成绩评定日期：

实验报告成绩：

2022～2023学年秋季学期

**《计算机系统》必修课**

课程实验报告



班级：人工智能2201（未来实验班）

组长：王新宇

组员：刘力瑞

报告日期：2024.1.5

目录

[1. 实验任务与分工 3](#_Toc186979417)

[1.1 实验任务概述 3](#_Toc186979418)

[1.2 小组成员分工详情 3](#_Toc186979419)

[2. 实验设计与实现 3](#_Toc186979420)

[2.1 CPU 总体架构设计 3](#_Toc186979421)

[2.2 代码文件概述 4](#_Toc186979422)

[2.3 测试环境与方法 4](#_Toc186979423)

[2.4 完成指令 5](#_Toc186979424)

[3 流水线各阶段详细设计 5](#_Toc186979425)

[3.1 IF（取指令）阶段 5](#_Toc186979426)

[3.2 ID（指令译码）阶段 7](#_Toc186979427)

[3.3 EX（执行）阶段 10](#_Toc186979428)

[3.4 MEM（访存）阶段 13](#_Toc186979429)

[3.5 WB（写回）阶段 14](#_Toc186979430)

[4. 实验测试与结果分析 16](#_Toc186979431)

[4.1 测试结果展示 16](#_Toc186979432)

[4.2 结果分析与讨论 21](#_Toc186979433)

[5. 实验总结与展望 21](#_Toc186979434)

[5.1 王新宇 21](#_Toc186979435)

[5.2 刘力瑞 22](#_Toc186979436)

# 1. 实验任务与分工

## 1.1 实验任务概述

本实验中要完成CPU流水线的测试，需要深入理解计算机系统的硬件运行机制，掌握流水线技术在提高 CPU 性能方面的原理和应用。要构建构建一个包含五级流水线，需要使用verilog完成取指 IF、译码 ID、执行 EX、访存 MEM、写回 WB的 CPU 模型等代码，以实现了一个具备基本功能的 CPU 流水线系统。

## 1.2 小组成员分工详情

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 姓名 | 任务分工 | 任务量占比 |
| 王新宇 | 实现IF，ID，MEM，WB,HILO，CTRL,STALL等指令以及主要代码编写，参加实验报告编写 | 70% |
| 刘力瑞 | 主要负责在流水线中的EX阶段编写，乘法器的设计参与实验报告的编写 | 30% |

# 2. 实验设计与实现

## 2.1 CPU 总体架构设计

CPU总体围绕一条五级流水线展开，包含多个功能模块，各模块协同工作实现指令的取指、译码、执行、访存和写回等操作，同时具备对流水线的控制以及特殊寄存器的处理功能，具体架构可以分为以下部分：

1. 流水线模块：包括IF（取指）、ID（译码）、EX（执行）、MEM（访存）、WB（写回）模块，构建了CPU指令执行的五级流水线基本框架，负责指令在不同阶段的处理和流转。

2.运算与寄存器模块：ALU相关位于/lib目录下的alu.v等文件构建了ALU，用于执行算术和逻辑运算，为EX模块提供运算支持。

3.寄存器相关：regfile.v构建了通用寄存器，hi\_lo\_reg.v实现了hilo寄存器（用于乘法和除法结果的存储等），这些寄存器在指令执行过程中用于数据的存储和传递。

4.控制模块：CTRL模块接收各阶段的请求信号，控制流水线各阶段的暂停和运行，协调各模块工作节奏。

5.数据传输总线：各模块之间通过特定宽度的数据总线连接，如IF模块到ID模块通过if\_to\_id\_bus（33位）传输数据，ID模块到EX模块通过id\_to\_ex\_bus（159位）传输数据等，确保数据在不同阶段的准确传递。

6.指令处理流程：

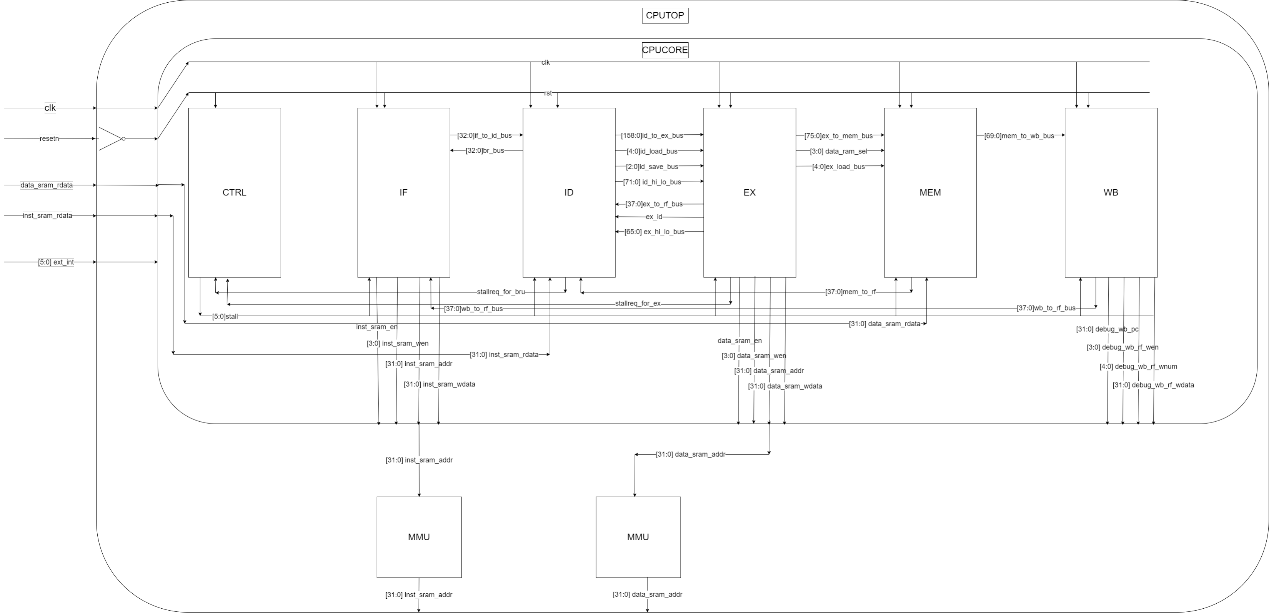
取指（IF）：从指令内存中获取指令，根据时钟、复位、暂停和跳转等信号控制指令地址的生成和指令的读取，将读取的指令传递给ID模块。

