



电子信息与电气学科规划教材

ARM原理与嵌入式应用

——基于LPC2400系列处理器
和IAR开发环境

桂电 - 丰宝联合实验室 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

TP332/140

2008

电子信息与电气学科规划教材

ARM 原理与嵌入式应用

——基于 LPC2400 系列处理器和 IAR 开发环境

桂电 - 丰宝联合实验室 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书以 NXP 公司最新推出的 LPC2478 芯片为例, 系统详细地介绍了 ARM 嵌入式系统的原理与应用。全书分为四大部分: (1) 嵌入式系统的基本概念、ARM7TDMI-S 内核的体系结构、ARM 指令系统和汇编语言编程等; (2) LPC2400 系列处理器的核心结构, 包括引脚配置、时钟控制、存储器管理、中断机制等方面的硬件结构和软件编程方法, 以及外部设备与接口技术; (3) IAR 公司的 EWARM 集成开发环境下针对嵌入式系统开发的方法和技术; (4) 实际应用实例, 包括嵌入式操作系统的定制和移植、实际产品的设计方案等。本书由“桂电-丰宝联合实验室”开发了配套的实验板和实验指导书, 并免费提供电子课件、程序源代码等电子资源。

本书适合作为高等院校电子信息类、计算机类、自动控制类和机械电子类专业高年级本科生及研究生嵌入式系统课程的教材, 也可供从事嵌入式系统设计的研发人员参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

ARM 原理与嵌入式应用: 基于 LPC2400 系列处理器和 IAR 开发环境 / 桂电—丰宝联合实验室编著.
北京: 电子工业出版社, 2008.7

电子信息与电气学科规划教材

ISBN 978-7-121-07007-5

I. A… II. 桂… III. 微处理器, ARM—高等学校—教材 IV. TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 095782 号

策划编辑: 张 濮

责任编辑: 张 濮

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 字数: 492.8 千字

印 次: 2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 33.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，软件、硬件可剪裁的，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格综合性要求的专用计算机系统。今天的嵌入式系统已普遍应用于国防电子、数字家庭、工业自动化、汽车电子、医疗科技、消费电子、无线通信、电力系统等国民经济的众多领域。随着嵌入式技术的发展，嵌入式系统将更广泛地应用于人类生活的方方面面。例如，基于嵌入式 Internet 网络的地球电子皮肤，可以嵌入到牙齿上的手机都在研发之中。著名嵌入式系统专家沈绪榜院士认为：“计算机是认识世界的工具，而嵌入式系统则是改造世界的产物。”

面对这种形势，近年来嵌入式系统业界广泛掀起了学习嵌入式系统理论并进行应用开发的热潮，各高等院校也都陆续开设了相关课程。2007 年，桂林电子科技大学信息与通信学院跟上海丰宝电子科技有限公司合作建立了“桂电—丰宝联合实验室”，双方合作成功开发了基于 NXP 公司最新的 LPC2400 系列微控制器的 ARM 实验教学平台。在此基础上，由丰宝公司资助，合作编写了这本 ARM 嵌入式系统理论教材，以求达到理论教学与实践教学的高度统一。

本书的编写是一种尝试，以编者自身理论教学和工程实践的体会，并尽可能地汲取近年来桂林电子科技大学嵌入式教学的成果，以及三家公司在嵌入式系统应用开发方面的经验，力图在教学内容和训练方法上有所突破，教材以综合性、设计性的实验作为训练手段，以素质教育为目标，调动学生的学习积极性，强调动手能力的培养和提高。

本书共 7 章，分为四部分，包括嵌入式概述和 ARM 基本原理、LPC2400 系列处理器的硬件结构和接口技术、IAR 开发环境的应用、基于 LPC2400 系列处理器的应用实例。第一部分包括第 1~3 章，其中第 1 章为嵌入式系统概论，介绍嵌入式系统的基本概念、常用的嵌入式处理器和常用的嵌入式操作系统；第 2 章详细讲述了 ARM7TDMI-S 内核的体系结构，包括编程模型、工作状态和工作模式、寄存器组织、存储器组织和异常处理等；第 3 章详细介绍了 ARM 指令系统，包括 ARM 的指令格式、寻址方式、指令集、伪指令和汇编语言编程。第二部分包括第 4 章和第 5 章，其中第 4 章详细介绍了 LPC2400 系列处理器的核心结构，包括引脚配置、时钟控制、存储器管理、中断机制等方面的硬件结构和软件编程方法；第 5 章介绍了 LPC2400 系列处理器的外部设备及其接口技术，详细介绍了 GPIO 端口、定时器、实时时钟，UART 串口、ADC 和 DAC、I²C 总线和网络接口等，包括其引脚、硬件接口、可编程寄存器、编程方法、应用举例等；另外，还简单介绍了 DMA、SPI、CAN、PWM、I²S、USB、SD/MMC 卡、LCD 等其他外设接口。第三部分为第 6 章，主要讲述 IAR 公司的 EWARM 集成开发环境，介绍该开发环境下针对嵌入式系统开发的方法和技术。第四部分为第 7 章，介绍实际应用实例，包括嵌入式操作系统的定制和移植，实际产品的设计方案等。

本书以当前流行的 ARM 内核和业界著名的 NXP 公司出品的 LPC2400 系列最新处理器作为讲授对象，综合了桂林电子科技大学的教师和生产厂商 NXP 公司、开发环境厂商 IAR 公司、应用开发企业上海丰宝电子科技有限公司的工程师们的成果、经验和技術，较好地兼顾了嵌入

式系统理论和工程实践两个方面。而且,与本教材配套的还有一套自行开发的基于 LPC2400 系列处理器和 IAR 开发环境的实验平台,包括实验设备、相关软件和相应实验指导书,可以将理论教学与实践教学有机地结合起来,切实提高学生的实际动手能力,为培养和训练学生开展科学研究、产品研发的能力,为其日后毕业走上工作岗位打下较坚实的基础。

