

第五届“龙芯杯”全国大学生计算机系统能力培养大赛

GenshinCPU 设计答辩

西北工业大学二队

江嘉熙 杨益滔 魏天昊 申世东



主要内容

- 概述
- 微架构
- 基础设施
- 系统展示



概述

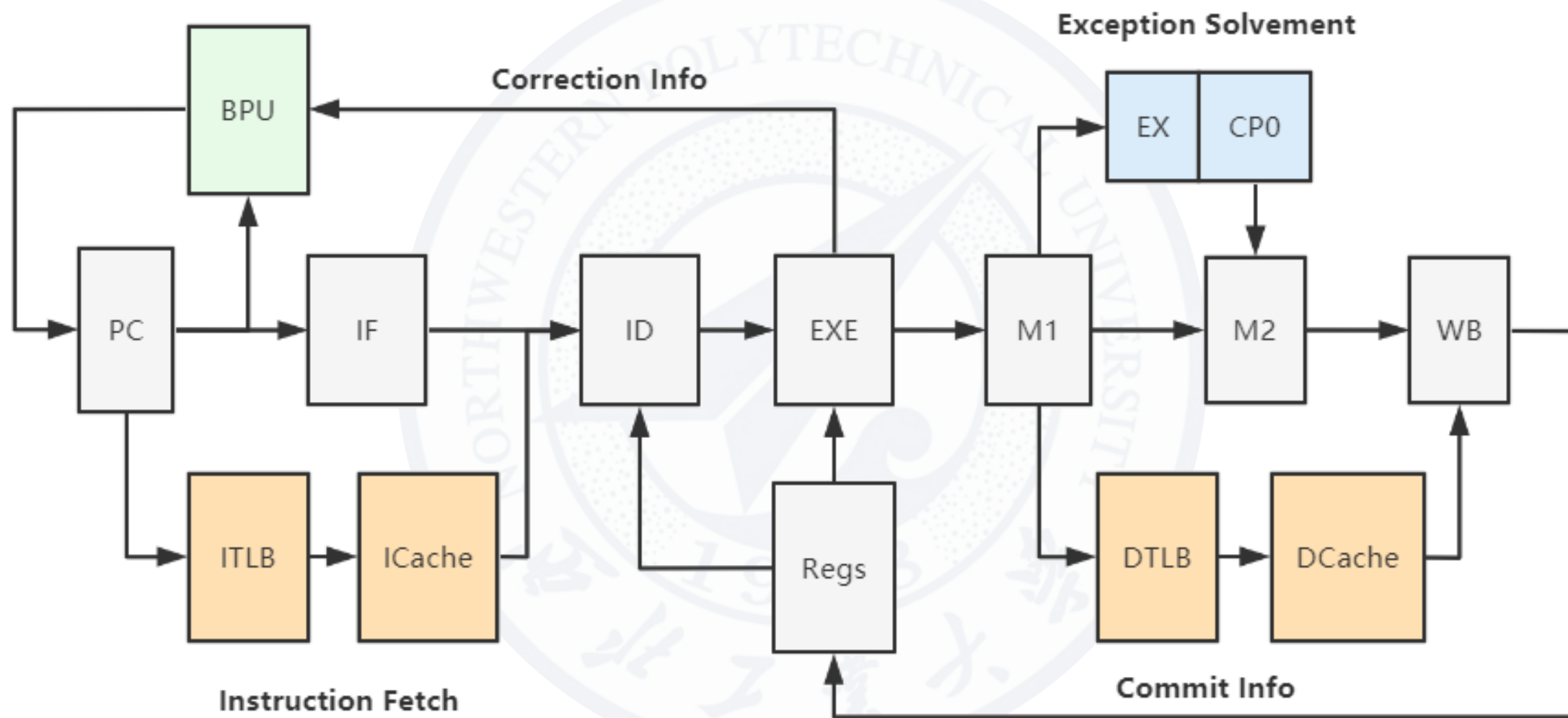


- ❑ 7级流水线：2级取指、1级译码、1级执行、2级访存、1级提交
- ❑ 追求单发顺序执行的**极致性**， CPU主频**150M**， IPC比**25.58**
- ❑ BHT+RAS的分支预测器， 整体准确率**89%**
- ❑ 8K、2路组相联、 **可配置参数的**ICache & DCache
- ❑ 8项全相联TLB支持， 加入**ITLB Buffer & DTLB Buffer**
- ❑ 支持96条指令， 18个CP0寄存器， 10种异常
- ❑ 能够正确启动**PMON, uCore & Linux**

The background features a large, light gray watermark of the Northwestern Polytechnical University logo. The logo is circular, with the English text "NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY" around the top and the Chinese text "西北工业大学" around the bottom. In the center is a stylized graphic of a compass rose or a star-like shape. The year "1938" is also visible in the center.

