

DOI: 10.3901/JME.2021.02.121

# 机翼中小尺度主动变形研究进展及关键技术<sup>\*</sup>

周文雅<sup>1</sup> 张宗宇<sup>1</sup> 王晓明<sup>2</sup> 吕维梁<sup>1</sup> 钱卫<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学航空航天学院 大连 116024;

2. 中山大学航空航天学院 广州 510006)

**摘要:** 变形机翼能够根据飞行工况的变化, 主动调节自身形状以改善飞行器任务适应性, 是未来飞行器设计的研究前沿与热点。阐述国内外机翼中小尺度主动变形技术的研究进展, 围绕机翼设计中柔顺变形能力与气动承载能力间冲突, 对现阶段变翼型弯度、变厚度和扭转变形机翼中的机械变形结构设计方案进行重点分析探讨。对变形机翼设计中变形蒙皮、轻质高输出驱动系统、协调变形控制系统设计等关键技术的研究瓶颈及技术方案进行阐述分析, 探讨变形机翼未来发展方向, 为变形机翼设计与工程应用提供技术参考。

**关键词:** 变形机翼; 主动变形; 变翼型弯度; 变厚度; 机翼扭转; 变形蒙皮

**中图分类号:** V224

## Research Progress and Key Techniques of Active Morphing Wing at Medium and Small Scales

ZHOU Wenya<sup>1</sup> ZHANG Zongyu<sup>1</sup> WANG Xiaoming<sup>2</sup> LÜ Weiliang<sup>1</sup> QIAN Wei<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006)

**Abstract:** According to the change of flight conditions, the morphing wing can actively adjust its shape to improve the mission adaptability of the aircraft, which is the research frontier and hotspot of future aircraft design. Based on this background, this paper mainly describes the research progress of small and medium scale active wing deformation technology at home and abroad. Focusing on the conflict between the flexibility deformation capacity and the aerodynamic bearing capacity in the design of the wing, the mechanical deformation structure design of the wing with variable camber, variable thickness and torsional morphing at the present stage is emphatically analyzed and discussed. The research bottleneck and technical scheme of the key technologies such as deformation skin, light and high output driving system and coordinated deformation control system in the design of morphing wing are expounded and analyzed. The future development direction of the morphing wing is discussed, which provides a technical reference for the design and engineering application of the morphing wing.

**Key words:** morphing wing; active morphing; variable camber; variable thickness; wing twisting; morphing skin

## 0 前言

机翼作为飞行器的关键组成部分, 对飞行器气动性能有着至关重要的影响。良好的气动特性可有效减少能量消耗, 降低有害物质排放和噪声污染。目前, 绝大多数机翼是通过襟翼、副翼等结构的偏

转实现其气动性能的改变。这种传统控制方式能保证飞行器在固定飞行任务和有限的飞行条件下, 拥有较高的气动效率。而未来飞行器设计将面临的空域、速域不断扩大, 对飞行器的任务适应性要求不断增强的严峻考验, 固定外形机翼可能难以满足不同飞行工况下对气动性能和飞行品质的需求<sup>[1]</sup>。为改善飞行器气动效率, 扩大飞行包线, 实现一机多能, 研究人员对机翼变形技术进行了深入研究。相较于常规舵面布局飞行器, 装配有变形机翼的变体飞行器诸多优势: 首先, 铰接形式的操纵面被光滑

<sup>\*</sup> 装备预研领域基金资助项目(6140206020)。20200122 收到初稿, 20200811 收到修改稿

连续的变形翼面所取代,可最大程度维持层流附着,减少噪音排放,改善隐身特性<sup>[2]</sup>;其次,变形机翼能够积极主动调整自身型面以适应变化通航环境,有效提升了飞行器任务适应性<sup>[3]</sup>。

应指出的是,机翼主动变形技术的应用渊源已久,世界上公认的第一架飞机:莱特兄弟的“飞行一号”就采用翼面翘曲的方式完成了飞行姿态的操控。BUBERT 等<sup>[4]</sup>在 1920 年,也已提出应用柔顺变形结构的变翼型弯度机翼设计方案。20 世纪 80 年代,变形机翼技术研究达到热潮,以美国空军实验室(AFRL)、美国航空航天局(NASA)、国防高级研究计划局(DARPL)为首的研究机构围绕机翼主动变形技术,相继开展了主动柔性机翼(AFW)<sup>[5]</sup>、任务自适应机翼(MAW)<sup>[6]</sup>、主动气动弹性机翼(AAW)<sup>[7]</sup>和智能机翼(Smart Wing)<sup>[8]</sup>等一系列的研究项目;此外,欧盟国家也相继针对机翼变形技术进行积极探索,先后进行了 CHANGE<sup>[9]</sup>、SARISTU<sup>[10]</sup>、SMS 和 3AS<sup>[11-12]</sup>等项目的研究。国内针对变机翼研究起步较晚,目前仍处于变形机翼系统设计与验证的前期阶段,尚未有真正满足工程应用的、系统性的变形机翼研究成果出现。

如上所述,变形机翼的设计与研制具有重要的科研价值和较高的研究热度。当前阶段,国内外研究人员虽对机翼变形技术开展了大量研究,但仍存在若干问题限制了该技术的应用与发展,亟待探讨解决方法。为此,本文针对现阶段国内外相关研究成果,着重对机翼中小尺度主动变形(主要包括变翼型弯度、变厚度和机翼扭转)技术方案的研究进展和成果进行综述,对自适应机翼设计过程中亟需解决的关键问题进行分析讨论,并对变形机翼的未来发展方向进行展望。

## 1 变形机翼基本概念及分类

自适应变形机翼是指能够根据飞行任务(攻击、侦查、巡航、机动突防等)的要求,利用布设在机身的传感装置实时感知外部环境(高度、速度、载荷)的变化,结合气动分析计算得到适配于当前飞行任务和环境的最佳气动外形,并协调变形控制技术,主动改变自身形状以提升气动性能的一种新型智能机翼。根据机翼变形形式的不同,其分类方式也有多种。WEISSHAAR<sup>[13]</sup>将变形机翼概念分为两类:① 机翼大范围内的变形或重构;② 小尺寸几何形状的调整。SOFLA 等<sup>[14]</sup>通过对变形机翼相关概念和变形技术的回顾,将机翼的变形分为三大类:① 面

内变形(包括变展长、变弦长以及变掠角);② 面外变形(包括展向弯曲、机翼扭转以及机翼折叠);③ 翼型变形(包括变翼型弯度和变厚度)。LI 等<sup>[15]</sup>依据变形尺度大小将机翼变形分为低、中、高三等级(表 1)。

表 1 机翼变形尺度划分

变形形式	变形目的	变形尺度
变翼型弯度	改善升阻比,降噪,飞行控制	小
变厚度	改善升阻比,提升低速性能	小
变扭转	飞行控制	中
变展长	改善升阻比,飞行控制	大
变后掠	改善升阻比,飞行控制,改善突风响应	大
折叠机翼	改善升阻比	大

机翼中小尺度变形能够以较低的能量消耗实现飞行器气动性能的明显改善和任务适应性的显著提高;以简单轻便的变形结构增强或取代传统机翼气动舵面的控制作用,在未来飞行器设计及使用过程中拥有巨大的应用潜力和可观的经济效益。因此,本文从机翼中小尺度变形角度出发,结合国内外相关领域最新研究进展,重点对机翼变翼型弯度、变厚度和扭转变形的实现途径进行了综述;并对变形机翼涉及的柔性蒙皮、驱动器、控制系统设计等关键技术进行了探讨。最后,结合机翼主动变形技术发展所面临的技术瓶颈,对变形机翼未来研究方向进行了预测。

## 2 机翼中小尺度主动变形研究进展

### 2.1 机翼变翼型弯度

机翼翼型弯度变形能有效改善飞行器升、阻力特性,降低燃料消耗,延迟气流分离,可增强或取代传统机翼中襟翼、副翼的控制作用,在短距起降、空中姿态控制等方面有着重要作用。

#### 2.1.1 传统机械结构变翼型弯度设计方案

以电机、液压为主要驱动源,搭配多铰接(关节)结构是早期变翼型弯度机翼设计方案的主要特征。如 MONNER<sup>[16]</sup>给出了一种“手指”构型的变翼型弯度设计方案(图 1),多个旋转铰被布设在机翼尾缘翼肋上,不仅能够实现机翼后缘弦向翼型弯度的变化,还能沿展向差动变化实现机翼的扭转。POONSONG<sup>[17]</sup>也进行了基于多关节结构的变翼型弯度机翼相关研究。MEGUID 等<sup>[18]</sup>采用在翼肋旋转铰附近增设滑动结构方式对 MONNER 的设计方案进行了改进,进一步提升了机翼变形的柔顺性(图 2)。

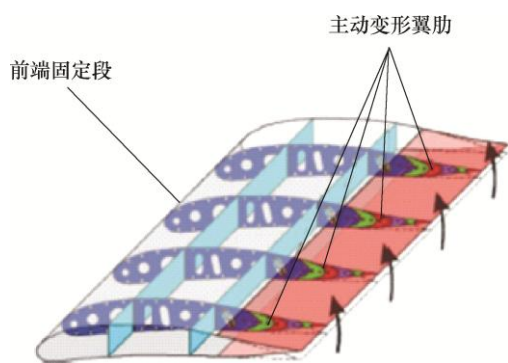


图1 “手指”构型变翼型弯度机翼模型

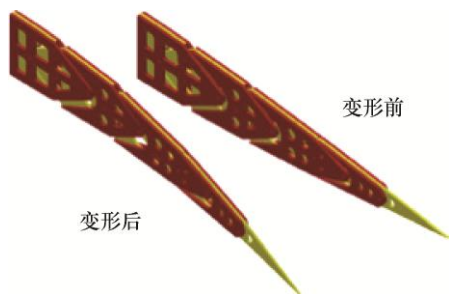


图2 变翼型弯度翼肋

国内学者李刚<sup>[19]</sup>也开展了基于铰接结构的可变翼型弯度机翼设计探索,给出了多种含复铰的变形翼肋设计方案(图3),并通过试验方法验证了所提方案的可靠性和可行性。

