

竹象虫后翅结构力学和空气动力学特性

许 顺, 王鹏宇, 崔舒然, 陈晓明, 王骏冲, 付辰琦
(吉林农业大学 工程技术学院, 长春 130118)

摘 要: 为研究长足大象甲后翅结构特性和飞行过程的空气动力学特性,建立长足大象甲后翅翅脉特征曲线的数学模型,利用有限元软件对其进行均匀载荷、垂直载荷和扭转载荷 3 种不同载荷下的静态分析和模态分析。基于嵌套网格法在 Fluent 软件中模拟后翅上下扑动,分析不同扑动幅值、扭转角度和扑动频率下的后翅升力系数和阻力系数变化规律。结果表明:长足大象甲后翅翅脉分布具有良好的结构刚度和承载能力,在受到不同载荷时,位移和应力的变化较小,结构稳定性较强,并且后翅振动频率为 90.312 Hz,与同类昆虫相比,更符合微型扑翼飞行翼研发要求。此外,模拟试验表明长足大象甲后翅可以通过改变扑动幅值、扭转角度和扑动频率来提高升力和推力以实现特技飞行。

关 键 词: 竹象虫; 仿生; 气动特性; 升力系数; 阻力系数

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Structural mechanical properties and aerodynamic characteristics of hind wings of cyrtotrachelus buqueti

XU Shun, WANG Pengyu, CUI Shuran, CHEN Xiaoming,
WANG Junchong, FU Chenqi
(College of Engineering and Technology,
Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In order to study the structural characteristics of hind wing and the aerodynamic characteristics during the flight of bamboo weevil, the mathematical model was established based on the characteristic curves of the wing veins of weevil hind wings. By using finite element method, the static structural mechanical properties of hind wing under three different loads (uniform load, vertical load, and torsional load) were researched, and the modal parameters were calculated. The up-down flapping of the hind wing was simulated in Fluent based on the overlapping mesh method. Aerodynamic characteristics of the hind wing under different flapping amplitude, torsion angle and flapping frequency were analyzed. The results showed that the rib distribution of the hind wing of the bamboo weevil has good structural stiffness and carrying capacity. The displacement and stress changes were small under different loads, and the structural stability was strong. The vibration frequency of the hind wing was 90.312 Hz, which was more in line with the development requirements of the micro flapping wing compared with similar insects. In addition, the simu-

收稿日期: 2022-02-28

基金项目: 吉林农业大学科研启动基金(202021152); 吉林省科技发展计划项目(20200201294JC)

作者简介: 许顺(1988—),女,讲师,硕士生导师,博士,主要从事工程仿生学、农业机械化及其自动化研究。

通信作者: 付辰琦(1988—),男,实验师,硕士,主要从事计算流体力学。E-mail:chenqi_fu@jlau.edu.cn

引用格式: 许顺,王鹏宇,崔舒然,等. 竹象虫后翅结构力学和空气动力学特性[J]. 航空动力学报,2022,37(9):1824-1834. XU Shun, WANG Pengyu, CUI Shuran, et al. Structural mechanical properties and aerodynamic characteristics of hind wings of cyrtotrachelus buqueti[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(9): 1824-1834.

lation results indicated that the hind wing of bamboo weevil can improve the lift and thrust by changing the flutter amplitude, torsion angle and flutter frequency to achieve aerobatic flight.

Key words: bamboo weevil; bionic; aerodynamic characteristics; lift coefficient; drag coefficient

仿昆式飞行翼在微型飞行器的研制中拥有广泛前景,是目前飞行翼研究的热点。昆虫翅膀在经历大自然环境变化后,其材料特性、结构形态和飞行性能都发生进化以适应恶劣环境对其自身的影响^[1-2]。比如像瓢虫、金龟子和竹象虫等鞘翅目昆虫拥有鞘翅和后翅,后翅可以完成各种复杂飞行来应对不同的飞行环境,同时在爬行和休息时,后翅可以通过折叠收回到鞘翅下方,防止后翅受伤和便于自身隐藏^[3]。科学家在昆虫后翅的启发下,对昆虫后翅展开仿生研究^[4-5],为空间展开机构和微型飞行器的设计与研制提供了优秀的羽翼模型,例如马耀鹏根据耳夹子虫(蠓螋)后翅折叠研制了航空太阳能折叠板^[6],Wang等仿造甲虫后翅研制了可折叠飞行器等^[7-8]。事实证明对昆虫后翅进行研究能有效促进仿昆飞行器的发展。

然而,昆虫翅膀的结构复杂,飞行时躲避障碍的飞行特技及其力学特性无法监测,阻碍了对其空气动力学特性的深入研究。于是,科学家另辟蹊径,利用有限元法研究昆虫翅膀的结构特性和复杂飞行时的空气动力学。例如,Ha等通过建立双叉犀金龟甲虫后翅的有限元模型探究了其产生不对称弯曲时的力学行为和人工制作的仿生翼静动态特性^[9-10]。Li、史晓君等利用有限元方法对蜻蜓翅膀的结构稳定性和力学性能进行了深入研究^[11-15]。这些研究在一定程度上阐述了昆虫后翅整体的结构稳定性,但是他们忽略了翅脉特征和分布对后翅结构的稳定性和力学性能的影响。此外,关于昆虫后翅结构的优越性应需重复调查和对比多种昆虫。长足大象甲是竹类主要害虫,其后翅外观尺寸与蜻蜓后翅相似,比蜜蜂后翅略大,其翅脉结构分布相对于其他昆虫较为简单,扑动频率于其他昆虫相比较,外形的优势可以帮助其在研制仿生微型扑翼飞行器时更容易实现。

在关于昆虫后翅空气动力学方面的研究中,Dickinson等利用果蝇模型模拟飞行流场,并测量果蝇扑动过程中产生的气动力,说明了扑翼如何在非定常流动中产生高升力^[16]。Tay用侵入边界法模拟不同柔性翼之间的翼-翼相互作用,探究了

