

注：教师姓名后留有一个空格，后面填写教师职称。下面加下划线。

阅后删除此文本框。

**本科毕业设计**

**基于x86架构的微内核操作系统的实现**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **学生姓名** | **：** | 郑嘉滨 |
| **学号** | **：** | 171543346 |
| **学院** | **：** | 互联网金融与信息工程 |
| **专业** | **：** | 计算机科学与技术 |
| **指导教师** | **：** | 邓伟林 **职称：** |
| **提交日期** | **：** | 年 月 日 |

**本科毕业论文（设计）诚信声明**

本人郑重声明：所呈交的本科毕业论文（设计），是本人在指导老师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，成果不存在知识产权争议，除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

 学生签名：

时间： 年 月 日

**关于论文（设计）使用授权的说明**

本人完全了解广东金融学院关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

1.按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；

2.学校有权保存学位论文的印刷本和电子版本，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；

3.学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文。

本人同意上述规定。

学生签名：

时间： 年 月 日

摘 要

**[关键词]**：

Abstract

**[Key Words]:**

目 录

[摘 要 I](#_Toc66008273)

[Abstract I](#_Toc66008274)

[目 录 II](#_Toc66008275)

[1 绪论 1](#_Toc66008276)

[1.1 研究背景 2](#_Toc66008277)

[1.2 国内外研究现状 2](#_Toc66008278)

[1.3主要研究工作 2](#_Toc66008279)

[1.4 章节安排 2](#_Toc66008280)

[2 相关技术基础 1](#_Toc66008281)

[2.1微内核架构 2](#_Toc66008282)

[2.1.1 微内核架构简介 2](#_Toc66008283)

[2.1.2 微内核相对于宏内核的优点 2](#_Toc66008284)

[2.2 x86架构 2](#_Toc66008285)

[2.2.1 Intel 8086 2](#_Toc66008286)

[2.2.2 Intel 80386 2](#_Toc66008287)

[2.3 NASM 2](#_Toc66008288)

[2.4 GCC 2](#_Toc66008289)

[2.5 Bochs虚拟机 2](#_Toc66008290)

[3 微内核中进程间的通信模型 1](#_Toc66008291)

[4 x86架构中内核的总体设计和实现 1](#_Toc66008292)

[5 对SBEA算法的改进 1](#_Toc66008293)

[5.1 PPEA和SBEA存在的问题 2](#_Toc66008294)

[5.2 优化策略 2](#_Toc66008295)

[6 性能验证实验与结果分析 1](#_Toc66008296)

[7全文总结与展望 1](#_Toc66008297)

[参考文献 2](#_Toc66008298)

[致 谢 3](#_Toc66008299)

[附录 内容名称 4](#_Toc66008300)

**基于x86架构的微内核操作系统的实现**

1 绪论

1.1 研究背景

操作系统（Operating system，OS）是一组主管并控制计算机操作，运用和运行硬件、软件资源和提供公共服务来组织用户交互的相互关联的系统软件程序，同时也是计算机系统的内核与基石。第一个操作系统（同时也是第一个批处理操作系统）是20世纪50年代中期由General Motors开发的，用在IBM 701上。**[1]**

在第一个简单批处理操作系统出现后，操作系统的发展经历了多道批处理系统、分时系统、实时系统、分布式操作系统等阶段，不同类型的操作系统有不同的应用场景。而在早期开发操作系统时，设计者通常只将关注点放在如何得到高效率上，对系统的设计缺乏首尾一致的思想**[2]**，导致随着系统的变大，整体呈现处混乱和安全性低的态势。不仅如此，随着代码的剧增，操作系统的可维护性大大降低，给维护人员增加负担。于是，操作系统结构化的思想应运而出。

