

# 数字逻辑与处理器基础

## 多周期处理器

cvxbzn

2021 年 6 月 6 日

## 目录

<b>1 数据通路设计</b>	<b>2</b>
1.1 寄存器与多路选择器及其功能 . . . . .	2
1.2 示意图 . . . . .	3
<b>2 控制信号分析与有限状态机实现</b>	<b>3</b>
2.1 控制信号及具体功能 . . . . .	3
2.2 状态转移图 . . . . .	4
<b>3 ALU 功能拓展</b>	<b>4</b>
3.1 setsub 类型和机器码字段内容 . . . . .	4
3.2 ALU verilog 代码修改 . . . . .	4
3.3 仿真结果 . . . . .	5
<b>4 汇编程序分析-1</b>	<b>5</b>
4.1 计算寄存器值 . . . . .	5
4.2 仿真结果 . . . . .	6
<b>5 汇编程序分析-2</b>	<b>6</b>
5.1 程序功能以及代码注释 . . . . .	6
5.2 将汇编翻译成机器码并写出 . . . . .	7
5.3 \$a0,\$v0 值 . . . . .	7
5.4 观察、描述并解释寄存器如何变化 . . . . .	8
<b>6 异常处理</b>	<b>8</b>
6.1 控制信号与功能 . . . . .	8
6.2 指令格式与状态转移图 . . . . .	9
6.3 仿真 . . . . .	9

# 1 数据通路设计

## 1.1 寄存器与多路选择器及其功能

- 寄存器

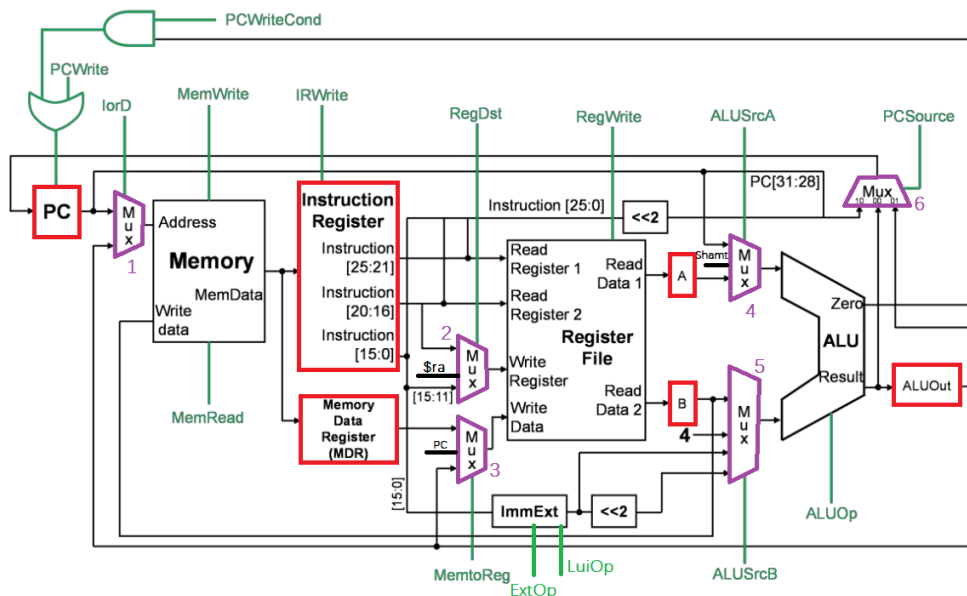
- PC: 输入下一状态 PC, 输出当前 PC, 使能信号为 1 时在时钟上升沿写入。
- 指令寄存器 (IR): 存放从存储器中取出的指令, IRWrite 为 1 时在时钟上升沿写入
- 数据寄存器 (MDR): 输入存储器的输出 MemData。
- 临时寄存器 A: 输入为寄存器堆中的 ReadData1
- 临时寄存器 B: 输入为寄存器堆中的 ReadData2
- ALU 寄存器 ALUOut: 存放 ALU 输出 ALUOut

