

嵌入式系统基础

朱恺 吉逸 储昊明 编著

T

THE BASIS OF
EMBEDDED SYSTEM



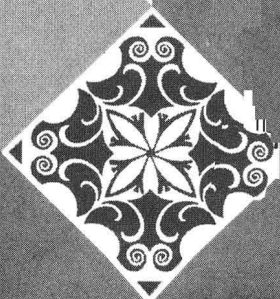
高等院校计算机专业人才培养规划教材(应用型)

嵌入式系统基础

朱恺 吉逸 储昊明 编著

T

THE BASIS OF
EMBEDDED SYSTEM



机械工业出版社
China Machine Press

ARM 处理器是一种高性能、低功耗的 RISC 处理器, 广泛应用于通信、家电、工控、航空等众多嵌入式产品中。

本书系统地介绍了 ARM 嵌入式系统的原理和 ARM 嵌入式开发技术的基础知识, 涵盖了 ARM 处理器工作原理、ARM 处理器编程模型、ARM 程序设计、实时操作系统、嵌入式系统开发流程和常用开发工具等内容。

本书理论与实践相结合, 实用性强, 可作为高等院校计算机及相关专业本科生教材, 也可作为研究生或嵌入式工程技术人员的参考书籍。

封底无防伪标均为盗版

版权所有, 侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统基础 / 朱恺, 吉逸, 储昊明编著. —北京: 机械工业出版社, 2012. 2
(高等院校计算机专业人才培养规划教材·应用型)

ISBN 978-7-111-37200-4

I. 嵌… II. ①朱… ②吉… ③储… III. 微型计算机—系统设计—高等学校—教材
IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 010695 号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 余洁

北京京北印刷有限公司印刷

2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

185mm × 260mm · 18.25 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-37200-4

定价: 36.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991; 88361066

购书热线: (010) 68326294; 88379649; 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

机械工业出版社华章公司多年来以“全球采集内容，服务中国教育”为己任，致力于引进国际知名大学广泛采用的计算机、电子工程和数学方面的经典教材，出版了一大批在计算机科学界享誉盛名的专家名著与名校教材，其中包括 Donald E. Knuth、Alfred V. Aho、Jim Gray、Jeffery D. Ullman 等名家的一批经典作品。这些作品为我国计算机教育及科研事业的发展起到了积极的推动作用。

近年来，我们一直关注国内计算机专业教育的发展和改革并大力支持、参与相关的教学研究活动。2006 年，教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会在对我国计算机专业教育现状和社会对人才的需求进行研究的基础上，发布了《高等学校计算机科学与技术专业发展战略研究报告暨专业规范（试行）》（以下简称《规范》）。为配合《规范》的实施和推广，我们出版了“面向计算机科学与技术专业规范系列教材”。这套教材的推出，对宣传《规范》提出的“按培养规格分类”的理念、推进高校学科建设起到了一定的促进作用。

2007 年，教育部下发了《关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》，强调高等教育以育人为本，以学生为主体，坚持以培养创新人才为重点，下大力气深化教育教学改革。在“质量工程”的思想指导下，各高校纷纷开展了相关的学科改革和教学研究活动。高等学校计算机科学与技术专业的教育开始从过去单纯注重知识的传授向注重学科能力的培养转型。2008 年年底，教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会成立了“高等学校计算机科学与技术专业人才专业能力构成与培养”项目研究小组，研究小组由蒋宗礼教授（组长）、王志英教授、岳丽华教授、陈明教授和张钢教授组成，研究计算机专业人才基本能力的构成和在计算机专业的主干课程中如何培养这些专业能力。

为配合“高等学校计算机科学与技术专业人才专业能力构成与培养”专项研究成果的推广，满足高校从知识传授向能力培养转型的需求，在教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会专家及国内众多知名高校专家的指导下，我们策划了这套“高等院校计算机专业人才培养规划教材”。这套教材以专项研究的成果为核心，围绕计算机专业本科生应具有的能力组织教材体系。本套教材的作者长期从事教学和科研工作，他们将自己在本科生能力培养方面的经验和心得融入教材的编写中，力图通过理论教学及实践训练，达到提升本科生专业能力的目标。希望这些有益的尝试能对推动国内计算机专业学生的能力培养起到积极的促进作用。

华章作为专业的出版团队，长久以来遵循着“分享、专业、创新”的价值观，实践着“国际视野、专业出版、教育为本、科学管理”的出版方针。这套教材的出版，是我们以教学研究指导出版的成功范例，我们将以严谨的治学态度以及全面服务的专业出版精神，与高等院校的老师们携手，为中国的高等教育事业走向国际化而努力。



