

槽道湍流展向振荡电磁力控制的实验研究

梅栋杰 范宝春[†] 陈耀慧 叶经方

(南京理工大学瞬态物理重点实验室, 南京 210094)

(2010 年 1 月 22 日收到; 2010 年 5 月 31 日收到修改稿)

对槽道湍流的展向振荡电磁力控制进行了实验研究, 讨论了展向振荡电磁力对宏观流场、近壁湍流结构以及壁面阻力的影响. 采用谱方法进行了数值模拟的对比. 数值模拟和实验结果均表明展向振荡电磁力能够使近壁区域的宏观流场产生周期性振荡, 并影响壁湍流的条带结构, 使其在展向上发生倾斜, 从而使壁面阻力减小.

关键词: 湍流, 展向振荡电磁力, 减阻, 近壁湍流结构

PACC: 0340G, 4762, 4765

1. 引 言

运输工具的运动由于受到阻力而消耗了大量的能量, 所以高效减阻是节约能源的重要方法. 边界层阻力是运输工具所受阻力的主要来源, 为达到减少边界层阻力的目的产生了各种各样的减阻方法和技术^[1-5].

使用电极和磁条组成的电磁板在弱电介质溶液中形成电磁力, 可以使边界层流动得到控制^[6-10]. 相对而言, 电磁力控制比振动壁面更容易实现, 并且电磁板的组装方式非常灵活, 可以实现多种控制策略, 因此壁湍流的电磁控制研究受到了特别的关注.

文献[11-14]对电磁板形成的流向电磁力和法向电磁力的减阻问题进行了实验和数值研究, 结果表明这两种湍流控制方法没有明显的减阻效果, 而文献[15-18]对平面电磁板形成的展向振荡电磁力的湍流控制问题进行了数值模拟, 结果证明展向振荡电磁力能够减少壁面阻力.

Pang 等^[19]对展向振荡电磁力的湍流控制问题进行了实验研究, 为方便和振动壁面的情况进行对比引入了等价壁面展向速度的概念, 即 $W^+ = \frac{St \cdot T^+}{2Re_\tau \pi}$, 结果表明当 W^+ 在 10—15 之间时能够达到 40% 的减阻效果. 文献[19]分析了展向速度尺度、

边界层速度剖面以及下扫事件频率, 认为展向振荡电磁力和振动壁面在减阻机理上存在很多相似之处. Breuer 等^[20]也进行了类似的实验研究, 他们采用了直接测量阻力的方法, 结果表明最高减阻率可达到 10%. 文献[20]指出, 只有振荡电磁力强度和流体惯性力相匹配时才能更有效地影响近壁湍流结构.

条带是壁湍流拟序结构的重要特征之一, 和壁面阻力的产生有很大联系, 条带结构的改变将会对壁面阻力产生影响. 基于这一事实, 本文对槽道湍流的展向振荡电磁力控制进行了实验研究, 讨论了展向振荡电磁力对宏观流场、近壁湍流结构以及壁面阻力的影响. 研究表明, 展向振荡电磁力能够使宏观流场产生周期性振荡, 使其在展向上产生速度, 进而影响壁湍流的条带结构, 使其在展向上发生倾斜, 最终使壁面阻力减小.

2. 工作原理

将长方形的磁条和电极按图 1 所示的方式交替排列组成平板型电磁板, 图中 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.

当磁条为永久磁铁时, 有麦克斯韦方程

$$\mathbf{B} = - \nabla\psi \quad (1)$$

和法拉第方程

[†] 通讯联系人. E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn

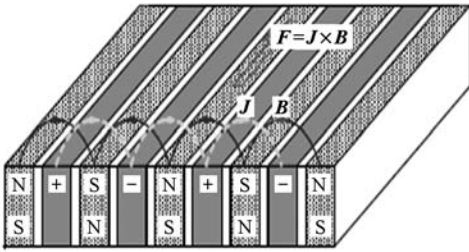


图1 平板型电磁板

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi, \quad (2)$$

其中 \mathbf{B} 为磁感应强度, \mathbf{E} 为电场强度. 上述方程皆可写成拉普拉斯方程, 即

$$\begin{aligned} \nabla^2\psi &= 0, \\ \nabla^2\varphi &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

从而可以通过数值方法求得电磁板的电场和磁场.

将电磁板置于电介质溶液中, 流体会受到洛伦兹力 \mathbf{F} 的作用. \mathbf{F} 满足

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (4)$$

其中 \mathbf{J} 为电流密度. \mathbf{J} 满足欧姆方程

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (5)$$

其中 σ 为流体电导率, $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ 表示电介质在磁场中运动产生的感应电流. 于是

$$\mathbf{F} = \sigma(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) + \sigma(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}. \quad (6)$$

(6)式中第一项表示电介质溶液在电磁场作用下的洛伦兹力, 第二项表示电介质溶液在磁场中运动产生感应电流而形成的洛伦兹力. 对于弱电介质溶液, 第二项可以忽略, 于是有

$$\mathbf{F} = \sigma(\mathbf{E} \times \mathbf{B}). \quad (7)$$

(7)式说明在弱电介质溶液中洛伦兹力场与流场无关, 可以直接通过电场和磁场获得, 即可以由方程(3)获得.

