

文章编号: 1000-8055(2007)09-1505-07

周期性扰动对平板湍流边界层统计性质的影响

王国华, 姜楠

(天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘 要: 用 IFA300 热线风速仪和 X 形二分量热线探针精细测量了平板湍流边界层在施加不同频率的周期性吹吸扰动前后不同法向位置的瞬时流向、法向速度分量的时间序列信号。在平板湍流边界层的固壁表面沿展向切割一条 5 mm 宽的窄缝, 在平板底部用扬声器从壁面向平板湍流边界层内施加不同频率的周期性吹吸扰动, 研究不同频率的周期性扰动在平板湍流边界层内发展演化的规律及对平板湍流边界层统计性质的影响。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 周期性扰动; 平板湍流边界层; 热线测速

中图分类号: O357

文献标识码: A

Influence of periodic disturbance on statistic character of turbulent boundary layer

WANG Guo-hua, JIANG Nan

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Simultaneous time sequence of longitudinal and normal velocity components with and without periodic blow-suction disturbance had been measured by IFA300 constant temperature anemometer and X-type hot-wire probe at different normal positions along the turbulent boundary layer. A latitudinal thin slot in 5 mm width was incised on a smooth flat plate. The periodic blow-suction force with different frequency was applied to turbulent boundary layer from a speaker woofer under the plate. The quantitative influence of local periodic blow-suction disturbance with different frequency on statistic character of turbulent boundary layer had been investigated.

Key words: aerospace propulsion system; periodic disturbance;

turbulent boundary layer above flat plate; hot-wire anemometry

湍流边界层是工程技术中典型的湍流流动形态之一, 工程技术中大量的湍流问题与湍流边界层密切相关, 如水轮机、汽轮机叶片表面附近的流动, 航空器固壁表面附近的流动等。相对于层流边界层, 湍流边界层可以使壁面摩擦阻力大幅度增加, 能耗增大, 壁面振颤加剧, 机械效率下降, 从而对系统和结构物的安全可靠构成严重威胁。因

此, 从机理上分析湍流边界层中的流动结构及其形成原因, 进而提出控制湍流边界层的有效方法成为湍流研究的前沿课题。在早期的湍流研究中, 湍流边界层内的流动被看作是一种完全随机的现象。20 世纪中叶, 随着流体力学实验技术的迅速发展, 人们对湍流的脉动特性进行了比较细致的研究。通过大量的实验观察和测量, 在湍流边界层

收稿日期: 2006-08-14; 修订日期: 2007-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(10472081; 10232020)

作者简介: 王国华(1979-), 男, 山西原平人, 硕士生, 主要从事湍流及其控制实验研究。

中发现有组织的大尺度运动,这种大尺度运动的强度、尺度和结构形态具有普遍性和可重复性,因而被称为相干结构(亦称拟序结构)^[1].进一步的研究表明,湍流是由多尺度结构的运动叠加而成的^[2],相干结构不仅存在于大尺度中,也存在于小尺度中^[3-5].不同尺度相干结构都具有很强的间歇性,条件相位平均结果表明,它们的发展和演化过程具有共同的特征,剪切湍流中的多尺度相干结构对湍流的统计性质产生重要影响^[6-7].相干结构的发现是湍流研究中的一次重大突破,使对湍流本质的认识从完全随机无序的阶段进入到无序和有序并存的新阶段^[8].现在相干结构已经被公认为是湍流中最重要的结构,它对湍流的维持、演化和发展起着重要的作用.开展湍流相干结构的理论和实验研究,为认识湍流的本质开辟了新的途径^[9].

现在控制相干结构已成为控制湍流的有效途径,可以通过控制相干结构猝发过程达到控制湍流的产生,减小壁面摩擦阻力的目的.控制相干结构在减小壁面摩擦阻力、降低流动噪声方面具有重要的应用前景,对于提高管道和飞行器的运输效率、降低能耗,提高空中飞行器和水下兵器的隐身性能方面具有重要的工程应用价值.为此,人们尝试了多种方法,周期性扰动的方法就是其中之一.1994年,Choi H^[10]采用在壁面加吹、吸扰动的方法,运用直接数值模拟证明了表面摩擦显著减小的地方流向涡可以被削弱.2001年 Park S H^[11]的研究表明,周期性扰动可以减小壁面摩擦阻力.

