

文章编号: 1672-8785(2021)08-0038-09

仿蜻蜓扑翼微飞行器研究现状

杜瑞娟 鹿嵩昊 公 爽

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 蜻蜓被认为是飞行行为简单且机动高效的昆虫之一, 因此成为众多微型飞行器(Micro Air Vehicle, MAV)的仿生设计原型。蜻蜓优异的飞行特性与其翅特性密不可分。它不仅可承受飞行过程中的多种载荷, 而且能保持高效飞行特性。总结了蜻蜓翅结构特性、飞行特性和仿蜻蜓扑翼 MAV 的研究现状及最新研究进展, 并分别对蜻蜓翅的翅脉、翅膜、翅结、翅痣、褶皱结构, 体液流动, 材料特性, 飞行机理以及红外探测应用进行了概述。同时针对仿生扑翼 MAV 的微型化需求, 对未来研究方向进行了分析。

关键词: 蜻蜓翅; 微型飞行器; 扑翼; 仿生

中图分类号: TN362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.08.006

Research Status of Dragonfly Flapping-Wing Micro Air Vehicle

DU Rui-juan, LU Song-hao, GONG Shuang

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: Dragonflies are considered to be one of the insects with simple flying behavior and efficient mobility, so they have become the bionic design prototypes of many micro air vehicles (MAV). The excellent flight characteristics of dragonflies are inseparable from their wing characteristics. It can not only withstand a variety of loads during flight, but also maintain high-efficiency flight characteristics. The research status and latest research progress of dragonfly wing structure characteristics, flight characteristics and dragonfly flapping-wing MAV are summarized. The wing vein, wing membrane, wing knot, pterostigma, fold structure, body fluid flow, material characteristics, flight mechanism and infrared detection application of dragonfly wings are summarized. In addition, according to the miniaturization requirements of the bionic flapping-wing MAV, the future research directions are analyzed.

Key words: dragonfly wing; micro air vehicle; flapping-wing; bionics

0 引言

20 世纪 90 年代初, MAV 这一概念在美国召开的高级军事技术研讨会上被提出后, 受

到了各国研究人员的密切关注。它具有隐蔽性好、质量轻、体积小以及便于携带等特点, 在军事和民用领域都有较好的应用前景。根据飞

收稿日期: 2021-06-01

作者简介: 杜瑞娟(1992-), 女, 青海人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为机载光电系统设计。
E-mail: duruijuan123@126.com

行原理的不同, MAV 可以分为固定翼、旋翼和扑翼三种^[1]。其中, 扑翼 MAV 主要模拟自然界中鸟类和昆虫的飞行方式, 即通过扑动翅膀来获得升力和改变飞行方向。与固定翼和旋翼 MAV 相比, 扑翼 MAV 能够在较小尺寸下产生更大的升力^[2], 并且飞行更具灵活性。昆虫因其尺寸更小且飞行特性优异, 为小型化仿生扑翼 MAV 设计提供了灵感。由于扑翼飞行时的精准导航和控制特性, 它对红外温度传感器的设计具有重要的指导意义。

昆虫的飞行能力与其翅膜和翅脉的结构及力学性能有着密切的关系^[3]。昆虫翅的结构多样性以及复杂的运动方式决定了昆虫飞行技巧的多样性和灵活性。蜻蜓翅仅占其自身总质量的 2%, 且其上不存在肌肉组织, 但在飞行、滑翔、悬停时都能保证极大的稳定性和较高的承载力^[4]。蜻蜓翅窄而细长, 却是昆虫中振翅次数最少但飞行速度最快的。这使其成为仿生扑翼 MAV 研究的主要生物模本之一。

蜻蜓翅由翅膜和翅脉组成(见图 1)。翅膜质轻薄, 呈透明状, 具有多层结构; 翅脉纵横交错, 由角质层和蜡质层组成, 具有复合夹层结构^[5]; 翅脉和翅膜构成稳定的网络结构。蜻蜓翅的微观结构对其生物力学和空气动力学特性具有一定的影响。



图 1 蜻蜓照片

1 蜻蜓翅结构研究现状

1.1 翅脉结构

蜻蜓翅的翅脉由纵脉和横脉构成。其中,

纵脉从翅根部向翅尖延展, 构成了蜻蜓翅的主体框架, 从而抵抗翅在扑翼过程中的弯矩和扭矩。纵脉具有较好的稳定性和承载能力; 横脉在翅中充当加强元件, 为纵脉提供横向支撑^[6], 使蜻蜓翅具有弦向柔韧性。蜻蜓纵脉与横脉构成了多个不同形状的翅室, 其排布具有一定的规律性, 能够承受在飞行过程中的多种载荷。靠近翅前缘的翅室多呈矩形排布, 靠近翅后缘的翅室多呈五边形或六边形。这种排列规律保证了蜻蜓翅在承受载荷时的稳定性及抗撕裂能力^[7]。

