

北京理工大学

本科生毕业设计（论文）

代理内核操作系统实验 PKE 在 K210 开发板
上的移植和改进

Transplantation and improvement of Proxy Kernel operating
system experiment (PKE) on K210 board

学 院：	计算机学院
专 业：	计算机科学与技术
学生姓名：	张国安
学 号：	1120181447
指导教师：	陆慧梅

2022 年 5 月 28 日

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导老师的指导下独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

特此申明。

本人签名：

日期：

年

月

日

关于使用授权的声明

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用毕业设计（论文）的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交本毕业设计（论文）的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存本毕业设计（论文）；③学校可允许本毕业设计（论文）被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换本毕业设计（论文）；⑤学校可以公布本毕业设计（论文）的全部或部分内容。

本人签名：

日期：

年

月

日

指导老师签名：

日期：

年

月

日

代理内核操作系统实验 PKE 在 K210 开发板上的移植和改进

摘 要

操作系统课程是计算机专业的重要专业基础课，其对于培养学生的工程能力与设计能力有着很大的意义。而操作系统实验部分更是课程的核心内容，该部分可以让学生在实践中学学习操作系统的算法、工程实现、设计思想。

代理内核是不具备独立 I/O 实现的操作系统内核，它的提出是为了支持受到 I/O 限制的 RISC-V CPU。它的所依赖的 I/O 功能都代理给了宿主机上的操作系统。它具有轻量、代码精简的优点。

本文是基于华中科技大学的代理内核操作系统实验的移植和改进。本文从源代码层面、经济成本与学习成本方面，分析了代理内核实验在教学过程中存在的优点与缺点。对于其目前存在的经济成本高、环境搭建复杂等缺点，本文提出了实验改进的需求。然后进行需求分析，并给出了移植到 K210 开发板上的解决方案。最后本文给出了移植代理内核操作系统实验到 K210 开发板上的具体实现，并编写了相关的实验指导书。完成了对代理内核操作系统实验的移植与改进。

关键词：操作系统，内核，代理内核，实验改进，K210，移植

Transplantation and improvement of Proxy Kernel operating system experiment (PKE) on K210 board

Abstract

The operating system course is an important professional course for the students major in Computer Science, It is of great significance to develop students' engineering ability and design ability. The operating system experiment is the core content of the course, This part allows students to learn the algorithm, engineering implementation and design idea of the operating system in practice.

The RISC-V Proxy Kernel is an operating system without independent I/O implementation. It is designed to support RISC-V CPU without I/O capability. It delegates I/O to a host computer for handling I/O calls. It has the advantages of light weight and simplified code.

This thesis is based on the transplantation and improvement of the Proxy Kernel operating system experiment of Huazhong University of Science and Technology. From the perspective of source code, economic cost and learning cost, we analyze the advantages and disadvantages of Proxy Kernel experiment in the teaching process. This thesis puts forward the disadvantages of high cost and complex experimental environment. Then the requirements analysis is carried out, and the solution which transplanted PKE to K210 development board is given. Finally, this thesis gives the concrete implementation of the solution, and then gives the tutorial of the experiment.

Key Words: Operating System, Proxy Kernel, Improvement, K210, Transplantation

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 研究工作的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状和发展态势	2
1.3 本文的主要贡献与创新	2
1.4 本文的结构安排	3
第 2 章 理论基础及相关技术	4
2.1 代理内核操作系统实验	4
2.1.1 代理内核的概念	4
2.1.2 代理内核的思想	4
2.1.3 代理内核实验的基本介绍	5
2.2 RISC-V 新型开放指令集和精简指令集介绍	5
2.2.1 RISC-V 的基本介绍	5
2.2.2 RISC-V 的特权架构	5
2.2.3 RISC-V 的中断、异常委托	6
2.3 现有内核在 K210 移植工作的参考	6
2.3.1 K210 的基本信息	6
2.3.2 THU ucore 在 K210 的移植	7
2.3.3 MIT xv6 在 K210 的移植	7
第 3 章 移植 PKE 的总体设计	8
3.1 移植 PKE 到 K210 的背景	8
3.1.1 PKE 移植前开发环境介绍	8
3.1.2 PKE 移植前开发环境的优缺点	9
3.1.3 PKE 移植后的预期收益	10
3.2 移植 PKE 的目标与需求分析	11
3.3 移植 K210 前 PKE 的总体设计	12
3.3.1 系统架构	12
3.3.2 主要功能模块介绍	13
3.3.3 执行流程	13
3.4 移植 PKE 到 K210 的技术方案	14

3.5 移植 K210 后 PKE 的总体设计	15
3.5.1 系统架构	15
3.5.2 主要功能模块介绍	15
3.5.3 执行流程	16
第 4 章 环境搭建	17
4.1 软件环境	17
4.1.1 编译工具链	17
4.1.2 代码准备	19
4.1.3 K210 环境	19
4.2 硬件环境	20
4.2.1 K210 硬件要求	20
第 5 章 移植 PKE 的具体实现	21
5.1 引入 RustSBI	21
5.1.1 SBI 背景与现状	21
5.1.2 RustSBI 的特性介绍	21
5.2 编译流程改造	23
5.2.1 内存布局改造	23
5.2.2 Makefile 改造	24
5.3 内核启动流程改造	25
5.4 驱动开发	25
5.4.1 串口驱动	25
5.4.2 时钟驱动	26
5.5 HTIF 依赖移除及接口移植	27
5.5.1 涉及接口梳理	27
5.5.2 接口移植的技术方案及实现	28
5.6 用户程序加载	32
5.6.1 单个进程加载	32
5.6.2 开启虚拟内存空间后用户进程的加载	32
5.6.3 多进程支持	33
第 6 章 代理内核实验的参考实现	35
6.1 系统调用	35
6.1.1 实验预期	35
6.1.2 具体实现	35

6.2 异常处理	37
6.2.1 实验预期	37
6.2.2 实验分析	37
6.3 定时器中断	38
6.3.1 实验预期	38
6.3.2 具体实现	39
6.4 虚拟地址和物理地址的转换	39
6.4.1 实验预期	39
6.4.2 具体实现	40
6.5 基本的内存管理	41
6.5.1 实验预期	41
6.5.2 具体实现	41
6.6 栈空间不足与缺页异常	42
6.6.1 实验预期	42
6.6.2 具体实现	43
6.7 创建子进程 fork 的实现	43
6.7.1 实验预期	43
6.7.2 具体实现	44
6.8 进程的控制权交接	44
6.8.1 实验预期	44
6.8.2 具体实现	45
6.9 进程的时间片调度	46
6.9.1 实验预期	46
6.9.2 具体实现	47
6.10 实验资料的管理	47
结 论	49
参考文献	50
致 谢	51

第 1 章 绪论

1.1 研究工作的背景和意义

操作系统是负责管理计算机软硬件资源的软件，它负责管理内存、进程管理、文件系统的管理。经过了几十年的发展，操作系统的原理、实践已经成为计算机知识的精华。对于计算机相关专业的学生来说，操作系统课程必不可少。无论是学习操作系统的基本原理、设计思想，还是动手实践其内容，对于培养计算机思维来说都是必不可少的^[1]。

在操作系统的教学中，理论教学必不可少。除此之外，还需要增加实验教学来培养学生的工程能力，让学生在实践中学学习操作系统原理，加深对操作系统理论知识理解^[2]。

本文的研究工作是改造代理内核操作系统实验，将其移植到 K210 开发板上，并对其实验进行改进。代理内核是精简的、轻量的操作系统内核，它可以给用户程序提供最基本的运行环境。它本身不具备访问外部设备的 I/O 实现，而是通过代理的方式，使用宿主机 Ubuntu 的 I/O 功能。代理内核是 RISC-V 开源软件生态的一部分。基于开源的 RISC-V 代理内核，华中科技大学操作系统团队开发了代理内核操作系统实验，并编写了其实验指导手册。

代理内核操作系统实验存在着优点与缺点。因为代理内核只需要关心内存和 CPU 等核心资源，它的代码数量极少，这非常有利于学生学习操作系统的核心原理。但是代理内核依赖于宿主机上的其他操作系统，这会有一些弊端。例如，在实际的操作系统教学中，代理内核的物理环境成本高昂。代理内核是运行在 64 位 RISC-V CPU 上的，其依赖的宿主机操作系统 Ubuntu 运行在 ARM 物理核上。而一块带有 FPGA（用于烧录 RISC-V CPU 软核）和 ARM 物理核的开发板，其市场平均价格在三千元以上。这种高昂的经济成本不利于教师在物理环境上展开大规模的实验教学。如果教学中只有软件模拟的开发环境，这将是不利于学生学习硬件相关知识的。除此之外，因为需要烧录 RISC-V CPU 软核，还需要让 ARM 核运行 Ubuntu，代理内核的物理环境搭建成本也比较高。

因此，本文从代理内核操作系统实验的实际出发，分析其目前存在的问题，提出了解决方案——将代理移植到基于 RISC-V 的、成本低廉的 K210 开发板上。最终

给出了移植的技术细节与实现代码，在移植后还对实验进行了改进，并给出了实验指导书。

1.2 国内外研究现状和发展态势

RISC-V 指令集是加利福尼亚大学伯克利分校在 2010 年提出的指令集，它是一种基于开放架构的指令集，也是一种精简指令集^[3]。它具有许多优点。首先，RISC-V 吸取了其他指令集的优点，避免了其他指令集的缺点。RISC-V 的指令架构是稳定的，这也保证了其指令的精简程度。与 RISC-V 相反的是 X86，X86 指令集自诞生以来，其指令数量不断增长，从一开始的八十条，增长到了一千多条。最终在 2015 年达到了 1978 年的 16 倍。其次，RISC-V 是开放的。RISC-V 被提出后，其开源生态不断完善，代理内核（RISC-V Proxy Kernel）就是属于 RISC-V 生态的一部分。这有利于后续研究者在前人的工作基础上进行研究^[4]。

代理内核的提出是为了支持受 I/O 限制的 RISC-V CPU 实现，代理内核将 I/O 相关的系统调用处理代理到了宿主机的其他操作系统上。在不关心 I/O 的条件下，这有利于快速验证 RISC-V CPU 实现的功能。代理内核项目（riscv-pk）最早是在 2011 年创建的，它属于 RISC-V 开源软件生态的一部分。

代理内核操作系统实验是华中科技大学于 2021 年发布的，它是基于代理内核的思想和代理内核项目（riscv-pk）部分实现代码开发完成的。本文就是基于此实验，对其进行了改进，并将其移植到了 K210 上。

近些年，将操作系统内核移植到 K210 的工作有很多^[5]。例如在 2020 年，南开大学操作系统团队将清华大学的 ucore 操作系统移植到了 K210 上。在 2021 年，华中科技大学操作系统团队将 MIT 的 xv6 操作系统移植到了 K210 上。这些移植工作都可以给我们当作参考资料使用，但是我们不能照搬其移植过程。因为代理内核的代理 I/O 机制使其区别于普通的操作系统内核，所以我们需要逐步分析代理内核操作系统实验的源码，得出属于其移植工作的解决方案。

1.3 本文的主要贡献与创新

本文介绍了代理内核操作系统实验在 K210 嵌入式平台的移植过程，最终改进了代理内核操作系统实验。本文的主要贡献与创新如下：

1. 在物理环境经济成本上，本文对 PKE 移植前后的物理开发环境进行了分析，

评价了技术可行性，并提出了详细的技术方案并实现。最后将代理内核操作系统实验的物理环境经济成本降至原先的三十分之一。这有利于该操作系统实验展开大规模的物理环境教学。

2. 在实验学习成本方面，本文降低了代理内核的环境搭建成本，让实验操作者免去实验搭建的繁琐细节。此外，本文还对代理内核实验进行了改进，提供更加易用的 API，增加 PKE 代码的可移植性，降低了实验操作者的开发成本和学习成本。

1.4 本文的结构安排

本文的结构安排如下：

在第一章，本文主要介绍了代理内核操作系统 PKE 移植 K210 的背景和意义。本文先是介绍了代理内核操作系统实验目前存在的问题，并给出了大致的解决方向。然后介绍了当前操作系统相关实验的研究现状和发展态势。最后描述了本文的大致结构。

第二章，本文介绍了技术方案中涉及到的理论基础和相关技术。并列举了其他操作系统实验移植到 K210 的参考方案。

第三章，本文分析了代理内核操作系统实验在移植前后的总体设计，如系统架构、主要功能模块、执行流程等。除此之外，本文还对比了代理内核移植前后的开发环境，得出了移植工作的预期收益。最后给出了移植 K210 的技术方案。

