

高雷诺数槽道湍流的壁面模化 大涡模拟研究

李 蒙¹, 涂正光², 徐晶磊¹

(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级重点实验室, 北京 100191;
2. 中国航天科工集团 第九总体设计部, 武汉 430040)

摘 要: 选取基准壁湍流的槽道流动, 研究了多种模型的壁面模化大涡模拟. 模型包括经典的大涡模拟、Spalart-Allmaras、分离涡模拟和一种动态混合模型. 基于摩擦速度的雷诺数范围为 395~12 000, 采用 3 组粗糙网格, 流向和展向维数分别同取 37, 49 和 65, 法向维数保证 $y^+(1) \sim 1$. 主要研究平均速度、雷诺切应力分布、详细分析了各模型的特性差异并展示了相应的湍流结构. 研究表明: 在高雷诺数粗糙网格下, 大涡模拟失去求解精度, 分离涡模拟出现对数律不匹配, 动态混合模型的计算接近直接数值模拟, 其对数率区可解应力约占雷诺切应力的 93%, 边界层外层可解应力约占 99%. 这说明合适的混合模型可以在经济成本下保证计算精度, 具有解决实际问题的潜力.

关 键 词: 湍流模型; RANS-LES 混合模型; 槽道流动; 壁面模化大涡模拟; 分离涡模拟

中图分类号: V231; O357.5

文献标志码: A

Investigation on wall modeled large eddy simulation of channel turbulent flow in high Reynolds number

LI Meng¹, TU Zheng-guang², XU Jing-lei¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. The 9th Designing,
China Aerospace Science and Industry Corporation, Wuhan 430040, China)

Abstract: The numerical simulation of plane channel flow was performed with various turbulent models, which were employed for wall modeled large eddy simulation. Large eddy simulation (LES), Spalart-Allmaras (S-A), detached eddy simulation (DES) and a dynamic hybrid model (Hybrid) were investigated. Using the Reynolds numbers ranging from 395 to 12 000 based on friction velocity, three kinds of coarse grid were used, the grid numbers of wall-parallel directions were set as 37, 49 and 65, simultaneously. $y^+(1) \sim 1$ was maintained in wall-normal direction. Mean velocity profile, Reynolds-shear stress and other turbulent statistics were predicted. It was shown that LES cannot provide accurate solutions at high Reynolds number and coarse grid conditions. Log layer mismatch was still a problem of DES. The simulation of Hybrid agreed well with direct numerical simulation (DNS), and the resolved stress accounted for 93% in log layer and about 99% in outer layer. Therefore,

收稿日期:2014-04-22

基金项目:国家自然科学基金(11002014)

作者简介:李蒙(1991—),男,河南南阳人,硕士生,主要从事湍流模型的研究.

proper hybrid model may provide accurate solutions with cost effectiveness and has potential to solve engineering problem.

Key words: turbulent model; hybrid Reynolds averaged Navier Stokes-large eddy simulation (RANS-LES) model; channel flow; wall modeled large eddy simulation; detached eddy simulation

目前许多湍流模型只能可靠预测简单的湍流流动,对工况相对复杂的流动的计算精度还有待提高.随着计算机技术的发展,在模型性能已经趋近瓶颈的情况下,采用壁面模化大涡模拟(wall modeled large eddy simulation, WMLES)方法不失为复杂流动模拟的可行途径.

Nikitin 等^[1]在 2000 年首次将分离涡模拟(detached eddy simulation, DES)^[2]用作 WMLES.这是一种“类 DES”的 WMLES,是将雷诺平均(reynolds average Navier Stokes, RANS)方法限定在靠近壁面薄边界层内,边界层的其他部分则使用大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法.但 Piomelli 等^[3]指出 DES 用作 WMLES 时近壁处脉动过弱. Hamba^[4]也指出网格尺度应力不足,会导致速度梯度斜率陡增.因此,当 LES 脉动较小时,速度型会偏离对数律(log-layer mismatch, LLM). Nikitin 等认为,通过网格加密并不能解决 LLM,只能使这个问题移向固体壁面. Shur 等^[5]提出了 IDDES(improved DDES)模型来改进 DDES(delayed detached eddy simulation)模型^[6],但是 IDDES 模型构造相对复杂. Piomelli 等^[7]在边界层的内层构造模型,可以消除 LLM,然而这种参数控制在工程应用上较难实现. Keating 等^[8]则使用一种新的控制策略,使得 Piomelli 等的模型易于实现. Davidson, Dahlstrom^[9]通过额外的 DNS 计算为 RANS-LES 混合模型提供可解脉动信息,提高了槽道湍流速度型预测的精度.徐晶磊等^[10]提炼出流动失稳度的因子构造出一个 RANS-LES 动态混合(Hybrid)模型,对稳态流动表现为 RANS,并可自动识别流场中的湍流结构,对低雷诺数槽道湍流的计算表明其可以很好地抑制 LLM 现象.

