浙江大学

本科实验报告

课程名称：	计算机体系结构
姓　　名：	姜雨童
学　　院：	计算机科学与技术学院
专　　业：	计算机科学与技术
邮　　箱：	3220103450@zju.edu.cn
QQ　　号：	1369218489
电　　话：	18867766468
指导教师：	王小航
报告日期：	2024 年 10 月 7 日

浙江大学实验报告

课程名称：计算机体系结构 实验类型：综合

实验项目名称：Lab01 Pipelined CPU supporting RISC-V RVI32 Instructions

学生姓名：姜雨童 学号：33220103450 同组学生姓名：/

实验地点：玉泉曹西 301 实验日期：2024 年 10 月 7 日

一、目标与原理

1-1 实验目标

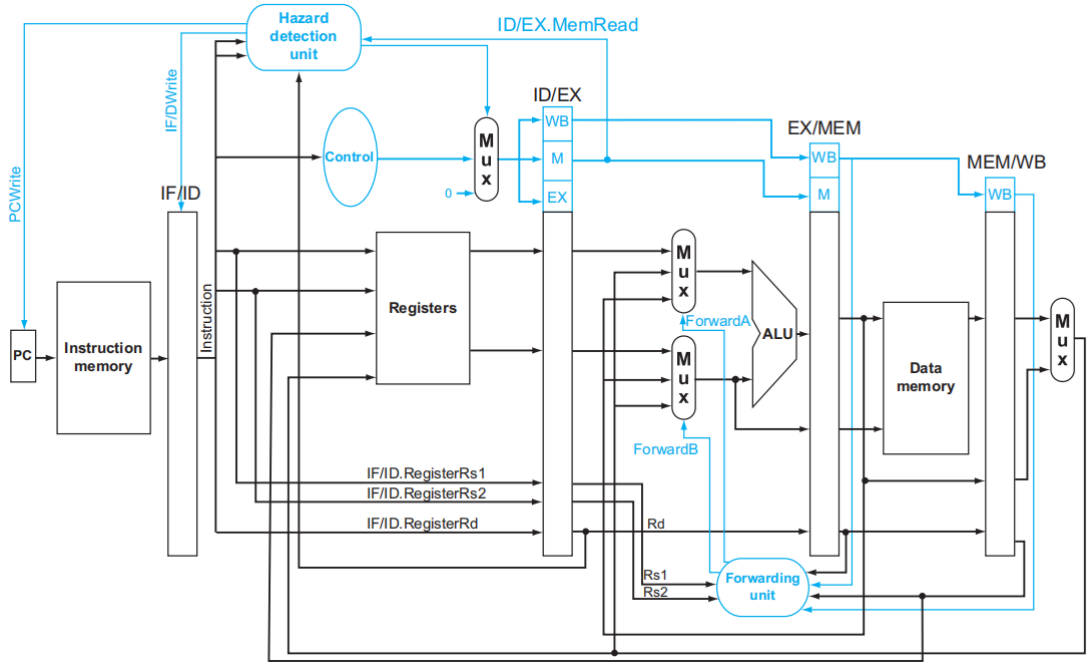
- Understand RISC-V RV32I instructions
- Master the design methods of pipelined CPU executing RV32I instructions
- Master the method of Pipeline Forwarding Detection and bypass unit design
- Master the methods of 1-cycle stall of Predict-not-taken branch design
- Master methods of program verification of Pipelined CPU executing RV32I instructions

