

硬件电路工程师从入门到提高丛书

# 嵌入式系统

## 原理与应用

姜立东 王寿武 陆晓鹏 陈绮 等编著

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



硬件电路工程师从入门到提高丛书

# 嵌入式系统原理与应用

姜立东 王寿武 陆晓鹏 陈绮 等编著



机械工业出版社

随着科学技术的迅速发展,嵌入式系统已经无所不在,网络设备、移动电话、PDA、掌上游戏机等都是嵌入式系统的成功典范。

本书从实际应用的角度出发,针对 ARM 体系结构和 VxWorks 操作系统,详细介绍了嵌入式系统开发的概念和应用,并且提供了一个支持网络的仿真平台,供读者实践书中提供的所有实例。全书可以分为两个部分:第 1 部分介绍 ARM 的产品特点和分类,深入浅出地对 ARM 处理器体系结构作了精炼的介绍,并且对 ARM 平台上优秀的开发套件 ADS 进行了介绍和实践;第 2 部分结合大量的程序实例,详细地介绍了 VxWorks 的实时嵌入式本质,并将 ARM 处理器与 VxWorks 操作系统有机结合起来,使得读者通过阅读本书能够迅速投入到嵌入式开发的热潮中。

本书内容丰富、全面系统、实用性很强,既可以作为高等学校相关专业的教材或参考书,同时也可以作为广大嵌入式系统设计工程师必不可少的工具书或培训教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统原理与应用/姜立东等编著. —北京:机械工业出版社, 2006.4  
(硬件电路工程师从入门到提高丛书)

ISBN 7-111-18801-2

I. 嵌... II. 姜... III. 微型计算机—系统开发 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 027601 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:张俊红 版式设计:冉晓华 责任校对:陈延翔

封面设计:陈沛 责任印制:杨曦

成都新华印务有限责任公司印刷

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.5 印张 · 484 千字

0001 - 4000 册

定价: 30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

# 硬件电路工程师从入门到提高丛书

## 编 委 会

主 编	姜雪松			
副主编	张俊红	张 凯		
编 委	方华刚	姜立东	蒋 亮	
	李晓凯	齐兆群	张 蓬	
	赵 鑫	叶 琅	许灵军	

# 丛 书 序

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步，以往有些硬件电路设计的书籍内容已经比较陈旧、落后，难以适应高等院校教学和硬件电路工程师的要求。特别是在电子学和通信技术发展神速、社会发展日新月异的今天，如何适应这种情况和要求，已经成为一个必须认真考虑的问题。

如今，我国已成为全球增长潜力最大的电子产品消费大国，同时也是全球最大的移动电话市场和第3大PC市场，未来5年还将成为全球第2大半导体市场。中国市场的商机令世界各国IT公司心动不已，竞相调整中国战略，纷纷加大投资。这种情况必将导致对硬件电路工程师的海量需求。以IC人才为例，据不完全统计，全国目前定位于IC设计的企业大约200多家，IC设计人员还不到4000人，大都是小作坊模式，每个企业只有两三人掌握某一方面芯片的专长。从总体上看，按未来几年的市场需求，每年所需IC设计人才保守估计在5万人左右，如果要保证整个IC设计产业正常运作，人才需求量则高达20~50万。可见，提高硬件电路设计的人才教育，加强硬件电路工程师的人才储备，已经成为高等院校和各大IT公司的当务之急。

硬件电路设计是一门涉及到多门学科、实用性非常强的技术，因此硬件电路设计人员的培养需要进行大量的实践，而不仅仅是纸上谈兵。对于硬件电路设计人员的培养，除了需要培养具体的设计技术和设计技巧外，更为重要的是需要培养设计人员的创新意识。为此，组织一套理论严谨、内容新颖、实用性较强的硬件电路设计丛书，将会对我国的硬件电路设计人才的培养起到很大的推动作用。机械工业出版社的领导和编辑们独具慧眼，选题准确，决策果断，通过对硬件电路设计的相关选题进行层层筛选，最终选定了8个十分具有代表性的选题；同时组织了一批多年从事硬件电路设计、具有丰富实践经验的硬件电路设计工程师来进行编写，目的是保证这套丛书的质量和实用性。这套硬件电路工程师从入门到提高丛书包括：

- 《Verilog HDL 与数字电路设计》
- 《VHDL 与数字电路设计》
- 《可编程逻辑器件和 EDA 设计技术》
- 《印制电路板设计》
- 《Protel DXP 电路设计入门与应用》
- 《HyperLynx 仿真与 PCB 设计》
- 《DSP 原理与应用》
- 《嵌入式系统原理与应用》

