微型飞行器的仿生力学
——蝴蝶飞行的气动力特性

孙 茂 黄 华

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 研究一种蝴蝶(Morpho peleides)前飞时的气动力特性. 在运动重叠网格上数值求解 Navier-Stokes 方程,对蝴蝶前飞时左、右翅膀的拍动运动以及跟随身体一起的俯仰运动进行计算. 结果表明:蝴蝶主要用"阻力原理"作拍动飞行,即平衡身体重量的举力和克服身体阻力的推力均主要由翅膀的阻力提供. 蝴蝶翅在下拍中产生很大的瞬态阻力(平行于拍动运动的力),对流动结构分析表明,产生此力的机制如下:每次下拍中产生了一个由前缘涡, 翅端涡及起动涡构成的强"涡环",其包含一个沿拍动方向的射流,产生此射流的反作用力即翅膀的阻力. 平衡身体重量的举力主要由翅膀下拍中产生的阻力提供. 上拍时(由于身体上仰,上拍实际是向后和向上拍动的),翅也产生阻力,但较下拍时小的多. 平衡身体阻力的推力主要由翅膀上拍中产生的阻力提供.

关 键 词: 拍动飞行; 蝴蝶; 气动力; N-S 方程数值解

中图分类号: V 211.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1146-06

Biomimetic mechanics of micro-air vehicles
——the aerodynamic force of butterfly in forward flight

Sun Mao Huang Hua

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The aerodynamics force generation of a butterfly (Morpho peleides) in forward flight was studied, using the method of numerically solving the Navier-Stokes equations in moving overset grids. The results shows that the vertical and thrust forces of the wings, which balances the weight and the body drag, are mainly contributed by the drag of the wings. During the downstroke, a strong 'vortex ring', consistes of the leading edge vortex, the wing tip vortices and the starting vortex, was generated. The 'vortex ring' containes a jet parallel to the wing flapping direction, and the jet produces a large instantaneous drag. The vertical force is mainly due to the drag of the downstroke. The thrust force is mainly due to the drag of the wings in the upstroke.

Key words: flapping flight; butterfly; aerodynamic force; Navier-Stokes simulation

微型飞行器(MAV)近年来为人们广泛关注. 若采用常规气动布局,MAV 会有低雷诺数下不能产生足够升力以平衡重量等问题. 具有高超飞行能力的昆虫可以为 MAV 所借鉴. 从 Weis-Fogh[1] 对台湾小黄蜂观察研究,提出"合拢/打开"机制到现在的几十年时间内,人们对蝇、蜂、蛾、蜻蜓等昆虫做过大量的实验和数值计算研究,对这些昆虫飞行的空气动力学原理已经有了一定的认识. Ellington[2] 等在对鹰蛾及其自动拍动模型的流场显示实验中发现昆虫翅膀在拍动过程中,翅前缘

收稿日期: 2006-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10472008)

作者简介: 孙 茂(1955-),男,贵州贵阳人,"长江学者奖励计划"特聘教授, m. sun@263. net.

形成的涡从翅的根部呈螺旋形流向翅的梢部,在随后的运动中保持不脱落,他们称此为不失速机制. Dickinson[3]等用实验的方法研究了模型果蝇翅的拍动运动,在拍动过程中升力一直保持较高的值,证实了 Ellington 等的不失速机制;他们还发现在拍动的开始和结束阶段都有一个大的升力峰,他们用另外 2 种机制,即"转动环量"机制和"尾迹捕获"机制来解释这 2 个升力峰. 但是 Sun 和 Tang[4]用数值计算研究了果蝇翅膀的拍动运动后,提出了不同的解释机制. 他们认为拍动开始阶段的升力峰是由于翅的快速加速运动产生的,而结束阶段的升力峰是由于翅的快速上仰产生的.

