

文章编号: 1000 8055(2008)09 1561-07

一种仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制的仿真估算研究

张西金, 方宗德, 杨小辉
(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要: 基于准稳态气动力模型, 推导了仿蜜蜂类昆虫扑翼气动力和力矩估算公式, 建立了扑翼运动函数. 将仿蜜蜂类昆虫扑翼视为空间运动刚体, 在其动力学方程基础上, 采用分层控制策略研究悬停控制问题. 外层为位置控制, X 和 Y 位置应用 PD 控制算法, Z 位置应用切换控制方法; 内层姿态控制采用切换控制方法, 并选择了一套机翼运动参数用于切换控制. 最后进行了仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制仿真试验, 试验结果表明所设计的控制策略是有效的, 一旦昆虫扑翼受到干扰偏离平衡位置后, 通过自动调节能够回到平衡位置附近.

关 键 词: 微扑翼飞行器; 悬停控制; 切换控制; 扑翼运动参数; 仿真

中图分类号: V276

文献标识码: A

Approximate simulation research on the hovering control of an insect flapping flight mimicking bee

ZHANG Xi jin, FANG Zong de, YANG Xiao hui

(School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the quasi-state aerodynamic force model, the paper deduced the aerodynamic force and moment approximate equations of an insect flapping flight mimicking bee, and developed kinematic functions of flapping wing. Then, the insect flapping flight mimicking bee was regarded as rigid body moving in the sky. Based on its dynamic equation, hovering control was investigated by means of hierarchical control. External control was position control, PD (proportion differentiation) controller was used for positions of X and Y , switching controller was employed for position of Z ; switching control strategy was also used for internal attitude control, and a set of kinematic parameters were selected for switching control. Finally, hovering control of the insect flapping flight mimicking bee was simulated. The result shows that the proposed control method is effective, when the insect flapping flight is disturbed and departs from balanced position, it can return near its balanced position by means of self regulation.

Key words: micro flapping flight; hovering control; switching control;
kinematic parameters of flapping wing; simulation

昆虫和鸟类经过几千万年的漫长进化过程, 获得了令人惊叹的飞行技巧. 例如一只普通的家蝇能倒着起飞、侧飞、倒着降落, 并能携带两倍于自身重量的物品; 所有的鸟类、昆虫没有清晰可见的“垂直安定面和方向舵”, 但其飞行稳定性和机

动性却是任何飞行器也无法与之相比的. 仿生学和空气动力学研究均表明, 对于特征尺寸相当于小鸟或者昆虫的微型飞行器来说, 仿照生物飞行的微扑翼飞行器在能量消耗、推进效率和机动灵活性等方面都要优于固定翼和旋翼飞行.

收稿日期: 2007 09 18; 修订日期: 2008 02 29

基金项目: 国家自然科学基金(50575183); 博士点专项科研基金(20050699022)

作者简介: 张西金(1972-), 男, 陕西彬县人, 讲师, 博士生, 主要从事微扑翼飞行器研究.

微扑翼飞行器所具有的独特的优势,使之成为微型飞行器发展的一个最具前景的方向. 经过近10年来各国科学家的努力,微扑翼飞行机理的实验和理论研究已取得了一定的成果^[1],并设计制作出短时间成功飞行的微扑翼飞行器. 随着微扑翼飞行器研究的继续深入,对其控制问题的研究开始引起了人们的注意. 模仿昆虫飞行模式,微扑翼飞行器能够停留在空中某一位置,这种悬停状态是区别与固定翼飞行器的一个典型飞行姿态. 由于微扑翼飞行器动力学方程的非线性强耦合特点,其悬停控制很难实现. 目前,美国加州大学在微扑翼飞行器飞行控制方面做了大量工作^[2-4],Schenato L等应用切换控制策略对悬停状态下微扑翼飞行器控制进行了仿真研究, Deng X等通过系统辨识得到了悬停运动的状态空间线性时不变模型,并设计了线性二次最优控制器. 总的来看,目前对微扑翼飞行器悬停控制研究还处于初始阶段,尚没有出现算法简单,性能理想的控制器.

