

引文格式: 盛世杰, 吴江浩, 张艳来, 等. 可悬停扑翼微型飞行器柔性仿生翼制备及其性能研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(22): 60-67, 87.
SHENG Shijie, WU Jianghao, ZHANG Yanlai, et al. Preparation and performance study of flexible bionic wings for hovering flapping wing micro air vehicles[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(22): 60-67, 87.

可悬停扑翼微型飞行器柔性仿生翼制备及其性能研究*

盛世杰, 吴江浩, 张艳来, 王奕超, 武荟怡

(北京航空航天大学, 北京 100191)

[摘要] 本文针对可悬停扑翼微型飞行器的柔性仿生翼存在质量与惯量过大、扑动效率低、使用寿命短等问题, 提出了一种基于复合材料的新型制备工艺。该工艺采用一种轻质耐撕裂的粗苯面料作为翼膜, 结合碳纤维预浸料固化成型翼脉, 通过激光切割、自粘接技术和标准化热固化流程, 显著提升了仿生翼的综合性能。试验结果表明, 与传统工艺相比, 采用本文工艺制备的仿生翼质量减轻了 53.6%, 扑动效率提高约 1~2 gf/W (提升幅度约 40%), 且在高频长时间扑动中未出现明显破损, 使用寿命显著延长。同时, 对比试验表明, 具有简化翼脉与仿昆虫翼脉的柔性仿生翼, 在气动性能上无显著差异, 这为仿生翼的优化设计提供了新的思路。此外, 飞行试验进一步验证了本文工艺仿生翼的实用性, 为可悬停扑翼微型飞行器的性能提升和实用化奠定了基础。

关键词: 柔性扑翼; 可悬停扑翼微型飞行器; 制备工艺; 仿生; 气动性能

中图分类号: V211; V279; TB33

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.22.060



盛世杰

博士研究生, 研究领域为扑翼微型飞行器仿生翼优化设计。

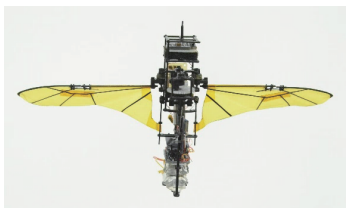
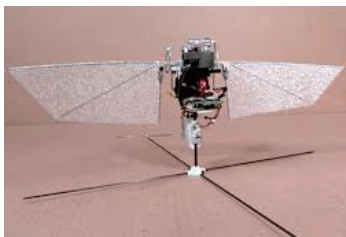
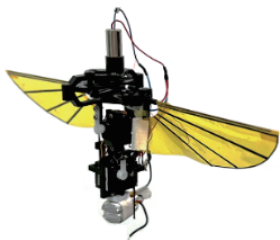
可悬停扑翼微型飞行器以蜂鸟或昆虫为仿生对象, 具有精准悬停、垂直起降和灵活机动的能力, 能够在狭小空间作业, 在灾害救援、环境监测和城市调查等领域具有广泛的应用前景^[1]。目前已有多个研究机构开发了可悬停扑翼微型飞行器的原理样机, 如图 1 所示^[2-6]。仿生翼是可悬停扑翼微型飞行器的关键部件, 其性能直接影响飞行器的整体飞行能力。在无尾式可悬停扑翼微型飞行器中, 柔性仿生翼不仅需要提供飞行所需的升力和推力, 还需要在没有额外控制舵面的情况下产生飞行控制力矩^[7]。

目前, 柔性仿生翼的性能主要从升力产生与扑动效率两个方面评价^[8-9]。

其中, 柔性仿生翼扑动产生的平均升力直接影响飞行器的载重和机动能力; 扑动效率反映单位机械功率 (即气动功率与惯性功率之和) 需求下产生升力的能力, 该值越高, 则飞行器的飞行功耗越低, 续航时间越长。此外, 从实用性角度出发, 使用寿命也是评价仿生翼性能的关键指标, 它不仅关系到仿生翼在高频扑动和潜在碰撞条件下的耐久性, 还影响可悬停扑翼微型飞行器的整体可靠性。

然而, 尽管柔性仿生翼在可悬停扑翼微型飞行器中承担着关键功能, 其现有的设计与制造工艺仍面临多方面的挑战, 限制了可悬停扑翼微型飞行器的性能提升和实际应用。在设计方面, 当前的仿生翼结构往往导

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12072013)。

(a) 宇航环境公司: Nano Hummingbird^[2](b) 布鲁塞尔自由大学: Colibri^[3](c) 建国大学: KUBeetle^[4](d) 马里兰大学: Robotic Hummingbird^[5](e) 新加坡国立大学: NUS-Roboticbird flies^[6]

(f) 北京航空航天大学: BH-fly

图1 可悬停扑翼微型飞行器

Fig.1 Hovering flapping wing micro air vehicles

致其整体质量(惯量)过大,尽管这类结构可能便于在实验室制造,但其高惯量显著增加了仿生翼扑动过程中的惯性功率需求,导致其扑动效率较低,成为制约可悬停扑翼微型飞行器续航时间(通常为几十秒^[10-11])的关键因素之一。在制备材料方面,当前仿生翼的翼膜多采用聚合物薄膜(例如聚酰亚胺(PI)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET))制备^[11-12],由于这些薄膜的抗撕裂性能差,导致仿生翼在复杂飞行环境中(例如树林、灌木丛)易受损,严重影响其使用寿命。此外,一种具有轻质抗撕裂特性的粗苯(Cuben)面料也被尝试用于翼膜制备,但该材料存在手工裁剪加工难度大,以及相较于聚合物薄膜价格偏高的缺点,目前仅在少数扑翼微型飞行器上使用^[13]。在制备工艺方面,现有工艺存在双重挑战。首先,翼脉结构的制造通常依赖标准规格的碳纤维复合材料(如预制圆柱杆或薄片),虽然简化了制备过程,但严重限制了翼脉几何形状的定制化设计与优化空间,不利于实现最佳气动性能;其次,当前的制备流程包含了大量人工环节(如手工裁剪翼膜、手工涂覆胶粘剂),导致仿生翼加工一致性较差(如质量分布不一致),这种不一致性可能引发扑动时的不对称气动力矩,对飞行器的稳定控制产生不利影响。

