

槽道流壁面展向周期振动减阻的一维谱分析

黄乐萍, 董刚, 范宝春

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

摘 要: 通过直接数值模拟(DNS)对壁面做展向周期运动的槽道湍流进行研究,建立了槽道湍流数据库。发现通过改变振幅大小和振动周期,可以使壁面摩擦阻力明显减少。对减阻前后一维湍流脉动能谱进行了定量分析,结果表明,控制后湍流脉动能普遍下降,流向和展向速度脉动都受到了很大的抑制,并且总动能在减少的同时,能量从时间尺度大的脉动向时间尺度小的脉动传输。分析了阻力变化周期中三个特征时段拟涡能谱的变化规律,发现总涡能在得到不同程度抑制的同时,具有不同的变化特征。结合近壁湍流拟序结构的变化规律,进一步揭示了壁面展向周期振动减阻的内在机理。

关键词: 湍流; 直接数值模拟; 展向壁面振动; 减阻; 谱分析

中图分类号: O357.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)05-1777-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.006

0 引言

飞行器运动时,由于流体的粘性,不可避免地会受到流体施加的阻力,从而使飞行减速,产生噪音和振动,并导致飞行失稳,造成燃料消耗量的增加。因此,减阻技术是一切飞行装置的关键技术,也是节能的重要途径。高效减阻可以提高推进效率和飞行稳定性,减少燃料损耗和减轻飞行器重量。这对改进飞机、导弹或普通弹箭的性能是非常有价值的。近半个世纪以来,为达到减少流动壁面阻力的目的,相继产生了各种各样的减阻方法和技术^[1]。在湍流状态下,光滑平板的展向周期振动(spanwise-wall oscillation)可以有效减少近壁湍流形成的摩擦阻力。Jung et al.^[2]1992年首先采用槽道流的直接数值模拟(DNS)的手段证实了这种减阻方法的有效性。此后,人们利用实验和数值计算开展了一系列关于利用壁面展向周期振动方法进行减阻的研究,并得到了基本相似的减阻参数^[3-6]。

但是由于湍流结构的复杂性,人们对展向壁面振动的减阻机理尚不完全清楚。Trujillo等人^[4]和Bogard等人^[7]认为,展向壁面振动可以消除近壁条带结构,从而抑制了上掠和下扫事件的频率,因而达到减小壁面阻力的效果。Miyake等人^[3]从流向涡动力学的角度来考虑展向壁面振动的影响,认为流

向涡的倾斜角在一个周期内有很大的变化,使得流向涡的拉伸相应地增大和减小,而总体上不断衰减。Choi等人^[5]提出了“展向涡模型”,他们认为壁面展向运动时,可以产生负展向涡,因而使得流向速度减少,变小的流向速度阻碍了近壁区域流向涡的拉伸,因而减少了下扫(sweep)事件的发生,从而使壁面阻力减小。除了上述“条带”和“流向涡”两类减阻机理外,还有学者从DNS结果的统计平均角度入手,指出Reynolds应力输运方程中压力变形项的变化在展向壁面振动减阻过程中起到了关键作用^[6]。这些观点从不同角度揭示了展向壁面振动引起的减阻机制,但是,鉴于湍流近壁结构的复杂性,许多问题还有待于进一步澄清。

本文基于Fourier-Chebyshev谱方法,对壁面做展向周期振动的槽道湍流进行了数值模拟。以壁面振动参数 $A = 1.0$ (振幅), $T = 16.0$ (周期)为算例,研究了壁面阻力在展向周期振动调制下的变化规律。对减阻前后湍流脉动能的一维波谱、频谱进行了分析,揭示了减阻过程中相关物理量的谱变化规律。将一个典型的阻力变化周期分成三个特征时段进行了讨论,分析了不同减阻过程中拟涡能谱的变化规律,结合三种减阻过程中近壁湍流拟序结构的变化特点,研究了壁面展向周期振动减阻的内在机理。揭示出展向振动壁面减阻是两种机理共同作用

的结果,一定流场条件下由某一机理起主导作用。

1 物理问题及数值方法

以槽道中充分发展的壁湍流为研究对象,其控制方程

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

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

边界条件为

$$\mathbf{u}_{w+} = (0, 0, 0)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{w-} = (0, 0, W)^T$$

