



CSTAM2012-B03-0006

可压缩槽道湍流对流速度研究

陈 军, 裴 杰, Fazle Hussain[◇], 余振苏

北京大学工学院

湍流与复杂系统国家重点实验室

[◇]美国休斯敦大学机械工程系

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

可压缩槽道湍流对流速度研究¹⁾

陈军^{*, 2)}, 裴杰^{*}, Fazle Hussain⁺, 余振苏^{*}

^{*} (北京大学工学院湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京海淀区 100871)

⁺ (Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Houston, TX 77204, USA)

摘要 本文对中等马赫数 ($M=0, 0.8, 2.0$ 和 3.0) 的可压缩槽道湍流进行了三维直接数值模拟 (DNS) 计算, 获得了可压缩条件下的瞬时流场。针对流向速度脉动, 通过两点速度脉动的时-空相关分析, 获得了在不同马赫数情况下的对流速度, 发现在可压缩和不可压情况下近壁区 (y^+) 的对流速度均为常数 (U^+)。各种马赫数情况下的速度剖面具有较强的相似性。本文采用了速度涡量相关结构 (Velocity-Vorticity Correlation Structure - VVCS) 对 DNS 结果进行计算和分析。VVCS 定义了在场空间中固定位置上与速度脉动最强相关的涡量区域, 能够反映流动区域内主导各空间点上速度脉动的统计涡量结构。基于 VVCS 的分析结果, 提出了一组流向速度脉动的对流速度的量化模型。在全槽道域和全部马赫数情况下, 模型预测结果与 DNS 的实际对流速度均吻合。该结果为流向涡结构的对流过程主导近壁对流速度这一假设提供了有力证据, 同时也证实了 VVCS 分析方法的可行性。

关键词 可压缩槽道流, 对流速度, DNS, 相关结构

引言

湍流脉动的对流速度, 也称为传播速度, 由各向同性 (网格) 湍流研究中的泰勒假设所提出[1]。依靠“冻结”湍流, 泰勒假设空间脉动可以从流动变量的时间信号获得——在 (x, t) 点的脉动与点的行为相同, 其中为湍流脉动的对流速度。在过去几十年里, 对流速度在剪切湍流研究中, 由于大尺度有序运动, 即拟序结构的出现, 对流速度研究受到了高度重视。流动结构和压缩性导致的内在非线性和非局部性质, 对理解高速情况下脉动的对流过程带来的困难 [2-5]。理论上讲, 对流速度课题从两点时空相关函数的特征形状来获得[6-8]。这是一个可以从传感器在空间点上获得的时间信号来提取空间结构的重要物理参数。前者更易于从实验上获得。除此之外, 对流速度在发动机共振、声辐射、减阻和热传输等方面也具有工程价值[9-10]。为定量理解, 人们已经对拟序结构的对流过程进行了研究[6,11], 发现拟序结构在质量、动量和能量传输中发挥着重要作用。然而, 虽然进行了许多探索工作, 在全流域定量描述对流速度依然没有进展。本研究提出了

一个不可压/可压缩槽道湍流的全流场对流速度剖面的预测模型。

拟序结构的对流速度的解释最初由文献 [6,11] 提出。通常被描述为代表着拟序结构的瞬时结构集合的平均传播速度, 可以通过传统的分析瞬时湍流场来提取。显然 Biot-Savart 定律表示湍流脉动由非局部的涡结构诱导。尤其对壁湍流, 近壁流动由流向缓冲区内的涡结构诱导[12], 同时恒定涡结构对流速度被认为与同一组涡结构相关。复杂性在于, 在流场演化过程中, 流场中不同部分以不同速度运动移动, 同时不同尺度的结构也以不同的传播速度运动。因此, 以拟序结构为原因来理解对流速度需要对拟序结构有一个完善的定义。

人们充分认识到, 涡量脉动作为湍流流动中有组织运动的最重要的元素[13-15], 通过与速度场相互作用参与湍流应力梯度的产生过程 [16-20]。因此, 速度和涡量脉动的两点互相关可以为理解速度脉动和由涡量脉动确定的拟序结构的相互关系提供了一个必要的理论对象。这一想法与速度涡量相关结构 (VVCS) 相一致[21], 后文会有详细解释。