针对上述问题,本研究提出了一种新型柔性仿生翼制备工艺,旨在克服现有工艺的局限性,提升仿生翼的

综合性能。通过对比本文工艺和传统工艺制备的仿生翼在升力产生、扑动效率及使用寿命方面的差异,验证本文工艺的优越性。此外,在本文仿生翼制备工艺的框架下,进一步探究不同的翼脉结构对仿生翼气动性能的影响规律,为后续优化设计提供试验依据。

1 基于复合材料的柔性仿生翼制备工艺

1.1 柔性仿生翼的结构与制备材料

本文设计的柔性仿生翼在结构上模仿了自然界昆虫的翅膀^[14],主要由翼膜和翼脉两部分组成(图2)。其中,翼膜在扑动过程中承载气动载荷,由轻质、柔软且耐撕裂的粗苯面料(面密度 18 g/m^2)制备。翼脉在仿生翼扑动时约束翼膜,使翼脉产生符合空气动力学需求的被动变形,从而提升仿生翼的气动性能。翼脉由高强度的T700碳纤维复合材料制备,其刚度远高于翼膜。

此外,仿生翼的前缘和翼根均设有双层套筒结构(图2)。套筒结构的外层由翼膜翻折形成,内层嵌入一段聚酰亚胺毛细管(外径 1.1 mm 、厚度 0.04 mm),以增强套筒的支撑性和耐久性。前缘套筒用于安装驱动杆(负责驱动仿生翼的扑动运动);翼根套筒连接控制杆(用于调节扑动过程中的迎角以产生控制力矩)。这种设计不仅实现了仿生翼与可悬停扑翼微型飞行器扑动机构的稳定连接,还使仿生翼能够灵活地绕前缘

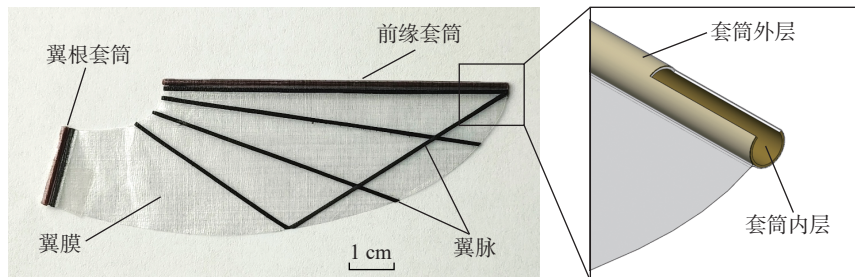


图2 柔性仿生翼的结构

Fig.2 Structure of flexible bionic wing

和翼根转动,从而进一步提升气动效率^[2]。

1.2 柔性仿生翼的制备过程

柔性仿生翼的制备过程可分为翼膜加工、翼脉成型、安装套筒3个关键阶段。

首先进行翼膜制备,本文选用具有优异耐撕裂特性的粗苯面料作为基材,采用激光切割机进行高精度加工,以获得目标几何外形的翼膜(图3(a))。加工完成后,利用粗苯面料的透光性,配合仿生翼设计图纸定位,在翼膜表面标记翼脉粘贴区域,确保后续组装的准确性。完成翼膜制备工作后,需要对翼脉进行预制备。选择厚度0.075 mm的碳纤维环氧树脂预浸料(固化温度90℃),通过激光切割将它们加工为设计尺寸的细长条带,然后粘贴在翼膜的指定位置(图3(b))。由于预浸料条带自身具有黏性,因此在粘贴时无须额外使用胶粘剂。为了制备套筒结构,在粘贴预浸料条带的过程中,需要在翼膜的前缘与翼根处各粘贴一根碳纤维预浸料条带,然后按照设计图纸将翼膜前缘和翼根翻折,使预浸料条带的裸露表面与翼膜再次粘贴,以得到前缘与翼根套筒的外侧结构。

完成上述步骤后,通过热固化工

艺实现翼脉的最终成型(图3(c))。将仿生翼半成品置于真空袋中,并在控制温度的条件下进行固化处理。考虑到粗苯面料的耐热极限(<135℃),本文选用低温固化碳纤维环氧树脂预浸料(固化温度90℃、固化时间60 min)制备翼脉,避免了翼膜在加热过程中损伤。

最后安装套筒(图3(d))。在已经成型的外层套筒中,精确插入与仿生翼的前缘、翼根等长的聚酰亚胺毛细管(外径1.1 mm、壁厚0.04 mm),使其成为套筒的内侧结构。该毛细管不仅增强了套筒的展向刚度,其低摩擦特性还保证了翼面转动的灵活性。至此,柔性仿生翼制备完成。

碳纤维预浸料的固化温度曲线如图4所示,考虑到热固化环境箱的温度控制误差($\pm 3^\circ\text{C}$),固化温度设置为95℃;为确保预浸料充分固化,升温时间为40 min(升温速率 $\leq 2\text{ K/min}$);固化完成后停止加热,约60 min后冷却至室温。固化后的翼脉与翼膜形成稳定的刚-柔复合结构,兼具刚度与变形协调性。

相较于传统工艺,本文制备工艺具有显著优势:(1)激光切割替代人工裁剪,保证构件尺寸一致性(误差小于0.1 mm);(2)翼脉在翼膜上固

化成型工艺,无须手工涂抹胶粘剂粘贴翼脉,避免了胶粘剂厚度不均匀与老化脱落的问题;(3)标准化热固化流程使产品批次稳定性提升。

2 柔性仿生翼的性能研究

2.1 不同工艺的柔性仿生翼的性能对比

为定量评估工艺改进效果,采用本文工艺与传统工艺制备了具有相同结构的仿生翼试样(图5)。如表1所示,在几何外形、翼展、翼脉结构一致的前提下,本文工艺仿生翼的质量仅为传统工艺仿生翼的46.4%。这一减重效果主要源于:(1)采用了低面密度的翼膜材料;(2)预浸料自

