文章编号: 0258-1825(2013)04-0487-07

混合型三阶格式及关于两种 DES 算法的比较计算研究

孙 $ilde{x}^1$,陈江涛¹,李 $ilde{h}^{1,2}$,张涵信^{1,2}

(1. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所,四川 绵阳 621000;

2. 北京航空航天大学 国家计算流体力学实验室, 北京 100083)

摘 要:为开展 RANS/LES 混合模拟,在传统三阶迎风偏置格式的基础上,提出一类混合型的三阶计算格式,格式在中高波数范围具有可调的耗散水平。在此基础上,文中通过计算比较研究两种 RANS/LES 混合算法:一种是基于 Spalart-Allmaras 一方程模型的 DES 模型(DES-SA),另一种是基于混合长度模型的 DES 模型(DES-ML),使用发展的三阶格式对圆柱绕流进行模拟,并将得到的结果与文献比较,对计算格式、DES-ML 算法进行了初步探讨。

关键词:RANS/LES混合算法;修正波数;混合格式

中图分类号: V211.3

文献标识码:A

0 引 言

一直以来,湍流研究都受到科技工作者的广泛关 注。目前湍流研究的数值手段主要有:雷诺平均方法 (RANS),大涡模拟(LES),直接数值模拟(DNS)。 RANS方法的优点是能够用较小的计算量得到较为 准确的平均流场,但是 RANS 方法难以准确模拟大 范围分离等复杂流动现象,也不能提供流场脉动量等 信息。而想要实现对湍流信息比较全面的把握,DNS 是最直接的手段,但 DNS 需要消耗大量的计算机资 源,因而对于实际问题往往难以处理。LES 也是目 前研究得比较多的一种湍流模拟方法,它能够以较 DNS 小的计算量获得比较丰富的湍流信息,但在靠 近壁面处 LES 需要的网格数为 $Re^{1.8}$ 量级 $^{[1]}$,和 DNS 的计算量相当,目前的计算能力仍难以承受。因此, 在实际的应用中,如果将研究的重点放在远离壁面的 大尺度流动区域,这时采用 LES/RANS 混合方法是 比较合适的。

DES 是 Spalart^[2] 在 1997 年提出的一种基于 Spalart-Allmaras 一方程模型的 LES/RANS 混合方法。简单地讲,这种模型是在自由流区域采用 LES 方法而在壁面附近采用 Spalart-Allmaras 一方程模型。这种方法在对许多实际问题的计算上都取得了较好的结果,应用比较广泛。目前,国内外许多学者

都提出了各自的 DES 模型,其中应用较广泛的有 Menter^[3]的 DES-SST 方法,以及 Batten 的 LNS^[4]等。

为了给出较为准确的计算结果,选择恰当的计算差分格式十分重要。对于低速问题,由于没有激波等间断结构,可以采用带迎风特性的、具有一定耗散水平的线性格式。这其中常用的是三阶和五阶迎风偏置格式^[5]。对于 LES 或 DES 尺度的数值模拟,可以近似描述为对于能够分辨的流动结构由计算给出,对于其他更小的结构则通过数值耗散抑制其增长。因此,研究格式的耗散特性并使格式在中高波数段具有合适的耗散水平是十分必要的。

本文在第一节,首先给出计算格式和 RANS/LES 混合算法:计算格式方面给出了混合型三阶格式的构造过程和特性分析; RANS/LES 混合算法给出了 DES-SA 和 DES-ML 方法描述; 在第二节给出数值方法的典型低速算例; 最后在第三节给出结论。

1 数值方法

1.1 控制方程

为了更加有效地求解非定常的不可压缩 N-S 方程,我们引入了虚拟压缩法,具体方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \beta \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial \tau} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial t} \tag{1}$$

^{*} 收稿日期:2012-05-15; 修订日期:2012-08-14

对上面的不可压缩 N-S 方程进行滤波处理,得到滤波后的 N-S 方程如下:

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tau} + \beta \frac{\partial^2 \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} - \frac{\partial \tau_{ij}^{\text{sgs}}}{\partial x_j}$$
(2)

其中 $\tau_{ij}^{ses} = \widehat{u_i u_j} - \widehat{u_i} \widehat{u_j}$ 称为亚格子应力,通常采用亚格子应力模型进行封闭求解。

