

文章编号:1000-8055(2013)08-1808-10

吹吸扰动控制猝发过程中雷诺应力的实验

刘 薇^{1,2}, 姜 楠^{3,4}, 谷润平^{1,2}

- (1. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300;
2. 天津市空管运行规划与安全技术重点实验室, 天津 300300;
3. 天津大学 机械工程学院 力学系, 天津 300072;
4. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 采用热线测速技术和双丝边界层热线探针, 在风洞中以高于对应最小湍流时间尺度的分辨率, 精细测量了平板湍流边界层施加不同频率周期性质量引射前后, 不同流向和法向位置的瞬时流向、法向和展向速度分量的时间序列信号. 采用流向脉动速度局部平均结构函数模极大值法检测了壁湍流猝发过程中拟序结构不同速度分量和雷诺应力分量的条件相位平均波形. 发现在扰动源下游一定范围内, 摩擦因数和雷诺应力幅值有所减小, 扰动改变了法向或展向脉动速度与流向脉动速度的条件相位平均波形的相位差, 使其保持在 $\pi/2$ 的奇数倍左右, 此时雷诺应力几乎为 0, 改变了湍流边界层原有雷诺应力的产生和扩散输运机制, 抑制了湍流雷诺应力的产生和输运.

关 键 词: 壁湍流; 吹吸扰动; 猝发; 雷诺应力; 相位差

中图分类号: V21; O357.4; O357.5

文献标志码: A

Experiments of Reynolds stress manipulation during burst by blow/suction disturbance

LIU Wei^{1,2}, JIANG Nan^{3,4}, GU Run-ping^{1,2}

- (1. College of Air Traffic Management,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Operation Programming and
Safety Technology of Air Traffic Management, Tianjin 300300, China;
3. Department of Mechanics,
School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
4. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China)

Abstract: The time sequence signals of instantaneous longitudinal, normal and span-wise velocity components at different vertical locations on the turbulent boundary layer over a flat plate were finely measured by constant temperature anemometry and double-sensor hot-wire probe in a wind tunnel. By the criteria of the module-maximum of locally averaged longitudinal velocity structure function, the conditional phase-averaged waveforms of different velocity components and Reynolds stress were detected during the burst. After disturbance,

收稿日期: 2012-07-21

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130802.1224.201308.1808_019.html

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10832001); 国家自然科学基金(60832012);

国家重点基础研究发展计划(2012CB720101); 中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室对外开放课题;

天津市高等教育学会“十二五”教育科学研究规划课题(125y065)

作者简介: 刘薇(1978—), 女, 天津人, 讲师, 博士, 主要从事飞行器空气动力及性能研究.

it is found that the friction coefficients and the Reynolds stress are reduced; the phase-differences between the phase-averaged waveforms of longitudinal vertical velocity and the span-wise velocity components are changed. When their phase differences are about odd times of $\pi/2$, the Reynolds stress is depressed to about zero. The mechanisms of production, diffusion and transportation of Reynolds stress are changed in wall-bounded turbulent flow and the Reynolds stresses are restrained to a certain degree.

Key words: wall turbulence; blowing and suction; burst; Reynolds stress; phase difference

从20世纪中叶开始,一系列流动显示技术应用于湍流的实验研究^[1-4]. Kim等^[2-3]用氢气泡技术显示了湍流边界层内层的拟序运动. Kim等^[2]观察到黏性底层的准周期条带结构. 喷射和扫掠等猝发过程导致湍流剧烈脉动,是湍流产生的主要过程,因此,通过控制拟序结构猝发可以改变流场的特性. 此外,拟序结构会把周围的流体吸卷进来,尤其是在大涡合并过程中,研究这一现象对于全面了解湍流的扩散输运至关重要. 比如在飞行器设计中发现,通过人为地将分离点推后能使机翼获得更大的升力,而推迟分离点的办法之一便是在机翼特定位置激发产生大尺度拟序结构. 另一方面,影响边界层中的拟序结构还能减少壁面摩擦阻力、增强壁面热传递和混合等.

目前有很多种控制拟序结构的方法都被证实是有效的. 壁面的吹吸会影响壁面的剪应力、摩擦阻力、湍动能、速度剖面以及猝发过程和各種尺度的变化^[5-7]. Antonia等^[8]提出吹吸流体会对近壁区中的低速条带起稳定作用,可以降低湍流度,使雷诺应力减小. Antonia等在水槽中用流动显示的方法,发现从一个多孔壁面引入一个速度很小(约为自由流速度的0.07%)的扰动,可以增加稳定性和低速条纹的流向拟序性,他们也证明了扰动会减小向外区喷射的平均频率. 引入局部吹吸扰动控制湍流的方法值得详细和深入地研究. 因为作为一种局部激励壁湍流的方法,它是简单而有效. 此外,通过局部吹/吸可以比较容易地控制激励的强度. 许多工程应用都使用局部扰动来改变湍流边界层. 例如,局部吹广泛地应用在燃气涡轮的表面降温 and 冷却电子芯片等方面. Pailhas等^[9]已经证明在湍流边界层中通过一个或多个缝隙引入局部小扰动的作用,可以用于控制飞机后掠翼的翼前缘对机身的影响.

本文的思想来源于人工从平板壁面的展向狭缝中引入质量引射,以便对壁湍流场中的相干结构实施控制,通过此种方法达到减阻的目的. 通

过平板壁面的展向狭缝,将不同频率的周期性质质量引射(或称吹吸小扰动)引入至流场中,通过改变壁湍流边界层中不同尺度的湍涡结构的湍流统计特征量的分布、条件相位平均波形的相位和幅值及不同速度分量的条件相位平均波形的相位差,从而对平板湍流边界层中原有的相干结构进行干扰和控制.

