

熊蜂用于控制飞行的气动力和力矩^{*}

吴江浩¹, 孙 茂²

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院 飞行器运用系, 北京 100083;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院 流体力学研究所, 北京 100083)

(周哲玮推荐)

摘要: 采用计算流体力学方法研究熊蜂用于控制飞行的气动力和力矩. 结果表明, 悬停时, 每 1 个翅膀运动参数主要控制 1 个或 2 个气动力和力矩. 当左右翅运动学参数对称变化时, 改变拍动幅角(或拍动频率) 主要可使垂直力改变. 改变平均拍动角主要可使俯仰力矩改变. 改变拍动攻角, 上拍和下拍攻角等值同向变化时, 主要可使垂直力改变; 等值反向变化时, 主要可使水平力改变. 改变转动模式, 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相同变化时, 主要可使垂直力改变; 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相反变化时, 主要可使水平力和俯仰力矩改变. 改变转动时间对气动力和力矩几乎无影响. 当左右翅运动学参数反对称变化时, 改变拍动幅角(或拍动频率) 主要可使滚转力矩改变. 改变拍动攻角, 上拍和下拍攻角等值同向变化时, 主要可使滚转力矩改变; 等值反向变化时, 主要可使偏航力矩改变. 改变转动模式, 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相同变化时, 主要可使侧向力和滚转力矩改变; 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相反变化时, 主要可使偏航力矩改变. 改变翅膀运动参数可分别控制 3 个方向的力矩及垂直力. 改变拍动角可以改变垂直力; 改变拍动角的平均位置可以改变俯仰力矩; 反对称改变左右翅的拍动攻角可以改变滚转力矩; 反对称改变拍动起始时刻可以改变偏航力矩. 通过对翅膀运动参数的适当调整熊蜂即可实现快速转弯飞行.

关键词: 昆虫; 气动力和力矩; 控制; 悬停; 机动飞行

中图分类号: V211.3; Q66 **文献标识码:** A

引 言

昆虫翅膀拍动所产生的气动力和力矩对昆虫飞行的稳定性和机动性是非常重要的^[1]. 在悬停和匀速飞行时, 飞行是动态不稳定的^[2-3], 昆虫通过不断改变翅膀拍动所产生的气动力和力矩使飞行稳定. 近年来, 人们使用多种方法研究了昆虫翅膀拍动运动产生的非定常气动力^[4-12]. 在认识了昆虫飞行的高升力机制后, 人们开始研究昆虫如何控制这些气动力和力矩.

Sane 等人^[13]通过实验研究了模型果蝇翅的运动学参数的变化对非定常气动力的影响. Wu 和 Sun^[14]通过计算流体力学(CFD)方法也研究了这一问题. 在上述研究中, 不论是实验测

* 收稿日期: 2007-09-17; 修订日期: 2008-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10732030)

作者简介: 吴江浩(1976—)男, 辽宁抚顺人, 副教授, 博士(联系人. Tel/Fax: + 86-10-82315237; E-mail: buaawjh@buaa.edu.cn).

量还是数值模拟都仅仅针对气动力进行了探讨, 而没有对力矩做深入研究. 昆虫飞行中翅膀拍动所产生的俯仰、偏航和滚转力矩对于飞行控制来说是非常重要的, 因此有必要对此进行深入研究.

本文主要研究翅膀运动学参数的变化如何影响气动力和力矩. 这里使用 CFD 方法来模拟运动流场并计算气动力和力矩. 通过求解翅表面的压力和摩擦力的分布很容易得到作用在昆虫质心上的气动力及绕昆虫质心轴的气动力矩. 本文选取模型熊蜂翅膀作为研究对象, 以悬停飞行的翅膀运动学参数作为平衡值, 这是因为本文所考虑的是低速, 近似悬停飞行的状况, 且熊蜂翅膀的形态学数据和运动学数据较全.

1 方 法

1.1 昆虫模型及其翅膀的拍动运动

本文研究的问题与飞机设计中的飞行力学类似, 故在飞行力学坐标系下来定义气动力和力矩. 熊蜂的模型及其翅膀的拍动运动如图 1 所示. 在惯性系 $Oxyz$ 中, O 为昆虫的质心, x 和 y 轴在拍动平面内(拍动平面为水平面), x 轴向前为正, y 轴向昆虫身体右侧为正, z 轴向下为正(见图 1(a)). 在体轴系 $Ox'y'z'$ 中, x' 轴与 x 轴夹角 χ , 为身体倾角. 另外, 本节假设悬停或低速飞行时, 翅身之间、左右翅之间的气动力干扰相互作用是可以忽略的, 并且悬停时的身体升力和阻力均为 0. 那么, 只要计算左右翅的气动力和力矩就可以得到昆虫所受的全部气动力和力矩了. 本文采用的模型翅的平面形状与熊蜂(*bombus terrestris*)翅^[15]的平面形状一样(见图 2), 翅的弦向剖面相对厚度为 3%.

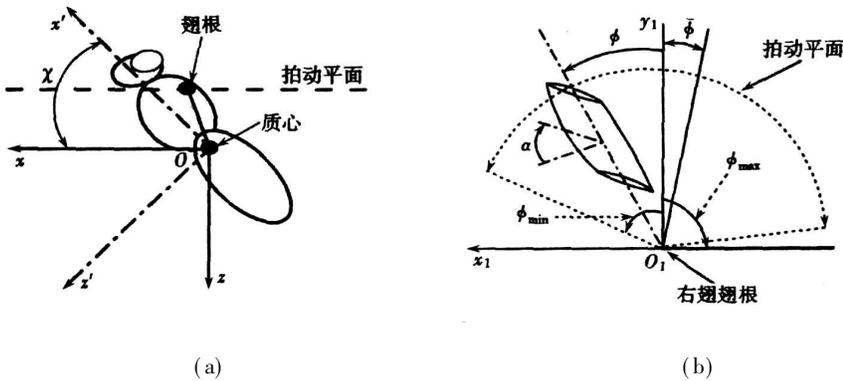


图 1 坐标系及翅膀拍动运动描述

熊蜂翅的拍动运动由两部分组成: 平动和邻近平动起始及结束时的俯仰转动. 翅的平动速度指的是 r_2 (翅面积二阶矩)处的线速度 u_b , 其与周向转动速度 $\dot{\phi}$ 的关系是 $\dot{\phi}(\tau) = u_b/r_2$. 根据文献[4]和文献[16], u_b 的无量纲形式可以表示为

$$u_b^+ = u_m^+ \sin(2\pi\tau/\tau_c), \quad (1)$$

其中 $u_b^+ = u_b/U$, (参考速度 $U = 2n\Phi_2$ 为翅膀拍动的平均线速度). 无量纲时间 $\tau = tU/c$ (t 为物理时间), u_m^+ 为 u_b^+ 的最大值, 是一常数, $\tau_c = 2\Phi_2/c$ 为无量纲拍动周期.