1-2 实验原理

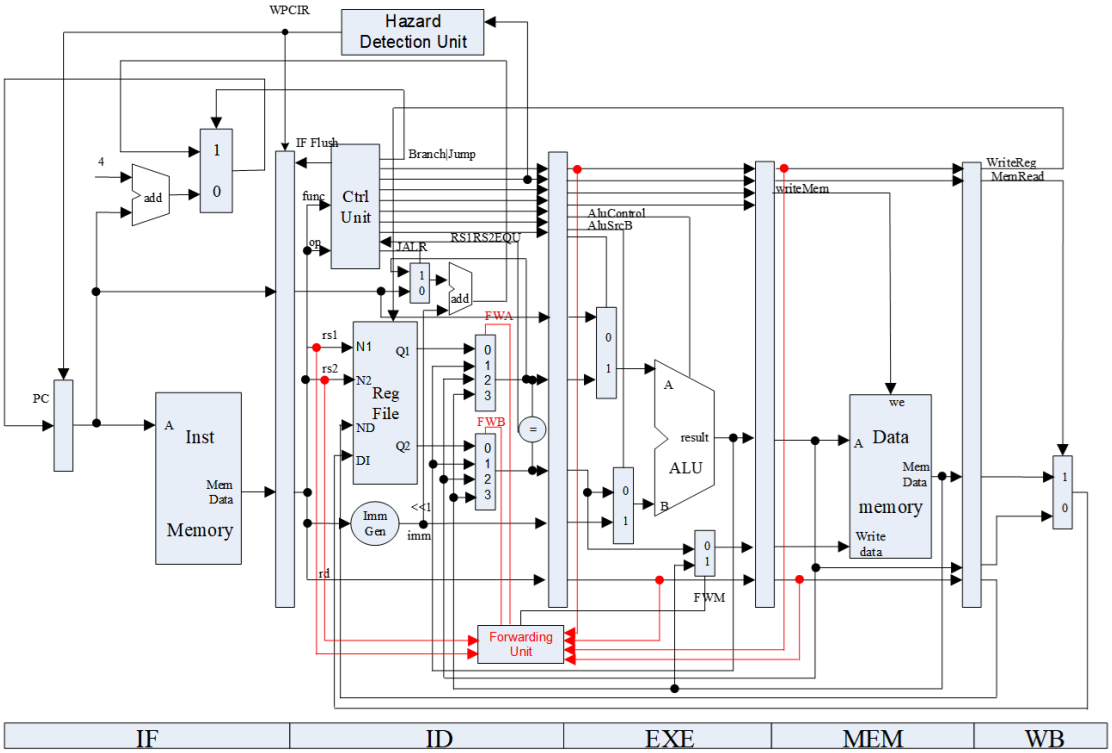
在流水线中有三种 hazards：data hazard, structure hazard 和 control hazard。
而实验中设计的五级流水线主要解决 data hazard 和 control hazard，解决方法为 forwarding、stall 和 predict-not-taken。

1-2-1 forwarding

常见的 forwarding 实现为：将 MEM 阶段的 ALU 结果/WB 阶段的 ALU 结果/MemoryLoad 的结果 forward 给 EXE 阶段的 forwarding unit（图 1-1）。
与之不同的是，本实验提供的代码中，forwarding 的判断位于 ID 阶段，因此需要将 EX 和 MEM 阶段的数据 forward 给 ID 阶段（图 1-2）。此时，供选择的值（FWA/FWB）分别为 reg 中的值、EXE 阶段 ALU 结果、MEM 阶段 ALU 结果，以及 MEM 阶段 memory 中的值。



（图 1-1）



（图 1-2）

1-2-2 stall

Forwarding 无法解决的情况，需要 stall（插入空指令）。
通过 IF 和 ID 阶段维持当前指令，冲刷后续阶段指令来实现。

1-2-3 predict-not-taken

流水线假设不发生跳转，继续按顺序执行指令。
若在 ID 阶段得知 Branch 结果时，发现预测错误，则 flush 下一条错误的指令（具体表现为 flush IF/ID pipeline register）。

二、操作方法与实验步骤

本实验框架代码已经给出，只需要补全以下四个文件中的代码：
CtrlUnit.v、HazardDetectionUnit.v、cmp_32.v、RV32core.v

2-1 cmp_32.v

本模块用于判断传入两个值的大小关系是否符合传入信号 ctrl（如 3'b001 代表两个值相等），符合时返回 1，否则返回 0。

```
assign c = (EQ  & res_EQ |
            NE  & res_NE |
            LT  & res_LT |
            LTU & res_LTU|
            GE  & res_GE |
            GEU & res_GEU
    );          //to fill sth. in ()
```

2-2 CtrlUnit.v

根据上下文补全指令解码部分（仅展示部分代码，下同）：

```
    wire BEQ = Bop & funct3_0;                          //to fill sth. in
    wire BNE = Bop & funct3_1;                          //to fill sth. in
    wire BLT = Bop & funct3_4;                          //to fill sth. in
```

