DOI：10.7527/S1000-6893.2013.0522

航 空 学 报 Jan. 25 2014 Vol.35 No.X: XX-XX
Acta Aeronautica et Astronautica Sinica ISSN 1000-6893 CN 11-1929/V
http://hkxb.buaa.edu.cn hkxb@buaa.edu.cn

doi：10.7527/S1000-6893.2013.0522

基于当地流动结构的 RANS/LES 混合模型

徐晶磊[1]，高歌[1]，杨焱[2,*]

1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力国家科技重点实验室，北京 100191
2. 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：针对传统RANS/LES混合模型固有的RANS和LES区域衔接难题，借鉴Vreman提出的代数涡粘模型（Phys. Fluids, 2004,16(10):3670），提取其中描述流动状态的判断函数，利用不可压缩槽道湍流标定模型系数，构造了一个新的RANS/LES混合模型。评估算例包括不可压槽道湍流、稳态超声速平板边界层、NACA4412翼型绕流和亚临界雷诺数圆柱绕流。该模型作为壁面模化LES，解决了传统RANS/LES方法中速度型偏离对数律的缺陷，且拓宽了原Vreman模型在粗糙网格上的适用性，具有较高精度。该模型同时解决了模化应力折损问题，且对大尺度分离流动的模拟精度相较传统的RANS/LES混合模型如分离涡模型（DES）有进一步提升。

关键词：湍流模型；混合RANS/LES方法；大尺度分离；大涡模拟；分离涡模拟

中图分类号： V211.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-6893（2014）XX-XXXX-XX

大尺度分离湍流的精确预测一直是RANS难以应付的难题，为了解决这个问题，1997年Spalart[1]在SA模型的基础上发展出了DES(Detached Eddy Simuation)。DES在网格长细比很大的边界层内采用壁面距离作为长度尺度，在网格趋向于各向同性的大尺度分离区域用网格尺度作为长度尺度，其本意是用RANS模型模化整个湍流边界层，而用LES模拟远离壁面的大尺度分离区域，从而改善了RANS计算大尺度分离的精度。然而上述的理想状态难以实现，只因DES通过壁面距离与网格间距的关系对RANS和LES进行二选一。当平行于壁面的网格间距小于边界层厚度时（对应着网格加密或者边界层厚度增加），LES会入侵到边界层内，DES会表现出一些不恰当的行为。因此对厚边界层和小尺度分离，DES模型不适用，此时计算并未失稳，模型中激活后的LES计算的湍流应力偏低，出现了模化应力折损(Modeled Stress Depletion)的缺陷。有研究者倾向于将流向和展向的网格做的很密，把DES用作LES的近壁模型，这是一种可行的方法，但这并不是DES的初衷；由于网格不够密或者失稳被推迟，或者说由于RANS和LES天然就是两种不同性质的方法，文献[2]的计算未产生足够的“LES脉动”从而导致边界层内速度型偏离对数律(Log-Layer Mismatch, LLM)。

总之，DES的主要缺陷之一在于RANS和LES的交界面经常位于边界层内，而LES区域脉动未被激活，即使激活也不足以替代模化的雷诺

收稿日期：2013-11-11；退修日期：2013-11-13；录用日期：2014-01-14； 网络出版时间： 2014-02-21 13:03
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7527/S1000-6893.2013.0522.html
基金项目：国家自然科学基金 (基金号 11002014)
*通讯作者. Tel.：010-82543976 E-mail: yangy@ustc.edu

引用格式：Xu J, Gao G, Yang Y. A RANS/LES hybrid MODEL BASED ON LOCAL FLOW STRUCTURE. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(x): xxx-xxx. 徐晶磊，高歌，杨焱. 基于当地流动结构的 RANS/LES 混合模型. 航空学报，2014, 35(x): xxx-xxx.

