

力学

# 柱体绕流的自适应数值模拟方法

李现今 郑洪伟 杨国伟

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室 北京 100190)

**摘要** 发展了基于二叉树数据结构的网格生成和流动的 Navier-Stokes 方程数值求解器。采用压力梯度或者密度梯度的绝对值作为网格自适应的控制参量,同时采用基于最小二乘法的无网格方法处理对于一般 Cartesian 网格难于处理的物面边界条件。采取了绕方柱流动和绕圆柱流动的经典二维定常和非定常层流算例对所发展的方法进行了验证。计算的结果验证了所发展的方法在处理绕流流动时的合理性和有效性。从而也为将来数值模拟具有较复杂几何外形的流动提供了一种网格布局合理、高效、边界处理简单易行的新思路。

**关键词** 自适应网格 Cartesian 网格 无网格法 数值模拟

**中图分类号** O354.1; **文献标志码** A

绕流问题在工程实际中常可遇到,如风对各种建筑物的绕流,河水流过桥墩,各种飞行器的设计,海洋石油工程中的开采平台、钻杆、水下输油管道等。在工业设备中绕流现象更是经常发生,如各类管壳式换热器。因此掌握流体绕物体流动的特性对工程实际和工业设备的设计非常重要;长期以来一直是学者们研究的热点问题,其中尤其以绕圆柱体和方柱体的流动最为常见和重要。这不仅因为它在工程技术中应用最广,而且研究它也是了解其他各种柱状钝体绕流的基础。绕方柱混合对流的研究是一个涉及到钝物体绕流和传热两方面相结合的课题。在过去的几十年里,该问题引起了众多的应用数学家、流体动力学家和传热学研究人员的极大关注。从学术研究的角度来看,绕方柱混合对流的基础是冷态条件下绕方柱流动流场的确定,它涉及到钝体绕流流动与分离、尾涡形成与变化的规律等涡旋动力学基础理论问题<sup>[1]</sup>。从工程应用的角度来看,深入研究由尖缘矩形横截面柱体所受到的绕流流体气动力载荷及其变化激起的流致振动问题是海洋工程和风工程等应用工程的需要。研究圆柱

绕流问题在工程实际中也具有很重要的意义。如水流对桥梁、海洋钻井平台支柱、海底输运管线、桩基码头等的作用中,风对塔建筑、化工塔设备、高空电缆等的作用中,都有重要的工程应用背景。因此,对圆柱绕流进行深入研究,了解其流动机理和水动力学规律,不仅具有理论意义,还具有明显的社会效益。

随着 CFD 的发展,有关复杂几何外形的流场分析计算已经成为人们极为关心的问题。而合理设计并生成高质量的网格是 CFD 计算的前提条件。目前,处理复杂几何外形的 CFD 网格类型主要有如下三种:贴体的结构网格、非网格和 Cartesian 网格。事实上,对于结构的 Cartesian 网格由于其在网格生成方面的简易、快速等优点,在 CFD 发展的初期得到了广泛的应用,然而,由于其在处理固壁表面边界问题上的复杂性与低效性,很快又被贴体曲线网格所替代。近来,非结构的 Cartesian 网格由于采用的是二叉树的简单数据结构,易于结合网格自适应技术,其又重新引起了人们对 Cartesian 网格的普遍兴趣。然而,如何合理的处理复杂的物面边界条件仍然是 Cartesian 网格技术的一个关键问题。因此,本文基于二叉树数据结构<sup>[2,3]</sup>,发展了一种普遍适用于二维外形的 Cartesian 网格生成方法,运用对任意网格的切割细分算法,实现了针对几何外形的网格自动生成,使得网格生成更具灵活性和适用性;

2012年2月29日收到 国家“973”计划项目(2011CB711100)、  
国家科技支撑计划项目(2009BAG12A03)资助  
第一作者简介:李现今,男,汉族,山东人。中国科学院力学研究所  
博士研究生。E-mail: vip\_manlxj@yahoo.com.cn.

同时采用无网格方法<sup>[4-8]</sup>解决了 Cartesian 网格难以处理的物面边界问题,避免了通常采用的复杂物面切割方法<sup>[9]</sup>。此方法直接利用最小二乘法获得通量变量的值并且能够较好的处理物面附近网格点的复杂分布,具有简单明了、适用范围广等优点。因此本文将 Cartesian 网格方法和无网格方法相结合,利用 Cartesian 网格法处理计算区域内部网格点,而将无网格法用于处理物面边界条件。空间格式采用有限体积 Roe 格式,时间格式采用修正的四步 Runge-Kutta 时间推进方法,并且结合网格自适应,求解了二维复杂流场的 Navier-Stokes 方程,实现了流场的自适应算法,与通常所采用的结构网格和非结构网格法相比,此方法大大改善了空间网格的分布,使得数值计算的分辨率、模拟效果及计算效率有了明显的提高。并将所发展的方法用于计算绕方柱流动和绕圆柱流动,所得的结果与相关文献[6,10-14等]的结果进行对比,进而验证了此方法在处理复杂物面边界条件下流动的合理性和有效性,也证明了 Cartesian 网格所具有的计算效率高、自适应能力强等优点。从而为 Cartesian 网格技术的未来发展提供了一种新的思路。

## 1 数值计算方法

### 1.1 二维 Navier-Stokes 方程组

当不考虑外加热和彻体力的影响时,直角坐标系下的二维可压非定常 Navier-Stokes 方程组的守恒积分形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_S Q dS + \int F \cdot n dl = 0 \quad (1)$$

式(1)中,  $Q$  为守恒向量,  $F$  为矢量通量,  $S$  表示面积区域,  $\partial S$  为  $S$  的边界,  $n$  为边界的外法向量,并且

$$Q = (\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho E)^T, \\ F = F_c - F_v = (F_{cx} - F_{vx} \quad F_{cy} - F_{vy}) \quad (2)$$

