

文章编号: 1000-8055(2008)07-1279-08

仿昆扑翼飞行器的翅膀惯性力分析

胡明朗, 魏瑞轩, 崔晓峰, 郭 庆
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 用理论模化和仿真试验相结合的方法, 研究了昆虫翅膀扑动产生的惯性力和惯性力矩. 在昆虫扑翼飞行运动的仿生模拟基础上, 研究了翅膀扑动过程中拍动幅度、拍动加(减)速周期、平动迎角和翻转加(减)速周期 4 个振翅运动参数对翅膀惯性力(矩)的影响. 研究表明: 微小尺度昆虫高频扑翅产生的惯性力幅值与气动力的幅值大致相当; 昆虫翅膀的弦向转动惯量比展向转动惯量近似高一个数量级; 翅膀拍动惯性力矩的影响远远高于翅膀转动惯性力矩的影响, 而转动惯性力矩是可以忽略不计的; 只要翅膀的拍动是对称的, 就可认为翅膀的扑动是近似对称的; 如果翅膀拍动对称的同时转动对称, 就可认为翅膀的扑动是严格对称的, 此时翅膀惯性力可以忽略.

关 键 词: 惯性力; 昆虫飞行; 扑翼飞行器; 惯性力矩; 振翅运动参数

中图分类号: V212

文献标识码: A

Inertia force of flapping wing in entomopter micro air vehicle

HU Minglang, WEI Ruixuan, CUI Xiaofeng, GUO Qing

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Inertia force and moments of flapping wing in insect flight were studied using the methods of theoretical modeling and simulation. The influence of stroke amplitude, stroke duration, midstroke angle of attack and flip duration on inertia force was studied by simulating the biological locomotion of insect flight. The study results show that: the magnitude of inertia force is almost equivalent to that of the aerodynamic force during the high frequency flap of small insect; the insect wing's chord inertia is much higher than its spread inertia—higher by an order of magnitude; the influence of stroke moment of inertia is much higher than that of the flip moment of inertia, so the flip moment of inertia can be ignored; it's believed that the flap is almost symmetrical if the stroke is symmetrical and the flap is absolute symmetrical if the stroke and the flip are both symmetrical, then the inertia force can be ignored. How to design the control mechanic of insect like flapping wing air vehicle to increase the symmetrical and eliminate the influence of inertia force was discussed at last.

Key words: inertia force; insect flight; flapping wing air vehicle; moment of inertia; stroke kinematics parameter

昆虫的飞行方式具有更多的可调运动学控制参数; 能够更好的利用非定常流克服低雷诺数下的飞行性能恶化问题; 因此飞行昆虫具有控制灵活、气动力大、抗干扰性强等优点, 昆虫的飞行机

理和应用研究得到了各方的重视.

昆虫在飞行过程中受到翅膀产生的气动力、惯性力和重力的作用, 虽然昆虫翅膀质量仅仅占昆虫总重的 1%~5%^[1], 但由于翅膀扑频高达数

收稿日期: 2007-07-11; 修订日期: 2008-04-18

基金项目: 863 基金项目(2007AA3); 863 计划项目(2006AA701); 空军工程大学工程学院优秀博士学位论文创新基金

作者简介: 胡明朗(1983-), 男, 四川苍溪人, 博士生. 主要从事微小型飞行器控制理论与应用研究.

百赫兹, 惯性力对动力学特性有较大影响, 比如翅膀在扑动过程中的弹性形变效应 80% 是由于惯性力的作用引起的^[2-3]. 因此, 研究翅膀惯性力对扑翼飞行器的建模与控制具有重要意义.

力学分析表明, 翅膀在对称扑动时, 翅膀惯性力仅仅在机体纵向产生稳定的周期振动, 且振动幅度有限, 所以此时翅膀惯性力对动力学特性的影响可忽略不计^[4].

那么什么才算是“对称扑动”呢? 即满足什么条件才能忽略翅膀惯性力呢? 本文针对上述问题, 采用理论模化和仿真试验相结合的方法, 对翅膀扑动过程中的惯性力进行分析; 进而对“对称扑动”进行更准确的定义, 在此基础上探讨了如何建立扑翼飞行器的操控机制才能消除翅膀惯性力影响.

1 试验模型和方法

1.1 昆虫模型

所使用的昆虫模型与孙茂^[5]、Dickinson^[6]等人研究昆虫悬停、前飞时的气动力与功耗所使用的一样, 相关数据如下: 重量 $1.96 \times 10^{-5} \text{ N}$, 翅长 $R = 0.3 \text{ cm}$, 两翅膀面积 0.058 cm^2 , 平均弦长 0.097 cm , 拍动幅度 150° , 拍动频率 240 Hz ; 翅膀的平面形状与果蝇 (*Drosophila melanogaster*) 一样 (见图 1), 翅膀质量占模型昆虫总质量的 1%.

