

文章编号: 1001-4888(2010)01-0001-08

湍流边界层相干结构剩余脉动 雷诺应力项的实验测量^{*}

郭爱东^{1,3}, 姜楠^{1,2}

(1. 天津大学 力学系, 天津 300072; 2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072;
3. 军事交通学院 装运机械系, 天津 300161)

摘要: 用 IFA300 恒温热线风速仪和 X 形二分量热线探针以采样间隔小于湍流耗散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的瞬时流向、法向速度分量的时间序列信号。用条件采样和相位平均技术提取了相干结构猝发过程中相干结构剩余脉动雷诺应力和随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力的条件相位平均波形。基于理论上对湍流相干结构动量方程中随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力和相干结构剩余脉动雷诺应力项的分析, 对两种雷诺应力项进行了对比研究。研究发现, 相干结构剩余脉动雷诺应力项在数值上具有和随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力相同的数量级, 表明在相干结构动力学模型方程中, 相干结构剩余脉动雷诺应力项并不像以前估计的那样可以忽略不计。

关键词: 湍流边界层; 相干结构剩余脉动雷诺应力; 随机脉动贡献雷诺应力

中图分类号: O357 **文献标识码:** A

0 引言

在湍流场中, 除平均流外, 同时还存在着不同尺度的相干结构成分和随机脉动成分, 所有与流动有关的物理量都可以分解为三部分^[1]:

$$f = \bar{f} + \tilde{f} + f' \quad (1)$$

其中 $\bar{f}$ 为由长时间平均得到的平均量; $\tilde{f}$ 为由相位平均量减去长时间平均量后得到的相干结构成分; f' 为湍流随机脉动量, 并且认为 $\tilde{f}$ 与 f' 是统计无关的。

如果用 $\bar{f}$ 表示对 f 的长时间平均, $\langle f \rangle$ 表示对 f 的相位平均, 考虑不可压缩流体动量方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} u_i \quad (2)$$

连续性方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

将速度场和压力场按如下方式进行三项分解:

$$u_i = \bar{u}_i + \tilde{u}_i + u'_i \quad (4)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} + p' \quad (5)$$

将(4)式和(5)式分别代入(2)式和(3)式, 将得到的式子分别做相位平均和长时间平均, 并用方程的相位平均减去长时间平均, 可以得到相干结构满足的方程:

^{*} 收稿日期: 2009-06-08; 修订日期: 2009-10-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10832001), 面上项目(10872145), 教育部高等学校新世纪优秀人才支持计划, 天津市科技发展计划(06TJJC13800), 上海市应用数学和力学研究所对外开放课题资助项目

通讯作者: 姜楠(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事湍流与实验流体力学的研究。E-mail: nanj@tju.edu.cn

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} \tilde{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \tilde{\gamma}_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tilde{s}_{ij} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

式(6)中,随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项 $\tilde{\gamma}_{ij} = -(\langle \tilde{u}'_i \tilde{u}'_j \rangle - \overline{\tilde{u}'_i \tilde{u}'_j})$ 以未知项的形式出现在方程中,引起相应的方程组不封闭,给求解带来困难。为了解决平均方程组的不封闭性问题,需要依靠理论与经验的结合,对雷诺应力项引进一系列模型假设,建立雷诺应力未知项与相位平均量之间的本构关系,使平均方程组(6)、(7)封闭。针对随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项 $\tilde{\gamma}_{ij}$, Reynolds^[1]、Wu^[2]、罗纪生和周恒^[3]分别提出了用流动稳定性理论解释湍流边界层外区大尺度相干结构的理论模型。这些理论模型后来也相继得到了 Brown^[4]、Falco^[5]、Antonia^[6]、王昕^[7]、王新军和罗纪生^[8]以及李万平^[9]、罗纪生和王新军^[10]等人在数值模拟和实验等方面的验证。

