

1-3-2019

Numerical Simulation Analysis of the Effects of Flight Angle and Bend-fold on Bird-like Flapping-wing Air Vehicle

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;

Xindong Gu

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

Yanqing Chen

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 Paper 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.

Numerical Simulation Analysis of the Effects of Flight Angle and Bend-fold on Bird-like Flapping-wing Air Vehicle

Abstract

Abstract: Aiming at the multi-parameter coupling problems of flapping-wing flight of birds, a 3D model of bird-like flapping-wing air vehicle (FAV) is established based on overall dimensions of bird. A multi-degree-of-freedom motion model of "swing-torsion-bending and folding" is built. The XFlow is used to analyze the effects of flight angle and flapping-wing bending-folding. Research results show that peak values of lift coefficient and drag coefficient change with different flight angles; at the zero flight angle, minimum mean drag coefficient and maximum lift-drag ratio will be achieved and avail to level flight. Caused by the bending-folding effect, violent vortex and negative pressure are produced on the upper surface of outer wings, which will improve lift-drag ratio and impact drag coefficient less.

Keywords

bird-like flapping-wing air vehicle, flight angle, bending-folding, XFlow, aerodynamic characteristics analysis

Recommended Citation

Yang Yonggang, Su Hanping, Gu Xindong, Chen Yanqing. Numerical Simulation Analysis of the Effects of Flight Angle and Bend-fold on Bird-like Flapping-wing Air Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1781-1786.

飞行角度及弯曲折叠对仿鸟扑翼飞行器影响分析

杨永刚, 苏汉平, 顾新冬, 陈燕青

(中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 针对鸟类扑翼飞行运动多参数耦合影响, 参照鸟外形尺寸构建仿鸟扑翼飞行器的三维模型, 建立扑翼“挥拍-扭转-弯曲折叠”多自由度运动模型, 以计算流体力学仿真软件 XFlow 为平台, 分别对机身飞行角度和扑翼弯曲折叠角两方面进行仿真分析。结果表明: 机身在不同飞行角度的情况下, 产生的升力系数和阻力系数的峰值不同; 飞行角度 0° 时平均阻力系数最小, 平均升阻比系数最大, 更有利于扑翼飞行器平飞飞行; 扑翼在弯曲折叠作用下, 外扑翼上表面形成剧烈涡流和负压, 有利于提高升力系数, 对阻力系数影响较小。

关键词: 仿鸟扑翼飞行器; 飞行角度; 扑翼弯曲折叠; XFlow; 气动特性分析

中图分类号: V224

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1781-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805020

Numerical Simulation Analysis of the Effects of Flight Angle and Bend-fold on Bird-like Flapping-wing Air Vehicle

Yang Yonggang, Su Hanping, Gu Xindong, Chen Yanqing

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

Abstract: Aiming at the multi-parameter coupling problems of flapping-wing flight of birds, a 3D model of bird-like flapping-wing air vehicle (FAV) is established based on overall dimensions of bird. A multi-degree-of-freedom motion model of “swing-torsion-bending and folding” is built. The XFlow is used to analyze the effects of flight angle and flapping-wing bending-folding. Research results show that peak values of lift coefficient and drag coefficient change with different flight angles; at the zero flight angle, minimum mean drag coefficient and maximum lift-drag ratio will be achieved and avail to level flight. Caused by the bending-folding effect, violent vortex and negative pressure are produced on the upper surface of outer wings, which will improve lift-drag ratio and impact drag coefficient less.

