

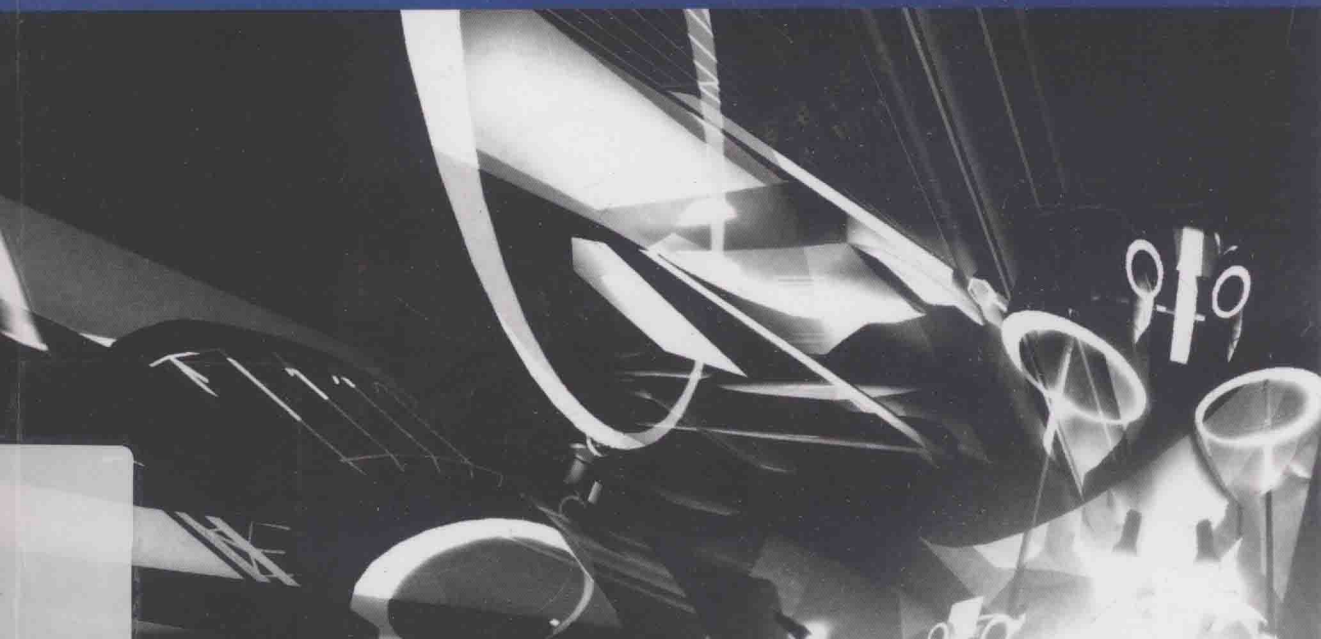
高等学校电子信息类专业
“十三五”规划教材

ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

基于STM32 ARM 处理器的编程技术

杨振江 朱敏波 丰博 朱贵宪 杨璐 编著

 西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

基于 STM32 ARM 处理器的编程技术

杨振江 朱敏波 丰博 朱贵宪 杨璐 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以 STM32 ARM 处理器(单片机)为应用基础,从学习要点、器件选型、库函数应用、硬件资源、工作原理和实例等角度对其做了全面叙述。所选内容以培养学生的动手能力和增强学生的工程应用能力为目的。所选实例都是经过作者精心设计,从科研工作与长期教学中优选而来的,对学生学习和掌握处理器(单片机)具有指导作用。

本书可作为高等院校计算机、自动化、电子信息和机电类专业的教材,也可作为嵌入式系统开发、智能仪器设计、数据采集、自动控制、数字通信、计算机接口设计等工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于 STM32 ARM 处理器的编程技术/杨振江等编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2016.1
高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3911-6

I. ① 基… II. ① 杨… III. ① 微控制器—程序设计—高等学校—教材 IV. ① TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 317231 号

策 划 云立实

责任编辑 云立实 亢列梅

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 23.875

字 数 569 千字

印 数 1~3000 册

定 价 43.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3911 - 6/TP

XDUP 4203001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

处理器(单片机)以其体积小、功能强、价格低、可靠性高等特点,在多个领域获得了广泛应用,特别在工业控制、智能化仪器仪表、产品自动化、分布式控制系统中都已取得了可喜的成果,是产品更新换代,发展新技术、改造老产品的主要手段,已经成为了工业发展水平的标志之一。目前,在众多处理器(单片机)产品中,除了8位(51内核)、16位(MSP430)外,32位的ARM处理器已经逐渐成为主流机种。本书以ST公司的STM32 ARM处理器为核心,重点介绍了处理器的应用基础、工作原理、时钟系统、存储器映射、接口电路、标准库函数、资源描述和实例等内容。本书内容由浅入深,突出所选内容的准确性、典型性和实用性,适合自学。

本书融入了作者多年的教学经验和科研实践,从应用角度出发详细介绍了GPIO配置、中断系统、定时器原理、串口技术、接口电路、应用系统和编程实例等内容。尤其是实践部分的内容都是经过作者精心设计、优选而来的,对学生学习和掌握处理器(单片机)具有指导意义。有些例子,更可直接应用于新产品的设计和开发中。

处理器(单片机)系统的设计,除了需考虑硬件可靠性外,程序设计也是必不可少的重要环节,因为代码的质量直接影响整个系统的性能。书中以STM32 ARM处理器的库函数为基础,给出了处理器的内部资源、模块功能、接口配置和实例,读者据此可方便地编写出适合自己的应用程序,并解决编写程序中的困难,减少不必要的重复工作。

全书共分9章,主要内容包括:ARM处理器概述、STM32应用基础、STM32常用固件库的使用与编程、GPIO端口的结构与编程应用、STM32处理器的中断技术、STM32定时/计数器的编程应用、串口通信技术与编程应用、A/D转换器的接口与编程应用及STM32处理器综合应用实例等。

本书主要由杨振江、朱敏波、丰博、朱贵宪和杨璐编写,另外,参加部分章节编写的还有惠欣、黄一波、孟江伟等同志。在编写过程中,始终得到了西安电子科技大学出版社云立实编辑的大力支持和帮助;童音博士为资料整理等付出了心血。在此,编者谨向他们表示由衷的感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,诚恳希望读者提出宝贵意见。