应力部分，会产生湍流内容不足的边界层，甚至产生非物理的分离。丁举春等[3]和孙明波等[4]对RANS/LES混合方法做了综述，同样提到了上述问题。

Spalart提出的DES是RANS/LES混合方法的先驱，近年来，RANS/LES混合方法逐渐成为湍流模拟的重要方法，其内涵不限于分离涡模拟(只求解分离涡)。随着混合方法研究的大量兴起，其性能也日趋完善。例如，Spalart等人[5]对DES进行一系列公式的修正后得出了DDES(Delayed DES)。DDES模型更符合提出DES的初衷，能够保证边界层（即使是厚边界层）内完全受RANS控制，而不阻止LES在大尺度分离区的激活，但若作为LES的近壁模型模拟附着湍流，DDES仍然没能解决速度型偏离对数律的问题。西北工业大学的宋科和乔志德[6]借鉴DDES的附面层延迟控制思想，构造了SA与Smagorinsky亚格子模型混合的Delayed RANS/LES模型，计算了GA(W)-1多段翼的大迎角绕流，避免了模化应力折损。国防科学技术大学的汪洪波等[7]构造了SA与一方程Yoshizawa亚格子模型的混合RANS/LES模型，使用的是混合函数，克服了DES依靠网格控制模型转换的缺点，能够保护模型在附着边界层的RANS特性。清华大学的肖志祥和符松[8]用基于可压缩修正SST的DES和DDES[5]模型计算了3个钝尾体，它们在非稳定区域的计算精度相当，都好于SST模型。最近，北京大学陈十一课题组提出的带约束条件的大涡模拟(Constrained LES, CLES)[9]新模型，克服了传统RANS/LES近壁区缺少小尺度脉动的缺陷。总之，为了提高湍流计算精度，对DES的应力折损缺陷的改进是相当必要的。

鉴于绝大部分混合模型都是利用人工参数控制RANS与LES开关，本文受Vreman2004年文章[10]的启发，从纯物理的角度，设计RANS/LES物理开关的函数，构造出了一个新理念RANS/LES混合模型。

1 模型形式

2004年Vreman提出了一个涡粘SGS模型，该模型的构造元素主要是速度的一阶导数，不含任何显式的滤波、平均或对中途计算结果的剪辑，并且在各向同性滤波尺度下是坐标旋转不变的。从形式上看，它并不比Smagorinsky涡粘模型复杂多少，计算精度却总是高于Smagorinsky涡粘模型，与标准动态亚格子模型接近，并且能用于转捩的计算。下面先给出它的构造形式：

$$\nu_t = c\Delta_m^2\sqrt{\frac{B_\beta}{\alpha_{ij}\alpha_{ij}}} \tag{1}$$

其中，

$$a_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \tag{2}$$

$$\beta_{ij} = \alpha_{mi}\alpha_{mj} \tag{3}$$

$$B_\beta = \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}^2 + \beta_{11}\beta_{33} - \beta_{13}^2 + \beta_{22}\beta_{33} - \beta_{23}^2 \tag{4}$$

模型常数 $c \approx 2.5C_S^2$，C_S 是Smagorinsky模型常数，原文中取为0.17。Vreman模型具有如此良好的性能，离不开它的构造理念。理论上亚格子耗散为：

$$D_t = -\tau_{ij}a_{ij} = -\tau_{ij}S_{ij} \tag{5}$$

对LES，湍流耗散不仅仅是亚格子耗散，还有空间导数与滤波的交换误差，模型中忽略交换误差的影响从而仅从 D_t 出发优化亚格子模型。在层流区域，亚格子耗散 D_t 应当为0，这是构造Vreman亚格子模型的核心思想。Vreman以平均速度梯度是否为0为判据，将可能存在的流动分为320种，并寻找到了其中13种满足亚格子耗散为0的流动。理想的涡粘性系数公式在这13种流动中的值也应当为0；而 $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 这一常常被用来构造亚格子模型的元素仅在所有速度梯度为0 的情形下才为0，显然不适合用来构造亚格子模型。Vreman发现 B_b 与亚格子耗散的行为完全一致，并推导出以它为元素的亚格子模型公式。实际上，这13种亚格子耗散为0的流动描述了所有的层流流动。研究发现，在层流区域，Vreman涡粘系数自动降为0，因此可以被用来计算转捩。

从另一方面来看，B_b 既然可以被用来判断流动的层流/湍流形态，就能够用来作为RANS/LES混合模型中选择RANS和LES的判据。Vreman模型是个LES模型，其湍流区域是存在拟序结构的。RANS的流场是雷诺平均的流场，它所模拟出的流动不希望有拟序结构，是类层流的，所以在该函数判断的“层流”区域就用

RANS模化湍流的全部脉动；一旦流动出现拟序结构而被该函数捕捉到时，用RANS就不合适了，要启动LES，开放网格对拟序结构的解析，并用亚格子模型模化无法解析的小尺度脉动。这种混合虽然丢失了计算转捩的特性，却能够十分经济地模拟出湍流边界层，并且在LES中植入RANS也有助计算的稳定，特别有助于高雷诺数计算。利用 B_b，这里构造出基于SA模型的RANS/LES混合模型，可保证无拟序结构的边界层完全受RANS控制。原SA模型输运方程为：

$$\frac{\partial \hat{\nu}}{\partial t}+u_j\frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j}=C_{b1}[1-f_{t2}]W\hat{\nu}+\frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+(1+C_{b2})\hat{\nu})\frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j}\right]-\frac{C_{b2}}{\sigma}\hat{\nu}\frac{\partial^2 \hat{\nu}}{\partial x_j^2}+\left\{C_{b1}\left[(1-f_{t2})f_{v2}+f_{t2}\right]\frac{1}{k^2}-C_{w1}f_w\left(\frac{\hat{\nu}}{\tilde{d}}\right)^2\right\} \tag{6}$$

