

昆虫飞行的空气动力学

孙 茂[†]

北京航空航天大学流体力学研究所, 北京 100191

摘 要 昆虫是最早出现、数量最多和体积最小的飞行者. 它们能悬停、跃升、急停、快速加速和转弯, 飞行技巧十分高超. 由于尺寸小, 因而翅膀的相对速度很小, 从而进行上述飞行所需的升力系数很大. 但昆虫翅膀的雷诺数又很低. 它们是如何在低雷诺数下产生高升力的, 是流体力学和生物学工作者都十分关心的问题. 近年来这一领域有了许多研究进展. 该文对这些进展进行综述, 并对今后工作提一些建议. 因 2005 年前的工作已在几篇综述文章有了详细介绍, 该文主要介绍 2005 年以来的工作. 首先简述昆虫翅的拍动运动及昆虫绕流的基本方程和相似参数; 然后对 2005 年之前的工作做一简要回顾. 之后介绍 2005 年后的进展, 依次为: 运动学观测; 前缘涡; 翅膀柔性变形及皱褶的影响; 拍动翅的尾涡结构; 翼/身、左右翅气动干扰及地面效应; 微小昆虫; 蝴蝶与蜻蜓; 机动飞行. 最后为对今后工作的建议.

关键词 昆虫, 飞行, 空气动力学

中图分类号: V211 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-14-065

收稿日期: 2014-11-05; 录用日期: 2014-11-24; 在线出版日期: 2014-12-15

[†] E-mail: m.sun@buaa.edu.cn

引用方式: 孙茂. 昆虫飞行的空气动力学. 力学进展, 2015, 45: 201501

Sun M. Aerodynamics of insect flight. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201501

© 2015《力学进展》版权所有

1 引 言

有翼昆虫在约 3.5 亿年前就开始飞行了 (Wootton 1981, Ellington 1991). 在漫长的进化过程中, 它们已成为飞行的佼佼者, 能悬停、跃升、急停、快速加速和转弯 (Dudley 2000). 人们对其中的空气动力学原理十分感兴趣. 这里除了好奇心之外, 还有两个原因. 其中一个: 昆虫飞行中气动力的产生及产生这些力所需的能耗对昆虫的生理学、行为学、进化等方面都有很大的影响, 生物学家在研究这些问题时需要了解气动力的特性 (Weis-Fogh 1972, Ellington et al. 1990). 另一个是: 工程师希望制造尺寸为厘米量级的微型飞行器 (Davis 1996, Wilson 2001), 他们想学习和模仿昆虫产生气动力的方法 (Ellington 1999, Ma et al. 2003).

昆虫飞行时翅膀快速拍动和翻转. 拍动有如直升机旋翼桨叶或螺旋桨桨叶的转动; 不同的是直升机桨叶总向一个方向转动, 而昆虫翅转动一定角度后, 就翻转过来, 向相反方向转动, 周而复始. 早期, 人们认为, 昆虫翅与旋翼桨叶、飞机机翼一样, 都是以某一攻角相对空气运动, 因而, 昆虫产生气动力的原理和飞机一样, 与滑翔或上升气流中翱翔的鸟一样, 没有什么新机制. 但当人们用飞机的机翼理论去计算昆虫的气动力和飞行的能耗时, 发现翅膀产生的升力远不够平衡昆虫的重量. 这是因为, 昆虫的尺寸很小 (翅长为 1~50 mm), 因而相对速度很小, 所需的升力系数很大, 可达机翼的 3 倍多. 因而, 人们认识到昆虫是用不同于飞机和直升机的空气动力学原理产生气动力的 (Ellington 1984a).

人们对昆虫飞行的空气动力学原理的探索已有约 100 年的历史; 在过去的二十多年中, 取得了很大的进展. 可以说, 已有了很深入和系统的了解 (Weis-Fogh & Jenson 1956, Ellington 1995, Sane 2003, Wang 2005, Wu 2011). 1956 年 Weis-Fogh 和 Jensen (1956) 系统地评述了之前的相关工作. 2005 年左右, Sane (2003), Wang (2005), Sun (2005) 及 Ausai 等 (2006) 的综述论文介绍了 Weis-Fogh 和 Jensen (1956) 的评述之后到 2005 年之前的进展. 因而, 本文主要介绍 2005 年以来的工作. 首先简述昆虫翅的拍动运动及昆虫绕流的基本方程和相似参数 (第 2 节); 然后对 2005 年之前的工作做一简要回顾 (第 3 节). 之后介绍 2005 年后的进展, 依次为: 运动学观测 (第 4 节); 前缘涡 (leading-edge vortex, LEV) (第 5 节); 翅膀柔性变形及皱褶的影响 (第 6 节); 拍动翅的尾涡结构 (第 7 节); 翼/身、左右翅气动干扰及地面效应 (第 8 节); 微小昆虫 (第 9 节); 蝴蝶与蜻蜓 (第 10 节); 机动飞行 (第 11 节). 最后为对今后工作的建议 (第 12 节).

2 昆虫翅的拍动运动及昆虫绕流的支配方程和相似参数

2.1 昆虫翅的拍动运动

大多数昆虫的翅膀近似在一个称为拍动平面的平面内拍动 (图 1). 对于某一昆虫, 拍动平面与身体的夹角通常是固定的. 若将昆虫翅膀近似为一刚性板, 则翅膀的拍动运动 (翅膀相对于身体的运动) 可用 3 个欧拉角来描述: 方位角 ϕ , 抬升角 θ 和 (几何) 攻角 ψ (或 α) (图 1). 方位角 ϕ 的变化幅度称为拍动幅度 (Φ); 对于不同的昆虫, Φ 约在 $60^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 大多数在 120° 左右 (Ellington 1984c, Fry et al. 2005, Mou et al. 2011). 对于大多数昆虫, 抬升角 θ 较小, 小于 10° (Ellington 1984c, Liu & Sun 2008, Walker et al. 2010); 这就是为什么上面说“昆虫翅近似在一个平面内拍动”的原因 (果蝇是一个例外, 其抬升角较大, 大于 30° ; Fry et al. 2005). 攻角 α 通常约为 35° 或更大 (Ellington 1984c, Liu & Sun 2008, Walker et al. 2010). 不同昆虫的拍动频率 (n) 约在 $25 \sim 400$ Hz 之间 (Dudley 2000).

昆虫翅不是刚性的, 拍动中翅膀会产生偏离刚性板的变形. 对于尺寸小的昆虫, 这种变形很小 (例如果蝇, 变形几乎没有, Vogel 1967a), 只有较大的昆虫, 例如蝴蝶, 变形才比较大 (Dudley 2000).

2.2 昆虫绕流的支配方程和相似参数

昆虫的绕流可假设为不可压缩流, 并且为层流. 流速十分低 (马赫数约为 0.02), 且昆虫的特征尺寸较拍动翅产生的声波波长小 2 个量级, 因而不可压缩流假设是合理的. 昆虫翅的雷诺数 (Re) 很小 ($Re = 10 \sim 4000$), 且翅面的剪切层是每次拍动新产生的.

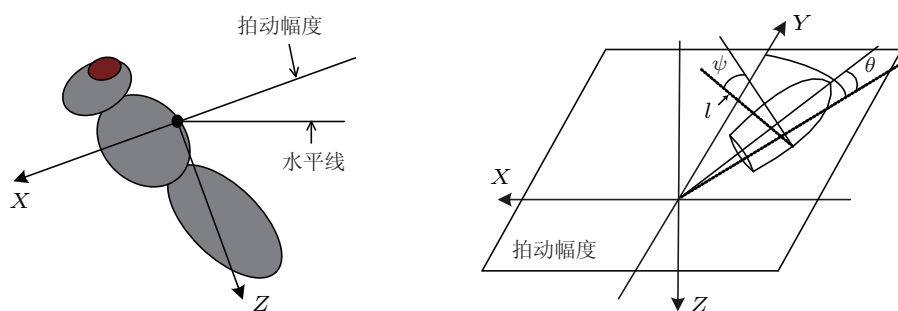


图 1

翅膀的拍动运动的 3 个欧拉角

的, 因而至少在近场, 流动是层流的. 从而, 支配方程就是不可压 Navier-Stokes 方程

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1b)$$

其中, $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 为流速, $p(\mathbf{x}, t)$ 为压强, ρ 为流体密度, ν 为运动黏性系数. 选取翅膀弦长 c 为参考长度, 翅膀回转半径 r_2 处平均速度 U 为参考速度 ($U = 2\Phi r_2 n$, 其中 Φ 为拍动幅度, n 为拍动频率), 上拍或下拍的周期 T_h 为参考时间 ($T_h = 1/(2n)$), 方程 (1) 变为

$$St \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + \mathbf{u}^* \cdot \nabla \mathbf{u}^* = -\nabla p^* + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u}^* \quad (2a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* = 0 \quad (2b)$$

式中, 符号 “*” 表示无量纲量; $p^* = p/(\rho U^2)$; Re 为雷诺数, 定义为 $Re = cU/\nu (= 2\Phi r_2 nc/\nu)$; St 为斯特劳哈尔数, 定义为 $St = c/UT_h (= c/(\Phi r_2))$. 方程 (2a) 中表征流动非定常性的斯特劳哈尔数 St 与拍动频率无关, 这是因为参考速度 U 含有拍动频率 n , 参考时间 T_h 含有 $1/n$ 的缘故. St 与 Φ 和 r_2/c 成反比 (r_2/c 正比于翅膀的展弦比). 大多数昆虫 Φ 约在 2.1 左右, r_2/c 约在 1.65 左右, 故 St 约为 0.3, 表明流动的非定常性是比较强的. 因 r_2 和 c 均正比于 R (翅膀长度), 雷诺数 Re 正比于 n 及 R^2 . 如上述, 不同昆虫的拍动频率 (n) 约在 25~400 Hz 之间, R 在 0.5~50 mm 之间, 故 Re 变化很大, 在 10~4000 之间 (极小的昆虫, Re 甚至小于 10).

考虑边界条件, 设飞行速度为 V_∞ , 边界条件中的无量纲参数为 $V_\infty/U = V_\infty/(2\Phi r_2 n)$ (飞行速度与翅膀拍动平均速度之比, 称为前进比, 用 J 表示).

因 St 近似为常数, 方程 (2a) 中的无量纲参数只有 Re . 这就是说, 几何上相似和拍动运动相似的昆虫, 例如蝇、蜂、蛾等昆虫, 无论尺寸大小, 拍动频率如何, 只要 Re 相同 (前飞时再加上前进比相同), 气动力系数便相同. 这大大方便了人们的实验和计算研究. 事实上, 人们发现 (见第 3 节), 由于昆虫翅绕流的分离点是固定在翅前缘处的, 因而除 Re 极小的情况 (例如, 小于 50), Re 的变化对流动的影响并不是很大, 从而基于某一昆虫的实验结果, 可推广至其他昆虫. 更重要的是, 这里的讨论表明了, 尺寸大小和拍动频率不同的许多昆虫, 产生气动力的机理是相同的 (Wu and Sun 2004).