1 实验原理和技术

实验采用扬声器从壁面向平板湍流边界层内施加不同频率的周期性吹吸扰动,对壁面湍流边界层中的多尺度流动结构进行干扰.观察周期性扰动在平板湍流边界层内发展演化的规律及对平板湍流边界层统计性质的影响.

实验用 TSF-IFA300 热线风速仪和 TSF-1243-T1.5 型双斜丝热线探头进行实验测量.以高于对应最小湍流结构时间尺度的分辨率,分别精细测量了风洞中不同扰动频率下平板湍流边界层不同法向位置流向、法向速度分量的时间序列信号,对不同扰动条件下的实验测量结果进行对比统计分析.实验采样频 52 100 Hz,每个空间点采样时间长度 21 s、数据量 1 048 576.

实验采用目前已比较成熟的湍流边界层近壁

区域平均速度剖面的测量技术.根据实验测量数据绘制无量纲化速度 $u^+ = U(y)/u_\tau$ 和无量纲化法向位置坐标 $y^+ = yu_\tau/\nu$ 之间的关系曲线.其中 $U(y)$ 为距离壁面法向位置 y 的流向平均速度, u_τ 为壁面摩擦速度, ν 为空气运动粘性系数.

2 实验设备和装置

实验是在天津大学流体力学实验室低湍流度风洞中完成的.风洞为木质结构的三元回流闭口式风洞,实验段横截面为切角的矩形,长 1 500 mm,高 600 mm,宽 800 mm,实验段风速在 0.5 m/s 和 40.0 m/s 之间连续可调,原始湍流度小于 0.2%.实验装置如图 1 所示,实验平板长 $L = 1\,500$ mm,宽 795 mm,厚 2 mm,水平放置在风洞实验段内,正对来流方向的平板前缘为楔形,通过平板上的一个流向宽度 5 mm,展向长度 795 mm 的展向缝引入局部扰动,该缝位于距离平板前缘 500 mm 处,缝的后边界的中心处为坐标轴的原点,流动方向为 x 方向,法线为 y 方向.一个信号发生器用于产生频率可控的周期信号,经过一台功率放大器,推动一个直径 300 mm 的扬声器周期跳动,向平板湍流边界层内施加吹吸扰动气流,扰动的强度由放大器的输出功率控制.

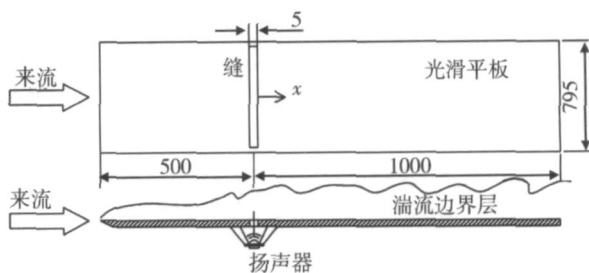


图1 吹吸扰动实验装置(单位:mm)

Fig.1 Experimental apparatus for suction and blowing (Unit:mm)

测速仪为美国 TSI 公司 IFA300 型恒温热线风速仪,通过与之配套的 CCTS-1193E 型三维自动控制坐标架以及 Thermalpro 软件,可以实现对流场不同位置瞬时速度的自动测量,测速探头为 TSF-1243-T1.5 型双斜丝热线探头,热线敏感材料为直径 $5\mu\text{m}$ 的钨丝,探头在使用前在 TSF-1128 型热线探针校准器上进行了标定.

