



高等学校电子信息类专业系列教材
教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材

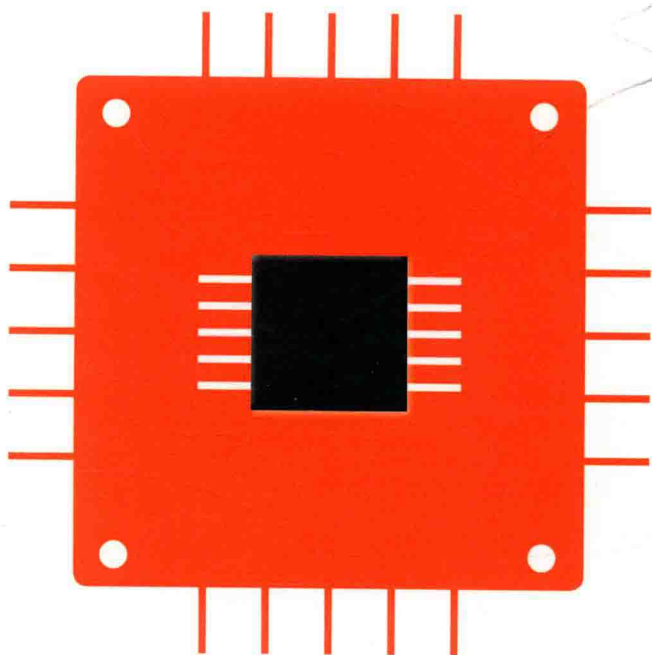
嵌入式与工业控制技术

Tutorial of Embedded Linux System

嵌入式Linux系统 开发及应用教程

金伟正 编著

Jin Weizheng



清华大学出版社



高等学校电子信息类



嵌入式 Linux 系统开发及应用教程

金伟正 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细介绍嵌入式系统开发过程中的主要技术问题,着重讲解嵌入式 Linux 系统的设计与实现,注重理论和实验的结合。全书分为 13 章,内容包括绪论、Linux 基础知识、Linux 编程环境、Linux 外壳程序编程、构建嵌入式 Linux 开发平台、ARM 调试环境、嵌入式 Bootloader 技术、Linux 内核配置、ARM-Linux 内核分析和移植、嵌入式文件系统、嵌入式 Linux 多线程编程、嵌入式 Web 服务器设计、嵌入式 Linux 的 GUI 等内容。

本书通俗易懂,图文并茂,注重理解与实例,大部分章节配有实例和源程序,可操作性强。本书可作为计算机学科、电子信息类相关专业本科生、研究生及工程硕士的“嵌入式系统”课程的教材,也可供相关研究人员、工程技术人员阅读参考。

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 Linux 系统开发及应用教程/金伟正编著. —北京:清华大学出版社,2017
(高等学校电子信息类专业系列教材)
ISBN 978-7-302-47608-5

I. ①嵌… II. ①金… III. ①Linux 操作系统—高等学校—教材 IV. ①TP316.85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 154212 号

责任编辑:曾 珊
封面设计:李召霞
责任校对:梁 毅
责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 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

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.5

字 数:495 千字

版 次:2017 年 10 月第 1 版

印 次:2017 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:45.00 元

产品编号:074358-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高〔2012〕4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕忠伟 教授

前言

PREFACE

嵌入式系统正在重新塑造人们的认知、生活、工作和娱乐方式。随着物联网及国内外嵌入式产品进一步开发和推广,嵌入式系统已经渗透到科学研究、工程设计、军事技术、商业文化艺术及人们日常生活中的方方面面。围绕着嵌入式系统构建的智能手机、人工智能、AR/VR、无人机、智能穿戴设备、汽车自动驾驶和智能家居系统等,极大地便利和丰富了人们的生活。由于嵌入式系统的研究和开发是一个理论性、实践性非常强的工作,因此开发嵌入式系统需要高素质的研发人员。它不但要求研发人员熟悉嵌入式处理器的硬件结构,还要求更多地掌握嵌入式系统开发的各个环节,如 Bootloader、内核、驱动、网络和文件系统等,同时还必须具备所属行业的相关知识和丰富的实践经验。

嵌入式 Linux 操作系统遵循 GNU 的 GPL 条款,具有源代码开放、代码工整、工作稳定、内核结构清晰、移植方便、系统内核小、执行效率高和网络功能强大等特点,从而成为嵌入式市场的领先者。