1 实验设备和测量技术

本实验是在天津大学低变湍流度风洞中完成的. 该风洞实验段高度为450 mm,长度为4500 mm,宽度为350 mm,原始湍流度小于0.07%. 为了加快湍流边界层的转捩,将正对来流方向的平板前缘削为楔形,并且在前缘附近安装了一条直径约为3 mm的绊线和宽度约为150 mm的砂纸. 在距离平板前缘约为1000 mm沿展向开了一条狭缝,该狭缝的展向长度约为300 mm,流向宽度约为5 mm. 如图1所示,坐标轴的原点位于狭缝上游边界的中心处. 本实验采用了TSI公司的IFA300型恒温热线风速仪以及1240-T1.5型、1243-T1.5型双丝热线探针进行测量,测量时1243型双丝热线探针的双丝置于坐标轴的 x - y 平面内,要求双丝的角平分线分别与 x 轴和 y 轴平行;1240型双丝热线探针的双丝置于坐标轴的 x - z 平面内,要求双丝的角平分线分别与 x 轴和 z

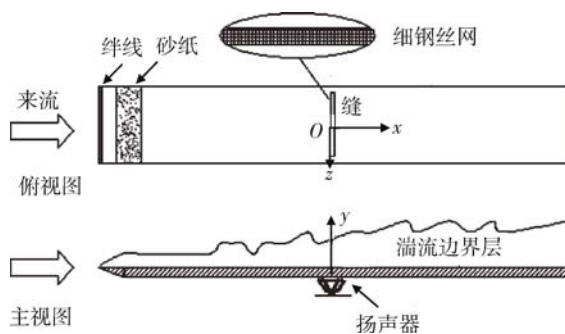


图1 实验段和局部扰动装置

Fig. 1 Test section and local disturbance apparatus

轴平行.局部扰动由信号发生器、功率放大器和扬声器组成的装置获得.

Kim 和 Sung^[10]采用直接数值模拟(DNS)方法研究了人为引入三种不同幅值的周期性小扰动(该扰动幅值约为来流速度的5%左右)对壁湍流边界层的影响,结果发现:扰动频率的变化对湍流结构的影响要比扰动幅值的变化影响更大或者说更为敏感.本实验中采用的小扰动的速度为0.45 m/s,约为来流速度的4%左右,无量纲化的扰动振幅固定在0.0375(为扰动速度与来流速度的比值).本实验中采用三种频率分别为16,32,64 Hz的周期性吹吸小扰动,无量纲化后的三种频率大小分别为 $f^+ = 0.0094, 0.0188, 0.0376$.实验采样频率为50 kHz,采样时间为21 s,数据量为1048576.自由来流速度为12 m/s,边界层厚度为140 mm,雷诺数为129140.以狭缝前边缘中心处为起始测量的原点,分别从沿着流向位置为-7.5, -2.5, 2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 40 mm处测量了施加周期性质量引射或称吹吸小扰动前后流场的变化情况.

2 分析方法

2.1 湍流多尺度局部平均结构函数

对于雷诺数有限的真实流体,用湍流局部结构平均的速度结构函数来表示一个湍流结构的相邻部分间的相对运动和相对变形.描述这个湍流结构前后两部分的相对运动和变形的湍流局部平均速度结构函数定义为^[11]

$$\delta u(b, a) = \overline{u(b+x)}_{x \in [0, a]} - \overline{u(b-x)}_{x \in [0, a]} \quad (1)$$

其中 $\overline{u(x)}$ 表示在同一个湍流结构内,尺度为 a ,中心位置分别为 $b - \frac{a}{2}$ 和 $b + \frac{a}{2}$ 的相邻两部分流体微团迁移速度的局部平均值,其差值为 $\delta u(b, a)$,代表尺度为 a 的相邻两部分流体微团的平均迁移速度的差, $2a$ 为湍流结构的尺度, $b - \frac{a}{2}$ 和 $b + \frac{a}{2}$ 分别为两个相邻流体微团中心的空间位置. $\delta u(b, a) > 0$ 表示中心为 $b + \frac{a}{2}$,尺度为 a 的前一个流体微团的平均迁移速度快于后一个流体微团的平均迁移速度,这两部分相邻流体作用效果体现为拉伸,此时上游的低速流体流向下流,使当地局部速度减小,可以理解为猝发过程中的喷射过程.反之, $\delta u(b, a) < 0$ 表示尺度为 a ,中心位

置为 $b + \frac{a}{2}$ 的前一部分流体微团的平均迁移速度慢于后一部分流体微团的平均迁移速度,这两部分相邻流体作用效果体现为压缩,上游的高速流体流向下流,使当地局部速度增加,可以理解为猝发过程中的扫掠过程.

p 阶局部平均结构函数定义为

$$\langle |\delta u(a, b)|^p \rangle_b =$$

$$\langle |\overline{u(x)}_{x \in [b+a, b]} - \overline{u(x)}_{x \in [b-a, b]}|^p \rangle_b \quad (2)$$

其中 $\langle \rangle_b$ 代表对位置 b 取系综平均.

特别地, $p = 2$ 时

$$E(a) = \langle |\delta u(a, b)|^2 \rangle_b =$$

$$\langle |\overline{u(x)}_{x \in [b+a, b]} - \overline{u(x)}_{x \in [b-a, b]}|^2 \rangle_b \quad (3)$$

式(3)表示一个尺度为 $2a$ 的湍流结构引起变形的湍流动能.

2.2 流向局部平均结构函数检测多尺度拟序结构

本文中用于检测并且提取不同尺度相干结构的猝发过程的方法是流向局部平均结构函数模局部极大值法.该方法将局部平均结构函数正的极大值作为判断扫掠过程的阈值;反之,将局部平均结构函数负的极小值作为判断喷射过程的阈值.这种判断准则依据的是:相干结构的猝发过程可被进一步分为喷射和扫掠过程.在相干结构猝发过程中,该结构的中心位置拉伸或压缩特征最明显,此时, $\delta u(b, a)$ 的幅值(模)达到极值.对应扫掠过程, $\delta u(b, a)$ 达到正极大值,代表相干结构的中心;对应喷射过程, $\delta u(b, a)$ 达到负极小值,代表相干结构的中心.因此,用 $\delta u(b, a)$ 的幅值达到极值的位置可以判断相干结构的在扫掠或喷射阶段的中心位置.此外,相干结构猝发的时间尺度是通过子波分析辨识湍流猝发事件的能量最大准则^[12]来确定的.

