

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.03.001

昆虫的扑翼轨迹及高升力机理

吉爱红 沈欢 李长龙 王寰 俞志伟

(南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所,南京,210016)

摘要:通过昆虫飞行运动学测试系统测试了约束状态下蜻蜓、独角仙和鸣鸣蝉等 3 种昆虫飞行时的各项参数,分析了 1 个周期的扑翼过程、扑翼轨迹和翅膀变形等。蜻蜓的扑翼频率为 22 ± 3 Hz,独角仙的扑翼频率为 30 ± 5 Hz,鸣鸣蝉的扑翼频率为 39 ± 6 Hz;蜻蜓的翼尖轨迹为“8”字形,独角仙为类“8”字形,鸣鸣蝉为椭圆形;发现在下扑和仰旋阶段,翅膀形状近似为伞状,这种伞状效应能有效提高升力。研究昆虫飞行不同拍翅模式下的升力特性对微型飞行器的机动飞行设计有参考意义。

关键词:昆虫;扑翼;飞行翅;升力;轨迹

中图分类号:O355

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)03-0289-06

Flapping Wing Trajectory and Lift Mechanism of Insects

JI Aihong, SHEN Huan, LI Changlong, WANG Huan, YU Zhiwei

(Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Flight parameters of tethered dragonflies (*Anax goliathus*), Hercules beetles (*Allomyrina dichotoma*), and cicadas (*Oncotympane maculaticollis*) are measured by insects flight kinematics measurement system. The flapping trajectory of wing tip, deformation of wing are analyzed in the process of the flapping. The result shows that the wings' flapping frequency of dragonflies, Hercules beetles, and cicadas are 22 ± 3 , 30 ± 5 and 39 ± 6 Hz, respectively. Furthermore, the flapping trajectory of dragonflies is "8" shape, beetles's is similar to "8" shape and cicadas's is ellipse shape. In the process of downstroke and supination when insects flapping, the structure of the wing looks like umbrella-shaped. The umbrella-shaped mode can raise the lift force effectively. The study of insects' wings flapping mode can inspire the design of man-made micro-air vehicle(MAV).

Key words: insects; flapping; flying wings; lift force; trajectory

昆虫飞行过程中的复杂扑翼运动是其能够产生瞬时升力和高升力并保持高效、灵活机动飞行的关键。Weisfogh 通过对黄蜂的飞行研究提出了昆虫扑翼飞行产生瞬时升力的 Clap-Fling 机制^[1]。Dickinson 等通过活体昆虫吊飞实验以及机械翅在

一个装满矿物油的油罐中的飞行模拟实验,得出了昆虫依靠延迟失速、旋转环流与尾流捕获的共同作用来产生高升力的结论^[2]。近年来,国内外的学者对上述机制中前缘涡的结构、演变及其稳定性进行了进一步研究。孙茂等系统研究了典型飞行状态

基金项目:国家自然科学基金(51375232,51475230)资助项目;江苏省重点研发计划(社会发展)(BE2017766)资助项目;研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20171510)资助项目。

收稿日期:2018-04-01;**修订日期:**2018-04-27

作者简介:吉爱红,男,研究员,博士生导师,主要研究方向:仿生机构、仿生机器人等,已发表论文 100 余篇,专利 20 余项。

通信作者:吉爱红, E-mail: meeahji@nuaa.edu.cn.

引用格式:吉爱红,沈欢,李长龙,等.昆虫的扑翼轨迹及高升力机理[J].南京航空航天大学学报,2018,50(3):289-294.
JI Aihong, SHEN Huan, LI Changlong, et al. Flapping wing trajectory and lift mechanism of insects[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(3):289-294.

