

文章编号: 1000-4750(2016)12-0021-10

基于 k - kL 两方程湍流模式的尺度自适应模拟

李 钊, 陈海昕, 张宇飞

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: k - kL 两方程模式是一种对湍动能积分尺度输运方程模化的新型湍流模式, 具有尺度自适应模拟的特性, 能够在统一的表达形式下对流动进行定常和非定常数值模拟。引入可实现性修正, 在二维零压力梯度平板边界层中验证其影响, 进而选择典型流动的标准算例对这一模式进行较为全面的评估。通过三维 CRM 翼身组合体绕流算例验证了该模式应用于工程问题的实用性, 并考察了网格密度对计算精度的影响。在周期山的三维非定常计算中, k - kL 模式能够较好分辨流场中丰富的涡结构, 准确捕捉流动大规模分离区的位置和形状, 统计平均的表面摩擦力分布和速度场与实验和大涡模拟结果符合良好。上述计算展示了 k - kL 两方程模式在定常和非定常计算中的流动预测能力和工程应用潜力。

关键词: 计算流体力学; k - kL 湍流模式; 尺度自适应模拟; 雷诺平均 Navier-Stokes 方程; 非定常流动分离

中图分类号: V211.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.0385

SCALE ADAPTIVE SIMULATION BASED ON A K-KL TWO-EQUATION TURBULENCE MODEL

LI Zhao, CHEN Hai-xin, ZHANG Yu-fei

(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The two-equation k - kL turbulence model is based on the transportation equations of turbulent kinetic energy and the integral scale. It is characterized by the capacity of the scale-adaptive simulation, and thus the satisfactory prediction performance in both steady and unsteady flow simulations under a unified form. The present study aims at a comprehensive assessment of this model through classical flow test cases. A two-dimensional zero-pressure-gradient boundary layer case is used to validate the currently introduced realizable correction of this model. Steady computations of the three-dimensional CRM wing/body show its engineering applicability compared with the SA model and the SST model. A grid convergence study is included. In the unsteady computations with the k - kL model, massive separation flows over the periodic hills are well predicted with rich vortical structures. The time-averaged friction distribution and the velocity field are in good agreement with the experimental data and the previous Large Eddy Simulation results. All above demonstrates the advantage and potential of this turbulence model in both steady and unsteady flow simulations.

Key words: computational fluid dynamics; k - kL turbulence model; scale-adaptive simulation; Reynolds averaged Navier-Stokes equation; unsteady flow separation

近年来, 以雷诺平均 Navier-Stokes 方法 (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) 为代表的湍流数值模拟方法在航空航天领域取得了极大的

成功, 但 RANS 方法很难准确模拟流动大规模分离问题。尽管大涡模拟方法 (Large Eddy Simulation, LES) 可以较好处理此类问题^[1-4], 过高的计算量却

收稿日期: 2015-05-07; 修改日期: 2015-08-24

基金项目: 国家 973 项目(2014CB744801); 国家自然科学基金项目(11102098, 11372160)

通讯作者: 陈海昕(1974—), 男, 陕西人, 教授, 博士, 主要从事空气动力学、计算流体力学研究(E-mail: chenhaixin@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 李 钊(1986—), 男, 河南人, 博士, 主要从事计算流体力学研究(E-mail: lizhao08@mails.tsinghua.edu.cn);

张宇飞(1983—), 男, 四川人, 讲师, 博士, 主要从事气动设计、计算流体力学研究(E-mail: zhangyufei@tsinghua.edu.cn).

限制了其全面工程应用。Spalart^[5]曾预测 2045 年才能完成飞行器和车辆的大涡模拟；美国近期提出了 2030 年结合超级计算机实现飞机全机大涡模拟的长期愿景和规划^[6]。针对当前的计算能力和工程需求，Menter 和 Egorov^[7-8]等提出了计算量介于 RANS 方法和 LES 方法之间的尺度自适应模拟方法 (Scale-Adaptive Simulation, SAS)。他们通过对 Rotta 提出的湍动能积分尺度输运方程的分析，将卡门尺度 (von Karman scale) 引入湍流模拟中，建立了基于当地流动特征的尺度自适应模拟的框架。Fröhlich 和 Terzi^[9]在关于 LES 和 RANS 混合方法的综述中将 PANS (Partially-Averaged Navier-Stokes) 和 SAS 等方法归类为第二代 URANS 方法，以区分其不同于传统 RANS 方法、LES 方法以及 RANS/LES 混合方法之处。其特征是通过引入某种尺度以部分解析湍流脉动，但又不必显式地依赖计算网格或 LES 中的过滤尺度。Spalart^[5]也指出，SAS 方法虽然完全保留了 RANS 方法的性质，但可以得到类似 LES 方法的表现。这是一类兼顾精度与效率的有着广阔应用前景的湍流模拟方法，对稳态流动和非稳态流动都有较好的模拟预测能力。

有两种思路可实现对流动的尺度自适应模拟。

一种思路是将卡门尺度引入较成熟的湍流模式，提高其对非稳态问题的预测能力。Menter 和 Egorov 基于工业界常用的 SST 模式发展了 SST-SAS 方法，并在 ANSYS FLUENT 商业软件中实现和推广。国内学者也应用这一方法开展了大量相关研究^[10-12]。此外，国内徐晶磊和阎超等^[13-14]利用单方程 SA 模式发展了 XY-SAS 方法；张扬等^[15]将卡门尺度用于 SST 模式的涡粘性系数构造，发展了 BY-SST 方法；白俊强、张扬等^[16]在 $k-\varepsilon$ 模式的基础上构造了新型单方程 KDO 模式，并将卡门尺度用于流动转换的预测。

另一种思路则是对 Rotta 提出的湍动能积分尺度模式进行发展和改进，提高其模拟流动问题的实用性。两方程湍流模式通常是关于湍动能 k 和湍流耗散 (如 ε 、 ω 等) 的输运方程，后者的输运方程过于复杂，很难直接模化。目前常见的做法是通过类比湍动能输运方程对湍流耗散建模，或根据若干假定忽略此方程、构造单方程模式。而 Rotta 建立的积分尺度输运方程可逐项模化，具有更完备的理论基础。模式提出之初就得到了学术界的关注，但壁面对数律不符等问题限制了其推广应用^[7]。Menter 和

