



CSTAM 2012-B03-0152

## 波形壁面湍流相干结构 TRPIV 测量和 POD 分析

王维，姜楠

天津大学机械工程学院力学系  
天津市现代工程力学重点实验室  
中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

### 第七届全国流体力学学术会议

2012 年 11 月 12—14 日 广西·桂林

# 波形壁面湍流相干结构 TRPIV 测量和 POD 分析

王维<sup>\*, +</sup>, 姜楠<sup>\*, +, 2)</sup>

\* (天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072)

+ (天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM), 北京 100190)

**摘要** 本文使用二维高时间分辨率粒子图像测速 (TRPIV) 系统对波形壁面湍流相干结构进行了实验研究。壁面几何形状的周期变化诱导湍流场近壁区的速度分布产生了周期性。湍流度的极值显示了流场内附加剪切层的形成与发展。象限分裂法的分析表明喷射和扫掠事件是主要的雷诺应力贡献者, 喷射事件虽然发生概率小于扫掠事件, 但是其贡献量大于后者, 突出了喷射事件的重要性。对流场速度进行最佳本征分解(Proper Orthogonal Decomposition)分解, 各模态能量百分比表明低阶的大尺度模态是湍动能的主要携带者, 同时这些模态也是雷诺应力的主要贡献者, 在湍流边界层大部分范围内的贡献都很大。

**关键词** 波形壁面, 剪切层, 最佳本征分解, 相干结构, 高时间分辨率粒子图像测速仪

## 引言

最近几十年的湍流研究结果揭示出相干结构对湍流的产生发展具有重大影响。这些研究主要集中于诸如平板壁面等规则流场, 而非规则流场也具有重要的理论研究和工程实用价值。粗糙元型或者是结构型边界的流场拥有更加强烈的质量、热量和动量上的输运。正是因为这样的属性, 结构型壁面被广泛应用于热交换设备的制造, 港口航道的设计等领域。

波形壁面湍流有着与平板下不同的特征, 壁面的变化诱导出了流场中速度和压力的空间周期变化。流场展现出与平板边界层的流场不同的湍流产生机制。尽管在近壁区平板边界层和波形壁面边界层的形成机制有着较大的不同, 但是 Cherukat(1998), Hudson(1996), Nakagawa(2003)等的研究表明当离壁面足够远时, 两种环境下的湍流物理量的统计性质并没有重大的区别, 暗示出在外区可能存在一种普适的流场特征。这也验证了 Raupach et

al.(1991)提出的假设: 高雷诺数下, 边界层外区的湍流运动是不受壁面条件的影响的。

## 1 试验方法

实验在 SZ-2 型循环式水槽内进行。实验段长 130cm, 宽 14cm, 深 15cm。实验使用 Dantec 二维 TRPIV 测速系统, 包括 Pegasus Systems Nd:YLF 双腔激光器, CCD 高速相机分辨率为  $1280 \times 1024$  pixels, 示踪粒子是直径  $10 \mu\text{m}$  的空心玻璃珠。实验中拍摄的是 X-Y 平面, 相机采样频率为 600Hz, 每组采集 6400 帧图像。拍摄的粒子图像范围为  $115.6 \times 92.48\text{mm}^2$ , 设置查询窗口为  $32 \times 32$  pixels, 经过互相关计算得到  $157 \times 125$  个速度矢量的瞬时流场, 空间分辨率为 0.72mm, 包含有流向和法向两个速度分量的信息。

实验所用波形板拟合的波形曲线为  $7.4 + 1.5 \cos(0.296x - 1.55)$ , 波长 21.22mm, 波幅 3mm, 形状如图 1。实验中来流速度为 0.118m/s 和 0.194m/s。

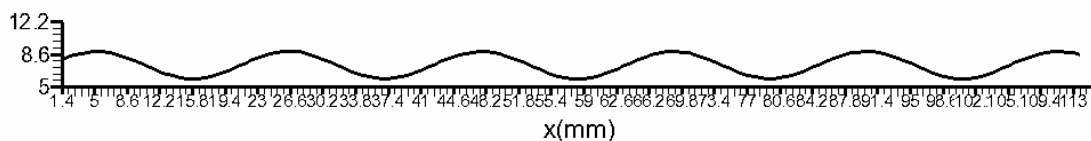


图 1 波形壁面曲线示意图

1) 基金资助项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10832001)面上项目(11272233), 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(NO. 2012CB720101), 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)2012对外开放课题。