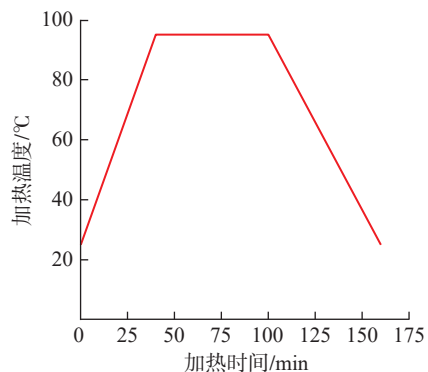


图4 碳纤维预浸料的固化温度曲线
Fig.4 Curing temperature curve of carbon fibre prepreps

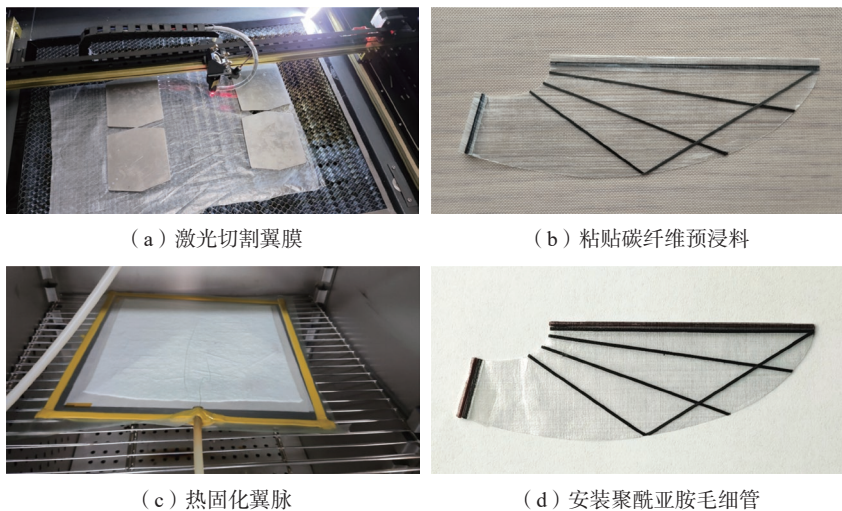
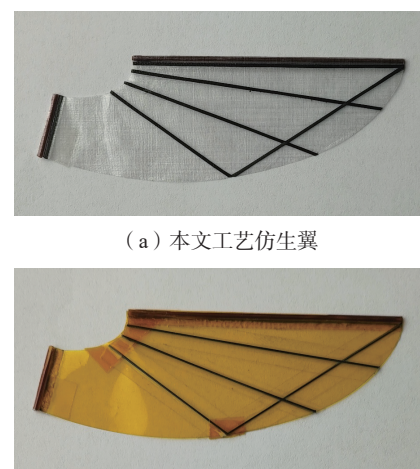


图3 柔性仿生翼制备工艺流程

Fig.3 Preparation process flow for flexible bionic wing



(a) 本文工艺仿生翼

(b) 传统工艺仿生翼

图5 仿生翼试样
Fig.5 Bionic wing samples

粘接减少了胶粘剂的附加质量；(3)更轻质的翼脉结构。质量的大幅降低使仿生翼扑动过程中的惯性功率显著降低,有助于提高扑动效率。

使用图6所示的试验测量系统测量了图5中两种柔性仿生翼的平均升力 \bar{L} 、扑动效率 (\bar{L}/P_m) 、 P_m 为扑动所需机械功率)和使用寿命。试验在无风常温常压的室内进行,试验系统包含扑动机构、力传感器(KD34s, ME)、测量放大器(GSV-8DS, ME)、电流探头(TCP2020, Tektronix)、示波器(TBS1102C, Tektronix)、稳压电源和计算机等设备。其中,扑动机构用于驱动仿生翼运动,稳压电源用于向扑动机构的空心杯电机供能,力传感器与信号采集放大器用于测量升力,电流探头与示波器用于监测电机的电流值 I 。电机输出的机械功率 P_m 通过式(1)评估^[15]。

$$P_m = (U - IR)(I - I_0) \quad (1)$$

式中, U 为稳压电源的输出电压; R 为空心杯电机的内阻; I_0 为电机在对应转速下的空载电流。此外,在试验中使用高速摄像机(FASTCAM Mini, Photron)记录柔性仿生翼的扑动和变形过程。

如图7所示,在相同扑动频率 f 下,本文工艺仿生翼产生的平均升力略低于传统工艺仿生翼,且这种差异随频率升高而增大,该现象可以用以下两点解释。

首先,两种仿生翼的升力差异部分源于扑动幅度的不一致。在扑动过程中,扑动机构中的驱动杆在仿生翼翻转过程中承受较大的惯性载荷,发生明显弯曲变形,这导致实际扑动幅度大于设计值^[16]。由于传统工艺仿生翼的转动惯量较大,其在翻转阶段产生的惯性载荷更强。因此,在相同扑动频率下,其扑动幅度始终高于本文工艺仿生翼,且该差异随频率升高而进一步扩大。如图8所示,当扑动频率由15 Hz增加至20 Hz后,本文工艺仿生翼的扑动幅度由175.8°

表1 本文/传统工艺制备的仿生翼(单翼)的质量、几何参数与制备材料

Table 1 Mass, geometric parameters and preparation materials of single bionic wing prepared using proposed process and traditional process

对比项	本文工艺仿生翼	传统工艺仿生翼
质量/g	0.160	0.345
结构质量占比	翼膜: 0.055 g (34.4%); 翼脉: 0.084 g (52.5%); 套管: 0.021 g (13.1%)	翼膜: 0.106 g (30.7%); 翼脉: 0.178 g (51.6%); 套管: 0.021 g (6.1%); 胶粘剂: 0.040 g (11.6%)
翼长/cm	9.5	9.5
翼面积/cm ²	25.87	25.87
翼膜材料	粗苯面料	聚酰亚胺(厚度 0.025 mm)
翼脉材料	碳纤维复合材料(预浸料固化)	碳纤维复合材料(成品)
额外使用粘合剂	否	是

