

嵌入式系统开发与应用系列教程

# 嵌入式系统 开发与应用教程

- ◎ 配套教学课件
- ◎ 配套实验教程

田 泽 编著



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

# 嵌入式系统开发与应用教程

田 泽 编著

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

## 内 容 简 介

本书是《嵌入式系统开发与应用系列教程》中的理论教程。在本教程内容设计上,首先完整讲述了嵌入式系统开发技术的基础知识和 ARM 技术,然后结合基于 ARM 处理器的嵌入式实际工程例程,系统讲述了嵌入式应用开发技术,形成了从易到难、相对完整、贴近实际工程应用的嵌入式理论教学体系。结合本系列教程的实验教程,可使读者快速、全面地掌握嵌入式系统开发与应用技术和开发技能。本书是基于 32 位 ARM 处理器的嵌入式系统开发与应用教学体系的重要组成部分,并配套多媒体教学课件。

本书可作为高等院校计算机、电类专业本科生、研究生以及相关工程技术人员进行嵌入式系统教学及培训的教材,也可作为基于 ARM 核嵌入式系统开发的工程技术人员的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统开发与应用教程/田泽编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.3

ISBN 7-81077-648-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 013552 号

## 嵌入式系统开发与应用教程

田 泽 编 著

责任编辑 王 瑛

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:28.25 字数:633 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7-81077-648-7 定价:35.00 元

# 序

## 嵌入式技术的发展

以 8 位单片机(或微控制器,MCU)为核心的嵌入式系统早已广泛应用于各个领域,这些应用大多数还处于单机使用的嵌入式低层次阶段。其特点是以 MCU 为核心,与一些简单的传感器、监测设备、伺服控制、指示、显示设备等配合,实现一定的测量、显示、信息处理及控制等功能。即使在一些工业控制、汽车电子和智能家居等多机应用中,为了实现多个 MCU 构成的系统间的信息交流,通常是利用 CAN、RS-232、RS-485 等总线将 MCU 组网。但这种网络的应用空间有限,相关的通信协议也比较单一,并且一般孤立于广泛应用的 Internet 以外。目前,Internet 已成为社会重要的基础信息设施,是信息流通的重要渠道。嵌入式系统必将与 Internet 完美融合,方便、低廉地将信息传送到世界任何一个地方。

随着嵌入式设备与 Internet 的广泛结合,手机、PDA、路由器、调制解调器等复杂的高端应用对嵌入式处理器的性能提出了更高的要求。虽然以 8 位单片机为核心的嵌入式技术不断发展,性能也不断提高,但由于其性能的局限性,已无法满足未来高性能嵌入式技术的发展需求。激烈的市场、技术竞争要求不断提高嵌入式系统的性价比;同时,也要求缩短嵌入式系统的开发周期。自从 20 世纪 70 年代初出现嵌入式系统的概念以来,嵌入式系统以其高性能、低功耗等特点高速发展。当时的嵌入式系统很多都不采用操作系统,它们只是为了实现某个控制功能,使用简单的循环控制来对外界的控制请求进行处理。随着嵌入式系统的快速发展,当应用系统越来越复杂、使用范围越来越广泛时,每增加一项新的应用功能,都可能需要从头开始设计系统软件,没有操作系统已成为其最大缺陷。但目前 8 位单片机上运行嵌入式操作系统尚有一定困难,因此,以 32 位微处理器作为高性能嵌入式系统开发的核心已是嵌入式技术发展的必然趋势。

20 世纪 90 年代后,嵌入式系统设计从以嵌入式微处理器/DSP 为核心的“集成电路”级设计,逐渐转向“集成系统”级设计,提出了系统芯片 SoC(System on a Chip)的基本概念。目前,嵌入式系统已进入以 SoC 为核心的设计阶段,并开始逐步实用化、规范化。SoC 为高性能嵌入式系统开发提供了功能丰富的硬件平台,也为实时嵌入式操作系统的广泛使用提供了硬件基础。从 20 世纪 80 年代开始,陆续出现了一些嵌入式操作系统,比较著名的有 VxWorks、Windows CE、Palm、 $\mu$ CLinux、pSOS 和  $\mu$ C/OS-II 等,但真正广泛使用只是近几年的事情。一方面是因为嵌入式系统软件开发复杂度增加的需求;另一方面是大量高性能、面向实际应用、集成多种系统功能的 SoC 芯片成为高端嵌入式应用的硬件核心,为可靠、高效、低成本地运行嵌入式操作系统提供了硬件平台。大部分嵌入式操作系统价格昂贵,而源代码开放的  $\mu$ C/OS-II、 $\mu$ CLinux 是大家比较看好的,也比较适用于教学。有关嵌入式操作系统的知识体系相对复杂,一些出版社已经出版了多种相关书籍,如果在教学、科研中比较感兴趣,请参阅相关资料。

嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高等优点,是嵌入式系统的核心。目前比较有影响的 32 位嵌入式微处理器有 ARM 公司的 ARM、Compaq 公司的 Alpha、HP 公司的 PA - RISC、IBM 公司的 PowerPC、MIPS 公司的 MIPS 和 Sun 公司的 Sparc 等。而 ARM 处理器具有高性能、低功耗、低成本等显著优点,已成为高性能、低功耗嵌入式微处理器的代名词,是目前 32 位、64 位嵌入式微处理器中应用最为广泛的一个系列。

20 世纪 90 年代初,半导体行业产业链形成设计业、制造业、封装测试业三业分离的产业分工。台积电、联电等半导体工厂崛起,一些 fabless、chipless 公司如雨后春笋般涌现出来。而英国先进 RISC 机器公司(Advanced RISC Machines,简称 ARM 公司)作为 fabless、chipless 这一生产模式最为成功的典范,既不生产芯片,也不销售芯片,而是设计出高效的 IP 内核,授权给各半导体公司使用;半导体公司在 ARM 技术的基础上,根据自己公司的产品定位,添加自己的设计并推出芯片产品;最后由 OEM 客户采用这些芯片来构建基于 ARM 技术的最终应用系统产品。经过 10 多年的发展,ARM 公司已成为业界领先的 IP 供应商。

回顾 ARM 技术的发展历程,在 ARM7 体系结构(体系结构版本 v3)刚被广泛接受和使用时,嵌入式微处理器的市场仍然大都由 8 位、16 位处理器占领。然而,这些产品却不能满足当时移动电话、调制解调器等高端应用对处理器性能的要求。这些高端产品需要 32 位 RISC 处理器的性能和更优于 16 位 CISC 处理器的代码密度,这就要求以更低的成本取得更好的性能和更优的代码密度。为了满足这种发展需求,ARM 体系结构增加了 T 变种,开发了一种新的指令体系,即 16 位 Thumb 指令集。Thumb 技术是 ARM 技术的一大特色。ARM 公司发布的 ARM7TDMI(T)是第一个支持 Thumb 指令集的微处理器,其工作模式可以方便地切换到 Thumb 状态。在该状态下运行的指令集是 16 位 Thumb 指令集,这在当时的 16 位系统与现在需要的 32 位系统之间搭起了一座桥梁。性能更优而不需要付出额外代价的 ARM,为在当时使用 8 位或 16 位处理器,却一直在寻找更优性能处理器的用户,提供了解决方案,也极大地推动了 ARM 技术的发展。16 位处理器一直没有像人们预期的那样发展起来的原因很复杂,由于 32 位 ARM 微处理器提供了低于一般 16 位微处理器的价格而高于一般 16 位微处理器的性能,使得高端嵌入式应用可以完全跨越 16 位而直接进入 32 位应用领域,这也许是原因之一。

ARM 微处理器得到了众多半导体厂家和整机厂商的大力支持,全球已有 100 多家 IT 公司在采用 ARM 技术,20 家最大的半导体厂商中有 19 家是 ARM 的用户,包括 TI、Philips 和 Intel 等公司。优良的性能和准确的市场定位极大地丰富了 ARM 资源,加速了基于 ARM 核的、面向各种应用系统芯片的开发应用,使 ARM 技术获得了更广泛的应用,确立了 ARM 技术的市场领先地位。ARM 在高性能嵌入式应用领域获得了巨大的成功,已在 32 位嵌入式应用中稳居世界第一。在 2002 年,基于 ARM 核的芯片占据了整个 32 位、64 位嵌入式微处理器市场的 79.5%,全世界已使用了 20 多亿个 ARM 核。如今,ARM 公司已经成为业界的龙头老大,“每个人的口袋中都装着 ARM”是毫不夸张的,因为几乎所有的手机、移动设备、PDA 都是用基于 ARM 核的系统芯片开发的。为了顺应当今世界技术革新的潮流,了解、学习和掌握高性能嵌入式技术,就必然要学习以 32 位 ARM 微处理器为核心的嵌入式开发技术及其应用

开发环境和平台。

对 IT 产业发展规律进行总结发现：如果说过去 20 年 PC 机的广泛应用是集成电路和 IT 相关技术发展的驱动器并且极大地促进了 IT 相关技术发展,那么未来几十年除了 PC 技术要继续高速发展之外,主要驱动器应该是与 Internet 相结合的、可移动的(mobile)、便携的(portable)、实时嵌入式 Internet 的信息处理设备,即进入了后 PC(Post-PC)时代。目前嵌入式 Internet 还仅局限于移动商务、智能家居(家电上网)、工业控制和智能设备的应用等方面,随着相关应用技术的发展,嵌入式技术必将与许多实际应用领域相结合,以难以想像的速度发展。这必然会极大地拓展嵌入式应用的广度和深度,体现嵌入式系统与实际应用密切结合的价值。

当代通用计算机工业是 Wintel(Microsoft 和 Intel 公司 20 世纪 90 年代初建立的联盟)垄断的工业。随着信息技术和网络技术的高速发展,嵌入式技术的广泛应用,使得这种垄断在后 PC 时代不再存在。嵌入式系统正是非 PC 设备的主体。互联网技术在世界范围的扩展以及中国通信事业的高速发展,为我国开发嵌入式产品造就了巨大的市场。与实际应用密切结合且技术高度分散的嵌入式技术,为我国 IT 技术的发展提供了难得的机遇。加快嵌入式技术的开发应用,掌握嵌入式开发核心技术,对于 IT 技术并不发达的中国是非常重要的。