2) Email: nanj@tju.edu.cn

## 2 结果分析

图 2 是 0.118m/s 来流速度下波形壁面的流向平均速度沿流向变化曲线。图中的曲线从下往上分别是  $0.09\delta$ ,  $0.16\delta$ ,  $0.26\delta$ ,  $0.43\delta$  四个无量纲的法向位置。离波峰最近位置的流向速度分布显现了很好的周期性，空间周期为波形壁面的波长。沿法向远离壁面，从曲线的变化可以看出边界条件给流场带来的周期性影响逐渐消失。流向上背风面压力为逆压梯度，迎风面为顺压梯度。逆压梯度具有使流场减速的作用，而顺压梯度则能加速。从波谷到波峰，速度逐渐增加，而从波峰到波谷速度递减。

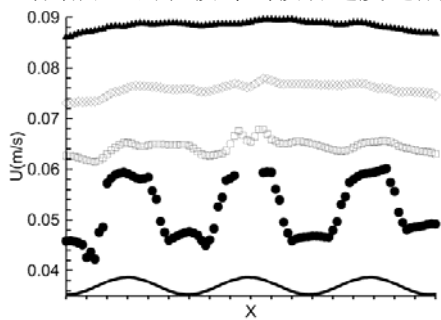


图 2 4 个法向位置处流向平均速度沿流向的分布

图 3 是与图 2 相同高度下法向平均速度沿流向变化的曲线。与流向平均速度相比，法向平均速度要小上 2 个量级，这给 PIV 测速系统带来了更大的不确定性。由于波形壁面的起伏是在垂直方向上，所以从图中看出法向速度受其影响比流向速度更大。远离波形壁面，V 的周期性变化并没有明显消失，而且不同高度的法向速度的大小也很接近，没有表现像出流向速度的大小远离壁面递增的现象。

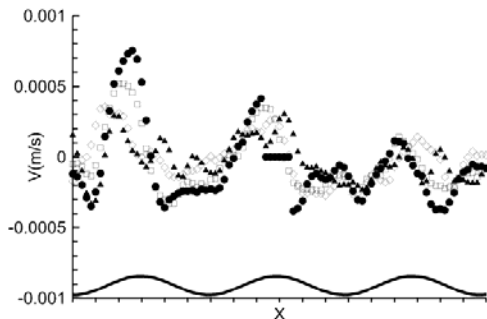


图 3 4 个法向位置处法向平均速度沿流向的分布

图 4 是波形壁面流场内的 4 个波谷位置处流向湍流度的分布，分别是 15.8mm、37.4mm、58.28mm 和 79.88mm。沿着法向，可以观察到

湍流度剖面出现了 2 到 3 个极值。Buckles(1984)研究了在波谷处有分离存在的情况下的波形壁面流场，建议使用湍流度的极值来标识剪切层的中心。剪切层在波峰后面形成，向下游运动中，逐渐远离壁面，并且可以延伸过好几个波长，下游波峰处产生新的剪切层，这样沿法向可以看到两个湍流度极值的出现，如图 5。第一个剪切层在形成后其法向位置几乎不变，直到第二个剪切层形成后，后者将前者“顶”了起来，而第二个剪切层的发展又呈现出与第一个剪切层几乎一样的发展。流场展现出与平板边界层的流场不同的湍流产生机制。对平板壁面流场来说，近壁区拟流向涡的形成被认为是湍流产生和维持的关键一环，它们像泵一样将低速流体抬离壁面。对波形壁面流场来说，剪切层才是湍流能量和雷诺应力的来源，剪切层的湍动能扩散控制着湍流产生，剪切层与当地的强速度梯度间的相互作用产生了较大的湍能产生项。