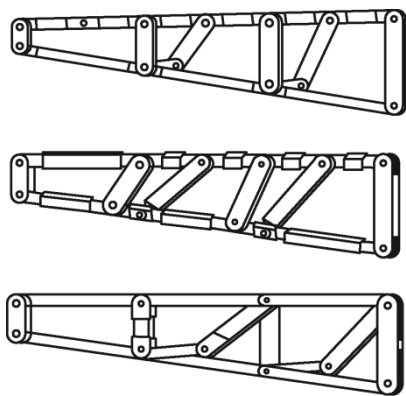


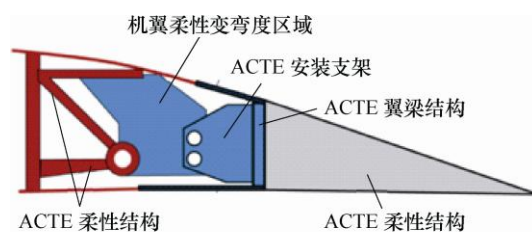
图3 可连续变翼型弯度机翼机构三维模型

随着机翼变形技术的深入探索,这种由传统驱动器驱动铰接结构设计方案的弊病也日益突显。首先,复杂的多铰接结构会给变形机翼系统的可操纵性和维护性带来消极影响。其次,科研人员也逐渐认识到:这种设计方案下,由机翼变形产生的附加气动收益,有时甚至无法抵消增设变形机构而带来的重量损失<sup>[6]</sup>。因此,研究者们逐步探索了直接将柔性材料或结构应用于变形翼面结构设计的可行性,AFRL的科研人员开发了一种具有驱动位移放大功效的柔性变形结构(图4),并成功将其应用于机翼前后缘弯度的主动控制中<sup>[20-21]</sup>。美国 FlexSys 公

司也尝试了基于柔性结构的“AFW”智能襟翼探索研究<sup>[22-23]</sup>,图5展示了该公司研究的柔性变形机翼产品 FlexFoil。该机翼由柔性内部结构和无缝弹性蒙皮构成,采用传统作动器驱动实现变形。FlexFoil的测试结果表明其机翼倾角能够实现  $2^{\circ} \sim 32^{\circ}$  的变化,气动性能、使用寿命均超过传统机翼。该公司计划于2020年在商用飞机上对 FlexFoil 进行测试,其相关技术成果有望应用于下一代民航飞机<sup>[24]</sup>。



图4 位移放大机构



(a) 自适应机翼后缘结构示意图



(b) 应用于湾流III亚音速飞机上的“柔性翼”

图5 主动柔性后缘襟翼“Flexfoil”

### 2.1.2 “顺从”构型的变翼型弯度机翼结构

为进一步提升变形机翼系统的结构变形性能,近年来,多种顺从构型的新式结构被相继应用于变形机翼结构设计中,在实现机翼连续光滑变形,改善翼面气动承载能力与柔顺变形能力等方面实现了新突破。

CAMPANILE 等<sup>[25]</sup>给出了一种“带肋”构型的变形翼肋设计方案,可在不影响结构整体刚度的前提下,实现机翼翼型弯度的可观调整(图6a)。受 CAMPANILE 启发,HASSE 等<sup>[26]</sup>结合结构拓扑优化手段,对“带肋”构型的机翼内部结构开展数值优化研究,最终形成了如图6b所示的新型翼肋结构。相关地面试验表明,重新设计的带肋结构能够实现翼型由 NACA0012 到 NACA2412 之间的自由变化。

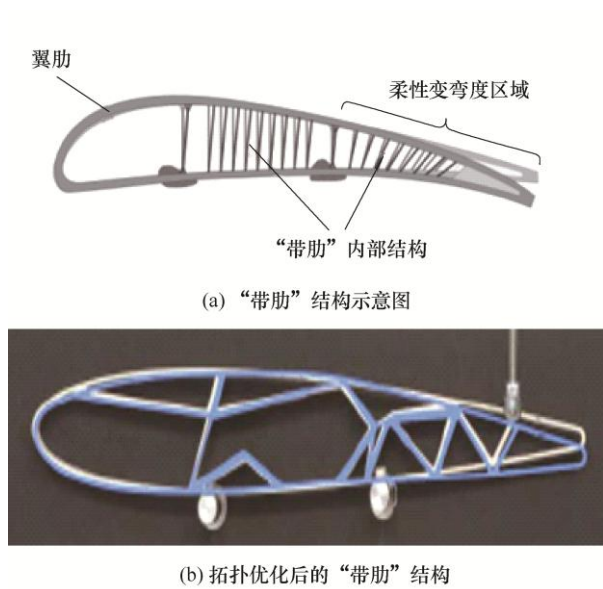


图 6 “带肋”结构变翼型弯度机翼模型

如何妥善处理变形机翼气动承载能力与柔顺变形能力间冲突,一直是翼面变形结构设计中的关键矛盾,而具有各项异性特性的波纹结构,为解决这一问题提供了新思路与新方法。YOKOZEKI 等<sup>[27]</sup>对波纹结构力学性能进行了系统探索,并对波纹结构在变形机翼上的应用提出两种改进措施:①沿波纹方向布设高刚度纤维杆以进一步增加波纹结构的纵向刚度(图 7a);②在波纹结构承载气动力的一侧填充柔性橡胶材料,使其具有光滑的气动表面(图 7b)。随后,YOKOZEKI 等<sup>[28-29]</sup>设计了一种以波纹结构为变形后缘,以电机驱动绳索为动力源的后缘弯度可变机翼,并开展了风洞试验(图 8),试验结果表明:所提设计方案能够实现翼面后缘弯度的有效调整和空气动力学特性的有效改善。

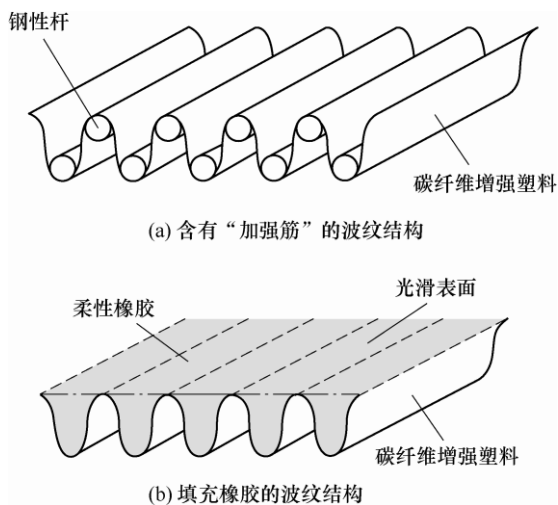


图 7 改进的波纹结构

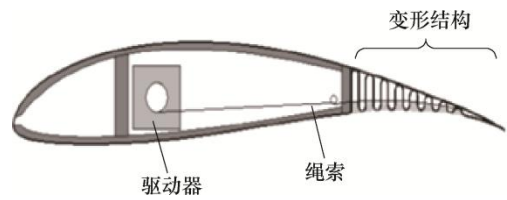


图 8 波纹结构变翼型弯度机翼

2014 年,PREVITALI 等<sup>[30]</sup>设计了一种性能更为优异的双壁波纹结构(图 9),并完成了基于该结构的柔性变翼型弯度机翼设计。图 10 展示了包含桁架式柔性翼肋和双臂波纹结构的机翼剖面图。最终完成的变形机翼如图 11 所示。低速风洞试验结果表明,设计的机翼能够产生足够的滚转力矩来替代传统副翼<sup>[31]</sup>。

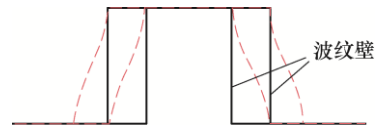


图 9 双壁波纹结构

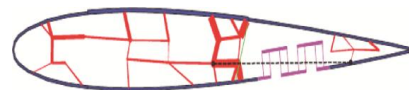


图 10 双壁波纹结构的翼肋

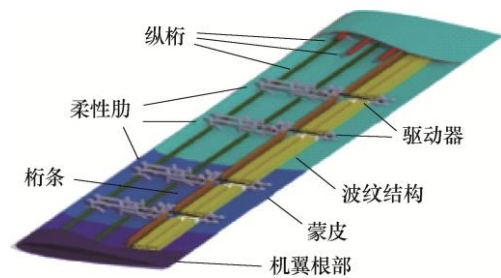


图 11 双壁波纹结构变翼型弯度机翼

将偏心结构旋转产生的空间位置变化应用于结构形状控制是实现翼型弯度变形控制的另一有效手段。MATTEO 等<sup>[32]</sup>给出了一种基于偏心结构的变形机翼设计理念。该方案中,偏心梁结构被作为翼肋直接安装在机翼后缘(图 12),其前端与布设在机翼前部的驱动电机相固连(图 13),可利用自身的旋转运动,驱使机翼后缘发生弯曲变形<sup>[33]</sup>。

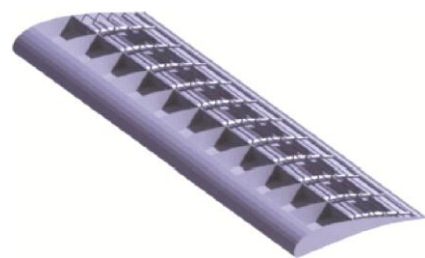


图 12 偏心梁结构的变翼型弯度机翼



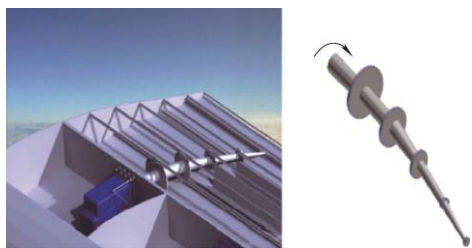


图 13 偏心梁驱动机构

EVANS 等<sup>[34]</sup>基于 Muller 提出的直接控制翼型 (Direct control airfoil geometry, DCAG) 的变形机翼设计概念, 设计了如图 14 所示的后缘可变翼型弯度机翼, 其变形原理与“偏心梁”结构类似, 由可旋转的翼肋驱动实现机翼后缘翼型弯度的变形。研究中, 该团队为克服柔性蒙皮在转动翼肋上难以附着的缺点, 将偏心梁与波纹结构相结合, 改进成如图 15 所示的变形机翼设计方案<sup>[35]</sup>, 既解决了蒙皮附着问题又提高了机翼的气动承载能力。相关地面及风洞试验表明, 该机翼能够实现向下  $15^\circ$  和向上  $10.27^\circ$  的弯曲变形, 且在不同变形状态下升阻比性能始终优于传统机翼。