其中 $\tilde{d}$ 。 d 为壁面距离，它是SA模型的长度尺度。为了构造混合模型，需要修正长度尺度。Vreman亚格子模型是以Smagorinsky模型为蓝本的，它们的涡粘性系数比值为：

$$\gamma_0=\left(2.5\left(C_s\Delta_m\right)^2\sqrt{\frac{B_\beta}{\alpha_{ij}\alpha_{ij}}}\right)/\left(\left(C_s\Delta_m\right)^2\Omega\right)=2.5\left(\frac{B_\beta}{\alpha_{ij}\alpha_{ij}}\right)^{1/2}/\Omega \tag{7}$$

无量纲参数 g_0 正是Vreman模型性能优越的体现。通过类比， 本文提出的RANS/LES混合模型长度尺度构造如下：

$$\begin{cases} g\le g_1, & \tilde{d}=d \\ g_1<g<g_2, & \tilde{d}=\dfrac{g-g_1}{g_2-g_1}gC_{DES}\Delta+\left(1-\dfrac{g-g_1}{g_2-g_1}\right)d \\ g\ge g_2, & \tilde{d}=gC_{DES}\Delta \end{cases} \tag{8}$$

式(7)、(8)中，

$$\Delta_m\equiv(\Delta_x\Delta_y\Delta_z)^{1/3},\quad \Delta\equiv\max(\Delta_x,\Delta_y,\Delta_z) \tag{9}$$

$$g=\Delta_m/\Delta\sqrt{g_0},\quad C_{DES}=0.65 \tag{10}$$

$$g_1=0.1,\quad g_2=0.2 \tag{11}$$

$$B_\beta=\beta_{11}\beta_{22}-\beta_{12}^2+\beta_{11}\beta_{33}-\beta_{13}^2+\beta_{22}\beta_{33}-\beta_{23}^2 \tag{12}$$

$$\beta_{ij}=\alpha_{mi}\alpha_{mj} \tag{13}$$

$$\alpha_{ij}=\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \tag{14}$$

考虑到机器浮点运算的误差，Vreman用 B_b 作为判据，B_b 大于10^{-8}时判断流动为层流，否则为湍流态。g 是 Vreman 亚格子粘性与Smagorinsky亚格子粘性之比，这一无量纲参数应当更加合适作判断参数。公式(8)中，g_1 和 g_2 作为 g 的上下限来判断流动是否为湍流态，其取值是经过槽道湍流LES的大量标定和优化的。在稳态的粘性子区，g 的量级总是在10^{-3}左右，过渡区起始，大约总在0.1左右，定为 g_1，此判据在非LES的计算中更为安全；过渡区域结束经验标定为0.2，即 g_2。粘性子区，认为流动未出现湍流结构或者结构很少，采用RANS的混合长d；过渡区域介于RANS和LES之间，用一个过渡函数计算混合长；过渡区域之外的惯性子区，湍流得到充分发展，激活亚格子模型。亚格子模型的系数，仍然用DES的原系数0.65，经过大量计算测试发现，该系数的性能基本为最优。值得一提的是公式(9)中的 Δ_m，为了优化模型性能，应该使用不同方向上的网格单元长度，m作为标号，但为了保证坐标不变性，还是使用了加权平均的单元尺度。

2 评估算例

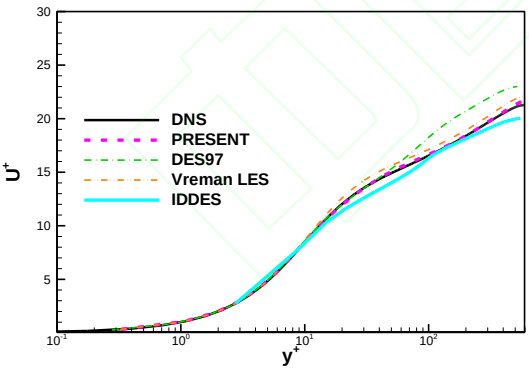
本文中，槽道流动的计算是用一个不可压缩流动求解器完成的。时间推进为三阶Runge-Kutta，空间格式为二阶中心差分。其他算例是用一个三维结构网格有限体积可压缩流动求解器完成的，对于稳态流动，时间格式为一阶隐式时间推进；对于非稳态流动，时间推进为二阶的双时间步法。该可压缩流动求解器的空间格式为Roe格式，MUSCL插值到三阶。

