

文章编号: 1672-9897(2011)02-0068-05

槽道壁湍流的展向振荡电磁力减阻控制的 PIV 研究

陈耀慧, 范宝春, 梅栋杰

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

摘要:壁湍流主要表现为条带和流向涡为主要特征的拟序结构和间歇性的湍流猝发事件, 这些都会导致壁面阻力的增加, 因此, 为了实现减阻, 需控制或消除壁面附近的流向涡进而抑制湍流的猝发。在该研究中, 利用展向振荡电磁力对槽道湍流的近壁流向涡进行控制, 以达到减阻的目的; 并利用 PIV 测试系统对其进行了实验研究, 讨论了这种电磁力的减阻效果及其减阻机理。结果表明: 展向振荡电磁力具有减小壁面阻力的功能, 其减阻机理为展向振荡的电磁力可以使条带倾斜, 在流场中产生附加的负展向涡, 导致近壁区域平均流向速度梯度的减小, 因此, 壁面阻力减小。

关键词:电磁力; 近壁湍流结构; 流动控制; PIV

中图分类号: O361.5 **文献标识码:** A

PIV study of drag reduction in the near-wall turbulent channel flow under the control of spanwise oscillating Lorentz force

CHEN Yao-hui, FAN Bao-chun, MEI Dong-jie

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

Abstract: The feature of near-wall turbulence is showed by intermittent turbulent burst events and coherent structures whose main characteristics are streaks and streamwise vorticity. The intermittent turbulent burst events and coherent structures will lead to near-wall drag increase; therefore, in order to achieve the drag reduction, we need to control or eliminate the streamwise vorticity in the near-wall area, and then control the turbulent burst. In current studies, in order to achieve the drag reduction, we used the spanwise oscillating Lorentz force to control the streamwise vorticity in the near-wall region, used the PIV test system to carry out an experimental studies and discussed the drag reduction effects and mechanism of such kind of Lorentz force. The results show that the spanwise oscillating Lorentz force has the function of drag reduction, and the mechanism of drag reduction when applied spanwise oscillating Lorentz force is this type of Lorentz force which can make the streaks incline and generate the additional negative spanwise vortex in the flow field, and this will decrease the average streamwise velocity gradient in the near-wall region which lead to the drag reduction.

Key words: Lorentz force; near-wall turbulence structure; flow control; PIV

0 引言

壁湍流的拟序结构是以条带和流向涡为主要特征的, 由于条带和涡的运动, 会在壁湍流中产生猝发事件, 该事件将主流体的能量带至壁面, 使壁面阻力增加, 因此, 湍流猝发事件的频率与强度和壁面阻力大小有着密切的联系^[1-2]。大部分的减阻方法和技术的核心思想都是抑制或者反向控制近壁湍流的拟序结构^[3-6]。Du 等人^[7-8]证明了在电导质中使用展向振

荡电磁力能够有效的影响近壁湍流的拟序结构, 抑制涡结构的生成。Berger 等人^[9]通过直接数值模拟 (DNS) 证明了这种方法可以持续减小阻力, Pang 和 Choi^[10]定义了一个展向壁面等价速度 $W_w^+ = St T^+ / (2\pi Re_\tau)$, 当 $W_w^+ = 10 \sim 15$ 时, 表面摩擦力的减阻率达到 30%~40%。他们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 等人^[13]也进行了类似的实验研究, 他们采用了直接

收稿日期: 2010-05-20; 修订日期: 2010-08-27

基金项目: 南京理工大学自主科研专项计划资助项目 (2010GJPY089)

直接测量阻力的方法,结果表明最高减阻率可达到10%。Breuer 等认为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。

流态显示技术在流体力学实验研究工作中有广泛的应用,但是,与 PIV 技术相比则有明显的欠缺。在定常流动中,流态显示可以表现流线及旋涡的形态,但不能定量只能定性地给出结果,而 PIV 技术可以定量地给出结果。在非定常情况下,通常采用的染色线显示流态,只能在一定程度上显示涡线而不能显示流线,而 PIV 技术可以定量测出速度场及涡量场,据此可以给出涡量场随时间的变化。因此,利用 PIV 的测试方法,对槽道流中,近壁湍流的展向振荡电磁力减阻控制的机理进行了实验研究,并与谱方法^[11]的计算结果进行了相互验证。结果表明:展向振荡电磁力具有减小壁面阻力的功能,其减阻机理为展向振荡的电磁力可以使条带倾斜,在流场中产生附加的负展向涡,导致近壁区域平均流向速度梯度的减小,因此,壁面阻力减小。此外,在振荡电磁力作用下,条带出现倾斜振荡,然后逐渐演化为层流化的流场,此时条带结构明显淡化,达到一定程度后,条带又逐渐增强,再演化为倾斜振荡的条带。因此,即使在电磁力控制的情况下,阻力也是振荡的。

