变体飞行器的气动与多学科设计 需求



王跃¹,马建华¹,韩忠华¹,宋文萍¹,杨字² 1.西北工业大学飞行器基础布局全国重点实验室,陕西西安710072 2.中国飞机强度研究所,陕西西安710072

摘 要:变体飞行器可以通过局部或整体变形来改变飞行器的外部形状,实时适应多种任务需求,在多种飞行环境下保持气动性能最优,已经成为21世纪航空航天领域的前沿研究热点。本文首先梳理了变体飞行器的气动与总体设计、结构、控制、噪声、隐身之间的联系,然后针对变体飞行器气动设计面临的任务需求,阐述了增升减阻、稳定性和操纵性、降低气动噪声以及增强飞行器隐身性等气动与多学科设计对不同变形方式的需求,最后对变体飞行器关键技术和未来发展方向进行了展望,为变体飞行器气动与多学科设计的发展提供参考。

关键词:变体飞行器;气动设计;增升减阻;稳定性和操纵性;降低气动噪声;增强飞行器隐身性

中图分类号:V211

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.05.002

当前,民用和军事领域都对飞行器提出了更高的要求, 要求新一代飞行器能够在变化很大的飞行环境(高度、马赫 数)下和在执行多种任务(如起降、巡航、机动、盘旋、攻击 等)时始终保持良好性能。传统飞行器通常是采用定点设 计优化,仅能够在设计点附近保持高性能,超出设计点后飞 行性能可能会急剧下降,不能满足越来越多样化的飞行需 要^[1-2]。因此,变体飞行器这一概念应运而生。变体飞行器 是指采用智能材料或结构,通过局部或整体的外形参数改 变,主动、自适应、连续变化外形,使飞行器产生更优的气动 及操纵性能,使飞行轨迹、高度和速度等机动多变,提高对 环境和任务的适应能力,并对多种飞行环境保持性能最优 的飞行器^[3-4]。以机翼平面为基准,变体飞行器的变形方式 可以分为面内变形、面外变形和翼型变形三类,如图1^[5-6] 所示。

变体飞行器设计是多学科交叉耦合的系统工程,面临 总体、气动、结构、控制等诸多关键技术问题。其中,提升气 动性能是变体飞行器发展的首要目标之一。因此,本文针 对以气动为核心的变体飞行器多学科设计要求,详细阐述 了在面对不同气动与多学科设计要求时对变体飞行器变形





形式的需求(见表1),探讨了制约变体飞行器发展的关键技术,并对未来的发展方向进行了展望。

收稿日期: 2023-11-01;退修日期: 2024-01-10;录用日期: 2024-03-15 基金项目: 陕西省自然科学基金(2023-JC-ZD-01)

引用格式: Wang Yue, Ma Jianhua, Han Zhonghua, et al. Aerodynamics and multidisciplinary design requirements on morphing aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(05): 16-27. 王跃, 马建华, 韩忠华, 等. 变体飞行器的气动与多学科设计需求[J]. 航空 科学技术, 2024, 35(05): 16-27.

表1 不同气动设计要求对变形形式的需求

 Table 1
 Different aerodynamic design requirements for deformation forms

与动设计需求		本 形 书 才
(切反打而水		文 /D/D式
增升减阻	增升	变展长、变弦长、折叠机翼、机翼扭转、 屏中恋曲
		 庞 问 马 田
	减阻	变形翼尖、变后掠、变厚度、变弯度
稳定性和操纵性		机翼扭转、变弯度
降低气动噪声		机翼扭转、连续变弯度
增强隐身性		变体尾翼

1 变体飞行器气动设计需求

相较于传统的固定翼飞行器,变体飞行器在气动设计 上的考量更为复杂。不仅涵盖了总体设计的协同效应,还 包括了气动布局对结构变形及耐久性的直接影响,以及气 动特性和飞行控制系统的高度整合。此外,还必须顾及气 动噪声的抑制措施以满足环境友好性要求,并且在现代航 空领域中,气动设计更需兼顾飞行器的隐身特性。因此,变 体飞行器的气动设计面临多学科、多变量、多约束难题。

1.1 气动与总体设计相协调

变体飞行器需要兼顾多种飞行工况的最优气动性能, 所以在气动与总体设计上与其他传统飞行器存在较大差 别。变体飞行器气动设计需要解决巡航状态下翼型设计和 机翼平面形状的气动优化和兼顾不同工况下通过变形达到 气动性能最优的问题。而总体设计的任务则是承担根据多 元任务需求,系统整合不同变形形态下气动与其他关键学 科领域之间的协同问题。因此,变形形式的选择直接关系 到飞行器设计的成功与否^[7]。洛克希德-马丁公司通过变 形飞机结构(MAS)项目开发了一种折叠翼变体飞行器方 案^[8],如图2所示。该飞行器可以根据需要从侦察机迅速变 为轰炸机。在不同飞行需求下变化机翼平面形状,机翼全 部展开有利于起飞或巡航,机翼全部收缩有利于高速或机 动飞行。与折叠状态相比,机翼展开状态的升阻比增加了 52%,提升了飞行器的低速和高速性能^{19]}。但是,由于当时 对折叠机翼变形形式的研究尚不成熟,导致该项目研究工 作失败。因此,在进行变体飞行器的气动设计过程中,必须 将气动设计与总体设计紧密结合考虑[10]。

