

文章编号:1674-8190(2019)05-691-07

# 空腔流动的拉格朗日涡动力学分析

韩帅斌<sup>1,2</sup>, 罗勇<sup>1,2</sup>, 张树海<sup>1,2</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 绵阳 621000)

(2. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 绵阳 621000)

**摘要:** 空腔流动中包含着丰富的涡结构相关物理现象, 开展空腔流动中的涡动力学分析能够为相应的流动控制和降噪提供理论依据。采用直接数值模拟获得开式空腔流动的高精度流场数据, 用拉格朗日拟序结构识别流场中的涡结构, 并结合  $Q$  判据和涡量通量分析, 对空腔中涡的生成、脱落、对流以及撞击破裂过程展开研究, 分析其动力学特性。结果表明: 在一个流动周期内, 拉格朗日拟序结构的卷起与脱离伴随着前缘涡的生成与脱落, 向下游发展; 拉格朗日拟序结构在后缘点的破裂伴随着  $Q$  与涡的破裂; 空腔内部的主涡则在整个流动周期内都维持相对稳定状态。

**关键词:** 空腔流动; 直接数值模拟; 涡动力学; 拉格朗日拟序结构

中图分类号: V211.1<sup>+</sup>7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.05.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Lagrangian Vortex Dynamics in the Open Cavity Flow

Han Shuaibin<sup>1,2</sup>, Luo Yong<sup>1,2</sup>, Zhang Shuhai<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

(2. Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The open cavity flow contains various physical phenomena relating to vortex structures. The study on the vortex dynamics in the open cavity can provide theoretical insights into flow control and noise reduction. Direct numerical simulation is performed to obtain high order accuracy flow field of the open cavity. The vortex structures are identified using the Lagrangian coherent structures. Together with the  $Q$ -criterion and vorticity flux analysis, the formation, convection, impingement and split of the vortex in the cavity is studied and the dynamical characteristics are revealed. Results show that in a flow cycle, the rolling up and shedding of Lagrangian coherent structures at the leading edge corresponds to the formation and shedding of the vortex developed downstream; and at the trailing edge the split of Lagrangian coherent structures corresponds to the split of  $Q$  and Vortex. The main vortex in the cavity remains stable during the whole period of the flow.

**Key words:** open cavity flow; direct numerical simulation; vortex dynamics; Lagrangian coherent structures

收稿日期:2019-07-04; 修回日期:2019-09-06

基金项目:国家自然科学基金(11732016)

通信作者:韩帅斌, hanpk@qq.com

引用格式:韩帅斌, 罗勇, 张树海. 空腔流动的拉格朗日涡动力学分析[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 691-697, 734.

Han Shuaibin, Luo Yong, Zhang Shuhai. Lagrangian vortex dynamics in the open cavity flow[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(5): 691-697, 734. (in Chinese)

## 0 引言

空腔流动是流体力学的经典流动问题,包含丰富的涡结构相关的物理现象,例如剪切层中涡的卷起与撞击、涡与剪切层相互作用、涡的产生与传播等。同时空腔流动具有较强的实际应用背景。在航空航天领域,剪切层内的涡与剪切层及空腔拐角相互作用产生的强烈噪声不仅影响身体健康,更会导致飞行器结构疲劳,危及飞行安全,是目前迫切需要解决的问题。自 20 世纪 50 年代起,空腔流动尤其是空腔流致噪声得到了大量研究<sup>[1-3]</sup>。空腔流致噪声与来流参数、空腔几何形态等密切相关。J. E. Rossiter<sup>[4]</sup>通过系列实验总结得到 Rossiter 半经验公式,能够很好地预测辐射噪声的振荡频率与来流马赫数的关系。通过 H. H. Heller 等<sup>[5]</sup>、C. K. W. Tam 等<sup>[6]</sup>的完善,公式预测范围和精度得到进一步提高。空腔流致噪声的动力学过程为:涡扰动在剪切层中不断增长,涡撞击空腔后缘产生声波,声波扰动向上游传播,声波扰动到达前缘诱导产生新的涡扰动<sup>[3]</sup>。该动力学过程的一个关键问题是涡量扰动和压力脉动之间如何相互转化。M. V. Morkovin 等<sup>[7]</sup>研究了压力信号转化为涡量扰动的物理机制;Y. P. Tang 等<sup>[8]</sup>对涡-边缘相互作用的形式进行了区分,对涡波转化压力波的物理机理作出了相应的阐释;万振华<sup>[9]</sup>借助涡量及拟涡能的时空演化分析了空腔中涡结构撞击后拐角产生压力脉动的动力学过程。空腔中的涡结构作为噪声的主要来源,其动力学过程对空腔流动特性及噪声的产生和传播起着重要作用,开展空腔流动中的涡动力学分析能够为相应的流动控制和降噪提供理论依据。

