

浙江大学

本科实验报告

RISC-V 微处理器设计

课程名称： 计算机组成与设计

姓 名： 姚桂涛

学 院： 信息与工程学院

专 业： 信息工程

学 号： 3190105597

指导老师： 屈民军、唐奕

2021 年 12 月 31 日

浙江大学实验报告

专业： 信息工程
姓名： 姚桂涛
学号： 3190105597
日期： 2021 年 12 月 31 日
地点： 教 11-400

课程名称： 计算机组成与设计 指导老师： 屈民军、唐奕 成绩： _____
实验名称： RISC-V 微处理器设计 实验类型： 设计验证 同组学生姓名： _____

一、 实验目的

二、 实验任务

1. 基本要求

设计一个流水线 RISC-V 微处理器，具体要求如下所述。

(1) 至少运行下列 RV32I 核心指令。

算术运算指令：add、sub、addi

逻辑运算指令：and、or、xor、slt、sltu、di、ori、xori、slti、sltiu

移位指令：sll、srl、sra、slli、srli、srai

条件分支指令：beq、bne、blt、bge、bltu、eu

无条件跳转指令：jal、jalr

数据传送指令：lw、sw、lui、auipc

空指令：nop

(2) 采用 5 级流水线技术，对数据冒险实现转发或阻塞功能。

(3) 在 Nexys Video 开发系统中实现 RISC-V 微处理器，要求 CPU 的运行速度大于 25MHz。

2. 扩展要求

(1) 要求设计的微处理器还能运行 lb、lh、ld、lbu、lhu、lwu、sb、sh 或 sd 等字节、半字和双字数据传送指令。

(2) 要求设计的 CPU 增加异常 (exception)、自陷 (trap)、中断 (interrupt) 等处理方案。

三、 实验原理与模块设计

1. 总体设计

流水线是数字系统中一种提高系统稳定性和工作速度的方法，广泛应用于高档 CPU 的架构中。根据 RISC-V 处理器指令的特点，将指令整体的处理过程分为取指令 (IF)、指令译码 (ID)、执行 (EX)、存储器访问 (MEM) 和寄存器写回 (WB) 五级。如图 30.2 示，一个指令的执行需要 5 个时钟周期，每个时钟周期的上升沿来临时，此指令所代表的一系列数据和控制信息将转移到下一级处理。

图所示为符合设计要求的流水线 RISC-V 微处理器的原理框图，采用五级流水线。由于在流水线中，数据和控制信息将在时钟周期的上升沿转移到下一级，所以规定流水线转移的变量命名遵守如下格式：名称 _ 流水

线级名称。如, 在 ID 级指令译码电路 (decode) 产生的寄存器写允许信号 RegWrite 在 ID 级、EX 级、MEM 级和 WB 级上的命名分别为 RegWrite_id、RegWrite_ex、RegWrite_mem 和 RegWrite_wb。在顶层文件中, 类似的变量名称有近百个, 这样的命名方式起到了很好的识别作用。

2. 流水线 RISC-V 微处理器的设计

根据流水线不同阶段, 将系统划分为 IF、ID、EX 和 MEM 四大模块, WB 部分功能电路非常简单, 可直接在顶层文件中设计。另外, 系统还包含 IF/ID、ID/EX、EX/MEM、MEM/WB 四个流水线寄存器。

2.1 取指令级模块 (IF) 的设计

IF 模块由指令指针寄存器 (PC)、指令存储器子模块 (Instruction ROM)、指令指针选择器 (MUX) 和一个 32 位加法器组成, IF 模块接口信息如表所示。

核心代码如下:

其中

2.2 指令译码模块 (ID) 的设计

指令译码模块的主要作用是从机器码中解析出指令, 并根据解析结果输出各种控制信号。ID 模块主要由指令译码 (Decode)、寄存器堆 (Registers)、冒险检测、分支检测和加法器等组成。ID 模块的接口信息如表所示。

(1) 寄存器堆 (Register) 子模块的设计

寄存器堆由 32 个 32 位寄存器组成, 这些寄存器通过寄存器号进行读写存取。寄存器堆的原理框图如图 30.8 所示。因为读取寄存器不会更改其内容, 故只需提供寄存器号即可读出该寄存器内容。读取端口采用数据选择器即可实现读取功能。

寄存器堆设计还应解决三阶数据相关的数据转发问题。当满足三阶数据相关条件时, 寄存器具有 Read After Write 特性。

RBW 子模块核心代码如下:

实现 Read After Write 寄存堆代码如下:

(2) 指令译码 (包含立即数产生电路) 子模块的设计

该子模块主要作用是根据指令确定各个控制信号的值, 同时产生立即数 Imm 和偏移量 offset。该模块是一个组合电路。

根据操作数的来源和立即数的不同, 将指令细分为不同类型, 并对于不同类型产生不同的控制信号。同时产生立即数和偏移量。

核心代码如下:

(3) 分支检测电路的设计

分支检测电路主要用于判断分支条件是否成立, 在 Verilog HDL 可以用比较运算符 “>”、“==” 和 “<” 描述, 但要注意符号数和无符号数的处理方法不同。在这里, 我们用加法器来实现。

用一个 32 位加法器完成 $rs1Data + (rs2Data) + 1$ (即 $rs1Data - rs2Data$), 设结果为 sum [31:0]。

确定比较运算的结果。对于比较运算来说, 如果最高位不同, 即 rs1Data [31] rs2Data [31], 可根据 rs1Data [31]、rs2Data [31] 决定比较结果, 但是应注意符号数、无符号数的最高位 rs1Data [31]、rs2Data [31] 代表意义不同。若两数最高位相同, 则两数之差不会溢出, 所以比较运算结果可由两个操作数之差的符号位 sum[31] 决定。

最终得到符号数与无符号数比较运算的结果:

$$isLT = rs1Data[31] \&\& (rs2Data[31]) || (rs1Data[31] \wedge rs2Data[31]) \&\& sum[31]$$

isLTU = (rs1Data[31])&&rs2Data[31]||((rs1Data[31]^rs2Data[31])&&sum[31])

最后用数据选择器完成下式即完成分支检测。

$$Branch = \begin{cases} (sum[31:0]); & SB_type \&\& (funct3 == beq_funct3) \\ |sum[31:0]; & SB_type \&\& (funct3 = bne_funct3) \\ isLT; & SB_type \&\& (funct3 = blt_funct3) \\ isLT; & SB_type \&\& (funct3 = bge_funct3) \\ isLTU; & SB_type \&\& (funct3 = bltu_funct3) \\ isLTU; & SB_type \&\& (funct3 = bgeu_funct3) \\ 0 & others \end{cases}$$

(4) 冒险检测功能电路（Hazard Detector）的设计

由前面分析可知，冒险成立的条件为：

上一条指令必须是 lw 指令（MemRead_ex=1）；两条指令读写同一个寄存器（rdAddr_ex=rs1Addr_id 或 rdAddr_ex=rs2Addr_id）。

当冒险成立应清空 ID/EX 寄存器并且阻塞流水线 ID 级、IF 级流水线，所以有

Stall=((rdAddr_ex==rs1Addr_id) || (rdAddr_ex==rs2Addr_id))&& MemRead_ex

IFWrite= Stall

在用 VerilogHDL 描述 ID 模块时，冒险检测功能电路（Hazard Detector）等功能单元比较简单，建议直接在 ID 顶层描述。

2.3 执行模块（EX）的设计

执行模块主要由 ALU 子模块、数据前推电路（Forwarding）及若干数据选择器组成。执行模块的接口信息如表所示。

(1) ALU 子模块的设计

算术逻辑运算单元（ALU）提供 CPU 的基本运算能力，如加、减、与、或、比较、移位等。具体而言，ALU 输入为两个操作数 A、B 和控制信号 ALUCode，由控制信号 ALUCode 决定采用何种运算，运算结果为 ALUResult。整理表 30.5 所示的 ALUCode 的功能表，可得到 ALU 的功能表，如表所示。

ALU 核心代码如下：

(2) 数据前推电路的设计

操作数 A 和 B 分别由数据选择器决定，数据选择器地址信号 ForwardA、ForwardB 的含义如表 30.9 所示。

同时根据一、二阶数据相关判断条件，可以得到：

2.4 数据存储器模块（DataRAM）的设计

数据存储器可用 Xilinx 的 IP 内核实现。考虑到 FPGA 的资源，数据存储器可设计为容量为 64×32 bit 的单端口 RAM，输出采用组合输出（Non Registered）。

由于数据存储器容量为 64×32 bit，故存储器地址共 6 位，与 ALUResult_mem[7:2] 连接。

2.5 流水线寄存器的设计

流水线寄存器负责将流水线的各部分分开，共有 IF/ID、ID/EX、EX/MEM、MEM/WB 四组，对四组流水线寄存器要求不完全相同，因此设计也有不同考虑。

EX/MEM、MEM/WB 两组流水线寄存器只是普通的 D 型寄存器。

当流水线发生数据冒险时，需要清空 ID/EX 流水线寄存器而插入一个气泡，因此 ID/EX 流水线寄存器是一个带同步清零功能的 D 型寄存器。

当流水线发生数据冒险时，需要阻塞 IF/ID 流水线寄存器；若跳转指令或分支成立，则还需要清空 ID/EX 流水线寄存器。因此，IF/ID 流水线寄存器除同步清零功能外，还需要具有保持功能（即具有使能 EN 信号输入）。