图2(a)和(b)分别为平板型电磁板的电场和磁场分布, 图中带箭头的曲线表示电力线或磁力线.

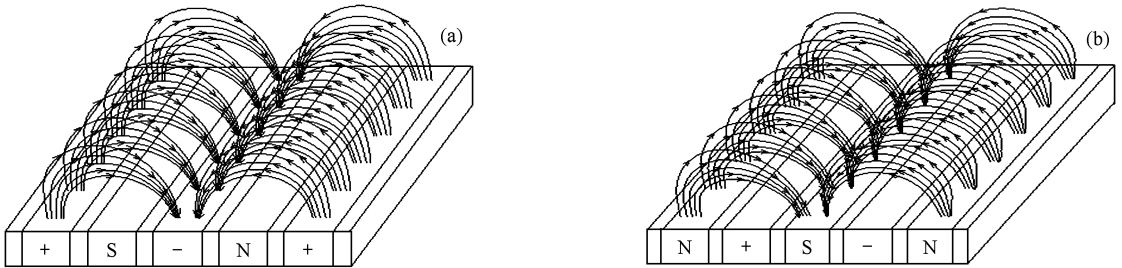


图2 电磁板表面的磁场和电场分布 (a)电场分布, (b)磁场分布

通过 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 可以计算得到弱电介质溶液中洛伦兹力的空间分布, 结果如图3所示. 从图3可以看出, 洛伦兹力在壁面处最大, 沿法向呈指数衰减, 其方向皆平行于磁条(或电极).

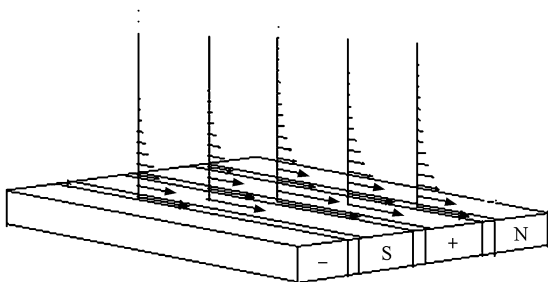


图3 电磁板表面的洛伦兹力分布

照片如图4所示, 其长度为305 mm, 宽度为190 mm, 电极和磁极的宽度皆为6 mm, 永久磁铁的磁感应强度为1 T. 将电极通过控制器接入直流电源会产生周期性变化的电流, 从而产生振荡电磁力.

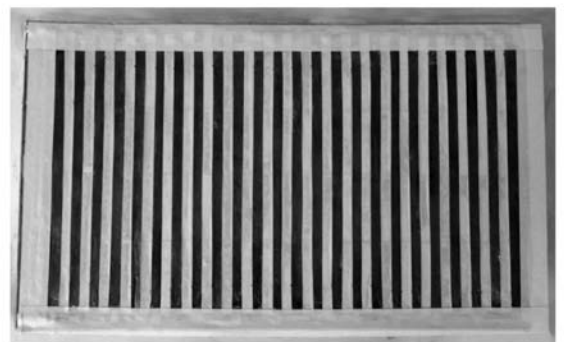


图4 平板型电磁板实物照片

本文根据上述原理制成的平板型电磁板实物

3. 实验系统

本实验所用的水洞结构如图 5 所示. 水泵将水箱的流体送到收缩段, 然后流经观测段, 再由回流扩散段回到水箱. 观测段长度为 1300 mm, 宽度为 300 mm, 高度为 290 mm, 由透明的有机玻璃制成, 可在其中进行流场观察和测量. 水洞中所用流体是浓度为 3% 的盐水, 水洞观测段中心流速 $U_c = 0.057$ m/s, 中心雷诺数 $Re = 8500$.

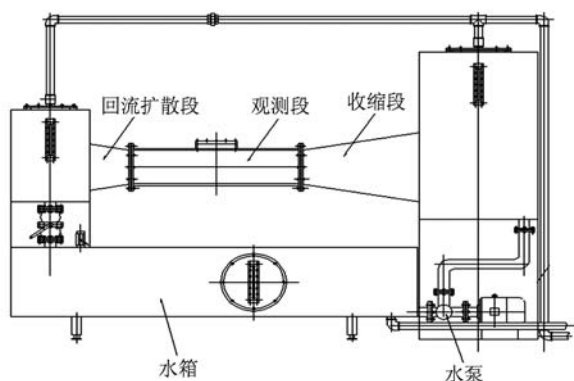


图 5 水洞结构

将电磁激励板以图 6(a) 的方式嵌入到测试阻力用的移动床上, 再将该移动床悬挂于水洞观测段, 使其表面与水洞观测段的底壁持平, 如图 6(b) 所示. 此时流体的流动方向与磁条垂直. 电极上的电压为 12.9 V, 振荡频率为 0.9 Hz, 通电后便可产生展向振荡电磁力.

