

双压电振子异步振动主动调制湍流 边界层流向涡减阻

白建侠^{1,2}, 姜楠^{1,3}, 唐湛棋¹, 崔晓通¹

(1. 天津大学仁爱学院 数学教学部, 天津 301636;

2. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072;

3. 天津大学 机械工程学院 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 以热线敏感丝为感受器、单片机(MCU)为控制器、双压电振子为动作器构成闭环控制回路,实现闭环主动控制湍流边界层相干结构减阻。采用安装在壁面上的展向布置的双压电振子异步振动方式,通过对压电振子输入3种不同振动频率,得到160 Hz工况实现最大减阻率为16.03%。压电振子振动使得湍动能更大幅度地集中在能量峰值周围,改变了湍流边界层近壁区的含能结构,对相干结构产生调制作用。压电振子振动频率与相干结构特征频率越接近,减阻效果越好。闭环控制中控制压电振子所需要的电能节省开环的75%,实现与开环控制相近的减阻效果。施加控制加入条件检测的条件相位平均波形时间周期略变短,以压电振子壁面扰动方式调制近壁流向涡,减小壁面摩擦阻力,获得减阻效果。

关 键 词: 压电振子; 减阻率; 流向涡; 湍流边界层; 闭环主动控制

中图分类号: V231.3; O375.5

文献标志码: A

Active modulation to streamwise vortex drag reduction of turbulent boundary layer by asynchronous vibration with double piezoelectric vibrator

BAI Jianxia^{1,2}, JIANG Nan^{1,3}, TANG Zhanqi¹, CUI Xiaotong¹

(1. Department of Mathematics,

Tianjin University Renai College, Tianjin 301636, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics,

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

Abstract: A closed-loop control circuit comprising of hot wire sensitive filament sensor, microprogrammed control unit (MCU) controller and double piezoelectric vibrators was designed to realize the coherent structure's drag reduction in turbulent boundary layer under closed-loop active control. Asynchronous vibration of the spanwise piezoelectric vibrators on the wall was adopted. By inputting three different vibration frequencies to the piezoelectric

收稿日期: 2019-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(11732010, 11572221, 11872272, U1633109, 11802195)

作者简介: 白建侠(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要研究领域为实验流体力学、湍流。

通信作者: 姜楠(1968—), 男, 教授, 博士, 主要研究领域为实验流体力学、湍流。E-mail: nanj@tju.edu.cn

引用格式: 白建侠, 姜楠, 唐湛棋, 等. 双压电振子异步振动主动调制湍流边界层流向涡减阻[J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2539-2548. BAI Jianxia, JIANG Nan, TANG Zhanqi, et al. Active modulation to streamwise vortex drag reduction of turbulent boundary layer by asynchronous vibration with double piezoelectric vibrator[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2539-2548.

vibrator, the maximum drag reduction efficiency of 16.03% at 160 Hz was acquired. The vibration of the piezoelectric oscillator made the turbulent kinetic energy concentrate around the maximal energy and modulated the coherent structure, which changed the structure of the turbulent boundary layer near the wall. When the vibration frequency of piezoelectric vibrator was close to the characteristic frequencies of coherent structures, the disturbance of piezoelectric vibrator exerted the most significant burst influence on coherent structures, and the drag reduction efficiency reached the maximum. Closed-loop control saved about 75% energy input and achieved a comparable control effect as open-loop control. Under the controlled condition with added condition detection, the time period of the conditional phase average waveform became shorter. The disturbance of piezoelectric oscillator was used to modulate streamwise vortex, thus the wall friction resistance was reduced, and the drag reduction effect was obtained.

Key words: piezoelectric vibrator; drag reduction efficiency; streamwise vortex; turbulent boundary layer; closed-loop active control

湍流边界层中的低速条带处于两侧分别为高、低速流体的两个反向旋转的流向涡之间,流向涡的条带生成机制是壁湍流自维持机制过程中的重要因素。图 1 给出了湍流边界层的自维持机制^[1-4]过程示意图。

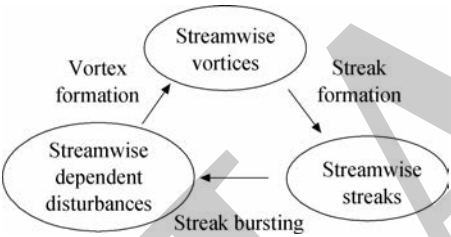


图 1 湍流边界层自维持过程
Fig. 1 Self-sustaining process in turbulent boundary layer

流向涡影响流体的上抛、下扫运动和低速条带的产生,在湍流自维持机制过程和壁面高摩擦阻力产生中都起着非常重要的作用(如图 2)。因此,尝试通过干扰流向涡来进行主动控制实现湍流边界层减阻,是一种行之有效的方法^[5]。本文使用双压电振子为动作器,通过压电振子的周期性振动来干扰流向涡,从而产生对相干结构的调

