

文章编号: 1000-8055(2022)12-2729-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220167

## 仿蜻蜓扑动机构改进及气动力/力矩测量

张 锐<sup>1</sup>, 胡 薇<sup>2</sup>, 郑 兴<sup>1</sup>, 徐礼超<sup>1</sup>, 汪 超<sup>3</sup>

- (1. 淮阴工学院 交通工程学院, 江苏 淮安 223003;  
2. 淮阴工学院 机械与材料工程学院, 江苏 淮安 223003;  
3. 东莞理工学院 机械工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘 要:** 为进一步提高扑翼微型飞行器的机动性能, 对前期提出的可移动铰链曲柄滑块扑动机构进行了改进和小型化。该机构运动学表明: 移动铰链后两侧翅膀扑动幅值差值从之前的 21.3° 增大到 51.2°, 同时平均扑动幅值降到 0°。研制了可快速模块化组装的碳纤维板仿蜻蜓扑翼样机。样机测量和试飞实验表明, 通过调节扑动频率可以明显改变样机的升力和推力, 有效实现飞行器的快速爬升机动飞行。在较大扑动频率移动铰链可以产生足够的偏航力矩和滚转力矩用于转弯等机动飞行。

**关 键 词:** 仿蜻蜓扑翼; 扑动机构; 移动铰链; 曲柄滑块; 气动力/力矩; 机动转弯

中图分类号: V211.1

文献标志码: A

## Improvement of flapping mechanism and measurement of aerodynamic force/moment of bionic dragonfly prototype

ZHANG Rui<sup>1</sup>, HU Wei<sup>2</sup>, ZHENG Xing<sup>1</sup>, XU Lichao<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>

- (1. School of Traffic Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian Jiangsu 223003, China;  
2. School of Mechanical Engineering,  
Huaiyin Institute of Technology, Huaian Jiangsu 223003, China;  
3. School of Mechanical Engineering,  
Dongguan University of Technology, Dongguan Guangdong 523808, China)

**Abstract:** For further improving the maneuverability of the flapping-wing micro air vehicle, the movable hinge crank slider flapping mechanism proposed earlier was improved and miniaturized. The kinematics of the flapping mechanism indicated that as the hinges moved, the difference of the bilateral flapping amplitudes increased from 21.3° to 51.2° and the bilateral mean flapping amplitudes decreased to 0°. And a modularized and carbon fiber plate bionic dragonfly prototype was designed. The measurement and flight test of the prototype showed that the lift and thrust of the prototype changed obviously by adjusting the flapping frequency, realizing rapid acceleration and climbing maneuvering flight. By moving the hinge, significant yaw moment and roll moment were generated for maneuvering turn at larger flapping frequency.

**Keywords:** bionic dragonfly flapping-wing; flapping mechanism; movable hinge; crank-slider; aerodynamic force/moment; maneuvering turn

收稿日期: 2022-03-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(52005104); 淮安市自然科学研究项目(HAB202152); 江苏省高校自然科学研究项目(22KJD410001); 广东省“创新强校工程”特色创新项目(2020KTSCX149); 广东省普通高校机器人与智能装备重点实验室(2017KSYS009); 东莞理工学院机器人与智能装备创新中心(KCYCXPT2017006); 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202211049016Z)

**作者简介:** 张锐(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要从事扑翼飞行器研究。

**引用格式:** 张锐, 胡薇, 郑兴, 等. 仿蜻蜓扑动机构改进及气动力/力矩测量[J]. 航空动力学报, 2022, 37(12): 2729-2735. ZHANG Rui, HU Wei, ZHENG Xing, et al. Improvement of flapping mechanism and measurement of aerodynamic force/moment of bionic dragonfly prototype[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(12): 2729-2735.

自然界中的飞行生物无一例外地采用扑翼飞行。除了前飞和悬停外,爬升、急转弯等机动飞行也是常见的飞行方式,主要用于捕食、逃生、避障等<sup>[1-2]</sup>。虽然鸟类和昆虫均采用扑翼飞行,但两者的机动飞行原理完全不同。鸟类具有尾翼,可调整飞行姿态,作用类似于固定翼尾翼<sup>[3]</sup>。然而昆虫没有尾翼,只能依靠左右翅膀非对称扑动实现机动飞行<sup>[4]</sup>,即通过调整扑动幅值<sup>[5-8]</sup>、扑动攻角<sup>[9-11]</sup>、扑动频率<sup>[12-14]</sup>等两侧扑动参数机动飞行,而且通常是多扑动参数同步调整<sup>[7,9]</sup>。

