

第四章 处理器体系结构

4-5——流水线实现高级技术

本节主要内容

- 数据冒险的其处理方法
 - 流水线暂停
 - 数据转发
- 加载使用冒险的处理方法
- 控制冒险的处理方法

回顾

使流水线处理器工作!

■ 数据冒险

- 指令使用寄存器R为目的，瞬时之后使用寄存器R为源
- 一般情况，不要降低流水线的速度

■ 控制冒险

- 条件分支错误
 - 我们的设计能够预测参与的所有分支
 - 执行2条额外的指令后正确的指令开始被执行
- 从ret指令中获得返回地址
 - 执行3条额外的指令后正确的指令开始被执行

流水阶段

■ 取指

- 选择当前PC
- 读取指令
- 计算增加PC值

■ 译码

- 读取程序寄存器

■ 执行

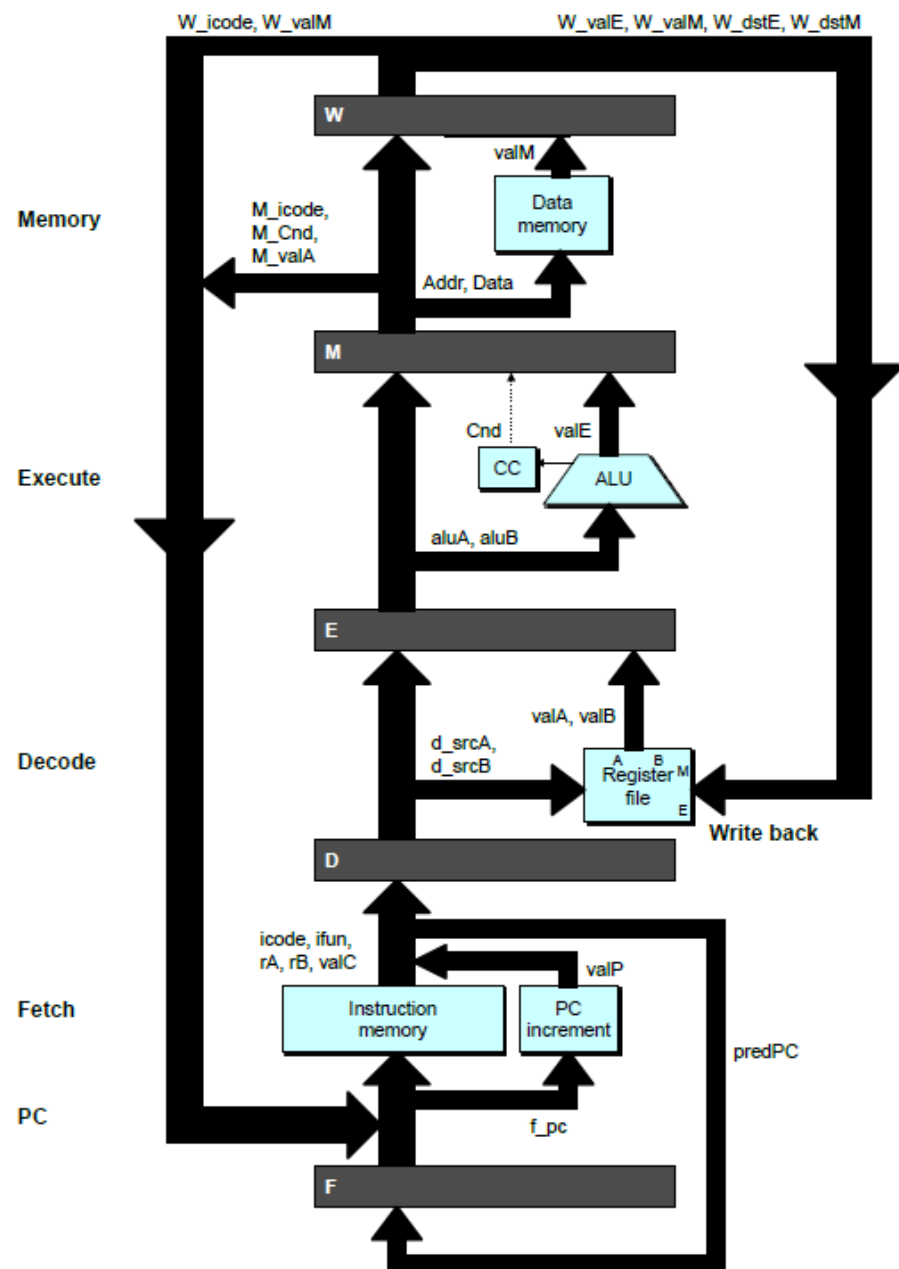
- 操作 ALU

■ 访存

- 读取或写入数据存储器

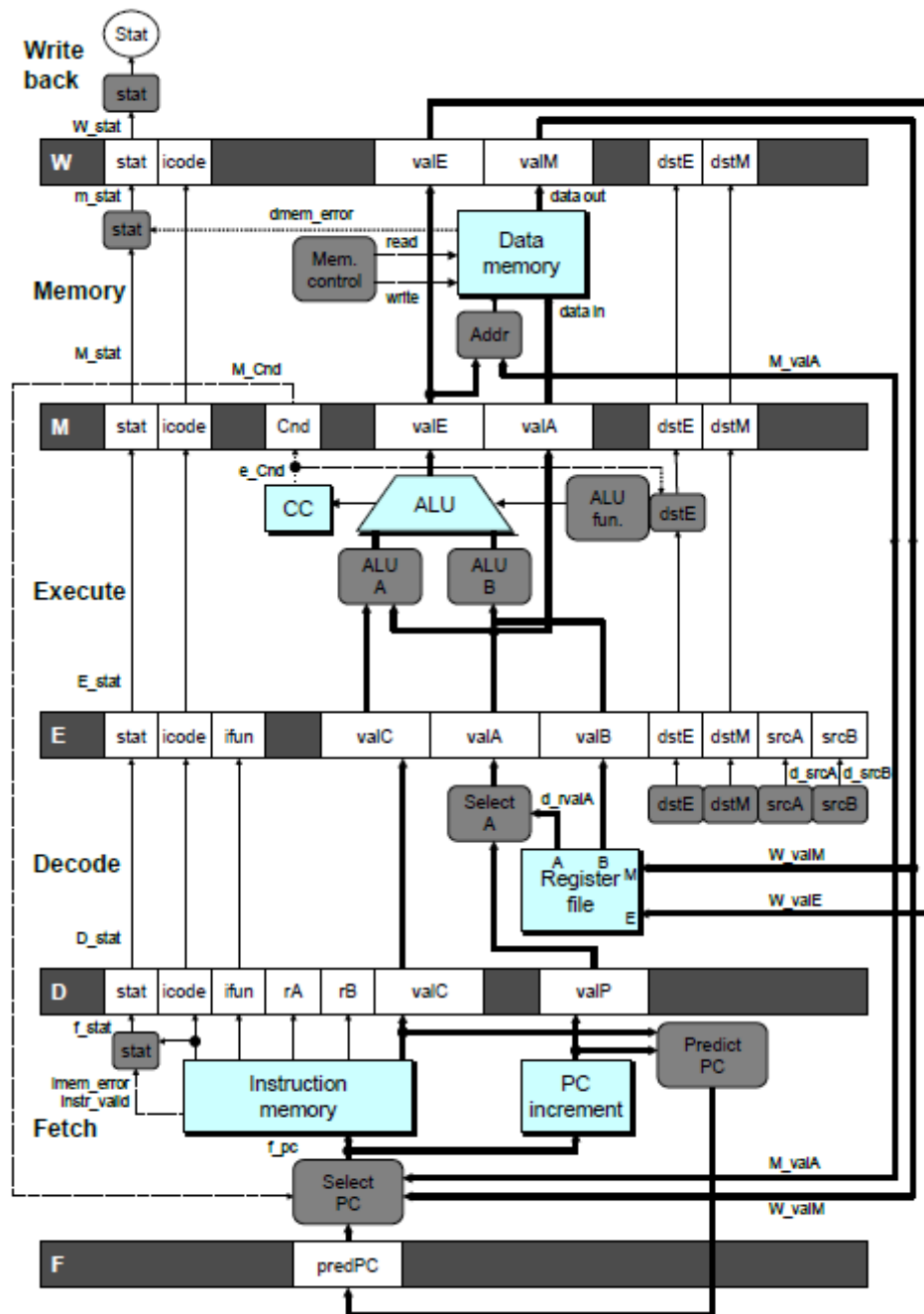
■ 写回

- 更新寄存器文件



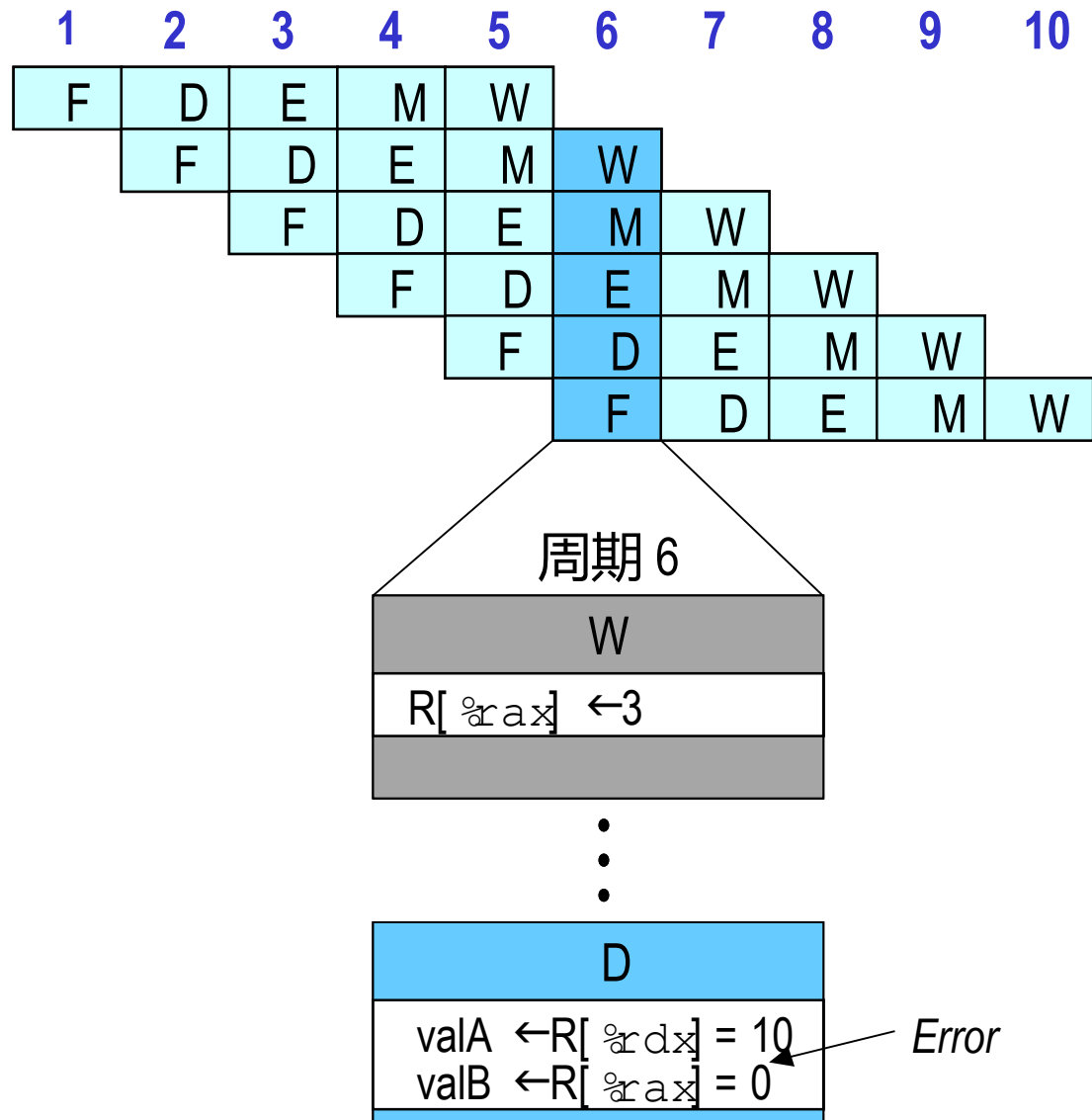
PIPE- 硬件

- 流水线寄存器保存指令执行过程的中间值
- 向上路径
 - 值从一个阶段向另一个阶段传递
 - 不能跳回到过去的阶段
 - e.g., ValC已经经过译码



数据相关: 两条Nop指令

```
# demo-h2.y
0x000: irmovq $10, %rdx
0x00a: irmovq $3, %rax
0x014: nop
0x015: nop
0x016: addq %rdx, %rax
0x018: halt
```



