

# 微射流改变绕流圆柱气动性能的数值模拟

高峰<sup>1,2</sup>, 汪亮<sup>2</sup>, 任继业<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**采用有限体积法求解 Favre 平均 N-S 方程,对微射流改变绕流圆柱的气动性能进行数值模拟。计算结果显示了在微射流作用下绕流圆柱的气动性能发生改变,揭示了微射流产生的低压回流区是绕流圆柱气动性能发生改变的根本原因,该结果和文献[1]中实验观察到的现象比较吻合。

**关键词:**微射流;圆柱绕流;纳维尔-斯托克斯方程;有限体积法;数值模拟

**中图分类号:**V211.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)06-0017-03

圆柱绕流问题是流体力学中的一个经典课题。当流动绕过圆柱时,压强将沿流程变化。逆压强梯度区域将产生边界层分离现象并在边界层分离后形成的尾流中产生回流或旋涡,招致很大的能量损失并增加了流动的阻力。所以,如何使流动分离以后再次附面并减小流动损失是工程技术人员长期以来探索的课题之一。关于减小绕流圆柱的流动分离,在早期的实验研究工作中所用方法大部分采用线性激励机制,对壁面边界层及分离剪切层的扰动刺激局限在一个比较小的频率范围内<sup>[1]</sup>。微射流技术是一种主动的流动控制技术,其机理是小尺度的扰动和大尺度的主流耦合进而改变主流流动状态<sup>[2]</sup>。和早期的方法相比,微射流技术是一种非线性的激励机制,可在一个相对比较宽的频率范围内对壁面边界层及分离剪切层注入扰动刺激。文献[1]报道在风洞中对微射流作动器改变绕流圆柱的气动性能进行了实验。实验结果显示,在微射流作用下绕流圆柱的尾迹区大为减小,绕流圆柱表面的压强系数发生明显的变化,进而影响绕流圆柱的气动性能发生改变。本文采用有限体积法结合湍流模型,对二维、粘性、非定常、可压微作动器射流改变绕流圆柱的气动性能进行数值模拟。计算结果揭示了微射流产生的低压回流区是绕流圆柱气动性能发生改变的根本原因。计算结果和文献[1]实验中观察到的现象比较吻合。

## 1 控制方程及数值方法

针对微作动器的结构特点及微射流和圆柱绕流合成流场的分析<sup>[3]</sup>,拟采用 Favre 平均 N-S 方程,其矢量形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} W d\Omega + \int_{\Gamma} (F - G) \cdot dS = \int_{\Omega} H d\Omega \quad (1)$$

式中,  $F$  为无粘通量矢量,  $G$  为粘性通量矢量,  $W(\rho, \rho u, \rho v, E)$ 。  $H$  为体积力和化学反应源项,本文不予考虑。为了提高精度,采用 Roe 的矢量通量分裂技术。式(1)的半离散格式为

$$\Gamma \frac{d}{dt} (\Omega Q) + \sum_{f=1}^{N_{faces}} (\phi_{fx} S_{fx} + \phi_{fy} S_{fy}) = 0 \quad (2)$$

式(2)的空间相离散采用二阶迎风格式,时间域离散采用 Jameson 等人发展的多步 Runge-Kutta 方法

收稿日期:2002-11-20

基金项目:西北工业大学博士创新基金资助项目(5211102-0800-6114101)

作者简介:高峰(1965-),男,安徽凤阳人,博士生,主要从事固体火箭发动机与计算流体力学研究;  
汪亮(1940-),男,安徽歙县人,博士生导师,主要从事火箭发动机研究。

$$\begin{cases} Q^0 = Q^n \\ Q^i = Q^{i-1} + \alpha_i \Delta \Gamma^{-1} R^{i-1} \Omega^{-1} & i = 1, 2, 3, 4 \\ Q^{n+1} = Q^4 \end{cases} \quad (3)$$