3 实验测量结果及分析讨论

不同频率(16, 32, 48, 64 Hz)周期性扰动在

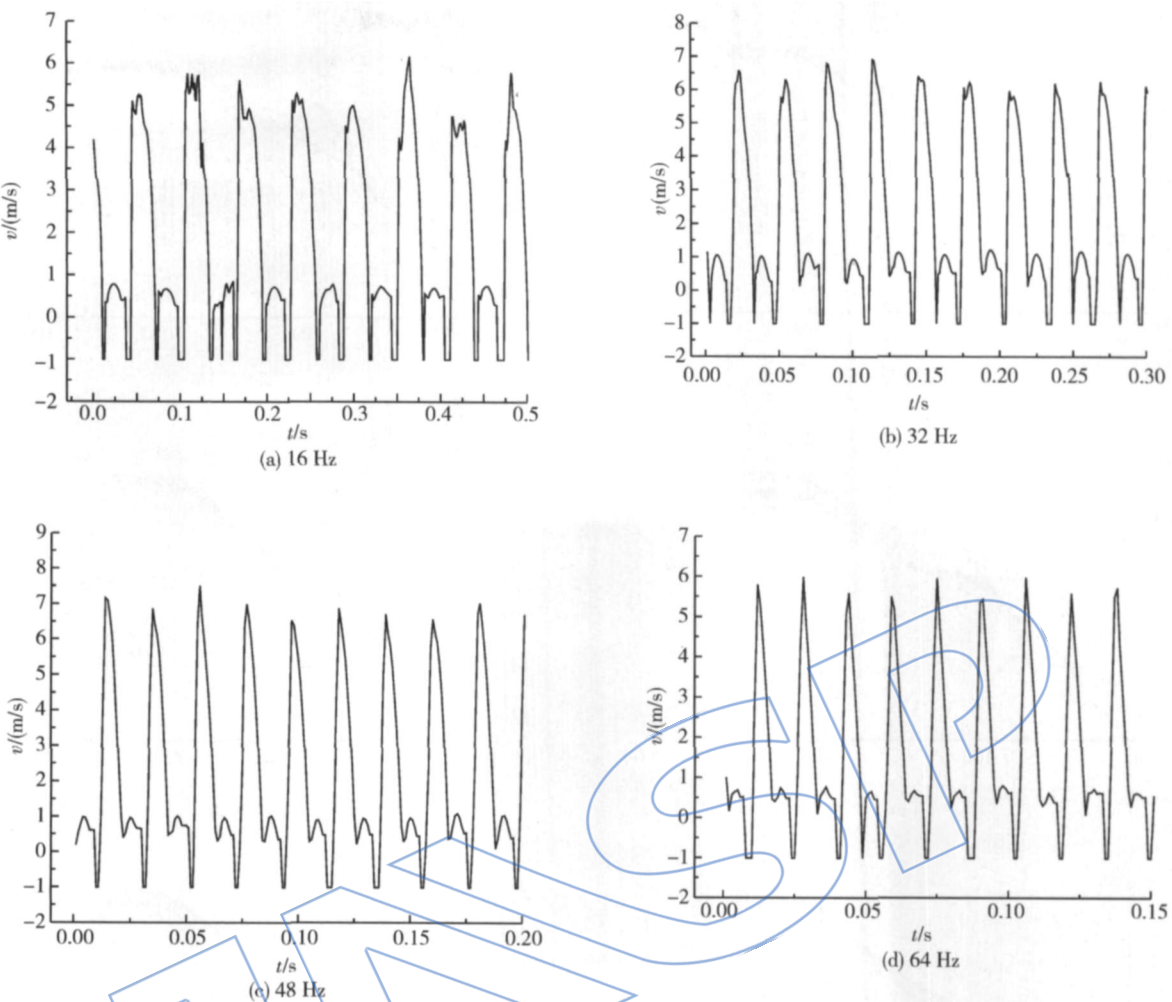


图 2 不同频率周期性扰动在窄缝的中心处测量的扰动速度信号

Fig. 2 Periodic disturbance velocity signals with different frequency at the center of slot

窄缝的中心处测量的扰动速度信号如图 2 所示。由图 2 可知,扰动使得瞬时高频脉动速度幅值周期性减弱,瞬时脉动速度变化与扰动信号同步性和拟序性增强,低频大尺度脉动幅度增大。

