

# 基于任意多面体网格的 Navier-Stokes 方程并行求解器

张明锋 杨国伟 郑冠男 刘中玉

(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室,北京 100190)

**摘要** 发展了一种基于任意多面体网格的 Navier-Stokes (NS) 方程并行求解器,基于积分守恒形式 NS 方程组,发展了支持任意多面体网格的中心有限体积方法。采用基于面的连接关系,对不同拓扑类型的网格[如结构网格、非结构混合网格、多面体网格及剪切六面体 (TRIMMER) 网格]进行统一处理。对于无黏通量空间离散格式采用 HLLW (Harten-Lax-Van Leer-Einfeldt-Wada) 格式,湍流模型采用  $k-\omega$  两方程模型,时间推进采用适合并行计算的 DP-LUR (data-parallel lower-upper relaxation) 格式的隐式算法。对 RAE2822 翼型和 ONERA M6 机翼的结构网格、混合网格、多面体网格及 TRIMMER 网格进行了对比验证,结果表明发展的求解器具有较好的网格普适性,在不同拓扑类型的网格上均能求得较为接近实验值的结果;对多面体网格测试了加速比和并行效率,并行计算大大提高了计算效率。证明了求解器具有宽广的网格适应性,能够较为稳定、快速、准确地模拟定常绕流问题。

**关键词** 并行求解器 Navier-Stokes 方程 任意多面体网格 有限体积方法 并行效率  
**中图分类号** O351.2; **文献标志码** A

随着计算机水平和计算能力的提高,研究人员希望借助 CFD 软件对复杂外形及复杂工况进行模拟计算;这就对计算网格的合理设计及高质量生成提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。结构网格具有较好的正交性和网格质量;但对于复杂外形生成较为困难;纯四面体非结构网格易于生成,且具有良好的复杂外形适应性;但其属于各向同性网格单元,需要巨大的网格量才能模拟黏性边界层流动。因此仅在无黏流动计算中得到了广泛的研究和应用<sup>[2-4]</sup>。引入各向异性的三棱柱、狭长六面体网格单元作为边界层网格,采用金字塔网格单元过渡到四面体单元的非结构混合网格成为现今模拟黏性流动的主要策略。非结构网格的采用能大幅减少研究人员生成网格花费的时间,但同时由于网格扭曲和较差的网格过渡,可能会导致计算近似解的偏差<sup>[5]</sup>。多面体网格包括组成混合网格的四面体、六面体、三棱柱和金字塔网格,之外还包括任意多面的多面体。网格生成比非结构网格更容易实现,人工花费的时间更少;而且在网格自适应和重叠网格的应用方面有更高的自由度;但同时网格过渡可能更差。大部分基于非结构网格的求解器只支持四面体、六面体、三棱柱及金字塔四种标准网格。本文旨在从

基于面的连接关系出发,将不同类型的网格单元统一进行处理,发展支持任意多面体网格的有限体积方法,开发适用于任意多面体网格的 NS 方程并行求解器。

结构网格可以用三个方向上的  $ijk$  来标识每一个网格单元及每一个节点;而非结构网格和多面体网格则需要耗费较大的内存来记录节点、边、面及体等之间的连接关系。对于本文采用的格心型有限体积方法,基于面的连接关系较为适用,因为几乎所有的变量(无黏通量、黏性通量和原始变量梯度等)都要计算穿过面的通量;每一个内部面记录其两侧的网格单元编号,并根据左右两侧网格单元体心上的值来构造格式求出面的通量,直接将面通量累加到两侧单元上,避免了存储面的通量,节省了计算机内存。运用这种方法将结构网格、非结构网格、多面体网格以及 TRIMMER 网格统一进行处理,不必对不同网格类型进行特殊处理。

遍历所有网格单元,记录归属于每个单元的所有面,利用八叉树搜索算法查找并删除重复的面,同时记录面两侧网格单元的编号及面上的节点编号等拓扑信息,避免了重复面的计算,减小了计算量和内存占用。