编委会

主任委员：蒋宗礼（北京工业大学）

委 员：（以姓氏拼音为序）

陈道蓄（南京大学）

陈 明（中国石油大学）

胡事民（清华大学）

孙茂松（清华大学）

王 珊（中国人民大学）

王志英（国防科学技术大学）

吴功宜（南开大学）

岳丽华（中国科学技术大学）

张 钢（天津大学）

郑人杰（清华大学）

联络人：朱 劼 姚 蕾



丛书序言

作为我国规模最大的理工科专业,计算机本科专业为国家的建设培养了大批人才。2006年,教育部计算机科学与技术专业教学指导委员会发布了《高等学校计算机科学与技术专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》(以下简称《规范》),提出了以“按培养规格分类”为核心思想的专业发展建议,把计算机专业人才划分为研究型、工程型、应用型3个类型。在《规范》的方针指导下,培养合格的计算机本科人才。

教育包括知识、能力、素质三个方面,专业教育不仅要重视知识的传授,更应突出专业能力的培养,实施能力导向的教育。如何以知识为载体实现能力的培养和素质的提高,特别是实现专业能力和素质的提高是非常重要的。对计算机专业本科教育而言,要想实现能力导向的教育,首先要分析专业能力的构成并考虑如何将其培养落实到教学实践中。为此,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会开展了计算机科学与技术专业人才专业能力(简称计算机专业能力)的培养研究。该项研究明确了计算机专业本科人才应具有的4大基本能力——计算思维能力、算法设计与分析能力、程序设计与实现能力、系统能力,并将这四大基本能力分解为82个能力点,探讨如何面对不同类型学生的教育需求,在教学活动中进行落实。

为体现研究成果在教学活动中的实现,我们根据《高等学校计算机科学与技术专业人才培养能力构成与培养》,出版了这套教材。本套教材面向高等院校从知识传授向能力培养转型的需求,在内容的选择、体系安排和教学方法上按照专业能力的培养的需要进行了探索。其主要特点有:

(1) 以教学研究为先导。本套教材以计算机专业能力专项研究成果为基础,体现了先进的教育理念和教学方法,内容选择、知识深度、结构安排更加符合计算机专业教育的需求。

(2) 落实能力培养的思想,同时满足课程的要求。本套教材不仅关注知识点的讲授,还凸显能力培养的要求,将能力的培养分解到各门课程的各个知识点的讲授中。

(3) 力求贴近教学实际。作者均长期从事实际教学工作且对专业能力的培养具有一定研究,教材编写注重科学组织内容、合理安排体系、便于教学实施,更具操作性。

(4) 构建立体化教材。为了方便教师的教学活动,配合主教材开发配套的实验教材、教师参考书、学生辅导书、电子课件等教辅资源。

本套丛书的出版是在配合计算机专业能力的培养和落实方面的初步尝试,我们衷心希望本套教材的出版能起到抛砖引玉的作用,也希望广大教育工作者加入到能力培养的研究和实践来,并对相关的教材建设提出自己的宝贵意见。

在后 PC 时代,嵌入式系统的应用已经深入到我们日常生产、生活的方方面面,我们似乎从未像今天这样依赖各种各样的智能设备去感知世界或与人交流。嵌入式系统的发展已经成为一种不可逆转的趋势,其影响绝不仅限于个人,它已经开始改变人们的娱乐方式、生活习惯和社会的生产组织形态。

此时,可能你已经意识到:你使用智能手机与朋友分享过微博;你使用数码相机记录过家庭生活的精彩一刻;你使用电子血压计做过体检……但你可能还未意识到:在绕地球飞行的卫星上、在变电站的监控设备中、在监测空气质量的监测站里……处处都有嵌入式系统的身影。蓦然回首,我们已经生活在一个嵌入式系统的世界中。

正因为嵌入式系统广泛的应用领域和广阔的应用前景,今天,嵌入式系统的设计和开发已经成为信息科学中的热门技术。据不完全统计,全球每年嵌入式系统处理器的出货量占处理器市场的 80% 以上,嵌入式系统所带动的相关产业的产值突破了 1 万亿美元。难怪福特汽车曾宣称:“福特出售的‘计算能力’已超过了 IBM。”这里的计算能力就是由聚集在福特汽车上的众多种类的嵌入式设备形成的。

