

# 变形飞行器协调控制方法研究进展及典型应用

连一鸣, 王鹏\*, 王柏森  
(国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073)

**摘要:** 针对变形飞行器的发展历程、协调控制方法研究进展以及方法的典型应用进行了综述。介绍了变形飞行器的优势与控制方法面临的挑战, 指出变形与飞行状态独立控制方法的劣势和协调控制的优势。针对不同变形机构类型对协调控制方法的需求进行了详细的总结与分析。描述一类在轨迹优化层面生成变形量指令的协调控制方法, 重点描述指令生成方法。面向高度-速度跟踪与姿态控制, 梳理变形协调控制方法的研究进展。对变形飞行器协调控制方法的典型应用进行了分析, 指出协调控制框架为变形飞行器的异类多执行机构的耦合控制、非对称变形控制和容错控制提供了新的视角, 可进一步提升飞行器性能。

**关键词:** 变形飞行器; 轨迹优化; 高度-速度跟踪; 姿态控制; 异类执行机构; 非对称变形控制; 容错控制

中图分类号: V249; V448 文献标识码: A 文章编号: 1009-1300(2025)05-0111-16

DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.20250143

## Research progress and typical application of coordinated control methods for morphing aircraft

Lian Yiming, Wang Peng\*, Wang Baisen  
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha 410073, China)

**Abstract:** The development history of morphing aircraft, the research progress of coordinated control methods, and their typical applications are reviewed. The advantages of morphing aircraft are outlined, alongside the challenges inherent in their control, emphasizing the limitations of independently controlling morphing and flight states and the benefits of a coordinated approach. A detailed summary and analysis are provided regarding the control requirements for various types of morphing mechanisms. A category of coordinated control methods that generate morphing commands at the trajectory optimization level is described, with particular attention paid to the command generation strategy. Research progress in coordinated control for

收稿日期: 2025-07-10; 修回日期: 2025-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(92371203)

作者简介: 连一鸣, 硕士研究生。

通讯作者: 王鹏, 教授。

引用格式: 连一鸣, 王鹏, 王柏森. 变形飞行器协调控制方法研究进展及典型应用[J]. 战术导弹技术, 2025(5): 111-126. (Lian Yiming, Wang Peng, Wang Baisen. Research progress and typical application of coordinated control methods for morphing aircraft[J]. Tactical Missile Technology, 2025(5): 111-126.)

altitude-speed tracking and attitude stabilization is reviewed. Typical applications of these methods are discussed, highlighting how the coordinated control framework offers new perspectives for managing coupled heterogeneous multi-actuator systems, asymmetric morphing and fault-tolerant control, with potential for further enhancing overall aircraft performance.

**Key words:** morphing aircraft; trajectory optimization; altitude-speed tracking; attitude control; heterogeneous actuators; asymmetric morphing control; fault-tolerant control

## 1 引言

变形飞行器是一类气动外形可变的飞行器。与传统飞行器只在某一工作场景下具有最优性能的特性不同,变形飞行器可以通过变外形设计改变飞行过程中所受到的气动力与气动力矩,从而获得不同的气动性能,以适应复杂的飞行环境与任务需求<sup>[1-3]</sup>。基于此,作为新一代飞行器设计的方向之一,变形飞行器受到了国内外学者越来越多的关注<sup>[4-5]</sup>。相较于传统固定外形飞行器,变形飞行器增加了控制的自由度,气动特性也因变形过程变得更加动态多变,因此变外形设计对飞行器控制系统的设计提出了更高要求。

变形飞行器的飞行状态控制研究主要解决两个问题:一个是如何变形,即根据任务场景与复杂环境设计变形策略;另一个是如何在引入变形的情况下,实现对飞行器状态的跟踪。传统的变形策略以单/多目标优化结果作为设计依据,针对不同的任务场景确定合适的变形策略。Xu等<sup>[6]</sup>将优化巡航效率目标转化为最小化发动机推力问题,通过离线求解得到了变后掠策略。Hua等<sup>[7]</sup>根据不同马赫数下变后掠飞行器的气动性能,设计了考虑最大升阻比、最小阻力和最大俯仰力矩梯度系数组合变形规则。针对变形过程引起的稳定控制问题,通常的做法是将变形视作模型扰动或气动系数的不确定性<sup>[2, 8]</sup>,并在飞行状态控制系统中进行补偿。Li等<sup>[9]</sup>使用扩张状态观测器补偿变形过程中产生的附加力与附加力矩,设计增益调度控制器实现了对高度速度指令的跟踪。Meng等<sup>[10]</sup>将飞行器变形引入的不确定性视为干扰,提出了一种基于预设性能的自抗扰控制方法,相比基于扩张状态观测器的控制方法改善了响应超调量和稳态误差。卢家乐等<sup>[11]</sup>结合自适应神经网络

对变形过程引起的跟踪误差进行补偿控制,确保了飞行器对状态指令的跟踪。

上述研究按照设计变形策略、补偿变形扰动的顺序流程在发挥变形优势的基础上实现了飞行器飞行状态的稳定控制。但是采用的变形策略是离线或半离线的,并且将变形独立于飞行器状态闭环控制系统之外。从控制系统设计角度来看,一方面变形策略只考虑固定的飞行环境与任务设置;另一方面飞行器气动舵面需要在完成飞行状态控制的基础上补偿变形带来的影响,限制了能力的发挥。因此,考虑将飞行器状态控制与变形控制紧密耦合在一起,根据任务需要与当前飞行状态进行变形的协调控制对充分发挥飞行器变形能力有重要意义。

相比变形与飞行器状态之间独立进行控制,协调控制具有如下优势:

### (1) 提高控制稳定性与抗扰能力

协调控制方法将变形量引入到控制系统设计中,变形机构与气动舵面等执行机构共同实现指令跟踪任务,控制器稳定性与抗扰能力相比变形开环有了显著提升<sup>[12-14]</sup>。

### (2) 高效拓展飞行器姿态可控范围

与变形独立控制相比,虽然变形对飞行状态的影响机理相同,但协调控制由于将飞行实时状态纳入变形策略的设计中,因此能够更高效地使用变形来实现并拓展飞行器姿态可控范围<sup>[13, 15]</sup>。

### (3) 实现变形策略的实时调整

在协调控制框架中,变形策略由当前飞行状态结合环境、任务需求等给出<sup>[14, 16]</sup>,不需要进行提前设计。

### (4) 为容错控制提供新的实现思路

飞行器各执行机构都可用来实现某一控制目

标,当某一机构的控制效率发生变化,即出现故障情况时,通过协调控制可以使用其他执行机构进行等效补偿<sup>[17]</sup>。

本文从变形飞行器变形结构的发展入手,展示了其与控制需求之间的辩证关系,提出协调控制方法是变形飞行器进一步提升性能的重要研究方向和发展趋势。基于国内外相关文献资料,进一步面向轨迹优化、高度-速度跟踪与姿态控制三个方面整理协调控制方法的研究进展,对协调控制研究重要性做出认识和判断:认为协调控制方法相比传统控制方法有更大优势,能够更加充分发挥出飞行器的变形能力。之后,本文以协调控制方法的典型应用为内容,进一步说明协调控制方法对协调异类多执行机构、非对称变形控制与变形容错控制的意义。

## 2 变形飞行器发展历程与控制需求演进

变形飞行器可以通过外形动态调整实现多任务适应性,其发展历程与变形机构类型和相应的控制形式密切相关。随着变形机构从刚性机械向应用新型材料、复合系统迭代,控制目标从单一位置跟踪逐步升级为多自由度协同优化,对协调控制方法的需求也越来越强。本节以控制需求变化为主线,介绍变形飞行器发展历程,揭示机构复杂性提升与协调控制模式的相互促进与发展模式。

### 2.1 机械式变形与弱耦合控制

早期变形飞行器以离散式变后掠翼为核心特征,通过齿轮、连杆等刚性机构实现有限构型切换。此类系统的控制焦点集中于预设位置的精确抵达与基础飞行稳定,协调需求体现为机构运动与飞行状态控制的简单时序管理。

1951年,美国贝尔公司的X-5飞行器<sup>[18]</sup>首次实现3档后掠角机械调节,其控制主要目的在于克服传动间隙与惯性扰动,以确保变形控制精度。然而,离散构型切换会带来气动焦点剧变的问题,飞行稳定性面临严峻挑战。1962年,通用公司研制的F-111飞行器<sup>[19]</sup>虽拓展了跨声速巡航与短距起降能力,但复杂变形机构引发的可靠性问题暴露出机械故障与飞行控制协同缺失的缺陷。1970年,

