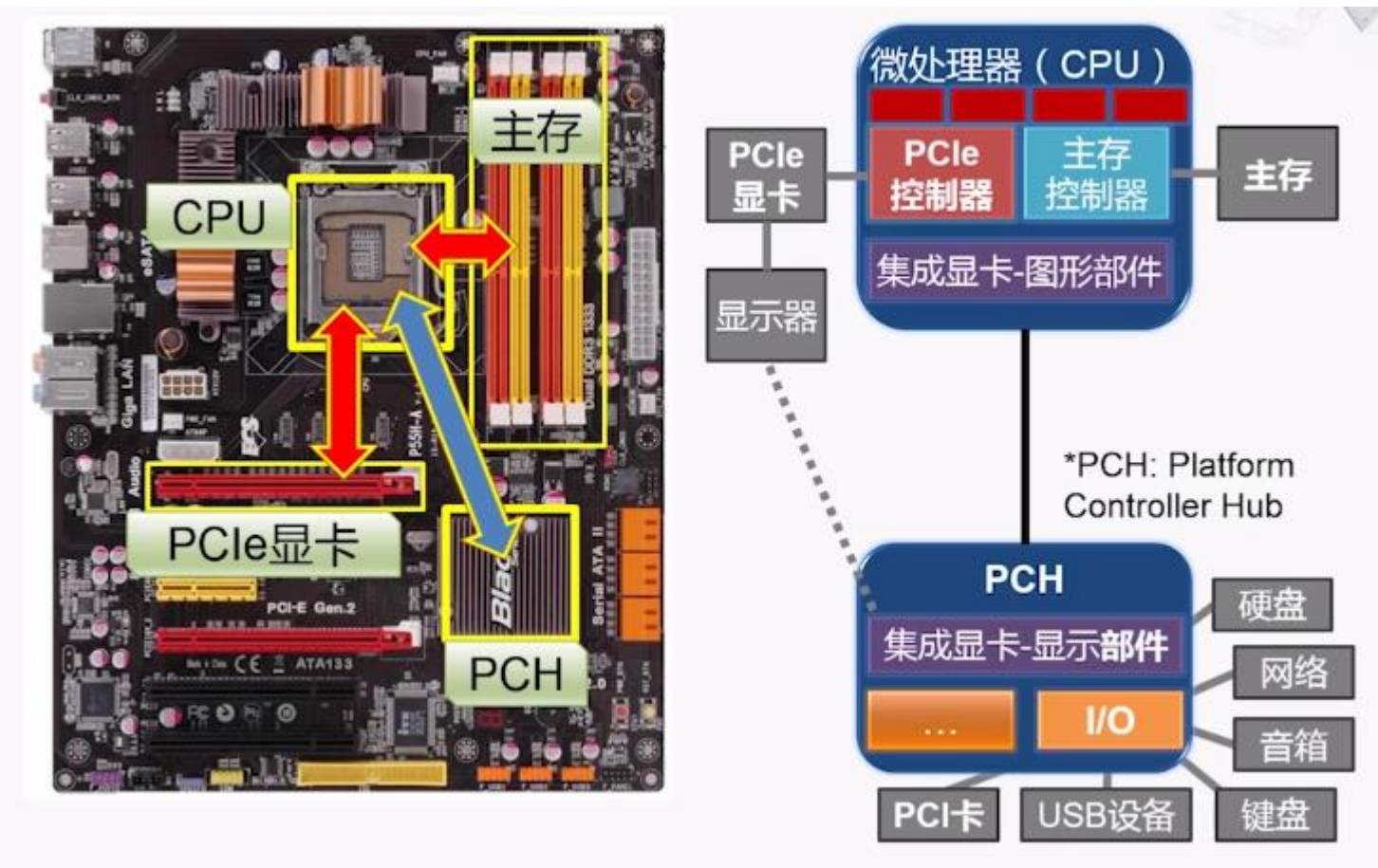
- 设总线在同一个时钟周期内能并行传送 D 个字节
- 总线带宽为 D_r , 总线时钟周期为 T, 总线频率 $f=1/T$
- 总线带宽 $D_r=D/T=D*f$