移动床的长度为 730 mm, 宽度为 285 mm, 高度为 70 mm, 用来测试壁面的阻力. 在来流剪应力作用下移动床在流向自由移动, 其位移量与壁面剪应力的大小有关, 可以通过位移传感器上的电压改变来反映位移量的改变.

实验中采用如图 7 所示的粒子图像测试系统检测黏性子层的质点流动速度, 从而给出壁湍流的条带分布. 为了显示壁面流动的宏观流动特征而设计了染色线注入装置, 使其在电磁激励板上流向流场缓慢注入高锰酸钾, 从而清晰地给出流动的迹线.

为了验证实验结果的可靠性, 本文还将数值模拟结果与实验结果进行定性对比. 数值模拟采用谱方法^[21], 中心雷诺数 $Re = 8500$, 电磁力强度 $St = 500$, 振荡周期 $T^* = 9$ (即振荡频率为 0.9 Hz).

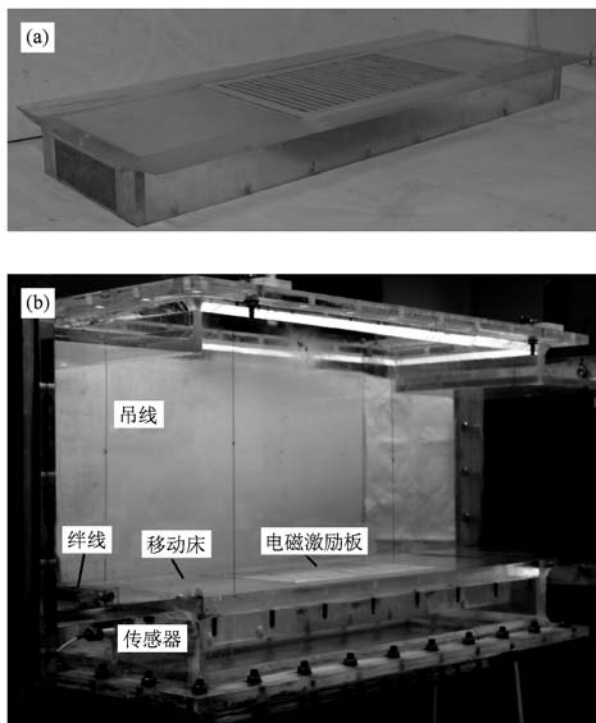


图 6 移动床和水洞观察段照片 (a) 嵌有电磁激励板的移动床, (b) 装有电磁激励板的水洞观测段

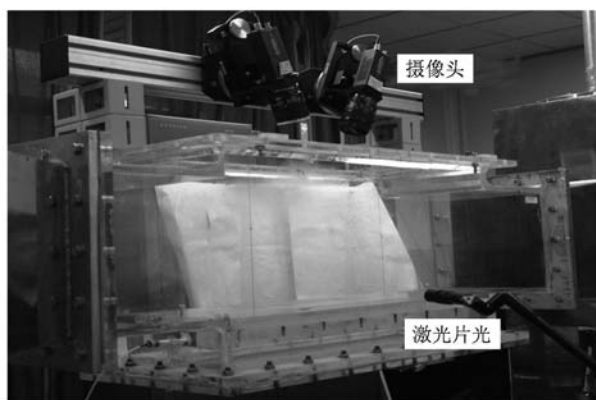


图 7 粒子图像测试系统照片

4. 结果及讨论

图 8 为展向振荡电磁力作用下流场染色迹线的实验图像, 其中图 8(a), (c) 和 (e) 对应的正向展向电磁力最大, 图 8(b) 和 (d) 对应的负向展向电磁力最大. 从图 8 可以看出, 正向电磁力最大时刻染色线明显向上方倾斜, 而负向电磁力最大时刻染色线向下方倾斜. 这说明在周期性展向振荡电磁力作用下流场也作相应的周期振荡. 图 9 是用示踪粒子表示

