

文章编号: 1001-4888(2023)06-0723-09

# 人工合成微射流周期吹吸扰动控制 壁湍流相干结构的实验研究\*

高赛芃<sup>1</sup>, 白建侠<sup>2</sup>, 程肖岐<sup>1</sup>, 田海平<sup>3</sup>, 姜楠<sup>1</sup>

(1. 天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300354; 2. 天津仁爱学院 数学教学部, 天津 301636;  
3. 太原理工大学 力学系, 山西太原 030024)

**摘要:** 湍流的壁面摩擦阻力与壁湍流相干结构的猝发过程有重要关系。减少壁面摩擦阻力的方法之一, 就是通过对壁湍流的相干结构进行控制实现的。为探究人工合成微射流的减阻效果, 通过控制镶嵌在壁面空腔上的压电振子进行周期振荡, 在壁面产生人工合成微射流, 实现壁湍流结构猝发主动控制。利用单丝边界层热线探针, 对施加人工合成微射流扰动前后平板湍流边界层的流向速度信号进行测量; 利用子波变换和能量最大尺度准则提取出最大含能尺度脉动速度信号的骨架后, 通过自相关法确定 VITA 法的平均周期  $T$  和门限值  $K$ ; 利用 VITA 法对湍流脉动速度信号进行检测, 得到相干结构猝发的条件相位平均波形。研究表明, 施加一定频率和振幅的人工合成微扰动以后, 湍流边界层平均速度剖面的黏性底层增厚, 对数律层上移。人工合成微射流能够抑制近壁相干结构的猝发, 使近壁相干结构的振幅明显降低, 从而产生减阻效果。同时, 人工合成微射流只能控制近壁区域相干结构猝发, 在远离壁面区域无法产生控制效果。

**关键词:** 湍流边界层; 合成微射流; 条件相位平均; VITA 法; 子波分析

**中图分类号:** O357.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-022

## 0 引言

湍流边界层是工程技术中的关键基础问题。在湍流研究的早期, 通常认为湍流边界层中的湍流脉动是完全随机运动<sup>[1]</sup>。20 世纪中叶以来, 随着流体力学实验技术的不断进步, 湍流边界层相干结构被发现<sup>[2-6]</sup>, 人们逐渐加深了对湍流边界层流动机理的认识, 认识到相干结构的猝发过程在局部时空范围内对湍流的产生具有重要贡献<sup>[1]</sup>。

近年来, 伴随着航空、航天、船舶工程的不断进步, 实验流体力学得到了长足的发展。在众多工程领域中, 如何减小湍流带来的摩擦阻力以提高工作效率是一个十分重要的科学研究问题。在流体中, 由于湍流的摩擦阻力远高于层流, 因此可以通过削弱湍流的方法来减小摩擦阻力。研究者就如何选取合适的壁湍流控制方式以减小摩擦阻力已经进行了大量研究<sup>[7-10]</sup>。在主动控制方面, 常见的控制方式包括通过壁面压电振子的振动抑制相干结构<sup>[11]</sup>、通过施加电磁场干扰对相干结构进行主动控制等<sup>[12]</sup>; 在被动控制方面, 常见的控制方式包括利用超疏水材料作为壁面材料<sup>[13]</sup>、向流体中加入少量聚合物溶液等<sup>[14]</sup>。从实际应用来看, 尽管被动控制的方式成本较为低廉、操作较为简单, 但被动控制无法很好地适

\* 收稿日期: 2023-02-02; 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972251, 12172242, 12202309, 12202310); 中德合作研究小组基金项目(GZ1575); 中国博士后基金项目(2022M712357)

通信作者: 姜楠(1968-), 男, 博士生导师, 教授。研究方向: 湍流、实验流体力学。Email: nanj@tju.edu.cn

应流动条件的变化,从而导致被动控制的效率较为低下。而主动控制可以通过调整控制参数以适应不同流动情况,具有较好的控制效果。因此,针对湍流边界层相干结构的主动控制研究成为湍流研究的热点。

湍流边界层相干结构猝发事件的条件相位波形可以鲜明地反映猝发事件中脉动速度的变化值。在湍流相干结构的猝发过程之中,流体黏性导致的剧烈剪切作用所产生的摩擦阻力是湍流摩擦阻力较大的根本原因,因此,有必要对壁湍流的相干结构进行控制。壁湍流相干结构是一种能够重复出现的准周期的流动结构,具有一定的规律性,因此可以通过测量近壁区域的瞬时脉动速度等物理量总结出相干结构的基本特征。采样方法主要有速度门限值法、象限分裂法、变间隔时间平均法(即 VITA 法)等。为了使 VITA 法不再依赖于主观选取的参数,叶阳等<sup>[15]</sup>通过子波分析对 VITA 法进行改进,使 VITA 法成为了一种较为客观的方法。