诺格公司的F-14战斗机<sup>[20]</sup>在集成先进雷达系统的基础上,通过变后掠翼设计满足了航母起降时的低空低速和机动时高空高速的需求。20世纪80年代末期,美苏分别研制的B-1与Tu-160变后掠战略轰炸机虽在材料与性能上取得突破,但高昂维护成本也凸显了刚性机构在控制鲁棒性上的固有局限。图1展示了变形飞行器机械式变形发展历程。

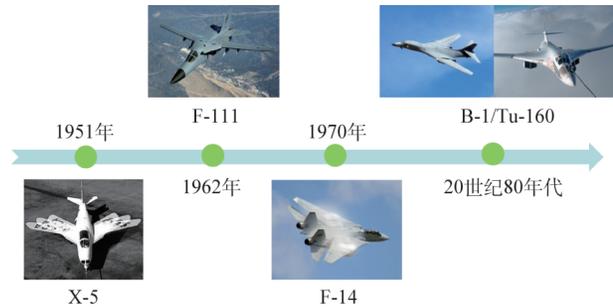


图1 机械式变形发展历程

Fig. 1 Evolution of mechanical morphing

由于控制复杂度受限于笨重的机构与匮乏的自由度,协调仅需解决“何时变形”的时序问题,即先完成变形再稳定姿态,二者耦合程度较浅。变形瞬态的气动干扰被视为扰动,依赖基础飞控系统被动补偿,对“如何协调”的耦合优化考虑较少。

随着机械执行机构技术的发展,变形机构连续、快速、准确变化的需求已得到极大的满足。目前绝大部分针对变形飞行器的研究都基于机械式变形,相关协调控制方法的研究也在不断地拓展飞行器的能力,并取得了一系列成果。但是从进一步提高飞行器变形能力,充分发挥协调控制方法优势的角度看,对发展执行机构新型技术的需求也越来越迫切。

### 2.2 新型材料驱动与多自由度协调

随着新型材料的发展与应用,变形飞行器获得了连续平滑变形能力,变形自由度由单一后掠角扩展至展长、弯度、扭转等多参数协同调节。控制目标转变为多自由度轨迹跟踪与气动性能实时优化,协调需求升级为多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统的强耦合管理。

1996年,主动气动弹性机翼(Active Aeroelastic Wing, AAW)<sup>[21]</sup>技术通过主动诱导机翼扭转变形,在F/A-18上实现了增强滚转效率的效果。气

动/结构/驱动器的深度耦合,揭示了多物理场协调的必要性。2000年,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)智能机翼项目以形状记忆合金(Shape Memory Alloys, SMA)驱动器<sup>[22]</sup>替代传统舵面,验证了柔性机翼在滚转/俯仰控制中的有效性,需使用逆模型前馈+自适应补偿等控制方法对SMA的材料迟滞与蠕变特性进行补偿。在DARPA变形飞机结构(Morphing Aircraft Structures, MAS)计划中,NextGen公司的MFX-1验证机<sup>[23]</sup>采用滑动蒙皮实现机翼面积、展长、后掠角连续调节,其控制难点在于大范围变形下的模型不确定性抑制,需开发鲁棒MIMO协调算法应对强非线性耦合。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)自适应柔性后缘(Adaptive Compliant Trailing Edge, ACTE)项目<sup>[24]</sup>可替代传统襟翼,有效减轻结构质量与飞行阻力,在湾流III飞机实现 $-2^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的连续弯度偏转。图2展示了由新型材料驱动变形的发展历程。

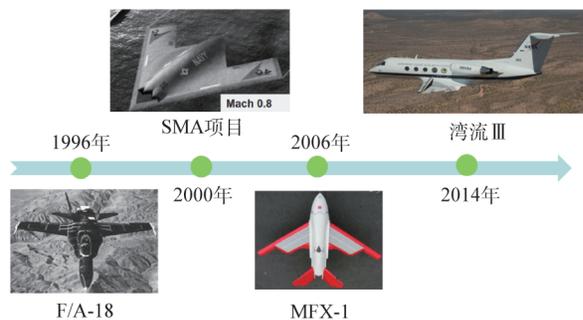


图2 新型材料驱动变形发展历程

Fig. 2 Evolution of new-material-driven morphing

新型材料的发展驱动变形飞行器的多自由度协同从时序配合升级为深度耦合,充分发挥连续变形能力,使协调控制从“辅助功能”转变为“性能核心”。

### 2.3 复合变形与系统级智能协调

多种机械变形模式与智能材料驱动模式都展现出了在特定场景下的应用优势。所以当前研究越来越聚焦于多种变形模式的结合应用<sup>[25]</sup>。但是在突破单模式局限的同时,研究面临着主动/被动单元组合、刚/柔结构共存、物理场(气动/热/

力/电)深度耦合、机构复杂度急剧增加等诸多问题。主要面临的控制挑战是多维系统的实时协同优化,协调需求演化为分层分布式智能决策问题。

如图3所示,王臻等<sup>[26]</sup>提出了变后掠-伸缩翼的变形模式,采用剪叉机构实现双自由度变形,控制器设计需要考虑平衡机构刚度与驱动能耗。Muhammed等<sup>[27]</sup>设计了一种多维变形翼,通过锯齿单元连接前后缘梁,电机驱动齿条引发弦向位移,解决变形平滑性与结构完整性的冲突是这一方案的控制系统需要考虑的关键问题。该研究团队<sup>[28]</sup>进一步提出了一种变展长-被动俯仰翼,飞行器的展向平移主梁中嵌入了扭簧机构,实现主动/被动单元的混合协调控制。NASA任务自适应数字化结构(Mission Adaptive Digital Composite Aerostructure Technologies, MADCAT)项目将机翼分解为模块化复合材料单元<sup>[29]</sup>,通过实时优化扭转与弯度分布提升气动效率,其核心挑战在于分布式驱动单元的智能协同控制。空客的超性能机翼融合了半气动弹性铰接翼尖与连续变弯度后缘,针对这一结构方案,需要构建协调离散铰接与连续变形的控制架构,抑制颤振等不良影响。

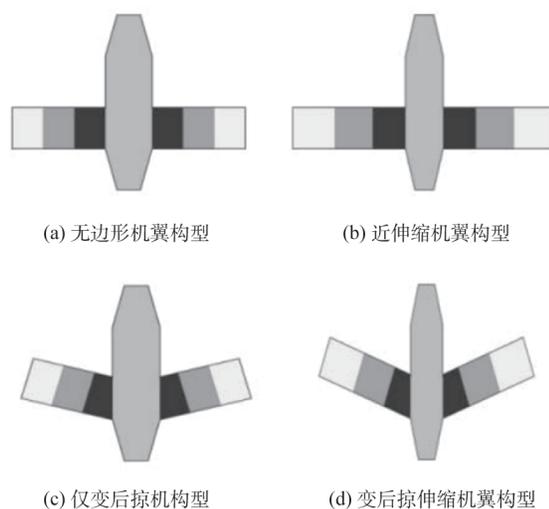


图3 变后掠-伸缩翼变形模式<sup>[26]</sup>

Fig. 3 Variable-sweep-telescopic morphing mode<sup>[26]</sup>

当前,复杂变形飞行器系统的实时决策与控制的研究重点在于通过分层分布式架构,在任务层(气动性能优化)、协调层(自由度动态分配)

与执行层（驱动精准控制）之间实施级联优化，以在平台面临的能耗、计算资源及通信带宽严格约束下，实现接近全局最优的协调控制性能。复合变形机制进一步将协调控制问题提升至系统级复杂度，其发展高度依赖于智能算法与分布式计算架构的突破，系统协调能力直接决定了理论性能潜力的实际转化程度。

在结构层面，模块化设计、嵌入式智能（如空客变形翼梢、MADCAT数字细胞概念）的发展，与控制层面的在线学习、分布式优化算法相融合，共同致力于实现环境感知、任务需求、变形状态与控制指令的全局动态最优匹配。这种深度融合智能技术的协调新模式，将成为突破未来变形飞行器性能边界的关键技术与重点研究方向。

### 3 面向轨迹优化的变形指令生成方法

一类变形飞行器协调控制方法是在轨迹优化层面生成变形指令，在控制层面进行跟踪。轨迹优化作为变形飞行器实现多任务适应的核心手段，其关键挑战在于如何将变形引入其中，使气动外形与飞行状态实现动态匹配。当前研究表明，通过将变形参数作为优化变量或决策输出，构建变形与轨迹的协同优化框架，可实现气动效率、任务效能与动态约束的平衡。本节为研究变形协调控制特性，先对轨迹优化问题中飞行器变形指令生成方法展开论述。