第四章，本文给出了代理内核操作系统实验移植 K210 的环境搭建过程。先从软件环境方面描述了其过程，如编译工具链的准备、烧录 K210 工具准备、串口通讯工具准备。然后提出了 K210 的硬件环境要求。

第五章，本文展示了移植代理内核操作系统实验的技术细节。先是向读者描述引入 RustSBI 的背景，再描述引入 RustSBI 引起的编译、启动流程改造。然后给出了在 K210 上的驱动程序与接口移植的细节，最后给出了 PKE 在 K210 上加载用户进程的技术方案。

第六章，本文给出了代理内核操作系统实验的九个基础实验的参考实现，并在最后给出了相关的代码库链接，实验指导书链接。

第 2 章 理论基础及相关技术

2.1 代理内核操作系统实验

2.1.1 代理内核的概念

代理内核 (Proxy Kernel) 是一种特殊的操作系统内核。代理内核系统是由代理内核和 Host 主机的操作系统 Ubuntu 组成的。代理内核与 Host 主机的操作系统之间使用 HTIF 接口进行通信。

代理内核并不是一个独立的操作系统，它虽然拥有 I/O 功能，但它不具备 I/O 的独立实现。它的 I/O 功能实现依赖于 Host 主机的操作系统 Ubuntu。也就是说，代理内核 Proxy Kernel 与 Host 主机的操作系统 Ubuntu 是并行运行的。它们之间通过 HTIF(Host Target Interface) 通信。当代理内核需要进行 I/O 时，代理内核就通过 HTIF 调用 Host 主机的操作系统 Ubuntu 的 I/O 接口，以达到 I/O 的目的。

2.1.2 代理内核的思想

代理内核是操作系统的核心。它只关心内存和 CPU 的管理，不关心外部设备 I/O 功能的实现。代理内核的 I/O 功能都代理给 Host 主机的操作系统 Ubuntu。这样做的好处是，开发者不必再拘泥于繁琐的外部设备的 I/O 实现，而是将注意力集中于计算机的核心资产 CPU、内存等。

除此之外，因为代理内核少了具体的 I/O 实现，代理内核的代码会变得更加精简。精简的代理内核代码更便于维护，也更便于后续学习者学习。

代理内核还有助于我们快速验证 CPU 软核。由于代理内核只关心 CPU 的管理，内存的管理。这么一来，我们就可以将代理内核运行在更加独立的 RISC-V CPU 软核上，该 CPU 软核不需要实现 I/O 功能。我们也可以更加集中精力去验证 CPU 软核的功能。从而进行快速的迭代和开发。在真实的物理环境 Zedboard 开发板上，代理内核的代码会被编译成 RISC-V 指令，最终运行在 FPGA 上的 RISC-V CPU 软核上。与此同时，Zedboard 开发板上的 ARM 物理核运行着 ARM 版本的 Ubuntu 操作系统。代理内核通过 Zedboard 上的 HTIF 接口调用 Ubuntu 的 I/O 接口，以达到 I/O 的目的。这种设计下，我们不需要实现 CPU 的 I/O 功能，我们可以快速对 RISC-V CPU 软核进行验证^[6]。

2.1.3 代理内核实验的基本介绍

代理内核实验 PKE 主要分为三个部分: a. 系统调用、异常处理、时钟中断, b. 内存管理, c. 进程管理。后面的实验对前面的实验具有依赖关系, 如果前面的实验没有完成, 后面的实验就不能进行。每个实验都具有用户态程序、内核态程序。实验操作者需要根据用户态程序的需求, 补全内核代码。只有这样, 代理内核自身和用户程序才能正常运行。

代理内核实验 PKE 的每个小实验都较为精简紧凑。对于实验操作者来说, 在梳理好每个实验执行流程之后, 就可以很容易对实验代码进行补全。实验代码短小精悍, 行数虽然少, 但是代码的意义却很大。它可以帮助实验操作者集中精力于管理计算机的内存、CPU, 帮助实验操作者快速验证操作系统的理论知识。

2.2 RISC-V 新型开放指令集和精简指令集介绍

2.2.1 RISC-V 的基本介绍

RISC-V 指令集是一种新型的开放和精简指令集。它通过取长补短的方式, 吸取了以往 CPU 指令集的优点、避免了以往 CPU 指令集的大部分缺点。

它是一个基于开放架构的指令集, RISC-V 的指令是开放的, 任何人都可以根据这个开放的指令集去实现 RISC-V 架构的 CPU。因此, RISC-V 指令集具有开源、免费的特点。

它是一个精简的指令集。RISC-V 手册指出, 同样的 C 语言程序^[7], 经过适用于不同 CPU 架构的编译器编译后, 得到的指令序列中, RISC-V 架构的指令是相对来说数量较少、较精简的。这对减少嵌入式设备功耗具有重要的意义^[8]。

2.2.2 RISC-V 的特权架构

RISC-V 的特权架构主要分为三种模式: 机器模式 (Machine-mode)、监管者模式 (Supervisor-mode)、用户模式 (User-mode)^[9]。

M 模式是拥有最高级权限的模式, M 模式的硬件线程完全掌控着寄存器、内存、I/O 的控制权。M 模式具备拦截和处理异常与中断的能力。除此之外, 它还可以将异常与中断托管给 S 模式。

S 模式的产生, 主要是为了解决存储碎片化的问题。S 模式之下, 我们可以开启分页机制, 使用基于页面的虚拟内存。这种模式的特权级相比 M 模式较低。与 M 模

式相比，S 模式拥有的权限较少。与 U 模式相比，S 模式拥有的权限较多。我们的操作系统内核 PKE，主要就是运行在 S 模式。

U 模式也就是用户态程序运行时的模式。它具备最低的特权级，拥有的权限最少。它所需的许多功能，都需要通过系统调用、中断、异常等机制获取。它通过这些机制，让 CPU 的执行切换到更高特权级的内核中，让内核来提供并执行用户态程序所需功能（如串口输出、定时器、异常处理等）。

这三种模式之间不是普通的链式关系，而是一层叠一层的金字塔结构。更高特权级的底层为上层提供运行时服务，更低特权级的上层运行并依赖于底层之上。

2.2.3 RISC-V 的中断、异常委托

前面我们提到，M 模式具备拦截和处理异常与中断的能力。M 模式下运行的内核可以根据中断/异常的状态码和向量表选择对应的处理程序。拦截和处理中断、异常。

除此之外，M 模式还可以将这两者的拦截和处理委托给 S 模式的内核。M 模式的内核可以在初始化时，通过设置异常委托寄存器（medeleg）、中断委托寄存器（mideleg），将异常和中断的拦截与处理委托给 S 层。M 层的内核只需要在初始化时，根据异常、中断的状态码，在委托寄存器的对应二进制位赋值即可。委托寄存器的初始化结束以后，寄存器上对应的异常/中断的拦截与处理都会交接给 S 模式的内核。

2.3 现有内核在 K210 移植工作的参考

2.3.1 K210 的基本信息

K210 是由嘉楠公司推出的一款 MCU，它具有成本低、高性能、性价比高等特点^[10]。

K210 拥有基于 RISC-V 架构、64 位的双核 CPU。它具有 6MB 物理内存，它的晶振频率是 400-600MHZ。除此之外，它拥有嘉楠自研的神经网络计算加速器 KPU，可以进行高性能的神经网络计算。

K210 的成本低廉。一块不带其他外设的 K210 MCU，只需要一百多元。这样成本低廉的物理开发板对嵌入式开发、操作系统实验教学、学生自学计算机知识很有好处。



图 2-1 K210 MCU

2.3.2 THU ucore 在 K210 的移植

ucore 是清华大学基于 MIT 开源的 xv6 内核开发的操作系统内核，它可以运行在 X86 计算机上，也可以运行在 X86 硬件模拟器上，如 QEMU、VirtualBox 等。麻雀虽小，五脏俱全。ucore 的代码量不到 5000 行，却包含了虚拟内存管理、进程管理、文件系统等主要内核功能。

早在 2020 年，南开大学的操作系统团队发起了 ucore 在 RISC-V 指令集 CPU 的移植活动。从 2020 年 3 月到 2020 年 4 月，历时 4 个月，他们完成了 ucore 从 X86 物理机到 RISC-V 物理机的移植，最终让 ucore 成功运行在 RISC-V 架构的 K210 上。

我们可以参考南开操作系统团队的移植工作，来完成 PKE 的移植与改进。

2.3.3 MIT xv6 在 K210 的移植

MIT 的 Frans Kaashoek 等在 2006 年参考 PDP-11 上的 UNIX Version 6 写了一个可在 X86 上跑的操作系统 xv6（基于 MIT License）^[11]

华科的操作系统团队完成了 xv6 从 X86 物理机到 RISC-V 物理机的移植，最终让 xv6 成功运行在 K210 上。

同理，我们可以参考华科操作系统团队的移植工作，来完成 PKE 的移植与改进。

第3章 移植 PKE 的总体设计

3.1 移植 PKE 到 K210 的背景

接下来，本文将通过阐述 PKE 移植前的开发环境与移植后的预期收益，介绍移植 PKE 到 K210 的背景。

3.1.1 PKE 移植前开发环境介绍

PKE 移植前的运行环境主要分为两种，分别是硬件环境和模拟器环境。他们的总体情况是一致的，但还是有一些细微的区别。

在模拟器环境上，PKE 运行在 spike 模拟的 RISC-V 64 位机器上。而 spike 模拟器则运行在宿主机 Ubuntu 上。当 PKE 需要使用外部设备的 I/O 功能时，PKE 就通过调用 spike 提供的 HTIF 接口，让 Ubuntu 提供 I/O 功能，以访问宿主机上的外设资源。

如下图，本文给出了模拟器环境的系统架构。

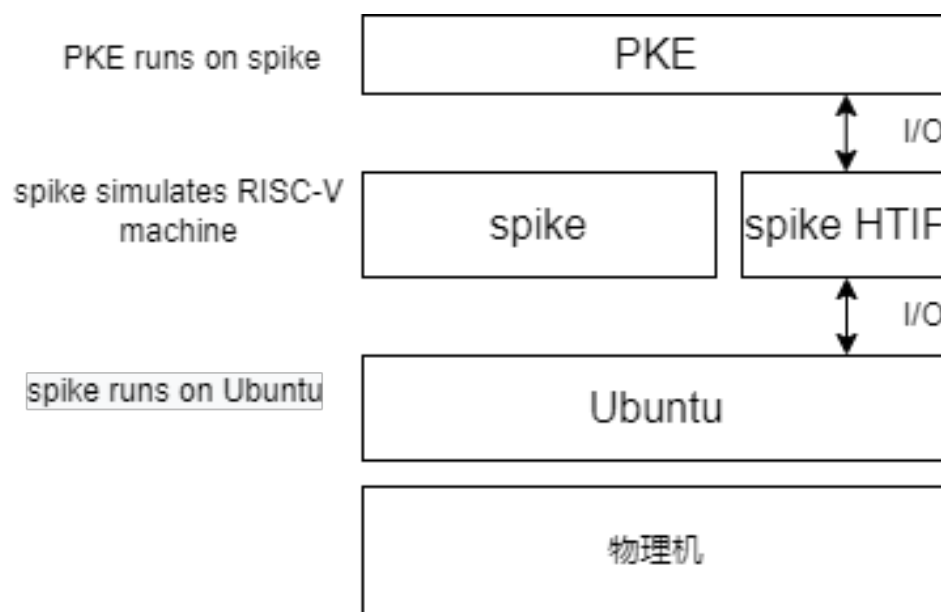


图 3-1 模拟器环境架构

在硬件环境上，我们的系统是运行在 PYNQ-Z2 开发板上。PYNQ-Z2 开发板是 Xilinx 公司的一款开发板，它具有丰富的外设资源、强大的性能。此外，它还兼容了 Arduino 和树莓派接口。

PYNQ-Z2 搭载了 FPGA 系统和 ARM 处理器^[12]。FPGA 可以烧录 RISC-V CPU 软核，ARM 硬核可以运行 Ubuntu 操作系统。我们的代理内核 PKE 运行在 RISC-V CPU 软核上，而提供外设功能的 Ubuntu 则运行在 ARM 硬核上。PKE 和 Ubuntu 之间是通过 riscv-fesvr 通信的。riscv-fesvr 是 PYNQ 开发板上的重要工具，没有它，PKE 就无法调用 ARM 上的 Ubuntu I/O 接口。riscv-fesvr 通过共享内存的方式，接收 PKE 的请求，使用 ARM 端的资源，并向 PKE 提供资源与功能。

