

文章编号: 1000-8055(2007)12-2204-07

MPI 环境下并程序准确性验证及效率分析

江小松^{1,2}, 刘建军²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100080;
2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 把已有的串行数值模拟程序改编成消息传递接口(MPI)下并行环境的并行数值模拟程序, 模拟了基于 NASA2TP1680 单级透平的 4 种不同组合的流场, 验证了并行程序的有效性和较好的并行效率. 同时, 分析了影响并行效率的主要因素.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 消息传递接口(MPI); 并行程序; 并行效率; 数值模拟
中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A

Accuracy verification and efficiency analysis of parallel program based on MPI

JIANG Xiao2song^{1,2}, LIU Jian2jun²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;
2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: An existing serial computational fluid dynamics (CFD) program was modified to a parallel simulation program based upon message passing interface (MPI). Four flow fields of different combinations for NASA2TP1680 single2stage turbine were simulated to validate the accuracy and parallel efficiency of the parallel program. The major influential factors to the parallel efficiency were also analyzed.

Key words: aerospace propulsion system; message passing interface (MPI); parallel program; parallel efficiency; numerical simulation

叶轮机械内部流动数值模拟已经成为叶轮机械气动设计与优化、流场分析等的有力工具, 由于叶轮机械内部实际流动是三维、粘性、非定常的, 为了比较真实的反映流场内部流动情况, 需要进行较大规模的数值计算, 这将耗费巨大的计算资源, 目前单个 CPU 的 PC 机还很难达到以上计算要求, 于是对于三维、粘性、非定常流动的数值模拟主要通过并行数值计算进行.

并行数值计算已经成为数值计算的一个重要分支, 在叶轮机械流场数值模拟中也得到越来越广泛的应用. 比如, Wolfgang Hohn 等采用 MPI 并行

程序对非定常三级低压透平内的非定常流动进行了数值计算^[1]; Ruprecht A 等对水利透平非定常流动中静-动叶片排间相互非定常作用进行了并行数值计算^[2]. 在国内也有很多这方面的研究, 比如, 林智荣、袁新对叶轮机械内部三维粘性流场进行了并行数值模拟^[3]; 赵晓路通过并行计算对多叶片排流动情况进行了研究^[4]. 随着对复杂流场的研究越来越深入, 需要的计算资源将会越来越大, 并行计算将成为进行这些研究的重要工具.

目前主要并行环境都是基于消息传递的, 其中较常用的有 PVM(parallel virtual machine)和 MPI

收稿日期: 200611227; 修订日期: 200704224

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50336050)

作者简介: 江小松(1972), 男, 江苏武进人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学分析的研究.

(message passing interface), 而 MPI 在并行计算领域得到越来越广泛的应用, 主要因为 MPI 与 PVM 相比具有很多优点: MPI 并行编程环境已经成为国际上并程序的标准, 得到很多国际组织和科研机构的支持; MPI 能较好适应分布式存储并行计算机系统; MPI 可以应用于各种同构和异构网络平台; MPI 几乎被所有并行计算环境和流行的多进程操作系统支持; 具有最佳的可移植性^[5].

本文作者在自主搭建的 MPI 并行环境(PC 集群)上完成了原有串行计算程序 DiskRow 的并行化, 并行化后的程序能够对多排多通道叶片三维流场进行并行数值计算. 本文通过串行程序和并行程序计算结果对比, 分析了并行程序的并行准确性和并行效率.

1 数值计算方法及并行计算平台简介

1.1 定常流动数值解法简介

在直角坐标系中, 三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程的无量纲形式为

$$\frac{5U}{5t} + \frac{5F}{5x} + \frac{5G}{5y} + \frac{5H}{5z} = \frac{1}{Re_1} \left(\frac{5F_v}{5x} + \frac{5G_v}{5y} + \frac{5H_v}{5z} \right) + Q \quad (1)$$

式中 U 为守恒变量; F , G 和 H 为无粘通量; F_v , G_v 和 H_v 为粘性通量; Q 为与旋转有关的源项; Re_1 为基于无量纲特征变量的雷诺数. 湍流粘性系数通过求解 Baldwin-Lomax 代数湍流模型获得. 采用一步有限体积 TVD Lax-Wendroff 格式数值求解该控制方程, 并使用多重网格技术使计算加速收敛到定常状态. 方程具体各项及求解方法见参考文献[6].