#### 3.1 伪谱法

伪谱法是一种将最优控制问题转化为非线性规划问题的数值方法，可通过设置伪谱法配点处的动力学约束实现变形策略与轨迹的深度融合。其在变形飞行器轨迹优化中具有独特优势。Zhang等<sup>[30]</sup>提出的自适应多元伪谱插值（Adaptive Multivariate Pseudospectral Interpolation, AMPI）方法通过将展长及其变化率作为控制变量，实现了变形参数与攻角的动态协同，该方法仅需计算多项式和矩阵乘法即可生成协同指令，显著提升了高超声速飞行中的实时响应能力，有效克服了变形带来的强耦合问题。朱睿颖等<sup>[31]</sup>针对异类升力体变形飞行器，基于高斯伪谱法（Gauss

Pseudospectral Method, GPM）构建了包含一锥展长、二锥展长差值等多维控制变量的气动代理模型，通过一体化优化变形策略与航迹，提升了射程，并降低了攻角范围。陈铁彪等<sup>[32]</sup>通过伪谱法同步优化变形律与控制律，实现了变形参数与轨迹参数的协同设计，使横向航程与覆盖范围得到了提升，为多模态协调控制提供了可行框架。

伪谱法凭借其全局优化特性和高维处理能力，已成为实现变形参数与飞行控制协同优化的有效工具，为变形飞行器的自主协调控制奠定了重要基础。

#### 3.2 凸规划方法

凸规划（Convex Programming, CP）是一种将非凸优化问题转化为凸优化问题的方法，其核心在于通过变量替换、约束松弛和线性化等手段重构问题形式，使其满足凸性要求。在变形飞行器的轨迹优化中，通常将机翼后掠角变化率等控制变量解耦为独立输入来解决多自由度耦合导致的非凸性。

面对变形参数与飞行状态的实时协调控制需求，Cai等<sup>[33]</sup>在变后掠飞行器的强非线性控制问题中采用了基于补偿因子的序列凸规划（Sequential Convex Programming, SCP）方法，通过线性化处理运动方程、路径约束和目标函数，将原问题转化为可实时求解的凸优化子问题，实现了变形指令与飞行轨迹的动态协同生成。针对更复杂的多自由度变形系统，王仰杰等<sup>[34]</sup>进一步发展了自适应信赖域更新的罚函数SCP方法，通过对数凸化处理路径约束并引入虚拟控制策略，将变后掠-变展长复合变形飞行器的再入轨迹优化问题转化为二阶锥规划（Second Order Conic Programming, SOCP）形式，通过约束后掠角变化率确保控制指令的物理可实现性。

凸规划方法与伪谱法的全局逼近能力，共同解决了变形相关非线性项的求解难题，使“变形-轨迹”协同指令可在线生成。

#### 3.3 多目标进化方法

多目标进化方法（Multi-Objective Evolutionary Algorithm, MOEA）是通过模拟生物进化机制解决多目标优化问题的智能算法。

该方法通常与分解策略结合，将轨迹优化中

的单目标转化为单目标子问题集合,同时进化算法的种群搜索特性能够有效探索变形参数与轨迹参数的复杂耦合关系。彭悟宇等<sup>[35]</sup>建立了基于分解的多目标优化算法(Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition, MOEA/D)协同优化框架,通过切比雪夫分解方法将射程与热流这对冲突目标转化为单目标子问题集合,其协调机制体现在将马赫数触发的变形时机与攻角指令进行联合优化,并利用种群邻域信息共享实现子问题间的协同进化。Yang等<sup>[36]</sup>则进一步深化了变形机构的抗扰功能,提出将伸缩率作为控制变量嵌入推-拉搜索策略(Push and Pull Search, PPS)算法,通过广义多项式混沌(Generalized Polynomial Chaos, GPC)方法传播不确定性并动态调整变形参数,实现了升阻特性的稳定控制。这种将轨迹、气动与变形机构解耦协同的抑制框架,不仅显著降低了终端高度标准差,而且将变形机构从传统执行机构拓展为主动抗扰的自由度,拓展了控制系统的自适应边界。

### 3.4 神经网络方法

神经网络方法是一种模仿生物神经系统结构和功能的机器学习算法,通过多层非线性变换建立输入与输出之间的复杂映射关系。在变形飞行器轨迹优化中神经网络作为高效的函数逼近器,通过离线训练学习伪谱法等传统优化方法生成的最优轨迹数据库,建立从飞行状态到控制指令的直接映射。同时作为多变量协调器,在处理变形参数与攻角、倾侧角等常规控制量之间的强耦合关系上也具有优势。

在面向轨迹优化的变形指令生成研究中,神经网络方法展现出强大的非线性映射能力和实时计算优势。周愉等<sup>[37]</sup>通过伪谱法与深度强化学习的结合,构建了双层规划框架,将高维耦合的轨迹-变形协调问题解耦为顶层轨迹规划和底层变形控制两个子问题。这种分层架构通过伪控制量作为中间变量,实现了计算效率的提升,证明了神经网络在处理变形飞行器多维度耦合控制中的有效性。类似地,Dai等<sup>[38]</sup>采用GPM生成包含不确定性的优化样本,通过反向传播(Back Propagation, BP)神经网络建立了飞行状态与最

优构型的实时映射,使后掠角与攻角实现了联合优化。该研究特别揭示了气动参数(如马赫数)与最优变形量之间的强相关性,为变形协调控制提供了物理可解释的决策依据。

上述研究先利用伪谱法等传统方法生成高精度优化样本,再训练神经网络学习状态-控制映射关系。这种混合方法既保留了传统优化方法的高精度特性,又发挥了神经网络在实时控制中的速度优势,为解决变形飞行器轨迹-变形强耦合这一核心挑战提供了切实可行的技术途径。

### 3.5 强化学习方法

强化学习方法是一种通过智能体与环境交互学习最优策略的机器学习模式,通过试错机制和奖励反馈来优化决策过程。通过构建包含飞行状态(如速度、高度、攻角)和变形参数(如后掠角)的马尔可夫决策过程,可实现气动特性与任务需求的协同优化。

强化学习方法通过动态决策机制实现了形态与飞行状态的自适应匹配。Xu<sup>[39]</sup>针对高速滑翔任务设计了双模块强化学习架构,通过升阻比偏差与热流/动压约束触发变形决策,其变形量模块融合了近端策略优化(Proximal Policy Optimization, PPO)与深度确定性策略梯度(Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG)算法,以滑翔距离增量为奖励动态生成后掠角指令,使飞行器在安全边界内维持最优气动效率。在协调控制框架的深化方面,Xu等<sup>[40]</sup>构建了包含速度、高度和攻角的多维状态空间,采用PPO算法实现变形决策与轨迹控制的深度协同。通过设计“下降高度-滑翔距离”比值的奖励函数,在训练后提升了滑翔距离。该研究将热流、动压及过载等安全约束纳入决策过程,建立了兼顾性能优化与包线保护的一体化控制框架。

强化学习通过奖励函数将任务目标(滑翔距离、末速度)与气动特性(升阻比、舵效)深度耦合,使变形策略从静态规则进化为动态响应机制,最终实现形态与飞行状态的自主适配。

综上,将变形引入轨迹优化中的做法具有特别的优势:(1)通过实时调节外形匹配飞行状态(如爬升增升、巡航降阻),可以显著拓展升阻比

调控范围<sup>[37-38, 41]</sup>; (2) 变形指令深度耦合制导需求<sup>[42]</sup>、热管理目标<sup>[41]</sup>及机动动作<sup>[43]</sup>, 实现固定构型无法实现的综合效能; (3) 将变形作为主动抗扰变量, 通过构型调整抑制不确定性影响<sup>[36]</sup>, 增强了抗扰能力。

## 4 变形飞行器协调控制方法研究进展

相较于变形与飞行状态独立的控制方法, 协调控制策略更能充分发挥变形潜力, 通过建立机体变形与飞行状态的动态耦合机制, 将后掠角、展长、折叠角等变形参数直接作为控制输入或优化变量, 突破了传统固定构型飞行器的气动性能限制。研究表明, 该机制可显著拓展系统控制自由度<sup>[13]</sup>、增强环境适应能力<sup>[44]</sup>, 并实现多目标协同优化<sup>[14]</sup>。基于方法的应用场景, 本节将从高度-速度跟踪和姿态控制两个方向, 分别对协调控制方法的研究进展进行阐述。

