DOI: 10.3901/JME.2020.05.047

基于蜜蜂腹部变体机制的空天飞行器 仿生变体头锥设计*

梁友鉴^{1,2} 赵杰亮¹ 阎绍泽¹

(1. 清华大学机械系摩擦学国家重点实验室智能生物机械分室 北京 100084;

2. 航天东方红卫星有限公司 北京 100094)

摘要: 头锥在空天飞行器气动外形的优化中起着重要作用, 基于蜜蜂腹部的变体机制, 设计了仿生变体头锥。利用 X 射线断层扫描技术和 Amira 软件对蜜蜂腹部分别进行全息无损扫描与三维重构, 试验结果表明, 相邻体节之间共有 12 束肌肉, 通过等效将相邻体节间的生理结构演化为并联机构, 利用基于螺旋理论的给定末端运动约束的型综合方法对上述机构进一步优化, 根据变体头锥的技术指标, 选择 2(3-SPR) 并串联机构作为变体头锥的变形驱动机构, 并进行了运动学分析。利用扫描电子显微镜试验研究了节间褶的形态特征和分布规律, 通过机构异化将其演化为锥面变胞折展机构。综合 2(3-SPR) 变形驱动并串联机构、锥面变胞折展机构和壳体, 设计了具有分节结构的仿生变体头锥, 以适应空天飞行器在不同飞行阶段的构型需求。

关键词: 蜜蜂腹部; 仿生变体头锥; 并联机构; 折展机构; 变胞机构

中图分类号: TG156

Bionic Design of Morphing Nose Cone for Aerospace Vehicle Based on the Deformable Mechanism of Honeybee Abdomen

LIANG Youjian^{1,2} ZHAO Jieliang¹ YAN Shaoze¹

(1. Division of Intelligent and Biomechanical Systems, State Key Laboratory of Tribology,

Tsinghua University, Beijing 100084;

2. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094)

Abstract: The nose cone of aerospace vehicle plays an important role in optimizing the aerodynamic configuration. A morphing nose cone is designed by mimicking the deformable mechanism of honeybee abdomen. The X-ray phase-contrast imaging technique and Amira software are used to perform the non-destructive scanning and three-dimensional reconstruction on the honeybee abdomen. Experimental results show that there are 12 bundles of muscles between the adjacent segments. A 2(3-SPR) parallel-serial driving mechanism is evolved from the intersegmental structures based on the screw theory and technical specifications, and the kinematic analysis is carried out. The folded intersegmental membrane is studied by using scanning electron microscope analysis technology and a conical metamorphic foldable mechanism is developed by integrating the metamorphic mechanism. Then, a segmental morphing nose cone is designed, which is assembled from 2(3-SPR) parallel-serial driving mechanism, conical metamorphic foldable mechanism and body wall. It is significant for the aerospace vehicle to meet the deformation requirements in different flight stages.

Key words: honeybee abdomen; bionic morphing nose cone; parallel mechanism; foldable mechanism; metamorphic mechanism

0 前言

空天飞行器是一种在大气层和太空中飞行的新型飞行器, 该飞行器经历的飞行环境非常复杂, 因

此在不同飞行阶段需要具有不同的最优气动构形^[1]。空天飞行器在上升段和再入段对其头锥的剖面外形半径要求具有较大差异, 上升段需要减小剖面半径并加长头部长, 以减弱激波强度, 减少飞行阻力; 再入段需要增大剖面半径, 以减小驻点热流密度, 减少气动热载荷^[2]。现阶段, 空天飞行器的气动外形主要有旋成体、翼身融合体、升力体和乘波体四种形式^[3], 但是, 这四种形式的空天飞行器从起飞

* 国家自然科学基金(51475258, 51805293)和北京市自然科学基金(3184050)资助项目。20190304 收到初稿, 20191029 收到修改稿

