

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.023

仿甲虫微型扑翼飞行器研制

毛致远, 沈欢, 智怡, 吉爱红

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:仿昆虫微型扑翼飞行器通过对昆虫的飞行方式模仿,具有隐蔽性高、可以悬停飞行等特点,可以在狭小场所及室外复杂环境中作业,应用场景广泛。设计一款仿独角仙扑翼飞行器,总质量为 28 g,翼展 12 cm,扑动幅度达 188°。扑动机构采用曲柄摇杆与滑轮结合的方式,实现了大扑动幅度;同时,机翼采用负扭转柔性翼型,提高机翼的气动效率。通过流体仿真确定具体的翼面参数与运动参数,获得相关的升力曲线。设计基于翼根改变的方向控制机构,并搭建实验平台验证飞行器的垂直起飞能力与俯仰滚转的姿态控制可行性。飞行实验表明:该飞行器具有良好的仿生性能,可为仿生扑翼飞行器的设计提供参考。

关键词:仿昆虫微型扑翼飞行器;结构设计;三维建模;飞行实验

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0117-08

Development of Beetle-shaped Micro-flapping-wing Aircraft

MAO Zhiyuan, SHEN Huan, ZHI Yi, JI Aihong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Flapping-wing micro air vehicle imitating the flight mode of insects, characterized with high concealment and hovering, can work in narrow places and outdoor complex environment with a wide range of applications. A flapping wing aircraft imitating unicorn beetle with a total weight of 28 g, a wingspan of 12 cm and flapping amplitude of 188° is designed. The flapping mechanism adopts the combination of crank rocker and pulley to achieve large flapping amplitude, and the wing applies negative torsion flexible airfoil to improve the aerodynamic efficiency of the wing. The specific wing parameters and motion parameters are determined by fluid simulation, and the relevant lift curves are obtained. A direction control mechanism based on wing root change is designed, and an experimental platform is built to verify the vertical take-off capability of the aircraft and the feasibility of attitude control of pitch roll. Test flights show that the designed aircraft has good bionic performance, a conducive reference for bionic flapping wing aircraft designing.

Keywords: insect-like flapping-wing micro air vehicle; structural design; three-dimensional modeling; test flight

0 引言

微型扑翼飞行器是一种模仿鸟类与昆虫等飞行生物运动姿态的飞行器。昆虫已经在自然界存在了很长时间,在自然选择下,其最终演化出十分卓越的飞行性能^[1]而广受人们的学习与关注。仿昆虫扑翼飞行器对昆虫的垂直起飞、悬停及快速转向的运动姿态进行模仿,拥有飞行效率高、机动能力强、能够在狭小空间作业等优点,因而具有广泛的应用前景。

到目前为止,许多科研人员对扑翼飞行器的结构进行设计与完善,研制出许多仿生扑翼飞行器。由美国航空公司研制的 Nano Hummingbird^[2]是第一台能够自由飞行的仿蜂鸟扑翼飞行器,其

质量仅为 19 g,翼展为 16.5 cm,采用绳驱动的方式并利用柔性翼面设计完成了翅膀的扭转运动,可以实现空中悬停。哈佛大学的 Wood 团队^[3-6],设计了一款压电驱动的仿生微型扑翼飞行器,其翼展为 30 mm,质量仅有 80 mg,被命名为 RoboBee,基于研究团队开发的高功率密度压电人工肌肉,扑动频率达 120 Hz,飞行器整体大小达真实昆虫大小,添加了模块化的控制方法后,该机械昆虫可以实现稳定悬停以及基本的控制飞行。韩国建国大学的 Park 团队研发出一架代号为“KU-Beetle”的无尾飞行器^[7],其使用四杆机构和滑轮-绳机构的组合,飞行器的全部质量仅有 21 g。其机翼可以实现约 190°的大扑动幅度,利用昆虫飞行时的 Clapping-fling 机制获得额外的垂直力,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51875281)

第一作者简介:毛致远(1998—),男,山东泰安人,研究生,研究方向为仿生机器人,mao1010051495@163.com。

并可以完成垂直起飞及悬停飞行。TU 等^[8]受蜂鸟启发,研制出一款被命名为 Robot.I 的飞行器,其翼展为 70 mm,质量仅 12 g,采用电机直接驱动机翼,通过扭簧实现往复运动。ZOU 等^[9]利用压电驱动技术成功研制出一款昆虫尺度的扑翼飞行器,其翼展为 3.5 cm,质量 84 mg,能够在 100 Hz 的共振频率下产生超过自质量的升力。虽然无法进行自由控制飞行,但是可以进行沿垂直导轨的制导起飞。王鹏程等^[10]在单曲柄扑翼机构上添加 Watt 连杆机构,对单曲柄机构扑动驱动飞行器的左右不对称问题进行了改进。张瑞坤等^[11]提出了一种空间 RSSR 机构,提高扑翼飞行器飞行的稳定性。王玉金等^[12]提出了一种基于 RC/RRU 并联机构的变迎角扑翼机构,提高了扑翼飞行器的性能。大部分昆虫在扑翼过程中伴随扭转运动,这种运动可以改变飞行时的迎角,从而增大扑动时产生的升力与推力。郝永平等^[13]提出了一种空间摇杆式机构,采用独立驱动的方式实现了机翼的扑动与扭转。

