

平板边界层转捩过程中低频信号的产生*

龚安龙^{1,2)} 李睿劬^{1,2)} 李存标^{1)†}

¹⁾ 北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871)

²⁾ 清华大学工程力学系, 北京 100084)

(2001 年 7 月 16 日收到, 2001 年 10 月 17 日收到修改稿)

利用 Fourier 频谱分析和小波变换处理在平板边界层转捩过程中测得的速度信号, 观察到频谱中存在低于基本扰动波频率的含能信号, 即文中所谓的低频信号. 在进一步分析中, 发现这种低频信号的产生可能与流动的间歇性有关. 由于流动的间歇性导致速度信号的脉动, 数据结构产生间歇变化, 这种信号并不一定对应于流场中的某一物理结构的真实频率.

关键词: 边界层, 转捩, Fourier 频谱分析, 小波变换

PACC: 4725C, 4715C, 4715F

率小于 2Hz 的结构性质成为重要问题之一.

1. 引 言

平板边界层转捩研究一直受到人们的广泛关注, 关注的焦点之一是如何从低频演化到高频. 过去的研究大多集中在这一方面, 原因是人们试图研究清楚流动结构的级串过程, 找到小尺度湍流结构产生的根源. 而研究转捩过程中从高频到低频的反向级串却很少, 实验研究更为稀少. 尽管有人们熟知的反级串理论, Kachanov^[1]在 N-型转捩的研究中发现了低于基本波频率 ω_0 的谐波扰动会增长, 并且这种低于基本波频率的半频扰动波在转捩后期会有较大的含能. 他认为这是亚谐共振的直接结果. 在 K-型转捩^[2,3]的研究中我们也发现存在同一现象. 不同的是扰动频率并不是 $\omega_0/(2 \cdot i)$, 而是低于 ω_0 的并不和 ω_0 形成某些确定关系的若干扰动频率的扰动会在转捩后期发展起来. 是什么原因导致它们的增长呢? 一种可能性是存在这类真正意义上的物理结构, 由某种非线性相互作用而致. 李存标^[4]总结了最近转捩中可能的拟序结构种类, 发现这些物理结构的频率均大于等于基本波的频率(2Hz), 因此研究这种低于基本波频率结构的产生过程及性质, 即研究主频

2. 实验方法

我们的实验是在北京大学湍流研究国家重点实验室的水槽中完成的(实验装置见图 1). 水槽的实验段长度为 6m, 横截面为 600mm × 400mm 的矩形截面. 它的来流湍流度约为 0.1%. 在水槽的实验段竖直放置一块光滑的平板, 平板长 1.8m, 展向宽 0.8m, 厚 15mm. 平板垂直放置水中, 其实验面和水槽壁面平行, 攻角为零, 这样, 实验段处于零压力梯度的流场中. 平板的头部圆滑过渡. 平板下游倾斜放置一块翼板, 抑制下游扰动波上传. 在 0.1% 来流湍流度的状态, 我们成功地获得了 Blasius 边界层, 证明可以获得稳定的层流流态, 适于研究转捩^[4].

在距平板前缘 200mm 处有一矩形孔(即 T-S 波发生器), 其长度为 150mm, 宽度为 1mm, 孔内是一个水腔, 水腔的另一面封闭并导出两根强度管与一个圆筒相接, 圆筒的另一侧与一个喇叭粘合, 圆筒密封. 由电压信号控制喇叭产生幅值为 1.8% U_0 的正弦 T-S 波, 频率为 2Hz.

实验使用热线风速仪及 TSI 公司生产的热膜进行测量, 热膜探头的传感部分长为 2mm. 测量的流

* 国家自然科学基金(批准号: 19972034)资助, 部分工作得到剑桥大学牛顿研究所的资助.

† 联系人.