数据相关: 无Nop指令

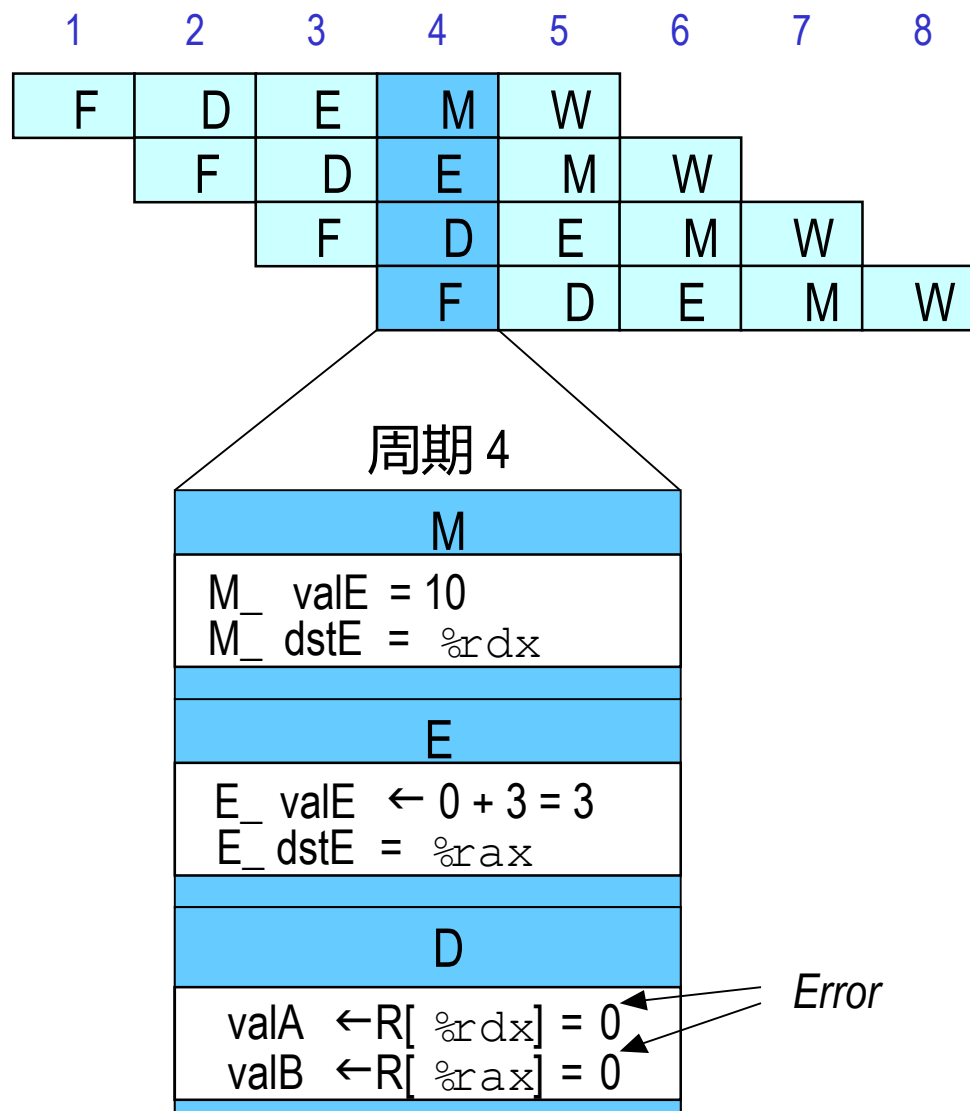
demo-h0.ys

0x000: irmovq \$10,%rdx

0x00a: irmovq \$3,%rax

0x014: addq %rdx,%rax

0x016: halt



数据相关的暂停

demo-h2.js

0x000: irmovq \$10,%rdx

0x00a: irmovq \$3,%rax

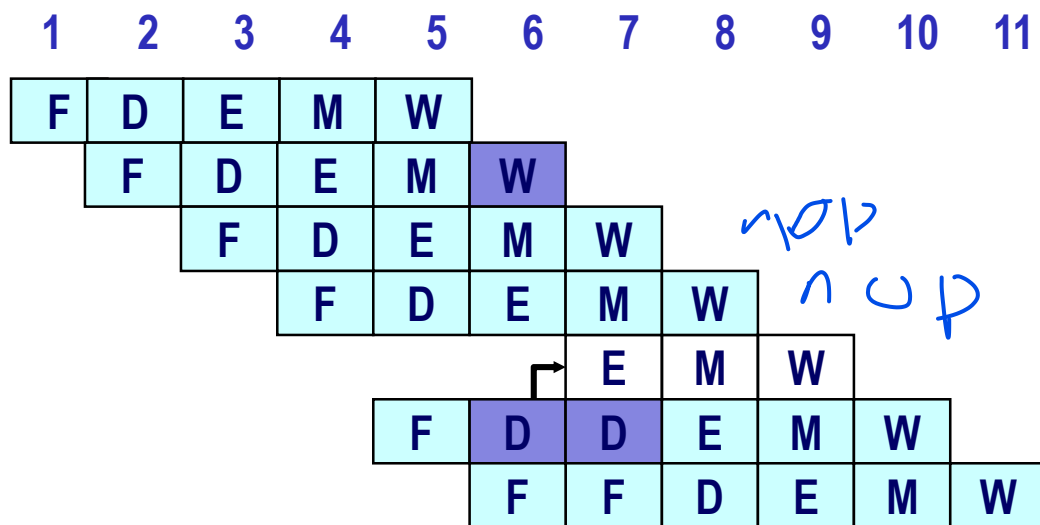
0x014: nop

0x015: nop

bubble

0x016: addq %rdx,%rax

0x018: halt



- 如果一条指令紧跟写寄存器指令后，并且两条指令存在数据冒险，则该指令执行速度可能放慢

以下这两种方法都可以，但实现不一样：

- 1) 将指令阻塞在译码阶段
- 2) 在指令执行阶段动态插入nop

不能同时读写

暂停条件

■ 源寄存器

- 当前指令的srcA和srcB都处于译码阶段

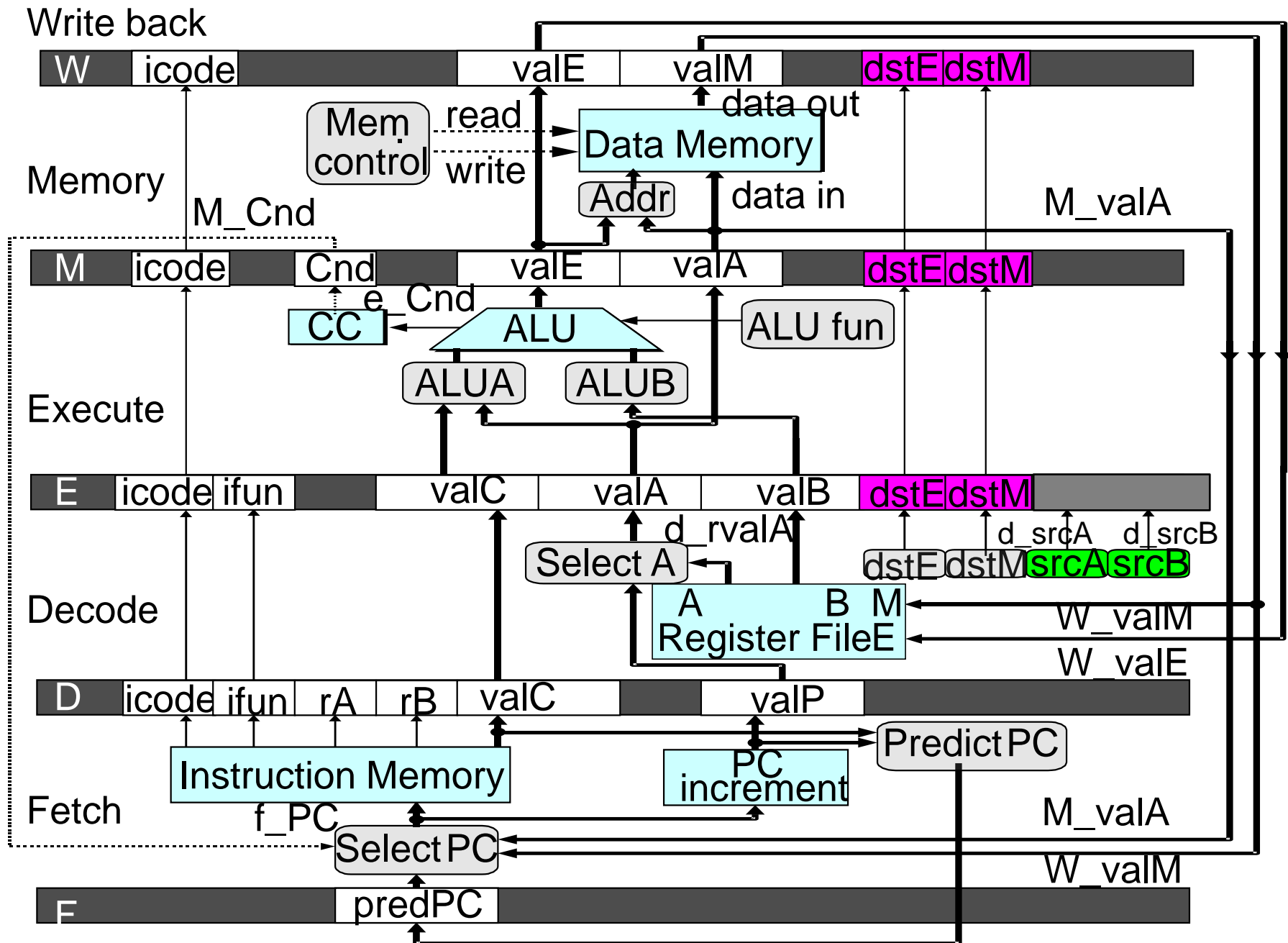
■ 目的寄存器

- dstE 和dstM 域
- 处于执行、访存和写回阶段的指令

■ 特例

ID能读到正确数据

- 对于ID为15(0xF)的寄存器不需要暂停
 - 表示无寄存器操作数
 - 或表示失败的条件和移动



检测暂停条件

demo-h2.y

0x000: irmovq \$10,%rdx

0x00a: irmovq \$3,%rax

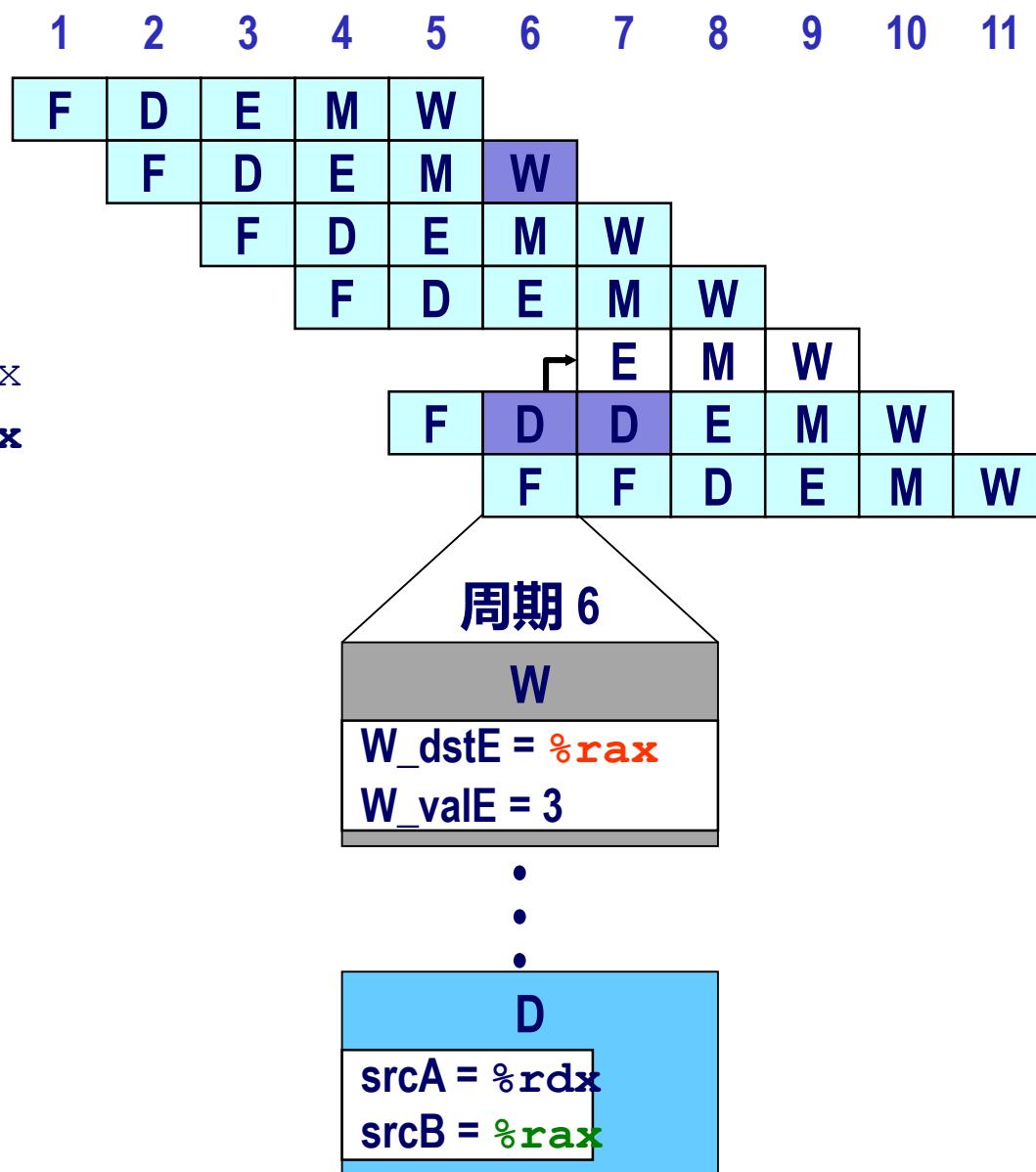
0x014: nop

0x015: nop

bubble

0x016: addq %rdx,%rax

0x018: halt



暂停 X3

0x000: `irmovq $10,%rdx`

0x00a: `irmovq $3,%rax`

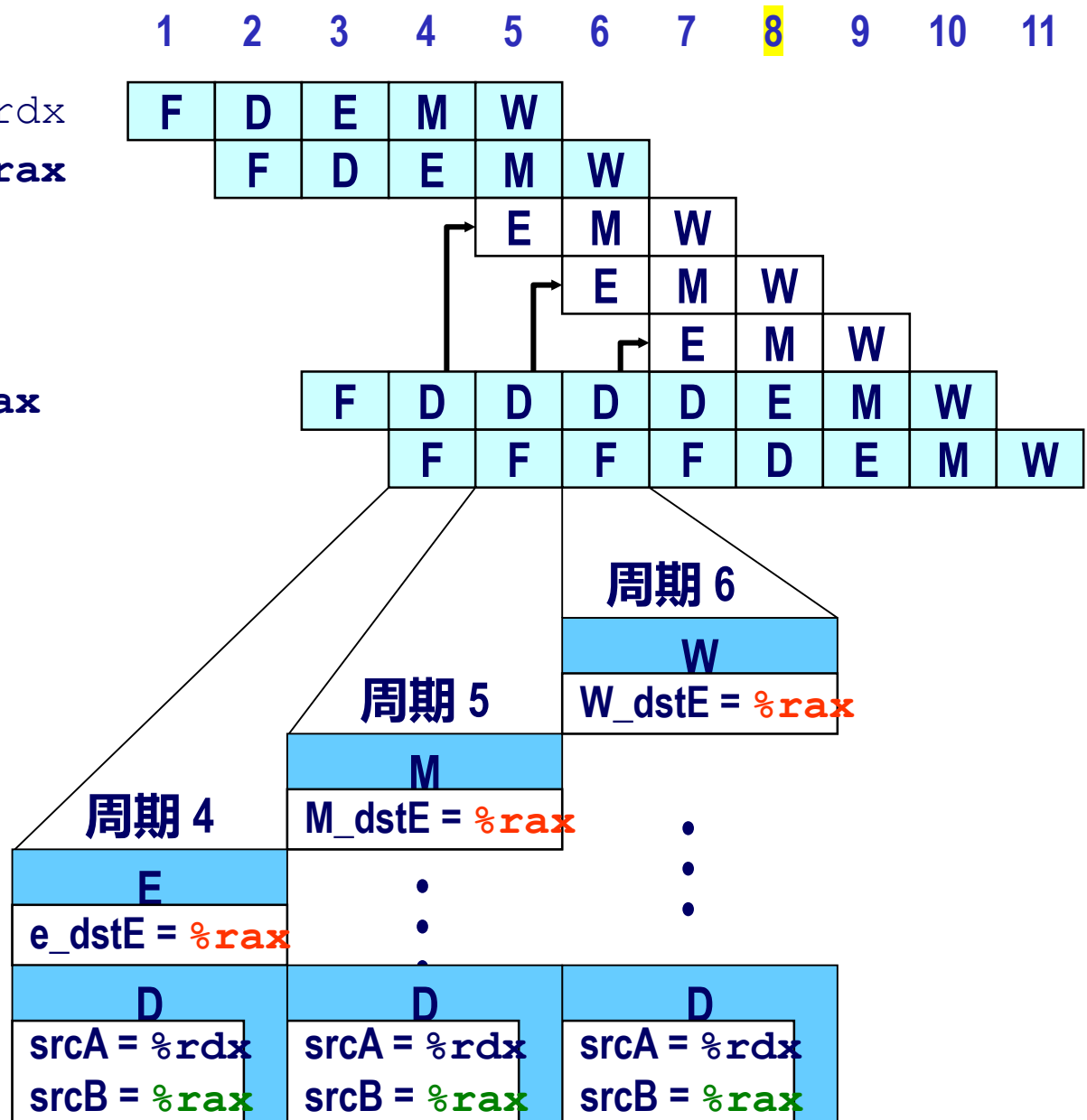
bubble

bubble

bubble

0x014: `addq %rdx,%rax`

0x016: `halt`



```
# demo-h0.ys
```

```
0x000: irmovq $10,%rdx
```

```
0x00a: irmovq $3,%rax
```

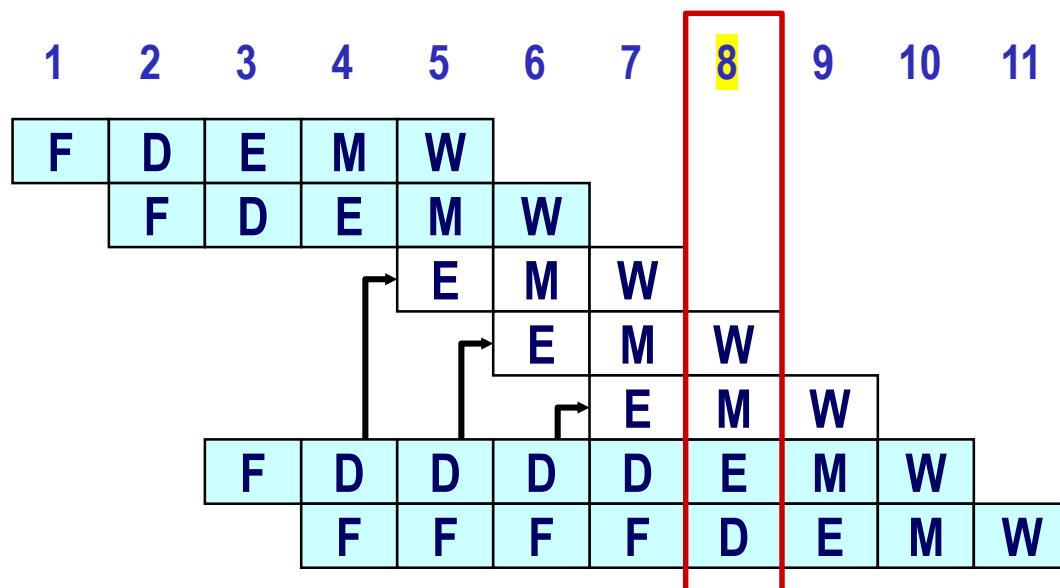
```
bubble
```

```
bubble
```

```
bubble
```

```
0x014: addq %rdx,%rax
```

```
0x016: halt
```



暂停时发生了什么？（以周期8为例）

