

文章编号: 1000-8055(2009)10-2163-06

吹吸扰动对壁湍流边界层摩擦阻力的影响

王玉春^{1,2}, 姜楠^{1,2}, 夏振炎^{1,2}, 田砚^{1,2}

(1. 天津大学 机械工程学院 力学系, 天津 300072;

2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 对风洞中平板湍流边界层施加局部周期性吹吸扰动, 并用 IFA-300 热线风速仪测量了其近壁区域不同法向位置瞬时速度的时间序列信号. 利用湍流边界层对数律平均速度剖面, 计算湍流的壁面摩擦阻力. 对平板湍流脉动速度信号用子波分析进行多尺度分解, 通过条件采样以及相位平均的方法获得不同尺度下的相干结构波形和能量分布, 来研究吹吸扰动对平板湍流边界层的摩擦阻力的影响. 结果表明, 扰动使得窄缝附近流动阻力增加, 而下游区域流动阻力减小.

关 键 词: 吹吸扰动; 摩擦阻力; 湍流边界层; 相干结构; 子波分析

中图分类号: O357

文献标识码: A

Effect of blowing and suction on friction drag of wall turbulent boundary layer

WANG Yu-chun^{1,2}, JIANG Nan^{1,2}, XIA Zhen-yan^{1,2}, TIAN Yan^{1,2}

(1. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China)

Abstract: An experimental study was carried out to investigate the effect of local forcing on the friction drag of a turbulent boundary layer. The local forcing was given to the boundary layer flow by means of a sinusoidally oscillating jet issuing from a thin spanwise slot at the wall. The relationship among some inner-scales physical parameters, e. g. the mean-velocity profile, skin friction velocity and fluid dynamics viscosity, and the relationship between skin friction velocity and skin friction shear stress were taken advantage of accurately calculating skin friction drag. The velocity signals were decomposed into multi-scale eddy structures by wavelet transform. A conditional sampling technique for multi-scale coherent structures detection from simultaneous turbulent field was introduced using multi-scale instantaneous intensity factor of wavelet coefficients. Coherent structures for different scales were extracted by this technique and the effect of blowing and suction on friction drag was investigated in flat-plate turbulent boundary layer. The results reveal that friction drag is increased by the local forcing near the thin slot and decreased at downstream region.

Key words: blowing and suction; friction drag; turbulent boundary layer;
coherent structures; wavelet analysis

收稿日期: 2008-10-20; **修订日期:** 2009-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(10832001, 10872145)

作者简介: 王玉春(1965-), 男, 江苏洪泽人, 副教授, 硕士, 主要从事实验流体力学研究. 电话: +86-022-27403574

E-mail: ww981218@126.com

在湍流边界层的近壁区域,低速流体间歇地向外喷射,外层高速流体间歇地扫掠壁面,产生了壁湍流相干结构拟周期的猝发过程^[1-2].研究表明,相干结构存在于从积分尺度到微分尺度的各个尺度中,它们的发展和演化过程非常相似,并占有湍流大部分的脉动能量,对湍流的统计性质产生重要影响^[3].

相干结构是湍流中最重要的结构,对湍流能量输运以及耗散具有重要作用,通过控制边界层中的相干结构运动,可以达到控制湍流能量传递的目的,抑制猝发的发生,可能会抑制湍流量的生成,从而达到减少流动阻力的目的^[4-6].

吹吸扰动就是控制边界层相干结构运动的方法之一.1994年,Choi^[7]运用直接数值模拟,在壁面施加与法向速度相位相反的吹、吸扰动,结果显示表面摩擦阻力显著降低.1996年Chun和Sung^[8]在分离和重附着流动实验中,通过位于分离点的缝隙进行吹、吸可以显著地控制流动结构.2001年S H Park^[9]的研究也显示了扰动的减阻效应.

本文通过沿平板的展向狭缝将周期吹吸扰动引入湍流边界层,利用热线测速技术,测量了不同频率扰动下平板湍流边界层近壁区瞬时速度的时间序列信号,得到了对数率平均速度剖面,用Haar子波对速度信号进行分解,利用条件采样和相位平均对相干结构进行了检测,得到多尺度相干结构条件相位平均波形和能量分布,研究分析吹吸扰动作用下壁面湍流的摩擦阻力变化和相应机理.

