

变体飞机智能结构技术进展



吴斌,杜旭朕,汪嘉兴

航空工业沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

摘 要:具有可变外形特征的变体飞机能始终保持最佳飞行状态,满足多种任务需求,是未来飞行器的重大技术方向。本文从变体飞机的背景出发,论述了变体飞机的结构组成和能力需求,阐述了变体飞机结构的关键技术(如柔性结构技术、驱动/控制技术和状态感知技术)的研究现状与发展方向,提出智能材料柔性结构、分布式驱动/控制系统与微小传感器一体化是未来变体结构的主方向。同时指出,4D打印技术在设计和制造智能材料柔性结构方面具有很大的应用潜力。本文的研究为变体飞机智能结构设计和关键技术研究提供了参考,对于未来变体飞机的发展具有指导意义。

关键词:变体结构; 柔性结构; 分布式驱动/控制系统; 状态感知; 4D打印

中图分类号:V214.9

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.12.002

通过改变外形特征,变体飞机能适应不同的飞行状态和任务需求。人类模仿鸟类实现飞行时即实现了初步变体,100多年来,飞机结构由早期的木材、帆布等制造的柔性结构,发展到了现在的金属、复合材料刚性结构,而变体技术也由早期的仿生变体发展到刚性变体,目前正在回归仿生,向柔性变体方向迈进。

连续、光滑的柔性变体对目前以刚性结构为主的飞机结构来说是一个不小的挑战,要求结构既要变形又要承载,这需要材料、结构、驱动、控制、传感器、制造工艺等多方面的突破。本文从变体飞机的背景出发,论述了变体飞机的结构组成和能力需求,阐述了变体飞机结构的关键技术(如柔性结构技术、驱动/控制技术和状态感知技术)的研究现状与发展方向,智能材料、柔性结构、分布式驱动/控制、微小传感器、4D打印等技术正推动着柔性变体技术向前进展。而柔性变体在飞行器尤其是高速或大型飞行器上的工程应用仍有待突破。本文研究为变体飞机智能结构设计和关键技术研究提供了参考。

1 飞机结构变体技术演变

飞机特别是战斗机,具有多种类型的飞行任务,包括起飞、爬升、巡航、机动、突防、着陆等不同的飞行阶段,其气动性能有不同的需求。如在起飞和着陆时,机场条件限制了起降速度,需要高升力飞行状态;巡航或转场时,要求飞机

航时最大,需保持最大升阻比飞行;突防时,又要求飞机进行最大飞行速度和高机动飞行。不同的飞行任务对飞机的性能也有不同的需求,如在执行截击任务时,需要高空高速性能;而近距缠斗时,又强调中空性能和机动性等。传统固定翼飞机只能在设计点附近具有最优的性能,而无法兼顾整个任务剖面,随着飞行任务和飞行状态的改变,飞机的气动性能会明显变差。传统飞机往往针对某一性能指标进行优化,专用于某一种作战任务,如第二代战机突出了高空高速性能,而第三代战机则突出了中低空的缠斗能力。随着战争形式的不断升级,飞机更加复杂和昂贵,飞机的多用途能力成为重要的需求指标,如何应对不同任务需求给飞机气动布局设计带来的挑战,成为飞机设计重点关注的问题。

变体飞机技术为解决这一系列矛盾带来了曙光。变体飞机可以在飞行过程中对不断改变的飞行条件做出响应,光滑连续地改变布局形式或者机体形状,解决不同设计点的需求矛盾,根据不同飞行状态实现增加升力、降低阻力、提高升阻比、增大航程、改善气动效率、提高机动性的目标。例如,通过改变翼展和机翼面积,变体飞机能够在宽速域下趋近理想的最小阻力和最小能耗^[1](见图1);通过改变后掠角和机翼面积,变体飞机可以在宽速域下保持最优升阻比^[1](见图2);可变展弦比的变体机翼能够在亚声速和超声速下都保持较大升阻比,提高飞行效率^[2](见图3)。与常规

收稿日期: 2022-10-18; 退修日期: 2022-11-06; 录用日期: 2022-11-19

引用格式: Wu Bin, Du Xuzhen, Wang Jiaxing. Smart structure technology progress of morphing aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 13-30. 吴斌,杜旭朕,汪嘉兴. 变体飞机智能结构技术进展[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 13-30.

固定翼飞机相比,变体飞机飞行包线更宽,作战效能更高^[3](见图4),并且能够根据飞行环境、飞行剖面以及作战任务等需要,自主改变气动构型,优化飞行性能。

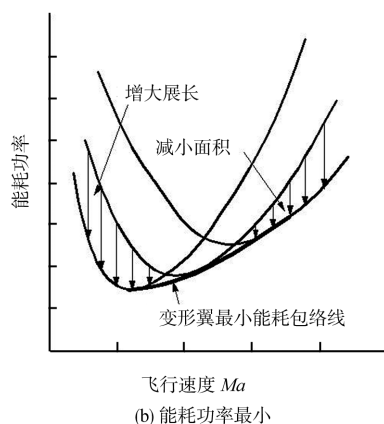
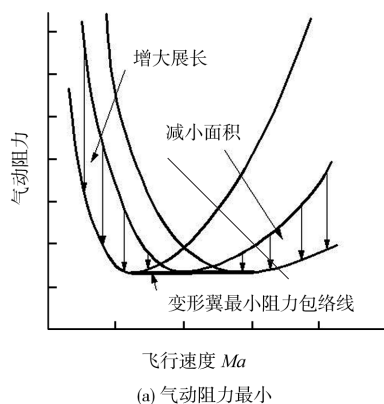


图1 改变翼展和机翼面积

Fig.1 Change span and wing area

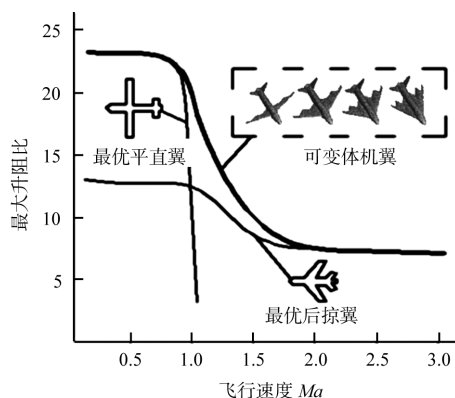


Fig.2 Change sweep angle and wing area

早期的变体概念来自对鸟类的仿生,航空先驱们在模仿鸟类设计飞行器时,也参考鸟类翅膀变体实现了飞行控

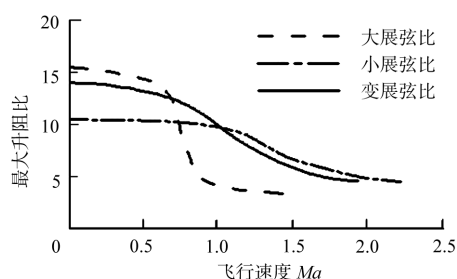


图3 变展弦比

Fig.3 Change aspect ratio

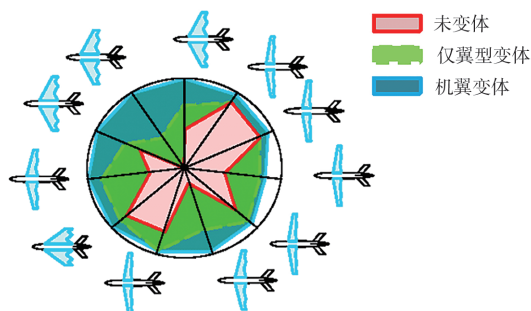


图4 变体飞机不同飞行状态效能

Fig.4 Efficacy of different flight states for a morphing aircraft

制。1903年,莱特兄弟实现人类历史上第一次有动力飞行时就应用了机翼扭转变体来实现横向控制。随着刚性结构和金属材料以及现代常规铰链控制应用于飞机上,飞机变体演变成利用铰链、枢轴和横杆等来改变飞机几何布局。以MAK-10的伸缩式机翼,Bell X-5、F-111、F-14、米格-23等的变后掠翼,XB-70的下垂机头和下反翼梢,V-22的倾转旋翼等为代表,如图5(a)所示,这时的变体只是通过机械的刚体运动进行简单的形状调整。刚性铰链和刚性变体对于金属刚性结构的现代飞机来说,的确是一种简单而行之有效的实现设计指标的技术手段。然而,随着人类文明以及战争形态的发展,民用飞机越来越重视经济性和环保性,军用飞机更加突出长航时、隐身性、高超声速等性能,使得传统刚性机构变体技术气动力离散、重量(质量)代价大、隐身性能差、易磨损等问题越来越突出,如图5(b)所示,刚性铰链、传统舵面和刚性变体难以满足新一代飞机变体能力的研制需求。

通过应用新型智能材料、新型作动器、传感器等实现光滑而持续地改变机翼等形状,并不断对飞行条件做出响应,柔性变体或者智能变体概念应运而生。柔性变体可以取消传统操纵面,机翼光滑变形,降低阻力;可以提高隐身性能;可以改善压力分布,减轻机翼根部载荷,降低结构重量;可



