



普通高等教育“十三五”电子信息类规划教材

ARM Cortex-A9 嵌入式技术教程

张石 主编



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”电子信息类规划教材

ARM Cortex - A9 嵌入式技术教程

主 编 张 石

副主编 余黎煌 鲍喜荣 张新宇



机械工业出版社

本书全面、系统地介绍了嵌入式系统中广泛使用的 ARM 处理器及最新的 ARM Cortex - A 系列处理器, 主要内容包括 ARM 处理器体系结构和指令系统; 基于 ARM Cortex - A9 内核的 Exynos4412 处理器; 基于 Exynos4412 处理器的 FS4412 实验教学系统; Linux 程序开发; 基于 FS4412 实验教学平台的嵌入式 Linux 应用程序和驱动程序的开发; ARM Cortex - A 系列处理器应用案例。

本书内容全面, 所列举的程序实例具有典型性, 并且全部经过调试, 有很高的参考价值。

本书可作为高等院校电子信息类专业、计算机科学与技术专业高年级学生和研究生教材, 也可作为嵌入式系统工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

ARM Cortex - A9 嵌入式技术教程/张石主编. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12

普通高等教育“十三五”电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-59764-3

I. ①A… II. ①张… III. ①微处理器-高等学校-教材 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 082828 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 徐 凡 责任编辑: 徐 凡

责任校对: 张 薇 责任印制: 孙 炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14 印张 · 337 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59764-3

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金 书 网: www.golden-book.com

前 言

本书以嵌入式系统的开发为主线，全面、系统地讲述了嵌入式系统开发的基本知识、基本流程和基本方法，并以三星公司的基于 ARM Cortex - A9 内核的 Exynos4412 处理器和华清远见公司的 FS4412 实验教学系统为硬件平台，介绍了嵌入式系统的软硬件开发过程。

本书力求实用，侧重于嵌入式系统的开发过程，力争能够指导学生进行一个完整的嵌入式系统开发。

本书共分 9 章，各章的具体内容如下：

第 1 章介绍了 ARM 公司及其处理器的发展历史、现状和未来发展趋势，ARM 公司的主流处理器架构及 Cortex 系列处理器。最后给出了 ARM 处理器选型中需要考虑的基本因素。

第 2 章介绍了 ARM 处理器体系结构的发展和特征、处理器的工作状态、寄存器组织、异常处理和 ARM Cortex - A9 内核架构等内容。

第 3 章介绍了 ARM 处理器的寻址方式，ARM 指令系统的基本格式、各种指令，ARMv4T 版本以后新增的指令以及指令的应用场合及方法。

第 4 章介绍了基于 ARM Cortex - A9 内核的 Exynos4412 处理器内核单元，Exynos4412 处理器片内外设的一些特性以及功能模块。

第 5 章介绍了 FS4412 实验教学系统的硬件资源，以及各功能模块单元中所用的芯片及其特征，并详细介绍了实验教学系统的硬件设计，包括存储系统、电源和时钟系统、LCD 及触摸屏人机接口系统等，以及多种通信接口的应用电路。

第 6 章介绍了 Exynos4412 处理器最基本的部件编程，包括处理器的 GPIO、中断控制器、异步通信、定时器、MMU 的编程方法和实例。

第 7 章介绍了 Linux 开发中常用的应用程序和驱动程序设计技巧，包括文件操作、线程创建及同步以及进程通信等，并介绍了 Linux 驱动程序设计的框架和流程，给出了具体实例。

第 8 章介绍了嵌入式 Linux 目标平台运行环境的建立，包括交叉编译工具的安装、引导程序 BootLoader、内核和根文件系统的编译，并通过具体的驱动程序案例，介绍了微处理器硬件部件驱动程序的基本设计思想。

第 9 章以 ARM Cortex - A9 及更高版本的 ARM 处理器为基础，介绍了几种系统应用案例，包括华为荣耀畅玩 5x 手机、网络机顶盒等。

附录介绍了 ARM 处理器的 CP15 协处理器使用的指令和寄存器。

本书的编写是在多轮教学实践的基础上完成的。本书内容充实，重点突出，阐述循序渐进，由浅入深。各章均安排了丰富的思考题，便于学生自学和自测。

本书的编写得到了东北大学研究生院的“东北大学研究生教育科研计划教学立项”和东北大学计算机科学与工程学院本科教学改革研究项目的支持。

本书采用了华清远见公司的 FS4412 实验教学系统，该公司为作者提供了大量的技术资料和技术支持。本书在编写过程中，还参考了参考文献所列论著的有关内容及网上相关资

