

槽道湍流展向振荡电磁力减阻的机理研究

梅栋杰 范宝春¹⁾ 陈耀慧 叶经方

(南京理工大学瞬态物理重点实验室, 南京 210094)

摘要 对槽道湍流的展向振荡电磁力控制进行了实验和数值研究. 实验通过 PIV 系统和浮动床阻力测试系统记录近壁区的条带变化和壁面阻力变化. 计算时, 利用谱方法直接模拟电磁力控制下的近壁流场. 实验和计算结果定性一致, 皆表明展向振荡电磁力可以减少壁面阻力, 并使条带倾斜. 计算结果还进一步揭示了电磁力减阻的机理. 电磁力诱导产生的流向涡与壁湍流的相互作用, 在近壁处形成负的脉动展向涡, 该涡将导致流向涡的倾斜和振荡, 从而抑制湍流, 减少壁面阻力.

关键词 展向振荡电磁力, 槽道湍流, 减阻机理, 数值模拟

中图分类号: O357.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)04-0653-07

引 言

对流动进行控制, 可以减少运动物体所受的阻力和抑制流场诱导的振动, 在工程应用方面, 是非常有价值的. 流场控制技术有很多种^[1-3], 其中, 电磁力控制比较容易实现, 其灵活性也非常强. 可以通过改变电极和磁条的排布方式, 产生不同方向的电磁力, 还可以通过改变电极上的通电方式, 产生振荡、行波等多种形式的电磁力. 因此, 流动的电磁力控制研究受到了特别的关注^[4-8].

Henoch 等^[9], Crawford 等^[10] 和 Nosenchuck 等^[11] 的实验和数值研究表明, 用电磁力控制流动时, 流向电磁力和法向电磁力没有明显的减阻效果. Pang 等^[12], Breuer 等^[13] 对展向振荡电磁力的减阻进行了实验研究, 讨论了减阻效果与电磁力的强度及振荡周期的关系, 此后, Berger 等^[14], Lee 等^[15], Du 等^[16] 和 Satake 等^[17] 通过数值模拟对实验进行了验证. 参照振动板减阻, 人们引进等价壁面展向速度, 以描述电磁力的强度 St 及振荡周期 T 对减阻的影响, 即 $W = \frac{St \cdot T}{2Re_T \pi}$. 结果表明, 当 W 约为 10 时, 减阻效果可达 40%. 梅栋杰等^[18-19] 也对展向振荡电磁力的减阻进行过实验和数值研究, 取得了和上述研究较为一致的结果.

本文通过实验和计算, 进一步对槽道湍流的展向振荡电磁力减阻及其机理进行研究. 实验中, 利用

PIV 记录电磁力作用下, 近壁区条带结构的变化, 并通过浮动床表面阻力测试系统, 记录壁面阻力的变化. 同时, 通过数值模拟, 讨论了电磁力控制下, 近壁区展向涡量、涡结构和条带的变化, 以及流场统计量的变化, 揭示了展向振荡电磁力减阻的机理. 数值模拟结果与实验结果定性相符.

1 实验方法

图 1 为平板电磁板结构示意图和实物照片. 磁条和电极以交替方式排列, S 和 N 分别表示磁条的南极和北极, + 和 - 分别表示电极的正极和负极. 在弱电解质溶液, 该电磁板可以产生与板平行的电磁力, 如图 1(a) 所示. 由于低速条带的长度大约在 400~1000 个壁面单位, 间距大约 100 个壁面单位, 故该电磁板设计尺寸为长 305 mm, 宽 190 mm, 大致可影响 10 条低速条带. 电极和磁极宽度会影响电磁力在法向的渗透深度^[12-13], 考虑到浮动床和水洞观察段的尺寸, 将电极 (或磁极) 的宽度设计为 6 mm, 其实物照片如图 1 (b) 所示. 同极电极用绝缘的电线连接, 可避免短路并避免热量损耗. 将正负两极接入可产生周期性变化的直流电源, 通电后便产生随时间变化的振荡电磁力.

实验水洞如图 2 所示, 充满浓度为 3% 的盐水, 观测段中心流速设定为 $U_c = 0.057$ m/s. 直流电源的电压为 12.9 V, 电源控制器的振荡频率为 0.9 Hz, 此

2010-05-13 收到第 1 稿, 2010-12-31 收到修改稿.

1) E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn

时等价壁面展向速度 W 约为 11.