- 多路选择器

- Mux1 控制信号 IorD(Instruction or data), 选择读取存储器的数据为指令 (0) 或者数据 (1)。
- Mux2 控制信号 RegDst: 选择写回寄存器堆中的寄存器位置, rt(00),rd(01) 或者 \$ra(10), 其中 \$ra 在执行 jal 指令时使用。
- Mux3 控制信号 MemToReg: 选择写回寄存器堆的数据来源。ALUOut(00), 内存数据 (01), PC(10)。
- Mux4 控制信号 ALUSrcA: 选择 ALU 操作数 1 的数据来源, PC(00), 临时寄存器 A(01), 以及在移位时用到的 Shamt(10)
- Mux5 控制信号 ALUSrcB: 选择 ALU 操作数 2 的数据来源, 临时寄存器 B(00), 常数 4(01), 立即数 (10) 以及移位后的立即数 (11)
- Mux6 控制信号 PCSource: 选择更新 PC 时 PC 的来源, PC+4(00), 分支指令计算结果 (01) 以及伪直接寻址 (10)

具体情况如下示意图所示, 寄存器用红色标出, 多路选择器用紫色标出, 代码见附件。

## 1.2 示意图



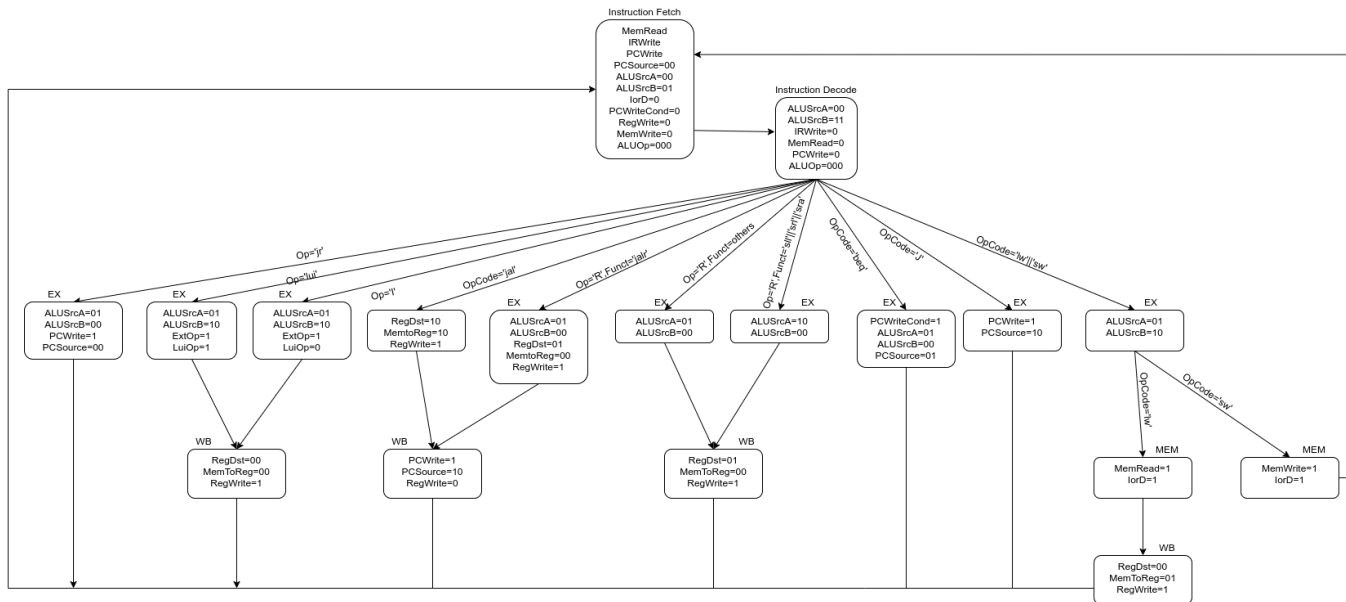
## 2 控制信号分析与有限状态机实现

## 2.1 控制信号及具体功能

- PCWrite: PC 寄存器的写使能信号；0-不能写 PC；1-允许写 PC
- PCWriteCond: 分支指令 PC 写使能信号，0-无分支指令；1-有分支指令
- IorD: 选择读取存储器的数据信号，0-指令，1-数据
- MemWrite: 内存的写使能信号；0-不能写内存；1-允许写内存
- MemRead: 内存的读使能信号；0-不能读内存；1-允许读内存
- IRWrite: 指令寄存器的写使能信号；0-不能写；1-允许写
- MemToReg: 写回寄存器堆数据来源选择信号；00-ALUOut, 01-内存数据, 10-PC
- RegDst: 写回寄存器堆的寄存器位置选择信号，00-rt, 01-rd 或者 10-\$ra
- RegWrite: 寄存器堆的写使能信号；0-不能写；1-允许写
- ExtOp: 符号扩展信号，0-逻辑扩展；1-算术扩展
- LuiOp: Lui 控制信号，0-不左移 16 位；1-左移 16 位
- ALUSrcA: ALU 操作数 1 数据来源选择信号；00-PC；01-临时寄存器 A；10-Shamt