到再入整个飞行过程中的气动构形均保持不变,无法获得实时最优气动性能。

变体飞行器的概念可以追溯到 1890 年^[4],目前,对变体飞行器的研究大多数集中于通过机翼变形来优化气动外形。可变后掠机翼是一种大变形机翼,可兼顾飞行器对高低速飞行的不同需求^[5]。滑动蒙皮变后掠飞行器 MFX-1 是由美国新一代航空公司提出的典型的变后掠机翼方案,该方案验证了飞行器在飞行过程中大面积改变机翼形状的可行性^[6]。可变展弦比机翼通过改变展弦比和机翼面积达到优化飞行器升阻比、飞行速度和机动性的目的^[7]。文献[8]通过可变形的细胞结构改变直升机叶片的弦向以期获得不同飞行状态的最优气动性能。折叠机翼通过改变机翼形状来完成不同环境下的飞行任务,如机翼面积、展弦比、后掠角等参数^[9]。文献[10]通过对海鸥翅膀的研究设计了一种折叠翼变体飞行器,该飞行器在高速和低速飞行时都具有较好的飞行性能。但机翼变形有时会使飞行器的气动特性复杂化,出现特殊的动力学问题^[11]。而头锥是变体飞行器设计中的重要一环,仿生变体头锥的研究为空天飞行器气动外形的优化提供了新思路。

蜜蜂是典型的具有飞行功能的腹部变体结构昆虫,其构形变化与空天飞行器头锥变形要求一致。李君兰等^[12]提出了空天飞行器变体头锥的概念,通过遗传算法求解了变体结构的最优几何参数,并建立物理模型进行数值分析验证了优化方法的有效性和可行性。ZHAO 等^[13-15]研究了蜜蜂腹部变形机制,依据仿生设计方法,设计了一种可变形头锥结构的初步机构方案。果晓东等^[16]分析了基于伞式导杆机构的变体头锥结构的运动学特性。本文通过对具有灵活机动变形能力的蜜蜂腹部的研究,揭示了其基于肌肉、壳体和节间褶协同作用的变体机制,通过等效和机构异化等手段设计了一种可获得实时最优气动构形的空天飞行器仿生变体头锥。

1 蜜蜂腹部节间连接结构

利用 X 射线断层扫描技术对蜜蜂腹部进行全息无损扫描,通过软件 Amira 6.0.1 进行三维重构。蜜蜂腹部相邻体节之间主要是通过肌肉和节间褶连接在一起,蜜蜂腹部以壳体(或背板)为基体,在不同类型肌肉(牵缩肌和扩张肌)的共同作用下驱动蜜蜂腹部完成伸缩、弯曲、摇摆等各项生理活动,节间褶在该过程中起到了限位和构型保护的作用,以配合蜜蜂腹部完成不同的形态变换。如图 1a 所示,肌肉 M1 斜对称地分布在背板两侧,一端

附着在背板的前缘,另一端附着在前一节背板近前缘处。肌肉 M2 将背板内突和前一节背板连接在一起,肌肉 M3 一端粘附在背板前缘,另一端粘附在前一节背板上(图 1b)。肌肉 M4 和 M5 位于相邻两节腹板前缘之间(图 1c),肌肉 M6 起始于腹板前缘的内突,斜向下延伸并附着于前一节腹板上(图 1d)。按功能分类,肌肉 M1、M3、M4 和 M5 属于牵缩肌,肌肉 M2 和 M6 为扩张肌。基于蜜蜂腹部生理结构的对称性得出结论:蜜蜂腹部相邻体节之间共有 12 束肌肉。

图 1 蜜蜂腹部节间肌肉分布规律

节间褶在蜜蜂腹部的各项生理活动中扮演着重要的角色^[13-14],通过扫描电镜试验,得到了节间褶的分布规律和形态特征。如图 2a 所示,同一节体内及相邻体节之间均通过节间褶相连,节间褶类似于一个弹性储能元件,可根据蜜蜂腹部的动作完成不同的形变以满足蜜蜂在不同状态下的构型要求,而且节间褶表面并非是平滑的,而是分布有多边形结构(图 2b),该结构可能与蜜蜂腹部灵活的变形能力有关。由于节间褶具有弹性,多边形结构在节间褶伸展过程中会产生形变,比如边 AB 的长度增长,边 AB 和 BC 之间的夹角增大(图 2c)。多边形结构在节间褶收缩或折叠过程中,边 AB 的长度减短,边 AB 和 BC 之间的夹角减小(图 2d)。

