香山昆明湖架构虚拟化扩展的设计和技术规划

裴晓坤[1] 徐泽凡[2]

[1]中国科学院大学

[2]中国科学技术大学

2023 年 8 月 24 日@第三届 RISC-V 中国峰会

目录

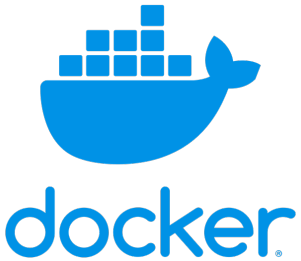
- 虚拟化技术
- RISC-V虚拟化扩展
- 香山虚拟化扩展设计思路
- 香山虚拟化扩展功能验证
- 总结与展望

目录

- **虚拟化技术**
  - **虚拟化技术的概念**
  - **虚拟化技术的分类**
  - **虚拟机管理程序**
- RISC-V虚拟化扩展
- 香山虚拟化扩展设计思路
- 香山虚拟化扩展功能验证
- 总结与展望

虚拟化技术·概念

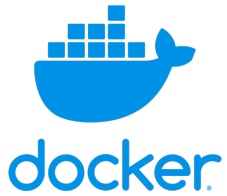
- 一种资源管理技术
  - 单台计算机中的硬件资源划分为名为虚拟机 (VM) 的多个虚拟计算机
- 常见的虚拟化技术



