DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.040

# 蜻蜓翅膀结构刚度有限元分析\*

# 史晓君<sup>1,2</sup> 于海业<sup>1</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林省经济管理干部学院机电工程系, 长春 130012)

【摘要】 以蜻蜓翅膀为研究对象,应用 CAD 和有限元分析软件 ANSYS 建立蜻蜓翅膀的有限元模型,通过静力学分析确定:蜻蜓翅膀脉络结构中主脉为主承力结构,主脉与次脉协调作用,使整体结构更为合理。根据蜻蜓翅膀起皱结构的特点,建立四边形、交错四边形两种褶皱结构网格模型,分析不同载荷作用下的力学性能。结果表明:相同均布载荷作用下,起皱的高度越大,结构变形量越小;在相同的起皱高度下,随着载荷的增加,变形量也随之增加,但起皱高度越大,随载荷增大的变形量越小,同时四边形网格结构的刚度稍大于交错四边形网格结构;在相同载荷作用下,有膜网格结构的变形量总是小于无膜的网格结构。

关键词: 蜻蜓翅膀 褶皱结构 力学性能 刚度 有限元 中图分类号: 0964 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0224-06

# Finite Element Analysis of Dragonfly Wing Structural Stiffness

Shi Xiaojun<sup>1,2</sup> Yu Haiye<sup>1</sup>

(1. Department of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Economic Management, Changchun 130012, China)

#### Abstract

The dragonfly wings were taken as the study objects, CAD and finite element analysis software ANSYS were applied to establish the finite element model of dragonfly wings. Through static analysis, the main vein structure was determined as load-bearing structure in dragonfly wings, the main vein and secondary veins coordinating so as to make the overall structure more reasonable. According to the characteristics of dragonfly wings wrinkled structure, the mesh model of rectangular and staggered quadrilateral fold structure was established, different mechanical properties under load were analyzed. The results showed that under the same uniform load, the greater the height of wrinkling was, the smaller structural deformation, and the greater structural stiffness would be. The analysis of quadrilateral mesh (no membrane) model in a different uniform deformation under load of the trend can be seen in the same wrinkle height, as the load increased, the deformation also increased, but as the wrinkle height increased, and with the smaller amount of deformation of the load increased, the quadrilateral mesh stiffness of the structure became slightly larger than staggered quadrilateral mesh structure. Under the same load, the deformation of a membrane mesh structure was always less than no membrane mesh structure.

Key words Dragonfly wings, Fold structure, Mechanical properties, Stiffness, Finite element

引言

蜻蜓翅膀结构十分精妙<sup>[1-2]</sup>,它是由管状的翅

脉和有少许抗弯刚度的翅膜组成的网状结构,翅脉 一般是中空的,在翅膀前缘和中部主脉有一定的褶 皱构造,朝翅尖方向逐渐平坦,使得翼展方向的弯曲

\* 吉林省科技厅重点项目(20080246)

收稿日期: 2011-08-26 修回日期: 2011-10-07

作者简介: 史晓君,博士生,吉林省经济管理干部学院副教授,主要从事温室结构仿生设计研究,E-mail: shixiaojun9352@ sohu. com 通讯作者: 于海业,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境测控与节能技术研究,E-mail: haiye@ jlu. edu. cn

刚度大大增加。除褶皱构造外,整个翅膀还双向起 拱,进一步增强了翅膀的刚度。另外主脉多形成四 边形网格,而次脉多形成五边形或六边形网格,这是 因为在相同材料下,六边形所围的面积比四边形多, 节省材料,而四边形网格产生的刚度大,蜻蜓翅膀正 是通过不同边形网格的组合运用,使结构更加优化。

目前国内外学者对蜻蜓翅膀的研究工作主要集 中在对其空气动力学方面的研究<sup>[3~10]</sup>,包括运动参 数的测量、运动机理的分析、具体构造的研究等。而 对蜻蜓自身结构的优越性、稳定性和合理性方面研 究还不够,在建筑结构方面的应用更少。

本文根据蜻蜓翅膀起皱结构的特点,分别建立 蜻蜓翅膀的脉络模型及四边形、交错四边形两种网 格模型,应用有限元分析软件 ANSYS,对各模型在 不同载荷作用下的变形情况进行力学分析,从而确 定蜻蜓翅膀的褶皱结构对刚度的影响,为进一步研 究温室结构仿生设计提供新的思路。

