

万核级并行飞机气动模拟软件 CCFD 研制

陈刚¹ 王磊¹ 陆忠华¹ 梁贤²

(1 中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心, 北京 100190;
2 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100080)

摘要 提出了面向大型飞机设计的气动模拟软件 CCFD 的架构和实现方法. 对于复杂流场建模和高分辨率湍流数值模拟, CCFD 采用对比分析各种计算模型和提高计算网格分辨率的方法来得到高精度的模拟结果和更精细的流场模型. CCFD 在并行编程模型、负载平衡、通信重叠等多个方面针对万核级的大规模并行计算进行了改进. 同时, CCFD 实现了批处理作业、双模式控制参数设置、计算过程监控等功能的用户友好操作界面. 通过在“天河一号”上进行的测试可以看出, 随着并行规模从 128 核增加到近万核(8 192 核), 作业的运行时间稳定降低, 加速比稳定增加.

关键词 飞机气动模拟; 计算流体力学; 中国计算流体力学软件; 万核级并行; 软件设计
中图分类号 TP301 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2011)S1-0099-03

Development of ten-thousand-core parallel software CCFD for aircraft aerodynamics simulation

Chen Gang¹ Wang Lei¹ Lu Zhonghua¹ Liang Xian²

(1 Supercomputing Center, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2 Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The aircraft aerodynamics simulation software CCFD (China computational fluid dynamics) was presented, which was developed for the design of large aircraft. For the complicated fluid modeling and high-resolution simulation of turbulence, CCFD compares various models and the method to get high-resolution result and detailed fluid model. Oriented for the parallel computing in terms of ten-thousand processors, the programming model, load balancing and communication overlap in CCFD were improved. In CCFD batch processing, double-model control arguments, computing monitoring and other user-friendly functions were also provided. By testing on the “Tianhe No. 1”, it can be seen that the time-costs of job decreased steadily, and the speed-up ratio increased constantly.

Key words aircraft aerodynamics simulation; computational fluid dynamics (CFD); CCFD software; ten-thousand-core level parallelization; software design

解决大型飞机的空气动力学^[1]问题的一个重要手段是基于并行计算的流场数值模拟方法. 大型飞机的设计需要解决复杂流场计算模型的建立、分辨率要求高和数值模拟计算规模大等问题. 而且, 针对国内大型飞机设计的具体情况, 流场数值模拟软件应该具有用户友好的操作界面. 现有的流场数值模拟软件不能很好地满足上述的要

求. 对于高端的、真正应用于飞机设计的软件, 国外的公司都严格保密, 无法买到. 其他比较成熟的商业 CFD^[2] 软件(如 Fluent^[3-4] 等)存在着版本低、精度低、限制 CPU 使用量级等缺点, 难以满足大型飞机设计的需要. 更重要的是, 没有软件源代码极大地制约了我国大型飞机的整体设计和制造业的长远发展. 国内的研究^[5-11] 主要侧重于商

收稿日期 2011-02-28.

作者简介 陈刚(1979-), 男, 博士, E-mail: chengang@seccas.cn.

基金项目 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA01A139, 2009AA01A130).

业软件在飞机设计方面的应用,以及小规模并行计算^[1].为此自主设计并实现了一个基于万核级并行计算规模的大型飞机气动数值模拟软件 CCFD.

1 系统整体架构

CCFD 软件主要包括 3 个组件:工作台、求解器和前/后处理接口,如图 1 所示.