Egorov 在 Rotta 模式的基础上建立了关于 k 和 \sqrt{k} 的 KSKL 模式，并指出其相对常规 RANS 方法的尺度自适应优势。基于这种思路，Abdol-Hamid^[17] 和 Decaix 等^[18] 分别发展了 $k-kL$ -MEAH2013 模式和 $k-l$ 模式。此类模式能够在统一的形式下进行定常和非定常流动模拟，不需要在非定常计算时引入额外修正。

需要指出的是，SAS 方法尽管在模型中并不显式体现时间步长或网格尺度，但在非定常模拟时，其有效的时空分辨率仍然受计算采用的时间步长和网格的限制。因此，为了捕捉关键非定常流动结构往往需要小的时间步长和精细的网格，这与 DES (Detached Eddy Simulation) 等 RANS/LES 混合方法的要求是类似的。其优势就在于，如果时空分辨率不足、甚至是定常模拟，SAS 可以自适应地转为传统的 RANS 计算^[9]，其结果仍然具有一定合理性和指导意义，这对于工业界的用户是一种必要和实用的特点。而统一形式的湍动能积分尺度模式更是具有这一优势，同时也便于在计算代码中实现。

本文基于后一种思路，对 Abdol-Hamid 发展的 $k-kL$ 模式进行验证、发展和评估。这一模式基于湍动能积分尺度输运方程模化，具有尺度自适应模拟的特性，以及理论清晰、构造简单、易于应用等优点，但目前复杂流动或工程问题中的验证和应用还较少。值得说明的是，Abdol-Hamid 在文献[17]中仅考察了其在二维定常计算中模拟分离流动的能力，实际上从尺度自适应的特征来看，其优势主要体现在三维非定常计算中；同时，在解决工程问题上也应有良好的表现。因此，本文对 $k-kL$ 模式分别从其模拟定常流动的实用性和预测非定常分离流动的能力两个方面进行考察。

在稳态流动问题中，选择三维翼身组合体绕流问题进行计算，考察网格密度对计算结果的影响，并与 SA 模式、SST 模式等成熟的湍流模式进行对比。针对周期山这一非定常大分离流动问题，本文采用 $k-kL$ 模式分别进行了二维定常计算和三维非定常计算，通过与实验、LES 计算以及 SST 模式计算的平均速度场对比，验证了其尺度自适应模拟特性，以及在处理非定常流动分离问题方面的优势。

1 数值方法

1.1 $k-kL$ 两方程湍流模式

关于湍动能 k 和湍动能积分尺度 kL 的两个模

式方程, 采用 Abdol-Hamid^[17]给出的形式:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\mu}^{3/4} \rho \frac{k^{5/2}}{kL} - 2\mu \frac{k}{d^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho kL}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j kL}{\partial x_j} = C_{\phi 1} \frac{(kL)}{k} P - C_{\phi 2} \rho k^{3/2} - 6\mu \frac{kL}{d^2} f_{\phi} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\phi} \mu_t) \frac{\partial kL}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

其中: x_j 为三个方向的空间位置; ρ 为密度; u_i 为三个方向的速度; μ 为流体的动力粘性系数; 系数 $C_{\phi 1}$ 中包含了卡门尺度 L_{vk} 的影响。模化雷诺应力为:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

涡粘性的计算采用下面的形式:

$$\mu_t = C_{\mu}^{1/4} \rho (kL) / k^{1/2} \quad (5)$$

方程中含有壁面距离 d 的项, 是 Abdol-Hamid^[17] 加入的固壁衰减项。方程中各系数的表达式为:

$$C_{\phi 1} = \zeta_1 - \zeta_2 \left(\frac{kL}{kL_{vk}} \right)^2 \quad (6)$$

$$f_{\phi} = \frac{1 + C_{d1} \xi}{1 + \xi^4} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{\rho d \sqrt{0.3k}}{20\mu} \quad (8)$$

上述各式中常数的取值为:

$$\zeta_1 = 1.2, \quad \zeta_2 = 0.97, \quad C_{\phi 2} = 0.13, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_{\phi} = 1.0, \quad C_{\mu} = 0.09, \quad C_{d1} = 4.7$$

固壁处两个模式变量都取为 0; 无穷远来流的无量纲涡粘性和湍动能则分别取 $\mu_t / \mu = 0.009$ 和 $k / U_{\infty}^2 = 9 \times 10^{-9}$ 。

1.2 卡门尺度

卡门尺度是尺度自适应模拟的关键。在 Rotta 提出的模型中, 相应的长度尺度实际上是由速度的一阶和三阶导数量决定的^[3]:

$$L^2 = 2\kappa^2 \left| \frac{\partial U / \partial y}{\partial^3 U / \partial y^3} \right| \quad (9)$$

Menter 和 Egorov^[7] 经过推导指出利用速度的二阶导数代替三阶导数更符合流动的非均匀性, 从而

将其简化并推广到三维:

$$L_{vk} = \kappa \left| \frac{U'}{U''} \right| \quad (10)$$

卡门尺度正比于当地速度一阶导数和二阶导数的比, 是一种衡量流体拉伸率空间变化的尺度, 可以自动调整以适应和反映大于网格尺度的小尺度流动结构。卡门常数取 $\kappa = 0.41$ 。速度的一阶导数量 $|U'|$ 和二阶导数量 $|U''|$ 分别为:

$$|U'| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (11)$$

$$|U''| = \sqrt{\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k}} \quad (12)$$

Davidson^[19]、Lincke 等^[20] 都对卡门尺度的特性和表达形式进行了研究和讨论。Xu 等^[21] 提出了基于涡量 Ω 的一种简化的形式, 用 Ω 的散度代替速度的二阶导数量的求解, 从而减小了计算量。

$$L_{vk} = \kappa \left| \frac{\Omega}{\nabla \cdot \Omega} \right| \quad (13)$$

其中:

$$\Omega = \sqrt{2W_{ij}W_{ij}} \quad (14)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

为了便于比较, 本文仍采用 Menter 和 Egorov 给出的形式。即使这样, 式(13)二阶导数量与 SST 模式中交叉项和混合函数需要的计算量相当, 其整体的计算成本并不比 SST 模式高。

同时, 采用 Abdol-Hamid^[17] 给出的卡门尺度限制:

$$\frac{kL}{10k} < L_{vk} < 1.3\kappa d \frac{P}{C_{\mu}^{3/4} \rho k^{5/2} / (kL)} \quad (16)$$