Schumann^[11]提出了一种有别于“类 DES”的 WMLES,在第 1 层网格无量纲化距离(y^+ 大约为 50)与壁面之间使用壁面模型模拟,主流网格只求解 LES 方程.张楠等^[12]根据共振三波理论,提出了一种基于近壁相干结构的大涡模拟壁面模型,

改善了大涡模拟的预测.肖红林等^[13]改进涡黏度中的修正函数 D ,克服了槽道湍流中平均流剖面偏高的问题.

对 WMLES 方法的研究还要考虑网格分辨率的影响.上面所引的大部分文献中网格选取足够精细,这样能保证计算的精度.额日其太等^[14]的研究也有同样结论.但是工业应用很难达到科研论文中的网格品质,那就要求模型对粗糙网格具有一定的容忍度.

本文以典型的槽道流为研究对象,选取经典的 Smagorinsky LES 模型, Vreman LES 模型^[15], Spalart-Allmaras(S-A)^[16]模型, DES 模型和动态 RANS-LES 混合模型,研究和分析它们在粗糙网格上的计算特性,为实际应用提供参考.湍流模型将以 Hybrid 为标识,对其形式简单介绍.

1 湍流模型

1.1 RANS 模型和亚格子涡黏模型

Hybrid 是基于 Spalart-Allmaras 一方程模型的混合模型,并采用 Vreman 提出的亚格子涡黏模型.

Vreman 模型的构造形式为

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

$$\alpha_{ij} = \overline{u_{j,i}} \quad (2)$$

$$\beta_{ij} = \alpha_{mj}\alpha_{mj} \quad (3)$$

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

式中模型常数 $c \approx 2.5C_S^2$, $C_S = 0.17$ 是 Smagorinsky 模型常数.

1.2 混合模型形式

Hybrid 的目的是对 DES 模型进行改进,消除 DES 自身固有的不适当行为,又要求模型符合 DES 的初衷. Hybrid 利用 Vreman 的亚格子模型来达到上面的目的.根据文献^[10],新的长度尺度如下:

$$\begin{cases} \gamma \leq \gamma_1 & \tilde{d} = d \\ \gamma_1 < \gamma < \gamma_2 & \tilde{d} = \frac{\gamma - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} \gamma C_{\text{des}} \Delta + \left(1 - \frac{\gamma - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1}\right) d \\ \gamma \geq \gamma_2 & \tilde{d} = \gamma C_{\text{des}} \Delta \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{\Delta \sqrt{\gamma_0}} \quad \gamma_0 = 2.5 \sqrt{\frac{B_\beta}{\alpha_{ij} \alpha_{ij}}} / \Omega \quad \Omega = \sqrt{2 \omega_{ij} \omega_{ij}} \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i})$$

$$\Delta_m = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad \Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z) \quad C_{\text{des}} = 0.65 \quad \gamma_1 = 0.1 \quad \gamma_2 = 0.2 \quad (6)$$

根据文献[10], γ_1 和 γ_2 的取值来自槽道 LES 的标定和优化. 当 $\gamma < 0.1$ 时, 认为流体处于稳态的黏性子区, 该区域没有湍流结构或者湍流结构很少, 使用 RANS 模型计算, 混合长度为 RANS 模型自身的混合长度 d ; γ 介于 $0.1 \sim 0.2$ 之间时, 认为流体处于过渡态, 使用新定义的函数作为长度尺度; $\gamma > 0.2$ 认为过渡态结束, 此时湍流内容相对丰富, 激活 LES, 长度尺度使用 $\tilde{d} = \gamma C_{\text{des}} \Delta$.

2 结果分析

分别计算了不同雷诺数下槽道的湍流流动. 槽道流向, 法向和展向计算域为 $2\pi\delta, 2\delta$ 和 $\pi\delta, \delta$ 为槽道高度之半. 计算网格的选取详见表 1. 空间离散使用二阶中心差分格式, 时间格式为三阶 Runge-Kutta. 壁面为无滑移边界条件, 展向和流向是周期性条件. 高雷诺数时, 为使近壁处得到足够的模化, 须使 $y^+(1) \sim 1$, 故对法向网格进行加密处理, 如表 1 所示.