矢量通量  $F$  分解成对流矢量通量  $F_c$  和黏性矢量通量  $F_v$  两部分,各矢量通量的具体表达式如下。

$$F_{cx} = \begin{pmatrix} \rho u \\ (\rho u^2 + p) \\ \rho uv \\ \rho uE + up \end{pmatrix}, F_{cy} = \begin{pmatrix} \rho v \\ (\rho v^2 + p) \\ \rho vE + vp \end{pmatrix}。$$

其中  $p, \rho, u, v, E$  分别为压力,密度,直角坐标系下的速度分量和单位质量气体的总能量。

$$F_{vx} = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \Pi_x \end{pmatrix}, F_{vx} = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \Pi_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)中

$$\Pi_x = u\tau_{xx} + v\tau_{xy} - q_x; \\ \Pi_y = u\tau_{yx} + v\tau_{yy} - q_y \quad (4)$$

黏性应力项分别为:

$$\begin{cases} \tau_{xx} = 2\mu u_x - \frac{2}{3}\mu(u_x + v_x) \\ \tau_{yy} = 2\mu v_y - \frac{2}{3}\mu(u_x + v_x) \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu(u_y + v_x) \end{cases} \quad (5)$$

热流量与温度梯度的关系符合 Fourier 定律,即

$$\begin{cases} q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \end{cases} \quad (6)$$

对于理想气体,有状态方程

$$\begin{cases} p = \rho RT \\ h = c_p T \end{cases} \quad (7)$$

单位质量气体的总能量为

$$E = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (8)$$

动力黏性系数  $\mu$  是温度和压力的函数,在层流状态下通过 Sutherland 公式计算,即

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \left(\frac{T_0 + T_s}{T + T_s}\right) \quad (9)$$

式(9)中,  $T_0 = 273.16$ , 对于空气,有

$$\mu_0 = 1.716 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}, T_s = 124 \text{ K}。$$

对于各向同性流体,导热系数  $k$  无方向性,仅随温度和压力变化,通过引入  $Pr$  数来确定,即

$$k = \frac{\mu c_p}{Pr} = \frac{\mu \gamma R}{(\gamma - 1) Pr} \quad (10)$$

对于空气,在层流状态下可取  $Pr = 0.72$ ,  $c_p$  和  $R$  分别为质量定压热容和气体常数。对于空间的离散采取的是 Roe 格式

$$\tilde{F}_{i+1/2} = \frac{1}{2} [F(U_l) + F(U_r)] - \frac{1}{2} L^{-1} |\hat{\Lambda}| L(U_r - U_l) \quad (11)$$

对于时间的离散方式采用的是四步 Runge-Kutta 时间推进格式。

本文主要针对低雷诺数流动情形,采用层流模型计算。

### 1.2 Cartesian 网格

#### 1.2.1 数据结构

数据结构,在网格的生成和流场的计算中扮演着重要的角色,依靠其对网格数据的组织和管理,方便了网格的生成和数据的转换。本文采用的是树状数据结构,在 Cartesian 网格中,采用的基本数据结构是四叉树,即由一个父网格节点生成四个子网格节点。

图 1 中表示了在四叉树数据结构的框架下的网格生成过程。

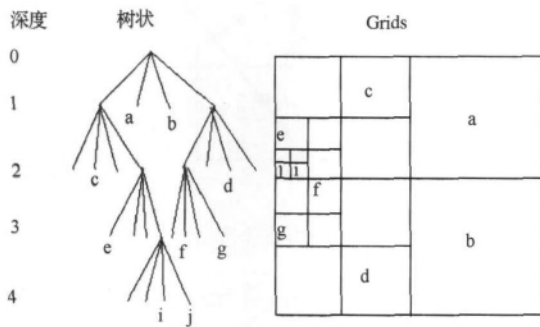


图 1 树结构中网格的生成过程(二维)

图 1 中左边一列,是网格的深度值( Depth)表示当前网格的大小与细分层数,对于“根”网格,其深度值为 0;右边是网格生成图( Grids),表示从“根”网格出发的网格细分和生成的过程;处于中间的是树状数据结构图( Tree),表示在树结构下,网格的生成过程。显然,没有再生成子结点的网格单元即是计算所需要的初始网格单元。

#### 1.2.2 网格的分类

为了更好的处理所有的网格,可将所有网格划分为三个部分并定义如下:与物面相交的为物面网格( Wall Grids),剩余的网格中,在物面里面的是固体网格( Solid Grids),在流场计算中,固体网格是需要删除的,而物面外面的是流场网格( Flow Grids),面上的离散点表示固体的表面(如图 2 所示)。

#### 1.2.3 网格自适应

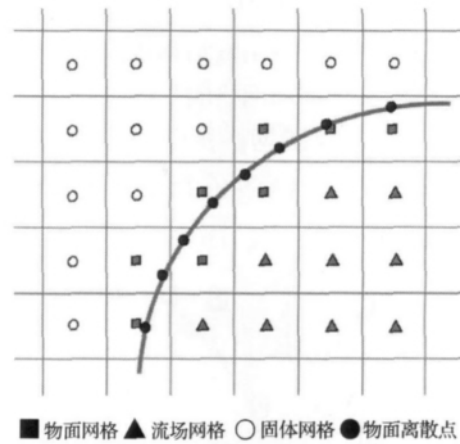


图 2 面上离散点

合理的网格分布对于提高计算的效率和精度至关重要。本文采取压力梯度或者密度梯度的绝对值作为自适应参量进行网格自适应划分。阈值可以由下式给定:

$$V_s = \frac{CR^{(n_1-n_0)}}{N} \tag{12}$$

式(12)中  $V_s$  是阈值,  $n_1$  为网格加密的深度值,  $n_0$  为初始网格加密的深度值,  $N$  为参数,通常取 100,  $CR$  为控制参数,  $CR$  的取值将直接影响网格的加密过程。对于任意一个网格,当其自适应参量大于给定的阈值时,其被标定为细分网格,进行自适应加密处理。相反地,当自适应参量小于给定的阈值,同时,网格深度小于或等于相邻网格的加密深度时,其被标定为粗化处理。

