

## 5. 分支预测

方案A：

分支成本对CPI的影响如下：

未命中率：10%。命中但预测错误：9%，预测正确：81%

$$CPI \text{ 增加量} = 15\% (10\% \times 3 + 9\% \times 4 + 81\% \times 0) = 0.099$$

$$\therefore CPI = 1 + 0.099 = 1.099$$

方案B： $CPI = 15\% \times 2 + 1 = 1.3$

$$\therefore 加速比 = \frac{CPI_B}{CPI_A} = 1.18, 性能提升 = \frac{CPI_A - CPI_B}{CPI_B} \approx 15\%$$

12. 考虑如下代码片段：

li a0, 0

li a4, 10000

addi a1, a0, 0

Loop: addi a3, a0, 2

rem a2, a1, a3

0xe44: bne a2, a0, Rem2 // B1

#.. Code A: 使用直接寻址方式，命中率为100%，预测正确率为100%

Rem2: addi a3, a0, 5 // 预测错误，命中率为10%，预测正确率为90%

rem a2, a1, a3

0xe89: bne a2, a0, End // B2

# code B

End: addi a1, a1, 1

0xec0: bne a1, a4, Loop // B3

1) 写出功能一致的C代码

```
#include <stdio.h>
```

```
int main(){
```

```
    int a0 = 0;
```

```
    int a4 = 10000;
```

```
    int a1 = a0;
```

```
    int a2, a3;
```

```
    for (a1 = 0; a1 < a4; a1++) {
```

```
        a3 = a0 + 2;
```

```
        a2 = a1 % a3;
```

```
        if (a2 == a0) {
```

```
            #Code A }
```

```
        a3 = a0 + 5;
```

```
        a2 = a1 % a3;
```

```
        if (a2 == a0) {
```

```
            #Code B }
```

```
}
```

```
return 0;
```

2) 在无分支预测时，上述代码中三条 bne 指令跳转的比例分别是多少？

B1：由  $a2 = a1 \% a3$  可知，B1 发生跳转的比例约为  $\frac{1}{5}$ 。即  $bne : 5m02$

B2：由  $a3 = a0 + 5$  可知，B2 跳转的比例约为  $\frac{4}{5}$ 。即  $bne : 5m1$

B3：由于几乎每次都进入 for 循环体内，直到  $a1$  增至 10000，因此 B3 跳转的概率为 0。

1. mode: bne : bne

2. m02, m10, 5m02 : 000x0

3) 引入一个静态分支预测器后, 对向前跳转支总是作出跳转预测(次), 向后总是不跳转, 则上述三条 bne 指令预测错误率分别是多少?

①  $B_1$ : bne a2, a0, Rem2

$$\text{准确率} = \frac{1}{2}$$

②  $B_2$ : bne a2, a0, End

$$\text{准确率} = \frac{1}{5}$$

③  $B_3$ :  $B_3$  为向前跳转, 准确率 = 99.99% ≈ 100%

13. 1)  $B_1$  的 PC 值:  $0xe49 = 110\underset{1}{|}0000\underset{1}{|}000$

$B_2$  的 PC 值:  $0xe84 = 11011\underset{1}{|}00001\underset{1}{|}00$

$B_3$  的 PC 值:  $0xec0 = 11011\underset{1}{|}000000$

$K+2=7, K=5$ , 要保证映射正确  $K$  最小值为 5.

2) 对于  $N=1$  的情况,  $B_3$  预测错误率会增加一次.  $N$  的最小值应为 2.

3)  $B_1$ : 准确率仍为  $\frac{1}{2}$  (50%)

$B_2$ : 准确率为  $\frac{4}{5}$  (80%)

$B_3$ : 准确率仍约为 99.99%

14. 循环中分支的规律如下:

第一次,  $a_1=0$ ,  $B_1$  不跳转,  $B_2$  不跳转,  $B_3$  跳转

若令跳转数 = 1, 不跳转数 = 0, 有如下规律:

$$a_1=0 \Rightarrow B_1=0, B_2=0, B_3=1$$

$$a_1=1 \Rightarrow B_1=1, B_2=1, B_3=1$$

$$a_1=2 \Rightarrow B_1=0, B_2=1, B_3=1$$

$$a_1=3 \Rightarrow B_1=1, B_2=1, B_3=1$$

$$a_1=4 \Rightarrow B_1=0, B_2=1, B_3=1$$

$$a_1=5 \Rightarrow B_1=1, B_2=0, B_3=1$$

:

要使  $B_1$  预测 100% 准确，只有两种情况， $H=1$   
 要使  $B_2$  预测准确，其跳转为 5 次为一个循环： $H=4$   
 要使  $B_3$  预测 100% 准确，一共循环 100000 次，其间没有重复的  
 规律， $\therefore H=9999$ .

