

文章编号: 1000\_0887(2005) 04\_0456\_09

# 用局部平均速度结构函数检测湍流 边界层多尺度相干结构\*

刘建华, 姜楠, 王振东, 舒玮

(天津大学 力学系, 天津 300072)

(刘宇陆推荐)

摘要: 测量风洞中平板湍流边界层不同法向位置的流向速度时间序列信号, 提出了基于局部多尺度平均意义的湍流多尺度局部平均结构函数的概念, 以描述湍流多尺度结构的伸缩变形和相对运动; 基于多尺度局部平均结构函数的概念与 Harr 子波变换的一致性, 提出了用湍流多尺度局部平均结构函数的平坦因子检测湍流边界层多尺度相干结构及其间歇性的检测方法, 提取近壁区域不同法向位置处多尺度相干结构的条件相位平均波形, 以研究多尺度相干结构猝发的动力学过程及其对湍流统计性质的影响

关键词: 湍流边界层; 相干结构; 平坦因子; 间歇性; 局部平均速度结构函数

中图分类号: O357 文献标识码: A

## 引言

在湍流早期的研究中, 湍流被看作是完全随机的运动, 用统计平均的方法研究湍流的特征. Kolmogorov<sup>[1]</sup> 根据随机场理论, 对充分发展(雷诺数趋于无穷大)的均匀各向同性湍流流体质点的相对运动进行了分析, 提出了描述一定空间距离  $l$  内流体质点相对运动速度的结构函数的概念, 研究其各阶统计矩随尺度  $l$  的变化规律:

$$\langle |\delta u(l)|^p \rangle \propto l^{\zeta(p)}, \quad \eta \ll l \ll L, \quad (1)$$

$$\zeta(p) = p/3, \quad (2)$$

$$\delta u(l) = u(x+l) - u(x). \quad (3)$$

(3) 式是沿流向空间距离为  $l$  的空间两点  $x$  和  $x+l$  的流向速度分量  $u(x)$  和  $u(x+l)$  的相对增量,  $\zeta(p)$  为标度指数,  $\eta$  为湍流的耗散尺度,  $L$  为湍流的积分尺度,  $\langle \rangle$  代表系综平均.

20 世纪 40 年代以后, 随着流体力学实验技术(主要是热线风速仪和流动显示技术)的发展, 能够对湍流瞬时脉动进行细致实验测量和观察, 从而深入研究湍流的产生、发展和演化的过程. 在湍流脉动中相继发现了相对有组织的间歇性的大尺度运动, 这种大尺度运动的强度、尺度和结构形态对于同一类型的流动具有普遍性和可重复性, 因而被称为相干结构或拟序结

\* 收稿日期: 2004\_02\_25; 修订日期: 2004\_12\_24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10472081; 10232020)

作者简介: 刘建华(1980—), 硕士(E-mail: liujianhua\_1980@163.com);

姜楠(1968—), 教授, 博士生导师, 主要从事湍流实验研究(联系人, Tel: + 86\_22\_27403574; Fax: + 86\_22\_27407025; E-mail: nanj@tju.edu.cn)

构。其中最著名的是美国斯坦福大学 Kline 小组 1967 年<sup>[2]</sup>关于湍流边界层近壁区域条纹结构猝发的观测工作。相干结构的理论和实验研究,为认识湍流的本质并最终达到控制湍流的目的开辟了新的途径<sup>[3]</sup>。

湍流是由多尺度结构运动组成的,因此描述流体运动的物理量在同一个空间点同一时刻为中心的不同时空尺度范围内,可以分解为从耗散尺度到积分尺度的不同尺度成分。前面所提到的大尺度相干结构只是其中一种尺度比较大,作用比较强,作用效果明显的拟序结构,因而在湍流实验研究中被较早发现。湍流脉动包含着关于不同尺度湍流结构非常丰富的信息,要对湍流中的脉动所包含的不同尺度结构进行深入研究,需要将湍流脉动信号分解成不同尺度的运动进行研究。

相干结构不仅存在于湍流大尺度运动中,也存在于湍流小尺度运动中<sup>[4]</sup>。最近的湍流精细实验测量和直接数值模拟结果表明,即使在均匀各向同性湍流中,也存在丝状的小尺度相干结构<sup>[5-8]</sup>。G. Ruiz Chavarria<sup>[9]</sup>, F. Toschi<sup>[10,11]</sup>, R. Camussi<sup>[12]</sup>, Miguel Onorato<sup>[13]</sup>在槽道湍流和边界层湍流的数值实验和物理实验中发现,槽道湍流近壁区和平板湍流边界层中也存在着多尺度相干结构,不同尺度相干结构具有很强的间歇性;条件相位平均结果表明,它们的演化过程具有典型的特征;湍流中的多尺度相干结构对湍流的统计性质产生重要影响。

