

计算域大小对大涡模拟计算结果的影响

康 凯^{1,3,4}, 张子良², 王卫强¹, 张明明^{3,4,5}, 王 博¹, 王国付¹

(1. 辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001;

2. 中国长江三峡集团有限公司 科学技术研究院, 北京 100038;

3. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

4. 中国科学院 风能利用重点实验室, 北京 100190;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了节省计算资源,提升计算效率,在保证计算结果准确的前提下,尽可能选取较小的计算域显得尤为重要。针对该问题,分别沿槽道的展向和流向选取不同的计算尺度($0.53\pi\delta\times2\delta\times0.177\pi\delta$, $\pi\delta\times2\delta\times0.5\pi\delta$, $2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$, $3\pi\delta\times2\delta\times1.5\pi\delta$, δ 为槽高的一半),在相同的计算条件且设置均满足大涡模拟计算要求的前提下,对摩擦雷诺数为 540 和 930 两种摩擦雷诺数下计算域大小对大涡模拟数值计算结果的影响进行了研究。结果发现:计算尺度不小于 $2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$ 的计算域能很好的呈现湍流计算结果。此外,在摩擦雷诺数为 930 时,相同计算域下所能检测的范围均有所提升,得到的计算结果更加准确。

关 键 词: 槽道湍流; 计算域尺度; 大涡模拟; 亚网格; 能谱分析

中图分类号: V211.3; O357

文献标志码: A

Influence of computational domain size on large eddy simulation results

KANG Kai^{1,3,4}, ZHANG Ziliang², WANG Weiqiang¹,
ZHANG Mingming^{3,4,5}, WANG Bo¹, WANG Guofu¹

(1. College of Petroleum Engineering,

Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, China;

2. Institute of Science and Technology,

China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

3. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. Key Laboratory of Wind Energy Utilization,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to save computing resources and improve computation efficiency, it is particularly important to ensure the accuracy of the calculation results and to select a computational domain as small as possible. The influence of computational domain size on large

收稿日期: 2020-01-09

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(51736008); 中国科学院洁净能源先导科技专项子课题(21050303)

作者简介: 康凯(1995—),男,硕士生,主要从事湍流减阻、仿生肋条减阻研究。E-mail: akai0205@163.com

通信作者: 王卫强(1974—),男,教授,博士,主要从事天然气输送技术、湍流减阻、仿生肋条减阻研究。E-mail: wwq920285@163.com

引用格式: 康凯,张子良,王卫强,等. 计算域大小对大涡模拟计算结果的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(11): 2440-2448. KANG Kai, ZHANG Ziliang, WANG Weiqiang, et al. Influence of computational domain size on large eddy simulation results[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11): 2440-2448.

eddy simulations of turbulent channels with periodic boundary conditions was studied. Simulations were presented in channels with streamwise and spanwise sizes of $0.53\pi\delta\times2\delta\times0.177\pi\delta$, $\pi\delta\times2\delta\times0.5\pi\delta$, $2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$ and $3\pi\delta\times2\delta\times1.5\pi\delta$, wherein δ is the channel half-height. On the premise that the calculation conditions are the same and the settings meet large eddy simulation calculation requirements, the influence of calculation domain size on large eddy simulation numerical calculation results under friction Reynolds number of 540 and 930 was studied. It was found that the computational scale not less than $2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$ could well present the turbulence results. In addition, the accuracy of turbulence information in the same computational domain was improved at friction Reynolds number of 930.

Key words: turbulent channel flow; computational domain size; large eddy simulation; subgrid; energy spectrum analysis

目前,常用的湍流数值模拟方法有雷诺时均(RANS)、大涡模拟(LES)和直接数值模拟(DNS)。RANS 数值模拟是通过雷诺平均方程对时间平均转化为定常问题,通过求解流场平均变量,而无需计算各尺度的湍流脉动,从而降低时间和空间的分辨率,缩减了计算量,因此被广泛应用于工业,但该方法只能提供湍流平均量,不具有普适性^[1-2]。DNS 虽然精度高,但付出的代价较大,对时间和计算资源占用较多^[3-4]。LES 相对于 RANS 而言,具有更高的精度,相比较于 DNS 而言又节省了计算资源,作为一种性价比较高的数值模拟方法被广泛的应用。事实上,LES 相较于 RANS 数值模拟方法而言,对计算域的大小具有更加严格的要求,理论上计算域太小,一部分湍流尺度将不能表现出来,计算结果也会失去意义^[4]。而计算域较大时网格量也增大,较大的网格量延长计算时间,降低计算效率并且占用较多的计算资源。总之,LES 计算结果的可靠首先必须基于足够大的计算域,使得人们选取的计算域可以囊括 70% 以上的能量^[5],在满足这样的前提下,选取较小的计算域。

本文针对槽道湍流流动,分别沿展向和流向选取不同的计算尺度,研究了 $Re_\tau=540$ 和 $Re_\tau=930$ 两种摩擦雷诺数下不同计算域大小对 LES 数值计算结果的影响。

1 计算模型

LES 方法兼有 DNS 方法与 RANS 方法的优点,即在保证计算资源的前提下可以对流场诸多细节进行模拟。LES 通过对 Navier-Stokes 方程进行滤波,对大于滤波宽度的大尺度涡运动进行直接模拟,小于滤波宽度的小尺度涡运动则引入