- ALUSrcB: ALU 操作数 2 数据来源选择信号; 00-临时寄存器 B; 01-常数 4; 10-立即数; 11-移位后的立即数
- ALUOp: ALU 控制信号; 000-ADD; 001-SUB; 100-AND; 101-SLT; 010-取决于 Funct
- PCSource: PC 更新来源选择信号; 00-PC+4; 01-分支指令计算结果; 10-伪直接寻址

## 2.2 状态转移图



### 3 ALU 功能拓展

### 3.1 setsub 类型和机器码字段内容

$$\text{setsub rd rs rt} : \{6'h0, \text{rs}[4:0], \text{rt}[4:0], \text{rd}[4:0], 5'h0, 6'h28\}$$

### 3.2 ALU verilog 代码修改

对应 ALUConf 设置为 5'b00011, 设计执行程序为

```
lui $a0 0xABCD
addi $a0 $a0 0x1234
lui $a1 0xCDEF
addi $a1 $a1 0x3456
setsub $a2 $a0 $a1
Loop:
beq $zero $zero Loop
```

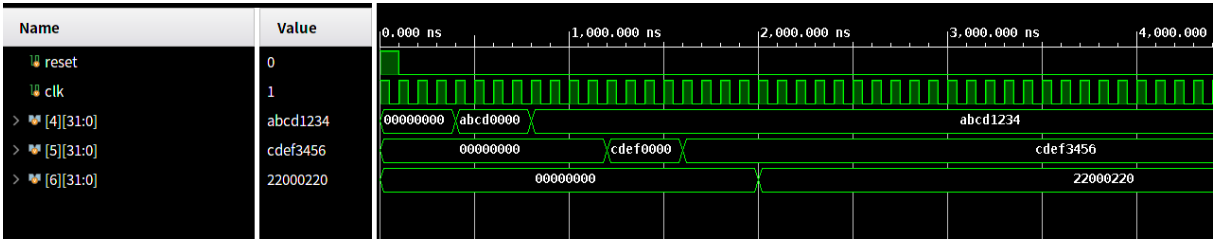
对应机器码为

```
{6'h0f,5'd0,5'd4,16'habcd}  
{6'h08,5'd4,5'd4,16'h1234}  
{6'h0f,5'd0,5'd5,16'hcdef}  
{6'h08,5'd5,5'd5,16'h3456}  
{6'h0,5'd4,5'd5,5'd6,5'h0,6'h28}  
{6'h04,5'd0,5'd0,16'hffff}
```

程序写在 InstAndDataMemory\_setsub.v 中，需修改顶层文件对应模块名称。

3.3 仿真结果

0xabcd1234 setsub 0xcdef5678  
= 1010\_1011\_1100\_1101\_0001\_0010\_0011\_0100 setsub 1100\_1101\_1110\_1111\_0011\_0100\_0101\_0110  
= 0010\_0010\_0000\_0000\_0000\_0010\_0010\_0000 = 0x2200\_0220  
仿真结果如图