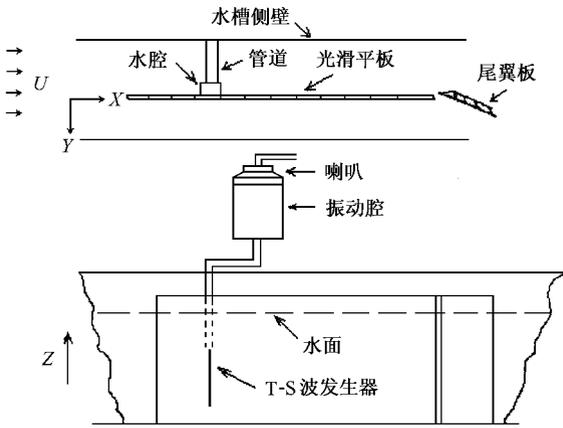


图1 实验模型和装置

向范围位于距离前缘 250mm 到 700mm 的区域内.在流向,展向和垂直于平板的方向上逐点测量,在每一点测量的物理量包括该点处的流向平均速度,除去扰动波后的脉动速度的幅值和相位.

在实验数据的后处理中,我们选择使用了 Fourier 变换和小波变换^[5,6]两种工具.我们先用 Fourier 变换得到了流动的频谱,再利用小波变换进一步分解频谱对应的速度时间序列中各频率的信号.小波分析和频谱分析能有效获得低频信号,结果是可靠的.

实验过程中,测量是在水槽启动超过 9h 以后进行的,这时,水槽中的水温稳定在大约 20℃,水的动力黏性系数为 $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,每米长度对应的 Re 数为 2.0×10^5 .

3. 实验结果

使用上述的数据处理方法,我们得到一系列频谱,并将其与间歇性现象进行对比研究,从而找到了低频信号产生的根本原因.

3.1. 速度信号中低频信号的观察

下文中 x, y 所用单位均为 mm,凡未标出的纵坐标,速度时间图中为已经归一化的速度,频谱图中为已经归一化的功率.

在平板边界层转换过程中,速度信号不断变化(见图 2 和图 3).在转换初期,由于人为施加了扰动,流场的速度信号相当于在层流基础上叠加了一个正弦信号,频率为扰动波的频率(2Hz).随着流动的发展,速度信号发生漂移或间歇的振荡,在频谱中出現了一些低频信号,只是相对弱小.在转换的中期,低频信号逐渐加强,在频谱中已占有了相当比重,有的低频对应的功率甚至超过了扰动基频对应的功率.但此时高频信号还较弱.到了转换后期,已接近充分发展的湍流,高频信号虽然有所加强,可是低频信号依然存在,并在频率谱上仍具有很大幅值.

3.2. 低频信号的演变

T-S 波刚产生时,流动在层流基础上叠加了一个正弦扰动.在近壁区,速度时间序列为正弦曲线(见图 4)但在流向的后续位置及其外层,速度时间序列发生了漂移和间断性振荡(见图 5),从而导致了弱的低