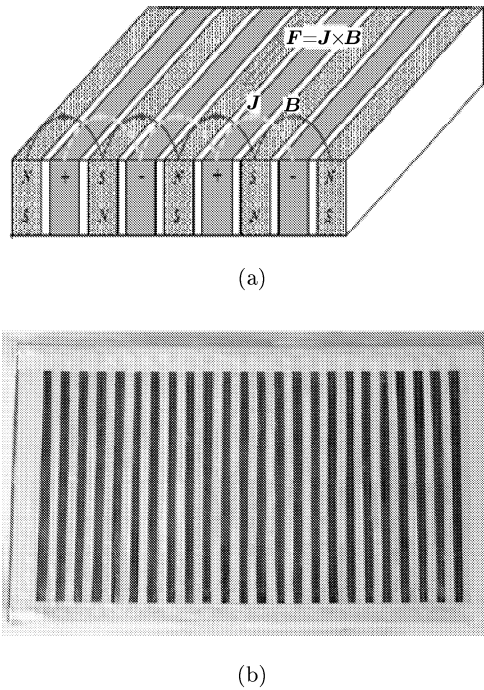


图 1 平板电磁板

Fig.1 Flat plate equipped with electro-magnetic actuator

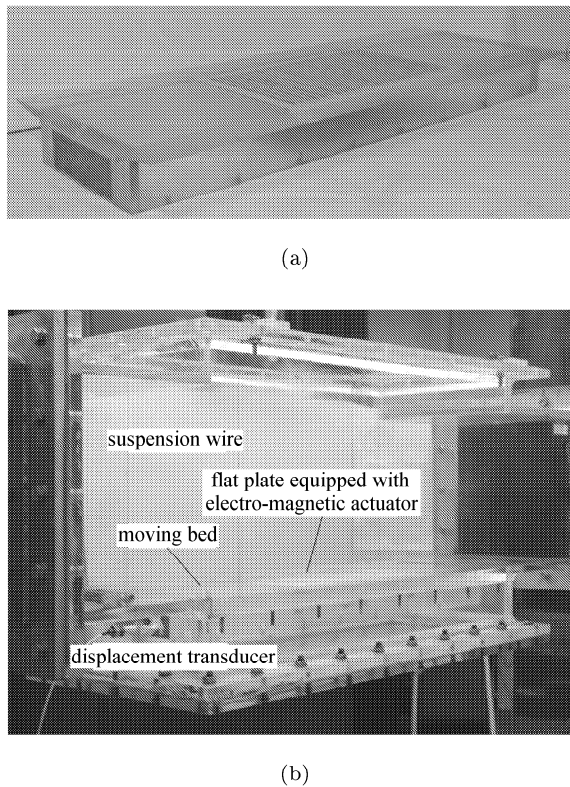


图 2 水洞观察段

Fig.2 Observation section of water tunnel

为测试壁面阻力,专门设计了应力测试移动床. 实验时,将电磁板光滑的嵌在移动床上,如图 2(a)所示. 再将该移动床水平悬挂于水洞观测段,使其表面与水洞底壁处于同一水平面,两者之间应具有很好的契合度,如图 2(b)所示. 在壁面剪应力作用下,移动床在流向位移,该位移可通过位移传感器来测量,其位移量与壁面剪应力的大小有关.

利用 PIV 系统,记录近壁区域的条带结构. CCD 摄像头安装在水洞观察段上方,双脉冲 YAG 激光片光放置在水洞观察段侧面,激光片光的位置设定在靠近浮动床壁面处. PIV 控制器使脉冲激光和 CCD 摄像头同步运行. 选用高岭土为示踪粒子,利用 CCD 摄像头捕捉激光片光层的流动影像,所获得的数据经过计算机处理后,便可得到近壁区域的条带结构.

2 数值模拟方法

数值模拟区域如图 3 所示,流向长度为 $4\pi/3$,展向长度为 $2\pi/3$,法向长度为 2,展向振荡电磁力施加在下壁面.

无量纲形式流动守恒方程形式为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

其中, $\mathbf{f} = (0, 0, f_z)$ 为单位质量的电磁力

$$f_z = Stc^{-y/\Delta} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

式中, St 是振荡电磁力的强度, T 是振荡电磁力的振荡周期, Δ 是振荡电磁力的渗透深度, Re 是雷诺数.