亚格子尺度模型进行模拟^[6-7]。运用 LES 对大于截止尺度的涡旋进行非稳态计算,小尺度的涡旋因具有各向同性,通常采用简单的涡流黏度模型处理。

湍流理论认为,维持槽道湍流充分发展所需的最小计算域流向尺度约为 300 个壁面单位,展向约为 100 个壁面单位^[8]。因此,本文中最小的计算域为: $0.53\pi\delta\times2\delta\times0.177\pi\delta$, δ 为槽高的一半,计算域尺度一般用 $\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$ 表示(其中流向和法向长度离散到傅里叶空间,用 $\pi\delta$ 来表征^[9])。此外,一些研究人员就 DNS 中计算域大小的选择开展了研究,得出计算域尺度为 $2\pi\delta\times2\delta\times0.5\delta$ 以及相近尺度时能够准确计算流场^[9-13]。本文为了验证在 LES 中采用该计算域是否也能得到准确的结果,特设置该计算域。事实上,一个计算域尺度越大,数值计算时所能分辨出的流动结构的尺度越大,计算结果也就越准确。本文选取尺度最大的计算域为: $3\pi\delta\times2\delta\times1.5\pi\delta$,作为标准与其他计算域的计算结果作对比。考虑到计算样本的充实,选取计算域为 $\pi\delta\times2\delta\times0.5\delta$,用于验证当计算域小于 $2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$,是否仍然能够得到准确的计算结果。

本文考虑不可压缩槽道湍流。且已有研究发现,如果仅希望能够准确计算湍流一阶量时(目前大部分研究所需达到的精度),采用较小的计算域即可满足要求^[9,11,13]。基于此,本文仅关注湍流一阶统计量,对流向(x)和展向(z)进行了周期性边界条件设置,法向(y)为无滑移光滑平板。在摩擦雷诺数 $Re_\tau=540$ 和 $Re_\tau=930$ 下,分别模拟计算四种不同计算域尺度的模型($0.53\pi\delta\times2\delta\times0.177\pi\delta$, $\pi\delta\times2\delta\times0.5\delta$, $2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$, $3\pi\delta\times2\delta\times1.5\pi\delta$)^[14],计算域法向高度(h)均为 180 mm。

使用 ICEM 软件对模型进行结构体网格划

分。即在壁面附近使用壁面函数或者使用足够密的网格,以便于对小涡进行模化^[15]。第一层网格高度为 0.03,设定无量纲壁面距离为 1,且以 1.05 倍的网格尺寸增长率增长,流向和展向网格均匀分

布。本文不同计算域下的网格分辨率保持相同,单位体积内的网格数目也一样,模型计算域大小及所采用的网格分辨率如表 1 所示,表中 Δx^+ 、 Δy^+ 、 Δz^+ 分别为流向、法向、展向的网格分辨率。

表 1 不同模型的网格参数
Table 1 Grid parameters of different models

算例	Re_τ	计算域大小	Δx^+	Δz^+	$\Delta y_{\max}^+$	网格量
Case01	540	$0.53\pi\delta\times2\delta\times0.177\pi\delta$	30	15	14.88	45 000
Case02		$\pi\delta\times2\delta\times0.5\pi\delta$	29.74	14.89	14.88	487 350
Case03		$2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$	29.76	14.87	14.88	1 949 400
Case04		$3\pi\delta\times2\delta\times1.5\pi\delta$	29.93	14.96	14.88	4 335 000
Case05	930	$0.53\pi\delta\times2\delta\times0.177\pi\delta$	29.81	14.76	14.67	273 000
Case06		$\pi\delta\times2\delta\times0.5\pi\delta$	29.79	14.92	14.67	1 440 600
Case07		$2\pi\delta\times2\delta\times\pi\delta$	29.97	14.97	14.67	5 703 750
Case08		$3\pi\delta\times2\delta\times1.5\pi\delta$	29.91	14.95	14.67	12 877 350

流体为不可压缩流体,密度和黏度等物理性质不随时间变化。离散格式采用二阶迎风格式,此格式具有一定的稳定性并且具有较高的精度。选取 Smagorinsky-lilly 亚格子模型^[16],模型系数采用默认值 0.1。流场的迭代求解方法为 SIMPLE(semi implicit for pressure linked equations)算法^[17],此算法具有较快的收敛速度。设置残差精度为 10^{-6} 。两种摩擦雷诺数下,流向给定的压力梯度分别为 0.012 42 Pa/m 和 0.036 84 Pa/m,以 case04 和 case08 为例,计算的时间步长分别为 $\Delta T^+=\Delta T v_1/\delta=0.024\ 1$ ^[14]和 $\Delta T^+=\Delta T v_1/\delta=0.0454$ (v_1 表示槽内最大流速),湍流平均时间均为 $T^+=1000$ 。

2 计算结果与分析

2.1 亚网格对计算结果的影响评价

LES 计算中,影响其计算精度的因素有很多。例如,LES 的数值计算精度、亚网格模型以及网格分辨率等因素。基于此,文中对 $Re_\tau=540$ 和 $Re_\tau=930$ 下四个不同大小计算域的计算设置中,除了计算域大小不同外,其他计算设置(包括来流设置、计算精度、亚网格模型和网格分辨率)均设置成相同值,且设置均满足 LES 计算的要求^[14]。从而这些因素对 LES 结果的影响可近似看做相等,便于单独考虑不同计算域大小对 LES 结果的影响。

以亚网格的角度出发,评估了亚网格对 LES

结果的影响,式(1)计算了总湍动能中模化湍流信息的比重,作为评价亚网格对计算结果影响的指标^[18]。

$$s = \frac{\langle \epsilon_i \rangle}{\langle \epsilon_i \rangle + \langle \epsilon_\mu \rangle}$$

(1)