1.2 并行计算平台简介

本文工作是在自主搭建的并行平台上进行的. 并行平台由通过 1 个 Hub 连接的 5 台 PC 机组成, 其中 1 台 PC 机作为服务器与外界连接, 其余 4 台配置相同、装有 Linux 操作系统的 PC 机进行并行计算的.

2 程序并行过程中计算域划分及数据传递

2.1 计算域的划分及分配

在叶轮机三维流动并行计算中计算域分区有很多方法, 比如沿叶高方向分区、沿径向分区、沿轴向分区以及按流动通道分区. 作者采用了

按流动通道分区的方法, 因为这样便于相邻区域间数据传递可以有较高的并行性, 并且容易扩展到多排和(或)多通道流场计算. 按流动通道分区就是把每个通道作为一个计算子区域分配到不同的计算进程中, 然后在不同进程中计算相应子区域的流场, 子区域间边界上的信息通过消息传递获得. 按流动通道划分子区域的示意图如图 1, 其中静叶排有 2 个通道, 动叶排有 3 个通道, 所以整个计算域可以划分为 5 个子区域, 需要 5 个进程完成整个流场的数值模拟.

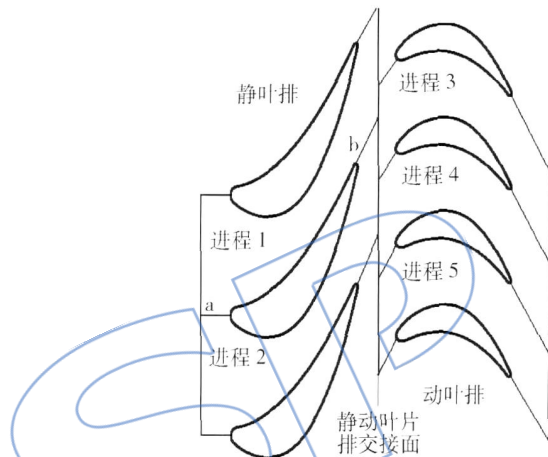


图 1 单级多通道计算域分区示意图

Fig. 1 Blocks for single-stage multi-passages

2.2 子计算域之间数据传递

子计算域间的数据传递可以分为两种情况: 相对静止情况和存在相对运动情况. 如图 1 所示, 同一个叶片排上, 相邻子区域是相对静止的, 对于这种情况, 子区域的交界处数据只需要直接进行传递, 图 1 中 a 和 b 表示进程 1 和进程 2 子区域交界处的交界面, 交界面上的数据只需要直接进行传递. 图 1 中静叶排和动叶排交接面处存在相对转动, 这种情况下有多种界面处理方法, 如插值传递法、掺混界面法等等, 处理方法不同, 数据传递方式也相应的有一定变化. 本文中采用了掺混界面法, 即先求得界面上通量平均值, 然后进行交接面处的数据传递.

3 计算结果与分析

本文以 NASA 单级透平^[7]为算例, 采用 4 种叶片排与通道数的组合, 验证了并行程序的准确性, 分析了计算的并行效率.

3.1 并行程序准确性分析

为了验证并行程序的准确性和普适性, 作者以 NASA2TP1680 单级透平为基础, 设计了如下

4 种组合:

组合 1))) 分别采用串程序和并程序对 NASA2TP1680 单级透平静叶排的单个通道进行计算, 串程序和并程序计算网格数相同为 113 @33 @25, 网格划分参看图 2;

