

文章编号: 0258-1825(2005)01-0088-05

二维 DRAGON 网格自动生成技术的研究

李亭鹤, 阎超

(北京航空航天大学, 国家计算流体力学实验室, 北京 100083)

摘要:对重叠网格技术中新出现的 Cut-Paste 方法进行了研究和改进, 结合网格洞边界标识的缝合与重组织技术, 首次将其应用在 DRAGON 网格生成中, 提出了二维 DRAGON 网格的自动生成方法, 最后编制出通用程序, 给出了多体网格的复杂示例。实际计算表明, 本文方法具有自动化程度高、可靠性好、DRAGON 网格质量高等特点。

关键词:重叠网格; Cut-Paste 方法; DRAGON 网格

中图分类号: V211.3 **文献标识码:** A

0 引言

计算流体力学(简称 CFD)中的计算网格, 按照逻辑关系可以分为非结构和结构两大类。非结构三角(或四面体)网格对物体外形的适应能力很强, 但具有流场计算效率低、内存耗费大、粘性模拟能力差等缺点; 结构化的贴体网格具有技术成熟、效率高、粘性计算精度高等特点, 然而在确定复杂空间拓扑关系时却显得比较困难。因此, 人们往往通过各种混合网格技术将两类网格结合起来, 达到“扬长避短”的效果。

重叠网格技术^[1]的出现一定程度上降低了结构网格对拓扑结构的依赖关系, 它允许网格区块之间的重叠、嵌套或覆盖, 无需进行繁杂的拓扑分区, 从而降低了网格生成难度。其技术核心主要是通过彼此“挖洞”(hole cutting)的方式建立起各网格间的耦合关系, 不同网格块的流场信息通常采用非守恒插值的方法进行传递。但是, 在存在激波等大梯度变化的地方, 非守恒插值往往会带来极大的计算误差, 甚至影响计算的稳定和收敛。各种守恒插值方法^[2-4]在三维情况下则显得过于复杂。

DRAGON 网格^[5-6]是在重叠网格的基础上发展起来的混合网格技术。它直接用非结构网格对结构网格的重叠区进行填补。这样, 流场的绝大部分仍然属于结构网格, 非结构网格主要起连接作用, 并且保证了流场信息的守恒传递。尽管这个思路非常简单和自然, 但由于重叠网格技术的限制, 得到有效、合理的网格“间隙”却远非易事。因此, 自该技术被提出以

来, DRAGON 网格相对于其他混合网格技术而言, 其发展一直很缓慢。目前, 国内外尚未见到关于 DRAGON 网格自动生成技术介绍的文献资料。

本文通过对重叠网格的新技术 Cut-Paste^[7]方法进行研究和改进, 实现了网格“间隙”的自动获取, 并结合网格洞边界的自动标识与重组织、Delaunay 非结构网格生成等技术, 成功实现了二维 DRAGON 网格的自动生成, 对其在三维情况下的网格自动生成与应用具有指导意义。

1 Cut-Paste 方法的基本思想

重叠网格技术一般包括两大步骤: 挖洞和识别插值点。Cut-Paste 方法则在挖洞结束后经过“切割”和“填补”两个阶段进一步改善网格洞面的质量。与传统的重叠网格技术相比, Cut-Paste 方法具有自动化程度高、网格重叠区域小、重叠位置远离物面等优点, 因而特别有利于 DRAGON 网格的构造。为简要起见, 这里仅介绍与 DRAGON 网格相关的内容。

1.1 洞映射

若某网格点落入另一网格域的非可透面(或称挖洞面, 如物面或人为指定的表面)内, 则应被标记出来而不参与流场的计算, 这一过程被形象地称为“挖洞”。因此挖洞实际是在重叠网格中建立插值内边界的过程。

Cut-Paste 方法直接利用物体表面作为挖洞面, 它采用了洞映射^[8](hole mapping)的技术, 用均匀的笛卡

· 收稿日期: 2004-01-04; 修订日期: 2004-03-19.
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10032060)资助。
作者简介: 李亭鹤(1975-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 流体力学专业。