料。在此向相关公司和论著作者一并表示衷心的感谢。

本书的主编为张石，副主编为余黎煌、鲍喜荣、张新宇、姚定界、闫鑫、李玉珍、杨朝晖参加了本书有关资料的收集整理工作。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中难免有一些错误和不足之处，恳请各位专家和读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第 1 章 ARM 嵌入式技术概论	1
1.1 ARM 处理器的历史及发展	1
1.2 ARM 处理器简介	2
1.2.1 ARM 处理器特征	2
1.2.2 ARM 处理器架构	2
1.2.3 Cortex 处理器架构	3
1.3 ARM 处理器系列	3
1.3.1 Classic ARM 处理器	3
1.3.2 Cortex - A 系列处理器	4
1.3.3 Cortex - M 系列处理器	7
1.3.4 Cortex - R 系列处理器	8
1.3.5 SecurCore 系列处理器	9
1.4 ARM 处理器的芯片选型	10
本章小结	11
思考题	11
第 2 章 ARM 处理器体系结构	12
2.1 数据类型	12
2.2 处理器工作模式	12
2.3 ARM 处理器的存储系统	13
2.3.1 存储空间	13
2.3.2 存储格式	13
2.3.3 存储管理单元	14
2.3.4 高速缓冲存储器	14
2.3.5 协处理器	15
2.4 寄存器组织	15
2.4.1 ARM 处理器模式下的寄存器分布	15
2.4.2 通用寄存器	17
2.4.3 程序状态寄存器	18
2.5 异常处理	21
2.5.1 ARM 处理器异常类型	21
2.5.2 ARM 异常处理	22
2.5.3 异常优先级	27
2.6 ARM Cortex - A9 内核架构	28
2.6.1 ARM Cortex - A9 架构简介	28
2.6.2 ARM Cortex - A9 单核技术	28
2.6.3 ARM Cortex - A9 多核技术	28
本章小结	31

思考题	31
第3章 ARM 处理器指令系统	32
3.1 ARM 指令集概述	32
3.2 ARM 指令的基本格式	33
3.2.1 ARM 指令集编码	33
3.2.2 ARM 指令基本语法格式	33
3.3 ARM 指令的寻址方式	35
3.4 ARM 存储器访问指令	39
3.5 ARM 数据处理指令	42
3.6 ARM 分支指令	49
3.7 协处理器指令	50
3.8 杂项指令	52
3.9 其他指令介绍	54
本章小结	56
思考题	56
第4章 Exynos4412 处理器简介	57
4.1 处理器功能介绍	57
4.2 处理器引脚介绍	59
4.3 内核单元	64
4.4 存储器系统	65
4.5 多媒体处理单元	65
4.6 外部连接及通信接口	66
4.7 系统外设单元	66
4.8 GPIO 单元	66
4.9 通用中断控制器	67
4.10 SPI 接口功能单元	68
4.11 I ² C 接口功能单元	69
4.12 UART 接口功能单元	70
4.13 ADC 功能单元	70
本章小结	71
思考题	71
第5章 Exynos4412 实验教学系统设计	72
5.1 实验教学系统概述	72
5.2 Exynos4412 存储模块	75
5.3 Exynos4412 电源管理系统	75
5.4 LED/KEY 模块	76
5.5 UART 模块	77
5.6 红外信号接收器	78
5.7 CAN/RS-485 通信接口模块	79
5.8 3-Axis 传感器模块	80
5.9 温度传感器模块	80
5.10 音频模块	81
5.11 ADC 模块	82
5.12 LCD 模块	82

5.13 摄像头接口模块	84
5.14 TF 卡/SD 卡存储模块	85
5.15 USB 模块	85
本章小结	86
思考题	86
第 6 章 Exynos4412 部件编程实例	87
6.1 GPIO 编程	87
6.1.1 GPIO 功能描述	87
6.1.2 Exynos4412 的 GPIO 常用寄存器分类	87
6.1.3 Exynos4412 的 GPIO 常用寄存器详解	88
6.1.4 GPIO 编程实例	90
6.2 中断控制器编程	94
6.2.1 ARM 处理器的中断响应流程	94
6.2.2 Exynos4412 中断概述	95
6.2.3 中断相关控制寄存器	95
6.2.4 ARM 中断编程实例	101
6.3 异步串行编程	105
6.3.1 Exynos4412 串口简述	106
6.3.2 UART 通信寄存器详解	106
6.3.3 UART 通信编程实例	110
6.4 PWM 定时器编程	113
6.4.1 PWM 定时器的寄存器	114
6.4.2 定时器的 PWM 输出工作流程	116
6.4.3 PWM 的编程实例	116
6.5 MMU 编程	118
6.5.1 MMU 的作用	118
6.5.2 MMU 的工作流程	119
6.5.3 MMU 编程实例	120
本章小结	123
思考题	123
第 7 章 Linux 程序开发	124
7.1 开发工具 GNU 概述	124
7.1.1 GCC 编译器	124
7.1.2 GNU Make	126
7.1.3 makefile 编程实例	130
7.2 Linux 文件 I/O 操作	132
7.2.1 Linux 系统调用和用户编程接口	132
7.2.2 Linux 文件 I/O 编程实例	133
7.3 Linux 多线程程序设计	136
7.3.1 任务、进程和线程概述	136
7.3.2 多线程编程常用函数	137
7.3.3 多线程编程实例	138
7.4 Linux 进程间通信	143
7.4.1 进程间通信方法概述	144

