

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术



Linux操作系统 原理与应用 (第2版)

陈莉君 康华 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术

Linux操作系统 原理与应用 (第2版)

陈莉君 康华 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是 Linux 内核及动手实践的入门教程。在庞大的 Linux 内核中,选取最基本的内容——进程管理、中断、内存管理、系统调用、内核同步、文件系统、I/O 设备管理等进行阐述。从原理出发,基于 Linux 内核源代码但又不局限于代码,分析原理如何落实到代码,并通过简单有效的实例说明如何调用 Linux 内核提供的函数进行内核级程序的开发。主要章节给出了具有实用价值的小型应用,从而让读者在实践中加深对原理的理解和应用能力。

本书对于希望深入 Linux 操作系统内部、阅读 Linux 内核源代码以及进行内核级程序开发的读者具有较高的参考价值。本书可作为高等院校计算机相关专业的本科生、研究生的教材, Linux 应用开发人员、嵌入式系统开发人员等均可从本书中获益。

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

Linux 操作系统原理与应用/陈莉君,康华编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2012.1
(21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术)

ISBN 978-7-302-27836-8

I. ①L… II. ①陈… ②康… III. ①Linux 操作系统—高等学校—教材 IV. ①TP316.89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 003605 号

责任编辑:付弘宇 薛 阳

责任校对:胡伟民

责任印制:王秀菊

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 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:17.25 字 数:431 千字

版 次:2012 年 1 月第 2 版 印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:28.00 元

产品编号:045103-01

编审委员会成员

(按地区排序)

清华大学	周立柱	教授
	覃征	教授
	王建民	教授
	冯建华	教授
	刘强	副教授
北京大学	杨冬青	教授
	陈钟	教授
	陈立军	副教授
北京航空航天大学	马殿富	教授
	吴超英	副教授
	姚淑珍	教授
中国人民大学	王珊	教授
	孟小峰	教授
	陈红	教授
北京师范大学	周明全	教授
北京交通大学	阮秋琦	教授
	赵宏	副教授
北京信息工程学院	孟庆昌	教授
北京科技大学	杨炳儒	教授
石油大学	陈明	教授
天津大学	艾德才	教授
复旦大学	吴立德	教授
	吴百锋	教授
	杨卫东	副教授
同济大学	苗夺谦	教授
	徐安	教授
华东理工大学	邵志清	教授
华东师范大学	杨宗源	教授
	应吉康	教授
东华大学	乐嘉锦	教授
	孙莉	副教授

浙江大学	吴朝晖	教授
	李善平	教授
扬州大学	李 云	教授
南京大学	骆 斌	教授
	黄 强	副教授
南京航空航天大学	黄志球	教授
	秦小麟	教授
南京理工大学	张功萱	教授
南京邮电学院	朱秀昌	教授
苏州大学	王宜怀	教授
	陈建明	副教授
江苏大学	鲍可进	教授
中国矿业大学	张 艳	教授
武汉大学	何炎祥	教授
华中科技大学	刘乐善	教授
中南财经政法大学	刘腾红	教授
华中师范大学	叶俊民	教授
	郑世珏	教授
	陈 利	教授
江汉大学	颜 彬	教授
国防科技大学	赵克佳	教授
	邹北骥	教授
中南大学	刘卫国	教授
湖南大学	林亚平	教授
西安交通大学	沈钧毅	教授
	齐 勇	教授
长安大学	巨永锋	教授
哈尔滨工业大学	郭茂祖	教授
吉林大学	徐一平	教授
	毕 强	教授
山东大学	孟祥旭	教授
	郝兴伟	教授
中山大学	潘小轰	教授
厦门大学	冯少荣	教授
厦门大学嘉庚学院	张思民	教授
云南大学	刘惟一	教授
电子科技大学	刘乃琦	教授
	罗 蕾	教授
成都理工大学	蔡 淮	教授
	于 春	副教授
西南交通大学	曾华燊	教授

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程(简称‘质量工程’)”,通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

20年前诞生于学生之手的 Linux,借助于 Internet 这片肥沃的土壤,在开源文化的大熔炉中,逐步成长为穿越桌面、服务器以及智能终端的通用操作系统。

1991年那个稚嫩的 0.01 版就是 Linus 在操作系统课上写的一个大作业,翻看其代码,调度程序也就三十多行,文件系统的读写函数各只有十多行(不含所调用的其他函数),如此而已,初学者可以在这样的代码中看到自己所写程序的影子。