扑翼相互作用的空气动力学问题^[17]。Le等为了探索甲虫后翅气动性能,建立了甲虫后翅的二维和三维模型,通过比较说明了涡流的作用^[18]。Engels等利用计算流体力学研究了大黄蜂在不同湍流强度中前飞空气动力学,研究表明随着湍流强度的增加,大黄蜂提升升力的措施也显著增加,以此解释了飞行过程中的飞行不稳定性^[19]。董强等基于Fluent软件研究了蝉翅翼飞行的周围流场,结果表明扭转对其翅翼气动力影响较大^[20]。此外,有研究表明^[21]昆虫后翅的材料特性使昆虫在飞行时,后翅翅膜在空气动力学的作用下发生小幅度弯曲和扭转,提升了昆虫在复杂情况下的空气动力,以及整个虫身的稳定性。总的来看,目前对于不同昆虫翅翼的气动特性研究没有统一的非定常计算方法,而且每种昆虫的结构特征和飞行动作存在很大差距,在躲避复杂地形和面对强对流时所采取的应对措施过于复杂,需要进一步探究。

本文基于长足大象甲(*crtotrachelus bugueti* guer,以下简称竹象虫)后翅翅脉特征曲线建立三维数学模型,运用有限元法研究了模型在均匀载荷、垂直载荷和扭转载荷下的变形和应力情况,以及模型的固有频率,分析了后翅翅脉结构对后翅的结构特性影响,并利用嵌套网格法对竹象虫后翅前飞运动进行了数值模拟,之后通过改变参数分析竹象虫后翅在不同参数下的气动特性,为仿昆式飞行翼以及微型飞行器的设计提供参考依据。

1 后翅数学模型与仿真实验方法

1.1 形态学分析与数学模型

这项研究中调查了竹象虫的后翅(见图1)。本次试验的竹象虫是从中国四川省乐山市郊区抓捕。如图1(c)所示,竹象虫后翅翅脉分布有别于其他甲虫^[22],竹象虫的后翅存在2个弯曲区和1个边缘关节。前径脉和后径脉形成关节,可以发生上下移动帮助后翅完成弦向折叠。横向折叠1为后翅的远端展向折叠,折叠终端为后径脉3+4和弯曲区。横向折叠2为后翅的近端展向折叠,折

荷变形、弯矩变形和扭矩变形,后翅的翅根位置则设立固定约束。飞行过程中,后翅在扑动时在空气的压力下产生升力和推力,因此均匀载荷是竹象虫后翅在飞行时所承受的主要载荷,其数值约等于竹象虫成虫体质量^[24],4.338 g。均匀载荷施加的位置要垂直施加在仿生翼整个翅面上。均匀载荷计算如下式:

$$\begin{cases} F = mg = 4.251 \times 10^{-5} \text{ kN} \\ q = \frac{F}{2A} = 4.7657 \times 10^{-5} \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

其中 F 为飞行的最小升力载荷; m 为成质量; q 为均匀载荷; A 为后翅面积。

将垂直载荷施加到模型的翅尖位置,分析其弯矩,计算公式如下:

$$\begin{cases} F_1 = qA = 2.12 \times 10^{-5} \text{ kN} \\ M = F_1 b_0 = 0.95 \times 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{mm} \end{cases} \quad (2)$$

其中 F_1 为在翅尖施加的力; M 为产生的弯矩; b_0 为后翅展向长度。

将大小相等方向相反的力分别施加在模型的前缘和后缘形成扭转载荷。分析其扭矩,计算公式如下:

$$T = F_1 \frac{b_1}{2} = 1.59 \times 10^{-4} \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (3)$$

其中 T 为施加的扭矩; b_1 为后翅的弦向长度。

将以上条件设置好后,分别对以上3种情况进行求解,得到相应分析结果。

1.3 模态分析

完成上述后翅结构静力学分析后,利用模态分析进行后翅结构的动态分析。首先利用静力学分析中设置好的模型和材料特性,之后在模态分析板块设置后翅模型的边界条件和载荷,在传统的模态分析中,所受的有效载荷只有零位移约束,所以将固定约束施加于后翅模型的翅根位置。最后在分析设置中,将模态扩展设置为6,计算得到后翅模型的前6阶固有频率和模态振型。

1.4 后翅空气动力学分析

1.4.1 后翅模型建立

将后翅模型导入 ANSYS 中 design modeler (DM) 模块中进行后翅模型的定义和流场模型的建立。本次仿真的对象为左右翅翼对称结构,所以在对其进行流体分析时只对其中一侧进行分析。

1.4.2 划分网格

模拟扑翼运动需要网格运动来模拟扑翼扑动,在本次仿真计算中使用嵌套网格法(overset

grid method)模拟网格运动,即要在建立的后翅几何模型的基础上划分1个可以覆盖后翅几何模型的背景网格。因此,最后的流场网格要包含1个背景网格和1个后翅几何网格,通过更新该网格满足流体仿真对网格的计算要求。本模型划分好的网格如图3所示。

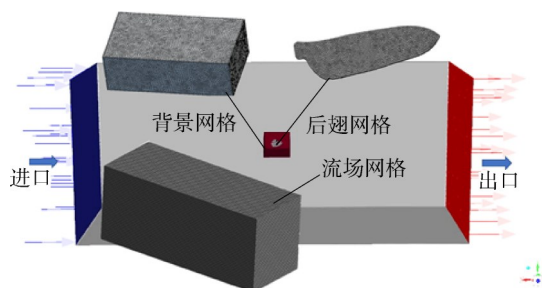


图3 流体网格
Fig.3 Fluid mesh

1.4.3 Navier-Stokes(N-S)方程与参数设置

昆虫的扑翼飞行方式与固定翼和旋翼不同,扑翼的运动既存在平动也存在转动,在进行流体仿真时可以将流场视为湍流处理^[27]。于是,模拟流场的控制方程采用 Navier-Stokes(N-S)方程,使用 re-normalization group(RNG) $k-\epsilon$ 湍流模型求解。另外,本次仿真选择基于压力的瞬态隐式分离求解器。

1.4.4 扑动方程与UDF编写

文献[28]表明,竹象虫飞行时的翅尖运动轨迹为1个类8字的扑动运动。本研究将其上下扑动简化为简谐函数,并在最高点和最低点添加后翅扭转的分段梯度函数描述竹象虫后翅扑动运动,模型如图4所示,图中以虫身建立固定的惯性坐标系 $OXYZ$,后翅建立独立坐标轴 Ox ,其 x 轴方向为后翅展向方向,后翅独立坐标轴绕 Y 轴上下扑动,绕自身 x 轴在最高点和最低点发生扭转。