1.3 NSAWET 计算程序

本文采用课题组自主开发的多块结构网格有限体积法求解器 NSAWET 程序^[22]。经过多年发展, 该求解器已成功应用于压气机失速机理研究^[23]和大型民用客机的气动设计^[24]等多个内、外流问题。控制方程为三维可压缩 Navier-Stokes 方程。空间重构和无粘通量计算分别采用 MUSCL 格式和 Roe 格式; 对于非定常计算, 则采用低耗散的 MDCD 格式^[25](Minimum Dispersion and Controllable Dissipation)和 SLAU 格式^[26](Simple Low-dissipation AUSM), 从而有效降低数值粘性。粘性通量则采用

二阶中心差分求得。时间推进采用带有双时间步长的 LU-SGS 隐式方法, 利用 V 循环的多重网格方法加速收敛。NSAWET 求解器包含了 SA 模式^[27]、Menter 提出的 SST 模式^[28]等多种湍流模式, 对湍流模式方程也采用相同的数值方法离散。基于 MPI 实现分区并行计算。

2 可实现性修正

2.1 可实现性修正方法

在应用 $k\text{-}kL\text{-}MEAH2013$ 模式的过程中容易出现计算不稳定的现象, 本文借用 Wilcox^[29]给出的可实现性修正对式(5)中涡粘性进行限制, 改善了其稳健性, 对处理复杂流动问题极为重要。

$$\mu'_t = \max[\mu_t, \rho k / 0.875 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} / C_\mu] \quad (17)$$

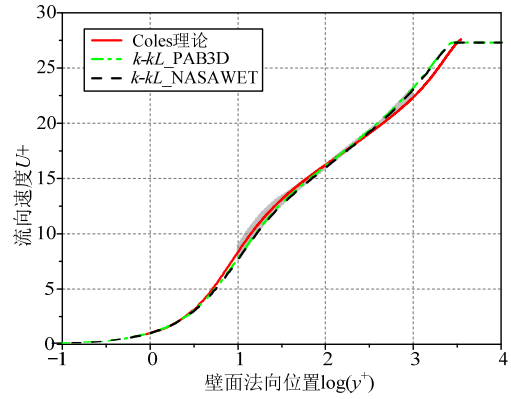
$$S_{ij} = S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (18)$$

2.2 可实现性修正影响的验证

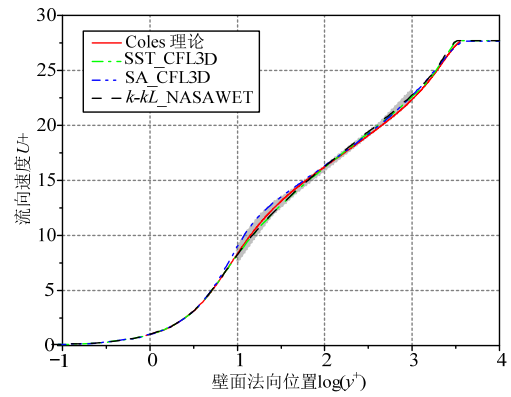
不可压缩零压力梯度平板湍流边界层是检验和验证 RANS 方法的基本问题^[30]。基于来流速度和单位长度的雷诺数为 $Re=5 \times 10^6$, 参考马赫数为 $Ma=0.2$ 。采用的网格包括 34×24 到 544×384 的五套网格, 粗网格由最密网格逐层变粗得到; 网格在壁面附近沿法向加密, 最粗的网格上壁面相邻网格的无量纲壁面距离大约为 $y^+=1.7$ 。平板表面为绝热无滑移壁面边界条件, 平板前自由滑移壁面采用对称条件, 进口和出口分别采用总温总压和静压边界条件, 远场采用 Riemann 边界条件。

利用最密网格计算得到的边界层内无量纲速度分布如图 1 所示。图中实线代表 Coles 的边界层理论得到的结果, 灰色区域代表不同经验理论得出结果的大致范围。

图 1(a) 对比了文献 [17] 中用原始 $k\text{-}kL\text{-}MEAH2013$ 模式计算的结果和本文用修正后的模式的计算结果(分别标为 $k\text{-}kL\text{-}PAB3D$ 和 $k\text{-}kL\text{-}NSAWET$), 两者基本一致, 考虑到不同求解器数值离散造成的差别, 说明可实现修正并不影响计算的精度。图 1(b) 则对比了 $k\text{-}kL$ 模式和 SA 模式、SST 模式在同一边界层厚度位置处求得的速度型。与 Coles 理论的预测结果相比, 三种模式在粘性底层和对数区都符合地很好; 在两者之间的缓冲区, $k\text{-}kL$ 模式的速度略小, 而 SA 模式略大, 但都在合理的范围内。



(a) $x/L=0.97$



(b) $Re_\theta=10000$

图 1 不同湍流模式的边界层速度型对比(544×384 网格)
Fig.1 Comparison of velocity distributions in boundary layer between different turbulence models (544×384 mesh)

图 2 显示了三种湍流模式的网格收敛性对比, 其中横坐标正比于网格单元的尺寸。可以看出, $k\text{-}kL$ 模式具有良好的网格收敛性, 在密网格上的阻力系数基本与另外两种湍流模式的预测值一致。

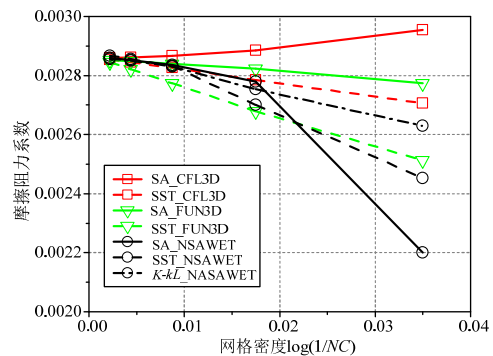


图 2 摩擦阻力的网格收敛性

Fig.2 Grid convergence of friction drag coefficient

3 三维 CRM 翼身组合体

3.1 计算模型与参数

通用研究模型(Common Research Model, CRM)^[31]

