



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

嵌入式系统开发与应用系列教程

田 泽 编著

- ◎ 配套教学课件
- ◎ 配套实验教程

# 嵌入式系统 开发与应用教程 (第2版)



北京航空航天大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

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

## (第2版)

田 泽 编著

北京航空航天大学出版社

## 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,从基于 32 位 ARM 处理器的嵌入式软、硬件开发基础知识入手,以基于 ARM7 内核的 S3C44B0X 芯片为硬件核心,以简易电子词典为开发实例,基于  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  和  $\mu\text{Clinux}$  两种嵌入式操作系统,详细介绍嵌入式系统软、硬件开发的全过程。

本书紧密结合嵌入式技术的最新发展,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;结合本系列教程中的实验教程,可使读者快速、全面地掌握嵌入式系统开发与应用的基础知识和开发技能。

本书可作为高等院校计算机、电类专业嵌入式系统课程的教材,也可作为嵌入式系统领域工程技术人员的培训教材或参考资料。

### 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. --2 版

--北京:北京航空航天大学出版社,2010.7

ISBN 978-7-81124-947-7

I. ①嵌… II. ①田… III. ①微型计算机—系统开发—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 031810 号

版权所有,侵权必究。

## 嵌入式系统开发与应用教程(第2版)

田 泽 编 著

责任编辑 崔肖娜 王洪权 冯 佳

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net) 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:27. 字数:762 千字

2010 年 7 月第 2 版 2010 年 7 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81124-947-7

定价:42.00 元

# 序

## 一、嵌入式开发与应用

以计算机为核心的嵌入式技术并不是什么新技术,它伴随着微处理器的诞生而诞生,并伴随着微处理器的发展而发展。随着计算机、微电子、网络和通信技术的高速发展及其向其他行业的高度渗透,嵌入式技术的应用范围急剧扩大,并不断改变着人们的生活、生产方式。嵌入式技术快速发展的同时,也极大地丰富、延伸了嵌入式系统的概念。

芯片技术给电子系统带来了小型化、低功耗、低成本和高度智能化等技术优势,这正是嵌入式技术永恒的追求。芯片技术发展到了 SoC 阶段,使系统在芯片级更进一步地实现了低功耗、低成本、小型化、智能化,加速了嵌入式系统升级换代的速度和小型化的实现程度,决定了嵌入式系统普及应用的深度以及智能化的程度。芯片技术极大地加速了嵌入式计算机的发展和普及。因此,嵌入式技术的发展主要体现在芯片技术的发展,以及在芯片技术限制下的算法改进和软件的进步上。

嵌入式硬件的核心是嵌入式处理器。处理器的嵌入式应用经历了以微处理器为核心的单板嵌入、在单片微控制器 MCU(Micro Control Unit)中嵌入基本资源的单片嵌入,以及基于 SoC/SoPC 的单片应用系统嵌入的发展过程,反映了嵌入式系统一直伴随着计算机、微电子和应用技术的发展,追求更高的性能密度、功能密度和更优的性价比。

目前,高性能嵌入式系统的硬件核心是拥有 32 位 ARM/PowerPC/MIPS 核的 SoC,其硬件平台具有强大的运算能力和丰富的片上资源,可以支持复杂的嵌入式操作系统 EOS(Embedded Operating Systems)的运行,使得 20 世纪 80 年代后期陆续出现的一些嵌入式操作系统真正广泛使用起来。大部分 EOS 价格昂贵,而源代码开放的  $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 、 $\mu\text{CLinux}$ 、Linux 功能相对简易,比较适用于教学,因此,大部分学校选用这些操作系统作为嵌入式软件教学平台。

EOS 的广泛应用改变了传统的基于 8 位处理器的开发模式。在基于 8 位硬件平台的开发中,硬件设计者通常也是软件开发者,其编程绝大多数以汇编语言为主(20 世纪 90 年代中后期陆续开始使用 C 语言),他们会考虑程序如何编写,同时也会考虑软件与硬件的配合。因此,设计开发人员一般都非常了解系统底层的软、硬件细节。当应用系统功能越来越复杂时,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,导致软件维护的工作量巨大。人们也追求在 8 位单片机上运行嵌入式操作系统,但受硬件性能的限制,效果并不理想。没有操作系统已成为其最大缺陷。这些技术人员对通用计算机基于操作系统的软件开发技术和工具的理解与掌握有限,传统意义上称其为硬件开发人员。

基于通用计算机操作系统的软件开发技术人员往往被称为软件程序员,他们深入进行基于 Microsoft Windows、Linux 等操作系统平台上的应用软件开发,感兴趣的是如何使用 C#、C++、Java 之类的高级编程语言实现复杂应用软件开发,而不太关心系统更多的底层硬件细节。因此,基于 8 位嵌入式系统的软件开发,与在通用计算机上基于操作系统的软件开发所采

取的技术思路和方法不同,这两大技术群体各自有着不同的开发应用领域。

引入了 EOS 概念后,嵌入式系统的应用程序开发与通用计算机平台的应用程序开发有了很大的相似之处,这就给传统的软件设计人员提供了新的技术舞台和发展机遇。但嵌入式软件的开发又不完全等同于纯粹的应用软件开发,在开发和调试过程中需要与底层硬件相联系,软件开发人员必须具备相当的硬件知识,对硬件系统工作原理有清楚的了解。因此,嵌入式技术的发展使得嵌入式软件开发人员,既要具备通用计算机平台程序开发的基本技能,又要对底层硬件有一定的了解。

