

风机流场并行数值模拟在集群系统上的应用

董庆伟^{1,2}, 何社阳¹, 马伟^{1,3}

(1. 河南科技大学机电工程学院, 洛阳 471003; 2. 河南省机械设计及传动系统重点实验室, 洛阳 471003;
3. 河南省高校先进制造技术重点学科开放实验室, 洛阳 471003)

摘要: 介绍集群系统的特点及其软硬件配置环境。利用计算流体力学商用软件 Fluent 对一种新型垂直轴风力机风轮在曙光天潮超级服务器 4000A 集群上进行数值模拟及并行计算, 得到风轮内外部的三维流场, 实现该软件在高性能并行计算机上的应用, 为并行有限元分析提供一个基础计算平台。

关键词: 集群; 并行计算; 计算流体力学

Application of Wind Turbine Flow Field Parallel Numerical Simulation on Cluster System

DONG Qing-wei^{1,2}, HE She-yang¹, MA Wei^{1,3}

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003;
2. Henan Key Laboratory for Machinery Design and Transmission System, Luoyang 471003;
3. Henan Key Laboratory for Advanced Manufacturing Technology, Luoyang 471003)

【Abstract】 This paper introduces the characters of cluster system and its software and hardware configuration environment. A numerical simulation and parallel computing is used in the wind turbine blade of a new type of vertical axis wind turbine through business software Fluent of Computational Fluid Dynamics(CFD) on the dawning super computer 4000A. It simulates and analyzes the internal and external 3D flow field of the wind turbine blade. The applications of software in clusters are achieved. It provides a basic computing platform for parallel finite element analysis.

【Key words】 cluster; parallel computing; Computational Fluid Dynamics(CFD)

1 概述

随着计算机技术的快速发展, 单台计算机的性能和可靠性越来越好, 但还是有许多现实的要求是单台计算机难以达到的。

在此类情况下, 往往需要将多台计算机组织起来进行协同工作模拟一台功能更强大的计算机来解决问题, 该技术称为集群技术。集群通过一群以网络技术连接起来的工作站或 PC 机的组合, 用某种结构的网络互连起来, 充分利用各工作站的资源, 统一调度、协调处理, 以实现高效计算。随着工程分析软件的网络化应用需求的增长, 传统的有限元分析程序正面临从根本上改变运行方式的压力, 采用何种手段以及怎样实现高性能的并行有限元分析系统是目前急需考虑的问题^[1]。

本文探讨了在曙光天潮超级服务器 4000A 集群上通过对一种新型风力机风轮流场有限元模拟分析, 阐述了在集群上进行计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)商用软件 Fluent 并行计算的可行性。

2 集群系统特点

曙光天潮超级服务器是曙光公司推出的面向信息服务和科学计算的新一代产品。其移植了国产超级计算机的最新成果——曙光 3000 上的成熟监控、管理技术、产品技术, 具有层次跨度大、覆盖面广的特点。在系统的可扩展性、可管理性、可用性等方面有了较大提高, 既支持信息服务, 又支持大规模科学计算, 可广泛用于石油、勘测、气象、生物信息

学、工程仿真、空气动力学等领域。系统采用集群体系结构, 运行 Linux/Window2000 多种操作系统, 配合专用的系统管理软件, 具有很高的可用性^[2]。

集群系统具有如下特点:

(1) 服务器聚集技术

曙光天潮超级服务器采用了聚集技术, 可以支持高可用集群、高性能计算集群、负载均衡集群等, 并且通过软硬件结合实现跨平台管理和监控, 不仅是国内首创, 同时也在世界上也处于技术发展的前沿。

(2) 系统监控和管理技术

曙光天朝超级服务器的监控工具可以监控到整个集群的软硬件运行状态, 如整个系统工作温度、各节点 CPU 和内存的使用率、网络流量、各节点主板温度、CPU 温度、主板电压、CPU 电压等, 使系统管理员对各节点的情况一目了然。

(3) 单一系统映象

系统中所有的资源被组织成统一的整体由用户管理和使

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目(2006AF01B02-02); 河南省科技发展攻关计划基金资助重点项目(082102240019); 河南科技大学科研基金资助项目(2007ZY046)

作者简介: 董庆伟(1969—), 女, 副教授、硕士, 主研方向: 计算机支持协同工作, 并行计算, 虚拟产品开发; 何社阳, 讲师、硕士; 马伟, 教授、硕士