3 测量结果与讨论

表1中给出了施加不同频率扰动后的壁面摩擦因数 C_f 在被无扰动时的壁面摩擦因数 C_{f0} 无量纲化后沿流向 x 的分布.本文采用平均速度剖面法测量湍流边界层的壁面摩擦阻力.湍流边界层近壁区域的对数律平均速度分布为

$$\frac{U(y)}{u_*} = A \ln \frac{yu_*}{\nu} + B \quad (4)$$

其中 $U(y)$ 为法向位置 y 处的平均流速; ν 是运动黏度; u_* 为壁面摩擦速度,它与壁面摩擦切变应力 τ_w 的关系为

$$\tau_w = \rho \cdot u_*^2 \quad (5)$$

壁面摩擦切变应力 τ_w 与壁面摩擦因数 C_f 的关系为

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho \cdot U_\infty^2} = 2 \cdot \left(\frac{u_*}{U_\infty} \right)^2 \quad (6)$$

表 1 无量纲化的摩擦因数 (C_f/C_0) 沿流向的分布

Table 1 Non-dimensional surface friction coefficient (C_f/C_0) along longitudinal direction

无量纲	x/mm					
频率 f^+	2.5	5	10	15	20	30
0.0094	0.857	0.871	0.842	0.894	0.935	0.976
0.0188	0.872	0.877	0.852	0.874	0.917	0.994
0.0376	0.843	0.861	0.838	0.868	0.903	0.978

通过测量湍流边界层近壁区域对数律平均速度分布,使用牛顿迭代法获得壁面摩擦速度 u_* ,然后计算出壁面摩擦切变应力 τ_w 和壁面摩擦因数 C_f . 实验中常数 A 取 $2.44 \sim 2.5$, B 取 $4.9 \sim 5.5$. 从表 1 中可以看出,在不同的流向位置和不同频率的周期性质量引射的作用下,摩擦因数都有所减小,只是减小的程度略有不同. 其中在流向位置 10 mm 处,摩擦因数减小得最多,约为 15%,随着向下游传播,扰动也在逐渐地衰减,在大于

10 mm 的流向位置,摩擦因数均逐渐回升. 在 Sano 和 Hirayama^[13] 及 Park 和 Choi^[14] 所做的定常扰动的实验中和 Tardu^[15] 所做的周期性吹的实验也可以观察到这种减小和逐渐恢复的情形. 其中文献[14]中认为加入扰动后,抬升了壁面附近的涡,减弱了其与壁面的相互作用,从而导致了壁面摩擦的减小.

图 2 和图 3 分别给出了无扰动和施加不同频率扰动前后的雷诺切变应力 $-\overline{u'v'}$, $-\overline{u'w'}$ 沿流向和法向分布的等值线图. 图中虚线部分给出的是数值的量级小于或等于 10^{-4} . 相对于无扰动的情况,在施加扰动以后, $-\overline{u'w'}$ 和 $-\overline{u'v'}$ 都有所减小,而且 $-\overline{u'w'}$ 要比 $-\overline{u'v'}$ 减小得更多. 雷诺应力和湍动能的输运密切相关,通过雷诺应力将平均运动动能转移到湍流脉动,维持湍流脉动. 由此可见,施加扰动减弱了湍动能的输运,一定程度上抑制了湍流脉动. 文献[16]利用直接数值模拟对壁面展向周期振动的槽道湍流进行研究,认为壁面展向周期振动使低速条带插入流向涡下方,使高速条带向流向涡上方运动,从而在雷诺应力的象限分析中一、三象限的比重增加,造成雷诺应力减小.

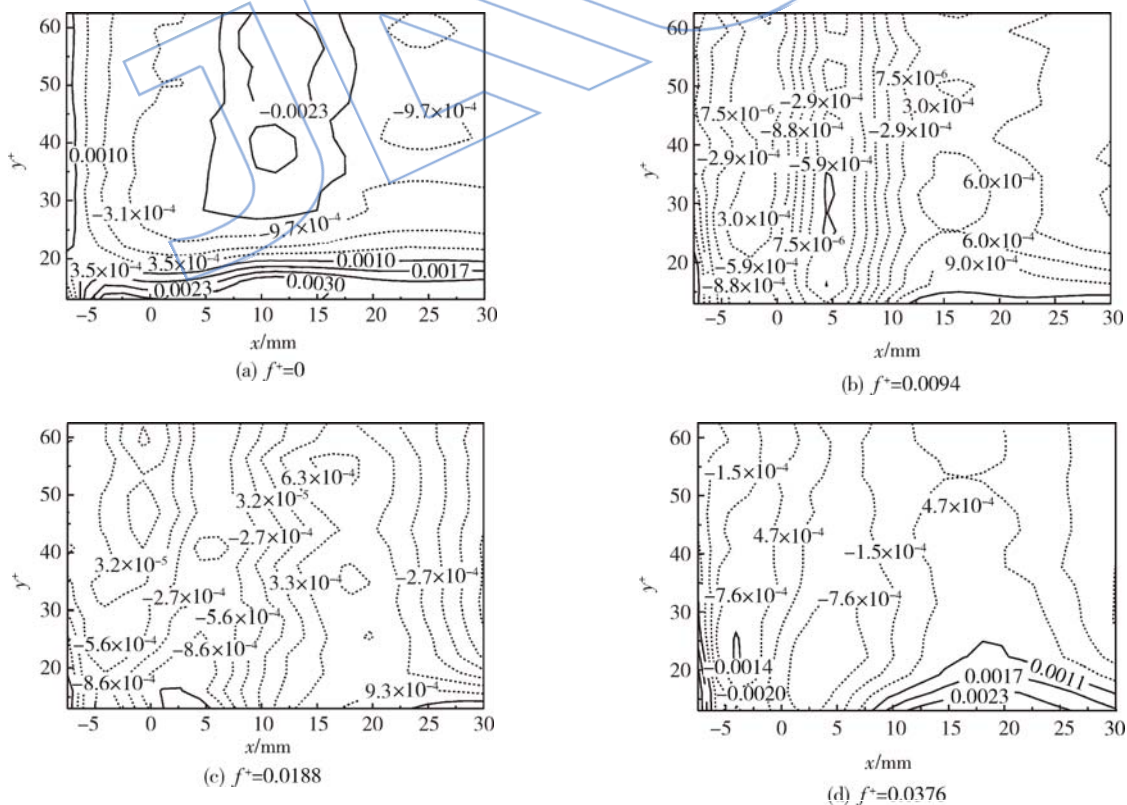


图 2 施加不同频率扰动前后的雷诺切变应力 $-\overline{u'w'}$ 沿流向和法向分布的等值线图

Fig. 2 Contours of Reynolds stress $-\overline{u'w'}$ along longitudinal and normal directions before and after disturbance

