



Lab 4 Pipelined CPU with Cache

2024-2025 春夏学期 计算机体系结构
课程实验报告

姓名 王浩雄

学号 3230106032

年级 2023 级

专业 混合班 (计算机科学与技术)

班级 混合 2303 班

2025 年 4 月 15 日

Lab 4 Report

1 实验目的

本实验要求在 Lab3 实现的 Cache 基础上，进一步完成 Cache 控制单元（CMU）的设计，并将其整合进流水线 CPU 中。具体要求如下：

1. 理解 CMU 的基本原理以及其状态机的工作机制；
2. 掌握 CMU 状态机的设计思想与状态转换逻辑，重点理解其在缓存命中与未命中过程中的控制流程；
3. 掌握 CMU 的功能验证方法，通过仿真验证其正确性；
4. 掌握 CMU 的设计方法，将其完整集成到 CPU 系统中，实现结构清晰、功能完整的访存子系统。

2 CMU 模块接口说明

CMU 模块的接口，按照连接对象可分为以下三类：

1. CPU 侧接口：

- `clk`: 时钟信号。
- `rst`: 异步复位信号。
- `addr_rw`: 读/写地址。
- `en_r`: 读使能，表示 load 指令。
- `en_w`: 写使能，表示 store 指令。
- `u_b_h_w`: 数据类型控制信号（表示 byte/half/word 及符号信息等）。
- `data_w`: 写入 Memory 的数据。
- `data_r`: 从 Cache/Memory 读出的数据。
- `stall`: 当 CMU 正在处理访存时，通知流水线暂停操作。该信号传给 Hazard detection unit，然后该 Unit 对流水线寄存器和 PC 寄存器进行控制，从而实现流水线停顿。

2. 内存侧接口：

- `mem_cs_o`: Memory 选择信号，高电平激活。

- `mem_we_o`: Memory 写使能，高电平表示写操作，低电平表示读操作。
- `mem_addr_o`: 读写 Memory 的地址。
- `mem_data_o`: 写入 Memory 的数据。
- `mem_data_i`: 从 Memory 读回的数据。
- `mem_ack_i`: 内存响应信号，表明本次操作完成。实验中 Cache 和 Memory 交互数据的时候是逐字发送的，每次读写成功一个字，Memory 都会发一个 ack 信号。

3. 调试输出接口：

- `cmu_state`: 输出当前状态机状态，用于调试工作。

3 状态机设计与切换逻辑

在 CMU 中，由于访存流程包含了多个相互依赖的操作。直接用组合逻辑难以清晰、可靠地描述各个操作步骤之间的时序关系和控制逻辑，且一些操作需要再多个时钟周期内完成。因此，采用有限状态机进行 CMU 设计。

该状态机的关键点在于缓存操作与内存操作分布在不同时钟边沿上。下面对逐个状态进行详细说明：

- **缓存操作**: 发生在当前状态的下降沿。
- **内存操作**: 发生在当前状态的上升沿。

3.1 S_IDLE (空闲状态)

- **含义**: 系统处于空闲状态，不会有内存操作。
- **操作**:

1. 如果缓存命中，则继续执行缓存操作，不需要访问内存，系统维持在该状态。
2. 如果未命中，根据缓存是否有效及数据是否脏，决定进入下一状态。

Code Listing 1: S_IDLE 状态转移逻辑

```
1 S_IDLE: begin
2     if (en_r || en_w) begin
3         if (cache_hit)
4             next_state = S_IDLE;
5         else if (cache_valid && cache_dirty)
```

```

6           next_state = S_PRE_BACK;
7
8     else
9       next_state = S_FILL;
10      end
11
12      next_word_count = 2'b00;
13
14 end

```

3.2 S_PRE_BACK (准备回写状态)

- **含义:** 进入此状态主要目的是为将脏数据回写到内存作准备。
- **操作:** 在此状态的下降沿进行一次缓存读取操作，从缓存中取出需要回写的数据。

Code Listing 2: S_PRE_BACK 状态转移逻辑

```

1 S_PRE_BACK: begin
2   next_state = S_BACK;
3   next_word_count = 2'b00;
4 end

```

3.3 S_BACK (正在回写状态)

- **含义:** 在该状态下，系统将脏数据写回到内存。
- **操作:**
 - 在上升沿: 将 S_PRE_BACK 状态中读取的数据写入内存。
 - 在下降沿: 从缓存中读取下一段要写回的数据，供下一次上升沿使用。
- **过程:** 整个缓存行需要写回，因此该过程会持续多个周期。由于一次内存写操作需要 4 个周期，在继续下一步之前需要等待内存的确认信号 mem_ack_i。