图2 节间褶的形态特征

2 分布式变形驱动机构设计及分析

肌肉为蜜蜂腹部各项生理活动提供了动力，在肌肉的肌原纤维中，粗肌丝和细肌丝按照一定的方式结合，通过蛋白质的变构作用，引起细肌丝在粗肌丝间的滑动，产生肌肉收缩活动^[17]，粗肌丝和细肌丝之间的相对运动与机械中移动副的功能是一致的(图 3a 和图 3b)。将肌肉与背、腹板的连接处等效为球副，前体节等效为动平台，后体节等效为定平台，则可获得 12-SPS 并联机构，该机构为冗余输入机构，可简化为具有 6 个自由度的 6-SPS 并联机构^[18](图 3c)。但对于蜜蜂腹部来讲，其主要的生理活动有 3 个自由度——伸缩，弯曲和摇摆，包括一个

移动自由度和两个转动自由度，因此，蜜蜂腹部相邻体节之间的生理结构可以等效为 $2R^{xy}1T^z$ 并联机构。为了确定该并联机构的最终构型，我们对 $2R^{xy}1T^z$ 对称三自由度并联机构进行了型综合。

将机构的分支主要分为三种情况：三运动副串联分支链、四运动副串联分支链和五运动副串联分支链。通过对前两种情况的构型分析得到的并联机构均为瞬时机构^[19]，因此，这里仅对第三种情况利用螺旋理论进行构型综合^[20]。

若每个分支链的自由度为 5，该五运动副三自由度的并联机构需要满足一个条件：分支约束螺旋为 1 力线矢，共面不平行，且不汇交于一点。当串联分支链所含运动副为 5 时，分支链对动平台施加一个约束。若分支约束螺旋系为一个垂直于定平台的力偶(即沿 Z 轴方向)，则各分支的约束力偶必定共轴，因此不能保证可限制动平台沿 XY 平面内的移动，所以，当串联分支链含 5 个运动副时，分支链对动平台施加的约束只能为力线矢。令分支约束螺旋为一个平行于 X 轴且过分支坐标系原点的力线矢，即

$$\mathcal{S}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (1)$$

对式(1)求反螺旋可得分支的基础运动螺旋系为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_2 &= (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_3 &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_4 &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0) \\ \mathcal{S}_5 &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中 5 个运动螺旋的不同线性组合可以生成不同的串联分支，在线性组合过程中，必须保证所有运动螺旋线性无关。为了避免出现螺旋副， $\mathcal{S}_1$ 、 $\mathcal{S}_2$ 和 $\mathcal{S}_3$ 只能彼此进行线性组合， $\mathcal{S}_4$ 和 $\mathcal{S}_5$ 进行线性组合所得到的运动副的一般表现形式为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}'_1 &= (a_1 \ b_1 \ c_1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}'_2 &= (a_2 \ b_2 \ c_2; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}'_3 &= (a_3 \ b_3 \ c_3; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}'_4 &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ e_4 \ f_4) \\ \mathcal{S}'_5 &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ e_5 \ f_5) \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, e_4, e_5$ 为各螺旋方向和位置在坐标系中的分量，后文中不再赘述。

通过运动副螺旋间适当的线性组合，可以将移动副转化为转动副，比如，移动副 $\mathcal{S}_4$ 可以通过与转动副 $\mathcal{S}_1$ 和 $\mathcal{S}_5$ 的线性组合转换为转动副， $\mathcal{S}_5$ 可以通过与转动副 $\mathcal{S}_1$ 和 $\mathcal{S}_4$ 的线性组合转换为转动副，所得到

图3 分布式变形驱动机构设计及定性分析

的运动副的一般表现形式为

$$\begin{aligned}\mathcal{S}_4'' &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ e_4' \ f_4') \\ \mathcal{S}_5'' &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ e_5' \ f_5')\end{aligned}\quad (4)$$