是为检验计算流体力学预测能力、由波音公司负责详细气动设计的现代客机模型,被用作第四次和第五次阻力预测会议(Drag Prediction Workshop, DPW)的验证算例^[32]。阻力预测的精度同时受到湍流模式、数值方法和网格等多种因素的影响。为了避免由于网格不同造成结果分散的情况,DPW5 提供了统一的基准网格系列。本文采用其中的多块结构网格系列,包括网格数由 $1.4 \times 10^8 \sim 6.4 \times 10^5$ 的五套网格(L1-L5),对 $k-kL$ 模式进行网格收敛性验证,实际最大网格规模为 4.1×10^7 。基于来流速度和参考弦长的雷诺数为 $Re=5 \times 10^6$,参考马赫数为 $Ma=0.85$,固定升力系数 $C_L=0.5$ 计算。

3.2 计算结果

图 3 显示了 CRM 翼身组合体的几何构型和表面压力分布。图 4 给出了 6 个不同展向站位的压力分布,并与风洞实验和 DPW5 中典型多块网格计算程序得到的结果进行对比。 $k-kL$ 模式的计算结果整体上与实验结果符合地较好。在翼梢附近存在一定差异,DPW5 的其它结果也存在相同的问题,Levy 等^[32]指出这种差异可能是风洞实验模型的翼梢附近存在变形导致的。对比不同网格密度,差别主要在于对激波位置的捕捉更加精确,而捕捉到的激波形态、位置没有发生根本性的改变。

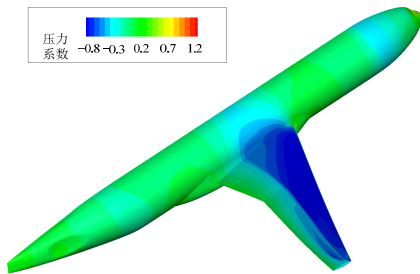
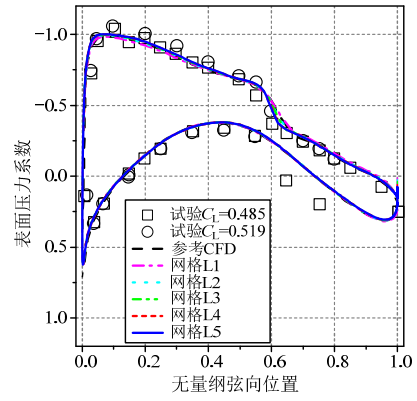
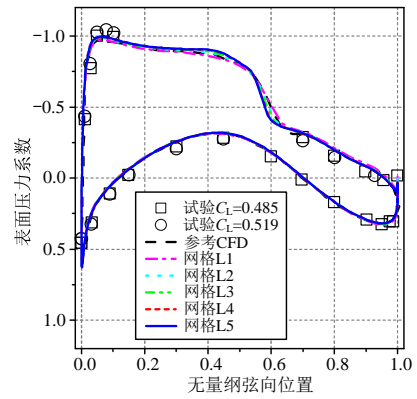


图 3 CRM 翼身组合体的压力分布

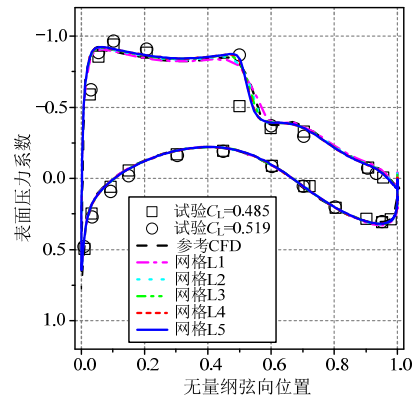
Fig.3 Pressure distribution of the CRM wing/body



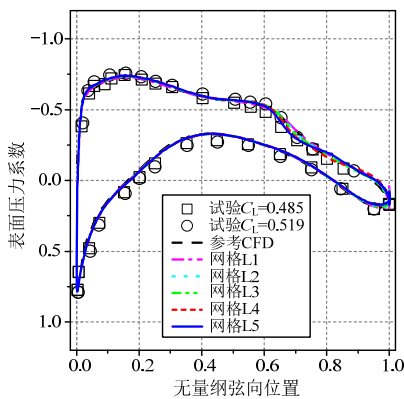
(b) $\eta=0.2828$



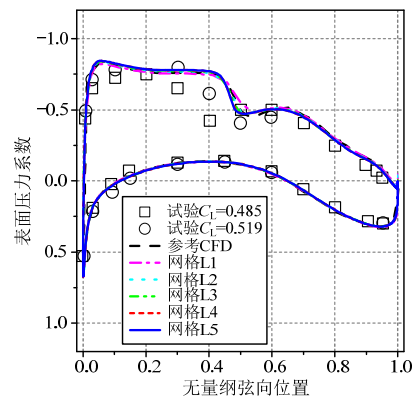
(c) $\eta=0.3971$



(d) $\eta=0.5024$



(a) $\eta=0.1306$



(e) $\eta=0.7268$

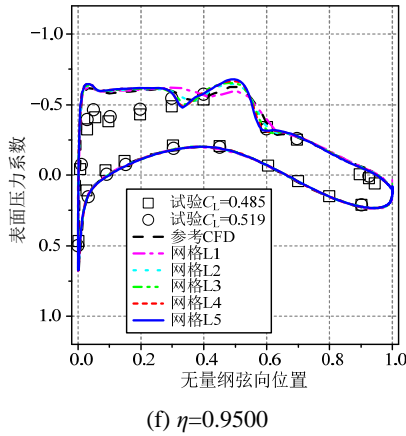
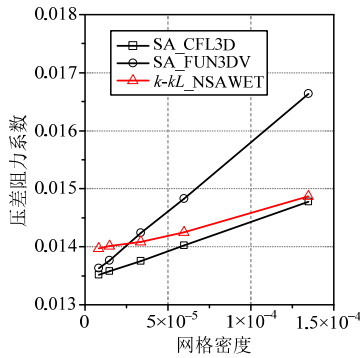
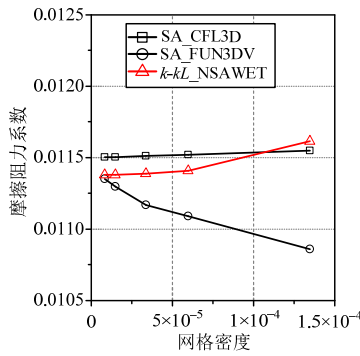