### 1.3 边界条件的处理

边界条件分为远场边界条件和物面边界条件。对于远场边界条件采用的类似于结构网格的处理方法,即通常采用的基于一维 Riemann 不变量的特征分析<sup>[19]</sup>来确定无黏流动变量的值,无需再进行特殊处理。由于采用 Cartesian 网格所得到的物面网格为非贴体网格,所以如何合理处理物面边界条件是 Cartesian 网格的一个关键。本文中采用的是基于最小二乘法的无网格方法来处理物面边界条件。

### 1.4 无网格法处理物面边界条件

为避免采用切割网格法生成的物面网格的复杂性,本文采用无网格法<sup>[5-8]</sup>来处理物面网格。无网格方法是新一代的计算方法,这种方法计算空间

导数不需要借助于事先划定的网格,从而避免了高维拉普拉斯网格法中网格缠结和扭曲等问题<sup>[7]</sup>。

无网格法处理物面网格的具体应用过程为:

(1) 对于一个物面网格找到一个离其中心点距离最近的点  $P$ , 并且这个点在组成物面的有向线段上, 如图 3 所示。

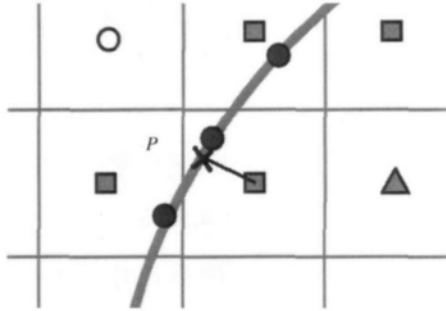


图 3 与物面网格中心点距离最近的点  $P$

(2) 按照由近及远的顺序在物面网格附近找到 8 个其它网格, 并且这 8 个网格均是流场网格, 如图 4 所示。

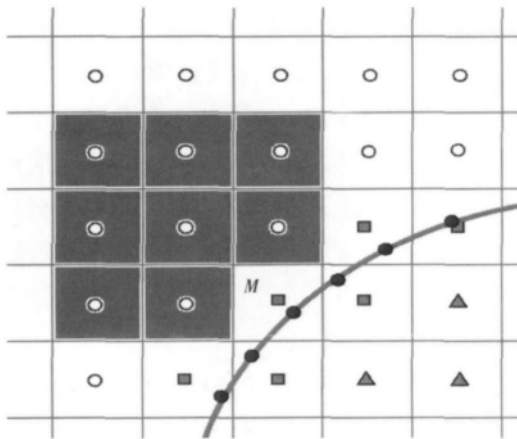


图 4 物面网格  $M$  的邻近 8 个流场网格(灰色网格)

(3) 可以假设  $P$  点附近区域的物理参数分布为:

$$f(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad (13)$$

因而根据 8 个网格中心点的参数并结合物面边界条件可以构成关于  $a_1, a_2, a_3, a_4$  的 8 个方程。这是一个超定方程组可以通过最小二乘法求解, 便可以得到  $a_1, a_2, a_3, a_4$  的值, 再代入式(13), 即可得到  $f(x, y)$  的具体表达式。

(4) 由以求得的式(13)的具体表达式可得物面

网格的各条边界的参数值, 这些参数值间接地满足物面流动条件。

对于物面处的无滑移边界条件<sup>[5, 8]</sup>表达如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \eta} = 0, V_\xi = 0, V_\eta = 0, \frac{\partial \rho}{\partial \eta} = 0 \quad (14)$$

式(14)中  $\frac{\partial}{\partial \eta}$  代表物面外法向方向导数,  $V_\xi$  为物面切向速度分量,  $V_\eta$  为物面法向速度分量, 如图 5 所示

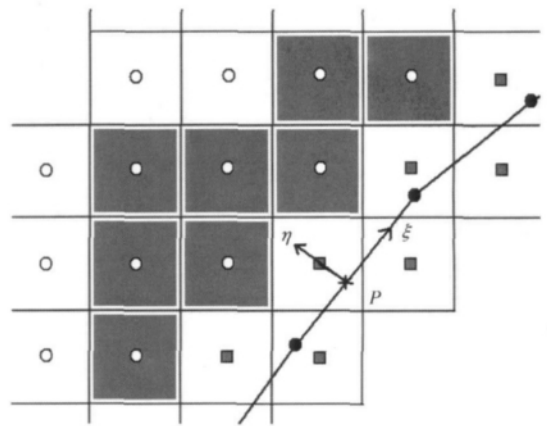


图 5 物面的速度分量

对于任一个物面网格, 首先找到离其中心最近的物面点  $P$ 。  $P$  点的法向和切向单位矢量可以根据其所在的有向线段求出, 若  $P$  点恰为两条线段的交点, 则其法向和切向单位矢量的值取为两条线段法向和切向的平均值。 设已求得的物面法向单位矢量为

$$\vec{\eta} = n_x \vec{i} + n_y \vec{j} \quad (15)$$

切向单位矢量为

$$\vec{\xi} = m_x \vec{i} + m_y \vec{j} \quad (16)$$

然后进行坐标变换, 将在  $x, y$  坐标系下的参数变换到以  $P$  点切向  $\xi$  和法向  $\eta$  构成的局部坐标系下, 即可得到式(13)在  $\xi - \eta$  坐标系下的表达式为

$$f(\xi, \eta) = b_1 + b_2\xi + b_3\eta + b_4\xi\eta \quad (17)$$

对于密度  $\rho$  将其在  $P$  处写为式(17)的形式

$$\rho(\xi, \eta) = b_1 + b_2\xi + b_3\eta + b_4\xi\eta \quad (18)$$

由边界条件式(14)可知

$$\left. \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \right|_{(0,0)} = b_3 + b_4\xi \Big|_{(0,0)} = b_3 = 0 \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)得

$$\rho(\xi, \eta) = b_1 + b_2\xi + b_4\xi\eta \quad (20)$$

由上面的讨论可以看出,加入了边界条件后,未知数个数从4个降为3个。将已找到的邻近8个网格的中心点的密度值和坐标值分别代入式(20)即可构成8个方程3个未知数的方程组如式(21)。

$$\rho_i(\xi, \eta) = b_1 + b_2\xi + b_4\xi\eta; i = 1, \dots, 8 \quad (21)$$

这是一个超定方程组,通过最小二乘法即可求解。求得密度分布的表达式之后,再将物面网格的边界的坐标代入其中就可以得到物面网格边界的密度值,这些值将在后面的流场计算中用到。