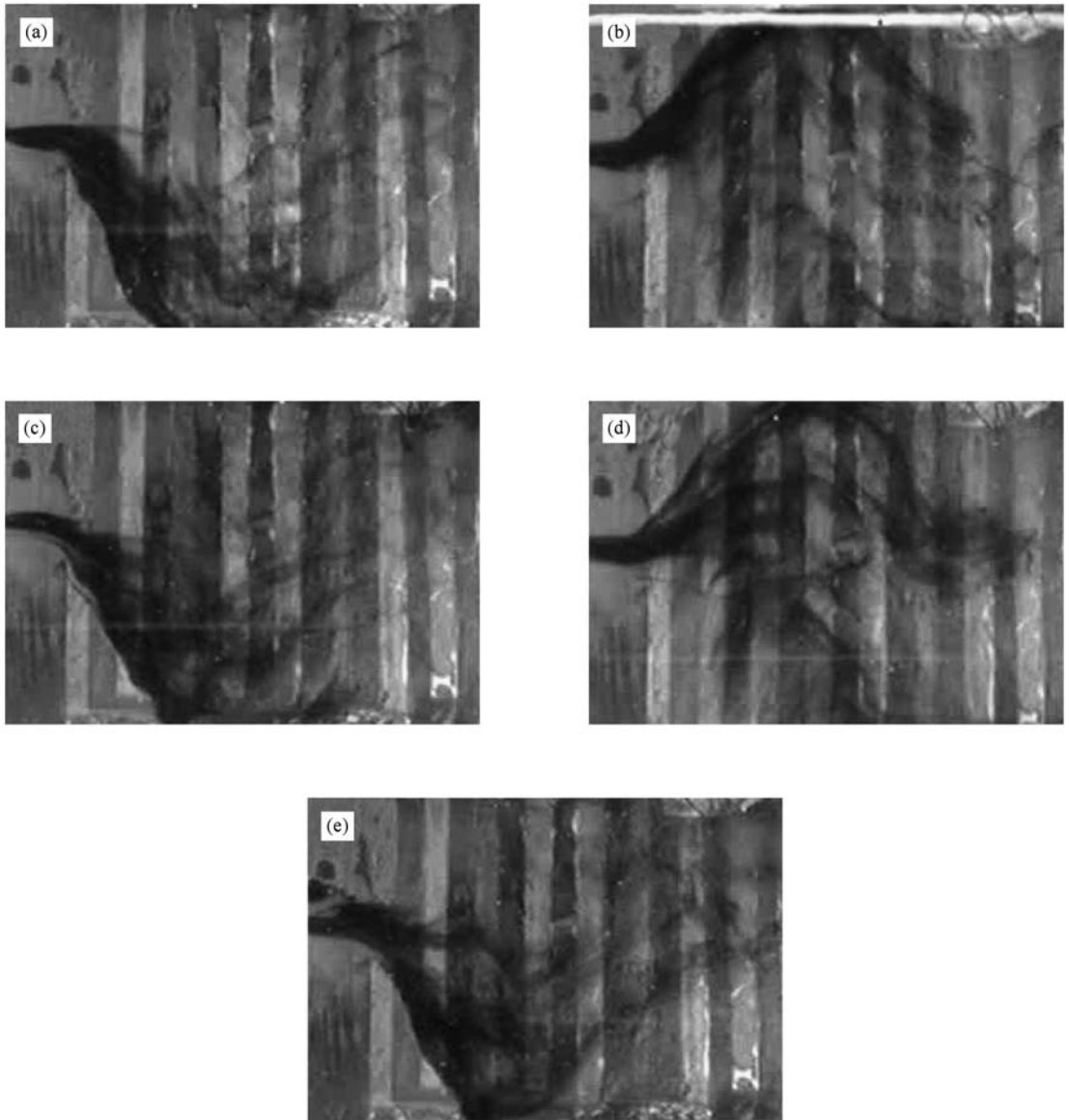


图 8 染色迹线分布的实验结果 (a) $t=T/4$, (b) $t=3T/4$, (c) $t=5T/4$, (d) $t=7T/4$, (e) $t=9T/4$

的流场染色迹线的数值计算结果,其中图 9(a),(c)和(e)对应正向电磁力最大,图 9(b)和(d)对应负向电磁力最大.图 9 所呈现的流场变化规律与图 8 的实验结果一致.

图 10 是通过粒子图像测试系统测得的近壁条带图,图中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.由图 10(a)可以看出,未加电磁力时近壁区域的高速条带和低速条带较为平直,且相间分布.施加展向振荡电磁力时条带出现周期振荡型的倾斜.图 10(b)中正向电磁力强度最大,条带明显向图上方倾斜,图 10(c)中负向电磁力最大,条带明显向下方倾斜.这说明展向振

荡电磁力能够影响近壁区域的湍流结构.图 11 为近壁区域条带分布的数值计算结果,该图呈现的规律和图 10 一致.