2.1 不可压缩槽道流动

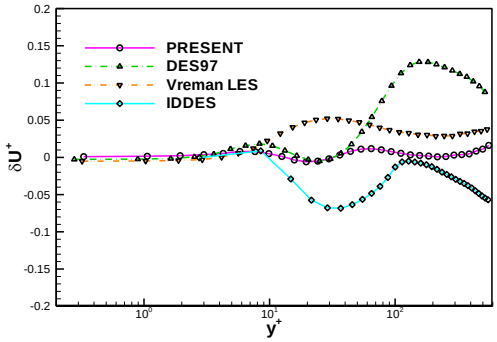
Spalart的DDES模型仅仅解决了模化应力折损问题，若将其作为壁面模化LES(WMLES, Wall modeled LES)，却仍解决不了速度型偏离对数律的问题，这是因为该模型使用的是壁面距离相关的R函数，而LES流动结构太丰富，该函数无法控制。本文开启或关闭LES依据的是湍流结构的出现，是贴合RANS/LES混合方法的本意的，所

以具有解决速度型偏离对数律的潜力。

槽道流动是WMLES的基准算例，流向、法向和展向的计算域分别为2π，2和π，网格为64×64×32。计算的工况Re_τ为590和2000，这样的雷诺数下，该网格已经粗糙到不足以支持足够的LES脉动，必须在近壁用RANS模化。图1的计算结果表明，Re_τ = 590时Vreman LES在近壁已经产生不了足够的脉动结构，因此速度型向上平移，但对数区域的脉动是足够的，这一点可以从斜率看出。而DES则因为近壁有了RANS的支持，与DNS贴合较好，但由于突然的LES转换，产生的脉动结构在对数区域严重不足，使得斜率大增。新模型则解决了这两个问题，与DNS几乎完全重合。图2中Vreman LES严重偏离DNS，这是因为这样的工况下网格已经相当粗糙，不过可以看出，y^+ > 100后的网格对脉动结构的支持还是足够的。在Re_τ = 590时本文模型的结果与DNS最为贴近。在Re_τ = 2000时，计算的网格对LES显得过于稀疏，但提供了一个极限的测试环境。本文模型的计算精度稍逊于Shur等人对DES的改进版IDDES[11]，分析这两个模型的模化应力后发现，IDDES会将LES的启动推迟，这就是为什么在高雷诺数时对LLM现象的控制好于本文的模型。本文的模型兼顾了计算的精度和对粗糙网格的容忍度。



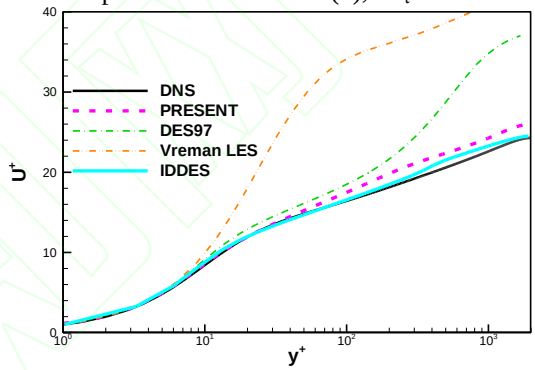
(a)



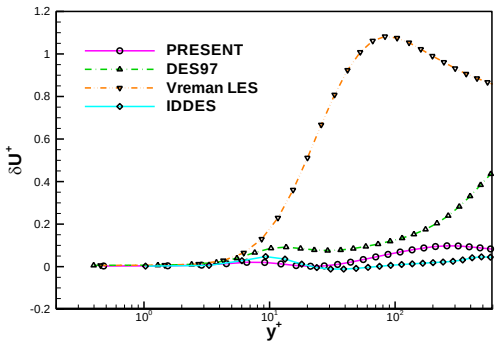
(b)

图1 速度剖面（上）及相对误差δU^+（以DNS数据为基准）（下），Re_τ= 590

Fig. 1 Velocity profile (a) and the relative error with respect to the DNS data (b), Re_τ= 590



(a)



(b)

图2 速度剖面(a)及相对误差δU^+（以DNS数据为基准）(b)，Re_τ = 2000

Fig. 2 Velocity profile (a) and the relative error with respect to the DNS data (b), Re_τ = 2000

2.2 稳态的超声速平板边界层

该混合模型是相对于DES的改进，要保证对任意的网格形态都能保证边界层的稳态区域完全受RANS的控制。非常自然地，本节选取平板边界层作为检验模型是否满足这一要求的基准算例。计算工况取中科院力学所高慧等[12]的DNS工