Keywords: bird-like flapping-wing air vehicle; flight angle; bending-folding; XFlow; aerodynamic characteristics analysis

引言

仿鸟扑翼飞行器与传统固定翼、旋翼飞行器



收稿日期: 2016-06-14 修回日期: 2016-07-29;
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, 硕士生, 研究方向为扑翼飞行器设计与气动特性分析。

相比, 具有机动效率高、系统紧凑等特点。扑翼飞行方式独特, 自然界飞行生物无一例外都采用这种方式飞行, 因此引起各国专家学者的广泛关注。传统扑翼飞行器主要倾向单自由度仿昆虫微型扑翼方向研究, 对中、大型仿鸟扑翼飞行器研究较少, 而对多自由度运动耦合的仿鸟扑翼飞行器研究更少。

非定常流体在扑翼空气动力学先前探索有大量的研究, Wei S 等^[1]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。Chang-kwon K 等^[2]通过建立仿果蝇柔性扑翼被动旋转模型,研究发现被动调整扑翼的形状可以提高升力,精简扑翼形状和灵活扑翼可以减轻尾流的干扰。魏瑞轩等^[3]在建立仿鸟扑翼飞行器柔性翼模型的基础上,用修正的准定常气动力计算模型估算出了翅膀扑动产生的高升力。赵钟等^[4]对三维单段翼/两段翼形式的鸟类扑翼挥拍进行了初步的数值模拟,初步探讨了鸟类飞行过程中对升力的影响因素。朱霖霖等^[5]研究了三维机器鸟翅膀的旋转幅度和旋转时间对飞行的状态影响。

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”多自由度耦合扑翼运动模型,根据计算流体力学基本思想运用 XFlow 软件对仿鸟扑翼飞行器飞行过程进行气动数值模拟,分析机身俯仰、扑翼弯曲折叠过程对气动特性的影响,以此来指导扑翼飞行器的研制与试飞。

1 仿鸟扑翼建模

1.1 鸟类扑翼飞行特点

要设计仿鸟扑翼飞行器,我们就不可避免对鸟的飞行方式进行分析,文献[6]中以绿头鸭为研究对象,将鸟扑翼运动分为4个阶段,其中鸟的下扑和抬升是整个周期主要阶段。本文综合普通鸟类在平飞过程(不包括起飞、滑翔)特点,将扑翼运动主要分为2个阶段:

(1) 下扑阶段:鸟翼从最高点开始下扑,扑翼基本保持展开状态,外翼有小幅度的弯曲折叠,其后外翼的折叠幅度继续增大,如图1中 a-f。

(2) 抬升阶段:弯曲折叠完成后,翅膀保持原有的拱形,从最低点开始上扑,在最高点处有小幅度的折叠,然后重复第一阶段,如图1中 g-l。

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。

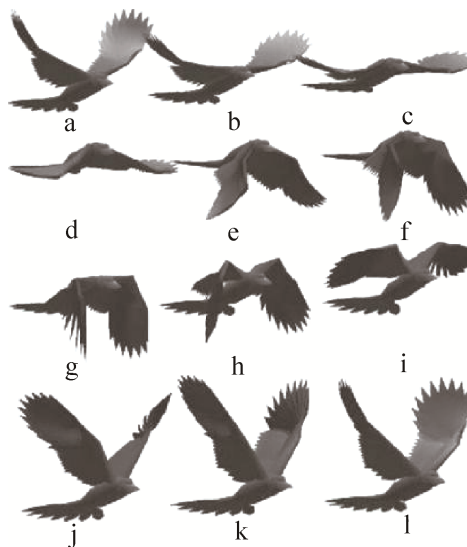


图1 鸟类扑翼飞行一个周期的分解图^[7]

Fig. 1 A periodic decomposition of bird flapping flight^[7]

1.2 扑翼运动模型

扑翼运动模型基本参考家鸽的外形,简化飞行器头、尾部和扑翼羽毛特征,设计一种如图2所示的模型。该运动模型包括鸟身(包括喙和尾部)、外翼和外翼。鸟身长720 mm,翼展长1280 mm,其中单个内翼长约170 mm,外翼长约400 mm,弦长240 mm。扑翼翼型采用上表面弧形、下表面内凹型以增加下扑阶段的升力和减小上扑阶段的负升力^[8],机身采用流线曲面以减小飞行阻力。