本书适合作为高等院校电子信息类、计算机类、自动控制类和机械电子类专业高年级本科生及研究生嵌入式系统课程的教材,也可供从事嵌入式系统设计的研发人员参考。

本书由“桂电-丰宝联合实验室”的教师和工程师共同编写,由欧阳宁、黄建华和宾辰忠统一规划。其中,黄建华编写了第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 6 章,以及第 4 章、第 7 章的部分内容。欧阳宁编写了第 5 章的部分内容。宾辰忠编写了第 4 章和第 5 章的部分内容。牛晓东编写了第 4 章和第 7 章的部分内容。林乐平、魏义海、李祥、王维、孙燕对本书进行了审阅。

特别感谢桂林电子科技大学欧阳缮教授、上海丰宝电子科技有限公司朱玉峰先生、刘永根先生、恩智浦半导体(上海)有限公司金字杰先生和爱亚软件技术咨询(上海)有限公司叶涛先生的大力支持。

由于本书作者能力有限,时间也较仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2008 年 5 月

配套资源说明:

本书配有电子课件、程序源代码等电子资源,读者可以登录电子工业出版社华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费下载。

“桂电-丰宝联合实验室”开发了与本书配套的基于 LPC2400 系列处理器的实验板和配套实验指导书,可以通过上海丰宝电子科技有限公司(www.linposh.com.cn)采购。

目 录

第 1 章 嵌入式系统概论	1		
1.1 嵌入式系统	1	2.5.4 对异常的响应	23
1.1.1 嵌入式系统的定义	1	2.5.5 从异常返回	24
1.1.2 嵌入式系统的组成	2	2.5.6 应用程序中的异常处理	25
1.1.3 嵌入式系统的特点	2	习题	25
1.2 嵌入式处理器	3		
1.2.1 嵌入式处理器的分类	3	第 3 章 ARM 指令系统	27
1.2.2 ARM 微处理器	5	3.1 ARM 处理器的指令格式	27
1.3 嵌入式操作系统	8	3.1.1 ARM 指令集的特点	27
1.3.1 操作系统的概念	8	3.1.2 ARM 指令的格式	27
1.3.2 嵌入式 Linux	8	3.2 ARM 指令的寻址方式	28
1.3.3 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$	9	3.2.1 立即寻址	28
1.3.4 Windows CE	9	3.2.2 寄存器寻址	29
1.3.5 VxWorks	9	3.2.3 寄存器间接寻址	29
1.3.6 IAR PowerPac	10	3.2.4 基址变址寻址	29
习题	10	3.2.5 多寄存器寻址	30
		3.2.6 寄存器移位寻址	30
		3.2.7 相对寻址	31
		3.2.8 堆栈寻址	31
第 2 章 ARM 体系结构	11	3.3 ARM 指令集	32
2.1 ARM7TDMI 程序员模型	11	3.3.1 加载/存储指令	32
2.1.1 ARM 处理器的体系结构	11	3.3.2 数据处理指令	34
2.1.2 ARM 处理器核	11	3.3.3 乘法指令与乘加指令	38
2.1.3 ARM7TDMI 内核	12	3.3.4 跳转指令	40
2.2 ARM 处理器的工作状态和工作模式	13	3.3.5 程序状态寄存器访问指令	41
2.2.1 ARM 处理器的工作状态	13	3.3.6 协处理器指令	42
2.2.2 ARM 处理器的工作模式	14	3.3.7 异常中断指令	43
2.3 ARM 处理器的寄存器组织	15	3.4 Thumb 指令集	44
2.3.1 ARM 状态下的寄存器组织	15	3.5 伪指令	44
2.3.2 Thumb 状态下的寄存器组织	17	3.5.1 ARM 伪指令	45
2.3.3 程序状态寄存器	18	3.5.2 数据定义伪指令	45
2.4 ARM 处理器的存储器组织	20	3.5.3 符号定义伪指令	46
2.5 异常	21	3.5.4 段定义伪指令	47
2.5.1 ARM 体系结构所支持的异常类型	21	3.5.5 模块控制伪指令	49
2.5.2 异常向量	23	3.5.6 汇编控制伪指令	49
2.5.3 异常优先级	23		

3.5.7 宏处理伪指令	50
3.6 ARM 汇编语言的规范	51
3.6.1 语句的格式	51
3.6.2 符号	51
3.6.3 常量和变量	52
3.7 ARM 汇编语言的程序结构	52
3.7.1 汇编语言的程序结构	52
3.7.2 一个简单的 ARM 汇编语言程序	52
3.8 ARM 程序设计举例	53
3.8.1 分支程序	53
3.8.2 循环程序	54
3.8.3 子程序调用	54
3.8.4 查表法	55
3.8.5 汇编语言与 C/C++ 的混合编程	55
3.9 用 ARM 汇编语言编写系统启动程序	57
3.9.1 编写启动程序的一般规则	57
3.9.2 IAR EWARM 软件包给出的 一般启动程序	58
习题	61

第 4 章 LPC2400 系列处理器 原理

63

4.1 LPC2400 系列处理器简介	63
4.1.1 LPC2400 系列处理器特性	63
4.1.2 LPC2400 系列处理器结构	64
4.2 处理器引脚配置	64
4.2.1 引脚配置	64
4.2.2 引脚连接模块	80
4.2.3 引脚连接模块的使用举例	82
4.3 存储器管理	83
4.3.1 存储器映射	83
4.3.2 存储器加速模块	89
4.3.3 外部存储器控制器	92
4.4 系统控制模块	96
4.4.1 系统控制和状态寄存器	96
4.4.2 外部中断	97
4.5 时钟和功率控制	100
4.5.1 晶体振荡器	100

