使用 Verilog HDL 的支持中断异常的五级流水线 MIPS CPU 设计文档

17373436 林昱同

一、模块规格

1、NextPC(PC 计算)

端口定义：

端口名	方向	位宽	功能简述
curPC	Input	[31:0]	当前 PC
BrImm	Input	[31:0]	拓展后的 BrImm
JImm	Input	[25:0]	J 指令的 Imm
JRImm	Input	[31:0]	JR 指令的目标地址
Br	Input	1	是否为分支指令
Jump	Input	1	是否为跳转指令
JType	Input	1	使用哪种跳转
NPC	Output	[31:0]	下一个 PC
PCAdd8	Output	[31:0]	PC+8

功能描述

序号	功能名	功能描述

1	下一条指令	根据指令情况计算 PC

2、GRF 单元（通用寄存器单元）

端口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
A1	Input	[4:0]	读寄存器编号 1
A2	Input	[4:0]	读寄存器标号 2
A3	Input	[4:0]	写寄存器编号
WD	Input	[31:0]	写入数据
clk	Input	1	时钟信号
reset	Input	1	复位信号
WE	Input	1	写入使能
RD1	Output	[31:0]	寄存器值 1
RD2	Output	[31:0]	寄存器值 2

功能描述

序号	功能名	功能描述
1	复位	当 reset 为 1 时，所有寄存器值均变为 0
2	读取值	RD1 RD2 始终为 A1 和 A2 编号的寄存器的值
3	写入	当 clk 上升沿来临时，如 WE 为 1，向 A3 号寄存器写入 WD

3、ALU（算术逻辑单元）

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
SrcA	Input	[31:0]	数据 A
SrcB	Input	[31:0]	数据 B
ALUCtrl	Input	[7:0]	ALU 功能控制信号
Shamt	Input	[4:0]	移位控制
ALUResult	Output	[31:0]	运算结果

功能描述

序号	功能名	功能描述	
		ALUCtrl	ALUResult
0	加	00000000	SrcA+SrcB
1	减	00000001	SrcA-SrcB
2	与	00000010	SrcA&SrcB
3	或	00000011	SrcA|SrcB
4	异或	00000100	SrcA^SrcB
5	或非	00000101	!(SrcA|SrcB)
6	逻辑左移	00000110	SrcB<<shamt
7	逻辑右移	00000111	SrcB>>shamt
8	算术右移	00001000	$signed(SrcB>>>shamt)

9	等于比较	00001001	SrcA==SrcB
10	小于比较	00001010	$signed(SrcA<SrcB)
11	小于等于	00001011	$signed(SrcA<=SrcB)
12	大于比较	00001100	$signed(SrcA>SrcB)
13	大于等于	00001101	$signed(SrcA>=SrcB)
14	小于 u	00001110	$unsigned(SrcA<SrcB)
15	小于等于 u	00001111	$unsigned(SrcA<=SrcB)
16	大于 u	00010000	$unsigned(SrcA>SrcB)
17	大于等于 u	00010001	$unsigned(SrcA>=SrcB)
18	逻辑左移 v	00010010	SrcB<<SrcA
19	逻辑右移 v	00010011	SrcB>>SrcB
20	算术右移 v	00010100	SrcB>>>SrcB

4、DM（数据储存器）

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
A	Input	[31:0]	地址，只有[4:0]有意义
WD	Input	[31:0]	写入数据
Clk	Input	1	时钟信号
WE	Input	1	写入使能
Reset	Input	1	初始化信号
RD	Output	[31:0]	读取数据

功能描述

序号	功能名	功能描述
1	写入	当时钟上升沿来临时，如果 Reset 为 0 且 WE 为 1，则再 A 的位置写入 WD
2	读取	RD 始终为地址为 A 的数据的值
3	清空	Reset 为 1 时，所有数据清 0

5、EXT（拓展器）

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
Imm	Input	[15:0]	输入立即数
ExtCtrl	Input	[1:0]	Extender 控制信号
Result	Output	[31:0]	拓展结果