这套丛书从实际应用的角度出发，详细介绍了目前硬件电路设计的各个主要方面。这套丛书非常重视可读性，内容深入浅出，便于读者自学；同时也非常注重实践性，列举了典型的工程实例，体现了硬件电路设计书籍的实践性，从而可以使读者快速高效地掌握相关领域的知识。这套丛书面向所有的硬件电路工程师和立志于成为硬件电路工程师的相关专业人

员，既可以作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的教材或者教学参考书，同时也可以作为各类从事电子系统设计的科研人员硬件电路工程师的应用参考书。

最后，预祝机械工业出版社硬件电路工程师从入门到提高丛书取得成功，为我国硬件电路工程师的人才培养和发展贡献一份力量。同时对参与这套丛书工作的各位作者、出版社的领导和编辑们表示衷心的感谢，感谢你们为我国硬件电路工程师的人才培养和储备所作的努力！

**硬件电路工程师从入门到提高丛书编委会**

# 前 言

嵌入式系统已经无处不在，从汽车电子、通信设备，到工业控制、医疗仪器，乃至航空航天、国防安全等各行各业，嵌入式系统正日益与人们的日常生活发生越来越紧密的联系。网络设备、移动电话，还有各式各样的手持电子设备（比如现在炙手可热的 N70 手机、PSP 游戏机），无不是嵌入式系统的成功典范。

所谓嵌入式系统，就是指以微处理器为核心的硬件平台与以嵌入式操作系统为核心的软件平台共同构建的系统。嵌入式系统最大的特点就是“嵌入”，即具备很强的针对性。面向不同的应用，构造出不同的嵌入式系统，但是高效、低功耗、低成本、实时、可靠、可裁减等特点都是嵌入式系统共同追求的目标。从硬件上看，ARM 公司的 32 位微控制器 IP 核因其卓越的性能和良好的扩充性为广大嵌入式系统设计者所喜爱。目前，大多数半导体公司都推出了自己的 ARM SoC 芯片，使用 ARM 芯片构造 32 位的嵌入式系统成为嵌入式系统中的一个重要分支，也占据了目前手持设备、娱乐设备的主体部分。从软件上看，美国风河 (WindRiver) 公司推出的 VxWorks 是实时嵌入式领域中当之无愧的领跑者，它的强实时性、高可靠性特点使得人类的火星探测成为了可能。

嵌入式系统的设计与开发要求开发人员“软硬兼施”，要求他们广泛地具备诸如计算机操作系统、底层软件开发、高级程序语言等软件方面的知识和能力，还要具备了解处理器、存储器等硬件性能和应用的能力；不但要在计算机领域有坚实的基础，也需要掌握通信、多媒体等技术。可见嵌入式系统体积、功耗虽小，但是其开发的门槛较高，含金量更是一点也不会少。

目前，从事嵌入式系统开发工作的技术人员人数众多，同时高等学校相关专业的本科生和研究生也立志于从事嵌入式系统开发，但是他们往往也和笔者当年一样，苦于没有将嵌入式系统理论及对工具的介绍用来指导具体实践的书籍，也曾迫切希望能有多一些资料可以学习。如今能够借此机会，将自己的微薄之力贡献出来，为广大学习嵌入式系统开发的朋友提供一个能够快速上手的平台，也算了却了一个心愿。

本书主要针对 ARM 体系结构和 VxWorks 操作系统，详细地介绍了嵌入式系统开发的概念和应用。本书共包括 13 章，分为两个部分。

第 1 部分为第 1~5 章，从 ARM 的产品特点、分类、性能指标和版本分类入手，深入浅出地对 ARM 处理器体系结构（如编程模型、指令集）作了精炼的介绍，并且通过对 ARM 平台上优秀的开发套件 ADS 的介绍和程序实践，让读者了解了现今如火如荼的 ARM 在嵌入式系统中的作用和一般的开发方法。

第 2 部分是第 6~13 章，通过对 VxWorks 操作系统多任务、任务间通信机制、内存管理、中断异常处理、定时以及网络机制的详细介绍，并通过大量的实际应用程序范例，提供了完全的单机仿真环境，供读者全程实践，将理论迅速转换为读者的实践。本书提供的所有 VxWorks 应用程序都可以在没有开发板的情况下按照书中的配置在普通 PC 上完全模拟运行，涵盖了实时多任务、网络应用等诸多实用程序，比如防火墙和 FTP 客户端实例等。最