对于压强  $P$ ,其求解过程与上面的对于密度  $\rho$  的求解过程完全一种样。

对于速度  $V_\xi$ ,利用边界条件有

$$V_\xi = b_1 + b_2\xi + b_3\eta + b_4\xi\eta \quad (22)$$

$$V_\xi = (0, 0) = b_1 = 0 \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)得到减少一个未知数的新函数

$$V_\xi(\xi, \eta) = b_2\xi + b_3\eta + b_4\xi\eta \quad (24)$$

将8个网格中心点的切向速度值和坐标值代入式(24),得到含有3个未知数的8个方程组

$$V_{\xi_i} = b_2\xi_i + b_3\eta_i + b_4\xi_i\eta_i; i = 1, \dots, 8 \quad (25)$$

这个方程组利用上面介绍的同样的方法求解。对于速度  $V_\eta$ ,采用和  $V_\xi$  同样的方法求解。最后,将得到的速度  $V_\xi$  和  $V_\eta$  转换成  $x-y$  坐标系下的速度  $u, v$  的值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 绕方柱流动

图6为边长为1的方柱中心位于坐标为(10.5, 12.5),计算区域为  $41 \times 25$  的初始网格图,来流条件为  $Ma = 0.2$ ,雷诺数分别为  $Re = 20$  和  $Re = 40$ 。自适应网格图7、流线图8、9、10的结果表明当雷诺数  $Re < 50$  时流动是稳定的,对于  $Re = 20$ ,无量纲时间  $t = 100$  左右达到定常解,对于  $Re = 50$ ,  $t = 200$  左右达到定常解。图8、图9、图10分别为  $Re = 20$ ,  $Re = 40$ ,  $Re = 50$  的方柱绕流流线显示。由此三图可以看出方柱尾流为两个对称的附体涡,为定常解,而且随雷诺数的增加,尾流对称涡的长度也在变大。当雷诺数  $50 < Re < 55$  时,方柱的尾迹涡型逐渐由定

常附体涡向非定常涡旋脱落过渡。图11和图12为  $Re = 55$  和  $Re = 60$  的流线图,图中方柱尾流为非定常周期性涡旋脱落。因此,方柱绕流定常流动过渡到非定常流动的临界雷诺数  $Re_c$  应该在50和55之间,这与 Kelkar 等<sup>[12]</sup>采用线性稳定性分析得到的临界雷诺数  $Re_c = 53$  相符合。

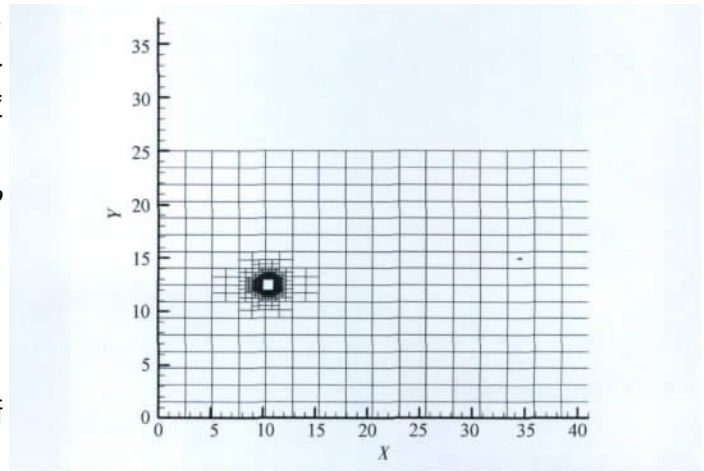


图6 绕方柱流动初始网格( $Re = 20, 40$ )

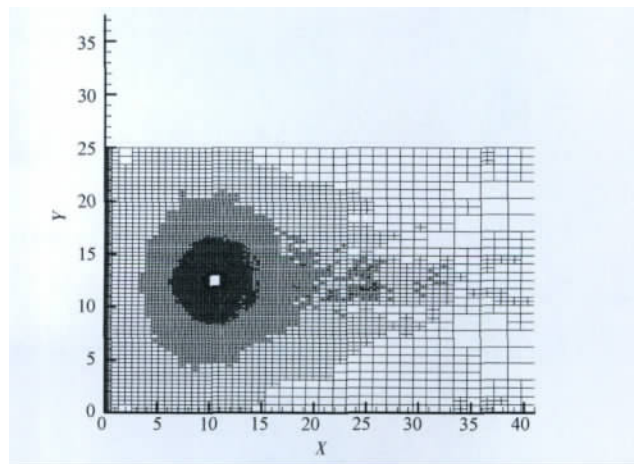


图7 绕方柱流动自适应网格( $Re = 20$ )

图13为来流  $Ma = 0.2$ ,  $Re = 100$  的方柱绕流的自适应网格图,图14为  $Re = 100$  的方柱非定常方柱绕流的涡量云图,图15、图16分别为  $Re = 100$  和  $Re = 250$  的非定常方柱绕流流线图,它们的特点是方柱尾流由定常的对称涡向非定常的涡旋脱落发展,涡旋交替由方柱的两个角点形成并脱落,并向周期性卡门涡街过渡。从表1、表2可以看出,  $Re = 100$  和 250 方柱绕流的各项计算结果与文献 [12] 符合的