虚拟化技术·分类

- 根据虚拟化程度，可以将虚拟化分为以下几类

操作系统级虚拟化



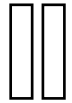
全虚拟化

硬件辅助

软件实现

半虚拟化

混合虚拟化

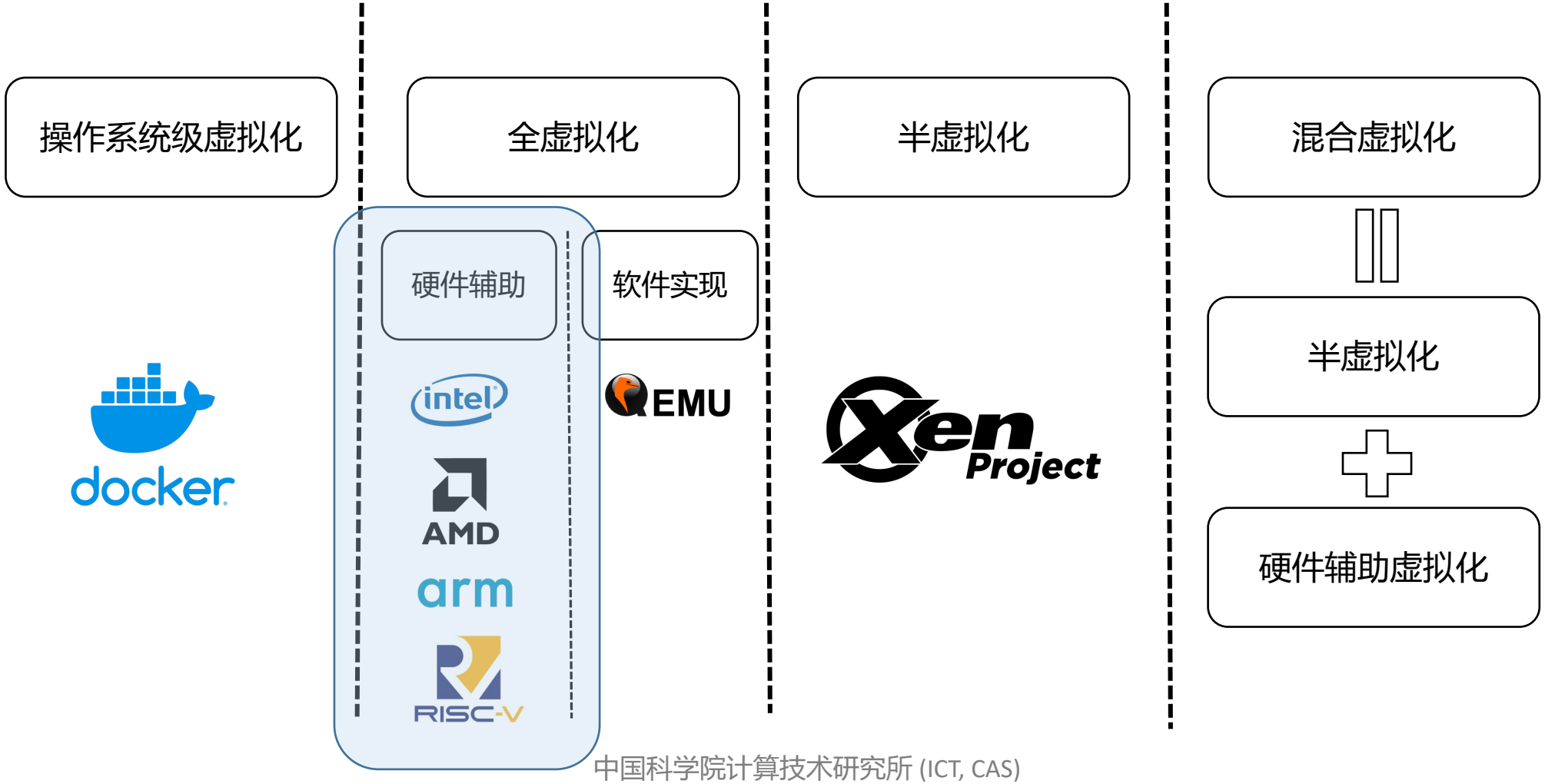


半虚拟化

硬件辅助虚拟化

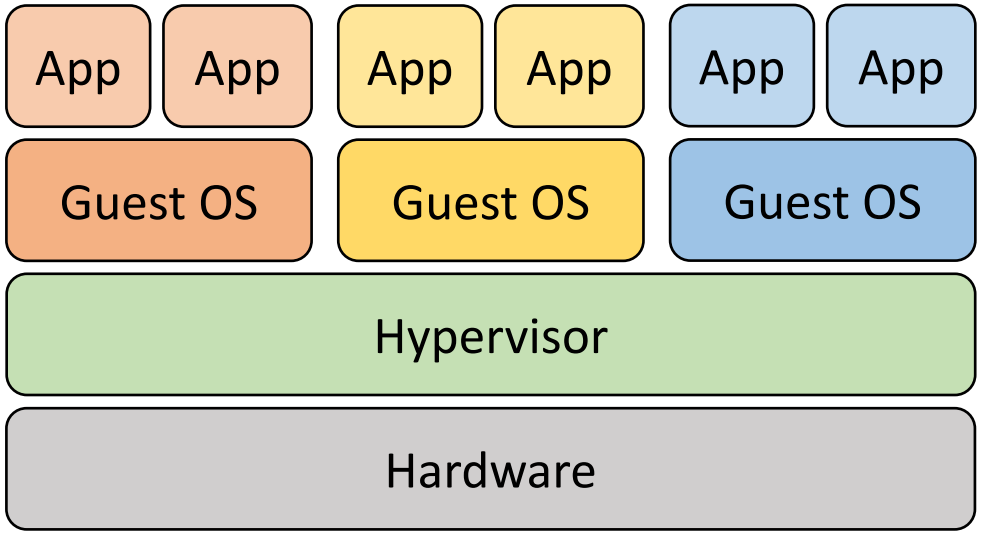
虚拟化技术·分类

- 根据虚拟化程度，可以将虚拟化分为以下几类

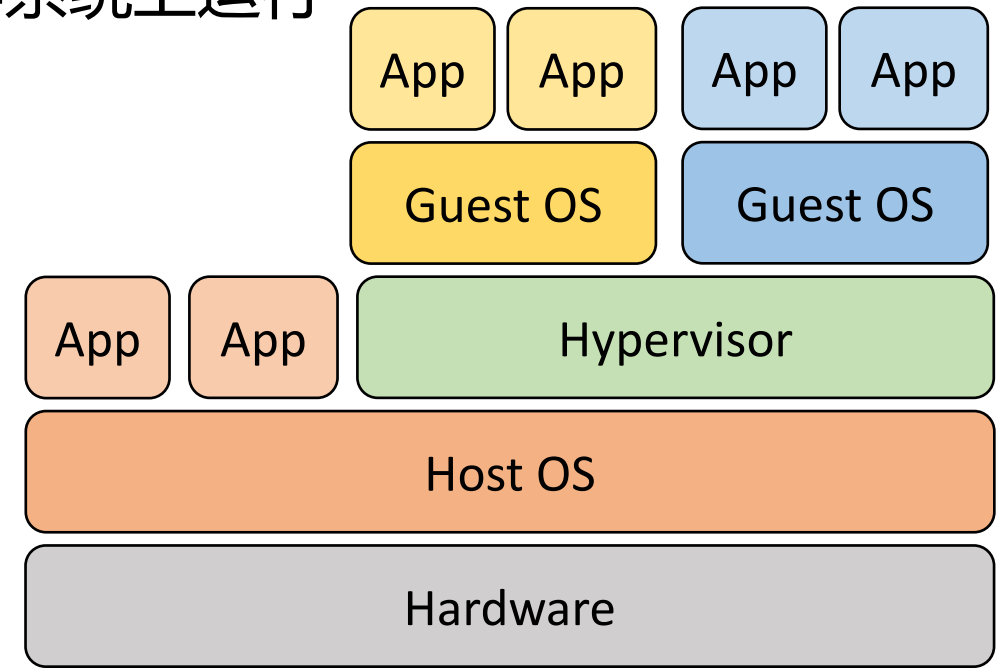


虚拟化技术·虚拟机管理程序

- 虚拟机管理程序（VMM， 也称 Hypervisor）分为两种：
  - Type-1， native or bare-metal hypervisors：在裸机运行
  - Type-2 or hosted hypervisors：在操作系统上运行