编 者

2015年8月

目 录

第 1 章 ARM 处理器概述..... 1	2.4.5 RCC 寄存器配置..... 40
1.1 什么是 ARM 处理器..... 1	2.5 STM32 系列处理器的存储结构与映射... 48
1.2 ARM 处理器的发展史..... 1	2.5.1 存储器结构..... 49
1.3 ARM 处理器的系列产品..... 2	2.5.2 存储器映射..... 50
1.3.1 ARM Cortex-A5 系列产品..... 3	2.5.3 系统存储器的地址重映射..... 52
1.3.2 ARM Cortex-A8 系列产品..... 4	
1.3.3 ARM Cortex-A9 系列产品..... 4	第 3 章 STM32 常用固件库的使用
1.3.4 ARM Cortex-A15 系列产品..... 5	与编程..... 54
1.4 ARM 处理器的架构..... 5	3.1 STM32 固件库概述..... 54
1.5 STM32 系列 ARM 处理器的特点与性能... 7	3.2 STM32 外设库函数调用基础..... 55
1.6 ARM 处理器系统的开发要点..... 11	3.3 通用输入/输出(GPIO)库函数..... 57
1.7 如何学习 ARM 处理器课程..... 12	3.3.1 GPIO 初始化相关函数..... 57
1.8 如何提高 ARM 处理器的开发技能..... 13	3.3.2 GPIO 引脚读写函数..... 60
	3.3.3 GPIO 端口读写函数..... 63
	3.3.4 GPIO 管脚事件输出配置使能函数... 64
	3.3.5 GPIO 管脚中断管理函数..... 64
第 2 章 STM32 应用基础..... 15	3.4 复位和时钟设置(RCC)库函数..... 65
2.1 STM32 系列处理器选型指南..... 15	3.4.1 RCC 初始化相关函数..... 67
2.1.1 STM32 系列处理器的命名规则..... 15	3.4.2 配置高速(HSE、HSI)相关函数..... 68
2.1.2 STM32 系列处理器的选型..... 16	3.4.3 设置 PLL 时钟源及倍频系数相关
2.1.3 STM32 系列处理器的引脚信息..... 22	函数..... 70
2.2 STM32 系列处理器内部结构..... 29	3.4.4 设置系统时钟(SYSCLK)相关函数... 71
2.3 STM32 系列处理器的电源管理..... 31	3.4.5 设置 AHB 时钟相关函数..... 72
2.3.1 电源结构..... 31	3.4.6 设置 USB、ADC 时钟相关函数..... 75
2.3.2 电源电压监视..... 32	3.4.7 设置低速晶振(LSE、LSI)相关函数... 76
2.3.3 复位电路..... 32	3.4.8 设置 RTC 时钟相关函数..... 77
2.3.4 低功耗模式..... 34	3.4.9 RCC 相关中断函数..... 78
2.3.5 STM32 的启动..... 35	3.5 异步通信(USART)串口库函数..... 79
2.4 STM32 系列处理器的时钟系统..... 36	3.5.1 USART 初始化相关函数..... 81
2.4.1 高速时钟(HSE、HSI)..... 38	3.5.2 USART 设置检查相关函数..... 84
2.4.2 锁相环时钟(PLL)..... 38	3.5.3 USART 输入/输出相关函数..... 86
2.4.3 低速时钟(LSE、LSI)..... 39	
2.4.4 系统时钟(SYSCLK)..... 39	

3.5.4 USART 相关中断函数	87	3.18.3 NVIC 检查选择类函数	184
3.6 通用定时器库函数	89	3.19 存储器(FLASH)库函数	186
3.6.1 定时器初始化与使能函数	91	3.19.1 FLASH 设置使能类函数	187
3.6.2 定时器时钟设置类函数	97	3.19.2 FLASH 检查擦除类函数	189
3.6.3 定时器配置类函数	99	3.19.3 FLASH 数据写入读出与保护类 函数	191
3.6.4 定时器参数获取或清除标志类 函数	103	3.19.4 FLASH 中断标志类函数	194
3.6.5 定时器中断类相关函数	104	第 4 章 GPIO 端口的结构与编程应用 ..	197
3.7 系统时基定时器(SysTick)库函数	105	4.1 GPIO 的硬件结构和功能	197
3.8 实时时钟(RTC)库函数	108	4.1.1 GPIO 复用与输入功能	198
3.8.1 RTC 设置读取类函数	109	4.1.2 GPIO 输出功能	199
3.8.2 RTC 等待检查类函数	111	4.1.3 GPIO 速度选择与输入保护功能	201
3.8.3 RTC 状态检查与中断类函数	112	4.2 GPIO 锁定与配置机制	202
3.9 后备域(BKP)库函数	114	4.3 I/O 端口外设的映射	203
3.10 独立看门狗(IWDG)库函数	117	4.4 GPIO 寄存器	207
3.11 窗口看门狗(WWDG)库函数	120	4.5 GPIO 编程应用	210
3.12 模/数转换器(ADC)库函数	123	4.5.1 GPIO 驱动力的普通应用	210
3.12.1 ADC 初始化与使能类函数	125	4.5.2 流水灯的控制与编程	211
3.12.2 ADC 设置获取类函数	130	4.5.3 通过 74HC595 实现的数码管 显示器	214
3.12.3 ADC 转换结果类函数	133	第 5 章 STM32 处理器的中断技术	218
3.12.4 ADC 标志与中断类函数	134	5.1 STM32 中断通道的管理	218
3.13 I2C 总线接口库函数	136	5.2 STM32 中断优先级的设置	221
3.13.1 I2C 初始化类函数	137	5.3 STM32 外部中断/事件控制器	223
3.13.2 I2C 使能类函数	140	5.3.1 EXTI 硬件结构	223
3.13.3 I2C 传输类函数	142	5.3.2 EXTI 的寄存器	226
3.13.4 I2C 标志与中断类函数	145	5.4 STM32 中断编程实例	228
3.14 SPI 总线接口库函数	148	第 6 章 STM32 定时/计数器的编程 应用	233
3.14.1 SPI 初始化与使能类函数	149	6.1 STM32 定时器概述	233
3.14.2 SPI 传输与 CRC 校验类函数	153	6.2 通用定时器 TIMx 的结构	234
3.14.3 SPI 标志与中断类函数	155	6.2.1 时钟源的选择	235
3.15 局域网(CAN)库函数	157	6.2.2 定时器的时基单元	237
3.15.1 CAN 初始化与使能类函数	158	6.2.3 捕获和比较通道	238
3.15.2 CAN 传输类函数	162	6.2.4 计数器与定时时间的计算	239
3.15.3 CAN 标志与中断类函数	167	6.3 RTC 的功能与操作	240
3.16 DMA 控制器库函数	169		
3.17 外部中断/事件控制器(EXTI)库函数	173		
3.18 嵌套向量中断控制器(NVIC)库函数	178		
3.18.1 NVIC 初始化设置类函数	179		
3.18.2 NVIC 使能类函数	183		