1.2 气动与结构设计相制约

变体飞行器的气动设计需要考虑到变形结构的可实现 性。变体飞行器机翼相比常规飞行器机翼,内部有更为复 杂的运动机构和附加组件。一方面,要考虑机翼在变形前



图 2 折叠翼变体飞机^[8] Fig.2 Folding wing morphing aircraft^[8]

后的完整性对整体气动外形的影响程度,确保变形过程不 会破坏气动性能;另一方面,变体结构所带来的额外重量 (质量)不可避免,这无疑会增大飞机整体重量,从而引发重 量增加与气动收益之间的矛盾。具体而言,即新增加的结 构部件重量必须与其所实现的气动性能提升相权衡,以在 满足变形功能需求的同时,最大限度地保持飞行器的气动 性能。

Alulema^[11]研究了一种变展长机翼对小型无人机的气动性能影响,如图3所示。研究结果显示,机翼变展长可以提高无人机的气动性能。然而,由于增加了作动系统和翼 盒结构的部件和机构,无人机总重量增加,导致飞行器变形带来的气动收益被抵消。

1.3 气动与控制设计相匹配

变体飞行器的气动设计对飞行器的稳定性和操纵性至



图 3 变展长机翼的翼箱结构和伸缩机构细节视图[11]



关重要。理想的操纵性意味着飞行员可以高效、准确且轻 松地驾驭变体飞行器,实现对机体形态的精准调控。而卓 越的稳定性则保证了飞行器在变形过程中以及各种飞行状 态下都能够保持良好的可控性和安全性,从而确保飞行器 无论是在巡航状态还是在变换外形时,都能维持最优的气 动性能,进而大幅提升整体飞行安全水平与任务完成效率。

研究发现,变体飞行器外形的改变尤其是大变形会引起重心位置、转动惯量、机翼面积和展长等物理参数的变化,这些参数的变化会导致气动力与力矩等气动参数产生较大变化,进而引起变体飞行器的动态特性发生改变。机 翼翼展的增加会导致滚转惯性的增加,降低飞行器的滚转控制,当翼尖垂直位移占机翼展长比例大于30%时,飞行器不稳定性的安全裕度会降低^[12]。苏晓东^[13]设计了一种U形变体无人机,如图4所示。在改变气动外形后,变体无人机的气动焦点前移了7.5%,静稳定裕度从-5%变为4.3%,即飞行器由纵向静稳定变为静不稳定。



图 4 U 形变体无入机^(1,4) Fig.4 U-shaped morphing unmanned aerial vehicle^[13]

1.4 气动与降噪设计综合平衡

降低气动噪声在现代客机气动设计过程中的地位逐渐 提升。未来空中交通规模不断扩大,机场周围和空中交通 路线沿线的人口密度不断增加,将给机场周边噪声控制带 来巨大挑战^[14]。随着大涵道比涡轮风扇发动机的使用,加 上消声短舱、V形花瓣喷嘴等发动机降噪方法的应用,传统 增升装置前缘缝翼产生的机体气动噪声已成为主要的噪声 声源^[15-16]。变体飞行器的连续变弯度机翼可以替代传统增 升装置,消除缝翼和襟翼,表面光滑变形可以有效降低气动 噪声。波音公司开展过光滑变后缘的风洞试验,试验速度 范围从*Ma*0.2到*Ma*2。风洞试验结果显示,在*Ma*0.7到 *Ma*0.9时,连续变后缘弯度机翼阻力系数相较于传统加装 增升装置的机翼最大降低了18%。然而在*Ma*2时,其阻力 系数反而增大了13%^[17]。这意味着采用光滑变后缘技术虽 然能够在一定程度上通过平滑变形来有效抑制气动噪声, 但是这一特性也可能限制飞行器无法在所有飞行条件下均 实现气动性能的全局最优。因此,如何在确保飞行器维持 优异气动性能的同时,又能有效地降低气动噪声,成为一个 亟待解决的关键问题。

1.5 气动与隐身设计折中平衡

近年来,飞行器防御技术受到各主要军事大国重视,部 分国家已经逐步建立起对飞行器具有拦截能力的防空反导 体系,并已验证了拦截能力。因此,军用飞行器气动设计必 须着眼于现在及未来潜在的拦截威胁,采取必要的技术措 施尽可能地提升其突防能力。而隐身技术是其中一项极为 重要且效果显著的技术手段^[18]。在飞行器气动设计中,机 身的截面形状通常被设计成接近于圆形,其浸润面积最小, 降低了飞行器的飞行阻力。但是,圆形的机身截面不利于 雷达隐身。圆形的机身剖面导致电磁波无论从哪个方向照 射,雷达散射截面都比较大。如图5所示,美国的F-117A 战机为了减小雷达截面积(RCS),飞机外形完全由平面构 成。不光滑的飞机表面带来了机动性很差、飞行速度慢、巡 航半径小等缺点。变体飞行器需要在飞行过程中改变外 形,而外形的改变是否会降低隐身性是一个待研究的 问题。



图 5 F-117A 攻击机 Fig.5 F-117A attack aircraft

2 不同气动设计需求下对变形形式的选择

飞行器的技术指标是以飞行器任务需求为出发点,不同种类的飞行器因为执行的任务各异,对飞行器的气动性能需求也不同。变体飞行器不同的变形方式对于飞行器气动性能的影响规律不同,带来的气动收益也存在差异。如何为变体飞行器选择合理的变形形式以满足不同的气动与 多学科设计需求是变体飞行器研究的一个基础问题。

