

相干结构动力学方程中雷诺应力复涡黏模型的实验研究

贾永霞² 姜楠^{1 2 3}

1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080

2. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072

3. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072

摘要: 采用双丝热线测速技术, 精细测量风洞中光滑壁湍流边界层不同法向位置的瞬时流向、法向速度分量以及流向速度的法向变形率的时间序列信号。以流向速度分量的子波系数的局部极值作为特征量检测平板湍流边界层相干结构猝发的喷射和扫掠过程, 用条件相位平均技术提取相干结构猝发的喷射和扫掠过程随机脉动速度对相干结构贡献的雷诺剪切应力和相干结构流向速度法向变形率的条件相位平均波形。基于理论上湍流相干结构复涡黏模型对涡黏系数的分析, 研究了相干结构猝发过程中雷诺应力分量与流向速度的法向速度变形率分量之间的宏观弛豫效应, 分析了相干结构猝发过程中这两者之间的相位关系及其沿湍流边界层法向的变化规律, 肯定了湍流相干结构复涡黏模型的合理性。

关键词: 湍流边界层, 相干结构, 复涡黏模型, 雷诺应力, 相位差

Experimental investigation of Reynolds stress complex eddy viscosity model for coherent structure dynamics

Jia YongXia, Jiang Nan

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, P.R.China)

Abstract: Time sequence signals of longitudinal, vertical velocity components, as well as velocity gradient at different vertical locations in the turbulent boundary layer (TBL) over a flat plate in a wind tunnel have been finely measured using double sensors hot-wire anemometry. The wavelet coefficient of longitudinal velocity component, as an index, is put forward to detect the ejection and sweep process of coherent structure in the TBL from the random fluctuating background. The phase-averaged waveforms of Reynolds stress residual contributing term of random fluctuations to coherent structure are extracted by conditional phase-average technique. Based on the analysis for complex eddy viscosity model for coherent structures theoretically, the phase differences and their variation across the TBL between Reynolds stress residual contributing term of random fluctuations to coherent structure and normal velocity gradient are studied. Through the experimental investigation, the reasonability of coherent structures complex eddy viscosity model is confirmed.

Keywords: Turbulent boundary layer, coherent structure, complex eddy viscosity model, Reynolds stress, phase difference

1、引言

在湍流研究的早期, 认为湍流是流体质点的完全随机运动, 为了避免随机性带来研究上的困难, 建立了以求解湍流系统平均量为目的的湍流模式理论。Reynolds^[1] (1895) 将湍流运动分解为系统平均量和脉动量, 导出雷诺平均方程, 但是方程中出现未知的雷诺应力项 $-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$, 需要对雷诺应力项引进一系列与湍流平均运动物理量有关的模型使雷诺平均方程封闭。在湍流模型建立过程中, 雷诺应力的重要作用促使科学家试图揭示引起湍流输运过程的物理机制。通过大量实验以及数值模拟, 发现雷诺应力产生的内在机理与近壁区相干结构的动力学行为密切相关。为了得到湍流场中的相干结构动力学方程, 将与流动有关的物理量分解为长时间平均量 \bar{f} 、相干结构量 \tilde{f} 和随机脉动量

f' 这三部分^[2]:

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

其中, 相位平均量 $\langle f \rangle = \bar{f} + \tilde{f}$ 。将速度场和压力场按(1)式进行三项分解, 并代入不可压缩流体动量方程和连续性方程, 做长时间平均和相位平均后, 最终得到相干结构满足的方程:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \tilde{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + v \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} \tilde{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \tilde{r}_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tilde{s}_{ij} \quad (2)$$

$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0$ (3) 其中 $\tilde{r}_{ij} = -(\langle u'_i u'_j \rangle - \bar{u}_i \bar{u}_j)$, $\tilde{s}_{ij} = -(\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle - \bar{u}_i \bar{u}_j)$ 。其中, 湍流随机脉动的雷诺应力项对相干成分的贡献 \tilde{r}_{ij} 的模拟, 采用以下形式:

$$\tilde{r}_{ij} = V_T \left[\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right] + \frac{1}{3} \delta_{ij} (\tilde{r}_{kk}) \quad (4)$$

式中 V_T 即为复涡黏性系数。

对于湍流边界层外区大尺度相干结构的理论模型中涡黏性系数的形式有不同的假定, Reynolds^[2]假定涡黏系数是实数, 提出的二维准层流模型不能给出不稳定的波; Wu^[3]采用复的常涡黏系数, 但所得到的不稳定波在靠近壁面处, 其幅值忽大忽小, 相位变化也太快, 这些都与 Brown^[4]和 Falco^[5]的实验不符; 罗纪生^[6]针对湍流边界层外区提出大小沿平板法向位置变化的复涡黏系数模型, 得到的结果与 Antonia^[7]的实验符合较好。将涡黏系数设成复数, 其理论解释为, 具有宏观时空尺度的湍涡运动时, 会与其它的湍涡结构发生相互作用, 产生不同湍涡结构之间的动量交换, 其弛豫时间是宏观尺度, 不能忽略不计, 同时湍涡具有一定的空间尺度, 这就表现为湍流应力与湍涡结构运动变形之间存在时空不同步性。工业领域中, 各种叶轮机械内部湍流流场的湍流应力与应变的极值往往发生在不同时空相位^[8], 因此湍流涡黏性模型中的涡黏系数应该包含时空相位信息。这种观点有其理论上的合理性, 也得到了 Brown^[5]、Falco^[6]、Antonia^[7]、Wu^[3]、罗纪生^{[4][11]}、王新军^[9]以及李万平^[10]等人在数值模拟和实验等方面的验证。王新军^{[9][11]}对壁面沿流向周期分布法向速度边界条件的槽道湍流进行了直接数值模拟, 提出雷诺应力复涡黏模型, 其涡黏系数的表达形式为 $V_T = |V_T| e^{i(\varphi(y) - \theta(y))}$, 结果分析表明相位信息 $\varphi(y), \theta(y)$ 是随壁面法向坐标 y 变化的函数。姜楠^[12]对平板湍流边界层外区多尺度相干结构雷诺应力与流向速度法向梯度之间的相位关系进行实验测量, 也发现湍流相干结构复涡黏系数模型具有一定的合理性。

本文根据式 $\tilde{r}_{12} = V_T \left[\frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} \right]$ (在边界层内 $\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}$ 相对于 $\frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$ 是高阶小量, 忽略不计), 对平板湍流边界层相干结构法向速度变形率与非相干结构成分对相干结构贡献的雷诺应力分量进行实验测量并分析两者之间的相位关系。

二、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, 实验段长 1.5m, 高 0.60m, 宽 0.80m, 原始湍流度 $\epsilon < 0.2\%$ 。本次实验的自由来流速度 8.9m/s, 边界层名义厚度为 84.5mm, 基于边界层名义厚度的雷诺数为 $Re_\delta = U_\infty \delta / v \sim 47467$ 。将前缘为楔形的不锈钢光滑平板水平置于风洞实验段的中心线处, 在平板前缘加绊线和砂纸带以加速边界层转换, 从而在探针测量位置形成充分发展的湍流, 并且保证平板上方压力梯度为零。在距离平板前端 800mm 处, 用 TSI-IFA300 恒温热线风速仪、直径为 $5 \mu m$ 的 X 形斜丝热线探针和平行丝热线探针分别沿平板法向获得 102 个测点的雷诺应力和速度变形率, 且保证两个探针测量的 102 个测点位置一一对应。本文实验的湍流脉动速度信号的采样频率为 50KHz, 采样时间为 21.97s, 每个测量点采集的样本总量 2^{20} 。

三、实验结果分析与讨论

1. 基本流场

图 1 为由粘性内尺度单位无量纲化的平板湍流边界层平均速度剖面。其中, $u^+ = u/u_*$ 和 $y^+ = yu_*/\nu$ 分别代表由摩擦速度 u_* 和运动粘性系数 ν 无量纲化的流向平均速度和法向位置, 从图中可看出本流场符合标准的湍流边界层流场。

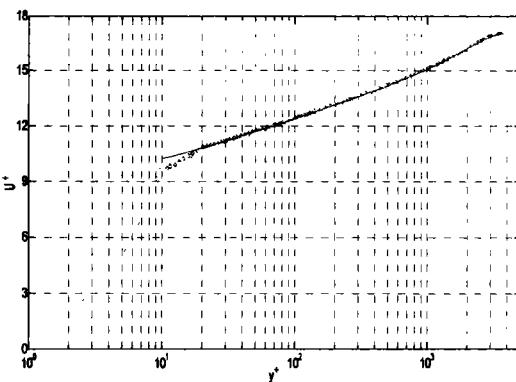


图 1 光滑平板湍流边界层平均速度剖面:

2. 速度变形率与雷诺应力的条件相位平均波形及两者的相位关系

用多尺度子波分析方法对湍流脉动速度进行多尺度分解^[12], 根据子波系数的瞬时强度因子检测能量最大尺度相干结构, 分离出流向速度多尺度相干结构成分及非相干结构成分。以相干结构流向速度分量的相位平均波形为基准, 应用条件相位平均技术提取相干结构法向速度变形率和非相干结构成分对相干结构贡献的雷诺应力的条件相位平均波形。采用互相关技术计算两者的相位平均波形对应不同相位差的互相关系数, 确定互相关系数取得最大值时的相位差即为速度变形率与雷诺应力之间的相位差。

