

湍流横向射流大涡模拟及大尺度结构的涡环模型

关 晖,吴锤结

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 ;2.解放军理工大学理学院,江苏 南京 211101)

摘要 采用大涡模拟方法数值模拟了流向椭圆喷嘴的湍流横向射流,重点研究其旋涡结构的产生、发展等动力学演化过程.结果表明:文献中所报道的横向射流基本涡结构,如反向旋转涡对、前缘涡、后缘涡、悬涡、肾涡、反肾涡等并非独立的物理实体,而是分别对应于新发现的横向射流基本涡结构——起始于喷嘴的三维拉伸涡环的局部结构.

关键词 湍流横向射流 拟序结构 大涡模拟 并行计算

中图分类号 :TV131.2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)02-0165-05

射流在工程中应用非常广泛,对其研究具有重要的理论价值和应用前景.在湍流射流中出现的大尺度拟序结构在湍流形成、卷吸和流体掺混中起主导作用,并对射流进行有效控制有重要作用.

在横向射流中最重要的物理现象是如图 1^[1]所示的旋涡结构的形成.New 等^[1,2]研究了椭圆横向射流,发现在椭圆横向射流中,由于反向涡对的存在,使得涡环无法形成,大尺度涡结构是直接由涡层变形和卷起形成的.射流涡附近的剪切层还演化成一些小尺度的反向涡对,它们会进一步发展成为非定常肾状或反肾状涡对.通过大量实验和数值模拟研究,一般认为在喷嘴形状为圆形的横向射流中,存在着如下几个基本的大尺度涡结构(图 1^[1]) :大尺度反向旋转涡对,位于喷嘴出口前端、贴近下边界的马蹄涡结构和射流后部形成的尾涡.此外,还存在非定常肾状或反肾状涡对和手柄涡、缘涡和后缘涡等小尺度涡结构.

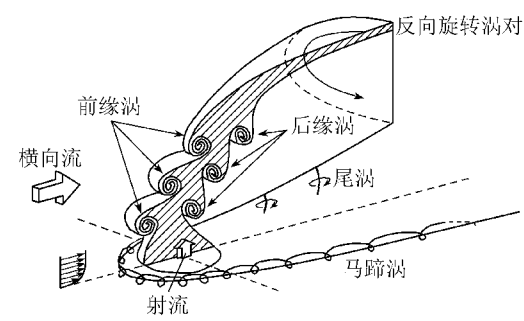


图 1 横向射流大尺度涡结构示意图
Fig.1 Sketch of large scale vortex structures of jet in crossflow

本文基于数值模拟结果,试图从旋涡时空演化等角度研究在椭圆横向射流中,上述大尺度涡结构发生的变化,新的涡结构和运动形式出现的可能性,以及是否存在更为基本和统一的涡结构.

1 研究方法概述

1.1 湍流大涡模拟的基本思想

在湍流大涡模拟中,采用滤波函数将流动变量 $f(x,t)$ 分解成大尺度量 $\bar{f}(x,t)$ 和小尺度量 $f'(x,t)$

$$f(x,t) = \bar{f}(x,t) + f'(x,t)$$
 (1)

其中
$$\bar{f}(x,t) = \int G(x,x')f(x',t)dx'$$
 (2)

式中 $G(x,x')$ 为给定的滤波函数.将式(1)代入

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \end{cases}$$
 (3)

即可得到大尺度 $\bar{f}(x, t)$ 满足的大涡模拟方程. 式中 τ_{ij} 为湍流亚网格应力, $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$. 由于一般 u_i 为未知, 所以必须对 τ_{ij} 建立模型进行模拟. 大涡模拟的关键是给出正确的亚网格(SGS)模式. 目前, 常用的是 SGS 模式中的涡黏模式, 包括 Smagorinsky 模式^[3] 和动力学模式^[4]. 本文采用 Smagorinsky 模式. 在该模式中, 亚网格应力中的非各向同性部分正比于湍流涡黏系数与大尺度变形率张量的乘积, 即

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} = -2C_s^2 \Delta^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (4)$$
$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$$

式中: δ_{ij} ——Kronecker δ 函数; ν_t ——涡黏系数; C_s ——Smagorinsky 常数, $C_s > 0$; $|\bar{S}|$ ——式(5)大尺度应变率张量的模.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

Reynolds 应力中对应于各向同性的部分可被包含在压力项中.

