



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向工程教育的本科计算机类专业系列教材

Operating System  
(Fourth Edition)

# 计算机 操作系统教程

(第4版)

左万利 王英 编著

高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向工程教育的本科计算机类专业系列教材

TP316/658

2019

Operating System  
(Fourth Edition)

# 计算机 操作系统教程 (第4版)

左万利 王英 编著

北方工业大学图书馆



C00636461

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书主要讲述操作系统的基本概念、基本原理、设计方法和实现技术。在经典内容的基础上,突出介绍了近年来操作系统的最新进展,如 Java 管理、触屏、多核与超线程、实时调度与多处理器调度、多级页表、快速文件系统、RAID 技术、分布协同、集群计算与云计算、微内核与嵌入式系统、操作系统安全等,并通过中断把操作系统各部分之间有机联系起来,深刻揭示操作系统的运作机理。主要章后附有现代系统方法案例,涉及 Linux、Windows 10 等流行操作系统,并对 UNIX 系统做了比较全面的分析。

本书第 4 版在选材和组织上进行了认真推敲,力求做到概念准确、知识完整、层次清晰、系统性强、理论联系实际、富有启发性,可用作高等学校计算机专业及相关专业教材,也可供相关技术人员阅读使用,对准备报考研究生的学生具有参考价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机操作系统教程 / 左万利, 王英编著. —4 版  
—北京: 高等教育出版社, 2019.6  
ISBN 978-7-04-051340-0

I. ①计… II. ①左… ②王… III. ①操作系统-高等学校-教材 IV. ①TP316

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 024700 号

策划编辑 张海波  
插图绘制 于博

责任编辑 张海波  
责任校对 陈杨

封面设计 赵阳  
责任印制 田甜

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印刷 人卫印务(北京)有限公司  
开本 787mm × 1092mm 1/16  
印张 28  
字数 630 千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 1994 年 9 月第 1 版  
2019 年 6 月第 4 版  
印 次 2019 年 6 月第 1 次印刷  
定 价 52.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 51340-00



左万利

吉林大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师、工学博士。曾作为高级访问学者在美国路易斯安那州立大学从事合作研究。主要研究领域包括操作系统、数据库、Web 智能。作为负责人承担国家自然科学基金项目 3 项，省部级项目 6 项，在国内外知名刊物和会议上发表论文 180 余篇，多被 SCI 或 EI 检索，编写教材和论著 7 部。曾获国家级教学成果二等奖、教育部优秀教材一等奖、教育部科技进步三等奖等多项奖励。



本书配套的数字资源使用方法如下：

1. 计算机访问 <http://abook.hep.com.cn/187708>，或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
2. 注册并登录，进入“我的课程”。
3. 输入教材封底防伪标签上的数字课程账号（20 位密码，刮开涂层可见），或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码，完成课程绑定。
4. 单击“进入课程”按钮，开始本数字课程的学习。



扫描二维码  
下载 Abook 应用

课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制，部分内容无法在手机端显示，请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题，请发邮件至 [abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。

# 前 言

《计算机操作系统教程》(国家“八五”规划教材,高等教育出版社,1994年9月)自出版以来,被许多高校采用,得到了广大读者的好评,曾获国家级教学成果二等奖、国家教委优秀教材一等奖、国家教委科技进步三等奖等多项奖励。该书的第2版(百门精品课程教材,高等教育出版社,2004年7月)在保持第一版经典风格的同时,对教材内容进行了系统的组织与更新,获得了吉林省普通高等学校优秀教材一等奖。该书第3版(普通高等教育“十一五”国家级规划教材,高等教育出版社,2010年7月)出版至今已有8年,为全面反映操作系统最新发展,在高等教育出版社的支持下,我们本着“更新、完善、提高”的原则,规划并编写了第4版教程,谨将其献给广大读者和操作系统课程的师生,力图满足“十三五”及后期国内操作系统教学的需要。