目前,对于仿昆虫扑翼飞行器的研究仍在进行中,本文以独角仙为研究对象,并以此为指导设计了以独角仙为仿生对象的扑翼飞行器,旨在完成密闭空间中的作业,如倒塌的建筑物、危险设施、人类难以到达的狭小场所以及复杂的户外空间。

1 仿独角仙扑翼飞行器结构设计

1.1 扑动机构设计

扑动机构的设计是飞行器整体设计中的重要步骤,它可以将驱动机构的运动转换为翼根的摆动,从而带动翅翼扑动产生足够的升力,因此设计合适的扑动机构十分重要。此外,扑动机构的尺寸和质量影响着整机的大小和质量,对其简化化和轻量化设计是必要的。本文的仿生对象选择独角仙,如图 1 所示。独角仙具有两对翅膀,前翅为鞘翅,起到保护后翅作用;后翅为飞行翅,是飞行时主要的升力来源,独角仙在飞行时以极大的振幅(约 180°)拍打飞行翅,并且在悬停期间,其飞行翅扑动的频率范围为 30~40 Hz^[14]。所以需要设计一种能够重现独角仙这种高振幅并且扑动频率较高的扑动机构,为此各研究机构提出了一些方案^[15-16]。这些方案多是采用传统扑动机构,利用曲柄摇杆机构将电机的转动变为机翼的小幅度摆动,然后使用滑块机构或齿轮齿条机构等来提

高扑动运动的幅值。

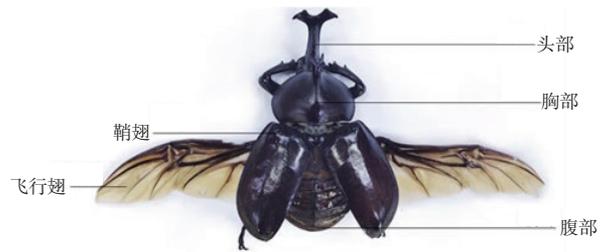


图 1 独角仙身体结构

本文通过将各类典型仿生扑翼飞行器^[17-22]的扑动机构进行比较,最终设计了一种扑动机构方案,它由四连杆机构和滑轮机构组成,可以更好地满足机翼的摆动要求,如图 2 所示。

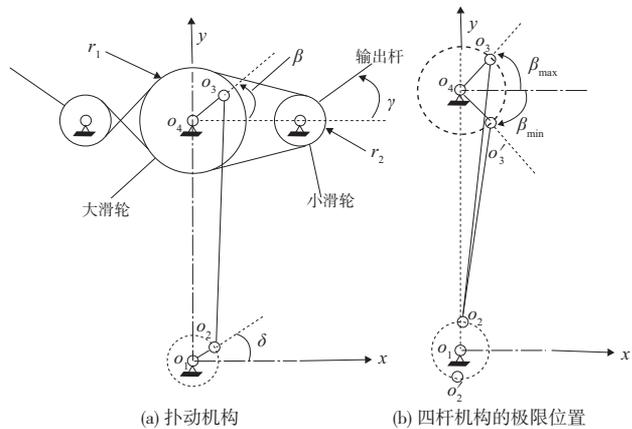


图 2 扑动机构原理图

图 2(a)是四连杆机构和滑轮机构组合的扑动机构原理图,固定在电机减速机构末端的主动曲柄 O_1O_2 进行旋转运动,此运动通过连杆 O_2O_3 转化为固定在大滑轮上的摇杆 O_3O_4 的往复运动,之后通过滑轮机构放大摆动角,最终实现了固定于小滑轮上的输出杆的大幅值摆动。

图 2(b)中, $O_1O_2O_3O_4$ 和 $O_1'O_2'O_3'O_4$ 分别为摇杆运动的上极限位置 β_{\max} 和下极限位置 β_{\min} 。为了保证所设计仿昆飞行器行进的稳定性,应保证飞行时前后行程中扑动运动相等,即应达到 $\beta_{\max} = \beta_{\min}$ 。在这两种情况下,关节 O_1 、 O_2 和 O_3 三者共线。在下极限位置时, O_2 位于 O_1 和 O_3 的延长线上;而在上极限位置时, O_2 则位于 O_1 和 O_3 之间的连线上。在求取设计参数时,将 O_1O_4 及 O_3O_4 的长度与摇杆输出角 β 定为输入参数,故 O_1O_2 和 O_3O_4 的大小可以由下式确定:

$$O_1O_2 = \frac{1}{2}(X-Y) \quad (1)$$

$$O_2 O_3 = \frac{1}{2}(X+Y) \quad (2)$$

式中: $X = \sqrt{O_1 O_4^2 + O_3 O_4^2 + 2O_1 O_4 \cdot O_3 O_4 \sin \beta_{\max}}$;