由于湍流中存在不同尺度的结构,流体质点的运动并不是完全随机的,流体质点的运动受所属流动结构的制约,研究湍流的统计性质需要考虑湍流结构的尺度效应。用基于湍流局部结构平均概念粗粒化的结构函数,研究一定尺度下湍流结构相对运动速度的统计规律,而不是用完全随机的流体质点相对运动速度,研究湍流的统计规律。因此,应该对经典的速度结构函数中的速度分量,先在一定尺度的结构内进行局部平均,得到这个结构的平均相对迁移速度。

## 1 Harr 子波变换与湍流多尺度局部平均结构函数

Harr 子波母函数的定义为:

$$H(t) = \begin{cases} 1, & -1 \leq t < 0, \\ -1, & 0 \leq t < 1, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其在尺度  $a > 0$  和位置  $b$  下的伸缩和平移变换为:

$$H_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} H\left(\frac{t-b}{a}\right) = \begin{cases} 1/\sqrt{a}, & -a+b \leq t < b, \\ -1/\sqrt{a}, & b \leq t < a+b, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

对于一维湍流信号  $u(t)$  的连续 Harr 子波变换为:

$$W_H(a,b) = \langle u(t), H_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \overline{H_{a,b}(t)} dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \overline{H\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \left[ \int_{-a+b}^b u(t) dt - \int_b^{a+b} u(t) dt \right]. \quad (6)$$

(6) 式用一定尺度  $a$  下的局部结构的平均速度,代替位置分别为  $t = b - a/2$  和  $t = b + a/2$  处的流体质点的瞬时运动速度,表示一定尺度下湍流结构前后两个部分的局部平均相对运动速度,而不是前后两个流体质点的相对运动速度,考虑了湍流结构的局部结构的多尺度特征。对于大尺度结构来说,局部平均的范围较大;反之,局部平均的范围较小。它的物理意义是:在时间段  $t \in [-a+b, a+b]$  内有一个时间尺度为  $2a$  的湍流结构流经热线探针所在位置,热线探针在  $t \in [-a+b, b]$  内测量到的流体的平均速度与在  $t \in [b, a+b]$  内测量到的

流体的平均速度的差, 即尺度为  $a$  的前一半结构与尺度为  $a$  的后一半结构的流向速度差别引起的流向拉伸变形。如果  $W(a, b) > 0$ , 则

$$\left[ \int_{-a+b}^b u(t) dt - \int_b^{a+b} u(t) dt \right] > 0$$

表示前一半(下游)结构的平均迁移速度快于后一半(上游)结构的平均迁移速度, 该流体结构正在进行拉伸。如果  $W(a, b) < 0$ , 则

$$\left[ \int_{-a+b}^b u(t) dt - \int_b^{a+b} u(t) dt \right] < 0$$

表示前一半(下游)结构的平均迁移速度慢于后一半(上游)结构的平均迁移速度, 该流体结构正在进行压缩。说明湍流中不同尺度流动结构的多尺度特征与子波变换的多分辨概念是一致的, 可以用子波变换的多分辨分析理论研究湍流结构的多尺度特征, 可以用(6)式代替(3)式定义一定尺度  $a$  和一定位置  $b$  下局部平均的湍流速度结构函数。

基于子波变换和局部平均概念粗粒化的  $p$  阶结构函数为

$$\langle |W_H(a, b)|^p \rangle_b = \left\langle \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \left[ \int_{-a+b}^b u(t) dt - \int_b^{a+b} u(t) dt \right] \right|^p \right\rangle_b, \quad (7)$$

其中  $\langle \rangle_b$  代表对位置  $b$  总体统计平均运算。

特别地,  $p = 2$  时,

$$I(a, b) = |W_H(a, b)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) H\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \right|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \left[ \int_{-a+b}^b u(t) dt - \int_b^{a+b} u(t) dt \right] \right|^2 \quad (8)$$

代表一个尺度  $a$  的湍流结构所拥有的动能。其统计平均值

$$E(a) = \langle |W_H(a, b)|^2 \rangle_b = \left\langle \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \left[ \int_{-a+b}^b u(t) dt - \int_b^{a+b} u(t) dt \right] \right|^2 \right\rangle_b \quad (9)$$

代表尺度  $a$  的所有湍流结构所拥有的平均动能。

$p = 4$  时, 基于湍流局部平均概念单一尺度结构的平坦因子定义为

$$F(a) = \frac{\langle |W_H(a, b)|^4 \rangle_b}{\left\{ \langle |W_H(a, b)|^2 \rangle_b \right\}^2} \quad (10)$$