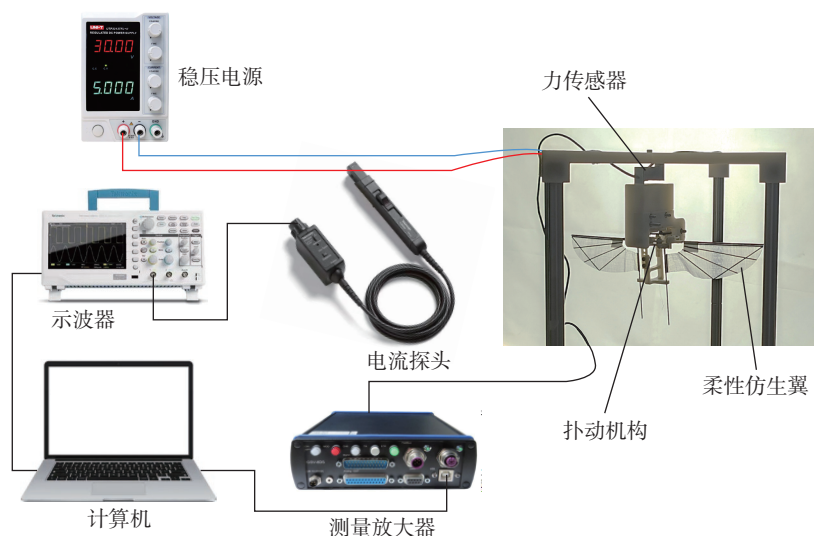


图6 试验测量系统组成

Fig.6 Components of experimental measurement system

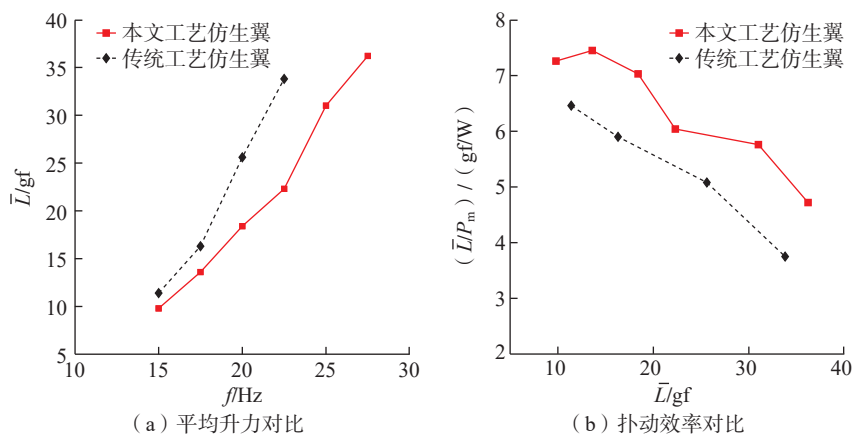


图7 本文/传统工艺仿生翼的气动性能对比

Fig.7 Comparison of aerodynamic performance of the bionic wings prepared using proposed process and traditional process

增加至 182.2° , 而传统工艺仿生翼由 183.0° 增加至 193.3° 。

其次, 升力差异还与翻转运动的相位有关。当仿生翼扑动至上下极限位置时, 会在自身惯性作用下绕前缘翻转, 该过程不仅需要克服气动阻力, 也贡献了部分升力^[17]。在相同的扑动频率下, 传统工艺仿生翼因转动惯量较大, 具有更高的转动动能, 使其翻转相位相对提前。如图 9 所示, 在上扑运动开始时, 本文工艺仿生翼的俯视投影面积较小, 表明其尚未完全完成翻转; 相反, 传统工艺仿生翼具有较大的俯视投影面积, 证明其翻转相位提前。已有研究表明, 翻转相位提前有助于提高升力系数, 因此传统工艺仿生翼能够产生更高的升力^[17-18]。

然而, 在产生同等升力时, 相较于传统工艺仿生翼, 本文工艺仿生翼的扑动效率始终高约 $1\sim 2$ gf/W (图 7 (b)), 这主要源于两种仿生翼在惯性功率上的差异。在扑动过程中, 当仿生翼加速时, 电机输出的机械功一部分用来增加仿生翼的动能 (即克服惯性做功), 另一部分用来克服气动阻力; 而在减速时, 仿生翼的惯性驱使翼继续扑动, 其动能可部分用于克服气动阻力, 剩余部分则以摩擦等形式耗散^[19]。由于传统工艺仿生翼转动惯量较高, 加速时需要电机输出更多机械功率, 同时在减速阶段耗散的动能也更多, 导致其扑动效率较低。相反, 本文工艺仿生翼凭借较低的转动惯量, 在上述过程中能量损耗更少, 因而表现出更高的扑动效率。如图 7 (b) 所示, 在平均升力 30 gf 时, 本文工艺仿生翼的扑动效率比传统工艺仿生翼高约 40% 。这一效率优势意味着, 对于悬停升力需求确定的扑翼微型飞行器, 本文工艺仿生翼能够显著降低悬停所需的机械功率, 从而有效延长飞行器的续航时间。

在使用寿命方面, 两种工艺的仿

生翼表现出显著差异。本试验分别制备了两种工艺的仿生翼各 5 对, 并在 25 Hz 扑动频率下进行持续 30 min 的测试, 结果如图 10 所示。测试结束后, 本文工艺的 5 对仿生翼均未出现明显破损, 仅翼根部分的翼膜

出现轻微褶皱 (图 10 (a)), 该褶皱源于扑动过程中翼根区域承受剧烈、周期性的拉伸载荷。相比之下, 传统工艺仿生翼出现了明显损伤, 3 只翼的翼膜发生撕裂, 其中 2 只的裂口位于翼根附近, 导致完全丧失升力, 所