译码（ID）：对指令进行译码，判断指令类型（一般指令或跳转指令等），读取通用寄存器的值，处理数据相关，确定操作数来源，将译码结果和相关数据传递给EX模块，同时处理流水线暂停请求。

执行（EX）：执行运算操作，包括算术、逻辑运算，计算地址，处理访存请求，将运算结果和访存相关信息传递给MEM模块，并向ID模块反馈部分数据。

访存（MEM）：根据EX模块传来的地址进行内存访问操作，处理load和store指令，将访存结果传递给WB模块。

写回（WB）：将结果写回寄存器堆，完成指令执行的最后一步。



## 2.2 代码文件概述

项目包含多个模块文件，共同构建了一条流水线的基本框架以及相关运算和寄存器等功能。包括 IF.v、ID.v、EX.v、MEM.v、WB.v、hi\_lo\_reg.v、mycpu\_core.v、mycpu\_top.v 等文件搭建流水线框架；位于 /lib 目录下的 alu.v、decoder\_2\_4.v、decoder\_5\_32.v、decoder\_6\_64.v、defines.vh、div.v、mmu.v、regfile.v 构建 ALU 和寄存器并定义头文件；位于 /lib/mul 目录下的 add.v、fa.v、mul.v 实现乘法运算。

## 2.3 测试环境与方法

测试平台：装有Vivado的windows系统。

使用VSCode编写代码，提供代码编辑功能。

利用Vivado进行模拟仿真，用于验证设计的正确性。

借助git进行版本管理，便于代码的更新、回溯和团队协作。

通过GitHub搭建项目仓库，实现代码的存储、共享和团队间的协同开发。

测试方法

debug

在实验的debug过程中，通过在波形图中添加可能有问题的数值，查看提示pc值附近目标的波形图来定位出错的位置及原因。通过观察波形图中信号的变化、数据的传输以及各模块之间的交互情况，分析指令执行过程中是否存在异常，如数据错误、信号时序问题等，从而找出导致错误的具体指令或模块操作，以便进行针对性的修改和优化。

## 2.4 完成指令

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 运算指令 | ADD | ADDI | ADDU | ADDIU |
|  | SUB | SUBU | SLT | SLTI |
|  | SLTU | SLTIU | DIV | DIVU |
|  | MULT | MULTU |  |  |
| 逻辑运算指令 | AND | ANDI | LUI | NOR |
|  | OR | ORI | XOR | XORI |
| 移位指令 | SLL | SLLV | SRA | SRAV |
|  | SRL | SRLV |  |  |
| 跳转指令 | BEQ | BNE | BGEZ | BGTZ |
|  | BLEZ | BLTZ | BLTZAL | BGEZAL |
|  | J | JAL | JR | JALR |
| 数据移动指令 | MFHI | MFLO | MTHI | MTLO |
| 访存指令 | LB | LBU | LH | LHU |
|  | LW | SB | SH | SW |

# 3 流水线各阶段详细设计

### 3.1 IF（取指令）阶段

**IF**（指令获取）段是 CPU 流水线的第一个阶段，主要负责从内存中获取指令。具体功能包括：

1. **获取下一条指令**：根据当前的程序计数器（PC，Program Counter）值从指令存储器（SRAM）中获取指令。
2. **更新 PC 值**：通过计算或跳转控制更新程序计数器的值，确保 CPU 始终获取正确的下一条指令。
3. **跳转支持**：如果当前执行的是跳转指令（如 beq，jal 等），根据分支控制信号更新 PC 值，进行跳转。
4. **信号传递**：将当前 PC 值和相关控制信号传递给下一级的 **ID**（指令译码）阶段。

端口设置：

| **端口名称** | **方向** | **类型** | **位宽** | **描述** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| clk | 输入 | wire | 1 | 时钟信号 |
| rst | 输入 | wire | 1 | 复位信号 |
| stall | 输入 | wire | StallBus | 暂停信号 |
| br\_bus | 输入 | wire | BR\_WD | 分支跳转信息 |
| if\_to\_id\_bus | 输出 | wire | IF\_TO\_ID\_WD | 传给ID阶段的指令数据 |
| inst\_sram\_en | 输出 | wire | 1 | 指令存储器使能信号 |
| inst\_sram\_wen | 输出 | wire | 4 | 指令存储器写使能信号 |
| inst\_sram\_addr | 输出 | wire | 32 | 指令存储器地址 |
| inst\_sram\_wdata | 输出 | wire | 32 | 指令存储器写数据 |

| **信号名称** | **类型** | **位宽** | **描述** |
| --- | --- | --- | --- |
| pc\_reg | reg | 32 | 当前程序计数器值 |
| ce\_reg | reg | 1 | 使能信号 |
| next\_pc | wire | 32 | 下一周期的PC值 |
| br\_e | wire | 1 | 是否有跳转 |
| br\_addr | wire | 32 | 跳转地址 |