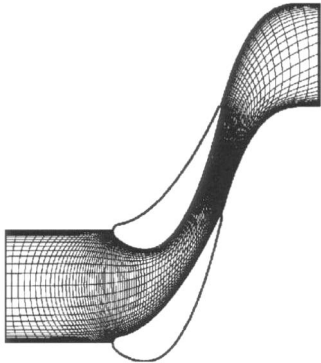


图 2 组合 1 单通道网格示意图
Fig. 2 Mesh for one passage

组合 2))) 采用并程序对 NASA2TP1680 单级透平静叶排的两个通道进行计算, 两个通道的计算网格数都为 113 @33 @25, 网格划分参看图 3;

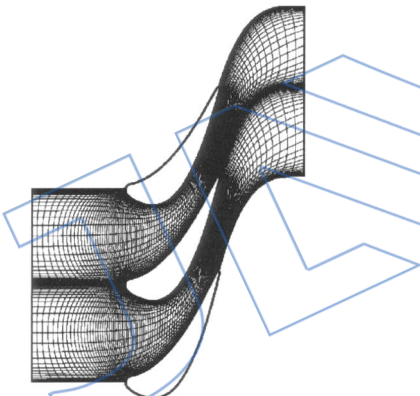


图 3 组合 2 两通道网格示意图
Fig. 3 Mesh for two passages

组合 3))) 分别采用串程序和并程序对 NASA2TP1680 单级透平进行计算, 其中动静叶片排都为单通道, 串程序和并程序计算网格数相同, 静叶为 113 @33 @25, 动叶为 113 @33 @25, 网格划分参看图 4;

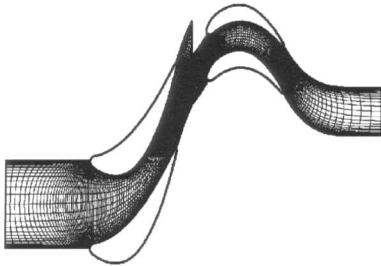


图 4 组合 3 两排单通道网格示意图
Fig. 4 Mesh for single stage

组合 4))) 采用并程序对 NASA2TP1680 单级透平进行计算, 其中静叶排为 1 个通道, 动叶排为两个通道. 计算网格数, 静叶为 113 @33 @25, 动叶两通道计算网格数相同为 113 @33 @25, 网格划分参看图 5.

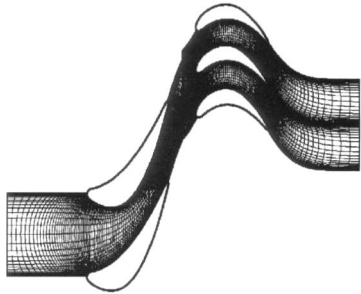


图 5 组合 4 两排多通道网格示意图
Fig. 5 Mesh for single stage multi passage

对于定常数值计算, 无论采用串程序还是并程序计算得到的通道内流动情况应该一致, 上面 4 种组合的数值计算证实了这一点. 具体结论通过计算得到的通道内压力分布和马赫数分布给出, 结果分析如下:

图 6 给出了组合 1 中串程序和并程序计算得到的 50% 叶高处叶片表面压力分布对比; 图 7 和图 8 给出串程序和并程序计算得到的静叶排单通道内 50% 叶高处压力分布情况; 图 9 和图 10 给出串程序和并程序计算得到的静叶排单通道内 50% 叶高处马赫数分布情况; 图中两通道中一个通道内压力或马赫数分布是另一个通道内的分布复制得到的. 从图 6~ 图 10 可以看到, 在单排单通道情况下无论是叶片表面压力分布还是流道内压力分布和马赫数分布, 串程序和并程序得到的结果都非常一致, 说明并行程

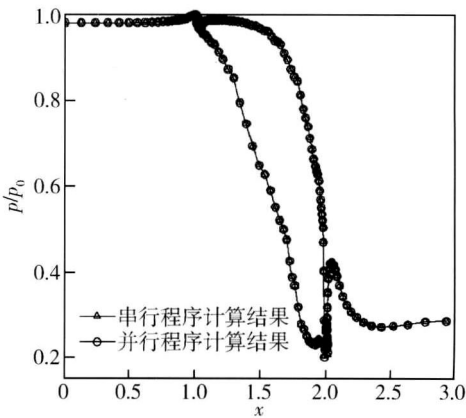


图 6 静叶排单通道半叶高处叶片表面压力分布
Fig. 6 Blade surface static pressure distributions at midspan for test case 1