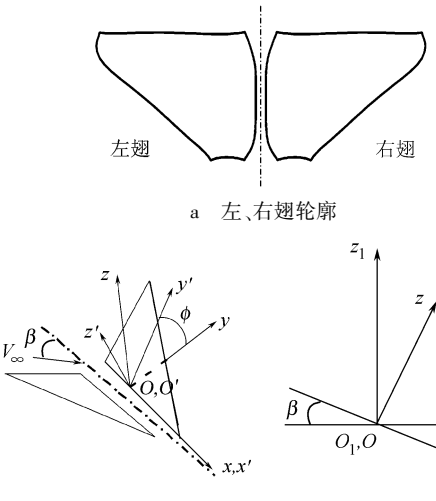
与前面提到的昆虫不同,蝴蝶的翅膀在拍动过程中没有明显的翻转运动,但身体在飞行中有显著的俯仰运动;而且蝴蝶翅的拍动频率比较低,只有 10 Hz 左右(果蝇约为 250 Hz);另外翅的展弦比比较小,一般在 1.5 左右(果蝇约为 3.0). 这些特点是否蕴含着新的气动机制呢? Dudley[5], Wootton[6], Backenbury[7], Brodsky[8]等曾对多种蝴蝶的飞行作过观测研究,但是关于蝴蝶飞行时的非定常运动的气动力特性的研究工作却很少,人们对于蝴蝶飞行的空气动力学原理还不是很了解.

Dudley[5]使用高速摄影技术对几十种蝴蝶的自由飞行(前飞)进行观测实验,同时还测量其形态学参数,本文选取其中的一种(Morpho peleides)作前飞运动的数值模拟研究. Dudley 在观察中还发现蝴蝶的前、后翅在飞行中一般都是重叠在一起的,很少分开,为了计算方便本文把重叠在一起的前、后翅当作一个翅来模拟其拍动,最后对其流动特性进行分析,从而初步了解蝴蝶飞行的气动原理.

1　方　法

1.1　坐标系,翅几何参数及运动参数

本文用到 3 个坐标系,坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 为惯性系(如图 1 所示),$O_1x_1y_1$ 平面为水平面,$O_1x_1z_1$ 平面为对称面;坐标系 $Oxyz$ 是固连在身体上的随体坐标系,Ox 轴与 O_1x_1 轴的夹角 β 为飞行时身体俯仰角,Oy 轴与 O_1y_1 轴重合;坐标系 $O'x'y'z'$ 为固连在翅上的随体坐标系,$O'x'$ 轴与 Ox 轴重合,$O'y'$ 轴与 Oy 轴的夹角 ϕ 即为翅在拍动过程中的方位角. 为了作图方便,图 1b 中的翅用三角形表示.



a　左、右翅轮廓

b　翅拍动示意图　　c　身体俯仰运动示意图

图 1　翅轮廓,坐标系,翅拍动及身体俯仰运动示意图

运动开始后,左、右两翅分别向下拍动,拍动平面与身体轴线(Ox 轴)的夹角保持为 90°不变. 拍动速度为 $\dot{\phi}$,无量纲拍动速度 $\dot{\phi}^+ = \dot{\phi}c/U$,翅的平均弦长 c 为 37.8 mm,参考速度 $U = 2f\phi_A r_2 = 0.56$ m/s,是一个周期内 r_2 处的平均拍动速度,r_2 为翅的面积二阶矩($= 0.48R$),翅的展长 R 为 60.5 mm,拍动频率 f 为 6.9 Hz,拍动幅度 $\phi_A = 80°$,其中上拍最大角为 65°,下拍最大角为 −15°. 另外前飞速度 $V_\infty = 1.28$ m/s. 以上数据均根据文献[5]中的测量结果确定. 翅的拍动采用余弦模式(如图 2 所示).

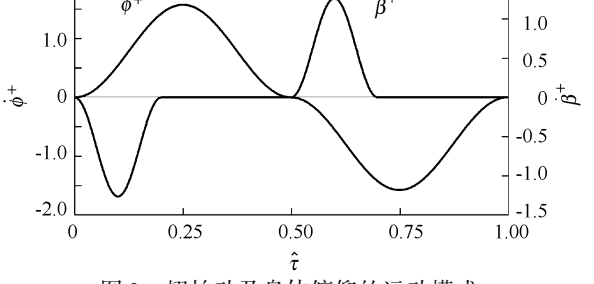


图 2　翅拍动及身体俯仰的运动模式

Dudley[5]认为蝴蝶在飞行中翅膀几乎没有翻转,但是身体有明显的俯仰运动,同时翅膀也跟随身体一起俯仰,不过到目前为止还没有关于蝴蝶身体俯仰运动过程的详细观测结果. Brodsky[8]指出:下拍时,蝴蝶的身体几乎处于水平,而在上拍时,却处于近似垂直的方向.

