

基于甲虫后翅的仿生扑翼振动模态特性分析



闫永为,孙霁宇

吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要:扑翼微型飞行器(FWMAV)的动力主要来源于机翼在低雷诺数下的高频扑动,在空气动力、惯性力以及机翼弹性力的综合作用下,机翼结构在发生形变的同时也会发生振动并影响微飞行器的动稳定性。针对扑翼振动特性的问题,本文获取了甲虫后翅的几何形貌参数和翅脉结构,发现后翅的前缘脉(C)和次前缘脉(Sc)中分布有体液微流;并在获取后翅材料力学数据的基础上,建立了三种不同翅脉结构(实心、空心、“空心+体液”)的后翅力学耦合模型;利用ANSYS对该力学耦合模型进行了振动模态特性分析,结果表明,在后翅扑动频率范围内,“空心+体液”的模型既能获得轴向和展向的变形能力,又能保持后翅基本形态,具有更优的动稳定性。

关键词:扑翼; 纳米力学; 体液微流; 有限元模型; 振动模态分析

中图分类号:V224

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.10.007

微型飞行器(MAV)可分为固定翼、旋翼和扑翼三类,在军事和民用领域具有广阔的应用前景^[1]。与固定翼和旋翼相比,扑翼微型飞行器(FWMAV)可将升降、悬停以及前飞运动集成于一个扑翼运动操作系统^[2],其双翼性能直接决定了FWMAV的飞行特性。FWMAV的机翼是柔性的,既能适应低雷诺数下“非定常流动”的气流变化^[3-4],又能保持一定的刚度适应流场变化并产生高升力^[5],还能在复杂流场作用下保持较好的飞行稳定性,降低机翼扑动产生的振动冲击^[6],这就要求FWMAV的双翼既具有优异的扑动力学性能,又具有良好的抗振性能。

鉴于扑翼微型飞行器的优异性,越来越多的研究者以自然界中的飞行动物(多为鸟类^[7]、蝙蝠^[8]、蝴蝶^[9]等)为仿生原型研制微型飞行器样机;随着微型飞行器朝尺寸微型化、结构轻量化发展的趋势,甲虫为其提供了新的仿生思路^[10]。研究发现,甲虫后翅的一部分翅脉是具有神经和体液等组织的中空结构,这些组织一方面能对翅脉的刚度有所影响^[11],另一方面能够在甲虫后翅折叠展开时起到液压推动作用,还对控制后翅进行适当的振动变形有所帮助^[12-13]。

目前,在机翼结构对扑翼动稳定性方面的研究相对较

少,T. Anh等^[14]根据甲虫后翅的质量和刚度分布,并考虑后翅结构各向异性,建立了由翅膜和锥形脉组成的仿生翼模型,进行模态分析后发现,不同频率下的后翅变形有利于气流向下流动并产生较高的升力。宋泽来等^[15]以亚洲瓢虫的后翅为仿生原型,建立了三种不同结构的后翅模型并对其进行了有限元仿真分析,研究表明,瓢虫后翅翅脉中的体液微流,在弯曲和扭转变形中没有作用而对后翅的动稳定特性有较大的影响。

针对FWMAV机翼在低雷诺数下复杂流场中的抗振性能,本研究以双叉犀金龟后翅为仿生原型,探索其后翅结构的振动模态特性,以期研究体液微流在扑翼飞行中对机翼的动稳定性作用,为扑翼微型飞行器的研制提供仿生学参考。

1 仿生翼模型

1.1 仿生原型

以迁飞性甲虫双叉犀金龟(见图1)为研究对象,其外形尺寸和体重相较于其他飞行动物更加适中,在保持一定“微型化”的同时具有更好的“容载性”。其具有一副坚硬的鞘翅和一副可折叠的柔性后翅,在非飞行时段,其后翅能收拢

收稿日期: 2022-05-07; 退修日期: 2022-07-14; 录用日期: 2022-08-15

基金项目: 航空科学基金(2020Z0740R4001)

引用格式: Yan Yongwei, Sun Jiyu. Vibration modal characteristics analysis of bionic flapping wing based on hind wing of beetle [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(10): 52-58. 闫永为, 孙霁宇. 基于甲虫后翅的仿生扑翼振动模态特性分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(10): 52-58.

