

# Verilog HDL 完成流水线处理器开发

流水线工程化方法

目录

- 一、 设计说明.....3
- 二、 测试代码.....3
- 三、 结果对比.....4
  - 1. P6\_hazard.asm .....4
  - 2. P6\_function.asm.....6
- 四、 参考数据通路.....8
- 五、 实现功能.....8
- 六、 问题与解决方案.....9

# 一、 设计说明

1. 支持 MIPS-C3 指令集
  - a) MIPS-C3={LB, LBU, LH, LHU, LW, SB, SH, SW, ADD, ADDU, SUB, SUBU, MULT, MULTU, DIV, DIVU, SLL, SRL, SRA, SLLV, SRLV, SRAV, AND, OR, XOR, NOR, ADDI, ADDIU, ANDI, ORI, XORI, LUI, SLT, SLTI, SLTIU, SLTU, BEQ, BNE, BLEZ, BGTZ, BLTZ, BGEZ, J, JAL, JALR, JR, MFHI, MFLO, MTHI, MTLO}
  - b) 运算类指令不支持溢出
2. 处理器为流水线设计，支持阻塞和转发

# 二、 测试代码

高老师提供的两个测试代码：P6\_hazard.asm 和 P6\_function.asm。

### 三、 结果对比

#### 1. P6\_hazard.asm

##### a) Mars 运行结果

| Registers |        | Coproc 1   | Coproc 0 |
|-----------|--------|------------|----------|
| Name      | Number | Value      |          |
| \$zero    | 0      | 0x00000000 |          |
| \$at      | 1      | 0x00000000 |          |
| \$v0      | 2      | 0x00000000 |          |
| \$v1      | 3      | 0x00000000 |          |
| \$a0      | 4      | 0x00000f0f |          |
| \$a1      | 5      | 0x00000f8f |          |
| \$a2      | 6      | 0x00008e1e |          |
| \$a3      | 7      | 0x00000f4f |          |
| \$t0      | 8      | 0x000031a4 |          |
| \$t1      | 9      | 0x000032d8 |          |
| \$t2      | 10     | 0x09dba60  |          |
| \$t3      | 11     | 0x00000134 |          |
| \$t4      | 12     | 0x00000000 |          |
| \$t5      | 13     | 0x00000000 |          |
| \$t6      | 14     | 0x00000000 |          |
| \$t7      | 15     | 0x00000000 |          |
| \$s0      | 16     | 0x00000000 |          |
| \$s1      | 17     | 0x00000000 |          |
| \$s2      | 18     | 0x00000000 |          |
| \$s3      | 19     | 0x00000000 |          |
| \$s4      | 20     | 0x00000000 |          |
| \$s5      | 21     | 0x00000000 |          |
| \$s6      | 22     | 0x00000003 |          |
| \$s7      | 23     | 0x0000001f |          |
| \$t8      | 24     | 0x00000000 |          |
| \$t9      | 25     | 0x00000000 |          |
| \$k0      | 26     | 0x00000001 |          |
| \$k1      | 27     | 0x00000004 |          |
| \$gp      | 28     | 0x00000000 |          |
| \$sp      | 29     | 0x00000080 |          |
| \$fp      | 30     | 0x00000000 |          |
| \$ra      | 31     | 0x000031a4 |          |

| Data Segment |            |            |            |            |             |             |             |              |
|--------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Address      | Value (+0) | Value (+4) | Value (+8) | Value (+c) | Value (+10) | Value (+14) | Value (+18) | Value (+1c)  |
| 0x00000000   | 0x0000004c | 0x00000f0f | 0x00000f8f | 0x00000000 | 0x00000000  | 0x00000058  | 0x00000000  | 0x00000000   |
| 0x00000020   | 0x00000f8f | 0x8e1e0000 | 0x4f000000 | 0xe1000000 | 0x00000040  | 0x00000040  | 0x00000300  | 0xffffffff8f |
| 0x00000040   | 0x00000f0f | 0x0001ffff | 0x00000f8f | 0x0000004c | 0x00004f00  | 0x000062d8  | 0x0000317c  | 0x0000328c   |
| 0x00000060   | 0x00000184 | 0x00003190 | 0x000032d8 | 0x000031a4 | 0x09dbea60  | 0x00000134  | 0x0000001f  | 0x00000003   |
| 0x00000080   | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000   |
| 0x000000a0   | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000   |
| 0x000000c0   | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000   |