操作系统的结构先后经历了无结构OS、模块化结构OS、分层式结构OS、微内核结构OS。现代的操作系统也可以大致分为宏内核OS和微内核OS。从当代主流操作系统的内核架构中，我们可以很清晰的看到，宏内核在当今的主流的操作系统架构中占据着绝对的优势。但是，如今操作系统的各种问题的出现，反过来暴露了宏内核的各种弊端。**[3]**宏内核一般包含了操作系统的大部分功能模块，代码高度集成，某个模块出现一个bug都有可能使整个系统崩溃。与之相对的，微内核架构的基本原则是机制跟策略相分离，把策略放置在操作系统较高层次，而机制置于微内核之中，也仅把系统最为核心、最为基础的模块放置于微内核中。同时，微内核操作系统给在外部空间的服务分配私有、独立的地址空间。这样，各服务间的隔离性得到保障，一个服务的崩溃不会对其他服务的正常工作产生影响。然而凡事都有两面性，微内核将部分服务放在用户空间必然导致进程之间的通信（Inter-process communication，IPC）频率的剧增，同时IPC带来的是频繁的上下文切换，即不断切换用户态和内核态。经过统计，执行微内核操作系统的绝大多数相关方法在用户态会产生一定的性能流失，约5%-10%左右。**[4]**但如今的计算机硬件性能与日剧增，考虑到微内核架构给整个系统带来的安全性，性能上的一点损失在一些条件下完全可以接受。

综上所述，相对于宏内核的高度集成和臃肿的设计架构，微内核优美的结构具有明显的优势，而这种优势随着当前嵌入式物联网技术的飞速发展愈发明显。微内核架构明显是未来的操作系统架构的趋势。

1.2 国内外研究现状

RC4000可能是第一个具备微内核架构思想的系统。这一系统可以用逐层添加操作系统的方法逐步扩充，以适应在进程调度与资源分配方面格式各样的不同需求。微内核术语早在1981年之前就出现了。**[3]**宏内核内高度集成的易变更的设备代码、协议、文件系统服务等使得宏内核随着规模的增大需要开发人员对这个内核代码进行复杂而又细致的管理，同时在某一项服务需要更升级更新时需要对整个内核的代码进行重新编译。为了克服这些问题，微内核思想由此产生。通过将一些需要频繁更新和修改的服务像其他用户服务一样，在用户空间实现这些服务，同时采用策略与机制分离的原则。机制放置于内核，策略放置于用户空间。

如今，经过数十年的发展，微内核已经发展到了第三代微内核。公认的第一代微内核操作系统是Mach，是由卡内基梅隆大学开发，为了用于操作系统研究，特别是分布式与并行运算上。但由于Mach初代内核提供了较多的服务，第一代Mach内核也被称为“胖微内核”。但Mach却有良好的跨平台性，Mach设计伊始将多处理器支持纳入考虑，是为千种处理器而设计的，移植到其他体系结构很容易。第二代微内核以L3和L4为代表，只提供最基本的操作系统服务并且注重性能优化。最显著的一点在于IPC中的优化，在同样的系统中Mach需要114毫秒来发送即便是最短的消息，而L3可以用少于10毫秒的时间来发送同样的消息。**[5]**L4内核是在L3的基础上发展起来的，对L3内核中具有的特性再次进行缩减， 就像L4/MIPS作者们所表述的：“一项特性当且仅当安全需要它在特权模式被实现时才应该在微内核里”。**[6]**由于它十分简单，L4很快被证明是具有高可移植性的。第三代微内核则主要重视系统的安全性问题等，其主要代表有：seL4、Fiasco、NOVA等。**[3]**

微内核不仅在学界取得了广泛的关注和影响，在业界也有逐渐颠覆宏内核的趋势。安卓(Android)操作系统是一个基于Linux内核与其他开源软件的开放源码的移动端操作系统。据操作系统行业数据分析显示：2019年手机端Android操作系统市场份额达68.63%。然而Google并没有止步于Android，在2016年之前Google就已经着手研发用于嵌入式系统的全新操作系统Google Fuchsia，这款OS不再是基于Linux这类宏内核，而是基于一个全新的名为Zircon的微内核；无独有偶，华为在2019年8月9日的开发者大会上，正式发布了鸿蒙操作系统（Harmony OS），一款全新面向全场景的分布式操作系统，而这款操作系统也是基于微内核架构的。