后一章通过强化 BSP 的概念和开发方法，将 ARM 处理器与 VxWorks 操作系统有机地结合起来，使读者了解微处理器与操作系统是如何配合开发和工作的。

本书内容丰富、全面系统、实用性很强，可以使读者快速全面地掌握基于 VxWorks 的嵌入式系统开发的知识，尤其是提供了一个完全网络仿真功能的目标平台贯穿始终，使读者真正能够即学即用，迅速掌握和体会嵌入式软件开发的手段和方法。本书既可以作为高等学校相关专业的教材或者参考书，同时也可以作为广大嵌入式软件工程师必不可少的工具书或培训教材。

本书由姜立东、王寿武、陆晓鹏、陈绮和王鹰共同编写，作者都有着多年的嵌入式系统开发经验，熟悉基于 VxWorks 的应用开发、网络应用，有着丰富的 BSP 开发经验，本书就是作者多年来设计嵌入式系统的经验总结。在本书编写的过程中，姜雪松、张凯、蒋亮、蒋建新、赵鑫和齐兆群为本书的编写整理了大量的资料，邹德智、丁海波、张博、张蓬、曹霖和刘磊完成了全书的校对工作，渠丽娜、郭健、张学静、程显奎、吴鹏、葛树涛和杜平参与了书中程序的调试工作，在这里向他们表示由衷的感谢。另外，作者在编写本书的过程中参考了不少专家和学者的著作、学术论文和经验总结等，在此对他们表示最诚挚的谢意！

限于作者的理论水平和实际开发经验，书中难免存在一些不足之处，恳请广大读者和相关专家批评指正。

作 者



# 目 录

丛书序	
前言	
第1章 ARM 处理器概述	1
1.1 初识 ARM	1
1.2 ARM 产品及其特点	2
1.3 ARM 微处理器简介	5
1.3.1 RISC 与 ARM	5
1.3.2 ARM 体系结构的版本	6
1.3.3 ARM 体系的变种	7
1.3.4 ARM/Thumb 体系命名规则	9
第2章 ARM 开发基础	10
2.1 ARM 处理器的工作状态	10
2.2 ARM 处理器的工作模式	11
2.3 ARM 寄存器的组织方式	11
2.3.1 ARM 寄存器的分类	11
2.3.2 不同工作模式下的寄存器组织	12
2.3.3 不同工作状态下的寄存器组织	13
第3章 ARM 指令系统	16
3.1 ARM 指令格式及寻址方式	16
3.1.1 基本的 ARM 指令及格式	16
3.1.2 ARM 指令的寻址方式	18
3.2 ARM 指令集介绍	20
3.2.1 跳转指令	20
3.2.2 数据处理指令	22
3.2.3 乘法指令与乘加指令	29
3.2.4 程序状态寄存器访问指令	32
3.2.5 加载/存储指令	34
3.2.6 批量数据加载/存储指令	37
3.2.7 数据交换指令	37
3.2.8 协处理器指令	38
3.2.9 异常产生指令	41
3.3 Thumb 指令集简介	42
第4章 ARM 存储系统及异常处理	44
4.1 ARM 处理器的存储系统	44
4.1.1 ARM 体系中的存储空间	44
4.1.2 ARM 的字节序	44
4.1.3 非对齐的存储访问操作	45
4.1.4 指令预取和自修改代码	45
4.1.5 系统控制协处理器 CP15	46
4.1.6 存储器管理单元	48
4.1.7 高速缓冲存储器和写缓冲区	50
4.2 ARM 处理器的异常	51
4.2.1 ARM 异常类型	51
4.2.2 对异常的响应	52
4.2.3 异常处理	52
4.2.4 从异常返回	53
4.2.5 异常的具体描述	53
第5章 ARM 开发系统	55
5.1 ADS 简介	55
5.2 ADS 命令行工具简介	55
5.3 ARM C/C++ 库简介	56
5.3.1 C/C++ 库的组成	56
5.3.2 库目录结构	57
5.4 CodeWarrior for ADS 安装与使用介绍	57
5.4.1 CodeWarrior IDE 介绍	57
5.4.2 CodeWarrior for ADS 安装说明	58
5.4.3 ADS 初探与 HelloWorld 实例	61
5.5 AXD 调试器简介	68
5.5.1 调试的基本概念	68
5.5.2 AXD 的使用	69
5.5.3 使用 AXD 和外部仿真器调试目标板	74
第6章 实时嵌入式操作系统	
VxWorks	76
6.1 嵌入式系统	76
6.2 实时系统与 RTOS	76
6.2.1 实时系统	76
6.2.2 实时操作系统	77
6.3 VxWorks 操作系统	78
第7章 Tornado 集成开发环境	81
7.1 Tornado 简介	81