式中 $\langle \rangle$ 表示平均量, ϵ_i 是由亚网格引入导致的模化湍流信息, ϵ_μ 是解析得到的湍流信息。

图 1 和图 2 分别为摩擦雷诺数 $Re_\tau=540$ 和 $Re_\tau=930$ 时,亚网格引入导致的模化湍流信息比重沿法向的曲线,图中 y^+ 为法向坐标的无量纲值。

从图 1 中可以看到,case01 在近壁区模化湍

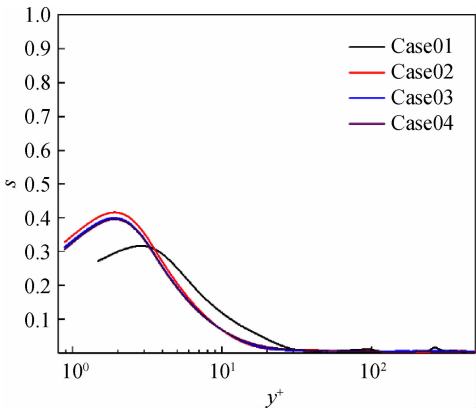


图 1 $Re_\tau=540$ 下不同计算域的 s 沿法向的变化
Fig. 1 Variation of s along the normal direction in different computational domains at $Re_\tau=540$

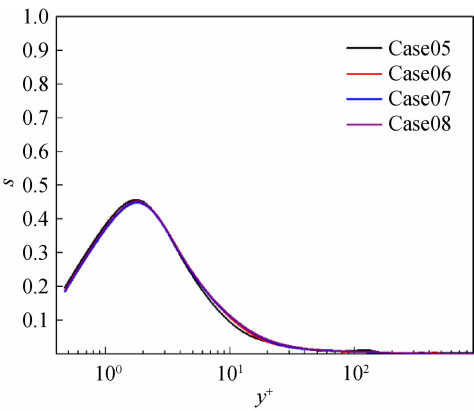


图 2 $Re_{\tau}=930$ 下不同计算域的 s 沿法向的变化
Fig. 2 Variation of s along the normal direction in different computational domains at $Re_{\tau}=930$

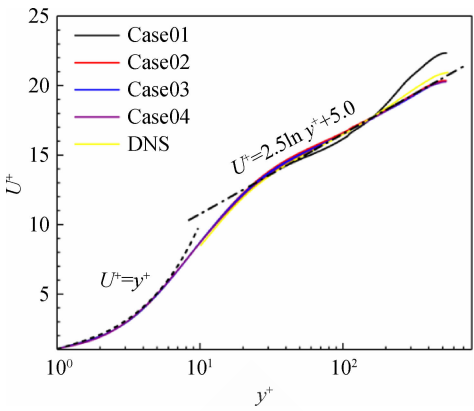


图 3 $Re_{\tau}=540$ 下不同计算域的流向平均速度曲线
Fig. 3 Mean streamwise velocity profiles in different computational domains at $Re_{\tau}=540$

流信息比重与其他案例相比误差相对较大。图 2 中,各案例模化湍流信息比重基本相同。从图中还可以看到,由亚网格引入导致的模化湍流信息在近壁区相对较高,其近壁区的网格分辨率指数甚至接近 50%,但对壁面边界层而言,这是正常的^[18]。在对数率区,由亚网格引入导致的模化湍流信息相对较低,流场中心处的位置趋近于 0,其计算也更接近于 DNS 计算。

2.2 速度分析

摩擦雷诺数 $Re_{\tau}=540$ 和 $Re_{\tau}=930$ 时,流向平均速度曲线分别如图 3、图 4 所示。槽道湍流边界层黏性底层和对数率区公式^[19-20]分别如下所示:

$$U^+ = y^+ \tag{2}$$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \tag{3}$$

式中 U^+ 为流向平均速度无量纲值; κ 为卡门常数, $\kappa=0.4$; B 为常量,约为 5.0。

图 3 和图 4 中虚线和点划线分别表示流体在黏性底层和对数率区速度与壁面高度的理论关系,可以看到本文选取的计算模型在黏性底层和对数率区呈现较好。此外,将相同摩擦雷诺数下 DNS 流场数据与文中不同计算域下的模拟数据相比较,图中可以看到较大的计算域模拟数据与 DNS 数据^[9]贴合更好,说明 LES 模拟数据准确,结果可靠。

如图 3,随着计算域增大,对数率区拟合效果更好。此外,图中最小的计算域沿法向的中心位置处速度梯度增大,在靠近法向中心的位置流速增大较快,在该位置处出现了不正常的凸起结构。而随着计算域尺度的增大,沿法向的平均流向速

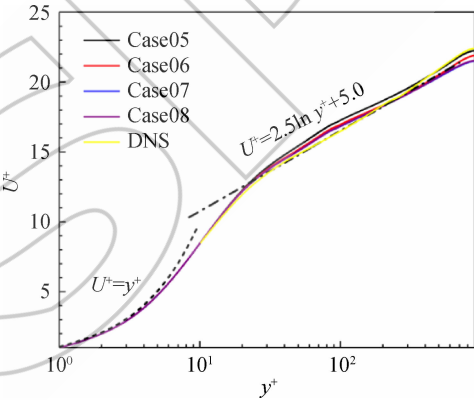


图 4 $Re_{\tau}=930$ 下不同计算域的流向平均速度曲线
Fig. 4 Mean streamwise velocity profiles in different computational domains at $Re_{\tau}=930$

度曲线基本重合。

图 4 可以看到,相同的流动条件下,最小的计算域在靠近法向中心的位置流速较大,不同大小的计算域之间存在误差,但相较于图 3 而言误差显著变小。而随着计算域尺度的增大,流场在对数率区的拟合效果也更好。

