

DOI: 10.7652/xjtuxb201709019

几何参数对三维仿生运动翼推进性能的影响研究

陈刚^{1,2,3}, 苑宗敬^{1,2,3}, 张鸿志³, 韩佳坤^{1,2,3}, 龚春林⁴

(1. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安; 3. 西安交通大学陕西省先进飞行器服役环境与控制重点实验室, 710049, 西安; 4. 西北工业大学航天学院, 710072, 西安)

摘要: 为了研究几何参数对三维仿生运动翼推进性能的影响,基于 IB-LBM 算法开发了可在天河 2 号超级计算机上运行的大规模并行求解器。实现过程包括用浸入边界法在翼型表面构造力函数,并通过插值函数将翼型表面的力函数分散到周围流体网格点,然后通过格子波尔兹曼方法进行流体计算,更新速度场。以椭球翼、平板翼、NACA0012 翼、长方体翼为研究对象,系统研究了仿生翼的几何形状对推力系数与涡系结构的影响。研究表明:椭球翼表面的涡系结构饱满且距离翼型表面最近,其推进性能最好;NACA0012 翼和平板翼的涡系结构类似,推进性能相近;长方体翼由于钝体效应导致涡系结构细小且距离翼型表面较远,其推进性能最差。研究结果表明,在仿生飞行器设计中,应避免采用类似于长方体外形的钝体仿生翼,椭球翼推进性能最佳,但是由于椭球型质量分布导致对仿生飞行器连接部位质量要求较高,可采用推进性能相近的平板翼。

关键词: 仿生运动翼;浸入边界法;格子波尔兹曼法;推进性能;几何参数

中图分类号: V211 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0131-07

Influences of Geometric Parameters on the Propulsion Performance of Three-Dimensional Bionic Motion Wings

CHEN Gang^{1,2,3}, YUAN Zongjing^{1,2,3}, ZHANG Hongzhi³, HAN Jiakun^{1,2,3}, GONG Chunlin⁴

(1. State Key Laboratory of Strength and Vibration for Mechanic Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Service Environment and Control for Flight Vehicles, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To study the influence of geometric parameters on the propulsion performance of three-dimensional bionic motion wings, a general large-scale solver based on IB-LBM algorithm for Tianhe-II supercomputer is developed. To implement this process, the immersed boundary method is used to construct a force function on the surface of the wing. Then the force function is spread to the neighbor fluid mesh with interpolation function. The lattice Boltzmann method is used to perform fluid computation and update the velocity field. Four different wings, i. e., ellipsoidal wing, plate wing, NACA0012 wing and cuboid wing, are investigated to explore how the geometric shapes of the wings influence the thrust coefficient and vortex structure. The numerical results show that the vortex induced by the ellipsoidal wing is fully structured and close to the surface of the wing, so its propulsion performance is best. The vortex structures of

NACA0012 wing and plate wing are similar, and hence have similar propulsion performance. The vortex structure of cuboid wing, however, is small and far from the wing surface, leading to a worst propulsion performance. So, in design of bionic airplane, the cuboid wing should be excluded. Although the performance of ellipsoidal wing is best, it requires a high-quality mass distribution in connection parts, so the plate wing would be a proper choice as a result of tradeoff.

Keywords: bionic motion wing; immersed boundary method; lattice Boltzmann method; propulsion performance; geometric parameter

研究推进机理对于开发高性能飞行器和水下航行器具有重要的借鉴意义^[1]。基于贴体网格求解 N-S 方程在仿生流动模拟中得到广泛应用^[2],但由于生物运动幅度大,贴体运动网格重构算法鲁棒性和运动网格质量难以保证,很容易导致计算效率降低、模拟精度下降甚至计算发散。浸入边界法 (IB) 将边界模化为流场中的力载荷而无需在每一个时间步重新生成网格,在模拟变形体、动边界问题上具有极强鲁棒性,近年来在仿生流动模拟中受到越来越多的关注^[3]。格子玻尔兹曼 (LBM) 方法具有编程实现简单、集成新物理模型容易、处理复杂边界方便和高效的并行性,近些年开始广泛用于模拟各种复杂流动模拟^[4]。LBM、IB 方法均基于笛卡尔网格求解,将 LBM 方法的高效并行性与 IB 方法处理运动边界的灵活性相结合,不仅可以提高传统 IB 方法的计算效率,而且有可能发展为一种高效通用动边界流动模拟方法。自从 Feng 等提出了模拟流体和粒子刚性耦合运动基本型 IB-LBM 耦合格式后^[5],各种改进型 IB-LBM 格式被陆续提出^[6]。