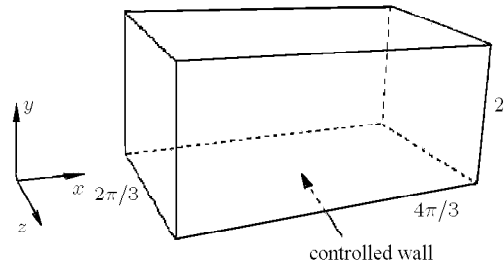


图 3 数值模拟区域示意图

Fig.3 Numerical simulation domain

对上述形式的流动守恒方程采用 Fourier-Chebyshev 谱方法离散^[20]. 流向和展向采用 Fourier 变换,采用均匀网格,网格数分别为 64 和 32,并采

用周期性边界条件. 法向采用 Chebyshev 变换, 采用非均匀网格, 近壁处最小 $\Delta y^+ = 0.2$, 中心处最大 $\Delta y^+ = 8.6$, 采用无滑移壁面条件. 方程 (1) 中的时间项, 采用三阶精度的半隐式后差分格式; 右边的线性项和压力项, 通过影响矩阵法和 Chebyshev-tau 方法联立求解, 用以消除残余散度; 还利用 3/2 规则, 消除非线性项的混淆误差.

数值模拟时间从 $t = 0$ 至 $t = 1000$, 当 $t = 200$ 时, 开始施加电磁力, 当 $t = 500$ 时, 开始对湍流量进行统计.

3 结果与讨论

3.1 电磁减阻

定义组合变量

$$W = StT / (2\pi Re_\tau) \quad (3)$$

称为等价壁面展向速度, 用以反映电磁力强度和振荡周期对近壁流场的影响. 图 4 是基于计算绘制的不同 W 的振荡电磁力作用下, 壁面平均阻力随时间的变化图. 由该图可以看出, 适当大小的 W 对湍流进行控制, 可使壁面阻力下降.

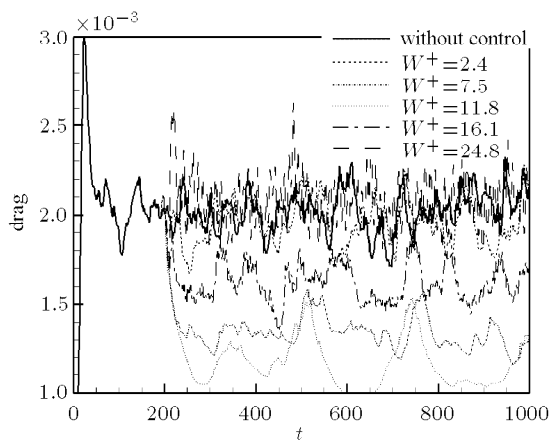


图 4 壁面平均阻力随时间的变化

Fig.4 Variations of mean skin fraction with time based calculations

定义减阻率

$$Dr = (1 - \langle \tau_w \rangle / \langle \tau_{wn} \rangle) \times 100\% \quad (4)$$

式中 $\langle \tau_w \rangle$ 表示施加控制情况下, 壁面摩擦应力的平均值, $\langle \tau_{wn} \rangle$ 表示未控制情况下壁面摩擦应力的平均值.

表 1 为减阻率随 W 的变化, 从中可以看出, 减阻率随 W 的增大先增大后减小, 在 $W = 11.8$ 达到

最佳减阻效果, 此结果和 Berger^[14] 的数值模拟结果以及 Pang^[12] 的实验结果是一致的. 梅栋杰等^[18] 曾通过数值计算, 对此进行过详细分析, 认为 W 的变化导致湍流猝发事件的频率与强度的变化, 但两者的变化趋势不同, 而壁面的阻力与湍流猝发事件的频率与强度成正比, 故存在最佳 W , 其减阻效果最好.

表 1 不同 W 对应的减阻率

Table 1 Drag reduction effect corresponding to different parameters W

W	2.4	7.5	11.8	16.1	24.8
$Dr / \%$	0.15	33	43	16	-4

实验时, 电磁板的等价壁面展向速度设计为 11 左右. 图 5 为电磁力作用下, 阻力变化的实测结果, $t = 20s$ 开始施加电磁力. 该图已将位移传感器上的电压变化量折算成减阻率. 由图可见, 展向振荡电磁力使壁面阻力降低, 平均减阻率约 8%, 低于数值模拟的结果.