综上所述，由内核架构在学界和业界的发展历史可知，微内核架构的操作系统的已经是大势所趋，宏内核开始有被摒弃的迹象。尽管以当前市场上流行的操作系统来看，似乎印证了Linus Torvalds在那场和Andy Tanenbaum（MINIX之父）的口水仗所说的，微内核仅具有结构上的优美，而在性能上却完全不及宏内核。但日后，随着学界和业界对微内核的瓶颈问题——IPC的优化，同时凭借着微内核的良好的可移植性和可维护性，微内核还是非常有可能成为未来的操作系统的主流架构。

1.3主要研究工作

本论文的主要工作内容如下：

（1）通过查阅各种制作操作微内核的书籍，制作了一个基于x86架构（80386）的简易微内核，并实现了基本的进程调度、IPC、内存管理、中断管理四大基本模块；

（2）对当前常用的IPC模型进行讨论，说明它们各自的优缺点；

（3）学习并研究了文章**[3]**的PPEA和SBEA算法，并发现SBEA在某种场景下的缺陷，提出利用“磋商”的方式完善SBEA算法。

1.4 章节安排

本论文的主要工作分为两部分，第一部分是实现一个简易的基于x86架构的微内核，第二部分是对SBEA进行某些应用场景下的改进：

第一章为绪论，介绍了操作系统、宏/微内核架构、微内核的发展历史以及近年来国内外发展现状，同时概括了本论文的主要创新点；

第二章为相关技术基础，介绍了微内核架构及其特点、x86架构中的鼻祖8086和第一次引入32位保护模式的80386，此外对本次微内核的开发工具进行了概述；

第三章为微内核中进程间的通信模型，介绍了当前常用的IPC机制，包括管道机制（PIPE）、命名管道（FIFO）、信号机制（Signal）等，并分析了它们各自的优缺点；

第四章为x86架构中内核的总体实现，该章节先从整体上描述了系统所实现的功能，再对进程调度、IPC、内存管理、中断管理四个模块进行了实现；

第五章为对SBEA算法的改进，开始先分析出SBEA算法在某些场景下存在的问题，接着再提出本论文对算法的改进策略；

第六章为性能验证试验与结果分析，利用本论文所实现的微内核对SBEA和改进后的SBEA进行极端条件下的性能试验，同时得出结果并分析；

第七章是结论，该章节对本论文进行总结，指出本论文工作中的不足之处并对未来进行了展望。

2 相关技术基础

2.1微内核架构

2.1.1 微内核架构简介

现代的操作系统的内核通常分为三种：微内核（Micro kernel）、宏内核（Monolithic kernel）和混合内核（Hybrid kernel）。20世纪五十年代中期到后期，操作系统的开发者很少考虑结构问题，也不具有构造大型操作系统的经验。在一些单体系结构的操作系统中，任何一个过程都可以调用任何其它过程。因此，在早期操作系统的规模不大时，这种结构的缺点如缺乏扩展性、可移植性、灵活性等问题没有明显的暴露出来。然而随着操作系统代码量的增加和规模的增大，这种缺乏结构的方法就无法支撑了。

结构化的操作系统设计方法随之出现，首先出现的就是分层的操作系统，如图2.1所示：



图2.1 分层的内核

但是分层的结构也存在一些问题。由于相邻层之间存在许多交互，且每一层处理相当多的功能，使得一层中的大的变化会对相邻层（上一层或下一层）中的代码产生巨大的影响。其结果是，在基本的操作系统上很难通过实现增加或减少一些功能实现一个专用的版本。另外，相邻层之间的高频交互使得安全性很难的到保证。

第一代微内核结构出现于20世纪80年代，是由卡内基-梅隆大学（Carnegie-Mellon）的Avie Tevanian和Richard Rashid主导开发的Mach微内核。微内核的基本原理是，只有最基本的操作系统功能才能放在内核中。非基本的服务和应用程序在微内核之上构造，并在用户态下执行。尽管什么应该在微内核中、什么应该在微内核外，不同的设计有不同的分界线，但是共同的特点是许多传统上属于操作系统一部分的功能现在都是外部子系统，包括设备驱动程序、文件系统、虚存管理程序、窗口系统和安全服务。微内核结构采用水平分层的结构代替了传统的纵向分层结构，如图2-2所示：