```
# demo-h0.ys
```

```
0x000: irmovq $10,%rdx
```

```
0x00a: irmovq $3,%rax
```

```
0x014: addq %rdx,%rax
```

```
0x016: halt
```

| 周期 8 | |
|------------|-----------------------|
| Write Back | 气泡 |
| Memory | 气泡 |
| Execute | 0x014: addq %rdx,%rax |
| Decode | 0x016: halt |
| Fetch | |

- 指令停顿在译码阶段
- 紧随其后的指令阻塞在取指阶段
- 气泡插入到执行阶段
 - 像一条自动产生的nop指令
 - 穿过后续阶段

暂停时发生了什么？（以周期8为例）

demo-h0.ys

0x000: irmovq \$10,%rdx

0x00a: irmovq \$3,%rax

0x014: addq %rdx,%rax

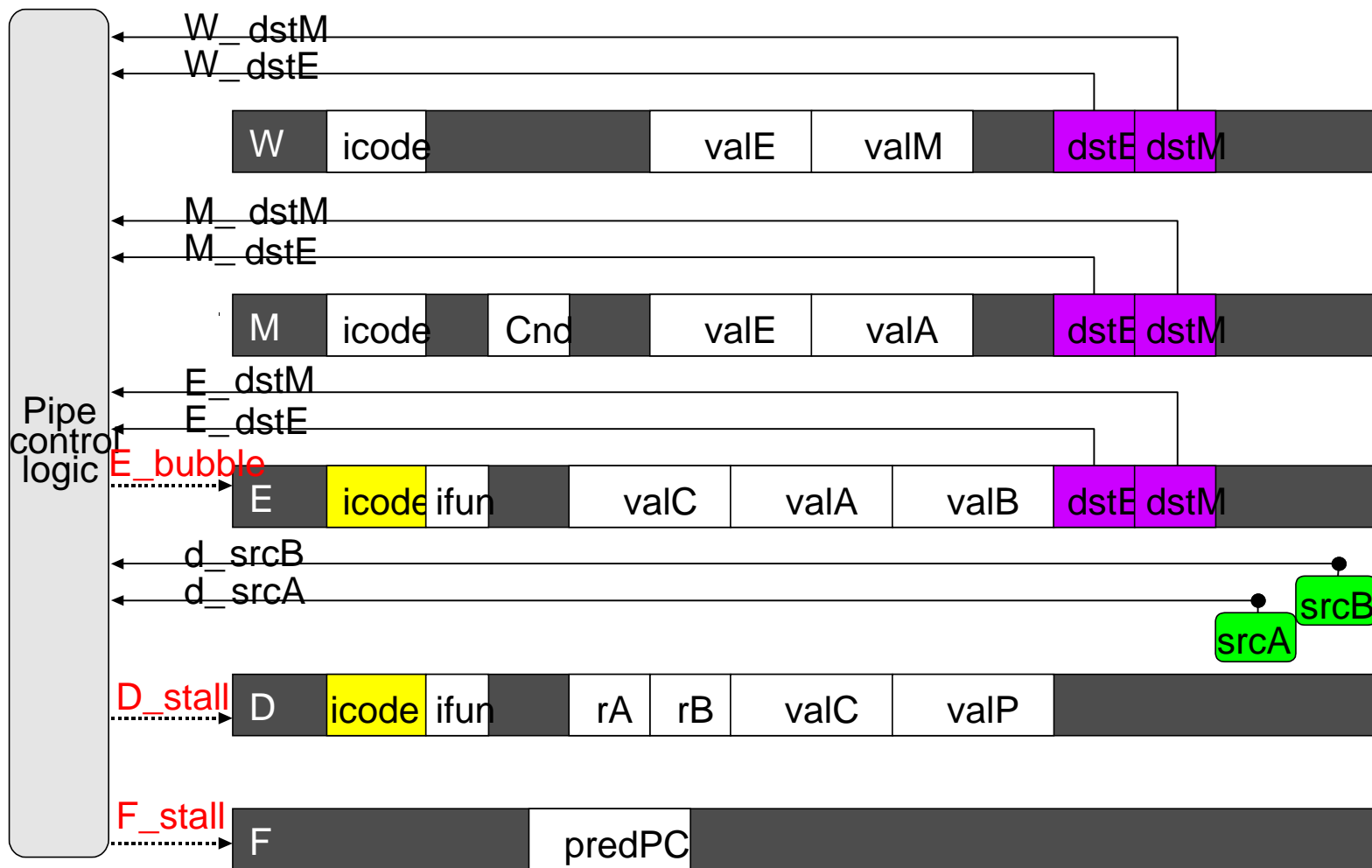
0x016: halt

周期 8

| | |
|------------|-----------------------|
| Write Back | 气泡 |
| Memory | 气泡 |
| Execute | 0x014: addq %rdx,%rax |
| Decode | 0x016: halt |
| Fetch | |

- 指令停顿在译码阶段（F/D流水线寄存器不能写入更新）
- 紧随其后的指令阻塞在取指阶段（PC不能写入更新）
- 气泡插入到执行阶段
 - 像一条自动产生的nop指令
 - 穿过后续阶段

暂停实现

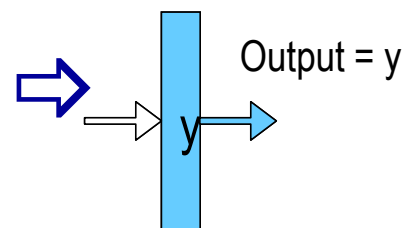
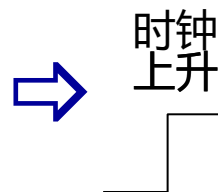
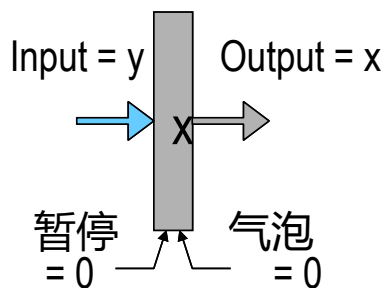


■ 流水线控制

- 组合逻辑检测暂停条件
- 为流水线寄存器的更新方式设置模式信号

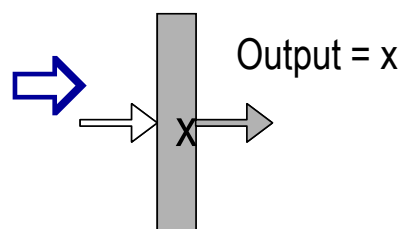
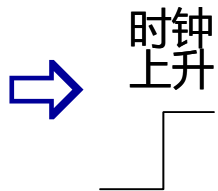
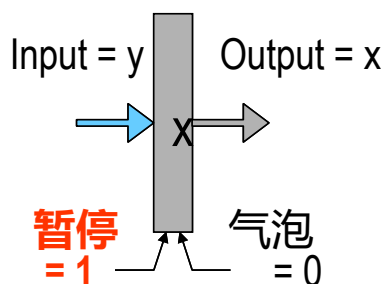
流水线寄存器模式

正常

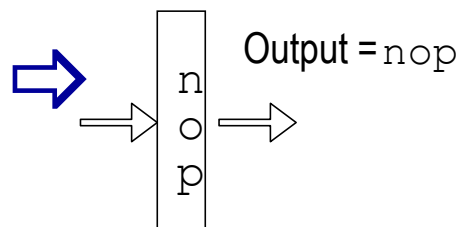
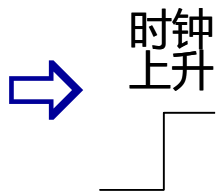
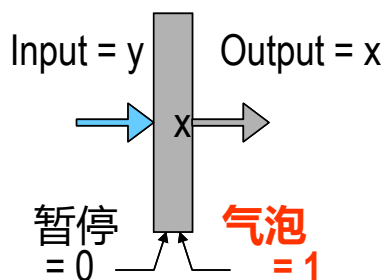