0x00000000 (.data)    ☒ Hexadecimal Addresses    ☒ Hexadecimal Values    ☐ ASCII

## b) ModelSim 仿真结果

| Regs |      | 0000000000 |
|------|------|------------|
| +    | [31] | 000031a4   |
| +    | [30] | 00000000   |
| +    | [29] | 00000080   |
| +    | [28] | 00000000   |
| +    | [27] | 00000004   |
| +    | [26] | 00000001   |
| +    | [25] | 00000000   |
| +    | [24] | 00000000   |
| +    | [23] | 0000001f   |
| +    | [22] | 00000003   |
| +    | [21] | 00000000   |
| +    | [20] | 00000000   |
| +    | [19] | 00000000   |
| +    | [18] | 00000000   |
| +    | [17] | 00000000   |
| +    | [16] | 00000000   |
| +    | [15] | 00000000   |
| +    | [14] | 00000000   |
| +    | [13] | 00000000   |
| +    | [12] | 00000000   |
| +    | [11] | 00000134   |
| +    | [10] | 09dbea60   |
| +    | [9]  | 000032d8   |
| +    | [8]  | 000031a4   |
| +    | [7]  | 00000f4f   |
| +    | [6]  | 00008e1e   |
| +    | [5]  | 00000f8f   |
| +    | [4]  | 00000f0f   |
| +    | [3]  | 00000000   |
| +    | [2]  | 00000000   |
| +    | [1]  | 00000000   |
| +    | [0]  | 00000000   |

| Memory Data - /MIPS_TB/MIPS/DM/RAM - Default |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 00000000                                     | 0000004c | 00000f0f | 00000f8f | 00000000 | 00000000 | 00000058 | 00000000 | 00000000 |
| 00000008                                     | 00000f8f | 8e1e0000 | 4f000000 | e1000000 | 00000040 | 00000040 | 00000300 | ffffff8f |
| 00000010                                     | 00000f0f | 0001ffff | 00000f8f | 0000004c | 00004f00 | 000062d8 | 0000317c | 0000328c |
| 00000018                                     | 00000184 | 00003190 | 000032d8 | 000031a4 | 09dbea60 | 00000134 | 0000001f | 00000003 |
| 00000020                                     | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 |

## 2. P6\_function.asm

### a) Mars 运行结果

| Registers |        |            | Coproc 1 | Coproc 0 |
|-----------|--------|------------|----------|----------|
| Name      | Number | Value      |          |          |
| \$zero    | 0      | 0x00000000 |          |          |
| \$at      | 1      | 0x00000000 |          |          |
| \$v0      | 2      | 0x00005554 |          |          |
| \$v1      | 3      | 0x98760000 |          |          |
| \$a0      | 4      | 0x98761234 |          |          |
| \$a1      | 5      | 0x00005554 |          |          |
| \$a2      | 6      | 0x0000b9f9 |          |          |
| \$a3      | 7      | 0x00003050 |          |          |
| \$t0      | 8      | 0x98761234 |          |          |
| \$t1      | 9      | 0x00003230 |          |          |
| \$t2      | 10     | 0x00000012 |          |          |
| \$t3      | 11     | 0x00003410 |          |          |
| \$t4      | 12     | 0x6e600000 |          |          |
| \$t5      | 13     | 0x0000c3af |          |          |
| \$t6      | 14     | 0xffffc3af |          |          |
| \$t7      | 15     | 0x00000000 |          |          |
| \$s0      | 16     | 0x00000000 |          |          |
| \$s1      | 17     | 0x00000000 |          |          |
| \$s2      | 18     | 0x00000000 |          |          |
| \$s3      | 19     | 0x00000001 |          |          |
| \$s4      | 20     | 0x00000001 |          |          |
| \$s5      | 21     | 0x00000000 |          |          |
| \$s6      | 22     | 0x00000000 |          |          |
| \$s7      | 23     | 0x00000000 |          |          |
| \$t8      | 24     | 0x00000000 |          |          |
| \$t9      | 25     | 0x00000000 |          |          |
| \$k0      | 26     | 0x00000000 |          |          |
| \$k1      | 27     | 0x00000000 |          |          |
| \$gp      | 28     | 0x00001800 |          |          |
| \$sp      | 29     | 0x00000000 |          |          |
| \$fp      | 30     | 0x00000000 |          |          |
| \$ra      | 31     | 0x00003170 |          |          |