1 展向振荡电磁力激活板

电介质溶液在电磁场中受到电磁力的作用

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{F}$ 为电磁力, $\mathbf{B}$ 代表磁感应强度向量, $\mathbf{J}$ 为电流密度,满足欧姆(Ohm)方程

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

式中 σ 代表电导率, $\mathbf{E}$ 为电场的电场强度, $\mathbf{U}$ 为流体运动速度, $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$ 表示电介质在磁场中的运动产生的感应电流。于是

$$\mathbf{F} = \sigma(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) + \sigma(\mathbf{U} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \quad (3)$$

因此,电磁力可以分为两部分,一部分来自磁场(方程右端第二项),另一部分来自电场与磁场(方程右端第一项)。对于强电介质溶液,如液态金属、熔融半导体等,其电导率较高($\sigma \approx 10^6 \text{ S/m}$),磁场形成的电磁力就可以影响流体的流动,此时不需要外电场。对于弱电介质溶液,则同时需要外加的电场和磁场,此时方程右端第二项常可忽略,

$$\mathbf{F} = \sigma(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

将磁条和电极交替方式排列如图1所示,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,该板置于弱电解质溶液中,

以产生电磁力,根据公式(4),电磁力的方向由电场 $\mathbf{E}$ 和磁场 $\mathbf{B}$ 决定。图2为根据 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 计算得到的弱电介质溶液中电磁力的空间分布,显然,洛伦兹力在壁面处最大,沿壁面法向呈指数衰减,其方向皆平行于磁条(或电极)。

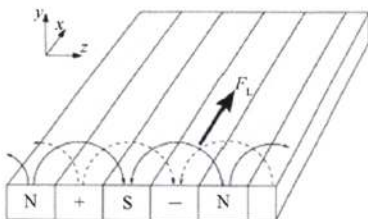


图1 磁极和电极交替方式排列的电磁激活板
Fig. 1 Electromagnetic actuator is assembled by magnetic pole and electrode alternately

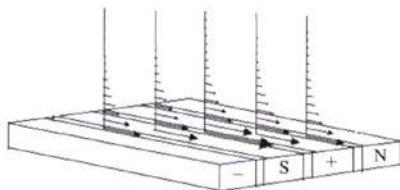


图2 电磁激励板形成的洛伦兹力
Fig. 2 Lorentz force is formed by electromagnetic actuator

图3是研究用电磁激活板实物照片,磁条的磁感应强度为 $B=0.78 \text{ T}$ 。设计过程中考虑了电磁板的尺寸、电极之间的距离、电路排布等问题。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305mm,宽190mm,大致可影响10条低速条带。电极和磁极宽度相同,其大小会影响电磁力在法向的渗透深度,此外,电极上为激活区域,电极之间为非激活区域,电极之间的距离应当尽量短,这样可以使低速条带更容易被下一个电极捕捉到,综合以上两点考虑,将电极(或磁极)的宽度设计为6mm。同极电极之间用绝缘电线连接,避免短路和产生热量。将正负两极的电线通过控制器接入直流电源,产生周期性变化的电场 $\mathbf{E}$,根据公式(4),可产生随时间变化的周期性振荡的电磁力。

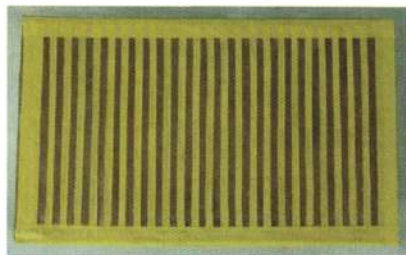


图3 电磁激活板实物照片
Fig. 3 The photo of electromagnetic actuator

2 实验系统

壁湍流的展向振荡电磁力的控制实验是在南京理工大学瞬态物理重点实验室的水洞中进行的,水洞由水泵、水箱、来流收缩段、实验观测段和回流扩散段组成,图4为水洞的实验观测段。实验观测段的截面积为 $290\text{mm}\times 300\text{mm}$,长 1300mm ,材料为透明的有机玻璃。实验使用的溶液是浓度为3%的盐水,溶液的密度 $\rho=1030\text{kg/m}^3$,电导率 $\sigma=10\text{S/m}$ 。通过水洞流速控制装置将观测段中心流速设定为 $U_c=0.057\text{m/s}$ 。电磁板的电极通过控制器接入直流电源,直流电源的电压设定为 12.9V ,控制器的振荡频率设定为 0.9Hz ,此时产生的展向振荡电磁力的等价壁面展向速度 W 约为11,与文献[10]研究的最佳减阻等价壁面速度相符, $W=\frac{St \cdot T}{2Re_r \pi}$,其中 Re_r 为中心雷诺数为8500, St 为电磁力强度 $St=500$, T 为振荡周期。