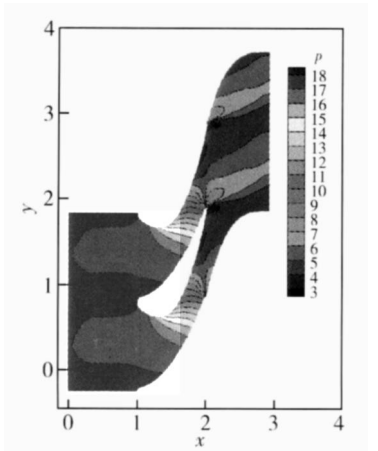


图 7 串行程序得到的半叶高处流道内压力分布
Fig. 7 Static pressure contours at midspan for test case 1 by serial code

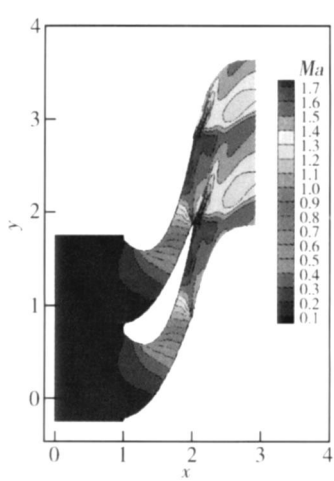


图 10 并行程序得到的半叶高处流道内马赫数分布
Fig. 10 Mach contours at midspan for test case 1 by parallel code

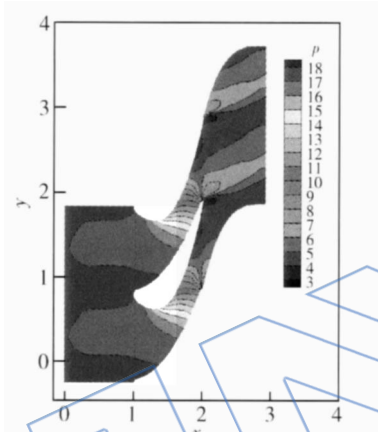


图 8 并行程序得到的半叶高处流道内压力分布
Fig. 8 Static pressure contours at midspan for test case 1 by parallel code

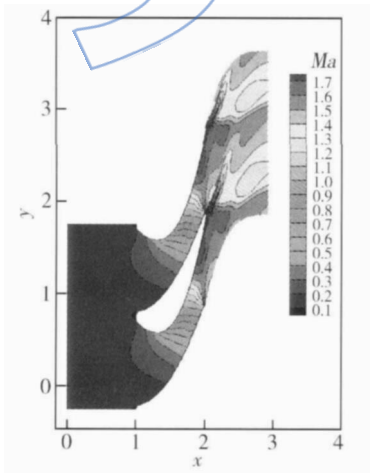


图 9 串行程序得到的半叶高处流道内马赫数分布
Fig. 9 Mach contours at midspan for test case 1 by serial code

排单通道 50% 叶高处叶片表面压力分布与组合 2 中并行程序得到的静叶排两通道 50% 叶高处叶片表面压力分布对比, 因为在定常情况下各通道内流动情况相似, 所以有可比性. 图 12 和图 13 给出了并行程序得到的静叶排两通道内 50% 叶高处压力分布和马赫数分布, 此处两通道内流场分布都为真实计算得到. 通过对比图 7 与图 12, 图 9 与图 13 可以看出: 对于同一叶片排内, 虽然通道数增加, 但是计算结果与串行程序计算结果相比依然一致, 因此可以得出并行程序在单排多通道情况下是准确的.