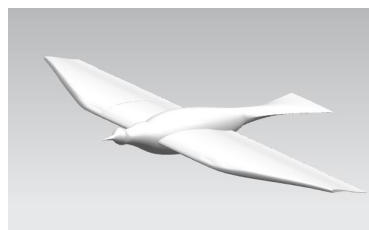


图2 仿鸟扑翼飞行器仿真三维模型

Fig. 2 3D model of bird flapping wing aircraft

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、内外翼的弯曲折叠以及鸟身的俯仰,如图3所示扑翼运动参数模型,其中图3(a)为扑动与弯曲折叠的合成,内翼扑动变化用 φ 表示,外翼相对内翼的弯曲折叠用 β 表示;图3(b)

为扑翼的扭转, 扑翼攻角变化用 α 表示。根据文献[9]中提出扑翼在扑动周期内攻角和折叠角变化的近似正弦扑动模型, 得到如下:

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

式中: 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。

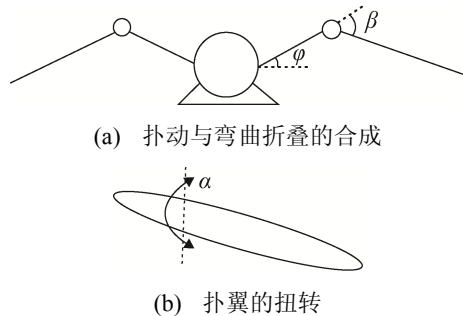


图 3 仿鸟扑翼运动模型

Fig. 3 Motion model of bird-like flapping wing

根据给定扑翼驱动机构设计参数: 扑翼扑动幅值 60° , 上扑扑动幅值 32° 条件下, 优化设计仿鸟驱动机构各杆杆长并导出扑翼扑动参数方程, 如图 4 设计扑动曲线所示。为保证扑翼在扑动过程中同步伴随着扑翼扭转和内外翼的弯曲折叠现象, 扑动参数幅值 ϕ 的运动函数用同频率正弦函数进行近似拟合。

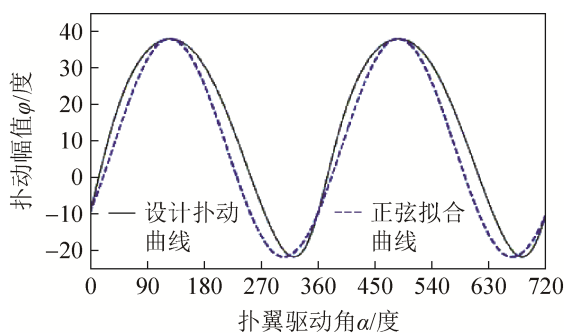


图 4 扑翼扑动拟合曲线

Fig. 4 Flapping fitting curve

2 仿真试验设置

为了达到气动特性仿真实验高效率、快速的预期目标, 文中采用正交实验设计方法, 挑出 6 组有

代表性的点进行仿真试验, 其中机身飞行仰角分别为 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° , 扑翼弯曲折叠最大角的取值分别为 0° 、 6° 、 12° 、 18° 、 24° 、 30° 。

在 UG NX 软件平台建立仿鸟扑翼飞行器的三维模型并保存成 stp 格式, 然后导入到 XFlow 软件中进行气动特性仿真分析。XFlow 作为新一代基于格子 Boltzmann 方法的 CFD 软件, 具有易于使用、边界条件处理方便, 不需要对流体区域划分网格, 同时表面复杂性不再是一种限制因素。

在 XFlow 软件平台上, 选定扑翼飞行器飞行方向 X 轴设置稳态风速且大小恒定 V_x , 机身飞行中轴线与 X 轴方向夹角为飞行器机身飞行仰角 δ , 扑翼外翼相对于内翼弯曲折叠最大角为 β 。