3.1 不同频率周期性吹吸扰动对平均速度剖面的影响

在距离平板前端 $x = 500\text{ mm}$ 流向位置处沿平板展向开 5 mm 宽的缝,通过展向缝向边界层内分别施加 $8, 16, 32, 48, 64\text{ Hz}$ 的周期性扰动,用热线风速仪测量施加扰动后缝下游 $x = 0 \sim 100\text{ mm}$ 的位置的平均速度剖面,如图 3 所示(图中: x' —用缝宽 5 mm 无量纲化的流向位置, $x' = x/5$; y^+ —无量纲化的法向位置坐标, $y^+ = y u_\tau / \nu$; u^+ —无量纲化速度, $u^+ = U / u_\tau$)。从图中可看出,在流向位置 $x' = 0.0$ 处开始,由壁面沿法向 $y^+ < 300$ 的近壁区域范围内,施加 $16, 32, 48, 64\text{ Hz}$ 的扰动效果比较明显,平均速度剖面与没有扰动的

情况差别较大;而 $8, 128\text{ Hz}$ 的扰动效果不明显,与没有施加扰动的平均速度剖面相差较小。这一结果表明,施加不同频率的扰动对边界层平均速度剖面的影响效果不尽相同, $16, 32, 48, 64\text{ Hz}$ 的扰动与湍流边界层固有多尺度流动结构耦合效果比较好,能够与湍流边界层固有多尺度流动结构相互作用,对湍流边界层固有多尺度流动结构影响较大,使湍流边界层对 $16, 32, 48, 64\text{ Hz}$ 扰动的接受性较好。从图 3 中还可看出,施加扰动后使缓冲层无量纲化的平均速度分布变化很大。相比较这几种频率,其中 32 Hz 的扰动的范围最大,效果也较明显。随着流向位置的增加,扰动对平均速度剖面的影响在逐渐减弱,在流向位置 $x = 100\text{ mm}$ 以后,施加扰动对平均速度剖面基本不产生影响。因此,在来流速度 $U_\infty = 7.8\text{ m/s}$ 条件下,扰动的影响区域可以确定为流向位置从窄缝开始到下游 $x' = 20.0$ 、法向位置 $y^+ \leq 300$ 的区域。