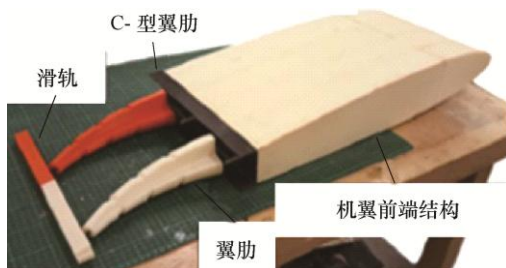
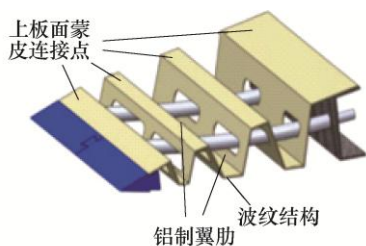
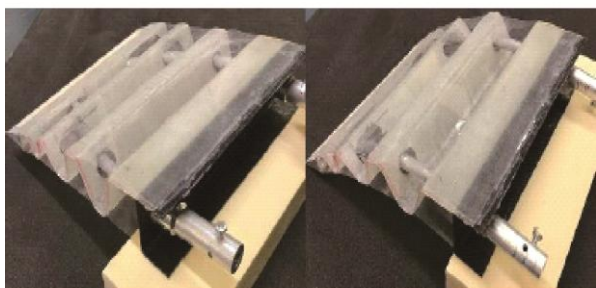


图 14 基于翼肋旋转的变翼型弯度机翼



(a) 含有偏心梁的波纹结构



(b) 变弯度机翼模型

图 15 波纹-偏心梁结构变翼型弯度机翼

WOODS 等<sup>[36]</sup>从仿生学角度出发, 利用驱动电机与绳缆构建了类比“鱼骨”的仿生“肌腱”系统, 并将其布设于机翼内部驱使翼面变形(图 16)。设计之初, 蒙皮采用弹性复合材料制作, 后为提高蒙皮的气动承载和变形能力, 改为含弹性涂层的波纹结构(图 17)<sup>[37]</sup>, 并对回折、矩形、梯形 3 种含涂层波纹结构蒙皮性能进行对比(图 18), 指出“梯形”波纹结构具有更高的抗弯抗拉刚度比, 更适宜作为蒙皮结构。此外, 该研究团队还开展了鱼骨结构变翼型弯度机翼优化设计工作<sup>[38]</sup>, 并对“气动肌肉”应用于鱼骨构型机翼驱动的可行性进行了分析<sup>[39]</sup>。

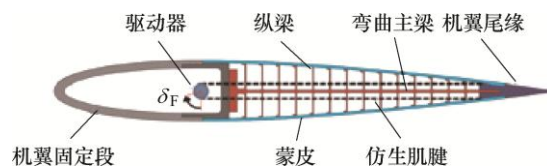


图 16 “鱼骨”结构

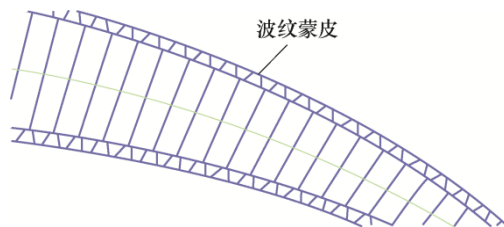


图 17 波纹结构蒙皮



图 18 三种典型波纹结构

充气结构由于其结构轻巧、便于收纳、成本低廉等优势被广泛应用于无人飞行器设计领域。由于充气翼面本身具有柔性, 并能通过充放气手段实现自身刚度主动调整的特性, 在进行形状控制过程中具有天然优势, JACOB 等<sup>[40-42]</sup>分别采用了形状记忆合金(图 19)与压电纤维复合材料为驱动器, 对充气翼面进行了变翼型弯度控制试验, 并取得了显著的控制效果(如图 20, 图中编号数据点表示机翼形变测量位置)。

“气动肌肉”是气动结构在变形机翼设计领域的另一重要应用, 其能够在外部压缩空气作用下, 做伸缩运动, 进而驱动被控结构变形。PEEL 等<sup>[43]</sup>采用“气动肌肉”为驱动器, 将其布设在机翼中部翼盒结构中, 通过充放气控制, 实现机翼前后缘弯度的有效调节(图 21)。

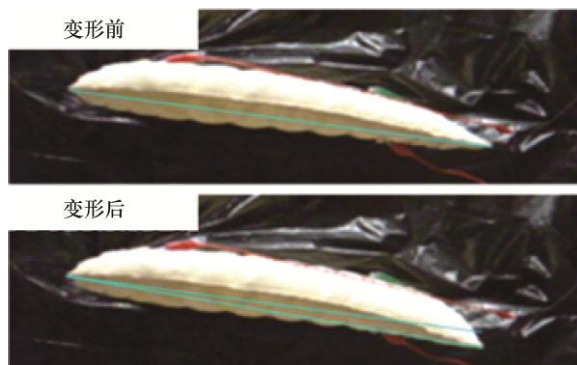


图 19 形状记忆合金驱动的变形机翼

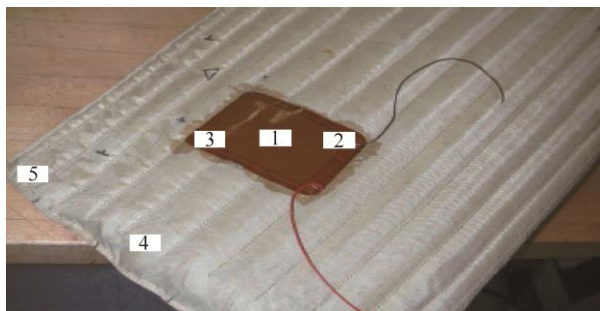


图 20 压电纤维材料驱动的变形机翼

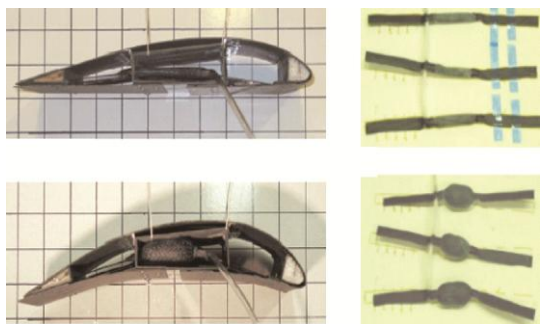


图 21 “气动肌肉”驱动的变翼型弯度机翼

WEAVER 等开展了将双稳态结构在变翼型弯度机翼上的应用探索<sup>[44-45]</sup>, 双稳态结构是一种自适应结构, 其能够在外部驱动作用下, 实现两个不同稳定状态间的快速切换, 图 22 展示了该研究机构设计的基于绳缆驱动的双稳态变形机翼结构示意图<sup>[46]</sup>。

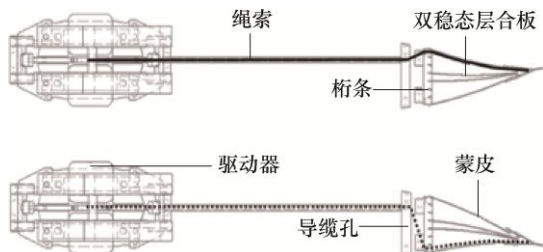


图 22 基于双稳态结构的变翼型弯度机翼

KUDER 等<sup>[47]</sup>将波纹结构、双稳态结构和压电纤维复合材料相结合, 给出了一种变后缘弯度机翼设计方案(图 23)。该方案中, 可通过压电驱动器驱

动作用, 实现双稳态结构稳态型面的快速切换, 并利用波纹结构巧妙吸收了翼面弯度变化过程中的屈曲变形。

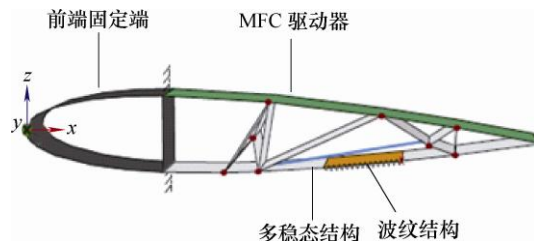


图 23 含波纹和双稳态结构的变翼型弯度机翼

### 2.1.3 基于智能材料/结构的变翼型弯度机翼设计方案

相较于电机、液压等传统驱动元件, 具有结构更加轻质、响应更为迅速、能量密度更大等优势智能驱动机构或材料则更受研究者青睐。近年来, 采用形状记忆材料、压电纤维材料、可变刚度材料、“气动肌肉”等智能单元为变形机翼驱动机构或变形结构的研究成果不断涌现。

压电驱动器由于其驱动带宽高, 能源转换效率高优势被大量应用于结构变形驱动与振动主动抑制领域中。然而, 早期的压电陶瓷等传统压电驱动器因其驱动位移小、材料脆性大等原因, 并非变形翼面驱动器的最优选择, 随着材料科学的不断发展进步, 更多性能更为优异的压电纤维智能材料被研发, 其中, 尤以美国兰利中心研制的宏纤维复合材料(Macro-fiber composites, MFC)性能最为优异。

BILGEN 等<sup>[48-49]</sup>率先开展了利用 MFC 为驱动器的小型可变翼型弯度无人机飞行控制试验, 取得了良好的控制效果<sup>[50]</sup>。同时该研究也指出压电材料的迟滞、蠕变特性对结构形状控制精度产生严重影响<sup>[51]</sup>。

PANKONIEN 等<sup>[52]</sup>给出了一种基于 MFC 模块化驱动单元的变翼型弯度机翼设计方案, 将含有 MFC 的多个智能变形单元固定于机翼尾缘内部(图 24), 在 MFC 驱动作用下, 结合柔性变形蒙皮, 可实现翼面尾缘形状连续光滑变形控制效果(图 25)。相较于二维平面意义上的可变翼型弯度机翼, 这种三维层次的变形机翼设计方案拥有更加优良的气动特性调节能力<sup>[53]</sup>。

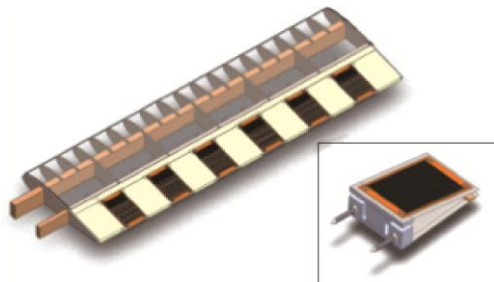


图 24 变形机翼及模块化的变形单元



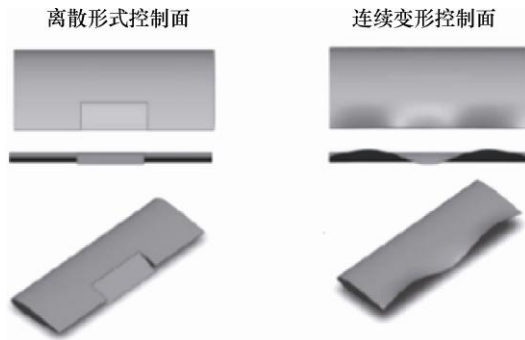


图 25 离散形式副翼与后缘展向变形机翼对比

MOLINARI 等<sup>[54]</sup>将 MFC 与经数值优化得到的桁架翼肋结构相组合,给出了如图 26 所示的变形翼面设计方案,并采用风洞试验和飞行试验验证手段对所提控制方案的可行性与有效性进行验证。试验结果表明,该变形翼面能够实现无人机气动特性的有效调节,通过两侧翼面的差动变形,能够实现无人机滚转姿态的有效控制。