## 嵌入式系统教学现状和 32 位嵌入式系统教学体系的建设

发展嵌入式技术,人才是关键。培养和培训相关人才,一方面,要在高校中加强嵌入式系统教学,这是人才的源头;另一方面,有一定实际项目开发经验的工程技术人员也需要加强嵌入式开发技术的培训。目前大学生就业难,而许多单位又招聘不到合适的开发人员,国内教育与人才需求之间存在不相适应的严重矛盾。虽然产生这一矛盾的原因很多,但就目前工科教育而言,存在重知识传授而轻能力与素质培养,重理论讲述而轻实践环节训练,重共性教育而轻个性发展,重对传统的继承而轻对现状的突破和创新等众多问题。这些问题反映在高校相关课程的教学体系设置中,就是可以提高自主开发能力的训练条件不具备,没有规范性的工程实际训练课程,已开设的相关课程教学内容陈旧,无法满足日新月异的新技术变革的需要,而且广度有限,深度不够;反映在实践教学过程中,就是没有一流的、与实际工程应用密切结合的实验教学设施以及相关实践性课程内容设计,使得高校培养的人才创新意识薄弱,实践能力不强,与实际工程应用需求严重脱节,学生发展后劲不足。这些原因可能是当前工科人才培养不能满足实际工程需求的一个重要因素。因此,用人单位不得不承担繁重的工程应用再教育的任务,这严重制约了我国相关技术的发展。

就我国大部分高校目前的嵌入式系统教学而言,整体仍然停留在 20 世纪 80 年代初发展起来的以 8 位 51 单片机为核心的教学水平上。总结近 20 多年来我国以单片机为核心的嵌入式系统教学情况,虽然它极大地促进了中国 IT 技术的发展,但是由于受传统教学体系的影响以及我国高等教育条件的限制,目前教学内容设置、教学方法、教学手段、教材编写体系与这门课程以实际应用为主的基本特征严重脱节。学生学完这门课程后,只能进行一般的、基于指令基础上的简单编程,而不能进行基本的的应用系统设计。在此基础上要想完成具有较大规模的

应用程序设计是有一定难度的,要独立进行一般的开发工作就更加有难度。学生进入技术开发岗位后,基本上要进行相当长一段时间的实际培训,才能基本进入开发流程;要独立承担项目,还需要更长一段时间。

以 32 位 ARM 为核心的嵌入式技术日益成为高性能嵌入式技术应用的基础,面向实际工程应用、以 ARM 为核心的嵌入式技术培训课程也日益受到工程技术人员的欢迎,正说明了在高校建立一个新的、基于 ARM 技术的嵌入式系统教学课程体系的必要性和迫切性,这可以从源头上解决嵌入式技术发展对人才的需求问题。

当然,与传统的以 8 位 51 单片机为核心的开发应用相比,ARM 微处理器的性能和处理能力遥遥领先,应用也日益广泛,但与之相应地,基于 ARM 的嵌入式系统软、硬件开发的复杂度和难度也急剧加大。要建立一个新的、以 ARM 技术为核心的嵌入式系统开发与应用的课程体系,就需要总结以往以 51 单片机为核心的嵌入式系统教学经验,同时也要与 ARM 技术的自身特点以及国内实际的教育基础和产业发展的具体情况密切结合;既要考虑大大提高目前我国嵌入式系统教学的水平,又不能脱离现在的教学实际;既要加强嵌入式系统基础教育,又要面向实际工程应用,提升嵌入式系统教学的实用性和工程性,将比较复杂的嵌入式模块综合开发的例程、嵌入式操作系统移植等内容写入教材中。

## 本系列教程和相关教学实验平台

要建立基于 32 位 ARM 技术的嵌入式系统教学体系,迫切需要相应的配套教材,这是教学体系建设的基础。目前,国内尚缺少适用的教材。

作者是国内最早翻译 ARM bible 级的《ARM SoC 体系结构》一书的译者之一,并从事基于 ARM 技术的相关教学及科研工作多年,与 ARM 公司、基于 ARM 核的芯片厂商以及对 ARM 感兴趣的读者建立了广泛的联系,他们给我提供了大量的技术信息。许多读者建议将基于 ARM 的嵌入式技术写进教科书中,使得基于 ARM 的嵌入式技术走进教室,走进实验室,以提升我国嵌入式技术开发的整体水平。这些建议使我萌发了编写本套《嵌入式系统开发与应用系列教程》的念头并付诸于实践。我们按照当前高校理论教学与实验教学的分类方法,编写了本套教程,希望以此为基础形成一个系统的、基于 32 位 ARM 的理论教学与实验教学体系。

