

超标量 RISC 微处理器指令发射算法设计

杨 坤, 高德远, 黄小平

(西北工业大学 航空微电子中心, 陕西 西安 710072)

摘 要: 提出了一种基于分布式控制方式的动态指令调度算法, 该算法能够有效提高指令发射效率, 降低指令分派单元逻辑复杂度, 提高系统主频. 该指令发射算法在自主设计的“龙腾 R3” RISC“三发射”超标量微处理器中进行应用实现, 达到了设计预期目标.

关键词: 指令多发射; 指令发射算法; 指令级并行

中图分类号: TP303

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)09-0008-04

Design of the Instrucion Issue Algorithm for RISC Superscalar MicroProcessor

YANG Kun, GAO De-yuan, HUANG Xiao-ping

(Aviation Microelectronics Center, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper proposes a dynamic instruction schedule algorithm which is based on the way of distributed control, the algorithm can effectively improve the instruction issue efficiency, decrease the complexity of instruction dispatch unit and improve the frequency of the system. The algorithm proposed by this paper is implemented in the “Longtium R3” “triple-issue” microprocessor which is designed by NWPU AMEC, and achieved the expectation.

Key words: multi-issue; instrucion issue algorithm; instruction level parallelism

1 引言

现代微处理器大都采用多发射的超标量结构来提高指令的执行速度, 通过在硬件上设置多个处理单元, 使得不同类型的指令能够同时发射, 独立地并行执行^[1].

多个执行部件为提高性能创造了条件, 但是也带来了影响性能的瓶颈问题, 如指令相关时产生的指令阻塞发射等问题, 如何设计出能够在由于相关而降低指令发射带宽的情况下最大限度地挖掘潜在的指令级并行性, 从而提高发射带宽并且易于实现的指令发射算法对于微处理器性能提升具有重要意义.

本文首先分析了 RISC 超标量微处理器指令多发射设计的基本思想和指令发射算法的重要性, 然后讨论了指令多发射过程中出现的一些问题以及对

于这些问题的解决方案. 最后本文对“龙腾 R3”超标量微处理器中所采用基于分布式控制方式的动态指令调度算法进行了详细论述, 并利用仿真平台对该发射算法进行了验证及性能测试, 结果表明该发射算法有效地提高了指令级并行处理能力, 达到了设计目标^[2].

2 超标量相关研究

2.1 超标量指令执行方式

超标量处理器是在流水体系结构上演变而来的, 通过增加取指、发射带宽以及复制执行部件等手段, 实现多条指令的并行执行, 从而提高系统性能^[3].

由于程序中的指令会存在各种相关的情况, 使得后续指令的执行依赖于前面指令的执行, 这些相关的产生会降低处理器的性能, 所以超标量处理器

都采用多发射的乱序执行机制以提高指令发射效率,与顺序超标量比较起来,动态调度多发射的乱序发射超标量处理器更能有效地找到不相关指令发射到功能部件,从而提高功能部件的利用率.

2.2 超标量指令多发射的问题及解决方案

超标量处理器的指令多发射及乱序执行过程会引起许多必须解决的问题.

(1) 在超标量处理器中,指令级并行受到指令间数据相关的影响.流水型处理器中存在的数据相关分为三类:

- ① 写后读相关(Read After Write, RAW);
- ② 读后写相关(Write After Read, WAR);
- ③ 写后写相关(Write After Write, WAW).

其中写后读相关为真相关,这种相关是程序的语义和功能所决定的,需要保留,然而读后写、写后写这两种相关的产生是由于指令的乱序执行所引起

的,故称为伪相关,伪相关是需要消除的,如图1所示.

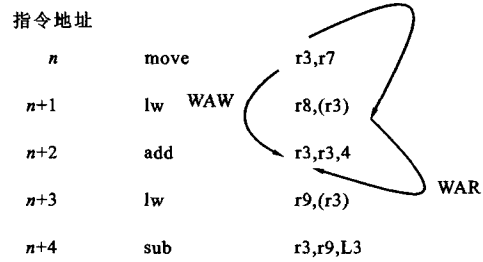


图1 乱序执行引起的数据相关

伪相关的产生,其实质是由于同一个寄存器被用在了不适当的场合.“龙腾 R3”利用寄存器重命名来解决指令运行过程中出现的数据相关,其对经过译码的三条指令的目的操作数同时进行重命名,并且在一个时钟周期内完成,源操作数与目的操作数的相关检测也在这一拍同时完成.重命名的详细实现如图2所示.

