

高等院校计算机实验与实践系列示范教材

嵌入式系统(基于ARM) 实验与实践教程

汤书森 张北斗 李柏年 马义德 编著

清华大学出版社



高等院校计算机实验与实践系列示范教材

嵌入式系统(基于ARM) 实验与实践教程

汤书森 张北斗 李柏年 马义德 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是“嵌入式系统原理与应用”课程的配套实验教材。本书基于北京达盛科技的 ARM7(EL-ARM-820 型,ARM7TDMI)和北京奥尔斯公司的 ARM9(OURS-2410RP,基于 Linux)微处理器的实验平台。

本书第 1 部分简要介绍嵌入式系统的特点、原理和组成;第 2 部分涉及一些必要的实验准备工作;第 3 部分介绍一些基本的实验操作,在后面部分重点介绍了基于 Linux 的嵌入式系统的开发优点及其开发的一般过程和方法。最后,在熟悉了必要的理论和实践的知识之后,适当安排了一些创新的实验供读者学习。教材结构安排由浅入深,在潜移默化的过程中提高读者理论知识和实践能力。

本书可作为电子学信息技术专业、通信专业及计算机技术相关专业本科三、四年级学生的实验教材,也可以作为职业技术专业的学习参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统(基于 ARM)实验与实践教程/汤书森等编著. —北京:清华大学出版社,2009.4
(高等院校计算机实验与实践系列示范教材)

ISBN 978-7-302-19572-6

I. 嵌… II. 汤… 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(2009)第 020106 号

责任编辑:郑寅堃 赵晓宁

责任校对:白 蕾

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:11.5 字 数:262 千字

版 次:2009 年 4 月第 1 版 印 次:2009 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:19.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:031705-01

出版说明

当前,重视实验与实践教育是各国高等教育界的发展潮流,我国与国外教学工作的差距也主要表现在实践教学环节上。面对新的形式和新的挑战,完善实验与实践教育体系成为一种必然。为了培养具有高质量、高素质、高实践能力和高创新能力的人才,全国很多高等院校在实验与实践教学方面进行了大力改革,在实验与实践教学内容、教学方法、教学体系、实验室建设等方面积累了大量的宝贵经验,起到了教学示范作用。

实验与实践性教学与理论教学是相辅相成的,具有同等重要的地位。它是在开放教育的基础上,为配合理论教学、培养学生分析问题和解决问题的能力以及加强训练学生专业实践能力而设置的教学环节;对于完成教学计划、落实教学大纲,确保教学质量,培养学生分析问题、解决问题的能力 and 实际操作技能更具有特别重要的意义。同时,实践教学也是培养应用型人才的重要途径,实践教学质量的好坏,实际上也决定了应用人才培养质量的高低。因此,加强实践教学环节,提高实践教学质量,对培养高质量的应用型人才至关重要。

近年来,教育部把实验与实践教学作为对高等院校教学工作评估的关键性指标。2005年1月,在教育部下发的《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》中明确指出:“高等学校要强化实践育人的意识,区别不同学科对实践教学的要求,合理制定实践教学方案,完善实践教学体系。要切实加强实验、实习、社会实践、毕业设计(论文)等实践教学环节,保障各环节的时间和效果,不得降低要求。”“要不断改革实践教学内容,改进实践教学方法,通过政策引导,吸引高水平教师从事实践环节教学工作。要加强产学研合作教育,充分利用国内外资源,不断拓展校际之间、校企之间、高校与科研院所之间的合作,加强各种形式的实践教学基地和实验室建设。”

为了配合开展实践教学及适应教学改革的需要,我们在全国各高等院校精心挖掘和遴选了一批在计算机实验与实践教学方面具有潜心研究并取得了富有特色、值得推广的教学成果的作者,把他们多年积累的教学经验编写成教材,为开展实践教学的学校起一个抛砖引玉的示范作用。

