

3. 若不同虚拟地址映射到不同物理地址，则

① 可能产生数据依赖，当 a_0, a_1 两寄存器中存储值相同时

② 可能产生数据依赖，当 a_0 寄存器中存储值等于 a_1 寄存器中存储值且位于同一虚拟地址命中

③ 不可能产生数据依赖，当虚拟地址页为 4KB 大小时， ld 指令对应 $load$ 值所位于的物理地址和 sd 指令 $store$ 值的物理地址一定不同。

若不同的虚拟地址页可以被映射到相同的物理地址页，则小为 4KB 时。

④ 情况下不一定只在对应虚拟地址相同时才产生数据依赖，对应相差 4096 的整数倍，在同虚拟地址页的相对相同位置对应的物理地址也可能相同从而产生数据依赖。

⑤ 可能产生数据依赖，对应 a_0, a_1 值相同就有可能产生数据依赖，原理与上相同。

5. 考虑一个深度流水线处理器，无分支指令时其基本 CPI 为 1。对于分支指令采用两种方案，方案 A 使用一个分支目标缓存 (BTB)，缓存缺失代价为额外 3 个周期，缓存命中但预测错误的代价为额外 4 个周期，缓存命中且预测正确则无分支代价。假设这个 BTB 的命中率为 90%，预测正确率为 99%。方案 B 不使用分支预测，分支代价固定为额外 2 个周期。假设分支频率为所有指令的 15%，则处理器采用方案 A 比采用方案 B 快多少？

对于 N 条指令，分别计算 A、B 对应的 CPI

$$CPI_B = \frac{N + 0.15N \times 2}{N} = 1.3$$

$$CPI_A = \frac{N + 0.15N \times 0.1 \times 3 + 0.15N \times 0.9 \times 1 \times 4}{N} = 1.099$$

对应 N 条指令，A 方案比 B 方案平均会快 $0.201N$ 个周期

12. 考虑如下的代码片段：

```
0x44:    li      a0,0
          li      a4,10000
          addi   a1,a0,1
Loop:   addi   a3,a0,21
          rem   a2,a1,a3
          #...CodeA
          bne   a2,a0,End //B1
          addi   a3,a0,5
          rem   a2,a1,a3
          bne   a2,a0,End //B2
          #...CodeB
End:    addi   a1,a1,1
0xcc0:  bne   a1,a4,Loop //B3
```

- 1) 写出与该汇编代码功能一致的 C 语言代码。
2) 无分支预测时，上述代码中的三条 bne 指令发生跳转的比例分别是多少？
3) 引入一个静态分支预测器，该预测器对向前跳转是给出“跳转”预测，对向后跳转总是给出“不跳转”预测，则上述代码中的三条 bne 指令的预测准确率分别是多少？

对于 B3 指令发生跳转，总共经过 10000 次循环，仅有最后一次未跳转

$$\text{故跳转比例为 } \frac{9999}{10000} = 99.99\%$$

对于 B1 指令，跳转比例为 $\frac{5000}{10000} = 50\%$

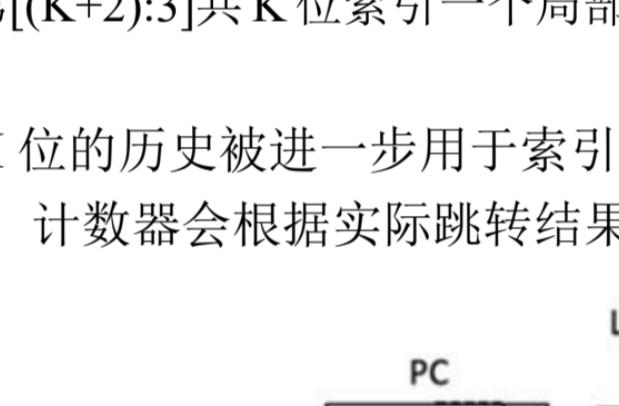
对于 B2 指令，跳转比例为 $\frac{10000 - 5000}{10000} = 50\%$

3) 对于 B，预测准确率： $\frac{10000 - 5000}{10000} = 50\%$

$$B_1 = \frac{5000}{10000} = 50\%$$

$$B_2 = \frac{9999}{10000} = 99.99\%$$

13. 仍考虑题 12 的代码片段，现引入局部预测器，如下图所示。该预测器使用 PC 的第 $[K-2:3]$ 共 K 位索引一个预测器表，该表的每个表项是一个 N-bit 的计数器，计数器的最高位用于预测是否跳转（1 为跳转，0 为不跳转），并根据实际跳转结果更新计数器的值（跳转自增 1，增至 2^n 后不再变化；不跳转自减 1，减至 0 后不再变化）。假设所有计数器的初始值均为 0。