Type-1



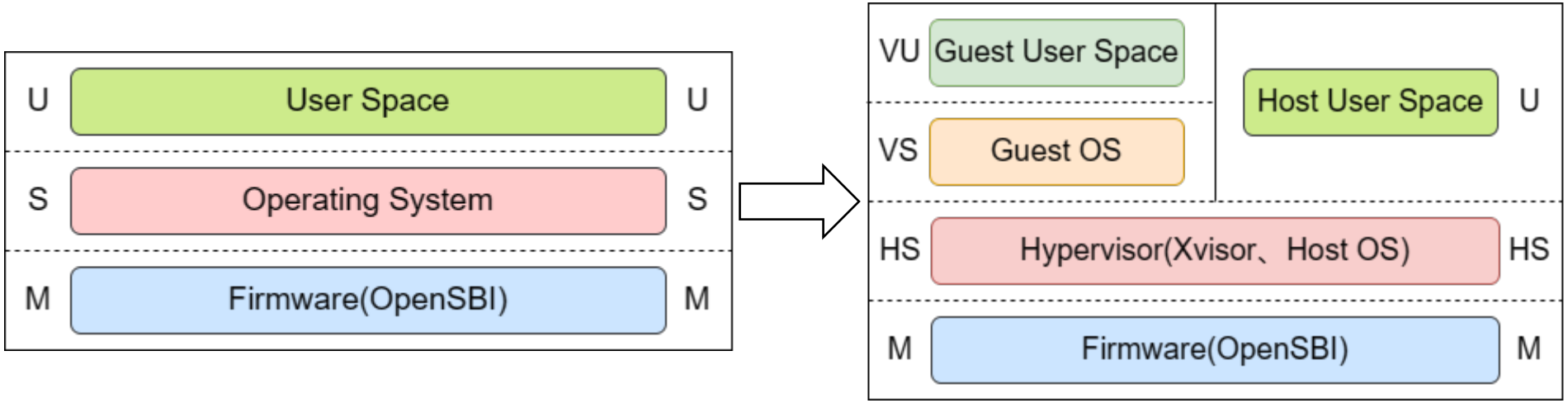
Type-2

目录

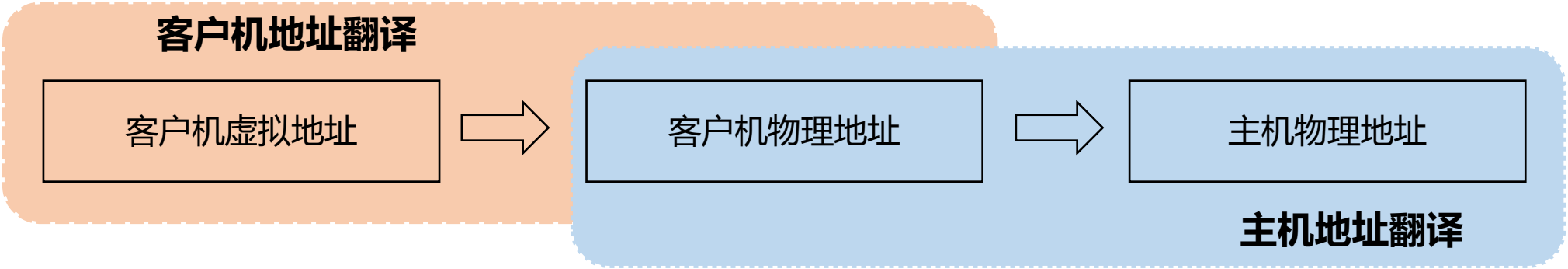
- 虚拟化技术
- **RISC-V虚拟化扩展**
  - **内容介绍**
  - **支持情况**
- 香山虚拟化扩展设计思路
- 香山虚拟化扩展功能验证
- 总结与展望

RISCV虚拟化扩展·内容

- CPU虚拟化
  - 特权级拓展
  - CSR拓展
  - 指令拓展
  - Trap拓展



- 内存虚拟化
  - 两阶段地址翻译：客户机的地址翻译、主机的地址翻译



RISCV虚拟化拓展·支持情况

- 软件层面支持：
  - 模拟器：QEMU、Spike

  - Hypervisor：KVM、Xvisor、Bao等

硬件层面支持：

- 开源：Rocket chip、NOEL-V、CVA6

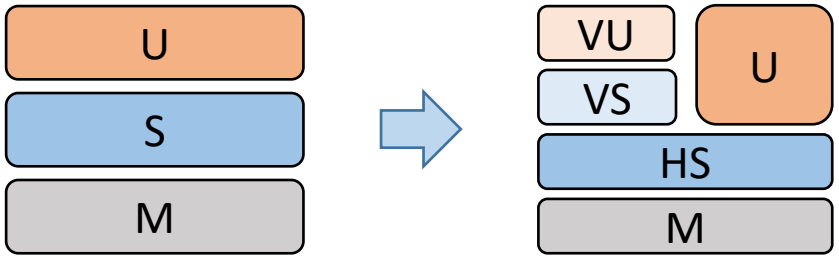
- 商业：赛昉的昉·天枢、SiFive 的 P 系列等

目录

- 虚拟化技术
- RISC-V虚拟化扩展
- **香山虚拟化扩展设计思路**
  - **CPU虚拟化**
  - **内存虚拟化**
- 香山虚拟化扩展功能验证
- 总结与展望

香山虚拟化扩展设计·CPU虚拟化

- 特权级
  - 新增V位，区分VS和HS、VU和U



- CSR寄存器

Hypervisor CSR	hstatus、hedeleg、hideleg、hvip、hip、hie、hgatp等
Virtual Supervisor CSR	vsstatus、vsip、vsie、vstvec、vsepc、vsatp等
Machine CSR	mstatus、mideleg、mip、mie、mtval2（新增）、mtinst（新增）