6.3.1	RTC 的基本功能	241
6.3.2	RTC 的基本操作	241
6.3.3	RTC 的供电与唤醒	243
6.3.4	BKP 与侵入检测	243
6.4	系统时钟 SysTick 的功能与使用	244
6.4.1	SysTick 内部结构	244
6.4.2	SysTick 定时器的使用	245
6.5	看门狗定时器的功能与操作	246
6.5.1	独立看门狗定时器的操作	246
6.5.2	窗口看门狗定时器的操作	247
6.6	定时器的编程应用实例	249
6.6.1	定时器的基本应用	249
6.6.2	频率信号测量的应用	254
6.6.3	通过 RTC 实现日历程序的应用	256
6.6.4	通过 SysTick 实现精确延时	258
6.6.5	看门狗定时器的应用	261
第 7 章	串口通信技术与编程应用	262
7.1	USART 的功能和内部结构	262
7.1.1	USART 的主要功能	262
7.1.2	USART 的内部结构	263
7.2	USART 的寄存器	265
7.3	USART 的收发格式	266
7.3.1	USART 的发送器	267
7.3.2	USART 的接收器	269
7.4	USART 波特率的设置	270
7.5	USART 硬件流控制	271
7.6	USART 中断请求与模式配置	272
7.7	USART 编程应用实例	274
7.7.1	串口通信应用基础	274
7.7.2	串口通信编程指导	275
7.7.3	串口 1 与 PC 的通信应用	286

第 8 章 A/D 转换器的接口与编程应用

8.1	ADC 的主要特征与架构	289
8.2	ADC 的通道选择与工作模式	292
8.3	ADC 的校准与数据对齐	294
8.4	ADC 的寄存器与中断	295
8.5	ADC 应用编程实例	296
8.5.1	ADC 的应用基础	296
8.5.2	热电阻温度的测量应用	298
8.5.3	芯片内部温度的采集	303

第 9 章 STM32 处理器综合应用实例

9.1	LED 点阵显示器的设计与编程	307
9.2	SHT1x 温湿度传感器的接口与应用	314
9.3	直流电机的调速与编程应用	321
9.4	RS485 通信的硬件设计与编程应用	325
9.5	中断优先级与看门狗定时器的测试应用	332
9.6	处理器 Flash 与串行 Flash 的编程应用	338
9.6.1	STM32 处理器 Flash 编程应用	339
9.6.2	串行 Flash 的编程应用	341
9.7	STM32 处理器与 W5200 网络模块的接口应用	348
9.7.1	W5200 性能特点与硬件接口	348
9.7.2	W5200 接口软件设计	353

附录

参考文献

第 1 章 ARM 处理器概述

1.1 什么是 ARM 处理器

ARM(Advanced RISC Machines)是微处理器行业的一家知名企业,是专门从事基于 RISC(Reduced Instruction Set Computer, 精简指令集计算机),技术芯片设计开发的公司。ARM 设计了高性能、廉价、耗能低的 RISC 处理器的相关技术及软件。也就是说,ARM 是微处理器的设计厂商,主要设计 ARM 处理器的标准,提出 ARM 指令集,再将 ARM 架构授权给世界上许多著名的半导体、软件和 OEM 厂商。每个厂商得到的都是一套独一无二的 ARM 相关技术及服务。该技术适用于嵌入系统控制、消费、多媒体、DSP 和移动式应用等多种领域。ARM 与其他厂商的这种合伙关系,使它很快就成为许多全球性 RISC 标准的缔造者。目前,全球共有 30 家半导体公司与 ARM 签订了硬件技术使用许可协议,其中包括 Intel、IBM、LG 半导体、NEC、SONY、飞利浦和 ST(意法半导体)等大公司。ARM 架构是面向市场设计的第一款 RISC 微处理器,是高级精简指令集机器。

1.2 ARM 处理器的发展史

1978 年 12 月 5 日,物理学家 Hermann Hauser 和工程师 Chris Curry 在英国剑桥创办了 CPU 公司(Cambridge Processing Unit),主要为当地市场供应电子设备。1979 年,CPU 公司改名为 Acorn 计算机公司。起初,Acorn 公司打算使用摩托罗拉公司的 16 位芯片,但是他们发现这种芯片太慢也太贵,于是开始进行自主研发。1985 年,Roger Wilson 和 Steve Furber 设计了他们自己的第一代 32 位、6 MHz 的处理器,用它做出了一台精简指令集的计算机,简称 ARM(Acorn RISC Machine)。这就是 ARM 这个名字的由来。

RISC 支持的指令比较简单,所以功耗小、价格便宜,特别适用于移动设备。早期使用 ARM 芯片的典型设备就是苹果公司的牛顿 PDA。

20 世纪 80 年代后期,ARM 很快开发成 Acorn 的台式机产品。1990 年 11 月 27 日,Acorn 公司正式改组为 ARM 计算机公司。20 世纪 90 年代,ARM 32 位嵌入式 RISC 处理器的应用扩展到世界范围,占据了低功耗、低成本和高性能嵌入式系统应用领域的领先地位。

1.3 ARM 处理器的系列产品

随着智能手机越来越普及,消费者在选购手机的时候,除了关心价格和外观之外,手机的性能也是人们最关心的因素之一。众所周知,处理器是影响手机性能的最关键的因素。大家都比较了解德州仪器、高通、英伟达以及三星等主流处理器厂商。但很多人并不知道,其实它们采用的都是同一个架构的 ARM 处理器,实际上,采用的处理器才是影响手机性能的关键因素。ARM 目前已经在移动电话领域占据了全球 90% 的市场份额。超过 100 家半导体公司持有不同形式的 ARM 授权,其中包括 Intel、IBM、LG、NEC、SONY、NXP(原 PHILIPS)和 NS 等公司,也包括微软、升阳和 MRI 等一系列知名软件系统公司。