收稿日期: 2009-05-15 **E-mail:** haust_2004@126.com

用, 用户感受不到单个节点计算机的存在。如果构成一个集群系统的每一个节点配有 1 个 CPU, 1 GB 内存和 40 GB 硬盘, 则通过单一系统映象, 由 10 个上述节点构成的集群系统呈现给用户的是一个配有 10 个 CPU, 10 GB 内存和 400 GB 硬盘的计算机系统。

(4)高可用技术

曙光天潮超级服务器对用户应用实现了单一 IP、负载均衡、失效转移工作的模式, 随时检测集群内各个节点的运行状态, 一旦发现某个或某些节点故障, 则不再将客户请求分发给这个(些)节点, 客户的请求将通过其他各种正常的节点得到响应, 整个过程无需人工参与。

(5)大规模并行计算机

曙光天潮超级服务器集成 PVM, MPI 环境, 可为企业提供高效、省时的高强度计算。它的超级计算能力允许用户利用普通的服务器在不修改应用程序情况下达到超级计算机的水平。尤其适合用户使用的特点是: 曙光天潮超级服务器可以根据用户计算规模的需要, 动态分布部分节点用于并行计算, 或对整个系统动态分配空闲时间作为并行计算的平台。

(6)系统支持动态扩展

曙光天潮超级服务器的集群式架构使其具有优异的动态扩展性。根据用户需求, 可以选择扩展能力很强的通用节点。用户如果需要减少节点数目, 则可随时指定节点与整个系统隔离; 用户如果需要扩展节点, 则只需稍微变更配置文件即可完成。

集群技术最大的特点之一是能够实现负载均衡。在用户访问频率较低时, 这种负载均衡表现得不会很明显, 而一旦用户的请求量增大后, 这种优势就会显现出来。集群的另一个优点是容错性好, 如果集群管理服务器发现集群中有一个节点出现故障, 那么它会使连在该节点上的连接重新定向到其他节点机上。同时, 由于采用了一种松散耦合的模式, 集群中的各个节点机使用 TCP/IP 或其他网络协议通过标准的网络设备连接在一起, 可以在系统正在运行的情况下, 很方便地添加或更换集群中的单个节点机, 因此集群系统有较好的可扩展性。

3 集群环境下的高性能计算

3.1 集群系统硬件配置

并行计算集群由一组互联的单机协调工作, 提供单一完整的计算资源, 它是一种并行或者分布处理系统。一个并行计算集群一般指 2 个或 2 个以上互相连接起来的计算机。

并行计算集群采用的结构为: 并行应用程序→并行编程环境→PC/工作站(通讯软件、网络接口硬件)→网络。并行编程环境能够给应用程序的开发提供可移植的、高效的、易用的工具, 包括消息传递库、调试器和描述文件。网络接口硬件充当一个通信处理器并且负责在集群各节点间通过网络收发数据包^[3]。本集群配置有 16 个计算节点, 计算速度为 6.24×10^{12} 次/s, 2 GB ECC Register DDR333 内存, 73 GB 10 K RPM Ultra320 SCSI 硬盘, 集成双通道 Ultra 320 SCSI 控制器, 1 000 MB RJ45 网卡, 1 个管理节点, 1 个 I/O 节点, 配置了 1 TB 存储设备(主要用于资源存储)。

3.2 集群系统软件配置

集群节点操作系统为 RedHat Linux 9, 是 Linux 最著名的开放操作系统。安装好操作系统就要对其进行网络配置。在所有节点微机上安装 TCP/IP 网络协议, 并定义节点微机不同网络名以便区分。安装 MPI 软件和存储并行程序的硬盘分

区或文件夹, 设置为共享, 应用并行虚拟机(Parallel Virtual Machine, PVM)和标准消息传递界面(Message Passing Interface, MPI)这 2 个并行计算支持环境作为系统的并行运算管理和并行程序开发平台。MPI 是全球工业、政府和科研部门联合推出的适合进程间进行标准消息传递的并行程序设计平台, 它是一种并行计算机的消息传递接口标准, 它能提高并行程序的可移植性和使用方便性。PVM 可以把多个计算机组织起来成为一个易于管理、可扩展、易编程使用的网络计算虚拟机。集群采用 MPICH 并行环境运行库^[4-6]。