4.5.2 锁相环 (PLL)	102
4.5.3 时钟分频	104
4.5.4 功率控制	106
4.5.5 时钟和功率控制举例	108
4.6 向量中断控制器	110
4.6.1 LPC2400 中断特性	110
4.6.2 功能概述	110
4.6.3 中断控制器结构	111
4.6.4 寄存器描述	112
4.6.5 中断源	117
4.6.6 VIC 使用注意事项	118
4.6.7 应用举例	118
4.7 LPC2400 最小系统	121
习题	122

第 5 章 LPC2400 系列处理器 接口技术

123

5.1 GPIO 接口	123
5.1.1 特性	123
5.1.2 应用场合	124
5.1.3 寄存器描述	124
5.1.4 使用注意事项	133
5.1.5 应用举例	134
5.2 定时器	136
5.2.1 特性	136
5.2.2 应用场合	136
5.2.3 定时器结构	136
5.2.4 引脚功能描述	136
5.2.5 寄存器功能描述	138
5.2.6 应用举例	143
5.3 看门狗	145
5.3.1 功能描述	145
5.3.2 看门狗的结构	146
5.3.3 寄存器功能描述	146
5.3.4 应用举例	148
5.4 实时时钟	149
5.4.1 功能描述	149
5.4.2 实时时钟的结构	150
5.4.3 寄存器功能描述	150

5.4.4 预分频器	156
5.4.5 电池存储器	158
5.4.6 使用注意事项	158
5.4.7 应用举例	159
5.5 UART 串口通信	161
5.5.1 概述	161
5.5.2 UART 的结构	162
5.5.3 寄存器功能描述	163
5.5.4 基本操作	170
5.5.5 应用举例	171
5.6 数模转换器和模数转换器	173
5.6.1 DAC 的特性	173
5.6.2 DAC 引脚和寄存器描述	174
5.6.3 DAC 基本操作	174
5.6.4 ADC 的特性	174
5.6.5 ADC 引脚描述	175
5.6.6 ADC 寄存器描述	175
5.6.7 ADC 基本操作	178
5.6.8 应用举例	178
5.7 I ² C 接口	180
5.7.1 I ² C 总线基本原理	180
5.7.2 I ² C 接口概述	181
5.7.3 I ² C 操作模式	182
5.7.4 I ² C 接口寄存器描述	185
5.7.5 应用举例	193
5.8 以太网接口	196
5.8.1 概述	196
5.8.2 结构和引脚描述	196
5.8.3 寄存器描述	198
5.8.4 应用举例	215
5.9 其他外设接口	219
5.9.1 GPDMA 控制器	219
5.9.2 SPI 接口	221
5.9.3 CAN 控制器	223
5.9.4 PWM 接口	226
5.9.5 I ² S 接口	230
5.9.6 USB 接口	232
5.9.7 SD/MMC 卡接口	239
5.9.8 LCD 控制器	241
习题	244

第 6 章 IAR 集成开发环境 245

6.1 IAR EWARM 集成开发环境与 配套仿真器	245
6.1.1 IAR EWARM 软件的特点	245
6.1.2 IAR J-Link 仿真器简介	249
6.2 工程的创建、编译和连接	250
6.2.1 在 IAR EWARM 中生成新项目	250
6.2.2 在 IAR EWARM 中编译项目	253
6.2.3 在 IAR EWARM 中连接项目	254
6.3 C-SPY 调试器	255
习题	260

第 7 章 嵌入式应用开发实例 261

7.1 基于 LPC2400 的 uCLinux 开发 平台配置	261
7.1.1 uCLinux 操作系统概述	261
7.1.2 建立 uCLinux 开发环境	262
7.1.3 编译 uCLinux 内核	263
7.1.4 内核的加载运行	264
7.2 在 uCLinux 下开发应用程序	264
7.2.1 串行通信	265
7.2.2 socket 编程	269
7.2.3 添加用户应用程序到 uCLinux	276
7.3 嵌入式产品开发实例：条码称	279
7.3.1 嵌入式系统设计简介	279
7.3.2 应用背景	279
7.3.3 系统简介	279
7.3.4 芯片选型	280
7.3.5 硬件原理设计	281
7.3.6 终端软件设计	287
7.4 嵌入式产品开发实例：野外数据 采集器	290
7.4.1 应用背景	290
7.4.2 系统简介	290
7.4.3 芯片选型	291
7.4.4 硬件原理设计	292

参考文献 297

第 1 章

嵌入式系统概论

1.1 嵌入式系统

1.1.1 嵌入式系统的定义

在科学技术高速发展的今天，从厨房的电饭煲、微波炉、电冰箱到客厅里的家庭媒体中心，各种智能化设备已经遍布在我们的周围。此时，我们听到最多的一个词便是“嵌入式系统”。现在，嵌入式系统带来的工业年产值已超过了 1 万亿美元，它已经成为信息技术（IT）产业争夺的重点。目前，中国嵌入式系统的主要客户分布在电信、医疗、汽车、安全和消费类等行业。其中，嵌入式在消费类电子领域占据的市场份额最大，为 36%，紧随其后的是安全，占 26%，其次是电信、医疗及其他，各占 20%、8%和 10%。

那么，什么才是“嵌入式系统”呢？按照 IEEE 的定义，嵌入式系统是“用于监视、控制或者辅助操作机器和设备的装置”（devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants）。这个定义是从应用上考虑的，可以看出，嵌入式系统是软件和硬件的综合体，还可以涵盖机电等附属装置。

而目前最常见、最通用的一个定义是：嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，其软、硬件可配置，对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格约束的一种专用计算机系统。