仿照 ImmSel 补全 cmp_ctrl 信号（比较结果用来确定是否跳转）：

```
assign Branch = (cmp_res & B_valid) | JAL | JALR;
//to fill sth. in 2.再这里用比较后的结果确定是否跳转
    parameter cmp_EQ  = 3'b001; // copied from cmp_32.v
    parameter cmp_NE  = 3'b010;
    parameter cmp_LT  = 3'b011;
    parameter cmp_LTU = 3'b100;
    parameter cmp_GE  = 3'b101;
    parameter cmp_GEU = 3'b110;
    assign cmp_ctrl = {3{BEQ }} & cmp_EQ |
                      {3{BNE }} & cmp_NE |
                      {3{BLT }} & cmp_LT |
                      {3{BLTU}} & cmp_LTU|
                      {3{BGE }} & cmp_GE |
```

```
                    {3{BGEU}} & cmp_GEU;
 //to fill sth. in 1.先这里判断应该怎么比较
```

根据 DataPath 补全信号：

```
assign ALUSrc_A = ~(JAL | JALR | AUIPC);          //to fill sth. in
assign ALUSrc_B = I_valid | L_valid | S_valid | LUI | AUIPC;      //to fill sth. in
```

区分 hazard 类型（一个原因在于提前到 ID 阶段判断时，需要用 hazard 类型来怕阶段 MEM 阶段 forward 的是 ALU 结果还是 memory 中的值）：

```
    parameter hazard_optype_ALU = 2'd1;
    // copied from PPT page-40, 和 HazardDetectionUnit.v 保持一致
    parameter hazard_optype_LOAD = 2'd2;
    parameter hazard_optype_STORE = 2'd3;
    assign hazard_optype = hazard_optype_ALU & {2{R_valid | I_valid | LUI | AUIPC | JAL
          | JALR}} | hazard_optype_LOAD & {2{L_valid}} |
           hazard_optype_STORE & {2{S_valid}};
     //to fill sth. in, ID 阶段解码指令是 ALU/LOAD/STORE
```

2-3 RV32core.v

根据 DataPath 补全模块调用代码（判断是否跳转 Branch）：

```
MUX2T1_32 mux_IF(.I0(PC_4_IF),.I1(jump_PC_ID),.s(Branch_ctrl),.o(next_PC_IF));
//to fill sth. in () +branch prediction, 0 不跳, 1 跳
```

根据图 1-2 补全模块调用代码（forward 部分）：

```
MUX4T1_32
mux_forward_A(.I0(rs1_data_reg),.I1(ALUout_EXE),.I2(ALUout_MEM),.I3(Datain_MEM),
//to fill sth. in ()
        .s(forward_ctrl_A),.o(rs1_data_ID));

MUX4T1_32
mux_forward_B(.I0(rs2_data_reg),.I1(ALUout_EXE),.I2(ALUout_MEM),.I3(Datain_MEM),
//to fill sth. in ()
        .s(forward_ctrl_B),.o(rs2_data_ID));
```

根绝图 1-2 补全模块调用代码（EXE 部分）：

```
MUX2T1_32 mux_A_EXE(.I0(PC_EXE),.I1(rs1_data_EXE),.s(ALUSrc_A_EXE),.o(ALUA_EXE));
//to fill sth. in ()*
MUX2T1_32 mux_B_EXE(.I0(rs2_data_EXE),.I1(Imm_EXE),.s(ALUSrc_B_EXE),.o(ALUB_EXE));
//to fill sth. in ()
```

2-4 HazardDetectionUnit.v

处理 hazard（包括 forward，stall 和 predict-not-taken-branch）

判断是否符合 forward 或 stall 的情况：

```
    wire forward_A_1 = rs1use_ID && rd_EXE && rs1_ID == rd_EXE && hazard_optype_EXE ==
hazard_optype_ALU; // ALU_EXE
    wire forward_A_2 = rs1use_ID && rd_MEM && rs1_ID == rd_MEM && hazard_optype_MEM ==
hazard_optype_ALU; // ALU_MEM
    wire forward_A_3 = rs1use_ID && rd_MEM && rs1_ID == rd_MEM && hazard_optype_MEM ==
hazard_optype_LOAD; // LOAD_MEM
    wire forward_A_stall = rs1use_ID && rd_EXE && rs1_ID == rd_EXE && hazard_optype_EXE
== hazard_optype_LOAD && hazard_optype_ID != hazard_optype_STORE;
    // 要用上一条指令 load 的结果
```

确定 forwardA 是三种情况中的哪一种：

```
assign forward_ctrl_A = {2{forward_A_1}} & 2'b01 |
                            {2{forward_A_2}} & 2'b10 |{2{forward_A_3}} & 2'b11 ;
```