经过多年发展,人类对扑翼升力机制<sup>[15]</sup>和机动飞行有了一定认识<sup>[16-18]</sup>,设计了多款扑翼微型飞行器(flapping-wing micro air vehicle, FMAV),如仿蜂鸟 FMAV<sup>[19]</sup>、仿鸟 FMAV<sup>[20-21]</sup>、仿蝙蝠 FMAV<sup>[22]</sup>、仿蜻蜓 FMAV<sup>[23]</sup>、仿蝴蝶 FMAV<sup>[24]</sup>。依据鸟类和飞行昆虫的机动飞行原理,现有 FMAV 可分为两种:一种为尾部机动 FMAV,即扑翼与传统尾翼结合的机动飞行方式,多用于仿鸟等大型飞行生物;另一种为翅膀机动 FMAV,即通过两侧翅膀实现机动飞行,多用于仿昆虫类小型飞行生物。因为自身尺寸和载荷的限制, FMAV 依靠尾翼摆动只能产生很小的气动力矩,机动效果近似于侧滑作用下大半径缓慢机动转弯。由于采用尾部舵面实现机动飞行的局限性,部分学者尝试采用两侧翅膀实现 FMAV 机动飞行。FMAV<sup>[19,23]</sup>均采用左右翅膀实现机动飞行,可实现侧飞、急转弯等动作,表明了翅膀机动 FMAV 拥有更加优异的机动性能。然而,由于机构复杂、零件繁多,尺寸过大,致使载重和续航性能大幅降低,一些机动飞行参数不如人意。真实蜻蜓机动半径仅 0.08 m<sup>[25]</sup>,最大机动加速度达 9g( $g$  为重力加速度)<sup>[26]</sup>,当前所有的仿蜻蜓类 FMAV 远达不到这些性能指标。

作为 FMAV 的核心,尤其具有可以调节两侧扑动参数的扑动机构,决定了 FMAV 整体机动性能。因此,对于 FMAV 而言,提高其机动能力以适应各种复杂任务,研究翅膀机动 FMAV 显得尤为重要。本文对前期提出的可移动铰链曲柄滑块扑动机构进一步改进,并研制一种模块化组装的碳纤维板仿蜻蜓 FMAV,对其扑动性能进行测量。研究结果为翅膀机动 FMAV 的设计提供了新思路。

## 1 现有扑动机构及铰链移动

前期工作表明<sup>[27]</sup>,将曲柄滑块机构中扑动杆铰链设计为可移动的,使铰链在机架滑槽内往复

移动,可以实现两侧翅膀扑动角非对称扑动,如图 1 所示。曲柄和连杆长分别为  $r_0$  和  $l_1$ ,曲柄转轴到滑槽距离为  $l_0$ ,两移动铰链距离恒为  $2l_2$ ,铰链右移距离为  $\Delta l$ 。

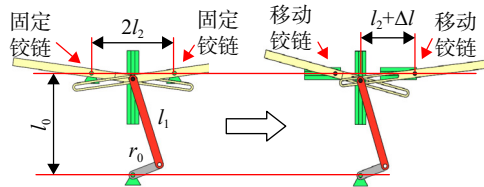


图 1 可移动铰链的曲柄滑块扑动机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of movable hinged crank slider flapping mechanism

前期考虑到样机结构尺寸偏大(展长为 400 mm,含电池质量为 100 g),铰链相对移动量过大,会造成重心不稳,设计的相对移动量  $\tau$  ( $\tau = \Delta l / r_0$ ) 最大值仅为 0.5。实际飞行中也发现当  $\tau = 0.5$  时,样机常会因侧倾过大而坠落。同时由于  $\tau$  较小,两侧翅膀扑动幅值差异偏小,使得样机转弯半径偏大,机动性不强。本文对该机构进行改进和小型化,具体几何参数如表 1 所示。

表 1 扑动机构几何参数

Table 1 Geometric parameters of flapping mechanism

| 参数              | 改进前 <sup>[27]</sup> | 改进后  |
|-----------------|---------------------|------|
| $r_0/\text{mm}$ | 10                  | 4    |
| $l_0/\text{mm}$ | 31.3                | 16.6 |
| $l_1/\text{mm}$ | 28.3                | 16.6 |
| $l_2/\text{mm}$ | 13                  | 5.1  |