(a) 各种刚性变体飞机

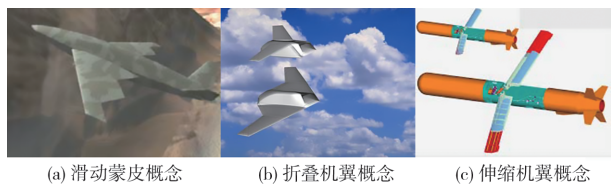


(b) F-14补充机翼完全展开后机身空洞的气囊

图5 刚性变体飞机

Fig.5 Rigid morphing aircraft

以抑制结构振动,增加系统及附件的结构寿命,提高飞机的安全性。其中以美国国防预先研究计划局(DARPA)的变体飞机结构(MAS)^[4]项目最具代表性,如图6所示。随着对鸟类飞行机制和仿生的重新认识,鸟类再一次成为现代飞机的模仿对象。美国国家航空航天局(NASA)提出了变体无人驾驶飞机概念机^[5],如图7所示,涉及生物技术、纳米技术、生物材料、适应性结构、微尺度流动控制、生物模拟概念、优化技术及控制技术等多领域的新型技术。



(a) 滑动蒙皮概念

(b) 折叠机翼概念

(c) 伸缩机翼概念

图6 MAS项目

Fig.6 The MAS project



图7 变体飞机概念机

Fig.7 Morphing aircraft concept

2 变体结构能力需求

以机翼(见图8)和进气道(见图9)结构^[6-7]为例,变体结构根据变形尺度可大致归结为三类:(1)局部微小变形结构(小变形)主要用于局部流场的主动控制和局部刚度特性变化,如进气道变唇口、喉道变形调节、变唇缘形状等,翼面表面蒙皮鼓包,改变振动特性^[8]等;(2)中等尺度分布式变形结构(中变形)主要用以取代传统气动控制组件,实现无缝、光滑、连续的气动控制(见图10),提高气动控制效率,增升减阻,增强机动性,如机翼前后缘变弯度、翼尖上下弯折等;(3)部件级整体变体结构(大变形)主要用以取代传统的变翼面积、变翼型、变后掠角等大部件的刚性机械变形,柔顺改变全机气动布局,增强飞行器在不同飞行条件和飞行任务下的适应能力,实现全程的性能最优化。

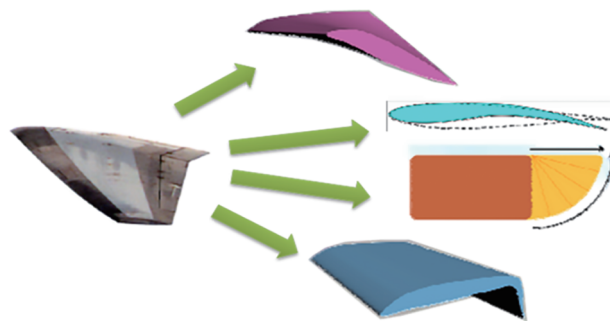


图8 机翼的变体结构构型变形演化方式

Fig.8 Evolution of different morphing wing configuration

NASA^[9]在1998年启动的变体飞机计划中对各种结构大变形、小变形及流场变形开展了研究,最后确定了以大变形变体飞机为主要研究方向,并且强调所谓变体,必须以机翼基本形状的改变为最低要求,否则“变体飞机”将退化为“变前后缘飞机”或“变机翼弯度飞机”,这不符合变体飞机

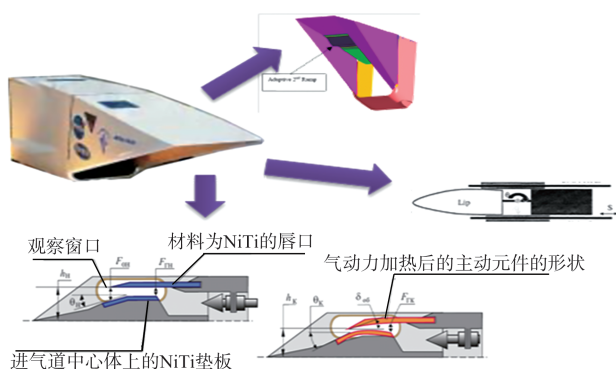


图9 进气道的变体结构构型变形演化方式

Fig.9 Evolution of different morphing air inlet configuration



(a) 传统前缘缝翼和后缘多段缝翼



(b) A380/A350XWB采用的变弯度下垂前缘

图10 变弯度结构取代传统缝翼

Fig.10 Variable camber structure adopted to replace traditional slotted flaps

发展的大方向。

变体飞机结构能力需求包括大变形能力、连续光滑的变体能力、变体过程中具备承载能力、结构变体响应时间满足要求、飞行状态感知与构型主动调控等,此外轻质化、长寿命、高可靠性等传统飞机结构的能力要求仍然适用。当前变体结构形式和功能实现的技术成熟度较低,距离应用还需大量基础性探索和工程化应用研究,全面开展智能变体结构耐久性/损伤容限等方面研究还为时尚早。

变体飞机结构涉及的关键技术包括柔性结构技术、驱动/控制技术、状态感知技术等。通过将智能材料、智能结构、新型作动器、先进传感器、高效控制器等无缝地综合应用于变体飞行器,通过设置在结构内部的敏感元件、信号采集与分析决策系统、执行机构的作动装置,可以根据任务需求自主改变结构形态,并对变化的外界环境做出即时响应,以始终保持预期的最优状态。

3 柔性结构技术

变体飞机在气动载荷下连续光滑地改变机体形状,柔性结构技术是其中的关键,柔性结构解决的是飞机能变形的问题。按机体结构组成可分为支撑内部空间的可变形骨架、构成连续表面的柔性蒙皮,以及可变形骨架与柔性蒙皮的连接三类技术。正如合金材料和复合材料构成了传统飞机的机体结构,具有变形能力的智能材料则成为变体飞机柔性结构的基础。

3.1 智能材料

智能材料由于具有主动或被动变形的能力而被视为柔性结构的理想材料。目前智能材料主要有形状记忆合金(SMA,见图11)、形状记忆聚合物(SMP,见图12)及其复合材料^[10]、变模量复合材料^[10](DMCs,见图13)、变模量泡沫^[11](DMF,见图14)、零泊松比材料等,表1梳理了部分智能材料类型及其特性。对于变体战斗机而言,理想智能材料的特性是输出力大、变形大、响应快,目前还没有非常符合要求的材料出现。如形状记忆合金输出力和变形能力相对满足要求,但其响应速度较慢,且其变形能力受环境影响较大,是其应用在变体结构上的“瓶颈”;零泊松比材料如应用于蒙皮,其表面连续性和法向承载能力是需突破的关键;形状记忆聚合物复合材料柔性蒙皮关键在于多稳态形态间变体过程的刚度控制。在成熟度相对较低的现阶段,采用智能材料与微机构混合方式,可以从原理上研究智能变体结构,100%智能材料的变体结构离工程应用还有不小的距离。

目前的柔性结构探索大多基于低速飞行的微小型飞行器^[12-15](见图15)和中高速飞行的中小型飞机^[16](见图16),柔性材料本身的性能就能满足其较低的强度、刚度需求,并且通过少量增加结构重量以及主动气动弹性技术等手段还可以降低飞行器对机翼刚度的要求,实现起来相对容易。但是对于高速飞行的大型飞行器(战斗机、运输机、弹箭等)来说,结构要求具有很高的强度和刚度,只依靠可变形材料本身的刚度和强度难以满足设计需求,必须设计可变形结构骨架与柔性材料、柔性蒙皮组合,共同承载,保证机翼承载能力,维持表面光滑连续。

3.2 柔性蒙皮

柔性蒙皮能够满足变体飞机表面结构件连续光滑大变形的要求,并且有承载能力。蒙皮需要足够的变形量来保证在机翼几何参数变化的过程中翼面始终光滑连续无缝,并且在变形过程中有足够的刚度来维持机翼的气动外形。柔性蒙皮往往需要具备三种变形能力,即长和宽方向的伸

表1 现有可变形骨架和柔性蒙皮的典型材料

Table 1 Typical material to make deformable framework and flexible skin

材料	典型材料	材料特性			
		输出力	输出位移	响应速度	能量密度
蒙皮材料	人造橡胶及其复合材料	小	大	快	低
	零泊松比材料	小	大	快	低
	形状记忆合金	大	大	慢	高
	形状记忆聚合物及其复合材料	小	小	中	低
	弹性记忆复合材料(EMC)	中	中	中	中
骨架结构材料	形状记忆纺织材料	小	大	中	低
	形状记忆合金	大	大	慢	高
	形状记忆聚合物及其复合材料	小	小	中	低
	弹性记忆复合材料(EMC)	中	中	中	中



图11 记忆合金 $Ni_{47}Ti_{44}Nb_9$ 铸锭、棒材、管材

Fig.11 Ingot, bar and pipe shape of $Ni_{47}Ti_{44}Nb_9$

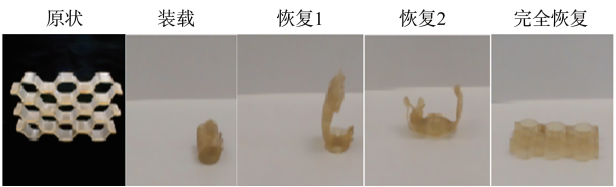


图12 形状记忆聚合物(SMP)

Fig.12 Shape memory polymer(SMP)

长与缩短、大角度的弯曲变形、剪切变形,柔性蒙皮变形行为一般是其中的某一种或几种的组合,其中剪切变形容易出现褶皱现象。有团队曾经采用鱼鳞片^[17]、瓦片堆叠^[18]方式模拟柔性蒙皮,该方案虽具有一定变形能力,但无法满足光滑连续和承载的需求,并不是真正的柔性蒙皮结构,如图17所示。