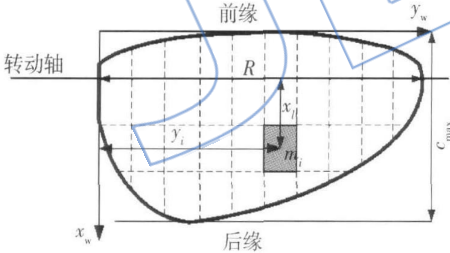


图 1 翅膀平面形状^[5]
Fig. 1 Wing shape

模型昆虫的翅膀为刚性翼, 不考虑扑动过程中的弹性形变; 翅膀具有两个自由度: 翅膀绕 z_b 轴的“拍动”(周向转动) 和绕翅膀展向轴 y_w 的“转动”, 其中 z_b 轴垂直于平均拍动平面; 果蝇翅膀的回转半径 $r_2 = 0.58R$, 展向位置 r_2 处的线速度称为翅膀的拍动速度^[5]; 果蝇翅膀的转动轴距前缘位置 $\hat{x}_0 = 0.25C_{\max}$, 其中 $C_{\max}$ 为翅膀的最大弦长^[7].

1.2 坐标系

本文使用如图 2 所示的三个右手直角坐标

系: 机体系 $OXYZ$; 拍动平面系 $o-x_b y_b z_b$; 翅膀系 $O'-x_w y_w z_w$.

机体坐标系 $OXYZ$ 的原点 O 位于机体质心, 固连于飞机机体; X 轴以机头为正; Y 轴垂直于 X 轴, 左为正; Z 轴向上为正.

拍动平面系 $o-x_b y_b z_b$ 的原点 o 位于翅膀根部, $ox_b y_b$ 为平均拍动平面.

翅膀系 $O'-x_w y_w z_w$ 随翅转动. y_w 沿翼展方向; x_w 在翅的弦向方向, 从前缘指向后缘; z_w 轴垂直于翼面.

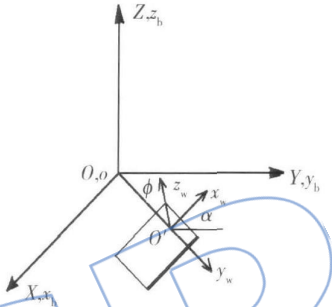


图 2 坐标系定义
Fig. 2 Sketches of the reference frames

分析悬停点处昆虫翅膀的惯性力, 不考虑平均扑动平面的倾斜角, 因此机体系与拍动平面系相重合. 在定义坐标系后, 可以用两个角度描述翅膀在扑动过程中的自由度: 迎角 α 即 x_w 轴与平均扑动平面的夹角; 扑动角 ϕ 即 y_w 轴在平均扑动平面内的投影与 y_b 轴的夹角, 以翅膀在机体后部为正.

1.3 试验模型

为了更大限度的利用非定常流动, 产生更大的升力, 昆虫一般采用图 3 中所示的一种理想扑动模式: 翅膀在平挥过程中维持大迎角以利用失速延迟机制, 在平挥结束阶段快速转动以利用快速加速机制、快速上仰机制和尾迹捕获机制. 昆虫所采用的这种洗式翅扑动过程可以简化考虑为四个分动作: 翅膀两次大迎角的平挥(下拍、上拍或者叫上挥)以及两次快速转动(顺翅与反翅)^[5].

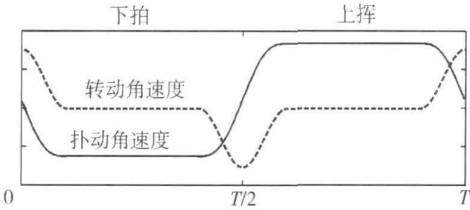


图 3 翅的理想运动模式^[5]
Fig. 3 Idealized wing kinematics

拍动过程由三部分组成: 加速阶段, 从拍动开始到加速到翅达到恒定的拍动速度; 平挥阶段, 翅膀维持恒定速度拍动; 减速阶段, 翅从恒定的速度减速到拍动结束, 并进入下一次拍动。

翅的转动过程也由三部分组成: 转动减速阶段, 翅的迎角由 $\pi/2$ 转动到平挥过程中的恒定迎角(称平动迎角); 平动迎角维持阶段, 翅保持大迎角拍动; 转动加速阶段, 翅从平动迎角转到 $\pi/2$ 处, 并进入下一个转动周期。

如图 3 所示, 翅膀的扑动模式可以通过拍动速度和迎角速度进行描述。拍动速度用 u_i^+ 表示, 为翅膀在回转半径处的线速度, 在平挥过程中取常数值 U^+ , 在拍动加速阶段由下式给出:

$$u_i^+ = U^+ \sin(\pi(\tau - \tau_1)/2\Delta\tau) \quad (1)$$
$$\tau_1 \leq \tau \leq \tau_1 + \Delta\tau$$

式中 $u_i^+ = u_i/U$ (U 为参考速度, 为 u_i 一个扑动周期的平均值, u_i^+ 为无量纲拍动速度); $\tau = tU/c$ (t 是时间, c 是弦长, τ 为无量纲时间); τ_1 为拍动开始无量纲时间; $\Delta\tau$ 为加速阶段无量纲时间。拍动减速阶段, 翅速可以由下式给出:

$$u_i^+ = U^+ \sin[\pi(\tau - \tau_1 + \Delta\tau)/2\Delta\tau] \quad (2)$$
$$\tau_1 \leq \tau \leq \tau_1 + \Delta\tau$$