式中, \mathbf{u} 为速度矢量, p 为压强, ν 为运动粘性系数。上标“ T ”表示转置,下标“ w^\pm ”表示上下壁面。上壁面保持静止,下壁面做展向振动,其运动速度为

$$W = A \sin(2\pi t/T) \quad (4)$$

式中 A 为振幅, T 为振动周期, t 为时间。

利用 Fourier-Chebyshev 谱方法,离散上述方程,进而对壁湍流进行了直接数值模拟。考虑到湍流脉动在流向(x)和展向(z)的统计平均特性,流向和展向采用 Fourier 变换,并采用周期性边界条件,而法向则采用 Chebyshev 变换法,并采用无滑移壁面条件^[8]。方程(1)中的时间项,采用三阶精度的半隐式向后差分格式。为消除流场出现的残余散度,方程(1)右边的线性项和压力项,利用影响矩阵法和 Chebyshev-tau 方法,联立求解^[9];方程(1)左边第二项,即非线性项,采用 3/2 规则,以消除混淆误差^[10];流向和展向均采用均匀网格,网格尺度分别为: $\Delta x^+ = \Delta z^+ = 11 (\sim 3.25\eta)$;法向网格在近壁处最小 $\Delta y^+ = 0.2 (\sim 6 \times 10^{-2}\eta)$,在槽道中心处最大 $\Delta y^+ = 8.6 (\sim 2.45\eta)$,其中, η 为 Kolmogorov 耗散尺度,即最小空间分辨率。计算过程中,流向流量保持不变,截面平均速度 $U_m = 2/3, Re_m = 2666$ 。壁面静止时,本文计算得到的相关统计量与实验结果符合得很好,表明了算法的正确性^[11]。

本文计算的终了时间为 $t = 1000$ 。当 $t = 300$ 时,用于形成湍流的流场初始扰动的影响基本消除,此时,下壁面开始做展向简谐振动,当 $t = 500$ 时,开始对湍流量进行统计。

2 结果分析和讨论

2.1 平均壁面减阻率

研究证明,近壁区域的流体运动是小尺度涡的湍流拟序运动,其基本要素是条带(streak)和涡结

构(vortex structures)。涡结构主要由准流向涡和沿流向排列的以流向涡量为主的马蹄涡列所构成。流向涡将流体上抛或下扫,从而在近壁区域沿展向形成交替变化的条带。研究表明,流向涡和近壁条带造成的流体的上掠和下扫(尤其是下扫)过程,直接形成了壁面阻力。当壁面做宏观的展向简谐振动后,由于流体的粘性,流场的“条带—涡结构”将发生变化,这些变化将直接影响壁面的阻力。为考察不同振动周期和振幅对壁面阻力的影响,本文计算了若干种不同的振动参数。结果表明,通过改变振幅大小和振动周期,可以使壁面摩擦阻力明显减少。随着平均减阻率的增加,阻力随时间的变化也更加稳定并呈现出周期性的变化。图 1 给出了几条壁面平均阻力随时间的变化曲线。可以发现, $A = 1.0, T = 16.0$ 时,减阻效果最好,平均壁面减阻率可达到 45% 左右,阻力的变化也呈现出明显的周期性。基于 $A = 1.0, T = 16.0$ 的算例,可以将一个减阻周期分为三个时段,如图 2 所示。其中, I 区为阻力峰值区,减阻效果相对较差。II 区为过渡阶段,减阻率有所提高,III 区为阻力平缓区,减阻效果最好。

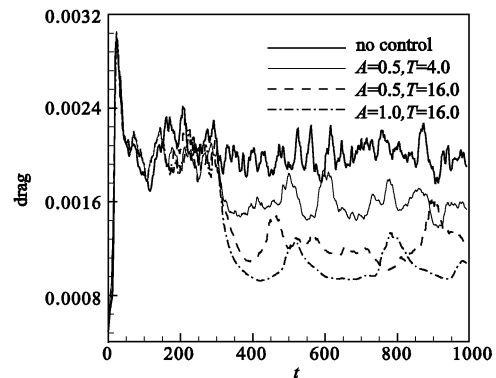


图 1 壁面平均阻力随时间的变化

Fig. 1 Time evolution of wall drag

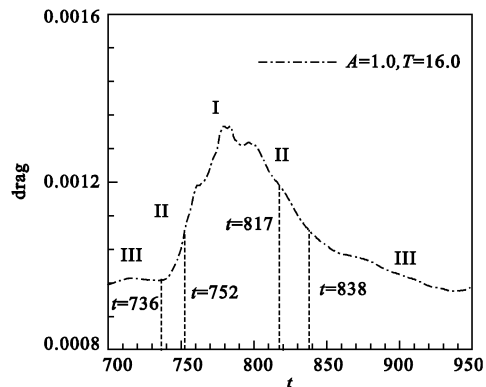


图 2 一个减阻周期的三个特征时段

Fig. 2 Three typical phases in a drag reduction periodicity

2.2 一维湍流脉动能谱

物理量的谱对于分析物理现象具有重要意义。湍流脉动的谱可以表示湍流脉动强度在各种尺度上的分布。时间相关函数的 Fourier 变换称为对应相关变量的频谱,其高频成分表示快变的脉动成分,或时间尺度小的脉动。空间相关函数的 Fourier 变换称为对应相关变量的波谱,它表示湍流脉动量在空间尺度上的分布,其高波数成分表示长度尺度小的湍流脉动^[10]。图 3(a) - (c) 分别是 $A = 1.0$, $T = 16.0$ 时,控制前后脉动速度分量 u' 、 v' 、 w' 的流向能谱 $E_{u'u'}$ (随 k_x 的变化) 在低波数端的分布。从图中可以发现,在控制的情况下, $E_{u'u'}$ 、 $E_{v'v'}$ 、 $E_{w'w'}$ 比没控制的差不多降低了两个数量级,说明流向速度脉动受到了很大的抑制。从能量的分布上来看,控制条件下,湍流脉动能在低波数上的能量比例减少,高波数上的能量比例增加,说明此时大尺度湍流脉动在控制下明显减少。

