**引文格式**:郭敏慧,田海平,马国祯,等. 结构参数对射流振荡器流体动力学特性的影响[J]. 太原理工大学学报,2026,57(5):1018-1028.

GUO Minhui, TIAN Haiping, MA Guozhen, et al. Influences of structural parameters on fluid dynamic characteristics of fluidic oscillator[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2026,57(5):1018-1028.

# 结构参数对射流振荡器流体动力学特性的影响

郭敏慧[1],田海平[1,2],马国祯[1,2],范时金[1]

(1. 太原理工大学 航空航天学院,山西 太原; 2. 太原理工大学 力学国家级实验教学示范中心,山西 太原)

**摘 要**:**【目的】**射流振荡器是一种依靠自身结构产生周期性射流的流动控制装置,其流动特性与外形结构密切相关,探索其结构参数对流体动力学特性的影响机制至关重要。**【方法】**采用数值方法研究了长径比$\alpha$、缩放比$\beta$、入口喉道宽度比$\gamma$以及反馈通道宽度比$\eta$等4种不同结构参数对射流振荡器流动特性的影响。同时,开发了一种评估涡流随时间发展演化的方法,用于从旋涡动力学角度探索关键结构参数对射流振荡器的影响机制。**【结果】**结果表明:某一类结构参数变化时,入口速度不影响该结构参数变化规律;长径比$\alpha$与缩放比$\beta$对射流振荡器振荡频率的影响较为敏感,而入口喉道宽度比$\gamma$以及反馈通道宽度$\eta$则不明显;长径比$\alpha<0.6$时振荡器产生直射流,$0.6<\alpha<3$时为周期性振荡递减区,$\alpha>3$时为周期性振荡平稳区;缩放比$\beta$与振荡频率在研究区间$1<\beta<4$成反比关系。涡动力学分析显示:随着长径比$\alpha$的增大,射流振荡器中反馈流对改变主射流方向的能力减弱且涡流发展演化的能力减弱,因此振荡频率随之减小;随着缩放比$\beta$增大,射流振荡器内外部涡流面积增大,因此其涡流生成演化的时间变长,从而引起振荡频率减小。**【结论】**该研究为射流振荡器的个性化优化设计及应用提供了理论基础。

**关键词**:射流振荡器;结构参数;振荡频率;长径比;缩放比

**中图分类号**:TP602 **文献标识码**:A

**DOI**:10.16355/j.tyut.1007-9432.20240534 **文章编号**:1007-9432(2026)05-1018-11

# Influences of Structural Parameters on Fluid Dynamic Characteristics of Fluidic Oscillator

**GUO Minhui[1], TIAN Haiping[1,2], MA Guozhen[1,2], FAN Shijin[1]**

(1. *College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*; 2. *National Experimental Teaching Demonstration Center for Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*)

**Abstract**:**【Purposes】** The fluidic oscillator is a flow control device that generates periodic jet flows on the basis of its own structure. Flow characteristics are closely related to its geometric configuration. **【Methods】** In this study, numerical simulation was employed to study the influence of four different structural parameters on the flow characteristics of fluidic oscillator. The structural parameters include the length-to-diameter ratio ($\alpha$), scaling ratio ($\beta$), inlet throat width ratio ($\gamma$), and feedback channel width ratio ($\eta$). A method was developed to evaluate vortex evolution over time. And the impact of key structural parameters on fluidic oscillators was focused from a vortex dynamics perspec-

**收稿日期**:2024-07-05;**修回日期**:2024-08-24

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(12172242,12302289,12332017)

**第一作者**:郭敏慧,硕士,(E-mail)minhui_guo@126.com

**通信作者**:田海平,副教授,研究领域为湍流结构动力学,(E-mail)tianhaiping88@126.com

tive.【**Results**】Results show that changes in a certain type of structural parameter are not affected by inlet velocity. The length-to-diameter ratio ($\alpha$) and scaling ratio ($\beta$) significantly affect the oscillation frequency of the fluidic oscillator, while the inlet throat width ratio ($\gamma$) and feedback channel width ($\eta$) have a lesser impact. For the length-to-diameter ratio ($\alpha$), the oscillator generates a straight jet flow when $\alpha<0.6$, enters a region of periodic oscillation decay when $0.6<\alpha<3$, and stabilizes into a region of periodic oscillation when $\alpha>3$.The scale ratio ($\beta$) and oscillation frequency show an inverse relationship within the range of $1<\beta<4$. Vortex dynamic analysis shows that as the length-to-diameter ratio ($\alpha$) increases, the feedback flow exhibits a diminished ability to alter the direction of the main jet, as well as a reduced capacity for vortex development and evolution. This phenomenon consequently leads to a reduction in the oscillation frequency. As the scaling ratio ($\beta$) increases, the vortex areas inside and outside the fluidic oscillator expand. The reduction in vortex area slows vortex formation and evolution, which reduces the oscillation frequency.【**Conclusions**】The study of structural parameters provides a theoretical basis for the individualized optimal design and application of fluidic oscillators.

**Keywords**: fluidic oscillators; structural parameters; oscillation frequency; length-diameter ratio; scaling ratio

射流振荡器是一种基于Coanda效应的流动控制装置，因实用性强、结构简单、易于控制而广泛应用于燃烧室燃烧[1]、流动分离控制[2-5]、传热冷却[6-9]等方面。其工作原理是主射流进入射流振荡器主腔室后会发生偏转并附壁在腔体一侧，进而在出口喉道形成两股流动：一股从出口斜向射出，另一股通过反馈通道使入口喉部的主射流附壁方向发生变化。如此反复，出口便形成周期性的振荡射流，又称扫掠射流。在相同的来流条件下，射流振荡器的流动特性与其自身因素密切相关，包括结构设计、结构参数以及排列方式。

在结构设计方面，Soheil等[10]对比了无反馈通道、单反馈通道和双反馈通道三种类型振荡器对单管换热性能的影响，发现双反馈通道的设计能够显著增强射流动量的渗透深度，从而有效提升管内的换热性能。此外，Ahmed等[11]通过粒子图像测速技术（Particle Image Velocimetry，PIV）对比分析了3种不同形状出口通道的流动特性，发现矩形出口通道的振荡器产生分离脉冲，而带分离楔的振荡器则产生双脉冲。进一步研究中，杨帆等[12]研究了振荡器出口分流楔的流动特性，发现具有分流楔的振荡器会有3个速度峰值，且速度峰值大小受分流楔距离影响。

在尺寸参数方面，Seo等[13]通过数值方法研究了主腔室长度对振荡频率的影响，结果显示振荡频率与初始射流附着点到出口连接处的距离成反比，而反馈通道长度同样与振荡频率呈现反比关系。Wen等[14]进一步探讨了入口喉道宽度、出口喉道宽度以及混合室宽度对涡流产生以及演化机制的影响，认为几何尺寸的变化实现了对反馈流量和再循环涡流的调节和控制，进而对振荡器的流动特性产生了显著影响。Amir等[15]对振荡器缩放比与射流散热特性的关联进行了探讨，提出缩放比较小的振荡器传热性能更优，但传热性能的提升幅度在缩放比进一步减小时逐渐减小。Park等[16]利用高速纹影可视化技术，定量分析射流振荡器内部几何参数对振荡射流流动特性的影响。研究发现，在超声速下，振荡频率与射流振荡器的长度成正比，而扫掠角度与其长度成反比。

