

文章编号: 1000-6893(2000)03-0238-03

# 多区域多重网格法在直升机粒子分离器中的应用

侯凌云<sup>1</sup>, 严传俊<sup>2</sup>

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084)

(2. 西北工业大学 七系, 陕西 西安 710072)

## APPLICATION OF MULTIBLOCK/MULTIGRID METHOD TO INLET PARTICLE SEPARATOR IN HELICOPTER

HOU Ling-yun<sup>1</sup>, YAN Chuan-jun<sup>2</sup>

(1. Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical University, Xi an 710072, China)

摘 要: 首次将多区域多重网格法用在一般曲线坐标系下交错网格布局的 SIMPLEC 算法中, 在直升机粒子分离器这类独特结构中的成功应用, 突破多重网格方法在多连通域中运用的局限性, 使复杂问题变得简单。结果表明, 它不仅能加快流场求解的收敛速度, 而且还能提高计算精度。

关键词: 多区域多重网格; 粒子分离器; 曲线坐标

中图分类号: V211.3 文献标识码: A

Abstract: A multiblock/multigrid method is developed in SIMPLEC algorithm with a layout of staggered grid on generalized curvilinear coordinates. Application to the peculiar construction of inlet particle separator in helicopter breaks through the limit of multigrid methods applying to multiply connected regions and makes complex problem simple. Results show that this multiblock/multigrid method can improve not only convergence, but also accuracy.

Key words: multiblock/multigrid; inlet particle separator; curvilinear coordinate

粒子分离器是安装在直升机发动机上, 能有效分离砂粒, 从而保证发动机性能和提高发动机使用寿命的一种防护装置。它在结构上有非常独特的地方: 型面弯曲复杂且曲率大, 环形分叉流路, 内外流路流动状态差异大, 这些都给数值模拟带来难度。多重网格技术的应用不仅可以快速求解流动问题, 而且还可以在增大网格节点数的同时不用牺牲收敛速度<sup>[1]</sup>。但在解决粒子分离器的分叉流场问题时, 简单地应用多重网格存在困难, 与多区域法的结合形成的多区域多重网格法, 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<sup>[2]</sup>。本文将多区域多重网格应用在一般曲线坐标系下交错网格布局的粒子分离器中, 并研究了多区域多重网格法在粒子分离器中的迭代性能及计算精度。

### 1 多区域多重网格的数值求解

对于非线性 N-S 方程, 采用多重网格中全近似格式 FAS 和 V 循环来求解, 方法简述如下:

在细网格上控制方程可写成

$$L^k \bar{5}^k = F^k \quad (1)$$

其中:  $L$  为非线性算子, 由对流和扩散项组成;  $\bar{5}$  为求解变量;  $F$  代表源项。在细网格上迭代数次, 得到近似解  $\bar{5}^k$ , 而后转换到下一层粗网格, 其方程为

$$L^{k-1} \bar{5}^{k-1} = L^{k-1} I_k^{k-1} \bar{5}^k + I_k^{k-1} (F^k - L^k \bar{5}^k) \quad (2)$$

其中:  $I_k^{k-1}$  为对变量本身的限制算子, 是把细网格上的变量限制到粗网格上;  $I_k^{k-1}$  为对残差的限制算子。在粗网格上迭代数次, 然后再到下一层粗网格, 直至最粗网格。接着做粗网格修正, 即

$$\bar{5}_{\text{new}}^k = \bar{5}_{\text{old}}^k + I_k^{k-1} (\bar{5}^{k-1} - I_k^{k-1} \bar{5}_{\text{old}}^k) \quad (3)$$

其中:  $I_k^{k-1}$  为插值算子, 是把粗网格上的变量插值到细网格上, 以新的  $\bar{5}^k$  为初值, 在较细网格上再迭代, 直至最细网格, 即完成一步 FAS 迭代。对于交错网格中变量  $u, v, p$  及相应的残差  $R^u, R^v, R^p$  的插值及限制算子的形式却各不一样。曲线坐标系的非均匀网格, 必须采用面积加权的办法来构造限制算子和插值算子。