## 2 改进后扑动机构运动学分析

图 2 给出了瞬时扑动角及其最大值、最小值,图中只标注了右侧扑动角。初始时曲柄处于最右侧,曲柄转角  $\theta$  逆时针为正。左右扑动杆和水平面夹角即为左、右瞬时扑动角  $\phi_l(\theta)$  和  $\phi_r(\theta)$ 。 $\phi_l(\theta)$  顺时针为正,  $\phi_r(\theta)$  逆时针为正。上扑和下扑结束时对应扑动角分别为最大扑动角和最小扑动角(用下标 max 和 min 表示)。结构尺寸改进后,当前  $\tau$  最大值可达 1.0。

扑动角幅值和平均扑动角定义分别如下:

$$\phi_0 = [\phi(\theta)_{\max} - \phi(\theta)_{\min}] / 2 \quad (1)$$

$$\bar{\phi} = [\phi(\theta)_{\max} + \phi(\theta)_{\min}] / 2 \quad (2)$$

其中  $\phi(\theta)_{\max}$  为瞬时扑动角最大值,  $\phi(\theta)_{\min}$  为瞬时扑动角最小值。

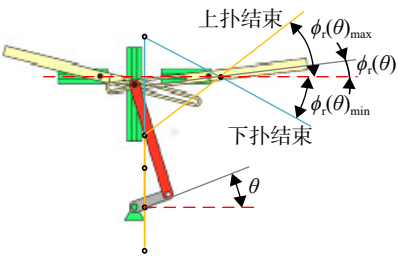


图 2 最大、最小扑动角示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of maximum and minimum of flapping angle

2.1 不同  $\tau$  时瞬时扑动角  $\phi(\theta)$  与曲柄转角  $\theta$  的关系

图 3 给出了  $\tau$  在  $0\sim 1.0$  范围内, 曲柄滑块扑动机构中的瞬时扑动角  $\phi(\theta)$  与曲柄转角  $\theta$  的变化关系, 图中包括左翅和右翅(只分析右移, 左移可做类似分析)。从图中看出,  $\tau=0$  时, 左右瞬时扑动角曲线重合, 可以保证稳定前飞。最大和最小瞬时扑动角对应的曲柄转角并不会随着  $\tau$  而变化, 都是在  $\theta=90^\circ$  获得最大瞬时扑动角, 在  $\theta=270^\circ$  获得最小瞬时扑动角。随着  $\tau$  增大, 左瞬时扑动角最大值一直增大, 而最小值一直减小。与之对应的是, 右瞬时扑动角最大值一直减小, 而最小值一直增大。最终使得左扑动角幅值越来越大, 右扑动角幅值越来越小, 左右翅膀扑动出现非对称性。

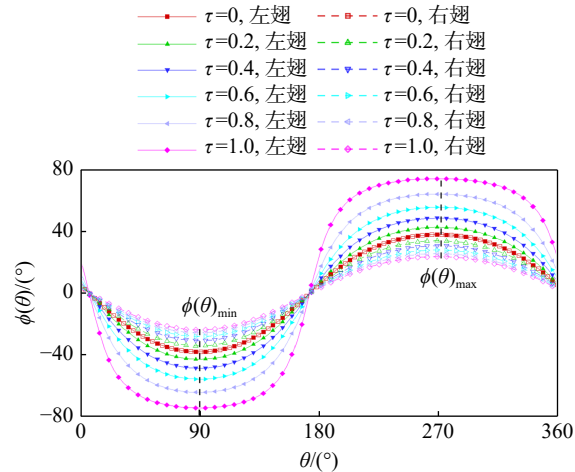


图 3 瞬时扑动角  $\phi(\theta)$  与曲柄转角  $\theta$  的变化关系  
Fig. 3 Relationship between instantaneous flapping angle  $\phi(\theta)$  and crank angle  $\theta$

2.2 扑动角幅值  $\phi_0$ 、平均扑动角  $\bar{\phi}$  与  $\tau$  的关系

图 4 给出了扑动机构改进前后  $\phi_0$ 、 $\bar{\phi}$  与  $\tau$  的关系。从图中看出, 随着  $\tau$  增大, 左扑动角幅值增大, 右扑动角减小, 打破了扑动对称性, 而且  $\tau$  越大, 非对称性越明显, 越利于机动飞行。改进后