大量仿生流动研究针对大展弦比生物模型,但对于小展弦比生物的运动,其三维效应非常明显,三维翼面诱导涡系结构远比二维翼型复杂^[7],同时翼面几何参数和流动参数对涡系结构及演化过程非常重要,进而显著影响仿生运动翼升推性能和推进效率^[8]。目前对三维仿生运动翼的数值研究远少于二维翼型,包括几何参数和流动参数影响的三维流动效应数值研究则更为少见。本文重点研究平面参数和翼型形状对三维仿生运动翼升推性能的影响,分析不同形状运动翼的非定常涡系结构及其演化规律,进而揭示几何参数对仿生运动翼流动特性的影响。

1 数值方法与验证

1.1 IB-LBM 方法

描述流体粒子运动带外力项的格子玻尔兹曼方程为

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta t, t + \delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)] + \frac{3}{2} \omega_i \mathbf{f} \cdot \mathbf{e}_i \delta t \quad (1)$$

式中: f_i 为密度分布函数; f_i^{eq} 为对应的平衡态分布函数; τ 为归一化松弛时间; δt 为时间步长; $\mathbf{f}$ 为体力密度; $\mathbf{e}_i$ 为粒子速度; ω_i 为权系数。式 (1) 通过 Chapman-Enskog 展开可还原为带体积力项的不可压 N-S 方程, LBM 方法采用笛卡尔直角网格离散流体区域。本文采用三维 D3Q19 离散速度格子模型,其平衡态分布函数为

$$f_i^{\text{eq}} = \rho \omega_i \left[1 + 3 \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u} + \frac{9}{2} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2 - \frac{3}{2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \right] \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \frac{\sum_i \mathbf{e}_i f_i + 0.5 \mathbf{f} \delta t}{\rho} \quad (3)$$

$$\rho = \sum_i f_i \quad (4)$$

$$p = c_s^2 \rho \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为流体速度。将浸入边界法与格子玻尔兹曼方法耦合发展为 IB-LBM 方法的关键在于如何处理 LBM-BGK 模型中与 N-S 方程对应的体力密度分布项。流体区域 Ω 用欧拉坐标 $\mathbf{x}$ 表示,浸入边界 Γ 用拉格朗日坐标 $\mathbf{s}$ 表示,将拉格朗日节点上受到的边界作用力分散到作用范围内的欧拉网格点 $\mathbf{x}$ 上,即可得到欧拉网格点上的体力项为

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = \int_{\Gamma} \mathbf{F}(\mathbf{s}, t) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{X}(\mathbf{s}, t)) d\mathbf{s} \quad (6)$$

常规 IBM 算法会导致模型产生内部流体质量效应,对流动模拟结果带来明显影响,因此本文采用考虑内部质量效应的速度修正 IB-LBM 算法^[9]。该方法关键在于通过直接加载包含速度信息的反馈力来模拟物体边界,并采用虚拟边界来构造式 (6) 中的拉格朗日体力项^[10]

$$\mathbf{F}(\mathbf{s}, t) = \alpha \int_0^t [\mathbf{u}(\mathbf{X}(\mathbf{s}, t), t_1) - \mathbf{u}] dt_1 + \beta [\mathbf{u}(\mathbf{X}(\mathbf{s}, t), t) - \mathbf{u}] \quad (7)$$

对于指定运动物体其速度 $\mathbf{u}(\mathbf{X}(\mathbf{s}, t), t)$ 可事先通过

附近欧拉点上的速度信息插值得到。 α 与 β 为反馈力系数分别对应速度时间积分与速度反馈^[11]。

本文针对刚性仿生运动翼所建立的三维 IB-LBM 并行求解器算法流程如下。

(1) 设定初始参数求解式(1), 初始化流场, 调用几何模型函数并初始化三维翼模型位置。

(2) 求解运动翼的运动控制方程计算下一时间步模型所处位置, 由式(7)计算浸入边界上集中力, 再由式(6)将集中力分散到对应欧拉网格点。

(3) 求解式(1), 获得欧拉网格点上速度压力等信息, 并输出流场信息与结构位置。

(4) 若未达到终止条件, 回到步骤(2)进行下一时间步迭代; 否则, 结束迭代, 进行后处理。

1.2 求解器验证

Dong 曾采用有限体积法结合浸入边界法求解不可压 N-S 方程, 对椭圆翼模型进行了系统的数值研究^[12]。本节通过与文献[12]椭圆翼模型结果对比, 来验证本文三维并行 IB-LBM 求解器的精度与有效性。椭圆扑动翼模型如图 1 所示, 其中 x 方向与来流方向重合, y 方向为椭圆翼展向, z 方向为椭圆翼厚度方向。椭圆翼参数为归一化参数, 来流方向长度为 1, 展向方向距离为 2, 厚度为 0.12。