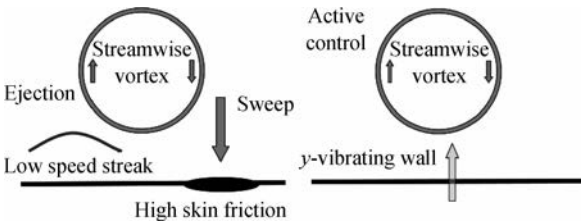


图 2 湍流边界层减阻过程
Fig. 2 Process of drag reduction in turbulent boundary layer

制作用,实现主动控制湍流边界层减阻的目的。被动控制和主动控制^[6-9]是湍流控制的主要方法。主动控制的优点是可以很好地适应流动状况的实时变化及相干结构的随机特性,通过适当的设计和评估方法,来实现最优控制^[10-11]。主动控制中需要有能量输入,且闭环控制中有流场反馈。主动控制需要通过动作器与流场之间相互作用,将控制电信号转化为流场的扰动^[12-13]。Segawa 等^[14]自主设计沿壁面法向振荡的致动器阵列,发现近壁区条带结构的规则性减弱。Itoh 等^[15]利用扬声器为激励器,得到了 7.5% 的减阻效果。

主动控制有开环和闭环控制两种方式^[16]。对湍流边界层闭环主动控制的相关研究,目前主要以数值模拟为主^[17-20],进行实验研究的还比较少。Bewley 等^[21]将最优控制理论应用于槽道湍流,获得最大减阻率为 50% 的减阻效果,并实现再层流化。Choi 等^[22]用次优控制算法在槽道湍流中获得 16% ~ 22% 的减阻率。Choi、Hammond 等^[22-23]用反向线性控制的结果表明,当数值传感器位于 $y^+ < 20$ 时实现减阻;在 $y^+ > 20$ 时发生增阻,其中 $y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$ 为用内尺度无量纲化的法向位置, y 为法向位置, u_τ 为壁面摩擦速度, ν 为运动黏度。在壁面上施加与 $y^+ = 15$ 处相反的法向速度时,可获得最大为 25% 减阻效果。

主动控制的动作器主要分为电磁动作器、流体动作器以及固体动作器^[24]。电磁动作器和流体动作器一般都需要输入较大的能量,才能实现对流场足够的扰动。固体动作器与流场直接接触,操作方便且易于实现控制。常见的固体动作器包括壁面振荡和压电陶瓷振子等。

Jacobson 和 Reynolds^[25] 最早将压电振子应用于湍流边界层主动控制,压电振子的振动产生一对反向旋转涡,并产生高低速条带。Rathnasingham^[26] 将镀镍压电陶瓷片黏附在薄膜上,构成法向吹、吸装置。Cattafesta 等^[27] 使用金属片和压电陶瓷片制成的压电振子为动作器,并用最优化算法推导出压电振子的频率响应函数。Bai 等^[28] 用展向排列的压电振子阵列对湍流边界层扰动,发现在大尺度相干结构和壁面之间产生了规则的流向涡干扰了近壁湍流产生,获得最大减阻率为 50% 的减阻效果。张浩等^[29], Zheng 等^[30] 对单个压电振子在不同工况下的控制效果进行对比研究,得到最大减阻率为 26.83%。本文以 mu-level 法为猝发事件的检测准则,自主设计以热线敏感丝感受器、单片机控制器和双压电振子动作器构成的闭环控制回路,从而实现了闭环主动控制湍流边界层相干结构减阻。

1 闭环控制系统

闭环控制系统包括传感器、控制器、被控对象以及执行控制的机构,如图 3 所示。闭环控制系统的核心是控制器。

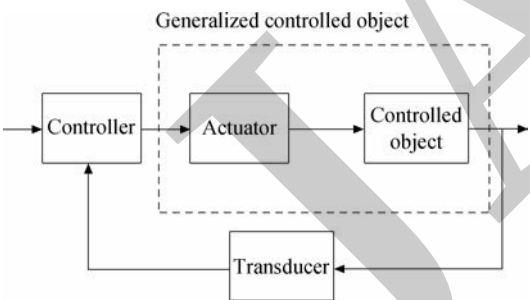


图 3 闭环控制系统结构

Fig. 3 General structure of the closed-loop control system

1.1 传感器

本实验中选取敏感热丝为闭环控制系统的传感器。敏感热丝为长为 1.25 mm,直径为 4 μm 的钨丝,将其点焊在迷你单丝热线探针(检测探针)上作为闭环控制的感受器。检测探针布置在压电振子上游,距离壁面法向位置约 0.6 mm ($y^+ = 15$)处。近壁区的相干结构从热线探针迁移到压电振子自由端的过程中,传感器在上游位置预先获取到流动信息,再经过控制器对相干结构进行识别,检测到相干结构猝发现象之后,压电振子发生振动。将传感器和 IFA(intelligence flow anal-

ysis)300 恒温热线风速仪连接。

1.2 控制器

本实验采用单片机作为控制器形式,单片机由 6 个部分组成,包括 SCM(single chip micryo)电源、CPU(central processing unit)及 IFA 模拟电压输入、交流稳压电源输入及 PZT(piezoelectric transducer)驱动电压输出、算法拷贝接口、MOSFET(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)管。为保证实验安全,将单片机放入控制器盒子中与计算机连接。图 4 为实施闭环控制的控制器实物图。