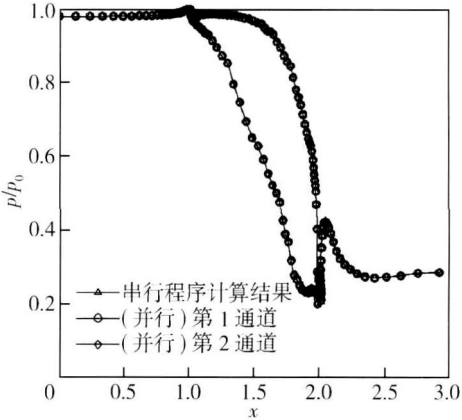


图 11 静叶排两通道半叶高处叶片表面压力分布
Fig. 11 Blade surface static pressure distributions at midspan for test case 2

图 14 给出了组合 3 中串行程序和并行程序得到的单级单通道 50% 叶高处叶片表面压力分布对比, 图 15 和图 16 给出了串行程序和并行程序得到的单级单通道内 50% 叶高处压力分布, 图 17 和图 18 给出了串行程序和并行程序得到的单

序在这种情况下是准确的.
图 11 给出了组合 1 中串行程序得到的静叶

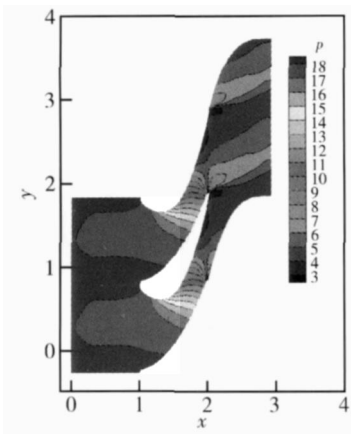


图 12 并程序得到的半叶高处流道内压力分布
Fig. 12 Static pressure contours at midspan
for test case 2 by parallel code

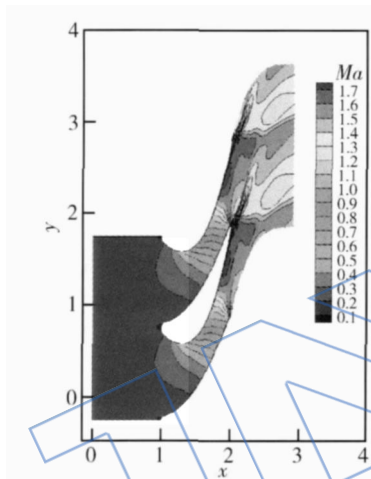


图 13 并程序得到的半叶高处流道内马赫数分布
Fig. 13 Mach contours at midspan for test case 2
by parallel code

级单通道内 50% 叶高处马赫数分布; 图中每排两通道中一个通道内压力或马赫数分布是另一个通道内马赫数分布复制转动得到的。从图 14~ 图 18 可以看到, 对于单级单通道的情况, 串程序和并程序计算结果吻合的非常好, 说明并程序对于单级单通道情况是准确的。

图 19 给出了串程序计算单级单通道和并程序计算单级多通道(其中静叶排为 1 个通道, 动叶排 2 个通道)得到的 50% 叶高处叶片表面压力分布对比, 图 20 给出了并程序得到的流道内 50% 叶高处压力分布, 图 21 给出了并程序得到的流道内 50% 叶高处马赫数分布, 其中静叶排中一个通道内压力或马赫数分布是通过另一个通道内马赫数分布复制转动得到的, 而动叶两个通道都是通过真实计算得到的。对比图 15 与图 20, 图 17 与图 21 可知, 在多通道情况下并程序也是

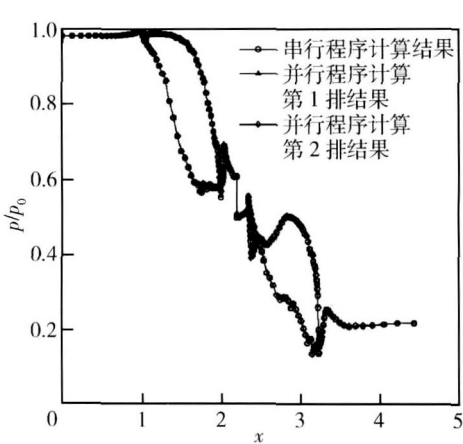


图 14 单级单通道半叶高处叶片表面压力分布
Fig. 14 Blade surface static pressure distributions
at midspan for test case 3