蜻蜓翅的翅脉是一种由几丁质和蛋白质构成的空心夹心结构^[8], 如图 2 所示。蜻蜓翅翅脉的夹层结构可增加翅的灵活性、减轻翅的重量, 同时保证翅结构的刚度^[9]。蜻蜓翅翅脉和翅膜的厚度不是均匀的尺寸, 其变化具有一定的规律性: 越靠近翅根部, 翅脉和翅膜越厚; 靠近翅尖部位时, 翅脉和翅膜厚度变小。翅脉和翅膜厚度从翅根部位到翅尖呈逐渐减小的趋势。这种特性使蜻蜓翅在飞行中能更有效地承受多种载荷^[10], 从而提高飞行的稳定性。

蜻蜓(*Sympetrum vulgatum*)翅翅脉的表面上分布着多种微观结构, 如图 3 所示^[11]。不同部位的翅脉表面微观结构又不相同。前缘脉表面上分布着锯齿状结构。这些锯齿朝一个方向整齐排列。与光滑的表面结构相比, 锯齿状结构可以减小蜻蜓扑翼飞行时所受的阻力。后缘脉表面上不规则地分布着一些凸包状微观结构。它们在蜻蜓飞行的过程中可以有效减小空气阻力。

当蜻蜓翅受到冲击时, 纵脉与横脉交叉连接的方式可以有效抑制受损面积的扩大^[9]。蜻蜓翅脉与翅脉的连接方式可以分为两种: 刚性连接和柔性连接。如图 4 所示, 柔性连接又称为可活动连接, 即翅脉与翅脉之间连接时存在一定的缝隙。这种缝隙允许翅脉在保持连接的前提下进行一定范围内的活动^[12]。柔性连接的翅脉之间存在可起缓冲吸能作用的节肢弹性蛋白^[13]。蜻蜓在飞行过程中, 当翅脉受到冲

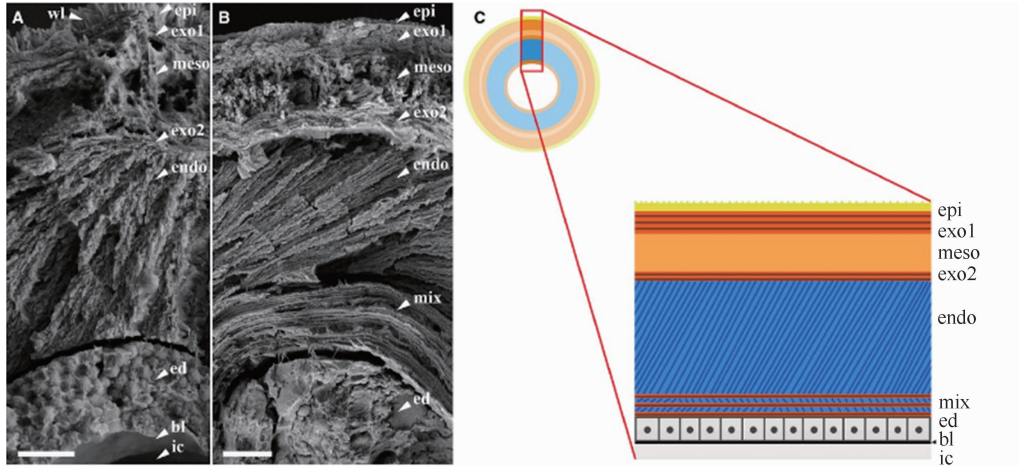


图 2 蜻蜓(Sympetrum vulgatum)翅脉的剖面结构^[9]