1 实验设备和测量技术

实验是在天津大学流体力学实验室低湍流度风洞中完成的.风洞实验段尺寸为长1500 mm,高600 mm,宽800 mm,实验段风速设计在0.5 m/s和40.0 m/s之间,原始湍流度小于0.2%.实验装置如图1所示,实验平板为不锈钢板,长1500 mm,宽795 mm,厚2 mm,水平放置在风洞实验段内,平板前缘为楔形,在距离平板前缘500 mm处,沿展向开一条长度为300 mm的狭缝,缝宽5 mm,将直径300 mm、功率150 W的扬声器由平板下侧覆盖在狭缝上,推动空气运动,产生吹吸扰动气流,扬声器由一个信号发生器和一台功率放大器组成的驱动装置推动,扰动频率和强度可调.实验中,以缝的后边界的中心处为坐标轴的原点,流动方向为x方向,法线为y方向,扰动气

流在缝出口处速度幅值控制在4 m/s左右.

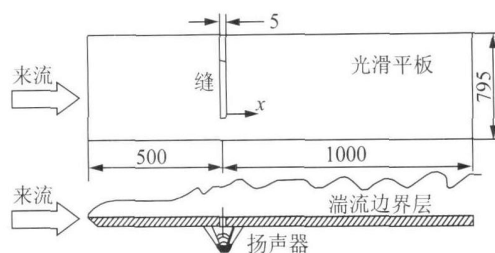


图1 吹吸扰动实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for blowing and suction

测速仪为美国TSI公司生产的IFA300型恒热线风速仪,共有一个测温通道,三个测速通道,并配有CCTS-1193E型三维自动控制坐标架,测速探头固定在坐标架支杆上,测点位置及其它采样参数可以预先设定,通过Thermalpro软件,可以实现对流场的自动测量.

2 分析方法

2.1 平板湍流边界层平均速度剖面和摩擦阻力

湍流边界层近壁区域的对数律平均速度分布

$$\frac{U}{u_*} = A \ln \frac{y u_*}{\nu} + B \quad (1)$$

其中 U 为平均流速; ν 是运动黏性系数; u_* 为壁面摩擦速度;它与壁面摩擦切应力 τ_w 的关系为

$$\tau_w = \rho u_*^2 \quad (2)$$

壁面摩擦切应力 τ_w 与壁面摩擦因数 G 的关系为

$$G = \tau_w / (\rho U_\infty^2 / 2) = 2(u_* / U_\infty)^2 \quad (3)$$

本文利用公式(1),(2),(3)来计算湍流边界层的壁面摩擦阻力.通过测量湍流边界层近壁区域对数律平均速度分布,使用牛顿迭代法获得的壁面摩擦速度 u_* ,并对参数 A,B 进行修正,然后计算出壁面摩擦切应力 τ_w 和壁面摩擦因数 G .实验中 A 取2.44, B 取4.9,以速度剖面未变形处的数据进行迭代计算,结果表明扰动对该区域 A,B 的值无影响.

2.2 湍流脉动信号的多尺度子波变换

子波变换^[10-11]是不同于傅立叶变换的一种新型的积分变换,它的积分核是一个被称为子波的函数,子波变换将信号在时域空间与频域空间同时分解,得到具有不同尺度或中心频率的信号分量.子波的概念在物理上和湍流的概念是十分吻合的.

对于一维湍流信号 $u(t)$ 的连续 Haar 子波变换为

$$W_H(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \left[\int_{a+b}^b u(t) dt - \int_a^{a+b} u(t) dt \right] \tag{4}$$

其中 a 为尺度参数; b 为位置参数;尺度为 a 的信号分量中心频率为

$$f = \frac{f_s \times f_0}{a} \tag{5}$$

其中 f_s 为采样频率; f_0 为母小波中心频率,对于 Haar 子波, $f_0 = 0.9961$.

式(4)表示某一尺度下某位置的子波系数,等于该尺度下湍流结构前后两个部分的局部平均运动速度的差值,表明湍流中不同尺度流动结构的多尺度特征与子波变换的多分辨概念是一致的,可以用子波分解的方法将湍流瞬时脉动速度分解为不同尺度的速度分量,并用式(4)定义一定尺度 a 和一定位置 b 下局部平均的湍流速度结构函数.