为了进一步分析不同大小的计算域在流向平均速度上的差异,将其在对数率区流场的对数行为进行检测,其诊断函数为^[11]

$$\Xi^+ = \frac{y^+}{\kappa} \frac{\partial U^+}{\partial y^+} \tag{4}$$

式中检测值 Ξ^+ 为卡门常数 κ 的倒数。

图 5 和图 6 分别表示 $Re_{\tau}=540$ 和 $Re_{\tau}=930$ 时的诊断函数曲线,点划线表示理论检测值, $\Xi^+ = 1/\kappa = 2.5$ (κ 理论值为 0.4)^[21]。图 5 中,最小的计算域监测信息在图中表现出明显的不正常,而其他三种不同计算域模型的数据基本接近,且与理论值吻合相对较好。图 6 中可以看到

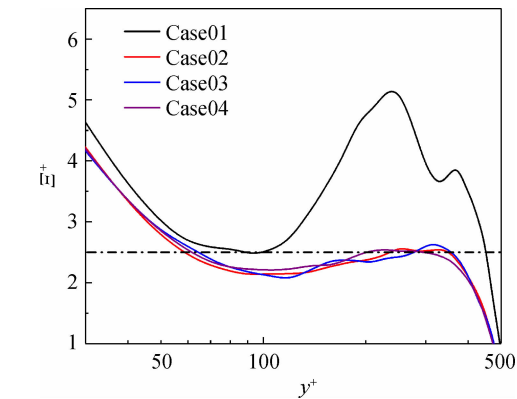


图 5 $Re_{\tau}=540$ 下不同计算域的对数率诊断函数曲线

Fig. 5 Logarithmic-law diagnostic functions in different computational domains at $Re_{\tau}=540$

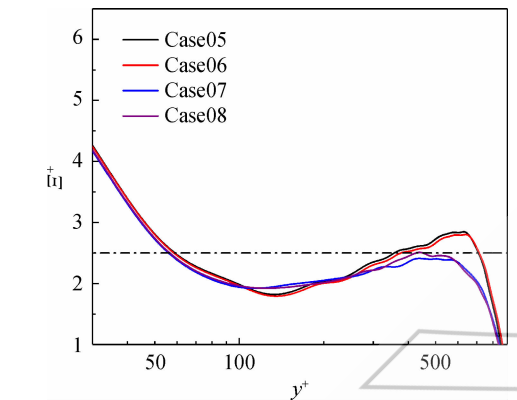


图 6 $Re_{\tau}=930$ 下不同计算域的对数率诊断函数曲线

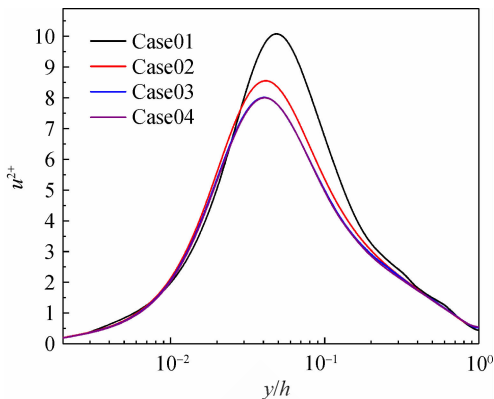
Fig. 6 Logarithmic-law diagnostic functions in different computational domains at $Re_{\tau}=930$

case05 和 case06 检测函数曲线在靠近计算域法向中心位置处有凸起,但相较于图 5 并不明显。通过对比最小计算域和其他计算域的曲线数据,可以很清楚地知道在 $Re_{\tau}=540$ 下,计算域 $0.53\pi\delta\times 2\delta\times 0.177\pi\delta$ 无法得到可靠的数值结果。

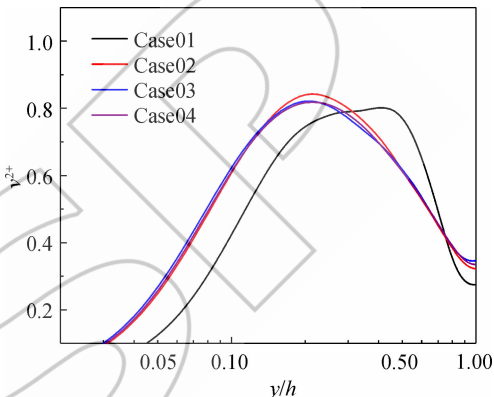
2.3 湍流度分析

$Re_{\tau}=540$ 和 $Re_{\tau}=930$ 时流向速度(u)、法向速度(v)和展向速度(w)的脉动速度均方曲线如图 7 和图 8 所示。

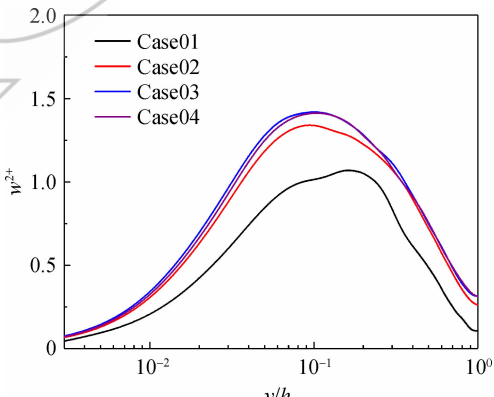
从图 7(a)中,可以清晰地看到,随着计算域尺度的增大,流向脉动速度曲线逐渐趋于某一值,图中 case03 和 case04 曲线重合,而计算域最小的 case01 与 case03、case04 相比较而言,具有较大的误差。图 7(b)和图 7(c)中也可以看到 case01 的法向脉动速度以及展向脉动速度曲线差异性较大。随计算域尺度的增大,整体脉动曲线也逐渐趋于某一值。从流向速度、法向速度和展向速度的脉动速度曲线中可以得到 case03 和 case04 曲