Stall：IF 和 ID 阶段维持当前指令，冲刷后续阶段的指令

```
    // Case: stall
    wire stall = forward_A_stall | forward_B_stall;
    assign PC_EN_IF = ~stall; // PC 寄存器不会更新，IF 阶段维持当前指令
    assign reg_FD_stall = stall; // ID 阶段维持当前指令
    assign reg_DE_flush = stall; // EX 阶段不会执行 ID 阶段的指令

    assign forward_ctrl_ls = rs2_EXE == rd_MEM && hazard_optype_MEM == hazard_optype_LOAD
&& hazard_optype_EXE == hazard_optype_STORE; // MEM 阶段 forward 的是 LOAD 指令
```

branch：ID 阶段知道结果错误，flush 后一条指令

```
    // Case: branch
    assign reg_FD_flush = Branch_ID; // ID 阶段知道结果错误，flush 后一条指令
```

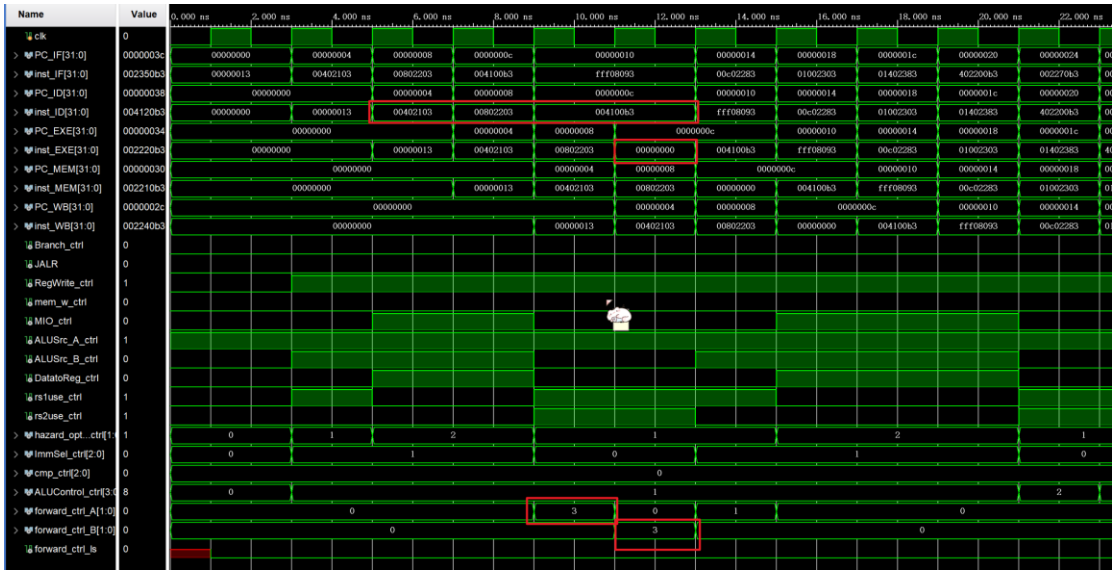
三、实验结果与分析

3-1 仿真结果

仿真结果完全符合预期，这里列举几个例子佐证：

Forward/stall:
截图中用红色方框框出对应指令和 forward/stall 信号。

00402103	4		lw x2, 4(x0)
00802203	8		lw x4, 8(x0)
004100b3	C		add x1, x2, x4



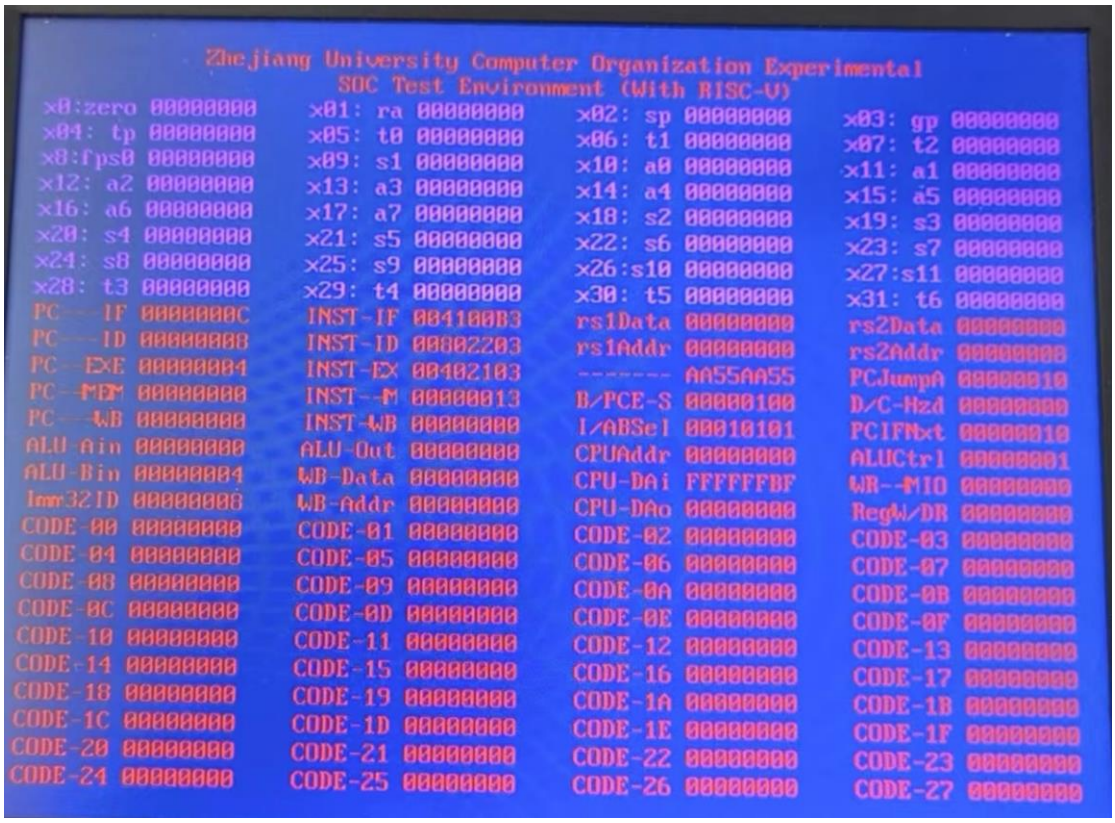
branch:

截图中用红色方框框出相关指令，粉色方框框出 branch 信号（包含了 stall）。

fff3b093	78		sltiu x1, x7, -1
00520863	7C		beq x4,x5,label0
00420663	80		beq x4,x4,label0
00000013	84		addi x0,x0,0
00000013	88		addi x0,x0,0
00421863	8C	label0:	bne x4,x4,label1
00521663	90		bne x4,x5,label1

