

分区多重网格法在复杂区域中的数值研究^{*}

侯凌云¹, 严传俊²

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084;

2. 西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘 要: 突破多重网格方法在多连通域中应用的局限性, 将分区法与多重网格法结合, 形成分区多重网格法, 应用在复杂几何域及复杂多连通域中, 结果表明, 它不仅能提高精度, 而且能加快收敛。

主题词: 航空发动机; 进气道; 网格法; 数值计算

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2000) 01-0054-03

Numerical investigation of zonal multigrid method in complex regions

Hou Lingyun¹, Yan Chuanjun²

(1. Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China;

2. Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: Breaks through the limit of multigrid method applying to multiply connected regions. Multigrid and zonal method are combined and zonal multigrid method is formed. Application to complex geometries and complex multiply connected regions show that zonal multigrid method can improve not only convergence, but also accuracy.

Subject terms: Aircraft engine; Inlet; Grids method; Numerical calculation

1 引 言

为了精确处理复杂流动问题, 经常需要改进计算方法, 增大网格节点数。这些措施往往会带来收敛速度减慢、迭代数目增加的后果, 而多重网格技术较少地受到网格节点数的影响, 是提高收敛速度的一个有效办法^[1]。所谓多重网格方法, 就是为了克服固定网格的缺点而新近发展起来的一种迭代解法, 它采用细网格消除高频误差分量, 粗网格有效去除低频误差分量。当采用几层网格时, 各种频率的误差可以得到比较均匀的衰减, 因而加快了迭代收敛的速度^[2]。本文采用多重网格中全近似格式 FAS 来求解非线性 N-S 方程。

但当解决实际复杂几何形状的问题时, 常常还会遇到包含多块结构的多连通域。对于它们, 多重网格的应用存在困难, 与分区法的有力结合形成的分区多重网格法, 将不但使收敛速度加快和计算精度提高, 而且突破了多重网格在多连通域中应用的局限性^[3]。

多重网格法与分区法的结合有两种方式, 第一种方式是将分区网格置于最外层; 第二种方法是多重网格置于最外层。Hinatsu 和 Ferziger^[4]对比了上述两种方法的收敛率, 发现方法一略占上风, 本文采用方法一。对于此法, 交界面边界条件在一个多重网格循环中仅交换一次, 因此它的优点在于减少了交界面插值等代数运算的次数, 能够在某些程度上消除误差的传递, 从而有助于获得较好的收敛率。

本文对单网格法、分区法和分区多重网格法进行了计算和比较, 研究了分区多重网格法在复杂区域问题中的迭代性能及计算精度, 并将它应用在航空发动机渐扩平面通道和粒子分离器中。

2 控制方程及数值求解

对于复杂区域, 在一般曲线坐标系下进行求解, 其控制方程表示为统一形式:

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (\rho U \Phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho V \Phi) = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{r \Gamma_{\Phi}}{J} \alpha \Phi_{\xi} \right) +$$

* 收稿日期: 1999-01-11; 修订日期: 1999-06-30。

作者简介: 侯凌云 (1972-), 女, 博士后, 研究领域: 计算流体力学及燃烧学。电话: 010-62782460。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{r \Gamma_{\Phi}}{J} y \Phi_{\eta} \right) + S^{\Phi}(\xi, \eta) + S^{CT} \quad (1)$$

其中 $U = r(ur_{\eta} - vx_{\eta})$, $V = r(vx_{\xi} - ur_{\xi})$

$$S^{CT} = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{r \Gamma_{\Phi}}{J} (-\beta \Phi_{\eta}) \right] + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{r \Gamma_{\xi}}{J} (-\beta \Phi_{\eta}) \right]$$

控制方程采用有限容积法离散, 内层迭代采用一般曲线坐标系下交错网格布局的 SIMPLEC 算法, 外层迭代采用分区多重网格法。

3 结果和讨论

采用单网格法、分区法和分区多重网格法分别对航空发动机渐扩平面通道和粒子分离器两种复杂区域进行计算。

3.1 渐扩平面通道

渐扩平面通道的几何形状及分区情况见图 1, 在单网格中采用 64×17 的网格, 在分区法与分区多重网格中采用 33×17 和 33×17 两块网格, 多重网格采用 5 层 V 循环。三种方法同时计算 $Re = 100$ 的层流流动。