基于 Haar 子波变换的局部平均粗粒化的 p 阶结构函数为

$$\left\langle \left| W_H(a,b) \right|^p \right\rangle_b = \left\langle \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \left[\int_{a+b}^b u(t) dt - \int_a^{a+b} u(t) dt \right] \right|^p \right\rangle_b \tag{6}$$

其中 $\langle \rangle_b$ 代表对位置 b 总体统计平均运算. 特别地, $p = 2$ 时

$$E(a) = \left\langle \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \left[\int_{a+b}^b u(t) dt - \int_a^{a+b} u(t) dt \right] \right|^2 \right\rangle_b \tag{7}$$

代表尺度为 a 的所有湍流结构所拥有的平均动能.

2.3 湍流多尺度相干结构的检测方法

由 Farge^[10-12] 等人引入的一种测量湍流间歇性的量化指标——瞬时强度因子定义为

$$I(a,b) = \frac{|W_H(a,b)|^2}{E(a)} \tag{8}$$

它表示某一尺度的湍流结构在不同时刻(位置)的脉动强度大小. $I(a,b)$ 较大,表明 $W_H(a,b)$ 幅值大,表明该处存在拉伸或压缩变形比较剧烈的湍流结构,即相应尺度的相干结构.以 $I(a,b)$ 取极大值的位置 b 为相干结构的中心,用自相关法^[13] 确定相干结构的周期,对原始速度信号进行相位平均,可得到该尺度相干结构的条件相位平均波形,以此研究相干结构的动力学过程.

3 实验结果及分析

实验测量了狭缝下游不同流向位置处,沿法向距壁面不同高度的多个测量点,获得了不同扰动频率(0,8,16,32,64 Hz) 下流向速度的时间序列信号,其中 0 Hz 表示无扰动,采样频率为 50 kHz,每个测点采样时间 20.9715 s,共有 1048576 个数据值,来流速度 $U_\infty = 4.5 \text{ m/s}$ 左右,流向位置用缝宽进行无量纲化,即 $x^+ = x/5$.

3.1 平均速度分布与摩擦阻力

图 2 为不同扰动频率下的平均速度剖面,由图可知,在 $x^+ = 0$ 处,由于扰动强度较大,其速度峰值与来流速度相当,使得速度剖面与无扰动相比发生变化,在 $30 < y^+ < 100$ 的区域,出现上凸形状,而在下游 $x^+ = 20$ 处,由于扰动气流的流量

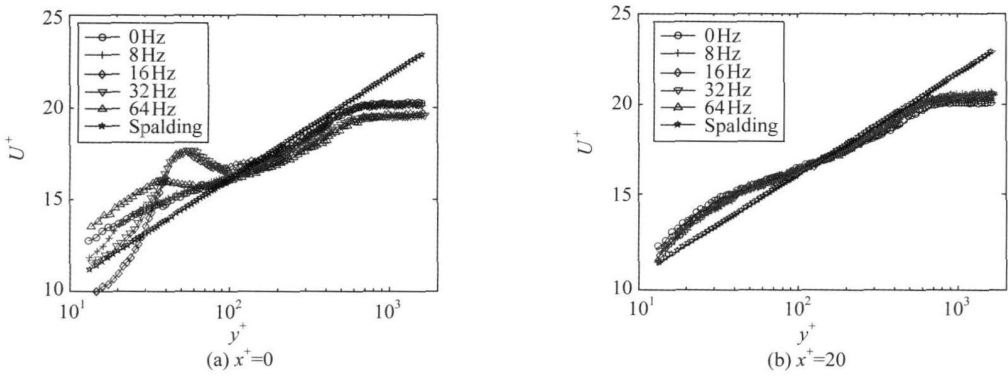


图 2 壁湍流对数律平均速度剖面
Fig.2 Logarithmic law of mean velocity profile in wall turbulence

很小,扰动对平均速度剖面的影响已经消失.不同扰动频率下壁面摩擦因数的计算表明,扰动使得 $x^+ = 0$ 处壁面摩擦阻力增加,而在下游 $x^+ = 20$ 和 $x^+ = 40$ 处,摩擦阻力减少,见表 1,表中雷诺数 Re 以测点距前缘距离为特征长度.