Code Listing 3: S_BACK 状态转移逻辑

```

1 S_BACK: begin
2   if (mem_ack_i && word_count == {ELEMENT_WORDS_WIDTH{1'b1}})
3     next_state = S_FILL;
4   else
5     next_state = S_BACK;
6
7   if (mem_ack_i)

```

```

8         next_word_count = word_count + 2'b01;
9     else
10        next_word_count = word_count;
11 end

```

3.4 S_FILL (填充缓存状态)

- **含义:** 当写回完成后, 或者在未写回情况下, 进入此状态从内存中读取数据填充缓存。
- **操作:**
 1. 在上升沿: 从内存中读取数据。
 2. 在下降沿: 将读取到的数据写入缓存。
- **过程:** 与写回过程类似, 为填满整个缓存行, 该过程也需要多个周期, 并等待内存确认信号 `mem_ack_i`。

Code Listing 4: S_FILL 状态转移逻辑

```

1 S_FILL: begin
2     if (mem_ack_i && word_count == {ELEMENT_WORDS_WIDTH{1'b1}})
3         next_state = S_WAIT;
4     else
5         next_state = S_FILL;
6
7     if (mem_ack_i)
8         next_word_count = word_count + 2'b01;
9     else
10        next_word_count = word_count;
11 end

```

3.5 S_WAIT (等待状态)

- **含义:** 针对之前 Cache miss 的情况, 有些缓存操作可能未能完成, 此状态用于执行这些剩余的操作。
- **操作:** 仍然在下降沿执行缓存操作, 待所有操作完成后返回空闲状态。

Code Listing 5: S_WAIT 状态转移逻辑

```

1 S_WAIT: begin
2     next_state = S_IDLE;
3     next_word_count = 2'b00;
4 end

```

3.6 状态机状态更新逻辑

状态机状态和字计数器的更新在时钟上升沿进行。具体逻辑如下：

Code Listing 6: 状态更新逻辑

```

1 always @ (posedge clk) begin
2     if (rst) begin
3         state <= S_IDLE;
4         word_count <= 2'b00;
5     end
6     else begin
7         state <= next_state;
8         word_count <= next_word_count;
9     end
10 end

```

3.7 状态机切换逻辑总结

整个状态机切换流程可描述为：

1. **S_IDLE:** CPU 发出访存请求后，系统首先检测缓存命中情况：
 - 若命中，直接在 **S_IDLE** 状态完成操作。
 - 若未命中且缓存有效且数据脏，则进入 **S_PRE_BACK** 状态；
 - 否则直接进入 **S_FILL** 状态进行缓存填充。
2. **S_PRE_BACK:** 准备回写，从缓存中读取出即将写回内存的数据，并初始化写回计数器，然后转入 **S_BACK** 状态。
3. **S_BACK:** 在上升沿将从 **S_PRE_BACK** 获取的数据写回内存，在下降沿继续从缓存中读取下一段数据，整个过程持续多个周期，直至写回完毕后转入 **S_FILL** 状态。
4. **S_FILL:** 在上升沿从内存中读取数据，下降沿将数据写入缓存，直到整个缓存行填充完毕后进入 **S_WAIT** 状态。