本文对直接数值模拟 (DNS, 最高马赫数 3.0) 的对流速度进行计算, 获得了对流速度剖

1) 基金资助项目: 国家自然科学基金: 90716008, 10572004, 11172006。973 项目: 2009CB724100。

2) Email: jun@pku.edu.cn

面。VVCS 方法本身提出在每个对流速度所在位置 y_r 都自然地与以平均速度运动的最强相关 VVCS 的位置 y_s 相联系[21]。更为重要的是，这一关系为对流速度的产生机理提供了合理描述，以下详细讨论。

1 可压缩槽道流对流速度

可压缩槽道流计算（最高马赫数 3.0）在中国科学院超级计算中心进行。计算参数如 Table I 所示。采用 10^6 网格点，基于中心速度和槽道半高的雷诺数 $Re \approx 3000$ 。当 Re_τ 随马赫数单调增加。在本研究的条件下，不能将雷诺数效应和马赫数效应截然分开。然而，研究将对以 VVCS 的概念来描述对流速度进行确认，这是完整描述马赫数效应的第一步。

TABLE I. The parameters and mesh grids of our simulations. L_x , L_y and L_z denote the streamwise (x), normal (y) and spanwise (z) domain size, respectively.

Case	Re	Re_τ	$L_x \times L_y \times L_z$	numerical scheme
Incomp.	3300	180	$4\pi\delta \times 2\delta \times 2\pi\delta$	Spectral method
M=0.8	3000	193	$4\pi\delta \times 2\delta \times 4\pi\delta/3$	Finite difference
M=2.0	3000	238	$4\pi\delta \times 2\delta \times 4\pi\delta/3$	Optimized WENO[22]
M=3.0	3000	300	$4\pi\delta \times 2\delta \times 4\pi\delta/3$	Optimized WENO[22]

当马赫数增加时，降低（密度增加）。为保证大尺度拟序结构的尺度固定，我们选择与成反比。实际选择如下： $\delta = 18, 20, 24$ 和 28 分别对应 $M = 0, 0.8, 2.0$ 和 3.0 。

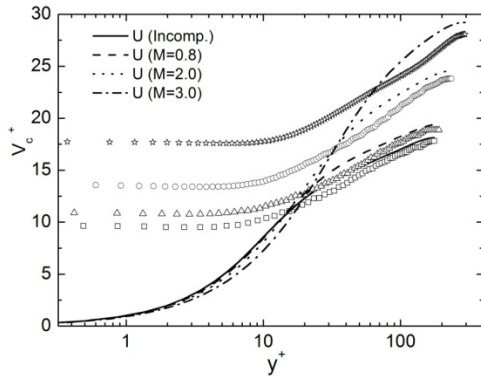


图 1 在四种马赫数条件下的平均速度 U 和对流速度 V_c 剖面。正方、三角形、圆形和星形符号分别代表在 $M = 0, 0.8, 2.0$ 和 3.0 情况下的对流速度 V_c 。

图 1 显示了在不同马赫数情况下的平均速度 $U(y^+)$ 和对流速度 $V_c(y^+)$ 。无论在不可压还是可压缩流动中， V_c 在近壁区 $y^+ < 10$ 高于当地平

均速度。以下各节中，速度信号或涡量信号，如，可以分解为系综平均部分和脉动部分，即。此处，可以是任意参量，如速度 (u, v, w) ，涡量，密度或温度。长度和时间用壁面单位表示时采用“+”上标，即和，其中，是运动粘性，是摩擦速度。

流向速度脉动的对流速度 V_c 采用流向速度的时空相关进行计算：

$$R_{uu}(\Delta x, \Delta t) = \frac{u'(x, y, z, t)u'(x + \Delta x, y, z, t + \Delta t)}{u_{rms}^2}$$

