

蜻蜓翅膀的自清洁特性及其动特性分析

弯艳玲¹,丛茜¹,李守魁²

(1. 吉林大学 仿生工程教育部重点实验室,长春 130022;2. 中国第一汽车集团 技术中心,长春 130011)

摘要:本文从蜻蜓翅膀表面自清洁特性出发,利用有限元方法分析了蜻蜓翅膀结构的质量稳定性与动特性间的关系。研究表明:蜻蜓翅膀结构的固有频率大于翅膀的拍翅频率,有效避免了共振现象的发生,而受污染之后的翅膀,频率降低,接近于拍翅频率,易导致灾难性的后果。蜻蜓翅膀表面的自清洁功能能够保证蜻蜓翅膀稳定的动力学特性。本文的研究为飞行器的稳定性设计提供了新的设计方法和思路。

关键词:工程仿生学;超疏水性;动特性;稳定性;蜻蜓翅膀;自清洁结构

中图分类号: TB17; TB122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2010)05-1283-05

Self-cleaning character and dynamic analysis of drayonfly wing

WAN Yan-ling¹, CONG Qian¹, LI Shou-kui²

(1. Key Laboratory for Bionic Engineering, Minisitry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. Research & Development Center, China FAW Group Corporation, Changchun 130011, China)

Abstract: The relationships between the mass stability and the dynamics of the self-cleaning structure of the dragonfly wing were analyzed by the finite element method. The results show that the natural frequency of the dragonfly wing is greater than its flap frequency, avoiding effectively the resonance. However, the natural frequency of the polluted wing drops to close to the flap frequency, leading easily to disastrous consequences. The self-cleaning structures in the dragonfly wing surface guarantee the dyanmics of its structural stability, which provides a new idea and approach to aircraft stability design.

Key words: engineering bionics; super-hydrophobicity; dynamics; stability; dragonfly wing; self-cleaning structure

在昆虫世界里,蜻蜓是最优秀的飞行能手,它不但能以 100 km/h 的速度在空中快速地疾飞几百千米,还可以在空中垂直上升、垂直下降、侧飞、倒退飞和悬停,做出各种高难度的特技飞行动作。蜻蜓翅膀重量虽不及总量的 1%~2%,但在飞行中却表现出超强的稳定性和承载能力^[1]。蜻蜓翅膀

主要由翅脉和翅膜构成,表面呈现凹凸不平的特征,但这种凹凸不平的构造并不影响蜻蜓整体的气动响应^[2],却能增加翅膀本身的弯曲刚度和扭转刚度,降低飞行中翅膀的弯曲和扭转变形^[3]。此外,翅脉和翅膜组成的翅膀褶皱结构还能提高翅膀的挠度和防止其疲劳断裂^[4-5]。蜻蜓翅膀主

收稿日期:2009-09-30.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50635030);吉林大学“985 工程”研究生创新基金项目(20080210);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090061120071)。

作者简介:弯艳玲(1979-),女,博士研究生。研究方向:生物仿生。E-mail:wanyanling@cust.edu.cn

通信作者:丛茜(1963-),女,教授,博士生导师。研究方向:工程仿生。E-mail:congqian@jlu.edu.cn

要由几丁质、蛋白质和纤维组成,其微观结构为多层结构,能抵抗较大的弯曲载荷和扭转变形^[6]。蜻蜓翅膀是由 3 层结构组成,其弹性模量和硬度分别为 2.85 GPa 和 0.14 GPa^[7]。蜻蜓翅膀表面还覆盖蜡质层^[8],蜡质层中有一种呈十字形纤维状的结构,这种纤维结构与翅膀的稳定性息息相关^[9]。此外,蜻蜓翅膀的蜡质层还与其翅膀表面的自清洁性能具有一定的联系^[10]。

本文从蜻蜓翅膀表面自清洁特性出发,利用有限元方法分析翅膀结构的质量稳定性与动特性之间的关系,研究蜻蜓翅膀表面的自清洁性与翅膀表面结构稳定性间的关系,阐述蜻蜓翅膀保持稳定性的原因,为飞行器的稳定性设计提供新的设计方法和思路。