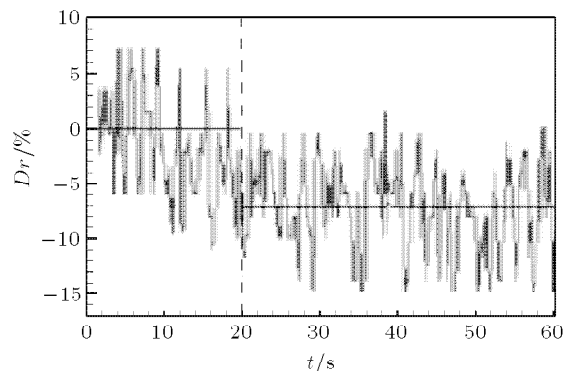


图 5 壁面阻力变化的实验结果

Fig.5 Variations of skin fraction from experiment

4.2 减阻机理

作用于近壁流场的展向振荡电磁力, 产生诱导流向涡, 这对壁湍流具有调制作用. 与振荡壁面控制壁湍流的机理^[21] 相仿, 诱导流向涡与壁湍流的相互作用, 使流场中产生附加的展向脉动涡.

图 6 是近壁区域展向涡瞬时分布的计算结果, 图中黑色代表负展向涡 $w_z < 0$, 白色代表正展向涡 $w_z > 0$. 由图可见, 未施加控制时, 近壁区域的正负展向涡交替出现, 其出现的概率相仿; 施加控制后, 负展向涡的出现概率明显大于正展向涡, 即生成了附加的负展向涡.

近壁区出现的负展向涡会改变边界层的平均速度剖面. 图 7 是由计算结果绘制的流向平均速度剖

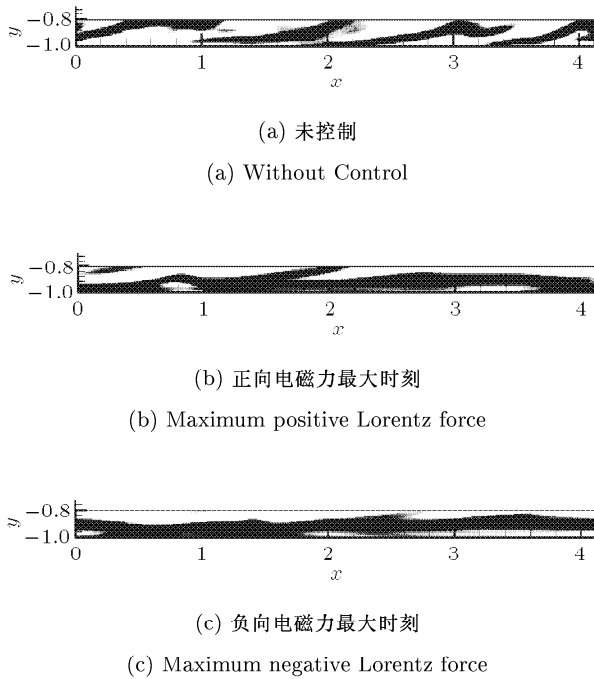


图 6 展向涡瞬时分布的数值模拟结果 ($z^+ = 180$)
 Fig.6 Instantaneous distribution of spanwise vortex from numerical simulation ($z^+ = 180$)

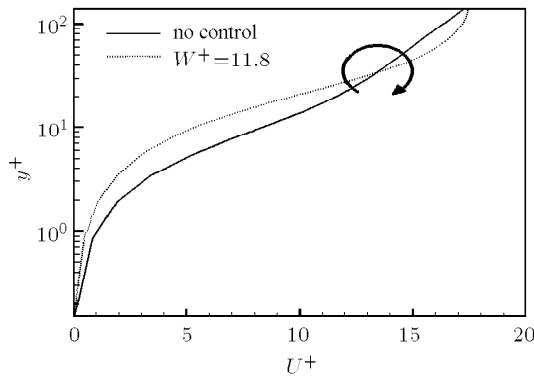


图 7 计算流向平均速度剖面
 Fig.7 Profiles of the streamwise mean velocity from numerical simulation

面, 图中实线为未控制, 虚线为电磁控制. 带箭头的圆圈表示展向振荡电磁力诱导产生的负平均展向涡, 它使靠近壁面一侧的平均流向速度梯度减小, 远离壁面一侧的平均流向速度梯度增大. 这种变化表明, 壁面阻力因负展向涡的生成而减小, 这与 Choi 提出的负展向涡理论^[22]是一致的.