基于上述的数据结构,本文成功发展了支持任意多面体网格的 NS 方程并行求解器。在达到对网格类型的普适性的同时,也能保持较好的计算精度。通过对 RAE2822 翼型的结构网格、混合

2016 年 3 月 11 日收到

第一作者简介:张明锋,男,博士。研究方向:计算流体力学。  
E-mail: zhangmf@mail.ustc.edu.cn

网格、多面体网格及 TRIMMER 网格进行对比计算,得到四种网格的计算结果,并与实验结果进行了对比。对 ONERA M6 三维机翼进行了四种网格的对比计算,求解器在模拟三维复杂流动同样取得了较好的结果,同时测试了并行程序的加速比和并行效率。

## 1 计算方法

本文数值计算的控制方程为守恒型雷诺平均 NS 方程,采用中心有限体积方法,将变量存储在网格单元中心;时间推进格式采用基于 DP-LUR 格式的隐式算法<sup>[6]</sup>;湍流模型采用 Wilcox  $k-\omega$  两方程模型<sup>[1]</sup>;并行计算采用 MPI 消息传递接口进行数据的传递。

### 1.1 控制方程

在三维笛卡尔坐标下,不考虑外力和热源的守恒型雷诺平均 NS 方程的积分形式可以表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{Q} dV + \oint_S \mathbf{E}(\mathbf{Q}) \hat{n} dS = \oint_S \mathbf{F}(\mathbf{Q}) \hat{n} dS \quad (1)$$

式(1)中,  $\mathbf{Q} = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho w \quad e_0]^T$  是守恒量矢量,  $\mathbf{E}$  为无黏通量,  $\mathbf{F}$  为黏性通量,  $V$  为控制体的体积,  $S$  为控制体的表面积。采用中心有限体积方法,将流场网格作为控制体将方程(1)进行离散化,定常流动的离散形式可以写为

$$\Delta V \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \sum_{i=1}^N \mathbf{E} \hat{n}_i \Delta S_i = \sum_{i=1}^N \mathbf{F} \hat{n}_i \Delta S_i \quad (2)$$

式(2)中,  $N$  是控制体的面个数,  $\hat{n}_i$  为控制体第  $i$  个面的外法线方向的单位矢量,  $\Delta S_i$  是控制体第  $i$  个面的面积。将每个面的  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{F}$  的通量求出之后按照面法线方向累加到左侧和右侧的控制体,如将  $\mathbf{E} \hat{n}_i \Delta S_i$  加到左侧的网格,将  $-\mathbf{E} \hat{n}_i \Delta S_i$  加到右侧的网格,即可得到每个网格的  $\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t}$ 。

### 1.2 空间离散格式

空间离散格式采用基于 Roe 格式发展的 HLLEW 格式,数值通量可以写为<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{E}_{LR} = \frac{1}{2} (\mathbf{E}_L + \mathbf{E}_R - \bar{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{A}} \mathbf{L} \Delta \mathbf{Q}) \quad (3)$$

式(3)中,  $\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_R - \mathbf{Q}_L$ ,  $\bar{\mathbf{R}}$ 、 $\hat{\mathbf{A}}$  和  $\bar{\mathbf{L}}$  矩阵分别是 Roe 平均的右特征矢量、本征值矢量和左特征矢量矩阵,下标 R 和 L 分别代表表面右侧和左侧的值。

网格面左侧原始变量值  $q_L$  通过左侧格心变量值  $q_i$  利用梯度值进行泰勒级数展开,得到二阶精度的重构值:

$$q_L = q_i + \varphi_i \nabla q_i (\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_i) \quad (4)$$

式(4)中,  $\nabla q_i$  为网格面左侧网格单元  $i$  格心处的梯度值,由高斯定理得到:

$$\nabla q_i = \frac{\sum_{j(i)} q_j \cdot \mathbf{S}_{ij}}{V_i} \quad (5)$$

式(5)中,  $j$  为所有与单元  $i$  相邻的单元,  $\mathbf{S}_{ij}$  为两者交界面的面矢量,  $q_i$  为  $q_i$  和  $q_j$  根据距离面心的距离的倒数加权平均得到,  $V_i$  为单元  $i$  的体积。为抑制间断面的数值振荡,引入 Venkatakrisnan 限制器  $\varphi_i$ <sup>[8]</sup>。