湍流模型采用适于低速流动的 RNG  $k-\varepsilon$  模型。

## 2 计算边界条件及初始条件

计算域边界条件涉及固体边界、自由边界、来流边界和微射流边界。固体边界采用无滑移边界条件,壁面的压强梯度和壁面温度梯度为零。自由边界取为远场,假设此处流动已充分发展,所有参数均进行线性外推。对来流边界,流动参数给定为自由来流值。微射流边界取微作动器出口速度,作动器出口速度为

$$\begin{cases} u_n \\ v_n \end{cases} = \begin{cases} V_{\max} g(x) \sin(2\pi ft + \Phi_n) \cos \beta \\ V_{\max} g(x) \sin(2\pi ft + \Phi_n) \sin \beta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $V_{\max}$  为微作动器出口最大速度;  $u, v$  分别为  $x, y$  方向速度分量;  $f$  为压电薄膜驱动频率;  $g(x)$  为  $x$  方向上的速度分布函数。本文取  $g(x)$  为 1, 即取为矩形分布。  $\Phi$  为作动器的工作相位, 且  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 > 0$ 。  $n = 1, 2$  分别代表两个作动器。

微射流流场是在静止的环境流体中建立起来的, 因此流场计算的初始条件为除微射流和来流边界以外速度均取为零, 压强、温度取常压、常温下的值。

## 3 计算结果及分析

有双微作动器的圆柱绕流的合成流场计算模型如图 1 所示。为了方便给定边界条件, 计算域取得充分大。外域尺寸为  $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 使边界上的参数变化很小, 不会出现数值反常。微射流作动器出口宽度为  $h = 0.5 \text{ mm}$ , 相邻两个作动器之间的距离为  $3h$ 。微射流出口最大速度  $V_{\max} = 22 \text{ m/s}$ , 压电薄膜驱动频率  $f = 1000 \text{ Hz}$ , 来流速度  $U = 32 \text{ m/s}$ , 圆柱直径为  $60 \text{ mm}$ 。双微作动器分别放置在点 1(驻点)、点 2(流动分离点) 和点 3(后端点) 以考察在双微射流作动器的作用下绕流圆柱气动性能的改变情况。数值计算中采用的数据与文献[1]实验中的数据大致相同。全场网格数约为 1 001 000。网格在物面附近及微射流中心线附近加密, 微射流入口内各有 10 个网格点。

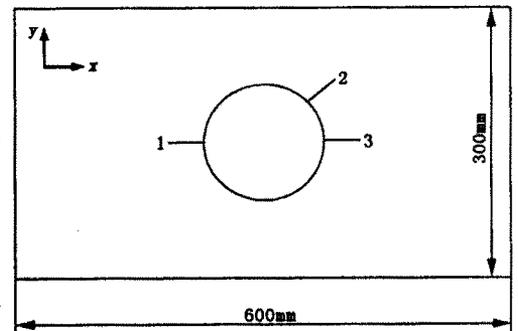


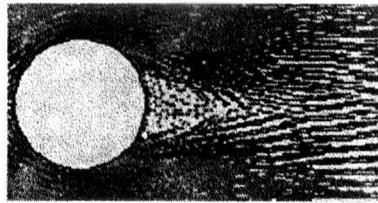
图 1 计算域简图

图 2 为双微作动器不工作(a)和工作(b)两种情况下绕流圆柱流场的矢量图及压强系数沿圆柱周向的分布图。可以看出, 微作动器不工作时由于压差阻力(形状阻力)的影响, 流动发生分离, 并在圆柱后部形成一个尾流区。尾流区内存在旋涡, 从而引起较大的能量损失。这一点从图 2(c)中也可看出, 压强系数曲线从驻点开始下降, 达到最小值后逐渐回升, 即压强开始恢复。但因流动分离的缘故, 压力无法完全恢复。双微作动器处于工作状态且  $\Delta\Phi = 120^\circ$  时, 在圆柱的流动分离点附近(相应于图 1 中点 2)形成了一个小的回流区, 从而对圆柱绕流流场产生了重要影响。比较两种情形的压强系数曲线, 双微作动器工作时圆柱表面各点(例如驻点及后端点)的压强系数均有所下降, 圆柱的驻点(点 1)和后端点(点 3)的压强系数差值减小, 即压强得到了恢复且减小了压差阻力。此外, 圆柱上下表面压强系数的差值增大。