式中 τ_1 为拍动开始无量纲时间, $\Delta\tau$ 为减速阶段无量纲时间。由 u_i 可确定扑动角速度, 有 $\dot{\alpha}(\tau) = u_i/r_2$ 。

翅膀的迎角速度由 $\dot{\alpha}^+$ 表示。在转动减速阶段, 其角速度为

$$\dot{\alpha}^+ = 0.5\dot{\alpha}^+ [1 - \cos(\pi(\tau - \tau_1)/2\Delta\tau)] \quad (3)$$
$$\tau_1 \leq \tau \leq \tau_1 + \Delta\tau$$

式中 $\dot{\alpha}^+ = \dot{\alpha}/U$; $\dot{\alpha}^+ = (\pi - 2\alpha)/2\Delta\tau$ 为一常数; α 表示平动迎角; τ_1 为翻转减速开始无量纲时间; $\Delta\tau$ 是翻转过程(从 α 翻转到 $\pi/2$)时间。

在转动加速阶段, 其角速度为

$$\dot{\alpha}^+ = 0.5\dot{\alpha}^+ [1 - \cos(\pi(\tau - \tau_2 + \Delta\tau)/2\Delta\tau)] \quad (4)$$
$$\tau_2 \leq \tau \leq \tau_2 + \Delta\tau$$

式中 τ_2 为翻转加速开始无量纲时间; $\Delta\tau$ 是翻转过程(从 $\pi/2$ 翻转到 $\pi - \alpha$)时间。

1.4 翅膀转动惯量

为了研究翅膀扑动中惯性力的影响, 首先需要计算翅膀的转动惯量。对于刚性翅膀而言, 其转动惯量仅仅与翅面积、形状和质量分布有关。昆虫翅膀的质量分布是非均匀的, 从翼尖到翼根, 无论是翅膜还是翅脉在厚度方向上均呈现出连续的梯度。Ennos 为了研究昆虫翅膀在外力矩作用下的

扭转变形及相关气动力问题, 测量了多种双翅目昆虫的翅膀的质量分布(如图 4 所示), 结果表明双翅目昆虫翅膀的质量分布是相似的^[7]。

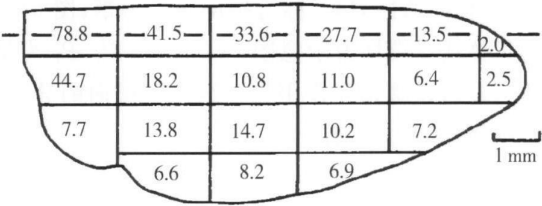


图 4 食蚜蝇(Eristalis tenax)翅膀的质量分布^[8]

Fig.4 Mass distribution of the wing of the hoverfly Eristalis tenax (Masses are given in microgramme)

因此, 本文用式(5)对图 4 中食蚜蝇翅膀的质量分布进行拟合, 用其近似表述果蝇翅膀的质量分布。

$$\rho(\hat{x}, \hat{y}) = 8.58 \frac{m_w}{S} e^{-2.313\hat{x} - 2.63\hat{y}} \quad (5)$$

式中 m_w 为翅膀质量, S 为翅膀面积, $\hat{x}, \hat{y}$ 为面元到转动轴和扑动轴的无因次距离; ρ 为面元的密度。

根据理论力学, 翅膀的惯性力矩为

$$J_x = \sum m_i y_i^2 \quad (6)$$
$$J_y = \sum m_i x_i^2$$

式中 J_x 为翅膀沿弦向的转动惯量; J_y 为翅膀沿展向的转动惯量, x, y 为面元到转动轴和扑动轴的距离, m_i 为面元的质量, 且有

$$m_i = \bar{\rho} s_i \quad (7)$$

式中 $\bar{\rho}$ 为面元的平均密度, s_i 为面元的面积。

本文将果蝇的翅膀分割为 40 个面元, 计算得到翅膀的转动惯量为

$$J_x = 4.56 \times 10^{-15} \text{ N} \cdot \text{m} \quad (8)$$
$$J_y = 3.53 \times 10^{-16} \text{ N} \cdot \text{m}$$

1.5 惯性力计算

翅快速转动和拍动时, 翅膀惯性力在机体上产生的力和力矩的分量如图 5 所示。

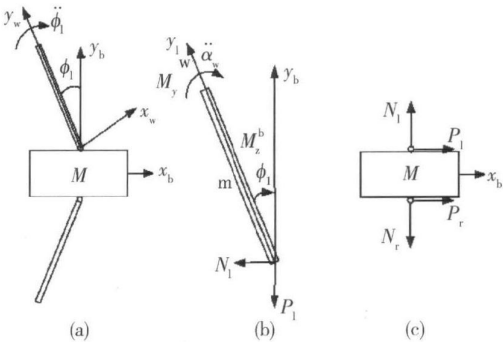


图 5 昆虫翅膀惯性力分析

Fig.5 Inertial force sketch map of the wing of the flying insect

图中,图 5(a)为翅膀相对机体拍动的运动示意图;图 5(b)为左翅所受惯性力示意图, M_y^w 为转动绕 y_w 轴的惯性力矩,称转动惯性力矩; M_z^b 为绕 z_b 轴的惯性力矩,称为拍动惯性力矩;图 5(c)为机体所受惯性力示意图, N_l, N_r 和 P_l, P_r 为机体与左右翅膀相互作用力在纵向和横向的分量.根据刚体动力学,有^[9]

$$\begin{aligned} M_{y,i}^w &= J_{y,i} \ddot{\alpha}_i \\ &\vdots \\ M_{z,i}^b &= J_{z,i} \phi_i \end{aligned} \quad (9)$$

