

LabH1 report

PB21000039 陈骆鑫

实验目的与内容

1. 完成适用于RISC-V的ALU模块的设计与仿真。
2. 完成MAV（求大小为4的滑动平均）模块的设计、仿真和上板测试。
3. 完成32位ALU的上板测试。

逻辑设计

1.ALU逻辑设计

- 在功能选择为0（减法）时，需要在t处输出是否相等、有符号数小于和无符号数小于这三个信号。
 - 对于是否相等，我们可以直接使用verilog提供的==运算符。
 - 由于没有声明signed时，verilog默认将数作为无符号数运算，我们也可以直接使用<运算符实现。
 - 对于有符号数小于：
 - 两个数符号位不同时，可以根据符号位直接得出大小关系。
 - 两个数符号位相同时，看作有符号数和看作无符号数时大小关系相同。
- 之后是8种运算的实现。
 - 注意到对于加、减和逻辑运算与、或、异或，看作有符号数和无符号数没有不同，可以直接使用verilog的对应运算符。
 - 对于逻辑左移、右移，看作有符号数和无符号数也没有不同，同样可以使用对应运算符。
 - 对于算术右移，如果使用>>>运算符，verilog默认将操作数看作无符号数，导致行为与逻辑右移相同，这显然是不正确的。一个简单的修改是以\$signed()函数将a转换为有符号数，再进行运算。
 - 注意：对于左移、右移运算，操作数b的大小不应大于或等于a的位数；为确保这一点，在RV64I中，移位运算只使用寄存器的低6位。但由于这次实验中ALU要求可以指定数据宽度，这点并不能较好实现：数据宽度甚至不一定是2的次方，如果简单的使用b的低位，仍然无法保证运算合法。这里索性没有考虑b是否符合范围，直接将b作为运算符的第二个操作数；当CPU等项目需要使用专用ALU时，再视情况在外部或ALU内部做处理。
- ALU代码如下：

```
1  module alu #(
2      parameter WIDTH = 32
3  )(
4      input [WIDTH-1:0] a, b,
5      input [2:0] f,
6      output reg [WIDTH-1:0] y,
7      output [2:0] t
```

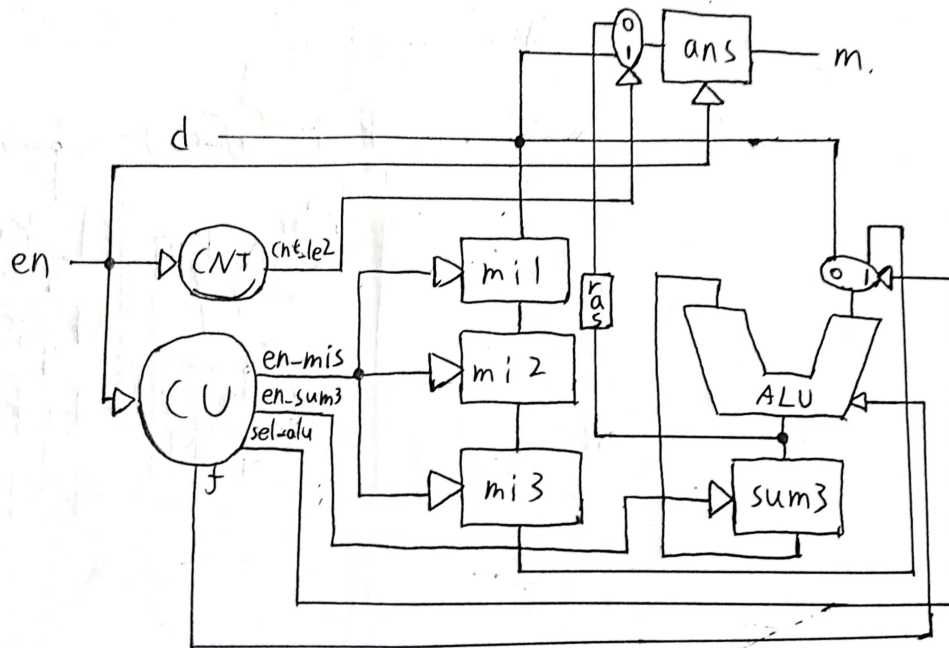
```

8 );
9     assign t[0] = (f == 0) ? (a == b) : 0;
10    assign t[1] = (f == 0) ? ((a[WIDTH-1] == b[WIDTH-1]) ? (a < b) :
    (a[WIDTH-1] > b[WIDTH-1])) : 0;
11    assign t[2] = (f == 0) ? (a < b) : 0;
12
13    always @(*) begin
14        y = 0;
15        case (f)
16            3'd0: y = a - b;
17            3'd1: y = a + b;
18            3'd2: y = a & b;
19            3'd3: y = a | b;
20            3'd4: y = a ^ b;
21            3'd5: y = a >> b;
22            3'd6: y = a << b;
23            3'd7: y = $signed(a) >>> b;
24        endcase
25    end
26 endmodule