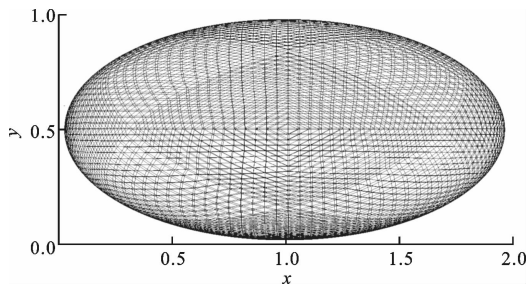


图1 椭圆扑动翼模型

根据文献[12], 模型中心在 z 方向运动和浮沉且同时绕中心转动方程为

$$z(t) = A_z \sin(2\pi f) \quad (8)$$

$$\theta(t) = A_\theta \cos(2\pi f) \quad (9)$$

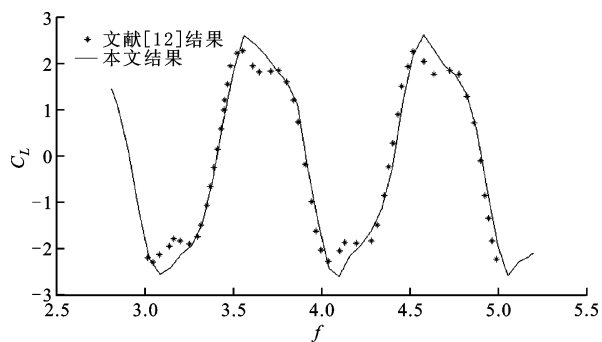
式中: A_z 为浮沉幅值; A_θ 为转动幅值; f 为扑动频率。仿生运动翼推力系数与升力系数定义为

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho U_\infty^2 A}; \quad C_L = \frac{L}{0.5\rho U_\infty^2 A} \quad (10)$$

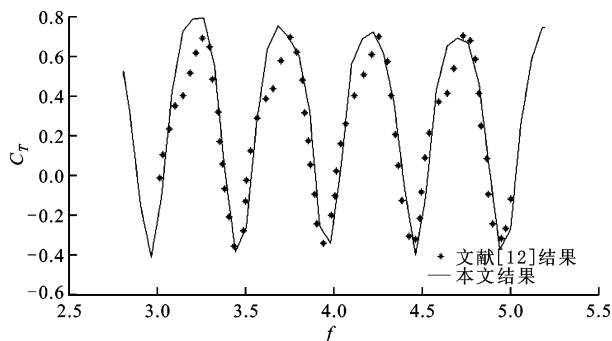
式中: T 为运动翼顺气流方向的力; L 为运动翼受到的升力; ρ 为流体密度; A 为面积。

经过网格收敛性检验, 本算例所采用的计算网格数量约为 3 300 万。椭圆翼气动特性随时间变化曲线如图 2 所示, 可知本文 IB-LBM 求解器与有限体积法预测的升推系数时间历程基本一致, 对时间

平均后所得的升力系数和推力系数基本一样。这表明本文求解器对仿生运动翼具有较高升推系数预测精度。为了验证本文求解器对涡系结构精细化捕捉能力, 进一步给出了椭圆扑翼涡系结构, 椭圆翼沉浮运动中间位置时刻的涡系结构俯视图如图 3 所示。椭圆翼诱导的尾涡由两列涡环组成, 单个涡环沿着法向方向诱导速度串联起来, 整个翼型后部流体涡环为类似喷流的涡系结构, 从而导致仿生运动翼获得前向运动推进力。尽管本文求解器捕捉到的涡环结构和文献[12]基本类似, 但涡环强度并没有随着远离翼面而很快耗散。这表明本文求解器能捕捉到更多精细化涡系结构, 在研究仿生运动翼流动机理



