

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术



操作系统实践

——基于Linux的应用与内核编程

房胜 李旭健 黄玲 李哲 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



操作系统实践

——基于Linux的应用与内核编程

房胜 李旭健 黄玲 李哲 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合多年操作系统课程理论与实践教学经验,基于当前流行的开源操作系统 Ubuntu14.04 LTS (Linux 内核 3.13.0)设计了一组操作系统课程实验。全书可分为两大部分,第一部分是 Linux 操作与应用编程,包括 Linux 常用命令、C 语言编程工具和典型的 Linux 应用开发,如多进程、进程通信等,并提供一个基于开源的 Qt 框架和 MySQL 数据库的综合实训案例;第二部分是 Linux 内核编程,这一部分紧密结合操作系统课程的教学内容,包含进程管理、内存管理、设备驱动程序和虚拟文件系统等。实验安排循序渐进,每个实验都有相应的原理性内容作为铺垫。配套电子资源提供所有实验的源代码及其他相关资料,可从清华大学出版社网站下载。本书特点是实验环境新、内容结构层次分明、经典与前沿兼顾,并与理论教学内容相呼应。

本书既可作为高等院校计算机、电子信息类等专业的操作系统实验课程教材,也可作为 Linux 编程相关课程的教材。另外,致力于转向最新 Linux 开源开发环境的读者也可以将其作为快速入门教程。

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

操作系统实践:基于 Linux 的应用与内核编程/房胜等编著. --北京:清华大学出版社,2015
21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术
ISBN 978-7-302-40527-6

I. ①操… II. ①房… III. ①Linux 操作系统—程序设计 IV. ①TP316.89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 136886 号

责任编辑:刘 星 王冰飞

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

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

印 装 者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.5 字 数:495 千字

版 次:2015 年 8 月第 1 版 印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.50 元

产品编号:063626-01

作为计算机学科的核心专业基础课程,操作系统的教学面临很大的挑战。

首先,在理论教学上操作系统描述的对象是微观的、隐蔽的、抽象的。操作系统讲述的模型、算法来自于与日常认识差别极大、以 ns 或 ms 秒为单位计时的计算空间(Cyberspace),这些模型、算法很难被直接观察、真实演示。

其次,在实践教学上操作系统往往面对的是具体的、整体的实际操作系统,而几乎每一个实际操作系统都是让人望而生畏的庞然大物,都有各自的一套复杂规定和实现方法。

因此,无论是理论教学还是实践教学,往往只能针对抽象后的操作系统普遍原理、方法及其模拟来进行。也因此,一些同学在学习操作系统课程后会有一个感慨:操作系统理论就像一门哲学,感觉学了很多,却又什么也没掌握;操作系统实践就像仰望高山,看到了其大其雄,但又无从攀登。

实践方能出真知。没有实践的支撑,操作系统的教学就是空中楼阁。在过去的十多年中,编者曾经尝试了多种实践教学方法来提升教学效果,但结果都不太令人满意,原因主要有两个:要么太简单,无法真正揭示操作系统的内涵;要么难度太高,很多同学难以完成。在尝试的过程中,编者发现了一个现象:目前操作系统的教材非常多,关于 Windows、Linux 等实际操作系统内核分析与编程的书籍也非常多,但与操作系统课程内容紧密结合、适于实践教学的书却很少。因此我们萌生了一个想法,能不能编写一本以实际操作系统为素材、以操作系统授课内容为主线、以验证实验为主要手段的实践教学用书,来帮助学生理解操作系统抽象的概念和原理呢?于是编写了本书。

1. 本书内容

本书可分为两部分:第一部分是 Linux 操作和应用编程;第二部分是 Linux 内核编程。

(1) 第一部分为第 1~10 章,主要是为学习过 C 语言、但未接触过 Linux 编程的读者提供一个快速上手的途径。Linux 应用,包括操作与编程,不光在实践中有广泛应用,而且对于理解 Linux 内核也有重要帮助。