对于现代民用航空领域来说,经济性和安全性无疑是 客机设计中首要关注的核心要素。而客机的燃油消耗主要 在巡航阶段。如何在确保飞行稳定性的前提下有效地降低 燃油消耗是一项艰巨的任务。此外,21世纪航空市场对噪 声限制标准的日益严苛,对变形形式的选择首要目标之一 便是提高巡航阶段升阻比和降低起降过程中的噪声水平。 对于战斗机,其气动设计不仅要满足飞行器的升阻性能,而 且要兼顾在复杂战斗环境中所需的快速、灵活、敏捷的机动 能力,同时还要具备高隐身性以应对复杂的战斗环境和作 战能力。因此,对于变形形式的需求主要是提升操纵性和 隐身性。大型高空侦察无人机对于变形形式的需求则侧重 在长时间巡航过程中维持较高的升阻比和较低的能量损 耗,从而确保续航能力。而小型无人机更加注重飞行过程 中的控制性,对于变形形式的需求是可以提高巡航升阻比 和操纵性。宽速域高超声速飞行器对于变形形式的选择是 既能保证在高超声速巡航阶段保持优异的气动性能,又要 充分考虑低速起飞和爬升阶段的适应性,力求在不同速度 区间内实现整体性能的最大化。

2.1 增升减阻对于变形形式的需求

增升和减阻是气动设计的两个首要目标。它们互相影 响并共同决定了飞行器的气动性能。增升和减阻可以通过 多种方式来实现。它们之间存在一定的权衡关系。一些增 升措施可能会在一定程度上加剧飞行器的阻力;而一些减 阻措施可能会降低飞行器的升力。因此,在进行气动设计 时,关键在于全面权衡和协同考虑升力增强与阻力减少的 各项要素,从而选出最为理想的气动设计方案。

对于变体飞行器,可以实现增升减阻需求的变形方式 主要包括变展长机翼、变弦长机翼、伸缩机翼、翻转机翼、变 形翼尖、变后掠机翼、机翼扭转、机翼展向弯曲、变厚度和变 弯度机翼等。

2.1.1 变展长和变弦长机翼:提高低速升力,增加升阻比

增加机翼展弦比是提高升力的有效手段之一。采用变 展长和变弦长机翼,可以灵活地增大机翼的展弦比及机翼 面积,从而达到显著提升飞行器升力的目的。

Santos^[19]设计了一种变展长概念飞机,如图6所示。机 翼展长可变化区间为1.55~2.5m。该飞行器在低速时,升阻 比最高可提升35%。

肖国华等^[20]将变形技术应用到导弹领域,用变形机构 实现水平翼面的快速重构,提出一种从固定翼内部伸出弹 翼的伸缩变展长形式。首先对8种外形伸缩翼导弹进行外 形优选,最终确立采用两段伸缩翼形式,如图7所示。对气



图 6 Santos^[19]设计的变展长机翼 Fig.6 Santos^[19] designed variable-span wing

动仿真结果分析发现,采用具有一定后掠角的两级伸缩变 形模式时,导弹的升阻比最大,纵向静稳定性最好。并且 对伸缩翼伸出时的马赫数以及飞行迎角进行优化设计,使 全飞行剖面导弹的综合作战效能最佳。

Sadique^[21]研制了一种适用于小型无人机的新型柔性 变弦长变弯度机翼。变形机翼可以实现高达10%的弦长和 ±20°的弯度变化。机翼表面覆盖弹性蒙皮,以保持其气动 外形,同时可以用于变形。对其进行二维气动分析,比较了 变形翼型相对于基准翼型和带襟翼翼型的气动性能。气动 分析结果表明,相对于基准翼型和带襟翼翼型,弦长的增加 提高了升力系数和升力线斜率,而弯度改变提高了大迎角 时的气动性能。



Fig.7 Oretical shape diagram of the three two-stage telescopic wing missiles^[20]

2.1.2 伸缩机翼和翻转机翼:增加低速升力,增加升阻比,平 衡低高速状态

伸缩翼和翻转翼可以在不同飞行环境下通过翼面的伸 缩和翻转完成特定的飞行任务。当机翼伸展时,增加低速 升力,提高升阻比,增加巡航时间和巡航距离;当机翼翻转时,增大飞行器的最大飞行速度,降低飞行阻力^[23]。

焦子涵等^[23]为解决高超声速巡航飞行器地面水平起飞 和高速巡航飞行气动性能的矛盾,提出了两种变形布局方 式:伸缩翼布局和翻转翼布局,如图8所示。在起飞时将机 翼伸展,高速飞行时收起。通过风洞试验比较了两种布局 下的低速气动特性。风洞试验结果表明,在增加相同机翼 面积时,伸缩翼在起飞状态升力增加了68%,但同时阻力增 加了35%;翻转翼在起飞状态升力增加了42%,阻力增加了 15%。伸缩翼或翻转翼布局具有明显的升力优势,说明亚 声速状态通过伸缩翼或翻转翼增加机翼展弦比是增升的有 效手段。



wing configuration^[23]

2.1.3 变形翼尖:降低诱导阻力

大型民航客机在巡航状态下诱导阻力约占总阻力的 40%;在低速和大迎角飞行工况下,诱导阻力占60%。因 此,降低诱导阻力可以极大地提高民用客机巡航阶段的升 阻比并降低燃油消耗,增加飞机航程^[24-26]。因此,变形翼尖 在减少诱导阻力方面具有很大的研究潜力。波音777X客 机采用了一种新型铰链折叠翼尖设计,如图9所示。该设 计在飞行期间可以有效降低诱导阻力^[27]。Cooper^[28]对某型 喷气式飞机的变形翼尖进行了初步研究,评估了该变形翼 尖相对于功率和重量作为罚函数的气动收益。研究发现, 使用变形翼尖装置可以节省约2%的燃油消耗。