作，来流Ma_∞ = 2.25，Reynolds数Re = 63500/in。不同于DNS，这里采用二维网格定常计算。网格流向×法向为257×49，采用多重网格法加速收敛，经过van Direst变换

$$u_{vd}^{+}=\int_0^{u^+}\left(\rho/\rho_{wall}\right)^{1/2}du^{+} \tag{15}$$

后的速度型分布见图3，DES预测的速度型相对于SA湍流模型上扬，表明此时RANS与LES的交界面位于边界层内部，这降低了涡粘性系数从而导致了模化应力折损。而DDES的结果与SA模型完全重合，表明该模型的判据确实能够保证稳态边界层完全受RANS控制。

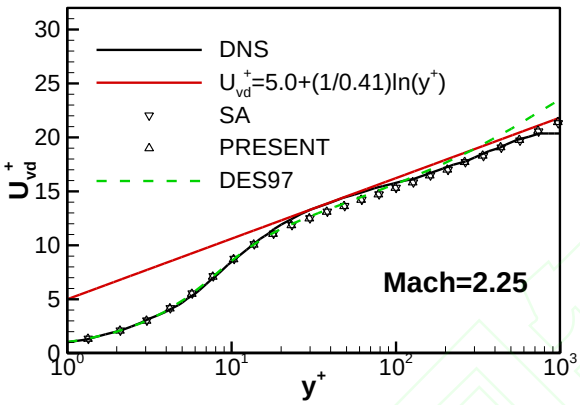
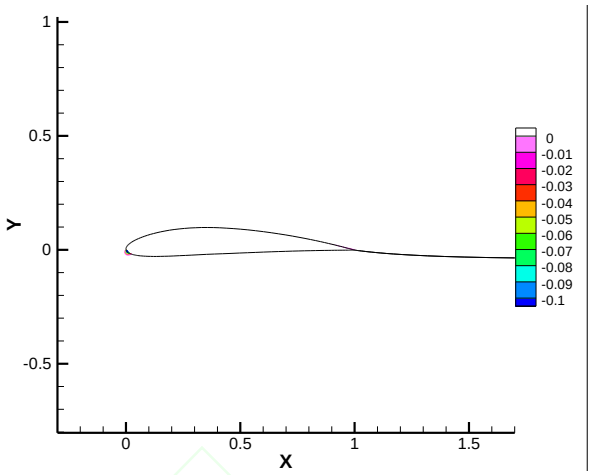


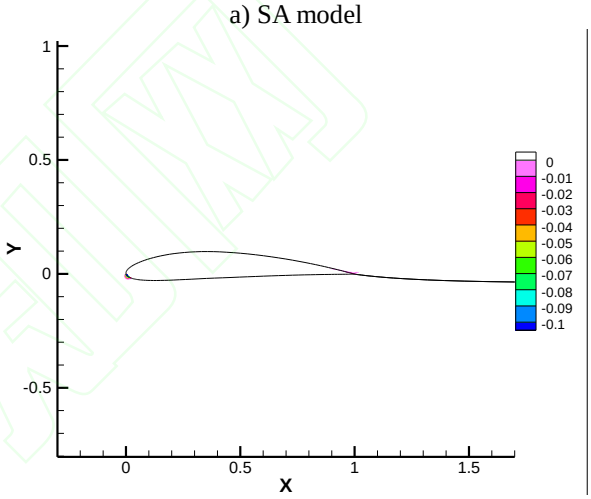
图3 x=8.8in处平均速度剖面沿法向分布
Fig. 3 Stream-wise velocity profile at x = 8.8 in

2.3 11°攻角的NACA4412翼型绕流

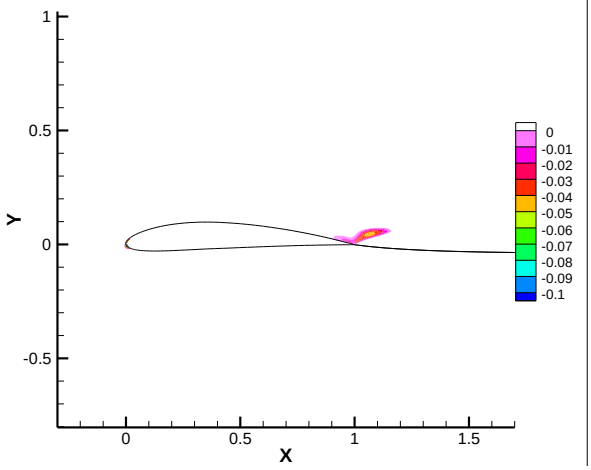
NACA4412翼型的计算网格流向和法向分别为257和81，展向长度为1，设置151个网格点，这是为了保证展向网格间距与流向的相当。这样的密网格下，RANS到LES的切换可能发生在边界层内，会产生非物理的边界层分离[13]。图4显示的是流向速度云图，负的来流速度表示分离区，可见SA模型计算结果无分离，而DES由于应力预测偏低而产生很大的分离区。本文模型产生非常狭窄的分离区，但相比DES可忽略，这是因为攻角已接近临界攻角，流动有失稳的趋势，模型的判断因子起作用而导致的。图5显示的是涡粘性系数云图，DES的涡粘性系数分布范围比SA和本文模型窄，同时大小也降低了，这就是后缘产生分离的原因所在。此时RANS的计算精度比小攻角时已有降低，采用三维的非稳态计算应能得到更准确的预测结果。