(a)



(b)



(c)

图 7 $Re_{\tau}=540$ 下流向、法向和展向的脉动速度均方图
Fig. 7 Streamwise, normal, and spanwise mean-squared velocity fluctuations at $Re_{\tau}=540$

线基本均重合,结合图 3 和图 5 可以初步得到,在 $Re_{\tau}=540$ 时,case03 网格量少,且得到的数据相对较准确。

由图 8(a)中可以看到,随着计算域尺度的增大,流向脉动速度曲线逐渐趋于某一值,图中 case07 和 case08 曲线重合,而计算域最小的 case05 与 case07、case08 相比较而言,具有明显的误差,但相较于图 7(a)而言,其误差明显减小。图 8(b)和图 8(c)中也可以看到 case05 的法向脉

动速度以及展向脉动速度随计算域尺度的增大,整体脉动曲线也逐渐趋于某一值。从流向速度、法向速度和展向速度的脉动速度曲线中可以得到 case07 和 case08 曲线基本均重合,结合图 4 和图 6 可以初步得到,在 $Re_\tau = 930$ 时,case07 网格量少,且得到的数据相对较准确。

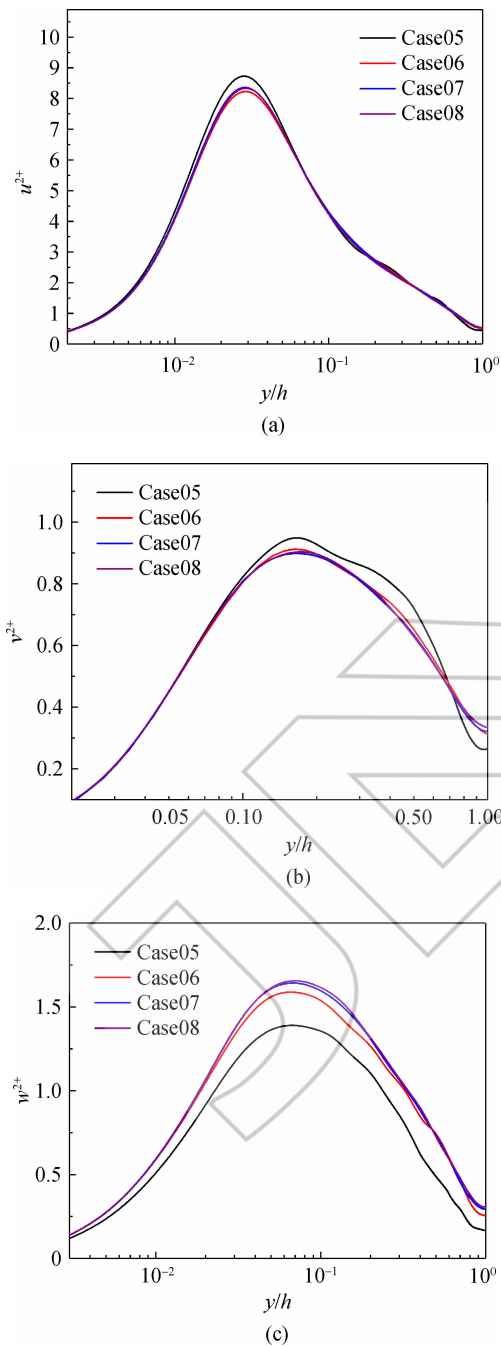


图 8 $Re_\tau = 930$ 下流向、法向和展向的脉动速度均方图
Fig. 8 Streamwise, normal, and spanwise mean-squared velocity fluctuations at $Re_\tau = 930$

2.4 能谱分析

为了进一步分析不同大小的计算域对 LES

计算结果的影响,以及在该计算域下计算结果所包含的湍流信息。提取某一瞬时刻沿法向中心位置剖面处的计算域瞬时速度,对其进行空间二维傅里叶变换,将其转换成波长域,频谱能量计算公式^[22]如下:

$$\phi_{uu}(k_x,k_z,y) = k_x k_z \langle \hat{u}(k_x,k_z,y) u^*(k_x,k_z,y) \rangle$$

(5)

式中 k_x 、 k_z 分别为流向和展向波数; $\hat{u}$ 表示 u 的傅里叶变换(可以是滤波的速度场,也可以是未滤波的速度场);上标 * 表示共轭复数。

图 9 为 $Re_\tau = 540$ 下,case01~case04 的频谱图,其中云图所展示的能量为无量纲值, λ_x^+ 和 λ_z^+ 分别为流向和展向的无量纲方向尺度。由上述频谱图以及横纵坐标所对应的范围可知,在保持网格分辨率相同的前提下,计算域越大检测到的湍流信息越多,较小的计算域无法捕捉流体中较大的湍流尺度。以图9(d)为例,图中红色划线依次表示 case01~case03 所能检测的范围,其中 case01 检测范围最小。而图 9(a)中在方向尺度较大时,能量较强,但实际上图 9(d)中 case01 所检测的区域并没有显示出高能区。此外,从 case01~case04 的频谱图中可以看到,随着计算域的增大,频谱图的趋势逐渐接近 case04,说明计算域越小,检测到的湍流信息也越不准确,而随着计算域的增大,得到的湍流信息也更加可靠。通过上述频谱图可以得到 case01 包含的湍流信息缺失严重,case02 包含了较少的湍流信息,而 case03 基本包含了大部分湍流信息。

