

三维亚声速冲击射流流场的数值模拟^{*}

何 枫, 姚朝晖, 谢峻石

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 利用有限体积法对三维可压缩的 N-S 方程进行离散, 对喷嘴的亚声速垂直冲击射流和斜冲击射流进行了数值模拟。网格的划分采用非结构性网格, 湍流模型为 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 在近壁处采用壁面函数进行修正, 流场计算结果与实验值吻合一致。计算可得到垂直冲击流场结构的三个区域: 自由射流、滞止区和壁面射流区域, 并显示出垂直冲击点附近区域的卷吸回流、速度分布。冲击射流近壁处存在着回流现象, 由于边界层流动和近壁回流引起距离固壁 $2D$ 内的速度梯度变化较大。斜冲击在近壁处平行壁面速度的最大值, 以及壁面上的总压最大值都偏离冲击点, 并且相对应。

关键词: 有限体积法; 非结构网格; 冲击射流; 湍流射流; 数学仿真

中图分类号: TR601 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2002) 01-0015-04

Numerical simulation on three-dimensional subsonic impinging jet

HE Feng, YAO Zhao-hui, XIE Jun-shi

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract Subsonic normal and oblique impinging jet were predicted by three-dimensional compressible Navier-Stokes equations. A finite volume method with unstructured meshes and RNG $k-\epsilon$ turbulence model were employed in the calculation. The characteristics of three regions, free flow, stagnation region and wall stress flow in normal impinging flow were simulated. The entrainment near impinging region and reverse flow were shown in the calculating results, which were coincided with those of experiment. From the distribution of velocity, a great velocity gradient can be seen in the zone with $2D$ distance to the wall. The phenomenon was due to the boundary flow and reverse flow near the wall. The maximum velocity component near the wall and the maximum total pressure shift from the impinging point.

Key words: Finite volume method; Unstructured mesh; Impinging jet; Turbulent jet; Mathematical simulation

1 引 言

喷气 VTO/STOL (Vertical or short take off and landing) 飞机的推进系统均涉及冲击射流。1993 年, Cooper 等人^[1,2] 利用双通道热线风速仪详细测量了无封闭板冲击射流的流场结构, 并以此为标准实验校核了四种湍流模型。1996 年, Barata Jorge^[3] 用实验方法和数值计算研究了在有低速横流的情况下, 单个以及一

组喷嘴所组成的复杂的冲击射流流场。1997 年, Ajer-sch^[4] 用流动显示技术测量了有横流时的冲击射流的流动状态。在国内, 关于可压缩冲击射流^[5] 方面的研究还比较少, 多限于液体工质的层流冲击射流的实验研究。本文从三维可压缩的 N-S 方程出发, 对气动喷嘴的亚声速垂直冲击射流和斜冲击射流进行了数值模拟。利用有限体积法对控制方程进行离散, 网格的划分采用非结构性网格, 湍流模型为 RNG $k-\epsilon$ 湍流模

^{*} 收稿日期: 2001-01-31; 修订日期: 2001-05-16。基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19902009)。

作者简介: 何 枫 (1963—), 女, 博士生, 副教授, 研究领域为工程流体力学。

型^[6],在近壁处采用壁面函数^[7]进行修正,计算结果与实验值进行了比较,吻合得比较一致。

2 控制方程

非定常可压缩射流满足积分 N-S 方程^[8]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dV + \oint (F - G) dA = 0 \quad (1)$$

式中, Ω 是控制体, $\partial \Omega$ 是控制体边界面, W 是求解变量, F 是无粘通量, G 是粘性通量。

控制方程采用有限体积法离散和求解,无粘通量采用基于 ROE 矢通量分裂迎风格式^[9,10],粘性通量采用中心差分,差分格式为二阶精度^[11]。时间离散采用 Gauss-Seidel 隐式迭代。湍流模型为 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,在近壁处采用壁面函数进行修正。网格的划分为六面体的非结构网格。

RNG $k-\epsilon$ 湍流模式是应用重整化群的方法导出的,该方法应用对等原理于高斯平衡态,对 ϵ 进行二次展开,大尺度对涡的影响由无序力来描述,应用统计物理中研究相变化的方法逐次消除湍流的小尺度。与标准的 $k-\epsilon$ 二方程湍流模型相比较, RNG $k-\epsilon$ 二方程湍流模型在剪切流和涡流方面的计算准确度有了较大的提高,本文将其引进到三维冲击射流的数值模拟。

