

# 面向二维零质量射流的动网格数值模拟方法\*

马晓永<sup>1</sup> 张征宇<sup>1</sup> 李聪健<sup>2</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000) (2. 西安交通大学理学院, 西安 710049)

**摘要** 为了研究零质量射流的作用机理和流场结构, 发展了一套面向二维零质量射流的非结构化动网格模拟方法: 采用控制容积法, 引入动网格控制方程, 并与任意曲线坐标系下矩阵形式的时均可压缩 N-S 方程组联合求解, 迭代过程中采用弹性类推法进行动态网格更新. 基于此方法, 对二维零质量射流进行数值模拟, 对计算获得的流场涡线和流线分布进行了分析和讨论, 并与其他学者类似算例进行了比较, 表明该方法能够合理揭示零质量射流的流场结构和作用机理, 可实现二维零质量射流的数值模拟.

**关键词** 动网格, 零质量射流, 非定常流动, 数值模拟

## 引言

流动控制是飞行器气动设计和研究的重要内容<sup>[1]</sup>. 近年由于零质量射流 (zero-net-mass-flux jet) 具有重量小, 结构简单, 工作时不需要外部提供气源等优点, 越来越受到研究学者的青睐. 零质量射流技术已经成为流动控制技术研究的热点, 并且随着 MEMS 技术的发展, 使得其应用前景更加广阔<sup>[2,3]</sup>.

为了进一步开展零质量射流在流动控制方面的研究, 本文开发了一套适用于二维零质量射流数值模拟的非结构化动网格模拟程序, 通过求解二维可压缩 N-S 方程, 研究了零质量射流在一定几何开孔和振动模式的情况下的流动机理, 并与其他学者的类似算例进行了比较和分析, 对计算程序进行了全面、合理的校验和考核.

## 1 零质量射流

零质量射流亦称为合成射流 (synthetic jet), 其主要由一个空腔构成, 空腔的底部是振动薄膜, 顶部为出气小孔. 当振动薄膜向上运动时, 腔内气体受到压缩后从小孔喷出, 在小孔边缘周围形成剪切层, 在适当的几何条件和振动参数下<sup>[4]</sup>, 剪切层卷起形成旋涡, 沿小孔向外的移动, 形成喷气状态; 当振动薄膜向下运动时, 外部流体进入腔内, 形成吸气状态. 喷出的气体来源于吸气过程中吸入的小孔周围的气体, 所以一个振动周期下来, 腔内整个流

动净质量为零. 零质量射流的本质是通过流体输运和能量输运来改变局部流动状态, 以期实现对流动分离、转捩的主动控制. 另一方面, 随着 MEMS 技术的发展以及阵列零质量射流结构的研究, 在诸如气动噪声控制、增强流动传热、减少涡轮流动损失等方面, 零质量射流都有着巨大的应用潜力.

## 2 计算模型和数值方法

### 2.1 计算模型

计算模型取自英国设菲尔德大学覃宁教授计算算例<sup>[5]</sup>, 由于文献未给出外场大小以及振动膜振动函数 (振幅和振动曲线), 本文计算采用了近似值, 并假定振动膜向上到达最大位置时满足某条二次函数曲线. 最大速率在振动膜中间位置, 随时间呈余弦变化, 振动膜的振动频率为  $f = 150\text{Hz}$ , 振幅为  $A = 0.5\text{mm}$ , 最大振动速率约为  $0.47\text{m/s}$ , 计算雷诺数 180, 斯托罗哈数 0.056, 相关计算公式为:  $St = df/U_0$ ,  $Re = \rho U_0 d/\mu$ ,  $U_0 = L_0/T = L_0 f$ ,  $L_0 = \int_0^{T/2} u_0(t) dt$ , 其中  $u_0(t)$  出口截面平均流向速度,  $T$  为一个振动周期时间,  $d$  是孔宽,  $\rho$  和  $\mu$  分别是流体密度和粘性系数. 振动膜运动方程为:  $\ddot{u}_b = 4f(y - y_0) \cos(2\pi ft) \vec{j}$ ,  $y = ax^2 + bx + c$ , 对于本文算例:  $y_0 = 0$ ,  $a = -7.851$ ,  $b = -0.005$ ,  $c = -0.006$ . 表 1 给出了本文和文献 [5] 计算模型及计算条件的对比情况.

2006-12-20 收到第 1 稿, 2007-04-26 收到修改稿.

\* 四川省重点科技攻关资助项目 (05GG009-013-02), 中国空气动力研究与发展中心科研创新基金项目

表 1 计算条件对比

Table 1 Comparison of computing conditions

|                              | Reference[5] | Present         |
|------------------------------|--------------|-----------------|
| Domain size                  | unknow       | 30mm × 40mm     |
| Cavity size                  | 20mm × 5mm   | 20mm × 5mm      |
| Orifice width $d$            | 1mm          | 1mm             |
| Orifice depth $h$            | 1mm          | 1mm             |
| Frequency of oscillation $f$ | 150Hz        | 150Hz           |
| Amplitude of diaphragm $A$   | ≈0.5mm       | 0.5mm           |
| Curve of diaphragm $y$       | unknow       | $ax^2 + bx + c$ |

### 2.2 网格及数值方法

结构化和非结构化网格在数值模拟中各有优缺点,鉴于非结构化网格比较容易生成,而且适应性较好,本文采用的是非结构化网格,在用动网格模拟射流腔体底部的振动时,采用弹性类推法进行网格更新.如图 1 所示,假定所有的网格点之间由“弹簧”连接,当腔体底部运动时,边界上的网格点位置首先发生移动,与边界上网格点相“连接”的其它网格点也由于“弹性力的作用”位置发生改变,以此类推,带动整个计算区域的网格作“弹性”运动.靠近底部(振动膜)的网格节点运动幅度较大,距离底部越远,相应网格点运动幅度越小.

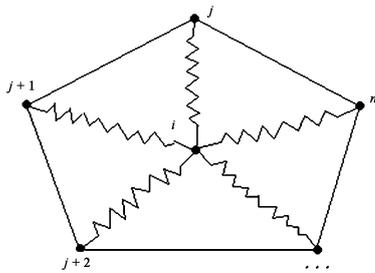


图 1 动网格弹性类推法  
Fig. 1 Spring analogy method

计算过程中,网格更新计算公式为:

$$\vec{x}_i^{t+\Delta t} = \vec{x}_i^t + \frac{\sum_j^n k_{ij} \Delta \vec{x}_j}{\sum_j^n k_{ij}} \quad (1)$$

其中  $k_{ij} = 1/\sqrt{|\vec{x}_j - \vec{x}_i|}$ ,  $\vec{x}_i, \vec{x}_j$  分别表示节点  $i, j$  初始时刻时的位置矢量,  $k_{ij}$  表示连接节点  $i, j$  之间“弹簧”的弹性系数,  $\vec{x}_i^t, \vec{x}_i^{t+\Delta t}$  分别表示节点  $i$  在  $t$  和  $t + \Delta t$  时刻的位置矢量.

计算采用任意曲线坐标系下矩阵形式的时均不可压缩  $N-S$  方程组,时间项采用一阶隐式格式,粘性项采用一阶迎风格式,紊流模型为一方程

Spalart-Allmaras 模型,整个方程组采用控制容积法进行离散,采用时间步进法进行求解.下壁面、合成射流空腔壁面均为无滑移和绝热壁面,外场边界采用外推法处理.流场初始化时压力为  $1atm$ ,温度为  $300K$ .在处理运动边界时,对任意大小控制体容积,积分形式动网格控制方程为:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \phi dV + \iint_{\partial V} \rho \phi (\vec{u} - \vec{u}_g) \cdot \vec{n} dF = \iint_{\partial V} \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \vec{n} dF + \iint_V S_\phi dV \quad (2)$$

式中  $\phi$  表示通用变量,  $\partial V$  为控制体的表面积,  $dF$  为控制体上微元表面积,  $\rho$  为流体密度,  $\vec{u}$  为流体速度,  $\vec{u}_g$  为网格运动速度,  $\Gamma_\phi$  为扩散系数,  $S_\phi$  为源项.计算过程中,振动膜在水平位置、向上和向下最大位置时网格情况如图 2 所示,图中还给出了结构化网格<sup>[5]</sup>和本文的计算网格对比情况.

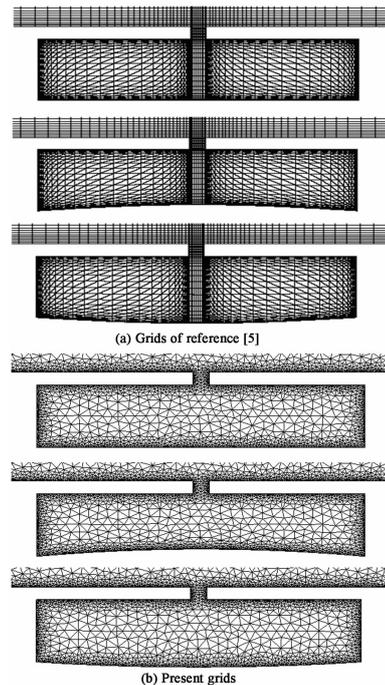


图 2 计算网格对比

Fig. 2 Comparison of grids

### 3 算例验证

为了验证上述数值模拟方法及计算程序的正确性,本文对国外类似算例进行了计算比较.需要指出的是,除了网格不一样外,外场大小、外场边界条件设置以及振动膜振幅和振动曲线也不相同,本文计算中采用的是近似值.这样就使得计算结果有所不同,本文主要对涡线和流线分布的计算结果进

行了比较与分析.

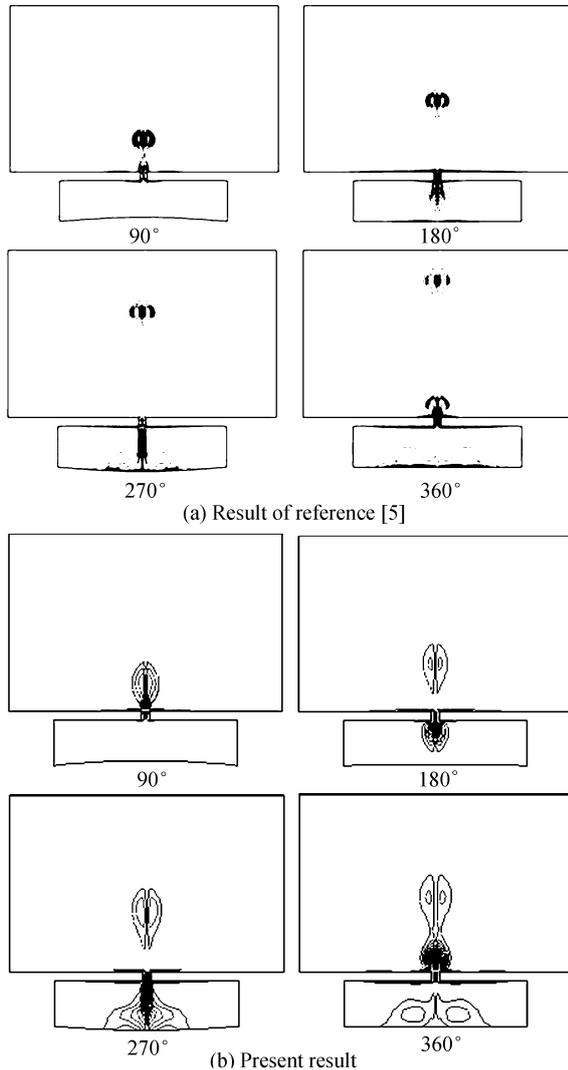


图3 首个振动周期内的涡线分布

Fig. 3 Vorticity magnitude of the first cycle

图3给出了首个振动周期内的涡线计算结果,其中图3(a)为文献[5]的计算结果.图4为首个振动周期内的流线分布结果.从不同相位涡线、流线分布可以看出:90°相位时,此时振动膜向上到达最大振幅位置,腔内气体受到压缩由射流孔向外喷出,在小孔出口附近,剪切层卷起形成涡对,计算结果和图3(a)涡线分布基本一致;180°相位时,振动膜向下恢复到水平位置,此时射流孔附近的气体被吸入腔内,而外场的涡对沿小孔向外的方向继续移动,和图3(a)同相位相比,本文计算的外场涡对移动速度稍慢一些,这是由于计算设置的外场边界条件、振动膜振幅和曲线函数和文献[5]不同所致,从图4(b)流线分布可以看出,外场涡对也受到了吸入气体的影响,这一点在270°相位时更加明显;

270°相位时,腔内振动膜向下到达最大振幅位置,外场涡对分布显著不同,图3(a)中涡对沿小孔向外方向快速运动,而本文计算结果显示涡对移动速度较慢,此外,图3(a)中靠近振动膜附近涡线分布较密,证明吸入的气体速度较大,气流冲击底部而形成漩涡.对于零质量射流,在一定频率和几何参数下,射流孔喷出和吸入的气流速度基本相当,由此可以推断出图3(a)中气流喷出的速度比较大,使得涡对能够以较快的速度运动;360°相位时,振动膜向上恢复到水平位置,气体再次由射流孔喷出,第二对涡对形成,喷出时和外场的涡对交接,流线分布也明显发生了改变.从图4整个周期内外场和腔内的流线分布来看,计算结果合理,基本上模拟出了零质量射流喷气和吸气时流场的分布情况.

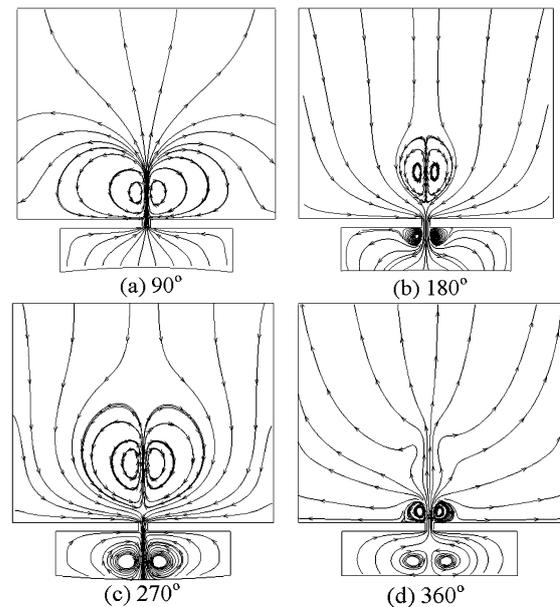


图4 首个振动周期内的流线分布

Fig. 4 Streamlines pattern of the first cycle

吸气作用,吸入壁面附近的低速气体,然后通过腔内振动薄膜压缩后由喷出,把形成的高速漩涡气流射入外流场;另一方面是能量的运输,零质量射流的抽吸作用相当于对边界层注入了能量,通过能量的注入来增强和放大流动分离区域的涡结构,由此改变局部的流动状态.此外,本文计算结果表明,零质量射流吸气时,外场的流场结构会受到吸气的影响,比如涡对的移动速度会变慢等.

#### 4 结论

为了探讨零质量射流的作用机理和流场结构,

本文开发了一套适用于二维零质量射流数值模拟的非结构化动网格模拟程序. 采用控制容积法对二维零质量射流进行了非定常数值模拟, 并对计算结果进行了分析与讨论, 通过与国外类似算例的比较, 表明非结构化网格能够满足零质量射流数值模拟的需要, 计算结果揭示了零质量射流的流场结构和作用机理, 开发的程序具有初步的二维零质量射流模拟能力, 可以进行相关二维零质量射流的数值模拟.

### 参 考 文 献

- 1 Barton L. Smith, Ari Glezer. Vectoring of adjacent synthetic jets. *Journal of Aircraft Industries Association of America*, 2005, 43(10): 2117 ~ 2122
- 2 S. C. Liddle, W. J. Crowther and N. J. Wood. Investigation of phase and spacing effects in synthetic jet actuator arrays. 43rd Aircraft Industries Association of America Aerospace Science Meeting and Exhibit, Nevada, Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2005: 107
- 3 罗振兵, 夏智勋. 合成射流技术及其在流动控制中应用的进展. *力学进展*, 2005, 35(2): 221 ~ 234 (Luo Zhenbin, Xia Zhixun. Advances in synthetic jet technology and applications in flow control. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(2): 221 ~ 234 (in Chinese))
- 4 Ryan Holman, Yogen Utturkar, Rajat Mittal, et al. Formation criterion for synthetic jets. *Journal of Aircraft Industries Association of America*, 2005, 43(10): 2110 ~ 2116
- 5 H. Xia and N. Qin. Dynamic grid and unsteady boundary conditions for synthetic jet flow. 43rd Aircraft Industries Association of America Aerospace Science Meeting and Exhibit, Nevada, Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2005: 106

## STUDY ON TWO-DIMENSIONAL ZERO-NET-MASS-FLUX JET USING DYNAMIC GRID\*

Ma Xiaoyong<sup>1</sup> Zhang Zhengyu<sup>1</sup> Li Congjian<sup>2</sup>

(1. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

(2. School of Science Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** A numerical simulation method using dynamic grid for two-dimensional zero-net-mass-flux jet flow was developed, in which the dynamic grid conservation equations and spring-based smoothing method were used. Compared with other similar examples, the results show that the flow structure and action mechanism of zero-net-mass-flux jet flow are reasonable, and therefore this method is useful.

**Key words** dynamic grid, zero-net-mass-flux jet, unsteady flow, numerical simulation

Received 20 December 2006, revised 26 April 2007.

\* The project supported by the Key Science and Technology Program of Sichuan (05GG009-013-02) and the Innovative Research Foundation of China Aerodynamics Research & Development Center