# 微系统设计方案综述

## 总体设计概述

本微系统为 Verilog 实现的 MIPS 微系统，包括流水线 CPU、Bridge、计时器，CPU 支持的指令集包括 `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, mfc0, mtc0, eret`。为了实现这些功能，CPU 主要包含了 `IFU, GRF, CP0, DM, ALU, MDU, IF_ID, ID_EX, EX_MEM, MEM_WB, SFU, DEC, CTRL` 这些模块。

## 关键模块定义

### 1.IFU

#### 介绍

取指令单元，内部包括 PC(程序计数器)、IM(指令存储器)及相关逻辑，其中 PC 具有同步复位功能，IM 的容量为 容量为 32bit * 4096，起始地址为 0x00003000。

#### 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| nPC | I | 32 | 设置下一个 PC 值。 |
| WE | I | 1 | 使能端。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| I | O | 32 | 当前指令。 |
| PC | O | 32 | 当前 PC 值。 |

#### 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将 PC 设置为 0x00003000。 |
| 2 | 取指令 | 当时钟上升沿到来时，I 输出当前 PC 对应的指令。 |
| 3 | 取PC值 | 当时钟上升沿到来时，PC 输出当前 PC 值。 |
| 4 | 设置PC值 | 当时钟上升沿到来且使能端有效时，将 nPC 设置为当前 PC 值。 |

# 2.GRF

## 介绍

通用寄存器组，也称为寄存器文件、寄存器堆，可以存取 32 位数据，具有同步复位功能。寄存器标号为 0 到 31，其中 0 号寄存器读取的结果恒为 0。

## 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| PC | I | 32 | 当前指令的 PC 值。 |
| A1 | I | 5 | 指定 32 个寄存器中的一个，将其存储的数据读出到 RD1。 |
| A2 | I | 5 | 指定 32 个寄存器中的一个，将其存储的数据读出到 RD2。 |
| A3 | I | 5 | 指定 32 个寄存器中的一个，作为写入的目标寄存器。 |
| WD | I | 32 | 写入寄存器的数据信号。 |
| WE | I | 1 | 写使能信号，高电平有效。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| RD1 | O | 32 | 输出 A1 指定的寄存器中的数据。 |
| RD2 | O | 32 | 输出 A2 指定的寄存器中的数据。 |

## 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将所有寄存器的值设置为 0x00000000。 |
| 2 | 读数据 | 读出 A1 和 A2 地址对应寄存器中存储的数据到 RD1 和 RD2；当 WE 有效时会将 WD 的值会实时反馈到对应的 RD1 或 RD2，即内部转发。 |
| 3 | 写数据 | 当 WE 有效且时钟上升沿到来时，将 WD 的数据写入 A3 对应的寄存器中。 |

# 3.CP0

## 介绍

协处理器 0，包含 4 个 32 位寄存器，用于支持中断和异常。

## 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| A1 | I | 5 | 指定 4 个寄存器中的一个，将其存储的数据读出到 RD。 |
| A2 | I | 5 | 指定 4 个寄存器中的一个，作为写入的目标寄存器。 |
| WD | I | 32 | 写入寄存器的数据信号。 |
| nEPC | I | 32 | 目前传入的下一个 EPC 值。 |
| nExc | I | 5 | 目前传入的下一个 ExcCode 值。 |
| nBD | I | 32 | 目前传入的下一个 BD 值。 |
| HWInt | I | 6 | 外部硬件中断信号。 |
| WE | I | 1 | 写使能信号，高电平有效。 |
| ERET | I | 1 | eret 指令信号，高电平有效。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| IntReq | O | 1 | 输出当前的中断请求。 |
| RD | O | 32 | 输出 A 指定的寄存器中的数据。 |

## 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将所有寄存器的值设置为 0x00000000。 |
| 2 | 读数据 | 读出 A1 地址对应寄存器中存储的数据到 RD；当 WE 有效时会将 WD 的值会实时反馈到对应的 RD，当 ERET 有效时会将 EXL 置 0，即内部转发。 |
| 3 | 写数据 | 当 WE 有效且时钟上升沿到来时，将 WD 的数据写入 A2 对应的寄存器中。 |
| 4 | 中断处理 | 根据各种传入信号和寄存器的值判断当前是否要进行中断，将结果输出到 IntReq。 |

# 4.ALU

## 介绍

算术逻辑单元，提供 32 位的多种运算功能。

## 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| A | I | 32 | 参与 ALU 计算的第一个值。 |
| B | I | 32 | 参与 ALU 计算的第二个值。 |
| Op | I | 4 | ALU 功能的选择信号，具体见功能定义。 |
| AO | O | 32 | ALU 的计算结果。 |
| Exc | O | 1 | 计算过程中是否产生溢出。 |

## 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 按位与 | 当 Op = 0 时，AO = A & B。 |
| 2 | 按位或 | 当 Op = 1 时，AO = A \| B。 |
| 3 | 加法，忽略溢出 | 当 Op = 2 时，AO = A + B。 |
| 4 | 减法，忽略溢出 | 当 Op = 3 时，AO = A - B。 |
| 5 | 左移 16 位 | 当 Op = 4 时，AO = A << 16。 |
| 6 | 有符号比大小 | 当 Op = 5 时，AO = A < B。 |
| 7 | 无符号比大小 | 当 Op = 6 时，AO = A < B。（有符号） |
| 8 | 逻辑左移 | 当 Op = 7 时，AO = A << B[4:0]。 |
| 9 | 逻辑右移 | 当 Op = 8 时，AO = A >> B[4:0]。 |
| 10 | 算术右移 | 当 Op = 9 时，AO = A >>> B[4:0]。 |
| 11 | 异或 | 当 Op = 10 时，AO = A ^ B。 |
| 12 | 或非 | 当 Op = 11 时，AO = ~(A \| B)。 |
| 13 | 加法，不忽略溢出 | 当 Op = 12 时，AO = A + B，如果产生溢出 Exc = 1。 |
| 14 | 减法，不忽略溢出 | 当 Op = 13 时，AO = A - B，如果产生溢出 Exc = 1。 |