| Data Segment |            |            |            |            |             |             |              |              |
|--------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Address      | Value (+0) | Value (+4) | Value (+8) | Value (+c) | Value (+10) | Value (+14) | Value (+18)  | Value (+1c)  |
| 0x00000000   | 0x98761234 | 0xfe766e60 | 0xc3af60af | 0x98761234 | 0xffff9876  | 0xffff9876  | 0xffffffff98 | 0xffffffff98 |
| 0x00000020   | 0x00000012 | 0x00000000 | 0x00003170 | 0x00003218 | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000   | 0x00000000   |
| 0x00000040   | 0x00005554 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000  | 0x00000000  | 0x00000000   | 0x00000000   |
| 0x00000060   | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00005554 | 0x98760000 | 0x98761234  | 0x00005554  | 0x0000b9f9   | 0x00003050   |
| 0x00000080   | 0x98761234 | 0x00003230 | 0x00000012 | 0x00003410 | 0x6e600000  | 0x0000c3af  | 0xfffc3af    | 0x00000000   |
| 0x000000a0   | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000001 | 0x00000001  | 0x00000000  | 0x00000000   | 0x00000000   |
| 0x000000c0   | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00001800  | 0x00000000  | 0x00000000   | 0x00003170   |

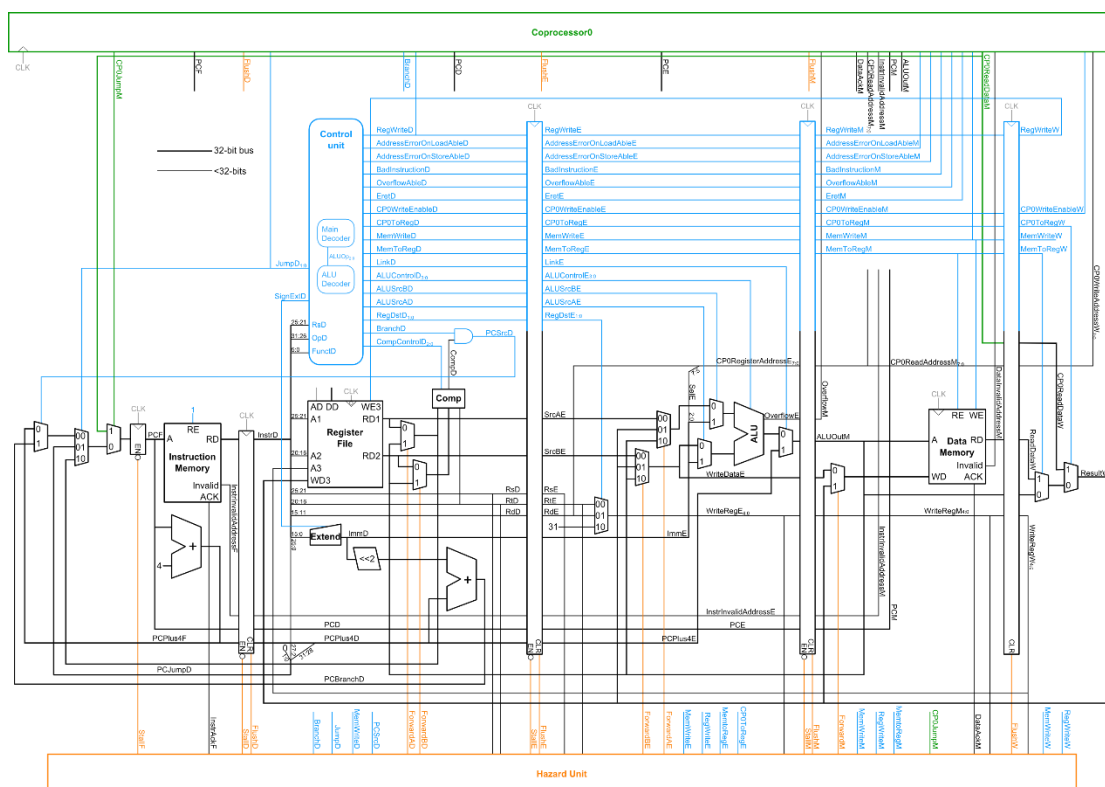
0x00000000 (.data)
☒ Hexadecimal Addresses
☒ Hexadecimal Values
☐ ASCII