最终的图像结构显示为

图形用户界面

中度可信度描述已自动生成

### 3.2 ID（指令译码）阶段

该模块是MIPS处理器的ID（译码）阶段，负责从IF（取指）阶段接收指令，并进行指令译码、寄存器读取、数据相关性处理，以及生成控制信号传送到执行阶段（EX）。此外，该模块还处理来自后续阶段（EX、MEM、WB）的写回数据，进行数据转发，以减少数据冲突。

1. **寄存器文件 (u\_regfile)**:

读取两个寄存器数据 (rdata1, rdata2)。

根据写回信号 (wb\_rf\_we, wb\_rf\_waddr, wb\_rf\_wdata) 写入数据。

1. **HI/LO寄存器 (u\_hi\_lo\_reg)**:

读取和写入HI/LO寄存器数据。

处理乘法和除法指令的结果。

1. **译码器 (u0\_decoder\_6\_64, u1\_decoder\_6\_64, etc.)**:

将指令的操作码和功能码译码为控制信号。

1. **数据转发逻辑**:

处理来自EX、MEM、WB阶段的写回数据，进行数据转发，避免数据相关性冲突。

1. **分支逻辑**:

生成分支指令的目标地址 (br\_addr) 和分支使能信号 (br\_e)。

| **端口名称** | **方向** | **位宽** | **描述** |
| --- | --- | --- | --- |
| clk | 输入 | 1 | 时钟信号 |
| rst | 输入 | 1 | 复位信号 |
| stall | 输入 | StallBus | 暂停信号 |
| if\_to\_id\_bus | 输入 | IF\_TO\_ID\_WD | 从IF阶段接收的数据总线 |
| inst\_sram\_rdata | 输入 | 32 | 指令存储器读取的数据 |
| ex\_id | 输入 | 1 | 来自执行阶段的分支指令信号 |
| wb\_to\_rf\_bus | 输入 | WB\_TO\_RF\_WD | 来自写回阶段的写回总线 |
| ex\_to\_rf\_bus | 输入 | EX\_TO\_RF\_WD | 来自执行阶段的写回总线 |
| mem\_to\_rf\_bus | 输入 | MEM\_TO\_RF\_WD | 来自内存阶段的写回总线 |
| ex\_hi\_lo\_bus | 输入 | 66 | 来自执行阶段的HI/LO寄存器数据 |
| id\_load\_bus | 输出 | LoadBus | 负载指令信号总线 |
| id\_save\_bus | 输出 | SaveBus | 存储指令信号总线 |
| stallreq\_for\_bru | 输出 | 1 | 向分支预测单元请求暂停信号 |
| id\_to\_ex\_bus | 输出 | ID\_TO\_EX\_WD | 传送到执行阶段的总线 |
| br\_bus | 输出 | BR\_WD | 分支指令相关信号总线 |

| **信号名称** | **位宽** | **描述** |
| --- | --- | --- |
| inst | 32 | 当前指令 |
| id\_pc | 32 | 当前指令的PC值 |
| rs, rt, rd | 5 | 指令中的寄存器地址 |
| imm, offset | 16 | 指令中的立即数或偏移量 |
| alu\_op | 12 | ALU操作控制信号 |
| rf\_we | 1 | 寄存器文件写使能信号 |
| rf\_waddr | 5 | 寄存器文件写地址 |
| ndata1, ndata2 | 32 | 读取的寄存器数据（经过数据转发） |
| br\_e | 1 | 分支指令使能信号 |
| br\_addr | 32 | 分支目标地址 |

最终图像结构表示为：

图片包含 日程表

描述已自动生成

### 3.3 EX（执行）阶段

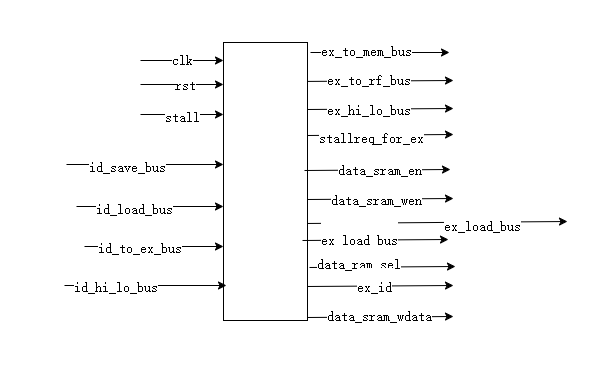
输入端口：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 接口名 | 宽度 | 数据 |
| clk | 1 | 时钟信号 |
| rst | 1 | 复位信号 |
| stall | 6 | 控制暂停信号 |
| id\_to\_ex\_bus | 169 | ID 段至EX 段数据 |
| id\_load\_bus | 5 | ID段传递读的数据 |
| id\_save\_bus | 3 | ID段传递写的数据 |
| id\_hi\_lo\_bus | 72 | ID 段至hilo段的数据 |