# 5.MDU

## 介绍

乘除块，内有 hi 和 lo 两个寄存器，可以进行乘除运算，完成相关乘除指令，并模拟乘除运算的延时。

## 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| A | I | 32 | 参与乘除运算的第一个值。 |
| B | I | 32 | 参与乘除运算的第二个值。 |
| Op | I | 4 | MDU 功能的选择信号，具体见功能定义。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| Busy | O | 1 | 当前是否正在进行乘除运算。 |
| hi | O | 32 | hi 寄存器的值。 |
| lo | O | 32 | lo 寄存器的值。 |

### 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将 MDU 中所有值设为 0x00000000。 |
| 2 | 有符号乘 | 当 Op = 1 时，将 A * B 的高 32 位和低 32 位分别写入 hi 和 lo 寄存器，延迟为 5 个时钟周期。（有符号） |
| 3 | 无符号乘 | 当 Op = 2 时，将 A * B 的高 32 位和低 32 位分别写入 hi 和 lo 寄存器，延迟为 5 个时钟周期。（无符号） |
| 4 | 有符号除 | 当 Op = 3 时，将 A / B 的余数和商分别写入 hi 和 lo 寄存器，延迟为 10 个时钟周期。（有符号） |
| 5 | 无符号除 | 当 Op = 4 时，将 A / B 的余数和商分别写入 hi 和 lo 寄存器，延迟为 10 个时钟周期。（有符号） |
| 6 | 写 hi 寄存器 | 当 Op = 7 时，将 A 写入 hi 寄存器。 |
| 7 | 写 lo 寄存器 | 当 Op = 8 时，将 A 写入 lo 寄存器。 |

## 6.DM

### 介绍

数据存储器，可以存取 32 位数据，容量为 32bit * 4096，具有同步复位功能，起始地址为 0x00000000。

### 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| PC | I | 32 | 当前指令的 PC 值。 |
| A | I | 5 | 读取或写入数据的地址。 |
| WD | I | 32 | 写入 DM 中的数据。 |
| Op | I | 2 | DM 功能的选择信号，具体见功能定义。 |
| PrRD | I | 32 | 来自计时器的输入信号。 |
| IntReq | I | 1 | 中断请求信号。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| RD | O | 32 | 根据 A 和 Op 输出对应的数据。 |
| PrWE | O | 1 | 输入到计时器的写使能信号。 |
| Exc | O | 2 | 无异常时为 0，取数异常时为 1，存数异常时为 2。 |

### 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将 DM 中所有值设为 0x00000000。 |
| 2 | 有符号读字节 | 当 Op = 0 时，输出对应字节的 32 位有符号扩展。 |
| 3 | 无符号读字节 | 当 Op = 1 时，输出对应字节的 32 位无符号扩展。 |
| 4 | 有符号读半字 | 当 Op = 2 时，输出对应半字的 32 位有符号扩展。 |
| 5 | 无符号读半字 | 当 Op = 3 时，输出对应半字的 32 位无符号扩展。 |
| 6 | 读字 | 当 Op = 4 时，输出对应字。 |
| 7 | 写字节 | 当 Op = 5 且时钟上升沿来临时，将 WD[7:0] 写入 A 对应的地址。 |
| 8 | 写半字 | 当 Op = 6 且时钟上升沿来临时，将 WD[15:0] 写入 A 对应的地址。 |
| 9 | 写字 | 当 Op = 7 且时钟上升沿来临时，将 WD 写入 A 对应的地址。 |

## 7.IF_ID

### 介绍

I 级和 D 级间的流水线寄存器，同时产生 D 级的控制信号。

### 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| nI | I | 32 | 下一个指令。 |
| nPC | I | 32 | 下一个 PC 值。 |
| WE | I | 1 | 使能端 |
| nBD | I | 1 | 下一个 BD 值。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| I | O | 32 | 当前指令。 |
| PC | O | 32 | 当前 PC 值。 |
| BD | O | 1 | 当前 BD 值。 |
| PCSrc | O | 4 | 0：PC = PC + 4。<br>1：跳转到 beq 指令对应的跳转地址。<br>2：跳转到 jal 指令和 j 指令对应的跳转地址。<br>3：跳转到 jalr 指令和 jr 指令对应的跳转地址。<br>4：跳转到 bne 指令对应的跳转地址。<br>5：跳转到 blez 指令对应的跳转地址。<br>6：跳转到 bgtz 指令对应的跳转地址。<br>7：跳转到 bltz 指令对应的跳转地址。<br>8：跳转到 bgez 指令对应的跳转地址。 |

### 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将所有值设为 0x00000000。 |
| 2 | 读数据 | 读出各个当前寄存器对应的值。 |
| 3 | 写数据 | 当 WE 有效且时钟上升沿到来时，将各个对应的值写入寄存器中。 |