功能描述

序号	功能名	功能描述
1	0 拓展	`Result={{16{0}},Imm}`
2	符号拓展	`Result={{16{Imm[15]}},Imm}`
3	加载到高位	`Result={Imm, {16{0}}}`
4	1 拓展	`Result={{16{1}},Imm}`

6、BC(Branch _Control 分支控制)

分支的控制信号既关乎数据流，也关乎控制信号，因此在下面定义控制信号之前定义描述。

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
Is_Br	Input	1	是否为分支指令
RD1	Input	32	RD1
RD2	Input	32	RD2
RT	Input	5	RT
Br	Output	1	是否分支跳转

功能描述

序号	功能名	功能描述
1	分支判断	`Br=IsBr&~(|(RD1^RD2));`

6．SC(Save Calculator)

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
Din	Input	32	要存入的数据
Adrin	Input	32	地址
SLCtrl	Input	3	存取类型控制
Dout	Output	32	输出到 DM 的数据

Adrout	Output	32	输出到 DM 的地址
ByteEN	Output	4	要写入哪些位

功能描述

序号	功能名	功能描述
1	Save word	存入字
2	Save half	存入半字
3	Save byte	存入字节

7. LC(Load Calculator)

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
memD	Input	32	内存中读取道德数据
GRFD	Input	32	RD2
Bytesel	Input	2	地址后两位
SLCtrl	Input	3	存取控制
Dout	Output	32	输出的数据

功能描述

序号	功能名	功能描述
1	load word	读取字
2	load half	读取半字，符号拓展

3	load halfu	读取半字，无符号拓展
4	load byte	读取字节，符号拓展
5	load byteu	读取字节，无符号拓展

8．MDU(乘除运算单元)

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
Clk	Input	1	时钟信号
Reset	Input	1	复位信号
SrcA	Input	32	输入 A
SrcB	Input	32	输入 B
Start	Input	1	启动信号
MDUCtrl	Input	3	控制信号
Lo	Output	32	低 32 位结果
Hi	Output	32	高 32 位结果
Busy	Output	1	Busy 信号

功能描述

序号	功能名	功能描述
1	MULT	乘
2	MULTU	无符号成

3	DIV	除
4	DIVU	无符号除
5	MTHI/LO	存入 HI/LO

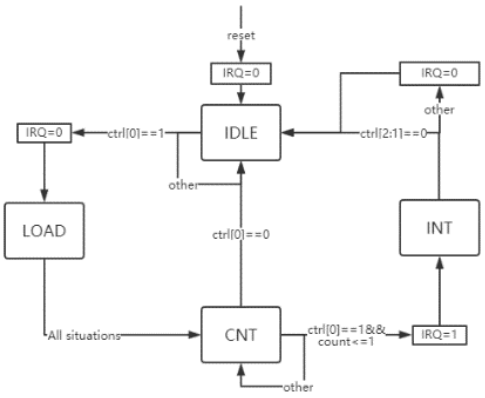
9. South Bridge(连接外部设备)

接口定义

端口名	方向	位宽	功能简述
Addr	Input	32	地址
WD	Input	32	数据
WE	Input	1	写使能
RD	Output	32	读到的数据
Dev*Addr	Output	32	传给 Dev 的地址
Dev*WD	Output	32	传给 Dev 的数据
Dev*WE	Output	1	传给 Dev 的写使能
Dev*RD	Input	32	Dev 读到的

10. Timer

完全参照《COCO 定时器设计规范-1.0.0.4.pdf》和网站上的状态图。



二、功能控制信号与数据通路

指令编码

Table A-2 MIPS32 Encoding of the Opcode Field

opcode		*bits 28..26*							
		0	1	2	3	4	5	6	7
bits 31..29		000	001	010	011	100	101	110	111
0	000	*SPECIAL* δ	*REGIMM* δ	J	JAL	BEQ	BNE	BLEZ	BGTZ
1	001	ADDI	ADDIU	SLTI	SLTIU	ANDI	ORI	XORI	LUI
2	010	*COP0* δ	*COP1* δ	*COP2* θδ	*COP1X*[1] δ	BEQL ϕ	BNEL ϕ	BLEZL ϕ	BGTZL ϕ
3	011	β	β	β	β	*SPECIAL2* δ	JALX ε	ε	*SPECIAL3*[2] δ⊕
4	100	LB	LH	LWL	LW	LBU	LHU	LWR	β
5	101	SB	SH	SWL	SW	β	β	SWR	CACHE
6	110	LL	LWC1	LWC2 θ	PREF	β	LDC1	LDC2 θ	β
7	111	SC	SWC1	SWC2 θ	*	β	SDC1	SDC2 θ	β

