

相干结构的尺度相似性与尺度相似亚格子模型

王瑞新¹, 姜楠^{2,3}

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072; 3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 为了对多尺度相干结构在湍流大涡模拟尺度相似亚格子模型中的作用进行实验测量研究, 分析尺度相似亚格子模型的适用尺度范围以及尺度相似亚格子模型沿平板湍流边界层法向的变化规律. 用热线风速仪以高于对应最小湍流时间尺度的分辨率精细测量了风洞中平板湍流边界层不同法向位置流向速度分量的时间序列信号. 用局部平均速度结构函数检测湍流多尺度相干结构的条件采样方法将壁湍流信号中的多尺度相干结构成份与非相干成份分离. 比较去除多尺度相干结构成份前后尺度互相关系数的变化规律, 研究多尺度相干结构在湍流不同尺度间动量、能量传递的机理. 研究表明, 不同尺度的湍流结构相似特性存在一个尺度范围, 大涡模拟的尺度相似亚格子尺度不能大于能量最大尺度.

关键词: 壁湍流; 多尺度相干结构; 大涡模拟; 尺度相似亚格子模型

doi: 10.3969/j.issn.1006-7043.201107051

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20120927.0959.014.html>

中图分类号: O357.5 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2012)10-1283-06

Scale similarity of coherent structures and scale-similar sub-grid model

WANG Ruixin¹, JIANG Nan^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The research sought an investigation of the effect of multi-scale coherent eddy structures on scale-similar LES (large eddy simulation) sub-grid model of turbulence flow. The main focus of the study examined the valid scale range of LES scale-similar sub-grid model, as well as its evolution in normal-wall direction across turbulent boundary layer. Time sequence signals of longitudinal velocity component at different normal-wall positions in turbulent boundary layer are measured by IFA300 constant temperature anemometer and hot-wire probe with sampling resolution higher than the frequency that corresponds to the smallest time scale of turbulence. Multi-scale coherent eddy structures are extracted from turbulent fluctuating velocity signals by locally-averaged velocity structure function and conditional sampling method. Velocity fluctuating signals, including or excluding coherent eddy structures, are separated respectively. A comparison of scale-correlation factors with and without multi-scale coherent eddy structures was performed. The mechanism of kinetic and momentum transfer in turbulence was revealed utilizing the concept of multi-scale coherent eddy structure. There is a scale range where scale similarity is valid. The scale where LES scale-similar sub-grid model is valid must be smaller than the maximum energetic scale.

Keywords: wall-bounded turbulence; multi-scale coherent eddy structures; LES (large eddy simulation); scale-similar sub-grid model

湍流模式理论和湍流大涡模拟是目前解决工程湍流问题的有效方法. 但模式理论的雷诺平均方程

和大涡模拟方程均会产生未知的雷诺应力项或亚格子雷诺应力项, 导致求解方程不封闭. 为了解决上述不封闭问题, 需要对雷诺应力项或亚格子雷诺应力项引进一系列模型假设, 使雷诺平均方程或大涡模拟方程封闭^[1]. 湍流是不同尺度和不同强度湍涡引起的不规则脉动的叠加^[2], 湍流脉动是由不同尺度涡结构的运动迭加在一起形成的^[3]. 因此, 对湍流

收稿日期: 2011-07-19. 网络出版时间: 2012-9-27 9:59.
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10832001); 国家973计划资助项目(2012CB720101).
作者简介: 王瑞新(1972-), 男, 博士研究生;
姜楠(1968-), 男, 教授, 博士生导师.
通信作者: 姜楠, E-mail: nanj@tju.edu.cn.