儿直角网格去包围、分割物面,并根据与物面的位置关系将笛卡儿单元划分为“外部”、“内部”和“边缘”单元,从而得到洞面的一个笛卡儿映射集合。洞映射技术假定笛卡儿域四周角落上的单元是外部单元,并由此向整个笛卡儿域内推进,进而实现全部单元的划分。通过简单的下标计算,能很快地判断出计算域内任一网格点相对洞面的位置关系:若网格点位于“外部”单元内,则该点一定位于洞面外;反之,则在洞面内。

1.2 切割阶段

经过上述挖洞过程所得到的重叠域通常十分巨大,由于插值点都位于流场梯度变化较大的壁面附近,插值网格单元和贡献单元的尺度差异有时能在一个数量级以上,这将降低流场计算的精度。因此在此阶段,由洞边界点(即插值点)构成的阵面逐步远离物面、向外扩张,直至再也没有网格单元重叠。

对于 DRAGON 网格而言,此阶段即是网格块“间隙”的形成过程。但由于形成的空隙通常过于狭窄,不利于非结构网格的填充,因此,需要进一步扩大网格间的空隙。这可以通过将最后得到的洞边界点改成洞内点得到。

1.3 填补阶段与寻找贡献单元

填补阶段基本上是“切割”的逆过程,洞边界面逐步收缩,直至出现洞外网格单元的重叠。但 DRAGON 网格的生成无需经历此阶段。

由于在整个切割和填补阶段中,需要反复寻找贡献单元,因此,必须采用高效、可靠的搜索方法。一般采用 stencil walk^[9]和 Newton-Raphson^[10]迭代法。许多文献都有详细介绍,故在此亦不再赘述。

2 对 Cut-Paste 方法的改进

从前面的介绍中可以看到,Cut-Paste 方法的自动化程度很高,所有网格洞面及重叠区的构造都是自动完成的,不需要人工干预,而且最后重叠区的位置和质量也非常令人满意。但是,该方法在洞映射、消除孤点等方面仍然存在需要改进的地方。

2.1 洞映射自动化

原有的洞映射方法假定笛卡儿网格的角单元必须是“外部”单元,即落于物面之外,并且在此基础上,要求被映射的物面必须完全封闭^[5-7]。如果没有这

些前提条件,接下来就很难判断相邻各单元的具体属性了。

经研究发现,如果事先知道物面外法向矢量方向的信息,就可以通过简单的逻辑判断,自动实现笛卡儿单元属性的确认。物面法矢的信息可以从流场求解的边界条件中获得。

如图 1 所示,定义判断准则:在物面外法向矢量的垂直和水平分量方向上,“边缘”单元(如单元 B)的外侧为“外部”单元(如单元 A),其内侧为“内部”单元(如单元 C)。因此,对所有“边缘”单元的内、外侧单元进行标记,若某单元始终被标记为“内部”(或“外部”)单元,则它一定是“内部”(或“外部”)单元,例如凸形区的内部单元和凹形区的外部单元。根据“内部”(或“外部”)单元的邻居一定也是“内部”(或“外部”)单元的原则,能方便地判断出其余所有单元的属性。该准则同样适用于三维情况。

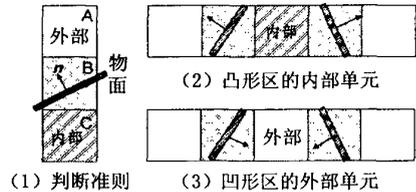


图 1 洞映射单元属性的判断

Fig. 1 Property of hole-map element

2.2 清除孤点

在“切割”阶段,网格洞边界面向外扩展时,往往由于各处的推进速度不一致,导致有小部分网格点被其它网格的洞边界隔离出来,如图 2(a)所示。当物面关系特别复杂、网格本身的质量很差时,这种情况就尤为突出。对重叠网格分区计算而言,被隔离出来的这小部分网格点,如果不作任何处理,将仍被视为有效的插值点,并且在以后的流场计算中,充当其它网格贡献单元的顶点,由此将引入极大的误差;而对于 DRAGON 网格的生成,孤点的存在,将使结构网格的洞边界变得非常复杂,从而不利于非结构网格的生成。因此应该在“切割”阶段结束后,由程序自动判断出来并予以舍去。原有的方法中并没有见到相关的解决方案。