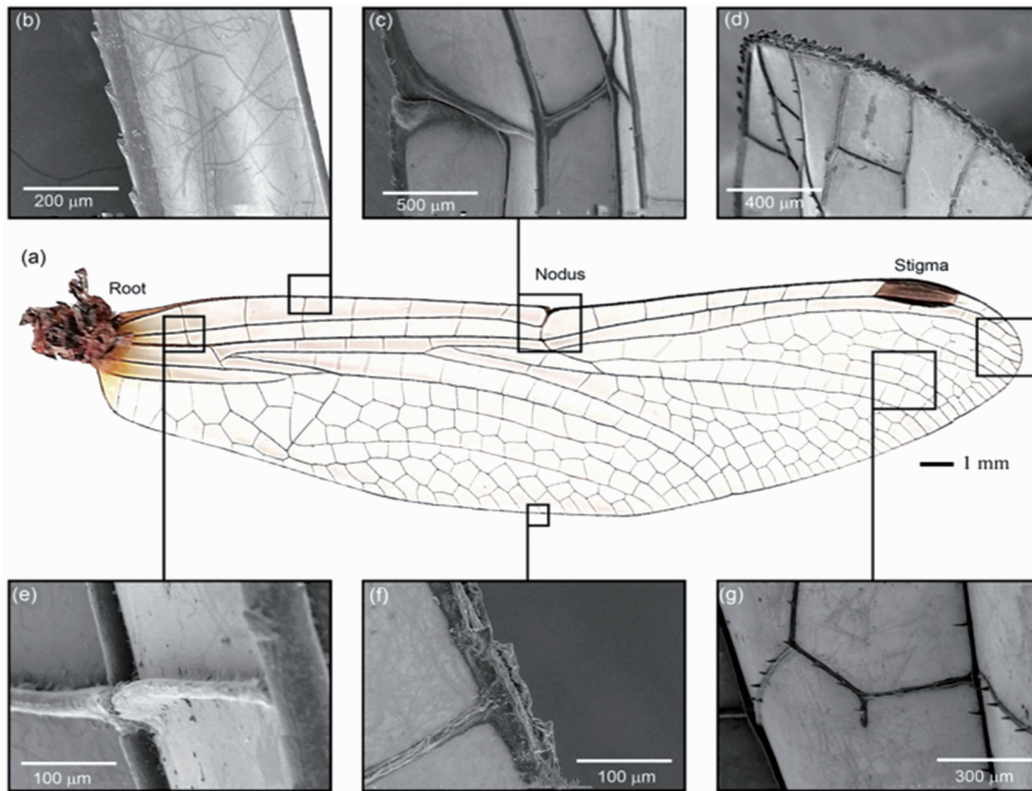


图 3 蜻蜓(Sympetrum vulgatum)翅的微观结构^[11]: (a)前翅根部结构; (b)前缘脉结构; (c)翅结; (d)翅末端结构; (e)径脉结构; (f)后缘脉结构; (g)翅脉与翅脉的连接结构

击时，节肢弹性蛋白受到挤压冲击后释放能量，对蜻蜓翅的形变起到一定作用，从而保证翅的柔韧性。刚性连接又称为不可活动连接，这种方式可为蜻蜓翅提供强有力的刚性支撑。

1.2 翅膜结构

蜻蜓翅的翅膜在它飞行时不仅能阻挡空气和利用气流，而且还能承受风荷载和分散应力。蜻蜓翅翅膜的结构和力学性能决定了其在

承受载荷时如何发生形变。蜻蜓翅翅膜由背部层、中间层和腹部三层结构构成。翅膜表面并不是光滑的，上下表面上随机分布着“纳米柱”状微观结构，而且该结构的表面上又分布着角质层涂蜡(见图 5)^[14]。“纳米柱”状微观结构还可以防止污染物附着在翅膜表面上。当细菌附着在其表层时，这种微观结构将会把细菌割裂致死^[15]。

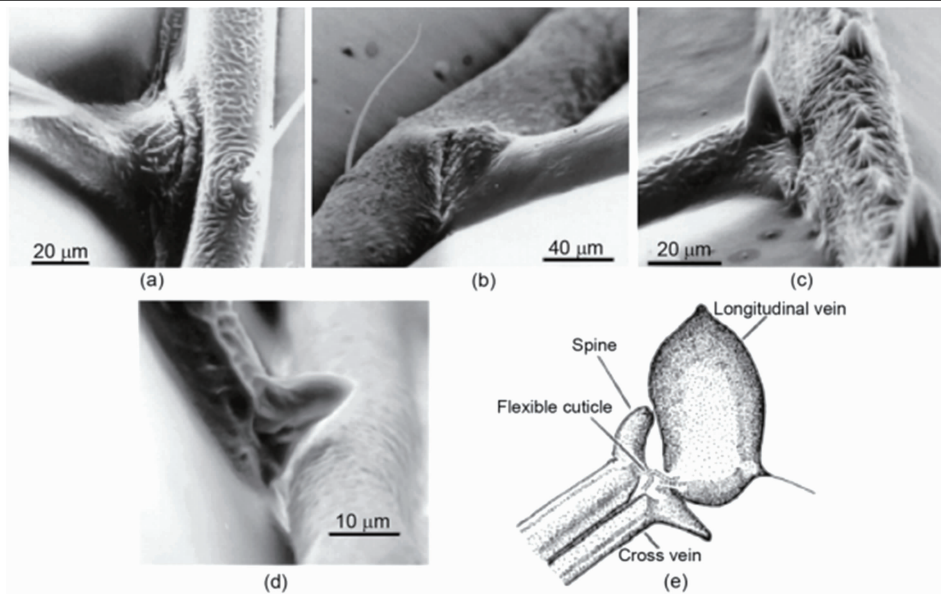


图 4 蜻蜓翅脉背面及翅脉的柔性连接示意图^[12]