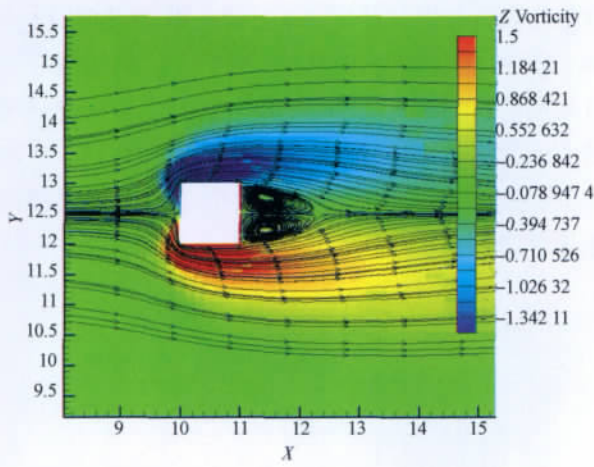


图8 绕方柱定常流流线和涡量云图 ( $Re = 20, t = 100$ )

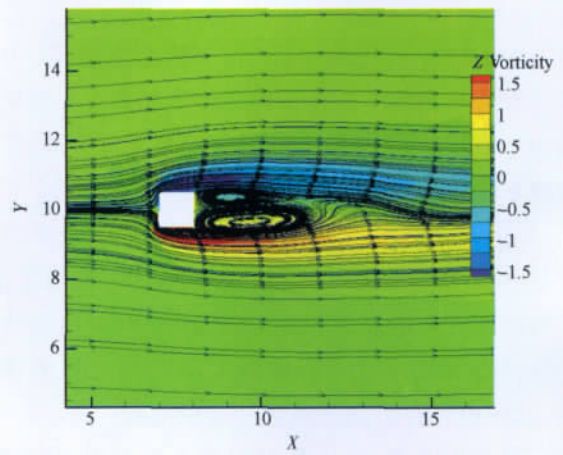


图11 绕方柱非定常流流线和涡量云图 ( $Re = 55, t = 200$ )

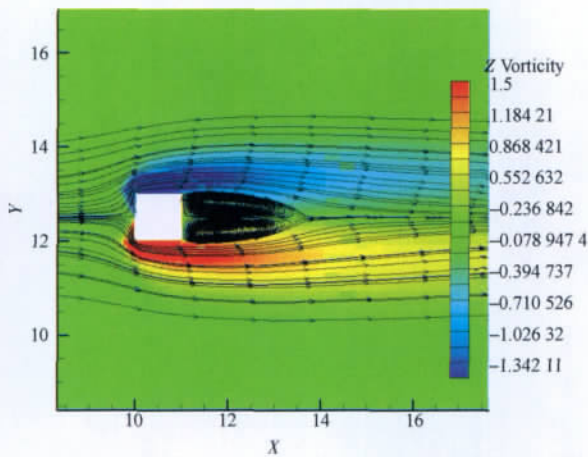


图9 绕方柱定常流流线和涡量云图 ( $Re = 40, t = 200$ )

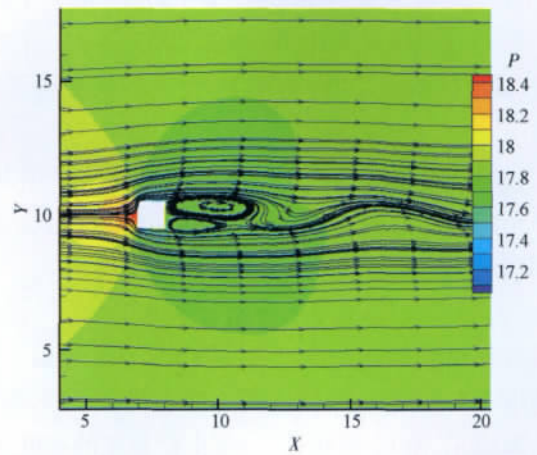


图12 绕方柱非定常流流线和压力云图 ( $Re = 60, t = 200$ )

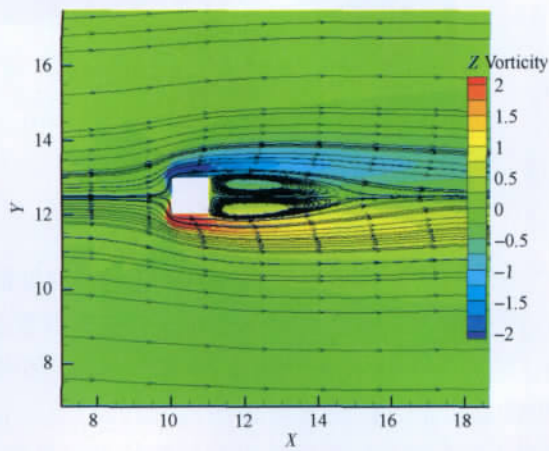


图10 绕方柱定常流流线和涡量云图 ( $Re = 50, t = 200$ )

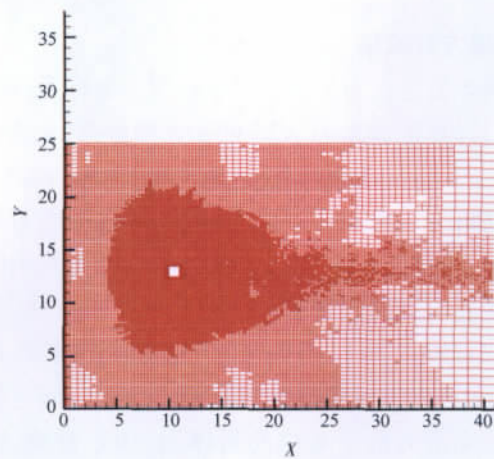


图13 绕方柱非定常流动初始网格 ( $Re = 100$ )