鉴于以往的风洞试验和其他验证模型仿真测试, 在 XFlow 软件平台选择虚拟风洞模式, 模拟自由空气流动。XFlow 软件仿真中无风洞墙面和模型支撑系统对来流流体的干扰, 无需对结果数据校正。

在选择仿真计算区域应考虑风洞的阻塞问题, 风洞阻塞比低于 2% 时阻塞干扰产生的误差影响才不需要校正^[10]。风洞阻塞比 δ 指实验模型在实验风道截面上的投影面积与风道截面积之比, 表达式为: $\delta = S_n/S$, 其中: δ 表示风洞阻塞比, S_n 为扑翼飞行器 X 轴方向的正投影面积, S 为风洞 X 轴方向喷口面积投影面积。根据仿真模型大小(由于飞行器左右对称, 取左侧扑翼和机身做仿真对象), 扑翼仿真模型在 X 轴方向的正投影面积为 0.1338 m^2 , 选择计算域为 $4 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的风洞, 此时风洞阻塞比 δ 为 1.78%, 计算域的边界条件如表 1 所示。

表 1 风洞计算域边界条件

Tab. 1 Boundary condition of wind tunnel

边界名称	边界条件	说明
流体	空气	温度 $T=288.15 \text{ K}$ 动力粘度系数 $\nu=10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
入口	速度边界	$V_x=4 \text{ m/s}$
出口	压力边界	相对压力值 0 Pa
模型表面	壁面边界	各方向速度滑移 0 m/s

3 气动特性结果分析

3.1 飞行角度变化的影响

在仿真试验中给定入口速度值,在 XFlow 软件位置模块中,选择机身角度变化对应的 Z 轴,分别给定机身角度为 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° ,其中内外扑翼的最大弯曲折叠角不变。设定外扑翼为内扑翼的父子关系,在外扑翼的位置模块设定弯曲折叠方程,对内扑翼输入扑动方程和扭转方程。设置扑翼的扑动频率为 1 Hz、仿真时间周期为 2 s、帧频为 30 Hz,总的帧数为 60。一般采用无量纲数升力系数 Cl 及阻力系数 Cd 衡量升力和阻力^[11],扑翼飞行器整机的升力系数和阻力系数如图 5。

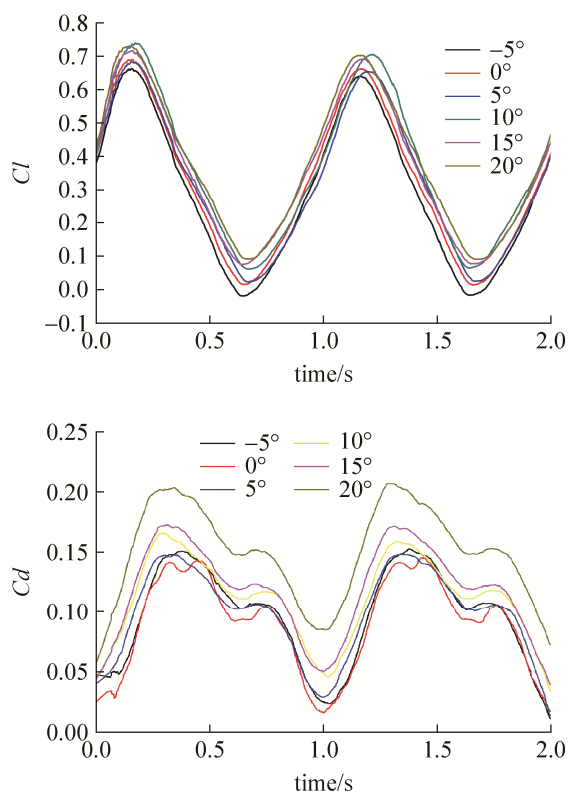


图 5 不同飞行角度下升力系数和阻力系数曲线
Fig. 5 Curve of lift coefficient and drag coefficient at different flight angles