2.6 顶层文件的设计

按照图 30.3 所示的原理框图连接各模块即可。为了测试方便，可将关键变量输出，关键变量有：指令指针 PC、指令码 Instruction_id、流水线插入气泡标志 Stall、分支标志 JumpFlag 即 {Jump, Branch}、ALU 输入输出（ALU_A、ALU_B、ALUResult_ex）和数据存储器的输出 MemDout_mem。

备注：具体代码过于长，具体可以参见 solution 中的代码源文件。

3. 实验设备

- (1) 装有 Vivado 和 ModelSim SE 软件的计算机。
- (2) Nexys Video 开发板一套。
- (3) 带有 HDMI 接口的显示器一台。

四、 实验结果

1. Decode 仿真

1.1 仿真波形

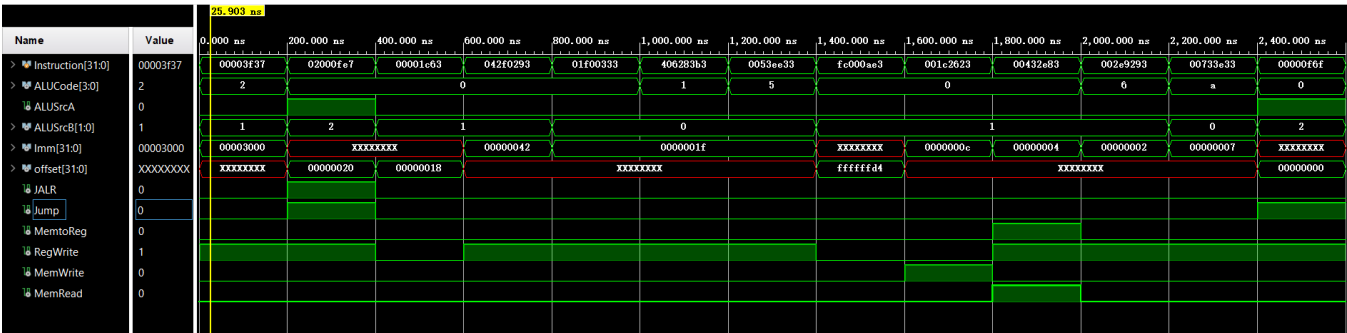


图 1: Decode 模块仿真波形图

1.2 仿真结果

- (1) lui x30, 0x3000, 为 U 型, Imm = 0x0000_3000, offset 无意义, ALUCode=4'd2, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2'b01, LUI 指令需要写回, RegWrite=1。

- (2) jalr X31, later(x0), I 型, Imm 无意义, offset=0x0000_0020, ALUCode=4' d0, ALUSrcA=1, ALUSrcB=2' b10, JALR=1, Jump=1, JALR 指令需要写回, RegWrite=1。
- (3) bne x0, x0, end, SB 型, Imm 无意义, offset=0x0000_0018, ALUCode=4' d0, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b01, BNE 指令不需要写回, RegWrite=0。
- (4) addi x5, x30, 42, I 型, Imm =0x0000_0042, offset 无意义, ALUCode=4' d0, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b01, ADDI 指令需要写回, RegWrite=1。
- (5) add x6, x0, x31, R 型, Imm 无意义, offset 无意义, ALUCode=4' d0, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b00, ADD 指令需要写回, RegWrite=1。
- (6) sub x7, x5, x6, R 型, Imm 无意义, offset 无意义, ALUCode=4' d1, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b00, SUB 指令需要写回, RegWrite=1。
- (7) or x28, x7, x5, R 型, Imm 无意义, offset 无意义, ALUCode=4' d5, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b00, OR 指令需要写回, RegWrite=1。
- (8) beq x0, x0, earlier, SB 型, Imm 无意义, offset=0xffff_ffd4, ALUCode=4' d0, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b01, BEQ 指令不需要写回, RegWrite=0。
- (9) sw x28, 0C(x0), S 型, Imm =0x0000_000c, offset 无意义, ALUCode=4' d0, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b01, MemWrite=1。
- (10) lw x29, 04(x6), I 型, Imm =0x0000_0004, offset 无意义, ALUCode=4' d0, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b01, MemRead=1, MemtoReg=1, RegWrite=1。
- (11) sll x5, x29, 2, I 型, Imm =0x0000_0002, offset 无意义, ALUCode=4' d6, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b01, RegWrite=1。
- (12) sltu x28, x6, x7, R 型, Imm 无意义, offset 无意义, ALUCode=4' d10, ALUSrcA=0, ALUSrcB=2' b00, RegWrite=1。
- (13) jal x31, done, UJ 型, Imm 无意义, offset=0x0000_0000, ALUCode=4' d1, ALUSrcA=1, ALUSrcB=2' b10, SUB 指令需要写回, RegWrite=1。