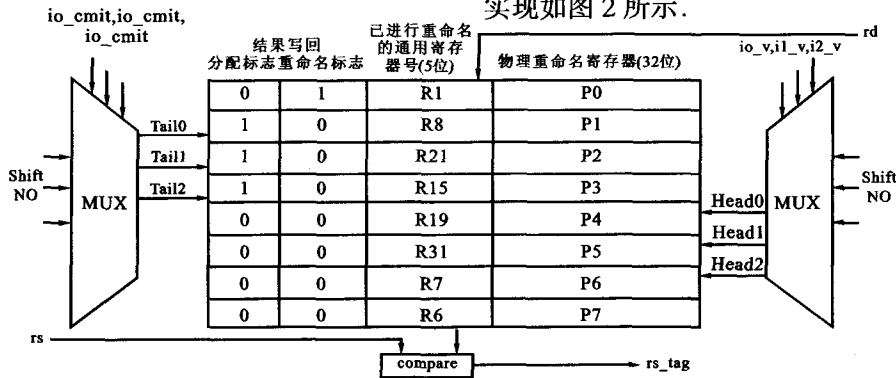


图2 “龙腾 R3”重命名实现

(2) 超标量处理器中,多条指令并行执行,此时可能会产生某些指令因为与前面执行中的指令产生相关而无法发射执行的情况.

保留站(Reservation station)是介于指令分派单元(Dispatch)和功能单元之间的一个缓冲部件,用以缓存因相关而阻塞后续指令发射执行的指令,这样后续没有相关的指令就可以继续进行发射执行,而保留站中的指令在相关解除后发射到功能单元进行执行,保留站需占用一个时钟周期.“龙腾 R3”的保留站设计如图3所示.

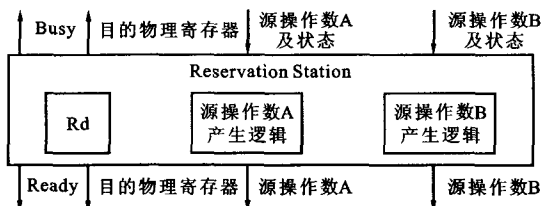


图3 “龙腾 R3”保留站基本结构

(3) 乱序执行过程中,为了保证程序的语义和正确性就需要设计一种机制保证指令的顺序提交,在要求精确异常的处理器中也需要保证指令顺序提交.

“龙腾 R3”完成队列实现如图4所示.“龙腾 R3”完成队列是一个8深度循环队列,其有三个头指针和三个尾指针,头指针指向的位置用于存放发射进入保留站或功能单元(我们称为指令已被发射)的指令的静态顺序编号,完成队列每个时钟周期根据发射的指令数目判断三个头指针循环向右移动的位数.尾指针指向的位置存放的是完成队列中具有最早静态顺序指令的静态顺序编号,指令通过功能单元执行之后向完成队列发提交请求,完成队列根据每个时钟周期能提交的指令的数目决定尾指针循环右移的位数.

2.3 指令发射算法研究

超标量微处理器指令发射策略的优劣直接决定了处理器的整体性能,根据处理器各性能参数设计

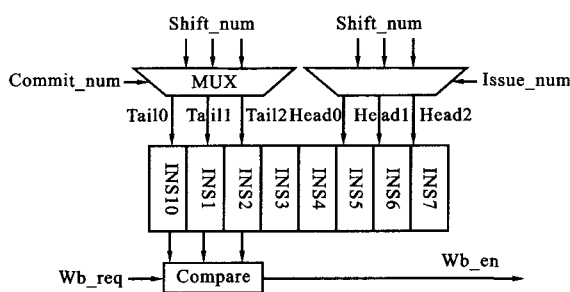


图4 “龙腾 R3”完成队列实现

出合适的指令发射策略是 RISC 超标量微处理器设计中的核心工作。

Tomasulo 算法是一种成熟的支持乱序执行的发射算法, Tomasulo 算法的许多改进已经应用于现代微处理器中, 它们的共同特点是通过跟踪指令的相关性使指令可以在操作数可用时立即开始执行, Tomasulo 算法结构图 5 所示。