本文据此给定身体的俯仰运动,无量纲角速度 $\dot{\beta}^+ = \dot{\beta}c/U$,并令其只在下拍及上拍刚开始时俯仰,俯仰时间为 $0.2\tau_c$,$\tau_c = tU/c$ 为运动的一个周期,$\hat{\tau} = \tau/\tau_c$(见图 2).

1.2 N-S 方程及计算方法

在惯性坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 下,三维非定常不可压 N-S 方程的无量纲形式为

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial \tau}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{3}$$

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

式中,u,v 和 w 是无量纲速度的 3 个分量;p 是无量纲压力;τ 是无量纲时间;Re 是雷诺数. 无量纲化时,参考速度、长度和时间分别取为 U,c 和 $\frac{c}{U}$.

本文使用拟压缩性方法来求解上述方程,此算法最初由 Rogers 等[9-11]提出,在连续方程中加入压力对虚拟时间的偏导数项,使整个方程组成为双曲型. 每个物理时间步拟用时间进行内迭代,对流项采用 Roe 格式后进行通量差分裂,这种迎风格式得到对角占优的矩阵,然后用线性 Gauss-Seidel 方法进行迭代求解. Rogers 和 Pulliam[12]后来又将上述拟压缩性算法从单体网格延伸到重叠网格. 重叠网格方法是一种常用的研究多体流动的网格技术,由于本文要研究有相对运动的左、右两翅的拍动运动,因此本文的计算都使用重叠网格方法. 重叠网格由两部分组成(网格分布见图 3),其一是绕各翅的贴体曲线网格(翅表面形状参见图 1a),另一部分是背景的笛卡尔网格,贴体网格分布到离翅面一定距离处,就嵌入到背景笛卡儿网格中,重叠处两个网格单元的大小尽量保持一致. 由于网格重叠,形成“洞”及“洞边界”,而翅网格在背景网格中不停的运动,“洞”和“洞边界”也在不断的变化,本文使用 Meakin[13]提出的算法来确定边界点及其所在的网格单元. 关于利用此方法进行昆虫飞行数值模拟计算的详细介绍可见 Sun 和 Lan[14]及 Sun 和 Yu[15]的研究工作.

本文使用两套网格. 第一套为粗网格,翅网格的大小为 40×77×55,背景网格的大小为 78×74×74,另一套为密网格,翅网格的大小为 50×105×66,背景网格的大小为 101×90×90. 从图 4

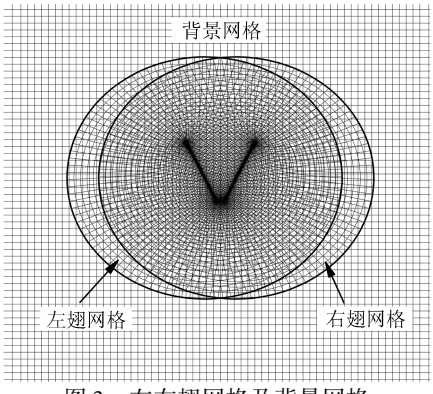


图 3 左右翅网格及背景网格

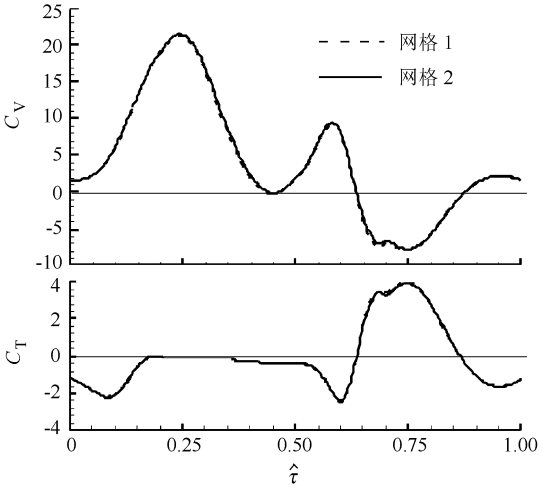


图 4 一个拍动周期内的 C_V 和 C_T

的气动力系数曲线可以看出,两套网格的计算结果几乎完全重合. 在气动力调平衡过程中,使用第一套网格以节省计算时间,最后使用第二套网格计算平衡时的流场,以便于分析.