暂停

寄存器写使能暂时失效



气泡



数据转发—增加旁路路径解决数据冒险

前递也叫转发，也叫旁路

■ 理想的流水线

- 源寄存器的写要在写回阶段才能进行
- 操作数在译码阶段从寄存器文件中读入
 - 需要在开始阶段保存在寄存器文件中

■ 观察

- 在执行阶段和访存阶段产生的值

■ 窍门

- 将指令生成的值直接传递到译码阶段
- 需要在译码阶段结束时有效（和计组课程这里有区别）

■ 转发源: e_valE m_valM M_valE W_valM W_valE

■ 转发目的: val_A val_B

数据转发示例

```
# demo-h2.y
```

```
0x000: irmovq $10, %rdx
```

```
0x00a: irmovq $3, %rax
```

```
0x014: nop
```

```
0x015: nop
```

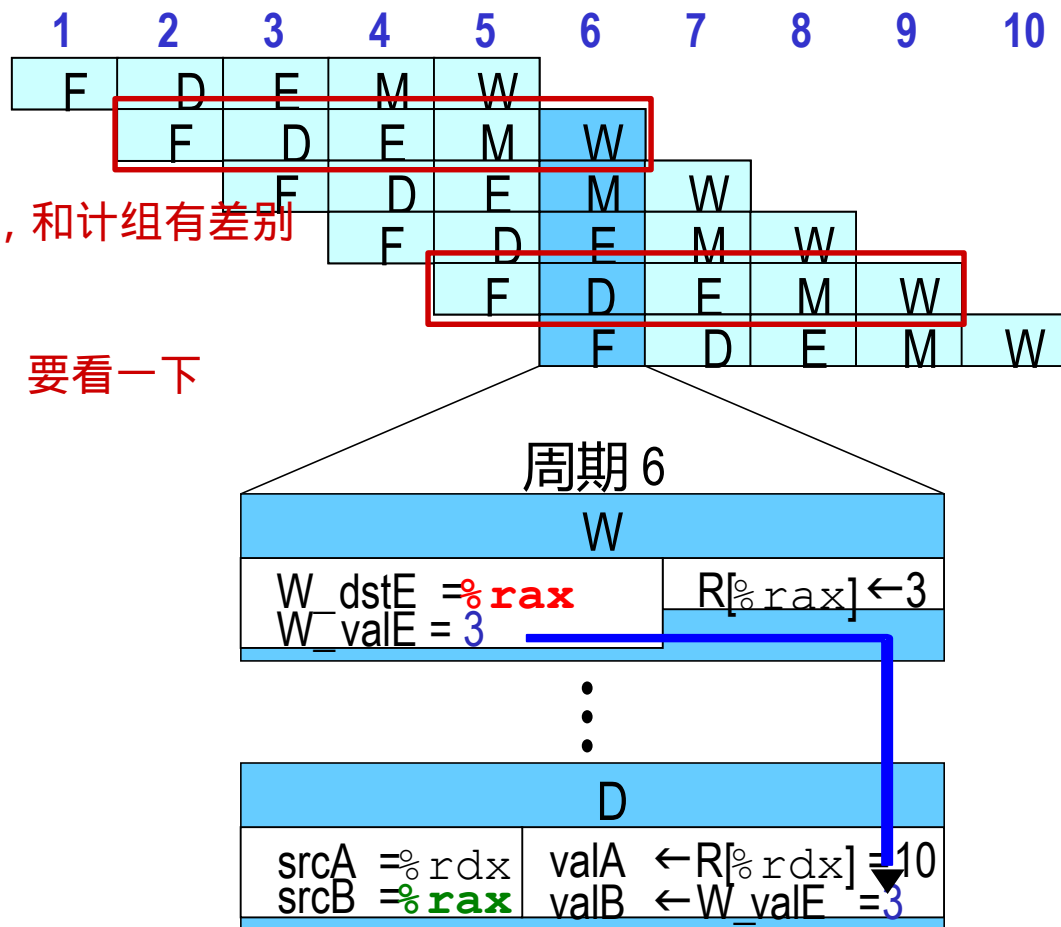
```
0x016: addq %rdx, %rax
```

```
0x018: halt
```