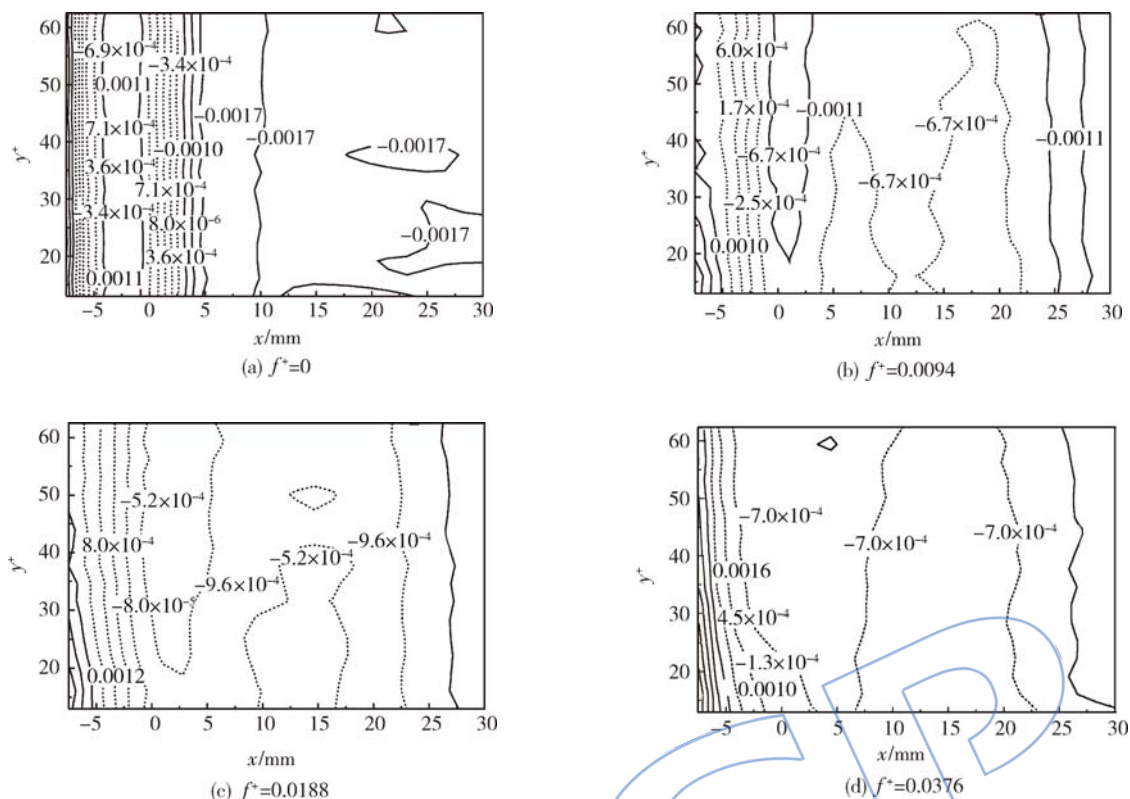


图3 施加不同频率扰动前后的雷诺切变应力 $-\overline{u'v'}$ 沿流向和法向分布的等值线图

Fig. 3 Contours of Reynolds stress $-\overline{u'v'}$ along longitudinal and normal directions before and after disturbance

本文采用子波分析辨识湍流猝发事件的能量最大准则确定拟序结构猝发对应的时间尺度. 图4(a)~图4(f)分别给出了未施加扰动时,在流向位置 $x = -7.5$ mm(缝上游)、法向位置 $y^+ = 20$, 流向、法向、展向脉动速度分量的分尺度拟序结构喷射和扫掠的条件相位平均波形. 图中纵轴为相位平均速度,横轴为时间,相位平均波形的点是按流体质点经过探针的时间先后排列的. 对于图4(a),喷射发生时,流向速度分量在时间历程中是一个急剧减速过程. 对于图4(b),扫掠发生时,流向速度分量的条件相位波形是一个急剧加速过程,这一过程的作用时间虽然只有 2×10^{-3} s,但是流体结构减速或压缩最剧烈. 这一过程对于湍流质量、动量和能量的输运,对于湍流的维持、发展和演化起着非常重要的作用. 许多文献表明,在相干结构的扫掠过程中,正是黏性流体的剧烈剪切作用产生了壁面摩擦阻力. 相比层流,这是湍流会产生更大壁面摩擦阻力的根本原因. 对于图4(c)和图4(e),喷射发生时,法向速度分量为远离壁面(正)的方向,此时展向速度向正方向的加速,表明低速流体自壁面向外区喷射使测点当

地流向速度降低同时低速流体在展向上向右侧加速(从上游向下游看时,展向正方向为右侧,负方向为左侧);对于图4(d)和图4(f)扫掠发生时,法向速度向靠近壁面的(负)的方向增加,此时展向速度为向负方向的加速,表明来自外区的高速流体扫掠使测点当地流向速度增加,同时低速流体在展向上向左侧加速. 这与 Subramanian 和 Rajagopalan 等^[17]用条件采样方法检测的结果是一致的.

