

文章编号: 1000-6893(2002) 01-0072-03

非结构聚合多重网格法流场数值模拟研究

吕宏强, 伍贻兆, 夏 健

(南京航空航天大学 空气动力学系, 江苏 南京 210016)

NUMERICAL SIMULATION OF FLOWFIELDS WITH UNSTRUCTURED AGGLOMERATION MULTIGRID ALGORITHM

LU Hong-qiang, WU Yi-zhao, XIA Jian

(Dept. of Aerodynamics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 在非结构网格上应用聚合多重网格技术来加速 Euler 方程的收敛过程。设计了一种高效率的网格聚合方法。采用四重网格, 在每一层网格上采用有限体积法进行计算。通过对多段翼型绕流的数值求解验证了多重网格加速收敛的高效性。

关键词: 非结构网格; 聚合网格; 多重网格法; 有限体积法

中图分类号: V211.3 文献标识码: A

Abstract: An agglomeration multigrid algorithm has been developed to accelerate the convergence of the Euler equations to a steady state on unstructured meshes. In the present work, an efficient method has been designed to agglomerate unstructured meshes. The finite volume method is adopted on each layer. The high efficiency of this multigrid algorithm has been verified by calculating flows around a multi-element airfoil.

Key words: unstructured mesh; agglomeration of meshes; multigrid; finite volume

多重网格法作为一种有效的加速收敛技术在结构网格上得到了广泛的应用。本文为了将其推广到非结构网格, 设计了一种高效的非结构网格聚合方法, 并采用了一种新的循环方式, 用四重网格进行 Euler 方程的数值求解。

1 网格的聚合

初始多段翼型网格数为 12138, 点数为 6273。各层相邻粗网格的之间的网格数比都约为 4:1 (见图 1)。网格聚合过程如下:

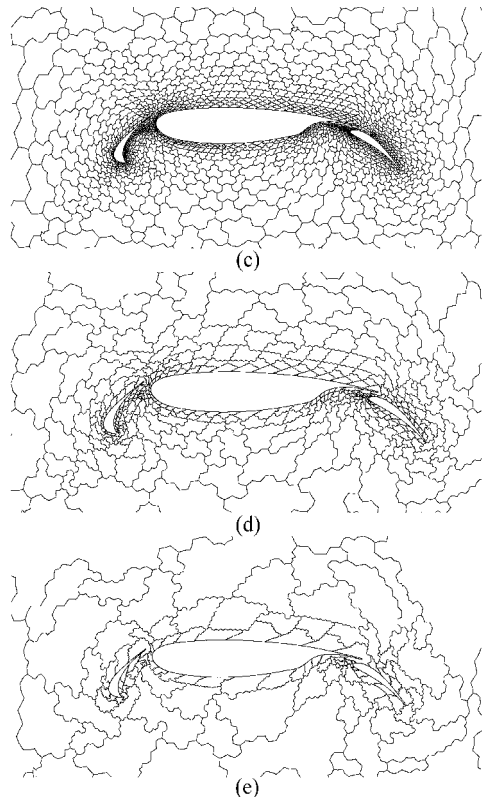
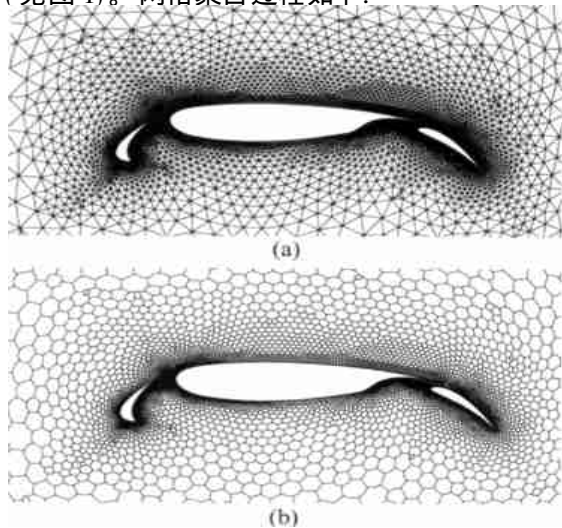


图 1 生成的多段翼型网格

Fig. 1 The adopted unstructured meshes around the multi-element airfoil

(1) 首先以每个节点为中心, 以此节点的相邻三角形单元的形心和和边的中点的连线围成的封闭多边形作为第 1 层粗网格的单元。

(2) 由第 1 层粗网格生成第 2 层粗网格采用了一种类似于层推进的方法: 首先, 选择内外边界上的元素作为起始聚合边界, 并在聚合边界上选择一元素作为待聚合元素。将与此待聚合元素相邻的没有聚合过的密网格的元素全部聚合为一个粗网格, 同时将所有与刚聚合过的密网元素相邻的未聚合的密网元素记录到待聚合边界中。然后选择聚合边界中与刚生成的这个粗网元素相邻的密网元素作为待聚合元素, 将与此待聚合元素相邻的没有聚合过的密网格的元素全部聚合为一个粗网格……如此反复, 直到聚合边界中所有的密网元素都聚合完毕。然后将聚合边界更新为待聚合边界。重复以上步骤直到所有密网元素都聚合完毕。