## 8.ID_EX

### 介绍

D 级和 E 级间的流水线寄存器，同时产生 E 级的控制信号。

### 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| nI | I | 32 | 下一个指令。 |
| nRD1 | I | 32 | 下一个 RD1 值。 |
| nRD2 | I | 32 | 下一个 RD2 值。 |
| nPC | I | 32 | 下一个 PC 值。 |
| nBD | I | 1 | 下一个 BD 值。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| I | O | 32 | 当前指令。 |
| RD1 | O | 32 | 当前 RD1 值。 |
| RD2 | O | 32 | 当前 RD2 值。 |
| PC | O | 32 | 当前 PC 值。 |
| BD | O | 1 | 当前 BD 值。 |
| ALUOp | O | 4 | ALU 功能的选择信号，具体见 ALU 模块的功能定义。 |
| ALUSrc | O | 3 | 0：ALU 的 A 输入端选择 RD1 输出端，ALU 的 B 输入端选择 RD2 输出端。<br>1：ALU 的 A 输入端选择 RD1 输出端，ALU 的 B 输入端选择 I[15:0] 的 32 位无符号扩展。<br>2：ALU 的 A 输入端选择 RD1 输出端，ALU 的 B 输入端选择 I[15:0] 的 32 位有符号扩展。<br>3：ALU 的 A 输入端选择 RD2 输出端，ALU 的 B 输入端选择 I[10:6]。<br>4：ALU 的 A 输入端选择 RD2 输出端，ALU 的 B 输入端选择 RD1 输出端。 |
| MDUOp | O | 3 | MDU 功能的选择信号，具体见 MDU 模块的功能定义。 |

## 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将所有值设为 0x00000000。 |
| 2 | 读数据 | 读出各个当前寄存器对应的值。 |
| 3 | 写数据 | 当时钟上升沿到来时，将各个对应的值写入寄存器中。 |

# 9.EX_MEM

## 介绍

E 级和 M 级间的流水线寄存器，同时产生 M 级的控制信号。

## 端口定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| nI | I | 32 | 下一个指令。 |
| nAO | I | 32 | 下一个 ALU 计算结果。 |
| nRD2 | I | 32 | 下一个 RD2 值。 |
| nPC | I | 32 | 下一个 PC 值。 |
| nBD | I | 1 | 下一个 BD 值。 |
| nExc | I | 5 | 下一个 ExcCode。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| I | O | 32 | 当前指令。 |
| AO | O | 32 | 当前 ALU 计算结果。 |
| RD2 | O | 32 | 当前 RD2 值。 |
| PC | O | 32 | 当前 PC 值。 |
| BD | O | 1 | 当前 BD 值。 |
| Exc | O | 5 | 当前 ExcCode。 |
| MemOp | O | 3 | DM 功能的选择信号，具体见 DM 模块的功能定义。 |
| MemtoReg | O | 2 | 0：准备写回 GRF 的 WD 输入端选择 AO 输出端。<br>1：准备写回 GRF 的 WD 输入端选择 DM 的 RD 输出端。<br>2：准备写回 GRF 的 WD 输入端选择 PC + 8。 |

## 功能定义

| 序号 | 功能名称 | 功能描述 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将所有值设为 0x00000000。 |
| 2 | 读数据 | 读出各个当前寄存器对应的值。 |
| 3 | 写数据 | 当时钟上升沿到来时，将各个对应的值写入寄存器中。 |

# 10.MEM_WB

## 介绍

M 级和 W 级间的流水线寄存器，同时产生 W 级的控制信号。

## 端口定义

| **nI** | **I** | **32** | **下一个指令。** |
|---|---|---|---|
| nPC | I | 32 | 下一个 PC 值。 |
| nWD | I | 32 | 下一个写入 GRF 的值。 |
| clk | I | 1 | 时钟信号。 |
| reset | I | 1 | 同步复位信号。 |
| I | O | 32 | 当前指令。 |
| PC | O | 32 | 当前 PC 值。 |
| WD | O | 32 | 当前写入 GRF 的值。 |
| RegWrite | O | 1 | 0：GRF 的写使能端 WE 无效。<br>1：GRF 的写使能端 WE 有效。 |
| RegDst | O | 2 | 0：准备写回 GRF 的 A3 输入端选择 I[20:16]。<br>1：准备写回 GRF 的 A3 输入端选择 I[15:11]。<br>2：准备写回 GRF 的 A3 输入端选择 31。 |
| RegWrite | O | 1 | 0：GRF 的写使能端 WE 无效。<br>1：GRF 的写使能端 WE 有效。 |

## 功能定义

| **序号** | **功能名称** | **功能描述** |
|---|---|---|
| 1 | 同步复位 | 当时钟上升沿到来且同步复位信号有效时，将所有值设为 0x00000000。 |
| 2 | 读数据 | 读出各个当前寄存器对应的值。 |
| 3 | 写数据 | 当时钟上升沿到来时，将各个对应的值写入寄存器中。 |