$Y = \sqrt{O_1 O_4^2 + O_3 O_4^2 - 2O_1 O_4 \cdot O_3 O_4 \sin \beta_{\min}}$ 。

摇杆输出角 β 可由下式确定:

$$\beta = -\sin^{-1}\left(\frac{A}{B}\right) - C \quad (3)$$

$$A = \frac{O_1 O_2^2 + O_3 O_4^2 + O_1 O_4^2 - O_2 O_3^2 - 2O_1 O_2 \cdot O_1 O_4 \sin \delta}{2O_3 O_4} \quad (4)$$

$$B = \sqrt{(O_1 O_2 \cos \delta)^2 + (O_1 O_2 \sin \delta - O_1 O_4)^2} \quad (5)$$

$$C = \tan^{-1}\left(\frac{O_1 O_2 \cos \delta}{O_1 O_2 \sin \delta - O_1 O_4}\right) \quad (6)$$

式中 δ 为曲柄输入角。

大滑轮与小滑轮直接通过细线连接,如图 2(a) 所示,右侧的细线直接将大小滑轮连接,而左侧的细线是扭转后连接大小滑轮的。这是为了保证左右两个小滑轮在同一方向上进行摆动,从而产生左右对称的扑动运动。左右机翼的前缘杆一端与固定在小滑轮上的输出杆相连,以产生机翼的扑动运动,机翼的扑动角 γ 可以由下式得到:

$$\gamma = \frac{r_1}{r_2} \beta \quad (7)$$

式中 r_1 和 r_2 分别为大小滑轮的半径,如图 2(a) 所示。

由此可以进行参数设定, $O_1 O_4$ 、 $O_3 O_4$ 和摇杆输出角 β 为输入参数,其值初步设定为 $O_1 O_4 = 20 \text{ mm}$, $O_3 O_4 = 5 \text{ mm}$, $\beta = 47^\circ$,结合式(1)、式(2),取 $O_1 O_2 = 3.6 \text{ mm}$, $O_1 O_4 = 20.3 \text{ mm}$,并取 $r_1 : r_2 = 2 : 1$,令设计扑动幅值为 188° 。

为了降低电机输出的转速并增加转矩,电机通过减速齿轮将动力传递到曲柄,扑动系统采用二级直齿齿轮减速设计,系统传动比为 21。最终设计扑动机构如图 3 所示。

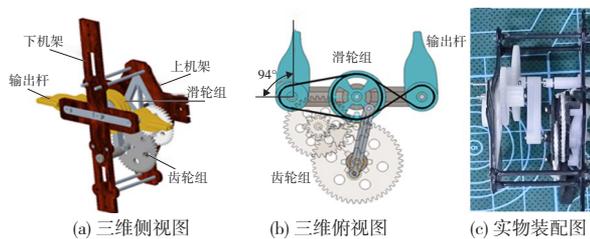


图 3 扑动机构

1.2 机翼设计

独角仙的飞行模式较为复杂,其翅膀十分灵

活,能够在扑动的同时完成扭转与摆动。为了使独角仙微型扑翼飞行器具有与独角仙一样的灵活飞行能力,仿独角仙扑翼飞行器的机翼需要能够在完成扑动时也能实现扭转。本文所设计的传动机构为了减少结构的复杂性,实现轻量化设计,没有设计机翼的主动扭转机构,故需要利用柔性翼面^[23]在扑动运动过程中发生的被动变形来完成扭转动作并获得额外的气动力。与传统的刚性翼相比,柔性翼可以提供更强的升力,在扑动过程中可以有效抑制涡流的不良影响,从而提高仿昆虫扑翼飞行器的气动性能^[24]。昆虫翅膀在飞行时可以发生被动柔性变形,飞行器采用柔性翼也是一种仿生设计。

初步设计的机翼如图 4 所示。初步设计机翼展长为 120 mm ,平均弦长 b_{av} 为 34 mm ,翼型采用弧形机翼。样机的机翼采用了负扭转柔性翼设计^[25],能够让机翼面与垂直方向形成一定的夹角,从而大幅提升飞行器的升力,同时也极大地提升了扑动效率。为了保证机翼面与垂直方向存有一定角度,将机翼翼根处向外延伸一段距离,使其与扑动轴之间有一定的夹角 σ ,选定 $\sigma = 15^\circ$,使得所设计的机翼安装到样机上后,自然产生一定的扭转。翼膜材料采用 0.0125 mm 的聚酰亚胺薄膜,该种材料密度低、柔韧性好、寿命长,机翼在此厚度下可以在不容易被气动力破坏的同时产生更强的升力。采用直径为 1 mm 碳纤维杆作为前缘翼杆,为增加翼面刚度,在单个翼面上采用数根 0.2 mm 直径的碳纤维杆作为翼脉。

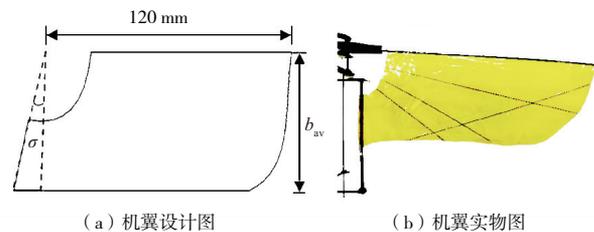


图 4 飞行器机翼

1.3 方向控制机构设计

与使用尾翼进行稳定控制的仿鸟扑翼飞行器不同,本文所设计的样机为仿昆虫无尾扑翼飞行器。为了进行样机稳定飞行控制,需要模仿昆虫产生纵向和横向姿态控制力矩的机制,设计一种主动控制系统,该系统能够在扑翼运动期间修改机翼运动学,从而产生导致姿态变化的控制力矩。