为了保证出版质量,本套教材中的每本书都经过编委会委员的精心筛选和

严格评审,坚持宁缺毋滥的原则,力争把每本书都做成精品。同时,为了能够让更多、更好的实践教学成果应用于社会和各高等院校,我们热切期望在这方面有经验和成果的教师能够加入到本套丛书的编写队伍中,为实践教学的发展和取得成效做出贡献;也衷心地期望广大读者对本套教材提出宝贵意见,以便我们更好地为读者服务。

清华大学出版社

联系人:索梅 suom@tup.tsinghua.edu.cn

近年来,以手机、数码相机、机顶盒(STB)、MOBTV、PDA、MP4 和 IPTV 等为代表的嵌入式系统新产品不断问世,国内外各大 IT 公司纷纷投入巨资加紧研发,嵌入式技术人才需求猛增。后 PC 时代的来临,促进了科技进步和经济发展。与此同时,随着通信网络、计算机技术和微电子技术的高速发展,嵌入式系统已成为了 IT 业的一个焦点。在数字信息技术和网络技术高速发展的后 PC 时代,嵌入式系统因其体积小、可靠性高、功能强、灵活方便等许多优点,已渗透到工业、军事、医疗以及日常生活等各个领域,对各行各业的技术改造、产品更新换代、加速自动化进程和提高生产率等方面起到了极其重要的推动作用。实际上,嵌入式系统无处不在,无所不在。

ARM 微处理器因其卓越的低功耗、高性能的特点,在 32 位嵌入式应用中已位居世界第一,是高性能、低功耗嵌入式处理器的代名词。为了顺应当今世界技术革新的潮流,学习和掌握嵌入式技术,就必然要学习和掌握以 ARM 微处理器为核心的嵌入式开发环境和开发平台,这对于研究和开发高性能微处理器、DSP 以及开发基于微处理器的 SoC 芯片设计及应用系统开发是非常必要的。

当前,嵌入式系统还是处在发展中的年轻的技术课程,课程涉及计算机软件、电子学及自动化。不同的专业、不同层次要求具有不同的特点。同时,嵌入式系统课程又是一门多学科交叉的课程,涉及微机原理与接口、计算机组成原理、操作系统、编译技术、网络通信、人机交互、软件测试、软硬件协同设计等诸多知识点。如何在有限的时间内通过理论学习、实验及实践练习,快速了解嵌入式系统的结构特点和开发环境搭建的方法、工程文件的生成、项目文件的添加、文件的编译和源程序的调试以及工程的开发方法等,是我们应该关注的问题。

在嵌入式系统应用中,对于复杂的系统,为使其具有资源管理、系统管理和中断处理等能力,提供多任务处理,更好地分配系统资源的功能,很有必要针对特定的硬件平台和实际应用移植操作系统。嵌入式操作系统在嵌入式系统的开发中具有一定的核心作用,因此很有必要结合操作系统更深入地学习嵌入式系统。

嵌入式系统本质上就是计算机——一种特殊的专用计算机。我们应该结合所学过的,如单片机、微型计算机原理与接口技术等课程,进而深入地学习嵌入式系统这门课程。

理论教学与实验教学是现代高等教育的两个重要组成部分,实验课是整个教学过程中的重要环节。在IT技术飞速发展的当今,面对激烈的国内外市场和技术的竞争,要求我们培养的学生应是基础扎实、知识面宽、富有创新精神和竞争意识的人才。这对我们的教学从理论到实践都提出了较高的要求,而实践教学对于学生,特别是对工科大学生实际工作能力的培养起着至关重要的作用。实验教学改革是一个系统工程。要在实验教学中突破传统的实验模式、发挥学生的主观能动性,加强对学生创新能力的培养是实验教学改革的一个难点。这涉及教学管理体制、实验教学内容、实验教学方法、实验教师队伍建设等诸多方面。要通过改革来提高实验教师的专业素质及改进教学内容,使实验教学能激发学生的主动竞争意识和创新思维,从而有利于学生创新能力的培养。也就是说,教学实践也是一个使学生从最初的模仿到自主设计、到创新的过程。如何在有限的教学时间里合理安排一些实验,从而使学生尽快从入门到提高,又较全面地打好理论基础、实验方法以及开发过程,是迫在眉睫的事情,也是我们教学人员应该认真思考的问题,这也是我们组织编写好一本好的实验教材的初衷。