### 1.3 时间推进格式

运用点隐式时间推进格式,对于控制体  $j$ ,方程(2)可写为

$$V_j \frac{\partial \mathbf{Q}_j}{\partial t} + \sum_{k(j)} \bar{\mathbf{E}}_{jk}^{n+1} \Delta S_{jk} = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{jk}^n \Delta S_{jk} \quad (6)$$

式(6)中,  $\Delta \mathbf{Q}_j = \mathbf{Q}_j^{n+1} - \mathbf{Q}_j^n$ ,  $n$  代表时间步,  $k$  为控制体  $j$  的相邻单元,  $\Delta S_{jk}$  为控制体  $k$  和  $j$  的界面。将无黏通量  $\bar{\mathbf{E}}_{jk}^{n+1}$  线性化,并作通量分裂,得:

$$\bar{\mathbf{E}}_{jk}^{n+1} = \bar{\mathbf{E}}_{jk}^n + (\mathbf{A} \Delta \mathbf{Q})_{jk} = \bar{\mathbf{E}}_{jk}^n + (\mathbf{A} \Delta \mathbf{Q})_{jk}^+ + (\mathbf{A} \Delta \mathbf{Q})_{jk}^- \quad (7)$$

式(7)中,  $\mathbf{A}$  是无黏通量矢量雅克比矩阵,取一阶迎风得:

$$\bar{\mathbf{E}}_{jk}^{n+1} = \bar{\mathbf{E}}_{jk}^n + \mathbf{A}_j^+ \Delta \mathbf{Q}_j + \mathbf{A}_k^- \Delta \mathbf{Q}_k \quad (8)$$

因此方程(6)可以写为

$$V_j \frac{\Delta \mathbf{Q}_j}{\Delta t} + \sum_{k(j)} \Delta S_{jk} \mathbf{A}_j^+ \Delta \mathbf{Q}_j + \sum_{k(j)} \Delta S_{jk} \mathbf{A}_k^- \Delta \mathbf{Q}_k = RHS_j \quad (9)$$

式(9)中,  $RHS_j$  代表单元  $j$  的残差,  $\mathbf{A}^\pm = (\mathbf{A} \pm \chi \sigma_A \mathbf{I}) / 2$ ,  $\sigma_A$  为雅克比矩阵  $\mathbf{A}$  的谱半径,  $\chi \geq 1$  用来调节计算稳定性,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。注意到  $\sum_{k(j)} \Delta S_{jk} \mathbf{A} = 0$ , 方程(9)可以写为

$$D \Delta \mathbf{Q}_j = RHS_j - 1/2 \sum_{k(j)} \Delta S_{jk} (\mathbf{A} - \chi \sigma_A \mathbf{I}) \Delta \mathbf{Q}_k \quad (10)$$

式(10)中,算符  $D = V_j \frac{\mathbf{I}}{\Delta t} + \frac{1}{2} \sum_{k(j)} \Delta S_{jk} \chi \sigma_A \mathbf{I}$ 。方程(10)的另一种形式可以指出  $m$  步迭代过程如下。

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{Q}_j^{(0)} &= D^{-1} RHS_j; \\ \Delta \mathbf{Q}_j^{(m)} &= D^{-1} (RHS_j - \sum_{k(j)} \Delta S_{jk} \mathbf{A}_k^- \Delta \mathbf{Q}_k^{(m-1)}); \\ \Delta \mathbf{Q}_j &= \Delta \mathbf{Q}_j^{(m_{\max})} \end{aligned} \quad (11)$$

### 1.4 边界条件

壁面边界为无滑移壁面,远场边界采用一维黎曼无反射条件。采用虚拟网格技术,将边界条件的处理独立进行,计算无黏通量及黏性通量时内部面和界面采用相同的格式,从边界到内场采用统一的离散格式<sup>[9]</sup>。

