清華大學
Tsinghua University

# NOP 项目展示

第七届“龙芯杯”全国大学生计算机系统能力培养大赛

计算机系 刘明道 高焕昂 王博文 花佳诚 2023.8.21

THU

厚德載物 自强不息 Tsinghua

# 微架构设计

## Microarchitecture Design

# 执行模型

迈向成功的第一步

## NOP：LoongArch Out-of-order Processor

- **避免**了顺序执行导致的**不必要等待**
- **现代处理器**几乎全部为乱序超标量
- LA32R 指令集首个**开源**、**完善**、**有教育意义**的**乱序超标量**处理器

# 面对挑战

欲戴王冠
必承其重

## 乱序超标量开发的挑战

- WAR 和 WAW **数据冲突**
- 保证指令执行的效果**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**，最高频率受限

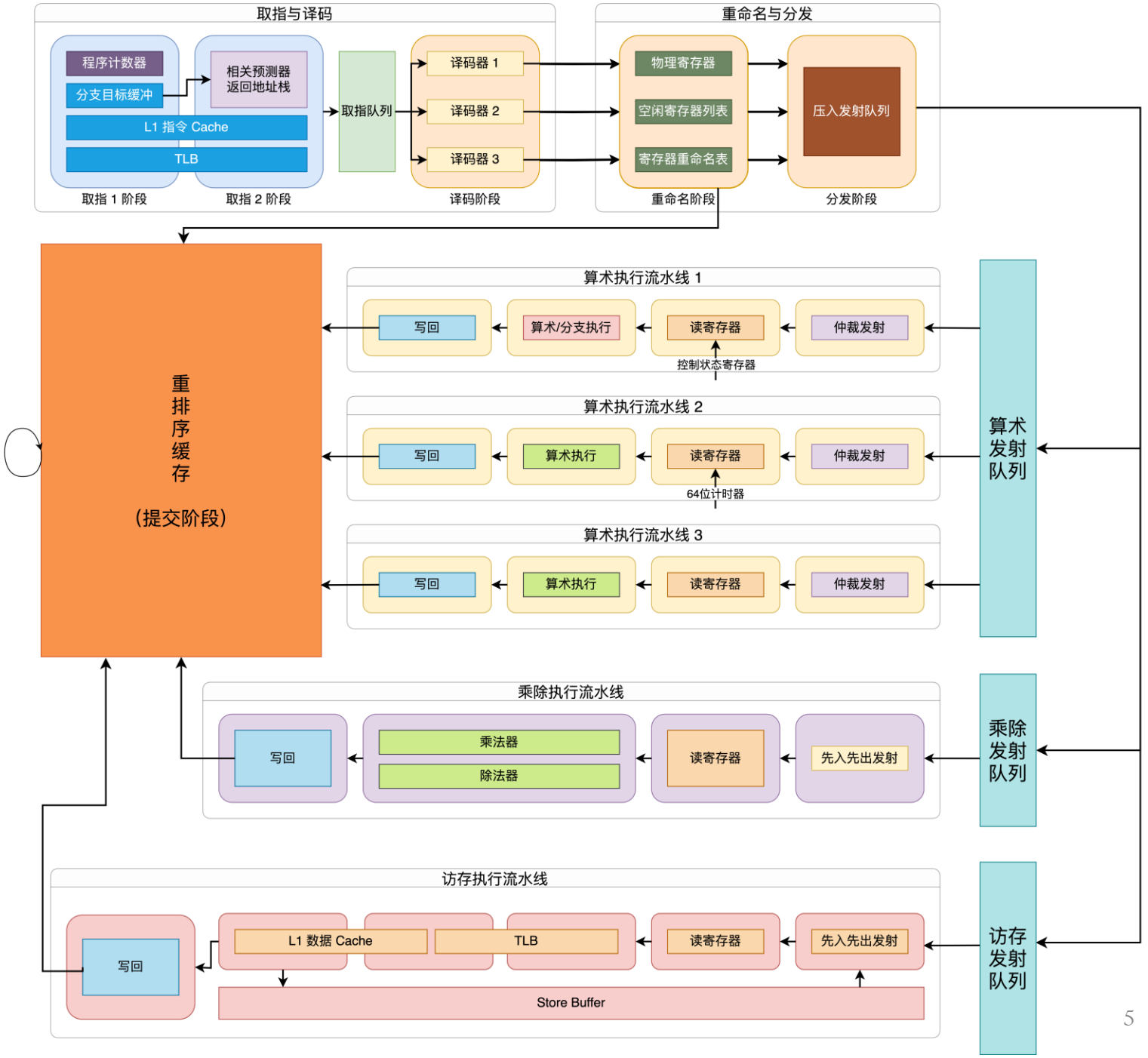
# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- **数据冲突**
- 难保证**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**



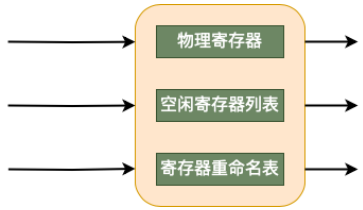
# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- **数据冲突**
- 难保证**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**

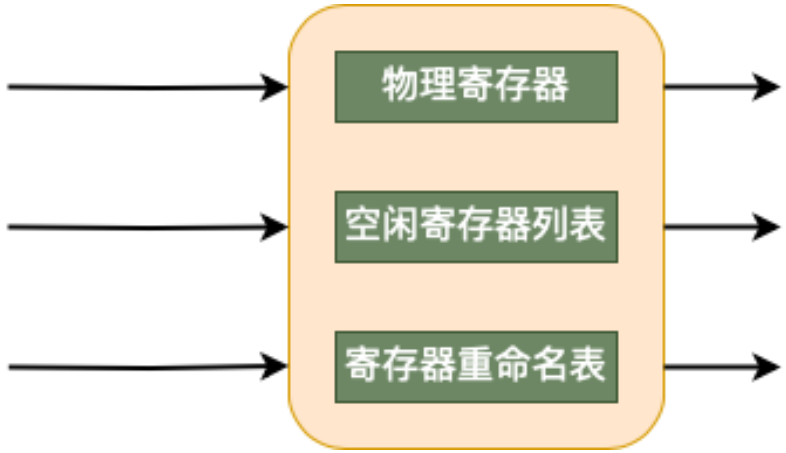


# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

~~数据冲突~~




寄存器重命名技术

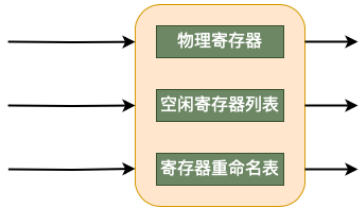
# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- ~~数据冲突~~
- 难保证**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**