教师不仅是知识的创造者,更应是知识的传播者,应能引领学生尽好、尽快地了解新知识和具备创新技能。

本书基于北京达盛科技的ARM7(EL-ARM-820型,ARM7TDMI),采用三星S3C44B0X(ARM7TDMI+Cache)处理器和北京奥尔斯公司的ARM9(OURS-2410RP,基于Linux)实验平台。因为ARM7最具ARM系列的代表性,代表了目前较低端且无MMU的ARM7TDMI核心处理器,应用广泛;而ARM9兼具较高性能,采用哈佛结构,而且应用广泛,更容易把握嵌入式系统的原理。从这两方面入手,能够达到触类旁通,窥一斑而知全貌的目的。本书知识结构较为全面,涉及教学中常用的几种操作系统如 μ CLinux、 μ cos及Linux等。而基于ARM & Linux的嵌入式系统开发,是当前嵌入式系统开发的焦点问题,目前ARM和Linux也是嵌入式系统发展中的重点方向。

本书在结构安排上,第1部分简要介绍嵌入式系统的特点、原理和组成结构,使读者具备必要的理论知识;第2部分做一些必要的实验准备工作;第3部分为一些基本的实验操作,从而巩固基本理论,掌握开发嵌入式系统的一般过程和基本方法,同时掌握嵌入式系统开发所涉及的软硬件知识。由于当前基于Linux的嵌入式系统的开发是嵌入式系统开发的热点,因此,在最后部分重点介绍了基于Linux的嵌入式系统的开发优点及其开发的一般过程和方法,这里仅仅起抛砖引玉作用,希望读者多学习与此部分相关的软硬件知识,以提高自己的能力。另外,在熟悉了必要的理论和实践的知识之后,适当安排了一些创新的实验供读者学习。教材结构安排由浅入深,在潜移默化的过程中提高读者理论知识和实践能力。

本书是在马义德教授的《嵌入式系统课程群建设与创新人才培养》(2008年获甘肃省教学成果一等奖)指导下,结合近几年的教学实践经验,针对学生面临的实际问题组织编写完成的。

在有实验箱的条件下,结合本书实验能够达到最佳效果。不具备实验条件的,也可以通过软件调试(ARMulate)来学习调试和运行过程,效果也不错。

本书部分内容是对上研究生过程的大部分文献资料整理的结果,吸纳并借鉴了达盛科技和奥尔斯公司的工程师的经验和资料。教材的整个架构设计、内容的撰写和整理主要由汤书森完成。由马义德教授和李柏年高级工程师主持编写第1~第3部分;由张北斗老师

编写第 4 部分并统稿。对源代码的分析和理解得到几位研究生的帮助,在此一并感谢!

本教材适合作为电子学信息技术专业、通信专业及计算机技术相关专业本科三、四年级学生的实验教材,以及职业技术专业的学习参考书。

由于作者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有错误之处,还望读者不吝赐教。只要读者能从中获取一点帮助,都会令作者感到欣慰的。