第 1、2 章主要介绍 Linux 的基本操作和常用的 Shell 命令。

第 3~7 章是与 Linux 应用编程相关的内容,包含 Linux 平台上的 C 语言开发环境、Makefile、系统时间、多进程程序开发、进程通信等。

第 8、9 章介绍目前 Linux 上流行的 Qt 框架和 MySQL 数据库。

第 10 章综合前面各章知识,设计了一个 Linux 综合实训案例,并给出了相应的实训题目。

(2) 第二部分为第 11~19 章,基本上是按操作系统课程的内容结构进行编排的,目的

是配合操作系统理论教学,使读者对操作系统课程中的重要概念、理论和方法有一个直观、具体、生动的认识。

第 11 章是 Linux 内核的配置与构建,第 12 章介绍 Linux 内核模块编程基本流程。

第 13~16 章对应进程管理,包括 Linux 进程控制块、多线程(进)程、同步机制、进程间通信等。

第 17 章对应内存管理,包括 Linux 物理内存、段页式寻址和虚拟地址空间管理等。

第 18 章对应设备管理,包括 Linux 设备文件、驱动程序等。

第 19 章对应文件系统,包括 Linux 虚拟文件系统、文件系统的加载等。

另外,与本书配套的电子资源中还给出了 Ubuntu 系统的安装方法、Linux 内核常用的系统调用以及 Shell 编程等内容。

本书各章节均有数量不等的配套实验,相应代码均在本书的配套素材中。由于实验较多,读者可以根据具体情况来组合使用;各章节包含的实验请读者参考本书实验目录。

2. 本书使用建议

读者在使用本书时,可以根据具体情况来进行组合安排。

第一部分内容可以作为 Linux 应用与编程课程的相关教材和实验用书。其中,第 2 章可以用于 Linux 基本应用实验,第 3~9 章可以作为 Linux 应用开发实验,其中的第 3、4 章是基础,不可跳过。另外,第 10 章给出了一个可以用于综合实训的基本框架,并且在 10.5 节给出了部分实训题目。

第二部分内容可以作为操作系统课程的配套实验用书。如果读者有 C 语言编程经验,但没有 Linux 编程经验,那么可以选学第一部分的基础内容,然后把重点放在第二部分;如果读者有较多 Linux 应用编程经验,可以直接从第二部分开始。第二部分各章具有较强的独立性,但第 12、13 章是后续各章的基础,请不要跳过。

本书内容以验证性实验为主,课后练习则是以验证实验为基础的设计实验,要求读者自己完成。虽然是以验证性实验为主,但其涉及的内容远不止实验本身,例如在第 17 章的实验 3 中,要把一个变量的物理地址计算出来,就需要把分页机制完整地梳理一遍。强烈建议读者阅读本书时一定要运行、分析电子资源中的源代码,结合操作系统教材理解其原理和机制。电子资源的网址为清华大学出版社(www.tup.tsinghua.edu.cn)本书页面或 <http://os.sdust.edu.cn/linux/>。

另外需要强调的是,本书不是系统讲解 Linux 的书籍,而主要是通过实验来帮助读者更好地掌握操作系统的原理、方法和概念。因此,考虑到教学的方便性和适用性,有些内容并未包含在本书中。例如,本书并未给出系统调用的实验,原因就在于添加一个新的系统调用必须重新编译内核,而这个过程短则半个小时,长则 1 个小时以上,不适于实践教学;类似的原因导致进程调度实验也未出现在本书中。当然读者可以把本书作为一个台阶,进一步深入学习 Linux,到那时你会发现 Linux 原来并非那么让人望而生畏。

本书分工如下:黄玲编写第 1~3 章,李哲编写第 4~6 章、11 章和 19 章,李旭健编写第

7~10 章,房胜编写第 12~18 章。全书由房胜和李旭健统稿。本书编写和出版过程中,得到了清华大学出版社工作人员的大力支持。此外,本书参考了很多文献,既有操作系统的教材,也有 Linux 内核的书籍和网上资料,感谢这些作者。另外,张征亮、孙楠楠、高秀洋、张丛静、李秀丽参与了本书的编写、审校和代码测试工作,在此一并表示感谢。

由于本书涉及内容广泛,且 Linux 内核日渐庞大,不断更新、演变,限于编者的水平,书中难免有不当甚至谬误之处,请各位读者不吝指正,您的支持是我们进一步努力的源动力。

作 者

2015 年 6 月

目 录

第 1 章 Linux 概述	1
1.1 Linux 的发展	1
1.1.1 Linux 概念	1
1.1.2 Linux 和 UNIX 的渊源	1
1.1.3 与 Linux 相关的协议和标准	3
1.2 Linux 的内核架构	4
1.2.1 Linux 操作系统结构	4
1.2.2 Linux 内核体系结构	5
1.2.3 内核版本和获取	6
1.2.4 内核源代码目录结构	7
1.3 Linux 的主要版本	9
1.3.1 Linux 版本介绍	9
1.3.2 Ubuntu 的首次使用	10
1.4 本章小结	15
习题	15
第 2 章 Linux 基本命令与应用	16
2.1 认识命令行	16
2.1.1 Terminal	16
2.1.2 命令用法初体验	18
2.1.3 其他虚拟终端	20
2.1.4 相关概念	22
2.2 使用文本文件	24
2.2.1 创建文本文件	24
2.2.2 查看文本文件内容	27
2.2.3 查找及统计	28
2.3 目录和文件	30
2.3.1 目录及文件的基本操作	30
2.3.2 文件权限	35
2.4 管理用户和用户组	39
2.4.1 相关配置文件	39
2.4.2 相关操作	40