本文采用分层控制策略对仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制问题展开研究. 首先基于准稳态气动力模型,研究了仿蜜蜂类昆虫扑翼气动力和力矩,建立了机翼运动函数. 然后将昆虫扑翼视为刚体,在其动力学方程基础上,采用分层控制策略进行悬停控制,外层为位置控制, X 和 Y 位置应用 PD (Proportion differentiation) 控制算法, Z 位置应用切换控制方法;内层姿态控制采用切换控制方法,并选择了一套机翼运动参数用于切换控制. 最后通过仿真试验验证了控制策略的有效性.

1 气动力及力矩

仿蜜蜂类昆虫扑翼可以视为刚体,它在空间运动包括随质心移动以及绕质心转动,研究其运动控制首先需要定义两个坐标系:地面坐标系和机身坐标系. 地面坐标系 $XOYZ$ 也叫惯性坐标系,固连在地球上, XOY 为水平面, X 轴方向任意确定, Y 轴与 X 轴垂直, Z 轴垂直与 XOY 面. 机身坐标系 $xoyz$ 坐标原点固定在机身重心处, xoy 平面为扑动平面, 翅翼在该平面内扑动, x 轴为机身纵轴在扑动平面上的投影,方向指向昆虫扑翼头部, y 轴在扑动平面内垂直与 x 轴, z 轴方向通过右手定则确定.

因为悬停状态下仿蜜蜂类昆虫扑翼飞行速度与机翼扑动的线速度相比非常小,忽略飞行速度对仿蜜蜂类昆虫扑翼气动力的影响. 以右翼为例,

基于准稳态模型,不考虑尾流捕获作用,由延后失速 (Delayed stall) 和旋转环流 (Rotational circulation) 机理产生的瞬时气动力为^[5-6]

$$F_{tr}(t, r) = \frac{1}{2} \rho \int_0^R C_t(\alpha_r(t)) c(r) U_r^2(t, r) dr \quad (1)$$

$$F_{nr}(t, r) = \frac{1}{2} \rho \int_0^R C_n(\alpha_r(t)) c(r) U_r^2(t, r) dr + \frac{1}{2} \rho \int_0^R C_{rot} c(r)^2 U_r(t, r) \dot{\alpha}_r(t) dr \quad (2)$$

$$U_r(t, r) = \dot{\phi}_r(t) r \quad (3)$$

其中 F_{tr} 和 F_{nr} 分别是相对于翼剖面的气动力切向分量和法向分量, ρ 是空气密度, $c(r)$ 是翼剖面弦长, $\phi_r(t)$ 是扑动角, $\alpha_r(t)$ 为迎角,即翼剖面与速度的夹角, $\alpha_r(t) = \pi/2 - \phi_r(t)$, $\phi_r(t)$ 为扭转角, R 是翅翼长度. $C_t(\alpha(t))$, $C_n(\alpha(t))$ 和 C_{rot} 是无量纲力系数, $C_t(\alpha(t))$ 和 $C_n(\alpha(t))$ 经验公式为式(4)和式(5), $C_{rot} = \pi$. 仿蜜蜂类昆虫扑翼气动力如图1所示.

$$C_t(\alpha(t)) = \begin{cases} 0.4 \cos^2(2\alpha(t)) & (0 \leq \alpha \leq \pi/4) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (4)$$

$$C_n(\alpha(t)) = 3.4 \sin \alpha(t) \quad (5)$$

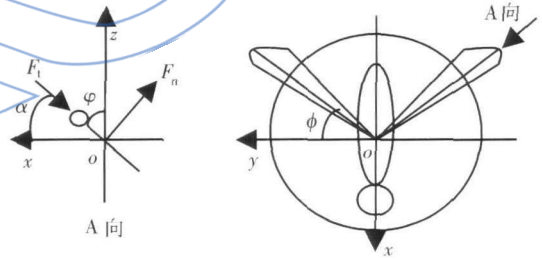


图1 仿蜜蜂类昆虫扑翼气动力

Fig. 1 Aerodynamic force of an insect flapping flight mimicking bee

下面推导在机身坐标系中3个气动力分量以及3个气动力矩分量. 将气动力 F_{tr} 和 F_{nr} 在机身坐标系内分解为升力和阻力, 计算公式如下:

$$F_{Lr}(t, r) = F_{nr}(t, r) \cos \alpha - F_{tr}(t, r) \sin \alpha \quad (6)$$

$$F_{Dr}(t, r) = -F_{nr}(t, r) \sin \alpha - F_{tr}(t, r) \cos \alpha \quad (7)$$