输出端口：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 接口名 | 宽度 | 数据 |
| ex\_to\_mem\_bus | 80 | EX段传给MEM段数据 |
| ex\_to\_rf\_bus | 38 | EX 至regfile的数据 |
| ex\_hi\_lo\_bus | 66 | EX 段至hilo段的数据 |
| stallreq\_for\_ex | 1 | 除法暂停请求信号 |
| data\_sram\_en | 1 | 访问内存与否 |
| data\_sram\_wen | 4 | 选择写入字节操作 |
| data\_sram\_addr | 32 | 内存数据存放的地址 |
| data\_sram\_wdata | 32 | 要写入内存的数据 |
| ex\_id | 38 | EX 段传给 ID 段的数据 |
| data\_ram\_sel | 4 | 内存字节选择信号 |
| ex\_load\_bus | 5 | EX 段读取的数据 |

相关输入输出接口图示



ALU运算：

id\_to\_ex\_bus组成

| **信号名称** | **位宽** | **描述** |
| --- | --- | --- |
| **ex\_pc** | 32 位 | 程序计数器（PC）值 |
| **inst** | 32 位 | 当前指令 |
| **alu\_op** | 12 位 | ALU 操作码，指定 ALU 执行的操作 |
| **sel\_alu\_src1** | 3 位 | 操作数1的来源选择信号 |
| **sel\_alu\_src2** | 4 位 | 操作数2的来源选择信号 |
| **data\_ram\_en** | 1 位 | 是否访问内存的标志 |
| **data\_ram\_wen** | 4 位 | 内存写操作的控制信号 |
| **rf\_we** | 1 位 | 是否写回寄存器文件的标志 |
| **rf\_waddr** | 5 位 | 写回寄存器的地址 |
| **sel\_rf\_res** | 1 位 | 选择写回寄存器的数据源 |
| **rf\_rdata1** | 32 位 | 寄存器文件中第一个操作数的数据 |
| **rf\_rdata2** | 32 位 | 寄存器文件中第二个操作数的数据 |
|  |  |  |

alu u\_alu(

.alu\_control (alu\_op ),//alu\_op是控制信号，表示进行的操作

.alu\_src1 (alu\_src1 ),

.alu\_src2 (alu\_src2 ),

.alu\_result (alu\_result )

);

    wire mul\_signed; // 有符号乘法标记

1. 则是有乘法与否。乘法运算是通过模拟二进制乘法的逐位加法和左移操作来实现的，

使用了 逐位加法 和 左移操作 来实现乘法的核心部分。这个过程是基于二进制乘法的原理。逐位加法： 如果操作数的当前位为1，则将 op1 加到结果 结果位 上。这样就模拟了二进制乘法中乘数对被乘数的加法操作。左移： 在每次处理完 当前位 之后，op1 会被左移一位，以便模拟每一位的乘法。

1. 乘法结束处理，在乘法过程结束时，如果是有符号乘法并且结果需要调整（即 操作数1和操作数2符号不同），代码会对结果进行补码处理（取反加一），以得到正确的符号。

**具体步骤**

1. **初始化：**

如果 进入除法状态且 取消乘法位0，且操作数1 和 操作数2都不为零，进入状态乘法计算状态。

如果任一操作数为零，操作数为零处理状态。

1. **符号扩展与补码转换：**

如果是有符号乘法，且操作数为负数（符号位为1），则：对操作数1和操作数2进行补码转换。补码转换是通过对操作数取反并加1来实现。

1. **逐位乘法：**进入状态 乘法计算状态，开始逐位乘法计算。通过计数器 cnt 控制对 op2 每一位的处理：如果 操作数2当前数 为1，则将 操作数1 加到 结果上。每次加完后，将 op1 左移一位，准备下一位的乘法。计数器 cnt 自增，直到所有位都处理完。
2. **结束处理：**在计数器 cnt 达到预定值（即 32 位乘法处理完成），如果是有符号乘法，且操作数符号不同（即结果应该为负），对结果 result\_o 进行补码转换（取反加一）。进入状态乘法完成。
3. **返回初始化状态：**

在状态乘法完成后，如果如果乘法开始状态位0，返回初始化状态，准备开始下一次操作。

**总结**

乘法实现的关键在于逐位加法和左移操作：

对于每一位的乘法，检查 操作数2当前位 是否为1，如果是，则将 op1 加到结果中。

每次处理完一位，op1 左移一位，相当于将操作数1乘以对应的位权。

最后根据符号位，调整结果的符号，并标记运算结束。

这种实现方式模拟了二进制的逐位乘法计算，适用于支持有符号和无符号整数的乘法运算。

### 3.4 MEM（访存）阶段

该模块为MIPS处理器的MEM阶段，负责处理内存访问操作。它从EX阶段接收数据，并根据指令类型进行内存读取或写入操作。该模块还负责将内存读取的数据格式化，并将其传递到WB阶段。

1. **寄存器模块**:

保存来自EX阶段的数据总线、字节选择信号和加载指令信号。

1. **指令解码模块**:

将ex\_load\_bus\_r解码为具体的加载指令信号（inst\_lb, inst\_lbu, inst\_lh, inst\_lhu, inst\_lw）。

1. **数据路径模块**:

根据data\_ram\_sel\_r选择从内存读取的字节、半字或字数据，并根据加载指令类型进行格式化（如符号扩展或零扩展）。

1. **结果选择模块**:

根据sel\_rf\_res和data\_ram\_en选择rf\_wdata是来自mem\_result还是ex\_result。

1. **数据打包模块**:

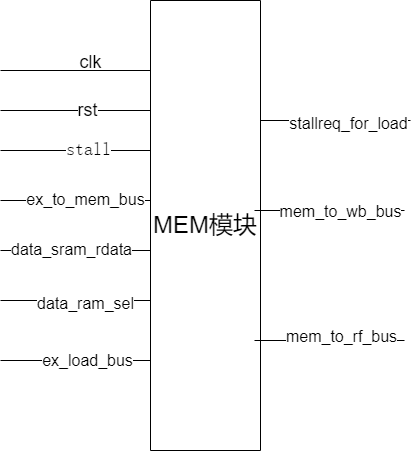
将mem\_pc、rf\_we、rf\_waddr和rf\_wdata打包成mem\_to\_wb\_bus和mem\_to\_rf\_bus，传递到后续阶段。

端口介绍：

| **端口名称** | **方 向** |  | **位宽** | **描述** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| clk | 输入 | | 1 | 时钟信号 |
| rst | 输入 | | 1 | 复位信号 |
| stall | 输入 | | StallBus | 暂停信号 |
| ex\_to\_mem\_bus | 输入 | | EX\_TO\_MEM\_WD | 来自EX阶段的数据总线 |
| data\_sram\_rdata | 输入 | | 32 | 内存读取的数据 |
| data\_ram\_sel | 输入 | | 4 | 字节选择信号，用于选择从内存读取的数据的字节 |
| ex\_load\_bus | 输入 | | LoadBus | 来自EX阶段的加载指令信号 |
| stallreq\_for\_load | 输出 | | 1 | 因加载指令产生的暂停请求信号 |
| mem\_to\_wb\_bus | 输出 | | MEM\_TO\_WB\_WD | 传送到WB阶段的数据总线 |
| mem\_to\_rf\_bus | 输出 | | MEM\_TO\_RF\_WD | 传送到寄存器文件的数据总线 |

信号介绍：

| **信号名称** | **位宽** | **描述** |
| --- | --- | --- |
| mem\_pc | 32 | 当前PC地址 |
| data\_ram\_en | 1 | 数据使能信号，控制内存读取 |
| data\_ram\_wen | 4 | 数据写使能信号，选择要写入的字节 |
| sel\_rf\_res | 1 | 选择寄存器文件写数据的来源 |
| rf\_we | 1 | 寄存器文件写使能信号 |
| rf\_waddr | 5 | 寄存器文件写地址 |
| rf\_wdata | 32 | 寄存器文件写数据 |
| ex\_result | 32 | 来自EX阶段的结果数据 |
| mem\_result | 32 | 根据加载指令类型格式化的内存数据 |
| inst\_lb, inst\_lbu,  inst\_lh, inst\_lhu,  inst\_lw | 1 each | 各种加载指令的使能信号 |
| b\_data, h\_data, w\_data | 8, 16, 32 | 从内存读取的字节、半字和字数据 |



### 3.5 WB（写回）阶段

该模块是MIPS流水线的写回（Write Back，WB）阶段。其主要功能是从内存到写回（MEM\_TO\_WB）阶段的流水线寄存器中读取数据，并将这些数据写回到寄存器堆（Register File，RF）。此外，该模块还提供了调试信号，以便在调试时观察内部状态。

主要有以下功能模块：

1. **寄存器存储**:

使用寄存器mem\_to\_wb\_bus\_r存储从mem\_to\_wb\_bus接收到的数据。

根据rst和stall信号控制寄存器的复位和更新。

1. **信号提取**:

从mem\_to\_wb\_bus\_r中提取wb\_pc、rf\_we、rf\_waddr和rf\_wdata。

1. **数据传递**:

将提取的信号组合成wb\_to\_rf\_bus，传给寄存器堆。

1. **调试信号**:

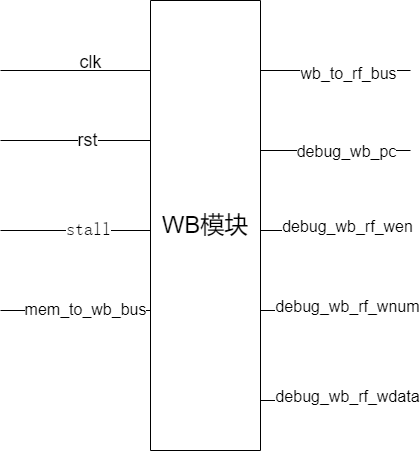
提供调试信号debug\_wb\_pc、debug\_wb\_rf\_wen、debug\_wb\_rf\_wnum和debug\_wb\_rf\_wdata，方便观察内部状态。

端口介绍：

| **端口名称** | **方向** | **宽度** | **描述** |
| --- | --- | --- | --- |
| clk | 输入 | 1 | 时钟信号 |
| rst | 输入 | 1 | 复位信号，高有效 |
| stall | 输入 | StallBus-1:0 | 流水线停顿信号，多位信号 |
| mem\_to\_wb\_bus | 输入 | MEM\_TO\_WB\_WD-  1:0 | 来自内存阶段的数据总线 |
| wb\_to\_rf\_bus | 输出 | WB\_TO\_RF\_WD-  1:0 | 传给寄存器堆的总线 |
| debug\_wb\_pc | 输出 | 32 | 调试用程序计数器 |
| debug\_wb\_rf\_wen | 输出 | 4 | 调试用寄存器写使能信号 |
| debug\_wb\_rf\_wnum | 输出 | 5 | 调试用寄存器写地址 |
| debug\_wb\_rf\_wdata | 输出 | 32 | 调试用寄存器写数据 |