下动物(蝇、蜂等昆虫、尺寸小的鸟和蝙蝠)作拍动运动时的气动力和流动特性、动物飞行的新推进机制、动物飞行的控制和增稳方式、机动飞行的高升力机理及控制原理等^[3-7]。吴子牛等研究了昆虫扑翼悬停飞行尾涡的影响,给出了拍动翅上的周期平均升力与涡环运动的半解析表达式^[8]。Dickinson等测量了果蝇作 Saccade 机动时身体和翅膀的运动学参数,研究了果蝇飞行中的身体平衡^[9-11]。陈伟等对大量昆虫进行吊飞实验,得出了昆虫翅振频率与翅形态、翅面积和身体质量等结构参数的联系^[12]。Lee 等研究了具有低展弦比的蝴蝶翼周围流场,发现当迎角超过 10° ,随着迎角的增加,流场变得不稳定,阻力会显著增加而升力仅仅逐渐变大^[13]。Henningsson 等通过大体积粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)实验方法首次发现了沙漠蝗虫扑翼过程中由“Kelvin-Helmholtz 不稳定机制”产生的位于剪切层的次级涡旋^[14]。Ortega Ancel 等发现蝴蝶扑翼飞行通过伸展前翅增加翼展使升阻比达到 6.28,从而显著提高了升力增强飞行机动性^[15]。由于各物种间翼型结构及雷诺数的差别,鸟类(除了蜂鸟)的飞行主要依赖于翼型的流线型结构以及初级飞羽的构型变化,昆虫、蜂鸟和蝙蝠的飞行主要依赖于前缘涡的环量增强作用以及尾涡俘获等非定常空气动力学机制。后者体现了自然界中微小型飞行生物的共同特征,且翅型结构相对简单,是微型仿生扑翼飞行器的理想原型^[16]。本文对蜻蜓(*Anax goliathus*)、独角仙(*Allomyrina dichotoma*)和鸣鸣蝉(*Oncotympane maculaticollis*)等 3 种昆虫开展系栓状态下的扑翼飞行实验,对其扑翼过程、扑翼轨迹、翅膀变形和升力特性进行了分析和讨论。

1 实验材料与方法

蜻蜓、独角仙和鸣鸣蝉成虫在夏季有较强的飞行能力,因此昆虫运动学测试实验安排在夏季进行。蜻蜓和鸣鸣蝉采集于紫金山麓,独角仙可从淘宝网购买,这样能够保证昆虫的活力和充足的数量。实验时室温为 $22\sim 25^\circ\text{C}$ 。实验昆虫的身体形态参数如表 1 所示。

表 1 昆虫身体形态参数及实验数据

Tab. 1 Morphological paramaters of insects and experimental data

昆虫	蜻蜓	独角仙	鸣鸣蝉
数量/只	10	15	13
质量/g	0.30 ± 0.01	7.00 ± 1.00	4.50 ± 0.20
体长/mm	50 ± 3	60 ± 5	50 ± 2
翼展/mm	53 ± 3	82 ± 4	62 ± 3
实验量/次	50	75	65

昆虫飞行运动学测试系统由两台高速摄像机(i-SPEED3, Olympus, 日本)组成(图 1),1 台高速摄像机的 Trigger in 与另 1 台高速摄像机的 Trig out 相连接,就可以通过设置一台高速摄像机的参数来进行 2 台高速摄像机的图像同步记录与采集。高速摄像机的拍摄频率为 1 500 帧/s,分辨率为 $1\ 280\times 1\ 024$ 。实验时用 502 胶水将昆虫的腹板固定在支架上,两台高速摄像机成 90° ,以固定昆虫的支架平面的中心为坐标原点。设定 1 台高速摄像机的拍摄图像坐标平面为 xoy ,另 1 台为 $yozy$,则两台高速摄像机的图像可形成 x, y 和 z 的 3 维空间图像。实验后,在 SigmaScan 软件(SigmaScan Pro5.0, SPSS 公司,美国)中将拍摄记录的 3 种昆虫的左右翅膀扑动图像的坐标点进行转化处理,并用 MATLAB R016 对数据进行分析。

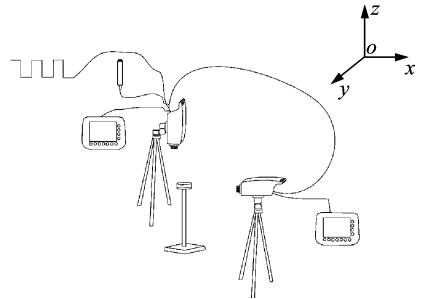


图 1 昆虫飞行运动学测试系统

Fig. 1 Measurement system of insect flight kinematics

2 实验结果与分析

观察发现,蜻蜓的后翅轮廓尺寸相对于前翅稍大,后翅翼展大于前翅翼展;另一方面,后翅面的脉络较前翅面更为清晰,翼尖点在图像中易于确定,因此分析蜻蜓的扑翼过程时选择后翅的扑动图像进行处理分析。独角仙的前翅为鞘翅,其主要作用是保护身体;后翅为飞行翅,因此以独角仙的后翅为对象开展扑动过程分析。鸣鸣蝉的前翅轮廓明显大于后翅,扑动过程中,后翅几乎不可见,而且升力主要由前翅的扑动产生,因此以鸣鸣蝉的前翅作为研究对象。