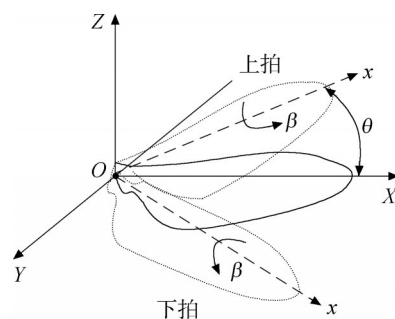


图4 后翅运动简图

Fig.4 Brief diagram of hind wing movement

最后将后翅运动的方程对时间求导,得到后翅角速度的运动方程,将坐标变换为惯性坐标,得

$$\dot{\beta}(t)=\begin{cases} 0 & 0 \leq t < \frac{3T}{16} \\ 4\pi f\beta \cos[8\pi f(t-T/8)] & \frac{3T}{16} + nT \leq t < \frac{5T}{16} + nT \\ 0 & \frac{5T}{16} + nT \leq t < \frac{11T}{16} + nT \\ 4\pi f\beta \cos[8\pi f(t-T/2)] & \frac{11T}{16} + nT \leq t < \frac{13T}{16} + nT \\ 0 & \frac{13T}{16} + nT \leq t < \frac{19T}{16} + nT \end{cases} \quad (5)$$

式中 β 为扭转角度, t 为时间, f 为扑动频率, T 为扑动周期, θ 为扑动幅值。

最后,通过坐标系转换得到后翅绕固定坐标系的角速度表达式:

$$\begin{cases} O(X)=\beta'(t)\cos\theta \\ O(Y)=\dot{\theta}(t) \\ O(Z)=\beta'(t)\sin\theta \end{cases} \quad (6)$$

文献[29]表明,甲虫后翅扑动幅值为 120° ,频率为 40 Hz ,扭转角度为 15° ,甲虫的飞行速度为 1.5 m/s ,取 1.5 m/s 为前飞速度,方向水平。将这些参数代入上述的运动方程,并在C语言环境中编写后翅模型的线速度和角速度运动程序,该程序主要调用了Fluent软件中用于实体运动的宏DEFINE_CG_MOTION。之后将编写的程序使用UDF进行编译和加载,结合运动网格实现后翅模型的运动。

1.4.5 后翅运动的升、阻力计算

后翅在扑动过程中会产生升力 F_{lift} 和阻力 F_{drag} ,本文将垂直于来流方向的 Z 轴分力设置为升力 F_{lift} ,平行于来流方向的 Y 轴分力设置为阻力 F_{drag} ,其中阻力与飞行的推力大小相等,方向相反^[20]。对于不同状况下的升力和阻力一般使用更为准确的无量纲数升力系数 C_{lift} 与阻力系数 C_{drag} 来进行比较^[29]。同理,推力系数与阻力系数大小相同,方向相反。升力系数 C_{lift} 和阻力系数 C_{drag} 与升力和阻力的关系公式^[30]如下:

$$C_{\text{lift}} = \frac{F_{\text{lift}}}{0.5\rho V^2 S} \quad (7)$$

$$C_{\text{drag}} = \frac{F_{\text{drag}}}{0.5\rho V^2 S} \quad (8)$$

其中 ρ 为空气密度; V 为参考速度; S 为翅翼的面积。

为得到竹象虫后翅升、阻力系数变化规律,本

到各分坐标的角速度表达式为

$$\dot{\theta}(t) = 2\pi f\theta \cos(2\pi ft) \quad (4)$$

研究通过改变扑动幅值(60° 、 90° 、 150°)、扭转角度(30° 、 45° 、 60° 、 75°)和扑动频率(35 、 45 、 50 Hz)来探究后翅在不同扑动幅值、不同扭转角度和不同扑动频率下的气动特性。

2 结果与分析

2.1 后翅结构力学结果与分析

2.1.1 静力学结果与分析

通过静力学分析得到后翅在均匀载荷、垂直载荷和扭转载荷下的变形和压力变化图,如图5~图7所示。

从图5中可以看出,在后翅均匀施加最小升力载荷,后翅结构的最大变形量为 2.0671 mm ,最大应力为 18.071 MPa 。其中翅根位置变形非常小,前径脉变形也不明显,并且变形由翅根到翅尖逐渐变大。最大应力集中在翅根位置,其他位置较小。这是因为昆虫后翅靠近翅根的主翅脉形成的三角形区域具有良好的结构刚度^[31]。竹象虫