嵌入式系统的巨大市场需求催生了巨大的人才需求,在大学生就业竞争日益激烈的大背景下,国内每年对于嵌入式系统设计和开发人才的需求缺口竟高达 30 万以上。由于嵌入式系统既涉及硬件又涉及软件,目前,从事嵌入式系统研发的工程师基本可以分为两类:一类是从事硬件研发的硬件工程师,主要完成硬件系统原理图和 PCB 印刷电路板的设计、开发与硬件相关的底层软件(如 BootLoader、设备驱动程序等);另一类是从事软件研发的软件工程师,主要完成对操作系统的裁剪、应用程序的开发、软件系统的调试等。

分工细化能够提高生产效率,这是工业生产的必然,但这一现状也使嵌入式人才培养陷入困境。多数学校或培训机构出于就业目的,将嵌入式人才培养等同于嵌入式开发技能培训,只教授一两种热门的开发工具(如 EDA 设计工具、Windows CE 平台、J2ME 程序开发等),而学生对嵌入式系统设计开发缺乏全面、深入的理解,这样的“人才”严格地说并不能称为嵌入式人才。这是因为,他们对于嵌入式系统知识往往是知其然而不知其所以然,一旦技术革新造成开发工具淘汰,他们就会因为基础知识欠缺而难以适应知识的更新。另一方面,也有不少学校由于硬件条件的限制或是师资的缺乏,使嵌入式系统的教学成为一门“理论课”,课程内容缺乏实用性,学生固然被灌输了大量的嵌入式概念和理论,但没有实际动手练习的机会,这样的学生在就业市场上自然也难受欢迎。

写作目的

嵌入式系统涉及计算机硬件、操作系统、软件开发、软件工程等诸多领域,知识点众多,其中不少内容还是信息科学中的难点;同时,嵌入式系统又是一门实践性很强的课程,嵌入式领域的处理器和开发工具种类众多,开发工具中很多参数的配置、代码的调试往往依赖于经验;本科教学的学时有限,如何选取教学内容,使之既能保证教学内容的完整,又能让学生掌握主

流的开发工具和开发技巧，是每一个嵌入式系统基础课程的授课者首先要思考的问题。基于以上三方面的考虑，我们编写了这本内容完整、理论和实践兼顾、适合本科教学的教材。

本书特色

本书选择了 ARM 处理器（以 ARM7TDMI 的 S3C44B0X 处理器为重点）和开源操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 作为示例进行知识讲解。这样选择是因为：ARM 公司是全球领先的 16/32 位 RISC 处理器知识产权核（IP Core）提供商，ARM 处理器具有功能强大、体积小、功耗低等优点，被众多芯片厂商支持。ARM 处理器广泛地应用于各类嵌入式产品中，其在 RISC 处理器市场的占有率在 75% 以上，可以说，ARM 处理器已经成为嵌入式处理器的主流。而 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 是一款结构小巧的可移植、可裁剪的实时多任务操作系统内核，它虽然不如商业实时操作系统功能强大，但由于源码开放且代码精练、设计规范，其 5000 余行代码的解析对于学习实时操作系统原理十分有益，十分适合于嵌入式的基础教学。同时， $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 结构简单、便于改进，在实际工程项目中也被广泛应用。

此外，本书中还介绍了嵌入式程序设计、嵌入式系统设计开发流程，以及 ARM 嵌入式开发中的主流开发工具（ADS 和 RealView MDK 等）的使用等实用性知识。这些知识结合之前的嵌入式系统原理，为初学者展现一个完整而生动的嵌入式系统场景。

教学建议

本书共 10 章：第 1 章总述嵌入式系统的相关知识；第 2~5 章系统介绍 ARM 处理器相关知识；第 6、7 章介绍实时操作系统相关知识；第 8、9 章介绍嵌入式系统设计、开发相关知识；第 10 章介绍 ARM7TDMI 的 S3C44B0X 处理器的系统结构，由于这部分内容很多是工程操作或工程定义，放在 ARM 处理器原理中并不合适，但在实际工作中又常常需要查阅使用，所以将其单独列出，读者可以将其与第 2、3 章对照学习。