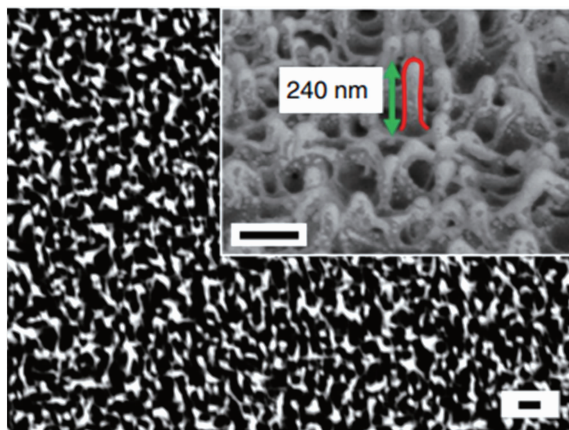


图 5 蜻蜓(*Diplacodes bipunctata*)前翅表面的微观结构^[14]

2 蜻蜓飞行机理的研究现状

根据传统的空气动力学理论,昆虫的扑翼飞行似乎不太可能实现。但科研人员通过试验、数据分析、飞行理论研究、数值模拟计算等方法对昆虫的飞行机理进行了一系列研究^[16],发现昆虫的扑翼运动可以分为下扑阶段、上仰阶段、上挥阶段和下俯阶段。图 6 为昆虫扑动运动的示意图。可以看出,昆虫的扑翼规律接近于简谐函数^[17],并且下扑阶段的时间与上挥阶段的时间具有一定的差异。

由于具有优异的飞行特性,蜻蜓一直是仿生研究的前沿和热点。蜻蜓在扑翼飞行时,扑

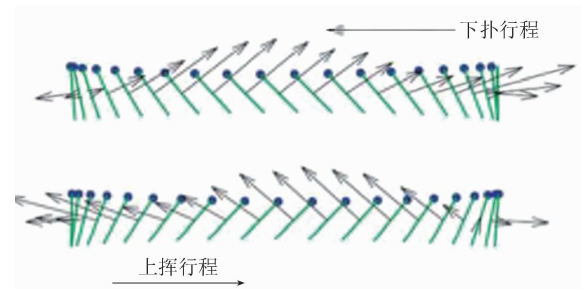


图 6 昆虫扑动运动的示意图^[17]

翼次数少,但其飞行速度最快。在飞行过程中还能表现多种高难度的飞行技能,如倒飞、滑翔、悬停,垂直飞行等。除此之外,蜻蜓还具有高机动性,可以在飞行过程中捕食^[18]。

通过研究载荷相对对翅结构性能的影响可以发现,翅向上挥达到平衡位置时发生的变形是下挥过程中变形的两倍。图 7 为在不同相位加载不同方向的载荷示意图^[19]。

蜻蜓翅的非定常运动及前后翅的互相作用对蜻蜓扑翼飞行时的气动特性起着重要作用。在扑翼飞行时,上挥过程和下拍过程中翅的前缘都会产生前缘涡。图 8 所示为英国牛津大学开展的蜻蜓可视化烟雾试验的相关数据^[20]。该试验采用了开放式风动(流速为 1 m/s),生动地反映了蜻蜓自由飞行时周围流场的变化。结果表明,蜻蜓在上挥阶段攻角较大,在下拍阶段攻角较小。

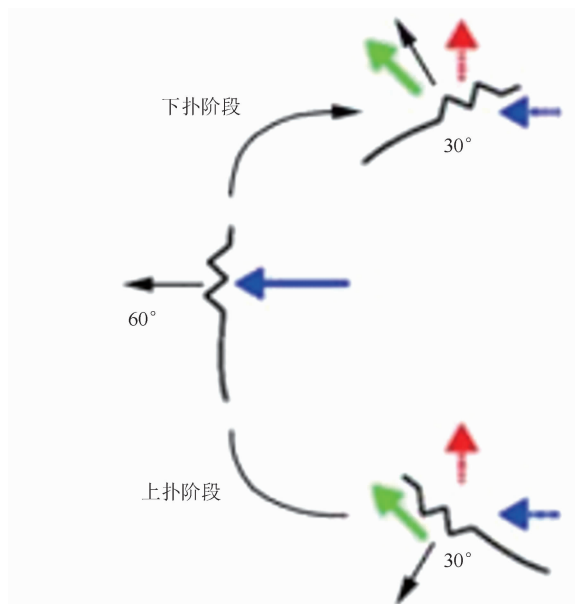


图 7 在不同相位加载不同方向的载荷示意图^[19]

滑翔是蜻蜓借助空气浮力与自身重力之间的相互作用力进行的一种飞行动作。蜻蜓在滑翔时，翅所产生的升力远远大于其他昆虫。这是因为蜻蜓翅具有较大的展弦比，可使蜻蜓拍动一次翅就能滑翔较长的距离。蜻蜓的滑翔速度与其种类有关，如黄蜻在 15 m/s 的速度下能够滑翔 10~15 s^[21]。悬停飞行是蜻蜓独有的飞行方式。蜻蜓在悬停飞行时，身体几乎保持水平，并利用前后翅的

