

用自相关法确定壁湍流相干结构 条件采样的门限值*

姜 楠 王立坤 李士心 舒 玮

(天津大学力学系, 天津 300072)

(中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室, 北京, 100080)

摘要 研究了用条件采样方法检测壁湍流相干结构的门限值与壁湍流相干结构平均猝发周期检测结果之间的关系, 根据用壁湍流流向脉动速度自相关函数检测壁湍流相干结构平均猝发周期的方法, 提出了用自相关法确定壁湍流相干结构条件采样的门限值, 从而检测壁湍流相干结构的方法

关键词 相干结构 条件采样 自相关 门限值 猝发

1 引言

1967 年, 美国斯坦福大学 S. J. Kline 等人^[1]在实验研究中发现, 在湍流边界层的近壁区内用流动显示观察到沿展向存在快慢相间的条纹结构, 而且低速流体具有抬升、震荡、喷射、破碎等一系列重复出现的运动。后人将这一系列重复出现的准周期过程称为猝发。目前认为, 猝发现象和壁湍流中的大尺度相干结构运动有关, 而且它在维持湍流、传递动量和能量等方面作用很大。目前实验中对相干结构的定量研究主要是通过测量流场中固定点处的脉动流速的时间序列信号, 然后从中提取出相干结构的信号来实现的。自七十年代以来, 普遍采用的是条件采样的方法, 其基本思想是根据人们总结出的猝发过程的基本特征制定一个准则, 依据这个准则将相干结构信号从湍流信号中提取出来。但是, 各种条件采样的检测方法都需要 1-2 个门限值才能得出确定的结论, 实验表明, 检测结果 (主要是相干结构猝发的次数和相干结构的平均猝发周期) 随门限值的改变而变化, 即使对实验采集的同一湍流脉动信号在不同的门限值下的检测结果也具有较大的差异^[2~6]。检测结果的差异说明条件采样的检测结果对检测的门限值具有较强的依赖性。因此, 客观地确定条件采样的门限值是客观地检测壁湍流相干结构, 将真实的相干结构信号从湍流信号中提取出来的前提。

检测壁湍流相干结构平均猝发周期的自相关法^[7,8]是根据统计平均的理论客观地检测壁湍流相干结构平均猝发周期的方法。它根据湍流近壁区流向脉动速度的自相关函数达到第二

* 国家自然科学基金、教育部高等学校博士学科点专项科研基金和国家“九五”攀登计划联合资助项目
1998-11-08 收到第 1 次稿

个峰值对应的延迟时间检测壁湍流相干结构的平均猝发周期。在这一方法中,平均猝发周期是根据信号的自相关函数计算确定,没有任何经验门限值,排除了由于人为确定门限值造成的主观随意性,因而是一种比较客观的方法。但是,由于这一方法是一种统计平均的方法,只能用统计平均的方法计算壁湍流相干结构的平均猝发周期,不能实现对湍流相干结构信号在时域进行实时检测,既不能检测到相干结构的猝发在什么时刻发生,也不能得到相干结构的信号波形。

因此,有必要使自相关法和条件采样法结合起来,使其取长补短,创造一种新的方法,使其既具有自相关法的客观性,克服由于人为确定门限值造成的主观性;又能够实时地检测相干结构的猝发过程。

2 门限值对 μ -level 法条件采样检测结果的影响的实验研究

Lu 等人^[9]在测量近壁湍流的雷诺应力时发现,当流向的脉动速度与其均方根值的比值为 -1 时,瞬时雷诺应力具有最大值,也就是说,在此情况下,湍流对雷诺应力的贡献最大。据此, Bogard 等人^[2]和 Luchik 等人^[3]便归结出检测相干结构的 μ -level 法。 μ -level 法的检测函数 $D(t)$ 定义如下:

$$D(t) = \begin{cases} 1 & u - Lu \\ 0 & u - 0.25u \end{cases}$$

其中 L 为门限经验值,一般取值 0.5-0.3, u 是流向脉动速度的均方根值。

μ -level 法的含义是,当相干结构经过测量点时,流向瞬时速度远远小于时均流速,从而出现流速的亏损,这说明底层靠近壁面的低速流体从壁面向外喷射(ejection)到达测点,使测点当地的流速降低。因此, μ -level 法检测的是相干结构中的低速流体从近壁区向外喷射的阶段。

我们对 μ -level 法门限值 L 对检测结果的影响进行了研究。对湍流边界层中近壁区测量到的流向脉动速度信号^[6](图 1 所示)在不同的门限值 L 下进行检测,图 2 是检测到的猝发频率 f (单位时间内的猝发次数)随门限值 L 的变化规律,图 3 是检测到的相干结构的平均猝发周期 \bar{T}_b 随门限值 L 的变化规律。从图中可以看到,门限值 L 较小时,检测函数将一些小尺度的脉动也检测为猝发事件,从而增加猝发的误判,使猝发次数增加,平均猝发周期减小;门限值较大时,会将一些强度较低的猝发漏掉,从而增加猝发的漏判,使猝发次数减少,平均猝发周期增加。因此,正确地选择检测函数的门限值对于正确地检测相干结构的猝发至关重要。