表 1 计算工况汇总

Table 1 Summary of computation cases

Re_τ	$N_x \times N_y \times N_z$	$\Delta x^+ \times \Delta z^+$	$y^+(1)$	r
395	$49 \times 65 \times 49$	50.7×25.4	0.25	1.139
2000	$37 \times 198 \times 37$	339.6×169.8	0.31	1.041
2000	$49 \times 198 \times 49$	256.5×128.3	0.31	1.041
2000	$65 \times 198 \times 65$	193.3×96.7	0.32	1.041
12000	$49 \times 239 \times 49$	1538.7×769.4	1.56	1.032

表 1 中 $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu$ 为基于摩擦速度 u_τ 和槽道高度之半 δ 的雷诺数, ν 为分子运动黏度. $y^+(1)$ 为 Hybrid 模型第 1 层网格与壁面间的距离. $r = \Delta y_{i+1}^+ / \Delta y_i^+$ 代表网格拉伸比. 计算结果用到表 1 中流向展向维度为 37 和 65 的网格时将会在文中注明, 没有注明则是使用流向展向维度为 49 的网格.

图 1 中可以看到 DES 和 Hybrid 模型的长度尺度随 Re_τ 的变化趋势. DES 在不同雷诺数下的趋势不变, RANS 长度尺度到 LES 长度尺度的过渡点出现在 $y = 0.088\delta$, 这种过渡显得很突然. Hybrid 模型近壁处长度尺度的过渡比 DES 光滑, 而且在边界层外层长度尺度大小仅为 DES 的 $1/2$. 另外, 根据文献[10], Hybrid 中的参数 B_β 能够根据当地的真实流动对长度尺度进行调整, 而不仅仅是依靠网格间距和壁面距离, 从而实现 RANS 和 LES 的有效混合.

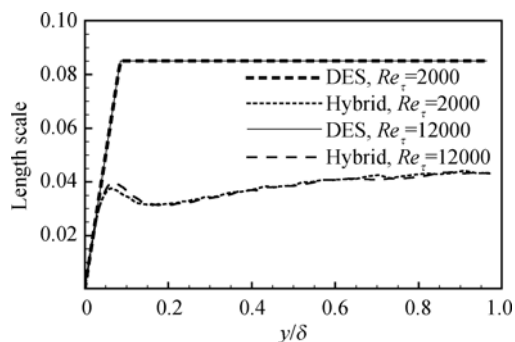
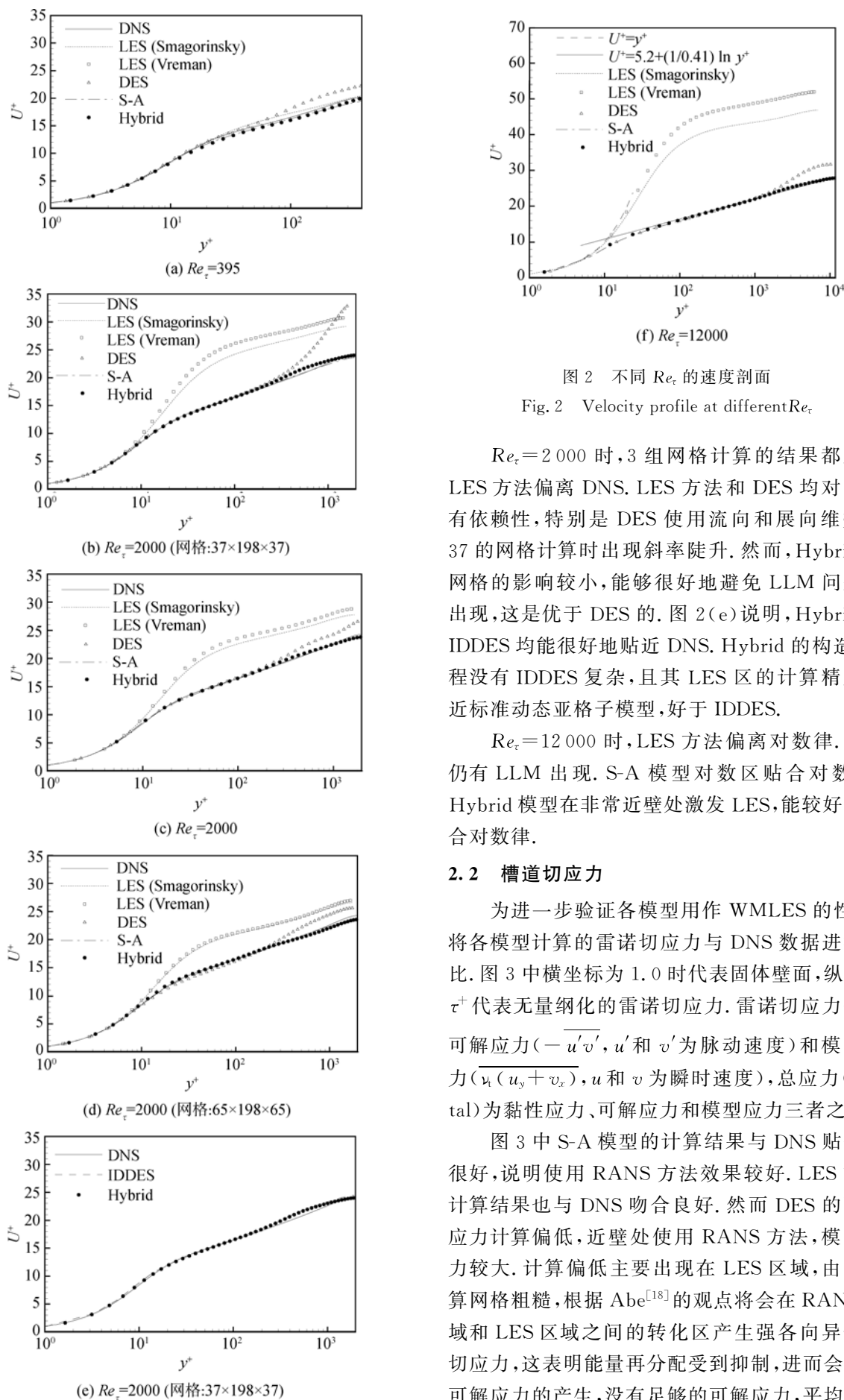