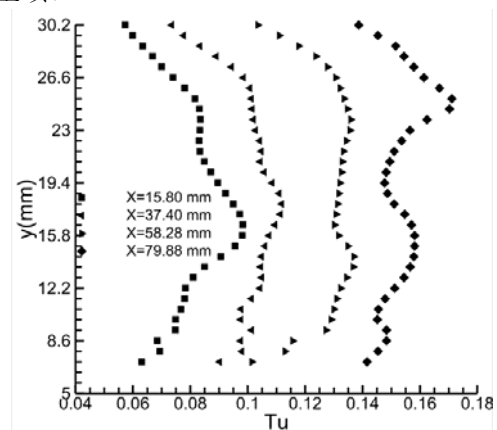


图 4 4 个波谷处的流向湍流度沿法向分布

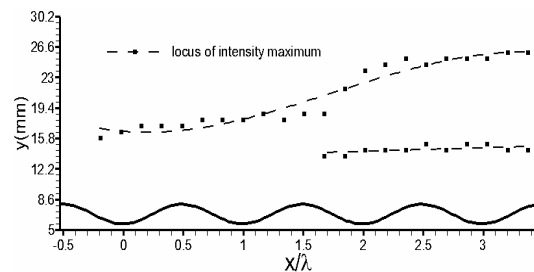


图 5 湍流度极值标识的剪切层

使用象限分裂法研究流向脉动速度和法向脉动速度平面内的 4 个象限的事件对平均雷诺应力的贡献。过程如下：

1) 基金资助项目：国家自然科学基金重点资助项目 (10832001) 面上项目 (11272233)，国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (NO. 2012CB720101)，中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 (LNM) 2012 对外开放课题。

2) Email: nanj@tju.edu.cn

$$\langle u'v' \rangle_Q = \frac{1}{T} \int_0^T uvI(t)dt, \quad Q=1, 2, 3, 4. \quad (1)$$

$$I(t) = \begin{cases} 1, & u'v' \text{ belongs to quadrant } i; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{T} \int_0^T I(t)dt. \quad (3)$$

图 6 和图 7 分别是根据上述程序得到的结果，其中雷诺应力的贡献以来流速度平方无量纲化，法向坐标以边界层厚度无量纲化。Q2 喷射和 Q4 扫掠事件在整个边界层内发生次数明显多于 Q1 和 Q3 事件。喷射事件频率远离壁面时慢慢减小，而扫掠事件随远离壁面逐渐增加，接近边界层边缘时下降。喷射与扫掠相比，在近壁区，喷射多于扫掠，外区扫掠的持续增加使其最终超过了喷射的次数。虽然扫掠在外区次数多于喷射，但是其对平均雷诺应力的贡献却并不多于喷射。Q2 喷射事件是流场边界层中雷诺应力的主要贡献者，Q4 扫掠事件居于第二位。

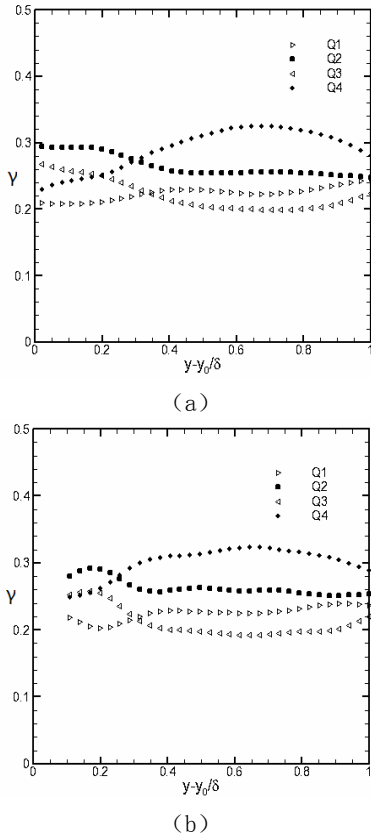


图 6 (a) 波谷处雷诺应力事件的频率;  
(b) 波峰处雷诺应力事件的频率

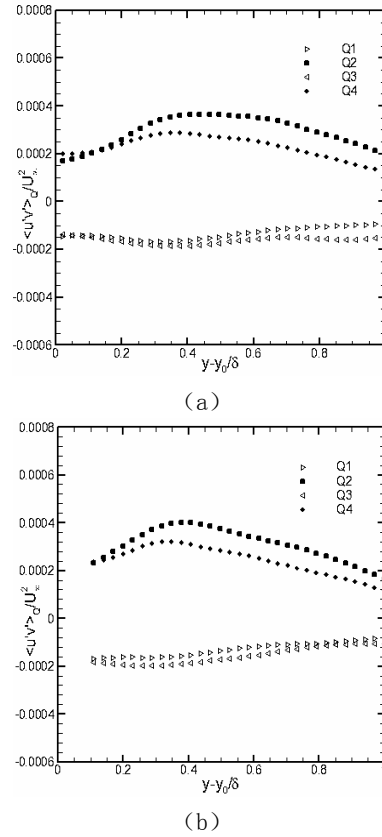


图 7 (a) 波谷处雷诺应力事件的贡献;  
(b) 波峰处雷诺应力事件的贡献

最佳本征分解 (Proper Orthogonal Decomposition) 广泛应用于模式识别、信号处理、数据压缩等领域，也称为 Karhunen-Loeve 分解等。POD 的基函数是基于相关函数的分解求得，所以 POD 具有统计方法的性质。同时 POD 是一个线性处理过程，是广义上的傅里叶分解 (Fourier Decomposition)。POD 的优越性在于在对速度场分解得到的众多基函数中 POD 的基函数是能量最优化的。许多成功将 POD 应用于流体力学的文章表明 POD 是提取相干结构的一个有力工具。