在排列方面，Elias等[17]通过热线实验研究了背靠背排列（即将两个振荡器的入口相连）对流动特性的影响。研究结果表明，尽管振荡器的整体运动机制得以保留，但共享反馈通道的流动会出现停滞现象。Song等[3]提出了一种横向排列的组合式振荡器设计（即将两个振荡器的反馈通道相连），并对其换热特性进行了分析。研究发现，组合式振荡器能够显著改善射流撞击目标平面的努塞尔数（$Nu$）分布的均匀性。

可见，影响射流振荡器流场特性的自身因素众多，如何设计出满足实际应用需求的射流振荡器成为该领域新的挑战。因此，探索经典射流振荡器中结构参数对流动特性的影响机制成为首要工作，也将为射流振荡器结构参数的优化设计指引方向。本研究关注的结构参数有长径比、缩放比、入口喉道宽度以及反馈通道宽度，旨在定量分析各参量对射流振荡器流场分布、频率影响的一般规律及调控机理。

# 1 研究方法

## 1.1 物理模型及结构参量选取

射流振荡器的内腔厚度在整个平面是恒定的，且相对长度而言厚度较薄。在中低雷诺数时，射流振荡器内外流动可以忽略三维效应，在数值模拟研究中简化为二维模型[15]。射流振荡器模型选用Ostermann等人[18]提出的经典结构，该模型结构如图1所示。研究中作为对照基准的结构尺寸如表1所示，并定义为标准尺寸。其中，$L$为射流振荡器主体长度，包括入口收缩段、主腔室和反馈通道段、出口扩散段；$D$为射流振荡器整体宽度。

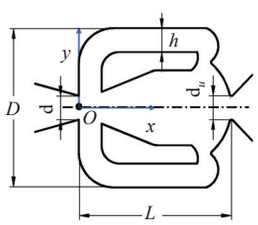



**图1 射流振荡器经典结构及参数尺寸示意图**

Fig. 1 Fluidic oscillator classical structure and parameter dimensions

**表1 射流振荡器标准尺寸表**

Table 1 Standard size of fluidic oscillator

| 参数名称 | $L_0$ | $D_0$ | $d_0$ | $h_0$ | $d_{u0}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 尺寸/mm | 40 | 40 | 6 | 6 | 6 |

图2所示为射流振荡器结构参数长径比$\alpha$($\alpha=L/D_0$)、缩放比$\beta$($\beta=D_1/D_0$)、入口喉道宽度比$\gamma$($\gamma=d_1/d_0$)以及反馈通道宽度$\eta$($\eta=h_1/h_2$)的变化规则。在结构参量的变化中，通过保持长度$L$不变、宽度$D$发生缩放来改变长径比$\alpha$；入口喉道中心点保持位置不变，通过缩放整个结构的几何尺寸来改变缩放比$\beta$；保持中心线不变，通过调节两侧对称结构的相对距离来改变入口喉道宽度比$\gamma$；通过改变楔形块的展向宽度来改变反馈通道的宽度比$\eta$。为了深入研究4类结构参数对射流振荡器的影响规律，数值工作中选择了3种不同的入口速度下共计60余种工况进行系统对比研究，具体模拟工况情况如表2所示。

**表2 各结构参数选值列表**

Table 2 Selected values for various structural parameters

| 参数名称 | 参数值 | 入口速度/(m·s$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 长径比$\alpha$ | 0.8、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 | 5<br>11<br>19 |
| 缩放比$\beta$ | 1、1.5、2、3、4 | |
| 入口喉道宽度比$\gamma$ | 1、1.25、1.5、1.75、2 | |
| 反馈通道宽度比$\eta$ | 1/3、1/2、2/3、1 | |

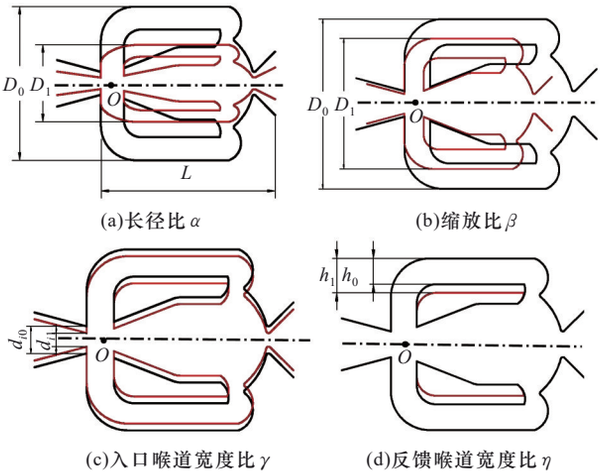



**图2 射流振荡器尺寸参数变化示意图**

Fig. 2 Schematic diagrams of fluidic oscillator with dimensional parameter variation

## 1.2 数值仿真设置

计算域如图3所示，射流振荡器腔体内部为内流场，出口连接一直径为$D=96d_0$的半圆区域作为外流场计算域。工作流体为液态水；射流振荡器入口为速度入口，入口湍流度为5%；外流场计算区域弧形边界设为压力出口，参考压力值为$p_0=101.325$ kPa；其余壁面设为无滑移固壁面。

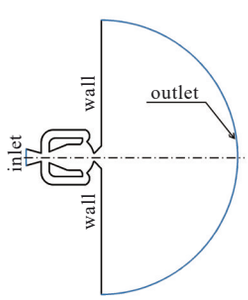



**图3 射流振荡器边界设置示意图**

Fig. 3 Boundary configuration diagram for fluidic oscillator

本研究采用结构化与非结构化相结合的方法划分网格。图4(a)为射流振荡器稀疏显示的整体网格，在振荡器外部流场区域为渐变的结构化矩形网格，在射流振荡器出口区域进行局部加密。图4(b)为射流振荡器内部整体网格图。除腔体内壁面生成的10层结构化矩形边界层网格外，其余网格均为三角形网格。边界层网格如图4(c)所示，第一层网格高度随来流速度大小及结构参数变化适当调节，满足$y^+<1$。

本研究基于二维非定常雷诺平均Navier-Stokes方程组求解射流振荡器的非定常流动，湍流模型选择SST $k$-$\omega$模型。时间项采用二阶隐式格式离散，对流扩散项采用二阶中心差分格式离散，

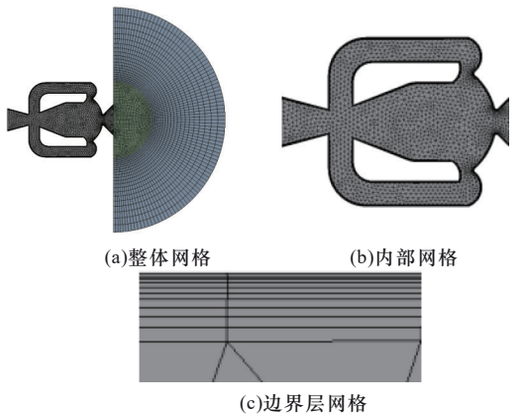



**图 4　射流振荡器网格设置示意图**

Fig. 4　Schematic diagrams of fluidic oscillator grid setting

采用PISO算法计算压力-速度耦合。结果部分采用射流振荡器非定常流动稳定后的10个周期的数据进行流动特性分析。

### 1.3　振荡频率的确定

为更直观分析振荡器腔内流动情况，选取入口喉道中心处A点、振荡器中心处B点、出口喉道中心处C点以及反馈通道入口D、E点作为监测关键点。首先对各点合速度随时间变化的信号进行快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform，FFT），得到各位置频率信息，见图5。因是反馈系统，反馈通道D、E点的频率为振荡系统主频$f$，中心线上A、B、C三点的频率为$2f$。