5. S_WAIT: 处理因缓存未命中而留下的未完成缓存操作，最终返回 S_IDLE 状态等待下一个访存请求。

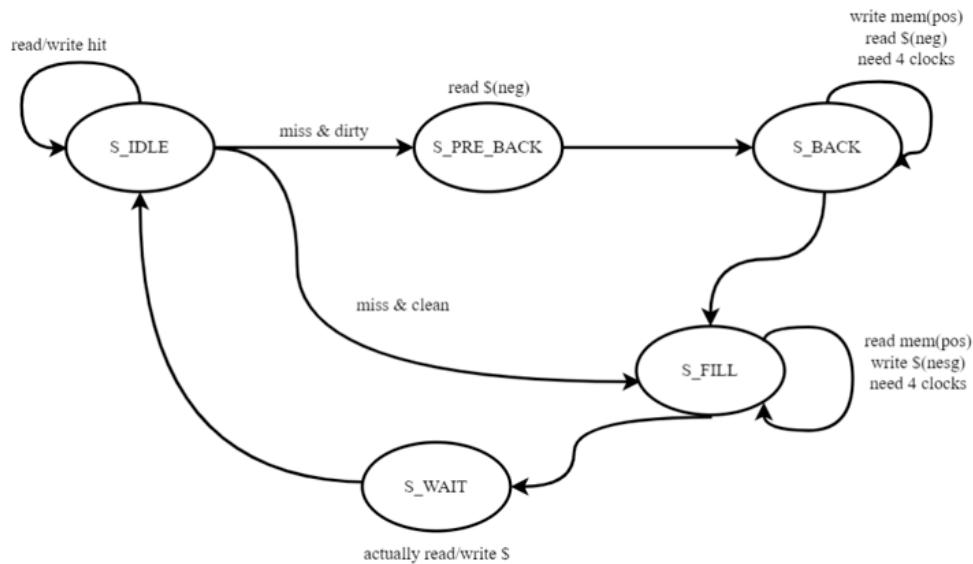


图 1: CMU 状态机切换流程图

4 实验结果

4.1 仿真测试点分析

通过仿真测试，我验证了 CMU 在不同操作要求、不同缓存状态下对缓存数据的获取和更新逻辑，确保了 CMU 控制逻辑正确实现。

使用的仿真激励文件如下：

```

1 initial begin
2     data[0]=40'h0_2_00000004; //read miss 1+17
3     data[1]=40'h0_3_00000019; //write miss 1+17
4     data[2]=40'h1_2_00000008; //read hit 1
5     data[3]=40'h1_3_00000014; //write hit 1
6     data[4]=40'h2_2_00000204; //read miss 1+17
7     data[5]=40'h2_3_00000218; //write miss 1+17
8     data[6]=40'h0_3_00000208; //write hit 1
9     data[7]=40'h4_2_00000414; //read miss+dirty 1+17+17
10    data[8]=40'h1_3_00000404; //write miss+clean 1+17
11    data[9]=40'h0; //end total:128
12 end
13
14 assign
15     u_b_h_w = data[index][38:36],
16     valid = data[index][33],
17     write = data[index][32],
18     addr = data[index][31:0];

```

内存初始化内容如下：

```

1 00000000 00000004 00000008 0000000C
2 00000010 00000014 00000018 0000001C
3 00000020 00000024 00000028 0000002C