对于相干结构剩余脉动雷诺应力项 $\tilde{s}_{ij} = -(\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle - \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j})$, 以前并没有进行过定量的实验测量。为了减少求解方程(6)、(7)时非线性项 $\tilde{s}_{ij}$ 带来的困难,一般认为该项在研究相干结构的起源问题时可以略去,是一级近似,而考虑此非线性项后产生的高次谐波,则是高阶修正项^[3]。本文在三元回流式低速风洞中,针对湍流相干结构动量方程中相干结构剩余脉动雷诺应力项 $\tilde{s}_{ij}$ 和随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项 $\tilde{\gamma}_{ij}$ 进行了实验测量,研究两类雷诺应力项的量级关系,为建立相干结构动力学模型提供了实验依据。

1 实验设备与测量方法

实验在天津大学流体力学实验室三元回流式低速风洞中完成,风洞为回流式闭口低速风洞,主要用于湍流的实验测量研究。风洞截面形状除风扇段为圆形外,其它均为八角形,实验段截面尺寸为高 0.60m,宽 0.80m,四角各切去一个 100mm×100mm 的切角,实验段长 1500mm,风洞的收缩比为 6.75,实验段气流速度在 40m/s 以下连续可调,原始湍流度 $\epsilon < 0.2\%$,流速稳定性 $\frac{|U - \bar{U}|_{\max}}{\bar{U}} < 0.2\%$,流速场的均匀性 $\frac{\sigma}{\bar{U}} < 0.25\%$ 。

实验用光滑平板水平放置在风洞实验段内,正对来流方向的平板前缘为楔形,平板前缘固定有绊线并贴有砂纸,以加速边界层转捩,保证在探针测量位置形成充分发展的湍流,平板中心线沿流向有多个测压孔与多管压力计相连,用以监测平板上流向压力梯度变化,保证流向压力梯度为零。在距离平板前端 800mm 处,用美国 TSI 公司 IFA300 型恒温热线风速仪,并用 TSI-1243-T1.5 型 X 形双丝热线探针进行测量,热线探针的热线敏感材料是直径为 5μm 的钨丝,TSI-1243-T1.5 型 X 形双丝热线探针的两根热线在空间成 X 形布置,用来测量空间一点的流向和法向的二维速度分量。

实验时大气压力为 759.81mmHg,温度为 19.5℃,来流速度为 12.6m/s。用 TSI-1243-T1.5 型 X 形双丝热线探针在流场的同一流向位置沿法向方向一共测量了 106 个测点,得到了各测点的流向、法向二维瞬时速度分量,测量中每个测点都采集了 1048576 组数据,采样频率为 50kHz,每个测点的采样时间长度为 20.97s。

2 实验结果分析与讨论

在实验数据分析过程中,用子波分析对湍流脉动速度信号进行多尺度分解,将湍流脉动速度信号分解成 20 个尺度。子波尺度依据离散的湍流脉动速度信号的采样频率和子波母函数的滤波特性自动进行频带划分,对实验采集的离散信号自动进行低通和高通共轭数字滤波。用自相关方法确定了不同尺度湍流结构的时间尺度,根据流向脉动速度分量子波系数的瞬时强度达到局部极大和极小值检测平板湍流边界层多尺度相干结构的喷射和扫掠过程,分离出湍流边界层多尺度相干结构成分及非相干结构成分^[11]。根据流向脉动速度分量的子波系数瞬时强度因子 $I(a, b)$ 检测和提取多尺度相干结构喷射和扫掠过程各物理量的相位平均波形,若某位置 b 的子波系数为负且瞬时强度因子 $I(a, b)$ 取得极大值,

则以 b 为中心, 前后各截取半个周期的原始脉动速度信号, 将其视为一个喷射过程。对所有提取出的同一尺度的喷射过程进行相位对齐平均, 得到该尺度喷射过程的条件平均波形。若某位置 b 的子波系数为正且瞬时强度因子 $I(a, b)$ 取得极大值, 则以 b 为中心, 前后各截取半个周期的原始脉动速度信号, 将其视为一个扫掠过程。对所有提取出的同一尺度的扫掠过程进行相位对齐平均, 得到该尺度扫掠过程的条件平均波形。