VITA 法<sup>[16-17]</sup>检测函数的定义为

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

式中:  $K$  为门限值;  $u(t)$  为流向脉动速度;  $u'$  为流向脉动速度的均方根值;  $\text{Var}(u(t))$  为流向脉动速度短时间平均方差:

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

式中,  $T$  为短时间平均周期。

在 VITA 法中较为关键的是短时间平均周期  $T$  和门限值  $K$ , 它们的数值一般只能依靠经验选取的方法。实验表明,即使对于完全相同的数据,选用不同门限值  $K$  进行检测仍然会得出不同的结果,说明 VITA 法检测结果对门限值  $K$  有较高的依赖性<sup>[18-19]</sup>。同时,短时间平均周期  $T$  的选取对于实验结果也有较大影响<sup>[20]</sup>。

子波分析作为一种新兴的数学工具,近年来被大量用于湍流研究<sup>[21-24]</sup>。一维信号  $u(t)$  在子波函数  $W_{ab}(t)$  下的子波变换  $W_u(a, b)$  为

$$W_u(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \overline{W_{ab}(t)} dt \quad (3)$$

式中,  $\overline{W_{ab}(t)}$  为  $W_{ab}(t)$  的共轭,  $W_{ab}(t)$  由子波母函数  $W(t)$  经过平移伸缩得到:

$$W_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} W\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

式中:  $a$  为伸缩常数;  $b$  为平移常数。

根据子波系数可以得到各个尺度中湍流脉动速度信号的分尺度湍动能  $E(a)$ :

$$E(a) = \frac{2}{C_w} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_u(a, b)|^2 db \quad (5)$$

其中

$$C_w = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{W}(k)|^2}{|k|} dk \quad (6)$$

式中,  $\hat{W}(k)$  为子波母函数  $W(t)$  的傅里叶变换。

分尺度湍动能和脉动速度的关系为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |u(t)|^2 dt = \int_0^{+\infty} \frac{E(a)}{a^2} da \quad (7)$$

由湍动能随尺度的分布式(5)可以得知,经过子波分析之后所得到的不同尺度的湍动能是不相同的。在所有的尺度中,存在某个尺度  $a^*$ , 其所对应的湍动能在总湍动能之中的占比最大,为猝发周期对应的时间尺度。

本文首先采用子波分析方法客观确定 VITA 法中的短时间平均周期  $T$  和检测门限  $K$ , 得到了不依赖于经验选取的一种客观的 VITA 检测方法。随后采用 VITA 法对施加人工合成微射流控制前后的湍流边界层相干结构进行检测, 提取了湍流边界层不同法向位置处相干结构猝发的条件相位平均波形。最后将施加人工合成微射流控制前后的相干结构脉动速度相位平均波形进行了对比。

## 1 实验装置和测量技术

### 1.1 人工合成微射流控制装置

压电振子由宽 3.6mm、厚 0.2mm 的铜片和宽 3.6mm、厚 0.22mm 的压电陶瓷片黏结而成, 有效振动长度为 30mm。压电振子以悬臂梁的形式一端平行悬挂在平板壁面上的预留空腔之上, 振子自由端与周围平板之间均有水平 1mm 宽的间隙, 压电振子的振动通过与壁面空腔中的空气相互作用, 对湍流边界层产生人工合成微射流周期吹吸扰动。

### 1.2 风洞

实验在低速回流式风洞中进行, 风洞的实验段长 1500mm, 横截面为切角的矩形, 宽 800mm, 高 600mm。实验段风速在 0.5m/s~40m/s 连续可调, 背景湍流度小于 0.2%。在风洞实验段沿中心线竖直放置一块 1700mm×600mm×15mm 的有机玻璃平板, 平板前缘为长短轴 6:1 的半椭圆形, 在平板前缘下游 80mm 处沿展向安装直径为 2mm 的绊线及宽 530mm 的 240 号砂纸带, 以保证热线测量处达到充分发展的湍流边界层(图 1)。实验时风洞实验段自由来流速度控制在 9.0m/s, 动量损失雷诺数  $Re_\theta = 2183$ 。