图 1 不同 Re_τ 下 DES 和 Hybrid 模型的长度尺度

Fig. 1 Length scales for DES and Hybrid at different Re_τ

2.1 槽道速度剖面

图 2 所示为各模型计算的槽道速度剖面图 (图中纵坐标 $U^+ = u/u_\tau$), Re_τ 为 395 和 2000 时, 将速度剖面与 DNS 数据对比, DNS 数据取自 Moser 数据库[17]; Re_τ 为 12000 时, 使用对数律作为基准. $Re_\tau = 395$ 时, Hybrid 与 DNS 贴合理想. 由于 S-A 模型的涡黏度较大, 故与 DNS 相比稍微偏下. DES 在 $y^+ > 30$ 时斜率增加, 致使曲线相对于 DNS 上扬, 出现 LLM 现象. 由于所选网格粗糙, 近壁处网格不能产生足够的 LES 脉动, 而 LES 模型近壁处又没有使用 RANS 模化, 因此 LES 模型在 $y^+ = 16$ 时便出现斜率增加. 基于 Vreman LES 计算精度高于基于 Smagorinsky 亚格子模型的 LES, 这是 Vreman 模型的优点.

图2 不同 Re_τ 的速度剖面Fig. 2 Velocity profile at different Re_τ

$Re_\tau = 2000$ 时, 3 组网格计算的结果都显示 LES 方法偏离 DNS. LES 方法和 DES 均对网格有依赖性, 特别是 DES 使用流向和展向维数为 37 的网格计算时出现斜率陡升. 然而, Hybrid 受网格的影响较小, 能够很好地避免 LLM 问题的出现, 这是优于 DES 的. 图 2(e) 说明, Hybrid 与 IDDES 均能很好地贴近 DNS. Hybrid 的构造、编程没有 IDDES 复杂, 且其 LES 区的计算精度接近标准动态亚格子模型, 好于 IDDES.

$Re_\tau = 12000$ 时, LES 方法偏离对数律. DES 仍有 LLM 出现. S-A 模型对数区贴合对数律. Hybrid 模型在非常近壁处激发 LES, 能较好地贴合对数律.

2.2 槽道切应力

为进一步验证各模型用作 WMLES 的性能, 将各模型计算的雷诺切应力与 DNS 数据进行对比. 图 3 中横坐标为 1.0 时代表固体壁面, 纵坐标 τ^+ 代表无量纲化的雷诺切应力. 雷诺切应力包括可解应力 ($-\overline{u'v'}$, u' 和 v' 为脉动速度) 和模型应力 ($\nu_t(u_y + v_x)$, u 和 v 为瞬时速度), 总应力 (Total) 为黏性应力、可解应力和模型应力三者之和.