由式(2)可知,这类机构的分支约束是一个约束力线矢,所有分支约束力线矢都必须满足的几何条件为共面且不汇交于一点,式(2)生成的分支运动链对动平台施加一个平行于 $\mathcal{S}_1$ 且过分支中心点的约束力线矢,只需使各分支中心点不重合,且各分支中由 $\mathcal{S}_1$ 决定的转动副轴线互不平行即可满足该几何条件。从以上分析可知,该机构中的移动副不能平行于定平台,若机构中出现圆柱副,则圆柱副轴线的方向必须与移动副中心线方向一致。比如, $\mathcal{S}_2$ 和 $\mathcal{S}_3$ 的线性组合可以得到转动副 $\mathcal{S}_2''=(0 \ a_2' \ a_3'; 0 \ 0 \ 0)$, $\mathcal{S}_4$ 和 $\mathcal{S}_5$ 的线性组合可以得到移动副 $\mathcal{S}_4''=(0 \ 0 \ 0; 0 \ a_2' \ a_3')$,则 $\mathcal{S}_2''$ 和 $\mathcal{S}_4''$ 可组合形成一个圆柱副。若机构中出现万向铰, $\mathcal{S}_4$ 和 $\mathcal{S}_5$ 可以通过与转动副 $\mathcal{S}_1$ 的线性组合转换为转动副,再通过与 $\mathcal{S}_2$ 或 $\mathcal{S}_3$ 的线性组合组成万向铰。当然, $\mathcal{S}_1$ 、 $\mathcal{S}_2$ 和 $\mathcal{S}_3$ 的线性组合可以得到一个球铰。下面主要分三种情况对五自由度分支链可能的组成情况进行分析。

(1) 五运动副串联分支链含有 2 个移动副。当五运动副串联分支链含有 2 个移动副时,可能的组合情况有:PPRRR、PPS 和 PPRU,除此之外,各运动副之间可通过不同排列顺序得到不同的五运动副串联分支链。

(2) 五运动副串联分支链含有 1 个移动副。当五运动副串联分支链含有 1 个移动副时,可能的组合情况有:RPRRR、SPR、RPRC、RRUP、PCU 和 UPU,除此之外,各运动副之间可通过不同排列顺序得到不同的五运动副串联分支链。

(3) 五运动副串联分支链含有 0 个移动副。当五运动副串联分支链含有 0 个移动副时,可能的组合情况有:RRRRR、RRS、RRRU、RRRC、URU 和 RUC,除此之外,各运动副之间可通过不同排列顺序得到不同的五运动副串联分支链。

从结构形式上来讲,每个串联分支链驱动部分应为移动副,且移动副两端为相同的运动副。从上述分析中可知,满足第一个条件的有三个串联分支链,分别为 SPR、CPU 和 UPU,同时满足这两个条件的只有 UPU 串联分支链。但从并联机器人的机构设计角度出发,也要考虑到机构运动的干涉、受力特性和工作空间等因素^[21],因此,最终选择 SPR 作为该 3-SPR 并联机构的串联分支链。

该并联机构由 3 个结构相同的 SPR 串联分支链将定平台和动平台连接,每个分支中的 S 副与基面

(定平台)平行,3 个分支的 3 个 R 副的方向矢量构成一个正三角形(图 3d)。取最左端的串联分支链为研究对象,坐标系如图 3e 所示,原点在该分支的第一个球副中心, X 轴与动平台上的转动副轴线平行, Z 轴垂直于基面,分支中各运动副的螺旋表示为

$$\begin{aligned}\mathcal{S}_1'' &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_2'' &= (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_3'' &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_4'' &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ e_2 \ f_2) \\ \mathcal{S}_5'' &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ -f_2 \ e_2)\end{aligned}\quad (5)$$