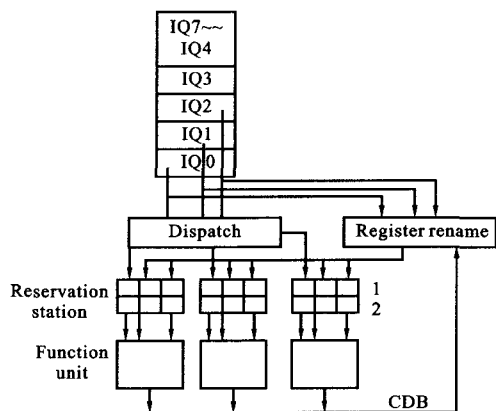


图5 Tomasulo 算法实现结构

Tomasulo 算法实现的关键即为消除数据伪相关的寄存器重命名机制和缓存指令的保留站机制, 这两种机制的实现使指令乱序执行成为可能, 从而提高了处理器的执行效率。在指令发射策略方面, Tomasulo 算法判断保留站或功能单元的忙闲状态, 从而决定何时发射指令, 发射到哪里, 发射几条等影响发射性能的关键因子, 这一部分的功能一般都由指令分派单元来完成, 为了使指令发射效率尽可能的高, 指令分派单元的负担太重, 极易成为整个系统的关键路径, 为了合理地对处理器进行功能划分, 提高系统整体效能, “龙腾 R3”采用分布的控制方式对指令分派单元进行了优化, 提高了性能。

3 发射算法设计

3.1 “龙腾 R3”分布式指令发射策略

“龙腾 R3”的指令发射策略对 Tomasulo 算法进

行了合理裁减, 根据对该设计中功能单元的设置, 重命名寄存器的数目, 保留站的深度, 以及发射带宽等参数的综合考虑设计了实现复杂度较小, 性能优良的指令发射策略。

与传统的集中式流水线控制方式不同, “龙腾 R3”采用分布式控制方式, 即在操作数准备好以后由各功能单元根据自己的状态独立地决定是否进行取数并执行。 “龙腾 R3”分布的控制方式能够很好地简化指令发射策略的实现部件——指令分派单元的设计。

为了降低设计的复杂度, 提高设计频率, “龙腾 R3”没有采用会产生大量长连线的旁路机制将功能单元的执行结果旁路到保留站, 而是采用将执行结果写回到重命名寄存器, 由重命名将结果送给保留站的方式。

“龙腾 R3”分布式控制详细结构如图 6 所示, 由于指令间的数据相关已经在寄存器重命名阶段进行了处理, 指令的顺序提交也有相应的机制保证, 而“龙腾 R3”分布的控制方式消除了指令分派单元对于各功能单元忙闲状态的检测, 功能单元是和对应的保留站独立进行交互的, 所以“龙腾 R3”指令分派单元中的发射策略实现逻辑只需根据指令译码之后产生的操作码(opcode)以及各功能单元对应的保留站的空满状态去判断各条指令之间结构相关的情况, 并针对具体情况决定合理的发射时机, 最后将发射指令的数目反馈给取指令单元和译码部件, 以避免未发射的指令被覆盖。

“龙腾 R3”有五个功能单元, 其中两个定点部件, 一个浮点部件, 一个分支处理单元和一个 Load/Store 单元, 每个功能单元对应一个深度为 1 的保留站, 为了最大程度地提高执行资源的利用率, “龙腾 R3”在处理结构相关时采取如下发射策略:

- (1) 三条指令需不同的功能单元执行且对应的 3 个保留站都为空, 则三条指令同时发射;
- (2) 需要处于不空状态下保留站所对应功能单元进行执行的指令不能发射;
- (3) 有超过一条指令需要相同的功能单元时, 只发射具有最早静态顺序的指令;