信号介绍：

| **信号名称** | **宽度** | **描述** |
| --- | --- | --- |
| mem\_to\_wb\_bus\_r | MEM\_TO\_WB\_WD-  1:0 | 存储从mem\_to\_wb\_bus接收到的数据的寄存器 |
| wb\_pc | 32 | 程序计数器，32位 |
| rf\_we | 1 | 寄存器写使能，1位 |
| rf\_waddr | 5 | 寄存器写地址，5位 |
| rf\_wdata | 32 | 寄存器写数据，32位 |



### 2.6 CTRL模块

**整体说明：**

接收各段传递过来的流水线请求信号，从而控制流水线各阶段的运行。接口如右图所示。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 接口名 | 宽度 | 输入/输出 | 作用 |
| 1 | clk | 1 | 输入 | 时钟信号 |
| 2 | stallreq\_for\_ex | 1 | 输入 | 执行阶段的指令是否请求流水线暂停 |
| 3 | stallreq\_for\_bru | 5 | 输入 | Load命令是否请求流水线暂停 |
| 4 | stall | 6 | 输出 | 暂停信号 |

**功能说明：**

假设位于流水线第 n 阶段的指令需要多个周期，进而请求流水线暂停，那么需要保持取指令地址 PC 不变，同时保持流水线第 n 阶段及之前的各个阶段的寄存器保持不变，而第 n 阶段后面的指令继续运行。stall[0]为 1 表示没有暂停，1-5为 1时分别 代表if 段、id 段、ex 段、 mem 段、wb 段暂停。

### 2.7 HILO寄存器模块

**整体说明：**

hi和lo属于协处理器，不在通用寄存器的范围内，这两个寄存器主要是在用来处理乘法和除法。以乘法作为示例，如果两个整数相乘，那么乘法的结果低位保存在lo寄存器，高位保存在hi寄存器。 当然，这两个寄存器也可以独立进行读取和写入。读的时候，使用mfhi、mflo；写入的时候，用mthi、mtlo。图形用户界面, 应用程序

描述已自动生成和通用寄存器不同，mfhi、mflo是在执行阶段才开始从hi、lo寄存器获取数值的。写入则和通用寄存器一样，也是在写回的时候完成的。

可以直接改写lib下的regfile.v，也可以添加hiloreg.v，创建u\_hi\_lo\_reg，但是MEM、WB也要跟着改，这里我们采用第二种方法，即添加hiloreg.v文件。接口如右图所示。

表 8 HILO寄存器输入输出

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 接口名 | 宽度 | 输入/输出 | 作用 |
| 1 | clk | 1 | 输入 | 时钟信号 |
| 2 | stall | 6 | 输入 | 控制暂停信号 |
| 3 | hi\_we | 1 | 输入 | hi寄存器的写使能信号 |
| 4 | lo\_we | 1 | 输入 | lo寄存器的写使能信号 |
| 5 | hi\_wdata | 32 | 输出 | Hi寄存器写的数据 |
| 6 | lo\_wdata | 32 | 输出 | Lo寄存器写的数据 |
| 7 | hi\_rdata | 32 | 输出 | Hi寄存器读的数据 |
| 8 | lo\_rdata | 32 | 输出 | Lo寄存器读的数据 |

**功能说明：**

当hi\_we和lo\_we均为1时，寄存器reg\_hi和reg\_lo同时将hi\_wdata和lo\_wdata写入。当hi\_we为0，lo\_we为1时，reg\_lo将lo\_wdata写入；当hi\_we为1，lo\_we为0时，reg\_hi将hi\_wdata写入。hi\_rdata和lo\_rdata分别输出reg\_hi和reg\_lo中的数据。

# 4. 实验测试与结果分析

## 4.1 测试结果展示

Test begin!

----[ 14025 ns] Number 8'd01 Functional Test Point PASS!!!

[ 22000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc5e4d4

[ 32000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc5f474

----[ 40475 ns] Number 8'd02 Functional Test Point PASS!!!

[ 42000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc89440

----[ 49355 ns] Number 8'd03 Functional Test Point PASS!!!

[ 52000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc3ad58

[ 62000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc3c260

----[ 71115 ns] Number 8'd04 Functional Test Point PASS!!!

[ 72000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc23898

[ 82000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc24c40

[ 92000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc2621c

[ 102000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc2776c

----[ 104845 ns] Number 8'd05 Functional Test Point PASS!!!

[ 112000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc4a0ac

----[ 117885 ns] Number 8'd06 Functional Test Point PASS!!!

[ 122000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc6a68c

[ 132000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc6b62c

[ 142000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc6c5cc

----[ 144265 ns] Number 8'd07 Functional Test Point PASS!!!

[ 152000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc509e4

[ 162000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc51984

----[ 167675 ns] Number 8'd08 Functional Test Point PASS!!!

[ 172000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc03bb0

[ 182000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc04b50

----[ 185575 ns] Number 8'd09 Functional Test Point PASS!!!

[ 192000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc3e008

[ 202000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc3efa8

----[ 203475 ns] Number 8'd10 Functional Test Point PASS!!!

[ 212000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc6f800

[ 222000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc707a0

----[ 222735 ns] Number 8'd11 Functional Test Point PASS!!!

[ 232000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc02648

----[ 237365 ns] Number 8'd12 Functional Test Point PASS!!!

[ 242000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc3faec

[ 252000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc40f3c

----[ 261915 ns] Number 8'd13 Functional Test Point PASS!!!

[ 262000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc00d58

[ 272000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc64ab8

[ 282000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc65db8

[ 292000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc67094

----[ 296425 ns] Number 8'd14 Functional Test Point PASS!!!

[ 302000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc84484

[ 312000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc85814

[ 322000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc86b8c

----[ 330855 ns] Number 8'd15 Functional Test Point PASS!!!