在鞘翅之下,以减小自身的尺寸,便于迁移和抵御天敌;在飞行时,快速地从鞘翅下展开进行扑动。

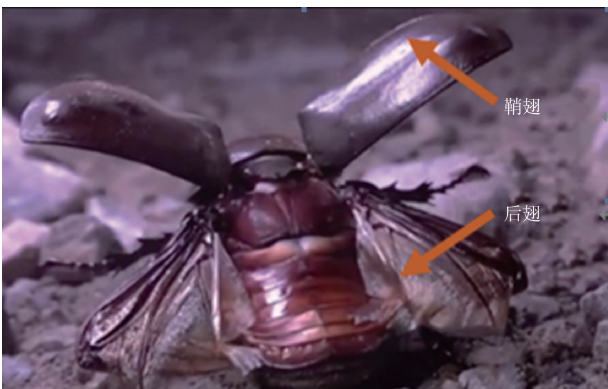


图1 双叉犀金龟及其后翅
Fig. 1 Trypoxylus dichotomus and its hind wings

1.2 甲虫后翅形貌参数和翅脉结构

1.2.1 甲虫后翅形貌参数

利用电子分析天平、体式显微系统(Zeiss SteREO Discovery V12, CarlZeiss, 德国)、超景深三维显微系统(VHX-6000, KEYENCE, 日本)分别测试了双叉犀金龟的重量、外形尺寸以及后翅的宏观几何形貌。

如图2所示,双叉犀金龟后翅翅脉的生长分布主要分为两种情况:第一种是由翅根向尾端纵向生长的主翅脉;第二种是由主翅脉分生出来横向生长的分支翅脉,但由于双叉犀金龟的进化程度较高,其分支翅脉已经逐渐退化,生长分布较少。后翅包含有多条主翅脉,即前缘脉(Costa, C)、亚前缘脉(Subcosta, Sc)、径脉(Radius, R)、中脉(Media, M)、肘脉(Cubitus, Cu)、臀脉(Anal, A)、軛脉(Jugal veins, J)。

翅脉将甲虫后翅划分为不同的区域,前缘脉C的末端、分支翅脉Cost1、臀脉1A和臀脉2A的前端以及臀脉3A的上部共同形成折叠区域(BZ1);径脉R从翅基出发向后翅末端延伸,在后翅中部位置产生分支,生长为分支翅脉R1和R2,其中R1斜向上生长、R2向下生长延伸至翅膜边缘;臀脉3A和分支翅脉R1围成折叠区域(BZ2)。Wr为翅基区域;臀脉1A和臀脉2A之间的区域为臀1区(Rg1);臀脉2A和臀脉3A之间的区域为臀2区(Rg2);臀脉3A和径脉支脉R2之间的区域为臀3区(Rg3);径脉支脉R2、径脉R以及中脉M之间的区域为径中区(RM);中脉M、肘脉支脉Cu1以及Cu2之间的区域为中肘区(MCu);肘脉Cu和軛脉J之间的区域为肘軛区(CuJ);前缘脉C、次前缘脉Sc以及径脉R

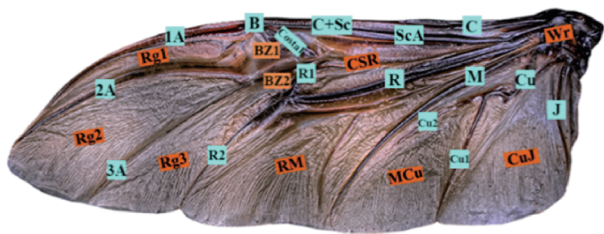


图2 双叉犀金龟后翅宏观形貌
Fig. 2 Macromorphology of hind wing of Trypoxylus dichotomus

之间的区域为CSR。

表1为测量所得的双叉犀金龟及其后翅的宏观形貌特征参数,本文选取了5只成年双叉犀金龟作为样本进行测试。

表1 双叉犀金龟及其后翅宏观形貌特征参数
Table 1 Characteristic parameters of macroscopic morphology of Trypoxylus dichotomus and its hind wings

特征参数	双叉犀金龟样品					平均值
	1	2	3	4	5	
体重/g	8.564	9.581	10.965	9.685	8.542	9.467±0.04
体长/mm	45.245	48.964	53.653	49.562	46.038	48.692±0.03
体宽/mm	28.53	29.64	30.59	30.14	28.92	29.564±0.03
后翅长度/mm	56.23	57.26	62.54	59.61	55.46	58.22±0.05
后翅宽度/mm	18.63	19.35	20.62	19.92	18.31	19.17±0.06