3.2 湍流脉动能量随尺度分布

姜楠^[14]提出能量最大原理,指出能量最大尺度对应的结构占有最多的湍流动能.为了清晰地观察不同频率的扰动对湍流的影响,根据式 (5),

选择中心频率为 2^{j-1} 的尺度,其中 $j = 1, 2, \dots, 15$,将壁湍流速度信号 $u(t)$ 分解为 15 个子波分量,并根据式 (7) 得到了壁湍流脉动速度动能 $E(a)$ 以及 $E(a)/a$ 随尺度参数 a (或中心频率 f) 的分布,见图 3,其中 E 代表各尺度能量和.由图可知,在 $x^+ = 0$ 处,与无扰动相比, $E(a)$ 曲线在扰动频率处出现峰值,能量大大增加,在 $E(a)/a$ 曲线上,无扰动信号在 $f = 64 \text{ Hz}$ 的尺度上出现最大能量,有扰动信号能量最大尺度出现在比扰动频

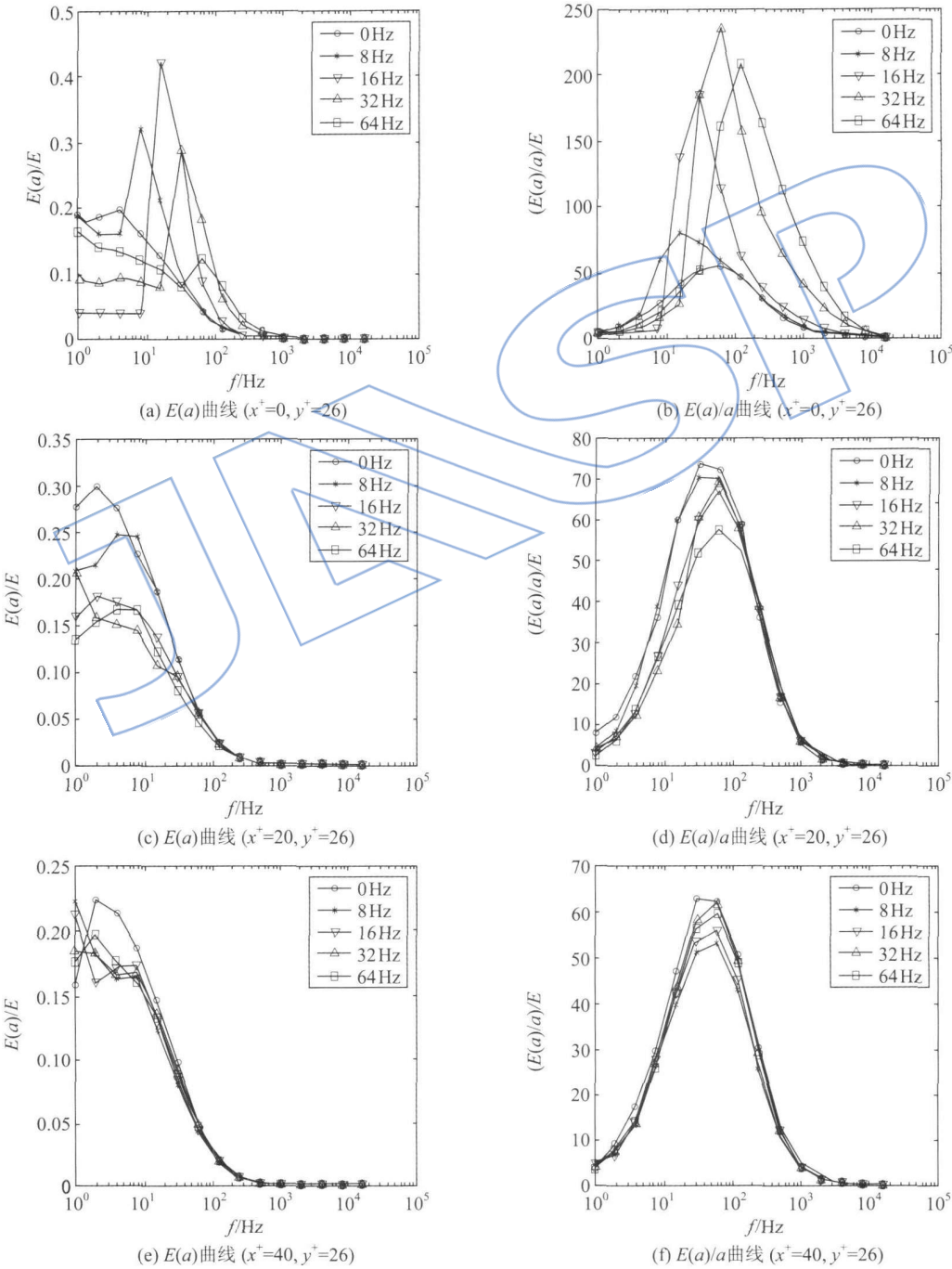


图 3 不同频率扰动下湍流能量随尺度分布

Fig. 3 Energy distributions across scales with various disturbing frequencies

表 1 壁面摩擦因数表
Table 1 Skin friction coefficient

f/Hz	$x^+ = 0$			$x^+ = 20$			$x^+ = 40$		
	Re	$u^+ / (\text{m/s})$	C_f	Re	$u^+ / (\text{m/s})$	C_f	Re	$u^+ / (\text{m/s})$	C_f
0	139341	0.221461	0.004873	195675	0.224340	0.004970	256795	0.224971	0.004797
8	139839	0.224230	0.004960	202675	0.225477	0.004680	256285	0.222445	0.004709
16	138986	0.221823	0.004914	203476	0.227555	0.004729	263901	0.227735	0.004655