1. In Release 1 of the Architecture, the COP1X opcode was called COP3, and was available as another user-available coprocessor. In Release 2 of the Architecture, a full 64-bit floating point unit is available with 32-bit CPUs, and the COP1X opcode is reserved for that purpose on all Release 2 CPUs. 32-bit implementations of Release 1 of the architecture are strongly discouraged from using this opcode for a user-available coprocessor as doing so will limit the potential for an upgrade path to a 64-bit floating point unit.
2. Release 2 of the Architecture added the SPECIAL3 opcode. Implementations of Release 1 of the Architecture signaled a Reserved Instruction Exception for this opcode.

Table A-3 MIPS32 *SPECIAL* Opcode Encoding of Function Field

function		*bits 2..0*							
		0	1	2	3	4	5	6	7
bits 5..3		000	001	010	011	100	101	110	111
0	000	SLL[1]	*MOVCI* δ	*SRL* δ	SRA	SLLV	*	*SRLV* δ	SRAV
1	001	JR[2]	JALR[2]	MOVZ	MOVN	SYSCALL	BREAK	*	SYNC
2	010	MFHI	MTHI	MFLO	MTLO	β	*	β	β
3	011	MULT	MULTU	DIV	DIVU	β	β	β	β
4	100	ADD	ADDU	SUB	SUBU	AND	OR	XOR	NOR
5	101	*	*	SLT	SLTU	β	β	β	β
6	110	TGE	TGEU	TLT	TLTU	TEQ	*	TNE	*
7	111	β	*	β	β	β	*	β	β

1. Specific encodings of the *rt*, *rd*, and *sa* fields are used to distinguish among the SLL, NOP, SSNOP and EHB functions.
2. Specific encodings of the hint field are used to distinguish JR from JR.HB and JALR from JALR.HB

Table A-4 MIPS32 *REGIMM* Encoding of rt Field

rt		*bits 18..16*							
		0	1	2	3	4	5	6	7
bits 20..19		000	001	010	011	100	101	110	111
0	00	BLTZ	BGEZ	BLTZL ϕ	BGEZL ϕ	*	*	*	*
1	01	TGEI	TGEIU	TLTI	TLTIU	TEQI	*	TNEI	*
2	10	BLTZAL	BGEZAL	BLTZALL ϕ	BGEZALL ϕ	*	*	*	*
3	11	*	*	*	*	*	*	*	SYNCI ⊕

分类指令

指令集：

MIPS-C3={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}

分类

R-RD1-RD2-ALU-WD 型：ADD、ADDU、SUB、SUBU、AND、OR、XOR、NOR、SLLV、SRLV、SRAV、SLT、SLTU、

R-RD1-Shamt-ALU-WD 型：SLL、 SRL、 SRA、

R-RD1-RD2-MDU 型：MULT、 MULTU、 DIV、 DIVU、

R-MDU-WD 型：MFHI、MFLO、

R-RD1-MDU 型：MTHI、MTLO

R-RD1-J：JR、

R-RD1-J-WD：JALR、

I-RD1-Imm-ALU-WD 型：ADDI、ADDIU、SLTI、SLTIU、ANDI、ORI、XORI、

型：

I-Imm-WD 型：LUI、

I-RD1-Imm-L-WD 型：LB、LBU、LH、LHU、LW、

I-RD1-RD2-Imm-S 型：SB、SH、SW、

I-RD1-RD2-Br 型：BEQ、BNE、

I-RD1-Br 型： BLEZ、BGTZ、

I-RD1-RegImm-Br 型： BLTZ、BGEZ、

J-Imm 型：J、

J-Imm-1f-WD 型：JAL、

数据流与控制信号定义

数据流：

分类后，每一类的控制信号都是相同的。

数据通路与控制信号.xlsx

控制信号真值表：

通过以上的数据通路列表，确定选择信号，并通过器件的使用情况来确定各个元件的写使能信号和模式。

数据通路与控制信号.xlsx

为了方便，以上的值为 X 时，均取 0.