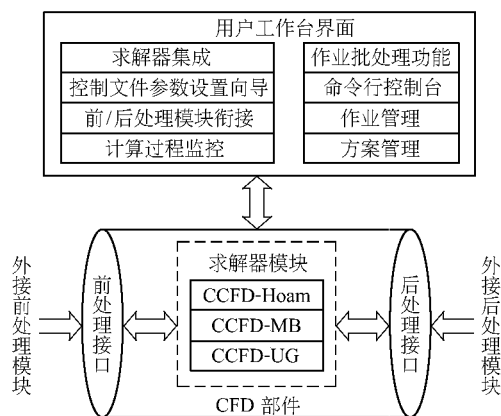


图 1 CCFD 软件的系统架构

a. 工作台组件. 该组件是用户对 CCFD 系统进行操作的图形化界面,主要提供方案管理、作业管理、批作业处理、控制文件参数设定、前/后处理接口和命令行控制台等功能模块.这里的方案是指用户创建的、待处理的数值模拟问题. b. 求解器组件. 用户在工作台上创建并提交作业后,CCFD 调用求解器组件,采用并行化数值模拟计算的方法求解该计算流体力学问题.该组件当前主要集成了 3 个求解器:CCFD-Hoam(单块结构网格有限差分法可压缩/不可压缩流动 Navier-Stokes 求解器);CCFD-UG(非结构/混合格网有限体积法可压缩流动 Navier-Stokes 求解器);CCFD-MB(多块结构化网格有限体积法可压缩流动 Navier-Stokes 求解器). c. 前/后处理接口. 通过与前/后处理工具进行通信和交互,将数值模拟问题的外接前/后处理工具集成到 CCFD 系统中来.前处理主要是指数值模拟计算作业的网格数据生成,后处理主要是指计算结果的可视化处理.

2 系统功能特色

2.1 面向大型飞机气动设计

针对大型飞机气动设计中的多个问题,CCFD 采用对比分析各种计算模型和提高计算网格分辨率的方法来得到高精度的模拟结果和更精

细的流场模型.

a. 复杂流场计算模型建立. 针对大型飞机低速时的高升力装置复杂流场模拟问题以及高速时的翼身组合体阻力预测问题,CCFD 软件提供了一方程 SA 模型、两方程 SST 模型、显式代数雷诺应力 EARSM 模型和解脱体涡模拟(DES)等几种可用模式.

b. 高分辨率湍流数值模拟. 大型飞机的增升、减阻、降噪、减振等设计目标都涉及到了湍流问题.利用 CCFD 软件,用户可以在超级计算机上开展大型飞机机翼、机身关键区域复杂湍流问题的大涡模拟及关键局部流动的直接数值模拟.

2.2 支持万核级的可扩展并行计算

由于传统的并行计算模型没有很好地适应万核级超级计算机的结构特点,CCFD 中对其进行了多方面的改进.

a. 并行编程模型:针对万核级超级计算机的结构特点采用新型并行编程模型,如流模型、VP(虚拟处理器)模型和渐近式模型等. b. 计算负载均衡:采取基于域分解技术,将划分阶段所产生的细粒度任务组合成粗粒度的任务,并为每 1 个处理器核分配最多 1 个任务. c. 计算与通信重叠技术:选用非阻塞通信方式实现通信与计算(至少是打包)相重叠的技术,以降低数据通信造成的额外开销. d. 高效率的并行计算:采用近壁区的高效精确计算方法、湍流模式与亚格子尺度模型设计、计算网格的合理划分和时空离散格式的选取等关键技术. e. 多级并行实现方法:针对万核级并行计算机的多级体系结构,实现了包括 MPI, OpenMP 和多核的多级混合并行技术. f. 基于容量调节的高速缓存命中率优化:为了提高高速缓存命中率,在并行软件的设计中设置反映高速缓存容量的可调参数.

2.3 用户友好的操作界面

为了较好地契合飞机设计人员的工作习惯,CCFD 提供了如下便捷的功能.

a. 批处理作业. 用户创建作业的时候可以指定作业的属性为批处理作业.然后,用户为作业的特定参数指定起始值、终止值以及间隔大小.系统自动按照用户的指定为该作业生成一组参数值.对于每一个单独的参数值,系统自动生成对应的一个新的子作业. b. 双模式控制参数设置. 求解器在运行前,通常都需要按照本次计算的需求设置控制文件中的参数.CCFD 提供了 2 种控制文件中参数的设定模式:全文编辑模式和向导模式.向导模式为用户提供了基于对话框的图形化参数

设定功能,为用户提供大部分参数的缺省值和有限枚举类型参数的候选值. c. 计算过程监控. 求解器在计算过程中通常会输出一些中间计算结果,CCFD 可以及时地将这些中间计算结果以折线图的方式实时、动态展示在工作台上. d. 命令行控制台. CCFD 中的命令行控制台窗口可以使得用户不需要离开 CCFD 工作台,就能够执行一些不太复杂的系统命令. 对于某些交互式的命令或求解器,用户也可以在命令行控制台中完成操作. e. 前/后处理工具集成. 对于外接前处理工具,CCFD 采用“数据文件导入”的方式将其生成的网格数据文件导入到方案中. 对于外接后处理工具,CCFD 采用“联动调用”的方式进行计算结果文件路径的传递,并启动该后处理工具.