图5为施加扰动前后,在法向 $y^+ = 20$ 的近壁缓冲层,流向 $x = 10$ mm 位置上,喷射扫掠过程中对应最大能量尺度的流向、法向和展向脉动速度分量的条件相位平均波形. 对应图5(a)和图5(b),可以发现施加扰动以后,相位平均波形的平静期变长,即拟序结构的猝发时间间隔变长,猝发的频率降低. 从法向脉动速度分量的条件相位平均波形,对应图5(c)和图5(d),可以发现施加扰动以后,法向脉动速度分量的条件相位平均波形与未施加扰动相比,相位完全反向. 从展向脉动速度分量的条件相位平均波形来看,对应图5(e)和图5(f),施加扰动以后,波形相位几乎相反,波幅

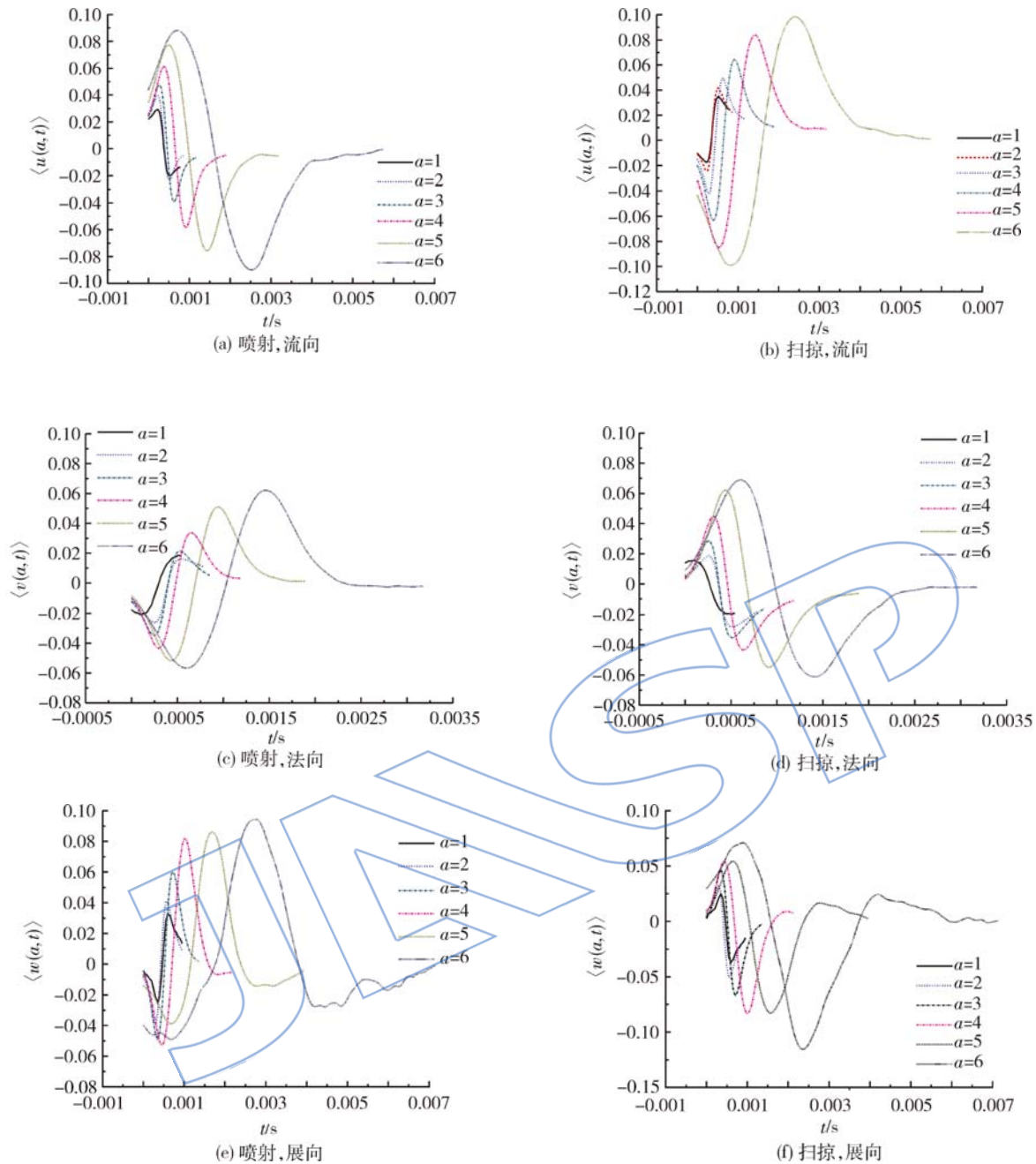


图 4 无扰动情况下流向、法向、展向脉动速度的条件相位平均波形随尺度的变化

Fig. 4 Conditional phase-averaged waveforms of longitudinal, normal and transverse fluctuating velocity varying with scales without disturbance

更为平缓. 说明周期吹吸扰动显著抑制了多尺度拟序结构的喷射和扫掠过程, 不仅改变了喷射和扫掠时脉动速度的条件相位波形的幅值, 也改变了喷射和扫掠时脉动速度的相位. 在 $f^+ = 0.0376$ 扰动频率上, 影响效果最显著.

图 6 给出了流向 $x=10\text{ mm}$, 缓冲层 $y^+ = 20$, 施加扰动前后 $\langle u'v' \rangle$ 和 $\langle u'w' \rangle$ 的条件相位平均波形, 发现施加扰动以后, $\langle u'v' \rangle$ 和 $\langle u'w' \rangle$ 的条件相位平均波形的幅值均有不同程度的减小, 而且, 更加趋近于 0, 其中施加频率 $f^+ = 0.0376$ 的

扰动时, 减小得最多. 结合图 5 发现周期性扰动改变了喷射和扫掠的动力学过程, 使得雷诺应力符号和幅值发生变化. 从图中可以看出, 施加扰动以后, $\langle u'v' \rangle$ 的条件相位平均波形符号完全改变, 由负值改变为正值, 这种变化完全是由于法向速度分量的相位平均波形的相位改变引起的. 从湍动能和雷诺应力的输运方程可知, 在湍流边界层中, 湍动能和各雷诺应力分量的生成主要由 $-\overline{u'v'} \frac{dU}{dy}$ 贡献, 施加扰动以后, 缓冲层雷诺应力