1.2.2 甲虫后翅翅脉结构

采用扫描电镜(SEM, EVO-18, CarlZeiss, 德国)测试了双叉犀金龟后翅的微观结构。

如图3(a)所示,前缘脉C和臀脉1A在折叠点B处快速收窄,上部形成了更多的褶皱而下部形成了一定的空隙,这种结构有利于金龟后翅的展向折叠;前缘脉C和臀脉1A表面具有褶皱结构,这是由于其为主要迎风脉,该结构能够获得更优异的抗压性能,还能更好地摆脱气流涡旋,更容易获得高升力^[13]。由图3(b)中可知,前缘脉C是中空(径宽200~310μm,径长350~420μm)的,而由图3(c)中可知,径脉R、中脉M都是实心的,这意味着只有前缘脉C中具有体液;前缘脉C不但是主要的支撑脉,而且是后翅展开的主要驱动脉,前缘脉C中具有体液可以更好地帮助前缘脉C展开后翅。

由图3(d)可知,后翅的翅膜厚度为20~30μm;对比图3(e)和图3(f)发现,翅膜在折叠区域BZ1和BZ2以及翅脉周围没有刚毛(而由若干个六边形微元构成),而在各翅脉分区间的翅膜上分布有大量的刚毛;这是因为在折叠区域和

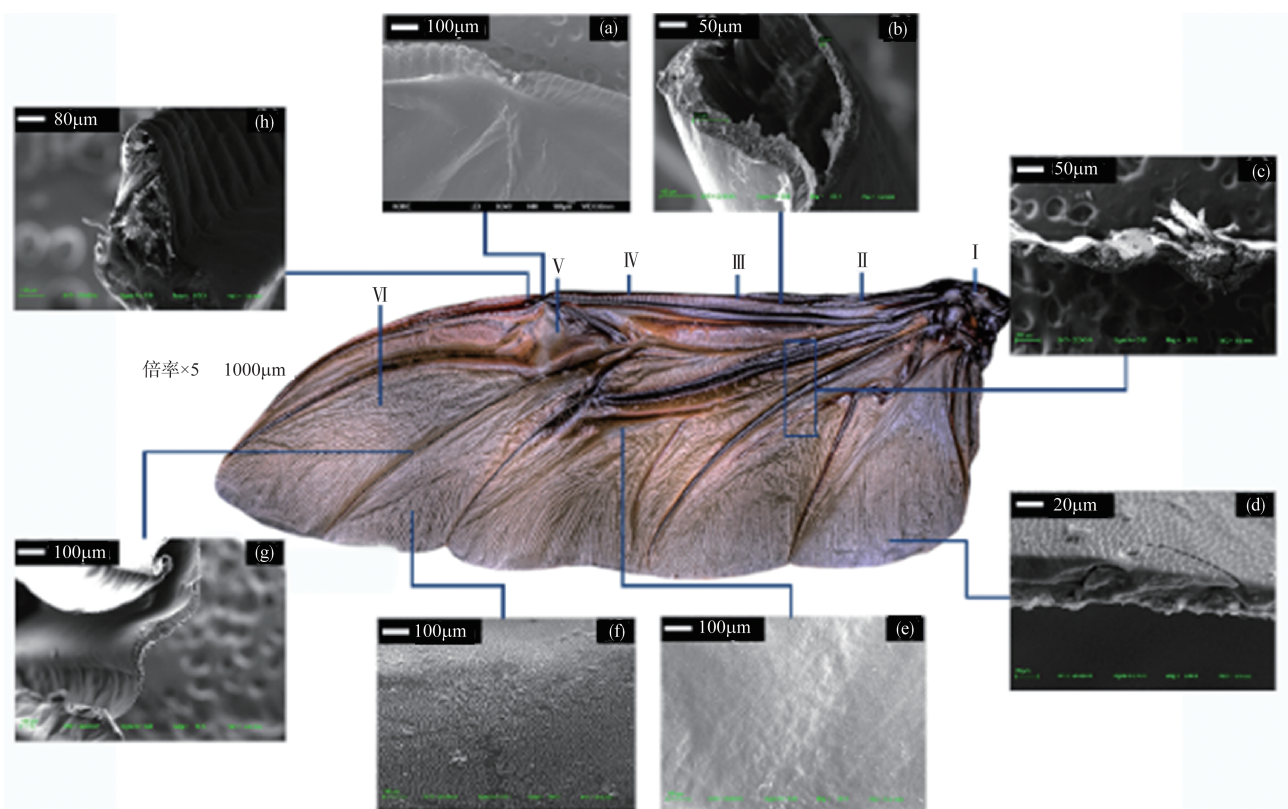


图3 双叉犀金龟后翅微观结构

Fig. 3 Microstructure of hind wing of Trypoxylus dichotomus

翅脉周围翅膜折叠作用显著,无刚毛的小六边形微元结构能够在保证翅膜更易折叠的情况下提升翅膜的韧性和刚度;而在各翅脉分区间的翅膜空气动力作用特性显著,刚毛结构能够更好地分离气流涡旋,且刚毛的排列朝向协同一致,能更好地摆脱气流;由图3(g)和图3(h)可知,臀脉3A和臀脉1A也是实心结构。表2为测量所得的后翅翅脉结构参数。