良好。

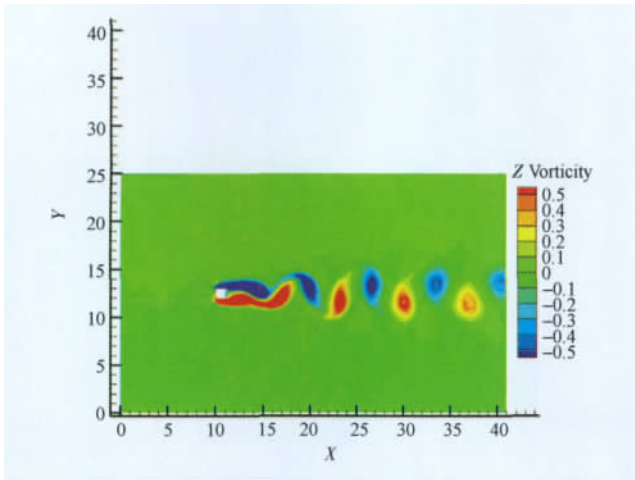


图 14 绕方柱非定常流动涡量云图(  $Re = 100$  )

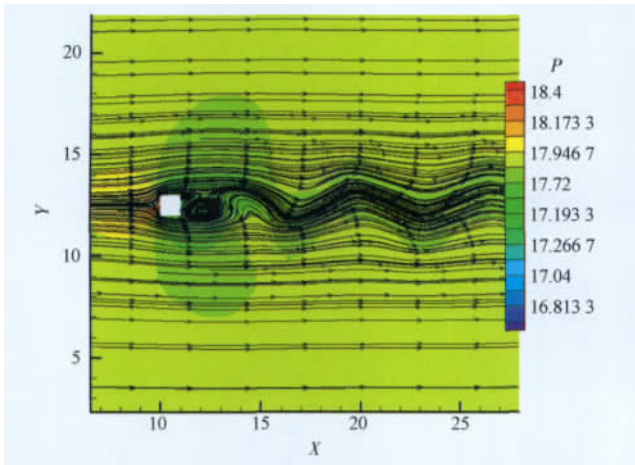


图 15 绕方柱非定常流动流线图和压力云图(  $Re = 100$  )

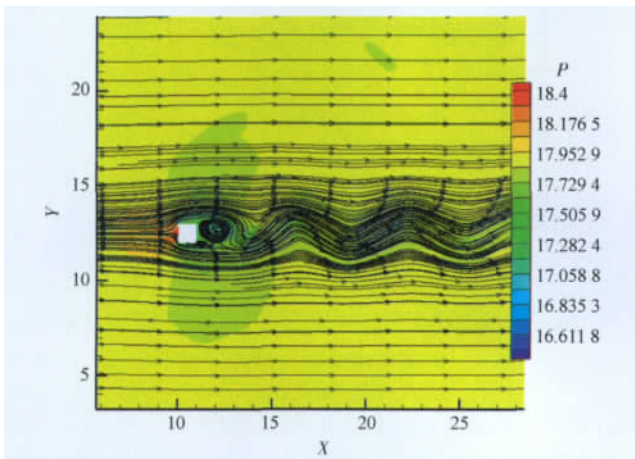


图 16 绕方柱非定常流动流线图和压力云图(  $Re = 250$  )

表 1 绕方柱流动升、阻力系数及  $St$  数与参考文献相应结果的对比(  $Re = 100$  )

	$C_d$	$C_l$	$S_t$
Davis <i>et al.</i> [13]	1.640	—	0.143
Zhangning [10]	1.663	0.116	0.145
Present	1.650	0.115	0.144

表 2 绕方柱流动升、阻力系数及  $St$  数与参考文献相应结果的对比(  $Re = 250$  )

	$C_d$	$C_L$	$S_t$
Davis <i>et al.</i> [13]	1.770	0.228	0.160
Zhangning [10]	1.798	0.241	0.165
Present	1.775	0.226	0.160

### 2.2 绕圆柱流动

图 17 为来流条件为  $Ma = 0.2$  ,  $Re = 300$  的流体绕单位圆柱流动的初始网格图,从自适应网格图 18 流线图 19 及涡量云图 20 上可以看出,流动过程为非定常过程,沿着来流方向,圆柱尾流涡旋的形成与脱落呈现出极强的规律性,周期性的涡旋从圆柱尾部交替脱落,形成了严格的卡门涡街。并且从图 19 的压力云图上可以看出对于压力梯度变化剧烈的地方,在图 18 的自适应网格上进行了相应的自适应加密,较好地捕捉了压力的布局情况。表 3 为与文献及实验结果的具体数据对比,可以看出符合的较好。

表 3 绕圆柱非定常流动升、阻力系数及  $St$  数与文献 [7] 及实验相应结果对比(  $Re = 300$  )

	$C_D$	$C_L$	$S_t$
Present	1.51	0.94	0.20
R. Ghias <i>et al.</i> [16]	1.42	0.93	0.21
Experiment	—	—	0.20

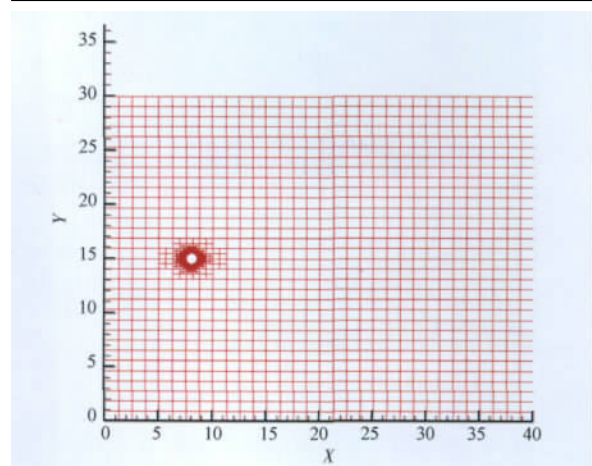


图 17 绕圆柱定常流动初始网格(  $Re = 300$  )

