

湍动尺度的模糊聚类分析*

梁在潮 刘士和

(武汉水利电力学院水利水电研究所, 1989年6月2日收到)

摘 要

湍流运动可看成是大小不同尺度的涡体运动的叠加。定量地确定湍动尺度的分类, 对于更好地描述不同尺度的涡体运动, 探讨不同尺度涡体之间的相互作用, 建立较好的湍流模式都具有重要的意义。

对事物按一定要求进行分类的数学方法, 叫做聚类分析。由于湍动尺度的分类具有一定程度的模糊性, 因而本文采用模糊聚类的方法, 对壁面光滑及粗糙两种边界条件下的湍动尺度进行了分类, 并对各类结构的特性及其相互作用进行了探讨。

一、统计指标的确定

湍流运动也可看成是具有不同波长或频率的简谐波的叠加。考虑到切变湍流中的相干结构是对湍能贡献较大的一种拟周期结构, 为了确定各频率子区间对湍动能量的贡献, 我们将截断频率内的频率区间 $[0, 83.33]$ 划分成十二个子区间, 其各频率子区间分别为 $[0, 3.79]$, $[3.79, 4.17]$, $[4.17, 4.63]$, $[4.63, 5.56]$, $[5.56, 6.67]$, $[6.67, 8.33]$, $[8.33, 11.9]$, $[11.9, 16.67]$, $[16.67, 23.8]$, $[23.8, 33.33]$, $[33.33, 47.62]$ 和 $[47.62, 83.33]$ 。图1为我们实测的壁面光滑($Re_* = 0.222$)和粗糙($Re_* = 90.69$)两种边界条件下各频率子区间单位频

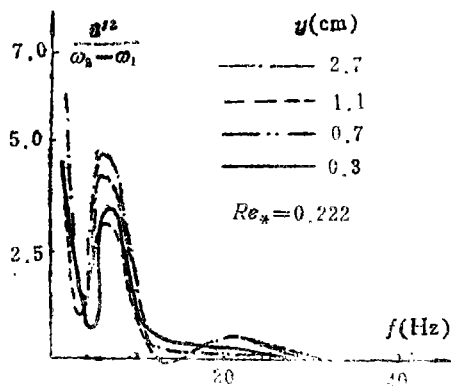


图 1a

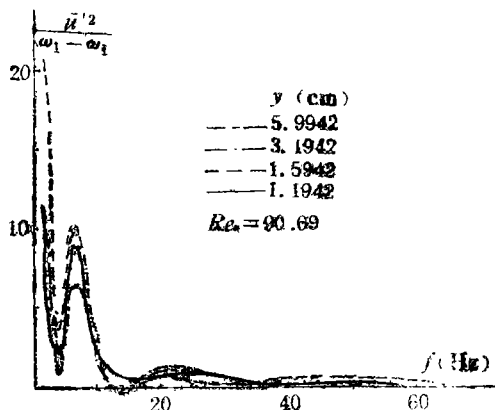


图 1b

* 蔡树棠推荐。

率分量对湍动能量的贡献分布。

由图 1 可看出,大致可将整个频率区间分成 A, B, C 三个子区间,其中 $A: [0, 4\text{Hz}]$, $B: [4, 14.3\text{Hz}]$, $C: [14.3, 83.33\text{Hz}]$ 。图 2 为实测的 A, B, C 三个子区间对湍动能量的贡献分布,从图中明显地看出, A 区是含能较大的湍流尺度。我们以 A, B, C 三个频率子区间对湍动能量的贡献作为统计指标,以沿垂向不同位置所得的纵向脉动流速值为样本,对湍动尺度进行模糊聚类分析。