本书第4版继承前三版的特色,既致力于讲授经典操作系统基本概念、基本理论、设计与实现技术,又注重与实际流行系统如UNIX、Linux、Windows中的成熟算法密切结合,同时把操作系统最新成果融入教材之中,紧跟操作系统发展的前沿,使教材体现知识的先进性、完整性、系统性和实用性。相比第3版,本书第4版主要做了如下修订。

(1) 对中断驱动的操作系统运作机理,从目态进程中断进入操作系统,到中断处理完毕回到目态,系统内部可能发生哪些情况,每种情况下操作系统如何处理,包括中断嵌套与系统的变化,中断与进程切换之间的关系,以及中断现场与进程切换现场各自的保存位置等,进行了细致的阐述,并首次给出了进程状态转换的分解图,试图把“操作系统是如何运转的”这个关键问题交代清楚,这是作者多年教学中一直孜孜以求的一个目标。

(2) 根据操作系统发展,系统地增补和更新了知识,增加了触屏界面、双态操作、线程汇聚、中断处理逻辑、最小裕度实时调度、Windows 10多处理器调度、存储障碍互斥、屏障、竞争条件、原子变量、Java管程、事务存储器、优先级倒置、多核与多处理器调度、下次适应存储分配、交换、非均匀存储器访问、快表可达、X86-64位体系结构下的存储管理、同步与异步I/O、写时复制、光盘物理结构与读写原理、固态硬盘、内存映射方式I/O、缓冲与缓存、ARM体系结构下的iOS与Android操作系统简介等内容。为提升读者分析问题与解决问题能力,新版教程增加了一些例题,如考虑死锁、饥饿、并行度三个要求的“过河问题”。为使存储管理部分目录分级与知识点呈现更加清晰,将原第六章“存储管理”分成了两章,即“主存储器管理”和“虚拟存储系统”。

(3) 本书第十二章精简并整合了上版教材中“网络操作系统与分布式操作系统”与“多核操作系统与多处理器操作系统”两章的内容,并增添了集群操作系统、云计算操作系统、嵌入式操作系统等内容,命名为“操作系统新技术”,涵盖了近年来操作系统发展的前沿技术,属于

操作系统高阶内容，供有兴趣研究操作系统的师生和读者选讲或选读。

(4)“操作系统理论”一章是已故作者周长林老师在操作系统理论模型上的一个特别贡献，可与队列模型相并列。该模型以自动机理论为基础，形式化地描述进程管理与资源管理，在前三版中得到对操作系统理论感兴趣读者的肯定，对深化操作系统理论研究起到积极作用。考虑到教学学时限制以及本书的普及性，本版删除了这一章，有兴趣的读者可以阅读本书之前的3个版本。

本书第十三章系统地介绍了UNIX第6版的核心技术，应当说现代版UNIX以及其后的Solaris和Linux等大大地发展了第6版，但本书仍以介绍第6版为主，其目的是想帮助读者阅读UNIX源代码，使读者在头脑中对操作系统的运作机理形成一个完整的印象，毫无疑问以长度10 000行的UNIX第6版为教学首选，而且这一版中所采用的一些技术，如调用fork创建子进程机制、将设备作为特殊文件、缓冲与缓存等至今看来仍然熠熠生辉。

本书自1994年出版以来，在吉林大学计算机本科教学中已经持续使用了25年，其课堂教学一般为64学时（4学分）。根据为学生减负的普遍要求，自2018级学生开始，本课程课堂教学将减少为48学时（3学分），外加32学时实验（1学分）。为适应这一变化，本书第4版在系统更新的同时，尽量控制篇幅，以适应新时期操作系统教学的学时要求，其中第十三章UNIX实例分析建议嵌入到原理的各个章节中讲授。

本书由左万利负责整体策划，王英增补和整合了第十二章，并增改了第八章与第九章中的少量内容，其余章节由左万利执笔。本书作者多年从事操作系统教学和研究，教材中许多内容都融入了作者对操作系统的理解和体会，能在高等教育出版社平台上与读者分享在操作系统领域的教学经验，作者感到很荣幸。本教材部分章节参考和借鉴了书中所列的部分操作系统教材和著作，谨向作者表示感谢和敬意。