本书大部分内容曾作为武汉大学电子信息学院研究生“嵌入式原理与应用”课程的讲义连续使用多届,取得良好的教学效果。编者总结了多年的科研经验和案例,力求从基本概念、基本原理、基本方法和基本应用出发,使读者能扎实、系统地掌握嵌入式 Linux 系统开发的方法和技能。

全书分为 13 章:第 1 章绪论;第 2 章为 Linux 操作系统入门基础;第 3 章介绍 Linux 系统环境下的程序设计基础;第 4 章学习 Linux 外壳程序的编程方法;第 5 章介绍如何构建嵌入式 Linux 开发平台;第 6 章对 ARM 调试工具、编译环境进行介绍;第 7 章对嵌入式 Bootloader 技术进行详细的分析;第 8 章详细讲述 Linux 内核配置方法;第 9 章以嵌入式操作系统 ARM-Linux 为例,对其内核进行详细的剖析,其原理也适用其他架构的处理器;第 10 章对嵌入式文件系统进行综合描述和具体分析;第 11 章介绍嵌入式 Linux 多线程编程方法;第 12 章就构建嵌入式 Web 服务器使用的相关技术进行了详细的分析;第 13 章详细介绍嵌入式图形用户界面的原理和设计方法。

本书特点

- 图文并茂,注重整体内容框架的讲解,培养学生的大局观。例如,第 1 章用多幅图片描述嵌入式 Linux 系统开发的整体框架及开发流程,便于读者快速入门;第 8 章用一张框图描述整个 Linux 内核代码树的结构,便于理解与记忆。
- 通俗易懂,注重理解与实例。大部分章节配有实例和源代码,引导读者逐步熟悉各种开发工具和环境,使读者建立感性认识,为进一步深入学习打下良好的基础,可操作性极强。
- 代码规范细致,内容深入,起点较高。在实例源代码中,进行了非常详细的注释,可

以引导读者理解和掌握编写程序的关键过程。在注重基础和实践的同时,注重知识的扩充,如本书对线程、网络编程及图形用户界面编程做了深入的讲解,使读者对嵌入式Linux系统的开发水平有本质的提高。

- 每章都给出了主要内容、本章小结以及思考题,有利于提升读者的自学效果。

作者分工与致谢

本书由金伟正编著,徐颖、金诗怡参与了部分翻译和编辑工作,他们的工作对本书的定稿起了很大的作用。本书参考了 *Embedded Linux Primer: A Practical, Real-World Approach*、*Linux Kernel Development 3rd Edition* 等书籍,有些内容取材于国内外最新的教材和技术资料,详见参考文献,有兴趣的读者可以进一步查阅。在此,谨向多位原作者表达诚挚的敬意和真诚的感谢。本书的部分资料来自网络,无法一一列举,在此一并感谢。同时,特别感谢武汉大学电子信息学院对本书给予的大力支持。

联系作者

由于编写时间仓促,编著者的水平有限,书中难免存在不妥或错误之处,如果您对本书有任何意见或建议,或对本书中的内容或章节有兴趣,不妨发电子邮件告诉我们(电子邮箱 jwz@whu.edu.cn),您提出的问题和建

金伟正

2017年3月于武汉大学

学习建议

- 本书定位

本书可作为计算机学科、电子信息类相关专业本科生、研究生及工程硕士的嵌入式系统课程的教材,也可供相关研究人员、工程技术人员阅读参考。

- 建议授课学时

如果将本书作为教材使用,建议将课程的教学分为课堂讲授和学生自主上机两个层次。课堂讲授建议 36~48 学时,学生自主上机建议 18~24 学时。教师可以根据不同的教学对象或教学大纲要求安排学时数和教学内容。