3 2005 之前工作的简要回顾

2005 年之前的工作已在 Weis-Fogh 和 Jensen (1956), Ellington (1995), Shyy 等 (1999, 2008, 2010), Sane (2003), Wang (2005) 及 Sun (2005) 等的综述文章有详细的讨论; 这里只作一简要回顾.

早期 (20 世纪 80 年代之前) 有关昆虫飞行气动力的研究思路类似于直升机旋翼和飞机螺旋桨的研究思路: 通过对昆虫翅膀运动进行观察, 获得拍动频率、拍动角等参数, 从而得知翅膀的运动速度; 将翅膀置于风洞定常来流中, 在相应的雷诺数 (Re) 下测量气动性能数据 (升、阻力系数, C_L 和 C_D , 随攻角的变化关系); 然后利用“叶素理论”和“动量理论”, 基于测得的气动性能数据及翅膀在每一时刻的速度和攻角, 估算昆虫飞行的升力和能耗. 这一思路的基本假设是拍动翅的气动力是准定常的. 结果表明, 上述定常条件下测到的升力系数远不能给出平衡昆虫重量的升力. 例如, 图 2 为果蝇翅在定常流动条件下升、阻力的极曲线: 即使在迎角为 30° 时, C_L 也很小, 只有 0.6 左右. 而由于昆虫翅膀的相对速度很小 (虽然翅膀拍动频率较高, 但尺寸很小, 故相对速度小), 需要用来平衡重量的无量纲升力 (即升力系数) 较大, 约在 2 左右 (这远比飞机巡航飞行时的大). 这说明不能用定常流理论来解释昆虫飞行所需的高升力 (大升力系数) (Ellington 1984a). 在同一时期, Weis-Fogh (1973) 在研究台湾小黄蜂的飞行时发现, 该昆虫在每一次下拍前, 两翅会在背部“合拢”, 然后快速“打开”. Lighthill (1973) 和 Maxworthy (1979) 分别对翅膀的“合拢打开”进行了理论分析和实验, 表明这一运动可产生很大的非定常升力; 人们称此高升力机制为 Weis-Fogh 机制. 虽然大多数昆虫不作打开合拢运动, 但是, Weis-Fogh 机制的发现和上述对准定常假设的否定, 促使人们从流动的非定常方面去思考昆虫产生高升力的问题.

如果说, 以上工作的主要结果是否定了昆虫用定常流模式产生升力这一想法, 那么, 进入 20 世纪 90 年代, 人们开始具体研究昆虫的非定常流动过程与其中的机理. 由于每一次拍动都是在大攻角下的快速加速和之后的平动, 人们认为昆虫可能是利用动态失速机制, 即保持瞬态高升力的机制, 来产生足够的升力的. Dickinson 和 Gotz

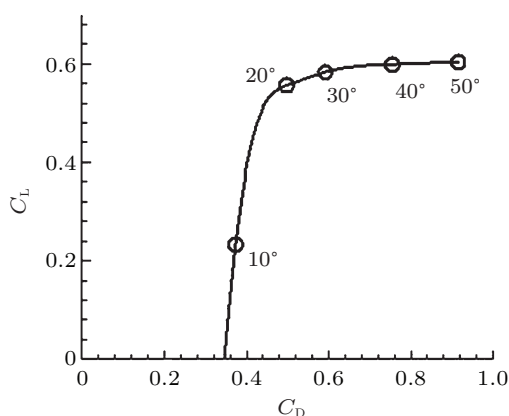


图 2

果蝇翅在定常流动条件下升、阻力的极曲线

(1993) 测量了翼型启动后的升力 ($Re = 75 \sim 225$, 针对果蝇等昆虫). 结果表明的确有大升力, 但其只能维持翼型运动约 2 个弦长所需的时间 (Re 较大时, 该时间较长些. 例如, $Re = 1000$ 时, 约为运动 3 个弦长的时间). 一般地, 昆虫翅膀拍动时, 翅膀外部的翼剖面要运动约 4 个弦长 (而在前飞速度较大时, 要运动约 7 个弦长). 因而, 人们又想, 也许动态失速并不在这里起重要作用. 到 1996 年, Ellington 等 (1996) 通过对鹰蛾飞行及其翅膀的拍动模型的流动显示, 观察到拍动翅膀上的失速涡在整个平动过程中都不脱落, 原因是存在一展向流动, 其稳定了失速涡; Ellington 称之为“前缘涡” (LEV), 见图 3. 这就是说, 动态失速的高升力可在平动过程中得以保持. 这是一重大发现, 称为“不失速机制”. 这一结果被以后的实验和数值计算所证实 (Liu et al. 1998, Dickinson et al. 1999, Lan & Sun 2001, Sun & Tang 2002).

上述工作表明上、下拍过程中, 不失速机制可产生高升力. 还有其他高升力机制吗? 由 2.1 节及图 1 知, 昆虫翅膀的拍动可分为 4 个部分: 2 个“平动”和 2 个转动; 即下拍和上拍过程中的“平动” (周向转动), 上拍和下拍之间及下拍和上拍之间的转动 (翻转). 上述不失速机制是在平动过程中的高升力机制. Dickinson 等 (1999) 通过拍动模型果蝇翅的气动力测量, 探索了翅膀翻转及翻转前后的气动力问题. 若翻转的一半是在上拍 (或下拍) 结束阶段, 另一半是在接着的下拍 (或上拍) 开始阶段, 称为对称翻转; 若翻转的大部分是在上拍 (或下拍) 结束阶段, 小部分在接着的下拍 (或上拍) 开始阶段, 称为超前翻转 (反之为滞后翻转). 他们发现, 在超前翻转的情形, 拍动中部有高升力, 拍动开始和结束阶段也出现了大升力. 拍动中部的大升力可用不失速机制解释. 他们提出, 拍动初期的大升力可能是由于翅膀与上一次拍动的尾迹相遇而产生的, 称为“尾迹捕获机制”; 拍动结束阶段 (翼在快速翻转) 的大升力可用马格努效应 (即转动圆柱或球可产生升力的机制) 来解释, 称为“转动机制”. Sun 和 Tang (2002) 用数值方法模拟果蝇翅作类似的拍动时的流动, 气动力的结果与 Dickinson 等 (1999) 的实验结果相符. 由于提供了流场信息, 可更好地解释气动力的成因. 他们指出: 起始阶段的升力峰是由于翅膀的快速加速运动产生的, 快速加速运动使翅膀不同部分在短时间内产

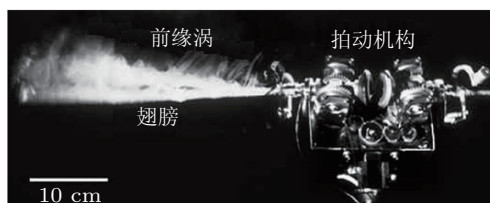


图 3

模型鹰蛾翅拍动运动时的前缘涡 (Ellington 1999)

生方向不同的强涡层, 即很大的涡量矩的时间变化率, 从而产生高升力 (也可用附加质量效应来解释); 而结束阶段的升力峰是由于仍在“平动”翅膀的快速上仰运动产生的, 快速上仰运动也使翅膀在短时间内产生很大的涡量矩的时间变化率, 从而产生了高升力 (分别称为“快速加速机制”和“快速上仰机制”). 关于 Dickinson 等 (1999) 提出的“尾迹捕获机制”, Sun 和 Tang (2002), Birch 和 Dickinson (2003), Wu 和 Sun (2005) 等的研究表明, 尾迹的影响主要是减小升力的. 另外, Dickinson 等在后来的一些文献中 (例如 Sane 和 Dickinson 2002, Sane 2003) 改变了可用马格努效应解释翼快速转动时的大升力的看法, 提出应用 Kramer 效应解释之. Kramer 效应是指 (Fung 1969): 向前运动的机翼绕其展向轴转动时, 尾缘处的流体将绕过尾缘从而违反库塔条件; 为满足库塔条件, 翼后缘将脱落一漩涡而翼上产生一附加的环量 $\Delta\Gamma$, 其正比于转动角速度和翼型弦长的平方; 而翼的转动产生的附加升力为 $\rho U \Delta\Gamma$ (ρ 是流体密度). 显然 Kramer 效应是基于薄翼理论的; 只适用高 Re 下, 厚度、弯度和攻角都较小的情形, 不适于昆虫拍动翼的低 Re , 大攻角分离流的情形.

上述结果主要是基于模型果蝇翅的, 表明果蝇翅用 3 个机制产生高升力: 不失速机制, 快速加速机制和快速上仰机制. 其他的昆虫也如此吗? Wu 和 Sun (2004) 用拍动翅的特征物理量对 N-S 方程作了无量纲化, 指出悬停飞行的唯一的相似参数是翅膀运动的 Re . Usherwood 和 Ellington (2002a, 2002b), Sun 和 Du (2003) 及 Luo 和 Sun (2005) 对若干昆虫的翅膀平面形状和展弦比的影响作了研究. 这些工作表明, 雷诺数在 100 以上的昆虫, 虽然翅长相差二十余倍, 体重相差几千倍 (果蝇, 翅长约 3 mm, 质量约 0.8 mg; 鹰蛾, 翅长约 52 mm, 质量约 1650 mg), 都是用上述 3 个机制产生气动力的. 但应指出, 虽然 3 个机制均起作用, 但因不失速机制作用的时间较长, 且在其作用时翅膀运动的速度较大, 故该机制产生的气动力占整个拍动周期中的大部分 (Sun & Du 2003, Fry et al. 2005, Aono et al. 2008).

对昆虫拍动翅产生高升力机理有了一定认识之后, 人们希望对拍动翼气动力的简单估算方法; 简单方法由于抓住了问题的主要因素, 还可对问题的物理机制有进一步的认识. Yu 等 (2003) 和 Ansari (2004) 基于理论分析发展了拍动翼的半解析方法; 该方法更清楚地解释了上述 3 个升力机制 (Yu & Tong 2005, Yu et al. 2005). Sane 和 Dickinson (2002) 将准定常理论中的升、阻力系数用转动翼的实验测量值取代, 得到简单的升、阻力计算公式; Pesavento 和 Wang (2004), Berman 和 Wang (2007) 也给出了类似的公式. 他们的公式虽不能正确计算快速加速和快速上仰 2 个机制产生的升力, 但还是能正确计算拍动翅升、阻力的主要部分.