需要说明的是,上面的研究的是右翼产生的气动力升力和阻力,同样可以推导出左翼产生的气动力升力和阻力计算公式如下. 实际仿蜜蜂类昆虫扑翼双翼运动时,先对左右机翼气动力单独计算,然后计算合力.

$$F_{Ll}(t, r) = F_{Lr}(t, r) \cos \alpha_l - F_{Lr}(t, r) \sin \alpha_l \quad (8)$$

$$F_{Dl}(t, r) = -F_{ml}(t, r) \sin \alpha_l - F_{ll}(t, r) \cos \alpha_l \quad (9)$$

在机身坐标系中3个气动力分量以及3个气动力矩分量为

$$F_{Ax}(t) = F_{Dl}(t, r) \cos(\phi(t)) + F_{Dr}(t, r) \cos(\phi(t)) \quad (10)$$

$$F_{Ay}(t) = F_{Ll}(t, r) + F_{Lr}(t, r) \quad (11)$$

$$F_{Az}(t) = F_{Dl}(t, r) \sin(\phi(t)) - F_{Dr}(t, r) \sin(\phi(t)) \quad (12)$$

$$M_{Ax}(t) = F_{Lr}(t, r) L \cos(\phi(t)) - F_{Ll}(t, r) L \cos(\phi(t)) \quad (13)$$

$$M_{Ay}(t) = -F_{ll}(t, r) L \sin(\phi(t)) - F_{Lr}(t, r) L \sin(\phi(t)) \quad (14)$$

$$M_{Az}(t) = F_{Dl}(t, r) L - F_{Dr}(t, r) L \quad (15)$$

建立高频拍动仿蜜蜂类昆虫扑翼动力学方程通常采用平均气动力和力矩,根据平均值计算公式可以得到

$$\bar{F}_{Ax} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{Ax}(t) dt \quad (16)$$

$$\bar{F}_{Ay} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{Ay}(t) dt \quad (17)$$

$$\bar{F}_{Az} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{Az}(t) dt \quad (18)$$

$$\bar{M}_{Ax} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{Ax}(t) dt \quad (19)$$

$$\bar{M}_{Ay} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{Ay}(t) dt \quad (20)$$

$$\bar{M}_{Az} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{Az}(t) dt \quad (21)$$

2 机翼运动函数

仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停飞行时机翼运动包括前后拍动和绕机翼纵轴的扭转,机翼在前拍(或后拍)结束时要通过扭转实现翅翼翻转,使产生的气动力能够平衡飞行器本身的重量.机翼拍动和扭转运动会对气动力和力矩产生影响,定义机翼运动如下:

拍动运动采用三角函数描述,定义扑动角为

$$\phi = \phi_{\max} \sin(2\pi f t) \quad (22)$$

考虑拍动运动前半周期和后半周期扭转时机

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_x \\ \bar{F}_y \\ \bar{F}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos \theta & -\sin \Psi \cos \vartheta + \cos \Psi \sin \theta \sin \vartheta & \sin \Psi \sin \vartheta + \cos \Psi \sin \theta \cos \vartheta \\ \sin \Psi \cos \theta & \cos \Psi \cos \vartheta + \sin \Psi \sin \theta \sin \vartheta & -\cos \Psi \sin \vartheta + \sin \Psi \sin \theta \cos \vartheta \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \vartheta & \cos \theta \cos \vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{F}_{Ax} \\ \bar{F}_{Ay} \\ \bar{F}_{Az} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中 m 为仿蜜蜂类昆虫扑翼质量,欧拉角 ϑ, θ, Ψ 分别代表滚转角、俯仰角和偏航角.