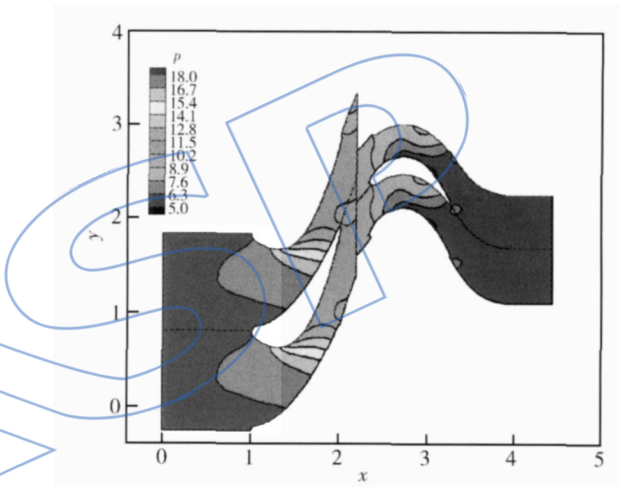


图 15 串程序得到的半叶高处流道内压力分布
Fig. 15 Static pressure contours at midspan
for test case 3 by serial code

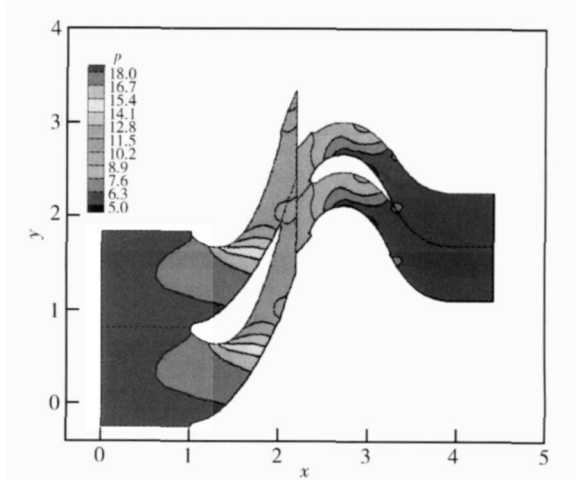


图 16 并程序得到的半叶高处流道内压力分布
Fig. 16 Static pressure contours at midspan
for test case 3 by parallel code

准确的。

综合上面 4 种组合的计算和分析可以得出结

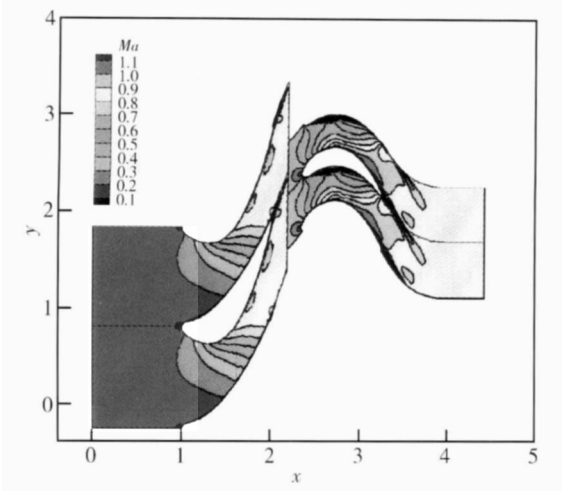


图 17 串程序得到的半叶高处流道内马赫数分布
Fig. 17 Mach contours at midspan for test case 3 by serial code

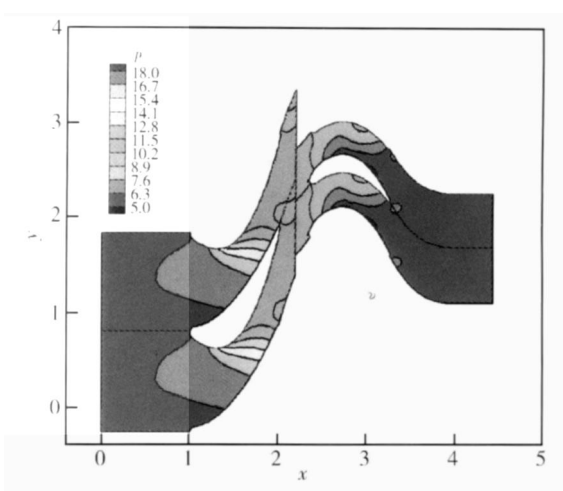


图 20 并程序得到的半叶高处流道内压力分布
Fig. 20 Static pressure contours at midspan for test case 4 by parallel code

