仿生扑翼机构的设计与运动学分析

贾 明 毕树生 宗光华 徐一村

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 仿生扑翼机构的设计以实现昆虫的扑翼形式为目标,通过仿生学与工程实际相结合,将昆虫复杂的扑翼运动分解为平扇与翻转两个基本动作,同时这两个自由度必须协调运动. 仿生扑翼机构主要包括并联的两组曲柄摇杆机构与差动轮系两个部分,由直流伺服电机作为驱动,将曲柄的连续旋转输入转换为翅膀的平扇与翻转两自由度复合运动输出. 通过建立运动模型对仿生扑翼机构进行运动学分析,得到扑翼的扇翅角及翅攻角与时间的关系曲线,然后选择合理的扑翼机构几何参数及齿轮副的传动比构筑扑翼机构样机,实现了预期的扑翼形式.

关 键 词: 仿生机构; 扑翼; 运动学分析

中图分类号: TH 112.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1087-04

Design of bionic flapping mechanism and its kinematic analysis

Jia Ming Bi Shusheng Zong Guanghua Xu Yicun

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Bionic flapping mechanism aims at realizing flapping motion of insect wings. It has become clear that two-degree-of-freedom flapping motion harmoniously is necessary for insects to produce enough lift. Double four-bar linkage mechanism and differential planetary gear train are two elements of bionic flapping mechanism, and its design, implementation, and testing were made. Driven by servo-actuator, double four-bar linkage mechanism transfers rotary motion to two sets of oscillating motions, then differential planetary gear train transfers oscillating motions to insectlike flapping motion of plunging and pitching. Mechanism kinematic analysis were made and linkage parameters and gear ratios were determined for implementing perfect flapping motion. Then instantaneous stroke angular position and angle of attack of the wing were plotted with respect to a complete alternation of upstroke and downstroke.

Key words: bionic mechanism; flapping wings; kinematic analysis

近年来,随着实验手段的不断完善、流场显示技术的发展及数值仿真方法的应用,人们对昆虫通过高频扇翅产生高升力的机理有了更深的认识,其相关的非定常空气动力学理论[1-3]逐渐被人们所掌握,从而为仿生扑翼机构的设计提供了理论基础. 现有的扑翼机构主要有两种形式:一种是单自由度的扑翼机构[4],通过齿轮减速与曲柄摇杆机构将电机的旋转运动转换为翅膀的往复扇翅运动,这种扑翼方式并没有充分利用扑翼产生高升力的机理;另一种具有两自由度的扑翼机构[5],通过两组曲柄摇杆机构将两组压电元件的摆动运动放大,再转换为翅膀的两自由度运动输出,其不足之处是它必须具备两组致动器,需要协调控制才能实现较好的翅膀复合运动. 而由多组空间机构、棘轮及弹簧组成的扑翼机构[6]在结构上过于复杂.

本文研究的扑翼机构采用并联的两组曲柄摇杆机构与差动轮系组合,将一个电机的旋转运动

收稿日期: 2005-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275004); "211"工程资助项目

作者简介: 贾 明(1978-),男,吉林镇赉人,博士生,jiaming_2002@sohu.com.

转换为翅膀平扇与翻转的两自由度复合运动输出. 由于结构与控制简单,所以这种扑翼机构更适于微型化,能够很好地解决扑翼式微型飞行器要求重量轻与升力大之间的矛盾.

1 仿生扑翼机构原理

1.1 扑翼机构设计目标

仿生扑翼机构的设计目标为实现昆虫的扑翼运动形式,而昆虫的种类很多,扑翼形式复杂多样. 但通过仿生学与工程实际相结合,以果蝇作为仿生对象具有代表性,可将昆虫复杂的扑翼运动分解为平扇与翻转两个基本动作(图 1),平扇运动改变翅膀的扇翅角 ϕ(下扇的起始位置与翅膀当前位置的夹角),翻转运动改变翅膀的翅攻角 α(翅膀扇动方向与翼后缘指向翼前缘方向的夹角),这两个动作的协调运动可以实现昆虫的自由飞行. 由非定常空气动力学理论及验证扑翼机理的实验[1]可知,升力随着 ϕ 范围的增大而增大,以果蝇为例,它在悬停飞行时 ϕ 可达到 180°;在平扇过程中翅膀保持匀速,并使 α 为 45° ~ 50° 可以获得较大升力;在上扇与下扇的转换过程中,翅膀迅速翻转以便转换扇翅方向后仍保持相同的翅攻角,在反扇后较快加速到平扇速度也有利于升力的产生.