### 4.1 面向高度-速度跟踪的协调控制方法

在高速飞行器的精确制导与机动任务中, 高度-速度的协同跟踪能力是评估飞行品质的核心指标。变形协调控制方法通过将机翼后掠角、展弦比等几何参数的主动调控纳入控制架构, 为系统提供了额外的气动自由度: 一方面, 变形机构可实时重构升/阻力特性, 直接生成跟踪指令所需的气动力增量; 另一方面, 其与舵面、发动机的协同作用能显著削弱通道间干扰, 增强系统对高度-速度指令的动态解耦能力与抗扰鲁棒性。因此, 设计高效的变形协调控制策略, 成为提升高速飞行器指令跟踪精度与机动性能的关键途径。

#### 4.1.1 多状态跟踪的协调控制方法

在高度-速度跟踪问题中, 变形飞行器因其变外形能力, 相比传统固定外形飞行器具有显著优势。变形机构为飞行器提供了一个额外的控制自由度, 使得系统在跟踪高度、速度的同时, 能够多对应一个状态量(如俯仰角)而使系统变为全驱系统。目前, 相关研究普遍采用变形机构(如变展长、变厚度、折叠翼)结合常规执行机构(升降舵、油门)作为控制输入, 以协同跟踪飞行速度、俯仰角和飞行高度多个状态目标。

基于这一思路, 研究者们探索了多种非优化的变形协调控制方法。殷明<sup>[12]</sup>以变展长和变厚度飞行器为对象, 通过反馈线性化解耦模型, 将变形量、升降舵偏角和油门开度均视为控制输入。通过设计非奇异动态终端滑模控制(Non-singular Dynamic Terminal Sliding Mode Control, NDTSMC)策略, 成功实现了对速度、俯仰角和高度指令的跟踪。其研究表明, 引入变形的协调控制不仅提升了指令跟踪的收敛速度和精度, 还显著增强了对复合干扰的抑制能力, 相较于固定构型飞行器展现出更好的鲁棒性。薛辰等<sup>[45-46]</sup>聚焦于折叠翼飞行器, 使用同样的方法实现了对状态目标的跟踪, 充分利用非奇异终端滑模控制方法的强鲁棒性抑制混合干扰, 并通过动态滑模控制(Dynamic Sliding Mode Control, DSMC)中非连续切换项的积分有效抑制了抖振。进一步证实, 变形量作为额外的控制输入, 能够通过更大范围地影响气动特性, 在协调控制框架下实现对干扰更有效的抑制, 从而提升整体控制精度、鲁棒性和机动性能。

张泽鹏<sup>[47]</sup>的研究则采用了变翼展、升降舵和推力作为执行机构, 利用差分进化算法有效辨识了气动导数与翼展变形率的线性关系系数。在基于反馈线性化解耦的基础上, 设计了融合径向基(Radial Basis Function, RBF)神经网络自适应补偿和指数收敛干扰观测器的鲁棒滑模控制策略。该策略通过神经网络补偿未建模动态, 干扰观测器估计外界扰动, 在变形协调控制框架下实现了良好的跟踪性能, 满足了稳态误差要求。

综上所述, 研究者们有效利用了变形带来的额外控制自由度, 在转化为非优化问题的同时, 显著提升了飞行器的轨迹跟踪精度、收敛速度、抗干扰能力和整体鲁棒性能。

#### 4.1.2 数据驱动控制方法

在高度-速度跟踪的协调控制任务中, 采用多状态跟踪方法实现变形的协调控制, 能够基于保真度较高的模型, 设计具有强鲁棒性的控制器, 其控制行为也具有明确的数学解释, 但这种模型驱动的控制方法严重依赖模型精度, 通常不适用于工作点大幅变动或新工况。而利用受控系统的

在线/离线的输入/输出数据来设计控制器的数据驱动方法,可以适用于机理复杂的系统,并且擅长处理强非线性、时变问题。基于此,本节从强化学习方法、数据驱动的动态规划方法等方法出发,对数据驱动控制方法进行整理。

强化学习方法不依赖精确的系统模型,而利用收集到的状态-动作-奖励数据来训练控制策略,是数据驱动控制的核心分支之一。通过智能探索与学习策略,强化学习方法可以有效应对变形飞行器的非线性动态与环境干扰,从而实现后掠角、翼展等变形参数的实时协调优化。该方法不仅能自动调整变形过程以减少轨迹误差,还能在强风扰、高超声速等高不确定性场景下优化综合性能,为变形飞行器提供自适应的控制框架。

在强化学习框架下可同步提升指令跟踪精度与综合飞行性能,直接聚焦于高效变形协调控制的核心需求。Cao等<sup>[48]</sup>聚焦变后掠翼飞行器的环境适应性问题,开发了增量式深度确定性策略梯度(Incremental Deep Deterministic Policy Gradient, IDDPG)算法,通过将动作空间限制为参考轨迹的偏差量以压缩搜索维度,并结合长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)网络记忆关键状态信息,显著减小了强风扰环境下的高度-速度跟踪误差,体现出该算法在处理变形过程不确定性方面的优势。Xu等<sup>[44]</sup>则利用分层强化学习架构实现跨时间尺度协调,在底层采用非线性动态逆(Nonlinear Dynamic Inversion, NDI)技术稳定后掠角变形过程,而顶层部署对抗深度强化学习网络(Dueling-DQN)智能体生成7档离散后掠角指令,过延长决策步长并构建考虑机动性和燃油经济性的多目标奖励函数,使变形机构能根据实时飞行状态自主优化后掠角。

然而,强化学习方法依赖大量试错学习的特性可能导致样本效率低下,尤其在状态空间庞大或环境交互成本高昂的变形控制任务中。为平衡探索效率与策略最优性,引入基于在线数据与离线数据的动态规划方法(如近似动态规划方法与自适应动态规划方法),通过估计环境模型与函数逼近技术近似求解贝尔曼方程,避免维度灾难,并在连续控制中展现出出色表现。

基于此类方法可实现变形协调控制的智能化与高效化目标。Liu等<sup>[49]</sup>提出了一种基于近似动态规划(Approximate Dynamic Programming)和非线性干扰观测器(Nonlinear Disturbance Observer, NDO)的变形协调框架,将后掠角/翼展变形过程建模为多模态切换系统,采用基于值迭代的近似动态规划算法求解无限时域最优切换序列和控制输入,使控制器根据飞行状态智能选择最优构型组合,有效降低了高度-速度跟踪误差并增强了系统的鲁棒性。陈宇腾等<sup>[50]</sup>针对高超声速变形飞行器的纵向协调问题,通过鲁棒动态面控制(Robust Dynamic Surface Control, RDSC)生成基础高度-速度控制指令,结合自适应动态规划(Adaptive Dynamic Programming)进行补偿优化;在自适应动态规划框架下,评论家(Critic)网络和演员(Actor)网络通过迭代求解哈密尔顿方程,动态调整变形参数(如后掠角变化率)、油门开度和升降舵的协同策略,权衡跟踪误差与能量消耗,最终实现了轨迹精度和推力脉冲的双重优化。

侯忠生<sup>[51]</sup>提出的无模型自适应控制(Model Free Adaptive Control, MFAC)方法是一种基于在线数据的数据驱动控制方法,该方法通过将控制对象的输入/输出数据用于估计动态线性化模型中的伪偏导数,从而将非线性系统转化为动态线性模型。由于MFAC方法线性化的模型为动态线性模型,因此可引入基于模型的控制方法中的多种设计思路与技术手段<sup>[52]</sup>,相比其他数据驱动控制方法表现出显著优势。该方法已成功应用于强非线性、快时变且需快速响应的变形飞行器控制中,实现了在大范围变形、气动参数快速时变和外部干扰下的稳定控制<sup>[53-54]</sup>。未来可进一步结合MFAC无需精确模型、支持多输入扩展的特点,将变形量作为控制输入之一,开展变形协调控制相关研究。

#### 4.1.3 其他方法

在面向高度-速度跟踪的变形协调控制研究中,除前述多状态跟踪协调控制方法、数据驱动控制方法外,基于优化理论及博弈论框架的协调控制策略也展现出显著优势。这些方法通过构建特定的目标函数(如性能指标、博弈收益),将变

形机构的控制输入与传统气动舵面及发动机推力输入纳入统一的决策框架中进行协同优化或博弈求解。其核心在于利用数学工具(优化算法、博弈均衡求解)寻求多输入系统的最优或均衡控制律,在满足系统约束的同时,实现高度与速度参考指令的高精度跟踪,并有效利用变形带来的气动效益提升飞行性能。以下综述几种代表性的协调控制方法。