Sun 和 Wu[16]使用单体网格计算模型果蝇翅拍动时的气动力,并与相关实验结果进行比较,验证了程序的正确性. 最近,Sun 和 Yu[15]使用重叠网格法计算一对翼型的打开运动,其结果与相关实验的测量结果吻合得很好. 他们的这些工作都表明,本文使用的数值计算方法是可靠的.

1.3 气动力计算

通过求解 N-S 方程,可以得到每一时间步各网格点的速度和压力,积分某一时间步翅表面的压力和粘性力就可以得到该时间步的气动力. 本文定义:翅的升力 l 为垂直于拍动速度方向的力(即与 Ox 轴平行,沿 Ox 轴负方向为正),翅的阻力 d 为平行于拍动速度方向的力(沿 Oz 轴正方向为正). 将升力和阻力分解到 O_1z_1 轴和 O_1x_1 轴,就可以得到蝴蝶的举力 V 和推力 T:

$$V=d\cos\beta+l\sin\beta$$

$$T=-d\sin\beta+l\cos\beta$$

举力系数为　　$C_V = \dfrac{V}{0.5\rho U^2 S}$

式中,ρ 为流体密度;S 为翅面积. C_T, C_l, C_d 的定义与此相似.

2　结果与讨论

2.1　平均气动力与重量及身体阻力的平衡

蝴蝶飞行时翅膀的举力平衡体重,推力平衡身体阻力. 本文的数值模拟计算采用前文所述的参数以及运动模式,同时通过调整身体的俯仰角来达到力的平衡. 当俯仰角变化范围为 28° ~0° 时,举力和推力分别与体重以及身体的阻力平衡.

平衡时一个拍动周期内,翅的平均举力系数 $\bar{C}_V = 3.99$,平均推力系数 $\bar{C}_T = 0.07$,翅的总面积 $S = 45.46\ \mathrm{cm}^2$,参考速度 $U = 0.56\ \mathrm{m/s}$,可以算出两翅共同产生的举力为 3.56×10^{-3} N,推力为 6.0×10^{-5} N. 蝴蝶的重量为 3.51×10^{-3} N,可见举力足够支撑其飞行. 目前还没有前飞时蝴蝶身体阻力的准确数据,不过 Dudly[17] 认为蝴蝶的身体无量纲参数与熊蜂相似,根据 Dudly[18] 等关于熊蜂身体气动力的实验结果,可以估算蝴蝶身体的阻力,6.0×10^{-5} N 的推力基本可以平衡其身体前飞时的阻力.

2.2　拍动周期内气动力随时间的变化

前面讨论了一个周期内的平均气动力系数,现在来考察气动力的时间变化过程,了解蝴蝶翅是怎样产生飞行所需的举力和推力的.

图 4 是一个周期内举力及推力系数的时间过程曲线,可以看到,前半个运动周期(对应翅的下拍),举力有一个很大的正峰值,而推力却基本位于 0 附近;后半个运动周期(对应翅的上拍),举力有一个小的多的负峰值,而推力此时却存在较大的正值.

图 5 为一个周期内阻力和升力系数的时间过程曲线,可以发现,前半个运动周期阻力系数 C_d 有一个很大的正峰值(约为 21),后半个运动周期 C_d 有一个相对小很多的负峰值(约为 -10). 另外,很明显在整个拍动过程中 C_d 比 C_l 要大很多,一个周期内的平均阻力系数和平均升力系数分别为 3.97 和 0.29,可见举力和推力基本上都是由阻力产生的.

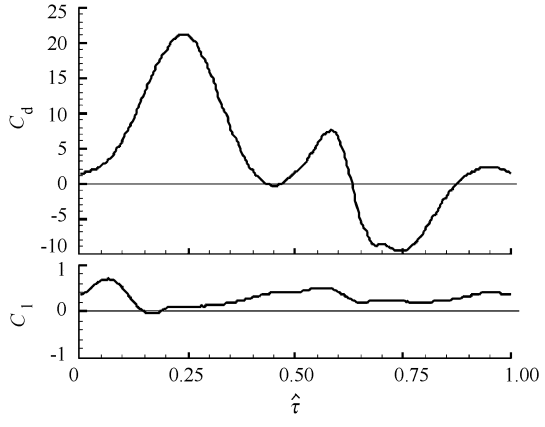


图 5　一个拍动周期内的 C_d 和 C_l

结合图 2 中的运动速度变化曲线可以发现,下拍时,身体几乎一直是水平的,翅膀上的大阻力提供平衡身体重量所需的举力;上拍时,由于身体的上仰,负的阻力指向前下方,由此产生平衡身体阻力所需的推力,虽然此时也产生负的举力,但是绝对值比下拍时小很多,因此一个拍动周期内,平均举力足够平衡体重.