图 3 中 S-A 模型的计算结果与 DNS 贴合得很好, 说明使用 RANS 方法效果较好. LES 方法计算结果也与 DNS 吻合良好. 然而 DES 的可解应力计算偏低, 近壁处使用 RANS 方法, 模型应力较大. 计算偏低主要出现在 LES 区域, 由于计算网格粗糙, 根据 Abe^[18] 的观点将会在 RANS 区域和 LES 区域之间的转化区产生强各向异性的切应力, 这表明能量再分配受到抑制, 进而会抑制可解应力的产生, 没有足够的可解应力, 平均速度

斜率必将陡升,最终导致速度曲线上移,这点不难从图 2(a)中观察到. Vreman LES 在 $Re_\tau=395$ 时计算的模型应力非常小. 与 DES 相比,Hybrid 的计算结果与 DNS 贴合得较为理想,且可解应力明

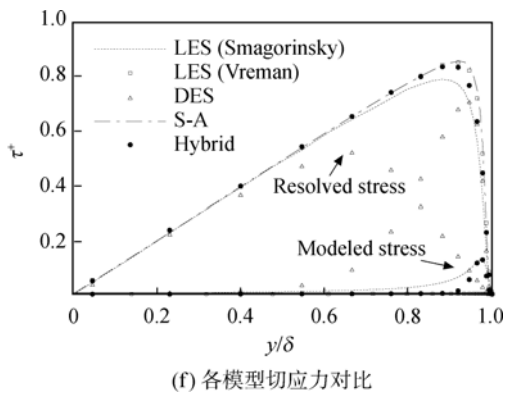
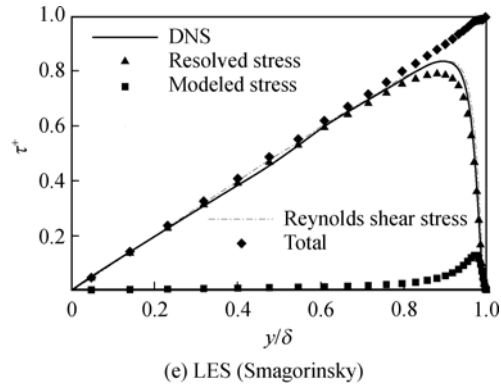
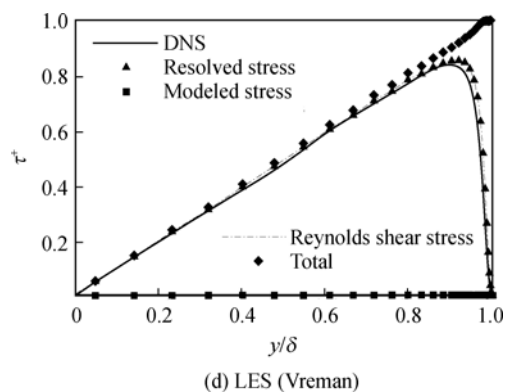
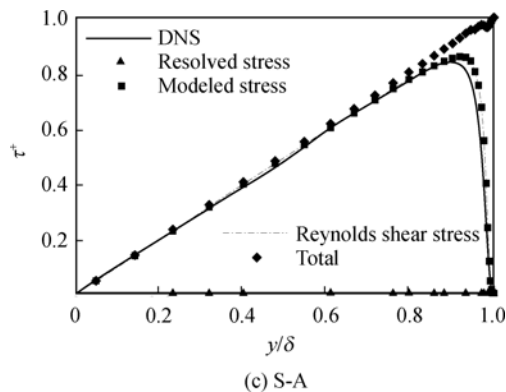
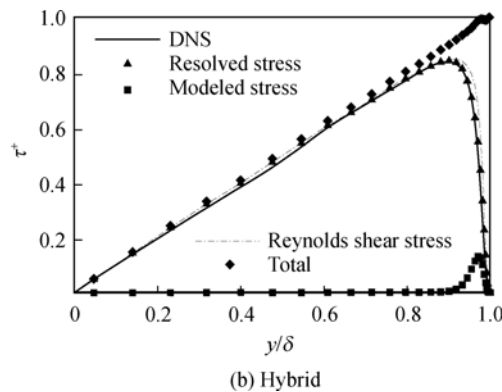
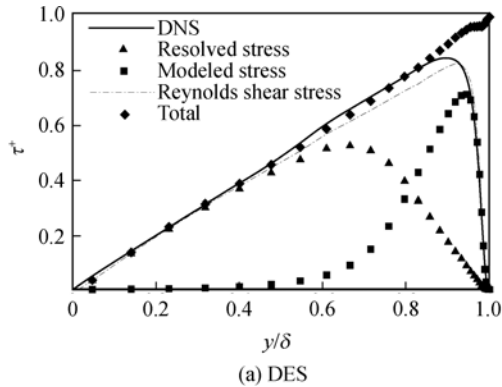


图 3 $Re_\tau=395$ 时的切应力
Fig. 3 Shear stress at $Re_\tau=395$

显较大. 图 3 还给出了 $Re_\tau=395$ 时各模型之间可解应力和模型应力的对比.