```

下面选取部分关键测试点进行详细说明：

4.1.1 Read Miss (Clean)

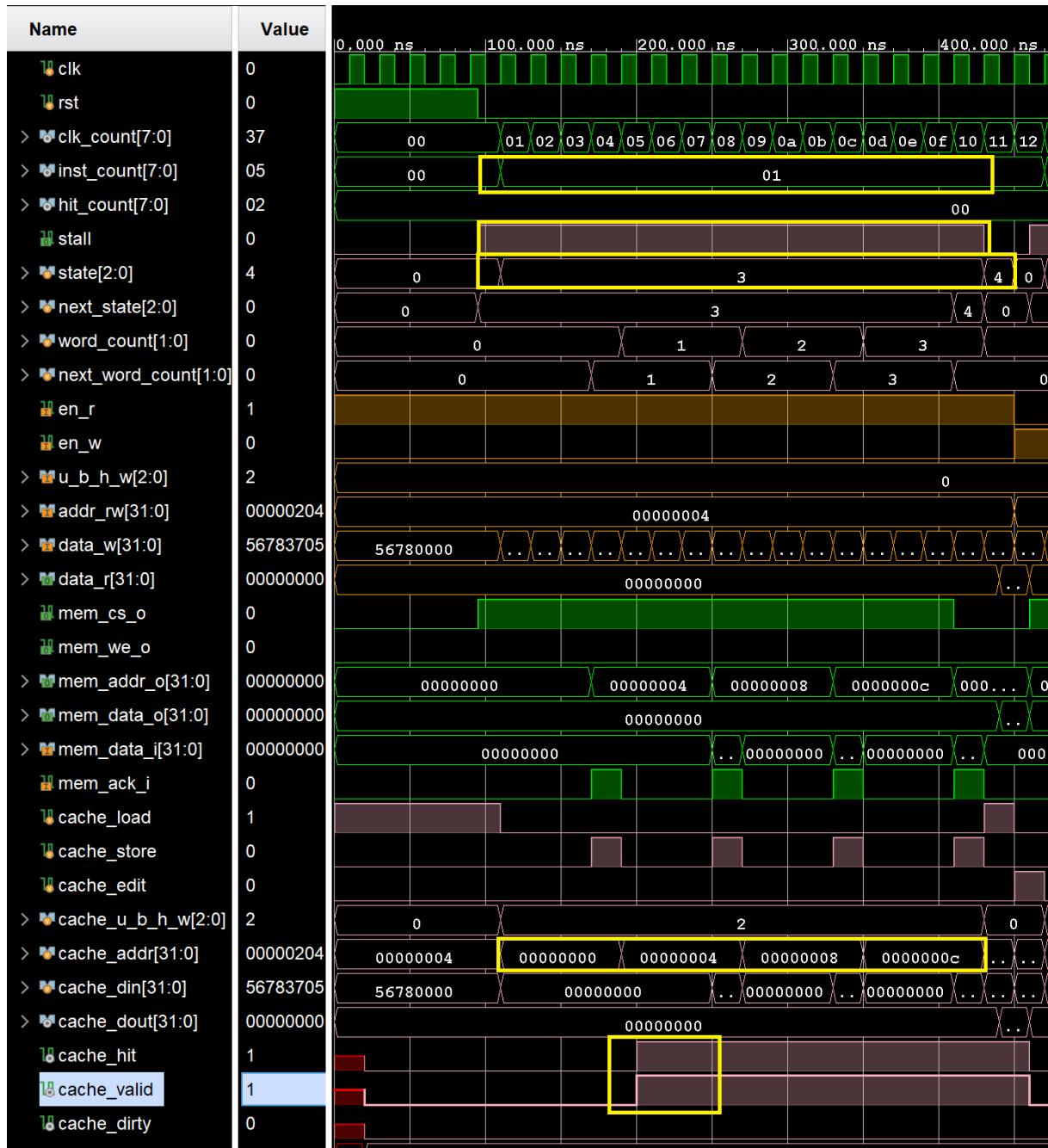


图 2: 指令号: 0

指令:

```
1 data[0]=40'h0_2_00000004; //read miss 1+17
```

解释:

- 在发生读缺失的情况下，假设缓存中有一个可用且可替换的位置，状态转换如下：
0 (S_IDLE) → 3 (S_FILL) → 4 (S_WAIT) → 0 (S_IDLE)。

2. 其中，在 S_FILL 阶段，由于内容是逐字读取的，因此可以观察到 word_count 由 0 自增到 3 的过程。
3. 此外，在 S_FILL 过程中，因为 CPU 需要地址 0x4 处的数据，缓存从内存中读取从 0x0 到 0xC 的块。在读取 0x4 处的数据后，cache_hit 和 cache_valid 变为 1。

4.1.2 Read and Write Hit

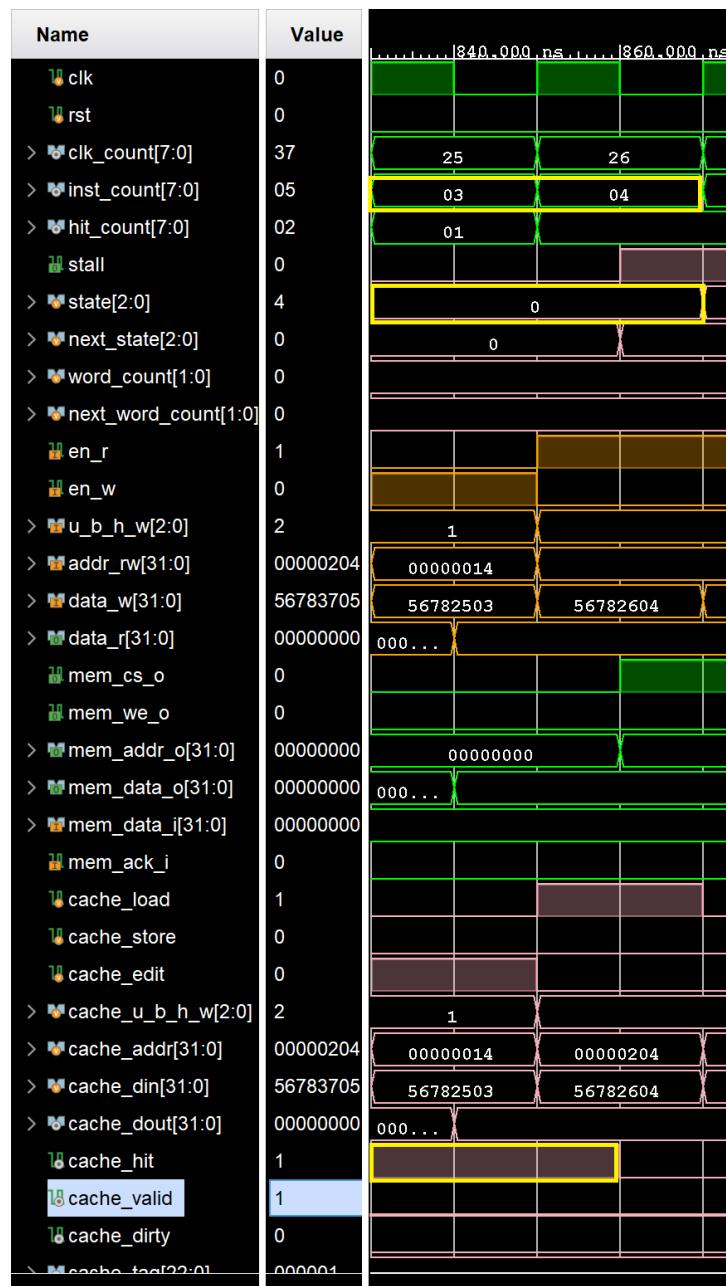


图 3: 指令号: 2-3

指令:

```
1 data[2]=40'h1_2_00000008; //read hit 1
```

```
2 data[3]=40'h1_3_00000014; //write hit 1
```