本书建议学时为 36 学时，各章的学时分配建议如下：

章 节	内 容	学 时
第 1 章 嵌入式系统基础知识	主要介绍嵌入式系统的基础知识，包括嵌入式系统的概念、特点、发展历史、分类、组成等	2
第 2 章 ARM 微处理器硬件结构	主要介绍 ARM 微处理器的硬件结构，包括 ARM 各系列微处理器的介绍、ARM7TDMI 的硬件结构、ARM 微处理器的存储体系、ARM 协处理器、ARM 片上总线、ARM 调试结构等	2
第 3 章 ARM 微处理器体系结构	主要介绍 ARM 微处理器的寄存器组织、工作状态、工作模式、异常处理、流水线技术、协处理器等	4
第 4 章 ARM 指令系统	系统地介绍 ARM 指令集和 Thumb 指令集的基本指令，以及各指令的应用场合及方法	4
第 5 章 ARM 程序设计基础	主要介绍 ARM 程序设计的一些基本概念，如 ARM 汇编语言的伪指令、汇编语言的语句格式和程序结构等，同时介绍 ARM 混合编程的内容	3
第 6 章 实时软件系统	主要介绍实时操作系统的概念、结构、工作原理，最后还介绍了主流的实时操作系统	4
第 7 章 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 源码解析和移植分析	重点介绍 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 的内核结构，包括任务调度、任务管理、时间管理、内存管理和任务间的通信与同步等基本功能，并提供在这个内核之上最基本的系统服务，如信号量、邮箱、消息队列、内存管理、中断管理等，最后介绍了 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 移植的相关知识	5

(续)

章 节	内 容	学 时
第 8 章 嵌入式系统设计开发流程	介绍嵌入式系统设计开发流程的相关知识, 包括需求分析、概要设计、详细设计、软硬件测试、软件调试等。最后以导航仪的设计开发为例, 来说明嵌入式系统设计开发的流程	4
第 9 章 嵌入式系统开发 工具及实例	主要介绍 ARM 嵌入式开发所使用的四种主流开发工具: ADS 1.2、Real-View MDK、RVDS 和 IAR EWARM, 并着重介绍了 ADS 1.2 和 RealView MDK 的使用方法	4
第 10 章 S3C44B0X 系统结构	主要介绍 S3C44B0X 的系统结构, 并对其内部各功能模块做了详细说明	4

致谢

本书在编写的过程中得到了很多专家和朋友的指导、帮助。特别感谢解放军理工大学胡友彬教授、东南大学杨全胜教授和宋之毅教授审阅本书并提出宝贵意见; 感谢博芯公司提供实验环境和产品资料; 感谢机械工业出版社华章公司策划编辑姚蕾的支持; 感谢家人的关心和鼓励, 正是你们的帮助才促使本书顺利地完成。

本书由朱恺、吉逸、储昊明合编, 吉逸负责第 1 章、储昊明负责第 2 章和第 10 章, 其余各章由朱恺编写, 最后由朱恺统稿。在本书的编写过程中, 我的好友王晓伟、王宇阳、叶飞江、李光生也参与了部分章节图表的绘制、代码的编写以及内容的整理工作。由于编者水平有限, 书中疏漏、不妥之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

朱 恺

2011 年 10 月于南京



目 录

出版者的话	
编委会	
丛书序言	
前言	
第1章 嵌入式系统基础知识	1
1.1 嵌入式系统概述	1
1.1.1 计算机的发展历史	1
1.1.2 嵌入式系统的发展历史	1
1.1.3 嵌入式系统的概念	3
1.1.4 嵌入式系统的特点	3
1.1.5 嵌入式系统的分类	4
1.1.6 嵌入式系统的典型应用	5
1.2 嵌入式系统的结构与组成	7
1.2.1 嵌入式系统的体系结构	7
1.2.2 嵌入式系统的组成	8
1.2.3 嵌入式处理器	9
1.2.4 实时操作系统	11
1.3 嵌入式系统程序开发	12
1.3.1 嵌入式系统程序开发过程	12
1.3.2 嵌入式系统程序开发层次	13
1.3.3 嵌入式系统程序开发语言	13
1.3.4 嵌入式系统的开发特点	14
1.4 嵌入式系统的新发展	14
1.5 嵌入式系统中的信息表示与运算基础	17
1.5.1 进位计数制与转换	17
1.5.2 计算机中数的表示	17
1.5.3 计算机中数的单位	18
1.6 本章小结	18
习题	18
第2章 ARM 微处理器硬件结构	19
2.1 ARM 简介	19
2.1.1 CISC	19
2.1.2 RISC	19
2.1.3 ARM 微处理器介绍	20
2.2 ARM7TDMI 微处理器硬件结构	22
2.2.1 ARM7TDMI 内核	23
2.2.2 ARM7TDMI 外围电路	24
2.2.3 ARM7TDMI 外围引脚	24
2.3 ARM 存储体系	27
2.3.1 ARM 存储器简述	27
2.3.2 ARM 存储层次结构	27
2.3.3 ARM 数据存储类型	28
2.3.4 ARM 数据存储方式	28
2.4 ARM 协处理器	29
2.5 ARM 片上总线	29
2.6 ARM 调试结构	30
2.7 ARM 外围电路扩展	31
2.8 本章小结	32
习题	32
第3章 ARM 微处理器体系结构	33
3.1 ARM 的工作状态	33
3.1.1 ARM/Thumb 技术介绍	33
3.1.2 ARM/Thumb 状态切换	33
3.2 ARM 的工作模式	34
3.3 ARM 的寄存器组织	34
3.3.1 ARM 状态下的寄存器组织	34
3.3.2 Thumb 状态下的寄存器组织	38
3.4 ARM 的异常处理	39
3.4.1 ARM 异常类型	39
3.4.2 对异常的响应	40
3.4.3 从异常返回	40
3.4.4 各类异常的具体描述	41
3.4.5 异常向量	43
3.4.6 异常优先级	44