## 2 实验设备和技术

实验是在天津大学流体力学实验室木质结构的直流闭口抽吸式低湍流度风洞中完成的。于2001年建成, 实验段长度4.5 m, 横截面为切角的矩形, 高0.45 m, 宽0.35 m, 风洞采用直流可控硅调速装置, 马达功率7.5 kW, 实验段风速在1.0 m/s和50.0 m/s之间连续可调, 原始湍流度小于0.07%。当流向速度为14 m/s时, 边界层厚度  $\delta = 20$  mm, 雷诺数  $Re_\delta = U_\infty \delta / \nu = 16\ 857$ 。

实验用前缘为楔形的平板固定在实验段的水平中心, 与来流方向平行, 平板长  $L = 4\ 500$  mm, 宽350 mm, 厚5 mm, 平板上贴砂纸, 以加速转捩, 使来流能够在探针测量位置处形成充分发展的湍流。在距离平板前端  $X = 3\ 000$  mm处, 用TSI公司IFA300型恒温热线风速仪及TSL1210\_T1.5型单丝热线探头进行测量, 热线敏感材料为直径2.5  $\mu\text{m}$  的钨丝。

为了获得恒温热线风速仪最佳频率响应和真实的输出电压  $E(t)$  及流动速度  $U(t)$  之间的响应关系, 每一个探针在每次测量前都单独进行标定。由TSL1210\_T1.5型热线探针测量湍流边界层近壁区域平均速度剖面如图1(a)、(b)所示, 说明本流场符合标准的湍流边界层流

场。从距离壁面  $y = 0.1 \text{ mm}$  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近壁区域流向速度分量的时间序列信号, 采样频率  $50\ 000 \text{ Hz}$ , 采样时间长度  $21 \text{ s}$ 、数据量  $1\ 048\ 576$ , 距离壁面  $y^+ = 28$  的流向速度分量时间序列信号如图 2 所示。