识别流场中的涡结构是开展涡动力学分析的关键步骤。目前存在诸多涡判据<sup>[10-11]</sup>可用来识别流场中的涡结构,但仍没有公认的涡的严格定义。既往的涡动力学研究大多采用欧拉框架下的分析工具例如闭合流线、涡量、Q 判据、准则等识别流场中的涡,然而这些方法通常仅使用某瞬时流场的速度或速度梯度提取涡结构,揭示的是流动的瞬时状态,缺失了动力学系统中与时间相关的信息,无法准确反映流动结构的历史累积效应以及相应的动力学特性。另外欧拉框架下的判据通常不具有客观性,即流场结果会随参考系改变而改变。

近年来,拉格朗日方法在复杂流动系统的动力学分析及涡识别方面取得了较大进展<sup>[12]</sup>。拉格朗日方法在时空相空间内跟踪流体粒子运动,能够客观地揭示非线性动力系统的动力学特性和流动机理。基于拉格朗日拟序结构(Lagrangian Coherent Structures,简称 LCS)识别流场中的涡结构并研究其时空演化规律,能够揭示开式空腔中的拉格朗日涡的动力学特性。

本文采用拉格朗日拟序结构,并结合 Q 判据和涡量通量分析,对开式空腔流动中涡的生成、脱落、对流以及撞击破裂过程展开研究,分析其动力学特性,为流动控制及降噪提供理论依据。

## 1 数值分析方法

### 1.1 高精度流场计算方法

通过求解非定常可压缩 Navier-Stokes 方程(简记为 N-S 方程)对空腔流动进行直接数值模拟,守恒形式的无量纲 N-S 方程为

$$\partial_t \rho + \partial_i(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\partial_i(\rho u_j) + \partial_i(\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) = \frac{1}{Re} \partial_i \sigma_{ij} \quad (2)$$

$$\partial_t E + \partial_i(u_i(E + p)) = \frac{1}{Re} \partial_i(\sigma_{ij} u_j + \dot{q}_i) \quad (3)$$

其中,

$$E = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho u_i u_i \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = \mu(u_{ij} + u_{ji}) - \frac{2}{3} \mu \partial_k u_k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\dot{q}_i = \frac{1}{(\gamma - 1)M^2} \frac{\mu}{Pr} \partial_i T \quad (6)$$

粘性系数的 Sutherland 公式为

$$\mu = T^{3/2} \frac{1 + C}{T + C}, C = \frac{110.4K}{T_\infty} \partial_i T \quad (7)$$

N-S 方程的对流项和粘性项分别采用五阶 WENO 格式和六阶中心差分格式进行离散。时间项采用三阶 TVD Runge-Kutta 格式求解获得高精度非定常无量纲流场数据。

### 1.2 拉格朗日拟序结构

拉格朗日拟序结构是基于追踪流体粒子运动而提取的流场中主导流动的吸引性、排斥性或者强剪切拟序结构,是流动的“骨架”<sup>[12]</sup>,目前已被广泛应用于流动分离<sup>[13]</sup>、涡动力学<sup>[14]</sup>、生物流体力

学<sup>[15]</sup>等。诸多方法可以用来提取流场中的 LCS, 其中有限时间李雅普诺夫指数(Finite Time Lyapunov Exponent, 简称 FTLE)是被广泛应用的一种方法。对于在非自治系统

$$\dot{x} = u(x, t) \quad (8)$$

中运动的粒子, FTLE 可以衡量相邻的两个粒子在一定时间间隔后的分离程度。FTLE 的计算基于流动映射  $F_{t_0}^t(x_0) : x_0 \rightarrow x(t, t_0, x_0)$ , 即初始时刻  $t_0$  位于  $x_0$  处的粒子与其在  $t$  时刻位置  $x(t, t_0, x_0)$  之间的映射关系。基于流动映射的梯度, 我们可以计算得到 FTLE 如下

$$\sigma_{t_0}^t(x_0) = \frac{1}{|t - t_0|} \ln \sqrt{\lambda_{\max}(\nabla F_{t_0}^t(x_0)^T \nabla F_{t_0}^t(x_0))} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为矩阵的最大特征值。