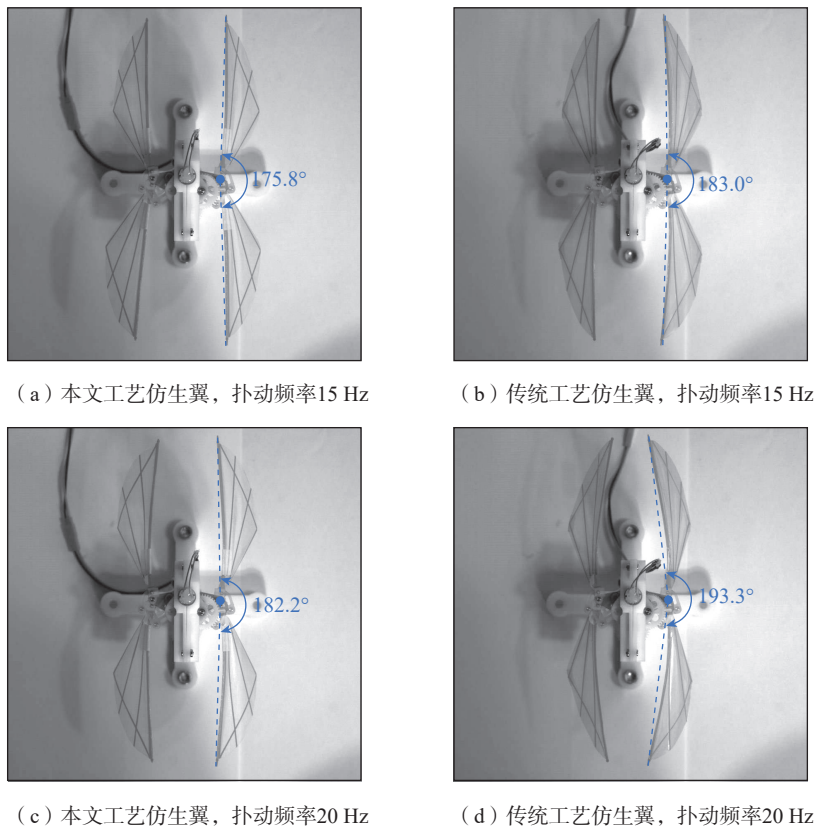


图 8 本文 / 传统工艺仿生翼的扑动幅度对比

Fig.8 Comparison of flapping amplitudes of bionic wings prepared using proposed process and traditional process

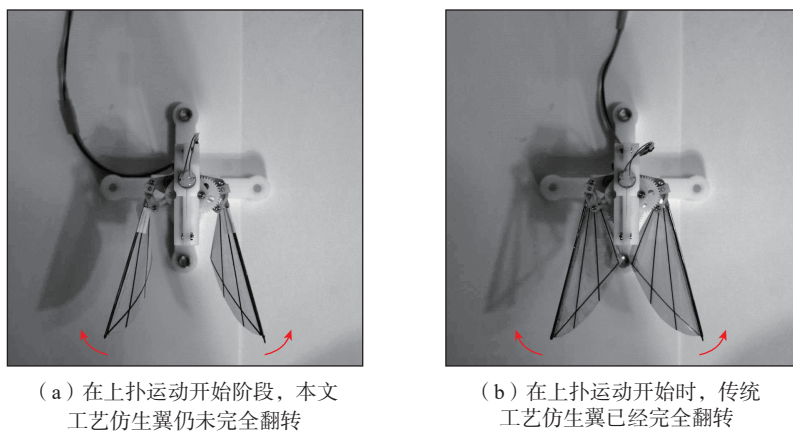


图 9 本文 / 传统工艺仿生翼的翻转运动对比

Fig.9 Comparison of rotational motions of bionic wings prepared using proposed process and traditional process

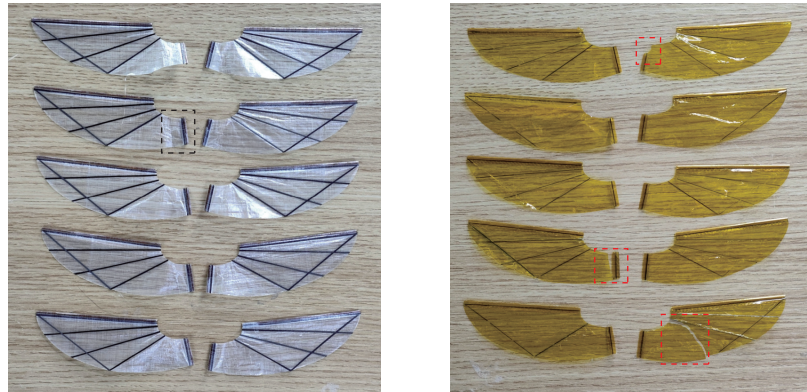
有试件均出现翼膜褶皱,并伴有不同程度的脱胶现象,即翼脉从翼膜上剥离,严重影响气动功能(图 10(b))。此类损伤可归因于聚酰亚胺薄膜抗撕裂性能较差,翼膜边缘的微小初始裂口在交变载荷下不断扩展,最终导致整体撕裂。同时,粘接界面可靠性不足进一步引发翼脉脱离。上述结果表明,本文工艺所制备的仿生翼具有更优的耐久性和更长的使用寿命。

2.2 不同翼脉的柔性仿生翼的性能对比

本文进一步探索了翼脉结构的优化潜力。如图 11 所示,受自然界昆虫翅膀的启发,制备了模仿食蚜蝇真实翼脉结构的柔性仿生翼(仿昆虫翼脉仿生翼),其外形尺寸与表 1 中本文工艺的仿生翼一致,单翼质量为 0.162 g,与本文工艺仿生翼(为了便于区分,下文将其改称为简化翼脉仿生翼)的质量相当。