我们在新版教程的修订过程中，对内容与叙述等进行了认真的推敲与完善，力图做到精准、缜密，并最大限度减少笔误。疏漏之处，敬请读者不吝赐教，作者的电子邮箱为wanli@jlu.edu.cn。

作者

2019年1月于吉林大学

## 第3版前言

《计算机操作系统教程》自1994年出版以来,被许多高等学校采用,得到广大读者的好评,曾获国家级教学成果二等奖、国家教委优秀教材一等奖、国家教委科技进步三等奖等多项奖励。该书的第2版(2004年7月出版)在保持第1版经典风格的同时,对教材内容进行了系统的组织与更新,获得吉林省普通高等学校优秀教材一等奖。作为计算机学科一个比较活跃的领域,近6年来操作系统经历了较快的发展过程。为适应新时期“操作系统”课程教学的新要求,编者根据最新的“操作系统”课程教学大纲,在多年教学经验的基础上,用了将近2年的时间,本着“充实、完善、提高”的编写原则,对第2版教材进行了比较系统的修订,并作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材出版。

在编写特色方面,本教材既致力于讲授经典操作系统的基本概念、基本理论、设计方法与实现技术,又注重与实际流行系统如UNIX、Linux、Windows中的成熟算法密切结合,同时把操作系统的最新成果融入教材之中,将学生带到操作系统发展的前沿,使教材体现知识的完整性、系统性、先进性和实用性。

在内容方面,本书第2版的篇幅适中,略偏少。新版教材对第2版教材未作大的删减,主要是增加和修订了一些内容,以更加完整地覆盖“操作系统”课程的知识点。所增加的内容主要有研究操作系统的几种观点、处理器阵发时间推算方法、带权周转时间、高级调度、前驱图与并发、Dekker互斥算法、Peterson互斥算法、PV操作实现、信号量集与SP操作、吸烟者问题、打印机管理、简单组合资源死锁的静态分析、同种组合资源死锁的必要条件、存储管理部件、下次适应算法、局部性原理、虚拟段式工作过程、用户打开文件表与系统打开文件表之间的联系、差分转储、磁盘输入输出参数、虚拟设备实例、进程驱逐、socket通信实例、间谍软件、UNIX文件符号链接等。所修订的内容主要有处理器调度指标与调度算法、地址映射示意图与步骤、基于杂凑技术的反置页表、二次机会与时钟调度算法、工作集计算方法、段的动态连接、伙伴堆存储分配算法、虚拟段页式工作原理、直接存储器存取、磁盘调度、RAID技术、事件排序、远程过程调用的实现、分布式死锁检测、计算机病毒、可信系统、UNIX缓冲与缓存等。为提高学生分析和解决问题的能力以及考研究生的应试能力,书中新增加了一些计算型例题,同时在各章末尾增加了一些主观性习题,丰富了题库。

考虑近年来多核芯片和多核系统的普及,新版教材增加了第十章(多核操作系统与多处理器操作系统),力图反映操作系统的最新发展状况。主要内容包括多核处理器架构、多核存储访问、多核调度算法、多核并发控制、高速缓存的一致性、多核启动过程等。

在理论模型方面,新版教材作了较大的修改。第2版教材中的描述是非形式化的,本版教材推出一个基于自动机的、完全形式化的理论模型。该模型基于资源改造的观点,提出I型、

II型、III型资源,给出进程、互斥、同步、合作、死锁等概念的形式化描述,使操作系统建立在坚实的理论基础之上。第十四章的读者对象主要是对操作系统理论感兴趣的读者,如果学时有限,在课堂上可以不讲,这不会影响学生对“操作系统”课程的理解和掌握。