(a) 升力系数



(b) 推力系数

图2 椭圆翼气动特性随时间变化的曲线



(a) 本文结果



(b) 文献[12]结果

图3 沉浮运动中间时刻涡系结构俯视图

时具有较高可信度。

2 算例与分析

2.1 计算模型

本文选择椭球翼、NACA0012翼、长方体翼与平板翼4种不同截面的翼型。4种仿生运动翼在顺气流方向长度为1,在展向长度为2。椭球翼、NACA0012翼、长方体翼在 z 方向上最大厚度均设置为0.12,三维平板翼厚度设置为0。本文通过对4个不同三维模型仿生运动的数值模拟来探讨平面形状和翼型形状等几何参数对仿生运动翼升推特性及非定常涡系结构的影响。

所有仿生运动翼仍采用经典拍动推进仿生运动模式: z 方向按照式(5)沉浮运动,同时中心按照式(6)转动。计算参数 A_z 为0.5, A_θ 为 $\pi/6$, f 为0.6,拍动翼的雷诺数 Re 为200,斯坦顿数 St 为0.6。运动翼处于运动轨迹中间位置时的中心点坐标为(5,5,5),流体计算域尺寸为 $18 \times 10 \times 10$,计算域左侧采用速度入口边界条件,右侧边界为出流边界条件,其余4个侧面采用周期性边界条件。经过网格收敛性检验后各模型整体网格划分为 $540 \times 300 \times 300$,即网格单元总计为4 860万。采用广州超算中心天河2超级计算机运行本文发展的并行求解器,时间步长选择为0.001,计算步数为10万。每个任务采用384个CPU计算核心,一个算例大约需要运行2 h。

2.2 推进性能分析

4个仿生运动翼的尾流区均出现关于 xy 平面对称的喷流,4个仿生翼均为推力翼型,其推进力大小可以通过动量定理来分析。各运动翼展向对称面上顺气流方向的平均速度云图如图4所示,平均速度值可通过一个周期内的瞬时速度值取算术平均得到,尾流区平均速度分布明显不同,图4b与图4d平均速度场分布非常相似,可以预计NACA0012翼和平板翼的推力系数也应该比较接近,而图4c所示尾流区平均速度分布强度明显小于其余3个翼型,预示长方体翼推力系数可能最小。

仿生运动翼动力学系数与 f 的关系曲线如图5所示。由图5可知,在当前来流条件下,尽管4个运动翼升力系数曲线在幅值上有差异,但均关于 x 坐标轴对称,4个仿生运动翼一个周期时间的平均升力系数均为0。4个仿生翼均为对称翼型,在本算例对称来流条件下其 z 向升力应该为0,对升力系数的准确预测再次验证了本文求解器的可信度。NACA0012翼、平板翼和椭球翼的推力系数曲线较为