2. ALU 模块仿真

2.1 仿真波形

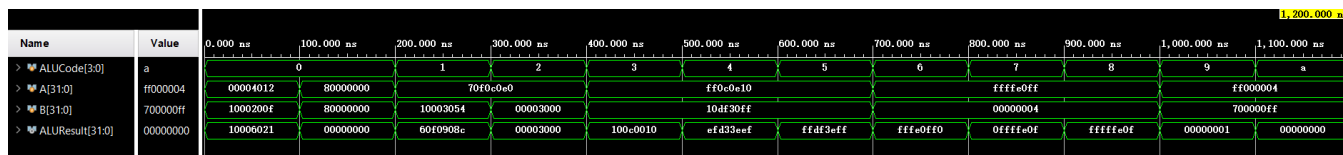


图 2: ALU 模块仿真波形图

2.2 仿真结果

从左到右对应的指令分别为:

add , add , sub , lui , and , xor , or , sll , srl , sra , slt , sltu
经过简单计算, 结果正确。

3. IF 模块仿真

3.1 仿真波形

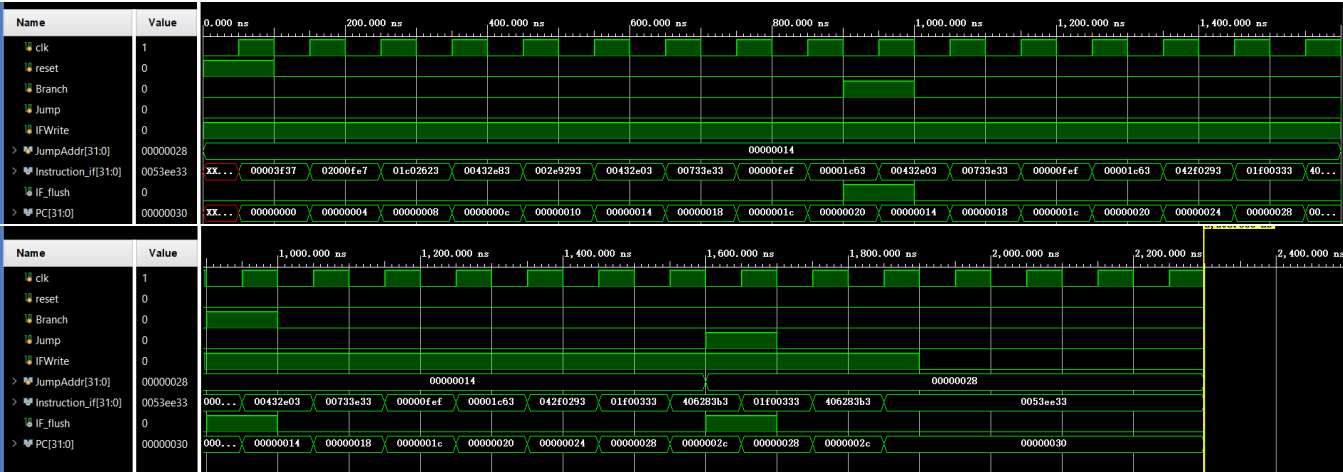


图 3: IF 模块仿真波形图

3.2 仿真结果

从图中可以看出, 当 Branch 与 Jump 都是 0 时, PC 依次递增。当 Branch 或 Jump 为 1 时, PC 可以实现正确的跳转。

4. 顶层模块仿真

4.1 仿真波形

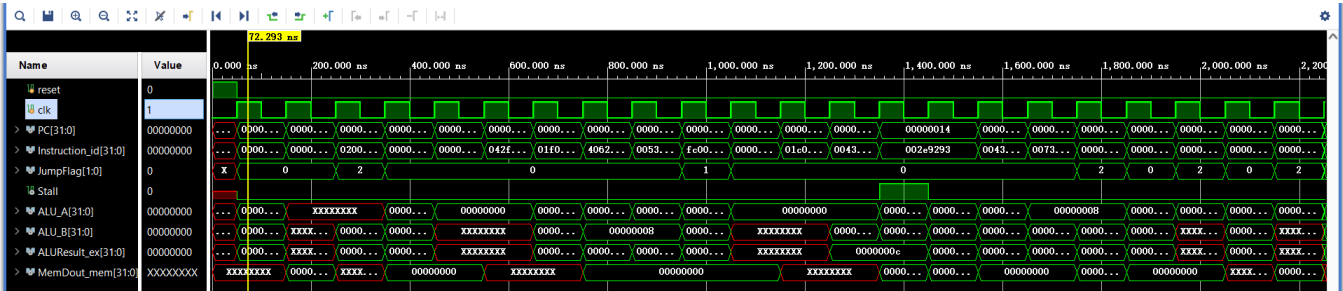


图 4: cpu 模块仿真波形图

4.2 仿真结果

将仿真结果与下表比对正常。

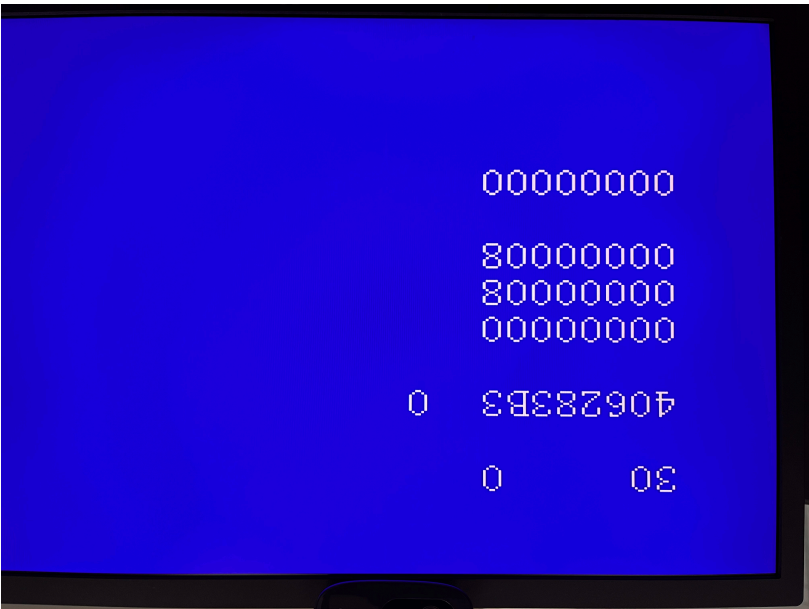


图 5: 上板结果之一

5. 上板验证

五、 问题记录

- (1) 刚开始实验的时候，看着实验指导书无从下手，难以理解整个 CPU 的架构。在听从老师的建议之后，我开始从一些比较简单或者实验指导书说明的比较详细的部分入手，开始写部分的实验代码。同时随着理论课程的学习，慢慢地对于各个部分的架构有了更加深刻的认识，而实验的进行也帮助我更加深刻地理解理论课学到的知识。