在教材知识结构和组织方面,编者认为第2版教材的章节次序是合理的,本版教材除增加一些章节外,未在结构上对章节作大的调整。

本书由左万历编写第一章~第九章、第十一章~第十三章,第十四章由周长林编写;第十章由彭涛编写。本教材的部分章节引用了参考文献中所列的中、英文操作系统教材和著作,在此向各位作者致以衷心的感谢和崇高的敬意。

本书的电子课件可以通过操作系统教学网站(网址 <http://ccst.jlu.edu.cn/dbwi/os>)获取。本教材建议讲授64学时,其中第九章、第十章和第十四章可以选讲,第十三章建议嵌入原理性的章节中讲授,以使教学更为生动。本书配套有《计算机操作系统教程(第3版)习题与实验指导》。

我们深知,编写一部好的教材是不容易的。为此我们付出了很大的努力,希望我们的工作成果能够得到广大师生的认可。但是,由于编者的水平和时间有限,错误与不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正。编者的电子邮箱为 [wanli@jlu.edu.cn](mailto:wanli@jlu.edu.cn)。

编者

2010年3月于吉林大学

## 第2版前言

《计算机操作系统教程》(高等教育出版社,1994年9月第1版)出版至今已近10年,这期间操作系统从理论到实践上都经历了一个较大的发展过程。本书第2版的主要目标是根据新的教学大纲,在保持原教程经典风格的同时,对操作系统的教学内容进行系统而全面的更新,以适应新世纪国内操作系统课程教学需要。

新版《计算机操作系统教程》增加了线程、实时调度与多处理机调度、自旋锁与多处理机互斥、条件临界区、饥饿与饿死、两阶段锁、同步方法、多级页表与倒置页表、伙伴堆内存分配、内存映射文件、日志结构文件、快速文件系统、Ext2fs、DMA、RAID技术、稳定存储器、进程迁移、RMI、分布式文件系统、保护与安全、嵌入式与微内核、面向对象操作系统设计方法等新内容,同时删除了作业控制语言等过时内容和并发程序设计等外延性成分,保证新版教程在篇幅上增加适当,适合国内操作系统课程教学学时要求。

为使理论与实际更好地结合,新版教程在每章后增加了流行系统(如Windows 2000/XP和Linux系统)中采用的具体算法和实现技术。全书最后比较全面地介绍了UNIX系统,给出了完整的数据结构以及核心算法。

新版教程还对部分章节的次序进行了重新安排和组织,将作业、进程、线程合并,作为主体在第二章中集中讲述;将中断与处理机调度这两个相互承接、密不可分的内容独立出来构成第三章;将互斥、同步与通讯、死锁与饥饿提前,分别构成第四章和第五章,使章节篇幅适中,逻辑关系连贯;将保护与安全纳入第十章“操作系统管理”;另外,原版第二章“操作系统理论”经过精炼后移到最后,更加方便教学取舍。

新版教程对重要术语进行了认真推敲,并以定义形式给出,明确了“系统开销”、“忙式等待”等概念,给出了地址映射的数学意义。新版教程对经典内容进行了认真的审定,使其更加严谨。除涉及管程语言和Ada语言的成分外,所有算法均由Pascal语言改为C语言描述。另外,新版教程特别注重能力和素质培养,各章中都安排有启发性问题,留给学生充分的思考空间。

作为高等教育出版社立体化精品课程教材,作者开发了与之配套的远程教学系统,并开通了相关教学网站(<http://info.jlu.edu.cn/~cs/os>)。为方便教学,作者还制作了与新版教材配套的多媒体教学课件,可以通过下载方式获取。我们将对网站进行动态维护并对课件进行周期性版本更新。与教材配套的操作系统习题解答与实验指导也将在近期完成。

新版教程力求更加准确地讲述操作系统的基本概念、基本原理、设计方法和实现技术,全面反映操作系统近年来的最新发展,深入介绍流行操作系统的核心算法。教材中部分章节引用了参考文献中列出的国外著作中的一些内容,谨在此向作者致以衷心的感谢和深深的敬意。