图4 带浮床的实验观测段
Fig. 4 The section of experimental observation which was equipped with floating-bed

在水洞观察段入口处,沿展向放置拌线,用于触发湍流。将图5所示的装有电磁激活板的浮床安装在图4所示的水洞观察段预留的凹槽中,并使来流的方向与磁条和电极垂直,以产生展向电磁力。浮床是用有机玻璃制作而成的,浮床的长和宽分别为 720mm 和 282mm ,浮床的上表面嵌入图3所示的电磁激活板。浮床的前面贴着不锈钢片,浮床的后面装有一定弹性系数的弹簧,用于阻止由于流体粘性产生的粘性阻力将浮床压到水洞观察段的壁面上,同时也可以提高浮床对粘性阻力改变的灵敏性。浮床的下部是一个封闭的空间,浮床的底部有进水孔,上部有出气孔,通过调节封闭空间中空气和水的比例,可以调整浮床的浮力,使其自身的重量和浮力达到平衡,从而提高其对外部粘性阻力改变所产生位移的灵敏度。利用悬挂线将浮床吊在水洞观察段中,通过调整悬挂线的长度调整浮床表面的水平度和高度,使其与水洞观察段底部相等。图4所示水洞观察段底部的

前方是位移传感器,通过配合浮床前部的不锈钢片,可以测量由于浮床的位移产生的电压差,从而反映出电磁控制下浮床的阻力变化。

3 PIV 测试系统

利用PIV,对壁湍流的展向振荡电磁力控制进行了实验研究。图6为PIV测试系统示意图,在水洞观察段上方放置FlowSense互自相关CCD摄像头作为图像记录系统,其最大分辨率为 $1600\text{像素}\times 1186\text{像素}$,侧面放置双脉冲YAG激光片光,片光与摄像头的位置是相互垂直的,并使其作用位置在 $5<y^+<15$ 内,激光器的工作频率为 15Hz ,可见光波长为 532nm ,每个脉冲能量为 120mJ ,脉冲宽度为 9ns 。通过PIV控制器使脉冲激光和CCD摄像头同步运行,并传输CCD摄像头获得的数据到计算机中。实验中图像采集区域的大小为 $80\text{mm}\times 60\text{mm}$,分辨率为最大分辨率。在图像处理中采用了互相关分析方法,分析时查询域大小为 $32\text{像素}\times 32\text{像素}$,PIV系统的控制和分析软件为Dantec公司的图像采集和后处理软件——FlowManager。

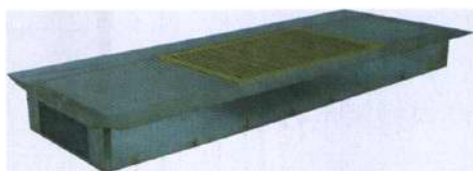


图5 装有电磁激活板的浮床
Fig. 5 The floating-bed which was equipped with electromagnetic actuator

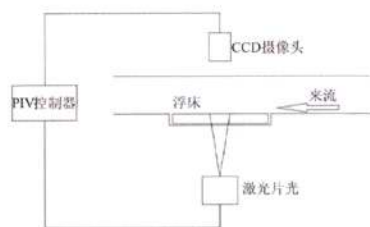


图6 PIV测试系统示意图
Fig. 6 Sketch of PIV test system

PIV技术在水洞中应用的关键是示踪粒子的大小和浓度,示踪粒子不能太多或太少,且应均匀分布在被测量的区域内。研究采用800目的高岭土作为示踪粒子,浓度大约为 $1024\text{像素}\times 1024\text{像素}$ (实际面积大约为 2.5mm^2)里有2~4个示踪粒子。

4 结果讨论

壁湍流主要表现为条带和流向涡为主要特征的拟序结构和间歇性的湍流猝发事件,这些都会导致壁

面阻力的增加。为了减阻,需控制流向涡,或是消除壁面附近的流向涡,或是抑制流向涡的抬升,将其稳定在壁面附近,以抑制湍流的猝发。研究利用展向振荡电磁力控制壁面附近的流向涡进而抑制湍流的触发,实现壁面的减阻。