无尾扑翼飞行器通过改变机翼运动产生俯

仰、滚转、偏航控制力矩来控制整体姿态。这些力矩的产生通过控制行程平面、控制后缘、控制左右翼扑动差异等控制机制实现。控制左右翼扑动差异机制往往需要多电动力驱动方式。本文飞行器采用单电动力驱动,难以分别控制左右翼的扑动差异;控制行程平面机制需要移动整个扑动机构,并在飞行过程中精准控制机构的结构参数,导致飞行器结构变得繁琐复杂。为了降低飞行器的质量,减少结构的复杂性,本文采用了控制后缘的控制机制,只需要对翼根的扭转进行调控,改变后缘的位置就能完成飞行器的姿态控制,如图5所示。

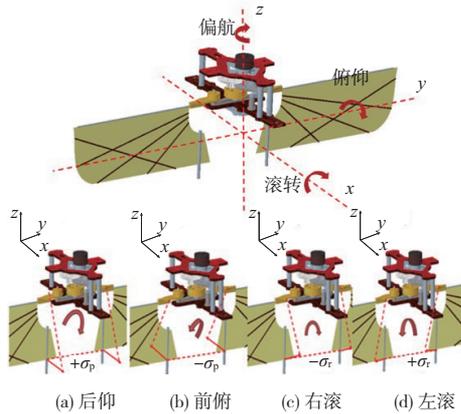


图5 姿态调节机构

由于偏航运动不影响无尾 MAV 的垂直稳定性,这意味着没有偏航控制,仿独角仙扑翼飞行器仍然可以在空中保持飞行。通过正确的俯仰控制和滚转控制,飞行器能够实现稳定垂直起飞、悬停、左右转向等动作。因此偏航控制并非必要条件。同时,偏航控制会导致飞行器的结构变得复杂,机身变得过重,从而使得起飞变得困难,故本文没有在飞行器上添加偏航控制机构。

图5(a)和图5(b)所示为俯仰动作,当需要进行俯仰控制时,令左右翼根同时绕 y 轴旋转一定角度 σ_p ,可以产生俯仰控制力矩。将左右机翼翼根绕轴转动同一角度 $+\sigma_p$,连接在翼根处的机翼后缘跟随着转动同样角度,机翼整体绕前缘杆向 x 轴正方向发生偏转,飞行器前方产生的力矩大于后方产生的力矩,总体产生后仰力矩,飞行器沿 x 正方向进行向后向上运动;反之,将两侧机翼翼根绕轴转动相同角度 $-\sigma_p$,机翼整体绕前缘杆向 x 轴负方向发生偏转,飞行器后方产生的力矩大于前方产生的力矩,总体产生前俯力矩,飞行器沿 x 负方向进行向前向下运动。滚转动作的控制与俯仰类似,图5(c)和图5(d)所示为滚转动作。

方向控制机构采用模块化设计,与扑动机构相互独立,这种设计降低了机构间耦合性,减少了方向控制机构对扑动机构可能产生的干扰,同时增强了机构零件的互换性,便于对飞行器的优化与修理。将所设计的控制机构与前文设计的扑动机构结合,得到整机的三维结构,如图6所示。

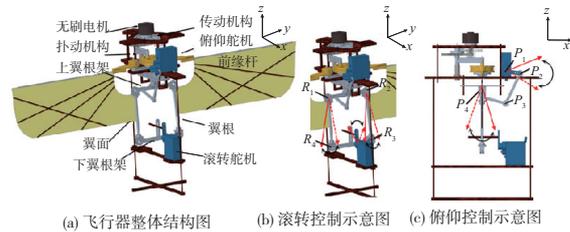


图6 仿甲虫扑翼飞行器三维图

图6(b)所示为滚转控制示意图,图中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 点是翼根杆与上、下翼根架的连接处,由铰链连接保证运动的顺滑,翼根杆与翼根架在这4点处共同构成了四边形机构。此机构的驱动动力由舵机提供,滚转舵机被机架支撑在机构下方,固定在飞行器的纵向对称平面上,其舵臂上固定一根直径1mm的碳棒,下翼根架上开有一道滑槽,通过碳棒与滑槽的结合,下翼根架随着舵机的摆动一起运动时,四边形机构变形,使左、右机翼翼根绕 x 轴转动一定角度,产生滚转控制力矩。

图6(c)所示俯仰控制示意图,位于舵机及舵臂上的 P_1 、 P_2 两点与上翼根架上的两点 P_3 、 P_4 组成了四连杆机构,舵臂 P_1 、 P_2 的摆动通过四杆机构传递到翼根杆上,左、右翼根随着舵机的转动,同时绕 y 轴转动一定角度,产生俯仰控制力矩。