由图 5 中升力曲线得出,随着机身角度的增大,整机的升力系数基本整体向上平移,各峰值顶点增加幅度不大。验证了翼型采用上表面弧形、下表面内凹和扑翼采用折叠翼可以增加上扑阶段的

升力,减小上扑阶段的负升力。同时,也证明了扑翼下扑是产生扑翼飞行所需升力的主要阶段^[12]。阻力系数是随着机身仰角的增大先减小后增大,当机身角度为 0° 时整机的阻力系数最小,下扑阶段产生较大的阻力。

平均升力系数 \overline{Cl} 、平均阻力 \overline{Cd} 系数和平均升阻力系数对比,如表 2 所示。可以看到,当机身飞行角度增大时,平均升力系数逐渐增大,平均阻力系数增大先减小后增大,而平均升阻系数比先增大后减小。当机身角度为 0° 时整机的平均阻力系数最小,平均升阻系数比最大。扑翼飞行器在平飞阶段机身角度为 0° ,有利于减小飞行阻力;在起飞阶段机身倾斜一定仰角,有利于提高起飞时升力。

表 2 不同飞行角度下平均升力系数、阻力系数和升阻系数对比

Tab. 2 Comparison of average lift coefficient, average drag coefficient and average ratio of lift/drag coefficient at different flight angles

飞行仰角 $/\circ$	平均升力 系数 \overline{Cl}	平均阻力 系数 \overline{Cd}	平均升阻系数比
-5	0.307 4	0.093 3	3.294 7
0	0.337 5	0.086 8	3.888 2
5	0.346 5	0.096 5	3.590 7
10	0.378 3	0.109 1	3.467 5
15	0.385 6	0.115 7	3.332 8
20	0.394 2	0.147 6	2.670 7

3.2 扑翼弯曲折叠角最大值变化的影响

对鸟类飞行特点的研究,扑翼飞行方式的弯曲折叠对气动力特性有很大的影响。在 XFlow 软件位置设计模块,分别设定扑翼位置方程,包括内外扑翼的扑动和扭转方程,通过设定外扑翼的弯曲折叠方程,弯曲折叠最大角的取值分别为 0° (即无弯曲折叠)、 6° 、 12° 、 18° 、 24° 、 30° 。在扑翼飞行器机身飞行仰角为 0° 、扑翼扑动频率为 1 Hz、仿真时间周期为 2 s、帧频为 30 Hz 条件下,扑翼飞行器的升力系数和阻力系数如图 6 所示。

从图 6 曲线趋势可以得出,翼上每一点的空气动力都是随时间和空间位置而变化的,这使得翼上

的空气动力非常复杂, 不过这种非定常效应能使升力系数的峰值明显增大。扑翼的弯曲折叠可以提高下扑阶段升力系数和升力系数幅值和减小上扑阶段升力系数。内外翼的弯曲折叠角最大角越大, 下扑升力系数幅值越高, 但平均升力系数和阻力系数变化不大。