解释：

在发生读命中和写命中时，状态机保持在 S_IDLE 状态，CPU 不会暂停。在此过程中，stall 为 0，cache_hit 为 1。

4.1.3 Read Miss (Dirty)

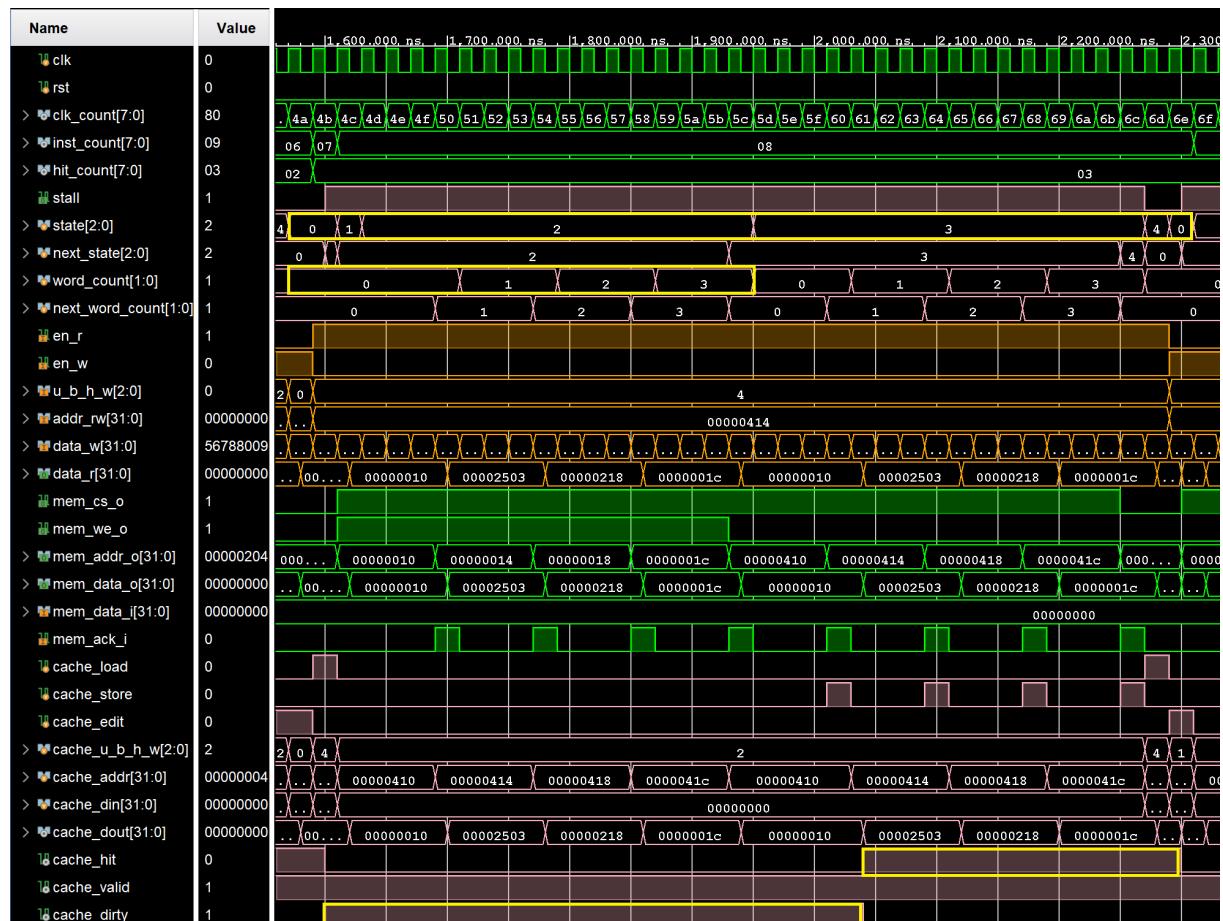


图 4: 指令号: 7

指令：

```
1 data[7]=40'h4_2_00000414; //read miss+dirty 1+17+17
```

解释：

1. 在发生读缺失且需要进行脏块替换时，状态转换如下：0 (S_IDLE) → 1 (S_PRE_BACK) → 2 (S_BACK) → 3 (S_FILL) → 4 (S_WAIT) → 0 (S_IDLE)。
2. 其中，在 S_BACK 和 S_FILL 两个阶段，由于内容是逐字读写的，因此可以观察到 word_count 由 0 自增到 3 的过程。