由于翅膀处于高频扇动状态,为了减小惯性力影响,同时为了最终应用于扑翼式微型飞行器,运动件的质量应尽可能小,两个转动之间应存在尽量小的质量耦合,而且机构的复杂程度也受到限制.

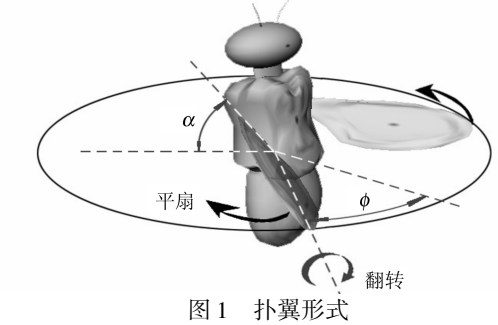


图 1 扑翼形式

1.2 仿生扑翼机构原理

针对设计目标及约束条件进行仿生扑翼机构的设计,主要可以分为两个部分,首先是并联的两组曲柄摇杆机构将曲柄输入的旋转运动转换为两个摇杆的摆动运动输出,如图 2 所示.

这两组曲柄摇杆机构的尺寸参数均相同,只是曲柄 O_1A 与曲柄 O_1A' 存在一固定的相位差 θ,

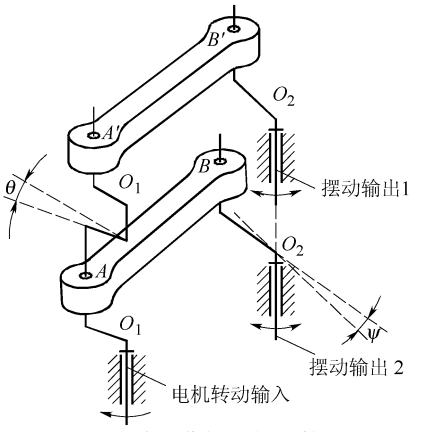


图 2 并联曲柄摇杆机构

所以两个摇杆的摆动输出并不同步,角度差 ψ 在不同转角位置时会有不同的取值. 如图 2 所示电机旋转方向,摇杆 O_2B' 会先到达摇杆运动空间的极限位置,随后摇杆 O_2B 才到达与其相对应的极限位置,在这一过程中,ψ 会逐渐减小到零,然后又会反方向逐渐增大,利用这一特性将两个摆动输出再传递到下面的差动轮系.

差动轮系原理如图 3 所示,当两个摆动输入的 ψ 不变时,行星轮随着行星轮支架绕轴 O_3 转动,自身不转动;当两个摆动输入的 ψ 变化或者反向运动时,行星轮会绕自身轴线 O_4 转动.

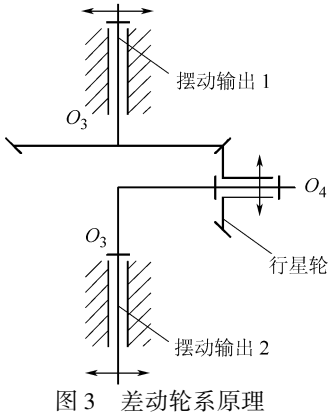


图 3 差动轮系原理

因此,将翅膀固定在行星轮上,当曲柄连续转动,两个摇杆摆动输出的 ψ 近似不变时,翅膀保持 α 不变而做平扇运动;当两个摇杆在极限位置处反向运动时,翅膀则完成反扇转换过程中的翻转运动. 于是,通过设计不同的扑翼机构参数就可以实现不同 ϕ 及 α 的扑翼形式.

2 机构运动学分析

首先分析并联曲柄摇杆机构的曲柄输入 β_1 及 θ 与摆动输出 β_3 及摆动输出 ψ 的关系. 机构的几何参数如图 4 所示.

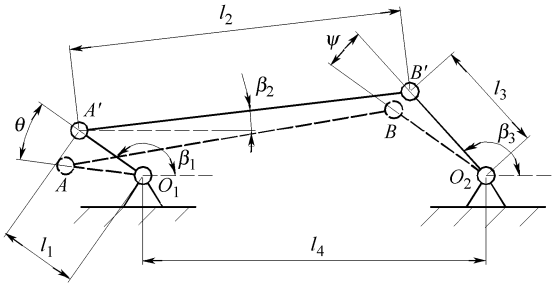


图 4　并联曲柄摇杆机构几何参数

由图 4 中几何关系可建立运动方程如下:

$$\left.\begin{aligned} &l_1\cos\beta_1 + l_2\cos\beta_2 - l_3\cos\beta_3 = l_4\\ &l_1\sin\beta_1 + l_2\sin\beta_2 - l_3\sin\beta_3 = 0\\ &l_1\cos(\beta_1+\theta) + l_2\cos\beta_2 - l_3\cos(\beta_3+\psi) = l_4\\ &l_1\sin(\beta_1+\theta) + l_2\sin\beta_2 - l_3\sin(\beta_3+\psi) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