- Hypervisor指令

访存指令	HLV.width、HLVX.HU/WU、HSV.width
Fence指令	HFENCE.VVMA/GVMA

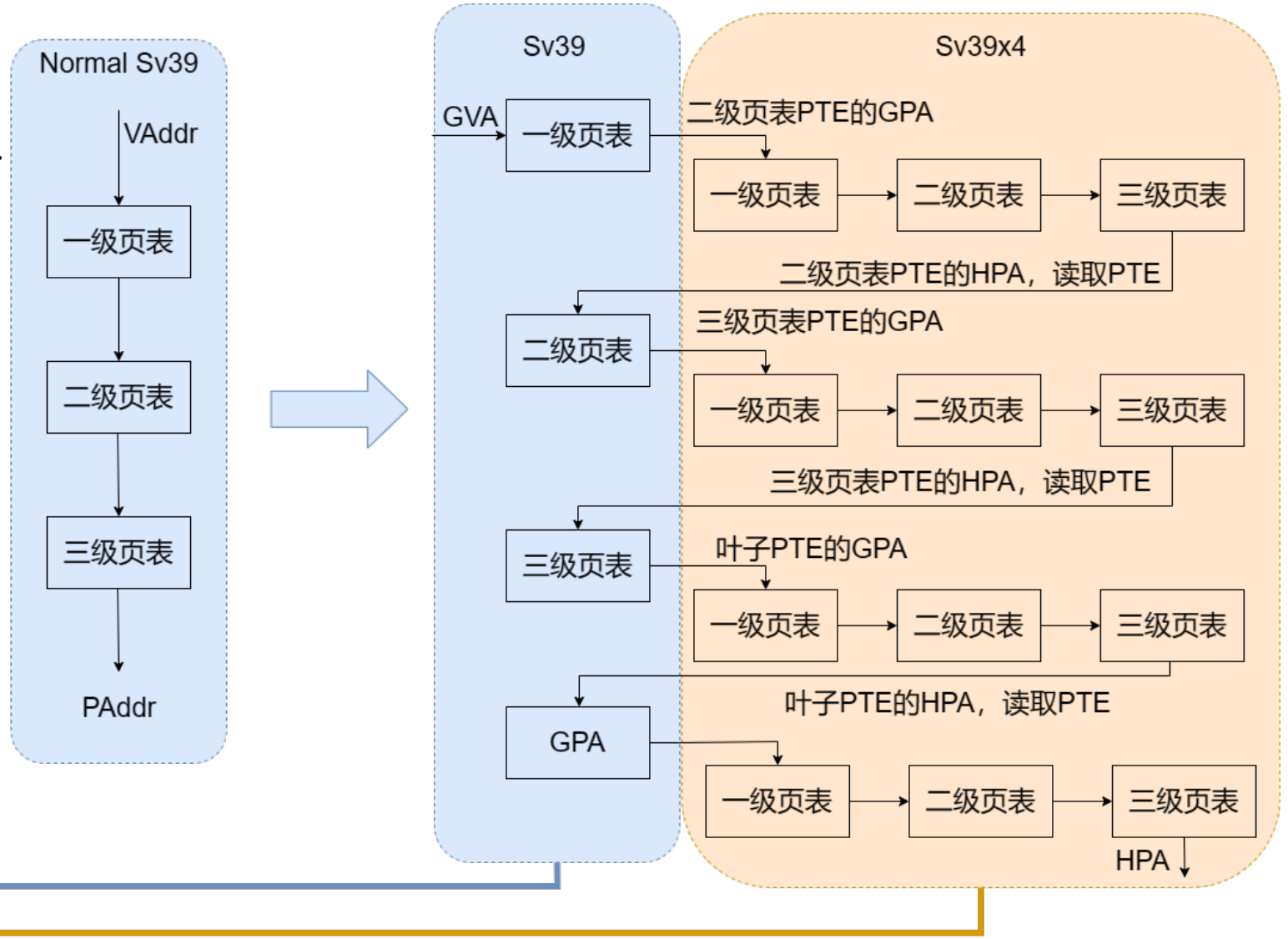
- Trap
  - 增加VS级陷入陷出的处理

新增中断	VS software interrupt、VS timer interrupt、VS external interrupt、Supervisor guest external interrupt
新增异常	Environment call from VS-mode、Instruction guest-page fault、Load guest-page fault、Virtual instruction、Store/AMO guest-page fault

香山虚拟化扩展设计·内存虚拟化

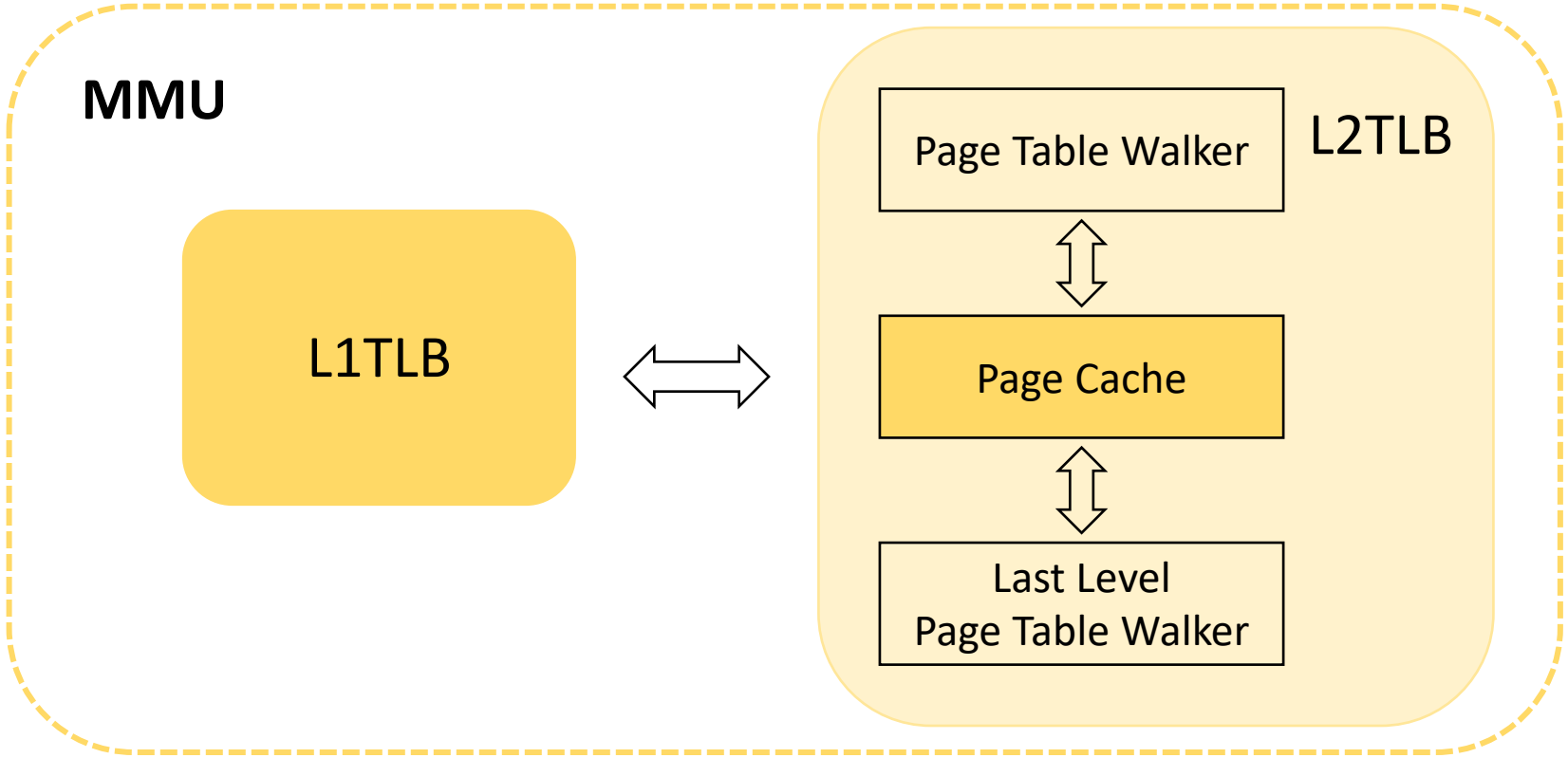
- 地址翻译模式
  - Sv39 --> Sv39 + Sv39x4
- 内存页表查询
  - 访存维度
  - 访存次数