32	140384	0.231461	0.005244	233067	0.228611	0.004752	265591	0.227917	0.004603
64	139063	0.227582	0.005167	203933	0.222087	0.004870	267757	0.231799	0.004684

率大一倍的频率对应的尺度上, $E(a)$ 及 $E(a)/a$ 曲线都表明, 扰动改变了湍流脉动信号的能量分布, 使得能量最大尺度附近的能量有较大增长, 而频率为几赫兹的更大尺度的信号能量下降, 同时高频的较小尺度的信号能量也有显著增长, 表明扰动加强了从大尺度含能区向小尺度耗散区的能量传递, 使得大尺度的湍涡结构从平均流场中吸取更多的能量, 并通过较小尺度的湍涡结构, 向耗散区的高频小尺度结构传递, 增加了湍流的能量损耗, 表现出增阻的特征; 而在 $x^+ = 20$ 和 $x^+ = 40$ 处, 与无扰动相比, 低频的扰动信号在 $E(a)$ 曲线上产生的尖峰仍可见到, 但已不甚明显, 而高频的扰动产生的尖峰已难以看到, $E(a)$ 及 $E(a)/a$ 曲线都表明, 扰动使得能量最大尺度附近的大尺度湍流结构的能量维持在较低水平, 而向高频的小尺度结构的能量传递也有所下降, 降低了湍流的能量损耗, 表现出减阻的特征.

3.3 湍流相干结构的条件相位平均波形

对多尺度相干结构进行条件相位平均, 可以得到多尺度相干结构的条件相位平均波形. 从而观察到相干结构的振幅、波长以及演化过程, 图 4 绘出不同扰动频率下能量最大尺度附近相干结构的条件相位平均波形. 图 4(a) 表明, 在 $x^+ = 0$ 处, 扰动使得相干结构的振幅加大, 周期略有增加, 表现出增阻的特征; 图 4(b), (c) 表明, 在 $x^+ = 20$ 和

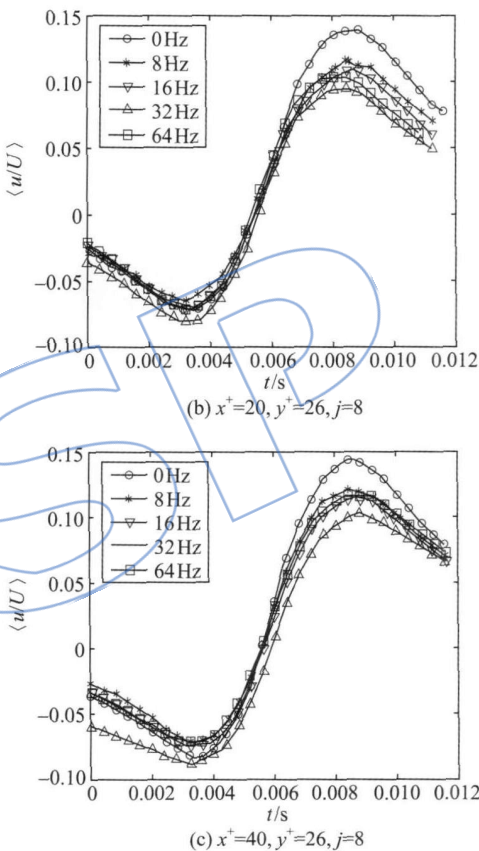
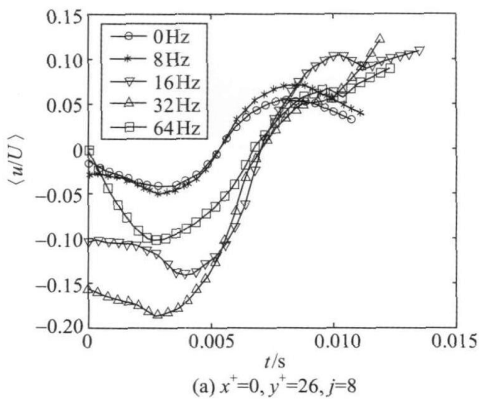