2.1.4 变后掠机翼:增加低速升力,降低高速飞行阻力 变后掠机翼可以根据不同的飞行状况,改变机翼的后



图 9 波音 777X 的折叠翼尖 Fig.9 Foiding wingtips for the Boeing 777X

掠角,低速采用小后掠角增加升力,高速状态下采用大后掠 角降低飞行阻力,有效地解决飞行器的高、低速协调设计 问题。

美国NextGen公司设计、制造并测试了一种变后掠翼 无人机,如图 10 所示。在试验过程中,该模型机可以在 185~220km/h的飞行速度下从15°到35°改变后掠角,机翼 面积改变40%,翼展改变30%,有效地提高了飞行器的飞行 性能^[29]。

张登成等^[30]设计了一种宽速域变构型高超声速飞行 器,如图11所示。通过连接翼实现飞行器在不同飞行阶段 适时变后掠,兼顾了低、跨、超和高超声速的气动特性。低 速时采用大展弦比、小后掠角的菱形连翼布局,可以快速完 成爬升,最大升阻比可达15.37;超声速时采用小展弦比、大 后掠角的菱形连翼布局,可以快速提升速度,最大升阻比为 4.8;高超声速时连接翼收回机身内,飞行器整体采用类乘 波体构型,进行高超声速巡航,最大升阻比接近4。实现在 全速域范围内气动特性较好,在保证高超声速阶段良好气 动特性的前提下改善低速、跨声速、超声速性能的目标。



图 10 变后掠翼无人机^[29] Fig.10 Variable swept wing UAV^[29]



2.1.5 机翼展向弯曲:调节展向升力分布,提高升力

机翼展向弯曲是通过控制沿翼展的升力分布,从而提 高飞行器的升力。2002年,美国国家航空航天局(NASA) 研究了一种超椭圆变弯曲翼展机翼(HECS),如图12所示。 其翼展方向的曲率是可以变化的,与理论上诱导阻力最小 的平面椭圆机翼展弦比和翼展保持一致。研究结果表明, 超椭圆变弯曲翼展机翼的表面积仅增加10%,但其升阻比 增加了15%^[31]。Lazos等^[32-34]在上述基础上对超椭圆变弯 曲翼展机翼进行了研究。研究发现,当机翼卷起时,翼尖起 到了改良小翼的作用,限制了从机翼下表面到上表面的涡 流卷起,并在一定的迎角范围内增加了升阻比。



图 12 超椭圆变弯曲翼展机翼^[31] Fig.12 Hyper-elliptic cambered span wing^[31]

2.1.6 变厚度和变弯度机翼:扩大机翼表面层流区,减小摩擦阻力

机翼表面层流区域的扩大可以减少跨声速飞行状态下的摩擦阻力, NASA的研究表明, 通过层流控制可以减少高达10%的飞机阻力^[35-36]。可有效地降低飞机燃油消耗率, 减小环境污染。

适当改变机翼厚度和弯度可以延迟气流转捩和控制气 流分离,增大机翼表面的层流区面积,提高飞行器性能^[37]。 其中,变弯度机翼因为实现方式相比其他变形结构简单而 得到了广泛研究。

Brailovski等^[38]开发了一种通过改变机翼翼型厚度来 增大层流区的变形层流机翼,如图13所示。在准恒定升力 条件下进行了风洞试验。风洞试验结果显示,变厚度机翼 阻力减少了18.5%,证明了增大机翼翼型厚度、降低飞机燃 油消耗的可行性。

空客公司在2017年开展了欧洲突破性层流飞机验证机(BLADE)项目,其层流机翼使得飞行阻力降低了10%。 光滑的层流流动可以减小阻力,但是需要制造过程中严格 控制公差以避免产生台阶或者缝隙^[39]。

Hetrick 等^[40]设计了一种与自然层流翼型相结合的"任务自适应机翼"。其可以通过调整机翼弯度从而延迟层流转捩,从而使整个巡航升力系数范围内都具有较高的升阻比,巡航范围的升阻比可增加3%~9%,并且使巡航距离增加15%或者更多。





2.2 稳定性和操纵性对于变形形式的需求

目前,适合提升飞行器操纵性的变形方式包括机翼扭 转和变弯度机翼;适合改善飞行器稳定性的变形方式包括 折叠翼尖和机翼展向弯曲。

2.2.1 机翼扭转与变弯度机翼:提高飞行器控制能力

美国在20世纪90年代进行了主动气动弹性机翼 (AAW)研究项目。该项目研究了一种形状记忆合金 (SMA)扭矩管,通过SMA扭矩管来实现翼展方向机翼扭转 控制。该项目证明了SMA扭矩管可以用于机翼扭转变形, 实现大型飞机的飞行控制。该技术已经在F/A-18A飞机上 进行了飞行测试,如图14^[41]所示。



图 14 F/A-18A^[41] Fig.14 F/A-18A^[41]

由NASA、美国空军研究实验室(AFRL)和密歇根州安 阿伯市的FlexSys公司合作完成的一项自适应柔性后缘 (ACTE)技术,在2014—2015年成功应用于"湾流"III试验 机的飞行测试。通过内外襟翼偏转不同的角度,达到机翼 扭转变形的效果,这验证了变形襟翼的结构可靠性^[42]。

