

文章编号: 1000-8055(2009)01-0204-05

空间曲柄摇杆扑翼机构设计分析

徐一村, 宗光华, 毕树生, 于靖军

(北京航空航天大学 机器人研究所, 北京 100191)

摘 要: 为了提高扑翼机构两侧运动支链的运动对称性, 进而扑翼增强飞行器滚转稳定性, 分析了平面曲柄摇杆扑翼机构运动不称的原因, 提出并构建了一种空间曲柄摇杆扑翼机构。计算仿真和样机试验结果表明, 与平面空间摇杆扑翼机构相比, 两翼扑动对称性有所提高; 试飞实验表明在扑翼飞行器中采用空间曲柄摇杆扑翼机构能够使提高滚转稳定性。该空间曲柄摇杆扑翼机构结构紧能够满足构建小型扑翼飞行器的需要。

关 键 词: 扑翼机构; 空间曲柄摇杆机构; 运动对称性

中图分类号: TH112.3

文献标识码: A

Design and analysis of a spatial crank-rocker flapping wing mechanism

XU Yi-cun, ZONG Guang-hua, BI Shu-sheng, YU Jing-jun

(Robotics Institute,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To increase the symmetry of the kinematics chains of the flapping mechanism and rolling stability of the flapping-wing aircraft, the reason of asymmetry of the planar crank-rocker flapping-wing mechanisms was analyzed, and a spatial crank-rocker flapping-wing mechanism was proposed and constructed. The simulation and the prototype test results prove that, the symmetry is better than the planar mechanisms, and flight experiments show that the rolling stability is increased for the flapping-wing aircraft with the spatial mechanism. The spatial crank-rocker flapping-wing mechanism is suitable for the mini flapping-wing aircrafts.

Key words: flapping-wing mechanism; spatial crank-rocker flapping-wing mechanism; symmetry of motion

近年来, 随着对飞行动物运动方式和升力产生机理研究的深入, 人们构建了大量的扑翼飞行器样机, 通过机翼的拍动和翻转产生推力和升力。就其扑翼机构而言, 主要可以分为模仿昆虫扑翼方式的二自由度扑翼机构^[1-4]和模仿鸟类的单自由度扑翼机构^[5-7]。

二自由度扑翼机构通过多个致动器协调工作产生二维扑动, 需要复杂的控制器来进行控制; 或通过多组空间机构将单个驱动转化为翼的扑动和

翻转二维运动, 机构复杂。因此现有的二自由度扑翼机构不适合应用于微小型扑翼飞行器。

目前采用的平面单自由度扑翼机构可以通过曲柄摇杆机构将驱动马达的周转运动转化为翼的扑动; 利用柔性翼梁和翼肋的气动弹性形变实现翼的二维运动。若扑翼机构两侧运动支链上的运动不完全对称, 则会导致两侧机翼扑动不对称, 进而影响扑翼飞行器的滚转稳定性。

本文在对平面曲柄摇杆扑翼机构分析的基础

收稿日期: 2007-12-10; 修订日期: 2008-02-27

基金项目: 国家“863”计划(20060104z2024)

作者简介: 徐一村(1979-), 男, 河南平顶山人, 博士生, 主要研究方向为柔性仿生扑翼推进机构。

上,提出了一种空间曲柄摇杆扑翼机构,可以在不增加机构负载程度的同时解决扑翼机构的扑动对称性问题。

1 机构综合

1.1 平面扑翼机构分析

扑翼机构的作用是将原动机的连续旋转运动转化为翼的往复转动。四杆机构中的曲柄摇杆机构可以将转动转化为往复运动,而且结构简单,因此被广泛采用。但是由于在扑动时,其两侧摇杆运动存在相差,导致两翼的扑动不完全对称,会对扑翼飞行器的滚转稳定性产生动态影响。为了改善两翼的运动对称性,常用的思路主要有以下几种:

1) 改进机构构形。比如,将图 1(a)所示的构型中两个连杆与曲柄的转动副分离,成为图 1(b)和所示构型。当杆长满足一定条件时,两侧摇杆可同时到达最高和最低点,其扑动对称性有所改善。但是在其他位置上两侧摇杆仍存在相差,不能完全消除扑动不对称性。