ARM 处理器系列产品有: ARM7 系列、ARM9 系列、ARM9E 系列、ARM10 系列、SecurCore 系列、Intel 的 StrongARM ARM11 系列、Intel 的 Xscale 等。其中, ARM7、ARM9、ARM9E 和 ARM10 为 4 个通用处理器系列,每一个系列提供一套相对独特的性能来满足不同应用领域的需求; SecurCore 系列专门为安全要求较高的应用而设计。

从 1985 年发布首款内核 ARM1 开始,经过三十多年的发展,ARM 处理器如今已经发展到运行速度可达 2.5 GHz 的 Cortex-A15 核心。

在应用选型方面,系统的工作频率在很大程度上决定了 ARM 微处理器的处理能力。ARM7 系列微处理器的典型处理速度为 0.9MIPS/MHz,常见的 ARM7 芯片系统主时钟为 20~133 MHz; ARM9 系列微处理器的典型处理速度为 1.1MIPS/MHz,常见的 ARM9 系统主时钟频率为 100~233 MHz; ARM10 系列芯片的主时钟频率最高可以达到 700 MHz。不同芯片对时钟的处理不同,有的芯片只需一个主时钟频率,有的芯片内部时钟控制器可以分别为 ARM 核和 USB、UART、DSP、音频等功能部件提供不同频率的时钟。

片内外围电路的选择除 ARM 微处理器核以外,几乎所有的 ARM 芯片均根据各自不同的应用领域,扩展了相关功能模块,并集成在芯片之上,称之为片内外围电路,如 USB 接口、I²S 接口、LCD 控制器、键盘接口、RTC、ADC 和 DAC、DSP 处理器等。设计者应分析系统的需求,尽可能采用片内外围电路完成所需的功能,这样既可简化系统的设计,又可提高系统的可靠性。

ARM11 系列处理器所提供的引擎除用于智能手机领域,还广泛用于消费类、家庭和嵌入式应用领域。该处理器的功耗非常低,提供的性能范围为小面积设计中的 350 MHz 到速度优化设计中的 1 GHz(45 nm 和 65 nm)。ARM11 处理器软件可以与以前所有 ARM 处理器兼容,并引入了用于多媒体处理的 32 位 SIMD、用于提高操作系统上下文切换性能的物理标记高速缓存、强制实施硬件安全性的 Trust Zone 以及针对实时应用的紧密耦合内存。

ARM1136J-S 发布于 2003 年,是针对高性能和高能效的应用而设计的。ARM1136J-S 是第一个执行 ARM v6 架构指令的处理器,它集成了一条具有独立 load-store 和算术流水线的 8 级流水线。ARM v6 指令包含了针对媒体处理的单指令多数据流(SIMD)扩展,采用特

殊的设计以改善视频处理性能。ARM1136JF-S 适合进行快速浮点运算,它在 ARM1136J-S 的基础上增加了向量浮点单元。

德州仪器 OMAP2 系列处理器采用了 ARM1136 架构,其中 TI OMAP 2420 能管理 130~400 万像素的摄像头和 QVGA(240×320)分辨率的屏幕,支持蓝牙、红外和高速 USB 传输,兼容 A-GPS 定位功能,可利用 WLAN 功能无线上网,支持第三方 SD、MMC 存储卡扩展,并可使用 SD I/O 设备,能处理 400 万甚至更高像素的静态图片,能够记录 30 帧/秒的 VGA(640×480)像素动态有声视频文件,能提供接近 Hi-Fi 级的 3D 环绕音效,支持 TV-OUT 输出功能,每秒可以计算 200 万个多边形。该系列处理器的代表产品有诺基亚 N82、N93、N95 等。

高通骁龙 Snapdragon S1 是针对当今大众市场的智能手机所开发的处理器。该处理器最高主频可达 1 GHz,是全球首款达到 1 GHz 主频的移动单核产品,采用了 65 nm 工艺并集成 Adreno 200 图形处理器(GPU),采用 ARM11 架构的处理器型号有 MSM7627/7227(主频为 600~800 MHz)和 MSM7625/7225(主频为 528 MHz)。

Tegra APX 2500 芯片采用 65 nm 制程工艺,核心频率为 750 MHz,并集成 256 KB 的 L2 缓存。芯片内建 GeForce 核心,支持 OpenGL ES 2.0 和 Direct3D Mobile 标准。APX 2500 属于 ARM11 MPCore 架构,其低功耗设计,使移动电话可以长时间播放音乐或高清影片。此外,它支持 720p 的 MPEG-4 与 H264/MPEG-4 AVC 的解码。输出方面,它支持 HDMI 1.2 和双显示输出。之后推出的 Tegra APX 2600 在 APX 2500 基础上增强了对 NAND 闪存的支持。2009 年在微软推出的 Zune HD 中使用了 Tegra APX 2600 芯片。

1.3.1 ARM Cortex-A5 系列产品

ARM 公司在经典处理器 ARM11 以后的产品改用 Cortex 命名,并分成 A、R 和 M 三类,旨在为不同的市场提供服务。

Cortex 系列属于 ARM v7 架构,这是 ARM 公司最新的指令集架构。ARM v7 架构定义了三大分工明确的系列:“A”系列,面向尖端的基于虚拟内存的操作系统和用户应用;“R”系列,针对实时系统;“M”系列,针对微控制器。由于应用领域不同,基于 ARM v7 架构的 Cortex 处理器系列所采用的技术也不相同,基于 ARM v7A 的称为 Cortex-A 系列,基于 ARM v7R 的称为 Cortex-R 系列,基于 ARM v7M 的称为 Cortex-M 系列。

Cortex-A5 是 Cortex-A 家族中最低端的处理器,其特点是功耗较低,单位功耗的效能很高,性能优于 ARM9 和 ARM11,适合应用在千元级的低端产品市场。