- 教学内容、重点和难点提示、课时分配

序号	教学内容	教学重点	教学难点	课时分配
第 1 章	绪论	嵌入式系统开发的一般过程、嵌入式操作系统	嵌入式系统开发的一般过程及方法	2 学时
第 2 章	Linux 基础知识	认识 Linux 操作系统、Linux 基本操作命令、Linux 文件与目录系统、Linux 网络服务	Linux 基本操作命令的使用	2 学时
第 3 章	Linux 编程环境	Linux 编程环境、VIM 及 Emacs 的使用、GNU make 使用及 Makefile 编程、GDB 的使用方法	GNU make 使用及 Makefile 编程方法	2 学时
第 4 章	Linux 外壳程序编程	创建和运行外壳程序、外壳程序的编程		2 学时
第 5 章	构建嵌入式 Linux 开发平台	GNU 跨平台开发工具链、嵌入式 Linux 内核及根文件系统、Bootloader 简介	GNU 跨平台开发工具链的建立过程	4 学时
第 6 章	ARM 调试环境	ARM 调试工具简介、ADS 软件调试工具		2 学时
第 7 章	嵌入式 Bootloader 技术	Bootloader 的基本概念、典型结构框架、分析和移植	Bootloader 的移植	6 学时
第 8 章	Linux 内核配置	内核开发特点、嵌入式 Linux 内核代码结构、嵌入式 Linux 内核配置	嵌入式 Linux 内核配置原理及方法	6 学时
第 9 章	ARM-Linux 内核分析和移植	ARM-Linux 的结构组成、ARM-Linux 的移植	ARM-Linux 的移植	6 学时

续表

序号	教学内容	教学重点	教学难点	课时分配
第 10 章	嵌入式文件系统	Linux 文件系统结构与特征、嵌入式文件系统的类型、根文件系统的构建	根文件系统的构建及设计	4 学时
第 11 章	嵌入式 Linux 多线程编程	Linux 线程编程基础、线程的同步与互斥		4 学时
第 12 章	嵌入式 Web 服务器设计	TCP/IP、UDP 及 HTTP 等协议、socket 编程基础、嵌入式 Web 服务器介绍、Web 服务器构建	嵌入式 Web 服务器类型及 Web 服务器构建	4 学时
第 13 章	嵌入式 Linux 的 GUI	嵌入式 GUI 简介、MiniGUI 及 Qt/Embedded 程序设计	MiniGUI 及 Qt/Embedded 的移植	4 学时

• 网上资源

本书的教学资源可从“武汉大学课程中心网推荐课程”中获取,网址为: <http://kczx.whu.edu.cn/G2S/ShowSystem/CourseCommend.aspx>。如果课时宽裕,教师可选取一些专家讲座或公开课视频,在课堂上播放,以扩大学生的眼界。

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 嵌入式系统概述	1
1.1.1 嵌入式系统的历史	1
1.1.2 嵌入式系统的特点	2
1.1.3 嵌入式处理器	2
1.1.4 嵌入式系统的发展趋势	3
1.2 嵌入式系统开发	4
1.2.1 需求分析及概要设计	4
1.2.2 嵌入式系统中的硬件及软件	6
1.2.3 嵌入式系统开发的一般过程	7
1.3 嵌入式操作系统	16
1.3.1 嵌入式操作系统的分类	16
1.3.2 嵌入式操作系统的特点	17
1.3.3 典型的嵌入式操作系统	18
1.3.4 嵌入式操作系统的选择	21
1.4 本章小结	21
1.5 思考题	22
第 2 章 Linux 基础知识	23
2.1 认识 Linux 操作系统	23
2.1.1 Linux 简明历史	23
2.1.2 Linux 系统的特点和组成	25
2.1.3 Linux 的开发过程	26
2.2 基本操作命令	28
2.2.1 字符界面简介	28
2.2.2 常用命令简介	28
2.3 Linux 文件与目录系统	33
2.3.1 Linux 文件系统类型介绍	33
2.3.2 Linux 目录系统	36
2.4 shell 简介	37
2.5 网络服务简介	38
2.5.1 Linux 支持的网络协议	38
2.5.2 Linux 的网络服务	39
2.6 本章小结	41

2.7 思考题	41
第3章 Linux 编程环境	42
3.1 Linux 编程环境介绍	42
3.1.1 开发工具环境	42
3.1.2 基于文本模式的开发平台	43
3.1.3 集成开发平台 Eclipse+CDT	43
3.1.4 文档帮助环境	44
3.2 常用编辑器	45
3.2.1 VIM 编辑器	46
3.2.2 Emacs 编辑器	48
3.3 gcc 编译器的使用	51
3.3.1 gcc 的主要选项	52
3.3.2 GNU C 扩展简介	55
3.4 GNU make 管理项目	56
3.4.1 make 简介	56
3.4.2 编写 Makefile 文件的规则	57
3.5 GDB 调试	61
3.5.1 GDB 命令介绍	61
3.5.2 GDB 调试例程	65
3.5.3 基于 GDB 的图形界面调试工具	68
3.6 本章小结	69
3.7 思考题	69
第4章 Linux 外壳程序编程	70
4.1 创建和运行外壳程序	70
4.1.1 创建外壳程序	70
4.1.2 运行外壳程序	71
4.2 使用外壳变量	72
4.2.1 给变量赋值	72
4.2.2 读取变量的值	72
4.2.3 位置变量和其他系统变量	72
4.2.4 引号的作用	73
4.3 数值运算命令	74
4.4 条件表达式	77
4.4.1 if 表达式	77
4.4.2 case 表达式	78
4.5 循环语句	79
4.5.1 for 语句	79
4.5.2 while 语句	80
4.5.3 until 语句	81
4.5.4 repeat 语句	82
4.6 shift 命令	82
4.7 select 语句	83
4.8 函数	83