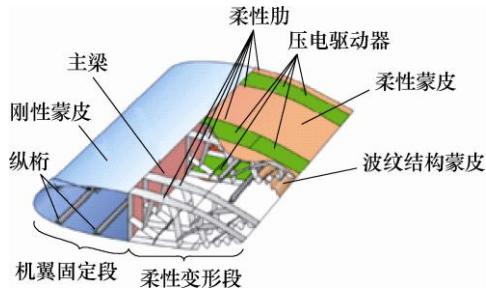


图 26 MFC 驱动可变翼型弯度机翼

压电材料曾被认为是用作变形机翼驱动器的最优方案<sup>[55]</sup>。但现有压电材料,如压电陶瓷、压电纤维等均存在驱动位移过小的缺陷,且在短时间内难以攻克。但同样基于压电材料逆压电效应输出力(矩)的超声电机则不存在这一问题。在 Smart Wing 项目执行过程中,BARTLEY-CHO 等<sup>[56]</sup>给出一种以超声电机结合偏心结构的变形机翼设计方案,并取得了良好的机翼弯度变形控制效果。刘卫东<sup>[57]</sup>结合连杆机构、波纹结构、柔性蒙皮结构,设计了如图 27 所示的变后缘翼型弯度机翼模型,利用超声电机驱动布设在机翼尾缘的连杆机构实现了后缘弯度的有效变形控制。并通过风洞试验验证了所提翼面变形方案对机翼气动特性的调节能力。

形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)因其形状记忆效应,也被广泛应用于结构变形控制领域中。ELZEY 等<sup>[58]</sup>将形状记忆合金丝与环状铰接结构相结合,构建了一种仿生“脊椎”结构,并将其应用于变翼型弯度机翼中(图 28)。该方案中,通过加热机构对布设在“脊椎”两侧的形状记忆合金丝加载非等效热载荷实现被控结构的变形控制。

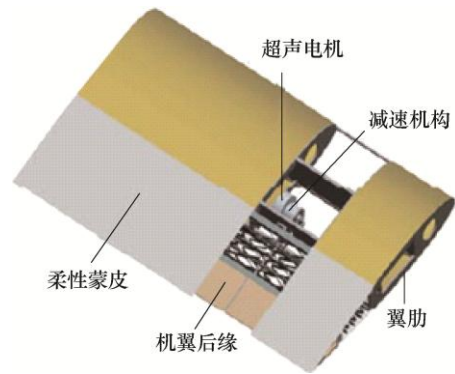


图 27 超声电机驱动的变翼型弯度机翼

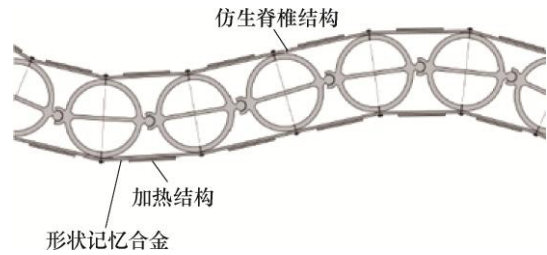


图 28 由 SMA 驱动的变形结构

2009 年,BARBARINO 等<sup>[59]</sup>提出了一种由 SMA 驱动的变后缘翼型弯度机翼设计方案。如图 29 所示,机翼翼肋后缘由 5 块刚性薄板组成,相邻的薄板间由交叉布设的弹性片连接,可由贯穿布设在薄板底部 SMA 驱动实现缘偏转。

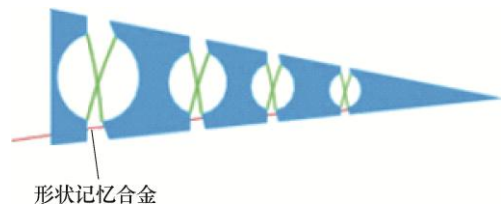


图 29 SMA 驱动的后缘变翼型弯度翼肋

SMA 的承载能力较弱是其应用于变形结构驱动的天然缺陷,因此,研究者们提出了将 SMA 嵌入到其他载体中或采用承载性能更强的形状记忆聚合物(Shape memory polymer, SMP)取代 SMA 的解决方案。

GONG 等<sup>[60]</sup>将 SMP 与波纹结构相结合,给出了一种适用于变翼型弯度的自适应变刚度蒙皮结构(图 30),并将该蒙皮结构搭配蜂窝结构和气动驱动单元,形成了如图 31 所示的变形机翼设计方案。

德累斯顿工业大学的 ASHIR 等<sup>[61]</sup>利用“编织”技术将 SMA 嵌入到纤维增强塑料结构中,设计了如图 32 所示可变翼型弯度翼面,试验数据表明,所设计的变翼型弯度翼面阻力特性较传统翼面有明显改善。

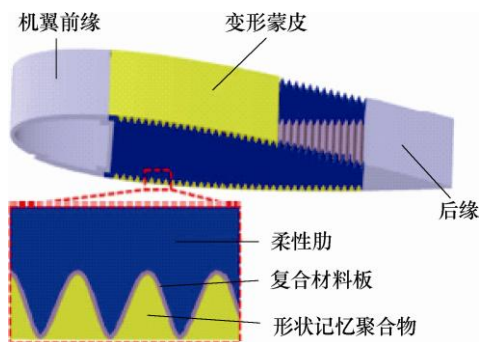


图 30 变刚度波纹结构蒙皮



图 31 变翼型弯度机翼样件

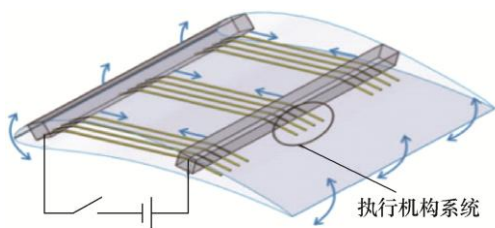


图 32 形状记忆合金驱动的变翼型弯度机翼

如前所述, 变形机翼气动承载能力与柔顺变形能力对机翼结构刚度的矛盾需求, 始终是困扰变形翼面结构设计的关键问题。而可变刚度材料的出现给变形翼面这种即“柔”又“刚”的需求提供了新选择。冷劲松等对可变刚度材料和结构开展了深入系统研究<sup>[62]</sup>。该团队的研究人员分别将流体变刚度管和形状记忆材料变刚度管(图 33)及“气动肌肉”(图 34)与弹性基底材料相结合, 组成了自适应变刚



(a) 流体控制变刚度管



(b) 形状记忆聚合物变刚度管

图 33 变刚度管

度蒙皮系统<sup>[63-64]</sup>, 该类自适应蒙皮结构可在流体压力或热载荷作用下实现弹性模量的大范围调整<sup>[65]</sup>, 满足不同变形阶段对蒙皮刚度的需求。

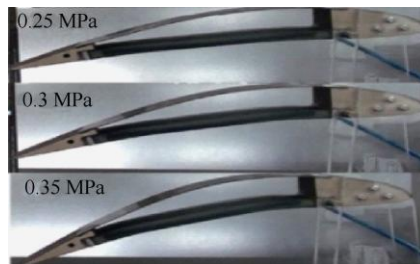


图 34 主动变形蒙皮驱动的变翼型弯度机翼

## 2.2 机翼变厚度

翼型厚度是机翼的重要参数, 可变厚度机翼能够根据流场结构的变化对机翼厚度主动调节, 从而达到控制转捩位置、延迟附面层分离、改善气动性能的目的<sup>[66-67]</sup>, 具有重要的研究价值。

早在 1992 年, 美国 AUSTIN 等<sup>[68]</sup>就开发了一种基于桁架结构的变厚度机翼(图 35), 通过调节布设在翼肋内部中支杆长度实现了翼型厚度的调节。

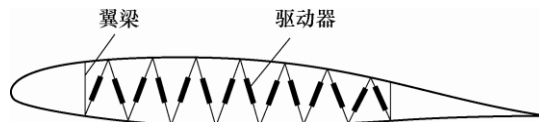


图 35 桁架结构自适应翼肋

加拿大国家研究中心在变厚度机翼技术研究领域取得了突出的成就, 提出了多种变厚度机翼的结构设计方案, 并进行了一系列的理论与试验研究<sup>[69-70]</sup>。图 36 展示了该研究机构设计的一种变厚度机翼。机翼由刚性固定部分和柔性变形蒙皮组成。通过布设在机翼内部 SMA 丝驱动位移转换机构实现了机翼厚度的改变。后续研究中, 该研究团队又陆续完成了机翼变厚度的开、闭环控制系统设计<sup>[71-73]</sup>。利用布设在机翼表面的压力传感器, 实现了压力变化和转捩点位置的关联, 为机翼形状优化提供了技术支持。相关风洞试验数据表明, 在保持升力稳定情况下, 所设计的变厚度机翼能够降低 22% 的阻力, 并使转捩位置后移 30%<sup>[74]</sup>。

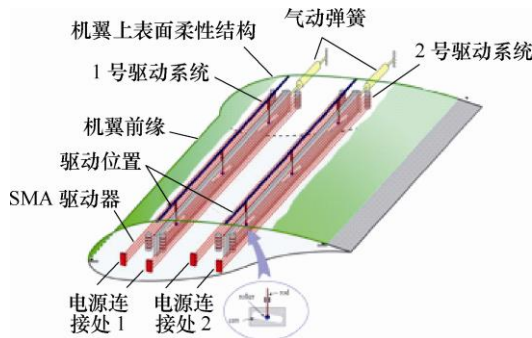


图 36 变厚度机翼模型



该研究机构指出, SMA 在驱动机翼变形过程中存在操作温度高、变形速率迟缓、能量消耗大等缺陷。对此, 该研究机构还提出一种由电机驱动偏心轴的变厚度机翼设计方案<sup>[74]</sup>, 如图 37 所示, 两个偏心轴分别布设于机翼弦长 30% 和 50% 位置处, 通过偏心轴的旋转实现机翼上表面蒙皮的起伏运动, 从而改变机翼厚度。