```

2.MAV模块设计

- 要求4个数的滑动平均，只要维护最近3个数 `mi1` , `mi2` , `mi3` 和它们的和 `sum3` , 就可以在数 `d` 新到来的第一个时钟周期内计算出滑动平均，第二个时钟周期完成维护变量的计算。
 - 为了在第一个时钟周期内计算出滑动平均，ALU在闲置状态下应始终置于 `sum3+d` 的状态。这样在 `en` 的上升沿到来时（本段 `en` 均指取边沿后的），可以立即用ALU输出算数右移两位更新答案。在同一个时钟周期，将 `sum3` 赋值为ALU输出（重复利用同一个结果以减少浪费）。
 - 第二个时钟周期内完成维护：将 `sum3` 赋值为 `sum3-mi3` , 这样 `sum3` 的维护就已经完成了。对最近三个数的维护类似于移位寄存器：令 `mi1=d` , `mi2=mi1` , `mi3=mi2` 即可。
- 但注意到要求在输入的数小于4个，即已经保存的数小于3个时，应该直接输出 `d` 。这样，我们需要额外记录当前已经保存的数。
 - 简单的思路是直接保存一个计数器 `cnt` , 每次完成维护后让 `cnt` 自增。
 - 但 `cnt` 自增需要利用ALU，会导致每次处理的时间增加一个时钟周期。一个更好的思路是另外构造一个4种状态的Moore型自动机，每次 `en` 上升沿从状态 `0/1/2` 转换为 `1/2/3` , 而从状态 `3` 只能转换到自身，并将是否为状态3作为输出。这样既能保持并行，又节省了资源。
- 注：如果使用外部的取边沿模块给 `en` 取边沿，则 `en_ps` 自然会相对 `en` 的上升沿延后一个时钟周期，这是不可避免的。一个解决办法是直接在内部保存一个周期前的 `en` 值，并使用 `~en_1s&en` 作为 `en_ps` 。
- 最终设计的数据通路如下图：