虽然大部分昆虫在功能上可视为只有一对翅膀, 有的昆虫 (如蜻蜓) 功能上都有两对翅膀. 另外, 蜻蜓的拍动平面是向前倾斜的, 下拍时攻角很大, 而上拍时攻角较小. 前、后翅气动干扰如何, 有否新的气动力机制, 倾斜拍动平面的影响如何, 是十分有趣

的问题. Wang (2000) 用二维翼以倾斜拍动平面拍动, 结果表明产生的垂直力足以支持蜻蜓的重量. Sun 和 Lan (2004), Yamamoto 和 Isogai (2005) 分别用计算和实验的方法研究了悬停飞行的蜻蜓前后翼的干扰问题, 表明了当前翼滞后于后翼拍动时 (蜻蜓和豆娘的拍动都是如此), 两翼的干扰是不利的, 但十分小. Sun 和 Lan (2004) 还指出, 以倾斜拍动平面拍动的蜻蜓翅既用升力原理也用阻力原理产生支持重量的举力; Wang (2004) 基于单个 2 维翼以倾斜拍动平面拍动的计算也表明了这一点. 长时间飞行中用阻力原理产生支持重量的举力, 这是人造飞行器不会采用的; 认识到动物飞行有这样的情形是很有趣的.

以上是 2005 年前工作的简要回顾, 下面介绍之后的主要工作.

4 运动学观测

上述 2005 前的研究工作中, 昆虫翅拍动的运动学和形态学参数主要是基于 Ellington 及其合作者对若干类昆虫自由飞行的观测结果 (Ellington 1984b, 1984c; Dudley & Ellington 1990a, 1990b; Willmott & Ellington 1997a, 1997b) 和 Vogel 及 Zanker 等对系留飞行的果蝇的观测结果 (Vogel 1967b, Zanker 1990). Ellington 等的自由飞行实验中, 因为只用了一个摄像机, 故只能较准确地测出拍动频率, 拍动角和抬升角, 而对于攻角只能给出较粗糙的估计. 系留飞行时的拍动参数与自由飞行的有一定的差别 (Fry et al. 2005). 这些问题对于上述关于气动力机理的结论并无大的影响 (Fry et al. 2005, Altshuler et al. 2005, Liu & Sun 2008, Mou et al. 2011). 但当要考虑飞行中的力和力矩的平衡及飞行的能耗问题时, 则需要有较准确的拍动参数.

Fry 等 (2005) 用 3 台高速摄像机和相应的图像处理方法, 测量了自由悬停的果蝇的拍动角, 攻角及抬升角随时间的变化关系. Altshuler 等 (2005), Liu 和 Sun (2008) 和 Mou 等 (2011) 用类似的方法分别测量了自由悬停的蜜蜂, 蜂蝇和食蚜蝇的上述参数; Wang 和 Russell (2007) 测量了系留飞行的蜻蜓的运动学参数. Mou 等 (2011) 的分析表明上述方法测量拍动角的误差约 3%, 抬升角和攻角的误差约为 10%.

上述 5 种昆虫的拍动运动各有特点. 蜂蝇的拍动幅度约为 110° , 抬升角较小, 约为 10° , 翅尖轨迹是一浅 U 形状. 这与 Ellington (1984b) 以往给出的许多昆虫的结果是一样的 (如上述, Ellington 的观测虽不能确定攻角, 但是能确定抬升角和拍动角). 果蝇的抬升角很大, 约 40° , 翅尖轨迹是一深 U 形状. 蜜蜂的特点是, 拍动幅度较小, 只有约 90° . 而食蚜蝇的特点是, 拍动平面是倾斜的. 蜻蜓的特点是显然的. 因而可以说, 上述拍动翅的运动参数测量结果代表了大多数昆虫的拍动运动. 为下一步研究提供了基础.

在第 2 节中提到, 只有将拍动翅视为一刚性板时, 才能用 3 个欧拉角: 拍动角, 抬

升角和攻角, 来描述翅的运动. 上述测量工作中 (Fry et al. 2005, Altshuler et al. 2005, Liu & Sun 2008, Mou et al. 2011), 都是将翅膀近似为一刚性板的, 而昆虫翅拍动中是有变形的. 这方面最近有了重要进展: 牛津大学 Taylor 的研究小组用 4 台高分辨率的高速摄像机, 并进一步改进了测量方法, 测出了自由飞行 (悬停) 的蜂蝇和系留飞行 (前飞) 的蝗虫翅膀的变形 (Walker et al. 2010). 作为例子, 图 4 给出了蜂蝇翅 25% 和 75% 翅长处处的翅剖面在下拍中各时刻的形状. 他们的结果为人们定量地研究变形对气动力的影响提供了基础.

应该指出, 上述自由飞行的拍动运动的定量测量均是针对悬停飞行的, 前飞的拍翅的运动学测量应为今后工作的一个重点.

5 前缘涡 (LEV)

第 3 节中说到的 3 个高升力机制中, 快速加速机制和快速上仰机制涉及的流动机理是比较简单的: 快速加速或快速上仰运动使翼在短时间内在其不同部位产生了方向不同的强涡层 (即产生了很大的涡量矩时间变化率), 从而产生高升力. 而另一个机制, 即不失速机制, 涉及前缘涡 (LEV) 的结构和演变及其稳定性 (这里, 稳定性指 LEV 附着于翅膀不脱落这一特性), 流动机理较复杂. 另外, 该机制较其他 2 个机制更重要 (如上文所说, 该机制产生的升力占整个拍动周期中的大部分). 因而, 人们近几年来对 LEV 进行了进一步研究 (Luo & Sun 2005, Shyy & Liu 2007, Shyy et al. 2009, Kim & Ghanil 2010, Ozen & Rochwell 2012, Jardin et al. 2012, Carn et al. 2013, Harbig et al. 2013, Garmann & Visbal 2014). 由于 LEV 是上拍或下拍中 “平动” (周向转动) 时的流动现象, 这些研究几乎都选择了翼在等攻角下做等速转动的简单情况来进行研究. 研究内容主要有两个方面.

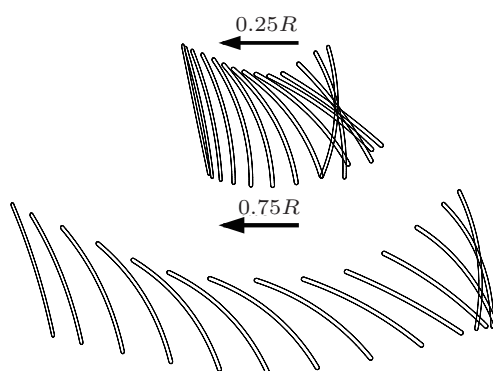


图 4

蜂蝇翅 25% 和 75% 翅长处处的翅剖面在下拍中各时刻的形状 (Walker et al. 2010)

一个方面是 LEV 的结构随时间 (或翼的转角) 的演变以及雷诺数和翼的几何参数 (展弦比等) 的影响, 主要有以下结果. LEV 在翼启动时形成, 翼转动约 40° 后, 其结构和环量随时间的变化就不大了; 而 LEV 的大小和环量沿翼展近似线性增大, 近似为一锥形涡 (图 5) (Luo & Sun 2005, Kim & Ghanil 2010, Harbig et al. 2013, Garmann & Visbal 2014). 在翼尖附近, LEV 将抬离翼面并转向流向方向, 与翼尖涡合并 (Ozen & Rochwell 2012, Jardin et al. 2012, Carn et al. 2013, Harbig 2013, Garmann & Visbal 2014). Jardin 等 (2012) 指出 LEV 在翼尖附近的转向和抬起, 是翼尖涡产生的向内的速度和 LEV 的轴向流 (向外) 的速度相互作用的结果.

Re 较小时, 例如 $Re = 10 \sim 200$, LEV 较松散; 随 Re 的增大, 其变得更紧凑 (Birch et al. 2004, Sun & Yu 2006, Harbig et al. 2013, Garmann & Visbal 2014). Lu 等 (2006) 的 PIV 实验发现, 当 $Re > 650$ 时, LEV 呈双涡结构 (图 6); 后来, 人们发现, 当 Re 更大时, 由于 Kelvin-Helmholtz 不稳定性, 连接前缘与 LEV 的涡层 (即向 LEV 输运涡量的涡层) 会形成若干小涡, LEV 会呈现多涡结构 (Ansari et al. 2009, Ozen & Rochwell 2012, Carn et al. 2013, Garmann & Visbal 2014). 当 Re 较大 (约大于 2000) 时, LEV 在翼的中部之外会出现螺旋型破裂; Re 更大时, LEV 上会出现小尺度结构 (Carn et al. 2013, Garmann et al. 2013, Harbig 2013). Harbig 等 (2013) 指出, 虽然 Re 增大时, LEV 变紧凑, 会出现破裂和产生小尺度结构, 但 LEV 的涡心的位置和环量不变. Wu 和 Sun (2004) 对拍动翼在 $Re = 20 \sim 1800$ 时的研究表明, 升力和阻力系数在 $Re < 150$ 时会随 Re 的减小而变小, 但当 $Re > 150$ 时, 气动导数随 Re 的变化不大. Garmann 和 Visbal (2014) 的结果表明, $Re = 3000$ 的升、阻力系数与 $Re = 5000$ 时几乎相同. 这些结果使人推想, 当 $Re > 150$ 时, 随着 Re 的增大, LEV 会变得紧凑, 会出现涡破裂和出现细小结构, 但由于总体位置和环量没有大的变化, 翼的升力和阻力系数变化不大. 这一想法应在将来的工作中研究.

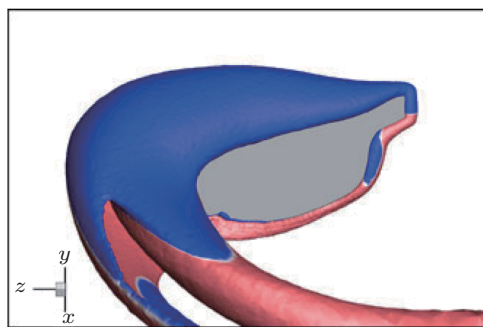


图 5

LEV, 翼转动约 40° 后 (Harbig et al. 2013)

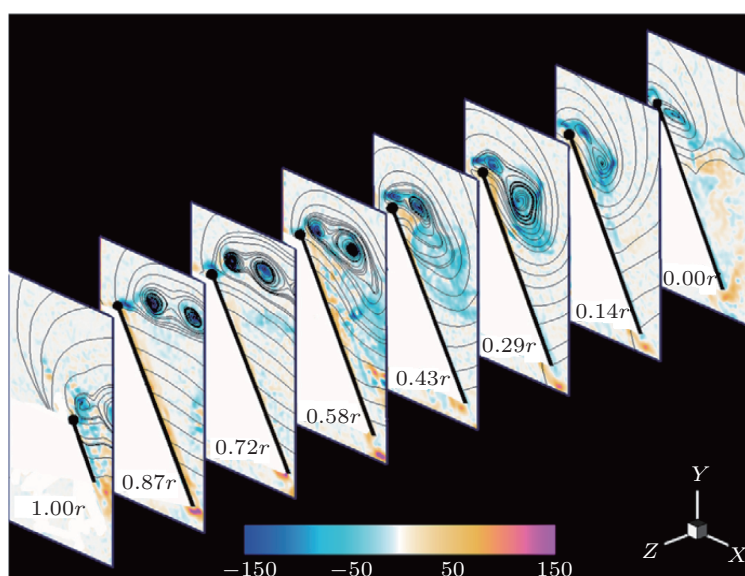


图 6

LEV 呈双涡结构 (Lu et al. 2006)

当展弦比 (AR) 增大 (保持 Re 不变) 时, 会在较小的 Re 下就出现双涡结构及涡破裂 (Harbig et al. 2013). 通常 LEV 在距翼根约 2 个弦长处就会覆盖上翼面, 即 LEV 尺寸与弦长相同 (Harbig et al. 2013, Garmann & Visbal 2014). 从而, 当翼的 AR 大于约 2 时, 翼外部的 LEV 有部分在后缘外 (Harbig et al. 2013, Garmann & Visbal 2014). 尽管 LEV 在翼外部的结构随 AR 的增大较大的不同, 但 Luo 和 Sun (2005), Harbig 等 (2013), Garmann 和 Visbal (2014) 的计算表明, 直到 $AR \approx 5.5$, 升力和阻力系数随 AR 没有太大的变化 (一般昆虫翅的 $AR < 5.5$). Harbig 等 (2013) 给出了 $AR = 7.3$ 的算例, 这时, 升力系数有了显著的减小. 上述工作并未仔细研究力为何随 AR 的增大流动结构有较大变化但气动力系数变化却变化不大的原因.