# 11.SFU

## 介绍

暂停 (Stall) 和 转发 (Forward) 的控制单元，产生两者的控制信号。

## 端口与功能定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| if_id_I | I | 32 | IF/ID 流水线寄存器当前的指令。 |
| id_ex_I | I | 32 | ID/EX 流水线寄存器当前的指令。 |
| ex_mem_I | I | 32 | EX/MEM 流水线寄存器当前的指令。 |
| mem_wb_I | I | 32 | MEM/WB 流水线寄存器当前的指令。 |
| Busy | I | 1 | 乘除块的 Busy 信号。 |
| Start | I | 1 | 乘除块的 Start 信号。 |
| Stall | O | 1 | 暂停信号。 |
| F_if_id_rs | O | 3 | 0：D 级 Rs 选择 GRF 的 RD1 输出端。<br>1：D 级 Rs 选择 ID/EX 流水线寄存器的 PC + 8 输出端。<br>2：D 级 Rs 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 PC + 8 输出端。<br>3：D 级 Rs 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 AO 输出端。<br>5：D 级 Rs 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 RD2 输出端。 |
| F_if_id_rt | O | 3 | 0：D 级 Rt 选择 GRF 的 RD2 输出端。<br>1：D 级 Rt 选择 ID/EX 流水线寄存器的 PC + 8 输出端。<br>2：D 级 Rt 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 PC + 8 输出端。<br>3：D 级 Rt 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 AO 输出端。<br>5：D 级 Rt 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 RD2 输出端。 |
| F_if_id_cp0rd | O | 3 | 0：D 级 Rd 选择 CP0 的 RD 输出端。<br>5：D 级 Rd 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 RD2 输出端。 |
| F_id_ex_rs | O | 3 | 0：E 级 Rs 选择 ID/EX 流水线寄存器 的 RD1 输出端。<br>2：E 级 Rs 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 PC + 8 输出端。<br>3：E 级 Rs 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 AO 输出端。<br>4：E 级 Rs 选择 MEM/WB 流水线寄存器的 WD 输出端。<br>5：E 级 Rs 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 RD2 输出端。 |
| F_id_ex_rt | O | 3 | 0：E 级 Rt 选择 ID/EX 流水线寄存器 的 RD2 输出端。<br>2：E 级 Rt 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 PC + 8 输出端。<br>3：E 级 Rt 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 AO 输出端。<br>4：E 级 Rt 选择 MEM/WB 流水线寄存器的 WD 输出端。<br>5：E 级 Rt 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 RD2 输出端。 |

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| F_id_ex_cp0rd | O | 3 | 0：E 级 Rt 选择 ID/EX 流水线寄存器 的 RD2 输出端。<br>4：E 级 Rd 选择 MEM/WB 流水线寄存器的 WD 输出端。<br>5：E 级 Rd 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 RD2 输出端。 |
| F_ex_mem_rt | O | 3 | 0：M 级 Rt 选择 EX/MEM 流水线寄存器的 WD 输出端。<br>4：M 级 Rt 选择 MEM/WB 流水线寄存器的 WD 输出端。 |

### 数据冒险分析表

| IF/ID当前指令 | | | | ID/EX (Tnew) | | | | | EX/MEM (Tnew) | | | | | MEM/WB (Tnew) | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指令类型 | 源寄存器 | Tuse | | jal 0/rd | cp0 mfc0:1/rt mtc0:1/rd | cal_i 1/rt | cal_r 1/rd | load 2/rt | jal 0/rd | cp0 mfc0:0/rt mtc0:0/rd | cal_r 0/rd | cal_i 0/rt | load 1/rt | jal 0/rd | cp0 mfc0:0/rt mtc0:0/rd | cal_r 0/rd | cal_i 0/rt | load 0/rt |
| j | rs/rt | 0 | | | 暂停 | 暂停 | 暂停 | 暂停 | | | | | 暂停 | | | | | |
| cal_r | rs/rt | 1 | | | | | | 暂停 | | | | | | | | | | |
| cal_i | rs | 1 | | | | | | 暂停 | | | | | | | | | | |
| ld | rs | 1 | | | | | | 暂停 | | | | | | | | | | |
| st | rs | 1 | | | | | | 暂停 | | | | | | | | | | |
| st | rt | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mtc0 | rt | 1 | | | | | | 暂停 | | | | | | | | | | |
| mfc0 | cp0:rd | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| eret | cp0:rd | 0 | | | 暂停 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | PC + 8 | | | | | PC + 8 | RD2 | AO | AO | | WD | WD | WD | WD | WD |
| 流水级 | 源寄存器 | 涉及指令 | 控制信号 | | | | | | | | | | | | | | | |
| IF/ID | rs | j | F_if_id_rs | | | | | | | | | | | | | | | |
| | rt | j | F_if_id_rt | | | | | | | | | | | | | | | |
| | cp0:rd | eret | F_if_id_cp0rd | | | | | | | | | | | | | | | |
| ID/EX | rs | cal_r, cal_i, ld, st | F_id_ex_rs | | | | | | | | | | | | | | | |
| | rt | cal_r, st,mtc0 | F_id_ex_rt | | | | | | | | | | | | | | | |
| | cp0:rd | mfc0 | F_id_ex_cp0rd | | | | | | | | | | | | | | | |
| EX/MEM | rt | st | F_ex_mem_rt | | | | | | | | | | | | | | | |

## 12.DEC

### 介绍

指令分类译码器，输入一个指令，返回该指令在数据冒险中对应的类型。

### 端口与功能定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| I | I | 32 | 需要分类的指令。 |
| j | O | 1 | 需要读寄存器的跳转指令。 |
| r | O | 1 | 除 `jalr, jr` 外的 R 型指令。 |
| i | O | 1 | I 型指令。 |
| ld | O | 1 | load 型指令。 |
| st | O | 1 | store 型指令。 |
| jal | O | 1 | `jal, jalr` 指令。 |
| rs | O | 5 | I[25:21]。 |
| rt | O | 5 | I[20:16]。 |
| rd | O | 5 | 如果指令为 `jal` 输出 31，否则输出 I[15:11]。 |