图4 不同展向截面处的表面压力分布
Fig.4 Pressure distributions at several spanwise locations

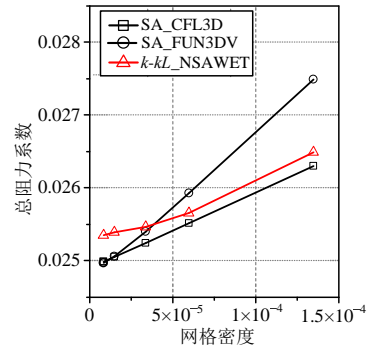
图5显示了压差阻力、摩擦阻力和总阻力的网格收敛过程，并与DPW5中两个典型计算程序的SA模式结果^[33]对比。横轴的网格因子与网格单元尺寸的平方成正比，这是基于阻力预测满足二阶精度的假定给出的。可以观察到，*k-kL*模式结果的网格收敛趋势明显，但压差阻力和摩擦阻力的预测值都略大，造成总阻力偏大。在图5(c)中插值得到阻力的纵轴截距值为0.02531，在DPW5统计出的预测水平范围(0.02496±0.00053)以内；相比DPW5阻力的平均预测值0.02516偏高了约0.6%。



(a) 压差阻力



(b) 摩擦阻力



(c) 总阻力

图5 CRM翼身组合体阻力、压差阻力和摩擦阻力的网格收敛过程

Fig.5 Grid convergence of drag, pressure drag and friction drag in the CRM case

此外，在中等网格L3上计算了攻角从2.5°~4.0°的极曲线，结果如图6所示。图中灰色区域为DPW5不同计算结果的大致分布范围。可以看出，*k-kL*模式的模拟结果与实验测量值基本符合，在后半段升力偏高，但仍在合理的范围内。

总体上来看，利用*k-kL*模式进行定常流场计算可以得到合理的气动特性预测结果，阻力预测随网格加密的收敛性较好。

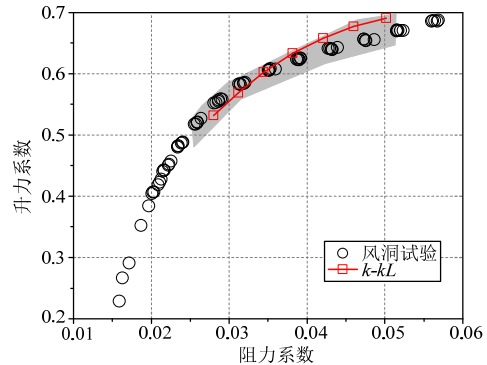


图6 CRM翼身组合体的极曲线(中等网格L3)

Fig.6 Drag polar of CRM wing/body (Grid L3)

4 周期山三维非定常分离流动

4.1 计算模型与参数

周期山是典型的充分发展湍流大分离问题算例。尽管在几何上只是平面槽道中简单的二维凸起障碍物，却具有显著的三维非定常性和复杂的流动结构。这一问题作为欧洲ERCOFTAC项目的验证算例^[34]，文献中有充足的实验(下文图中标记为EXP)和非定常大涡模拟(下文图中标记为LES_LESOCC)数据可供比较^[35-37]。计算域如图7所

示。基于山顶处的截面平均速度 U_b 和山高 h 的雷诺数 $Re=10600$ ，参考马赫数取为 $Ma=0.2$ 以满足不可压缩流动的条件。在流向和展向采用均匀网格；壁面法向在上下表面附近加密，保证 $y^+ < 1$ 。上下壁面采用等温无滑移边界条件，流向和展向均采用周期边界条件。为了维持恒定的流量及给定的雷诺数，在流向加入随时间变化的体积力 f_x ：

$$f_x^{n+1} = f_x^n + (U_b^* - 2U_b^n + U_b^{n-1}) / \Delta t \quad (19)$$

式中：上标 n 代表不同时刻； U_b^* 和 U_b^n 分别代表山顶处截面的平均速度的目标值和当前的瞬时值。

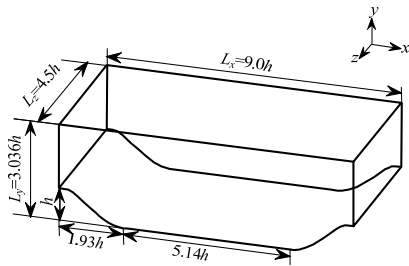


图 7 计算域示意图

Fig.7 Physical configuration of the periodic hill flow

对于三维非定常计算，流向、法向和展向的网格数分别为 $96 \times 112 \times 64$ ，网格量仅相当于 Breuer 等^[36]的全 LES 计算的 6%。三维非定常计算利用二维定常计算的结果作为初始场，二维定常计算采用如图 8 所示的展向截面网格。无量纲时间步长为 $\Delta t' = \Delta t U_b / h = 0.01$ 。通过流向不同位置的流量判断流动是否达到充分发展状态。此后进行时均和展向平均，周期约 50 个通过时间 ($T = L_x / U_b = 9h / U_b$)。

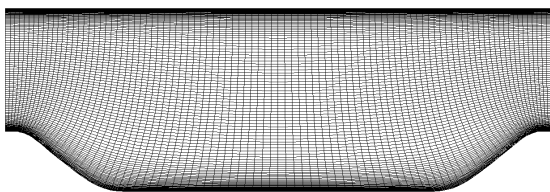


图 8 展向截面网格示意图

Fig.8 Mesh of a spanwise section

4.2 二维定常计算结果

基于传统 RANS 方法的定常计算已经被证明很难模拟此类大分离流动。Abdol-Hamid 在文献[17]中根据大涡模拟计算的平均速度场给定进出口的边界条件，采用二维定常方法计算了这一问题，得到了与实验符合良好的结果。但这种强制指定速度分布的方法不具有普适性，也无法自动满足流向的周期性。本文在流向采用周期条件和体积力的方法

进行二维定常计算，图 9 和图 10 分别显示了利用 SST 模式和 $k-kL$ 模式得到的速度场和下表面摩擦阻力分布。两种湍流模式都无法准确预测分离区的形状和范围；从再附点的位置上看， $k-kL$ 模式的模拟结果甚至与大涡模拟的结果偏差更大。