图 4(a) - (c) 分别是控制前后的展向能谱图 (随 k_z 变化)。和控制前相比,控制后的 $E_{u'u'}$ 、 $E_{v'v'}$ 差不多也降低了两个数量级, $E_{w'w'}$ 减幅相对小一些。

与流向能谱不同的是,从能量的分布上来看,湍流脉动能在低波数上的能量比例增加,高波数上的能量比例减少,这说明小尺度展向脉动在控制下也明显减少。控制后能量分布在流向与展向所表现出的不同变化,其原因目前尚不清楚,还有待进一步研究。

图 5(a) - (c) 分别给出了控制前后脉动速度分量 u' 、 v' 、 w' 随角频率 ω 变化的能谱。通过对比可以看出,施加控制后,整个频段上 $E_{u'u'}$ 、 $E_{v'v'}$ 、 $E_{w'w'}$ 显著降低。从能量的分布上看,低频成分所占比例减少,高频增加。这表明总动能在减少的同时,能量从时间尺度大的脉动向时间尺度小的脉动传输,这一规律与 Choi 等人^[12]的研究结果是一致的。

2.3 三个特征时段的一维拟涡能谱

上一节的分析表明,壁面展向周期振动减阻后,湍流脉动能普遍下降,无论是流向还是展向速度脉动都受到了很大的抑制。但是,对应图 2 给出的阻力下降的三个特征时段,相关物理量的谱所呈现出的变化规律是不尽相同的。为进一步考察这一变化规律,本节讨论了三个特征时段拟涡能谱的变化特点。

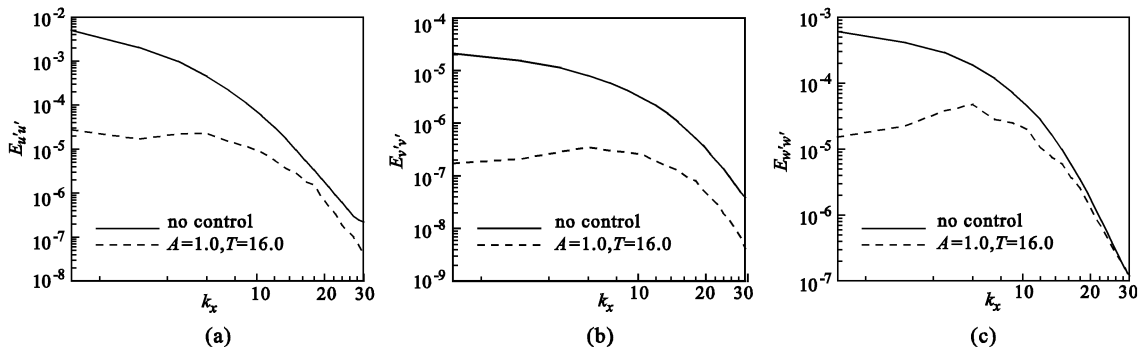


图 3 低波数端 u' 、 v' 、 w' 随 k_x 变化的能谱, $y^+ = 5.36$

Fig. 3 Energy spectra of u' , v' , w' versus k_x at $y^+ = 5.36$ and low-wave number end

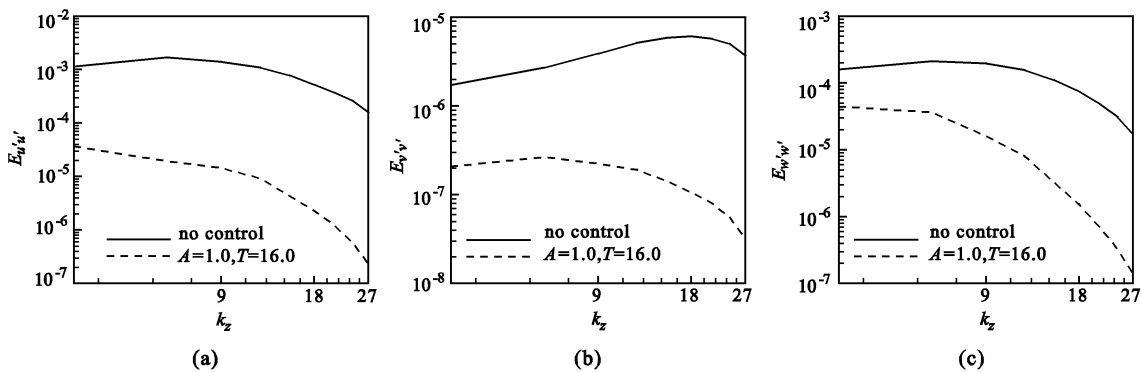


图 4 低波数端 u' 、 v' 、 w' 随 k_z 变化的能谱, $y^+ = 5.36$

Fig. 4 Energy spectra of u' , v' , w' versus k_z at $y^+ = 5.36$ and low-wave number end