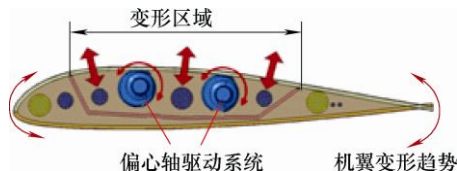


图 37 偏心轴驱动的变厚度机翼

哈尔滨工业大学的孙健<sup>[75]</sup>提出了一种利用气动柔性管(Pneumatic flexible tubes, PFTs)驱动蜂窝结构的变厚度机翼设计方案, 如图 38 所示, 气动柔性管可沿展向或弦向布置于两组蜂窝结构之间, 通过气动管的充放气实现机翼厚度的改变。

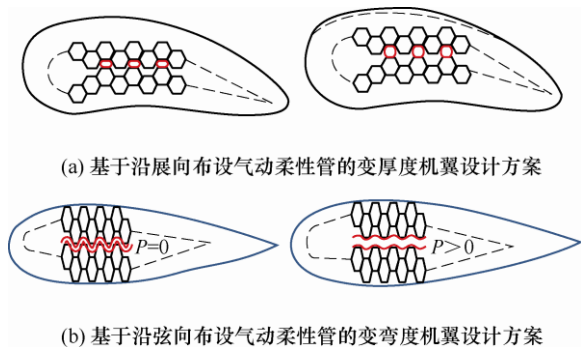
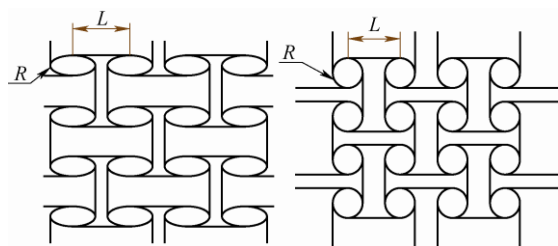
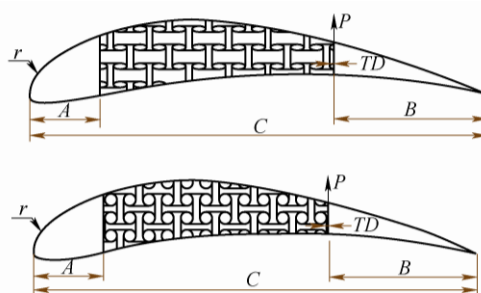


图 38 由气动柔性管驱动的变厚度机翼原理图

BUDARAPU 等<sup>[76]</sup>提出了一种基于拉胀结构的机翼厚度变形方案。该机翼的结构如图 39 所示, 负泊松比蜂窝结构被布设在机翼中部变形段; 机翼前后缘由不可变形材料制成, 为蜂窝结构提供了严格的变形边界条件。蜂窝结构可由布设其内部椭圆或圆形单元的转动实现“膨胀”变形, 从而实现机翼厚度的改变。基于这种拉胀结构的变厚度机翼主要优点如下: ① 能够在有限的结构应变下提供较大位移; ② 具有独特的变形特性, 可实现负泊松比的形变。



(a) “拉胀”结构示意图



(b) 含有“拉胀”结构的机翼示意图

图 39 拉胀结构驱动的变厚度机翼

## 2.3 机翼扭转变形

如前所述, 机翼扭转变形被认为是最古老的一种飞行姿态控制方式。随着飞行速度的提高, 机翼结构刚度也不断增强, 使得机翼扭转变形难以实现。但随着机翼气动弹性研究的不断深入, 人们指出应该对机翼刚度进行合理的设计以产生期望的扭转变形, 并利用这种变形实现飞行姿态的控制。相关研究表明, 机翼的扭转不但可以替代副翼实现飞机的滚转控制, 还能在飞行过程中降低诱导阻力、提高升阻比、减少燃料消耗<sup>[77]</sup>。

DARPA 的研究人员在智能机翼项目第二阶段中将机翼沿展向分为十段, 通过控制每一段机翼翼型弯度实现整个机翼的扭转变形<sup>[78]</sup>。2007 年, STANFORD 等<sup>[79]</sup>设计了一种以碳纤维材料为骨架、柔性薄膜材料为蒙皮的可扭转变形机翼, 并成功将其应用于小型无人机上, 实现了滚转姿态的控制。2010 年, 荷兰代尔夫特理工大学的 VOS 等<sup>[80]</sup>提出了一种扭转变形机翼设计方案, 其结构主要特点是机翼的蒙皮在尾缘处是非闭合的。可同时连接机翼上下表面蒙皮的螺杆机构被布设在机翼后部, 通过螺杆的旋转, 可实现机翼上下表面蒙皮延展向的错位滑动, 进而实现机翼的扭转变形(图 40)。风洞试验结果表明, 所设计的变形机翼最大能够实现  $27^\circ$  的扭转, 在此状态下升力系数提升 0.7。

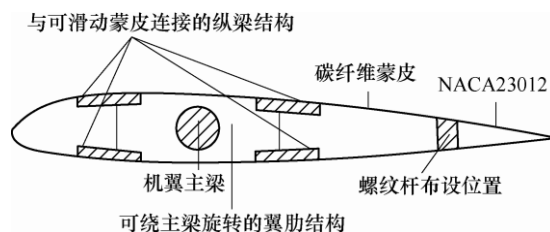


图 40 扭转变形机翼示意图

RAITHER 等<sup>[81]</sup>设计了一种基于变刚度材料的弯-扭耦合变形机翼。其核心技术为一种自适应变刚度梁结构(如图 41 所示, 其中  $G$  为材料刚度,  $t$  为材料厚度,  $Q$  为外界载荷)。该自适应梁结构中的深灰

色部分由刚度可变的智能材料制作。当对该结构施加加热激励时, 智能材料的剪切刚度会发生变化, 促使梁结构的剪切中心水平移动, 在气动载荷的作用下产生弯-扭耦合变形。图 42 展示了基于该结构的弯-扭耦合变形机翼样机, 仿真及试验结果表明, 机翼弯-扭耦合变形带来的气动力变化足以用于飞机的滚转控制, 且扭转变形是连续光滑的, 气动性能可得到改善。

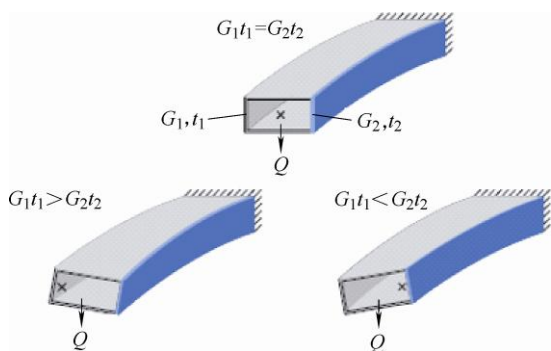


图 41 自适应梁结构



图 42 试验用样机

在美国智能机翼项目中, 研究人员提出了一种基于扭矩管结构的扭转变形机翼设计方案<sup>[82-83]</sup>, 并完成了 SMA 驱动的扭矩管驱动器设计。近期, ASO 等<sup>[84-85]</sup>设计了一种双圆管式机翼扭转变形驱动机构(图 43)。该机构由内管和外管组成。外管表面与翼肋相连, 靠近翼根的端部固定在机身上; 内管与可提供扭矩的执行机构相连。通过内管转动可实现机翼的扭转变形。

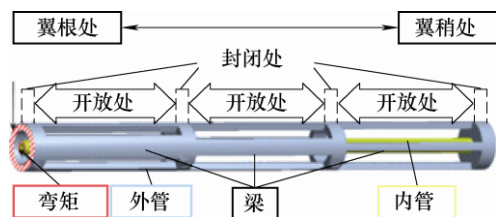


图 43 双圆管式扭转结构

2016 年, 由 NASA 自适应数字复合航空结构技术团队(MADCAT)牵头, 联合美国多家高校合作研发了一款采用“数字化”增强碳纤维材料制作的扭

转变形机翼<sup>[86-87]</sup>。图 44 展示了采用离散构建方法设计的可扭转变形机翼内部结构。机翼蒙皮由分段形式的聚酰亚胺薄膜制作以协调扭转变形。机翼的扭转由布设在其内部的可旋转碳纤维杆驱动产生。文献[88]展示了该机翼内部详细结构及制作过程。风洞及飞行试验表明, 所设计的扭转变形机翼能够很好地控制飞机的滚转。研发团队表示, 这种空间网格状的高比刚度、超轻型航空结构设计方式能够显著降低机翼的重量和复杂度, 有可能颠覆未来飞行器的设计、制造方式。



图 44 扭转变形机翼内部结构

RODRIGUE 等<sup>[89]</sup>提出了一种全新的扭转变形机翼设计方案, 与现有的扭转变形机翼相比, 该变形方案主要特点为扭转变形只发生在机翼中部。如图 45 所示, 整个机翼沿展长方向分为固定段、扭转变形段和旋转翼梢段三个部分。中部变形段是由 PDMS 和 PLA 组成的智能软复合结构, 可由交叉布设在内部 SMA 丝驱动。图 46 展示了扭转变形段内部结构, 浅色 SMA 丝被布设在靠近机翼下表面处, 深色 SMA 丝被布设在靠近机翼上表面处。通过对两组 SMA 丝施加不同的电激励, 即可驱动机翼中部变形段产生扭转变形, 而翼梢段位置也会随之改变。

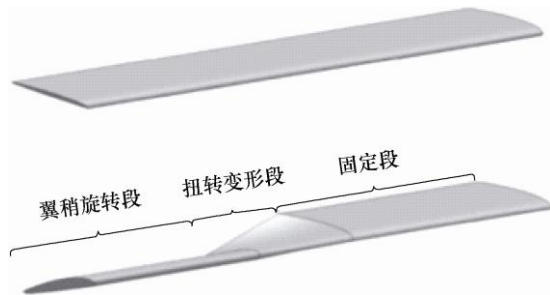


图 45 智能软复合结构扭转机翼模型

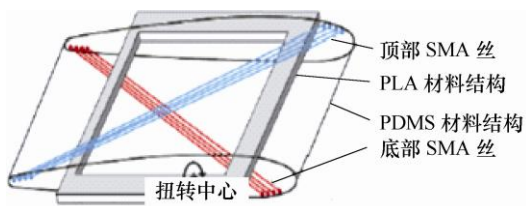


图 46 扭转变形段结构示意图

该设计方案的优点在于升力的增加主要集中在翼尖附近, 机翼变形范围较小, 不会对其内部部件的布置产生大的影响, 试验数据显示, 机翼翼梢段能够实现最大  $6.25^\circ$  的扭转, 机翼的气动性能得到显著提升。

