

蝉翅翼的运动研究与三维数值分析

董 强, 张西金, 赵 宁, 黄强强
(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要: 以蝉为研究对象, 首先通过分析蝉翅翼在高速摄像机下的运动影像获得了其运动方程, 然后建立了蝉翅翼的三维模型, 并研究了基于 Fluent 软件的蝉翅翼周围流场数值模拟方法, 最后模拟分析了三维蝉翅翼模型在不同运动参数(拍动频率、拍动幅值和最大扭转角度)下的平均升力系数和平均阻力系数。研究结果表明最大扭转角度对蝉翅翼气动力影响较大, 因此在仿蝉扑翼飞行器的设计与操控中必须考虑扭转运动。

关 键 词: 蝉翅翼; 运动研究; 三维数值分析; 升力系数; 阻力系数

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Movement research and three-dimensional numerical analysis on the wing of a cicada

DONG Qiang, ZHANG Xi-jin, ZHAO Ning, HUANG Qiang-qiang

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

Abstract: A cicada was regarded as a research object. Firstly, its wing movement equations were gotten by analyzing the cicada's movement images from high-speed camera. Then, a three-dimensional model of the cicada's wing was established, and the numerical simulation method of flow field around the cicada's wing was studied based on Fluent software. Finally, the average lift and drag coefficients of the three-dimensional cicada's wing model were analyzed under the situation of different movement parameters (flapping frequency, flapping amplitude and maximum torsional angle). The research result shows that the maximum torsional angle greatly impacts the aerodynamics of cicada's wing, so the torsional movement must be considered in the design and manipulation of the flapping-wing maro air vehicles mimicking cicada.

Key words: cicada's wing; movement research; three-dimensional numerical analysis; lift coefficient; drag coefficient

模仿鸟或昆虫飞行方式的微扑翼飞行器具有广泛的应用前景^[1-3], 是目前微型飞行器领域的研究的热点。在实验方面, Ellington 等^[4]通过观测鹰蛾前飞时的绕流, 发现了翅膀拍动中的前缘涡; Dickinson 等^[5]对果蝇模型进行了流场显示实验, 并测量了拍动过程中的气动力, 结论说明非定常流动使模型产生了高升力。在气动力特性的计算方面, Smith 等^[6]用非定常面元法计算了昆虫的气动特性; Liu, Sun 等^[7-8]等通过求解三维非定常

N-S 方程分别对鹰蛾与果蝇的悬停飞行进行了数值模拟; 刘岚等^[9]用计算流体力学(CFD)中的 ALE(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian)单元对三维 N-S 方程进行了求解, 得到了每个时间步上流场各网格点的压力和速度, 但计算结果有待于进一步实验验证; 曾锐^[10]采用了非定常涡格法对柔性仿鸟扑翼的气动特性进行了分析, 其计算结果与实验结果有一定程度的吻合。另外, 实践证明, 面元法计算简单但结果较为粗糙, 求解三维 N-S 方

收稿日期: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51175426); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2012JM7010)

作者简介: 董强(1988—), 男, 陕西咸阳人, 硕士生, 研究方向为微扑翼设计。E-mail: strongdq@aliyun.com

程计算量大且对边界条件要求非常严格^[11]。总地来看,目前还没有非常成熟的扑翼飞行器非定常流场计算方法,这方面仍需要进一步探索。

蝉是生物界体形较大的飞行昆虫之一(质量为 5 g 左右),翅翼大(翼展为 125.0 mm 左右)、拍动频率低,在目前的技术水平下仿蝉扑翼飞行器易于实现,而且鲜有从事仿蝉扑翼飞行器研究。本文以蝉翅翼为研究对象,通过实验研究其运动方式,并探索了利用 Fluent 软件对三维蝉翅翼模型周围非定常流场进行数值模拟的方法,获得翅翼在不同运动控制参数下的气动特性,为微扑翼飞行器的设计及控制提供了参考依据。