人们在研究壁湍流的展向振荡壁面控制时发现,壁面的展向振荡会导致条带倾斜,而条带倾斜又导致壁面阻力下降^[22].其原因可简单解释如下:条带倾斜可在流场中产生附加的负展向涡,这将导致平均流向速度的变化,如图 12 所示,图中虚线为静止壁面的剖面,实线为负展向涡影响下的变形剖面.由图 12 可知,负展向涡的出现会导致近壁区域平均流向速度梯度的减小和对数区的上移.因此近壁某处出现的附加负展向涡可以减小壁面阻力.为

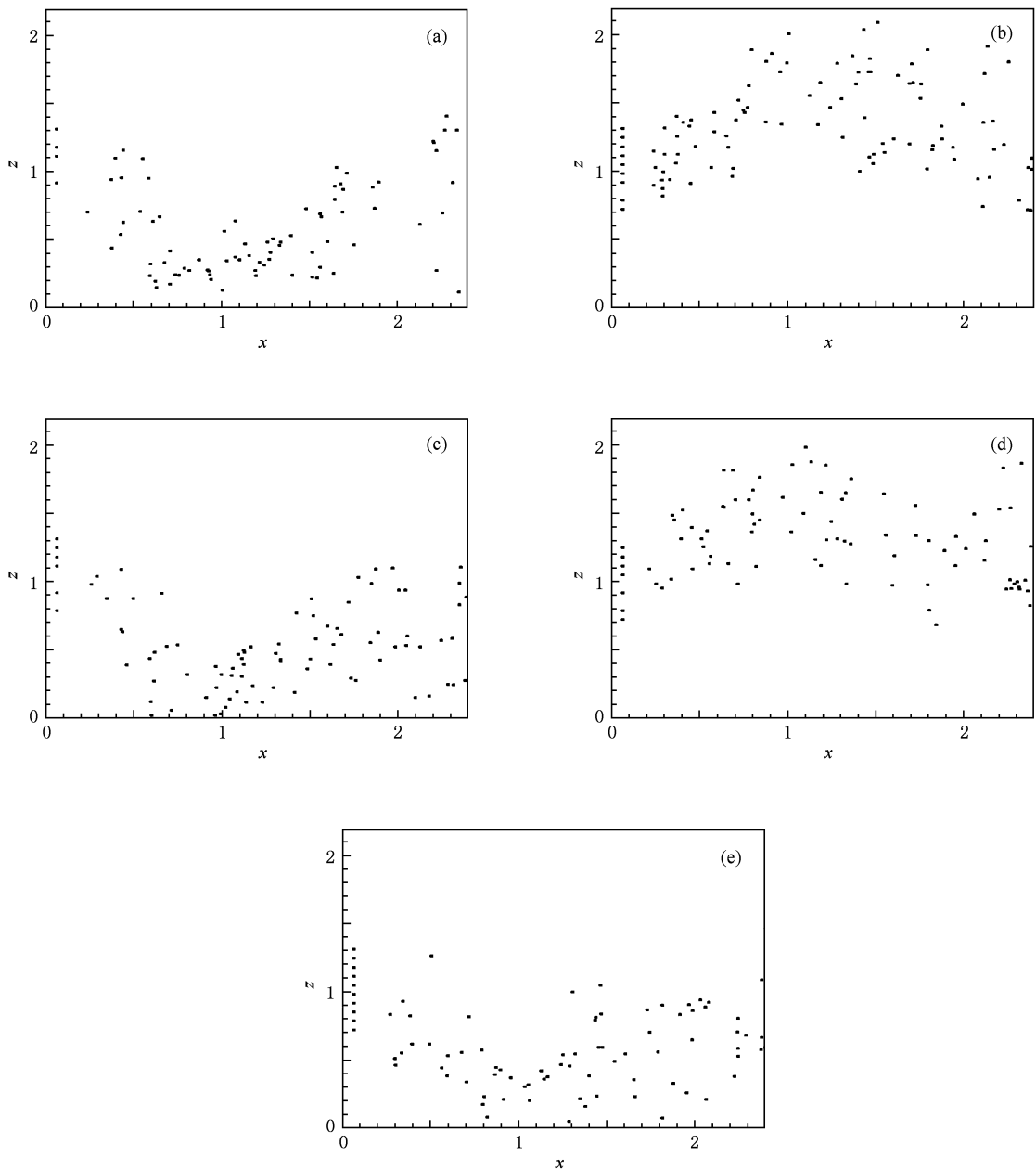


图9 示踪粒子表示的染色迹线分布的数值模拟结果 (a) $t=T/4$, (b) $t=3T/4$, (c) $t=5T/4$, (d) $t=7T/4$, (e) $t=9T/4$

统一描述层流转捩过程中各种湍流产生机制以及壁湍流的湍流猝发机制, Lee 等^[23] 引进三维非线性波的概念, 据此也可给出振荡减阻的机理, 即振荡会使三维非线性波偏离壁面, 从而使近壁流向速度减小, 进而导致壁面阻力减小。

与展向振荡壁面类似, 展向振荡电磁力也可使条带倾斜. 文献^[24] 曾对振荡电磁力的减阻进行过数值研究, 结果表明条带倾斜还可以有效抑制湍流猝发事件, 这也是壁面减阻的一种机理。