相位差来得到升力；通过高升力支撑身体自重，保持稳定飞行^[22]。

蜻蜓翅具有独特的褶皱结构。这种结构在不同部位的褶皱程度也有所不同。它对蜻蜓的气动特性有着重要作用^[23]。如图 9 所示，翅膜与翅脉之间形成的角度也具有多样性。一般来说，褶皱角度在 80°~150° 范围内^[6]。褶皱结构的多样性决定了蜻蜓在飞行中具有更优秀的灵活性，有利于它们在飞行中进行扭转变形。当气流经过蜻蜓翅表面时，气流在翅前缘分离。与光滑的平板状的翅相比，蜻蜓翅由于具有褶皱结构，气流在分离后能够更快地重新贴合在翼面，可有效提升翅的气动特性，产生更高的升力和更大的升阻比。对具有褶皱结构的蜻蜓翅模型进行了全面的风洞试验研究，并测试了它在不同攻角下的飞行特性。结果表明，在所有攻角下，其飞行性能比无褶皱的平滑翼优异，且可获得更高的升力。

3 仿蜻蜓扑翼 MAV 研究现状

随着仿生扑翼 MAV 研究的不断深入，其微型化已经成为当前的研究热点。越来越多的科研人员选取昆虫作为仿生研究对象，以昆虫自身结构的特殊性为灵感来设计扑翼 MAV。

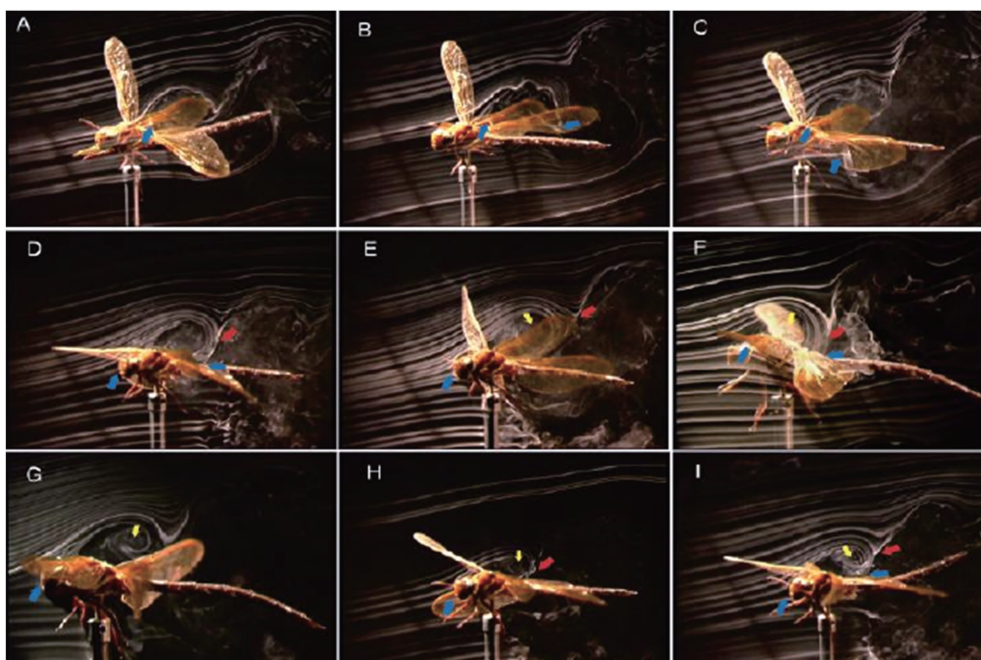


图 8 蜻蜓自由飞行时周围流场的变化^[20]

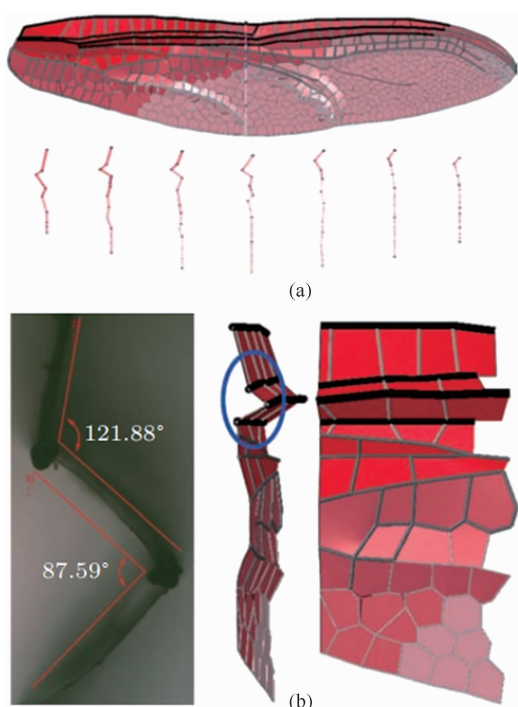


图 9 蜻蜓翅的褶皱结构^[6]: (a) 蜻蜓翅不同部位的褶皱结构; (b) 褶皱结构的夹角和模型示意图

由于具有优异的飞行特性, 蜻蜓成为最早的仿生原型。Ang H S 等人通过研究蜻蜓前后翅在飞行中的配合及相互作用, 设计出了一种仿蜻蜓 MAV (见图 10)^[23]。它能够实现前、后翅的扑翼拍打, 同时可以改变和调控飞行的攻角, 从而模拟蜻蜓的不同飞行方式和实现稳定飞行。