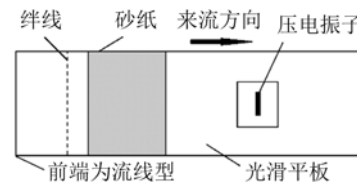


图 1 湍流边界层周期吹吸扰动实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup of periodic blow-suck disturbance in turbulent boundary layer

### 1.3 热线测速

测速仪器为 TSI-IFA300 型恒温热线风速仪和 TSI-1621A-T1.5 型微型单丝边界层热线探针, 热线敏感材料为直径 4 $\mu$ m、长度 1.27mm 的钨丝。

实验中沿平板法线方向选取 161 个不等间距的法向位置, 探针移动采用 1193E 型三维步进电机控制自动坐标架, 控制精度为一个 600mm 行程的误差不大于 10 $\mu$ m, 步长在近壁区设置为 0.2mm, 外区设置为 1mm。采用 12 位 DAQ 卡进行数据采集, 采样频率为 100kHz, 低通滤波截止频率为 50kHz, 每个法向位置的瞬时速度采样时间长度为 41.9s, 瞬时速度样本量为 4194304。

## 2 实验测量结果及分析讨论

### 2.1 平均速度剖面

实验组选取的施加电压分别为 20V、60V、100V, 施加的周期吹吸扰动频率分别为 80Hz、160Hz、240Hz, 两者相互组合得到 20V/80Hz、20V/160Hz、20V/240Hz、60V/80Hz、60V/160Hz、60V/240Hz、100V/80Hz、100V/160Hz、100V/240Hz 共计 9 种不同工况。对照组选取压电振子不振动的情况进行对比。图 2(a) 为这 10 种工况下的湍流边界层平均速度剖面。图 2(b) 中散点分别为不施加控制、100V/80Hz 和 100V/160Hz 工况下的湍流边界层的平均速度剖面, 而直线为 3 种工况下对数律层平均速度剖面的拟合。图中  $U^+ = \frac{U}{U_\tau}$ ,  $y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu}$  为用黏性内尺度特征量无量纲化后的流向平均速度和法向坐标, 其中  $U$  为流向平均速度;  $U_\tau$  为摩擦速度;  $y$  为到壁面的距离;  $\nu$  为运动黏性系数;  $U_\infty$  为无穷远处来流速度;  $\delta$  为速度边界层名义厚度。从图中可以看出, 在施加人工合成微射流周期吹吸扰动控制后, 平均速度剖面图的形状没有改变, 但是在施加人工合成微射流控制的情况下, 黏性底层平均速度剖面的斜率发生变化, 即出现了黏性底层增厚, 对数律层上移的现象, 表明湍流边界层施加人工合成微射流周期吹吸扰动控制后产生了减阻效果。这与前人所做的实验结果相符<sup>[19]</sup>。

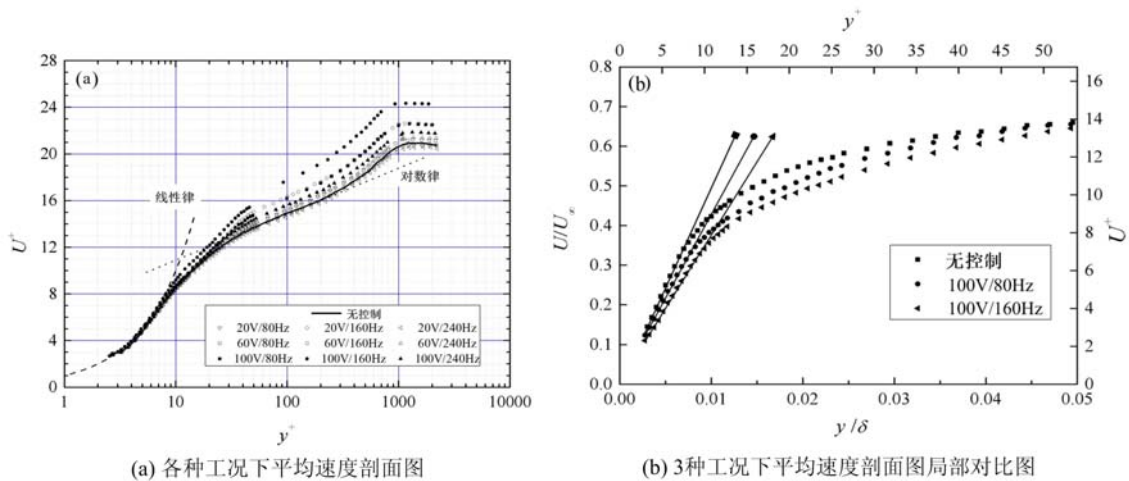


图2 各种工况下湍流边界层平均速度剖面

Fig. 2 Mean velocity profile in turbulent boundary layer under different cases

## 2.2 子波分析

对不同法向位置的流向脉动速度信号时间序列进行子波变换,其中子波母函数选用 db3。对流向脉动速度进行 20 个尺度的分解,得到子波系数。根据每一个尺度子波系数的模的平方,得到分尺度湍动能随尺度  $a$  的分布。图 3 给出了  $y^+ = 17.9$  处 3 种工况的分尺度湍动能随尺度参数分布。