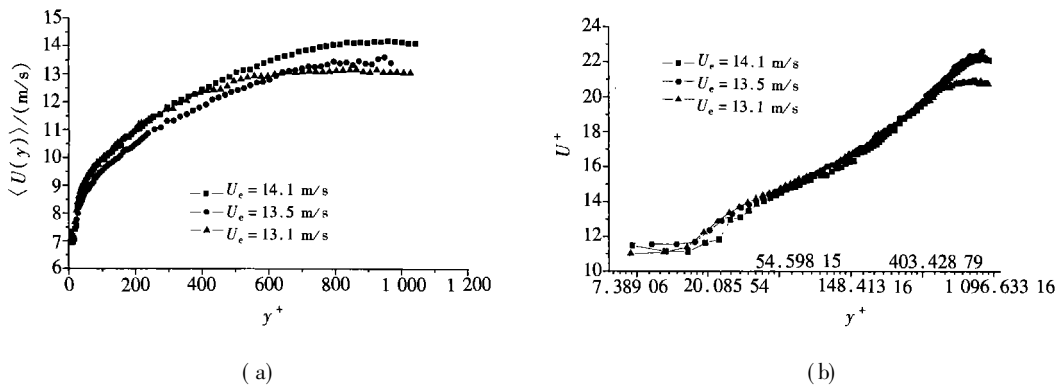


图 1 湍流边界层平均速度剖面

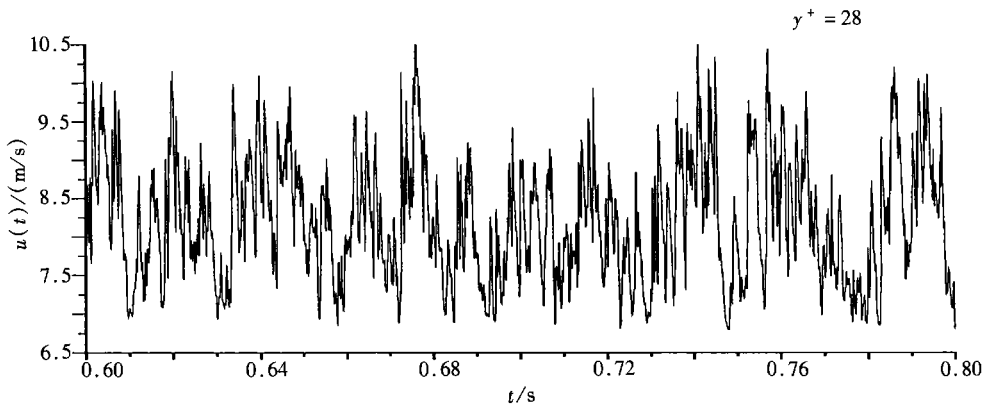


图 2 平板湍流边界层近壁区域  $y^+ = 28$  瞬时速度信号  $u(t)$

### 3 实验结果分析

为了考虑湍流结构的多尺度效应, 按照公式(6)进行速度结构函数多尺度分解, 计算了 14 个尺度的湍流局部结构平均的速度结构函数。图 3 为根据(9)式得到的每一个尺度的湍流结构所拥有的平均动能。从图 3 中看出, 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 6 个尺度; 在对数律层, 能量最大尺度为第 7 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。图 4 为根据(10)式得到的单一尺度结构的平坦因子随尺度的分布。随着尺度的增大, 平坦因子由明显大于 3 逐渐减小并最终稳定在 3 周围。与脉动速度动能随尺度参数的分布图 3 对比发现, 小于能量最大尺度  $a^*$  的结构, 其平坦因子  $F(a) \geq 3$ , 表明这些尺度的湍流结构中存在大量的间歇性的相干结构。平坦因子  $F(a) \leq 3$ , 表明这些尺度的湍流结构中间歇性的相干结构比较少。

根据子波系数的瞬时局部平坦因子, 我们提出了用子波变换检测湍流多尺度相干结构的条件采样方法。根据子波系数的瞬时局部平坦因子, 定义检测函数如下:

$$D(t) = \begin{cases} 1, & F(a, b) > 3, t \in [b - T(a), b + T(a)], \\ 0, & \text{否则,} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $T(a)$  是根据文献[14]用单一尺度速度信号自相关函数确定的湍流结构的尺度。

一旦间歇性相干结构被检测到,就可以对原始信号进行相位平均来获得事件的平均演化过程。

$$\langle u(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(b_i + t), F(a, b_i) > 3, \quad t \in [-T(a), T(a)] \quad (12)$$

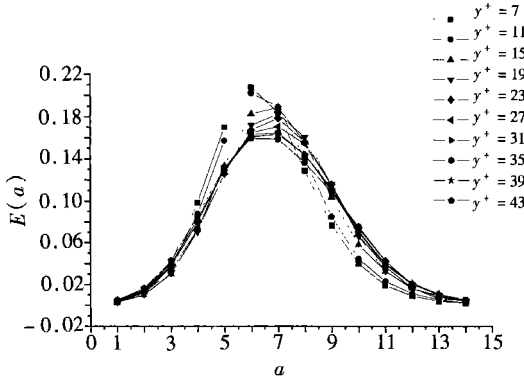


图3 分尺度结构的能量随尺度分布

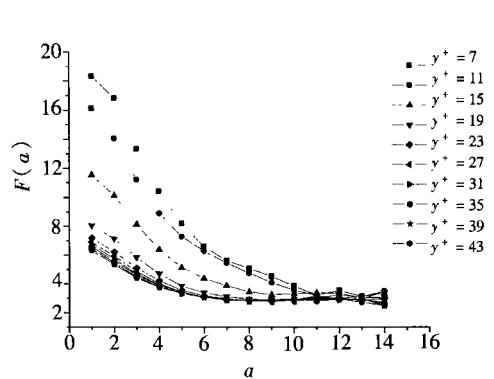


图4 分尺度结构的平坦因子随尺度的分布

图5(a)~(f)分别为在缓冲层法向位置  $y^+ = 7, y^+ = 11, y^+ = 15, y^+ = 19, y^+ = 23, y^+ = 27$  处提取出的不同尺度相干结构速度的条件相位平均波形。在缓冲层不同法向位置,相干结构速度的条件相位平均波形具有明显的连续变化的过程,这说明不同法向位置的相干结构动力学演化过程具有不同的特征。在缓冲层  $y^+ = 7$ ,小尺度相干结构速度的条件相位平均波形表现为一个压缩—拉伸过程,从第4个尺度开始,相干结构速度的条件相位平均波形表现为压缩—拉伸—压缩—拉伸过程的“M”形状的拟周期,两个压缩—拉伸过程的强度从不对称随着尺度增大而变得对称,其中第7个尺度相干结构的强度最大,速度相位平均波形的“M”形状最典型,相干结构的动力学过程为两个同向应变过程。在缓冲层  $y^+ = 15$ 以后,相干结构条件相位平均波形的第一个压缩—拉伸过程逐渐减弱并消失,相干结构条件相位平均波形逐渐演化成一个拉伸—压缩—拉伸的拟周期过程,速度相位平均波形为两个反对称的应变过程。