2.3 槽道脉动速度方均根

图 4 中槽道脉动速度方均根的计算为可解湍流脉动, 不包括模化部分, 所选的雷诺数分别是 $Re_\tau=950, 2000$. 从整个槽道的计算结果来看, Hybrid 模型对流向速度方均根 u'_{rms} 、法向速度方均根 v'_{rms} 及展向速度方均根 w'_{rms} 的预测是令人满意的, 特别是不同雷诺数下 Hybrid 对 u'_{rms} 峰值的预测足够精确, 另外 Hybrid 对 v'_{rms} 和 w'_{rms} 的变化趋势的预测与 DNS 一致. 因此将 Hybrid 用作 WMLES 是可行的. 相反地, 使用 DES, 近壁处湍流脉动的衰减过多, 由于捕捉不到足够的脉动, 因此图中近壁处脉动速度方均根值较低. 可见, DES 不适合用作 WMLES.

2.4 槽道横截面瞬时速度分布

图 5 为分别使用 S-A 模型、DES 和 Hybrid 模型的槽道流向横截面 (yz) 速度矢量分布. S-A 模型将整个边界层模化, 进行雷诺平均处理. 在槽道中心处 ($y/\delta=1.0$), DES 和 Hybrid 的计算结果相差不大, 但是在近壁处和过渡区两者的模拟有明显区别. 与 DES 不同, Hybrid 在过渡区壁

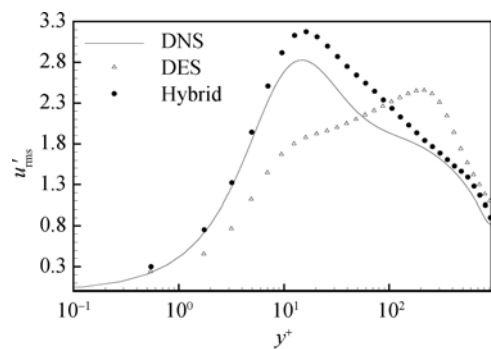
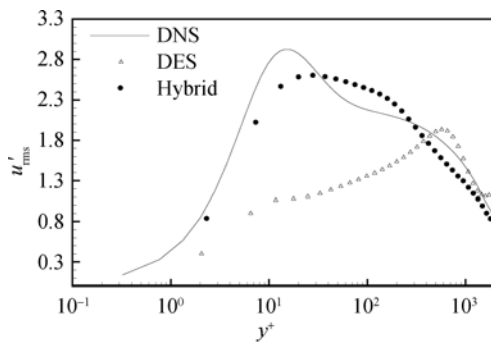
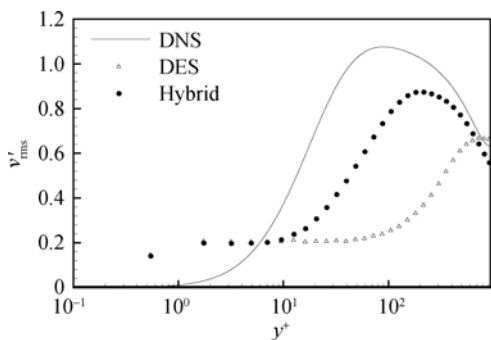
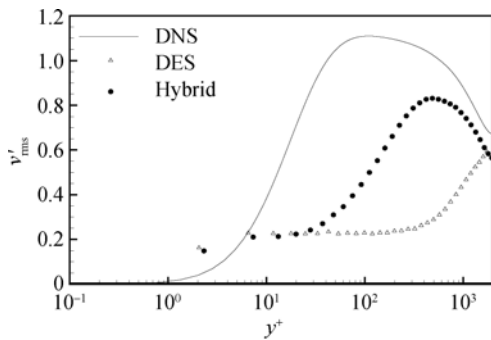
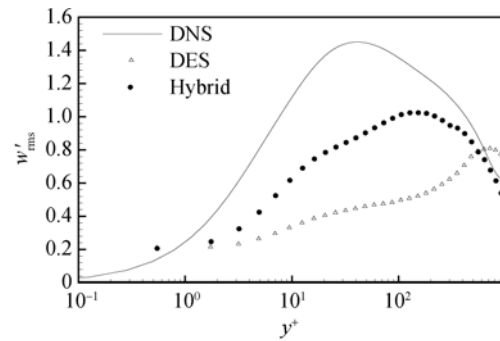
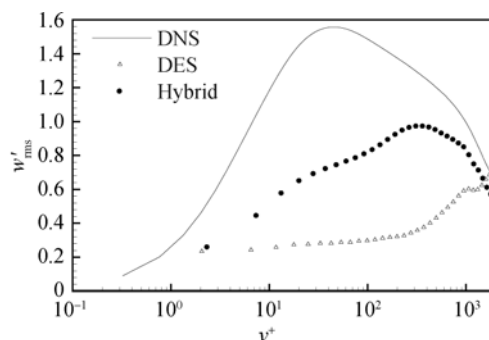
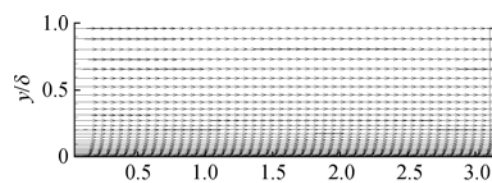
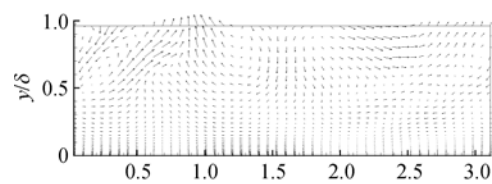
(a) $Re_{\tau}=950$ (b) $Re_{\tau}=2000$ (c) $Re_{\tau}=950$ (d) $Re_{\tau}=2000$ (e) $Re_{\tau}=950$ (f) $Re_{\tau}=2000$