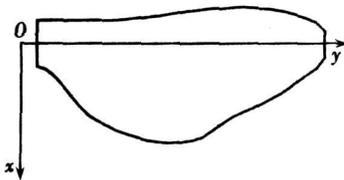


图 2 翅膀平面形状

翅拍动的攻角为 α . 除了在上拍和下拍的开始和结束阶段外, α 始终为一常值(下拍时为 α_d , 上拍时为 α_u). 翅的俯仰转动用 $\dot{\alpha}$ 来表示, 称为俯仰角速度, 由下式给出:

$$\dot{\alpha}^+ = 0.05\dot{\alpha}_0^+ \left\{ 1 - \cos[2\pi(\tau - \tau_r) / \Delta\tau_r] \right\}, \quad \tau_r \leq \tau \leq (\tau_r + \Delta\tau_r). \quad (2)$$

其无量纲形式为 $\dot{\alpha}^+ = \dot{\alpha} c / U$, $\dot{\alpha}_0^+$ 为无量纲平均转动角速度, 是一常数, τ_r 为无量纲转动开始时间, $\Delta\tau_r$ 为无量纲转动时间. 翅在 $\Delta\tau_r$ 内, 下拍结束时从 $\alpha = \alpha_d$ 转到 $\alpha = 180^\circ - \alpha_u$, 上拍结束时从 $\alpha = 180^\circ - \alpha_u$ 转到 $\alpha = \alpha_d$. 因此, 当 α_d , α_u 和 $\Delta\tau_r$ 确定后即可得到 $\dot{\alpha}_0^+$.

为了确定翅膀的拍动运动, 需要获得如下参数: 无量纲拍动线速度 u_m^+ , 拍动攻角 α_d 和 α_u , 转动时间 $\Delta\tau_r$, 转动起始时刻 τ_r , 拍动周期 τ_c 和平均拍动角 ϕ (见图 1(b)).

1.2 控制方程组

本文采用的控制方程为三维不可压 Navier-Stokes 方程组. 惯性坐标系 $Oxyz$ 中 N-S 方程三维不可压无量纲形式如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

无量纲参数中 u , v 和 w 是速度的 3 个分量, p 是压力, τ 是时间. 参考速度、参考长度和参考时间分别取为 U , c , 和 c/U . 上述方程中 Re 是 Reynolds 数, 定义为 $Re = cU/\nu$, 其中 ν 是流体的运动粘性系数.

本文计算所使用的程序与文献[3]和文献[10]中的一样, 有关该程序求解非定常流动的准确性和精度可参见文献[14]和文献[15]中关于程序验证的部分. 本文计算所使用的三维单域 O-H 型网格沿径向, 周向和展向的点数分别为 93, 109 和 78. 第 1 层网格距翅表面的径向距离为 0.0015. 径向远场边界为 20 倍平均弦长. 时间步长为 0.02. 有关不同的网格密度, 远场边界和时间步长对计算精度的影响参见文献[14], 此处不赘述.

求解 N-S 方程以后, 得到了流场中每个时间步上各网格点的速度和压力. 翅膀的气动力是由翅表面的粘性剪切力和压力组成的. 积分某一时间步翅表面的压力和粘性力的就得到该时间步的气动力了. 本文定义沿 z 轴负方向, x 和 y 轴正方向的力分别为垂直力 (L), 水平力 (X) 和侧向力 (Y); 绕 x 、 y 和 z 轴的力矩分别为滚转力矩 (M_x), 俯仰力矩 (M_y) 和偏航力矩 (M_z), 可由作用在翅膀上的气动力计算得到. 对气动力和力矩进行无量纲化, 分别除以 $0.5\rho U^2 S_t$ 和 $0.5\rho U^2 S_t c$ (U 为翅膀平均拍动线速度, S_t 为两翅面积, c 为翅膀平均弦长, ρ 为空气密度), 得到无量纲气动力和力矩系数分别为 L^+ , X^+ , Y^+ , M_x^+ , M_y^+ 和 M_z^+ .

1.3 影响气动力和力矩的参数

对于给定翅膀形状, 并不考虑翅膀变形效应时, 拍动运动中影响气动力和力矩系数的无量纲参数包括: Re , u_m^+ , α_d , α_u , $\Delta\tau_r$, τ_r , τ_c , ϕ 和 l_1 (翅根到质心的距离). 其中 $u_m^+ (= \pi\Phi r_2/U)$, $\tau_c = 2\Phi_2/c$. 由文献[4]和文献[5]可知, 熊蜂的形态学参数如下: 质量 (m) 为 175 mg; 翅长 (R) 为 13.2 mm; 平均弦长 (c) 为 4.01 mm; $r_2 = 0.55R$; 单翅面积 (S) 为 53 mm²; 身体倾角 (x_0)

为 57.5° ; 身体长度(l_b) 为 $1.41R$; 翅根与质心间的距离(l_1) 为 $0.21 l_b$; 两翅根部之间的水平距离(d) 为 $0.8c$. 悬停时, 翅膀拍动运动参数为: 拍动幅角 $\Phi_h = 116^\circ$, 拍动频率 $n_h = 155 \text{ Hz}$; 身体倾角 $\alpha = 46.8^\circ$; 翻转时间 $\Delta\tau_r = 0.25\tau_c$; 对称翻转.

本文以熊蜂悬停时的翅膀运动学参数为平衡值, 此时, $Re = 1326$, $U = 4.59 \text{ m/s}$. 悬停时, α_d 、 α_u 和 ϕ 未知, 可根据气动力和力矩的平衡条件来确定. 平衡条件是: 平均举力等于昆虫体重, 平均水平力、平均侧力和绕质心的平均力矩均为 0. 通过计算得到, 悬停时: $\alpha_d = 24^\circ$, $\alpha_u = 24^\circ$ 和 $\phi = 2^\circ$.

本文通过改变悬停时翅膀的拍动幅角、拍动频率、平均拍动角、攻角、翻转时间和翻转起始时刻来研究气动力和力矩是如何随这些参数变化的.

2 结果与分析

2.1 1 个翅产生的气动力和力矩

首先, 本文研究了 1 个翅(这里用右翅)的运动学参数变化对气动力和力矩的影响. 当左、右翅拍动的运动学参数相同时, 纵向气动力和力矩(垂直力、水平力和俯仰力矩)等值同向; 横向气动力和力矩(侧向力、滚转力矩和偏航力矩)等值反向. 故这里讨论 1 个翅的拍动对气动力和力矩的影响时选择左、右翅均可. 具体分析方法是: 改变 1 个运动学参数时, 其它参数保持为平衡值.

2.1.1 改变拍动幅角的影响

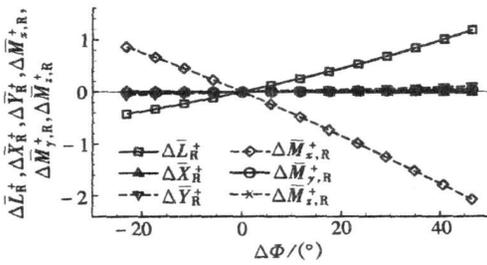


图 3 气动力和力矩随拍动幅角 Φ 的变化

图 3 给出了右翅产生的气动力和力矩随拍动幅角 Φ 的变化(其中 Δ 表示相对于平衡值的增量). 图 4 给出了 1 个拍动周期内气动力和力矩系数随时间的变化过程(为了清楚描述, 此处定义了 1 个参数 t , 其中 $t = 0$ 表示下拍开始时刻, $t = 1$ 表示上拍结束时刻). 由图 3 知, 改变 Φ , 主要使垂直力(L_R^+) 和滚转力矩($M_{x,R}^+$) 改变, 其他力和力矩几乎不变. 物理解释如下: 当 Φ 增大时, 翅膀拍动速度增大($u_t \sim \Phi n r_2$), 上拍和下拍时翅膀升力和阻力均增大(图 4(a), 图 4(b)), 其中升力增大可使垂直力增大. 阻力沿 x 轴方向的分量也增大, 但上拍和下拍的增量大小近似相等、方向相反(图 5 和图 4(c)), 故平均水平力几乎不变. 同理, 平均侧向力也几乎不变.