2.1 昆虫翅膀扑动过程

由记录的图像分析可知,3 种昆虫翅膀扑动 1 个周期大致可分为下扑(Down-stroke)、仰旋(Supination)、上挥(Up-stroke)和俯旋(Pronation)4 个阶段(图 2)。昆虫翅膀下扑时,翅膀的变形方向垂直于翅面向上。在这个阶段翅膀边缘部位有一定的弯曲,弯曲的方向与扑翼的方向相同,翅膀的形状类似于伞状,如图 2(a)所示。昆虫翅膀仰旋

(即昆虫扑翼时翅膀下扑的最大角度处)时,翅膀首先垂直于翅面向上变形,沿着翅膀根部与翅尖的连线处中间呈外凸的形式,直至仰旋结束为止。在这个过程中翅膀边缘部位有一定的弯曲现象发生,与下扑时翅膀变形相似,如图 2(b)。而且在仰旋阶段昆虫飞行时依靠旋转环流和尾流捕获机制获得更大的升力。昆虫翅膀上挥时,翅膀的变形方向垂直于翅面向下,翅膀变形不明显,在翅膀边缘处未发现明显的弯曲现象,翅膀在上挥的过程并未出现明显的伞状,如图 2(c)所示。昆虫翅膀俯旋(即昆虫扑翼时翅膀上挥的最大角度处)时,从图 2(d)中可以看出翅膀中间有微小变形,而翅膀前缘部分并未出现弯曲的现象,从整体上看翅膀的变形形状并不是伞状。可将昆虫翅膀的变形分为垂直于翅面向上的变形(外凸)和垂直于翅面向下的变形(内凹)两种。翅膀垂直于翅面向上的变形(外凸)说明翅膀下方的空气压力大于翅膀上方的空气压力,使得变形垂直于翅面向上,从而产生较大的升力来保持飞行姿态。翅膀垂直于翅面向下的变形(内凹)说明翅膀上方的空气压力大于翅膀下方的空气压力,使得变形垂直于翅面向下,从而产生 1 个相对于升力较小的推力来维持昆虫的飞行方向。在扑翼的过程中,昆虫通过主动的扭转行为使其产生更有效的升力来维持昆虫在空中飞行的姿态。而在上挥的过程中并未发现翅膀这种主动扭转弯曲的现象发生,说明在这个过程中翅膀只需要产生能维持前飞的推力,而这个推力远远小于升力。由于迎角的存在,在产生升力的同时也产生了推力。从变形的整体形状上看,翅膀是呈现伞状的变形即伞状效应,这样更能有效合理地产生空气动力,即产生更加有效而且更大的升力来维持昆虫的飞行姿态。