本书第1版曾获得国家教学成果二等奖、国家教委第三届优秀教材一等奖、国家教委科

技进步三等奖等多项奖励。新版教材得到高等教育出版社立体化精品课程教材建设项目的支持，在此深表谢意。

本书第2版由左万历负责整体规划并执笔前十二章，第十三章由周长林编写。由于作者水平所限，加之时间仓促，若有错误与不当之处，敬请读者不吝赐教。作者的电子信箱为：

wanli@jlu.edu.cn。

作者

2004年3月于长春

# 第 1 版前言

本书是根据国家教育委员会 1992 年颁发的计算机软件专业操作系统课程教学基本要求，结合作者多年教学经验和科研成果，参考国内外操作系统最新发展，联系目前我国操作系统教学实际编写而成的。在编写过程中，我们力求做到体系完整、结构合理、内容丰富、取舍得当、概念准确、叙述清晰、观点明确、深入浅出、适用面广、便于自学，适应 20 世纪 90 年代高等学校计算机专业操作系统教学的需要。

全书共分十四章：第一章是对操作系统的概括性描述；第二章给出操作系统的理论模型；第三章至第六章讲述资源管理，包括处理机管理、存储管理、文件管理、设备管理等；第七章和第八章讲述任务管理，包括作业管理和进程管理；第九章讨论操作系统的体系结构；第十章介绍网络与分布式操作系统；第十一章讲述并发程序设计；第十二章讲述操作系统管理；第十三章介绍 UNIX 操作系统；第十四章简述几个常见的操作系统。

考虑近年来操作系统在网络、分布式等方面有了较大的发展，为提高学生的适应能力，除基本内容外，本书还增加了一些新的内容，具体包括：（1）网络与分布式操作系统，介绍网络和分布式操作系统的基本原理以及与传统操作系统之间的联系和差别；（2）并发程序设计，在着重阐明操作系统对并发程序设计所应提供的支持的基础上，概述几种并发程序设计语言，并给出若干并发程序设计的例子；（3）操作系统管理，讲述系统管理员和操作员所应掌握的知识；（4）UNIX 操作系统，描述 UNIX 操作系统所采用的主要技术和特点，既使理论联系实际，又使读者对这一著名的系统有一定程度的了解。这样一来，全书篇幅较长，如因学时限制不能全部讲授，对于增加的内容可以根据具体情况选择其中部分章节。

教材的第二章处于比较特殊的地位，它给出了操作系统的理论模型。考虑到易于讲解和接受，此模型不是严格形式化的。本章的目的是使学生在在学习操作系统具体内容之前，先对操作系统的基本知识——资源、进程、资源共享、进程并发执行等有一个理性的认识，以指导其后各章具体内容的学习。由于本章具有较强的独立性，可以安排在第九章之后讲授，作为对前面具体内容的理论总结。本章也可以不讲，这不会影响其他章节的学习。

对于具体教学安排提出如下建议，仅供参考：

（1）用 48~54 个学时讲授基本内容，包括第一章及第三章至第九章。其中某些节（标记※号的）可以选讲。有些内容可以由学生自学。

（2）如有更多的学时，可以根据教学目标选讲其余各章，其中第十三章应当优先介绍。

本书由周长林负责总体策划以及第二章的编写，其余各章均由左万历执笔。

限于作者水平，错误与不妥之处在所难免，恳请读者给予批评指正。  
在本书出版之际，南京大学计算机科学系谭耀铭副教授在百忙之中审阅了本书，并提出许多宝贵意见和有益的建议，在此深表谢意。

作者

1993年8月于吉林大学

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581999 58582371 58582488

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务与版权管理部

邮政编码 100120

## 防伪查询说明

用户购书后刮开封底防伪涂层，利用手机微信等软件扫描二维码，会跳转至防伪查询网页，获得所购图书详细信息。也可将防伪二维码下的20位密码按从左到右、从上到下的顺序发送短信至106695881280，免费查询所购图书真伪。