与预期一致。

4 汇编程序分析-1

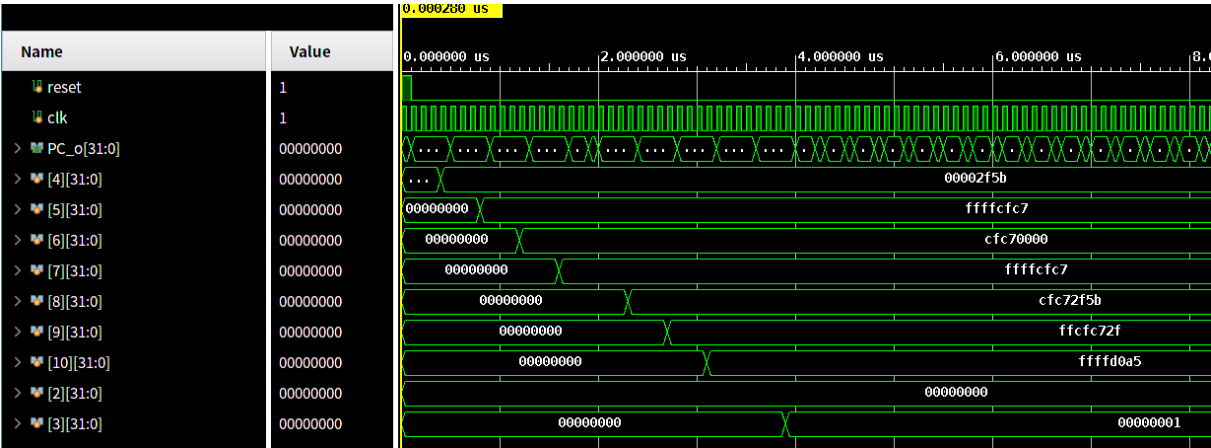
4.1 计算寄存器值

```
addi $a0, $zero, 12123      # $a0 = 0x0000_2f5b  
addiu $a1, $zero, -12345    # $a1 = 0xffff_cfc7  
sll $a2, $a1, 16            # $a2 = 0xcfc7_0000  
sra $a3, $a2, 16            # $a3 = 0xffff_cfc7  
beq $a3, $a1, L1            # 跳转至 L1  
lui $a0, 22222              # 不执行  
  
L1:  
add $t0, $a2, $a0           # $t0 = 0xcfc7_2f5b  
sra $t1, $t0, 8             # $t1 = 0xffcf_c72f  
addi $t2, $zero, -12123     # $t2 = 0xffff_d0a5
```

```
slt $v0, $a0, $t2      # 有符号情况下 $a0 > $t2 , $v0=1
sltu $v1, $a0, $t2     # 无符号情况下 $a0 < $t2 , $v1=0

Loop:
j Loop
```

4.2 仿真结果



可见与计算结果一致。

5 汇编程序分析-2

5.1 程序功能以及代码注释

```
addi $a0, $zero, 5      # $a0 = 5
xor $v0, $zero, $zero   # $v0 = 0
jal sum                  # 跳转到sum
Loop:
beq $zero, $zero, Loop  # 程序结束
sum:
addi $sp, $sp, -8       # 入栈前栈指针 -8
sw $ra, 4($sp)          # $ra 入栈
sw $a0, 0($sp)          # $a0 入栈
slti $t0, $a0, 1        # if $a0 < 1 $t0 = 1
beq $t0, $zero, L1      # if $a0 >= 1, goto L1
addi $sp, $sp, 8        # 出栈恢复栈指针
jr $ra                  # 回到上一个过程 $ra 存的位置
```

```

L1:
add $v0, $a0, $v0      # $v0 = $a0 + $v0
addi $a0, $a0, -1      # $a0 = $a0 - 1
jal sum                 # 迭代
lw $a0, 0($sp)
lw $ra, 4($sp)
addi $sp, $sp, 8        # 出栈恢复栈指针
add $v0, $a0, $v0      # 又加一次, $v0 = $a0 + $v0
jr $ra