- 注：圆形为FSM，方形为寄存器，椭圆形为选择器；带有三角形的为控制信号输入；不带有三角形的，左侧或上侧的为数据输入，右侧或下侧的为数据输出。

- 代码如下：

```

1  module mav (
2      input  clk,
3      input  rstn,
4      input  en,
5      input  [15:0] d,
6      output [15:0] m
7  );
8      wire [15:0] alu_out, mi1_out, mi2_out, mi3_out, cnt_out, sum3_out;
9      // debounce DB_EN(.x(en), .clk(clk), .rstn(rstn), .y(en_db));
10     assign en_db = en; // no debounce need while testing
11     register #(.WIDTH(1)) EN_LS (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(1),
12     .d(en_db), .q(en_ls));
13     assign en_ps = ~en_ls & en_db;
14     cnt CNT(.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_ps), .cnt_le2(cnt_le2));
15
16     register #(.WIDTH(16)) ANS (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_ps),
17     .d(cnt_le2 ? d : {{2{alu_out[15]}}}, alu_out[15:2]), .q(m));
18     register #(.WIDTH(16)) MI1 (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_mis),
19     .d(d), .q(mi1_out));
20     register #(.WIDTH(16)) MI2 (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_mis),
21     .d(mi1_out), .q(mi2_out));
22     register #(.WIDTH(16)) MI3 (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_mis),
23     .d(mi2_out), .q(mi3_out));
24     register #(.WIDTH(16)) SUM3 (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_sum3),
25     .d(alu_out), .q(sum3_out));
26
27     wire [2:0] f, t;
28     alu #(.WIDTH(16)) ALU(.a(sum3_out), .b(sel_alu_b ? mi3_out : d),
29     .f(f), .y(alu_out), .t(t));

```

```

25     cu    CU(.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_ps), .sel_alu_b(sel_alu_b),
               .en_mis(en_mis), .en_sum3(en_sum3), .f(f));
26 endmodule

```

- ```

1 module cnt(
2 input clk,
3 input rstn,
4 input en,
5 output cnt_le2
6);
7 reg [1:0] cnt_cs, cnt_ns;
8 always @(posedge clk, negedge rstn) begin
9 if (!rstn) begin
10 cnt_cs <= 0;
11 end
12 else
13 cnt_cs <= cnt_ns;
14 end
15
16 always @(*) begin
17 cnt_ns = cnt_cs;
18 case (cnt_cs)
19 0: if (en) cnt_ns = 1;
20 1: if (en) cnt_ns = 2;
21 2: if (en) cnt_ns = 3;
22 endcase
23 end
24
25 assign cnt_le2 = (cnt_cs != 3);
26 endmodule

```

- ```

1  module cu(
2      input clk, rstn, en,
3      output reg sel_alu_b,
4      output reg en_mis, en_sum3,
5      output reg [2:0] f
6  );
7
8      reg cs, ns;
9      parameter S0 = 1'd0, S1 = 1'd1;
10     parameter f_sub = 3'd0, f_add = 3'd1;
11
12     always @(posedge clk, negedge rstn) begin
13         if (!rstn) begin
14             cs <= 0;
15         end
16         else cs <= ns;
17     end
18
19     always @(*) begin
20         ns = cs;
21         sel_alu_b = 0;
22         en_mis = 0; en_sum3 = 0;
23         f = 0;
24         case(cs)
25             S0: begin
26                 sel_alu_b = 0; f = f_add; // sum3 + d

```

```

27         if (en) begin
28             en_sum3 = 1;
29             ns = S1;
30         end
31         else ns = S0;
32     end
33
34     S1: begin
35         sel_alu_b = 1; f = f_sub; // sum3 - mi3
36         en_sum3 = 1;
37         en_mis = 1; // shift mi1 to mi3
38         ns = S0;
39     end
40 endcase
41 end
42 endmodule