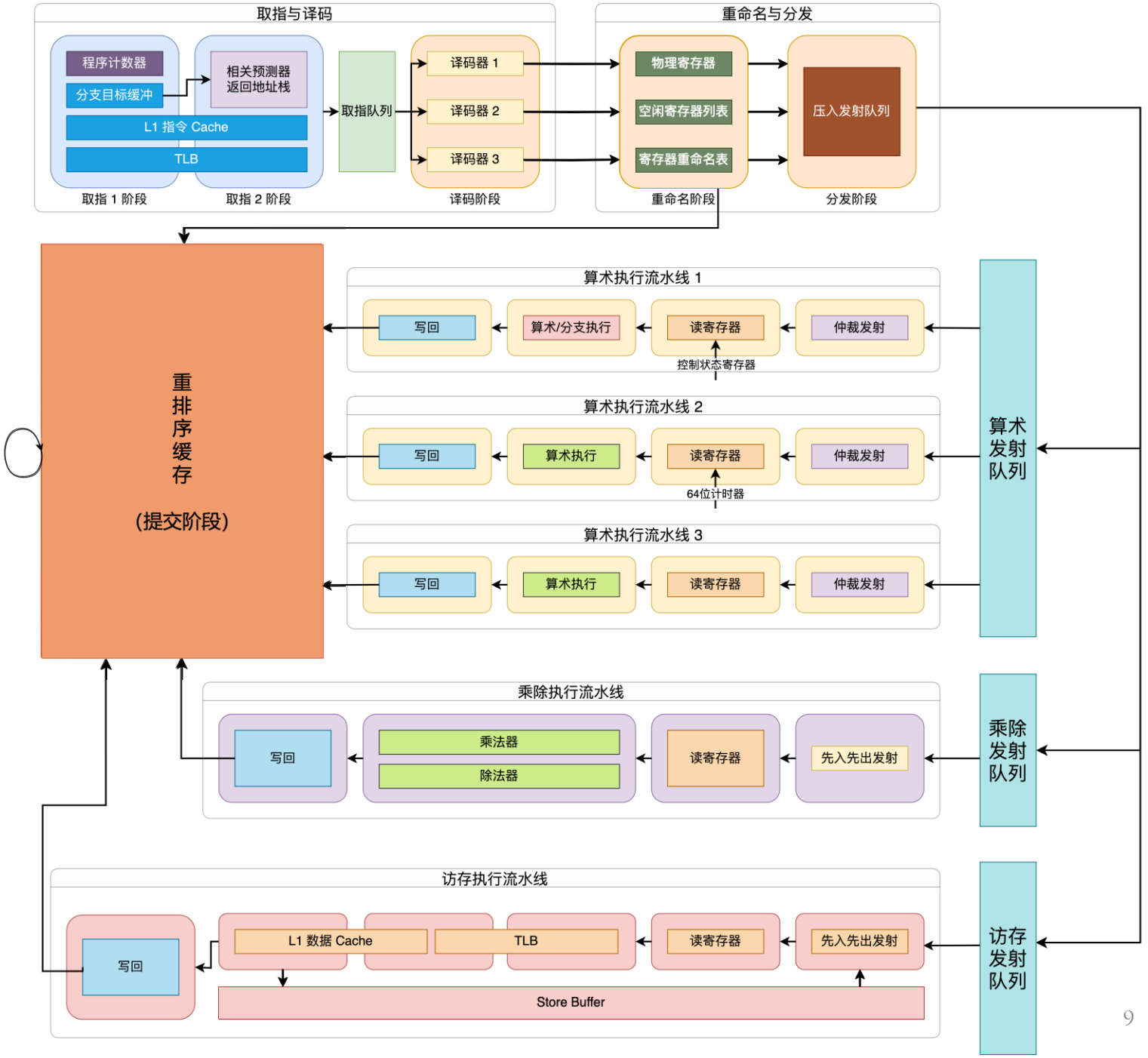
# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- ~~数据冲突~~
- 难保证**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**



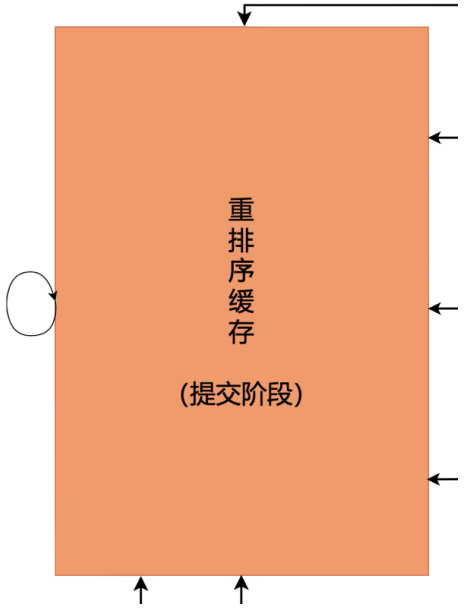
# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- ~~数据冲突~~
- 难保证**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**

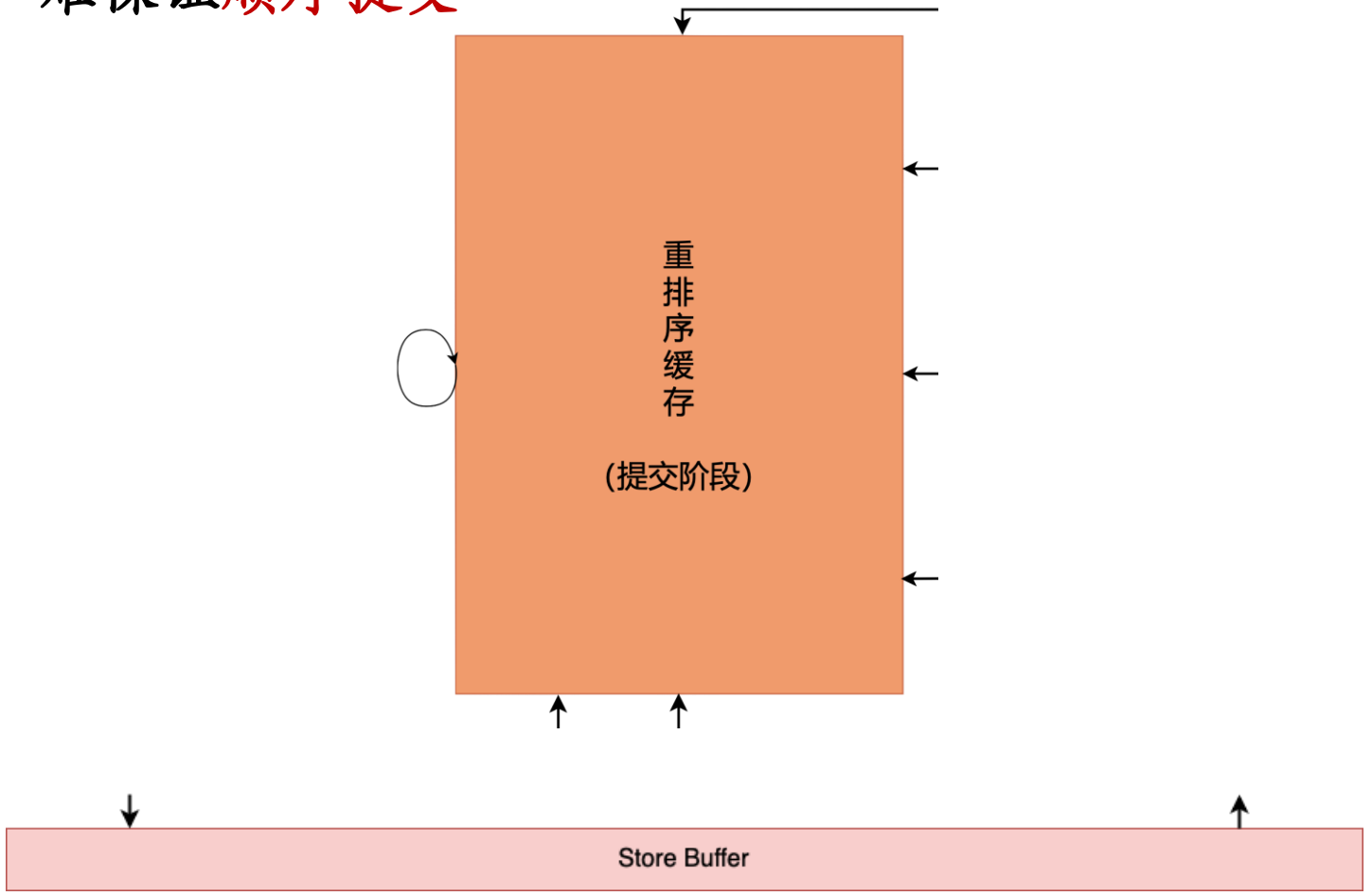



# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

~~难保证顺序提交~~




增加重排序缓存与 Store Buffer

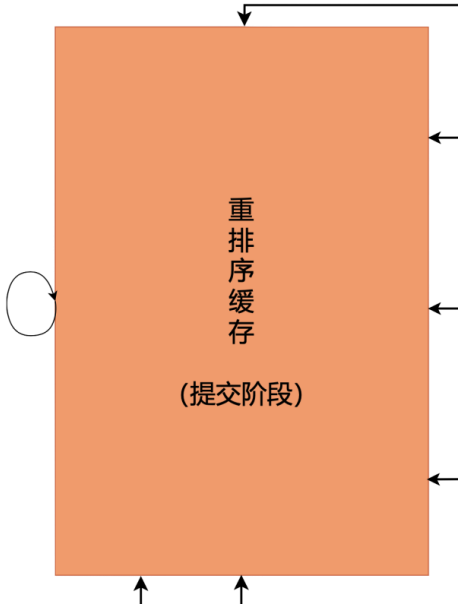
# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- ~~数据冲突~~
- ~~难保证~~**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**