本文以相干结构流向速度分量的相位平均波形为基准, 用条件相位平均技术提取了相应时刻各尺度的平板湍流边界层随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力三个分量 $\tilde{\gamma}_{11}$ 、 $\tilde{\gamma}_{12}$ 、 $\tilde{\gamma}_{22}$ 和相干结构剩余脉动雷诺应力项三个分量 $\tilde{s}_{11}$ 、 $\tilde{s}_{12}$ 、 $\tilde{s}_{22}$ 的条件相位平均波形, 并分别对两类雷诺应力分量进行了对比。图 1、图 2、图 3、图 4 分别为第 1、2、5、7 尺度相干结构喷射和扫掠过程中 $\tilde{\gamma}_{11}$ 、 $\tilde{\gamma}_{12}$ 、 $\tilde{\gamma}_{22}$ 和 $\tilde{s}_{11}$ 、 $\tilde{s}_{12}$ 、 $\tilde{s}_{22}$ 的条件相位平均波形。

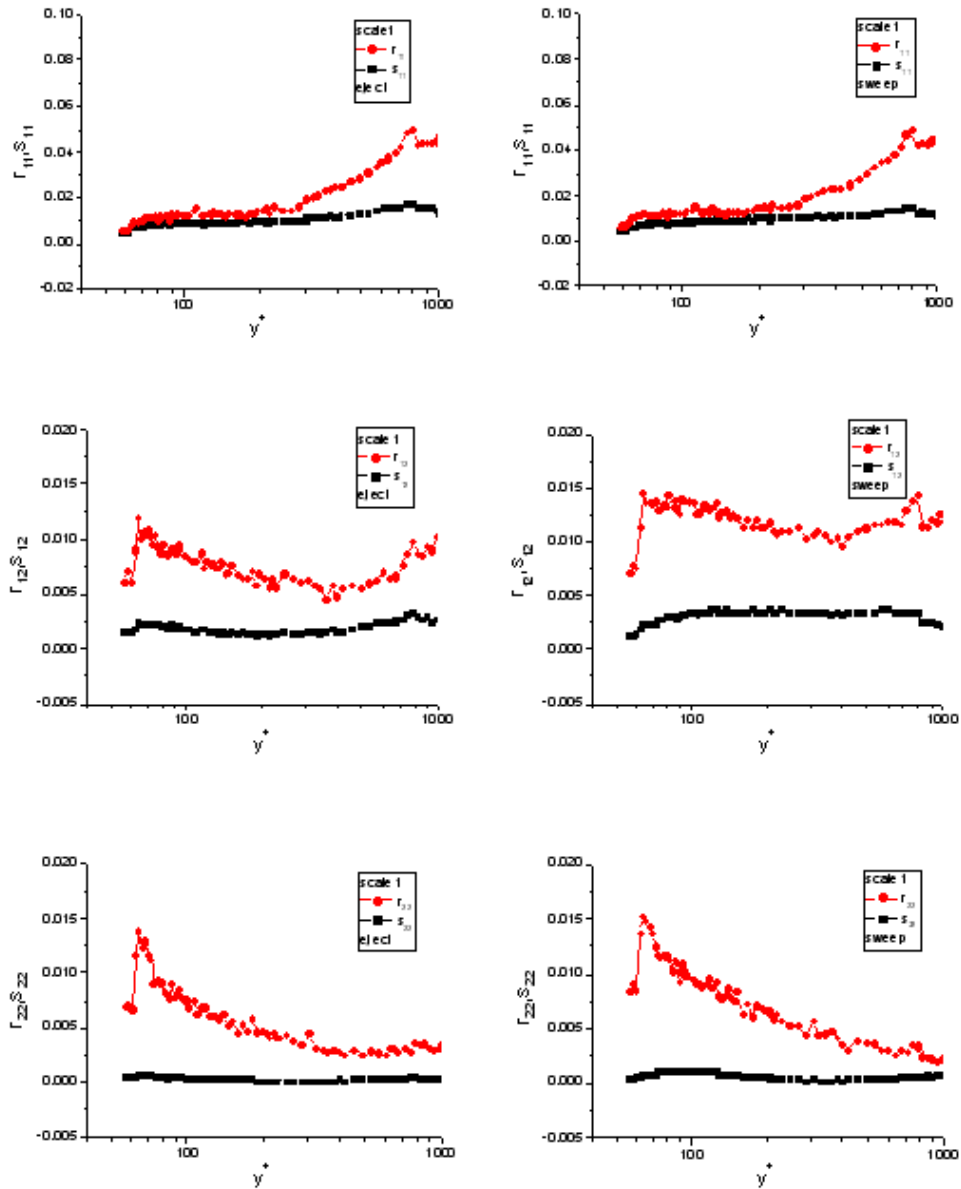


图 1 第 1 尺度相干结构喷射和扫掠过程中随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项与相干结构剩余脉动雷诺应力项比较

Fig. 1 Comparison between $\tilde{\gamma}_{11}$ 、 $\tilde{\gamma}_{12}$ 、 $\tilde{\gamma}_{22}$ and $\tilde{s}_{11}$ 、 $\tilde{s}_{12}$ 、 $\tilde{s}_{22}$ in the course of eject and sweep process for coherent structures in the first scale