嵌入式系统开发与应用涉及软、硬件及操作系统等复杂的知识,基于 ARM 的嵌入式系统教学,尤其是面向实际开发应用的教学工作是一项非常复杂的系统工程。本套教程尝试性地将大量的基本嵌入式系统开发与应用的复杂例程从教学和实验角度出发写入教材中,希望基于 ARM 的基础嵌入式系统教学能更好地融合实际应用。本书是作者在研究生、本科生嵌入式系统教学及相关技术培训讲义的基础上完成的。

本系列教程的基本组成和内容如下:

### ◆《嵌入式系统开发与应用教程》

#### ——配套多媒体教学课件

内容包括:嵌入式系统开发与应用基本概念、ARM 技术概述、ARM 指令系统和基于 ARM 的嵌入式程序设计基础、基于 ARM 的开发实例、源代码开放的嵌入式操作系统

$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 、 $\mu\text{CLinux}$  移植与应用开发。使读者能够系统、完整地掌握嵌入式系统开发的基本概念和设计流程、基于 ARM 的嵌入式软件程序设计与开发技能、嵌入式操作系统移植的基本概念和应用开发的基础。

◆《嵌入式系统开发与应用实验教程(第2版)》

——配套 Embest ARM 实验教学系统

——配套多媒体实验教学课件

主要内容：以 Embest ARM 实验教学系统为硬件实验平台，结合《嵌入式系统开发与应用教程》的理论教学，系统设计了嵌入式系统开发与应用的实验内容，涉及嵌入式软件开发基础实验、嵌入式基本接口实验、复杂人机接口实验、通信与音频接口实验、实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$  移植及应用开发实验、嵌入式操作系统  $\mu\text{CLinux}$  的移植及应用开发实验，6 大部分共 29 个实验，形成了从易到难、相对完整、贴近实际工程应用的嵌入式实验教学体系，可使读者快速、全面地掌握嵌入式开发与应用技术和实际项目的开发技能。本书的目的在于培养学生综合设计创新能力、实际应用工程开发能力。

◆《嵌入式系统开发与应用学习指导》

本书为《嵌入式系统开发与应用教程》、《嵌入式系统开发与应用实验教程》的读者提供相关的学习背景知识；对学习过程中要掌握的重点及疑难点进行归纳与详细讲解；对上述两本教程中的习题进行讲解；对开发过程中常见问题进行分析与解答。本书的目的是帮助读者全面、准确地掌握嵌入式系统开发与应用的基本知识、基本开发技能以及解决嵌入式系统开发与应用中遇到的基本问题。

为了便于教学和实验，我们针对《嵌入式系统开发与应用教程》、《嵌入式系统开发与应用实验教程》两本教材，还为教师提供相配套的多媒体教学课件。在此基础上，我们将根据实际教学情况和相关技术的发展，及时更新相关教材、实验及课件内容。

本系列教程配套的参考资料及其说明如下：

◆《嵌入式系统开发与应用》

——配套多媒体教学课件

为作者在北京航空航天大学出版社出版的一本书。《嵌入式系统开发与应用》力求将嵌入式系统开发与应用技术全面介绍给读者，内容全面、详细和系统，非常适于学习嵌入式系统开发的工程技术人员阅读。但因其内容较多，不太适宜作为高等院校嵌入式系统课程的短学时教材，而高校研究生或本科生的多学时嵌入式系统课程可选用此书作为教材。此书亦可作为嵌入式系统开发的工程技术人员的培训资料，因此为本书亦配套了多媒体教学课件。

本系列教程中的《嵌入式系统开发与应用教程》一书是针对高校嵌入式系统教学的特点，在《嵌入式系统开发与应用》一书基础上精简而成的，更合于短学时的教学和培训。对于选用本系列教程作为教材的高校师生，亦可将《嵌入式系统开发与应用》作为配套参考资料。

在对本套教程理论教学、实验教学的内容设计以及 Embest ARM 实验教学系统的开发过程中，我们进行了充分的调查和研究，并总结以往嵌入式系统教学存在的问题，在加强嵌入式



系统开发基础、嵌入式系统应用软件设计、嵌入式系统基本硬件接口、嵌入式操作系统移植及应用教学内容的基础上,紧密结合嵌入式系统开发过程的实际工程应用,将嵌入式系统外围复杂的实用模块开发例程移植到本套教程的理论和实验教学内容中,形成了从易到难、相对完整、贴近嵌入式系统工程开发应用的理论和实验教学及培训体系。

本套教程将理论教学与实验教学融为一体,为系统学习、掌握基于 ARM 的嵌入式系统开发技术提供了一种选择方案。通过本套教程的学习,不仅可使读者能够系统地掌握嵌入式系统开发的基本知识,而且对复杂实用的外围接口模块的开发、嵌入式操作系统移植也能有一个全面了解。本套教程提供的实际嵌入式系统开发例程也可以应用到实际开发过程中。