中的结构进行研究,需要将湍流脉动速度信号分解成不同尺度进行研究. 每一个尺度中还存在着不同层次的结构. 近年来已发现在湍流中存在普适的有序的小尺度结构. G Ruiz Chavarria^[4]、F. Toschi^[5-6]、R. Camussi^[7]、Ciguél Onorato^[8]均发现槽道湍流近壁区和平板湍流边界层中存在着多尺度相干结构^[9]. 研究湍流中的多尺度相干结构具有重要意义. 首先研究湍流中的多尺度相干结构可以提出基于湍流多尺度结构分解的新的数值模拟方法. M. Farge^[10]提出了基于子波分解的湍流相干涡数值模拟技术(coherent vortex simulation, CVS). 其次研究剪切湍流中的多尺度相干结构可以建立更加符合湍流机理的分尺度湍流模型和湍流亚格子尺度模型, Charles Meneveau^[11]提出了基于子波分解多尺度的湍流脉动动能能流等新的物理概念,是建立新的湍流模式和湍流亚格子尺度模型的理论基础.

本文在上述研究工作的基础上,采用热线测速技术对多尺度相干结构在湍流大涡模拟尺度相似亚格子模型中的作用进行了实验测量研究. 精细测量了风洞中平板湍流边界层不同法向位置流向速度分量的时间序列信号,比较了去除多尺度相干结构成份前后尺度互相关系数的变化规律,研究多尺度相干结构在湍流不同尺度间动量、能量传递的机理. 分析了尺度相似亚格子模型的适用尺度范围以及尺度相似亚格子模型沿平板湍流边界层法向的变化规律.

1 大涡模拟尺度相似亚格子模型

Bardina 等^[12]认为,从大尺度脉动到小尺度脉动的动量输运主要由大尺度脉动中的最小尺度脉动来产生,并且过滤后的最小尺度脉动速度和过滤掉的小尺度脉动速度相似. 据此提出了亚格子动量输运模型,称为尺度相似模型.

设 Δ 尺度上做一次过滤后,小尺度脉动为

$$u_i' = u_i - \bar{u}_i.$$

亚格子应力为

$$\tau_{ij} = -(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j).$$

在一次滤波后再做一次滤波(过滤尺度可以等于或大于 Δ) 得到大尺度脉动中的最小脉动:

$$\bar{u}_i' = \bar{u}_i - \bar{\bar{u}}_i.$$

根据尺度相似假定应有

$$\overline{u_i' u_j'} \approx \bar{u}_i' \bar{u}_j' = (\bar{u}_i - \bar{\bar{u}}_i)(\bar{u}_j - \bar{\bar{u}}_j),$$

以及

$$\overline{u_i' u_j} \approx \bar{u}_i' \bar{u}_j = (\bar{u}_i - \bar{\bar{u}}_i) \bar{u}_j$$

经过代数运算,可得:

$$\tau_{ij} = -(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \approx (\overline{\bar{u}_i u_j} - \bar{\bar{u}}_i \bar{u}_j). \quad (1)$$

或

$$\tau_{ij} = C_{ss}(\overline{\bar{u}_i u_j} - \bar{\bar{u}}_i \bar{u}_j).$$

其中 C_{ss} 是尺度相似模式的系数,应用伽利略不变性原理,模式常数 C_{ss} 必须等于 1.

大涡模拟的主要困难在于计算固壁附近流动的不准确性,其原因在于亚格子尺度模型没有将相干结构在壁湍流中的作用与亚格子尺度模型联系起来. 为了分析壁湍流相干结构对大涡模拟亚格子尺度模型的影响机理,本文在平板湍流边界层中对大涡模拟亚格子动量尺度相似模型进行了实验验证,分析了壁湍流多尺度相干结构对大涡模拟亚格子尺度模型的影响机制,肯定了相干结构的多尺度相似特性在尺度相似亚格子动量模型中的重要作用.

2 壁湍流热线测量技术

实验在低速回流式风洞中完成,实验用不锈钢平板长 1 500 mm,宽 800 mm,厚 2 mm,前缘为尖楔形,固定在风洞实验段的水平中心,与自由来流方向平行,平板前缘下游 20 mm 处开始沿展向贴宽 40 mm 砂纸带作为人工扰动装置,以加速边界层转捩. 实验验证在距离平板前缘 $X = 600$ mm 下游已形成充分发展的湍流边界层.