1 蜻蜓翅膀整体力学分析

#### 1.1 模型与量纲

## 1.1.1 模型

采集蜻蜓翅膀,在显微镜下观察测量其形状尺 寸,取一组原始尺寸:前翅长宽尺寸为 25.2 mm × 6.1 mm;面积  $A_1 = 34.5 \text{ mm}^2$ ;后翅长宽尺寸为 25.5 mm × 9.4 mm;面积  $A_2 = 50.4 \text{ mm}^2$ ;总质量  $m = 158.9 \text{ mg}_{\odot}$ 

参考蜻蜓膜翅的体视显微镜照片,结合其几何 特征以及翅脉的分布情况,用 AutoCAD 绘制蜻蜓膜 翅脉络图,将生成的几何模型导入 ANSYS 有限元分 析软件中,设置单元类型和参数,划分网格,建立有 限元力学模型,如图1所示。



#### 1.1.2 量纲

蜻蜓翅膀在外部载荷作用下,通过静力学分析 得到的变形为小变形,为方便对有限元分析结果的 观察,将计算量纲统一为:长度,dmm(丝米);力, bN;质量,mg;时间,s。量纲换算关系为:1 dmm =  $10^{-4}$  m;1 bN =  $10^{-10}$  N;1 mg =  $10^{-6}$  kg。材料属性<sup>[9]</sup> 为:弹性模量  $E = 3.8 \times 10^{9}$  N/m<sup>2</sup> =  $3.8 \times 10^{11}$  bN/dmm<sup>2</sup>;泊松比 $\mu = 0.25$ 。

## 1.2 静力学分析与讨论

1.2.1 蜻蜓翅膀主、次脉刚度分析

蜻蜓翅膀在翅根处与基体相连,为准确模拟蜻 蜓翅膀在飞行过程中的受力特点及变形情况,将翅 根端固定,建立悬臂网格结构进行力学分析。

翅根处施加位移约束,主脉、全脉分别施加相同 的均布载荷,同时,在全脉有限元模型中的主脉上 施加相同的均布载荷。均布载荷 q 为蜻蜓飞行所需 的最小升力,即自身体重分布在前、后翅上的平均 值<sup>[10]</sup>,满足

 $q = mg/(2A_1 + 2A_2) = 917.08 \text{ bN/dmm}^2$ 

为方便观察,在主脉与全脉模型的相同位置上, 沿翅展方向各取13个观察节点,节点位置如图1中 黑点所示。图2为提取特征节点的挠度和建立的挠 度分布曲线。从图中可以看出,主脉模型承载的最 大z向位移为4.396 dmm,全脉模型承载的最大位 移为9.513 dmm,全脉模型上主脉承载的最大位移 为3.144 dmm,3种情况下最大挠度都出现在翅尖 位置,并且沿着翅膀伸展方向,从翅根到翅尖变形逐 渐增加。



Fig. 2 Deflection distribution curves of uniform load

观察3组挠度分布曲线,从曲线中的数据对比 可以看出,全脉加载的整体变形最大,全脉模型上主 脉加载的整体变形最小,各对应节点的挠度略小于 主脉模型上施加载荷时的挠度,说明次脉对主框架 挠度影响不大,主脉弯曲刚度大,具有更强的稳定性 和承载能力。由此可知,主脉为蜻蜓翅膀的主承力 结构,主、次脉相结合,可提高结构的整体强度和承 载能力。

1.2.2 主、次脉交界处的变形协调性分析

在翅根处施加位移约束,在主、次脉翅尖处分别 施加沿z轴方向的集中力F,F大小取蜻蜓自身体重





Fig. 3 Displacement distribution contours of concentration (a) 主脉 (b) 全脉

从图 3 可以看出,两模型变形规律相同,变形均 是从翅根到翅尖逐渐增大,最大的结构变形均出现 在模型的末端,主脉最大挠度为 78.38 dmm,全脉最 大挠度为 66.47 dmm,但两模型都只产生了整体变 形。