试验测量表明,两种仿生翼(仿昆虫翼脉 / 简化翼脉仿生翼)在气动性能方面未表现出显著差异。如图 12 所示,在相同扑动频率下,简化翼脉仿生翼的平均升力略高于仿昆虫翼脉仿生翼,但二者的扑动效率基本一致。这种性能上的相似性主要源于两者在扑动运动和变形模式上的高度接近。通过对比相同扑动位置(即扑动周期内相同时刻)的高速摄像图像(图 13),可观察到两种仿生翼的外轮廓几乎完全重合。这种运动与变形行为的一致性,使它们在相同扑动频率下产生的升力及所需气动功率十分接近。此外,由于两种仿生翼的质量和结构形式相近,其转动惯量也应处于同一量级,因而惯性功率消耗方面亦无显著差异。上述因素共同作用,使得两种仿生翼表现出相似的扑动效率。

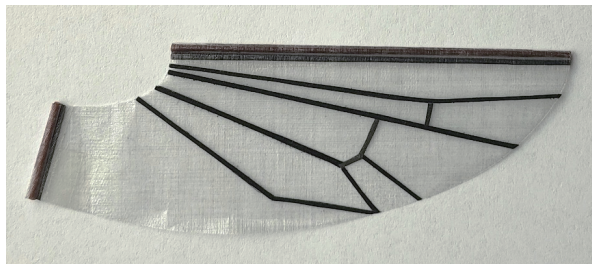
值得注意的是,仿昆虫翼脉仿生翼因翼脉数量更多、结构更复杂,其制备难度高于简化翼脉仿生翼。相比之下,简化翼脉仿生翼在工程应



(a) 本文工艺仿生翼
(b) 传统工艺仿生翼
(黑色虚线框为翼膜褶皱区域示例)
(红色虚线框为翼膜撕裂位置)

图 10 仿生翼扑动 30 min 后的情况

Fig.10 State of bionic wings after flapping for 30 minutes



(a) 仿昆虫翼脉仿生翼



(b) 食蚜蝇翼

图 11 仿昆虫翼脉仿生翼与食蚜蝇翼

Fig.11 Bionic wing with insect-like veins and hoverfly wing

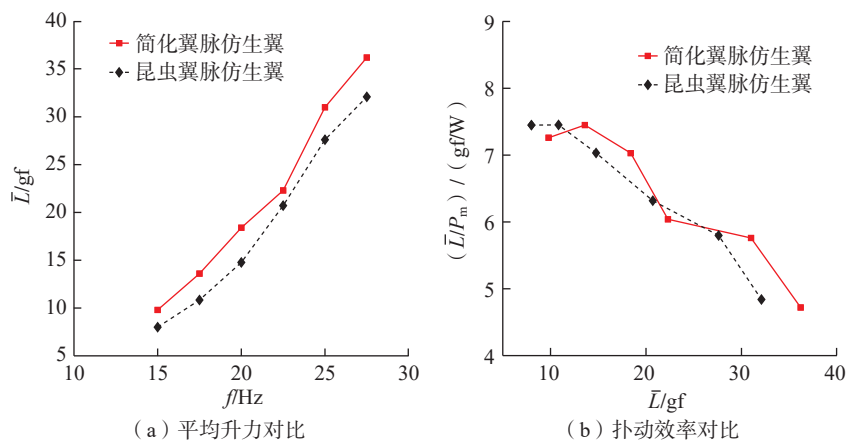


图 12 简化翼脉 / 仿昆虫翼脉仿生翼的气动性能对比

Fig.12 Comparison of aerodynamic performance between bionic wings with simplified veins and those with insect-like veins

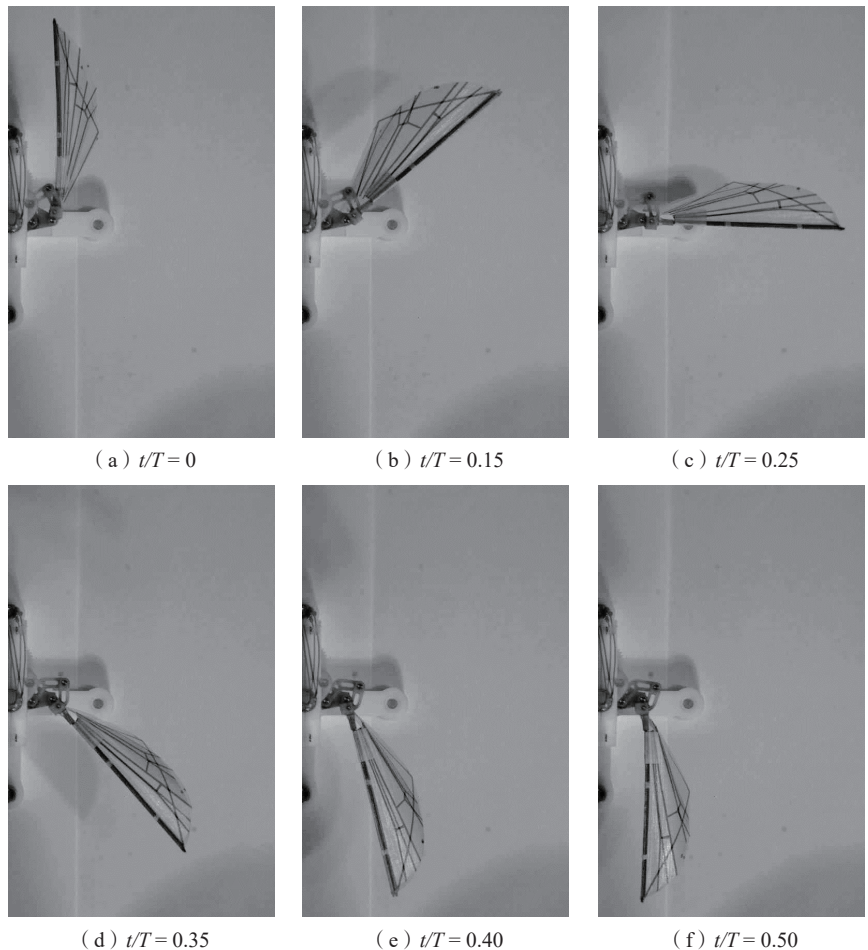
用上更具合理性。结构模态分析结果表明,两种仿生翼具有相似的模态特征(图 14)。这表明,尽管在局部几何形态(翼脉形状)方面存在差异,但两种仿生翼的整体刚度和质量分布较为接近。这一特性使得它们在相同动态载荷作用下表现出相似的变形模式,与图 13 中的运动观测结果一致。进一步表明,昆虫的复杂翼脉结构可能并非完全出于气动性能优化的需求。通过合理简化的翼脉设计,同样可以获得与真实昆虫翼脉相当的气动性能。因此,从实际工程应用的角度出发,简化翼脉仿生翼在加工可行性和产品一致性方面表现更优,因此是更具实用价值的选择。