a) SA model

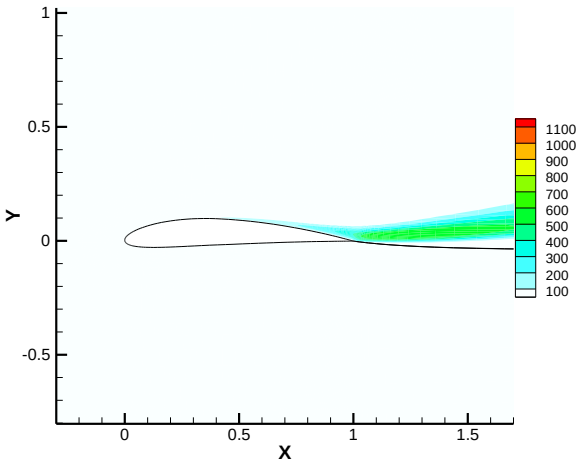


b) Present model

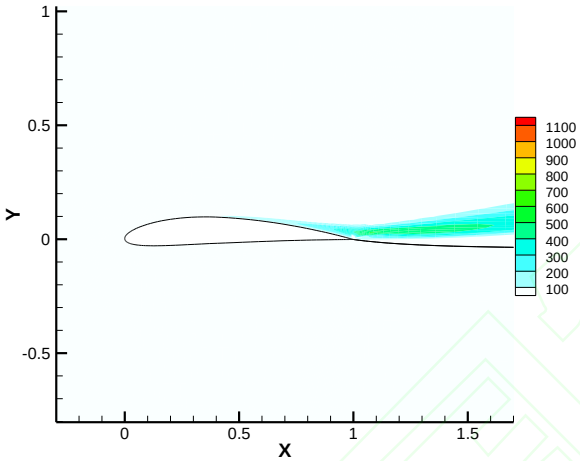


c) DES model

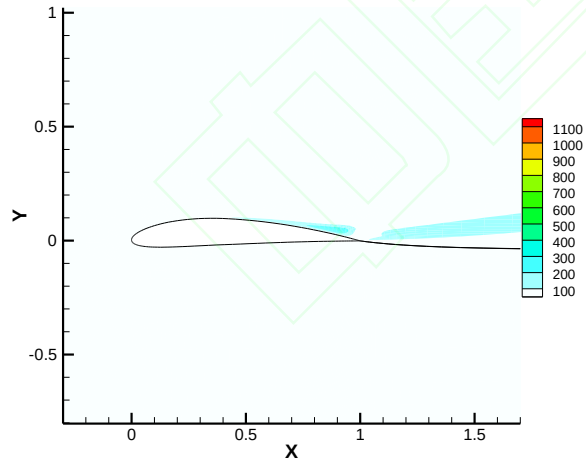
图4 流向速度分布云图
Fig.4 Contours of velocity profile



a) SA model



b) Present model



c) DES model

图5 涡粘性系数ν_t分布云图

Fig.5 Contours of eddy-viscosity

2.4 亚临界雷诺数圆柱绕流

本文模型作为对DES的改进，对大尺度分离流动也应能提供恰当的LES功能。本文选取基于圆柱直径D的雷诺数$Re_D = 3900$的圆柱绕流为评估算例。当$350 < Re_D < 2\times10^5$时，圆柱绕流位于“亚临界区域”，此时边界层层流分离，转捩沿着自由剪切层发生。圆柱展向长度取为$2D$，展向网格数为65，尾迹进行网格加密，总网格量约为85万。为了再现分离前的层流边界层，要使来流湍流度很小，设置入口涡粘性系数与层流粘性系数之比为10^{-3}。