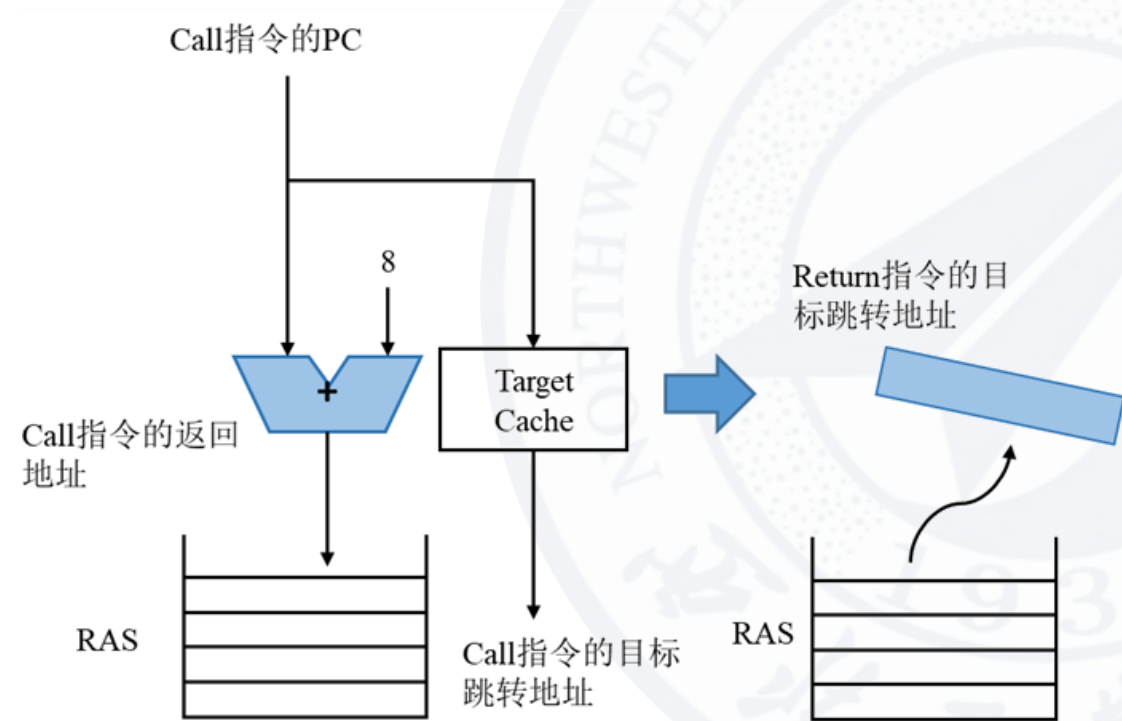
微架构

CPU微架构



分支预测

根据分支指令的类型使用BHT (Branch History Table) 和RAS (Return Address Stack) 进行预测：



RAS示意图

Benchmark	正确率
sha	97%
dhrystone	96%
Crc32	96%
Stream copy	96%
String search	95%
Select sort	94%
Bit count	91%
Coremark	85%
Quick sort	81%
Bubble sort	69%
All	89%