### 3 变形机翼关键技术

#### 3.1 变形蒙皮技术

变形蒙皮是变形机翼重要组成部分之一, 不但要求其能在有限驱动力作用下产生足够的弹性变形, 还需保证足够的面外刚度以承受、传递气动载荷。综合现有的研究成果, 机翼变形蒙皮设计方案大体可划分为以下 4 类: ① 分段结构蒙皮; ② 高弹性材料蒙皮; ③ 可变刚度蒙皮; ④ 波纹结构蒙皮。表 2 从变形能力、气动承载能力、制备工艺等角度出发, 给出了各类变形蒙皮性能对比情况。

表 2 变形蒙皮性能对比

种类	变形能力	气动承载能力	制备工艺
多段结构蒙皮	良好	一般	简单
高弹性材料蒙皮	一般	较差	简单
可变刚度蒙皮	良好	良好	复杂
波纹结构蒙皮	良好	一般	一般

分段结构蒙皮是变形机翼设计初期广泛采用的变形蒙皮解决方案之一。其结构类似于自然界中鱼鳞叠片, 由可滑动的分段刚性结构构成, 具有良好的气动承载能力和变形能力, 但因此带来的气动问题也相当突出。由于蒙皮的非连续性, 不但无法提供光滑的气动表面, 机翼的气密性也被严重破坏, 气动效率受到严重影响。在现阶段的研究中, 这种分段结构的变形蒙皮设计方案已经很少被采用。

硅橡胶等高弹性材料因其良好的柔韧性被认为是制作变形蒙皮的理想材料之一。KIKUTA<sup>[90]</sup>较早开展了变形蒙皮材料的研究, 并建立了系统的变形蒙皮材料评价方法, 对包括热塑性聚氨酯橡胶 (Thermoplastic polyurethanes)、共聚酯 (Co-polyesters) 等大量材料的性能进行了详细的分析, 试验结果表明选用的材料均无法完全满足变形蒙皮所要求的条件。这类基于高弹性材料的变形蒙皮主要缺陷在于其难以承受、传递气动载荷, 且需要持续的外界驱动以维持其形变<sup>[91]</sup>。针对上述缺陷, 两种解决方案被提出: ① 以高弹性材料为基质, 内部嵌入增强材料 (如碳纤维等) 制成柔性基复合材料 (Flexible matrix composite, FMC); ② 将高弹性体材料与蜂

窝等支撑结构相结合, 其具体表现形式可以是蜂窝结构为夹层, 表面覆以高弹性体材料的蜂窝芯层合结构; 或将高弹性体材料直接浇筑在蜂窝结构中。现有研究表明, 两种方案均能在不明显影响结构变形性能的前提下显著增强变形蒙皮的气动承载能力。

可变刚度蒙皮可分为两类, 一类是直接由变刚度材料 (如形状记忆材料等) 构成, 另一种是采用将变刚度结构 (如变刚度管, 气动肌肉纤维等) 嵌入软基质材料中形成的柔性基复合材料 (FMC) 制作。变刚度蒙皮的优越性在于其能够在飞行过程中主动降低结构刚度以协调机翼形变的发生, 在机翼形状变化结束后又能主动提高结构刚度以提升气动承载能力, 有效解决了变形能力与气动承载能力间的冲突。此外, 部分变刚度结构还兼具变形驱动能力 (如在软基质材料中嵌入气动肌肉纤维的变刚度结构), 实现了变形驱动/气动承载能力的集成。

波纹结构的极端各向异性性能为其在变形蒙皮上的应用提供了先天优势, 通过对波纹方向的合理布设能实现柔性变形能力和气动承载能力间的协调。但波纹结构表面凹凸起伏形状对机翼的气动效率产生了不利影响。鉴于此研究者提出多种改进措施, 包括在波纹结构表面填充柔性材料以提供光滑的气动表面<sup>[27]</sup>; 以波纹结构为夹层, 表面粘贴高弹性体材料涂层, 形成波纹芯层合结构<sup>[37]</sup>; 或将波纹结构的波长和波高尽量缩短以降低不光滑表面对气动特性造成的不利影响等。

#### 3.2 轻质高输出驱动机构设计

变形机翼驱动单元是制约翼面变形性能的重要因素, 其性能优劣与机翼变形控制效果休戚相关。伴随科技进步与发展, 变形驱动系统也正逐步经历着革新与换代。精度更高、质量更轻、响应更快、能耗更低是未来变形结构对驱动系统的新诉求。在此背景下, 各类新式智能驱动单元应运而生, 主要包括: 形状记忆材料、压电材料、“气动肌肉”、电/磁致伸缩材料等。

形状记忆材料作为一种功能材料, 因其在热载荷激励下能恢复初始形状的特性, 受到结构变形控制领域学者的广泛青睐。然而不可避免的是, 这种智能材料在实际工程应用中, 由于“热惯性”效应, 存在着变形响应速率受加热、冷却速度影响严重的问题。在不引入外界换热装置情况下, 其驱动频率往往不高, 倘使增设外接强制换热装置, 又势必带来被控结构质量和空间上的附加损失。因此, 在后续应用研究中, 有效改善该类材料的热传导系数进



而实现其响应速率的提升,是保障其在变形机翼系统中高效可靠服役的前提。

压电材料因其在控制精度、驱动带宽、能量密度等方面的优异表现,在结构形状及振动主动控制领域中展现出了良好的应用前景<sup>[92]</sup>。在材料科学迅猛发展的今天,多种形式智能压电材料相继问世,其中尤以压电纤维复合材料的性能最为优异。相较于传统压电材料,压电纤维复合材料的驱动应变明显提高,环境适应性更加优良,克服了压电陶瓷材料不易应用于复杂曲面结构形状控制的局限性。但不可否认的是,压电材料在实际工程应用中也面临诸多挑战。首先,驱动位移不高是所有压电材料共性缺陷;其次,压电材料的迟滞、蠕变非线性特征会对控制效果产生难以忽视的消极影响;此外,如何实现压电材料在翼面结构上的大规模集成应用以及降低其对驱动电压需求也是未来应用需要解决的关键问题<sup>[93]</sup>。

超声电机是压电材料在驱动器领域的又一重要应用,其在响应精度、能量密度、结构体积上有着传统电机无法比拟的优势,曾被认为是变形机翼系统最理想的驱动元件之一,受到研究者的高度重视。但是,超声电机也存在着故障率较高、使用寿命短、制造工艺复杂等不足,这些因素是限制其在变形机翼领域应用的主要挑战。

“气动肌肉”又称“人工肌肉”是一种以外部压缩空气为能量来源的驱动元件,不仅具有响应速率快、结构轻便等优势,而且造价低廉<sup>[65]</sup>。在变形机翼驱动领域得到了广泛的应用。但该类驱动器也并非完美无缺,由于“气动肌肉”通过外界气源的充放气实现驱动位移的输出,因而其控制精度受气动阀门性能制约严重,并伴随有明显的迟滞非线性特征,且对外部变化气压环境的鲁棒性不强。

综上所述,以上各种智能驱动系统或在能量密度、或在响应速率、或在驱动精度等一方面或多方面实现了性能突破。但是在实际工程应用中,都面临着各自的瓶颈与挑战。因此,在后续的研究中,应围绕各类新型材料和元件的特性,进行优化改善研究,为在变形机翼上应用提供技术支撑。

### 3.3 控制系统设计

机翼变形控制是变形机翼系统设计中关键组成部分。其研究重、难点可概括总结为以下几个方面:① 机翼动态变形过程中的动力学特性的准确预测及结构变形与气动特性间的耦合机理探究;② 满足机翼动态变形控制要求的强鲁棒、非线性时变控制系统设计;③ 多驱动器/传感器布局下,面向变体

飞行器的协同控制技术研究。

应指出的是,机翼形状的主动控制任务,绝非仅仅是实现翼面构型的精确调整,而是在保障飞行安全前提下,以改善飞行品质为目的,控制翼面向满足当前任务需求的最优构型平稳切换。已有相关研究成果揭示,不合理翼面变形策略(包括变形形式、变形历程、变形速率)往往会加剧瞬态结构动力学特性及非定常气动特性对主动控制的不利影响,对飞行器的安全性,操稳特性产生消极作用<sup>[48, 94]</sup>。因此,在进行机翼形状控制系统设计前,必须深刻明确由翼面变形所带来的气动收益及非定常气动特性变化规律<sup>[95-96]</sup>。具体而言,需要充分结合基于 CFD 数值仿真、风洞试验、飞行试验所获得的气动数据,深入探究气动特性与翼面形状变化间的耦合作用关系,合理地进行控制律设计和变形历程规划。在提升飞行器飞行品质的同时,避免非期望动力学特性的产生。

机翼变形控制作为变体飞行器控制的重要环节,往往难以剥离飞行控制系统设计进行独立考虑。机翼变形控制过程中,伴随着质心、压心、转动惯量等动力学的参数变化,这使得被控模型具有强时变特性,高度的非线性及不确定性,给控制系统设计带来了巨大挑战<sup>[97]</sup>。随着近年来控制理论的飞速发展和对变体结构动力学特性认识的逐渐加深,针对变形机翼控制系统的设计方法也日渐成熟。总结现有研究成果,可将变形翼面控制系统设计方法概括为以下三类:第一类方法是采用线性参变系统(Linear parameter varying, LPV)手段对变形机翼系统进行建模,将机翼变形模态映射为 LPV 系统状态空间矩阵中的时变参数,即可实现在保留系统非线性时变特征的同时,将传统飞行器经典控制方法扩展应用于变形机翼控制任务中<sup>[98-100]</sup>。第二类常用手段是将飞行器控制任务依据功能层级,划分为机翼变形控制、飞行器姿态控制、飞行器制导控制等多回路,实现飞行控制与变形控制通道的解耦,降低控制器设计整体的难度和复杂度。此外,伴随着非线性控制理论的日渐成熟,大量非线性控制方法在变形翼面控制系统设计中也不断被尝试,如“动态逆控制、模糊控制、滑模控制、神经网络控制”等等。但该类控制器设计对复杂系统的建模误敏感度较高,对于在变形机翼这类高不确定系统中应用具有一定的局限性。