如下图，本文给出了硬件环境的系统架构。

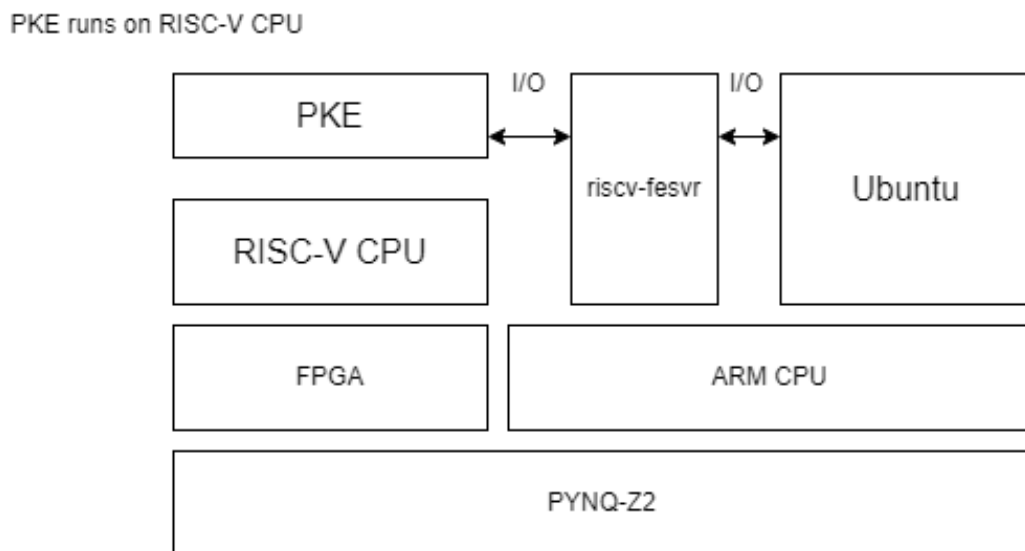


图 3-2 硬件环境架构

3.1.2 PKE 移植前开发环境的优缺点

在上一小节，本文简单介绍了 PKE 在移植前的开发环境。在本小节，本文会客观分析 PKE 原先的物理开发环境的优点与缺点。

在原先的物理环境中，代理内核的系统是运行在 PYNQ-Z2 板子上的。PYNQ-Z2 拥有 FPGA 和 ARM 物理核。FPGA 可以让开发者烧录 RISC-V CPU 软核，然后让开发者在 RISC-V CPU 软核上运行 PKE。ARM 硬核可以运行 Ubuntu 操作系统，提供 I/O 功能^[13]。

从不同的开发方向看。如果开发者是在开发 CPU 软核，需要快速验证 FPGA 上的 CPU 软核并进行迭代。这种物理环境允许开发者不实现 CPU 涉及 I/O 的功能，便于开发快速开发和验证 CPU 软核。

如果开发者是在开发或学习操作系统，这种开发环境反而对开发者不利。一个原因是提供这种物理环境的开发板 PYNQ-Z2 价格昂贵，成本高昂。其价格已经快要接近一台 PC 机的价格。此开发板在某网购平台上的均价已达到三千余元。这对入门级操作系统学习者购买学习资料、课程实验教学都是不利的。

另一个原因环境配置繁琐，开发者需要在 PYNQ 上烧录 RISC-V CPU 软核，还需要在 ARM 核上部署 Ubuntu。除此之外，还需要在 ARM 核上部署 riscv-fesvr，让 PKE 与 Ubuntu 通信。这种开发环境的部署成本和学习成本是很高的，这对于刚入门操作系统实验学习的开发者是不利的。

总而言之，PKE 系统的物理环境价格昂贵、成本高昂、搭建成本高、学习成本高，不利于学习者入门，也不利于大规模展开实验教学^[14]。这些是 PKE 移植前的物理环境的痛点。为了解决这些痛点，本文提出了将 PKE 移植到 K210 上的方案。将在下一小节阐述该方案的收益。

3.1.3 PKE 移植后的预期收益

上一小节我们提到，PKE 原先的物理环境有许多缺点。这些缺点不利于学习者入门、也不利于大规模展开实验教学。因此，我们计划将 PKE 移植到 K210 物理环境中。PKE 移植后，我们将拥有如下收益：

1. 成本低廉

K210 板子价格低廉。一块不带外设的普通 K210 SoC 的市场价格只需要一百多元。与动辄就要三千余元的 PYNQ-Z2 相比，K210 的经济成本仅仅是 PYNQ-Z2 的三十分之一。这非常有利于我们开展大规模的物理环境实验教学。也非常有利于入门学习者购买资料进行学习。

2. 物理环境搭建成本低

在 K210 上，我们不再像从前在 PYNQ-Z2 那样烧录 RISC-V CPU 软核，也不需要再在 PYNQ-Z2 的 ARM 核上加载运行 Ubuntu。由于 K210 带有 RISC-V 64 位 CPU，我们只需要在 K210 上烧录并运行 PKE 即可。这使得我们的物理环境搭建成本变得极低。

3. 环境搭建学习成本低

移植 PKE 到 K210 后，我们可以使用配置好的 docker 环境包、编写 Makefile 将编译与烧录流程变得自动化。由于不再需要在 PYNQ-Z2 上烧录 RISC-V CPU 软核，也不需要再在 PYNQ-Z2 的 ARM 核上加载运行 Ubuntu。我们的环境搭建是自动化的。环境搭建的学习成本也是很低的。

3.2 移植 PKE 的目标与需求分析

1. 降低 PKE 在物理环境的开发成本

移植 PKE 的首要目标，是降低 PKE 在物理环境的开发成本。这其中包括降低购买硬件资源的经济成本，也包括降低环境搭建的学习成本。这将有利于我们后续开展大规模的物理环境实验。也会降低 PKE 实验的学习门槛。

2. 用户态程序无感知

PKE 在移植 K210 的过程中，会有一定程度的内核态代码修改。从实验迁移的角度来看，这些内核态代码的修改不应该让用户态程序感知到。否则，我们很有可能还要修改用户态程序，以适配修改过的 PKE。这不仅会增加我们移植 PKE 的开发成本，也会增加后续实验操作者的学习成本。

3. 减少实验操作者对移植的感知

PKE 移植后产生的内核态代码修改，应该尽可能地不让实验操作者感知。修改过后的 PKE，应该对实验操作者提供与原先一致的接口，以降低移植对实验操作者的影响。

4. 提高实验操作者的开发效率

移植后的 PKE 需要能做到提高实验操作者的开发效率，如环境搭建更加简化、编译流程和烧录流程更加自动化、调试过程更加清晰化、提供给实验者的 API 更加易用。

5. 降低 PKE 后续移植的成本

经过改造后的 PKE，后续移植到其他 RISC-V 开发板时，它的移植成本应该降低。也就是说，我们的移植工作应该是可复用的。只要是 PKE 移植到其他的 RISC-V 开发板，我们都应该尽可能地减少对内核代码的改动。

3.3 移植 K210 前 PKE 的总体设计

在 PKE 移植前，我们对 PKE 的架构、各主要功能模块、执行流程进行了梳理。本节将对这些梳理好的内容进行介绍。这将便于读者理解我们后续的移植工作。

3.3.1 系统架构

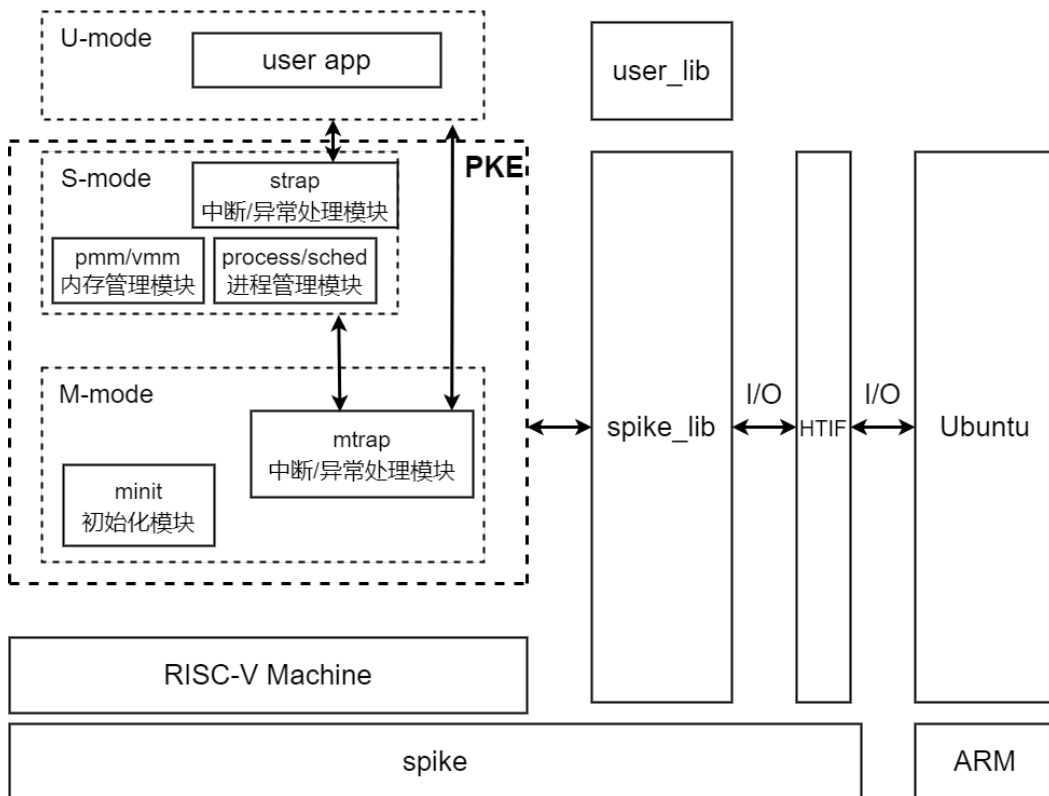


图 3-3 移植前 PKE 的系统架构

如架构图所示，硬件之上，我们的系统分为三种特权模式。分别为机器模式（M-mode）、监管者模式（S-mode）、用户模式（U-mode）。

代理内核 PKE 可以运行在两种特权模式。这两种特权模式分别是机器模式和监管者模式（S-mode）。

PKE 运行在机器模式时，主要负责内核的初始化工作，如读取并解析设备树文件、将时钟初始化、将 HTIF 接口初始化、将异常与中断委托寄存器初始化、设置内核入口点、设置中断向量表、加载用户进程。除此之外，处于 M 模式的 PKE 还负责部分中断/异常的拦截与处理。只要是没有委托给 S 模式的中断与异常，都会交给 M 模式的 PKE 进行拦截与处理。

PKE 运行在监管者模式时，主要负责物理内存的管理、虚拟内存的管理、物理内存与虚拟内存地址的转换、进程的调度、部分中断与异常的拦截与处理。

用户程序则运行在用户态。在 PKE 启动时，用户程序会被 PKE 加载到内存中，然后加载成进程，最终由 PKE 运行。用户程序的特权级是最低的，拥有的权限最少。PKE 会为用户程序提供系统调用接口，在保证权限安全的情况下，为用户程序提供所需功能。

3.3.2 主要功能模块介绍

PKE 主要分为五个功能模块，分别是初始化模块、中断/异常的拦截与处理模块、内存管理模块、进程管理模块、spike 相关模块。

初始化模块运行在 M 模式，主要负责读取并解析设备树文件、将时钟初始化、将 HTIF 接口初始化、将异常与中断委托寄存器初始化、设置内核入口点、设置中断向量表、加载用户进程等。

中断/异常的拦截与处理模块在 M 模式和 S 模式都存在。该模块主要负责中断/异常的拦截与处理。mideleg 和 medeleg 寄存器分别决定了中断和异常在哪个层进行处理。除此之外，mtvec 和 stvec 决定了中断向量表的入口点。当发生异常或中断时，RISC-V CPU 会将异常或中断交给对应特权级的层处理。处理异常或中断的层根据中断向量表选择对应的处理程序，处理异常或中断。

内存管理模块运行在 S 模式，该模块完成了物理内存的初始化、分页模式的开启、虚拟地址空间的管理、内存的基本分配和回收、虚实地址之间的转换。

进程管理模块运行在 S 模式，该模块负责用户进程的加载、子进程的创建、进程的控制权交接、进程的时间片调度。

spike 相关模块在 M 模式和 S 模式都存在，该模块负责 HTIF 的初始化、与 Host 机器上的 Ubuntu 通信、向 PKE 提供 I/O 功能。

3.3.3 执行流程

PKE 首先需要在 M 模式下进行初始化，在完成中断/异常的委托初始化后、PKE 会进而设置 sie 寄存器来确定 M 模式下要处理的中断，之后 PKE 会设置 mtvec 寄存器来确定中断向量表的入口点。除此之外，很有可能对定时器中断进行了设置。最后 PKE 会从 M 模式进入 S 模式。

