

文章编号:1671-6833(2017)01-0001-05

# 蝉翼结构静力学仿真和力学性能分析

徐 赫, 杨 怡, 雷志鹏

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 在分析蝉翼结构特征的基础上,采用有限元法对主翅结构进行了仿真分析,研究各部位截面和刚度对结构力学性能的贡献.基于矢量工具和造型软件,使用 Beam189 单元和 Shell93 单元构建能反映蝉翼主要特征的有限元模型,然后对滑翔状态下蝉翼的力学性能进行仿真分析.发现蝉翼整体呈翘曲状,最大变形和最大应力均分布在后翅脉附近.比较各类翅脉的最大变形量可知,前、中、后 3 种翅脉对蝉翼刚度的贡献呈递减趋势,其中前翅脉为蝉翼提供主要的刚度.并改变质量系数对蝉翼进行模态分析,分析基频的变化,论证加固尾脉对颤振的抑制效果.

**关键词:** 蝉翼;结构仿真;数值分析;力学性能;模态分析

**中图分类号:** O33 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.030

## 0 引言

一直以来人们都在观察动植物的结构,并从中受到启迪.仿生学的发展对人类社会有着极其重要的推动作用<sup>[1]</sup>.有翼昆虫等飞行动物有非常良好的飞行机动性能(如苍蝇可在  $10^{-4}$  s 的时间内做  $180^\circ$  的转向,蜻蜓可以采用各种姿势进行飞行),而这与有翼昆虫的翅翼结构有着密不可分的关系.

目前,国内外很多学者研究了昆虫的翅翼结构和飞行性能.Wang 等<sup>[2]</sup>采用梳状条纹投影方法,首次测得了蜻蜓自由飞行拍翅运动的相关参数;Wu 等<sup>[3]</sup>对昆虫悬停时拍翼的运动参数对气动性能的影响进行了研究;李忠学<sup>[4]</sup>就蜻蜓的翅膀进行了二维和三维的建模,分析了在滑翔飞行过程中蜻蜓翅膀的变形和应力特征;Zhang 等<sup>[5]</sup>测定了蜂蝇翅膀的运动学参数;Fry 等<sup>[6]</sup>结合数值计算获得翅膀的气动力;Huang 等<sup>[7]</sup>探究了蝴蝶飞行的机制;Kim 等<sup>[8]</sup>通过实验研究了三维的涡旋结构;孙茂<sup>[9]</sup>就国内外昆虫飞行气动力学上的研究进行了总结,对比了多种研究方法和思路.而在蝉翼的研究方面,Song 等<sup>[10]</sup>测定了蝉翅膜和翅脉的弹性模量,弯艳玲等<sup>[11]</sup>对典型膜质翅的疏

水性进行了探究,并使用逆向化技术对翅膀进行建模.

然而,研究者对蝉翼结构特征的研究还明显不足.蝉翼的重量仅占蝉总体重的 1% 左右,却能保证蝉在飞行中具有极好的稳定性和极高的承载能力.如何建立符合其结构特性的模型是当前研究面临的主要问题.而基于精确模型对蝉翼结构的力学特性进行研究将有助于分析和解释蝉的优越飞行性能,并为仿生学设计提供借鉴.

故笔者根据已有的蝉翼结构参数,通过数值模拟的方法,探究蝉翼主翅结构的力学特性,建立符合其结构特征的有限元模型,分析滑翔状况下蝉翼的变形和应力分布情况,讨论翅脉截面对面外刚度的影响,验证加固尾脉的抗振特性.

## 1 有限元建模

不同种类蝉的主翅结构存在共性,均是由各种尺寸的脉和一定弯曲刚度的膜复合而成.翅脉通常可以分成 4 部分:前翅脉、后翅脉、中间支脉和加固尾脉<sup>[12]</sup>.图 1 为蝉翼的一般结构形式.

蝉翼的脉为基体提供了主要的结构支撑,而膜是重要的空气动力学结构,厚度非常薄,力学上可认为其只承受拉应力的作用.

收稿日期:2016-03-25;修订日期:2016-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372113)

通信作者:杨怡(1975—),男,广东龙川人,华南理工大学副教授,博士,主要从事结构振动分析方面的研究,  
E-mail: yiyang@scut.edu.cn.