表 1 是单网格法、分区法和分区多重网格法三种方法在迭代数和 CPU 时间的对比, 由表中可以看出, 分区法在计算收敛速度上略快于单网格法, 这是因为分区计算中在重叠区域强加了全局质量守恒, 有助于稳定甚至加快收敛; 分区多重网格法在迭代数与 CPU 时间上均优于单网格法和分区法。

图 2 为采用分区多重网格法在交界面上求解结果的对比, 由图中可看出, 由区域 1 中所计算的交界面值与区域 2 中所计算的值一致。这说明采用分区多重网格法不仅能使收敛速度加快, 而且能在重叠区域使数据得以连续变化。

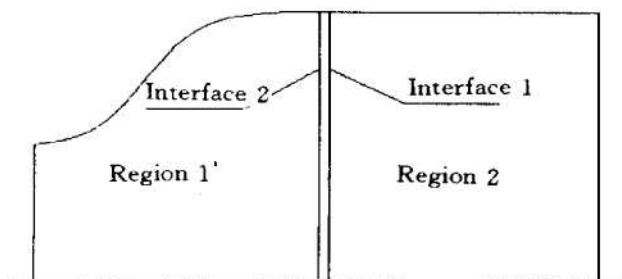


Fig. 1 Geometry and interface

Table 1 Comparison of iteration performance among three methods

Method	Grid No.	Iterations No.	CPU time/s
Single-grid	64×17	335	569
Zonal	$33 \times 17 / 33 \times 17$	277	470
Zonal multigrid	$33 \times 17 / 33 \times 17$	57	330

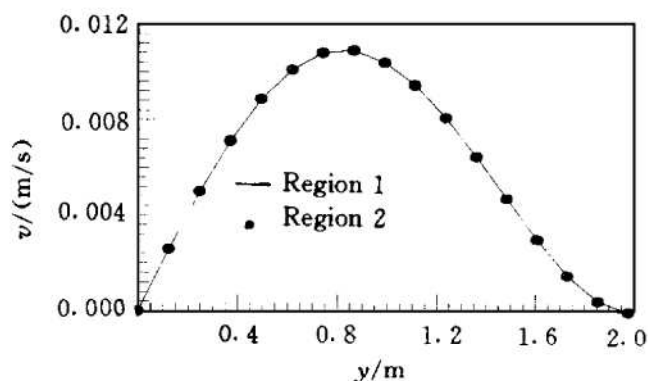


Fig. 2 Comparison of interface velocity between two regions

3.2 粒子分离器流动

发动机粒子分离器具有分叉流场结构, 属多连通域。由于存在两个分叉流道, 考虑将整个区域分为三个子区域, 粒子分流器前的整体区域段为区域 1, 主气流流道为区域 2, 清除流流道为区域 3。为适合多重网格的采用, 区域 1 采用 25×25 网格, 网格在分流器唇口处加密, 区域 2 采用 17×13 网格, 区域 3 采用 17×9 网格, 其网格分布图如图 3, 多重网格采用 3 层循环。为便于与单网格比较, 单网格法采用 40×22 网格, 这样可以尽可能与分区多重网格法的网格接近。

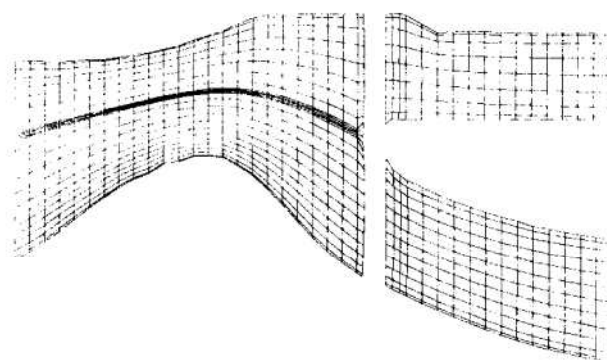


Fig. 3 Grid of three regions

图 4 是单网格法、分区法及分区多重网格法在收敛过程中的迭代数对比, 从图中可看出, 单网格法 (1) 线收敛速度最慢, 分区多重网格法 (3) 线收敛速度最快, 但在此算例中, 由于网格的限制, 采用的是 3 层循环, 使收敛速度的加快率略低, 若增加网格节点数, 采用较高层循环, 则能使收敛速率加速更快一些。