1.2 湍流大涡模拟数值方法

采用的湍流大涡模拟数值方法是基于三维笛卡尔坐标系下的可压缩有限体积算法. 求解的控制方程是经 Favre 滤波^[5] $\tilde{f} = \frac{\overline{\rho f}}{\bar{\rho}}$ 的可压缩 N-S 方程. 略去非线性项, 采用 Smagorinsky 亚网格模式, 得控制方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j E + p u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} q_j + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i \sigma_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \\ q_j = -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \end{cases} \quad (7)$$

是对大涡模拟方程求导得到的等效应力张量和等效热流矢量. 等效标量输运率可表示为

$$\begin{cases} \mu_{eff} = \mu_{lam} + \mu_{sgs} \\ \lambda_{eff} = \lambda_{lam} + \lambda_{sgs} = \frac{\mu_{lam} c_p}{Pr_{lam}} + \frac{\mu_{sgs} c_p}{Pr_{sgs}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, 设 Pr_{sgs} 为常数, μ_{sgs} 采用 Smagorinsky 亚网格模式系数

$$\mu_T = 2C\rho\Delta^2 |\bar{S}| \quad (9)$$

其中, $C = C_s^2$, $C_s = 0.1$, Δ 为空间滤波宽度(等于网格宽度).

式(6)又可表示为

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

在笛卡尔坐标系下, 可用守恒型有限差分算子将式(10)中的空间导数项表示为

$$L_h(\bar{U}_{i,j,k}^n) = \frac{\bar{F}_{i-\frac{1}{2},j,k}^n - \bar{F}_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} + \frac{\bar{G}_{i,j-\frac{1}{2},k}^n - \bar{G}_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} + \frac{\bar{H}_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n - \bar{H}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} \quad (11)$$

式(11)中的无黏部分可通过对 5×5 阶对角变换矩阵的单调分段抛物近似和由基于线化特征近似黎曼算法来求得

$$A = S^{-1} \Lambda S \quad (12)$$

式中: Λ ——Jacobi 矩阵; Λ —— A 的特征值对角矩阵. 黏性通量可用二阶空间中心差分来计算. 时间推进采用两步 Runge-Kutta 法

$$\begin{cases} \bar{U}_{i,j,k}^{(l)} = \bar{U}_{i,j,k}^n + \Delta t L_h(\bar{U}_{i,j,k}^n) \\ \bar{U}_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1}{2} [\bar{U}_{i,j,k}^n + \bar{U}_{i,j,k}^{(l)} + \Delta t L_h(\bar{U}_{i,j,k}^{(l)})] \end{cases} \quad (13)$$

对该算法和程序的验证可参见有关材料^①。

2 湍流射流大尺度结构分析

2.1 横向射流的流动参数与初始条件、边界条件设定

应用上述湍流大涡模拟方法,在解放军理工大学流体力学研究中心的并行机群上对湍流横向射流进行数值模拟,得到从 1 ~ 70 000 步、每隔 100 步的高 Reynolds 数湍流椭圆横向射流发生、发展数据库,以及从 70 000 ~ 86 300 步、每隔 10 步的湍流横向射流完全发展过程数据库.总数据量为 184 GB,输出量为全流场网格点坐标、速度、压力、密度等.分别以椭圆喷嘴的长轴、射流速度和射流密度为特征长度、特征速度和特征密度对所有参数进行无量纲化.以下所有变量均为无量纲量。

2.1.1 流动参数

a. 几何参数.计算网格等间距分布, $\Delta x = 1/9, \Delta y = 1/9, \Delta z = 1/9$,在流向(x 向)、法向(y 向)和展向(z 向)所采用的网格数为 $258 \times 125 \times 125$,计算区域为 $x \times y \times z = 28.667 \times 13.889 \times 13.889$.采用 6 个计算节点,用沿流向均匀分区的区域分解法进行并行计算.时间步长 $\Delta t = 0.00967$,总时间步 86 300 步,总计算时间 $T = 834.233$.流向椭圆射流喷嘴位于 $y = 0$ 的平面上,其中心位于 $x = 2.44, y = 0, z = 7$ 处,椭圆长、短轴长度分别为 $a = 1$ 和 $b = 1/3$.

b. 物理参数.椭圆射流喷嘴速度均布 $u_{jet} = v_{jet}j = 1j$,射流流体密度 $\rho_{jet} = 1$.位于 $x = 0$ 截面背景流的入流速度为 $u_{\infty} = ui = 1/3i$,背景流入流流体密度为 $\rho_{\infty} = 2$,背景流和射流的运动黏性系数均为 $\nu = 6.667 \times 10^{-5}$,基于喷嘴长轴和射流出口最大速度的 Reynolds 数为 15 000.