关于 LEV 研究的另一个方面是其稳定性 (即附着于上翼面不脱落) 问题. Ellington 等 (1996) 在鹰蛾翅 ($Re = 3400$) 及其模型翅上发现前缘涡时, 就观察到了有一从翅根到翅尖的轴向流. 他们认为是该轴向流将涡量输送到翅尖而流入下游, 避免了涡量不断增大而使涡脱落, 从而稳定了 LEV. 但 Birch 和 Dickinson (2001) 用模型果蝇翼 ($Re \approx 100$) 做实验时, 却发现几乎没有轴向流, LEV 也不脱落; 他们猜想不是轴向流, 而可能是翼尖涡的下洗作用减小了翅的有效攻角而使 LEV 不脱落. 后来 Birch 等 (2004) 又在 $Re = 120$ 和 $Re = 1400$ 的情况下进行了实验, 发现 2 种情况下 LEV 均不脱落, 但 $Re = 120$ 时几乎无轴向流, 而 $Re = 1400$ 时, 有很大轴向流; 因而, 他们认为, 可能在 Re 大小不同时, LEV 稳定的原因不同. Sun 和 Wu (2005), Kim 和 Gharil (2010),

Garmann 等 (2013), Harbig 等 (2013) 等的实验和计算均表明 Re 较大 (大于约 200) 时, LEV 上有较大的轴向流. 如果说 Re 较大时是轴向流使 LEV 稳定, 那么是什么机制产生了轴向流? Sun 和 Wu (2005) 计算了转动翼上的 LEV ($Re = 400$), 并将 N-S 方程写于转动坐标系上, 指出可能维持轴向流动的力有压力梯度产生的轴向力、哥氏力和离心力. 他们的计算表明, 压力梯度产生的力和离心力远大于哥氏力; Garmann 和 Visbal (2014) 在 $Re = 2000 \sim 5000$ 下的计算也给出了同样结果. 他们认为, Re 较大时, 是翅根到翅尖的压力梯度和离心力产生轴向流使 LEV 稳定的.

Wojcik 和 Buchholz (2014) 定量地分析了 LEV 中涡量输运 ($Re \approx 2000$); 他们指出轴向流作用远不足以完成所需的涡量输运. 他们认为, 由于 LEV 诱导作用, 翼附近产生了二次涡, 其反向涡量与 LEV 的涡量抵消, 是 LEV 稳定的原因. Shyy 等 (2009) 提出可能是翅尖涡的下洗作用使 LEV 附于翼面的. Lentink 和 Dickinson (2009) 提出可能是哥氏力和离心力使 LEV 稳定的, 但未给数据支持该说法.

总之, LEV 的稳定性问题, 目前还没有清楚的了解.

6 翅膀柔性变形及皱褶的影响

昆虫翅通常有皱褶 (Rees 1975), 在拍动过程中有周期性的变形 (Ellington 1984c, Ennos 1989, Walker et al. 2010). 人们对昆虫翅结构的力学特性的研究表明, 翅的皱褶使其在重量很轻的情况下却有较大的刚度 (Rees 1975, Nenman & Wootton 1988, Ennos 1988). 这些研究还预测, 由于翅膀翅脉和皱褶的分布及厚度的变化, 昆虫翅作拍动运动时的变形主要为沿展向方向的扭转和弦向的正弯度. 对自由飞行昆虫的观测证实了这一预测 (Ellington 1984c, Ennos 1989, Walker et al. 2002, Walker et al. 2010). Du 和 Sun (2008) 用计算的方法研究了随时间变化的扭转和弯度变形对气动力的影响; 扭转和弯度的大小取自 Wang 等 (2002) 的观测数据. 他们将变形翼与刚性翼比较, 刚性翼的攻角取为变形翼在回转半径 r_2 处翼剖面的攻角. 结果表明: 弯度增加升力和阻力; 而扭转对气动力的影响很小 (这是因为, 与刚性翼相比, 扭转增加了 r_2 以内翼剖面的攻角但减小了 r_2 以外翼剖面的攻角). Young 等 (2009) 测量了蝗虫前飞时翅的变形随时间的变化, 然后用数值计算方法研究了变形对气动力和能耗的影响. 他们发现变形可使飞行的能耗显著降低. Du 和 Sun (2010) 基于 Walker 等 (2010) 的测量数据, 用数值计算方法研究了蜂蝇悬停飞行时翅的变形的影响; 结果表明, 与刚性翼相比 (刚性翼的攻角保持与变形翼 r_2 处攻角相同), 升力增大约 10%, 阻力增大约 3%, 气动功减小约 5%. 他们的分析表明, 升阻力的增大主要是由于弯度产生的, 而气动功的减小是因为扭转使 r_2 内攻角变大, r_2 外攻角变小, 从而使气动力作用点向内移动, 气动力矩变小, 故气动功变小. 10% 的升力和 3% 的阻力的增加虽不算太大, 但 10% 的升力增加, 产

生此升力的功率又有 5% 降低, 两者结合, 会使平衡飞行的能耗显著减小; 这与 Young 等 (2009) 的结论相同.

上述研究用测量出的翅膀变形数据来给定边界条件, 计算变形的影响. 也有研究者试图用流固耦合的方法, 将翅的变形和变形对流动的影响一起确定. Ishihara 等 (2009) 将翅膀简化为二维翼, 用弹簧来模拟扭转柔性; 他们的计算表明, 翼在上下拍之间的翻转可通过扭转变形自动完成. Vanella 等 (2009) 和 Eldredge 等 (2010) 也研究二维翼, 他们将翼分为两段, 之间用弹簧连接, 用以模拟翼的弦向 (即弯度) 变形. 这一模型产生的弯度是负的, 与真实情况不符. 他们计算结果表明, 弦向变形使升力减小, 但会使升阻比略为增大. Zhao 等 (2010, 2011) 用具有柔性的三维翼进行了实验研究; 结果表明柔性变形对力和 LEV 都有显著影响. 由于模型翼的结构、材料弹性模量及质量分布与真实翼的不同, 产生的变形与昆虫拍动翼的不同 (例如弯度是负的), 结果虽有参考意义, 但不能代表真实翼的结果. 最近, Nakata 和 Liu (2012a) 针对昆虫翼发展了一种耦合求解 N-S 方程和结构动力学方程的流固耦合方法. 翅膀由翅脉和其间的薄膜构成; 翅脉的分布, 粗细变化, 膜的厚度变化及翅脉和膜的弹性模量均基于实验数据. 他们用这一方法研究了鹰蛾悬停飞行时翅的变形及其对流动的影响 (Nakata & Liu 2012b). 他们计算出的变形定性是正确的: 翅在展向方向扭转 (攻角沿展向方向减小) 并产生正弯度. 变形对气动力的影响与上面给定变形的计算结果 (Young et al. 2009, Du & Sun 2010) 相同, 及变形使升力增大, 气动功减小. 他们发现变形使 LEV 的破裂推迟 (鹰蛾的 $Re \approx 3500$, LEV 会破裂).

以上工作中只考虑了翅膀的变形, 而翅的皱褶与变形同时存在. 其对气动力的影响如何? Du 和 Sun (2012) 研究了两者同存在时的气动特性, 他们针对悬停飞行的蜂蝇进行研究, 因其是有变形和皱褶的测量数据; 结果如下: 无皱褶时, 变形使升力增大 9.7%, 使气动功减小 5.2%; 无变形时, 皱褶使升力减小 6.5%, 使气动功增大 2.2%. 当变形和皱褶同时存在时, 升力的增大 3%, 而气动功的减小 3%. 皱褶对升力的负作用会抵消弯度变形的正作用. 这表明, 皱褶和变形共同作用时, 气动力改变很小, 用刚性翼 (攻角为变形翼 r_2 处的攻角) 代替真实翼是一较好的近似. 这一结果是基于蜂蝇的实验数据给出的, 其他昆虫是否如此需进一步研究. Meng 和 Sun (2013) 给出了为何皱褶使升力减小的原因: 下翼面的皱褶中产生了较强的旋涡, 从而产生低压区; 而上翼面的皱褶处于分离区中, 流速低, 不能产生类似下翼面皱褶处那样的强涡和低压区, 这样就减小了升力.

上面对变形和皱褶的影响的研究中用了两种途径, 一种是用实验方法测量自由飞行中翅膀的变形, 然后用实验数据给定流动计算或实验中的边界条件, 求出气动力. 另一种是用流固耦合的计算或实验, 同时给出翅膀的变形和相应的气动力. 对于第一种途径, 虽然测量自由飞昆虫拍动翅的变形有一定难度, 但这种难度是可克服的, 得到

的变形也是接近真实的. 第 2 种途径需要给出翅膀上翅脉和翅膜的分布和变化, 皱褶的分布和变化, 活的机体的弹性模量, 等等, 这是十分困难的. 因而, 对于第 2 种途径, 因不能准确给出翅膀结构和材料特性, 这一途径是很难得到准确的结果的. 上面讲到 Du 和 Sun (2012) 关于蜂蝇悬停飞行的结果: 由于弯度变形和皱褶对气动力的影响会相互抵消, 用刚性平板翼是一很好的近似. 应对其他典型昆虫进行类似的研究, 若这一结果也适于其他昆虫, 则在考虑气动力时可忽略翅膀的变形和皱褶, 大大简化了问题.