利用人造橡胶等弹性材料自身的大变形能力,将其作

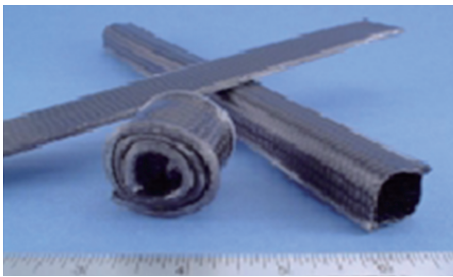


图13 变模量复合材料(DMCs)

Fig.13 Dynamic modulus composites(DMCs)

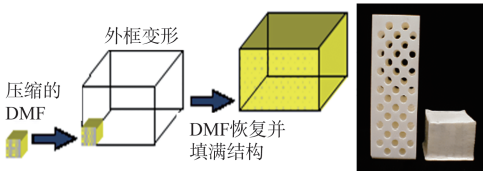


图14 变模量泡沫(DMF)

Fig.14 Dynamic modulus foam(DMF)



图15 国内外研制的变体飞机航模

Fig.15 Different morphing aero models



图16 自适应后缘应用于湾流III亚声速飞机上

Fig.16 ACTE tested on Gulfstream III

为柔性蒙皮是一个常见的方案,一般适用于微小型飞行器或中低速小型无人机。但弹性材料面内承载能力较差,难以传递面内载荷,必须依靠内部支撑结构传载^[19-20],例如,“滑动蒙皮”变体验证机的硅橡胶柔性蒙皮采用了内埋式支撑,如图18所示,对于垂直表面的法向载荷,弹性材料更无

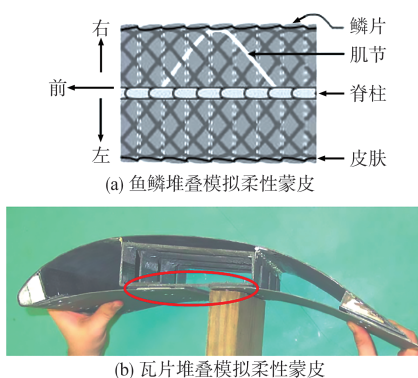


图 17 鱼鳞、瓦片堆叠式蒙皮

Fig.17 Fish scale or tile stacked shape skin



图 18 硅橡胶柔性蒙皮

Fig.18 Silicon rubber used as flexible skin

法承受并传递,因此并不适合作为大型或中高速飞机的蒙皮材料。采用形状记忆聚合物及其复合材料(见图 19~图 21)能够满足弹性大变形要求,且有一定承载能力,具有较好的发展潜力,如洛马公司^[21]在折叠机翼关节处采用的 Ω 变形蒙皮就采用了形状记忆聚合物,如图 20 所示。基于形状记忆聚合物,还可以开发出不连续纤维、编织、波纹铺层等新型复合材料,是实现大变形的柔性蒙皮结构的方案之一,如图 21 所示。通过零泊松比蜂窝搭配柔性材料填充或作为表皮组成的复合式蜂窝蒙皮^[22-23],在实现大变形的同时,可以进一步提高承载能力,在高速飞行的大型飞行器的柔性蒙皮解决方案上也具有一定的应用潜力,如图 22 所示。

3.3 可变形骨架

经历 100 多年的发展,现代飞机形成了适应于现有成熟制造工艺的结构构型,即以蒙皮、框、梁、墙、翼肋、长桁等为主的板杆结构,具有高效承载、内部空间大的特点。通过设计可变形骨架,将其与传统刚性板杆结构融合,使内部骨架结构既能变形又能承载,是现实的、可行性较高的方案。可变形骨架根据变形能力和部位需求,通常有多关节、多连杆、曲轴、柔性中板、可变桁架等方案实现。

多关节式结构应用在机翼前缘襟翼、后缘襟副翼等部位,可以实现变弯度和弯扭组合,如图 23 所示;通过曲轴结

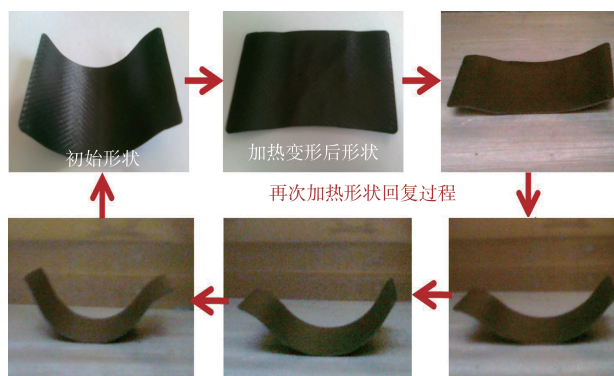


图 19 形状记忆聚合物碳纤维复合材料柔性蒙皮

Fig.19 SMP based carbon fiber composite used as flexible skin



图 20 洛马公司的变体机翼

Fig.20 Lockheed Martin morphing aircraft

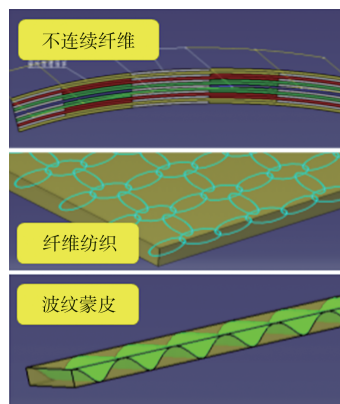


图 21 可实现拉伸增长的形状记忆聚合物复合材料

Fig.21 Stretchable SMP based composite

构^[24]可以将电机转动转变为舵面的弯扭,如图 24 所示;柔性中板+分布式隔板结构组合构建后缘骨架部分,通过驱动柔性中板^[25]可实现翼面后缘的整体偏转和上下开裂偏转,

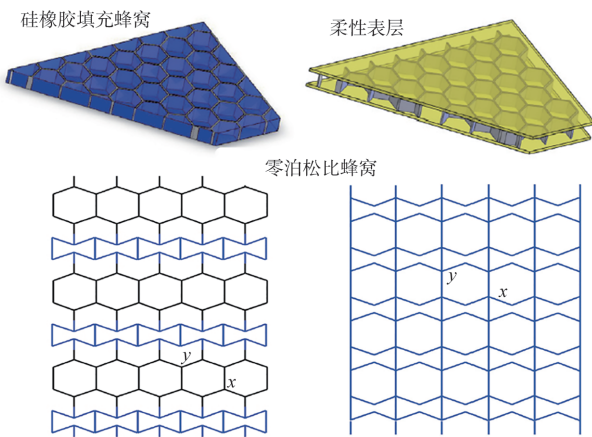


图22 可变形蜂窝蒙皮和零泊松比蜂窝结构

Fig.22 Flexible honeycomb skin and zero Poisson ratio honeycomb structure

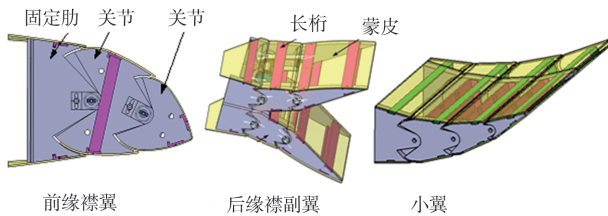


图23 多关节结构及其应用部位

Fig.23 Multi joint structure and its application

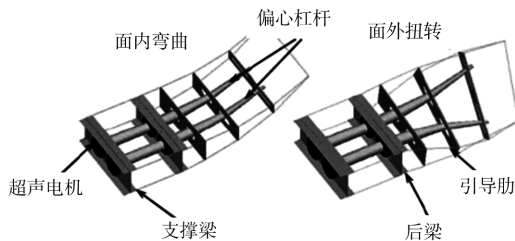


图24 超声电机驱动曲轴机构

Fig.24 Crankshaft mechanism driven by ultrasonic motor

如图25所示。对于上翘翼尖、上翘平尾、折叠关节等类似于刚性变体的部位,通过传统的转动关节方案结合柔性蒙皮可以实现,如图26所示;采用FMC管^[26-28]嵌入连续柔性结构材料中能够实现类似转动关节的效果,如图27所示。

通过多连杆机构的运动,驱动多处垂直于连杆机构的横向构件,以此来实现变体和承载,应用在前后缘开缝襟翼的控制上,结合柔性蒙皮,可实现光滑连续变体,如图28所示。但该方案在多处连杆机构之间的变形协调上存在难点,特别是前后端不等距的变形部位容易出现卡死情况。此外,多连杆机构变体结构不能出现其他平行于连杆机构的纵向构件,因此该方案的承载能力受到限制。