2.1.2 初始条件与边界条件

设初始时刻全流场速度为 $u = 1/3i$.左边界和椭圆喷嘴处为入流边界,右边界为连续出流边界,下边界为无滑移边界,上边界及前、后边界均为滑移边界。

2.2 流向喷嘴的湍流椭圆横向射流大尺度结构时空演化

2.2.1 等涡量面分析

为了对横向射流的涡结构有一个整体概念,图 2 给出了 Reynolds 数为 15 000 的流向椭圆喷嘴的湍流横

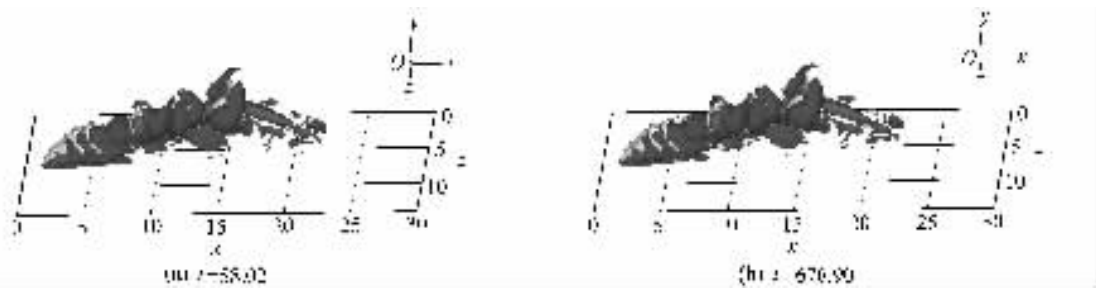


图 2 流向椭圆喷嘴的湍流椭圆横向射流大尺度涡结构的等涡量随时间演化

Fig.2 Time evolution of iso-surface of vorticity for large scale structures of turbulent jet in crossflow with stream-wise elliptical nozzle

向射流涡结构的等涡量面随时间的演化过程.当横向射流充分发展之后,其大尺度结构主要由反向旋转涡对及缠绕其上的间歇涡组成,如图 3^[1]给出的流动显示实验结果.在空间上,随着涡结构向下游运动,一开始射流核心区不断抬升,其与边界层的相互作用减弱,但到了充分发展阶段,其所处位置比初期达到的最高点略低,另一方面由于剪切、裹入等作用,射流核心区周围的小尺度结构不断发生拉伸、破裂、对并,逐渐将大尺度涡分解为一系列震荡尾涡,并裹入外流流体,从而加强了掺混作用。



图 3 横向射流流动显示

Fig.3 Flow visualization of jet in crossflow

① CHEMNOUSOY A A. Les of mixing layer and flow in square duct by the second-order explicit scheme. http://www.geocities.com/andrei_chemnoussev/mypage.htm. 1999.

2.2.2 二维涡量场截面与小尺度涡结构分析

下面考察横向射流充分发展时($t = 96.70$)的涡量场在不同流向截面处的涡结构. 从图 4 中可以看到类似于 New 等^[1,2]实验观察到的小尺度非对称肾状和反肾状涡对,在接近横向射流出口截面上($x = 3.11$),大尺度涡结构以接近对称的反向旋转涡对为主,并在其前缘上方出现肾涡与反肾涡等小尺度结构. 在流动进一步发展而远离射流出口处($x \geq 8.89$),由于尾涡与反向旋转涡系的相互作用,出现了非对称反向旋转涡对.

2.2.3 三维涡核的选取原则与涡结构的局部细节

如何识别复杂湍流中的涡结构是一个令人十分困惑的问题,至今为止无法在湍流场中唯一地确定一个完整的涡. 在无黏流中,流场中涡旋唯一可能的形态是涡环,它由一系列包围其上、构成物质面的涡线组成,其拓扑结构不可改变. 但在真实黏流中,涡线不再是物质线,而构成涡环的涡面也不再是物质面,特别是在局部 Re 较低处,可以发生涡管的断裂、重联等拓扑结构变化. 但在高 Re 流中,在涡管(涡线)拓扑结构不发生变化的区域中,在一定的演化时段中,仍可近似将其视为物质面(线),从而跟踪其演化过程,得到涡结构演化的许多信息. 在远离壁面的横向射流核心区,局部 Re 较高,故可近似认为图 5 所示的涡线是物质线,跟踪的是三维涡环的演化过程.