1.3 甲虫后翅微流作用

利用小动物成像系统(chemstudio plus)对双叉犀金龟后翅翅脉内体液流动情况进行观测。

表2 后翅微观形貌特征参数

Table 2 Morphological parameters of micromorphology of hind wing

特征参数	内径长/ μm	内径宽/ μm	上表皮厚度/ μm	下表皮厚度/ μm
前缘脉	240 ± 12	400 ± 12	125 ± 8	32 ± 0.6
次前缘脉	385 ± 12	400 ± 12	95 ± 8	98 ± 8
径脉	350 ± 12	360 ± 12	68 ± 2	29 ± 2
中脉	125 ± 12	340 ± 12	43 ± 2	36 ± 2
臀脉	35 ± 2	35 ± 2	—	—
翅膜	—	—	12.5 ± 2.5	12.5 ± 2.5

如图4所示,白色部分为翅脉内随着体液流动的荧光指示剂,其主要集中于翅基和各翅脉连接翅基的部分以及前缘脉和次前缘脉的交会部分。体液在经过翅基后主要向前缘脉以及前缘脉和次前缘脉交会处延伸,一直达到折叠点B;除前缘脉、前缘脉和次前缘脉交会地带以外的其他翅脉处,甲虫后翅体液都只能流向翅脉根部而不能继续向翅尖延伸。表明甲虫后翅翅脉内的体液,一方面可以流向翅基和各翅脉根部,使后翅可以在体液的作用下辅助翅基肌肉,进行后翅的扑动等飞行;另一方面延伸至前缘脉、前缘脉和次前缘脉交会区的末端有助于其进行折叠、展开动作。

此外,荧光指示剂显示的体液流动规律与甲虫后翅翅脉微观结构具有相关性,验证了后翅翅脉中除前缘脉和次前缘脉含有体液外,其他翅脉均没有体液。

1.4 后翅纳米力学特性

利用纳米力学测试系统(USA)对金龟后翅的力学性能进行了试验。

图5为纳米力学测试结果,测试位置I位于后翅的翅基肌肉上,测试位置II、III、IV位于后翅前缘脉C上,测试位置V位于后翅折叠区域BZ1中,测试位置VI位于后翅翅膜上。由图5可知,后翅翅基肌肉的约化模量值以及硬度值最大,分

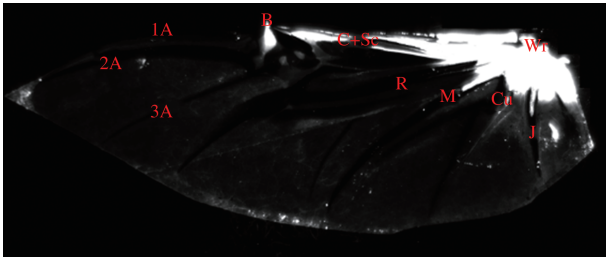


图4 后翅体液微流

Fig. 4 Micro fluid of hind wing

别为 $E_f = (0.81 \pm 0.06)$ GPa、 $H = (0.52 \pm 0.06)$ GPa；前缘脉C上测试位置II、III、IV的约化模量值呈逐渐增加的趋势，从 $E_f = (0.6 \pm 0.02)$ GPa 逐渐增加到 $E_f = (0.71 \pm 0.06)$ GPa，但其硬度值相近，分别为 $H_{II} = (0.36 \pm 0.02)$ GPa、 $H_{III} = (0.42 \pm 0.04)$ GPa 以及 $H_{IV} = (0.38 \pm 0.02)$ GPa，其值皆略小于翅基肌肉的约化模量值，但都大于折叠区域BZ1和翅膜上约化模量值；折叠区域BZ1的约化模量值略小于前缘脉C上测试位置V的数值，为 $E_f = (0.58 \pm 0.02)$ GPa，但略大于后翅翅膜上的约化模量值；后翅翅膜的约化模量值最小，为 $E_f = (0.30 \pm 0.012)$ GPa。