图 10 为 $Re_\tau = 930$ 下,case05~case08 的频谱图。图 10(d)中红色虚线依次表示 case05~case07 所能检测的范围,其中 case05 检测范围最小。从图中也可以得到,在保持网格分辨率相同的前提下,计算域越大检测到的湍流信息越多,较小的计算域无法捕捉流体中较大的湍流尺度,而较大的计算域得到的湍流信息也更加可靠。通过上述频谱图可以得到 case05 包含的湍流信息缺失严重,case06 包含的湍流信息较少,而 case07 基本包含了大部分湍流信息。

提取图 9 和图 10 中各个算例所对应的监测区间,其信息如表 2 所示。表 2 中 s^+ 为各案例下能监测区间的大小, s_{case08}^+ 为 case08 能检测到的区间大小。通过流向和展向的无量纲方向尺度得到不同计算域可检测区间的大小。可以看到,随着计算域计算尺度的增大,其监测湍流信息的无量

网区间也增大,而相同大小的计算域,摩擦雷诺数较大的其监测区间越大,其监测得到的信息也越准确。将上述案例中监测区间最大的计算域 case08 作为基准,其他计算域得到的无量纲监测

区间除以 case08 得到监测区间的百分比,如表所示。发现 $Re_\tau=930$ 相较于 $Re_\tau=540$ 而言,相同计算域下所能检测的范围有所提升,得到的计算结果更加准确。

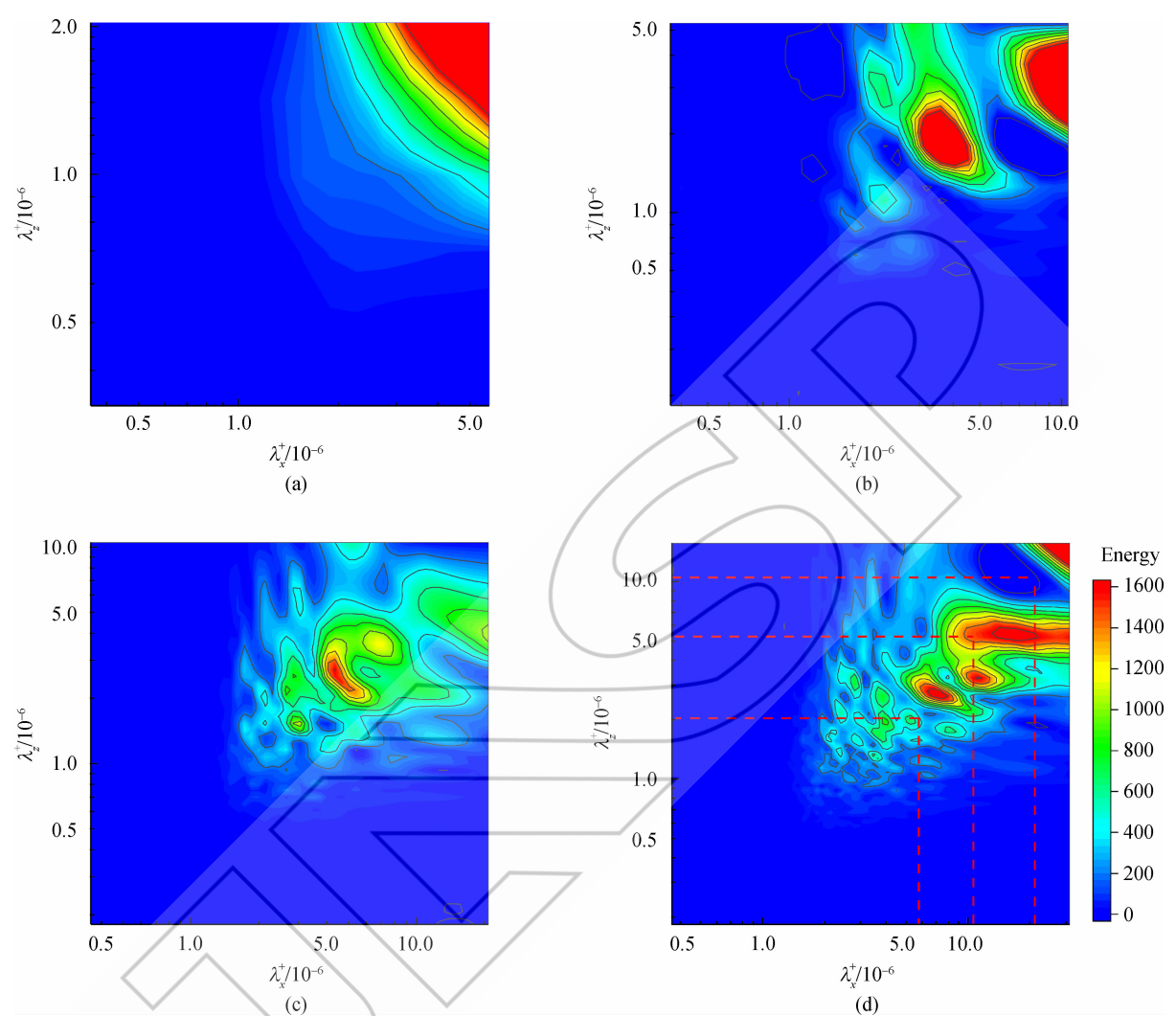
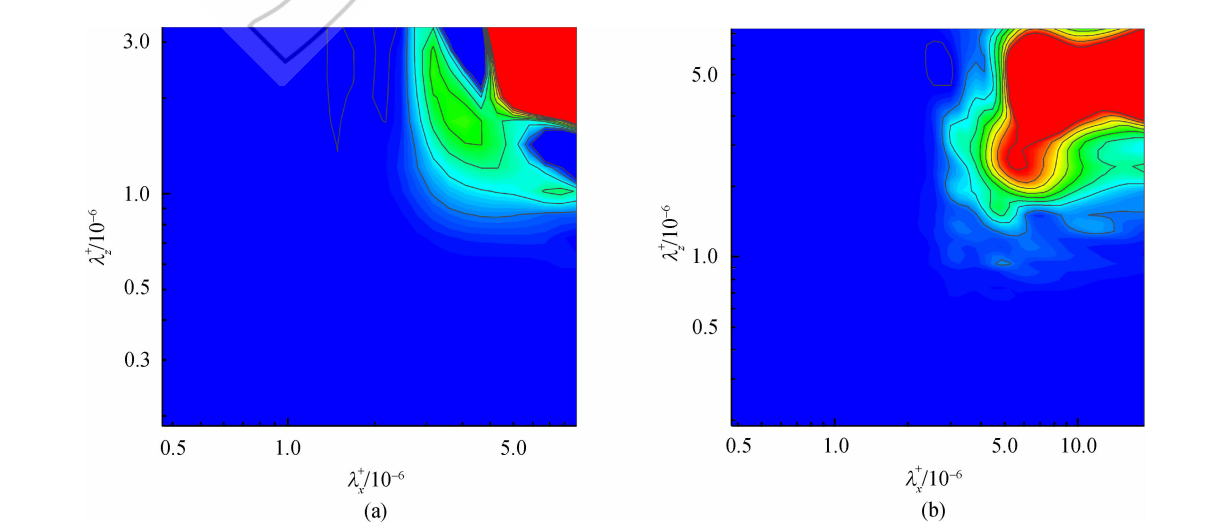