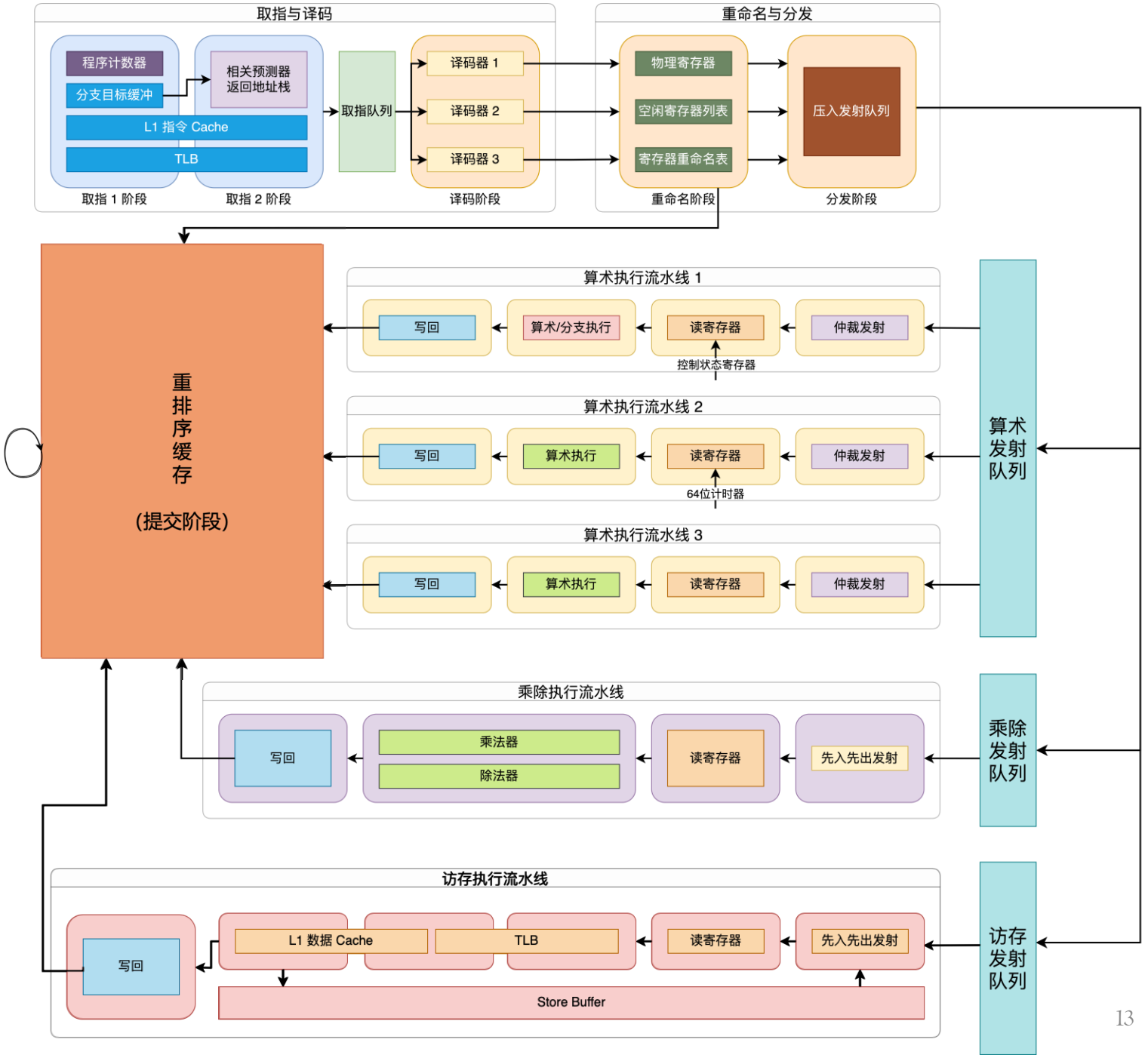

# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- ~~数据冲突~~
- ~~难保证~~**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**



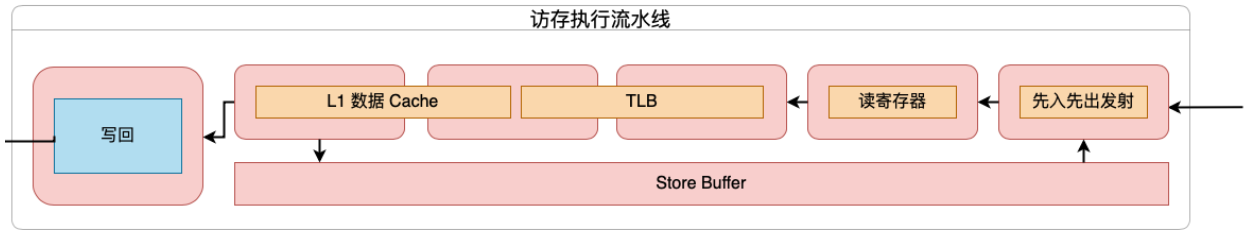
# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

**乱序超标量开发的挑战**

- ~~数据冲突~~
- ~~难保证~~**顺序提交**
- **复杂逻辑**导致**高延迟**

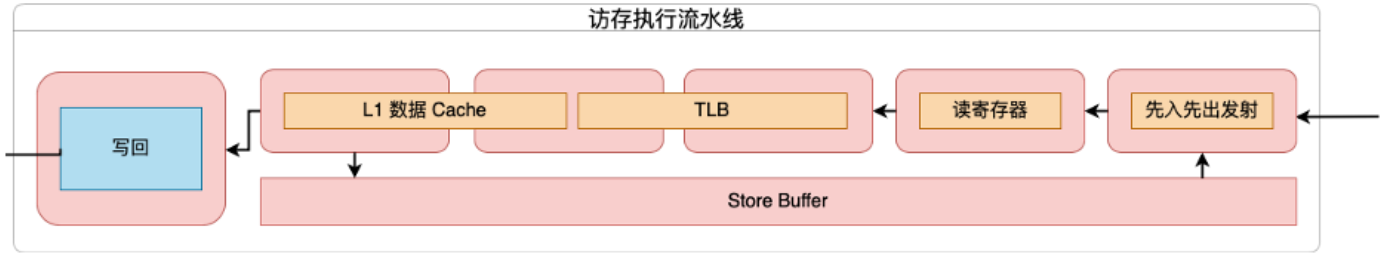


# 逐个击破

兵来将挡

水来土掩

~~复杂逻辑~~导致~~高延迟~~




流水线切分

# 性能

突破边际效应
创造新的纪录

| NOP 处理器主频 107.69 M | | | |
|---|---|---|---|
| 任务 | PerfUp | IPCUp | IPCReal |
| bit_count | 3.86 | 1.79 | 1.63 |
| buble_sort | 2.28 | 1.06 | 0.63 |
| coremark | 2.58 | 1.20 | 0.87 |
| crc32 | 4.89 | 2.27 | 1.42 |
| dhrystone | 2.51 | 1.19 | 0.89 |
| quick_sort | 1.95 | 0.91 | 0.68 |
| select_sort | 3.40 | 1.58 | 1.14 |
| sha | 3.81 | 1.77 | 1.34 |
| stream_copy | 2.73 | 1.27 | 0.87 |
| stringsearch | 3.11 | 1.44 | 1.15 |
| Geo. Mean | 3.00 | 1.40 | 1.02 |

**龙芯杯历史上首个 IPC > 1 的处理器！**

# 分支预测

敢猜会猜

## 基于实际问题

- 乱序处理器逻辑复杂，需要更深的流水线保证频率
- 分支预测失败时，恢复代价极高

## 设计优化方案

- 相关预测器：综合考虑全局与局部模式，预测是否跳转
- 分支目标缓存 (BTB)：缓存最近的分支指令的跳转地址
- 返回地址栈 (RAS)：记录调用地址，在返回时直接预测