2) 优化杆长设计。增加连杆长度可以减小两侧摇杆的运动差异。但是,受其他设计条件约束,连杆长度不可能无限制增加,采用这种方法仅能减小而不能完全消除扑动不对称性。

3) 提前分离运动支链。前述两种思路均是在单曲柄双摇杆的基础上提出的。而若通过齿轮齿副或滑动副分离运动支链,成为双曲柄双摇杆机构,或者利用曲柄滑块机构使得连杆的运动对称于机身纵平面(如图 2 所示),则可以保证两侧机翼扑动完全对称。但是,由于引入了齿轮副或滑动副,传动效率会有所损失,且增加了结构体积和重量。

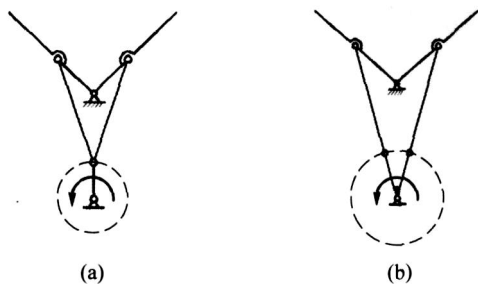


图 1 平面扑翼机构

Fig. 1 Planar flapping-wing mechanism

1.2 空间扑翼机构

平面四杆扑翼机构运动不对称的原因在于曲柄的转动相对于机身纵平面是不对称的。如果扑

翼机构两侧运动支链中曲柄的运动相对于机身纵平面对称,则两翼的扑动必然也是对称的。

如果曲柄转轴垂直于机身纵平面,则其两端的转动关于机身纵平面必然是对称的,而两摇杆的运动也将是对称的。

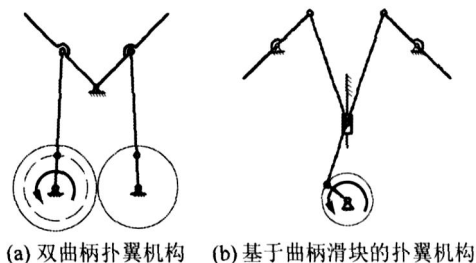


图 2 扑翼机构

Fig. 2 Flapping-wing mechanism

依此思路可以由图 1(a)演化出一种构型简单的空间扑翼机构,如图 3 所示。将平面扑翼机构中曲柄的转动中心在水平面内旋转 90° ,就转化为一个空间四杆机构。此时由于两个曲柄的运动关于机身纵平面对称,因此可以完全消除两侧传动支链的不对称性。同时由于曲柄和摇杆的转轴不平行,需要将连杆两端的平面转动副改为球副。

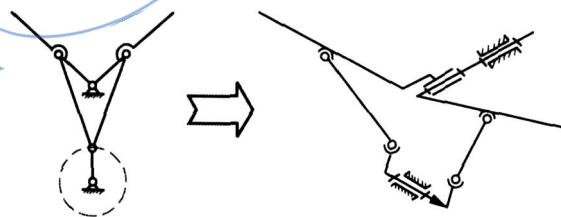


图 3 由平面机构演化为空间机构

Fig. 3 Convert a planar mechanism to a spatial mechanism

这种型式的空间扑翼机构的自由度数

$$F = 6n - \sum_{i=1}^5 P_i \times i - k \quad (1)$$

机构单侧支链由曲柄、连杆、摇杆组成, $n = 3$; 包含 2 个转动副和 2 个球副, $P_3 = 4$ 。由于连杆两端都是球副,因此连杆上存在一个转动为局部自由度, $k = 1$ 。代入式(1),得机构的自由度 $F = 1$,该机构有确定的运动。

2 尺寸综合

2.1 运动分析

以机构左侧支链为例进行分析。以曲柄转轴与机身纵平面的交点为 O 点,飞行器前向为 x 方

向,竖直上方为 z 方向建立坐标系,并定义各杆件长如图4所示.其中 ϕ 和 θ 为曲柄和摇杆的转角.