3. 在 S_BACK 阶段结束后，观察到 `cache_dirty` 信号变为 0, `cache_hit` 信号变为 1，这与设计逻辑相符。

4.2 上板测试结果分析

通过上板测试，我验证了 CMU 在不同操作要求、不同缓存状态下对缓存数据的获取和更新逻辑，确保了 CMU 控制逻辑正确实现。

ROM 初始化文件如下：

NO.	Instruction	Addr.	Label	ASM	Comment
0	00000013	0	<u>start</u> :	addi x0, x0, 0	
1	01c00083	4		lb x1, 0x01C(x0)	# FOF0FOFO in 0x1C # miss, read 0x010~0x01C to set 1 line 0
2	01c01103	8		lh x2, 0x01C(x0)	# FFFFFFOFO hit
3	01c02183	C		lw x3, 0x01C(x0)	# FOF0FOFO hit
4	01c04203	10		lbu x4, 0x01C(x0)	# 000000FO hit
5	01c05283	14		lhu x5, 0x01C(x0)	# 0000FOFO hit
6	21002003	18		lw x0, 0x210(x0)	# miss, read 0x210~0x21C to cache set 1 line 1
7	abcde0b7	1C		lw x7, 20(x0)	
8	402200b3	20		lui x1 0xABCD E	
9	71c08093	24		addi x1, x1, 0x71C	# x1 = 0xABCD E 71C
10	00100023	28		sb x1, 0x0(x0)	# miss, read 0x000~0x00C to cache set 0 line 0
11	00101223	2C		sh x1, 0x4(x0)	# hit
12	00102423	30		sw x1, 0x8(x0)	# hit
13	20002303	34		lw x6, 0x200(x0)	# miss, read 0x200~0x20C to cache set 0 line 1
14	40002383	38		lw x7, 0x400(x0)	# miss, write 0x000~0x00C back to ram, then read 0x400~40C to cache set 0 line 0
15	41002403	3C		lw x8, 0x410(x0)	# miss, no write back because of clean, read 0x410~41C to cache set 1 line 0
16	0ed06813	40	loop:	ori x16, x0, 0xED	# end
17	ffdff06f	44		jal x0, loop	

RAM 初始化内容如下：

NO.	Data	Addr.	Comment	NO.	Instruction	Addr.	Comment
0	000080BF	0		16	00000000	40	
1	00000008	4		17	00000000	44	
2	00000010	8		18	00000000	48	
3	00000014	C		19	00000000	4C	
4	FFFF0000	10		20	A3000000	50	
5	OFFF0000	14		21	27000000	54	
6	FF000F0F	18		22	79000000	58	
7	FOFOFOFO	1C		23	15100000	5C	
8	00000000	20		24	00000000	60	
9	00000000	24		25	00000000	64	
10	00000000	28		26	00000000	68	
11	00000000	2C		27	00000000	6C	
12	00000000	30		28	00000000	70	
13	00000000	34		29	00000000	74	
14	00000000	38		30	00000000	78	
15	00000000	3C		31	00000000	7C	

上板测试结果如下，均与预期相符：

测试点 1：x1-x5 寄存器数据加载正确

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-V)							
x0:zero 00000000	x01: ra FFFFFFFF0	x02: sp FFFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0				
x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000				
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000				
x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000				
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000				
x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000				
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26:s10 00000000	x27:s11 00000000				
x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000				
PC---IF 00000024	INST-IF 00100023	rs1Data FFFFFFFF0	rs2Data 00000000				
PC---ID 00000020	INST-ID 71C08093	rs1Addr 00000001	rs2Addr 0000001C				
PC---EXE 0000001C	INST-EX ABCDE0B7	CMU-RAM 00030000	PCJumpA 0000073C				
PC---MEM 00000018	INST-M 21002003	B/PCE-S 00000008	D/C-Hzd 00000000				
PC---WB 00000014	INST-WB 01C05283	I/ABSel 00010001	PCIFNbt 00000028				
ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000210	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000001				
ALU-Bin ABCDE000	WB-Data 0000F0F0	CPU-Dai 00000000	WR-MIO 00000001				
Imm32ID 0000071C	WB-Addr 00000005	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001				

测试点 2：x1 寄存器的值计算正确 0xABCD E71C

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-V)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0				
x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000				
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000				
x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000				
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000				
x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000				
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26:s10 00000000	x27:s11 00000000				
x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000				
PC---IF 00000030	INST-IF 20002303	rs1Data 00000000	rs2Data ABCDE71C				
PC---ID 0000002C	INST-ID 001012423	rs1Addr 00000000	rs2Addr 00000001				
PC---EXE 00000028	INST-EX 00101223	CMU-RAM 00000000	PCJumpA 00000034				
PC---MEM 00000024	INST-M 00100023	B/PCE-S 00000000	D/C-Hzd 00000000				
PC---WB 00000020	INST-WB 71C08093	I/ABSel 00040001	PCIFNbt 00000034				
ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000000	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000001				
ALU-Bin 00000004	WB-Data ABCDE71C	CPU-Dai 00000000	WR-MIO 00000001				
Imm32ID 00000008	WB-Addr 00000001	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010000				