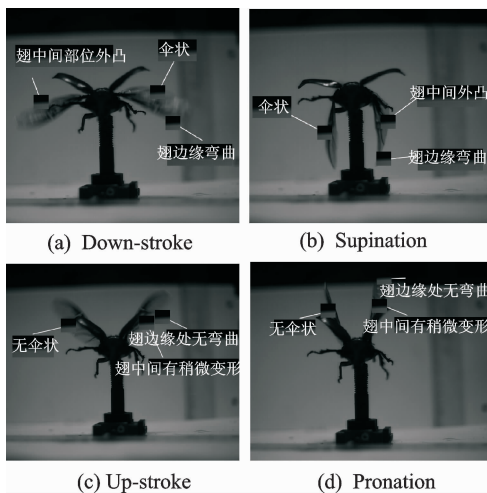


图 2 昆虫 1 个周期内扑翼的 4 个阶段

Fig. 2 Four phases in cycle of insects' wings flapping

根据统计结果可知,蜻蜓的后翅扑动 1 周需要的时间约为 45.5 ms,扑动频率为 22 ± 3 Hz。从完成俯旋开始下扑至最低点约 20.9 ms,然后翅膀绕翅根与翅尖的连线的轴线旋转约 5° ,时间为 5 ms,接着上挥至最高点约 15.9 ms,进而翅膀绕翅根与翅尖的连线的轴线旋转约 10° ,该阶段俯旋耗时 3.7 ms。独角仙后翅扑动 1 周经历时间为 33.3 ms,扑动频率为 30 ± 5 Hz。下扑阶段约 17.3 ms,然后翅膀绕翅根与翅尖的连线的轴线旋转约 15° ,该仰旋阶段时间为 2.3 ms,接着上挥阶段耗时 12 ms 到达最高点,进而翅膀绕翅根与翅尖的连线的轴线旋转 30° ,时间为 1.7 ms。鸣鸣蝉前翅扑动 1 周的时间为 25.6 ms 左右,扑动频率为 39 ± 6 Hz。从完成俯旋开始下扑至最低点约 11 ms,然后翅膀绕翅根与翅尖的连线的轴线旋转约 10° ,时间仅约 2 ms,接着上挥阶段耗时 11 ms 到达最高点,进而翅膀绕翅根与翅尖的连线的轴线旋转 20° 左右,时间仅 1.6 ms。表 2 为 3 种昆虫飞行翅扑动 1 个周期过程中下扑、仰旋、上挥和俯旋 4 个阶段经历的时间比例。由表 2 可知,3 种昆虫中飞行翅的下扑阶段时间超过上挥阶段时间。昆虫在下扑的过程中主要是提供升力,而上挥的过程主要产生推力。昆虫在扑翼的过程中产生升力的时间要大于产生推力的时间,这样才能够使昆虫有足够大的升力维持其飞行状态。另一方面,昆虫仰旋阶段时间略大于俯旋阶段时间,这可以使昆虫能够在飞行时做一些复杂的机动动作如急停、转弯等^[10],而且仰旋阶段是翅膀由下扑调整为上挥的转折阶段,受到空气阻力较大,所以这个过程经历时间相对俯旋阶段较长。

表 2 昆虫扑翼 4 个阶段所占的百分比

Tab. 2 Percentages of the four processes during insects flapping wings

类别	下扑	仰旋	上挥	俯旋	%
蜻蜓	46	11	35	8	
独角仙	52	7	36	5	
鸣鸣蝉	43	8	43	6	

独角仙飞行时其折叠的后翅完全展开后的翼展可达 82 mm(表 1),鸣鸣蝉和蜻蜓的翼展分别为 62 mm 和 53 mm,但是独角仙的扑翼频率略小于鸣鸣蝉的扑翼频率。蜻蜓、独角仙和鸣鸣蝉的扑翼角度分别为 $90^\circ \pm 10^\circ$, $170^\circ \pm 7^\circ$ 和 $120^\circ \pm 9^\circ$ 。由扑翼角度和扑翼频率,可以计算出 3 种昆虫的扑翼速度分别为 11, 28.3 和 26 rad/s。独角仙的平均角速度最大,蜻蜓最小。3 种昆虫中,独角仙的质

量最大,蜻蜓最轻。由以上分析可知,昆虫在飞行时由于翅膀的大小和质量不同导致了扑翼频率、扑翼角度存在着明显的不同,从而决定了不同的扑翼升力。

2.2 昆虫扑翼的三维轨迹

分析昆虫扑翼过程发现,蜻蜓翅膀在上挥和下扑时,翅膀沿扭转轴有一定的扭转,使其迎角快速地改变。独角仙翅膀上挥和下扑时完全张开平伸,其翅膀在扑动时弯曲变形,形状类似于伞状。鸣鸣蝉在上挥阶段左右两翅膀虽然会相互接近,但仍然有一定距离或者仅两对翅膀后面的部分会出现极短的接触时间。3种昆虫在扑翼过程中翅膀的变形程度和扑动轨迹存在着明显的差异。这种差异性表现为昆虫在飞行过程中存在着不同的扑翼方式。图3—5分别为蜻蜓、独角仙和鸣鸣蝉扑翼运动时飞行翅的翼尖三维轨迹(各4组),由图3—5可知,蜻蜓的翼尖轨迹为“8”字形,独角仙为类“8”字形,而鸣鸣蝉的翼尖轨迹近似椭圆形。相同的翼面面积下,“8”字形扑动轨迹的升力最大,椭圆形扑动轨迹产生的升力相对最小^[17]。3种昆虫中,蜻蜓的质量最小,其翼展和翼面面积也最小,采用“8”字形轨迹的扑动方式可以产生足够的升力来保持空中的飞行状态。独角仙的质量最大,翼面展和翼面面积也最大,采用类“8”字形的扑动轨迹,相比于蜻蜓的扑翼轨迹,独角仙采用这个扑翼方式可以产生足够的升力来保持在空中的飞行状态。鸣鸣蝉的扑翼轨迹与蜻蜓和独角仙相比差异性很大,采用椭圆形翼尖轨迹进行扑翼运动。虽然椭圆形轨迹产生的升力小于“8”字形的轨迹,但是鸣鸣蝉的翅膀较大采用椭圆形的轨迹也能使其保持足够的升力。