在学习基于 ARM 的嵌入式系统开发时,选择合适的开发工具可以加快开发进度,降低开发成本。目前世界上有几十家公司提供不同类别的 ARM 开发工具和产品。ARM 应用的开发工具主要包括集成开发环境 IDE、嵌入式实时操作系统、评估板、JTAG 仿真器等。一般来说,一套具备最基本功能的嵌入式集成开发环境 IDE 是嵌入式系统开发所必不可少的。目前国内外主要使用的 IDE 环境有 ARM 公司的 SDT 和 ADS、美国 Green Hills 软件公司的 Multi 2000、台湾的 Hitool for ARM 以及英蓓特公司的 Embest IDE for ARM 等;而国内使用较多的 IDE 为 ARM 公司的 SDT、ADS 以及英蓓特公司的 Embest IDE for ARM。仿真器有 ARM 公司的 Muti-ICE 和英蓓特公司的 Embest 系列 ARM JTAG 仿真器。

SDT 和 ADS 是 ARM 公司早期的集成开发环境(IDE),其用户界面不太符合中国人的使用习惯,而且软件本身价格很高,仿真器也是价格不菲。SDT 和 ADS 目前都已经停止升级。英蓓特公司的 ARM 集成开发环境套件(包括 Embest IDE、指令集模拟器、仿真器及 Flash 编程器等相关开发工具)是国内最早的 ARM 开发工具之一,完全自主开发,本土技术支持实力雄厚,且价格合理,并能为嵌入式系统开发人员提供软、硬件开发工具、嵌入式系统完整解决方案及技术信息服务;因此,本套教程选用英蓓特公司的集成开发环境套件作为 ARM 应用开发的教学工具。

SAMSUNG 公司 S3C 系列芯片是国内市场占有率最高的基于 ARM 核的微处理器之一,其接口模块丰富,适用面广,比较适合教学实验。英蓓特公司开发了基于 S3C44B0 芯片的 Embest ARM 实验教学系统,以较低的价格为用户提供了全面的嵌入式系统开发与学习的平台。该实验教学系统具有存储器、I/O、数码管液晶显示屏、触摸屏、键盘、音频输出、以太网接口、USB 接口、I<sup>2</sup>C 接口,高级扩展包括 IDE 硬盘、CF 卡、Flash 电子硬盘等硬件接口,完全可以满足各种层次的嵌入式系统教学需求;因此,本实验教程选择 Embest ARM 实验教学系统作为实验平台。

## 学习本系列教程所需基础知识

嵌入式系统开发与应用的内容繁杂,涉及基本的硬件知识(如嵌入式微处理器及其基本的接口知识、扩展的人机接口、网络通信接口等)、操作系统(应该至少了解一种操作系统的中断、优先级、任务间通信、同步等知识)、程序设计知识(C、C++、汇编语言程序设计,至少要熟悉 C 语言);同时,还涉及一定的数字电路知识以及使用示波器、逻辑分析仪等基本技能。因此,

在系统地学习本门课程之前,必须先修微机原理与接口、C 语言程序设计课程,有一些计算机操作系统原理、体系结构和系统结构的基本概念,同时对于网络协议有一定的了解。为了兼顾各方面学生的基本需求,我们在《嵌入式系统开发与应用教程》及《嵌入式系统开发与应用实验教程》中,对于涉及的相关内容,加了一些必要的背景知识,如网络协议的基本介绍、触摸屏基本知识、键盘接口程序设计的基本知识等,使学生既能专心于嵌入式系统知识的学习,也能使他们在较短时间内对相关知识有所了解。

## 致 谢

在本系列教程的编写过程中,得到了北京航空航天大学出版社、ARM 中国总裁谭军博士、北京理工大学马忠梅教授的关心和指导,北京大学信息科学技术学院盛世敏教授、于敦山博士和蒋安平博士也给予了大量的支持和帮助。感谢我的博士导师中国科学院微电子研究所的仇玉林研究员、北大盛世敏教授,感谢我的硕士导师西安交通大学邱祖廉教授,感谢他们对我一如既往的关心、理解和帮助。他们将我带入科学研究的殿堂,并给予我各种帮助,是我无穷的精神源泉,在此表示深深感谢!

在本书的编写过程中,我的硕士研究生闫效莺、车晓萍以及本科生谢辉、杨冬峰、张精通、徐德正、宋文博、侯利军、杨艳锋、杨景松和宫志坚等同学,在原课程讲义的基础上为程序添加了详细的注解,使之更贴近于面向基础的课程教育,在此表示感谢!

深圳市英蓓特信息技术有限公司的徐光峰、张国瑞、黄日新、唐晖等工程师也提供了详细的 Embest ARM 实验教学系统的技术资料和各种帮助,并对本套教程以及实验体系的内容设计及完善提出了大量的意见和建议,在此表示感谢!

感谢我的爱人王永红给予我的理解和支持,是她在家庭中默默地劳作和操持,使我可以安心于工作。正是由于她给予我最及时、最需要的关心和照顾,使我在单调的工作之余,生活总是绚丽、多彩。感谢我的儿子田祎琨,我很少在生活和学习上给予他照顾,希望他幼小的心灵能够理解我!

感谢北京航空航天大学出版社的编辑们,正是由于他们高效、努力的工作,才使得本书能够及时与大家见面!