# 分支预测

敢猜会猜

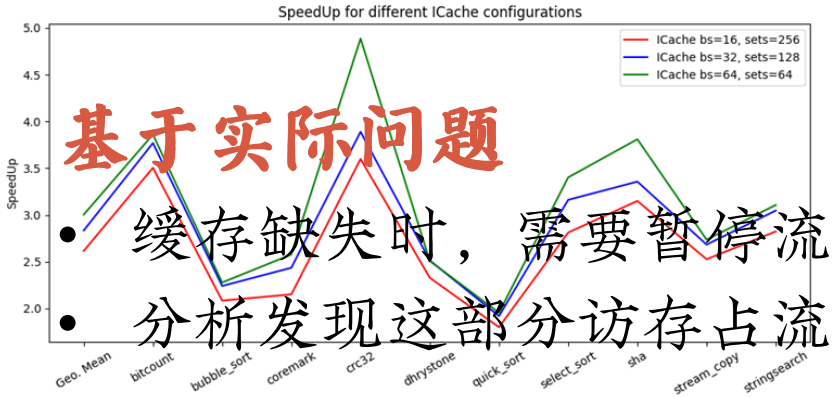
## 设计优化方案

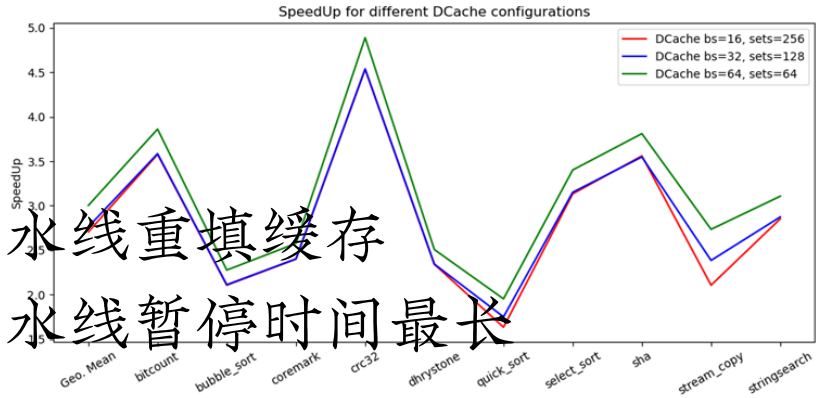
- 相关预测器：综合考虑全局与局部模式，预测是否跳转
- 分支目标缓存 (BTB)：缓存最近的分支指令的跳转地址
- 返回地址栈 (RAS)：记录调用地址，在返回时直接预测

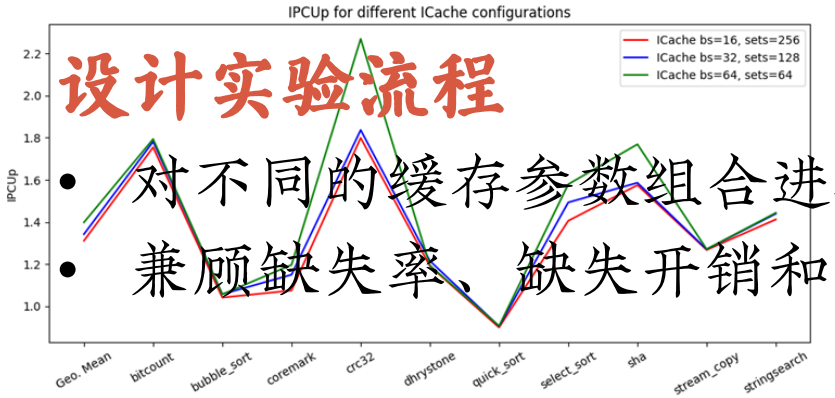
| 架构 | 永远预测跳转失败（朴素） | 相关预测器 + 分支目标缓存 | 相关预测器 + 分支目标缓存 + 返回地址栈 (NOP) |
|---|---|---|---|
| 分支预测失败率（↓） | 68.28 | 9.43 (-86.2%) | 7.22 (-89.4%) |