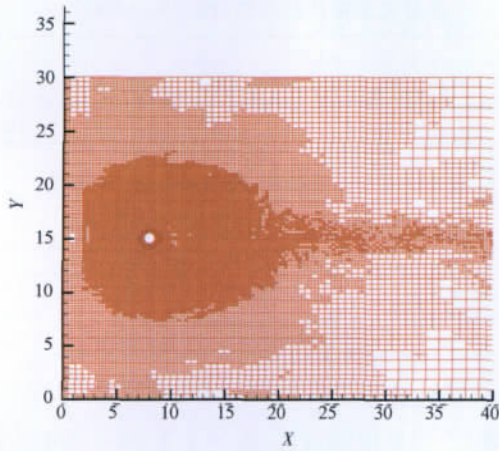


图 18 绕圆柱非定常流动自适应网格 ( $Re = 300$ )

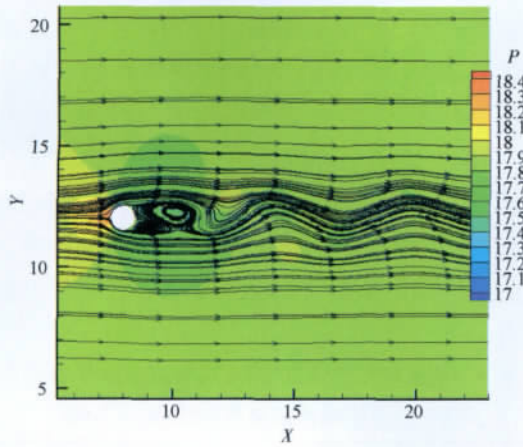


图 19 绕圆柱非定常流动流线和压力云图 ( $Re = 300$ )

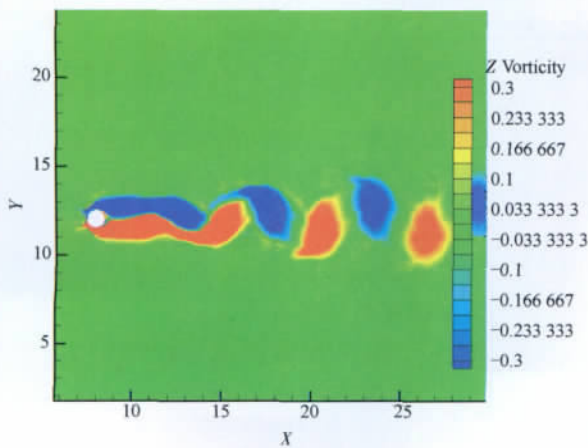


图 20 绕圆柱非定常流动涡量云图 ( $Re = 300$ )

图 21、图 22 为来流条件为  $Ma = 0.2$   $Re = 45$  的流体绕单位圆柱流动的涡量云图和流线图,从所得

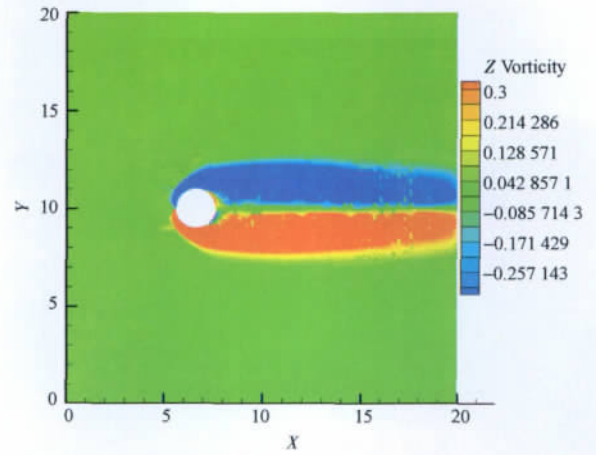


图 21 绕圆柱定常流动涡量云图 ( $Re = 45$ )

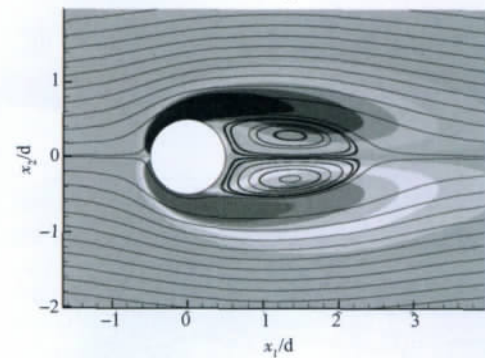
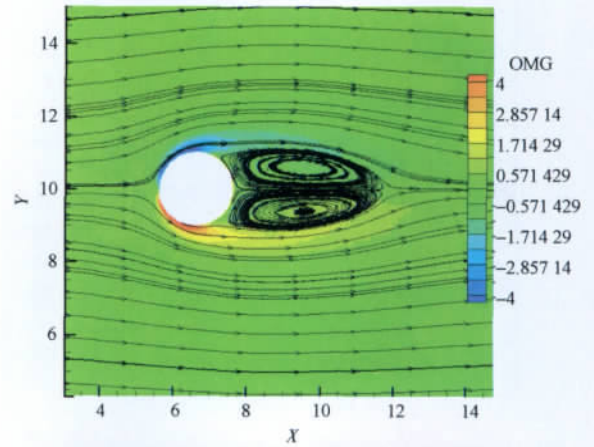


图 22 绕圆柱定常流动流线和涡量云图(与文献 [16]相应结果对比) ( $Re = 45$ )

结果可以看出此流动过程为定常的。并且图 22 为与文献 [16]相应结果的对比,可以看出符合的较好。

通过以上算例和分析可以看出 Cartesian 网格能够准确地根据压力梯度或者密度梯度的变化情



况进行网格自适应加密或者粗化,使用无网格方法计算得到的结果与文献中使用贴体结构网格计算的结果或实验结果符合良好。因此本文所发展的方法能够较好的模拟绕方柱和绕圆柱等的定常和非定常的低雷诺数流动过程。这也说明本文所发展的网格生成技术、流场求解方法和物面边界处理的方法是成功、准确的。