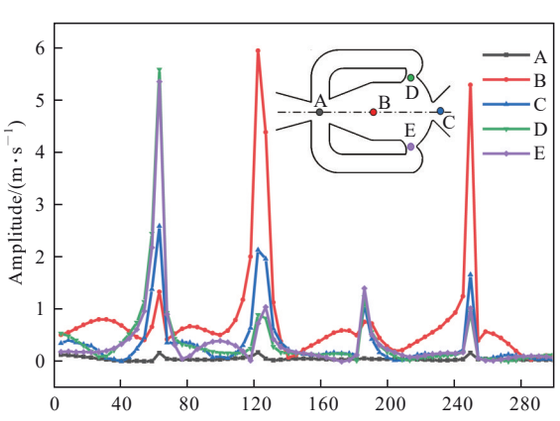
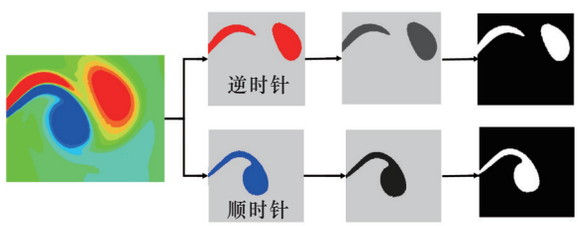



**图 5　快速傅里叶变换后各监测点速度振幅随频率变化曲线**

Fig. 5　Curves of velocity amplitude variation with frequency after fast Fourier transform at monitoring points

### 1.4　旋涡结构时空演化辨识分析方法

为探究腔内外流场旋涡发展演化对振荡器流场特性的影响机制，特将瞬时涡旋边界进行识别，并以面积大小近似作为涡旋影响强弱的简单判断依据。图6示意了瞬时流场中涡旋辨识与统计方法：(1)基于涡量场显示流场，以涡量值0上下对称显示，如图6(a)所示；(2)分别对涡量场的正负涡旋区域进行识别并剔除涡量较小的部分，确定涡旋区域，即阈值区域，如图6(b)所示；(3)分别将阈值筛选后的图像转化为灰度图像，即图6(c)；(4)将正负涡旋区域的灰度图像进行二值化处理，二值化后图像见图6(d)，识别目标区域的边界及连通域，并分别求得涡旋区域面积；(5)将瞬时流场的正负涡旋信息（逆时针为正、顺时针为负）与模型关联，得到瞬时流场正负涡旋的实时情况。




(a)涡量场　(b)阈值筛选　(c)灰度图像　(d)黑白二值化

**图 6　涡旋辨识与统计方法示意图**

Fig. 6　Illustration of vortex identification and statistical method

### 1.5　数值计算准确性检验

为验证计算结果的准确性，在本节中对计算结果进行网格与时间步长的无关性检验，并将计算后的振荡频率与已有的研究结果进行对比。网格数量和时间步长的选择影响计算结果的准确性和计算效率。为不失一般性，本文在中间流速（11 m/s）下，基于经典结构二维模型，将网格量等级画分为粗、中、细、精细等四个等级进行仿真，结果见表3。可见细网格量计算准确性与精细网格相比偏差很小，可作为计算基础网格。在时间步长选择方面，在细网格量下，选取了5个时间步长对所得振荡频率进行了比较分析，结果见表4。以最小步长结果为参照，可见在时间步为$1\times10^{-5}$时，误差值较小。为确保计算结果的准确性，将网格数量与时间步长无关性检验中误差控制在1%以内。综上所述，系统性数值模拟过程中射流振荡器网格设置采用与细网格相同的设置方法，将时间步长设置为$1\times10^{-5}$，兼顾计算准确度与计算效率。

**表 3　网格无关性检验**

Table 3　Grid independence test

| 网格粗细程度 | 网格数 | 频率/Hz | 误差/% |
|---|---|---|---|
| 粗 | 18 966 | 60.6 | 7.2 |
| 中 | 31 529 | 57.3 | 1.4 |
| 细 | 65 648 | 56.23 | 0.4 |
| 精细 | 129 494 | 56.49 | -- |

为进一步验证计算结果的准确性，将计算后的振荡频率随雷诺$Re$（$Re=\rho Ud/\mu$）变化情况与已有

表4 时间无关性检验

Table 4 Time independence test

| 时间步长 $t$/s | 频率/Hz | 误差/% |
|---|---|---|
| $2\times10^{-5}$ | 51.65 | 8.09 |
| $1.5\times10^{-5}$ | 54 | 5.79 |
| $1.2\times10^{-5}$ | 57.32 | 3.91 |
| $1\times10^{-5}$ | 56.23 | 0.54 |
| $5\times10^{-6}$ | 56.2 | -- |

的研究结果进行对比;其中,$\rho$、$\mu$分别为流体的密度和黏性系数,$U$取射流振荡器出口中心处D点的平均速度,$d$取出口喉道宽度$d_0$。图7为本文研究与前人研究(Schmidt[19]等与Zheng[20]等)的对比情况,符合频率与雷诺数呈线性正相关关系,同时斜率也接近。

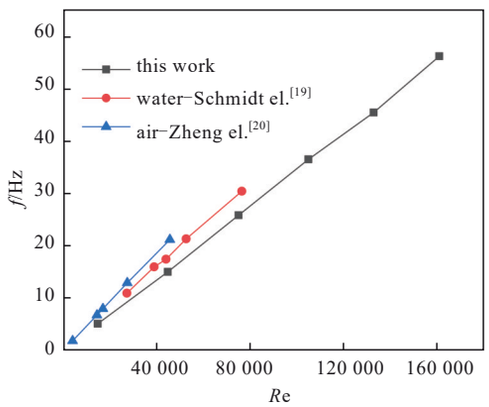



图7 频率与雷诺数关系验证

Fig. 7 Validation of relationship between frequency and reynolds number

## 2 基本模型流动特性

### 2.1 基本流场

为进一步判断研究方法的可靠性,本文选取了射流振荡器腔内流场在一个稳定周期内的速度云图变化情况,如图8所示,其中射流振荡器尺寸选用表1所列的标准尺寸。入口速度为$\sqrt{u^2+v^2}=11$ m/s,$u$为射流$x$方向速度,$v$为射流$y$方向速度,云图显示的速度为合速度。可见,在一个周期内,腔内流体在两侧壁面上各附壁1次又回到了初始时刻的附壁位置,射流出口流体在径向上摆动了2次同样回到了初始时刻的出流方位,完成了循环。该运动模式与已有对标准射流振荡器模型的研究一致,进一步验证了该研究中数值模拟的准确性。