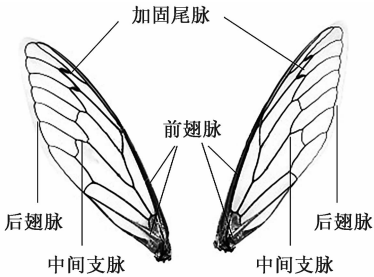


图 1 蝉翼示意图  
Fig. 1 Structure of cicada's wings

蝉翼结构有 3 个主要的特点:①数十倍的跨厚比;②蝉翼在沿翼展方向存在较大刚度,且比翼弦方向的刚度要高出数个量级;③尾翼附近的加固尾脉较中间支脉有着更大的质量系数,影响了结构的动态响应.然而由于蝉翼结构的复杂性,重现这个结构的所有细节既不现实也不经济,故可根据翅膀结构特点进行数值仿真分析.

笔者采用等比的高清蝉翼照片,使用 Adobe Illustrator CS5 软件对其进行矢量化处理,获取矢量坐标,然后将矢量坐标保存成通用格式,基于造型软件,Pro/E 与 CS5 的数据接口,对矢量点数据进行输出.最后在 Pro/E 中利用样条曲线的功能,构造并修正内、外轮廓线,进而构建各表面,生成蝉翼的实体模型.

将实体模型导入 Ansys 程序中,采用适用于大变形分析的平面协调梁单元 Beam189 来模拟翅脉,八节点等参曲壳单元 Shell93 来模拟翅膜,建立能贴合蝉翼结构特性的有限元模型.

Beam189 单元是一种适合分析细长到中等长度梁结构的单元,基于 Timoshenko 梁理论建立,并考虑了剪切变形的影响.对于像蝉翼这样的大跨度结构,Beam189 可较好地模拟翅脉的变形特性.

Shell93 单元则采用 Lagrangian 非线性有限元的方式描述,具有塑性、应力刚化、大变形以及大应变的特性,其应力刚化特性可以模拟翼膜在受到横向风载时膜面张力增大和翼展方向刚度增加的特性.

根据测量和观察,将翅脉的截面定义为环状,对不同位置的翅脉赋予不一样的横截面积,具体参数见表 1 (由于较难精确模拟截面的连续变化,笔者用已测定的数个位置的均值来定义截面).

表 1 翅脉截面参数

Tab. 1 Sectional parameters of the wings mm

类别	内径	外径
前翅脉	0.500 0	0.800 0
后翅脉	0.050 0	0.080 0
中间支脉	0.062 5	0.100 0
加固尾脉	0.250 0	0.400 0

根据统计,蝉翼翼膜厚度的分布在几十至几百微米<sup>[13]</sup>.笔者所选蝉与文献[14]的蝉同属,且蝉翼外形尺寸相近,故借鉴其测定的翅膜厚度分布:在近翅端赋予膜 0.12 mm 的厚度,在远翅端赋予膜 0.04 mm 的厚度,蝉翼近远端示意如图 2 所示.

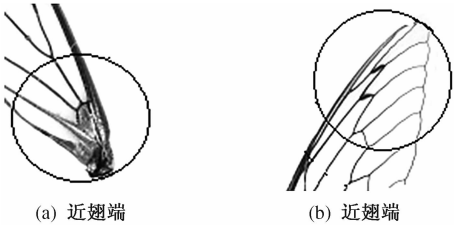


图 2 蝉翼的近远端  
Fig. 2 Proximal end and far end of cicada's wings

根据上述定义,对蝉翼模型进行网格划分,有限元模型如图 3 所示,共计 2 995 个单元.参照文献[10]中的实验结果将蝉翼模型参数取为:翅膜的弹性模量  $E_1 = 3.5 \text{ GPa}$ ;翅脉的弹性模量  $E_2 = 1.9 \text{ GPa}$ ;泊松比  $\gamma = 0.25$ ,  $\gamma = 0.23$ ;一片蝉翼面积  $S = 12 \text{ mm}^2$ .

