

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.03.019

# 昆虫尺度微型仿生飞行器的研究

## Research on Insect-scale Flapping-wing Micro Aerial Vehicles

邹 阳 张卫平 周 岁 王晨阳 / ZOU Yang ZHANG Weiping ZHOU Sui WANG Chenyang

(上海交通大学, 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

### 摘 要:

微型仿生飞行器的研究涉及仿生学原理、准稳态气动力和原理样机的研制等。概述了上海交通大学针对昆虫尺度的微型仿生飞行器的新颖的设计和加工方法。该方法确保了零部件空间位置的合理安排,从而减少了零部件的装配难度。具体来说,压电驱动器的设计考虑了电气隔离和装配问题;传动机构与机身整合成一个部件,避免了相互之间的装配。翅脉的纤维方向进行了合理的布置,使得翅膀拥有高强度和高刚度。最终,研制的压电驱动微型仿生飞行器重 84mg,翼展 35mm,在 100Hz 的拍打共振频率下可以产生  $\pm 60^\circ$  的拍打角度,能产生足够的升力实现起飞。

**关键词:** 仿生学;微型飞行器;压电驱动器;共振频率

**中图分类号:** V211.8

**文献标识码:** A

[Abstract] The research of flapping-wing micro aerial vehicles (FMAVs) involves the study of bionics principles, quasi-steady-state aerodynamics and prototypes development. This paper gives an overview of a novel method for designing and fabricating insect-scale FMAVs from Shanghai Jiao Tong University. Each component is properly designed and reasonably arranged to reduce the assembly difficulties of such insect-scale FMAV. Specifically, the design of the piezoelectric actuator has taken into account the electrical isolation and assembly issues. The transmission and the airframe are integrated into one component to avoid assembly difficulties. Fiber directions of the wing veins are reasonably arranged to possess high strength and high stiffness. As a result, this FMAV, which weighs 84mg with a wingspan of 35mm, can generate sufficient thrust to take off with a flapping amplitude approximately  $\pm 60^\circ$  under the resonant wingbeat frequency of 100Hz.

[Keywords] bionics; micro aerial vehicles; piezoelectric actuators; resonant frequency

## 0 引言

昆虫通过拍动翅膀飞行,表现出很强的敏捷性、机动性和稳定性,并且可以产生自身重量几倍的升力<sup>[1-5]</sup>。扑翼飞行的气动力机制在许多方面与固定翼飞行不同<sup>[4-5]</sup>,其关键优势在于能产生稳定的气动力,实现悬飞。近几十年来,许多研究人员一直在从事昆虫飞行机制的研究,并尝试研制微型

仿生飞行器<sup>[6-8]</sup>。值得庆幸的是,微型仿生飞行器的研究在过去几年中取得了前所未有的进展。例如,哈佛大学微型机器人实验室已经实现了压电驱动微型仿生飞行器的首次起飞<sup>[6]</sup>。普渡大学仿生机器人实验室研发了一款电磁驱动微型仿生飞行器,实现了起飞<sup>[7]</sup>。

随着尺寸的缩小,传统的机械结构和系统会遇到很多挑战。对于昆虫尺度的微型仿生飞行器(通

[基金项目] 预研项目(LZY2016215, 301020803, 1620010701);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0583);教育部支撑项目(6141A02022607);上海专业技术服务平台项目(16DZ2290103)

常翼展 $<5\text{cm}$ ,重量 $<1\text{g}$ ),传统的机械部件效率低下,因为在这个尺度,表面力开始起到比体积力更重要的作用。上海交通大学研制了一台电磁驱动的昆虫尺度微型仿生飞行器<sup>[8]</sup>和一台压电驱动的昆虫尺度微型仿生飞行器<sup>[9]</sup>,均成功实现了克服重力起飞。本文以压电驱动的昆虫尺度微型仿生飞行器为例,概述了上海交通大学昆虫尺度微型仿生飞行器的设计和加工方法以及相应的测试技术。