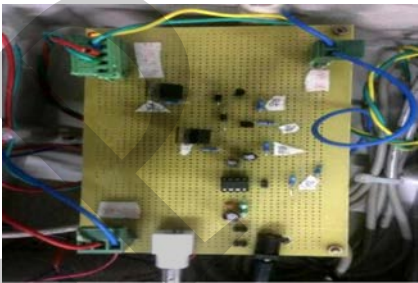


图 4 闭环控制器实物图

Fig. 4 Physical diagram of closed-loop control system

通过 LABVIEW 控制软件界面进行实时闭环控制。图 5 为本文自主设计的 LABVIEW 控制软件界面。界面中设置了数据采集界面、数据转化界面以及数据查看界面。

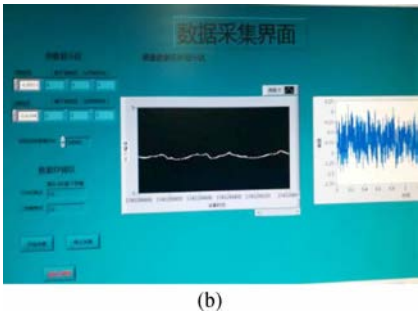
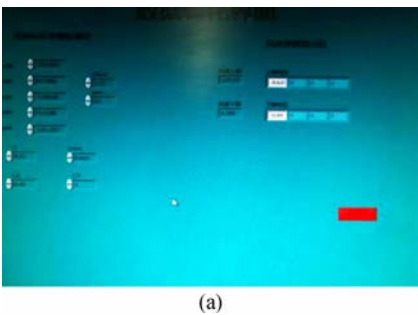


图 5 LABVIEW 控制软件界面

Fig. 5 Interface of LABVIEW control software

用 μ -level 法检测湍流边界层中相干结构的猝发现象。当 $u < -Lu_{rms}$ 时,表明检测到湍流猝发事件,驱动电路连通,压电振子开始振动;当 $u \geq -0.25Lu_{rms}$ 时,表明未检测到猝发事件,驱动电路关断,压电振子停止振动。其中 u 为脉动速度, u_{rms} 为脉动速度的方均根值,门限 L 取值为 1。图 6 为 μ -level 法的算法示意图。横轴为时间 t ,纵轴表示 u 与 u_{rms} 的比值。

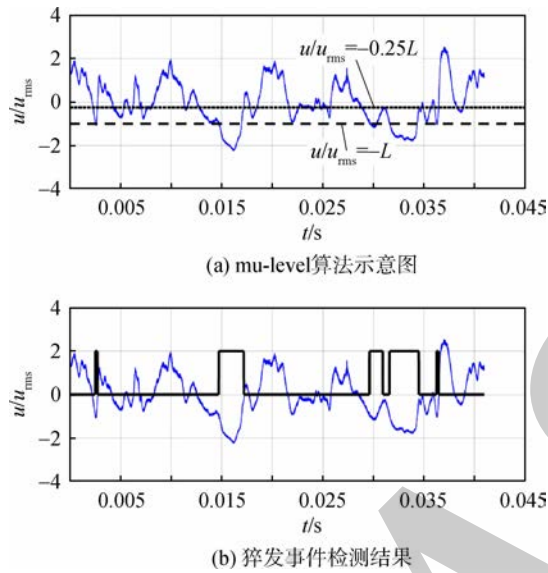


图 6 μ -level 算法原理
Fig. 6 μ -level algorithm principle

1.3 执行机构

闭环控制系统的执行机构包括双压电振子动作器、迷你热丝探针感受器、控制器及交流变频稳压电源。实验中使用湍流边界层单丝热线探针测量不同法向位置的流向脉动速度信号。远方 GK10005 交流变频稳压电源为压电振子输入不同的电压幅值及振动频率。图 7 和图 8 分别为交流变频稳压电源和单丝边界层热线探针实物图。



图 7 交流变频电源
Fig. 7 Alternating current variable-frequency power supply



图 8 单丝边界层探针
Fig. 8 Single sensor boundary-layer probe

1.4 被控对象

实验的被控对象为湍流边界层近壁区的相干结构。Pei 等^[31]得出 $y^+ = 15$ 处相干结构的迁移速度约为 $11u_\tau$ 。根据热丝传感器和 PZT 振子自由端之间的流向距离为 39.8 mm,计算得出相干结构从传感器到 PZT 振子自由端的迁移时间约为 9.05 ms。因此,在控制算法中,人为设置一个 9 ms 的时间延迟,使相干结构迁移所用时间和整个控制回路所用时间相等。

2 实验装置

主动控制实验在三元低速木质回流式风洞中进行。实验段尺寸为 1 500 mm(长)×800 mm(宽)×600 mm(高),沿中心线竖直放置一块宽 600 mm、厚 15 mm 的有机玻璃平板。为了加速边界层转捩,在平板前缘下游安装了砂纸和绊线,保证实施控制和测量的流动为充分发展的湍流状态。在实验平板上距离前缘 1 090 mm 的中心线处,切割出一块长为 150 mm、宽为 100 mm 的凹槽,该凹槽中嵌入的是展向布置的双压电振子平板,两个振子的自由端均在平板的中心位置处。实验中使用的压电振子由磷铜片和压电陶瓷片黏结而制成。压电振子的有效振动长度为 30 mm,宽为 3.6 mm、厚为 0.2 mm,磷铜片宽为 3.6 mm、厚为 0.22 mm。