7.4.2	进程间相关函数介绍	144
7.4.3	进程间通信编程实例	147
7.5	Linux 驱动程序设计	154
7.5.1	Linux 的设备管理	154
7.5.2	设备驱动程序结构	155
7.5.3	字符型驱动编程实例	159
	本章小结	163
	思考题	164
第8章	嵌入式 Linux 程序开发	165
8.1	嵌入式 Linux 搭建	165
8.1.1	Linux 的交叉开发环境建立	165
8.1.2	嵌入式 Linux 引导程序 BootLoader 的配置和编译	167
8.1.3	嵌入式 Linux 系统内核的配置和编译	170
8.1.4	嵌入式 Linux 根文件系统设置	173
8.2	嵌入式 Linux LED 驱动程序开发	176
8.2.1	LED 驱动程序设计相关函数	177
8.2.2	LED 驱动程序设计	178
8.2.3	驱动程序编译	185
8.2.4	测试应用程序设计	186
8.2.5	驱动程序测试	187
8.3	PWM 驱动程序开发设计实例	187
8.3.1	PWM 硬件连接原理	188
8.3.2	PWM 驱动源程序设计	188
8.3.3	PWM 驱动程序编译	193
8.3.4	PWM 测试应用程序设计及编译	194
8.3.5	PWM 测试	196
	本章小结	197
	思考题	197
第9章	系统应用案例	198
9.1	华为荣耀畅玩 5x 手机	198
9.1.1	硬件结构	198
9.1.2	荣耀畅玩 5x 手机的技术指标	198
9.1.3	高通骁龙 615 处理器	200
9.1.4	海思处理器	202
9.2	网络机顶盒	202
9.2.1	功能	202
9.2.2	原理结构	203
9.2.3	小米盒子 3 增强版	204
9.2.4	天猫魔盒 M10	206
	本章小结	206
	思考题	206
附录	ARM 处理器的 CP15 协处理器	207
	参考文献	216

第 1 章 ARM 嵌入式技术概论

1.1 ARM 处理器的历史及发展

嵌入式技术是当前微电子技术与计算机技术结合的技术，以嵌入式计算机为核心的嵌入式系统是继 IT 网络技术之后信息技术又一个新的发展方向。嵌入式系统是“量身定做”的“专用计算机应用系统”，由嵌入式硬件和嵌入式软件组成。嵌入式系统硬件的核心是嵌入式微处理器，嵌入式系统软件主要包括嵌入式应用软件和嵌入式操作系统。

ARM 即 Advanced RISC Machines 的缩写，具有多种含义。它既可以代表一个公司的名字，也可以代表微处理器内核，即 ARM 公司设计的知识产权 (IP) 核——ARM 核，还可以代表一类嵌入式处理器，即使用 ARM 核的嵌入式微处理器——ARM 处理器。当前，ARM 处理器凭借其卓越的性能和显著的优点，已经成为高性能、低功耗、低成本嵌入式处理器的代名词，得到了众多的半导体厂家和整机厂商的大力支持。

1990 年，Advanced RISC Machines Limited 在英国剑桥成立，后来简称为 ARM Limited，即 ARM 公司。ARM 公司是设计公司，专门从事基于 RISC 芯片技术开发，是知识产权 (IP) 供应商。

ARM 公司本身不直接从事芯片生产，主要出售芯片设计技术的授权。世界各大半导体生产商从 ARM 公司购买其设计的 ARM 微处理器核，再根据各自不同的应用领域加入适当的外围电路，从而形成自己的 ARM 微处理器芯片进入市场。目前，全世界有几十家大的半导体公司使用 ARM 公司的授权，因此不仅使得 ARM 技术获得更多的第三方工具、制造、软件的支持，又使整个系统成本降低，使产品更容易进入市场被消费者所接受，更具有竞争力。ARM 公司于 1993 年开发了 ARM7 系列处理器内核，随后相继推出了 ARM9 系列、ARM9E 系列、ARM10E 系列、ARM11 系列、Cortex 系列、SecurCore 系列处理器。