## 1 设计与制造

### 1.1 整体设计

如图1所示,昆虫翅膀由间接肌肉(背部腹侧肌肉和背部纵向肌肉)驱动,从而产生上冲程和下冲程。同时,翅膀产生不受肌肉控制的被动扭转运动,产生升力<sup>[10-11]</sup>。

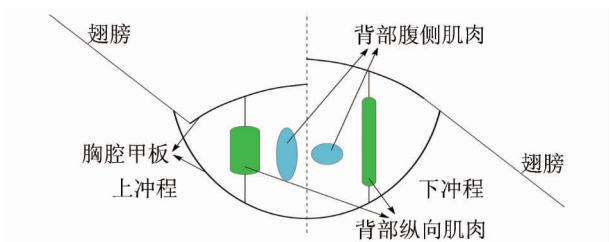


图1 昆虫的胸腔结构示意图

之前已经尝试使用CFD的方法研究了蜂鸟扑翼飞行的周围流场分布,获得了一些升阻力的数据<sup>[12]</sup>。除此之外,还基于叶素法建立了昆虫扑翼飞行的准稳态气动力模型<sup>[13]</sup>,并在悬飞条件下对昆虫翅膀的形貌学和运动学进行了优化<sup>[14]</sup>。前期的理论工作为微型仿生飞行器样机的设计提供了有力的参考。

如图2所示,上海交通大学研制的微型仿生飞行器由压电驱动器、传动机构与机身、一对翅膀和辅助零件组成。每个翅膀分别胶合在传动机构的

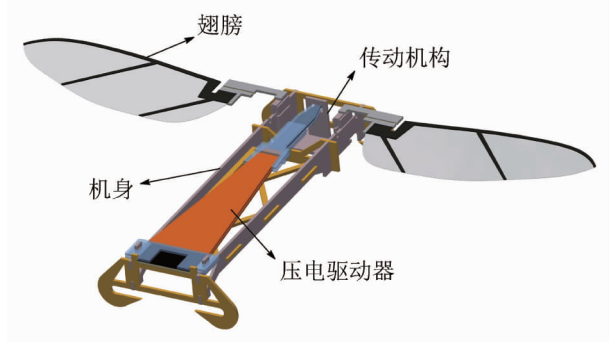


图2 微型仿生飞行器的整体设计图

两侧,各自拥有两个自由度,即拍动和扭转。在翅膀根部设计了柔性铰链,允许翅膀在惯性力和气动力作用下发生被动扭转运动,并产生升力。

### 1.2 压电驱动器

驱动器的选择主要考虑其输出力、位移和响应速度等因素。悬臂梁式双晶片压电驱动器具有位移精度高、响应速度快、输出力矩大、功耗低等优点,是一种良好的驱动方式<sup>[6]</sup>。之前的工作已经对压电驱动器的几何形状和材料选型进行了优化,最大限度地提高了其功率密度<sup>[15]</sup>。因此,本文重点介绍的是压电驱动器的加工工艺。

如图3所示,压电驱动器由七层平面材料通过激光加工制作而成。首先,使用紫外激光将七层平面材料(包括PZT、玻璃纤维和碳纤维)图案化从而获得所需的平面形状。然后,根据预先设计的定位孔和槽,将七层平板按照特定的顺序叠合在一起。在高温高压的条件下,碳纤维和玻璃纤维中的环氧树脂固化,并将七层平板粘合在一起。最后,使用紫外激光切割外形结构,释放出压电驱动器。