两个压电振子以悬臂梁的形式平行悬挂在平板深度为 5 mm 的空腔之上。压电振子平板如图 9 和图 10 所示。将两个压电振子的铜片极均与电源一极相连,陶瓷片极都与另一极相连,压电振子同向振动,即为同步控制的工况(记为 SYN);若将一个振子的铜片极与另一个振子的陶瓷片极连到电源的一极,则为异步振动的工况(记为 ASYN)。

实验段的自由来流速度 $U_\infty = 9.0$ m/s,边界层名义厚度 $\delta = 43$ mm,动量损失厚度 $\theta = 4.03$

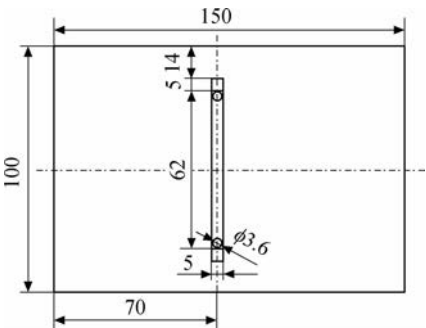


图 9 双压电振子模型图(单位:mm)

Fig. 9 Diagram of the double piezoelectric vibrators (unit:mm)



图 10 双压电振子实物图

Fig. 10 Picture of the double piezoelectric vibrators

mm,动量损失雷诺数 $Re_\theta=2706$ 。单丝湍边界层热线探针布置在压电振子下游 2 mm 处,测量不同法向位置的流向脉动速度信号。压电振子下游的边界层探针和上游的检测探针进行同步测量,采样频率为 100 kHz,每个空间点样本量为 2^{22} 个,采样时间约为 42 s。在研究了双压电振子开环主动控制湍流边界层减阻的基础上^[32],在控制前首先进行两种无控制工况来测试检测探针对湍流边界层的影响;然后进行异步控制 100 V/80 Hz(对振子的驱动电压幅值为 100 V,振动频率为 80 Hz)、1000 V/160 Hz、1000 V/240 Hz 三组及一组无控制工况(记为 None)作为对照组。

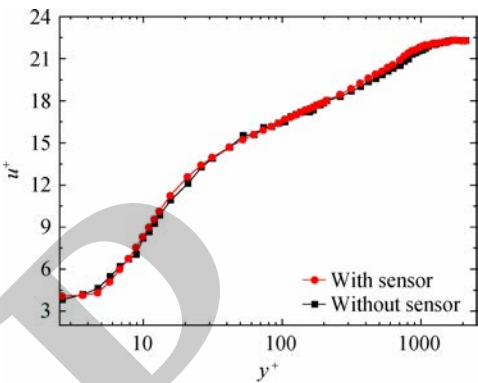
3 实验结果分析

3.1 平均速度剖面

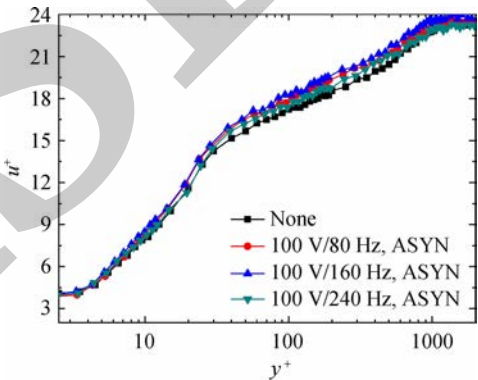
图 11 为不同工况用内尺度无量纲化的平板湍流边界层平均速度剖面。其中 $u^+=\frac{u}{u_\tau}$, $y^+=\frac{yu_\tau}{\nu}$ 分别代表由壁面摩擦速度和运动黏度无量纲化的流向平均速度和法向位置。

图 11(a)为压电振子上游有无感受器探针的平均速度剖面对比图。黑色线为无感受器探针时平板湍流边界层的速度剖面,红色线表示插入感

受器探针时下游的湍流边界层的速度剖面。图 11(b)为电压幅值为 100 V 时 3 种不同振动频率下异步控制与无控制的的湍流边界层平均速度剖面对比图。黑色线为无控制工况,红色、蓝色及绿色线为异步控制 100 V/80 Hz、100 V/160 Hz 及 100 V/240 Hz 的平均速度剖面。



(a) 无控制



(b) 100 V 不同频率异步振动

图 11 平板湍流边界层平均速度剖面

Fig. 11 Average velocity profiles of the turbulent boundary layer on the plate

图 11(a)中两种无控制工况平均速度剖面基本重合,表明检测探针孔及检测探针的布置对湍流边界层影响很小。图 11(b)说明控制没有改变湍流边界层典型的分层结构,平均速度剖面的黏性底层能够很好地符合在一起,与之前主动控制减阻实验的结果相吻合^[29-30,33]。施加控制后,各工况的平均速度剖面对数律区上移,符合减阻壁面的特征。当驱动频率为 160 Hz 时,平均速度剖面的对数律区上移最多,减阻效果最好。