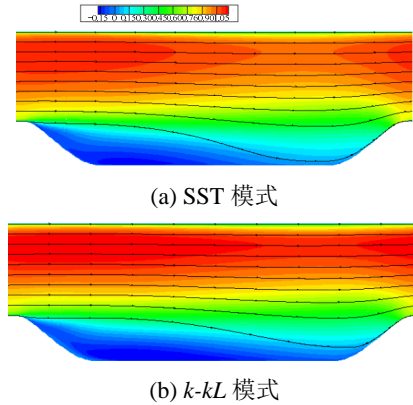


图 9 二维定常计算的流向速度和流线分布

Fig.9 Streamlines and contours of streamwise velocity with 2D steady computation

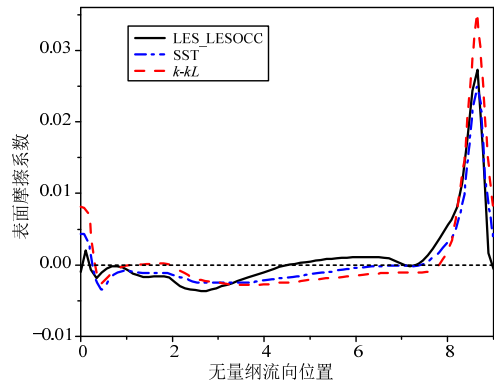
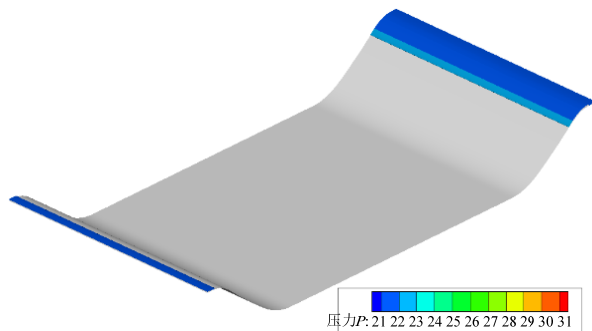


图 10 二维定常计算的下表面摩擦阻力分布

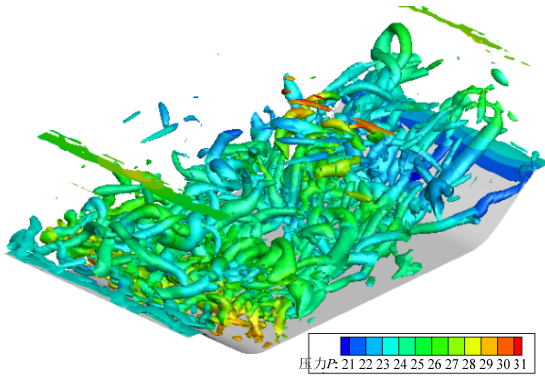
Fig.10 Friction coefficient distributions on the lower surface with 2D steady computation

4.3 三维非定常计算结果

采用 $k-kL$ 模式三维非定常计算得到的瞬时流场如图 11(b)所示，相比 SST 模式，如图 11(a)所示显示了更加丰富的涡结构。



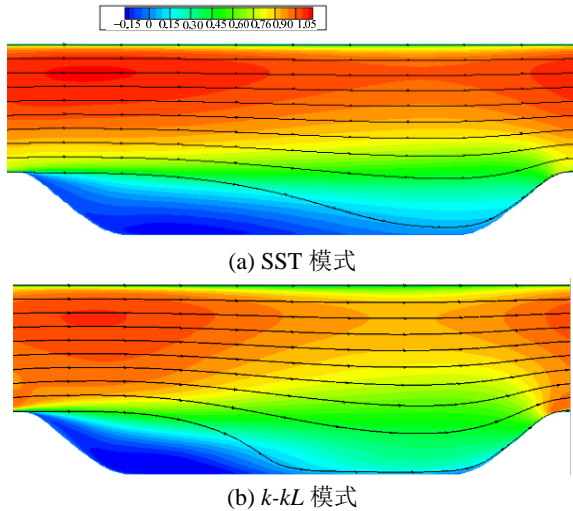
(a) SST 模式



(b) *k-kL* 模式

图 11 采用 *k-kL* 模式三维非定常计算瞬时涡结构($Q=1.5$)
Fig.11 Instantaneous vortex structure calculated by 3D unsteady computation using the *k-kL* model ($Q=1.5$)

图 12 和图 13 分别对比了三维非定常计算下两种湍流模式得到的平均速度场和下表面摩擦阻力分布。可以看到, SST 模式的三维非定常结果相比二维定常计算没有明显改善, 预测的再附点位置仍然过于靠近下游; 而 *k-kL* 模式具有尺度自适应模拟的能力, 准确捕捉到了分离区的起止范围和形状, 对摩擦阻力分布的预测也更合理。



(a) SST 模式

(b) *k-kL* 模式

图 12 三维非定常计算的平均流向速度和流线分布
Fig.12 Streamlines and contours of mean streamwise velocity with 3D unsteady computation

详细的流向和法向平均速度分布如图 14 和图 15 所示, 图中比较了流向 5 个位置两种湍流模式的计算结果。相比 SST 模式, *k-kL* 模式对平均速度分布的预测精度显著提高, 在部分区域甚至达到了大涡模拟的水平。注意到法向速度比流向速度小了一个量级, 尽管在 $x/h=2.0$ 附近与参考数据有一定偏差, 但实际上其误差也在可接受的范围内。

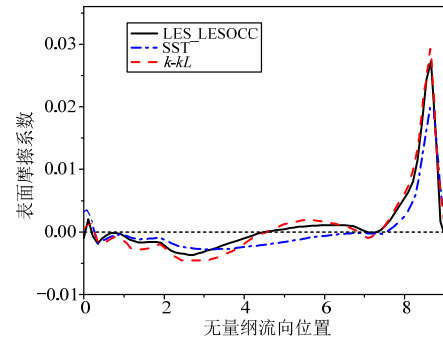


图 13 三维非定常计算的下表面平均摩擦阻力分布
Fig.13 Averaged friction coefficient distribution on the lower surface with 3D unsteady computation