一个也可以，和计组有差别

要看一下

- `irmovq` 处于写回阶段
- 结果值保存到W流水线寄存器
- 转发作为valB提供给译码阶段



旁路路径

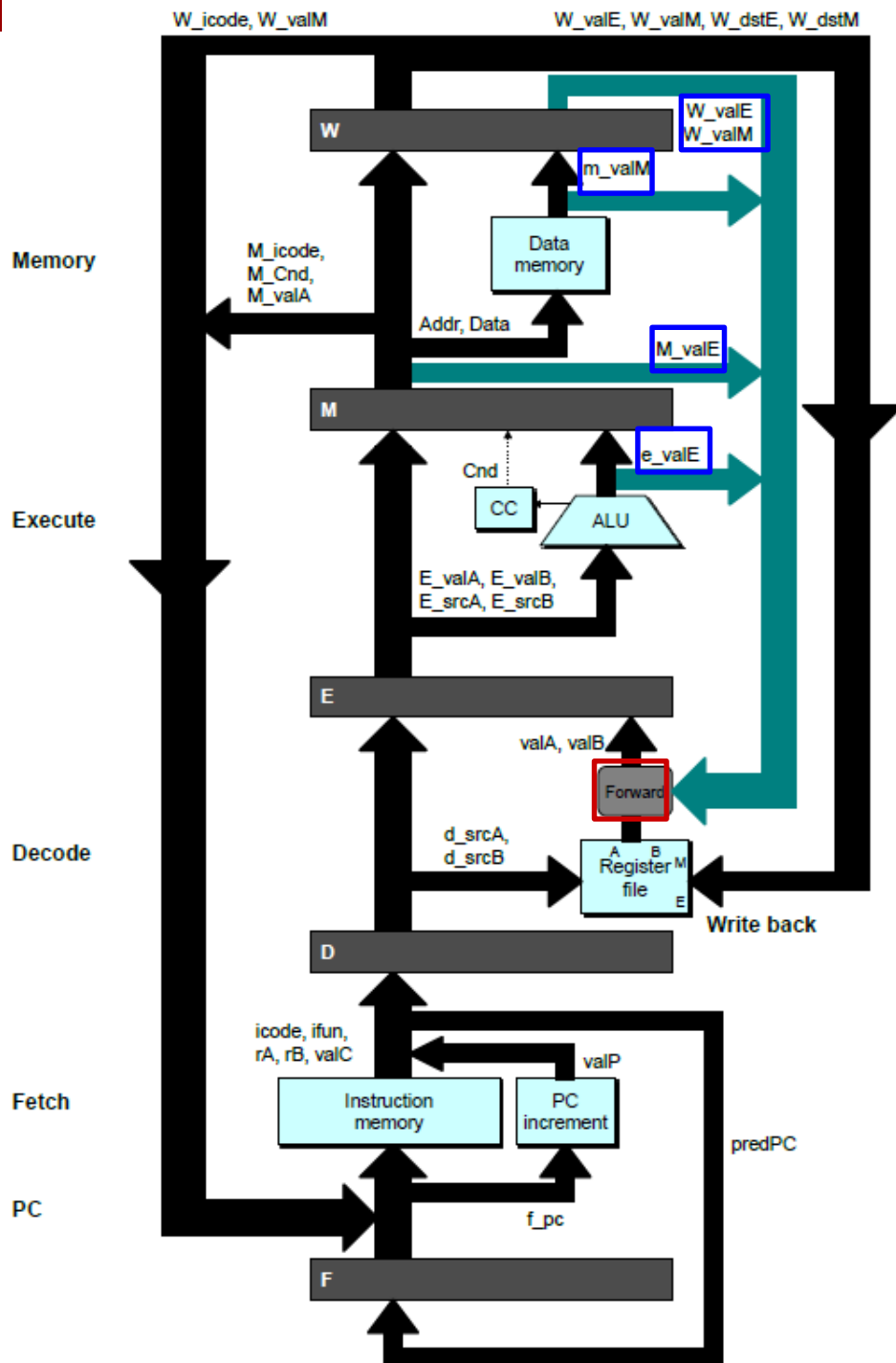
■ 译码阶段

尽量在译码阶段做替换

- 转发逻辑选中valA和valB
- 通常来自寄存器文件
- 转发：从后面的流水线阶段获得valA和valB

■ 转发源

- 执行: valE
- 访存: valE, valM
- 写回: valE, valM



数据转发示例 #2

demo-h0.ys

0x000: irmovq \$10,%rdx

0x00a: irmovq \$3,%rax

0x014: addq %rdx,%rax

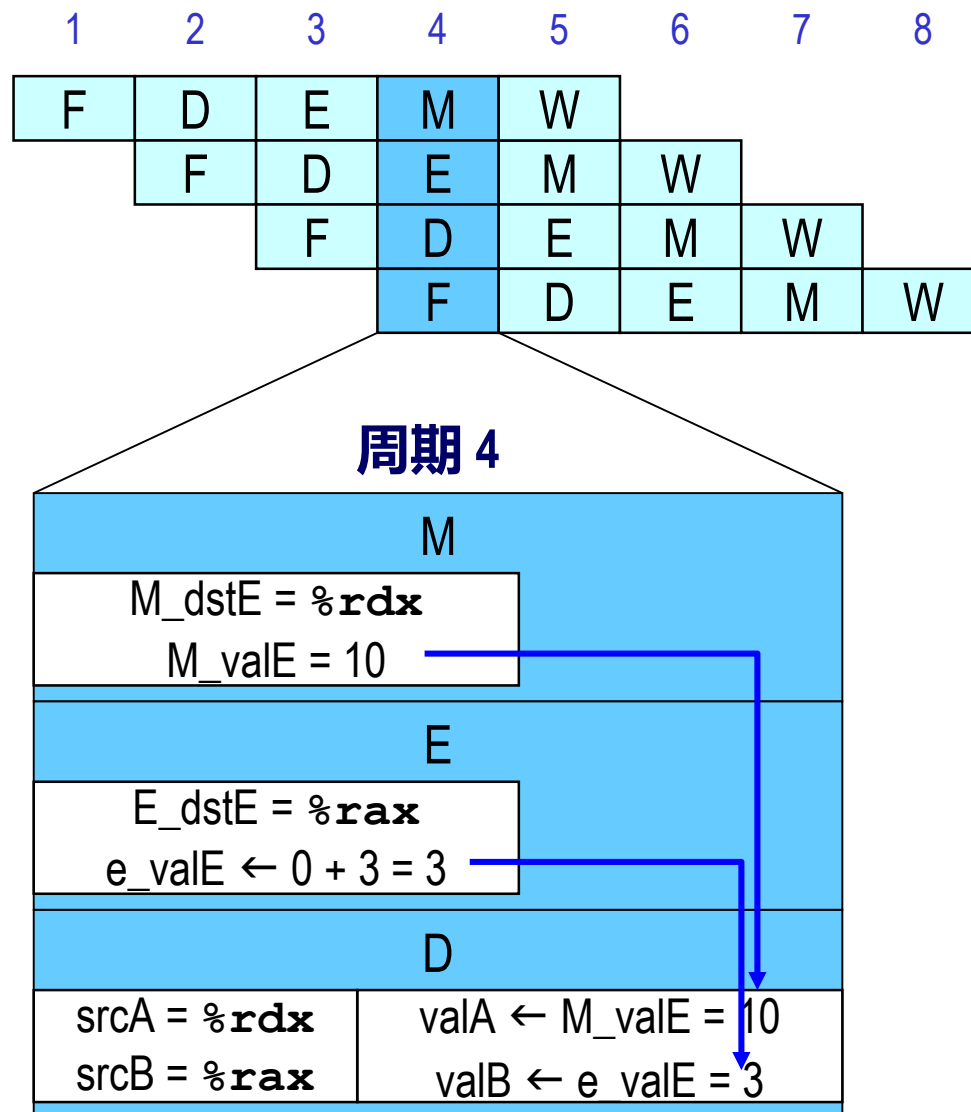
0x016: halt

■ 寄存器%rdx

- 由ALU在前一个周期产生
- 转发自访存阶段作为valA

■ 寄存器%rax

- 值只能由ALU产生
- 转发自执行阶段作为valB



转发优先级

demo-priority.py

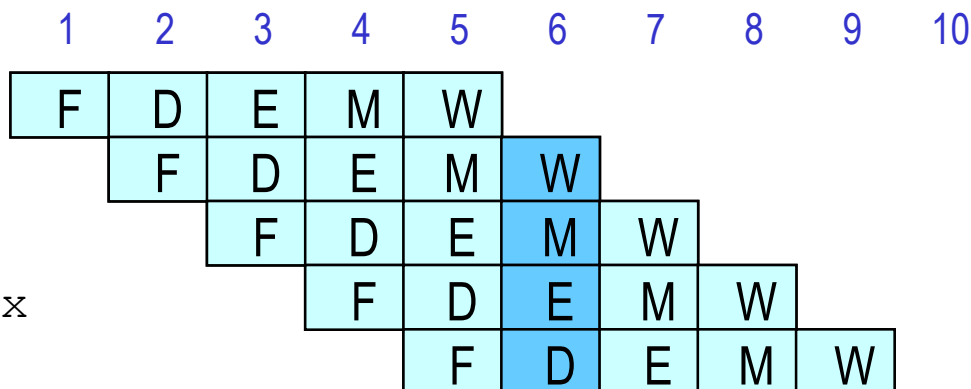
0x000: irmovq \$1, %rax

0x00a: irmovq \$2, %rax

0x014: irmovq \$3, %rax

0x01e: rrmovq %rax, %rdx

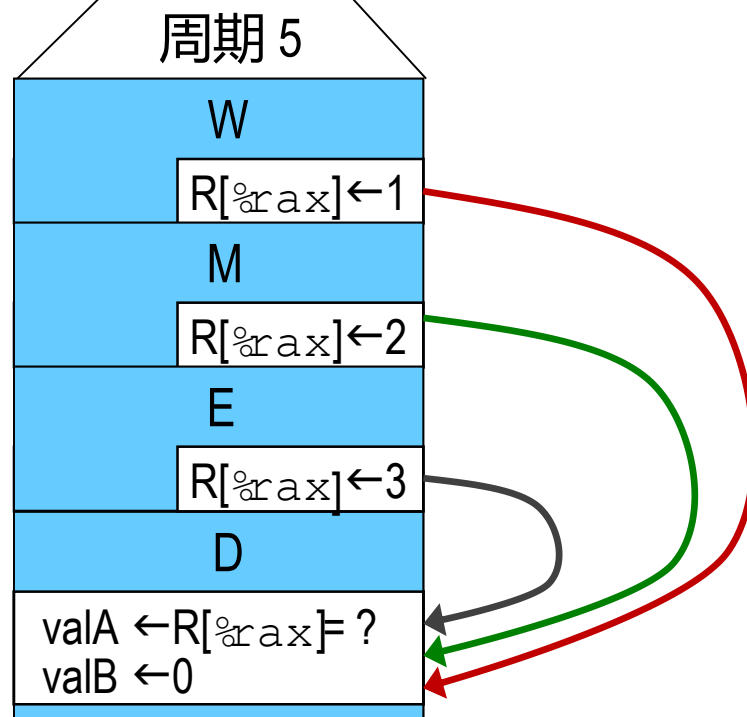
0x020: halt



■ 多重转发选择

- 哪一个应该具有最高优先级，**选最近的指令转发**
- 匹配串行语义
- 使用从最早的流水线阶段获取的匹配值

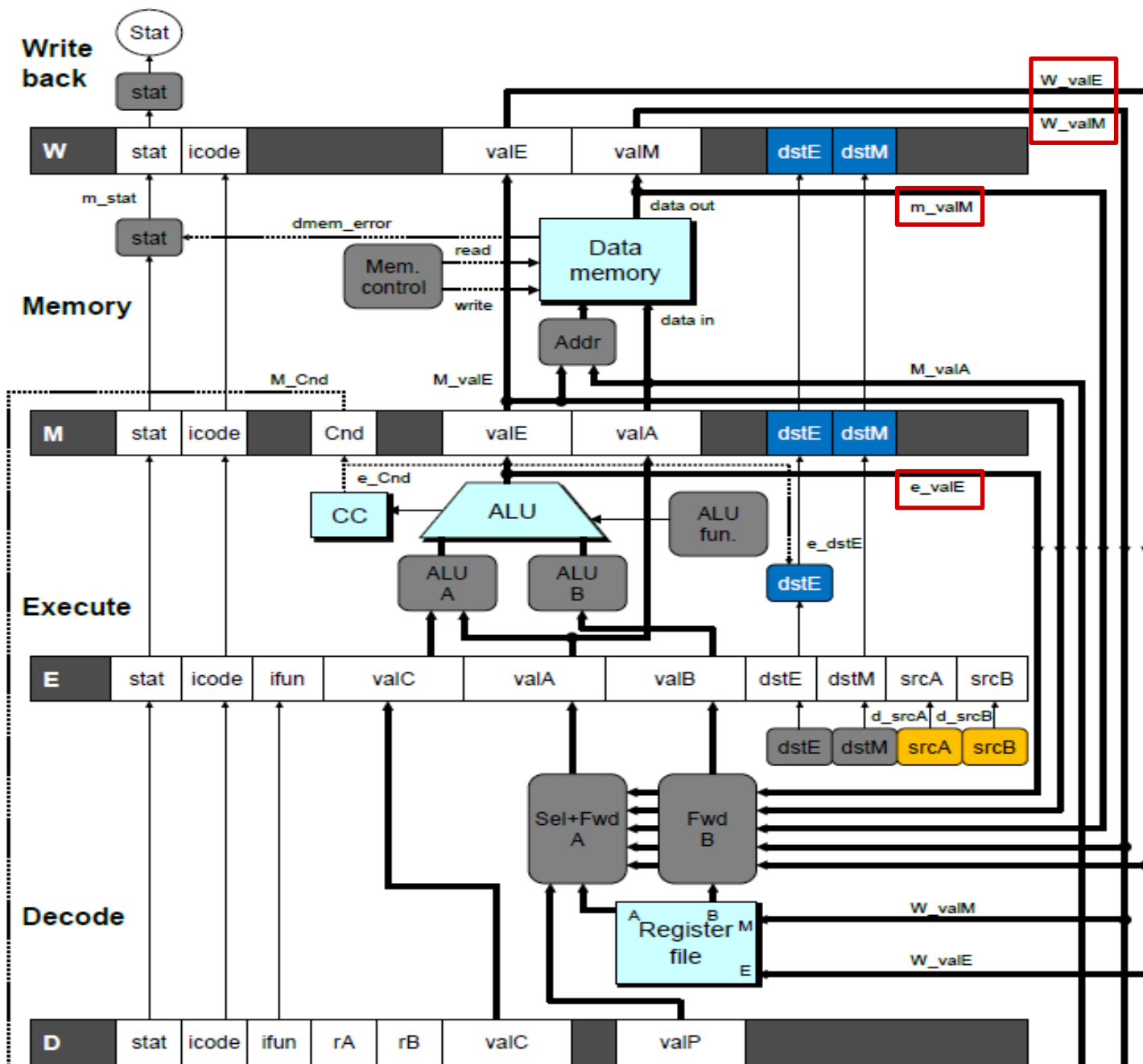
理解“最早的流水线阶段”：流水线阶段：F D E M W。多重转发只会转发阶段E M W的寄存器，所以优先级：E > M > W。
(这里的早就是离当前指令最近的意思)



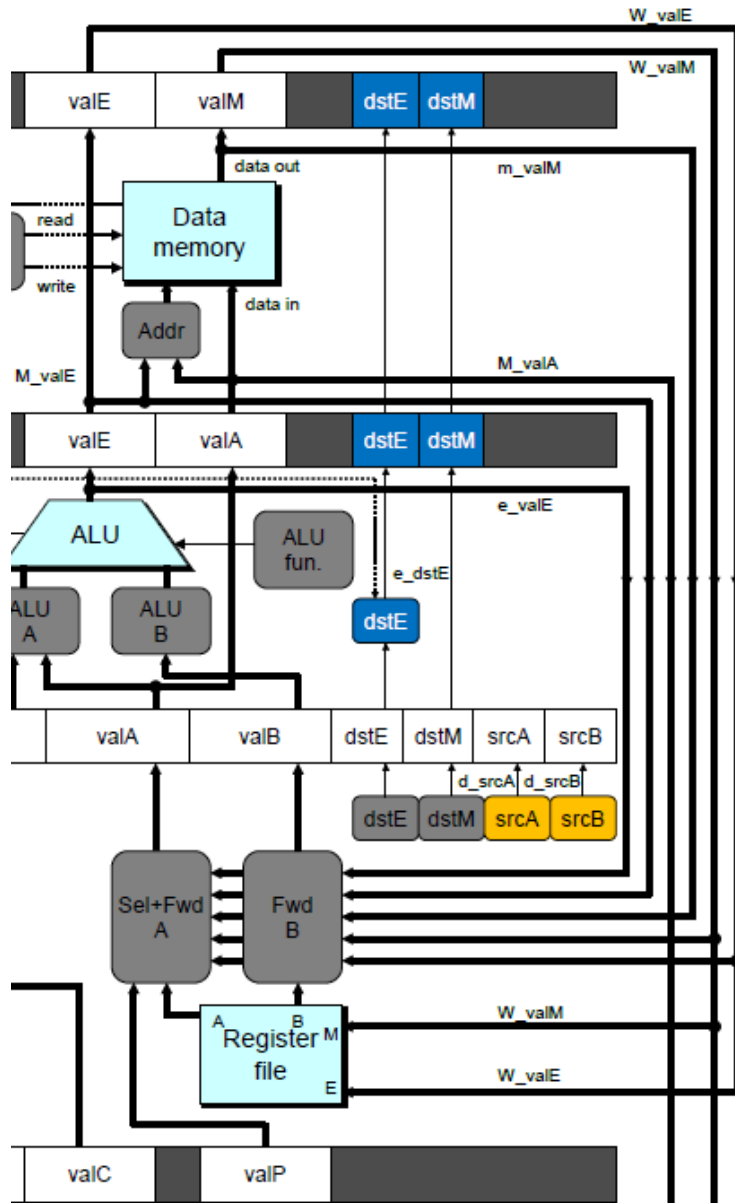
实现转发

在译码阶段从E、M和W流水线寄存器中添加额外的反馈路径

在译码阶段创建逻辑块来从valA和valB的多来源中进行选择



实现转发



```
## What should be the A value?
int d_valA = [
    # Use incremented PC
    D_icode in { ICALL, IJXX } : D_valP;
    # Forward valE from execute
    d_srcA == e_dstE : e_valE;
    # Forward valM from memory
    d_srcA == M_dstM : m_valM;
    # Forward valE from memory
    d_srcA == M_dstE : M_valE;
    # Forward valM from write back
    d_srcA == W_dstM : W_valM;
    # Forward valE from write back
    d_srcA == W_dstE : W_valE;
    # Use value read from register file
    1 : d_rvalA;
];
```

小写字母：硬件出来的结果，大写：已进入流水线寄存器

只用转发不能解决load-use情况，还需加暂停

demo-luh.js

0x000: irmovq \$128,%rdx

0x00a: irmovq \$3,%rcx

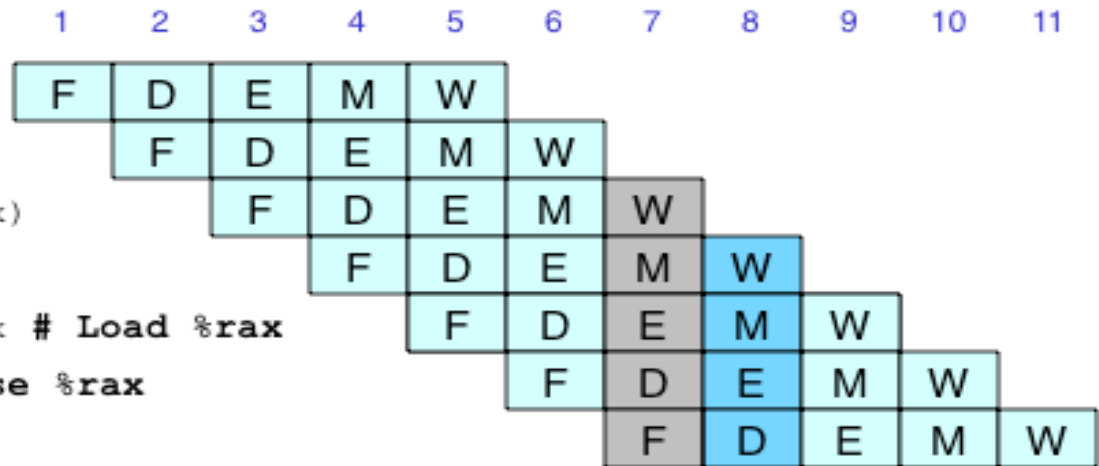
0x014: rmmovq %rcx, 0(%rdx)

0x01e: irmovq \$10,%rbx

0x028: mrmovq 0(%rdx),%rax # Load %rax

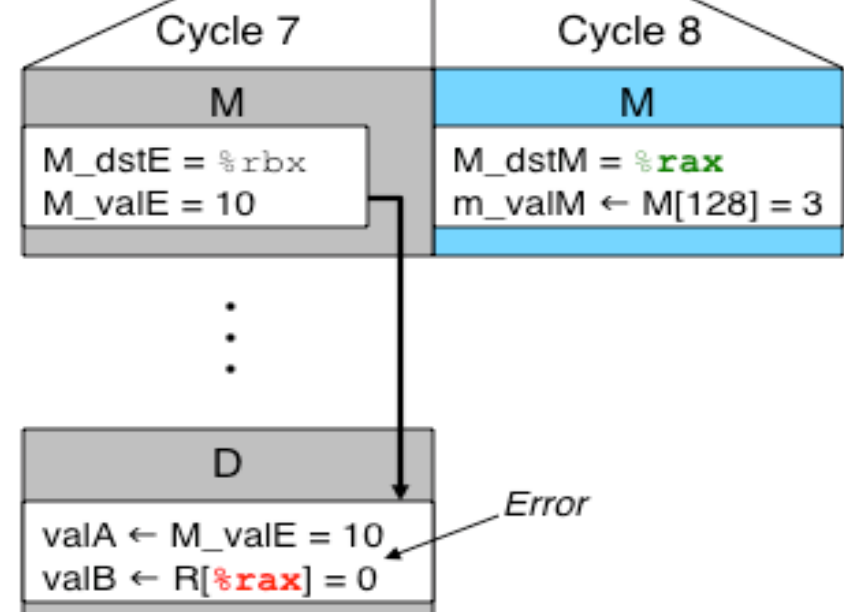
0x032: addq %rbx,%rax # Use %rax

0x034: halt



■ 加载-使用 依赖

- 在周期7译码阶段结束时需要的值
- 在周期8访存阶段才读取该值



解决 加载/使用 冒险的办法: 暂停+前递

```
# demo-luh.js
```

```
0x000: irmovq $128,%rdx
```

```
0x00a: irmovq $3,%rcx
```

```
0x014: rmmovq %rcx, 0(%rdx)
```