2.2.2 折叠翼尖和机翼展向弯曲:提高飞行器稳定性

折叠翼尖和机翼展向弯曲可以在一定程度上改善飞行 器的稳定性。

Mills等^[43]开展了一项使用折叠翼尖作为小型无人机 控制效应器的试验研究,如图15所示。结果表明,折叠翼 尖在控制横向和纵向稳定性方面是有效的,特别是在大动 压和大迎角情况下。



图 15 折叠翼尖无人机^[43] Fig.15 Folding winglets UAV^[43]

Yu Kai 等^[41]使用一种 SMA 对展向弯曲机翼进行了研究,可以通过加热使飞机的弯曲机翼展开来为飞机提供升力以实现稳定飞行。研究发现,通过改变 SMA 可以显著提高变形机翼抗风能力。

2.3 降噪对于变形形式的需求

连续变弯度机翼和机翼扭转可以使机翼表面光滑连续 变形,消除传统飞行器增升装置的缝隙,在低速和跨声速状 态下,可以达到降低气动噪声的目的。

灵巧智能飞机结构(SARISTU)项目是欧盟委员会第 七框架计划下的一项大型合作项目。该项目于2011—2015 年实施。其中一个项目是通过变形技术使机翼表面形状平 滑变化(见图16),以实现增升减阻减少燃油消耗,同时在飞 行过程中降噪约8dB^[45-46]。

自适应柔性后缘(ACTE)技术使用柔性机翼使机翼能 够连续变化,如图17所示。飞行测试显示,在飞行速度 Ma 0.85时,噪声减小约40%^[47-48]。

2.4 隐身对于变形形式的需求

目前,为了能够有更好的隐身性能,通常采用飞翼布局,但是飞翼布局飞机没有常规的尾翼,飞机航向稳定性和



图 16 进行风洞试验的 SARISTU 机翼模型^[45] Fig.16 SARISTU wing model for wind tunnel testing^[45]



图 17 "湾流"III试验机^[47] Fig.17 "Gulfstream" III testing aircraft^[47]

纵向操纵性存在问题。对此,马晓永等^[49]提出了一种多功 能变体尾翼概念(见图18),以解决飞翼布局的横航向稳定 性与控制问题,同时又兼顾全机的隐身特性。多功能变体 尾翼关闭时,全机为飞翼布局,具有较好的气动和隐身性 能;多功能变体尾翼打开45°后,在*Ma*0.9、迎角为0°的状态 下,偏航力矩系数对侧滑角导数值由-0.0001 增至0.0004, 航向稳定性明显得到改善。但隐身性能有所下降,雷达截 面积峰值视角变宽,平均高出约5dB(X~Ku频段)。尽管 隐身能力有所减弱,但是航向增稳明显^[49]。

3 变体飞行器关键技术与未来发展方向

随着智能材料、智能算法等新兴技术的发展,变体飞行





Fig.18 A multifunctional morphing tail typical flight mode^[49]

器领域将展现出极其丰富的创新潜力与发展前景。

3.1 变体飞行器关键技术

变体飞行器不同的变形方式会产生不同的作用效果, 不同学科之间互相耦合,变体飞行器的设计难度也将会增 大,将气动与多学科优化设计应用于变体飞行器设计将有 效解决该问题。同时,所有变形方式都离不开机翼的光滑 连续变形,因此智能材料与结构设计等技术仍是其中的 关键。

3.1.1 变体飞行器的气动与多学科优化设计

多学科优化设计是一种通过充分探索和利用工程系统 中相互作用的协同机制来开展复杂工程系统及其子系统设 计的方法论^[50]。变体飞行器的设计过程涉及气动、结构、控 制、噪声、隐身性等多个学科,它们之间相互耦合,单独对每 个学科进行优化,很难获得最优的气动外形。气动与多学 科优化设计可以在满足任务要求下寻优得到各个任务下最 优的飞行器外形,不仅能够达到设计要求,还能极大节约成 本。将气动与多学科优化设计应用到变体飞行器的外形设 计将具有极大潜力。其难点主要包括:(1)变体飞行器多学 科优化设计过程中不同学科之间的相互影响和耦合的关系 使优化设计过程更加复杂,需要综合考虑各个学科的要求 和限制;(2)变体飞行器的多学科优化过程需要多个学科领 域协同工作,进行大量的仿真计算,这将大幅增加优化时 间;(3)变体飞行器的多学科优化设计往往涉及多个目标, 如飞行性能、稳定性和操纵性、气动噪声、隐身性等,这些目 标之间存在冲突和权衡,需要进行合理的方案设计;(4)变 体飞行器的多学科优化设计空间非常庞大,这使得设计过 程中需要考虑大量的设计变量和约束条件,增加了设计的 复杂性和难度。

3.1.2 变体飞行器智能材料与结构设计

要实现真正意义上的变体飞行器,重点在于机翼的变 形。变形机构和蒙皮设计应满足机翼的变形要求。变体飞 行器蒙皮不仅要保证表面具有一定的刚度可以承受足够强 的气动载荷,还要有一定的韧性和柔性实现光滑无缝变形。 传统的蒙皮材料无法满足上述要求,智能材料有望解决该 问题。智能材料主要包括形状记忆合金、形状记忆聚合物 以及复合材料、变模量复合材料、变模量泡沫、零泊松比材 料等,但是它们也都存在各自的缺点^[51-52]。飞行器变形受 到材料和结构固有特性的限制。因此,发展高性能智能材 料和结构可以有效地促进变体飞行器的发展。