图 2 给出不同法向位置能量最大尺度相干结构喷射和扫掠过程中 $\tilde{r}_{12} = -(\langle u'v' \rangle - \overline{u'v'})$ 与 $\frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$ 的条件相位平均波形比较。从图中看出, 喷射和扫掠阶段相干结构对应的法向速度变形率与非相干成分对相干结构贡献的雷诺应力分量之间存在相位差 $\Delta\Phi = \varphi(y) - \theta(y)$, 其中喷射阶段雷诺应力相位滞后(小)于速度变形率, $\Delta\Phi < 0$; 扫掠阶段雷诺应力相位超前(大)于速度变形率, $\Delta\Phi > 0$ 。图 3 显示了能量最大尺度相干结构喷射和扫掠阶段雷诺应力分量与法向速度梯度之间的相位差沿边界层不同法向位置的变化规律。喷射阶段, 在 $y^+ = 29.95$ 处, 雷诺应力相位滞后速度梯度约 70° , 随着法向位置的增加, 到 $y^+ = 54.46$ 时, 雷诺应力的波形发生变化, 且雷诺应力相位与速度梯度相位差变小, 雷诺应力相位滞后速度梯度约 30° , 在 $y^+ = 100$ 以外, 雷诺应力几乎与速度梯度具有相同的步调。扫掠阶段, 在近壁区两者相位差变小, 在 $y^+ = 100$ 以后, 随着法向位置的变化, 雷诺应力与速度梯度的时间相位关系几乎不再改变, 相位差维持在 20° 左右, 在 $y^+ = 200$ 之后, 相位差逐渐变为 0° 。以上结果表明距离平板较远处, 随机成分产生的小涡不受壁面的影响, 而在壁面附近, 这种小涡的行为会受到壁面的影响。近壁区域法向速度变形率与非相干结构成分对相干结构贡献的雷诺应力的相位差随法向位置的变化与壁面的剪切作用有很大关系。图 7、8 表明模拟非相干成分对相干结构贡献的雷诺应力时, 复涡黏性理论模型^[4]是合理的。

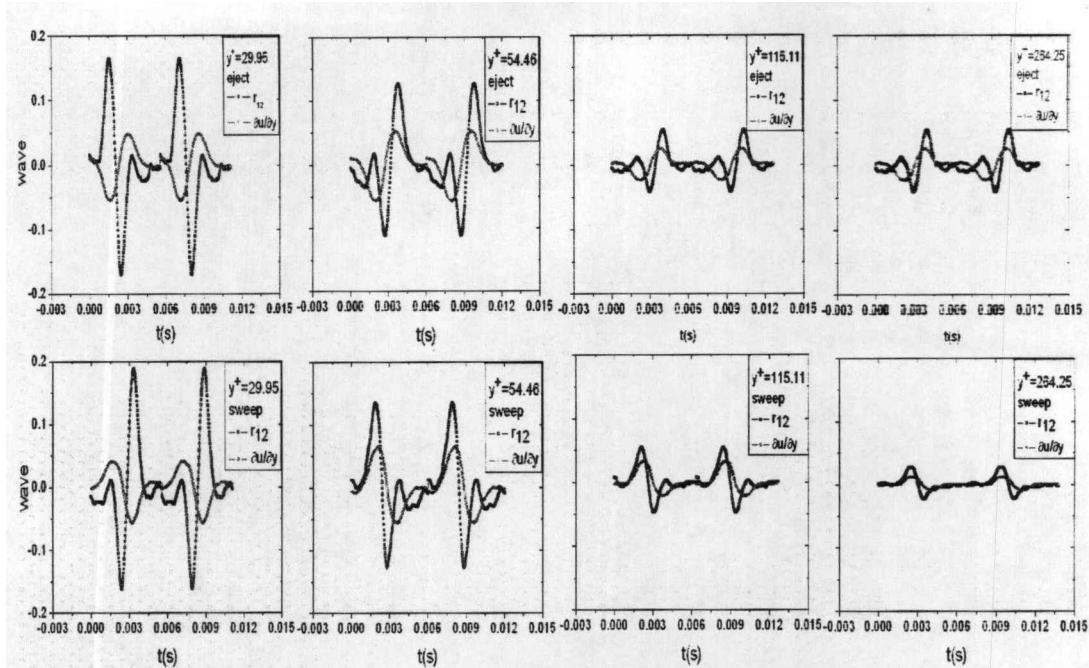


图 3 y^+ 分别为 29.95、54.46、115.11、264.25 时能量最大尺度对应的喷射和扫掠过程中随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力与相干结构流向速度梯度的条件相位平均波形相位关系