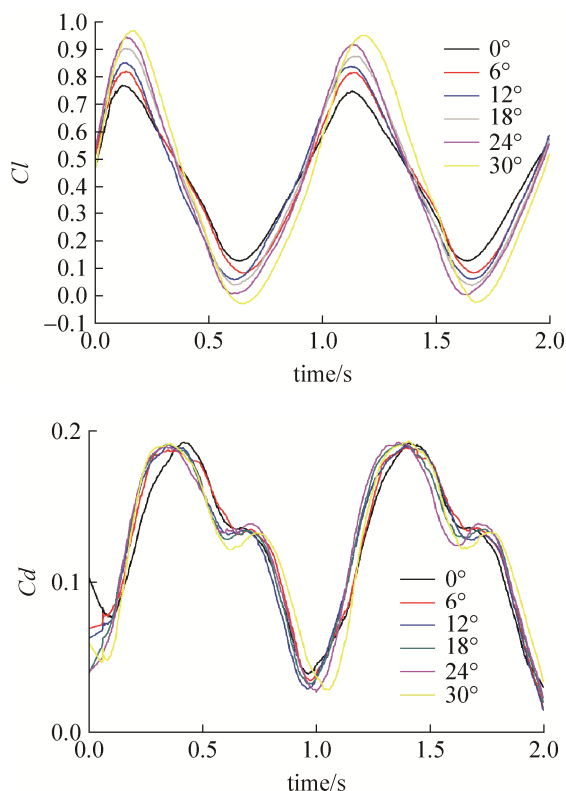


图 6 不同弯曲折叠角下升力系数和阻力系数曲线
Fig. 6 Curve of lift coefficient and drag coefficient at different bending-folding angle

图 7 所示为扑翼扑动过程展向速度云图, 可以看出: 扑翼在整个扑动过程中伴随着复杂非定常的空气流动。当扑翼在下扑到最低点时, 上表面的空气的流速大于下表面空气流速, 并且可以看到绕流在外扑翼上表面形成了漩涡, 且漩涡强度在下扑过程中逐渐增大, 由此形成的极低气压增加了巨大的升力。抬升阶段扑翼下表面的流体流速明显小于上表面, 并且下翼面在抬升过程中形成的漩涡, 并逐渐向外扑翼移动, 漩涡强度没有下扑阶段剧烈, 故而扑翼在整个扑动周期产生升力。

图 8 所示为扑翼扑动过程机身压力云图, 可以

看出: 扑翼前缘和翼梢处的压力变化越剧烈。在扑翼上扑阶段上、下翼面流体流速的差别, 造成上翼面压力小于下翼面压力, 上下翼面压力差便形成下扑阶段的升力。外翼上翼面形成负压, 有利于提高上下翼面压力差, 增大下扑阶段的升力。抬升阶段扑翼下表面形成负压, 上翼面压力大于下翼面压力, 使扑翼在抬升阶段产生负升力。