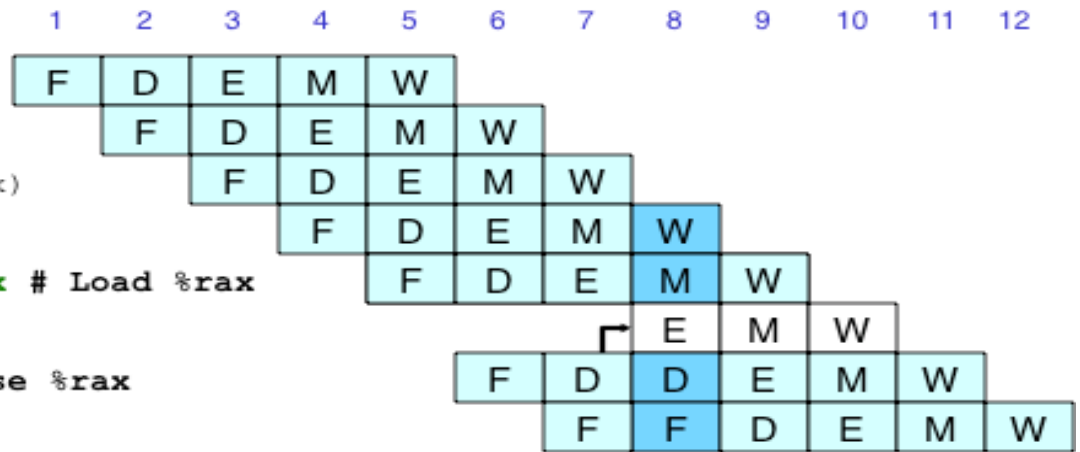
```
0x01e: irmovq $10,%rbx
```

```
0x028: mrmovq 0(%rdx),%rax # Load %rax
```

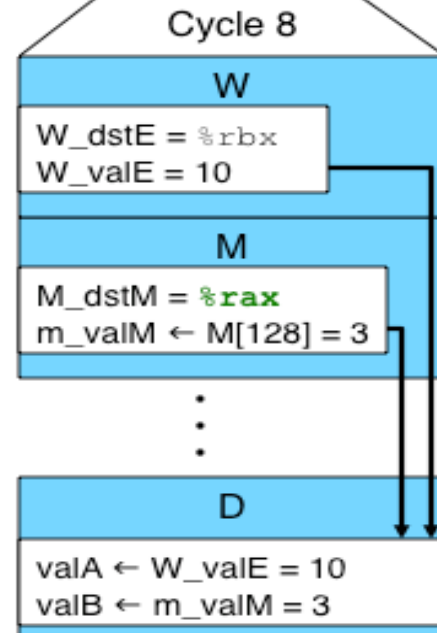
bubble

```
0x032: addq %rbx,%rax # Use %rax
```

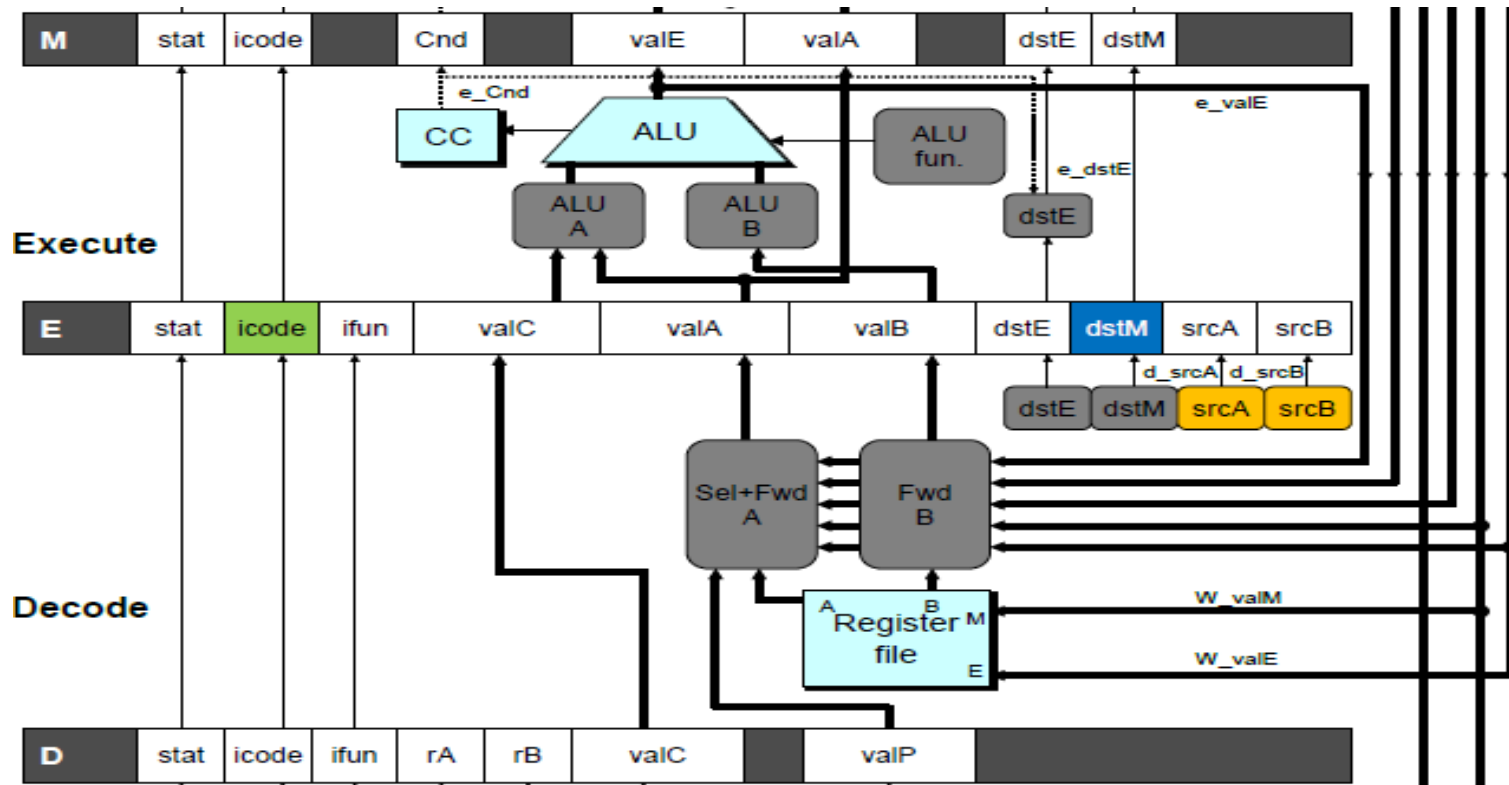
```
0x034: halt
```



- 使用指令暂停一个周期
- 然后就可以获取从访存阶段转发的加载值



检测 加载/使用 冒险



| 条件 | 触发 |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 加载/使用 冒险 | <code>E_icode in { IMRMOVQ, IPOPOPQ } &&</code> <code>E_dstM in { d_srcA, d_srcB }</code> |

加载/使用 冒险的控制

```
# demo -luh .ys
```

```
0x000: irmovq $128,%rdx
```

```
0x00a: irmovq $3,%rcx
```

```
0x014: rmmovq %rcx, 0(%rdx)
```

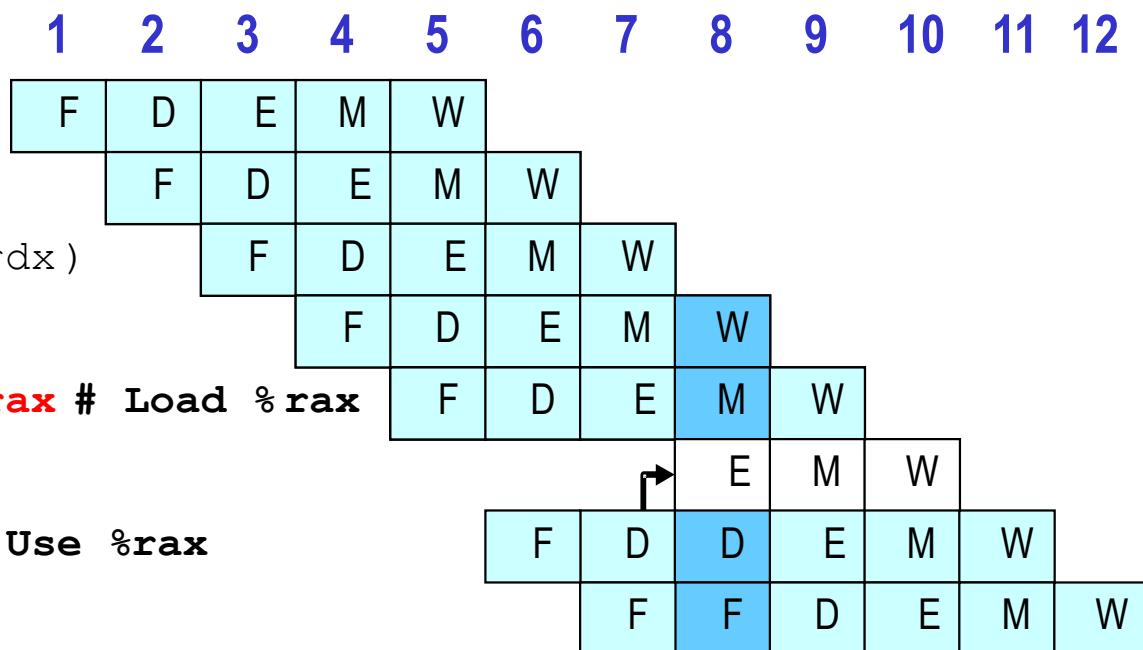
```
0x01e: irmovq $10,%ebx
```

```
0x028: mrmovq 0(%rdx), %rax # Load %rax
```

bubble

```
0x032: addq %ebx, %rax # Use %rax
```

```
0x034: halt
```



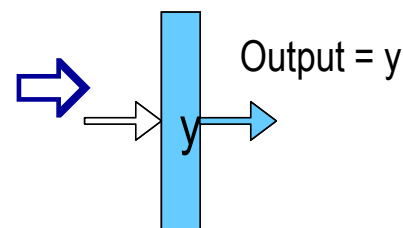
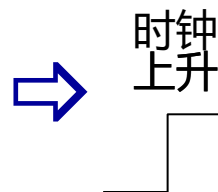
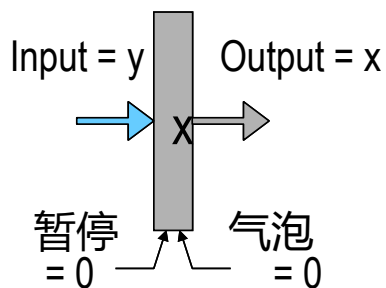
- 将指令暂停在取指和译码阶段
- 在执行阶段注入气泡

| 条件 | F | D | E | M | W |
|----------|----|----|----|----|----|
| 加载/使用 冒险 | 暂停 | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 |

备注：从load类指令角度看，需要对F、D暂停，对E进行气泡化处理，即对流水线寄存器做控制；本例中，对第7周期的流水线寄存器做控制，产生了8周期的结果。

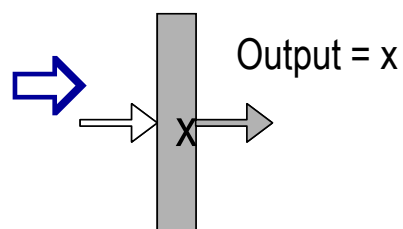
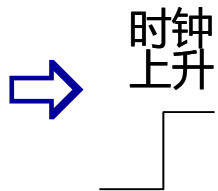
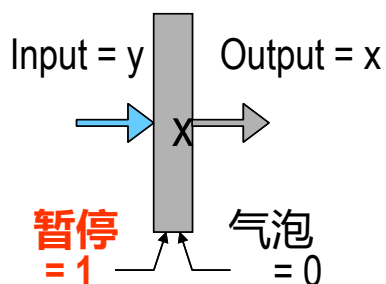
流水线寄存器模式

正常

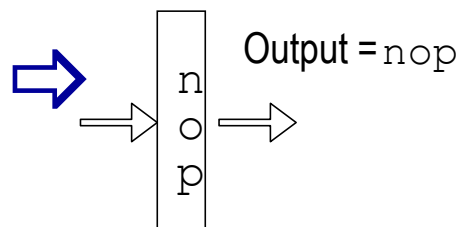
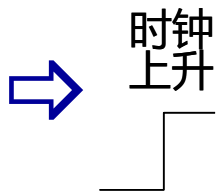
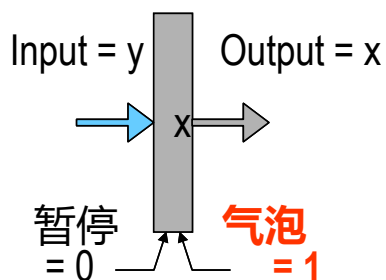


暂停

寄存器写使能暂时失效



气泡



分支预测错误示例

demo-j.js

```

0x000:      xorq %rax,%rax
0x002:      jne  t                # Not taken
0x00b:      irmovq $1, %rax      # Fall through
0x015:      nop
0x016:      nop
0x017:      nop
0x018:      halt
0x019:  t:  irmovq $3, %rdx      # Target
0x023:      irmovq $4, %rcx      # Should not execute
0x02d:      irmovq $5, %rdx      # Should not execute
  