1 蝉翅翼运动研究

1.1 蝉翅翼运动方式

蝉的翅翼分主翼和副翼,在根部通过特殊的连接机构(类似于铰链)连接,通过实验观察翅翼拍动时主副翼之间的相对运动很小,因此将蝉翅翼作为一个整体处理。为了准确地描述蝉翅翼的运动,将蝉的头部黏结在实验台的细长杆上(蝉头部甲壳较厚,不会对蝉造成影响),拍摄了蝉翅翼在高速摄影机下的运动影像。通过观察一个周期内翅翼的运动,可以发现:在翅翼向下扑动的过程中弦向变形很小且并不发生扭转,略其变形影响,认为翅翼只是最简单地向下运动(图 1(a));在翅翼运动到最低点时,在前方肌肉的带动下向上扭转,发生倾斜(图 1(b));而后,翅翼在肌肉的带动下向上运动(图 1(c));到达最高点后,翅翼在前方肌肉带动下向下扭转,恢复水平向下扑动,重复以前的运动(图 1(d))。

通过运动分析软件 Movias Pro 对影像的分析,总结出蝉翅翼的运动规律:其上下拍动随时间几乎是正弦变化的,频率是 38.46 Hz;翅翼向下运动时保持水平,在最低点时向上扭转 15°,向上运动时保持倾斜,到达最高点后向下扭转 15°恢复水平;翅翼扑动的最大幅度约为 55.65°(翅翼与水平面夹角)。其拍动角度 θ 和扭转角度 β 的变化规律近似如图 2 所示。

1.2 蝉翅翼运动方程

建立惯性参考系 OXYZ,也称固定坐标系。扑翼飞行时,在翅翼上建立随体坐标系 Oxyz,将其 x 轴定义为沿翅翼弦向, y 轴沿翅翼展向。固定坐标系保持静止不动,而随体坐标系则固着在翅翼上随之运动,在初始时刻($t=0$)固定坐标系与随

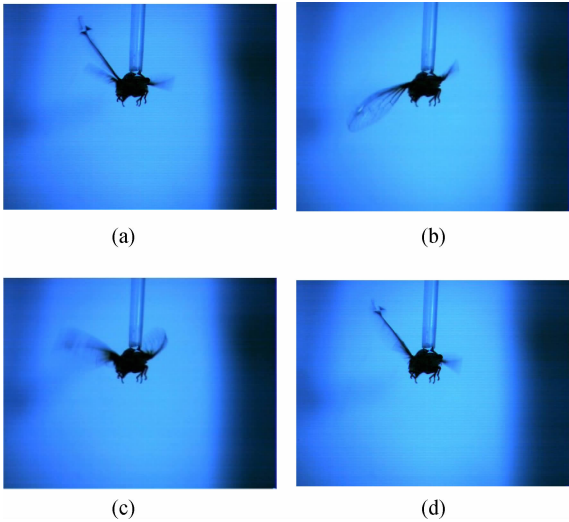


图 1 蝉翅翼一周运动影像

Fig. 1 Periodic movement images of cicada's wing

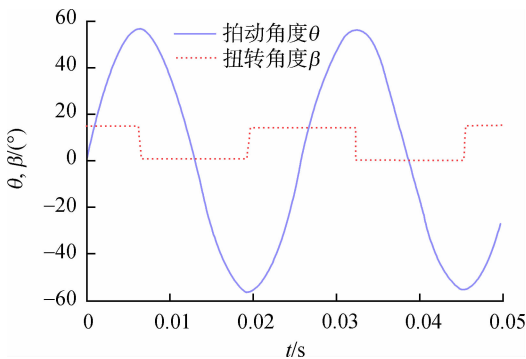


图 2 蝉翅翼的拍动角度和扭转角度随时间变化规律

Fig. 2 Cicada's wings flapping angle and torsional angle varying with time

体坐标系重合。其翅翼运动如图 3 所示。蝉翅翼在绕固定坐标系 Y 轴上下拍动的同时,也在绕随体坐标系 x 轴扭转。图中拍动角度 θ 即拍动平面的轴线与水平面的夹角。

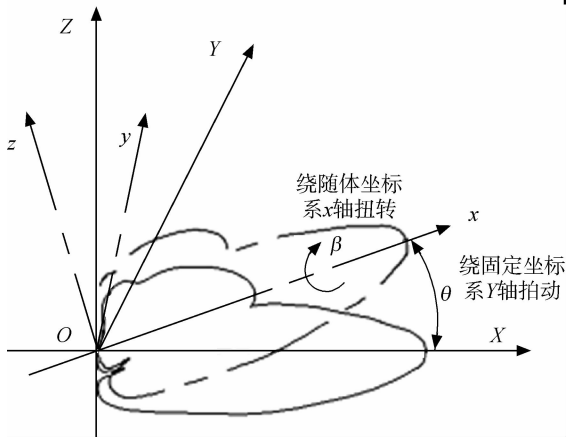


图 3 蝉翅翼运动示意图

Fig. 3 Movement of the cicada's wing

根据分析,三维情形下蝉翅翼的运动可以由以下两个运动方程组成:

1) 绕翅根展向(Y 轴)上下拍动 $\theta(t)$

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(2\pi ft)$$

(1)

2) 绕体轴线(x 轴)扭转运动 $\beta(t)$

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0 & 0 \leq t < 19T/80 \\ 0.5\beta_0 \sin[40\pi f(t - 18T/80)] + 0.5\beta_0 & 19T/80 + nT \leq t < 21T/80 + nT \\ 0 & 21T/80 + nT \leq t < 59T/80 + nT \\ 0.5\beta_0 \sin[40\pi f(t - 56T/80)] + 0.5\beta_0 & 59T/80 + nT \leq t < 61T/80 + nT \\ \beta_0 & 61T/80 + nT \leq t < 99T/80 + nT \end{cases}$$

(2)

其中 f 是拍动频率(Hz), θ_0 是拍动幅值(rad), β_0 是最大扭转角(rad), $T=1/f$ 是拍动周期.

对式(1)、式(2)求导可以得到翅翼拍动和扭转运动的角速度方程:

$$\dot{\theta}(t) = 2\pi f\theta_0 \cos(2\pi ft)$$

(3)

$$\dot{\beta}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 19T/80 \\ 20\pi f\beta_0 \cos[40\pi f(t - 18T/80)] & 19T/80 + nT \leq t < 21T/80 + nT \\ 0 & 21T/80 + nT \leq t < 59T/80 + nT \\ 20\pi f\beta_0 \cos[40\pi f(t - 56T/80)] & 59T/80 + nT \leq t < 61T/80 + nT \\ 0 & 61T/80 + nT \leq t < 99T/80 + nT \end{cases}$$

(4)

通过坐标系转换,可以得到翅翼绕固定坐标系的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的旋转速度分别为

$$\begin{cases} O(X) = \cos\theta\dot{\beta}(t) \\ O(Y) = \dot{\theta}(t) \\ O(Z) = \sin\theta\dot{\beta}(t) \end{cases}$$

(5)

2 数值模拟

2.1 蝉翅翼三维模型

由于将蝉翅翼当作一个整体考虑,因此进行了整体建模,主副翼之间位置的摆放符合蝉实际飞行时主副翼之间的相对位置.

利用高速摄像机拍下蝉翅翼的真实照片,然后严格按照蝉翅翼主副翼外边缘进行扫略,再对图片进行矢量化处理,导入 Pro/E 软件中绘出其边缘轮廓线.实际昆虫翼是薄板状的,且翼面凸凹不平,Rees^[12]认为,从空气动力学角度看,这种翼结构恰与一个略有厚度翼型的功能相近. LUO 等^[13]通过数值模拟,进一步验证了这种凸凹不平的构造并不影响整体拍动运动的气动响应,因此,本文忽略翅面结构,仅对边缘轮廓线拉伸较小厚度,得到蝉翅翼的三维简化模型,如图 4 所示,翅长为 52.5 mm,翅宽为 27.0 mm,翅厚为 20 μm .

2.2 控制方程

本文采用的控制方程为三维不可压 N-S 方程组. 固定坐标系 $OXYZ$ 中三维不可压无量纲 N-S 方程组^[14]如下:

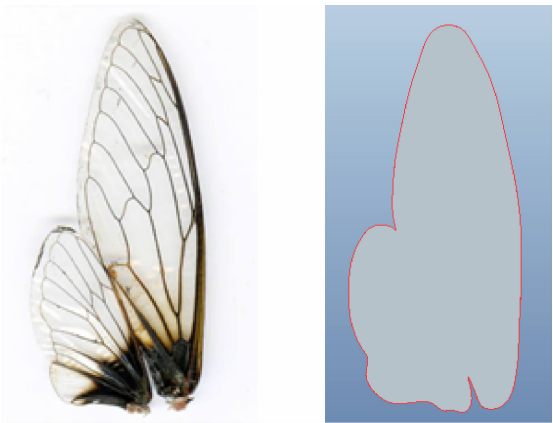


图 4 真实蝉翅翼和三维模型
Fig. 4 Cicada's wing and its 3D model

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

(6)

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

(7)

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

(8)

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

(9)

式中 u, v 和 w 分别为流体沿 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的速度, p 是压力, t 是时间. 上述方程中 Re 是雷诺数, 定义为 $Re=cU/\nu$, 其中 ν 为空气的运动黏度,

U 为翅膀平均拍动线速度, c 为翅膀平均弦长.