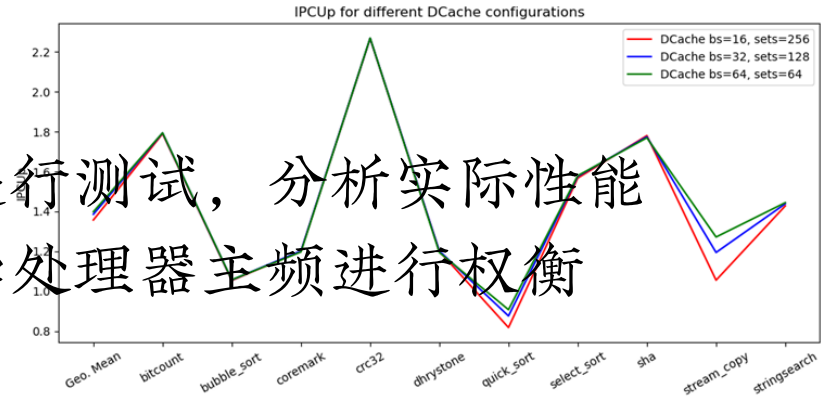
# 缓存设置

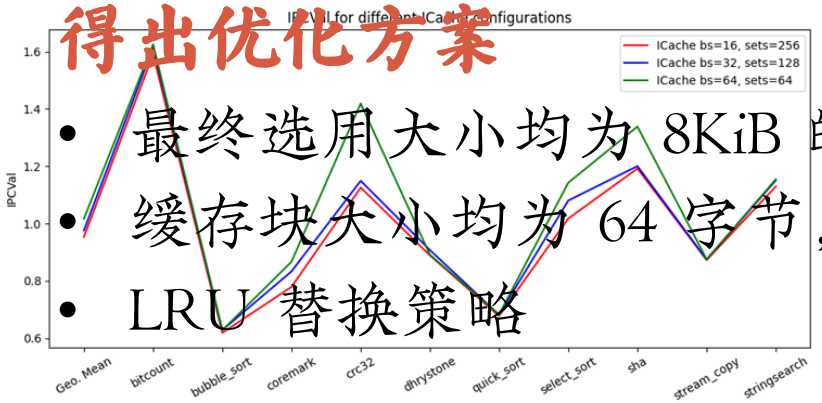
昨事重来心不变
往昔足迹永留痕

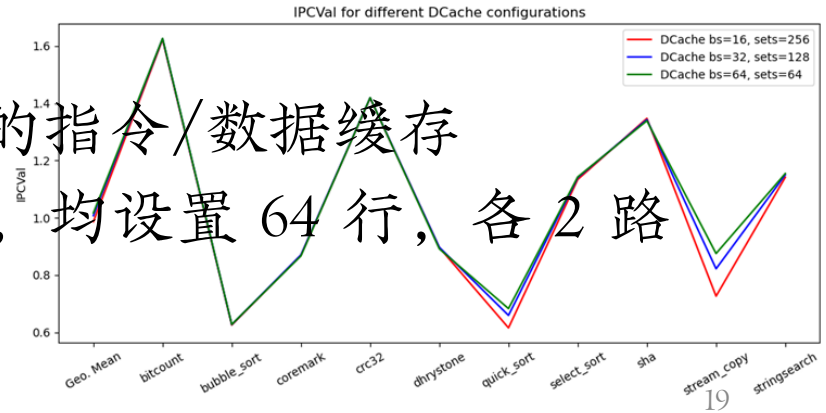



**基于实际问题**

- 缓存缺失时，需要暂停流水线重填缓存
- 分析发现这部分访存占流水线暂停时间最长

**设计实验流程**

- 对不同的缓存参数组合进行测试，分析实际性能
- 兼顾缺失率、缺失开销和处理器主频进行权衡

**得出优化方案**

- 最终选用大小均为 8KiB 的指令/数据缓存
- 缓存块大小均为 64 字节，均设置 64 行，各 2 路
- LRU 替换策略

# 访存优化

提前启程

因为大概率不会晚点

## 流水线切分

- LA32R 中全相联 TLB 查找逻辑成为性能瓶颈
- 大道至简，将地址翻译过程切分为两个流水段

## 推测唤醒

- 流水线切分更深后，Load-Use 指令对间隔进一步增大
- 假设缓存总是有效，提前唤醒等待指令
- Load-Use 指令对间隔周期：4 → 3

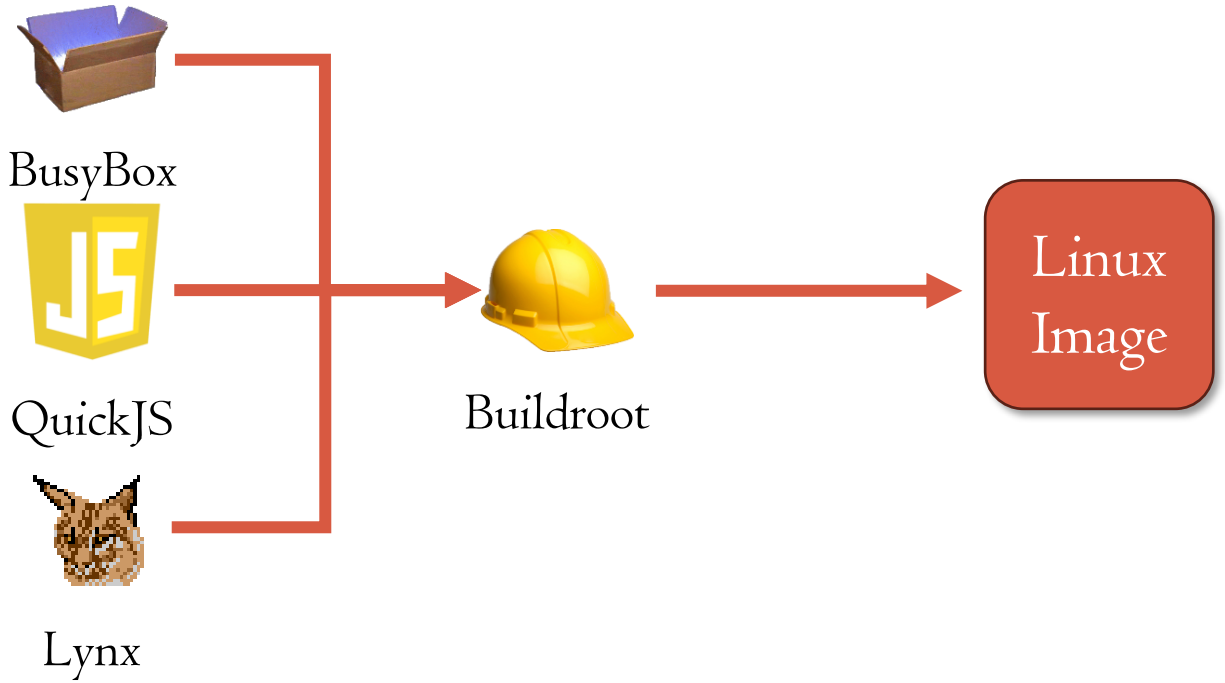
| 架构 | 单阶段地址翻译（朴素） | 二阶段地址翻译 | 二阶段地址翻译 + 推测唤醒 (NOP) |
|---|---|---|---|
| 频率（↑） | 86.67 | 98.46 (+13.6%) | 107.69 (+24.3%) |
| 加速比（↑） | 2.37 | 2.66 (+12.2%) | 3.00 (+26.7%) |

# SoC 设计 & 系统软件

## SoC Design & System Software

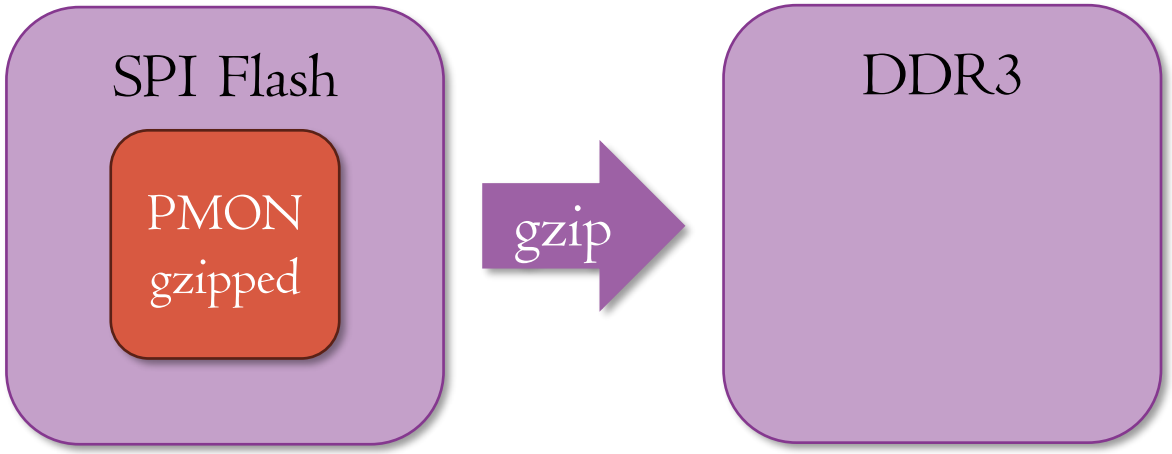
# 系统软件构建

- 移植 Chiplab-PMON 并修复其中的 bug 和未定义行为
- 移植 la32r-Linux，修复错误，适配驱动
- 各类用户程序: buildroot → Linux 镜像