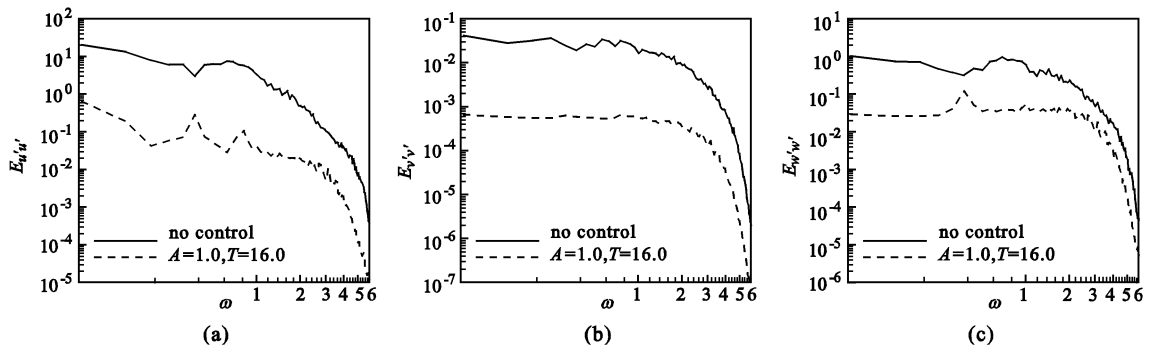


图 5 低频端 u', v', w' 随频率 ω 变化的能谱, $y^+ = 5.36$
 Fig. 5 Energy spectra of u', v', w' versus ω at $y^+ = 5.36$ and low-frequency end

图 6 给出了图 2 的三个特征时段,低波数端总涡量的流向能谱(随 k_x 的变化)。与静止壁面相比, I 区低波数段总涡能下降了约一个数量级,高波数段没有明显的变化。II 区总涡能在低波数段继续下降的同时,高波数区的降幅也十分显著。III 区总涡能降幅最大,在整个波段上普遍下降,约有两个数量级的不同。图 7 中显示的是总涡量的展向能谱(随 k_z 的变化)。与没有控制的情况相比,三个区域的总涡能在低波数段的比例都有所增加,在高波数上的比例都相应减少。这表明大尺度涡结构所占的比例增加,控制后的涡结构更加规则化。不同的是, II 区、III 区总涡能在整个波段上整体下降, I 区则在低波数段总涡能略有增加。

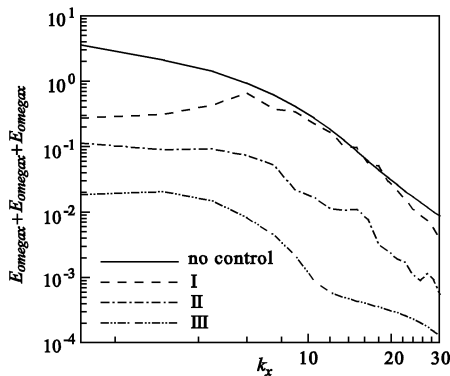


图 6 低波数端总涡量随 k_x 变化的流向能谱, $y^+ = 5.36$
 Fig. 6 Energy spectra of total vorticity versus k_x at $y^+ = 5.36$ and low-wave number end

图 8(a) - (c) 分别给出了 I、II、III 三个特征时段总的拟涡能谱在低频端随角频率 ω 的变化情况。从图中可以发现, I 区流场中的涡能减少以低频区为主,高频成分变化较小。II 区涡能的高低频成分

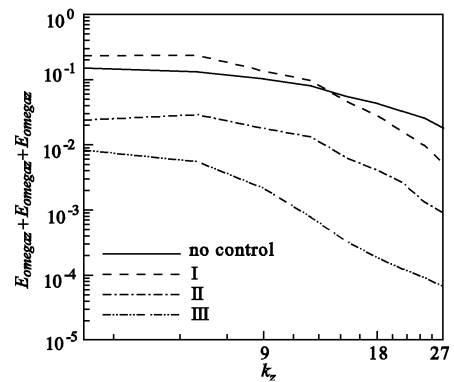


图 7 低波数端总涡量随 k_z 变化的展向能谱, $y^+ = 5.36$
 Fig. 7 Energy spectra of total vorticity versus k_z at $y^+ = 5.36$ and low-wave number end