由该坐标系和杆长定义可得该扑翼机构的运动方程

$$\begin{aligned} (b\sin\phi)^2 + (a - c\cos\theta)^2 + \\ (bc\cos\phi - h - c\sin\theta)^2 = L^2 \end{aligned} \quad (2)$$

该方程的解析解形式复杂,因此需要通过数值计算方法得到 ϕ 和 θ 的关系.

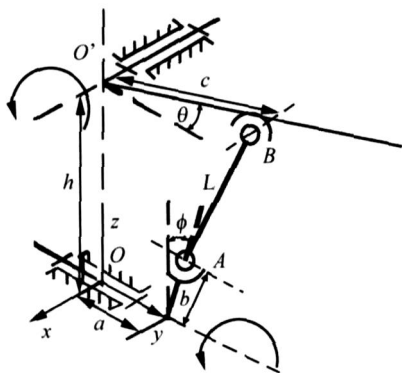


图4 机构坐标系及杆长定义

Fig.4 Coordinate system and definition of bar length

2.2 参数确定

机构各杆件长度中, h , a 和 c 由传动件的尺寸和机身结构决定,取 $h = 52$ mm, $a = 11$ mm, $c = 40$ mm. L 和 b 的尺寸将根据 θ 和 ϕ 的关系确定.

扑翼飞行器设计翼展 1 m,设计飞行速度约 10 m/s.参考与此接近的中型鸟类的飞行方式,取扑翼幅度为 40° .定义 $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 分别是扑翼上、下角度极限,则有

$$\theta_{\max} - \theta_{\min} = 40^\circ \quad (3)$$

扑翼飞行器的控制远不如自然界鸟类那么灵活,因此,稳定性是设计中需要解决的重要问题之一.对于固定翼飞行器,可以通过采用上单翼布局 and 增加上反角来增加稳定性.在设计扑翼飞行器时,也可以采用同样的方法.但扑翼飞行器的翼反角随着扑动不停变化,因此定义扑翼飞行器的平均上反角为

$$\theta_E = \frac{\theta_{\max} + \theta_{\min}}{2} \quad (4)$$

参考固定翼飞机,取 $\theta_E = 2^\circ$.

将式(3)、(4)联立,并代入公式(2)中,可得

$$\begin{cases} \theta_{\max} = 22^\circ \\ \theta_{\min} = -18^\circ \end{cases} \quad (5)$$

由机构构型分析可知,摇杆的上、下极限位置分别对应曲柄在上、下极限位置.即当 $\phi = 0$ 时, θ

$= 22^\circ$; $\phi = 180$ 时 $\theta = -18^\circ$.

将各杆长度以及 θ 与 ϕ 的关系代入(5)中,可解得

$$\begin{cases} b = 13.43 \text{ mm} \\ L = 59.57 \text{ mm} \end{cases}$$

从工程实际角度出发,将长度值取整,得 $b = 13$ mm, $L = 60$ mm.

至此,所有杆件长度均已确定.

按照上述机构构型和参数,本文构建了空间扑翼机构样机,如图5所示.

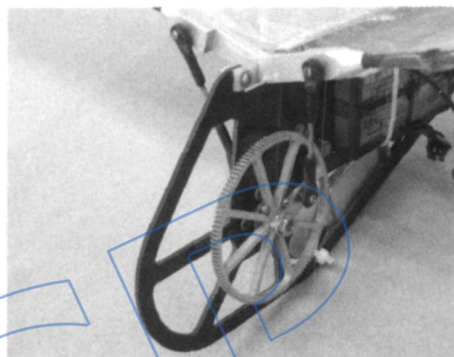


图5 空间扑翼机构样机

Fig.5 Prototype of the spatial flapping-wing mechanism

样机驱动器选用了外转子无刷电机,其特点是转矩和转动惯量大,长度短.这样可以减小负载的周期变化引起的转速变化,并减小由于电机横置引起的配平问题.

减速器采用了传动比为 15 的一级开式直齿轮传动.这样的传动方案可以减少传动级数,简化结构和提高效率;而且齿轮与机身平行,不增加迎风面积.

扑翼机构中的球面副选用模型直升机连杆上使用的尼龙球形铰链,它具有强度高、重量轻、自润滑的特点,可以满足扑翼机构需要.