纵轴合速度($u=\sqrt{u^2+v^2}$)依照入口边界速度($v_0$)作无量纲处理,$v^+=v/v_0$;横轴以周期(公式$T$

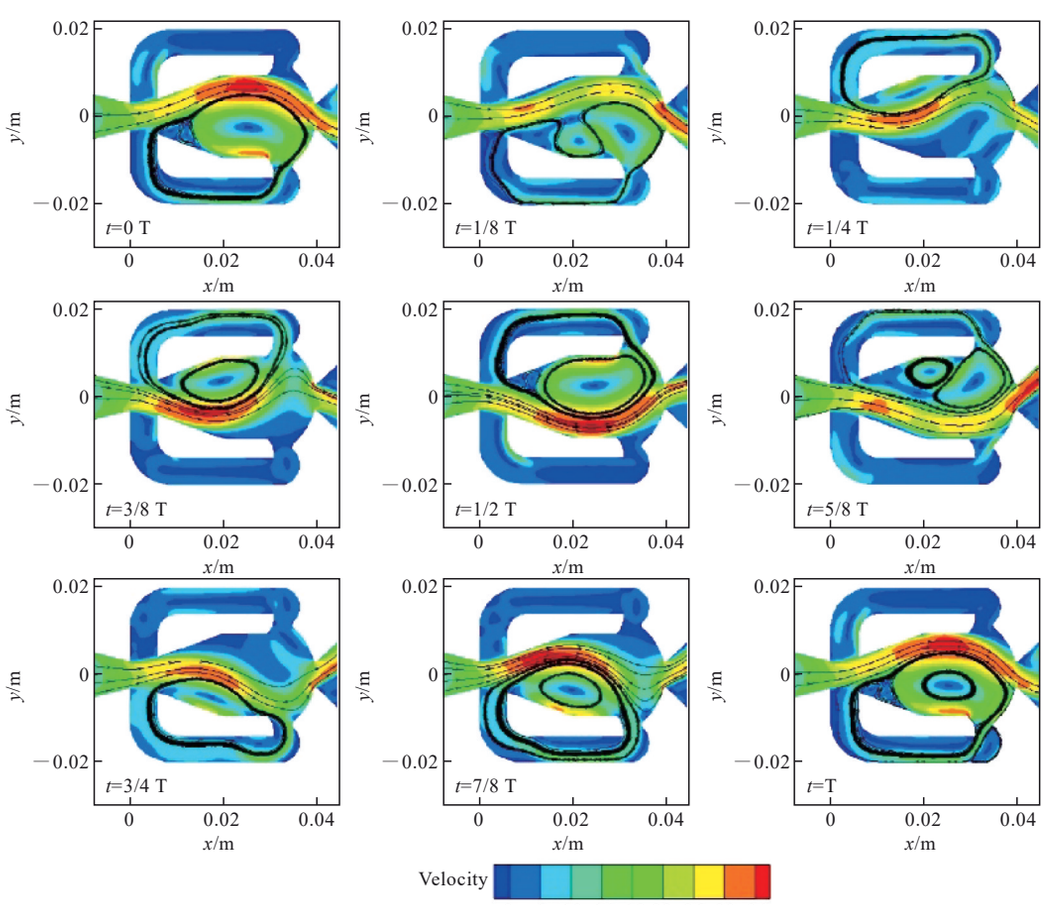



图8 射流振荡器一个周期内流场变化云图

Fig. 8 Flow field variation maps within one cycle for a fluidic oscillator

$=1/f, t^+=t/T$）进行无量纲处理，得到一个完整射流周期内各点速度的变化情况，如图 9 所示。结合图 8 流动显示云图结果易得：入口 A 点速度受反馈流影响轻微起伏，基本恒定；出口 C 点一个周期内出现 2 次峰值；两个反馈通道入口 D、E 点速度变化情况完全相反，高速周期出现两个峰值，一处峰值为腔内主流冲击出口壁面所致（对应图 8 中 $t=1/4T$ 与 $t=3/4T$），一处峰值为腔内主流改变方向过程中迟滞的部分流动冲击腔内壁面所致（对应图 8 中 $t=0T$ 与 $t=1/2T$）；一个周期内腔内主流扫过中心线上 B 点 2 次，附壁涡的卷起会迟滞速度的下降时间；同时注意到，附壁运动与 B、C 两者峰值产生存在相位差，出口 C 点峰值与 B 点相比也存在滞后。这些情况符合射流振荡器典型流动特征，也体现出腔内涡旋演化对系统的重要性。

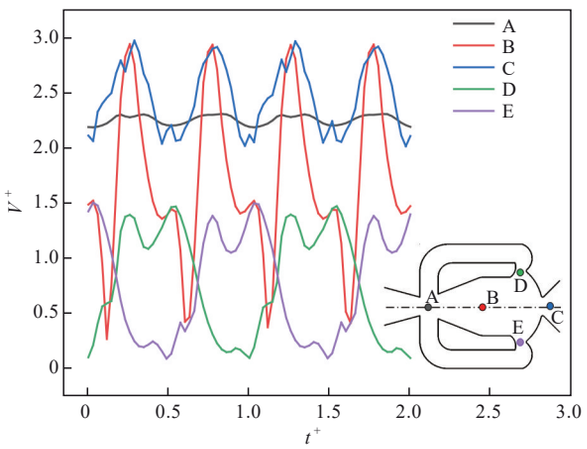



**图 9　振荡腔内主要检测点速度随时间变化曲线**

Fig. 9　Time-variation curves of velocity at main monitoring points inside the oscillation chamber

### 2.2　内外流场旋涡结构时空演化辨识分析方法

图 10 显示了振荡器一个周期内腔体内外流场的涡旋发展演化过程，图 11 则显示了腔内/外流场正/负涡旋面积 $S$ 随时间变化曲线图。纵轴涡流面积依照标准尺寸下振荡器面积 $S_j$ 作无量纲处理，$S^+=S/S_j$；横轴以周期（$T=1/f, t^+=t/T$）进行量纲分析易得，腔内正负旋涡发展演化周期完全相反，相位差 180°；外部正负涡旋演化情况相反，存在一定的相位差；正负涡旋在内外流场分布上呈现同步趋势，外流场涡旋情况相较于内流场有较大的相位延