都有明显的下降。而 III 区总涡能在整个频段上都大幅降低,变化最为明显。

以上分析表明,减阻的三个特征时段内,涡能在得到不同程度抑制的同时,具有不同的变化规律。研究表明,这些规律和相应区域中近壁拟序结构的变化规律是相对应的。图 9 为减阻前后,近壁区域的条带及其对应的涡结构的分布。图中,涡是用速度梯度张量的共轭复数特征根的虚部的等值面^[13]表示的。从图中可以发现,和没有控制的情况(图 9(a))相比, I 区内,近壁湍流的主要变化特征是条带及涡结构的倾斜,其倾斜角度随着壁面的周期展向振动,而呈周期性变化。这种展向振动壁面所导致的倾斜条带已在较多文献中^[4,12]得到证实。II 区为过渡阶段,该区内,条带数量随着振动而逐渐减少,条带结构也逐渐模糊、间距变宽,涡结构明显减少。III 区涡结构大量减少,条带几近消失。这说明,伴随涡能的衰减,各种尺度的涡都得到了很好的抑制。

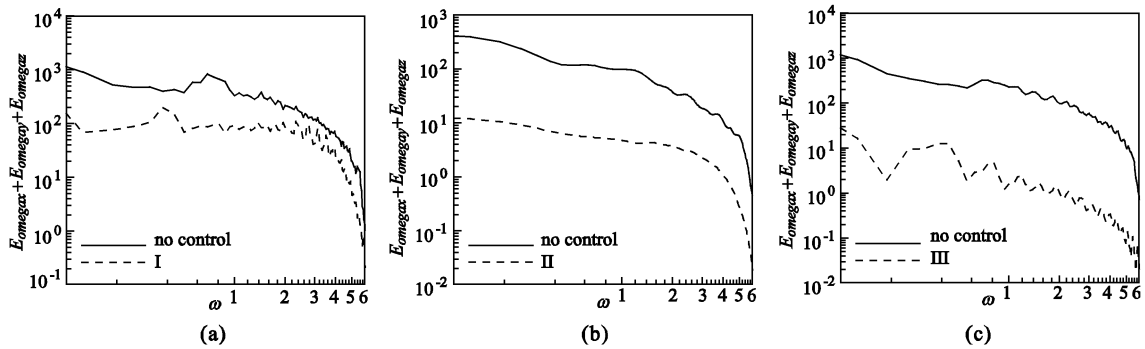


图 8 低频端总涡量随角频率 ω 变化的能谱, $y^+ = 5.36$

Fig. 8 Energy spectra of total vorticity versus ω at $y^+ = 5.36$ and low-frequency end

近壁拟序结构在一个减阻周期内的这三种变化特征,与这三个区域的阻力下降动力学变化机制是相对应的。在 I 区内,展向壁面振动导致的条带倾斜角呈周期性变化(图 9(b)),根据 Choi 等人^[5,12,14]提出的“展向涡模型”理论,这种倾斜将产生负的展向涡,这有利于减阻。图 10(a)为 I 区平均负展向涡量在 y 方向的剖面图,由该图可以看出,控制后, I 区的确有负的展向涡生成,并且生成的负展向涡主要集中在 $y \approx -0.92$ ($y^+ \approx 15$) 处。图 11 给出了控制前后 I 区 $y^+ \approx 15$ 处总展向涡能中负展向涡能所占的百分比。从中也可看出,控制后 $y^+ \approx 15$ 处相对产生了更多的负展向涡。

和 I 区相比,区域 II 中条带虽然存在,但已模糊和变宽,涡的数量也明显减少,如图 9(c)所示。图

10(b)为 II 区平均负展向涡在 y 方向的剖面图,由该图可以看出, $y^+ \approx 15$ 附近已经没有负的展向涡生成,而此时的减阻效率反而有所提高(参见图 2),这说明,由涡和条带倾斜产生的负展向涡所导致的减阻,此时已不是减阻的主要因素。研究表明,振动壁面的作用下,涡和条带的结构会发生相应的变化,条带与涡之间会发生相对滑移,如图 12 所示,而无论壁面向何方运动,马蹄涡的涡腿总是向高速条带偏移。这使得高速流体下扫和低速流体上抛皆被减弱,条带模糊和变宽,从而导致壁面摩擦阻力的减小和湍流的衰减。图 13 给出了 II 区 $y^+ \approx 9$ 处流向涡的展向能谱(随 k_x 的变化及随 ω 的变化)。由图可见,和静止壁面相比,区域 II 中流向涡能显著衰减。这和涡-条带结构的变化是一致的。