用 TSI 公司 IFA300 型恒温热线风速仪及 TSI-1211-T1.5 型单丝边界层热线探针进行测量,热线敏感材料为直径 $2.5 \mu\text{m}$ 的钨丝. 用工具显微镜测量探针钨丝距离壁面的最小距离为 0.2 mm. 实验中自由来流风速 7.8 m/s,在风洞中心线沿着 $X = 600 \sim 1\ 000$ mm 不同的流向位置进行平均流场的测量. 从距离壁面 $y = 0.2$ mm 的位置开始沿平板湍流边界层的法向精细测量湍流边界层流向速度分量的时间序列信号,采样频率 50 K,每个空间点采样时间长度 21 s,测量数据量 1 048 576,每个流向位置的速度剖面沿法向共测量 102 个空间点. 测量结果表明,在距离平板前缘 $X = 700$ mm 的测量点处产生边界层名义厚度 $\delta = 10$ mm 的充分发展湍流边界层,对应雷诺数 $Re_\delta = \frac{U_\infty \delta}{\nu} = 48\ 470$,利用壁湍流对数律平均速度剖面与壁面摩擦速度、流体粘性系数等内尺度物理量的关系,在 $60 < y^+ < 120$ 区间段通过牛顿非线性迭代拟合,得到壁面摩擦速度 $u_* = 0.36$ m/s,壁面摩擦系数 $C_f = 0.000\ 42$. 用粘性内尺度单位无量纲化的湍流边界层半对数坐标平均速度剖面如图 1 所示.

图 1 为用粘性内尺度单位壁面摩擦速度 u_* 和运动黏性系数 ν 无量纲化的平均速度剖面. 其中 $u^+ = U(y)/u_*$ 是无量纲化的流向平均速度, $y^+ = yu_*/\nu$ 是无量纲化的壁面法向坐标. 从中可以明显

分辨出近壁区缓冲层、对数律层以及外区的尾流层，说明本流场符合标准的充分发展湍流边界层流场。

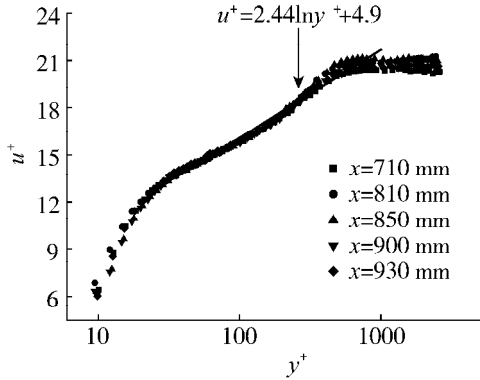
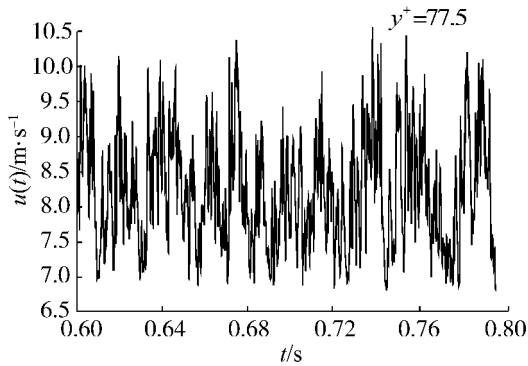


图 1 湍流边界层无量纲平均速度剖面

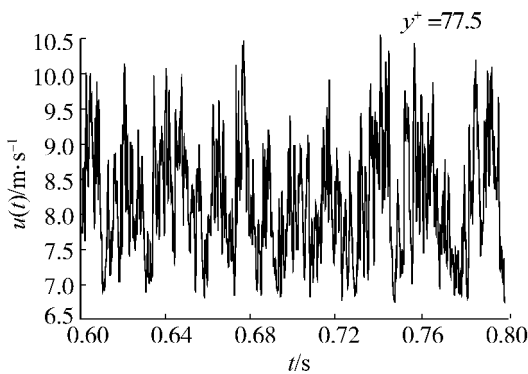
Fig. 1 Mean velocity profile of turbulent boundary layer