2.5 其他常见命令	42
2.5.1 挂载和卸载设备	42
2.5.2 安装和卸载软件	44
2.6 本章小结	45
习题	46
练习	46
第3章 从 Hello Linux 程序开始	47
3.1 Hello Linux	47
3.1.1 hello_linux 的诞生	47
3.1.2 Linux 平台 C 语言编码风格	48
3.1.3 开发工具	49
3.2 gcc 编译	52
3.2.1 单文件的编译	52
3.2.2 多个源文件的编译	55
3.2.3 其他介绍	56
3.3 gdb 调试	57
3.3.1 gdb 介绍	58
3.3.2 使用 gdb 调试 C 语言文件	59
3.4 本章小结	64
习题	64
练习	64
第4章 利用 Makefile 管理一个工程	65
4.1 第一个 Makefile	65
4.1.1 利用 make 编译一个程序文件	65
4.1.2 利用 make 编译多个程序文件	66
4.2 Makefile 的基本概念与规则	68
4.2.1 Makefile 的基本概念	68
4.2.2 规则	69
4.3 本章小结	72
习题	72
练习	72
第5章 Linux 系统中的时间	73
5.1 时间表示	73
5.1.1 Linux 系统时间	73
5.1.2 Linux 应用程序时间函数	74
5.2 利用程序显示系统时间	76

5.2.1 常用时间函数	76
5.2.2 高级时间函数	78
5.3 时间的测量与计时	79
5.3.1 时间测量	79
5.3.2 计时器	80
5.4 本章小结	81
习题	81
练习	81
第 6 章 多进程程序开发	82
6.1 进程概念	82
6.2 进程的创建	83
6.3 连续调用多次 fork 函数	85
6.4 启动外部程序	86
6.5 本章小结	87
习题	87
练习	87
第 7 章 进程间通信	88
7.1 概述	88
7.2 管道通信	89
7.2.1 管道概述	89
7.2.2 无名管道	90
7.2.3 命名管道	94
7.3 套接字通信	99
7.3.1 用文件套接字实现本地进程通信	99
7.3.2 用网络套接字实现网络进程通信	103
7.4 本章小结	106
习题	106
练习	106
第 8 章 利用 Qt 开发 GUI 应用程序	107
8.1 Qt 及 Qt Creator	107
8.1.1 Qt 简介	107
8.1.2 Qt Creator	108
8.1.3 Qt 的安装和启动	109
8.1.4 Qt Creator 的界面组成	110
8.2 用 Qt Creator 完成一个 GUI 项目	112
8.2.1 创建 Qt GUI 项目	112

8.2.2	程序的运行	115
8.3	信号和槽	116
8.3.1	信号和槽的概念	116
8.3.2	用信号-槽机制响应 GUI 事件	116
8.3.3	关于信号-槽的进一步说明	117
8.4	Qt 设计师	118
8.4.1	简介	118
8.4.2	Qt 设计师的功能	119
8.5	本章小结	119
	习题	120
	练习	120
第 9 章	MySQL 数据库	121
9.1	安装 MySQL	121
9.2	MySQL 的基本用法	122
9.2.1	MySQL 管理	122
9.2.2	数据库操作	122
9.2.3	数据类型	124
9.2.4	表操作	125
9.2.5	创建一个数据库	127
9.3	使用 C 语言访问 MySQL 数据库	129
9.3.1	连接数据库	129
9.3.2	执行 SQL 语句	130
9.3.3	处理数据	135
9.4	本章小结	137
	习题	137
	练习	137
第 10 章	Linux 综合应用	138
10.1	概述	138
10.1.1	系统需求	138
10.1.2	本章内容结构	139
10.2	原型设计	139
10.2.1	添加资源文件	139
10.2.2	界面设计	139
10.2.3	界面布局	142
10.2.4	添加动作	142
10.3	系统设计	144
10.3.1	系统架构	145