飞行器的主要电子部件如图7所示。扑动机构的动力选用无刷电机提供,姿态调节机构中左、右翼根杆的转动采用舵机控制,选用飞行控制板作为飞行器控制系统的核心,通过PWM信号对电机与舵机进行调节,实现飞行器的姿态调节。

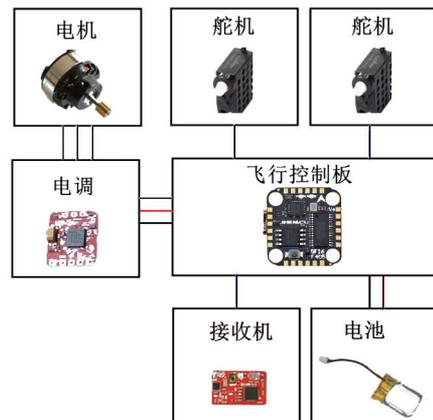


图7 仿独角仙扑翼飞行器主要电子部件

2 流体仿真与试验

2.1 流体仿真

对飞行器进行气动分析研究^[26],在仿生扑翼飞行器的设计中十分重要。本文采用 XFlow 软件来分析仿独角仙飞行器的气动特性,该软件计算效率高,无需使用复杂的网格对流体区域进行划分,对扑翼运动中产生的非定常力计算十分有利。设置虚拟风洞为 1.8 m×1.0 m×0.8 m 的长方体,参考标准为模型尺寸的 6 倍,如图 8 所示。将仿甲虫飞行器的模型导入仿真软件后,设置 x 轴为翼展方向, z 方向为来流方向, y 方向为垂直向上。流体介质选择为空气,流体密度为 1.225 kg/m^3 ,仿真温度设置为 288.15 K,流动模型选择单向外部流,雷诺数 Re 设置为 3.4×10^3 。

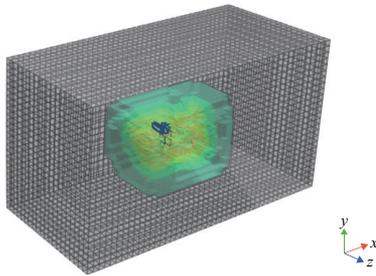


图 8 飞行器流体仿真模型

机翼的形状是影响扑翼飞行器升力产生的重要因素。在翼展为 120 mm,平均翼弦为 34 mm,翼面的翼根倾角为 15° 的基础上,设计了一系列类型的翼面形状以研究不同翼面条件下升力的变化,如图 9 所示。

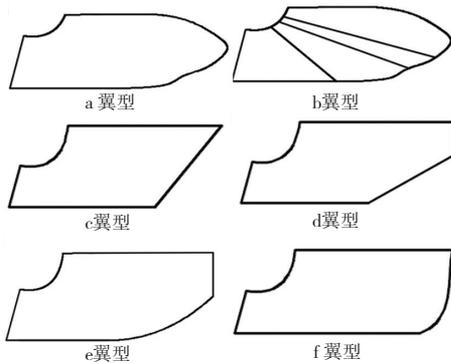


图 9 6 种不同翼型

图 9 中 a、b 是所设计的两款仿生翼型,其形状尺寸通过导入独角仙飞行翅图,采用样条曲线提取其外轮廓获得,能够极大程度地模仿真实昆虫翅翼的外形。b 翼型在 a 翼型的基础上,通过模仿独角仙飞行翅翼脉布局,添加了 3 根翼脉以

加固翼面。图 9 中 c、d、e、f 没有完全按照仿生原型的翅膀进行设计,机翼形状分别采用了梯形翼、类五边形翼、椭圆翼及弧形翼面。图 10 所示为此 6 种翼型的实时升力变化曲线。

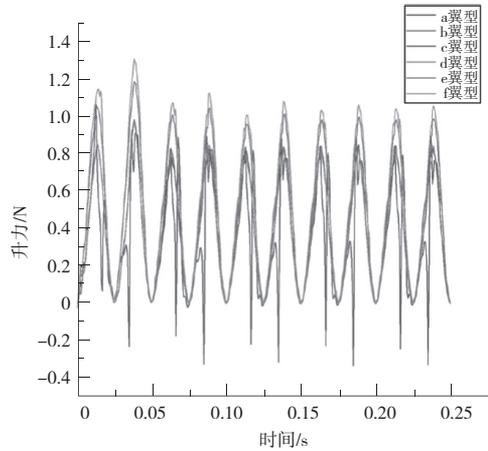


图 10 6 种翼型的升力曲线

a 翼型的平均升力为 0.38 N, b 翼型的平均升力为 0.41 N,对比 b 翼型与 a 翼型的平均升力, b 翼型的平均升力得到了 10% 的提高。可以看出,在机翼上添加翼脉可以有效提高升力。c、d、e、f 翼型的平均升力分别为 0.33 N、0.37 N、0.48 N、0.51 N,升力均能够超过飞行器预计的重力 0.3 N,整体的升力值随着翼面弧度与面积的增加而增加。翼尖附近具有一定弧形的 e、f 机翼所产生的升力明显大于梯形翼与类五边形翼的 c、d 机翼,并且 a、b 仿生翼型设计在实验条件下没有获得最高升力。此外,c 翼型的升力曲线在扑动周期中产生了明显波动,在波峰附近出现了较小的波峰值。从仿真结果整体来看,弧形翼与椭圆翼的气动性能较好,仿生翼型与类五边形翼型其次,梯形翼型最差。最终选择了弧形翼型作为本文飞行器的机翼形状,此翼型翼面的初步设计形状相同,验证了前文设计的合理性,后续的仿真均采用此种翼型进行。