图 10 仿蜻蜓扑翼微飞行器^[23]

蜻蜓翅虽轻薄但坚韧, 在飞行过程中能够进行被动变形, 从而改善其空气动力学性能。图 11 所示为美国 TechJect 公司研发的仿蜻蜓 MAV。该飞行器体积小、重量轻, 具有两对

像蜻蜓翅一样薄而透明的翼。它可实现多种飞行模式, 尤其是在飞行过程中可以实现悬停。这种 MAV 具有 20 个传感器, 可用于航拍、特技飞行或者安全巡逻。

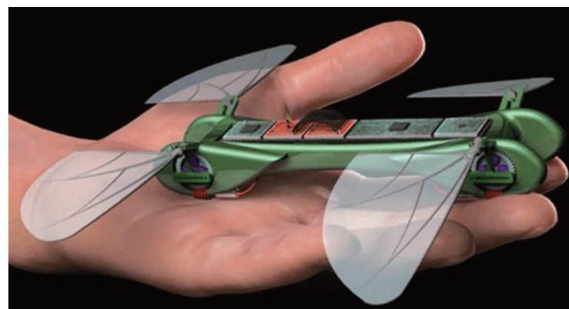


图 11 TechJect 公司研发的仿蜻蜓 MAV

图 12 所示为英国动物生态学公司研发的蜻蜓无人机。它具有两对翼和四条腿。这种特殊的外形构造使其既可在空中稳定飞翔, 又可在陆地上行走。蜻蜓无人机体型只有手掌大小, 易于隐藏, 主要用于军事侦察。



图 12 蜻蜓无人机的概念图

加拿大多伦多大学航空航天研究所通过研究蜻蜓前翅的扑翼方式, 设计了一款可模拟蜻蜓飞行方式的 MAV (见图 13)^[24]。图 14 所示为美国特拉华大学研制的仿蜻蜓 MAV 的模型和滑块曲柄机构。该模型整体上较蜻蜓偏大, 翼展超过 32 cm, 质量大于 20 g, 机翼以 2 Hz 的频率振动^[25]。

Festo 公司研制了一种可模拟蜻蜓扑翼飞行规律的 MAV——BionicOpter (见图 15)^[26]。它体长 44 cm, 翼展 63 cm, 重 175 g, 外形与蜻蜓生物原型极其接近; 机翼设计非常轻薄, 但能够有效承受飞行中的多种载荷, 可模拟蜻蜓的多种飞行模式。图 16 所示为美国联合学院机械工程系研制的仿蜻蜓 MAV。