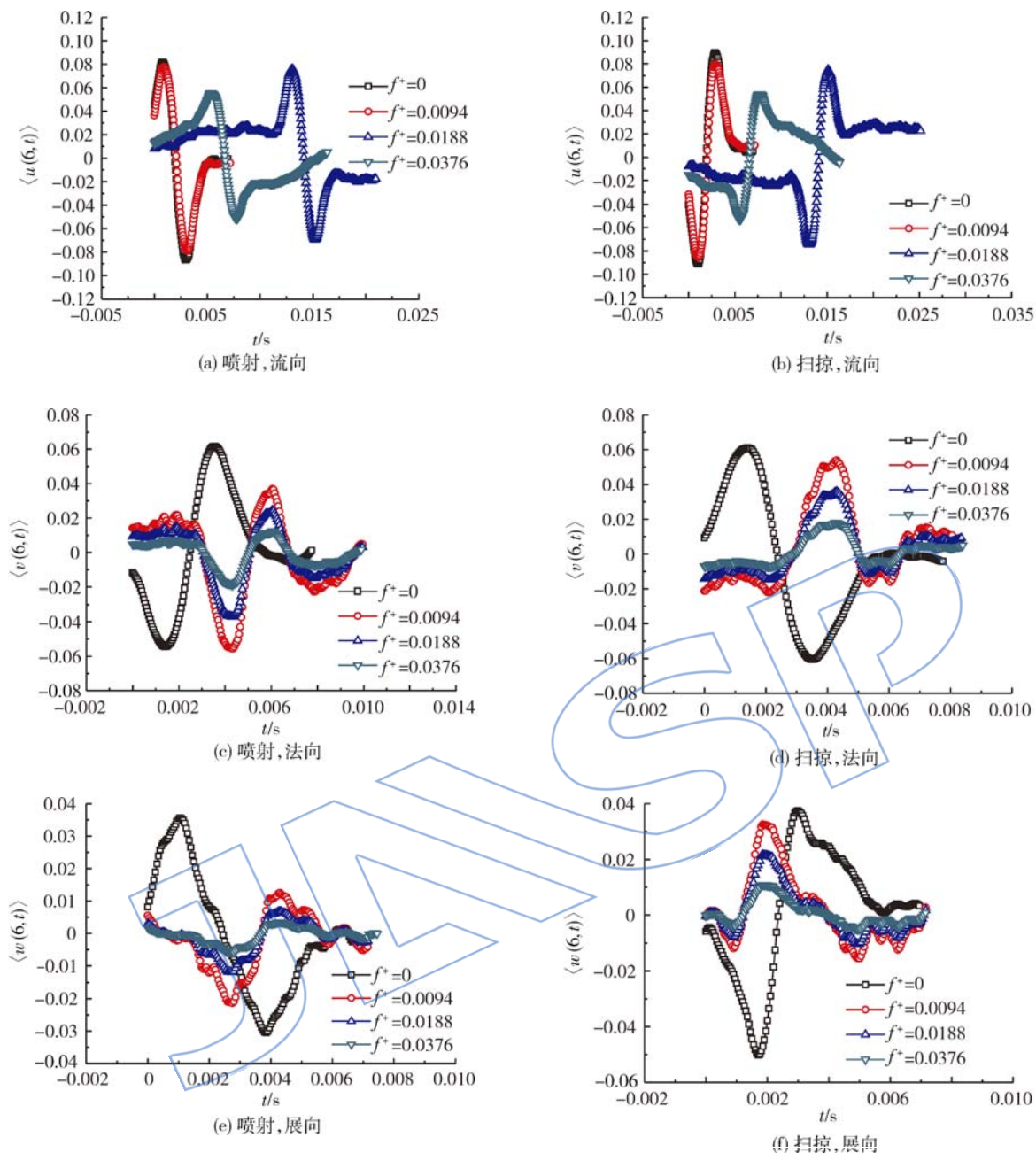


图5 施加扰动前后, $x=10\text{ mm}$, $y^+=20$, 流向、法向和展向脉动速度的条件相位平均波形

Fig. 5 Conditional phase-averaged waveforms of longitudinal, normal and transverse fluctuating velocity at $x=10\text{ mm}$ and $y^+=20$ before and after disturbance

$\overline{u'v'}$ 的符号和幅值改变, 由负值改变为正值, 使 $-\overline{u'v'} \frac{dU}{dy}$ 对湍动能和各雷诺应力分量的生成产生了负的贡献, 使湍动能和各雷诺应力分量减小. 考察 $\langle u'w' \rangle$ 的条件相位平均波形, 发现相位平均波形的幅值有明显减小, 随着扰动频率的增加, 波形更趋近于 0 附近波动.

为了进一步研究流向脉动速度和法向脉动速度分量(或展向脉动速度分量)相位平均波形的相位差与雷诺应力的关系, 计算流向脉动速度和法向

脉动速度分量(或展向脉动速度分量)相位平均波形对应不同时间延迟(相位差)的互相关系数, 当互相关系数达到最大值时, 对应法向脉动速度分量(或展向脉动速度分量)滞后或超前于流向脉动速度相位平均波形的延迟时间, 将此延迟时间用相应尺度的喷射或扫掠事件的时间周期(一个周期对应 2π)折算成相位角度, 即为法向脉动速度分量(或展向脉动速度分量)滞后或超前于流向脉动速度相位平均波形的相位差^[18]. 图7给出了流向 $x=10\text{ mm}$ 处, 扰动频率 $f^+=0.0376$, 喷射和扫掠过程

中,近壁缓冲层和对数律层,不同法向位置流向脉动速度分量 u' 和横向脉动速度 v' 或 w' 的条件相位平均波形的相关系数随横向脉动速度 v' 或 w' 滞后于流向脉动速度 u' 相位角 $\Delta\theta$ 的变化. 从图中可以看到,流向和法向脉动速度的条件相位平均波形的相关系数的最大值集中在 $3\pi/2(270^\circ)$ 左右,流向和展向脉动速度的条件相位平均波形

的相关系数的最大值也集中在 $3\pi/2(270^\circ)$ 左右. 说明在施加周期性吹吸扰动后,改变了横向脉动速度分量(法向和展向脉动速度分量)与流向脉动速度分量的相位差的角度,使其接近 $\pi/2$ 的奇数倍,呈现出一个脉动速度分量的幅值达到最大而此时另一个脉动速度分量的幅值几乎为 0 的相位关系,减小了雷诺应力分量的幅值.