# PMON-Linux 两级启动引导系统

1. PMON: SPI Flash → 内存



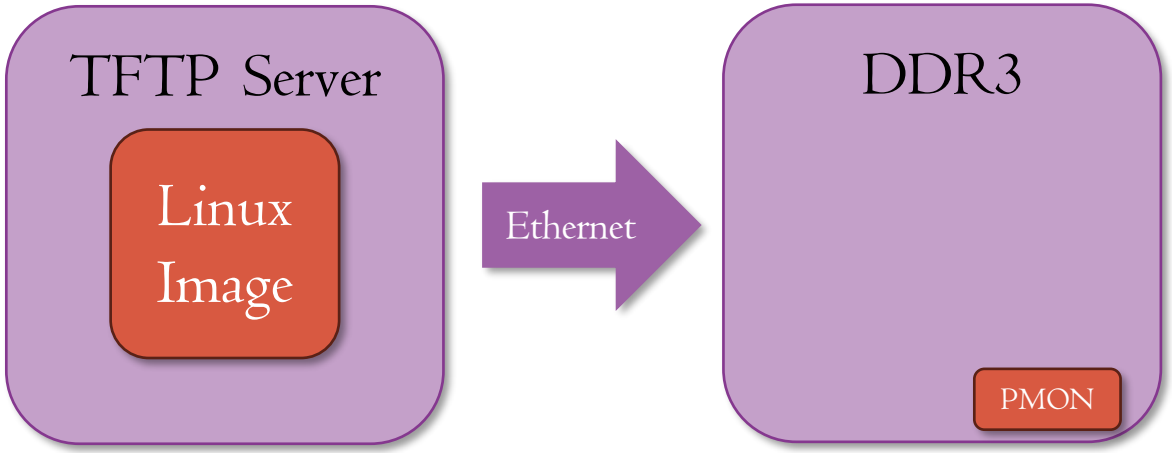

2. Linux: Ethernet → 内存



麻雀虽小
五脏俱全

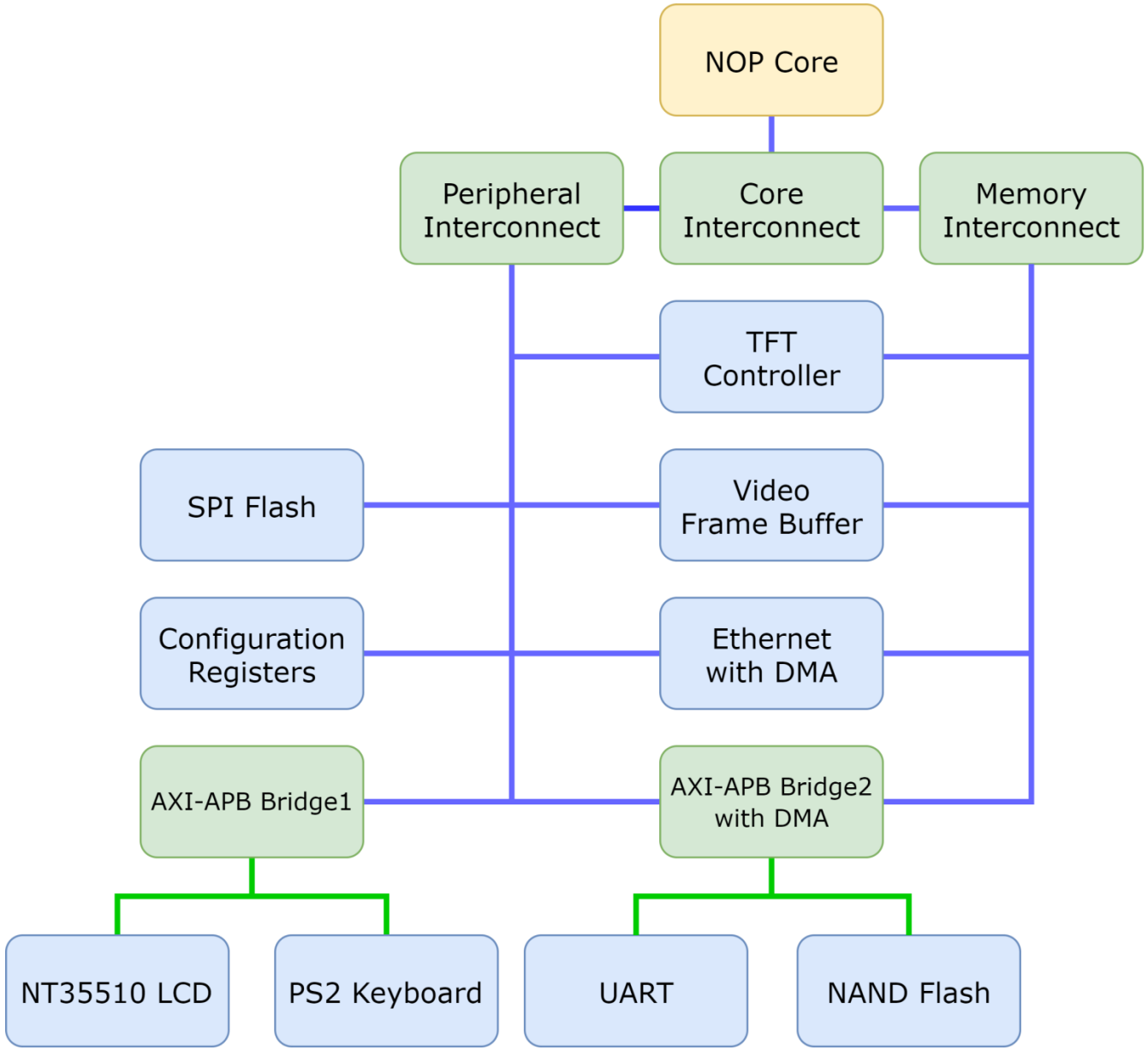
# PMON-Linux 两级启动引导系统

1. PMON: SPI Flash → 内存
2. Linux: Ethernet → 内存






麻雀虽小
五脏俱全




# NOP-SoC

支持除USB外全部外设

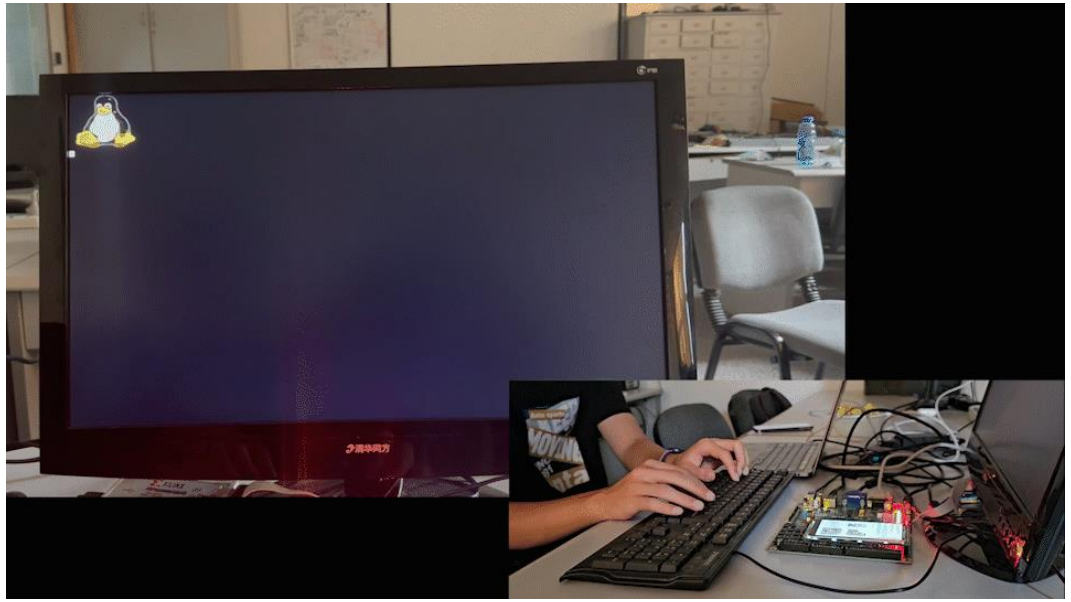
## 板上存储

- DRAM (128M DDR3)
- NAND Flash (128M)
- SPI Flash (1M)