图 9 $Re_\tau=540$ 下不同计算域的频谱图

Fig. 9 Premultiplied two-dimensional spectra in different computational domains at $Re_\tau=540$



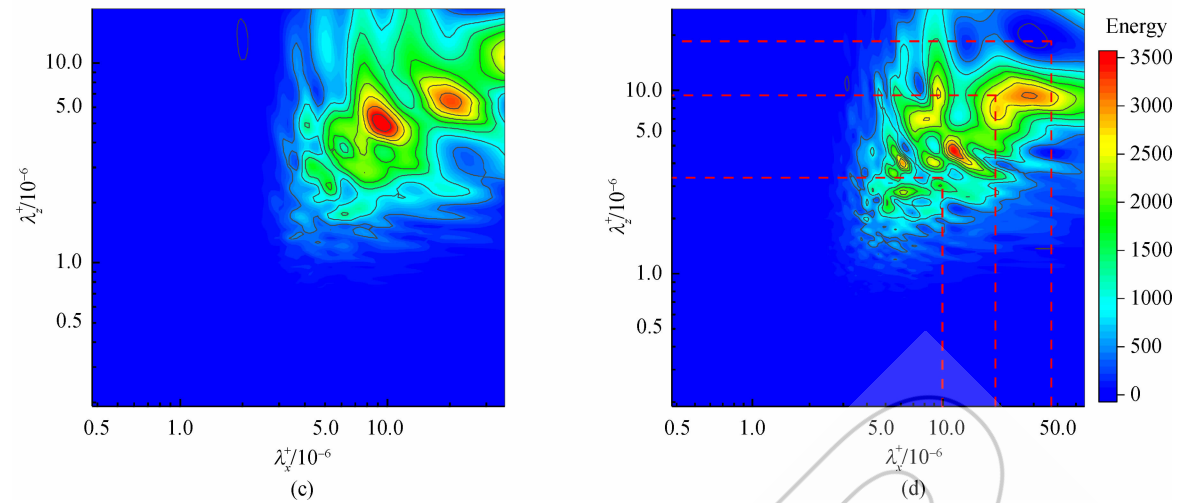


图 10 $Re_{\tau}=930$ 下不同计算域的频谱图

Fig. 10 Premultiplied two-dimensional spectra in different computational domains at $Re_{\tau}=930$

表 2 不同摩擦雷诺数下计算域监测区间

Table 2 Monitoring area of computational domain at different Reynolds numbers

算例	$\lambda_{x,\min}^+/10^{-7}$	$\lambda_{z,\min}^+/10^{-7}$	$\lambda_{x,\max}^+/10^{-7}$	$\lambda_{z,\max}^+/10^{-7}$	$s^+/10^{-12}$	$(s^+/s_{\text{case08}}^+)/\%$
case01	3.58	3.39	57.34	20.35	9.11	0.60
case02	3.66	1.83	106.07	53.13	52.53	3.45
case03	3.62	1.81	210.20	105.00	213.17	14.00
case04	3.65	1.82	313.82	156.91	481.03	31.58
case05	3.68	1.86	99.47	33.46	30.27	1.99
case06	3.77	1.89	188.56	94.45	171.04	11.23
case07	3.78	1.89	370.39	185.03	671.43	44.08
case08	3.78	1.89	555.71	277.86	1523.16	

3 结 论

1) 通过 LES 湍流计算,不同大小的计算域得到的计算结果均有一定误差,计算域为 $0.53\pi\delta\times 2\delta\times 0.177\pi\delta$ 时误差相对严重,计算域 $2\pi\delta\times 2\delta\times \pi\delta$ 和 $3\pi\delta\times 2\delta\times 1.5\pi\delta$ 两者计算结果吻合较好,能很好地呈现湍流计算结果。