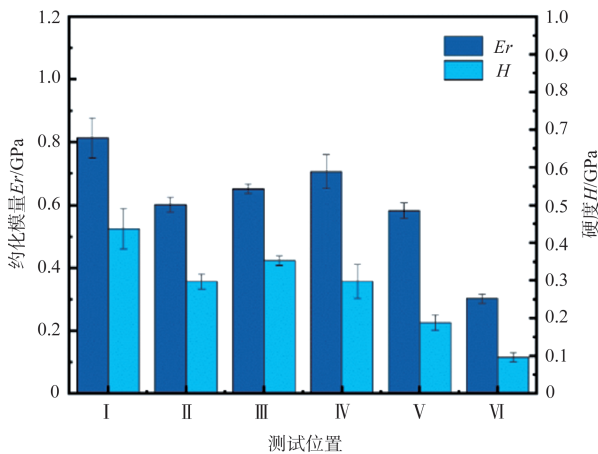


图5 后翅纳米力学性能

Fig. 5 Nano-mechanical properties of hind wing

1.5 有限元模型

以后翅宏观形貌参数为基准，建立了后翅模型HW的翅膜翼型草图及翅脉轮廓草图；结合翅脉微观结构参数，确定了后翅模型HW的翅脉等效脉径及翅膜厚度的参数值；由后翅体液流动状况，将后翅模型HW分为了前缘脉C及亚前缘脉Sc分别为空心、实心、“空心+体液”的三种不同的子模型HW-I、HW-II以及HW-III，如图6所示。根据后翅纳米力学性能参数，设置材料属性（其中，各翅脉约化模量值设置为所测得的翅脉约化模量的平均值）。建模数据如下：

前缘脉C： $d=0.6$ mm， $D=0.75$ mm；次前缘脉Sc： $d=0.6$ mm， $D=0.75$ mm；径脉径R： $D=0.5$ mm；中脉径M： $D=0.5$ mm；肘脉径Cu： $D=0.4$ mm；臀脉1A： $D=0.4$ mm；臀脉2A： $D=0.4$ mm；臀脉3A： $D=0.4$ mm；翅膜厚度为0.05mm；其中， d 为翅脉内径， D 为翅脉外径。翅脉平均弹性模量为0.65GPa；翅膜弹性模量为0.3GPa；折叠区(Band-zone)弹性模量为0.45GPa；翅基(Wr)弹性模量为0.7GPa；液体微流体弹性模量为2.18GPa；泊松比：0.25。

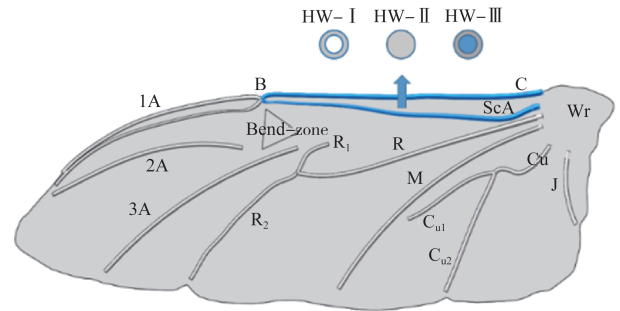


图6 后翅有限元模型

Fig. 6 Finite element model of hind wing

2 数值仿真结果及分析

本文采用有限元分析计算的方法对后翅模型进行模态分析，以确定模型的固有频率和振型。进行模态分析时，约束不同其分析结果就不同，考虑到双叉犀金龟后翅的飞行特点，本文对后翅翅基部位进行约束。

2.1 前缘脉和次前缘脉为空心结构

由图7可知，模型HW-I的一阶模态振型主要为翅膜臀区的轴向摆动，其固有频率为3.24Hz、最大变形量为6.00mm；振动变形主要发生在臀区处并从臀区向后翅中部逐渐减小，在径中区发现轻微振动变形。二阶模态的主要振型为后翅中肘区边缘的弦向振动变形，以及后翅臀区处的展向振动变形，其固有频率为12.53Hz、最大变形量为6.11mm，略大于一阶模态最大变形量；振动变形主要发生在后翅中肘区处并逐渐向后翅径中区和后翅肘区减小，在臀2区的边缘处略有变形，翅膜其他区域并未发现明显变形。三阶模态的变形主要发生在后翅臀3区、翅膜边缘处以及折叠点B的周围，后翅中部未发现明显变形，振动变形主要为沿后翅中部的翻转变形；其固有频率为17.05Hz、最大变形量为6.38mm。四阶模态变形主要发生在臀区末端、径脉分支翅脉末端周围以及肘区末端，其他区域未见明显变形；其固有频率为26.31Hz，最大变形量为7.97mm。五阶模态变形主要发生在臀2区的末端、沿臀2

区到臀3区的弦向变形、沿径中区的弦向变形以及肘枢区的末端;振动变形主要是在展向的多次扭转,最大变形量发生在肘枢区;固有频率为39.60Hz,最大变形量为39.60mm。六阶模态变形主要发生在整个臀1脉和臀2脉周围、臀3脉末端、前径区、中脉末端周围以及肘枢区,整个模型四周发生较大变形,呈现轴向和弦向的扭转变形;固有频率为46.24Hz,最大变形量为6.65mm。

