

计算机体系结构



2018-8-18

版权所有，未经同意，不得修改

编辑历史

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **时间** | **修订人** | **说明** |
| 2018-08-18 | 邹弢 | 开始编写 |
|  |  |  |
|  |  |  |

计算机体系结构

# 处理器微结构

## 乱序执行

**静态 vs 动态流水线调度：**

* **静态调度：**
  + 基于软件（编译器）的指令调度。
  + 难点：变长的操作时延，内存地址，分支方向未知。
* **动态调度：**
* 基于硬件的指令调度
* 动态信息可利用：Cache缺失、分支预测失败、Load/Store地址

**In-Order Pipeline：**

F

D

E

R

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

E

**. . .**

Integer add

Integer mul

FP mul

Cache miss

W

* 问题：数据依赖会推迟后续指令的Dispatch（发送一条指令到Functional Unit - FU）。
* 阻塞示例：ADD指令阻塞了整个流水线，后续的独立指令也无法执行。

|  |  |
| --- | --- |
| IMUL R3 🡨 R1, R2  **ADD R3 🡨 R3, R1**  ADD R1 🡨 R6, R7  IMUL R5 🡨 R6, R8  ADD R7 🡨 R9, R9 | LD R3 🡨 R1 (0) //延迟未知,编译器优化流水线困难  **ADD R3 🡨 R3, R1**  ADD R1 🡨 R6, R7  IMUL R5 🡨 R6, R8  ADD R7 🡨 R9, R9 |

**防止Dispatch Stall的方法：**

* 粒度合适的多线程。 -- 不能改善单线程的性能
* 值预测 – 不总能预测准确
* 编译时的指令调度和重排序 – 缺少动态信息，调度困难
* 乱序Dispatch/Scheduling/execution：跟踪数据流，当指令依赖的数据ready后，才发射指令。

**乱序执行的思路：**

* **分离指令：**将有依赖的指令与无依赖的指令分开。无依赖指令可执行，有依赖指令暂存在 Reservation Station（保留站）中。
* **监控输入源：**监控保留站中每条指令所有输入数据的ready情况。
* **发射指令：**当一条指令的所有数据准备ok，Dispatch该指令。即：指令Dispatch按数据流顺序，而不是按控制流顺序。
* **优点：**当出现长延迟操作时，允许无依赖指令执行。

**顺序执行 vs 乱序执行：**

|  |  |
| --- | --- |
| IMUL R3 🡨 R1, R2  ADD R3 🡨 R3, R1  ADD R1 🡨 R6, R7  IMUL R5 🡨 R6, R8  ADD R7 🡨 R3, R5 | |
| 图 1 顺序执行 + 准确异常 – 16cycle | 图 2 乱序执行 + 准确异常 – 12cycle |

**实现乱序执行的思路：**

1. **关联Value：**通过寄存器重命名，将【tag】与每个数据相联，建立consumer <-> producer的连接
2. **缓存指令：**将重命名后的指令插入【保留站】
3. **跟踪指令Source Value：**
   1. 值产生后，广播【tag】
   2. 指令比较【source tag】与【broadcast tag】，相等则ready
4. 当一条指令的所有Source Value准备ok，**Dispatch该指令**到Functional Unit(FU)
   1. 所有Source ok -> 指令wake up
   2. 如果多个指令ok，每个FU选择一条指令。

### Tomasulo算法

#### 背景

**背景：**寄存器重命令的乱序执行算法，由Robert Tomasulo发明，应用于IBM 360/91 浮点运算单元（FPU – Floating Point Unit）

**相比于当今算法的主要不同：**

* 支持精确异常：IBM 360/91不支持

**现代Pipeline结构：**

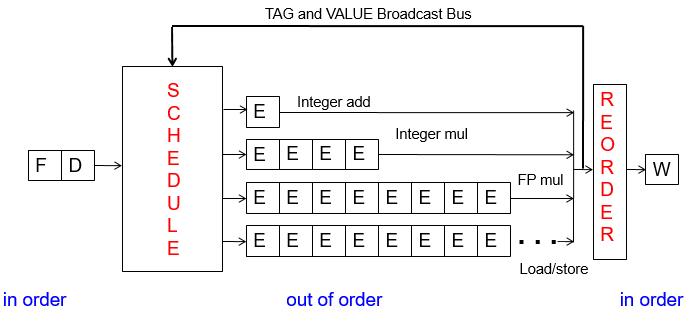


图 3 现代Pipeline结构

* Schedule模块：保留站（scheduling window）
* Reorder模块：Reordering（reorder buffer, instruction window），保证Load/Store的顺序。

乱序执行处理器结构：

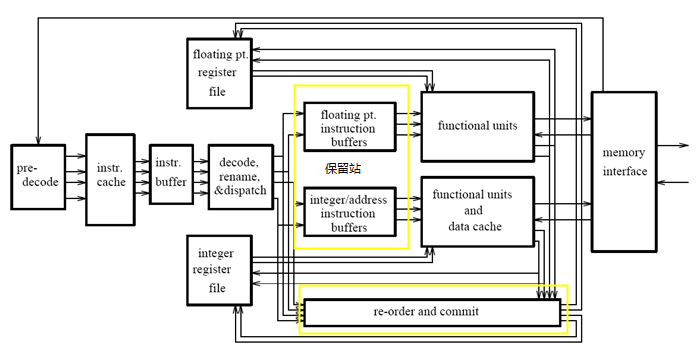


图 4 乱序执行处理器结构

**Tomasulo机器：**IBM 360/91结构

取指->译码->分发到保留站等待操作数->操作数ready,Dispatch到执行单元(FP FU)->执行结果经CDB总线广播: tag + value-> 匹配tag， 更新FP Register和保留站指令等待状态。