7 拍动翅的尾涡结构

昆虫飞行时留下的尾迹 (尾涡) 是昆虫翅与空气相互作用的结果, 可视为 “行走的足迹”. 由尾涡结构和强度的变化可在一定程度上了解翅上的气动力特性. 另外, 昆虫之间的气动干扰也是由尾涡的诱导作用产生的. 因而人们对昆虫的尾涡结构有兴趣. 早期, Ellington (1984b) 假设悬停飞行的昆虫翅的每一次拍动产生一涡环, 尾迹由涡环串构成; 给定昆虫的重量, 平均升力就确定了; 从而涡环的强度和向下运动的速度可估计出, 进而可估算飞行的诱导功率. 最近 Wang 和 Wu (2010) 基于涡环串模型, 并采用有关气动力和涡量矩的关系的理论, 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, 其清楚地解释了涡环半径的增大和收缩、下洗速度对升力的影响, 以及刚开始拍动的几个周期的升力变化等问题. Aono 等 (2008) 对果蝇拍动翅的数值模拟表明, 每次拍动的尾涡近似为一涡环 (图 7). 果蝇翅拍动幅度较大, 约为 160° , 因而每次拍动开始和结束时两翅很接近, 故两翅的翅尖涡相连接, 形成了一涡环. 许多昆虫的

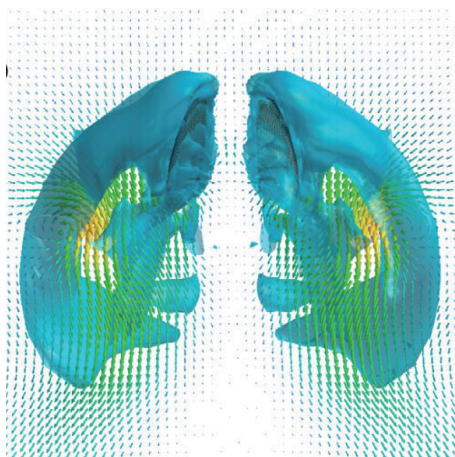


图 7

果蝇每次拍动的尾涡近似为一涡环 (Aono et al. 2008)

拍动幅度没有这样大, 约为 120° 左右 (例如 Ellington 1984c). Yu 和 Sun (2009) 用数值方法给出了拍动幅度为 120° 的模型昆虫悬停飞行时的尾涡结构 (图 8): 左右翅各有一涡环链; 涡环是倾斜的, 新产生的涡环和上一次拍动的涡环 “首尾相接”. 涡环是倾斜的 (即伴随涡环射流不是垂直向下的), 表明拍动翅不但产生了升力 (垂直力) 也产生了阻力 (水平力). Bomphrey 等 (2009) 对熊蜂在小速度下自由飞行 (拍动幅度约为 115°) 时的流动显示也表明左右翅的尾涡是分开的, 但由于实验条件限制, 尾涡结构不清楚. 目前还没有对尾涡结构的定量测量结果.

8 翼/身、左右翅气动干扰及地面效应

人们进行昆虫拍动翅的流动研究时, 通常针对一对翅膀或一个翅膀绕流进行研究. 这实际上是分别假设了翅膀和身体的相互作用及左右翅的相互作用很小. 这些假设是否合理呢? Aono 等 (2008) 用数值模拟的方法研究了模型果蝇悬停飞行时的身体/翅膀的干扰问题. 结果表明, 有身体时的周期平均升力较无身体时增大了约 2%. Yu 和 Sun (2009) 类似的研究也给出了相同的结果. Liang 和 Sun (2013) 的数值模拟研究还考虑了模型果蝇前飞 (前进比为 $0\sim 0.67$), 垂直上、下飞和侧滑 (前进比为 0.35) 以及几种机动飞行 (绕质心作偏航, 俯仰及滚转运动) 的情形. 结果表明有身体时与没有时周期平均气动力和力矩的差别小于 4.5%. Wang 和 Wu (2012) 在悬停飞行的涡环串模型中加入一球体来模拟身体, 涡环串在球中镜像给出其对翅膀的影响. 他们的结果表明身体的影响使不同昆虫的平均升力减小 $0.2\%\sim 8\%$. 这与 Aono 等 (2008), Yu 和 Sun (2009) 及 Liang 和 Sun (2013) 身体使平均升力略有增大的结果不同. Wang 和 Wu (2012) 的模型虽然作了较大的简化, 如将细长的身体假设为球体, 将翅膀的两条 “涡环链” (涡环是倾斜的) 视为一涡环串 (涡环是水平的) 等, 但还是抓住了尾涡的主要特征. 因而上述差别的原因需进一步探讨; 希望能有这方面的实验测量工作.

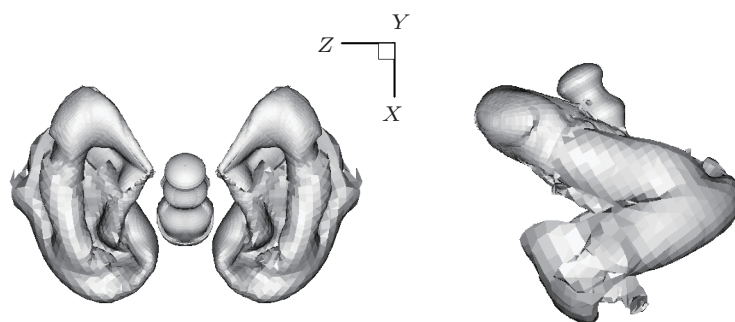


图 8

拍动幅度为 120° 的模型昆虫悬停飞行时的尾涡结构 (Yu & Sun 2009)

上面提及的 Yu 和 Sun (2009), Liang 和 Sun (2013) 对模型果蝇的数值模拟研究中, 还给出了左右翅的相互干扰结果, 干扰作用是较小的. 悬停飞行时, 与单独一个翅拍动的情况相比, 由于另一个翅的存在会使升力减小约 3%; 前飞时, 减小量更小. 他们给出的解释是, 左右翼各产生了一系列涡环, 左翼对右翼的影响与左翼的涡环在右翼附近产生的诱导速度有关. 而涡环的诱导速度的特点是, 涡环内有较大的诱导速度 (射流) 而环外的诱导速度很小, 右翼在左翼的涡环之外, “受到” 的诱速很小 (图 9), 故受到的气动影响小. 右翼对左翼的影响也可同样解释.

昆虫有时会接近地面或类似地面的物面飞行. Gao 和 Lu (2008) 用数值模拟方法研究了二维拍动翼的地面效应问题 ($Re = 100$). 离地高度较小时 (翼尾缘离地约 1 个弦长), 地面效应的作用是正的 (使升力增大); 高度增加 (尾缘离地约为 1.5~3 个弦长), 地面效应的作用却变成负的; 高度再增加, 地面效应消失. 出现地面效应使升力减小是拍动翼与受到地面阻碍后的尾涡相互作用的结果. 直升机 (Re 高) 近地悬停飞行的研究中, 并未观察到地面效应使升力减小的现象. 因而, 上面的结果是很有趣的.

9 微小昆虫

Wu 和 Sun (2004) 计算了 $Re = 13 \sim 1500$ 时拍动翼的气动力, 发现当 $Re < 100$ 时, 随着 Re 的减小, 升力系数迅速减小而阻力系数迅速增大. 例如, 对于同样的拍动运动, $Re = 20$ 时的平均升力系数只有 $Re = 200$ 时的 60%. Liu 和 Aono (2009) 计算了 $Re = 12, 134, 1123$ 和 6300 的情形, 也获得类似的结果. 升力小的原因是, 在 $Re < 100$ 时, 黏性作用变得显著, LEV 强度很弱, 结构十分 “松散”; 加速和上仰中产生的涡层也较弱. 因而, 第 3 节中讲到的 3 个高升力机制已不能产生较大的升力 (Wu & Sun 2004, Liu & Aono 2009). 许多微小昆虫 (身長约为 1 mm, 最小的, 例如一些蓟马, 身長只有 0.25 mm), Re 在 20 甚至 10 以下. 这些昆虫产生飞行所需的气动力应还有其他的机制.

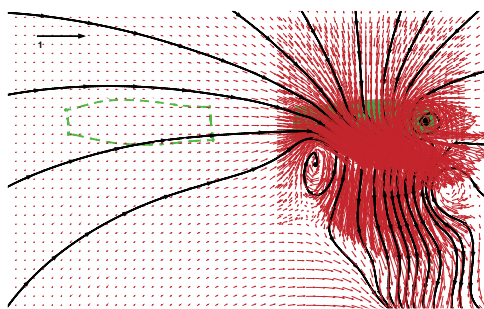


图 9

右翼在左翼的涡环之外, “受到” 的诱速很小 (Liang & Sun 2013)

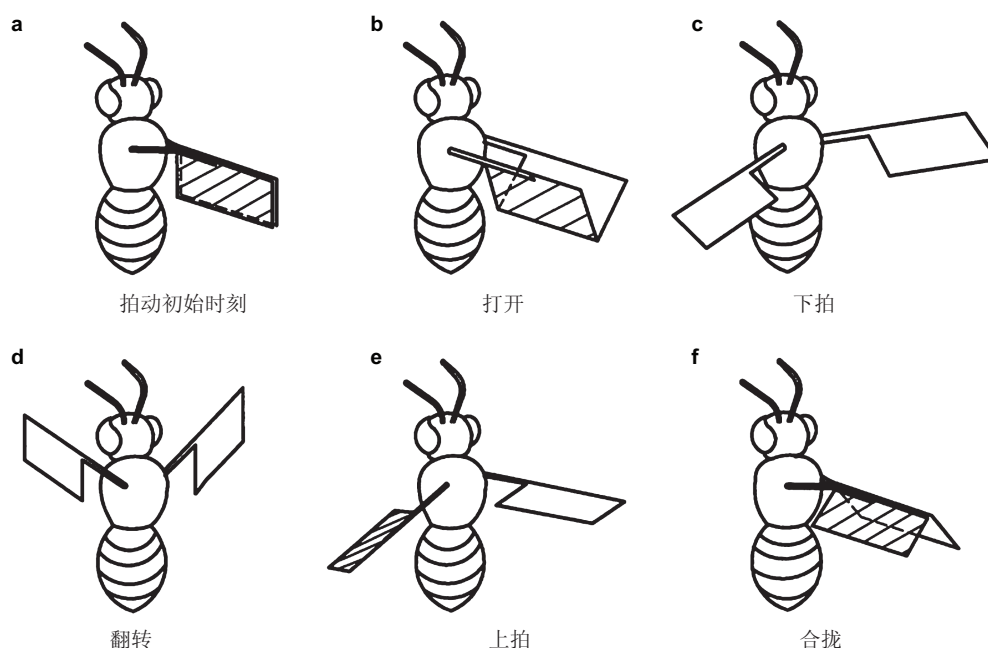


图 10

合拢 (clap) 打开 (fling)

上面提到, 台湾小黄蜂 ($Re \approx 15$) 采用“合拢打开”机制 (图 10) (Weis-Fogh 1973). 对于“合拢打开”运动, Lighthill (1973) 的理论分析解和 Manwozthy (1979) 的实验测量都表明其可产生大升力. Sun 和 Yu (2003), Miller 和 Peskin (2005) 用数值模拟的方法研究了包括“合拢打开”的拍动运动. 上述研究均采用二维翼, Sun 和 Yu (2006) 将上述研究推广到三维翼. 这些工作表明, 加上“打开合拢”产生的高升力后, 台湾小黄蜂拍动翼可产生足够平衡重量的升力. 他们指出了一个问题的: “打开合拢”中产生了附加的升力, 但产生此升力时翼上也产生了十分大的阻力 (大于升力 5 倍以上). 以上的研究中采用的是刚性翼, Miller 和 Peskin (2009) 研究了柔性翼的情况, 发现柔性翼的“打开合拢”可产生更大些的升力, 且阻力小了许多.