3 分尺度雷诺应力的尺度相似性

首先,为了验证湍流多尺度局部平均速度结构函数分解和重构程序的正确性,对距离壁面 $y^+ = 77.5$ 的流向速度时间序列信号进行了 20 尺度的分解和重构,如图 2 所示.为了显示清楚小尺度脉动的细节,图中只给出 0.2 s 内的部分.由图可以看出 2 个速度信号的波形完全一致,说明所使用的程序是可靠的.



(a) 测量的速度信号



(b) 重构的速度信号

图 2 测量的速度信号与重构的速度信号比较

Fig. 2 Comparison of the measured velocity signal and the reconstructed velocity signal

为了考虑湍流结构的多尺度效应,进行湍流脉动速度信号的局部平均速度结构函数多尺度分解和重构,重构后的 20 个单一尺度的脉动速度信号如图 3 所示.图 4 为每一个尺度的湍流结构所拥有的湍流脉动动能占全部湍流脉动动能的百分比.图 4 表明,不同尺度的结构占有的湍流脉动动能是不同的.存在着一个能量最大尺度 a^* ,对应的湍流结构占有最多的湍流脉动动能,在缓冲层能量最大尺度为第 8 个尺度,在对数律层和外区,能量最大尺度为第 9 个尺度,说明在湍流边界层的不同位置,起主要作用的湍流结构的尺度是不同的,这符合对数律层相干结构的尺度大于缓冲层相干结构的尺度.图 5 为单一尺度湍流脉动速度无量纲化的平坦因子随尺度的分布,与图 4 对比发现,小于能量最大尺度 a^* 的结构,平坦因子 $FF(a) \geq 3$,表明这些尺度的湍流结构中存在大量间歇性的相干结构.大于能量最大尺度 a^* 的结构,平坦因子 $FF(a) \leq 3$,表明这些大尺度结构没有单体的涡旋形相干结构,而是由小尺度相干结构耦合而成的局部波包结构.