对于传统的 8 位嵌入式开发工程师,其优势是对微处理器的结构和硬件接口有比较深入的了解,也具有一定的底层软件开发技能和经验。这些经验和技能,在 32 位高端嵌入式系统的设计与开发中仍然是必须的。但他们对于嵌入式操作系统及应用软件的开发过程了解得不够深入。

对于基于传统 PC 机上的软件设计人员来说,程序开发是在通用的 Wintel 架构(Microsoft Windows 操作系统与 Intel CPU)计算机技术上发展起来的,可在不用了解硬件操作与操作系统的情况下任意使用各类资源。在一个成熟的平台基础上开发应用程序是相当方便和快速的,软件开发几乎不用关心硬件结构。开发人员一般都具有比较深厚的基于操作系统平台的应用程序开发能力,对软件开发流程、软件质量保证与评测体系等有较深入的掌握,但他们对系统底层硬件结构的认识比较欠缺,甚至完全不了解。

无论对于传统的 8 位嵌入式工程师,还是传统 PC 机上的软件设计人员,在基于 32 位高性能嵌入式系统的开发中,他们都有自身优势。但最为根本的是,两者都需要更新自身的知识结构,积极完成开发方式的转型,在项目中大胆去实践(我认为这才是最为重要的)。

国内开发者一般是采用芯片厂家提供的标准软、硬件开发平台和应用解决方案,并结合具体的应用需求进行软、硬件扩充或剪裁。在这种开发模式下,芯片的功能和性能几乎决定了系统的功能和性能,硬件成本及产品形态也趋于一致,差异在于应用软件的开发。应用软件成为嵌入式开发的主体,这必然会导致嵌入式产品同质化现象严重。缺乏核心“芯片”,又不重视面向系统需求的应用软件开发,长期缺“芯”又少“魂”,这必然会影响中国 IT 产业的发展。

系统芯片化、芯片系统化是将系统的开发延伸到芯片级,将系统的需求延伸到芯片级,在芯片设计级就要充分考虑系统需求的软、硬件实现,在芯片开发过程中参与系统需求的软、硬件实现,使其在 SoC 设计和验证时集中体现。在 SoC 设计和验证过程中实现了系统需求、硬件及软件的价值链,这才能真正体现嵌入式系统的核心竞争力。

## 二、嵌入式人才培养和嵌入式教学体系建设

嵌入式产业要发展,人才是关键。掌握了 32 位嵌入式软、硬件开发的人才,其就业形势一直很好。在我多次参与的招聘中,有嵌入式基本开发经验的工程师仍然很难招聘到。加强嵌入式人才培养刻不容缓。一方面,要实现对现有 IT 从业人员的转型。目前我国已有一大批高素质的 IT 从业人员,他们通过一定的培训、自我学习和项目实践,可以很快成为 32 位高端嵌入式技术开发的主力军。另一方面,要充分利用我国的高等教育资源,在理工科高校的相关专业加强嵌入式教学,加大嵌入式应用人才的培养力度,为我国嵌入式发展提供大量优秀后备人才。

2005 年以前,我国高校嵌入式教学几乎都是 20 世纪 80 年代初发展起来,大多数以 8 位

51 单片机为核心。2005 年以后,随着以 32 位 ARM 为核心的嵌入式技术日益成为高性能嵌入式应用的基础,以 ARM 为核心的嵌入式课程已经逐步进入高校,许多高校开展了以 32 位 ARM 为核心的嵌入式系统教学。

与传统的以 8 位 51 单片机为核心的开发应用相比,基于 ARM 的嵌入式系统软、硬件开发的复杂度和难度急剧加大。近年来,以 32 位 ARM 为核心的嵌入式教学,对于我国嵌入式开发的整体水平有所推动,但并没有获得像单片机那样的人才培养效果,而且给学生留下了嵌入式课程的学习入门起点高、学习过程难度大、上手不容易的印象,教师也普遍反映教学难度大。

目前在嵌入式人才中,精通低端 8 位系统设计开发的应用技术人才和纯粹的软件编程人员仍然相对过剩,而掌握软、硬件技术相结合的高端 32 位开发人才仍然比较少,从业人员呈现两端多、中间少的哑铃结构。

从技术角度讲,嵌入式技术经过近几年的高速发展,已经形成相对完整的知识和技术体系。嵌入式知识体系涉及电子技术、计算机技术、微电子技术和相关专业的应用学科领域知识,是多学科、多技术相结合、相互辅助、相互关联的一门综合学科。嵌入式开发需求的多样性,使得软件、硬件开发往往是基于不同层面以及具体技术相结合的应用开发,从基于现成芯片(4/8/16 位单片机、ARM、SoPC 等)的系统开发,到可能包含部分半定制逻辑设计的 FPGA/CPLD 的应用系统开发,以及考虑全系统应用基于芯片级 SoPC/SoC 的开发,所涵盖的内容包括与微控制器及其外延相关的 ASIC、SoPC/SoC、ARM、DSP、嵌入式实时操作系统,以及与应用对象相关的测控、网络、通信、图形图像等技术,开发手段从底层器件的硬件描述、驱动及应用程序的设计,到操作系统的定制、移植,以及嵌入式软件开发与测试等。嵌入式系统能够具有如此宽泛的知识涵盖,实属罕见。