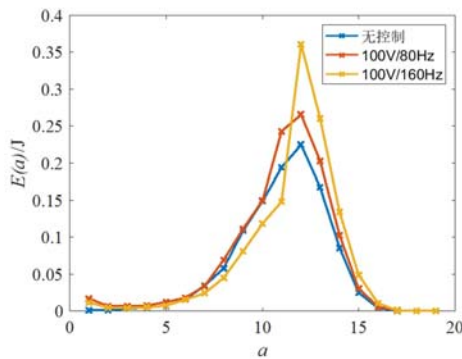


图3 湍流边界层中不同控制工况分尺度湍动能随尺度的分布

Fig. 3 Distribution of the turbulent kinetic energy across wavelet scales in the turbulent boundary layer under different control cases

从图 3 中可以观察到,施加人工合成微射流周期吹吸扰动后,能量最大尺度附近的湍动能峰值显著上升。这表明施加人工合成微射流周期吹吸扰动控制后,湍动能更加集中在能量最大尺度附近。对于近壁区,第 12 尺度湍流脉动动能最大,小于第 12 尺度杂乱无章的随机运动的小尺度结构受到周期吹吸扰动调制作用,湍动能下降,大尺度有序结构的湍动能增加。图 4 为 3 种工况下从 10s 开始到 10.2s 结束共计 0.2s 内 20 个尺度的子波系数  $W(a, b)$  云图,其中纵轴为子波尺度,横轴为时间。从图中可以看到,在第 11 尺度至第 13 尺度之间,出现

深色区域,代表此处小波系数幅值远大于其余尺度。

按照能量最大准则,需要采取分尺度湍动能最大的尺度的子波系数进行信号重构。由于第 11 到第 13 尺度的子波系数远大于其余尺度,因此采用第 11 到第 13 尺度的子波系数进行信号重构,得到重构信号。通过对比重构信号和原始信号(图 5),可以发现重构信号很好地保留了相干结构的基本信息,基本与原始信号趋势相同,同时一定程度上去除了小尺度脉动和噪声的影响。

## 2.3 确定 VITA 法短时间平均周期 $T$

为了消除在 VITA 法检测相干结构猝发中主观经验因素的影响,在进行检测的时候需要通过客观方法确定短时间平均周期  $T$  和门限值  $K$ 。姜楠等<sup>[20]</sup>提出了用自相关法确定 VITA 法的平均周期  $T$  的方法。该方法认为流向脉动速度的自相关函数第 1 个极大值所对应的延迟时间为短时间平均周期  $T$ ,从而消除了人为因素的影响。

首先对脉动速度信号进行子波变换,根据分尺度子波系数得到湍动能随尺度参数的分布,确定分尺

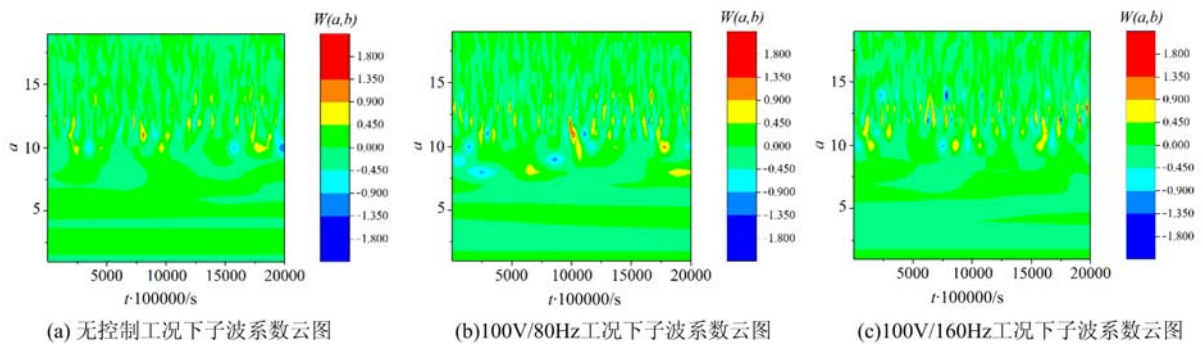


图 4 不同控制工况下流向速度的子波系数云图

Fig. 4 Contour of wavelet coefficients for streamwise velocity under different control cases