4.9	shell 应用举例	85
4.10	本章小结	89
4.11	思考题	89
第 5 章	构建嵌入式 Linux 开发平台	90
5.1	GNU 跨平台开发工具链	90
5.1.1	基础知识	90
5.1.2	GNU 跨平台开发工具链的建立过程	90
5.2	嵌入式 Linux 内核	97
5.3	嵌入式 Linux 根文件系统	98
5.4	Bootloader 简介	99
5.5	本章小结	100
5.6	思考题	100
第 6 章	ARM 调试环境	101
6.1	ARM 调试工具简介	101
6.1.1	JTAG 仿真器	101
6.1.2	Multi-ICE Server	102
6.2	ADS 软件调试工具	104
6.2.1	使用 Metrowork CodeWarrior for ARM Developer Suite	104
6.2.2	使用 RealView Debugger	107
6.2.3	使用 AXD Debugger	109
6.3	本章小结	116
6.4	思考题	116
第 7 章	嵌入式 Bootloader 技术	117
7.1	Bootloader 的基本概念	117
7.1.1	Bootloader 的安装点和启动过程	117
7.1.2	Bootloader 的模式	118
7.1.3	Bootloader 与主机之间的通信方式	118
7.2	Bootloader 典型结构框架	119
7.2.1	Bootloader 总体流程	119
7.2.2	Bootloader 的 stage1	120
7.2.3	Bootloader 的 stage2	122
7.3	典型 Bootloader 分析和移植	129
7.3.1	Blob	129
7.3.2	U-Boot	133
7.4	其他 Bootloader 简介	139
7.4.1	Redboot	139
7.4.2	ARMBoot	139
7.4.3	PPCBoot	139
7.5	本章小结	140
7.6	思考题	140
第 8 章	Linux 内核配置	141
8.1	内核概述	141

8.2	嵌入式 Linux 内核代码结构	142
8.3	内核开发的特点	144
8.3.1	没有 libc 库	144
8.3.2	GNU C	144
8.3.3	没有内存保护机制	145
8.3.4	不要轻易在内核中使用浮点数	145
8.3.5	容积小而固定的栈	146
8.3.6	同步和并发	146
8.3.7	可移植性的重要性	146
8.4	嵌入式 Linux 内核的配置	146
8.4.1	Makefile	147
8.4.2	配置文件	151
8.4.3	Linux 内核配置选项	154
8.5	配置举例	159
8.6	本章小结	161
8.7	思考题	162
第 9 章	ARM-Linux 内核分析和移植	163
9.1	ARM 微处理器	163
9.1.1	RISC 体系结构	163
9.1.2	ARM 微处理器的类型	164
9.1.3	ARM 微处理器的寄存器结构	167
9.1.4	ARM 微处理器的指令结构	168
9.2	ARM-Linux 内存管理	168
9.2.1	内存管理单元(MMU)	168
9.2.2	ARM-Linux 的存储管理机制	169
9.2.3	ARM-Linux 存储机制的建立	169
9.2.4	ARM-Linux 对进程虚拟空间的管理	173
9.3	ARM-Linux 进程管理与调度	176
9.3.1	task_struct 数据结构	176
9.3.2	Linux 进程的创建、执行和消亡	184
9.3.3	ARM_Linux 的进程调度	189
9.4	ARM-Linux 中断与中断处理	195
9.4.1	Linux 处理中断概述	195
9.4.2	ARM 体系程序的执行流程	199
9.4.3	ARM 处理器对异常中断的响应及返回过程	199
9.5	Linux 驱动程序简介	202
9.5.1	设备的分类	203
9.5.2	设备号	203
9.5.3	设备节点	204
9.5.4	用户空间和内核空间	204
9.6	Linux 模块化机制	204
9.6.1	Linux 的模块化	204
9.6.2	模块的载入	206