多区域法是将整个区域划分为几个子区域, 对每个子区产生一个独立的网格, 在每个网格中

分别求解流场,而后交换并传递信息。多区域网格采用重叠网格,为了较好利用多区域法,合适地处理交界面是至关重要的,在交界面采用全局质量守恒及动量守恒。

多区域多重网格法是将上述2种方法结合,多区域网格置于最外层,即各区域之间的边界信息交换仅在最细的网格上进行,而多重网格的循环在各区域内单独进行,交界面边界条件在1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。

多区域多重网格的运用,使得数据结构变得更加复杂。为便于不同层次、不同区域之间信息的交换,定义一指针系统,由整数数组  $n_{begin}(m, n)$  来指向各层及各区域的数据的开始,其中  $m$  是多重网格循环的网格层数,  $n$  是多区域法中子区域数。每个子区域第1个变量的入口位置由网格层数及子区域数来计算,在各层的数据按多重网格的格式来管理,所有的自变量和网格参数以一维的方式存贮。这种类型的数据形式,数据试验表明,易于处理不同区域、不同层数交界面的数据,并节省内存。

对于多区域多重网格在一般曲线坐标系交错网格布局的SIMPLEC算法中的应用,多区域多重网格的循环作为外循环,在某一层网格中各方程的求解作为内循环,在该层网格上的各变量采用SIMPLEC算法的分离方式求解,即每个方程按顺序求解。

## 2 粒子分离器的应用

直升机粒子分离器流路为环形分叉流路,两个分叉流路分别称之为主气流流路和清除流流路,它是巧妙地利用通道型面的设计,使进入发动机的空气中所含外来物在其惯性和碰撞作用下进入清除流路而被排除到机外。

粒子分离器的分叉流场结构属多连通域。由于存在2个分叉流道,考虑将整个区域分为3个子区域,如图1所示,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  $25 \times 25$  网格,网格在分流器唇口处加密,区域2采用  $17 \times 13$  网格,区域3采用  $17 \times 9$  网格,其网格分布图如图2,多重网格采用3层循环。为便于与单网格比较,如图3所示,单网格法采用  $40 \times 22$  网格,这