其中，和分别代表流向空间间隔和时间延迟。在壁湍流中， R_{uu} 呈现出椭圆等高线分布，其斜率定义为 u' 的对流速度 V_c [23,24]。

均速度。 V_c 随马赫数增长明显。Kim 和 Hussain(1993)推测 V_c 平台显示了近壁区速度脉动以一种波动方式进行传播[25]。一个有趣的事实是：在可压缩流动中，本研究采用了等温壁面条件，因此导致大平均密度（以及温度）梯度（该结论也在文献[26, 27]中得到印证），近壁区以及）。这预示着速度脉动与内能传输之间的强烈关联。这种关联如何影响对流速度将是 VVCS 模型在本研究中的主要讨论内容。

另一个值得注意的事实是，外区的对流速度总是低于平均速度（在 $M=3.0$, $y^+ \approx 120$ 位置达到 -10%），这种差异会随马赫数增加而增加。同时，近槽道中心区，对流速度再次接近平均速度。Kim 和 Hussain 将相对较低的对流速度解释为‘对平均对流速度做出贡献的湍流结构’远离壁面运动的结果[25]。本研究对这一观点提供了一个量化解释。

考虑到 V_c 剖面对所有压缩条件均表现出相似分布, 获得 V_c 对不同马赫数的统一模型是可能的。本研究采用两点速度涡量互相关来了解对流速度并建立一个量化模型, 该模型对四种对流马赫数情况被证实为是成功的。

2 对流速度模型

本节首先介绍 VVCS 定义, 速度和涡量脉动的非局部关联结构, 然后展示对流速度定量模型。

2.1 VVCS 和空间耦合函数

VVCS 由两点归一化速度-涡量相关张量的等值面定义, 即在 A 点速度脉动 u_i' 和 B 点的涡量脉动 ω_j' :

$$R_{u_i \omega_j}(y_r; \Delta x, y, \Delta z) = \frac{\overline{u_i'(x, y_r, z) \omega_j'(x + \Delta x, y, z + \Delta z)}}{u_{i,rms}(y_r) \omega_{j,rms}(y)} \quad (1)$$

其中, 以壁面距离为 y_r 参考点处的速度脉动 u_i' , B 点处距离 A 点。固定 A 点并变化 B 点, 可以获得三维场, 表示 $\omega_j'(y)$ 和 $u_i'(y_r)$ 的相关性 (在固定位置 y_r)。可以理解为在 y_r 处的速度将在近壁留下“脚印”——根据 Biot-Savart 律诱导近壁速度结构。原始的 VVCS 为 33 张量分量形式。本研究着重于识别主导流向速度脉动的 VVCS, 同时我们选择流向涡量分量作为最重要的分量。因此, 张量构成一个标量场。的几何拓扑结构是发展对流速度量化模型的基础。虽然多点统计是一个很深入的研究课题, 但两点速度-涡量相关系数场定义的三维几何结构是全新的并产生了下文介绍的非平凡发现。

本节首先介绍 VVCS 定义, 速度和涡量脉动的非局部关联结构, 然后展示对流速度定量模型。

通过分析发现呈现出良好几何性质的强相关流向涡结构: 当低值等值面构成了随机分布的空间体; 当等值面值增加到某个阈值时, 结构呈现出很强的大尺度几何结构 (如图 2 所示,)。当高于该阈值后, 几何拓扑结构基本不发生变化。

图 2 所示的拓扑结构包含了两对子结构: 一对是相反相关的附着于壁面的结构, 称为“近壁相关结构” (NWCS); 另一对在 NWCS 之上的结构有着长流向尺度并向上倾斜。NWCS 通常附着于壁面, 而第二对涡结构

则跟随参考点移动, 因此称为“伴随相关结构” (ASCS)。

VVCS 的一个重要特征便是在整个流场范围内可识别拟序结构的能力。这特征主要是由于其几何性质依赖于参考点选取。也就是说, VVCS 的几何结构是一个描述壁湍流性质的参考点 y_r 的函数。这一概念在 She 等关于壁湍流多层结构的分析中进行了详细论述[30]。

2.2 非局部耦合模型 (DC 模型)

