

文章编号: 1001-4888(2017)02-0202-07

# 用子波分析修正检测壁湍流猝发的 VITA 法<sup>\*</sup>

叶阳<sup>1</sup>, 杨凯弘<sup>1</sup>, 姜楠<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300354; 2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300354)

**摘要:** 应用壁湍流脉动速度信号子波分析的一系列方法对检测壁湍流猝发事件的 VITA 法进行了修正。其中, 用能量最大准则确定 VITA 法短时间平均周期; 以子波变换能量最大尺度脉动速度的短时间平均方差的局部极大值点作为检测函数的中心点, 取代了传统 VITA 法中对短时间周期平均方差选用门限值的方法, 避免了 VITA 法检测结果对门限值的主观经验依赖性, 提高了 VITA 法检测壁湍流猝发事件的客观性和准确性。

**关键词:** 子波分析; 相干结构; 猝发; 变间隔时间平均法(VITA); 门限值

**中图分类号:** O357.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-129

## 0 引言

用变间隔时间的平均法, 即(Varying Interval Time Average Method, 简称 VITA 法), 检测壁湍流猝发, 是由 Blackwelder 等<sup>[1]</sup>提出, Johanssonz 等<sup>[2]</sup>进行完善的, 这一方法的检测函数定义如下:

$$D(t) = \begin{cases} 1 & \hat{Var}(u(t)) \geq Ku'^2 \quad \text{and} \quad \frac{du}{dt} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $K$  是门限值, 一般经验取值  $1.2 \sim 2.0$ ;  $u'$  是流向脉动速度方根值;  $\hat{Var}(u(t))$  是流向脉动速度  $u(t)$  的短时间平均方差, 定义如下:

$$\hat{Var}(u(t)) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} [u(t)]^2 dt - \left[ \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} u(t) dt \right]^2 \quad (2)$$

其中  $T$  为短时间平均周期。

目前, VITA 法已经广泛应用于相干结构的检测<sup>[3-5]</sup>, 但单独使用 VITA 法仍有一定的局限性, 例如, 对于如何取门限值  $K$ , 目前尚未有统一论, 仅凭借经验取值, 带有一定的主观经验依赖性。  $K$  取值过高, 易产生漏判, 而  $K$  取值过低又容易产生误判。所以即使对同一数据处理,  $K$  值不同, 得出的结果也可能不同。而其门限值  $K$ , 本质上是鉴定猝发发生时流向脉动速度短时间方差与平均速度方差的比值, 具有特定的物理意义与相应的现象, 不能仅凭经验取值, 所以门限值  $K$  的选取是 VITA 法中需要解决的一个问题。

同样, 对于 VITA 法的短时间平均周期  $T$  的选定也没有确切的结论, Blackwelder 等<sup>[1]</sup>认为  $T$  应当大于 10 倍的黏性时间单位, 舒玮等<sup>[6]</sup>认为  $T$  大于 30 倍的黏性时间单位后测量结果与  $T$  无关。所以, VITA 法的短时间平均周期  $T$  的选取仍主要依靠经验, 具有一定的主观性。

子波分析是近几年新发展起来的一种数学方法, 通过时间序列信号与一个被称为子波的解析函数

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272233)、(11332006)、(11572221)、(11411130150)联合资助

通讯作者: 姜楠, 教授, 博士生导师, 主要从事实验流体力学与湍流研究。Email: nanj@tju.edu.cn

进行卷积,将信号在时域与频域空间同时进行分解<sup>[7,8]</sup>。子波变换是一个时间和频率的局域变换,因而能有效地从多尺度复杂信号中检测在时间的局部范围内发生的一定时间尺度的拟序事件。1997年,姜楠等<sup>[9]</sup>提出了用子波分析辨识壁湍流猝发事件的能量最大准则,壁湍流脉动速度信号的总动能可以按照子波尺度进行分解,各分尺度信号占有的动能的总和等于脉动速度信号的总动能:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |u(t)|^2 dt = \int_0^{+\infty} \frac{E(a)}{a^2} da \quad (3)$$

其中,

$$E(a) = \frac{2}{C_w} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_u(a, t)|^2 dt \quad (4)$$

本文旨在通过子波分析的有关方法,修正 VITA 法中确定门限值  $K$  和短时间平均周期  $T$  时对主观经验的依赖性,提高湍流近壁区相干结构检测的客观性和准确性。