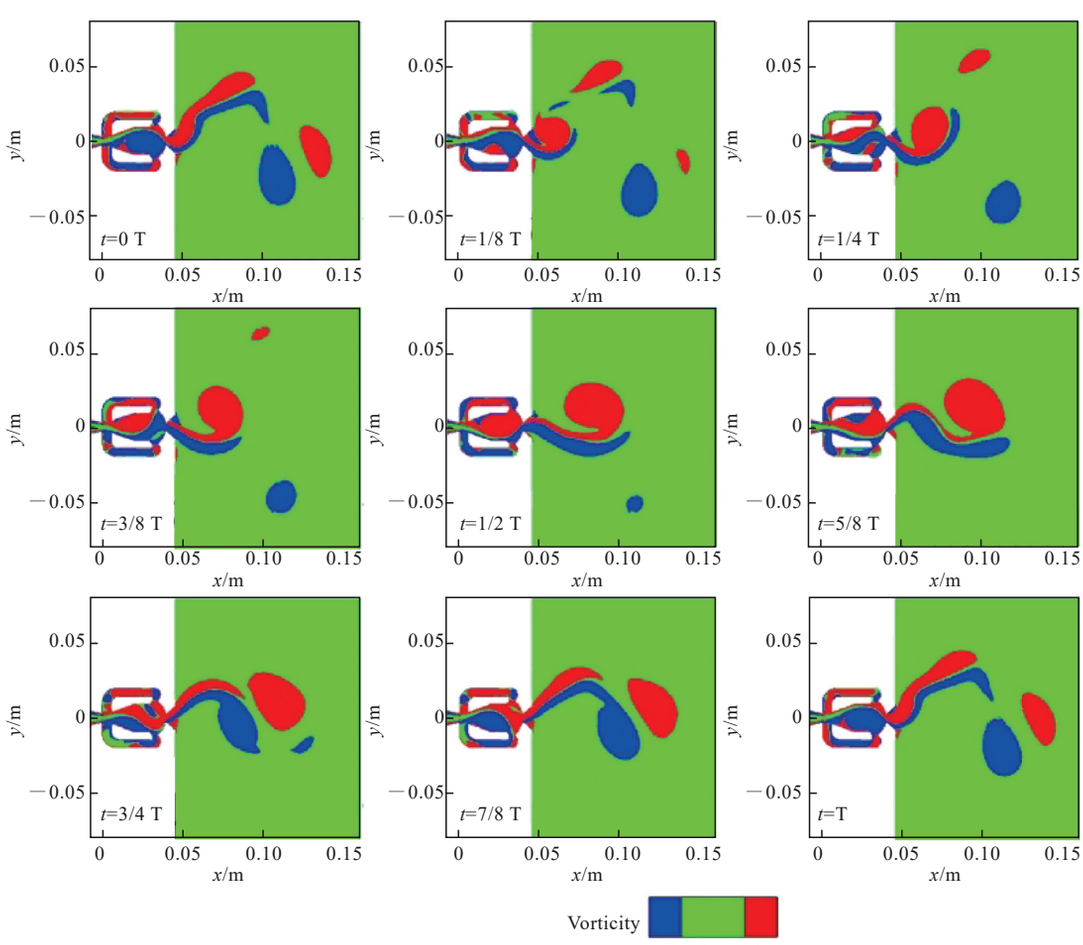



**图 10　射流振荡器一个周期内涡量场**

Fig. 10　Vorticity fields within one cycle of fluidic oscillator

迟。在涡量场中，涡流的生成与发展演化在一个周期内存在明显的不对称性。Zheng[6]和Woszidlo[21]等人的研究结果中，均存在射流流场平均分布在$y$方向不对称的情况。以上分析，证实了涡旋结构时空演化辨识方法的可靠性，且从射流振荡器流场与涡量场的角度分析了射流偏转的不对称性，解释了产生不对称扫掠射流的原因。

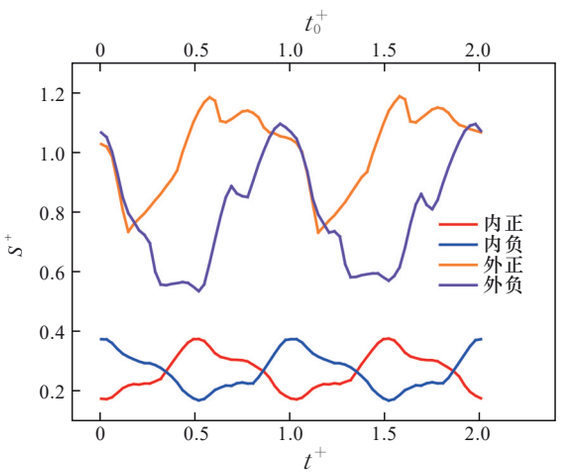



**图11 射流振荡器内外部涡面积随时间变化曲线图**

Fig. 11 Time variation curves of vortex area inside and outside the fluidic oscillator

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 结构参数对振荡频率的影响

为探究振荡器各外形尺寸对流动特性的影响，本文对表2中工况进行了系统的数值模拟研究，综合考察了入口速度$v_0$、长径比$\alpha$、缩放比$\beta$、反馈通路宽度比$\gamma$以及入口喉道直径比，并对频率$f$进行了系统分析，结果如图12所示。

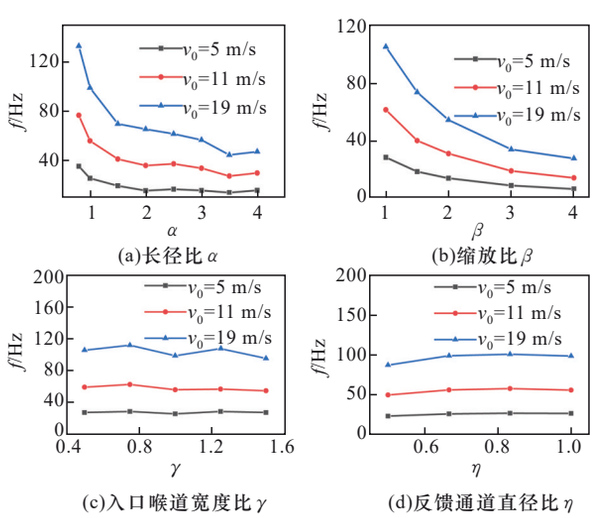



**图12 频率随各尺寸参数变化曲线图**

Fig. 12 Curves of frequency variations with various dimensional parameters

图12(a)所示为振荡器频率随长径比$\alpha$变化曲线图。在长径比$\alpha<0.6$时，主射流流入入口喉道后未向上壁面偏转，只有少量流体流入反馈通道处，因此，只能在出口处以直射流形式流出而未进行扫掠；在长径比$0.6<\alpha<1.5$，随着长径比的增大，振荡器流向长度大于展向宽度，射流附着主腔室上壁面后流出的时间变长，流入反馈通道内的流体减少，振荡频率逐渐减小；在长径比$1.5<\alpha<3$时，振荡器宽度变化较小，振荡频率减小的幅度变小；在长径比$\alpha>3$时，振荡器宽度对振荡频率影响较小，振荡频率几乎保持不变。图12(b)所示为振荡器频率随缩放比$\beta$变化曲线图。随着缩放比的增加，流经振荡器的距离变长，沿程损失增大，机械能减小，因此频率减小，频率与缩放比呈反比。图12(c)所示为振荡器频率入口喉道宽度比$\gamma$变化曲线图。在入口喉道宽度$\gamma\leqslant1.5$时，振荡频率变化较为不明显；在$\gamma>1.5$时，由于主腔室较宽，射流在振荡器内未形成扫掠射流。图12(d)所示为振荡器频率随着反馈喉道宽度变化比$\eta$曲线图。在$\eta<2/3$时，随着反馈通道宽度比$\eta$增大，流入反馈喉道的射流增加，射流振荡速度增长，频率随之增长；在$\eta>2/3$时，反馈通道对于反馈流的限制较少，流入反馈通道内的流体保持不变，振荡频率逐渐保持稳定。

为不失一般性，这里将频率作无量纲化处理，需要构造一个射流振荡器特征频率参数。考虑稳定直射流流经与振荡器腔体长度相同的管路恰好构造一个时间常数$T$，其倒数即为一个固定频率参数$f_0$。基于此，这里定义射流振荡器无量纲化的振荡频率为$f^+=f/f_0=f/(v_0/L_0)$，其中，$f$为某结构参数下某入口条件下的振荡频率，$L_0$为标准尺寸下振荡器的特征长度，$v_0$为设定的振荡器入口速度。图13为频率无量纲后的结果，可见：不同入口速度$v_0$下，结构变量与频率的关联曲线趋向一致，即入口速度并不影响某一结构变量对射流振荡器频率的影响。长径比$\alpha$以及缩放比$\beta$对振荡频率的影响较为敏感，因此在下文中对上述两结构参数变化时各工况的流动特性进行详细研究。

### 3.2 长径比对振荡器流动特性的影响

为了分析长径比$\alpha$对振荡器流动特性的影响情况，通过振荡器腔内关键点的速度变化曲线、腔体内外涡旋时空演化云图及线图来进行综合分析，并对标准情况下的周期进行无量纲化。其中，$t^+=$