7.1.1 交叉开发环境 .....	81	9.1.3 内存管理的基本概念 .....	168
7.1.2 Tornado 与 VxWorks 的关系 .....	82	9.2 VxWorks 内存管理机制 .....	169
7.2 Tornado 初探 .....	83	9.2.1 VxWork 内存布局 .....	169
7.2.1 安装 Tornado 2.2 for ARM .....	83	9.2.2 VxWorks 动态内存管理 .....	170
7.2.2 Tornado 目录结构 .....	88	9.3 VxWorks 内存管理函数 及应用 .....	172
7.2.3 Tornado 基本组件的功能 .....	89	9.3.1 VxWorks 内存管理常用函 数库 .....	172
7.3 入门实例——HelloWorld 应用 程序 .....	90	9.3.2 VxWorks 内存分区实践 .....	172
7.3.1 创建工程 .....	90	<b>第 10 章 中断、异常和定时</b> .....	174
7.3.2 添加并编译源代码 .....	92	10.1 中断和异常 .....	174
7.3.3 使用 VxSim 模拟器 .....	95	10.2 VxWorks 中断处理机制 .....	174
7.4 入门实例——VxWorks 可启动 映像 .....	97	10.2.1 中断向量表 .....	174
7.4.1 可启动工程与 BSP .....	98	10.2.2 中断服务程序 .....	175
7.4.2 裁减与定制 VxWorks .....	100	10.3 中断与任务级的通信 .....	178
7.5 进阶使用 .....	103	10.4 VxWorks 异常处理机制 .....	178
7.5.1 使用调试与分析工具 .....	103	10.5 VxWorks 的定时机制 .....	179
7.5.2 使用外部工具 .....	118	10.5.1 系统时钟及辅助时钟 .....	179
7.5.3 使用 WindSh .....	119	10.5.2 看门狗定时器 .....	180
<b>第 8 章 任务控制及任务间通信</b> .....	122	<b>第 11 章 网络协议栈及编程</b> .....	188
8.1 VxWorks 任务 .....	122	11.1 VxWorks 网络协议栈 .....	188
8.2 VxWorks 多任务 .....	122	11.1.1 完备的网络解决方案 .....	188
8.2.1 任务状态转换 .....	123	11.1.2 网络协议栈层间接口 .....	189
8.2.2 任务调度 .....	124	11.2 网络驱动和 MUX 接口 .....	190
8.2.3 任务错误状态 .....	126	11.2.1 MUX 与网络协议、网络驱动 的关系 .....	190
8.2.4 任务异常处理 .....	127	11.2.2 VxWorks 网络初始化步骤 .....	191
8.2.5 共享代码和重入 .....	127	11.2.3 VxWorks 网络驱动开发概述 .....	193
8.2.6 VxWorks 系统任务 .....	129	11.3 VxSim 完全网络仿真环境 .....	199
8.3 VxWorks 任务控制函数 .....	130	11.4 套接字编程 .....	203
8.3.1 任务创建与任务删除 .....	130	11.4.1 套接字 .....	203
8.3.2 任务的控制 .....	131	11.4.2 套接字通信流程 .....	204
8.4 任务间通信 .....	132	11.4.3 SockLib 函数 .....	206
8.4.1 信号量 .....	132	11.4.4 基于流套接字的双机通信 实例 .....	210
8.4.2 消息队列 .....	161	11.5 使用 IPFilter 截获 IP 包 .....	217
8.4.3 管道 .....	164	11.6 FTP 程序实例 .....	222
8.4.4 共享与互斥 .....	165	<b>第 12 章 基于 VxWorks 的综合应用 实例</b> .....	229
8.4.5 网络上任务间的通信 .....	166	12.1 VxWorks 任务间通信实例 .....	229
<b>第 9 章 内存管理</b> .....	167	12.2 经典算法题解 .....	236
9.1 嵌入式系统内存概述 .....	167		
9.1.1 嵌入式系统内存分类 .....	167		
9.1.2 嵌入式系统内存管理的特点 .....	168		