2.3 UDF 函数和动网格技术

用户通过自定义函数 UDF 与 Fluent 模块的内部数据进行交流,可以解决一些标准的 Fluent 模块不能解决的问题,例如自己制定模型参数和定义边界条件等.

将翅翼看做刚体,其运动可以通过以下 UDF 函数实现: DEFINE _ CG _ MOTION (name, Thread * dt, vel[], omega[], time, dtime), 将翅翼相对于各坐标轴旋转的角速度 (rad/s) 通过 omega[0] (绕 X 轴旋转), omega[1] (绕 Y 轴旋转) 和 omega[2] (绕 Z 轴旋转) 传递给求解器,实现翅翼的拍动和扭转.

Fluent 中动网格的计算方法有: 弹簧近似光滑法、动态分层法和局部网格重划法. 考虑到翅翼上下拍动造成的变形区域较大, 因此采用弹簧近似法和局部网格重划法来实现网格的更新.

2.4 计算设置

选择绕流区域的大小和网格划分密度对于计算非常重要, 绕流区域过小、网格划分稀疏, 会对计算精度产生较大影响; 而绕流区域过大、网格划分细密, 会使计算复杂增加计算时间. 为此将翼型置于 $400\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的长方体区域内, 并且在翅翼周围建立了一个较小的包围域, 在包围域内的网格划分较为细密, 而整体域的网格划分较为稀疏. 使用 Gambit 软件建立模型, 采用四面体非结构化网格进行网格划分, 共有 217 087 个结点, 1 245 933 个控制体, 最大控制体积 $8.493\,094 \times 10^{-8}\text{ m}^3$, 最小控制体积为 $2.251\,076 \times 10^{-12}\text{ m}^3$.

对于非定常流动, Fluent 中采用有限体积法进行离散, 选择重整化群 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 湍流模型, 对离散方程用 SIMPLEC (semi-implicit method for pressure-linked equations-consistent)^[15] 的压力速度耦合方法进行求解. 用 UDF 编写翅翼的拍动与扭转运动. 由蝉的飞行速度一般为 $2 \sim 8\text{ m/s}$ ^[16], 取平均值 5.0 m/s 为来流速度, 方向水平.

2.5 运动过程中升阻力系数

低雷诺数下, 空气在翅翼的拍动与扭转的复合运动下产生非定常流动, 从而使翼型产生的升力 (F_l) 和阻力 (F_d). 根据翅翼的运动分析, 其在下拍和上拍时的攻角分别为 0° 和 15° , 本文定义沿 Z 轴正方向为升力, 沿 Y 轴正方向为阻力, 升力系数 (C_l) 和阻力系数 (C_d) 定义^[17] 如下:

$$C_l = \frac{F_l}{0.5\rho U^2 S} \tag{10}$$

$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho U^2 S} \tag{11}$$

式中 ρ 为空气密度; S 为翅翼面积.

为了便于对比分析, 本文采用了一个周期内的平均升力系数和平均阻力系数. 另外, 为了表达方便, 也采用了平均推力系数, 平均推力系数 (C_t) 与平均阻力系数大小相等方向相反.

3 模拟结果分析

3.1 算例验证

为了验证本文计算结果的有效性, 对 Dickinson 的果蝇拍动实验进行了数值模拟, 建立了果蝇的拍动模型. 使用 Dickinson 的实验数据: 矿物油密度为 880 kg/m^3 , 模型翼长为 0.25 m , 翼面积为 0.0167 m^2 , 拍动频率为 0.145 Hz , 拍动幅角为 160° , 上下拍动攻角均为 40° , 扭转角度比拍动角度超前 8% . 为了进行直观的对比, 使用 UDF 函数直接计算出了果蝇模型在拍动中的升力 (Fluent 在计算开始时会有突变, 取计算稳定后的第 2 个周期的数据). 本文升力 F_l 计算结果同 Dickinson 实验结果的比较如图 5 所示, 两者趋势吻合很好, 说明利用 Fluent 模拟三维扑翼拍动的非定常流场是可行的.