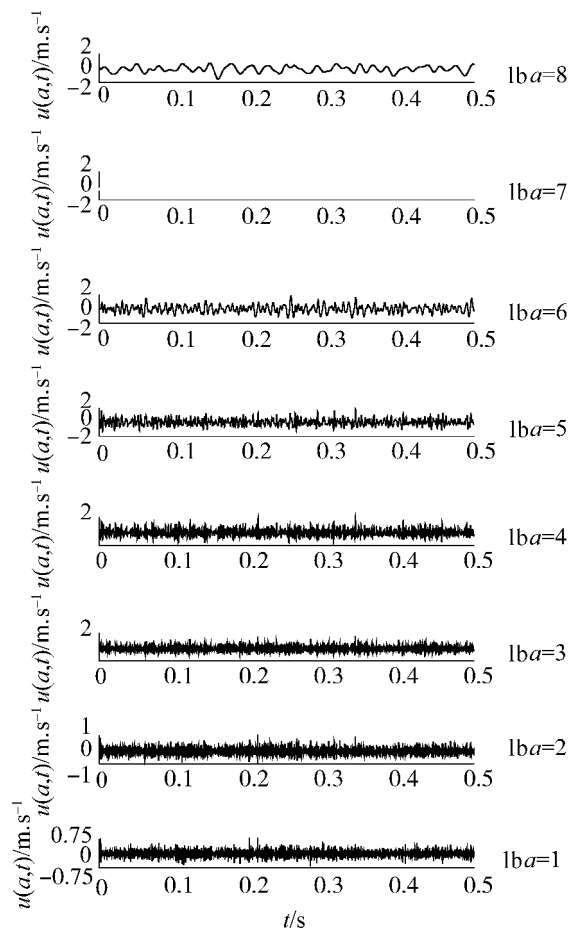


图 3 重构的单一尺度脉动速度信号

Fig. 3 Reconstruction of single-scale fluctuating velocity signals

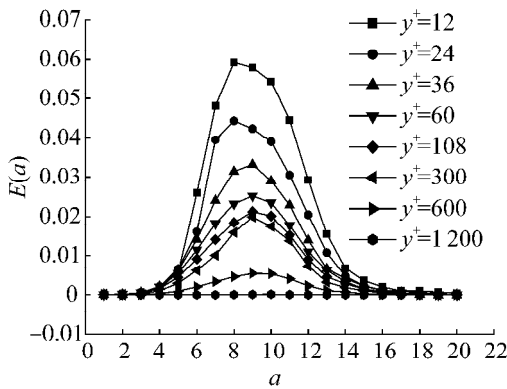


图4 分尺度湍流脉动动能随尺度分布

Fig. 4 Evolution of single-scale fluctuating kinetic energy across scales

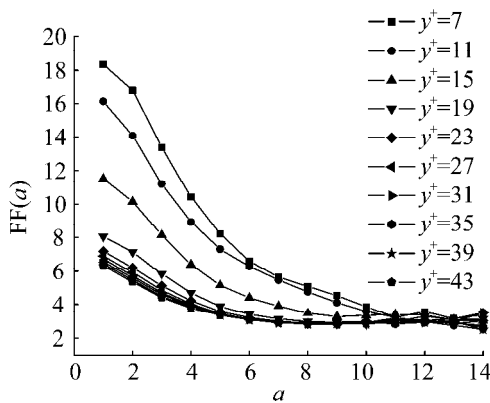


图5 分尺度结构的平坦因子随尺度的分布

Fig. 5 Evolution of single-scale flatness across scales

为了从壁湍流脉动速度信号中检测和提取壁湍流相干结构成分,姜楠等^[13-14]提出了用多尺度局部平均速度结构函数的瞬时强度因子和平坦因子提取壁湍流相干结构猝发事件瞬时脉动速度信号的方法.从平板湍流边界层实验测量数据分离出壁湍流相干结构瞬时脉动速度信号和非相干结构瞬时脉动速度信号.图6给出了利用上述方法分离出来的不同尺度的相干结构脉动速度信号.从图6可以看出,不同尺度相干结构的流向脉动速度信号具有很好的尺度关联特性,有大尺度相干结构的时刻一定有小尺度相干结构,大小尺度相干结构呈现优美的多尺度嵌套规律,一个较大尺度速度信号下都嵌套着下一尺度的速度信号,并且不同尺度的信号有着很好的相似性,说明大尺度相干结构的猝发过程与小尺度的强烈脉动是同时发生的,在此过程中实现湍流能量和能量向小尺度的传递.多尺度相干结构的尺度相似特性是大涡模拟动量相似亚格子尺度模型的物理基础.图7给出了1~8尺度分离出的相干结构局部平均结构函数重构以后的相干结构速度信号,可以看到相干结构间歇性地经过测量探针.

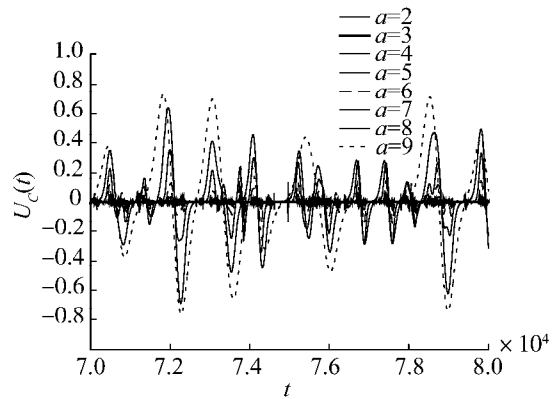


图6 重构的单一尺度相干结构脉动速度信号

Fig. 6 Reconstruction of single-scale fluctuating velocity signals for coherent structures