本文采用的方法是,每次洞边界面推进结束后,在洞边界面上取出一个插值点,考查该点的四周:如果其相邻的网格点中没有“洞外点”,则认为该点是孤点,应被赋予“洞内点”的属性。实践表明,该方法简

单而能有效地清除残余的孤点,使得洞边界“干净”、“连续”。图 2(b)是清除孤点后的结果。对于非常复杂的网格重叠情况,实时地清除孤点就显得更加重要。

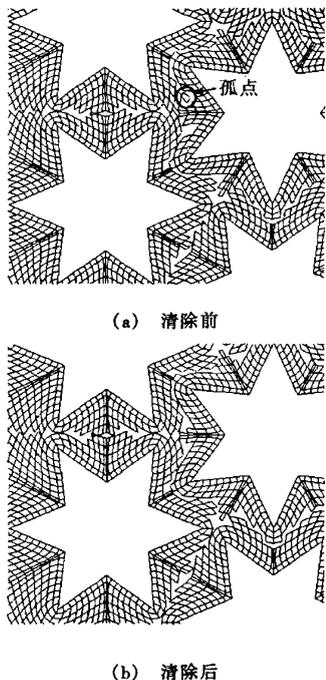


图 2 “切割”阶段的孤点清除

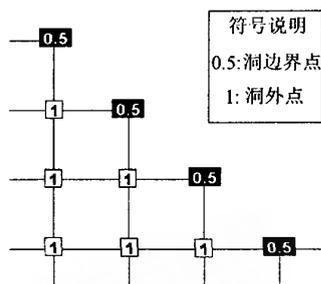
Fig.2 Deletion of orphan grid during cut-phase

3 洞边界标识的缝合与重组织

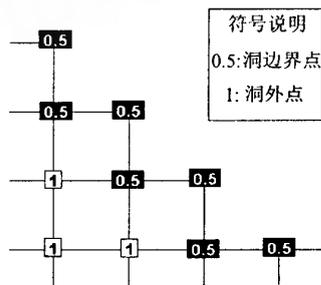
经过切割阶段得到的洞边界,一般容易出现如图 3(a)所示的洞边界标识不连续情况,但这与非结构网格生成的边界连续性要求相冲突,因此需要进行洞边界的缝合,即如图 3(b)中所示,将对角位于洞内的洞外点标记为洞边界点。值得注意的是,经过边界缝合后,可能产生新的孤立点,因此必须及时清除。

另外,为了满足非结构网格对输入边界的有序性(如顺、逆时针)要求,必须将散乱的边界点重新组织成有序的边界线。对于复杂的边界情况,如何自动收集和组织的边界点,并且有效地避免遗漏或重复,却是比较棘手的问题。

本文将其实抽象为一个简单而有趣的路线问题:对于如图 4 所示的封闭边界 ABCD...KLA,假设有人从 A 点出发向 B 开始行进,经过一段行程后再回到 A 点。要求中间(除起点外)不能重复或遗漏其它点,并且人的左侧始终是“洞外点”。



(a) 边界标识不连续



(b) 缝合边界

图 3 洞边界的缝合

Fig.3 Hole-boundary close-up

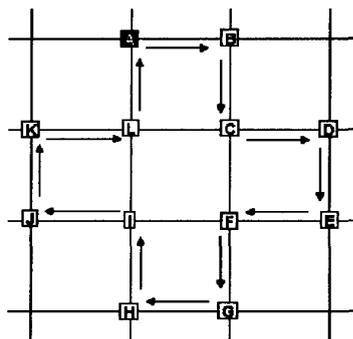


图 4 行进路线示意图

Fig.4 Map of walk-route

本文给出的自动行进方案是:从起点开始,将前次的行进方向记为 $G_1(g_0, g_1)$,其中 g_0, g_1 是逻辑空间 (i, j) 中的分量,取值 0 或 1,如 A 点的起始方向为 $G_1(1, 0)$ 表示行进方向为 i 方向。同时另外存在两个可能的行进方向 $G_0(-g_1, g_0)$ 和 $G_2(g_1, -g_0)$ 并且规定三个方向的查询顺序依次为 $G_0 > G_1 > G_2$ 。如果在某一方向上没有站点,那么自动查询下一个方向。