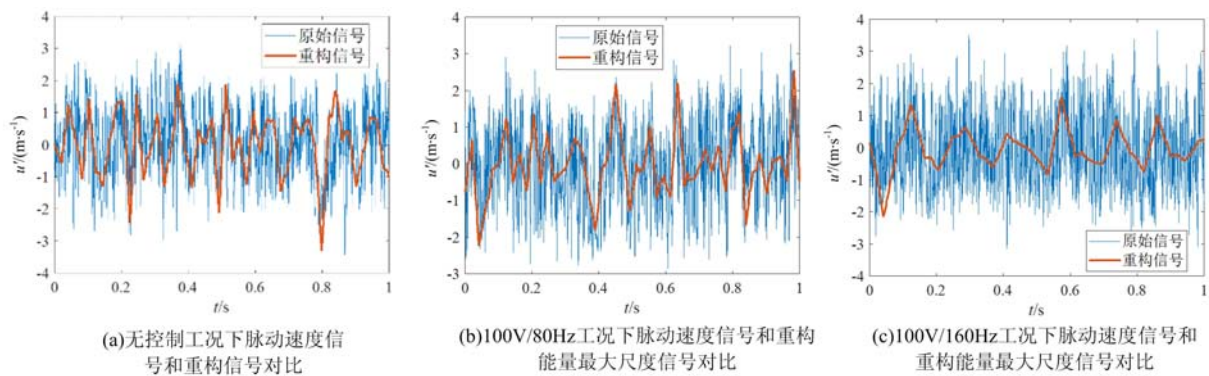


图 5 不同控制工况下流向速度的子波系数云图

Fig. 5 Contour of wavelet coefficients for streamwise velocity under different control cases

度湍动能最大的尺度。随后,根据分尺度湍动能最大的第 11 到第 13 尺度的子波系数重构的信号,求得能量最大尺度重构的脉动速度信号的自相关函数  $R$  如图 6 所示。通过自相关函数函数法,确定第一个极大值所对应的延迟时间,得到猝发平均周期。

#### 2.4 确定 VITA 法的门限值

传统 VITA 法检测时,门限值  $K$  的一般经验取值范围为  $1.2 \sim 2.0$ ,没有明确标准。孙葵花等<sup>[25]</sup>的实验表明,VITA 法检测结果与门限值  $K$  相关度较高,门限值  $K$  选择的任意性会导致信号的遗漏或错判。因此在进行检测之前,需要对 VITA 法的门限值  $K$  进行确定。姜楠等<sup>[26]</sup>提出用确定 VITA 的门限值  $K$  的自相关法,通过客观方法选取门限值  $K$ 。该方法是通过变化不同的门限值  $K$  对脉动速度信号进行 VITA 法的检测,得到猝发的平均周期  $T_B$  与门限值  $K$  之间的关系,再代入由自相关法求得的猝发平均周期,即可得到门限值  $K$ 。这种方法不依赖于主观判断,因此能够排除门限值选择中对主观经验的依赖性。本文在  $0.1$  到  $1.5$  之间,均匀选取  $15$  个不同的门限值  $K$ ,对经过能量最大尺度重构脉动速度信号进行 VITA 法的检测,得到猝发的平均周期  $T_B$  与 VITA 法门限值  $K$  之间的关系(图 7)。通过对比图 7 与用自相关法求得的猝发平均周期  $T_B$ ,可以得出门限值  $K$  的取值。从 VITA 法的式(1)可以看出,随着门限值  $K$  的增加,流向脉动速度的短时间平均

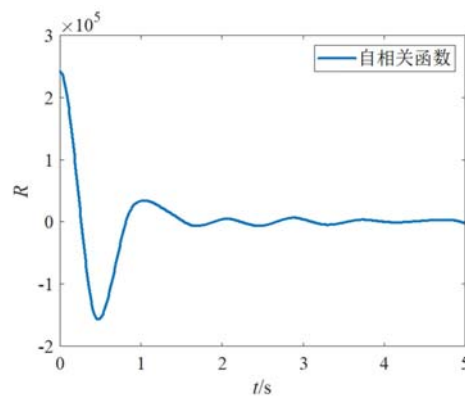


图 6 重构能量最大尺度湍流脉动速度信号的自相关函数  
Fig. 6 Auto-correlation function of reconstructed velocity signals at most energetic scale