变形协调控制的实现途径多样,除前述方法外,基于优化理论的策略提供了有效解决方案。余挽强等<sup>[15]</sup>将大展弦比飞行器的二面角铰链扭矩作为独立控制输入嵌入线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)架构。相比仅采用升降舵作为控制输入的方案,这种主动变形控制通过实时调整气动布局生成等效升力,减小了高度通道的负超调量与变化率,提高了高度跟踪性能。针对传统优化方法难以处理状态受限的挑战,徐文丰等<sup>[55]</sup>提出了多模型预测控制(Multi-Model Predictive Control, MMPC)策略。该方法采用基于广义欧氏距离的模态判别方法选择最优线性化模型,并引入松弛变量将状态约束转化为二次规划问题,在保证优化问题可行性的同时,通过滚动时域优化协调控制变形机构、舵面和发动机推力,实现了变形飞行器在输入幅值和速率受限条件下的状态变量约束处理以及对参考轨迹的平滑跟踪。

另一方面,博弈论框架为解决变形协调问题提供了新颖视角。Wang等<sup>[56]</sup>提出微分博弈协调控制架构,将机翼变形控制输入与飞行状态控制输入分别建模为博弈参与者,通过构建包含跟踪误差与能量损耗的优化性能指标,将协调问题转化为纳什均衡解求解。该方法在非合作博弈模式下实现了变形机构与气动舵面的最优动态平衡。同样基于微分博弈框架,Wang等<sup>[57]</sup>针对高超声速变形飞行器提出了基于安全强化学习(Safe Reinforcement Learning, SRL)的自适应合作博弈控制方法。该方法在合作博弈框架下将机翼变形参数作为辅助控制输入与常规控制输入共同作用,使用控制障碍函数(Control Barrier Function, CBF)和tanh函数解决了飞行器状态约束和输入约束问题,为飞行器的安全变形协同控制提供了有

效解决方案。

本节从多状态跟踪的协调控制方法、数据驱动控制方法到优化与博弈理论,系统介绍了变形协调控制框架下解决高度-速度指令的跟踪的方法。通过将变形机构作为辅助控制输入,并设计多执行机构的协调决策机制,可有效克服传统单一舵面控制的物理局限,显著提升了高度通道的响应速度,并抑制速度耦合超调。

## 4.2 面向姿态控制的协调控制方法

飞行器变形过程伴随显著的气动/惯性耦合效应,这为姿态控制带来了挑战。传统方法常将变形视为需抑制的干扰源或预设的固定动作,难以有效应对大范围构型变化引发的强非线性、模型不确定性以及执行器冗余分配问题。主动将变形状态引入控制回路、与传统舵面协同构成异类执行器系统的变形协调控制为解决上述问题提供了一种新的思路。

飞行器姿态控制的核心在于驱动各执行机构偏转,以实现指令的稳定、准确、快速跟踪。在变形飞行器姿态协调控制框架下,变形量与气动舵面均被视为控制量。当执行机构数量超过跟踪目标自由度时,控制问题转化为过驱动问题,这通常需要基于凸优化方法的控制分配策略进行处理。优化控制理论通过构建统一的目标函数,将变形指令生成与飞行状态跟踪混合求解,能够显式地通过性能指标协调能量效率与跟踪精度,并基于控制分配理论实现异类执行器的动态冗余管理与能力融合。下面以控制分配框架下姿态控制关注问题的处理方法为维度,介绍姿态控制场景下的变形协调控制方法。

### 4.2.1 基于动态耦合与多目标优化的控制分配方法

为实现变形与飞行状态的动态耦合,进一步发挥变形飞行器的性能潜力,研究者们发展了多种协调策略。Wang等<sup>[58]</sup>通过非线性最小二乘拟合构建翼展变形率与后掠角变形率的显式映射模型,量化揭示翼展与升阻比变化的强非线性规律,并设计超螺旋积分滑模控制器(Integral Sliding Mode Control based on Super-Twisting Control, ISMC-STC),利用有限时间收敛特性在大气动参

数扰动下实现扰动精确补偿,有效抑制了传统滑模控制的抖振缺陷;该研究者<sup>[13]</sup>进一步将变形参数作为独立控制输入重构纵向非仿射模型,开发基于零空间修正的非线性分配算法,通过控制效率矩阵的动态加权优化,实现了在强扰动条件下,变形机构能有效分担控制力矩,并显著扩大升阻比的主动调控范围。变形能力的发挥需要综合考虑跟踪精度的约束和提升气动性能的需求,Zhao等<sup>[59]</sup>采用克里金代理建模表征变形后缘的气动特性,提出分层多目标粒子群优化(Hierarchical Multi-Objective Particle Swarm Optimization, HMOPSO)算法,按照分配误差最小化、升/阻系数优化和舵面偏转减小的优先级进行排序,实现控制目标解耦,将升阻比最大化转化为非线性控制分配问题,实现变形后缘与舵面的协同决策。为满足多目标优化下跟踪精度的要求,Zheng等<sup>[60]</sup>提出分层控制框架,通过优先级任务分配将高优先级的姿态控制与低优先级的气动效率优化解耦,在保证跟踪精度的基础上再提升升阻比,验证了动态一致性原则在多目标协同中的有效性。

#### 4.2.2 面向不确定性与扰动的鲁棒自适应分配方法

针对变形飞机面对的不确定性与扰动问题,鲁棒自适应分配方法通过结合先进控制策略与执行器协调机制,有效提升系统的稳定性。在Liu等<sup>[61]</sup>的研究中,设计了自适应控制律与分配算法结合的控制框架,通过在线调整控制增益与执行器权重,有效抑制了翼型变化引发的状态矩阵扰动,降低了跟踪误差,凸显自适应分配在强非线性系统中的鲁棒性。Liu等<sup>[14]</sup>则关注快速变形诱导的附加扰动问题,提出了非线性扰动观测器增量滑模控制(Nonlinear Disturbance Observer and Incremental Sliding-Mode Control, NDOISMC)框架,利用非线性扰动观测器实时估计并补偿由气动参数时变和未建模动态引起的未知扰动,结合增量滑模设计降低模型依赖性;采用SOCP来协调具有异构动态特性(变形机构响应慢 $\tau_w=0.5\text{ s}$ ,舵面响应快 $\tau_a=0.05\text{ s}$ )的执行器,实现了在高攻角机动时优先增大展长提升升力效能、调节后掠角增强俯仰响应的主动变形策略。针对非对称伸缩翼存在的强耦合效应,Yue等<sup>[62]</sup>建立了六自由度

时变动力学模型,通过滑模控制生成三轴力矩指令,并采用最小能量法动态协调翼展伸缩与舵面偏转的执行权重,在机动中提高了滚转角跟踪速度并降低能量损耗,验证了异类执行器的动态协同优势。另一种有效方法是基于气动指标在线优化变形参数<sup>[63]</sup>,通过实时优化升阻比或升力系数等指标决策最优变形量,并设计自适应律实时补偿由变形引起的机身几何偏差与质心偏移,利用动态面控制(Dynamic Surface Control, DSC)结合边界层估计机制,提升联合扰动下的跟踪精度与燃油效率。通过在线优化与扰动抑制,平衡模型不确定性与执行器的异构性,实现了高鲁棒性的机动性能提升。

#### 4.2.3 基于零空间修正的抗饱和分配方法

舵面输出饱和是姿态控制中的常见挑战,而变形协调控制为此提供了独特的解决方案。舵面输出受限时,可利用变形机构的冗余控制自由度动态补偿力矩损失。Wang等<sup>[64]</sup>提出了零空间增强型控制分配策略,当检测到舵面输出饱和时,通过零空间矩阵将饱和舵面的控制指令重新分配到翼展变形通道。该策略采用初始解校正算法,在伪逆法求得的基础控制量上引入零空间修正向量,动态调整变形率以精确补偿虚拟控制力矩,确保闭环系统稳定性不受执行器饱和影响。在非对称翼尖变形控制过程中,Liu等<sup>[65]</sup>设计了增量滑模控制器与二次规划动态分配律,将执行器动态特性引入优化目标函数中,构建综合考虑力矩跟踪精度与机构能耗的加权指标。当滚转舵面达到饱和边界时,分配算法通过解耦零空间将力矩需求实时分配给翼尖上反角,利用气动耦合效应生成补偿力矩,从而降低最大状态跟踪误差。这些研究共同推动了变形飞行器姿态控制逻辑的根本性转变。陈学海<sup>[66]</sup>的研究聚焦于复杂变形过程的闭环稳定性,提出了增益调度与超螺旋控制的复合框架:平飞阶段采用非线性扩张状态观测器(Nonlinear Extended State Observer, NESO)抑制慢变扰动;机动阶段则将后掠角作为辅助控制输入,结合伪逆法与零空间修正算法动态分配虚拟指令。该框架减小了舵面负荷,凸显了变形机构在抗饱和和控制中的独特价值。