的两侧扑动幅值差值最大达到  $51.2^\circ$ , 同时平均扑动幅值降到  $0^\circ$  左右。对于前期的扑动机构, 当  $\tau$  增大时, 左平均扑动角减小, 右平均扑动角增大, 这就意味着在一个扑动周期内左翅膀整体下移, 右翅膀整体上移, 不利于横向稳定性。改进后扑动机构的左右平均扑动角不受  $\tau$  的影响, 铰链移动只是影响了平均扑动幅值, 有利于机动飞行, 因此, 改进后的扑动机构更能有效实现机动飞行。

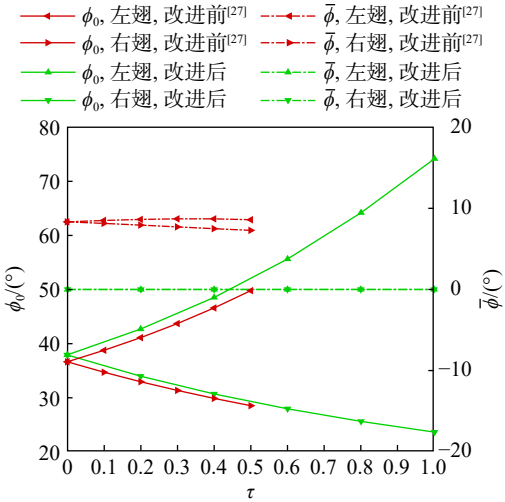


图 4 扑动角幅值  $\phi_0$ 、平均扑动角  $\bar{\phi}$  与  $\tau$  的关系  
Fig. 4 Relation between  $\tau$  and flapping amplitudes  $\phi_0$  and mean flapping angle  $\bar{\phi}$

3 碳板样机设计

3.1 总体参数

本文基于前期仿蜻蜓样机进行适当小型化, 初步设计飞行器质量约为  $80\text{ g}$ , 具体样机设计参数如表 2 所示。采用  $1/4$  椭圆型翅膀, 前缘采用直径为  $0.8\text{ mm}$  的碳纤维杆, 翅面采用薄帆布, 并用  $0.2\text{ mm}$  碳纤维杆支撑翅面, 防止过大变形。采用简单 T 形尾部, 尾部相对于机架有  $10^\circ$  安装角, 同时尾部到机架距离可调, 便于调节重心。

表 2 扑翼样机设计参数  
Table 2 Design parameters of prototype

| 参数      | 数值  |
|---------|-----|
| 质量/g    | 80  |
| 弦长/mm   | 40  |
| 翼展/mm   | 280 |
| 展弦比     | 7   |
| 功率/W    | 8   |
| 扑动频率/Hz | 10  |

3.2 部件设计及组装

本文同样采用齿轮齿条移动铰链。铰链固连

于齿条上, 齿轮固定于舵机输出轴上, 通过齿轮与齿条啮合运动实现铰链往复移动, 如图5所示。当舵机收到机动信号时(向右机动为例), 舵机通过齿轮带动齿条在机架的滑槽内向右移动, 齿条带动移动铰链右移, 左右扑动杆绕移动铰链扑动的同时被移动铰链带动右移。此时, 右扑动角增大, 左扑动角减小, 实现非对称扑动。

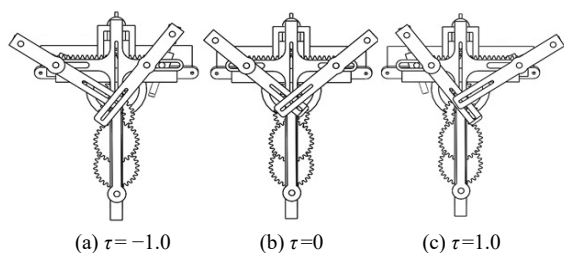


图5 铰链移动后扑动模型

Fig. 5 Flapping model after hinges moving

前期为减轻质量, 除了曲柄轴、扑动杆外, 样机的机架、连杆等均采用碳板打印, 最后通过强力胶水黏接。但是实际发现摔落后连接处开胶, 特别是某个部件损坏后不易更换, 需要拆解整个样机。同时由于样机结构紧凑, 所有部件都需要在机架内组装, 安装不方便。当前样机中碳纤维板连接处全部设计成卡槽结构, 并采用模块化组装。样机分成6个模块: 前扑动模块、驱动模块、后扑动模块、机架模块、尾部模块和翅膀模块, 如图6所示。

前扑动模块包含前部扑动杆、连杆、前曲轴、圆柱滑块、移动铰链、齿轮齿条、舵机及移动支架。驱动模块包括无刷电动机、减速齿轮、后曲轴、电动机架, 该模块主要驱动后曲轴转动。后