3.2 变体飞行器未来发展方向

未来,变体飞行器的发展方向包括宽速域高超声速变

体飞行器和自主决策飞行变体飞行器。

3.2.1 宽速域高超声速变体飞行器

目前,宽速域高超声速飞行器由于其飞行速度快、反应 时间短、作战半径大、隐蔽性好、突防能力强等独特的优势, 已成为世界航空航天领域一个极其重要的发展方向和世界 各国广泛关注的研究热点^[53]。将变体飞行器技术的研究应 用到宽速域高超声速飞行器的研制具有广泛的发展前景。 但是,需要解决两个问题:(1)对飞行器变形前后的非定常 流动机理进行充分研究;(2)对材料的要求更加严格。飞行 器在高超声速飞行时,会产生极高的热量,变形材料需要能 够在高温下仍然具有良好的变形能力。

3.2.2 自主决策飞行变体飞行器

无人化是未来飞行器的一个发展方向。所以,未来的 变体飞行器将更加注重自主飞行能力的发展,将具备更强 大的感知和决策能力,在没有人类干预的情况下自主完成 变形。这主要包括智能变形策略和智能自主控制技术两个 方面^[54]。引入更先进的传感器、机器学习和深度学习技术, 使变体飞行器可以更准确地感知周围环境,并对这些变化 做出实时反应,通过内部作动器将机翼连续改变为最适合 的形状。

4 结束语

变体飞行器可以同时适用于不同的飞行环境和飞行任 务,是未来先进飞行器的重要发展方向。目前,变体飞行器 的设计面临诸多复杂问题,对于这些问题的研究仍处于初 步阶段。本文梳理了变体飞行器的气动设计与总体设计、 结构、控制、噪声、隐身之间的联系,阐述了增升减阻、稳定 性和操纵性、降低气动噪声以及增强飞行器隐身性等气动 与多学科设计对不同变形方式的需求,并对变体飞行器的 关键技术和未来变体飞行器的发展方向进行了展望。

⁴AST

参考文献

- [1] 张伟强,费王华,郭鹏飞,等.飞行器变体技术发展现状及趋势[C]//北京力学会第27届学术年会,2021.
 Zhang Weiqiang, Fei Wanghua, Guo Pengfei, et al. Development status and trends of morphing variant technology [C]// Proceedings of the 27th Annual Academic Conference of Beijing Mechanics Society, 2021. (in Chinese)
- [2] 陆宇平,何真.变体飞行器控制系统综述[J].航空学报,2009,

30(10):1906-1911.

Lu Yuping, He Zhen. A survey of morphing aircraft control systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30 (10):1906-1911. (in Chinese)

[3] 王鹏,陈浩岚,鲍存余,等.变形飞行器建模及控制方法研究 综述[J].宇航学报,2022,43(7):853-865.

Wang Peng, Chen Haolan, Bao Cunyu, et al. Review on modeling and control methods of morphing vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 853-865. (in Chinese)

[4] 崔尔杰.变形飞行器的发展是一个从概念到实践的挑战[M]. 北京:中国科学技术出版社,2009.

Cui Erjie. A challenge for the development of morphing aircraft from concept to practice[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2019. (in Chinese)

 [5] 冯文正,于菲,关玉明,等.变形翼面内变形的研究现状及关 键技术[J].航空工程进展,2023,14(3):1-14.
 Feng Wenzheng, Yu Fei, Guan Yuming, et al. Research status

and key technologies of in-plane deformation of morphing wing surface [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 1-14. (in Chinese)

- [6] 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.
- [7] 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):6-10.

Yue Ting, Wang Lixin, Ai Junqiang. Key technologies in morphing aircraft design[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(5): 6-10. (in Chinese)

- [8] Love M, Zink S, Stroud R, et al. Impact of actuation concepts on morphing aircraft structures [C]. 45th AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004: 1724.
- [9] 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)
- [10] 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. (in Chinese)

- [11] Alulema V H, Valencia E A, Toapanta E, et al. Performance assessment of a variable-span morphing wing small UAV for high altitude surveillance missions[C]. AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum, 2020: 3962.
- [12] Afonso F, Vale J, Lau F, et al. Performance based multidisciplinary design optimization of morphing aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 67: 1-12.
- [13] 苏晓东.一种U形变体无人飞行器气动外形技术研究[J].中国科技信息,2020(5):38-41.
 Su Xiaodong. Research on aerodynamic shape technology of a U-shaped variant unmannedaerial vehicle[J]. China Science and Technology Information, 2020(5):38-41. (in Chinese)
- [14] 丁聪,曾维理,魏文斌,等.民用机场噪声评估综述[J].航空计 算技术,2021,51(5):130-134.
 Ding Cong, Zeng Weili, Wei Wenbin, et al. Review of civil airport noise assessment[J]. Aeronautical Computing Technique, 2021, 51(5):130-134. (in Chinese)
- [15] Satti R, Li Y, Shock R, et al. Computational aeroacoustic analysis of a high-lift configuration[C]. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008:34.
- [16] 刘沛清,李玲,邢宇,等.大型飞机增升装置气动噪声研究进展[J].空气动力学学报,2017,35(4):472-484.
 Liu Peiqing, Li Ling, Xing Yu, et al. Developments of aeroacoustic investigation on high-lift device for large aircrafts
 [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35(4): 472-484. (in Chinese)
- [17] 李士途,艾俊强,任远春,等.变弯度机翼前后缘结构技术发展与应用前景[J].航空科学技术,2022,33(12):31-40.
 Li Shitu, Ai Junqiang, Ren Yuanchun, et al. Development and application prospect of variable leading and trailing edge structure technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022,33(12): 31-40. (in Chinese)
- [18] 罗志勇,郝璐.超声速飞行器隐身技术发展趋势分析[J].战术
 导弹技术,2016(2):16-22.
 Luo Zhiyong, Hao Lu. The development tendency analysis of

stealthy technology used on supersonic aircraft[J]. Tactical Missile Technology, 2016(2):16-22. (in Chinese)