10.3.2	客户端功能设计	145
10.3.3	服务器功能设计	145
10.4	系统实现	146
10.4.1	数据结构(通信协议)	146
10.4.2	客户端实现	146
10.4.3	服务器端实现	147
10.4.4	几点说明	148
10.5	Linux 应用综合实训	148
10.6	本章小结	149
第 11 章	构建 Linux 内核系统	150
11.1	概述	150
11.2	内核初始化	151
11.3	内核配置	152
11.4	内核构建	153
11.5	本章小结	154
	练习	154
第 12 章	添加最简单的 Linux 内核模块	155
12.1	用户态与内核态	155
12.1.1	C/C++ 应用程序的运行机制	155
12.1.2	Linux 内核模块	156
12.2	添加最简单的 Linux 内核模块	157
12.2.1	LKM 代码框架	157
12.2.2	LKM 编译	159
12.2.3	kello.c 的编译、添加和删除	160
12.2.4	LKM 与 C 应用程序的差异	161
12.3	printk 和某些常见宏	162
12.3.1	实时显示内核模块运行信息	162
12.3.2	显示位置信息	163
12.4	本章小结	163
	练习	163
第 13 章	基于 proc 的 Linux 进程控制块信息读取	164
13.1	proc 伪文件系统	164
13.1.1	proc 中的文件	164
13.1.2	proc 中文件的内容	165
13.1.3	proc 伪文件系统介绍	167
13.2	Linux 中的进程控制块	168

13.2.1	Linux 进程控制块 task_struct	169
13.2.2	进程重要信息解读	170
13.3	通过 proc 读取 Linux 进程信息	172
13.3.1	创建 proc 文件	172
13.3.2	基于 seq_file 机制的 proc 文件操作	173
13.3.3	task_struct 信息读取过程	176
13.3.4	tasklist 内核模块编译和添加	178
13.3.5	tasklist 内核模块工作流程	178
13.4	task_struct 重要信息	180
13.4.1	Linux 进程调度策略	180
13.4.2	进程优先级	181
13.4.3	进程控制块中的其他信息	182
13.5	向 proc 文件写入数据	183
13.5.1	用户空间和内核空间之间传递数据	183
13.5.2	内核空间内存分配	183
13.5.3	proc 文件的写操作函数	185
13.6	本章小结	185
	习题	186
	练习	186
第 14 章	POSIX 多任务及同步机制	187
14.1	fork 创建进程	187
14.1.1	fork 创建进程的流程	187
14.1.2	fork/exec 创建进程的流程	190
14.1.3	fork 进阶问题	192
14.2	POSIX 线程机制	194
14.2.1	POSIX 概述	194
14.2.2	POSIX 线程创建	195
14.3	POSIX 多线程及同步机制	198
14.3.1	多个线程的资源竞争访问	198
14.3.2	POSIX 同步机制	200
14.4	条件变量与生产者-消费者问题	202
14.4.1	同步与互斥	202
14.4.2	POSIX 条件变量	203
14.4.3	条件变量在生产者-消费者问题中的应用	204
14.5	本章小结	206
	习题	207
	练习	208

第 15 章 用户态和内核态信号量	209
15.1 信号量与同步问题	209
15.1.1 信号量概述	209
15.1.2 同步问题	210
15.2 POSIX 信号量	212
15.2.1 无名信号量	213
15.2.2 有名信号量	214
15.2.3 POSIX 信号量用于线程同步问题	215
15.2.4 POSIX 信号量用于进程间同步	218
15.2.5 Linux 中的信号量技术	223
15.3 内核信号量和内核线程	224
15.3.1 Linux 内核信号量	224
15.3.2 Linux 内核线程	224
15.3.3 内核信号量和线程的例子	226
15.3.4 Linux 内核同步技术	228
15.4 本章小结	229
习题	229
练习	229
第 16 章 基于共享内存的进程间通信	231
16.1 共享内存	231
16.2 共享内存映射文件	234
16.2.1 单个进程的内存映射文件	234
16.2.2 多个进程间的内存映射文件的同步	235
16.3 POSIX 共享内存对象	237
16.4 本章小结	239
习题	239
练习	240
第 17 章 Linux 内存管理	241
17.1 Linux 物理内存管理机制	241
17.1.1 内存结点 node	242
17.1.2 内存结点 zone	242
17.1.3 物理页框 page	243
17.2 IA32 的寻址机制	244
17.2.1 IA32 的段机制	244
17.2.2 IA32 的页面映射机制	247
17.2.3 IA32 中的控制寄存器以及 PAE、PSE	248