文献[101]指出,“分布式驱动器布局在提升翼面变形灵活度、改善系统鲁棒性上更具优势”,将分布式智能驱动单元、传感器模块和柔顺变形机构相

集成的设计思路是未来变形翼面设计发展的重要方向<sup>[2, 102]</sup>。基于此, 不难推测, 未来变形机翼系统必将是在多输入输出架构下的高集成性和高不确定性的复杂系统。届时, 如何协调管理多驱动模块, 融合多源传感器信息, 实现机翼形状的空间、时间有效协同控制也是变形机翼控制系统设计的关键问题。

## 4 结论与展望

机翼主动变形技术是未来机翼设计的重要趋势之一, 其研究涉及结构力学、空气动力学、气动弹性力学、智能材料、控制等多学科的交互, 具有复杂的耦合特性。国内外研究人员已对机翼主动变形技术开展了大量的研究工作, 但多数研究处于理论分析与地面试验阶段, 与实际应用尚有距离。

本文以中小尺度变形机翼为背景, 以机翼结构设计中变形能力与承载能力冲突为切入点, 对现阶段变翼型弯度、变厚度和扭转变形机翼中结构设计方案进行了归纳分析。对变形机翼中变形蒙皮、轻质高输出驱动系统、协调变形控制系统设计等关键技术进行了重点探讨, 并给出研究技术路线。研究表明将智能驱动系统与轻质高效变形结构、分布传感系统相结合的一体化设计思路是未来变体飞行器设计重要发展方向。

为进一步促进机翼主动变形技术在飞行器设计中的应用, 在未来发展中着重解决以下问题。

(1) 在柔顺变形结构设计中, 强化柔性材料的研制与变形结构的开发, 突破气动承载能力与结构变形能力间的矛盾; 着重采用轻量化、高可靠度的设计方案, 并注重数字化、模块化、智能化先进制造技术在变形机翼设计中的应用。

(2) 在变形驱动系统设计中, 一方面提升现有的压电材料、形状记忆材料和变刚度材料的性能, 突破其在变形机翼应用上的局限性; 另一方面, 强化新型驱动技术的创新和智能材料的开发, 使“智能化”变形机翼的发展步入新阶段。

(3) 在变形机翼控制系统设计的未来研究中, 应深刻明确机翼变形带来的气动特性变化规律, 探究变形机翼在气动/结构/温度及机电耦合(此处主要面向采用压电材料及形状机翼合金等智能材料或结构为驱动器的变形机翼系统)等多场耦合下的动力学特性研究, 并据此指导控制任务的开展; 着重考虑变形机翼时变特性、非线性和不确定性的控制系统建模及控制算法开发; 顺应变形机翼

发展趋势, 强化驱动系统、变形结构、传感系统的集成设计与协同控制研究, 保障变形机翼系统可靠性。

## 参 考 文 献

- [1] 白鹏, 陈钱, 徐国武, 等. 智能可变形飞行器关键技术发展现状及展望[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(3): 426-443.  
BAI Peng, CHEN Qian, XU Guowu, et al. Development status of key technologies and expectation about smart morphing aircraft[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(3): 426-443.
- [2] 冷劲松, 孙健, 刘彦菊. 智能材料和结构在变体飞行器上的应用现状与前景展望[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 29-45.  
LENG Jinsong, SUN Jian, LIU Yanju. Application status and future prospect of smart materials and structures in morphing air-craft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2014, 35(1): 29-45.
- [3] CIARELLA A, TSOTSKAS C, HAHN M, et al. A Multi-fidelity, multi-disciplinary analysis and optimization framework for the design of morphing UAV wing[C]// 16th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Dallas, 2015: 2326.
- [4] BUBERT E A, WOODS B K S, LEE K, et al. Design and fabrication of a passive 1D morphing aircraft skin[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(17): 1699-1717.
- [5] PERRY III B, COLE S R, MILLER G D. Summary of an active flexible wing program[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(1): 10-15.
- [6] BONNEMA K, SMITH S. AFTI/F-111 mission adaptive wing flight research program[C]//4th Flight Test Conference, 1988: 2118.
- [7] PENDLETON E W, BESSETTE D, FIELD P B, et al. Active aeroelastic wing flight research program: technical program and model analytical development[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(4): 554-561.
- [8] KUDVA J N. Overview of the DARPA smart wing project[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004, 15(4): 261-267.
- [9] YAMAN Y. Combined morphing assessment software using flight envelope data and mission based morphing prototype wing development, change: An overview presentation[C/CD]//3rd EASN international workshop on

- aerostructures, Milano, Italy, 2013.
- [10] Smart intelligent aircraft structures (SARISTU) : Proceedings of the final project conference[M]. Springer, 2015.
- [11] LAFLEUR J, OLDS J, BRAUN R. Daedalon: A revolutionary morphing spacecraft design for planetary exploration[C]//1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, 2005: 2771.
- [12] BARBARINO S, BILGEN O, AJAJ R M, et al. A review of morphing aircraft[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2011, 22(9): 823-877.
- [13] WEISSHAAR T A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(2): 337-353.
- [14] SOFLA A Y N, MEGUID S A, TAN K T, et al. Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1284-1292.
- [15] LI D, ZHAO S, DA RONCH A, et al. A review of modelling and analysis of morphing wings[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 100: 46-62.
- [16] MONNER H P. Realization of an optimized wing camber by using formvariable flap structures[J]. Aerospace Science and Technology, 2001, 5(7): 445-455.
- [17] POONSONG P. Design and analysis of a multi-section variable camber wing[D]. MD: University of Maryland, 2004.
- [18] MEGUID S A, SU Y, WANG Y. Complete morphing wing design using flexible-rib system[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2017, 13(1): 159-171.
- [19] 李刚. 含复铰可连续变弯度机翼机构设计与优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- LI Gang. Design and optimization of camber Continuously morphing wing mechanism with multiple joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [20] KOTA S, HETRICK J A, OSBORN R, et al. Design and application of compliant mechanisms for morphing aircraft structures[C]//Proceedings of SPIE 5054, Smart Structures and Materials 2003: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2003, 5054: 24-34.
- [21] JOO J J, MARKS C R, ZIENTARSKI L, et al. Variable camber compliant wing-design[C]//23rd AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. Kissimmee, 2015: 1050.
- [22] YOUNGREN H. Multi-point design and optimization of an natural laminar flow airfoil for a mission adaptive compliant wing[C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2008: 293.
- [23] HETRICK J, OSBORN R, KOTA S, et al. Flight testing of mission adaptive compliant wing[C]//AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Honolulu, 2007.
- [24] MILLER E J, CRUZ J, LUNG S, et al. Evaluation of the hinge moment and normal force aerodynamic loads from a seamless adaptive compliant trailing edge flap in flight[C]//AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, 2015.
- [25] CAMPANILE L F, SACHAU D. The belt-rib concept: A structronic approach to variable amber[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(3): 215-224.
- [26] HASSE A, ZUEST I, CAMPANILE L F. Modal synthesis of belt-rib structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(3): 722-732.
- [27] YOKOZEKI T, TAKEDA S, OGASAWARA T, et al. Mechanical properties of corrugated composites for candidate materials of flexible wing structures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(10): 1578-1586.
- [28] YOKOZEKI T, SUGIURA A, HIRANO Y. Development and wind tunnel test of variable camber morphing wing[C]//22nd AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference. National Harbor, Maryland, 2014: 1261.
- [29] YOKOZEKI T, SUGIURA A, HIRANO Y. Development of variable camber morphing airfoil using corrugated structure[J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(3): 1023-1029.
- [30] PREVITALI F, ARRIETA A F, ERMANNI P. Double-walled corrugated structure for bending-stiff anisotropic morphing skins[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(5): 599-613.
- [31] PREVITALI F, MOLINARI G, ARRIETA A F, et al. Design and experimental characterization of a morphing wing with enhanced corrugated skin[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(2): 278-292.
- [32] MATTEO N D, GUO S, AHMED S, et al. Design and analysis of a morphing flap structure for high lift wing[C]//AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, & Materials Conference



- AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference. Orlando, 2010.
- [33] MATTEO N D, GUO S. Morphing trailing edge flap for high lift wing[C]// AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Denver, 2011.
- [34] EVANS C, HARMER M, MARKS O, et al. Development and testing of a variable camber morphing wing mechanism[C]//2nd International Symposium on Sustainable Aviation. Istanbul, 2016.
- [35] LOUDON K, BOUFERROUK A, COLEMAN B, et al. Further development of a variable camber morphing mechanism using the direct control airfoil geometry concept[C]//International Symposium on Sustainable Aviation 2018. Rome, 2018.
- [36] WOODS B K S, DAYYANI I, FRISWELL M I. Fluid/structure-interaction analysis of the fish-bone-active-camber morphing concept[J]. *Journal of Aircraft*, 2014, 52(1): 307-319.
- [37] DAYYANI I, KHODAPARAST H H, WOODS B K S, et al. The design of a coated composite corrugated skin for the camber morphing airfoil[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(13): 1592-1608.
- [38] WOODS B K S, FRISWELL M I. Multi-objective geometry optimization of the fish bone active camber morphing airfoil[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 27(6): 808-819.
- [39] WOODS B K S, KOTHEA C S, SIROHI J, et al. Pneumatic artificial muscles for trailing edge flap actuation: A feasibility study[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 105021.
- [40] JACOB J D, SIMPSON A, SMITH S. Design and flight testing of inflatable wings with wing warping[R]. SAE, 2005.
- [41] JACOB J, SMITH S. Design of hale aircraft using inflatable wings[C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2008: 167.
- [42] USHER T D, ULIBARRI K R, CAMARGO G S. Piezoelectric microfiber composite actuators for morphing wings[J]. *ISRN Materials Science*, 2013, 2013: 1-8.
- [43] PEEL L D, MEJIA J, NARVAEZ B, et al. Development of a simple morphing wing using elastomeric composites as skins and actuators[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(9): 091003.
- [44] DIACONU C G, WEAVER P M, MATTIONI F. Concepts for morphing airfoil sections using bi-stable laminated composite structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, 46(6): 689-701.
- [45] DAYNES S, WEAVER P M, POTTER K D. Aeroelastic study of bistable composite airfoils[J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 46(6): 2169-2174.
- [46] DAYNES S, NALL S J, WEAVER P M, et al. Bistable composite flap for an airfoil[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(1): 334-338.
- [47] KUDER I K, FASEL U, ERMANNI P, et al. Concurrent design of a morphing aerofoil with variable stiffness bi-stable laminates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(11): 115001.
- [48] BILGEN O, KOCHERSBERGER K, DIGGS E, et al. Morphing wing micro-air-vehicles via macro-fiber-composite actuators[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, 2007: 1785.
- [49] BILGEN O, KOCHERSBERGER K B, INMAN D J, et al. Novel, bidirectional, variable-camber airfoil via macro-fiber composite actuators[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(1): 303-314.
- [50] BILGEN O, FRISWELL M I. Piezoceramic composite actuators for a solid-state variable-camber wing[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(7): 806-817.
- [51] WRIGHT C, BILGEN O. A piezocomposite trailing-edge for subsonic aircraft[C]//ASME 2018 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. San Antonio, 2018: V001T04A007-V001T04A007.
- [52] PANKONIEN A, INMAN D J. Experimental testing of spanwise morphing trailing edge concept[C]//Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2013. International Society for Optics and Photonics, San Diego, 2013, 8688: 868815.
- [53] PREVITALI F, ARRIETA A F, ERMANNI P. Performance of a three-dimensional morphing wing and comparison with a conventional wing[J]. *AIAA Journal*, 2014, 52(10): 2101-2113.
- [54] MOLINARI G, QUACK M, ARRIETA A F, et al. Design, realization and structural testing of a compliant adaptable wing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(10): 105027.