这个定义是从技术角度来进行定义的，更加全面。它不仅指明了嵌入式系统是一种专用计算机系统（非 PC 的智能电子设备），而且说明了嵌入式系统的几个基本要素，即：面向应用、以计算机技术为基础、软硬件可裁剪，并且在功能、可靠性、成本、体积和功耗上有严格约束。而“嵌入式系统”中“嵌入”一词，即指其软、硬件可裁剪的特性，它表示该系统通常是更大系统中的一个完整的部分。嵌入的系统中可以共存多个嵌入式系统。

嵌入式系统几乎应用于所有电气设备：手机、机顶盒、个人数字助理（PDA）、汽车控制系统、微波炉控制器、电梯控制器、安全系统、医疗仪器、立体音响、自动取款机等。即使是一台通用个人计算机（PC），也包括嵌入式系统，它的外部设备都包含了嵌入式微处理器，如硬盘、软驱、显示器、键盘、鼠标、声卡、网卡、Modem、打印机和扫描仪等都是由嵌入式处理器控制的。

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的。如果独立于应用自行发展，则会失去市场。因此，大多数嵌入式系统的开发者不是计算机专业的人才，而是各个行业的技术人员。例如，开发数字医疗设备，往往是生物医学工程技术人员和计算机专业的技术人员一起来参与完成。

嵌入式系统是一种专用计算机系统，它和通用计算机系统使用的技术是一样的，都包含

了硬件和软件部分，但对两者的性能评价指标是不同的。嵌入式系统往往只是一个大系统中的组成部分，控制大系统的工作，它的价值在于它所控制的大系统。例如，智能洗衣机的评价指标往往是洗净度、耗水、耗电、洗衣速度等，而不是控制它的处理器的速度、存储容量等。而通用计算机不同，它更关注计算能力、处理速度、存储数据的能力等指标。

1.1.2 嵌入式系统的组成

由于嵌入式系统基于计算机技术，它的组成也跟计算机组成类似，主要包括两个部分：嵌入式硬件系统和嵌入式软件系统。

嵌入式硬件系统主要包括：嵌入式处理器、存储器、接口控制器与接插件、模拟电路和电源等部分。目前针对嵌入式系统的外围硬件设备扩展有很多，常用的有串口、以太网接口（网络设备）、USB 接口（USB 设备，如优盘、移动硬盘等外部存储设备）、音频接口（如 MP3 播放器）、液晶显示屏（如数码相机、数码摄像机、MP4 播放器、PDA 等）、摄像头（如拍照手机）等。可以看到，不同的嵌入式系统的设计可能会用到不同的外围硬件设备。以数码相机为例，它需要使用到摄像头、液晶显示屏、USB、SD 或 MS 卡，如果该数码相机还要有 MP3 功能，就需要加上音频解码设备。没有外围设备的支持，嵌入式系统是不完整的。

嵌入式软件系统主要包括底层驱动、操作系统软件（嵌入式操作系统）和应用程序（应用软件）几部分。底层驱动实现嵌入式系统硬件和软件之间的接口，操作系统实现系统的进程调度、任务处理，应用程序实现系统功能的应用。由于嵌入式系统的应用领域十分广泛，所以应用程序（应用软件）的表现形式也千差万别。有时设计人员会把操作系统和应用软件两部分组合在一起：应用软件控制系统的运作和行为，操作系统控制应用程序编程与硬件的交互作用。

在嵌入式系统的组成中，嵌入式系统的核心是嵌入式处理器。因此，嵌入式处理器的技术指标（如功耗、体积、成本、可靠性、速度、处理能力、电磁兼容性等）均受到应用要求的制约，这些也是各个半导体厂商之间竞争的热点。嵌入式处理器的应用软件是实现嵌入式系统功能的关键。一般来说，软件需要固化存储，有时称为固件（Firmware），软件代码要求高质量和高可靠性。

1.1.3 嵌入式系统的特点

与常见的通用计算机系统相比，嵌入式系统一般具有以下特点。

（1）面向特定的应用。与通用 CPU 相比，嵌入式 CPU 是为特定用户群设计的。如 ARM 系列多用于手机中，Motorola 的龙珠系统多用于中档 PDA 中。应用需求决定了嵌入式系统的设计。决定嵌入式 CPU 应用环境的主要因素在于其提供的接口功能和处理速度。

（2）专用性强，可根据需要灵活定制。嵌入式系统的个性化很强，其中的软件系统和硬件的结合非常紧密，一般要针对硬件进行系统的移植。

（3）系统内核小。嵌入式系统一般是应用于小型电子装置的，系统资源相对有限，所以内核较之传统的操作系统要小得多。例如， $\mu\text{C}/\text{OS}$ 系统内核只有 5 KB，而 Windows 的内核则要大得多。

（4）体积小、功耗低、成本低、效率高。由于嵌入式系统集成度高、体积小，所以对其系统软件和应用软件一般有一些特殊要求。例如，软件固化在 ROM 中，要求高质量、高可靠

性的软件代码,具有实时处理能力等。同时,由于嵌入式系统往往没有充足的电能(如电池供电),所以多为低功耗系统。而且,系统功耗越低,温度越低,其可靠性和稳定性也就越高。

(5) 具有较长的生命周期。嵌入式系统与具体应用有机地结合在一起,它的升级和具体产品同步进行。

(6) 通常有实时性要求,需要有高实时性操作系统(Real-Time Operating System, RTOS)。这是嵌入式软件的基本要求,用以实现任务调度、资源分配等功能。按照实时性的不同,嵌入式系统可以分为软实时系统和硬实时系统。软实时系统对实时性要求不高,通常用于人机交互较多的领域;而硬实时系统主要应用于工控、航天、军事等领域。