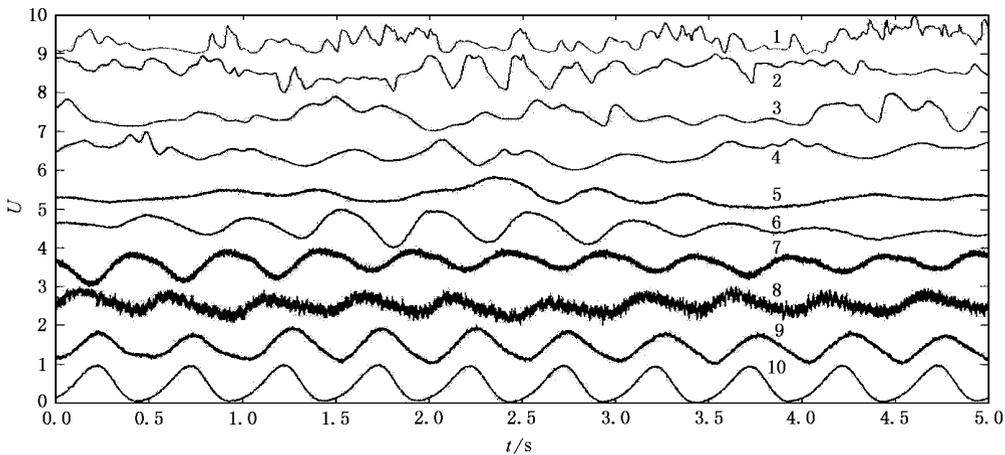


图2 转换过程中流向不同位置的速度时间序列.曲线 1 为 $x = 700, y = 0.6$; 2 为 $x = 650, y = 2.4$; 3 为 $x = 600, y = 0.8$; 4 为 $x = 550, y = 0.6$; 5 为 $x = 500, y = 1.8$; 6 为 $x = 450, y = 0.6$; 7 为 $x = 400, y = 1.4$; 8 为 $x = 350, y = 1.2$; 9 为 $x = 300, y = 0.4$; 10 为 $x = 250, y = 0.2$.

频信号的产生(见图7频谱中小于2Hz的结果).

列产生了幅值间断增强或振荡以及信号的漂移(包括抬升和下降).通过小波变换分解出最低频率的信

由图5可清晰看到,边界层外层的速度时间序

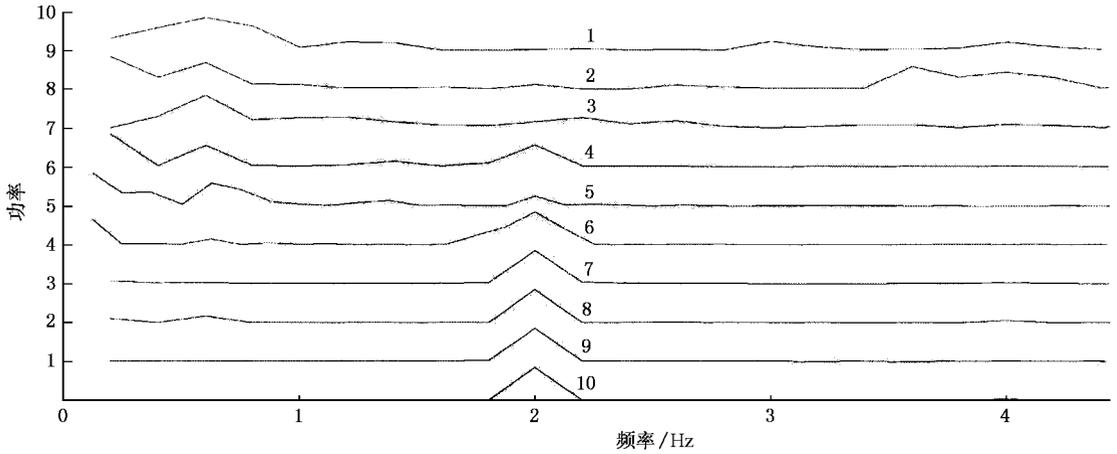


图3 转换过程中对应的频谱(与图2曲线一一对应)

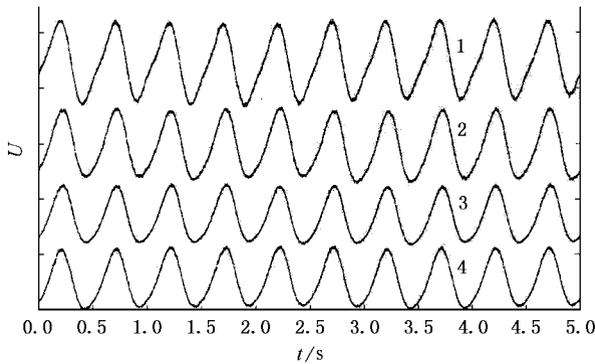


图4 转捩前期近壁区的速度时间序列为正弦曲线. 曲线1为 $x = 250, y = 0.6$; 2为 $x = 250, y = 0.4$; 3为 $x = 250, y = 0.2$; 4为 $x = 250, y = 0$

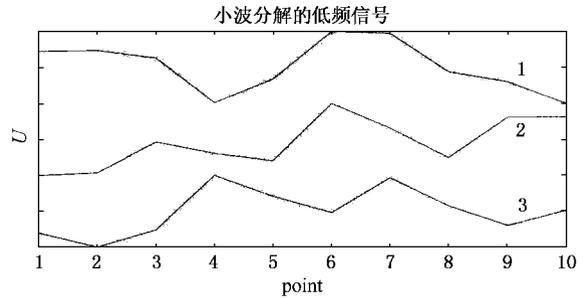


图6 转捩初期外层流动速度信号的小波分解图(与图5一一对应)