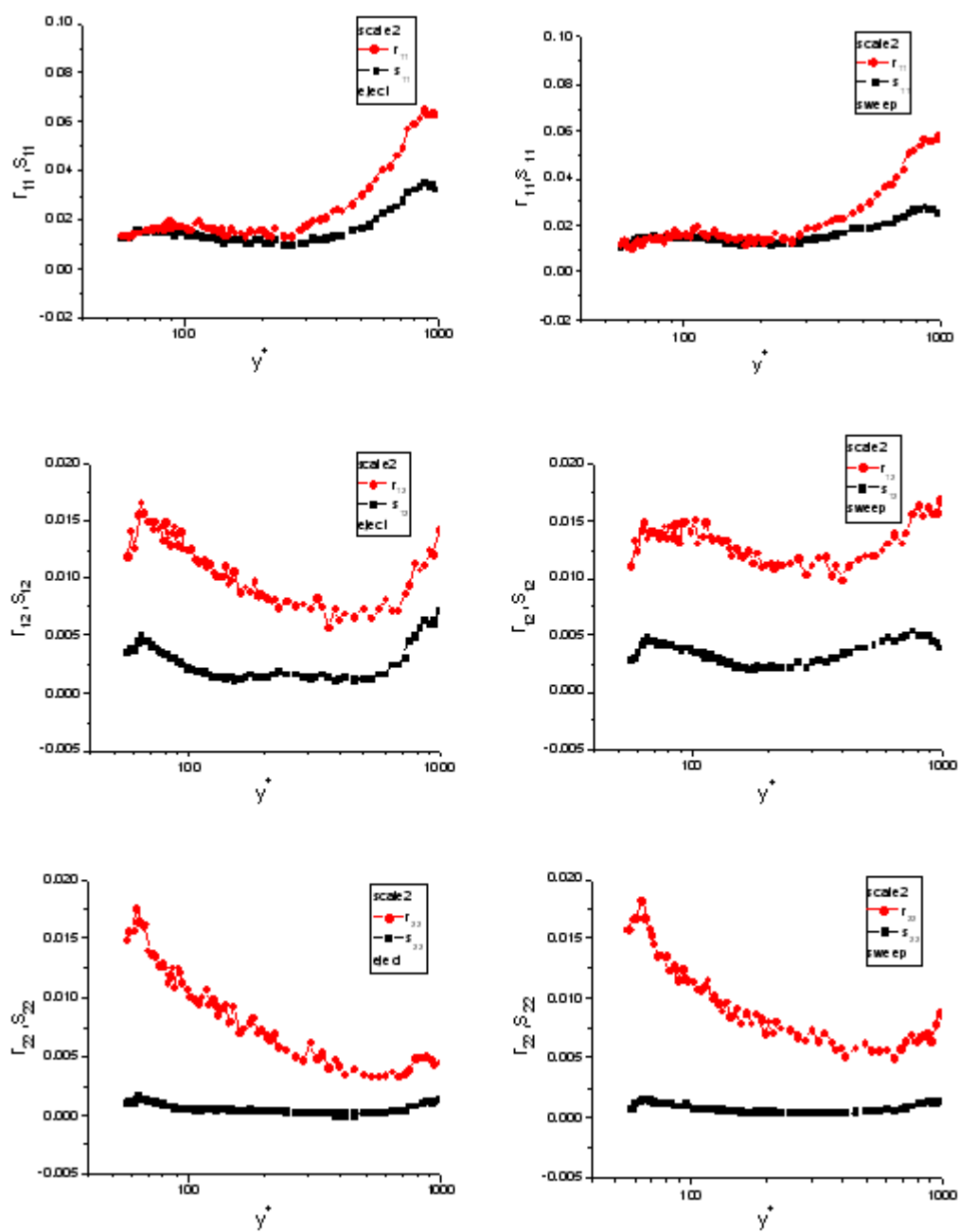


图 2 第 2 尺度相干结构喷射和扫掠过程中随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项与相干结构剩余脉动雷诺应力项比较

Fig. 2 Comparison between $\tilde{\tau}_{11}$, $\tilde{\tau}_{12}$, $\tilde{\tau}_{22}$ and $\tilde{s}_{11}$, $\tilde{s}_{12}$, $\tilde{s}_{22}$ in the course of eject and sweep process for coherent structures in the second scale