有所不同,在前半周期 $[0, T/2]$, 扭转时机用 a 表示,后半周期 $[T/2, T]$ 扭转时机用 b 表示,将拍动周期16等份,前半周期扭转过程持续 $2T/16$,后半周期扭转过程持续 $2T/16$.对于右翼扭转角表示为

$$\varphi_R = \begin{cases} \varphi_{R \max} & (0 \leq t < a_R - T/16), \\ \varphi_{R \max} \cos[8\pi f(t - a_R)] & (a_R - T/16 \leq t < a_R + T/16), \\ -\varphi_{R \max} & (a_R + T/16 \leq t < T/2), \\ -\varphi_{R \max} & (T/2 \leq t < b_R - T/16), \\ \varphi_{R \max} \cos[8\pi f(t - b_R) + \pi] & (b_R - T/16 \leq t < b_R + T/16), \\ \varphi_{R \max} & (b_R + T/16 \leq t < T) \end{cases} \quad (23)$$

其中扭转时机 $a_R \in [T/16, 7T/16]$, $b_R \in [9T/16, 15T/16]$.同理根据 $\varphi_{L \max}, a_L, b_L$ 可以给出左翼扭转角 φ_L 表达式.

扭转时机不同,机翼翻转时刻就不同,根据翻转时刻将机翼运动归纳为三种模式.若翻转的一半在拍动结束阶段完成,另一半在下次拍动的初始阶段完成,称为“对称模式”;若将翻转提前,在拍动结束阶段完成,称为“超前模式”;反之称为“滞后模式”.

3 仿蜜蜂类昆虫扑翼动力学方程

将仿蜜蜂类昆虫扑翼看作空间运动刚体,在气动力和重力作用下,惯性坐标系 $XOYZ$ 中仿蜜蜂类昆虫扑翼质心运动动力学方程为

$$\begin{cases} m\ddot{X} = F_x \\ \ddot{Y} = F_y \\ m\ddot{Z} = F_z - mg \end{cases} \quad (24)$$

由于仿蜜蜂类昆虫扑翼结构对称,惯积 $J_{yz} = J_{zx} = J_{xy} = 0$.用 J_x, J_y 和 J_z 为分别表示绕 x, y, z

三轴的惯矩, w_x, w_y 和 w_z 分别表示绕 x, y, z 三轴转动角速度, 在机身坐标系下根据动量矩定理建立仿蜜蜂类昆虫扑翼绕质心转动动力学方程^[7]

$$\begin{cases} J_x \frac{dw_x}{dt} + (J_z - J_y)w_yw_z = \bar{M}_{Ax} \\ J_y \frac{dw_y}{dt} + (J_x - J_z)w_zw_x = \bar{M}_{Ay} \\ J_z \frac{dw_z}{dt} + (J_y - J_x)w_xw_y = \bar{M}_{Az} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\vartheta \\ 0 & \cos\vartheta & \cos\theta\sin\vartheta \\ 0 & -\sin\vartheta & \cos\theta\cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vartheta} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} \quad (27)$$

4 悬停控制

仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制的目标是使其保持在平衡位置 $P=(0,0,0)$, 即一旦昆虫扑翼受到干扰偏离平衡位置后, 通过自动调节使其回到平衡位置附近. 由于各运动参数对各个方向上的气动力和力矩都有影响, 任何方向上气动力和气动力矩的变化必然会影响其他方向上的气动力和气动力矩, 因此式(24)和式(26)组成的非线性仿蜜蜂类昆虫扑翼动力学方程具有强耦合特点, 常规控制方法很难取得理想控制效果. 本文对悬停控制采用分层控制策略, 外层为位置控制, 内层为姿态控制, 外层控制根据位置误差产生期望姿态角, 然后通过内层控制实现姿态角, 从而使仿蜜蜂类昆虫扑翼升力在地面坐标系各坐标轴上产生分量, 推动昆虫扑翼移动来减小位置误差.