本文对 VVCS 的几何特征, 如参考点和相关结构之间的关系, 进行了定量测量。对, 在 y_r 的 u' 相关的 ASCS 上最大相关系数距离壁面的位置定义为结构坐标 y_s , 如图 2(d)-(f) 所示。因此, 在在 y_r 的 u' 与在 y_s 的 ASCS 便构成了一种非局部耦合关系。函数

$$\Psi \quad (2)$$

描述了这种非局部关联, 并作为 VVCS 一个几何量度在本研究中使用。

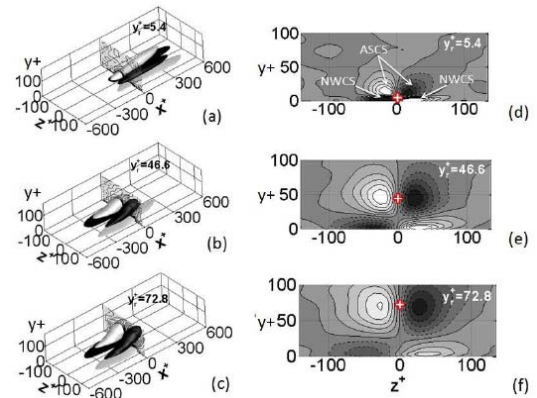


图 2 拓扑结构及其在 $x=0$ 处 ($y-z$) 平面的二维切面

图 3 描述了单调函数 Ψ 。在 <10 内, 接近于常数 (在不可压流动中, $=17$)。这意味着在 <10 的区域内, u' 的对流速度主导由 ASCS 代表的近壁涡运动。与近壁处变化相对比, 在外区 (>0.1) 并不随马赫数发生重大的变化, 仅比略小。总之, 在 VVCS 框架下, Ψ 提供了 u' 与 ω'_x 的非局部关联的定量描述。

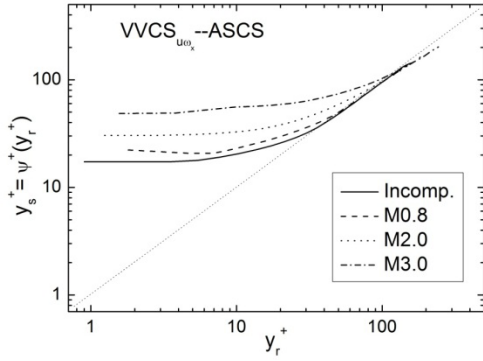


图3 在四种马赫数情况下的 ψ

本文首先发展了一个定量模型，称为“非局部耦合模型”（Distant-Coupling Model），简单假设为

$$V_c^{DC}(y) = U(\psi(y)) \quad (3)$$

这一假设基于 ASCS 是在 y_s 点的几何结构，与在 y_r 点的速度脉动最相关。简单的模型用于将 ASCS 的平均速度，即 $U(y_s)$ ，建立 y_r 点对流速度模型。

图4所示描述了流速度的产生机制。VVCS 表明了 A (y_s) 点的涡元与在 B (y_r) 点的速度脉动的非局部关联（图中用波浪线表示）。本文设想这种关联决定了对流过程；尤其是，在 y_r 点的速度脉动与 y_s 的 ASCS 有着强关联，即其定义的最强相关流向涡量集中区。在 DC 模型中，这种耦合作用决定了对流速度完全由远处的 ASCS 的平均速度所决定。

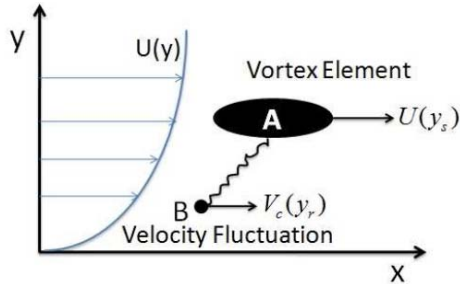


图4 对流速度定量模型示意图

如图5所示，DC模型的预测结果与DNS获得的结果定性一致，但有20%的高估。这种系统高估表明，DC模型忽略了某些重要因素。于是本文发展了改进的DC模型（MDC模型）。