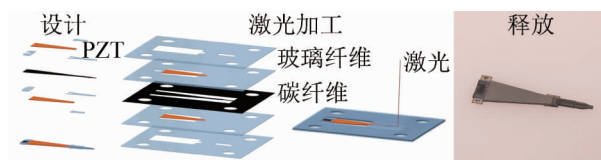


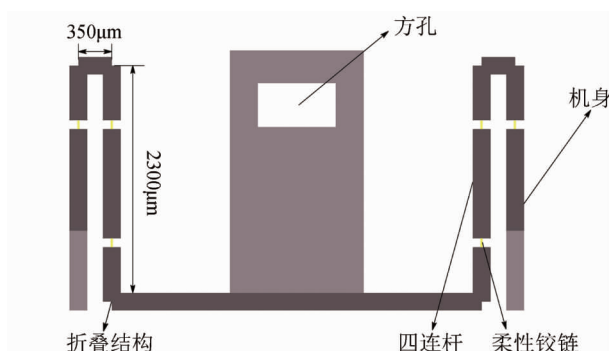
图3 压电驱动器的设计、制造和释放

### 1.3 传动机构与机身

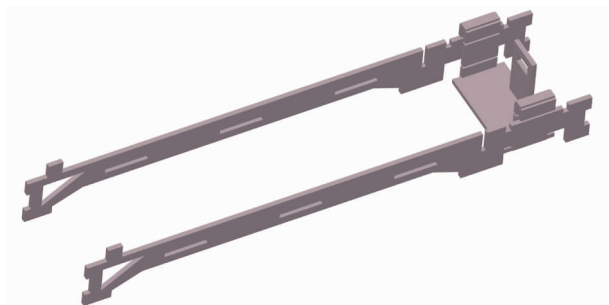
传动机构将压电驱动器的位移放大,转化为翅膀的往复拍打运动。但是,随着尺度的缩小,表面力的作用开始强于体积力,传统的旋转关节变得低效。因此,如图4(a)所示,最终选用了基于柔性铰链的四连杆机构作为微型仿生飞行器的传动机构<sup>[16]</sup>。机身的主要作用是定位、固定传动机构和驱动器。另一方面,在保证机身刚度的前提下,应该尽可能减轻其重量。

由于传动机构的特征尺寸和总体尺寸都相对较小,导致了传动机构与机身之间的装配问题。例如,使用手动过程很难将传动机构与机身装配在一起。另外,装配误差对传动机构特征尺寸的精度影响很大。在本文中,将传动机构与机身集成在一个部件中(见图4(b)),避免了两者之间的装配,保证了传动机构特征尺寸的精度。

传动机构与机身的制造包括两个部分:柔性铰链和折叠结构。柔性铰链可用作“轴”,而折叠结构可用于平面形状到三维形状的转化。这两个部分均由两层  $80\mu\text{m}$  厚的碳纤维和一层  $7.5\mu\text{m}$  厚的聚酰亚胺薄膜叠合而成。其中,碳纤维作为刚性结构层,聚酰亚胺作为柔性变形层。柔性铰链和折叠结构的制造过程如图 5 所示。值得强调的是,折叠结构一旦被释放,它们就需要根据预先设计的折痕进行折叠,然后使用瞬干胶锁住。