- (2) 实验一个很大的难点是代码中有非常多的变量和传输线，所以很多时候容易漏掉或者看错一些端口。所以为了尽量减少这些问题，我尽量使代码的格式规范化，命名尽量和结构框架图中的一致，事实证明这样的习惯极大的帮助了我的调试。
- (3) 在调试过程中，发现 Decode 模块的 Imm 和 offset 在应该是不确定的状态时（比如 I 型指令时 offset 应为不确定状态）却有着之前确定的状态，查看代码之后发现是在某些 if 语句下未给应该是不确定状态的 Imm 或 offset 赋值 x。
- (4) 在第 15 个时钟周期的时候，MemDout 并没有出现正确的值，我开始一直在第 15 个周期的各个模块去查看相关的值是否正确，最后才意识到这里 stall 之后的值，应去 stall 之前的那条指令去检查。
- (5) 设计 ALU 的时候遇到 Binvert 位扩展的问题，最后通过百度解决了问题。

六、 思考题

如下面两条指令，条件分支指令试图读取上一条指令的目标寄存器，插入气泡或数据转发都无法解决流水线冲突问题。为什么在大多 CPU 架构中，都不去解决这一问题？这一问题应在什么层面中解决？

```
lw X28, 04(X6) beq X28,x29,Loop
```


答: 插入一气泡, 将 MEM/WB 寄存器的数据转发到 EX, 这样似乎是可以的。经典的 MIPS 使用了负载延迟槽, 在 lw 后面加入 nop 但是负载延迟在硬件上非常不可预知, 从 RAM 或缓存 load, 可能会因资源竞争而变慢。负载延迟使延迟增加, 因此大多数 CPU 架构中不去解决这一问题。后来的 MIPS 增加了死锁来避免填充 nop。

这一问题主要靠汇编器调整指令顺序来解决