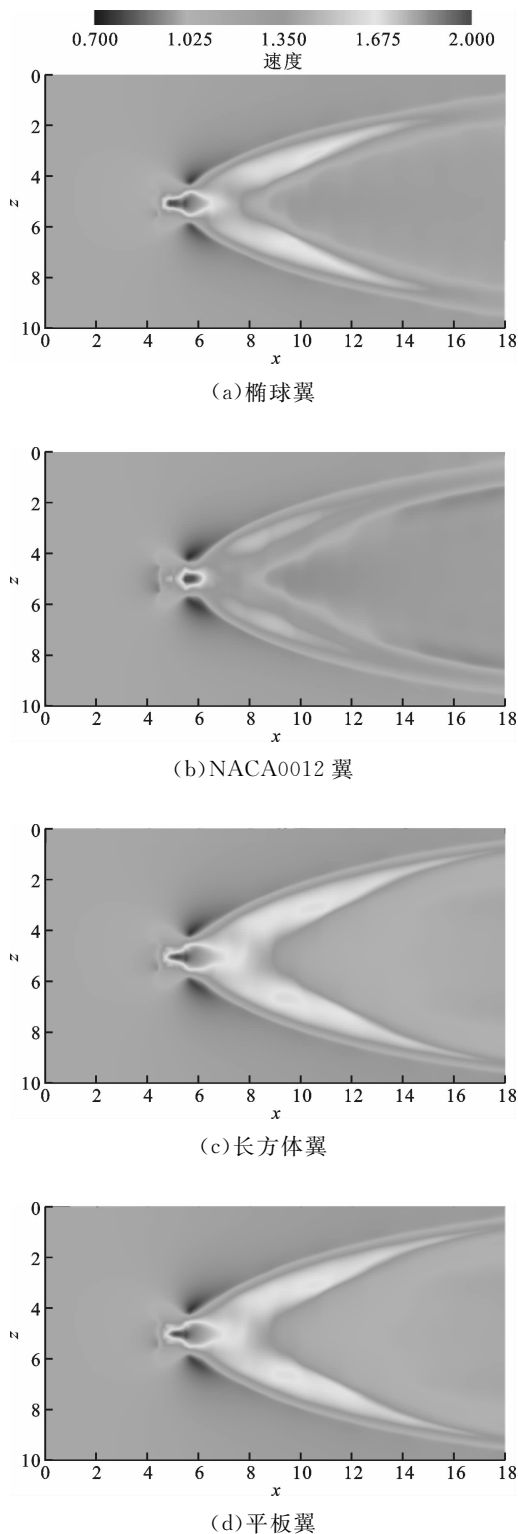


图4 展向对称面上顺气流方向平均速度分布云图

接近,正向幅度要大于长方体翼,对各翼推力曲线进行时间平均,可得椭球翼、NACA0012翼、平板翼和长方体翼型的推力系数分别为0.390 3、0.372 0、0.354 2和0.091 6,可见椭球翼推力系数最大,NACA0012翼和平板翼居中,而长方体翼平均推力系数最小。NACA0012翼型、平板翼和长方体翼的平

面投影形状均为同样尺寸长方形,其推力系数均小于平面形状为椭圆的椭球翼。这说明椭圆翼仿生运动产生的推力系数要大于长方形翼,而大部分鱼类身体和昆虫翅膀平面投影均近似于椭圆形,表明生物进化背后有其深刻的自然规律依据。NACA0012翼和平板翼平面形状一样却产生了不同的推力系数,说明翼型对推力系数也有显著影响。

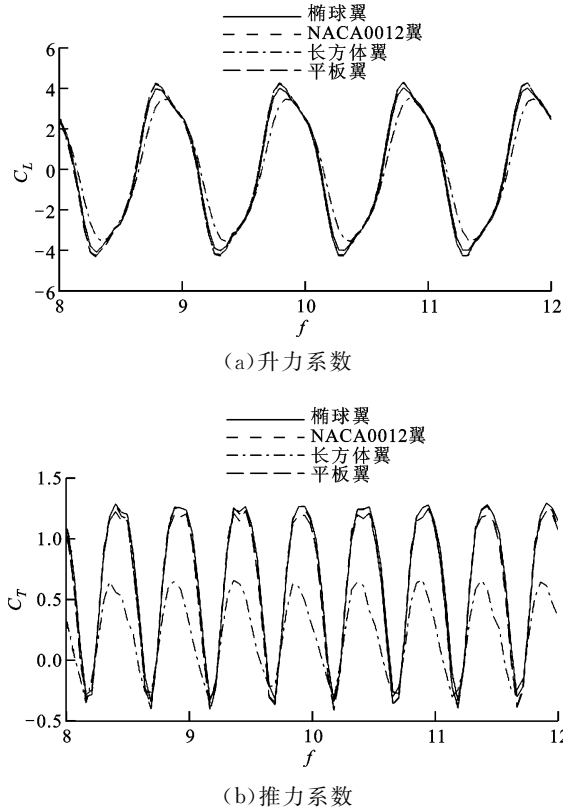


图 5 仿生运动翼动力学系数与 f 的关系曲线

2.3 涡系结构分析

各运动翼展向对称面上涡量分布图和各翼涡量图的局部放大图如图 6、7 所示。由图 7 可知:椭圆翼前缘涡相比于其他仿生运动翼涡强度更大且更贴近翼面,前缘涡长度占翼型长度比也明显大于其他翼型,而其推力系数也最大;NACA0012 翼前缘涡比平板翼前缘涡更靠近上翼面,其推力系数也略微大于平板翼;长方体翼前缘涡不仅为涡强较小的细长状,且该涡与翼面距离也远大于其他翼的前缘涡。这表明翼面前缘涡是决定仿生运动翼推力性能的重要因素,长方体翼的较厚非流线前缘最终影响前缘涡的形成过程,同时该涡将影响翼型顺气流方向平均速度场分布。NACA0012 翼型与平板翼型前后缘处均为尖沿,与长方体翼相比可诱导出基本相似的涡结构和顺流方向的平均速度场,其推力系数也较为接近。