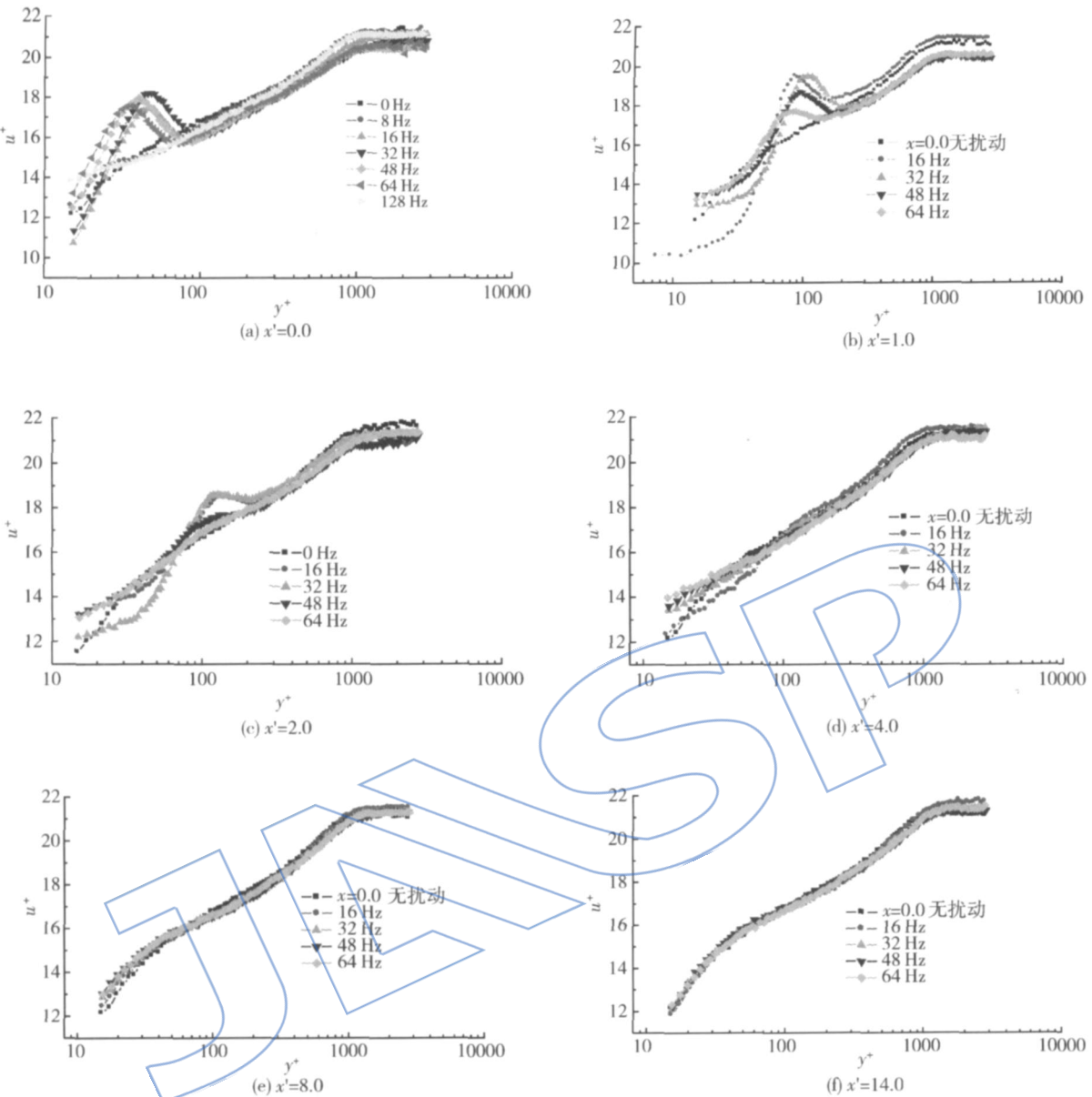


图 3 不同流向位置不同频率周期性吹吸扰动对平均速度剖面的影响

Fig. 3 Influence of different frequency periodic disturbance on mean velocity profile

3.2 不同频率周期吹吸扰动对流向、法向脉动速度均方根值的影响

湍流脉动对湍流动量、质量、能量的运输和传递起重要作用,因而研究不同频率周期性吹吸扰动对湍流脉动速度的影响会对湍流边界层相干结构的控制有启示作用.图 4 和图 5 分别表示在流向位置 $x'=2.0$ 处无量纲化的流向脉动速度均方根值 u_{rms}^+ 和法向脉动速度均方根值 v_{rms}^+ 随无量纲化的法向位置 y^+ 变化的情况.可以看出,施加 16,32 Hz 的周期性扰动均使流向脉动速度均方根值在 $y^+=100$ 附近出现峰值,而且,对应于 32 Hz 的周期性扰动的峰值较高.施加 48,64 Hz 的周期性扰动则不再出现明显的峰值,而施加不同

频率的周期性扰动均使流向脉动速度均方根值在 $y^+=10\sim110$ 区域内有显著增加.16,32,48,64 Hz 的扰动都使法向脉动速度均方根值出现明显的峰值,而其中 32 Hz 的扰动效果略大些.

3.3 同一频率周期吹吸扰动对不同流向位置处流向、法向脉动速度均方根值的影响

湍流脉动速度是体现湍流脉动运动的重要物理统计量,周期性扰动对 u_{rms}^+, v_{rms}^+ 流向上影响的范围基本上可以认为是对湍流脉动的影响范围.以 16 Hz 扰动为例,分别给出不同流向位置处 u_{rms}^+ 和 v_{rms}^+ 随 y^+ 的变化,如图 6 和图 7 所示.可以看出:随着流向距离增加,16 Hz 周期性扰动条