Cortex-A5 内部核心数目可选(1~4 核),同时与 Cortex-A8 一样在内部使用了 Trust Zone 安全技术以及 NEON 多媒体处理引擎,并能与 Cortex-A8/A9 处理器实现完全的应用兼容。采用四核配置时,SOC 芯片内部还可搭配 Mail GPU 或由用户按需求配用 PowerVR MBX/SGX GPU。Cortex-A5 处理器和 Cortex-A8 与 Cortex-A9 一样基于 ARM v7 架构,采用 40 nm 低功耗制程技术制作,默认工作电压为 1.1 V,单核核心频率为 480 MHz,四核核心频率可达 1 GHz,含缓存的核心面积最小仅 1 mm^2 ,一级缓存容量最大 64 KB,功耗/频率比参数为 12 mW/MHz。

1.3.2 ARM Cortex-A8 系列产品

ARM Cortex-A8 处理器的速率可以在 600 MHz~1 GHz 的范围内调节, 能够满足那些需要工作在 300 mW 以下的功耗优化的移动设备的要求; 并能满足那些需要 2000 Dhystone MIPS 的性能优化的消费类应用的要求。

Cortex-A8 处理器是 ARM 的第一款超标量处理器, 具有提高代码密度和性能的技术, 用于多媒体和信号处理的 NEON 技术, 用于高效地支持预编译和即时编译 Java 及其他字节码语言的 Jazelle®, 以及运行时间编译目标(RCT)技术。

Cortex-A8 处理器采用 65 nm 制程工艺制作, 核心频率为 650 MHz(65 nm LP 工艺)/1.1 GHz(65 nm GP 工艺), 内建二级缓存, 二级缓存最大容量为 1 MB, 一级缓存最大为 64 KB, 功耗/频率比参数为 0.59/0.45 mW/MHz。

TI OMAP3 系列处理器采用了 ARM Cortex-A8 架构, 可提供比基于 ARM11 的处理器多至 3 倍的性能增益, 同时使得 3G 手持终端具有可与笔记本电脑媲美的功能以及先进的娱乐功能。作为业界第一个采用 65 nm CMOS 工艺设计的应用处理器, OMAP 3430 在降低内核电压和功耗的同时, 比以前的 OMAP 处理器系列具有更高的工作频率。OMAP 3430 的代表产品为摩托罗拉里程碑、XT711、三星 I8910、诺基亚 N900、Palm Pre 等。可以运行在 800 MHz 的处理器 OMAP 3440 的代表产品则为摩托罗拉 XT720、Archos 5 等。

三星蜂鸟(hummingbird)核心同样是在 Cortex-A8 基础上进行修改并增强的一款核心, 采用这款核心的代表产品便是三星 S5PC110/S5PV210 和苹果 A4 核心。而 hummingbird 核心也正是三星和苹果合作研发而来的。其实测性能较其他普通 A8 核心的 CPU 有了成倍的增长。

三星 S5PC110/S5PV210 可以说是世界上最强的 Cortex-A8 架构方案芯片, 它在原 Cortex-A8 的基础上进行了大幅度的优化, 在性能上也获得了大幅度的增长, 基本上能够达到同等架构的 CPU 效能的 1 倍以上。采用该处理器的机型有三星 I9000 等。

苹果 iPhone 4 和苹果 iPad 以及 iTouch 4 都采用了和三星 S5PC110 处理器相近的 A4 处理器, 不过苹果作了更多的优化, 尤其是苹果 A4 将负责视频硬解的 VXD370 改成了 VXD375, CPU 和内存的直连也令 PowerVR 535 的实际表现要超越三星 S5PC110 的 PowerVR 540 处理器。但归根结底, 苹果 A4 处理器还是一个基于 ARM Cortex-A8 核心的高性能处理器。

1.3.3 ARM Cortex-A9 系列产品

Cortex-A9 是性能很高的 ARM 处理器, 可实现受到广泛支持的 ARM v7 体系结构的丰富功能。Cortex-A9 处理器的设计旨在打造最先进的、高效率的、长度动态可变的、多指令执行超标量体系结构, 凭借范围广泛的消费类、网络、企业和移动应用中的前沿产品所需的功能, 它可以提供史无前例的高性能和高效能。

Cortex-A9 微体系结构既可用于可伸缩的多核处理器(Cortex-A9 MPCore 多核处理器), 也可用于更传统的处理器(Cortex-A9 单核处理器)。可伸缩的多核处理器和单核处理器支持 16、32 或 64 KB 4 路关联的 L1 高速缓存配置, 对于可选的 L2 高速缓存控制器, 最多支持

8 MB 的 L2 高速缓存配置，它们具有极高的灵活性，均适用于特定应用领域和市场。

2011 年推出的 OMAP 4430 是德州仪器公司的首个双核处理器型号，采用双核心 ARM Cortex-A9 MP 架构，相比 Cortex-A8 内核整体提升了 1.5 倍的性能。OMAP 4430 在同级双核处理器中被喻为性能最优秀的处理器，拥有 Tegra2 没有的 NEON 模块，拥有比 E4210 更小的发热量，拥有比 MSM8260 更优秀的构架，所以有“怪兽级”双核处理器之称。OMAP 4430 的代表产品有 LG Optimus 3D，摩托罗拉里程碑 3、XT883，三星 I9100G，黑莓 PlayBook 等。

Tegra 3 虽然名为“四核”，但是实际上内部包含了 5 个 CPU 核心，其中一个被称为“Companion CPU core”协核心。NVIDIA 将这种架构称为 vSMP(Variable Symmetric Multiprocessing, 可变对称多处理)。Tegra 3 中的 5 个 CPU 核心均为 Cortex-A9 架构。不过，其中四个主要核心最高可支持 1.4 GHz 主频，而最后一个协核心最高频率仅 500 MHz。

1.3.4 ARM Cortex-A15 系列产品

在 Cortex-A9 双核处理器初见端倪之后，ARM 再次给大家带来惊喜，那就是 ARM 可能会推出一款四核芯片，处理速度最快能够达到 2.5 GHz。在已上市智能手机芯片当中，Cortex-A15 可能是目前主频最高的双核芯片。这款芯片除了将手机 CPU 运行速度提升至 2.5 GHz 以外，还可以支持超过 4 GB 的内存，能力相当惊人，毕竟如此强劲芯片只有在更加强悍的硬件、软件的支持下，才能够正常地发挥作用。