```

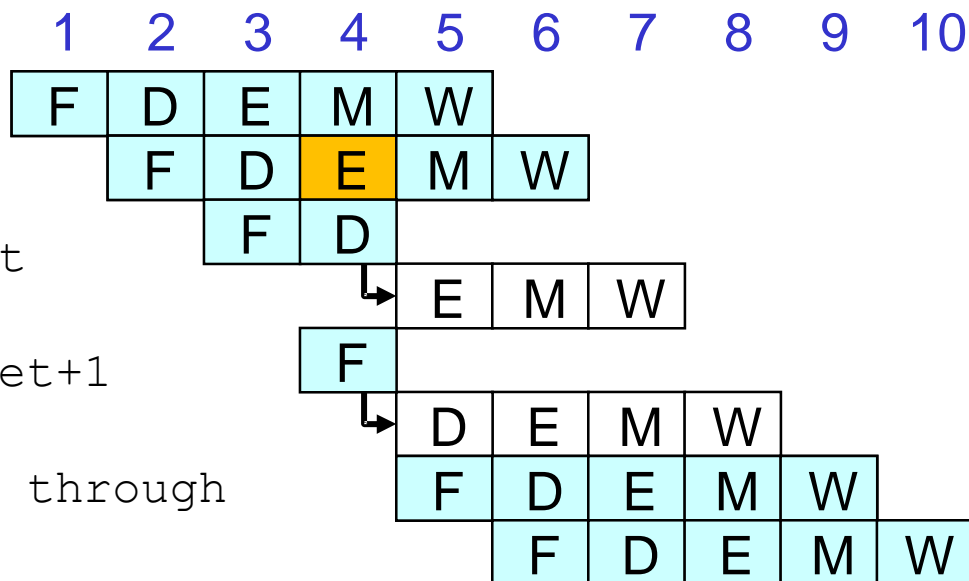
- 只能执行最早的7条指令

处理预测错误

#demo-j.js

```

0x000: xorq %rax, %rax
0x002: jne target #Not Taken
0x016: irmovq $3, %rdx #target
      bubble
0x020: irmovq $4, %rcx # target+1
      bubble
0x00b: irmovq $1, %rax # Fall through
0x015: halt
  
```



作为预测分支

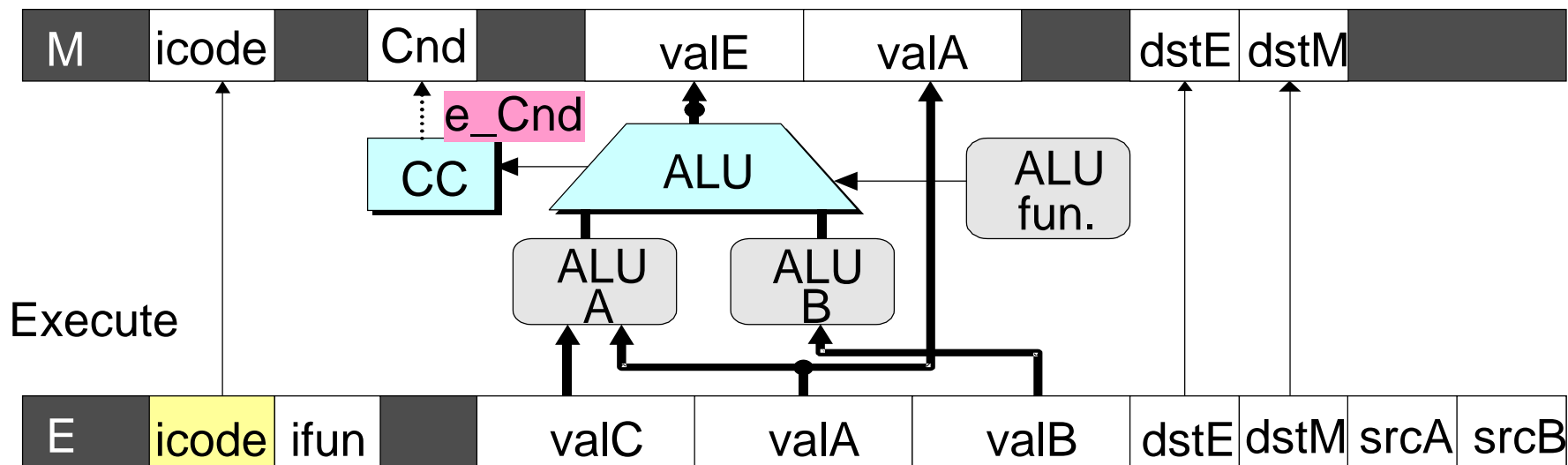
- 取出 2 条目标指令



当预测错误时取消

- 在执行阶段检测到未选择该分支
- 在紧跟的指令周期中，将处于执行和译码阶段的指令用气泡替换掉
- 此时没有出现副作用

检测分支预测错误



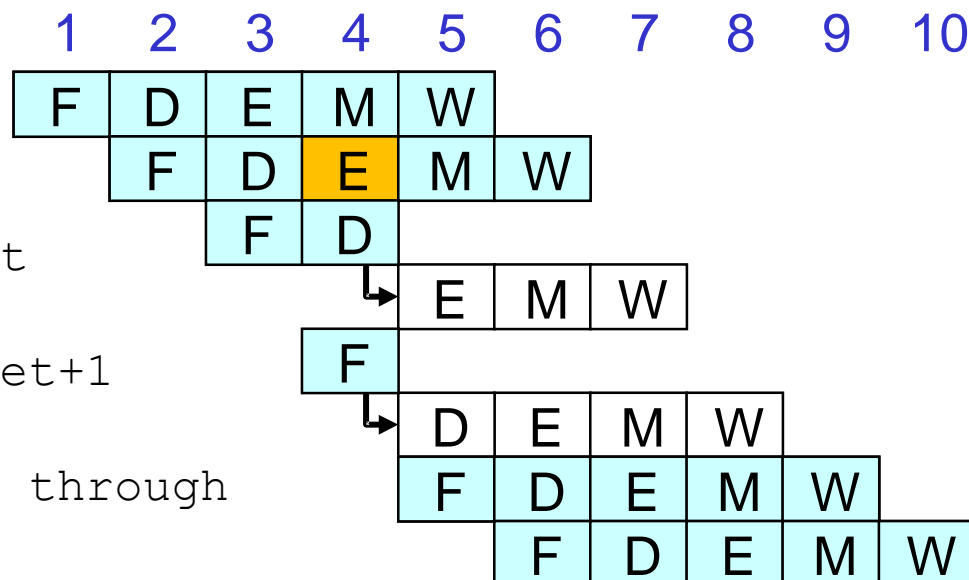
| 条件 | 触发 |
|--------|----------------------------------|
| 分支预测错误 | $E_icode = IJXX \ \& \ !e_Cnd$ |

预测错误的控制

#demo-j.js

```

0x000: xorq %rax, %rax
0x002: jne target #Not Taken
0x016: irmovq $2, %rdx #target
      bubble
0x020: irmovq $3, %rbx # target+1
      bubble
0x00b: irmovq $1, %rax # Fall through
0x015: halt
  
```



| 条件 | F | D | E | M | W |
|--------|----|----|----|----|----|
| 分支预测错误 | 正常 | 气泡 | 气泡 | 正常 | 正常 |

备注：从Jxx条件跳转指令（失败情况下）角度看，需要对D、E进行气泡化处理，即对流水线寄存器做控制；本例中，对第4周期的流水线寄存器做控制，产生了5周期的结果。

Return示例

demo-retb.ys

```

0x000:      irmovq Stack,%rsp      # Intialize stack pointer
0x00a:      call p                  # Procedure call
0x013:      irmovq $5,%rsi        # Return point
0x01d:      halt
0x020:      .pos 0x20
0x020: p:   irmovq $-1,%rdi        # procedure
0x02a:      ret
0x02b:      irmovq $1,%rax         # Should not be executed
0x035:      irmovq $2,%rcx         # Should not be executed
0x03f:      irmovq $3,%rdx         # Should not be executed
0x049:      irmovq $4,%rbx         # Should not be executed
0x100:      .pos 0x100
0x100: Stack:                     # Stack: Stack pointer

```

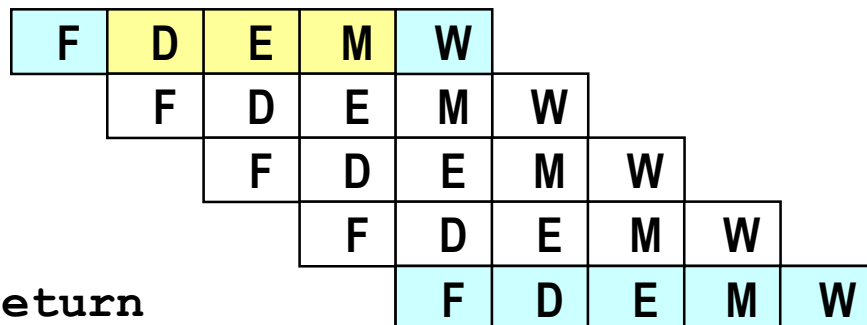
- 之前执行了3条额外的指令

正确的Return示例

```

1: 0x026: ret
2:         bubble
3:         bubble
4:         bubble
5: 0x013: irmovq $5, %rsi #return

```



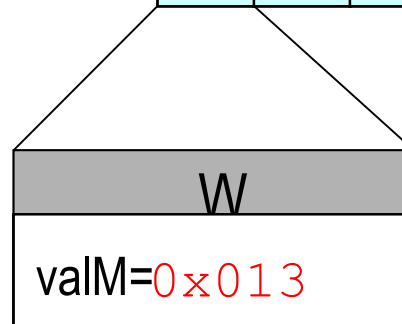
■ 当ret经过流水线时，暂停在取指阶段

● 当处于译码、执行和访存阶段

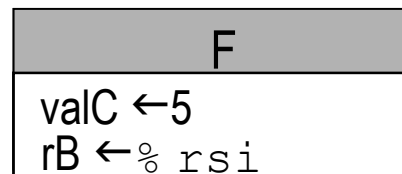
■ 在译码阶段注入气泡

■ 当到达写回阶段释放暂停

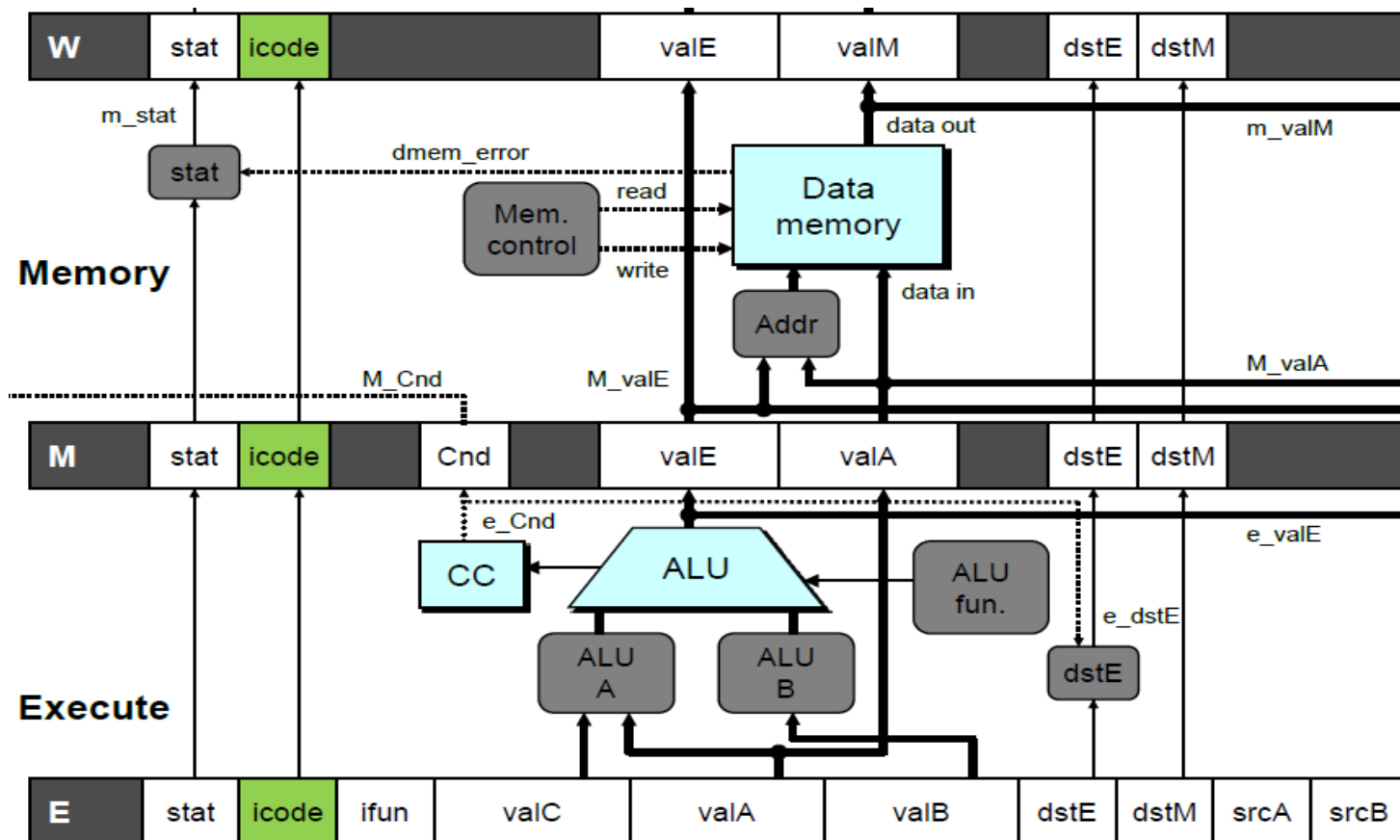
注释：释放暂停指的是不继续bubble，对ret指令只需暂停三个周期即可，不过多做暂停处理了