$$4 * 3 = 12$$



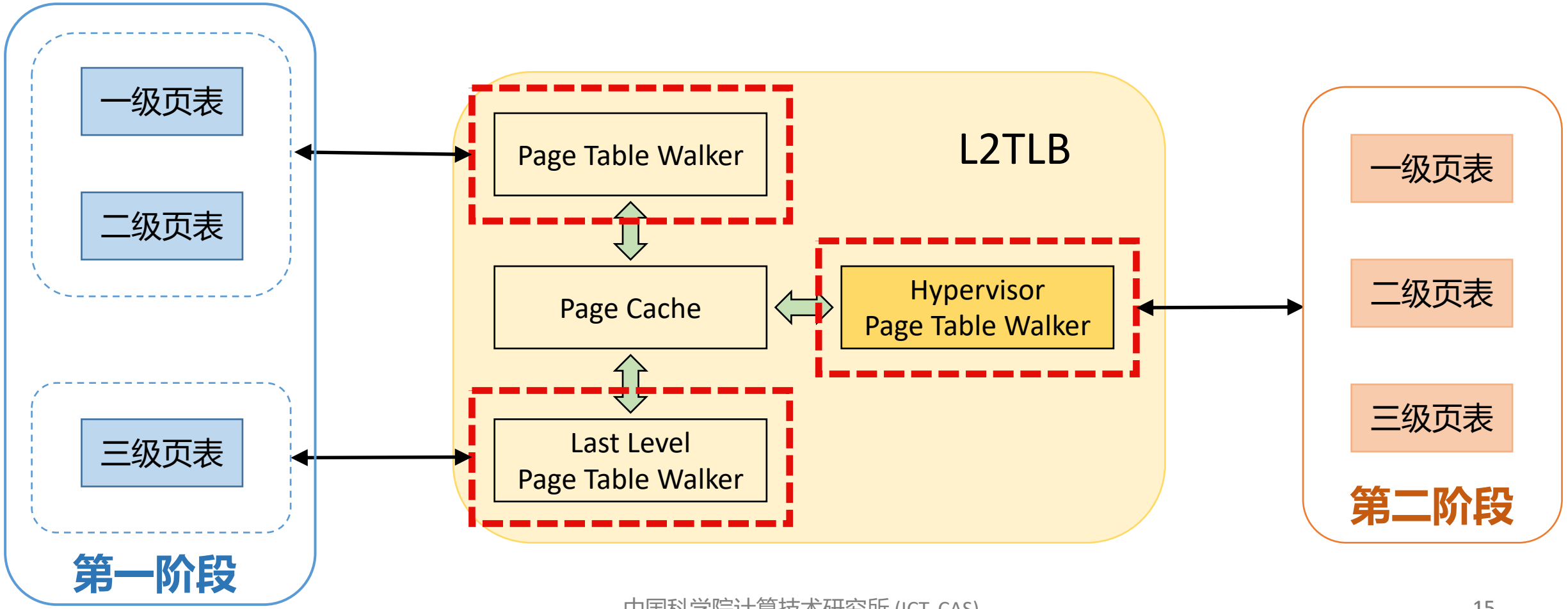
香山虚拟化扩展设计·内存虚拟化

- MMU（Memory Management Unit）
  - 增加第二阶段的翻译，客户机物理地址 -> 主机物理地址
  - 存储两阶段翻译过程中的页表，L1TLB和L2TLB的Page Cache