三、冒险

数据冒险：

分析

能转发就转发，不能就暂停

每一级流水线 cpu 一旦计算出结果，就可以向前转发。

一旦一个地方需要 RD1/RD2，就可以接受转发。

策略

对于每个指令，译码出 Tnew（计算出结果的时间），Tuse（最晚得到正确寄存器值的时间），使用一个控制器中的流水线寄存器记录并传递，使用大小比较决定转发还是暂停。

Tnew 与 Tuse

数据通路与控制信号.xlsx

暂停机制

代码

```
assign A1Tnew=  IDA1==DEA3&&DERegWE ? DETnew :
                IDA1==EMA3&&EMRegWE ? EMTnew :
                IDA1==MWA3&&MWRegWE ? MWTnew :
                2'd0;
assign A2Tnew=  IDA2==DEA3&&DERegWE ? DETnew :
                IDA2==EMA3&&EMRegWE ? EMTnew :
                IDA2==MWA3&&MWRegWE ? MWTnew :
                2'd0;
```

```
assign stall=   (IDA1!=0&&A1Tnew>Tuse1)||(IDA2!=0&&A2Tnew>Tuse2);
```

转发机制

转发目的地

均为外部转发。

GRF 的输出的 RD1，RD2；

D/Ereg 和 E/Mreg 的输出的 RD1，RD2.

逻辑

当源寄存器已经计算出结果（Tnew=0）并且转发目标的 A1A2 为要写入的 A3 时，进行转发。

代码

```
assign D1FWSel= IDA1==5'd0 ? 2'd0 :
                IDA1==DEA3&&DETnew==0&&DERegWE ? 2'd1 :
                IDA1==EMA3&&EMTnew==0&&EMRegWE ? 2'd2 :
                IDA1==MWA3&&MWTnew==0&&MWRegWE ? 2'd3 :
                2'd0;
assign D2FWSel= IDA2==5'd0 ? 2'd0 :
                IDA2==DEA3&&DETnew==0&&DERegWE ? 2'd1 :
                IDA2==EMA3&&EMTnew==0&&EMRegWE ? 2'd2 :
                IDA2==MWA3&&MWTnew==0&&MWRegWE ? 2'd3 :
                2'd0;
assign E1FWSel= DEA1==5'd0 ? 2'd0 :
                DEA1==EMA3&&EMTnew==0&&EMRegWE ? 2'd1 :
                DEA1==MWA3&&MWTnew==0&&MWRegWE ? 2'd2 :
                2'd0;
assign E2FWSel= DEA2==5'd0 ? 2'd0 :
                DEA2==EMA3&&EMTnew==0&&EMRegWE ? 2'd1 :
                DEA2==MWA3&&MWTnew==0&&MWRegWE ? 2'd2 :
                2'd0;
assign M1FWSel= EMA1==5'd0 ? 2'd0 :
                EMA1==MWA3&&MWTnew==0&&MWRegWE ? 2'd1 :
```

```
                2'd0;
assign M2FWSel= EMA2==5'd0 ? 2'd0 :
                EMA2==MWA3&&MWTnew==0&&MWRegWE ? 2'd1 :
                2'd0;
```