可见,当振动频率在3.24~39.60Hz时,模型HW-I在保持后翅结构特征的同时伴随展向弯曲变形和轴向扭转变形;达到或超过46.24Hz时,后翅发生了较大形变不再保持原来的形状特征,表明在模型HW-I的材料属性和整体结构下,当扑动频率超过46.24Hz时极易对后翅造成损坏;当振动频率在12.53~26.31Hz时,模型HW-I易发生扭转变形,表明后翅在扑动时完成扭转动作,此扑动频率最佳。

2.2 前缘脉和次前缘脉为实心结构

图8为后翅模型HW-II一阶至六阶模态分析图。对比

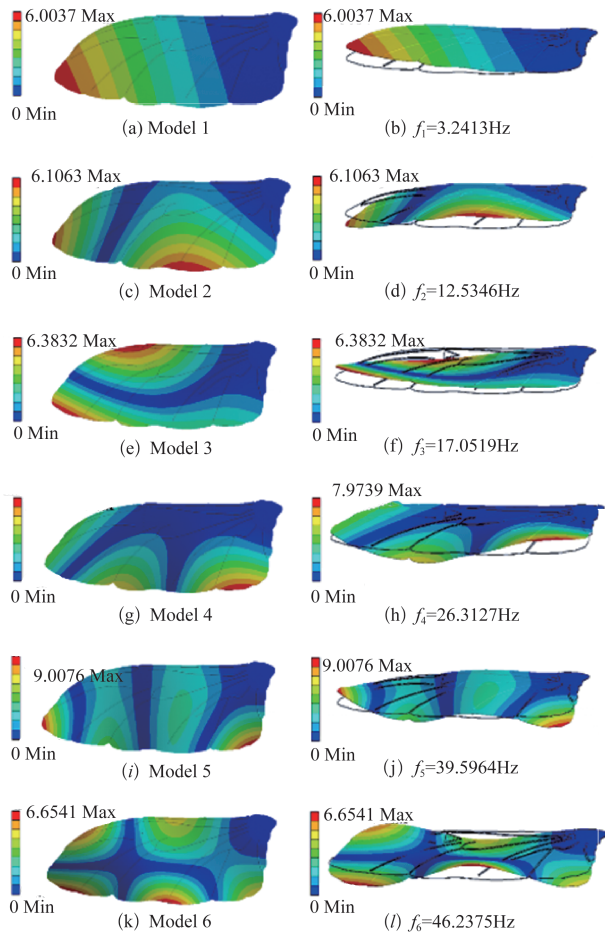


图7 模型HW-I模态分析结果(单位:mm)

Fig. 7 Model HW-I modal analysis results

图7和图8可知,当改变前缘脉和次前缘脉为实心结构时,模型HW-II和模型HW-I的模态振动规律相近,但模型HW-II的各阶固有频率均有所升高,表明实心结构提高了后翅整体抵抗振动变形的能力,又由于前缘脉和次前缘脉在后翅中所占比重较低,故提高作用有限;模型HW-II相比于模型HW-I,在发生振动变形的同时更能保持较好的后翅形态,表明实心结构相比于空心结构,在获得变形能力的同时,更有利于维持后翅飞行性能的稳定;当振动频率超过50.28Hz时,模型HW-II四周变形较大,模型中部收缩明显,模型整体已不再具有后翅的基本形态,表明模型失去其原有的结构特征,破坏了其承载特性。