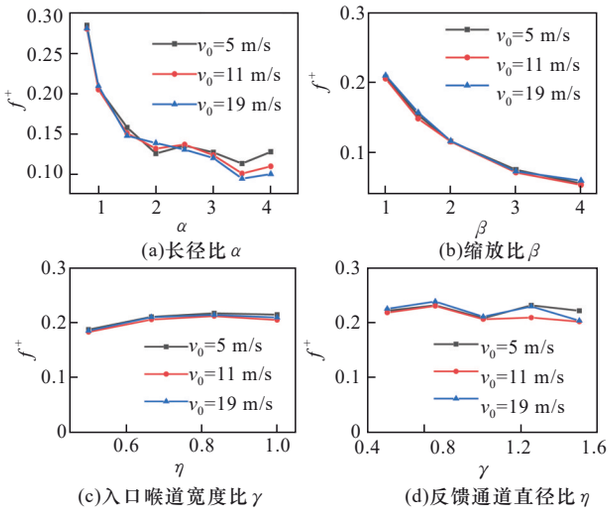



**图 13　$f^+$ 随各尺寸参数变化曲线图**

Fig. 13　Curves of $f^+$ variations with various dimensional parameters

$t/T$，$t_0^+=t/T_0$，$T$ 为该工况下射流振荡周期，$T_0$ 为标准工况下射流振荡周期；$v^+=v/v_0$，$v$ 为各监测点的合速度；$S^+=S/S_j$，$S$ 为涡流面积，$S_j$ 为标准射流振荡器面积。图 14 为各长径比 $\alpha$ 下振荡器内部各点的速度变化情况图，上横轴与下横轴分别代表时间与标准尺寸下振荡周期的比值（$t_0^+$）和时间与该工况下振荡周期的比值（$t^+$）。随着长径比 $\alpha$ 的增大，反馈通道入口处（D、E 点）的速度峰值基本不变，但速度分布逐渐集中在中心线附近，一个周期内总流量逐渐降低，在入口处对主射流的改变能力下降。同时，随着长径比 $\alpha$ 的增大，振荡器中心点（B 点）以及入口喉道中心处（C 点）的速度峰值逐渐减小，主射流流过振荡器的速度逐渐减缓，因此振荡器振荡周期变长，其频率逐渐减小。

图 15 为涡流面积随时间与该工况下振荡周期的比值（$t^+$）和时间与标准尺寸振荡周期的比值（$t_0^+$）变化的曲线图。随着长径比 $\alpha$ 的增大，其反馈流对主射流冲击变弱，其涡流生成与发展动力变弱，涡量值减小，该涡量值下振荡器内外涡流面积随之减小。通过增大振荡器的长径比 $\alpha$，会减小振荡器混合室的宽度，振荡器内部的涡流生成空间变小且更加扁长，因此涡流的发展演化时间均减慢，振荡器周期变长，振荡频率逐渐减小。

### 3.3　缩放比对振荡器流动特性的影响

由 3.1 节可知，射流振荡器缩放比 $\beta$ 可以影响其振荡频率且振荡频率随着缩放比 $\beta$ 的增大而减小。图 16 所示为射流振荡器各监测点的速度随时间与该工况下振荡周期的比值（$t^+$）和时间与标准尺寸下振荡周期的比值（$t_0^+$）变化的曲线图。由图中可

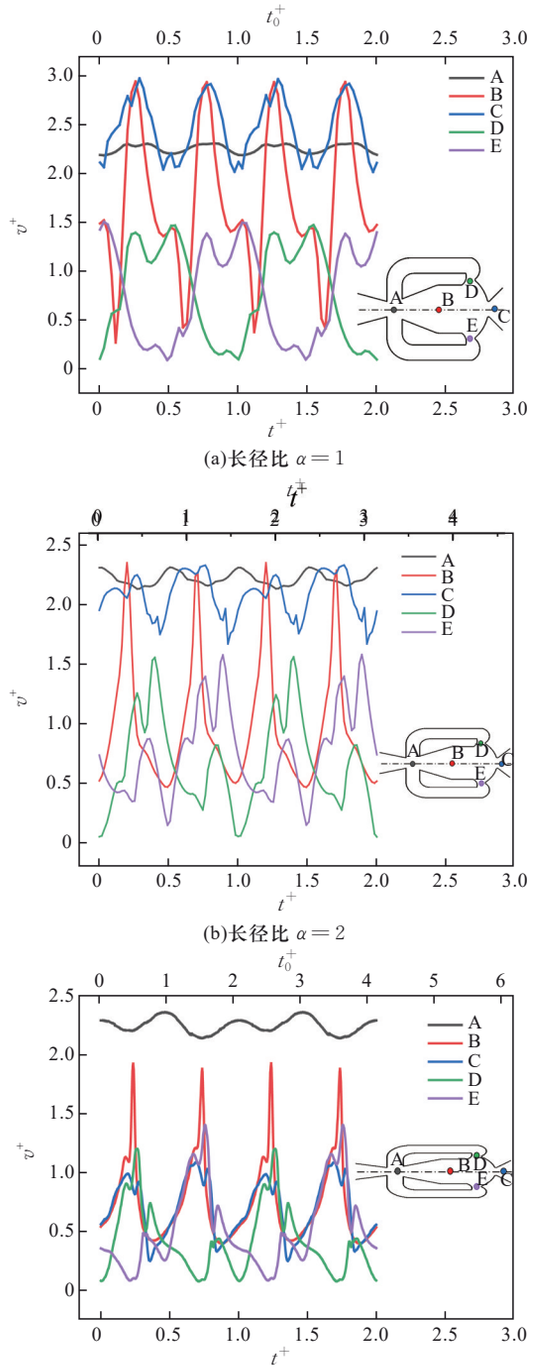
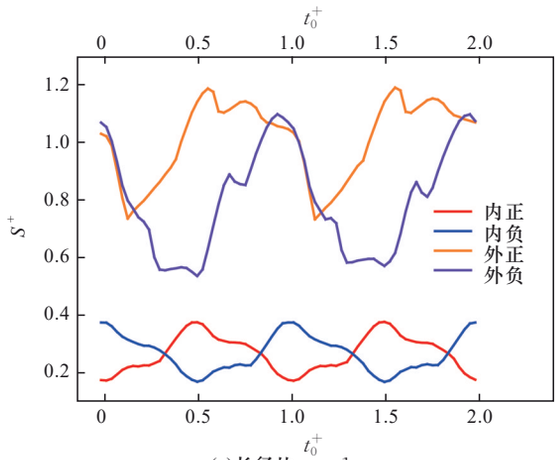


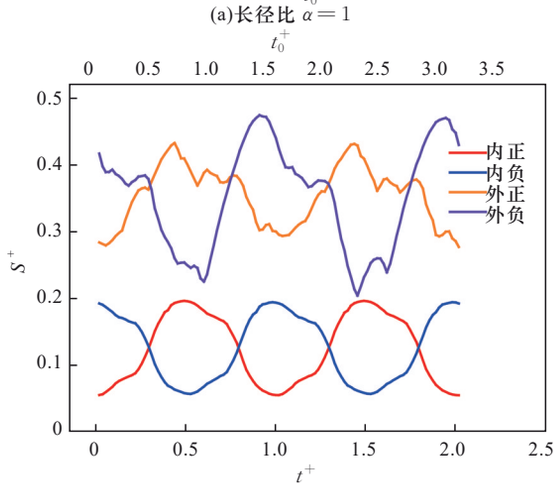

**图 14　各长径比下监测点速度曲线图**

Fig. 14　Velocity curves at monitoring points for various length-to-diameter ratios