### 3 结 论

本文成功发展了基于二叉树数据结构的自适应网格生成及流场求解器。所发展方法的特点总结如下:

1) 基于二叉树数据结构发展了 Cartesian 网格的网格生成并与网格自适应相结合,改善了网格的空间分布,既保证了数值计算的分辨率和模拟效果又提高了计算效率。

2) 采用无网格法用来处理物面边界条件,使 Cartesian 网格亦能较好地解决具有复杂几何外形的物面边界问题。为 Cartesian 网格未来技术的发展提供了一种新的思路。

3) 通过柱体绕流的算例验证了所发展算法的有效性和合理性,计算结果证明了 Cartesian 网格所具有的计算效率高、自适应能力强等独特优点,为以后处理绕具有复杂几何外形物体的流动提供了新手段。下一步工作将此法发展到用于三维流场的计算。

### 参 考 文 献

- 童秉纲,张丙暄,崔尔杰. 非定常流与涡运动. 北京: 国防工业出版社, 1993
- 桑为民. 基于自适应直角切割及混合网格的 Euler/N-S 方程数值模拟. [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学 2002
- Wan Z J. A quadtree-based adaptive cartesian/quad grid flow solver for Navier-Stokes equations. *Comput Fluid*, 1998; 27(4): 529—549
- Tang L, Yang J, Lee J. Hybrid Cartesian grid/gridless algorithm for store separation prediction. *AIAA*, 2010—508—762 2010
- Koh E P C, Tsai H M, Liu F. Euler solution using cartesian grid with a gridless least-squares boundary treatment. *AIAA Journal*, 2005; 43(2): 246—255
- Shu C, Chew Y T, Niu X D. Least-squares-based lattice Boltzmann method: a meshless approach for simulation of flows with complex geometry. *Physical Review*, 2001; 64: 1—4
- 陈 思. 计算力学中高精度无网格法基础理论研究. [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学 2007
- Koh E P C, Tsai H M, Liu F. Euler solution using Cartesian grid with least squares Technique. *AIAA*, 2003 2003—1120
- Yang G, Causon D M, Ingram D M, et al. A Cartesian cut cell method for axisymmetric separating body flows. *AIAA* 96—1973 1996
- 张 宁. 混合对流绕方柱涡旋脱落及对传热影响的数值研究. [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学 2004
- Ishida I T, Kawai S, Nakahashi K. A high-resolution method for flow simulations with block-structured cartesian grid approach. *AIAA* 2011—3380 2011
- Kelkar K M, Patankar S V. Numerical prediction of vortex shedding behind a square cylinder. *Int J Num Methods in Fluids*, 1992; 14: 327—341
- Davis R W, Moore E F. A numerical study of vortex shedding from rectangles. *J Fluid Mech*, 1982; 116: 475—450
- Akhilesh K, Sahu R P, Chhabra V. Eswaran two-dimensional unsteady laminar flow of a power law fluid across a square cylinder. *J Non-Newtonian Fluid Mech*, 2009; 160: 157—167
- 蔡晋升. 跨音速大迎角欧拉方程数值分析. [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学 1992
- Ghias R, Mittal R, Dong H. A sharp interface immersed boundary method for compressible viscous flows. *Journal of Comput Physics*, 2007; 225: 528—533
- Xu Shiliang. Collected programs for common algorithm (2nd edition), Tsinghua University Press, 1992; (in Chinese)
- Batina J T. A gridless Euler/Navier-stokes solution algorithm for complex-aircraft application. *AIAA Paper* 93—0333, Jan. 1993
- Woodward P R, Colella P. The numerical simulation of two-dimensional fluid flow with strong shocks, *JCP*, 1984; 54: 115
- Arlinger B G. NLR 7301 two element airfoil at high lift. *Notes on Numerical Fluid Mechanics*, 1997; 58: 375—396

(下转第 3314 页)

## The Effect of Idine Molecule Filter Temperature to Wind Field Measurement

ZHANG Na

( Naval Aeronautical Engineering Institute Qingdao Branch ,Qindao 266041 ,P. R. China)

**[Abstract]** The absorbing curve , atmospheric backscattering signal of different backscattering ratio  $R(b)$  , and the spectrum curve of Idine molecule filter permeance function  $R(r, \nu)$  are simulated. It has been proved to have relation to the temperature of Idine molecule filter. And then the error curve by changing the temperature is achieved. Lastly the appropriate temperature and the wind field can be retrieved from the field measurement wind system are set up , which is developed by ocean university of China. The error of wind speed is 0.985 m/s by compared with sounding balloon.

**[Key words]** the ratio of backscattering      the temperature of Idine molecule filter      measurement accuracy

---

( 上接第 3303 页)

## Adaptive Numerical Simulation Method to Flows over Cube or Cylinder

LI Xian-jin , ZHENG Hong-wei , YANG Guo-wei

( Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics , Institute of Mechanics , C A S , Beijing 100190 , P. R. China)

**[Abstract]** A quadtree-based adaptive Cartesian grid generation and flow solver of Navier-Stokes equations were developed . The grid adaptation based on pressure or density gradient was performed and a gridless or meshless method based on the least-square fashion was used to treat the wall surface boundary condition , which is generally difficult to be handled for the common Cartesian grid. First , to validate the technique of grid adaptation , the flows over a cube were computed. Second , the flows over the cylinder were calculated to validate the developed method. The computational results indicated the developed method is reasonable for complex flows. So this method provides a new idea to the simulation of flows over the objects with complex geometry figures and this method has the special characters of the more reasonable distribution of grids , the higher efficiency and the easier of boundary treatment.

**[Key words]** adaptive grid      Cartesian grid      gridless method      numerical simulation