```

3.ALU_TEST模块设计

- 由于七段数码管只能显示8位16进制数，仿照上学期数电实验labH5，进行如下设计：
 - ALU的五个端口各接一个寄存器，输出接数码管显示。
 - **cl**，**cr** 切换当前数码管显示内容，共有 **a**，**b**，**f**，**y** 四种状态，分别对应指示灯0-3。而 **t** 输出较短，直接对应最左侧三个指示灯。
 - 在前三种状态下，如果推上开关 **sw[i]**，当前数 **a** 将会变为 $(a \ll 4) + i$ ，即十六进制下左移一位，并填充新输入的数值。注意 **f** 只有三位，故此时效果等同于 **f=i[3:0]**。
 - 这些功能可以用一个简单的状态机实现，部分思路与上学期实验相似。七段数码管显示直接复用了上学期的代码。
- 代码如下：

```

1  module alu_test(
2      input [15:0] sw,
3      input cl, cr,
4      input clk, rstn,
5      output reg [3:0] state,
6      output [2:0] t_out,
7      output [6:0] cn,
8      output [7:0] an
9  );
10     reg en_a, en_b, en_f;
11     reg [31:0] a_in, b_in;
12     wire [31:0] a_out, b_out, alu_out;
13     reg [2:0] f_in;
14     wire [2:0] f_out;
15     register #(.WIDTH(32)) REG_A (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_a),
16     .d(a_in), .q(a_out));
17     register #(.WIDTH(32)) REG_B (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_b),
18     .d(b_in), .q(b_out));
19     register #(.WIDTH(3)) REG_F (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(en_f),
20     .d(f_in), .q(f_out));
21
22     wire [2:0] t;
23     alu #(.WIDTH(32)) ALU(.a(a_out), .b(b_out), .f(f_out), .t(t),
24     .y(alu_out));
25     register #(.WIDTH(3)) REG_T (.clk(clk), .rstn(rstn), .en(1), .d(t),
26     .q(t_out));
27
28

```

```

23     wire [15:0] sw_ps;
24     wire [3:0] hd;
25     take_posedge #(.WIDTH(16)) PS_SW (.x(sw), .clk(clk), .rstn(rstn),
.y(sw_ps));
26     encoder16_4 ECD(.in(sw_ps), .f(ipt), .out(hd));
27
28     reg [1:0] sel_ddp;
29     wire [31:0] ddp_in;
30     selector4 #(.WIDTH(32)) SEL_DDP(.in0(a_out), .in1(b_out),
.in2({29'd0, f_out}), .in3(alu_out), .sel(sel_ddp), .out(ddp_in));
31
32     dynamic_display DDP(.clk(clk), .rstn(rstn), .d(ddp_in), .an(an),
.cn(cn));
33
34     debounce DB_cl(.x(cl), .clk(clk), .rstn(rstn), .y(cl_db));
35     take_posedge PE_cl(.x(cl_db), .clk(clk), .rstn(rstn), .y(cl_ps));
36     debounce DB_cr(.x(cr), .clk(clk), .rstn(rstn), .y(cr_db));
37     take_posedge PE_cr(.x(cr_db), .clk(clk), .rstn(rstn), .y(cr_ps));
38
39
40     parameter S0 = 2'd0, S1 = 2'd1, S2 = 2'd2, S3 = 2'd3;
41     reg [1:0] cs, ns;
42
43     always @(posedge clk, negedge rstn) begin
44         if (!rstn) cs <= S0;
45         else cs <= ns;
46     end
47
48     always @(*) begin
49         ns = cs;
50         en_a = 0; en_b = 0; en_f = 0;
51         a_in = a_out; b_in = b_out; f_in = f_out;
52         sel_ddp = 0;
53         state = 4'b0001;
54         case (cs)
55             S0: begin
56                 sel_ddp = 0;
57                 state = 4'b0001;
58                 if (ipt) begin
59                     en_a = 1; a_in = {a_out[27:0], hd};
60                 end
61                 if (cl_ps) ns = S3;
62                 else if (cr_ps) ns = S1;
63             end
64
65             S1: begin
66                 sel_ddp = 1;
67                 state = 4'b0010;
68                 if (ipt) begin
69                     en_b = 1; b_in = {b_out[27:0], hd};
70                 end
71                 if (cl_ps) ns = S0;
72                 else if (cr_ps) ns = S2;
73             end
74
75             S2: begin
76                 sel_ddp = 2;
77                 state = 4'b0100;

```

```

78         if (ipt) begin
79             en_f = 1; f_in = hd[2:0];
80         end
81         if (cl_ps) ns = S1;
82         else if (cr_ps) ns = S3;
83     end
84
85     S3: begin
86         sel_ddp = 3;
87         state = 4'b1000;
88         if (cl_ps) ns = S2;
89         else if (cr_ps) ns = S0;
90     end
91 endcase
92 end
93 endmodule