式中下标 $i=1, r$ 表示左右翅膀, J_x 为翅膀弦向转动惯量; J_y 为翅膀展向转动惯量.

翅膀惯性力矩经过坐标转换,可以得到机体系上的惯性力矩:

$$\begin{aligned} M_x^b &= M_{y,l}^w \cos \phi_l - M_{y,r}^w \cos \phi_r \\ M_y^b &= -M_{y,l}^w \sin \phi_l - M_{y,r}^w \sin \phi_r \\ M_z^b &= M_{z,l}^b + M_{z,r}^b \end{aligned} \quad (10)$$

式中下标 l, r 表示左右翅膀, $M_i^b, i=x, y, z$ 表示惯性力矩在机体系各轴上分量.

根据图 5(c)中机体的受力分析,有

$$\begin{aligned} f_x^b &= M \ddot{x} = N_l + N_r \\ f_y^b &= M \ddot{y} = P_l - P_r \\ f_z^b &= M \ddot{z} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $f_i^b, i=x, y, z$ 表示惯性力在机体系各轴上分量.由翅膀的受力分析(见图 5(b)),可得纵向力分量为

$$N_i = m \frac{d^2}{dt^2}(x + R_\varphi \sin \phi_i), i=1, r \quad (12)$$

等式中 R_φ 为转动轴心到翅膀质心的距离.

同理可得翅膀的横向力分量为

$$P_i = m \frac{d^2}{dt^2}(y + R_\varphi \cos \phi_i), i=1, r \quad (13)$$

1.6 试验过程

基于文献[3]中已建立的虚拟扑翼飞行器仿真平台(VFMAVS),测量翅膀扑动时产生的气动力和惯性力,研究翅膀拍动与转动对飞行器动力学特性的影响.

大部分昆虫的扑动频率不随飞行速度变化,所以在惯性力分析过程中假设拍动频率不随果蝇的飞行变化^[10];翅膀惯性力仅仅与翅膀运动的角度和角加速度有关,因此忽略翅膀翻转时刻对惯性力的影响,在试验中仅仅需要考虑拍动幅度、拍动加(减)速周期、平动迎角和翻转加(减)速周期对惯性力的影响;翅的扑动轴 z_b 与转动轴 y_w 相互垂直,可分别研究它们对飞行器动力学特性的

影响.进行如下试验:

首先,在典型的扑动方式(扑动幅度 150° , 加(减)速周期 $0.08T$, 平动迎角 45° , 翻转加(减)速周期 $0.08T$)下,进行气动力和惯性力的比较.

然后,翅扑动幅度在 $60^\circ \sim 150^\circ$ 之间每隔 15° 取值,对每种不同的扑动幅度,其拍动加(减)速周期在 $0.025T$ 到 $0.25T$ 之间每隔 $0.025T$ 取值进行试验,共进行 7×9 组试验,研究拍动惯性力矩对推力、侧向力和偏航力矩的影响.

最后,翅膀平动迎角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间每隔 5° 取值,对每种不同的平动迎角,其翻转加(减)速周期在 $0.025T$ 到 $0.25T$ 之间每隔 $0.025T$ 取值进行试验,共进行 10×9 组试验,研究转动惯性力矩对横滚力矩和俯仰力矩的影响.

2 试验结果及分析

本节分析 7×9 组拍动试验和 10×9 组转动试验时翅膀扑动产生的惯性力.为了使结果显示的清晰和形象化,图表中仅仅给出部分数据,并且力单位为 $1.96 \times 10^{-5} \text{ N}$ 、力矩单位为 $5.88 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$.

2.1 惯性力与气动力比较

图 6 为模型昆虫在典型扑动模式时,右翅产生的惯性力和气动力.

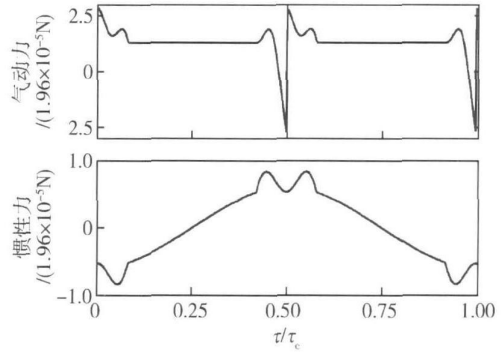


图 6 翅膀惯性力与气动力比较

Fig. 6 Inertial forces and aerodynamics forces contributed by flapping

结果表明,翅膀扑动产生的惯性力幅值与气动力幅值大致相当,因此必须分析翅膀惯性力的作用机制.