而嵌入式课程设置大都是 36~54 学时,在如此之少的学时内,对于一个没有任何应用工程经验的初学者,往往面临着诸多知识点需要掌握。但是,对嵌入式相关基础知识没有作为一个完整的教学体系进行安排,因此,学生学习起来感觉非常吃力。同时受传统教学体系的影响,嵌入式教学的内容设置、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。学完这门课程后,学生往往是“一头雾水”。进入技术开发岗位后,一般还要进行相当长一段时间的锻炼,才能掌握基本的开发流程、具备初步的开发能力。

我国相关计算机教学核心课程是以通用 Wintel 架构为基础的,与嵌入式系统还是有较大差别,学生虽然学习了许多计算机课程,但学习嵌入式系统仍然有些吃力。系统地建立嵌入式系统的教学核心课程体系,是嵌入式人才培养的关键,而目前靠一门课程的教学很难实现。

### 三、本系列教程介绍

在过去的近 10 年中,作者编写了一系列基于 ARM 的理论和实验教材,尝试性地将大量的基本嵌入式开发与应用的复杂例程,从教学和实验的角度写入到教材中。其中《嵌入式系统开发与应用教程》和《嵌入式系统开发与应用实验教程》已经被许多所大学使用。更为有幸的是,这两本书都入选为教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。作者近年来一直想依据本人的教学和科研实践经验,并结合不同层次大学的教学情况,对这两本教材进行大幅度修订,并确定了将项目开发技能培养作为修订的出发点,由浅入深、由抽象到具体、由理论知识到技能,为嵌入式开发初学者提供一个软、硬件完全融合的开发方法及流程的参考,使其更贴

近于目前的嵌入式教学实际。

目前出版的理论和实验教材往往与具体公司的实验箱关联度很大,这些实验箱提供了稳定的软、硬件平台和许多实验例程。但这些庞大实验箱的外围接口(包括扩展接口)越来越复杂,兼容处理器也越来越多,软件开发环境越来越好,这势必导致软、硬件平台非常复杂,使得学生感觉很茫然,不利于其快速上手,也不利于其嵌入式硬件能力的提高。

本书没有采用现成的实验箱,而是以一个简易电子辞典的开发为例,从嵌入式软、硬件开发的角度,系统介绍了软、硬件开发的全过程。由于篇幅限制,将硬件开发涉及的基本知识放到实验教材中,结合实验课程进行讲述。从一定意义上讲,实验教材是对理论教材的有机补充,同时也自成体系。

对于不同层次的学校、不同的专业背景及教学学时,对本教材的使用可灵活安排。由于学时限制,对于嵌入式软件编程和基本模块章节,建议可选择部分内容作为教学重点,其余作为学生课外扩展实验内容,以增强学生的自学能力。对于所介绍的两个操作系统,可根据具体情况重点讲述其中之一。对于提高软、硬件综合开发应用能力的三个综合实验,建议可以结合课程或毕业设计来开展。

#### 四、致 谢

在本系列教材的编写过程中,得到了北京航空航天大学出版社的大力支持,在此表示深深感谢!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!

我的硕士研究生王泉、杨峰、黎小玉、王绮卉、刘娟、淮治华、李攀、刘宁宁、余兆安、黄鹏、赵彬、张玢、郭海英、李娜等同学,参与了这套图书的校对工作,在此表示感谢!

感谢我的爱人王永红给予我的理解和支持,正是她在家庭中默默地劳作和操持,才使我可以安心于工作。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,我在生活和学习上给予他的照顾和辅导不够,希望他能够理解!

感谢所有帮助过我的人们,有了他们的理解、帮助和支持,我才能够完成本套图书的写作。

由于时间仓促及众多客观条件的制约,书中难免存在错误和不足之处,敬请读者谅解,并真诚地欢迎读者提出宝贵的意见和建议。也衷心希望教育界、科研界、产业界携手并进,促进我国嵌入式技术快速、稳定、健康的发展。

田 泽  
2009年10月

# 前 言

本书是《嵌入式系统开发与应用系列教程》中的理论教程,是基于 32 位 ARM 处理器的嵌入式系统教学体系建设的重要组成部分。

ARM 处理器经过 20 多年的发展,已成为全球范围内 32 位嵌入式领域中应用最为广泛的微处理器核,到 2007 年底,已经有 100 亿个基于 ARM 核的微处理器在应用。ARM 技术应用的广泛性也加速了 ARM 技术的发展,许多先进的嵌入式技术都与 ARM 技术有很好的融合,因此基于 ARM 进行嵌入式教学无疑是最合适的。

全书共有 6 章,分为 3 大部分。

第 1 部分是本书的第 1 章,主要介绍嵌入式系统的开发基础。本部分从嵌入式系统的概念、硬件组成及开发、软件组成及开发,以及嵌入式技术的发展趋势 4 方面,介绍嵌入式系统开发的基础知识。通过本章的学习,可使学生系统地建立起嵌入式系统及其开发的整体概念。嵌入式系统开发的多样性和复杂性,使得不可能对本章所有内容都详细描述,只能对其主要内容进行讲述。