(7) 需要专门的软、硬件开发工具和环境。由于嵌入式系统的运行平台与开发平台是不同的,嵌入式系统本身不具备自主开发能力,所以需要专门的软、硬件开发工具和环境。嵌入式系统的开发通常采用交叉开发环境:开发平台称为宿主机,有丰富的软、硬件资源;运行嵌入式软件的平台称为目标机,资源相对有限。在宿主主机上进行软件的编辑、编译,然后下载到目标机上调试、运行。

1.2 嵌入式处理器

嵌入式系统的核心部件是嵌入式处理器,据不完全统计,目前全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 种,流行体系结构有 30 多个系列,其中 8051 体系的占了多半。生产 8051 单片机的半导体厂家有 20 多个,共有 350 多种衍生产品,仅 NXP 公司就有近百种。现在几乎每个半导体制造商都生产嵌入式处理器,而且越来越多的公司有自己的处理器设计部门。嵌入式处理器的寻址空间一般为 64 KB~4 GB,处理速度为 0.1~2000 MIPS,常用封装的引脚数为 8~208 个。

1.2.1 嵌入式处理器的分类

从应用的角度来划分,嵌入式处理器包含下面几种类型。

1. 嵌入式微控制器(Microcontroller Unit, MCU)

MCU 又称为单片机,就是将整个计算机系统集成到一块芯片中。MCU 一般以某一种微处理器(MPU)内核为核心,芯片内部集成 ROM、RAM、总线逻辑、定时器等各种必要的功能模块。与 MPU 相比,微控制器的最大特点是单片化,体积大大减小,从而使功耗和成本下降,可靠性提高。

MCU 是目前嵌入式系统应用的主流。由于 MCU 的片上资源一般比较丰富,适合于控制,因此称为微控制器。为适应不同的应用需求,一般一个系列的单片机具有多种衍生产品,每种衍生产品的处理器内核都是一样的,不同的是存储器和外设的配置及封装。这样可以最大限度地与应用需求相匹配,从而减小功耗和成本。

MCU 目前的品种和数量最多,比较有代表性的通用系列包括 8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、MC68HC05/11/12/16、68300 等。另外,还有许多半通用系列,如支持 USB 接口的 8XC930/931、C540、C541。

2. 嵌入式微处理器(Microprocessor Unit, MPU)

MPU 的基础是通用计算机中的 CPU。为了满足嵌入式应用的特殊要求,MPU 虽然在功

能上和标准微处理器基本是一样的，但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面一般都做了各种增强。

MPU 目前主要有 Am186/188、386EX、SC400、PowerPC、68000、MIPS、ARM 系列等。

MPU 又可分为复杂指令集计算机 (CISC) 和精简指令集计算机 (RISC) 两类。大多数台式 PC 都使用 CISC 微处理器，如 Intel 公司的 x86。RISC 结构体系有两大主流：Silicon Graphics 公司（硅谷图形公司）的 MIPS 技术，ARM 公司的 Advanced RISC Machines 技术。

RISC 和 CISC 是目前设计制造微处理器的两种典型技术，为达到高效的目的，采用的方法不同。它们的差异主要有以下几点。

(1) 指令系统：RISC 设计者把主要精力放在那些经常使用的指令上，对不常用的功能，常通过组合指令来实现；而 CISC 计算机的指令系统比较丰富，有专用指令来完成特定的功能。

(2) 存储器操作：RISC 对存储器操作有限制，使控制简单化；而 CISC 机器的存储器操作指令多，操作直接。

(3) 程序：RISC 汇编语言程序一般需要较大的内存空间，实现特殊功能时程序复杂，不易设计；而 CISC 汇编语言程序编程相对简单，科学计算及复杂操作的程序设计相对容易，效率较高。

(4) 中断：RISC 机器在一条指令执行的适当地方可以响应中断，而 CISC 机器在一条指令执行结束后响应中断。

(5) CPU：RISC 的 CPU 包含较少的单元电路，面积小、功耗低；而 CISC 的 CPU 包含丰富的电路单元，功能强、面积大、功耗大。

(6) 设计周期：RISC 微处理器结构简单，布局紧凑，设计周期短，且易于采用最新技术；CISC 微处理器结构复杂，设计周期长。

(7) 易用性：RISC 微处理器结构简单，指令规整，性能容易把握，易学易用；CISC 微处理器结构复杂，功能强大，实现特殊功能容易。

(8) 应用范围：RISC 机器更适合于嵌入式应用，而 CISC 机器更适合于通用计算机。

3. 嵌入式 DSP (Digital Signal Processor, DSP)

DSP 对系统结构和指令进行了特殊设计，使其适合于执行 DSP 算法，编译效率较高，指令执行速度也较高。在数字滤波、FFT、谱分析等方面，DSP 算法正在大量进入嵌入式领域。

推动嵌入式 DSP 发展的一个重要因素是嵌入式系统的智能化。例如，各种带有智能逻辑的消费类产品、生物信息识别终端、带有加/解密算法的键盘、ADSL 接入、实时语音压缩/解压系统、虚拟现实显示，等等。这类智能化算法一般运算量都比较大，特别是向量运算、指针线性寻址等较多，而这些正是 DSP 的长处所在。

嵌入式 DSP 有两个发展来源，一是 DSP 经过单片化、EMC 改造、增加片上外设成为嵌入式 DSP，TI 公司的 TMS320C2000/C5000 等属于此范畴；二是在通用单片机或片上系统 (SoC) 中增加 DSP 协处理器，如 Intel 公司的 MCS-296。

嵌入式 DSP 比较有代表性的产品是 Texas Instruments 公司的 TMS320 系列和 Motorola 公司的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列、用于移动通信的 C5000 系列，以及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。DSP56000 系列目前已经发展成为 DSP56000、DSP56100、DSP56200 和 DSP56300 等几个不同系列的处理器。DSP 的设计者们

