

大涡结构在有压梯度边界层流中的演化机理

张艳梅,陆昌根,曹卫东

(河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 采用直接数值模拟方法,研究大涡结构在不同压力梯度作用下的非线性演化特征.计算结果表明,在逆压梯度条件下,大涡结构幅值快速增长,形成很强的流向涡结构,雷诺应力迅速增加,这可能导致猝发现象的产生;与此相反,在顺压梯度边界层流中,大涡结构很难被激发起来,易于流体流动趋于稳定状态.这些结论与某些理论和试验结果一致.

关键词 压力梯度 大涡结构 边界层

中图分类号 O357.5

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2007)05-0510-04

20 世纪 60 年代,Kline 等^[1]在湍流边界层近壁区发现了大涡结构,这为湍流研究开辟了一个新的途径.大涡结构是湍流边界层中最为活跃的大尺度运动结构.Breuerl 等^[2]在边界层内叠加两对无黏反转涡结构作为大涡结构的初始模型,数值模拟了大涡结构随时间的演化规律,获得了在流体运动中存在多种形态的涡结构的结论.Jeong 等^[3]利用流向涡的模型进行数值模拟,得到的大涡结构特性与试验结果非常吻合.Zhou 等^[4]将一定强度的发卡涡作为初始扰动,激发出更多的准流向涡、展向涡及强剪切层.工程实际中有压力梯度的边界层流动是最为普遍的情况,如飞机、船舶、叶轮机叶片等边界层内压力梯度沿流向不断变化,使得边界层中的湍流经常处于非平衡状态,给湍流计算带来了更大的困难^[5].本文采用直接数值模拟方法研究了大涡结构在不同压力梯度作用下的非线性演化机理.

1 大涡结构的理论模型

与 Breuerl 等^[2]构造的模型类似,本文用一对方向相反的旋涡作为边界层流中大涡结构的理论模型:

$$\begin{cases} u' = 0 \\ v' = A_0 (cx' - 2.5) (cy' + 0.6)^3 [1 - 2(cz')^2] e^{-(cx'-2.5)^2 - (cy'+0.6)^2 - (cz')^2} / 6 \\ w' = -A_0 (cx' - 2.5) cz' [3(cy' + 0.6)^2 - 2(cy' + 0.6)^4] e^{-(cx'-2.5)^2 - (cy'+0.6)^2 - (cz')^2} / 1.2 \end{cases} \quad (1)$$
$$x' = x(i)/5 \quad y' = y(j)/1.2 \quad z' = z(k)/6$$

式中: A_0 ——局部初始扰动的幅值,本文取 $A_0 = 0.28$;

c ——模型参数,本文取 $c = 4$.

式(1)所获得的大涡结构的初始扰动值主要集中在 $0 < x(i) < 10$ 内,为了清楚起见,本文仅给出 $x(i) < 60$ 的初始法向速度(v')绝对值最大点所在 xz 平面上的法向速度等值线分布(图 1(a))以及 $x(i) < 60$ 的初始展向速度绝对值最大点所在 xz 平面上的展向速度等值线分布(图 1(b)).图 1 实线为速度为正的等值线,虚线为速度为负的等值线.

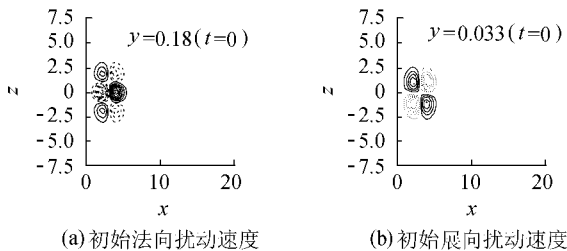


图 1 初始法向扰动速度和初始展向扰动速度的等值线分布(间距 0.001)

Fig.1 Contour of initial normal and initial spanwise disturbance velocities (contour spacing = 0.001)

2 数值计算方法

直接数值模拟的基本方程是无量纲的扰动方程和连续方程

$$\frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} + [(\mathbf{u}' \cdot \nabla) \mathbf{u}' + (\mathbf{u}_0 \cdot \nabla) \mathbf{u}' + (\mathbf{u}' \cdot \nabla) \mathbf{u}_0] + \nabla p' = \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u}' \quad \nabla \cdot \mathbf{u}' = 0 \quad (2)$$