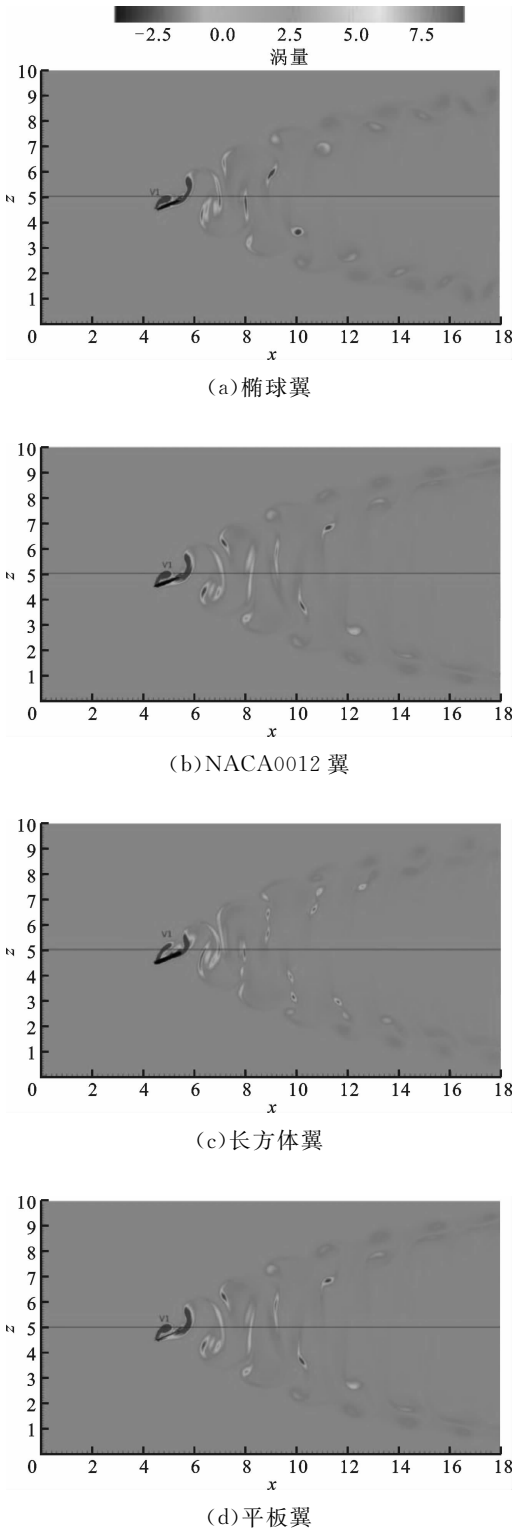
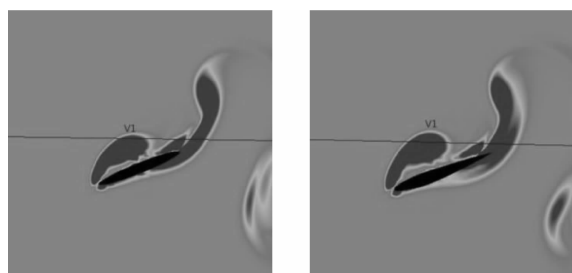


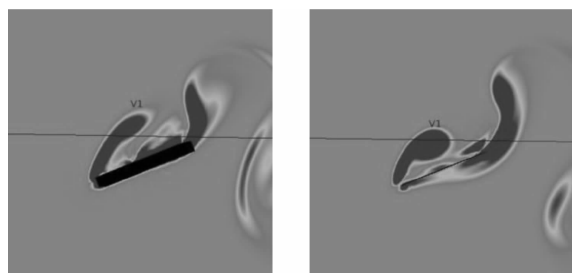
图 6 仿生运动翼展向对称面涡量图

Q 准则则是识别流场涡系结构最常用的指标之一,各仿生运动翼尾迹区由 Q 变量识别的涡系结构如图 8 所示。由图 8a 可知,相比于其他 3 种仿生运动翼,椭球翼顺流向各级涡环均尽管涡强在逐渐减小,但保持比较完整的涡环状,因此能诱导出较强的速度分量,在 4 种仿生运动翼中具有最好的推进性