17.3	IA32 结构上的 Linux 地址映射机制	250
17.3.1	Linux 中段地址映射机制	250
17.3.2	IA32 Linux 段地址映射实验	252
17.3.3	IA32 Linux 页地址映射	256
17.3.4	IA32 Linux 页地址映射实验	259
17.4	Linux 进程地址空间	263
17.4.1	Linux 中进程的虚拟地址空间	263
17.4.2	获取进程虚拟地址空间信息	267
17.4.3	Linux 中进程的虚拟存储区域 vma	268
17.4.4	获取进程的虚拟内存区域信息	270
17.4.5	Linux 中进程、内存和文件的关系	272
17.5	本章小结	274
	习题	275
	练习	276
第 18 章	Linux 设备驱动程序	277
18.1	概述	277
18.1.1	设备管理基本概念	277
18.1.2	Linux 字符设备管理	279
18.2	字符设备 CMOS 驱动程序	282
18.2.1	CMOS RTC 信息	282
18.2.2	获取 CMOS RTC 信息的驱动程序内核模块	282
18.2.3	CMOS RTC 驱动程序内核模块测试	284
18.3	基于内存映射的杂项设备驱动程序	286
18.3.1	Linux 中的杂项设备	286
18.3.2	设备驱动中的内存映射	286
18.3.3	基于内存映射的杂项设备驱动程序	287
18.3.4	测试	289
18.4	本章小结	289
	习题	290
	练习	290
第 19 章	Linux 虚拟文件系统	292
19.1	概述	292
19.1.1	VFS 在 Linux 中的作用	293
19.1.2	VFS 支持的文件系统类型	293
19.1.3	VFS 的基本数据结构	294
19.2	VFS 对象的操作	296
19.2.1	注册文件系统	296

19.2.2	文件系统装载	297
19.2.3	与进程相关的文件系统数据结构	298
19.2.4	从当前进程访问 Linux 内核 VFS 文件系统	299
19.3	proc 文件系统	300
19.3.1	主要数据结构	300
19.3.2	proc 文件系统的操作	302
19.4	本章小结	303
习题		303
练习		303
参考文献		304

第2章 Linux 基本命令与应用

实验 1: 认识命令行的相关实验	23
实验 2: 创建文本文件	26
实验 3: 查看文本文件	28
实验 4: 文本文件查找及统计	29
实验 5: 目录及文件基本操作	35
实验 6: 文件权限	38
实验 7: 管理用户和用户组	42
实验 8: 其他常见操作	45

第3章 从 Hello Linux 程序开始

实验 1: 简单程序开发	52
实验 2: 单步编译和多步编译	57
实验 3: 浏览 gdb 内置命令	59
实验 4: 利用 gdb 调试程序	63

第4章 利用 Makefile 管理一个工程

实验 1: Makefile 与命令行编译的比较	68
实验 2: 编写 Makefile	72

第5章 Linux 系统中的时间

实验 1: 编程显示系统时间	79
实验 2: Linux 中的时间测量	79
实验 3: Linux 中的计时器	81

第6章 多进程程序开发

实验 1: 利用 fork 创建进程	85
实验 2: 连续调用多次 fork 函数	86
实验 3: 启动外部程序	87

第7章 进程间通信

实验 1: 管道通信	99
------------------	----

实验 2: 文件套接字通信	103
实验 3: 网络套接字通信	106

第 8 章 利用 Qt 开发 GUI 应用程序

实验 1: Qt 的安装与启动	112
实验 2: 创建 Qt GUI 项目	115
实验 3: 信号-槽机制	118

第 9 章 MySQL 数据库

实验 1: MySQL 数据库操作	124
实验 2: MySQL 表操作	127
实验 3: 创建一个 MySQL 数据库	129
实验 4: 用 C 语言访问 MySQL 数据库	136

第 12 章 添加最简单的 Linux 内核模块

实验 1: 添加最简单的内核模块 kello	162
实验 2: 内核模块输出信息显示	162

第 13 章 基于 proc 的 Linux 进程控制块信息读取

实验 1: 测试 proc 文件系统功能	168
实验 2: 创建显示系统进程信息的 proc 模块	179
实验 3: 显示 Linux 进程控制块中更多的信息	182

第 14 章 POSIX 多任务及同步机制

实验 1: Linux 进程创建	193
实验 2: POSIX 线程创建	198
实验 3: POSIX 线程互斥和参数传递	202
实验 4: 使用 POSIX 条件变量实现线程同步	206

第 15 章 用户态和内核态信号量

实验 1: 使用 POSIX 信号量实现线程同步	217
实验 2: 使用 POSIX 信号量实现进程同步	223
实验 3: 创建 Linux 内核线程并使用内核信号量实现同步	228

第 16 章 基于共享内存的进程间通信

实验 1: 使用内存映射文件实现进程间通信	237
实验 2: 使用共享内存对象实现进程同步	239