在实际计算中, FTLE 既可以前向时间积分也可以逆向时间积分, 对应的 FTLE 的峰分别捕捉流场中的前向 LCS (pLCS) 和逆向 LCS (nLCS), pLCS 通常是流场中的排斥性结构, nLCS 则通常是流场中的吸引性结构。H. Yangzi 等<sup>[16]</sup>采用 pLCS 和 nLCS 的边界识别拉格朗日涡边界并追踪涡运动, 本文采用该方法对空腔中的拉格朗日涡结构进行动力学分析。

### 1.3 Q 判据

欧拉框架下常用来识别涡的一种方法是 J. C. R. Hunt 等<sup>[17]</sup>提出的 Q 判据。速度梯度张量可以分解为对称的应变率张量 S 和反对称的涡张量  $\Omega$ , 即

$$\nabla u = S + \Omega \quad (10)$$

式中:  $S = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T)$ ,  $\Omega = \frac{1}{2}(\nabla u - \nabla u^T)$ 。

Q 值的定义即为

$$Q = \frac{1}{2}(|\Omega|^2 - |S|^2) \quad (11)$$

在流场中 Q 值为正的地方, 也即涡张量对流体变形的贡献大于应变率张量贡献的区域被识别为涡。Q 判据具有伽利略不变性, 但在旋转或加速参考系中则不能正确进行涡识别。对于本文中的开式空腔流动, 参考系不存在旋转或加速, Q 判据能够给出涡的正确描述, 因而被用来与 LCS 识别的拉格朗日涡对比验证, 并描述相应的涡动力学。

## 2 数值计算及验证

### 2.1 计算模型及设置

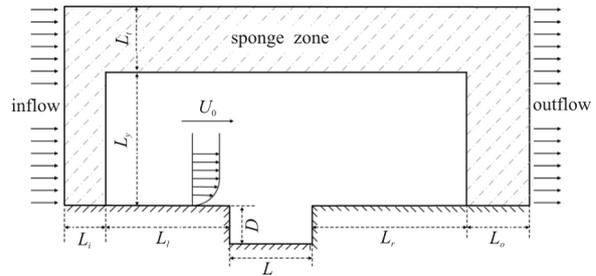
本文直接数值模拟的空腔流动计算域及空腔附近网格如图 1 所示, 其中空腔长深比为 2 : 1, 各项无量纲长度参数为

$$L = 2D, L_l = 7D, L_r = 20D, L_y = 20D \quad (12)$$

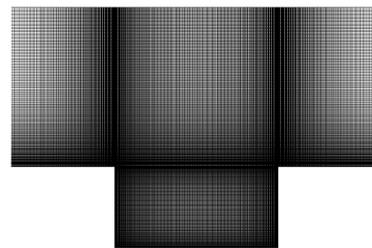
腔外网格为  $810 \times 300$ , 腔内网格为  $240 \times 120$ , 并在腔壁附近加密以捕捉边界层。空腔流动会产生强烈的声波, 为避免声波在边界的反射污染流场, 在计算域边界设置海绵层<sup>[18]</sup>吸收声波, 从而获得准确的高精度流场数据。海绵层的长度参数为

$$L_i = 3D, L_o = 10D, L_t = 10D \quad (13)$$

本文针对亚声速流动开展研究, 分析所用的流场物理量均为无量纲量。空腔的流动参数设置为  $Ma = 0.8, Re = 2\,500, Pr = 0.7$ , 其中雷诺数基于空腔深度  $D$ 。



(a) 二维空腔流动计算区域示意图



(b) 腔体附近网格分布

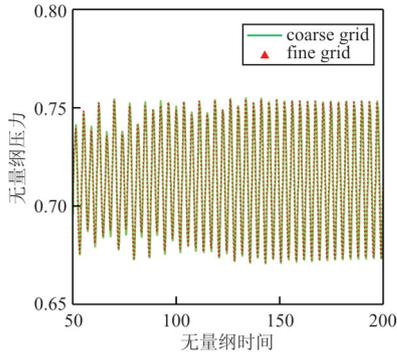
图 1 二维空腔流动计算域及网格

Fig. 1 Computational domain and mesh of the open cavity

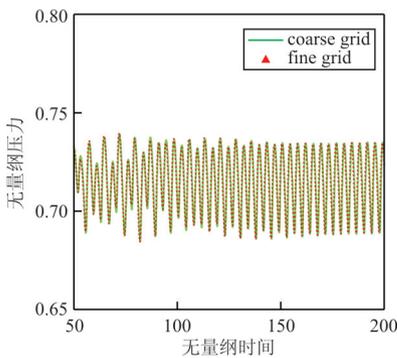
### 2.2 计算结果及验证

本文直接数值模拟所用代码已在参考文献 [13, 19] 中得到很好验证。针对本算例, 首先进行网格收敛性验证。考虑一套加密网格, 其中腔外网格为  $1\,245 \times 470$ , 腔内网格为  $400 \times 200$ , 并比较两