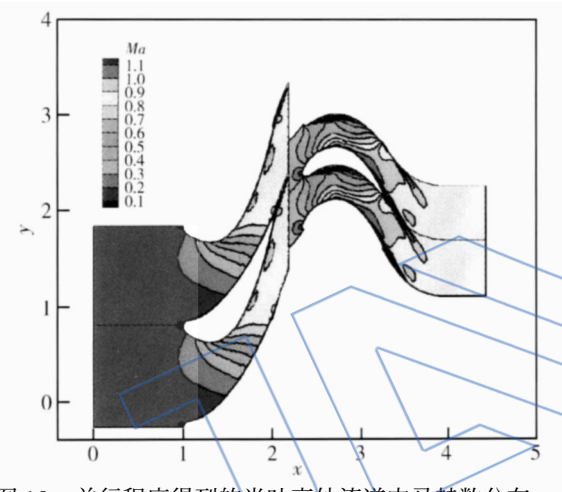


图 18 并程序得到的半叶高处流道内马赫数分布
Fig. 18 Mach contours at midspan for test case 3 by parallel code

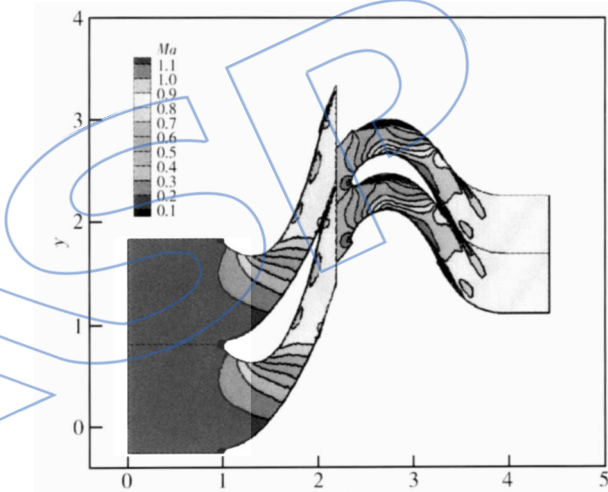


图 21 并程序得到的半叶高处流道内马赫数分布
Fig. 21 Mach contours at midspan for test case 4 by parallel code

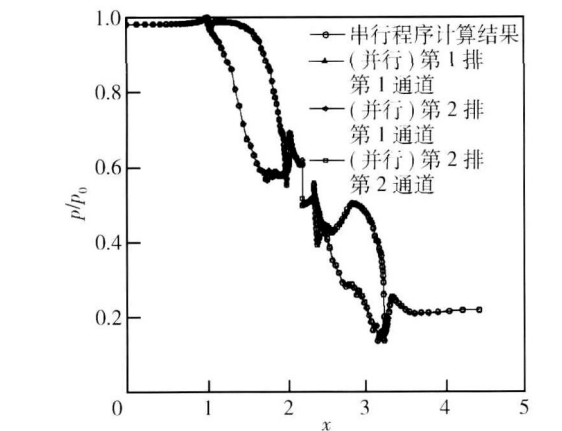


图 19 单级多通道半叶高处叶片表面压力分布
Fig. 19 Blade surface static pressure distributions at midspan for test case 4

具有特殊性而是具有普适性的, 它可以用于计算任意多个叶片排或叶片通道的流场。

3.2 并行计算的并行加速比与并行效率分析

并行加速比或并行效率是衡量并行计算性能的一个参数. 并行加速比的定义是串行计算物理时间除以并行计算物理时间, 即 $N = t_{\text{串}} / t_{\text{并}}$; 并行效率的定义是并行加速比除以并行计算的进程数, $G = N/n$ (n 为并行进程数)。