由此可知,蝴蝶正是利用身体的俯仰来起到与果蝇等其他昆虫翅膀的翻转运动类似的作用.

2.3　流动结构分析及气动力产生机制

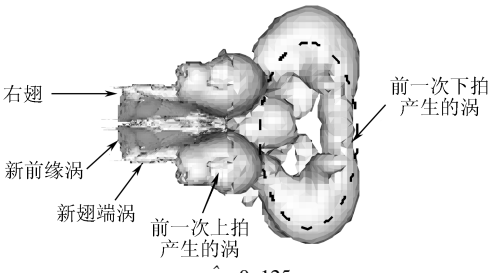
图 6 给出了拍动的不同时刻左右两翅附近流场的等涡量面的俯视图.

下拍运动开始后,左、右两翅对称地从一个较小的夹角(50°)打开向两边拍动,此时两翅的前缘和端部分别形成较强的前缘涡(LEV)和翅端涡(图 6a),同时,翅下游还分别存在于上一个拍动周期的下拍和上拍过程中形成的涡. 在随后的拍动运动中,前缘涡和翅端涡(翅端涡延续到翅后缘,该部分翅端涡也就是起动涡)在短时间内发展为一"涡环"(图 6b),这一过程对应着大的涡量矩随时间的变化率. 这刚好可以解释从 $\tau = 0$ 到 $\tau \approx 0.25\tau_c$ 这段时间内,十分大的 C_d 峰值(见图 5)的产生原因.

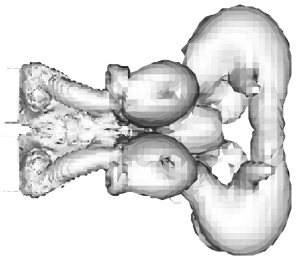
图 7 为 $\tau = 0.25\tau_c$ 时 AA' 和 BB' 截面的等涡量线图,考察其中的等涡量线,可以更清楚地看出前缘涡与翅端涡的结构,在这些涡的共同作用下,两翅之间的区域形成了很强的向下流动(见图8 BB' 截面的速度矢量示意图),即射流,这也从物理上解释了十分大的 C_d 峰值的产生原因. 而在此后阶段 C_d 的下降是由于拍动速度减小,同时在较大的前方来流的作用下,翅面上的涡开始变得松散并且向后移动、脱落(见图 6c、图 6d).

在随后的上拍过程中,上翅面没有新的涡形成,同时下拍时产生的"涡环"继续向后脱落,并且在流体的粘性作用下逐渐耗散.

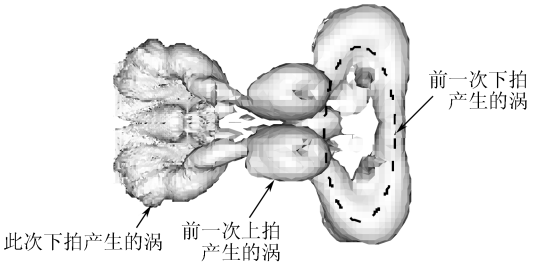
上拍运动开始后,左、右两翅的下翅面也产生前缘涡和翅端涡,而且明显比下拍时上翅面产生的涡要弱的多,这是由于上拍开始时两翅间的夹角比较大(150°),而且由于身体的上仰,拍动运