2.2 拍动惯性力矩

图 7 为果蝇翅膀在典型扑动方式(拍动加(减)速周期 $0.08T$, 平动迎角 45° , 翻转加(减)速周期 $0.08T$)下,翅膀在四种不同的拍动幅度($\varphi=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$)时,翅膀惯性力在机体系上产

生的推力 $F_{i,x}$ 、侧向力 $F_{i,y}$ 以及偏航力矩 $M_{i,z}$ 在一个周期内变化的曲线(平均值见表 1)。

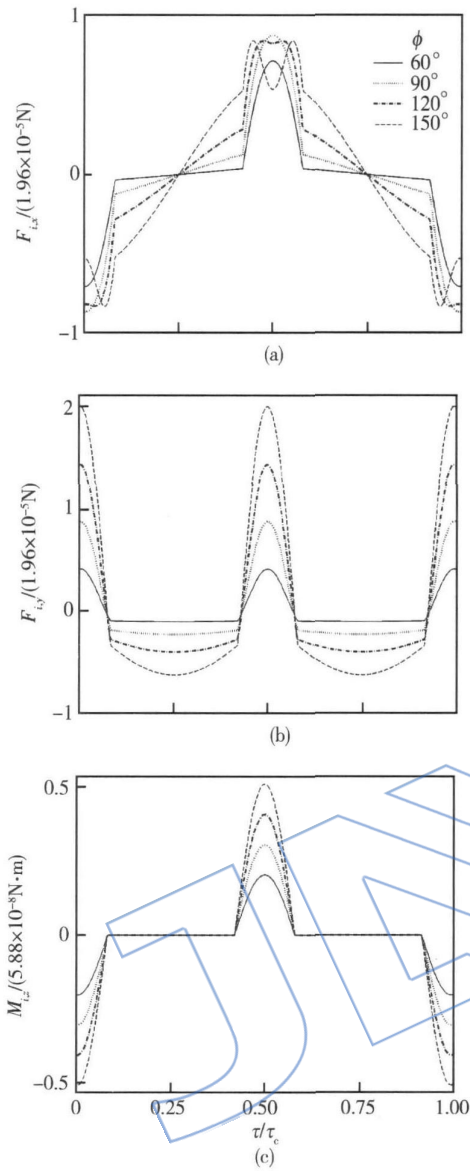


图 7 拍动幅度对惯性力(矩)影响

Fig. 7 Resultant inertial forces and torques acting on insect body while change stroke amplitude

表 1 拍动幅度对平均惯性力(矩)影响

Table 1 Influence of stroke amplitude on mean inertia forces and mean inertia moments				
$\phi / (^{\circ})$	60	90	120	150
$\overline{F_{i,x}} \left[\frac{\tau_c}{4}, \frac{3\tau_c}{4} \right] \setminus 1.96 \times 10^{-5} \text{ N}$	0.167	0.252	0.336	0.421
$\overline{F_{i,y}} / 1.96 \times 10^{-5} \text{ N}$	0.004 30	0.009 2	0.015	0.021
$\overline{M_{i,z}} \left[\frac{\tau_c}{4}, \frac{3\tau_c}{4} \right] \setminus 5.88 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$	0.042	0.063	0.084	0.105

表中 $\overline{F_{i,x}} \left[\frac{\tau_c}{4}, \frac{3\tau_c}{4} \right]$ 表示惯性力从 1/4 周期到 3/4 周期的平均值; $\overline{F_i}$ 表示惯性力在一个拍动周期内的平均值。

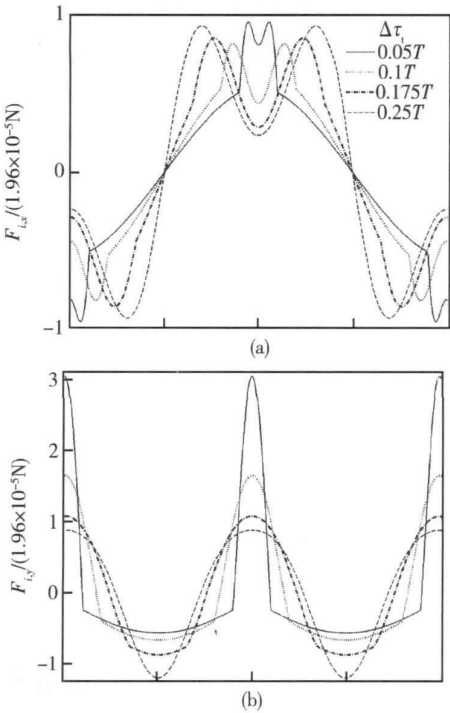
图 7 和表 1 表明, 翅膀的扑动幅度越大, 惯性力在机体上产生的力和力矩的幅值越大, 一段时间内的平均值也越大。

图 7(a) 中, 扑动幅度为 120° 和 150° 时, 翅膀惯性力产生的推力曲线存在着凹陷段, 这是由于扑动角大于 90° 时, 惯性力在 x_b 轴向上的分量会减小(如式 12 所示)。