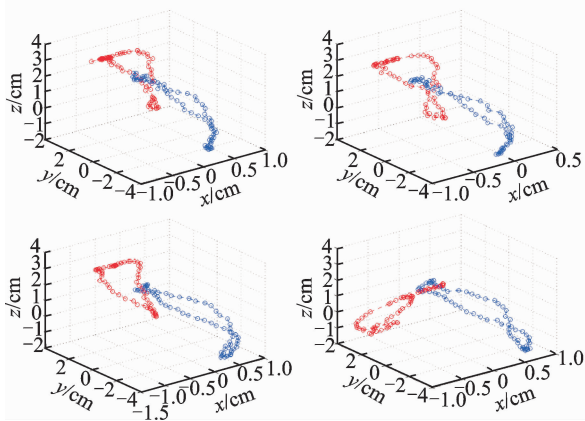


图3 蜻蜓翅膀扑翼三维轨迹

Fig. 3 Wing flapping wing 3D trajectory of dragonflies

图6为3种昆虫翅尖在 x, y, z 这3个方向上的位移。通过3种昆虫在 x, y, z 这3个方向上扑

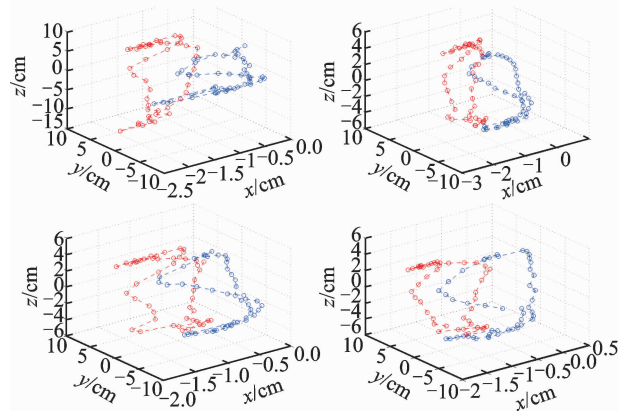


图4 独角仙翅膀扑翼三维轨迹

Fig. 4 Wing flapping wing 3D trajectory of Hercules beetles

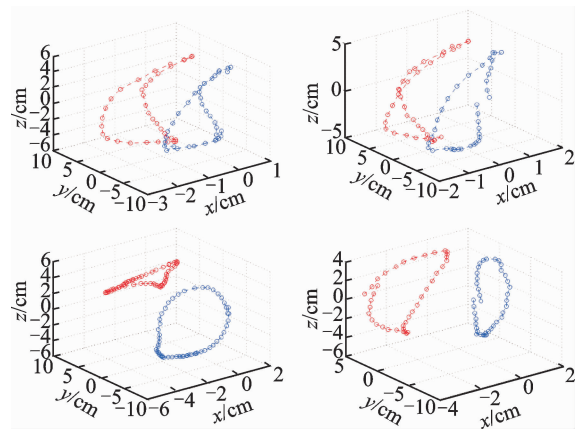
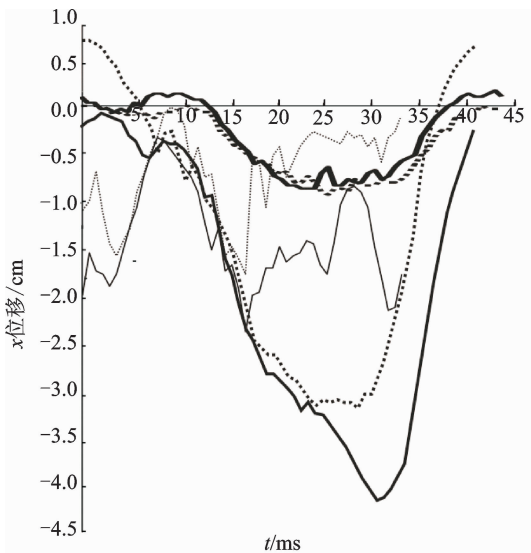