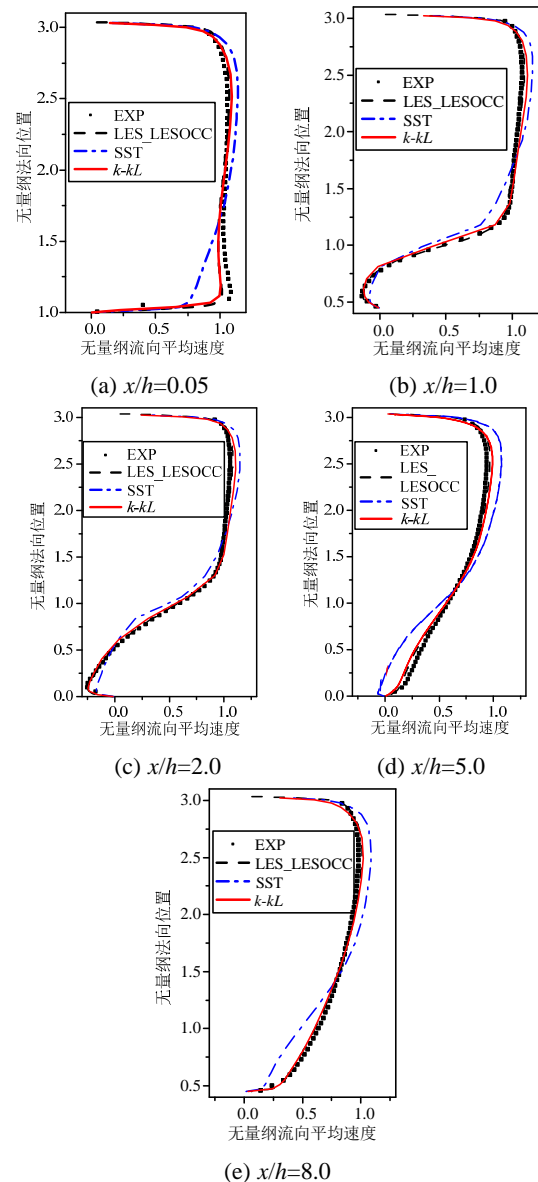


图 14 三维非定常计算的不同流向位置的平均流向速度分布

Fig.14 Mean streamwise velocity distribution at different streamwise locations with 3D unsteady computation

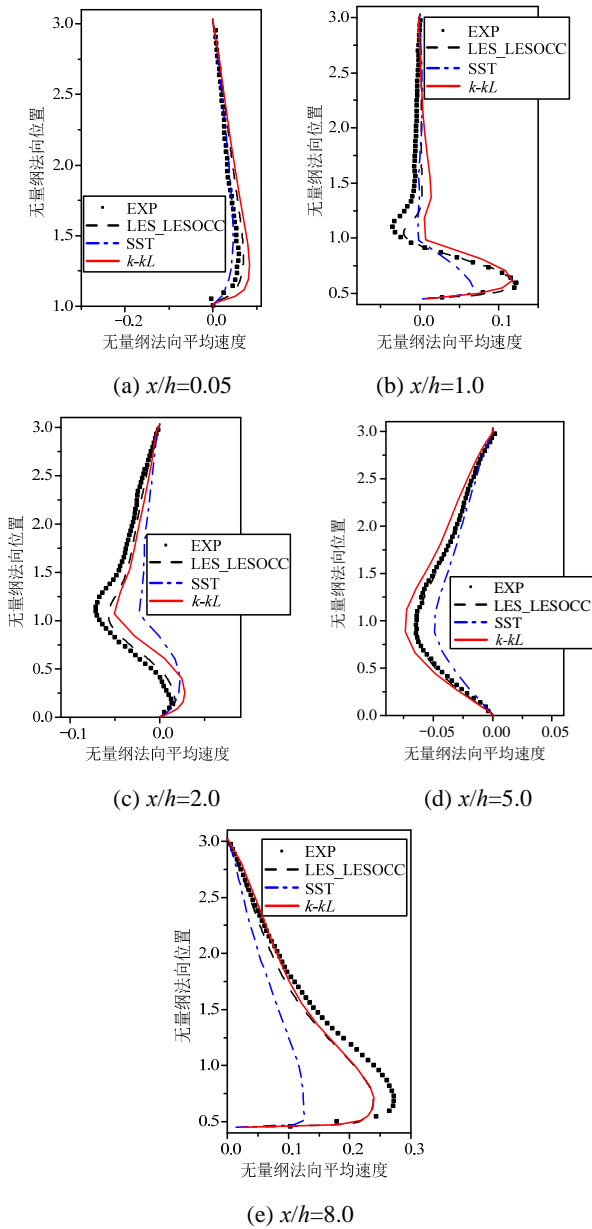


图 15 三维非定常计算的不同流向位置的平均法向速度分布

Fig.15 Mean wall-normal velocity distribution at different streamwise locations with 3D unsteady computation

5 结论

本文通过典型流动的数值模拟,对基于湍动能积分尺度的 $k-kL$ 两方程模式进行了较为全面的评估,证明了 $k-kL$ 模式在统一的形式下处理定常和非定常流动问题的能力。 $k-kL$ 模式在定常模拟方面和非定常模拟方面可以分别得到与目前工程中常用的 SST 模式和 DES 方法相近的结果,具有形式统一、便于实现的优势,特别是在改善其计算稳健性后,具有广阔的工程应用前景。

同时更应当看到,相比基于湍流耗散的 RANS

方法, $k-kL$ 模式的发展尚处于起步阶段,其实用效果有待在工程实际中进一步检验。在精确的积分尺度输运方程的基础上,如何对各项进行模化、如何高效计算卡门尺度,从而将其在理论上的优势转化为工程实用的湍流模拟能力,仍然有巨大的发展潜力。

参考文献:

- [1] 王兵, 张会强, 王希麟. 亚格子尺度湍流特性研究[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 47-51.
Wang Bing, Zhang Huiqiang, Wang Xilin. On sub-grid scale turbulence characteristics [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 47-51. (in Chinese)
- [2] 郭涛, 张涛, 赵威. 基于 LES 的直管流致振动分析[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 340-346.
Guo Tao, Zhang Tao, Zhao Wei. Flow-induced vibration analysis of straight pipe based on LES [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 340-346. (in Chinese)
- [3] 王晓玲, 孙蕊蕊, 敖雪菲, 等. 大涡模拟在旋流沉砂池中的应用研究[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 155-162.
Wang Xiaoling, Sun Ruirui, Ao Xuefei, et al. Large eddy simulation on vortex grit chamber for sandstone wastewater treatment [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 155-162. (in Chinese)
- [4] 薛大文, 陈志华, 孙晓晖, 等. 翼型绕流分离的微楔控制[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 217-222.
Xue Dawen, Chen Zhihua, Sun Xiaohui, et al. Micro-ramp control of the boundary separation induced by the flow past an airfoil [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 217-221. (in Chinese)
- [5] Spalart P R. Detached-eddy simulation [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2009, 41(1): 181-202.
- [6] Slotnick J, Khodadoust A, Alonso J, et al. CFD vision 2030 study: a path to revolutionary computational aerosciences [M]. Virginia US: NASA, 2014: 1-51.
- [7] Menter F R, Egorov Y. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions. Part 1: theory and model description [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2010, 85(1): 113-138.
- [8] Egorov Y, Menter F R, Lechner R, et al. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions. Part 2: Application to complex flows [J]. Flow Turbulence and Combustion, 2010, 85(1): 139-165.
- [9] Fröhlich J, von Terzi D. Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(5): 349-377.
- [10] 白俊强, 王晨, 张扬. 一种基于冯卡门尺度的湍流模式在模拟稳态和非稳态问题中的应用[J]. 工程力学, 2014, 31(11): 39-45.
Bai Junqiang, Wang Chen, Zhang Yang. Application of a turbulence model based on von Karman length scale in steady and unsteady flow simulation [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(11): 39-45. (in Chinese)
- [11] 杜磊, 宁方飞. 高亚临界雷诺数圆柱绕流的尺度自适应