编 者

2009 年 2 月

第 1 部分 基本理论

第 1 章 嵌入式系统的概述	3
1.1 嵌入式系统	3
1.2 基本概念	4
1.3 嵌入式系统的应用范围	4
第 2 章 嵌入式系统特点	6
2.1 嵌入式系统的特点综述	6
2.2 交叉编译	7
2.3 建立宿主 PC 端的开发环境	8
2.4 BootLoader	8
第 3 章 嵌入式系统的组成及开发	9
3.1 嵌入式系统的组成	9
3.2 嵌入式系统的层次结构	10
3.2.1 嵌入式系统的硬件	11
3.2.2 嵌入式处理器的分类	11
3.2.3 ARM 处理器特点	11
3.2.4 嵌入式系统的软件	12
3.3 嵌入式系统开发的基本流程	12
3.4 基于 Linux 的嵌入式系统开发流程	13
3.5 嵌入式系统的调试	13
3.6 嵌入式软件开发的特点和面临的技术挑战	13
第 4 章 嵌入式系统的发展机遇与趋势	15
4.1 嵌入式技术是中国 IT 发展的难得机遇	15
4.2 嵌入式系统的发展趋势	15

第 5 章 实验预备	17
5.1 ARM7 和 ARM9 的比较	17
5.2 哈佛结构与冯·诺依曼结构比较	20
5.3 ADS 实验环境的搭建、配置与实例分析	21
实验 1 基于 ADS 的实验环境的搭建与配置	21
实验 2 基于 ADS 的环境的实例分析	31

第 2 部分 基础实验

第 6 章 基于 ARM7 的实验	49
6.1 与硬件资源相关的接口实验	49
6.2 交叉开发环境	49
6.3 系统结构简介	50
实验 3 基于 ARM 的硬件 BOOT 的基本设计	51
实验 4 ARM 的 I/O 接口	53
实验 5 ARM 的中断过程	56
实验 6 基于 ARM 的 DMA 实验	58
实验 7 ARM 的 UART 通信实验	60
实验 8 ARM 的 A/D 接口实验	63
第 7 章 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的 ARM 系统的实验	65
7.1 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 简介	65
7.2 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的特点	65
7.3 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的文件结构	66
7.4 任务的状态与转换图	67
7.5 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的启动流程	67
7.6 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的任务管理	67
7.7 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的系统调用	68
实验 9 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的内核在 ARM 处理器上的移植	69
实验 10 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的串口驱动的应用	73
实验 11 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的 LCD 驱动的应用	75
实验 12 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的键盘驱动编写	78
实验 13 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的小型应用程序编写	80
第 8 章 基于 μCLinux ARM 系统的实验	83
8.1 Linux	83
8.2 Linux 的特点	83
8.3 Linux 作为嵌入式操作系统的优点	84

8.4	μ CLinux 简介	85
实验 14	实验环境的搭建与配置	86
实验 15	BootLoader 引导程序	92
实验 16	μ CLinux 的移植、内核文件的生成与刻录	97
实验 17	关于 μ CLinux 驱动程序的编写	101
实验 18	μ CLinux 应用程序的编写	103
第 9 章	基于 ARM9 与硬件资源相关的实验	105
9.1	ARM9 及其特点	105
9.2	平台简介	105
9.3	性能指标	106
9.4	实验说明	107
实验 19	GPIO 接口与端口控制	109
实验 20	实时时钟实验	114
实验 21	基于 I ² C 的 EEPROM 实验	118
实验 22	基于 I ² C 的数码管扫描电路实验	121
实验 23	WATCHDOG	123
实验 24	触摸屏控制实验	124
实验 25	发光二极管点阵(8×8)	129
第 3 部分 基于 ARM & Linux 嵌入式系统的开发实验		
第 10 章	基于 ARM & Linux 嵌入式系统的基本实验	133
10.1	Linux 作为嵌入式操作系统的优点	133
10.2	实验设备	133
10.3	预备知识	133
10.4	Linux 驱动程序的介绍	133
10.5	Linux 驱动程序原理	134
10.6	Linux 系统下的设备驱动程序简述	135
10.7	Linux 系统下的具体实现	136
实验 26	基于 ARM9+Linux 的嵌入式开发的实验准备	137
实验 27	简单的驱动程序示例	155
实验 28	LCD 控制实验	156
实验 29	CAN 总线通信	160
第 4 部分 基于 ARM 自主设计与创新实验		
附录	嵌入式系统网络资源	167
参考文献	168