进入 S 模式后，PKE 会对物理内存进行初始化，进而开启 SV39 分页机制，接着

会对虚拟地址空间进行初始化，将虚拟地址和物理地址进行映射。进程模块会加载用户进程，并将其设置为当前进程。接着跳转到 U 模式，开始执行用户进程。

用户进程在运行时，如果发生了系统调用、中断或异常，CPU 的执行会跳转到特权级更高的模式的 PKE 内核，如 M 模式、S 模式的 PKE。接下来 PKE，将会为用户进程提供系统调用功能、处理异常或中断的功能。

3.4 移植 PKE 到 K210 的技术方案

为了解决 PKE 目前存在的痛点，我们在本小节提供移植 PKE 到 K210 的技术方案。

首先，我们需要引入 RustSBI。RustSBI 会读取并解析设备树文件，这可以帮助我们屏蔽 K210 SoC 的细节。此外，RustSBI 还提供了一些二进制接口，如串口输出、定时器设置等，这可以减少我们移植过程中的开发成本。

第二，我们需要改造编译流程。由于我们引入了 RustSBI，所以在内核编译打包时，我们需要将 RustSBI 一起打包进入内核的 img 文件中。这需要我们改造现有的编译流程，编写 Makefile 以完成我们所需编译与烧录功能。

第三，我们需要改造内核的启动流程。由于 RustSBI 占据了 M 模式，我们的 PKE 内核只能运行在 S 模式上，所以我们需要将原先 M 模式的启动逻辑迁移到 S 模式上。这就需要我们改造 PKE 的启动流程。

第四，我们需要开发驱动程序。虽然 RustSBI 为我们提供了一些二进制接口，如串口输出、定时器设置等。但这些接口只提供了最简单的功能，如输出单个字符。我们需要在此之上进行封装并形成驱动程序，以便后续移植时使用。

第五，我们需要将 HTIF 依赖移除然后进行接口移植。对于移植 K210 后的 PKE 而言，HTIF 接口已经失去作用，并且会干扰 PKE 的运行。所以我们需要移除 PKE 中的 HTIF 依赖。再根据我们的需求，对依赖的接口进行移植。

最后，我们需要对用户程序进行加载。由于开发成本的原因，我们暂时不打算实现文件系统。原先的 PKE 是通过文件系统加载用户程序的，我们需要改造成通过内存加载。通过调研发现，ucore 在未实现文件系统时，是通过同时编译打包内核程序和用户程序到内核文件中，并记录用户程序的起始地址和长度。最终根据记录值在内存中加载用户程序。PKE 参考了这种方式，实现了类似于 ucore 的内存加载用户进程的方式。

由于我们移除了 HTIF 依赖，我们不再需要 `spike` 提供的 HTIF 功能，因此 `spike` 相关模块也会被移除。

其他模块与移植前的 PKE 相比，功能大致相同，这里就不再赘述了。

PKE 之外还有烧录工具 K-Flash、串口通讯工具 `minitem`。K-Flash 是一个 Python 程序，它帮助我们将打包好的内核烧录到 K210^[15]。`minitem` 是一个串口通讯工具，它可以接收 K210 串口输出信息，并将信息显示在我们的上位机上。

3.5.3 执行流程

RustSBI 首先需要在 M 模式下进行初始化，在完成中断/异常的委托初始化后、设备树文件加载和解析后，还有其他初始化工作以后。RustSBI 会从 M 模式进入 S 模式。跳转到 PKE 的入口点，将控制权交给 PKE。

进入 S 模式后，PKE 会对物理内存进行初始化，进而开启 SV39 分页机制，接着会对虚拟地址空间进行初始化，将虚拟地址和物理地址进行映射。进程模块会通过内存的方式加载用户进程，并将其设置为当前进程。接着跳转到 U 模式，开始执行用户进程。

用户进程在运行时，如果发生了系统调用、中断或异常，CPU 的执行会跳转模式的 S 模式的 PKE 或 M 模式的 RustSBI。接下来 PKE 或 RustSBI，将会为用户进程提供系统调用功能、处理异常或中断的功能。

第 4 章 环境搭建

4.1 软件环境

4.1.1 编译工具链

step1. 访问 sifive 官网，下载 riscv gcc toolchain

<https://www.sifive.com/software>

step2. 找到 Prebuilt RISC-V GCC Toolchain。根据开发环境选择对应的版本。

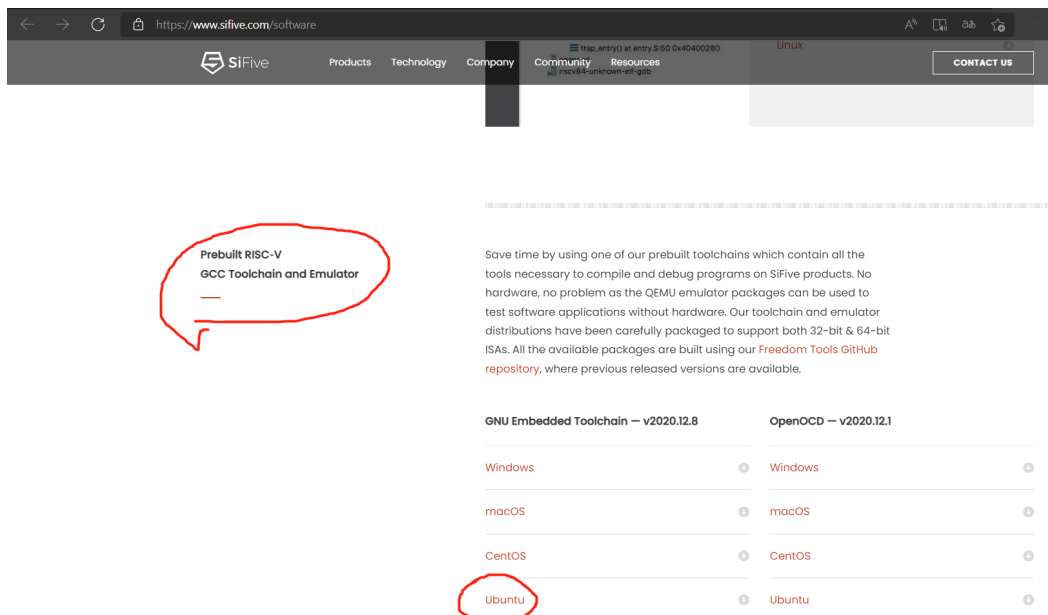


图 4-1 编译工具链列表

step3. 将下载好的 tar.gz 压缩包解压

```
1 tar -zxvf $your_tar_gz
```

代码 4-1: 解压命令

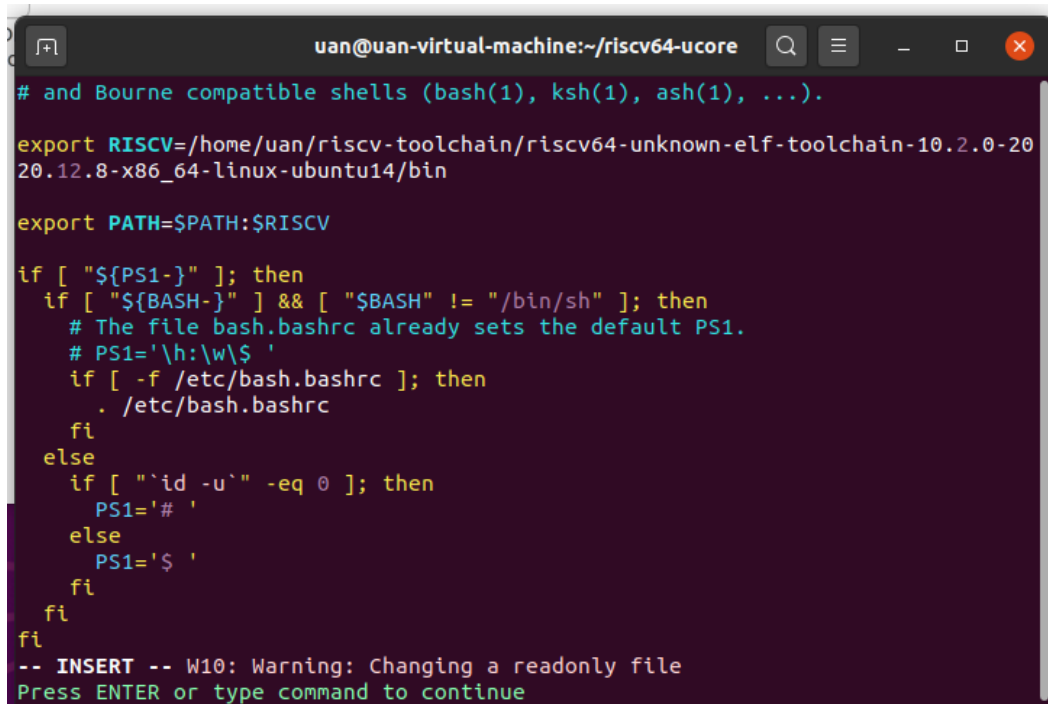
step4. 配置环境变量。解压完成得到文件夹，进入文件夹里的 bin 目录，打开 terminal，输入 pwd 获得当前路径。复制获得的路径。将复制到的路径加入系统的 PATH 环境变量。

```
1 vim /etc/profile
2 #添加以下两行到文件末尾
```



```
3 export RISCVC=$your_path
4 export PATH=$PATH:$RISCVC
```

代码 4-2: 修改环境变量



```
uan@uan-virtual-machine:~/riscv64-ucore
# and Bourne compatible shells (bash(1), ksh(1), ash(1), ...).

export RISCVC=/home/uan/riscv-toolchain/riscv64-unknown-elf-toolchain-10.2.0-20
20.12.8-x86_64-linux-ubuntu14/bin

export PATH=$PATH:$RISCVC

if [ "${PS1-}" ]; then
  if [ "${BASH-}" ] && [ "$BASH" != "/bin/sh" ]; then
    # The file bash.bashrc already sets the default PS1.
    # PS1='\h:\w\$ '
    if [ -f /etc/bash.bashrc ]; then
      . /etc/bash.bashrc
    fi
  else
    if [ "`id -u`" -eq 0 ]; then
      PS1='# '
    else
      PS1='$ '
    fi
  fi
fi
-- INSERT -- W10: Warning: Changing a readonly file
Press ENTER or type command to continue
```

图 4-2 配置环境变量

step5. 加载环境变量文件

```
1 source /etc/profile
```

代码 4-3: 加载环境变量文件

step6. 验证编译环境

在终端输入 `riscv64-unknown-elf-gcc -v`，如果出现以下内容，则编译环境配置成功。

```
1 Using built-in specs.
2 ....
3 gcc version 10.2.0 (SiFive GCC-Metal 10.2.0-2020.12.8)
```

代码 4-4: 验证编译环境

4.1.2 代码准备

step1. 下载 riscv64-pke-k210 的代码库并查看所有分支

```
1 git clone git@github.com:BITzga/riscv64-pke-k210.git
2 git branch -a
```

代码 4-5: 下载代码库

step2. 根据开发需求选择分支。

如下所示，k210 前缀的代码分支是根据 k210 环境移植完成的代码。而其他普通分支则是 PKE 原先的代码。此时，根据开发需求使用 `git checkout` 命令选择分支即可。

```
1 remotes/origin/k210/lab1_1_syscall
2 remotes/origin/k210/lab1_2_exception
3 remotes/origin/k210/lab1_3_irq
4 remotes/origin/k210/lab2_1_pagetable
5 remotes/origin/k210/lab2_2_allocatepage
6 remotes/origin/k210/lab2_3_pagefault
7 remotes/origin/k210/lab3_1_fork
8 remotes/origin/k210/lab3_2_yield
9 remotes/origin/k210/lab3_3_rrsched
10 remotes/origin/lab1_1_syscall
11 remotes/origin/lab1_2_exception
12 remotes/origin/lab1_3_irq
13 remotes/origin/lab2_1_pagetable
14 remotes/origin/lab2_2_allocatepage
15 remotes/origin/lab2_3_pagefault
16 remotes/origin/lab3_1_fork
17 remotes/origin/lab3_2_yield
18 remotes/origin/lab3_3_rrsched
19 remotes/origin/master
```

代码 4-6: 分支列表

4.1.3 K210 环境

- Python3 环境

由于烧录程序和串口调试工具都是使用 Python3 编写的。Python 是解释型语言，所以我们需要安装 Python3 解释器^[16]。除此之外我们还需要安装 Python 包管

理工具 `pip`^[17]。

```
1      sudo apt-get install python3
2      sudo apt-get install python3-pip
3
```