图 7(a), (c) 表明, 仅仅改变扑动幅度时, 翅膀在上挥或下拍前半程和后半程惯性力产生的推力和偏航力矩大小相等, 方向相反, 在一个扑动周期中平均推力和平均偏航力矩为 0。

图 7(b) 表明, 翅膀在拍动加速与减速过程中产生正的侧向力, 平挥过程中产生负的侧向力; 扑动幅度越大, 平均侧向力越大。左右翅的扑动幅度相等时, 左右翅膀惯性力在机体上产生侧向力的合力在一个扑动周期内的平均值为 0。

图 8 为果蝇翅膀在典型扑动方式(扑动幅度 150°, 平动迎角 45°, 翻转加(减)速周期 0.08T)下, 以 4 种不同的拍动加(减)速周期 ($\Delta\tau = 0.05T, 0.1T, 0.175T, 0.25T$) 时, 惯性力在机体系上产生的推力 $F_{i,x}$ 、侧向力 $F_{i,y}$ 以及偏航力矩 $M_{i,z}$ 在一个扑动周期内的变化曲线(平均值见表 2)。



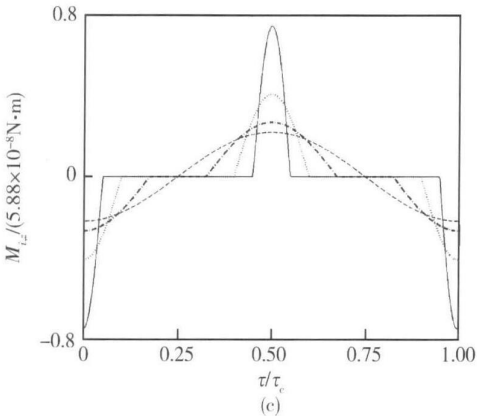


图 8 拍动加(减)速周期对惯性力(矩)影响

Fig. 8 Inertia force and moments as functions of acceleration and deceleration duration of azimuthal rotational

表 2 拍动加(减)速周期对平均惯性力(矩)影响

Table 2 Effects of duration of azimuthal rotation on mean inertia forces and mean inertia moments

$\Delta \tau_i$	0.05T	0.1T	0.175T	0.25T
$F_{i,x} \left(\frac{\tau_c}{4}, \frac{3\tau_c}{4} \right) \setminus$ $1.96 \times 10^{-5} \text{ N}$	0.4	0.435	0.499	0.587
$F_{i,y} / 1.96 \times 10^{-5} \text{ N}$	0.032	0.0173	0.0114	0.0093
$M_{i,z} \left(\frac{\tau_c}{4}, \frac{3\tau_c}{4} \right) \setminus$ $5.88 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$	0.1	0.11	0.124	0.145

图 8 和表 2 表明,翅膀拍动的加(减)速周期越小,惯性力在机体上产生的力和力矩的幅值越大,同时平均推力和平均偏航力矩越大,但是平均侧向力越小。

根据上述结果分析可得,一次扑动过程中的两个扑动加速周期与两个扑动减速周期两两相等,即 $\Delta \tau^{U,a} = \Delta \tau^{U,d}$, $\Delta \tau^{D,a} = \Delta \tau^{D,d}$ 或者 $\Delta \tau^{U,a} = \Delta \tau^{D,d}$, $\Delta \tau^{D,a} = \Delta \tau^{U,d}$ 时,翅膀惯性力产生的平均推力和平均偏航力矩为 0; 当拍动加(减)速周期由四个值随机组合产生时,例如左翅 $\Delta \tau^{U,a} = a$, $\Delta \tau^{U,d} = b$, $\Delta \tau^{D,a} = c$, $\Delta \tau^{D,d} = d$ 而右翅 $\Delta \tau^{U,a} = d$, $\Delta \tau^{U,d} = b$, $\Delta \tau^{D,a} = a$, $\Delta \tau^{D,d} = c$, 左右翅膀惯性力在机体上产生侧向力的合力在一个扑动周期内的平均值为 0。上式中上标 U, D 分别表示上挥和下拍过程,上标 a, d 分别表示扑动加速和减速阶段, a, b, c, d 表示随机选取的一组时间量。

2.3 转动惯性力矩

为清晰起见,图 9 仅给出果蝇翅膀在典型扑动方式(拍动幅度 150°, 拍动加(减)速周期

0.08T, 平动迎角 45°) 下,翅膀在四种不同的翻转周期($\Delta \tau_r = 0.05T, 0.1T, 0.175T, 0.225T$) 时, S 翅膀惯性力在机体系上产生的横滚力矩 M_{ix} 与俯仰力矩 M_{iy} 在一个周期内的变化曲线(平均值见表 3)。