鸟类和昆虫都是利用扑动翅膀以保持在空中运动,并通过改变扑动的频率来满足其不同的飞行需要,昆虫的扑动频率一般高于鸟类,独角仙的扑动频率高达 30~40 Hz。独角仙在飞行时以较大的振幅拍打飞行翅,在飞行的过程中翅膀会有较大的扭转动作,较大扭转动作能够在翅膀上划的过程中提供额外的升力。

扑动频率、扑动幅度及扭转幅度对升力的产生均有一定影响,通过保持其余参数不变,改变其中一种参数,对飞行器悬停飞行时的升力进行仿真计算,得到曲线如图 11 所示。

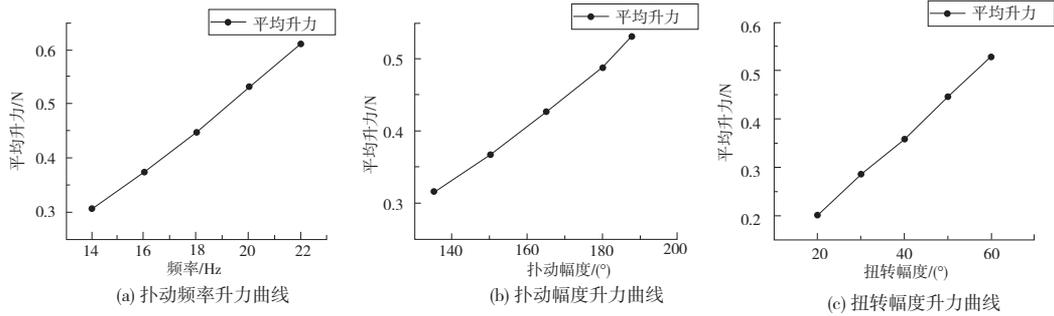


图 11 不同参数的升力曲线

从图 11 的仿真结果可知,仿甲虫扑翼飞行器的升力随着扑动频率、扑动幅度、扭转幅度的提高均呈上升趋势。其中扑动频率对于升力的提高最明显;随着扑动幅度的增大,升力上升的速度明显提高,在 180°~200°范围内尤其明显,这可能是较大扑动幅度导致在左右翼合拢时产生了较为明显的 clap-fling 机制,进一步提高了升力;随着扭转幅度的增大,升力也明显呈上升趋势。所以本文选择 20 Hz 的扑动频率、188°的扑动幅度、60°的扭转幅度作为最终的设计参数。

2.2 飞行实验

根据所设计的三维结构,对样机进行加工安装,整机采用轻量化设计,结构件采用 3D 打印件与碳纤维制作,减少飞行器整体质量,整机质量为 28 g(不含电池),如图 12 所示。

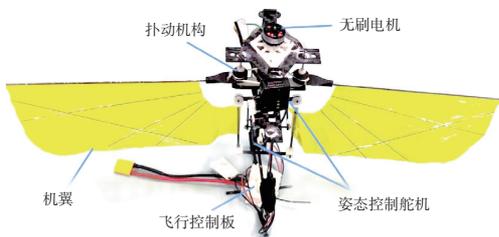


图 12 仿独角仙扑翼飞行器样机

在进行样机飞行实验前,先对扑翼样机升力进行测试。将飞行器底部支架固定在电子天平上,通过天平的测力平台抬升的数值测量升力,如图 13 所示。

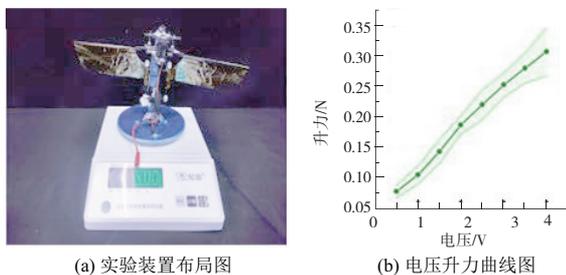


图 13 飞行器升力测试

根据曲线可知,所设计的样机在翼展为 120 mm,平均翼弦为 34 mm 的弧形翼面情况下,所产生的升力在测试条件下由 0.077 N 增加到 0.308 N,电压每提高 0.5 V,升力就可以增加约 0.03 N;当电压由 1 V 提高到 1.5 V 时,增幅最大为 0.044 N。飞行器自身质量为 0.28 N,所产生的升力在实验条件下最高为 0.308 N,升重比为 1.1,可以完成起飞动作。

为验证飞行器垂直起飞能力,对装配好的样机进行飞行试验,飞行器通过外部电源供电,实验中使用碳棒搭建侧边导轨对飞行器运动轨迹进行约束,防止飞行器不受控制向四周运动。如图 14 所示,样机可沿着轨道垂直起飞,但由于飞行器采用手工制作,左、右机翼存在一定的扑动不对称问题,同时由于没有添加方向控制机构,起飞时出现一定程度的不稳定性。