ARM Cortex-A15 MPCore 处理器提供前所未有的处理功能，与低功耗特性相结合，在 ARM 的各种新市场和现有市场上成就了卓越的产品，这些市场包括移动计算、高端数字家电、服务器和无线基础结构。

Cortex-A15 MPCore 处理器是 Cortex-A 系列处理器的最新成员，它在应用方面与所有其他获得高度赞誉的 Cortex-A 处理器完全兼容，这样，就可以利用成熟的开发平台和软件体系，包括 Android、Adobe Flash Player、Java Platform Standard Edition(Java SE)、Java FX、Linux、Microsoft Windows Embedded、Symbian 和 Ubuntu 以及 700 多个 ARM Connected Community 成员。这些成员提供应用软件、硬件和软件开发工具、中间件以及 SOC 设计服务。

1.4 ARM 处理器的架构

ARM 是一个 32 位精简指令集(RISC)处理器的架构，其广泛应用在许多嵌入式系统设计中。由于节能的特点，ARM 处理器非常适用于移动通信领域，符合其主要设计目标为低功耗的电特性。功能上增加 DSP 指令集，提供增强的 16 位和 32 位算术运算能力，提高了性能和灵活性。ARM 还提供两个前沿特性来辅助带深嵌入处理器的高集成 SOC 器件的调试，它们是嵌入式 ICE-RT 逻辑和嵌入式跟踪宏核(ETMS)系列。

1. 体系结构

在传统复杂指令集(Complex Instruction Set Computer, CISC)各种指令中，大约有 20%

的指令会被反复使用, 占整个程序代码的 80% 左右。而余下的指令却不经常使用, 在程序设计中只占 20%。

而在精简指令集各种指令中, 结构优先选取使用频率最高的简单指令, 避免复杂指令, 将指令长度固定, 指令格式和寻址方式种类减少, 以控制逻辑为主, 不用或少用微码控制等指令。

2. 寄存器结构

ARM 处理器共有 37 个寄存器, 被分为若干个组(BANK), 这些寄存器包括:

- (1) 31 个通用寄存器, 包括程序计数器(PC 指针), 均为 32 位的寄存器。
- (2) 6 个状态寄存器, 用以标识 CPU 的工作状态及程序的运行状态, 均为 32 位, 只使用了其中的一部分。

3. 指令结构

ARM 微处理器的较新体系结构中支持两种指令集: ARM 指令集和 Thumb 指令集。其中, ARM 指令为 32 位长度, Thumb 指令为 16 位长度。Thumb 指令集为 ARM 指令集的功能子集, 但与等价的 ARM 代码相比较, 可节省 30%~40% 以上的存储空间, 同时具备 32 位代码的所有优点。

4. RISC 体系结构的特点

- (1) 采用固定长度的指令格式, 指令归整、简单, 基本寻址方式有 2~3 种。
- (2) 使用单周期指令, 便于流水线操作执行。
- (3) 大量使用寄存器, 数据处理指令只对寄存器进行操作, 只有加载/存储指令可以访问存储器, 以提高指令的执行效率。
- (4) 所有的指令都可根据前面的执行结果决定是否被执行, 从而提高指令的执行效率。
- (5) 可用加载/存储指令批量传输数据, 以提高数据的传输效率。
- (6) 可在一条数据处理指令中同时完成逻辑处理和移位处理。
- (7) 在循环处理中使用地址的自动增减来提高运行效率。

5. ARM 微处理器的工作状态

从编程角度看, ARM 微处理器的工作状态一般有两种, 并可在两种状态之间切换。第一种为 ARM 状态, 此时处理器执行 32 位的字对齐的 ARM 指令。在 ARM 状态下, 当操作数寄存器的状态位为 0 时, 执行 BX 指令时可以使微处理器从 Thumb 状态切换到 ARM 状态。此外, 在处理器进行异常处理时, 把 PC 指针放入异常模式链接寄存器中, 并从异常向量地址开始执行程序, 也可以使处理器切换到 ARM 状态。第二种为 Thumb 状态, 此时处理器执行 16 位的、半字对齐的 Thumb 指令。在 Thumb 状态下, 当操作数寄存器的状态位(位 0)为 1 时, 可以采用执行 BX 指令的方法, 使微处理器从 ARM 状态切换到 Thumb 状态。此外, 当处理器在 Thumb 状态下发生异常(如 IRQ、FIQ、Undef、Abort、SWI 等)时, 当进行异常处理返回时自动切换到 Thumb 状态。

6. 高效的系统总线

在 ARM 嵌入式系统中, 处理器没有采用 DSP(数字信号处理器)架构中的多级流水线机制, 而是采用了一组专门针对 ARM 内核的片上系统(SOC)开发的总线规范, 即

AMBA(Advanced Microcontroller Bus Architecture)。

该总线规范由 ARM 公司设计, 独立于 ARM 微处理器的制程工艺技术。在该总线规范中, 定义了以下三种可供用户组合使用的不同类型的总线:

(1) AHB (Advanced High-Performance Bus)。该类型的总线支持多种数据传输方式, 以及多个总线主设备之间的数据传输, 适用于高性能和高时钟频率的系统模块, 如 CPU 处理器、片上存储器、DMA 设备、DSP 以及其他协同处理器等。

(2) ASB(Advanced System Bus)。该类型总线同样也适用于高性能的系统模块。在不需要使用 AHB 的场合, 用户也可以选择 ASB 作为系统总线。

(3) APB (Advanced Peripheral Bus)。该类型总线的主要特点是结构简单、低速、功耗极低。该总线主要适用于低功耗、对实时性要求不高的外部设备, 如对汽车门窗锁的控制等。