利用代数原理和方法可以得到该螺旋系的反螺旋为

$$\mathcal{S}'' = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (6)$$

该反螺旋该串联分支链的转动副 R 受到一个沿 X 方向即平行于其转动轴线的约束力。

3 个相同分支有 3 个类似的力线矢,都与各自分支在动平台上的转动副轴线平行。作用于动平台上的 3 个力线矢约束了动平台的 3 个自由度,包括动平台沿 X 轴和 Y 轴的移动和绕 Z 轴的转动。机构的自由度可以按照修正的 G-K 公式计算

$$\begin{aligned}M &= d(n-g-1) + \sum_{i=1}^g f_i + v = \\ &6(8-9-1) + 15 + 0 = 3\end{aligned}\quad (7)$$

因为在机构任何可能的运动过程中,包括上述的两个转动和一个移动,各个分支的运动副因结构的限制总保持原有的几何关系,所以都可以建立如图 3d 所示的坐标系,这样得到的式(5)和式(6)总保持不变,3 个反螺旋仍旧线性无关,那么公共约束和冗余约束也不变,式(7)不变。因此自由度是全身的。

如图 3f~3j 所示,蜜蜂腹部由初始状态(图 3f)实现伸(图 3g)缩(图 3h),摇摆(图 3i)和弯曲(图 3j)等生理活动均可通过该并联机构来完成。

根据变体头锥的具体技术指标和参数,要求头锥伸缩比不低于全长的 6%,弯曲角度大于等于 10° 。若按照蜜蜂腹部的实际体节数来设计变体头锥,有利的方面是使得头锥的变形更为灵活,弊端是增大了头锥的重量、成本和制造难度,因此,在满足头锥变形要求的前提下,应最大可能地降低头锥的重量、成本和制造难度,本文选取两组 3-SPR 并联机构串联在一起作为整体头锥的变形驱动机构,从机构学角度讲,该变体头锥即为 2(3-SPR)并串联机构。如图 4 所示为 2(3-SPR)并串联机构的坐标原理图,包括两组动平台、定平台以及连接动平台和定平台

的驱动分支等组成。第一组的特征在于: 动平台的半径为 502 mm, 厚度为 20 mm; 定平台的半径为 584 mm, 厚度为 20 mm; 分支链由 3 个完全相同的 SPR(球副-移动副-转动副)串联链组成; 3 个驱动分支的 R 副的方向矢量构成一个正三角形, R 副轴线与 S 副中心的垂直距离为 600 mm。第二组的特征在于: 动平台的半径为 378.8 mm, 厚度为 20 mm; 定平台的半径为 502 mm, 厚度为 20 mm; 分支链由 3 个完全相同的 SPR 串联链组成; 3 个驱动分支的 R 副的方向矢量构成一个正三角形, R 副轴线与 S 副中心的垂直距离为 600 mm。

图 4 2(3-SPR)并串联机构坐标原理图

利用矢量法推导了各驱动分支的位姿、速度和加速度, 求解了机构各分支的雅可比矩阵, 并利用 Matlab 进行逆运动学仿真分析, 假定动平台绕 X 轴旋转的角度为 $\frac{\pi}{12}\sin\pi t$, 沿 Z 轴位移为 $-100\sin\pi t$ 。

从图 5 中可以看出, 各驱动分支的变化周期是一致的, 基于机构参数的对称性及运动参数的设定, 支链 2 和支链 3、支链 5 和支链 6 的曲线变化规律同步, 与支链 1 和支链 4 的变化曲线幅值绝对值相差较大, 这种差异是由各分支链的运动学尺寸、类型和位置不同造成的。