从另一个角度讲, 负脉动展向涡的出现, 会使特征的流向涡倾斜, 进而导致条带倾斜, 其倾斜角随负展向涡的大小, 以及与此相关的电磁力的振荡而振荡^[21]. 图 8 为近壁区流向涡分布的计算结果,

灰色表示涡结构. 可以看出, 正向电磁力最大时, 流向涡明显向上方倾斜; 负向电磁力最大时, 流向涡明显向下方倾斜. 图 9 是条带分布的计算结果, 不同的灰度表示不同的速度, 浅色表示高速条带, 深色表示低速条带. 同样可以看出, 正向电磁力强度最大时, 条带明显向图上方倾斜; 而负向电磁力最大时, 条带明显向图下方倾斜.

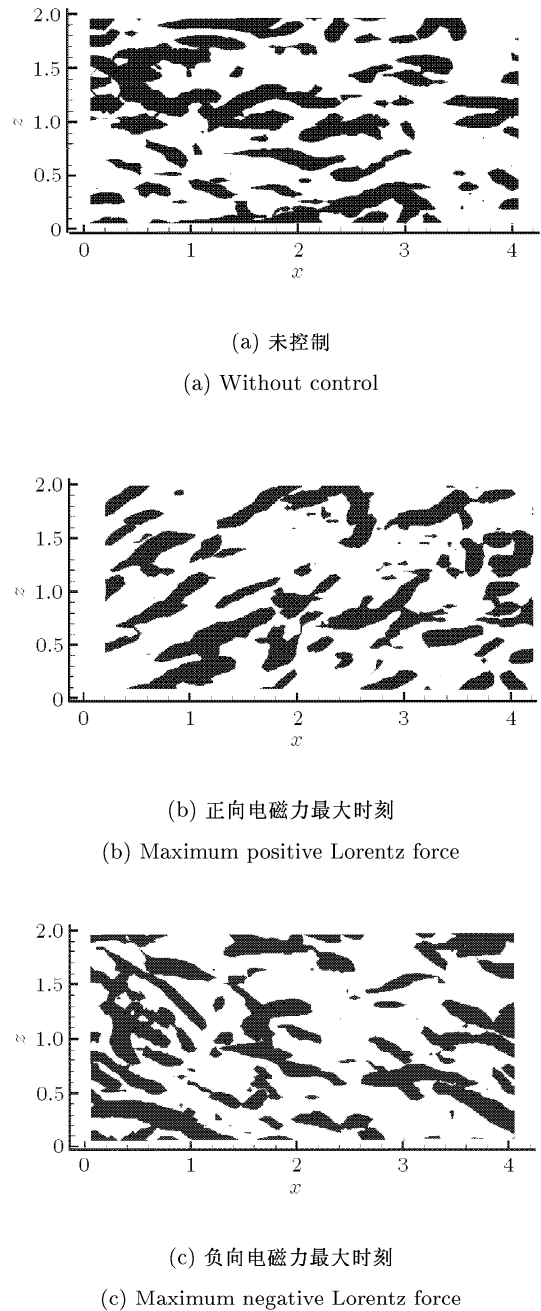
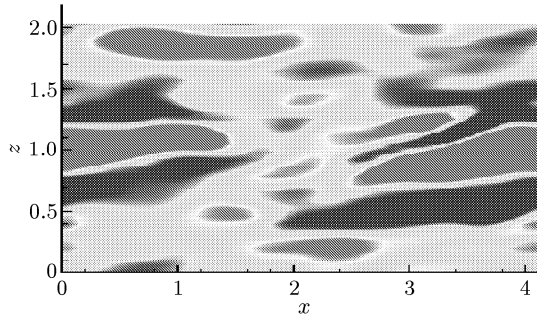
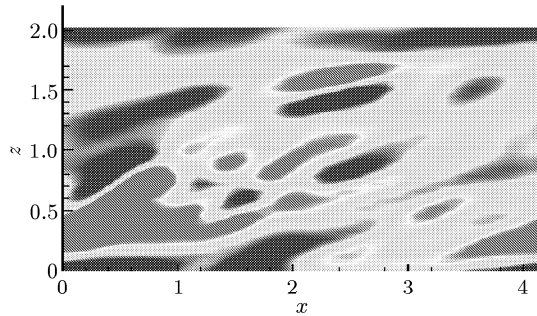