程序分支预测命中率

Cache设计

□ Cache组相连度和块大小**可配置**

□ 采用2路组相连, 8KB, 块大小为16字

□ 两种ram的混合使用

□ 采用VIPT, LRU算法, 写回写分配

□ 两级流水

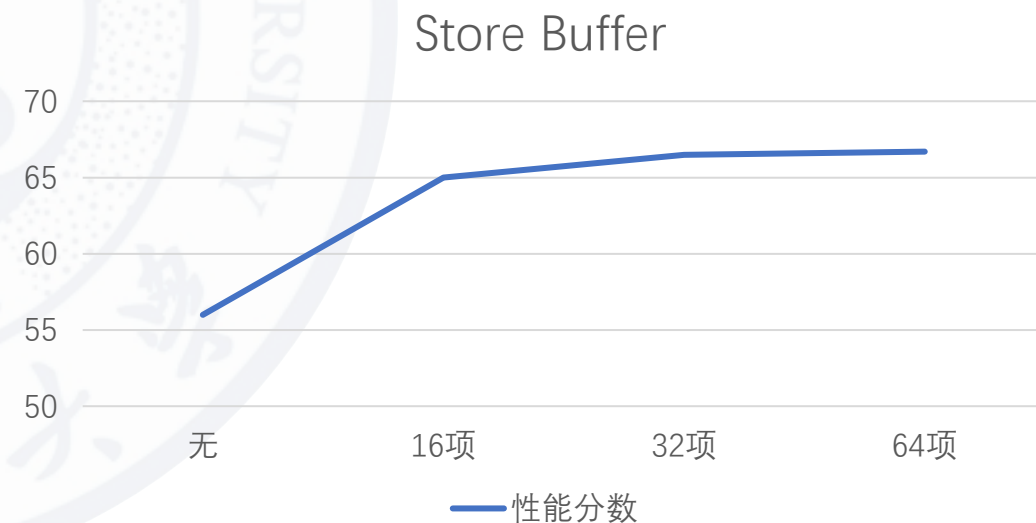
□ Uncache Store加速,

可配置的Store Buffer项数

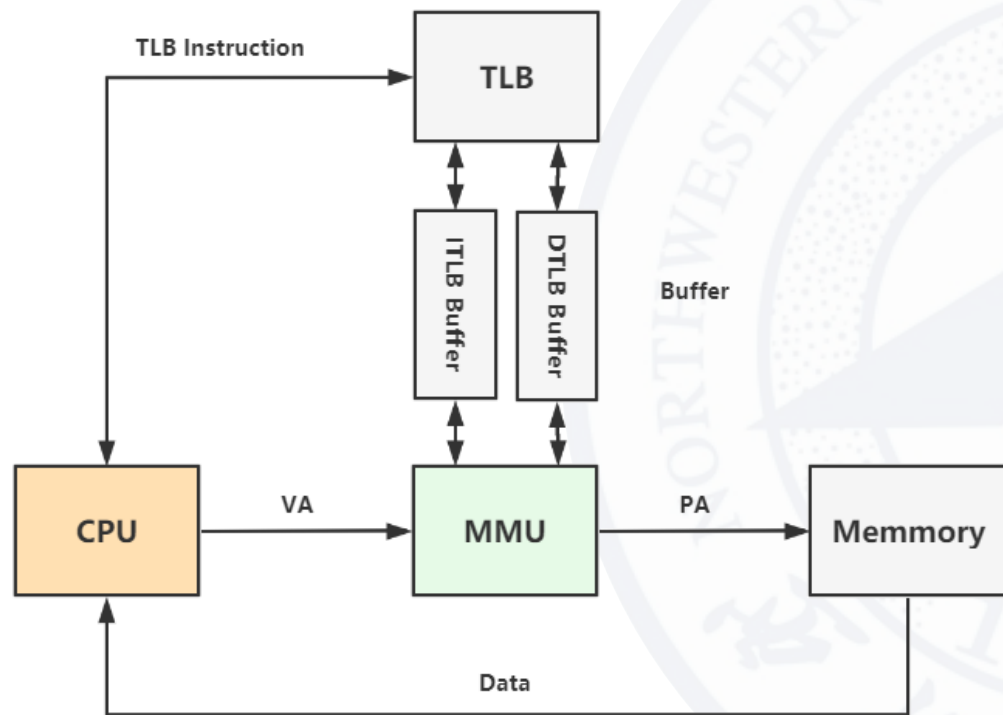
□ 连续命中时**无需阻塞**



两级流水Cache



TLB设计



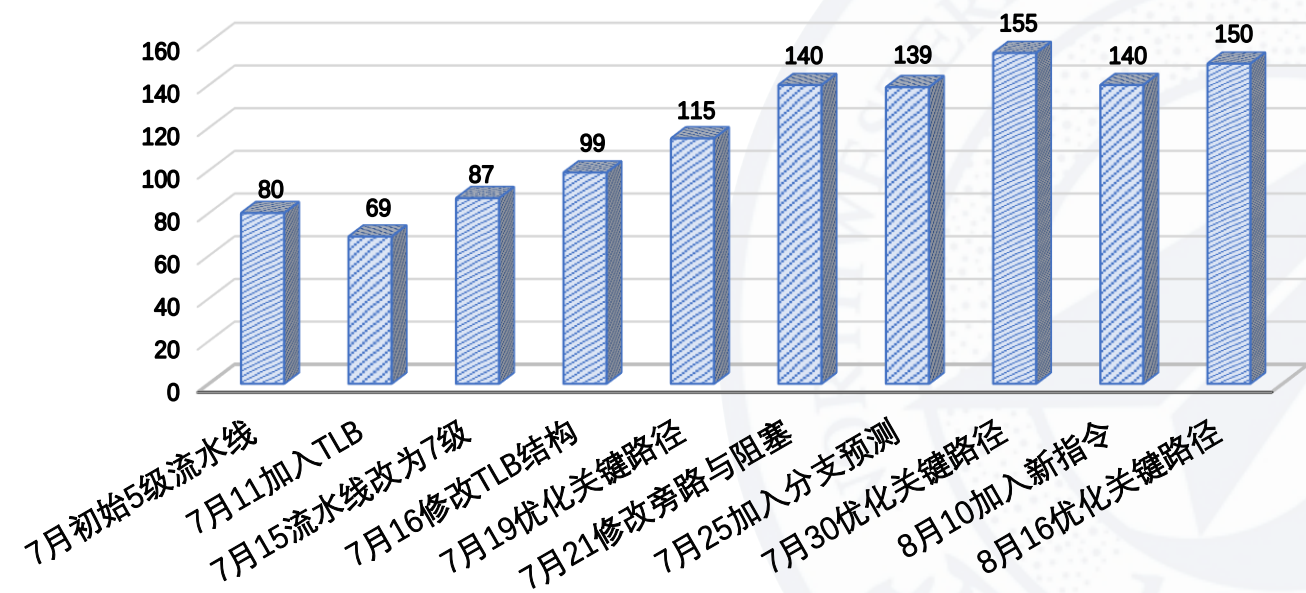
❑ 8项全相联TLB

❑ ITLB Buffer & DTLB Buffer缓存上一次的地址翻译信息，在发生miss后查找TLB

❑ CPU通过TLB Buffer与TLB交互，**不会成为关键路径**

性能提升

□ 决赛频率**150MHz**，初赛频率**155MHz**（**全国第一**）



优化策略：

- 将CPU从5级流水，改为7级流水
- 将Cache的hit信号判断前移至Tag查询时
- 将EXE级的旁路统一移动到ID级
- 将Load指令字节片选使能，移动至WB级
- 使用TLB Buffer与CPU进行交互
- 减少TLB项数至8项

性能公式： $\text{CPU时间} = \text{指令数} \times \text{CPI} \times \text{时钟周期时间}$

The background features a large, light gray watermark of the Northwestern Polytechnical University logo. The logo is circular, with the English text "NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY" around the top and the Chinese text "西北工业大学" around the bottom. In the center is a stylized graphic of a compass rose or a star, with the year "1938" below it.