4.1 姿态控制

改变机翼运动形式可以产生姿态调节所需的力矩^[4]. 为了姿态控制, 将机翼运动分为四种形式. A: 两翼拍动幅度相同, 扭转幅度相同, 前半周期同时超前, 后半周期同时滞后(或者前半周期同时滞后, 后半周期同时超前), 可以产生俯仰力矩; B: 两翼拍动幅度相同, 扭转幅度相同, 前半周期左翼滞后, 后半周期左翼超前, 前半周期右翼超前, 后半周期右翼滞后(或者前半周期右翼滞后, 后半周期右翼超前, 前半周期左翼超前, 后半周期左翼滞后), 可以产生偏航力矩; C: 两翼对称拍动, 拍动幅度相同, 左翼扭转幅度小于右翼(或者左翼扭转幅度大于右翼), 可以产生滚转力矩; D: 两翼对称拍动, 拍动幅度相同, 扭转幅度相同, 不产生力矩.

根据前面分析, 采用表 1 所示运动参数组合, 各力矩不存在耦合现象, 采用切换控制易于实现

姿态角解耦控制. 考虑姿态欧拉角误差及其变化率, 切换控制输入取

$$u_{\xi} = \text{sign}(C_0 e_{\xi} + C_1 \dot{e}_{\xi}) \quad (28)$$

式中 ξ 代表欧拉角 ϑ, θ 和 Ψ, e_{ξ} 为欧拉角误差, 系数 C_0, C_1 通过试验确定.

仿蜜蜂类昆虫扑翼完成一次机翼扑动周期后, 检测 e_{ξ} 和 $\dot{e}_{\xi}$, 根据 u_{ξ} 符号, 从表 1 序号 1~6 和 8 中选择相应运动参数输出. 比如, $u_{\theta}=1$, 说明欧拉角 θ 没有到达目标值, M_{θ} 应为正值, 选择序号为 2 的运动参数组合; $u_{\theta}=-1$, 说明欧拉角 θ 出现超调, M_{θ} 应为负值, 选择序号为 1 的运动参数组合; $u_{\theta}=0$, 说明欧拉角 θ 到达目标值, M_{θ} 应为零, 选择序号为 8 的运动参数组合.

4.2 运动控制

外层运动控制采用 PD 控制. 当 X 方向出现误差时, 通过俯仰力矩改变俯仰角, 产生 F_x 作用力, 推动仿蜜蜂类昆虫扑翼前飞或倒飞, 当 Y 方向出现误差时, 通过滚转力矩改变滚转角, 产生 F_y 作用力, 推动昆虫扑翼侧飞. 俯仰角和滚转角控制算法为

$$\theta = K_{p1}X + K_{d1}\dot{X} \quad (29)$$

$$\vartheta = K_{p2}Y + K_{d2}\dot{Y} \quad (30)$$

由于对称拍动时仿蜜蜂类昆虫扑翼只产生气动升力, 而且随着扑动幅度的改变, 升力大小发生变化, 其它气动力和力矩均为零(见表 1), 因此, 当 Z 方向出现误差时, 在对称拍动下通过调节扑动幅度控制仿蜜蜂类昆虫扑翼升降, 本文采用切换控制, 取 $\phi_{\max}=\pi/4$ 时为平衡状态, 升力和重量平衡, 切换控制策略为: $Z<0, \phi_{\max}=\pi/3$, 增大升力; $Z>0, \phi_{\max}=\pi/6$, 减小升力; $Z=0, \phi_{\max}=\pi/4$, 保持升力不变.

综合以上设计, 仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制原理如图 2 所示.