### 13.CTRL

#### 介绍

指令译码器，输入 Op 和 Func，输出该指令是哪个指令。本 CPU 采用分布式译码，对应控制信号的功能已在上述四个流水线寄存器中详细描述。

#### 端口与功能定义

| 端口 | 输入/输出 | 位宽 | 描述 |
| --- | --- | --- | --- |
| Op | I | 6 | 所有指令的操作码，对应 I[31:26]。 |
| Func | I | 6 | R 指令中辅助识别的操作码，对应 I[5:0]。 |
| 每种指令 | O | 1 | 判断是否是每种指令。 |

## 重要机制实现方法

### M 级处理中断

将异常信号流水到 M 级，同时结合外部中断信号，判断此时是否要进行中断，如果进行中断就清空所有流水寄存器，并将 nPC 改为 0x00004180。

这样做 MEM/WB 流水线寄存器的指令如果需要写入 GRF，可以恰好写入而不用再特殊处理。

# 测试方案

## 典型测试样例

- 取指异常：

```
.text

li $28, 0
li $29, 0

# jr PC mod 4 not 0
la $1, label1
la $2, label1
addiu $1, $1, 1
jr $1
nop
label1:

# jr PC < 0x3000
li $1, 0x2996
la $2, label2
jr $1
nop
label2:

# jr PC > 0x4ffc
li $1, 0x4fff
la $2, label3
jr $1
```

```
nop
label3:

end:j end

.ktext 0x4180
mfc0 $12, $12
mfc0 $13, $13
mfc0 $14, $14
mtc0 $2, $14
eret
ori $1, $0, 0
```

- 其它异常：

```
.text

li $28, 0
li $29, 0

lw $1, 1($0)
lh $1, 1($0)
lhu $1, 1($0)

lh $1, 0x7f00($0)
lhu $1, 0x7f04($0)
lb $1, 0x7f08($0)
lbu $1, 0x7f10($0)
lb $1, 0x7f14($0)
lb $1, 0x7f18($0)

li $2, 0x7fffffff
lw $1, 1($2)
lh $1, 1($2)
lhu $1, 1($2)
lb $1, 1($2)
lbu $1, 1($2)

lw $1, 0x3000($0)
lh $1, 0x4000($0)
lhu $1, 0x6000($0)
lb $1, 0x7f0c($0)
lbu $1, 0x7f1c($0)

sw $1, 1($0)
sh $1, 1($0)

sh $1, 0x7f00($0)
sb $1, 0x7f04($0)
sh $1, 0x7f08($0)
sb $1, 0x7f10($0)
sh $1, 0x7f14($0)
sb $1, 0x7f18($0)

li $2, 0x7fffffff
sw $1, 1($2)
```

```
sh $1, 1($2)
sb $1, 1($2)

sw $1, 0x7f08($0)
sh $1, 0x7f08($0)
sb $1, 0x7f08($0)
sw $1, 0x7f18($0)
sh $1, 0x7f18($0)
sb $1, 0x7f18($0)

sw $1, 0x3000($0)
sh $1, 0x4000($0)
sh $1, 0x6000($0)
sb $1, 0x7f0c($0)
sb $1, 0x7f1c($0)

msub $1, $2

li $1, 0x7fffffff
add $1, $1, $1
addi $1, $1, 1
li $1, 0x80000000
add $1, $1, $1
addi $1, $1, -1
sub $1, $1, $2
sub $1, $2, $1

end:j end


.ktext 0x4180
mfc0 $12, $12
mfc0 $13, $13
mfc0 $14, $14
addi $14, $14, 4
mtc0 $14, $14
eret
ori $1, $0, 0
```

- 计时器功能测试：

```
.text
li $12, 0x0c01
mtc0 $12, $12

li $1, 500
li $2, 9

sw $1, 0x7f04($0)
sw $2, 0x7f00($0)
li $1, 1000
sw $1, 0x7f14($0)
sw $2, 0x7f10($0)

lw $1, 0x7f00($0)
lw $1, 0x7f04($0)
lw $1, 0x7f10($0)
```

```
lw $1, 0x7f14($0)

li $1, 0
li $2, 0

for:
ori $3, $3, 0
beq $1, $0, for
nop
beq $2, $0, for
nop

lw $1, 0x7f00($0)
lw $1, 0x7f04($0)
lw $1, 0x7f10($0)
lw $1, 0x7f14($0)

end:j end

.ktext 0x4180
mfc0 $13, $13
li $15, 0x7fffffff
and $13, $13, $15
li $14, 1024
beq $13, $14, timer0
nop
li $14, 2048
beq $13, $14, timer1
nop
eret

timer0:
li $1, 1
sw $0, 0x7f00($0)
eret

timer1:
li $2, 2
sw $0, 0x7f10($0)
eret
```