- 应模拟[J]. 力学学报, 2014, 46(4): 487—496.
- Du Lei, Ning Fangfei. Scale adaptive simulation of flows around a circular cylinder at high sub-critical Reynolds number [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(4): 487—496. (in Chinese)
- [12] 王翔宇, 李栋. SST-SAS 在小分离流动数值模拟中的表现测试[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(3): 337—340.
- Wang Xiangyu, Li Dong. Behavior of SST-SAS for mild airfoil trailing-edge separation [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(3): 337—340. (in Chinese)
- [13] 高瑞泽, 徐晶磊, 赵瑞, 等. XY-SAS 模型对于分离流动的性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(4): 415—419.
- Gao Ruize, Xu Jinglei, Zhao Rui, et al. Evaluation of XY-SAS model for separated flows [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(4): 415—419. (in Chinese)
- [14] 徐晶磊, 阎超. 一个一方程 scale-adaptive simulation 模型的构造[J]. 气体物理, 2010, 5(1): 79—82.
- Xu Jinglei, Yan Chao. A one-equation scale-adaptive simulation model [J]. Physics of Gases, 2010, 5(1): 79—82. (in Chinese)
- [15] 张扬, 白俊强, 华俊, 等. 基于卡门尺度和滤波方法的 SST 方程改进[J]. 力学学报, 2013, 45(3): 442—446.
- Zhang Yang, Bai Junqiang, Hua Jun, et al. Improvement and assessment of the SST equation based on Karman scale and filter [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(3): 442—446. (in Chinese)
- [16] 白俊强, 张扬, 徐晶磊, 等. 新型单方程湍流模型构造及应用研究[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1804—1814.
- Bai Junqiang, Zhang Yang, Xu Jinglei, et al. Construction and its application of a new one-equation turbulence model [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 1804—1814. (in Chinese)
- [17] Abdol-Hamid K S. Assessments of a turbulence model based on Menter's modification to Rotta's two-equation model [J]. Grapevine, TX, US: 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2013.
- [18] Decaix J, Goncalves E. Time-dependent simulation of cavitating flow with $k-l$ turbulence models [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 68(8): 1053—1072.
- [19] Davidson L. Evaluation of the SST-SAS model: channel flow, asymmetric diffuser and axisymmetric hill [C]. Egmond aan Zee, The Netherlands: European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCOMAS CFD), 2006.
- [20] Lincke A. Verification and validation of von Karman length scale for identification of turbulent structures [M]. Gottingen German: DLR, 2009: 29—62.
- [21] Xu J, Hu N, Gao G. A high-fidelity turbulence length scale for flow simulation [C]// Berlin German: Progress in Hybrid RANS-LES Modelling, Springer, 2011: 141—145.
- [22] Chen H X, Fu S, Li F W. Navier-Stokes simulations for transport aircraft wing/body high-lift configurations [J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(5): 883—890.
- [23] Chen H X, Huang X D, Shi K, et al. A computational fluid dynamics study of circumferential groove casing treatment in a transonic axial compressor [J]. Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME, 2014, 136(3): 31003.
- [24] 张宇飞, 陈海昕, 符松, 等. 一种实用的运输类飞机机翼/发动机短舱一体化优化设计方法[J]. 航空学报, 2012, 33(11): 1993—2001.
- Zhang Yufei, Chen Haixin, Fu Song, et al. A practical optimization design method for transport aircraft wing/nacelle integration [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11): 1993—2001. (in Chinese)
- [25] Wang Q J, Ren Y X, Sun Z S, et al. Low dispersion finite volume scheme based on reconstruction with minimized dispersion and controllable dissipation [J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2013, 56(2): 423—431.
- [26] Shima E, Kitamura K. Parameter-free simple low-dissipation AUSM-family scheme for all speeds [J]. AIAA Journal, 2011, 49(8): 1693—1709.
- [27] Spalart P R, Allmaras S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows [C]. Reno, NV, US: 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992.
- [28] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598—1605.
- [29] Wilcox D C. Formulation of the $k-w$ turbulence model revisited [J]. AIAA Journal, 2008, 46(11): 2823—2838.
- [30] Rumsey C. Turbulence modeling resource [DB]. <http://turbmodels.larc.nasa.gov/>. 2014-08-06.
- [31] Rivers M. Common research model [DB]. <http://commonresearchmodel.larc.nasa.gov/>. 2012-02-10.
- [32] Levy D W, Laflin K R, Tinoco E N, et al. Summary of data from the fifth computational fluid dynamics drag prediction workshop [C]. Grapevine, TX, US: 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2013.
- [33] Park A, Laflin K R, Chaffin M S, et al. CFL3D, FUN3D, and NSU3D contributions to the fifth drag prediction workshop [C]. Grapevine, TX, US: 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2013.
- [34] ERCOFTAC. 2D periodic hill flow [DB]. http://qnet-ercoftac.cfms.org.uk/w/index.php/UFR_3-30. 2013-07-25.
- [35] Fröhlich J, Mellen C P, Rodi W, et al. Highly resolved large-eddy simulation of separated flow in a channel with streamwise periodic constrictions [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 526(3): 19—66.
- [36] Breuer M, Peller N, Rapp C, et al. Flow over periodic hills-numerical and experimental study in a wide range of Reynolds numbers [J]. Computers & Fluids, 2009, 38(2): 433—457.
- [37] Rapp C, Manhart M. Flow over periodic hills: an experimental study [J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(1): 247—269.