## 1.5 网格并行分区技术及计算网格

对于规模较大的网格,利用并行计算可极大提高计算效率。本文采用明尼苏达大学发展的 parmetis 多级  $k$  路超图分区方法<sup>[10]</sup>,对流场网格进行并行分区,其分区的计算负载和通讯负载都基本达到了最优状态<sup>[11]</sup>。

本文针对 ONERA M6 机翼在相同的远场条件下分别生成了结构网格、混合网格、多面体网格和 TRIMMER 网格等四种类型的网格,如图 1(a)~(d)所示。其中,混合网格由物面附近的结构边界层网格和边界层外的非结构网格组成,如图 1(b)所示;图 1(c)和图 1(d)分别给出了多面体网格和 TRIMMER 网格在物面及对称面上的分布示意,可以看出由于多面体网格和 TRIMMER 网格的各向同性特点,导致了物面网格数量的急剧增加。

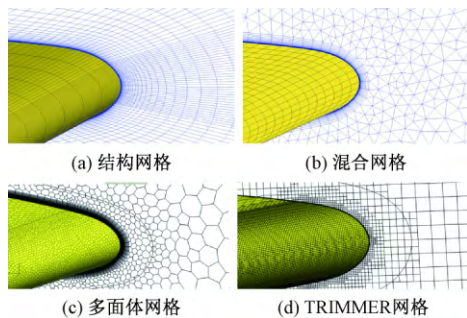


图 1 四种网格类型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four types of meshes

## 2 计算结果及分析

### 2.1 RAE2822 翼型

本文针对 RAE2822 标模进行不同类型二维网格的对比计算。在相同的远场条件下生成二维结构网格、混合网格、多边形网格及 TRIMMER 网格四种网格类型。边界层首层网格厚度均为  $10^{-5}c$ ,  $c$  为参考弦长。

选用亚声速和跨声速两种工况进行计算,分别为工况一:  $Ma = 0.6$ ,  $\alpha = 2.57^\circ$ ,  $Re = 6.3 \times 10^6$  和  $Ma = 0.73$ ,  $\alpha = 3.19^\circ$ ,  $Re = 6.5 \times 10^6$ , 其中跨声速工况经过经验修正后的参数为工况二:  $Ma = 0.734$ ,  $\alpha = 2.79^\circ$ ,  $Re = 6.5 \times 10^6$ <sup>[12]</sup>。

时间步长取当地时间步长,两种工况下四种不同类型的网格计算均采用相同的初始 CFL 数。为加快收敛、增加程序的鲁棒性,根据全场最大的计算残差是否超出事先设定的阈值来动态调整 CFL 数,从而动态调整时间步长,即在变化剧烈的网格区域减小时间步长,而变化较小的区域可增大时间步长。

图 2 给出了工况一四种网格计算出的物面压力分布,可以看出除了前缘上表面四种网格的压力偏小和下表面压力稍大之外,其他部位结构网格和混合网格的物面压力与实验值比较吻合。图 3 给出了工况二各网格的物面压力分布,可以看出结构网格和混合网格的物面压力分布与实验值吻合的较好,尤其对于激波位置的捕捉较为准确,而多面体网格和 TRIMMER 网格激波位置较实验值靠后;TRIMMER 网格在后缘下表面的压力也出现了明显的偏离。总体上看,结构网格和混合网格的结果要优于多面体网格和 TRIMMER 网格,因为前两者较为规则且有较好的网格过渡,进而直接影响计算结果。