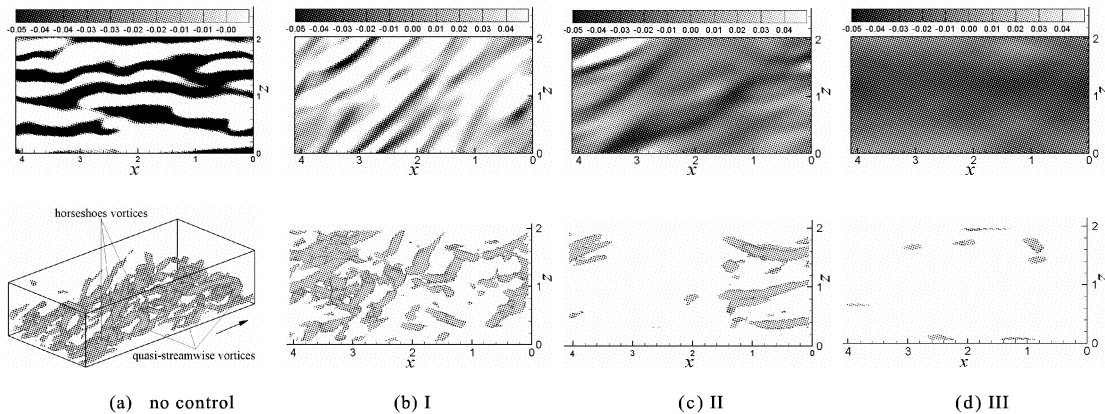


图 9 近壁区条带及涡结构分布

黑色代表低速条带 $u' < 0$, 白色代表高速条带 $u' > 0$, $y^+ = 9$, 灰色代表涡结构

(a) $0 < y^+ < 120$; (b) - (d) $0 < y^+ < 40$

Fig. 9 The distributions of the streaks and the vortex structures near the wall. The black area represents the low speed streak, $u' < 0$, the white area represents the high speed streak, $u' > 0$, $y^+ = 9$, the gray area represents vortex structures

(a) $0 < y^+ < 120$; (b) - (d) $0 < y^+ < 40$

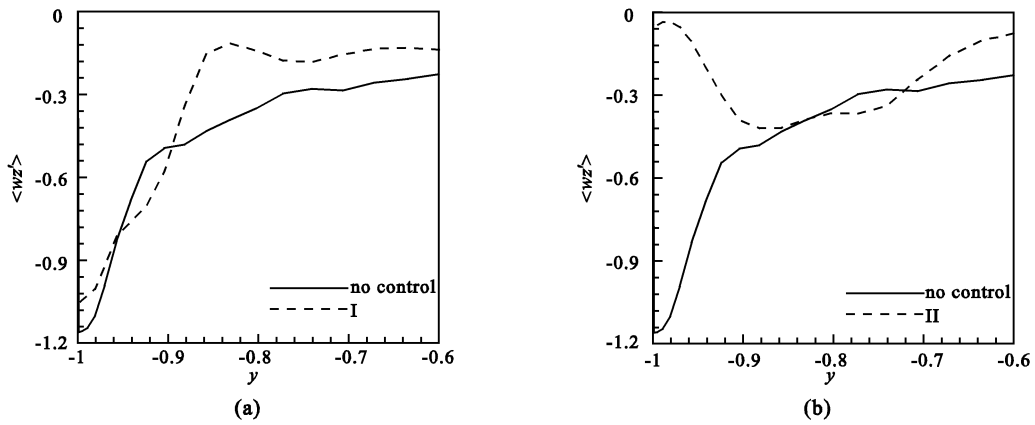


图 10 平均负展向涡量剖面

Fig. 10 Profiles of the negative spanwise mean vorticity

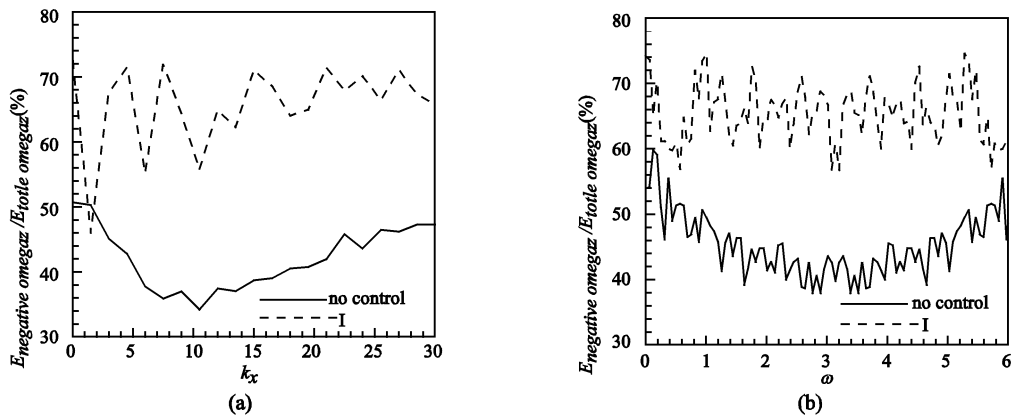


图 11 总展向涡能中负展向涡能所占的百分比, $y^+ \approx 15$

Fig. 11 Profiles of the percentage of the negative spanwise vorticity at $y^+ \approx 15$