图5 鸣鸣蝉翅膀扑翼三维轨迹

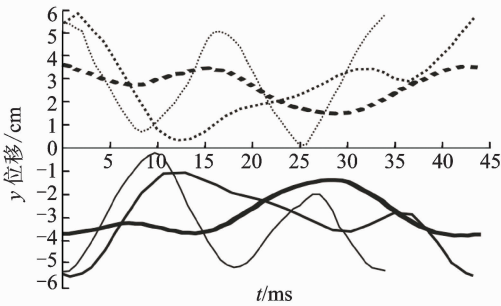
Fig. 5 Wing flapping wing 3D trajectory of cicadas

翼轨迹曲线可以看出3种昆虫扑翼过程的不同之处。在 x 方向上,蜻蜓左右翅的轨迹曲线近似于1个对称的余弦曲线,而独角仙则出现两个波峰,近似于两个周期的正弦曲线,鸣鸣蝉也近似为正弦曲线;在 y 方向上,蜻蜓左右翅曲线呈现出两个周期与幅值不同的余弦曲线,而独角仙左右翅曲线则是两个周期相同、幅值相同的余弦曲线,鸣鸣蝉左右翅呈现的是两个周期、幅值近似相同的正弦曲线;在 z 方向上,蜻蜓左右翅呈现的是1个不规则的余弦曲线,前半周期小于后半周期,独角仙左右翅呈现的是1个完整的正弦曲线,而鸣鸣蝉呈现的是一个完整的余弦曲线。在 x, y, z 这3个方向上不同的曲线形状,可以得到3种昆虫在飞行时扑翼方式的不同,即如前文所述的蜻蜓的“8”字形轨迹,独角仙采用的类“8”字形轨迹,而鸣鸣蝉采用的椭圆形轨迹。但是综合分析可知,3种昆虫左右翅的扑动频率一致,扑翼轨迹曲线的转折点对左右翅膀也基本上是一致。昆虫飞行时左右翅在1个周期内保持相同的扑翼方式。但是在 z 方向上,轨迹曲

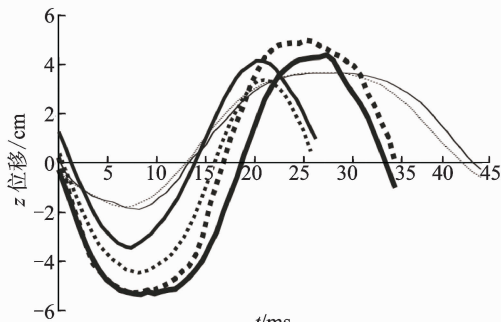
线呈上、下不对称,也就意味着上、下扑翼是不对称的。这说明昆虫在飞行的过程中左右翅虽然扑动相位一致,但是翅膀所运动的轨迹并不是完全一致,这有利于昆虫进行一些高难度的机动飞行,如转弯、倾斜飞行等。



(a) x direction



(b) y direction



(c) z direction

注: —蜻蜓左翅翅尖;蜻蜓右翅翅尖;
—鸣鸣蝉左翅翅尖;鸣鸣蝉右翅翅尖;
—独角仙左翅翅尖;独角仙右翅翅尖;

图6 昆虫翅膀在 x, y, z 方向上位移Fig. 6 Displacements of insects' wings in x, y, z directions