图6 模块化组装的碳纤维板扑翼样机

Fig. 6 Modularized carbon fiber plate prototype

扑动模块包括后部扑动杆、连杆、圆柱滑块、移动铰链、齿轮齿条、舵机和移动支架。机架模块包括前扑动模块、驱动模块和后扑动模块串联起来的各种碳杆、舵机固定座和电池固定座。采用模块化组装后, 各模块比较独立, 某个部件损坏时, 只需要拆下该模块更换即可。最终组装的样机约为82 g(含1S电池)。

### 3.3 控制系统方案

本文各控制部件和控制系统框图如图7所示, 包括电调、接收器、遥控器、前后舵机、锂电池等。锂电池通过电调为无刷电动机和接收器供电, 电动机驱动前后曲轴带动前后四翅扑动, 实现稳定飞行。接收器连接两个并联接线的舵机, 舵机控制前后移动铰链, 实现机动飞行。当接收器收到来自于遥控器的油门信号时, 电调开始调节电动机转速, 从而调节扑动频率, 调节飞行速度。当接收器收到机动飞行信号时, 接收器通过舵机控制前后移动铰链同步移动, 最终实现机动转弯飞行。

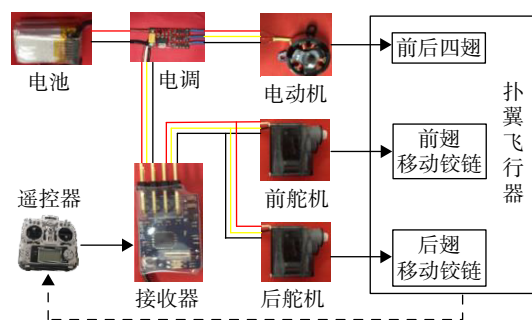


图7 控制部件及控制系统框图

Fig. 7 Control components and control system block diagram

## 4 样机气动/力矩测量

### 4.1 平台搭建

图8为实验测量系统平台。测量系统平台主要包括安装座、固定架、六维力传感器、频率计、样机、数据处理采集卡、稳压电源以及数据分析软件。传感器三坐标轴分别指向水平后方、竖直上方和样机左侧(从样机尾部向头部观测), 分别测量阻力 $D$ 、升力 $L$ 和侧向力 $F_z$ 。阻力为负值时表示前进的推力 $T$ , 即 $T=-D$ 。绕坐标轴的力矩分别为滚转力矩 $M_x$ 、偏航力矩 $M_y$ 和俯仰力矩 $M_z$ 。六维力传感器为宇立A3813A, 其三方向力量程均为20 N, 三方向力矩量程均为0.75 N·m, 对应的精度分别为6 mN和250 mN·mm, 共振频率为750 Hz, 滞后精度为0.5FS(full scale)。数据采集卡为宇立M8128B1SN4299, 采样频率为2 000 Hz。

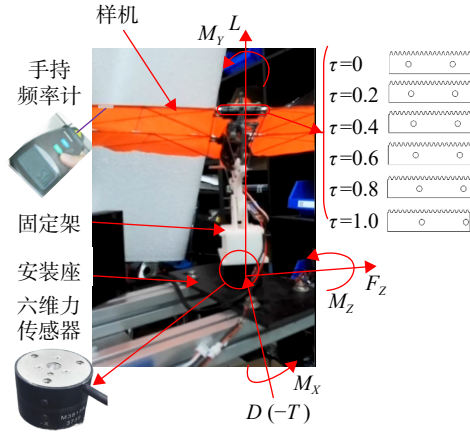


图 8 样机测试平台

Fig. 8 Testing platform of prototype

#### 4.2 测量结果

首先在安装支架上对组装后的样机进行传动平稳性和扑动频率测试。由于摩擦和安装误差,样机最大扑动频率为 8 Hz, 略低于设计值 10 Hz, 样机最低扑动频率为 2 Hz。在进行室外飞行前,在实验平台上对该扑翼飞行器进行了气动力及气动力矩测量。本文主要测量不同扑动频率下,不同铰链位置处该扑翼飞行器的三方向气动力及气动力矩。图 9 给出了扑动频率  $f$  为 2、4、6、8 Hz 时样机总气动力和总气动力矩的测量结果。