图 5 各分支位移时间曲线

3 锥面变胞折叠机构设计

蜜蜂腹部的节间褶主要具有三大功能: 连接, 限位和构形保护。基于节间褶的以上特性, 将其等效为网状空间折叠机构^[22], 图 6a 为其机构简图。该折叠机构的两端均通过球副与相邻体节相连, 各杆件之间通过转动副连接, 但该机构不能较好地保持其流线型气动外形。比如在收缩过程中, 当杆 1 和杆 2 绕球副 S_1 、 S_2 做顺时针和逆时针旋转时, 因为在该设计中所有杆件均为刚体, 而转动副 R_1 和 R_2 之间的相对位置不变, 那么杆 1 和杆 2 除去绕球副做顺时针和逆时针旋转的同时, 还有一个垂直于纸面向外旋转的运动, 该变形的结果是头锥的表面向外凸起, 破坏了其流线型气动外形。为了解决这个问题, 将折叠机构中与上顶部相连接的杆件与上顶部固连在一起, 同时, 去除图 6a 中将 4 个转动副 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 集中在一起的连接件(图 6b)。但是, 该机构依然存在一个力的传递问题: 只有当杆 3 和杆 4 各自的运动副到达几何位形的极限位置时杆 5 和杆 6 才会动作, 而在该过程中, 各杆件或运动副之间可能会产生干涉等问题, 这对机构的运动稳定性以及运动副本身的损伤有较大影响。

为了解决上述问题, 通过对节间褶表面多边形结构的分析, 将变胞机构理论^[23]糅合到锥面折叠机构的设计中。在蜜蜂腹部的运动过程中, 节间褶表面多边形结构的各边夹角的变化类似于约束变胞机构中的几何变胞, 边长长度的变化类似于约束变胞机构中的力变胞。如图 6c 所示, 该变胞副属于约束变胞副中的几何变胞副。在初始构态时, 杆件 1 相对于杆件 2 可以绕转动副自由转动; 当转动副处于变胞构态时, 由于构件 2 中凸台的存在限制了杆件 1 的顺时针转动, 杆件 1 只能相对于杆件 2 做逆时针转动, 此时, 在杆件 1 顺时针转动方向上运动副由单自由度转动副变换为 0 自由度转动副。如图 6d 所示, 该变胞副属于约束变胞副中的弹簧力变胞副。在初始构态时, 约束力 F_1 小于等于弹簧预紧力, 滑块 1 相对于导轨 2 不发生移动, 移动副处于静止状态, 此时变胞副的自由度为 0; 在变胞构态时, 随着约束力的逐渐增大, 当约束力 F_2 大于弹簧的预紧力时机构发生变胞, 滑块 1 与导轨 2 之间产生相对移动, 变胞副由 0 自由度变为单自由度。如图 6e 所示, 用上述几何变胞副和弹簧力变胞副替换原来的转动副和移动副得到了新的锥面变胞折叠机构。根据实际需要, 可在固连在底座的球副(如 S_3)周围加约束弹簧, 以保证在重力作用下或形态变换过程

中锥面变胞折展机构流场的气动外形。

图6 锥面变胞折展机构设计及构态变换过程

以一个基本折展单元为例,其三种构态如图6f所示,通过邻接矩阵^[24]来描述构态变换过程,从变胞源矩阵中可以清晰地看到变胞机构运动副的数量及性质。基本折展单元初始构态的邻接矩阵即变胞源矩阵为

$$U = U_1 \cup U_2 = \begin{bmatrix} 1 & R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R & 2 & S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S & 3 & S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 5 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P & 6 & S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S & 7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R & 2 & S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S & 3 & S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S & 4 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 5 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P & 6 & S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S & 7 \end{bmatrix} \quad (8)$$

基本折展单元变胞构态1的邻接矩阵为

$$U_1 = \begin{bmatrix} 1 & R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R & 2 & S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S & 3 & S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \end{bmatrix} \quad (9)$$

基本折展单元变胞构态2的邻接矩阵为

$$U_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 5 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P & 6 & S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S & 7 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4 仿生变体头锥设计

蜜蜂腹部以壳体为基体,通过肌肉的驱动作用完成各项生理活动,在该过程中,节间褶起到了限位和构形保护的作用。蜜蜂腹部的变形功能与变体头锥的构形变换功能一致(图7a和图7b),将变形驱动机构和锥面变胞折展机构以及壳体综合到一起得到了如图7c所示的仿生变体头锥,其机构简图如图7d所示。该头锥由6节组成,与蜜蜂腹部的节数