代码 4-7: 安装 Python3 环境

- 烧录工具我们编写好的程序，经过编译，变成 `bin` 文件，还需要烧录到 K210 上才能运行。而烧录需要借助烧录工具，这里我们使用了 `K-Flash`。
- 串口调试工具内核在运行时，输出信息是通过串口输出的，我们需要一个串口调试工具来接收 K210 上的串口信息。这里我们需要安装并使用 `miniterm`。

```
1      sudo apt-get install miniterm
2
```

代码 4-8: 安装 miniterm

- RustSBI-K210 支持包 SBI 是 RISC-V 的规范之一，它规定了监管者二进制 (Supervisor Binary Interface) 接口。RustSBI-K210 是 SBI 标准的一种实现，它使用 Rust 语言进行编写，具有性能安全的特点。除此之外，RustSBI-K210 还对 K210 板子提供了特殊的支持。它还可以在 K210 上作为我们内核程序的 Bootloader^[18]。我们需要使用 RustSBI-K210 支持包来支持内核移植，这里我们需要在烧录内核时引入 RustSBI-K210 支持包。

在这里，我们可以下载到 RustSBI-K210 的 release 版本

<https://github.com/rustsbi/rustsbi-k210/releases>

4.2 硬件环境

4.2.1 K210 硬件要求

硬件环境较为简单，我们只需要一块具有串口功能的 K210 板子和一根数据线即可。

第5章 移植PKE的具体实现

5.1 引入RustSBI

5.1.1 SBI背景与现状

移植K210时，PKE需要依赖SBI（Supervisor Binary Interface）提供Bootloader和RUNTIME功能，所以烧录内核时需要带上SBI固件。通过调研发现，OpenSBI与RustSBI（用Rust语言实现的SBI）均按照SBI标准实现。这两种也是业内使用最多的开源SBI。qemu就使用了OpenSBI为RISC-V提供了环境支持。此外，RustSBI还对K210做了特殊支持。所以目前暂定使用RustSBI当作SBI固件，为PKE提供Bootloader功能和RUNTIME运行时服务。移植过程中我们不需要关心RustSBI的具体实现，只需要根据SBI标准调用其接口即可。

除此之外，引入SBI，可以便于内核在其他板子上运行。当更换板子时，不需要改变内核代码，只需要更改RustSBI的支持包，获取对应硬件平台的支持包即可。这也简化了后续内核在其他芯片的移植工作。

5.1.2 RustSBI的特性介绍

1. RustSBI可以进行中断和异常委托

RustSBI在M模式下初始化时，会通过硬编码的方式将部分中断和异常委托给PKE。而剩余部分则由RustSBI自行处理，例如指令异常的处理。

```
1 // 委托终端；把S的中断全部委托给S层
2 fn delegate_interrupt_exception() {
3     use riscv::register::{medeleg, mideleg, mie};
4     unsafe {
5         mideleg::set_stimer();
6         mideleg::set_ssoft();
7         medeleg::set_instruction_misaligned();
8         medeleg::set_breakpoint();
9         medeleg::set_user_env_call();
10        mie::set_msoft();
11    }
12 }
```

代码 5-1: RustSBI 的中断和异常委托

由于需要兼容 K210 上的旧版 RISC-V 指令集，RustSBI-K210 无法将指令异常的处理托管给 S 层的 PKE。所以我们不能轻易改动 RustSBI-K210 关于指令异常的逻辑。

2. RustSBI 可以提供 Bootloader 功能与运行时服务

RustSBI 在完成初始化工作后，会跳转到 0x80020000 处，进入 S 模式，将控制权交给 PKE。

除此之外，RustSBI 实现了 SBI 标准的绝大部分要求，它可以提供运行时服务，如 SBI PUTCHAR，向串口输出信息、SBI SHUTDOWN，关闭所有硬件线程的运行。RustSBI 是使用 Rust 实现的，Rust 的语言特性会保证 RustSBI 具有安全的性能，不会发生内存泄漏。因此，RustSBI 的性能是安全的^[19]。

3. RustSBI 可以兼容 K210 旧版指令集

RustSBI 在 K210 兼容了高版本的指令。K210 实现的 RISC-V 指令集是 1.9.1 标准的。目前最新的特权级标准已经达到 1.11。如果我们的内核代码里有用到更高级的 RISC-V 汇编指令，可能会在 K210 上无法运行。这种情况下，就要改动内核的代码，会带来许多工作量。因此，使用 RustSBI 可以使我们免去处理 RISC-V 汇编版本的麻烦。

4. RustSBI 可以兼容不同的 RISC-V 开发板

使用 RustSBI，我们可以屏蔽不同的 RISC-V 开发板的差异，只需要使用 M 模式的 RustSBI 提供的功能即可。RustSBI 是 SBI 标准的 Rust 语言实现，RustSBI-K210 是 RustSBI 在 K210 上的具体实现。得益于 RustSBI 屏蔽了许多开发板的细节，我们移植后的 PKE 代码是不涉及 K210 的细节的。当 PKE 需要移植到其他 RISC-V 开发板时，我们只需要更改 RustSBI 的支持包即可。即更换 RustSBI 在不同开发板上的实现包。

5.2 编译流程改造

引入 RustSBI 之后，我们的 PKE 的入口点地址从原先的 0x80000000 变成了 0x80020000。我们需要将入口点地址的修改同步到内存布局中，这样以后链接器才能将我们的程序链接到正确的地址上。

RustSBI-K210 的支持包是 bin 文件，它需要一起打包到内核程序中，然后一起烧录到 K210 上。这就需要我们改造编译流程。

接下来本文将详细阐述这俩方面的改造过程。

5.2.1 内存布局改造

由于我们引入了 RustSBI，RustSBI 需要占用 0x80000000-0x8001FFFF 的物理内存空间。所以，内核的程序入口点由此发生了变化。我们需要修改内核 lds 文件，更改了程序的入口点以保证内核可以正常运行。

首先，我们先在 mentry.S 中加入以下两行代码，用以确保 _mentry 是内核程序的入口点。

```
1  .globl _mentry
2  .section .text.prologue, "ax"
3  _mentry:
```

代码 5-2: 修改内核程序入口点

确定了内核的程序入口点，还需要把程序入口点的地址设置为 0x80020000，这需要我们对内存布局进行改造。修改 BASE_ADDRESS，赋值为 0x80020000. 并设置代码段的起始地址为 BASE_ADDRESS，自此，内存布局就修改完成了。

```
1  OUTPUT_ARCH(riscv)
2  ENTRY(_mentry)
3  BASE_ADDRESS = 0x80020000;
4  SECTIONS
5  {
6      /*-----*/
7      /* Code and read-only segment */
8      /*-----*/
9
10     /* Begining of code and text segment, starts from DRAM_BASE to be
effective before enabling paging */
11     . = BASE_ADDRESS;
```

```

12
13     /* text: Program code section */
14     .text :
15     {
16         stext = .;
17         *(.text.prologue);
18         *(.text.stub .text.* .gnu.linkonce.t.*);
19         . = ALIGN(0x1000);
20         .....
21     }

```

代码 5-3: 修改内存布局

5.2.2 Makefile 改造

由于我们需要引入 RustSBI，并需要将其打包进入内核。除此之外，还需要将内核烧录到 K210，并与 K210 进行串口通讯。现有的 Makefile 并不支持这些工作。因此，我们需要修改 MakeFile^[20]。

```

1     $(KERNEL_K210_TARGET): $(KERNEL_TEMP_TARGET) $(BOOTLOADER)
2     $(COPY) $(BOOTLOADER) $@
3     $(V)dd if=$(KERNEL_TEMP_TARGET) of=$@ bs=128K seek=1

```

代码 5-4: 修改 Makefile

整体的编译流程为：

1. 打包内核

```

1     $(KERNEL_K210_TARGET): $(KERNEL_TEMP_TARGET) $(BOOTLOADER)
2     $(COPY) $(BOOTLOADER) $@
3     $(V)dd if=$(KERNEL_TEMP_TARGET) of=$@ bs=128K seek=1

```

代码 5-5: 打包内核

以上步骤是为了把 rust-sbi.bin 和 pke.img 打包成 kernel.img。bs=128k 意味着输入/输出的 block 大小为 128k，seek=1 意味着跳过第零个 block 进行复制操作。也就是说，内核镜像里第零个 block 存放着 rust-sbi.bin，第一个 block 才开始存放 pke.img。128k 对应着十六进制 0x20000，也就是二进制的 0010 0000 0000 0000 0000。

我们的 kernel.img 放置在 0x80000000 处，再加上以上原因，pke 的地址自然就是 0x8020000。所以，我们需要在链接脚本 kernel.lds 里指定内核起始地址为 0x8020000，

这也相当于告诉 SBI 这是内核的起始地址。当 SBI 在行使 Bootloader 的功能时，会跳转到 0x8020000，将控制权转接给内核。

2. 烧录

用数据线将 K210 与上位机连接，再使用 K-Flash，指定好相关参数即可完成烧录。

```
1 $(PYTHON) compile_tool/kflash.py -p $(PORT) -b 1500000 $(KERNEL_K210_TARGET)
```

代码 5-6: 烧录

3. 运行 minitem，与 K210 进行串口通讯

```
1 $(TERM) --eol LF --dtr 0 --rts 0 --filter direct $(PORT) 115200
```

代码 5-7: 运行 minitem

打开 miniterm，接收 K210 的串口打印输出。

4. 总结

最小可执行内核在 K210 的运行流程是：指定内核起始地址-> 打包完整内核镜像-> 烧录到 flash-> 引导程序加载和运行 RustSBI-> RustSBI 运行并跳转到内核的指定地址-> RustSBI 将控制权交接给内核-> 内核运行

5.3 内核启动流程改造

由于 RustSBI 已经运行在 M 态，并且为我们提供了许多运行时服务。有了 RustSBI，在 K210 上，pke 运行在 M 态会破坏 RustSBI 的设计，因此 pke 只需要运行在 S 态即可。

这样，我们就可以直接将 pke 的 M 态代码根据自身需求迁移到 S 态代码。迁移完成后，需要更改内核程序入口点至 S 态入口

修改 mentry.S 文件，将 call m_start 替换成 call s_start

5.4 驱动开发

5.4.1 串口驱动

串口驱动的开发较为简单，因为 RustSBI 已经帮我们实现了串口功能，并提供了相应的二进制接口，我们只需要调用二进制接口并简单封装即可。

```
1 void cons_putc(int c) {
```



```
2     sbi_console_putchar((unsigned char) c);
3 }
4
5 void sbi_console_putchar(unsigned char ch) {
6     sbi_call(SBI_CONSOLE_PUTCHAR, ch, 0, 0);
7 }
```

代码 5-8: 串口驱动

5.4.2 时钟驱动

时钟驱动程序的编写稍微复杂。时钟驱动主要分为三个部分：读取时间、设置时间、设置时钟中断、时钟初始化。

读取时间部分我们采用了内联汇编的方式，使用 `rdtime` 指令获取 K210 的当前时间。需要注意的是，我们的驱动代码还需要判断当前 CPU 架构的位数，如果是 32 位，则需要分低位和高位两次读取当前时间。

```
1 static inline uint64 get_cycles(void) {
2     #if __riscv_xlen == 64
3         uint64 n;
4         __asm__ __volatile__ ("rdtime %0" : "=r"(n));
5         return n;
6     #else
7         uint32_t lo, hi, tmp;
8         __asm__ __volatile__ (
9             "1:\n"
10            "rdtimeh %0\n"
11            "rdtime %1\n"
12            "rdtimeh %2\n"
13            "bne %0, %2, 1b"
14            : "=&r"(hi), "=&r"(lo), "=&r"(tmp));
15            return ((uint64) hi << 32) | lo;
16        #endif
17 }
```

设置时钟中断部分，我们通过调用 RustSBI 提供的接口来实现。

```
1 void clock_set_next_event(void) { sbi_set_timer(get_cycles() + timebase); }
2
3 void sbi_set_timer(unsigned long long stime_value) {
4     sbi_call(SBI_SET_TIMER, stime_value, 0, 0);
5 }
```

```
5     }
```

代码 5-9: 设置时钟中断

这一段实现逻辑较为简单，只是对 RustSBI 提供接口的简单封装。我们是通过 `get_cycles()` 函数获取当前时间，再加上我们的配置值 `timebase`，得到下一次时间中断的时间。

时钟初始化部分，我们通过设置 `sie` 寄存器的时钟中断使能位，开启 S 态的时钟中断，让 S 态的 PKE 能够拦截和处理时钟中断。

```
1 void clock_init(void) {
2     // enable timer interrupt in sie
3     set_csr(sie, MIP_STIP);
4     clock_set_next_event();
5     g_ticks = 0;
6     sprintf("++ setup timer interrupts\n");
7 }
```