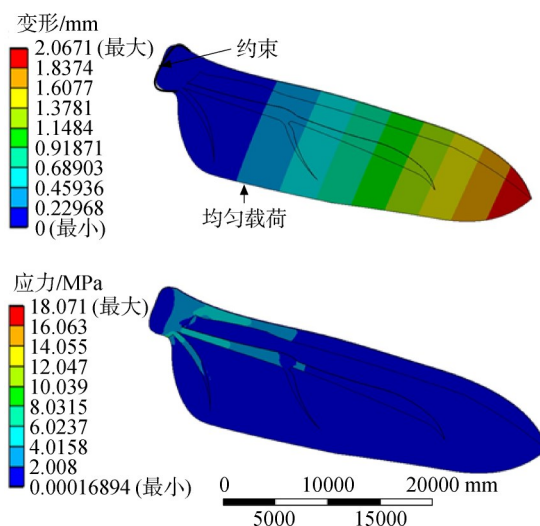


图5 均匀载荷

Fig.5 Uniform load

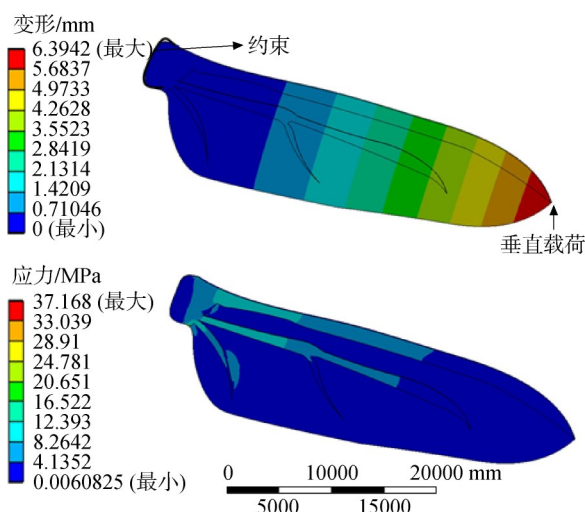


图6 垂直载荷
Fig.6 Vertical load

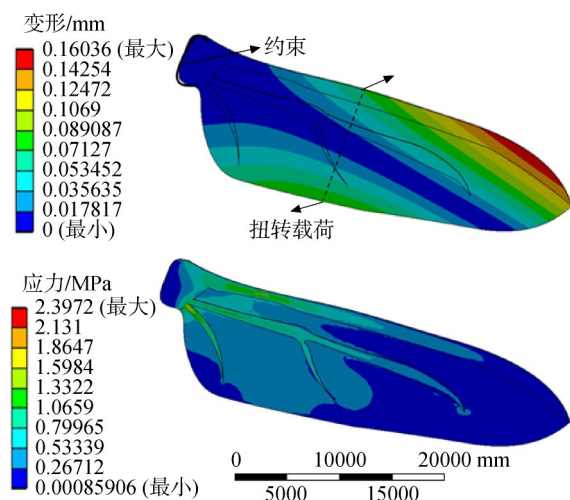


图7 扭转载荷
Fig.7 Torsion load

后翅翅脉的分布在受到均匀载荷时,翅根三角区域翅脉的变形非常小,而在此区域的应力相较于其他地区较大。

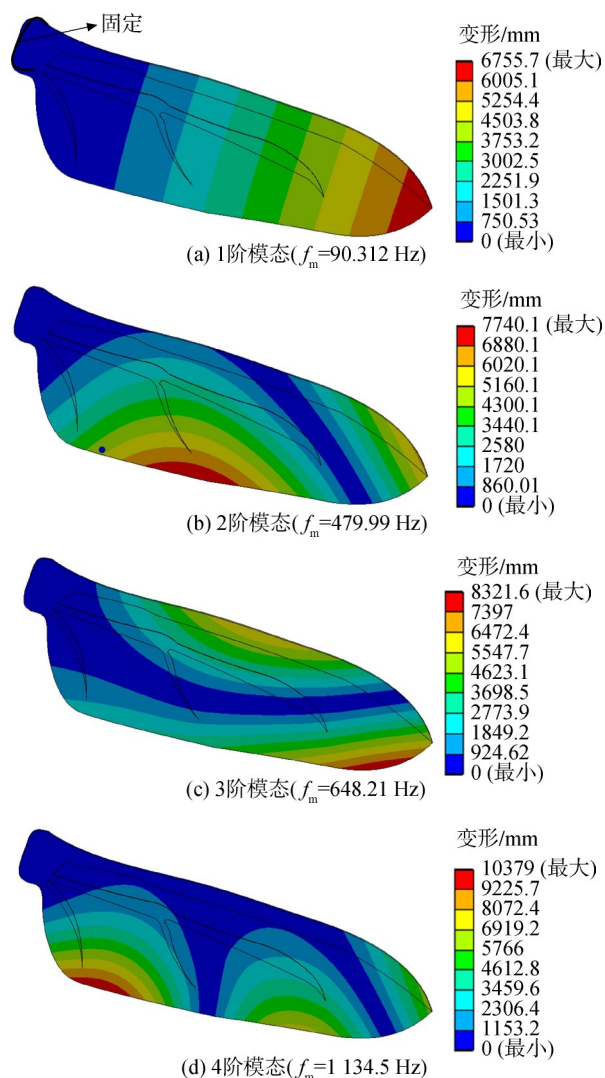
从图6中可以看出,后翅结构在受到垂直载荷的作用下产生的最大的变形为6.394 2 mm,最大应力为37.168 MPa。变形较为均匀,最大变形发生在翅尖位置。应力主要分布在前径脉、后中脉1+2和后径脉,当受到垂直载荷产生弯矩变形时,变形和应力与均匀载荷相比偏大,但变形和应力分布比较均匀,这说明应力分布扩展到分支翅脉中,即后翅翅脉在受到单独较大冲击时,载荷都会由翅脉传递到翅根,由主翅脉来承载最大受力,分支翅脉起被动运动作用。

从图7中可以看出,在前缘翅脉和后缘翅脉施加扭转载荷时,后翅结构的最大变形为

0.160 36 mm,最大应力为2.397 2 MPa。后翅的变形从弦向的中间位置向前缘翅脉和后缘翅脉逐渐减小。这说明当后翅的前缘翅脉和后缘翅脉产生扭转载荷时,翅脉的变形和应力主要集中在前缘翅脉和主翅脉。

2.1.2 模态结果与分析

模态结果如图8所示。由前6阶模态振型图可知,竹象虫后翅的振动模态有1阶弯曲变形和1阶扭转变形两种,1阶弯曲变形较为均匀,之后扭转变形主要集中在展向和弦向变形区域,竹象虫后翅生物材料的机翼1阶模态频率(f_m)为90.312 Hz,与竹象虫后翅的扑动频率(63~66) Hz接近但不同步,所以竹象虫后翅在扑动时不会与后翅材料产生共振效应。第6阶固有模态振动频率是其振动频率的数倍。模态分析的最小固有频率为90.312 Hz,一般在研制微型扑翼飞行器时,机翼设置的振动频率为20~25 Hz,竹象虫的最小固有频率与之相比扩大了4倍,由此证明,仿竹象虫后翅设计的仿生翼完全适用于微型扑翼飞行器。



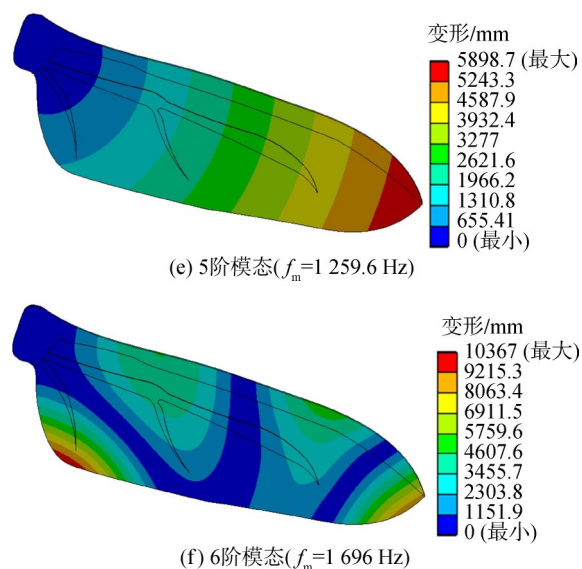


图8 后翅前6阶模态振型图

Fig.8 Figures of the first six modes of the hind wing

2.2 空气动力学结果与分析

2.2.1 结果验证

本次仿真试验所使用的仿真方法在文献[20, 32]中被证实,利用Fluent模拟三维扑翼扑动的非定常流场是可行的。此外,在非定常流场仿真中嵌套网格法在文献[33-35]中被证实是1种高效的运动方法。最后,将本次仿真结果与上述文献中的结果对比,发现符合规律。综上,可以证明本次仿真方法所得结果的正确性。