1 蜻蜓翅膀的结构分析

1.1 实验方法

本文利用扫描电子显微镜(JSM-6700F,日本)对蜻蜓翅膀表面的微观结构进行测量。在电镜观察之前对样本进行镀金处理,镀金厚度为 20 nm。

1.2 实验结果

蜻蜓翅膀的翅脉是翅面在气管部位加厚形成,中空,其内分布着气管、神经和循环体液。蜻蜓翅脉截面近似环形(见图 1),但不同位置的翅

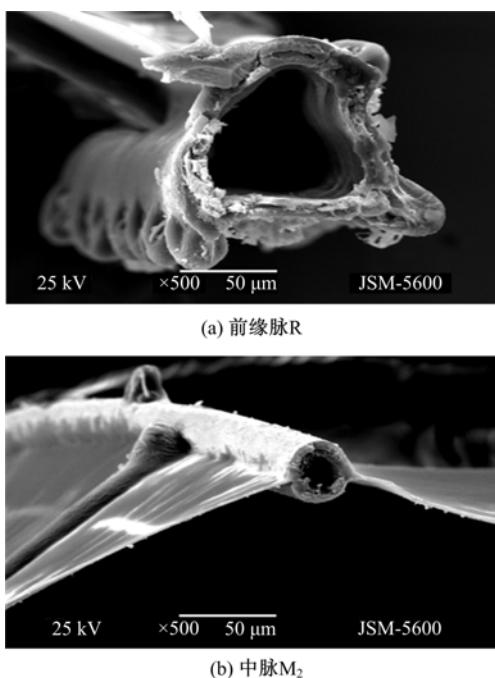


图 1 距翅基 0.44 L 处翅脉截面图(L 为前翅长度)
Fig. 1 Cross-section of vein 0.44 L away from wing base

脉表现不同的厚度和形状。根据测量结果,本文将翅脉定义为横截面为环形的梁单元,分为 6 个级别(见表 1)。

表 1 翅脉的几何结构

Table 1 Geometrical structure of veins

名称	级别					
	1	2	3	4	5	6
外直径/μm	129.38	116.85	100.07	75.47	51.28	33.90
壁厚/μm	12.13	11.09	7.57	6.18	4.40	3.17

蜻蜓翅膀厚度不均一,越靠近翅基的部位越厚,厚度沿翼展及翼弦的方向逐减,最厚处可达 4.08 μm(靠近翅基和前缘脉处),翅尖处厚度仅为 1 μm 左右。本文将蜻蜓翅膀厚度定义为 3 个量级,靠近前缘脉、亚前缘脉和径脉 R1 处定义为 4.3 μm,翅尖及外缘处定义为 1.8 μm,其余部位定义为 2.6 μm。

实验发现,蜻蜓翅膀及翅脉表面覆盖大量的纳米柱状结构,柱状结构直径为 66.90~200.73 nm,间距为 20.00~650.00 nm,柱高为 0.3 μm 左右^[10]。这些柱状结构与表面蜡质层共同作用形成了蜻蜓翅膀表面的自清洁性能^[11]。蜻蜓翅膀的自清洁性能使水滴带走翅膀上的污染物,而保持翅膀不被浸湿,从而有助于蜻蜓减轻体重、保持平衡、减小阻力和提高飞翔速度。

2 有限元模型的建立

2.1 模型建立

为比较真实地再现翅膀的几何结构,本文利用 Imageware 逆向工程软件,建立前翅的几何模型。翅脉在整个翅膀结构中主要起支撑作用,承受剪切应力,因此本文将翅脉定义为 Nastran 中的 beam 单元,翅膀定义为 shell 单元,污染物定义为 mass 单元。为更接近实际结构,按照翅脉直径和翅膀测量数据,将翅脉分为 6 组,翅膀分为 3 组,共 5237 个单元。

2.2 边界条件及材料属性

蜻蜓翅膀是一种天然复合材料,其强度之高和重量之轻是很少见的。根据现有文献,将蜻蜓翅膀的翅脉和翅膀设定为各向同性、线性的且不随温度变化的材料,其弹性模量 E 分别为 2.8 GPa 和 1.5 GPa,泊松比为 0.25,密度为 1200 kg/m³^[1,12-13]。由于蜻蜓翅膀采用薄壳单元,且属于不规则网格结构,网格划分采用自由划分方式。