```

仿真结果与分析

1. ALU仿真

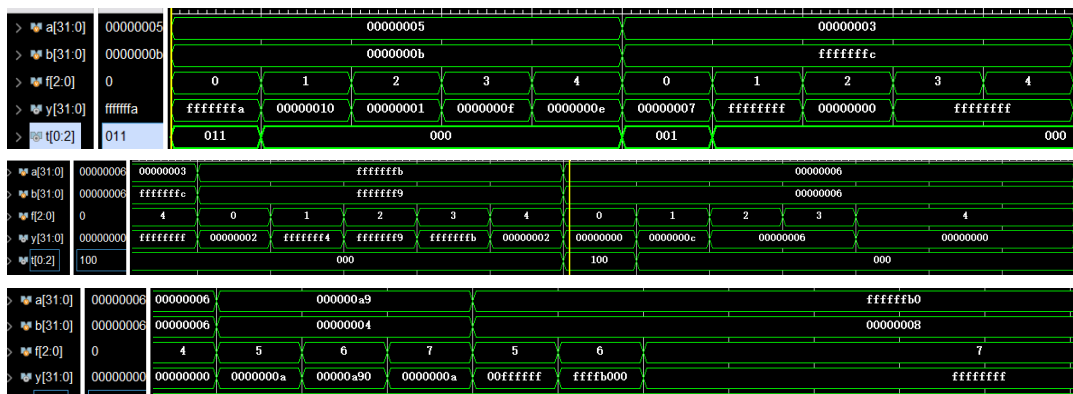
- 首先使用手动构造的几组数据做初步检验：

```

1  module alu_tb_handmade;
2      reg signed [31:0] a, b;
3      reg [2:0] f;
4      wire [31:0] y;
5      wire [2:0] t;
6
7      alu #(.WIDTH(32)) ALU (.a(a), .b(b), .f(f), .y(y), .t(t));
8
9
10     initial begin
11         // binary and decimal arithmetic test
12         a = 5; b = 11;
13         f = 0; #1; f = 1; #1; f = 2; #1; f = 3; #1; f = 4; #1;
14         a = 3; b = -4;
15         f = 0; #1; f = 1; #1; f = 2; #1; f = 3; #1; f = 4; #1;
16         a = -5; b = -7;
17         f = 0; #1; f = 1; #1; f = 2; #1; f = 3; #1; f = 4; #1;
18         a = 6; b = 6;
19         f = 0; #1; f = 1; #1; f = 2; #1; f = 3; #1; f = 4; #1;
20
21         #2;
22
23         // binary shift test
24         a = 32'b1010_1001; b = 4;
25         f = 5; #1; f = 6; #1; f = 7; #1;
26         a = 32'b1111_1111_1111_1111_1111_1111_1011_0000; b = 8;
27         f = 5; #1; f = 6; #1; f = 7; #1;
28     end
29 endmodule

