

6-14-2018

Aerodynamic Simulation of Multi-DOF Flapping-wing Air Vehicle of Bird-like Based on XFlow Software

Yonggang Yang

School of Aeronautics Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Hanping Su

School of Aeronautics Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Aerodynamic Simulation of Multi-DOF Flapping-wing Air Vehicle of Bird-like Based on XFlow Software

Abstract

Abstract: The aerodynamic characteristics analysis of flapping-wing is of great significance to the design, manufacturing and control of the aircraft. *In this paper, a simple motion model of multiple-Degrees-of-Freedom (multi-DOF) of "swing-torsion-bending and folding" is established by analyzing the flight characteristics of bird-like flapping wing. The flapping-wing air vehicle of multi-DOF is numerically simulated in the case of unsteady flow at low Reynolds number by XFlow software. The effects of flapping wing shape, frequency and inflow on surrounding air are analyzed.* The simulation results provide theory and technique supports for the flapping-wing air vehicle's research and development.

Keywords

bird-like flapping-wing air vehicle, multi-DOF, XFlow, aerodynamic characteristics, velocity contour

Recommended Citation

Yang Yonggang, Su Hanping. Aerodynamic Simulation of Multi-DOF Flapping-wing Air Vehicle of Bird-like Based on XFlow Software[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2162-2167.

基于 XFlow 多自由度仿鸟扑翼飞行器气动仿真

杨永刚, 苏汉平

(中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 在仿鸟扑翼飞行器的设计中, 扑翼的气动特性分析对样机的制作、试飞和控制有重大影响。分析了鸟类扑翼飞行扑动特点, 给出了一种简易“挥拍-扭转-弯曲折叠”多自由度运动模型, 利用 XFlow 软件在低雷诺数非定常流场情况下对多自由度扑翼飞行器进行三维数值仿真模拟, 求解在扑翼扑动作用下的周围绕流空气的流场特性, 分析飞行器扑翼截面形状、扑动频率和来流速度对流场的影响。给出的仿真结果可以对扑翼飞行器的研制和改进提供理论和技术支持。

关键词: 仿鸟扑翼飞行器; 多自由度; XFlow; 气动力特性; 速度云图

中图分类号: V224

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2162-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806020

Aerodynamic Simulation of Multi-DOF Flapping-wing Air Vehicle of Bird-like Based on XFlow Software

Yang Yonggang, Su Hanping

(School of Aeronautics Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The aerodynamic characteristics analysis of flapping-wing is of great significance to the design, manufacturing and control of the aircraft. In this paper, a simple motion model of multiple-Degrees-of-Freedom (multi-DOF) of “swing-torsion-bending and folding” is established by analyzing the flight characteristics of bird-like flapping wing. The flapping-wing air vehicle of multi-DOF is numerically simulated in the case of unsteady flow at low Reynolds number by XFlow software. The effects of flapping wing shape, frequency and inflow on surrounding air are analyzed. The simulation results provide theory and technique supports for the flapping-wing air vehicle's research and development.

Keywords: bird-like flapping-wing air vehicle; multi-DOF; XFlow; aerodynamic characteristics; velocity contour

引言

扑翼飞行几乎是所有自然界飞行生物采用的飞行模式, 这种模式可以通过扑翼的挥拍直接产生升力和推力, 这与固定翼、旋翼飞行方式相比, 具

有机动性高、系统紧凑的优点。与自然界的鸟类飞行, 目前的仿鸟扑翼飞行器的飞行能力还很笨拙, 距离高仿还有很大距离^[1]。扑翼飞行的气动机理与传统的固定翼和旋翼飞行相比较起来要复杂得多, 人们对这一领域的认识目前还很不完善, 对扑翼飞行的气动机理研究还处于初级阶段。气动特性研究是整个扑翼飞行器设计环节中关键的一环, 随着计算流体力学(CFD)的发展, 大大加快气动特性的探究发展。传统仿鸟扑翼飞行器数值研究多采用单自由度仿真模型, 仿真分析鸟类飞行中的上下扑动和