[ 332000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc7a0f0

----[ 333825 ns] Number 8'd16 Functional Test Point PASS!!!

----[ 336795 ns] Number 8'd17 Functional Test Point PASS!!!

----[ 338455 ns] Number 8'd18 Functional Test Point PASS!!!

----[ 340625 ns] Number 8'd19 Functional Test Point PASS!!!

[ 342000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc87f18

----[ 342805 ns] Number 8'd20 Functional Test Point PASS!!!

[ 352000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc8006c

[ 362000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc8100c

----[ 364615 ns] Number 8'd21 Functional Test Point PASS!!!

[ 372000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0b1c8

[ 382000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0c168

----[ 385015 ns] Number 8'd22 Functional Test Point PASS!!!

[ 392000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc332a8

[ 402000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc34248

----[ 406375 ns] Number 8'd23 Functional Test Point PASS!!!

[ 412000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc61798

[ 422000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc62738

[ 432000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc636d8

----[ 432785 ns] Number 8'd24 Functional Test Point PASS!!!

[ 442000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc7b564

[ 452000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc7c504

----[ 456195 ns] Number 8'd25 Functional Test Point PASS!!!

[ 462000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc4d470

[ 472000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc4e410

----[ 481535 ns] Number 8'd26 Functional Test Point PASS!!!

[ 482000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc6cfc8

[ 492000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc6df68

----[ 499435 ns] Number 8'd27 Functional Test Point PASS!!!

[ 502000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc8a360

[ 512000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc8b300

[ 522000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc8c2a0

----[ 525825 ns] Number 8'd28 Functional Test Point PASS!!!

[ 532000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc78914

[ 542000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc798b4

----[ 546225 ns] Number 8'd29 Functional Test Point PASS!!!

[ 552000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc475a4

[ 562000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc48544

[ 572000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc494e4

----[ 572635 ns] Number 8'd30 Functional Test Point PASS!!!

[ 582000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc09260

[ 592000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0a200

----[ 593035 ns] Number 8'd31 Functional Test Point PASS!!!

[ 602000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc76b40

[ 612000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc77ae0

----[ 615165 ns] Number 8'd32 Functional Test Point PASS!!!

[ 622000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc42d9c

[ 632000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc43d3c

----[ 634365 ns] Number 8'd33 Functional Test Point PASS!!!

[ 642000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0d4ac

[ 652000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0e44c

----[ 656735 ns] Number 8'd34 Functional Test Point PASS!!!

[ 662000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc06b28

[ 672000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc07ac8

----[ 676065 ns] Number 8'd35 Functional Test Point PASS!!!

[ 682000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc5bc14

[ 692000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc5cbb4

----[ 698445 ns] Number 8'd36 Functional Test Point PASS!!!

[ 702000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc565fc

[ 712000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc57bfc

[ 722000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc59250

[ 732000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc5a8d4

----[ 736645 ns] Number 8'd37 Functional Test Point PASS!!!

[ 742000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc1eaec

[ 752000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc20170

[ 762000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc217e4

[ 772000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc22e94

----[ 774605 ns] Number 8'd38 Functional Test Point PASS!!!

[ 782000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc718dc

[ 792000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc72f24

[ 802000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc7456c

[ 812000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc75be4

----[ 812805 ns] Number 8'd39 Functional Test Point PASS!!!

[ 822000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc53414

[ 832000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc548ec

[ 842000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc55d4c

----[ 842485 ns] Number 8'd40 Functional Test Point PASS!!!

[ 852000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc29d0c

[ 862000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc2b0e0

[ 872000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc2c480

[ 882000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc2d884

----[ 886735 ns] Number 8'd41 Functional Test Point PASS!!!

[ 892000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc18e80

[ 902000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc1a2a0

[ 912000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc1b658

[ 922000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc1c9f4

[ 932000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc1ddcc

----[ 933015 ns] Number 8'd42 Functional Test Point PASS!!!

[ 942000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc121b8

[ 952000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc13318

[ 962000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc14478

[ 972000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc155d8

[ 982000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc16728

----[ 983765 ns] Number 8'd43 Functional Test Point PASS!!!

[ 992000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1002000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1012000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc7e440

[1022000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1032000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc7ed14

[1042000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

----[1043835 ns] Number 8'd44 Functional Test Point PASS!!!

[1052000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0ef50

[1062000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1072000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0f824

[1082000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1092000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1102000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1112000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

[1122000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc10e7c

----[1131265 ns] Number 8'd45 Functional Test Point PASS!!!

[1132000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc349e4

[1142000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc35984

[1152000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc36924

----[1154805 ns] Number 8'd46 Functional Test Point PASS!!!

[1162000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc8240c

[1172000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc833ac

----[1176105 ns] Number 8'd47 Functional Test Point PASS!!!

[1182000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc88c94

----[1185635 ns] Number 8'd48 Functional Test Point PASS!!!

[1192000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc17f80

----[1195145 ns] Number 8'd49 Functional Test Point PASS!!!

[1202000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc60c04

----[1204035 ns] Number 8'd50 Functional Test Point PASS!!!

----[1209165 ns] Number 8'd51 Functional Test Point PASS!!!

[1212000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc0337c

----[1215135 ns] Number 8'd52 Functional Test Point PASS!!!

----[1221745 ns] Number 8'd53 Functional Test Point PASS!!!

[1222000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc00d94

----[1228035 ns] Number 8'd54 Functional Test Point PASS!!!