```

o

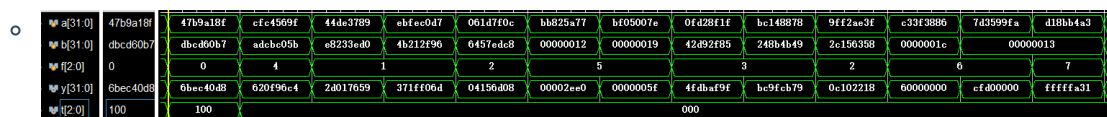


- 之后随机生成数据（可以配合计算机验证）

```

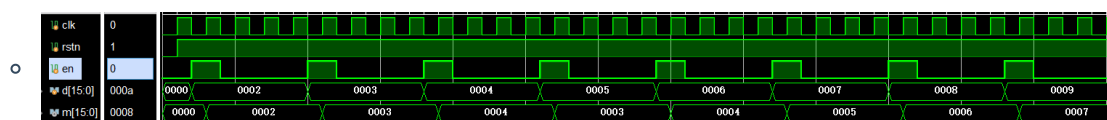
1  module alu_tb;
2      reg [31:0] a, b;
3      reg [2:0] f;
4      wire [31:0] y;
5      wire [2:0] t;
6
7      alu #(.WIDTH(32)) ALU (.a(a), .b(b), .f(f), .y(y), .t(t));
8
9      integer seed = 100;
10
11     initial begin
12         forever begin
13             a = $random();
14             f = $random();
15             b = $random();
16             if (f >= 5) begin
17                 b = b[4:0];
18             end
19             #5;
20         end
21     end
22 endmodule

```



2.MAV仿真

- 该部分仿真有两个目的，分析模块的正确性，以及确认是否能在当周期立即得到结果。



- 可以发现满足要求。

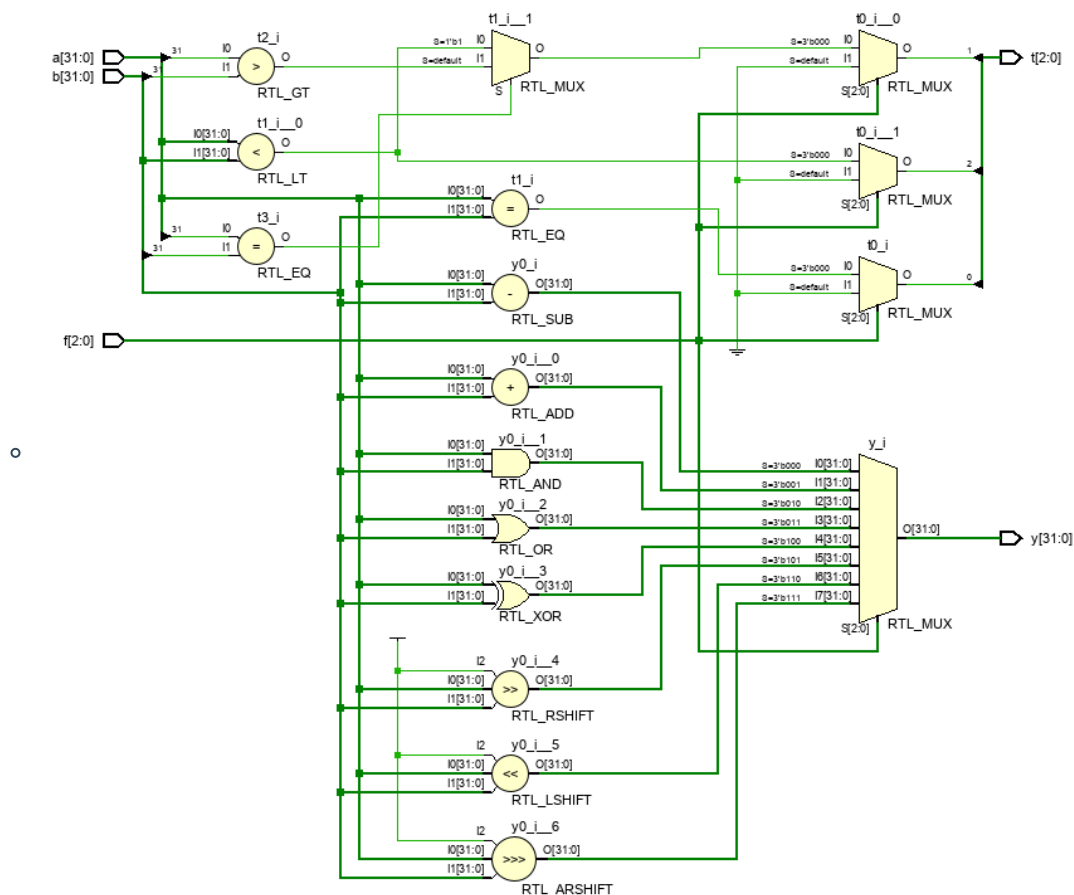
3.ALU_TEST模块

由于ALU已经经过测试，此部分不做仿真，直接上板测试。

电路设计与分析

1.ALU模块

- RTL电路图:

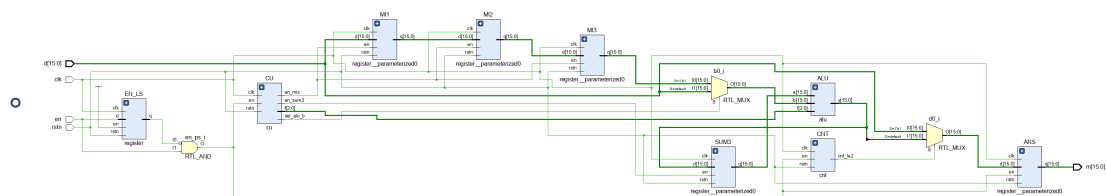


- 资源使用: (非时序电路, 无Time Report)

Resource	Utilization	Available	Utilization %
LUT	410	63400	0.65
IO	102	210	48.57

2.MAV模块

- RTL电路图: (大图, 可放大)



- 时间情况:

Setup	Hold	Pulse Width
Worst Negative Slack (WNS): 5.505 ns	Worst Hold Slack (WHS): 0.119 ns	Worst Pulse Width Slack (WPWS): 4.500 ns
Total Negative Slack (TNS): 0.000 ns	Total Hold Slack (THS): 0.000 ns	Total Pulse Width Negative Slack (TPWS): 0.000 ns
Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0
Total Number of Endpoints: 147	Total Number of Endpoints: 147	Total Number of Endpoints: 85

All user specified timing constraints are met.

- 资源使用:

Name	1	Slice LUTs (63400)	Slice Registers (126800)	Slice (15850)	LUT as Logic (63400)	Bonded IOB (210)	BUFGCTRL (32)
▼ N mav		35	84	18	35	35	1
ALU (alu)		0	0	4	0	0	0
ANS (register__parameterized0)		0	16	5	0	0	0
CNT (cnt)		16	2	6	16	0	0
CU (cu)		1	1	1	1	0	0
EN_LS (register)		1	1	1	1	0	0
MI1 (register__parameterized0_0)		0	16	6	0	0	0
MI2 (register__parameterized0_1)		1	16	8	1	0	0
MI3 (register__parameterized0_2)		16	16	9	16	0	0
SUM3 (register__parameterized0_3)		0	16	4	0	0	0

3.ALU_TEST模块

- 此部分由于状态机未单独提取出，RTL电路图较杂乱，不再展示。
- 时间性能如下：

Setup	Hold	Pulse Width
Worst Negative Slack (WNS): 4.312 ns	Worst Hold Slack (WHS): 0.162 ns	Worst Pulse Width Slack (WPWS): 4.500 ns
Total Negative Slack (TNS): 0.000 ns	Total Hold Slack (THS): 0.000 ns	Total Pulse Width Negative Slack (TPWS): 0.000 ns
Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0
Total Number of Endpoints: 399	Total Number of Endpoints: 399	Total Number of Endpoints: 252
All user specified timing constraints are met.		