12.2.1 理发师问题 .....	236	13.4 VxWorks BSP 的设计与 开发 .....	272
12.2.2 哲学家吃饭问题 .....	240	13.4.1 嵌入式系统软件开发方法 .....	272
12.3 网络应用实例——ping 函数 实现 .....	245	13.4.2 系统的初始化配置文件设计 .....	273
<b>第 13 章 基于 ARM 处理器平台的 BSP 开发 .....</b>	<b>262</b>	13.4.3 系统入口汇编模块的开发 .....	276
13.1 BSP 的概念 .....	262	13.4.4 BSP 的 C 文件代码设计 .....	294
13.2 BSP 总体结构与功能 .....	263	13.5 VxWorks 下的驱动程序 .....	295
13.2.1 BSP 工程文件结构 .....	263	13.5.1 VxWorks I/O 系统简介 .....	295
13.2.2 VxWorks 操作系统映像 .....	265	13.5.2 VxWorks 驱动程序简介 .....	297
13.2.3 BootRom 映像代码结构 .....	266	13.5.3 串口驱动的设计概述 .....	297
13.2.4 VxWorks 映像代码结构 .....	267	13.6 BSP 的测试 .....	299
13.3 基于 ARM 的 VxWorks 引导 顺序 .....	269	<b>参考文献 .....</b>	<b>302</b>

# 第 1 章 ARM 处理器概述

## 1.1 初识 ARM

ARM 的全称是 Advanced RISC Machine (先进精简指令计算机), 它是英国的一家电子公司, 是微处理器行业的一家知名企业。ARM 公司成立于 1990 年 11 月, 由 Acorn、Apple 和 VLSI 三家公司联合建立。ARM 公司于 1990 年首创了 chipless 的生产模式, 即该公司既不生产芯片, 也不设计芯片, 而是设计出高效的微处理器 IP 内核, 授权给半导体公司使用。ARM 公司在这种模式下设计了大量高性能、廉价、耗能低的 RISC 处理器、相关技术及软件, 其技术具有性能高、成本低和能耗省的特点, 适用于多种领域, 比如嵌入式系统控制、消费及教育类多媒体、DSP 和无线通信等。基于 ARM 技术的微处理器应用约占据了 32 位 RISC 微处理器的 75% 以上的市场份额, ARM 技术正在逐步渗入到我们生活的各个方面。

ARM 公司的产品是 IP (Intelligence Property, 知识产权), 没有任何物理意义上的硬件实体。但是凭借着先进的技术和低廉的价格, 世界上很多大的半导体公司都以 ARM 公司的技术授权为基础, 添加自己的设计, 并推出最终的芯片产品。如 Intel、LG 半导体、NEC、SONY、TI、Philips 公司等业界巨头都是 ARM 公司的客户, 它们进一步设计并且制造出了面向市场的 ARM7、ARM9、ARM9E-S、StrongARM、ARM10 等著名的芯片产品。

ARM 公司自 1990 年正式成立至今, 在 32 位 RISC CPU 开发领域不断取得突破, 其结构已经从 V3 发展到 V6。由于 ARM 公司自成立以来, 一直以 IP 提供者的身份向各大半导体制造商出售知识产权, 而自己从不介入芯片的生产销售, 加上其设计的芯核具有功耗低、成本低等显著优点, 因此获得众多的半导体厂家和整机厂商的大力支持, 在 32 位嵌入式应用领域获得了巨大的成功, 在低功耗、低成本的嵌入式系统应用领域确立了市场领导地位。现在设计、生产 ARM 芯片的国际大公司已经超过 50 多家, 国内中兴通讯和华为通讯等公司也已经购买了 ARM 公司的芯核, 用于通信专用芯片的设计。

目前非常流行的 ARM 芯核有 ARM7TDMI、StrongARM ARM720T、ARM9TDMI、ARM922T、ARM940T、ARM946T、ARM966T、ARM10TDMI 等。自 V5 以后, ARM 公司提供 Piccolo DSP 的芯核给芯片设计者, 用于设计 ARM + DSP 的 SoC (System on Chip, 片上系统) 结构的芯片。此外, ARM 芯片还获得了许多实时操作系统 (Real Time Operating System) 供应商的支持, 如 Windows CE、Linux、VxWorks、uCOS、BeOS 等。

ARM 微处理器正得到越来越多的应用, 几乎已经深入到各个领域。

### 1. 工业控制领域

作为 32 位 RISC 架构的处理器, ARM 不但占据了高端微控制器市场的大部分市场份额, 同时也逐渐向低端微控制器应用领域扩展。ARM 微控制器的低功耗、高性价比, 向传统的 8 位/16 位微控制器提出了挑战, 使得越来越多的工控微处理器生产商开始支持 ARM 处理器。