9.6.3	模块的卸载	207
9.7	ARM-Linux 系统启动与初始化	207
9.7.1	内核数据结构的初始化	207
9.7.2	外设初始化	212
9.7.3	init 进程和 linitab 文件	213
9.7.4	rc 启动脚本	214
9.7.5	shell 的启动	214
9.8	ARM-Linux 内核裁减	215
9.9	ARM-Linux 移植	217
9.9.1	移植准备	218
9.9.2	移植步骤	218
9.9.3	配置内核选项	218
9.9.4	修改 Kernel 文件系统部分代码	219
9.10	本章小结	221
9.11	思考题	222
第 10 章	嵌入式文件系统	223
10.1	Linux 文件系统结构与特征	223
10.1.1	Linux 文件系统概述	223
10.1.2	Linux 文件系统布局	223
10.1.3	Linux 支持的文件系统	229
10.2	嵌入式文件系统简介	231
10.2.1	NOR Flash 与 NAND Flash 介绍	231
10.2.2	MTD 介绍	232
10.2.3	cramfs 文件系统简介	234
10.2.4	romfs 文件系统简介	235
10.2.5	JFFS 文件系统简介	237
10.2.6	YAFFS 文件系统简介	238
10.3	构建根文件系统	239
10.4	根文件系统设置	241
10.5	BusyBox	243
10.5.1	BusyBox 简介	243
10.5.2	使用 BusyBox 构建根文件系统	244
10.6	嵌入式文件系统的设计	246
10.6.1	文件系统格式的选型的基本策略	246
10.6.2	混合型文件系统的设计	247
10.7	本章小结	248
10.8	思考题	249
第 11 章	嵌入式 Linux 多线程编程	250
11.1	线程基本概念	250
11.1.1	Linux 线程简介	250
11.1.2	Linux 线程编程基础	251
11.2	多线程同步	254
11.2.1	互斥锁	254

11.2.2	条件变量	257
11.2.3	信号量	258
11.3	生产者-消费者问题	262
11.3.1	生产者-消费者问题简介	262
11.3.2	生产者-消费者问题实例	262
11.4	本章小结	266
11.5	思考题	266
第 12 章	嵌入式 Web 服务器设计	267
12.1	TCP/IP 协议	267
12.1.1	TCP/IP 协议栈	267
12.1.2	TCP/IP 协议栈的数据流向	268
12.1.3	TCP 协议与 UDP 协议	268
12.2	HTTP 协议	270
12.2.1	HTTP 协议的方法	270
12.2.2	HTTP 协议消息头	272
12.2.3	HTTP 协议使用举例	273
12.2.4	内核网络服务	274
12.3	socket 编程基础	274
12.3.1	socket 描述	274
12.3.2	socket 描述符	275
12.4	嵌入式 Web 服务器介绍	276
12.4.1	协议标准	276
12.4.2	瘦 Web 服务器	276
12.4.3	嵌入式应用接口技术	277
12.4.4	实现形式	278
12.4.5	RomPager	278
12.4.6	EMIT	279
12.5	Web 服务器构建	279
12.6	本章小结	282
12.7	思考题	283
第 13 章	嵌入式 Linux 的 GUI	284
13.1	嵌入式 GUI 简介	284
13.1.1	MiniGUI	285
13.1.2	Qt/Embedded	285
13.1.3	Nano-X	286
13.1.4	OpenGUI	286
13.2	MiniGUI 程序设计基础	287
13.2.1	MiniGUI V1.3.3 软件包	287
13.2.2	MiniGUI 的特点	288
13.2.3	窗口处理过程	290
13.2.4	MiniGUI 的线程机制	291
13.2.5	MiniGUI 的体系结构	292
13.2.6	MiniGUI 的底层引擎	293

13.2.7	MiniGUI 的三种运行模式	293
13.2.8	MiniGUI 移植	294
13.3	Qt/Embedded 程序设计基础	296
13.3.1	Qt/Embedded 图形引擎实现基础	298
13.3.2	Qt/Embedded 事件驱动基础	299
13.3.3	Qt/Embedded 底层支持分析	300
13.3.4	Qt/Embedded 移植	300
13.4	本章小结	305
13.5	思考题	306
	参考文献	307