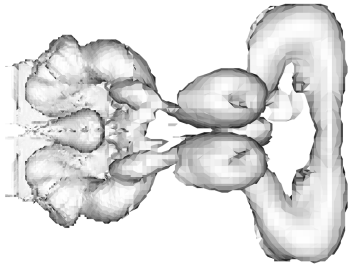
a $\hat{\tau}=0.125$



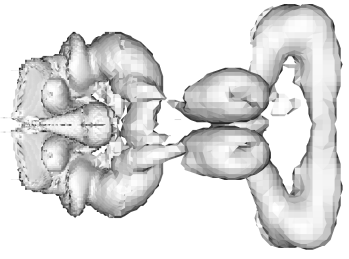
b $\hat{\tau}=0.25$



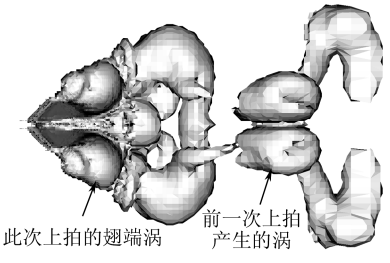
c $\hat{\tau}=0.5$



d $\hat{\tau}=0.625$

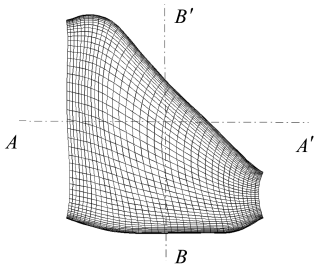


e $\hat{\tau}=0.75$

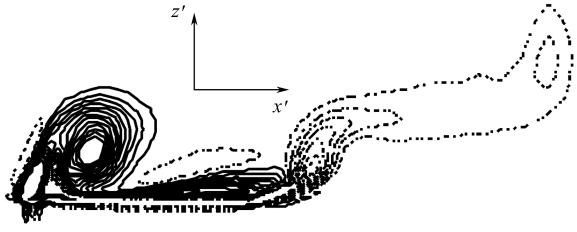


f $\hat{\tau}=1.0$

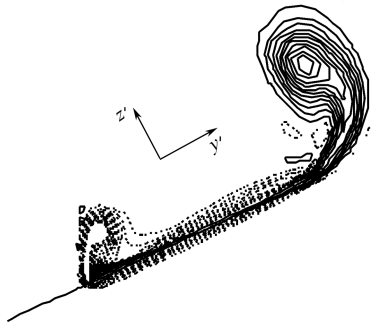
图 6 一个周期内不同时刻翅面附近流场的等涡量面俯视图



a 单翅 AA' 及 BB' 截面位置



b AA' 截面等涡量线



c BB' 截面等涡量线

图 7 $\hat{\tau}=0.25$ 时右翅 AA' 和 BB' 截面等涡量线

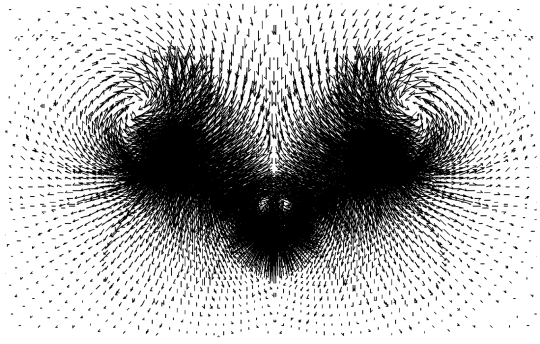
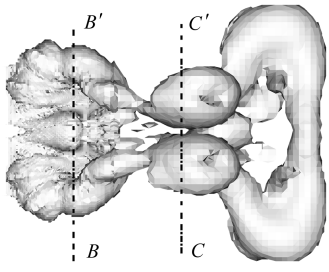


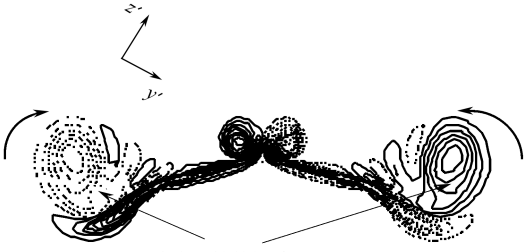
图 8 $\hat{\tau}=0.25$ 时 BB' 截面的流场速度矢量图

动方向与来流方向的夹角变小. 因此上拍时阻力的峰值比下拍时的要小的多. 同样由于拍动速度的减小以及来流的作用,下翅面的涡在随后的运动中也后移,并从翅端部翻到上翅面脱落(见图 6e、图 6f). 这些正好可以解释图 5 中 C_d 在上拍过程中的变化($\tau=0.5\tau_c \sim 1.0\tau_c$).