## 2. 网络应用领域

基于 ARM 微处理器结构的 ADSL (不对称数字用户线)、语音、视频芯片的不断问世,加速了宽带技术的推广,宽带的普及又推动了 ARM 在这些领域的进步。

## 3. 无线通信领域

目前已有超过 85% 的无线通信终端设备采用了 ARM 技术,在手持设备中多半能够见到 ARM 的身影。ARM 以其高性能和低成本在该领域的地位日益巩固。

## 4. 消费类电子产品

从智能手机到风靡全球的 PSP (Play Station Portable, SONY 新一代掌上游戏机),从数字视音频播放器到风头正劲的数字机顶盒,无处不见 ARM 的身影。此外,数码相机、打印机也多采用 ARM 技术,ARM 在消费类电子产品中占据了绝对的优势。

此外,ARM 微处理器及技术还应用到了更多不同的领域,并会在将来取得更加广泛的应用。

# 1.2 ARM 产品及其特点

ARM 具有众多产品系列,这些系列的处理器都具有 ARM 体系结构的共同特点,同时又都有各自的特点及应用领域。

### 1. ARM7 系列

ARM7 系列是低功耗的 32 位处理器,最高处理能力能达到 130MIPS (百万条指令/秒)。该系列包括 ARM7TDMI、ARM7TDMI-S、ARM7EJ-S 和 ARM720T 等型号,其中 ARM7TDMI 是目前使用最广泛的 32 位 RISC 处理器。该系列的主要功能特点有:

- 1) 极低的功耗,适合对功耗要求较高的应用,如便携式产品。
- 2) 能够提供 0.9MIPS/MHz 的三级流水线结构。
- 3) 代码密度高并兼容 16 位的 Thumb 指令集。
- 4) 对操作系统的支持广泛,包括 Windows CE、Linux、Palm OS 等。
- 5) 指令系统与 ARM9 系列、ARM9E 系列和 ARM10E 系列兼容。

ARM7 系列产品的性能特征如表 1-1 所示。

表 1-1 ARM7 系列产品的性能特征

型 号	Cache 容量 (指令/数据)/KB	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	Thumb	DSP	Jazelle
ARM7TDMI	无	无	无	有	有	无	无
ARM7TDMI-S	无	无	无	有	有	无	无
ARM7EJ-S	无	无	无	有	有	有	有
ARM720T	8/8	无	MMU	有	有	无	无

该系列属于低成本、低功耗的常规微处理器,配有高速缓存 (Cache)、内存管理、写缓冲和 JTAG (联合测试工作组),广泛应用于工业控制、网络和调制解调器设备、移动电话等多种多媒体和嵌入式应用领域,尤其是手持式计算、数据通信和消费类、多媒体类产品。

### 2. ARM9 系列

ARM9 系列处理器属于低功耗、高性能的微处理器，包括 ARM920T、ARM922T、ARM940T 等型号。该系列具有以下特点：

- 1) 5 级整数流水线，指令执行效率更高。
- 2) 支持 32 位 ARM 指令集和 16 位 Thumb 指令集。
- 3) 支持 32 位的高速 AMBA（高级微控制器总线架构）总线接口。
- 4) 全性能的 MMU（存储管理单元），支持 VxWorks、Linux、Palm OS 等多种主流嵌入式操作系统。
- 5) 支持数据 Cache 和指令 Cache，具有更高的指令和数据处理能力。

ARM9 系列产品的性能特征如表 1-2 所示。

表 1-2 ARM9 系列产品的性能特征

型 号	Cache 容量 (指令/数据)/KB	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	Thumb	DSP	Jazelle
ARM920T	16/16	无	MMU	有	有	无	无
ARM922T	8/8	无	MMU	有	有	无	无
ARM940T	4/4	无	MMU	有	有	无	无

ARM9 处理器多应用于高级引擎管理、保安系统、机顶盒、便携计算机、数码相机/摄像机、掌上游戏机和高档打印机等产品。

### 3. ARM9E 系列

ARM9E 系列处理器是 ARM9 系列处理器的增强版，在单 ARM9 内核之外提供了增强的 DSP（数字信号处理）处理能力，适用于需要同时使用 DSP 和微控制器的应用场合。

ARM9E 系列产品的性能特征如表 1-3 所示。

表 1-3 ARM9E 系列产品的性能特征

型 号	Cache 容量 (指令/数据)	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	Thumb	DSP	Jazelle
ARM926EJ-S	4~128KB/4~128KB	有	MMU	双 AHB	有	有	有
ARM946E-S	4KB~1MB/4KB~1MB	有	MPU	AHB	有	有	无
ARM966E-S	无	有	无	AHB	有	有	无