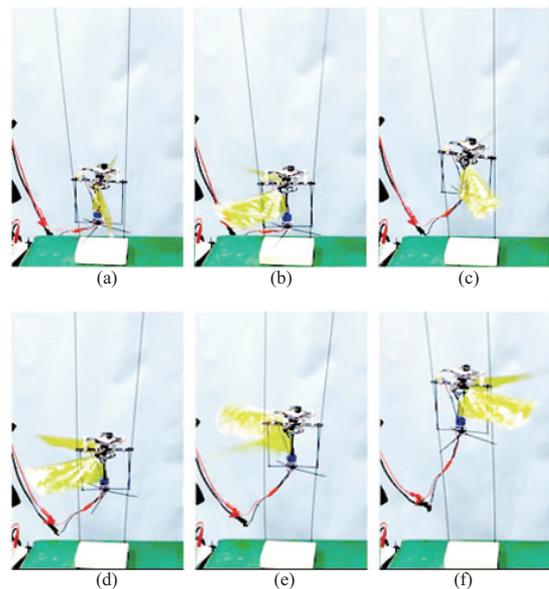


图 14 飞行器垂直起飞

为了进一步验证所设计的方向控制机构能否完成调节姿态的作用,搭建了方向控制机构的验

证实实验平台。该平台通过铰链和支撑架与飞行器相连接,铰链只有一个方向的自由度,使得飞行器只能向一个方向摆动,消除了控制力矩以外的因素对飞行器姿态的影响。

将飞行器安装在实验平台上,通过外部电源对飞行器供电,向飞行器发送俯仰命令,操控仿独角仙扑翼飞行器进行向前与向后运动,如图 15 所示。飞行器收到俯仰操控指令后舵机通过连杆使翼根发生倾转,令飞行器前后的力矩发生变化,带动飞行器绕铰链向后、向前摆动。经过多次实验,铰链向后、向前摆动的最大角度达 18° ,飞行器能够对应地完成前飞与后飞动作,符合设计要求。

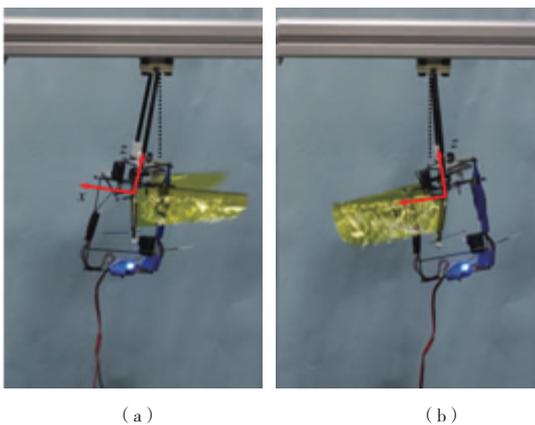


图 15 仿独角仙飞行器俯仰控制

同样,向飞行器发送滚转命令,操控仿独角仙扑翼飞行器进行向左与向右滚动运动,如图 16 所示。铰链向左、向右摆动的最大角度达 23° ,说明飞行器能够对应地完成左滚与右滚动作,符合设计要求。

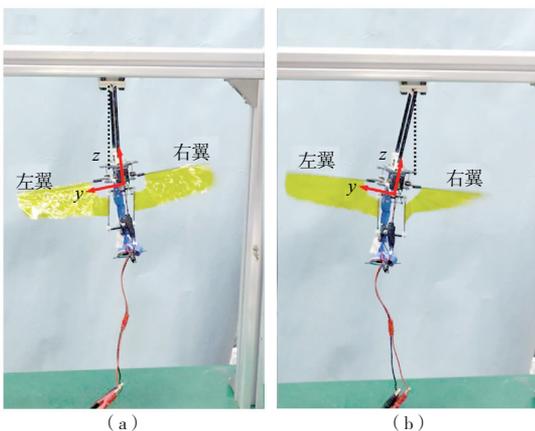


图 16 仿独角仙飞行器滚转控制

飞行实验表明:仿独角仙飞行器所产生的升力大于自身重力,能够完成垂直起飞动作。同时,

方向控制机构可以实现飞行器的俯仰及滚转控制力矩的产生,飞行器可以实现姿态控制。所设计的扑翼飞行器仿生性能较好,扑动原理与方向控制原理与昆虫类似,整机尺寸与质量较小,隐蔽性高,能够满足狭小空间作业的需求。

3 结语

以独角仙为仿生对象,设计了一款扑翼飞行器,对独角仙的左、右翼对称扑动,大幅度扑动以及无尾控制策略进行了仿生设计。通过三维建模软件构建了飞行器的模型,并通过流体仿真软件进行了气动分析。制作了仿独角仙飞行器样机,通过飞行实验验证了所设计的传动机构与控制机构的可行性。