利用上述的实验系统,研究振荡的展向电磁力对壁面流动的控制,研究其抑制湍流和减少阻力的功能。图7为等价壁面速度 W 约为11的振荡电磁力控制下,测试壁面阻力的位移传感器的电压变化曲线。0~20s为无控制时的输出电压,20~60s为振荡电磁力控制下的输出电压。由图可以看出,施加展向振荡电磁力后,电压明显下降,说明该电磁力确实具有减小壁面阻力的功能。

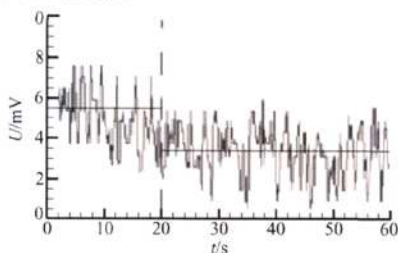


图7 壁面阻力变化的实验结果

Fig. 7 Experimental time histories of near-wall drag reduction

为进一步研究电磁力作用下流场结构的变化,笔者对壁湍流的近壁流场进行了PIV测试。图8为PIV测得的无控制情况下, $x-z$ 平面的近壁流向速度等位图($y^+=9$)。条带为脉动的速度场,图8中流体从左向右流动,红色的为流体高速流动形成条带,称为高速条带,而蓝色则对应为低速条带,二者相间分布,具有典型的壁湍流的条带结构特征。

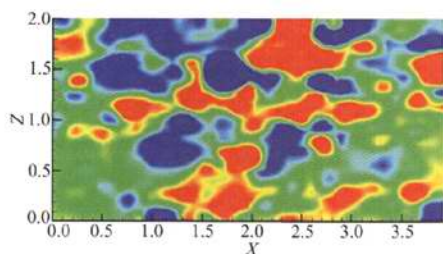
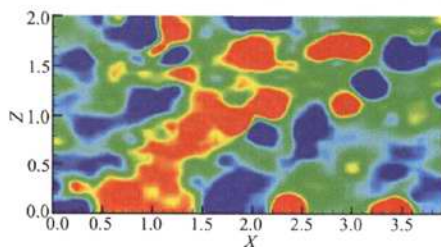


图8 无控制时,PIV测得的 $x-z$ 平面近壁流向速度等位图($y^+=9$)

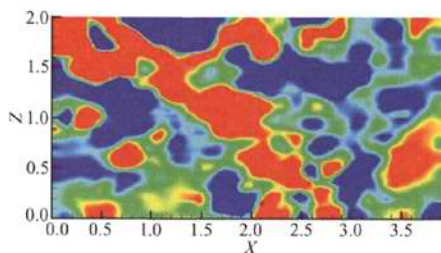
Fig. 8 Near-wall coordinatograph of streamwise velocity in $x-z$ plane is measured by PIV without Lorentz force control ($y^+=9$)

图9为振荡电磁力控制下, $x-z$ 平面的近壁流向速度等位图(y^+),其中(a)对应于正向电磁力最大,(b)对应与负向电磁力最大。由图可知,正向电磁力强度最大时,条带明显向上方倾斜,负向电磁力最大时,条带则明显向下倾斜。即在展向振荡的展向电磁

力作用下,条带出现了向上或向下倾斜的周期振荡。



(a) 正向电磁力最大



(b) 负向电磁力最大

图9 电磁力作用下,PIV测得的 $x-z$ 平面近壁流向速度等位图($y^+=9$)

Fig. 9 Near-wall coordinatograph of streamwise velocity in $x-z$ plane is measured by PIV under the Lorentz force control ($y^+=9$)

条带倾斜会导致壁面阻力下降^[12]。因为,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10所示。该图为数值计算结果,图中实线为静止壁面的流向平均速度剖面,虚线为负展向涡影响下,变形的流向平均速度剖面。由图可知,负展向涡的出现,导致近壁区域平均流向速度梯度的减小,这说明壁面阻力减小。

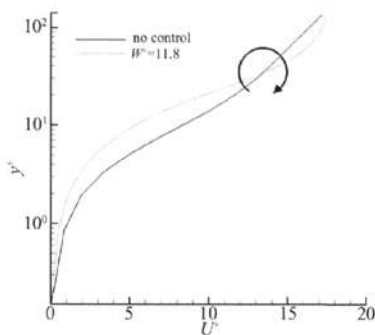


图10 流向平均速度剖面的数值模拟结果

Fig. 10 Numerical result of streamwise means velocity profiles

振荡的倾斜条带会逐渐使流向涡强度减弱,使壁湍流层流化,具体表现为条带间距逐渐变宽,强度逐渐减弱。图11为PIV的测试结果。由图可以看出,条带倾斜演变成的流场中,条带数量明显减少,间距变宽,条带结构也很模糊。壁湍流的层流化将使壁面阻力下降。