套网格下空腔底部(0.5D,0)和空腔外部(0,2D)处的压力随时间变化。两套网格下压力变化基本一致,如图 2 所示,可以看出:幅值和相位差别均很小,说明本计算所用网格密度已经足够。



(a) 空腔底部  $x=0.5D$  处压力随时间变化



(b) 空腔外  $x=0, y=2D$  处压力随时间变化

图 2 网格收敛性验证

Fig. 2 Validation of grid convergence

对空腔(0.995D,D)处的速度和压力脉动采样分析,结果如图 3 所示,流动呈现出强烈的周期性,且无量纲时间周期为  $T=3.75$ 。对包含 5 个流动周期的 468 个流场片段进行快速傅里叶变换(FFT),采样点的频谱如图 4 所示。

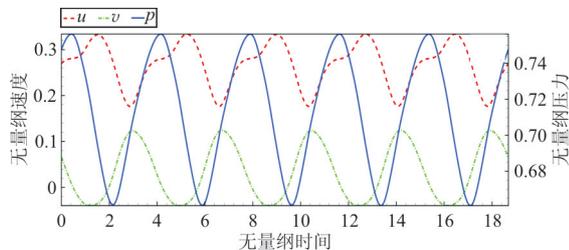


图 3 速度及压力时间演化

Fig. 3 Time evolution of velocity and pressure

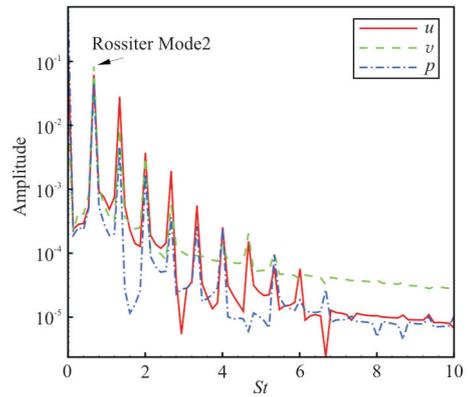


图 4 空腔压力及速度脉动频谱分布

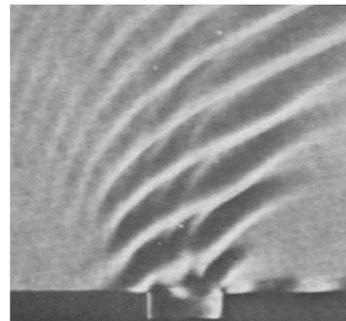
Fig. 4 Frequency spectrum of velocity and pressure perturbation in the open cavity

从图 4 可以看出:主频  $St=0.668$ 。

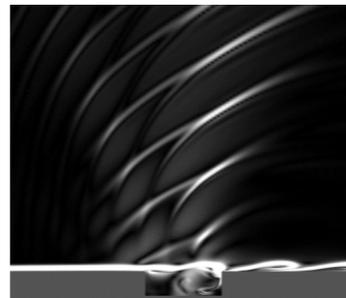
Rossiter 给出的半经验公式<sup>[20]</sup>

$$St_n = \frac{f_n L}{U} = \frac{n - \gamma}{M + 1/k} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (14)$$

可见,图 4 得到的主频与式(14)中的第 2 模态即  $St_2=0.686$  吻合较好,而且与 K. Krishnamurty<sup>[21]</sup> 的实验结果频率  $St=0.656$  吻合良好。Krishnamurty 的实验纹影与直接数值模拟获得的数值纹影对比如图 5 所示。



(a) Krishnamurty 实验纹影



(b) 数值纹影

图 5 实验纹影图与 DNS 计算所得数值纹影对比

Fig. 5 Comparison between experimental Schlieren and Numerical Schlieren from DNS

从图 5 可以看出:两者在定性上吻合良好,波系结构较为一致。

### 3 涡动力学分析

#### 3.1 流场基本结构

一个周期内的流线结构如图 6 所示,空腔内部主要有四个回流区,它们构成了流场的主要拓扑结构。在  $t=0, 2T$  时刻,空腔尾缘点处涡量等值面撕裂,在  $t=0.8T$  时刻在前缘开始形成闭合流线结构,这些特征在欧拉框架下通常被看作涡破裂和涡生成。然而流线和涡量都不具有客观性,所揭示的流场结果会随参考系的变化而变化。另外瞬时流态不能揭示涡结构的动态演化过程,其动力学特性也无法揭示。因此接下来本文采用拉格朗日方法对流场涡结构进行动力学特性分析。