翅根处施加位移约束,对翅脉分别施加 x 轴和 y 轴方向上的均布载荷 q,图 4 为均布载荷作用下的 位移场分布等值线图。由图 4 可知,在不同方向的 均布载荷作用下,最大变形都发生在翅膀末端,变形 量最大值分别为 0.012 631 dmm 和 0.111 415 dmm。



of uniform load (a) x 轴方向 (b) y 轴方向

由图 3、4 分析可知,在集中力和各向均布载荷 作用下,翅脉只发生整体变形,网格形状不发生变 化,说明主脉为主承力结构,在主脉与次脉的交界处 变形协调,即主脉与次脉共同工作,使力学结构更为 合理。

#### 2 褶皱结构的力学分析

#### 2.1 有限元网格模型

蜻蜓翅膀为三维的立体结构,从翅膀横截面

图<sup>[1]</sup>中可以发现,主脉四边形网格结构呈锯齿型结构,次脉六边形网格结构呈拱形结构。为了对主脉的空间力学性能进行精确研究,从蜻蜓翅膀结构中,分离出两类基本的悬臂网格结构:四边形网格和交错四边形网格,如图5所示。



(a) 四边形(10×10) (b) 交错四边形(10×10) 根据主脉网格实际尺寸,取四边形单元边长a =

2 mm, b = 1.5 mm, 两种网格的外框长宽一致, 均为 20 mm×15 mm。弹性模量  $E_1 = 3.8 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>, 泊 松比  $\mu_1 = 0.25$ , 梁外径  $R_0 = 1$  dm, 壁厚 r = 0.25 dm; 用八节点等参数曲壳单元 shell93 模拟翅膜, 取弹 性模量  $E_2 = 1.5 \times 10^{11}$  N/m<sup>2[11]</sup>, 泊松比  $\mu_2 = 0.25$ , 壳厚度 h = 0.02 dm, 建立有限元分析模型。

#### 2.2 模型求解

两种网格模型建立不同的 z 向褶皱(起皱高度 为 0,1,3,5,7,9,10,12 dmm),做成锯齿状,分别施 加相同的载荷 F'作大位移静态分析,观察各 z 向结 构变形图并提取模型在不同褶皱下的最大 z 向位 移,进行结构分析。

结合蜻蜓翅膀飞行时所受最小升力,均布载荷 F'取 10 000 bN 的 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 倍。

2.2.1 空间褶皱结构对刚度的影响

图 6 为左侧施加位移约束的悬臂四边形网格结构在 7×10<sup>4</sup> bN 均布载荷下的 z 向位移等值线图和转角图,由图可知,平面网格起皱,高度为 5 dmm时,其最大 z 向挠度由 74.555 dmm 转变为 6.576 dmm,减小 67.979 dmm,为平面模型的 8.8%;最大转角由 0.577 649 rad 转变为 0.045 3 rad,减小了 0.532 349 rad,仅为平面模型的 7.84%。起皱高度为 1.2 mm 时,挠度和转角值最小,分别为 1.263 dmm和 0.009 195 rad。观察不同均布载荷作用时,模型在不同起皱高度下的位移等值线图和转角图,可以得到与  $F' = 7 \times 10^4$  bN 作用下相同的变化规律,取不同载荷下不同起皱高度时的最大挠度,做出图 7 所示四边形网格(无膜)模型在载荷作用下的变形趋势图。

由图7可以看出,相同的均布载荷作用下,起皱





的高度越大,结构变形越小,即结构的刚度就越大; 在相同的起皱高度下,随着载荷的增加,变形量也随 之增加,但起皱高度越大,随载荷增大的变形量越 小。可见,蜻蜓翅膀起皱的结构可以显著提高其结 构的刚度。

# 2.2.2 翅膜对结构刚度的影响

观察四边形有膜网格在不同载荷下的 z 向位移 等值线图和转角图可以看出,平面模型在有膜无膜 时挠度和转角值基本一致,但随着模型的起皱,有膜 无膜时挠度和转角值则不再一致。取在不同均布载 荷下,悬臂四边形网格(有膜)在不同起皱高度时的 最大挠度,做出图 8 所示的挠度变化趋势图。由 图 8 可知,在均布载荷下,有膜四边形网格结构的变 形规律与无模四边形网格结构一致,即随着起皱高



图 8 四边形网格(有膜)挠度随载荷的变化趋势比较图 Fig. 8 Deflection trends comparison of quadrilateral mesh (with film)