图6给出圆柱表面上压力系数分布。若无特殊说明，所有的计算都在上述网格量为85万的中等网格上进行，用(M)标记，(F)表示在三个方向上都加密$\sqrt{2}$倍的网格上计算的结果。DNS的结果取自文献[12]。图中清晰可见，用DES和本文模型计算的结果都比较贴近DNS，并且在中等网格上用本文模型计算的结果好于DES；而网格加密后，DES的计算结果往本文模型结果上靠拢，说明本文模型确实提升了DES的计算精度，这主要归功于Vreman亚格子模型的引入。

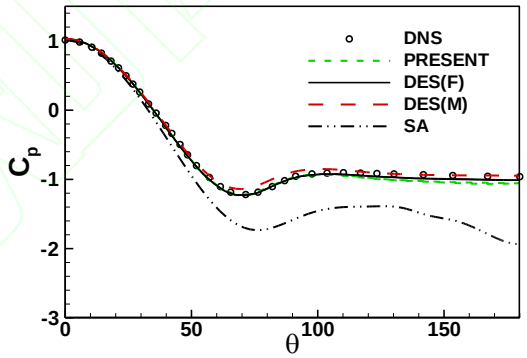
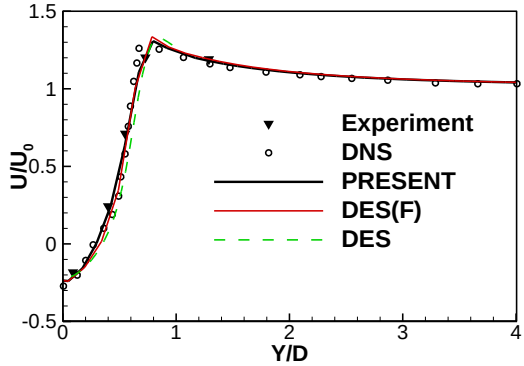
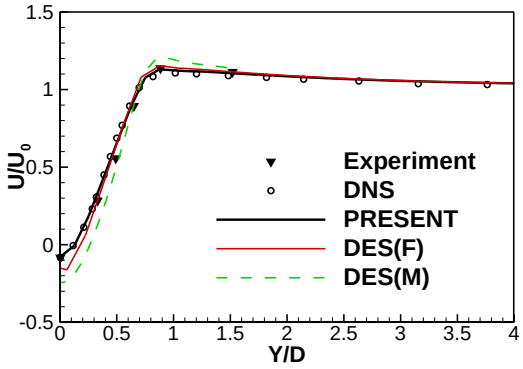


图6 压力系数沿圆柱表面分布

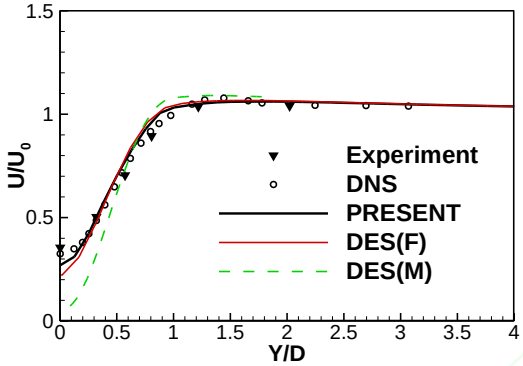
Fig. 6 Pressure coefficient on the cylinder surface



(a) x/D=1.06



(b) x/D=1.54



(c) x/D=2.02

图7 不同x/D站位流向速度沿y向的分布

Fig. 7 Streamwise velocity profiles along y axis at different x/D

圆柱绕流尾迹流向平均速度分布见图7，加密后的DES计算结果同样往本文模型的结果靠拢，并且在近尾迹区，本文模型的计算结果与DNS[15]和实验[16]都符合得非常好，甚至要好于密网格上DES的计算结果。

3 结 论

从亚格子耗散角度出发构造亚格子模型是一种新颖而符合物理的想法，Vreman推导出的亚格子模型不仅能够用作转捩的计算，计算精度也大大超越一般的涡粘Smagorinsky模型。由于其中的参数可以用来判断湍流结构的有无，非常自然地，可以用来作为混合模型的RANS和LES交界的判断依据，构造适用于高雷诺数计算的RANS/LES混合模型。本文构造的这种RANS/LES混合方法有如下特征：

(1) 可保证无拟序结构的边界层完全受RANS 控制并允许非稳态结构的猝发，达到RANS/LES混合的理想状态，而且在非稳态区域的计算精度大大超越DES。

(2) 本文提出的RANS/LES模型若作为LES的近壁模型模拟附着湍流，也可解决速度型偏离对数律问题，拓宽了LES模型的应用范围。

参 考 文 献

[1] Spalart PR, Jou W H, Strelets M, et al. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In Liu C, Liu Z. Advances in DNS/LES. Columbus, Ohio: Greyden Press, 1997