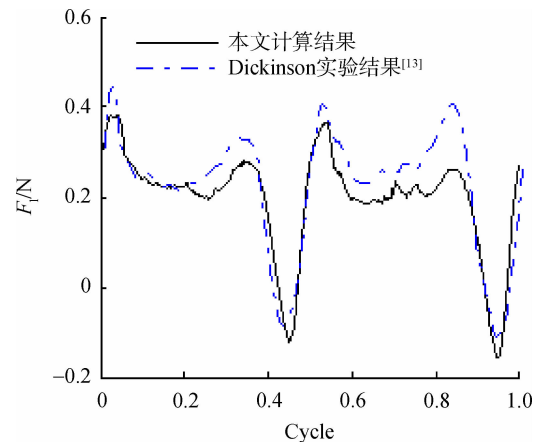


图 5 本文升力计算结果与 Dickinson 实验结果^[3] 的比较
Fig. 5 Comparison of lift between computed results in this paper and experiment data from Dickinson^[3]

3.2 流场分析

研究蝉翅翼的目的是希望能揭示昆虫飞行的机理, 在拍动频率是 40 Hz , 扭转角度为 15° , 拍动幅度为 45° (水平面上下均为 45°), 时间步长设为

0.0001 s, 来流速度 $U_0 = 5 \text{ m/s}$, 计算 700 个时间步长, 迭代了 14000 次. 图 6 为翅翼在一个拍动周期内在距翅根 30 mm 处的 X 截面(翅翼展向)的流场速度和压力云图.

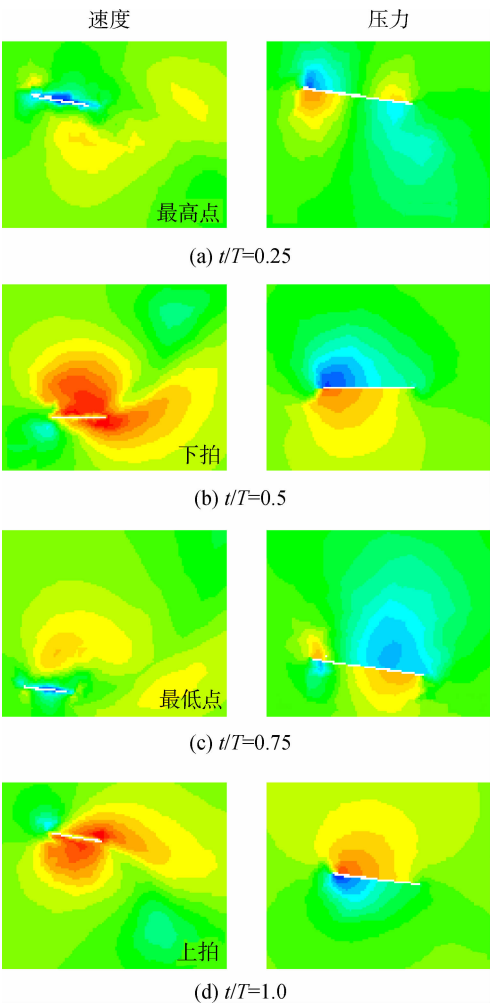


图 6 一个周期的流场速度和压力分布
Fig. 6 A period of field velocity and pressure distribution

当翅翼运动到最高点(最低点)附近时, 此时其拍动速度非常小, 翅翼主要进行扭转运动, 由其速度云图可以看出, 在扭转作用下, 翅翼的前缘、下表面(上表面)附近和距离翅翼尾部较远的地方均出现了高速旋涡, 说明出现了非定常的流动; 在翅翼下拍(上挥)过程中, 翅翼前缘和尾部则出现了低速旋涡, 上表面(下表面)出现了高速旋涡并且此时其上表面(下表面)的空气流速远远大于下表面(上表面), 流速差产生压力差, 使得翅翼产生垂直于翼面向上(下)的力.

3.3 升阻力系数分析

翅翼在下拍过程中与来流方向一致, 在下拍

到最低点时发生扭转, 使翅翼与来流方向形成一定夹角, 保持夹角不变进行上挥, 到最高点时再进行扭转, 恢复与来流方向一致. 其运动过程中升力系数和阻力系数随时间的变化曲线如图 7 所示.