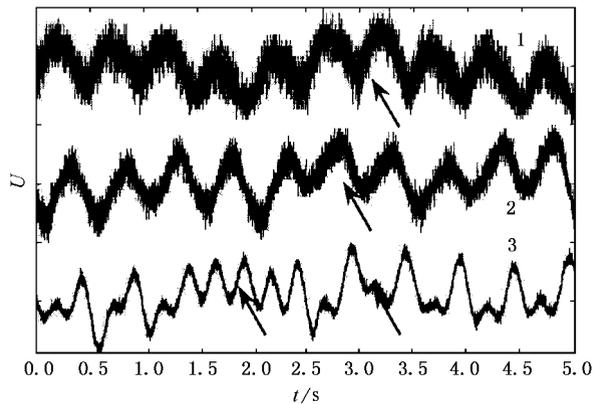


图5 转捩前期外层流动速度信号. 图中所示箭头所指即为速度的幅值间断加强、振荡及漂移抬升. 曲线1为 $x = 400, y = 9.0$; 2为 $x = 350, y = 3.6$; 3为 $x = 300, y = 1.4$

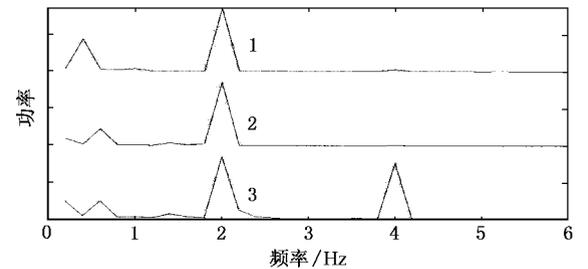


图7 转捩前期外层流动速度信号频谱图(与图5一一对应)

号,如图6(纵坐标已归一化)所示,我们可以更清楚地观察到其大致形状.图7的频谱图进一步说明低频信号已开始出现,尽管还不强.这里要说明一下:速度的小波分解图中,横坐标是与时间成正比的数据点数值,纵坐标是与速度成正比的分解值.

在转捩的初期,速度信号已包含了一定的随机性振荡和漂移,并产生了低频信号.

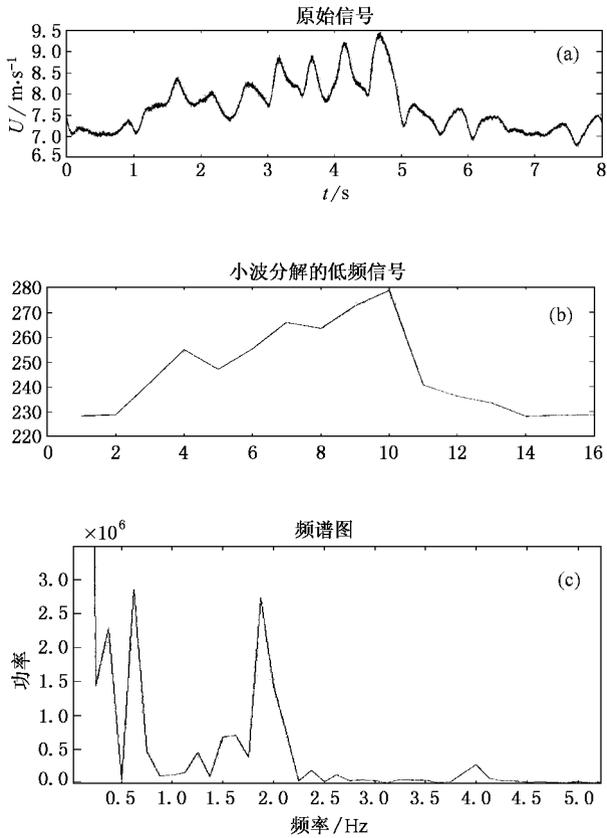


图8 $x = 500, y = 0.2$ 的速度信号分析

随着不稳定性的发展,流动的速度信号中开始出现较明显的变化,即叠加了许多谐波信号,出现明显的低频信号.