3 分析与比较

3.1 仿真分析

为了比较空间扑翼机构与前述各平面机构的运动对称性,按照上节所述条件确定各机构参数建立机构,并使用 Adams 软件进行运动分析.

图1中的平面扑翼机构在一个周期内两侧机翼运动角度变化如图6所示.

由图5可知,这两种平面扑翼机构中,左右翼扑动均存在差异.其中第一中机构结构简单,但其扑动不对称性非常显著.第二种机构运动差异较

小,但仍未能完全消除.

使用相同的方法,对本文所述空间扑翼机构进行分析,其一个周期内两侧机翼运动角度变化如图 7 所示.

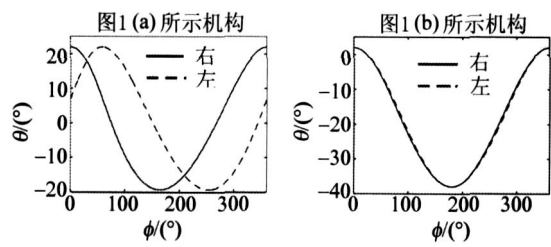


图 6 平面扑翼机构角度曲线
Fig. 6 Angle curves of the planer flapping-wing mechanisms

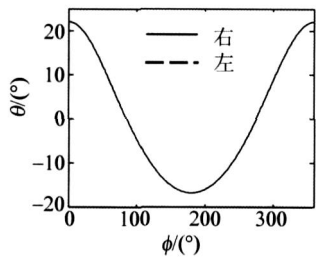


图 7 空间扑翼机构的角度曲线
Fig. 7 Angle curves of the spatial flapping-wing mechanism

由图 7 可以看出,该空间扑翼机构两侧机翼不存在运动差异.

3.2 样机试验

为了对实际机构进行比较,本文制作了图 1(a)所示平面扑翼机构的样机(图 8),与空间扑翼机构进行对比.

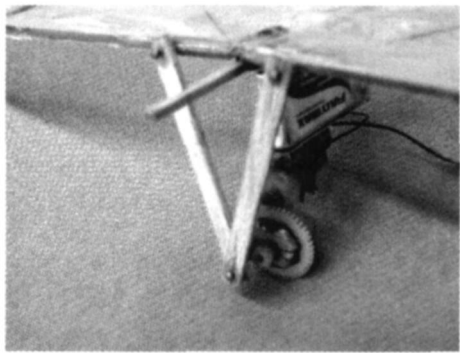


图 8 平面扑翼机构样机
Fig. 8 Prototype of the planer flapping-wing mechanism

为了验证样机的运动对称性,本文进行了试验,过程如下:

- 1) 将样机水平固定在试验台上;
- 2) 在样机翼根转轴处和两侧翼梁上固定反光标记点,如图 9 所示;

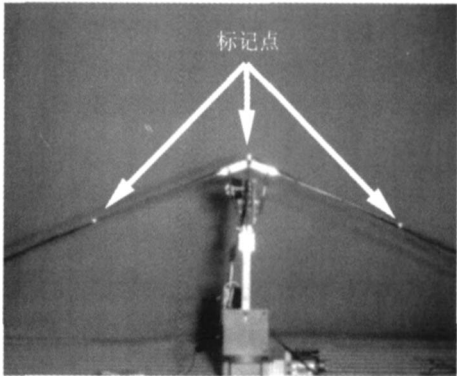


图 9 试验方法示意图
Fig. 9 Sketch of prototype examination

- 3) 使样机运转,在样机前方使用本 Photron 1 280 PCI 高速摄像机正对样机轴线进行拍摄.拍摄时使用 50 mm 镜头,拍摄速率 500 fps,图像分辨率 1 280 × 1 024,快门速率 1/4 000 s;
- 4) 在拍摄到的图像序列中选择一个完整的周期;
- 5) 使用 Matlab 6.5 软件对所选图像序列进行分析,提取标记点位置,并计算两侧翼梁角度(图 10).