把重点放在了处理连续的数据流上。如果嵌入式应用中强调对连续数据流的处理和高精度复杂运算,则应该选用 DSP 器件。

4. 嵌入式 SoC (Embedded System on Chip)

随着 VLSI 设计的普及和半导体工艺的迅速发展,可以在一块硅片上实现一个更为复杂的系统,这就是 SoC (System on Chip)。各种通用处理器内核和其他外围设备都将成为 SoC 设计公司的标准库中的器件,用标准的 VHDL 等硬件描述语言描述。用户只需要定义出整个应用系统,仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂制作芯片样品。这样,整个嵌入式系统大部分都可以集成到一块芯片中,应用系统的电路板变得很简洁,这将有利于减小体积和功耗,提高系统的可靠性。

SoC 可以分为通用和专用两类。通用系列包括 Motorola 的 M-Core、某些 ARM 系列器件、Echelon 和 Motorola 联合研制的 Neuron 芯片等。专用 SoC 一般专用于某类系统中,不为一般用户所知。一个有代表性的产品是 NXP 的 Smart XA,它将 XA 单片机内核和支持超过 2048 位复杂 RSA 算法的 CCU (Communication Control Unit) 单元制作在一块硅片上,形成一个可加载 Java 或 C 语言的专用的 SoC,可用于 Internet 安全方面。

1.2.2 ARM 微处理器

ARM (Advanced RISC Machines),既可以认为是一个公司的名字,也可以认为是对一类微处理器的通称,还可以认为是一种技术的名字。1991 年 ARM 公司成立于英国剑桥,主要出售芯片设计技术的授权。目前,采用 ARM 技术知识产权 (IP) 核的微处理器,即通常所说的 ARM 微处理器,已广泛应用于工业控制、消费类电子产品、通信系统、网络系统、无线系统等各个领域。

1. ARM 微处理器的应用领域

(1) 工业控制:作为 32 位的 RISC 架构,基于 ARM 核的微控制器芯片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。

(2) 无线通信:目前已有超过 85% 的无线通信设备采用了 ARM 技术,ARM 以其高性能和低成本,在该领域的地位日益巩固。

(3) 网络应用:随着宽带技术的推广,采用 ARM 技术的 ADSL 芯片正逐步获得竞争优势。此外,ARM 在语音及视频处理上进行了优化,并获得广泛支持,也对 DSP 的应用领域提出了挑战。

(4) 消费类电子产品:ARM 技术在目前流行的数字音频播放器、数字机顶盒和游戏机中得到了广泛采用。

(5) 成像和安全产品:在现在流行的数码相机和打印机中,绝大部分采用 ARM 技术。手机中的 32 位 SIM 智能卡也采用了 ARM 技术。

2. ARM 微处理器的特点

(1) 体积小、低功耗、低成本、高性能。

(2) 支持 Thumb (16 位) /ARM (32 位) 双指令集,兼容 8 位和 16 位器件。

(3) 大量使用寄存器,指令执行速度更快。

(4) 大多数数据操作都在寄存器中完成。

(5) 寻址方式灵活简单, 执行效率高。

(6) 指令长度固定。

3. ARM 微处理器系列

目前常用的 ARM 微处理器有 ARM7 系列、ARM9 系列、ARM9E 系列、ARM10E 系列、SecurCore 系列、Intel 的 StrongARM、Intel 的 XScale 等。其中, ARM7、ARM9、ARM9E 和 ARM10E 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。例如, ARM7 系列适用于工业控制、网络设备、移动电话等应用, ARM9、ARM9E 和 ARM10E 系列则更适合无线设备、消费类电子产品的设计, SecurCore 系列专门为安全要求较高的应用而设计。

4. 常用的 ARM 芯片生产厂家

1) NXP 公司

NXP (恩智浦半导体) 是 2006 年从皇家飞利浦体系中独立出的半导体公司, 共有超过 6700 位研发工程师, 总部仍设在荷兰 Eindhoven, 为欧洲第二大半导体公司, 且名列全球前十强的行列。NXP 公司的 ARM 处理器主要为 LPC 系列芯片, 经历了 LPC2100 系列、LPC2200 系列、LPC2300 系列以及目前推出的 LPC2400 系列芯片。目前, LPC2400 系列芯片主要有 LPC2468、LPC2470、LPC2478 几款型号。

2008 年 3 月, NXP 发布了全新的 LPC2478 微控制器, 这是业界唯一提供集成的 LCD 支持的基于闪存的 ARM7 MCU。同时推出的 LPC2470 是其无闪存版本。全新的微控制器配有双路 ARM 高速总线 (AHB), 可实现多种高带宽外设的同步操作。这一全新的 NXP 微控制器系列显著降低了成本、空间和功耗, 是广泛应用于 LCD 面板并需要网络连接的工业、消费、零售和医疗系统产品的理想之选。

NXP LPC2478 和 LPC2470 微控制器支持大多数静态 LCD 显示器 (最高分辨率 1024×768 像素、15 阶灰度单色和每像素 24 位真彩色 TFT 面板)。此外, 新的控制器提供 512 KB、高速的 128 位嵌入式闪存, 带有内建的纠错功能, 尽可能确保其可靠性。LPC2478 和 LPC2470 仅需单电压 (3.3 V) 电源, 拥有独特的实时时钟 (RTC), 并配有带电池的 2 KB SRAM, 使得微控制器在休眠状态时只消耗很少的电流, 而在出现外部中断或达到用户自定时间时, 设备可迅速恢复工作。