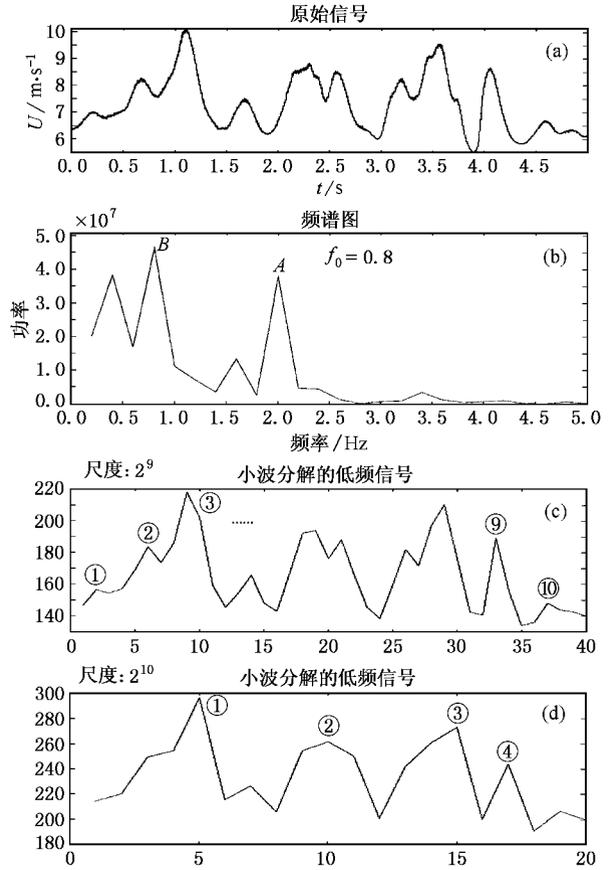


图10 $x = 600, y = 0.2$ 的速度信号分析图 (a)是原始速度信号 (b)是其 Fourier 频谱分析结果 (c)是经尺度为 2^9 的小波分解提取的低频信号的重构图 (d)是经尺度为 2^{10} 的小波分解提取的低频信号的重构图;①,②...表示峰值脉冲;A, B 对应频率分别为 2Hz 和 0.8Hz