蜻蜓在外界环境活动, 如果自清洁功能丧失或未能及时起作用, 蜻蜓翅膀会受到不同程度的污染根据污染程度的不同, 本文定义轻度污染(点污染)、中度污染(面污染)和严重污染(整个翅膀)3 种污染工况。轻度污染即翅膀局部部位附着粉尘颗粒。由于附着位置的不同对蜻蜓翅膀结构稳定性的影响也有差异, 本文选择靠近前缘翅基处、前缘翅结处、内缘与外缘交汇处以及外缘翅尖处 4 个位置(受轻度污染如图 2 中标号 1、2、3、4 所示的位置)。中度污染即蜻蜓翅膀一定面积受污染, 选择翅基、翅中心和翅尖 3 个位置(如图 2 中标号 5、6、7 所示的位置)。

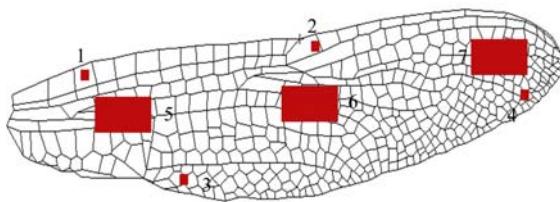


图 2 蜻蜓翅膀受污染位置

Fig. 2 Polluted positions of dragonfly wing

蜻蜓沿纵向轴线呈对称结构, 因此将翅膀在对称面施加 6 个自由度的约束。利用 MSC. Patran 进行前后处理, MSC. Nastran 求解序列 SOL103 对翅膀结构进行模态分析。

3 结果及讨论

为研究蜻蜓翅膀表面的自清洁性与翅膀结构的动特性之间的关系, 分别对翅膀结构无污染(工况 0)和受污染(三种污染情况, 工况 1~8)两种情况下的翅膀结构进行模态分析, 得到每种工况下的固有频率和振型。

由图 3 所示的蜻蜓翅膀前四阶模态振型可知: 一阶模态为翅膀的整体拍动, 二阶主要为一阶弯曲, 三阶为一阶扭转, 四阶为弯曲和扭转的耦合情况, 各阶振型均表现为翅膀后部和外缘变形较大, 这与翅膀直径和翅膀厚度的分布相对应, 与实际结构相符(即前缘和内缘具有较大的刚度)。翅膀的各阶模态振型与蜻蜓翅膀运动形式(拍动、扭转)相对应^[14]。蜻蜓在拍翅过程中, 翅膀由于受到空气的反作用力, 将会产生弯曲和扭转, 以减缓翅膀受到的外界作用力, 避免拍翅过程中产生刚性破坏。