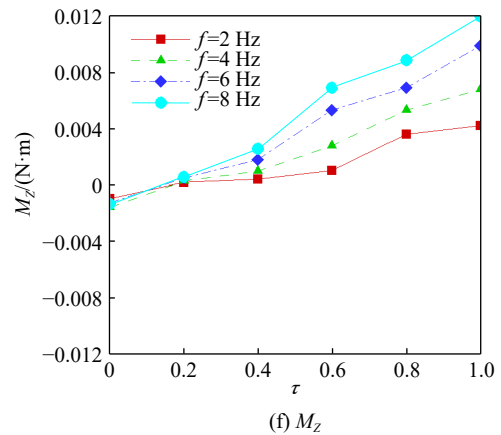
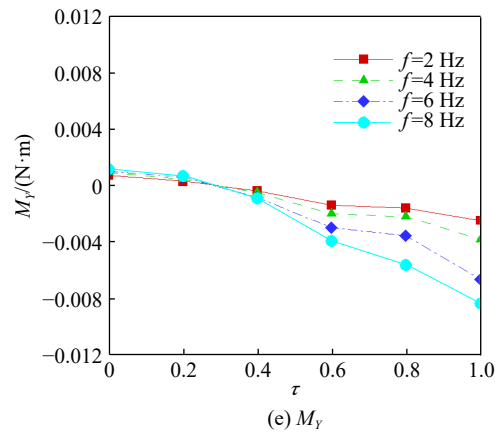
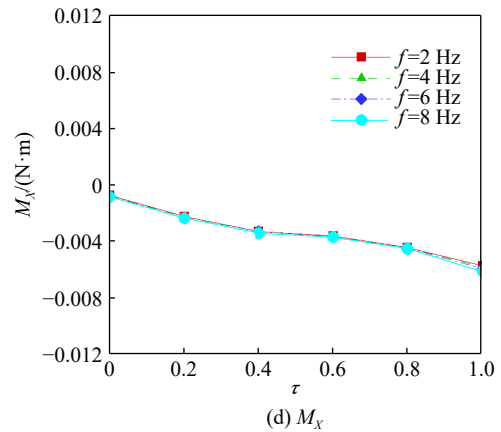
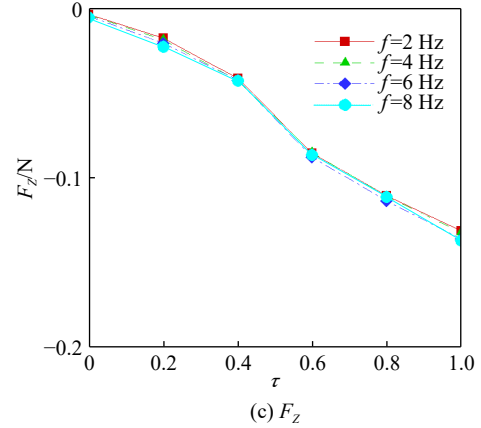
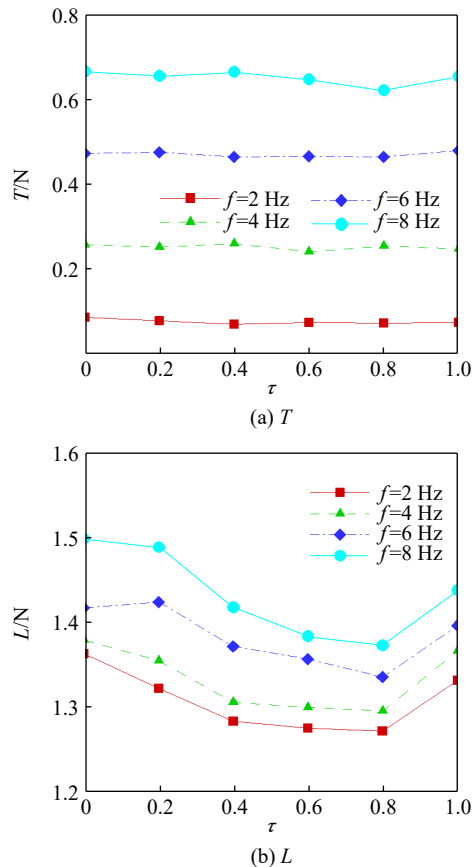


图 9 气动力/力矩测量结果

Fig. 9 Measurement results of aerodynamic force/moment

从图 9 可以看出,在  $\tau=0$  时(对称扑动时),四个翅膀产生一定的  $T$  和  $L$ ,而  $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  均很小,从而保证飞行器实现稳定前飞。当  $\tau$  逐渐增大时, $T$  变化较小(见图 9(a)), $L$  一定程度先减小后逐渐增大(见图 9(b)), $F_z$  一直减小(见图 9(c))。这说明铰链移动对样机前进方向的机动性影响不大,对垂直方向的机动性有一定的影响,对侧向的机动性影响最大。铰链右移后, $F_z$  为负值,即侧向力指向右侧,可为样机提供一定的侧向力用于侧向机动或抵抗侧风。 $\tau$  越大,侧向力越大,侧向机动性越明显。