Linux 从曾经的 0.01 版到现在的 3.0 版,历经了八百多个版本的变迁,其中变化的点滴都记录在 Linux 内核邮件列表(LKML)中,从这些足迹中,我们会寻觅到一个变量为什么那样定义,一个结构体为什么要增减字段,一个函数的参数为什么从三个变为两个,在这一个个的细节中,软件设计的蛛丝马迹也就逐步展现出来。但是,这些过往的信息是海量的,多本教材都无法容纳,需要读者进行大量的课外阅读。

Linux 内核的全部源代码是一个庞大的世界,如何在这庞大而又复杂的世界中抓住主要内容,如何找到进入 Linux 内部的突破口,又如何把 Linux 的源代码变为自己所需,并在此基础上进行内核级程序的开发,这是本书要探讨的内容。

首先第 1 章概述从不同侧面概要描述了大家熟悉而又陌生的操作系统,使读者从宏观上对操作系统有一个初步认识。之后,简要介绍了 Linux 的同族同源 UNIX,从而说明 Linux 赖以生存的土壤源于三十多年 UNIX 的发展。为了让读者对 Linux 有初步了解后动手实践,本章还介绍了 Linux 内核中的模块编写方法,并以链表为入口点,让读者近距离感知 Linux 内核代码设计中的精彩和美妙。

第 2 章内存寻址从寻址方式的演变入手,给出与操作系统设计密切相关的概念。比如,实模式、保护模式、各种寄存器、物理地址、虚拟地址以及线性地址等。然后对保护模式的分段机制和分页机制简要描述,并从 Linux 设计的角度分析了这些机制的具体落实。接着介绍了 Linux 中的汇编以及嵌入式汇编,最后给出了 Linux 系统的地址映射示例,这是在第 2 章就引入内存寻址的根本目的,就是操作系统如何借助硬件把虚地址转化为物理地址。

第 3 章进程从进程的引入开始,阐述了进程的各个方面,包括进程上下文、进程层次结构、进程状态,尤其是对进程控制块进行了比较全面的介绍。task_struct 结构作为描述 Linux 进程的核心数据结构,对其熟悉和掌握可深入了解进程的入口点。另外,进程控制块的各种组织方式链表、散列表、队列等数据结构是管理和调度进程的基础。在这些基础上,对核心内容进程调度进行了代码级的描述,并给出了 Linux 新版本中改进的方法和思路。最后,以进程系统调用的剖析和应用结束本章。

第 4 章内存管理主要围绕虚地址到物理地址的转换,由此引发出了各种问题,比如地址映射问题,一方面把可执行映像映射到虚拟地址空间,另一方面把虚地址空间映射到物理地址空间。而在程序执行时,涉及请页问题,把虚空间中的页真正搬到物理空间,由此要对物理空间进行分配和回收,而在物理内存不够时,又必须进行内外交换,交换的效率直接影响

系统的性能,于是缓冲和刷新技术应运而生。本章最后一节给出了一个比较完整的例子,说明内存管理在实际中的应用。

第5章中断和异常涵盖了较多的概念:中断和异常、中断向量、IRQ、中断描述符表、中断请求队列、中断的上半部和下半部、时钟中断、时钟节拍、节拍率、定时器等。中断使得硬件与处理器进行通信,不同的设备对应的中断不同;同时,不同的中断具有不同的中断服务程序,其中断处理程序的入口地址存放在中断向量表中。当某个中断发生时,对应的中断服务程序得到执行,在执行期间不接受外界的干扰。为了缓解中断服务程序的压力,内核中引入了中断下半部机制,其本质都是推后下半部函数的执行。时钟中断是内核跳动的脉搏,本章引入了时钟节拍、jiffies、节拍率等概念,简要介绍了时钟中断的运行机制,同时给出了定时器的简单应用。

第6章系统调用是内核与用户程序进行交互的接口。本章从不同角度对系统调用进行了描述,说明了系统调用与API、系统命令以及内核函数之间的关系。然后,分析了Linux内核如何实现系统调用,说明系统调用处理程序及服务例程在整个系统调用执行过程中的作用。最后,通过两个实例讨论了如何增加系统调用,并给出了从用户空间调用系统调用的简单例子。本章最后的日志收集系统实例给出了完整的过程,以便读者充分认识系统调用的价值并在自己的项目开发中灵活应用。