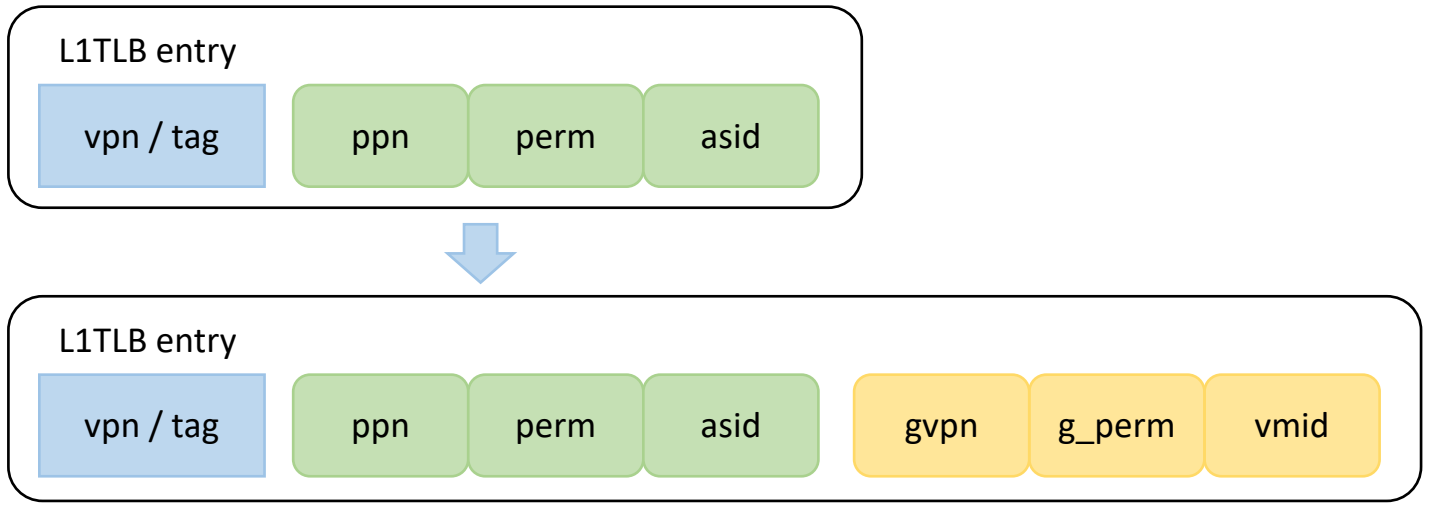
香山虚拟化扩展设计·内存虚拟化

- 增加第二阶段地址翻译
  - 新增Hypervisor Page Table Walker，负责客户机物理地址转换为主机物理地址



香山虚拟化扩展设计·内存虚拟化

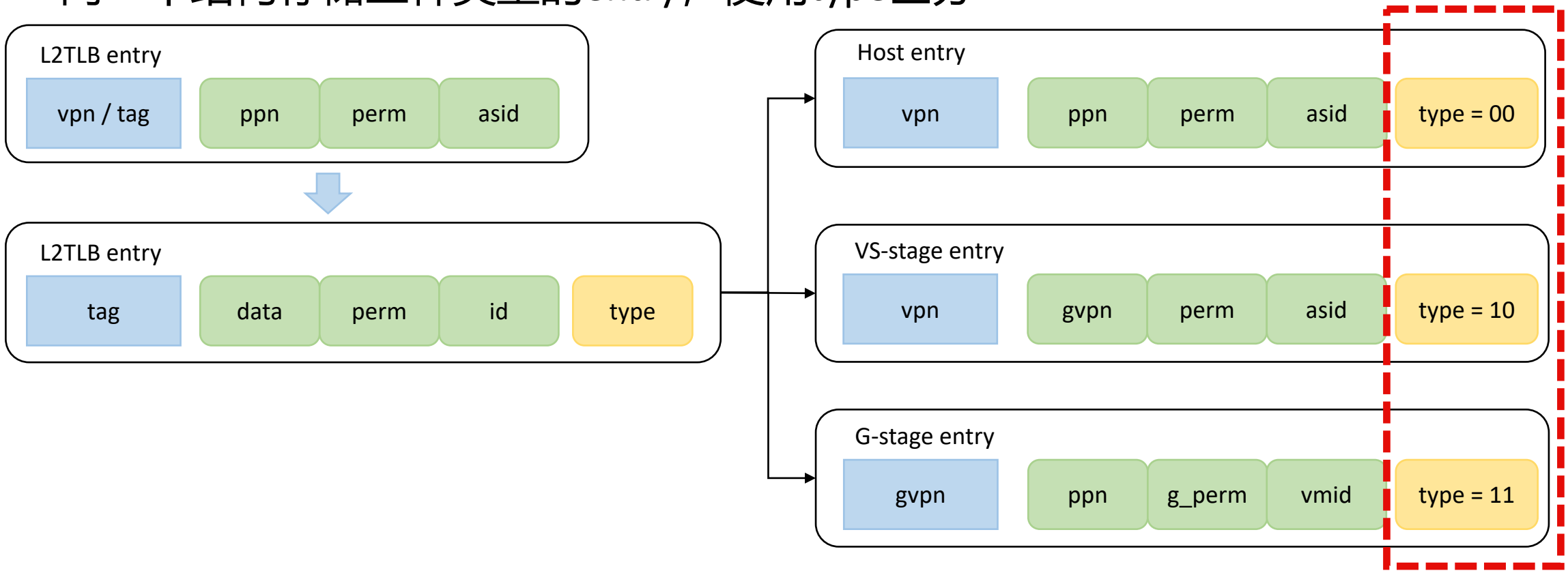
- L1TLB存储项修改



- gvpn：第一阶段翻译的ppn，第二阶段翻译的vpn
- g_perm：第二阶段翻译得到的perm
- vmid：所属虚拟机的id

香山虚拟化扩展设计·内存虚拟化

- L2TLB存储项修改
  - 同一个结构存储三种类型的entry，使用type区分

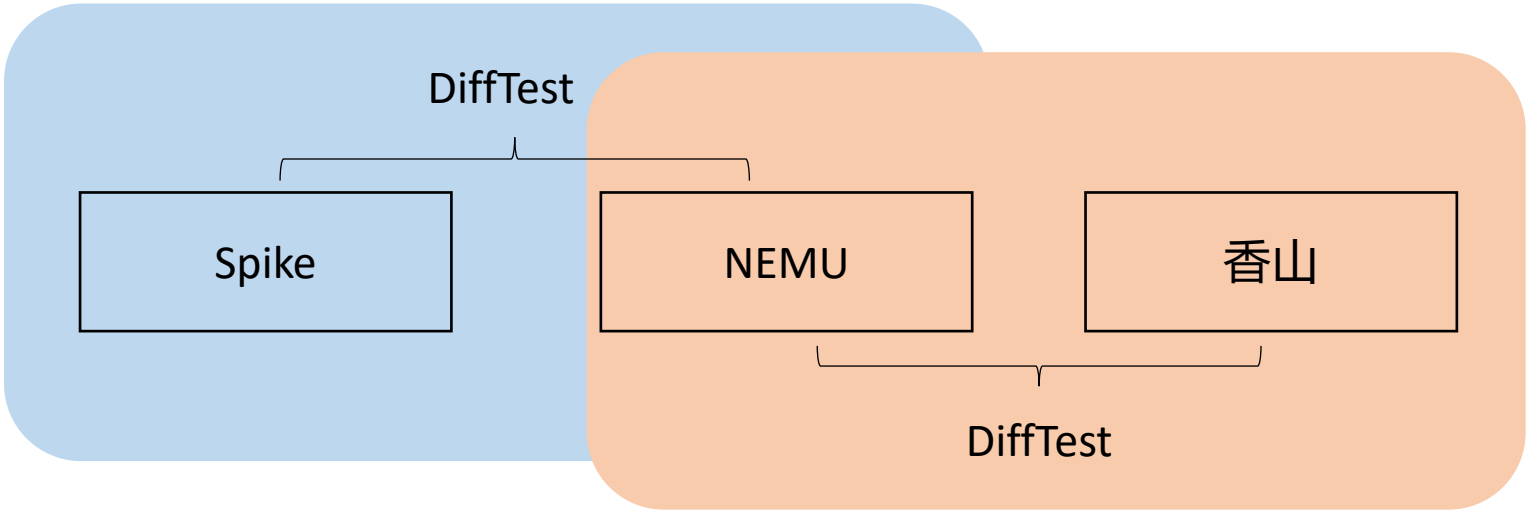


目录

- 虚拟化技术
- RISCV虚拟化扩展