表 1 中列出了 4 种组合的并行加速比和并行效率. 从表中可以看到: 对于组合 1(单排单通道计算), 由于并行计算不存在进程间数据传递, 它的并行效率是 1; 对于组合 2(单排多通道计算)和组合 3(两排单通道计算), 计算过程中单个进程只涉及到一个方向的数据传递, 传递数据量较小

表 1 并行程序的并行效率
Table 1 Parallel efficiency of the parallel code

算例组合	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4
计算网格数	93 225	186 450	186 450	279 675
串行程序计算时间/s	3 071	6 142	6 087	91 313
并行程序计算时间/s	3 071	3 200	3 200	3 328
并行加速比	1.0	1.919 4	1.902 2	2.743 7
并行效率	11 0	11 959 7	11 951 1	11 914 6

计算粒度较大, 并行效率较高; 对于组合 4(两排多通道计算), 单个进程既要进行相邻通道之间的数据传递又要进行相邻叶片排之间的数据传递, 传递数据量较大(相对于组合 2、组合 3, 计算粒度较小), 并行加速比或并行效率相对较低.

由以上三种情况不难推断出并行效率与单个进程传递数据量的大小有关(或与计算粒度的大小有关). 在叶轮机械内部流动数值计算中, 对于多排多通道计算, 排数的增加和(或) 通道数的增加, 并不影响单个进程传递数据量的大小, 所以理论上并行效率并不会随着排数和(或) 通道数的增加有明显降低, 但由于排数和(或) 通道数的增加将会增加进程间的不同步性, 可能使效率有所降低. 比如, 在组合 4 的基础上增加排数和(或) 通道数, 计算的并行效率仍将保持较高并行效率但略低于 0. 91. 对于一些特殊情况, 并行效率会比较高, 比如, 组合 1 中进程不存在数据传递, 并行效率接近 1, 组合 2、组合 3 中单个进程传递的数据量的大小只相当于组合 4 中单个进程数据传递量的一半, 并行效率明显高于组合 4. 另外, 影响并行效率的还有其它很多因素, 如各分区计算规模的不平衡.

4 结 论

本文对基于 MPI 环境的并行程序的准确性和并行效率进行了验证, 通过对比分析证实了并行计算程序具有良好的并行准确性和较高的并行效率, 该项工作为以后进行叶片排内三维、粘性、

非定常流动的数值模拟和研究打下了好的基础.

参考文献:

[1] Hohn W, Gombert R, Kraus A. Unsteady aerodynamical blade row interaction in a new multistage research turbine Part 2: Numerical investigation [R]. ASME Paper 2002 GT20307.

[2] Ruprecht A, Bauer C, Gentner C, et al. Parallel computation of stato2rotor interaction in an axial turbine [R]. ASME PVP Conference, CFD Symposium, 1999.

[3] 林智荣, 袁新. 并行计算用于叶轮机械流场特性分析 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23 (6): 6952698.

LIN Zhirong, YU AN Xin. Parallel computation of three2dimensional flow field within turbomachinery [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23 (6): 6952698.

[4] 赵晓路. 使用流道反算延伸的多叶片排并行计算 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21 (5): 5592562.

ZHAO Xiaolu. A novel extension approach of blade computational domain for the multistage parallel calculation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21 (5): 5592562.

[5] Snir M, Otto S, Huss2Lederman S. MPI: the complete reference [M]. Cambridge, Massachusetts London, England: The MIT Press, 1996.

[6] 刘建军. 用多块多网格方法数值模拟三维粘性流动 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23 (1): 4648.

LIU Jianjun. Numerical simulation of 3D viscous flow using a multiblock multigrid method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23 (1): 46248.

[7] Moffit T P, Szanca E M, Whitney W J. Design and cold air test of single stage uncooled core turbine with high work output [R]. NASA T P21680, June, 1980.