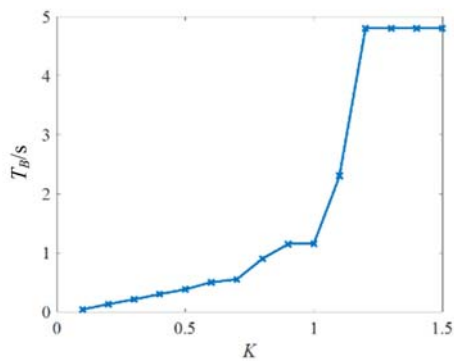


图7 平均猝发周期随门限值的变化  
Fig. 7 Variation of the average burst period with the threshold value

方差  $\text{Var}(u(t))$  不变, 而等号右侧  $Ku^2$  变大, 因此对于原始信号的检测标准更加严格, 导致检测出的信号数量减少, 平均猝发周期增大。从图7中也可以发现, 平均猝发周期随门限值增大呈不严格单调递增趋势。

## 2.5 VITA 法检测结果

通过2.3、2.4节提到的自相关法, 可以确定本文实验猝发平均周期  $T_B = 1.0586\text{s}$ , 门限值  $K = 0.8$ 。获得短时间平均周期  $T$  以及门限值  $K$  之后, 通过VITA法对近壁区重构信号进行检测。在不同工况下检测的猝发事件结果如图8所示。

## 2.6 相干结构猝发的相位平均波形

针对每次猝发, 以VITA法检测到的猝发时刻

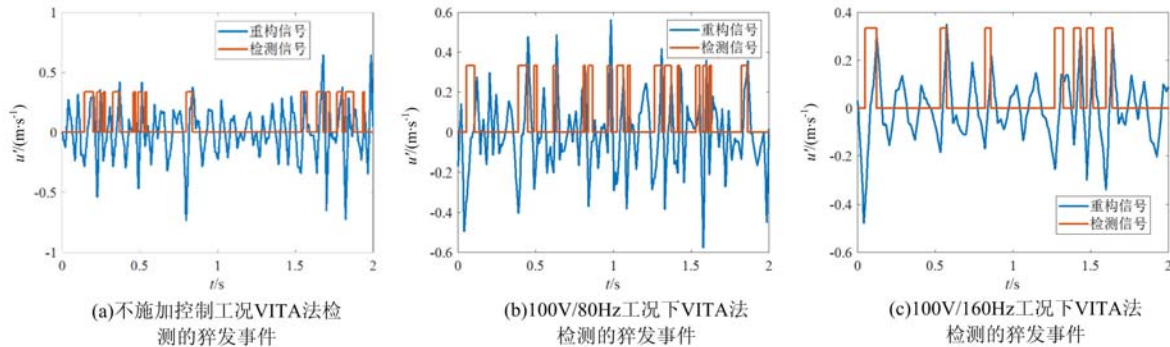


图8 用VITA法检测的猝发事件

Fig. 8 Burst events detected by VITA method

为中心, 向前截取  $T_B/2$  信号, 向后截取  $T_B/2$  信号, 将检测到的信号按照相位对齐取平均, 即可得到相干结构猝发的相位平均波形。图9显示了在同样施加100V电压的情况时, 压电振子振动频率分别为

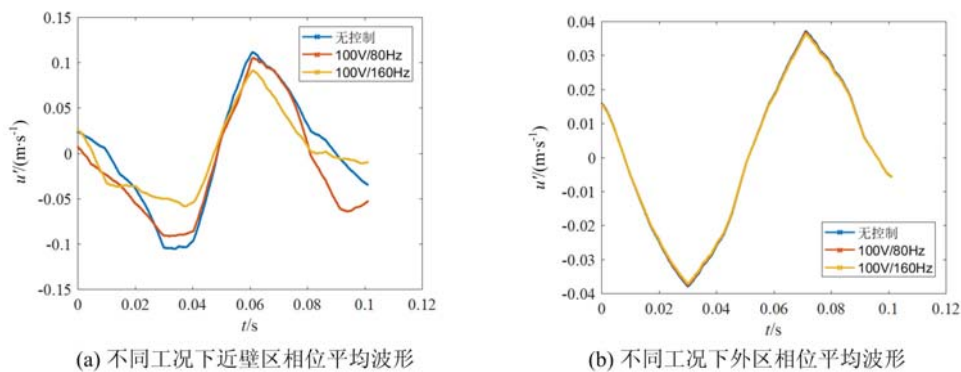


图9 不同工况下壁湍流相干结构猝发流向速度相位平均波形

Fig. 9 Comparison of phase-locked average waveform for longitudinal velocity component of coherent structure burst under different cases