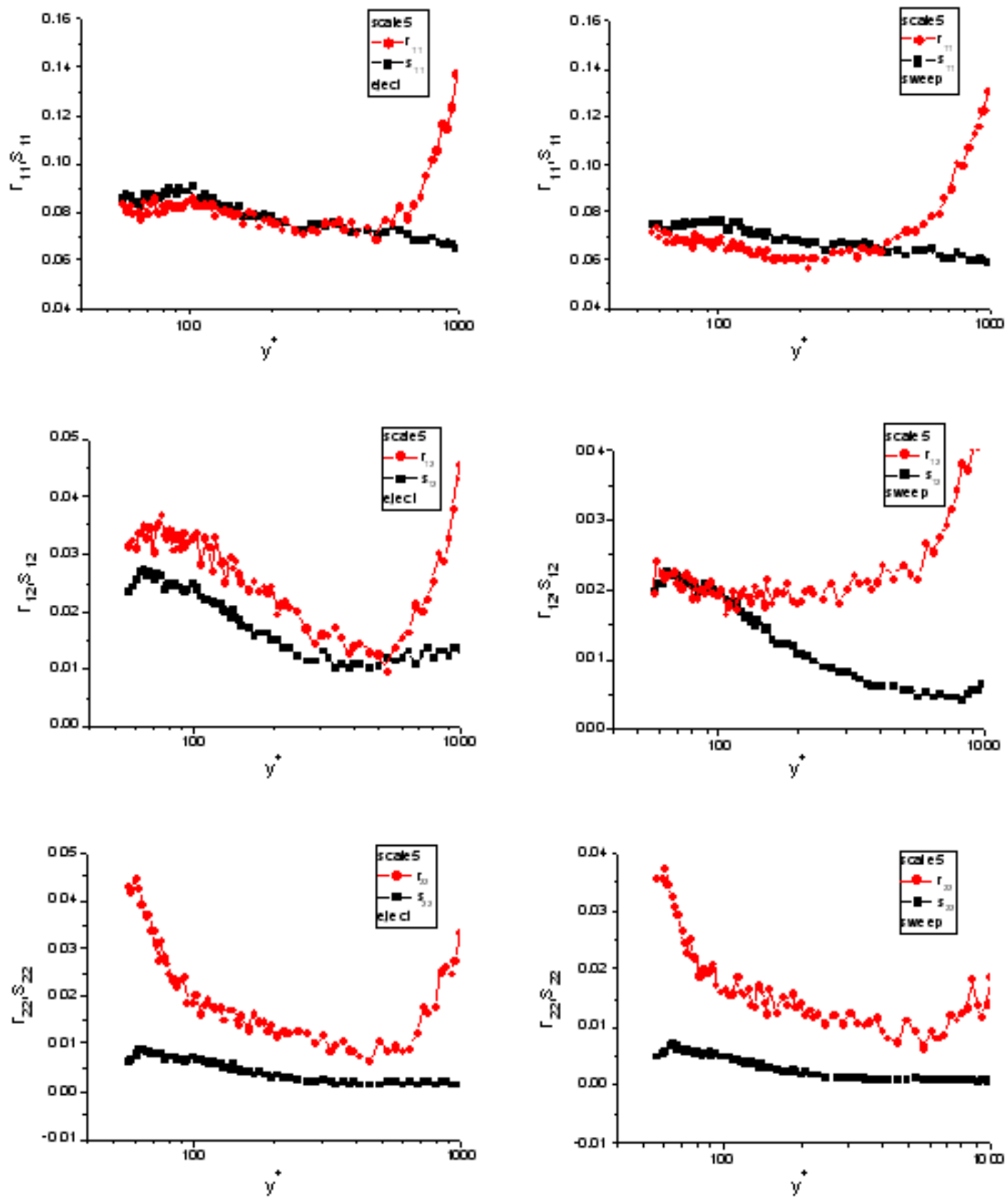


图 3 第 5 尺度相干结构喷射和扫掠过程中随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项与相干结构剩余脉动雷诺应力项比较

Fig. 3 Comparison between $\tilde{r}_{11}$, $\tilde{r}_{12}$, $\tilde{r}_{22}$ and $\tilde{s}_{11}$, $\tilde{s}_{12}$, $\tilde{s}_{22}$ in the course of eject and sweep process for coherent structures in the fifth scale