ARM7、ARM9、ARM11 都是经典系列，也就是上一代处理器，其中 ARM9、ARM11 架构被采用得比较多，有不少中端 MID 平板电脑的处理器采用这种架构。新的 ARM Cortex 处理器系列包括了 ARMv7 架构的所有系列，分为 A、R、M 三类，旨在为各种不同的市场提供服务。Cortex-A 系列针对日益增长的且运行 Linux、Windows CE 和 Symbian 操作系统的消费娱乐产品和无线产品；Cortex-R 系列针对需要运行实时操作系统来进行控制应用的系统，包括汽车电子、网络和影音系统；Cortex-M 系列则是为那些对开发费用非常敏感，同时对性能要求不断增加的微控制器应用所设计的。Cortex 系列处理器的发展路线如图 1-1 所示。

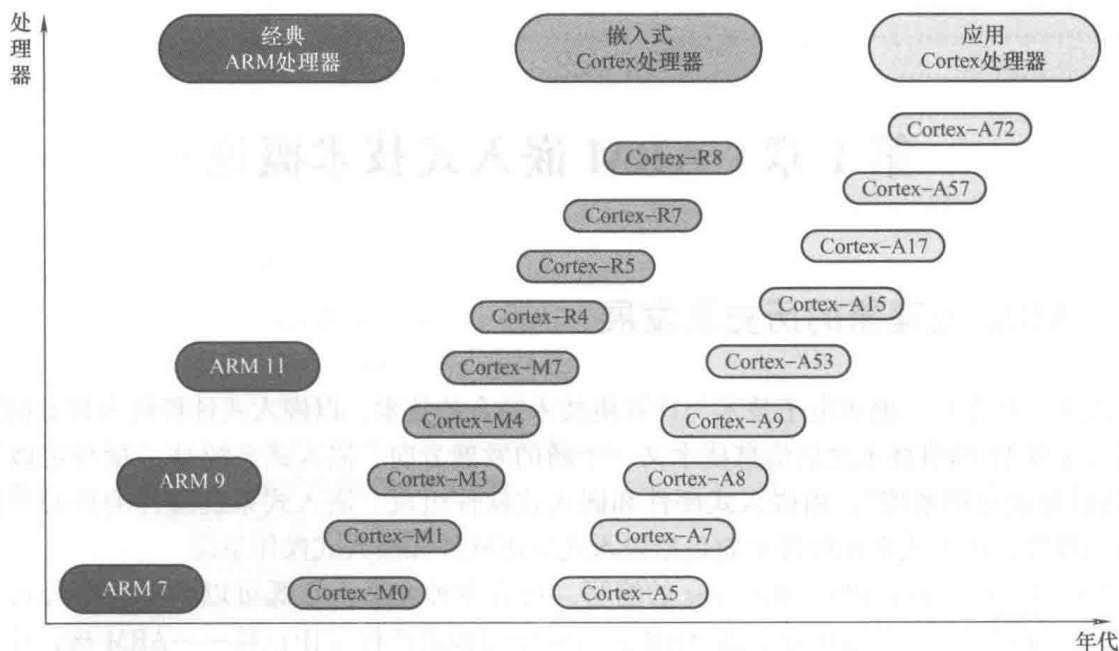


图 1-1 Cortex 系列处理器发展路线

1.2 ARM 处理器简介

1.2.1 ARM 处理器特征

ARM 内核采用精简指令集计算机（RISC）体系结构。ARM 处理器的主要特征如下：

- 1) 采用大量的寄存器，它们都可以用于多种用途。
- 2) 每条指令都可以有条件执行。
- 3) 能够在单时钟周期执行的单条指令内完成一项普通的移位操作和一项普通的 ALU 操作。
- 4) 通过协处理器指令集来扩展 ARM 指令集，包括在编程模式中增加了新的寄存器和数据类型。

5) ARM 内核增加了一套称为 Thumb 指令的 16 位指令集，使得内核既能够执行 16 位指令，也能够执行 32 位指令，从而增强了 ARM 内核的功能。

1.2.2 ARM 处理器架构

目前，ARM 设计的处理器体系结构已经从 v1 发展到了 v8，ARM 处理器的架构见表 1-1。

表 1-1 ARM 处理器的架构

架构	处理器系列
ARMv1	ARM1
ARMv2	ARM2、ARM3
ARMv3	ARM6、ARM7

(续)

架构	处理器系列
ARMv4	StrongARM、ARM7TDMI、ARM9TDMI
ARMv5	ARM7EJ、ARM9E、ARM10E、XScale
ARMv6	ARM11、ARM Cortex - M
ARMv7	ARM Cortex - A、ARM Cortex - M、ARM Cortex - R
ARMv8	Cortex - A57、Cortex - A72

ARM 早期的几款内核架构已经被后来的新架构所取代，目前主流的架构有 ARMv4、ARMv5、ARMv6、ARMv7 以及最新的 ARMv8 等，基于这 5 种架构的 ARM 微处理器又可分为 ARM7（不包括 v3 架构部分）、ARM9、ARM9E、ARM10E、ARM11 以及 Cortex - A/M/R 等主流系列。