在对数律层,多尺度相干结构的条件相位平均波形尽管时间长度相差很大,形状却基本一致,具有一定的相似性,均表现为一个拉伸—压缩—拉伸的拟周期过程,速度相位平均波形为两个反对称的应变过程。首先是一个缓慢的减速过程,然后是一个突然的急剧加速过程,最后又是一个缓慢的减速过程,其中大尺度结构首尾的两个缓慢的减速过程中还包含小振幅的振荡。将时间历程转化为空间结构,则相干结构最下游头部的速度稍快,有缓慢的拉伸作用。中间部分则是下游速度慢,上游速度突然急剧加快的一个强烈压缩过程,上游流体对下游流体有剧烈的推动作用,这一部分的作用非常短暂,但作用最为强烈。最后部分仍然是下游流体对上游流体的缓慢拉伸过程。

从图6可以看出,在对数层以外,相干结构速度的条件相位平均波形与缓冲层正好相反,表现为拉伸—压缩—拉伸—压缩的“W”形状的拟周期过程,两个拉伸—压缩过程的强度从不对称随着尺度增大而变得对称,其中第7个尺度相干结构的强度最大,速度相位平均波形的“W”形状最典型,相干结构的动力学过程为两个同向应变过程。

图7为各尺度检测出的相干结构发生的概率,即相干结构的间歇因子。从图7可以看出,缓冲层和对数律层相干结构发生的概率具有明显的差别,缓冲层各尺度相干结构发生的概率明显大于对数律层各尺度相干结构发生的概率,其中  $y^+ = 11$ 小尺度相干结构发生的概率最大