3 数值模拟分析

3.1 三维亚声速垂直冲击射流

图 1 是垂直冲击射流的计算域示意图。喷嘴出口直径 $D=3\text{ mm}$, 出口速度 240 m/s , 出口距固壁 $L=20D$ 。由于垂直冲击射流的对称性,因此可以取全场 1/4 区域进行计算,冲击固壁位于图 1 中 $A_1B_1C_1D_1$ 平面。外流场的计算域为 $20D \times 50D \times 50D$, 计算域内的网格点为 1.6×10^5 个。流场速度测量采用 DANTEC 的 Streamline90N10 热线测速仪。

在文献[5]中已给出垂直冲击射流沿 x 轴线上的速度分量 u 分布以及近壁处的速度径向速度分布,并与实验结果吻合很好,充分说明了计算模拟结果是可信的。这里进一步给出沿流向不同截面处的 u 速度剖面的计算结果(图 2)以及沿流向射流轴线的湍动能分布(图 3)。无论是速度剖面还是湍动能的分

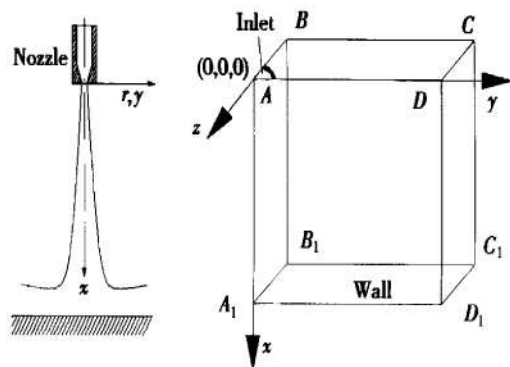


Fig. 1 Sketch of normal impinging jet

布都可以明确垂直冲击射流的两个主要区域,一为自由射流($x < 18D$)包括初始区、过渡区、充分发展区;另一为在近壁处的滞止区;以及各区域速度和湍动

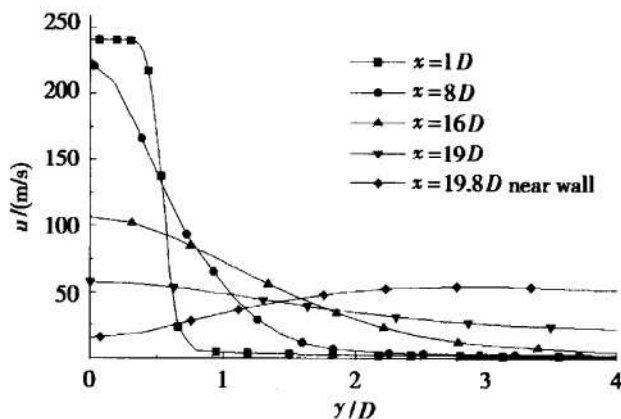


Fig. 2 Profiles of velocity component u

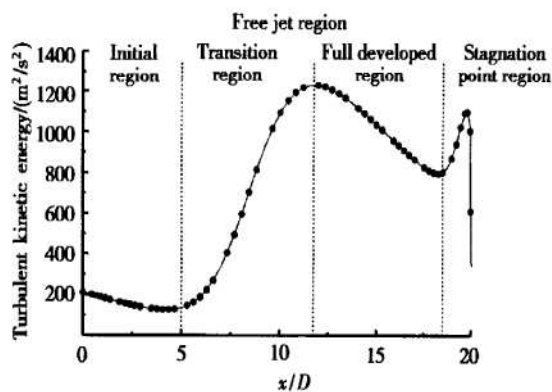


Fig. 3 Turbulent kinetic energy along x axis

能的发展。从图4对称面 AA_1D_1D 上 $y=10D, 15D, 20D$ 的不同截面上的合速度分布图中可以看出,随着流动沿固壁方向向外发展,近壁处速度在衰减,但沿 x 负方向的在距固壁 $2D$ 范围内速度梯度变化很大,一是由于固壁边界层流动,二是由于近壁卷吸大回流

(负 v) 造成的。从图 5 速度矢量图也可以看出, 在射流卷吸作用下, 周围气体的径向速度与固壁附近剪切流动的径向速度方向相反, 在剪切流动的近壁附近会出现径向速度为 0 的点, 从而导致不同 y 截面上的合速度分布的梯度变化。

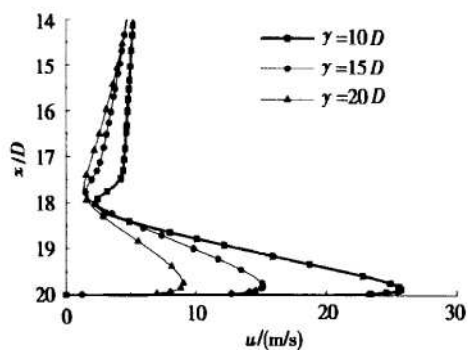


Fig. 4 Distributions of resultant velocity
(the wall at $x = 20D$)

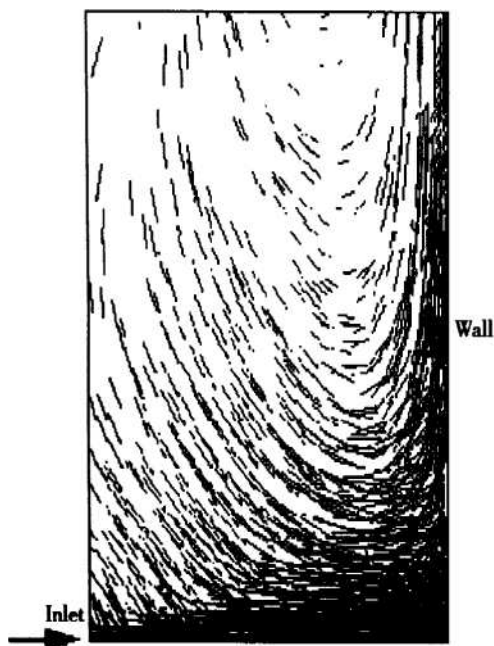


Fig. 5 Velocity vectors on the plane AA_1DD_1

3.2 三维亚声速斜冲击射流

图 6 显示的是斜冲击射流的计算域示意图。喷嘴出口直径 $D = 3 \text{ mm}$, 出口距固壁 $L = 10D$, 喷嘴中心轴线与冲击固壁 $ABCD$ 的夹角为 30° , 压比为 2。取空间 1/2 区域进行计算, 射流的冲击点为坐标原点。外流场的计算域为 $40D \times 10D \times 8D$, 计算域内的网格点为 1.5×10^5 个。边界条件和湍流模型与亚声速垂直冲击射流相同。

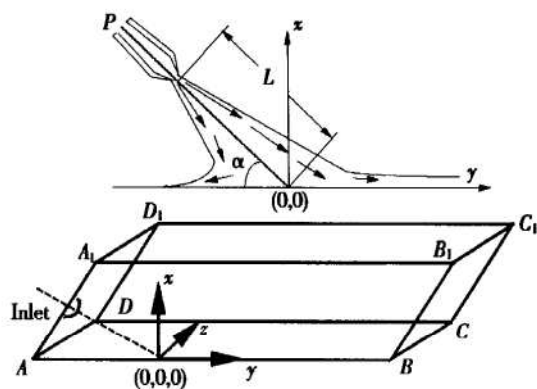


Fig. 6 Sketch of oblique impinging jet

当射流冲击到固壁上的时候, 主流将向冲击点的右侧 ($y > 0$) 流动, 射流左侧 ($y < 0$) 靠近冲击点区域的气体由于受到射流的卷吸作用, 也将向右侧流动。

利用热线风速仪测量对称面 AA_1B_1B 上近固壁处 ($x = D/6$)、冲击点下游 $y > 0$ 速度分量 v 沿 y 方向的分布, 在图 7 中给出近壁处速度分量 u 和固壁 $x = 0$ 上的静压分布的计算值, 图 8 为速度分量 v 计算值与实验值的比较以及固壁 $x = 0$ 上的总压分布, 计算与实验结果相吻合。从图中可以看出, 对于近壁处速度分量 u , 其最大值出现在对应 $y = 0$ 的位置, 在冲击区附近沿固壁, u 值衰减的很快。在 $y = \pm 5D$ 左右, 速度分量 u 基本上衰减为 0, 这时冲击射流转变为固壁剪切流动。而近壁处 $y = 0$ 附近的速度分量 v 并没有滞止到 0。当 $y > 0$ 即位于冲击点的右侧的流动, 速度分量 v 先是逐渐增大, 在 $y = 2D$ 左右 v 达到最大值, 然后再逐渐衰减。在冲击点的左侧 $y < 0$ 区域, v 逐渐衰减, 受到射流主体的剪切卷吸, 仍旧 $v > 0$; 只是在近壁 $y = -2.5D \sim -5D$ 的小范围内, 存在着回流, $v < 0$ 。固壁上的总压和静压分布分别与近壁处速度分量 u 和 v 相对应。

图 9 为对称面 AA_1B_1B 上 $y = 10D, 15D, 20D$ 的不同截面上的合速度分布, 其流动特征与图 4 中垂直射流的特征基本相符。

4 结 论

亚声速垂直冲击射流和斜冲击射流的数值模拟, 可以采用有限体积法对三维可压缩的 N-S 方程进行离散, 应用非结构网格, RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 在近壁处

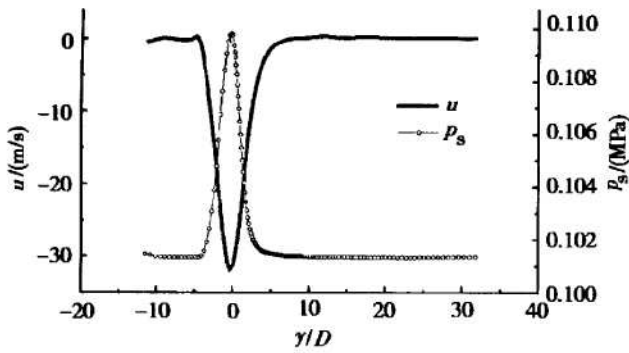


Fig. 7 Velocity component u near the wall
($x = D/6$) and static pressure p_s on the wall ($x = 0$)

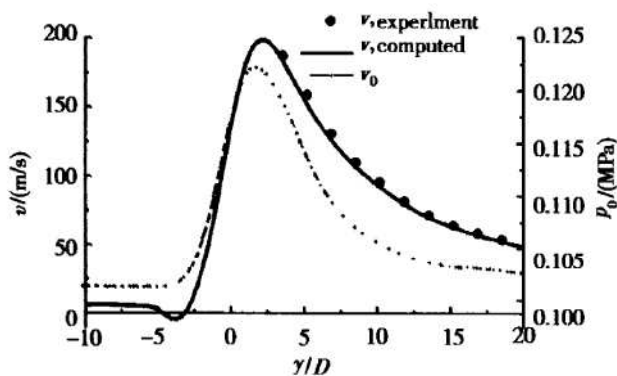


Fig. 8 Velocity component v near the wall
($x = D/6$) and total pressure p_0 on the wall ($x = 0$)

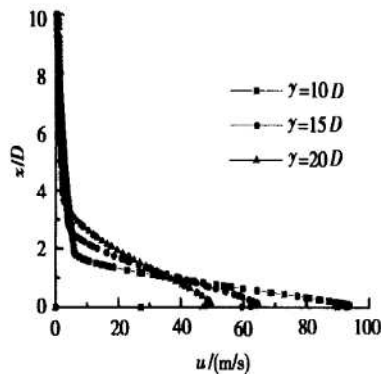


Fig. 9 Distributions of resultant velocity
(the wall at $x = 0$)

参考文献:

- [1] Cooper D, Jackson D C, Launder B E, et al. Impinging jet studies for turbulence model assessment [I] Flow Field Experiments [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36(10): 2675~ 2684.
- [2] Craft T J, Graham L J W, Launder B E. Impinging jet studies for turbulence model assessment [II] An examination of the performance of four turbulence models [J]. *International Journal of Heat and mass Transfer*, 1993, 36(10): 2685~ 2697.
- [3] Barata J M M. Fountain flows produced by multiple impinging jets in a crossflow [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(12): 2523~ 2530.
- [4] Ajersch P, Zhou Jiar-Ming, Ketler S, et al. Multiple jets in a crossflow: detailed measurements and numerical simulations proceedings of the international gas turbine and aeroengine congress and exposition [R]. *Houston, TX: USA, Paper: 95-GT-9. Jun 5~ 8 1995.*
- [5] 何枫, 谢峻石, 郝鹏飞. 应用 S-A 模型的自由射流和冲击射流数值模拟 [J]. *推进技术*, 2001, 22(1): 43~ 46.
- [6] Smith L M, Woodruff S L. Renormalization group analysis of turbulence [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1998, 30: 275~ 310.
- [7] Kim S E, Choudhury D. Near-wall treatment using wall functions sensitized to pressure gradient [C]. *Hilton Head, USA: FED Separated and Complex Flows Proceedings of the 1995 ASME/JSME Fluids Engineering and Laser Anemometry Conference and Exhibition*, 1995, 217: 273~ 280.
- [8] Kashitani M, Miyazato Y, Masuda M, et al. Numerical and experimental investigations of supersonic jets from sootblower nozzle [J]. *JSME International Journal, Series B*, 1998, 41(2): 375~ 380.
- [9] Batina J T. Implicit upwind solution algorithms for three-dimensional unstructure meshes [J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(5): 801~ 805.
- [10] Roe P L. Characteristic based schemes for the Euler equations [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1986, 18: 337~ 365.
- [11] Barth T J, Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes [R]. *AIAA-89-0366*.

(编辑: 王居信)

采用壁面函数进行修正, 其计算结果与实验值吻合一致。计算可得到垂直冲击射流结构的三个区域: 自由射流区、滞止区和壁面射流区。冲击射流近壁处存在着回流现象, 由于边界层流动和回流在距离固壁 $2D$ 内的速度梯度变化较大, 有入射角的射流其冲击点附近的速度分布不同于垂直冲击。