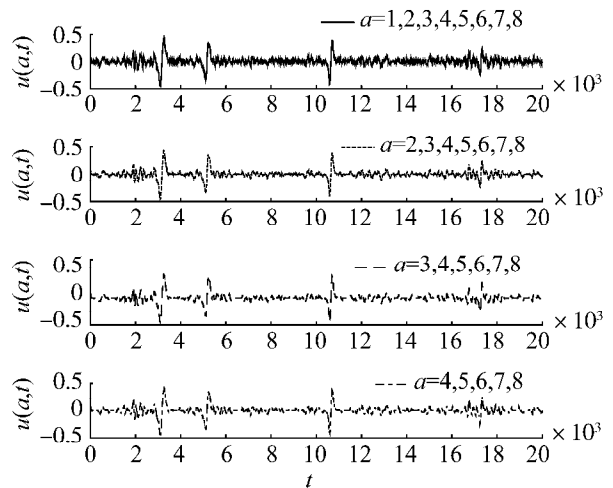


图7 重构的多尺度复合相干结构速度信号

Fig. 7 Reconstruction of composite fluctuating velocity signals for coherent structures

为了进一步证实多尺度相干结构的尺度相似特性在动量相似亚格子尺度模型中的作用,用检测湍流多尺度相干结构的条件采样方法将壁湍流信号中的多尺度相干结构成份与非相干成分分离,将此信号分解为2部分:1)检测出的局部湍流多尺度相干结构信号;2)去除相干结构以后的非相干成分信号,分别针对不同尺度的单一尺度未分离相干结构的混合脉动速度信号、单一尺度的相干结构脉动速度信号、单一尺度的分离相干结构脉动速度信号以后剩下的非相干成分脉动速度信号,计算式(1)左右两边的相关性.

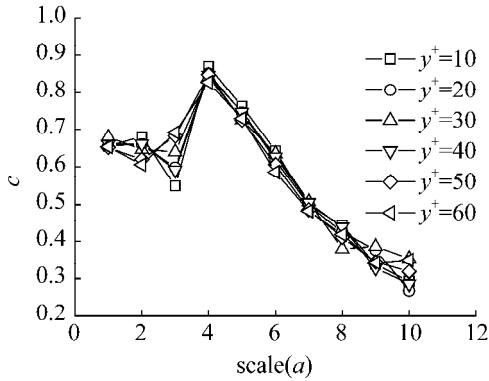
设 $u_1'(a)$ 即为第 a 个尺度的流向脉动速度分量,即第 a 个尺度低通流向速度 $u_1(a)$ 与第 $a+1$ 个尺度低通流向速度 $u_1(a+1)$ (即 $u_1(a)$ 的低通滤波)之差.

$$S_1(a) = \overline{u_1'(a) u_1'(a)},$$

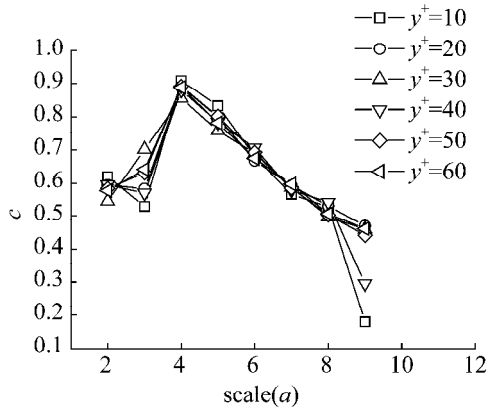
$$S_2(a) = \overline{u_1'(a+1) u_1'(a+1)}.$$