感谢所有帮助过我的人们,有了他们的理解、帮助和支持,我才能完成我的写作。

由于时间仓促等众多客观条件的制约,书中存在各种错误和不足,敬请读者谅解,并真诚地欢迎读者提出宝贵的意见和建议。希望教育界、科研界、产业界携手并进,抓住嵌入式技术为我国 IT 发展提供的难得机遇,促进我国嵌入式技术快速、稳定、健康地发展。

田 泽

2004 年 4 月

# 前 言

本书属于《嵌入式系统开发与应用系列教程》的理论教程,是基于 32 位 ARM 的嵌入式系统教学体系建设的重要组成部分。本书以嵌入式系统的基本开发技术为主线,以 ARM 处理器核及国内应用广泛的 SAMSUNG 公司 S3C44B0X(基于 ARM7TDMI)为硬件平台,系统讲述了嵌入式系统开发的基本知识、基本流程和基本方法及以 ARM 微处理器为核心的嵌入式系统开发过程。为了提升目前我国嵌入式系统的教学水平而又不脱离目前的教学实际,在本系列教程中的理论课程内容的设置和实验教学内容的开发过程中,我们既强调嵌入式基础教育,打好嵌入式系统开发与应用的基础,又面向实际工程应用,提升嵌入式系统教学的实用性和工程性。

本书按技术内容分为 7 章,共 5 大部分,各部分具体内容及包含的章节如下。

**第 1 部分:**为书的第 1 章,主要介绍了嵌入式系统开发的基础知识。内容包括嵌入式系统基本概念、组成结构、硬件组成、操作系统、应用软件开发、开发流程和发展趋势。通过本章的学习,可使读者系统地建立起嵌入式系统开发的整体概念和知识体系。

**第 2 部分:**为书的第 2 章,主要对 ARM 技术进行全面论述。通过本章的学习,可使读者对 ARM 技术有个全面的了解,并建立起以 ARM 技术为基础的嵌入式系统应用和以 ARM 核为基础的嵌入式 SoC 芯片设计的技术框架。在学习本部分时,读者可根据不同情况有所取舍。

**第 3 部分:**为书的第 3、4、5 章。主要介绍了嵌入式系统的应用程序设计。第 3 章主要介绍 ARM 指令集。第 4 章主要介绍 Thumb 指令集。ARM 和 Thumb 两种指令集只是基于 ARM 的嵌入式编程的基础。第 5 章主要讲述如何运用前面学过的汇编指令并结合 C 语言来进行嵌入式程序设计。首先介绍了伪操作、宏指令和伪指令等嵌入式汇编语言程序设计基础知识,然后讲述了 ARM 汇编语言程序设计。本章以实际例程中用到的 C 语言讲述了嵌入式 C 语言程序设计基础,并在此基础上列举了一个嵌入式 C 程序设计实例;对于嵌入式编程技巧和 C 语言与汇编语言混合编程也进行了简述;最后通过一个基于 Embest IDE for ARM 开发环境下的嵌入式软件开发与调试实例讲述了嵌入式软件开发流程和开发工具的使用。在本章讲述中,密切结合嵌入式系统开发的实际例程,通过学习,可使读者掌握嵌入式程序设计的基本知识、基本方法和基本流程。本部分一些程序代码和内容可见《嵌入式系统开发与应用实验教程(第 2 版)》所附光盘。

**第 4 部分:**为书的第 6 章。主要讲述的是基于 S3C44B0X 的嵌入式系统开发。SAM-

SUNG 公司的 S3C44B0X 片上功能很强大,是国内应用广泛的基于 ARM7TDMI 内核的 SoC。本部分以 S3C44B0X 为例,对嵌入式系统开发进行全面介绍,涉及片上基本功能模块及这些模块的应用开发;在此基础上还介绍了基于 S3C44B0X 的 S3CEV40 开发板设计,并对基于 S3CEV40 的启动程序开发进行了讲述。基于 S3C44B0X 的应用功能开发详见《嵌入式系统开发与应用实验教程》。通过这些嵌入式外围主要模块应用功能开发的学习,可使读者对于嵌入式系统开发有一个全面了解。本部分一些程序代码和内容可见《嵌入式系统开发与应用实验教程(第 2 版)》所附光盘。

**第 5 部分:**为书的第 7 章,主要对于嵌入式操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$  和  $\mu\text{CLinux}$  的基本知识进行讲述,在此基础上分别对基于 S3C44B0X 的移植及应用开发进行介绍。

通过本书的学习,可使学生用最短的时间掌握 32 位嵌入式系统应用开发的基础理论知识,培养学生良好的实际操作能力和高端嵌入式产品研发设计能力,进而满足社会对高素质、开拓型嵌入式系统开发人才的需求。本书包含大量软件和硬件设计资源,可作为基于 ARM 核嵌入式系统开发的技术参考手册;也可作为计算机、电类专业本科生和研究生以及相关工程技术人员进行嵌入式系统教学及培训的实验和参考教材。