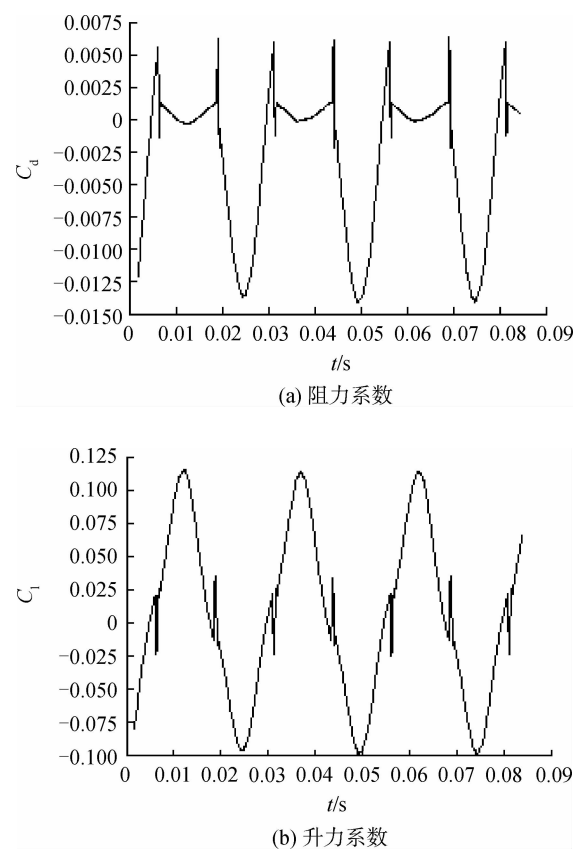


图 7 升力系数和阻力系数随时间的变化曲线
Fig. 7 Curves of lift and drag coefficients varying with time

由图 7(a)可以看出, 在翅翼的下拍阶段(较小下凹段)受到阻力, 在上挥阶段(较大下凹段)受到推力, 并且由于翅翼的扭转作用, 使得上挥阶段的推力系数大于下拍阶段的阻力系数, 平均作用下使翅翼在水平方向受到推力. 由升力系数图可以看出, 在翅翼的下拍阶段(上凸段)升力系数为正, 上挥阶段(下凹段)升力系数为负, 并且由于翅翼的扭转作用, 使得负升力系数幅值小于正升力系数幅值, 平均作用下使翅翼在竖直方向受到升力.

3.4 拍动频率对平均升力系数和平均推力系数的影响($\theta_0 = 45^\circ$, $\beta_0 = 15^\circ$)

平均升力系数($\overline{C_l}$)和平均推力系数($\overline{C_d}$)随拍动频率的变化如图 8 所示. 对平均升力系数来说, 在 10~30 Hz 频率范围内近似保持不变, 在 30~80 Hz 频率范围内缓慢增大. 对平均推力系数来说, 在 10~80 Hz 频率范围内由负值变为正值并

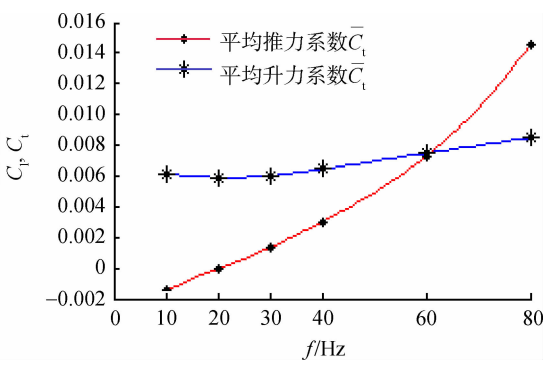


图 8 平均升力系数和平均推力系数随拍动频率的变化
Fig. 8 Average lift coefficients and averaged thrust coefficients varying with flapping frequency

迅速增大,在 20 Hz 左右频率时取得临界点.