资源冒险

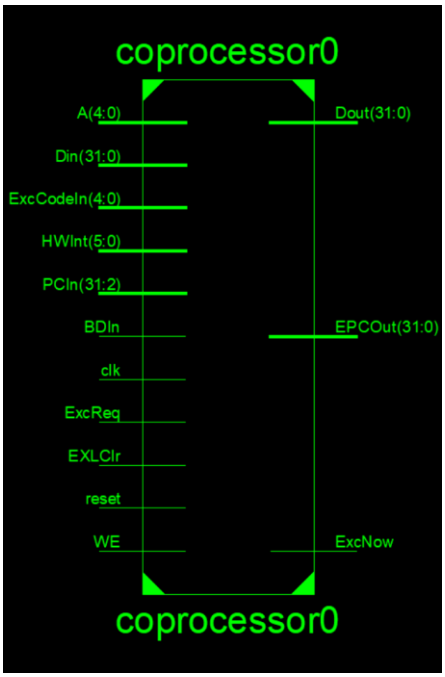
MDU 可能会出现资源冒险。

因此一旦当前使用 MDU（start==1），MDU 的 busy 为 1，当前 IF/ID 级需要使用 MDU，则暂停。

四、异常和中断

1、CP0

接口



功能

1、 四个寄存器，分别为 12，13，14，15 号

2、 中断：当|（HWInt&IM）&IE&EXL 时，发出中断（异常）信号，ExcCode 写入 0

3、 异常：当 ExcReq 为 1 时，写入 ExcCode，发出异常信号。

4、 EXLClr：eret 时，清空

2、三条有关 CP0 的指令

新增选择器和 CP0 控制器，专门检测这三条指令。

这三条指令的 Tnew 和 Tuse 类似于 LW 和 SW 指令。

3、异常中断策略

异常的检测

每一级有一个 ExcChecker，负责检测当前级的 Exc。

将 ExcCode 流水

PC 和 BD

从 F 级开始流水。

注意，暂停时，BD 和 PC 要照常流水（理解为这个硬件 nop 为造成暂停的流水的那条指令生成的）

在 M 级最终判断，写入 EPC、Cause 和 PCreg

此时要清空全部流水线。

ERET 在 M 级跳转

清空全部流水线，但流水线的 PC 应该为 EPC。

ERET 和 Exc/Int 进入的优先级大于 stall！

五、CPU 的测试

1、测试电路

TB 编写

由于写入寄存器和 DM 时都有输出，可以通过这些输出来调试。

因此只需要使用复位即可

先设置 reset=1；

在#100 后设置 reset=0

2、老测试集

测试用例 1

sample1.asm

网站上所给出的测试代码。

测试用例 2

```
ori $s1, $0, 32
ori $s2, $0, 0
ori $s0, $0, 0
for_1_begin:
beq $s0, $s1, for_1_end
    sw $s0, 0($s2)
    ori $t0, $0, 4
    addu $s2, $s2, $t0
ori $t0, $0, 1
addu $s0, $s0, $t0
beq $0, $0, for_1_begin
for_1_end:
nop
```

简单的把内存 0-31 填充上数字的程序。

期望下，内存中 0-31 地址分别被填充 0-31

测试用例 3

```
ori $0, $0, 0xffffffff
ori $1, $0, 0xffffffff
ori $2, $0, 0xffffffff
ori $3, $0, 0xffffffff
ori $4, $0, 0xffffffff
ori $5, $0, 0xffffffff
ori $6, $0, 0xffffffff
ori $7, $0, 0xffffffff
ori $8, $0, 0xffffffff
ori $9, $0, 0xffffffff
ori $10, $0, 0xffffffff
ori $11, $0, 0xffffffff
ori $12, $0, 0xffffffff
ori $13, $0, 0xffffffff
ori $14, $0, 0xffffffff
ori $15, $0, 0xffffffff
ori $16, $0, 0xffffffff
ori $17, $0, 0xffffffff
ori $18, $0, 0xffffffff
ori $19, $0, 0xffffffff
ori $20, $0, 0xffffffff
ori $21, $0, 0xffffffff
ori $22, $0, 0xffffffff
ori $23, $0, 0xffffffff
ori $24, $0, 0xffffffff
ori $25, $0, 0xffffffff
ori $26, $0, 0xffffffff
ori $27, $0, 0xffffffff
ori $28, $0, 0xffffffff
ori $29, $0, 0xffffffff
ori $30, $0, 0xffffffff
ori $31, $0, 0xffffffff
```