从目前的文献上看, 除了台湾小黄蜂之外, 还没有观察到其他微小昆虫用“合拢打开”运动. 例如某种蓟马, 翅长为 0.5 mm, $Re = 15$, 其拍动方式与一般的昆虫无异, 没有“合拢打开”运动 (Tanaka 1995). 不同的是, 其翅膀是由一根杆加上刚毛构成 (图 11). Sunada 等 (2002) 测量了这种翅膀的模型翼 (在平板翼上开若干缝, 称为“梳子翼”) 上的气动力. 发现其产生的气动力比平板翼的还小. 可以说, 微小昆虫 ($Re = 100$ 以下) 产生高升力的机制还有待探索. 还有, 因为体积甚小, 拍动频高, 测量较困难, 微小昆虫的拍动翅的完整和定量的运动学测量还没有. 运动学测量是研究升力机制的



图 11

一种蓟马, 翅长约为 0.5 mm (Tanaka 1995)

基础, 应先进行这一工作.

10 蝴蝶和蜻蜓

蝴蝶与其他昆虫甚不同: 其翅膀展弦比较小 (甚至小于 1), 上拍时翅膀不翻转, 拍动频率低, 飞行中身体有较大幅度的上下和俯仰震荡. 对蝴蝶飞行的空气动力学研究相对蝇、蜂、蛾等的少很多. 早期的工作主要是运动学观测和气动力的定性分析. Betts 和 Wootton (1988), Dudley (1990) 用高速摄像机观测了蝴蝶前飞和作机动飞行时身体和翅膀的运动. Brodshy (1991), Srygley 和 Thomar (2002) 分别对在风洞中作系留飞行和自由飞行的蝴蝶的尾迹作了流动显示实验. Dudley (1991) 用定常空气动力学理论粗略估算了飞行的需用功率. Sunada 等 (1993) 研究了蝴蝶起飞时的运动学和空气动力学问题. 以上研究工作中, 只有 Sunada 等 (1993) 的工作定量地研究了非定常流动; 作者用非定常面元法计算了起飞时翅膀打开的气动力, 发现是该蝴蝶是用“合拢打开”机制来产生起飞时的大升力的. 该工作只研究了第 1 次下拍中的流动.

最近有 2 项工作 (Huang & Sun 2012, Yokoyama et al. 2013) 对蝴蝶飞行的流动作了定量分析. Huang 和 Sun (2012) 用耦合数值求解运动方程和 N-S 方程的方法, 研究了一模型蝴蝶前飞时的流动和气动力 (模型蝴蝶翅膀的拍动参数基于 Dudley (1990) 的实测数据). 他们通过不断改变初始条件和拍动幅度, 获得近似的平衡飞行的周期解. 他们的主要结果如下. 翅膀产生的气动力几乎与身体的纵轴垂直, 下拍产生的远

大于上拍的。下拍时, 身体的俯仰角很小 (即身体几乎是水平的), 下拍产生的较大的气动力方向向上并略向后, 提供了支持重量的垂直力和一个较小的向后的水平力; 上拍时, 身体俯仰角较大, 上拍产生的较小的气动力方向向前并略向下, 提供了一向前的水平力, 其克服身体阻力和上拍时产生的向后的水平力。这表明蝴蝶身体的俯仰震荡起了其他昆虫翅膀翻转的作用。也就是说, 其他昆虫是通过改变翅膀的攻角 (及抬升角和拍动平面) 来使气动力指向所需的方向, 而蝴蝶是通过身体的俯仰角变化来达到此目的。他们还给出了该模型蝴蝶的尾涡系 (图 12)。翅的前后缘和侧缘均产生较强的涡, 形成一涡环。他们认为, 下拍中产生的大升力可能与该涡环有关。Yokoyama 等 (2013) 测量了一种蝴蝶前飞时的身体运动和翅膀拍动运动参数; 并基于测量的身体和翅膀运动参数用数值求解 N-S 方程的方法, 计算了气动力和尾涡结构; 结果与 Huang 和 Sun (2012) 的类似。给定身体运动和拍动运动即是给出了平衡飞行的周期解。他们还在在此基础上用耦合求解运动方程和 N-S 方程的方法模拟了该蝴蝶的自由飞行, 发现其很快就偏离了平衡飞行的解, 表明了飞行是不稳定的。上述 2 项工作均未深入分析蝴蝶的高升力机制与其他昆虫的有何不同。

第 3 节中讲到, 蜻蜓悬停和前飞时前后翅之间的气动干扰不大, 且干扰是使升力略有减小 (Sun & Lan 2004, Yamamoto & Isogai 2005)。那里的工作只考虑了气动力, 后来人们进一步考查了能耗问题 (Wang & Russell 2007, Usherwood & Lehman 2008), 发现悬停飞行 (两翅相位差 180°) 时前后翅的影响虽然对升力影响不大, 但对产生该升力的能耗有明显影响: 使能耗减小。能耗减小的机制还没有清楚的解释。

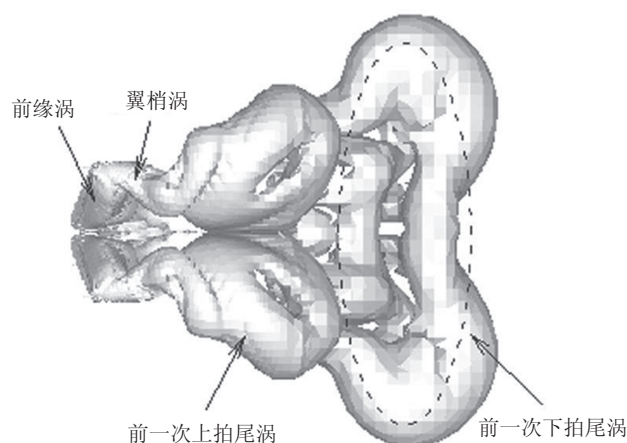


图 12

蝴蝶的尾涡系 (Huang & Sun 2012)

蜻蜓是少数能作滑翔飞行的昆虫之一. Zhang 和 Lu (2009) 研究了滑翔飞行条件下前后翅的干扰问题, 发现干扰增大了升力, 减小了阻力, 很有益于提高滑翔飞行的性能. 他们通过对流动的分析, 给出了上述现象的解释: 前后翅和两者间的间隔一起, 有如一个机翼和其开缝襟翼, 流过开缝的气流可控制后翅的分离, “襟翼” 又可使前翅的环量增加.

11 机动飞行

昆虫经常作机动飞行. 典型的机动飞行有: 快速加速或急停、快速转弯、Saccade (悬停飞行中的快速 90° 转向)、起飞和着陆等. 人们猜想这些飞行中可能有很大的气动力和新的气动力机制. 对于这些机动飞行, 虽有很多照片和身体运动的描述, 但只有少数工作对翅膀拍动运动作定量测量.

Fry 等 (2003) 和 Bergo 等 (2010) 测量了果蝇, Zhang 和 Sun (2010) 测量了蜂蝇, 作 Saccade 机动时身体和翅膀的运动学参数; 基于运动学参数, 他们用实验测量 (Fry et al. 2003) 和数值计算 (Bergo et al. 2010, Zhang & Sun 2010) 获得 Saccade 机动中翅膀的气动力. Card 和 Dickinson (2008), Chen 等 (2013) 用类似方法分别研究了果蝇和蜂蝇的起飞; Chen 和 Sun (2014) 也研究了果蝇的起飞. Muijres 等 (2014) 研究了果蝇前飞时的快速转弯; Wang 等 (2013) 研究了蜻蜓前飞的快速转弯. 上述研究发现, Saccade 机动和前飞中快速转弯中, 两翅产生了较大的力矩, 而这些力矩是靠略增大一翅的气动力同时较大幅度减小另一翅的气动力来产生的, 即这些机动飞行中并没有用新的高升力机制; 蜂蝇的起飞较缓慢, 升力只略大于重量, 也无新的高升力机理; 而果蝇的起飞十分快, 但很大的垂直力是腿部的弹跳产生的, 也无需翅的高升力.

上述 Saccade 机动和前飞中快速转弯机动主要涉及改变运动方向. 快速加速、急停、跃升等快速改变运动速度的机动飞行还没有翅膀拍动的运动学参数的测量, 因而, 是否有新高升力机理还不清楚, 应在今后的工作中研究.

12 对今后研究工作的建议

- (1) 昆虫前飞时翅膀拍动运动的测量; 基于翅膀运动测量数据, 用模型试验和数值模拟的方法, 研究前飞时的流动和气动力问题, 探索可能存在的气动力新机制.
- (2) 快速加速、减速 (急停) 等机动飞行时翅膀的运动学测量和流动机理的研究.
- (3) 微小昆虫 ($Re < 100$) 的翅膀拍动运动的测量及气动力机理研究.
- (4) 蝴蝶飞行产生高升力的机理研究.
- (5) 前缘涡稳定 (不脱落) 的机理的研究.

致 谢 国家自然科学基金 (11232002) 资助项目.