3.5 拍动幅值对平均升力系数和平均推力系数的影响 ($f=40\text{ Hz}$, $\beta_0=15^\circ$)

拍动幅值对翅翼的飞行也有较大的影响^[18]. 实际飞行中,翅翼拍动幅值不超过 90° ,这里为了进行理论分析,计算了拍动幅值从 $15^\circ\sim120^\circ$ 时平均升力系数和平均推力系数. 平均升力系数和平均推力系数随拍动幅值的变化关系如图 9 所示,对平均推力系数来说,当拍动幅值在 $15^\circ\sim90^\circ$ 时由负到正并迅速增大,在 $90^\circ\sim120^\circ$ 时迅速减小,其最大值出现在拍动幅值为 90° 附近. 对平均升力系数来说,当拍动幅值在 $15^\circ\sim60^\circ$ 时,平均升力系数近似保持不变;当拍动幅值在 $60^\circ\sim90^\circ$ 时,平均升力系数迅速增大;当拍动幅值在 $90^\circ\sim120^\circ$ 时,平均升力系数又保持不变.

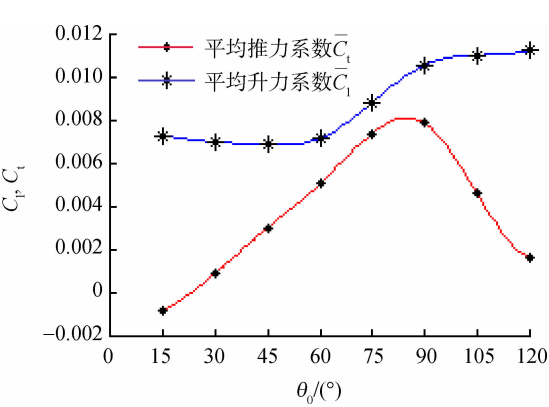


图 9 平均升力系数和平均推力系数随拍动幅值的变化
Fig. 9 Average lift coefficient and averaged thrust coefficients varying with flapping amplitude

3.6 最大扭转角度对平均升力系数和平均推力系数的影响 ($f=40\text{ Hz}$, $\theta_0=45^\circ$)

在翅翼拍动过程中,最大扭转角度是影响翅

翼飞行的重要参数. 改变最大扭转角度,将影响上挥过程中翅翼与来流方向和挥拍方向的夹角,从而引起平均升力系数的变化. 不同最大扭转角度下平均升力系数和平均推力系数的变化关系如图 10 所示. 平均推力系数在最大扭转角度从 $0^\circ\sim30^\circ$ 时缓慢增大,在 $30^\circ\sim52^\circ$ 时缓慢减小,且在这两个范围内平均推力系数为正值,表明翅翼在水平方向上受到推力,其最大值在最大扭转角度为 30° 附近. 平均推力系数在最大扭转角度从 $52^\circ\sim120^\circ$ 时迅速减小,且为负值,表明翅翼在水平方向上受到阻力. 平均升力系数在最大扭转角从 $0^\circ\sim90^\circ$ 时不断增大,在 $90^\circ\sim120^\circ$ 时近似保持不变.

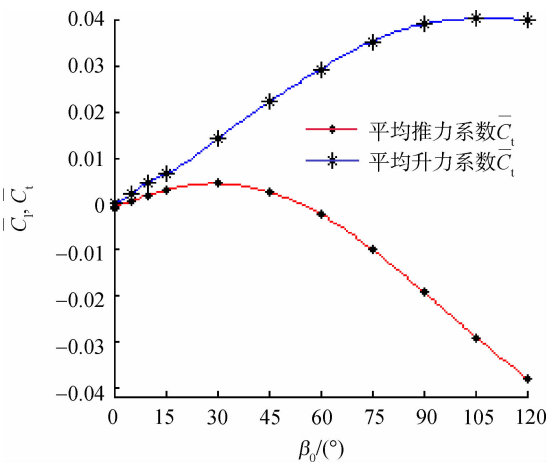


图 10 平均升力系数和平均推力系数随最大扭转角度的变化
Fig. 10 Average lift coefficients and averaged thrust coefficients varying with maximum torsion angle

4 结 论

本文以蝉为研究对象,分析了蝉翅翼的运动方式,并对三维蝉翅翼模型周围流场进行了数值模拟. 通过模拟可以看出:

1) 翅翼在运动过程中绕流在翅翼前缘、尾部、上表面或下表面产生了旋涡,说明出现了非定常的空气流动.

2) 翅翼在下拍运动中产生了较小的阻力和较大的升力;在上挥运动中产生了较大的推力和较小的负升力(与升力方向相反),平均作用下使翅翼产生了用于飞行的推力和升力.