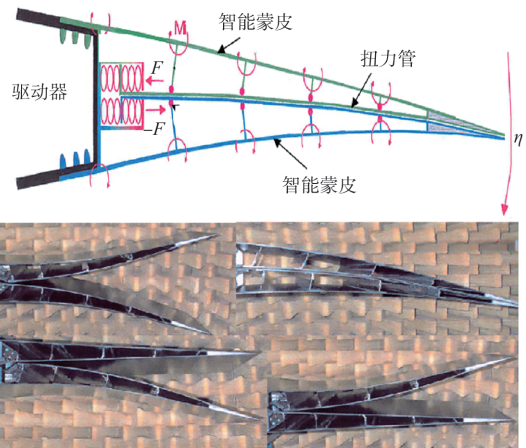


图25 柔性中板和分布式隔板组合的后缘偏转结构

Fig.25 Flexible middle plate and distributed plate combined structure

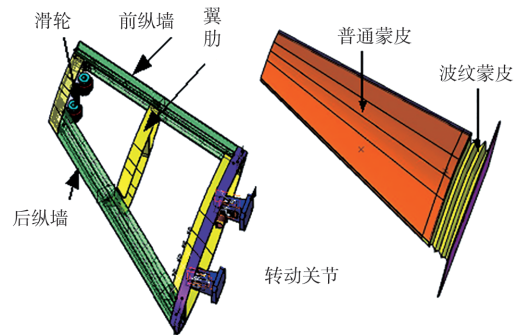


图26 转动关节与柔性蒙皮结合

Fig.26 Combination of rotating joint and flexible skin

上述的多关节、多连杆、曲轴等可变形骨架方案适合于翼面前后缘、翼尖等部位的中等尺度变体,对于需要改变整个翼面厚度、面积、翼型、后掠角等大尺度的变体则无能为力。采用柔性空间桁架结构^[29-30]能够实现机翼沿弦向和展向的大变形和整体变刚度,该方案是将宏观尺度上的变形离散分解到若干小区域内,再通过改变每个小区域结构单元的形状分别实现,如图29、图30所示。采用大量模块化单元,像乐高积木一样搭建结构,是飞机结构设计师追求的理想方案之一。基于该理念,MIT团队^[31-32]设计了一种由“数字化材料”组成的变体机翼,如图31所示;NASA和MIT的工程师团队^[33]联合开发并测试了一种由数百个相同的微小聚合物点阵晶格组成的变体机翼,如图32所示。对于载荷较低的飞机来说,这是易于实现的,但若想将此方案应用于大型飞机,如何设计模块间的众多连接,使其既轻量化又可靠,仍然面临挑战。

此外,现实中成熟的可变形柔性结构来自自然界的演

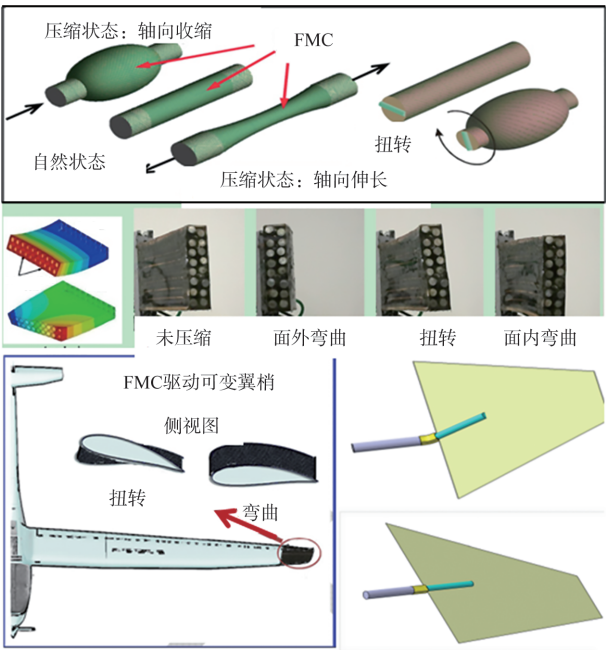


图27 FMC管嵌入柔性结构材料
Fig.27 Flexible structure embedded by FMC

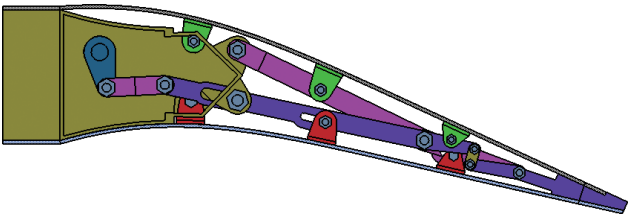


图28 多连杆结构实现可变形骨架
Fig.28 Deformable framework composed of multi-link mechanism

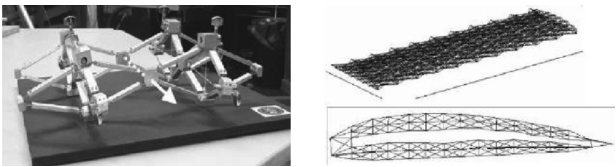


图29 柔性空间桁架结构
Fig.29 Flexible space truss structure

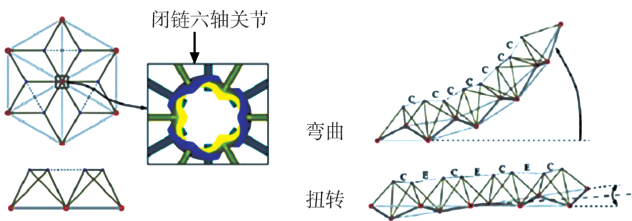


图30 自适应桁架结构
Fig.30 Adaptive truss structure



图31 采用数字化材料组装的变体机翼
Fig.31 Morphing wing composed by digital materials

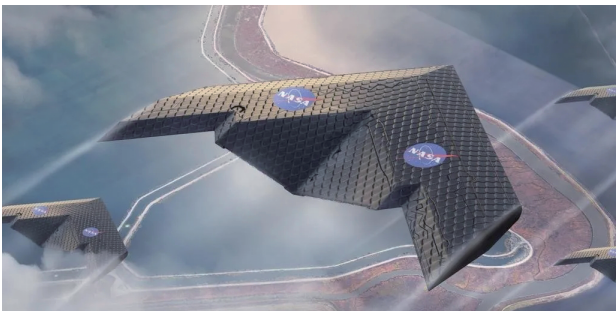


图32 采用点阵晶格组成的变体机翼
Fig.32 Morphing wing composed by lattice materials

化,采用仿生结构设计可变形骨架的研究仍然得到了一些科研人员的关注,如脊椎和鱼骨是常用的仿生对象。仿脊椎式结构^[34]属于多关节结构方案,仿鱼骨结构^[35]与柔性中板变体结构原理相同,如图33、图34所示。



图33 仿脊椎式变弯度机翼
Fig.33 Spine shape variable camber wing

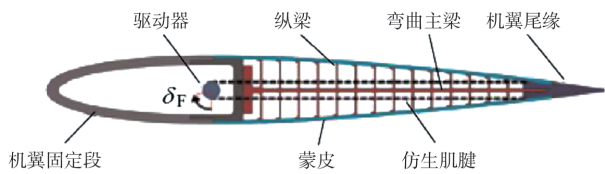


图34 仿鱼骨变弯度机翼
Fig.34 Fishbone shape variable camber wing

柔性蒙皮与骨架的连接是保证结构变体过程中二者形面协调光滑的关键。不合理的连接方式,容易发生刚度不匹配、结构外形不光滑、不连续等问题,还会出现局部凸起、

褶皱^[36]等现象,甚至会引起蒙皮与可变形骨架互相制约、卡死情况的发生,影响变体实现和气动性能,如图 35 所示。蒙皮与骨架的连接大体可分为铰接(见图 28)、固连^[37](见图 36)、滑动^[38](见图 37)等方式。

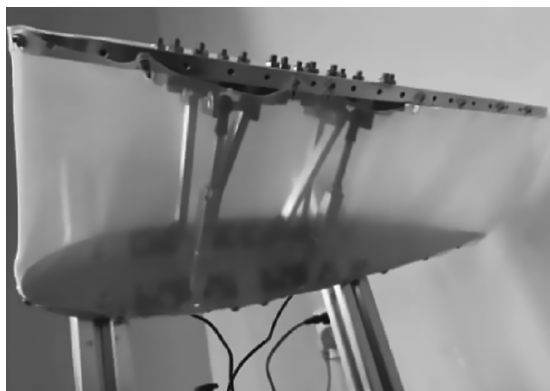


图 35 蒙皮与骨架的不合理连接导致褶皱

Fig.35 Wrinkles due to unreasonable connection between skin and structure

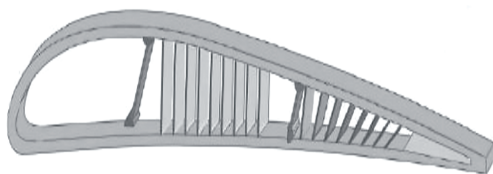


图 36 蒙皮与骨架固连方式

Fig.36 Skin and framework tied together

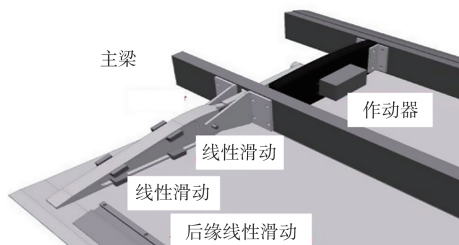
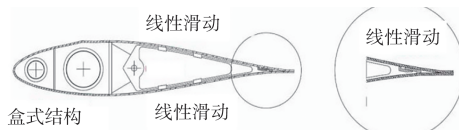


图 37 滑块滑槽连接方式

Fig.37 Slider connection between skin and ribs

4 驱动/控制技术

柔性结构满足变体机翼的承载以及光滑连续变形的要求,实现飞机“能变形”的能力,而驱动/控制技术则为柔性结构提供驱动力和控制策略,在大变形承载条件下与结构

融合,解决飞机“怎么变”的问题。

现有的驱动技术按材料可分为:传统机械系统驱动、传动,记忆合金驱动,压电材料驱动,智能材料驱动、机械传动,磁致伸缩材料驱动等;按驱动部位,又可分为骨架驱动、蒙皮驱动和骨架与蒙皮协同驱动等。传统机械驱动一般与可变形骨架融合在一起,各种驱动方式如图 38~图 49 所示。表 2 对现有智能驱动材料的输出力、输出位移、响应速度、驱动刚度、能量密度等进行了初步梳理。