□ 几个实例

- ISA 16bit 8.3MHz $Dr=2*8=16MB/s$
- EISA 32bit 16MHz $Dr=4*16=64MB/s$
- PCI 32/64bit 33MHz $Dr=133/266MB/s$
- AGP 64bit 66MHz $Dr=8*66=528MB/s$
- PCI-X 64Bit 133MHz $Dr=8*133=1GB/s$

● 总线

总线的物理实现





嵌入式系统与通用计算机系统的比较

2) 嵌入式系统与通用计算机系统的不同点

- 形态：“嵌入”于不同设备 Vs 基本相同的标准形态独立存在
- 性能：“嵌入”的不同设备 Vs 通用指标(计算能力、存储能力)
- 功能：专用单一 Vs 通用复杂
- 功耗： $mW \sim W$ Vs $10^2 W$
- 资源：够用就行 Vs 大而全



嵌入式系统的特点

1. 专用性强

嵌入在微波炉中的系统只能完成微波炉的控制功能，而不能在洗衣机中使用。

2. 可裁剪性

软硬件均可剪裁，STM32F1系列，CPU主频72M，操作系统最小8KB。

3. 实时性好

例如用户将银行卡插入ATM机插卡口，ATM机控制系统必须立即启动读卡程序。

4. 可靠性高

很多嵌入式系统必须全天候持续工作，甚至在极端环境下正常运行，大多数嵌入式系统都具有可靠性机制。如看门狗、内存保护和重启机制等。

5. 生命周期长

与具体嵌入的产品同步：导入期→成长期→成熟期→衰退期。

6. 不易被垄断

通用计算机，硬件：Intel，软件：Microsoft；嵌入式系统，百花齐艳，百家齐鸣！



思 考

C 语言代码是如何在计算机上运行的？

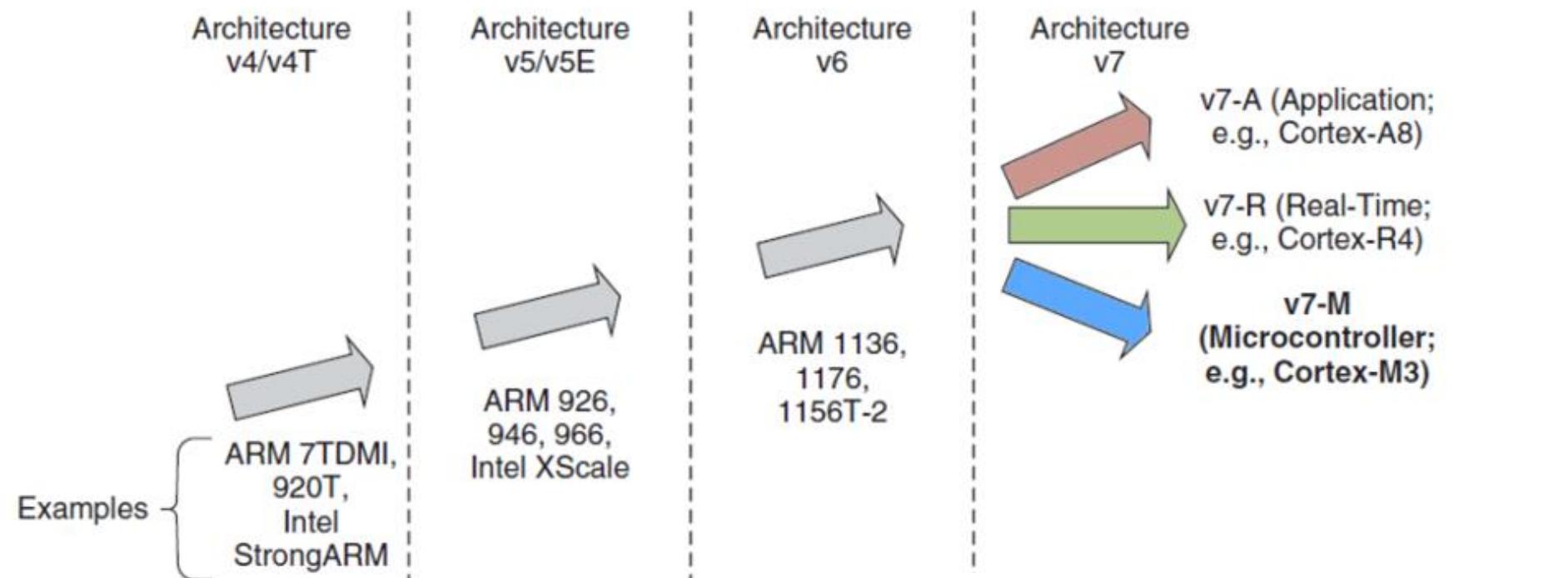


1.2 嵌入式处理器 ARM Cortex-M3

ARM 简介

- ▶ ARM (Advanced RISC Machine) , 既可指英国的芯片设计公司ARM公司，通常我们所说的ARM芯片是对一类处理器芯片的统称。
- ▶ ARM芯片本质上是一个精简指令集（RISC）处理器架构，其广泛地使用在许多嵌入式处理器设计中。其主要特点就是低成本、高性能、低功耗，目前已被大多数芯片厂家采用。
- ▶ ARM公司仅为各大芯片厂商提供IP核，而非完整的芯片。
- ▶ 当今，全球 95% 以上的手机以及超过四分之一的电子设备都在使用ARM 技术。