```

可见每次循环相当于加了两次 \$a0，因此如果第一行的 5 是任意正整数 n，程序实现了  $2\sum_{i=1}^n i$  的功能。此外由于 lw，\$a0 最终值仍为 n。

## 5.2 将汇编翻译成机器码并写出

```

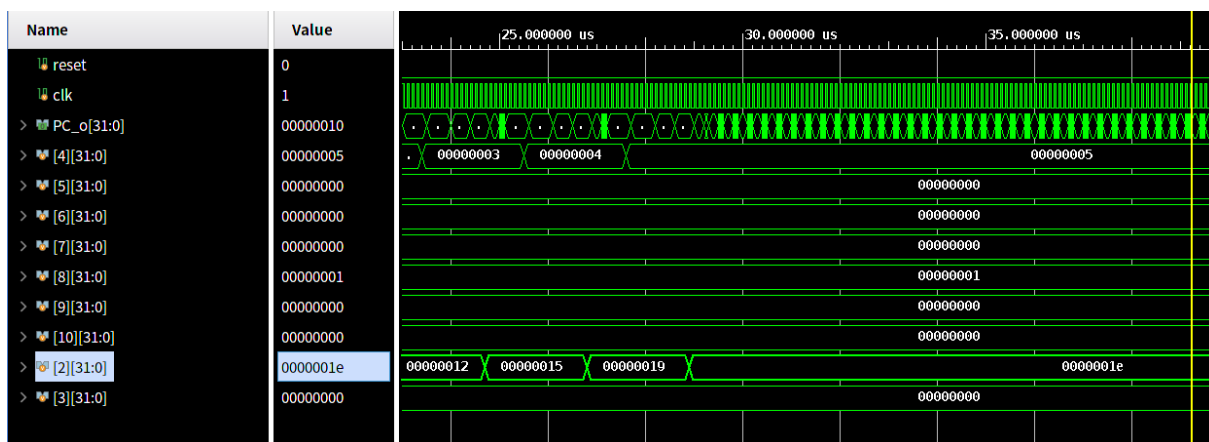
{6'h08,5'd0,5'd4,16'd5}
{6'h0,5'd0,5'd0,5'd2,5'h0,6'h26}
{6'h03,26'd4}
{6'h04,5'd0,5'd0,16'hfff}
{6'h08,5'd29,5'd29,16'dfff8}
{6'h2b,5'd29,5'd31,16'd4}
{6'h2b,5'd29,5'd4,16'd0}
{6'h0a,5'd4,5'd8,16'd1}
{6'h04,5'd8,5'd0,16'd2}
{6'h08,5'd29,5'd29,16'd8}
{6'h0,5'd31,15'd0,6'h08}
{6'h0,5'd4,5'd2,5'd2,5'd0,6'h20}
{6'h08,5'd04,5'd04,16'hfff}
{6'h03,26'h4}
{6'h23,5'd29,5'd4,16'd0}
{6'h23,5'd29,5'd31,16'd4}
{6'h08,5'd29,5'd29,16'd8}
{6'h0,5'd4,5'd2,5'd2,5'd0,6'h20}
{6'h0,5'd31,15'd0,6'h08}