第 **1** 部分

基本理论

P A R T 1



1.1 嵌入式系统

近几年来,嵌入式系统产品(如手机、MP3、IPOD、机顶盒和掌上计算机等)成为大众广泛使用的产品。新型的嵌入式产品不断问世,市场购销两旺。IT 公司纷纷投入巨资加紧研发,嵌入式技术人才需求猛增。这些反映后 PC 时代的科技进步和经济发展,直接推动了嵌入式系统教学快速发展。从 2002 年起,全国许多高等院校的计算机系、电子系、自动化系和软件学院陆续开设了嵌入式系统课程,据估计大约有 200 多所院校开设了这门课。有的院校甚至还设立了嵌入式技术专业 and 嵌入式技术系。预计这种嵌入式系统教学大发展的趋势将会延续下去,并且扩大到更多的技术专业。嵌入式系统课程是一门多学科交叉的课程,包含了计算机系统组成原理、微机原理与接口、操作系统、编译技术、网络通信技术、人机交互、软件测试等学科领域的诸多知识点,授课内容概括性强。为了让学生们透彻地学懂理论,稳固地掌握知识,光靠课堂讲授的理论教学远远不够,必须通过实验教学环节让学生深刻体验嵌入式系统的实际软硬件知识,并由以此来提高他们的动手能力。

随着通信网络技术、计算机技术和微电子技术的高速发展,嵌入式系统已成为了 IT 业的一个焦点。同时在数字信息技术和网络技术高速发展的后 PC 时代,嵌入式系统因其体积小、可靠性高、功能强和灵活方便等许多优点,已渗透到工业、军事、医疗以及日常生活等各个领域,对各行各业的技术改造、产品更新换代、加速自动化进程及提高生产率等方面起到了极其重要的推动作用。

对于复杂的系统,为使其具有资源管理、系统管理和中断处理等能力,提供多任务处理,更好地分配系统资源的功能,很有必要针对特定的硬件平台和实际应用移植操作系统。嵌入式操作系统是嵌入式系统的核心。在各种嵌入式操作系统中,Linux 凭借其在结构清晰、源代码开放性等方面的优势,成为了嵌入式开发的首选。嵌入式 Linux 操作系统也以其开放源代码、易于开发、功能强大、稳定和成本低等优势迅速跻身于主流嵌入式开发平台。在国内外无论是学术界还是工程界,都进行了很多 Linux 向别的平台上的移植技术方面的研究,是 Linux 在嵌入式领域

中应用的一个热点。嵌入式系统必须根据应用需要对硬件和软件进行剪裁,所以如何对Linux内核进行修改和剪裁,以满足系统的需求,是移植技术中的关键。

1.2 基本概念

1. 根据 IEEE 定义

嵌入式系统是“控制、监视或者辅助设备、机器和车间运行的装置”。

按照历史性、本质性、普遍性要求,嵌入式系统应定义为:“嵌入到对象体系中的专用计算机系统”。

2. 一般定义

嵌入式系统是以具体应用为中心,以计算机技术为基础,适用于对功能、可靠性、成本、体积和功耗等有严格要求的专用计算机系统。

在明确了嵌入式系统定义的基础上,可从以下几方面来理解嵌入式系统。

(1) 嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的,是与应用紧密结合的,它具有很强的专用性,必须结合实际系统需求进行合理的裁减利用。嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起,它的升级换代也是和具体产品同步进行,因此嵌入式系统产品一旦进入市场,具有较长的生命周期。

(2) 嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各个行业的具体应用相结合后的产物。这一点就决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。