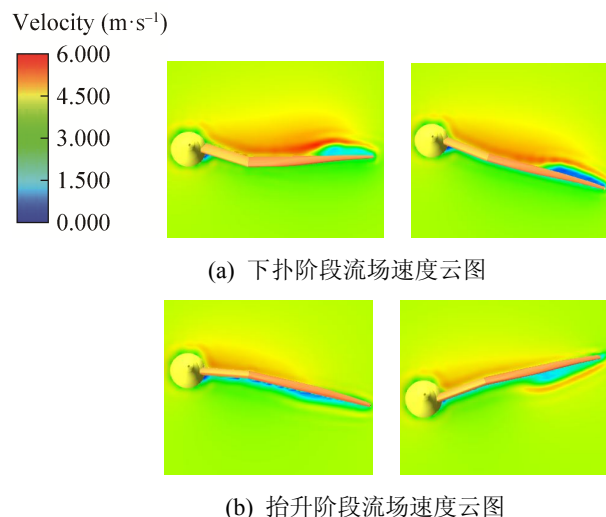


图 7 扑翼展向流场速度云图

Fig. 7 Velocity contours of flapping-wing spread flowfield

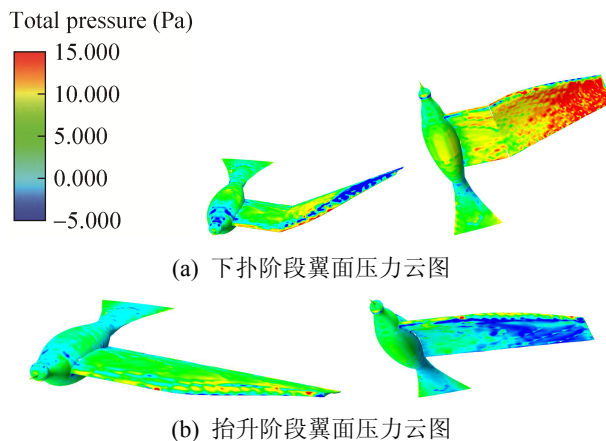


图 8 扑翼全机身压力云图

Fig. 8 Full body pressure contours of flapping-wing

4 结论

本文分析鸟类飞行特点, UG 软件平台上建立多自由度仿鸟扑翼飞行器三维模型, 从外形和飞行机理上更加接近大型鸟类。在 XFlow 平台上进行

三维可视化数值仿真模拟,并分析了飞行器机身飞行角度和扑翼的弯曲折叠对气动特性的影响,最终得出以下结论:

(1) 扑翼在整个扑动周期升力系数和阻力系数呈周期变化,扑翼下扑是产生扑翼飞行所需升力的主要阶段。

(2) 机身飞行仰角增大,可以提高整机的平均升力但同时增加飞行阻力。平飞阶段机身飞行角度为 0° 时,整机的阻力系数最小,平均升阻系数比最大,更有利于飞行器的飞行。

(3) 扑翼弯曲折叠幅度影响翼面上流体流速和机身的压力,并影响翼面上漩涡的剧烈程度。下扑时外扑翼上漩涡逐渐增强,增加上下翼面压力差,提高飞行升力,对阻力影响较小;抬升时扑翼下表面逐渐形成漩涡,并向外扑翼移动,减小了负升力。

本文研究的是三维流场中扑翼运动产生的升、阻力系数及翼面的压力、流速和涡流情况。由于扑动方程和弯曲折叠方程均采用正弦近似拟合,与实际更加复杂的扑翼的运动规律还有一定差距,还需要进行更加深入的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Chang-Kwon Kang, Wei S. Passive Wing Rotation in Flexible Flapping Wing Aerodynamics[C]// *Aiaa Applied Aerodynamics Conference*, 2012: 25-28.
- [3] 魏瑞轩, 胡明朗, 郭庆, 等. 仿鸟扑翼飞行器动力学建模[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(15): 4811-4814.
Wei Ruixuan, Hu Minglang, Guo Qing, et al. Dynamics Modeling of Bird-like Flapping Wing Air Vehicle[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(15): 4811-4814.
- [4] 赵钟, 段旭鹏, 常兴华, 等. 鸟类扑翼运动的非定常运动初步数值模拟研究[C]// *全国流体力学学术会议*. 2012.
Zhao Zhong, Duan Xupeng, Chang Xinghua, et al. Numerical Study of Simplified Wing Flapping of A Pigeon-like Model[C]// *The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics(CSTAM)*. 2012.
- [5] Linlin Zhu, Hui Guan, Chuijie Wu. Vorticity Dynamics and Control of Self-Propelled Flying of a Three-Dimensional Bird[J]. *ACTA Aerodynamica Sinica* (S0258-1825), 2016, 34(2): 204-213.
- [6] 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.
- [7] Wu J C, Popovic Z. Realistic modeling of bird flight animations[J]. *Acm Transactions on Graphics* (S0730-0301), 2003, 22(3): 888-895.
- [8] 朱保利. 多自由度扑翼微型飞行器设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Zhu Baoli. Design of Multi-DOF Flapping-Wing Micro-Air Vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [9] Vest M S, Katz J. Unsteady aerodynamic model of flapping wings[J]. *Aiaa Journal* (S0001-1452), 2012, 34(7): 1435-1440.
- [10] Altinisik A, Kutukceken E, Umur H. Experimental and Numerical Aerodynamic Analysis of a Passenger Car: Influence of the Blockage Ratio on Drag Coefficient[J]. *Journal of Fluids Engineering* (S0098-2202), 2015, 137(8): 1-14.
- [11] 刘淳. 仿蝙蝠翼微型扑翼飞行器空气动力性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
Liu Chun. Aerodynamic Performance of Flapping Wing Micro Aero Vehicle Imitating Bat Wing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [12] 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.