3.2 各工况减阻率及相对振动时间

计算得出壁面切应力

$$\tau_w = \rho u_\tau^2 \tag{1}$$

其中 ρ 为空气密度, u_τ 为壁面摩擦速度。

摩擦阻力系数

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$$

(2)

相对减阻率为

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{f_m}}{C_{f_u}}\right) \times 100\%$$

(3)

其中 C_{f_m} 为施加控制工况下的摩擦阻力系数,而 C_{f_u} 为不施加控制工况的摩擦阻力系数。表 1 给出了不同工况下的减阻率及压电振子的相对振动时间。

表 1 减阻率及相对振动时间

Table 1 Drag reduction efficiency and relative vibration time

工况	壁面摩擦速度	减阻率	相对振动
	$u_\tau/(m/s)$	$\eta/\%$	时间 t/s
无控制	0.407		
100 V/80 Hz, ASYN	0.378	12.83	0.233
100 V/160 Hz, ASYN	0.374	16.03	0.256
100 V/240 Hz, ASYN	0.388	9.18	0.198

表 1 中 3 种异步振动的工况都实现减阻效果。当压电振子振动频率为 160 Hz 时,减阻效果最佳为 16.03%。压电振子振动的时间约占总时间的 25%,说明闭环控制中控制压电振子所需要的电能节省了开环的约 75%,却实现了与开环控制相近的减阻效果^[30,32],体现了闭环控制的优势。

小波分析是一种信号分析的数学方法,可以在时域和频域方面更好地显示信号局部化的信息。用小波分析方法可以分析湍流脉动速度信号中不同尺度的结构^[33-35]。

3.3 小波系数等值云图

图 12 为 $y^+ = 15$ 处的不同工况小波系数等值云图对比,图中横轴为时间 t ,纵轴为尺度 a ,图中不同的颜色表示对应不同的小波系数幅值 $W_u(a,b)$,其中 b 表示位置。

图 12 中可看出,施加异步控制的 3 种工况中,压电振子的振动对相干结构猝发产生明显的调制作用,使相干结构的猝发间隔变得均匀,尺度跨度较为一致,能量分布也更加集中。其中 100 V/160 Hz 异步控制的工况调制作用最为明显。