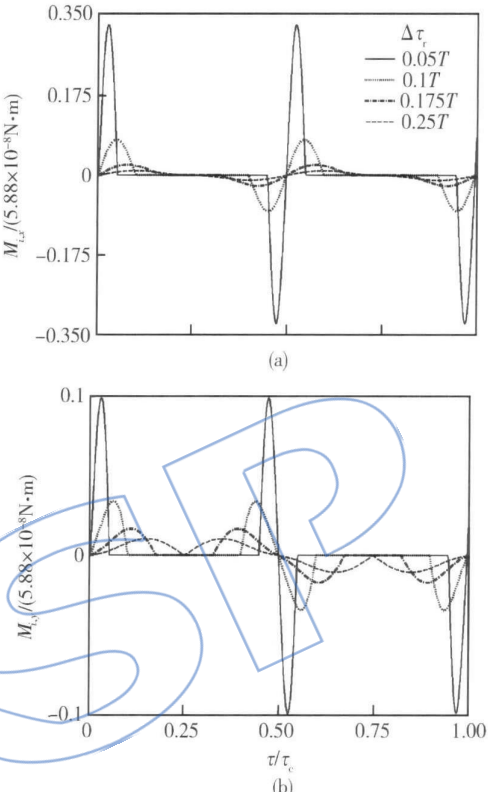


图 9 翻转加(减)速周期对惯性力矩影响

Fig. 9 Inertia moments as functions of duration of flip rotation

表 3 翻转加(减)速周期对平均惯性力矩影响

Table 3 Effects of duration of flip rotation on mean inertia moments

$\Delta \tau_r$	0.05T	0.1T	0.175T	0.25T
$M_{i,x} \left(0, \frac{\tau_c}{4} \right) \setminus$ $5.88 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$	0.041	0.020	0.009 8	0.005 5
$M_{i,y} \left(0, \frac{\tau_c}{4} \right) \setminus$ $5.88 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$	0.013	0.008 6	0.007 0	0.006 1

图 10 为果蝇翅膀在典型扑动方式(拍动幅度 150°, 拍动加(减)速周期 0.08T, 翻转加(减)速周期 0.15T) 下,翅膀在四种不同的平动迎角($\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) 时,翅膀惯性力作用在机体系上产生的横滚力矩 M_{ix} 与俯仰力矩 M_{iy} 在一个周期内的变化曲线(平均值见表 4)。

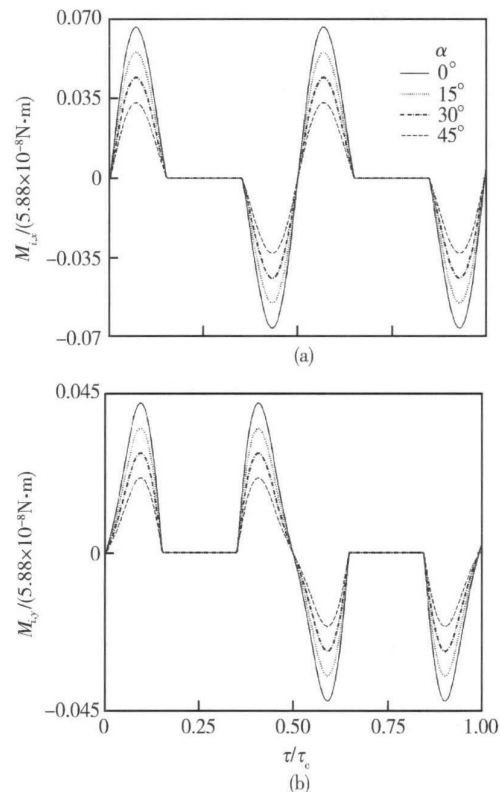


图 10 平动迎角对惯性力矩影响

Fig. 10 Inertia moments as functions of mid stroke angle of attack

表 4 平动迎角对平均惯性力矩影响

Table 4 Effects of mid stroke angle of attack on mean inertia moments

$\alpha / (^{\circ})$	0	15	30	45
$\overline{M}_{i,x} \left(0, \frac{\tau_c}{4} \right) \backslash$ $5.88 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$	0.024	0.020	0.016	0.012
$\overline{M}_{i,y} \left(0, \frac{\tau_c}{4} \right) \backslash$ $5.88 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$	0.015	0.012	0.009 8	0.007 3

图 9~ 图 10 和表 3~ 表 4 表明, 翻转加(减)速周期和平动迎角越大, 产生平均横滚力矩和平均俯仰力矩越小。

根据图表分析可知, 当上挥和下拍过程中的平动迎角不相等时, 翅膀产生的平均俯仰力矩不等于 0; 当上挥或下拍过程中的转动加速周期与转动减速周期分别相等时, 翅膀惯性力产生的平均横滚力矩等于 0。

即有

$$\alpha^U \neq \alpha^D \Rightarrow \overline{M}_y \neq 0$$
$$\begin{cases} \Delta \tau_r^{U,a} = \Delta \tau_r^{U,d} \\ \Delta \tau_r^{D,a} = \Delta \tau_r^{D,d} \end{cases} \Rightarrow \overline{M}_x = 0 \quad (14)$$