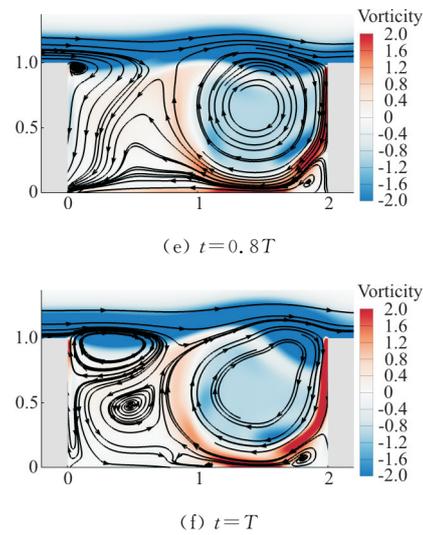
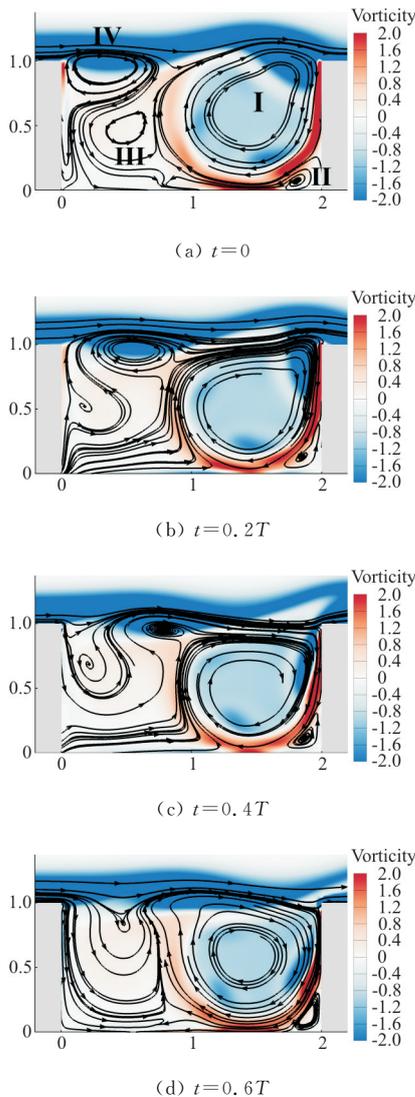


图 6 空腔流动的流线及涡量分布

Fig. 6 Streamlines and vorticity distribution in the cavity

#### 3.2 拉格朗日涡动力学分析

对空腔流动的流场进行 FTLE 的计算,积分时长是影响计算结果的重要参数,通常随着积分时长的增加,FTLE 的峰所提取的 LCS 结构更加锐利。因此在本文计算中,积分时长选取为一个时间周期  $T=3.75$ ,使得 FTLE 的峰能够准确捕捉到流场中的 LCS。一个周期内不同时刻的 pLCS(红色)和 nLCS(蓝色)如图 7 所示,pLCS 为排斥性结构,附近的流体粒子被其排斥从而流向动力学特性不同的区域;nLCS 则为吸引性结构,在时空演化过程中吸引周围来自不同动力学特性区域的流体粒子向其聚集靠拢,因此 pLCS 和 nLCS 是不同动力学特性区域的边界。涡结构作为流场中的拟序结构,在涡边界内外,流动的特性存在差异,因而涡边界可用 LCS 进行识别。将 pLCS 和 nLCS 包络的闭合区域作为涡结构,两者交叉处的鞍点作为追踪涡结构运动的特征点来分析拉格朗日涡的动力学特性。

pLCS 和 nLCS 包络区域形成的涡结构主要有三个:空腔前缘点剪切层卷起后形成的涡,空腔后缘点处即将发生撞击和撕裂的涡以及空腔右侧的主涡。这与流线所揭示的四个主要回流区有所不同,位于空腔右下拐角处的回流区 II 和位于空腔左侧的回流区 III 未被 LCS 揭示出来。由于 LCS 揭示的是拟序结构,能在一定生命周期内保持动力学