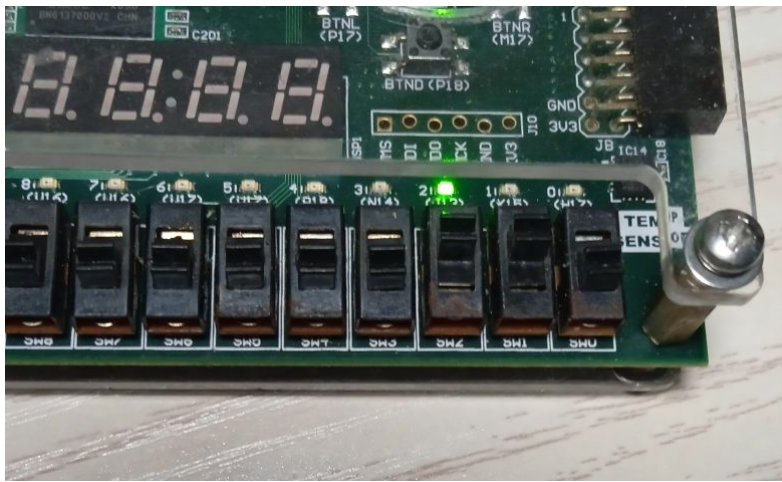
- 使用资源如下：

Name	1	Slice LUTs (63400)	Slice Registers (126800)	F7 Muxes (31700)	Slice (15850)	LUT as Logic (63400)	Bonded IOB (210)	BUFGCTRL (32)
▼ N alu_test		741	254	4	209	741	42	1
ALU (alu)		0	0	0	15	0	0	0
> DB_cl (debounce)		82	54	0	24	82	0	0
> DB_cr (debounce_0)		83	54	0	26	83	0	0
> DDP (dynamic_display)		65	36	0	22	65	0	0
PE_cl (take_posedge__parameterized0)		2	2	0	2	2	0	0
PE_cr (take_posedge__parameterized0_1)		2	2	0	2	2	0	0
PS_SW (take_posedge)		34	32	0	15	34	0	0
REG_A (register)		192	32	0	72	192	0	0
REG_B (register_2)		184	32	0	81	184	0	0
REG_F (register__parameterized0)		113	3	4	47	113	0	0
REG_T (register__parameterized0_3)		0	3	0	1	0	0	0

- 注意：这里的时间和资源情况是整个模块的情况。如果想要单独考虑ALU的情况，应该考虑像数电实验labH1一样，给输入输出接上寄存器后，调整时钟周期直接跑综合、实现。

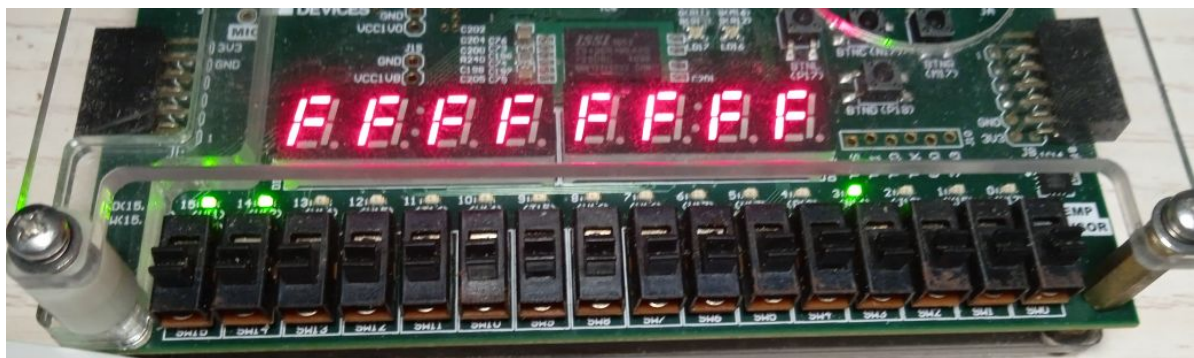
测试结果与分析

1.MAV上板测试



与PPT中相同输入顺序，输入到6时，结果为4.

2.ALU_TEST上板测试



这是第一个操作数为2，第二个操作数为3，功能为0（减法+比较）时的输出。

总结

- 本次实验完成了ALU模块及其上板测试，并利用ALU实现了求4个数的滑动平均。
- 这次实验总体给人的感觉是上来就上强度了。看起来本次实验内容不多，实际上很多地方实现很有难度。