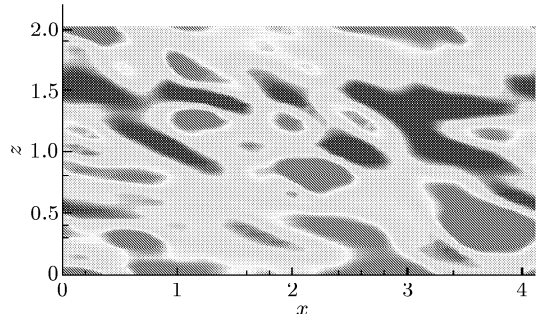
图 8 近壁区域涡结构分布的数值模拟结果 ($0 < y^+ < 40$)
 Fig.8 Distributions of the vortex structures near the wall based calculation ($0 < y^+ < 40$)



(a) 未控制
(a) Without Control



(b) 正向电磁力最大时刻
(b) Maximum positive Lorentz force



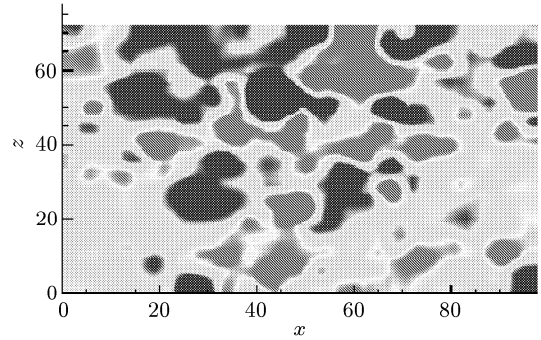
(c) 负向电磁力最大时刻
(c) Maximum negative Lorentz force

图 9 近壁区域条带分布的数值模拟结果 ($y^+ = 10$)
Fig.9 Distributions of the streak structures near the wall based calculation ($y^+ = 10$)

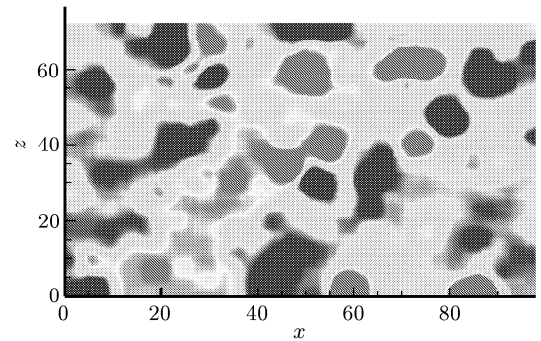
图 10 是 PIV 系统测得的近壁区的条带图，浅色表示高速条带，深色表示低速条带。由图可见，实验结果和计算结果一致，条带出现倾斜和振荡。

流向涡 (或条带) 的倾斜不利于湍流猝发事件的发生，使湍流强度减弱。图 11 是速度均方根剖面的计算结果。由图可见，施加控制后，流向和法向速度均方根皆减弱，且流向速度均方根的峰值明显外