为了验证湍流大涡模拟尺度相似亚格子模型中速度相邻尺度成份间尺度相似性,需要计算 $S_1(a)$

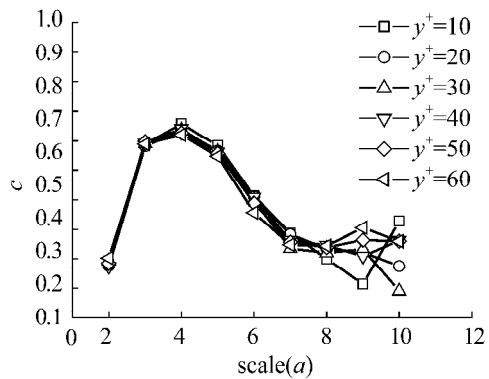
与 $S_2(a)$ 的相关系数 $C_{11}(a)$. 通过运算, 分别得到不同法向位置处流向脉动速度的相关系数 $C_{11}(a)$ 随尺度参数 a 的变化规律, 以及 $C_{11}(a)$ 随平板湍流边界层法向的变化规律. 图 8 分别给出不同尺度的单一尺度未分离相干结构的混合脉动速度信号、单一尺度的相干结构脉动速度信号、单一尺度的分离相干结构脉动速度信号以后剩下的非相干成分脉动速度信号, $C_{11}(a)$ 及其随湍流边界层法向的变化规律.



(a) 含有相干结构时近壁 6 个不同法向位置相关系数 $C_{11}(a)$ 随尺度参数 a 变化规律



(b) 仅保留相干结构时近壁 6 个不同法向位置相关系数 $C_{11}(a)$ 随尺度参数 a 的变化规律



(c) 去除相多尺度干结构后, 近壁 6 个不同法向位置相关系数 $C_{11}(a)$ 随尺度参数 a 的变化规律

图 8 $C_{11}(a)$ 随尺度的变化规律

Fig. 8 Variation of $C_{11}(a)$ across scales

图 8(a) 含有相干结构时近壁 6 个不同法向位置相关系数 $C_{11}(a)$ 随尺度参数 a 变化规律. 如果将小尺度高频噪声影响忽略, 可以看出随着尺度 a 增加尺度相关性 $C_{11}(a)$ 逐渐降低的趋势, 其中第 4 尺度的尺度相似互相关系数大约为 0.9, 第 6 尺度的尺度相似互相关系数大约为 0.6, 第 8 尺度的尺度相似互相关系数则小于 0.5. 所以为了保证湍流大涡模拟的亚格子动量传递的尺度相似性, 湍流大涡模拟的亚格子尺度不能大于第 8 尺度. 图 8(b) 为仅保留相干结构时近壁 6 个不同法向位置相关系数 $C_{11}(a)$ 随尺度参数 a 的变化规律, 从图 8(b) 中可以看出, 多尺度相干结构间动量传递的尺度互相关系数与图 8(a) 所示的尺度互相关系数非常接近, 说明湍流中的多尺度相干结构在湍流相邻尺度间的动量、能量传递中起主要作用, 是湍流相邻尺度间的动量、能量传递的主体结构, 对湍流相邻尺度间的动量、能量传递负有主要责任. 图 8(c) 为去除相多尺度干结构后, 近壁 6 个不同法向位置相关系数 $C_{11}(a)$ 随尺度参数 a 的变化规律, 从图 8(c) 中可以看出, 去除多尺度相干结构后, 多尺度结构间动量传递的尺度互相关系数明显降低, 其中第 4 尺度的尺度相似互相关系数小于 0.7, 第 6 尺度的尺度相似互相关系数小于 0.4, 第八尺度的尺度相似互相关系数则小于 0.3. 湍流相邻尺度间的动量、能量传递的相关性下降了大约 40%. 这同样说明湍流中的多尺度相干结构在湍流相邻尺度间的动量、能量传递中起主要作用, 是湍流相邻尺度间的动量、能量传递的主体结构, 对湍流相邻尺度间的动量、能量传递负有主要责任. 多尺度相干结构的尺度相似特性是大涡模拟动量相似亚格子尺度模型的物理基础.