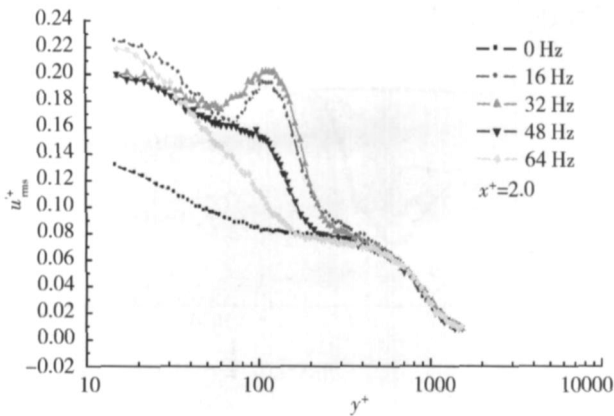


图 4 不同频率周期性吹吸扰动对 u_{rms}^+ 的影响

Fig. 4 Influence of periodic disturbance at different frequency on u_{rms}^+

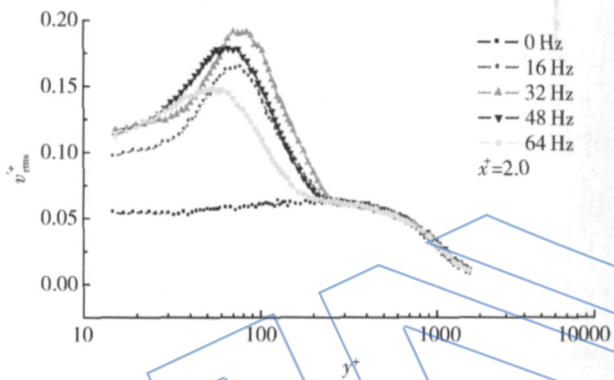


图 5 不同频率周期性吹吸扰动对 v_{rms}^+ 的影响

Fig. 5 Influence of periodic disturbance at different frequency on v_{rms}^+

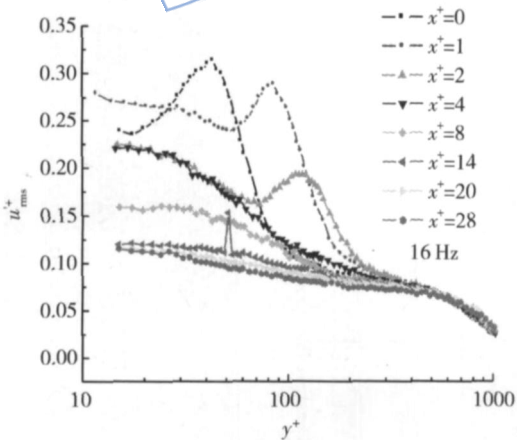


图 6 16 Hz 周期性吹吸扰动对不同流向位置处 u_{rms}^+ 的影响

Fig. 6 Influence of 16 Hz periodic disturbance on u_{rms}^+ at different longitudinal locations

件下 u_{rms}^+ 和 v_{rms}^+ 变化的幅值都在逐渐减小;直到流向 $x^+ = 20, 28$ 位置处 u_{rms}^+ 和 v_{rms}^+ 随 y 变化的曲线虽略有差别,但已不很明显,这说明 16 Hz 周期性扰动对 u_{rms}^+ 和 v_{rms}^+ 流向影响区域的边界在 $x^+ = 20$ (对应 $x = 100$ mm) 附近. 这说明扰动不仅影响了湍流平均速度剖面,而且对湍流边界层内瞬时流动结构产生了影响.

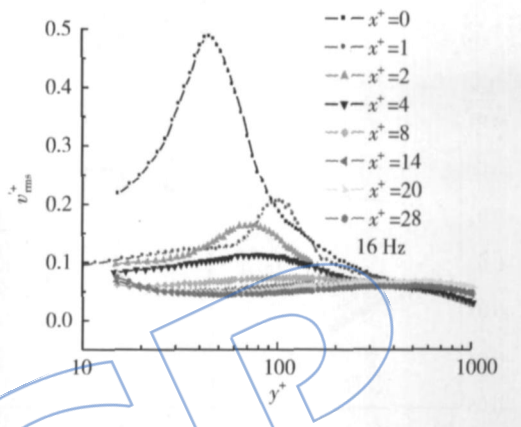


图 7 16 Hz 周期性吹吸扰动对不同流向位置处 v_{rms}^+ 的影响

Fig. 7 Influence of 16 Hz periodic disturbance on v_{rms}^+ at different longitudinal locations