综上,变形飞行器的姿态控制从预设变形到跟踪控制的串联架构到变形与飞行状态协调控制的并联架构的转变,使得变形机构从潜在的干扰源或约束条件,改变为有价值的主动控制自由度,与传统舵面共同构成了强大的异类冗余系统,为提升飞行器的综合性能开辟了新途径。

## 5 变形飞行器协调控制方法典型应用

飞行器通过变形,可以实现对气动力/力矩的调整,拓展飞行性能边界。在协调控制框架下,不仅可以使变形飞行器的变形能力与飞行状态耦合,实现一定目标下的轨迹优化;还可以将变形机构与气动舵面都视为控制输入,作为高度-速度跟踪和姿态控制的可用手段,表现出相比于固定翼飞行器更优的性能。基于此,在下面几种场景中应用变形飞行器协调控制方法,有望从方法框架层面进一步提高飞行器的性能。

### 5.1 异类多执行机构耦合控制

将协调控制方法应用于异类执行机构耦合控制,能够将执行机构的动态差异转化为设计自由度,从而提升系统性能。异类执行机构因物理特性不同,存在显著的带宽差异与响应滞后。传统静态分配或连续化近似策略容易引发指令跟踪误差增大、执行器饱和等问题,而协调控制框架通过动态差异的主动利用机制,有效解决了这些问题<sup>[67-68]</sup>。例如,李蔚蓝<sup>[67]</sup>提出的分层递进分配框架采用线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)优化的动态控制分配,将执行机构动态模型引入二次规划,补偿延迟导致的控制衰减,并通过变权值策略在线调整权重矩阵,这种方法通过分层物理特性解耦,解决了异类机构在低动压主导权切换时的协调问题。此外,从频域分配角度出发,Härkegård等<sup>[68]</sup>提出基于约束二次规划的动态分配方法,在目标函数中引入执行器速率惩罚项和稳态偏好项,通过调整权重使高频指令自动导向快执行器,低频指令导向慢执行器,从而将动态差异转化为频域设计自由度。这些方法的核心优势在于能够依据执行机构的动态特性差异,实现任务的自适应分配,提升系统的控制精度和

鲁棒性。

尽管变形飞行器基于协调控制的异类执行机构耦合控制研究取得了显著进展,但仍面临一些问题。变形飞行器的气动参数突变与质量分布变化会进一步放大执行机构的动态差异,引发控制抖振甚至失稳<sup>[69]</sup>。针对这一问题,Xu等<sup>[69]</sup>在反步控制中嵌入一阶动态模型,通过障碍李雅普诺夫函数限制舵面跟踪误差,并设计了自适应律补偿滞后干扰。Yan等<sup>[70]</sup>则采用自适应超螺旋算法(Adaptive Super-Twisting Algorithm, ASTA)来进行滑模控制,通过双闭环增益调节实时匹配执行机构慢响应动作与快响应动作,消除传统滑模的高频抖振。这些方法通过将执行机构动态模型直接引入控制器设计,主动协调变形引起的舵效非线性变化,实现变形/机构动态/飞行状态的闭环匹配。此外,当动态差异伴随未知参数摄动时,自适应机制成为协调差异与不确定性的核心手段。Tjønnås等<sup>[71]</sup>提出的基于李雅普诺夫稳定的自适应框架,通过参数化模型显式分离执行器动态与效应器非线性,设计动态控制分配更新律和自适应参数估计律,在线协调快慢执行器响应,同时结合扰动参数估计,实现推力损失突变下的渐进优化。这种方法的思想可直接迁移至变形飞行器,通过在线估计机翼变形角与气动参数漂移,实现慢速变形机构与快速推进器的能耗最优匹配。

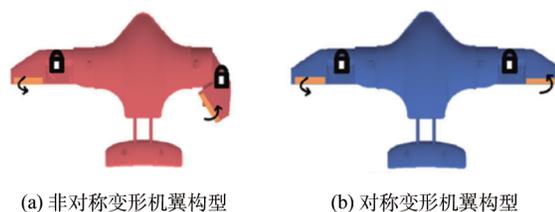
动态特性差异的主动利用是变形飞行器协调控制的核心技术趋势。其共性在于突破静态分配局限,通过多层次策略实现差异资源化:在差异建模层中,通过构建参数化映射及频域响应模型,量化异类机构的时/频域特性<sup>[67, 72-73]</sup>;在分配优化层中,采用LMI优化、混合规划、权重自适应等策略,依据飞行状态动态解耦快慢任务<sup>[67-68]</sup>;在补偿执行层中,通过本地化补偿器、自适应增益调节、动态约束嵌入实现精准跟踪<sup>[69-70]</sup>。通过自适应机制动态匹配变形阶段的舵效变化与执行器带宽,使系统在构型切换时仍维持控制鲁棒性,这不仅解决了传统方法因忽略动态差异导致的抖振、饱和及能效损失问题,还通过机构特性与飞行状态的实时匹配,实现跨域飞行中的控制自由度拓展与鲁棒性增强。

## 5.2 非对称变形控制

非对称变形控制通过几何非对称主动拓展了系统的控制自由度。相较于传统控制方法,协调控制能够更有效整合非对称变形与传统舵面的效能。非对称变形通过改变气动压力分布重构稳定性边界,如Si等<sup>[74]</sup>的研究证实变后掠飞行器左右机翼差动可以改善横向稳定性。此外,变形机构可规避传统气动舵面在大侧滑角机动时的饱和风险,同时弥补纯变形控制因慢动态特性导致的响应速度局限。通过协调控制手段可使系统能更高效地利用变形带来的气动收益,显著提升机动能力。

不过,非对称变形控制的实现仍面临多项挑战。首先,气动特性存在临界跃变现象:例如当后掠角超过阈值时,横向静稳定性导数符号反转,导致传统滚转控制律失效<sup>[74]</sup>。这需建立气动状态实时反馈机制,动态修正控制增益或在临界点切换舵面极性,以实现稳定性效应的主动利用。其次,变形机构固有的滞回效应、响应速度慢及小迎角工况下力矩不足等问题制约了控制精度。Lu等<sup>[75]</sup>通过构建显式表征滞回的二阶马尔可夫模型,结合改进的柔性演员-评论家(Soft Actor-Critic, SAC)算法与嫡正则化策略,实现了复杂飞行条件下翼型的快速精准跟踪。Liu等<sup>[76]</sup>则提出了一种非对称机翼变形模式,机翼可以根据飞行需要选择是否锁定左右机翼,图4展示的是锁定情况下的非对称与对称构型,研究者针对响应速度与气动耦合问题,基于非线性模型设计自适应协同控制律,根据实时攻角动态分配变形量,在维持滚转控制效能的同时减少副翼偏转,提高控制余量。针对机构响应迟滞问题,Ajaj等<sup>[77]</sup>提出效能比分时复用策略:在巡航阶段由变形机构提供高效滚转力矩,机动时切换至副翼主导的快速响应模式,有效平衡气动效率与动态需求。

控制架构的鲁棒性与功能弹性亦需强化。非对称变形与舵面的力矩耦合特性增加了执行机构协调复杂度,尤其在硬件故障时系统容错能力不足。对此,杨贯通<sup>[78]</sup>提出了“虚拟舵面”机制,当展长调节机构卡滞时,系统通过故障观测器计算其等效滚转力矩并作为前馈输入至副翼控制器,实现功能重构以减轻舵面负担。童磊<sup>[79]</sup>的监督控



(a) 非对称变形机翼构型

(b) 对称变形机翼构型

图4 一种非对称机翼变形模式<sup>[76]</sup>Fig. 4 An asymmetric wing morphing configuration<sup>[76]</sup>

制器-主控制器架构进一步扩展了决策维度,在监督层依据滚转角误差阈值自动切换变形模态,使得飞行器在方向舵失效等极端工况下仍维持可控飞行,展现了对场景的自适应重构能力。

综上,协调控制下的非对称变形研究通过气动状态反馈闭环<sup>[72]</sup>、智能算法动态优化<sup>[75-76]</sup>及机构功能虚拟化<sup>[78]</sup>等手段,实现了物理特性与控制律的深度适配。通过差动输入同步调节滚转/偏航力矩,结合虚拟舵面映射与模态切换机制,系统在提升气动效能的同时扩展了控制自由度,从根本上缓解传统舵面饱和和受限问题,并增强了对故障工况的功能弹性补偿能力。