图4 脉动速度与方均根的对比

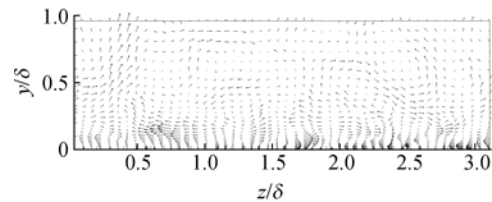
Fig. 4 Fluctuating velocity vs root mean square



(a) S-A



(b) DES



(c) Hybrid

图5 $Re_{\tau}=2000$ 时槽道流向横截面的瞬时速度矢量Fig. 5 Instantaneous velocity vectors in channel cross-stream plane at $Re_{\tau}=2000$

面法向和展向的速度脉动要比 DES 的明显,而且可解的长度尺度更小。

图6为 $Re_{\tau}=2000$ 时平行壁面的近壁湍流中流向速度的瞬时轮廓, u 为流向瞬时速度。可以看到 DES 中有大尺度条纹被沿流向拉长, 出现“Super-Streaks”^[8], 这种条纹结构是非物理的, 说明近壁处网格的没有得到充分利用。而使用 Hybrid 计算结果非常可观, 近壁处速度轮廓图中基本为小尺度涡, 流向速度脉动减小, 法向和展向的速度脉动有所增加, 预测更趋向于三维, 这是与实际相符的。

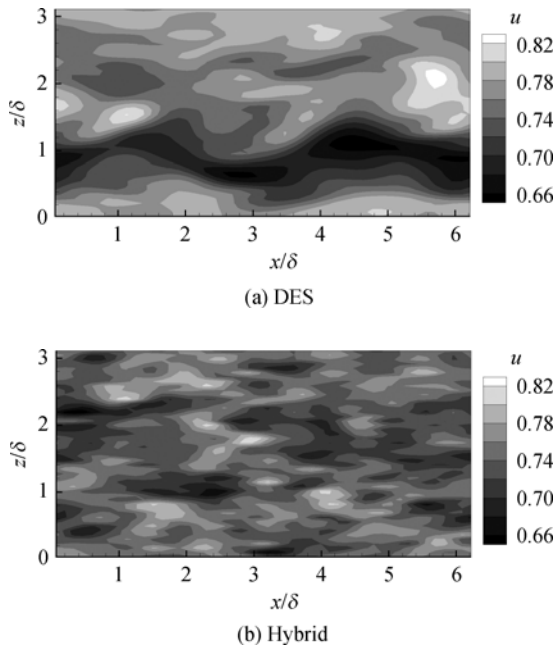


图 6 $Re_\tau=2000$ 时槽道近壁处 ($y^+ \sim 20$) 流向速度
瞬时轮廓

Fig. 6 Contour of instantaneous streamwise velocity
near the wall ($y^+ \sim 20$) at $Re_\tau=2000$