0Hz、80Hz及160Hz的3种工况下, 在湍流边界层近壁区缓冲层  $y^+ = 17.9$  和远离壁面区域  $y^+ = 929.4$  用VITA法检测到的相干结构猝发的周期相位平均波形。由图9可以看出, 在近壁区域, 施加控制后相干结构猝发过程中脉动速度幅值显著降低, 即通过压电振子采取的主动控制对壁湍流猝发进行了有

效抑制。同时,施加的控制电压越强,抑制效果越明显,且施加人工合成微射流周期吹吸扰动的影响只限于近壁区域,对远离壁面的外区不起作用。

### 3 结论

本文从相干结构猝发主动控制的角度,研究了施加不同频率的人工合成微射流周期吹吸扰动,对于湍流边界层相干结构猝发的影响,得出以下结论:

(1) 施加人工合成微射流周期吹吸扰动,使近壁区域的相干结构猝发脉动速度幅值减小,抑制了近壁区域相干结构的猝发过程。同时,压电振子施加扰动对湍流边界层的影响仅限于近壁区域,对远离壁面的区域没有影响。

(2) 由于调制作用,施加人工合成微射流周期吹吸扰动能够使小于能量最大尺度的小尺度湍流结构的湍动能下降,使大于能量最大尺度的大尺度湍流结构的湍动能增加。

(3) 在研究中采用 VITA 法进行检测,发现改进的 VITA 法能够客观检测湍流的猝发事件。

#### 参考文献:

- [1] 姜楠,刘薇,刘建华,等.壁湍流相干结构猝发过程中雷诺应力的相位平均波形[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2008,38(3):279-288 (JIANG Nan, LIU Wei, LIU Jianhua, et al. Phase average waveform of Reynolds stress during wall turbulence coherent structure burst [J]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2008, 38(3):279-288 (in Chinese))
- [2] 许春晓.壁湍流相干结构和减阻控制机理[J].力学进展,2015,45(1):111-140 (XU Chunxiao. Coherent structures and drag-reduction mechanism in wall turbulence[J]. Advances in Mechanics, 2015, 45(1):111-140 (in Chinese))
- [3] Grant H L. The large eddies of turbulent motion[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1959, 4(2):149-190.
- [4] Kline S J, Runstadler P W. Some preliminary results of visual studies of the flow model of the wall layers of the turbulent boundary layer[J]. Journal of Applied Mechanics, 1959, 2: 166-170.
- [5] Robinson S K. Coherent motions in turbulent boundary layer[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 23(1):601-639.
- [6] Corino E R, Brodkey R S. A visual investigation of the wall region in turbulent flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 37(1):1-30.
- [7] 刘敏.基于不同喷射角度的壁面吹气控制湍流边界层减阻研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020 (LIU Min. Research on drag reduction of turbulent boundary layer controlled by wall blowing based on different injection angles [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (in Chinese))
- [8] 吴广伟.等离子体诱导吹气和吸气的湍流边界层的减阻控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019 (WU Guangwei. Research on drag reduction control of turbulent boundary layer induced by plasma blowing and suction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese))
- [9] Jason L S, John K. Periodic control of turbulent boundary layers[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(15):1093-1105.
- [10] Karniadakis G E, Choi K S. Mechanisms on transverse motions in turbulent wall flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35(1):45-62.
- [11] 张浩,郑小波,姜楠.基于单个压电振子的湍流边界层主动控制[J].力学学报,2016,48(3):536-544 (ZHANG Hao, ZHENG Xiaobo, JIANG Nan. Active control of turbulent boundary layer based on a single piezoelectric oscillator[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(3):536-544 (in Chinese))
- [12] Berger T W, Kim J, Lee C. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(3):631-649.
- [13] 刘铁峰.超疏水表面壁湍流减阻机理的 TRPIV 实验研究[D].天津:天津大学,2018 (LIU Tiefeng. TRPIV experimental study on the drag reduction mechanism of superhydrophobic surface wall turbulence [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese))