•
•
•



检测Return



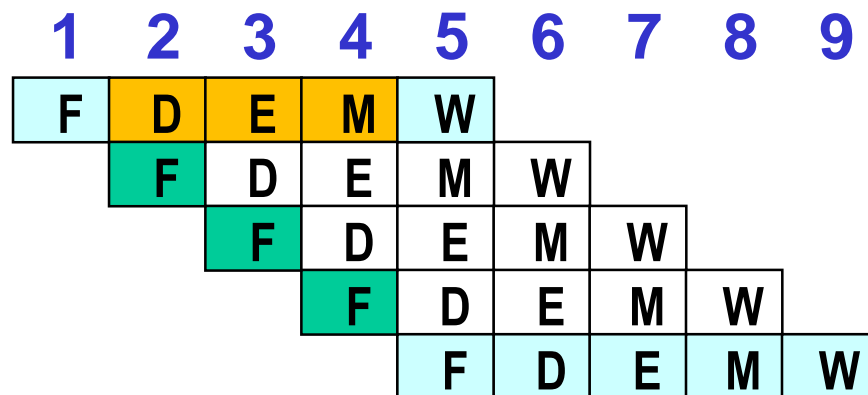
| 条件 | 触发 |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 处理 <code>ret</code> | <code>IRET</code> in { <code>D_icode</code> , <code>E_icode</code> , <code>M_icode</code> } |

Return的控制

```
# demo_retb
```

```
0x026:      ret
           bubble
           bubble
           bubble
```

```
0x014:  irmovq$5,%rsi # Return
```



| 条件 | F | D | E | M | W |
|---------------|----|----|----|----|----|
| 处理 ret | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 | 正常 |

备注：如果在D、E、M阶段分别检测出lcode是ret指令，都需要立刻对F流水线寄存器做暂停处理、对D流水线寄存器做气泡化处理，每一个当前做都会直接影响到下个阶段的结果。上面ret这个例子2、3、4三个阶段都做处理，3、4、5则表现出了处理结果。

解决三种冒险：检测+处理动作

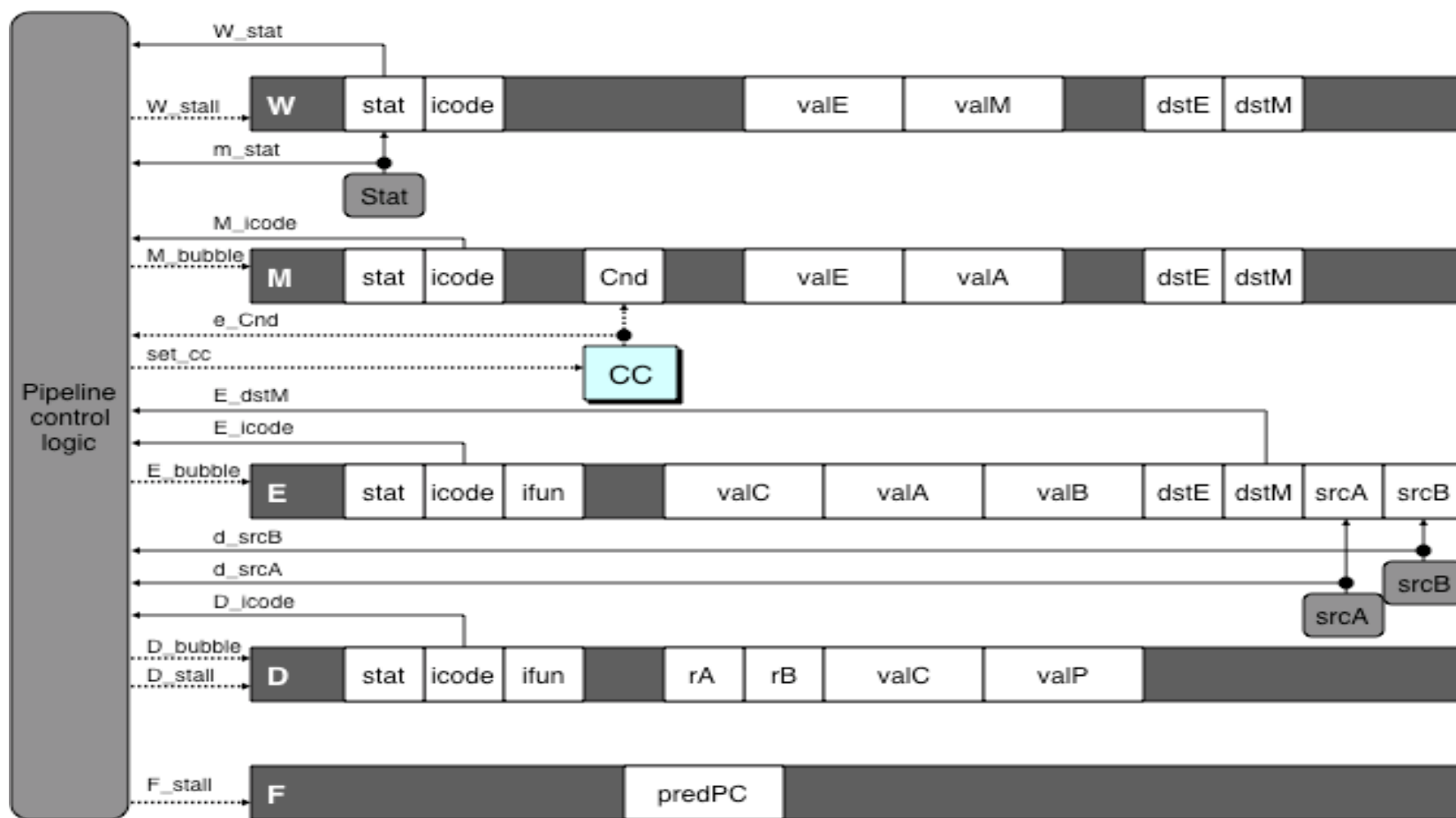
■ 检测

| 条件 | 触发 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 处理 ret | IRET in { D_icode , E_icode , M_icode } |
| 加载/使用 冒险 | E_icode in { IMRMOVQ , IPOPQ } && E_dstM in { d_srcA , d_srcB } |
| 分支预测错误 | E_icode = IJXX & !e_Cnd |

■ 动作(在下一个周期)

| 条件 | F | D | E | M | W |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 处理 ret | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 | 正常 |
| 加载/使用 冒险 | 暂停 | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 |
| 分支预测错误 | 正常 | 气泡 | 气泡 | 正常 | 正常 |

实现流水线控制



- 组合逻辑产生流水线控制信号
- 动作发生在每个追随周期开始的时候

流水线控制的初始版本

■ 检测

| 条件 | 触发 |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 处理 <code>ret</code> | <code>IRET</code> in { <code>D_icode</code> , <code>E_icode</code> , <code>M_icode</code> } |
| 加载/使用 冒险 | <code>E_icode</code> in { <code>IMRMOVQ</code> , <code>IPOPQ</code> } && <code>E_dstM</code> in { <code>d_srcA</code> , <code>d_srcB</code> } |
| 分支预测错误 | <code>E_icode</code> = <code>IJXX</code> & <code>!e_Cnd</code> |

■ 动作(在下一个周期)

| 条件 | F | D | E | M | W |
|---------------------|----|----|----|----|----|
| 处理 <code>ret</code> | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 | 正常 |
| 加载/使用 冒险 | 暂停 | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 |
| 分支预测错误 | 正常 | 气泡 | 气泡 | 正常 | 正常 |

```

bool F_stall =
    # Conditions for a load/use hazard
    E_icode in { IMRMOVQ, IPOPQ } && E_dstM in
    { d_srcA, d_srcB } ||
    # stalling at fetch while ret passes
    through pipeline
    IRET in { D_icode, E_icode, M_icode };

bool D_stall =
    # Conditions for a load/use hazard
    E_icode in { IMRMOVQ, IPOPQ } && E_dstM in
    { d_srcA, d_srcB };
  
```

流水线控制的初始版本

■ 检测

| 条件 | 触发 |
|----------|--------------------------------------------------------------------|
| 处理 ret | IRET in { D_icode, E_icode, M_icode } |
| 加载/使用 冒险 | E_icode in { IMRMOVQ, IPOPOPQ } && E_dstM in { d_srcA, d_srcB } |
| 分支预测错误 | E_icode = IJXX & !e_Cnd |

■ 动作(在下一个周期)

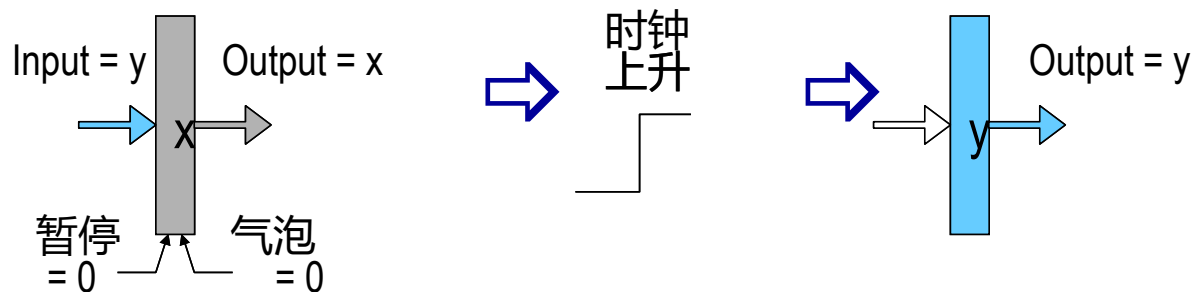
| 条件 | F | D | E | M | W |
|----------|----|----|----|----|----|
| 处理 ret | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 | 正常 |
| 加载/使用 冒险 | 暂停 | 暂停 | 气泡 | 正常 | 正常 |
| 分支预测错误 | 正常 | 气泡 | 气泡 | 正常 | 正常 |

```
bool D_bubble =
    # Mispredicted branch
    (E_icode == IJXX && !e_Cnd) ||
    # stalling at fetch while ret passes
    through pipeline
    IRET in { D_icode, E_icode, M_icode };
```

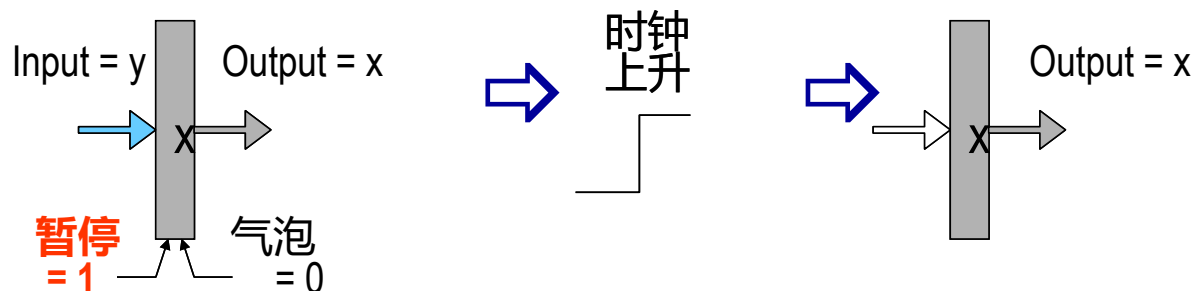
```
bool E_bubble =
    # Mispredicted branch
    (E_icode == IJXX && !e_Cnd) ||
    # Load/use hazard
    E_icode in { IMRMOVQ, IPOPOPQ } && E_dstM in
    { d_srcA, d_srcB };
```


流水线寄存器模式（优先级）

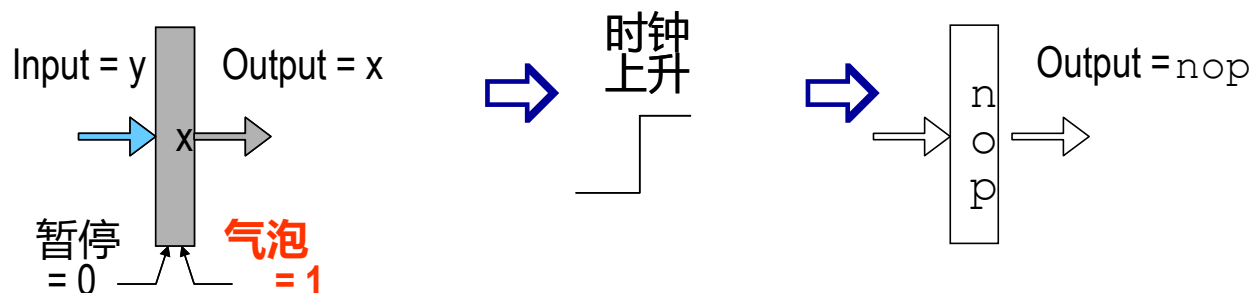
正常



暂停



气泡



4-5 习题

1. Y86-64流水线CPU中的冒险的种类与处理方法。

(1)数据冒险：指令使用寄存器**R**为目的，瞬时之后使用**R**寄存器为源。

处理方法有：

①暂停：通过在执行阶段插入气泡（bubble/nop），使得当前指令执行暂停在译码阶段；

②数据转发：增加valM/valE的旁路路径，直接送到译码阶段；

(2)加载使用冒险：指令暂停在取指和译码阶段,在执行阶段插入气泡（bubble/nop）

(3)控制冒险：分支预测错误：在条件为真的地址target处的两条指令分别插入1个bubble。ret：在ret后插入3个bubble。

考简答

流水线总结

■ 数据冒险

- 大部分使用转发处理
 - 没有性能损失
- 加载/使用 冒险需要一个周期的暂停

■ 控制冒险

- 检测到分支预测错误时取消指令
 - 两个时钟周期被浪费
- 暂停在取指阶段，直到ret通过流水线
 - 三个时钟周期被浪费

Enjoy!