(a) 椭球翼

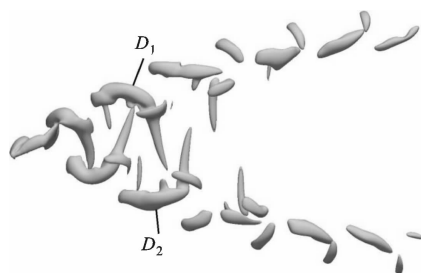
(b) NACA0012 翼



(c) 长方体型

(d) 平板翼

图7 翼型展向对称面涡量局部放大图



(d) 三维平板翼

图8 翼型尾迹区Q判据涡系结构

CA0012翼同级涡强度略大于平板翼,因此NACA0012翼的推进性能比平板翼好。考虑加工工艺的便利性和加工成本,实际仿生飞行器可选择平板翼。图8中 D_1 、 D_2 为涡环法向,各涡环将在 D_1 、 D_2 方向诱导流场速度,对比4种翼涡系结构可发现长方体翼涡环法向与来流之间夹角最大,在翼面流向中心线上诱导速度最小,因此长方体翼的推进性能最差。

3 结 论

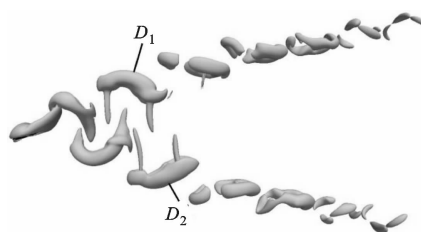
本文基于速度修正IB-LBM算法发展了面向天河2号超级计算机的大规模并行求解器。通过与基于N-S方程的浸入边界法所预测的椭圆翼流场结果进行对比,验证了本文所发展的IB-LBM求解器具有较高精度。随后,对椭球翼、NACA0012翼、长方体翼和平板翼等4种三维仿生运动翼典型拍动非定常流动进行了大规模数值模拟,给出了其升推系数并捕捉到精细化涡系结构。

研究发现,仿生运动翼的平面形状、翼型形状和前后缘特征对推进性能有直接影响,椭球翼推进性能最好,NACA0012翼和平板翼次之,长方体翼最差。数值模拟结果表明,仿生运动翼上翼面前缘涡的强度及贴近翼面的距离是决定其推进性能的重要因素。前缘涡越强越贴近翼面,则其推进性能就越好,翼后尾迹区脱出的涡环保持越久涡环破碎越晚,则推进性能就越好。4种仿生运动翼中,椭圆翼和NACA0012翼的推进性能相对较好,但考虑到加工便利性和加工成本,实际仿生飞行器可选择推进性能略差的平板翼。

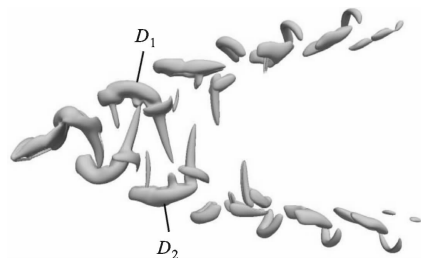
参考文献:

- [1] 严惠云, 张浩磊, 刘小民. 一种仿生鱼体自主游动的水动力学特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 138-144.

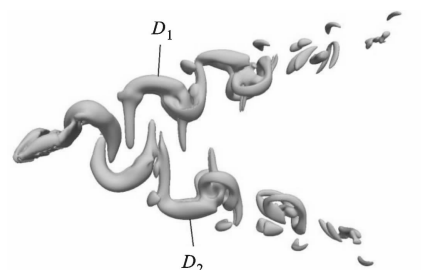
YAN Huiyun, ZHANG Haolei, LIU Xiaomin. Nu-