ARM 处理器进化史



- Cortex-A—面向性能密集型系统的应用处理器内核
- Cortex-R—面向实时应用的高性能内核
- Cortex-M—面向各类嵌入式应用的微控制器内核

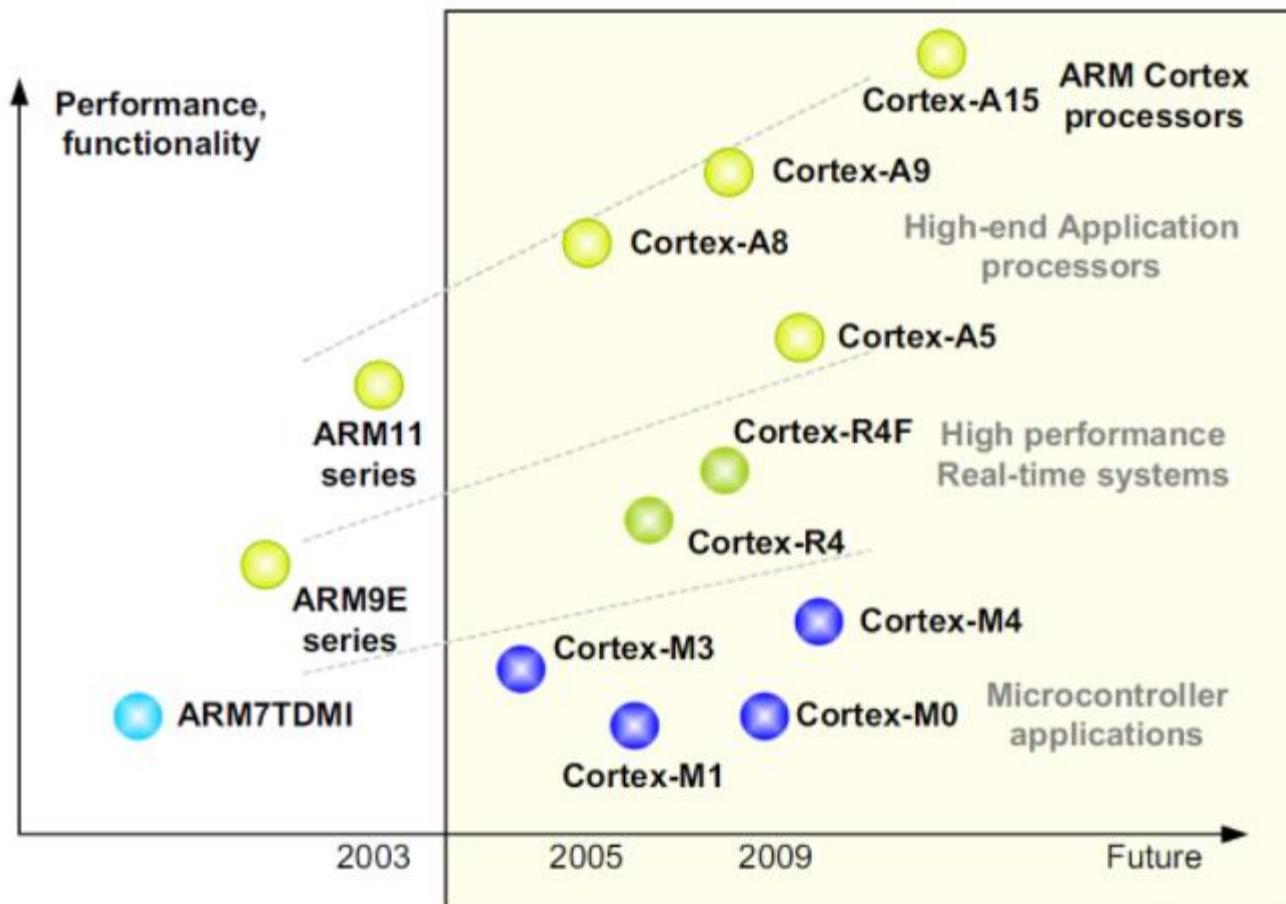


Figure 1.3:

Diversity of processor architecture to three areas in the Cortex processor family.

<https://blog.csdn.net/gardenyou/>



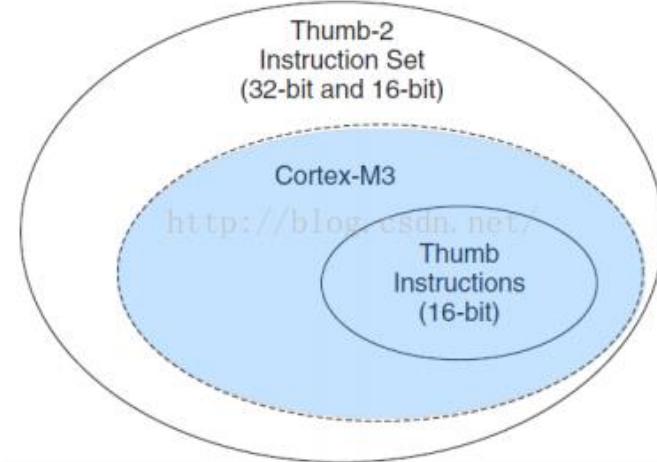
Cortex-M3 技术特性

特性	ARM7TDMI-S	Cortex-M3
架构	ARMv4T (冯 · 诺依曼)	ARMv7-M (哈佛)
ISA 支持	Thumb / ARM	Thumb / Thumb - 2
流水线	3 级	3 级 + 分支预测
中断	FIQ / IRQ	NMI + 1 到 240 个物理中断
中断延迟	24-42 个时钟周期	12 个时钟周期
休眠模式	无	集成
内存保护	无	8 区域内存保护单元
Dhrystone	0.95 DMIPS/MHz (ARM 模式)	1.25 DMIPS/MHz
功耗	0.28mW/MHz	0.19mW/MHz
面积	0.62mm ² (仅内核)	0.86mm ² (内核 + 外设) *