2.3 柔性仿生翼的试飞测试

除地面测试外,本研究还在无风常温常压的室内环境开展了试飞测试,以检验柔性仿生翼的实际性能。简化翼脉仿生翼被安装在一款无尾式可悬停扑翼微型飞行器(BH-fly)上(图 15(a)),该飞行器质量约为 33 g,实际试飞过程如图 15(b)所示。试飞测试表明,本文工艺仿生翼不仅能为飞行器产生足够升力,同时也能满足飞行器的飞行控制需求,使飞行器能够实现悬停、垂直起降、前飞、倒飞等动作。

3 结论

针对当前可悬停扑翼微型飞行器柔性仿生翼存在的问题,本文提出了一种基于复合材料的新型制备工艺。通过试验验证,本文工艺制备的仿生翼展现出多方面的性能优势:质量减轻达 50% 以上,扑动效率提升约 1~2 gf/W;在较高的平均升力条件下,本文工艺仿生翼的扑动效率比传统工艺仿生翼高约 40%,使用寿命显著延长。这些改进有助于提升可悬停扑翼微型飞行器的续航性能,为其迈向实用化提供了关键技术支撑。



注: t 为真实时间; T 为扑动周期。

图 13 简化翼脉/仿昆虫翼脉仿生翼在相同扑动位置时的重叠图像

Fig.13 Overlapping images of bionic wings with simplified veins and those with insect-like veins at the same flapping position

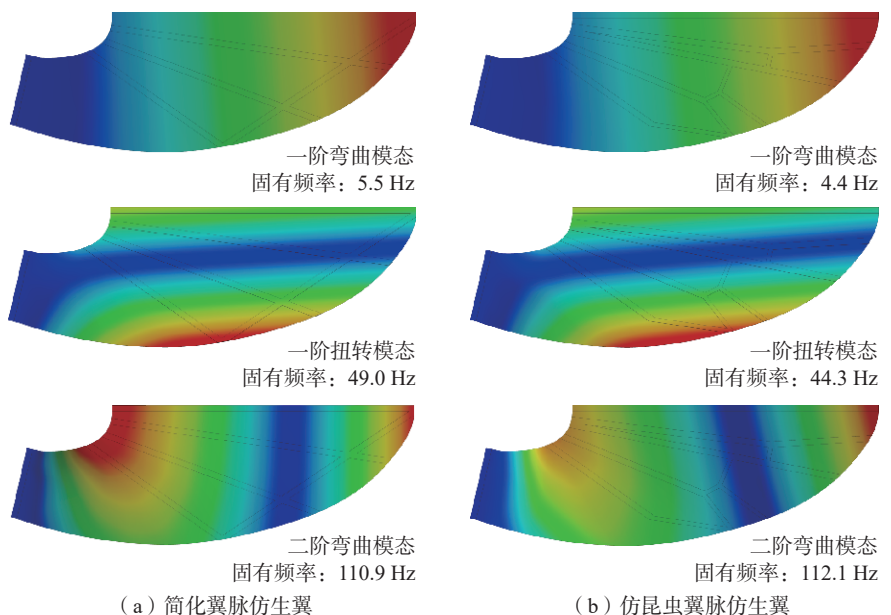
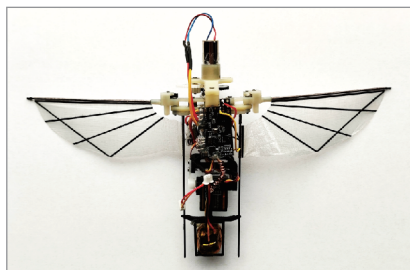


图 14 模态分析结果

Fig.14 Result of mode analysis



(a) 可悬停扑翼微型飞行器 (BH-fly)



(b) 飞行器前飞过程

图 15 柔性仿生翼的试飞

Fig. 15 Test flight of flexible bionic wing

在工艺设计方面,本研究实现了两点突破;首先,采用激光切割和预浸料自粘接技术,大幅减少了人工制备环节;其次,通过标准化热固化流程,使产品加工一致性提升。这些技术进步不仅解决了传统工艺存在的质量波动大、使用寿命短等问题,还为后续的批量生产仿生翼奠定了基础。

此外,本文发现,复杂昆虫翼脉与简化翼脉的仿生翼在气动性能(包括产生升力与扑动效率)上没有显著差异。这一发现表明,在设计柔性仿生翼的翼脉时,不必完全复制生物结构的复杂性,这为柔性仿生翼优化设计提供了新的思路。