收稿日期: 2016-07-21 修回日期: 2016-08-29;
基金项目: 中央高校基本科研业务费(3122013c010);
作者简介: 杨永刚(1978-), 男, 吉林四平, 博士, 副教授, 研究方向为仿生扑翼机器人技术; 苏汉平(1989-), 男, 湖北黄冈, 硕士, 研究方向为扑翼飞行器设计与气动特性分析。

<http://www.china-simulation.com>

• 2162 •

翼面绕展向扭转过程,而对三维多自由度运动耦合的仿鸟扑翼飞行器研究更少。

西北工业大学王利光团队^[2-3]改进扑动式柔性扑翼模型,开展了柔性扑翼变形与气动特性相关的研究。陈亮^[4]利用改进叶素理论对仿鸟扑翼机器人的空气动力学问题进行了研究,发现升力由扑翼内、外翼段共同产生。陈利丽等^[5]对聚酯薄膜柔性扑翼模型耦合特性研究,并研究了惯性力和关键运动参数对柔性扑翼气动及结构特性的影响规律。Wei S 等^[6]利用建立挥拍-扭转模型,发现翼尖涡在翼尖区域构建低压涡旋,通过延迟或防止翼尖涡脱落可以提高升力。

文中分析鸟类飞行特点,建立三维仿鸟模型并构造简易“挥拍-扭转-弯曲折叠”多自由度扑翼运动规律,高度仿真鸟类飞行过程,利用 XFlow 软件在低雷诺数非定常流场情况下对多自由度扑翼飞行器进行三维数值仿真模拟,求解在扑翼扑动作用下的周围绕流空气的流场特性,分析飞行器扑翼截面形状、扑动频率和来流速度对机身流场的影响,以此来指导扑翼飞行器的研制和改进并提供必要的理论和技术支持。

1 仿鸟扑翼飞行器仿真模型

1.1 鸟类扑翼飞行特点

南京航空航天大学曾锐^[7]通过对绿头鸭飞行研究发现,鸟类在平飞过程(不包括起飞、滑翔)可以分为 4 个阶段:

(1) 下扑阶段:鸟翼从最高点开始下扑至最低阶段,翅膀基本保持展开状态。

(2) 折叠阶段:在最低点扑翼短暂停顿,外扑翼向内弯曲折叠,形状如拱形,有效翼展长减小。

(3) 抬升阶段:折叠完成后,翅膀保持原有的拱形,从最低点开始上扑至最高点。

(4) 展平阶段:在最高点,翅膀迅速展平,持续时间很短,然后重复开始第一阶段。

鸟翼在扑动过程时,自身具有一定的仰角以及

各翼剖面间还存在扭转变形。其中,翼面绕鸟身旋转暂不考虑。尽管各种不同体型鸟类扑翼动作不一而同,但在鸟类正常水平平飞时,其扑翼的动作基本可以分为下扑和抬升两个阶段。下扑阶段是扑翼运动的主要阶段,这时,羽翼间的间隙关闭和羽翼展开增大了下扑鸟翼的受力面积,提高了下扑时的正升力;抬升阶段是为了使双翼回到最高点开始下一阶段的扑动,在扑翼抬升过程中,鸟的羽翼间的间隙可以使空气自由穿过,减小扑翼上扑的负升力;扑翼翼面弯曲折叠,如此减小负升力和空气阻力,增大了扑动周期里的平均升力。

1.2 扑翼运动模型

传统三维仿鸟扑翼飞行器气动特性仿真中存在的难点,如复杂曲面的模型,大量的网格,计算时间长等问题,因此仿真模型基本参考家鸽的外形,简化飞行器头部、尾部和扑翼羽毛特征,设计一种如图 1 所示的模型。该仿真模型包括鸟身(包括喙和尾翼)、外扑翼和外扑翼。整个飞行器机身采用光滑流线曲面设计,扑翼截面采用“上凸下凹”造型。鸟身长 720 mm,翼展长 1 280 mm,其中单个内翼长约 170 mm,外翼长约 400 mm,弦长 240 mm。