第7章内核同步首先介绍了临界区、共享队列、死锁等相关的同步概念,然后给出了内核中常用的三种同步方法,即原子操作、自旋锁以及信号量,其中对信号量的实现机制进行了稍微深入的分析。为了加强读者对同步机制的应用能力,本章给出了两大实例,其一是生产者-消费者模型,其二是内核中线程、系统调用以及定时器任务队列的并发执行。通过这两个例子,让读者深刻体会并发程序编写中如何应用同步机制。

第8章文件系统首先介绍了文件系统的基础知识,其中涉及索引节点、软连接、硬链接、文件系统、文件类型以及文件的访问权限等概念。虚拟文件系统机制使得Linux可以支持各种不同的文件系统,其实现中涉及的主要对象有超级块、索引节点、目录项以及文件,对这些数据结构的描述可以使读者深入到细节了解具体字段的含义。然后,简要讨论了文件系统的注册、安装以及卸载,最后的实例给出romfs文件系统的具体实现。

第9章设备驱动首先阐述了设备驱动程序在文件系统中所处的位置。接着介绍了驱动程序的通用框架,以及Linux字符驱动的简单实例,让读者对驱动程序有一个初步认识。然后对设备驱动开发中所涉及的I/O空间进行了比较详细的介绍。在字符设备驱动一节,把内存空间的一片区域看做一个字符设备,并给出了开发这样一个驱动程序的具体步骤和过程。最后,对块设备驱动程序的开发给出了简要描述。

为了突出主题,本教材尽量简化相关内容,但为了填补课堂教学和实践开发之间的鸿沟,我们在Linux内核之旅 www.kerneltravel.net 网站上发布了与内核相关的学习资料。针对读者学习操作系统课程后,苦于无用武之地的现状,网站上讨论了如何进行Linux内核层面上的系统软件开发,并配以有实用价值或指导意义的实验。

在近几年的教学过程中,依然感到学生对Linux系统的陌生和动手能力偏弱,针对这种现状,在本次改版过程中,尽量从Linux命令级入手,逐步过渡到原理;从简单的小实验入手,逐步过渡到大例子,以便学生把所学原理与平时遇到的问题联系起来。

由于本教材的篇幅所限,本书内容进行了一定的简化,这可能在某种程度上影响了读者

对其内容的深入理解,为此,Linux 内核之旅网站公布了作者曾经编写的《深入分析 Linux 内核源代码》一书的电子版内容,以满足读者深入探究之愿望。

在本次内容的改编过程中,得到了很多学生的支持,他们是许振文、牛涛、陈继峰、武婷、武特等,而武特的博客 <http://edsionte.com/techblog/>更是让初学者有一种亲近感和熟悉感,希望大家在学习的过程中,以博客的形式分享自己的心得。

作 者

2011年9月

第1版前言

芬兰大学生 Linus Torvalds 在赫尔辛基大学学习操作系统课程时,由于不满足于使用教学所用的操作系统 MINIX,于是着手开发了一个简单的程序,之后开发了显示器、键盘和调制解调器的驱动程序,磁盘驱动程序,文件系统,这样,一个操作系统的原型就这样形成了。

这个诞生于学生之手的 Linux,在 Internet 这片肥沃的土壤中不断成长,逐步发展为与 UNIX、Windows 并驾齐驱的实用操作系统。与 Windows 不同,Linux 与 UNIX 界面相似,但它的窗口向所有人完全敞开,任何想了解其内在机理的爱好者都可以走进其内部世界。

1999 年春,我们有幸走进了这个开放的世界,那时我们分析的是 Linux 内核 2.0 版。在阅读源代码的基础上,我们编写了《Linux 操作系统内核分析》一书。随着 Linux 内核版本的不断更新,我们又陆续编写和翻译了针对 Linux 内核 2.2 版本、2.4 版本及 2.6 版本的相关书籍。

Linux 内核是用 C 语言和汇编语言编写的(以 C 语言为主),其全部源代码是一个庞大的集合。如何在这个庞大而复杂的集合中抓住主要内容,找到进入 Linux 内部的突破口,又如何使 Linux 的源代码适应自己的需求,并在此基础上进行内核级程序的开发,这是本书要探讨的内容。

首先,本书的第 1 章引导读者初识操作系统,从操作系统这座大厦的各个侧面观其外貌,并走近 Linux 内核,考察其内在结构。但这种全局性的认识仅是个起点,要从根本上了解操作系统,与之相关的硬件知识是不可或缺的。第 2 章以 Intel x86 处理器为基础,从内存寻址的角度介绍了硬件对操作系统特有的支持,这种支持使得虚拟内存管理有了坚实的物质基础。