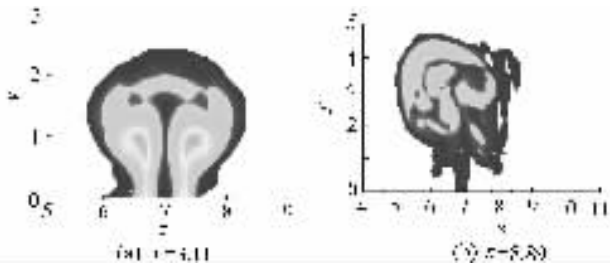


图 4 流向椭圆喷嘴的湍流椭圆横向射流的二维涡量截面图(x 截面, $t = 96.70$)

Fig.4 2D sections of vorticity of turbulent jet in crossflow with stream-wise elliptical nozzle(x section, $t = 96.70$)

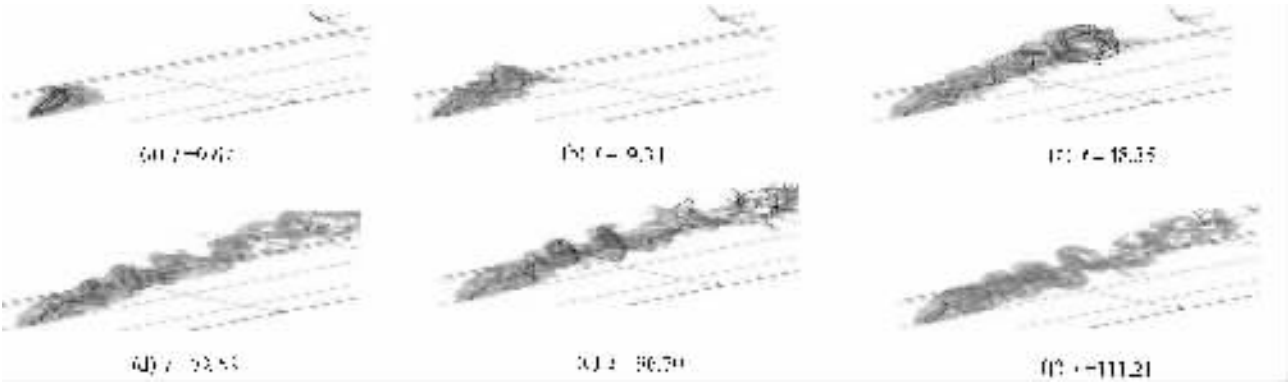


图 5 流向椭圆喷嘴的湍流椭圆横向射流的三维涡线

Fig.5 3D vortex lines of turbulent jet in crossflow with stream-wise elliptical nozzle

利用旋涡轴心处压力最低的特性,在喷嘴附近的流场中找到三维射流涡环的轴心位置. 由于很难精确找到涡核位置,只能考察涡核附近 3 条涡线的演化过程. 从涡结构的局部细节(图 6)可见,在不同流向截面上,三维涡环起到主干作用. 图中等值面为总涡量 $|\omega| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} = 10$ 的三维等值面,3 条涡线分别经过 $(1.89, 0.11, 7.22)$, $(2.00, 0.11, 7.22)$, $(2.11, 0.11, 7.22)$.

2.2.4 三维涡线的时、空演化

从图 5 所示的三维涡线演化过程中可看到. 在接近喷嘴处,由于剪切作用产生涡环(图 5(a)). 这些涡环一经产生,并不马上脱落,而是一方面沿流向拉伸,另一方面在尾流和边界层相互作用下逐渐抬升. 由于流动的阻塞作用,其头部抬升角度更大(图 5(b)). 随着流动的进一步发展,涡环进一步拉伸,同时变形、扭曲,从而在外观上产生复杂的射流边界(图 5(c)). 当涡环拉伸到一定时候($t = 48.35$, 图 5(c)),突然脱落,随后经过喷嘴的涡环是新产生的涡环(图 5(d)). 由图 5(e)和图 5(f)可见,在等涡量面图中显示的环状结构实际上可对应于涡环的两种形态,即涡环拉伸过程中缠绕在射流核心区上的螺旋状涡环(图 5(e))或涡环的头部(图 5(f)). 这里,缠绕在射流核心区的螺旋状涡环与 New 等流动显示实验结果图 3^[1]非常相似.