参考文献

- Altshuler D L, Dickson W B, Vance J T, Roberts S P, Dickinson M H. 2005. Short-amplitude high frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight. *PNAS.*, **102**: 18213-18218.
- Ansari S A, Phillips N, Stabler G, Zbikowski R, Knowles K. 2009. Spanwise flow on an impulsively-started rotating wing at low Reynolds numbers. In: Proceedings of 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Antonio, Texas, AIAA-2009-4032: 1-9.
- Ansari S A, Zbikowski R, Knowles K. 2006. Aerodynamic modeling of insect-like flapping flight for micro air vehicles. *Prog. Aerosp. Sci.*, **42**: 129-172.
- Aono H, Liang F, Liu H. 2008. Near- and far- field aerodynamics in insect hovering flight: An integrated computational study. *J. Exp. Biol.*, **211**: 239-257.
- Ansari S A. 2004. A nonlinear, unsteady, aerodynamic model for insect-like flapping wings in the hover with micro air vehicle applications. [PhD Thesis]. Shrivenham: Cranfield University.
- Berman G J, Wang Z J. 2007. Energy-minimizing kinematics in hovering insect flight. *J. Fluid Mech.*, **582**: 153-168.
- Bergou A J, Ristroph L, Guckenheimer J, Cohen I, Wang Z J. 2010. Fruit flies modulate passive wing pitching to generate in-flight turns. *Phys. Rev. Lett.*, **104**: 148101.
- Betts C R, Wootton R J. 1988. Wing shape and flight behaviour in butterflies (Lepidoptera: papilionoidea and hesperioidea): A preliminary analysis. *J. Exp. Biol.*, **138**: 271-288.
- Birch J M, Dickinson M H. 2001. Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. *Nature*, **412**: 729-733.
- Birch J M, Dickinson M H. 2003. The influence of wing-wake interactions on the production of aerodynamic forces in flapping flight. *J. Exp. Biol.*, **206**: 2257-2272.
- Birch J M, Dickson W B, Dickinson M H. 2004. Force production and flow structure of the leading edge vortex on flapping wings at high and low Reynolds numbers. *J. Exp. Biol.*, **207**: 1063-1072.
- Bomphrey R J, Taylor G K, Thomas A L R. 2009. Smoke visualization of free-flying bumblebees indicates independent leading-edge vortices on each wing pair. *Exp Fluids*, **46**: 811-821.
- Brodsky A K. 1991. Vortex formation in the tethered flight of the peacock butterfly *Inachis Io* L. (Lepidoptera, Nymphalidae) and some aspects of insect flight evolution. *J. Exp. Biol.*, **161**: 77-95.
- Card G, Dickinson M H. 2008. Performance trade-offs in the flight initiation of *Drosophila*. *J. Exp. Biol.* **211**: 341-353.
- Carr Z R, Chen C, Ringuette M J. 2013. Finite-span rotating wings: three-dimensional vortex formation and variations with aspect ratio. *Exp. Fluids*, **54**: 1-26.
- Chen M W, Zhang Y L, Sun M. 2013. Wing and body motion and aerodynamic and leg forces during take-off in droneflies. *J. R. Soc. Interface*, **10**: 20130808.
- Chen M W, Sun M. 2014. Wing/body kinematics measurement and force and moment analyses of the takeoff flight of fruitflies. *Acta Mechanica Sinica*, **30**: 495-506.
- Davis W R, Kosichi B B, Boroson D M, Kostishack D F. 1996. Micro air vehicle for optical surveillance. *The Lincoln Laboratory J.*, **9**: 197-217.
- Dickinson M H, Götz K G. 1993. Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers. *J. Exp. Biol.*, **174**: 45-64.
- Dickinson M H, Lehman F O, Sane S P. 1999. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science*, **284**: 1954-1960.

- Du G, Sun M. 2008. Effects of unsteady deformation of flapping wings on its aerodynamic forces. *Appl. Math. Mech. Engl. Ed.*, **29**: 731-741.
- Du G, Sun M. 2010. Effects of wing deformation on aerodynamic forces in hovering hoverflies. *J. Exp. Biol.*, **213**: 2273-2283.
- Du G, Sun M. 2012. Aerodynamic effects of corrugation and deformation in flapping wings of hovering hoverflies. *J. Theor. Biol.*, **300**: 19-28.
- Dudley R. 1990. Biomechanics of flight in neotropical butterflies: Morphometrics and kinematics. *J. Exp. Biol.*, **150**: 37-53.
- Dudley R. 1991. Biomechanics of flight in neotropical butterflies: Aerodynamics and mechanical power requirements. *J. Exp. Biol.* **159**: 335-357.
- Dudley R. 2000. The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution. Princeton: Princeton University Press.
- Dudley R, Ellington C P. 1990a. Mechanics of forward flight in bumblebees: I. Kinematics and morphology. *J. Exp. Biol.*, **148**: 19-52.
- Dudley R, Ellington C P. 1990b. Mechanics of forward flight in bumblebees: II. Quasi-steady lift and power requirements. *J. Exp. Biol.*, **148**: 53-88.
- Eldredge J D, Toomey J, Medina A. 2010. On the roles of chord-wise flexibility in a flapping wing with hovering kinematics. *J. Fluid Mech.* **659**: 94-115
- Ellington C P. 1984a. The aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **305**: 1-15.
- Ellington C P. 1984b. The aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological parameters. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **305**: 17-40.
- Ellington C P. 1984c. Aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **305**: 41-78.
- Ellington C P. 1984d. The aerodynamics of hovering insect flight. V. A vortex theory. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **305**: 115-144.
- Ellington C P. 1991. Aerodynamics and the origin of insect flight. *Adv. Insect Physiol.*, **23**: 171-210.
- Ellington C P. 1995. Unsteady aerodynamics of insect flight. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, **49**: 109-129.
- Ellington C P. 1999. The novel aerodynamics of insect flight: Applications to micro-air vehicles. *J. Exp. Biol.*, **202**: 3439-3448.
- Ellington C P, Machin K E, Casey T M. 1990. Oxygen consumption of bumblebees in forward flight. *Nature*, **347**: 472.
- Ellington C P, Van Den Berg C, Willmott A P, Thomas A L R. 1996. Leading-edge vortices in insect flight. *Nature*, **384**: 626-630.
- Ennos A R. 1988. The importance of torsion in the design of insect wings. *J. Exp. Biol.*, **140**: 137-160.
- Ennos A R. 1989. The kinematics and aerodynamics of the free flight of some Diptera. *J. Exp. Biol.*, **142**: 49-85.
- Fry S N, Sayaman R, Dickinson M H. 2003. The aerodynamics of free-flight maneuvers in *Drosophila*. *Science*, **300**: 495-498.
- Fry S N, Sayaman R, Dickinson M H. 2005. The aerodynamics of hovering flight in *Drosophila*. *J. Exp. Biol.*, **208**: 2303-2318.

- Fung Y C. 1969. An Introduction to the Theory of Aeroelasticity. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chapman & Hall, Ltd., London.
- Garmann D J, Visbal M R. 2014. Dynamics of revolving wings for various aspect ratios. *J. Fluid Mech.*, **748**: 932–956.
- Garmann D J, Visbal M R, Orkwis P. 2013. Three-dimensional flow structure and aerodynamic loading on a revolving wing. *Phys. Fluids*, **25**: 034101-034127.
- Harbig R R, Sheridan J, Thompson M C. 2013. Reynolds number and aspect ratio effects on the leading-edge vortex for rotating insect wing planforms. *J. Fluid Mech.*, **717**: 166–192.
- Huang H, Sun M. 2012. Forward flight of a model butterfly: Simulation by equations of motion coupled with the Navier–Stokes equations. *Acta Mechanica Sinica*, **28**: 1–12.
- Ishihara D, Horie T, Denda M. 2009. A two-dimensional computational study on the fluid–structure interaction cause of wing pitch changes in dipteran flapping flight. *J. Exp. Biol.*, **212**: 1–10.
- Jardin T, Farcy A, David L. 2012. Three-dimensional effects in hovering fapping flight. *J. Fluid Mech.*, **702**: 102–125.
- Kim D, Gharib M. 2010. Experimental study of three-dimensional vortex structures in translating and rotating plates. *Exp. Fluids*, **49**: 329–339.
- Lan S L, Sun M. 2001. Aerodynamic properties of a wing performing unsteady motions at low Reynolds number. *Acta. Mechanica*, **149**: 135–147.
- Lentink D, Dickinson M H. 2009. Rotational accelerations stabilize leading edge vortices on revolving fly wings. *J. Expl Biol.*, **212**: 2705–2719.
- Liang B, Sun M. 2013. Aerodynamic interactions between wing and body of a model insect at forward flight and in maneuvers. *J. Bionic Eng.*, **10**: 19–27.
- Lighthill M J. 1973. On the Weis-Fogh mechanism of lift generation. *J. Fluid Mech.*, **60**: 1–17.
- Liu H, Ellington C P, Kawachi K, Van Den Berg C, Willmott A P. 1998. A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering. *J. Exp. Biol.*, **201**: 461–477.
- Liu H, Aono H. 2009. Size effects on insect hovering aerodynamics: An integrated computation study. *Bioinsp. Biomim.* **4**: 015002.
- Liu Y P, Sun M. 2008. Wing kinematics measurement and aerodynamics of hovering drone-flies. *J. Exp. Biol.*, **211**: 2014–2025.
- Lu Y, Shen G X. 2008. Three-dimensional flow structures and evolution of the leading-edge vortices on a flapping wing. *J. Exp. Biol.*, **211**: 1221–1230.
- Luo G Y, Sun M. 2005. The effects of corrugation and wing planform on the aerodynamic force production of sweeping model insect wings. *Acta Mechanica Sinica*, **21**: 531–541.
- Ma K Y, Chirarattananon P, Fuller S B, Wood R J. 2013. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot. *Science*, **340**: 603–607.
- Maxworthy T. 1979. Experiments on the Weis-Fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight. Part 1. Dynamics of the “fling”. *J. Fluid Mech.*, **93**: 47–63.
- Meng X G, Sun M. 2013. Aerodynamic effects of wing corrugation at gliding flight at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, **25** : 071905.
- Miller L A, Peskin C S. 2005. A computational fluid dynamics of “clap and fling” in the smallest flying insects. *J. Exp. Biol.*, **208**: 195–212.
- Miller L A, Peskin C S. 2009. Flexible clap and fling in tiny insect flight. *J. Exp. Biol.*, **212**: 3076–3090.

- Mou X L, Liu Y P, Sun M. 2011. Wing motion measurement and aerodynamics of hovering true hoverflies. *J. Exp. Biol.*, **214**: 2832-2844.
- Muijres F T, Elzinga M J, Melis J M, Dickinson M H. 2014. Flies evade looming targets by executing rapid visually directed banked turns. *Science*, **344**: 172-177.
- Nakata T, Liu H. 2012a. A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings. *J. Comput. Phys.*, **231**: 1822-1847.
- Nakata T, Liu H. 2012b. Aerodynamic performance of a hovering hawkmoth with flexible wings: A computational approach. *Proc. R. Soc. B.*, **279**: 722-731.
- Newman D J S, Wootton R J. 1986. An approach to the mechanics of pleating in dragonfly wings. *J. Exp. Biol.*, **125**: 361-372.
- Ozen C A, Rockwell D. 2012. Three-dimensional flow structure on a rotating wing. *J. Fluid Mech.*, **707**: 541-550.
- Pesavento U, Wang Z J. 2004. Navier-Stokes solutions, model of fluid forces, and center of mass elevation. *Phys. Rev. Lett.*, **93**: 116-164.
- Rees C J C. 1975. Form and function in corrugated insect wings. *Nature*, **256**: 200-203.
- Sane S P. 2003. The aerodynamics of insect flight. *J. Exp. Biol.*, **206**: 4191-4208.
- Sane S P, Dickinson M H. 2002. The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight. *J. Exp. Biol.*, **205**: 1087-1098.
- Shyy W, Liu H. 2007. Flapping wings and aerodynamic lift: The role of leading-edge vortices. *AIAA Journal*, **45**: 2817-2819.
- Shyy W, Trizilla P, Kang C K, Aono H. 2009. Can Tip Vortices enhance lift of a flapping wing? *AIAA Journal*, **2**: 289-293.
- Shyy W, Aono H, Chimakurthi S K, Trizila P, Kang C K, Cesink C E S, Liu H. 2010. Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity. *Prog. Aerosp. Sci.*, **46**: 284.
- Shyy W, Berg M, Ljungqvist D. 1999. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Prog. Aerosp. Sci.*, **35**: 455.
- Shyy W, Lian Y, Tang J, Viieru D, Liu H. 2008. Aerodynamics of Low Reynolds Number Fliers. New York: Cambridge University Press.
- Srygley R B, Thomas A L R. 2002. Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies. *Nature*, **420**: 660-664.
- Sun M. 2005. High-lift generation and power requirements of insect flight. *Fluid Dynamics Research*, **37**: 21-39.
- Sun M, Du G. 2003. Lift and power requirements of hovering insect flight. *Acta Mechanica Sinica*, **19**: 458-469.
- Sun M, Lan S L. 2004. A computational study of the aerodynamic forces and power requirements of dragonfly (*Aeschna juncea*) hovering. *J. Exp. Biol.*, **207**: 1887-1901.
- Sun M, Tang J. 2002. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion. *J. Exp. Biol.*, **205**: 55-70.
- Sun M, Wu J H. 2004. Large aerodynamic forces on a sweeping wing at low Reynolds number. *Acta Mechanica Sinica*, **20**: 24-31.
- Sun M, Yu X. 2003. Flow around two airfoils performing fling and subsequent translation and translation and subsequent flap. *Acta Mechanica Sinica*, **19**: 103-117.