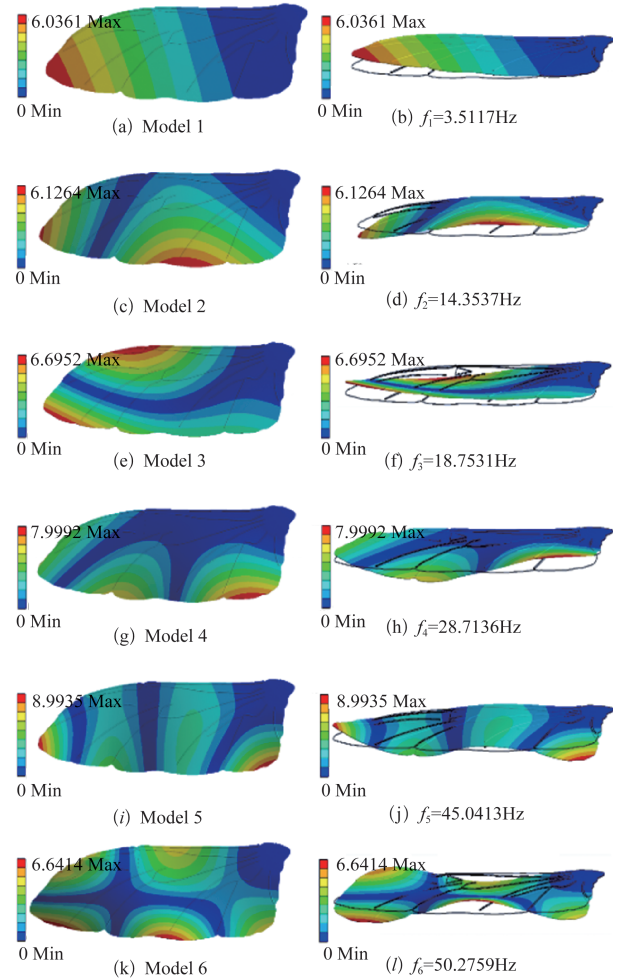


图8 模型HW-II模态分析结果(单位:mm)

Fig. 8 Model HW-II modal analysis results

2.3 前缘脉和次前缘脉填充体液

图9为后翅模型HW-III一阶至六阶模态分析图。对比图7~图9可知,三种模型的振动变形量相近,不具有明显差异性,但模型HW-III和模型HW-II的各阶固有频率均高于

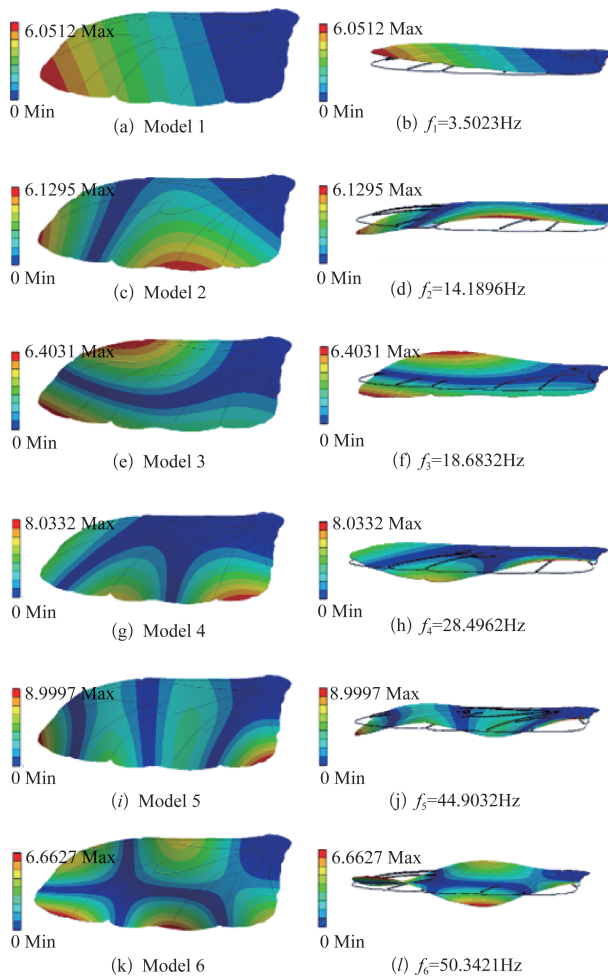


图9 模型HW-III模态分析结果(单位:mm)

Fig. 9 Model HW-III modal analysis results

模型HW-I,这是因为模型HW-III和模型HW-II的质量均高于模型HW-I,较高的质量不易产生振动变形,也说明空心结构具有较强的动不稳定性,不适用于仿生翼的研制;当振动频率达到50.34Hz时,模型HW-III相比于模型HW-II,在获得振动变形的同时,其四周未见明显变形,其中部未见明显收缩,仍能保持后翅的基本结构形态,表明填充体液微流的翅脉结构,在受到振动冲击时具有很好的缓冲作用。

3 结论

通过分别固定三种模型的翅基部位,对其进行模态分析后可得:

(1)三种模型产生的振动变形都主要发生在后翅边缘处,并从边缘处向中部延伸;振动变形主要表现为展向的扑动变形和弦向的扭转变形,随着固有频率的升高和模态数的增加,其最大变形量呈先增大后减小的趋势,但整个模型

的变形范围不断增大。

(2)当固有频率分别达到并超过46.24Hz和50.28Hz时,前缘脉和次前缘脉分别为实心 and 空心结构的模型,四周发生了较大变形,失去了后翅的基本形状结构;而“空心+体液”的模型在获得振动变形的同时依然保持后翅基本形态,因为体液在模型振动的过程中,由于惯性力的作用,能抵消一部分振动冲量;表明在设计仿生翼骨架时可考虑在空心结构中填充体液的方式,以提高其动稳定特性。