2.2.2 后翅升、阻力系数分析

竹象虫后翅扑动过程为:首先在中间位置上拍到最高点,扭转角度向下拍至中间位置后再向下拍到最低点,最后扭转角度向上拍到中间位置,完成1个周期。其升阻力系数与时间变化曲线如图9所示。从图中可以看出,在上拍阶段升力系数为负,下拍阶段升力系数为正,阻力系数在两个阶段都为负。这说明后翅在下拍阶段主要产生竖直方向的升力;后翅在上拍阶段和下拍阶段都产生水平方向的推力;推力的大小与扭转角度有关,当扭转角度为 0° 时,后翅产生的推力为零。

2.2.3 流场变化结果与分析

研究竹象虫后翅的目的是希望能揭示竹象虫飞行的机理,在平均攻角为 15° ,扑动幅值为 120° 条件下,时间步长设为 $0.000\ 1\text{ s}$,来流速度为 1.5 m/s ,计算500个时间步长,迭代了10 000次。图10和图11为竹象虫后翅在1个扑动周期内在距翅根 20 mm 处的X截面(蝉翅翼展向)的流场速度和压力分布。

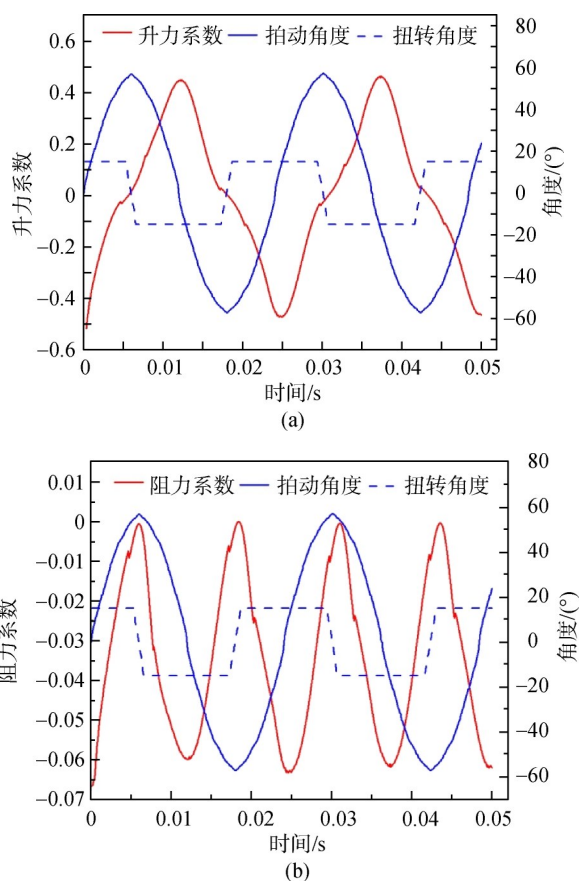


图9 升阻力系数随时间变化曲线

Fig.9 Curves of lift and drag coefficients varying with time

观察1个周期内的速度变化图可知,后翅上拍过程中前缘涡流在扑翼下方产生,随着后翅上拍发生扭转时,前缘涡流脱落形成尾流,在向下拍时,前缘涡流在后翅上方产生,随后翅下拍到最低点扭转时前缘涡流向后缘移动,当发生扭转时,前缘涡流在后翅下方产生同时下拍的后缘尾流有一部分补充到生成的前缘涡流中,另一部分发生脱落,最后后翅上拍到中间位置,完成1个扑动周期。后翅在发生扭转时,速度分布会发生变化,上拍过程中速度主要集中于后翅下方,下拍过程中速度集中于后翅上方。

从1个周期内的压力变化图可知,后翅在上拍时,后翅上方由于流速较快造成后翅的上下表面形成压力差,上表面压力大于下表面压力,从而产生负升力。在下拍时,后翅下方流速快,导致上表面压力小于下表面压力,后翅产生用于飞行的正升力。