由此可解得

$$\beta_3 = \pi - \arccos\frac{l_3^2 + D^2 - l_2^2}{2l_3D} - \operatorname{sign}(\sin\beta_1)\arccos\frac{l_4^2 + D^2 - l_1^2}{2l_4D} \tag{2}$$

$$\psi = \pi - \arccos\frac{l_3^2 + E^2 - l_2^2}{2l_3E} - \operatorname{sign}(\sin(\beta_1+\theta))\arccos\frac{l_4^2 + E^2 - l_1^2}{2l_4E} - \beta_3 \tag{3}$$

式中　$D = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4\cos\beta_1}$

$E = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4\cos(\beta_1+\theta)}$

为了增大 ϕ 的运动范围,所以在并联曲柄摇杆机构的输出与差动轮系的输入之间增加了齿轮副,用于将摇杆的摆角范围放大. 齿轮副的传动比设为 i_1,如图 5 所示差动轮系的各个角度关系,因此,可以求得两个摆动输入分别为

$$\gamma_1 = i_1\beta_3 \tag{4}$$

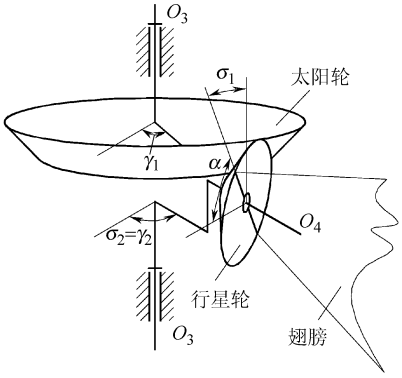


图 5　差动轮系角度关系

$$\gamma_2 = i_1(\beta_3 + \psi) \tag{5}$$

此时行星轮绕自身轴线 O_4 的相对运动转过的角度 σ_1 及随行星轮支架绕 O_3 的牵连运动转过的角度 σ_2 可以由下式确定:

$$\sigma_1 = i_2(\gamma_1 - \gamma_2) = -i_1i_2\psi \tag{6}$$

$$\sigma_2 = \gamma_2 = i_1(\beta_3 + \psi) \tag{7}$$

式中,i_2 表示当行星轮支架不动时,太阳轮与行星轮的传动比;式(6)中的负号表示 σ_1 与 ψ 的方向相反,σ_1 的值表示翼后缘指向翼前缘的方向与 O_3 轴夹角的大小. 然后,将行星轮的转角与翅膀的 ϕ 及 α 相对应,即可以得到

$$\phi = \sigma_2 \tag{8}$$

$$|\alpha| = \frac{\pi}{2} - |\sigma_1| \tag{9}$$

α 的方向取决于翅膀扇动方向与翼后缘指向翼前缘方向的夹角,如果夹角为锐角,α 为正值;如果夹角为钝角,α 为负值.

曲柄输入 β_1 随时间 t 变化的关系如下:

$$\beta_1 = \omega t \tag{10}$$

式中 ω 为常数,代入式(8)、式(9)可得到 ϕ 及 α 随时间的变化规律,对时间进行求导,可得到两个转动的速度与加速度的运动规律. 进一步对扑翼机构进行受力分析,可求得机构的动力学特性.

3　仿生扑翼机构的构筑

3.1　仿生扑翼机构参数

机构外观尺寸范围为 30 mm×40 mm×50 mm,重 60 g,如图 6 所示仿生扑翼机构样机. 各个连杆的尺寸分别为 l_1=2.5 mm,l_2=29.8 mm,l_3=4 mm,l_4=30 mm,两个齿轮副的传动比为 i_1=1.58,i_2=2.5,并联曲柄摇杆机构的两个曲柄输入的 θ 设为 18°.

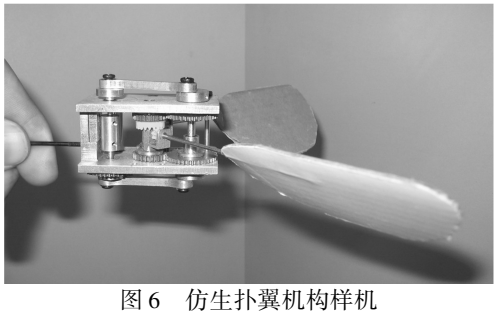


图 6　仿生扑翼机构样机

3.2　扑翼运动规律

曲柄输入转速设为 $\omega = 20\pi$,即扑翼频率为 10 Hz,由运动学分析可知 ϕ 及 α 随时间的变化规律,如图 7 所示为一个周期内的变化曲线.