基础设施

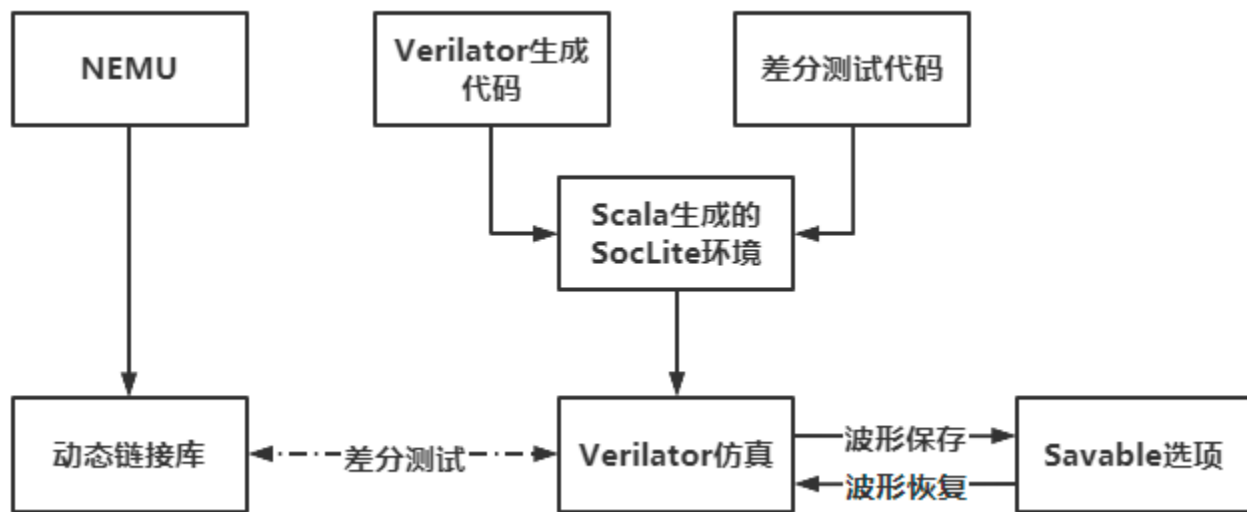
Verilator & GitLab CI



- 使用GitLab CI构建自动化测评工具
- 大赛阶段总计完成自动化测评**483次**,大约节约了**300小时**的本地调试时间
- 利用Scala代码生成仿真环境
- 加速仿真,仿真速度大约为**Vivado的100倍**
- 可以为**操作系统仿真**提供支持