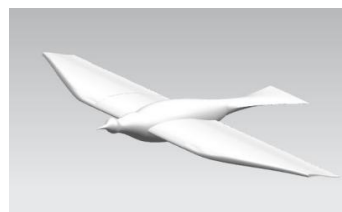


图 1 仿鸟扑翼飞行器仿真模型
Fig. 1 Simulation model of bird-like flapping-wing air vehicle

要使数值结果能反映真实的流场情况,首先重要的一步是设定合适的和真实扑翼相符的运动规律。根据对鸟类扑翼飞行基本的分析,可将扑翼飞行的及其复杂的运动方式可分解为:上下扑动、绕翼展方向的扭转、内外翼的弯曲折叠。文中仿鸟扑翼运动参数模型如图 2 所示,其中图 2(a)为扑翼的扑动与弯曲折叠的运动合成,内翼挥拍角度变化用

φ 表示, 外翼相对内翼的弯曲折叠角用 β 表示; 图 2(b) 为扑翼在挥拍过程中的扭转角度的变化, 扑翼扭转角度变化用 α 表示。

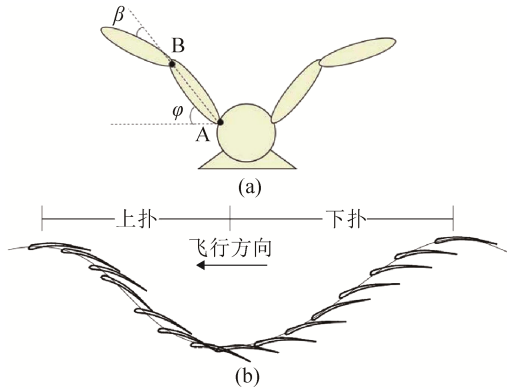


图2 仿鸟扑翼参数模型
Fig. 2 Parameter model of bird-like flapping-wing

根据文献[8]中指出扑翼在扑动周期内扑翼的扭转角和弯曲折叠角一样呈近似正弦或余弦规律, 提出仿鸟扑翼近似正弦扑动模型, 得到如下:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 \sin(2\pi ft + \phi_\alpha) + \alpha_1 \\ \beta = \beta_0 \sin(2\pi ft + \phi_\beta) + \beta_1 \end{cases}$$

其中: f 为扑翼扑动的频率, 通过调整初始值, 满足扑动过程中扭转、弯曲折叠变化。已有实验结果表明, 弦向扭转运动与展向扑动运动相差 90° 相位^[9]。上述的扑动参数可以根据扑翼飞行器的驱动机构和飞行参数来设定。

2 仿真方案设置

为了达到研究扑翼截面、扑动频率和来流速度对机身流场及对气动力的影响, 本文对两种不同扑翼截面形状、5 组不同扑动频率及 6 组不同来流速度分别对多自由度扑翼模型进行三维数值分析。其中扑翼截面形状分别采用“上凸下凹”翼型和等弦长的平板。根据一般中型鸟类飞行扑动频率在 2 Hz 左右, 模拟扑翼扑动频率具体为 1 Hz、1.5 Hz、2 Hz、2.5 Hz、3 Hz, 来流速度具体取值为 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s、5 m/s、6 m/s。

将仿鸟多自由度扑翼飞行器仿真模型导入 XFlow 软件, 在飞行器飞行方向 X 轴方向设置相

应风速, 即来流流速 V_x 。仿真模型导入后, 通过模型位置模块输入相应的位置方程和角度运动方程, 实现扑翼的“挥拍-扭转-弯曲折叠”运动; 通过虚拟风洞参数设定模块, 来改变来流流速的大小。

确定计算域及边界, 选取计算域类型为虚拟风洞, 虚拟风洞的计算域参数的设定需要满足一些条件: 计算域设定过大, 仿真实验精度和完成效率对计算机的硬件有要求较高。因此, 本次计算域设定为 X 轴 6 倍方向展身长, 机头 2.5 倍机身长; Y 轴方向 5 倍机身高度, X 轴方向 4 倍扑翼正投影长度。数值仿真湍流模型选用壁面自适应局部涡粘性模型, 提供一个统一的局部涡粘性及近壁面行为。在进口边界条件设定流体为空气, 以及其温度 $T=288.15$ K、动力粘度系数 $\nu=10^{-4}$ ps·s、流体密度 $\rho=1.25$ kg/m³、来流流速 V_x 。出口边界条件设置压力边界相对压力值为 0 pa, 模型表面各方向速度滑移 0 m/s。