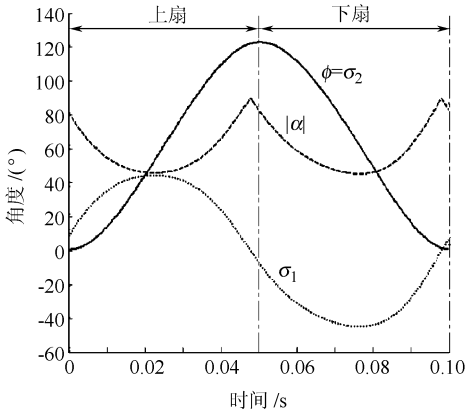


图7 角度随时间的变化规律

由此可知翅膀的 ϕ 范围约为120°,在平扇过程中近似保持 α 为45°~50°,在上扇与下扇的结束过程中,翅膀迅速翻转并在反扇前达到最大翅攻角90°,随后迅速减小,由扑翼飞行机理可知这种提前翻转形式[1]是较为理想的形式.

如图8所示为经过机构尺度优化后的两个角速度随时间的变化规律,由此可知,翅膀在上扇与下扇的平扇过程中先加速、再近似匀速、最后减速至零然后反向. 翅膀翻转发生在上扇与下扇的转换过程中,在平扇过程中近似为零,以保持翅攻角近似不变. 因此,这样的运动规律较好地实现了预期的扑翼形式.

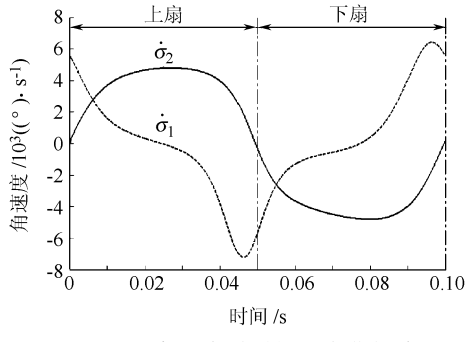


图8 角速度随时间的变化规律

3.3 扑翼试验

由直流伺服电机驱动仿生扑翼机构,当频率小于5 Hz时,翅膀可以实现较为理想的扑翼形式,当扑翼频率增加时,由于齿轮传动副及连杆机构间存在间隙,且翅膀上的作用力也会随之增加,这会强制翅膀产生翻转,表现为角度 σ_1 的摆动范围增大,α 变小. 为了避免这种变化,在行星轮的自身轴线 O_4 轴上设计了限位挡块,其作用是限制角度 σ_1 的变化,使行星轮在有限的摆角范围内转动,以便 α 在平扇时近似稳定为45°~50°,如图9所示.

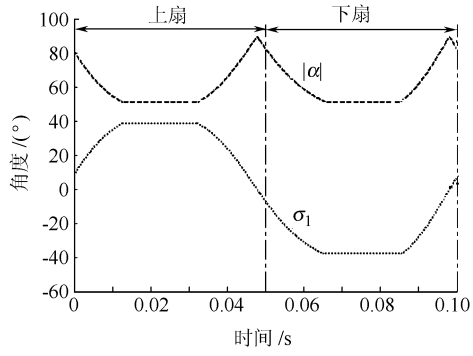


图9 限位后角度随时间的变化规律

4 结束语

通过设计仿生扑翼机构来实现翅膀两自由度的协调运动,在运动学分析的基础上选择合适的扑翼机构几何参数,最终实现了较为理想的扑翼形式. 本文所设计的扑翼机构将两个自由度的运动由一个驱动完成,避免了由两个驱动所带来的质量耦合及控制上的联动问题,具有控制与结构简单、重量轻、适于小型化的优点,可最终应用于扑翼式微型飞行器的设计中.

参考文献(References)

[1] Sane S P. The aerodynamics of flapping wings [D]. Berkeley: Department of Integrative Biology, University of California, 2001

[2] Dickinson M H, Lehmann F O, Sane S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight [J]. Science, 1999, 284: 1954-1960

[3] Sun M, Du G. Lift and power requirements of hovering insects flight[J]. Acta Mech Sinica, 2003, 19(5): 458-469

[4] Pornsin-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, NJ:IEEE, 2000:799-804

[5] Avadhanula S, Wood R J, Campolo D, et al. Dynamically tuned design of the MFI thorax[C]// IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington, DC:IEEE, 2002: 11-15

[6] Zbikowski Rafal, Galinski Cezary, Pedersen Christopher B. Four-bar linkage mechanism for insectlike flapping wings in hover: concept and an outline of its realization[J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2005, 127(4): 817-824

(责任编辑:赵海容)