进程管理是操作系统的灵魂。第 3 章从内核实现的角度分析了进程赖以存活的各种数据结构,但没有过多涉及具体代码。进程是一个动态变化的实体,这一章从生命历程的角度说明了进程从诞生到死亡的过程。

内存作为计算机系统的重要资源,因为其容量的有限和程序规模的不断扩大,需要从技术上对其容量进行扩充。第 4 章主要讨论了虚拟内存管理的实现技术,并给出了一个实例,帮助读者加深理解。

随后的 5~9 章对中断、内核同步、系统调用、文件系统以及驱动程序从内核设计的角度进行了讨论,并给出了相应的实例以加深读者对相关内容的理解。

本书的附录部分简单介绍了内核链表和内核模块的概念。最后给出了一些网络资源的地址,感兴趣的读者可以在相关网站上获取更丰富的资料。

为了突出主题,本书尽量简化相关内容。但为了填补课堂教学和实践开发之间的鸿沟,为了辅助本书的出版,我们将在 www.kerneltravel.net 网站上不定期发布专题性电子刊

物。网站上也将针对学生学习操作系统课程后苦于无用武之地的现状,讨论了如何进行Linux内核层面上的系统软件开发,并配有实用价值或指导意义的实验,帮助学生认识Linux内核,学习Linux内核,进而理解与开发Linux内核。同时,网站提供了本书和实验中涉及的源代码,并将建立一个以教学为中心的论坛,以解答读者的疑问。

编 者

2005年4月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 认识操作系统	1
1.1.1 从使用者角度看	1
1.1.2 从程序开发者的角度看	2
1.1.3 从操作系统在整个计算机系统所处位置看	2
1.1.4 从操作系统设计者的角度看	3
1.1.5 操作系统组成	4
1.2 开放源代码的 UNIX/Linux 操作系统	5
1.2.1 UNIX 诞生和发展	5
1.2.2 Linux 诞生	6
1.2.3 操作系统标准 POSIX	6
1.2.4 GNU 和 Linux	6
1.2.5 Linux 的开发模式	7
1.3 Linux 内核	7
1.3.1 Linux 内核的技术特点	7
1.3.2 Linux 内核的位置	8
1.3.3 Linux 内核体系结构	9
1.4 Linux 内核源代码	10
1.4.1 Linux 内核版本	10
1.4.2 Linux 内核源代码的结构	11
1.4.3 Linux 内核源代码分析工具	12
1.5 Linux 内核模块编程入门	12
1.5.1 模块的定义	13
1.5.2 编写一个简单的模块	13
1.5.3 应用程序与内核模块的比较	15
1.6 Linux 内核中链表的实现及应用	15
1.6.1 链表的演化	15
1.6.2 链表的定义和操作	16
1.6.3 链表的应用	19
1.7 小结	21
习题	21

第2章 内存寻址	22
2.1 内存寻址	22
2.1.1 Intel x86 CPU 寻址的演变	22
2.1.2 80x86 寄存器简介	24
2.1.3 物理地址、虚拟地址及线性地址	26
2.2 段机制	27
2.2.1 段描述符	27
2.2.2 地址转换及保护	29
2.2.3 Linux 中的段	29
2.3 分页机制	31
2.3.1 页与页表	31
2.3.2 线性地址到物理地址的转换	34
2.3.3 分页举例	34
2.3.4 页面高速缓存	35
2.4 Linux 中的分页机制	36
2.5 Linux 中的汇编语言	38
2.5.1 AT&T 与 Intel 汇编语言的比较	38
2.5.2 AT&T 汇编语言的相关知识	39
2.5.3 GCC 嵌入式汇编	40
2.6 Linux 系统地址映射举例	43
2.7 小结	45
习题	45
第3章 进程	47
3.1 进程介绍	47
3.1.1 程序和进程	47
3.1.2 进程的层次结构	49
3.1.3 进程状态	50
3.1.4 进程举例	50
3.2 Linux 系统中的进程控制块	52
3.2.1 进程状态	53
3.2.2 进程标识符	55
3.2.3 进程之间的亲属关系	56
3.2.4 进程控制块的存放	56
3.2.5 当前进程	57
3.3 Linux 系统中进程的组织方式	58
3.3.1 进程链表	58
3.3.2 哈希表	59