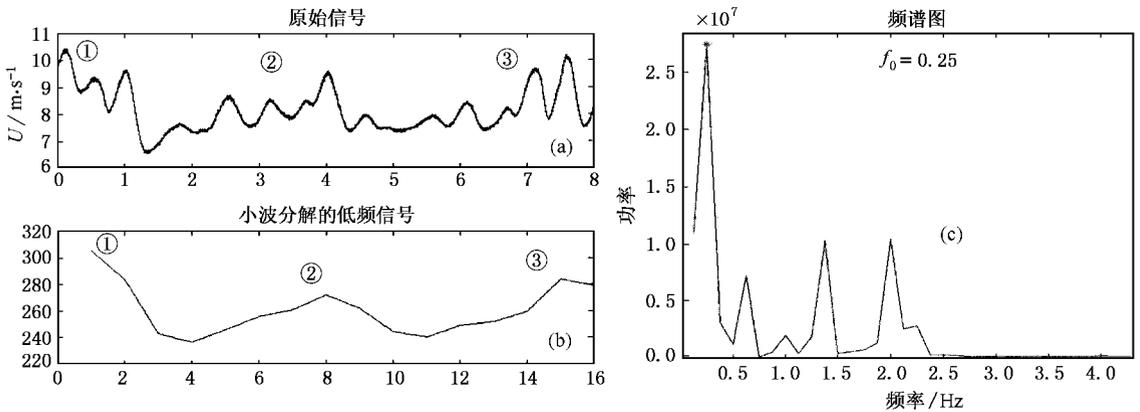


图9 $x = 550, y = 0.2$ 的速度信号分析①,②,③所示为速度信号的脉动

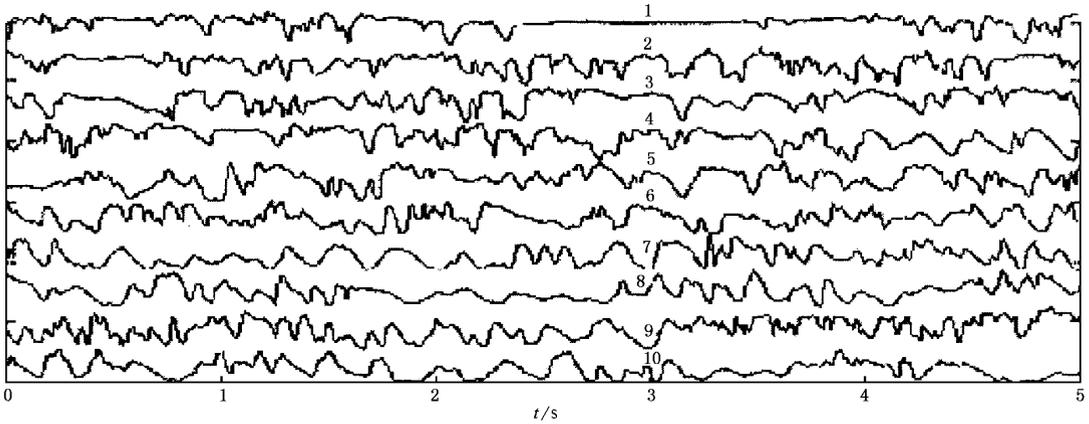


图 11 $x = 700$ 在垂直平板平面方向各位置上的速度时间序列中产生了平稳信号和随机脉冲信号交替出现的现象 (曲线 1—10 的 y 的值依次为 3.6 3.2 2.8 2.4 2.0 1.8 1.6 1.4 1.2 1.0)

图 8 中速度信号经历了一个较大的低频脉冲, 对应于频谱图产生了一个很大的截止频率(图中已截断部分), 同时还有一些其他低频. 图 9 则显示出数个低频脉冲. 下面对其进行简单的定量分析. 速度图中采样时间 $8s$ 内出现了两个较大脉冲(其实①和③只是一个脉冲的两部分), 所以可估算一下最低频率

$$f_0 = 0.25 \text{ (Hz)}.$$

这与图 9 的结果正好一致. 同时, 我们看到各频谱中高频信号相当弱.

图 10 是对这一阶段另一位置上的速度信号的分析. 在图 10(c) 中有大小尖峰(①, ②...) 共计 10 个, 如图所示; 所以必存在频率 $f_A = 2\text{Hz}$ (采样时间为 $5s$, 见图 10(a)), 这正好是扰动基频, 即图 10(b) 中 A 点对应的频率. 同样在图 10(d) 中大的脉冲共 4 个, 所以存在频率 $f_B = 0.8\text{Hz}$, 这也正是图(b)中 B 点对应的低频 0.8Hz .

我们从上面的分析中发现低频信号的出现源自速度信号中叠加了较大的低频速度脉冲, 而这些脉冲对应着转捩中某些结构的发展和相互作用. 这就说明在低频信号和间歇性之间存在着某种联系.

转捩进入后期, 流动用肉眼观看会感觉更加复杂. 这时流动已接近并达到了湍流状态. 此时由于大尺度结构的破裂^[4]导致了大量高频信号的产生, 而低于基频的低频信号仍然存在, 并占有一定的能量比重. 从图 11 中可以看到流动明显的间歇性.

图 12 是对 $x = 650, y = 0.6$ 处速度信号的综合分析, 方法同前. 由图中尖峰个数不难算得图(c) 对应频率即是 C 点频率 0.6Hz ; 图(d) 对应频率为 D 点频率 1.2Hz .