3 CCFD 系统性能效果

以对槽道湍流进行大规模直接数值模拟为案例,分析 CCFD 在万核级计算机上的并行性能进行. 案例的网格数约为 13×10^8 ($1\ 280 \times 1\ 025 \times 1\ 024$),马赫数为 1.5,雷诺数为 4.5×10^4 ,温度为 288 K. 作业的运行环境为国家超级计算天津中心“天河一号”千万亿次超级计算机. 对于同样的作业,分别采用 128,512,1 024,2 048,4 096 和 8 192 个处理器核来进行并行计算. 表 1 所示为不同并行规模(处理器核数下)的计算时间和加速比的比较. 从表中可以看出,随着并行规模从 128 核增加到近万核(8 192),作业的运行时间稳定降低,加速比稳定上升. 与 128 核并行规模相比较,

表 1 槽道湍流大规模数值模拟并行性能比较

处理器核数	运行时间/h	加速比
128	164.00	1.00
512	18.70	8.77
1 024	7.58	21.63
2 048	4.82	34.02
4 096	3.18	51.57
8 192	2.85	57.54

作业在 8 192 核规模的加速比为 57.54. 与并行规模的增长速度相比较,作业在 512,1 024,2 048 和 4 096 等情况下的计算加速比出现了超线性的特点. 超线性出现的原因主要是在上述的并行规模情况下,计算过程中的数据存在一定的局部性,减

少了进程之间的通信开销. 可见,CCFD 在万核级规模下的并行性能比较理想.

本文介绍了自主开发的基于万核级并行的飞机气动模拟软件 CCFD 的设计. CCFD 能够支持大型飞机设计中的复杂流场数值模拟和高分辨率数值模拟,针对万核级的超级计算机的结构特点实现了多种高效的并行计算技术和方法,提供了用户友好的操作界面. 测试证明:CCFD 在复杂流场和高分辨率数值模拟计算中具有很好的可靠性,能够解决大型飞机设计中的工程问题.

参 考 文 献

- [1] 陈再新. 空气动力学[M]. 北京:航空工业出版社,1993.
- [2] 傅德薰,马延文. 计算流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [3] 李勇,安亦然. 介绍计算流体力学通用软件——Fluent[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2001,16(2): 254-259.
- [4] 翟建华. 计算流体力学(CFD)的通用软件[J]. 河北科技大学学报,2005,26(2): 160-165.
- [5] 张晓萍,曾会华,余雄庆. CFD 方法在联结翼飞机方案设计中的应用[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(6): 160-165.
- [6] 吴剑锋,何广军,赵玉芹. 飞机尾向的红外辐射特性计算[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(6): 26-28.
- [7] 谢江,毛国勇,张武. FLUENT 及其在飞机绕流流场并行计算中的应用[J]. 计算机工程与应用,2007,43(28): 246-248.
- [8] 张森,冯丽娟,刘铁军,等. CFD 商用软件在民用支线飞机高速计算中的应用[J]. 民用飞机设计与研究,2004(4): 64-68.
- [9] 沈琼,余雄庆. 无人机机载导弹分离轨迹的数值仿真[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(5): 99-102.
- [10] 毛国勇,谢江,张武. 基于 Cart3D 的全机数值模拟及并行计算[J]. 计算机工程与应用,2008,44(27): 207-208.
- [11] 李向群,安亦然,王世安,等. 高速飞机的全机气动数值分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2004,19(S1): 838-848.
- [12] 张林波,迟学斌,莫则尧,等. 并行计算导论[M]. 北京:清华大学出版社,2006.