式中： $\mathbf{u}_0$ ——满足 Falkner-Skan 方程 $f''' + ff'' + \beta(1 - f^2) = 0$ 的数值解； β ——压力梯度参数； $\mathbf{u}', p'$ ——扰动速度和扰动压力； ∇ ——梯度算子； ∇^2 ——拉普拉斯算子； Re ——雷诺数. 对扰动方程进行直接数值模拟的方法是：时间导数采用 3 阶混合显-隐分裂格式，空间导数在 x 和 y 向采用变间距网格的紧致有限差分离散及 z 向 Fourier 谱展开相结合方法离散^[6].

计算区域：流向 $0 \leq x \leq 120$ ，法向 $0 \leq y \leq 6$ ，展向 $-7.3 \leq z \leq 7.3$. 计算网格： $\{x, y, z\} = \{200, 200, 32\}$. 入口($x = 0$)边界条件： $u' = v' = w' = 0, \partial p' / \partial x = 0$. 出口($x = 120$)边界条件：速度反射出流边界条件， $\partial p' / \partial x = 0$. 壁面($y = 0$)边界条件： $u' = v' = w' = 0, \partial p' / \partial x = 0$. 边界层外缘($y = 6$)边界条件： $\partial u / \partial y = 0, \partial v / \partial y = 0, \partial w / \partial y = 0, p = 0$.

3 计算结果及分析

以 5 种不同压力梯度条件($\beta = -0.1, -0.05, 0, 0.05, 0.1$, 负值表示逆压梯度, 正值表示顺压梯度, 零表示无压力梯度下)大涡结构的演化为例进行分析. 在无量纲的情况下, 定义幅值

$$A = \sqrt{|u|_{\max}^2 + |v|_{\max}^2 + |w|_{\max}^2} \quad (3)$$

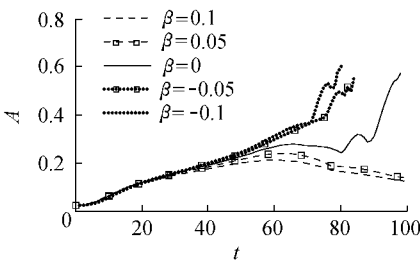


图 2 大涡结构幅值随时间的演化曲线
Fig.2 Evolution curves of amplitudes of coherent structures

雷诺应力的形成是湍流运动中大涡结构产生及发展的基本特征, 雷诺应力与大涡结构强度有密切联系. 雷诺应力越大, 流动的脉动强度越大, 即从平均流中获得的能量越大. 图 3 显示了不同压力梯度下的最大雷诺应力随时间的演化. 在演化的起始阶段, 大涡结构分布强度较弱, 非线性作用较弱. 随着时间的推进, 在逆压梯度的边界层中, 大涡结构的最大雷诺应力远大于在顺压梯度边界层中的增长速率, 并且逆压梯度越大, 其增长的速率越快. 在零压梯度条件下, 最大雷诺应力也在增长, 但与逆压梯度条件相比, 其增长速率比较慢. 然而在顺压梯度条件下, 最大雷诺应力随着时间的增长而迅速衰减. 该结果与文献[8]的结果一致.

流向涡的产生在流动失稳过程中起着很重要的作用, 流向涡越大, 流动越不稳定, 越容易发生流动失稳直至湍流的发生. 图 4(a), (b), (c) 表示在 $t = 80$ 时刻不同压力梯度边界层中扰动速度的流向涡量最大值所在位置 zy 平面上速度矢量的分布. 可以看出：流向涡在展向上呈大小相等、方向相反的对称分布. 在顺压梯度条件下, 流向涡在展向上分布的强度较弱. 在零压梯度条件下, 流向涡在展向上的分布强度比顺压梯度强, 流向涡向上抬升, 且出现了 2 个明显对称的流向涡. 在逆压梯度条件下, 流向涡在展向分布强度最强, 且继续向上抬升, 中间明显形成强烈上喷下扫现象. 该现象与文献[7]的试验结果吻合.