ARM 处理器指令集

ARM指令集为32位指令集，可以实现ARM架构下所有功能。而为了解决代码长度的问题，ARM体系结构又增加了T变种，开发了一种新的指令体系，这就是Thumb指令集。



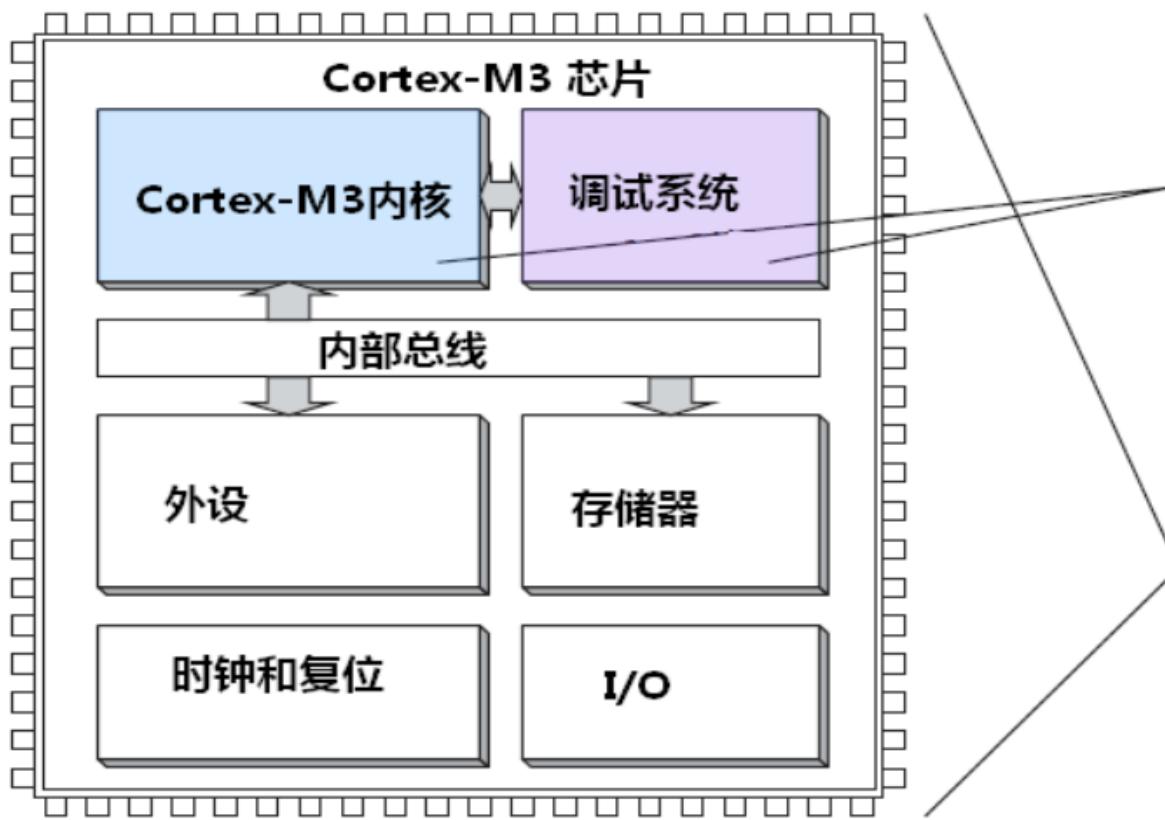
Thumb指令集是从标准32位ARM指令集抽出来部分指令格式，重新编成16位的操作码。这能带来很高的代码密度。支持Thumb的ARM体系结构的处理器状态可以方便的切换、运行到Thumb状态，在该状态下指令集是16位的Thumb指令集。

Thumb-2指令集是对ARM架构的重要扩展，在Thumb指令的基础上做了如下的扩充：增加了一些新的16位Thumb指令来改进程序的执行流程，增加了一些新的32位Thumb指令以实现一些ARM指令的专有功能。增加的32位指令解决了之前Thumb指令集不能访问协处理器、特权指令和特殊功能指令的局限。新的Thumb指令集现在可以实现所有的功能，这样就不需要在ARM/Thumb状态之间反复切换了，代码密度和性能得到的显著的提高。