对应系统有 25 个计数器，共有 3 个 bne 分支指令，故最小需 $K=2$ 即可 $2^2 > 3$

- 1) 要保证上述代码片段被映射到不同的局部预测器， K 的最小值是多少？

- 2) 要使该预测器对三条 bne 指令的预测准确率均不低于题 12 中的静态预测器， N 的最小值是多少？

- 3) 对上述给出的最小 N ，在程序稳态时，三条 bne 指令的预测准确率分别是多少？

对于 B1 而言，2 位计数器结果与一直预测不跳转结果相同， $\alpha_{B1} = 50\%$

B2 而言：

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \text{x} & \text{x} & \checkmark & \checkmark & \text{x} & \checkmark & \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

$$\alpha_{B2} = \frac{1999 \times 4 + 3}{10000} = \frac{7999}{10000} = 79.99\% \quad \text{若不考虑前 3 次预测情况} \quad \text{稳态时 } \alpha_{B2} \approx 79.99\% \approx 80\%$$

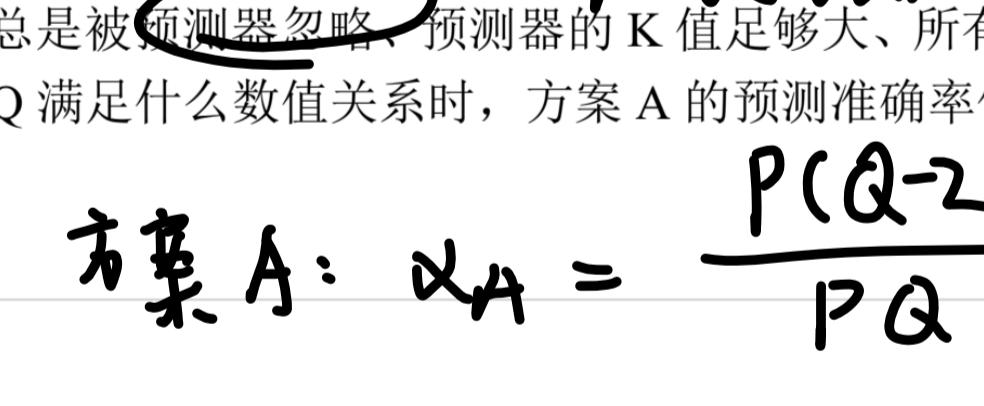
对于 B3 而言：

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \text{x} & \text{x} & \checkmark & \checkmark & \text{x} & \text{x} & \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

$$\alpha_{B3} = \frac{9997}{10000} = 99.97\% \quad \text{若不考虑前几次计数器调整时状态} \quad \text{稳态时 } \alpha_{B3} \approx 99.99\% \approx 100\%$$

14. 仍考虑题 12 的代码片段，现引入局部分支历史，如下图所示。该预测器使用 PC 的第 $[K-2:3]$ 共 K 位索引一个局部分支历史表，其每个表项是一个 H-bit 的局部分支历史。

该 H 位的历史表进一步由素引一张单比特计数器构成的预测表（1 为跳转，0 为不跳转）。计数器会根据实际跳转结果进行更新。



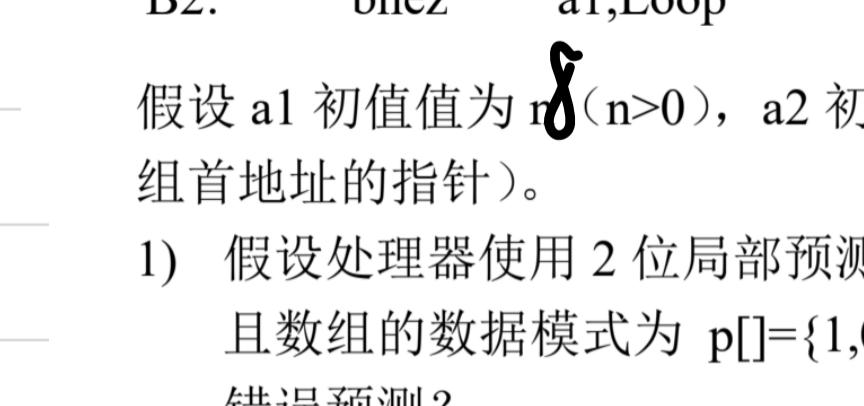
假设 K 的值足够大，使得上述代码片段中的不同分支会被映射到局部分支历史表中的不同位置。则为了使得三条 bne 指令能在程序稳态时被完全准确地预测， H 的最小值是多少？