NXP LPC2478 和 LPC2470 微控制器支持多种外设, 除了 LCD 接口外, 还包括以太网、USB Host/OTG/Device、两个 CAN 通道、四个 UART、三条 I²C 总线、双输入双输出 I²S、SPI、SSP、RTC、ADC/DAC、SD/MMC 卡接口以及连接 SRAM、SDRAM 和 NOR 闪存的外部接口。

2) Samsung 公司

Samsung 公司的 ARM 处理器是目前使用最广的 ARM 处理器之一。Samsung 公司针对 ARM 处理器的应用范围将其处理器分成 3 类。

(1) 手持设备。适合各类低功耗产品, 常用的芯片有: S3C44B0 (ARM7TDMI 核心, 主频 66 MHz, 集成 STN LCD 控制器, 无网络接口) 和 S3C2410 (ARM920T 核心, 主频 200 MHz, 支持 TFT、USB Host 和 Device、SD Host 及 MMC 接口, 触摸屏接口, NAND Flash 直接引导, 无网络接口)。适用产品: POS、PDA、E-Book、GPS、智能电话、电子书包、机顶盒、手持游戏机、电子相册、视频监控、智能控制仪表等。

(2) 网络设备。常用的芯片有: S3C4510B (ARM7TDMI 核心, 主频 50 MHz, MAC 接口, 无 LCD 控制器) 和 S3C2510 (ARM940T 核心, 主频 166 MHz, 两通道 MAC 接口, DES/3DES 加密, PCI 总线, USB Host 和 Device)。适用产品: 以太网 HUB、交换机、路由器、VOIP、XDSL Modem、WLAN 产品、家庭网关等网络设备。

(3) ADSL。常用的芯片有 S5N8947 (ARM7, 66MHz, 2ch MAC, USB, ATM SAR)。适用产品: ADSL 桥接 Modem、ADSL 路由器、ADSL 网关、VOIP、VODSL、DSLAM。

3) TI 公司

TI 公司的 OMAP 处理器内含一个增强型处理器 (ARM925) 和 TI 公司研制的低功耗定点 DSP (TMS320C55x)。该双核心组件设计的目的是为了有效地处理多媒体应用和 MMI 应用。其中, ARM925 用于执行操作系统, 而 DSP 用于处理所有多媒体应用。

OMAP 平台由一个微处理器子系统 (ARM)、一个 DSP 子系统、一个内存接口流量控制器、一些专用的多媒体应用外围设备 (MWA) 和一个多任务接口构成。在 OMAP 中, 每个核心的最高执行速度都可达到 150 MHz, 并且都可以随作业频率的降低而做出相应改动以节约功耗。C55x DSP 内有 5 组数据总线, 在一个周期内允许 3 次读取作业和 2 次写入作业。C55x 最独特的地方就是具备双 MAC 结构, 并且其内部具有一个硬件图形加速器。

OMAP 嵌入式处理器系列是专门为支持第三代 (3G) 无线终端应用而设计的应用处理器体系结构。OMAP 嵌入式处理器系列包括应用处理器和集成的基带应用处理器, 目前已广泛应用于 PDA、无线远程通信、医疗器械等领域。

4) Motorola 公司

Motorola 公司的 32 位处理器有 68k 系列、DragonBall、PowerPC 等系列。其中 68k 系列和 PowerPC 系列都是独立的处理器体系结构。DragonBall 系列有继承 68k 系列的 MC68XX328 CPU, 还包括集成 ARM 内核的 MC9328 系列, 包括 MC9328MX1, MC9328MXL 等系列产品。

MC9328MX1 处理器是 DragonBall 家族中的第五代工业标准的产品。它的特点是低功耗、高集成度, 用于个人手持产品等。它采用 ARM920T 微处理核, 拥有蓝牙无线接口, 提供智能外围组合接口, 高档处理核, 电源管理系统, 主频可达 200 MHz。组合模块包含: LCD 控制器、静态 RAM、USB 接口支持、AD 转换 (包括触摸屏) 以及一个 MMC/SD 主控器, 并且提供蓝牙技术应用、SIM 卡接口、Memory Stick 接口, I²C 和 SSI 总线等。

另外, 从 Motorola 半导体独立出来的 Freescale (飞思卡尔) 公司推出的 ColdFire 系列微控制器, 在低端工业控制领域的应用中也有不俗的表现。

5) Intel 公司

Intel 公司在原 StrongARM 的基础上发展了第二代嵌入式微处理器体系结构——XScale。XScale 微处理器除了具有比上一代 StrongARM 微处理器更好的数据处理速度外, 还具有更低的功耗和强大的外围设备集成能力。

Intel 公司的 80200 是以 XScale 体系结构设计的一种嵌入式微处理器。80200 使用 Intel 公司的超流水线 RISC 技术, 具有 32 KB 的指令高速缓存 (Cache) 和 32 KB 的数据高速缓存, 还具有 32 位的指令和数据 MMU。

PXA255 和 PXA270 是 XScale 系列的典型代表, 它是基于 PDA 应用的微处理器。内部集成了很多手持设备需要的外围设备, 包括 RTC、看门狗、USB、串口、蓝牙控制器, 可外扩 PS/2 接口、以太网、红外线、LCD 触摸屏控制器等。

1.3 嵌入式操作系统

1.3.1 操作系统的概念

大型嵌入式系统通常需要完成复杂的功能，所以需要操作系统来完成各任务之间的调度。由于桌面型操作系统的体积和实时性等特性不能满足嵌入式系统的要求，从而促进了嵌入式操作系统的发展。

操作系统（Operating System, OS）的基本思想是隐藏底层不同硬件的差异，向在其上运行的应用程序提供一个统一的调用接口。应用程序通过这一接口实现对硬件的使用和控制，而不必考虑不同硬件操作方式的差异。