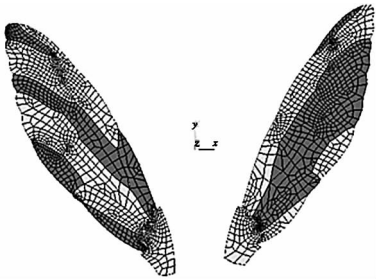


图 3 蝉翼有限元模型  
Fig. 3 The finite element model of wings

2 滑翔状态分析

为计算方便,采用以下计算量纲:长度单位为 dmm (丝米);力的单位为 bN;质量单位为 mg.

蝉在滑翔状态下,仅受到重力和升力作用.当翅翼保持展开状态时,翅翼表面层流体为层流,而

气流升力近似为均布荷载<sup>[15]</sup>.  
由计算可知荷载大小,在蝉翼根部施加  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的位移约束,在面外方向施加求得的均布荷载并进行求解,计算结果如图 4 所示.

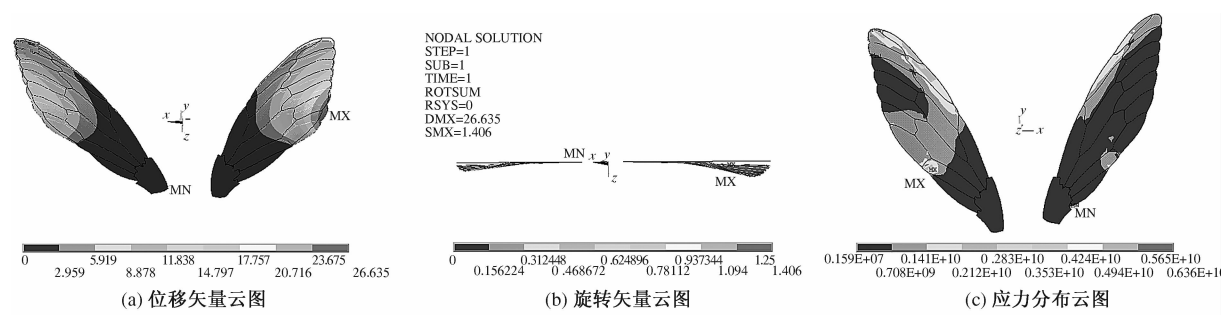


图 4 滑翔状态下的计算结果

Fig. 4 Calculation results in gliding state

由图 4(a)可知,最大变形发生在后翅脉附近区域,为 26.635 mm,变形主要沿  $z$  方向,而  $x$ 、 $y$  方向的变形可以忽略不计.

由图 4(b)可知,蝉翼整体呈翘曲状,主要为绕  $x$ 、 $y$  轴的旋转,这一部分的仰旋对升力的贡献巨大,是蝉翼产生高升力的原因之一.

由图 4(c)可见整个蝉翼上的应力分布.应力最大值为  $0.63 \times 10^{10} \text{ bN/mm}^2$ ,位于后翅脉根部;应力最小值为  $0.159 \times 10^7 \text{ bN/mm}^2$ ,位于前翅脉附近.由于翅膜的存在,应力在蝉翼上的分布较为均匀.

3 翅脉截面对刚度的影响

在蝉短暂的生命中,蝉翼经历了一个快速的成长过程,在这个过程中,翅脉的尺寸不断发生改变,伴随而来的是飞行能力不断改善.文中使用的是成熟蝉的翼翅结构,在其整个生命周期中具有最佳的飞行性能.

翅脉在蝉翼的结构中起着骨架的作用,探究其刚度特性可作为大跨度结构设计的参照,且有助于分析蝉翼的变形特征.

故笔者基于成熟体模型和控制变量法,赋予 3 种翅脉不同的截面尺寸,观察蝉翼的变形,探究各位置翅脉对整个蝉翼刚度的贡献.计算结果如表 2 所示.

由表 2 可知,在 3 种翅脉内径变化时,对蝉翼最大位移影响最明显的是前翅脉.随着内径增大,最大位移增幅为 121.3%;其次是中间支脉,最大位移增幅为 34.8%;影响最小的是后翅脉,最大位移增幅只有 17.4%.