1.3 STM32系列微控制器

从Cortex-M3内核到基于Cortex-M3的MCU

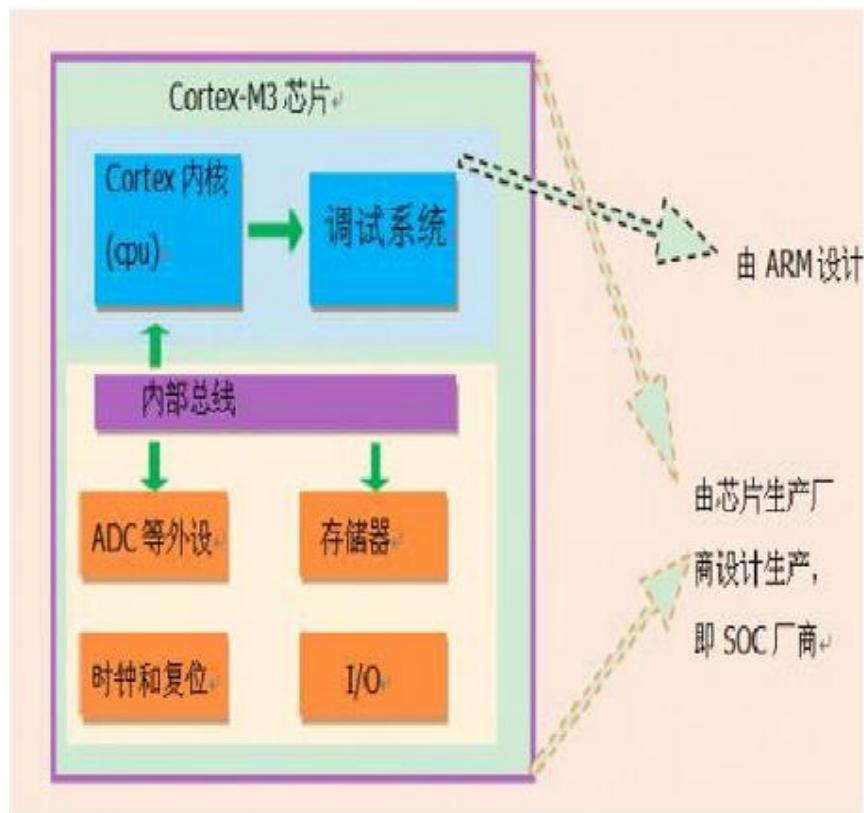


由ARM设计

由芯片制造商
设计开发



ARM与STM32

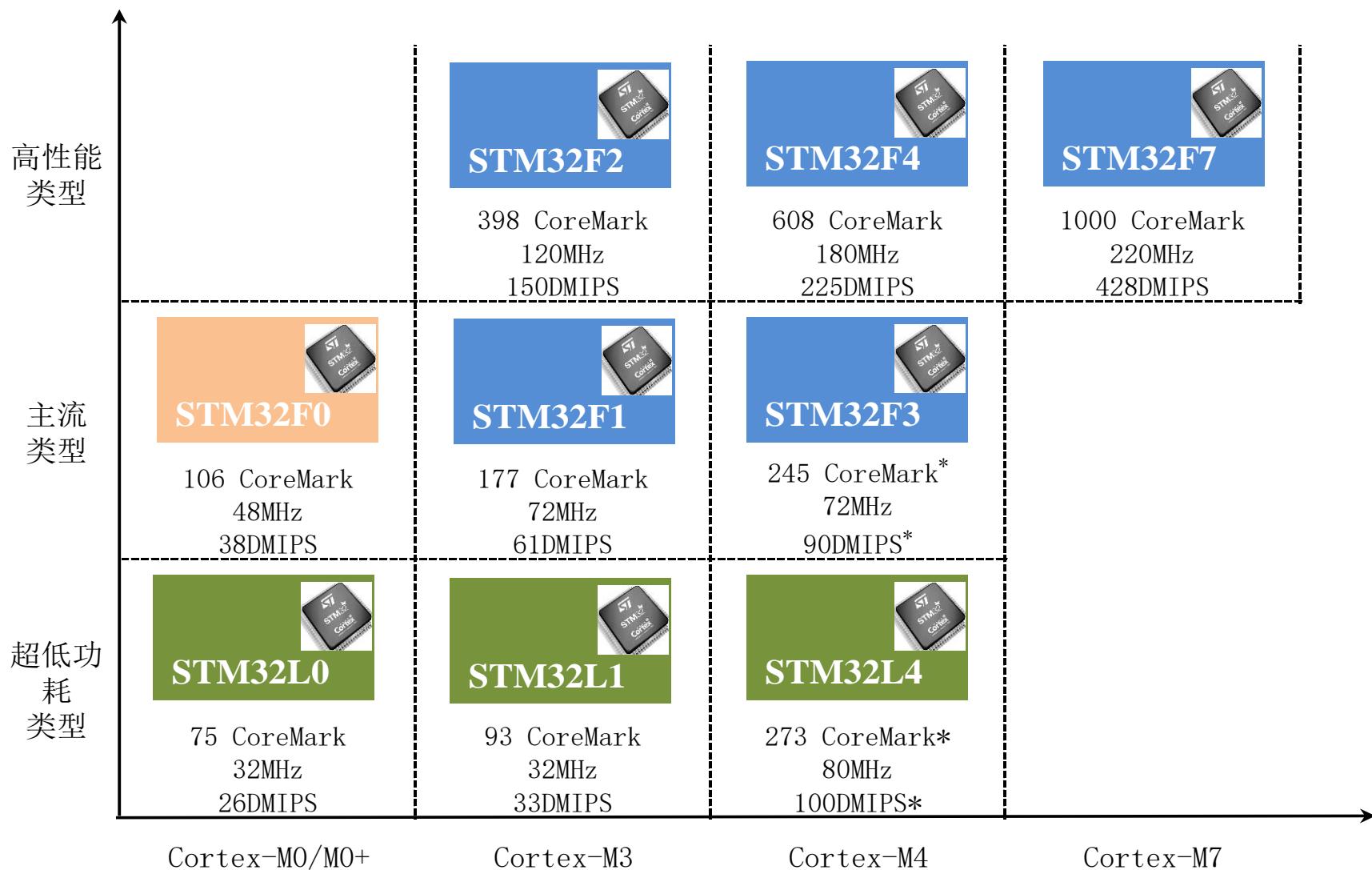


ARM单片机生产公司	国别
ATMEL (爱特梅尔)	美国
ST (意法半导体)	欧洲
NXP (恩智浦)	荷兰
Samsung (三星)	韩国
.....

- 意法半导体（ST）集团于1987年成立，是由意大利的SGS微电子公司和法国Thomson半导体公司合并而成，是世界最大的半导体公司之一。生产信号调节、传感器、二极管、功率晶体管、存储器、射频晶体管、微控制器等多达32类产品。其生产的微控制器包含8位和32位，其中STM32系列单片机是目前最流行的Cortex-M微控制器。



STM32 微控制器产品线





本章小结

本章是课程的第一章，首先讲解了嵌入式系统的定义，并比较了嵌入式系统和通用计算机系统异同点，由此总结出嵌入式系统的特点。其中，特别讲解了计算机运行的基本原理，包括两种基本体系结构和计算机的基本组成（CPU、存储系统、总线）。在此基础上，引入课程的主角——微控制器。因为ARM嵌入式系统特殊的商业模式，所以第一步介绍了ARM处理器，第二步介绍基于ARM内核的STM32微控制器。