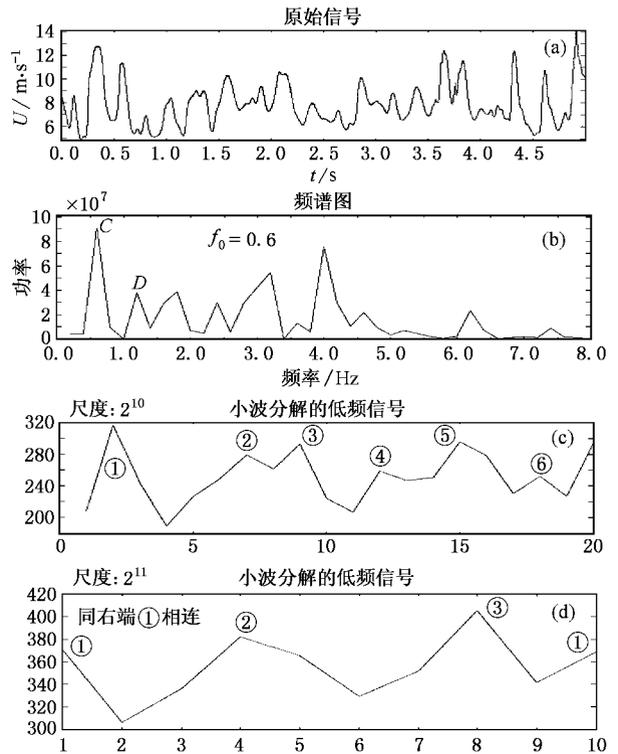


图 12 $x = 650, y = 0.6$ 的速度信号分析图 ①, ②... 表示峰值脉冲; C, D 对应频率分别为 $0.6\text{Hz}, 1.2\text{Hz}$

4. 讨 论

在平板边界层转捩过程中, 流动的频谱中出现了低于扰动波频率的低频含能信号, 由于在已有的转捩实验现象报告中并未找到某种可能对应着这种低频信号的单一的大尺度结构, 所以必须重新分析

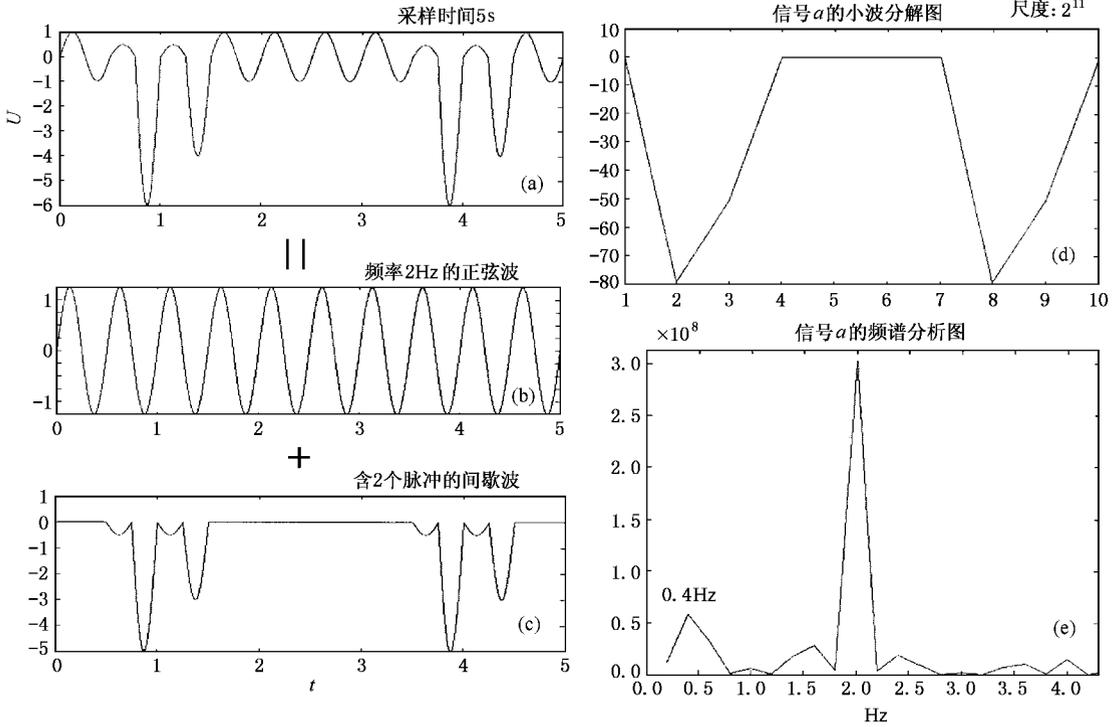


图 13 间歇脉冲对低频的贡献

数据结构.通过具体处理,利用数值的方法验证了间歇性可能是产生这种低频含能信号的原因(见图 13).