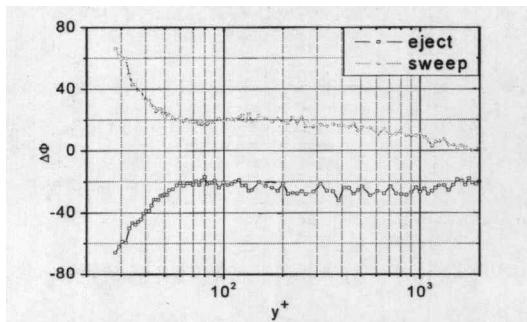


图 4 能量最大尺度对应的喷射和扫掠阶段随机脉动对相干结构贡献的雷诺应力与相干结构法向速度梯度的沿不同法向位置的相位差

四、结论

通过对不同尺度的相干结构喷射和扫掠过程中非相干成分对相干结构贡献的雷诺应力分量和相干结构法向速度变形率之间的相位差分析，可以得到以下结论：

(1) 应用湍流涡黏模型模拟雷诺应力时，要考即雷诺应力与平均速度变形率的时空不同步性，用带时空相位变化的涡黏系数对平均速度变形率的相位进行修正，使得雷诺应力和平均速度变形率相位对齐，才能得到正确的雷诺应力分布。所有在时空上存在周期变化的流动结构的湍流都存在类似的问题，比如叶轮机械的湍流计算。以前由于实验技术的限制，这个问题并未引起足够的注意。因此，复涡黏性系数形式的湍流雷诺应力模型是合理的；

(2) 具有宏观尺度的湍流相干结构间力的相互作用与相干结构运动变形的弛豫时间不能忽略不计，表现为非相干成分对相干结构贡献的雷诺应力分量和相干结构法向速度变形率之间的不同步性，它们之间存在着时空上的相位差，这是目前用于非定常湍流结构的涡黏模式理论需要考虑的一个重要因素；

(3) 相干结构的法向速度变形率与随机成分产生的雷诺应力分量之间的相位差与相干结构喷射和扫掠的具体物理过程有关，喷射阶段雷诺应力相位滞后于法向速度变形率。扫掠阶段雷诺应力相位超前于法向速度变形率相位。法向速度变形率与雷诺应力之间的相位差在近壁区域 $y^+ < 60$ 以内随边界层法向位置变化，在近壁区域以外 ($y^+ > 60$) 几乎不随边界层法向位置变化。

参考文献

- Reynolds, O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 1985, 186:123–164.
- Reynolds W C, Hussain A K M F. The mechanics of an organized wave in turbulent shear flow. Part 3. *J Fluid Mech.*, 1972, 54: 263—288.
- Wu X S, Zhou H. Linear instability of turbulent boundary layer as a mechanism for the generation of large scale coherent structures. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(20):1685—1690.
- Brown G L, Thomas A S W. Large structure in a turbulent boundary layer. *Physics of Fluids*, 1977, 20(10): S243—S252.
- Falco R E. Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers. *Physics of Fluids*, 1977, 20(10): S124—S132.
- 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. *中国科学 A 辑*, 1993, 23(1): 56—62. (Luo J S, Zhou H. 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))
- 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 Fluid Mech.*, 1990, 213: 267—286.
- Bruns J M, Fernholz H H, Monkewitz P A. An experimental investigation of a three-dimensional turbulent boundary layer in an 'S' shaped duct. *J Fluid Mech.*, 1999, 393: 175—213.
- Wang X J, Luo J S, Zhou H. On the eddy viscosity model of periodic turbulent shear flows. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 19(5): 470—475.
- 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. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(4): 122—125. (Li W P, Wang X Q, Xie H. Phase delay of the Reynolds stress and wall pressure fluctuation in wall shear flows. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition)* 2007, 35(4): 122—125 (in chinese)).
- 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. *力学学报*, 2005, 37(6):673—681. (Luo J S, Wang X J. The study of turbulent properties in stable flexuous blow-suck boundary channel flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2005, 37(6): 673—681 (in chinese)).
- 郭爱东, 姜楠. 壁湍流多尺度相干结构复涡黏模型的实验研究. *力学学报*, 2010, 42(2): 159—168. (Guo A D, Jiang N. Experimental research on complex eddy viscosity modeling of multi-scale coherent structures in wall turbulence. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2010, 42(2): 159—168 (in chinese)).