很多产品厂商选择购买操作系统，在此基础上开发自己的应用程序，最终形成产品。事实上，因为嵌入式系统是将所有程序，包括操作系统、驱动程序、应用程序的程序代码全部烧写进 ROM 里执行，所以操作系统在这里的角色更像是一套函数库（Library）。

操作系统主要完成三项任务：内存管理、多任务管理和外围设备管理。

嵌入式操作系统（Embedded Operating System, EOS）负责嵌入式系统的全部软、硬件资源的分配、调度、控制、协调。它必须体现其所在系统的特征，能够通过加载/卸载某些模块来达到系统所要求的功能。

EOS 是相对于一般操作系统而言的，它除具备了一般操作系统最基本的功能，如任务调度、同步机制、中断处理、文件处理等外，还有以下特点。

（1）强稳定性，弱交互性：嵌入式系统一旦开始运行就不需要用户过多的干预，这就要求负责系统管理的 EOS 具有很强的稳定性。

（2）较强的实时性：EOS 实时性一般较强，可用于各种设备的控制当中。

（3）可伸缩性：EOS 具有开放、可伸缩性的体系结构。

（4）外设接口的统一性：EOS 提供各种设备驱动接口。

嵌入式系统的操作系统核心通常要求体积要很小，因为硬件 ROM 的容量有限，除了应用程序之外，不希望操作系统占用太大的存储空间。事实上，嵌入式操作系统可以很小，只提供基本的管理功能和调度功能，缩小到 10~20 KB 以内的嵌入式操作系统比比皆是，用惯微软的 Windows 系统的用户很可能会觉得不可思议。

不同的应用场合会产生不同特点的嵌入式操作系统，但它们都会有一个核心（Kernel）和一些系统服务（System Service）。操作系统必须提供一些系统服务供应用程序调用，包括文件系统、内存分配、I/O 存取服务、中断服务、任务（Task）服务、时间（Timer）服务等，设备驱动程序（Device Driver）则是要建立在 I/O 存取和中断服务上的。有些嵌入式操作系统也会提供多种通信协议和用户接口函数库等。

1.3.2 嵌入式 Linux

Linux 是当今最为流行的一款开放源代码的操作系统。在目前正在开发的嵌入式系统中，70% 以上的项目选择 Linux 作为嵌入式操作系统。

经过改造后的嵌入式 Linux 具有适合于嵌入式系统的特点：

（1）内核精简，高性能、稳定；

- (2) 良好的多任务支持;
- (3) 适用于不同的 CPU 体系架构, 支持多种体系架构, 如 x86、ARM、MIPS、ALPHA、SPARC 等;
- (4) 具有可伸缩的结构, 使 Linux 适合于从简单到复杂的各种嵌入式应用;
- (5) 以设备驱动程序的方式为应用提供统一的外设接口;
- (6) 开放源码, 软件资源丰富, 获得广泛的软件开发者的支持, 价格低廉、结构灵活、适用面广;
- (7) 完整的技术文档, 便于用户的二次开发。

1.3.3 μ C/OS-II

μ C/OS-II 是 Jean J. Labrosse 在 1990 年前后编写的一个实时操作系统内核, 通常也称为 MUCOS 或者 UCOS。

严格地说, μ C/OS-II 只是一个实时操作系统内核, 它仅仅包含了任务调度、任务管理、时间管理、内存管理和任务间通信和同步等基本功能, 没有提供输入/输出管理、文件管理、网络等额外的服务。但由于 μ C/OS-II 良好的可扩展性和源码开放, 这些功能完全可以由用户根据需要自己实现。

μ C/OS-II 获得广泛使用不仅是因为它的源码开放, 还有一个重要原因, 就是它的可移植性。 μ C/OS-II 的大部分代码都是用 C 语言写成的, 只有与处理器的硬件相关的一部分代码用汇编语言编写。可以说, μ C/OS-II 在最初设计时就考虑到了系统的可移植性, 这一点和同样源码开放的 Linux 很不一样。后者在开始的时候只是用于 x86 体系结构, 后来才将和硬件相关的代码单独提取出来。

目前 μ C/OS-II 支持 ARM、PowerPC、MIPS、68k/ColdFire 和 x86 等多种体系结构。

1.3.4 Windows CE

Windows CE 主要应用于 PDA 和智能电话(Smart Phone)等多媒体网络产品。微软于 2004 年推出了代号为 Macallan 的新版 Windows CE 系列的操作系统。

Windows CE 的目的是, 让不同语言所写的程序可以在不同的硬件上执行, 也就是所谓的 .NET Compact Framework。在这个 Framework 下的应用程序与硬件互相独立无关, 而核心本身是一个支持多线程和多 CPU 的操作系统。在工作调度方面, 为了提高系统的实时性, 主要设置了 256 级的工作优先级和可嵌入式中断处理。

如同在 PC 桌面环境, Windows CE 系列在通信和网络的能力, 以及在多媒体方面极具优势。它提供的协议软件非常完整, 甚至还提供了有保密与验证的加密通信, 如 PCT/SSL。而在多媒体方面, 目前在 PC 上执行的 Windows Media 和 DirectX 都已经应用到 Windows CE 3.0 以上的平台, 其主要功能就是对图形、影音进行编码与解码, 并对多媒体信号进行处理。

1.3.5 VxWorks

VxWorks 操作系统是美国 WindRiver 公司于 1983 年设计开发的一种嵌入式实时操作系统, 是嵌入式开发环境的关键组成部分。VxWorks 以其高可靠性、实时性和可裁剪性, 以及良好的持续发展能力、高性能的内核与友好的用户开发环境, 在嵌入式实时操作系统领域占据一席之地。因此, 它被广泛地应用在通信、军事、航空、航天等高精尖技术和实时性要求