- 香山虚拟化扩展设计思路
- **香山虚拟化扩展功能验证**
  - **验证框架**
  - **单元测试**
  - **系统测试**
- 总结与展望

香山虚拟化扩展功能验证·验证框架

- 以DiffTest框架为核心，进行验证
  - DiffTest：在线差分验证框架
  - NEMU：高性能指令级解释器
- 验证NEMU： NEMU <-> Spike （已完成）
- 验证香山 ： 香山 <-> NEMU （调试中）



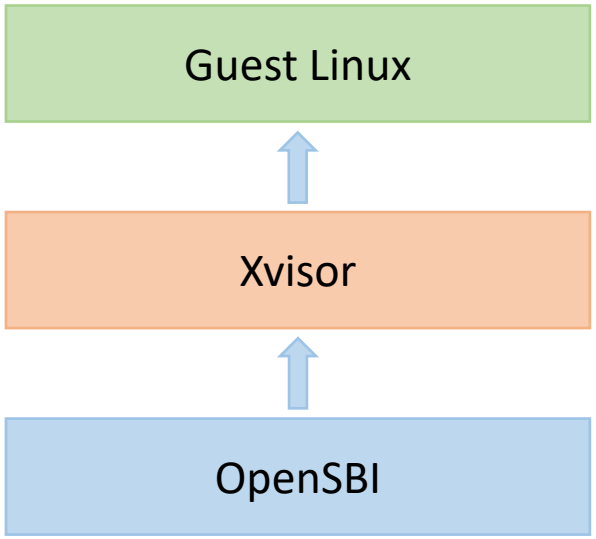
香山虚拟化扩展功能验证·单元测试

- 虚拟化验证程序集： riscv-hyp-tests
  - 开源项目，https://github.com/josecm/riscv-hyp-tests
  - 9个测试程序，共108个测试点，包含CPU虚拟化和内存虚拟化
  - 用于测试虚拟化扩展的基本功能