$t = 80$ 时不同压力梯度条件下最大展向速度沿法向的分布如图 4(d) 所示. 在这 5 种不同的压力梯度下, 逆压梯度 $\beta = -0.1$ 时得到的最大展向速度是最大的, 其次是 $\beta = -0.05$, 而在顺压梯度 $\beta = 0.1$ 时得到的最大展向速度值是最小的. 最大展向速度越大, 流向涡变化越激烈, 这与图 4(a), (b), (c) 的结

图 2 为不同压力梯度条件下大涡结构幅值随时间的演化曲线. 从图 2 可以看出, 在逆压梯度条件下, 大涡结构的幅值更容易增长, 并且随着逆压梯度的升高, 幅值增长的速率也在快速增加. 在零压梯度条件下, 大涡结构的幅值也在增长, 但比逆压梯度的情况增长要慢. 在顺压梯度条件下, 大涡结构的幅值起初是增长的, 但受到顺压梯度的作用, 在 $t > 60$ 后幅值不断衰减, 且随着顺压梯度的增大, 幅值衰减的速率也相应加快. 该结果与文献[7]的结果一致.

雷诺应力的形成是湍流运动中大涡结构产生及发展的基本特征, 雷诺应力与大涡结构强度

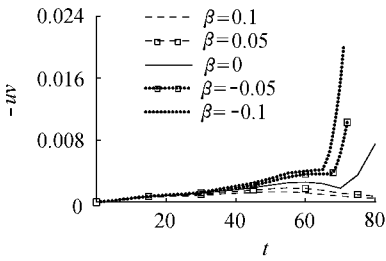


图 3 最大雷诺应力随时间的演化曲线
Fig.3 Evolution curves of maximal Reynolds stresses

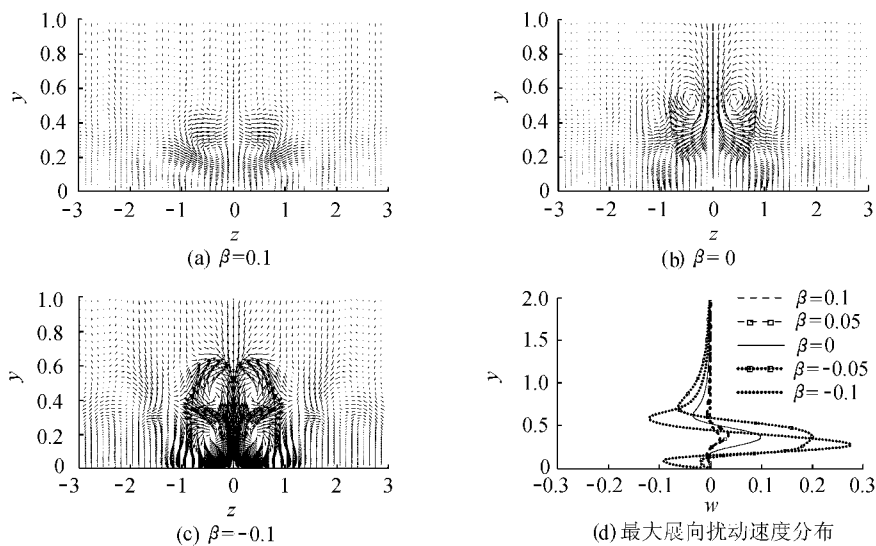


图 4 zy 平面上速度矢量图及最大展向扰动速度分布

Fig.4 Velocity vectors in z - y plane and distribution of maximal spanwise disturbance velocity

果一致.另外,最大展向速度的增大,使得扰动在展向上从中心区域扩散的能力也在增强.最大展向速度越大,横流越不稳定,越容易激发湍流.