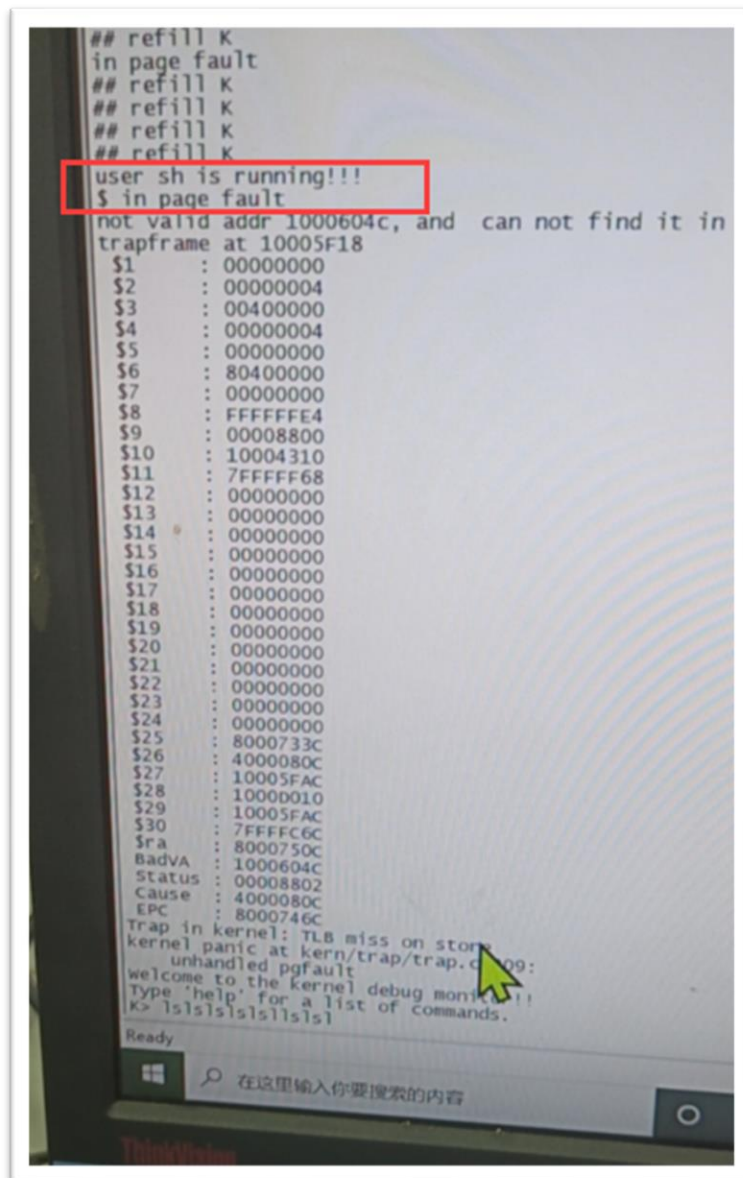
差分测试

- 参考一生一芯开源项目NutShell**自主构建**了MIPS32架构下的CPU差分测试框架, 实现了在**仿真环境中调试操作系统**的目标。快速准确定位到许多隐蔽Bug。
- 利用Verilator的Savable选项完成对电路状态的保存与恢复,从而快速回溯至出错位置, **精准定位错误**。
- 最终我们的CPU在仿**内核态初始化**。



差分测试框架图

差分测试效果演示



现象：启动uCore进入命令行后，串口无法输入任何数据，等待约半分钟后，操作系统报Kernel panic。

解决：使用差分测试框架调试，**等待约5小时，CPU运行40亿时钟周期后**，定位到一条mfc0指令出错，具体为Status寄存器UM位（用于指示**内核态与用户态**）未实现，在正确实现该位后，问题解决，可以正常启动uCore。

The background features a large, light gray watermark of the Northwestern Polytechnical University (NPU) logo. The logo is circular, with the English text "NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY" around the top and the Chinese text "西北工业大学" around the bottom. In the center is a stylized graphic of a compass rose or a star, with the year "1938" below it.

系统展示

系统展示—PMON

```
Configuration [FCR,EL,NET]
Version: PMON2000 2.1 (ls1b) #362: 2017年 04月 13日 星期四 09:55:07 CST commit 77efeacd131b8ea
oongson.cn> Date: Thu Aug 4 15:52:15 2016 +0800 .
Supported loaders [srec, elf, bin]
Supported filesystems [mtd, net, fs/yaffs2, fat, fs, disk, socket, tty, ram]
This software may be redistributed under the BSD copyright.
Copyright 2000-2002, Opsycon AB, Sweden.
Copyright 2005, ICT CAS.
CPU GODSON1 @ 99.99 MHz / Bus @ 99.99 MHz
Memory size 128 MB (128 MB Low memory, 0 MB High memory) .
Primary Instruction cache size 8kb (64 line, 2 way)
Primary Data cache size 8kb (64 line, 2 way)

BEV1
BEV2
BEV3
BEV0
BEV in SR set to zero.

NAND DETE
NAND device: Manufacturer ID: 0xec, Chip ID: 0xf1 (Samsung NAND 128MiB 3,3V 8-bit)
NAND_ECC_NONE selected by board driver. This is not recommended !!
Scanning device for bad blocks
Bad eraseblock 515 at 0x04060000
Bad eraseblock 1023 at 0x07fe0000
NANDFlash info:
erase size      131072 B
write size      2048 B
oob size        64 B
PMON> ifconfig dmfe0 169.254.26.43
```

PMON 进入命令行

系统展示—uCore

```
check_boot_pgdir() succeeded!
----- BEGIN -----
----- END -----
check_slab() succeeded!
kmalloc_init() succeeded!
check_vma_struct() succeeded!
check_pgfault() succeeded!
check_vmm() succeeded.
sched class: RR_scheduler
ramdisk_init(): initrd found, magic: 0x2f8dbe2a, 0x000002bc secs
sfs: mount: 'simple file system' (81/6/87)
vfs: mount disk0.
kernel_execve: pid = 2, name = "sh".
user sh is running!!!
```