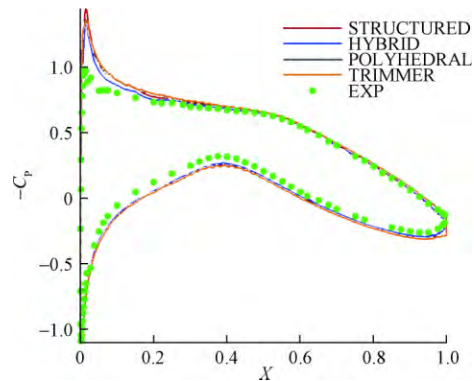


图 2  $Ma = 0.6$  工况物面压力分布对比

Fig. 2 Comparison of surface pressure distribution at  $Ma = 0.6$

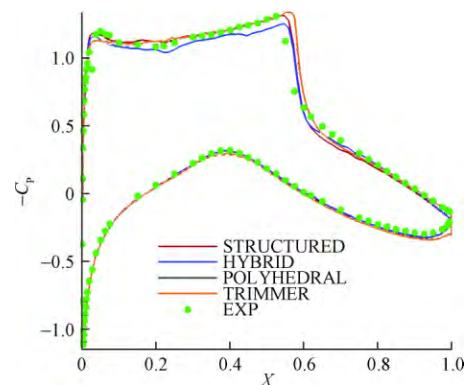


图 3  $Ma = 0.734$  工况物面压力分布对比

Fig. 3 Comparison of surface pressure distribution at  $Ma = 0.734$

### 2.2 ONERA M6 机翼

ONERA M6 机翼是一个经典的标模,因其有着较为简单的几何外形,同时有较为复杂的跨声速流动,如局部超声速流动、激波和湍流边界层分离。本文基于 M6 机翼生成结构网格、混合网格、多面体网格和 TRIMMER 网格四种类型的网格,网格单元数等信息如表 1 中所示。首层网格厚度均为  $10^{-5}c$ ,  $c$  为参考弦长。计算条件为  $Ma = 0.8395$ ,  $\alpha = 3.06^\circ$ ,

$Re = 1.172 \times 10^7$ 。

表 1 M6 机翼四种网格的拓扑信息

Table 1 Topological information of four types of meshes of M6 wing

网格类型	物面网格数	单元数	边界层数
结构网格	41 022	7 559 182	
混合网格	41 022	12 289 822	40
多面体网格	168 001	13 389 604	50
TRIMMER 网格	416 720	33 665 379	15

时间步长取当地时间步长,四种类型的网格计算采用相同的初始 CFL 数,同样取动态 CFL 数。图 4 给出了四种网格计算的收敛历程,可以看出流场平均残差在 5 000 步以后减小个数量级,求解器在四种网格上都能较快收敛。图 5(a) ~ (f) 给出了机翼不同站位的物面压力分布四种网格的计算结果对比,可以看出四种网格的计算结果均与实验结果较为一致,如上下表面的压力分布、激波位置,尤其是图 5(a) ~ (d) 中两道激波的出现和位置的捕捉都较为准确。

### 3 并行加速比及并行效率

为验证程序的并行效率,针对 M6 机翼的多面体网格测试了加速比和并行效率,网格量为

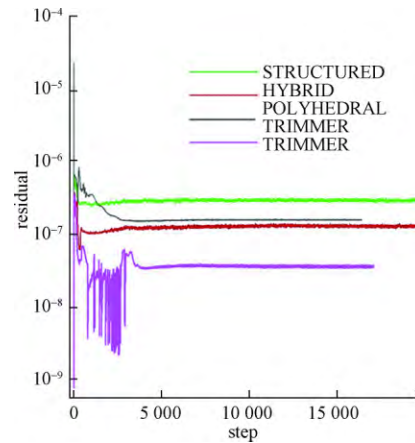


图 4 四种类型网格的计算收敛历程  
Fig. 4 Convergence process of computation upon four types of meshes