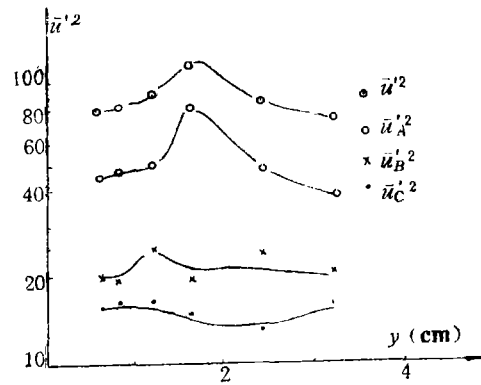


图 2 不同垂向位置的湍动能量分布

二、聚类分析的步骤

1. 数据正规化,即将所有样本中的统计指标转化成不大于 1 的实数,本文选择略大于所有统计指标中最大值的正数与各统计指标相除来达到要求。

2. 计算分类对象相似程度统计量,建立样本间的模糊关系。

3. 求模糊关系的传递闭包,即寻找包含 $R=(r_{ij})$ 的最小模糊传递关系。

4. 选定适当的阈值 λ ,求得普通的等价关系 R_λ ,从而对湍动尺度进行模糊分类:

根据我们实测的资料,并进行上述步骤的处理,得到壁面光滑条件下,其模糊等价关系为:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0.163 & 0.154 \\ 0.163 & 1 & 0.154 \\ 0.154 & 0.154 & 1 \end{pmatrix}$$

(1) 若取 $\lambda=0$, 则其 R_λ 为

$$R_0 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

这意味着湍流由一类湍动尺度所组成。也就是说,将湍流结构看成是一种尺度的涡体所组成,这显然是不符合实际的。

(2) 若取 $\lambda=0.16$, 则其 R_λ 为:

$$R_{0.16} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

这意味着湍流由两类湍动尺度所组成。

(3) 若取 $\lambda=0.9$, 则其 R_λ 为:

$$R_{0.9} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

从而湍流由三种类型的湍动尺度所组成。

对于粗糙壁面,得到的模糊等价关系为:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0.176 & 0.176 \\ 0.176 & 1 & 0.211 \\ 0.176 & 0.211 & 1 \end{pmatrix}$$

若分别取阈值 $\lambda=0, 0.2, 0.9$, 可得出类似于光滑壁面分类结果.

因此, 整个边壁切变湍流结构可分类如图3:

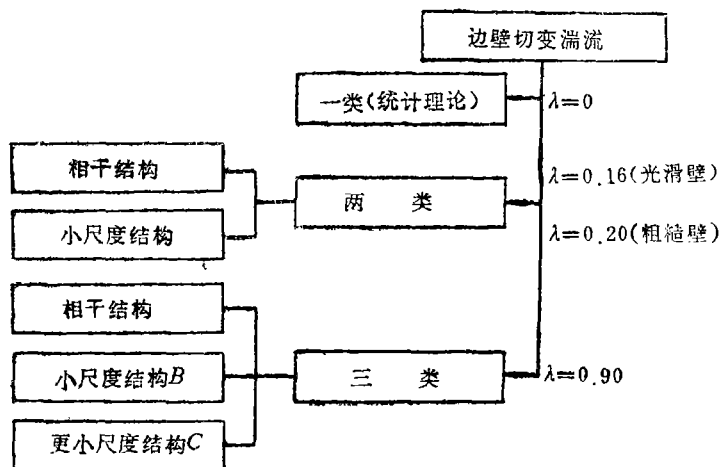


图 3

三、三类结构的特性及其相互作用

利用数字滤波, 分离出上面的三类结构的信号, 并分别计算出其自相关函数. 图 4 为壁面光滑和壁面粗糙两种边界条件下的三类结构的自相关函数曲线. 从图中看出, 结构 A (由自相关函数 $R_A(\tau)$ 反映), 即相干结构, 其 $R_A(\tau)$ 的衰减相当缓慢, 也就是说, 相干结构在一定时段内保持自身特性向下游移动. 而小尺度结构 B ($R_B(\tau)$) 和结构 C ($R_C(\tau)$), 尤其是更小尺度结构 C, 具有相当快的衰减速率.