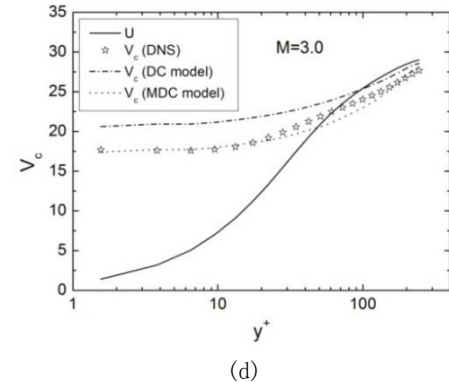
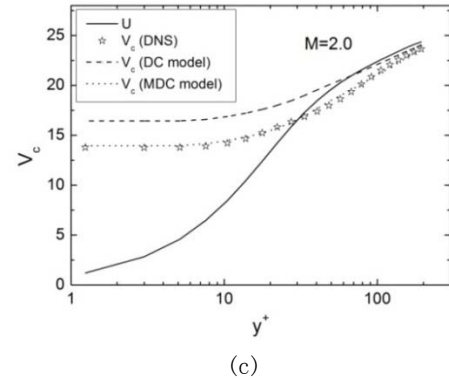
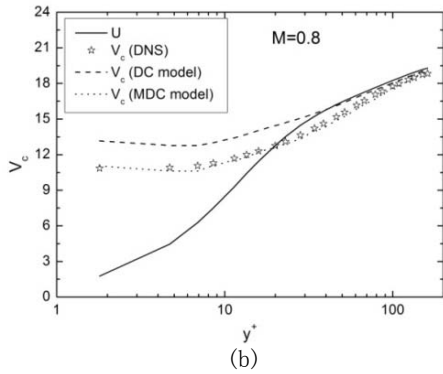
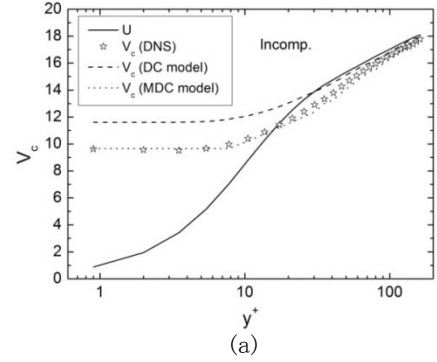


图5 DC模型（公式（3））和MDC模型（公式（4））对流速度预测结果。实线为DNS数据计算得到的平均速度，星号表示从DNS计算得到的对流速度。虚线和点划线分别代表DC模型和MDC模型的预测结果。

2.3 改进的非局部耦合模型（MDC模型）

本文通过选取在 y_r 处(图4中的B点)的脉动时间与在 y_s 处(图4中的A点)相关涡元有贡

献的脉动事件子系综来建立一个更为精确的对流速度预测模型。通过分析发现，慢速涡元对于速度脉动对流过程的贡献更大，也更有效。因此，本文通过定义一个阈值来构成一个子系综。子系综的平均速度小于全体系综的平均速度。于是，MDC模型便可描述为， y_r 点的速度脉动由 y_s 点低于某个速度阈值的涡元所决定。

为建立该模型，本文通过定义速度阈值 U_{lim} ，即仅 $u < U_{lim}$ 涡元才决定 y_r 点的对流速度。因此，MDC模型可描述为

$$V_c(y) = \bar{U}(\psi(y)) = \int_0^{U_{lim}(\psi(y))} up(u)du |_{\psi(y)} \quad (4)$$

其中，为子系综平均对流速度， $p(u)$ 为速度 u 的概率密度函数。

U_{lim} 是通过经验获得的。通过定义来表示和位于 y_s 的比例系数： $\psi(y_r) = U_{lim}^{-1}(V_c(y_r))$ 。对于固定值，本文计算了根据以上模型通过积分计算所有 y_r 的对流速度剖面。本文计算了预测剖面对于DNS获得的剖面的误差，通过选择最优来使得误差最小。结果发现，除 $M=3$ 情况，通过以上方法获得的计算的速度剖面误差在整个槽道区域内不超过5%。特别值得注意的是，对于所有的 y_s 和 M_s 。也就是说，对于所有四种可压缩槽道湍流（马赫数达3.0）对流速度整个剖面上，1.05是一个普适的参数，结果如图5所示。