与展向振荡壁面类似, 展向振荡电磁力也可使

条带倾斜, 从而也具有减小壁面阻力的效果. 图 13 是位移传感器电压 U 随时间 t 变化的实验结果, 图中垂直虚线表示在 $t=20$ s 时开始施加展向振荡电磁力, 两条水平实线分别表示 $t=20$ s 前和 $t=20$ s 后位移传感器电压的平均值. 由图 13 可以看出, 施加展向振荡电磁力后位移传感器电压明显下降, 从而间接说明移动床表面所受阻力减小. 图 14 为壁面阻力随时间变化的计算结果, 图中垂直虚线表示在 $t=50$ 时开始施加展向振荡电磁力. 从图 14 同样可以看出壁面阻力的减小。

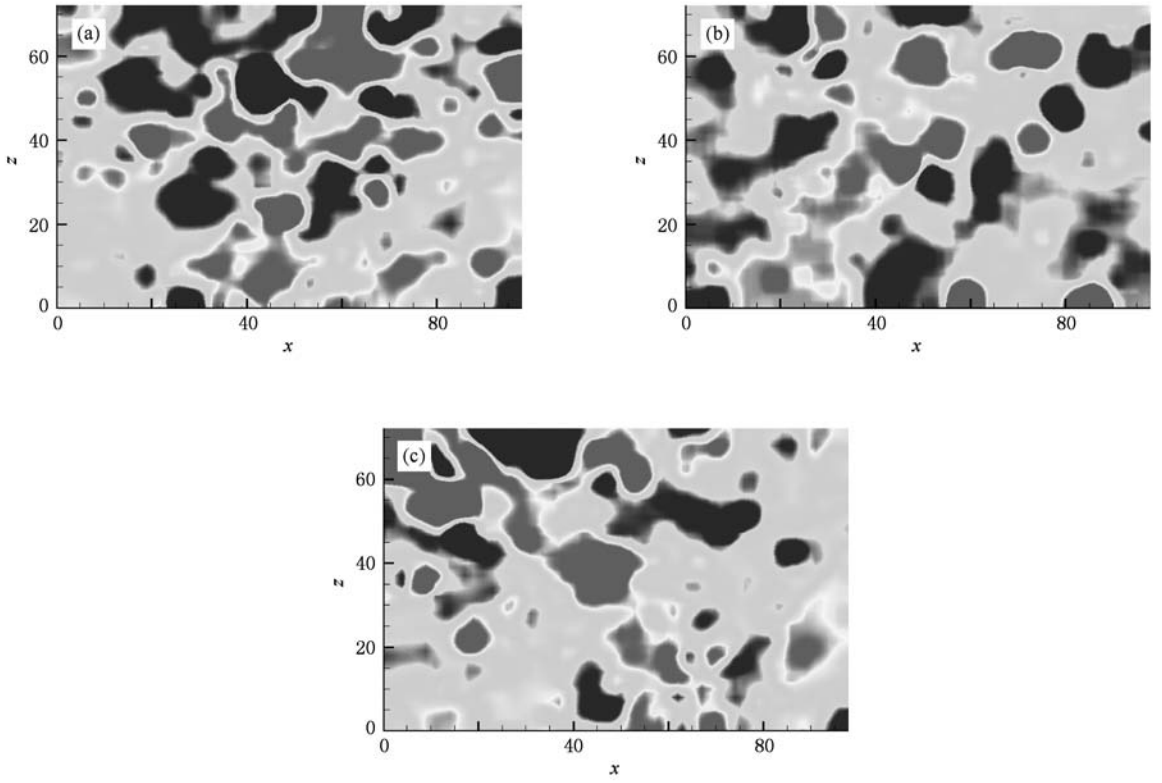


图 10 近壁区域条带分布的实验结果 (a) $t=0$, (b) $t=T/4$, (c) $t=3T/4$

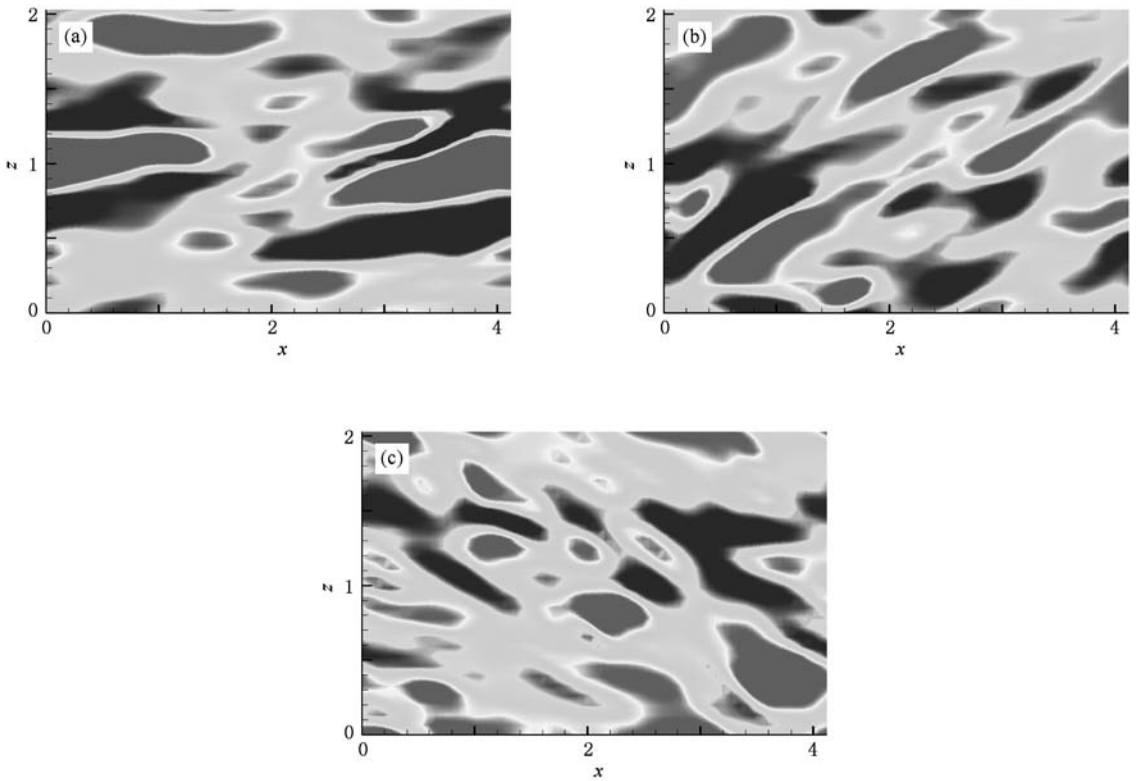


图 11 近壁区域条带分布的计算结果 (a) $t=0$, (b) $t=T/4$, (c) $t=3T/4$