- 延迟槽异常测试:

```
.text

li $28, 0
li $29, 0

li $1, 1
bne $0, $0, end
lw $1, 1($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lh $1, 1($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lhu $1, 1($0)
```

```
li $1, 1
bne $0, $0, end
lh $1, 0x7f00($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lhu $1, 0x7f04($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lb $1, 0x7f08($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lbu $1, 0x7f10($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lb $1, 0x7f14($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lb $1, 0x7f18($0)

li $2, 0x7fffffff
li $1, 1
bne $0, $0, end
lw $1, 1($2)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lh $1, 1($2)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lhu $1, 1($2)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lb $1, 1($2)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lbu $1, 1($2)

li $1, 1
bne $0, $0, end
lw $1, 0x3000($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lh $1, 0x4000($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lhu $1, 0x6000($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lb $1, 0x7f0c($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
lbu $1, 0x7f1c($0)

li $1, 1
bne $0, $0, end
sw $1, 1($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
```

```
sh $1, 1($0)

li $1, 1
bne $0, $0, end
sh $1, 0x7f00($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 0x7f04($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sh $1, 0x7f08($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 0x7f10($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sh $1, 0x7f14($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 0x7f18($0)

li $2, 0x7fffffff
li $1, 1
bne $0, $0, end
sw $1, 1($2)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sh $1, 1($2)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 1($2)

li $1, 1
bne $0, $0, end
sw $1, 0x7f08($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sh $1, 0x7f08($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 0x7f08($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sw $1, 0x7f18($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sh $1, 0x7f18($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 0x7f18($0)

li $1, 1
bne $0, $0, end
sw $1, 0x3000($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sh $1, 0x4000($0)
li $1, 1
```

```
bne $0, $0, end
sh $1, 0x6000($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 0x7f0c($0)
li $1, 1
bne $0, $0, end
sb $1, 0x7f1c($0)

li $1, 1
bne $0, $0, end
msub $1, $2



li $1, 0x7fffffff
li $11, 1
bne $0, $0, end
add $1, $1, $1
li $11, 1
bne $0, $0, end
addi $1, $1, 1
li $1, 0x80000000
li $11, 1
bne $0, $0, end
add $1, $1, $1
li $11, 1
bne $0, $0, end
addi $1, $1, -1
li $11, 1
bne $0, $0, end
sub $1, $1, $2
li $11, 1
bne $0, $0, end
sub $1, $2, $1

end:j end


.ktext 0x4180
mfc0 $12, $12
mfc0 $13, $13
mfc0 $14, $14
addi $14, $14, 8
mtc0 $14, $14
eret
ori $1, $0, 0
```

# 自动测试工具

## 全自动化对拍器（仅测试 P6 + mfc0 + mtc0 + IO）

- 重复下述过程无数次：
  - 使用 C++ 随机化生成一段 MIPS 汇编代码。
  - 使用魔改版的 Mars，执行汇编指令时会按照格式输出评测机需要的信息（即需要 $display 的信息）。

- 使用 Mars 的命令行代码编译并执行，将输出导入到 `m.out`。
- 使用 Mars 的命令行代码编译并将机器码导出到 `code.txt`。
- 使用 IVerilog 命令行代码将 testbench 文件转换为可进行仿真的 `tb.out` 文件。
- 使用 IVerilog 命令行代码 执行仿真，并将输出导入到 `v.out`。
- 使用 C++ 删掉 `v.out` 中多余的信息（例如一些警告和时间），将 `m.out` 和 `v.out` 分别排序。
- 使用 `fc` 将 `v.out` 和 `m.out` 进行比对，在第一组 `WA` 的数据点停下。