及结构特征稳定,而回流区Ⅲ即使从流线观察不能保持稳定的形态且无清晰边界,因此未被 LCS 识别出来;回流区Ⅱ位于空腔右侧底部拐角处,速度较低,其靠近壁面的边界由于无滑移边界速度几乎为零,吸引力或排斥性较弱,因而只有与主涡相交的边界被 LCS 揭示出来,而完整的涡结构未被识别出来。流场中  $Q$  值大于零的区域如图 7 中灰黑色区域所示。 $Q$  值揭示的涡区域也主要有三个,即空腔右侧的主涡和剪切层中卷起和向下游发展的两个涡,与 LCS 包络所揭示的涡结构覆盖的区域基本一致。空腔右下拐角处的角涡尽管被  $Q$  值所揭示,但强度较弱,且形态和边界不够清晰稳定。流线揭示的回流区Ⅲ同样未被  $Q$  所识别如图 6 所示,表明空腔左侧尽管存在瞬时封闭流线,但不能保持动力学稳定性及清晰边界,该回流区不能识别为涡结构。综上,LCS 与  $Q$  值都清晰地揭示了空腔流动的流场中存在的主要涡结构,而空腔右侧的角涡则由于吸引力或排斥性较弱,未被 LCS 识别出来。

空腔右侧的主涡在整个流动周期中形态基本维持不变,绕涡心顺时针旋转,周期与流场周期一致。在运动过程中,空腔后缘点处剪切层中的涡撕裂后,一部分流体被 nLCS 及 pLCS 包络并随主涡运动进入到主涡中;同时主涡靠近剪切层一侧流体被 pLCS 吸引靠近剪切层进入主流,随主流对流至下游。

剪切层中的涡结构则经历了复杂的生成、增大、脱落、对流、破裂等过程,其完整周期为流场中压力和速度脉动周期的两倍,而且剪切层内两个涡结构的完整运动动力学过程和特性是相同的。在图 7 中, $t=0.4T$  时刻如图 7(c) 所示,剪切层中的涡结构在空腔前缘点开始生成并逐渐增大直至  $t=T$  时刻如图 7(c)~图 7(f) 所示,从前缘点脱落进入到剪切层中,并随主流一起向下游对流。在对流过程中如图 7(a)~图 7(e) 所示,涡结构发生形变扭曲,并在  $t=T+0.8T$  时刻如图 7(e) 所示,开始撞击空腔后缘点,整个撞击过程中如图 7(f)、图 7(a)、图 7(b)、图 7(c) 所示,涡结构不断被空腔后缘点撕裂,最终在  $t=2T+0.4T$  如图 7(c) 所示,被撕裂为两部分,一部分随主流在空腔外向下游流动,另一部分则进入主涡部分随主涡在空腔内部流动。