4 Fluent在集群上的并行计算

CFD 是近代流体力学、计算数学和计算机科学相结合的产物, 是一门具有强大生命力的边缘学科。它以电子计算机为工具, 应用各种离散化的数值计算方法, 对流体力学的各类问题进行数值实验、计算机模拟和分析研究, 以解决各种实际问题, 并揭示新的物理现象, 开拓新的研究方向。CFD 中有许多复杂的数学问题和计算, 应用串行计算机求解, 运行时间长, 无法满足需要, 而集群系统并行计算使许多复杂的计算流体力学问题进行计算机仿真模拟成为可能, 应用集群实现并行计算需要安装支持并行计算的软件。

Fluent 公司设计的 Fluent 软件是基于 CFD 软件群的思想, 针对各种复杂流动的物理现象, 采用数值解法, 以期在计算速度、稳定性和精度等方面达到优化组合, 从而高效地解决复杂流动计算问题, 模拟流动、传热和化学反应等物理现象。软件主要特征之一是具有高效的并行计算功能, 即 Fluent 支持并行计算。在集群上进行软件并行环境配置后, 要安装计算流体力学的 Fluent 软件, 在一个主节点安装该软件, 其余节点镜像即可。

在集群上实现并行计算是将网格分割成多个子域, 子域的数量是计算节点的整数倍(如 8 个子域可对应于 1 个、2 个、4 个、8 个计算节点)。每个子域会“居住”在不同的计算节点上。它有可能是并行机的计算节点, 或是运行在多个 CPU 工作平台上的程序。其提供多种自动分区算法, 内置的 MPI 并行机制可以大幅度提高分布式并行效率。另外, Fluent 还具有动态负载均衡功能, 当并行计算的 CPU 负载不平衡时可自动调整分区以确保全局高效率并行计算^[7]。

4.1 并行分区算法

并行 CFD 原理为: 将整个流场划分成子区域分配给各 CPU, 把子区域的初始流场信息、几何信息分别装载入各子区域对应的 CPU 的内存中, 在每一个 CPU 中启动计算进程, 由主进程调度各 CPU 的计算。在每一步迭代求解过程中, 由各 CPU 完成子区域的计算并在边界完成数据交换^[6]。在并行计算前要对使用的节点进行定义, 本文计算中使用 4 个节点, 定义如下:

```
node1: 2(2 代表 CPU 数)
node2: 2
node3: 2
node4: 2
输入编译语句:
# vi ncpu(n 代表使用的 CPU 数目)
```

4.2 实例

本实验要计算的是一种新型垂直轴风力发电机三叶风能传递腔式风轮的风能利用率。用 Fluent 软件模拟研究风力机内部及外部流场的流动状态, 求得输出转矩, 从而计算该风机利用率, 并通过流场分析优化结构设计。三叶风能传递腔

式风轮的结构如图 1 所示。

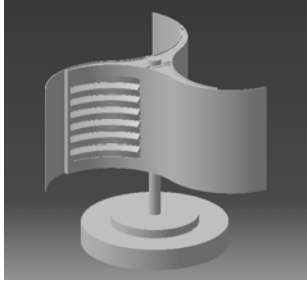


图 1 三叶风能传递腔式风轮结构

此类风轮拼接件多, 且为薄壁件, 特别是急流口上设计有急流峰, 在进行网格划分时, 间隔取得过大则在集流峰狭长空间内划分失败, 间隔取得过小生成网格数量又太多(达数十万), 普通单机运算困难, 甚至死机。因此, 尝试在集群上计算。计算前先使用 Gambit 进行网格划分, 确定边界类型及边界条件, 随后在集群系统中输入执行 Fluent 的命令语句, 此时系统进入 Fluent 运行界面。在此界面中除了和单机一致的相关操作外, 还要进行并行计算相关设置, 选择要用节点。Flunet 并行计算在集群系统上的配置环境如图 2 所示。