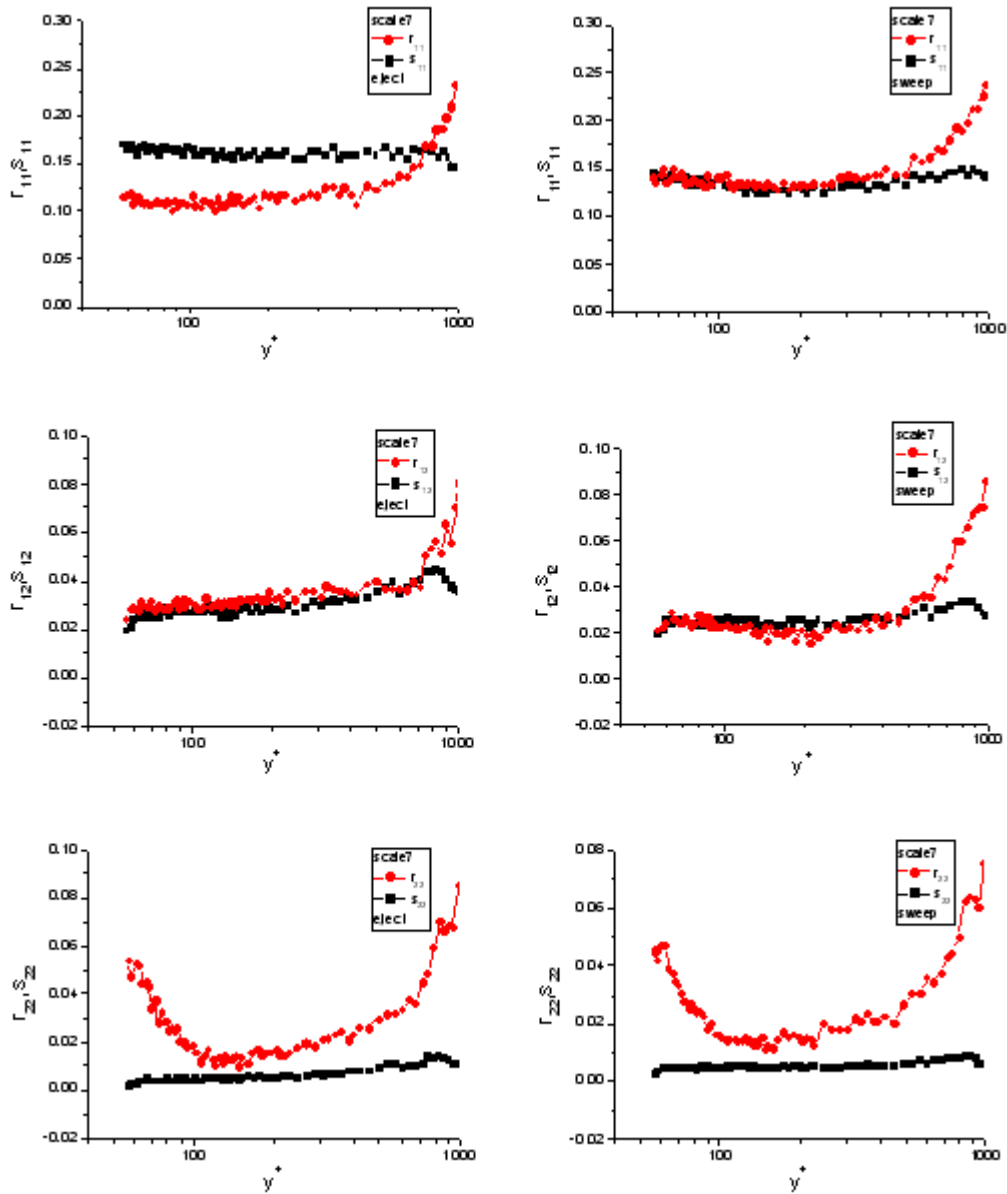


图 4 第 7 尺度相干结构喷射和扫掠过程中随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项与相干结构剩余脉动雷诺应力项比较

Fig. 4 Comparison between $\tilde{r}_{11}$, $\tilde{r}_{12}$, $\tilde{r}_{22}$ and $\tilde{s}_{11}$, $\tilde{s}_{12}$, $\tilde{s}_{22}$ in the course of eject and sweep process for coherent structures in the seventh scale

从图中可以看出,随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力在相干结构喷射过程和扫掠过程中的变化趋势基本相同;同样,相干结构剩余脉动雷诺应力项在相干结构喷射过程和扫掠过程中的变化趋势也基本相同;两类雷诺应力在数值上具有相同的数量级,其中, $\tilde{r}_{11}$ 和 $\tilde{s}_{11}$ 在数值上相差不大,尤其在湍流边界层近壁区二者数值基本接近; $\tilde{r}_{12}$ 和 $\tilde{s}_{12}$ 相比较,在相干结构尺度比较小时, $\tilde{r}_{12}$ 要略大于 $\tilde{s}_{12}$,随着相干结构尺度的增大,二者在数值上逐渐接近; $\tilde{r}_{22}$ 要大于 $\tilde{s}_{22}$,特别是在湍流边界层近壁区和边界层外边界附近, $\tilde{r}_{22}$ 是 $\tilde{s}_{22}$ 的几倍到十几倍;在湍流边界层中,相干结构剩余脉动雷诺应力项随边界层法向位置变化缓慢,而随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力在边界层外边界发生较明显的增长。

3 结论

通过对不同尺度的相干结构喷射和扫掠过程中相干结构剩余脉动雷诺应力项 $\tilde{s}_{ij} = -(\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle - \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j})$ 与随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项 $\tilde{\gamma}_{ij} = -(\langle u'_i u'_j \rangle - \overline{u'_i u'_j})$ 的对比实验研究, 可以得到如下结论:

相干结构剩余脉动雷诺应力项 $\tilde{s}_{ij} = -(\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle - \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j})$ 在数值上与随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力项 $\tilde{\gamma}_{ij} = -(\langle u'_i u'_j \rangle - \overline{u'_i u'_j})$ 具有相同的量级, 因而在相干结构动力学模型方程中, 应考虑该项对方程的影响和作用, 并不像以前估计的那样 $\tilde{s}_{ij}$ 可以忽略不计。