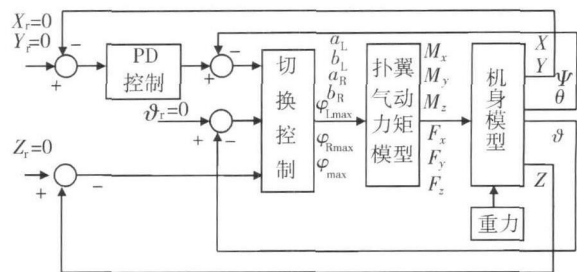


图 2 仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制图

Fig. 2 Hovering flight control diagram of an insect flapping flight mimicking bee

表 1 运动参数组合表
Table 1 Combination of kinematic parameters

序号	运动参数							平均气动力			平均气动力矩			运动形式
	$\phi_{\max} / \text{rad}$	$\varphi_{\text{Lmax}} / \text{rad}$	$\varphi_{\text{Rmax}} / \text{rad}$	a_{L} / s	b_{L} / s	a_{R} / s	b_{R} / s	F_x / mN	F_y / mN	F_z / mN	$\bar{M}_x / (\text{mN} \cdot \text{mm})$	$\bar{M}_y / (\text{mN} \cdot \text{mm})$	$\bar{M}_z / (\text{mN} \cdot \text{mm})$	
1	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/4$	5T/16	11T/16	5T/16	11T/16	0.163	0	0.756	0	-0.139	0	A
2	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/4$	3T/16	13T/16	3T/16	13T/16	-0.163	0	0.756	0	0.139	0	
3	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/4$	5T/16	11T/16	3T/16	13T/16	0	0	0.756	0	0	-1.383	B
4	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/4$	3T/16	13T/16	5T/16	11T/16	0	0	0.756	0	0	1.383	
5	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/3$	4T/16	12T/16	4T/16	12T/16	0	-0.003	0.770	0.200	0	0	C
6	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/4$	4T/16	12T/16	4T/16	12T/16	0	0.003	0.770	-0.200	0	0	
7	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/4$	4T/16	12T/16	4T/16	12T/16	0	0	0.806	0	0	0	D
8	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	4T/16	12T/16	4T/16	12T/16	0	0	0.466	0	0	0	
9	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/4$	4T/16	12T/16	4T/16	12T/16	0	0	0.219	0	0	0	

4.3 悬停控制仿真试验

用 Matlab/simulink 搭建仿真模型, 对仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制进行研究. 采用矩形机翼, 机翼尺寸及其它仿真参数如表 2 所示. 任取两种初始位置仿真, 控制过程如图 3 和图 4 所示.

从图 3 可以看出, 从初始位置(0.015, -0.02, 0.03)开始, 系统经过 5 s 过渡后, X 稳态误差

0.000 95 m, Y 稳态误差 0.001 55 m, Z 稳态误差 0.001 28 m. 从图 4 可以看出, 从初始位置(-0.01, 0.015, 0.01)开始, 系统经过 5 s 过渡后, X 误差稳态 0.000 083 m, Y 稳态误差0.000 24 m, Z 稳态误差 0.000 49 m. 仿真试验表明, 本文所设计的仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制策略是有效的, 一旦昆虫扑翼受到干扰偏离平衡位置(0, 0, 0)后, 通过自动调