代码 5-10: 时钟初始化

5.5 HTIF 依赖移除及接口移植

PKE 已有代码对 `spike` 提供的 HTIF（Host-Target InterFace）接口存在依赖。当 PKE 需要打印字符串到屏幕、访问主机上的文件或设备时会调用 HTIF 相关接口。PKE 通过 HTIF 接口调用 Linux 对应接口，进而实现访问外部设备的功能^[21]。

如果需要在 K210 上维持和原先 PKE 在 `spike` 模拟器一样的环境。K210 需要同时运行 PKE 和 Linux 两个内核程序，还要提供 `spike` 模拟器类似的与 Linux 访问的 HTIF 接口。这样的移植方案的开发成本会很高。并且收益不大。

所以移植 PKE 到 K210 时，我们需要移除 PKE 对 HTIF 的依赖，自行实现其依赖功能，编写相关代码。这样 K210 只需要运行一个内核程序（PKE）即可，移植工作的开发成本会很低。

5.5.1 涉及接口梳理

串口相关接口

运行在 K210 上的 PKE，需要使用串口接口来进行串口的访问。打印字符串到上位机。这样子才能方便我们进行实验验证，程序调试。PKE 原先并未实现串口功能，

而是通过调用 HTIF 接口来使用串口功能。因此，我们需要自行实现串口功能。

文件系统相关接口

原先的 PKE 没有实现文件系统，而是通过调用 HTIF 接口来使用文件系统功能。PKE 在加载用户 elf 程序文件时，通过调用 HTIF 接口来访问用户程序文件，从而将用户程序加载到内存中。最后再运行用户程序。

Device Tree 相关接口

此接口的功能是用于读取设备树文件，以屏蔽 SoC 细节。

shutdown 接口

供 panic 使用的接口，用于关闭设备。在内核 panic 时调用。PKE 原先并未实现该功能，而是通过调用 HTIF 接口来实现。

poweroff 接口

供 panic 使用的接口，用于关闭设备电源。在内核 assert 失败时使用。PKE 原先并未实现该功能，而是通过调用 HTIF 接口来实现。

定时器接口

此接口用于 PKE 设置定时中断，读取时间。PKE 中是使用 MMIO（memory mapping IO）来设置定时中断。由于 K210 开发板此方面的资料较少，不确定 K210 是否支持此方式。从减少开发成本的角度考虑，该接口使用 SBI 接口来实现的方案最低，可以免去查阅资料和测试的成本。因此，该接口也需要我们进行移植。

5.5.2 接口移植的技术方案及实现

串口及格式化输出实现

由于我们已经引入了 RustSBI，我们很容易实现串口输出。我们只需要调用 SBI 提供的串口服务即可。

```
1  uint64 SBI_CONSOLE_PUTCHAR = 1;  
2  uint64 sbi_call(uint64 sbi_type, uint64 arg0, uint64 arg1, uint64 arg2) {
```

```
3     uint64 ret_val;
4     __asm__ volatile (
5         "mv x17, %[sbi_type]\n"
6         "mv x10, %[arg0]\n"
7         "mv x11, %[arg1]\n"
8         "mv x12, %[arg2]\n"
9         "ecall\n"
10        "mv %[ret_val], x10"
11        : [ret_val] "=r"(ret_val)
12        : [sbi_type] "r"(sbi_type), [arg0] "r"(arg0), [arg1] "r"(arg1), [arg2] "r"(
13          arg2)
14        : "memory"
15        );
16        return ret_val;
17    }
18
19    void sbi_console_putchar(unsigned char ch) {
20        sbi_call(SBI_CONSOLE_PUTCHAR, ch, 0, 0);
21    }
```

代码 5-11: 串口实现代码

有了串口输出的方法，接下来我们需要格式化输出 `sprint`。`sprint` 定义在 `spike_utils.c`，接下来我们看看 `sprint` 的代码实现。

```
1     void sprint(char *buf, const char *fmt, ...) {
2         va_list args;
3         va_start(args, fmt);
4         vsnprintf(buf, 1024, fmt, args);
5         va_end(args);
6     }
```

代码 5-12: `sprint` 实现代码

`sprint` 函数的第一个参数对应了一个字符串的起始地址，第二个参数... 代表可变参数。接下来我们点开 `vprintk` 的实现：

```
1     void vprintk(const char* s, va_list vl) {
2         char out[256];
3         int res = vsnprintf(out, sizeof(out), s, vl);
4         //you need spike_file_init before this call
5         spike_file_write(stderr, out, res < sizeof(out) ? res : sizeof(out));
```

```
6      }
```

代码 5-13: vprintk 实现代码

通过阅读代码发现，`vsnprintf`并没有将字符串真正输出到控制台。而是根据原先的字符串和参数做字符串格式化，将最终结果保存在 `out` 数组中。

真正将字符串打印的函数调用是 `spike_file_write`。这个函数是调用了 `spike` 的接口，通过 `spike` 去调用 Linux 的字符串打印 API。所以我们需要在 K210 上实现串口输出，方案已经很明显，就是将 `vprintk` 函数中的 `spike_file_write` 函数替换成 `sbi_console_putchar` 实现的打印函数 `cputs`。

```
1  void vprintk(const char *s, va_list vl) {
2      char out[256];
3      int res = vsnprintf(out, sizeof(out), s, vl);
4      cputs(out);
5  }
6  /* *
7   * cputs- writes the string pointed by @str to stdout and
8   * appends a newline character.
9   * */
10 int cputs(const char *str) {
11     int cnt = 0;
12     char c;
13     while ((c = *str++) != '\0') {
14         cputch(c, &cnt);
15     }
16     cputch('\n', &cnt);
17     return cnt;
18 }
```

代码 5-14: vprintk 改造代码

至此，我们完成了串口实现和格式化输出。通过在 K210 上验证，我们的 `sprint` 可以通过串口，在控制台上输出格式化的字符串。

文件系统相关接口

由于文件系统的开发成本较高，开发时间不足等原因，我们暂时未实现文件系统。我们采用了内存加载的方式加载用户进程。

Device Tree 相关接口

PKE 运行在 S 态，设备树文件已经由 M 态的 RustSBI 读取并处理。因此 PKE 不需要读取和解析设备树文件。所以，我们在移植时，只需要去除 PKE 读取 DTB 的代码即可。

shutdown 与 poweroff 接口

内核在编码调试过程中，需要借助一些方法来判断变量值是否符合预期，如 `assert` 方法。如果不符合预期需要打印错误信息，并且让内核 `panic`。那么 `panic` 在 `pke` 上是如何实现的呢？我们可以阅读 `pke` 实现 `panic` 的代码。

```
1  void do_panic(const char *s, ...) {
2      va_list vl;
3      va_start(vl, s);
4      sprintf(s, vl);
5      shutdown(-1);
6      va_end(vl);
7  }
8
9  void shutdown(int code) {
10     sprintf("System is shutting down with exit code %d.\n", code);
11     frontend_syscall(HTIFSYS_exit, code, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
12     while (1)
13         ;
14 }
```

代码 5-15: `panic` 实现代码

通过观察我们可以发现，`panic` 的调用链路是：

`do_panic`->`shutdown`->`frontend_syscall`

最终 `panic` 是通过 `frontend_syscall` 调用 `spike` 提供的接口实现的。既然是需要调用 `spike` 的 HTIF，与 `spike` 的 HTIF 具有依赖关系，那么我们移植的时候就需要去除相关依赖，自行实现 `do_panic` 函数。

通过观察 `panic` 和 `poweroff` 功能，很容易发现，他们都是打印报错信息，然后终止了硬件线程（`hart`）。那么我们可以通过调用 SBI 的 `shutdown` 接口来实现这两个接口，打印报错以后，终止所有的 `hart`。

定时器接口

在前面的部分，我们已经阐述了时间驱动的实现，因此，我们可以直接使用实现好的时间驱动，以此提供定时器相关的接口功能。

5.6 用户程序加载

5.6.1 单个进程加载

在原先 PKE 的中，是通过调用 `spike` 接口，进而调用 `linux` 的文件系统接口来加载用户程序的。而在 K210 上，我们没有 `spike` 的环境支持，不能直接调用 `spike` 接口。因此，加载用户程序就需要自行实现文件系统，或者使用其他办法。

由于文件系统的实现较为繁琐，其工作量会阻塞这个移植进度。为了便于移植开发的快速迭代，我们暂时不实现文件系统。而是采用将用户程序一起编译进入内核的方式，通过获取用户程序在内存的地址，再让 PKE 加载进程的办法来实现这个需求。

具体的做法是：

1. 将用户程序、内核和 RustSBI 一起编译打包到 `kernel.img`
2. 使用 `objdump` 命令查找到用户程序 `main` 函数的地址
3. 得到地址以后，把地址的值赋值到 `kernel/config.h` 中配置的用户程序起始点的宏定义中

通过这种技术方案，我们可以用较低的开发成本实现用户程序加载。

5.6.2 开启虚拟内存空间后用户进程的加载

在开启分页模式与虚拟内存之前。我们的 PKE 是运行在裸机模式下的，这就意味着此时没有虚拟内存的概念，程序中的地址就是实际的物理地址。

而开启分页模式和虚拟内存后，我们的 PKE 是运行在虚拟内存模式下的，此时的 PKE 将物理地址和虚拟地址做了简单的一对一映射。映射包括内核的地址，也包括用户进程的地址。

在移植前，PKE 通过文件系统的接口加载用户进程，并将用户程序映射到虚拟内存中。

移植后，PKE 是通过打包编译、内存加载的方式加载用户进程。我们开启分页模式和虚拟内存之后，也需要对用户进程进行映射，否则用户进程在执行时就会出错。

```

1  user_vm_map((pagetable_t) proc->pagetable,
2      USER_PROGRAM_ENTRY,
3      (uint64)_etext - USER_PROGRAM_ENTRY,
4      USER_PROGRAM_ENTRY,
5      prot_to_type(PROT_WRITE | PROT_EXEC | PROT_READ, 1));
6
7      // maps virtual address [va, va+sz] to [pa, pa+sz]
8      //(for user application).
9
10     void user_vm_map(pagetable_t page_dir, uint64 va, uint64 size, uint64 pa
11 , int perm) {
12         if (map_pages(page_dir, va, size, pa, perm) != 0) {
13             panic("fail to user_vm_map .\n");
14         }
15     }

```

代码 5-16: 用户进程地址映射

我们通过调用 PKE 提供的库函数 `user_vm_map()` 来实现用户进程的映射。它可以完成一段区间内物理地址和虚拟地址的映射。函数的第一个参数是进程的页表，这个页表是进程的根页表项，可以用以索引和查找其他页表项。第二个参数和第四个参数分别是虚拟地址和物理地址的起始地址。这里我们都设置了同样的值。第三个参数是映射空间的大小，由于我们的用户程序是最后编译的，它的空间大小是从 `main` 入口点开始到代码段结束的 `_etext` 地址。第五个参数是用于设置虚拟内存空间的权限。为了正确加载和运行进程，我们将其设置成了可读可写可执行。

5.6.3 多进程支持

PKE 在开启多进程之后，不再是执行单个用户进程，而是调度运行进程池中的用户进程。原先的进程加载方式也迁移到了 `alloc_process()` 函数中。

因此，我们还需要将进程加载和内存映射的逻辑迁移到 `alloc_process()` 函数中。具体的实现方式与上一节的方式基本相同，只不过是实现的位置不同，并且多了一些进程描述字段值的设置。

```

1  user_vm_map((pagetable_t) proc->pagetable, USER_PROGRAM_ENTRY, (uint64)
    _etext - USER_PROGRAM_ENTRY,

```



```
2         USER_PROGRAM_ENTRY,
3         prot_to_type(PROT_WRITE | PROT_EXEC | PROT_READ, 1));
4
5     // record the vm region in proc->mapped_info
6     int j;
7     for (j = 0; j < PGSIZE / sizeof(mapped_region); j++) {
8         if (proc->mapped_info[j].va == 0x0) break;
9     }
10
11     proc->mapped_info[j].va = USER_PROGRAM_ENTRY;
12     proc->mapped_info[j].npages = 1;
13     proc->mapped_info[j].seg_type = CODE_SEGMENT;
14     proc->total_mapped_region++;
15     proc->trapframe->epc = USER_PROGRAM_ENTRY;
```

代码 5-17: 多进程情况下用户进程的加载和映射

如上代码，描述了多进程情况下用户进程的加载和映射。第一行代码的逻辑与原先未开启多进程时相同，这里就不再赘述。

第二段代码是对进程的 `mapped_info` 数组进行遍历，找到 `va` 还未设置的 `mapped_info`。由之前的内核逻辑得知，此时找到的 `mapped_info` 是用于描述进程代码段的。