- [55] WLEZIEN R, HORNER G, MCGOWAN A, et al. The aircraft morphing program[C]//39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Long Beach, 1998: 1927.
- [56] BARTLEY-CHO J D, WANG D P, MARTIN C A, et al. Development of high-rate, adaptive trailing edge control surface for the smart wing phase 2 wind tunnel model[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15(4): 279-291.
- [57] 刘卫东. 变形机翼关键技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- LIU Weidong. Research on key technology of morphing Wing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [58] ELZEY D M, SOFIA A Y N, WADLEY H N G. A bio-inspired high-authority actuator for shape morphing structures[C]//Proceedings of SPIE 5053, Smart Structures and Materials 2003: Active Materials: Behavior and Mechanics, 2003, 5053: 92-101.
- [59] BARBARINO S, PECORA R, LECCE L, et al. A novel SMA-based concept for airfoil structural morphing[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18(5-6): 696-705.
- [60] GONG X, LIU L, SCARPA F, et al. Variable stiffness corrugated composite structure with shape memory polymer for morphing skin applications[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(3): 035052.
- [61] ASHIR M, HINDAHL J, NOCKE A, et al. Development of an adaptive morphing wing based on fiber-reinforced plastics and shape memory alloys[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2019: 1528083718823295.
- [62] SUN J, GUAN Q, LIU Y, et al. Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 27(17): 2289-2312.
- [63] 陈以金. 变体飞行器柔性蒙皮及支撑结构性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- CHEN Yijin. Study on flexible skin and supporting substructure of morphing aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [64] CHEN S, CHEN Y, ZHANG Z, et al. Experiment and analysis of morphing skin embedded with shape memory polymer composite tube[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(16): 2052-2059.
- [65] 冯宁. 基于气动肌肉纤维的主动变形蒙皮结构性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- FENG Ning. Analysis of active morphing skin Structures based on pneumatic muscle fibers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [66] KOREANSCHI A, GABOR O S, ACOTTO J, et al. Optimization and design of an aircraft's morphing wing-tip demonstrator for drag reduction at low speed, Part I—Aerodynamic optimization using genetic, bee colony and gradient descent algorithms[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(1): 149-163.
- [67] KOREANSCHI A, GABOR O S, ACOTTO J, et al. Optimization and design of an aircraft's morphing wing-tip demonstrator for drag reduction at low speeds, Part II—Experimental validation using Infra-Red transition measurement from wind tunnel tests[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(1): 164-174.
- [68] AUSTIN F, ROSSI M J, VAN NOSTRAND W, et al. Static shape control for adaptive wings[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(9): 1895-1901.
- [69] COUTU D, BRAILOVSKI V, TERRIAULT P, et al. Experimental validation of the 3D numerical model for an adaptive laminar wing with flexible extrados[C]//18th International Conference of Adaptive Structures and Technologies. Ottawa, 2007.
- [70] POPOV A V, BOTEZ R M, LABIB M. Transition point detection from the surface pressure distribution for controller design[J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(1): 23-28.
- [71] GRIGORIE T L, BOTEZ R M, POPOV A V. Adaptive neuro-fuzzy controllers for an open-loop morphing wing system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 223(7): 965-975.
- [72] POPOV A V, GRIGORIE L T, BOTEZ R M, et al. Closed-loop control validation of a morphing wing using wind tunnel tests[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(4): 1309-1317.
- [73] KAMMEGNE M J T, BOTEZ R M, GRIGORIE L T, et al. Proportional fuzzy feed-forward architecture control validation by wind tunnel tests of a morphing wing[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(2): 561-576.
- [74] KAMMEGNE M J T, GRIGORIE L T, BOTEZ R M, et al. Design and wind tunnel experimental validation of a controlled new rotary actuation system for a morphing

- wing application[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(1): 132-145.
- [75] 孙健. 基于 SMPC 蒙皮和主动蜂窝结构的可变形机翼结构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- SUN Jian. Investigation on morphing wing structures based on shape memory polymer composite (SMPC) skins and active honeycomb structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [76] BUDARAPU P R, NATARAJAN R. Design concepts of an aircraft wing: Composite and morphing airfoil with auxetic structures[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2016, 10(4): 394-408.
- [77] PECORA R, AMOROSO F, LECCE L. Effectiveness of wing twist morphing in roll control[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(6): 1666-1674.
- [78] KUDVA J N, SANDERS B P, PINKERTON-FLORENCE J L, et al. Overview of the DARPA/AFRL/NASA smart wing phase II program[C]//Proceedings of SPIE 4332, Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. 2001, 4332: 383-390.
- [79] STANFORD B, ABDULRAHIM M, LIND R, et al. Investigation of membrane actuation for roll control of a micro air vehicle[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(3): 741-749.
- [80] VOS R, GURDAL Z, ABDALLA M. Mechanism for warp-controlled twist of a morphing wing[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(2): 450-457.
- [81] RAITHER W, HEYMANNS M, BERGAMINI A, et al. Morphing wing structure with controllable twist based on adaptive bending-twist coupling[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(6): 065017.
- [82] JARDINE A P, BARTLEY-CHO J D, FLANAGAN J S. Improved design and performance of the SMA torque tube for the DARPA Smart Wing Program[C]//Proceedings of SPIE 3674, Smart Structures and Materials 1999: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 1999, 3674: 260-270.
- [83] PRAHLAD H, CHOPRA I. Design of a variable twist tilt-rotor blade using shape memory alloy (SMA) actuators[C]//Proceedings of SPIE 4327, Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems, 2001, 4327: 46-60.
- [84] ASO A, TANAKA H. Study on a morphing wing structure using open-section member[C]//Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2015), Cairns, 2015: 352.
- [85] ASO A, PERREY M, TANAKA H. Experimental study on wing twist-morphing structure using a double-tube cylinder[J]. Transactions of the Japan society For Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2017, 15(2016): a1-a6.
- [86] CRAMER N B, CHEUNG K, SWEI S S M. Design and testing of a lattice-based cellular component active twist wing[C]//24th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, San Diego, 2016: 1085.
- [87] CHEUNG K, CELLUCCI D, COPPLESTONE G, et al. Development of mission adaptive digital composite aerostructure technologies (MADCAT)[C]//17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Denver, 2017: 4273.
- [88] JENETT B, CALISCH S, CELLUCCI D, et al. Digital morphing wing: Active wing shaping concept using composite lattice-based cellular structures[J]. Soft Robotics, 2017, 4(1): 33-48.
- [89] RODRIGUE H, CHO S, HAN M W, et al. Effect of twist morphing wing segment on aerodynamic performance of UAV[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(1): 229-236.
- [90] KIKUTA M T. Mechanical properties of candidate materials for morphing wings[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [91] THILL C L, ETCHES J, BOND I, et al. Morphing skins[J]. The Aeronautical Journal, 2008, 112(1129): 117-139.
- [92] 王小明, 周文雅, 吴志刚. 压电纤维复合材料驱动的机翼动态形状控制[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 159-167.
- WANG Xiaoming, ZHOU Wenya, WU Zhigang. Dynamic shape control of wing using piezoelectric fiber composite materials[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 159-167.
- [93] VASISTA S, TONG L, WONG K C. Realization of morphing wings: A multidisciplinary challenge[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(1): 11-28.
- [94] LI M, CHEN W M, GUAN D. Improvement of aircraft rolling power by use of piezoelectric actuators[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2004, 17(2): 87-92.
- [95] WANG X, ZHOU W, WU Z. Feedback tracking control for dynamic morphing of piezocomposite actuated



- flexible wings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 416: 17-28.
- [96] WANG X, ZHOU W, XUN G, et al. Dynamic shape control of piezocomposite-actuated morphing wings with vibration suppression[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(3): 358-370.
- [97] 李文成. 变体飞行器动力学建模与稳定性分析及控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- LI Wencheng. Dynamics modeling, stability analysis and control of morphing aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [98] 殷明, 陆宇平, 何真. 变体飞行器 LPV 建模与鲁棒增益调度控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(2): 202-207.
- YIN Ming, LU Yuping, HE Zhen. LPV modeling and robust gain scheduling control of morphing aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(2): 202-207.
- [99] 杨贯通. 变外形飞行器建模与控制方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- YANG Guantong. Research on modeling and control of morphing flight vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [100] 邵朋院, 吴成富, 马松辉, 等. 基于 LPV 鲁棒输出反馈控制的变形无人机暂态控制律设计[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(5): 746-749.
- SHAO Pengyuan, WU Chengfu, MA Songhui, et al. An effective design of transient mode controller for morphing UAV based on LPV robust output feedback control[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(5): 746-749.
- [101] 陆宇平, 何真. 变体飞行器控制系统综述[J]. 航空学报, 2009, 30(10): 1912-1917.
- LU Yuping, HE Zhen. A survey of morphing aircraft control systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(10): 1912-1917.
- [102] 祝连庆, 孙广开, 李红, 等. 智能柔性变形机翼技术的应用与发展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 28-42.
- ZHU Lianqing, SUN Guangkai, LI Hong, et al. Intelligent and flexible morphing wing technology: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 28-42.
- 
- 作者简介: 周文雅, 男, 1981年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为飞行器动力学与控制。  
E-mail: zwy@dlut.edu.cn
- 张宗宇(通信作者), 男, 1995年出生。主要研究方向为飞行器动力学与控制。  
E-mail: z18042654126@163.com