- 代码如下：
  - 数据生成器：

```
#include <bits/stdc++.h>

using namespace std;

vector<int> r;
mt19937 mt(time(0));
uniform_int_distribution<int>
    u16(0, (1 << 16) - 1),
    s16(-(1 << 15), (1 << 15) - 1),
    siz(0, 15),
    reg(0, 2),
    grf(1, 30),
    shift(0, 31),
    I(1, 42),
    J(43, 51),
    IJ(1, 51),
    one(11, 42),
    cp0(12, 14),
    b(0, 1);

int cnt, tot;

int getR(){
    return r[reg(mt)];
}

void solve(int i){
    int x, X;
    switch(i){
        case 1:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            printf("lb $%d, %d($%d)\n", getR(), siz(mt), x);
            tot += 2;
            break;
        case 2:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            printf("lbu $%d, %d($%d)\n", getR(), siz(mt), x);
            tot += 2;
            break;
        case 3:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            printf("lh $%d, %d($%d)\n", getR(), siz(mt) >> 1 << 1, x);
            tot += 2;
```

```
            break;
        case 4:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            printf("lhu $%d, %d($%d)\n", getR(), siz(mt) >> 1 << 1, x);
            tot += 2;
            break;
        case 5:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            X = b(mt) ? siz(mt) >> 2 << 2 : b(mt) ? 0x7f04 : 0x7f14;
            printf("lw $%d, %d($%d)\n", getR(), X, x);
            tot += 2;
            break;
        case 6:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            printf("sb $%d, %d($%d)\n", getR(), siz(mt), x);
            tot += 2;
            break;
        case 7:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            printf("sh $%d, %d($%d)\n", getR(), siz(mt) >> 1 << 1, x);
            tot += 2;
            break;
        case 8:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $0, 0\n", x);
            X = b(mt) ? siz(mt) >> 2 << 2 : b(mt) ? 0x7f04 : 0x7f14;
            printf("sw $%d, %d($%d)\n", getR(), X, x);
            tot += 2;
            break;
        case 9:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $%d, 1\n", x, x);
            printf("div $%d, $%d\n", getR(), x);
            tot += 2;
            break;
        case 10:
            x = getR();
            printf("ori $%d, $%d, 1\n", x, x);
            printf("divu $%d, $%d\n", getR(), x);
            tot += 2;
            break;
        case 11:
            printf("add $%d, $0, $%d\n", getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 12:
            printf("addu $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 13:
            x = getR();
            printf("sub $%d, $%d, $%d\n", getR(), x, x);
            tot++;
            break;
```

```
        case 14:
            printf("subu $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 15:
            printf("mult $%d, $%d\n", getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 16:
            printf("multu $%d, $%d\n", getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 17:
            printf("slt $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 18:
            printf("sltu $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 19:
            printf("sll $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), shift(mt));
            tot++;
            break;
        case 20:
            printf("srl $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), shift(mt));
            tot++;
            break;
        case 21:
            printf("sra $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), shift(mt));
            tot++;
            break;
        case 22:
            printf("sllv $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 23:
            printf("srlv $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 24:
            printf("srav $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 25:
            printf("and $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 26:
            printf("or $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 27:
            printf("xor $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
            tot++;
            break;
        case 28:
            printf("nor $%d, $%d, $%d\n", getR(), getR(), getR());
```

```
            tot++;
            break;
        case 29:
            printf("addi $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), 0);
            tot++;
            break;
        case 30:
            printf("addiu $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), s16(mt));
            tot++;
            break;
        case 31:
            printf("andi $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), u16(mt));
            tot++;
            break;
        case 32:
            printf("ori $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), u16(mt));
            tot++;
            break;
        case 33:
            printf("xori $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), u16(mt));
            tot++;
            break;
        case 34:
            printf("lui $%d, %d\n", getR(), u16(mt));
            tot++;
            break;
        case 35:
            printf("slti $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), s16(mt));
            tot++;
            break;
        case 36:
            printf("sltiu $%d, $%d, %d\n", getR(), getR(), s16(mt));
            tot++;
            break;
        case 37:
            printf("mfhi $%d\n", getR());
            tot++;
            break;
        case 38:
            printf("mflo $%d\n", getR());
            tot++;
            break;
        case 39:
            printf("mthi $%d\n", getR());
            tot++;
            break;
        case 40:
            printf("mtlo $%d\n", getR());
            tot++;
            break;
        case 41:
            printf("mfc0 $%d, $%d\n", getR(), cp0(mt));
            tot++;
            break;
        case 42:
            printf("mtc0 $%d, $%d\n", getR(), b(mt) ? 12 : 14);
            tot++;
            break;
```

```
        case 43:
            printf("beq $%d, $%d, label%d\n", getR(), getR(), ++cnt);
            solve(I(mt));
            solve(I(mt));
            printf("label%d: ", cnt);
            solve(I(mt));
            tot++;
            break;
        case 44:
            printf("bne $%d, $%d, label%d\n", getR(), getR(), ++cnt);
            solve(I(mt));
            solve(I(mt));
            printf("label%d: ", cnt);
            solve(I(mt));
            tot++;
            break;
        case 45:
            printf("blez $%d, label%d\n", getR(), ++cnt);
            solve(I(mt));
            solve(I(mt));
            printf("label%d: ", cnt);
            solve(I(mt));
            tot++;
            break;
        case 46:
            printf("bgtz $%d, label%d\n", getR(), ++cnt);
            solve(I(mt));
            solve(I(mt));
            printf("label%d: ", cnt);
            solve(I(mt));
            tot++;
            break;
        case 47:
            printf("bltz $%d, label%d\n", getR(), ++cnt);
            solve(I(mt));
            solve(I(mt));
            printf("label%d: ", cnt);
            solve(I(mt));
            tot++;
            break;
        case 48:
            printf("bgez $%d, label%d\n", getR(), ++cnt);
            solve(I(mt));
            solve(I(mt));
            printf("label%d: ", cnt);
            solve(I(mt));
            tot++;
            break;
        case 49:
            printf("j label%d\n", ++cnt);
            solve(I(mt));
            solve(I(mt));
            printf("label%d: ", cnt);
            solve(I(mt));
            tot++;
            break;
        case 50:
            printf("jal label%d\n", ++cnt);
```

```
            X = getR();
            printf("ori $%d, $0, 16\n", X);
            solve(one(mt));
            printf("label%d: addu $%d, $%d, $31\n", cnt, X, X);
            printf("jr $%d\n", X);
            puts("nop");//solve(I(mt));
            tot += 4;
            break;
        case 51:
            printf("jal label%d\n", ++cnt);
            X = getR();
            printf("ori $%d, $0, 16\n", X);
            solve(one(mt));
            printf("label%d: addu $%d, $%d, $31\n", cnt, X, X);
            printf("jalr $%d, $%d\n", getR(), X);
            puts("nop");//solve(I(mt));
            tot += 4;
            break;
    }
}

int main(){
    r.push_back(grf(mt)), r.push_back(grf(mt)), r.push_back(grf(mt));
    freopen("test.asm", "w", stdout);
    puts("ori $28, $0, 0");
    puts("ori $29, $0, 0");
    puts("mtc0 $0, $12");
    while(tot < 900) solve(IJ(mt));
}
```

- 格式处理器：

```
#include <bits/stdc++.h>
#define maxn 100086

using namespace std;

vector<string> v, w;
char s[maxn];

int main(){
    freopen("v.out", "r", stdin);
    while(gets(s) != NULL){
        string S = s;
        v.push_back(s);
    }
    freopen("v.out", "w", stdout);

    for(int i = 0;i < v.size();i++){
        if(v[i].length() <= 20 || v[i][20] != '@') continue;
        v[i] = v[i].substr(20);
        if(v[i][11] == '$' && v[i][12] == ' ' && v[i][13] == '0')
continue;
        w.push_back(v[i]);
    }
    sort(w.begin(), w.end());
    for(int i = 0;i < w.size();i++) printf("%s\n", w[i].c_str());
```

```
    v.clear();
    freopen("m.out", "r", stdin);
    while(gets(s) != NULL){
        string S = s;
        v.push_back(s);
    }
    freopen("m.out", "w", stdout);
    sort(v.begin(), v.end());
    for(int i = 0;i < v.size();i++){
        if(v[i][0] == '@') printf("%s\n", v[i].c_str());
    }
}
```