1.2 数值格式

在 DES 计算中,常用的数值格式有高阶迎风偏置格式,各类中心差分格式,以及 WENO 格式等。下面对五阶迎风偏置格式,三阶迎风偏置格式,二阶中心差分格式,四阶中心差分格式,六阶中心差分格式进行修正波数分析。

修正波数(Modified Wave Number)的概念在差分格式误差傅里叶分析方法中被广泛采用[6],它刻画了波数空间中差分格式求得的近似导数与真实物理导数之间的相近程度。如果用 $F_T\{f(x)\}=\hat{f}(k)$ 表示 f(x) 的傅里叶变换,则 f(x) 的一阶物理导数的傅里叶变换为: $\hat{f}(x)=ik\hat{f}(k)$,对于一般的差分格式:

$$\sum_{m=-M_{l}}^{M_{r}} a_{m} f'_{fd} (x + m\Delta) = \sum_{l=-L_{l}}^{L_{r}} b_{l} f(x + l\Delta) / \Delta$$
 (3)

两端进行傅里叶变换,并考虑到 $F_T\{f(x+a)\}=e^{i\alpha}\hat{f}(k)$,可将式(3)化作: $\hat{f}_{fd}(x)=ik^*\hat{f}(k)$,其中 k^* 称为修正波数。将以上的分析方法用到几种常用的格式上,并对其修正波数进行分析。关于二阶中心差分格式,四阶中心差分,以及六阶中心差分格式的具体形式,这里不再重复。而现在采用的三阶迎风偏置和五阶迎风偏置格式具体形式为:

三阶迎风偏置格式:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{3f_i - 6f_{i-1} + 2f_{i+1} + f_{i-2}}{6\Delta x} \tag{4}$$

五阶迎风偏置格式:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{-2f_{i-3} + 15f_{i-2} - 60f_{i-1} + 20f_i + 30f_{i+1} - 3f_{i+2}}{60\Delta x}$$

通过傅里叶分析,求得以上格式的修正波数。当格式为中心差分格式时,修正波数只有实数部分,而迎风格式的修正波数包含实部和虚部,得到的修正波数如图 1、图 2 所示。

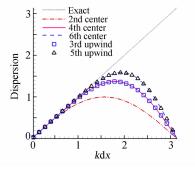


图 1 常用格式修正波数实部

Fig. 1 The real part of the modified wave number of commonly used schemes

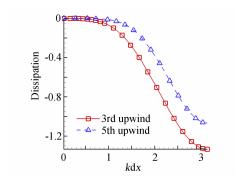


图 2 常用格式修正波数虚部

Fig. 2 The imaginary part of the modified wave number of commonly used schemes

从图中可以看出,无论是三阶格式还是五阶格式耗散都较高,因此对于许多低速问题,两种格式都表现出了足够的稳定性,但另一方面,对于有些问题,格式的耗散偏高。我们通过采用加权的形式,改造现有的三阶迎风偏置格式,使得改造后的格式模板与三阶迎风偏置格式相同,同时降低了格式的 π 耗散,提高了格式对中高波数结构的捕捉能力。为了能够尽量减小耗散,应使加权后的格式趋近于中心格式,选取的三阶格式如下:

格式 1:

$$E_{i+1/2}^{(0)} = \frac{2}{6}E_i + \frac{5}{6}E_{i+1} - \frac{1}{6}E_{i+2}$$
 (6)

格式 2:

$$E_{i+1/2}^{(1)} = -\frac{1}{6}E_{i-1} + \frac{5}{6}E_i + \frac{2}{6}E_{i+1}$$
 (7)

加权后的形式为:

$$E_{i+1/2}^{\text{Hyb}} = -\frac{1}{6}(1-\alpha)E_{i-1} + (\frac{5}{6} - \frac{1}{2}\alpha)E_i + (\frac{2}{6} + \frac{1}{2}\alpha)E_{i+1} - \frac{1}{6}\alpha E_{i+2}$$
(8)

上式中,当 α =0.5时,格式为四阶精度,其他情况格式精度为三阶。对于上面得到的混合格式,采用修正

波数进行分析,并与常用格式比较,如图 3、图 4 所示。

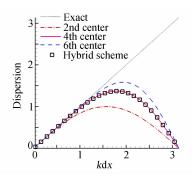


图 3 混合格式修正波数实部

Fig. 3 The real part of the modified wave number of the hybrid schemes

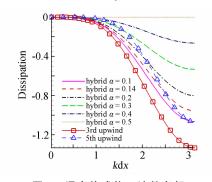


图 4 混合格式修正波数虚部

Fig. 4 The imaginary part of the modified wave number of the hybrid schemes

从图 3 可以看出,混合格式修正波数的实部也就是格式的色散部分和四阶中心差分的色散部分一致,而虚数部分也就是格式的耗散部分随着权值的变大,耗散逐渐减小,并趋近于 0。因此通过加权形式来改造原来的三阶格式减小耗散的方式是可行的。权值的取法有许多种方式,这里列出两种方案:scheme-I:

混合格式的耗散在 π 处与五阶迎风偏置格式格式相同,由此确定的权值为: α =0.1; scheme-II:

混合格式的耗散在与五阶迎风偏置格式的耗散 在交点前后的最大相对值大小相同,由此确定的权值 为: α =0.14。

因为要求耗散比五阶偏置迎风格式低,而 α = 0.5 时为四阶中心差分格式,所以按照上面的分析, α 的取值范围应该是[0.1,0.5]或[0.14,0.5]。

1.3 Spalart 的 DES 模型[2] (DES-SA)

DES-SA 是基于 Spalart-Allmaras 一方程模型[7] 提出来的。首先给出不可压缩形式 Spalart-Allmaras 一方程模型,设涡粘系数 $\nu_i = \bar{\nu} f_{v_i}$,其输运方程为:

$$\frac{D\tilde{v}}{Dt} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{v} + \frac{1}{\sigma} \{ \nabla [(v + \tilde{v}) \nabla \tilde{v}] + c_{b2} (\nabla \tilde{v})^{2} \} - (c_{w1}f_{w}) (\frac{\tilde{v}}{d})^{2}$$
(9)

其中基本的附加关系式为:

$$\widetilde{S} = S + \frac{\widetilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}$$

$$v_t = \widetilde{v} f_{v1}$$
(10)

关于 Spalart-Allmaras 一方程模型的其他具体参数,可参考文献[7],这里就不再赘述。DES-SA 采用的输运方程的形式与上面的一方程模型相同,只是对于 d 做了如下的替换:

$$\tilde{d} = \min(d, C_{DES}\Delta)$$
 (11)
其中 $\Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z), C_{DES} = 0.65$ 是模型常数。
当在壁面附近时, $d < C_{DES}\Delta$,湍流模型为 S-A 一方程
模型,而在远离壁面的区域, $d > C_{DES}\Delta$,湍流模型变
换为亚格子模型。

1.4 基于混合长度的 DES 模型(DES-ML)

混合长度湍流模型如 Baldwin-Lomax 模型(B-L模型)的内层模型与 Smagorinsky 亚格子模型很相似,因此两者混合就成为一种比较好地构造 DES 模型的方式。有许多学者都做过这方面的工作^[8,9]。张涵信院士在分析现有算法后,提出一种基于混合长度模型的算法,其构造过程如下:

在壁面附近,采用 B-L 模型的内层模型:

$$v_t = l_m^2 |\Omega_{ii}| \tag{12}$$

而在远离壁面的位置,采用亚格子应力模型。为了更清楚的理解亚格子模型在这里的应用情况,我们对式(2)中得到的亚格子应力项进行分析。

对于滤波运算,我们有: $u_i = \tilde{u}_i + u''$,将其代人到 $\tau_{ii}^{sgs} = \widetilde{u_i u_i} - \widetilde{u_i} \, \widetilde{u_i} \, + , 并进行 Leonard 分解^[8]:$

$$\widetilde{u_{i}u_{j}} - \widetilde{u}_{i}\widetilde{u}_{j} = \underbrace{(\widetilde{u}_{i} + u_{i}^{"})(\widetilde{u}_{j} + u_{j}^{"})}_{(\widetilde{u}_{j} + \widetilde{u}_{j}u_{i}^{"} + \widetilde{u}_{i}\widetilde{u}_{j} - \widetilde{u}_{i}\widetilde{u}_{j}}_{= \widetilde{u}_{i}u_{j} + C_{ij} + L_{ij}}$$

$$= R_{ij} + C_{ij} + L_{ij} \tag{13}$$

上面的式子中:

$$R_{ij} = \widetilde{u_i u_j^r}$$

$$C_{ij} = \widetilde{u_i u_j^r} + \widetilde{u_j u_i^r}$$
(14)

$$L_{ij} = \widetilde{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} - \widetilde{u}_i \tilde{u}_j$$