测试点 3：0x28 指令发生 Write Miss，进入状态机的 S_FILL 状态

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-V)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0				
x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000				
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000				
x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000				
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000				
x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000				
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26:s10 00000000	x27:s11 00000000				
x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000				
PC---IF 00000030	INST-IF 20002303	rs1Data 00000000	rs2Data ABCDE71C				
PC---ID 0000002C	INST-ID 001012423	rs1Addr 00000000	rs2Addr 00000001				
PC---EXE 00000028	INST-EX 00101223	CMU-RAM 00030001	PCJumpA 00000034				
PC---MEM 00000024	INST-M 00100023	B/PCE-S 00000000	D/C-Hzd 00000000				
PC---WB 00000020	INST-WB 71C08093	I/ABSel 00040001	PCIFNbt 00000034				
ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000000	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000001				
ALU-Bin 00000004	WB-Data ABCDE71C	CPU-Dai 00000000	WR-MIO 00000001				
Imm32ID 00000008	WB-Addr 00000001	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010000				

测试点 4: 0x34 指令发生 Read Miss, 进入状态机的 S_FILL 状态

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-U)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0	x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000	x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000	x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26: s10 00000000	x27: s11 00000000	x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000
PC---IF 0000003C	INST-IF 0ED06813	rs1Data 00000000	rs2Data 00000000	PC---ID 0000003B	INST-ID 41002403	rs1Addr 00000000	rs2Addr 00000010
PC---EXE 00000034	INST-EX 40002383	CPU-RAM 0003 001	PCJumpA 00000148	PC---FLD 00000030	INST-M 20002303	D/FCL-S 00000000	D/C-Hzd 00000000
PC---WB 0000002C	INST-WB 00102423	I/ABSel 00010001	PCIFNbt 00000040	ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000200	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000001
ALU-Bin 00000400	WB-Data 00000008	CPU-Dai 00000000	WR--MIO 00000001	Imm32ID 00000410	WB-Addr 00000008	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00000000

测试点 5: 0x38 指令发生 Read Miss (Dirty), 需先写回脏块再读取新块, 依次经历状态机的所有状态

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-U)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0	x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000	x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000	x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26: s10 00000000	x27: s11 00000000	x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000
PC---IF 00000040	INST-IF FFDFF06F	rs1Data 00000000	rs2Data 00000000	PC---ID 0000003C	INST-ID 0ED06813	rs1Addr 00000000	rs2Addr 00000000
PC---EXE 00000038	INST-EX 41002403	CPU-RAM 0001 000	PCJumpA 00000129	PC---FLD 00000031	INST-M 40002383	D/FCL-S 00000000	D/C-Hzd 00000000
PC---WB 00000030	INST-WB 20002303	I/ABSel 00010001	PCIFNbt 00000044	ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000400	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000004
ALU-Bin 00000410	WB-Data 00000008	CPU-Dai 00000000	WR--MIO 00000001	Imm32ID 000000ED	WB-Addr 00000008	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-U)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0	x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000	x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000	x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26: s10 00000000	x27: s11 00000000	x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000
PC---IF 00000040	INST-IF FFDFF06F	rs1Data 00000000	rs2Data 00000000	PC---ID 0000003C	INST-ID 0ED06813	rs1Addr 00000000	rs2Addr 00000000
PC---EXE 00000038	INST-EX 41002403	CPU-RAM 0002 004	PCJumpA 00000129	PC---FLD 00000031	INST-M 40002383	D/FCL-S 00000000	D/C-Hzd 00000000
PC---WB 00000030	INST-WB 20002303	I/ABSel 00010001	PCIFNbt 00000044	ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000400	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000004
ALU-Bin 00000410	WB-Data 00000008	CPU-Dai 00000000	WR--MIO 00000001	Imm32ID 000000ED	WB-Addr 00000008	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-V)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0	x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000	x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000	x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26:s10 00000000	x27:s11 00000000	x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000
PC---IF 00000048	INST-IF FFDFF06F	rs1Data 00000000	rs2Data 00000000	PC---ID 00000030	INST-ID 0ED06813	rs1Addr 00000000	rs2Addr 0000000D
PC---EXE 00000030	INST-EX 41002403	CMU-RAM 00031001	PCJumpA 00000129	PC---ID 00000030	INST-ID 40002383	D/TCL-S 00000000	D/C-Hzd 00000000
PC---WB 00000030	INST-WB 20002303	I/ABSel 00010001	PCIFNxt 00000044	ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000400	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000004
ALU-Bin 00000010	WB-Data 00000000	CPU-Dai 00000000	WR--MIO 00000001	ALU-Bin 00000410	WB-Data 00000000	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001
Imm32ID 000000ED	WB-Addr 00000006	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001				