(3) 其它层粗网格的生成与第 2 层粗网格的生成过程完全相同。

2 数值传递

相邻网格层之间的参数传递采用面积加权^[1]思想。从细网格到粗网格的数值传递如下

$$W_c = (W_f S_{fc} / S_c) \quad (1)$$

$$R_c = (R_f S_{fc} / S_f) \quad (2)$$

式中: W 表示流动变量; R 表示残值; S 表示单元面积; 而 S_{fc} 则表示粗网格单元与细网格单元相交部分的面积。下标 c 和 f 代表粗网格和细网格, 粗网格到细网格的修正量插值为

$$C_f = (C_c S_{fc} / S_f) \quad (3)$$

3 迭代算法

采用四步显式 Runge-Kutta 法进行时间推进。在第 1 层密网格上进行的迭代为

$$W^{(q)} = W^{(0)} - \alpha_f \Delta t R(W^{(q-1)}) \quad (4)$$

粗网格上进行迭代时, 需加一强迫函数

$$P = R - R(W) \quad (5)$$

$$W^{(q)} = W^{(0)} - \alpha_c \Delta t [R(W^{(q-1)}) + P] \quad (6)$$

式中: R 和 W 为从上一层网格传递过来的参数。可以看出粗网格上进行的第一步迭代是由上一层密网传来的残值推动的。式(5)中 R 和 W 分别表示由密网格传递过来的残值和流动变量。

4 循环过程

采用图 2 所示的循环过程。考虑到最粗的两层网格的网格数很少, 只在最粗的两层网格上重

复迭代, 每一个循环比 $W^{[2]}$ 型节约很多机时, 又比 $V^{[2]}$ 型循环更好的消除误差。

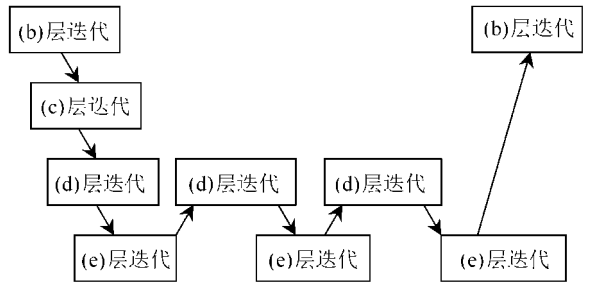


图 2 循环过程
Fig. 2 Multigrid cycle

5 算例分析

对亚音速 ($Ma = 0.3, \alpha = 10^\circ$) 状态下的多段翼型的绕流进行了数值模拟。采用的网格是第 1 到第 4 层粗网格(图 1 中的 (b), (c), (d), (e))。单、多重算法收敛速度比较如图 3。横轴为循环数, 纵轴为残值的对数。图 4 是单、多重网格算法 C_p 曲线对比, 结果完全重合。

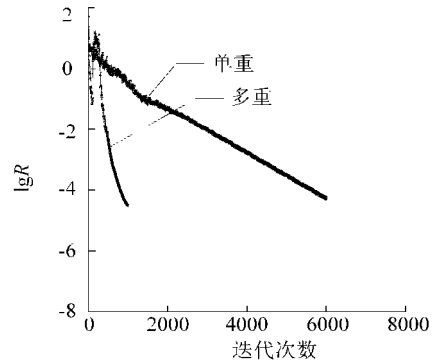


图 3 收敛历史
Fig. 3 Convergence rate

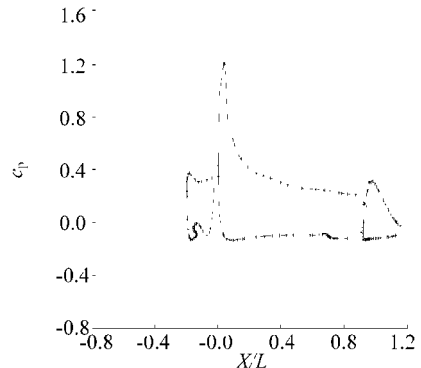


图 4 C_p 分布
Fig. 4 Distribution of C_p

6 结 论

设计了一种新的网格聚合方法, 基本思想是

以单元组成待聚合边界进行推进式聚合。此方法的优点在于能够保证相邻两层网格的单元数比约为 4:1, 并且聚合的网格具有较好的质量。另外, 采用一种介于 V 型循环和 W 型循环之间的循环方式。此方法只在最粗的两层网格上重复迭代, 由于这两层边数和网格数都很少, 额外的迭代并不花费多少时间, 因此每个循环的耗时比 W 型少的多, 又比单纯的 V 型循环更彻底的消除误差。成功的将多重网格法应用到了非结构网格。

参 考 文 献

- [1] Mavriplis D J. Multigrid solution of the two-dimensional Euler equations on unstructured triangular meshes[J]. AIAA J, 1988, 26(7): 824-831.
- [2] Mavriplis D J. Multigrid techniques for unstructured meshes[R]. ICASE 95-27. 1995.

作者简介:



吕宏强(1977-) 男, 山东莱阳人, 南京航空航天大学博士研究生, 主要从事流体数值模拟研究。电话: 025-4892735, E-mail: lhqam@nuaa.edu.cn。

伍贻兆(1945-) 男, 回族, 江苏六合人, 南京航空航天大学教授, 博士生导师。1983年到1987年为南京航空学院空气动力学系在职博士研究生; 1990年到1991年为法国达索飞机公司理论空气动力学部博士后。长期从事计算流体力学与跨音速空气动力学方面的研究。电话: 025-4892894。

夏健(1970-) 男, 浙江绍兴人, 南京航空航天大学讲师, 博士。1998年博士毕业于南京航空航天大学空气动力学系。主要从事流体力学数值模拟研究工作。电话: 025-4894730。E-mail: xjam@nuaa.edu.cn。

(责任编辑: 吴小勇)