图7 仿生变体头锥设计及其机构简图

相同, 为了在满足其变形要求的情况下较大幅度地保护其流线型气动外形, 将头锥的整个第 3 节和第 5 节设计成锥面变胞折展机构, 整个头锥相当于两组由变形驱动机构、锥面变胞折展机构和壳体组成的基础单元串联而成。该变体头锥的收缩和弯曲过程如图 8a~8d 所示, 构态变换过程如图 8e~8h 所示。当头锥的第一组和第二组中的基本折展单元发生几何变胞后, 头锥由初始构态变换到构态 1; 头锥继续缩短将作用力传递给弹簧力变胞副, 头锥由构态 1 变换到构态 2, 在该过程中几何变胞保持相对静止; 当头锥处于构态 3 时, 如果头锥变形前的基础外形为初始构态, 则在运动过程中几何变胞和力变胞会相继发生, 如果头锥变形前的基础外形为其他构态, 则具体情况具体分析。通过运动仿真分析得到该头锥的最大伸缩比为 10.2%, 最大弯曲角度为 12.9° , 满足变形要求。

图 8 变体头锥变形及其构态变换过程

5 结论

(1) 本文利用扫描电镜和三维重构技术研究了蜜蜂腹部的节间褶与肌肉的形态特征及分布规律, 揭示了蜜蜂腹部的变体机制: 蜜蜂腹部以壳体为基体, 通过肌肉的驱动作用完成各项生理活动, 在该过程中, 节间褶扮演着限位和构形保护的角色。

(2) 通过等效将蜜蜂腹部节内与节间基于肌肉和壳体的生理结构等效为并联机构, 基于螺旋理论的给定末端运动约束的型综合方法, 对 $2R^{xy}1T^z$ 对称

三自由度并联机构进行进一步优化, 得到了 3-SPR 并联机构, 基于变体头锥的实际技术指标和参数, 综合考虑头锥的变形要求和重量、成本、制造难度等因素, 最终选择 2(3-SPR) 并串联机构作为变体头锥的分布式变形驱动机构, 并进行了运动学分析。

(3) 基于节间褶的功能和形态特征, 通过机构异化将其演化为空间折展机构, 并糅合变胞机构理论设计了锥面变胞折展机构。

(4) 基于蜜蜂腹部的变体机制, 综合 2(3-SPR) 变形驱动并串联机构、锥面变胞折展机构和壳体, 设计了具有分节结构的仿生变体头锥, 以适应空天飞行器在不同飞行阶段的构型需求。本文的研究结果对空天飞行器气动性能的优化和仿生设计具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] WU J N, LI J L, YAN S Z. Design of deployable bistable structures for morphing skin and its structural optimization[J]. *Engineering Optimization*, 2014, 46(6): 745-762.
- [2] ZHANG Y, ZHAO J, CHEN W, et al. Biomimetic skeleton structure of morphing nose cone for aerospace vehicle inspired by variable geometry mechanism of honeybee abdomen[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92: 405-416.
- [3] 周丹杰. 空天飞行器气动外形构想[J]. *飞航导弹*, 2005(6): 31-33.
ZHOU Danjie. Aerodynamic configuration of aerospace vehicle[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2005(6): 31-33.
- [4] ELLINGTON C P. The novel aerodynamics of insect flight: Applications to micro-air vehicles[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1999, 202: 3439-3448.
- [5] 许云涛. 智能变形飞行器发展及关键技术研究[J]. *战略导弹技术*, 2017(2): 26-33.
XU Yuntao. Research on the development and key technology of smart morphing aircraft[J]. *Tactical Missile Technology*, 2017(2): 26-33.
- [6] OLYMPIO K R, GANDHI F. Skin designs using multi-objective topology optimization[C]// 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA, April 7-10, 2008, Schaumburg, IL, 2008: 1-26.
- [7] CHEN Y J, YIN W L, LIU Y J, et al. Structural design and analysis of morphing skin embedded with pneumatic muscle fibers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(8): 1-8.
- [8] BARBARINO S, GANDHI F, WEBSTER S D. Design of extendable chord sections for morphing helicopter rotor