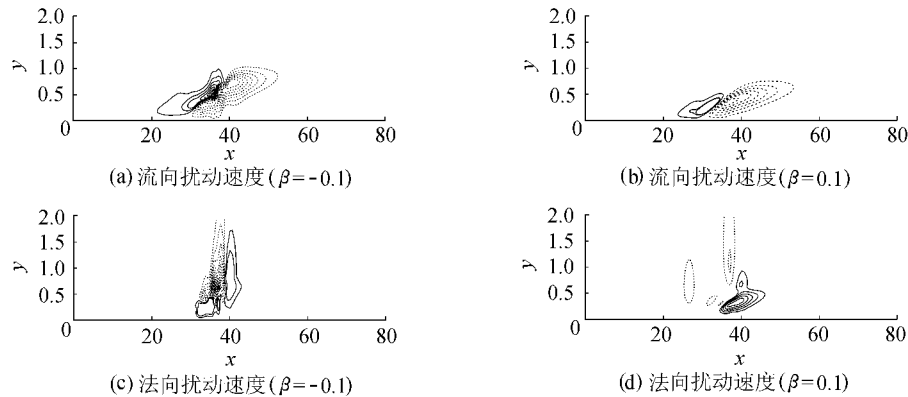


图 5 流向和法向扰动速度的等值线(等值线间距为 0.002, $t=80$)

Fig.5 Contours of streamwise and normal disturbance velocities (contour spacing = 0.002 and $t=80$)

图 5 给出了 $t=80, \beta=0.1$ 和 $\beta=-0.1$ 时流向以及法向扰动速度的等值线.在同一时刻逆压梯度作用下,流向以及法向扰动速度均大于顺压梯度作用下的扰动速度.在法向上,逆压梯度作用下的扰动速度范围比较大,且有向主流发展的趋势;从整体上来看,流向扰动速度大于 0 的区域对应着法向扰动速度小于 0 的区域,说明流体冲向壁面,即为下扫现象;而流向扰动速度小于 0 的区域对应着法向扰动速度大于 0 的区域,说明流体远离壁面,即为上喷现象.上述结果与文献[8]观察到的现象一致.

4 结 论

本文数值模拟了大涡结构在不同压力梯度条件下的演化过程.计算结果表明:在逆压梯度条件下,大涡结构幅值更容易增长,而顺压梯度条件却抑制扰动幅值的增长.逆压梯度边界层中的最大雷诺应力、流向涡量、展向速度均大于顺压梯度的情况,且随着逆压梯度的增加,差值更加显著.上述结果表明,逆压梯度边界层流中的大涡结构容易被激发产生及快速增长.顺压梯度边界层流中的大涡结构难被激发.

参考文献：

[1] KLINE S L, REYNOLDS W C, SCHRAUB F H, et al. The structure of turbulent boundary layers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 30 (1): 741-773.

[2] BREUERL K S, LANDAHL M T. The evolution of a localized disturbance in a laminar boundary layer :part 2 strong disturbance[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 220 :595-621.

[3] JEONG J, HUSSAIN F, SCHOPPA W, et al. Coherent structures near the wall in a turbulent channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 32 :185-221.

[4] ZHOU J, ADRIAN R J, BALACHANDAR S, et al. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 387 :353-381.

[5] ROOD E P. Ship hydrodynamics basic research in the United States[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 1995, 25(4) :22-34.

[6] LU Chang-gen, CAO Wei-dong, QIAN Jian-hua. A study on numerical method of Navier-Stokes equations and nonlinear-evolution of the coherent structure in a laminar boundary layer[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 2006, 18(3) :372-377.

[7] 李兆瑞, 陆利蓬, 张强. 定常压力梯度边界层相干结构的直接数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(4) :321-326.

[8] 李兆瑞, 叶建, 陆利蓬. 变逆压梯度湍流边界层条纹结构的流动显示[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(5) :563-565.

Evolution of coherent structures in boundary layer
with pressure gradients

ZHANG Yan-mei, LU Chang-gen, CAO Wei-dong

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract By use of direct numerical simulation method, the nonlinear evolution of coherent structures under different pressure gradients was studied. According to the result, the amplitude of coherent structures grows fast in a boundary layer with negative pressure gradients, then the streamwise vortex structure is formed, and Reynolds stress increases fast. These factors might result in the occurrence of turbulences. However, it is difficult for coherent structures to be excited in the boundary layer with positive pressure gradients, and thus, the flow is apt to become stable under such a condition. The numerical results agree well with those from theoretical analysis and experiments.

Key words pressure gradient ; coherent structures ; boundary layer