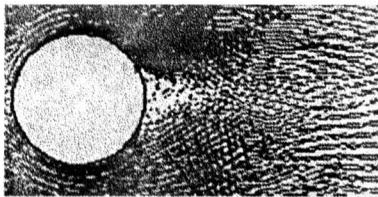
图 3 为双微作动器位于圆柱表面不同位置的压强系数曲线沿圆柱周向的分布。可以看出, 微作动器在圆柱表面的位置不同, 压强系数曲线沿圆柱周向的分布亦不同。其中, 微作动器在位置 2 附近时, 圆柱上、下表面压强系数的差值最大, 即对圆柱的气动力性能影响最大。这正是流场主动控制技术的特点, 在流场的扰动敏感点注入合适的非线性动力学扰动模式即可有效地改变流场的特征。微射流和主流在量级上虽存在着巨大的差别, 但仍可改变流场的特征, 达到以“小”控“大”的目的。

图 4 为位于分离点附近的双微射流作动器存在相位差时圆柱表面压强系数曲线沿圆柱周向的分布。可以看出, 双微射流作动器存在相位差时圆柱表面压强系数曲线沿圆柱周向的分布也是不同的。随着相位差的增大, 圆柱表面各点压强系数曲线的值均有所下降。此外, 相位差愈大, 圆柱上、下表面压强系数的差值愈

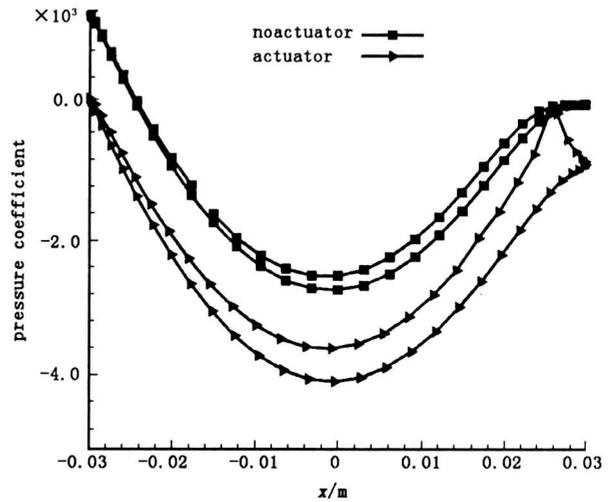
大,对圆柱气动性能的影响也愈大。



(a)



(b)



(c)