图2.2微内核

微内核架构大多用在嵌入式操作系统中，包括：Mach，QNX，Sel4等标准微内核。其次之外，还有Windows NT，Mac OS X这类变种微内核。它们为了追求性能，将需要具备特权的服务组件放进核心空间，违反了微内核的基本设计原则，更接近宏内核的设计方式。这被称为混合内核，是介于微内核与宏内核之间的一种类型。

2.1.2 微内核相对于宏内核的优点

微内核设计的基本思想是简化内核功能，使在内核空间之外的用户空间尽可能多地实现系统服务，同时在系统服务之间加入安全保护措施。于此相对的，在宏内核架构中用户服务和内核服务在同一空间中实现，内核管理着进程调度，内存管理，文件管理和系统调用等模块的工作，由于用户服务在内核服务被实现在同一空间中，这样执行速度上要比微内核快。然而宏内核的劣势也显而易见，那就是内核中的某个服务崩溃，整个内核也崩溃了。另一点，想要在内核中添加新的功能就意味着内核的各个模块需要做相应的修改，因此其扩展性弱。

尽管微内核由于系统模块的分离导致性能上稍不如宏内核，但是微内核依然具有宏内核所不具备的巨大优势。微内核系统结构的核心优势有：（1）内核体积小，方便移植和进行维护；（2）进行拓展修改简易，这是因为微内核很多重要核心模块基本在核的外面完成；（3）系统使用人员很容易更新软件，是由于其仅是硬件的低级抽象，有很多其他模块的部分是到内核外面执行的，因此即使需要完成二次开发改造，也无需对内核再进行研发拓展；（4）可靠性比较高，这是因为每个核心模块都以离散部分模型存放在内核之外，当一个功能模块突然故障也不会干扰其他模块的正常运行。

但是，阻碍着微内核发展的恰巧也是微内核的优点所在之处。微内核架构本质上是一种客户-服务器模式（C/S Model），在微内核架构将众多系统服务放置到用户空间的同时，为系统服务间带来了地址空间边界，因此进程之间的通信（Inter-process communication，IPC）都需要经过内核再将消息发送给目标服务，这时就需要不断的切换用户态和内核态来实现系统。

总而言之，微内核架构所存在的一些问题可以归为以下几点：  
（1）进程或者服务间采用进程间通信的方式交换数据或者调用系统服务，而不是使用宏内核所使用的指针调用方式，这将造成额外的操作系统开销；  
（2）执行一些频繁使用的系统服务时，比如网络收发数据，造成频繁地上下文切换对操作系统来说也是一个负担；  
（3）由于系统服务高度模块化，系统服务之间存在大量的内存复制；  
（4）对互相之间存在的复杂调用关系的系统服务，难以合理地设计通信接口；  
（5）系统服务与内核在地址空间上分离，造成代码局部性差，降低了cache命中率。

2.2 x86架构

2.2.1 Intel 8086

8086是Intel公司第一款16位处理器，诞生于1978年，是整个Intel 32位架构处理器(IA-32)的开山鼻祖。8086体系架构由Stephen P. Morse设计，并在最后定案时得到Bruce Ravenel（8087体系结构设计者）的帮助。逻辑设计者是以Jim McKevitt与John Bayliss为首的硬件开发工程师团队。项目经理是William Pohlman。迄今为止8086的指令集仍然是PC机与服务器的基本指令集。

8086包含8个16位通用寄存器和4个16位段寄存器，通用寄存器分别是：AX、BX、CX、DX、SI、DI、BP、SP，而AX、BX、CX和DX可以分别拆成两个8位AH和AL、BH和BL、CH和CL、DH和DL使用，8086的内部结构如图2.3所示：

图2.3

8086的内存寻址采用的是分段模型。由于它的地址总线是20位，最多可以寻址1M大小的内存，但是段寄存器只有16位，所以在进行寻址时要将段寄存器向左移4位，再加上16位的段内偏移，最终构成段地址：偏移量的组合。由于段寄存器是16位的，在段不重叠的情况下，最多可以将1MB的内存分成65536个段，段地址分别是0000H、0001H、0002H … ,一直到FFFFH。同样在不允许段之间重叠的情况下，每个段的最大长度是64KB，因为偏移地址是16位，从0000H到FFFFH。在这种情况下，1MB的内存最多能划分成16个段，每段长64KB，段地址分别是0000H、0001H、2000H、3000H、…、一直到F000H。