## 1 实验设备与测量技术

### 1.1 实验设备与装置

实验在天津大学流体力学实验室三元低速闭口回流式风洞中进行。风洞为木质结构,实验段长 1500mm,横截面为切角的矩形,宽 800mm,高 600mm。实验段风速在 0.5m/s 到 40m/s 之间连续可调,背景湍流度小于 0.2%。实验中产生湍流边界层的平板为 15mm 厚的有机玻璃板,长 1700mm,宽 600mm,竖直固定在风洞实验段中心线上,前缘为 4:1 半椭圆,并铺设直径 2mm 绊线和宽度 2cm 的 240 号静电水砂纸带,以加速流场转换,得到充分发展的湍流边界层。

### 1.2 实验仪器与测量技术

测速仪器为 TSI-IFA300 型恒温热线风速仪和 TSI-1621A-T1.5 型单丝边界层热线探针,热线敏感材料为直径 4 $\mu$ m 钨丝,探针使用前在 TSI-1128 型热线探针校准器上进行了标定。数据采集卡采用美国 UEI 公司生产的 WIN-30DS4 型 12 位 A/D 卡。热线探针支杆由 CCTS-1193E 型计算机自动控制三维坐标架移动。

### 1.3 实验具体参数

实验时风洞实验段自由来流速度控制在  $U_\infty = 9.6\text{m/s}$ ,边界层名义厚度  $\delta = 39.88\text{mm}$ ,位移损失厚度  $\delta_1 = 5.63\text{mm}$ ,动量损失厚度  $\theta = 4.17\text{mm}$ ,形状因子  $H = 1.35$ ,名义雷诺数  $Re_\delta = 24092$ ,动量损失雷诺数  $Re_\theta = 2518$ 。用计算机控制步进电机坐标架移动热线探针测量湍流边界层不同法向位置的流向瞬时速度信号,共测量 161 个空间法向位置,采样频率为 100000Hz,采样间隔为 0.00001s,每个空间点样本数量为 4194304,采样时间长度为 41.9s。

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 湍流脉动速度信号的多尺度子波分析

图 1 给出了在  $y^+ = 18.57$  处对流向脉动速度进行 21 个尺度子波变换的子波系数的等值线云图,从图 1 看到,在第 9 尺度(对应频率中心 100Hz)存在着能量很大(颜色非常鲜艳)的拟序的间歇性的成分,很好地反映了湍流大尺度速度脉动。

图 2 所示为对平板湍流边界层 20 个不同法向位置的流向脉动速度信号进行 1 至 20 阶子波分析,将各阶子波系数进行重构,分尺度信号平均能量随尺度的分布,即为湍流脉动能随子波分解尺度  $a$  分布。由图 2 可知,对于近壁区的每一个法向位置,第 9 尺度湍流脉动动能最大。

图 3 是  $y^+ = 18.57$  位置处能量最大的第 9 尺度子波系数重构的信号与原始脉动速度信号的对比,很好地反映了湍流大尺度速度脉动,保留了相干结构的基本信息,同时去除了小尺度的干扰,认为是湍流信号的“骨架”。

### 2.2 VITA 法的检测结果随门限值的变化

图 4 给出了在近壁面区缓冲层内,用 VITA 法检测壁湍流猝发的检测结果随门限值  $K$  和短时间平

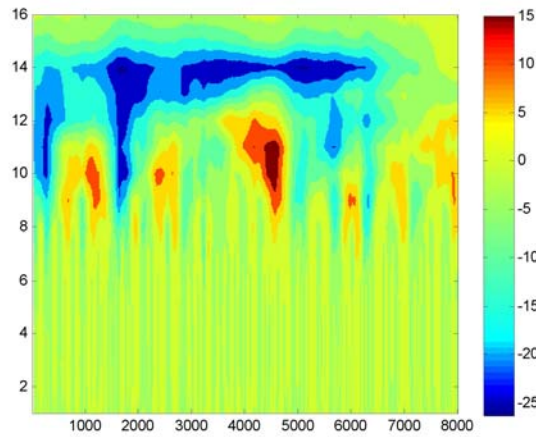


图 1  $y^+ = 18.57$  处流向脉动速度子波系数的等值线图

Fig. 1 Contour of wavelet coefficients for streamwise fluctuating velocity at  $y^+ = 18.57$