基于 ARM 的嵌入式系统教学体系建设刚刚开始,而嵌入式应用开发又涉及软、硬件及操作系统等复杂的知识,因此它的教学体系,尤其是面向实际开发应用的教学体系的建立,是一项非常复杂的系统工程。本书力求为该系统工程的建设做一些基础性工作,并真诚地欢迎读者就此提出宝贵的意见和建议。

田 泽

2005 年 1 月

# 目 录

## 第 1 章 嵌入式系统开发基础

<b>1.1 嵌入式系统的基本概念</b> .....	1
1.1.1 嵌入式计算机 .....	1
1.1.2 嵌入式系统的概念 .....	5
1.1.3 嵌入式系统的特点 .....	6
1.1.4 嵌入式系统的分类 .....	9
1.1.5 嵌入式系统的应用范围 .....	9
1.1.6 嵌入式技术是中国 IT 发展的难得机遇 .....	9
<b>1.2 嵌入式系统的组成结构</b> .....	10
1.2.1 嵌入式系统硬件基本结构介绍 .....	11
1.2.2 嵌入式系统软件的层次结构 .....	12
1.2.3 启动程序 BootLoader 介绍 .....	14
<b>1.3 嵌入式系统的硬件组成</b> .....	15
1.3.1 嵌入式处理器 .....	15
1.3.2 典型嵌入式处理器介绍 .....	16
1.3.3 嵌入式 SoC .....	21
1.3.4 可编程片上系统 SOPC .....	22
1.3.5 嵌入式外围接口电路和设备接口 .....	24
<b>1.4 嵌入式操作系统</b> .....	25
1.4.1 嵌入式操作系统介绍 .....	26
1.4.2 嵌入式实时操作系统 .....	26
1.4.3 典型嵌入式操作系统介绍 .....	28
<b>1.5 嵌入式应用软件开发</b> .....	31
1.5.1 嵌入式软件开发的特点和技术挑战 .....	31
1.5.2 嵌入式软件开发环境 .....	32
1.5.3 嵌入式应用软件开发的基本流程 .....	35
1.5.4 嵌入式软件开发的可移植性和可重用性 .....	39
<b>1.6 嵌入式系统的开发流程</b> .....	40
1.6.1 嵌入式系统开发考虑的要害 .....	41
1.6.2 软硬件协同设计 .....	41

1.6.3 嵌入式系统开发的基本流程 .....	42
<b>1.7 嵌入式系统的发展趋势</b> .....	44
1.7.1 即将来临的以 ARM 为核心的 32 位浪潮 .....	44
1.7.2 嵌入式系统与 Internet 的融合 .....	46
1.7.3 嵌入式系统的发展趋势 .....	47
<b>习 题</b> .....	48

## 第 2 章 ARM 技术概述

<b>2.1 ARM 体系结构的发展历史和技术特征</b> .....	50
2.1.1 ARM 技术的发展历程 .....	51
2.1.2 ARM 体系结构的技术特征 .....	53
<b>2.2 ARM 体系结构不同版本的发展概述</b> .....	54
2.2.1 ARM 体系结构的基本版本 .....	54
2.2.2 ARM 体系结构的演变 .....	57
2.2.3 ARM 体系结构的命名规则 .....	59
<b>2.3 Thumb 技术介绍</b> .....	59
2.3.1 Thumb 的技术概述 .....	60
2.3.2 Thumb 的技术特点 .....	60
<b>2.4 ARM 处理器工作状态</b> .....	60
<b>2.5 ARM 处理器工作模式</b> .....	61
<b>2.6 ARM 寄存器组成</b> .....	62
2.6.1 ARM 寄存器组成概述 .....	62
2.6.2 ARM 状态下的寄存器组织 .....	63
2.6.3 Thumb 状态下的寄存器组织 .....	68
<b>2.7 ARM 的异常中断</b> .....	69
2.7.1 ARM 的异常中断响应过程 .....	70
2.7.2 从异常中断处理程序中返回 .....	71
2.7.3 异常中断向量表 .....	73
2.7.4 异常中断的优先级 .....	73
<b>2.8 ARM 典型流水线技术简介</b> .....	74
2.8.1 ARM 的 3 级流水线简介 .....	74
2.8.2 ARM 的 5 级流水线简介 .....	75
<b>2.9 ARM 存储器接口及存储器层次</b> .....	77
2.9.1 ARM 存储数据类型和存储格式 .....	77

2.9.2 ARM 的存储器层次简介 .....	78
<b>2.10 ARM 协处理器 .....</b>	<b>79</b>
<b>2.11 ARM 片上总线 AMBA .....</b>	<b>79</b>
<b>2.12 ARM 的调试结构 .....</b>	<b>80</b>
<b>2.13 ARM 核综述 .....</b>	<b>81</b>
2.13.1 ARM7 系列核 .....	82
2.13.2 ARM9 系列核 .....	87
2.13.3 ARM10 系列核 .....	89
2.13.4 StrongARM 和 XScale 系列核 .....	91
2.13.5 SecurCore 系列核 .....	94
<b>2.14 基于 ARM 核的芯片选择 .....</b>	<b>95</b>
2.14.1 应用角度的 ARM 芯片选择原则 .....	95
2.14.2 多内核 ARM 角度的芯片选择原则 .....	97
<b>习 题 .....</b>	<b>98</b>