超过 20%, 是湍流边界层多尺度流动结构最活跃的区域。对数律层相干结构发生的概率均小于 10%。

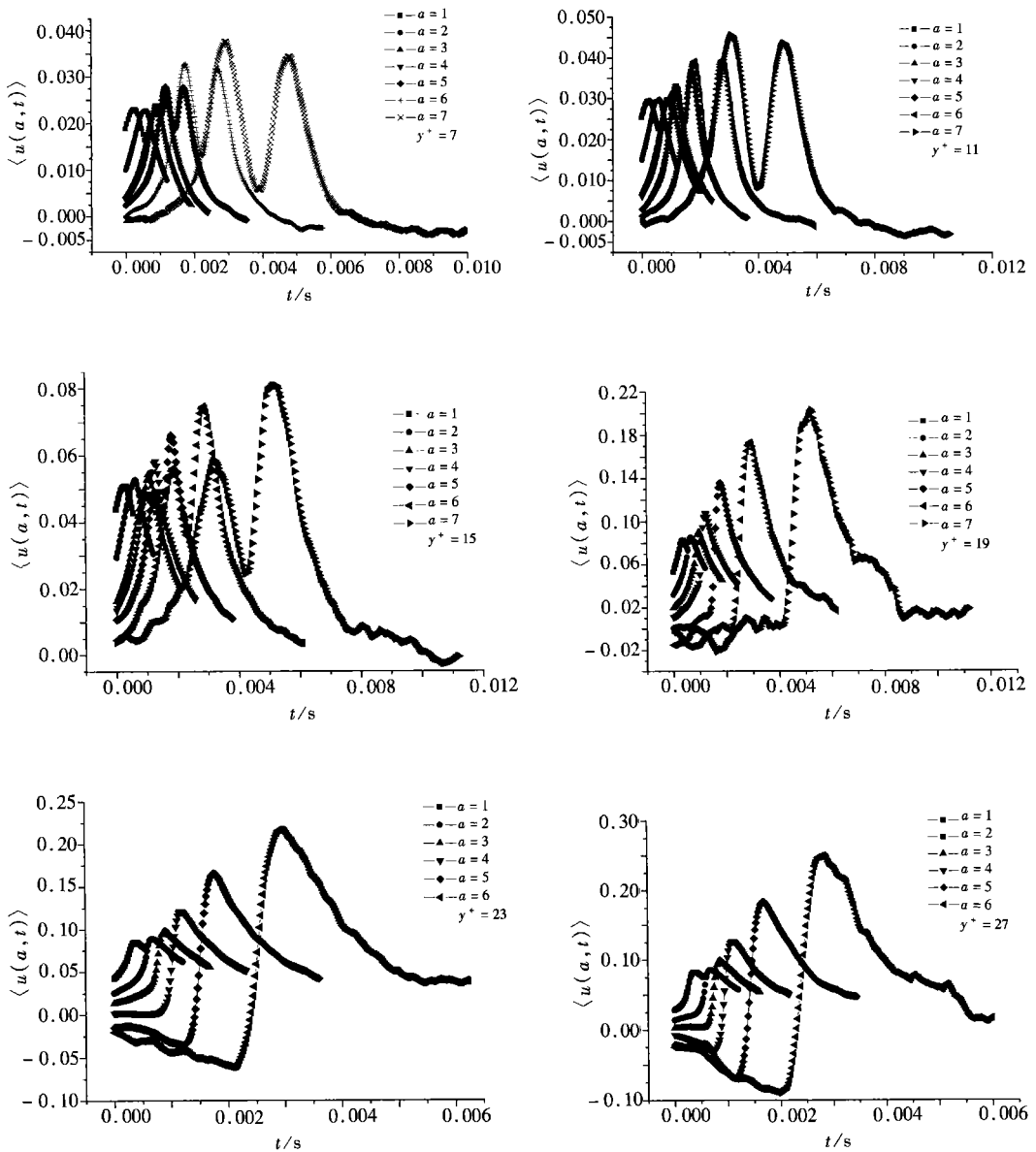


图 5 缓冲层相干结构条件相位平均波形

图 8 为单一尺度相干结构动能占该尺度湍动能的百分比。从图 8 可以看出, 缓冲层和对数律层相干结构占有的动能具有明显的差别, 缓冲层各尺度相干结构占有的动能明显大于对数律层各尺度相干结构占有的动能, 说明缓冲层内的相干结构占有特别重要的地位, 其中缓冲层内小尺度相干结构占有该尺度湍流动能的 80% 以上。其中  $y^+ = 11$  小尺度相干结构占有该尺度湍流动能最大超过 90%, 又一次说明了这是湍流边界层多尺度流动结构最活跃的区域。对数律层相干结构对该尺度湍流动能的占有率均小于 60%。

图 9 为一个相干结构的平均强度与一个非相干结构的平均强度的比值随尺度的分布。从图 9 可以看到, 缓冲层和对数律层相干结构的相对强度具有明显的差别, 缓冲层小尺度相干

结构的平均强度是一个非相干结构的平均强度 20 倍以上, 其中  $y^+ = 11$  小尺度相干结构相对强度最大, 是一个非相干结构的平均强度 32 倍。对数律层小尺度相干结构的相对强度均小于  $16^\circ$ 。图 10 为提取相干结构前后, 单一尺度湍流结构的平均动能随尺度的变化规律。从图 10 看出, 提取相干结构以后, 单一尺度湍流结构的动能均显著减小。