3.4 不同频率周期性扰动对同一流向位置雷诺应力剖面的影响

扰动对雷诺应力的影响,如图 8 所示. 雷诺应力可以看作是流向脉动速度和法向脉动速度共同影响的结果. 在边界层 $30 < y^+ < 300$ 内,施加周期性扰动使得雷诺应力变化的幅值增大,使边界层内雷诺应力在不同的流向位置处出现负的峰值的法向位置不同:在 $x' = 0.0$ 处,雷诺应力在 $y^+ = 40$ 附近出现负的峰值;在 $x' = 1.0$ 和 2.0 处,速度剖面在 $y^+ = 100$ 附近出现大峰值;当流向位置 $x \geq 100$ mm 时,扰动基本对雷诺应力的速度剖面没有影响. 在所施加的扰动频率内,其中 32 Hz 周期性扰动影响范围最广,作用幅值最大. 进一步研究施加周期扰动对湍流基本流场产生的影响发现,流向位置由 $x' = 0.00 \sim 20.0$,周期扰动对雷诺应力速度剖面的影响在逐渐减弱. 在流向位置处 $x' = 20.0$ 及其以后和法向位置 $y^+ > 300$ 后,扰动对雷诺应力速度剖面基本没有影响. 本文施加扰动的影响区域可确定为从窄缝开始直到下游 $x' = 20.0$ 这段区域和法向位置 $y^+ < 300$ 的这段区域.