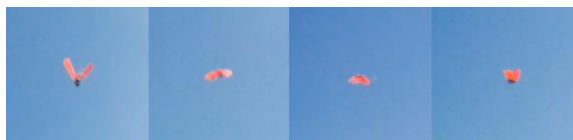
当  $\tau$  逐渐增大时, $M_x$ 、 $M_y$  和  $M_z$  在数值上均逐渐增大。 $M_x$  为负值(见图 9(d)),表明样机具有右侧滚转趋势。 $M_y$  也为负值(见图 9(e)),说明样机具有右侧偏航趋势。需要说明的是, $M_z$  为正值(见图 9(f)),说明样机具有一定向下的俯仰趋势。本文测量的  $M_z$  和其他两个方向的力矩为同一数量级,然而数值研究<sup>[21]</sup>表明  $M_z$  远小于其他两个方向的力矩。这是因为样机测量需要,加大了传感器与翅膀间的气动力力臂。真实蜻蜓飞行时也有一定的俯仰运动<sup>[4]</sup>,因此在样机设计时应避免铰链移动过大,减小俯仰力矩的影响。

当  $f$  逐渐增大时, $T$  明显增大(见图 9(a)), $L$  一定程度增大(见图 9(b)),而  $F_z$  几乎不变(见图 9(c))。通过调整  $f$ ,可以实现样机加、减速飞行。随着  $f$  增大, $M_x$  几乎不变(见图 9(d)),而  $M_y$ (见图 9(e))和  $M_z$ (见图 9(f))在数值上逐渐增大,并且  $\tau$  越大, $M_y$  和  $M_z$  增大趋势越明显。因此在较大  $f$  时,控制铰链移动可以实现样机更快地机动转弯飞行。

最后对样机进行了室外飞行,如图 10 所示。通过遥控器远程控制舵机,进而带动铰链移动实现样机机动飞行。遥控器转向旋钮向一侧移动时样机也向同一侧机动飞行,实现了通过调节两侧翅膀扑动幅值进行机动转弯飞行。



(a) 样机右转弯



(b) 样机左转弯



(c) 样机爬升

图 10 样机试飞

Fig. 10 Flight test of prototype

## 5 结 论

本文对前期提出的可移动铰链曲柄滑块扑动机构进行了结构改进和小型化。机构运动学表明,改进后的扑动幅值差值从  $21.3^\circ$  增大到  $51.2^\circ$ ,并研制了可快速模块化组装的碳纤维板仿蜻蜓扑翼样机。样机测量和试飞实验表明,调节扑动频率可以有效实现飞行器的快速爬升机动飞行,在较大扑动频率移动铰链可有效实现机动转弯。研究结果为基于翅膀机动飞行的 FMAV 的设计提供了新思路。

## 参考文献:

- [1] ALTSHULER D L. Flight performance and competitive displacement of hummingbirds across elevational gradients[J]. *The American Naturalist*, 2006, 167(2): 216-229.
- [2] MOORE T Y, BIEWENER A A. Outrun or outmaneuver: predator-prey interactions as a model system for integrating biomechanical studies in a broader ecological, and evolutionary context[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2015, 55(6): 1188-1197.
- [3] CLARK C J. On hummingbird tail morphology as shaped by the interactions between flight-related functions, and sexual selection[D]. Berkeley, US: University of California, 2009.
- [4] LIU Hao, RAVI S, KOLOMENSKIY D, et al. Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, 371(1704): 20150390.1-20150390.11.
- [5] WANG Hao, ZENG Lijiang, LIU Hao, et al. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(4): 745-757.
- [6] MENG Xueguang, SUN Mao. Aerodynamics and vortical structures in hovering fruitflies[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(3): 031901.1-031901.22.
- [7] FRY S N, SAYAMAN R, DICKINSON M H. The aerodynamics of free-flight maneuvers in drosophila[J]. *Science*, 2003, 300(5618): 495-498.
- [8] RAMAMURTI R, SANDBERG W C. A computational investigation of the three-dimensional unsteady aerodynamics of drosophila hovering and maneuvering[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210(5): 881-896.
- [9] ALEXANDER D E. Wind tunnel studies of turns by flying dragonflies[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1986, 122(3): 81-98.
- [10] RISTROPH L, BERMAN G J, BERGOU A J, et al. Automated hull reconstruction motion tracking (HRMT) applied to sideways ma-