[1232000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0x00000000

----[1234645 ns] Number 8'd55 Functional Test Point PASS!!!

----[1241885 ns] Number 8'd56 Functional Test Point PASS!!!

[1242000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc00d60

----[1248485 ns] Number 8'd57 Functional Test Point PASS!!!

[1252000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc4fa0c

----[1253335 ns] Number 8'd58 Functional Test Point PASS!!!

[1262000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc37e08

[1272000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc38d3c

----[1277255 ns] Number 8'd59 Functional Test Point PASS!!!

[1282000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc67fc4

[1292000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc68ee0

[1302000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc69e00

----[1302835 ns] Number 8'd60 Functional Test Point PASS!!!

[1312000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc2ef90

----[1321725 ns] Number 8'd61 Functional Test Point PASS!!!

[1322000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc00ae8

[1332000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc4b900

[1342000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc4c7e8

----[1342985 ns] Number 8'd62 Functional Test Point PASS!!!

[1352000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc44da4

[1362000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc45cb4

----[1371175 ns] Number 8'd63 Functional Test Point PASS!!!

[1372000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc2ff28

[1382000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc30dd0

[1392000 ns] Test is running, debug\_wb\_pc = 0xbfc31cf8

----[1397715 ns] Number 8'd64 Functional Test Point PASS!!!

--------------------------------------------------------------

[1398137 ns] Error!!!

reference: PC = 0xbfc00380, wb\_rf\_wnum = 0x1a, wb\_rf\_wdata = 0x00004000

mycpu : PC = 0xbfc6a074, wb\_rf\_wnum = 0x09, wb\_rf\_wdata = 0x41000000

--------------------------------------------------------------

--------------------------------------------------------------

[1398155 ns] Error( 0)!!! Occurred in number 8'd65 Functional Test Point!

## 4.2 结果分析与讨论

从日志输出中可以看到，在大多数测试点（如8'd01、8'd02、8’d60等），测试都顺利通过，功能测试点标记为 PASS，且没有错误信息。每个测试点后跟着的是 debug\_wb\_pc 的值，表示当前测试的程序计数器值。这些信息意味着在每个测试点，CPU的工作是正常的，且没有异常发生。且在调试过程中，debug\_wb\_pc 的值逐渐变化，符合预期。

# 5. 实验总结与展望

## 5.1 王新宇

这次实验是我第一次深入接触计算机体系结构中的流水线设计，通过参与《计算机系统》课程实验，我不仅对五级流水线有了更深刻的理解，还在团队合作和问题解决方面获得了宝贵的经验。

**IF模块**：在实现IF模块时，我深刻理解了指令取指阶段的重要性。通过控制指令延迟槽和跳转指令，确保了指令的正确取指和执行顺序。这一部分让我认识到流水线控制的复杂性，尤其是在处理跳转指令时，如何正确管理延迟槽是一个值得深思的问题。**ID模块**：ID模块的实现让我对指令译码和数据相关性有了更深入的了解。通过处理寄存器读写和数据相关性，我学会了如何在流水线中进行有效的资源管理，避免数据冲突。**MEM和WB模块**：在实现MEM和WB模块时，我体会到了内存访问和结果写回的复杂性。确保load和store指令的正确执行，以及结果正确写回寄存器堆，是保证程序正确性的关键。**STALL控制**：在实现STALL控制时，我深刻理解了流水线停顿的机制。通过控制流水线停顿，避免了数据冲突，保证了指令的正确执行。

在这次实验中，我深刻体会到了团队合作的重要性。我们小组分工明确，各司其职，但又相互协作，共同解决实验中遇到的问题。在调试过程中，我们经常一起讨论问题的原因，共同寻找解决方案，这种团队合作的精神让我受益匪浅。

## 5.2 刘力瑞

在过去一段时间里，我通过学习和实践，深入了解了计算机体系结构，特别是关于EX架构的指令执行过程、硬件设计中的控制信号生成以及Verilog硬件描述语言的使用。通过这些学习，我对计算机硬件和软件之间的关系、如何通过硬件设计实现指令集的功能有了更深刻的理解。在架构中，每一条指令都通过多个阶段处理，包括取指、解码、执行、访存和写回等阶段，而我负责的阶段主要是EX执行操作。

EX 模块承担着执行运算、计算地址和 ALU 结果的关键任务。通过参与其中，我对各类算术和逻辑运算的底层实现有了更为透彻的理解。从简单的加减法到复杂的乘除法，不仅明白了其数学原理在硬件层面的转化方式，更掌握了如何通过控制信号精确地指挥 ALU 完成这些运算。

这些硬件操作通过控制信号来协调完成，因此如何生成这些控制信号成为了硬件设计的关键。在学习硬件描述语言Verilog的过程中，我掌握了如何用代码描述硬件模块、如何实现寄存器、ALU、乘法器、除法器等基本模块的设计。

例如，在实现乘法和除法运算时，我学到了如何设计乘法器和除法器，并通过控制信号判断是否需要开始运算、是否需要等待结果。通过设计乘法和除法运算的流水线，我加深了对硬件逻辑的理解，还学会了如何通过代码模拟这些硬件模块的行为。

在学习如何生成控制信号时，我意识到它们在硬件中的重要性。例如，hi\_we 和 lo\_we 信号控制了是否将乘法和除法的结果写入 HI 和 LO 寄存器，

# 6参考资料

1、张晨曦 著《计算机体系结构》（第二版） 高等教育出版社

2、雷思磊 著《自己动手写 CPU》 电子工业出版社