因此,对整个结构的刚度贡献从前翅脉到后翅脉是递减的.前翅脉提供了结构的主要刚度,远大于后翅脉和中间支脉,中间支脉对结构刚度的贡献较后翅脉多.

结合滑翔分析中蝉翼变形可知,蝉翼的刚度也是从前翅脉往后翅脉递减.这样的结构特性在流场中容易形成仰角,产生升力,且能为大跨度结构提供良好的支撑效果.此外,还可以观察到,最大位移的增长方式均可分为两个区间.

前翅脉和后翅脉内径增幅为 7 倍以内时,蝉翼的最大位移增幅不明显;为 7 倍以上时,蝉翼的最大位移增幅逐渐明显.中间支脉内径增幅为 5 倍以内时,蝉翼的最大位移增幅不明显;为 5 倍以上时,蝉翼的最大位移增幅逐渐明显.

4 固有频率分析

在自然界中,人们观察到很多飞行昆虫具有防颤振的结构,如蜻蜓前翅沿的翅痣.在蝉翼上,加固尾脉则扮演了类似的角色.加固尾脉相对中间支脉有更大的质量系数,对蝉翼的动态性能有着重要影响,且随着蝉的逐渐进化,某些种属蝉的加固尾脉的质量系数已达到 10 倍以上<sup>[16]</sup>.

表 3 为不同质量系数下蝉翼前三阶频率的计算结果.由表 3 可知,随着质量系数上升,各阶频率均有明显下降.当质量系数为 22 时,左翼的基频降低了约 30%,右翼的基频降低了约 26%,对应的高阶频率也有相应的下降.由此可见,加固翅脉的质量集中效应可有效降低结构的固有频率,从而抑制颤振的发生.

表 2 不同内径的前翅脉、后翅脉、中间支脉对应的蝉翼最大位移  
Tab.2 The maximum displacements of wings corresponding to different inner diameter of front, far and middle nervure

前翅脉			后翅脉			中间支脉		
外径	内径	最大位移	外径	内径	最大位移	外径	内径	最大位移
0.8	0.050	26.118	0.08	0.005 0	26.035	0.1	0.012 50	25.469
	0.200	26.129		0.020 0	26.051		0.025 00	25.496
	0.300	26.176		0.030 0	26.112		0.037 50	25.612
	0.400	26.310		0.040 0	26.277		0.050 00	25.930
	0.500	26.635		0.050 0	26.635		0.062 50	26.635
	0.600	27.443		0.060 0	27.329		0.075 00	28.061
	0.700	30.235		0.070 0	28.627		0.087 50	30.946
	0.750	36.201		0.075 0	29.686		0.093 75	33.509
	0.765	42.046		0.076 5	30.095		0.112 50	34.213
	0.780	57.810		0.078 0	30.569		0.125 00	34.345

表 3 不同质量系数下蝉翼的频率  
Tab.3 Wings' frequencies under different mass coefficients

质量系数	位置	一阶	二阶	三阶
1	左翼	1 089.1	1 640.1	2 831.3
	右翼	1 164.6	1 706.8	2 987.3
3	左翼	1 073.5	1 606.9	2 824.4
	右翼	1 105.3	1 609.5	2 949.7
7	左翼	1 008.2	1 514.5	2 803.9
	右翼	1 047.3	1 566.7	2 822.6
14	左翼	886.81	1 431.1	2 447.1
	右翼	1 007.2	1 514.2	2 744.0
22	左翼	768.43	1 308.7	1 950.7
	右翼	853.74	1 455.7	2 556.0

5 结论

1) 滑翔状态下,由于膜结构的作用,蝉翼上应力分布较为均匀,最大变形发生在后翅脉附近,以致后翅脉尾部产生较大扭转变形,使得整体结构呈流线型。

2) 对蝉翼面外刚度贡献最大的是前翅脉,然后是中间支脉,而后翅脉贡献最小。整个结构在前翅脉到后翅脉间的刚度是递减的,这样的结构在流场中容易形成仰角,产生升力。

3) 加固尾脉降低了蝉翼的各阶固有频率,能有效抑制蝉翼颤振的发生。

参考文献:

[1] PARK J B. Biomaterial science and engineering [M]. New York: Pergamum Press, 1984.