当上挥与下拍过程中的平动迎角相等, 同时转动过程中的加速周期和减速周期分别相等时, 翅膀惯性力产生的平均横滚力矩和平均俯仰力矩等于 0。

即有

$$\begin{cases} \Delta \tau_r^{D,a} = \Delta \tau_r^{U,d} \\ \Delta \tau_r^{U,a} = \Delta \tau_r^{D,d} \\ \alpha^U = \alpha^D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \overline{M}_x = 0 \\ \overline{M}_y = 0 \end{cases} \quad (15)$$

2.4 结果分析

根据试验结果可以分析得到如下结论:

- 1) 拍动惯性力的影响远远高于转动惯性力的影响, 拍动产生的惯性力和惯性力矩比转动高 1 个数量级;
- 2) 左右翅膀拍动幅度不相等或拍动加速/ 减速周期不相等会在机体系 y_b 轴产生侧向力;
- 3) 上挥和下拍过程中拍动减速周期不等于拍动加速周期, 会在机体系 x_b 轴产生推力的同时, 在 z_b 轴产生一个偏航力矩;
- 4) 翅膀的上挥平动迎角不等于下拍平动迎角时, 平均俯仰力矩不等于 0;
- 5) 上挥和下拍过程中翻转加速周期等于翻转减速周期时, 即使上挥平动迎角不等于下拍平动迎角, 平均横滚力矩仍然等于 0。

根据以上分析结果, 对扑动过程翅膀惯性力对机体的影响作出如下定义: 如果翅膀在扑动过程中, 惯性力在机体上产生的平均推力、平均侧向力和平均偏航力矩等于 0, 称拍动对称; 惯性力在机体上产生的平均横滚力矩和平均俯仰力矩等于 0, 称转动对称。

当扑动满足拍动对称时称为近似对称扑动; 在拍动对称的同时满足转动对称, 称为严格对称扑动。

为了在飞行器飞行时降低惯性力对飞行器动力学特性的影响, 在设计扑翼飞行器的操控机制时, 应尽可能的以翅膀转动角为调整对象, 保持拍动的对称性。本项目组已实现仅仅通过调整平动迎角和开始翻转时刻, 实现扑翼飞行器三向气动力和三向控制力矩的解耦操控, 证实了仅仅通过调整转动角建立扑翼飞行器操控机制的可行性^[11]。

3 结 论

通过理论模化和仿真试验, 在对昆虫扑翼运动的仿生模拟基础上, 研究了翅膀扑动产生的惯

性力和惯性力矩. 研究表明: 翅膀拍动不对称对飞行器动力学的影响远远高于翅膀转动不对称所带来的影响. 因此, 只要翅膀的拍动是对称的, 就认为翅膀的扑动是近似对称的; 如果拍动对称的同时转动对称, 翅膀的扑动就是严格对称的. 在飞行操控时, 应最大限度的增大飞行器翅膀扑动的对称性, 消除翅膀惯性力的影响, 本项目组的研究证明了仅仅通过调整转动角实现对扑翼飞行器的操控是可行的^[11], 可进一步研究严格对称条件下扑翼飞行器的操控机制.

参考文献:

[1] Daniel T L, Combes S A. Flexible wings and fins: bending by inertial or fluid dynamic force[J]. Integr Comp Biol. 2002 42(5): 1044-1049.

[2] Combes S A, Daniel T L. Into thin air: Contributions of aerodynamic and inertial elastic forces to wing bending in the hawkmoth *manduca sexta*[J]. The Journal of Experimental Biology, 2003, 206(17): 2999-3006.

[3] 苟兴禹, 胡明朗, 魏瑞轩. 虚拟扑翼飞行器建模仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 2877-2880.

GOU Xingyu, HU Minglang, WEI Ruixuan. Modeling and simulation of virtual flapping wing air vehicle[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2007, 19(13): 2877-2880. (in Chinese)

[4] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight

I: The quasi steady analysis[J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 1984, 305(1122): 1-15.

[5] 孙茂, 吴江浩. 微型飞行器的仿生流体力学——昆虫前飞时的气动力和能耗[J]. 自动化学报, 2002, 23(5): 385-393.

SUN Mao, WU Jianghao. Biomimetic aerodynamics of micro air vehicles——aerodynamic force and power requirements in forward flight of insect [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(5): 385-393. (in Chinese)

[6] Sane S P, Dickinson M. The aerodynamic effects of wing rotation and revised quasi steady model of flapping flight [J]. The Journal of Experimental Biology, 2002, 205(8): 1087-1096.

[7] Ennos A R. Inertial and aerodynamic torques on the wings of diptera in flight[J]. The Journal of Experimental Biology, 1989, 142(1): 87-95.

[8] Ennos A R. The inertial cause of the wing rotation in diptera[J]. The Journal of Experimental Biology, 1988, 140(1): 161-169.

[9] McCormick B W. Aerodynamics, aeronautics and flight mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1979.

[10] Willmott A P, Ellington C P. Mechanics of flight in the hawkmoth *manduca sexta* II: Aerodynamic consequences of kinematic and morphological variation[J]. The Journal of Experimental Biology, 1997, 200(21): 2723-2745.

[11] 胡明朗, 魏瑞轩. 微型仿昆扑翼飞行器控制 I: 操控机制 [C] // 第二十六届中国控制会议论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007, 4: 643-648.