 R_{ij} 称作亚格子应力项, C_{ij} 称作交叉项, L_{ij} 称作 Leonard 应力项。如果采用某些滤波算子,交叉项和 Leonard 项是可以忽略的,余下的亚格子应力项,可

采用亚格子应力模型进行求解。但更一般地,由于两 次滤波效果与一次滤波效果的并不相同[10],Leonard 应力项就不可以忽略。有鉴于此,张涵信院士提出了 带 Leonard 应力项的亚格子模型:

$$\tau_{ij,c\Delta}^{\text{sgs}} = (c\Delta)^2 \left| \Omega_{ij} \right| S_{ij} + \frac{1}{12} \Delta^2 \nabla u_i \nabla u_j \qquad (15)$$

上式中第一项为类 Smagorinsky 亚格子应力模型,第 二项 $\frac{1}{12}\Delta^2 \nabla u_i \nabla u_j$ 为 Leonard 应力项^[11]。在实际计 算中考虑到 Smagorinsky 模型具有较大的耗散性[12], 可适当减小模型系数 c,在本文计算中 c 取 0.1。

2 例

2.1 混合格式基础算例验证

将上面得到的混合格式应用到二维的层流平板 和二维的方腔流动的计算中,验证其可行性。

(1) 二维层流平板

这里采用的二维层流平板算例的计算域大小为: 上边界离平板距离为5,平板长度为1,平板前增加长 度为1的对称面。平板上边界采用的边界条件为压 力为无穷远处压力值,速度外插;平板表面采用无滑 移固壁条件;平板前有长度为1的对称面;来流条件 为速度为给定值,压力插值;出口边界速度插值,压力 由初始条件给定。计算网格为 97×97, 网格在壁面 和平板前沿作指数压缩,其中法向距离的最小值为 0.0006,流向距离最小值为 0.009。得到的计算结果 如下,可以看出两种格式在距平板前沿 0.9 处的速度 型与 Blasius 解符合得很好。

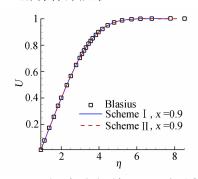


图 5 层流平板速度型与 Blasius 解比较 Fig. 5 The comparison betweenthe computation

and Blasius' similarity solution

(2) 二维方腔流动

这里采用的边长为1的方腔,四周都是无滑移固 壁,顶部以单位速度匀速向右移动。计算所用的网格 为81×81,网格在壁面附近做指数压缩,最小网格间 距为 0.0022。我们计算 Re = 5000 时的情况,虚拟压 缩系数取1。这个问题几何外形简单,是很多文献采 用的标准算例,Rogers^[5]的工作被认为具有较高的 精度。

从图 6 和图 7 可以看出,在Re=5000 时,两种格 式都清楚地分辨出了方腔流动中的主涡和角上的小 涡,对于右下角的二次涡也能清楚地分辨。在图 8 和 图 9 中的速度 U、V 在中心线附近的分布,图中可以 明显的看出在方腔中心附近速度是呈线性分布,在靠 近壁面附近,中心涡与壁面发生相互作用,引起一些 速度型的改变。总的来讲无论是流线图还是中心线 附近速度曲线都与文献的结果符合的比较好,达到了 预期的目的。



混合格式,Scheme I,流线图

Fig. 6 Streamlines using hybrid scheme I

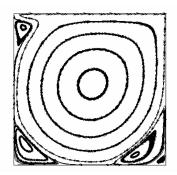
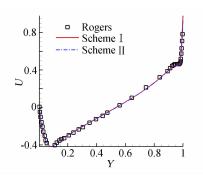


图 7 混合格式, Scheme II, 流线图 Fig. 7 Streamlines using hybrid scheme II



混合格式,X=0.5,U的分布 The comparison about the U distribution along Y, at X=0.5

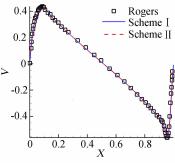


图 9 混合格式,Y=0.5,V 的分布 Fig. 9 The comparison about the V distribution along X, at Y=0.5