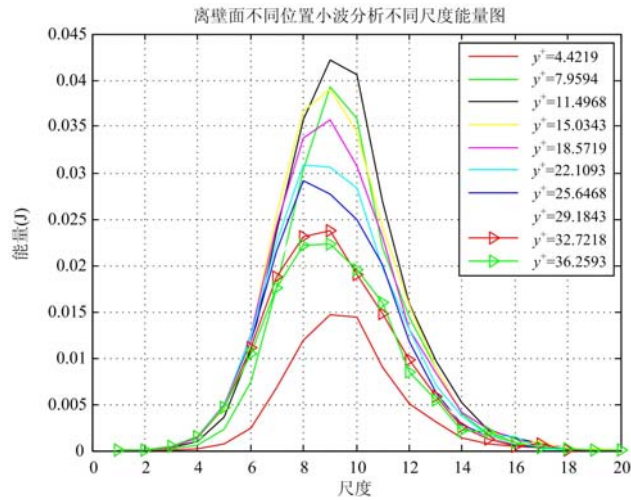


图 2 平板湍流边界层 20 个不同法向位置的流向脉动速度分尺度信号平均能量随尺度的分布

Fig. 2 Distribution of the average energy of the 20 different normal flow velocity scales in the turbulent boundary layer of different position

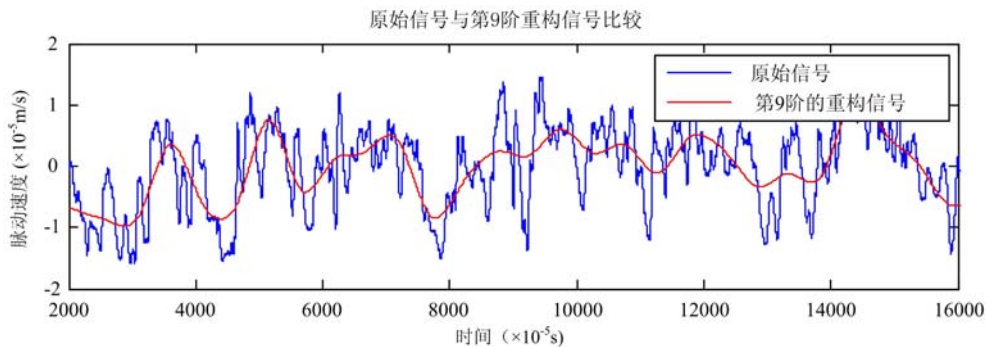


图 3 原始脉动速度信号与第 9 尺度重构脉动速度信号比较

Fig. 3 Comparison between original fluctuating velocity signal and reconstructed ninth scale signal

均周期  $T$  的变化规律,其中纵坐标是短时间平均周期  $T$ ,横坐标是检测门限值  $K$ ,不同颜色代表检测到的猝发次数。从图 4 可以看到,检测门限值  $K$  和短时间平均周期  $T$  对检测到的猝发次数有很大影响,检测到的猝发次数随门限值  $K$  的增加单调减小,随短时间平均周期  $T$  的增加而增加。其原因是小尺度脉动对大尺度相干结构猝发检测的影响。壁湍流脉动速度信号是由多种尺度成分组合而成的,同一个

大尺度猝发会由于小尺度脉动的干扰,被检测成多次猝发(如图 5 所示)。

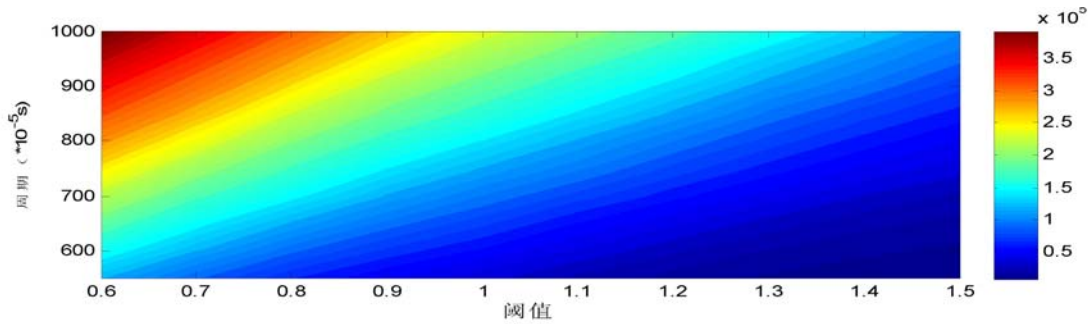


图 4 用 VITA 法检测壁湍流猝发的检测结果随检测阈值  $K$  以及短时间平均周期  $T$  的变化规律

Fig. 4 The detected burst number varies with the threshold levels and short time average interval by VITA scheme