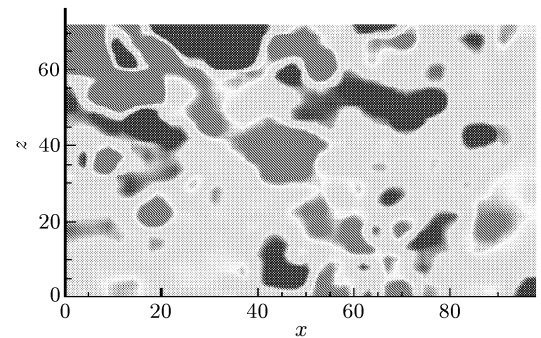
移，但展向速度均方根由于受到展向电磁力的诱导而出现较大的值。



(a) 未控制
(a) Without control

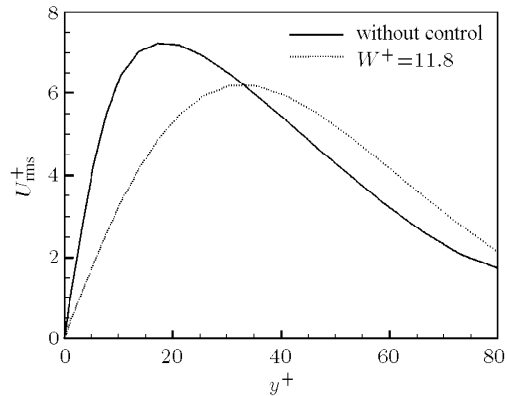


(b) 正向电磁力最大时刻
(b) Maximum positive Lorentz force

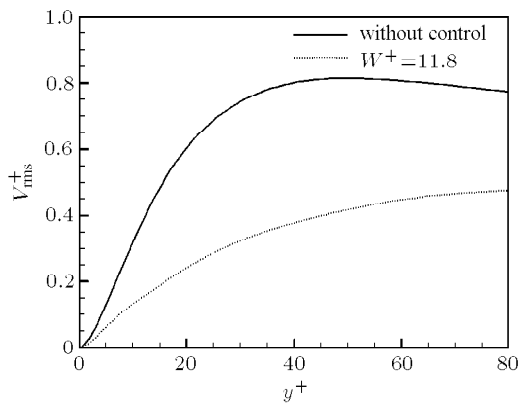


(c) 负向电磁力最大时刻
(c) Maximum negative Lorentz force

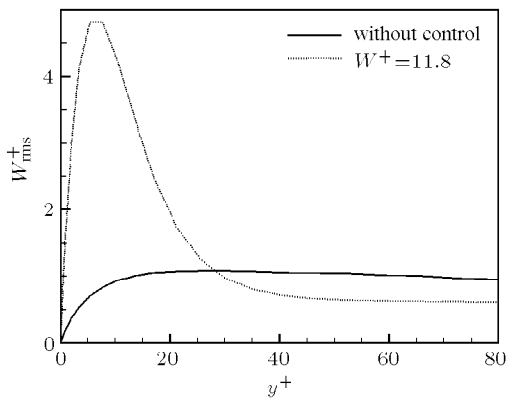
图 10 近壁区域条带分布的实验结果 ($y^+ = 10$)
Fig.10 Distributions of the streak structures near the wall from experiment ($y^+ = 10$)



(a) 流向
(a) Streamwise



(b) 法向
(b) Wall-normal



(c) 展向
(c) Spanwise

图 11 速度均方根剖面的数值模拟结果

Fig.11 Root-mean square of velocity

4 结 论

对槽道湍流展向振荡电磁力控制进行了数值模拟,发现减阻率随 W 的增大先增大后减小,在 $W =$

11.8 时取极值. 选取 $W = 11.8$ 为参数进行了实验研究,观察了施加电磁力前后浮动床的位移变化,结果证明展向振荡电磁力确实能够减小壁面阻力. 根据实验和数值模拟结果,进一步研究了电磁力对近壁区域条带、流向涡以及展向涡的影响,结果表明展向振荡电磁力作用下,在近壁区域产生负的展向涡,从而导致拟序结构的倾斜和振荡,和边界层速度剖面的变形,最终使壁面阻力减小.

参 考 文 献

- Xu J, Dong SC, Martin R, et al. Turbulent drag reduction by constant near-wall forcing. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 582(7): 79-101
- Park H, Lee D, Jeon WP, et al. Drag reduction in flow over a two-dimensional bluff body with a blunt trailing edge using a new passive device. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 563(9): 389-414
- 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. *Journal of Turbulence*, 2006, 7(1): 1-17
- Chen YH, Fan BC, Chen ZH, et al. Influences of Lorentz force on the hydrofoil lift. *Acta Mechanica Sinica*, 2009, 25(5): 589-595
- 陈耀慧, 范宝春, 周本谋等. 翼型绕流的电磁力控制. *力学学报*, 2008, 40(1): 121-127 (Chen Yaohui, Fan Baochun, Zhou Benmou, et al. Electro-magnetic control of hydrofoil wake. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(1): 121-127 (in Chinese))
- 陈志华, 范宝春. 包覆电磁场激活板的圆柱尾迹的数值研究. *力学学报*, 2002, 34(6): 978-983 (Chen Zhihua, Fan Baochun. Numerical investigation on wake of cylinder covered with electro-magnetic actuator. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 34(6): 978-983 (in Chinese))
- 陈耀慧, 范宝春, 陈志华等. 翼型绕流电磁控制的实验和数值研究. *物理学报*, 2008, 57(2): 648-653 (Chen Yaohui, Fan Baochun, Chen Zhihua, et al. Experimental and numerical investigations on the electro-magnetic control of hydrofoil wake. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(2): 648-653 (in Chinese))
- Zhang H, Fan BC, Chen ZH. Optimal control of cylinder wake flow by electro-magnetic force based on adjoint flow field. *European Journal of Mechanics*, 2010, 29(1): 53-60
- Henoeh C, Stace J. Experimental investigation of a salt water turbulent boundary layer modified by an applied streamwise magnetohydrodynamic body force. *Physics of Fluids*, 1995, 7(6): 1371-1383
- Crawford CH, Kamiadakis GE. Reynolds stress analysis of EMHD-controlled wall turbulence, Part I streamwise forcing. *Physics of Fluids*, 1997, 9(3): 788-806
- Nosenchuck DM, Brown GL. Near-Wall Turbulent Flows. New York: Elsevier Science Publishers BV, 1993. 689-695