- blades[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(9): 891-905.
- [9] BYE D R, MCCLURE P D. Design of a morphing vehicle[C]// 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA, April 23-26, 2007, Honolulu, Hawaii, 2007: 1-16.
- [10] ABDULRAHIM M, LIND R. Control and Simulation of a multi-role morphing micro air vehicle[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, April 15-18, 2005, San Francisco, California, 2005: 1-19.
- [11] 桑为民, 陈年旭. 变体飞机的研究进展及其关键技术[J]. *飞行力学*, 2009, 27(6): 5-9.
SANG Weimin, CHEN Nianxu. Development and key technologies of the morphing aircraft[J]. *Flight Dynamics*, 2009, 27(6): 5-9.
- [12] LI J L, WU J N, YAN S Z. Conceptual design of deployment structure of morphing nose cone[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, 5: 1-7.
- [13] ZHAO J L, YAN S Z, WU J N. Critical structure for telescopic movement of honey bee (Insecta: Apidae) abdomen: Folded intersegmental membrane[J]. *Journal of Insect Science*, 2016, 16(1): 1-8.
- [14] ZHAO J L, WU J N, YAN S Z. Movement analysis of flexion and extension of honeybee abdomen based on an adaptive segmented structure[J]. *Journal of Insect Science*, 2015, 15(1): 1-6.
- [15] ZHAO J L, YAN S Z, DENG L R, et al. Design and analysis of biomimetic nose cone for morphing of aerospace vehicle[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2017, 14(2): 317-326.
- [16] 果晓东, 李君兰, 陈炜铎, 等. 基于伞式导杆机构的变体头锥设计与仿真[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 336-343.
GUO Xiaodong, LI Junlan, CHEN Weihua, et al. Design and simulation of morphing nose cone for umbrella guide-rod mechanism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 336-343.
- [17] DRAGOMIR C T. On the nature of the forces acting between myofilaments in resting state and under contraction[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1970, 27(3): 343-356.
- [18] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. The Stewart platform manipulator: A review[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2000, 35(1): 15-40.
- [19] 李秦川. 对称少自由度并联机器人型综合理论及新机综合[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
LI Qinchuan. Type synthesis theory of lower-mobility parallel mechanisms and synthesis of new architectures[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2003.
- [20] HUANG Z, LI Q C. Construction and kinematic properties of 3-UPU parallel mechanisms[C]// Proceedings of DETC'02 ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, September 29-October 2, 2007, Montreal, Canada, 2007: 1027-1033.
- [21] 赵燕, 黄真. 3-RPS 并联机构的主动力和约束力分析[J]. *燕山大学学报*, 2008, 32(4): 299-339.
ZHAO Yan, HUANG Zhen. Analysis of active force and constraint force reactions of 3-RPS parallel manipulator[J]. *Journal of Yanshan University*, 2008, 32(4): 299-339.
- [22] 邓宗全. 空间折展机构设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
DENG Zongquan. Design of space deployable and foldable mechanism[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013.
- [23] 李树军, 王洪光, 戴建生. 变胞机构的等效阻力梯度模型及其设计方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(1): 18-23.
LI Shujun, WANG Hongguang, DAI Jiansheng. The equivalent resistance gradient model of metamorphic mechanisms and the design method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(1): 18-23.
- [24] 王德伦, 戴建生. 变胞机构及其综合的理论基础[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(8): 32-42.
WANG Delun, DAI Jiansheng. Theoretical foundation of metamorphic mechanism and its synthesis[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(8): 32-42.

作者简介: 梁友鉴, 男, 1991 年出生, 工程师。主要研究方向为卫星总体设计。

E-mail: liangyoujianlw@163.com

赵杰亮, 男, 1989 年出生, 助理研究员。主要研究方向为仿生机械、机械设计理论及方法和航天器设计及动力学分析。

E-mail: zhaojl2017@mail.tsinghua.edu.cn

阎绍泽(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械系统动力学、航天动力学与可靠性与智能结构设计与昆虫仿生。

E-mail: yansz@mail.tsinghua.edu.cn