第 2 部分是本书的第 2、3 章,主要内容是 ARM 技术概述和基于 ARM 的嵌入式软件开发基础。第 2 章对 ARM 核的体系结构及相关技术进行全面论述,通过本章的学习,读者可对 ARM 技术有基本的了解和掌握,建立起以 ARM 核为基础的嵌入式系统应用技术基础。第 3 章密切结合具体开发例程,对基于 ARM 的嵌入式软件开发中所涉及的基础内容进行讲述,使读者能够掌握基于 ARM 嵌入式程序设计的基本知识。

第 3 部分是本书的第 4、5、6 章,以一个基于 S3C44B0X 的简易型电子词典为开发实例,全面介绍嵌入式硬件、软件开发的全过程。Samsung 公司的 S3C44B0X 是基于 ARM7TDMI 内核的 SoC,该芯片功能强大,片上资源丰富,在国内的科研、教学及应用开发方面都具有较大的用量。第 4 章首先对基于 S3C44B0X 的简易电子词典的开发进行讲解,主要介绍系统硬件开发和无操作系统的软件开发。第 5 章对基于  $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$  嵌入式操作系统的电子词典软件开发进行讲述。第 6 章对基于  $\mu\text{CLinux}$  嵌入式操作系统的电子词典软件开发进行讲述。

本书是在《嵌入式系统开发与应用教程》基础上进行大幅度修订而成,与第 1 版相比较,本书主要是加强了嵌入式系统硬件开发的内容,并以一个基于 S3C44B0X 的简易型电子词典为开发实例,全面介绍了嵌入式硬件、软件开发的全过程,目的是加强学生嵌入式综合能力的培养。由于学时限制,建议教师介绍嵌入式软件编程和基本模块章节时,可选择部分内容作为教学重点,其余作为学生课外扩展内容,以增强学生的自学能力。对于本书所介绍的两个操作系统的内容,教师可根据具体情况重点讲述其中之一。

将本书结合《嵌入式系统开发与应用实验教程(第 3 版)》一书共同组织教学,可使读者用最短的时间,在掌握 32 位嵌入式系统应用开发的基础理论知识的同时,从易到难逐步培养高



端嵌入式产品的研发和设计能力,符合社会对开拓型、创新型高素质嵌入式人才的需求。

嵌入式系统应用开发涉及软、硬件及操作系统等复杂的知识。基于 ARM 核的芯片应用越来越多,支持 ARM 开发的工具和评估板越来越多,支持 ARM 的操作系统也越来越多。虽然本书力求全面讲述基于 ARM 的嵌入式系统应用开发技术,但是由于篇幅有限,要彻底将嵌入式系统讲述透彻是很困难的。作者力求在基于 ARM 的嵌入式系统开发与应用体系建设方面做一些基础性工作,书中如有不足之处,真诚地欢迎读者提出宝贵的意见和建议。

本教材配有教学课件。需要用于教学的教师,请与北京航空航天大学出版社联系。北京航空航天大学出版社联系方式如下:

通信地址:北京海淀区学院路 37 号北京航空航天大学出版社市场部

邮 编:100191

电话/传真:010-82317027

E-mail: bhkejian@126.com

田 泽

2009 年 10 月

# 目 录

## 第 1 章 嵌入式系统开发基础

1.1 嵌入式系统的基本概念 .....	1
1.1.1 嵌入式计算机 .....	1
1.1.2 嵌入式系统的定义、特点及应用范围 .....	4
1.1.3 嵌入式系统的组成结构 .....	6
1.1.4 嵌入式系统的基本开发流程 .....	8
1.1.5 嵌入式系统的知识体系 .....	9
1.2 嵌入式系统的硬件组成及开发 .....	12
1.2.1 嵌入式微处理器 .....	12
1.2.2 典型 32 位嵌入式微处理器介绍 .....	13
1.2.3 嵌入式 SoC/SoPC .....	16
1.2.4 嵌入式外围接口电路和设备接口 .....	19
1.2.5 嵌入式系统的硬件开发 .....	23
1.3 嵌入式系统的软件组成及开发 .....	25
1.3.1 嵌入式系统的软件层次结构 .....	25
1.3.2 嵌入式操作系统 .....	26
1.3.3 嵌入式系统的软件开发 .....	32
1.4 嵌入式技术的发展趋势 .....	42
习 题 .....	44

## 第 2 章 ARM 技术概述

2.1 ARM 体系结构及技术特征 .....	46
2.1.1 ARM 的发展历程 .....	46
2.1.2 RISC 体系结构概述 .....	47
2.1.3 ARM 体系结构 .....	49
2.1.4 Thumb 技术介绍 .....	50
2.1.5 Thumb-2 技术介绍 .....	51
2.1.6 ARM 核简述 .....	52
2.1.7 ARM 发展总结 .....	57
2.2 ARM 处理器工作状态及模式 .....	58
2.2.1 ARM 处理器工作状态 .....	58
2.2.2 ARM 处理器工作模式 .....	58
2.3 ARM 寄存器组成 .....	60
2.3.1 ARM 寄存器组成概述 .....	60
2.3.2 ARM 状态下的寄存器组织 .....	60