HI GENESIS CPU

```
$ ls
@ is [directory] 2(hlinks) 6(blocks) 1536(bytes) : @'.'
[d] 2(h) 6(b) 1536(s) .
[d] 2(h) 6(b) 1536(s) ..
[-] 1(h) 21(b) 85000(s) cat
[-] 1(h) 1(b) 21(s) test.txt
[-] 1(h) 21(b) 85128(s) ls
[-] 1(h) 22(b) 89268(s) sh
lsdir: step 4
$ cat test.txt
hello World! Haha...
$
```

uCore 进入命令行

系统展示—Linux

```
serial8250.0: ttyS0 at MMIO 0x1fe40000 (irq = 163) is a ST16650
console [ttyS0] enabled, bootconsole disabled
console [ttyS0] enabled, bootconsole disabled
brd: module loaded
m25p80 spi0.0: m25p80 (1024 Kbytes)
ITC MAC 10/100M Fast Ethernet Adapter driver 1.0 init
TCP cubic registered
NET: Registered protocol family 17
drivers rtc/hctosys.c: unable to open rtc device (rtc0)
Freeing unused kernel memory: 1352k freed
Algorithmics/MIPS FPU Emulator v1.5
```

WELCOME TO
MIPS GENSHINCEPU!

```
init started: BusyBox v1.23.2 (2016-05-13 03:51:29 CST)
```

```
Please press Enter to activate this console.
# echo "Hello World!!!"
Hello World!!!
#
```

Linux 进入命令行

启动操作系统中遇到的BUG

- ❑ Random寄存器的值设为固定值，因此TLBWR总是写入同一项，某些情况下陷入死循环，无法进入Linux用户态。
- ❑ Status寄存器没有正确实现UM位，进入uCore命令行后串口无法输入，约半分钟后报出Kernel Panic。
- ❑ ICache取指未考虑Config0寄存器的K0位，在进程切换时出现取指错误。

总结反思



时间线

2021.4
完成组队

2021.6.11
第二版AXI接口
通过

2021.7.15
重构为7级流水
线,性能分
45@105M

2021.8.3
启动PMON操
作系统

2021.8.13
启动uCore

2021.5.1
第一版SRAM
接口通过

2021.7.1
添加Cache,性能分
39@80M

2021.7.30
性能优化,性能分
80@160M

2021.8.10
搭建完成差
分测试框架

2021.8.16
启动Linux

设计亮点

□ 精益求精的硬件设计

- CPU主频**150M**，IPC比**25.58**，加速比**76.5**，初赛提交版本主频排名**全国第一**
- 实现高效**可配置**Cache,采用精准的分支预测技术，追求**极致性能**

□ 完整高效的基础设施

- 搭建差分测试框架，支持在**仿真环境**中调试操作系统
- 通过自动化测试工具，节省大量本地测试时间

□ 功能齐全的系统支持

- 实现96条指令，10种异常，8项TLB，兼容MIPS32R1的完整核心
- 成功启动PMON，uCore，**3天**启动Linux

丰富配套软件

- 提升**系统软件能力**，移植用户态下命令行程序
- 移植相关编译器，解释器

软硬件协同开发

- 尝试实现MIPS标准的CP1浮点运算单元
- 针对特定程序行为，实现硬件运算加速

尝试先进优化方向

- 不一味追求主频，尝试**更多优化方向**
- 尝试多发射乱序执行等**现代超标量**处理器技术



请各位专家批评指正！

▣ GenshinCPU支持的指令

- ADD ADDI ADDIU ADDU DIV DIVU MADD MADDU MSUB MSUBU MUL MULT MULTU
SLT SLTI SLTIU SLTU SUB SUBU AND ANDI LUI NOR OR ORI XOR XORI MFHI MFLO
MOVN MOVZ MTHI MTLO
- SLL SLLV SRA SRAV SRL SRLV
- BEQ BGEZ BGEZAL BGTZ BLEZ BLTZ BLTZAL BNE BNEL BEQL J JAL JALR JR
- LB LBU LH LHU LW LWL LWR SB SH SW SWL SWR
- SYNC CACHE PREF WAIT SSNOP NOP
- BREAK SYSCALL ERET MFC0 MTC0 TLBP TLBR TLBWI TLBWR

□ GenshinCPU实现的CP0寄存器

- Index
- Random
- EntryLo0
- EntryLo1
- Context
- PageMask
- Wired
- BadVAddr
- Count
- EntryHi
- Compare
- Status
- Cause
- EPC
- PRID
- Ebase
- Config0
- Config1

□ GenshinCPU支持的异常

- Int Mod TLBL TLBS AdEL AdES Ov Sys Bp RI CpU