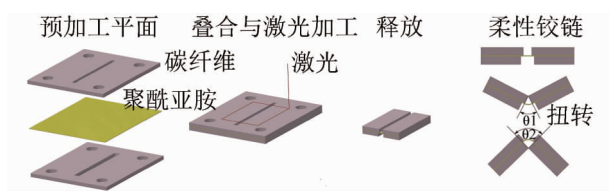


(a) 微型仿生飞行器的胸腔结构剖视图

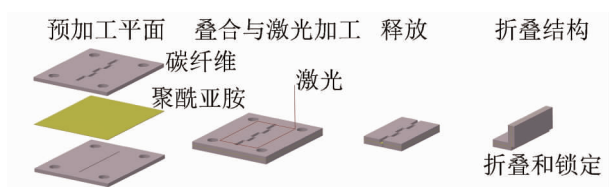


(b) 传动机构与机身的一体化 CAD 模型

图 4 传动机构与机身的设计



(a) 柔性铰链的加工过程示意图



(b) 折叠结构的加工过程示意图

图 5 柔性铰链与折叠结构制造过程示意图

对于传动机构与机身的一体化部件,通过使用图 5 中的加工过程很容易获得其平面结构。经过折叠和锁定之后,可以获得其三维结构,如图 6 所示。

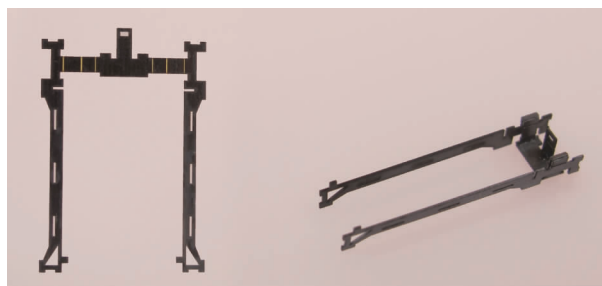


图 6 传动机构与机身一体化结构的照片  
(包括折叠前和折叠后)

#### 1.4 翅膀

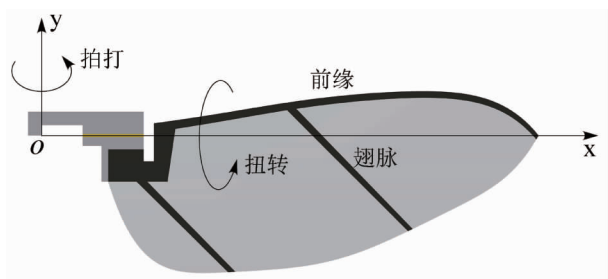
人工翅膀的设计仿照真实昆虫 *Eristalis tenax* 的翅膀形状和大小。翅膜使用  $1.5\mu\text{m}$  厚的聚酯膜 (Ultra-polyester), 翅脉使用  $60\mu\text{m}$  厚的碳纤维预浸料。最终,获得的单个翅膀重量为  $0.5\text{mg}$ , 翅膀长度为  $13\text{mm}$ 。人工翅膀和 *Eristalis tenax* 翅膀的形貌学参数对比如表 1 所示。

表 1 人工翅膀和 *Eristalis tenax* 翅膀的形貌学参数

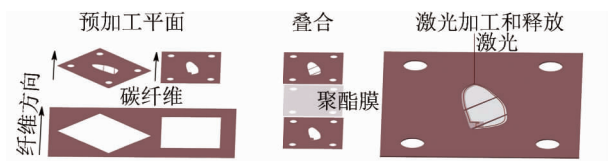
形貌学参数	人工翅膀	<i>Eristalis</i> 翅膀
$R/\text{mm}$	13.0	11.4
展弦比	6.86	7.15
$r_1(S)$	0.474	0.471
$r_2(S)$	0.534	0.534
$r_3(S)$	0.579	0.579

其中,  $R$  是翅膀长度,  $r_k(S)$  是翅膀的无量纲  $k$  阶面积矩回转半径, *Eristalis* 翅膀的相关数据来源于 Ellington C P<sup>[17]</sup>。

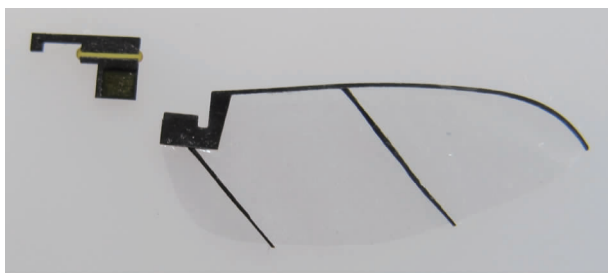
碳纤维材料是单向的,沿着纤维方向的模量远高于垂直于纤维方向的模量。如图 7(a)所示,翅膀的前缘和翅脉之间存在一个很大的角度(约  $45^\circ$ )。如果将前缘和翅脉同时从单个碳纤维片材上加工获得,则不可能保证它们都沿着纤维方向。如果前缘和翅脉分开制造并使用手动装配,则难以保证翅膀的重复性和一致性。在本文中,如图 7(b)所示,前缘和翅脉在不同的碳纤维片材中加工获得,同时保证了它们都沿着碳纤维的纤维方向。然后,根据预先设计的定位孔,将两层碳纤维片材叠合在一起,并将  $1.5\mu\text{m}$  厚的聚酯膜夹在两层之间。最后,通过紫外激光器切割外形释放出最终的翅膀。