## 反盗版短信举报

编辑短信“JB，图书名称，出版社，购买地点”发送至10669588128

## 防伪客服电话

(010) 58582300

# 目 录

第一章 操作系统概述	1	1.5.2 堆与栈	17
1.1 操作系统的概念	1	1.5.3 寄存器	18
1.1.1 操作系统的地位	1	1.5.4 特权指令与非特权指令	18
1.1.2 操作系统的作用	2	1.5.5 处理器状态及状态转换	19
1.1.3 操作系统的定义	3	1.5.6 地址映射机构	19
1.2 操作系统的历史	3	1.5.7 存储保护设施	20
1.2.1 操作系统的产生	3	1.5.8 中断装置	20
1.2.2 操作系统的完善	5	1.5.9 通道与DMA控制器	20
1.2.3 操作系统的发展	6	1.6 操作系统的界面形式	20
1.3 操作系统的特性	7	1.6.1 交互终端命令	21
1.3.1 并发性	7	1.6.2 图形用户界面	21
1.3.2 共享性	8	1.6.3 触屏用户界面	21
1.3.3 异步性	8	1.6.4 作业控制语言	21
1.3.4 虚拟性	8	1.6.5 系统调用命令	22
1.4 操作系统的分类	8	1.7 操作系统的运行机理	22
1.4.1 多道批处理操作系统	8	1.8 研究操作系统的几种观点	23
1.4.2 分时操作系统	9	1.8.1 进程观点	23
1.4.3 实时操作系统	10	1.8.2 资源管理观点	23
1.4.4 通用操作系统	11	1.8.3 虚拟机观点	24
1.4.5 单用户操作系统	12	1.9 系统举例	24
1.4.6 网络操作系统	12	1.9.1 Linux系统	24
1.4.7 分布式操作系统	13	1.9.2 Windows 10系统	25
1.4.8 多处理器操作系统	13	习题一	25
1.4.9 集群操作系统	14	第二章 进程、线程与作业	27
1.4.10 云计算操作系统	14	2.1 多道程序设计	27
1.4.11 嵌入式操作系统	15	2.1.1 单道程序设计的缺点	27
1.4.12 多媒体操作系统	16	2.1.2 多道程序设计的提出	28
1.4.13 智能卡操作系统	16	2.1.3 多道程序设计的问题	30
1.5 操作系统的硬件环境	16	2.2 进程的引入	31
1.5.1 定时装置	16		

2.2.1	进程的概念	31	3.1.7	中断处理例程	56
2.2.2	进程状态及状态转换	31	3.2	处理器调度	62
2.2.3	进程控制块	32	3.2.1	处理器调度算法	62
2.2.4	进程的组成与上下文	33	3.2.2	处理器调度时机	69
2.2.5	进程的队列	34	3.2.3	处理器调度过程	71
2.2.6	进程的类型和特性	35	3.3	调度级别与多级调度	71
2.2.7	进程间的相互联系与 相互作用	36	3.3.1	交换与中级调度	72
2.2.8	进程的创建、撤销与汇聚	36	3.3.2	作业与高级调度	72
2.2.9	进程与程序的联系和差别	37	3.4	实时调度	74
2.3	线程与轻进程	38	3.4.1	最早截止期优先调度	76
2.3.1	线程的引入	38	3.4.2	单调速率调度	76
2.3.2	线程的概念	38	3.4.3	最小裕度优先调度	77
2.3.3	线程的结构	38	3.5	系统举例	77
2.3.4	线程控制块	40	3.5.1	Linux进程调度	77
2.3.5	线程的实现	40	3.5.2	Windows 10线程调度	78
2.3.6	线程的应用	42	习题三		80
2.4	作业	43	第四章	互斥、同步与通信	83
2.4.1	批处理作业	43	4.1	并发进程	83
2.4.2	交互式作业	44	4.1.1	前驱图的定义	83
2.5	系统举例	45	4.1.2	顺序程序及其特性	84
2.5.1	Java线程	45	4.1.3	并发程序及其特性	84
2.5.2	Linux进程与线程	46	4.1.4	程序并发执行的条件	86
2.5.3	Windows 10的进程、 线程与纤程	47	4.1.5	并发程序的表示	86
习题二		48	4.1.6	与时间有关的错误	87
第三章	中断与处理器调度	49	4.2	进程互斥	88
3.1	中断与中断系统	49	4.2.1	共享变量与临界区	88
3.1.1	中断概念	49	4.2.2	临界区与进程互斥	89
3.1.2	中断装置	49	4.2.3	进程互斥原则	90
3.1.3	中断处理逻辑	53	4.2.4	进程互斥的软件实现	91
3.1.4	现场级别与保存位置	54	4.2.5	进程互斥的硬件支持	97
3.1.5	嵌套中断与系统栈	55	4.3	进程同步	101
3.1.6	进程状态转换的分解图	55	4.3.1	进程同步的概念	102
			4.3.2	进程同步机制	103
			4.3.3	信号量与PV操作	103