实践表明,该方案非常简单有效,不会重复或者遗漏边界点。

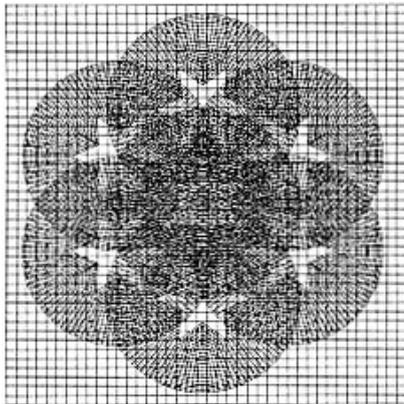
4 非结构网格的生成

由于结构网格的间隙总是出现在远离物面的地方,因此我们希望非结构网格呈现正三角形的特性,而 Delaunay 三角形具有比较接近正三角形等诸多优点,因此本文采用 Delaunay 三角形化方法生成非结构网格,并根据文献[11]介绍的初始三角形化方法,解决了边界匹配问题(boundary conforming),同时参考文献[12]的思想,实现了求解区域内的自动加点。整个非结构网格的生成过程无需人工干预。具体步骤不再赘述。

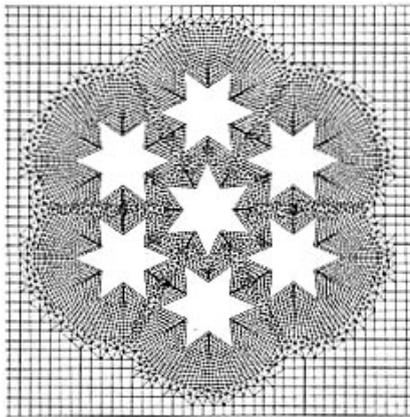
5 网格算例

根据前述技术方案,我们编制了二维 DRAGON 网格自动生成的通用程序,其中包括了改进的 Cut-Paste 方法、边界处理和非结构网格自动生成等模块,对任意物体外形的二维流场,均能由最初的初始重叠

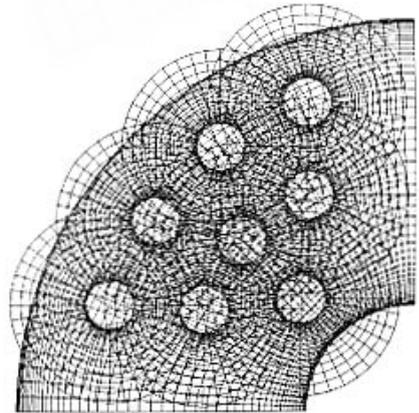
网格自动生成 DRAGON 网格。为了验证本文方法的可行性及可靠程度,本文给出了如图 5 所示的多体网格的复杂算例。所有算例的输入都只需要原始网格和边界条件,如图 5(a),最后自动生成如图 5(b)所示的 DRAGON 网格。值得注意的是图 5 所示的内流问题中,小圆柱的初始网格被允许落到弯管壁面外,本文方法自动识别并将弯管壁外的网格排除掉,最后仍然能够得到正确的 DRAGON 网格。



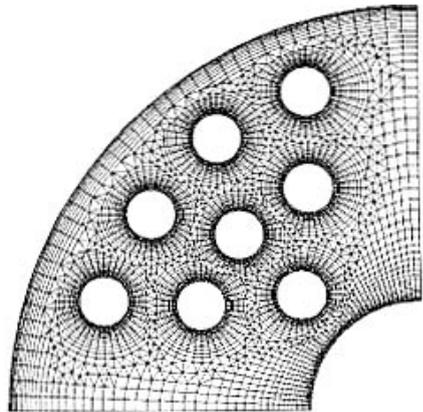
(a) 初始网格



(b) DRAGON 网格
(1) 7 个六角星(外流情况)