- 评测代码：

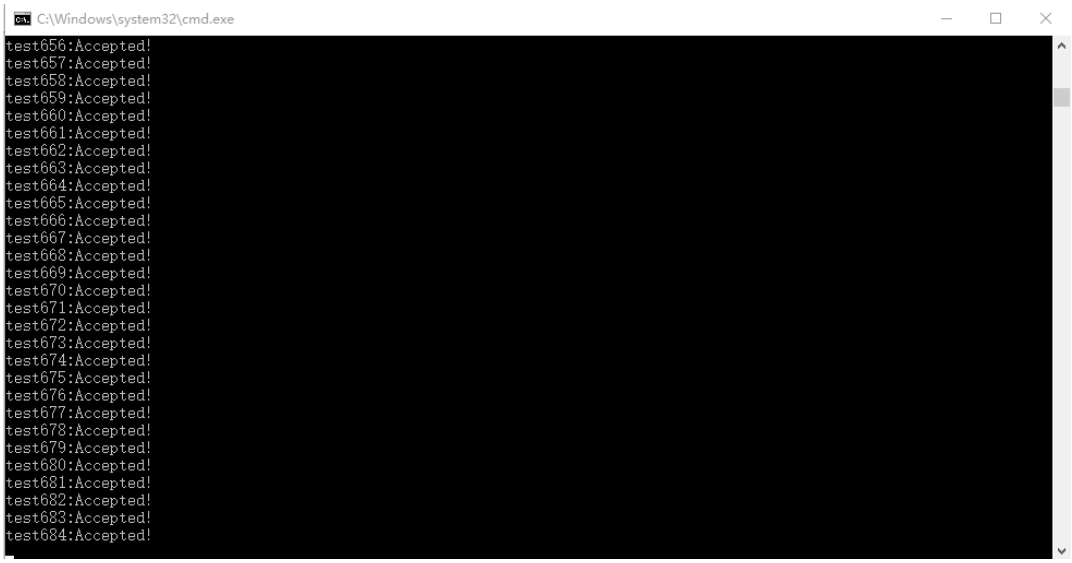
```
#include <bits/stdc++.h>

using namespace std;

char s[10086];
int cnt = 0;

int main(){
    while(1){
        system("gen.exe");
        system("java -jar Mars_Changed.jar db mc CompactDataAtZero nc
test.asm > m.out");
        system("java -jar Mars_Changed.jar mc CompactDataAtZero a dump .text
HexText code.txt test.asm > log.txt");
        system("iverilog -o tb.out -y D:\\coding\\CO\\Verilog\\P7
D:\\coding\\CO\\Verilog\\P7\\tb.v");
        system("vvp tb.out > v.out");
        system("del.exe");
        system("fc v.out m.out > log.txt");
        freopen("log.txt", "r", stdin);
        gets(s), gets(s);
        printf("test%d:", ++cnt);
        if(s[0] != 'F'){
            puts("Wrong Answer!");
            break;
        }
        puts("Accepted!");
    }
}
```

- 效果图如下：

- 


# 思考题

1. 我们计组课程一本参考书目标题中有“硬件/软件接口”接口字样，那么到底什么是“硬件/软件接口”？（Tips：什么是接口？和我们到现在为止所学的有什么联系？）
   - “硬件/软件接口”是指令（机器码）。硬件实现了一些功能，并按照规约可以被相应的指令所操控。软件通过规约使用相应的指令操控硬件完成相应的功能，从而达到软件所期望的效果。指令在这个过程中实现了硬件软件的对接，因此是“硬件/软件接口”。
2. 在我们设计的流水线中，DM 处于 CPU 内部，请你考虑现代计算机中它的位置应该在何处。
   - 位于 CPU 外部和各种外接设备中。
3. BE 部件对所有的外设都是必要的吗？
   - 不是，只有对**字节/半字**有存取需求的才有必要。
4. 请阅读官方提供的定时器源代码，阐述两种中断模式的异同，并分别针对每一种模式绘制状态转移图。
   - 见计时器说明文档。
5. 请开发一个主程序以及定时器的exception handler。整个系统完成如下功能：
   1. 定时器在主程序中被初始化为模式0；
   2. 定时器倒计数至0产生中断；
   3. handler设置使能Enable为1从而再次启动定时器的计数器。2及3被无限重复。
   4. 主程序在初始化时将定时器初始化为模式0，设定初值寄存器的初值为某个值，如100或1000。（注意，主程序可能需要涉及对CP0.SR的编程，推荐阅读过后文后再进行。）

      ```
      .text
      li $12, 0x0401
      mtc0 $12, $12
      li $1, 100
      li $2, 9
      sw $1, 0x7f04($0)
      sw $2, 0x7f00($0)

      for:j for
      nop

      .ktext 0x4180
      li $1, 100
      li $2, 9
      sw $1, 0x7f04($0)
      ```

```
sw $2, 0x7f00($0)
eret
```

6. 请查阅相关资料，说明鼠标和键盘的输入信号是如何被CPU知晓的？
    - 鼠标和键盘产生中断信号，进入中断处理区的对应位置，将输入信号从鼠标和键盘中读入寄存器。