[2] Hamba F. A hybrid RANS/LES simulation of turbulent channel flow [J]. Theor. Comput. Fluid Dyn., 2003, 16:387-403

[3] 丁举春，吴宗成，鞠胜军. 分离涡模拟方法的研究. 北京力学会第18届学术年会论文集, 2012:47-48

[4] 孙明波，汪洪波，梁剑寒，刘卫东，王振国. 复杂湍流流动的混合RANS/LES方法研究. 航空计算技术, 2011, 41(1):24-33

[5] Spalart PR, Deck S, Shur ML, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. Theor. Comput. Fluid Dyn., 2006, 20:181-195

[6] 宋科，乔志德. 多段翼型大迎角分离流动的Delayed RANS/LES 混合算法. 航空计算技术, 2009, 39(3):42-55

[7] 汪洪波，孙明波，吴海燕，王振国. 一种改进的类DES湍流模拟方法. 航空动力学报, 2011, 26(10):2167-2173

[8] Xiao ZX, Fu S. Studies of the unsteady supersonic base flows around three after bodies. Acta Mech. Sin., 2009, 25:471-479

[9] Shi YP, Xiao ZL, Chen SY. Constrained subgrid-scale stress model for large eddy simulation. Physics of Fluids., 2008, 20, 011701

[10] Vreman AW. An eddy-viscosity subgrid-scale model for turbulent shear flow: Algebraic theory and applications. Physics of Fluids, 2004, 16(10):3670-3681

[11] Shur ML, Spalart PR, Strelets MK, et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(6):1638-1649

[12] Gao H, Fu DX, Ma YW, et al. Direct numerical simulation of supersonic turbulent boundary layer flow. Chinese Physics Letters, 2005, 22(7):1709-1712

[13] Menter FR, Kuntz M. Adaption of Eddy-Viscosity

Turbulence Models to Unsteady Separated Flow Behind Vehicles. Proc. Conf. The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Busses and Trains, Asilomar, Ca, 2003

[14] Ma X, Karamanos GS, Karniadakis GE. Dynamics and low-dimensionality of a turbulence near wake. J. Fluid Mech., 2000, 410:29-65

[15] Lourenco LM, Shih C. Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder - A particle image velocimetry study. (private communication)

[16] Ong L, Wallace J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder. Exp. Fluids, 1996, 20(6):441-453

作者简介：

徐晶磊 男，博士，讲师，硕士生导师。主要研究方向：湍流模型，计算流体力学。

Tel: 010-82317403

E-mail: xujl@buaa.edu.cn

高歌 男，教授，博士生导师。主要研究方向：湍流，涡动力学，旋涡动力装置，真空能。

Tel: 010-82317412

E-mail: gaoge45@gmail.com

杨焱 男，博士，助理研究员。主要研究方向：计算流体力学。

Tel: 010-82543976

E-mail: yangy@ustc.edu

A RANS/LES hybrid MODEL BASED ON LOCAL FLOW STRUCTURE

XU Jinglei[1], GAO Ge[1], YANG Yan[2,*]

1. *National Key Laboratory on Aero-engines*, *School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

2. *State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Abstract: In order to overcome the inherent deficiency of traditional RANS/LES hybrid approach, 'the bridging problem of RANS and LES', a discriminating function extracted from the Vreman's SGS model (Vreman, Phys. Fluids, 2004, 16(10):3670), which was used to describe flow regimes, is employed to propose a new RANS/LES hybrid model. The model coefficients are calibrated by incompressible turbulent channel flows. The test cases include incompressible turbulent channel flows, stable-state supersonic boundary layer over flat plate, flow past NACA4412 airfoil and flow past a circular cylinder at subcritical Reynolds number. This new model not only is able to solve the Modeled-Stress-Depletion problem, but also greatly raises the accuracy, comparing to that of traditional RANS/LES hybrid approach, such as Detached Eddy Simulation (DES) in predicting large-scale unsteadiness. Furthermore, the model can also solve the Log-Layer Mismatch problem when RANS/LES hybrid is employed as wall modeled LES, extending the ability of Vreman's LES model in dealing with coarse meshes. The accuracy is greatly improved.

Key words: turbulence models; hybrid RANS/LES; large-scale separation; Large Eddy Simulation (LES); Detated Eddy Simulation (DES)

---

* Received：2013-11-11；Revised：2013-11-13；Accepted：2014-01-14；Published online：
URL：
Foundation item：National Natural Science Foundation of China (No. 11002014)
*Corresponding author. Tel.：010-82543976 E-mail: yangy@ustc.edu