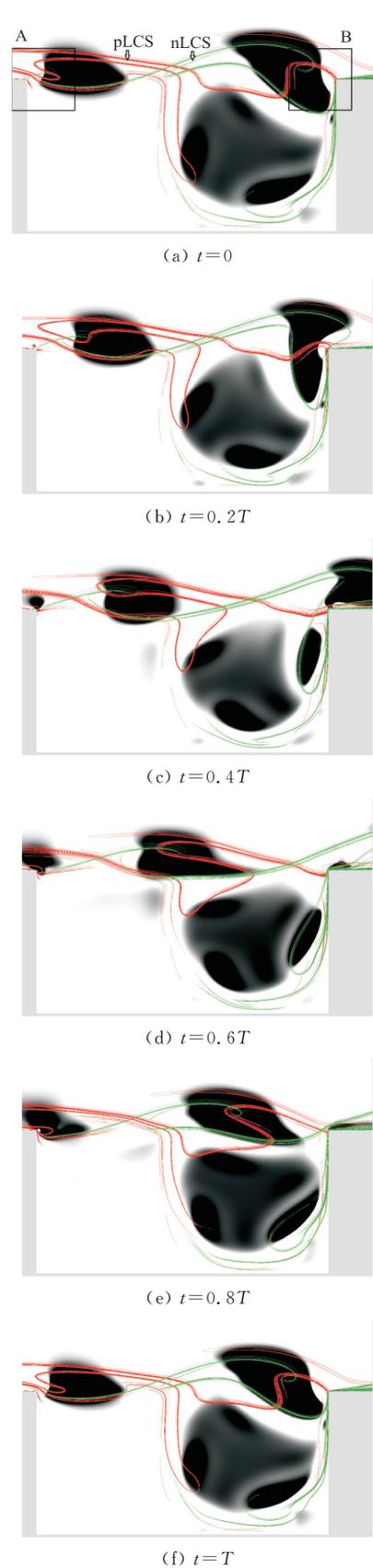


图 7 LCS 及  $Q$  值分布

Fig. 7 LCS and  $Q$  value distribution in the cavity

前缘点和后缘点附近区域的涡通量为

$$\Gamma = \int_S \omega dA \quad (15)$$

式中:  $\omega$  为涡量。

剪切层中涡的生成、脱落、撞击和破裂时刻的量化分析通过式(15)的时间演化特性分析给出,分析结果与 LCS 分析给出的特征时刻相互对照验证。选取的前后缘点附近区域分别如图 7 中 A、B 所示,两个时间周期内的涡通量时间演化如图 8 所示,注意在两个区域内涡通量都是负值。由 A 区域内的涡通量时间演化可知:在  $t=0.35T$  时刻,涡通量开始逐渐积累增加,意味着涡结构开始形成;在  $t=0.87T$  时刻涡通量达到极大值并开始减小,意味着此时涡结构开始从前缘点脱落。由 B 区域内的涡通量时间演化可知:在  $t=0.76T$  时刻,涡通量开始迅速增加并在  $t=1.12T$  时刻达到极大值,意味着从上游而来的涡结构开始对流至后缘点处并撞击后缘点,随后涡通量开始减小,直至  $t=1.43T$  时刻涡通量减小至极小值,此时涡结构撕裂成为两部分,一部分随主流对流而下,另一部分则进入空腔中的主涡内。以上基于涡通量的涡结构动力学特性分析与 LCS 分析结果基本一致,印证了基于 LCS 分析涡动力学的准确性。

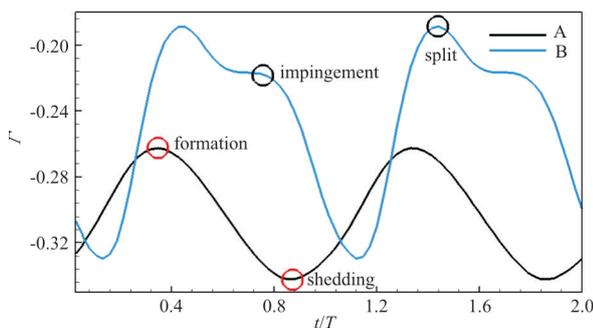


图 8 涡通量时间演化

Fig. 8 Time evolution of vorticity flux

## 4 结 论

(1) 吸引性和排斥性拉格朗日拟序结构边界的包裹作为空腔流动中的涡边界,可有效识别出空腔中形态基本维持不变的主涡和剪切层内发生复杂动力学过程的涡。空腔右侧的角涡则由于吸引性和排斥性较弱,未被识别出来。

(2)  $Q$  判据以及涡量通量的时间演化分析表明,在流动周期内,拉格朗日拟序结构在空腔前缘

点的卷起与脱离伴随着前缘涡的生成与脱落,并向下游发展;拉格朗日拟序结构在后缘点的撞击破裂伴随着  $Q$  与涡的破裂。

(3) 剪切层中的涡结构经历了复杂的生成、增大、脱落、对流、破裂等过程,空腔内部的主涡则在整个流动周期内都维持相对稳定形态。

## 参考文献

- [1] Rowley C W, Williams D R. Dynamics and control of high Reynolds number flow over open cavities[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 2006, 38(1): 251-276.
- [2] 王显圣, 杨党国, 刘俊, 等. 空腔可压缩流致噪声问题研究进展[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(3): 1-16.  
Wang Xiansheng, Yang Dangguo, Liu Jun, et al. Progress of research on noise induced by compressible flow over cavities[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(3): 1-16. (in Chinese)
- [3] 刘俊, 蔡晋生, 杨党国, 等. 超声速空腔流动波系演化及噪声控制研究进展[J]. *航空学报*, 2018, 39(11): 022366.  
Liu Jun, Cai Jinsheng, Yang Dangguo, et al. Research progress in wave evolution and noise control for supersonic cavity flows[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(11): 022366. (in Chinese)
- [4] Rossiter J E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds[R]. Ministry of Aviation, Royal Aircraft Establishment, RAE Farnborough, 1964.
- [5] Heller H H, Holmes D G, Covert E E. Flow-induced pressure oscillations in shallow cavities[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1971, 18(4): 545-553.
- [6] Tam C K W, Block P J W. On the tones and pressure oscillations induced by flow over rectangular cavities[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1978, 89(2): 373-399.
- [7] Morkovin M V, Paranjape S V. On acoustic excitation of shear layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 19: 328-335.
- [8] Tang Y P, Rockwell D. Instantaneous pressure fields at a corner associated with vortex impingement[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1983, 126: 187-204.
- [9] 万振华. 可压缩剪切流噪声的计算与机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.  
Wan Zhenhua. The computations and investigations of compressible shear flow noise[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [10] Haller G. An objective definition of a vortex[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 525: 1-26.
- [11] Shuling T, Yisheng G, Xiangrui D, et al. Definitions of vortex vector and vortex[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 849: 312-339.
- [12] Haller G. Lagrangian coherent structures[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015, 47: 137-162.