[2] WANG H, ZENG L J, LIU H, et al. Measuring wing kinematics, flight trajectory, and body attitude during

forward flight and turning maneuvers in dragonflies [J]. Journal of experimental biology, 2003, 206(4): 57-745.

[3] WU J H, SUN M. Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing [J]. Journal of experimental biology, 2004, 207(7): 1137-1150.

[4] 李忠学. 结构仿生学与新型有限元计算理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[5] ZHANG Y L, SUN M. Wing kinematics measurement and aerodynamics of free-flight maneuvers in drone-flies [J]. Acta mechanica sinica, 2010, 26(3): 371-382.

[6] FRY S N, SAYAMAN R, DICKINSON M H. The aerodynamics of free-flight maneuvers in drosophila [J]. Science, 2003, 300(5618): 495-498.

[7] HUANG H, SUN M. Forward flight of a model butterfly: Simulation by equations of motion coupled with the Navier-Stokes equations [J]. Acta mechanica sinica, 2012, 24(6): 14-209.

[8] KIM D, GHARIB M. Experimental study of three-dimensional vortex structures in translating and rotating plates [J]. Experiments in fluids, 2010, 49(1): 329-339.

[9] 孙茂. 昆虫飞行的空气动力学[J]. 力学进展, 2015, 45(1): 1-28.

[10] SONG F, LEE K L, SOH A K, et ali. Experimental studies of the material properties of the forewing of cicada (Homóptera, Cicàdidae) [J]. Journal of experimental biology, 2004, 207(17): 3035-3042.

[11] 弯艳玲, 丛茜, 刘诗, 等. 蜜蜂、家蝇前翅微观结构及浸润性能研究[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线[2008-01-03]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200801-44>.

[12] TSUYUKI K, SUDO S. The wing structure and flap-

ping behavior of cicada [ C ]//JSME annual meeting.  
the Japan society of mechanical engineers. Tokyo:  
JSME, 2003: 85 – 86.

[ 13 ] CHEN K F. New genera and species of Chinese ci-  
cadas with cynonymical and nomenclatorial notes [ J ].  
Journal of the New York entomological society, 1943,  
51(1): 19 – 53.

[ 14 ] TSUYUKI K, SUDO S. The properties of wing and air-  
flow of flying insects [ C ]//24th International congress  
of the aeronautical sciences. Yokohama: ICAS, 2004:  
1 – 10.

[ 15 ] ELLINGTON C. The novel aerodynamics of insect  
flight: applications to micro-air vehicles [ J ]. Journal  
of experimental biology, 1999, 202(23): 3439 – 3448.

[ 16 ] ROHDENDORF B B. Evolution and classification of  
the flight apparatuses of insects [ J ]. Trudy paleont  
Inst, 1949, 16: 163 – 176.

Structural Simulation Analysis of the Mechanical Properties of a Cicada’s Wings

XU He, YANG Yi, LEI Zhipeng

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on vector tools and modeling software, this paper analyzed and summarized the structure characteristics of cicada’s wings. And then the element Beam189 and element Shell93 were used to construct finite element model which could reflect the main characteristics of cicada’s wings. The mechanical properties of cicada’s wings in gliding state were simulated and analyzed. In that state, the whole structure of cicada’s wings was found warping shape, and the maximum deformation and stress were close to the far nervure. With the change of sectional size of all kinds of nervure in same ratio, comparative calculation was done to obtain the maximum deformation of the corresponding cicada’s wings. The results showed that the increasing of cicada’s wings’ deformation corresponding to three kind nervure were 121.3%、34.8%、17.4% respectively, so their contribution to the stiffness decreased. Among them, front nervure provided main stiffness for cicada’s wings. With the change of the quality coefficient of reinforcement nervure, modal analysis was done to analyze the fundamental frequency changes which could prove suppression effect of reinforcement nervure on flutter. When the quality coefficient of reinforcement nervure was 22, the fundamental frequency decreases about 30%.

**Key words:** cicada’s wing; structural simulation; numerical analysis; mechanical property; modal analysis