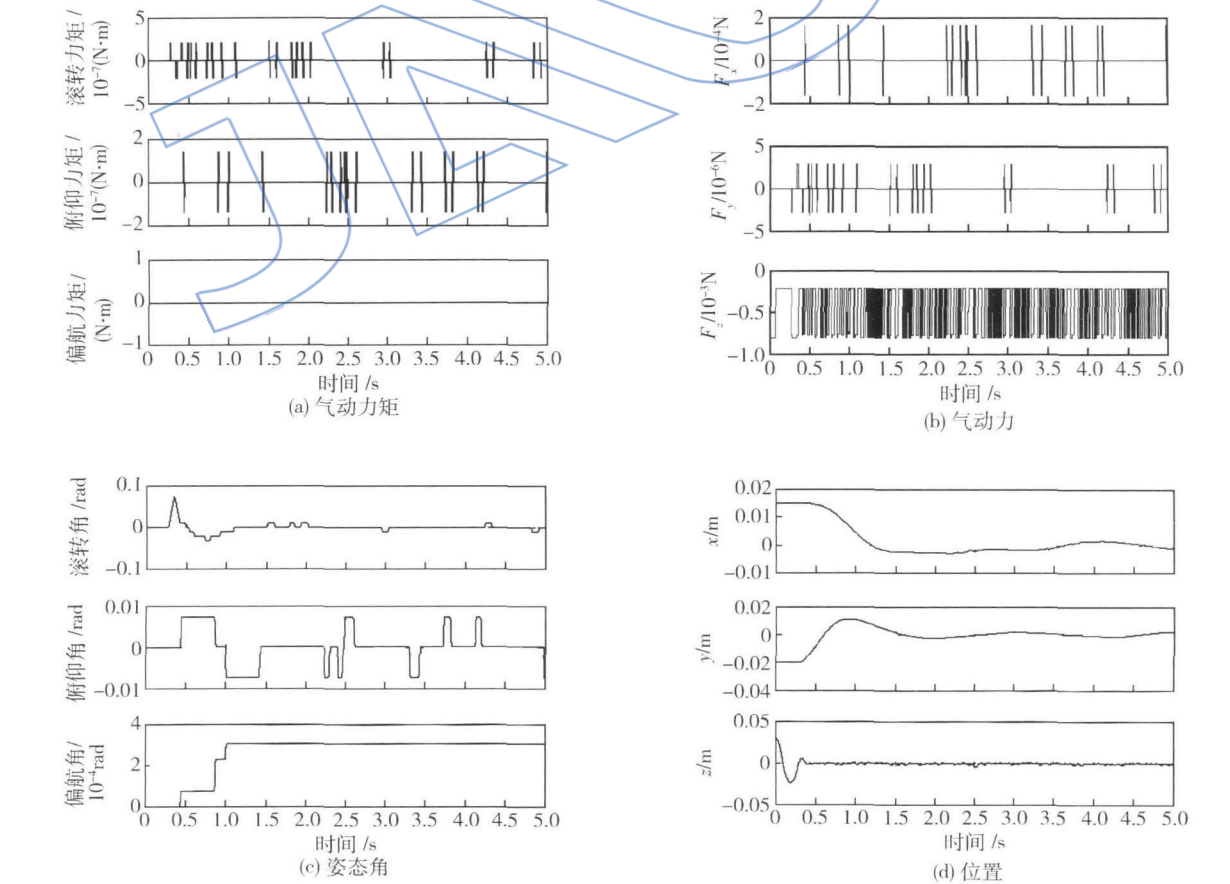


图 3 悬停控制 (初始位置(0.015, - 0.02, 0.03))

Fig. 3 Hovering flight control (Original position(0.015, - 0.02, 0.03))