3 结束语

通过昆虫飞行运动学测试系统测试了约束状态下蜻蜓、独角仙和鸣鸣蝉等3种昆虫飞行时的各项参数。分别以蜻蜓后翅、独角仙后翅和鸣鸣蝉前

翅的扑动图像分析了1个周期的扑翼过程、扑翼轨迹和翅膀变形等。蜻蜓的扑翼频率为 22 ± 3 Hz, 独角仙的扑翼频率为 30 ± 5 Hz, 鸣鸣蝉的扑翼频率为 39 ± 6 Hz。昆虫在飞行时由于翅膀的大小和质量不同导致了扑翼频率、扑翼角度存在着明显的不同,从而决定了不同的扑翼升力。在下扑、仰旋、上挥和俯旋4个阶段中,下扑时间比上挥时间大,说明了昆虫需要较长的时间来产生足够的升力来维持飞行。蜻蜓的翼尖轨迹为“8”字形,独角仙为类“8”字形,鸣鸣蝉为椭圆形;发现在下扑和仰旋阶段,翅膀形状近似为伞状,这种伞状效应能有效提高升力。研究昆虫飞行在不同拍翅模式下的升力特性对微型飞行器的机动飞行设计有参考意义。

参考文献:

- [1] WEISFOGH T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals; Including novel mechanisms for lift production [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1973, 59(1): 169-230.
- [2] SANE S P, DICKINSON M H. The control of flight force by a flapping wing: Lift and drag production [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(15): 2607-2626.
- [3] LUO Guoyu, SUN Mao. 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.
- [4] DU Gang, SUN Mao. Effects of unsteady deformation of flapping wings on its aerodynamic forces [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2008, 29(6): 731-741.
- [5] 孙茂. 昆虫飞行的空气动力学 [J]. *力学进展*, 2015, 45: 1-28.
SUN Mao. Aerodynamics of insect flight [J]. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 1-28.
- [6] LIANG Bin, SUN Mao. Aerodynamic interactions between wing and body of a model insect at forward flight and in maneuvers [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, 10(1): 19-27.
- [7] MENG Xueguang, LIU Yanpeng, SUN Mao. Aerodynamics of ascending flight in fruit flies [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2017, 14(1): 75-87.
- [8] WANG Xiaoxin, WU Ziniu. Stroke-averaged lift forces due to vortex rings and their mutual interactions for a flapping flight model [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 654(659): 453-472.
- [9] CARD G, DICKINSON M H. Performance trade-offs in the flight initiation of drosophila [J]. *Journal of Ex-*

- perimental Biology, 2008, 211(3): 341-353.
- [10] MUIJRES F T, MELIS J M, DICKINSON M H. Flies evade looming targets by executing rapid visually directed banked turns [J]. *Science*, 2014, 344 (6180): 172-177.
- [11] PRY S N, SAYAMAN R, DICKINSON M H. The aerodynamics of free-flight maneuvers in drosophila [J]. *Science*, 2003, 300(5618): 495-498.
- [12] 陈伟, 张志涛, 傅强. 若干吊飞昆虫的翅振模式及翅振频率 [J]. *昆虫学报*, 1996, 39(3): 246-252.
CHEN Wei, ZHANG Zhitao, FU Qiang. The wing-beat patterns and frequencies of some insects [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1996, 39(3): 246-252.
- [13] LEE B, SEONG J, PARK H, et al. Flow structures around a butterfly-shaped low-aspect-ratio wing [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(7): 2669-2675.
- [14] HENNINGSSON P, MICHAELIS D, NAKATA T, S, et al. The complex aerodynamic footprint of desert locusts revealed by large-volume tomographic particle image velocimetry [J]. *Journal of Royal Society Interface*, 2015, 12(108): 119.
- [15] ORTEGA ANCEL A, EASTWOOD R, VOGT D, et al. Aerodynamic evaluation of wing shape and wing orientation in four butterfly species using numerical simulations and a low-speed wind tunnel, and its implications for the design of flying micro-robots [J]. *Interface Focus*, 2016, 7(1): 87.
- [16] SHYY W, KANG C K, CHIRARATTANANON P, et al. Aerodynamics, sensing and control of insect-scale flapping-wing flight [J]. *Proceedings of Royal Society A*, 2016, 472(2186): 712.
- [17] 张永立, 赵创新, 徐进良, 等. 扑翼轨迹对空气动力的影响 [J]. *科学通报*, 2006, 51(6): 634-640.
ZHANG Yongli, ZHAO Chuangxin, XU Jinliang, et al. Impact of flapping wing trajectory on aerodynamics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 634-640.

(编辑: 陈珺)