## 5.3 容错控制

协调控制框架下的容错控制能够将系统故障的被动应对转化为资源优化的主动调控。在该框架下,基于自适应控制分配律,通过姿态跟踪误差在线修正控制效率矩阵,驱动健康舵面实时补偿故障机构效能,无需显式精确故障定位即可快速响应<sup>[80]</sup>。同时,采用智能分层解耦架构(如控制律层、故障检测层、分配层)可实现跨执行通道的协同补偿<sup>[81]</sup>。此策略通过协调分配算法,将故障机构的预期效能动态迁移至健康机构,实现等效补偿,有效降低对硬件冗余度的依赖性<sup>[78]</sup>。核心优势是将故障隐含于系统模型(如扰动模型或动态等效关系),通过动态控制分配直接实现控制效能的自主迁移,避免了传统故障检测与诊断带来的延迟问题<sup>[82]</sup>。

然而,在变形飞行器上应用基于协调控制的容错控制仍面临挑战,主要集中在异类执行机构特性差异与资源约束两方面。首要问题是故障导致本已存在的慢速变形机构与快速传统舵面(如气动舵)间的响应特性差异被进一步放大<sup>[78, 83]</sup>,

同时系统控制冗余度下降,使得剩余健康机构在物理约束(如舵偏角、舵速率、力/力矩限制)下可能无法完全满足对故障的等效补偿需求<sup>[78, 84-85]</sup>。为解决响应特性和资源限制问题,杨贯通<sup>[78]</sup>通过构建含不对称变形机构的线性变参数(Linear Parameter-Varying, LPV)模型,建立变形机构与常规操纵面的动态功能等效关系(如等效为滚转力矩生成器),使得在故障情况下慢速变形机构与快速舵面能形成动态互补。对于冗余度下降导致的资源约束难题,一种思路是优化算法设计。姚家桢<sup>[83]</sup>融合遗传学习粒子群算法与自适应重构策略,以操纵面偏转量、效能矩阵系数为多目标优化变量进行重分配,动态调整剩余健康舵面偏转幅度以最大化补偿能力。更进一步,针对大规模分布式执行器系统,江未来等<sup>[84]</sup>提出故障资源化调度策略,将执行器故障概率分布转化为整数约束,利用改进遗传算法进行优化,策略性地将部分故障执行器作为“免费资源”进行约束化再利用,激活其他健康执行器阵列,从而提高系统整体资源利用率与控制冗余,有效应对了概率性故障下的资源受限问题。

变形飞行器的容错能力需要通过可量化指标进行预评估,以确保系统在发生故障后具备足够的操纵裕度,避免因执行机构饱和或动力学失稳引发二次故障。刘易斯等<sup>[86]</sup>提出了舵面效能因子的概念,定义为舵面动力学状态空间方程的系数,用于量化舵面的实际偏转能力相对于理想状态的损耗程度;史静平等<sup>[87]</sup>构建的基于转矩可达集(Attainable Moment Subset, AMS)的分层容错空间管理框架,通过计算执行机构组合的AMS体积与三轴力矩边界,直接量化系统的最大容错潜力,为故障重构提供动态阈值参考。

综上所述,变形飞行器的容错控制本质是多执行机构动态功能冗余的协调调度。利用协调分配算法实现了在故障场景下变形过程与飞行状态的稳定过渡,完成了从被动应对到主动调控的资源优化范式转变。

## 6 结 论

变形飞行器的变形机构为实现飞行任务额外

提供了一种手段,如何充分发挥变形优势以实现飞行器性能的提升是此类飞行器控制系统要解决的重要问题。协调控制方法思路下,变形与飞行状态实现了动态匹配,与其余执行机构实现了协同控制,利用变形特性实现轨迹优化,真正将变形机构融入到了飞行器的任务实现中。本文通过对高度-速度跟踪和姿态控制两种场景下的变形协调控制方法进行总结,发现相较于独立控制,变形飞行器协调控制方法能够实现更好的抗干扰能力与更好的跟踪效果。协调控制下变形机构可视作为传统执行机构的补充乃至等效手段,基于此,将方法应用于变形飞行器异类执行机构的耦合控制、非对称变形控制与容错控制中,将更能实现变形能力的最大化。可以预见,随着智能方法、新材料等技术的发展,协调控制框架下的变形飞行器有望突破现有飞行器性能边界,实现更高维度的适应性、机动性与任务效能。

## [参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 冉茂鹏,王成才,刘华华,等.变体飞行器控制技术发展现状与展望[J].航空学报,2022,43(10):432-449.
- [3] 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(5):16-27.
- [4] 张旭辉,解春雷,刘思佳,等.智能变形飞行器发展需求及难点分析[J].航空学报,2023,44(21):8-34.
- [5] Chu L, Li Q, Gu F, et al. Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(5): 220-246.
- [6] Xu W, Li Y, Pei B, et al. A nonlinear programming-based morphing strategy for a variable-sweep morphing aircraft aiming at optimizing the cruising efficiency[J]. Aerospace, 2023, 10(49): 49-73.
- [7] Hua S, Wang X, Wang Z, et al. Integrated aerodynamic and trajectory studies of a long-range morphing missile[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2022, 59(6): 1934-1945.

- [8] 蔡光斌, 毛定坤, 杨芊, 等. 基于SDRE的变体飞行器LPV稳定控制[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(12): 4013-4020.
- [9] Li Y, Liu J, Wang C, et al. Disturbance rejection LPV control of morphing aircraft based on extended state observer[C]. International Conference on Guidance, Navigation and Control, Harbin, China, 2022.
- [10] Meng F Y, Wang T J, Chen G. Prescribed performance-based active anti-disturbance backstepping control for morphing aircraft [J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 152: 109386.
- [11] 卢家乐, 梁小辉. 面向变后掠过程的飞行器智能抗扰动控制[J]. 宇航学报, 2024, 45(12): 1997-2008.
- [12] 殷明. 变体飞行器变形与飞行的协调控制问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [13] 王子健. 变体飞行器的变形辅助机动控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [14] Liu J, Shan J, Wang J, et al. Incremental sliding-mode control and allocation for morphing-wing aircraft fast manoeuvring [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 131: 107959.
- [15] 余挽强, 刘燕斌, 陈柏屹. 大展弦比飞行器变形辅助高度控制策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(5): 1746-1752.
- [16] Jiang W, Zheng C, Hou D, et al. Autonomous shape decision making of morphing aircraft with improved reinforcement learning [J]. Aerospace, 2024, 11(1): 74-89.
- [17] 郭雷, 王恩美, 卢昊, 等. 仿生变构型飞行器智能控制技术: 进展与展望[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(4): 25-32.
- [18] 董彦非, 陈元恺, 彭金京. 可变后掠翼技术发展展望[J]. 飞行力学, 2014, 32(2): 97-100.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Pendleton E W, Bessette D. Active aeroelastic wing flight research program: Technical program and model analytical development [J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(4): 554-561.
- [22] Kudva J N. Overview of the DARPA smart wing project [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004, 15(4): 261-267.
- [23] Flanagan J S, Strutzenberg R C, Myers R B, et al. Development and flight testing of a morphing aircraft, the NextGen MFX-1 [C]. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Waikiki, Hawaii, USA, 2007.
- [24] Cumming S B, Smith M S, Ali A N, et al. Aerodynamic flight-test results for the adaptive compliant trailing edge [C]. Aiaa Atmospheric Flight Mechanics Conference, California, USA, 2016.
- [25] 王帅, 晁涛, 韩宇辰, 等. 变体飞行器变形策略与控制方法研究进展[J]. 战术导弹技术, 2024(4): 1-12.
- [26] 王臻, 杨智春, 崔高伟, 等. 变后掠伸缩变体机翼的受控运动[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(10): 1314-1319.
- [27] Muhammed S P, Ajaj R M, Akhan K. A compliant polymorphing wing for small UAVs [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(10): 2575-2588.
- [28] Muhammed S P, Zawar H, Rafic M, et al. A polymorphing wing capable of span extension and variable pitch [J]. Aerospace, 2022, 9(4): 205-229.
- [29] Cheung K, Cellucct D, Coppelstone G, et al. Development of mission adaptive digital composite aerostructure technologies [C]. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Colorado, USA, 2017.
- [30] Zhang C X, Zhang Y K, Wei C Z. Onboard trajectory generation of hypersonic morphing aircraft [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 2021(1): 1-11.
- [31] 朱睿颖, 齐征, 王兰松, 等. 可变构型飞行器航迹优化设计[J]. 战术导弹技术, 2020(5): 157-164.
- [32] 陈铁彪, 龚旻, 王洪波, 等. 临近空间可变形滑翔飞行器轨迹优化与性能分析[J]. 宇航学报, 2018, 39(9): 944-952.
- [33] Cai G, Qin J, Luo K, et al. Online trajectory planning of morphing vehicle based on sequential convex programming [C]. 2023 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Lingshui, China, 2023.
- [34] 王仰杰, 龙腾, 李俊志, 等. 高超变体飞行器再入轨迹罚函数序列凸规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(5): 1747-1759.
- [35] 彭悟宇, 杨涛, 王常悦, 等. 高超声速伸缩翼变形飞行器轨迹多目标优化[J]. 国防科技大学学报, 2019,