4.3.4 条件临界区 .....	112	5.10 鸵鸟算法 .....	166
4.3.5 管程 .....	114	5.11 有关问题的讨论 .....	166
4.3.6 会合 .....	128	5.11.1 关于充要性算法 .....	166
4.3.7 事务存储器 .....	137	5.11.2 关于消耗型资源问题 .....	166
4.4 进程高级通信 .....	138	5.11.3 关于可剥夺资源问题 .....	167
4.4.1 进程间通信的概念 .....	138	5.11.4 关于两阶段锁 .....	167
4.4.2 进程间通信的模式 .....	138	5.12 饥饿与饿死 .....	168
4.4.3 直接方式 .....	139	5.13 活锁 .....	169
4.4.4 间接方式 .....	142	5.14 优先级倒置 .....	169
4.5 系统举例 .....	144	5.15 可复用资源死锁的静态分析 .....	170
4.5.1 Linux进程间通信 .....	144	5.16 同种组合资源死锁的必要条件 .....	173
4.5.2 Windows 10的并发控制 .....	146	5.17 死锁与饥饿的例子 .....	174
习题四 .....	147	5.18 系统举例 .....	179
<b>第五章 死锁与饥饿 .....</b>	<b>152</b>	习题五 .....	179
5.1 死锁的概念 .....	152	<b>第六章 主存储器管理 .....</b>	<b>183</b>
5.2 死锁的类型 .....	153	6.1 存储管理的功能 .....	183
5.2.1 竞争资源引起的死锁 .....	153	6.1.1 存储分配 .....	183
5.2.2 进程间通信引起的死锁 .....	153	6.1.2 存储共享 .....	183
5.2.3 其他原因引起的死锁 .....	153	6.1.3 存储保护 .....	184
5.3 死锁的条件 .....	153	6.1.4 存储扩充 .....	185
5.4 死锁的处理 .....	154	6.1.5 地址映射 .....	185
5.5 资源分配图 .....	154	6.2 内存资源管理 .....	185
5.5.1 资源分配图的定义 .....	154	6.2.1 内存分区 .....	185
5.5.2 资源分配图的约简 .....	156	6.2.2 内存分配 .....	186
5.6 死锁的预防 .....	156	6.2.3 碎片与紧凑 .....	188
5.6.1 预先分配策略 .....	157	6.3 单一连续区存储管理 .....	189
5.6.2 有序分配策略 .....	157	6.3.1 基本原理 .....	189
5.7 死锁的避免 .....	158	6.3.2 双对界 .....	190
5.7.1 安全状态与安全进程序列 .....	158	6.3.3 交换与重定位 .....	190
5.7.2 银行家算法 .....	159	6.3.4 覆盖技术 .....	191
5.8 死锁的发现 .....	162	6.4 页式存储管理 .....	191
5.8.1 死锁检测算法 .....	162	6.4.1 基本原理 .....	191
5.8.2 死锁检测时刻 .....	164	6.4.2 多级页表 .....	195
5.9 死锁的恢复 .....	165	6.4.3 反置页表 .....	196