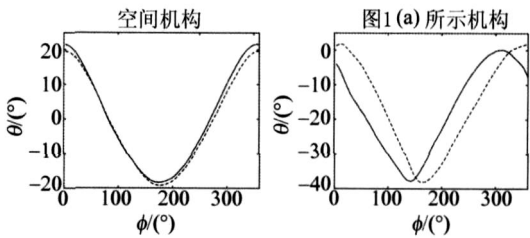


图 10 扑翼机构样机的角度曲线
Fig. 10 Angle curves of the prototypes

由图 10 可以看出:

- 1) 空间扑翼机构右侧角度始终大于左侧.这是由于样机放置时纵轴与摄像机 Y 轴存在偏差所致,属于试验误差;
- 2) 空间扑翼机构右侧角度范围略大于左侧.这是由于曲柄分离后,两侧曲柄长度不严格一致所致,属于加工装配误差;
- 3) 平面机构位置极点处曲线比较尖锐.这是由于存在装配误差,导致传动效率下降,运动不连贯所致.而空间扑翼机构由于采用了球副,对加工及装配误差不敏感,运动连贯;
- 4) 试验结果与前文所述仿真结果基本吻合,

空间扑翼机构运动对称性明显优于第一种平面扑翼机构。

3.3 试飞实验

本文在对扑翼机构进行研究的基础上,构建了一系列微小型扑翼飞行器样机,并进行了试飞实验(图11)。

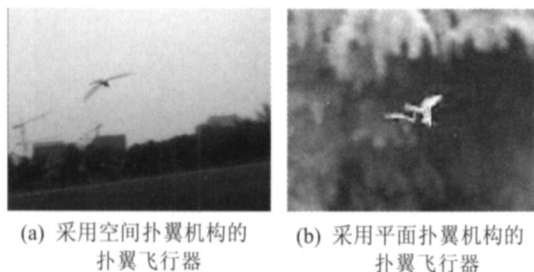


图11 样机试飞截图

Fig. 11 Snap shots of prototypes flight

通过试飞发现,采用单曲柄双摇杆平面扑翼机构的扑翼飞行器在试飞时会出现方向不确定的偏转,难以通过配平改善稳定性。而采用空间曲柄摇杆机构的扑翼飞行器的偏转方向是固定的,通过配重进行配平后可以稳定飞行。

4 结论

扑翼机构平面扑翼机构在解决两侧机翼扑动运动对称性和减轻结构重量的矛盾时难以兼顾。本文通过对平面扑翼机构的分析和改型提出了一种空间曲柄摇杆扑翼机构,并结合实际需要进行尺寸综合。计算比较和样机试验比较证明,这种扑翼机构运动对称性好,大大增强了扑翼飞行器的滚转稳定性,同时结构紧凑,能够满足构建小型扑翼飞行器的需要。

参考文献:

- [1] Avadhanula S, Wood R J, Campolo, et al. Dynamically tuned design of the MFI thorax[C]// IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington, D C: [s. n.], 2002: 11-15.
- [2] Galinski R C, Pedersen C B. Four-bar linkage mechanism for insectlike flapping wings in hover: concept and an outline of its realization[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127: 817-824.
- [3] Jones K D, Platzer M F, An experimental and numerical investigation of a flapping wing propulsion [R]. 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper No. 99-0995, 1999.
- [4] 贾明, 毕树生, 宗光华, 等. 仿生扑翼机构的设计与运动学分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1087-1090.
- JIA Ming, BI Shusheng, ZONG Guanghua, et al. Design of bionic flapping mechanism and its kinematic analysis [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9): 1087-1090. (in Chinese)
- [5] Pornsiri-Sirirak T N, Lee S W, Nassef H, et al. MEMS wing technology for a battery-powered ornithopter[C]// IEEE 13th Annual Int. Conf. on MEMS, Piscataway, N J: [s. n.], 2000: 799-804.
- [6] Madangopal R, Khan Z A, Agrawal S K. Biologically inspired design of small flapping wing air vehicles using four-bar mechanisms and quasi-steady aerodynamics[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127: 809-816.
- [7] Muniappan A, Duriyanandhan V, Baskar V. Lift characteristics of the flapping wing micro air vehicle [R]. Chicago, Illinois: AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, 20-23 September, 2004.