2.2.4 不同扑动幅值结果与分析

后翅在不同幅值下的升力系数变化曲线如图12(a)所示,从图中可以看出,随着扑动幅值的增大,升力系数正向峰值和负向峰值都增大。且正

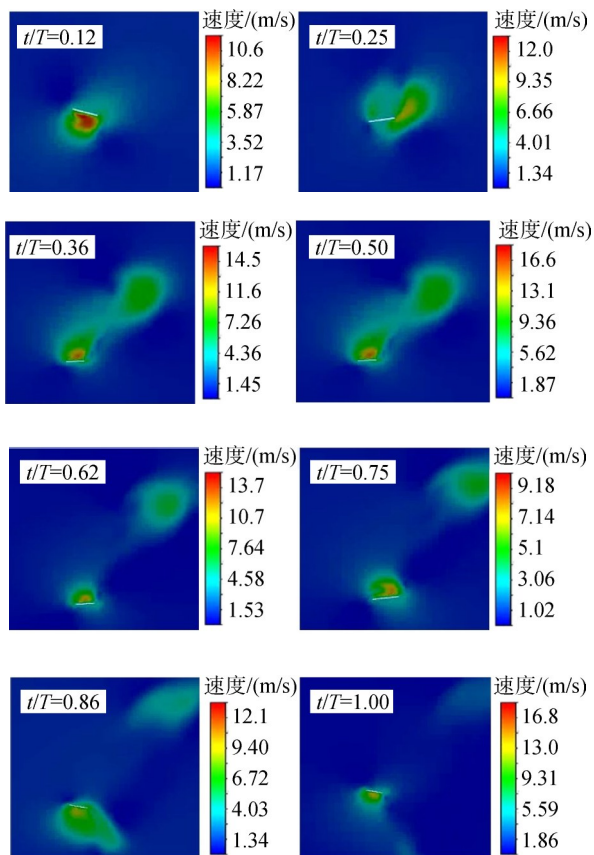


图 10 速度变化图

Fig.10 Diagram of velocity change

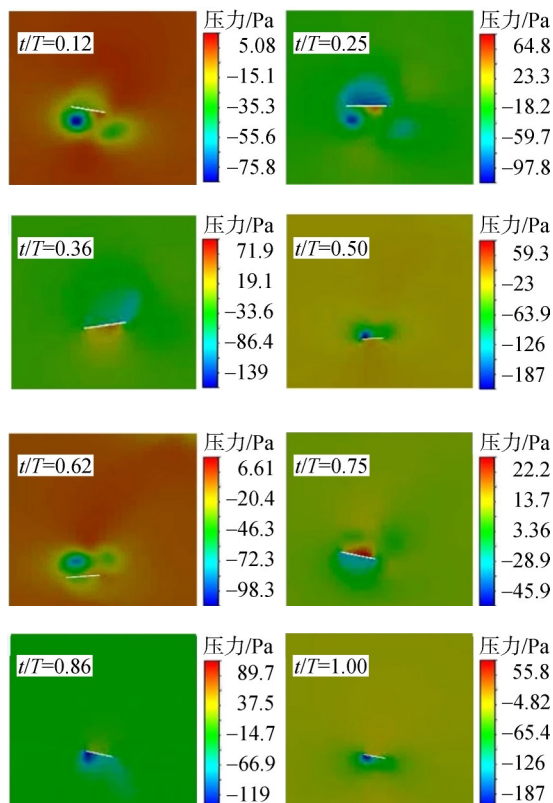
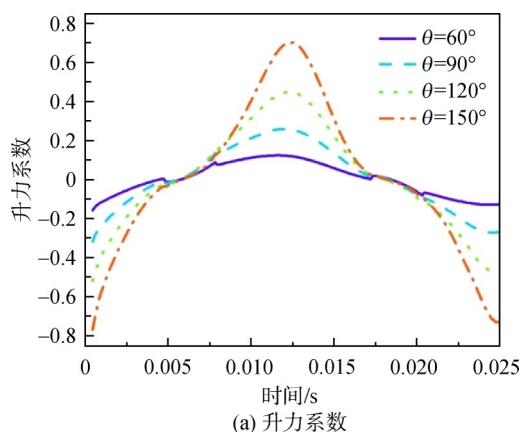


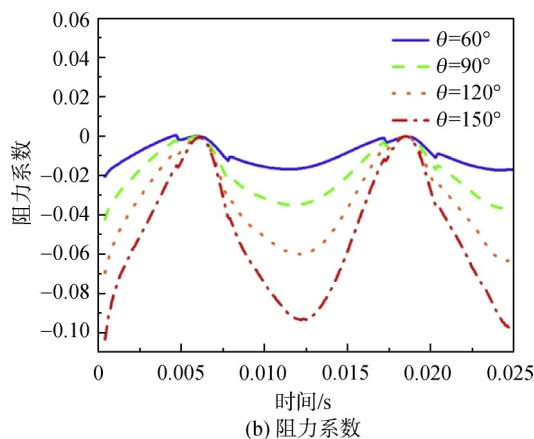
图 11 压力变化图

Fig.11 Diagram of pressure change

向峰值变化明显。在扭转阶段,升力系数几乎不变。这说明增大扑动幅值可以有效地提升竹象虫后翅的气动性能。图 12(b)为后翅在不同幅值下的阻力系数变化曲线。从图中可以看出,随着扑动幅值的增大,阻力系数的负向峰值增大。在扭转阶段,随着扑动幅值的增大,阻力系数曲线过渡越平滑。这说明增大扑动幅值有利于后翅稳定地完成上拍与下拍之间的转换。同时,负峰值的增大也说明,增大扑动幅值可以有效地提升竹象虫后翅的推进能力。



(a) 升力系数



(b) 阻力系数

图 12 不同扑动幅值随时间变化曲线

Fig.12 Curves of different flapping amplitudes varying with time

2.2.5 不同扭转角度结果与分析

后翅在不同扭转角度下的升力系数变化曲线如图 13(a)所示,从图中可以看出,随着扭转角度的增大,后翅在上拍阶段升力系数变化很小,下拍阶段升力系数峰值缓慢下降。在扭转阶段,升力系数变化较大,扭转角度在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 升力系数变化较为平滑,扭转角度在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 发生了较大弯曲过渡,这说明增大扭转角度对升力有一定的提升,但是过大的扭转角度又导致升力系数变化幅

度过大反而引起失速。图 13(b)为后翅在不同扭转角度下的阻力系数变化曲线,由图可知,随扭转角度增大,上拍阶段的阻力系数几乎不变,下拍阶段随扭转角度增大阻力系数负峰值先变大后变小。其中,扭转角度为 45° 时阻力系数最大。在扭转阶段,扭转角度过大导致涡流脱落较快,阻力系数波动明显。这说明增大扭转角度对后翅的推进能力有一定的提升,但扭转角度越大,不利于维持后翅飞行的稳定性。综合升力系数变化规律得到扭转角度在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 时,后翅飞行性能较为稳定。

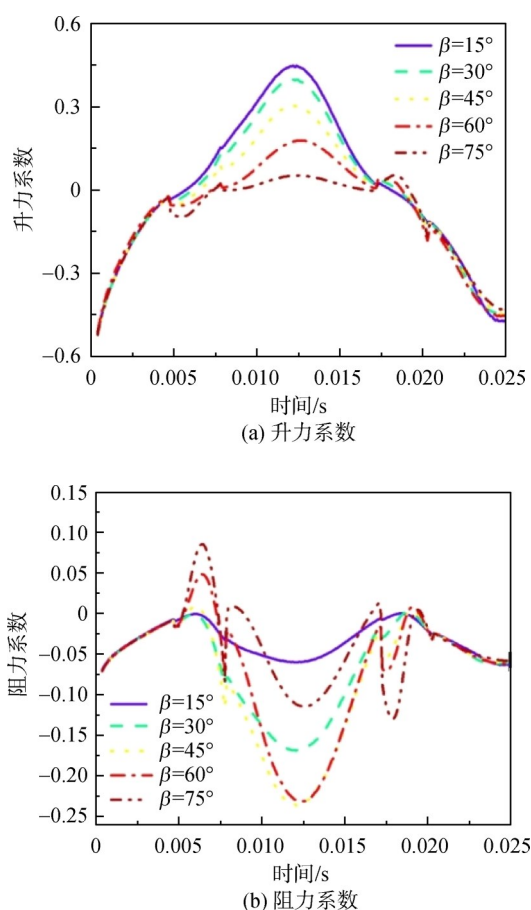


图 13 不同扭转角度随时间变化曲线

Fig.13 Curves of different torsion angles varying with time

2.2.6 不同扑动频率结果与分析

后翅在不同的扑动频率下升力系数曲线如图 14(a)所示,由图可知,随着扑动频率的增加,升力系数在不同方向上都有所增加,同时发生扭转的时间提前了,即随着扑动频率增大,扭转阶段的升力提升较为迅速,这说明增大后翅的扑动频率可以有效提升后翅的气动性能。图 14(b)为后翅在不同扑动频率下阻力系数曲线图,由图可知,扑动