表 2 现有智能驱动材料

Table 2 Intelligent driving materials available

材料类型	材料特性				
	输出力	输出位移	响应速度	驱动刚度	能量密度
压电陶瓷	中	小	快	高	中
压电聚合物	小	小	中	低	低
电致伸缩	中	小	快	高	中
磁致伸缩	中	小	快	高	中
SMA	大	大	慢	高	高
SMP	小	小	中	低	低

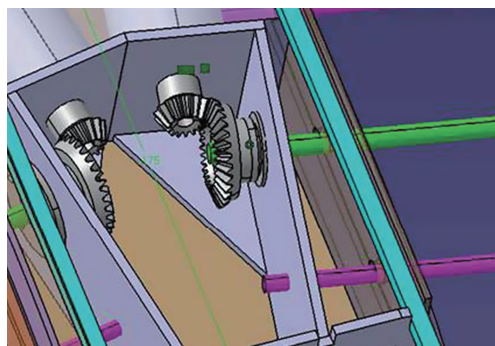


图 38 传统机械系统驱动、传动

Fig.38 Traditional mechanical drive

SMA 驱动主要有形状记忆合金片阵列^[39](见图 39)、扭力管驱动^[40](见图 40)、记忆合金丝分布式驱动(见图 50)等。SMA 的优势在于驱动力大,能承受大应变、多次循环以及大范围的应变率变化(8%),但 SMA 响应速度慢,只适用于准静态变形情况,为使记忆合金发生相变所需的加热及冷却速度很难加快,采用记忆合金驱动结构变形只适合于低频驱动,难以完成诸如不同高度、不同空气升力条件机翼形状的实时驱动,不适用于需要飞机快速响应变体的结构部位。

压电材料多用于结构小尺度变形的驱动控制^[41](见图 41)和振动抑制^[8](见图 42)领域。压电材料同时具有力学和电学性质,既能通过正、逆压电效应实现电能和机械能的

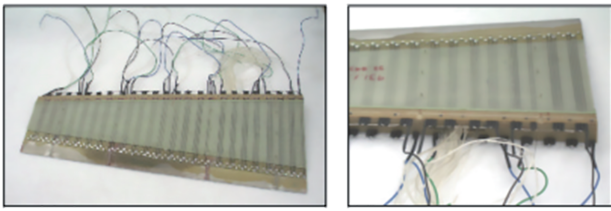


图39 记忆合金片阵列,实现后缘偏转

Fig.39 Arranged SMA sheets to achieve trailing edge deflection

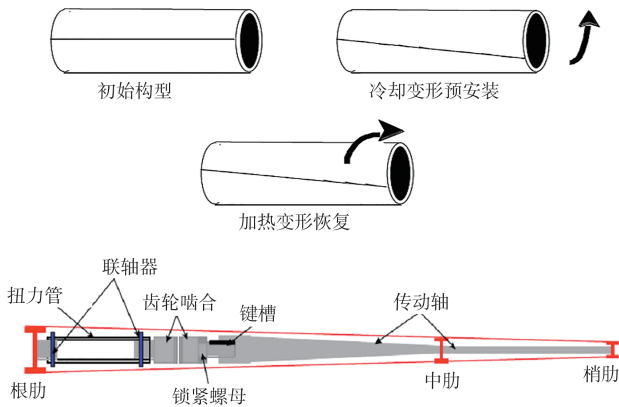


图40 扭力管驱动实现机翼扭转

Fig.40 Torsion tube drives the wing to twist

转换,又具有弹性体的弹性特性。常用的压电材料有石英晶体、压电陶瓷、聚偏二氟乙烯和压电复合材料。压电陶瓷响应速度快,但驱动力较小,极限应变值低,约为 $1000\mu\epsilon$,难以用于应变值多为 $4000 \sim 6000\mu\epsilon$ 的结构,需要研究如何提高压电陶瓷材料的压电应变率。另外,受制备工艺的限制,现有压电陶瓷驱动器^[42-43]多为形状简单的矩形片或圆柱体,如图43、图44所示,需研究对于异形构件如曲面、管件等所需的特殊形状的压电陶瓷材料的制备方法。此外,纤维压电材料^[44](见图45)重量轻,且便于埋设,但自身韧性差,易破坏,使其应用受到一定的限制。在MAS项目中,DARPA还资助发展一种称为紧凑式混合作动器项目(CHAP)的新型压电作动器^[45],这种作动器体积非常小,能布置在狭小的机翼折叠以及前缘空间内,有效缩小连接机构的体积,控制结构重量,如图46所示。

将智能材料驱动与传统机构相结合,放大输出位移,可有效提高其驱动能力,扩大其适用范围。图47展示了机构增强的SMA丝驱动^[46]。

传统机械系统驱动、传动,扭力管驱动,压电叠堆泵驱动,磁致伸缩材料驱动(见图48)属于集中式驱动,多用于类

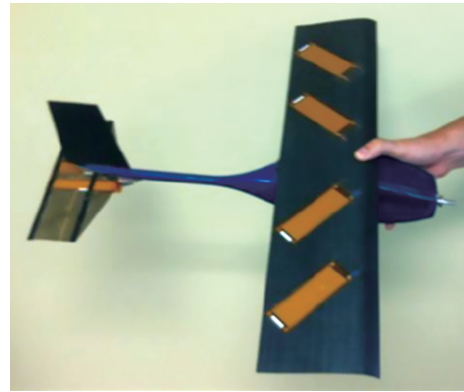


图41 利用压电材料提升机翼滚转能力

Fig.41 Piezoelectric material to help the air model roll

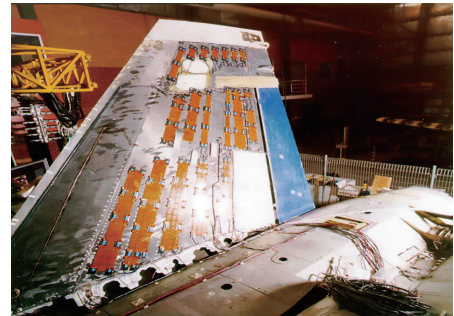


图42 MFC用于消除F-18尾翼颤振

Fig.42 MFC used on F-18 vertical tail to eliminate chatting

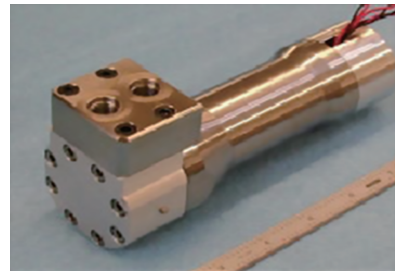


图43 压电叠堆泵驱动

Fig.43 Piezoelectric stack pump



图44 压电超声电机驱动器

Fig.44 Piezoelectric ultrasonic motor

似刚性变体的部位,各种新型的集中式驱动相较于传统机械系统驱动,尤其是在通航等领域应用越来越多的电动作动筒和电动舵机,优势并不明显,反而因技术成熟度不

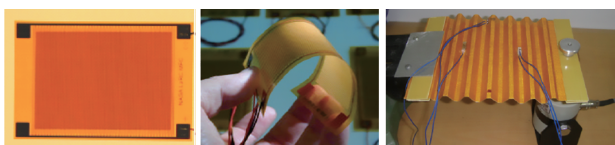
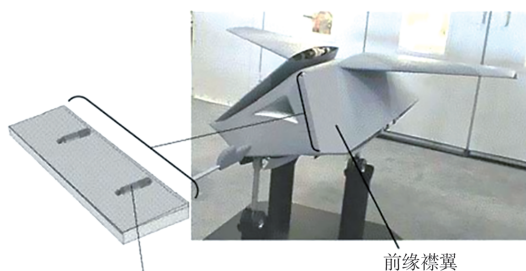


图 45 压电纤维复合材料(AFC、MFC)

Fig.45 Piezoelectric fiber composites



嵌入襟翼的线性作动器

前缘襟翼

图 46 应用于折叠机翼和前缘襟翼的压电作动器

Fig.46 Piezoelectric driver used on folding wing and leading edge flap

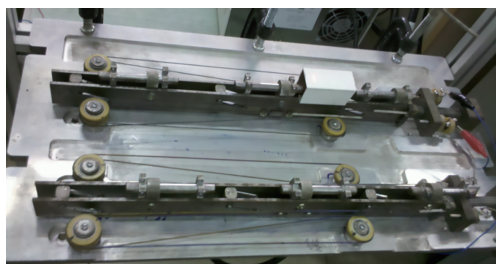


图 47 机构增强的 SMA 丝驱动

Fig.47 Mechanism-enhanced SMA driver

足而存在诸多问题。分布式驱动^[47-48]可以实现大尺度的柔性变体,能够满足飞机大部分变体需求(见图 49),采用形状记忆合金、压电材料等智能驱动器的分布式驱动具有较高的发展前景。如采用形状记忆合金丝分布式驱动翼面形状(见图 50),驱动力均匀,可实现型面的复杂变体等,具有集中式驱动无法实现的优势。但目前分布式驱动有许多核心技术问题需要突破,如在复杂、变化的空气环境中实现驱动系统的有效温度控制和保持,以及如何实现驱动和驱动后翼面的精准控制等。