### 4. ARM10E 系列

ARM10E 系列处理器包括 ARM1020E、ARM1022E 和 ARM1026EJ-S 三种型号。该系列处理器同样具有高性能、低功耗的特点，而其新的体系结构使得在相同频率下性能较 ARM9E 提高了近 50%。同时，ARM10E 系列采用了先进的节能方式，使其功耗极低。该系列具有以下特点：

- 1) 支持 DSP 指令集，适合于需要高速数字信号处理的场合。
- 2) 6 级整数流水线，指令执行效率更高。
- 3) 支持 32 位 ARM 指令集和 16 位 Thumb 指令集。
- 4) 支持 32 位的高速 AMBA 总线接口。
- 5) 支持 VFP10 浮点处理协处理器。
- 6) 全性能的 MMU（内存管理单元），支持 Windows CE、Linux、VxWorks 等多种主流

嵌入式操作系统。

7) 支持数据 Cache 和指令 Cache, 具有更高的指令和数据处理能力。

ARM10E 系列产品的性能特征如表 1-4 所示。

表 1-4 ARM10E 系列产品的性能特征

型 号	Cache 容量 (指令/数据)/KB	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	Thumb	DSP	Jazelle
ARM1020E	32/32	无	MMU	双 AHB	有	有	无
ARM1022E	16/16	无	MMU	双 AHB	有	有	无
ARM1026EJ-S	可变	有	MMU + MMU	双 AHB	有	有	有

ARM10E 系列微处理器主要应用于下一代无线设备、数字消费品、成像设备、工业控制、通信和信息系统等领域。

### 5. ARM11 系列

ARM11 系列处理器是目前比较先进的产品系列, 主要有 ARM1136J-S 和 ARM1136JF-S 型, 其产品的性能特征如表 1-5 所示。

表 1-5 ARM11 系列产品的性能特征

型 号	Cache 容量 (指令/数据)/KB	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	DSP	Jazelle	SIMD	浮点 运算
ARM1136J-S	4~64/4~64	有	MMU	4 个 64 位 AHB	有	有	有	无
ARM1136JF-S	4~64/4~64	有	MMU	4 个 64 位 AHB	有	有	有	有

### 6. SecurCore 系列

SecurCore 系列是应安全需要而设计的, 提供完善的 32 位 RISC 技术的安全解决方案。因此, SecurCore 系列微处理器除了具有 ARM 体系结构的低功耗、高性能的特点外, 还具有其独特的优势, 即提供了对安全解决方案的支持。

SecurCore 系列产品的性能特征如表 1-6 所示。

表 1-6 SecurCore 系列产品的性能特征

型 号	Cache (指令/数据)	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	Thumb	DSP	Jazelle
SC100	无	无	MPU	无	有	无	无
SC110	无	无	MPU	无	有	无	无
SC200	可选	无	MPU	无	有	有	有
SC210	可选	无	MPU	无	有	有	有

SecurCore 系列微处理器除了具有 ARM 体系结构各种主要特点外, 还在系统安全方面具有如下的特点:

- 1) 带有灵活的保护单元, 以确保操作系统和应用数据的安全。
- 2) 采用软内核技术, 防止外部对其进行扫描探测。
- 3) 可集成用户自己的安全特性和其他协处理器。

SecurCore 系列微处理器主要应用于一些对安全性要求较高的应用产品及应用系统, 如电子商务、电子政务、电子银行业务、网络和认证系统等领域。

SecurCore 系列微处理器包含 SecurCore SC100、SecurCore SC110、SecurCore SC200 和 SecurCore SC210 等 4 种类型，以适用于不同的应用场合。

### 7. StrongARM 系列

StrongARM 系列现已授权给 Intel 公司。StrongARM 系列属于高性能、同时满足常规需要的一种微处理器，它融合了 Intel 的处理器技术以及 ARM 体系结构的高效的优点。常见的 StrongARM 产品有 SA110 处理器、SA1100 PDA 系统芯片和 SA1500 多媒体处理器芯片等。该系列的处理器尤其适用于消费类电子产品，如 PDA（个人数字助理）、便携式通信产品。其性能特征如表 1-7 所示。

表 1-7 Intel StrongARM 系列产品的性能特征

型 号	Cache 容量 (指令/数据)/KB	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	Thumb	DSP	Jazelle
Strong ARM	16/8	无	MMU	N/A	无	无	无