7. ARM 的工作模式

(1) 用户模式: ARM 处理器正常的程序执行状态。

(2) 快速中断模式: 用于高速数据传输或通道处理, 当触发快速中断时进入此模式。

(3) 外部中断模式: 用于通用的中断处理, 当触发外部中断时进入此模式。

(4) 管理模式: 操作系统使用的保护模式, 在系统复位或者执行软件中断指令时进入此模式。

(5) 数据访问终止模式: 当数据或指令预取终止时进入此模式, 可用于虚拟存储及存储保护。

(6) 系统模式: 运行具有特权的操作系统任务。

(7) 未定义指令中止模式: 当未定义的指令执行时进入该模式, 可用于支持硬件协处理器的软件仿真。

1.5 STM32 系列 ARM 处理器的特点与性能

STM32 系列 ARM 处理器是为满足高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用的需求而专门设计的 ARM Cortex-M0/M3/M4 内核。按内核架构分为不同的产品, 其典型产品有 STM32F101 “基本型”系列、STM32F103 “增强型”系列和 STM32F105、STM32F107 “互连型”系列。该处理器是由意大利 SGS 微电子公司和法国 Thomson 半导体公司两个公司合并为意法半导体公司(简称 ST 公司)设计制造的。ST 是全球第五大半导体厂商, 在很多市场居世界领先水平。例如, 意法半导体公司是世界第一大专用模拟芯片和电源转换芯片制造商, 世界第一大工业半导体和机顶盒芯片供应商, 而且在分立器件、手机/相机模块和车用集成电路领域居世界前列。

1. ST 超低功耗 ARM Cortex-M3 内核处理器

STM32L 系列产品基于超低功耗的 ARM Cortex-M3 处理器内核, 采用意法半导体独有的两大节能技术——130 nm 专用低泄漏电流制造工艺和优化的节能架构, 提供业界领先的

节能性能。该系列属于意法半导体阵容强大的 32 位 STM32 微控制器产品家族。该产品家族共有 180 余款产品，全系列产品共用大部分引脚、软件和外设，优异的兼容性为开发人员带来最大的设计灵活性。

STM32L 系列新增低功耗运行和低功耗睡眠两个低功耗模式，通过利用超低功耗的稳压器和振荡器，微控制器可大幅度降低低频下的工作功耗。稳压器不依赖电源电压即可满足电流要求。STM32L 还提供动态电压升降功能，这是一项成功应用多年的节能技术，可进一步降低芯片在中低频下运行时的内部工作电压。在正常运行模式下，闪存的电流消耗最低为 230 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ ，STM32L 的功耗/性能比最低为 185 $\mu\text{A}/\text{DMIPS}$ 。此外，STM32L 电路的设计目的是以低电压实现高性能，有效延长电池供电设备的充电间隔。片上模拟功能的最低工作电源电压为 1.8 V。数字功能的最低工作电源电压为 1.65 V。在电池电压降低时，可以延长电池供电设备的工作时间。

增强型系列时钟频率可达到 72 MHz，是同类产品中性能最高的；基本型时钟频率为 36 MHz，以 16 位产品的价格得到比 16 位产品大幅提升的性能，是 32 位产品用户的最佳选择。两个系列都内置 32~128 KB 的闪存，不同之处是 SRAM 的最大容量和外设接口的组合各异。时钟频率为 72 MHz 时，从闪存执行代码，STM32 功耗为 36 mA，是 32 位市场上功耗最低的产品，相当于 0.5 mA/MHz。

2. ST 超低功耗 ARM Cortex-M0 内核处理器

STM32F0 系列产品基于超低功耗的 ARM Cortex-M0 处理器内核，整合增强的技术和功能，瞄准超低成本预算的应用。该系列微控制器缩小了采用 8 位和 16 位微控制器的设备与采用 32 位微控制器的设备之间的性能差距，能够在经济型用户终端产品上实现先进且复杂的功能。

3. STM32 系列处理器的性能

(1) 存储器：片上集成 32~512 KB 的 Flash 存储器，6~64 KB 的 SRAM 存储器。

(2) 时钟、复位和电源管理：2.0~3.6 V 的电源供电和 I/O 接口的驱动电压；POR、PDR 和可编程的电压探测器(PVD)；4~16 MHz 的晶振；内嵌出厂前调校的 8 MHz RC 振荡电路；内部 40 kHz 的 RC 振荡电路；用于 CPU 时钟的 PLL；带校准，用于 RTC 的 32 kHz 的晶振。

(3) 低功耗：3 种低功耗模式为休眠、停止、待机模式，还具有为 RTC 和备份寄存器供电的 VBAT。

(4) 调试模式：串行调试(SWD)和 JTAG 接口。

(5) DMA：12 通道 DMA 控制器，支持的外设有定时器、ADC、DAC、SPI、IIC 和 UART。

(6) 两个 12 位的 μs 级的 A/D 转换器(16 通道)：A/D 测量范围为 0~3.6 V；具有双采样和保持能力；片上集成一个温度传感器。

(7) 2 通道 12 位 D/A 转换器：为 STM32F103xC、STM32F103xD、STM32F103xE 独有。

(8) 最多 112 个快速 I/O 端口：根据型号的不同，有 26、37、51、80 和 112 个 I/O 端口，所有的端口都可以映射到 16 个外部中断向量；除了模拟输入，所有的 I/O 端口都可以接受 5 V 以内的输入。

(9) 最多 11 个定时器: 4 个 16 位定时器, 每个定时器有 4 个 IC/OC/PWM 或者脉冲计数器; 两个 16 位的 6 通道高级控制定时器, 最多 6 个通道可用于 PWM 输出; 两个看门狗定时器(独立看门狗和窗口看门狗); 1 个 SysTick 定时器, 为 24 位倒计数器; 两个 16 位基本定时器, 用于驱动 DAC。

(10) 最多 13 个通信接口: 两个 IIC 接口(SMBus/PMBus); 5 个 USART 接口(ISO7816 接口、LIN、IrDA 兼容、调试控制); 3 个 SPI 接口(传输速率为 18 Mb/s), 两个和 IIS 复用; 一个 CAN 接口(2.0B); 一个 USB 2.0 全速接口; 一个 SDIO 接口。

4. STM32 系列处理器的内涵

(1) 集成嵌入式 Flash 和 SRAM 存储器的 ARM Cortex-M3 内核。与 8/16 位设备相比, ARM Cortex-M3 32 位 RISC 处理器提供了更高的代码效率。STM32F103xx 微控制器带有一个嵌入式的 ARM 核, 可以兼容所有的 ARM 工具和软件。

(2) 嵌入式 Flash 存储器和 RAM 存储器。内置多达 512 KB 的嵌入式 Flash, 可用于存储程序和数据。多达 64 KB 的嵌入式 RAM 可以以 CPU 的时钟速度进行读写(无等待状态)。