3.3.3	就绪队列	60
3.3.4	等待队列	61
3.4	进程调度	63
3.4.1	基本原理	64
3.4.2	时间片	65
3.4.3	Linux 进程调度时机	65
3.4.4	进程调度的依据	66
3.4.5	调度函数 schedule()的实现	67
3.4.6	Linux 2.6 调度程序的改进	70
3.5	进程的创建	73
3.5.1	创建进程	73
3.5.2	线程及其创建	74
3.6	与进程相关的系统调用及其应用	76
3.6.1	fork 系统调用	76
3.6.2	exec 系统调用	77
3.6.3	wait 系统调用	78
3.6.4	exit 系统调用	79
3.6.5	进程的一生	80
3.7	系统调用及应用	81
3.8	小结	82
	习题	82
第 4 章	内存管理	84
4.1	Linux 的内存管理概述	84
4.1.1	虚拟内存、内核空间和用户空间	84
4.1.2	虚拟内存实现机制间的关系	87
4.2	进程的用户空间管理	87
4.2.1	进程用户空间的描述	89
4.2.2	进程用户空间的创建	93
4.2.3	虚存映射	94
4.2.4	进程的虚存区举例	95
4.2.5	与用户空间相关的系统调用	97
4.3	请页机制	98
4.3.1	缺页异常处理程序	99
4.3.2	请求调页	101
4.3.3	写时复制	102
4.4	物理内存分配与回收	102
4.4.1	页描述符	102
4.4.2	伙伴算法	104

4.4.3	物理页面的分配	104
4.4.4	物理页面的回收	106
4.4.5	Slab 分配机制	107
4.4.6	内核空间非连续内存区的分配	111
4.4.7	物理内存分配举例	113
4.5	交换机制	115
4.5.1	交换的基本原理	115
4.5.2	页面交换守护进程 kswapd	118
4.6	内存管理实例	119
4.6.1	相关背景知识	119
4.6.2	代码体系结构介绍	120
4.6.3	实现过程	122
4.6.4	程序代码	122
4.7	小结	128
	习题	128
第 5 章	中断和异常	130
5.1	中断是什么	130
5.1.1	中断向量	130
5.1.2	外设可屏蔽中断	131
5.1.3	异常及非屏蔽中断	131
5.1.4	中断描述符表	132
5.1.5	相关汇编指令	133
5.2	中断描述符表的初始化	134
5.2.1	IDT 表项的设置	134
5.2.2	对陷阱门和系统门的初始化	135
5.2.3	中断门的设置	135
5.2.4	中断处理程序的形成	136
5.3	中断处理	137
5.3.1	中断和异常的硬件处理	137
5.3.2	中断请求队列的建立	138
5.3.3	中断处理程序的执行	141
5.3.4	从中断返回	142
5.3.5	中断的简单应用	142
5.4	中断的下半部处理机制	144
5.4.1	为什么把中断分为两部分来处理	144
5.4.2	小任务机制	145
5.4.3	工作队列	147
5.5	中断应用——时钟中断	150

5.5.1	时钟硬件	150
5.5.2	时钟运作机制	151
5.5.3	Linux 时间系统	152
5.5.4	时钟中断	153
5.5.5	定时器及应用	156
5.6	小结	159
	习题	159
第 6 章	系统调用	161
6.1	系统调用与应用编程接口、系统命令以及内核函数的关系	161
6.1.1	系统调用与 API	161
6.1.2	系统调用与系统命令	162
6.1.3	系统调用与内核函数	162
6.2	系统调用基本概念	163
6.2.1	系统调用号	163
6.2.2	系统调用表	163
6.2.3	系统调用服务例程和系统调用处理程序	164
6.3	系统调用实现	164
6.3.1	初始化系统调用	165
6.3.2	system_call() 函数	165
6.3.3	参数传递	166
6.3.4	跟踪系统调用的执行	167
6.4	封装例程	168
6.5	添加新系统调用	169
6.5.1	添加系统调用的步骤	170
6.5.2	系统调用的调试	171
6.6	实例-系统调用日志收集系统	172
6.6.1	代码结构体系介绍	172
6.6.2	把代码集成到内核中	176
6.7	小结	179
	习题	179
第 7 章	内核中的同步	180
7.1	临界区和竞争状态	180
7.1.1	临界区举例	180
7.1.2	共享队列和加锁	181
7.1.3	确定保护对象	182
7.1.4	死锁	182
7.1.5	并发执行的原因	183