如图 13 所示,信号 a 由频率为 2Hz 的平稳正弦波 b 与含两个间歇性脉冲的波 c 叠加而成.经尺度为 2^9 的小波分解可以看出产生了低频 0.4Hz,正好对应于信号 a 的频谱图中.这说明这种低于基本波频率的频率值可能由于数据间歇性的存在而产生.换句话说,若干高频信号的间歇出现,会在数据分析上带来某些低频的结构.寻找这种低频物理结构往往不容易,如果真正存在这种物理结构,显然这些信号处理结果中的低频能和物理结构对应.若不存在,这样的物理结构,数据的间歇性会产生这样的频率分布上的低频信号.而事实上,用流动显示方法检测这些低频含能结构(时空上的大尺度结构)是否存在是不难的,本问题也正是因为大量的显示得不到这种低频物理结构而诱发的^[3,4].

5. 结 论

由于在边界层流动中对应于频谱图中低频结构的真实物理结构并未在实验中观测到,所以,我们从所作的实验数据的分析得出如下结论:在平板边界层转换过程的频谱中出现的低于基本波频率的含能频率信号,与边界层流动中已发现的大尺度的时空结构的直接关系没有找到,而与速度时间序列所显示出来的间歇性相关,即可能由间歇性产生了低于基本波频率的低频信号.这种低频结构可能并不对应于大尺度物理结构,换句话说,由于是单点测量,测到的频率不是某种结构出现的所有频率.而间歇性的产生是由于初始条件中非周期条件导致的^[3].非周期扰动是广谱的分布,而低频结构的频率是较低的,因此仅仅是非周期扰动中某些低频扰动参与了非线性相互作用,详细讨论已在文献 3 中给出.

- [1] Kachanov Yu S 1987 *J. Fluid Mech.* **184** 43
Kachanov Yu S 1994 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **26** 411
- [2] Klebanoff P S Tidstrom K D and Sargent L M 1962 *J. Fluid Mech.* **12** 1
- [3] Lee C B 2001 *Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute* (Los Angeles :California State University Press) pp 61—80
- [4] Lee C B 2000 *Phys. Rev. E* **62** 3659
Lee C B 2001 *Exps. Fluids* **30** 354
Lee C B 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 182 (in Chinese) [李存
- 标 2001 物理学报 **50** 182]
- Lee C B 1998 *Phys. Letts. A* **247** 397
- Lee C B 2000 *Chin. Phys.* **9** 508
- [5] Yang F S 1999 *Wavelet Transformation and Its Application* (Beijing : Science Press [in Chinese] 杨福生 1999 小波变换的工程分析与应用(北京 科学出版社)
- [6] Ma J ,Tan L Y and Ran Q W 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1223 (in Chinese) [马 晶、谭立英、冉启文 1999 物理学报 **48** 1223]

On the generation of low-frequency signals in a transitional boundary layer^{*}

Gong An-Long^{1,2)} Li Rui-Qu^{1,2)} Li Cun-Biao¹⁾

¹⁾(State Key Laboratory for Turbulence Research and Complex Systems ,Peking University ,Beijing 100871 ,China)

²⁾(Department of Engineering Mechanics ,Tsinghua University ,Beijing 100084 ,China)

(Received 16 July 2001 ; revised manuscript received 17 October 2001)

Abstract

The fast Fourier transform(FFT) and wavelet transformation were used to process the experimental data in a transitional boundary layer. A low-frequency high-amplitude distribution was observed in the power spectrum. The experimental evidence shows that this distribution is related to the intermittent phenomena in a fluid. Therefore ,it responses to an intermittent data structure instead of a real physical one.

Keywords : FFT , wavelet , boundary layer , transition , intermittent phenomena

PACC : 4725C , 4715C , 4715F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19972034).