H 最小值即为序列中最长单数字列位数。

对于 B2 分支指令，位数即为 4。

$$H_{min} = 4$$

15. 仍考虑题 12 中的代码片段，现引入全局分支历史，如下图所示。该预测器拥有一个 M 位的 GHR，记录了程序中任意分支的历史。当一个新分支被执行时，跳转分支使得 GHR 左移 1 位并在末位写入 1。GHR 被用于索引一张单比特计数器构成的预测表（1 为跳转，0 为不跳转）。计数器会根据实际跳转结果进行更新。



为了使得三条 bne 指令都能在程序稳态时被完全准确地预测，M 的最小值是多少？

与上题相类似，可以找出循环序列为最长单数字列位数。

预测规则：00|11|00|11|10|11|01|01|11|01|1111 其中最长单数字列位数为 5 个 1。

$$10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ \text{故 } M_{min} = 5$$

16. 在实际应用中常能遇到如下的代码场景：

```
for (int i=0;i<p;i++) { /outer loop
    for (int j=0;j<q;j++) { /inner loop
        /SomeCode
    }
}
```

视进入循环体执行为“跳转”，不进入为“不跳转”。现有两种分支预测器方案：方案 A 使用题 13 中的预测器结构 ($N=1$)，方案 B 使用题 14 中的预测器结构 ($H=Q$)。假设 $Q=2$ 且内外循环各 inner loop 为 10 次，外层 loop 为 10 次，每条指令的分支总次数被限制为 2 次，预测器的 K 位固定为 1，所有计数器的初始值均为 0。试分析当 P 和 Q 满足什么数值关系时，方案 A 的预测准确率优于方案 B？

$$\text{方案 A: } \alpha_A = \frac{P(Q-2) + P-2}{PQ + P} = \frac{PQ - P - 2}{PQ + P}$$

$$\text{方案 B: } \alpha_B = \frac{PQ - 2(Q-1)}{PQ}$$

若 $\alpha_A > \alpha_B$ 则有 $PQ - P - 2 > PQ - 2(Q-1)$

$$Q-1 > P$$

17. 考虑如下的指令序列：

```
Loop:  lw      a4,0(a3)
          addi   a1,a3,1
          bnez  a4,B2
          addi   a2,a3,2
          bnez  a1,B1
          bnez  a1,End
```

假设 $a1$ 初始值为 0， $a2$ 初始值为 0， $a3$ 初始值为 p (p 为一个指向 32 位整数数组的指针)。

1) 假设处理器使用 2 位局部预测器，分支 B1 和 B2 映射到不同的预测器表。若 $n=8$

且数据的数据模式为 $p[0]=1,0,1,0,1,0,1,0, \dots$ ，则上述代码执行过程中一共会发生多少次错误预测？

2) 现引入 1 位的全局分支历史，I 中的其他假设不变，则上述代码执行过程中一共会发多少次错误预测？

3) 若改为 2 位的全局分支历史，I 中的其他假设不变，则上述代码执行过程中一共会发生多少次错误预测？

4) 非常感谢分支历史！历史表的位数对预测准确率有什么影响？

5) 当数组 $p[i]$ 的数据模式变为在 0 和 1 之间以 0.5 概率随机取值时，I 中的论点有什么变化？

6) 忽略前端乱序，指令经过译码、发射、执行和写回后即可完成执行并提交。现考虑如下的指令序列：

```
I1:    ld      a1,0(a3)
          addi   a1,a3,1
          bnez  a1,B2
          addi   a2,a3,2
          bnez  a1,B1
          bnez  a1,End
```

假设 $a1$ 初始值为 0， $a2$ 初始值为 0， $a3$ 初始值为 p (p 为一个指向 32 位整数数组的指针)。

7) 如果 ROB 缓冲区是无限的，将下表补充完全。(部分结果已给出)

Decode (ROB enqueue)	Issue	WB	Committed	操作码	目标	源 1	源 2
11	0	1	2	3	ld	T0	a0
12	1	3	4	1	addi	T1	T0
13	2	4	5	1	addi	T2	T0
14	3	5	6	1	addi	T3	T0
15	4	6	7	1	addi	T4	T0
16	5	7	8	2	final.d	T5	T3
17	6	8	2	2	final.d	T6	T3

8) 如果 ROB 缓冲区有 2 条指令，当一条指令提交后的下一周期该指令的数据被占据，谁将负责补足？部分结果已给出。

9) 对于 B1，预测计数器为 00。前 2 次预测完全错误，错了 2 次。

对于 B2，开始计数器为 00。第 1 次不跳转，错了 1 次。

对于 B3，开始计数器为 00。第 1 次跳转，错了 1 次。

故预测结果一共有 4 次错误，错了 4 次。

若忽略前端乱序，更早的指令会使得后边的指令执行并提交。

</div