1.2.3 Cortex 处理器架构

Cortex 系列处理器基于 ARMv7 架构和最新的 ARMv8 架构。下面对这两种新的架构进行简单介绍。

新一代 ARMv7 架构是在 ARMv6 架构的基础上诞生的，该架构采用了 Thumb - 2 技术，它是在 ARM 的 Thumb 代码压缩技术的基础上发展起来的，并且保持了对现存 ARM 解决方案完整的代码兼容性。Thumb - 2 技术比纯 32 位代码少使用 31% 的内存，减小了系统开销，同时比已有的基于 Thumb 技术的解决方案高出 38% 的性能。ARMv7 架构还采用了 NEON 技术，将 DSP 和媒体处理能力提高了近 4 倍，并支持改良的浮点运算，满足下一代 3D 图形、游戏物理应用及传统嵌入式控制应用的需求。

最新的 ARMv8 架构基于 32 位的 ARMv7 架构，包含两个主要的执行状态：AArch64 和 AArch32。AArch64 执行状态针对 64 位处理技术，引入了一个全新的指令集 A64，且支持现有的 ARM 指令集。ARMv8 将 64 位架构支持引入 ARM 架构中，保留了 TrustZone 安全执行环境、虚拟化、NEON（高级 SIMD）等 ARMv7 的关键技术特性，应用于有更高要求的产品领域，如企业应用、高档消费电子产品等。

1.3 ARM 处理器系列

目前的 ARM 处理器主要包括 Classic ARM 处理器、Cortex - A 系列处理器、Cortex - M 系列处理器、Cortex - R 系列处理器以及 SecurCore 系列处理器。Cortex - A 系列处理器是针对尖端的基于虚拟内存的操作系统和用户应用设计的，Cortex - M 系列处理器对微控制器和低成本应用提供优化，Cortex - R 系列处理器是面向实时系统的。

1.3.1 Classic ARM 处理器

虽然 Classic ARM 处理器的推出时间已超过 15 年，但是 ARM7TDMI 仍是市场上销量最高的 32 位处理器，占据目前市场上销售的所有 32 位处理器市场份额的四分之一，所以该类产品仍处于核心地位。

Classic ARM 处理器由三个处理器系列组成：

- 1) ARM7 系列：ARM7TDMI - S 和 ARM7EJ - S 处理器。
- 2) ARM9 系列：ARM926EJ - S、ARM946E - S 和 ARM968E - S 处理器。
- 3) ARM11 系列：ARM1136J (F) - S、ARM1156T2 (F) - S、ARM1176JZ (F) - S 和 ARM11MPCore 处理器。

各系列处理器的说明见表 1-2。在新的设计中可以采用更高性能的 Cortex 系列处理器代替相应的 Classic ARM 处理器，具体替代关系也在表 1-2 中给出。

表 1-2 Classic ARM 各系列处理器说明

系列	处理器	说 明	Cortex 替代产品
ARM11	ARM11MPCore	率先采用了多核技术，并继续为各种不同的应用场合授权，包括手机、导航设备等等	Cortex - A9 Cortex - A5
	ARM1176JZ (F) - S	是 Classic ARM 系列中的最高性能单核处理器，它引入了 Trust-Zone 技术，从而可以在恶意代码所及范围之外安全执行操作。它在各种不同的应用领域得到广泛授权，可用于当今主流品牌的手机、机顶盒、数字电视、高端相框和其他众多应用领域	Cortex - A9 Cortex - A8 Cortex - A5
	ARM1156T2 (F) - S	是最高性能的实时 Classic ARM 处理器，它首次引入了 Thumb - 2 指令集架构。该处理器在高性能确定性控制系统（例如汽车、工业控制和机器人解决方案）中很有用	Cortex - R4
	ARM1136J (F) - S	除扩展流水线、频率和性能之外、ARM1136J (F) - S 在许多方面都与 ARM926EJ - S 相似。该处理器还引入了基本单指令多数据（Single Instruction Multiple Data, SIMD）指令来提高编解码器性能，并提供可选浮点支持	Cortex - A5
ARM9	ARM968E - S	面积最小，功耗最低的 ARM9 处理器是众多实时类型应用的理想之选。通过可轻松从标准接口集成的紧密耦合内存，该处理器可高效工作	Cortex - R4
	ARM946E - S	包含可选 cache 接口以及完整的内存保护单元的实时处理器，对于大部分代码位于主存储器中的应用，该处理器非常有用。它按需加载到 cache 中，同时关键的异常处理代码和数据仍本地保留在紧密耦合内存中	Cortex - R4
	ARM926EJ - S	是入门级处理器。可支持完全版操作系统，包括 Linux、Windows CE 和 Symbian。因此，该处理器是众多需要完整图形用户界面应用的理想之选	Cortex - A5
ARM7	ARM7TDMI - S	是出色的重负荷处理器，适用于众多应用领域，该处理器通常用于手机，现在广泛用于移动和非移动应用领域	Cortex - M3 Cortex - M0