2.2.2 Intel 80386

Intel 80386 发布于1985年，是以1978年8086处理器为基础发展起来的。Intel 80386是第一款具有32位的保护模式的CPU，其将PC由16位的时代带入到了32位的时代。

80386具有三种工作模式：实模式（Real mode）、保护模式（Protected mode）、虚拟86模式（V86）。其中的保护模式是本设计内核工作的主要模式。所谓的保护模式是一种与80286系列和之后的x86兼容的CPU的运行模式。保护模式有大量的新特性，如存储器保护、标签页系统以及硬件支持的虚拟内存，能够增强多任务处理和系统稳定度，现今大部分的x86操作系统都在保护模式下运行，包括Linux、FreeBSD、以及微软Windows 2.0和之后的版本。

在80386中，它对8086的一部分寄存器进行了拓展，由16位寄存器拓展成为32位寄存器同时增加了两个段寄存器GS和FS。它将AX、BX、CX、DX、SI、DI、BP、SP分别拓展成32位的EAX、EBX、ECX、EDX、ESI、EDI、EBP、ESP。段寄存器位数保持不变，当其中保存的不再是段机制，而是保存与全局描述符表（Global descriptor table，GDT）或者局部描述符表（Local descriptor table，LDT）相关的一个索引及属性，被称为段选择子（Selector）。

此外，每个段寄存器还包括一个64位不可见的部分，称为描述符高速缓冲器。Intel 80386的内部结构如图2.4所示：



图2.4

80386的地址线有32根，而在段描述符中段基址也是32位，所以理论上来说80386对内存的访问不再需要分段，但是为了向后兼容8086等x86架构的处理器，80386处理器还是需要以分段的方式访问内存。但是它也提供了一种变通的方式，即把整个4G内存看成一个段，段基址是00000H。在这种情况下可视为不分段，即平坦模型（Flat Mode）。

80386，以及后续的32位处理器都兼容实模式，可以运行实模式下的8086程序。在计算机一开始加电的时候，CPU的状态还是处于实模式下，此时它相当于一个非常快速的8086 处理器。在经过一系列的设置后，CPU才从实模式跳入到保护模式。

其他一些新特性将在后面的微内核的实现的章节再细究。

2.3 NASM

Netwide Assembler 是一款基于Intel x86架构的汇编与反汇编工具。它可以用来编写16位、32位（IA-32）和64位（x86-64）的程序，其所采用的是x86汇编语法的变体而不是AT&A语法。

NASM也被用来编译本毕业设计的内核汇编代码，所采用的的版本是 2.10.07。

2.4 GCC

GNU编译器套装（GNU compiler collection，GCC）是一套编程语言编译器，以及GPL及LGPL许可证所发行的自由软件，也是GNU计划的关键部分，也是GNU工具链的主要组成部分之一。GCC原名为GNU C语言编译器（GNU C compiler），因为它原本只能处理C语言，后经过拓展，变得可以处理C++、Fortran、Pascal、Objective-C、Java等一系列主流的编程语言。有别于局限于特定系统与运行环境的编译器，GCC在所有平台上都使用同一个前端处理程序，产生一样的中介嘛，因此该中介码在各个其他平台上使用GCC编译，有很大机会可得到正确无误的输出程序。

GCC被用于编译本毕业设计的内核的C语言代码，所采用的版本是4.8.5。

2.5 Bochs虚拟机

Bochs 是一款开源的，能够用来模拟x86硬件平台的虚拟机。Bochs的典型应用是提供x86 PC的完整仿真，包括x86处理器（包括保护模式）、硬件设备、和存储器。这种特点使得能够在主机上模拟运行和调试操作系统的内核。