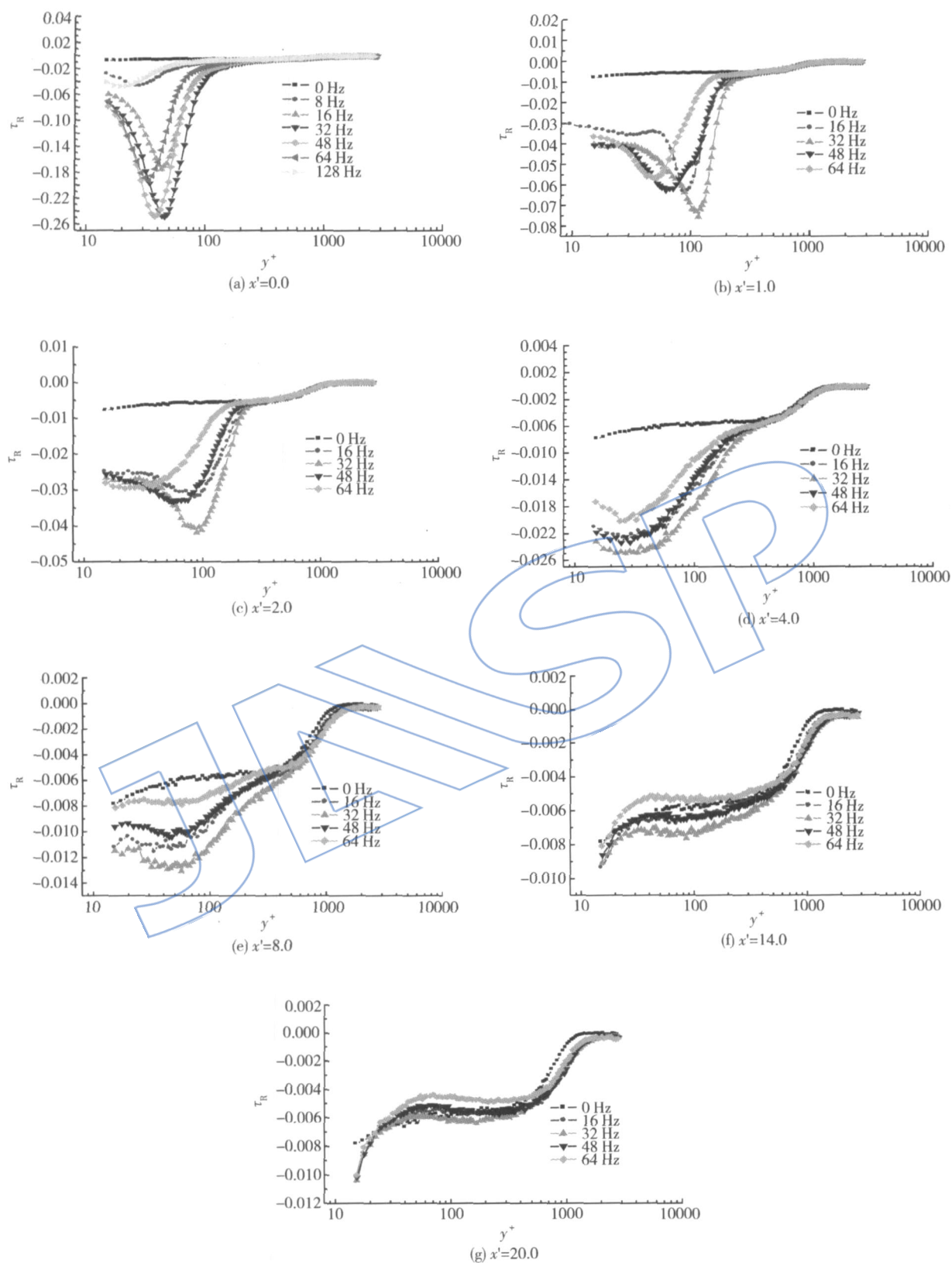


图 8 不同频率周期性扰动对同一流向位置 uv 剖面的影响

Fig. 8 Influence of periodic disturbance at different frequency on Reynolds stress profile

4 结 论

(1) 施加不同频率的周期性扰动对边界层平

均速度剖面的影响效果不尽相同,16,32,48,64 Hz 的扰动效果比较明显,其中 32 Hz 的扰动效果最明显,而 8,128 Hz 的扰动效果不明显,说明

湍流边界层固有流动结构对扰动的频率具有选择接受性.

(2) 施加 16, 32 Hz 的周期性扰动均使无量纲化的流向、法向脉动速度均方根值、雷诺应力在近壁区域 $y^+ = 100$ 附近出现峰值, 且对应于 32 Hz 的扰动的峰值较高. 说明扰动不仅影响了湍流平均速度剖面, 而且对湍流边界层内瞬时流动结构及湍流脉动速度产生了影响.

(3) 施加扰动的影响区域可确定为从窄缝开始直到下游 $x' = 20.0$ 这段区域和法向位置 $y^+ < 300$ 的这段区域内. 在流向 $x' = 20.0$ 下游位置及法向 $y^+ > 300$ 的远离壁面区域, 扰动对平板湍流边界层的影响逐渐衰减. 说明在低速不可压缩条件下, 壁面周期吹吸扰动只对平板湍流边界层近壁区域产生影响, 而对湍流边界层外区没有影响. 说明近壁湍流只与壁面内尺度条件有关, 而与边界层外区条件无关. 这与超声速边界层的气动声学特性明显不同.

参考文献:

- [1] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F H, et al. The structure of turbulent boundary layer[J]. J Fluid Mech., 1967, 30: 741-774.
- [2] 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.
- [3] Chavarria G R, Gliberto S, Baudet C, et al. Scaling properties of the streamwise component of velocity in a turbulent boundary layer[J]. Physica D, 2000, 141: 183-198.
- [4] Toschi F, Amiti G, Succi S, et al. Intermittency and structure functions in channel flow turbulence[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(25): 5044-5047.
- [5] Toschi F, Leveque E, Chavarria G R. Shear effects in non-homogeneous turbulence[J]. Physical Review Letters, 2002, 85(7): 1436-1439.
- [6] Camussi R, Guj G. Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: Intermittency and coherent structures[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 348: 177-199.
- [7] Onorato C, Camussi R, Iuso G. Small scale intermittency and bursting in a turbulent channel flow[J]. Physical Review E, 2000, 61(2): 1447-1454.
- [8] 王振东. 湍流研究的进展[J]. 物理通报, 1992, 12(12): 1-4.
WANG Zhendong. Advances in turbulent research[J]. Physics Bulletin, 1992, 12(12): 1-4.
- [9] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 走近湍流[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 1-8.
ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Approach to turbulence[J]. Mechanics in engineering, 2002, 24(1): 1-8.
- [10] Choi H, Moin P, Kim J. Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows[J]. J Fluid Mech, 1994, 262: 75-110.
- [11] Park S H, Lee I, Sung H J. Effect of local forcing on a turbulent boundary layer[J]. Exp in Fluids, 2001, 31: 384-393.