图 4 湍流多尺度相干结构的条件相位平均波形
Fig. 4 Phased-average evolution shapes for multi-scale coherent structures

40 处, 扰动使得相干结构的振幅有所减小, 周期基本不变, 表现出减阻的特征; 而扰动对相干结构的演化过程影响不大.

4 结 论

- 1) 扰动使得扰动源附近 ($x^+ = 0$) 的流动阻力增加, 使得扰动源下游 ($x^+ = 20, 40$) 流动阻力减小.
- 2) 扰动使得扰动源附近 ($x^+ = 0$) 的平均速度分布在对数律底部出现上凸, 而扰动源下游 ($x^+ = 20, 40$) 无此现象.
- 3) 扰动使得缓冲区能量最大尺度附近的相

干结构的相位平均波形在扰动源附近($x^+ = 0$)振幅加大,周期延长,表现出增阻特征,而扰动源下游($x^+ = 20, 40$),振幅减小,周期不变,表现出减阻特征.扰动对相干结构的演化过程影响不大.

4) 扰动改变了缓冲区能量分布,使得在扰动源附近($x^+ = 0$),能量最大尺度出现在扰动频率的倍频对应的尺度上,能量最大尺度及较小的各尺度结构的能量大大增加,增强了湍流的能量耗散,表现出增阻的特征,而在扰动源下游($x^+ = 20$ 和 40),扰动基本不改变能量最大尺度位置,但降低了各尺度湍流信号的能量水平,表现出减阻的特征.

参考文献:

- [1] Corino E R, Brodkey R S. A visual investigation of the wall region in turbulent flow [J]. J. Fluid Mech., 1969, 37:1-30.
- [2] Kim H T, Kline S J, Reynolds W C. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer [J]. J. Fluid Mech., 1971, 50:133-160.
- [3] Camussi R, Guj G. Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: intermittency and coherent structures [J]. J. Fluid Mech., 1997, 348:177-199.
- [4] Liepmann H W, Narasimha R. Turbulence management and relaminarisation [M]. Bangalore, India: IUTAM Symposium, 1988:285-304.
- [5] Gad-el-Hak M. Flow control: passive, active and reactive flow management[M]. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2000:120-148.
- [6] Luckhik T S, Tiederman W G. Turbulent structure in low-concentration drag-reducing channel flows [J]. J. Fluid Mech., 1988, 190:241-263.
- [7] Choi H, Moin P, Kim J. Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows[J]. J. Fluid Mech., 1994, 262:75-110.
- [8] Chun K B, Sung H J. Control of turbulent separated flow over a backward-facing step[J]. Exp. in Fluids, 1996, 21:417-426.
- [9] Park S H, Lee I, Sung H J. Effect of local forcing on a turbulent boundary layer [J]. Exp. in Fluids, 2001, 31:384-393.
- [10] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence [J]. Annu. Rev. Fluid Mech., 1992, 24:395-457.
- [11] Farge M, Schneider K. Coherent vortex simulation(CVS), a semi-deterministic turbulence model using wavelet [J]. Flow Turbulence and Combustion, 2001, 66:393-426.
- [12] Farge M, Kevlahan N, Perrier V, et al. Wavelet and turbulence [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(4):639-669.
- [13] 舒玮,姜楠. 湍流中涡的尺度分析[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(增刊):89-95.
SHU Wei, JIANG Nan. Eddy scale analysis in turbulence [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(Suppl):89-95. (in Chinese)
- [14] 姜楠,王振东,舒玮. 辨识子波分析壁湍流猝发事件的能量最大准则[J]. 力学学报, 1997, 29(4):406-411.
JIANG Nan, WANG Zhendong, SHU Wei. Maximum energy criterion in the identification of burst events in wall turbulence by wavelet analysis[J]. Acta Mechanica Sinica, 1997, 29(4):406-411. (in Chinese)