受污染后的蜻蜓翅膀前几阶振型与污染前振型相同, 而其振动频率发生一定变化。表 2 为各

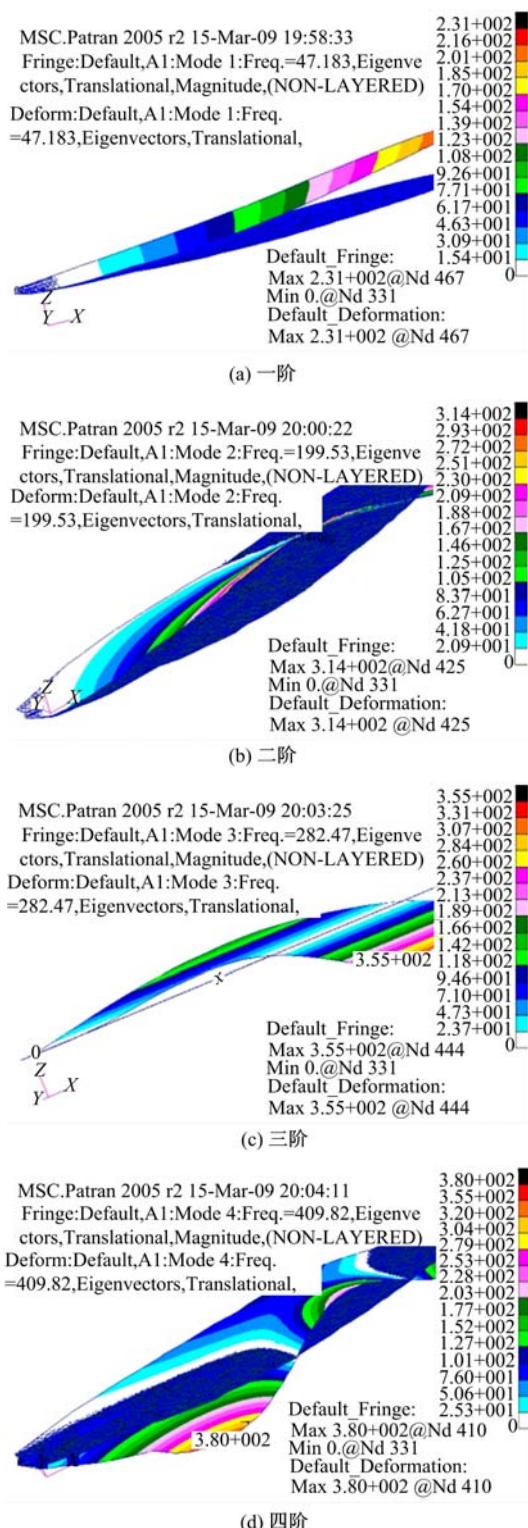


图 3 蜻蜓翅膀的模态振型(无污染)

Fig. 3 Mode shapes corresponding to first four natural frequencies of dragonfly wings (no polluted)

工况下前 10 阶固有频率。其中, 工况 0 为蜻蜓翅膀无污染时的固有频率, 工况 1~8 为受到污染后的固有频率。工况 0 的计算结果与蜻蜓翅膀实际结构的物理实验结果一致^[14], 说明本文所建的

有

表 2 各种污染工况下的前 10 阶频率/Hz
Table 2 First ten order frequencies of different working conditions/Hz

工况	阶 次									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	47.184	199.53	282.47	409.82	515.32	720.89	819.29	997.93	1097.8	1254.9
1	47.071	199.15	274.93	408.47	500.92	703.15	737.80	915.74	1054.5	1252.9
2	40.661	198.52	213.60	388.24	511.58	710.32	818.16	983.82	1096.9	1127.0
3	45.345	111.87	250.41	291.76	490.81	620.71	790.84	968.99	1031.2	1129.1
4	27.83	166.75	235.65	359.93	497.92	595.43	776.31	877.60	969.26	1036.3
5	46.469	180.96	262.71	360.24	457.20	644.72	723.18	906.98	1035.0	1186.1
6	39.894	166.06	261.20	375.01	471.39	630.03	736.79	822.04	954.57	1050.7
7	30.24	177.12	259.24	369.36	457.17	643.04	673.94	901.12	917.53	1016.1
8	38.203	166.21	261.23	360.86	448.07	627.27	716.12	847.63	938.06	1104.7

注:工况 0 为翅膀无污染;工况 1~4 为点污染;工况 5~7 为面污染;工况 8 为整个翅膀污染。

限元模型是准确的,从而保证了本文分析结果的准确性。与工况 0 相比,工况 1~8 的固有频率均有不同程度的降低,但降低幅值因污染位置和程度的不同而不同。翅膀受污染后,各阶频率相应降低,这是由于污染物增加了蜻蜓翅膀的质量,改变了整个系统的质量,由振动方程可知,系统的固有频率会随系统的质量增加而降低,与计算结果相符合。

由于上述各工况所施加的质量载荷都是相同的,因此系统的固有频率主要受系统刚度的影响,刚度越大,系统具有的频率较高,反之则较低。由于蜻蜓翅膀直径及翅膀厚度沿径向和轴向逐减,以及受翅膀前缘和翅基褶皱三维结构的影响,蜻蜓翅膀前缘和翅基处的刚度要大于外缘和翅尖处,所以点污染时,工况 1 的固有频率降低的幅值较小,工况 2 和 3 逐减,工况 4 频率降低的幅值较大;面污染时工况 5 频率降低的幅值较小,工况 7 频率降低的幅值较大,这与翅膀的实际结构相对应。整个翅膀(工况 8)受污染时,从系统的刚度分布看(翅膀结构刚度沿翼展方向递减),固有频率应小于翅膀前部受污染的频率而大于后部受污染时的频率,即工况 8 的频率大于工况 4 和 7,小于工况 1 和 5。综上所述,蜻蜓翅膀前缘或翅基受污染时,对翅膀的动特性影响较小;而翅尖或外缘受污染时,对翅膀的动特性影响较大;整个翅膀受污染时对翅膀的动特性的影响介于二者之间。