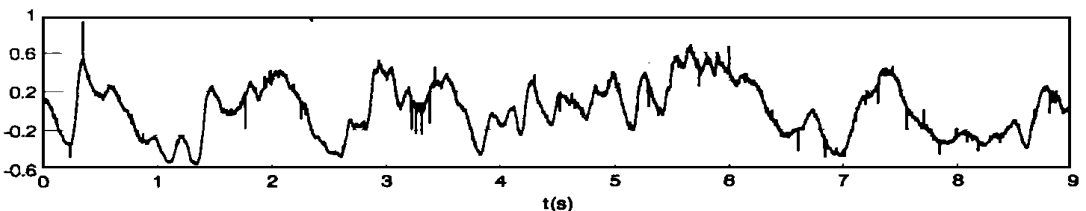


图 1 湍流边界层近壁区流向脉动速度信号

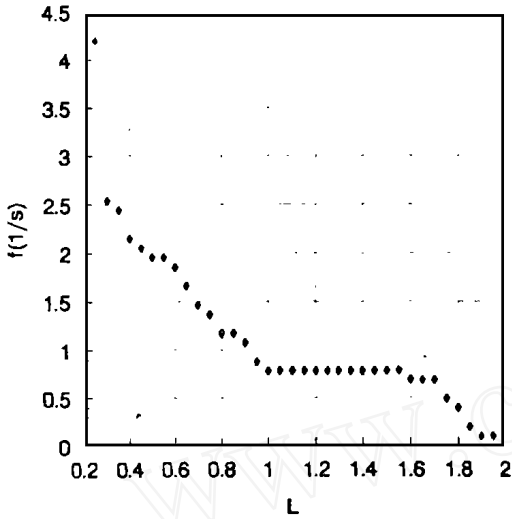


图 2 检测到的猝发频率 f (单位时间内的猝发次数) 随门限值 L 的变化

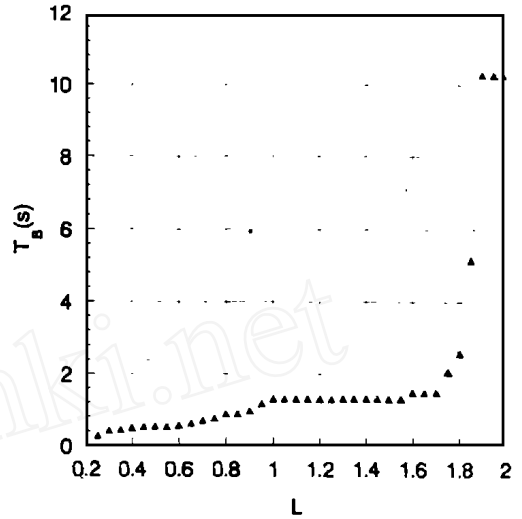


图 3 检测到的相干结构的平均猝发周期 \bar{T}_B 随门限值 L 的变化

3 用自相关法检测壁湍流相干结构的平均猝发周期

图 4 是该流向脉动速度信号的自相关函数, 文献^[7,8]指出, 自相关函数达到第二个峰值时所对应的延迟时间为壁湍流相干结构的平均猝发周期 \bar{T}_B 。在这一方法中, 平均猝发周期是根据信号的自相关函数计算确定, 没有任何经验门限值, 排除了由于人为确定门限值造成的主观随意性, 因而是一种比较客观的方法

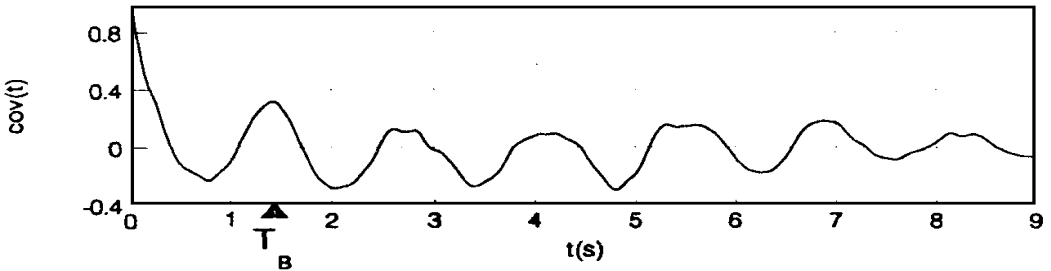


图 4 壁湍流流向脉动速度信号的自相关函数

4 用自相关法客观地确定壁湍流相干结构条件采样的门限值

根据图 4 客观确定的壁湍流相干结构平均猝发周期 \bar{T}_B , 利用图 3 中检测到的相干结构的平均猝发猝发周期 \bar{T}_B 随门限值 L 的变化规律, 可以客观地确定检测壁湍流相干结构猝发事件的门限值 L 。

5 用客观确定的门限值客观地检测壁湍流相干结构的猝发事件

利用自相关法客观确定的门限值(本文 L 的取值范围为1.0~1.4),对湍流近壁区脉动速度信号时间序列进行条件采样,就可以在时域对壁湍流相干结构的猝发事件进行实时的客观检测(图5所示),提取相干结构条件平均的速度信号波形(图6所示).