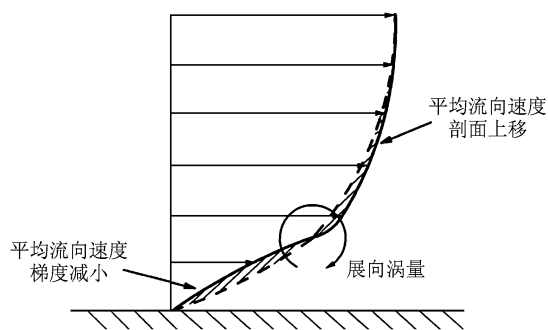


图 12 负展向涡对平均流向速度剖面的影响

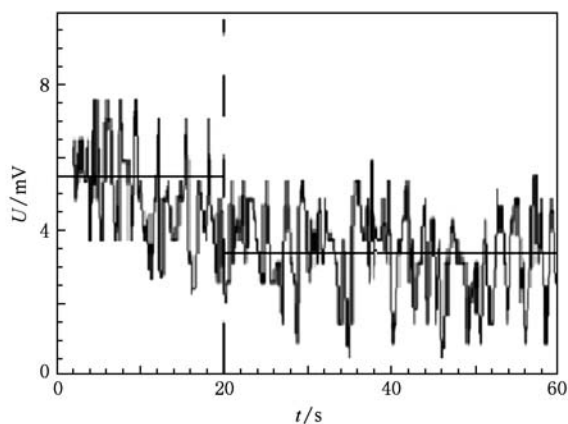


图 13 位移传感器电压随时间变化的实验结果

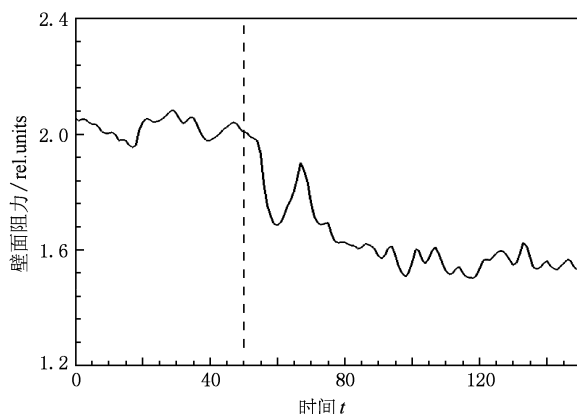


图 14 壁面阻力随时间变化的计算结果

试方法,对槽道湍流展向振荡电磁力控制进行了实验研究.为了验证实验结果的正确性,采用谱方法进行了数值模拟.通过在水中加入染色线反映了展向振荡电磁力对近壁区域固有流场的影响;通过粒子图像测速系统对近壁区域的流速进行了测量,反映了展向振荡电磁力对近壁区域湍流结构的影响;通过位移传感器测量浮动床的位移变化,反映了展向振荡电磁力对壁面阻力的影响.数值模拟取得了和实验一致的结果.实验和数值模拟结果表明,展向振荡电磁力能够使近壁区域固有流场发生周期性的振荡,进而使近壁区域的条带结构倾斜,最终导致壁面阻力的减小.