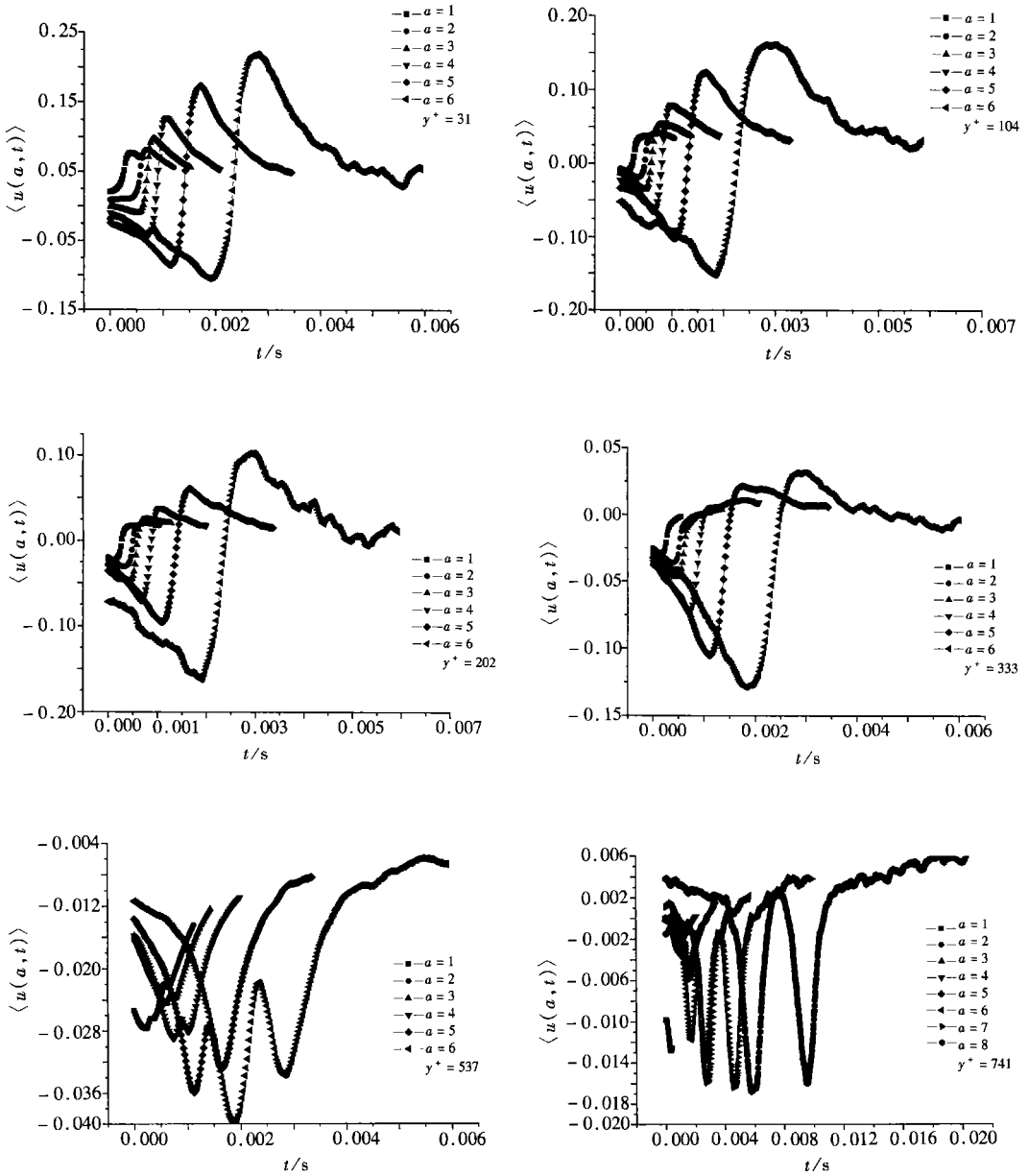


图 6 对数层相干结构条件相位平均波形

## 4 结 论

基于湍流局部多尺度结构的物理背景, 指出了雷诺数有限的真实湍流场与完全随机场的本质区别在于湍流场中流体质点的运动不是完全随机的, 湍流场中存在不同尺度的结构, 湍流中流体质点的运动受所属流体结构的制约; 提出湍流多尺度局部平均结构函数的概念以描述