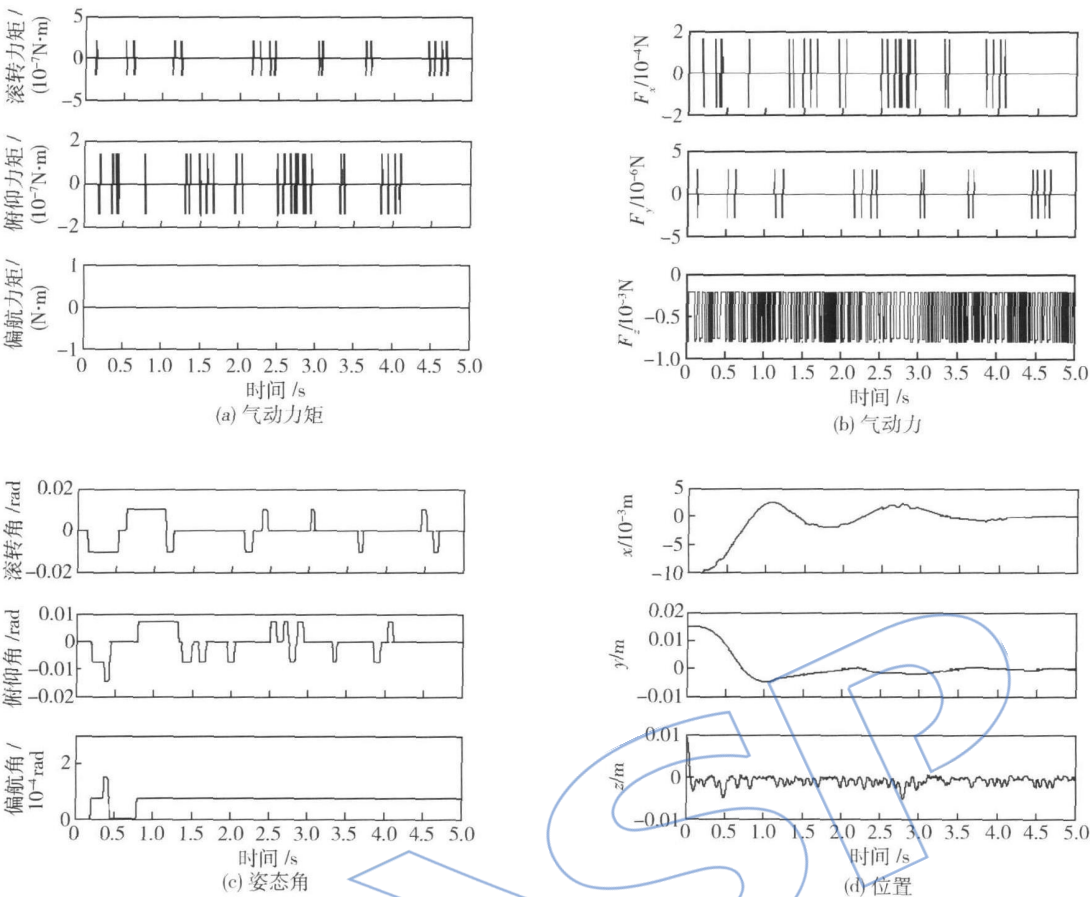


图 4 悬停控制 (初始位置(- 0.01, 0.015, 0.01))
Fig. 4 Hovering flight control (Original position (- 0.01, 0.015, 0.01))

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参 数	参数值
$m/10^{-4}\text{kg}$	0.475 8
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.225
f/Hz	100
R/mm	10
$c(r)/\text{mm}$	5
$J_x/10^{-8}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.19
$J_y/10^{-8}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.19
$J_z10^{-8}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.38
C_0	15
C_1	1
K_{p1}	1.5
K_{d1}	0.3
K_{p2}	1.5
K_{d2}	0.3

节能够回到平衡位置附近.

5 结 论

- 1) 本文基于准稳态气动力模型, 研究了仿蜜蜂类昆虫扑翼气动力和力矩, 建立了机翼运动函数.
 - 2) 将仿蜜蜂类昆虫扑翼视为空间运动刚体, 在其动力学方程基础上, 采用分层控制策略研究了悬停控制问题.
 - 3) 用 Matlab/simulink 搭建了仿真模型, 进行了仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制仿真试验, 试验结果表明所设计的控制策略是有效的.
- 仿蜜蜂类昆虫扑翼一个非线性强耦合系统, 其控制过程极为复杂, 本文研究了仿蜜蜂类昆虫扑翼悬停控制问题, 将来要进一步研究平飞, 俯冲、爬升、转弯等运动控制问题, 以期实现仿蜜蜂类昆虫扑翼的高度飞行机动灵活性.

参考文献:

[1] 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.

[2] Deng X, Schenato L, Sastry S. Model identification and attitude control scheme for a micromechanical flying insect [C]// Proceedings of the 7th ICARCV. Singapore: IEEE, 2002.

[3] Deng X, Schenato L, Sastry S. Hovering flight control of a micromechanical flying insect[C]// Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2001: 235-240.

[4] Schenato L, Deng X, Sastry S. Flight control system for a micromechanical flying insect: architecture and implementation[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea: IEEE, 2001: 1641-1646.

[5] Schenato L, Deng X, Wu W C, et al. Virtual insect flight simulator(VIFS): A software testbed for insect flight [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea: IEEE, 2001: 3885-3892.

[6] Schenato L. Analysis and control of flapping flight: From biological to robotic insects[D]. Berkeley: University of California, 2003.

[7] 高浩,朱培申,高正红. 高等飞行动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