AST

参考文献

- [1] 唐兴中,冷俊杰,李治权,等. 微型无人直升机的应用现状及发展趋势探析[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1):41-46.
Tang Xingzhong, Leng Junjie, Li Zhiqian, et al. Research on the development trend of micro unmanned helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 41-46. (in Chinese)
- [2] Delaurier J D, Harris J M. A study of mechanical flapping-wing flight[J]. Aeronautical Journal, 1993, 97(968): 277-286.
- [3] 郑光鹏. 双向耦合的微型柔性扑翼非定常气动特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
Zheng Guangpeng. Unsteady aerodynamic characteristics of bidirectional coupled miniature flexible flapping wing[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] 王朝晖,叶小明. 定常假设优化叶型在非定常数值模拟下的气动性能研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(2):23-27.
Wang Chaohui, Ye Xiaoming. Aerodynamic performance analysis of blade optimized based on steady[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(2):23-27. (in Chinese)
- [5] 鲍麟. 昆虫翼柔性变形的力学效应研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007.
Bao Lin. Study on mechanical effect of insect wing flexible deformation[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [6] 王晓明. 压电驱动柔性翼面的优化设计与变形控制方法[D]. 大连:大连理工大学,2018.
Wang Xiaoming. Optimization design and deformation control method of piezoelectric driven flexible airfoil[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [7] Gerdes J W, Gupta S K, Wilkerson S A. A review of bird-inspired flapping wing miniature air vehicle designs[J]. Journal

- of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(2):21-34.
- [8] Pornsin-Sirirak T N, Tai Y C, Ho C M, et al. Microbat: A palm-sized electrically powered ornithopter[J]. Proceedings of the NASA/JPL Workshop on Biomimetic Robotics, 2001(5): 14-17.
- [9] Wagter C D, Tijmons S, Remes B D W, et al. Autonomous flight of a 20g flapping wing mav with a 4g onboard stereo vision system[C]// Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, Hong Kong, 2014: 4982-4987.
- [10] Sun J, Liu C, Bhushan B. A review of beetle hindwings: Structure, mechanical properties, mechanism and bioinspiration [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2019, 94: 63-73.
- [11] Xiang J, Du J, Li D, et al. Functional morphology and structural characteristics of wings of the ladybird beetle, *coccinella septempunctata*[J]. Microscopy Research and Technique, 2016, 79(6): 550-556.
- [12] Hou D, Yin Y, Zhong Z, et al. A new torsion control mechanism induced by blood circulation in dragonfly wings[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10: 16020.
- [13] Song Z L, Tong J, Yan Y W, et al. Effects of microfluid in the veins of the deployable hindwings of the Asian performance[J]. Computers in Biology and Medicine, 2020, 121: 103817.
- [14] Anh T, Jae H. Wing flexibility effects on the flight performance of an insect-like flapping- wing micro-air vehicle[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 79: 468-481.
- [15] Song Z L, Tong J, Yan Y W, et al. Effects of pterostigma structure on vibrational characteristics of flight performance on Asian ladybird *harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) [J]. Scientific Reports, 2020, 10:11371.

Vibration Modal Characteristics Analysis of Bionic Flapping Wing Based on Hind Wing of Beetle

Yan Yongwei, Sun Jiyu

Key Laboratory of Bionic Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China

Abstract: The power of flapping-wing micro air vehicle (FWMAV) mainly comes from the high-frequency flapping of the wing under low Reynolds number. Under the combined action of aerodynamic force, inertia force and elastic force of wing, the deformation of wing structure will produce vibration and affect the dynamic stability of the micro air vehicle. In order to solve the problem of flapping wing vibration characteristics, we obtained the geometric morphology parameters and wing vein structure of the hind wing of beetle, and find that there are fluid microflows in the leading edge veins C and the secondary leading edge veins Sc of the hind wing. Based on the mechanical data of hind wing materials, the mechanical coupling models of three different wing veins (solid, hollow, hollow + fluid) are established. The modal vibration characteristics are analyzed by ANSYS, and results show that the hollow + fluid model can not only obtain the axial and extensional deformation ability, but also keep the basic shape of the hind wing, and has better dynamic stability in the range of flapping frequency.

Key Words: flapping wing; nanomechanics; micro fluid; finite element model; vibration modal analysis

Received: 2022-05-07; **Revised:** 2022-07-14; **Accepted:** 2022-08-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2020Z0740R4001)