1.3.2 Cortex - A 系列处理器

Cortex - A 系列处理器提供了一系列用于执行复杂计算任务的解决方案，例如它支持多个操作系统（OS）平台以及多个软件应用程序的设备解决方案。另一方面，Cortex - A 系列

处理器在功耗和兼容性方面也拥有显著的优势。

Cortex - A 系列包括高性能的 Cortex - A17、成熟的 Cortex - A15、被广泛运用的 Cortex - A9 和高效率的 Cortex - A7、Cortex - A5 处理器，这些处理器都使用相同的 ARMv7 - A 架构，因此它们对应用程序具有良好的兼容性，包括对传统的 ARM、Thumb 和高性能的 Thumb - 2 指令集的支持。采用 ARMv8 - A 架构的 Cortex - A72、Cortex - A57、Cortex - A53 和 Cortex - A35 处理器都支持 64 位计算。ARMv8 - A 架构还拥有专门的执行状态，允许它来处理传统的 ARM32 位应用程序。这提供了对现有的 32 位生态系统升级的较好方法，并确保 64 位的生态系统是向后兼容的。

Cortex - A 系列的处理器众多，本节只对最新的 Cortex - A72、成熟的 Cortex - A15 和被广泛运用的 Cortex - A9 处理器作简单介绍。读者如需要其他处理器的详细信息可以自行到 ARM 公司官网（www.arm.com）查阅相关资料。

1. Cortex - A9 处理器

Cortex - A9 处理器是低功耗、散热良好、成本要求高的设备上的通用选择，例如智能手机、数字电视等，并且消费者和企业也将其应用在实现物联网上。

Cortex - A9 多核处理器是首款结合了 Cortex 应用级架构以及具有可扩展性能的多处理能力的 ARM 处理器，其提供了下列增强的多核技术：

- 1) 加速器一致性端口（ACP），用于提高系统性能和降低系统能耗。
- 2) 先进总线接口单元（Advanced Bus Interface Unit），用于在高带宽设备中实现低延迟时间。
- 3) 多核 TtustZone 技术，结合中断虚拟，允许基于硬件的安全和加强的类虚拟（para-virtualization）解决方案。
- 4) 通用中断控制器（GIC），用于软件移植和优化的多核通信。
- Cortex - A9 处理器的基本信息见表 1-3。

表 1-3 Cortex - A9 处理器的基本信息

项 目	采用的技术
体系结构	ARMv7 - A Cortex
Dhrystone 性能	每个内核 2.50 DMIPS/MHz
多核	1 ~ 4 个核，也提供单核版本
ISA 支持	ARM Thumb - 2/Thumb Jazelle DBX 和 RCT DSP 扩展 高级 SIMD NEON 单元（可选） 浮点单元（可选）
内存管理	内存管理单元
调试和追踪	CoreSight DK - A9（单独提供）

2. Cortex - A15 处理器

在 Cortex - A9 双核处理器之后，ARM 推出了一款型号为 Cortex - A15 的多核处理器。

Cortex - A15 的最快处理速度能达到 2.5GHz，还可以支持超过 4G 的存储。

Cortex - A15 处理器基于 ARMv7 - A Cortex 微架构，单个处理器集群拥有 1~4 个 SMP 处理核心，彼此通过 AMBA4 技术互联，支持一系列 ISA，能够在不断下降的功耗和成本预算的基础上提供高度可扩展性的解决方案，广泛适用于智能手机、平板电脑、大屏幕移动计算设备、高端数字家庭娱乐终端、无线基站、企业基础架构产品等。Cortex - A15 处理器的基本信息见表 1-4。

表 1-4 Cortex - A15 处理器的基本信息

项 目	采用的技术
体系结构	ARMv7 - A Cortex
多核	单个处理器群集中可配置 1~4 个 SMP 核心 通过 AMBA4 技术实现多个一致的 SMP 处理器群集
ISA 支持	ARM Thumb - 2 TrustZone 安全技术 NEON 高级 SIMD DSP&SIMD 扩展 VFPv4 浮点 Jazelle RCT 硬件虚拟化支持 大物理地址扩展（LPAE）
内存管理	ARMv7 内存管理单元
调试和追踪	CoreSight DK - A15