(a) 初始网格



(b) DRAGON 网格
(2) 弯管中的 8 个小圆柱(内流情况)

图 5 复杂流场中的 DRAGON 网格
Fig.5 DRAGON grids for complex flow

6 结 论

本文研究了计算流体力学重叠网格技术中的 Cut-Paste 思想,并首次将其应用在 DRAGON 网格的生成上,在洞映射和孤点消除等方面对原方法进行了改进,并结合了洞边界自动缝合与重组织技术,采用了 Delaunay 非结构网格生成方法,从而实现了二维

DRAGON 网格的自动生成。实际计算结果表明,本文方法自动化程度高、可靠性好,最后生成的 DRAGON 网格具有自动远离物面、非结构区域小等优点,更能体现在复杂流场粘性计算中的优势。

目前,三维 DRAGON 网格自动生成的工作正在开展。

参 考 文 献:

- [1] STEGER J L, DOUGHERTY F C and BENEK J A. A chimera grid scheme [R]. ASME Mini-Symposium on Advances in Grid Generation, Houston, TX, 1982.
- [2] MOON Y J, LIOU M S. Conservative treatment of boundary interfaces for overlaid grids and multi-level grid adaptations [R]. AIAA Paper 89-1980-CP, 1989.
- [3] WANG Z J, YANG H Q. A unified conservative zonal interface treatment for arbitrarily patched and overlapped grids [R]. AIAA Paper 94-0320, 1994.
- [4] WANG Z J, YANG H Q, PRZEKWAŚ A J. Implicit conservative interfacing for 3D overlapped chimera grids [R]. AIAA-95-1683-CP, 1995.
- [5] KAO K H, LIOU M S. Direct replacement of arbitrary grid-overlapping by nonstructured grid [R]. AIAA-95-0346, 1995.
- [6] ZHENG Y, LIOU M S. Progress in the three-dimensional DRAGON grid scheme [R]. AIAA-2001-2540, 2001.
- [7] CHO K W, KOWN J H. Development of a fully systemized chimera methodology for steady/unsteady problems [J]. *Journal of Aircraft*, 1999, 36(6):973-980.
- [8] CHIU I T, MEAKIN R. On automating domain connectivity for overset grids [R]. AIAA Paper 95-0854, 1995.
- [9] BUNING P. Numerical algorithms in CFD post-processing [R]. Computer Graphics and Flow Visualization in Computational Fluid Dynamics. Lecture Series 1989-07. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brussels, Belgium, 1989.
- [10] GERRITSEN M. Geometrical modeling of 3D aerodynamic configurations [R]. M. Sc. thesis, Technische Universiteit Delft, Faculteit Lucht-en Ruimtevaart, 1988.
- [11] SUBRAMANIAN G, RAVEENDRA V S, GOPOLAKRISHNA K. Robust boundary triangulation and Delaunay triangulation of arbitrary planar domains [J]. *Int J Num Methods Eng*, 1994, 37: 1779-1789.
- [12] YU B, LIN M J, TAO W Q. Automatic generation of unstructured grids with Delaunay triangulation and its applications [J]. *Heat Mass Transfer*, 1999, 34(5): 361-370.

Investigation of automatic generation technique for two-dimensional DRAGON grid

LI Ting-he, YAN Chao

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, National Laboratory for Computational Fluid Dynamics, Beijing 100083, China)

Abstract: The newly emerged cut-paste algorithm in overlapping grid technique is investigated and enhanced here for automatic DRAGON grid generation, with label close-up and reorganization techniques for hole-boundaries between structured grids. The enhancements are mainly on hole-mapping and orphan grid deletion. A universal code based on this algorithm is built up with complex examples in two dimensional cases for validation. The results reveal that a very automatic and stable degree is achieved for high-quality DRAGON grid generation.

Key words: overlapping grid; cut-paste algorithm; DRAGON grid