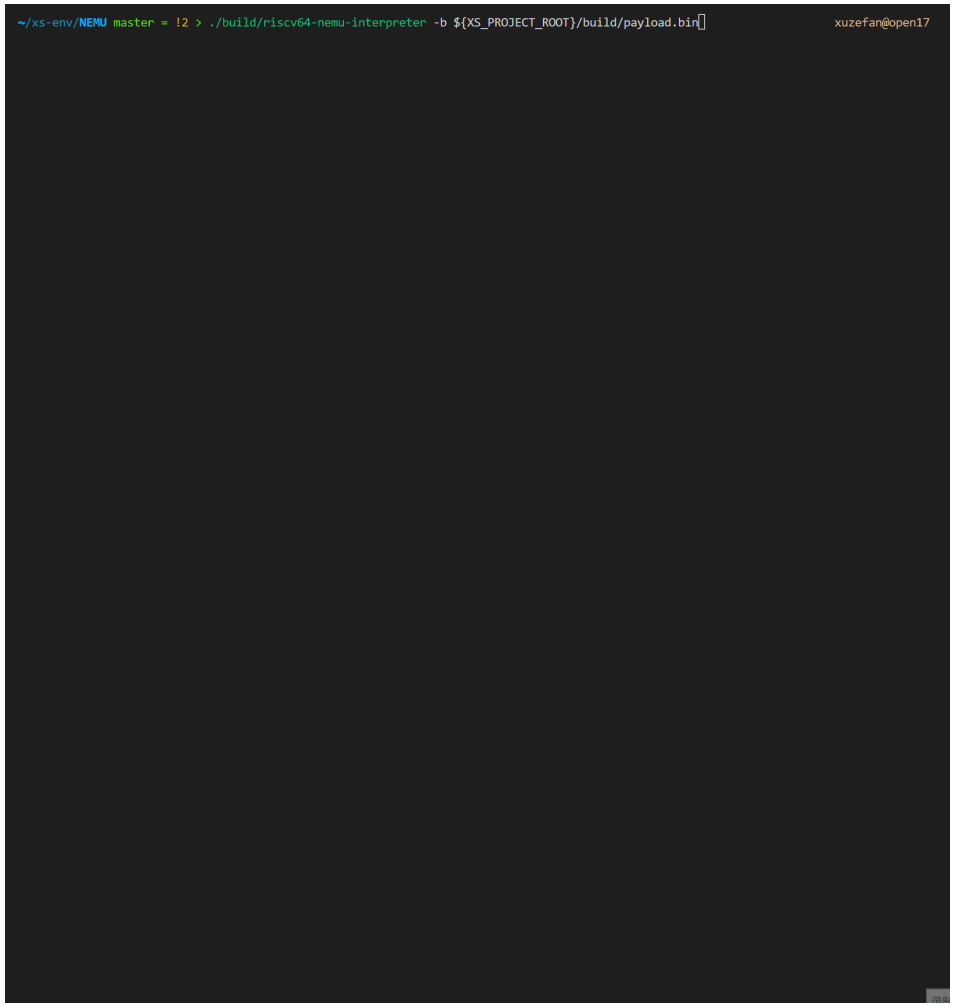
测试用例名	测试内容
tinst_tests	触发各种情况的 pagefault，检查 mtinst
wfi_exception_tests	不同特权级下，wfi 指令可能引发的异常
hfence_test	虚拟化 fence 指令的功能
virtual_instruction	虚拟化指令异常的触发
interrupt_tests	VS 级软件中断的触发以及其代理机制
check_xip_regs	中断相关的 CSR 寄存器的读写
m_and_hs_using_vs_access	测试 mprv 位的功能、虚拟化访存指令
second_stage_only_translation	测试只有第二阶段地址翻译的情况
two_stage_translation	测试 VS 级下的地址翻译情况

香山虚拟化扩展功能验证·系统测试

- Xvisor
  - 开源 type-1 hypervisor
  - OpenSBI + Xvisor + Guest Linux

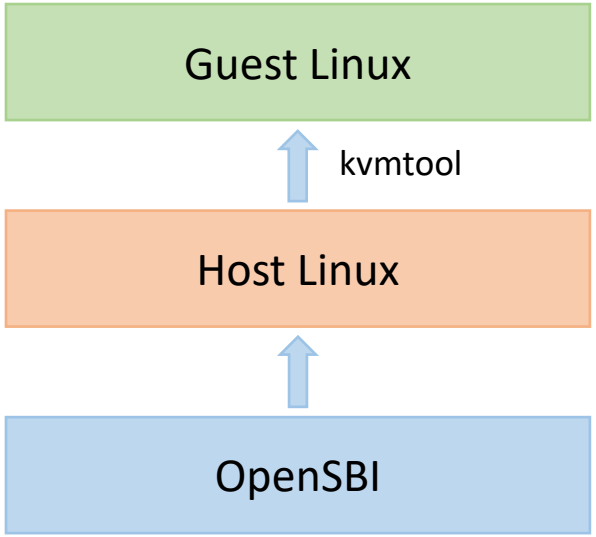


- NEMU运行Xvisor效果



香山虚拟化扩展功能验证·系统测试

- KVM
  - Type-2 hypervisor（有分类认为type-1）
  - OpenSBI + Linux + kvmtool + Guest Linux
  - kvmtool：轻量级的虚拟机管理工具



- NEMU运行KVM效果

```
➜ ~ cd NEMU_DEBUG
➜ NEMU_DEBUG cd NEMU
➜ NEMU git:(master) X ./build/riscv64-nemu-interpreter -b -d ../riscv-isa-sim/difftest/build/riscv64-spike-so ../../kvm-riscv/opensbi
_xiangshan/build/platform/generic/firmware/fw_payload.bin
```

目录

- 虚拟化技术
- RISC-V虚拟化扩展
- 虚拟化扩展设计思路
- 虚拟化扩展功能验证
- **总结与展望**

总结与展望

- 总结
  - 虚拟化技术、RISC-V虚拟化拓展的内容
  - CPU虚拟化和内存虚拟化在香山上的实现
  - 香山功能验证

- 展望
  - RISC-V AIA（Advanced Interrupt Architecture）
  - RISC-V IOMMU

敬请批评指正！