(a) 人工翅膀的设计图



(b) 翅膀的加工过程示意图



(c) 人工翅膀和翅膀根部的实物照片

图7 人工翅膀设计、加工及实物示意图

翅膀根部的制造工艺与传动机构类似,采用 $60\mu\text{m}$ 厚的碳纤维和 $7.5\mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺制造而成,如图7(c)所示。

### 1.5 辅助零件

辅助零件包括加强筋和钩子。它们由两层 $80\mu\text{m}$ 厚的碳纤维制成,两层碳纤维的纤维方向正交。如图8所示,使用紫外激光器可以很容易地制造出加强筋和钩子。

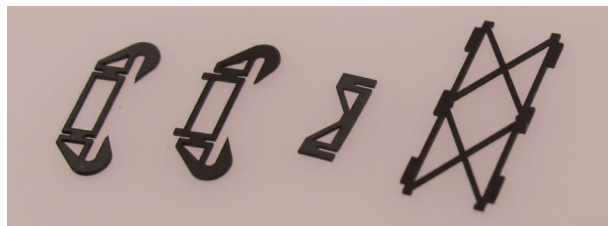


图8 加强筋和钩子的实物照片

### 1.6 整机装配

所有部件按照一定的顺序通过手工方式装配起来,形成了最终的压电驱动微型仿生飞行器,如图9所示。表2列出了所有部件和整机的重量。

图9所示。表2列出了所有部件和整机的重量。

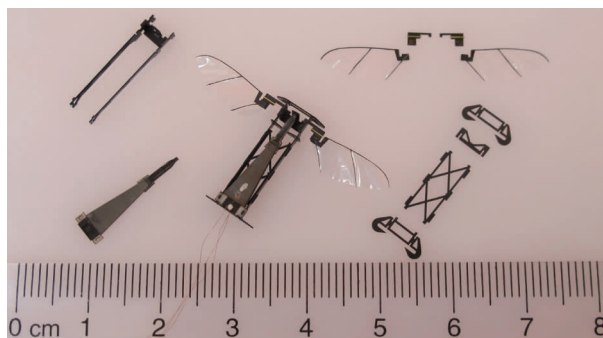


图9 压电驱动微型仿生飞行器所有部件和整机的照片

表2 压电驱动微型仿生飞行器的零部件和整机重量

部件	重量/mg
压电驱动器	55
传动机构与机身	12
翅膀(一对)	1
翅膀根部	1
加强筋和钩子	9
导线、胶等	6
整机	84

## 2 测试实验

### 2.1 压电驱动器的测试

如图10所示,对压电驱动器进行了频率-幅值测试。使用双通道信号发生器(NI PXIe-6124)配合压电陶瓷驱动电源对压电驱动器进行驱动;使用激光位移传感器(来自KEYENCE,型号LK-G30,感测范围10mm,再现性 $0.05\mu\text{m}$ ,带宽50kHz)测量压电驱动器的尖端位移。

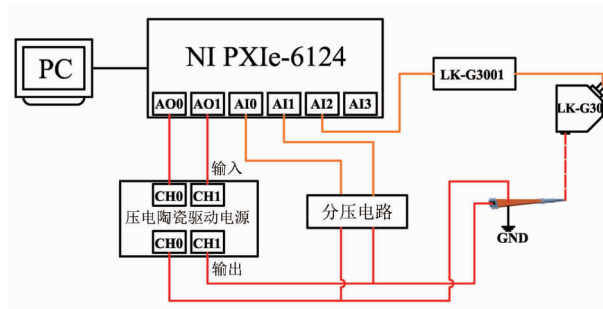


图10 压电驱动器测试系统图

为了确定压电驱动器的谐振频率,我们将驱动信号的峰值设置为固定值250V,并将信号发生器工





作在扫频模式下。空载条件下,测得压电驱动器的谐振频率约为 700Hz,此时尖端振幅约为  $\pm 1.5\text{mm}$ ;负载条件下(带动翅膀),测得压电驱动器的谐振频率约为 100Hz,此时尖端振幅约为  $\pm 380\mu\text{m}$ ,对应的翅膀拍打幅度约  $\pm 60^\circ$ 。