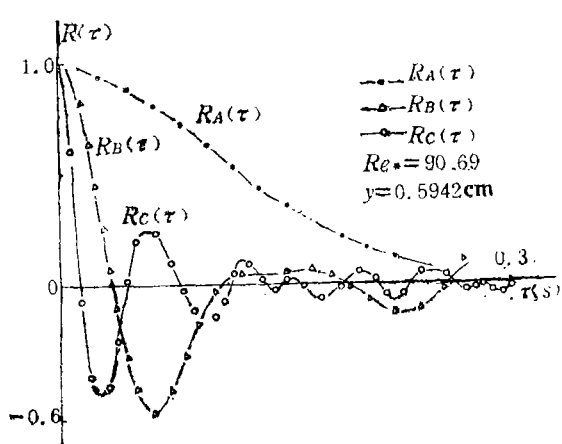


图 4a

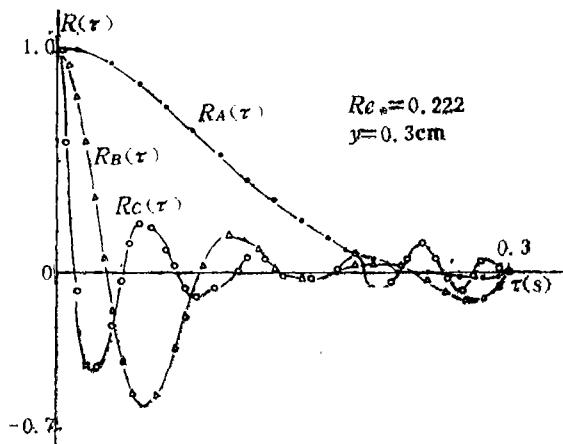


图 4b

图 5 是壁面粗糙条件下同一断面上不同垂向位置的结构 A 自相关函数曲线. 图 6 是同样条件下脉动强度的垂向分布图. 从图中看出, 随着离壁面的距离增加, 结构 A 的自相关函数