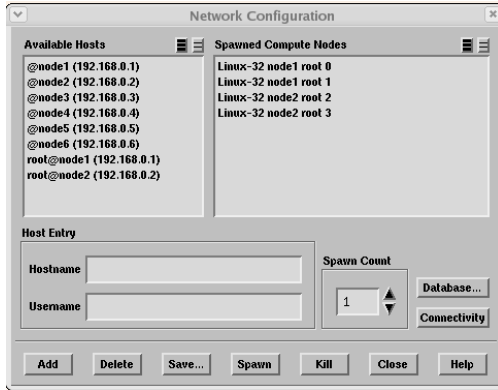


图 2 Flunet 并行计算在集群系统上的配置环境

Flunet 并行计算在集群系统上的执行结果如图 3 所示。

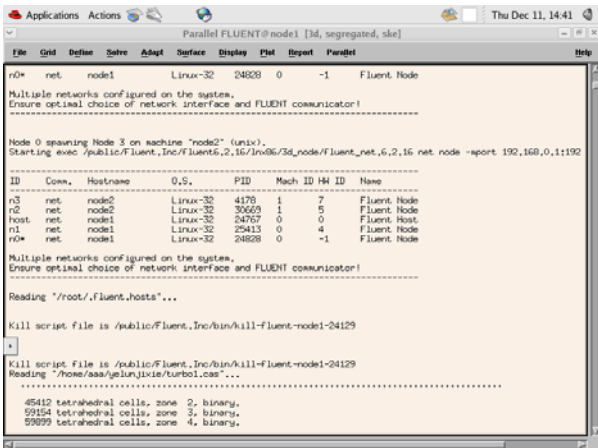


图 3 Flunet 并行计算在集群系统上的执行结果

至此相关并行环境已设置好, 下文操作同单机上一样设置求解模型、确定流体的材料属性、边界类型及其边界条件, 进行流场初始化、求解计算, 图 4 显示的是流场 $z=0$ 时风轮速度矢量图分布。由处理结果可以计算输出力矩及风能利用率。

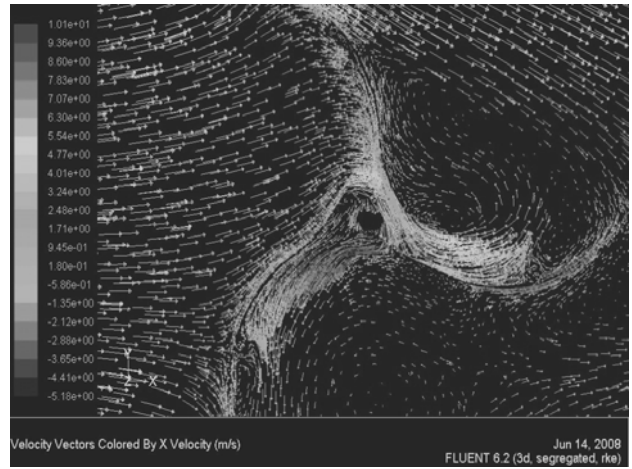


图 4 $z=0$ 时的平面速度矢量分布

5 结束语

本文通过实例实现了在集群上利用多个计算节点(处理器)进行流体力学并行数值模拟计算。此特定并行有限元计算集群系统具有很好的稳定性及效率, 通过网络互联实现全系统范围内的资源共享, 提供高效、省时的高强度计算。

集群系统与传统并行处理系统相比有系统开发周期短、系统扩展性好、用户编程方便等优点, 它代表了高性能计算机发展的新方向, 为进行大规模科学工程计算提供了技术参考。

参考文献

- [1] 李海江. 基于集群的并行有限元分析研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(1): 117-123.
- [2] 天潮超级服务器曙光 4000A[Z]. [2008-08-29]. <http://www.dawning.com.cn/>.
- [3] 王启平, 王 璐, 伍 毅, 等. 结构高性能计算中的并行有限元方法[J]. 安徽工业大学学报, 2005, 22(2): 135-138.
- [4] 齐 杰, 高春鸣. 面向集群渲染的反馈控制负载均衡算法[J]. 计算机应用, 2008, 34(16): 135-137.
- [5] 刘维峰, 卢 伟, 许海燕. 基于局域网和 MPI 的 PC 集群计算环境[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(5): 127-129.
- [6] 尹怡欣, 邱 博, 胡长军, 等. 集群计算通信库 HPCL_USTB 的零拷贝 MPI 系统[J]. 计算机应用, 2006, 32(23): 58-60.
- [7] 王 飞, 杨树兴, 徐 勇, 等. 基于集群系统的导弹流场并行数值模拟[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 206-208.

编辑 陆燕菲