参考文献

- [1] 程诚,陈隆,张艳来,等.可悬停仿生扑翼微型飞行器气动设计综述[J].空气动力学学报,2025,43(2):1-26.
- CHENG Cheng, CHEN Long, ZHANG Yanlai, et al. A review of aerodynamic design for hover-capable flapping-wing micro air vehicles[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2025, 43(2): 1-26.
- [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. Nashville, Tennessee: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [3] HU K, DENG H C, XIAO S J, et al. Design of a bio-inspired, two-winged, flapping-wing micro air vehicle with high-lift performance[J]. Journal of Bionic Engineering, 2024, 21(3): 1191-1207.
- [4] PHAN H V, PARK H C. Mechanisms of collision recovery in flying beetles and flapping-wing robots[J]. Science, 2020, 370(6521): 1214-1219.
- [5] UNIVERSITY T A, COLEMAN D, HRISHIKESHAVAN V, et al. Design, development and flight-testing of a robotic hummingbird[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 71st Annual Forum. Virginia Beach, VA. The Vertical Flight Society, 2015: 1-18.
- [6] NGUYEN Q V, CHAN W L. Development and flight performance of a biologically-inspired tailless flapping-wing micro air vehicle with wing stroke plane modulation[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 14(1): 016015.
- [7] PHAN H V, PARK H C. Design and evaluation of a deformable wing configuration for economical hovering flight of an insect-like tailless flying robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13(3): 036009.
- [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] 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.
- [10] PHAN H V, AURECIANUS S, AU T K L, et al. Towards the long-endurance flight of an insect-inspired, tailless, two-winged, flapping-wing flying robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5059-5066.
- [11] PHAN H V, KANG T, PARK H C. Design and stable flight of a 21 g insect-like tailless flapping wing micro air vehicle with angular rates feedback control[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(3): 036006.
- [12] MA H, GONG P Y, TIAN Y Q, et al. HiFly-dragon: A dragonfly inspired flapping flying robot with modified, resonant, direct-driven flapping mechanisms[J]. Drones, 2024, 8(4): 126.
- [13] ROSHANBIN A, ALTARTOURI H, KARÁSEK M, et al. COLIBRI: A hovering flapping twin-wing robot[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2017, 9(4): 270-282.
- [14] GORDON M S, BLICKHAN R, DABIRI J O, et al. Animal locomotion: physical principles and adaptations[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [15] WU J H, SHENG S J, LIU Z M, et al. Experimental study on the aerodynamic optimization design of flexible wings for tailless flapping wing micro air vehicles[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2025, 17: 17568-293251348206.
- [16] DU F, WU J H. Analytical modeling for flapping wing deformation and kinematics with beam flexibility[J]. AIAA Journal, 2023, 61(2): 875-889.
- [17] SUN M, TANG J. Lift and power requirements of hovering flight in *Drosophila virilis*[J]. The Journal of Experimental Biology, 2002, 205(16): 2413-2427.
- [18] WU J H, SUN M. Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing[J]. The Journal of Experimental Biology, 2004, 207(7): 1137-1150.
- [19] MAO S, GANG D. Lift and power requirements of hovering insect flight[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 19(5): 458-469.

通信作者: 吴江浩,教授,博士,研究领域为新型扑翼、旋翼微型飞行器设计,微型飞行器仿生流体力学与飞行动力学,飞发耦合翼身融合布局飞机气动设计与优化,飞机飞行载荷计算与适航符合性方法。

(下转第 87 页)

excellent multi-physics field manipulation capabilities in mechanics, acoustics, and thermodynamics, and exhibit broad application prospects in the field of smart structures. Although the development of additive manufacturing technology has significantly enhanced the shape complexity of lattice materials, its limitations in build size and manufacturing efficiency still impede the integrated fabrication of large-scale complex structures, which has become a key technical bottleneck for their engineering application. To address this, this paper proposes a prefabricated assembly construction method using standard unit cells, which enables configuration flexibility and manufacturing feasibility for large-scale lattice materials in complex structures via modular construction and spatial assembly. In terms of structural configuration, octahedral lattice unit cells serve as the basic components, with two connection strategies developed: Bolt joints for flexible material systems and bionic plug-in joints for rigid ones, enabling modular assembly for diverse application requirements. For flexible structures, linear actuators are integrated to construct an actively deformable wing structure, which achieves local deformation control with a maximum thickness adjustment range of 25 mm and a maximum surface inclination angle of 12° . For rigid structures, a lattice sandwich cockpit prototype is constructed, and a homogenized finite element model is established for static mechanical analysis, resulting in a bending stiffness of 2564.1 N/mm and a torsional stiffness of 1409 N · m/deg. The research results indicate that this assembled lattice structural system, while maintaining lightweight properties and high performance, possesses good assembly flexibility and cross-scale adaptability, thereby offering an effective configuration and manufacturing solution for the engineering application of smart structures and lightweight aircraft components.

Keywords: Lattice materials; Prefabricated assembled structures; Modular design; Additive manufacturing; Smart structures

(责编 七七)

(上接第 67 页)

Preparation and Performance Study of Flexible Bionic Wings for Hovering Flapping Wing Micro Air Vehicles

SHENG Shijie, WU Jianghai, ZHANG Yanlai, WANG Yichao, WU Huiyi

(Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] This paper proposes a novel preparation process utilizing composite materials for the flexible bionic wings of hovering flapping wing micro air vehicles (FWMAVs), addressing issues such as excessive mass and inertia, low flapping efficiency, and limited service life. The process employs lightweight, tear-resistant Cuben fabric as the wing membrane, combined with carbon fiber prepreg curing to form the wing veins. It also incorporates laser cutting, self-bonding technology, and a standardized thermal curing process, significantly enhancing the performance of the bionic wings. Experimental results demonstrate that, compared to traditional processes, the bionic wing prepared using this process reduces mass by 53.6%, increases flapping efficiency by 1–2 gf/W (approximately 40%), and exhibits no significant damage during high-frequency, long-duration flapping, thereby substantially extending service life. Meanwhile, comparative experiments reveal no significant difference in aerodynamic performance between flexible bionic wings with simplified wing veins and those with insect-like veins, offering a new perspective for the optimal design of bionic wings. Furthermore, flight experiments validate the practicality of the proposed bionic wing fabrication process, laying a foundation for performance enhancement and practical application of hovering FWMAVs.

Keywords: Flexible wings; Hovering flapping wing micro air vehicles; Preparation process; Bionics;

Aerodynamic performance

(责编 七七)