样可以尽可能与多区域多重网格法的网格接近。

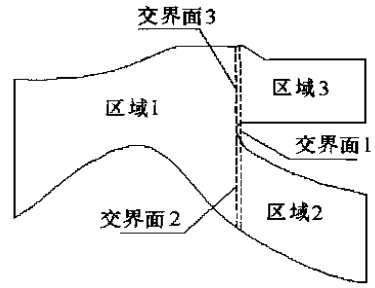


图1 分区布局

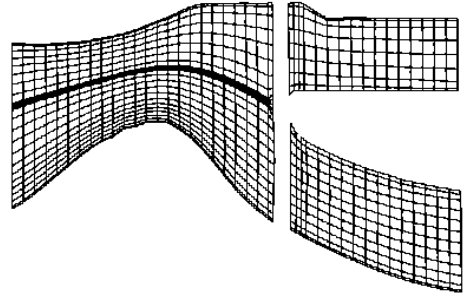


图2 3个区域网格分布

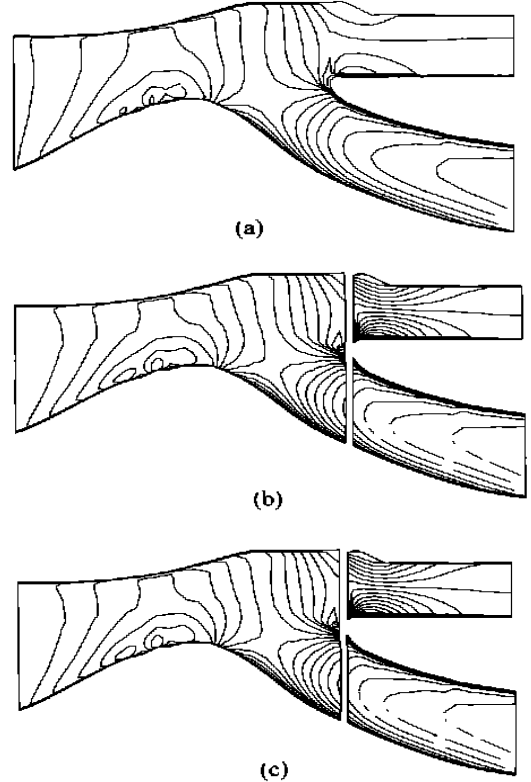


图3 速度等值线对比

(a) 单网格法; (b) 多区域法; (c) 多区域多重网格法

图3是采用单网格法和多区域多重网格法速度等值线的对比,由于多区域法和多区域多重网格法在区域1中分流器唇口处网格的加密,致使图3(b)和图3(c)中速度等值线在唇口附近密集,从而更精确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。

表 1 是单网格法、多区域法及多区域多重网格法在收敛过程中的迭代性能对比, CPU 时间是相对 P5/133 而言, 从表中可看出, 单网格法收敛速度最慢, 多区域多重网格法收敛速度最快。多区域法在收敛速度上略快于单网格法, 这是因为多区域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。尽管多区域多重网格在插值限制运算和各区域交换信息方面花费了一些时间, 然而由于迭代数目的大大减少, 总 CPU 时间上还是显示了一定优势。

表 1 迭代性能对比

	网格数	迭代数	CPU 时间/s
单网格法	40 × 22	505	348
多区域法	25 × 25, 17 × 13, 17 × 9	230	255
多区域多重 网格法	25 × 25, 17 × 13, 17 × 9	87	150

由此可看出, 多区域法可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, 则使收敛速率得以加快, 两者有力结合, 扬长避短, 使精度提高的同时也加快了收敛。

(上接 237 页)

### 3 结 论

将多区域法与多重网格法有力结合, 巧妙对数据结构进行管理, 形成多区域多重网格法, 成功应用在一般曲线坐标系下交错网格布局的直升机粒子分离器中, 说明多区域多重网格法不仅能提高精度, 而且能加快收敛。

### 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] 侯凌云. 直升机粒子分离器两相流场的数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 1998.

作者简介:



侯凌云 女, 27 岁, 博士后, 主要研究方向为计算流体力学及燃烧学。联系电话: (010) 62782460(O)。



严传俊 男, 63 岁, 教授, 博士生导师。主要研究方向为三维两相反应流数值计算, 脉冲爆震发动机, 涡与火焰相互作用。联系电话: (029) 8492741(O)。E-mail: ycj@nwpu.edu.cn。

序号	项目名称	时间	地点	人数	筹办单位和联系人	备注
0029	航空工业科技信息工作改革与发展研讨会	三或四季度	待定	40	628 所 赵桥轮 (010) 64955799	
0030	信息资源开发和网络服务工作研讨会	三季度	待定	40	628 所 赵桥轮 (010) 64955799	
0031	标准化专业委员会会议	下半年	待定	50	301 所 李占魁、陈晓东	
0032	环境工程学术交流会	三季度	待定	40	301 所 吴彦灵	
0033	总体专业分会第五届学术交流会	7 月	待定	50	603 所 郭兆电	
0034	几何设计专业委员会第四次学术交流会	9 月	广西桂林	40	611 所 赵静波 (028) 5509331	
0035	重量专业第八次学术交流会	7 月	待定	30	603 所 郭兆电	
0036	海峡两岸飞行技术研究会	5 月	成都	50	民航 徐柏龄 64091590, 64092117	对台交流
0037	第五届飞行技术研讨会	1 月	北京	60 ~ 80	徐柏龄 64091590, 64092117	9932 延期
0038	全国第三届航空航天装备失效分析学术交流会	9 月	待定	80	民航总局安全技术中心 栗牧怀 (010) 64294832 航天 703 所 朱军辉 (010) 68383286 失效分析专业分会习年生 (010) 62456622-5046	可对外开放