右翅的升力变化可改变滚转力矩, 这是显而易见的. 另外, 由于翅在质心上方, 阻力沿 y 轴的分量的变化也可使滚转力矩发生改变, 但由于上拍和下拍所产生的阻力增量相同、方向相反, 故总的变化近似为 0. 升力和阻力沿 x 轴的分量的变化可改变俯仰力矩, 但同样由于上拍时产生的力矩变化量与下拍时产生的几乎抵消, 故平均俯仰力矩几乎不变. 同理, 平均偏航力矩的变化也近似为 0.

2.1.2 改变平均拍动角的影响

图 6 给出了气动力和力矩随平均拍动角 ϕ 的变化. 可见, 改变 ϕ 可使俯仰力矩改变. 当 ϕ 变化时, 翅的拍动速度和攻角均不变, 但气动力的作用点相对于悬停时的前移或后移, 故俯仰力矩改变.

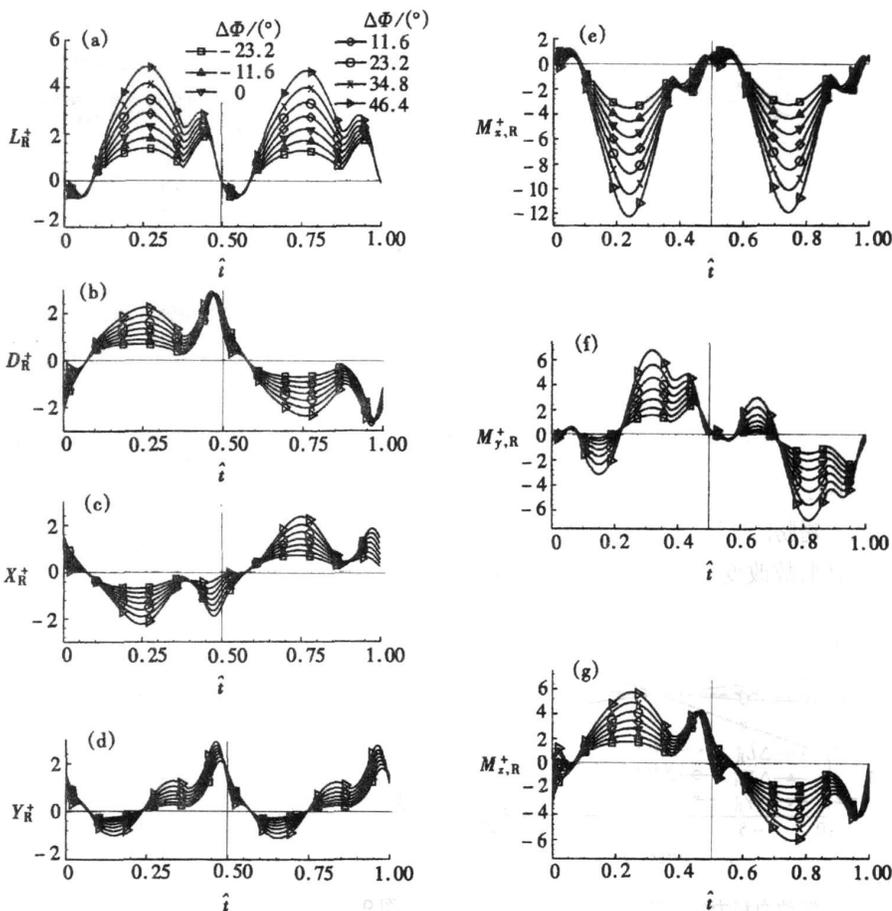


图4 1次拍动中气动力和力矩随拍动幅角 Φ 变化的时间过程

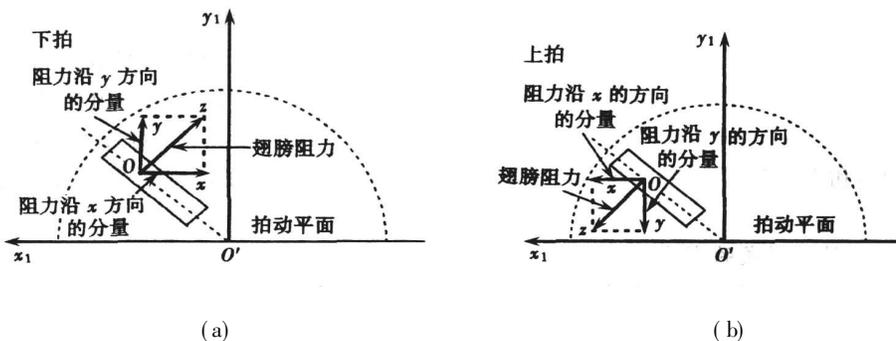


图5 翅膀阻力沿 x 轴和 y 轴方向的分量

2.1.3 改变攻角的影响

令 $\Delta\alpha_1$ 表示 α_d 和 α_u 等值同向变化(例如: $\Delta\alpha_1 = 5^\circ$ 表示 α_d 和 α_u 均比悬停时的值增加 5°)。令 $\Delta\alpha_2$ 表示 α_d 和 α_u 等值反向变化, 即 α_d 变化量为 $\Delta\alpha_2$ 时, α_u 变化量为 $-\Delta\alpha_2$ (例如: $\Delta\alpha_2 = 5^\circ$ 表示 α_d 比悬停时的值增加 5° , 而 α_u 比悬停时的值减少 5°)。

图7 给出了右翅产生的气动力和力矩随 $\Delta\alpha_1$ 的变化。可见, 与改变 Φ 的情况类似, α_d 和 α_u 的等值同向变化主要使 L_R^+ 和 $M_{x,R}^+$ 改变。

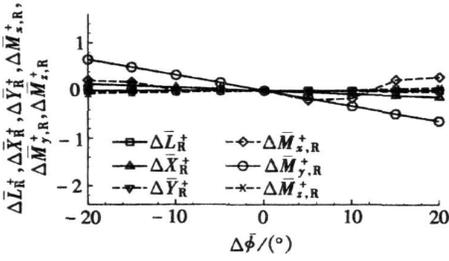


图6 气动力和力矩随平均拍动角 ϕ 的变化

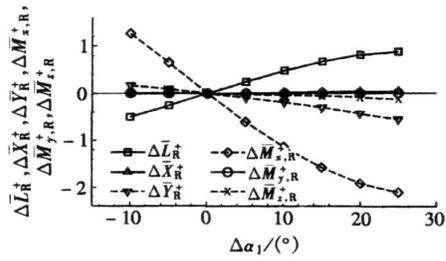


图7 气动力和力矩随攻角 $\Delta\alpha_1$ 的变化

图8 给出了右翅产生的气动力和力矩随 $\Delta\alpha_2$ 的变化. 可见, α_d 和 α_u 等值反向变化主要使水平力(X_R^+) 和偏航力矩($M_{z,R}^+$) 改变且俯仰力矩($M_{y,R}^+$) 和滚转力矩($M_{x,R}^+$) 略有变化, 而垂直力 L_R^+ 和侧向力 Y_R^+ 几乎不变. X_R^+ 和 $M_{z,R}^+$ 随 $\Delta\alpha_2$ 的变化相对较大, 其物理解释如下: 当 α_d 增大 α_u 减小时, 在下拍时翅膀升力增大, 上拍时减小, 在1个拍动周期内, 平均升力(或垂直力)几乎不变. 翅膀阻力沿 x 轴的分量在下拍和上拍时均增大, 故平均水平力增大. 因该力作用于质心的右侧, 故改变偏航力矩.

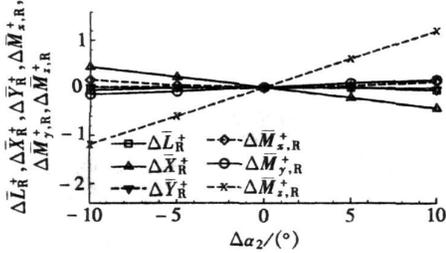


图8 气动力和力矩随攻角 $\Delta\alpha_2$ 的变化

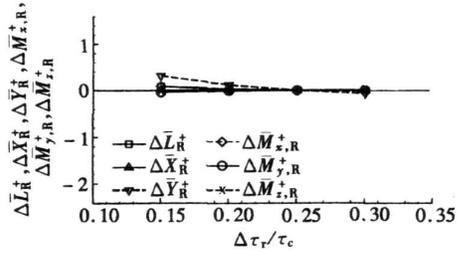


图9 气动力和力矩随翻转时间 $\Delta\tau_r$ 的变化

2.1.4 改变转动时间的影响

图9 给出了右翅产生的气动力和力矩随翅膀转动时间的变化. 可见, 气动力和力矩随 $\Delta\tau_r$ 变化不大. 图10 给出了一个拍动周期内气动力和力矩系数随时间的变化过程. 可见, 在拍动中部气动力和力矩随 $\Delta\tau_r$ 的变化不大; 翻转时随 $\Delta\tau_r$ 变化较大. 当 $\Delta\tau_r$ 相对较小时(转动率较大), 气动力和力矩的峰值较大, 但该峰值持续时间较短; 当 $\Delta\tau_r$ 相对较大时(转动率较小), 气动力和力矩的峰值较小, 但该峰值持续时间较长. 因此, 平均气动力和力矩随 $\Delta\tau_r$ 变化不大.

2.1.5 改变转动模式的影响

在本节中, 定义了一个与转动模式有关的参数 Δr_t , 当 $\Delta r_t = 0$ 时为对称转动, 当 $\Delta r_t = 0.125\tau_c$ 时为全部超前转动(转动时间为 $0.25\tau_c$), $\Delta r_t < 0$ 表示滞后转动.

首先, 我们分析翅膀前拍靠近昆虫腹部时的转动模式和后拍靠近昆虫背部时的转动模式相同变化的情况. 此时, 转动同为超前或滞后, 转动超前(或滞后)量为 Δr_{tl} . 图11 给出了右翅产生的气动力和力矩随 Δr_{tl} 的变化. 可见, 这种变化主要可使垂直力(L_R^+), 侧向力(Y_R^+) 和滚转力矩($M_{x,R}^+$) 改变. 其物理解释如下: 假设取 $\Delta r_{tl} = 0.075\tau_c$ (超前转动), 在下拍或上拍的后半部分升力和阻力均比对称转动时的值大(见图12(a)、图12(b); 文献[8]中的图3及文献[10]中的图12(b)、图12(c)). 这就解释了 L_R^+ 和 Y_R^+ 增大的原因. 质心右侧垂直力的变化使

M_x^+ 改变.

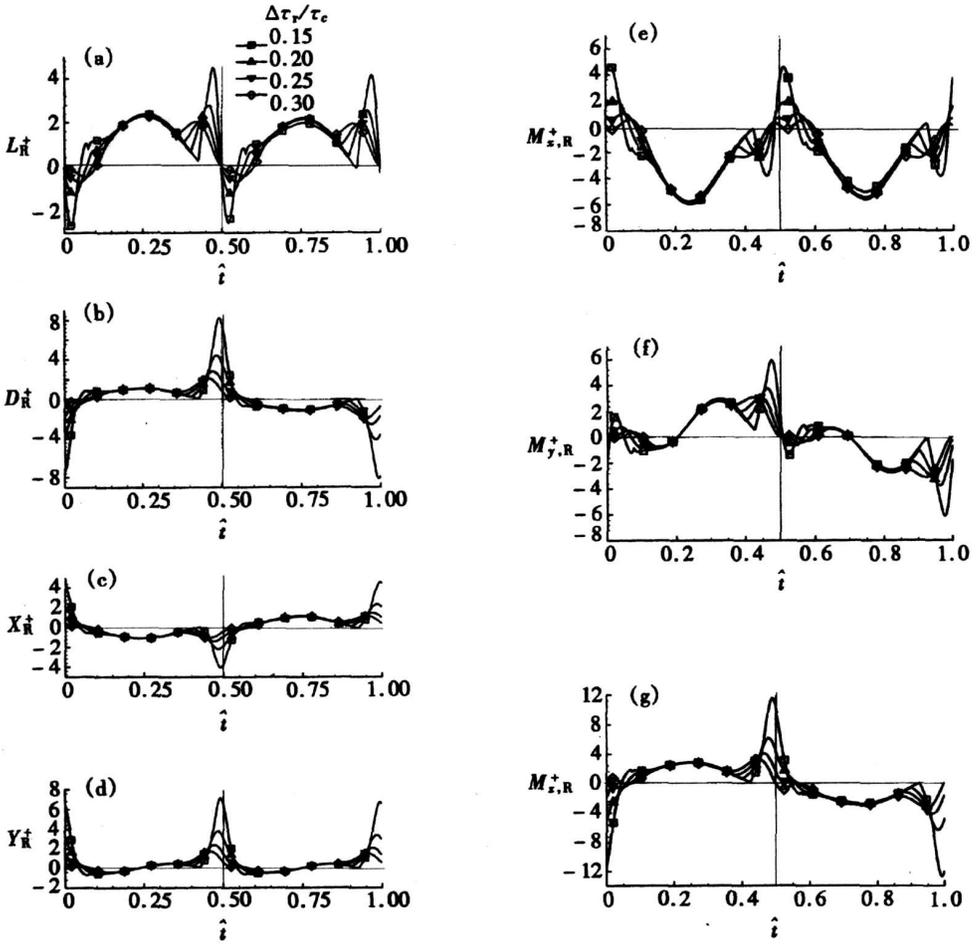


图 10 1 次拍动中气动力和力矩随翻转时间 $\Delta\tau_r$ 变化的时间过程

其次, 我们分析翅膀前拍靠近昆虫腹部时的转动模式和后拍靠近昆虫背部时的转动模式相反变化的情况. 转动超前 (或滞后) 量为 Δr_{12} . 例如: $\Delta r_{12} = 0.1\tau_c$ 表示前部转动超前 $0.1\tau_c$ 而后部转动滞后 $0.1\tau_c$. 图 13 给出了右翅产生的气动力和力矩随 Δr_{12} 的变化. 可见, 这种变化主要可使俯仰力矩 ($M_{y,R}^+$) 和偏航力矩 ($M_{z,R}^+$) 改变, 同时水平力 (X_R^+) 也略有变化, 其他气动力和力矩的变化几乎为 0. 其物理解释如下: 假设取 $\Delta r_{12} =$

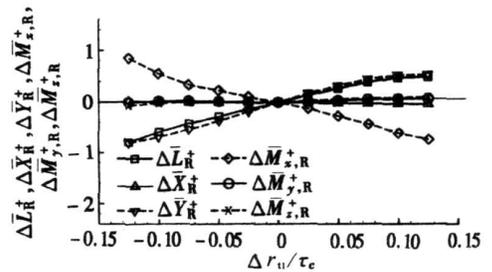


图 11 气动力和力矩随转动起始时刻 Δr_{11} 的变化

$0.075\tau_c$, 即前部转动超前 $0.075\tau_c$, 后部转动滞后 $0.075\tau_c$. 从图 14 给出的一个拍动周期内气动力和力矩系数随时间的变化过程可见, $\Delta r_{12} = 0.075\tau_c$ 时, 与对称转动相比 ($\Delta r_{12} = 0$), 下拍时 ($t = 0 \sim 0.5$) 升力和阻力变化较大, 上拍时 ($t = 0.5 \sim 1$) 变化较小. 这是因为靠近昆虫腹部时的转动和靠近昆虫背部时的转动均主要发生在下拍. 与对称转动相比, 下拍时 (图

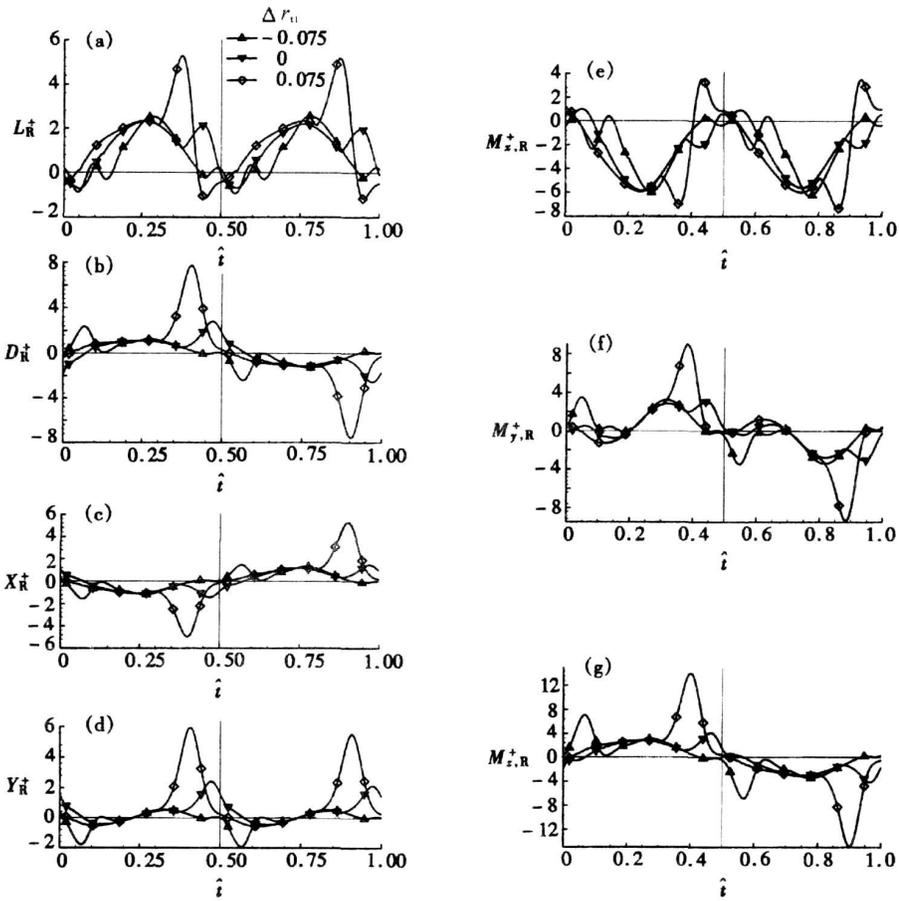


图 12 1 次拍动中气动力和力矩随转动起始时刻 Δr_{11} 变化的时间过程

14(a); $t = 0 \sim 0.5$) 的升力增大, 其中后半部分($t \approx 0.25 \sim 0.5$) 升力增大, 前半部分($t \approx 0 \sim 0.25$) 升力减小. 这产生了一个绕 y 轴的力偶, 即改变了俯仰力矩. 同时, 下拍时阻力的变化较大(图 14(b); $t = 0 \sim 0.5$) 也使水平力和偏航力矩改变.

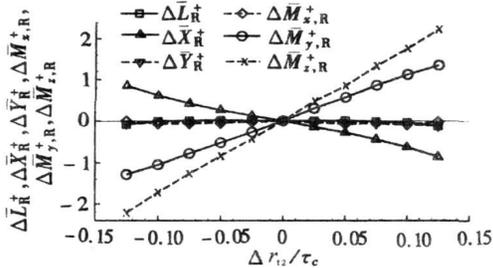


图 13 气动力和力矩随转动起始时刻 Δr_{12} 的变化

2.2 双翅的合力与合力矩

本文假设悬停或低速飞行时, 翅身之间, 左右翅之间的气动力干扰相互作用是可以忽略的, 并且悬停时的身体升力和阻力均为 0. 那么, 左右翅的合力和合力矩就是昆虫所受的气动力和力矩了.

2.2.1 左右翅运动学参数对称变化的情形

如前述, 当左右翅拍动的运动学参数相同时, 纵向气动力和力矩(垂直力, 水平力和俯仰力矩)等值同向; 横向气动力和力矩(侧向力, 滚转力矩

和偏航力矩)等值反向. 根据上文的分析已经得到右翅的气动力和力矩, 那么也就得到了相应的左翅的气动力和力矩, 对应的矢量和就是双翅的合力与合力矩, 即昆虫所受到的总的气动力

和力矩. 下面将讨论这些力和力矩是如何随翅膀的运动学参数变化的.

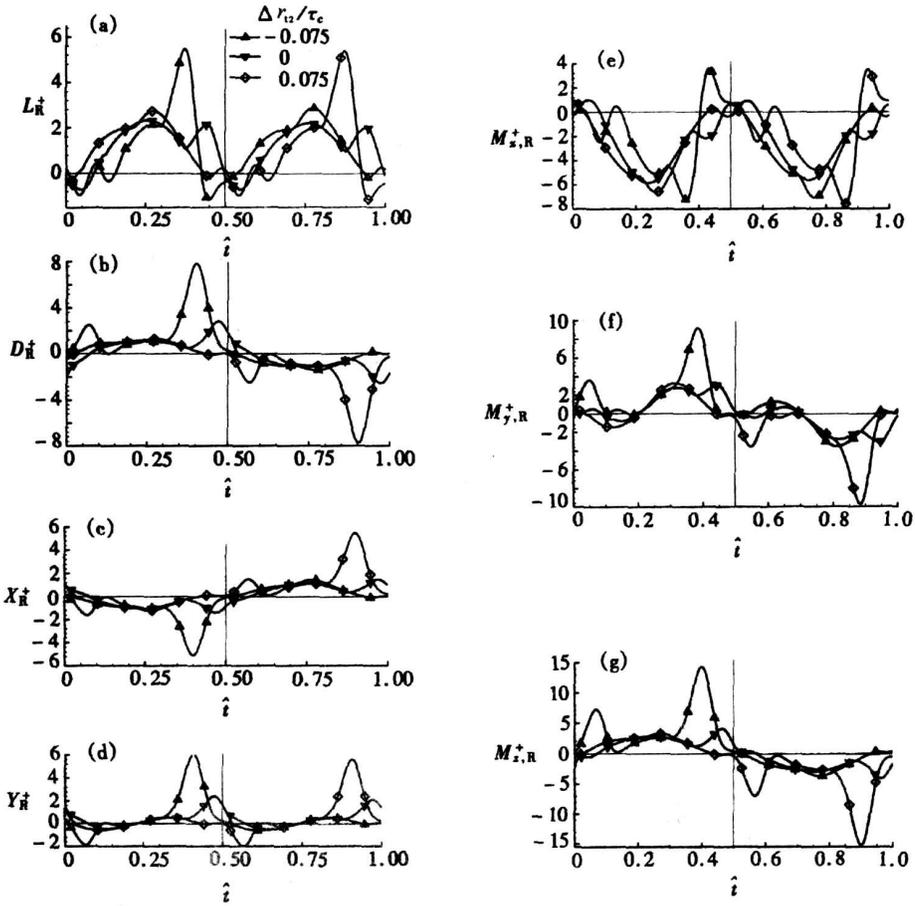


图 14 1 次拍动中气动力和力矩随转动起始时刻 Δr_{12} 变化的时间过程

2.2.1.1 改变 Φ 的影响

如图 3 所示, 改变 Φ 时, 右翅的垂直力和滚转力矩改变; 同时, 左翅的垂直力的变化与右翅的相同, 滚转力矩的变化与右翅的大小相同方向相反. 可见, 改变 Φ 可使垂直力改变. 也就是说, 当 Φ 变化时, 垂直力合力的大小改变, 作用点和方向不变. 同理, 改变频率 n 时, 结果与改变 Φ 时一样.

2.2.1.2 改变 ϕ 的影响

如图 6 所示, 改变 ϕ 时, 右翅的俯仰力矩改变较大, 滚转力矩略有变化; 左翅亦如此. 可见, 改变 ϕ 主要可使俯仰力矩改变. 也就是说, 当 ϕ 变化时, 气动力合力的大小和方向均不变, 而力的作用点前移或后移.

2.2.1.3 改变 α 的影响

如图 7 所示, 当 α_d 和 α_u 等值同向变化时, 右翅的垂直力、侧向力和滚转力矩改变; 左翅产生与右翅同向的垂直力及反向的侧向力和滚转力矩的等值变化量. 可见, α_d 和 α_u 等值同向变化可使垂直力改变. 这与前述改变 Φ 的情况相似. 如图 8 所示, 当 α_d 和 α_u 等值反向变化时, 右翅水平力和偏航力矩改变较大, 俯仰力矩和滚转力矩略有变化. 左翅产生的俯仰力矩

和滚转力矩的变化量与右翅的等值反向,可抵消,故 α_d 和 α_u 等值反向变化可使水平力和俯仰力矩改变.

2.2.1.4 改变转动时间的影响

如图 9 所示,转动时间变化对气动力和力矩的影响很小,左右翅均如此.

2.2.1.5 改变转动起始时刻的影响

如图 11 所示,当右翅在前拍靠近昆虫腹部时的转动模式和后拍靠近昆虫背部时的转动模式相同变化时,改变转动模式可使垂直力、侧向力和滚转力矩改变;此时,左翅产生与右翅等值同向的垂直力变化量及等值反向的侧向力和滚转力矩变化量.可见,改变转动模式可使垂直力改变.如图 13 所示,当右翅在前拍靠近昆虫腹部时的转动模式和后拍靠近昆虫背部时的转动模式相反变化时,改变转动模式可使俯仰力矩和偏航力矩改变较大,水平力略有变化.此时,左翅产生与右翅等值同向的水平力和俯仰力矩变化量及等值反向的偏航力矩的变化量,可见,改变转动模式可使水平力和俯仰力矩改变.

综上所述,当左右翅运动学参数对称变化时,昆虫所受的纵向气动力和力矩是单翅所产生的 2 倍.将其无量纲化时,参考面积取为 $S_t (= 2S)$,而对单翅(左翅或右翅)的气动力和力矩进行无量纲化时,参考面积取为 S .因此,昆虫所受的纵向无量纲气动力和力矩系数(如 L^+ 、 X^+ 和 M_y^+)与作用在单翅上的一样.也就是说,我们可以把图 3、图 6~ 图 9、图 11 和图 13(实线)中的 L_{R}^+ 、 X_{R}^+ 和 $M_{y,R}^+$ 分别看成 L^+ 、 X^+ 和 M_y^+ .

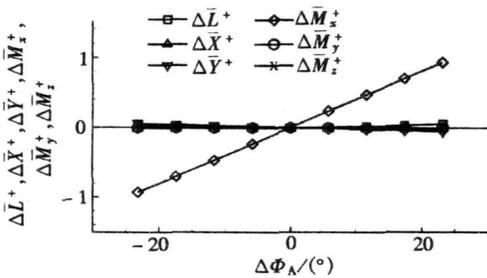


图 15 气动力和力矩随拍动幅角 $\Delta\Phi_A$ 的变化

2.2.2 左右翅运动学参数反对称变化的情形

2.2.2.1 改变 Φ 的影响

令 $\Delta\Phi_A$ 表示左右翅 Φ 反对称变化.即当左翅的 Φ 相对于平衡值增大 $\Delta\Phi_A$ 时,右翅的 Φ 相对于平衡值减小 $\Delta\Phi_A$.

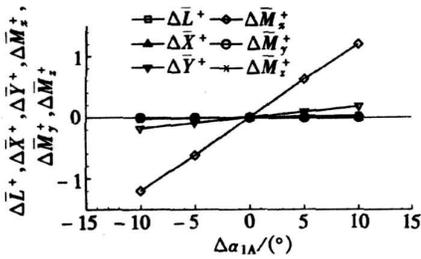
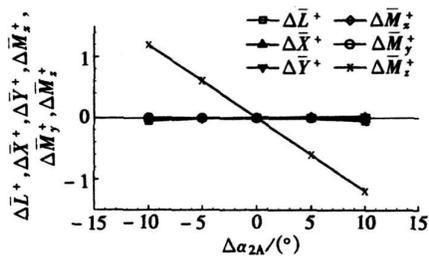
图 15 给出了双翅产生的气动力和力矩随 $\Delta\Phi_A$ 的变化.可见,改变 $\Delta\Phi_A$ 可使滚转力矩改变,其他气动力和力矩几乎不变.正如前文所述(图 3),一侧翅膀 Φ 增大(或减小)可使垂直力和滚转力矩增大(或减小).另一侧翅膀 Φ 减小(或

增大)同样的值,可使垂直力也减小(或增大)同样的值,而滚转力矩增大(或减小)同样的值.结果双翅垂直力的变化量互相抵消,只产生滚转力矩的改变.实际上,滚转力矩的变化也是由双翅的垂直力变化产生的:双翅产生的垂直力变化量等值反向,即绕 x 轴的一对力偶,可产生滚转力矩.

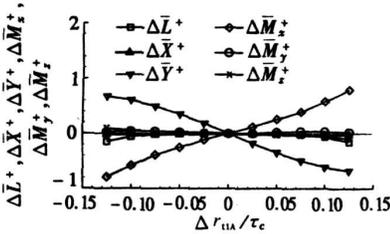
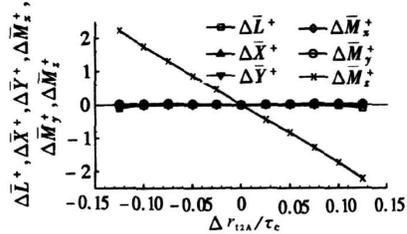
2.2.2.2 改变 α 的影响

令 $\Delta\alpha_{1A}$ 定义如下:左翅的 α_d 和 α_u 同时改变 $\Delta\alpha_{1A}$ 而右翅的同时改变 $-\Delta\alpha_{1A}$.图 16 给出了双翅产生的气动力和力矩随 $\Delta\alpha_{1A}$ 的变化.可见,与改变 $\Delta\Phi_A$ 的情况类似,改变 $\Delta\alpha_{1A}$ 主要使滚转力矩改变.

令 $\Delta\alpha_{2A}$ 定义如下:左翅的 α_d 和 α_u 分别增大和减小 $\Delta\alpha_{2A}$ 而右翅的 α_d 和 α_u 分别减小和增大 $\Delta\alpha_{2A}$.图 17 给出了双翅产生的气动力和力矩随 $\Delta\alpha_{2A}$ 的变化.可见,改变 $\Delta\alpha_{2A}$ 主要使偏航力矩改变,其他气动力和力矩几乎不变.如前文所述(图 8),当一侧翅膀的 α_d 和 α_u 等值反向

图 16 气动力和力矩随攻角 $\Delta\alpha_{1A}$ 的变化图 17 气动力和力矩随攻角 $\Delta\alpha_{2A}$ 的变化

变化时,主要使水平力和偏航力矩改变. 双翅产生等值同向的偏航力矩变化量及等值反向的水平力变化量. 总的效果是只有偏航力矩发生改变. 实际上,偏航力矩的变化也是由双翅的水平力变化引起的: 双翅产生的水平力变化量等值反向,即是绕 z 轴的一对力偶,可产生偏航力矩.

图 18 气动力和力矩随转动起始时刻 Δt_{11A} 的变化图 19 气动力和力矩随转动起始时刻 Δt_{12A} 的变化

2.2.2.3 改变转动起始时刻的影响

图 18 给出了双翅产生的气动力和力矩随某种转动模式的变化. 这种转动模式是: 不论翅膀前拍靠近昆虫腹部时还是后拍靠近昆虫背部时, 一侧翅膀超前转动, 另一侧翅膀滞后转动. 这种转动模式的变化主要使滚转力矩和侧向力改变. 如前文所述(图 11), 此时, 右翅的垂直力、侧向力和滚转力矩改变. 左翅产生与右翅等值同向的侧向力和滚转力矩的变化量及等值反向的垂直力的变化量. 总的效果是侧向力和滚转力矩改变.

图 19 给出了双翅产生的气动力和力矩随另一种转动模式的变化. 这种转动模式是: 一侧翅膀前拍靠近昆虫腹部时超前(或滞后)转动, 后拍靠近昆虫背部时滞后(或超前)转动; 另一侧翅膀前拍靠近昆虫腹部时滞后(或超前)转动, 后拍靠近昆虫背部时超前(或滞后)转动. 这种转动模式的变化主要可使偏航力矩改变, 其他气动力和力矩几乎不变. 如前文所述(图 13), 此时, 右翅的水平力、俯仰力矩和偏航力矩改变. 左翅产生与右翅等值同向的水平力和俯仰力矩的变化量及等值反向的偏航力矩的变化量. 总的效果是偏航力矩改变.

3 上述研究结果的意义

人们观察到自然界昆虫悬停飞行是稳定的, 但 Sun 和 Xiong^[3]通过研究熊蜂的悬停飞行发现其纵向扰动运动由 3 个特征模态构成: 不稳定振荡模态、快衰减模态和慢衰减模态. 其中不稳定振荡模态和慢衰减模态对于悬停的稳定性是不利的. 那么, 熊蜂很有可能运用了上述分析中的某一种或几种控制气动力和力矩的翅膀拍动运动学参数的组合来使其稳定悬停的. 上

述研究成果对于人们进一步研究昆虫的飞行稳定性和控制问题有很大的启发意义.

3.1 翅膀拍动运动的每个参数主要控制 1 到 2 个气动力和力矩

在研究昆虫飞行的控制机理时, 我们希望了解每个控制参数主要会影响哪些气动力和力矩. 通过上述分析可知, 在目前研究的所有运动学参数中, 每个参数主要影响 1 到 2 个气动力和力矩.

当左右翅运动学参数对称变化时, 改变拍动幅角(或拍动频率)主要可使垂直力改变(图 3 中实线). 改变平均拍动角主要可使俯仰力矩改变(图 6 中实线). 改变拍动攻角, 上拍和下拍攻角等值同向变化时, 主要可使垂直力改变(图 7 中实线); 等值反向变化时, 主要可使水平力改变(图 8 中实线). 改变转动模式, 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相同变化时, 主要可使垂直力改变(图 11 中实线); 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相反变化时, 主要可使水平力和俯仰力矩改变(图 13 中实线). 改变转动时间对气动力和力矩几乎无影响(图 9 中实线).

当左右翅运动学参数反对称变化时, 改变拍动幅角(或拍动频率)主要可使滚转力矩改变(图 15). 改变拍动攻角, 上拍和下拍攻角等值同向变化时, 主要可使滚转力矩改变(图 16); 等值反向变化时, 主要可使偏航力矩改变(图 17). 改变转动模式, 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相同变化时, 主要可使侧向力和滚转力矩改变(图 18); 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相反变化时, 主要可使偏航力矩改变(图 19).

3.2 垂直力和 3 个方向的力矩可分别由翅膀运动参数独立控制

在传统的飞机设计中, 滚转、俯仰和偏航力矩分别由副翼、平尾和垂尾来控制. 同样, 我们也希望昆虫在悬停或低速飞行时不用操纵舵面就能做到这一点. 根据上述分析可知, 垂直力和力矩可由翅膀拍动的运动学参数独立控制. 例如: 改变拍动幅角可仅使垂直力改变; 改变平均拍动角可仅使俯仰力矩改变; 反对称改变左右翅的拍动攻角可仅使滚转力矩改变; 反对称改变左右翅的转动模式可仅使偏航力矩改变.

由文献[3]知, 熊蜂悬停飞行的纵向扰动运动由 3 个特征模态构成: 不稳定振荡模态, 快衰减模态和慢衰减模态. 为了能够稳定的悬停飞行, 不稳定振荡模态和慢衰减模态需要控制. 其中, 不稳定振荡模态是由水平运动和俯仰运动耦合产生的^[3], 慢衰减模态是由垂直运动产生的^[3]. 因此, 只要通过改变拍动运动参数并产生与俯仰运动中反向的力矩即可控制不稳定振荡模态; 通过产生与垂直运动方向相反的垂直力即可使慢衰减模态加快衰减. 根据前文分析可知, 改变平均拍动角可仅使俯仰力矩改变以控制不稳定振荡模态, 改变拍动幅角(或拍动频率)可仅使垂直力改变以加快慢衰减模态的收敛速度. 这些控制方式很有可能是昆虫在悬停或低速飞行中所采取的.

3.3 昆虫可实现快速转弯飞行

如前文所述(见图 13、图 15~ 图 17、图 19), 适当改变翅膀拍动的运动学参数就可使 3 个方向的无量纲力矩达到 1. 下面将通过 1 个例子来说明这么大的力矩到底对昆虫的机动飞行起多大作用.

首先, 需要确定绕 x 、 y 和 z 轴的转动惯量. 根据文献[3]和文献[4]知 $I_y' = I_y = 0.213 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 只要确定 I_x' 和 I_z' , 即可计算出 I_x 和 I_z . 假设昆虫身体为一旋成体, 即有 $I_z' =$

I_y' . 再假设身体近似为一圆柱(质心近似位于身体纵轴的中点, 见文献[4]), 圆柱的高度为昆虫身体的长度, 直径为沿昆虫体轴方向从头部算起 18% 身长处的身直径, 此圆柱的体积乘以昆虫的平均密度恰好近似等于昆虫的质量. 进一步计算得该圆柱体绕 x' 轴的转动惯量是其绕 z' 轴的转动惯量的 0.046 倍, 即 $I_x' = 0.046I_z' = 0.046I_y'$. 根据 I_y' 算出 I_x' 和 I_z' , 再由下述公式可得到 I_x 和 I_z :

$$I_x = I_x' \cos^2 \alpha + I_z' \sin^2 \alpha, \quad (7)$$

$$I_z = I_x' \sin^2 \alpha + I_z' \cos^2 \alpha, \quad (8)$$

计算得到: $I_x = 0.118 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 和 $I_z = 0.105 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

其次, 选取一种控制方式(即改变哪个运动学参数). 此处选择左右翅拍动攻角反对称变化. 如果变化量为 10° , 由图 17 可知, M_z^+ 为 -1.2 , 因 $M_z = 0.5\rho U^2 S_{tc} M_z^+$ (其中 $0.5\rho U^2 S_{tc} = 5.51 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$), 故绕 z 轴的角加速度可达 $M_z/I_z = -6546 \text{ s}^{-2}$. 此时, 昆虫翅膀只需拍动 3~4 次(或 0.02 s)就可转过 90° , 这是相当快速的.

4 结 论

当左右翅运动学参数对称变化时, 改变拍动幅角(或拍动频率)主要可使垂直力改变. 改变平均拍动角主要可使俯仰力矩改变. 改变拍动攻角, 上拍和下拍攻角等值同向变化时, 主要可使垂直力改变; 等值反向变化时, 主要可使水平力改变. 改变转动模式, 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相同变化时, 主要可使垂直力改变; 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相反变化时, 主要可使水平力和俯仰力矩改变. 改变转动时间对气动力和力矩几乎无影响.

当左右翅运动学参数反对称变化时, 改变拍动幅角(或拍动频率)主要可使滚转力矩改变. 改变拍动攻角, 上拍和下拍攻角等值同向变化时, 主要可使滚转力矩改变; 等值反向变化时, 主要可使偏航力矩改变. 改变转动模式, 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相同变化时, 主要可使侧向力和滚转力矩改变; 当翅膀前拍靠近昆虫腹部和后拍靠近昆虫背部的转动模式相反变化时, 主要可使偏航力矩改变.

垂直力和 3 个方向的力矩可分别由翅膀运动参数独立控制. 例如: 改变拍动幅角可使垂直力改变; 改变平均拍动角可使俯仰力矩改变; 反对称改变左右翅的拍动攻角可使滚转力矩改变; 反对称改变左右翅的转动模式可使偏航力矩改变.

昆虫通过合适地改变翅膀拍动运动参数即可实现快速转弯飞行. 例如: 当左右翅拍动攻角反对称变化时, 如果变化量为 10° , 昆虫翅膀只需拍动 3~4 次(或 0.02 s)就可转过 90° , 这是相当快速的.

致谢 作者感谢北航“凡舟”青年科学基金(20070502)对本文的资助.

[参 考 文 献]

- [1] Taylor G K. Mechanics and aerodynamics of insect flight control[J]. *Biol Rev*, 2001, **76**(4): 449-471.
- [2] Taylor G K, Thomas A L R. Dynamic flight stability in the desert locust *Schistocerca gregaria*[J]. *J Exp Biol*, 2003, **206**(16): 2803-2829.
- [3] Sun M, Xiong Y. Dynamic flight stability of a hovering bumble-bee[J]. *J Exp Biol*, 2005, **208**(3):

- 447-459.
- [4] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of forward flight in bumble- bees — I Kinematics and morphology[J]. *J Exp Biol*, 1990, **148**(1): 19-52.
- [5] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of forward flight in bumble- bees — II Quasi-steady lift and power requirements[J]. *J Exp Biol*, 1990, **148**(1): 53-88.
- [6] Dickinson M H, Gtz K G. Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers[J]. *J Exp Biol*, 1993, **174**(1): 45-64.
- [7] Ellington C P, Van den Berg C, Willmott A P, et al. Leading edge vortices in insect flight[J]. *Nature*, 1996, **347**(12): 472-473.
- [8] Dickinson M H, Lehman F O, Sane S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight [J]. *Science*, 1999, **284**(18): 1954-1960.
- [9] Wang Z J. Two dimensional mechanism for insect hovering[J]. *Physical Rev Lett*, 2000, **85**(10): 2216-2219.
- [10] Sun M, Tang J. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion [J]. *J Exp Biol*, 2002, **205**(1): 55-70.
- [11] Usherwood J R, Ellington C P. The aerodynamics of revolving wings—I Model hawkmoth wings [J]. *J Exp Biol*, 2002, **205**(11): 1547-1564.
- [12] Usherwood J R, Ellington C P. The aerodynamics of revolving wings—II Propeller force coefficients from mayfly to quail[J]. *J Exp Biol*, 2002, **205**(11): 1565-1576.
- [13] Sane S P, Dickinson M H. The control of flight force by a flapping wing: lift and drag production [J]. *J Exp Biol*, 2001, **204**(19): 2607-2626.
- [14] Wu J H, Sun M. Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing[J]. *J Exp Biol*, 2004, **207**(8): 1137-1150.
- [15] Sun M, Wu J H. Aerodynamic force generation and power requirements in forward flight in a fruit fly with modeled wing motion[J]. *J Exp Biol*, 2003, **206**(17): 3065-3083.
- [16] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight—II Morphological parameters[J]. *Phil Trans R Soc Lond B*, 1984, **305**(1122): 17-40.

Control of Flight Forces and Moments by the Flapping Wings of a Model Bumble- bee

WU Jiang-hao¹, SUN Mao²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, P. R. China;

2. Institute of Fluid Mechanics, School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: The control of flight forces and moments by the flapping wings of a model bumble- bee is studied using the method of computational fluid dynamics. Hovering flight was taken as the reference flight: wing kinematic parameters are varied with respect to their values at hovering flight. Moments about (and forces along) x , y , z axes that pass the center of mass were computed. Changing stroke amplitude (or wingbeat frequency) mainly produces a vertical force. Changing mean stroke angle mainly produces a pitch moment. Changing wing angle of attack, when down- and up- strokes having equal change, mainly produces a vertical force, and when down- and up- strokes having opposite changes, mainly produces a horizontal force and a pitch moment. Changing wing rotation timing, when dorsal and ventral rotations having the same timing, mainly produces a vertical force, and when dorsal and ventral rotations having opposite timings, mainly produces a pitch moment and a horizontal force. Changing rotation duration has very small effect on the forces and moments. Anti- symmetrical- ly changing stroke amplitude (or wingbeat frequency) of the contralateral wings mainly produces a roll moment. Anti- symmetrically changing the angles of attack of the contralateral wings, when down- and up- stroke having equal change, mainly produces a roll moment, and when down- and up- stroke having opposite changes, mainly produces a yaw moment. Anti- symmetrically changing wing rotation timing of the contralateral wings, when dorsal and ventral rotations having the same timing, mainly produces a roll moment and a side force, and when dorsal and ventral rotations having opposite timings, mainly produces a yaw moment. Vertical force and moments about the three axes can be separately controlled by separate kinematic variables. Very fast rotation can be achieved with moderate changes in wing kinematics.

Key words: insect; flight force and moment; control; hovering; turning maneuver