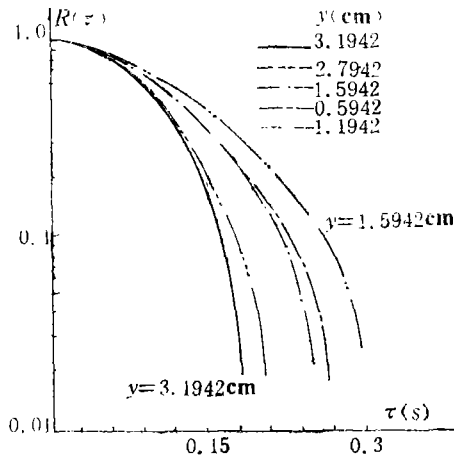


图 5

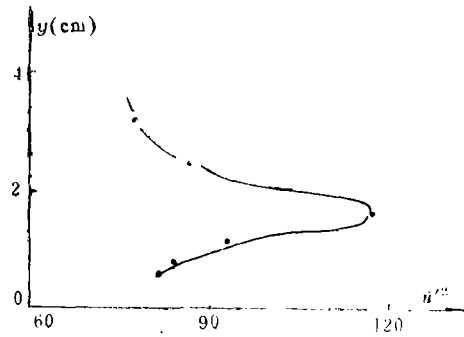


图 6

的衰减速率具有由快到慢，再由慢到快的过程，其衰减速率最慢处与脉动湍动强度最大值出现的位置相对应，从而说明结构A是对湍动能起主要贡献的流动结构。

通过计算，得出结构A和结构B的互相关函数 $R_{AB}(\tau)$ ，图7(a)(b)表示。由图中看出，

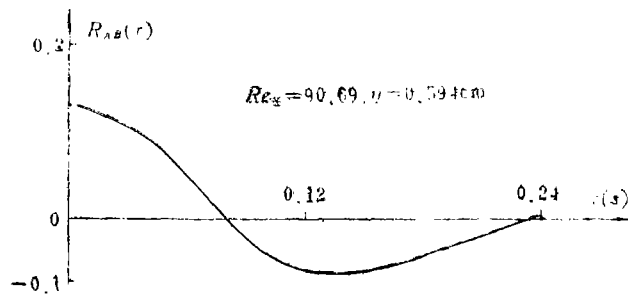


图 7a

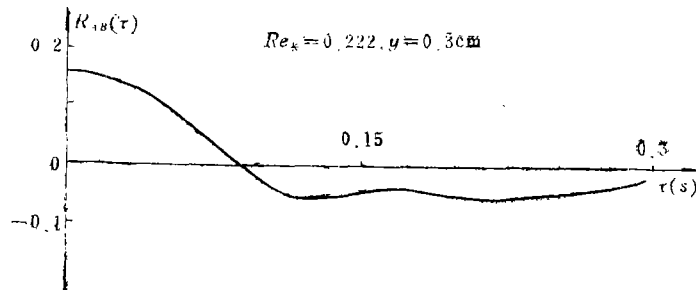


图 7b

结构A和结构B之间，从统计来说存在一定程度的相关，且两者之间是同相的。计算结果还表明，结构B和结构C之间，结构A和结构C之间，其互相关系数皆小于0.1，从而说明它们之间不存在相位联系。

四、结 论

1. 用模糊聚类方法对具有一定模糊程度的湍流尺度进行分类是可取的，而且是可行的。

2. 以频率子区间对湍动能的贡献作为统计指标, 以沿垂向不同位置处的脉动流速值为样本, 阈值 λ 值建议取为:

光滑边壁: $\lambda=0, 0.16, 0.9$

粗糙边壁: $\lambda=0, 0.2, 0.9$

以 $\lambda=0.9$, 将湍流分成大、中、小湍动尺度。

3. 大尺度结构衰减缓慢, 在一定时段内保持自身特性向下游迁移, 其衰减率随离边壁距离的增加由快到慢, 再由慢到快, 衰减速率最慢处与湍动强度最大处相当。而小尺度结构的衰减速度很快。

4. 大尺度结构与中尺度结构有一定的关系, 但大尺度结构与小尺度结构之间似乎不存在相位联系。

参 考 文 献

- [1] Morrison, W.R. B. and R. E. Kronauer, Structural similarity for fully developed turbulence in smooth tubes, *J. F. M.*, **39** (1969), 117—143.
- [2] Morrison, W. R. B., et al., Experimental evidence of waves in the sublayer, *J. F. M.*, **47** (1971), 639—656.
- [3] Lu, S. S. and W. W. Willmarth, Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer, *J. F. M.*, **60** (1973), 481—511.
- [4] Sabot, J. and G. Comte-Bellot, Intermittency of coherent structures in the core region of fully developed turbulent pipe flow, *J. F. M.*, **74** (1976), 767—796.
- [5] Wallace, J. M., et al., Pattern-recognized structures in bounded turbulent shear flows, *J. F. M.*, **83** (1977), 673—693.
- [6] Blackwelder, R. F. and R. E. Kaplan, On the wall structure of the turbulent boundary layer, *J. F. M.*, **76** (1976), 89—112.
- [7] Chen, Chyan-Hai P. and R. F. Blackwelder, Large-scale motion in a turbulent boundary layer: a study using temperature contamination, *J. F. M.*, **89** (1978), 1—31.
- [8] Ueda, H. and J. O. Hinze, Fine-structure turbulence in the wall region of a turbulent boundary layer, *J. F. M.*, **67** (1975), 125—143.
- [9] 梁在潮, 《紊流力学》, 河南科技出版社 (1988).
- [10] 汪培庄, 《模糊集合论及其应用》, 上海科技出版社 (1983).
- [11] 刘士和, 复杂边界湍流相干结构及其理论探讨, 武汉水利电力学院博士论文 (1987).

Fuzzy Cluster Analysis of Turbulent Scales

Liang Zai-chao Liu Shi-he

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan)

Abstract

Turbulent motion could be regarded as the superposition of fluctuations with different scales. It's of great theoretical and practical importance to determine the classification of turbulent scales quantitatively to the better description of vortex motions with different scales, and to the research of the interaction among different scales of vortex and the construction of better turbulent models. The mathematical method, which carries out the classification on a certain requirement, is called cluster analysis. In this paper, fuzzy cluster analysis method is used to study the classification of turbulent scales quantitatively in smooth and rough wall boundary conditions. Furthermore, the properties and interactions among all kinds of flow structures are also studied. The results are helpful to gain some insight into the properties and interactions of all kinds of turbulent scales in wall turbulent shear flow.