图2 双微作动器位于驻点时流场的矢量图及压强系数沿圆柱周向的分布

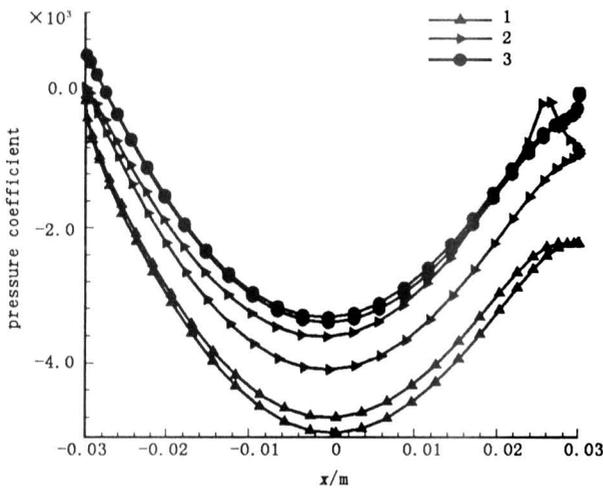


图3 双微作动器位于圆柱表面不同位置时压强系数曲线沿圆柱周向的分布

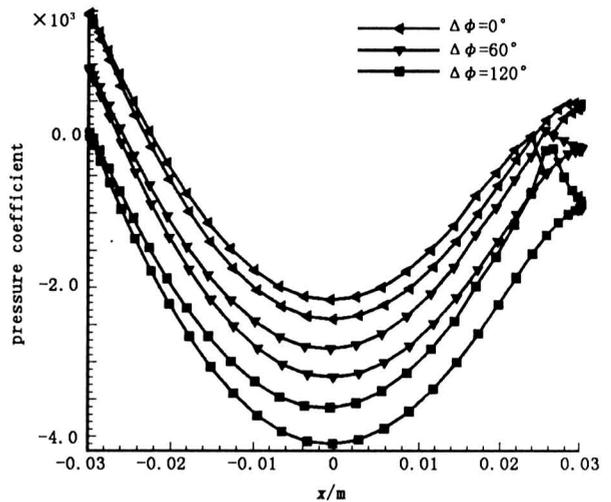


图4 双微作动器存在相位差时圆柱表面压强系数曲线

### 4 结论

采用有限体积法,对二维、粘性、非定常、不可压圆柱绕流流场进行数值模拟。计算结果表明双微作动器工作时部分分离流重新附面,尾流区减小;相邻的双微作动器存在相位差时,圆柱上下表面压强系数的差值随着相位差的增大而增大,进而影响到绕流圆柱的气动性能发生变化。此外,微作动器的位置不同,微射流对圆柱气动性能的影响亦不同。数值模拟发现,微作动器放置在分离点附近时,圆柱上下表面压强系数的差值增大,即对圆柱的气动性能影响较大。这和文献[1]实验所观察到的现象比较吻合。

### 参考文献:

[1] Amitay M, Honohan A, Trautman M, et al. Modification of the Aerodynamics Characteristics of Bluff Bodies Using Fluidic Actuators[R]. AIAA 97-2004,1997.

[2] McMichael J M. Progress and Prospects for active Flow Control Using Microfabricated Electro-Mechanical System (MEMS)[R]. AIAA 96-0306,1996.

## The Study of the Infrared Radiation Characteristics of the Cruise Missile

BAI Wei - xiong, WU Fa - wen

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** According to the demand of ground to air defense, the cruise missile is studied and analyzed for its infrared radiation characteristics in this paper. And the three aspects, i. e. airflow heating, feather flow radiation and jet nozzle radiation, are calculated, finally the calculated results and relative analysis are given.

**Key words:** cruise missile; infrared radiation; feather flow radiation; ground to air defense

(上接第7页)

## Blown - up Theory and Its Applications

YI Lin

( Department of Mathematics, Slippery Rock University, Slippery Rock - Pennsylvania, PA 16057, USA )

**Abstract:** In this paper, by combining mathematical models and the underlying physical systems, the concept of blown - ups introduced for the study of whole evolutions is elaborated deeply. Based on the analysis of nonlinear models, mathematical physics meanings and mathematical characters of blown - ups are provided. At the end, the concept of blown - ups is applied to the study of chemical chain reactions with existing mutual reactions between chains.

**Key words:** linearity; non - linearity; whole evolution; blown - up

(上接第19页)

[3] 高峰,何高让,汪亮. 微射流流场原理性实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(3):8-11.

(编辑:田新华)

## Numerical Emulation on a Micro - jet Actuator Modifying the Aerodynamic Performance of a Cylindrical Body

GAO Feng<sup>1,2</sup>, WANG Liang<sup>2</sup>, REN Ji - ye<sup>1</sup>

( 1. The Missile Institute, Air Force Engineering university, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China )

**Abstract:** The Favre - averaged N - S equations and k -  $\epsilon$  model are solved by using the finite volume method, and a numerical emulation is done for the micro - jet actuators in modifying the aerodynamic performance of a cylindrical body. The result shows that the aerodynamic performance of a cylindrical body is modified, and " low pressure recirculation region " produced is a root cause of the modification. And the calculating results are in agreement with the phenomena observed in the experiments of the documents.

**Key words:** micro - jet; cylindrical flowing around a body; Navier - Stokes equations; finite volume method; numerical emulation