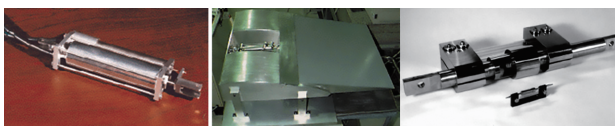
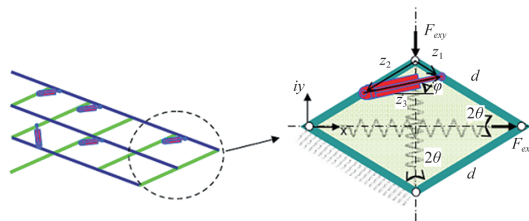


图 48 磁致伸缩材料驱动器

Fig.48 Magnetostrictive driver



(a) 自适应桁架翼肋结构



(b) 剪形机翼机构

图 49 分布式变形机械结构

Fig.49 Distributed deformed structure

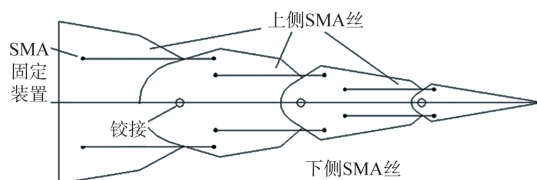


图 50 记忆合金丝分布式驱动

Fig.50 Structure distributed driven by SMA

飞机变形控制系统根据机载传感器和飞控系统发送的飞行状态信息,给遍布于飞机的分布式驱动器施加激励,使其伸缩、弯曲或扭转,驱动柔性结构变形,使飞机达到预想的形体状态,实现对不同飞行状态的适应。图 51 所示为一种变弯度机翼的变形控制方案。

值得注意的是,目前新型的驱动/控制技术大多处于开发与原理验证阶段,变形能力、重量、可靠性等还不能满足飞机上变体应用的要求。

5 状态感知技术

变体飞机的自适应变形能力依赖于状态感知技术。状态感知技术和飞行控制系统为变体机翼自适应变形提供输入和反馈,为变体飞机解决“变到位”的问题。例如,美国 F-14 战斗机机翼为变后掠翼,后掠角的变化为 $20^{\circ} \sim 68^{\circ}$,飞行过程中利用空速管感知飞机速度,再通过控制系统驱动

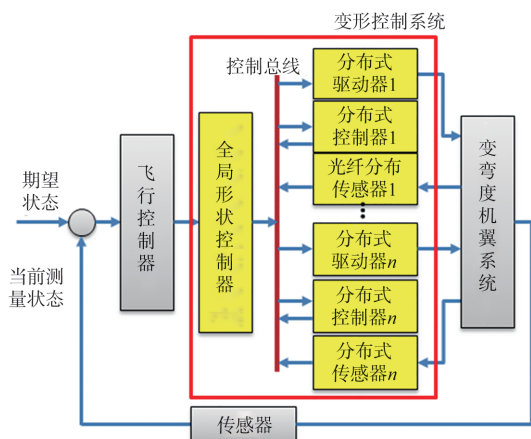


图 51 一种变弯度机翼变形控制方案

Fig.51 A deformation control approach for variable camber wing

机翼后掠角自动改变,最大变化速度可达 $7(^{\circ})/s$,以此来保持操稳性能。

变体飞机需要感知的“状态”信息包括空速、海拔、迎角、过载、角速度、角加速度等飞机整体飞行和运动状态信息,还包括机体的应力、应变、位移、曲率、振动、损伤、转动角度等结构状态信息。飞机飞行状态和运动状态信息来自飞机自身的空速管、高度计、GPS、罗盘等机载传感器和飞控系统,对于飞机而言属于成熟技术,需要解决的问题在于如何在飞控系统中将飞行状态与变体驱动/控制方案耦合,实现飞行包线和飞行性能的全任务优化。

理想的变体结构应为作动、控制和传感一体化结构,如图 52 所示,其中作动器用来改变结构的物理性质和结构形状,并最终实现结构的自适应的变体功能;传感材料用来感知内外部环境信息,受重量和空间尺寸限制,这些传感器通常微小且遍布机翼内部和智能蒙皮中。例如,温度传感器可以实时检测 SMA 丝周围的气流温度,霍尔角度传感器能够测量每个关节转轴转过的角度,压力传感器能够测量蒙皮表面的压力等。部分智能材料除具备变形能力,还具备感知功能和响应功能,由其组成的智能变体结构易于实现作动、控制、传感一体化。

状态感知技术与传统结构的健康监控技术关联紧密,光纤光栅是结构健康监测常用的传感器。光纤光栅能够检测微小的形变,具有灵敏度高、结构适应性好、体积小、重量轻、瞬态响应、抗电磁干扰、长距离传输损耗低的独特优势,能够实现对温度、压力、变形和冲击等 70 多种物理量的检测,适用于大型复杂航空结构的智能检测^[49-50]。在变体飞机柔性蒙皮中植入光纤光栅可以对变体机翼的气动外形进

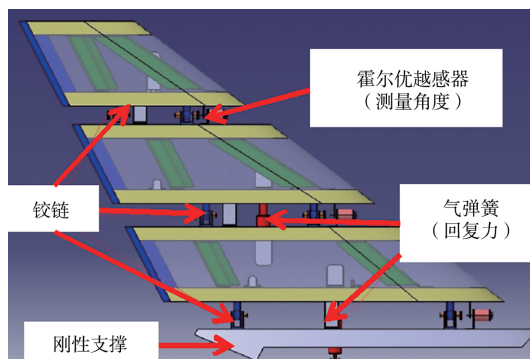


图 52 传感、作动、控制一体结构

Fig.52 Structure with sensors, actuators and controllers integrated

行实时监测^[51],如图 53 所示。例如,欧盟智能飞机结构(Saritsu)项目^[52]的机翼集成的传感器技术包括监测外形、探测损伤,以及影响敏感涂层的光纤和超声技术,如图 54 所示。在局部长度、曲率变化较大的部位,光纤光栅如何避免失效是其后续需要攻关的方向之一。

6 4D 打印技术

经过了多年研究探索,目前具有较高成熟度的高速变体飞机结构技术仍然未得到广泛应用。除了上文提到的用于柔性结构、驱动控制的各种智能材料技术成熟度较低,满足不了使用要求等原因以外,柔性结构及其分布式驱动控制使得结构复杂程度高,各种性能耦合,导致传统制造技术难以实现如此复杂变体结构的制造。传统制造技术也是变体结构技术受限的原因之一。突破传统制造观念限制,协同运用材料、制造及构型设计等技术进行颠覆性创新成为迫切需求^[53]。

增材制造技术(也称 3D 打印)作为一种新兴制造技术正逐步应用于航空器的大型整体化结构和复杂精细结构的工程化制造^[54-55],图 55 给出了目前主要工业用的增材制造技术。4D 打印技术是指将智能材料或智能材料与传统材料混合进行 3D 打印成形,打印出的构件可根据特定条件或环境的激励变化做出响应,改变构件的构型、刚度、功能等。智能结构 4D 打印技术,可实现智能材料元件的自组装、多功能和自我修复等,也能够制造具有可调节形状、特性或功能的动态结构,这对于变体飞机结构的制造具有独特的潜力。例如,美国空军研究实验室(AFRL)采用增材制造技术使用软性和刚性材料设计制成的飞机机翼多材料共形控制面,与传统襟翼相比,具有更高的空气动力效能,结构完整性和操控性能也更为出色。再如,利用形状记忆聚合物通

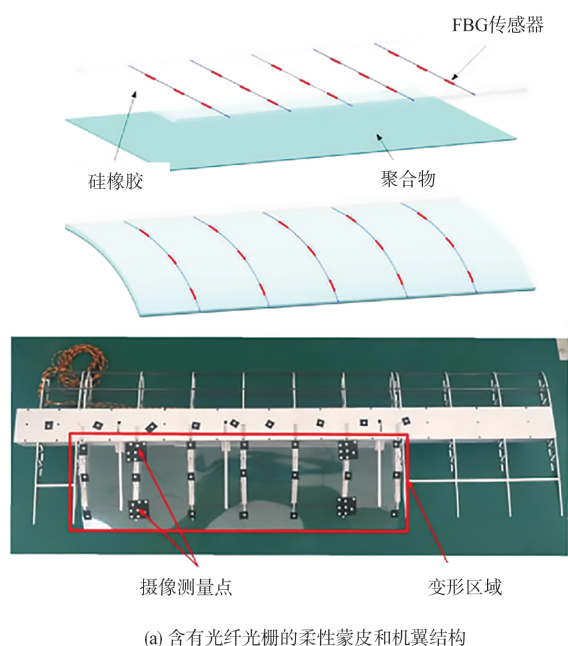


图53 光纤光栅可以对机翼外形进行实时监测(单位:mm)