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-V)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0	x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000	x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000	x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26:s10 00000000	x27:s11 00000000	x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000
PC---IF 00000048	INST-IF FFDFF06F	rs1Data 00000000	rs2Data 00000000	PC---ID 00000030	INST-ID 0ED06813	rs1Addr 00000000	rs2Addr 0000000D
PC---EXE 00000030	INST-EX 41002403	CMU-RAM 00041000	PCJumpA 00000129	PC---ID 00000030	INST-ID 40002383	D/TCL-S 00000100	D/C-Hzd 00000000
PC---WB 00000030	INST-WB 20002303	I/ABSel 00010001	PCIFNxt 00000044	ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000400	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000004
ALU-Bin 00000010	WB-Data 00000000	CPU-Dai 00000000	WR--MIO 00000001	ALU-Bin 00000410	WB-Data 00000000	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001
Imm32ID 000000ED	WB-Addr 00000006	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001				

测试点 6: 0x3C 指令发生 Read Miss, 进入状态机的 S_FILL 状态

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-V)							
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFF0F0	x03: gp F0F0F0F0	x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000
x8:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000	x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000
x16: a6 00000000	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000	x20: s4 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26:s10 00000000	x27:s11 00000000	x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000
PC---IF 00000044	INST-IF 00000000	rs1Data 00000000	rs2Data 00000000	PC---ID 00000044	INST-ID FFDFF06F	rs1Addr 00000000	rs2Addr 0000000D
PC---ID 00000044	INST-ID 0ED06813	CMU-RAM 00031001	PCJumpA 0000003C	PC---EXE 00000030	INST-EX 0ED06813	CMU-RAM 00031001	PCJumpA 0000003C
PC---ID 00000030	INST-ID 41002403	D/TCL-S 00010001	D/C-Hzd 00000001	PC---WB 00000034	INST-WB 40002383	I/ABSel 00031000	PCIFNxt 0000003C
PC---WB 00000034	INST-WB 20002303	I/ABSel 00010001	PCIFNxt 0000003C	ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000410	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000004
ALU-Bin 000000ED	WB-Data 00000000	CPU-Dai 0FFF0000	WR--MIO 00000001	ALU-Bin 00000410	WB-Data 00000000	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001
Imm32ID FFFFFFFC	WB-Addr 00000007	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010001				

测试点 7: 完成所有指令, x16 寄存器被设置为 0xED

Zhejiang University Computer Organization Experimental SOC Test Environment (With RISC-V)			
x0:zero 00000000	x01: ra ABCDE71C	x02: sp FFFFFF00	x03: gp F0F0F0F0
x04: tp 000000F0	x05: t0 0000F0F0	x06: t1 00000000	x07: t2 00000000
x08:fps0 00000000	x09: s1 00000000	x10: a0 00000000	x11: a1 00000000
x12: a2 00000000	x13: a3 00000000	x14: a4 00000000	x15: a5 00000000
x16: a6 000000ED	x17: a7 00000000	x18: s2 00000000	x19: s3 00000000
x20: s1 00000000	x21: s5 00000000	x22: s6 00000000	x23: s7 00000000
x24: s8 00000000	x25: s9 00000000	x26:s10 00000000	x27:s11 00000000
x28: t3 00000000	x29: t4 00000000	x30: t5 00000000	x31: t6 00000000
PC---IF 00000044	INST-IF 00000000	rs1Data 00000000	rs2Data 00000000
PC---ID 00000040	INST-ID FFDF706F	rs1Addr 0000001F	rs2Addr 0000001D
PC--EXE 0000003C	INST-EX 0ED06813	CMU-RAM 00000000	PCJumpA 0000003C
PC--MEM 00000040	INST-M 00000013	B/PCE-S 00010101	D/C-HzD 00000001
PC--WB 00000040	INST-WB FFDF706F	I/ABSel 00038100	PCIFNxt 0000003C
ALU-Ain 00000000	ALU-Out 00000000	CPUAddr 00000000	ALUCtrl 00000000
ALU-Bin 000000ED	WB-Data 00000044	CPU-Dai 00000000	WR--MIO 00000000
Imm32ID FFFFFFFC	WB-Addr 00000000	CPU-Dao 00000000	RegW/DR 00010000