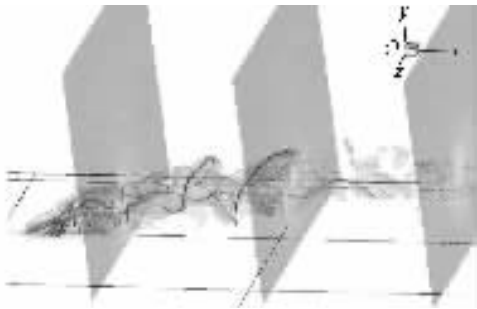


图 6 流向椭圆喷嘴的湍流横向射流三维涡结构的局部细节

Fig.6 Local detail of 3D vortex structures of turbulent jet in crossflow with stream-wise elliptical nozzle

从三维涡丝演化过程(图 5)可见,真正起作用的是拉伸、抬起、脱落的三维涡环,它与众多实验和文献中观察到的、但实际上是由三维涡环头部组成的反向旋转涡对的概念不同.笔者认为,所谓反向旋转涡对、前缘涡、后缘涡、悬涡、肾涡、反肾涡等均起始于喷嘴的三维拉伸涡环的局部结构,这一认识与 Sykes 等^[6]提出三维涡环模型很接近,但他们的涡环一经产生就不断从喷嘴处脱落,这与本文的数值模拟结果不符.本文结果显示,涡环产生后先拉伸后脱落.

图 7 给出的流向椭圆喷嘴湍流横向射流的前缘近壁马蹄涡很快就在喷嘴后部汇聚,形成闭合的涡结构,与图 1^[1]中所示的开放型马蹄涡不同.

3 结 论

从以上研究中可以清楚看到,在湍流横向射流中真正起主导作用的是沿流向拉伸、沿法向抬升并间歇脱落的三维涡环.这些涡环发源于喷嘴出口附近的剪切层,在横向射流、背景流以及尾流的共同作用下,经历拉伸、抬起、扭曲等过程后,涡环突然脱落,同时新涡环产生,上述过程不断重复.

参考文献：

[1] NEW T H, LIM T T, LUO S C. Elliptic jets in cross-flow[J]. J Fluid Mech, 2003, 494 :119—140.
[2] LIM T T, NEW T H, LUO S C. On the development of large-scale structures of a jet normal to a cross flow[J]. Phys Fluids, 2001, 13 : 770—775.
[3] SMAGORINSKY U. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment[J]. Mon Weath Rev, 1963, 91 : 99—164.
[4] GERMANO M, PIOMELLI U, MOIN P, et al. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model[J]. Phys Fluids, 1991, A(3) :1760—1765.
[5] FAVRE A. Équations des gaz turbulents compressible, I, Formes generales, II, Méthode des vitesses moyennes, méthode des vitesses macroscopiques pondérées par la mass volumique[J]. J de Mécanique, 1965, 4 :361, 391.
[6] SYKES W, LEWELLEN W, PARKER S. On the vorticity dynamics of a turbulent jet in a crossflow[J]. J Fluid Mech, 1986, 168 :393—413.

A vortex ring model of large-scale structures for simulation of turbulent jets in crossflow

GUAN Hui¹, WU Chui-jie²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract A numerical simulation was made of the turbulent jet in crossflow with a stream-wise elliptical nozzle by use of the large-eddy simulation method, with emphasis on the generation and development of vortex structures. The results show that the basic vortex structures in literatures, such as the counter-rotating vortex pair, leading-edge vortices, lee-side vortices, hanging vortices, kidney vortices, anti-kidney vortices, etc. are not the independent physical substance, but are local structures of the 3-D stretching vortex ring originated from the orifice of the nozzle—a newly discovered basic vortex structure of turbulent jets in crossflow.

Key words turbulent jet in crossflow ; coherent structure ; large-eddy simulation ; parallel computation

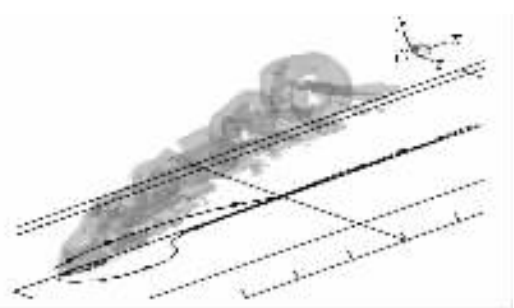


图 7 流向椭圆喷嘴横向射流的前缘
Fig.7 Horseshoe vortex in front of turbulent jet in crossflow with stream-wise elliptical nozzle