(3) 嵌套矢量中断控制器(NVIC)。该控制器可以处理 43 个可屏蔽中断通道(不包括 Cortex-M3 的 16 根中断线), 提供 16 个中断优先级。紧密耦合的 NVIC 实现了更低的中断处理延迟, 直接向内核传递中断入口向量地址, 紧密耦合的 NVIC 内核接口, 允许中断提前处理, 即对后到的更高优先级的中断进行处理, 支持尾链, 自动保存处理器状态, 中断入口在中断退出时自动恢复, 不需要指令干预。

(4) 外部中断/事件控制器(EXTI)。外部中断/事件控制器由用于 19 条产生中断/事件请求的边沿探测器线组成。每条线可以被单独配置用于选择触发事件(上升沿或下降沿, 或者两者都可以), 也可以被单独屏蔽。由一个挂起寄存器来维护中断请求的状态。当外部线上出现长度超过内部 APB2 时钟周期的脉冲时, EXTI 能够探测到。有多达 112 个 GPIO 连接到 16 个外部中断线。

(5) 时钟和启动。在启动的时候首先要进行系统时钟的选择, 但在复位的时候只能选用内部 8 MHz 的晶振为 CPU 时钟。复位后可以选择外部 4~16 MHz 的时钟, 并且会被 CPU 判定是否选择成功。在这期间, 控制器被禁止软件中断。同时, 如果有需要(如碰到被选择的晶振失败), 内部 PLL 时钟也可管理使用。在时钟管理中, 通过多个预比较器来配置 AHB 频率, 包括高速 APB(APB2)和低速 APB(APB1)。高速 APB 最高的频率为 72 MHz, 低速 APB 最高的频率为 36 MHz。

(6) Boot 模式。在启动的时候, Boot 引脚被用来在 3 种 Boot 选项中选择一种: 从用户 Flash 导入、从系统存储器导入和从 SRAM 导入。Boot 导入程序位于系统存储器, 用于通过 USART1 重新对 Flash 存储器编程。

(7) 电源供电方案。有三种: VDD, 电压范围为 2.0~3.6 V, 外部电源通过 VDD 引脚提供, 用于 I/O 和内部调压器; VSSA 和 VDDA, 电压范围为 2.0~3.6 V, 外部模拟电压输入, 用于 ADC、复位模块、RC 和 PLL, 在 VDD 范围之内(ADC 被限制在 2.4 V), VSSA 和 VDDA 必须相应连接到 VSS 和 VDD; VBAT, 电压范围为 1.8~3.6 V, 当 VDD 无效时为 RTC, 外部 32 kHz 晶振和备份寄存器供电(通过电源切换实现)。

(8) 电源管理。设备有一个完整的上电复位(POR)和掉电复位(PDR)电路。这条电路一直有效,用于确保从 2 V 启动或者掉到 2 V 的时候进行一些必要的操作。当 VDD 低于一个特定的下限 VPOR/PDR 时,不需要外部复位电路,设备也可以保持在复位模式。设备特有一个嵌入的可编程电压探测器(PVD),用于检测 VDD,并且和 VPVD 限值比较,当 VDD 低于 VPVD 或者 VDD 大于 VPVD 时会产生一个中断。中断服务程序可以产生一个警告信息或者将 MCU 置为一个安全状态。PVD 由软件使能。

(9) 电压调节。调压器有 3 种运行模式:主(MR)、低功耗(LPR)和掉电。MR 用在传统意义上的调节模式(运行模式),LPR 用在停止模式,掉电用在待机模式。调压器输出为高阻时,核心电路掉电,包括零消耗(寄存器和 SRAM 的内容不会丢失)。

(10) 低功耗模式。STM32F103xx 支持 3 种低功耗模式,从而在低功耗、短启动时间和可用唤醒源之间达到一个最好的平衡点。这三种模式是:

休眠模式,只有 CPU 停止工作,所有外设继续运行,在中断/事件发生时唤醒 CPU。

停止模式,允许以最小的功耗来保持 SRAM 和寄存器的内容。1.8 V 区域的时钟都停止,PLL、HSI 和 HSE RC 振荡器被禁能,调压器也被置为正常或者低功耗模式。设备可以通过外部中断线从停止模式被唤醒。外部中断源可以是 16 个外部中断线之一、PVD 输出或者 TRC 警告。

待机模式,追求最少的功耗,内部调压器被关闭,这样 1.8 V 区域断电。PLL、HSI 和 HSE RC 振荡器也被关闭。在进入待机模式之后,除了备份寄存器和待机电路外,SRAM 和寄存器的内容也会丢失。当外部复位(NRST 引脚)、IWDG 复位、WKUP 引脚出现上升沿或者 TRC 警告发生时,设备退出待机模式。进入停止模式或者待机模式时,TRC、IWDG 和相关的时钟源不会停止。

5. STM32 互连型处理器的特点

STM32 互连型系列产品分为两个型号:STM32F105 和 STM32F107。STM32F105 具有 USB 和 CAN 2.0 接口。STM32F107 在 USB 和 CAN 2.0 接口基础上增加了以太网 10/100 MAC 模块。片上集成的以太网 MAC 支持 MII 和 RMII,因此,实现一个完整的以太网收发器只需一个外部 PHY 芯片。只使用一个 25 MHz 晶振即可给整个微控制器提供时钟频率,包括以太网和 USB 外设接口。微控制器还能产生一个 25 MHz 或 50 MHz 的时钟输出,驱动外部以太网 PHY 层芯片,从而为客户节省一个附加晶振。

音频功能方面,新系列微控制器提供两个 I²S 音频接口,支持主机和从机两种模式,既可用作输入又可用作输出,分辨率为 16 bit 或 32 bit。音频采样频率从 8 kHz 到 96 kHz。利用新系列微控制器强大的处理性能,开发人员可以用软件实现音频编解码器,从而消除对外部组件的需求。把 U 盘插入微控制器的 USB 接口,可以现场升级软件;也可以通过以太网下载代码进行软件升级。这个功能可简化大型系统网络(如远程控制器或销售终端设备)的管理和维护工作。

6. 较短的开发周期

ARM 嵌入式系统的开发周期完全是由 ARM 的商业模式决定的。ARM 公司将成熟的 ARM 技术直接授权给其他合作芯片设计厂商,在很大程度上缩短了 ARM 嵌入式产品的开发周期,而这对于芯片设计厂商而言也是一个巨大的优势。