Fig.53 FBG monitors the wing profile in real time

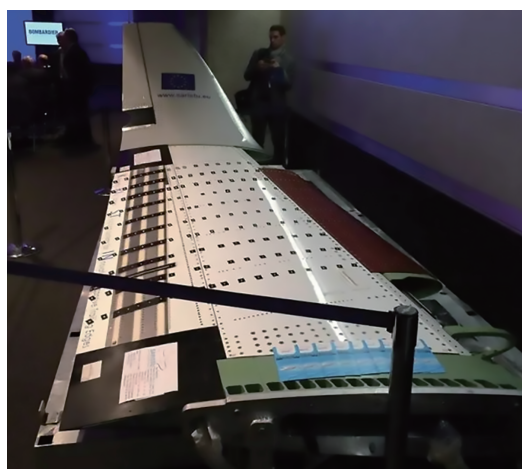


图54 欧盟智能飞机结构(Saritsu)项目

Fig.54 Smart intelligent aircraft structures (Saritsu) project by EU

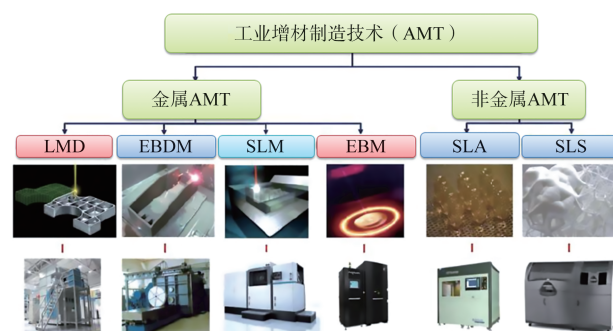


图55 主要工业用增材制造技术

Fig.55 Main additive manufacturing technology for industrial application

过4D打印制造变体机翼的无缝柔性蒙皮,能够满足变体飞行器连续、光滑变形和轻质的需求^[56]。目前,形状记忆合金、形状记忆聚合物、压电材料、硅橡胶、磁驱动材料等智能材料都能够通过增材制造技术实现制备^[57],如图56所示。

4D打印的变体结构特征包括“拓扑结构”“点阵结构”“多材料复合”等^[53]。拓扑优化能够利用优化的手段保证一定约束下获取最优的结构性能,对变体机翼结构展开考虑多物理场耦合、多目标的拓扑优化设计,能够使结构设计摆脱对初始构型和工程师经验的依赖,可能获得完全意想不到的创新构型,可以实现零泊松比、负泊松比等结构构型。拓扑优化与增材制造技术结合^[58],能够进一步加强变体机翼结构的可制造性。点阵结构是一种性能优良的新型多功能优化设计载体,可以有效融合防/隔热、隐身、变体、减振



图56 智能材料通过4D打印制备

Fig.56 4D printed smart materials

等功能,其单胞结构周期性或非周期性排列的结构构型,在力、热、声等领域具有独特的优异性能。通过智能材料点阵结构的4D打印^[59]能够缓解变体机翼结构^[33]既要承载又要变形的矛盾,将多种形态、多种功能的柔性可变形结构简化为设计点阵单胞以及单胞变化规律的问题,有效降低多功能结构的复杂程度,如图57、图58所示。4D打印还能够制造将异种材料复合在一起的梯度结构^[60],以实现性能、功能的梯度变化,如通过将不同激励诱导伸缩的材料复合在一起,改变温度或湿度等激励,可实现构件不对称的弯曲偏转,如图59所示。

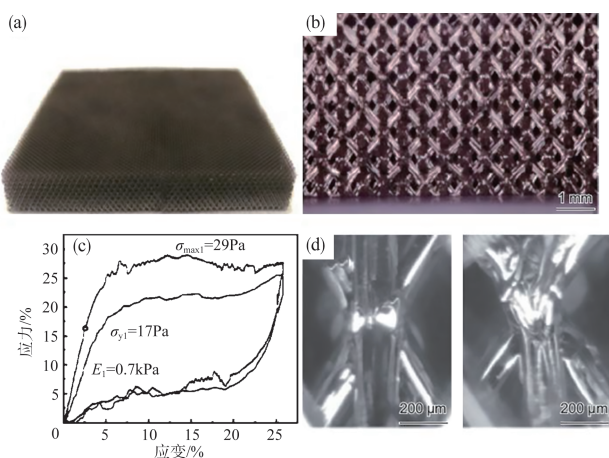


图57 4D打印多功能点阵结构

Fig.57 4D printing multifunction lattice structure



图58 基于点阵结构设计的变体机翼

Fig.58 Morphing wing based on lattice structure

随着变体研究回归仿生,模仿鸟类或昆虫的特殊飞行方式,4D打印技术采用超轻材料和点阵结构、蜂窝结构等柔性结构制造的柔性机翼^[61],其空气动力学和气动声学特性具有良好的可设计性,成为未来变体飞行器设计制造的通用解决方案,如图60所示。

4D打印技术刚刚兴起不久,面临可打印智能材料种类少、智能材料打印后变形性能下降、缺少工程实用的智能结构设计、难以精确驱动和控制等挑战,4D打印的智能

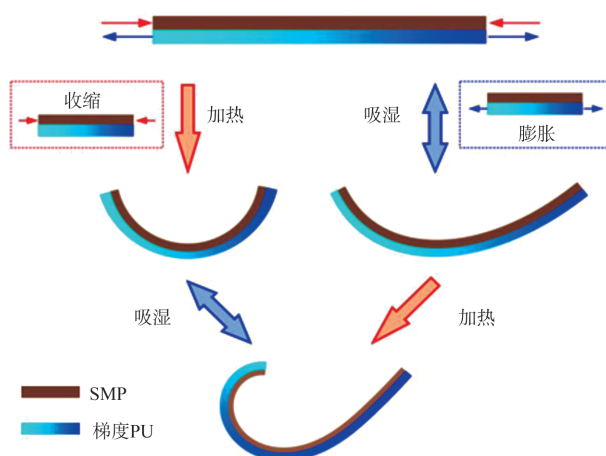


图59 异质材料梯度结构示意图

Fig.59 Illustration of multi-material structure

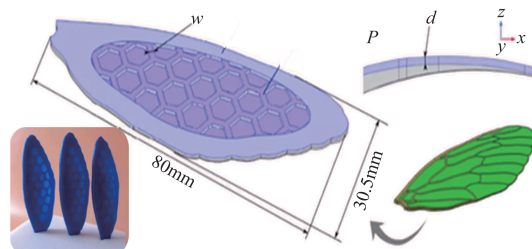


图60 采用4D打印技术制造的仿生扑翼

Fig.60 Bionic wings made by 4D printing technology

变体结构的力学行为、失效特征与可靠性研究也尚未启动,但该技术对智能结构领域的拓展依然让人非常期待,相信4D打印的智能结构是未来变体飞机的重要支撑。

7 结论

变体飞机能够有效应对不同飞行状态和不同任务需求对飞机布局设计的挑战,是未来飞行器的重要发展方向,但同时也对智能材料、变体结构、状态感知与控制等提出了新的要求。本文首先简述了变体飞机的背景和发展历程,然后提出了变体飞机结构的组成以及能力需求,最后就变体飞机结构所涉及的关键技术进行了分析和总结。得到以下结论:

(1) 变体飞机结构,除轻质化、长寿命、高可靠性等传统飞机结构能力需求外,大变形能力、连续光滑变体能力、变体过程中具备承载能力,以及变体响应时间等是变体飞机结构研制的核心需求。

(2) 变体飞机结构涉及柔性结构技术、驱动/控制技术、状态感知技术等关键技术,智能材料柔性结构、分布式驱动/控制系统与微小传感器一体化是未来变体结构的主

方向。

(3) 当前变体飞机结构技术成熟度较低, 现有案例设计多针对载荷和刚度要求较低的低速微型无人机或中高速小型无人机展开, 工程化应用还需大量基础性研究和工程化研制。

(4) 采用智能材料与增材制造相结合的4D打印技术对于变体飞机结构研制具有独特优势, 未来在工程应用方面具有巨大的潜力。

AST

参考文献

- [1] 董二宝. 智能变形飞行器结构实现机制与若干关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
Dong Erbao. Research on realization mechanism and some key technologies of smart morphing aircraft structures [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [2] 乐挺, 王立新, 艾俊强. 变体飞机设计的主要关键技术[J]. 飞行力学, 2009, 27(5): 5.
Yue Ting, Wang Lixin, Ai Junqiang. Key technologies in morphing aircraft design[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(5): 5. (in Chinese)
- [3] Joshi S, Tidwell Z, Crossley W, et al. Comparison of morphing wing strategies based upon aircraft performance impacts[C]//45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004: 1722.
- [4] Weisshaar T A. Morphing aircraft technology: new shapes for aircraft design[D]. Purdue University, 2006.
- [5] McGowan A M R, Vicroy D D, Busan R C, et al. Perspectives on highly adaptive or morphing aircraft[R]. NATO RTO AVT-168, 2009.
- [6] Pitt D M, Dunne J P, White E V, et al. SAMPSON smart inlet SMA powered adaptive lip design and static test[C]//Proceedings of the 42nd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Seattle, WA, 2001: 16-20.
- [7] Pitt D M, Dunne J P, White E V. Design and test of a SMA powered adaptive aircraft inlet internal wall[C]//43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2002.
- [8] Wickramasinghe V, Chen Y, Zimcik D. Experimental evaluation of a full-scale advanced hybrid buffet suppression system for the f/a-18 vertical tail[C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 2006: 2136.
- [9] Kudva J N, Martin C A, Scherer L B, et al. Overview of the DARPA/AFRL/NASA smart wing program[C]//Smart Structures and Materials 1999: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. SPIE, 1999.
- [10] Perkins D, Reed J, Havens E. Morphing Wing Structures for Loitering Air Vehicles[C]//AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004.
- [11] Perkins D A, Reed J J L, Havens E. Morphing wing structures for loitering air vehicles [C]// Proceedings of the 45th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, 2004: 1-10.
- [12] Wang Q, Chen Y, Tang H. Mechanism design for aircraft morphing wing[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 2012: 1608.
- [13] Mestrinho J, Gamboa P, Santos P. Design optimization of a variable-span morphing wing for a small UAV[C]//52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 2011: 2025.
- [14] Arrison L, Birocco K, Gaylord C, et al. 2002-2003 AE/ME morphing wing design[R]. Spring Semester Final Report, 2003.
- [15] Cadogan D, Graham W, Smith T. Inflatable and rigidizable wings for unmanned aerial vehicles[C]//2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Conference, and Workshop & Exhibit, 2003: 6630.
- [16] Miller E J, Cruz J, Lung S F, et al. Evaluation of the hinge moment and normal force aerodynamic loads from a seamless adaptive compliant trailing edge flap in flight[C]//54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016: 38.
- [17] Long J, Hale M, Mchenry M, et al. Functions of fish skin: Flexural stiffness and steady swimming of longnose gar *lepisosteus osseus*[J]. Journal of Experimental Biology, 1996, 199(10): 2139-2151.
- [18] Peel L, Mejia J, Narvaez B, et al. Development of a simple morphing wing using elastomeric composites as skins and actuators [J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 131(9): 1-8.