Bochs用于模拟运行和调试本毕业设计的内核，所采用的的版本是2.6.8。Bochs的配置文件bochsrc如图2.5所示：

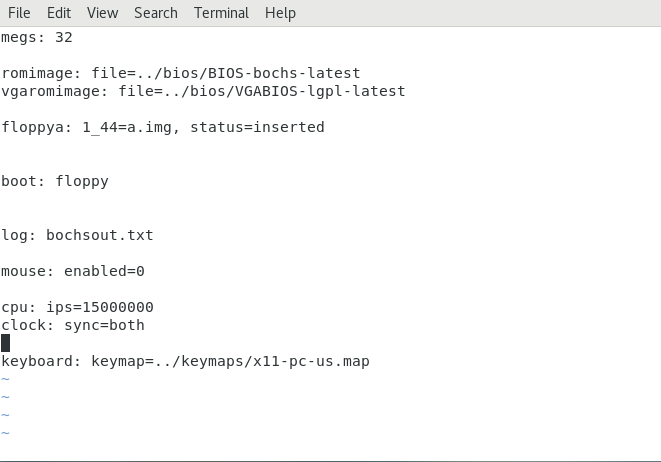


图2.5

3 微内核中进程间的通信模型

3.1 进程间通信（Inter-process communication, IPC）

进程间通信是指进程之间信息的交换。**[2]**微内核引入了地址空间的概念使得各个线程运行在各自独立的地址空间中。但不同进程必不可免地要进行数据交换，由于地址空间分离的原因，进程不能直接访问其他进程的地址空间的数据。这样,微内核必须提供相应的通信机制。

随着微内核的发展，进程通信机制已由早期的低级进程通信机制发展为能传送大量数据的高级通信工具机制。高级通信机制通常分为四大类：共享存储器系统、消息传递系统、管道通信系统、客户机-服务器系统。下面分别介绍这四种通信模型。

3.2 共享存储器系统（Shared-Memory System）

共享内存是需要通信双方在系统中开辟一块能够共同访问处于同种逻辑内存区域的一种通信媒介。**[7]**进程双方在利用共享内存通信时，同时需要采用信号量机制进行同步操作。微内核采用共享内存方式作为IPC机制需要经过4个阶段分别是创建、连接、访问以及释放。系统还需要为进程提供系统调用以便进程能够向内核传入相关的参数，比如申请共享内存的大小、系统对内存进行访问时需要执行信号量的锁定操作。互斥约束不属于共享内存机制的一部分，但必须由使用共享内存的进程提供。

共享存储器系统又根据所共享区域的类型分为基于共享数据结构的通信方式和基于共享存储区的通信方式。**[2]**第一种要求进程公用某些数据结构来实现通信，如在生产者-消费者模型中的有界缓冲区，这在具体的C语言编程时体现为全局变量。然而一个数据结构的大小有限，故每次不可能传送大量的数据，基于共享数据结构的通信方式实际上是一种低级通信。第二种基于共享内存区的通信方式是一种高级通信。内核为进程双方在内存中划分出一块共享存储区，进程通过对该内存区域进行读写来交换信息实现通信。同步控制当然也需要用到信号量机制。在进程完成通信后，需要将其归还给共享存储区。

3.3 消息传递系统（Message Passing System）

在这种模型中，进程不需要控制任何共享存储区和数据结构，只需要以格式化的消息（message）为单位，将数据封装进消息中，并利用内核提供的通信命令（或通信原语），完成进程间的的数据交换。这种方式隐藏了通信实现细节，使通信过程对用户透明化，降低了通信程序设计的复杂性和错误率，成为当前最广泛使用的一类进程间通信的机制。**[2]**这种消息封装的思想类似于计算机网络中，上一层协议将报文传给下一相邻层后，下一相邻层对上一层隐藏具体的传输细节，对于上一层而言，可以看做是点对点（Point to Point）传输。

内核一种常见的消息传递系统实现方案是实现一个消息队列。以两进程通信为例，队列两头连接着进程双方。当Receiver从没有消息的空队列中获得消息时，它会处于阻塞状态等待Sender将消息放入消息队列中；当Sender向已满的队列中放入消息时，它也会进入阻塞状态等待Receiver将消息从消息队列中取走。消息队列通信模型如图3.1所示：