3.5 ARM 的流水线技术	44	5.1.2 数据定义伪指令	83
3.5.1 ARM7 的三级流水线	44	5.1.3 汇编控制伪指令	86
3.5.2 三级流水线中 PC 的行为	45	5.1.4 地址读取伪指令	88
3.5.3 ARM9 的五级流水线	46	5.1.5 其他常用的伪指令	89
3.6 ARM 协处理器	47	5.2 ARM 汇编语言	93
3.7 本章小结	48	5.2.1 ARM 汇编语句格式	93
习题	49	5.2.2 汇编语言程序中常用的 符号	93
第4章 ARM 指令系统	50	5.2.3 汇编语言程序中的表达式 和运算符	95
4.1 ARM 指令集概述	50	5.2.4 ARM 汇编程序结构	97
4.1.1 ARM 指令集编码	50	5.2.5 ARM 汇编程序示例	98
4.1.2 ARM 指令的条件码	50	5.3 汇编语言与 C 语言的混合编程	101
4.1.3 ARM 指令格式	51	5.3.1 ARM 程序的文件格式	102
4.2 ARM 指令的寻址方式	52	5.3.2 ATPCS 简介	102
4.2.1 立即寻址	52	5.3.3 内嵌汇编	104
4.2.2 寄存器寻址	52	5.3.4 C 语言程序和 ARM 汇编 程序间相互调用	106
4.2.3 寄存器间接寻址	53	5.4 本章小结	109
4.2.4 基址变址寻址	53	习题	109
4.2.5 堆栈寻址	54	第6章 实时软件系统	111
4.2.6 块拷贝寻址	54	6.1 实时软件系统概述	111
4.2.7 相对寻址	56	6.2 实时软件系统结构	112
4.3 ARM 指令集	56	6.2.1 轮转结构	112
4.3.1 跳转指令	56	6.2.2 带有中断的轮转结构	113
4.3.2 数据处理指令	57	6.2.3 函数队列调度结构	114
4.3.3 乘法指令与乘加指令	61	6.2.4 实时操作系统结构	115
4.3.4 程序状态寄存器访问指令	63	6.3 实时操作系统概述	116
4.3.5 加载/存储指令	63	6.3.1 实时操作系统分类	116
4.3.6 批量数据加载/存储指令	65	6.3.2 实时操作系统体系结构	116
4.3.7 数据交换指令	66	6.4 实时操作系统运行原理	119
4.3.8 移位指令(操作)	66	6.4.1 任务	120
4.3.9 协处理器指令	67	6.4.2 互斥	122
4.3.10 异常产生指令	68	6.4.3 同步	123
4.3.11 基本功能段示例	70	6.4.4 任务间通信	124
4.4 Thumb 指令及应用	71	6.4.5 中断处理	125
4.4.1 Thumb 指令集概述	71	6.4.6 时钟节拍	127
4.4.2 Thumb 指令分类介绍	72	6.4.7 死锁	128
4.5 本章小结	80	6.4.8 实时调度策略	130
习题	80	6.5 主流的实时操作系统	136
第5章 ARM 程序设计基础	82	6.6 本章小结	141
5.1 ARM 汇编伪指令	82		
5.1.1 符号定义伪指令	82		

习题	141	8.6.2 规格说明	196
第7章 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 源码解析和移植		8.6.3 体系结构设计 (概要设计)	197
分析	142	8.6.4 硬件构件和软件构件的设计 (详细设计)	198
7.1 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的内核结构	142	8.6.5 系统集成与测试	199
7.1.1 文件结构	142	8.7 本章小结	199
7.1.2 初始化和启动	143	习题	200
7.1.3 时钟节拍	148	第9章 嵌入式系统开发工具及实例	201
7.1.4 任务管理	150	9.1 ARM 嵌入式开发工具概览	201
7.1.5 中断服务	156	9.2 ADS 1.2	202
7.1.6 任务间通信	157	9.2.1 建立一个工程	204
7.2 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的移植	164	9.2.2 配置生成目标	207
7.2.1 INCLUDES. H	165	9.2.3 编译连接	211
7.2.2 OS_CPU. H	166	9.2.4 用 AXD 进行代码调试	212
7.2.3 OS_CPU_C. C	168	9.3 RealView MDK	213
7.2.4 OS_CPU_A. ASM	171	9.3.1 集成开发环境简介	213
7.3 本章小结	174	9.3.2 工程管理	215
习题	174	9.3.3 编写源程序	222
第8章 嵌入式系统设计开发流程	176	9.3.4 编译程序	225
8.1 嵌入式系统设计开发基础	176	9.3.5 调试程序	226
8.1.1 嵌入式系统产品生命 周期	176	9.4 RVDS	229
8.1.2 嵌入式系统分析与设计 方法	177	9.4.1 RVDS 简介	229
8.1.3 统一建模语言 UML	177	9.4.2 RVDS 特点	230
8.2 嵌入式系统需求分析	182	9.5 IAR EWARM	233
8.3 嵌入式系统的设计	183	9.5.1 EWARM 集成开发环境 介绍	233
8.3.1 设计模式	183	9.5.2 IAR J-Link 仿真器简介	234
8.3.2 概要设计	185	9.6 本章小结	235
8.3.3 详细设计	186	习题	235
8.4 嵌入式系统测试	186	第10章 S3C44B0X 系统结构	236
8.4.1 硬件测试	186	10.1 S3C44B0X 简介	236
8.4.2 软件测试	188	10.1.1 片上功能	236
8.4.3 嵌入式系统的系统测试	190	10.1.2 特性	237
8.5 嵌入式系统的调试	191	10.1.3 芯片引脚定义	239
8.5.1 软件模拟器	191	10.2 S3C44B0X 存储控制器	243
8.5.2 在线仿真调试	191	10.2.1 空间划分	243
8.5.3 片上调试	192	10.2.2 功能描述	244
8.5.4 基于调试代理的调试 方法	194	10.2.3 特殊功能寄存器	244
8.6 嵌入式系统设计实例	195	10.3 S3C44B0X 的 I/O 端口	247
8.6.1 需求分析	196	10.3.1 功能概述	247

10.3.2	端口控制寄存器	249	10.6.1	概述	263
10.4	S3C44BOX 的 DMA	251	10.6.2	中断控制器操作	263
10.4.1	概述	251	10.6.3	中断源	264
10.4.2	ZDMA	251	10.6.4	特殊功能寄存器	266
10.4.3	BDMA	252	10.7	S3C44BOX 的 RTC	269
10.4.4	DMA 请求源选择	252	10.7.1	概述	269
10.4.5	自动重装模式	253	10.7.2	RTC 特性	269
10.4.6	DMA 相关寄存器	253	10.7.3	RTC 操作	270
10.5	S3C44BOX 的 UART	256	10.7.4	特殊功能寄存器	271
10.5.1	概述	256	10.8	S3C44BOX 的其他模块	272
10.5.2	UART 操作	256	10.9	本章小结	275
10.5.3	特殊功能寄存器	259	习题		275
10.6	S3C44BOX 的中断控制器	263	参考文献		277

嵌入式系统基础知识

计算机是人类在 20 世纪的一项伟大科技发明。以计算机技术为基础的信息革命极大地提高了人类的生产效率，也改变了人们通信、获取信息的方式。在信息化的今天，计算机已经深入到我们日常工作、生活的方方面面。

其实，我们常说的“计算机”除了我们熟知的个人计算机（PC）、运行速度达千亿次每秒的巨型计算机外，还包括一类与我们日常生活联系最为密切的微小型计算机，诸如，智能手机、信息家电、车载 GPS 导航等。这一类面向不同行业应用的计算机，在性能、功耗、体积、成本等方面往往有不同的要求，这类计算机又被统称为“嵌入式计算机”或“嵌入式系统”。

1.1 嵌入式系统概述

自从 1946 年世界上第一台电子数字计算机 ENIAC 问世以来，计算机共经历了电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路和超大规模集成电路 5 个时代的发展。而在这快速发展历程中，计算机技术突飞猛进，特别是进入 20 世纪 70 年代以后，微型计算机的出现为计算机的广泛应用开拓了更加广阔的前景。

1.1.1 计算机的发展历史

20 世纪 40 年代末到 50 年代中期的计算机都采用电子管为主要元件，称为第一代计算机，也就是电子管时代的计算机。这一代计算机主要用于科学计算。

50 年代中期开始，晶体管取代电子管，大大缩小了计算机的体积，降低了成本，同时将运算速度提高了近百倍，称为第二代计算机，也就是晶体管时代的计算机。在应用上，计算机不仅用于科学计算，而且开始用于数据处理和过程控制。

60 年代中期，集成电路问世，此后出现了中、小规模集成电路构成的第三代计算机。在这一时期，实时系统和计算机通信网络有了一定的发展，此期间开始出现一些嵌入式系统的雏形——简单的实时控制系统。

70 年代初，出现了以大规模集成电路为主体的第四代计算机。计算机的体积进一步缩小，性能进一步提高，发展了并行技术和多机系统，出现了精简指令集计算机（Reduced Instruction Set Computer, RISC）。如今的嵌入式系统基本是以第四代计算机为基础来实现的。

而所谓的第五代计算机，其主要目标是采用超大规模集成电路（Very Large Scale Integration, VLSI），在系统结构上类似人脑的神经网络，在材料上使用常温超导材料和光器件，在计算机结构上采用超并行的数据流计算等。

1.1.2 嵌入式系统的发展历史

嵌入式系统从出现至今已历经 40 多年的时间，发展历史悠久。早在电子数字计算机出现之

前就有了把计算装置嵌入到系统和设备之中的嵌入式系统,如把计算机嵌入到导弹等武器和航天器中。但是直到20世纪60年代末(集成电路化的第三代计算机时期),随着微电子技术的发展,真正意义上的嵌入式系统才逐步兴起。近十几年来,随着计算机、通信、消费电子的一体化趋势日益明显,嵌入式技术已成为一个研究热点。纵观嵌入式系统的发展过程,大致经历了4个阶段。

1. 无操作系统阶段

嵌入式系统最初的应用是基于单片机的,大多以可编程控制器的形式出现,具有监控、伺服和设备指示等功能,通常应用于各类工业控制和飞机、导弹等武器装备中。这时的应用都没有操作系统的支持,只能通过汇编和C语言进行直接控制。虽然这些装置初步具备了嵌入式的应用特点,但仅仅是用8位的单片机芯片来执行一些单进程的程序,严格意义上讲这些应用还谈不上“系统”的概念。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是:系统结构和功能相对单一,任务简单,处理效率较低,存储容量较小,几乎没有用户接口。由于这种嵌入式系统实现简单,价格低廉,曾经在工业控制领域中得到了非常广泛的应用,但无法满足对执行效率、用户接口和存储容量都有较高要求的智能化电子产品的需要。

2. 简单操作系统阶段

20世纪80年代,随着微电子工艺水平的提高,集成电路制造商开始把嵌入式应用中所需要的微处理器、I/O接口、A/D转换接口及ROM、RAM等部件集成到一片VLSI中,制造出面向I/O设计的微控制器。这种控制器一举成为嵌入式系统领域中异军突起的新秀。与此同时,嵌入式系统的程序员也开始基于一些简单的操作系统开发嵌入式应用软件,大大缩短了开发周期,提高了开发效率。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是:出现了大量高可靠性、低功耗的嵌入式处理器,各种简单的嵌入式操作系统开始出现并得到迅速发展。此时的嵌入式操作系统虽然简单,但已经初步具备了一定的兼容性和扩展性,内核精巧且效率高,主要用来控制系统负载及监控应用程序的运行。

3. 实时操作系统阶段

20世纪90年代以后,在分布控制、柔性制造、数字化通信和信息家电等巨大需求的牵引下,嵌入式系统进一步飞速发展。嵌入式微控制器(MCU)和嵌入式DSP处理器朝高集成度、高精度、高速度、低功耗的方向发展。伴随着硬件性能的提高,嵌入式软件规模也不断扩大,逐渐形成了实时操作系统(Real-time Operation System, RTOS),并成为嵌入式系统的主流。

由于嵌入式实时操作系统具有高度的模块化、扩展性和可靠性,它在目前的嵌入式应用中运用越来越广泛,尤其在功能复杂、系统庞大的应用中显得越来越重要。使用嵌入式实时操作系统具有很多优势:能充分发挥32位处理器的多任务潜力;提高开发效率,缩短开发周期;开发出来的产品具有高可靠性。嵌入式操作系统有几十种,常见的有 μ CLinux、RTLinux、Windows CE、Palm OS、VxWorks、eCos、 μ C/OS-II。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是:32位处理器芯片具有高速度、低功耗、低价格的特点。嵌入式操作系统的实时性也有了很大的提高,已经能够运行在各种不同类型的微处理器上,具有高度的模块化和扩展性。此时的操作系统已经具备了文件和目录管理、设备管理、多任务、网络、图形用户界面等功能,并提供了大量的应用程序接口(Application Programming Interface, API),从而使应用软件的开发变得更加简单。