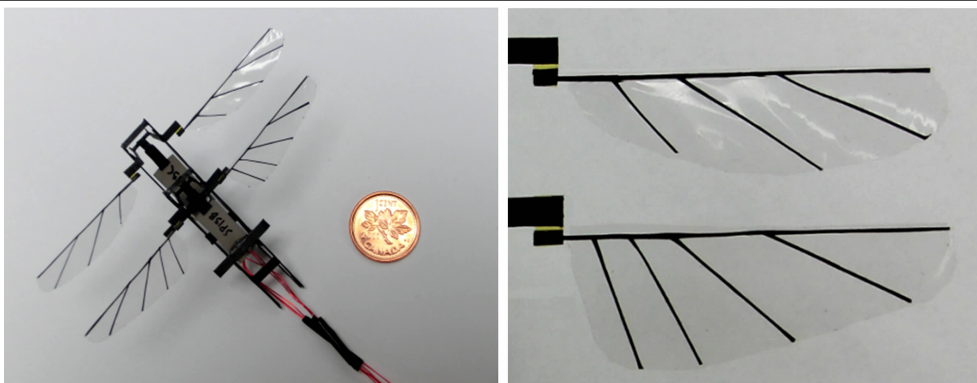


图 13 加拿大多伦多大学航空航天研究所设计的仿蜻蜓 MAV^[24]: (a) MAV 实物; (b) 蜻蜓前翅和后翅模型



图 14 特拉华大学设计的仿蜻蜓 MAV^[25]: (a) 仿蜻蜓 MAV; (b) 仿蜻蜓 MAV 翅

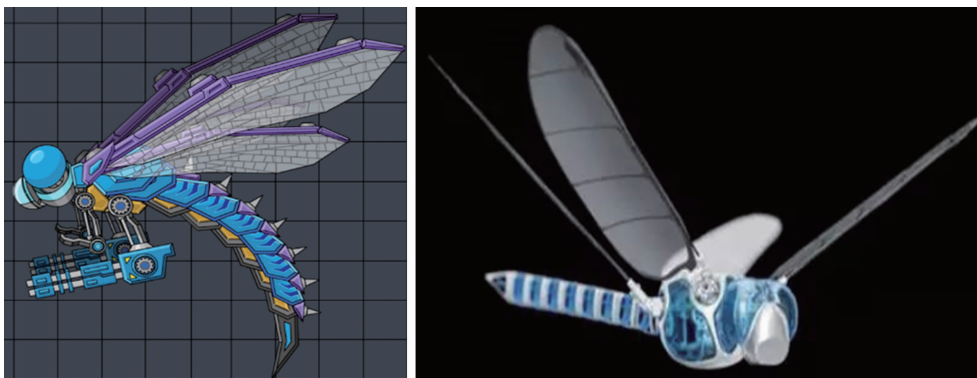


图 15 仿蜻蜓扑翼微飞行器 BionicOpter^[26]: (a) 概念图; (b) 实物图

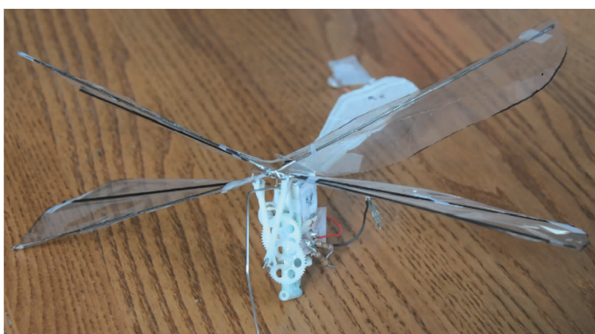
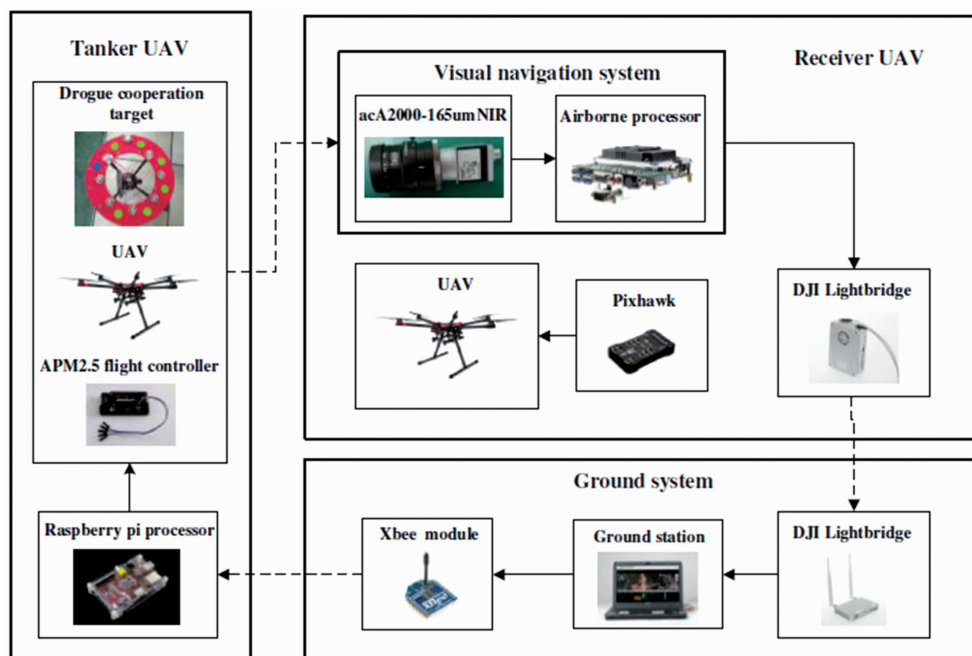


图 16 美国联合学院机械工程系研制的仿蜻蜓 MAV

除了扑翼结构之外，无人机的导航和控制系统在飞行过程中同样扮演着重要的角色。该系统的最基本、最核心的参数之一是姿态角。

传统的姿态角测量方法主要基于惯性测量系统。但由于其硬件系统设计复杂，成本高昂，并且在长时间工作时容易产生较大的累计误差，因此开发出新型姿态角测量方法显得尤为重要和迫切。

Duan H 等人设计了一种基于红外温度传感器和 ARM Cortex-M3 内核微处理器 STM32F103ZET6 的新型姿态角测量系统(见图 17)。它能够借助两对红外温度传感器对飞机的俯仰姿态和横滚信息进行采集和分析。与传统的机械式姿态测量系统相比，这种系统具有体积小、重量轻、成本低等优点^[27]。

图 17 视觉测量系统的配置^[27]