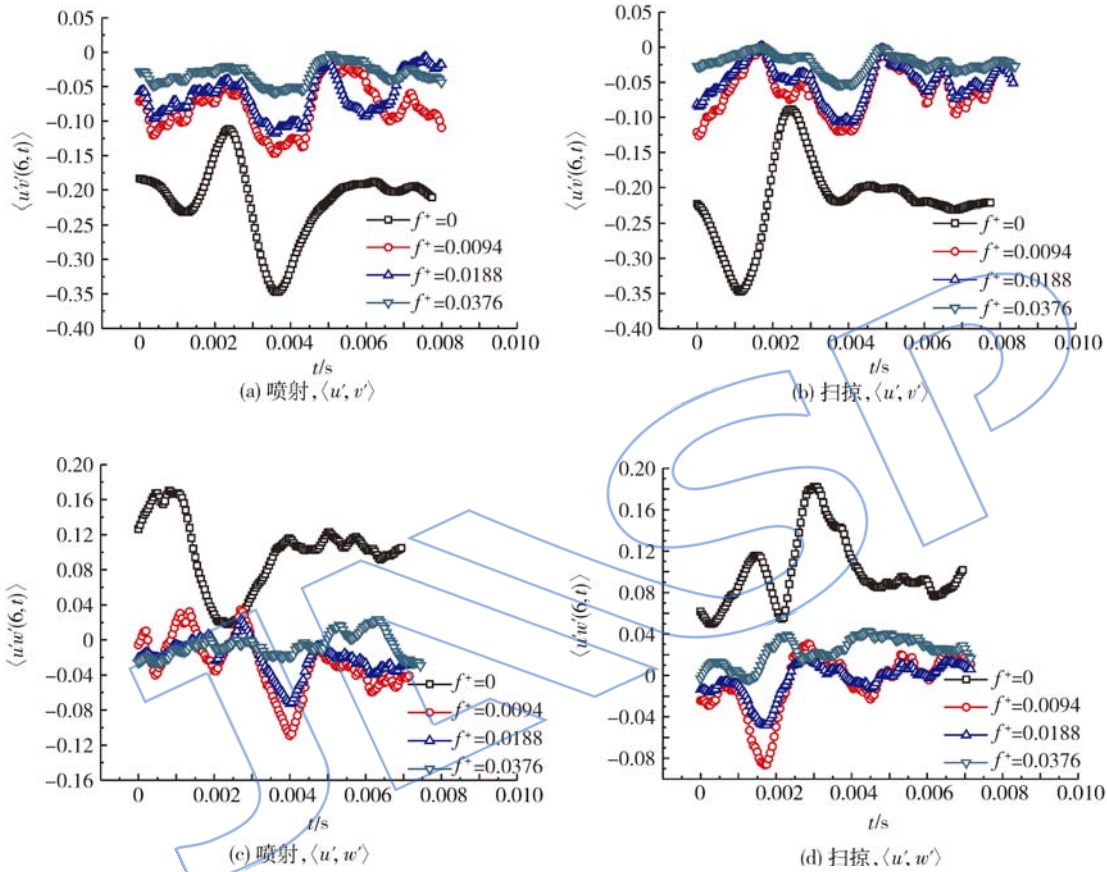
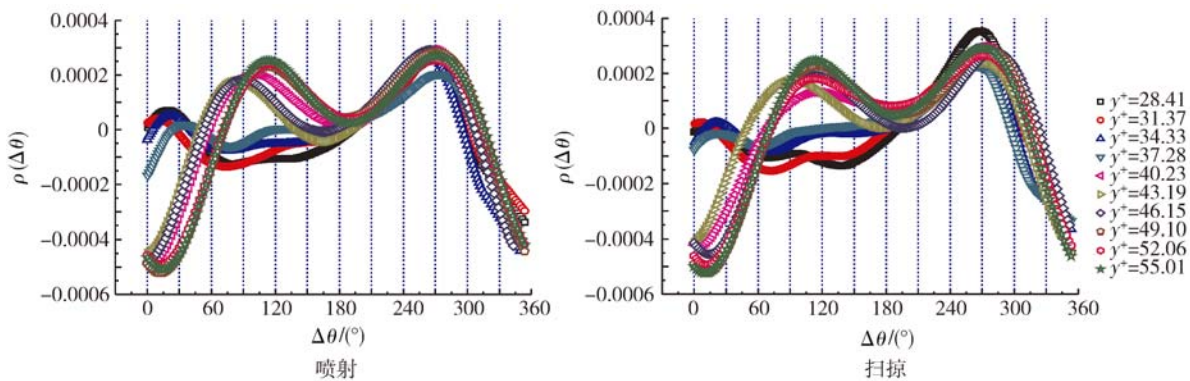


图 6 施加扰动前后 $\langle u'v' \rangle$ 和 $\langle u'w' \rangle$ 的条件相位平均波形

Fig. 6 Conditional phase-averaged waveforms of Reynolds stress at $x=10$ mm and $y^+=20$ before and after disturbance