频率越大,后翅的阻力系数的负峰值越大。在扭转阶段,频率越高,阻力系数曲线过渡越平滑。这说明增大扑翼频率可提高后翅的推进能力和扭转过程的柔顺性,有效地提高竹象虫后翅的气动性能。

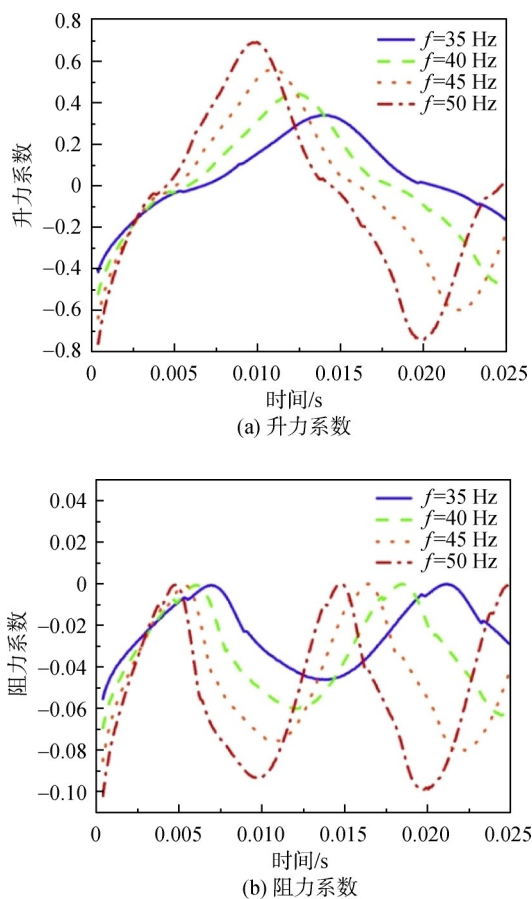


图 14 不同扑动频率随时间变化曲线

Fig.14 Curves of different flapping frequencies varying with time

3 讨论

通过对竹象虫后翅结构的力学分析结果表明,竹象虫后翅在受到均匀载荷时,主翅脉的变形较小,翅脉结构分布合理,后翅具有良好的结构刚度和承载能力,在飞行中有较强的稳定性。在受到单一垂直载荷时,竹象虫后翅可以在主翅脉和分支翅脉的配合下,将应力传递到翅根位置。如果在飞行中受到特殊载荷时,后翅弯曲的几何非线性特征较小^[36],说明后翅拥有良好的应对突发情况的能力。后翅在受到扭转载荷时,前缘翅脉可以有效地防止扭转变形,说明后翅扭转主要发生在分支翅脉中,前缘翅脉主要起支撑作用。由模态结果可知,后翅的固有振型符合振动规律,其

固有频率较高,在扑动过程中不会产生共振效应。总的说来,竹象虫后翅优异的结构力学特性和较高固有频率符合仿昆式扑翼飞行器中飞行翼的结构强度要求和振动频率要求。

通过对竹象虫后翅空气动力学分析结果表明,竹象虫后翅升力系数和阻力系数相对于其他昆虫^[20,30]较大,能够产生的升力和推力也较大,这可能与竹象虫的后翅面积有关。从速度变化图和压力变化图中可以看出后翅在涡流的作用下产生高升力^[16],并且从速度和压力角度解释了升力的产生机制。此外,为了探究竹象虫后翅如何完成复杂飞行的原理,通过改变后翅扑动幅值、扭转角度和扑动频率,结果表明增大扑动幅值和扑动频率可以有效地提高升力和推力,扭转角度对升力的影响最大,扭转角度过大过小都会给后翅造成负面影响。因此,推测竹象虫通过翅根肌肉控制后翅改变扑动幅值、扭转角度和扑动频率来完成躲避障碍的复杂飞行和适应不同环境的特技飞行。总的来说,竹象虫后翅具有比蝉和苍蝇更大的展开面积以及比蜻蜓更大的扑动幅度和更小的扑动频率,这在研制仿昆式微型飞行器时更有优势,并且竹象虫后翅在休息时,可以将后翅以“Z”字形折叠收入前翅中,与金龟子的“V”字形折叠相比后翅折叠比更大,更利于隐藏。

4 结 论

本文以竹象虫后翅为研究对象,运用其形态学建立数学模型,进行结构力学特性研究,并基于嵌套网格法进行后翅前飞状态流场及气动特性研究。研究表明:

1) 竹象虫后翅翅脉结构具有良好的结构刚度和载荷承载能力,前缘翅脉在后翅中起主要支撑作用,并与分支翅脉相互配合,使其在飞行时受到展向弯矩和弦向扭矩时有较好的稳定性。且竹象虫后翅的1阶固有频率远大于其扑动频率,可以有效地防止发生共振,符合仿生翼的设计要求。

2) 竹象虫后翅增大扑动幅值和扑动频率可以有效地提升后翅的升力和推力,增强其气动特性。而增大扭转角度可以有效地提升后翅升力,但是角度过大会影响推力的产生,影响扑翼飞行的稳定性。综合考虑,其扭转角度在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间为优。

经综合分析研究可得,竹象虫后翅结构力学特性和气动特性相对优异,可为微型扑翼飞行器

的仿生机翼设计提供参考。

参考文献:

- [1] WANG Z J. Dissecting insect flight[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2005, 37:183-210.
- [2] DUDLEY R. The biomechanics of insect flight: form, function, evolution[J]. Annals of the Entomological Society of America, 2000, 93(5):307-308.
- [3] HAAS F, GORB S, WOOTTON R J. Elastic joints in dermapteran hind wings: materials and wing folding[J]. Arthropod Structure and Development, 2000, 29(2):137-146.
- [4] YOUNG J, WALKER S M, BOMPHREY R J, et al. Details of insect wing design and deformation enhance aerodynamic function and flight efficiency[J]. Science, 2009, 325(5947):1549-1552.
- [5] NGUYEN T T, SUNDAR D S, YEO K S, et al. Modeling and analysis of insect-like flexible wings at low Reynolds number[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 62:294-317.
- [6] 马耀鹏. 基于蠼螋后翅折展机理的空间展开机构设计及其折展性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
MA Yaopeng. Design of space deployable mechanism and its folding performance based on the folding mechanism of hind wing of earwigs [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [7] WANG C, WANG C, NING Y, et al. Design and mechanical analysis of bionic foldable beetle wings[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2018, 2018 (2): 1308465.1 - 1308465.10.
- [8] WANG C, NING Y, WANG X, et al. Simulation analysis of the aerodynamic performance of a bionic aircraft with foldable beetle wings in gliding flight[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2020, 2020(1):8843360.1-8843360.12.
- [9] HA N S, TRUONG Q T, GOO N S, et al. Biomechanical properties of insect wings: the stress stiffening effects on the asymmetric bending of the allomyrina dichotoma beetle's hind wing[J]. PLoS One, 2013, 8(12):1-10.
- [10] HA N S, NGUYEN Q V, GOO N S, et al. Static and dynamic characteristics of an artificial wing mimicking an allomyrina dichotoma beetle's hind wing for flapping-wing micro air vehicles[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52 (9): 1535 - 1549.
- [11] LI Z, SHEN W, TONG G, et al. On the vein-stiffening membrane structure of a dragonfly hind wing[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2009, 10(1):72-81.
- [12] 史晓君, 于海业. 蜻蜓翅膀拱形结构静力学分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(5):1395-1397, 1400.
SHI Xiaojun, YU Haiye. Static analysis of dragonfly wing arch structure[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(5):1395-1397, 1400. (in Chinese)
- [13] 史晓君, 于海业. 蜻蜓翅膀结构刚度有限元分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1):224-229, 223.
SHI Xiaojun, YU Haiye. Finite element analysis of dragonfly

- wing structural stiffness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):224-229, 223. (in Chinese)
- [14] REN H, WANG X, LI X, et al. Effects of dragonfly wing structure on the dynamic performances[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(1):28-38.
- [15] JONGERIUS S R, LENTINK D. Structural analysis of a dragonfly wing[J]. Experimental Mechanics, 2010, 50(9):1323-1334.
- [16] DICKINSON M H, LEHMANN F O, SANE S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight[J]. Science, 1999, 284(5422):1954-1960.
- [17] TAY W B. Effect of different types of wing-wing interactions in flapping MAVs[J]. Journal of Bionic Engineering, 2017, 14(1):60-74.
- [18] LE T Q, VAN TRUONG T, TRAN H T, et al. Two- and three-dimensional simulations of beetle hind wing flapping during free forward flight[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(3):316-328.
- [19] ENGELS T, KOLOMENSKIY D, SCHNEIDER K, et al. Bumblebee flight in heavy turbulence[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(2):1-5.
- [20] 董强, 张西金, 赵宁, 等. 蝉翅翼的运动研究与三维数值分析[J]. 航空动力学报, 2015, 30(3):588-594.
- DONG Qiang, ZHANG Xijin, ZHAO Ning, et al. Motion study and 3D numerical analysis of cicada wing[J]. Journal of Aerodynamics, 2015, 30(3):588-594. (in Chinese)
- [21] GREETER J, HEDRICK T L. Direct lateral maneuvers in hawkmoths[J]. Biology Open, 2016, 5(1):72-82.
- [22] KUKALOVÁ P J, LAWRENCE J F. Evolution of the hind wing in coleoptera[J]. The Canadian Entomologist, 1993, 125(2):181-258.
- [23] 许顺. 长足大象甲的特征、力学、运动特征及其仿生分析[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- XU Shun. Characteristic, mechanics, movement of cirtotrachelus buqueti guer and bionic analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [24] LI X, GUO C. Microstructure and material properties of hind wings of a bamboo weevil cyrtotrachelus buqueti (coleoptera: curculionidae)[J]. Microscopy Research and Technique, 2019, 82(7):1102-1113.
- [25] HA N S, JIN T L, GOO N S, et al. Anisotropy and non-homogeneity of an allomyrina dichotoma beetle hind wing membrane[J]. Bioinspiration and Biomimetics, 2011, 6(4):1-15.
- [26] JIN T, GOO N S, WOO S C, et al. Use of a digital image correlation technique for measuring the material properties of beetle wing[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(3):224-231.
- [27] ELLINGTON C P. The aerodynamics of hovering insect flight: I the quasi-steady analysis[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: B Biological Sciences, 1984, 305(1122):1-15.
- [28] LI X, GUO C. Wing-kinematics measurement and flight modelling of the bamboo weevil C. buqueti[J]. IET Nanobiotechnology, 2019, 14(1):53-58.
- [29] 宁宇. 仿甲虫微型扑翼飞行器气动特性数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2019.
- NING Yu. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of a miniature flapping wing aircraft resembling a beetle [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2019. (in Chinese)
- [30] 左德参. 仿生微型飞行器若干关键问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- ZUO Decan. Research on some key issues of bionic micro air vehicles[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [31] ZHAO Y, WANG D, TONG J, et al. Statics analysis of dragonfly wing based on finite element model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15):33-38.
- [32] 兰世隆, 孙茂. 模型昆虫翼作非定常运动时的气动力特性[J]. 力学学报, 2001, 33(2):173-182.
- LAN Shilong, SUN MAO. Aerodynamic characteristics of model insect wing in unsteady motion[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2001, 33(2):173-182. (in Chinese)
- [33] 杨爱明, 乔志德. 用运动嵌套网格方法数值模拟旋翼前飞非定常流场[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(4):427-433.
- YANG Aiming, QIAO Zhide. Numerical simulation of unsteady flow field of rotor forward flight by moving nested mesh method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(4):427-433. (in Chinese)
- [34] PROSSER D, BASRAI T, DICKERT J, et al. Wing kinematics and aerodynamics of a hovering flapping micro aerial vehicle[C]//Proceedings of Aerospace Conference. Big Sky, US: IEEE, 2011:1-10.
- [35] LI L, HAO Y, XU J, et al. Numerical simulation of unsteady aerodynamic characteristics of the three-dimensional composite motion of a flapping wing based on overlapping nested grids[J]. AIP Advances, 2020, 10(3):1-13.
- [36] MACHIDA K, SHIMANUKI J. Structure analysis of the wing of a dragonfly[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Experimental Mechanics and Third Conference of the Asian Committee on Experimental Mechanics. Bellingham, US: International Society for Optics and Photonics, 2005:671-676.

(编辑: 陈 越)