接着第三段代码会对进程代码段的描述体 `mapped_info` 进行赋值与初始化。至此，多进程下用户进程的加载就结束了。

第 6 章 代理内核实验的参考实现

在本章节，我们将给出移植 K210 后的代理内核实验的参考实现。每个实验实现的阐述结构大致相同，先从实验的用户程序开始，描述实验的目标和预期效果。最后我们会给出实验的参考实现代码和实现过程描述。

6.1 系统调用

6.1.1 实验预期

给定用户态应用 user/app_helloworld.c。

```
1  #include "user_lib.h"
2
3  int main(void) {
4      printu("Hello world!\n");
5      exit(0);
6  }
```

代码 6-1: 用户态应用 app_helloworld.c

实验的目标是 PKE 能够加载并成功运行它。实验预期是应用通过系统调用，成功打印出“Hello world!”，并正常退出。

6.1.2 具体实现

如上的用户态代码很简单，只有两行。第一行是用户态的打印函数 printu()。第二行是退出进程的函数 exit()。关于 printu() 和 exit() 函数的定义在 user_lib.c。接下来我们看看这两个函数的具体实现：

```
1  int printu(const char *s, ...) {
2      va_list vl;
3      va_start(vl, s);
4      char out[256]; // fixed buffer size.
5      int res = vsnprintf(out, sizeof(out), s, vl);
6      va_end(vl);
7      const char *buf = out;
8      size_t n = res < sizeof(out) ? res : sizeof(out);
9
10     return do_user_call(SYS_user_print, (uint64) buf, n, 0, 0, 0, 0, 0);
11 }
```

```

12
13     int exit(int code) {
14         return do_user_call(SYS_user_exit, code, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
15     }

```

代码 6-2: printu 与 exit 的实现

观察发现，`printu()` 和 `exit()` 函数的实现都是简单处理了输入的参数，然后就调用了 `do_user_call()` 函数。他们俩都是通过系统调用来获取自己所需的功能。那么结论已经很明显，我们只需要在 PKE 的内核代码中实现 `printu()` 和 `exit()` 的系统调用即可。

观察内核代码发现，`printu()` 和 `exit()` 的系统调用都已经实现，系统调用部分只有 `handle_syscall()` 并未实现。该函数的功能是让用户进程的 `pc` 值增加 4。之所以增加 4，是因为 RISC-V 的指令是 32 位的，32 位代表着 4 个字节。然后调用系统调用，最终将返回值保存在 `a0` 寄存器中。接下来我们给出它的实现代码。

```

1 static void handle_syscall(trapframe *tf) {
2     tf->epc += 4;
3     tf->regs.a0 = do_syscall(tf->regs.a0, tf->regs.a1,
4                             tf->regs.a2, tf->regs.a3,
5                             tf->regs.a4, tf->regs.a5,
6                             tf->regs.a6, tf->regs.a7);
7 }

```

代码 6-3: handle_syscall 的实现

将实验要求实现后，我们可以在 K210 上运行实验代码，得到如下结果。

```

1 [rustsbi] Version 0.1.0
2
3 .-----  --  --  -----'-----'-----'-----  --
4 | _ \    | | | | /      | /      || _ \ | |
5 | |_) |  | | | | | (----`---| |----`| (----`| |_) || |
6 | /    | | | | \ \    | | \ \    | _ < | |
7 | \| \----.| `--' |.----) | | |.----) | | |_) || |
8 |_| `-----| \-----/ |-----/    |__| |-----/    |_____/ |__|
9
10 [rustsbi] Platform: K210
11 [rustsbi] misa: RV64ACDFIMSU
12 [rustsbi] mideleg: 0x222
13 [rustsbi] medeleg: 0x1ab

```

```
13 [rustsbi] Kernel entry: 0x80020000
14 Enter supervisor mode...
15
16 Application program entry point (virtual address): 0x00000000800206b2
17
18 Switch to user mode...
19
20 Hello world!
21
22 User exit with code:0.
23
24 System is shutting down with exit code 0.
25
26 [rustsbi] todo: shutdown all harts on k210; program halt
```

代码 6-4: lab1 实验结果

6.2 异常处理

6.2.1 实验预期

给定用户态应用 user/app_illegal_instruction.c

```
1 int main(void) {
2     printu("Going to hack the system by running privilege instructions.\n");
3     asm volatile("csrw sscratch, 0");
4     exit(0);
5 }
```

代码 6-5: 用户态应用 app_illegal_instruction.c

我们可以看到，用户态程序执行了非法指令 `csrw`。这个指令的执行在 U 模式是不被允许的，在 U 模式执行这个指令会产生非法指令异常。我们的实验预期是 PKE 能够捕获执行这个指令时产生的非法指令异常，并进行简单处理。

6.2.2 实验分析

由于 RustSBI-K210 支持包对 K210 进行了兼容性的处理。K210 实现的 RISC-V 指令集版本是 1.9.1，而最新的 RISC-V 指令集版本是 1.11.0。为了能让 K210 能够运行高版本的 RISC-V 指令，该支持包捕获了高版本指令产生的异常，然后将其转换为低版本的指令。这种机制使得我们可以在 K210 上运行最新版的 RISC-V 指令。

为了保持这种兼容性，指令异常只能由 M 模式的 RustSBI 处理，我们不能将指令异常托管给 S 模式的 PKE。所以此次实验，我们没有办法在 PKE 中完成，只能交给 RustSBI 处理。所幸，RustSBI 已经实现了非法指令的捕获与处理，当用户程序执行非法指令时，RustSBI 会捕获异常，并且产生 `panic`，输出 `panic` 信息。这和原来实验的预期是一致的。

此次实验不需要我们改动 PKE 代码，就可以得到预期效果：

```

1  [rustsbi] Version 0.1.0
2
3  .-----  --  --  -----'-----'-----'-----  --
4  |  _  \    | | | | /    |    | /    ||  _  \ | |
5  |  |_) |    | | | | |    | (----`---| |----`---| |_) || |
6  |    /    | | | | \    | |    \    |  _  < | |
7  |  | \  ----.| `--'  |.----) |    | | .----) |  | |_) || |
8  |  _| `_.----| \_____/ |_____/    |__| |_____/    |_____/ |__|
9
10 [rustsbi] Platform: K210
11 [rustsbi] misa: RV64ACDFIMSU
12 [rustsbi] mideleg: 0x222
13 [rustsbi] medeleg: 0x1ab
14 [rustsbi] Kernel entry: 0x80020000
15 Enter supervisor mode...
16
17 Application program entry point (virtual address): 0x0000000080020788
18
19 Switch to user mode...
20
21 Going to hack the system by running privilege instructions.
22
23 [rustsbi] panicked at 'invalid instruction, mepc: 0000000080020798,
24 instruction: 14005073', platform/k210/src/main.rs:522:17

```

代码 6-6: lab2 实验结果

6.3 定时器中断

6.3.1 实验预期

给定用户态应用 `user/app_long_loop.c`

```
1 #include "user_lib.h"
```

```
2
3  int main(void) {
4      printu("Hello world!\n");
5      int i;
6      for (i = 0; i < 100000000; ++i) {
7          if (i % 5000000 == 0) printu("wait %d\n", i);
8      }
9      exit(0);
10 }
```

代码 6-7: 用户态应用 app_long_loop.c

实验操作者需要初始化时钟中断，设置定时器中断的时间间隔，并且编写时钟中断处理程序。最终让用户程序执行循环的同时，定时打印出自增的次数。

6.3.2 具体实现

```
1
2  //时钟初始化部分已在kernel.c中的s_start()中完成。
3  void handle_stimer_trap() {
4      sprint("Ticks %d\n", ++g_ticks);
5      clock_set_next_event();
6  }
```

代码 6-8: 定时器中断处理程序

我们的实现逻辑很简单，就是让定时器中断的次数自增，并打印输出。然后设置下一次定时器中断的时间。

6.4 虚拟地址和物理地址的转换

6.4.1 实验预期

给定用户态应用 user/app_helloworld_no_lds.c

```
1  #include "user_lib.h"
2
3  int main(void) {
4      printu("Hello world!\n");
5      exit(0);
6  }
```

代码 6-9: 用户态应用 app_helloworld_no_lds.c

此时的用户程序是没有链接脚本文件的。用户程序在编译和链接时并未指定好程序中符号的地址。与此同时，PKE 已经开启虚拟内存，用户进程的物理内存空间也被映射到虚拟内存上了。

用户进程在调用 `printu` 时，它会通过 `ecall` 指令，切换到拥有更高特权级的 S 模式的内核，让内核完成打印输出。需要指出的是，用户进程传入内核的地址参数是虚拟地址，内核需要将该虚拟地址转换成物理地址才能访问字符串“Hello world!”。

所以我们的实验预期是内核成功转换用户进程传入的虚拟地址，并完成打印输出。

6.4.2 具体实现

```
1  ssize_t sys_user_print(const char* buf, size_t n) {
2      //buf is an address in user space on user stack,
3      //so we have to transfer it into phisical address (kernel is running in
4      direct mapping).
5      assert( current );
6      char* pa = (char*)user_va_to_pa((pagetable_t)(current->pagetable), (void
7      *)buf);
8      sprint(pa);
9      return 0;
10 }
11
12 void *user_va_to_pa(pagetable_t page_dir, void *va) {
13     uint64 va0 = (uint64) va;
14     pte_t *PTE = page_walk(page_dir, va0, 0);
15     uint64 pa = 0;
16     if (PTE) {
17         pa = PTE2PA(*PTE) + (va0 & ((1 << PGSHIFT) - 1));
18         return (void *) pa;
19     } else {
20         return NULL;
21     }
22 }
```

代码 6-10: 虚拟地址到物理地址的转换

虚拟地址到物理地址的转换逻辑很简单，首先是通过调用 `page_walk()` 函数，查找虚拟地址的页表项。找到页表项以后，再通过 `PTE2PA()` 函数和一些移位操作获得

物理地址。

6.5 基本的内存管理

6.5.1 实验预期

给定用户态应用 user/app_naive_malloc.c

```
1  #include "user_lib.h"
2
3  struct my_structure {
4      char c;
5      int n;
6  };
7
8  int main(void) {
9      struct my_structure* s = (struct my_structure*)naive_malloc();
10     s->c = 'a';
11     s->n = 1;
12
13     printu("s: %lx, {%c %d}\n", s, s->c, s->n);
14
15     naive_free(s);
16     exit(0);
17 }
```

代码 6-11: 用户态应用 app_naive_malloc.c

如用户程序所示，我们的 PKE 需要支持内存的分配和回收。而内存的分配逻辑在 PKE 中已经实现好了，我们现在还需要实现内存的回收。也就是实现 naive_free() 函数。

6.5.2 具体实现

```
1  uint64 sys_user_free_page(uint64 va) {
2      user_vm_unmap((pagetable_t)current->pagetable, va, PGSIZE, 1);
3      return 0;
4  }
5
6  void user_vm_unmap(pagetable_t page_dir, uint64 va, uint64 size, int free) {
7      if (free) {
8          pte_t *PTE = page_walk(page_dir, va, 0);
```



```
9         if (PTE != NULL) {
10             free_page(user_va_to_pa(page_dir, (void *) va));
11             *PTE = *PTE & (~PTE_V);
12         } else {
13             sprintf("PTE of free page is NULL\n");
14         }
15     }
16 }
```

内存回收的逻辑稍微复杂一些，我们首先是根据根页表项与虚拟地址去调用 `page_walk()` 函数，得到需要回收的虚拟地址对应的页表项。然后将页表项的 `PTE_V` 位置 0，这意味着此页表项将变成无效页表项。与此同时，我们通过 `free_page()` 函数将物理页面回收。在这里我们只考虑一个物理页。

6.6 栈空间不足与缺页异常

6.6.1 实验预期

给定应用 `user/app_sum_sequence.c`

```
1  #include "user_lib.h"
2  #include "../util/types.h"
3
4  uint64 sum_sequence(uint64 n) {
5      if (n == 0)
6          return 0;
7      else
8          return sum_sequence( n-1 ) + n;
9  }
10
11 int main(void) {
12     uint64 n = 1000;
13     printu("Summation of an arithmetic sequence from 0 to %ld is: %ld \n", n,
14           sum_sequence(n) );
15     exit(0);
16 }
```