4 结 论

1) 湍流中的多尺度相干结构在湍流相邻尺度间的动量、能量传递中起主要作用, 是湍流相邻尺度间的动量、能量传递的主体结构, 对湍流相邻尺度间的动量、能量传递负有主要责任. 多尺度相干结构的尺度相似特性是大涡模拟动量相似亚格子尺度模型的物理基础.

2) 大尺度结构猝发过程与相邻小尺度结构的猝发过程密切相关, 二者几乎是同时发生的. 能量最大尺度结构在猝发过程中从湍流从平均运动获得能量, 与此同时, 在大尺度结构猝发过程中实现了动量和能量向相邻小尺度结构的传递.

3) 不同尺度的湍流结构相似特性存在一个尺度范围, 不能超过能量最大尺度, 本文实验条件下为第 8 尺度, 相应 12.8 ms 或者 105 个粘性内尺度时

间单位. 因此, 大涡模拟的尺度相似亚格子尺度不能大于能量最大尺度.

参考文献:

- [1] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论与模拟 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 238-240.
- [2] 舒玮, 姜楠. 湍流中涡的尺度分析 [J]. 空气动力学报, 2000, 18(增刊): 89-95.
SHU Wei, JIANG Nan. Analysis of eddy scale in turbulent flows [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(suppl): 89-95.
- [3] 姜楠, 王瑞新. 湍流边界层微小尺度流动结构的精细实验测量 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(5): 644-648.
JIANG Nan, WANG Ruixin. Finely experimental measurement of micro-scale flow structures in turbulent boundary layer [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(5): 644-648.
- [4] CHAVARRIA G R, CILIBERTO S, BAUDET C, et al. Scaling properties of the streamwise component of velocity in a turbulent boundary layer [J]. Physica D, 2000, 141(3): 183-198.
- [5] TOSCHI F, AMATI G, SUCCI S, et al. Intermittency and structure functions in channel flow turbulence [J]. Physics Review Letter, 1999, 82(25): 5044-5047.
- [6] TOSCHI F, LEVEQUE E, CHAVARRIA G R. Shear effects in non-homogeneous turbulence [J]. Physics Review Letter, 2000, 85(7): 1436-1439.
- [7] CAMUSSI R, GUJ G. Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: intermittency and coherent structures [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 348: 177-199.
- [8] ONORATO M, CAMUSSI R, IUSO G. Small scale intermittency and bursting in a turbulent channel flow [J]. Physical Review E, 2000, 61(2): 1447-1454.
- [9] 姜楠, 田砚. 子波分析检测壁湍流多尺度相干结构及其间歇性 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(1): 7-12.
JIANG Nan, TIAN Yan. Experimental investigation of multi-scale coherent structures and intermittency in turbulent boundary layer [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(1): 7-12.
- [10] FARGE M, SCHNEIDER K. Coherent vortex simulation (CVS), a semi-deterministic turbulence model using wavelet [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2001, 66: 393-426.
- [11] MENEVEAU C. Analysis of turbulence in the orthonormal wavelet representation [J]. J Fluid Mech, 1991, 232: 469-520.
- [12] BARDINA J. Improved subgrid model for large-eddy simulation [C] // 13th Fluid and Plasma Dynamics Conference. Snowmass, USA, 1980.
- [13] 常跃峰, 姜楠. 沟槽壁面湍流边界层相干结构被动控制的热线测量 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(7): 705-711.
CHANG Yuefeng, JIANG Nan. Hot-wire measurements of passive control for coherent structure in the turbulent boundary layer of a groove-riblet surface [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(7): 705-711.
- [14] JIANG Nan, LIU Wei, LIU Jianhua, et al. Phase-averaged waveforms of Reynolds stress in wall turbulence during the burst events of coherent structures [J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy, 2008, 51(7): 857-866.

[责任编辑: 郑可为]