本文对波形壁面的 6399 个瞬时流场中流向范围 26.6mm-69.08mm，法向范围 9.32mm-35.96mm 的区域进行 POD 分析。图 8 是分解得到的关于  $u'$  和  $v'$  的前 2 阶模态。POD 分解将相关矩阵的特征值降序排列，相对应的基函数是在能量上依次递减。 $u'$  和  $v'$  的第一阶模态的尺度在流向和法向上都与分析区域的大小相当，第二阶模态的尺度则是第一阶模态的一半左右，随着模态数增加，尺度会越来越小。需注意的是这些基函数是数学意义上对速度场的分解，并不一定代表着流

场中真实的结构。Liu(2001)指出流场的结构是许多尺度的 POD 基函数的叠加, 单个的 POD 基函数是不能描述结构的。从图中可以看出分别在第一阶和第二阶模态下, 流向和法向脉动速度的基函数在流场区域的同一位置上几乎都是反号的, 因此对应位置的雷诺应力 $-u'v'$ 就是正的, 即对雷诺应力的贡献也是正的。类似的正贡献分布为主导的情况在前面低阶的模态一直存在。

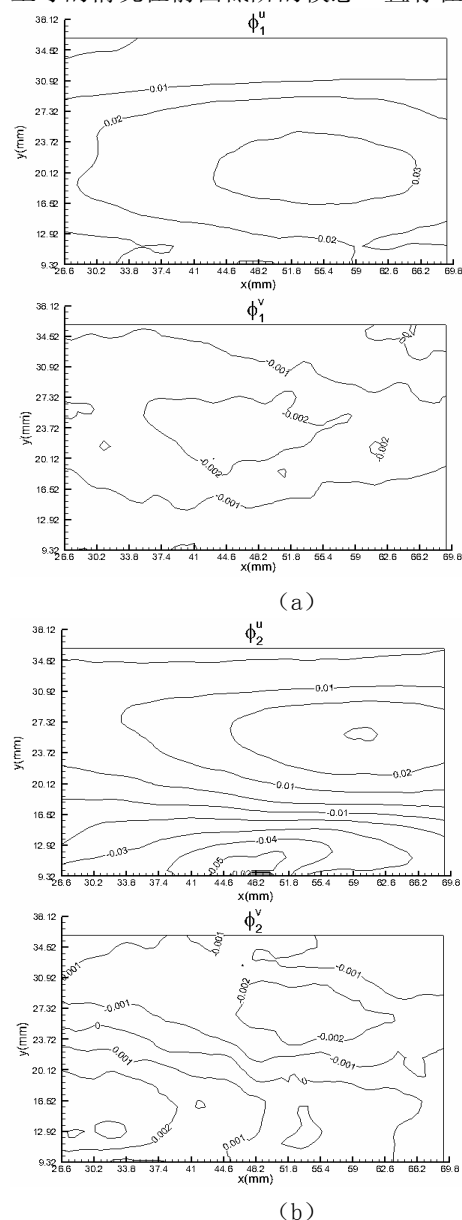


图 8 (a) 对流向和法向脉动速度场 POD 分解得到的第一阶模态; (b) POD 分解得到的第二阶模态

Moin(1989)指出基于 POD 的基函数的正交性, 各阶模态对流场统计量的贡献都是可以得到的。图 9(a)是 POD 分解的流向脉动速度的前 200

阶模态对流向湍动能的单独贡献和积累贡献。前 3 个模态就已经占有一半以上的流向湍动能, 前 47 个模态的贡献量之和就已经占到总的流向湍动能的 90%。图 9(b)是前 8 阶模态的积累贡献量在波谷和波峰处沿边界层法向的分布, 前 8 阶模态一直对当地湍动能有着主导的贡献, 接近边界层边缘时才降下来。POD 模态对流场湍动能和雷诺应力的贡献的分析说明大尺度“结构”是湍能的主要贡献者, 对流场的质量输运和动量输运起到至关重要的作用。