133 896 04。测试平台为曙光高性能服务器,测试进程数取 1 ~ 128。加速比  $S$  和并行效率  $E$  的定义公式为

$$S = \frac{T_1}{T_n}; E = \frac{S}{n} \times 100\%。$$

式中  $T_1$  为一个进程的计算时间,  $T_n$  为  $n$  个进程的计算时间。

表 2 列出了程序在 1 ~ 128 个进程上定常迭代 10 步的测试结果,其中统计了数据传输总时间、平

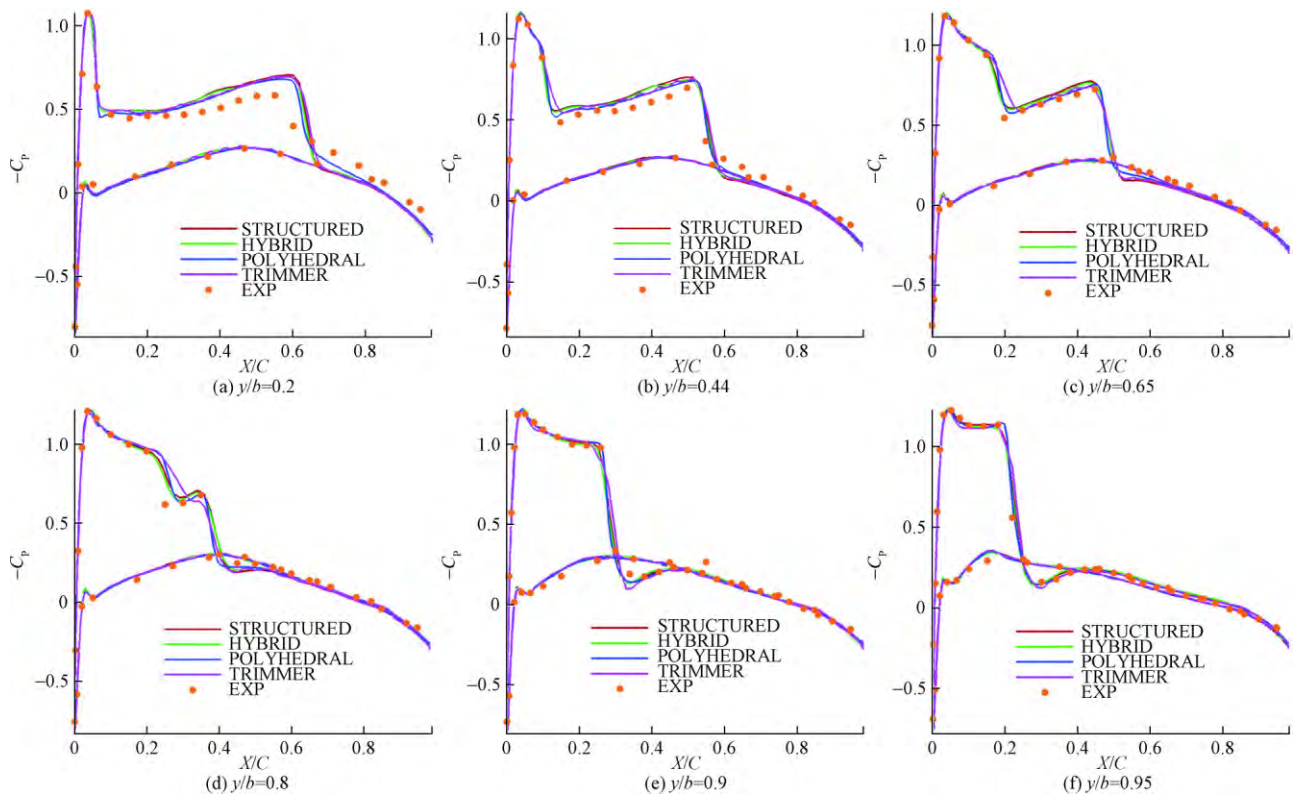


图 5 M6 机翼不同站位的四种网格计算结果对比

Fig. 5 Comparison of computational results of four types of meshes at different sections of M6 wing

均每步的数据传输时间  $T_s$ 、程序迭代 10 步的总运行时间  $T_r$ 、数据传输时间占程序总运行时间的比例  $R$  以及加速比  $S$  和并行效率  $E$ 。可以看出随着进程数的增加, 总运行时间明显减少, 加速比  $S$  增加显著; 但是当进程数大于 24 时数据传输总时间  $T_t$  并没有随进程数增加而明显减小, 而数据传输时间占总运行时间的比例随着进程数的增加而显著增加, 并行效率  $E$  下降明显; 若 CPU 运行速度进一步加快, 并行效率将更低。因此, 当网格规模确定以后, 存在一个合理的进程数, 在减少运行时间的同时保证并行的效率, 以合理利用计算资源。