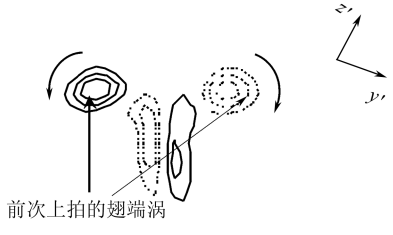
图 9 为 $\tau=0.5\tau_c$ 时 BB' 和 CC' 截面的等涡量线图,考察其中的等涡量线,可以发现,上拍时产生的涡的旋向与下拍时的相反,因此上拍时的阻力与下拍时的方向相反.



a　双翅 *BB′*及 *CC′*截面位置



b　*BB′*截面等涡量线



c　*CC′*截面等涡量线

图 9　$\hat{\tau}=0.5$ 时左右两翅 *BB′*和 *CC′*截面等涡量线

3　结　论

蝴蝶主要是用“阻力原理”作拍动飞行的,即平衡身体重量的举力和克服身体阻力的推力均主要由翅膀的阻力提供. 蝴蝶翅在下拍中产生很大的瞬态阻力(平行于拍动运动的力),对流动结构分析表明,产生此力的机制如下:每次下拍中产生了一个由前缘涡,翅端涡及起动涡构成的强“涡环”,其包含一个沿拍动方向的射流,产生此射流的反作用力即翅膀的阻力. 平衡身体重量的举力主要由翅膀下拍中产生的阻力提供. 上拍时(由于身体上仰,上拍实际是向后和向上拍动的),翅也产生阻力,但较下拍时小得多. 平衡身体阻力的推力主要由翅膀上拍中产生的阻力提供.

参考文献（References）

[1] Weis-Fogh T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanism for lift production[J]. J Exp Biol, 1973, 59: 169-230

[2] Ellington C P, Van den Berg C, Willmott A P. Leading edge vortices in insect flight[J]. Nature, 1996, 384: 626-630

[3] Dickinson M H, Lehmann F O, Sane S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight[J]. Science, 1999, 284: 1954-1960

[4] Sun M, Tang J. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion[J]. J Exp Biol, 2002, 205: 55-70

[5] Dudley R. Biomechanics of flight in neotropical butterflies: morphometrics and kinematics[J]. J Exp Biol, 1990, 150: 37-53

[6] Betts C R, Wootton R J. Wing shape and flight behaviour in butterflies (lepidoptera: papilionoidea and hesperioidea): a preliminary analysis[J]. J Exp Biol, 1988, 138: 271-288

[7] Backenbury J H. Kinematics of take-off and climbing flight in butterflies[J]. J Zool, Lond, 1991, 224: 251-270

[8] Brodsky A K. Vortex formation in the tethered flight of the peacock butterfly Inachis Io L (Lepidoptera, Nymphalidae) and some aspects of insect flight evolution[J]. J Exp Biol, 1991, 161: 77-95

[9] Rogers S E, Kwak D. Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations[J]. AIAA Journal, 1990, 28: 253-262

[10] Rogers S E, Kwak D, Kiris C. Steady and unsteady solutions of the incompressible Navier-Stokes equations[J]. AIAA Journal, 1991, 33: 2066-2072

[11] Rogers S E. On the use of implicit line-relaxation and multizonal computations[R]. AIAA-91-1611, 1991

[12] Rogers S E, Pulliam T H. Accuracy enhancements for overset grid methods for moving body problems[R]. AIAA-94-0523, 1994

[13] Meakin R L. On the spatial and temporal accuracy of overset grid methods for moving body problems[R]. AIAA-94-1925, 1994

[14] Sun M, Lan S L. A computational study of the aerodynamic forces and power requirements of dragonfly (Aeschna juncea) hovering[J]. J Exp Biol, 2004, 207: 1887-1901

[15] Sun M, Yu X. Flows around two airfoils performing fling and subsequent translation and translation and subsequent clap[J]. Acta Mechanica, 2003, 19:103-117

[16] 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: 3065-3083

[17] Dudley R. Biomechanics of flight in neotropical butterflies: aerodynamics and mechanical power requirements[J]. J Exp Biol, 1991, 159: 335-357

[18] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of foreward flight in bumblebees II: quasi-steady lift and power requirements[J]. J Exp Biol, 1990, 148: 53-88