MDC模型的精确预测结果表明速度脉动与涡量脉动之间的非局部相互关联由低速运动的涡结构所控制。速度阈值 $1.05U$ 是一个经验值。本文将模型的成功预测归结为VVCS捕捉到了在可压缩槽道流中流向速度与涡量脉动的普适关系，虽然其物理含义仍需要深入研究。值得注意的是，在 $M=3.0$ 情况下模型预测结果与DNS结果存在微小差异，这一点需要进一步研究。

本文并未对可压缩效应建立完整的描述，仅完成了在有限雷诺数和马赫数情况下的槽道流对流速度的定量刻画。然而，采用VVCS来构建对流速度模型（并研究压缩性效应）是可行的，并可将其应用于更大范围的流动情况。系统研究马赫数效应将具有重要的价值。

3 结 论

本文计算了在可压缩槽道流中流向脉动 u' 的对流速度 V_c 。（最高马赫数 $M=3$ ，

Re3000）。在不同马赫数情况下，的剖面展示了高度的相似性。

基于新定义的统计结构—VVCS，本文讨论了速度脉动的对流过程及其与在流场中普遍存在的拟序结构之间的关系。结果表明，ASCS，位于NWCS之上的子结构，控制着 u' 的对流速度。基于观察，本文建立了一个量化模型，MDC模型，获得了令人满意的结果。该模型的关键是刻画位于 y_s 的最相关涡元与位于 y_r 的速度脉动之间空间关系的空间耦合函数 $y_s=\psi(y_r)$ 。该函数由VVCS的几何特征来定量描述。从原理上讲，函数 $y_s=\psi(y_r)$ 描述了速度与涡量之间的非局部关联，其重要性远远超出了构建对流速度模型这一范畴。

另一个重要发现是控制对流速度的VVCS结构似乎依赖于涡元的速度—仅慢速运动的涡元有效。单一阈值1.05构建了对于所有 y_s 和全部四个马赫数情况的统一 V_c 预测模型，因此VVCS的概念在可压缩及不可压缩槽道流中得到了验证。该工作为定量获得高雷诺数和高马赫数以及其他情况的相似解建立了基础。

参考文献

- 1 Taylor G I. The Spectrum of Turbulence, in Proc. R. Soc. Lond. A, 1938. vol. 164, 476 - 490.
- 2 Spina E F, Donovan J F, Smits A J. Convection velocity in supersonic turbulent boundary layers, Phys Fluids A, 1991, 3 (12): 3124
- 3 Gruber M R, Nejad A S, Chen T H, Dutton J C. Large structure convection velocity measurements in compressible transverse injection flow fields, Exp. Fluids, 1997, 22:397
- 4 Cao Y-H, Chen J, She Z-S. The nature of near-wall convection velocity in turbulent channel flow, Acta Mechanica Sinica, 2008, 24:587
- 5 Cao Y-H, Pei J, Chen J, She Z-S. Compressibility Effects in Turbulent Boundary Layers, Chin. Phys. Lett., 2008, 25:3315
- 6 Zaman K B M Q Hussain F. Taylor hypothesis and large-scale coherent structures, Journal of Fluid Mech, 1981, 112:379
- 7 He G-W, Zhang J-B. Elliptic model for space-time correlations in turbulent shear flows, Phys. Rev. E, 2006, 73:055303
- 8 Zhao X, He G-W. Space-time correlations of fluctuating velocities in turbulent shear flows, Phys. Rev. E, 2009, 79:046316
- 9 Kim J, Lele C, Chio H. Suboptimal control of turbulent channel flow for drag reduction, Journal of Fluid Mech, 1998, 358:245