3 数值仿真及结果分析

3.1 截面形状对扑翼气动特性的影响

南京航空航天大学朱保利在研究扑翼飞行器如何提高向上升力时提到, 可采取改变翼面截面形状, 上翼面做成弧形, 下翼面为平面或内凹, 可增大下扑时翼型升力, 减小上扑阶段的负升力^[7]。本文为了探讨扑翼截面对气动特性的影响, 采用“上凸下凹”翼型和等投影面积、等翼展长和等参考面积平板两种不同截面形状。输入扑翼的挥拍运动和扭转方程, 设定扑翼的内外翼弯曲折叠一致, 设定扑翼的扑动频率为 1 Hz, 来流流速设定为 4 m/s, 仿真时间设定 2 s。

截面形状“上凸下凹”翼型 (Airfoil) 和平板 (Plate) 的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 如图 3 所示。根据图 3 扑翼截面“上凸下凹”翼型和平板的升力系数和阻力系数发现, 采用“上凸下凹”翼型能有效的提高扑翼扑动周期的升力系数和平均升力系数, 增大下扑阶段的升力, 减少了扑翼抬升阶段产生的负升力, 与此同时, 扑翼截面“上凸下凹”翼型较平

板截面能有效较小扑动周期的阻力, 上凸下凹”翼型的平均阻力系数更低。

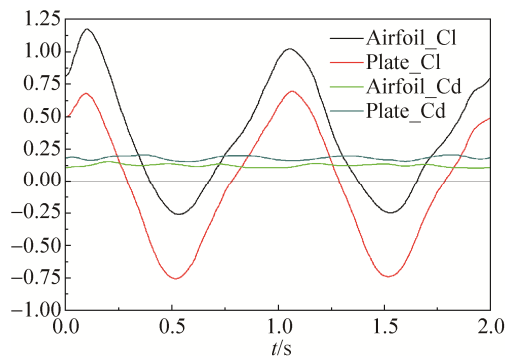
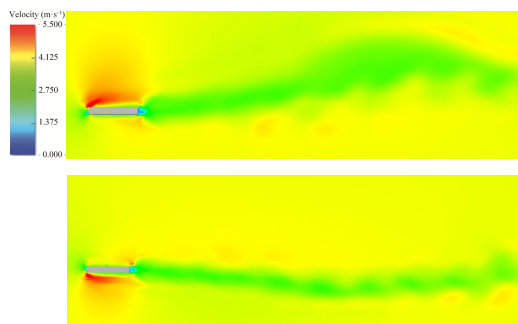
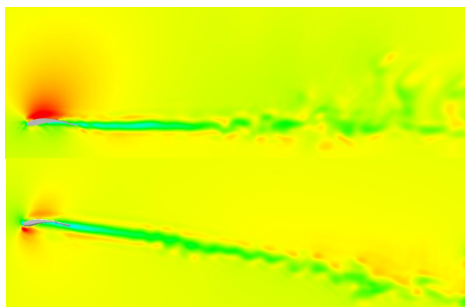


图3 不同截面下升力系数和阻力系数变化曲线
Fig.3 Curve of lift coefficient and drag coefficient at different section



(a) 平板截面(上: 下扑阶段; 下: 抬升阶段)



(b) “上凸下凹”翼型(上: 下扑阶段; 下: 抬升阶段)

图4 不同截面扑翼弦向速度云图
Fig. 4 Velocity contours in different section

对比图4中不同截面(平板和翼型)扑翼弦向的速度云图可知, 在扑翼下扑阶段两种截面在上表面前缘产生强烈的漩涡, 采用“上凸下凹”翼型截面能有效阻止下扑阶段扑翼上表面前缘涡的附着和延迟漩涡的脱落, 从而可以有效提高下扑阶段的升力^[10]。抬升阶段在扑翼下表面同样形成前缘涡,