- tomation & Instrumentation, 2017(3): 51-54. (in Chinese)
- [8] D'Sa R, Henderson T, Jenson D, et al. Design and experiments for a transformable solar-UAV[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2017.
- [9] Kingry N, Towers L, Liu Y C, et al. Design, modeling and control of a solar-powered quadcopter[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2018: 1251-1258.
- [10] Hoffmann K A, Chiang S T. Computational fluid dynamics for engineers[M]. Wichita, KS: Engineering Education System, 1993.
- [11] 王允良, 高永, 侯志强. 无人飞行器外形布局设计及其气动特性计算分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(4): 361-364.  
Wang Yunliang, Gao Yong, Hou Zhiqiang. Shape layout design and aerodynamic characteristics calculation of unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2011, 26(4): 361-364. (in Chinese)
- [12] 王璐, 王云, 马成宇, 等. 旋翼推进式无人飞艇气动特性分析[J]. 飞行力学, 2018, 36(1): 8-15.  
Wang Lu, Wang Yun, Ma Chengyu, et al. Aerodynamic characteristics analysis of rotor propulsion unmanned airship[J]. Flight Mechanics, 2018, 36(1): 8-15. (in Chinese)
- [13] Holman D M, Brionnaud R M, Martínez F J, et al. Advanced aerodynamic analysis of the NASA high-lift trap wing with a moving flap configuration[C]. 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2012.
- [14] Ducros F, Nicoud F, Poinso T. Wall-adapting local eddy-viscosity models for simulations in complex geometries[C]. Proceedings of 6th ICFD Conference on Numerical Methods for Fluid Dynamics, 1998: 293-299.
- [15] Thibault S, Holman D, Garcia S, et al. CFD simulation of a quad-rotor UAV with rotors in motion explicitly modeled using an LBM approach with adaptive refinement[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017: 583.

### 作者简介:

- 阮永井(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。
- 王琦(1963—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器结构优化。
- 邹森(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。
- 陈金铭(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器气动设计。

(编辑:马文静)

### (上接第 697 页)

- [13] Shuaibin H, Shuhai Z, Hanxin Z. A Lagrangian criterion of unsteady flow separation for two-dimensional periodic flows[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018, 39: 1007-1018.
- [14] Rockwood M P, Taira K, Green M A. Detecting vortex formation and shedding in cylinder wakes using lagrangian coherent structures[J]. AIAA Journal, 2016, 55(1): 15-23.
- [15] Peng J, Dabiri J. Transport of inertial particles by Lagrangian coherent structures: application to predator-prey interaction in jellyfish feeding[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 623: 75-84.
- [16] Yangzi H, Melissa A Green. Detection and tracking of vortex phenomena using Lagrangian coherent structures[J], Experiments in Fluids, 2015, 56: 147.
- [17] Hunt J C R, Wray A A, Moin P Eddies. Stream and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulence Research Report CTR-S88, 1988: 193-208.
- [18] Freund J B. Proposed inflow/outflow boundary conditions for direct computation of aerodynamic sound[J]. AIAA Journal, 1997, 25(4): 740-742.
- [19] Zhang S, Li H, Liu X, et al. Classification and sound generation of two-dimensional interaction of two Taylor vortices[J]. Physics of Fluids, 2013, 25(5): 056103.
- [20] Rowley C W, Tim Colonius, Basu A J. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 455: 315-346.
- [21] Krishnamurty K. Sound radiation from surface cutouts in high speed flow[D]. USA: California Institute of Technology, 1956.

### 作者简介:

- 韩帅斌(1992—),男,硕士,研究实习员。主要研究方向:非定常流动分离、涡动力学、气动声学。
- 罗勇(1990—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:计算气动声学。
- 张树海(1963—),男,博士,研究员。主要研究方向:高精度数值方法、计算气动声学、非定常流动分离。

(编辑:沈惺)