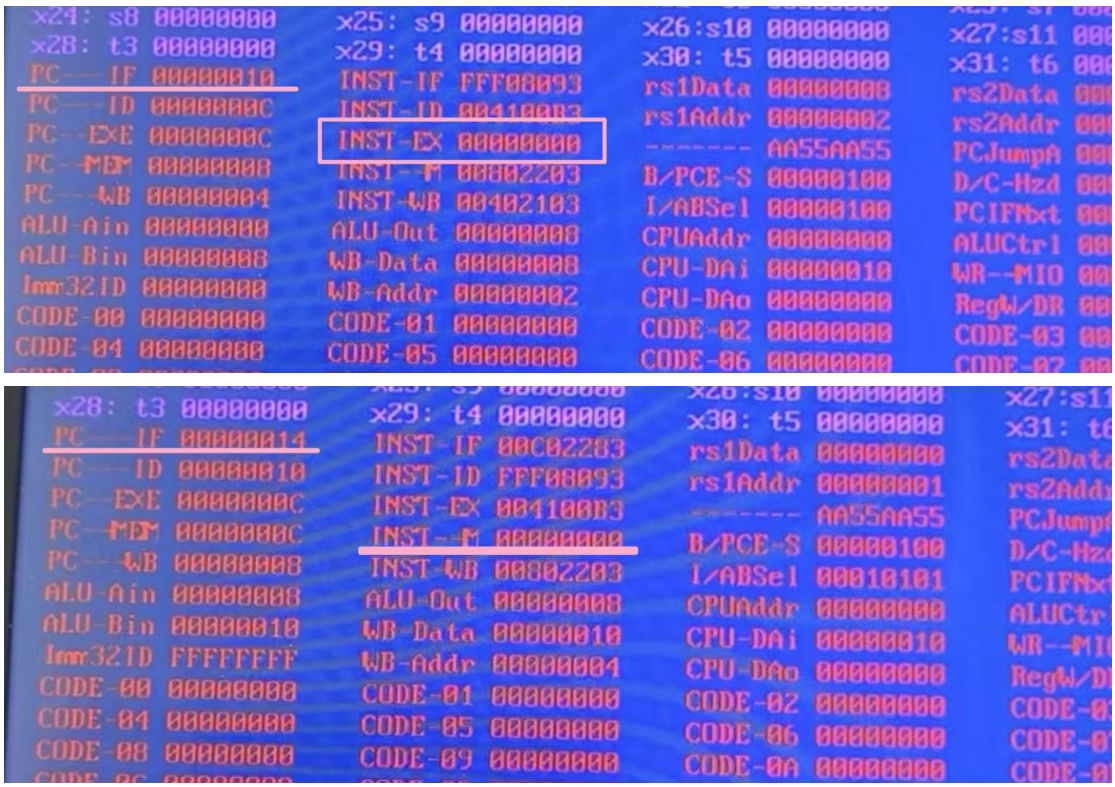
3-2 上板验证

上板后界面如下：



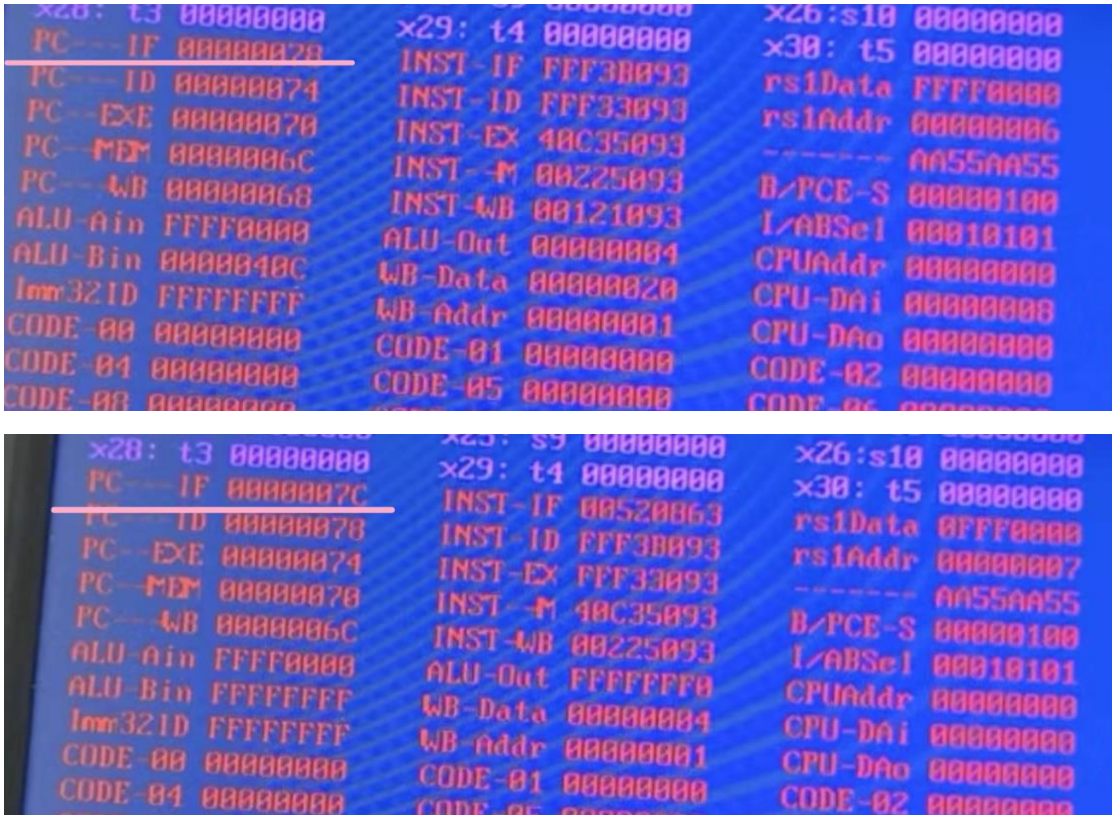
下面截取连续几帧画面对报告 3-1 仿真结果中的两个例子进行说明：

Forward/stall（IF 阶段 PC 从 0C 到 14）：
第三张图可以看出，IF 和 ID 指令不变，EXE 阶段插入了空指令。



Branch（IF 阶段 PC 从 78 到 84）：

其中 PC_IF 为 80 和 8C 的帧很快被跳过，对视频进行慢速处理后截图，因此部分数字不稳定，有闪动或是显示不清的情况。



四、讨论、心得

本次实验基本上都是上学期计组所学的内容，因此难度并没有那么高。但是各种判断条件/mux 选择的线路都需要对照线路图仔细填写，一旦有细节出错就可能整个跑不出来（下图），因此实验过程还是略有些繁琐。