### 8. Xscale

Xscale 处理器是目前 Intel 主要推广和应用的一款基于 ARMv5TE 体系结构的处理器。它是一款全性能、高性价比、低功耗的处理器，支持 16 位的 Thumb 指令集和 DSP 指令集，已大量使用在移动通信、消费类手持设备以及网络产品中，其产品的性能特征如表 1-8 所示。目前，主流的中高端 PDA 产品以及新款智能手机通常都采用高性能的 Xscale 处理器。

表 1-8 Intel Xscale 产品的性能特征

型 号	Cache 容量 (指令/数据)/KB	紧密耦合存储器 (TCM)	存储器管理	AHB 总线接口	Thumb	DSP	Jazelle
XScale	32/32	无	MMU	N/A	有	有	无

## 1.3 ARM 微处理器简介

前面谈到了很多关于 ARM 产品系列的特点及应用方面的情况，可以看到 ARM 的应用无处不在。它能够如此广泛地被应用，很大程度上得益于其低功耗、高功效的 RISC 体系结构。

### 1.3.1 RISC 与 ARM

1979 年，美国加州大学伯克利分校提出了 RISC (Reduced Instruction Set Computer, 精简指令集计算机) 的概念，这个概念是相对于传统的 CISC (Complex Instruction Set Computer, 复杂指令集计算机) 结构而提出的。CISC 随着计算机的发展而不断引入新的复杂的指令集，为支持这些新增的指令，计算机的体系结构会越来越复杂。在 CISC 的各种指令中，大约有 20% 的指令会被反复使用，占整个程序代码的 80%，而余下的 80% 的指令却不经常使用，在程序设计中只占 20%，这种不合理逐渐成为了 CISC 的固有缺点。

RISC 的诞生并非只是简单地减少了指令，而是把着眼点放在了如何使计算机的结构更加简单合理而提高运算速度上。RISC 结构是将指令长度固定，并将指令格式和寻址方式种类减少；优先选取使用频率最高的简单指令，避免复杂指令；以控制逻辑为主，不用或少用



微码控制等措施来达到精简结构, 并提高运算速度的目的。

RISC 体系结构应具有如下特点:

- 1) 固定长度指令格式, 指令归整、简单, 基本寻址方式有 2 或 3 种。
- 2) 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/存储指令可访问存储器。

ARM 是 RISC 体系结构的 CPU, 除了具有以上介绍的 RISC 的特点之外, ARM 处理器在较新的体系结构中同时支持两种指令集: ARM 指令集和 Thumb 指令集。ARM 指令集中的指令均为 32 位长度, 而 Thumb 指令集中的指令为 16 位长度。Thumb 指令集实现了 ARM 指令集的功能子集, 而且具有比等价 ARM 指令代码节省 30% ~ 40% 以上存储空间等优点。Thumb 指令集虽然是 16 位指令集, 但是具备 32 位代码的所有优点。

此外, ARM 的指令集还采用了一些特别的技术, 在保证高性能的前提下, 尽量缩小芯片的面积, 并降低功耗。这些技术包括:

- 1) 所有的指令都可根据前面的执行结果决定是否被执行。
- 2) 可用加载/存储指令来批量传输数据, 以提高数据的传输效率。
- 3) 可在一条数据处理指令中同时完成逻辑处理和移位处理。
- 4) 在循环处理中使用地址的自动增减来提高运行效率。

### 1.3.2 ARM 体系结构的版本

目前为止, ARM 体系结构共定义了 6 个版本, 版本号分别为 1~6。版本号的增加伴随着指令集的扩大与增强。同时, 各版本中还有一些变种, 这些变种定义了该版本指令集中不同的功能。下面介绍 ARM 体系结构不同版本指令集的特点, 以及各版本包含的一些变种的特点。

ARM 体系结构的 6 个版本的特点如下:

#### 1. 版本 1

本版本在 ARM1 中实现, 但没用在商业产品中, 它包括下列指令:

- 1) 处理乘法指令之外的基本数据处理指令。
- 2) 基于字节、字和多字的读取和写入 (Load/Store) 指令。
- 3) 包括子程序调用指令 BL 在内的跳转指令。
- 4) 供操作系统使用的软件中断指令 SWI。

本版本中的地址空间是 26 位, 目前已经不再使用。

#### 2. 版本 2

版本 2 与版本 1 的地址空间都是 26 位, 目前也不再使用, 不同的是版本 2 增加了下列指令:

- 1) 乘法指令和乘加法指令。
- 2) 支持协处理器的指令。
- 3) 对于 FIQ 模式, 提供了额外的两个备份寄存器。
- 4) SWP 指令及 SWPB 指令。

#### 3. 版本 3