- [19] Santos P, Sousa J, Gamboa P. Variable-span wing development for improved flight performance[J]. Journal of Intelligent Material System & Structures, 2017, 28(8): 961-978.
- [20] 肖国华,周国峰,李富贵,等.伸缩式升力翼导弹变形策略仿 真研究[J].飞行力学,2022,40(4):70-75.
 Xiao Guohua, Zhou Guofeng, Li Fugui, et al. Study on the deformation strategy of reconfigurable lift wing missile based on ballistic simulation[J]. Flight Dynamics, 2022,40(4): 70-75. (in Chinese)
- [21] Sadique M, Ajaj R M, Khan K A. Acompliant polymorphing wing for small UAVs[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(10): 2575-2588.
- [22] 吕侦军,卢志毅,陈庆民,等.高速变翼面飞行器研究现状及 关键气动技术[J].空天技术,2022(6):49-56.
 Lyu Zhenjun, Lu Zhiyi, Chen Qingmin, et al. Research status and key aerodynamic technology of high speed variable wing vehicle[J]. Aerospace Technology, 2022(6):49-56. (in Chinese)
- [23] 焦子涵,付秋军,邓帆,等.全速域可变形飞行器气动布局设 计及试验研究[J].固体火箭技术,2017,40(5):653-659.
 Jiao Zihan, Fu Qiujun, Deng Fan, et al, Aerodynamic configuration design and experimental study of all-speed morphing aircraft[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(5):653-659. (in Chinese)
- [24] 张超.形状记忆合金驱动可变后掠角翼梢小翼的研究[J].装 备制造技术,2022(11):36-38.
 Zhang Chao. Research on SMA driven variable swept winglet
 [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(11):36-38. (in Chinese)
- [25] 蒋彪,李杰.民机翼梢小翼气动特性数值模拟分析研究[J].航 空计算技术,2011,41(1):38-43.

Jiang Biao, Li Jie. Aerodynamic analysis of civil aircraft equipped with winglet on numerical simulation[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011,41(1):38-43. (in Chinese)

[26] 司亮,王和平.翼梢小翼后缘舵面偏转对机翼气动特性影响 研究[J].航空计算技术,2010,40(3):52-56.

Si Liang, Wang Heping. Investigation of efforts of control deflection on trailing edge of the winglets on the wing's aerodynamic characteristic[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010,40(3):52-56. (in Chinese)

[27] 王辉,陈泽洲.中高速条件下不同翼尖小翼的数值模拟分析 [J].中国民航大学学报,2021,39(4):8-12.

Wang Hui, Chen Zezhou. Numerical simulation analysis of different winglets under medium-high speed conditions[J].Journal of Cicil Aviation University of China, 2021,39(4):8-12. (in Chinese)

- [28] Cooper J E, Chekkal I, Cheung R C M, et al. Design of a morphing wingtip[J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(5): 1394-1403.
- [29] Bowman J, Sanders B, Cannon B, et al. Development of next generation morphing aircraft structures[C].48th AIAA/ASME/ ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007: 1730.
- [30] 张登成,罗浩,张艳华,等.宽速域变构型高超声速飞行器气动特性研究[J].固体火箭技术,2019,42(1):128-134.
 Zhang Dengcheng, Luo Hao, Zhang Yanhua, et al. Aerodynamic analysis of a wide-ranged morphing hypersonic vehicle[J].
 Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(1): 128-134. (in Chinese)
- [31] Davidson J, Chwalowski P, Lazos B. Flight dynamic simulation assessment of a morphable hyper-elliptic cambered span winged configuration[C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 2003: 5301.
- [32] Lazos S, Barry S. Biologically Inspired fixed-wing configuration studies[J]. Journal of Aircraft, 2015, 42(5):1089-1098.
- [33] Abdulrahim M, Lind R. Flight testing and response characteristics of a variable gull-wing morphing aircraft[C].AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004: 5113.
- [34] Collazo Garcia III A R, Ansell P J. Characterization of a griffith-type transonic, laminar-flow airfoil[J]. Journal of Aircraft, 2019, 56(4): 1597-1609.
- [35] Supekar A H. Design, analysis and development of a morphable wing structure forunmanned aerial vehicle performance augmentation[D]. Texas: The University of Texas at Arlington, 2007.
- [36] 王宇,黄东东,郭士钧,等.变体机翼后缘多学科设计与优化
 [J].南京航空航天大学学报,2021,53(3):415-424.
 Wang Yu, Huang Dongdong, Guo Shijun, et al. Multidisciplinary design and optimization of trailing edge of morphing

wing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2021,53(3):415-424. (in Chinese)