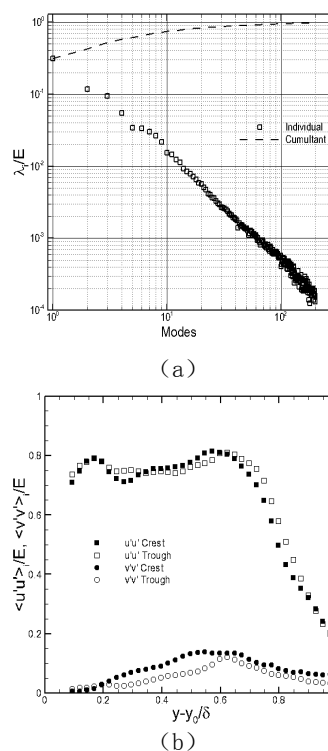


图 8 (a) 流向脉动速度的 POD 分解的各模态的能量分布; (b) 前 8 个模态的能量贡献量在波谷和波峰处沿法向分布

### 3 结 论

波形边界条件带给近壁区流场速度分布的周期性, 并且周期性对法向速度要更大一些。用湍流度极值标识的剪切层揭示了波形壁面流场与平板湍流不同的发展特征。对脉动速度场进行象限分裂法分析的结果表明喷射和扫掠事件发生的频率很高, 而且喷射和扫掠事件是雷诺应力的主要贡献者。流场的 POD 分解表明低阶模态对应的大尺度“结构”含有主要的湍动能, 同时也是雷诺应力的主要贡献者, 承担着流场的质量动量输运。

## 参考文献

- 1 Cantwell BJ. Organized motion in turbulent flows. *Ann.Rev.Fluid.Mech.*,1981,13:457~51
- 2 Head MR., Bandyopadhyay P. New aspects of turbulent boundary-layer structure. *J.Fluid.Mech.*,1981,107:297~338
- 3 Robinson ST. Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer. *Annu.Rev.Fluid.Mech.*,1991,23:601~639
- 4 Buckles J, Hanratty TJ, Adrian RJ. Turbulent flow over large-amplitude wavy surfaces. *J.Fluid.Mech.*,1984,140:27~44
- 5 Cherukat P, Na Y, Hanratty TJ, et al. Direct Numerical Simulation of a Fully Developed Turbulent Flow over a Wavy Wall. *Theoert.Comput.Fluid Dynamics*,1998,11:109~134
- 6 Hudson JD,Dykhno L, Hanratty TJ. Turbulence production in flow over a wavy wall. *Exp Fluids*,1996,20:257~265
- 7 Nakagawa S, Na Y, et al. Influence of a wavy boundary on turbulence. *Experiments in Fluids*,2003,35: 422~436
- 8 Nakagawa S, Hanratty TJ Particle image velocimetry measurements of flow over a wavy wall. *Physics of Fluids*,2001,13:3504~3507
- 9 Raupach MR, Antonia RA, et al. Rough-wall turbulent boundary layers. *Applied Mechanics Reviews*,1991,44:1~25
- 10 Liu ZC,Adrian RJ, Hanratty TJ. Large-scale modes of turbulent channel flow: transport and structure. *J.Fluid.Mech.*,2001,448:53~80
- 11 Berkooz G, Holmes P, Lumley JL. The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent flows. *Annu.Rev.Fluid.Mech.*,1993,25:539~575
- 12 Liang YC, Lee HP, et al. Proper Orthogonal Decomposition and Its Applications—Part I: Theory. *Journal of Sound and Vibration*,2002,252(3): 527~544
- 13 Chatterjee A. An introduction to the proper orthogonal decomposition. *Current Science*,2000, 78(7):808~817
- 14 Moin P,Moser R. Characteristic-eddy decomposition of turbulence in a channel. *J.Fluid.Mech.*,1989,200:471~509

## TRPIV MEASUREMENT AND POD ANALYSIS OF COHERENT STRUCTURE IN TURBULENT FLOW OVER A WAVY WALL

Wang Wei<sup>1,2</sup> Jiang Nan<sup>1,2</sup>

(1 Dept. of Mechanics of Tianjin University, Tianjin 300072, China)

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

**Abstract** An experimental study of coherent structure in turbulent flow over a wavy wall was performed by using 2D TR-PIV. The geometric variation of the wall-surface shape induces the periodicity to the flow in the vicinity of the wall. The peaks of turbulence intensity indicate the formation and development of the shear layers. By the quadrant splitting, it suggests that although the frequency of ejections is less than sweeps, ejections are the first contributor to the Reynolds stress, sweeps are second. This shows the importance of ejections. Using proper orthogonal decomposition (POD), it shows that the low-order modes are the main energy carriers, and also the main contributors to the Reynolds stress, which are dominant almost in the whole boundary layer.

**Key words** wavy wall, shear layer, proper orthogonal decomposition, coherent structure, TRPIV