“龙腾 R3”指令分派单元的具体实现见图 7。

指令分派的实现即根据上一周期发射的指令数目将这一周期进入的指令和上次未发射的指令有选择地组成可以进行指令发射判断的新指令组合, 新的指令组合直接对三条指令需要进入的保留站的忙闲状态进行检测, 有处于空闲状态下的保留站就进行发射。指令发射的同时产生这一周期的指令发射

数目,指令发射数目要反馈给取指和译码单元,从而 保证这一周期未发射的指令不被丢弃。

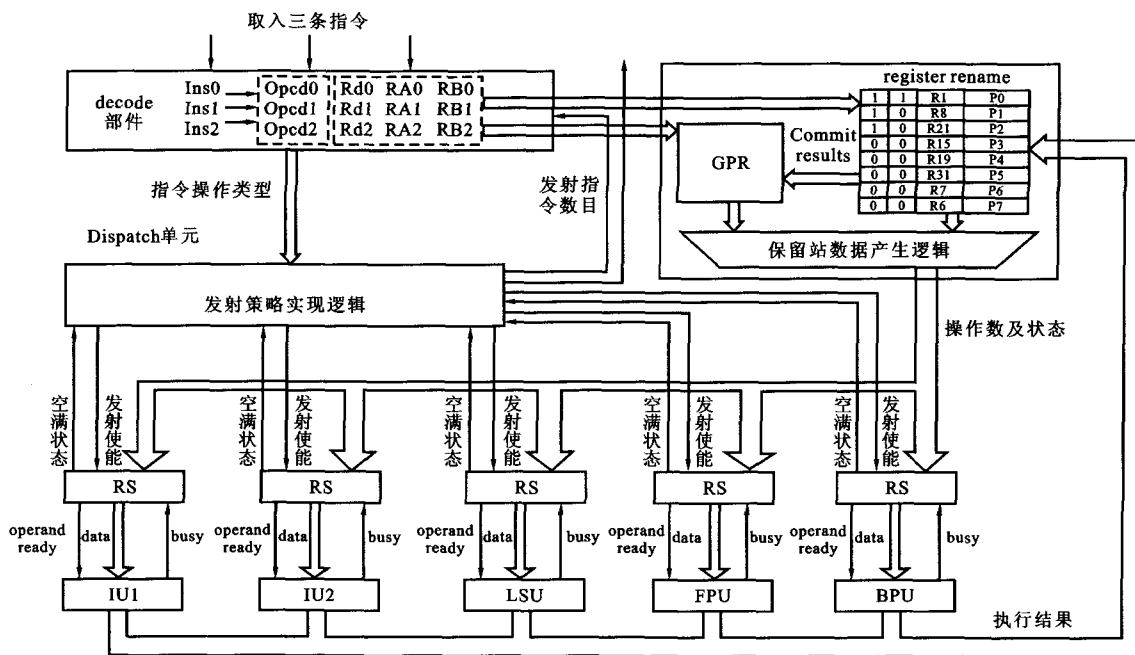


图6 “龙腾 R3”分布式控制详细结构

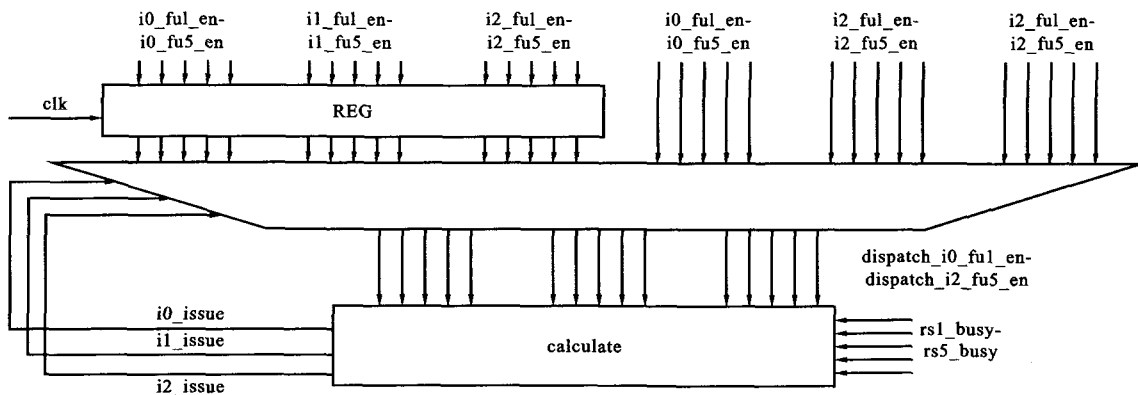


图7 “龙腾 R3”指令分派单元实现

“龙腾 R3”分布的指令控制执行方式简化了指令发射策略,使指令分派单元的逻辑复杂度大大降低,硬件实现也更加容易。

3.2 “龙腾 R3”性能仿真

利用已搭建好的验证仿真平台对“龙腾 R3”指令发射算法进行了性能仿真,结果表明该方案能够有效解决指令乱序执行过程中出现的各种问题,明显提高了指令级并行处理能力,与面向航空领域的嵌入式处理器“龙腾 R2”双发射微处理器相比,IPC 提高了近一倍。

由于采用分布式的控制策略,与“龙腾 R2”相比,“龙腾 R3”指令分派单元的逻辑得到简化,没有成为整个设计的关键路径。“龙腾 R3”的功能单元没有增加,资源利用率得到提升,综合后面积只增加了

1/3 强,达到了预期设计目标。

4 结束语

本文对“龙腾 R3”三发射超标量微处理器指令发射算法进行了详细论述,对于指令执行过程中产生的数据相关,寄存器重命名,保留站设计,乱序执行等问题及其解决方案进行了深入的研究,并结合西北工业大学航空微电子中心自主设计的“龙腾 R3”RISC 超标量微处理器项目,在该微处理器上实现了三发射乱序执行机制,提高了处理器的性能。

参考文献:

- [1] 朱霞.支持线程级并行的硬件技术研究[D].西安:西北工业大学,2003:15-19.

(下转第 15 页)

5 结束语

卫星系统硬件和软件加固的方法有效地提高了系统的可靠性,本文所述的通过 TMS320LF2407A 的 SPI 接口实现从外部 FRAM 中引导加载应用程序的方法,提高了代码存储的安全性,经过多次实验,此方法稳定可靠,为星载计算机的软件存储安全进行了有益的尝试,可以作为代码存储安全设计的参考^[7].

参考文献:

- [1] 江思敏. TMS320LF240x DSP 硬件开发教程[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 丁义刚. 空间辐射环境单粒子效应研究[J]. 航天器航天工程, 2007, 24(5): 283-292.
- [3] 何江红. 封装器件可靠性快速评估的研究[J]. 微电子学与计算机, 1996, 13(2): 6-10.

- [4] Texas Instruments Incorporated. TMS320LF/LC24 系列 DSP 指令和编程工具[M]. 徐科军, 肖本贤, 张兴, 等, 译. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [5] 王志梅, 王丽军, 刘正高. 航天型号可靠性信息系统软件的设计与实现[J]. 质量与可靠性, 2008(6): 45-47.
- [6] 李芳华. 星载软件可靠性设计方法[J]. 上海航天, 2003(3): 24-27.
- [7] 刘军华, 刘文平, 唐威, 等. DSP 芯片外部存储器设计一例[J]. 微电子学与计算机, 2003, 20(3): 17-20.

作者简介:

王 岩 男, (1972-), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为计算机控制、空间光通信控制.

杨奇峰 男, (1985-), 硕士研究生. 研究方向为计算机控制、嵌入式系统.

贾 琪 男, (1986-), 硕士研究生. 研究方向为计算机控制、嵌入式系统.

(上接第 11 页)

- [2] 王得力, 高德远, 张骏, 等. 32 位嵌入式 CISC 微处理器设计[J]. 微电子学与计算机, 2009, 36(5): 291-295.
- [3] Hennessy John L, Patterson David A. 计算机系统结构——量化研究方法[M]. 3 版. 郑纬民, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.

作者简介:

杨 坤 男, (1984-), 硕士研究生. 研究方向为专用集成电路设计、微处理器体系结构.

高德远 男, (1946-), 教授, 博士生导师. 研究方向为计算机体系结构、VLSI 系统设计.

黄小平 男, (1980-), 讲师. 研究方向为专用集成电路设计、VLSI 系统设计.