参考文献:

- [1] Reynolds W C, Hussain A K M F. The mechanics of an organized wave in turbulent shear flow[J]. Part 3. J. Fluid Mech, 1972, 54: 263—288.
- [2] Wu X S, Zhou H. Linear instability of turbulent boundary layer as a mechanism for the generation of large scale coherent structures[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(20): 1685—1690.
- [3] 罗纪生, 周恒. 湍流边界层外区大尺度相干结构的理论模型及与实验的比较[J]. 中国科学 A 辑, 1993, 23(1): 56—62 (Luo Jisheng, Zhou Heng. The comparison of theoretical model with experiment on large scale coherent structures in outer field of turbulent boundary layer[J]. Science in China (Series A), 1993, 23(1): 56—62 (in chinese))
- [4] Garry L Brown, Andrew S W Thomas. Large structure in a turbulent boundary layer[J]. The Physics of Fluids, 1977, 20(10): S243—S252.
- [5] Falco R E. Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers[J]. The Physics of Fluids, 1977, 20(10): S124—S132.
- [6] Antonia R A, Bisset D K, Browne L W. Effect of Reynolds number on the topology of the organized motion in a turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mech, 1990, 213: 267—286.
- [7] 王昕, 连源. 湍流边界层复涡黏模式的实验研究[J]. 力学学报, 2002, 34(3): 519—524 (Wang Xin, Lian Yuan. Experimental research on complex eddy viscosity modeling in turbulent boundary layer[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 34(3): 519—524 (in chinese))
- [8] Wang X J, Luo J S, Zhou H. On the eddy viscosity model of periodic turbulent shear flows[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 19(5): 470—475.
- [9] 李万平, 王小庆, 谢华. 湍流边界层雷诺应力和壁脉动压强相位滞后分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 122—125 (Li Wanping, Wang Xiaoqing, Xie Hua. Phase delay of the Reynolds stress and wall pressure fluctuation in wall shear flows[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition), 2007, 35(4): 122—125 (in chinese))
- [10] 罗纪生, 王新军. 壁面定常波纹状吹吸槽道流中湍流特性的研究[J]. 力学学报, 2005, 37(6): 673—681 (Luo Jisheng, Wang Xinjun. The study of turbulent properties in stable flexuous blow-suck boundary channel flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(6): 673—681 (in chinese))
- [11] Jiang Nan, Zhang Jin. Detecting multi-scale coherent eddy structures and intermittency in turbulent boundary layer by wavelet analysis[J]. Chinese Physics Letter, 2005, 22(8): 1968—1971.

Experimental Measurement of Residual Pulsant Reynolds Stress Term for Coherent Structures in Turbulent Boundary Layer

GUO Ai-dong^{1,3}, JIANG Nan^{1,2}

(1. Deptment of Mechanics of Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China;

3. Handling Equipment Mechanical Department, Academy of military Transportation, Tianjin 300161, China)

Abstract: Time sequence signals of longitudinal and normal velocity components at different vertical locations in turbulent boundary layer over a flat plate in a wind tunnel were finely measured by a IFA-300 model constant temperature anemometry and X type hot-wire probes. The sampling resolution is higher than the dissipative time scale of turbulent flow. The phase-averaged waveforms of residual pulsant Reynolds stress term of coherent structures and Reynolds stress contribution term of random fluctuation during coherent structures burst process were extracted by conditional sampling and phase-average technique. The residual pulsant Reynolds stress term of coherent structures was compared quantitatively with the Reynolds stress contribution term of random fluctuation based on theoretical analysis. It was found that the residual pulsant Reynolds stress term of coherent structures has the same order of magnitude with the Reynolds stress contribution term of random fluctuation and can not be ignored in the dynamic model of coherent structures. This is not as that estimated before.

Keywords: turbulent boundary layer; Reynolds stress residual term of coherent structures; Reynolds stress contribution term of random fluctuation