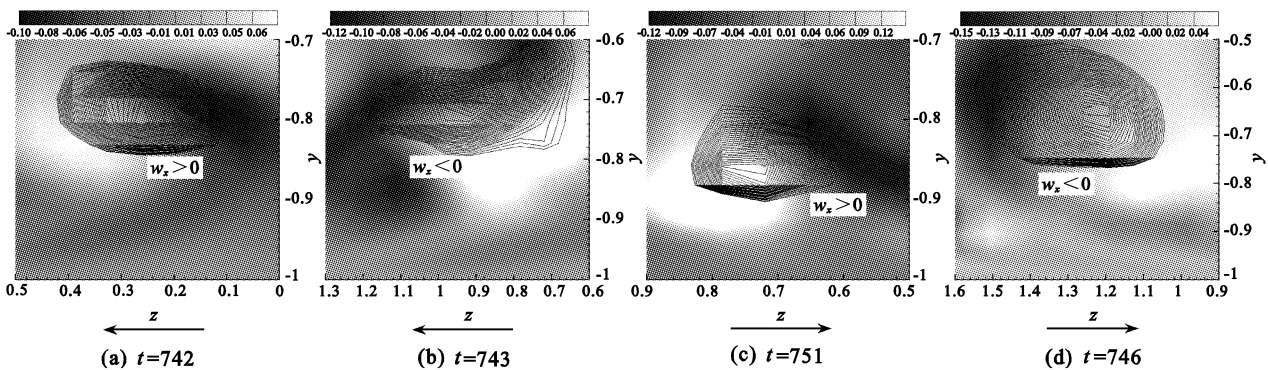


图 12 $x^+ \approx 18$ 处,近壁区流向涡与条带的分布

黑色代表低速条带 $u' < 0$, 白色代表高速条带 $u' > 0$, 等值线代表流向涡, 箭头方向代表壁面移动方向

Fig. 12 The distribution of the streaks and the vortex structures adjoining the wall, the black area represents the low speed streak $u' < 0$, the white area represents the high speed streak $u' > 0$, the contour lines represent streamwise vortices,

the arrowheads represent the direction of the wall displacement, $x^+ \approx 18$

由于流体上抛、下扫运动的减弱,条带逐渐模糊和变宽,以及涡结构的变弱和变少,减阻效率达到极

大值,瞬时减阻率可达 53.4%,此时,流场已发展为 III 区的情形,如图 9(d) 所示。显然,流场中以条带

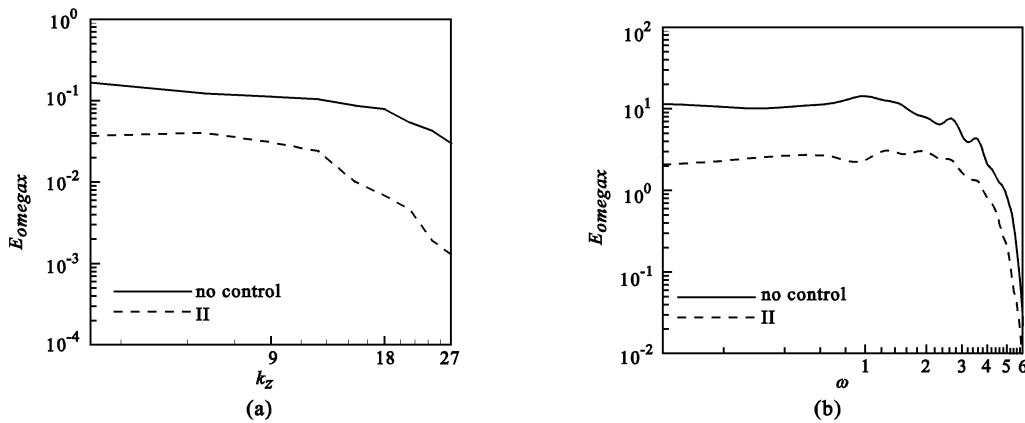


图 13 低波数端 ω_x' 的能谱, $y^+ \approx 9$

Fig. 13 Energy spectra of ω_x' at $y^+ \approx 9$ and low-wave number end

和涡为基本特征的壁湍流的拟序结构已近乎消失 (这与前面谱分析的结果相符合, 参见图 6、7 及图 8 (c)), 由于该拟序结构导致的阻力增加, 也因此得到有效抑制。由于流场的不稳定性, 该状态不能长久维持, 一段时间后, 会向 II 区宽条带的情形发展, 进而成为 I 区倾斜条带的情形, 阻力也在此变化过程中增加。这样, 壁湍流的结构、减阻效果及减阻机理皆随时间呈周期性变化。

3 结束语

利用 Fourier-Chebyshev 谱方法, 本文对壁面在展向作周期运动的槽道湍流进行了直接数值模拟, 并以壁面振动参数 $A = 1.0, T = 16.0$ 为算例, 对相关物理量的一维能谱进行了分析。结果表明, 控制后, 流向湍流脉动能在低波数上的能量比例减少, 高波数上的能量比例增加, 大尺度湍流脉动明显减少。展向湍流脉动能在低波数上的能量比例增加, 高波数上的能量比例减少, 这说明小尺度展向脉动在控制下也都受到了很大的抑制。另外, 由于展向振动对湍流的抑制作用, 总动能在减少的同时, 能量从时间尺度大的脉动向时间尺度小的脉动传输。