图 13 给出了法向位置 $y^+ = 8, 11, 15, 30$ 处不同工况的能量尺度分布图。横轴为尺度 a ,纵

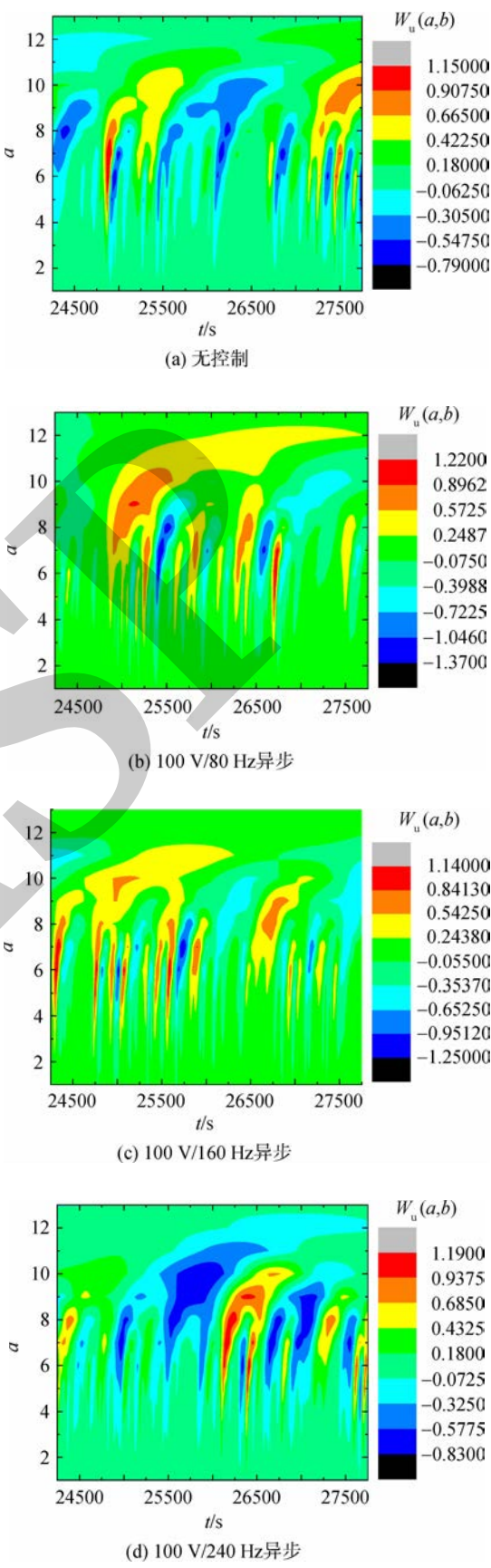


图 12 小波系数等值云图

Fig. 12 Contours of wavelet coefficients

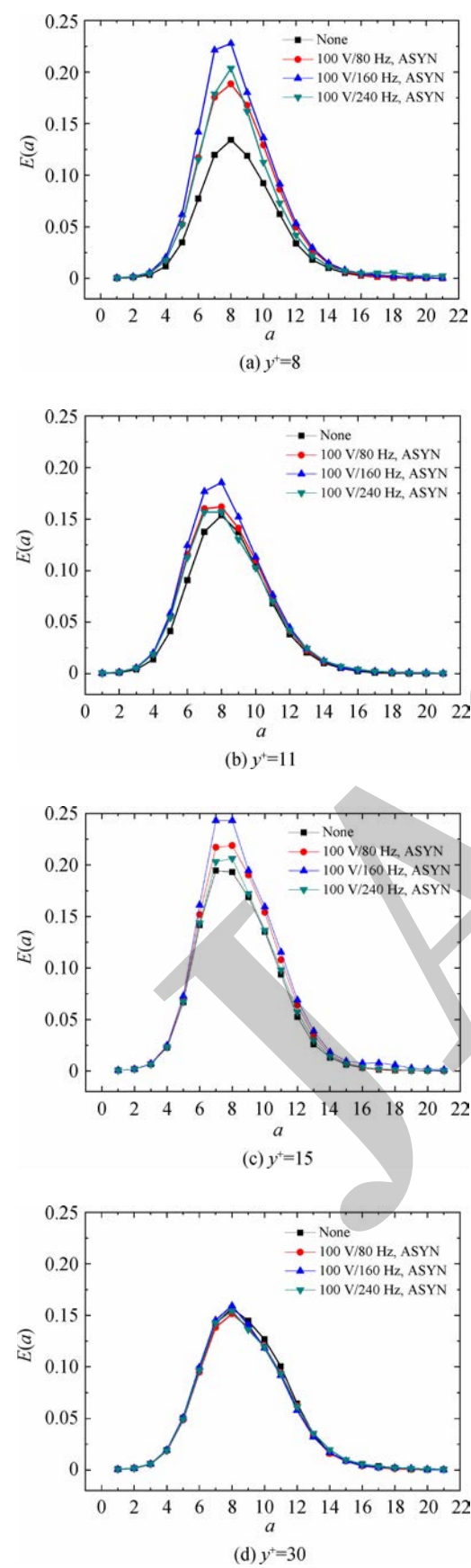


图 13 不同法向位置不同工况能量随尺度分布
Fig. 13 Scale-dependent energy distribution at different normal positions and different working conditions

轴为不同尺度对应的脉动动能 $E(a)$ 。图中可以看出,各工况的能最大尺度均在第 8 尺度,施加异步控制后第 6~12 尺度的湍动能发生明显改变。其中 100 V/160 Hz 的工况第 8 尺度能量峰值最高。第 8 尺度湍动能在近壁区幅值较大,对应与壁面高摩擦阻力密切相关的大尺度流向涡结构。压电振子的振动使得湍动能更大程度地集中在能量峰值周围,改变了湍流边界层近壁区的含能结构。压电振子的扰动对相干结构产生调制作用,破坏了近壁区湍流不同尺度湍涡结构间的维持、演化机制和能量级串机制。

3.4 平均猝发周期及猝发频率

对 $y^+ = 15$ 处无控制工况时得到的小波系数进行自相关分析,得到不同尺度的相干结构对应的平均猝发频率,如图 14 所示。横轴为尺度 a ,纵轴为对应的平均猝发频率 f 。图中可以看出,能量最大尺度(第 8 尺度)湍流相干结构的平均猝发周期约为 5.6 ms,该尺度对应的特征频率为 178 Hz。压电振子的振动频率与相干结构的特征频率越接近,减阻效果越好。

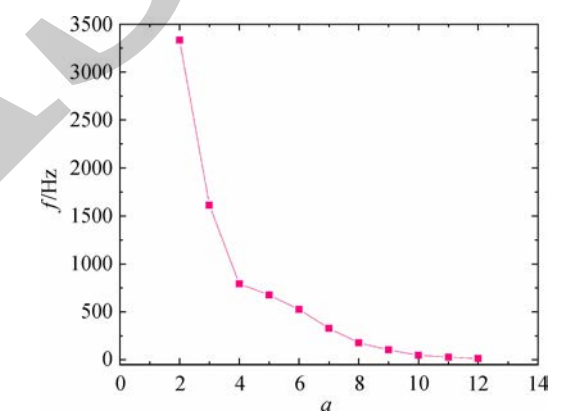


图 14 各尺度相干结构的平均猝发频率
Fig. 14 Average burst frequency of coherent structures of various scales

3.5 条件相位平均波形

图 15 给出了不同工况在 4 个不同的法向位置 $y^+ = 11, 15, 21, 30$ 处第 8 尺度的扫描事件相干结构的条件相位平均波形。横轴为时间 t ,纵轴为扫描事件的流向脉动速度 $u(t)$ 的幅值。其中黑色线为无控制工况的条件相位平均波形;红色线为异步 100 V/160 Hz 工况的条件相位平均波形;蓝色线为异步 100 V/160 Hz 工况中加入 mu-level 法的条件检测的条件相位平均波形。