此外,工况 0 下模型的一阶频率为 47 Hz,远高于蜻蜓翅膀的拍翅频率(27 Hz)^[15],因此蜻蜓在拍翅飞行过程中,拍翅频率与低阶固有频率相

差较大,能有效避免共振现象,防止和翅膀结构发生大变形,产生较大的内应力,使翅膀遭受破坏;而翅膀受污染后,模型频率降低,低阶频率接近拍翅频率,易发生共振。由此可见,蜻蜓翅膀的自清洁结构有效保证了表面质量的稳定性,避免了蜻蜓翅膀结构动态特性的改变。

4 结束语

通过有限元分析结果可以看出,蜻蜓翅膀的一阶频率为 47 Hz,远远高于蜻蜓的拍翅频率(27 Hz),有效避免了共振现象的发生。一旦翅膀丧失自清洁功能而受到污染,翅膀结构质量会发生改变,将影响翅膀结构的动态特性,降低翅膀的固有频率,对蜻蜓的飞行稳定性产生恶劣影响,这充分说明翅膀表面的自清洁结构能有效提高蜻蜓在空中的飞行质量。因此自清洁结构可应用到机翼的表面,确保飞机在空中复杂的气象条件下保持表面的清洁,尤其是能够防止飞机在飞行过程中表面结冰,保证飞机运行的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] Kesel A B, Philippi U, Nachtigall W. Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method[J]. Computers in Biology and Medicine, 1998, 28(4): 423-437.
- [2] Luo G Y, Sun M. The effects of corrugation and wing plan form on the aerodynamic force production of sweeping model insect wings[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 21(6): 531-541.

- [3] Sunada S, Zeng L J, Kawachi K. The relationship between dragonfly wing structure and torsional deformation[J]. *J Theor Biol*, 1998, 193: 39-45.
- [4] Machida K J, Shimanuki J. Structure analysis of the wing of a dragonfly [C] // International Society for Optical Engineering Proceeding Series, Tokyo, 2005.
- [5] Combes S A. Wing flexibility and design for animal flight[D]. Seattle: University of Washington, 2002.
- [6] 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.
- [7] Song F, Xiao K W, Bai K, et al. Microstructure and nanomechanical properties of the wing membrane of dragonfly[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 457(1/2): 254-260.
- [8] Gorb S N, Kesel A, Berger J. Microsculpture of the wing surface in Odonata: evidence for cuticular wax covering[J]. *Arthropod Structure & Development*, 2000, 29(2): 129-135.
- [9] Kreuz P, Arnold W, Kesel A B. Acoustic microscopic analysis of the biological structure of insect wing membranes with emphasis on their waxy surface[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2001, 29(12): 1054-1058.
- [10] Wan Y L, Cong Q, Wang X J, et al. The wettability and mechanism of geometric non-smooth structure of dragonfly wing surface[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2008(Sup.): 40-45.
- [11] 弯艳玲,丛茜,金敬福,等.蜻蜓翅膀微观结构及其润湿性[J].吉林大学学报:工学版,2009,39(3):732-736.
- Wan Yan-ling, Cong Qian, Jin Jing-fu, et al. Microstructure and wettability of dragonfly wings [J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2009, 39(3): 732-736.
- [12] Kreuz P, Kesel A B, Kempf M, et al. Struktur-und materialanalyse biologischer systeme am beispiel insektenflügel[R]. Biona-Report 14 Stuttgart: Kischer, 2000.
- [13] Kreuz P, Kesel A B, Arnold W, et al. Struktur-und materialanalyse biologischer systeme-die flügellcutikula der insekten odonata, Anisoptera [R]. Stuttgart: Fischer, 2000.
- [14] 胡劲松,程鹏,续佰钦.多谱勒测振仪测量蜻蜓动力学参数及其分析[J].光学技术,2005(增刊):443-447.
- Hu Jing-song, Cheng Peng, Xu Bo-qin. Measuring the dynamics parameter of dragonfly wing by laser doppler vibrometer and its analysis [J]. *Optical Technique*, 2005(Sup.): 443-447.
- [15] Norberg R A. Hovering flight of the chagonfly: *Aeschna juncea* L, kinematics and aerodynamics [J]. *Swimming and Flying in Nature*, 1975, 2: 763-781.