度的增加,变形量显著减小,刚度明显增强。

图 9 为四边形网格(有膜)起皱高度为 5 dmm 时,在 7 × 10<sup>4</sup> bN 均布载荷下的 z 向位移等值线图和 转角图,可以看出,有膜时最大 z 向挠度为 4.89 dmm,相对于无膜时的挠度 6.576 dmm 减少了 1.686 dmm,为无膜时的 74.36%;最大转角为 0.034 572 rad,相对于无膜时最大转角值0.045 3 rad 减小了 0.010 73 rad,为无膜时的 76.32%。

图 10 为四边形网格在 7 × 10<sup>4</sup> bN 均布载荷下 的位移变化趋势图,由图中可知,起皱高度为 0.1 mm时,无膜结构最大位移 51.935 dmm,有膜结 构最大位移 47.8 dmm,减小了 7.96%,起皱高度为 0.3 mm时,无膜结构最大位移 15.924 dmm,有膜结 构最大位移 12.668 dmm,减小了 20.4%,起皱高度 为 0.9 mm 时,无膜结构最大位移 2.251 dmm,有膜 结构最大位移 1.533 dmm,减小了 31.89%,起皱高 度为 1.2 mm 时,无膜结构最大位移 1.263 dmm,有 膜结构最大位移 0.803 dmm,减小了 36.42%。



由以上分析可知,平面模型中,有膜无膜对结构 的刚度并不产生影响,但随着网格的起皱,相同载荷 作用下,有膜四边形网格结构的变形量总是小于无 膜的四边形网格结构,即有膜四边形网格结构的刚 度大于无膜四边形网格结构,并且刚度的变化随着 高度的增加而增大。

2.2.3 四边形连接方式对结构刚度的影响

交错四边形网格模型取同样的 z 向褶皱(起皱 高度为 0、1、3、5、7、9、10、12 dmm),做成锯齿状,对 有膜交错四边形网格和有膜交错四边形网格分别施 加相同的荷载 F 作大位移静态分析。可知其变形 规律与四边形网格结构一致,即:有膜的交错四边形 网格结构与无膜交错四边形网格结构的挠度都随着 载荷的增加呈线性增长;相同的载荷下,有膜四边形 网格的变形量总是小于无膜四边形网格。图 11、12分别为  $F' = 7 \times 10^4$  bN、起皱高度 5 dmm 时得到的 z向位移等值线图和最大转角图。



图 13 为四边形网格与交错四边形网格分别起 皱 1 dmm 和 9 dmm 时,随均布载荷的挠度变化趋势 图。从图 13 中可以看出,两种网格结构的变形规律 相同;相同载荷条件下,交错四边形网格结构的变形 量稍大于四边形网格结构。

图 14 为四边形网格与交错四边形网格在均布 载荷 F 分别为 1 × 10<sup>4</sup> bN、1 × 10<sup>5</sup> bN 时的挠度变化 趋势图。从图 14 可知,在相同起皱高度下,四边形 网格结构的变形稍小于交错四边形网格结构,两种 结构的变形差值随着起皱高度的增加而有所减小。