- 12 Pang J, Choi KS. Turbulent drag reduction by Lorentz force oscillation. *Physics of Fluids*, 2004, 16(5): 35-38
- 13 Breuer KS, Park J, Henoeh C. Actuation and control of turbulent channel flow using Lorentz force. *Physics of Fluids*, 2004, 16(4): 897-907
- 14 Berger TW, Kim J, Lee C, et al. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force. *Physics of Fluids*, 2000, 12(3): 631-649
- 15 Lee C, Kim J. Control of the viscous sublayer for drag reduction. *Physics of Fluids*, 2002, 14(7): 2523-2529
- 16 Du YQ, Symeonidis V, Karniadakis GE. Drag reduction in wall-bounded turbulence via a travelling wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 457: 1-34
- 17 Satake S, Kasagi N. Turbulence control with wall-adjacent thin layer damping spanwise velocity fluctuations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1996, 17(3): 343-352
- 18 梅栋杰, 范宝春, 黄乐萍等. 槽道湍流的展向振荡电磁力壁面减阻. *物理学报*, 2010, 59(10): 6786-6792 (Mei Dongjie, Fan Baochun, Huang Leping, et al. Drag reduction in turbulent channel flow utilizing spanwise oscillating Lorentz force. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 6786-6792 (in Chinese))
- 19 梅栋杰, 范宝春, 陈耀慧等. 槽道湍流展向振荡电磁力控制的实验研究. *物理学报*, 2010, 59(12): 8335-8342 (Mei Dongjie, Fan Baochun, Chen Yaohui, et al. Experimental investigation in turbulent channel flow utilizing spanwise oscillating Lorentz force. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8335-8342 (in Chinese))
- 20 Canuto C, Hussaini MY, Quarteroni A, et al. *Spectral Methods in Fluid Dynamics*. New York: Springer-Verlag, 1988. 201-212
- 21 黄乐萍, 范宝春, 董刚. 槽道湍流壁面展向周期振动减阻机理研究. *南京理工大学学报*, 2010, 34(3): 361-366 (Huang Leping, Fan Baochun, Dong Gang. Mechanism of drag reduction due to spanwise wall oscillation in turbulent channel flow. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2010, 34(3): 361-366 (in Chinese))
- 22 Choi KS. Near-wall structure of turbulent boundary layer with spanwise-wall oscillation. *Physics of Fluids*, 2002, 14(7): 2530-2542

(责任编辑: 刘俊丽)

MECHANISM OF DRAG REDUCTION BY SPANWISE OSCILLATING LORENTZ FORCE IN TURBULENT CHANNEL FLOW

Mei Dongjie Fan Baochun¹⁾ Chen Yaohui Ye Jingfang

(Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Numerical simulations and experiment research are both carried out to investigate the control of spanwise oscillating Lorentz forces on a turbulent channel flow. The variation of the streaks and the skin friction drag are obtained through the PIV system and the drag measurement system, respectively. The flow field in the near-wall region is shown through direct numerical simulations utilizing spectral method. The experiment results are consistent with the numerical simulation ones qualitatively, and both indicate that the streaks are tilted into the spanwise direction and the drag reduction utilizing spanwise oscillating Lorentz forces can be realized. The numerical simulation results reveal more details of the drag reduction mechanism which can be explained as the spanwise fluctuating vortices generated, from interaction between the induced longitudinal vortices and intrinsic turbulent flow in the near-wall region can make the longitudinal vortices tilted and oscillated to suppress the turbulent intensity and lead to drag reduction.

Key words spanwise oscillating Lorentz force, turbulent channel flow, mechanism of drag reduction, numerical simulation

Received 13 May 2010, revised 31 December 2010.

1) E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn