

扑翼轨迹对空气动力的影响

张永立 赵创新 徐进良* ZHANG Yang

(中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 中国科学院研究生院, 北京 100049; Department of Mechanical Engineering, Aerospace and Manufacturing Division, University of Manchester, Manchester S61000, UK. * 联系人, E-mail: xujl@ms.giec.ac.cn)

摘要 通过数值求解 N-S 方程研究, 在不同拍动轨迹下的蜻蜓翅膀所受的气动力, 对比了直线拍动、椭圆拍动、“8”字拍动和双“8”下的受力特性。结果表明, 不同拍动轨迹下升阻力曲线的具有一个共同特征: 下拍阶段主要提供升力, 上提阶段主要提供推力; 几种拍动轨迹下的最大升力系数峰值都超过了 5, “8”字和双“8”字拍动甚至超过了 6, 远远超过稳态下的 1; 相对于直线拍动轨迹(无横向偏移量), 椭圆型轨迹和双“8”字型轨迹均导致升力的降低, 而“8”字型拍动轨迹下的升力和推力却得到明显提高。由于各种需要, 昆虫在飞行过程中需不时地改变翅膀的拍动状态。研究昆虫飞行不同拍翅模式下的受力特性对微型飞行器的机动飞行设计有参考意义。

关键词 蜻蜓 升力 阻力 非定常空气动力学 计算流体动力学

按定常空气动力学理论, 昆虫难以提供克服自身重量升力飞行。事实上, 昆虫不仅可以自由飞行, 还能实现快速启动、悬停、倒飞等机动飞行。揭示昆虫的飞行奥秘对微型飞行器的设计有着重要意义。

较早的昆虫飞行研究以实验为主, 配合烟气流进行可视化测量^[1,2]是昆虫飞行实验中较为成功的方法, 这种方法可以直观得到昆虫飞行可视化流场以及飞行总动力特性, 但不能获得每个翅膀上的具体气动力特性。为了研究翅膀上的瞬时气动力, 研究者们根据相似性原理, 加工出昆虫机械翅进行动态模拟测量^[3-7], 并成功揭示了昆虫翅膀产生高升力的部分机理, 即失速延迟(或前缘涡不脱落)、俯仰旋转环量、尾涡捕获^[4,5]。

随着数值方法的逐步完善, 计算流体动力学成为研究昆虫飞行非定常空气动力学有力工具, 并成功揭示了翼展流对升力的影响^[8]、蜻蜓二维悬停的高升力机理^[9,10]、蜻蜓前后翼相互干扰下的气动力特性^[11]以及果蝇翅膀的非定常流动^[12]等, 而且基于计算结果和实验数据的对照总结出了产生高升力的若干机制。另外, 近几年也有研究者开始尝试数值研究翅膀柔性变形对气动力学特性的影响^[13]。

目前, 绝大多数数值研究是在直线拍动轨迹下进行的, 而实际中的许多昆虫翅膀拍动轨迹并非直线, 普遍存在横向偏移运动^[9], 为了研究横向偏移对飞行特性的影响, 本研究计算并比较了几种拍动轨迹(直线、椭圆、“8”字)下的升阻力特性。

一些研究^[14-16]对于活体在捆绑或者自由飞行状

态下的扑动轨迹(椭圆、直线、“8”字)测量给予了详细的报道, 但是都没有进一步讨论这些轨迹对气动力的影响, Wang^[17]曾建议应当对比这些拍动模式定量的影响。尽管Sane和Dickinson^[6]在机械模型上通过步进电机来控制拍动轨迹, 同时研究了升阻力特性, 给出了椭圆和“8”字拍动的定量测量结果, 但是其测量结果和计算结果之间的差别较大, Sane和Dickinson^[6]认为是他们使用的准定常模型不能准确描述“8”字拍动所导致。据作者所知, 目前还未有该方面的详细报道。基于此, 本研究对这 3 种轨迹气动力特性做了定量的计算, 以给出理论结果。

昆虫飞行气动力的数值模拟是一个复杂的非定常、外流场、边流场区域计算问题, 直接模拟其三维运动是一项很具有挑战性的工作^[18,19], 一种比较易于操作的方法就是把三维问题简化为二维问题来处理。二维计算虽然不能考虑三维效应, 但它节省了计算时间, 排除了过多参数的影响, 有利于集中研究若干主要参数对气动力特性的影响。本研究即是如此简化处理的。

1 模型描述

蜻蜓飞行具有惊人的机动性和稳定性, 但它飞行时翅膀拍动频率却只有几十赫兹, 相对于其他昆虫较低, 适合作为仿生微型飞行器的设计参考。因此本研究选择蜻蜓作为研究对象。

如图 1 所示(为了清晰起见, 图中只画出蜻蜓的一对前翅), 蜻蜓翅膀做空间复合运动: 绕自身轴上下拍动的同时绕翼展轴线(右翅绕 o_1o_2 线)做俯仰转

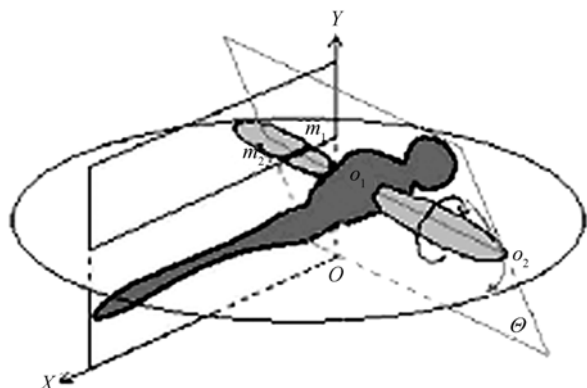


图 1 蜻蜓翅膀运动示意图

动(即不断改变翅膀攻角),上下拍动过程中,翅膀不完全保持在拍动平面 Θ 内,存在着横向偏移运动(即翅膀按照特定频率前后偏移摆动,周期性的偏离 Θ 平面).为了简化计算,鉴于蜻蜓翅膀的展弦比较大^[20,21],本研究忽略三维效应,仅考虑蜻蜓翅膀展向横截面(即弦向切面,图 1 中的截面 m_1m_2)在二维流场中运动的气动力特性.严格地讲,横截面 m_1m_2 的拍动轨迹是一弧面,弧心在翅膀根部,在二维计算中把此弧面近似作为平面处理,认为 m_1m_2 运动保持在 XOY 平面内(OX 为水平方向, OY 为竖直方向).

取出图 1 中的 XOY 平面,对翅膀截面 m_1m_2 的运动作详细分析(图 2).本研究假设翅膀截面 m_1m_2 为椭圆型,翅膀弦长为椭圆长轴的两倍,翅膀厚度为椭圆短轴的两倍.在 XOY 内建立一个局部坐标系 xoy ,原点 o 位于翅膀拍动轨迹线的中点, x 轴位于拍动平面

Θ 内, y 轴垂直于拍动平面.二维情况下,翅膀的运动可以描述为基点平动和绕基点转动的复合.基点即为翅膀转动轴,这里取为翅膀的形心,即椭圆 m_1m_2 的圆心,距离翼前缘 $0.5c$.翅膀在 x 方向的运动代表三维飞行中的上下拍动,翅膀在 y 方向上的运动代表三维飞行中的横向偏移运动,翅膀攻角的改变对应于三维飞行中的俯仰运动.二维情况下,通常把翅膀的上下拍动称为平动(包括横向偏移运动),把改变翅膀攻角的俯仰运动称为转动.本研究翅膀运动函数具体描述如下^[9],为了考虑不同拍动轨迹对飞行气动力的影响,本研究增加了横向偏移运动函数):

翅膀平动位移表达式(即基点的运动)为:

$$x(t) = \frac{A_0}{2} \cos(2\pi f_0 t) \quad (\text{上下拍动}); \quad (1)$$

$$y(t) = \frac{B_0}{2} \sin(2\pi f_1 t) \quad (\text{横向偏移}). \quad (2)$$

翅膀转动表达式(即攻角的变化)为:

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} \sin(2\pi f_0 t + \varphi). \quad (3)$$

本研究翼型为椭圆型, $c = 1 \text{ cm}$, $A_0 = 2.5 \text{ cm}$, $f_0 = 40 \text{ Hz}$, $\beta = \pi/3$ (依据的蜻蜓飞行参数参见文献^[9, 20, 21].若无特别说明,翅膀厚弦比 $h/c = 1/20$ (h 为翅膀厚度)).

本研究对参数 B_0 , f_1 对飞行气动力特性的影响展开讨论.

若 $B_0 = 0$,则为直线拍动,运动函数和文献^[9]的相同(图 2(a));若 $B_0 \neq 0$,则根据 f_1 的变化,有不同的

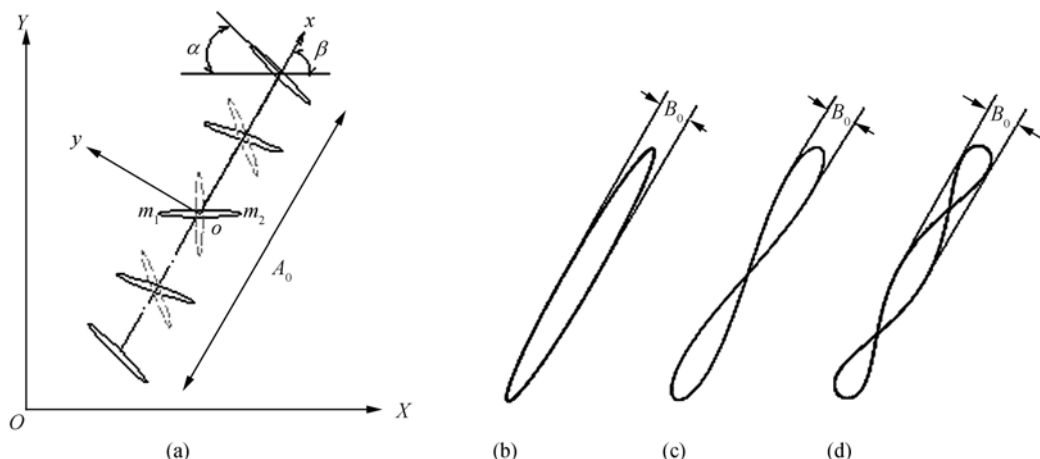


图 2 蜻蜓翅膀截面 m_1m_2 的运动分析

(a) 直线拍动轨迹,一个周期内不同时刻翅膀位置示意图.实椭圆表示下拍阶段的翅膀位置,虚椭圆表示上拍阶段的翅膀位置. XOY 为地球坐标系, xoy 为局部坐标系(原点位于拍动轨迹中点). A_0 为拍动幅值; B_0 为横向偏移幅值; c 为弦长; α 为翅膀攻角,是翼弦与水平面的夹角; β 为拍动平面角,是翅膀转动轴轨迹线与水平面的夹角.(b) 椭圆拍动轨迹.(c) “8”字型拍动轨迹.(d) 双“8”字型拍动轨迹

拍动轨迹: $f_1 = f_0$ 为椭圆型拍动轨迹(图 2(b)); $f_1 = 2f_0$ 为“8”字型拍动轨迹(图 2(c)); $f_1 = 3f_0$ 为双“8”字型拍动轨迹(图 2(d)). 本研究算例中, 气体密度 $\rho = 1.225 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, 动力黏性系数为 $\mu = 2.45 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (此处流体黏性大于空气的真实黏性, 是为了研究较小雷诺数下的运动特性, 也是为了方便与文献[9]中数据对比), 雷诺数 $\text{Re} = V_{\max} c/\nu = 157$ ($V_{\max}$ 为翅膀最大拍动速度).

2 控制方程及边界条件

2.1 控制方程

本研究计算模型是非定常二维层流不可压外流场, 此模型的质量和动量方程可以如下描述:

$$\frac{\partial u}{\partial X} + \frac{\partial v}{\partial Y} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial X} + v \frac{\partial v}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial Y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial Y^2} \right). \quad (6)$$

但由于翅膀在空间位置随时间不断变化, 导致所要计算的流场区域不断变化, 单元控制体也随之改变. 每计算一个时间步, 网格需要重新划分. 为了保证守恒性, 上述质量和动量方程中必须考虑网格移动带来的影响. 引入变量网格移动速度 $\bar{V}_g$, 则质量和动量方程可以如下描述(积分型控制方程):

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho(\bar{V} - \bar{V}_g) \cdot d\bar{A} = 0; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho u(\bar{V} - \bar{V}_g) \cdot d\bar{A} \\ &= \int_{\partial\Omega} \mu \nabla u \cdot d\bar{A} + \int_{\Omega} \left(-\frac{\partial p}{\partial X} \right) d\Omega; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho v(\bar{V} - \bar{V}_g) \cdot d\bar{A} \\ &= \int_{\partial\Omega} \mu \nabla v \cdot d\bar{A} + \int_{\Omega} \left(-\frac{\partial p}{\partial Y} \right) d\Omega. \end{aligned} \quad (9)$$

进而写成通用标量 ϕ 的守恒型积分控制方程:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \phi(\bar{V} - \bar{V}_g) \cdot d\bar{A} \\ &= \int_{\partial\Omega} \mu \nabla \phi \cdot d\bar{A} + \int_{\Omega} S_{\phi} d\Omega. \end{aligned} \quad (10)$$

其中 Ω 是边界不断移动的控制体, $\partial\Omega$ 表示控制体边界. 当 $\phi = 1$ 时, 即为质量守恒方程, 当 $\phi = u$ 和 $\phi = v$ 时, 即为动量守恒方程.

每个时间步下网格都进行重新划分, 一旦确定了 n 时间步网格和 $n+1$ 时间步重新划分的新网格, 就可知全场的网格速度 $\bar{V}_g$ 和控制体积 Ω^n 及 Ω^{n+1} . $n+1$ 时间步网格节点上的 n 时间步的物理量值可以通过 n 时间步网格节点上的物理量值插值得到. 这样, 方程(10)的时间偏导项一阶向后差分式(11)中的变体积问题和方程(10)的对流项中的网格移动速度问题均得到解决.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega = \frac{(\rho \phi \Omega)^{n+1} - (\rho \phi \Omega)^n}{\Delta t}. \quad (11)$$

所以对于本研究所研究的二维扑翼运动, 依然是 3 个方程(质量方程(7), 两个动量方程(8)(9)), 3 个未知数 (u, v, p), 方程封闭. 给定初始条件和边界条件, 即可求解.

2.2 初始条件和边界条件

计算流场区域如图 3 所示, 翅膀是流场内边界, 视为可移动墙边界条件内边界墙的速度函数可以通过对(1)~(3)式求导并向 XOY 坐标系中 X, Y 轴分解、叠加得到:

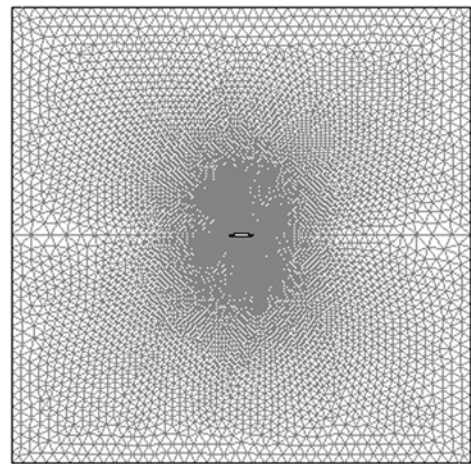


图3 全场计算区域网格

$$u(t) = -A_0 \pi f_0 \sin(2\pi f_0 t) \cos \beta - B_0 \pi f_1 \cos(2\pi f_1 t) \sin \beta; \quad (12)$$

$$v(t) = -A_0 \pi f_0 \sin(2\pi f_0 t) \sin \beta + B_0 \pi f_1 \cos(2\pi f_1 t) \cos \beta; \quad (13)$$

$$\omega(t) = \frac{\pi}{2} \pi f_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi). \quad (14)$$

上述表达式即为计算区域内边界条件, 外边界条件设压强恒为零(环境压强设为一个大气压). 取表达式(12)~(14)中 $t = 0$ 得到内边界速度初始条件:

$$u(0) = -B_0 \pi f_1 \sin \beta; \quad (15)$$

$$v(0) = B_0 \pi f_1 \cos \beta; \quad (16)$$

$$\omega(0) = \frac{\pi}{2} \pi f_0 \cos \varphi. \quad (17)$$

其余区域的速度初始值设为零;全场初始压强设为零.确定了初始条件和边界条件,采用 SIMPLEC,二阶迎风格式求解方程(10)(即方程(7)~(9)).

3 结果与讨论

3.1 计算可信性验证

理论上,外流场计算问题的外边界在无穷远处,但实际数值计算只能取有限场,为了考虑计算流场区域尺寸效应,本研究比较了几种不同区域尺寸(外边界边长分别为 $5c$, $10c$, $15c$, $20c$)下的计算结果,事实表明,当外边界尺寸大于 $10c$ 时,计算结果基本不再受区域尺寸的影响.另一个需要考虑的因素是网格质量,本研究对此也作了数值实验,结果表明,选择适当的网格重划参数,可以使得网格在翅膀附近高密度,而在较远处比较稀疏(图 3).这样既实现了详细捕捉翅膀附近的流场信息,又减少了计算量,并且较好地保证了网格重划过程中单元控制体变化较为平稳,有利于避免数值抖动.总网格数保持在 4 万个单元左右即可满足计算要求,为了便于每一个新时间步网格重划,本研究选择了三角形单元(图 3).

为了说明此数值方法研究昆虫飞行气动力的可行性,本研究依照文献[9]的翅膀运动函数作了计算,但其文中没有明确说明椭圆翅膀的厚弦比,本

证算例选择了厚弦比 $1/8$.本算例经过 10 多个翅膀摆动周期的计算,升阻力达到稳定的周期性变化,计算结束.图 4 对本研究和文献[9]的计算结果作了比较,从图中可以看出,两者所得升阻力曲线随时间的变化趋势极为相似,只是幅值稍微不同,幅值的不同可能是由于两者计算中所选用的翅膀厚弦比不同引起的.图中升力是指翅膀运动产生合力在竖直方向(Y 轴)上的分量,沿 Y 轴正方向为正;阻力是指翅膀运动产生合力在水平方向(X 轴)上的分量,沿 X 轴正方向为正,负的阻力表示推力.例如昆虫前飞过程中一个周期内产生的平均阻力小于零,说明昆虫受到向前的推动力.求出一个周期内的二维平均升力和推力(即单位翼展上的受力)分别为 0.034 和 0.018 N/m.我们假设蜻蜓翅膀为椭圆形,典型蜻蜓翅膀长 5 cm,宽 1 cm,则两对翅膀产生的平均升力为 0.0053 N,而典型蜻蜓重量介于 $0.001 \sim 0.0025$ N^[9,20,21,23],大于蜻蜓体重,所以蜻蜓不仅能够正常飞行,还具有非常优秀的机动飞行能力.这一结果从另一个角度验证了本研究数值计算的可信性.为了方便研究,本研究讨论过程中应用升阻力、推力和力矩系数的概念,分别定义如下:

$$C_L = \frac{\text{升力}}{0.5 \rho \bar{V}^2 c}; \quad C_D = \frac{\text{阻力}}{0.5 \rho \bar{V}^2 c};$$

$$C_T = \frac{\text{推力}}{0.5 \rho \bar{V}^2 c} = -C_D; \quad C_M = \frac{\text{力矩}}{0.5 \rho \bar{V}^2 c^2} \quad (18)$$

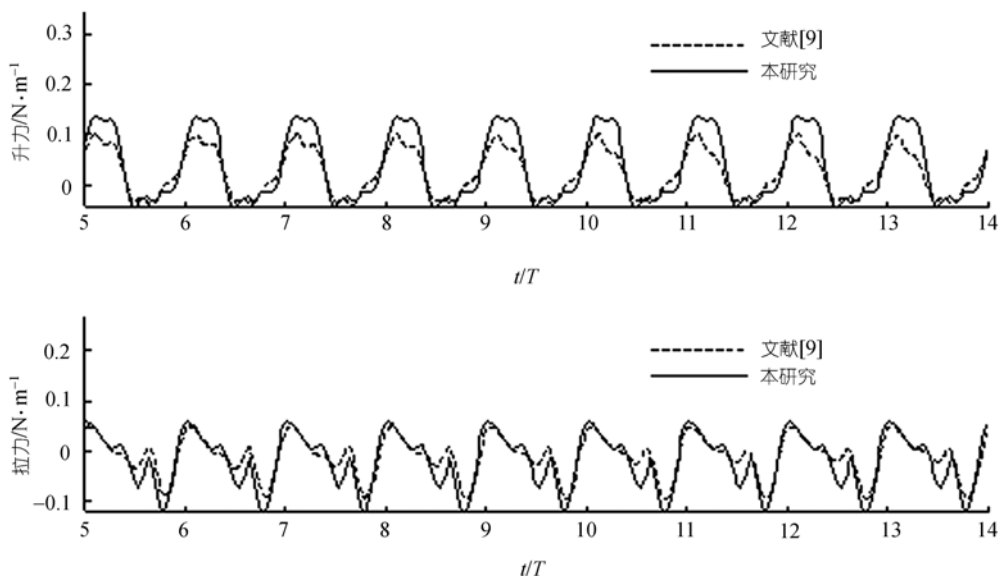


图 4 本研究算例升阻力曲线与文献[9]升阻力曲线对照
翅膀运动周期 $T = 0.025$ s

其中 $\bar{V}$ 是翅膀一个周期内的平均拍动速度, $\bar{V} = 2f_0A_0$.

3.2 翅膀拍动轨迹的影响

目前多数文献对昆虫飞行的研究局限于直线拍动轨迹, 没有考虑翅膀横向偏移运动对升阻力特性的影响, 而飞行中的昆虫翅膀横向偏移运动是存在的^[6,21,24]. 本研究就蜻蜓翅膀拍动横向偏移带来的影响作专门研究. 随横向偏移拍动频率的不同, 翅膀拍动轨迹分为椭圆形拍动、“8”字形拍动和双“8”字形拍动(见前面关于翅膀运动学的描述). 昆虫翅膀一般都比较薄, 这里设蜻蜓翅膀厚弦比为 $1/20$, 相位角 $\varphi = 0$.

计算得到不同拍动轨迹下升阻力曲线的一个共同特征: 下拍阶段主要提供升力, 上提阶段主要提供推力(图5只显示直线和“8”字轨迹). 在拍动起初位置, 升力迅速增大, 这与Sane和Dickinson^[6]实验结果相吻合. 本研究计算4种拍动轨迹下的最大升力系数峰值都超过了5, “8”字和双“8”字拍动甚至超过了6, 远远超过稳态下的1^[20].

对照直线拍动, 分析“8”字形拍动升力和推力特性.

从图5中可以看出, “8”字形拍动平均升力大于直线拍动主要是由于在 $t = 0.25T$ 和 $t = 0.50T$ 附近“8”字形拍动升力远高于直线拍动升力; “8”字形拍动平均推力大于直线拍动主要是由于在 $t = 0.75T$ 附近“8”字形拍动推力远高于直线拍动. 在 $t = 0.25T$ 时, 翅膀处于下拍中点位置, “8”字形拍动在翼前缘和翼后缘的上翼面所形成的涡大于直线拍动所形成的涡(图6(c), 1和2), 并且涡基本上处于翅膀的正上方, 而直线拍动所形成的涡则向翼后缘偏离, 这使得“8”字形拍动的翅膀上下翼面压力差大于直线拍动(图6(c), 3和4), 因此升力较大. 此时刻阻力差别不大是由于翅膀处于水平方向, 合力在 X 轴方向的分量都

接近于零. 从运动学的角度分析, 该时刻, “8”字拍动比直线拍动多了一个横向偏移速度(图7, $t = 0.25T$ 时刻), 导致翅膀合速度方向较接近于竖直向下, 速度引起的阻力则较接近于竖直向上, 因此产生较大的升力. 在 $t = 0.50T$ 附近, 相对于直线拍动, “8”字拍动多了沿 xoy 坐标系中 y 轴正方向的横向偏移速度, 此横向偏移速度减小了翼前缘对上翼面前后缘涡的阻尼作用, 使得涡的旋转速度较大, 增大了低压区(图6(e), 3和4), 因此 $t = 0.50T$ 附近, “8”字拍动升阻力大于直线拍动. 在 $t = 0.75T$ 时, 翅膀处于上提中点位置, “8”字拍动在翼上缘(图6(g), 4中翼右侧)形成较大的高压区, 导致压力差大于直线拍动压力差, 所以产生较大的前推力. 此时刻两者升力差别不大是由于翅膀处于竖直方向, 合力在 Y 轴方向的分量接近于零.

无论是直线拍动, 还是“8”字拍动, 下拍过程中前缘涡一直没有脱落, 这使得上翼面的低压区得以保持(图8), 这是产生非定常高升力的机理之一^[7,12]. 从图8中的涡量场周期图可以看出, 翼前后缘涡的脱落主要是由翅膀的快速旋转和拍动速度的反向所致. 各种拍动轨迹下的涡脱落频率一致, 一个拍动周期脱落一对涡. 图8显示了直线拍动和“8”字拍动下的涡街图, “8”字拍动的涡街较强于直线拍动. 把昆虫和气体视为一个系统, 根据动量定理, 向下流动的气体越多、速度越大, 则昆虫受到的升力就越高, 所以“8”字拍动升推力较直线拍动大; 而且两者涡街均向右下方脱落, 可以推断出昆虫受到的合力(升推力)方向必是左上方.

为了与已有研究的实验数据对比, 表1列出了各种拍动轨迹下一个周期内的平均升阻力系数. 当横向偏移量 $B_0 = A_0/10$ 时, 相对于稳态下的最大升力, 椭圆形拍动平均升力增加24%, “8”字形拍动平均升力增加76%, 双“8”字形拍动的平均升力增加43%;

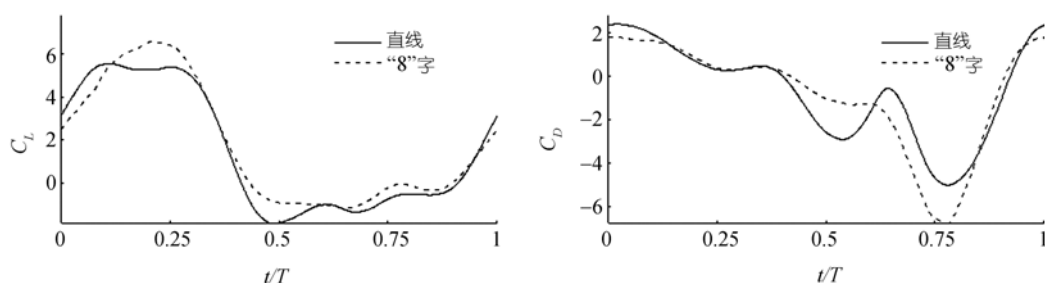


图5 直线拍动轨迹和“8”字拍动轨迹下的升阻力、力矩曲线

翅膀拍动横向偏移量为 $A_0/10$

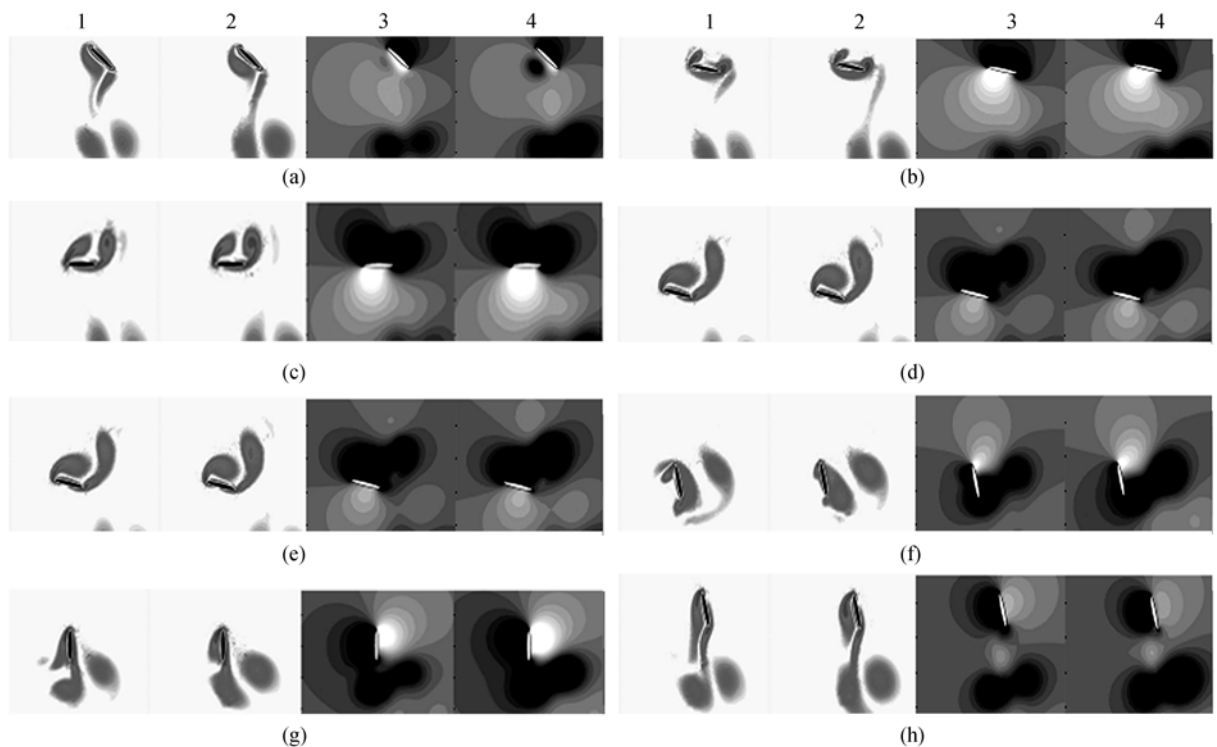


图 6 一个周期内不同时刻直线拍动和“8”字拍动轨迹下的涡量和压强比较图

(a) $t = 0.0 T (t = 1.0 T)$; (b) $t = 0.125 T$; (c) $t = 0.25 T$; (d) $t = 0.375 T$; (e) $t = 0.5 T$; (f) $t = 0.625 T$; (g) $t = 0.75 T$; (h) $t = 0.875 T$. 第 1 列为直线拍动轨迹涡量图, 第 2 列为“8”字拍动轨迹涡量图, 第 3 列为直线拍动轨迹压强图, 第 4 列为“8”字拍动轨迹压强图. 压强图中白色表示高压, 黑色表示低压

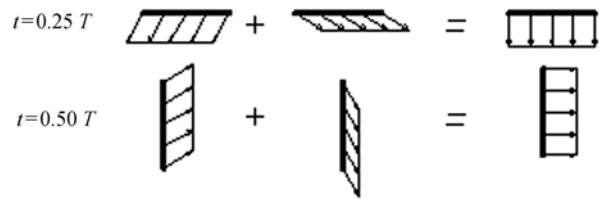


图 7 “8”字拍动在 $t = 0.25 T$ 和 $t = 0.50 T$ 时刻的平均速度合成图

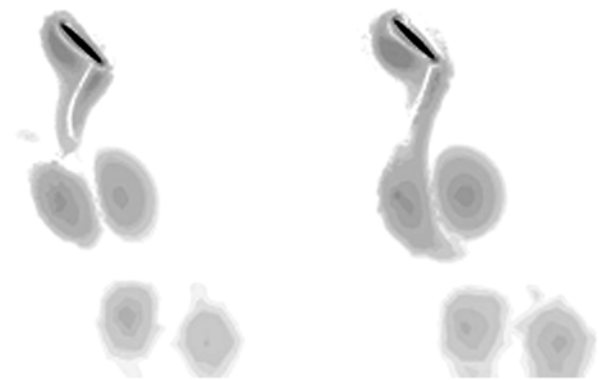


图 8 直线拍动轨迹(左)和“8”字拍动轨迹(右)涡街图

表 1 不同拍动轨迹下的平均升阻力系数

		$B_0 = 0.0^a)$	$B_0 = A_0/10$	$B_0 = A_0/5$
椭圆	C_L	1.46	1.24	0.98
	C_D	-0.75	-0.93	-0.99
	C_R	1.65	1.55	1.40
“8”字	C_L	1.46	1.76	1.55
	C_D	-0.75	-0.88	-0.87
	C_R	1.65	1.97	1.77
双“8”字	C_L	1.46	1.43	1.11
	C_D	-0.75	-0.79	-0.70
	C_R	1.65	1.64	1.32

a) $B_0 = 0.0$ 表示没有横向偏移, 即为直线拍动

相对于直线拍动, 椭圆和双“8”字拍动的平均升力均小于直线拍动($C_L = 1.46$), 而“8”字拍动所产生的升力和推力却均大于直线拍动. 可以看出随着偏移量增加, 椭圆拍动的升力系数都减小, 这与 Sane 和 Dickinson^[6]的机械模型实验结果相一致.

对“8”字拍动, 表 1 显示得是升阻力是先增大再减小, 这与 Sane 和 Dickinson^[6]的实验结果 8 字拍动是随着偏移量增加而升阻力减小有差别, 作者认为不一致的原因可能是由于 Sane 和 Dickinson^[6]实验中的

偏移量大所致(本研究计算的偏移量 $B_0 = A_0/10$ 和 $B_0 = A_0/5$ 下的升阻力, 偏移角度小于 5° , 而Sane和Dickinson^[6]的实验偏移角最小为 10°)。Sane和Dickinson^[6]的实验及其按照准定常模型计算结果有很大的差别, 他们认为是采用的计算模型不能准确描述8字拍动所导致。这问题有待于进一步讨论。

4 结论

通过对拍动轨迹对气动力的研究, 发现不同的翅膀拍动轨迹对其升阻力都很大的影响, 对比椭圆、直线、8字以及双8字的翅膀拍动模式下的受力分析。本研究认为, 几种拍动轨迹下的最大升力系数峰值都超过了5, 远远超过稳态下的最大升力值1; 与直线拍动轨迹相比, 椭圆型轨迹和双“8”字型轨迹均导致升力的降低, 而“8”字型拍动轨迹下的升力和推力却得到明显提高。采用8字拍动模式对产生升力、推力更为有利。

致谢 本工作受中国科学院国际重点合作项目(批准号: GJHZ05)及国家自然科学基金项目(批准号: 50476088)资助。

参 考 文 献

- Grodtnitsky D L, Morozov P P. Vortex formation during tethered flight of functionally and morphologically two-winged insects, including evolutionary considerations on insect flight. *J Exp Biol*, 1993, 182: 11~40
- Dickinson M H, Götz K G. The wake dynamics and flight forces of the fruit fly *Drosophila melanogaster*. *J Exp Biol*, 1996, 199: 2085~2104
- Dickinson M H, Götz K G. Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers. *J Exp Biol*, 1993, 174: 45~64
- Ellington C P, Berg C V D, Willmott A P, et al. Leading-edge vortices in insect flight. *Nature*, 1996, 384: 626~630[DOI]
- Dickinson M H, Lehmann F O, Sane S P. Wing Rotation and the Aerodynamic basis of insect flight. *Science*, 1999, 284: 1954~1960[DOI]
- Sane S P, Dickinson M H. The control of flight force by a flapping wing: Lift and drag production. *J Exp Biol*, 2001, 204: 2607~2626
- Birch J M, Dickinson M H. Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. *Nature*, 2001, 412: 729~733[DOI]
- Liu H, Ellington C P, Kawachi K, et al. A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering. *J Exp Biol*, 1998, 201: 461~477
- Wang Z J. Two dimensional mechanism for insect hovering. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 2216~2219[DOI]
- Wang Z J, Birch J M, Dickinson M H. Unsteady forces and flows in low Reynolds number hovering flight: two-dimensional computations vs robotic wing experiments. *J Exp Biol*, 2004, 207: 449~460[DOI]
- Lan S L, Sun M. Aerodynamic force and flow structure of two airfoils in flapping motions. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 17: 310~331
- Sun M, Tang J. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion. *J Exp Biol*, 2002, 205: 55~70
- Ho S, Nassef H, Pornsinsirak N, et al. Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers. *Prog Aerospace Sci*, 2003, 39: 635~681[DOI]
- Ellington C P. The aerodynamic basis of insect flight. *Phil Trans R Soc Lond B*, 1984, 305: 1~181
- Zanker J M, Gotz K G. The wing beat of *Drosophila melanogaster*. *Dynamics. Phil Trans R Soc Lond B*, 1990, 327: 19~44
- Fry S N, Sayaman R, Dickinson M H. The aerodynamics of free-flight Maneuvers in *Drosophila*. *Science*, 2003, 300: 495~498[DOI]
- Wang Z J. The role of drag in insect hovering. *J Exp Biol*, 2004, 207: 4147~4155[DOI]
- Ramamurti R, Sandberg W. Computational study of 3-D flapping foil flows. 15th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Anaheim, California, USA, 2001. 0605
- Togashi F, Ito Y, Murayama M, et al. Flow simulation of flapping wings of an insect using overset unstructured grid. 15th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Anaheim, California, USA, 2001. 2619
- Okamoto M, Yasuda K, Azuma A. Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly. *J Exp Biol*, 1996, 199: 281~294
- Wakeling J M, Ellington C P. Dragonfly flight : Gliding flight and steady-state aerodynamic forces. *J Exp Biol*, 1997, 200: 543~556
- Wakeling J M, Ellington C P. Dragonfly flight : Velocities, accelerations and kinematics of flapping flight. *J Exp Biol*, 1997, 200: 557~582
- Wakeling J M, Ellington C P. Dragonfly flight : Lift and power requirements. *J Exp Biol*, 1997, 200: 583~600
- Weis-Fogh T. An exception is a special class of tiny insects. *J Exp Biol*, 1973, 59: 169~230

(2005-09-26 收稿, 2006-02-13 接受)