- 10 Blake W K. Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration. Academic:London,1986
- 11 Johansson A V, Alfredsson P H, Kim J. Evolution and dynamic of shear-layer structures in near-wall turbulence, Journal of Fluid Mech, 1991, 224:597
- 12 Schoppa W, Hussain F. Coherent structure generation in near-wall turbulence, Journal of Fluid Mechanics, 2002, 453:57
- 13 Balint J, Vukoslavcevic P, Wallace J M. A study of vortical structure of the turbulent boundary layer, In advances in Turbulence (ed. G. Comte-Bellot & J. Mathieu) 456 - 464, 1987
- 14 Balint J, Wallace J M, Vukslavcevic P. The velocity and vorticity vector fields of a turbulent boundary layer. Part2. Statistical properties, Journal of Fluid Mech, 1991, 228:53
- 15 Wallace J M, Foss J F. The measurement of vorticity in turbulent flows, Annu. Rev. Fluid Mech.,1995, 27:469
- 16 Willmarth W W. Structure of turbulent boundary layers ,Adv. Appl. Mech, 1975, 15:159
- 17 Smith C R, Walker A H, Sobrun U. On the dynamics of near wall turbulence , J. Inform. Phil. Trans. :Phys. Sci. Engng, 1991, 336:131
- 18 Klewicki J C, Velocity-vorticity correlations related to the gradients of the Reynolds stress in parallel turbulent wall flows ,Phys. Fluids A, 1989, 1:1285
- 19 J. O. Hinze, Turbulence, 1975
- 20 Priyadarshana P J A, Klewicki J C, Treat S., Foss J F. Statistical structure of turbulent boundary layer velocity vorticity products at high and low Reynolds numbers , Journal of Fluid Mech,2007, 570:307
- 21 Chen J, Pei J, She Z-S, Hussain F. Velocity--Vorticity Correlation Structure in Turbulent Channel Flow , AIP Conference Proceedings, 2011, 1376:87
- 22 Martin M P, Taylor E M, Wu M, Weirs V G. A bandwidth-optimized WENO scheme for the effective direct numerical simulation of compressible turbulence, Journal of computational physics, 2006,220:270
- 23 Wills J A B. On convection velocities in turbulent shear flow, Journal Fluid Mech, 1994, 20(3):417
- 24 Hussain F, Clark A R. Measurements of wavenumber- celerity spectrum in plane and axisymmetric jets, AIAA Journal, 1981, 19(1):51
- 25 Kim J, Hussain F. Propagation velocity of perturbations in turbulent channel flow, Phys. Fluids, 1993, 5(3):695
- 26 Coleman G N, Kim J, Moser R. D. A numerical study of turbulent supersonic isothermal-wall channel flow , Journal of Fluid Mech, 1995, 305:159
- 27 Huang P, Coleman G, Bradshaw P. Compressible turbulent channel flows: DNCS results and modeling, Journal of Fluid Mech, 1995, 305:185
- 28 Blackwelder R, Eckelmann H. Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon, Journal of Fluid Mech, 1979 94:577
- 29 Jeong J, Hussain F, Schoppa W, Kim J. Coherent structures near the wall in a turbulent channel flow, Journal of Fluid Mech, 1997, 332:185
- 30 She Z-S, Chen X, Wu Y, Hussain F. New perspective in statistical modeling of wall-bounded turbulence, Acta Mechanica Sinica, 2010, 26:847

A MODEL FOR PROPAGATION SPEED IN TURBULENT CHANNEL FLOWS

CHEN Jun¹, PEI Jie¹, HUSSAIN Fazle², SHE Zhensu¹

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

(2 Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Houston, TX 77204,USA)

Abstract The propagation speed V_c of the streamwise velocity fluctuations u' in turbulent channel flows is calculated using direct numerical simulations (DNS) data at four Mach numbers ($M=0, 0.8, 2.0$ and 3.0). The profiles of V_c are shown to display remarkable similarity at different M . Quantitative models are developed based on a statistical structure called *Velocity-Vorticity Correlation Structure* (VVCS), defined as the vorticity region most correlated to velocity fluctuations at a fixed location. Good agreement with DNS-measured propagation velocities is obtained throughout the channel and for all M . The result confirms earlier speculation that the near-wall propagation is due to an advection by coherent vortex structures, and validates the concept of the VVCS.

Key words channel flow, compressibility effects, propagation speed, coherent structure, correlation structure