

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：基于 RISC-V 的用户态中断扩展

系 别：计算机科学与技术系

专 业：计算机科学与技术

姓 名：田凯夫

指导教师：陈 渝 副教授

2023 年 5 月 4 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名：_____ 导师签名：_____ 日 期：_____

中文摘要

论文的摘要是对论文研究内容和成果的高度概括。摘要应对论文所研究的问题及其研究目的进行描述，对研究方法和过程进行简单介绍，对研究成果和所得结论进行概括。摘要应具有独立性和自明性，其内容应包含与论文全文同等量的主要信息。使读者即使不阅读全文，通过摘要就能了解论文的总体内容和主要成果。

论文摘要的书写应力求精确、简明。切忌写成对论文书写内容进行提要的形式，尤其要避免“第 1 章……；第 2 章……；……”这种或类似的陈述方式。

关键词是为了文献标引工作、用以表示全文主要内容信息的单词或术语。关键词不超过 5 个，每个关键词中间用分号分隔。

关键词：关键词 1；关键词 2；关键词 3；关键词 4；关键词 5

ABSTRACT

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summary of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Keywords are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 keywords, with semi-colons used in between to separate one another.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3; keyword 4; keyword 5

目 录

插图索引.....	VI
表格索引.....	VII
第 1 章 引言	1
第 2 章 背景介绍	2
第 3 章 设计草案	3
第 4 章 软件实现	4
4.1 QEMU	4
4.1.1 指令翻译	4
4.1.2 CPU 状态.....	5
4.1.3 核间中断	6
4.2 Linux.....	6
4.3 libc.....	6
4.4 APP	6
第 5 章 硬件实现	7
5.1 Rocket Chip.....	7
5.2 UINTC 用户态中断控制器	7
5.3 UIPI 协处理器	7
5.4 RISC-V N 扩展	7
第 6 章 性能评估	8
第 7 章 结论	9
参考文献.....	10
致 谢.....	11
声 明.....	13
附录 A 补充内容	15

插图索引

表格索引

主要符号表

PI	聚酰亚胺
MPI	聚酰亚胺模型化合物, N-苯基邻苯酰亚胺
PBI	聚苯并咪唑
MPBI	聚苯并咪唑模型化合物, N-苯基苯并咪唑
PY	聚吡咯
PMDA-BDA	均苯四酸二酐与联苯四胺合成的聚吡咯薄膜
MPY	聚吡咯模型化合物
As-PPT	聚苯基不对称三嗪
MAsPPT	聚苯基不对称三嗪单模型化合物, 3,5,6-三苯基-1,2,4-三嗪
DMA sPPT	聚苯基不对称三嗪双模型化合物 (水解实验模型化合物)
S-PPT	聚苯基对称三嗪
MSPPT	聚苯基对称三嗪模型化合物, 2,4,6-三苯基-1,3,5-三嗪
PPQ	聚苯基喹噁啉
MPPQ	聚苯基喹噁啉模型化合物, 3,4-二苯基苯并二嗪
HMPI	聚酰亚胺模型化合物的质子化产物
HMPY	聚吡咯模型化合物的质子化产物
HMPBI	聚苯并咪唑模型化合物的质子化产物
HMA sPPT	聚苯基不对称三嗪模型化合物的质子化产物
HMSPT	聚苯基对称三嗪模型化合物的质子化产物
HMPPQ	聚苯基喹噁啉模型化合物的质子化产物
PDT	热分解温度
HPLC	高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography)
HPCE	高效毛细管电泳色谱 (High Performance Capillary electrophoresis)
LC-MS	液相色谱-质谱联用 (Liquid chromatography-Mass Spectrum)
TIC	总离子浓度 (Total Ion Content)
<i>ab initio</i>	基于第一原理的量子化学计算方法, 常称从头算法
DFT	密度泛函理论 (Density Functional Theory)
E_a	化学反应的活化能 (Activation Energy)
ZPE	零点振动能 (Zero Vibration Energy)

PES	势能面 (Potential Energy Surface)
TS	过渡态 (Transition State)
TST	过渡态理论 (Transition State Theory)
ΔG^\ddagger	活化自由能 (Activation Free Energy)
κ	传输系数 (Transmission Coefficient)
IRC	内禀反应坐标 (Intrinsic Reaction Coordinates)
ν_i	虚频 (Imaginary Frequency)
ONIOM	分层算法 (Our own N-layered Integrated molecular Orbital and molecular Mechanics)
SCF	自洽场 (Self-Consistent Field)
SCRF	自洽反应场 (Self-Consistent Reaction Field)

第 1 章 引言

第 2 章 背景介绍

第 3 章 设计草案

第 4 章 软件实现

4.1 QEMU

QEMU^[1] 为操作系统和用户态程序提供虚拟的执行环境，通过动态的二进制转换，模拟 CPU 的行为，同时支持多种外设的仿真，在系统开发中扮演着重要角色。QEMU 支持模拟 RISC-V 运行环境，通过对 QEMU 的修改和测试，我们可以不断完善设计草案。对 QEMU 的修改主要分为四个方面：

- 指令翻译：引入对 UIPI 指令的译码和执行；
- CPU 状态：维护 CSR 寄存器等 CPU 状态；
- 内存读写：UIPI 指令需要直接访问物理内存和 UINTC 外设，直接调用 `void cpu_physical_memory_rw(hwaddr addr, void *buf, hwaddr len, bool is_write)` 函数完成对物理地址的读写；
- 核间中断：实现 UINTC 并向各个核发送中断。