2) 通过能谱分析,计算域 $0.53\pi\delta\times 2\delta\times 0.177\pi\delta$ 所包含的湍流信息缺失严重,计算域 $2\pi\delta\times 2\delta\times \pi\delta$ 和 $3\pi\delta\times 2\delta\times 1.5\pi\delta$ 包含信息基本完全,考虑到计算资源等因素,建议选取 $2\pi\delta\times 2\delta\times \pi\delta$ 为槽道湍流数值模拟基准。

3) 通过对比两种摩擦雷诺数下频谱图所包含信息的差异以及最小计算域对计算结果的影响。发现 $Re_{\tau}=930$ 相较于 $Re_{\tau}=540$ 而言,相同计算域下所能检测的范围均有所提升,得到的计

算结果更加准确。

目前,本文计算了两个摩擦雷诺数下以及四个不同大小计算域下的计算结果,为进一步的研究提供了参考以及支持。而在未来的研究工作中,可以尝试更多的摩擦雷诺数以及计算域计算尺度,通过更加充实的计算结果,以期得到更加普适的结论。

参考文献:

[1] KNOPP T, ALRUTZ T, SCHWAMBORN D. A grid and flow adaptive wall-function method for RANS turbulence modelling[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 220 (1): 19-40.

[2] BLAZEK J. Computational fluid dynamics: principles and applications[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2005: 8-10, 243-246.

[3] WISSINK J G. DNS of separating low Reynolds number

- flow in a turbine cascade with incoming wakes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 626-635.
- [4] KIM J, MOIN P, MOSER R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177: 133-166.
- [5] HOYAS S, JAVIER J. Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to $Re_\tau=2003$ [J]. Physics of Fluids, 2006, 18(1): 011702. 1-011702. 4.
- [6] NICOU D, FRÉDÉRIC D. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor[J]. Flow Turbulence and Combustion, 1999, 62(3): 183-200.
- [7] WEICKERT M, TEIKE G, SCHMIDT O, et al. Investigation of the LES WALE turbulence model within the lattice Boltzmann framework[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2010, 59(7): 2200-2214.
- [8] JIMÉNEZ J, MOIN P. The minimal flow unit in near-wall turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 225: 213-240.
- [9] LOZANO-DURÁN A, JIMÉNEZ J. Effect of the computational domain on direct simulations of turbulent channels up to $Re_\tau=4\ 200$ [J]. Physics of Fluids, 2014, 26(1): 011702. 1-011702. 7.
- [10] CHU D C, KARNIADAKIS G E. A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 250: 1-42.
- [11] VREMEN A W, KUERTEN J G M. Comparison of direct numerical simulation databases of turbulent channel flow at $Re_\tau=180$ [J]. Physics of Fluids, 2014, 26(1): 015102. 1-015102. 21.
- [12] NG J H, JAIMAN R K, LIM T T. Direct numerical simulations of riblets in a fully-developed turbulent channel flow: effects of geometry[M]//SENGUPTA T K, LELE S K, SREENIVASAN K R, et al. Advances in Computation, Modeling and Control of Transitional and Turbulent Flows. Singapore: World Scientific, 2016: 155-165.
- [13] BENSCHOP H O G, BREUGEM W P. Drag reduction by herringbone riblet texture in direct numerical simulations of turbulent channel flow[J]. Journal of Turbulence, 2017, 18(8): 717-759.
- [14] MARTIN S, BHUSHAN B. Fluid flow analysis of a shark-inspired microstructure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 756: 5-29.
- [15] 王泽, 刘卫明. 壁面湍流模型对湍流分离流动数值模拟的影响[J]. 空气动力学学报, 2002, 23(2): 198-205.
WANG Ze, LIU Weiming. Effects of near-wall turbulence model on numerical simulation of turbulent separated flows[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2002, 23(2): 198-205. (in Chinese)
- [16] 俞建阳, 王若玉, 陈浮, 等. 不同亚格子模型的对比分析及其运用[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(11): 2311-2318.
YU Jianyang, WANG Ruoyu, CHEN Fu, et al. A comparison of the different subgrid-scale models and its application [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(11): 2311-2318. (in Chinese)
- [17] 杨海霞. 沟槽面湍流边界层减阻的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
YANG Haixia. Numerical study on drag reduction of turbulent boundary layer in trough surface[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [18] CELIK I B, CEHRELI Z N, YAVUZ I. Index of resolution quality for large eddy simulations[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(5): 949-958.
- [19] AUPOIX B, PAILHAS G, HOUEVILLE R. Towards a general strategy to model riblet effects[J]. AIAA Journal, 2012, 50(3): 708-716.
- [20] 马峰, 黄少峰, 朱德祥. 湍流模型在船舶计算流体力学中的适用性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2009, 24(2): 207-216.
MA Zheng, HUANG Shaofeng, ZHU Dexiang. Study on applicability of turbulence model in ship computational fluid dynamics[J]. Journal of Hydrodynamics (A), 2009, 24(2): 207-216. (in Chinese)
- [21] ZANOUN E S, DURST F, NAGIB H. Evaluating the law of the wall in two-dimensional fully developed turbulent channel flows[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(10): 3079-3089.
- [22] CHIN C C, HUTCHINS N, OOI A S H, et al. Use of direct numerical simulation (DNS) data to investigate spatial resolution issues in measurements of wall-bounded turbulence[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(11): 115401. 1-115401. 10.

(编辑: 陈 越)