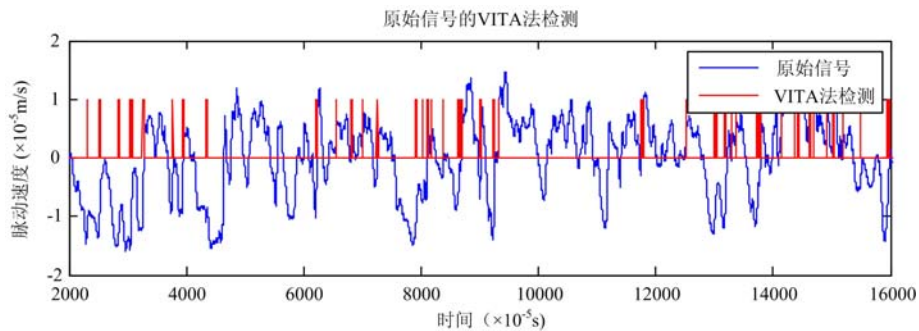


图 5 对  $y^+ = 13.57$  处原始流向脉动速度信号进行 VITA 法检测的结果

Fig. 5 Time trace of streamwise fluctuating velocity and detection function at  $y^+ = 13.75$

### 2.3 用能量最大准则确定湍流猝发的平均周期

姜楠等<sup>[11]</sup>提出了用能量最大准则确定 VITA 法的平均周期这一方法。其思想为对由得到的湍流近壁区域边界层的流向脉动速度采用子波分析,用能量最大准则选定与壁湍流猝发事件时间尺度对应的能量最大的尺度,该尺度即为 VITA 法所需的短时间平均周期  $T$ 。如图 6 所示为第 9 尺度子波系数的自相关函数<sup>[12]</sup>,由图 6 自相关函数的波长可取得第 9 尺度脉动速度信号的周期  $T = 0.1338\text{s}$ ,相当于 702.83 个黏性时间单位。

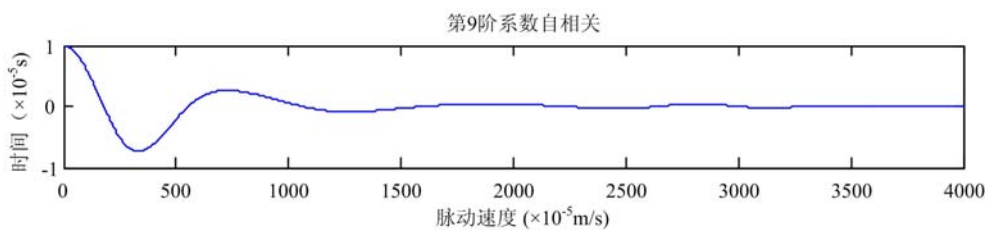


图 6 第 9 尺度子波系数自相关函数

Fig. 6 Ninth scale wavelet coefficients autocorrelation function

### 2.4 用能量最大尺度脉动速度信号的短时间平均方差的局部极大值检测猝发的时间位置

将壁湍流脉动速度信号子波分析技术引入壁湍流相干结构猝发检测方法的研究<sup>[12]</sup>,结合壁湍流脉动速度信号子波多尺度分析,用能量最大尺度的子波系数重构的脉动速度信号消除了小尺度脉动的影响。将能量最大尺度脉动速度信号的短时间平均方差的局部极大值点作为检测函数的中心,可以取代原始脉动速度短时间平均方差,进行相干结构猝发的检测。图 7 为用本文提出的检测方法对第 9 尺度重构信号的短时间平均方差的局部极大值点进行检测的结果,红线代表第 9 阶重构的脉动速度信号的局部短时间平均方差随时间的变化,蓝线代表能量最大的第 9 尺度湍流脉动速度信号。可以看出,能量最大的第 9 尺度湍流脉动速度的短时间平均方差的极大值点,代表第 9 尺度湍流脉动速度急剧变化

(急剧增长或者急剧下降)的过程,如果加上  $\frac{\partial u}{\partial t} > 0$  的检测条件,则该点是能量最大的第 9 尺度脉动速度急剧增长的时刻,也就是外区高速流体急剧下扫,达到探针所在测点位置,使当地速度急剧增长的时刻,即第四象限的事件;如果加上  $\frac{\partial u}{\partial t} < 0$  的检测条件,则该点是能量最大的第 9 尺度脉动速度急剧下降的时刻,也就是低速流体向外区喷射,使测点当地的脉动速度急剧下降的时刻,即第二象限的事件。总结新的 VITA 法检测准则如下:

$$D(b) = \begin{cases} 1(\text{sweep}) & \text{Var}[u'(a^*, b)] = \max \text{Var}[u'(a^*, t)] \& \& \frac{\partial u'(a^*, b)}{\partial t} > 0 \\ -1(\text{eject}) & \text{Var}[u'(a^*, b)] = \max \text{Var}[u'(a^*, t)] \& \& \frac{\partial u'(a^*, b)}{\partial t} < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\text{Var}[u'(a^*, b)] = \frac{1}{a^*} \int_{b-\frac{a^*}{2}}^{b+\frac{a^*}{2}} [u'(a^*, t)]^2 dt - \left[ \frac{1}{a^*} \int_{b-\frac{a^*}{2}}^{b+\frac{a^*}{2}} u'(a^*, t) dt \right]^2 \quad (6)$$

为能量最大尺度脉动速度  $u'(a^*, t)$  的短时间平均方差,表示能量最大尺度脉动速度  $u'(a^*, t)$  在短时间周期  $T = a^*$  内的变化程度,  $u'(a^*, t)$  为能量最大尺度流向脉动速度,  $a^*$  代表能量最大尺度参数。

该检测方法避免了由于门限值  $K$  选取的主观性引起相干结构的误判漏判。因此,用能量最大尺度脉动速度的短时间平均方差的极大值作为判别湍流的喷射和扫掠过程是合理的,用此方法能够比较准确地检测相干结构的喷射和扫掠过程。

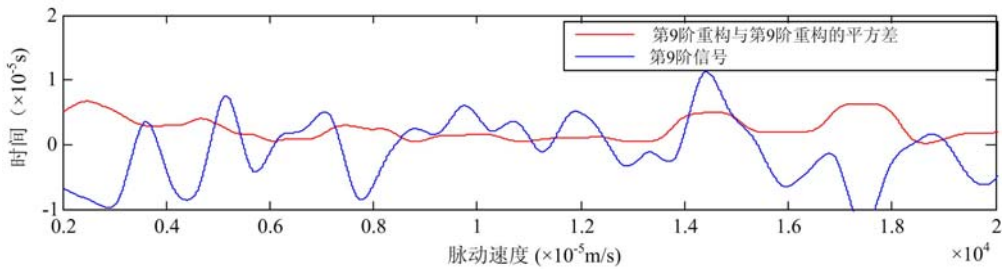


图 7 第 9 尺度重构脉动速度信号和第 9 尺度重构信号的短时间平均方差

Fig. 7 Ninth scale reconstruction of fluctuating velocity signals and the short time average variance of ninth scale reconstruction signal

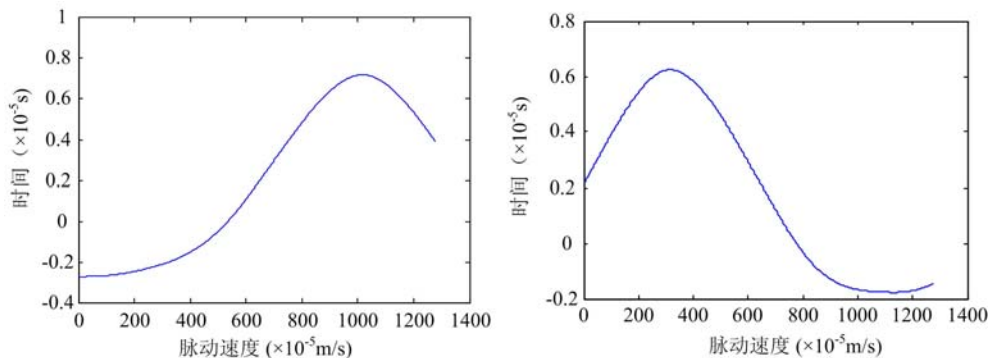


图 8 扫掠(左图)和喷射(右图)的脉动速度相位平均波形

Fig. 8 The phase-averaged fluctuating velocity waveforms of sweep(left) and eject(right)

对能量最大第 9 尺度脉动速度信号用公式(5)、(6)进行检测,以检测到的短时间平均方差的局部极大值点分别作为喷射和扫掠的中心,在其前后各截取长度  $\frac{a^*}{2}$  的脉动速度信号片断,对这些条件采样的脉动速度信号片断按照相位对齐原则进行叠加平均,得到喷射和扫掠过程中脉动速度的相位平均波