# 3 结论

(1) 主脉为蜻蜓翅膀的主承力结构,次脉对结



构刚度影响不大,主、次脉相结合,可提高结构的整体强度和承载能力。

(2)在各向均布载荷及集中力作用下,蜻蜓翅膀结构只发生整体变形,网格形状不发生变化,说明其结构整体性能优越,为优化的承力结构。

(3) 蜻蜓翅膀起皱的结构可以显著提高其结构的刚度,起皱的高度越大,结构变形量越小,即结构



(a) 载荷 1×10<sup>4</sup> bN (b) 载荷 1×10<sup>5</sup> bN

的刚度就越大。在相同的条件下,构成前缘主脉及 次缘脉的四边形网格结构的刚度稍大于构成中部主 脉的交错四边形网格结构。

(4) 蜻蜓翅膀的立体结构中,翅膜与翅脉协调作用,使翅膀结构的刚度得到了提高,并且,随着起皱高度的增加,翅膜对结构刚度的变形协调作用也增强。

参考文献

- 1 Okamoto M, Yasuda K, Azuma A. Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly [J]. The Journal of Experimental Biology, 1996, 199: 281 ~ 294.
- 2 Wagner T, Neinhuis C, Barthlott W. Wettability and contaminability of insect wings as a function of their surface sculptures [J]. Acta Zoologica, 1996, 77(3): 213 ~ 225.
- 3 童秉纲,孙茂,尹协振. 飞行和游动生物流体力学的国内研究进展概述[J]. 自然杂志, 2005,27(4):9~16. Tong Binggang, Sun Mao, Yin Xiezhen. Flying and swimming of biological fluid dynamics of the domestic research overview [J]. Nature, 2005, 27(4):9~16. (in Chinese)
- 4 程鹏,柳兆涛. 蜻蜓飞行姿态的实时模拟测量[J]. 实验力学,2002,17(3):315~319. Cheng Peng, Liu Zhaotao. Dragonfly flight attitude measurements of real-time simulation [J]. Experimental Mechanics, 2002, 17(3):315~319. (in Chinese)
- 5 曾理江.昆虫运动机理研究及其应用[J].中国科学基金,2000,42(4):110~123. Zeng Lijiang. Insect movement mechanism and its application [J]. Science Foundation of China, 2000, 42 (4): 110~123. (in Chinese)
- 6 Newman D J, Wootton R J. An approach to the mechanics of pleating in dragonfly wings [J]. The Journal of Experimental Biology, 1986, 126(1): 361 ~ 372.
- 7 张孝松. 基于蜻蜓翅翼的仿生微扑翼飞行器机翼的有限元分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006. Zhang Xiaosong. Dragonfly wings acquired based on biomimetic flapping-wing micro-finite element analysis of aircraft wing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)

(3) 改进定子曲线 k 值从零增加到 0.10 mm,

叶片受到的接触反力可以减小 160 N,该接触反力 的减小,对减小叶片的磨损、降低泵的噪声和延长寿 命起到积极作用。

#### 参考文献

- 1 冀宏. 液压气压传动与控制[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009.
- 2 雷天觉. 液压工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- 3 黎光英.叶片式液压泵和马达[M].北京:机械工业出版社,1993.
- 4 那焱青,牛祎洁,那成烈.叶片泵过渡曲线辨识问题研究[J].农业机械学报,2006,37(2):51~54.
  Na Yanqing, Niu Yijie, Na Chenglie. Study on identification of vane pump of transition curve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2):51~54. (in Chinese)
- 5 林立强,鲁阳. 转子式叶片泵的低噪声定子内轮廓过渡曲线研究[J]. 机床与液压,2010,38(19):21~24. Lin Liqiang,Lu Yang. Low noise transitional curves study for internal contour of the stator of rotary vane pump [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(19):21~24. (in Chinese)
- 6 何存兴. 液压元件[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- 7 那成烈. 轴向柱塞泵可压缩流体配流原理[M]. 北京:兵器工业出版社,2002.
- 8 李少年.可压缩流体工作介质双作用叶片泵力学特性的建模与仿真[D]. 兰州:兰州理工大学,2004.
- 9 史维祥.关于定量叶片泵叶片倾角的探讨[J].机床与液压,1984(2):12~15.
  Shi Weixiang. Study on heeling angle in fixed displacement vane pump [J]. Machine Tool & Hydraulics, 1984(2):12~15.
  (in Chinese)
- 10 那焱青,李少年,王峥嵘,等. 关于子母叶片泵叶片的受力分析[J]. 兰州理工大学学报,2004, 30(4): 61~63.
  Na Yanqing, Li Shaonian, Wang Zhengrong, et al. Kinetic analysis of vane in composite vane pump [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(4): 61~63. (in Chinese)
- 11 Antonio Giuffrida, Rosario Lanzafame. Cam shape and theoretical flow rate in balanced vane pumps [J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(3): 353 ~ 369.

------

#### (上接第 229 页)

- 8 Zhao P F, Liu C Y, Zheng M Z, et al. A flapping model wing experiment for insect flight investigation [C] // The 2nd Internetional Symposium on Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC),2003:14~17.
- 9 Wootton R J. Functional morphology of insect wings [J]. Annual Review of Entomology, 1992, 37: 113 ~ 140.
- 10 赵彦如. 蜻蜓膜翅结构特征和纳米力学行为及仿生分析[D]. 长春:吉林大学,2007.
  Zhao Yanru. Dragonfly wing structure and nanomechanicsl behavior and bionic analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 11 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.