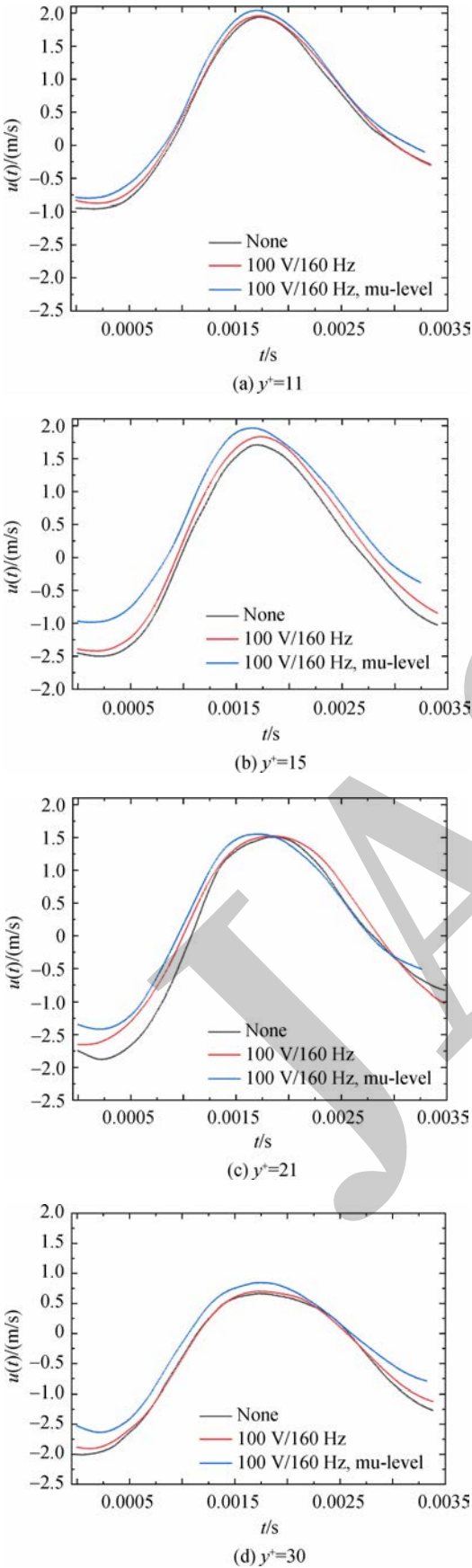


图 15 第 8 尺度条件相位平均波形

Fig. 15 Conditional phase-averaged waveforms at the 8th scale

图 15 中可以看出,施加控制工况的条件相位波形曲线的脉动振幅均比无控制时增大,且条件相位波形均保持明显的平滑曲线的特性。加入条件检测的异步 100 V/160 Hz 工况的条件相位平均波形时间周期略变短,说明以压电振子壁面扰动方式调制近壁流向涡,进而减小壁面摩擦阻力,获得减阻效果。

4 结 论

本文在闭环主动控制方式下,研究了沿展向布置的双压电振子在 3 种不同振动频率下的异步振动对湍流边界层产生的影响,得到以下结论:

- 1) 异步 100 V/160 Hz 的工况减阻效果最佳为 16.03%。闭环控制中控制压电振子所需要的电能节省了开环的 75%,却实现了与开环控制相近的减阻效果。
- 2) 压电振子的振动对相干结构猝发产生调制作用,使相干结构的猝发间隔变得均匀,尺度跨度较为一致,能量分布也更加集中。其中 100 V/160 Hz 异步控制的工况最为明显。
- 3) 施加异步控制后第 6~12 尺度的湍动能发生改变。振子振动改变了湍流边界层近壁区的含能结构,对相干结构产生调制作用。压电振子的振动频率与相干结构的特征频率越接近,减阻效果越好。
- 4) 加入条件检测的异步控制工况中,条件相位平均波形时间周期略变短,说明以压电振子壁面扰动方式调制近壁流向涡,进而减小壁面摩擦阻力,获得减阻效果。

参考文献:

[1] HAMILTON J M, KIM J, WALEFFE F. Regeneration mechanisms of near-wall turbulence structure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 287: 317-348.

[2] JIMÉNEZ J, PINELLI A. The autonomous cycle of near-wall turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 389: 335-359.

[3] PANTON R L. Overview of the self-sustaining mechanisms of wall turbulence[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(4): 341-383.

[4] JIMÉNEZ J, KAWAHARA G, SIMENS M P, et al. Characterization of near-wall turbulence in terms of equilibrium and “bursting” solutions[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(1): 015105. 1-015105. 11.