15. 根据汇编代码，执行顺序为  $B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow B_1 \dots$   
 要全部预测准确，需有 9990 位  
 $\therefore M$  最小值为 9990.

16. 外循环，针对 i 的分支总是被忽略。

对内层循环，首先经历 Q 次跳转，接着不进入，1 次不跳转，以此规律循环重复 P 次

方案 A：每个内部循环不出错两次，准确率为  $\frac{Q-1}{Q+1}$

方案 B： $\because H=Q$ ，由于初始值为 0，会错误 Q 次，此后正确。

$$\text{准确率} = \frac{P \times (Q+1) - Q}{P(Q+1)} = \frac{P+P-1}{P(Q+1)}$$

方案 A 优于 B： $\frac{Q-1}{Q+1} > \frac{P+P-1}{P(Q+1)}$

$$\therefore PQ - P > PQ + P - Q, Q > 2P$$

$\therefore$  当  $Q > 2P$  时方案 A 优于方案 B.

17. Loop:  $lw\ a4, 0(a3)$

addi a3, a3, 4

addi a1, a1, -1

B1: beq \$ a4, B2

adli a2, a2, 1

B2: bne \$ a1, Loop

1) a1初值为n，则B2会跳转n次，最后一次不跳转；B1跳转情况与数组元素有关

当n=8, p[]={1, 0, 1, 0, 1, ...}时，对于B1, 分支在跳转与不跳转中交替

换，∴一共有4次错误

且对于B2, 初始错误2次，最后错误1次，共错误3次。

全部错误为7次

2) GHR记录B2的跳转情况

对于B1, 第一次GHR=0, PHT=00; 正确一次，此后错4次

对于B2, 开始时共错误4次，最后错一次，共错误3次

∴一次错误7次

3) 对于B1: ① GHR PHT

① 00 00 正确

② 01 00 错误

③ 11 00 正确

④ 01 01 错误

⑤ 11 00 正确

⑥ 01 10 正确

⑦ 11 00 正确

⑧ 01 11 正确

01情况下错误2次，其余正确

对于B2, 同理有

	GHR	PHT	
①	00	00	错误
②	11	00	错误
③	10	00	错误
④	11	01	错误
⑤	10	01	气泡错误
⑥	11	10	正确
⑦	10	10	正确
⑧	11	11	死角错误

错误6次  
共发生8次错误

4) 对于类似 B1 的跳变频繁情况, 引入 GHR 会使正确率提升, 对于循环迭代则会上增加较大的芯片化成本, 正确率反而下降。当 N 非常大时, 这种影响会减小, 故 (3) 中预测器表现最好。

5) 当 PC 随机取值时, 因 B1 跳转之间没有相关性, 所以不应使用 GHR; (1) 中的预测器表现最好。

18. 可能是由于异常指令处于流水线的不同阶段造成乱序产生。  
流水线可以再增加一个提交阶段, 例如使用 ROB 使顺序精确  
处理异常, 并在处理完后恢复程序顺序执行, 来确保对乱序  
异常的顺序处理。

20. 1)

	周某日				操作码	目标	源1	源2
	Decode	Issue	WB	Committed				
I <sub>1</sub>	0	10	2	3	fld	T <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	-
I <sub>2</sub>	1	3	13	14	fmul.d	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	f <sub>0</sub>
I <sub>3</sub>	2	14	16	17	fadd.d	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	f <sub>0</sub>
I <sub>4</sub>	3	4	5	18	addi	a <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	-
I <sub>5</sub>	4	5	6	19	fld	T <sub>3</sub>	a <sub>0</sub>	-
I <sub>6</sub>	5	8	18	20	fmul.d	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>3</sub>
I <sub>7</sub>	6	19	21	22	fadd.d	T <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>2</sub>

2) 若 ROB 仅容纳 2 条指令, 表如下:

	周某日				操作码	目标	源1	源2
	Decode	Issue	WB	committed				
I <sub>1</sub>	0	1	2	3	fld	T <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	-
I <sub>2</sub>	1	3	13	14	fmul.d	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>0</sub>
I <sub>3</sub>	4	14	16	17	fadd.d	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	f <sub>0</sub>
I <sub>4</sub>	15	16	17	18	addi	a <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	-
I <sub>5</sub>	18	19	20	21	fld	T <sub>3</sub>	a <sub>0</sub>	-
I <sub>6</sub>	19	20	30	31	fmul	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>3</sub>
I <sub>7</sub>	22	31	33	34	fadd.d	T <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>2</sub>