- 41 (1): 41–47.
- [36] Yang H, Chao T, Wang S. Robust multiobjective trajectory optimization for hypersonic telescopic wing morphing aircraft[C]. International Conference on Autonomous Unmanned Systems, Nanjing, China, 2023.
- [37] 周愉, 王永海, 杨丁, 等. 一种基于目标分层架构的变形飞行器智能规划方法[J]. 宇航学报, 2023, 44 (11): 1670–1682.
- [38] Dai P, Yan B, Liu R, et al. Integrated morphing strategy and trajectory optimization of a morphing waverider and its online implementation based on the neural network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 59383–59393.
- [39] Xu D. Research on optimization design method of autonomous deformation decision for intelligent morphing aircraft[C]. 2023 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Lingshui, China, 2023.
- [40] Xu D, Wang J. A new trajectory optimization design method of smart morphing aircraft[C]. China Automation Congress, Qingdao, China, 2024.
- [41] 杨博, 朱一川, 魏延明, 等. 折叠式变体飞行器轨迹优化及控制分析[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40 (3): 64–75.
- [42] 王青, 刘华华, 屈东扬. 一种基于DDPG的变体飞行器智能变形决策方法[J]. 宇航学报, 2024, 45 (10): 1560–1567.
- [43] Rudnick-cohen E S, Hodson J D, Reich G W, et al. Design and trajectory planning optimization of a morphing airfoil for 3-D flight maneuvers [C]. AIAA Scitech 2021 Forum, Nashville, USA, 2021.
- [44] Xu W, Li Y, Pei B, et al. Coordinated intelligent control of the flight control system and shape change of variable sweep morphing aircraft based on dueling-DQN[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 130: 107898.
- [45] 薛辰, 徐亮, 吕蓉蓉, 等. 基于滑模控制的折叠翼飞行器辅助机动研究[J]. 动力学与控制学报, 2019, 17 (1): 7–14.
- [46] 薛辰. 折叠翼飞行器变形过程飞行控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [47] 张泽鹏. 变体固定翼无人机动力学建模与飞行控制研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2025.
- [48] Cao R, Lu K. Trajectory tracking control of variable sweep aircraft based on reinforcement learning[J]. Biomimetics, 2024, 9 (5): 263–281.
- [49] Liu J, Shan J, Hu Y, et al. Optimal switching control for morphing aircraft with aerodynamic uncertainty [C]. 16th IEEE International Conference on Control and Automation, Hokkaido, Japan, 2020.
- [50] 陈宇腾, 常晶, 陈为胜, 等. 一种高超声速飞行器的纵向变形与飞行最优协调控制方法[J]. 宇航学报, 2025, 46 (3): 485–498.
- [51] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [52] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35 (6): 650–667.
- [53] Che H, Chen J, Bai G, et al. A modified model-free adaptive control method for large-scale morphing unmanned vehicles[J]. Drones, 2023, 7 (8): 495–515.
- [54] Che H, Chen J, Wang Y, et al. Data-driven model-free adaptive attitude control for morphing vehicles [J]. IET Control Theory & Applications, 2022, 16 (9): 1696–1707.
- [55] 徐文丰, 李颖晖, 裴彬彬, 等. 基于多模型MPC的变体飞机协调优化控制[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (9): 2902–2911.
- [56] Wang F, Wang J W. Optimal coordinated control for wing deformation and flight state of morphing aircraft via differential game[C]. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Xi'an, China, 2024.
- [57] Wang J W, Wang F, Wu H N, et al. Safe RL-based adaptive cooperative game control of wing deformation and flight state tracking for morphing hypersonic vehicles [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2025, 61 (4): 1–13.
- [58] Wang Z, Hou M, Hao M. Morphing-aided maneuver control of morphing aircraft with variable wing span and sweep angle [C]. International Conference on Guidance, Navigation and Control, Harbin, China, 2022.
- [59] Zhao X, Yang Y, Ma X. Kriging aerodynamic modeling and multi-objective control allocation for flying wing UAVs with morphing trailing-edge [J]. IEEE Access, 2021, 9: 62394–62404.
- [60] Zheng H, Cai G B, Wang Y C, et al. Integrated attitude and morphing control for morphing aircrafts: A method to improve aerodynamic efficiency [J]. Aerospace Science and Technology, 2025, 166: 110553.
- [61] Liu C, Zhang S. Novel robust control framework for morphing aircraft [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24 (2): 281–287.
- [62] Yue T, Zhang X, Wang L, et al. Flight dynamic mod-

- eling and control for a telescopic wing morphing aircraft via asymmetric wing morphing [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 70: 328–338.
- [63] Wang E, Lu H, Zhang J, et al. A novel adaptive coordinated tracking control scheme for a morphing aircraft with telescopic wings [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37 (2): 148–162.
- [64] Wang Z J, Hou M Z, Hao M R. Robust composite control of telescopic wing morphing aircraft with control allocation [C]. 2021 China Automation Congress, Beijing, China, 2021.
- [65] Liu X D, Xu Y, Luo J Q. An asymmetrically variable wingtip anhedral angles morphing aircraft based on incremental sliding mode control: Improving lateral maneuver capability [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38 (1): 103166.
- [66] 陈学海. 变后掠翼飞行器变形稳定与协调控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [67] 李蔚蓝. 具有异类冗余执行机构的飞行器控制分配研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [68] Härkegård O. Dynamic control allocation using constrained quadratic programming [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 27 (6): 1028–1034.
- [69] Xu W, Li Y, Lv M, et al. Modeling and switching adaptive control for nonlinear morphing aircraft considering actuator dynamics [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 122: 107349.
- [70] Yan B, Dai P, Liu R, et al. Adaptive super-twisting sliding mode control of variable sweep morphing aircraft [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92: 198–210.
- [71] Tjønnås J, Johansen T A. Optimizing adaptive control allocation with actuator dynamics [J]. *Modeling, Identification and Control*, 2008, 29 (2): 67–75.
- [72] Venkataraman R, Oppenheimer M, Doman D. A new control allocation method that accounts for effector dynamics [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Montana, USA, 2004.
- [73] Heer P D, De Visser C C, Hoogendoorn M L, et al. Incremental nonlinear control allocation for an aircraft with distributed electric propulsion [C]. *AIAA SCITECH 2023 Forum*, National Harbor, USA, 2023.
- [74] Si P, Wu M J, Huo Y Q, et al. Effect of wing sweep and asymmetry on flight dynamics of a sweep-morphing aircraft [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2025, 161: 110120.
- [75] Lu K, Fu Q, Cao R, et al. Asymmetric airfoil morphing via deep reinforcement learning [J]. *Biomimetics*, 2022, 7 (4): 188–207.
- [76] Liu Y B, Zhang J M, Gao L, et al. Employing wing morphing to cooperate aileron deflection improves the rolling agility of drones [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5 (11): 2300420.
- [77] Ajaj R M, Jankee G K. The transformer aircraft: A multi-mission unmanned aerial vehicle capable of symmetric and asymmetric span morphing [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76: 512–522.
- [78] 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.
- [79] 童磊. 不对称变后掠翼飞行器多刚体建模与飞行控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [80] 张泰雷. 控制分配算法研究及其在系统重构控制中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [81] 周丹. 小型固定翼无人机操纵面故障容错控制[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2023.
- [82] Xu S, Wei C, Zhang L, et al. Neural network based adaptive nonsingular practical predefined-time fault-tolerant control for hypersonic morphing aircraft [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37 (4): 421–435.
- [83] 姚家楨. 基于群智能算法的控制分配策略研究与设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [84] 江未来, 董朝阳, 王通, 等. 基于控制分配的一类变体飞行器容错控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40 (3): 355–359.
- [85] 苏浩秦, 邓建华, 葛彤. 控制效能与飞机多操纵面配置[J]. *西北工业大学学报*, 2003 (6): 711–713.
- [86] 刘易斯, 杨佑绪, 刘焱, 等. 考虑舵面效能柔性飞机阵风减缓控制系统[J]. *北京航空航天大学学报*, 2025, 51 (1): 248–256.
- [87] 史静平, 屈晓波, 毕可军. 一种基于转矩可达集的操纵面组合分配设计方法[J]. *西北工业大学学报*, 2014, 32 (1): 123–130.