[5] KIM J. Physics and control of wall turbulence for drag reduction[J]. Philosophical Transactions of The Royal Society: A Mathematical Physical and Engineering Sciences,

- 2011,369:1396-1411.
- [6] MARUSIC I, MATHIS R, HUTCHINS N. Predictive model for wall-bounded turbulent flow[J]. *Science*, 2010, 329(5988):193-196.
- [7] GAD-EL-HAK M. Flow control: passive, active, and reactive flow management[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [8] KANG S, CHOI H. Active wall motions for skin-friction drag reduction[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 12(12):3301-3304.
- [9] KRAL L D. Active flow control technology[R]. New York: ASME Fluids Engineering Division, 1999.
- [10] KASAGI N, SUZUKI Y, FUKAGATA K. Micro electro-mechanical systems-based feedback control of turbulence for skin friction reduction[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, 41(1):231-251.
- [11] LIU Jianhua, JIANG Nan, WANG Zhendong, et al. Multi-scale coherent structures in turbulent boundary layer detected by locally averaged velocity structure functions[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, English Edition, 2005, 26(4):495-504.
- [12] 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.
- [13] RATHNASINGHAM R, BREUER K S. Active control of turbulent boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 495:209-223.
- [14] SEGAWA T, KAWAGUCHI Y, KIKUSHIMA Y, et al. Active control of streak structures in wall turbulence using an actuator array producing inclined wavy disturbances[J]. *Journal of Turbulence*, 2002, 3(1):1-15.
- [15] ITOH M, TAMANO S, YOKOTA K, et al. Drag reduction in a turbulent boundary layer on a flexible sheet undergoing a spanwise traveling wave motion[J]. *Journal of Turbulence*, 2006, 7(27):N27001-N27017.
- [16] KIM J. Control of turbulent boundary layers[J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(5):1093-1105.
- [17] TIAN Haiping, JIANG Nan, HUANG Yongxiang, et al. Study on local topology model of low/high streak structures in wall-bounded turbulence by tomographic time-resolved particle image velocimetry[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, English Edition, 2015, 36(9):1121-1130.
- [18] 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):111-139.
- XU Chunxiao. Coherent structures and drag reduction mechanism in wall turbulence[J]. *Advances in Mechanics*, 2015, 45(1):111-139 (in Chinese)
- [19] 杨歌, 许春晓, 崔桂香. 槽道湍流减阻次优控制方案研究[J]. *力学学报*, 2010, 42(5):818-829.
- YANG Ge, XU Chunxiao, CUI Guixiang. Study on suboptimal schemes for skin-friction reduction in turbulent channel flow[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(5):818-829. (in Chinese)
- [20] SKOTE M. Turbulent boundary layer flow subject to streamwise oscillation of spanwise wall-velocity[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(8):061703.
- [21] BEWLEY T R, MOIN P, TEMAM R. DNS-based predictive control of turbulence: an optimal target for feedback algorithms[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 447:179-225.
- [22] CHOI H, MOIN P, KIM J. Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 262:75-110.
- [23] HAMMOND E P, BEWLEY T R, MOIN P. Observed mechanisms for turbulence attenuation and enhancement in opposition-controlled wall-bounded flows[J]. *Physics of Fluids*, 1998, 10(9):2421-2423.
- [24] CATTAFESTA L N, SHEPLAK M. Actuators for active flow control[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, 43(1):247-272.
- [25] JACOBSON S A, REYNOLDS W C. Active control of streamwise vortices and streaks in boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 360:179-211.
- [26] RATHNASINGHAM R. System identification and active control of a turbulent boundary layer[J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9(7):1867-1869.
- [27] CATTAFESTA L N, GARY S, SHUKLA D. Development of piezoelectric actuators for active flow control[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(8):1562-1568.
- [28] BAI Haili, ZHOU Yu. Active control of turbulent boundary layer using an array of piezo-ceramic actuators[J]. *Proceedings in Physics*, 2009, 132:201-204.
- [29] 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)
- [30] ZHENG Xiaobo, JIANG Nan, ZHANG Hao. 2016. Pre-terminated control of turbulent boundary layer with a piezoelectric oscillator[J]. *Chinese Physics: B*, 2016, 25(1):014703. 1-014703. 5.
- [31] PEI Jie, SHE Zhen-su, CHEN Jun, et al. Model for propagation speed in turbulent channel flows[J]. *Physical Review: E Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics*, 2012, 86(2):046307. 1-046307. 6.
- [32] BAI Jianxia, JIANG Nan, ZHENG Xiaobo, et al. Active control of wall-bounded turbulence for drag reduction with piezoelectric oscillators[J]. *Chinese Physics: B*, 2018, 27(7):074701. 1-074701. 7.
- [33] 王二丹, 田海平, 张静娴, 等. 超疏水壁面湍流边界层减阻机理的 TRIV 实验[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(12):2870-2877.
- WANG Erdan, TIAN Haiping, ZHANG Jingxian, et al. TRIV experimental of drag-reduction mechanism in turbulent boundary layer over superhydrophobic surfaces[J].

Journal of Aerospace Power,2016,31(12):2870-2877. (in Chinese)

[34] 常跃峰,姜楠. 沟槽壁湍流多尺度相干结构实验研究[J]. 航空动力学报,2008,23(5):788-795.

CHANG Yuefeng,JIANG Nan. Experimental study on coherent structure passive control and drag reduction in turbulent boundary layer in the grooved surface[J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(5):788-795. (in Chinese)

[35] 姜楠,于培宁,管新蕾. 湍流边界层相干结构空间拓扑形态的层析 TRPIV 测量[J]. 航空动力学报,2012,27(5):1113-1121.

JIANG Nan, YU Peining, GUAN Xinlei. Tomo-TRPIV measurement coherent structure spatial topology in turbulent boundary layer [J]. Journal of Aerospace Power, 2012,27(5):1113-1121. (in Chinese)

(编辑:王碧琰)