(a) 椭球翼



(b) NACA0012 翼



(c) 长方体翼

- merical analysis of hydrodynamics characteristics for autonomous swimming of bionic tunas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 138-144.
- [2] 李丹宇, 刘小民, 李典. 仿生翼几何特征与气动性能的关系初探 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1): 88-96.
- LI Danyu, LIU Xiaomin, LI Dian. Study on the relationship between geometric features and aerodynamic performance of bionic wings [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 88-96.
- [3] 潘定一, 邓见, 邵雪明. 基于沉浸边界法的二维拍动翼数值模拟 [J]. 空气动力学学报, 2008, 26(4): 419-424.
- PAN Dingyi, DENG Jian, SHAO Xueming. Numerical simulation of 2-D flapping foil by using immersed-boundary method [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(4): 419-424.
- [4] 栾辉宝, 徐辉, 陈黎, 等. 有限体积法与 LBM 分区耦合模拟方腔自然对流 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 78-83.
- LUAN Huibao, XU Hui, CHEN Li, et al. Coupling of FVM and LBM for natural convection in a square cavity [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 78-83.
- [5] FENG Z G, MICHAELIDES E E. The immersed boundary-lattice Boltzmann method for solving fluid-particles interaction problems [J]. Journal of Computational Physics, 2004, 195(2): 602-628.
- [6] WU J, SHU C. Implicit velocity correction-based immersed boundary-lattice Boltzmann method and its applications [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(6): 1963-1979.
- [7] BUCHHOLZ J H, SMITS A J. The wake structure and thrust performance of a rigid low-aspect-ratio pitching panel [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 603: 331-365.
- [8] WU J. An adaptive immersed boundary-lattice Boltzmann method for simulating a flapping foil in ground effect [J]. Computers & Fluids, 2015, 106: 171-184.
- [9] SUZUKI K, INAMURO T. Effect of internal mass in the simulation of a moving body by the immersed boundary method [J]. Computers & Fluids, 2011, 49(1): 173-187.
- [10] SUZUKI K, INAMURO T. A higher-order immersed boundary-lattice Boltzmann method using a smooth velocity field near boundaries [J]. Computers & Fluids, 2013, 76: 105-115.
- [11] SUZUKI K, MINAMI K, INAMURO T. Lift and thrust generation by a butterfly-like flapping wing-body model: immersed boundary-lattice Boltzmann simulations [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 767: 659-695.
- [12] DONG H, MITTAL R, NAJJAR F M. Wake topology and hydrodynamic performance of low-aspect-ratio flapping foils [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 566: 309-343.
- [本刊相关文献链接]**
- 李丹宇, 刘小民, 李典. 仿生翼几何特征与气动性能的关系初探. 2017, 51(1): 88-96. [doi:10.7652/xjtuxb201701014]
- 李典, 刘小民, 杨罗娜. 仿鸭翼的三维仿生翼型叶片气动特性研究. 2016, 50(9): 111-118. [doi:10.7652/xjtuxb201609018]
- 吴波, 杨利, 金绍江, 等. 仿生活塞疲劳寿命预测与回归设计. 2016, 50(5): 72-80. [doi:10.7652/xjtuxb201605011]
- 严惠云, 张浩磊, 刘小民. 一种仿生鱼体自主游动的水动力学特性分析. 2016, 50(2): 138-144. [doi:10.7652/xjtuxb201602023]
- 王海龙, 王刚, 陈曦, 等. 仿海蟹机器人游泳足水动力学分析与实验研究. 2015, 49(8): 75-83. [doi:10.7652/xjtuxb201508013]
- 刘小民, 赵嘉, 李典. 单圆弧等厚叶片前后缘多元耦合仿生设计及降噪机理研究. 2015, 49(3): 1-10. [doi:10.7652/xjtuxb201503001]
- 刘小民, 李烁. 仿鸭翼前缘蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响. 2015, 49(1): 14-20. [doi:10.7652/xjtuxb201501003]
- 张帆, 金英泽, 王祥, 等. 可倾瓦导轴承液膜力非线性指数模型及应用研究. 2017, 51(3): 72-79. [doi:10.7652/xjtuxb201703013]
- 仲继泽, 徐自力. 流固单向耦合的能量法及机翼颤振预测. 2017, 51(1): 109-114. [doi:10.7652/xjtuxb201701017]
- 张鸿志, 周强, 陈刚, 等. 气动弹性系统本征正交分解降阶模型精度的参数影响研究. 2016, 50(11): 104-109. [doi:10.7652/xjtuxb201611016]
- 刘涛, 杨树明, 蒋庄德. 超振荡透镜的三维全矢量电磁分析方法. 2017, 51(8): 1-5. [doi:10.7652/xjtuxb201708001]
- 韩江涛, 张英杰, 李程辉, 等. 面向光学三维测量的非均匀条纹生成方法. 2017, 51(8): 12-18. [doi:10.7652/xjtuxb201708003]
- 李志刚, 陈尧兴, 李军. 高偏心率下旋转密封泄漏特性和静态动力特性研究. 2017, 51(7): 1-7. [doi:10.7652/xjtuxb201707001]
- 高庆, 廖高良, 张永海, 等. 透平级气动及运行参数对轮缘密封密封性能影响的数值研究. 2017, 51(7): 62-72. [doi:10.7652/xjtuxb201707010]

(编辑 赵炜)