4 结论与展望

由于具有优异的飞行特性和精巧的生物结构, 蜻蜓受到广大研究者的青睐, 成为众多微型飞行器的仿生设计原型。人们在这方面也积累了丰富的研究成果。该研究在蜻蜓的翅脉、翅膜、翅结、翅痣、褶皱结构, 体液流动, 材料特性以及飞行机理等方面具有较大的发展空间。随着仿生扑翼 MAV 研究的不断深入, 其微型化设计已经成为当前的研究热点。目前, 蜻蜓翅的研究和实际应用主要集中在对蜻蜓翅的宏观结构和材料特性的仿生上。未来对蜻蜓翅的微观结构、体液内循环、微观结构之间柔性作用的进一步研究, 将会为实现仿生扑翼微飞行器的微型化提供技术支撑。

参考文献

- [1] 顾明, 张瑞彪, 黄贵林, 等. 微型扑翼飞行器控制系统设计 [J]. *电子技术*, 2013, **42**(8): 63-66.
- [2] 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.
- [3] Wootton R, Kukalovapeck J, Newman D, et al. Smart engineering in the mid-carboniferous: how

well could palaeozoic dragonflies fly? [J]. *Science*, 1998, **282**(5389): 749-751.

- [4] Azuma A, Azuma S, Watanabe I, et al. Flight mechanics of a dragonfly [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1985, **116**(1): 79-107.
- [5] Wang G, Guo Z, Liu W. Interfacial effects of superhydrophobic plant surfaces: a review [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, **11**(3): 325-345.
- [6] Newman D J S, Wootton R J. An approach to the mechanics of pleating in dragonfly wings [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1986, **125**(1): 361-372.
- [7] Darvizeh M, Darvizeh A, Rajabi H, et al. Free vibration analysis of dragonfly wings using finite element method [J]. *The International Journal of Multiphysics*, 2009, **3**(1): 101-110.
- [8] Wang X S, Li Y, Shi Y F. Effects of sandwich microstructures on mechanical behaviors of dragonfly wing vein [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, **68**(1): 186-192.
- [9] Arjangpay A, Darvizeh A, Tooski M Y. Effects of structural characteristics of a bionic dragonfly wing on its low velocity impact resistance [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, **15**(5):

- 859–871.
- [10] Chaudhuri A, Haftka R T, Ifju P, et al. Experimental flapping wing optimization and uncertainty quantification using limited samples [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2014, **51**(4): 957–970.
- [11] Chen Y L, Wang X S, Ren H H, et al. An organic junction between the vein and membrane of the dragonfly wing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(16): 1658–1660.
- [12] Newman D J S. The functional wing morphology of some Odonata [D]. Exeter : University of Exeter, 1982.
- [13] Rajabi H, Shafiei A, Darvizeh A, et al. Resilin-microjoints: a smart design strategy to avoid failure in dragonfly wings [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 39039.
- [14] Sudo S, Tsuyuki K, Kobayashi T. Experimental study on the collision of a droplet with a dragonfly wing [J]. *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, 2005, **5**(3): 272–279.
- [15] Ivanova E P, Hasan J, Webb H K, et al. Bactericidal activity of black silicon [J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2838.
- [16] 程鹏, 柳兆涛, 付东杰, 等. 蜻蜓飞行姿态的实时模拟测量 [J]. *实验力学*, 2002, **17**(3): 315–319.
- [17] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1984, **305**(1122): 145–181.
- [18] Wang Z J. Unsteady forces and flows in low Reynolds number hovering flight: two-dimensional computations vs robotic wing experiments [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**(3): 449–460.
- [19] Wakeling J M, Ellington C P. Dragonfly flight. II. Velocities, accelerations and kinematics of flapping flight [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1997, **200**(3): 557–582.
- [20] 蒋照华, 汪超, 谢鹏, 等. 仿蜻蜓扑翼飞行器翅翼结构力学特性研究进展 [J]. *机械科学与技术*, 2018, **37**(6): 971–979.
- [21] Thomas A L R. Dragonfly flight: free-flight and tethered flow visualizations reveal a diverse array of unsteady lift-generating mechanisms, controlled primarily via angle of attack [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**(24): 4299–4323.
- [22] Murphy J T, Hu H. An experimental study of a bio-inspired corrugated airfoil for micro air vehicle applications [J]. *Experiments in Fluids*, 2010, **49**(2): 531–546.
- [23] Ang H S, Xiao T H, Duan W B. Flight mechanism and design of biomimetic micro air vehicles [J]. *Science in China*, 2009, **52**(12): 3722–3728.
- [24] Szabo P A K, D’Eleuterio G M T. At-scale lift experiments modeling dragonfly forewings [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, **13**(4): 046008.
- [25] Dileo C, Deng X. Design of and experiments on a dragonfly-inspired robot [J]. *Advanced Robotics*, 2009, **23**(7–8): 1003–1021.
- [26] Stoll W, Frontzek H, Festo A Get al. Lightweight design with intelligent kinematics [EB/OL]. www.festo.com/net/SupportPortal/Files/248133/Festo_BionicOpter_en, 2016.
- [27] Chen S, Duan H, Deng Y, et al. Drogue pose estimation for unmanned aerial vehicle autonomous aerial refueling system based on infrared vision sensor [J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(12): 124105.