- Sun M, Yu X. 2006. Aerodynamic force generation in hovering flight in a tiny insect. *AIAA Journal*, **44**: 1532-1540.
- Sunada S, Kawachi K, Watanabe I. 1993. Performance of a butterfly in take-off flight. *J. Exp. Biol.*, **183**: 249-227.
- Sunada S, Takashima H, Hattori T, Yasuda K, Kawachi K. 2002. Fluid-dynamic characteristics of a bristled wing. *J. Exp. Biol.*, **205**: 2737-2744.
- Tanaka S. 1995. Thrips' flight. Part 1. In: Symposia 95 of Exploratory Research for Advanced Technology, Japan Science and Technology Corporation, Tokyo, 27-34.
- Usherwood J R, Ellington C P. 2002a. The aerodynamics of revolving wings. I. Model hawkmoth wings. *J. Exp. Biol.*, **205**: 1547-1564.
- Usherwood J R, Ellington C P. 2002b. The aerodynamics of revolving wings. II. Propeller force coefficients from mayfly to quail. *J. Exp. Biol.*, **205**: 1565-1576.
- Usherwood J R, Lehmann F. 2008. Phasing of dragonfly wings can improve aerodynamic efficiency by removing swirl. *J. R. Soc. Interface*, **5**: 1303-1307.
- Vanella M, Fitzgerald T, Preidikman S, Balaras E, Balachandran B. 2009. Influence of flexibility on the aerodynamic performance of a hovering wing. *J. Exp. Biol.*, **212**: 95-105.
- Vogel S. 1967a. Flight in *Drosophila*. II. Variations in stroke parameters and wing contour. *J. Exp. Biol.*, **46**: 383-392.
- Vogel S. 1967b. Flight in *Drosophila*. III. Aerodynamic characteristics of fly wings and wing models. *J. Exp. Biol.*, **46**: 431-443.
- Walker S M, Thomas A L R, Taylor G K. 2010. Deformable wing kinematics in free-flying hoverflies. *J. R. Soc. Interface*, **7**: 131-142.
- Wang H, Zeng L J, Liu H, Yin C Y. 2003. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies. *J. Exp. Biol.*, **206**: 745-757.
- Wang H, Zeng L J, Yin C Y. 2002. Measuring the body position, attitude and wing deformation of a free-flight dragonfly by combining a comb fringe pattern with sign points on the wing. *Measurement Science and Technology*, **13**: 903-908.
- Wang Z J. 2004. The role of drag in insect hovering. *J. Exp. Biol.*, **207**: 4147-4155.
- Wang Z J. 2005. Dissecting insect flight. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **37**: 183-210.
- Wang Z J, Russell D. 2007. Effect of forewing and hindwing interactions on aerodynamic forces and power in hovering dragonfly flight. *Phys. Rev. Lett.*, **99**: 148101.
- Wang X X, Wu Z N. 2010. Stroke-averaged lift forces due to vortex rings and their mutual interactions for a flapping flight model. *J. Fluid Mech.*, **654**: 453-472.
- Wang X X, Wu Z N. 2012. Lift force reduction due to body image of vortex for a hovering flight model. *J. Fluid Mech.*, **709**: 648-658.
- Weis-Fogh T. 1972. Energetics of hovering flight in hummingbirds and in *Drosophila*. *J. Exp. Biol.*, **56**: 79-104.
- Weis-Fogh T. 1973. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanism for lift production. *J. Exp. Biol.*, **59**: 169-230.
- Weis-Fogh T, Jensen M. 1956. Biology and physics of locust flight. I. Basic principles of insect flight. A critical review. *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.*, **239**: 415-458.

- Willmott A P, Ellington C P. 1997a. The mechanics of flight in the hawkmoth *Manduca sexta*. I. Kinematics of hovering and forward flight. *J. Exp. Biol.*, **200**: 2705-2722.
- Willmott A P, Ellington C P. 1997b. The mechanics of flight in the hawkmoth *Manduca sexta*. II. Aerodynamic consequences of kinematic and morphological variation. *J. Exp. Biol.*, **200**: 2723-2745.
- Wilson J. 2001. Micro warfare. *Popular Mechanics*, **2**: 62.
- Wojcik C J, Buchholz J H J. 2014. Vorticity transport in the leading-edge vortex on a rotating blade. *J. Fluid Mech.*, **743**: 249-261.
- Wootton R J. 1981. Palaeozoic insects. *Annu. Rev. Ent.*, **26**: 319-344.
- Wu J H, Sun M. 2004. Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing. *J. Exp. Biol.*, **207**: 1137-1150.
- Wu J H, Sun M. 2005. The influence of the wake of a flapping wing on the production of aerodynamic forces. *Acta Mechanica Sinica*, **21**: 411-418.
- Wu T Y. 2011. Fish swimming and bird/insect flight. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **43**: 25-48.
- Yamamoto M, Isogai K. 2005. Measurement of unsteady aerodynamic forces for a mechanical dragonfly model. *AIAA Journal*, **43**: 2475-2480.
- Yokoyama N, Senda K, Iima M, Hirai N. 2013. Aerodynamic forces and vortical structures in flapping butterfly's forward flight. *Physics of Fluids*, **25**: 021902.
- Young J, Walker S M, Bompfrey R J, Taylor G K, Thomas L R. 2009. Details of insect wing design and deformation enhance aerodynamic function and flight efficiency. *Science*, **325**: 1549-1552.
- Yu X, Sun M. 2009. A computational study of the wing-wing and wing-body interactions of a model insect. *Acta Mechanica Sinica*, **25**: 421-431.
- Yu Y L, Tong B G. 2005. A flow control mechanism in wing flapping with stroke asymmetry during insect forward flight. *Acta Mechanica Sinica*, **21**: 218-227.
- Yu Y L, Tong B G, Ma H Y. 2003. An analytical approach to theoretical modeling of highly unsteady viscous flow excited by wing flapping in small insects. *Acta Mechanica Sinica*, **19**: 508-516.
- Yu Y L, Tong B G, Ma H Y. 2005. Unsteady flow mechanics revisited in insect flapping flight. *Acta Mechanica Sinica*, **37**: 257-265.
- Zhang J, Lu X Y. 2009. Aerodynamic performance due to forewing and hindwing interaction in gliding dragonfly flight. *Physical Review E*, **80**: 017302-017305.
- Zhang Y L, Sun M. 2010. Wing kinematics measurement and aerodynamics of free-flight maneuvers in drone-flies. *Acta Mechanica Sinica*, **26**: 371-382.
- Zanker J M. 1990. The wing beat of *Drosophila melanogaster*. I. Kinematics. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **327**: 1-18.
- Zhao L, Huang Q, Deng X Y, Sane S P. 2010. Aerodynamic effects of flexibility in flapping wings. *J. R. Soc. Interface*, **7**: 485-497.
- Zhao L, Deng X Y, Sane S P. 2011. Modulation of leading edge vorticity and aerodynamic forces in flexible flapping wings. *Bioinsp. Biomim.*, **6**: 036007.

(责任编辑: 黎作武)

Aerodynamics of insect flight

SUN Mao[†]

Institute of fluid mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China

Abstract Insects are the earliest, most numerous and smallest fliers in the world. They can hover, fly forward, climb and descend with ease while demonstrating amazing stabilities, and they can also maneuver in impressive ways like no other organisms could. Although the wing of an insect beats at high frequency, the wing's relative velocity is small owing to the small wing length. As a result, the mean lift coefficient of wing required to balance the insect weight is relatively high, about 1.5–2, much higher than that of an airplane at cruising flight. The Reynolds number of insects' wings is small, ranging from about 10 to 3 500. How the required high-lift coefficient is produced at such low Reynolds number? Researchers are very interested in this question and in recent years, significant progress has been made in the area. Works before 2005 have been discussed in detail in several review papers, and in this article, we review the advances made since 2005. We begin with an overview of the flapping kinematics and basic equations of fluid dynamics. It is followed by a summary of the works before 2005. Then we review the advances made since 2005, dealing in turn with measurement of wing motion in freely-flying insects, leading-edge vortex, effect of wing deformation and corrugation, vortex wake of flapping wings, ground effect and aerodynamic interaction between wings and body, flight of tiny insects, flight of butterfly and dragonfly, and maneuvering flight. Finally, we make remarks on the state-of-the-art of this research field and speculate its outlooks in the near future.

Keywords insect, flight, aerodynamics

Received: 5 November 2014; accepted: 24 November 2014; online: 15 December 2014

[†] E-mail: m.sun@buaa.edu.cn

Cite as: Sun M. Aerodynamics of insect flight. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201501

© 2015 *Advances in Mechanics*.



孙茂, 1955 年 8 月出生; 1978 年毕业于北京航空学院空气动力学专业, 1983 年获美国普林斯顿大学航空工程系博士学位, 1983—1985 年在美国马里兰大学做博士后工作. 1989 年起任北京航空航天大学教授; 是“长江学者”特聘教授, 国务院学科评议组 (力学) 成员、中国空气动力学学会副理事长、国际刊物 *Journal Bionic Engineering* 和 *Bioinspiration and Biomimetics* 的编委. 主要研究动物飞行的流体力学机理和飞行控制原理, 为微型飞行器提供气动布局和控制方式的新概念. 研究成果获得“教育部自然科学奖”一等奖和“国家自然科学奖”二等奖; 最近应邀在国际顶尖综述刊物《现代物理评论》发表“昆虫飞行力学”的长篇综述论文.