表 2 并行加速比及并行效率

Table 2 Speedup ratio and parallel efficiency

$n$	$T_t/s$	$T_s/s$	$T_r/s$	$R$	$S$	$E$
1			1 802			
2	11.3	1.13	801	0.014	2.25	112.4%
4	18.1	1.81	419	0.043	4.30	107.5%
8	9.7	0.97	239	0.041	7.54	94.3%
16	5.1	0.51	126	0.040	14.28	89.2%
24	4.3	0.43	88	0.049	20.40	85.0%
32	5.0	0.5	70	0.072	25.78	80.5%
48	9.0	0.9	62	0.145	29.11	60.6%
64	5.7	0.57	43	0.133	41.90	65.5%
80	5.3	0.53	37	0.142	48.17	60.2%
96	3.4	0.34	30	0.114	60.66	63.2%
128	3.3	0.33	25	0.131	71.78	56.1%

## 4 结论

本文发展了一种基于任意多面体网格的 NS 方程并行求解器, 具有较强的网格适应性, 能处理任意拓扑的网格, 且具有较好的加速效率, 能准确高效地求解三维复杂流场的流动。通过对 RAE2822 翼型和 ONERA M6 机翼的结构网格、混合网格、多面体网格和 TRIMMER 网格进行计算对比发现, 四种类型网格的物面压力分布计算结果与实验值符合的较好。通过测试加速比和并行效率可以看出对于特定规模的网格, 选择合理的进程数, 程序具有良好的并行效率。

### 参 考 文 献

1 阎超. 计算流体力学方法及应用. 北京: 北京航空航天大学出

版社, 2006: 183—233

Yan Chao. Method and application of computational fluid dynamics. Beijing: Beihang University Press 2006: 183—233

- Jameson A, Schmidt W, Turkel E. Numerical solutions of the Euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes. AIAA, 1981: 1259
- Barth T J, Jespersen D C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. AIAA, 1989: 0366
- Frink N T. Upwind scheme for solving the Euler equations on unstructured tetrahedral meshes. AIAA, Journal, 1992; 30 (1): 70—77
- Ahn H T, Carey G F. An enhanced polygonal finite - volume method for unstructured hybrid meshes. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2007; 54(1): 29—46
- 郑冠男, 邓守春, 韩同来, 等. 基于混合网格 Navier-Stokes 方程的并行隐式计算方法研究. 应用力学学报, 2011; 28(3): 211—218  
Zheng Guannan, Deng Shouchun, Han Tonglai, et al. An implicit parallel computing method based on the Navier-Stokes equations with hybrid grids. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011; 28(3): 211—218
- Obayashi S, Guruswamy G P. Convergence acceleration of a Navier-Stokes solver for efficient static aeroelastic computations. AIAA Journal, 1995; 33 (6): 1134—1141
- Venkatakrishnan V. On the accuracy of limiters and convergence to steady steady state solutions. AIAA, 1993: 0880
- 李桂波. 气动弹性降阶模型及颤振主动抑制方法研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2011  
Li Guibo. Study on aeroelastic reduced order models and active flutter suppression. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011
- Karypis G, Kumar V. Multilevel K-way hypergraph partitioning. Vlsi Design, 2000; 11 (3): 285—300
- 郑冠男. 基于混合网格 Navier-Stokes 方程并行算法的气动弹性研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2011  
Zheng Guannan. Aeroelastic investigation based on hybrid grid parallel Navier-Stokes solver. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011
- 张一帆, 张小莉. RAE2822 翼型跨音速流动 CFD 计算的可信度分析. 航空计算技术, 2009; 39(4): 68—70  
Zhang Yifan, Zhang Xiaoli. Credibility analysis of RAE2822 airfoil transonic flow computation. Aeronautical Computing Technique, 2009; 39(4): 68—70