2.2 利用 DES-ML 和 DES-SA 模拟圆柱绕流

圆柱绕流是检验程序非定常计算能力的经典算例,也是验证 DES 模型经常采用的算例,被许多学者所采用^[13]。计算所采用的雷诺数是 Re=3900,采用的具体的计算参数为:圆柱采用单位 1 直径的圆柱,展向宽度为 3。网格为 O 型网格,流向网格 100,径向网格 100,展向分布 30 个点,在靠近壁面处进行指数加密,径向的第一个网格点离壁面的距离为 1×10⁻⁴。圆柱表面采用无滑移固壁;展向采用周期边界条件;进口速度为给定值值,压力外插,出口为速度外插,压力为给定值。计算所用的时间为 0.01 个单位时间,每 100个单位时间对物理量在展向和时间上求平均,得到平均流场。图 10 是瞬时涡量等值面图,图 11 到图 14 为模拟所得的平均流场与实验值的对比结果。

图 11 表示沿圆柱表面压力系数 C_p 。参考值采用 Norberg [14] 的实验结果。图中可以看出,虽然 DES-ML 在分离点附近与实验值有一定差距,但在分离后与实验值符合得很好。图 12 表示沿尾迹中心线上,流向速度 U 的分布。参考值采用 $Ong^{[15]}$ 和 $Lourenco^{[16]}$ 的实验结果。从图中可以明显看出,流场在离开圆柱壁面附近位置出存在一个回流区,但随着离圆柱距离的变大,回流区最终消失。DES-ML

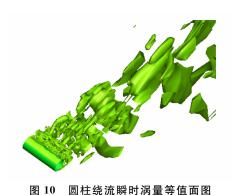
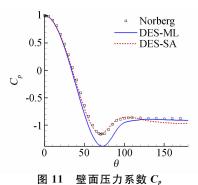


图 10 图性统机解的闲里等值阅图 Fig. 10 The instantaneous iso-surface of vorticity



g. 11 The pressure coefficient on the cylinder surface

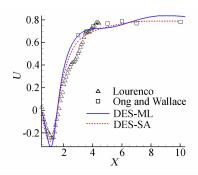


图 12 沿尾迹中心线流向速度分布 Fig. 12 The distribution of streamwise velocity on the center line in the wake of the cylinder

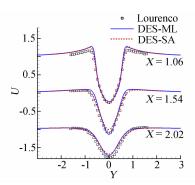


图 13 在尾迹不同位置流向速度分布 Fig. 13 The distribution of streamwise velocity at different locations in the wake of the cylinder

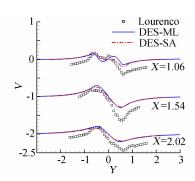


图 14 在尾迹不同位置法向速度分布 Fig. 14 The distribution of cross-flow velocity at different locations in the wake of the cylinder

较为准确地反映出了这一物理实际。图 13 和图 14 分别表示的是在尾迹不同位置处 (X=1.06, X=1.54, X=2.02),沿 y 方向流向速度和法向速度的分布情况,这里参考的实验值为 Lourenco 的工作。在图 13 中,可以看到流向速度 U 的速度型在尾迹上基本呈现一个 V 型的分布,但离开圆柱表面越远,这个 V 型的分布就会越来越圆滑。图 14 中,值得注意的是,在 X=1.06 的位置处,DES-ML 明显优于 DES-SA,它准确捕捉到了在尾迹中法向速度 V 的更加细微转折。总体而言,从这两图中可以看出 DES-ML 在平均速度型方面的表现比较好,能够准确地计算出圆柱尾迹不同位置处的平均速度型,与实验值也符合得比较好。

3 结 论

本文通过引入修正波数的概念,对原有的三阶迎风偏置格式进行了改造,提出了一类混合型三阶格式,该格式可以通过调节权值来控制在中高波数附近的耗散特性,并利用 DES-ML 和 DES-SA 方法对圆柱绕流进行了模拟,得到如下结论:

- (1)通过改造原有的三阶迎风偏置格式,得到一种耗散可调混合型格式。关于格式耗散水平的调节, 文中给出了推荐的范围,但并不是绝对的。在具体使用中,可以根据计算的具体情况,在保证稳定性的前提下进行调节选取适合的耗散水平。
- (2)利用得到的混合型格式对平板和方腔两个基础算例进行初步计算,取得了比较好的效果,表明该格式可以用于低速流场计算。
- (3)利用 DES-ML 对圆柱绕流进行了模拟,得到的结果与实验结果符合较好。尾迹区不同位置处的法向速度分布比较表明,相比 DES-SA, DES-ML取得与实验更为接近的结果。

参考文献:

- [1] CHAPMAN D. Computational aerodynamics development and outlook[A]. AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib., New Orleans La[C]. 17th, New Orleans, AIAA-1979-129.
- [2] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, et al. A new version of detached eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities[J]. Theoretical and Computational

- Fluid Dynamics, 2006, 20(3): 181-195.
- [3] MENTER F R, KUNTZ M, BENDER R. A scale-a-daptive simulation model for turbulent flow predictions [A]. AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib[C]. 41st, Reno, AIAA-2003-0767.
- [4] BATTEN P, GOLDBERG U, CHAKRAVARTHY S. LNS-an approach towards embedded les [A]. AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib [C]. 40th, Reno, AIAA-2002-0427.
- [5] ROGERS S.E., KWAK D. An upwind differencing scheme for the incompressible Navier-Stokes equations [J]. Applied Numerical Mathematics, 1991, 8(1): 43-64.
- [6] LELE S K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 103(1): 16-42.
- [7] SPALART P R, ALLMARAS S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[J]. La Recherche Aerospatiale, 1994, 1, 5-21.
- [8] 袁先旭,邓小兵,谢显飞,等.超声速湍流流场的 RANS/LES 混合计算方法研究[J].空气动力学学报, 2009,27(6):723-738.
- [9] 肖志祥,陈海昕,李启兵,等. 采用 RANS/LES 方法研究分离流动[J]. 空气动力学学报,2006,24(2):218-221.
- [10] SAGAUT P. Large-eddy simulation for incompressible flows: An Introduction[M]. Springer Press, 1998.
- [11] LEONARD A. Energy cascade in large-eddy simulation of turbulent fluid flows[J]. Advances in Geophysics. 1974, 18: 237-248.
- [12] 张兆顺,崔桂香,许春晓.湍流大涡数值模拟的理论和应用「M、清华大学出版社,2008,1.
- [13] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D = 3900[J]$. *Physics of Fluids*, 2000, 12(2): 403-417.
- [14] NORBERG C. An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: Influence of aspect ratio[J].

 Journal of Fluid Mechanics, 1994, 258: 258-287.
- [15] ONG L, WALLACE J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder [J]. Experiments in Fluids, 1996, 20(6): 441-453.
- [16] LOURENCO L M, SHIH C. Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder. (private communication, 1993, data taken from Ref. [13]).

A hybrid third order scheme and the comparative investigations on two DES methods by computations

SUN Dong¹, CHEN Jiang-tao¹, LI Qin^{1,2}, ZHANG Han-xin^{1,2}

- (1. China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;
- 2. National Laboratory of CFD, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to make numerical simulations using Detached-Eddy Simulation (DES) hybrid method, a third-order hybrid scheme has been proposed on the basis of the traditional third-order upwind-biased scheme. The dissipation of the new hybrid scheme can be adjusted in moderate and higher band of the scaled wave number. Based on the aforementioned works, comparative numerical studies have been made on two RANS/LES hybrid methods, i. e., DES-SA based on the S-A turbulent model and DES-ML based on the mixing length model. The computations choose the low-speed flow around three-dimensional cylinder as an example, while using several difference schemes including the developed third-order scheme. Comparisons have been made between the obtained results and that from references, and discussions have been made about the new hybrid scheme and DES-ML method also.

Key words: RANS/LES hybrid method; modified wave number; hybrid scheme

(上接第 472 页)

On a class of center-typed third order difference scheme orienting to engineering utilizations

LI Qin^{1, 2}, SUN Dong¹, ZHENG Yong-kang², ZHANG Han-xin^{1, 2}

(1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China;

2. National Computational Fluid Dynamics Laboratory, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing

Abstract: Techniques are developed for the construction of difference schemes by analyzing their dissipation relations and using re-linearizing process; A center-typed third order nonlinear scheme is presented, which has the equivalent grid stencil as the NND scheme. Because the linear part of the scheme has well performance about the dissipative characteristics, and the linear form of it will be preferred as far as possible due to the re-linearizing technique, the improvement will be obtained theoretically on the resolution and maitainance ability about the vortices in computations; On the other hand, the scheme will change back into NNDlike scheme by the nonlinear procedure when encoutnering non-smooth region, and the dissipation and stability mechanism will be brought into action. The validating computations show that, the scheme can be used in computations containing vortices and perturbations with viscosity, and the simple form of the algorithm makes it easily utilized in engineering purpose and extended to finite volume method.

Key words: NND scheme; weighted scheme; vortex; heat flux