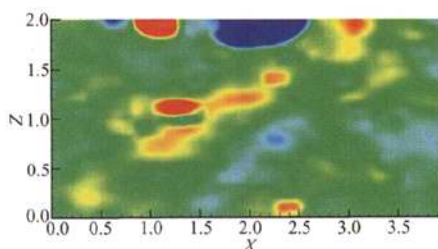


图 11 电磁力控制下的近壁区条带分布图(条带变宽变少变模糊)

Fig. 11 Near-wall streaks structure profile under the control of Lorentz force (streaks broaden, diminished and fogged)

实际上,在振荡电磁力作用下,条带出现倾斜振荡,然后逐渐演化为层流化的流场,此时条带结构明显淡化,达到一定程度后,条带又逐渐增强,再演化为倾斜振荡的条带。因此,控制后的流场是处于条带倾斜、减弱又形成倾斜条带的周期振荡状态。由于倾斜条带的减阻效果不及层流化状态,因此,即使在电磁力控制的情况下,阻力也是振荡的,如图 7 中的阻力测试曲线所示。

5 结 论

对槽道湍流的展向振荡电磁力减阻控制进行了 PIV 实验研究,讨论了展向振荡电磁力控制下湍流壁面阻力的变化情况,及其减阻的内部机理。研究结果表明:

(1) 展向振荡电磁力确实具有减小壁面阻力的功能;

(2) 展向振荡的电磁力可以使条带倾斜,导致壁面阻力下降,其机理可以解析为:条带倾斜可在流场中产生附加的负展向涡,导致近壁区域平均流向速度梯度的减小,这说明壁面阻力减小;

(3) 振荡电磁力作用下,条带出现倾斜振荡,然后逐渐演化为层流化的流场,此时条带结构明显淡化,达到一定程度后,条带又逐渐增强,再演化为倾斜振荡的条带。因此,控制后的流场是处于条带倾斜、减弱又形成倾斜条带的周期振荡状态。由于倾斜条带的减阻效果不及层流化状态,因此,即使在电磁力控制的情况下,阻力也是振荡的。

参考文献:

[1] SCHOPPA W, HUSSAIN F. Coherent structure generation in near-wall turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 453: 57-108.

- [2] KIM J, MOIN P, MOSER R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177: 133-166.
- [3] ROBINSON S K. Coherent motions in the turbulent boundary layer[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23: 601-639.
- [4] SCHOPPA W, HUSSAIN F. Coherent structure generation in near-wall turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 453: 57-108.
- [5] KIM J, MOIN P, MOSER R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177: 133-166.
- [6] KARNIADAKIS G E, CHOI K S. Mechanisms on transverse motions in turbulent wall flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 45-62.
- [7] DU Y, KARNIADAKIS G E. Suppressing wall-turbulence via a transverse traveling wave[J]. Science, 2000, 288: 1230-1234.
- [8] DU Y, SYMEONIDIS V, KARNIADAKIS G E. Drag reduction in wallbounded turbulence via transverse travelling wave[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 457: 1-34.
- [9] BERGER T W, KIM J, LEE C, et al. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force[J]. Physics of Fluids, 2000, 12: 631-649.
- [10] PANG J, CHOI K S. Turbulent drag reduction by Lorentz force oscillation[J]. Physics of Fluids, 2004, 16(5): L35-L38.
- [11] HUANG L P, FAN B C, DONG G. Turbulent drag reduction via a transverse wave traveling along streamwise direction induced by Lorentz force[J]. Physics of Fluids, 2010, 22: 015103-1 - 015103-8.
- [12] 黄乐萍, 范宝春, 董刚. 槽道湍流壁面展向周期震动减阻机理研究[J]. 南京理工大学学报, 2010, 34(3): 361-366.
- [13] BERGER T W, KIM J, LEE C, et al. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force[J]. Physics of Fluids, 2000, 12(3): 631-649.

作者简介:



陈耀慧(1979-),男,广西北海人,博士后。研究方向:流动控制,通讯地址:江苏省南京市南京理工大学瞬态物理重点实验室(210094),电话:025-84303236,13814052826, E-mail: yhchen@mail.njust.edu.cn