### 第 3 章 ARM 指令集

<b>3.1 ARM 指令集概述 .....</b>	<b>99</b>
3.1.1 ARM 指令集编码 .....	99
3.1.2 条件执行 .....	100
3.1.3 指令分类及指令格式 .....	101
<b>3.2 ARM 寻址方式 .....</b>	<b>102</b>
3.2.1 立即寻址 .....	102
3.2.2 寄存器寻址 .....	104
3.2.3 寄存器间接寻址 .....	105
3.2.4 基址加偏址寻址 .....	106
3.2.5 堆栈寻址 .....	108
3.2.6 块拷贝寻址 .....	109
3.2.7 相对寻址 .....	111
<b>3.3 ARM 指令详细介绍 .....</b>	<b>111</b>
3.3.1 数据处理指令 .....	111
3.3.2 Load/Store 指令 .....	119
3.3.3 状态寄存器与通用寄存器之间的传送指令 .....	128
3.3.4 转移指令 .....	131
3.3.5 异常中断产生指令 .....	135

3.3.6 协处理器指令	138
3.3.7 未使用的指令空间	142
习 题	144

## 第 4 章 Thumb 指令集

4.1 Thumb 指令集概述	147
4.1.1 Thumb 指令集编码	148
4.1.2 Thumb 状态切换	148
4.1.3 编程模型	149
4.1.4 Thumb 指令集特点	150
4.2 Thumb 指令详细介绍	151
4.2.1 Thumb 数据处理指令	151
4.2.2 Thumb 转移指令	159
4.2.3 数据存取指令	163
4.2.4 异常中断指令	169
习 题	171

## 第 5 章 基于 ARM 的嵌入式系统应用程序设计

5.1 ARM 汇编语言的伪操作、宏指令与伪指令	173
5.1.1 2 种编译模式的集成开发环境 IDE 介绍	174
5.1.2 ADS 编译环境下的 ARM 伪操作和宏指令	174
5.1.3 GNU 编译环境下的 ARM 伪操作与宏指令	201
5.1.4 ARM 汇编语言的伪指令	211
5.2 ARM 汇编语言程序设计	215
5.2.1 ARM 汇编中的文件格式	215
5.2.2 ARM 汇编语言语句格式	215
5.2.3 ARM 汇编语言编程的重点	225
5.2.4 ARM 汇编程序实例	232
5.3 嵌入式 C 语言程序设计基础	238
5.3.1 C 语言的“预处理伪指令”在嵌入式程序设计中的应用	238
5.3.2 嵌入式程序设计中的函数及函数库	244
5.3.3 嵌入式程序设计中常用的 C 语言语句	247
5.3.4 嵌入式程序设计中 C 语言的变量、数组、结构和联合	252
5.4 嵌入式 C 语言程序设计实例	259



5.4.1	实例实现功能介绍	259
5.4.2	实例实现程序源代码介绍	261
<b>5.5</b>	<b>嵌入式 C 语言程序设计技巧</b>	269
5.5.1	变量定义	269
5.5.2	参数传递	271
5.5.3	循环条件	272
<b>5.6</b>	<b>C 语言与汇编语言混合编程</b>	273
5.6.1	ATPCS 介绍	273
5.6.2	内嵌汇编	277
5.6.3	C 语言和 ARM 汇编语言程序间相互调用	283
<b>5.7</b>	<b>基于 Embest IDE for ARM 环境的软件开发实例</b>	286
	习 题	286
<b>第 6 章</b>	<b>基于 S3C44B0X 的嵌入式系统应用开发实例</b>	
<b>6.1</b>	<b>S3C44B0X 处理器介绍</b>	290
6.1.1	SAMSUNG S3C44B0X 简介	290
6.1.2	SAMSUNG S3C44B0X 特点	290
6.1.3	S3C44B0X 功能结构框图	294
6.1.4	S3C44B0X 引脚信号描述	294
<b>6.2</b>	<b>S3C44B0X 存储控制器功能及应用开发</b>	299
6.2.1	S3C44B0X 存储控制器概述	300
6.2.2	S3C44B0X 存储器空间划分简述	300
6.2.3	S3C44B0X 存储控制器功能描述	301
6.2.4	S3C44B0X 存储控制器的特殊功能寄存器	302
6.2.5	S3C44B0X 存储器应用编程	306
<b>6.3</b>	<b>S3C44B0X I/O 端口功能及应用开发</b>	306
6.3.1	S3C44B0X I/O 功能概述	306
6.3.2	S3C44B0X 端口功能配置	307
6.3.3	S3C44B0X 端口功能控制描述	308
6.3.4	S3C44B0X I/O 端口的特殊功能寄存器	310
6.3.5	S3C44B0X I/O 端口应用编程	315
<b>6.4</b>	<b>S3C44B0X DMA 功能及应用开发</b>	316
6.4.1	S3C44B0X DMA 概述	316
6.4.2	S3C44B0X ZDMA/BDMA 操作	316