图3.1

3.4 管道通信系统（Pipe Communication System）

4 x86架构中内核的总体设计和实现

5 对SBEA算法的改进

5.1 PPEA和SBEA存在的问题

文章**[3]**提出了基于物理页面的快速交换IPC通信算法（PPEA）与基于段机制交换快速IPC算法（SBEA），这两个算法保证了微内核IPC中的高效性和安全性。然而，美中不足的是，在某些应用场景下，这两个算法存在着一些不足。在PPEA中，进行改变的实际上是进程的页表，也就是将通信进程双方各自的某一个IPC buffer物理页（每一个IPC buffer 是一个物理页，大小为4KB）的物理地址进行交换。将消息发送方（Sender）的IPC buffer的物理地址映射到接收方IPC buffer的线性地址；而将接收方（Receiver）的IPC buffer映射到Sender的线性地址中，如此仅仅需要花费修改页表的时间和Receiver读取数据的时间，就可以完成进程间的数据交换。对于SBEA，内核管理一个称为IPC buffer 位图的数据结构，每个IPC buffe大小为128B，在每一次进程申请发送数据时就分配一个IPC buffer的线性地址给该进程，同时也给Receiver分配一个IPC buffer，并且利用fs段寄存器来指向这一个128B的段，在Sender将数据放入物理页后，内核对Sender和Receiver的LDT中指向双方IPC buffer的段基址进行交换，如此当Receiver利用该段去访存时，已经可以获得通信数据，且若Sender需要继续发送数据，可以不用等到Receiver接收完后才能放入数据，因为得到的Receiver的IPC buffer是空的（如果只是单向传输的话），由此提高了通信效率。

然而SBEA作为对PPEA的改进，存在如下一个问题。再内核确定好IPC buffer的大小后（这里假定为128B），非常小的通信数据譬如100B、200B等可以在短短几次的段基址交换后完成通信，但如果是有2KB大小的数据需要传输，则需要进行16次段基址交换，而又因为2KB<4KB，所以不可能使用PPEA进行进程间通信。这样受限于固定的IPC buffer，在最极端的情况下，数据大小为3.99KB，则需要32次段基址交换。如果这类通信在系统中占的比例较大，显而易见，SEBA的性能将大大降低。

5.2 优化策略

由此，本文提出一种称为“磋商”（Negotiate）的方式解决上述问题。在两个进程进行通信前，Sender向内核提出negotiate请求，并发送一个negotiate报文给内核，内核再通知Receiver。若Receiver同意，则发送“同意”（Agree）报文，这样可以充分利用段的大小任意的特点，只进行一次段基址交换就可以完成这个IPC。尽管需要额外花费一次IPC，但这种代价相比与前文所述的最差要进行32次段基址交换而言显然是值得的。

6 性能验证实验与结果分析

7全文总结与展望

参考文献

[1] William Stallings. Operating System: Internals and Design Principles(6th edition)[M]. Beijing:

Publishing House of Electronics Industry, 2010:36

[2] 汤小丹, 梁红兵, 哲凤屏, 汤子瀛. 计算机操作系统(4th edition)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 24-74

[3] 彭星海. 基于x86架构的微内核操作系统的研究与实现[D]. 电子科技大学, 2020

[4] 王宽卿. 微内核进程间通信的研究[D]. 浙江大学, 2010

[5] 中文维基百科. L3微内核[EB/OL]. (2021-2-7) [2021-3-6]. htttps://www.wiki-wiki.top/wiki/L3

[6] 中文维基百科. L4微内核[EB/OL]. (2021-2-26) [2021-3-6]. <https://www.wiki-wiki.top/baike-L4>微内核系列

[7] 冯丽. 基于异构多核环境下微内核操作系统通信机制的研究[D]. 桂林理工大学, 2019

致 谢

附录 内容名称

以下内容可放在附录之内：

(1) 正文内过于冗长的公式推导；

(2) 方便他人阅读所需的辅助性数学工具或表格；

(3) 重复性数据和图表；

(4) 论文使用的主要符号的意义和单位；

(5) 程序说明和程序全文。