3. Cortex - A72 处理器

于 2015 年年初正式发布的 Cortex - A72 处理器是 ARM 公司性能最高、最先进的处理器之一，其基于 ARMv8 - A 架构，并构建于 Cortex - A57 处理器在移动和企业设备领域获得成功的基础之上。在相同的移动设备电池寿命限制下，Cortex - A72 相较基于 Cortex - A15 的设备能提供 3.5 倍的性能表现，展现优异的整体功耗性能。

Cortex - A72 的强化性能和功耗水平为消费者带来超凡的体验，这些高端设备包括高档的智能手机、中型平板电脑、大型平板电脑、翻盖式笔记本电脑等外形规格可变化的移动设备。未来的企业基站和服务器芯片也能受惠于 Cortex - A72 的性能，并在其优异的能效基础上和有限的功耗范围内增加内核数量，提升工作负载量。

Cortex - A72 是目前基于 ARMv8 - A 架构的处理器中性能最高的处理器。它再次展现了 ARM 在处理器技术中的领先地位，在提升新的性能标准之余大幅降低了功耗，广泛地扩展应用于移动设备与企业设备。

Cortex - A72 可在芯片上单独实现，也可以搭配 Cortex - A53 处理器与 ARM CoreLink CCI 高速缓存一致性互连（Cache Coherent Interconnect）构成 ARM big. LITTLE 配置，进一步提升能效。Cortex - A72 处理器的基本信息见表 1-5。

表 1-5 Cortex - A72 处理器的基本信息

项 目	采用的技术
体系结构	ARMv8 - A Cortex
多核	单个处理器群集中可配置 1 ~ 4 个 SMP 核心 通过 AMBA 5 CHI 或 AMBA 4 ACE 技术，可实现多个一致的 SMP 处理器群集
ISA 支持	AArch32 可完全向下兼容 ARMv7 AArch64 提供 64 位支持和全新架构功能 TrustZone 安全技术 NEON 高级 SIMD DSP 和 SIMD 扩展 VFPv4 浮点 硬件虚拟化支持
调试和跟踪	CoreSight DK - A72

1.3.3 Cortex - M 系列处理器

Cortex - M 系列处理器针对那些对成本和功耗敏感的 MCU 和终端应用进行了优化。这些终端应用包括智能测量、人机接口设备、汽车和工业控制系统、大型家用电器、消费性产品和医疗器械等。针对十分广泛的嵌入式应用，每个处理器都提供最佳权衡取舍。Cortex - M 系列处理器的特点如图 1-2 所示。

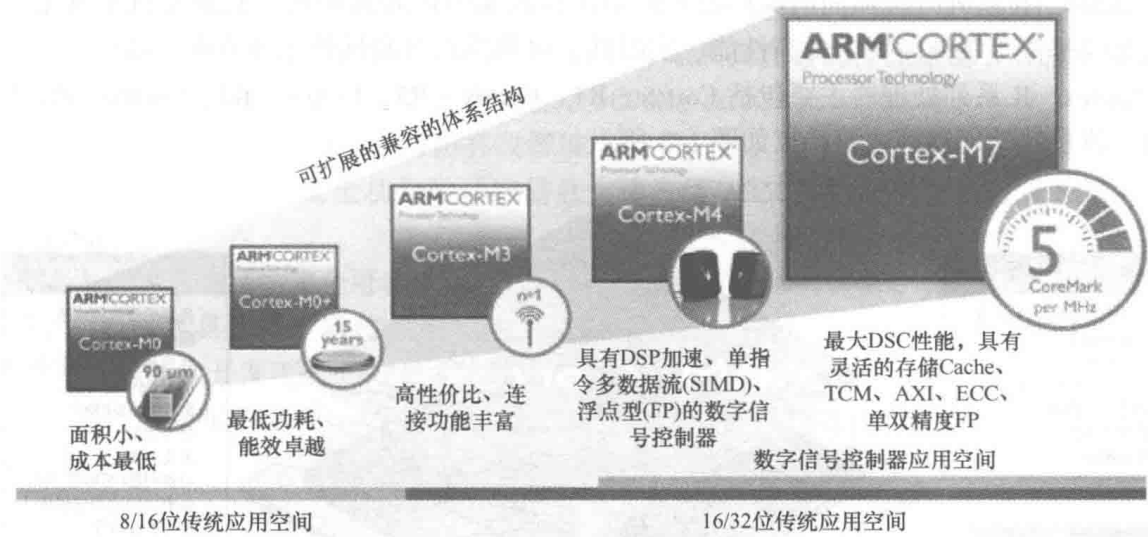


图 1-2 Cortex - M 系列处理器的特点

Cortex - M 系列处理器都是向上兼容的，这使得软件重用以及从一个 Cortex - M 处理器无缝发展到另一个成为可能。

Cortex - M0 处理器是目前最小的 ARM 处理器。该处理器的芯片面积非常小，功耗极低，且编程所需的代码占用量很少，这使得开发人员可以直接跳过 16 位系统，以接近 8 位系统的成本获取 32 位系统的性能。