```

程序写在 InstAndDataMemory\_1.v 中，需修改顶层文件对应模块名称。

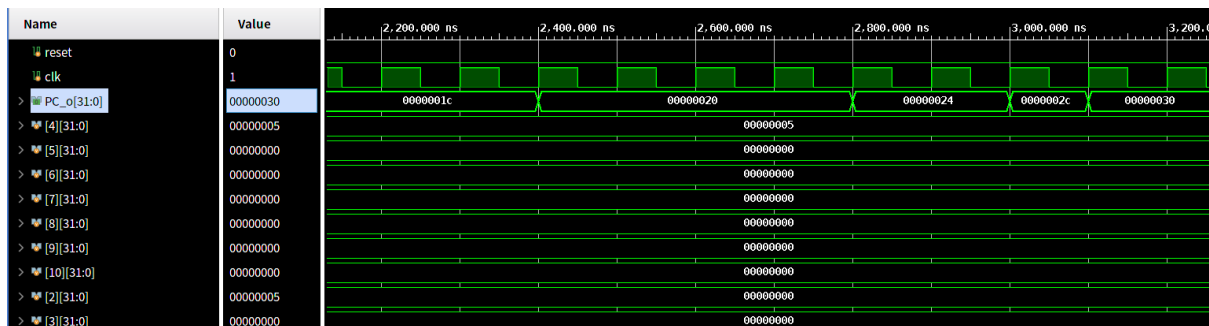
## 5.3 \$a0,\$v0 值

根据上述分析，\$v0 值为 30，即 0x1e，\$a0 值为 5，仿真结果如图



## 5.4 观察、描述并解释寄存器如何变化

PC 在 sIF 状态结束时 +4, 在 beq、j、jal、jr 的 EX 阶段结束时 PC 跳转到对应的地址, 如下图所示。



\$a0 从 5 减小至 0 再增加至 0,

`addi $a0, $a0, -1`

使 \$a0 减小, 减至 0 后 lw 指令装载之前 \$a0 值。

\$v0 是 \$a0 累加,

$$\$v0 = 5 + 4 + 3 + 2 + 1 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5$$

入栈时 \$sp 减 8, 当 \$a0 等于 0 时开始出栈, \$sp 加 8。

\$ra 在执行 jal 指令时改变, 第一次 jal 时 \$ra 为 0x0c, 之后为 0x38, 最后一次 lw 后 \$ra 为 0x0c。

## 6 异常处理

### 6.1 控制信号与功能

- exp\_flag: 异常判断信号, 0-无异常, 1-异常
- exp\_write: 异常寄存器 (EPC, ErrorTarget) 写信号, 0-不能写, 1-允许写
- exp\_state: 异常 PC 跳转选择信号, 0-0x7c, 1-EPC