4. 嵌入式片上系统阶段

随着EDA(Electronic Design Automation, 电子设计自动化)技术的推广和VLSI设计的普及化及半导体工艺的迅速发展,在一个硅片上实现更为复杂的系统的时代已来临,这就是嵌入式片上系统(System on Chip, SoC)。SoC最大的特点是成功实现了软、硬件无缝结合,直接处

理器片内嵌入操作系统的代码模块。各种通用处理器内核将作为 SoC 设计公司的标准库, 和许多其他嵌入式系统外设一样, 成为 VLSI 设计中一种标准的器件, 用标准的 VHDL、Verilog 或者 System C 等语言描述, 存储在器件库中。用户只需要定义出其整个应用系统, 仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂制作样品。这样除个别无法集成的器件以外, 整个嵌入式系统大部分均可集成到一块或几块芯片中去, 应用系统电路板将变得很简洁, 非常有利于嵌入式应用产品减小体积和功耗、提高可靠性。

SoC 可以分为通用和专用两类。通用系列包括 Infineon 公司的 TriCore、Motorola 公司的 M-Core、某些 ARM 系列器件、Echelon 公司和 Motorola 公司联合研制的 Neuron 芯片等。SoC 一般专用于某个或某类系统, 不为一般用户所知。一个有代表性的产品是 Philips 公司的 SmartXA, 它将 XA 单片机内核和支持 RSA 加密算法的单元制作在一块硅片上, 形成一个可加载 Java 或 C 语言专用的 SoC, 可用于公众互联网。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是: 硬件和软件的界限不那么明显了, 处理器内核、I/O 功能部件和嵌入式操作系统都可以写成标准库, 用户根据需要进行调用, 硬件和嵌入式软件朝着统一化的方向发展, 系统的集成度更高。

1.1.3 嵌入式系统的概念

嵌入式系统是一种面向特定行业的专用计算机系统, 是信息技术 (Information Technology) 在后 PC 时代最重要的发展方向。

嵌入式系统的一个被广为接受的定义是: 以应用为中心、计算机技术为基础, 软、硬件可裁剪, 功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。广而言之, 可以认为凡是带有微处理器的专用软硬件系统都可以称为嵌入式系统。嵌入式系统采用“量体裁衣”的方式把所需的功能嵌入到各种应用系统中, 它融合了计算机软硬件技术、通信技术和半导体微电子技术, 是信息技术的最终产品。

由此可见, 嵌入式系统属于一种专用的计算机系统, 它最核心的特点是紧密围绕着某 (几) 类应用, 在软、硬件方面做出合理及必要的设计, 使之完成相应的功能即可。

1.1.4 嵌入式系统的特点

由于嵌入式系统是一种特定的计算机系统, 所以, 它具有计算机系统一些共性的特点, 如它也有处理器、存储器、外围接口等硬件结构; 软件也可分为操作系统、应用软件等。但同时由于其面向不同行业、不同应用, 所以又具有自身独有的特点, 总体看来, 嵌入式系统具备如下特点。

1. 专用系统, 应用广泛

任何一个嵌入式系统都和特定应用相关, 用途固定, 这一点与普通 PC 不同。不同领域的嵌入式系统之间在软、硬件结构上可能会差别很大。嵌入式系统的应用领域广泛, 在制造工业、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、军事装备、消费类产品等方面均能看到嵌入式系统的身影。全球在用的嵌入式系统数量远远大于通用计算机, 目前嵌入式系统每年的芯片使用量要占到芯片市场的 80% 以上。

2. 软、硬件可裁剪

嵌入式系统在开发之初就要根据其所要应用的领域, 对其体积、功耗、配置、可靠性等方面进行周密的设计, 这一设计过程不仅牵涉到硬件也会牵涉到软件。在设计过程中, 可以裁剪不需要的接口、存储器件或是软件模块、通信协议, 只保留和应用相关的部分。

例如, 像 MP3 之类的消费电子产品对产品的功耗、体积都有着严格的要求, 所以, 在裁剪中可以只保留 USB、音频等接口, 而对于网络接口等则可以省去, 在软件上也无须考虑实现网