Cortex - M0 + 处理器是能效极高的 ARM 处理器。它以极为成功的 Cortex - M0 处理器为

基础，保留了全部指令集和数据兼容性，同时进一步降低了能耗，提高了性能。它与 Cortex-M0 处理器一样，芯片面积很小，功耗极低，并且所需的代码量极少。

Cortex-M3 处理器是行业领先的 32 位处理器，适用于具有较高确定性的实时应用，经过专门开发，可以针对广泛的设备（包括微控制器、汽车车身系统、工业控制系统以及无线网络和传感器）开发高性能低成本平台。

Cortex-M3 处理器具有出色的计算性能以及对事件的优异响应能力，并且可应对实际应用中中对低功率（包括动态和静态）需求的挑战。此处理器配置十分灵活，从而可满足广泛的应用。

Cortex-M4 处理器是 ARM 公司专门开发的最新嵌入式处理器之一，用于需要控制功能和数字信号处理功能相结合的领域。

高效的信号处理功能与 Cortex-M 处理器系列的低功耗、低成本和易于使用的优点相结合，旨在提供专门面向电动机控制、汽车、电源管理、嵌入式音频和工业自动化市场等新兴应用的灵活解决方案。

Cortex-M7 处理器目前是高性能 Cortex-M 系列处理器中具有最高性能的成员之一，它能构建各种复杂的微控制器与嵌入式芯片。Cortex-M7 的设计旨在提供超高性能，并保持 ARMv7-M 架构卓越的响应性和易用性。它拥有业内领先的高性能和灵活的系统接口，是各种应用领域的理想之选。

1.3.4 Cortex-R 系列处理器

Cortex-R 系列处理器面向深层嵌入式系统以及实时嵌入式市场。它满足汽车安全、存储或无线基带等领域所要求的高性能、实时性、可靠性以及高性价比等方面的需求。

Cortex-R 系列处理器主要包括 Cortex-R4、Cortex-R5、Cortex-R7、Cortex-R8 等处理器。该系列处理器的主要特点如图 1-3 所示。

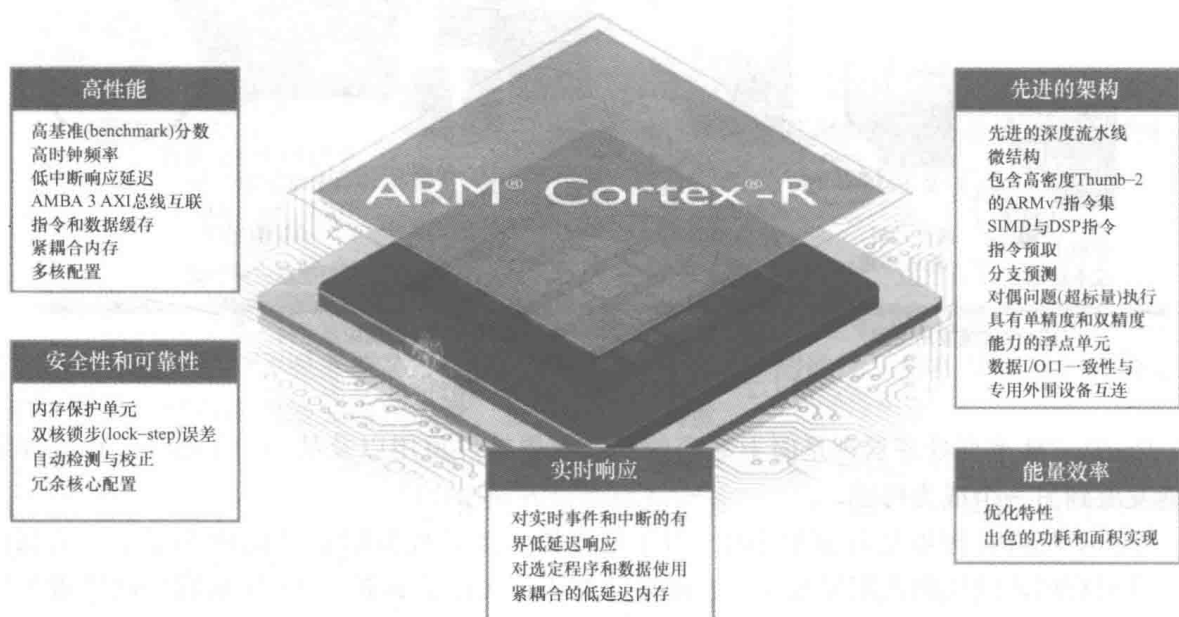


图 1-3 Cortex-R 系列处理器主要特点