- neuers of free-flying insects[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(9): 1324-1335.
- [11] TAYLOR G K. Mechanics and aerodynamics of insect flight control[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2001, 76(4): 449-471.
- [12] HORMANN U, HEINZEL H G, WENDLER G. The phasic influence of self-generated air current modulations on the locust flight motor[J]. *Journal of Comparative Physiology*, 1983, 150(4): 427-438.
- [13] LEHMANN F O, DICKINSON M H. The control of wing kinematics and flight forces in fruit flies (*drosophila*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1998, 201(3): 385-401.
- [14] CHENG Bin, FRY S N, HUANG Qi, et al. Aerodynamic damping during rapid flight maneuvers in the fruit fly *drosophila*[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(4): 602-612.
- [15] 薛栋, 宋笔锋, 宋文萍, 等. 仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行力学耦合研究进展[J]. *空气动力学学报*, 2018, 36(1): 88-97.
- XUE Dong, SONG Bifeng, SONG Wingping, et al. Advances in coupling aeroelasticity and flight dynamics of bird inspired FMAV [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(1): 88-97. (in Chinese)
- [16] ONISHI M, ISHIHARA D. Partitioned method of insect flapping flight for maneuvering analysis[J]. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2019, 121(1): 145-175.
- [17] KAJAK K M, KARÁSEK M, QI P C, et al. A minimal longitudinal dynamic model of a tailless flapping wing robot for control design[J]. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2019, 14(4): 046008.1-046008.16.
- [18] 张锐, 周超英, 汪超, 等. 蜻蜓非对称扑动时的气动特性[J]. *航空学报*, 2017, 38(12): 101-113.
- ZHANG Rui, ZHOU Chaoying, WANG Chao, et al. Aerodynamic characteristics of dragonfly in asymmetric flapping[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(12): 101-113. (in Chinese)
- [19] KEENNON M, KLINGEBIEL K, WON H. Development of the nano hummingbird: a tailless flapping wing micro air vehicle[R]. Nashville, US: 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012.
- [20] 杨茵, 李栋, 张振辉. 微型扑翼飞行器非定常运动对平尾的影响[J]. *航空学报*, 2012, 33(10): 1827-1833.
- YANG Yin, LI Dong, ZHANG Zhenghui. Influences of flapping wing micro aerial vehicle unsteady motion on horizontal tail[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(10): 1827-1833. (in Chinese)
- [21] 黄鸣阳, 肖天航, 昂海松. 多段柔性变体扑翼飞行器设计[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(8): 1838-1844.
- HUANG Mingyang, XIAO Tianhang, ANG Haisong. Design of an ornithopter with multisection flexible morphing wings[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(8): 1838-1844. (in Chinese)
- [22] 齐津浩, 张卫平. 仿生蝙蝠飞行器的设计制造[J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(5): 48-53.
- QI Jinhao, ZHANG Weiping. Design and manufacture of bionic bat aircraft[J]. *Machine Design and Research*, 2020, 36(5): 48-53. (in Chinese)
- [23] GAISSERT N, MUGRAUER R, JEBENS A, et al. Inventing a micro aerial vehicle inspired by the mechanics of dragonfly flight[R]. Esslingen, Germany: Conference Towards Autonomous Robotic Systems, 2014.
- [24] 冷焯, 张卫平, 周岁, 等. 仿生蝴蝶飞行器设计分析[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(4): 32-35.
- LENG Ye, ZHANG Weiping, ZHOU Sui, et al. Design and analysis of bionic butterfly aircraft[J]. *Machine Design and Research*, 2019, 35(4): 32-35. (in Chinese)
- [25] SUNADA S, WANG H, ZENG Lijiang, et al. Analysis of maneuvering flight of an insect[J]. *Journal of Bionics Engineering*, 2004, 1(2): 88-101.
- [26] CHEN Y H, SKOTE M, ZHAO Y, et al. Dragonfly (sympetrum flaveolum) flight: kinematic measurement and modelling[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 40(7): 115-126.
- [27] ZHANG Rui, ZHANG Haiyang, XU Lichao, et al. Mechanism and kinematics for flapping-wing micro air vehicles maneuvering based on bilateral wings[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 2022: 5759343.1-5759343.10.

(编辑: 秦理曼)