## 2.2 微型仿生飞行器起飞测试

为了避开俯仰、翻滚和偏航力矩对飞行器的影响,我们将飞行器放置在竖直导轨上,使得其只能在竖直方向移动。竖直导轨由自锁装置拉紧。在外部电源(频率为 100Hz,峰峰值为 250V)的激励下,压电驱动微型仿生飞行器沿着竖直导轨起飞,如图 11 所示。



图 11 压电驱动微型仿生飞行器起飞

## 3 结论

本文系统地概述了上海交通大学昆虫尺度微型仿生飞行器的设计、制造和测试方法。

1) 通过使用该方法,压电驱动器展现出了很高的性能指标。

2) 成功地避免了传动机构与机身的装配。

3) 研制了一种重量小于 100mg 的压电驱动微型仿生飞行器,并成功实现了起飞。

### 参考文献:

- [1] Wang Z J. Dissecting insect flight[J]. Annu. Rev. Fluid Mech., 2005, 37: 183 – 210.
- [2] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight, IV. Aerodynamic mechanisms [J]. Philosoph. Trans. Roy. Soc. London. Ser. B, Biol. Sci., 1984, 305: 79 – 113.
- [3] Sane S P. The aerodynamics of insect flight[J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(23): 191 – 208.
- [4] 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.
- [5] Sane S P, Dickinson M H. The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight[J].

Journal of Experimental Biology, 2002, 205 (8): 1087 – 1096.

[6] Wood R J. The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 341 – 347.

[7] Roll J A, Cheng B, Deng X. An Electromagnetic Actuator for High-Frequency Flapping-Wing Microair Vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 31(2): 400 – 414.

[8] Zou Y, Zhang W, Zhang Z. Liftoff of an Electromagnetically Driven Insect-Inspired Flapping-Wing Robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(5): 1285 – 1289.

[9] Zou Y, Zhang W, Ke X, et al. The design and microfabrication of a sub 100 mg insect-scale flapping-wing robot[J]. IET Micro & Nano Letters, 2017, 12(5): 297 – 300.

[10] Ennos A R. The inertial cause of wing rotation in Diptera [J]. J. exp. biol., 1988, 53(1): 161 – 169.

[11] Whitney J P, Wood R J. Aeromechanics of passive rotation in flapping flight[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 660(660): 197 – 220.

[12] Yang S, Zhang W. Numerical analysis of the three-dimensional aerodynamics of a hovering rufous hummingbird (Selasphorus rufus) [J]. Acta Mechanica Sinica, 2015, 31(6): 931 – 943.

[13] Ke X, Zhang W, Cai X, et al. Wing geometry and kinematic parameters optimization of flapping wing hovering flight for minimum energy [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 64: 192 – 203.

[14] Ke X and Zhang W. Wing Geometry and Kinematic Parameters Optimization of Flapping Wing Hovering Flight [J]. Applied Sciences, 2016, 6(12): 390.

[15] 柴双双, 张卫平, 柯希俊, 等. 仿昆虫扑翼微飞行器中压电驱动器的性能参数分析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(5): 663 – 668.

[16] 邹才均, 张卫平, 柯希俊, 等. 仿昆虫扑翼微飞行器中高效传动铰链的研究[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(3): 439 – 444.

[17] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight, II. Morphological parameters [J]. Philosoph. Trans. Roy. Soc. London. Ser. B, Biol. Sci., 1984, 305: 17 – 40.

### 作者简介:

邹 阳 男, 博士生。主要研究方向: 微型仿生飞行器。Tel: 13122183290, E-mail: zystccc@sjtu.edu.cn

张卫平 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 微型仿生飞行器、MEMS 和微惯性技术。Tel: 021 – 34208598, E-mail: zwp37@163.com