形(图 8 所示)。

$$\langle f(t) \rangle_{\text{sweep}} = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} f(t_i + t), \quad t \in \left[-\frac{a^*}{2}, \frac{a^*}{2}\right], \quad \text{while } D_e(t_j) = 1 \quad (7)$$

$$\langle f(t) \rangle_{\text{eject}} = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} f(t_i + t), \quad t \in \left[-\frac{a^*}{2}, \frac{a^*}{2}\right], \quad \text{while } D_e(t_j) = -1 \quad (8)$$

从图 8 可看出,在扫掠过程中,高速流体从外区高速向下扫掠,到达热线探针所在的位置,使探针所在位置的流向脉动速度快速增长,直到脉动速度达到最高值,然后再逐渐缓慢波动下降;在喷射过程中,低速流体从壁面向外振荡喷射,到达热线探针所在的位置,使探针所在位置的流向脉动速度快速下降,直到脉动速度达到最低值,然后再逐渐缓慢波动上升,相干结构喷射和扫掠的演化过程都具有很好的相干性,对湍流雷诺应力的产生有很大的贡献,对湍流的产生、维持、演化、发展具有主导作用。

### 3 主要结论

利用子波分析检测壁湍流相干结构猝发时间尺度的能量最大准则及相关方法,可以降低 VITA 法短时间周期  $T$  和门限值  $K$  依靠主观经验选取造成的相干结构判定误差。用能量最大准则确定检测壁湍流猝发事件的 VITA 法短时间平均周期,以子波变换能量最大尺度脉动速度的短时间平均方差的局部极大值点作为检测函数的中心点,能够有效地修正 VITA 法的缺陷,子波分析的能量最大准则与 VITA 法结合使用,能够更为客观准确地检测相干结构的猝发事件。

#### 参考文献:

- [1] Blackwelder R I, Kaplan R E. On the wall structure of the turbulent boundary layers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1976, 76:89—112.
- [2] Johansson A V, Alfredsson P H. On the structure of turbulent channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 122:291—314.
- [3] Antonia R A. Conditional sampling in turbulence measurement[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, 13: 131—156.
- [4] Cantwell B J. Organized motions in turbulent flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, 13:457—515.
- [5] Robinson S K. Coherent motions in turbulent boundary layer[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23: 601—639.
- [6] Shu W, Tang N. Burst frequency in turbulent boundary layers[J]. Acta Mechanica Siniica, 1988, 4(4):291—303.
- [7] Farge M, Kevlahan N, Perrier V. Wavelets and turbulence[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(4):639—669.
- [8] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1992, 24:395—457.
- [9] 姜楠, 王振东, 舒玮. 辨识子波分析壁湍流猝发事件的能量最大准则[J]. 力学学报, 1997, 29(4):406—411 (JIANG Nan, WANG Zhendong, SHU Wei. The maximum energy criterion for identifying burst events in wall turbulence using wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1997, 29(4):406—412 (in Chinese))
- [10] Zheng Xiaobo, Jiang Nan. Experimental study on spectrum and multi-scale nature of wall pressure and velocity in turbulent boundary layer[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(6): 064702.
- [11] 姜楠, 舒玮, 王振东. 用能量最大准则确定 VITA 法的平均周期[J]. 力学学报, 2000, 32(5):548—551 (JIANG Nan, SHU Wei, WANG Zhendong. Determination of the short time average interval in VITA method by maximum energy criterion[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 32(5):548—551 (in Chinese))
- [12] 舒玮, 姜楠. 湍流中涡的尺度分析[J]. 空气动力学报, 2000, 18(增刊):89—95 (SHU Wei, JIANG Nan. Analysis of eddy scale in turbulent flows [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(S):89—95 (in Chinese))

## On the Modification of VITA Method for Detection of Turbulence Burst on Wall Surface by Wavelet Analysis

YE Yang<sup>1</sup>, YANG Kai-hong<sup>1</sup>, JIANG Nan<sup>1,2</sup>

(1. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300354, China)

**Abstract:** A series of methods based on the analysis of wall turbulence pulse velocity signal wavelet are adopted to modify VITA method used in detecting wall surface turbulence burst events. Among which, the short time average period  $T$  in VITA method is determined by maximum energy criterion; the local maximum point of short time average variance of the maximum scale fluctuation velocity in energy wavelet transform is used as the detection function center; threshold value selection for short period average variance in traditional the dependence of detection subjective experience on threshold value is avoided; therefore, objectivity and accuracy of VITA method in detecting turbulence burst events on wall surface are improved.

**Keywords:** wavelet analysis; coherent structure; burst; varying interval time average method (VITA); threshold quantity