在振动壁面的调制下, 减小后的阻力呈周期性变化。典型的周期可分成三个区域, 随着三个特征区域的周期性交替, 相关物理量的谱也呈现出不同的变化规律, 这些规律和相应区域中近壁拟序结构的变化及阻力下降的动力学机理是相一致的。I 区主要表现为条带和涡结构的倾斜, 此时, 产生了更多的负展向涡。II 区为过渡阶段, 条带和流向涡都相

应减少, 谱能显著下降, 涡与条带间产生滑移, 壁湍流得到进一步抑制, 该区的减阻效果好于 I 区。III 区的条带和涡几近消失, 总涡能在整个频段上都大幅降低, 各种尺度的涡都得到了很好的抑制, 减阻效果最好。

参考文献:

- [1] XU Jin, DONG Su-chuan, Maxey M R, Karniadakis G E. Turbulent drag reduction by constant near-wall forcing[J]. J. Fluid Mech, 2007, 582: 79 - 101.
- [2] Jung W J, Mangiavacchi, N, Akhavan R. Suppression of turbulence in wall-bounded flows by high-frequency spanwise oscillations[J]. Phys Fluids, 1992, 4(8): 1605 - 1607.
- [3] Miyake Y, Tsujimoto K, Takahashi M. On the mechanism of drag reduction of near-wall turbulence by wall oscillation [J]. JSME, Series B, 1997, 40(4): 558 - 566.
- [4] Trujillo S, Bogard D, Ball K. Turbulent boundary layer drag reduction using an oscillating wall[C]. AIAA Paper, AIAA97 - 1870, 1997.
- [5] Choi K S, Graham M. Drag reduction of turbulent pipe flows by circular-wall oscillation[J]. Phys Fluids, 1998, 10: 7 - 9.
- [6] 黄伟希, 许春晓, 崔桂香, 张兆顺. 壁面展向周期振动的槽道湍流减阻机理的研究[J]. 力学学报, 2004, 36(1): 24 - 30. [HUANG Wei-xi, XU Chun-xiao, CUI Gui-xiang, ZHANG Zhao-shun. Mechanism of drag reduction by spanwise wall oscillation in turbulent channel flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2004, 36(1): 24 - 30.]
- [7] Bogard DC, Ball KS, Wassen E. Drag Reduction for Turbulent Layer Flows Using an Oscillating Wall [R]. AFOSR Report, 2000, No. TTCRL 00 - 2.
- [8] Zhao H, Wu JZ, and Luo JS. Turbulent drag reduction by traveling wave of flexible wall[J]. Fluid Dynamics Research, 2004,

- 34(3): 175 – 198.
- [9] Canto C, Hassaini MY, Quarteroni A, Zang TA. Spectral Methods in Fluid Dynamics[M]. New York: Springer-Verlag, 1988.
- [10] 张兆顺. 湍流[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. [ZHANG Zhao-shun. Turbulence[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.]
- [11] 朱兰. 基于展向壁面振动控制的槽道湍流结构研究[D]. 研究生论文. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 2008: 27 – 29. [ZHU Lan. Turbulent channel flow structure based on spanwise-wall oscillation[D]. Graduates dissertations. Key Lab of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology.]
- [12] Choi KS. Near-wall structure of turbulent boundary layer with spanwise-wall oscillation[J]. Phys Fluids, 2002, 14: 2530 – 2542.
- [13] Zhou J, Adrian R J, Balachandar S, Kendall T M. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow[J]. J. Fluid Mech, 1999, 1: 353 – 396.
- [14] Choi K S, Clayton B R. The mechanism of turbulent drag reduction with wall oscillation[J]. Heat Fluid Flow, 2001, 22: 1 – 9.

作者简介:黄乐萍(1983 –),女,博士生,研究方向为流体控制理论与技术。

通信地址:南京理工大学瞬态物理国家重点实验室(210094)

电话:13813028314

E-mail:huanglp2602@tom.com

One-Dimensional Spectral Analysis of Drag Reduction with Spanwise-Wall Oscillation in Channel Flow

HUANG Le-ping, DONG Gang, FAN Bao-chun

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

Abstract: A turbulent channel flow subjected to spanwise wall oscillation was investigated by direct numerical simulation (DNS). The DNS results show that the friction drag can be reduced significantly by changing the amplitude and the period of the oscillation. The one-dimensional energy spectra analyses of velocity fluctuations were carried out quantitatively. It is found that turbulence kinetic energies are reduced remarkably, and that the streamwise and spanwise velocity fluctuations are suppressed dramatically. Simultaneously, there is a transfer of energy from the large-timescale to small-timescale turbulence eddies by the periodic spanwise-wall oscillation. The differences of the vorticity energy spectra of three typical drag reduction phases in a drag reduction periodicity were analysed. It is found that the suppressions of total vorticity energy for these three phases are different. Three kinds of changes in the structures of near-wall turbulence were analyzed. The mechanisms of turbulence suppression and drag reduction via spanwise wall oscillation were further clarified.

Key words: Turbulence; Direct numerical simulation; Spanwise-wall oscillation; Drag reduction; Spectral analysis