- [37] Crouch J D. Boundary-layer transition prediction for laminar flow control[R]. AIAA Paper 2015-2472, 2015.
- [38] Brailovski V, Terriault P, Georges T, et al. SMA actuators for morphing wings[J].Physics Procedia, 2010, 10(12): 197-203.
- [39] 王彬文,杨宇,钱战森,等.机翼变弯度技术研究进展[J].航空 学报,2022,43(1):144-163.
 Wang Binwen, Yang Yu, Qian Zhansen. Technical development of variable camber wing: Review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022,43(1):144-163. (in Chinese)
- [40] Hetrick J, Osborn R, Kota S, et al. Flight testing of mission adaptive compliant wing[C]. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007: 1709.
- [41] Pendleton E, Bessette D, Field P, et al. The active aeroelastic wing flight research program[R]. AIAA-98-1972, 1998.
- [42] 宋刚.变体机翼结构技术最新进展[J]. 国际航空, 2022(7): 65-68.

Song Gang. The latest progress in variant wing structure technology[J]. International Aviation, 2022(7): 65-68. (in Chinese)

- [43] Mills J, Ajaj R. Flight dynamics and control using folding wingtips: An experimental study[J]. Aerospace, 2017, 4(2):19.
- [44] Yu Kai, Yin Weilong, Sun Shouhua, et al. Design and analysis of morphing wing based on SMP composite[C]. Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 2009. SPIE, 2009.
- [45] European Commission. Periodic report summary 4: SARISTU
 [EB/OL]. (2015-08-31). https://cordis. europa. eu/project/id/ 284562/reporting.
- [46] Wölcken P C, Papadopoulos M. Smart intelligent aircraft structures(SARISTUP) [C]//Proceedings of the Final Project Conference, 2016.
- [47] 何屹. NASA 成功测试可变形机翼航空新技术[EB/OL].(2015-05-01).https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/5/318034.shtm.
 He Yi. NASA successfully tests new aeronautical technology for a deformable wing[EB/OL]. (2015-05-01). https://news.

sciencenet.cn/htmlnews/2015/5/318034.shtm.(in Chinese)

- [48] 吴蔚,袁成. NASA实现柔性后缘在飞行中动态变形[EB/OL].
 (2017-06-12). https://www.sohu.com/a/148271352_819742.
 Wu Wei, Yuan Cheng. NASA achieves in-flight dynamic deformation of the flexible trailing edge[EB/OL].(2017-06-12).
 https://www.sohu.com/a/148271352_819742.(in Chinese)
- [49] 马晓永,苏继川,钟世东,等.一种变体尾翼的气动-隐身特性 研究[J].空气动力学学报,2020,38(5):896-900.
 Ma Xiaoyong, Su Jichuan, Zhong Shidong, et al. Study of aerodynamic and stealthy performance fora multifunctional morphing tail[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020,38(5):896-900. (in Chinese)
- [50] 韩忠华,龙腾,宋学官,等.飞行器多学科优化设计研究现状 与展望[J].气动研究与实验,2020(1):29-62.
 Han Zhonghua, Long Teng, Song Xueguan, et al. Theory and method of aircraft multidisciplinary design optimization: Current status and future direction[J]. Aerodynamic Research & Experiment, 2020(1):29-62. (in Chinese)
- [51] 张尧,张婉,别大卫,等.智能变体飞行器研究综述与发展趋势分析[J].飞航导弹,2021(6):14-23.
 Zhang Yao, Zhang Wan, Bie Dawei, et al. Research review and development trend analysis of Intelligent morphing aircraft[J].
 Aerodynamic Missile Journal, 2021(6):14-23. (in Chinese)
- [52] 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.
 Wu Bin, Du Xuzhen, Wang Jiaxing. Smart structure technology progress of morphing aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022,33(12):13-30. (in Chinese)
- [53] 崔尔杰.近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题[J].力
 学进展,2009,39(6):658-673.
 Cui Erjie. Research statutes, development trends and key

technical problems of near space flying[J]. Advances in Mechanics, 2009,39(6): 658-673. (in Chinese)

[54] 王青,刘华华.变体飞行器智能自主决策与控制[J].现代防御 技术,2020,48(6):5-11.Wang Qing, Liu Huahua. Intelligent autonomous decision-

making and control of morphing aircraft[J]. Modern Defence Technology, 2020,48(6):5-11. (in Chinese)

Aerodynamics and Multidisciplinary Design Requirements on Morphing Aircraft

Wang Yue¹, Ma Jianhua¹, Han Zhonghua¹, Song Wenping¹, Yang Yu²

1. National Key Laboratory of Aircraft Configuration Design, Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072, China

2. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi' an 710072, China

Abstract: Morphing aircraft can change the shape of the aircraft through local or global deformation, adapt to various mission requirements in real-time, and maintain optimal aerodynamic performance in various flight environments. It has become a cutting-edge research hotspot in the field of aerospace in the 21st century. This paper first outlines the relationship between the aerodynamics of morphing aircraft and overall design, structure, control, noise, and stealth. Next, in response to the mission requirements faced by aerodynamic design, the requirements on different deformation modes in aerodynamic and multidisciplinary design requirements such as increased lift and drag reduction, stability and controllability, reduced aerodynamic noise, and enhanced aircraft stealth were elaborated. Finally, it also looks forward to future development directions, providing reference for the development of morphing aircraft aerodynamics and multidisciplinary design.

Key Words: morphing aircraft; aerodynamic design; increasing lift and reducing drag; stability and controllability; reducing aerodynamic noise; enhancing aircraft stealth