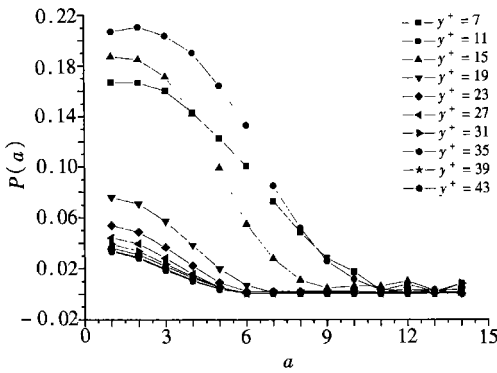


图7 单一尺度相干结构间歇因子随尺度分布

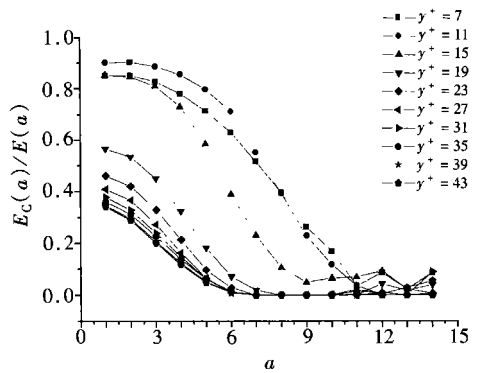


图8 单一尺度相干结构动能占该尺度动能的百分比

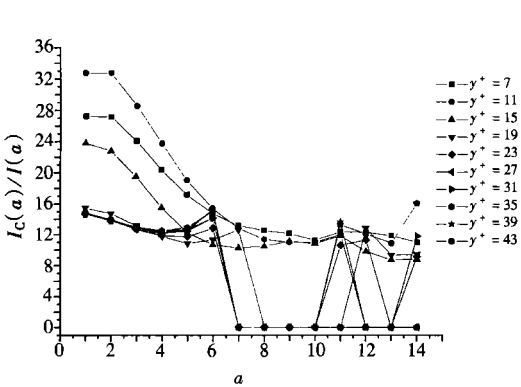


图9 单一尺度相干结构平均相对强度

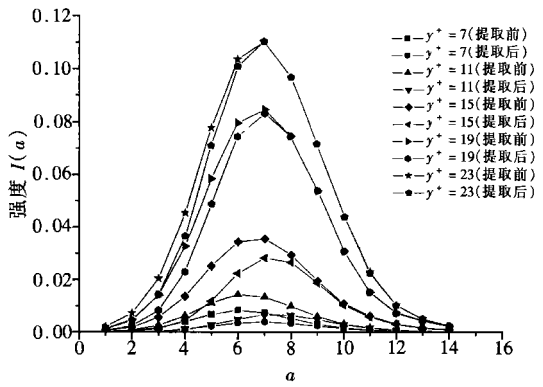


图10 提取相干结构前后单一尺度湍流结构动能变化

湍流多尺度结构的伸缩变形和相对运动;并对湍流边界层近壁区域流向速度分量的多尺度局部平均结构函数进行了实验测量,提出用湍流多尺度局部平均结构函数的平坦因子检测湍流多尺度相干结构,提取湍流边界层多尺度相干结构的条件相位平均波形,对比研究湍流多尺度相干结构的相位平均波形、发生的概率、占有的湍流能量、相对强度等分尺度统计特征随尺度的变化规律,结论如下:

- 1) 雷诺数有限的真实湍流中由于粘性不能忽略和局部剪切作用,湍流中存在不同尺度的结构,流体质点的运动并非完全随机的,湍流中流体质点的运动受所属流体结构的制约。
- 2) 在不超过能量最大尺度的各尺度湍流结构中均存在强间歇性的相干结构,其中能量最大尺度的相干结构表现为典型的猝发现象。
- 3) 缓冲层的多尺度相干结构和对数律层多尺度相干结构存在明显差别,在相位平均波形、发生的概率、占有的湍流能量、相对强度等方面均大于对数律层多尺度相干结构,说明缓冲层内的相干结构占有特别重要的地位,缓冲层是湍流边界层多尺度流动结构最活跃的区域。

[参考文献]

[1] Kolmogorov A N. Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence[J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1941, 32(1): 19—21.

[2] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F H, et al. The structure of turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 30(4): 741—774.



- [3] 王振东. 湍流研究的进展[J]. 物理通报, 1992, **12**(12): 1—4.
- [4] 黄永念. 湍流与混沌之间关系的发展近况[A]. 见: 黄永念 主编. 第三届全国湍流与流动稳定性学术会议论文集[C]. 第三届全国湍流与流动稳定性学术会议, 天津, 1991, 1—6.
- [5] Douady S, Couder Y, Brachet M E. Direct observation of intermittency of intense vorticity filaments in turbulence[J]. *Physics Review Letter*, 1991, **67**(8): 983—986.
- [6] Siggia E D. Numerical study of small\_scale intermittency in 3\_dimensional turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, **107**: 375—406.
- [7] Vincent A, Meneguzzi M. The spatial structure and statistical properties of homogeneous turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, **225**: 1—20.
- [8] SHE Zhen\_su, Jackson E, Orszag S A. Intermittent vortex structures in homogeneous isotropic turbulence[J]. *Nature*, 1990, **344**(62/63): 226—228.
- [9] Chavarria G Ruiz, 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.
- [10] 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.
- [11] Toschi F, Leveque E, Chavarria G Ruiz. Shear effects in non\_homogeneous turbulence[J]. *Physics Review Letter*, 2000, **85**(7): 1436—1439.
- [12] Camussi R, Guj G. Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: intermittency and coherent structures[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, **348**: 177—199.
- [13] Onorato Miguel, Camussi Roberto, Iuso Gaetano. Small scale intermittency and bursting in a turbulent channel flow[J]. *Physical Review E*, **61**(2): 1447—1454.
- [14] 舒玮, 姜楠. 湍流中涡的尺度分析[J]. 空气动力学报, 2000, **18**(supp): 89—95.

## Multi\_Scale Coherent Structures in Turbulent Boundary Layer Detected by Locally Averaged Velocity Structure Functions

LIU Jian\_hua, JIANG Nan, WANG Zhen\_dong, SHU Wei

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

**Abstract:** The time sequence of longitudinal velocity component at different vertical locations in turbulent boundary layer was finely measured in a wind tunnel. The concept of coarse\_grained velocity structure functions, which describes the relative motions of straining and compressing for multi\_scale eddy structures in turbulent flows, was put forward based on the theory of locally multi\_scale average. Based on the consistency between coarse\_grained velocity structure function and Harr wavelet transformation, detecting method was presented, by which the coherent structures and their intermittency was identified by multi\_scale flatness factor calculated by locally average structure function. Phase\_averaged evolution course for multi\_scale coherent eddy structures in wall turbulence were extracted by this conditional sampling to educe scheme. The dynamics course of multi\_scale coherent eddy structures and their effects on statistics of turbulent flows were studied.

**Key words:** turbulent boundary layer; coherent structure; flatness factor; intermittency; locally averaged velocity structure function