图 5 是采用单网格法和分区多重网格法后, 压力结果的对比, 与前面算例有所不同的是, 由于分区多重网格法在区域 1 中分流器唇口处网格的加密, 致使图 5 (b) 中压力等值线在唇口附近密集, 从而更精确

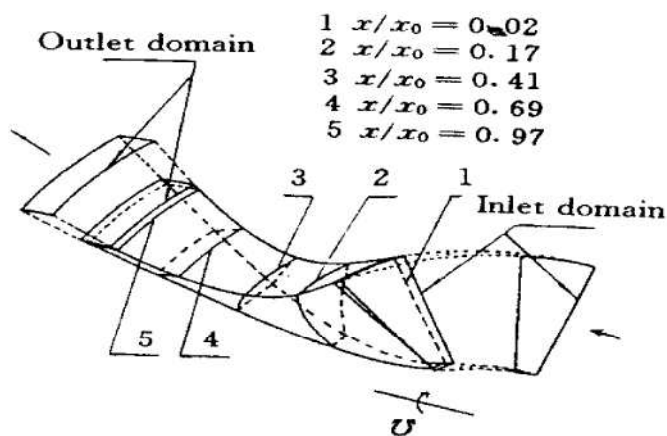


Fig. 4 Comparison of iteration process among three methods

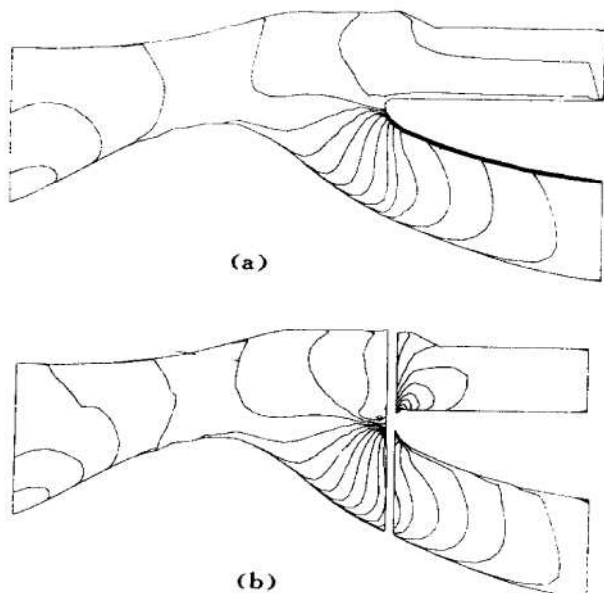


Fig. 5 Comparison of pressure contour among three methods

计算出分流器附近的流动情况, 这样使整个流场相对单网格法计算精度有所提高, 然而收敛速率并不因精

度提高而下降, 反而因多重网格的运用, 使收敛速率大大加快。需要指出的是, 在图 5 (b) 中交界面等值线并未光滑连接, 这是因为三个区域的等值线是分别绘制的, 等值线取值范围不尽一致, 造成等值线划分不一样。在实际结果中, 交界面上不同区域所计算的数据是则相同的。

由此可以看出, 分区法能够灵活处理各区域的不同网格, 使计算精度得以提高, 而多重网格通过光滑分量的有效去除, 则可使收敛速率得以加快, 两者有力结合, 扬长避短, 从而在使精度提高的同时也加快了收敛。

5 结 论

分区多重网格法能加快收敛, 同时提高精度, 在发动机粒子分离器等复杂区域中得到很好应用, 它增强了解决复杂问题的灵活性, 使许多以前让人棘手的难题迎刃而解, 并变得简单、可行。从计算流体力学的发展趋势来看, 分区多重网格法将会在航空、航天等大型工程问题中得以广泛应用。

参 考 文 献

- 1 侯凌云, 严传俊. 复杂几何域中不可压流动的多重网格计算 [J]. 航空动力学报, 1998, 13 (3): 245~248.
- 2 孙再庸, 何洪庆, 蔡体敏. 多重网格法求解火焰稳定器钝头体管流问题 [J]. 推进技术, 1998, 19 (5).
- 3 侯凌云. 直升机粒子分离器两相流场的数值模拟 [D]: [学位论文]. 西安: 西北工业大学, 1998.
- 4 Hinatsu M, Ferziger J H. Numerical computation of unsteady incompressible flow in complex geometry using a composite multigrid technique [J]. Int. J. Numer. Meth. Fluids. 1991, 13: 971~997.

(责任编辑: 史亚红)