2.3.3	Thumb 状态下的寄存器组织 .....	64
<b>2.4</b>	<b>ARM 的异常中断 .....</b>	<b>65</b>
2.4.1	ARM 的异常中断响应过程 .....	66
2.4.2	从异常中断处理程序中返回 .....	68
2.4.3	异常中断向量表 .....	69
2.4.4	异常中断的优先级 .....	70
<b>2.5</b>	<b>ARM 存储器接口及协处理器接口 .....</b>	<b>70</b>
2.5.1	ARM 存储数据类型和存储格式 .....	71
2.5.2	ARM 存储器层次简介 .....	71
2.5.3	ARM 存储系统简介 .....	72
2.5.4	ARM 协处理器 .....	74
<b>2.6</b>	<b>ARM 片上总线 AMBA 概述 .....</b>	<b>74</b>
<b>2.7</b>	<b>基于 JTAG 的 ARM 系统调试 .....</b>	<b>75</b>
2.7.1	基于 JTAG 仿真器的调试结构 .....	76
2.7.2	ARM 的嵌入式跟踪 .....	77
<b>2.8</b>	<b>基于 ARM 核的芯片选择简介 .....</b>	<b>79</b>
	习 题 .....	81
<b>第 3 章 基于 ARM 的嵌入式软件开发基础</b>		
<b>3.1</b>	<b>ARM 指令集 .....</b>	<b>83</b>
3.1.1	ARM 指令集概述 .....	83
3.1.2	ARM 寻址方式 .....	85
3.1.3	ARM 指令详细介绍 .....	92
<b>3.2</b>	<b>Thumb 指令集 .....</b>	<b>117</b>
3.2.1	Thumb 指令集概述 .....	117
3.2.2	Thumb 指令详细介绍 .....	120
<b>3.3</b>	<b>基于 ARM 的汇编语言程序设计基础 .....</b>	<b>124</b>
3.3.1	ARM 汇编语言的伪操作、宏指令与伪指令 .....	124
3.3.2	ARM 汇编语言程序设计 .....	147
3.3.3	ARM 汇编语言编程的重点 .....	155
3.3.4	ARM 汇编程序实例 .....	161
<b>3.4</b>	<b>基于 ARM 的嵌入式 C 语言程序设计基础 .....</b>	<b>164</b>
3.4.1	C 语言的预处理伪指令在嵌入式程序设计中的应用 .....	164
3.4.2	嵌入式 C 语言程序设计中的函数及函数库 .....	168
3.4.3	嵌入式程序设计中常用的 C 语言语句 .....	170
3.4.4	嵌入式程序设计中 C 语言的变量、数组、结构、联合 .....	172
<b>3.5</b>	<b>基于 ARM 的嵌入式 C 语言程序设计技巧 .....</b>	<b>177</b>
3.5.1	变量定义 .....	177
3.5.2	参数传递 .....	179
3.5.3	循环条件 .....	179

3.6 C语言与汇编语言混合编程 .....	180
3.6.1 APCS介绍 .....	180
3.6.2 内嵌汇编 .....	183
3.6.3 C语言和ARM汇编语言程序间相互调用 .....	188
习 题 .....	190
<b>第4章 基于S3C44B0X嵌入式系统应用开发实例</b>	
4.1 S3C44B0X处理器介绍 .....	192
4.1.1 S3C44B0X简介 .....	192
4.1.2 S3C44B0X特点 .....	193
4.1.3 S3C44B0X功能结构框图 .....	195
4.1.4 S3C44B0X引脚信号描述 .....	196
4.2 基于S3C44B0X电子词典开发概述 .....	199
4.2.1 电子词典系统定义与需求分析 .....	199
4.2.2 电子词典方案设计 .....	200
4.3 基于S3C44B0X电子词典的硬件开发 .....	201
4.3.1 基于S3C44B0X的最小系统设计 .....	201
4.3.2 显示模块 .....	203
4.3.3 触摸屏及键盘模块 .....	206
4.3.4 I/O端口设计 .....	215
4.3.5 硬件资源分配 .....	216
4.4 基于S3C44B0X电子词典软件开发环境的建立 .....	217
4.5 基于S3C44B0X电子词典功能模块及应用开发介绍 .....	218
4.5.1 S3C44B0X时钟电源管理器的功能及应用开发 .....	218
4.5.2 S3C44B0X存储控制器的功能及应用开发 .....	227
4.5.3 S3C44B0X I/O端口的功能及应用开发 .....	236
4.5.4 S3C44B0X中断控制器的功能及应用开发 .....	246
4.5.5 S3C44B0X UART接口的功能及应用开发 .....	261
4.5.6 S3C44B0X I <sup>2</sup> C总线接口的功能及应用开发 .....	276
4.5.7 S3C44B0X A/D转换器的功能及应用开发 .....	287
4.5.8 S3C44B0X LCD控制器的功能及应用开发 .....	293
4.5.9 S3C44B0X看门狗定时器的功能及应用开发 .....	314
4.6 基于S3C44B0X电子词典的软件开发 .....	319
4.6.1 电子词典硬件测试软件开发 .....	320
4.6.2 电子词典应用软件开发 .....	323
习 题 .....	331
<b>第5章 基于<math>\mu</math>C/OS-II的嵌入式开发</b>	
5.1 $\mu$ C/OS-II简介 .....	333
5.1.1 $\mu$ C/OS-II的基本特点 .....	334
5.1.2 $\mu$ C/OS-II的基本结构 .....	334

5.2	基于 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 的软件开发基础 .....	337
5.2.1	$\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 开发基础概念 .....	337
5.2.2	基于 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 嵌入式系统应用的基本结构 .....	344
5.2.3	基于 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 嵌入式系统的软件开发过程 .....	345
5.3	基于 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 的电子词典设计与实现 .....	346
5.3.1	电子词典系统设计 .....	346
5.3.2	开发环境的建立 .....	348
5.3.3	驱动程序的设计与调试 .....	359
5.3.4	用户任务设计 .....	363
5.4	基于 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 的电子词典代码构成 .....	367
	习 题 .....	369
<b>第 6 章 基于 <math>\mu\text{C}/\text{Linux}</math> 的嵌入式开发</b>		
6.1	$\mu\text{C}/\text{Linux}$ 操作系统 .....	370
6.1.1	$\mu\text{C}/\text{Linux}$ 操作系统简介 .....	370
6.1.2	$\mu\text{C}/\text{Linux}$ 的基本结构 .....	370
6.2	基于 $\mu\text{C}/\text{Linux}$ 的嵌入式系统开发流程 .....	374
6.3	基于 $\mu\text{C}/\text{Linux}$ 的电子词典开发 .....	375
6.3.1	开发环境 .....	376
6.3.2	内核移植和启动 .....	381
6.3.3	设备驱动 .....	394
6.3.4	应用程序 .....	410
6.3.5	调 试 .....	414
	习 题 .....	417
	参考文献 .....	418

# 第 1 章 嵌入式系统开发基础

本章从嵌入式系统的基本概念、嵌入式系统的硬件组成及开发、嵌入式系统的软件组成及开发、嵌入式技术的发展趋势 4 方面,介绍了嵌入式系统开发的基础知识。通过本章学习,读者可系统地建立起嵌入式系统及其开发的整体概念。

本章主要包括:

- ▶ 嵌入式系统的基本概念
- ▶ 嵌入式系统的硬件组成及开发
- ▶ 嵌入式系统的软件组成及开发
- ▶ 嵌入式技术的发展趋势

## 1.1 嵌入式系统的基本概念

以嵌入式计算机为核心的嵌入式技术并不是新技术,它随着微处理器的诞生而诞生,并随着微处理器的发展而发展。但随着计算机技术、微电子技术、网络技术和通信技术的高速发展及相互高度渗透,嵌入式技术的应用范围急剧扩大,并不断改变着人们的生活、生产方式。嵌入式技术快速发展的同时,也极大地丰富、延伸了嵌入式系统的概念。

本节从嵌入式系统的核心——嵌入式计算机的形成和发展出发,对嵌入式系统的基本概念、组成结构以及基本开发流程进行了介绍;对嵌入式系统学习中涉及的知识体系,从初学者的角度进行了讲述。

### 1.1.1 嵌入式计算机

#### 1. 嵌入式计算机的发展历史

首先回顾一下计算机的发展历史。电子计算机诞生于 20 世纪 40 年代,在此之前,人类已经历了机械(Mechanical)和机电(Electromechanical)时代。最早的机械计算机(约公元前 500 年)可能是我国的算盘,它早于法国 Pascal 为他从事税收工作的父亲设计的机械式加法器(公元 1642 年)。此后在 1822 年,现代计算机鼻祖——英国数学家 Charles Babbage(1791—1871 年)设计了一台可以执行算术运算差分机的模型,具有 6 位数的计算能力,更重要的是,它能够计算到二次方的任何函数。后来,George Boole(1815—1864 年)提出了布尔代数的革命性概念,就是今天的二进制。进入 20 世纪后,Claude Shannon 提出的信息论和开关理论,分别为今天的通信理论以及从布尔代数到电子计算机的实现提供了理论依据。另一个大名鼎鼎的人物 Alan Mathison Turing(1912—1954 年)则把算法的概念应用到了计算机,此外,他在机器与自然方面的研究发展到今天就是“人工智能(Artificial Intelligence)”。到了 20 世纪 30 年代,Bell 实验室的 Geoge Stibitz 使用继电器制作了加法器,并用灯泡作为输出指示器实现了他的设想。这在通用计算机的研究和制造方面迈出了重要的一步。1944 年,哈佛大学的 Howard Aiken 发明了 Harvard Mark 系列计算机,并且在其中采用了分开的指令存储器和数据存储器,这就是后来著名的“哈佛结构”。

很多人认为 ENIAC 的诞生标志着电子计算机时代的开始。电子计算机的发展经历了第一代的电子管计算机(1946—1956 年)、第二代分立晶体管计算机(1959—1964 年)、第三代小/中规

模集成电路计算机(1964—1975年)、第四代大规模/超大规模集成电路计算机(1975—1990年)、第五代甚大规模集成电路计算机,以及第六代极大规模集成电路计算机。按照摩尔定律,每过18个月,硅片上晶体管的数量就会增加一倍。随着大规模集成电路工艺的发展,芯片的集成度越来越高,也越来越接近工艺甚至物理的上限,最终,晶体管会变得只有几个分子那样小。这样今后集成更多晶体管数目的集成电路又该怎么称呼呢?

20世纪70年代,集成电路工业发展到大规模集成电路LSI阶段,可以在单片晶圆上集成1000个以上的门电路,这是微处理器(Microprocessor)电路实现的物理基础。

大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)的发展,使得把计算机的主体——中央处理单元(CPU)集成在一个芯片上成为可能。由一片或几片LSI组成的CPU称为微处理器,微处理器使计算机进入微型计算机时代。Intel公司于1971年推出了第一个可编程的4位微处理器芯片4004,这项突破性的发明被用于当时袖珍型可编程的Busicom计算器中。这一应用被认为是开创了人类将智能芯片内嵌于电脑和无“生命”设备中的历程,使设备运行可控化、智能化。Rockwell公司也闻风而动,在1972年推出PPS-4四位微处理器。

Intel公司意识到微处理器是个可盈利的产品,在认识到4位微处理器字长不能满足实际复杂应用的需求后,于1972年4月推出了第一个4位PMOS微处理器8008芯片,它的性能是4004的2倍,因此命名为“8008”。1973年,National Semiconductor公司和Fairchild公司分别推出SC/MP和F8八位微处理器。当时,“电脑”这个术语尚未使用,8008用在被称为“打字机”的设备中。第一台用做电脑“大脑”的微处理器诞生于1974年,这就是Intel公司的新一代处理器8080。8080是第一个NMOS微处理器,它扩充了8008的指令。1974年也是其他微处理器迅速发展的一年,具有代表性的8位微处理器还有6800和1802等,Motorola公司的6800是第一个单一电源(+5V)的微处理器,而8080需要3种电源(+12V、+5V和-5V)。RCA公司的1802微处理器第一次采用CMOS工艺,这是继第一代PMOS和第二代NMOS之后更为先进的半导体工艺,它可以提供更高的集成度、更快的速度和更低的功耗。

1974年也出现了早期的16位微处理器,如National PACE、Texas Instruments TMS-9900和General Instrument CP-1600等。到1974年7月,已有19种微处理器问世,各种微处理器满足了不同市场的需求,应用范围也在不断扩大。到1975年,微处理器品种已增加到40种。

世界上第一台采用8080的微型计算机称为Altair,据说这一名称取自电视节目StarTrek中星际飞船Enterprise的目的地。仅仅几个月之内,其销量就达到数万台。它由MIT(麻省理工学院)1975年推出,标志着家用计算机的诞生。Apple公司于1977年推出的基于Rockwell6502八位微处理器的家用计算机Apple-II,成为个人计算机(PC)的雏形。

与此同时,微处理器表现出的智能化水平引起了设备制造、机电控制等专业人士的兴趣,他们要求将微型机嵌入到一个控制对象的体系中,实现对象体系的智能化控制。微处理器的问世极大地促进了控制领域的发展,复杂的控制系统最初只是由简单的设备组成,以微处理器这样的部件作为主要的运算、控制和反馈器件,极大地提高了系统的可控性和智能化。例如,汽车排放物在过去的20年间减少了90%,这主要归功于在发动机管理系统中成功地应用了微处理器。目前,微处理器在汽车和飞机上已经得到广泛使用,一辆轿车可能装配了数十个以上的微处理器,它们控制着从发动机火花塞、传动轴一直到避免由于关门时产生的压力而使司机耳朵胀痛的控制系统等众多部件。由此可见,在应用于控制等领域时,计算机嵌入到设备中便失去了微型计算机原来的形态。

因此,微处理器在控制领域的应用,不仅引起了控制领域的一场革命,而且引起了微处理器功能和存在形态的显著变化。

超大规模集成电路的发展,使得把CPU、存储器以及各种外部设备的接口做在一块集成电

路芯片上成为可能。为了满足控制领域对微处理器的需求,在1976年初便出现了与微处理器类似的产品,即微控制器(Microcontroller),或称为微计算机,也就是国内俗称的“单片机”。它将CPU、ROM、RAM以及I/O接口等集成一体,具有一般计算机数字处理等基本功能,并根据实际应用配以外围电路和应用软件,可广泛嵌入到仪器、仪表、工程控制设备、智能家电和各种智能设备与应用系统中。因此,微控制器的应用被称为“嵌入式应用”。

当时有代表性的型号为8位的Intel 8048和Motorola 6802,4位的Rockwell PPS-4和Texas TMS-1000等。

1976年,在8位微处理器的市场上出现了具有影响的Intel 8085和Zilog Z80。为了突破8位机对存储量、速度和处理数据长度的限制,1978年出现了一批高性能、实用的16位微处理器,具有代表性的为Intel 8086、Motorola 68000和Zilog Z8000,它们都采用NMOS工艺。

Intel 8086是在8080和8085的基础上发展起来的,是Intel公司最早投入市场的微处理器。8086具有8/16位处理能力,指令系统包含8080/8085指令,增加了16位数据处理指令,基本指令为92条。1979年,Intel公司又推出了8088,内部结构同8086几乎相同,但它是内部总线为16位而外部总线为8位的准16位微处理器。8086/8088扩充了乘法和除法指令,且最先采用了指令Cache的设计思想。

Motorola 68000的设计目标是32位,由于受芯片封装的限制,它最终以16位微处理器的形式推出。Z8000继承了Z80的设计原则,支持复杂指令集系统。

20世纪70年代后期是微处理器发展的一个重要分水岭。1978年,IBM公司推出了一举成名的新产品——IBM个人计算机(PC)。该产品采用了Intel 8088微处理器作为“大脑”,这标志着PC机时代从此诞生。8088的成功使Intel公司进入了世界财富500强之列,《财富》杂志将Intel公司誉为“20世纪70年代最出色的企业”之一,从此确立了Intel公司的地位,Intel公司继而成为万众瞩目的焦点。这时,互联网也悄无声息地萌发了,但开始仅有斯坦福大学和麻省理工学院寥寥无几的专家对其感兴趣。谁也未能料到,这个叫做Internet的东西后来会成为席卷全球的一项技术,会渗透到我们生活的每个角落,成为信息社会的基础。

在电子计算机发展的初期,计算机一直是“供养”在特殊机房中的大型、昂贵的专用设备,主要是实现一些特殊的数值计算。直到20世纪70年代微处理器的出现,计算机应用才出现历史性的变化。这也使计算机褪去了神圣的光环,步入平民化的时代。自从Intel公司推出4004四位微处理器以来,随着微处理器技术的发展,其组成结构和含义都产生了巨大的变化,而且成本越来越低。早期的微处理器仅包含ALU、寄存器、时钟和简单的逻辑控制;而现代微处理器中,组成CPU的各功能模块的结构和性能已同早期的大不一样。如现代微处理器的ALU包含了整数、浮点、转移和装入/存储部件,而不是早期简单的算术、逻辑运算部件;寄存器已不是早期的几个,已变成含有数十个寄存器的寄存器组;控制部件除完成指令转移外,还要完成多种中断管理、片内调试、总线控制和管理及协处理器接口;外围存储器系统包含复杂的指令和数据Cache。

到20世纪80年代初,微处理器及微控制器各自已发展成为一个庞大的家族,以Intel公司x86为主流的应用于PC机的微处理器格局已形成。为了区别于原有的PC通用计算机,把嵌入到对象体系中、实现对象体系智能化控制的计算机,称为“嵌入式计算机”。

因此,嵌入式计算机诞生于微处理器发展时代。早期的嵌入式计算机是将计算机嵌入到一个具体应用的控制对象的体系中,这是嵌入式系统发展的起点,同时标志着计算机进入了通用计算机与嵌入式计算机两大分支并行发展的时代,从而导致20世纪末计算机应用的高速发展,并由此引发了计算机分类方式的变化。

处理器芯片是计算机发展的转折点,处理器芯片的体系结构在一定程度上起着定义、规范计算机产品的作用。从此计算机按照处理器芯片体系结构的发展而演变。



## 2. 嵌入式计算机

传统的计算机分类是按照计算机的处理字长、体系结构、运算速度、结构规模、适用领域进行的,如通常所说的大型计算机、中型计算机、小型计算机和微型计算机,并以此标准来组织学科和产业分工,这种分类方法沿袭了多年。

随着近30年来微电子技术、计算机技术、移动通信技术的高速发展,以及网络技术的广泛应用,实际情况已经发生了根本性的变化。例如,由20世纪70年代末定义的微型计算机演变而来的PC机,其处理速度目前已远远超过了当年定义的大、中、小型计算机。

随着计算机技术对其他行业的广泛渗透,以及与其他行业具体应用技术的相互结合,以应用为中心的分类方法变得更加切合实际发展,即按计算机的嵌入式应用和非嵌入式应用将其分为通用计算机和嵌入式计算机。

通用计算机具有一般计算机的基本标准形态,通过装配不同的应用软件,以基本雷同的面目应用在社会各个领域,其典型产品为PC机;而嵌入式计算机,则是非通用计算机形态的计算机应用,它以嵌入式系统核心部件的形式隐藏在各种装置、设备、产品和系统中。因此,嵌入式计算机是一种计算机的存在形式,是从计算机技术的发展中分离出来的。

嵌入式计算机应用属于“专用计算机”应用。嵌入式计算机与实际应用的广泛结合,是在一切可能的设备中都使用计算机,将这些设备变得更智能化、可计算化。嵌入式计算机是构成未来数字化世界的基本细胞、元素。

从计算机的发展历史可以看出,嵌入式计算机并非现在才有,它用于控制设备或嵌入到系统的历史几乎同计算机自身的历史一样长。例如,在20世纪60年代晚期的通信领域,计算机被用于电子电话交换机,称为“存储程序控制”系统。存储程序指内存装有程序和例程信息。存储控制逻辑,而不是将其固化在硬件中,这在当时确实是有突破性的。许多嵌入式计算机就是从早期台式PC机应用中淘汰下来后,应用在智能产品的开发中,变成了嵌入式应用。早期PC机,诸如TRS-80、Apple-II及其所用的Z80和6502处理器,至今仍然在许多领域中应用,因此旧的微处理器并没有灭绝,而是变成了嵌入式的应用。

嵌入式计算机在应用数量上已远远超过各种通用计算机,一台通用计算机的外设中就包含多个嵌入式微处理器,键盘、鼠标、软驱、硬盘、显卡、显示器、Modem、网卡、声卡、打印机、扫描仪、数码相机、USB集线器等,都是由嵌入式微处理器控制的。在制造工业、过程控制、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,均是嵌入式计算机广泛应用的领域。

### 1.1.2 嵌入式系统的定义、特点及应用范围

#### 1. 嵌入式系统的定义

嵌入式系统是嵌入到对象体中以嵌入式计算机为核心的专用计算机系统。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,又一个新的技术发展方向。

IEEE(国际电气和电子工程师协会)对嵌入式系统的定义为:嵌入式系统是“用于控制、监视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)”。这主要是从应用对象上加以定义,涵盖了软、硬件及辅助机械设备。

国内普遍认同的嵌入式系统的定义为:以应用为中心,以计算机技术为基础,软、硬件可裁剪,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。相比较而言,国内的定义更全面一些,体现了嵌入式系统的“嵌入”、“专用性”、“计算机”的基本要素和特征。