(3) 嵌入式系统必须根据应用需求对软硬件进行改进,满足应用系统的功能、可靠性、成本和体积等要求。为了提高执行速度和系统可靠性,嵌入式系统中的软件一般都固化在存储器芯片或单片机本身中,而不是存储于磁盘等载体中。

(4) 嵌入式系统本身不具备自主开发能力,即使设计完成以后用户通常也是不能对其中的程序功能进行修改的,必须有一套开发工具和环境才能进行开发。

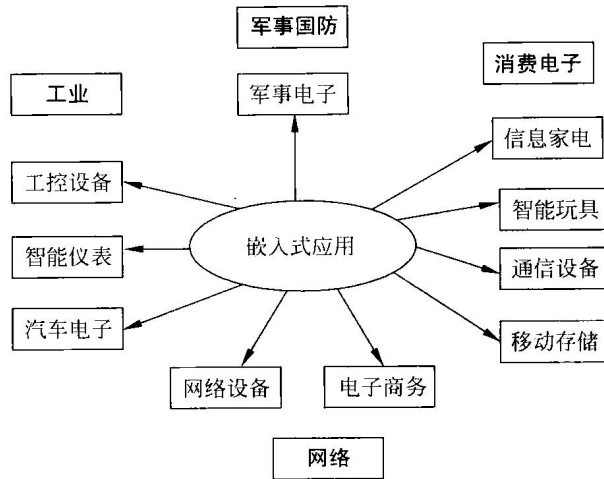
实际上,凡是与产品结合在一起的具有嵌入式特点的控制系统,都可以叫嵌入式系统。现在人们讲嵌入式系统时,在某种程度上是指近些年比较热的具有操作系统的嵌入式系统。

1.3 嵌入式系统的应用范围

嵌入式系统的应用范围大致可以划分为以下 6 大类。

- (1) 移动计算设备及消费类电子。
- (2) 办公设备。
- (3) 网络设备。
- (4) 工控及医疗设备。
- (5) 汽车电子。
- (6) 信息电器——智能家居。

通常,嵌入式系统应用领域如图 1.1 所示。



2.1 嵌入式系统的特点综述

嵌入式系统是以具体应用为中心,以计算机技术为基础,采用可裁减的软硬件,适用于对功能、可靠性、成本、体积和功耗等有严格要求的专用计算机系统。它具有以下特点。

(1) 嵌入式系统是应用于特定环境下,针对特定用途来设计的系统,是“专用”的计算机系统,所以不同于通用计算机系统。

(2) 它的硬件和软件都必须高效率地设计、“量体裁衣”、去除冗余,力争在较少的资源上实现更高的性能。

(3) 嵌入式系统的目标代码通常是固化在非易失性存储器(ROM、EPROM、EEPROM 和 Flash)芯片中。

(4) 嵌入式系统使用的操作系统一般是实时操作系统(RTOS),系统有实时约束。

(5) 嵌入式系统比通用 PC 系统资源少得多。

(6) 嵌入式系统“嵌入”到对象的体系中,对对象、环境和嵌入式系统自身具有严格的要求,一般的嵌入式系统具有低功耗、体积小、集成度高和成本低等特点。

(7) 嵌入式系统开发需要开发工具和环境。由于其本身不具备自主开发能力,即使设计完成以后,用户通常也是不能对其中的程序功能进行修改,必须有一套开发工具和环境才能进行开发。

(8) 建立完整的嵌入式系统的系统测试和可靠性评估体系,保证嵌入式系统高效、可靠、稳定地工作。

为了更好地把握嵌入式系统的特点,下面从硬件和软件两个方面把它与通用 PC 做个比较,分别如表 2.1 和表 2.2 所示。

表 2.1 硬件平台的比较

设备名称	嵌入式系统	PC
CPU	嵌入式处理器(ARM、MIPS)	CPU(Intel 的 Pentium、AMD 的 Athlon 等)
内存	SDRAM 芯片	SDRAM 或 DDR 内存条