填充所有寄存器

测试用例 4

```
jal init    #init()
nop
ori $s0, $0, 1
ori $s1, $0, 1024
for_1_begin:
beq $s0, $s1, for_1_end #for i = 1 to 1024
nop

    sll $s2, $s0, 2

    lw $t0, -4($s2) #get a[i-1]
    ori $t1, $0, 0x8000     #try zero extern (16'b1000...)
    subu $t0, $t0, $t1
    sw $t0, 0($s2)      #a[i]=a[i-1]-0x8000     // can less than 0

ori $t0, $0, 1
addu $s0, $s0, $t0
j for_1_begin
nop
for_1_end:

jal end #end of program

init:   #void init()

    ori $t0, $0, 0x7111 #to try the lui     //lui is {imm,{16{0}}}, not
{imm, $rs}
    lui $t0, 0x00ff
    ori $t0, 0x8000     #0x0ff8000(9 continouns zero begin from 16's bits)

    sw $t0, 0($0)  #a[0] = 0x00010000
    j init_end
    nop

init_end:
jr $ra
nop
end:
```

期望下内存从 0x00078000 填填充至 0xfff80000

测试用例 5

```
lui $t1, 0x1234
ori $t1, $t1, 0x5678

sb $t1,0($0)
sb $t1,1($0)
sb $t1,2($0)
sb $t1,3($0)

sh $t1,4($0)
sh $t1,6($0)

swl $t1,8($0)  #8+0
swl $t1,13($0) #12+1
swl $t1,18($0) #16+2
swl $t1,23($0) #20+3

swr $t1,24($0) #24+0
swr $t1,29($0) #28+1
swr $t1,34($0) #32+2
swr $t1,39($0) #36+3

sw $t1, 40($0)
```

测试各种 s 指令

测试用例 6

```
li $t1 0x12345678
sw $t1, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lb $t2, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lb $t2, 1($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lb $t2, 2($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lb $t2, 3($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lh $t2, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lh $t2, 2($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lbu $t2, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lbu $t2, 1($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lbu $t2, 2($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lbu $t2, 3($0)
```

```
lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lhu $t2, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lhu $t2, 2($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lw $t2, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwl $t2, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwl $t2, 1($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwl $t2, 2($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwl $t2, 3($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwr $t2, 0($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwr $t2, 1($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwr $t2, 2($0)

lui $t2, 0xffff
ori $t2, 0xffff
lwr $t2, 3($0)
```

测试用例 7

本测试用例使用代码生成，代码见思考题，枚举了各种 Tuse 和 Tnew。

由于测试代码太大，这里放不下，测试代码附在压缩文件中。

sample7.asm

测试用例 8

将题目中给出的数据去除大部分连续的 nop

sample5.asm

测试用例 9

乘法简单测试，并看波形。

```
li $t1, 0x12345678
li $t2, 0x87654321
mult $t1, $t2
mflo $t1
mfhi $t2
```

测试用例 10

随机生成的程序。

sample6.asm

测试用例 11

由程序生成的程序。

程序由 P6 思考题最后一题改造而成。

sample8.asm

测试用例 12

sample9.asm

测试用例 13

MDU 的测试

sample11.asm

3、异常/中断测试集

简单的 handler

handler.asm

不能使用 mars 直接导出，使用指令：

```
java -jar '.\Mars2018 .jar'  nc a db mc CompactDataAtZero dump 0x00003000-0x0000417C HexText
```

导出。

1、异常测试

sample1.asm

2、中断测试

sample2.asm

3、异常测试（较完备）

sample3.asm

4、中断测试（较完备）

使用之前的暂停的测试集加上两个定时器来实现，通过不输出 pc>=0x4180 时的信息，和之前的比较，判断正误

sample4.asm

思考题

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”？

主要是指软件和硬件之间的一种协同关系。为了达到这种关系，他们之间有一种类似于接口/api 的东西。

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。

对于现代家用计算机/微型计算机（PC）来说。应该处于 CPU 外部，通过桥和内存管理器和 CPU 相连。

如果是单片机，他可能在芯片内部。

BE 部件对所有的外设都是必要的吗？

不是

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……

见测试程序

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？

通过中断信号。在中断服务程序读入鼠标寄存器中的值。