5. 结 论

利用染色线、粒子图像测速、位移传感器等测

- [1] Park H, Lee D, Jeon W P, Hahn S, Kim J, Kim J, Choi J, Choi H 2006 *J. Fluid Mech.* **563** 389
- [2] Itoh M, Tamano S, Yokota K, Taniguchi S 2006 *J. Turbulence* **7** 1
- [3] Li G, Li H M, Li Y M, Nie C Q, Xu Y J, Zhang Y, Zhu J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4026 (in Chinese) [李 钢、李汉明、李轶明、聂超群、徐燕骥、张 翼、朱俊强 2009 物理学报 **58** 4026]
- [4] Liu W D, Qiu X M, Sun A P, Tang D L, Zeng X J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 186 (in Chinese) [刘万东、邱孝明、孙爱萍、唐德礼、曾学军 2007 物理学报 **56** 186]
- [5] Gong B Z, Zhang B J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1504 (in Chinese) [龚博致、张秉坚 2009 物理学报 **58** 1504]
- [6] Chen Y H, Fan B C, Chen Z H, Zhou B M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 648 (in Chinese) [陈耀慧、范宝春、陈志华、周本谋 2008 物理学报 **57** 648]
- [7] Chen Z H, Fan B C, Zhou B M, Li H Z 2007 *Chin. Phys.* **16** 1077
- [8] Chen Y H, Fan B C, Chen Z H, Li H Z 2009 *Sci. China G* **52** 1364
- [9] Zhang H, Fan B C, Chen Z H 2009 *Fluid Dyn. Res.* **41** 045507
- [10] Zhang H, Fan B C, Chen Z H, Dong G, Zhou B M 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 2946
- [11] Henoch C, Stace J 1995 *Phys. Fluids* **7** 1371
- [12] Crawford C H, Karniadakis G E 1997 *Phys. Fluids* **9** 788
- [13] Nosenchuck D M, Brown G L 1993 *Near-Wall Turbulent Flows* (New York: Elsevier Science Publisher) p689
- [14] Bandyopadhyay P R, Castano J M 1996 *Proceedings of the Forum on Control of Transitional and Turbulent Flows, Fluids Engineering Division Conference* (San Diego: San Diego Publisher) p53
- [15] Berger T W, Kim J, Lee C, Lim J 2000 *Phys. Fluids* **12** 631

- [16] Lee C, Kim J 2002 *Phys. Fluids* **14** 2523 *Methods in Fluid Dynamics* (New York: Springer-Verlag) p201
- [17] Du Y Q, Symeonidis V, Karniadakis G E 2002 *J. Fluid Mech.* **457** 1 [22] Choi K S 2002 *Phys. Fluids* **14** 2530
- [18] Satake S, Kasagi N 1996 *Int. J. Heat Fluid Flow* **17** 343 [23] Lee C B, Wu J Z 2008 *Appl. Mech. Rev.* **61** 030802
- [19] Pang J, Choi K S 2004 *Phys. Fluids* **16** 35 [24] Mei D J, Fan B C, Huang L P, Dong G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6777 (in Chinese) [梅栋杰、范宝春、黄乐萍、董刚 2010 物理学报 **59** 6777]
- [20] Breuer K S, Park J, Henoch C 2004 *Phys. Fluids* **16** 897
- [21] Canuto C, Hussaini M Y, Quarteroni A, Zang T A 1988 *Spectral*

Experimental investigation on turbulent channel flow utilizing spanwise oscillating Lorentz force

Mei Dong-Jie Fan Bao-Chun[†] Chen Yao-Hui Ye Jing-Fang

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

(Received 22 January 2010; revised manuscript received 31 May 2010)

Abstract

Experimental investigation on the effect of using spanwise oscillating Lorentz force to control near-wall turbulence is presented in this paper. The effects of spanwise oscillating Lorentz force on macroscopic flow field, near-wall coherent structure and skin friction are discussed. Direct numerical simulation is carried out to verify the experimental results. The results from experiment and numerical simulation suggest that the spanwise oscillating Lorentz force can make the macroscopic flow field oscillating periodically, the streak structures are twisted into the spanwise direction and the skin friction is reduced.

Keywords: turbulence, spanwise oscillating Lorentz force, drag reduction, near-wall turbulent structure

PACC: 0340G, 4762, 4765

[†] Corresponding author. E-mail: befan@mail.njust.edu.cn