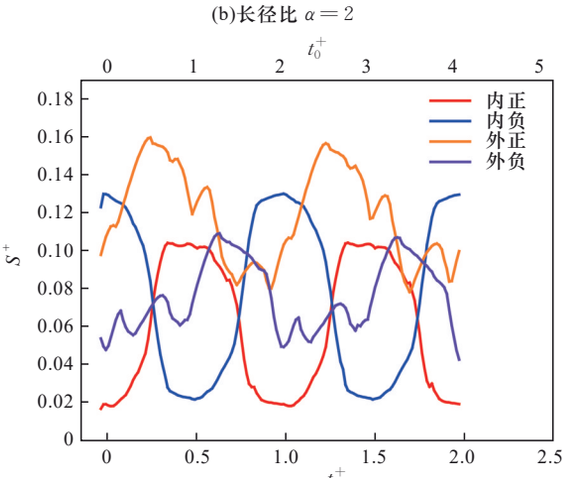
知，随着缩放比 $\beta$ 的增加，其流入反馈通道的速度分布变化较小，但振荡器尺寸逐渐增大，其反馈流流经反馈通道的时间增大，撞击主射流的时间变缓，因此推动主射流发生偏转的时间变长，其振荡周期变长。同时，随着缩放比 $\beta$ 的增大，扫掠射流在出口喉道处的波动逐渐增大，其出口喉道中心点（C 点）峰值与谷值间速度差逐渐增大。




(a)长径比 $\alpha=1$



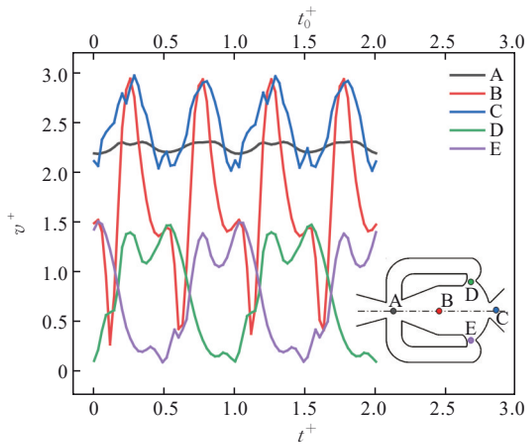

(b)长径比 $\alpha=2$



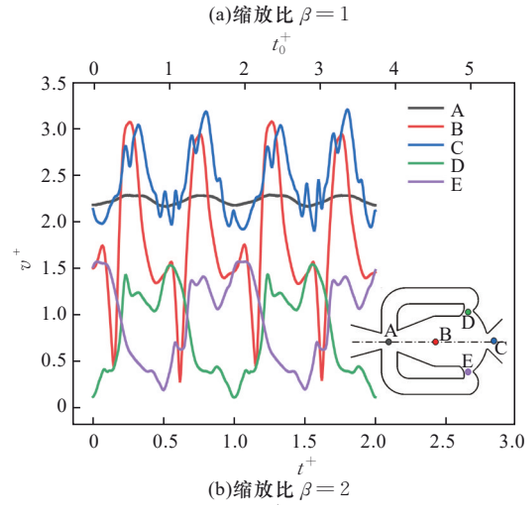

(c)长径比 $\alpha=3.5$

**图15 各长径比下涡面积曲线图**

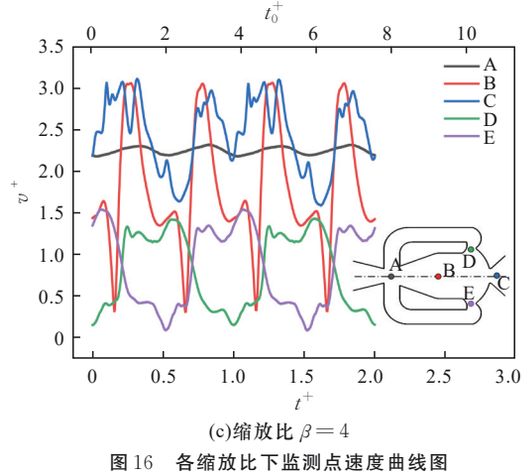
Fig. 15 Vortex area curves for various length-to-diameter ratios




(a)缩放比 $\beta=1$




(b)缩放比 $\beta=2$




(c)缩放比 $\beta=4$

**图16 各缩放比下监测点速度曲线图**

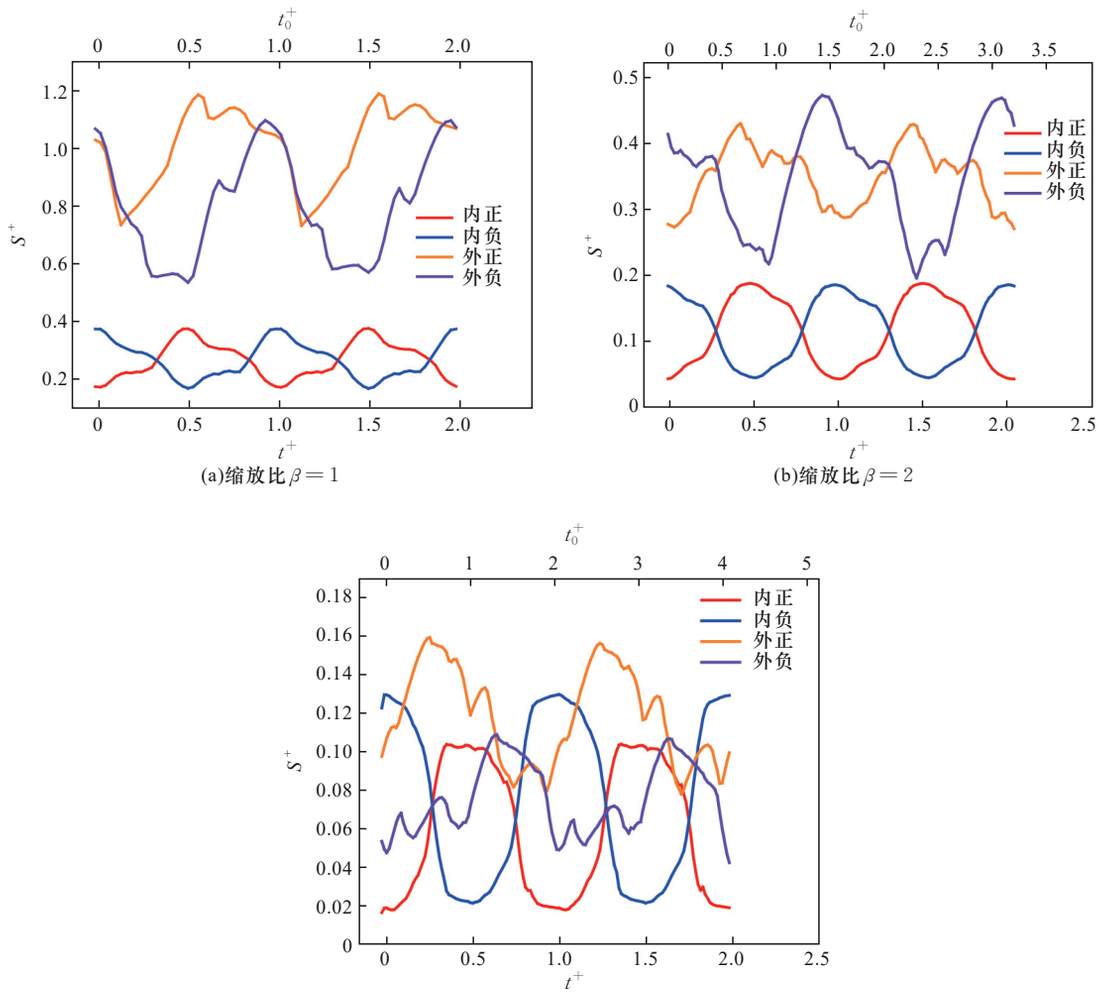
Fig. 16 Velocity curves at monitoring points for various scaling ratios