## b) ModelSim 仿真结果

| Regs |          |
|------|----------|
| [31] | 00003170 |
| [30] | 00000000 |
| [29] | 00000000 |
| [28] | 00000000 |
| [27] | 00000000 |
| [26] | 00000000 |
| [25] | 00000000 |
| [24] | 00000000 |
| [23] | 00000000 |
| [22] | 00000000 |
| [21] | 00000000 |
| [20] | 00000001 |
| [19] | 00000001 |
| [18] | 00000000 |
| [17] | 00000000 |
| [16] | 00000000 |
| [15] | 00000000 |
| [14] | fffc3af  |
| [13] | 0000c3af |
| [12] | 6e600000 |
| [11] | 00003410 |
| [10] | 00000012 |
| [9]  | 00003230 |
| [8]  | 98761234 |
| [7]  | 00003050 |
| [6]  | 0000b9f9 |
| [5]  | 00005554 |
| [4]  | 98761234 |
| [3]  | 98760000 |
| [2]  | 00005554 |
| [1]  | 00000000 |
| [0]  | 00000000 |

|  |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Memory Data - /MIPS_TB/MIPS/DM/RAM - Default |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 00000000                                     | 98761234 | fe766e60 | c3af60af | 98761234 | ffff9876 | ffff9876 | ffffff98 | ffffff98 |
| 00000008                                     | 00000012 | 00000000 | 00003170 | 00003218 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 |
| 00000010                                     | 00005554 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 |
| 00000018                                     | 00000000 | 00000000 | 00005554 | 98760000 | 98761234 | 00005554 | 0000b9f9 | 00003050 |
| 00000020                                     | 98761234 | 00003230 | 00000012 | 00003410 | 6e600000 | 0000c3af | ffffc3af | 00000000 |
| 00000028                                     | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 | 00000000 |

## 四、参考数据通路



## 五、实现功能

1. 支持 MIPS-C3 指令集的全部 50 条指令。
2. 正确进行数据转发与阻塞。
3. 执行乘法需要 5 个时钟周期，执行除法需要 10 个时钟周期，该功能使用一个计数器模拟实现。
4. 进行乘除法运算时，可以并行执行其他非乘除法指令，冒险检测单元会根据 ID 级的指令类型以及乘除法部件的 Busy 值来判断是否对流水线进行暂停和冲刷。
5. 为和测试代码保持一致，方便进行测试，本次实验支持一个延迟槽。
6. 为简化控制信号，没有对 ALU 单独设置控制器，而是直接在主控制器中发出 ALU 控制信号。



## 六、 问题与解决方案

1. ALU 在进行算术右移运算时，输入数据与控制信号都正确，但结果不对。  
解决方案：上网查阅得知被移位的对象必须定义为 `reg` 类型，而我是直接对输出信号进行 `assign` 赋值，添加 `reg` 类型的临时变量后，问题解决。
2. 根据 MIPS32 手册，JAL 与 JALR 指令向寄存器中存入的值应为  $PC + 8$ ，但在流水寄存器中传递的值为  $PC + 4$ 。  
解决方案：观察数据通路发现，流水寄存器中  $PC + 4$  的值在译码阶段过后用途只是用来向 JAL 和 JALR 指令对应的寄存器中写入值。因此在 `RegE` 及之后的流水寄存器中，我将传递  $PC + 4$  改成了传递  $PC + 8$ ，从而正确实现了 JAL 和 JALR 指令的功能。
3. 产生控制信号时要对不同指令产生不同信号，判断指令类型时指令类型编码挤在一起不利于查看。  
解决方案：使用宏定义或参数定义的形式将指令类型编码等常量集中放置。