(下转第 139 页)

- tor CBF beta/PEBP2 beta and a myosin heavy chain in acute myeloid leukemia. *Science* ,1993; 261: 1041—4
- 20 Jager S , Kim D Y , Hultquist J F , *et al.* Vif hijacks CBF-beta to degrade APOBEC3G and promote HIV-1 infection. *Nature* ,2012; 481: 371—375
- 21 Zhang W , Du J , Evans S L , *et al.* T-cell differentiation factor CBF-beta regulates HIV-1 Vif-mediated evasion of host restriction. *Nature* 2012; 481: 376—379
- 22 Ai Y , Zhu D , Wang C , *et al.* Core-binding factor subunit beta is not required for non-primate lentiviral Vif-mediated APOBEC3 degradation. *J Virol* 2014; 88: 12112—12122
- 23 Lucifora J , Xia Y , Reisinger F , *et al.* Specific and nonhepatotoxic degradation of nuclear hepatitis B virus cccDNA. *Science* ,2014; 343: 1221—1228

## Construction of CBF $\beta$ Knockout Cell Line by CRISPR/Cas9 and the Construction of CBF $\beta$ Eukaryotic Expression Vector

XU Feng-chao , SONG Hong-xiao , TAN Guang-yun , CHEN Jian-zhu

( Institute of Translational Medicine , Department of Immunology , the First Hospital , Jilin University , Changchun 130061 , P. R. China)

**[Abstract]** The CBF $\beta$  knockout HepG2 Cell Line and the HA-CBF $\beta$  eukaryotic expression vector was constructed. CRISPR/Cas9 gene knockout , Cas9 expression vector and CBF $\beta$  sgRNA were co-transfected into HepG2 cell , puromycin was used for the positive gene knockout cell selection; Construct the CBF $\beta$  expression vector by infusion cloning method. RNA was extracted from the HepG2 cells and reversed to cDNA , specific PCR primers were designed to amplify the CBF $\beta$  gene which was ligated to VR1012 vector , and transformed to Trans5a competent cell , pick colonies for PCR and digestion verification , and finally conformed by sequencing. The CBF $\beta$  knockout HepG2 cell line and the CBF $\beta$  eukaryotic expression vector which can stably expressed in HepG2 cells have been established. A foundation for the study of CBF $\beta$  gene in regulating HBV replication was laid.

**[Key words]** CBF $\beta$  CRISPR/Cas9 gene knockout eukaryotic expression vector

( 上接第 105 页)

## A Parallel Solver for Navier-Stokes Equation Based on Arbitrary Polyhedral Grids

ZHANG Ming-feng , YANG Guo-wei , ZHENG Guan-nan , LIU Zhong-yu

( LMFS of Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , P. R. China)

**[Abstract]** A parallel solver for NS( Navier-Stokes) equations is developed based on arbitrary polyhedral grids. The central finite volume method is promoted based on integral conservation form NS equations , adaptive to arbitrary polyhedral grids. Grids of different topological types are implemented uniformly by introducing face-based connectivity , such as structural grids , hybrid grids , polyhedral grids and TRIMMER grids. The HLLW scheme is applied for spatial discretization of the inviscid fluxes , and  $k-\omega$  two equations turbulence models are used for the simulation of turbulent flows. The implicit time-marching method using DP-LUR( data-parallel lower-upper-relaxation) is considered to improve the parallel computation. The comparison of structured grid , hybrid grid , polyhedral grid and TRIMMER grid for RAE2822 aerofoil is validated. It is shown that the results of different grids are closer to the experimental values , and that the solver in this paper has good universality in grids. The speed-up ratio and parallel efficiency are tested in TRIMMER mesh. It is demonstrated that parallel calculation could improve greatly calculation efficiency. Thus it is proved that the solver in this paper are stable , fast and accurate while exhibiting good adaptability on mesh topology.

**[Key words]** parallel solver Navier-Stokes equation arbitrary polyhedral grid finite volume method parallel efficiency