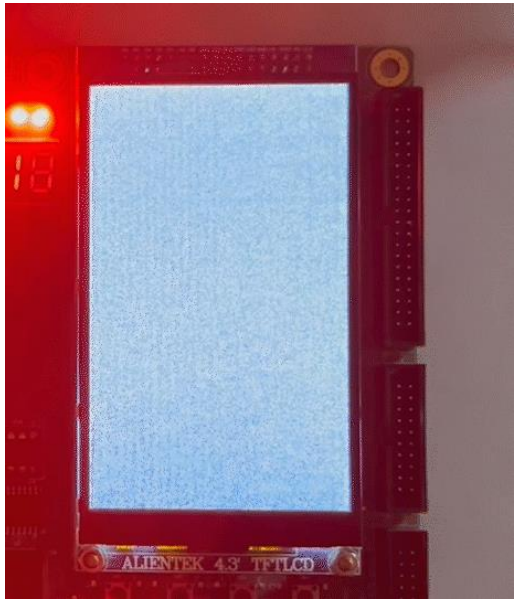
## 输入输出

- 串口
- 以太网
- PS/2
- GPIO
- VGA
- NT35510 LCD

# 视频输出

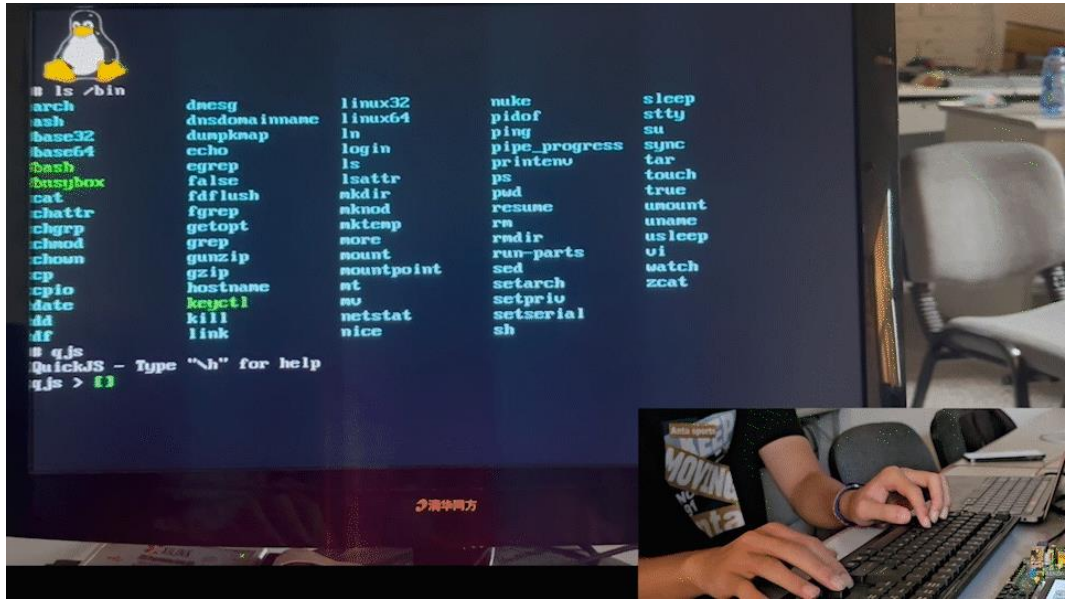


PS2, VGA

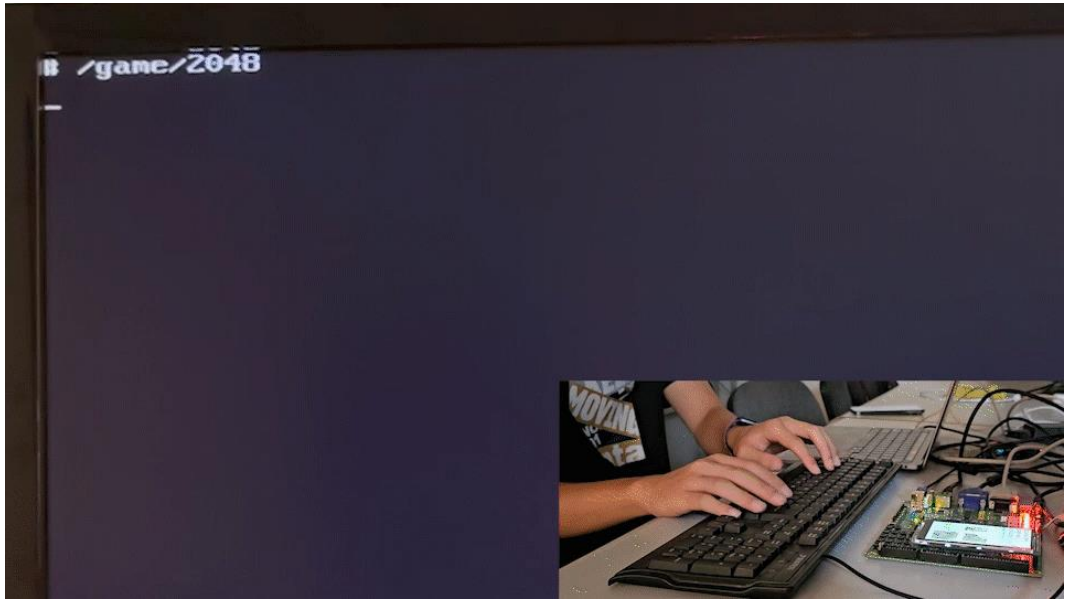



LCD

# 复杂应用

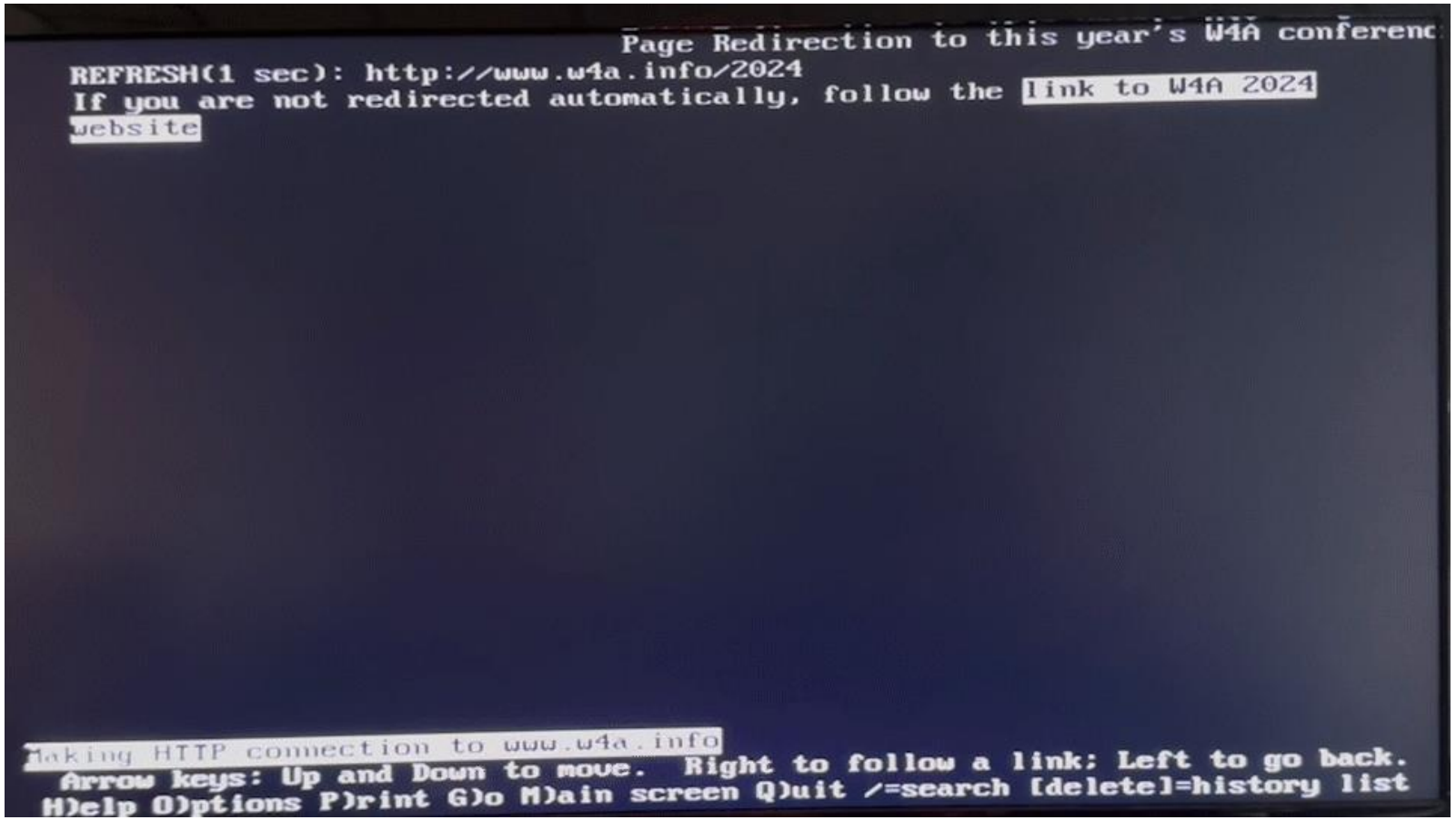



QuickJS




2048

# 网页浏览




使用 Lynx 浏览 http://www.w4a.info/

# 总结致谢

## Summary & Acknowledgement

# 总结

感谢观看
欢迎提问

# NOP：极致的性能、极致的功能

- **乱序 5 发射**
  - 乱序微架构：寄存器重命名 / 重排序缓存 / StoreBuffer / **仲裁发射**
  - 性能优化：指令 & 数据缓存 / 关键路径切分 / **分支预测** / **推测唤醒**
- 频率 **107.69 MHz**，**IPC 1.02**
- 对性能基线**加速比 3.00**，**IPC 加速比 1.40**
- **海量**外设
  - 板上存储：DRAM / NAND Flash / SPI Flash
  - 输入输出：UART / Ethernet / PS-2 / GPIO / VGA / LCD
- **稳定丰富**系统软件
  - PMON / Linux / 各类用户程序