3) 平均升力系数随着拍动频率的增加而增大,随着拍动幅值和最大扭转角度的增加增大到一定值后近似保持不变. 平均推力系数随着拍动频率的增加而增大,而随着拍动幅值和最大扭转角度的增加先增大后减小.

4) 从数值上来看,拍动频率和拍动幅值对平均升力系数的影响较小,而最大扭转角度对平均升力系数的影响较大。

本文在研究过程中只考虑了单翅运动,忽略双翅挥拍和虫体本身以及翅翼的柔性变形等影响,因而下一步要深入考虑这些因素进行翅翼周围流场分析。

参考文献:

- [1] 孙茂,吴江浩.昆虫飞行的高升力机理和能耗[J].北京航空航天大学学报,2003,29(11):970-977.
SUN Mao, WU Jianghao. Unsteady lift mechanisms and energetic in flying insects[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(11): 970-977. (in Chinese)
- [2] 孙茂.昆虫飞行的高升力机理[J].力学进展,2002,32(3):425-434.
SUN Mao. Unsteady lift mechanisms in insect flight[J]. Mechanical Development, 2002, 32(3): 425-434. (in Chinese)
- [3] 兰世隆,孙茂.模型昆虫翼非定常运动时的气动力特性[J].力学学报,2001,33(2):173-182.
LAN Shilong, SUN Mao. Aerodynamic properties of a wing performance unsteady rotational motions[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2001, 33(2): 173-182. (in Chinese)
- [4] Ellington C P, Van Den Berg C, Willmott A P, et al. Leading-edge vortices in insect flight[J]. Nature, 1996, 384: 626-630.
- [5] 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.
- [6] Smith M J C, Wilkin P J, Williams M H. The advantages of an unsteady panel method in modeling the aerodynamic forces on a rigid flapping wings[J]. Journal of Experimental Biology, 1996, 199(5): 1073-1083.
- [7] LIU H, Kawachi K. A numerical study of insect flight[J]. Journal Computational Physics, 1998, 146(1): 124-143.
- [8] SUN Mao, TANG Jian. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion[J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(1): 55-70.
- [9] 刘岚,方宗德,侯宇,等.微型扑翼飞行器的气动建模分析与试验[J].航空动力学报,2005,20(1):22-28.
LIU Lan, FANG Zongde, HOU Yu, et al. Aerodynamic modeling and analysis of flapping-wing MAV[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 22-28. (in Chinese)
- [10] 曾锐.仿鸟微型扑翼飞行器的气动特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.
ZENG Rui. Aerodynamic characteristics of flapping-wing MAV simulating bird flight[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [11] 贺红林,周翔.柔性扑翼非定常涡格法气动计算的改进与实现[J].航空学报,2010,31(6):1122-1126.
HE Honglin, ZHOU Xiang. Implementation of an improved unsteady vortex lattice method for flexible flapping-wing aerodynamic computation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1122-1126. (in Chinese)
- [12] Rees C. Form and function in corrugated insect wings[J]. Nature, 1975, 256: 200-203.
- [13] LUO Guoyu, SUN M. The effects of corrugation and wing planform on the aerodynamic force production of sweeping model insect wings[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 21(6): 531-541.
- [14] 吴江浩,孙茂.熊蜂用于控制飞行的气动力和力矩[J].应用数学和力学,2008,29(3):301-305.
WU Jianghao, SUN Mao. Control of flight forces and movements by the flapping wings of a model bumble-bee[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(3): 301-305. (in Chinese)
- [15] 周超英,林玉峰.扑翼气动力特性的数值研究[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(9):1403-1409.
ZHOU Chaoying, LIN Yufeng. Numerical study on aerodynamic performance of flapping wings[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(9): 1403-1409. (in Chinese)
- [16] Oberdorster O, Grant P R. Predator foolhardiness and morphological evolution in 17-year cicadas[J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2007, 90(1): 1-13.
- [17] 左德参.仿生微型飞行器若干关键问题的研究[D].上海:上海交通大学,2007.
ZUO Decan. Key problems study on flapping-wing micro aerial vehicles[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [18] 苗文博,程暮林.昆虫振翅三维情形数值分析[J].水动力学研究与进展: A 辑,2005,20(suppl. 1): 859-866.
MIAO Wenbo, CHENG Mulin. Numerical simulation of insect flight in three-dimensional condition[J]. Journal of Hydrodynamics: Series A, 2005, 20(suppl. 1): 859-866. (in Chinese)