4.1.1 指令翻译

QEMU 翻译一条指令的大致过程为：从客户机指令（Guest Instructions）到中间码（TCG, Tiny Code Generator），最后再到宿主机指令（Host Instructions）。QEMU 的翻译机制类似于 CPU 流水线中的译码阶段，需要定义模式串来帮助 QEMU 在执行到某一指令时调用对应的辅助函数。模式串的定义位于 `target/riscv/insn32.decode`：

1	uiپی_send	00000000	000000	.....	010	.....	1111011	@r2
2	uiپی_read	00000001	000000	.....	010	.....	1111011	@r2
3	uiپی_write	00000010	000000	.....	010	.....	1111011	@r2
4	uiپی_activate	00000011	000000	.....	010	.....	1111011	@r2
5	uiپی_deactivate	0000100	000000	.....	010	.....	1111011	@r2

以 `uret` 这条指令为例，在 `target/riscv/insn_trans` 目录下，有各种指令的翻译过程，主要用来将指令解析的结果（寄存器，立即数等）传递给辅助函数，将客户机指令拆解为宿主机指令来模拟目标指令的功能。对于 `uret` 指令的执行涉及到较多 CPU 状态的变化，会对 `pc`，`CSR` 等产生影响，辅助函数的定义位于 `target/riscv/helperh`，通过宏定义 `DEF_HELPER_x` 来声明辅助函数，例如：

```

1 DEF_HELPER_1(uret, tl, env)
2 DEF_HELPER_4(csrrw, tl, env, int, tl, tl)

```

其中第一个参数对应辅助函数的名称，第二个参数代表函数的返回值类型（tl 表示 target_ulong），后面的参数都是辅助函数传入的参数类型。有了以上的参考，我们可以定义其他辅助函数：

```

1 DEF_HELPER_2(uipei_write, void, env, tl)
2 void helper_uipi_write(CPURISCVState *env, target_ulong src) {
3     if (uipei_enabled(env, env->suicfg)) {
4         uint64_t addr = UINTC_REG_HIGH(env->suicfg, SUIRS_INDEX(
5             env->suicfg));
6         cpu_physical_memory_write(addr, &src, 8);
7     }
8 }

```

4.1.2 CPU 状态

struct CPUArchState：CPU 状态结构体位于 target/riscv/cpu.h。这个结构同时考虑了 RV32、RV64、RV128 的情况，这些寄存器都是 CPU 运行时必要的状态。包括但不限于：

- pc
- 整数、浮点寄存器堆
- CSR，有些寄存器是 M 态和 S 态复用的，例如 mstatus、mip 等
- PMP 寄存器堆
- 通过 kernel_addr、fdt_addr 等从指定位置加载镜像

在 target/riscv/cpu.h 文件末尾的表中注册 CSR 的操作函数。

中断异常、CSR 等宏定义位于 target/riscv/cpu_bits.h，我们需要在其中添加和 U 态有关的中断控制位。CPU 中断异常处理函数位于 target/riscv/cpu_helper.c 的最后，这个函数对中断异常原因进行判断，并根据 CPU 当前的特权级做不同的处理。这个函数只给出了 M 态和 S 态的中断异常处理，我们需要额外在此处加入委托给 U 态的中断异常处理，也就是读写 ustatus，ucause，uepc 等寄存器。

4.1.3 核间中断

4.2 Linux

4.3 libc

4.4 APP

第 5 章 硬件实现

5.1 Rocket Chip

5.2 UINTC 用户态中断控制器

5.3 UIPI 协处理器

5.4 RISC-V N 扩展

第 6 章 性能评估

第 7 章 结论

参考文献

- [1] About QEMU[EB/OL]. 2023. <https://www.qemu.org/docs/master/about/index.html>.

致 谢

衷心感谢导师 ××× 教授和物理系 ×× 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 Robert Field 教授热心指导与帮助，不胜感激。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____ 日 期：_____

附录 A 补充内容

附录是与论文内容密切相关、但编入正文又影响整篇论文编排的条理和逻辑性的资料，例如某些重要的数据表格、计算程序、统计表等，是论文主体的补充内容，可根据需要设置。

A.1 图表示例

A.1.1 图

附录中的图片示例（图 A.1）。

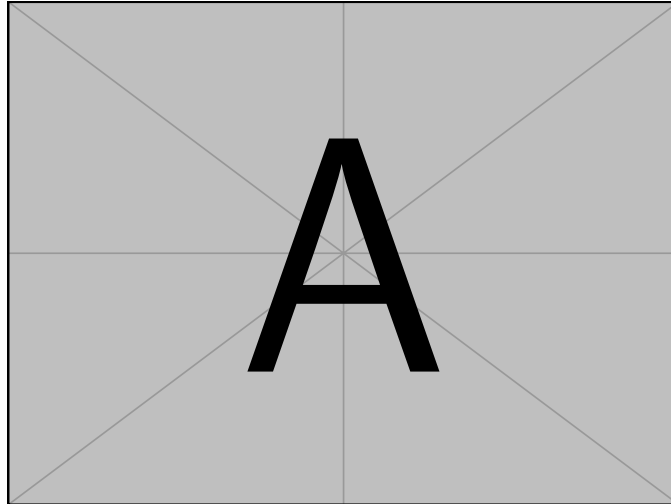


图 A.1 附录中的图片示例

A.1.2 表格

附录中的表格示例（表 A.1）。

A.2 数学公式

附录中的数学公式示例（公式（A.1））。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (\text{A.1})$$

表 A.1 附录中的表格示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.bbx	BibLaTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.cbx	BibLaTeX 引用样式文件