- [19] Andersen G, Cowan D, Piatak D. Aero elastic modeling, analysis and testing of a morphing wing structure[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, 2007.
- [20] Flanagan J, Strutzenberg R, Myers R, et al. Development and flight testing of a morphing aircraft, the Nextgen MFX-1[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, 2007.
- [21] Bye D, McClure P. Design of a morphing vehicle[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, 2007.
- [22] Olympio K, Gandhi F. Modeling and numerical analyses of skin design concepts[C]//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 17th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 2009: 2115.
- [23] Olympio K, Gandhi F. Zero-v cellular honeycomb flexible skins for one dimensional wing morphing[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural, and Materials Conference. Honolulu, 2007:1735.
- [24] Kudva J N, Sanders B P, Pinkerton-Florance J L, et al. Overview of the DARPA/AFRL/NASA smartwing phase II program[C]// SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2001:383-389.
- [25] Wildschek A, Havar T, Platner K. An all-composite, all-electric, morphing trailing edge device for flight control on a blended-wing-body airliner[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2010, 224(1):1-9.
- [26] Philen M, Shan Y, Bakis C, et al. Variable stiffness adaptive structures utilizing hydraulically pressurized flexible matrix composites with valve control[C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference. 2006: 2134.
- [27] Shan Y, Bakis C E. Flexible matrix composite actuators[C]//20th Technical Conference of the American Society for Composites 2005. 2005: 1712-1731.
- [28] Shan Y, Philen M, Lotfi A, et al. Variable stiffness structures utilizing fluidic flexible matrix composites[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(4): 443-456.
- [29] Deepak S R, George A L, Mary F, et al. Aircraft structural morphing using tendon-actuated compliant cellular trusses. [J] Journal of Aircraft, 2005, 42(6):1614-1620.
- [30] Sofla A Y N, Elzey D M, Wadley H N G. Shape morphing hinged truss structures[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(6):65012.
- [31] Cramer N B, Cheung K, Swee 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.
- [32] 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, 2017: 4273.
- [33] Cramer N B, Cellucci D W, Formoso O B, et al. Elastic shape morphing of ultralight structures by programmable assembly [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(5): 55006.
- [34] Elzey D M, Sofla A Y N, Wadley H N G. A bio-inspired, high-authority actuator for shape morphing structures[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5053:92-100.
- [35] Woods B K S, Wereley N M, Friswell M. Preliminary investigation of a fishbone active camber concept[C]//ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Stone Mountain, Georgia, USA, 2012.
- [36] 陈小雨, 杨睿, 李扬, 等. 变体飞行器的折转翼尖设计及分析 [J]. 现代机械, 2021(4):5.
Chen Xiaoyu, Yang Rui, Li Yang, et al. Design and analysis of folding wing tip for morphing aircraft[J]. Modern Machinery, 2021(4):5. (in Chinese)
- [37] Campanile L F, Sachau D. The belt-rib concept: A structronic approach to variable camber [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(3):215-224.
- [38] Ricci S, Scotti A, Terraneo M. Design, manufacturing and preliminary test results of an adaptive wing camber model[C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 2006: 2043.
- [39] Martin C A, Carpenter B F. Design, fabrication, and testing of

- scaled wind tunnel model for the smart wing phase II program [J]. *Proc Spie*, 2002, 4698: 44-52.
- [40] 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]//1999 Symposium on Smart Structures and Materials. International Society for Optics and Photonics, 1999: 260-269.
- [41] Pankonien A, Inman D J. Experimental testing of spanwise morphing trailing edge concept[C]//SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics, 2013: 868815.
- [42] Regelbrugge M, Lindler J, Anderson E. Design model for piezohydraulic actuators[C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2003: 1640.
- [43] 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 II wind tunnel model[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2004, 15(4): 279-291.
- [44] Wilkie A W K, Bryant R G, High J W, et al. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2000, 3991: 323-334.
- [45] 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.
- [46] 张明德. 变厚度机翼结构设计及精确控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- Zhang Mingde. Research on architectural design and accuracy control of a variable-thickness wing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [47] Austin F, Rossi M J, Van N W, et al. Static shape control for adaptive wings[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(9): 1895-1901.
- [48] James J J, Brian S, Terrence J, et al. Optimal actuator location within a morphing wing scissor mechanism configuration[J]. *Smart Structures and Materials*, 2006, 6166: 616603.
- [49] 袁慎芳, 邱雷, 吴键, 等. 大型飞机的发展对结构健康监测的需求与挑战[J]. *航空制造技术*, 2009(22): 6.
- Yuan Shenfang, Qiu Lei, Wu Jian, et al. Challenge in structural health monitoring of large aircraft development [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009(22): 6. (in Chinese)
- [50] 常飞, 韩庆, 尚柏林. 光纤技术在军用飞机结构健康监测中的研究[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(10): 7.
- Chang Fei, Han Qing, Shang Bolin. Application of FBG on flight vehicle structural health monitoring systems[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(10): 7. (in Chinese)
- [51] 张雄雄, 宋言明, 孟凡勇, 等. 变体飞行器柔性复合蒙皮植入式光纤形状传感[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 8.
- Zhang Xiongiong, Song Yanming, Meng Fanyong, et al. Flexible composite skin embedded optical fiber shape sensing for variant aircraft[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 8. (in Chinese)
- [52] Piet C W. Smart intelligent aircraft structures (SARISTU) [M]. Springer, 2011.
- [53] 苏亚东, 王向明, 吴斌, 等. 4D打印技术在航空飞行器研制中的应用潜力[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 11.
- Su Yadong, Wang Xiangming, Wu Bin, et al. Application potential of 4D printing technology in development of aircraft [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(2): 11. (in Chinese)
- [54] 王向明. 飞机新概念结构设计与工程应用[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(4): 1-7.
- Wang Xiangming. New concept structure design and engineering application of aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(4): 1-7. (in Chinese)
- [55] 温学, 何志平. 金属材料增材制造技术在直升机中的应用发展研究[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(9): 58-65.
- Wen Xue, He Zhiping. Application and development of additive manufacturing technology in helicopter[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(9): 58-65. (in Chinese)
- [56] 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 aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 29-45. (in Chinese)
- [57] 陈花玲, 罗斌, 朱子才, 等. 4D打印: 智能材料与结构增材制造技术的研究进展[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(2): 12.
- Chen Hualing, Luo Bin, Zhu Zicai, et al. 4D printing: Progress

- in additive manufacturing technology of smart materials and structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2):12. (in Chinese)
- [58] 刘书田, 李取浩, 陈文炯, 等. 拓扑优化与增材制造结合:一种设计与制造一体化方法[J]. 航空制造技术, 2017(10): 26-31.
Liu Shutian, Li Quhao, Chen Wenjiong, et al. Combination of topology optimization and additive manufacturing: An integration method of structural design and manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(10): 26-31. (in Chinese)
- [59] Schaedler T A, Jacobsen A J, Torrents A, et al. Ultralight metallic microlattices[J]. Science, 2011, 334(6058): 962-965.
- [60] 宋正义. 复杂组分梯度仿生3D打印系统及其3D/4D打印应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Song Zhengyi. Research on biomimetic 3D printing system towards complex composition gradient and its 3D/4D printing application [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [61] Zhilyaev I, Aneer N, Kottapalli A G P, et al. Fully-printed metamaterial-type flexible wings with controllable flight characteristics[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2022, 17(2): 25002.

Smart Structure Technology Progress of Morphing Aircraft

Wu Bin, Du Xuzhen, Wang Jiaying

AVIC Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China

Abstract: A morphing aircraft can change its configuration to hold the best flight state. For this reason, a morphing aircraft has the ability to complete many different tasks. It is a major technical direction of aircraft. Based on the background of morphing plane, this paper expounds the structure composition and capability requirements. Three technologies, including flexible structure technology, drive/control technology and state perception technology, are described in detail about the research status and development direction. This paper points out that the main direction of the future morphing plane structure is the integration of smart material and flexible structure, distributed drive control system and micro sensors. Furthermore, this paper points out that 4D printing technology has great potential in design and manufacturing intelligent material and flexible structure. This study provides a reference of smart structure design and key technology research for morphing aircraft, and has guiding significance for the development of future morphing aircraft.

Key Words: morphing structure; flexible structure; distributed drive/control system; state perception; 4D printing