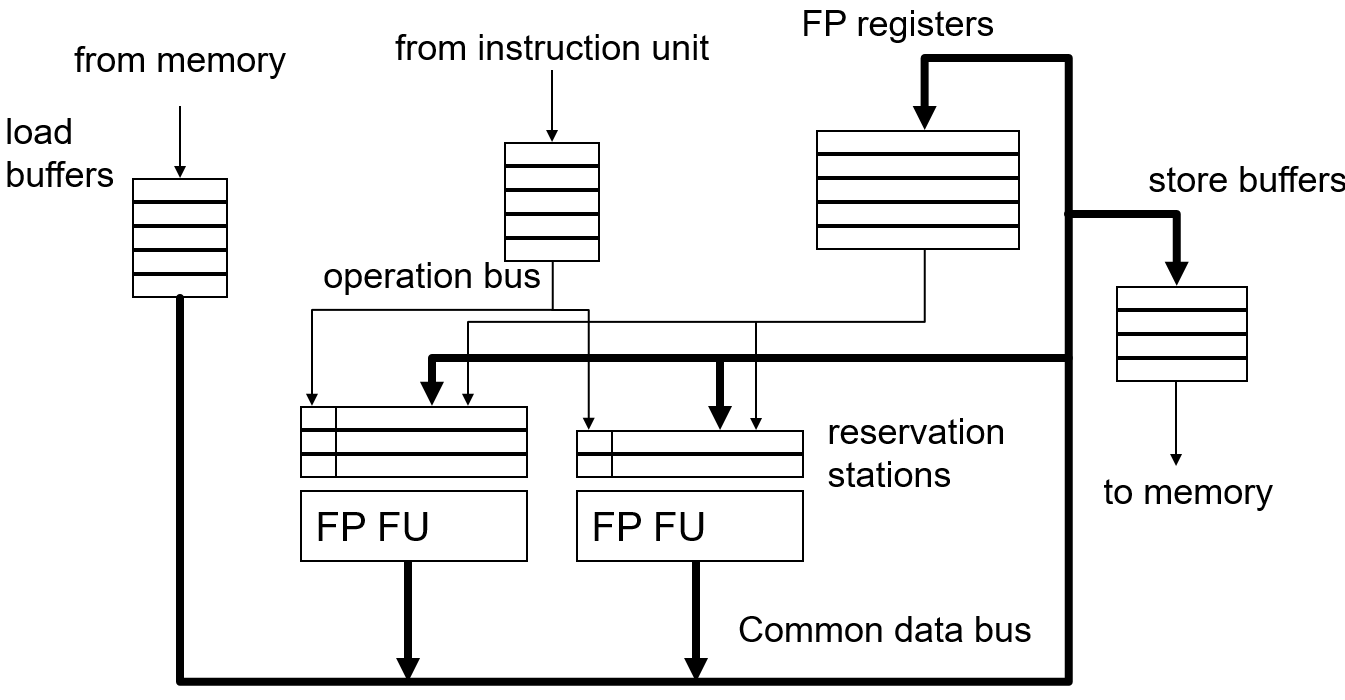


图 5 IBM 360/91流水线结构

#### 算法流程

**寄存器重命名：**

* Tomasulo算法的寄存器重命名规则：将Register ID重命名为保留站中持有该寄存器值的RS Entry ID，此ID即tag。
* 作用：可以消除输出依赖和自依赖。这些依赖都是应该寄存器不够导致的。

**Tomasulo算法流程：**



图 6 Tomasulo调度算法流程

#### 调度示例

调度示例：

|  |  |
| --- | --- |
| MUL R3 <- R1, R2  ADD R5 <- R3, R4  ADD R7 <- R2, R6  ADD R10 <- R8, R9  MUL R11 <- R7, R10  ADD R5 <- R5, R11 | **执行时间（EX）：** ADD - 1 cycle；MUL – 3 cycle  **执行器件：**加法器一个，乘法器一个 |

**In-order流水线周期：**

* 采用计分板方法调度
* 非精确异常
* 指令依赖的寄存器在译码阶段之后被更新，需要重新译码（获取寄存器值）

**no forwarding版本周期：** W后延才能获取写入寄存器的值。



图 7 In-Order流水线周期示例 - no forwarding

**full forwarding版本周期：**



图 8 In-Order流水线周期示例 – full forwarding

**Out-of-Order流水线周期：**非精确异常，Tomasulo调度算法



Tomasulo调度 – 各周期运行情况：



附录

# 术语

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 术语 | 全称 | 描述 |
| FU | Functional Unit | 功能单元，如ALU，FPU |
| FPU | Floating Point Unit | 浮点运算单元 |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

# 引用

# 标准样式

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
|  |

|  |  |
| --- | --- |
| **项目** | **描述** |
|  |  |
|  |  |
|  |  |