3 结 论

本文将 Hybrid, DES, S-A, Smagorinsky LES 和 Vreman LES 用作 WMLES, 计算了槽道流动。通过对各模型的对比分析, 得出以下结论:

1) Hybrid 在不同雷诺数下的速度剖面均与 DNS 贴合良好, 抑制了 LLM 现象, 在高雷诺数下仍然能够保持较好的精度, 体现了该模型的工程应用价值。而 DES 的速度剖面则不太理想, 速度型偏离较严重。

2) DES 对可解应力的预测偏低。与 DES 相比, Hybrid 的可解应力足够大, 总应力的计算与 DNS 吻合。Hybrid 对脉动速度方均根槽道横截面瞬时速度分布的预测明显优于 DES, 体现了 Hybrid 对网格的有效利用, 说明 Hybrid 适合用作 WMLES。

3) 由于对网格分辨率的依赖太强, Smagorinsky LES 和 Vreman LES 在较高雷诺数下对速度剖面的预测不准确。而 Hybrid 在粗糙网格下的计算具有足够的精度, 说明 Hybrid 对粗糙网格具有一定的容忍度, 应用于工程实际中具有良好的经济性。

参考文献:

[1] Nikitin N V, Nicoud F, Wasistho B, et al. An approach to

wall modeling in large-eddy simulations[J]. Physics of Fluids, 2000, 12(7): 1629-1632.

[2] Spalart P R, Jou W H, Strelets M, et al. Comments on the feasibility of les for wings, and on a hybrid rans-les approach[C]// Proceedin of 1st AFOSR International Conference on DNS/LES. Ruston, LA: Greyden Press, 1997.

[3] Piomelli U, Balaras E. Wall-layer models for large-eddy simulation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2002, 34(1): 349-74.

[4] Hamba F. A hybrid RANS-LES simulation of turbulent channel flow[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2003, 16(5): 387-403.

[5] Shur M L, Spalart P R, Strelets M K, et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(6): 1638-1649.

[6] 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.

[7] Piomelli U, Balaras E, Pasinato H, et al. The inner-outer layer interface in large-eddy simulations with wall-layer models[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 538-550.

[8] Keating A, Piomelli U. A dynamic stochastic forcing method as a wall-layer model for large-eddy simulation [J]. Journal of Turbulence, 2006, 7(12): 1-24.

[9] Davidson L, Dahlstrom S. Hybrid LES-RANS: an approach to make LES applicable at high Reynolds number[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2005, 19(6): 415-427.

[10] 徐晶晶, 高歌, 杨焱. 基于当地流动结构的 RANS/LES 混合模型[J]. 航空学报, 2014, 35(11): 2992-2999.

XU Jinglei, GAO Ge, YANG Yan. A RANS-LES hybrid model based on local flow structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 2992-2999. (in Chinese)

[11] Schumann U. Subgrid scale model for finite difference simulation of turbulent flows in plane channels and annuli[J]. Journal of Computational Physics, 1975, 18(4): 376-404.

[12] 张楠, 刘凯, 陆利蓬, 等. 基于相干结构的大涡模拟壁面模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(1): 5-8.

ZHANG Nan, LIU Kai, LU Lipeng, et al. Wall model in LES based on coherent structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(1): 5-8. (in Chinese)

[13] 肖红林, 罗纪生. 大涡模拟中亚格子模型的改进及其在槽道湍流中的应用[J]. 航空动力学报, 2007, 22(4): 583-587.

XIAO Honglin, LUO Jisheng. Improvement of subgrid model in large eddy simulation and applications in turbulent channel flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4): 583-587. (in Chinese)

- [14] 额日其太,邹正平,王强. 三维槽道湍流的大涡模拟[J]. 推进技术,2004,25(1):23-26,31.
Eriqitai,ZOU Zhengping,WANG Qiang. Large-eddy simulation of 3D turbulent in the channel[J]. Journal of Propulsion Technology,2004,25(1):23-26,31. (in Chinese)
- [15] Vreman A W. An eddy-viscosity subgrid-scale model for turbulent shear flow:algebraic theory and applications[J]. Physics of Fluids,2004,16(10):3670-3681.
- [16] Spalart P R,Allmaras S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows [J]. La Recherche Aéronautique, 1994,439(1):5-21.
- [17] Moser R D,Kim J,Mansour N N. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau=590$ [J]. Physics of Fluids,1999,11(4):943-945.
- [18] Abe K. A hybrid LES/RANS approach using an anisotropy-resolving algebraic turbulent model[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2005,26(2):204-222.

(编辑:叶 青)