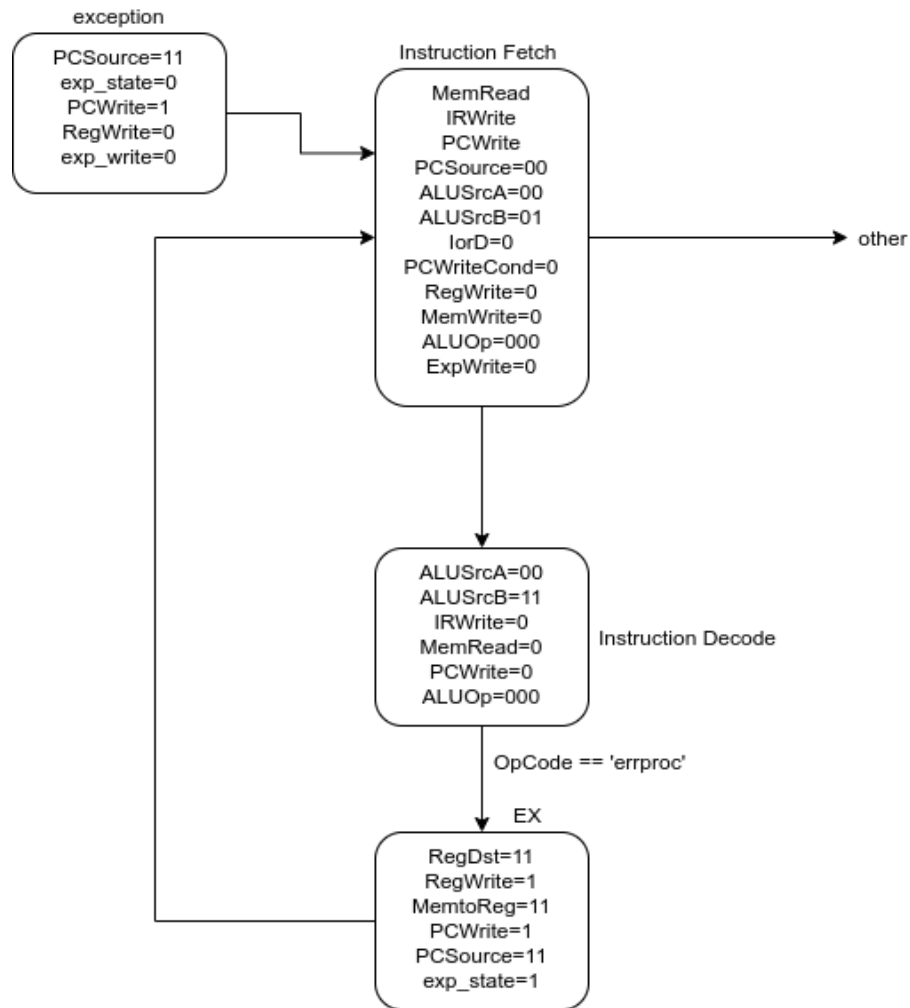


## 6.2 指令格式与状态转移图

由于异常处理程序只涉及将 0xffff\_fff 写回目标寄存器无额外功能，因此只需要分配新 OpCode 加以区分。指令格式

{6'h05, 26'h0}

状态转移图为



## 6.3 仿真

汇编程序为

```

lui $a0 0x7fff
addi $a0 $a0 0x1234
lui $a1 0x7fff
addi $a1 $a1 0x1234
  
```

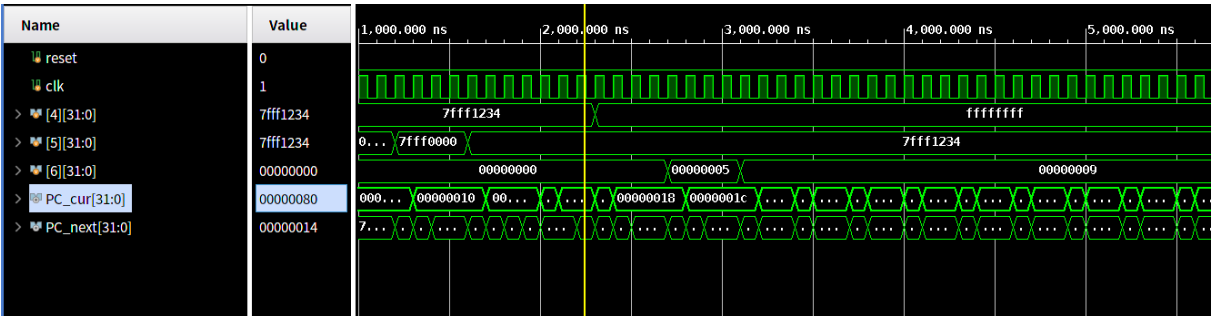
```
add $a0 $a0 $a1
addi $a2 $0 5
addi $a2 $a2 4
Loop:
beq $zero $zero Loop
```

对应机器码为

```
{6'h0f,5'd0,5'd4,16'h7fff}
{6'h08,5'd4,5'd4,16'h1234}
{6'h0f,5'd0,5'd5,16'h7fff}
{6'h08,5'd5,5'd5,16'h1234}
{6'h0,5'd4,5'd5,5'd4,5'h0,6'h20}
{6'h08,5'd0,5'd6,16'd5}
{6'h08,5'd6,5'd6,16'd4}
{6'h04,5'd0,5'd0,16'hffff}
```

程序写在 InstAndDataMemory\_exp.v 中，需修改顶层文件对应模块名称。这段程序 \$a0 会溢出，最终值应为 fff\_fff，而 \$a2 继续执行，最终值应为 9。

仿真结果为



与预期一致。