涡流的发展与演化与振荡频率密切相关。图17为涡流面积随时间与该工况下振荡周期的比值($t^+$)和时间与标准尺寸下振荡周期的比值($t_0^+$)变化的曲线图。如图17所示,随着缩放比的增加,涡流面积峰值整体增大。其涡流的生成与发展演化过程逐渐变缓,因此推动主射流向另一侧偏转时间变缓,其振荡周期增大,振荡频率随之减小。

## 4 结论

本文采用数值方法研究了不同结构参数(长径比$\alpha$、缩放比$\beta$、入口喉道宽度比$\gamma$以及反馈通道宽度比$\eta$)对振荡器振荡频率以及流动特性的影响,得到以下结论:

(1)通过构建射流振荡器特征频率$f_0$($f_0=v_0/L$,$L$为腔体特征长度,$v_0$为入口速度),可




(a)缩放比$\beta=1$　　(b)缩放比$\beta=2$

(c)缩放比$\beta=4$

**图 17　各缩放比下涡面积曲线图**

Fig. 17　Vortex area curves for various scaling ratios

以在研究结构变量对频率影响时消除入口速度$v_0$带来的影响，大大降低了变量研究中的复杂性。

（2）入口喉道宽度比$\gamma$以及反馈通道宽度$\eta$变化对频率$f$不敏感，无量纲频率$f^+$锁定在0.18～0.23的狭小区间。频率$f$受长径比$\alpha$及缩放比$\beta$的影响显著，并与两者呈反比关系。

（3）随着长径比$\alpha$增加，反馈通路的速度分布逐渐集中在中心线附近，一个周期内流经反馈通道的流量减少。较弱的反馈流动在入口处对入射流方向的改变能力下降，同时旋涡结构的生成演化动力变弱，整体造成振荡周期变长，频率下降。

（4）随着缩放比$\beta$增加，各监测点的速度变化变缓，主射流与反馈流流经振荡器的时间变长，且振荡器内外部涡流面积峰值均增大，生成与发展演化时间变长，因此对推动主射流偏转的作用变缓，振荡器振荡周期变长，频率减小。

**参考文献：**

[1] Guyot D，Paschereit C O，Raghu S.Active combustion control using a fluidic oscillator for asymmetric fuel flow modulation[J]. International Journal of Flow Control，2009，1(2)：155-166.

[2] Zhou K，Li Z，Liu Y，et al.Sweeping jet control of flow around a circular cylinder[J].Experimental Thermal and Fluid Science，2023，141：110785.https：//doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2022.110785

[3] Song J，Wang S，Wen X，et al.Active flow control in an s-shaped duct at mach 0.4 using sweeping jet actuators[j].experimental thermal and fluid science，2022，138：110699.https：//doi.org/ 10.1016/j.expthermflusci.2022.110699

[4] Shmilovich A，Yadlin Y，Whalen E A.Active flow control computations：from a single actuator to a complete airplane[J].AIAA Journal，2018，56(12)：4730-4740.https：//doi.org/10.2514/1.J056307

[5] 孙启翔，王万波，黄勇，等.影响振荡射流分离控制效果的关键因素[J].空气动力学报，2024，42(2)：56-67.

[6] Kong X,Zhang Y,Li G,et al.Heat transfer and flow structure characteristics of film-cooled leading edge model with sweeping and normal jets[J].International Communications in Heat and Mass Transfer,2022,138:106338.https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106338

[7] Kong X,Zhang Y,Li G,et al.Simulation of flow structure and heat transfer of sweeping jet and film composite cooling on a flat plate[J].Applied Thermal Engineering,2022,213:118741.https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118741

[8] 汪胜,韩东,周天昊,等.横流对振荡射流冲击冷却特性影响的数值研究[J].动力工程学报,2022,42(2):115-121.

[9] Kim S H,Kim H D,Kim K C.Measurement of two-dimensional heat transfer and flow characteristics of an impinging sweeping jet[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,136(6):415-426.https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.021

[10] Ghanami S,Farhadi M.Heat transfer enhancement in a single-pipe heat exchanger with fluidic oscillators[J].Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2019,140(3):1107-1119.https://doi.org/ 10.1007/s10973-019-08816-2

[11] Abdulnaim A M,Emara A A,Moneib H A.Influence of exit configuration on the flow fields and oscillation characteristics inside and outside the fluidic oscillator[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2019,610(1):012052.https://doi.org/10.1088/1757-899x/610/1/012052

[12] 杨帆,温新,何创新,等.出口分流装置对振荡射流流场的影响[J].空气动力学报,2023,41(4):104-115.

[13] Seo J H,Zhu C,Mittal R.Flow Physics and Frequency Scaling of Sweeping Jet Fluidic Oscillators[J].AIAA Journal,2018,56(6):2208-2219.https://doi.org/10.2514/1.J056563

[14] Wen X,Li Z,Zhou L,et al.Flow dynamics of a fluidic oscillator with internal geometry variations[J].Physics of Fluids,2020,32(7):075111.https://doi.org/10.1063/5.0012471

[15] Joulaei A,Nili-Ahmadabadi M,Yeong Ha M.Numerical study of the effect of geometric scaling of a fluidic oscillator on the heat transfer and frequency of impinging sweeping jet[J].Applied Thermal Engineering,2023,221:119848.https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119848

[16] Tajik A R,Kara K,Parezanović V.Sensitivity of a fluidic oscillator to modifications of feedback channel and mixing chamber geometry[J].Experiments in Fluids,2021,62(12):1-19.https://doi.org/ 10.1007/s00348-021-03342-0

[17] Sundström E T,Tomac M N.Synchronization and flow characteristics of the opposed facing oscillator pair in back-to-back configuration[J].Flow,Turbulence and Combustion,2019,104(1):71-87.https://doi.org/10.1007/s10494-019-00064-6

[18] Ostermann F,Woszidlo R,Nayeri C,et al.Experimental comparison between the flow field of two common fluidic oscillator designs[C/OL]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting.Kissimmee,USA,2015.https://doi.org/10.2514/6.2015-0781

[19] Schmidt H J,Woszidlo R,Nayeri C N,et al.Separation control with fluidic oscillators in water[J].Experiments in Fluids,2017,58(8):106-123.

[20] Zheng J G,Xia L,Hu J,et al.Numerical investigation of characteristics of fluidic oscillator operating in quiescent air and a cross-flow[J].Aerospace Science and Technology,2021,113:106731.https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106731

[21] Woszidlo R,Ostermann F,Nayeri C N,et al.The time-resolved natural flow field of a fluidic oscillator[J].Experiments in Fluids,2015,56(6):125-136.

(编辑:贾丽红)