其大小和强度明显小于下扑阶段, 但采用“上凸下凹”翼型截面上下表面的速度差要小于平板截面, 故上下翼面的压差也小了很多, 有效的减小抬升阶段扑翼产生的负升力。

3.2 扑动频率对扑翼气动特性的影响

扑翼飞行器升力的提供是靠扑翼的上下挥拍, 扑动频率对扑翼飞行器的升、阻力具有重要影响。在来流速度为 4 m/s, 研究扑动频率为 1 Hz、1.5 Hz、2 Hz、2.5 Hz、3 Hz 下的升阻力变化, 其余扑翼运动参数保持不变。在仿真时间 2 s 内, 升力系数和阻力系数变化如图 5。

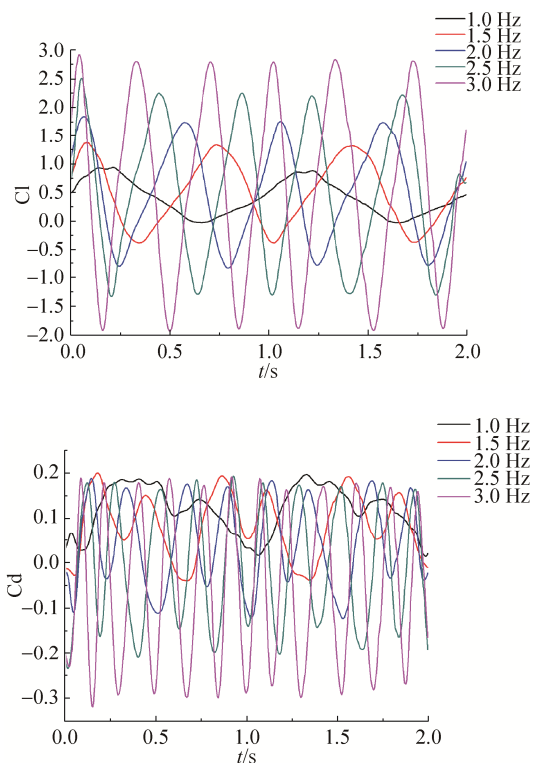


图5 不同频率下扑翼升力系数和阻力系数
Fig. 5 Curve of lift coefficient and drag coefficient at different frequency

从图5中可以看到在不同的频率下, 扑翼的升力系数和阻力系数呈周期变化。增加扑翼的扑动频率, 升力系数的波峰值呈线性变大、波谷值减小, 即下扑阶段的正升力增大, 抬升阶段负升力也同时增大。提高扑翼的扑动频率对下扑阶段的阻力影响较小, 反映在阻力系数曲线变化就是下扑阶段的波

峰值变化不大,而在抬升阶段阻力系数变化较大,负阻力系数随频率的增大而增大,即推力产生主要在抬升阶段。平均升力系数和平均阻力系数随扑动频率的变化如表1所示。

表1 不同扑动频率下平均升力系数和平均阻力系数对比
Tab. 1 Average of lift coefficient and drag coefficient at different frequency

扑动频率	平均升力系数	平均阻力系数
1 Hz	0.428 30	0.114 37
1.5 Hz	0.480 57	0.085 09
2 Hz	0.513 33	0.043 07
2.5 Hz	0.521 39	0.003 51
3 Hz	0.569 37	-0.055 71

可以观察到,扑翼的平均升力系数随扑动频率的增加而增大,平均阻力系数随扑动频率增加而减小至负平均阻力系数(即平均推力系数),且平均升力系数增大趋势没平均阻力系数变化明显,说明通过增加扑翼的扑动频率更容易获得较大的升力和推力。在扑动频率在2.5 Hz左右开始,扑翼在飞行方向显示推力,且随着频率增加呈增大趋势,且增大幅度越来越大。

3.3 空气来流速度对扑翼气动特性的影响

扑翼飞行器在实际飞行过程中周围流体的速度是不断变化的,在不同流体流速下机身所受到的升阻力是不同的。本节是研究流体流速对仿鸟多自由度扑翼飞行器气动特性影响,计算来流速度为1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s、5 m/s、6 m/s情况下,其他参数保持相同。在仿真时间2 s内,下扑阶段(左)和抬升阶段(右)展向速度云图变化如图6(来流速度依次向下为:1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s、5 m/s、6 m/s)。