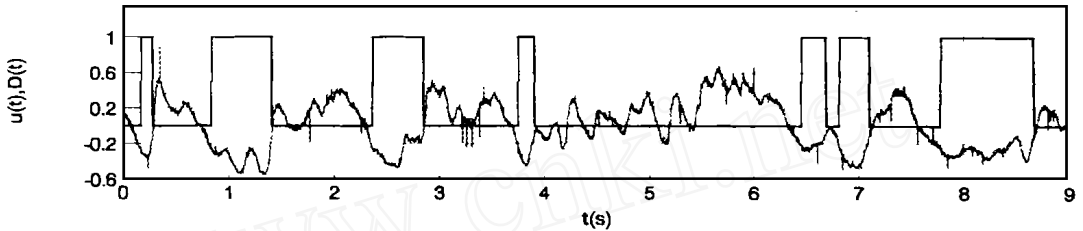


图5 用 μ -level 法在客观确定的门限值下检测壁湍流相干结构的猝发事件

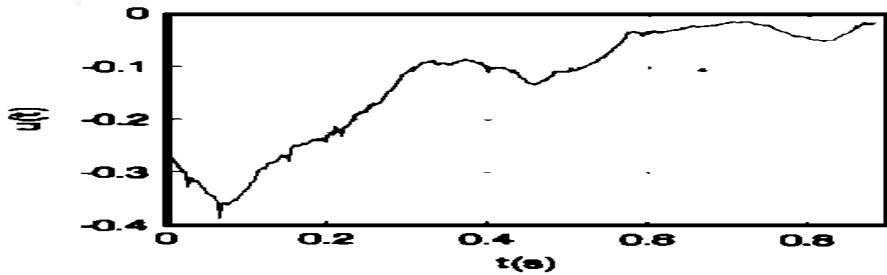


图6 μ -level 法提取的相干结构的条件平均波形

6 主要结论

本文认为,利用条件采样方法检测壁湍流相干结构的猝发事件,不能人为地根据以往的经验数据确定条件采样的门限值,因为由于实验条件的差异和人们对相干结构主观认识的不同,他们所采用的门限值具有很大的差异和主观随意性.要客观地检测壁湍流相干结构的猝发事件,应遵循以下步骤进行:

- (1) 用自相关法客观确定壁湍流相干结构的平均猝发周期
- (2) 改变不同的门限值,研究在不同的门限值下条件采样检测到的相干结构的平均猝发周期随门限值的变化规律
- (3) 利用自相关法客观确定的壁湍流相干结构的平均猝发周期,确定条件采样的门限值
- (4) 在客观确定的门限值下对壁湍流脉动速度信号进行条件采样,检测壁湍流相干结构的猝发事件,提取相干结构的速度信号条件平均波形

参 考 文 献

- 1 Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A, Runstadler P W. The structure of turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1967, 30: 741- 774
- 2 Bogard D G, Tiedeman W G. Burst detection with single-point velocity measurements. *J. Fluid Mech.*, 1986 162: 389 - 413
- 3 Luchik T S, Tiedeman W G. Time-scale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flows. *J. Fluid Mech.*, 1987, 174: 529- 552
- 4 舒玮. 壁湍流相干结构的条件采样方法. 中国力学学会第三届全国实验流体力学学术会议交流资料, 中国力学学会第三届全国实验流体力学学术会议, 天津, 1990
- 5 Tubergen R G, Tiedeman W G. Evaluation of ejection detection schemes in turbulent wall flows. *Experiments in Fluids* 1993, 15(4- 5): 255- 262
- 6 孙葵花, 舒玮. 湍流猝发的检测方法. *力学学报*, 1994, 26(4): 488- 493
- 7 Kim H T, Kline S J, Reynolds W C. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1971, 50: 133- 157
- 8 姜楠, 王振东. 用自相关法检测壁湍流的平均猝发周期. *实验力学*, 1995, 10(4): 343- 348
- 9 Lu S S, Wilmarth W W. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1973, 60: 481- 511

Determination of the Threshold Values for Conditional Sampling in Detecting the Coherent Structures of Wall Turbulence by Using Auto-Correlation Method

JIANG Nan WANG Likun LI Shixin SHU Wei

(Tianjin University, 300072)

Abstract The relation between the threshold value in conditional sampling scheme for detecting the coherent structures and the average burst period of the coherent structures in wall turbulence is examined experimentally. Based on the average burst period of coherent structures, which could be detected by the auto-correlation function of longitudinal fluctuating velocity in wall turbulence, an auto-correlation method for determining the threshold value in condition sampling scheme is presented.

Key words coherent structure, conditional sampling, auto-correlation, threshold, burst

作 者 简 介

姜楠, 1968年7月生, 博士, 副教授. 主要研究方向为湍流与流动稳定性