# 附录1: NOP 核微架构设计图

**前端:**

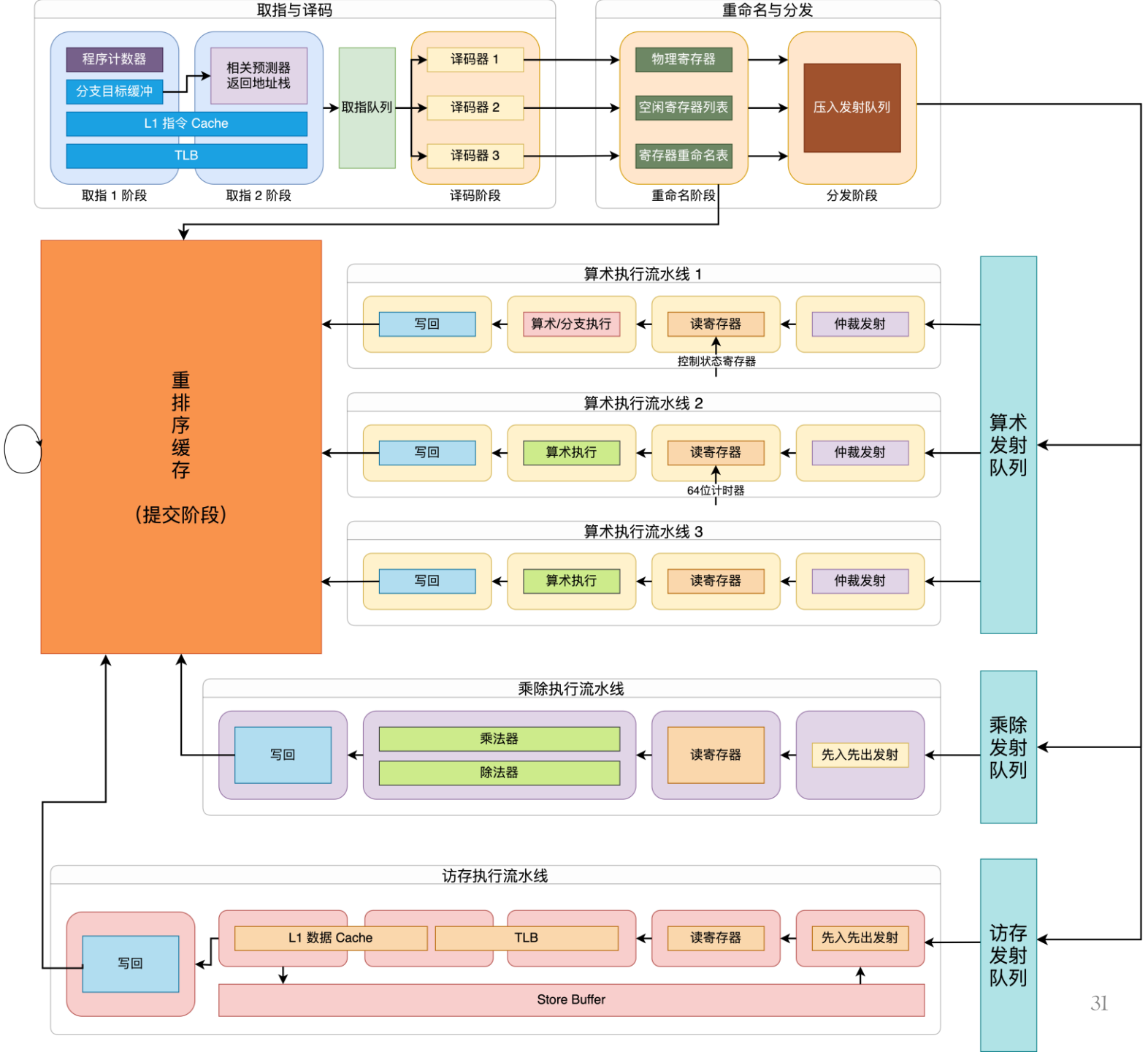
- 取指1 取指2 译码 重命名 分发

**后端:**

- 发射 读寄存器 执行 写回 提交

**流水线:**

- 算术执行流水线 × 3
  - 其中一条非对称
- 乘除执行流水线 × 1
- 访存执行流水线 × 1



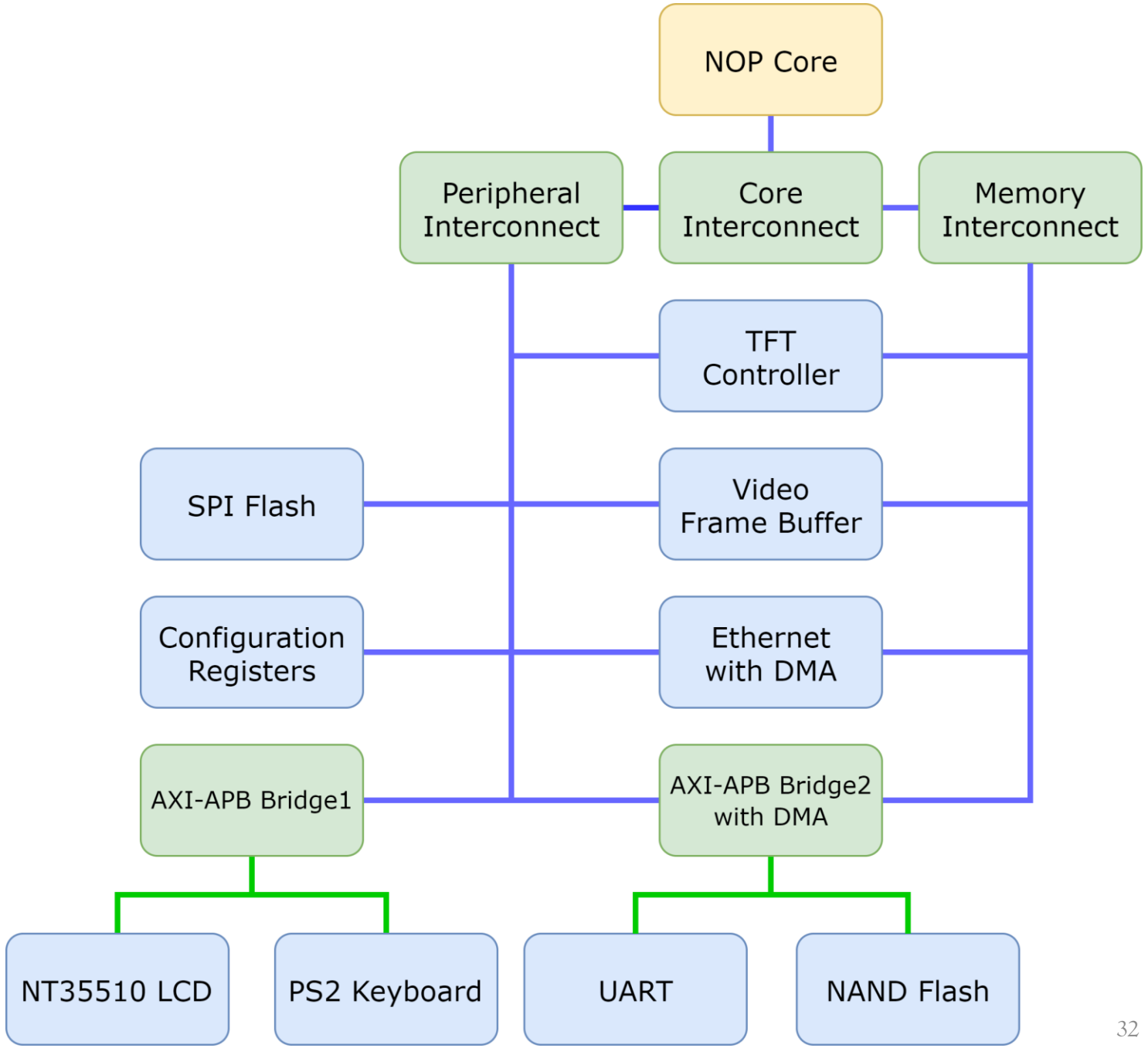
# 附录2: NOP SoC 结构图

**板上存储:**

- DRAM (128M DDR3)
- NAND Flash (128M)
- SPI Flash (1M)

**输入输出:**

- 串口
- 以太网
- PS/2
- GPIO
- VGA
- NT35510 LCD



# 附录3: NOP 核在比赛提供的性能测试程序上的结果

| NOP 处理器主频 107.69 M | | | |
|---|---|---|---|
| 任务 | PerfUp | IPCUp | IPCReal |
| bit_count | 3.86 | 1.79 | 1.63 |
| buble_sort | 2.28 | 1.06 | 0.63 |
| coremark | 2.58 | 1.20 | 0.87 |
| crc32 | 4.89 | 2.27 | 1.42 |
| dhrystone | 2.51 | 1.19 | 0.89 |
| quick_sort | 1.95 | 0.91 | 0.68 |
| select_sort | 3.40 | 1.58 | 1.14 |
| sha | 3.81 | 1.77 | 1.34 |
| stream_copy | 2.73 | 1.27 | 0.87 |
| stringsearch | 3.11 | 1.44 | 1.15 |
| Geo. Mean | 3.00 | 1.40 | 1.02 |

# 附录4: NOP 核的分支预测模块消融实验的结果

**NOP-B:**

- 取消了分支预测学习功能的处理核，总是预测分支失败

**NOP-R:**

- 只开启了相关预测器和分支目标缓存的处理器核

**NOP:**

- 所有分支预测模块都启用的处理器核

| NOP 核分支预测模块 | | | |
|---|---|---|---|
| 任务 | 架构 | | |
| | NOP-B | NOP-R | NOP |
| bit_count | 42.93 | 19.35 | 5.55 |
| buble_sort | 50.27 | 15.94 | 15.94 |
| coremark | 46.40 | 10.59 | 9.85 |
| crc32 | 93.23 | 3.68 | 1.87 |
| dhrystone | 68.19 | 5.09 | 2.44 |
| quick_sort | 31.36 | 22.98 | 22.95 |
| select_sort | 90.68 | 5.05 | 5.05 |
| sha | 86.46 | 1.65 | 1.36 |
| stream_copy | 98.75 | 1.53 | 1.21 |
| stringsearch | 74.48 | 8.44 | 6.02 |
| Avg. | 68.28 | 9.43 | **7.22** |

# 附录5: NOP 核在访存流水线上做出的优化的消融实验

**NOP-S:**

- 使用传统的单阶段地址翻译，但访存阶段的 MEMADDR 段取消，其所有功能并入 MEM1 段

**NOP-D:**

- 将单阶段地址翻译切分成两地址翻译，取指阶段两阶段为 IF1 和 IF2，访存阶段为 MEMADDR 与 MEM1

**NOP:**

- 在 NOP-D 的基础上启用了推测唤醒的处理器核

| NOP 核访存流水线优化 | | | |
|---|---|---|---|
| 任务 | 架构 | | |
| | NOP-S | NOP-D | NOP |
| Freq. (MHz) | 86.67 | 98.46 | **107.69** |
| bit_count | 3.11 | 3.55 | 3.86 |
| buble_sort | 1.84 | 1.95 | 2.28 |
| coremark | 2.04 | 2.22 | 2.58 |
| crc32 | 3.19 | 4.46 | 4.89 |
| dhrystone | 2.24 | 2.30 | 2.51 |
| quick_sort | 1.61 | 1.76 | 1.95 |
| select_sort | 2.60 | 3.10 | 3.40 |
| sha | 2.76 | 3.28 | 3.81 |
| stream_copy | 2.23 | 2.30 | 2.73 |
| stringsearch | 2.57 | 2.68 | 3.11 |
| Geo Mean. | 2.37 | 2.66 | **3.00** |

# 附录6: NOP 核的指令/数据缓存评估结果