由图6不同来流速度下扑翼展向的速度云图变化可知,在扑翼下扑阶段,扑翼上表面空气的流速明显高于下表面空气流速,并且可以看到在外扑翼的上表面的绕流形成漩涡;同样,扑翼在抬升阶段,扑翼的上表面空气流速稍高于下表面空气流速,在外扑翼的下表面同样也形成漩涡,强度要小于上扑阶段涡旋,故抬升阶段产生的负升力不足以

抵消下扑时的正升力。

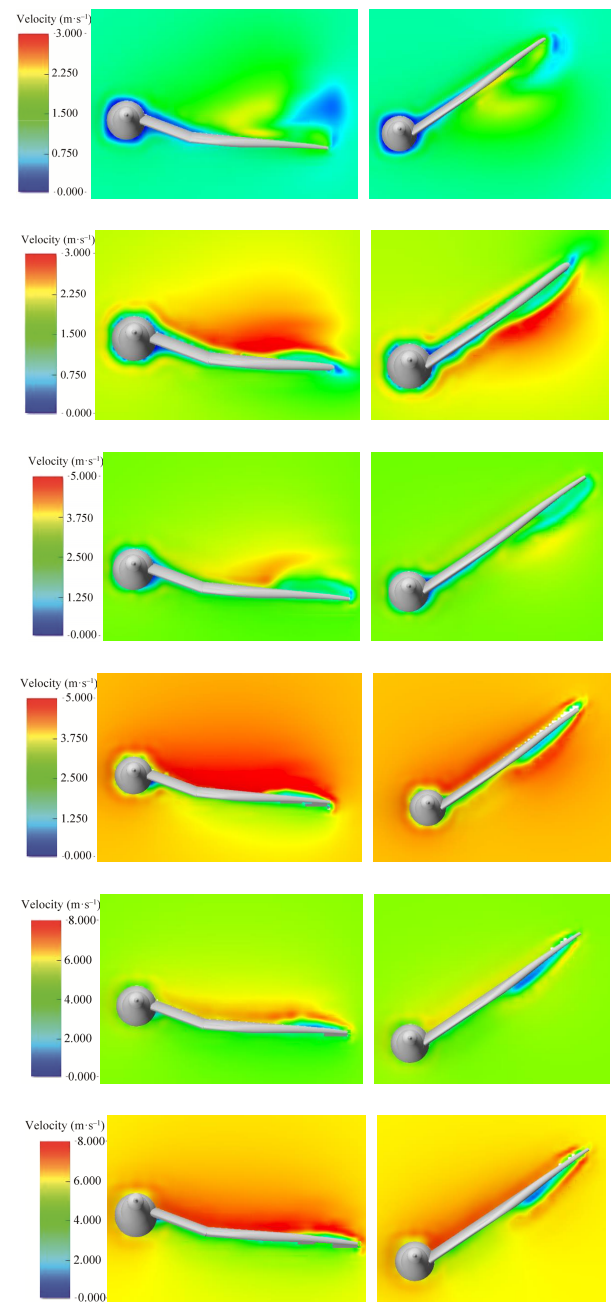


图6 不同来流速度下扑翼展向的速度云图

Fig. 6 Velocity contours of flapping-wing spread flowfield at different velocity

扑翼上下表面空气流速的差别,由Bernoulli方程可知,扑翼上表面压力小于下表面的压力,上下表面的压差就形成升力,且下扑阶段产生的升力要明显大于抬升阶段产生的升力。随着来流速度的增加,扑翼下扑阶段和抬升阶段产生的涡流也逐渐增强,扑翼的上下表面空气流速差增大,产生的升

力也逐渐增大。

根据表 2 所示不同来流速度下平均升力系数和平均阻力系数对比发现, 随着来流空气流速的增加, 扑翼的平均升力系数增大, 且增大趋势先较大后平缓; 平均阻力系数先增大后减小, 且空气流速在 3 m/s 时平均阻力系数最大。

表 2 不同来流速度下平均升力系数和平均阻力系数对比
Tab. 2 Comparison of average lift coefficient, average drag coefficient at different velocity