(a) 不同法向位置流向脉动速度、法向脉动速度的条件相位平均波形的相关系数随法向脉动速度滞后于流向脉动速度相位角度 $\Delta\theta$ 的变化

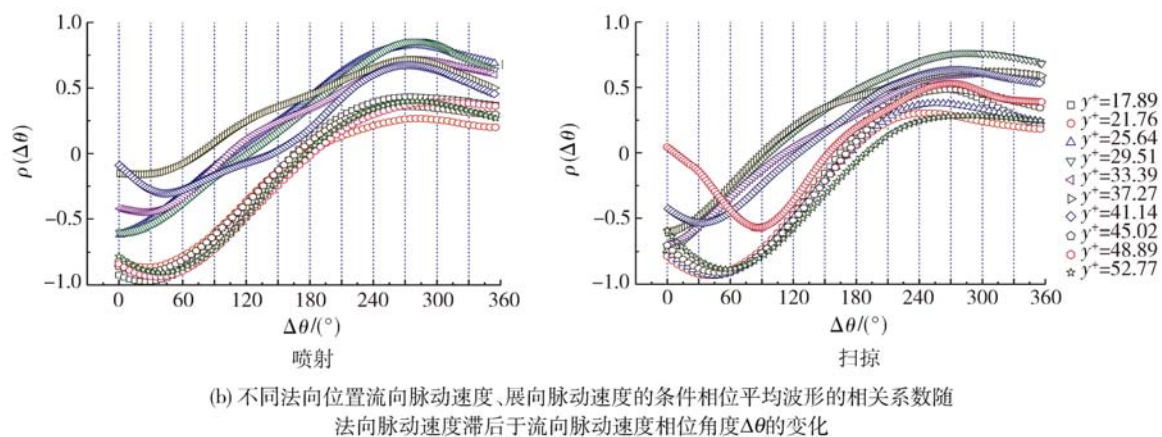


图7 不同脉动速度分量的条件相位平均波形的相关系数随相位角的变化

Fig. 7 Correlative coefficients of conditional phase-averaged waveforms of different fluctuating velocities varying with lag phase angles

4 结 论

本文通过对平板湍流边界层通过展向狭缝施加不同频率的局部周期性吹吸扰动控制拟序结构进行实验研究,得出如下结论:

1) 施加扰动使各流向位置上摩擦因数都有所减小,尤其流向 $x=10\text{ mm}$ 处减小得最多;使雷诺切应力幅值减小的空间范围变大。

2) 采用流向脉动速度局部平均结构函数模极大值法提取了喷射和扫掠过程中,拟序结构不同速度分量和雷诺应力分量的条件相位平均波形,在湍流边界层的缓冲层,喷射和扫掠过程中,流向和法向速度的条件相位平均波形幅值明显减小,说明低速条纹结构的向上运动和高速条纹的下扫运动均受到抑制,而且扰动频率越大抑制得也就越强烈,展向速度的条件相位平均波形更为平滑,说明展向条纹结构更加有序化,抑制了条纹结构在展向的失稳,从而抑制了猝发过程。

3) 从相干结构不同速度分量的相位平均波形相位关系的角度,进一步研究了施加不同频率的周期性质量引射前后,壁湍流边界层的减阻机理;实验发现施加的扰动改变了流向速度与法向或展向速度条件相位平均波形的相位差,使流向速度与法向或展向速度的相位差保持在 $\pi/2$ 的奇数倍左右,此时一个速度分量的幅值几乎为 0 而另一个速度分量的幅值则达到最大,使雷诺应力分量的幅值保持在较小的状态,从而达到了控制湍流产生和减阻的目的。

参考文献:

- [1] Corino E R, Brodkey R S. A visual investigation of the wall region in turbulent flow[J]. J Fluid Mech, 1969, 37(1): 1-30.
- [2] Kim H T, Kline S J, Reynolds W C. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer[J]. J Fluid Mech, 1971, 50(1): 133-160.
- [3] Offen G R, Kline S J. Combined dye-streak and hydrogen-bubble visual observations of a turbulent boundary layer[J]. J Fluid Mech, 1974, 62(2): 223-239.
- [4] Smith C R, Metzler S P. The characteristics of low speed streaks in the near wall region of a turbulent boundary layer[J]. J Fluid Mech, 1983, 129(1): 27-54.
- [5] Park J, Choi H. Effects of uniform blowing or suction from a spanwise slot on a turbulent boundary layer flow[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(10): 3095-3105.
- [6] Park S H, Lee I, Sung H J. Effect of local forcing on a turbulent boundary layer[J]. Experiments in Fluids, 2001, 31(4): 384-393.
- [7] Rhee G H, Sung H J. Numerical prediction of locally forced turbulent boundary layer[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, 22(6): 624-632.
- [8] Antonia R A, Zhu Y. Effect of concentrated wall suction on a turbulent boundary layer[J]. Phys Fluids, 1995, 7(10): 2465-2474.
- [9] Pailhas G, Cousteix J, Anselmet F, et al. Influence of suction through a slot on a turbulent boundary layer[R]. Munich, Germany: the 8th Symposium on Turbulent Shear Flows, 1991.
- [10] Kim K, Sung H J, Chung M K. Assessment of local blowing and suction in a turbulent boundary layer[J]. AIAA Journal, 2002, 40(1): 175-177.

- [11] JIANG Nan, ZHANG Jin. Detecting multi-scale coherent eddy structures and intermittency in turbulent boundary layer by wavelet analysis [J]. Chinese Physics Letter, 2005, 22(8): 1968-1971.
- [12] 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]. Acta Mechanica Sinica, 1997, 29(4): 406-411. (in Chinese)
- [13] Sano M, Hirayama N. Turbulent boundary layers with injection and suction through a slit: first report mean and turbulence characteristics[J]. Bull J Soc Mech Eng, 1985, 28(239): 807-816.
- [14] Park J, Choi H. Effects of uniform blowing or suction from a spanwise slot on a turbulent boundary layer flow[J]. Phys Fluids, 1999, 11(10): 3095-3105.
- [15] Tardu S. Near wall turbulence control by local time periodic blowing [J]. Exp Thermal Fluid Sci, 1998, 16(1/2): 41-53.
- [16] 黄伟希, 许春晓, 崔桂香, 等. 壁面展向周期振动的槽道湍流减阻机理的研究[J]. 力学学报, 2004, 36(1): 24-30.
HUANG Weixi, XU Chunxiao, CUI Guixiang, et al. Mechanism of drag reduction by spanwise wall oscillation in turbulent channel flow[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(1): 23-40. (in Chinese)
- [17] Subramanian C S, Rajagopalan S, Antonia R A, et al. Comparison of conditional sampling and averaging techniques in a turbulent boundary layer[J]. J Fluid Mech, 1982, 123: 335-362.
- [18] Jiang N, Liu W, Liu J H, et al. Phase-averaged waveforms of Reynolds stress in wall turbulence during the burst events of coherent structures[J]. Science in China: Series G, 2008, 51(7): 857-866.