采用单电机驱动的曲柄摇杆机构与滑轮机构作为飞行器的扑动机构,减小了飞行器的尺寸与质量,同时设计了基于控制翼根的方向控制机构,使飞行器可以完成俯仰和滚转等多姿态的调节。飞行器总质量为 28 g,可以产生足够的升力保证起飞,翼展较小,可以产生大幅值扑动,具有良好的仿生性能,为仿生扑翼飞行器的发展提供了参考。

参考文献:

- [1] ZASPEL J. The insects: an outline of entomology, 5th edition[J]. American Entomologist, 2016, 62: 129-130.
- [2] KEENNON M, KLINGEBIEL K, WON H. Development of the Nano Hummingbird: a tailless flapping wing micro air vehicle [C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. [S.I.;s.n], 2012: 588.
- [3] MA K Y, CHIRARATTANANON P, FULLER S B, et al. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot[J]. Science, 2013, 340(6132): 603-609.
- [4] CHIRARATTANANON P, MA K Y, CHENG R, et al. Wind disturbance rejection for an insect-scale flapping-wing robot [C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, Germany: IEEE, 2015: 60-67.
- [5] MA K Y, CHIRARATTANANON P, WOOD R J. Design and fabrication of an insect-scale flying robot for control autonomy [C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, Germany: IEEE, 2015: 1558-1564.
- [6] GRAULE M A, CHIRARATTANANON P, FULLER S B, et al. Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion [J]. Science, 2016, 352(6288): 978-982.

- [7] PHAN H V, PARK H C. Mechanisms of collision recovery in flying beetles and flapping-wing robots[J]. *Science*, 2020, 370(6521): 1214-1219.
- [8] TU Z, FEI F, DENG X Y. Untethered flight of an at-scale dual-motor hummingbird robot with bio-inspired decoupled wings[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 4194-4201.
- [9] ZOU Y, ZHANG W P, KE X J, et al. The design and microfabrication of a sub 100 mg insect-scale flapping-wing robot[J]. *Micro & Nano Letters*, 2017, 12(5): 297-300.
- [10] 王鹏程,王浩,顾光健. 单曲柄双摇杆无相差扑翼驱动机构的设计与仿真[J]. *机械制造与自动化*, 2020, 49(1): 94-96, 126.
- [11] 张瑞坤,何畏. 空间 RSSR 扑翼驱动机构设计与动力学分析[J]. *液压与气动*, 2023, 47(12): 176-183.
- [12] 王玉金,胡睿,夏友长,等. 基于 RC/RRU 并联机构的变迎角扑翼飞行器设计[J]. *机械传动*, 2023, 47(10): 139-147.
- [13] 郝永平,李伦,徐九龙,等. 仿生扑翼“0”形轨迹机构的设计及气动力特性[J]. *机器人*, 2020, 42(2): 179-190.
- [14] VAN TRUONG T, LE T Q, BYUN D, et al. Flexible wing kinematics of a free-flying beetle (rhinoceros beetle *trypoxylus dichotomus*) [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2012, 9(2): 177-184.
- [15] NAN Y H, KARÁSEK M, LALAMI M E, et al. Experimental optimization of wing shape for a hummingbird-like flapping wing micro air vehicle[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(2): 026010.
- [16] ZHANG J, FEI F, TU Z, et al. Design optimization and system integration of robotic hummingbird[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017: 5422-5428.
- [17] GALIŃSKI C, ZBIKOWSKI R. Insect-like flapping wing mechanism based on a double spherical Scotch yoke[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2005, 2(3): 223-235.
- [18] FLORIS V B, WILLIAM R, HOD L. From insects to machines demonstration of a passively stable, untethered flapping - hovering micro - air vehicle [J]. *IEEE ROBOTICS & AUTOMATION MAGAZINE*, 2008, 15(4): 68-74.
- [19] CHI X K, WANG S P, ZHANG Y X, et al. A tailless butterfly - type ornithopter with low aspect ratio wings[C]//CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2018). Guiyang. London: IET, 2018: 1-6.
- [20] TAKAHASHI H, ABE K, TAKAHATA T, et al. Experimental study of the aerodynamic interaction between the forewing and hindwing of a beetle - type ornithopter[J]. *Aerospace*, 2018, 5(3): 83.
- [21] KARÁSEK M, MUIJRES F T, DE WAGTER C, et al. A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns[J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1089-1094.
- [22] SHI Y D, HE W, GUO M Q, et al. Mechanism design and motion analysis of a flapping-wing air vehicle[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022(1): 7920914.
- [23] YAN Y W, SONG F, XU N, et al. Study on the vibration reduction characteristics of FWMAV flexible bionic wings mimicking the hindwings of *trypoxylus dichotomus*[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2023, 20(5): 2179-2193.
- [24] ZHENG L X, HEDRICK T L, MITTAL R. Time-varying wing-twist improves aerodynamic efficiency of forward flight in butterflies[J]. *PLoS One*, 2013, 8(1): 53060.
- [25] WALKER S M, THOMAS A L R, TAYLOR G K. Deformable wing kinematics in free-flying hoverflies[J]. *Journal of the Royal Society*, 2010, 7(42): 131-142.
- [26] 石健瑜,薛雅丽. 低成本微型飞行器自动化测量平台的设计与搭建[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(4): 60-63.

收稿日期:2024-01-16