- [14] 王超伟, 杨绍琼, 姜楠. 高分子溶液对湍流边界层减阻机理的实验研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(6):2384—2391 (WANG Chaowei, YANG Shaoqiong, JIANG Nan. Experimental investigation of drag reduction in turbulent boundary layer with polymer additives solution[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(6):2384—2391 (in Chinese))
- [15] 叶阳, 杨凯弘, 姜楠. 用子波分析修正检测壁湍流猝发的 VITA 法[J]. 实验力学, 2017, 32(2):202—208 (YE Yang, YANG Kaihong, JIANG Nan. On the modification of VITA method for detection of turbulence burst on wall surface by wavelet analysis[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(2):202—208 (in Chinese))
- [16] Blackwelder R F, Kaplan R E. On the wall structure of the turbulent boundary layers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1976, 76:89—112.
- [17] Johansson A V, Alfredsson P H. On the structure of turbulent channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 122:295—314.
- [18] Bogard D G, Tiederman W G. Burst detection with single-point velocity measurements[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 162:389—413.
- [19] Luchik T S, Tiederman W G. Time-scale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 174:529—552.
- [20] 姜楠, 王振东. 用自相关法检测壁湍流的平均猝发周期[J]. 实验力学, 1995, 10(4):343—348 (JIANG Nan, WANG Zhendong. Detection of average burst period in wall turbulence by means of autocorrelation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(4):343—348 (in Chinese))
- [21] Marie P, Kai S. Coherent vortex simulation (CVS), A semi-deterministic turbulence model using wavelet [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2001, 66:393—426.
- [22] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1992, 24:395—457.
- [23] Farge M, Kevlahan N, Perrier V. Wavelet and turbulence[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(4):639—669.
- [24] Bandyopadhyay P R. Review: mean flow in turbulent boundary layers disturbed to alter skin friction[J]. Journal of Fluids Engineering, 1986, 108(2):127—140.
- [25] 孙葵花, 舒玮. 湍流猝发的检测方法[J]. 力学学报, 1994, 26(4):488—493 (SUN Kuihua, SHU Wei. On the burst detection techniques in wall-turbulence[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26(4):488—493 (in Chinese))
- [26] 姜楠, 王振东, 舒玮. 用自相关法确定 VITA 法的门限  $K$ [J]. 实验力学, 2000, 15(1):30—35 (JIANG Nan, WANG Zhendong, SHU Wei. Determination of the threshold in VITA scheme by using self-correlation method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(1):30—35 (in Chinese))

## Experimental investigation on active control of coherent structure in wall-bounded turbulence with periodic blow-suck disturbance by submerged micro-synthetic jet flow

GAO Saipeng<sup>1</sup>, BAI Jianxia<sup>2</sup>, CHENG Xiaoqi<sup>1</sup>, TIAN Haiping<sup>3</sup>, JIANG Nan<sup>1</sup>

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

2. Mathematics Teaching Department of Tianjin Ren'ai University, Tianjin 301636, China;

3. Department of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** By controlling the periodic oscillation of piezoelectric vibrators embedded in the wall cavity, an artificial synthetic microjet is generated on the surface of the wall, and the open-loop active control of coherent structure bursts in the turbulent boundary layer on a flat plate is realized. The instantaneous velocity signals at different wall-normal positions of the turbulent boundary layer are measured with a mini hot-wire boundary probe of anemometer before and after the micro-jet disturbance superposed. The wavelet transform and the maximum energy criterion are employed to extract the skeleton of the fluctuating velocity signals at the most energetic scale. The short average



period  $T$  and the threshold level  $K$  of VITA method is determined by the maximum energy criterion and the autocorrelation function of the wavelet coefficients at the most energetic scale. Finally, the burst events of coherent structures are detected from the time series signals of fluctuating velocity by VITA scheme and the eigen-waveform of coherent structure bursts is obtained by phase-locked average of the detected segments of fluctuating velocity signals. The results demonstrate that the active control strategy of the artificial synthetic microjet can make the buffer sublayer thicker and lift the logarithmic law sublayer of the mean velocity profile up with drag reduction effect. By comparing the eigen-waveform of the coherent structure burst before and after the active control strategy of the artificial synthetic microjet performing, it is confirmed that the amplitude of the eigen-waveform of the coherent structure in the near-wall region is significantly depressed, which indicating that the active control strategy can suppress the burst of the coherent structure in the near-wall region while it is invalid in the outer region of the turbulent layer.

**Keywords:** turbulent boundary layer; micro-synthetic jet flow; conditional sampling phase-lock average; VITA method; wavelet analysis