来流速度/(m/s)	平均升力系数	平均阻力系数
1	0.237 40	0.031 7
2	0.333 48	0.118 78
3	0.407 68	0.131 02
4	0.450 81	0.126 71
5	0.477 00	0.112 03
6	0.489 90	0.093 56

根据以上分析, 我们可以就能解释中小型飞类起飞时为何要想方设法增大起飞初速度。如麻雀、鸽子等鸟类起飞时双脚都要尽力一蹬, 飞鸟采取这些措施来增大速度从而获得较大的升力。

4 结论

本文分析了鸟类的扑翼运动, 针对仿鸟扑翼飞行器的扑翼运动建立“挥拍-扭转-弯曲折叠”三维多自由度扑翼运动模型, 在计算流体力学软件 XFlow 的平台上, 从扑翼的升、阻力系数和翼面的速度云图两方面研究扑翼截面形状、扑动频率和来流速度对扑翼气动特性的影响, 得到了多自由度仿鸟扑翼飞行器气动特性方面的一些规律。研究结果表明, 采用“上凸下凹”翼型截面能有效提高扑翼下扑阶段升力和减小抬升阶段产生的负升力, 通过增加扑翼的扑动频率和空气来流速度, 有利于提高扑翼扑动过程中产生的升力, 这之前利用二维单自由度结果一致, 证明这种建立三维多自由度扑翼飞行器运动模型的可行性, 这一结论可以为多自由度仿鸟扑翼飞行器的设计和试飞控制提供参考。

参考文献:

- [1] 杨文青, 宋笔锋, 宋文萍, 等. 仿生微型扑翼飞行器中的空气动力学问题研究进展与挑战[J]. 实验流体力学, 2015, 29(3): 1-10.

- Yang Wenqing, Song Bifeng, Song Wenping, et al. The progress and challenges of aerodynamics in the bionic flapping-wing micro air vehicle[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(3): 1-10.
- [2] Wang L, Song B, Yang W, et al. Experimental Characterization of a Flexible Membrane Flapping-wing in Forward Flight[C]// ICAS2014. St. Petersburg. Russia, 2014.
- [3] Yang W, Song B, Song W, et al. Aerodynamic Research of Flexible Flapping Wing by Combining DIC and CFD Approaches[C]// ICAS2014. St. Petersburg. Russia, 2014.
- [4] 陈亮, 管贻生, 张宪民. 仿鸟扑翼机器人气动力建模与分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 53-57.
- Chen Liang, Guan Yisheng, Zhang Xianmin. Aerodynamic Modeling and Analysis of Biomimetic Flapping-Wing Robot[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(6): 53-57.
- [5] 陈利丽, 宋笔锋, 宋文萍, 等. 柔性扑翼气动结构耦合特性数值研究[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(1): 125-133.
- Chen Lili, Song Bifeng, Song Wenping, et al. Numerical aerodynamic-structural coupling research for flexible flapping wing[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(1): 125-133.
- [6] Wei S, Trizila P, Kang C K, et al. Can Tip Vortices Enhance Lift of a Flapping Wing[J]. Aiaa Journal (S0001-1452), 2009, 47(2): 289-293.
- [7] 曾锐, 昂海松. 仿鸟复合振动的扑翼气动分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(1): 6-12.
- Zeng Rui, Ang Haisong. Aerodynamic Computation of Flapping-Wing Simulating Bird Wings[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, 35(1): 6-12.
- [8] 肖天航, 段文博, 昂海松. 仿鸟柔性扑翼气动特性与能耗的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(6): 709-718.
- Xiao Tianhang, Duan Wenbo, Ang Haisong. Numerical investigation on aerodynamics and power requirement of a bird-like flexible flapping wing[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(6): 709-718.
- [9] Heathcote S, Gursul I. Flexible Flapping Airfoil Propulsion at Low Reynolds Numbers[J]. Aiaa Journal (S0001-1452), 2007, 45(5): 1066-1079.
- [10] 张钰, 吕鹏, 张俭, 等. 基于三路舵机驱动的扑翼飞行模型气动特性研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3): 281-287.
- Zhang Yu, Lv Peng, Zhang Jian, et al. On the Aerodynamic Performance of Flapping Wing Model Based on Three Steering Gears[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3): 281-287.