代码 6-12: 用户态应用 `app_sum_sequence.c`

如上代码所示，用户程序执行了一个递归求等差数列的函数，递归的层数是 1000 层。显然，这么深的递归层数，很容易导致栈溢出，从而导致缺页异常。

所以我们的实验预期是 PKE 能够捕获缺页异常，并且能够为用户进程的栈空间进行一定的扩容。让该用户进程成功运行。

6.6.2 具体实现

```
1  void handle_user_page_fault(uint64 mcause, uint64 sepc, uint64 stval) {
2      sprintf("handle_page_fault: %lx\n", stval);
3      switch (mcause) {
4          case CAUSE_STORE_PAGE_FAULT:
5              if (stval < USER_STACK_TOP
6                  && (stval - USER_STACK_TOP) >= 20 * (STACK_SIZE)) {
7                  user_vm_map((pagetable_t) current->pagetable,
8                              stval - stval % PGSIZE,
9                              PGSIZE,
10                             (uint64) alloc_page(),
11                             prot_to_type(PROT_WRITE | PROT_READ, 1));
12              } else {
13                  panic("handle_page_fault: stack overflow\n");
14              }
15              break;
16          default:
17              sprintf("unknown page fault.\n");
18              break;
19      }
20 }
```

代码 6-13: handle_page_fault

6.7 创建子进程 fork 的实现

6.7.1 实验预期

给定应用 user/app_naive_fork.c

```
1  #include "../user/user_lib.h"
2  #include "../util/types.h"
3
4  int main(void) {
5      uint64 pid = fork();
6      if (pid == 0) {
7          printu("Child: Hello world!\n");
```

```
8     } else {
9         printu("Parent: Hello world! child id %ld\n", pid);
10    }
11
12    exit(0);
13 }
```

代码 6-14: 用户态应用 app_naive_fork.c

如用户代码所示，PKE 需要创建一个用户进程的子进程，然后调度运行两者。

6.7.2 具体实现

如下所示，我们在 kernel/process.c 中补全了 do_fork() 函数。

```
1 //          panic("You need to implement the code segment mapping of
child in lab3_1.\n");
2 for (int j = 0; j < parent->mapped_info[i].npages; j++) {
3     map_pages(child->pagetable,
4               parent->mapped_info[i].va + j * PGSIZE,
5               (uint64) _etext - USER_PROGRAM_ENTRY,
6               USER_PROGRAM_ENTRY,
7               prot_to_type(PROT_WRITE | PROT_READ | PROT_EXEC, 1));
8
9     sprintf("do_fork map code segment at pa:%lx of parent to child at va:%lx
.\n",
10            USER_PROGRAM_ENTRY, parent->mapped_info[i].va + j * PGSIZE);
11 }
```

代码 6-15: do_fork

6.8 进程的控制权交接

6.8.1 实验预期

给定应用 user/app_yield.c

```
1 #include "../user/user_lib.h"
2 #include "../util/types.h"
3
4 int main(void) {
5     uint64 pid = fork();
6     uint64 rounds = 0xffff;
```

```
7     if (pid == 0) {
8         printu("Child: Hello world! \n");
9         for (uint64 i = 0; i < rounds; ++i) {
10             if (i % 10000 == 0) {
11                 printu("Child running %ld \n", i);
12                 yield();
13             }
14         }
15     } else {
16         printu("Parent: Hello world! \n");
17         for (uint64 i = 0; i < rounds; ++i) {
18             if (i % 10000 == 0) {
19                 printu("Parent running %ld \n", i);
20                 yield();
21             }
22         }
23     }
24
25     exit(0);
26     return 0;
27 }
```

代码 6-16: 用户态应用 app_yield.c

如用户代码所示，父子进程都轮流执行了 `yield()` 函数。`yield()` 函数是一个可以交出进程自己的 CPU 执行权的函数。`yield()` 函数是由 PKE 内核实现的系统调用功能之一。

我们的实验预期是，父子进程之间的调度是可以交替的，也就是说父子进程之间需要轮流打印出他们对应的字符串。

6.8.2 具体实现

如下，本文给出了 `yield()` 函数的实现。实现逻辑较为简单，就不再具体阐述了。

```
1  ssize_t sys_user_yield() {
2      assert(current);
3      current->status = READY;
4      insert_to_ready_queue(current);
5      schedule();
6
7      return 0;
```

```
8     }
```

代码 6-17: yield

6.9 进程的时间片调度

6.9.1 实验预期

给定应用 user/app_two_long_loops.c

```
1  #include "../user/user_lib.h"
2  #include "../util/types.h"
3
4  int main(void) {
5      uint64 pid = fork();
6      uint64 rounds = 100000000;
7      uint64 interval = 10000000;
8      uint64 a = 0;
9      if (pid == 0) {
10         printu("Child: Hello world! \n");
11         for (uint64 i = 0; i < rounds; ++i) {
12             if (i % interval == 0) printu("Child running %ld \n", i);
13         }
14     } else {
15         printu("Parent: Hello world! \n");
16         for (uint64 i = 0; i < rounds; ++i) {
17             if (i % interval == 0) printu("Parent running %ld \n", i);
18         }
19     }
20
21     exit(0);
22     return 0;
23 }
```

代码 6-18: 用户态应用 app_two_long_loops.c

如上代码所示，我们的用户父子进程不再主动调用 `yield()` 函数交出 CPU 执行权。而是由 PKE 内核利用时间片轮询的方式来调度父子进程，定时地切换父子进程的执行权。

所以我们的实验预期是，完成 PKE 内核中时间片调度进程的实现，并让父子进程交替执行。

6.9.2 具体实现

```
1  void smode_trap_handler(void) {
2      assert(current);
3      current->trapframe->epc = read_csr(sepc);
4      uint64 cause = read_csr(scause);
5
6      switch (cause) {
7          case CAUSE_STIMER_S_TRAP:
8              handle_stimer_trap();
9              rrsched();
10             break;
11         default:
12             //.....省略展示此部分代码.....
13     }
14     switch_to(current);
15 }
16
17 void rrsched() {
18     assert(current);
19     if (current->tick_count < TIME_SLICE_LEN) {
20         current->tick_count++;
21     } else {
22         current->tick_count = 0;
23         current->status = READY;
24         insert_to_ready_queue(current);
25         schedule();
26     }
27 }
```

代码 6-19: 时间片调度

时间片调度进程的实现，是通过设置定时器中断，当 S 模式的 PKE 拦截到定时器中断时，就会执行中断处理程序，处理程序其中就包括了进程的切换。

6.10 实验资料的管理

在我们移植实验的过程中，我们使用了 git 来管理 PKE 移植的代码，并且将移植后的代码放置在了 GitHub 仓库中。GitHub 仓库的链接如下：

<https://github.com/BITzga/riscv64-pke-k210>。

此代码库包含 18 个主要分支，其中有 9 个分支是 PKE 移植前的代码分支，这 9 个分支的代码保持不变，没有受到修改，是移植前的基础分支，也可以供我们进行移植前后的代码比较。

此外还有另外 9 个 k210 前缀的分支。他们是移植后的代码分支，均已通过功能测试，都可以被烧录和运行在 K210 上, 并且可以达到实验预期效果。

```
1 remotes/origin/k210/lab1_1_syscall
2 remotes/origin/k210/lab1_2_exception
3 remotes/origin/k210/lab1_3_irq
4 remotes/origin/k210/lab2_1_pagetable
5 remotes/origin/k210/lab2_2_allocatepage
6 remotes/origin/k210/lab2_3_pagefault
7 remotes/origin/k210/lab3_1_fork
8 remotes/origin/k210/lab3_2_yield
9 remotes/origin/k210/lab3_3_rrsched
10 remotes/origin/lab1_1_syscall
11 remotes/origin/lab1_2_exception
12 remotes/origin/lab1_3_irq
13 remotes/origin/lab2_1_pagetable
14 remotes/origin/lab2_2_allocatepage
15 remotes/origin/lab2_3_pagefault
16 remotes/origin/lab3_1_fork
17 remotes/origin/lab3_2_yield
18 remotes/origin/lab3_3_rrsched
```

代码 6-20: 分支列表

此外，我们在移植开发工作完成以后，还编写了相关的实验指导书，并放置在了 gitbook 上。由于时间关系，我们的实验指导书并不是特别完善，后续我们将对其进行补充和完善。这里我们先给出实验指导书的 gitbook 链接：

<https://1621184422.gitbook.io/pke-k210-tutorial>

结 论

本文从实际出发，考虑实验教学的经济成本、环境搭建的学习成本，对现有的代理内核操作系统实验 PKE 进行了改造，最终将其移植到 K210 开发板上，并完成了实验改进。

整个过程从原有代理内核操作系统实验的实际出发，分析其在物理环境下进行实验的经济成本、环境搭建的成本。逐步梳理出目前存在的痛点，并提出解决痛点的需求。再对目前实验改造的需求进行需求分析。需求分析结束后，本文提出了实验移植和改进的技术方案。然后本文从环境搭建、移植的具体实现详细阐述了技术方案。接着本文给出了代理内核操作系统实验在移植后的参考实现，列举了九个实验的参考实现，并分别给出了代码和说明。最后，本文给出了代理内核移植后的代码仓库的 GitHub 地址，也给出了实验指导书的 gitbook 地址。

虽然本文完成了代理内核实验在 K210 上的移植和改进，但其中还有很多可改进的点。例如，由于时间关系，我们并未在移植后的 PKE 中实现文件系统。因为没有文件系统，PKE 内核在无法通过文件的形式加载用户进程。只能通过一并编译用户程序与内核、再通过内存加载的形式加载用户进程。这种方式是较为繁琐的，实验的内核代码或是用户程序代码的改动，都会引起用户程序的入口点变化，这种变化需要我们手动同步到 `kernel/config.h` 里的宏定义里。

这个痛点可以用两种方式解决，一个是直接实现文件系统，将 PKE 加载用户进程的方式改为文件系统加载的方式。另一个方式是通过编写自动化编译脚本，使用脚本自动获取用户程序的入口点，并将其同步到 `kernel/config.h` 里的宏定义里。

参考文献

- [1] 张其亮, 韩斌. 操作系统课程实验教学改革探析[J]. 计算机教育, 2010(07): 91-93.
- [2] 孙述和, 谢青松, 董付国, 等. 操作系统实验教学研究探索[J]. 计算机教育, 2010(1): 4.
- [3] 雷思磊. RISC-V 架构的开源处理器及 SoC 研究综述[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017, 17(2): 6.
- [4] 胡振波. RISC-V 的爆发, 是中国芯片产业的一次机遇[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(7): 3.
- [5] 孙卫真, 刘雪松, 朱威浦, 等. 基于 RISC-V 的计算机系统综合实验设计[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(4): 7.
- [6] 郭勇, 罗乐, 刘森态, 等. RISC-V 架构开源 CPU 的设计与实现[J]. 探索科学, 2019.
- [7] Ieee B E. IEEE Standard System C Language Reference Manual[J]. IEEE, 2006.
- [8] Waterman A, Lee Y, Patterson D A, et al. The risc-v instruction set manual. volume 1: User-level isa, version 2.0[R]. California Univ Berkeley Dept of Electrical Engineering, 2014.
- [9] Waterman A, Lee Y, Avizienis R, et al. The risc-v instruction set manual volume 2: Privileged architecture version 1.7[R]. University of California at Berkeley Berkeley United States, 2015.
- [10] 嘉楠科技勘智 Kendryte 芯片发布[J]. 信息网络安全, 2018.
- [11] 张治国. Xv6 操作系统在教学中的应用探讨[J]. 福建电脑, 2020.
- [12] Cui Y, Shu G, Li D. Research on Binary Neural Network Classification Models Based on the PYNQ Development Board[J]. Electrical Automation, 2019.
- [13] Hennessy J L, Patterson D A. Computer architecture: a quantitative approach[M]. Elsevier, 2011.
- [14] Zhang D, Liu Y, Xing W. Reform and Practice of Operating System Course[J]. 计算机教育, 2021(12): 6.
- [15] Pavan P, Bez R. Flash memory cells-an overview[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 85(8): 1248-1271.
- [16] Van Rossum G, Drake F L. The python language reference manual[M]. Network Theory Ltd., 2011.
- [17] Gibbs F. Installing Python Modules with pip[J]. The Programming Historian, 2013(2).
- [18] 马学文, 朱名日, 程小辉. 嵌入式系统中 Bootloader 的设计与实现[J]. 计算机工程, 2005, 31(7): 3.
- [19] II F, Matsakis N. The Rust Language[J]. Ada letters, 2014.
- [20] Ma X. Analyse and Research of Makefile Base on Linux 2.6[J]. CONTROL AND AUTOMATION, 2006, 166: 232.
- [21] Singhal S P, Sridevi M, Narayanan N S, et al. Porting of eChronos RTOS on RISC-V Architecture[J]. Advances in Communication and Computational Technology, 2019.

致 谢

值此论文完成之际，首先向我的导师表示感谢……