

多节链式倾转旋翼飞行器构形重构与策略研究*

王续乔 杨 帅

(中国民航大学机器人研究所 天津 300300)

摘要:多节链式倾转旋翼飞行器具有多样的本体构形形态、丰富的组合变换序列以及非唯一的构形达成解集等特点。为使飞行器在应对不同任务条件时能够获得优越的飞行性能与任务达成的重构方案,进而提高其变体执行效率和任务适应性,本文研究了多节链式倾转旋翼飞行器的构形重构与策略。首先,分析了该飞行器的属性,并确定了通过性、稳定性和能耗3个关键因素作为重构策略的评价指标;其次,通过层次分析法(AHP)确定了各指标的权重,并基于加权平均法建立了重构决策方法;最后,通过实验验证了重构策略的有效性和科学性,结果表明该重构策略将综合评分平均提高了26.87%,有效改善了飞行器的性能,特别是在通过性和稳定性方面。研究结果表明,所提出的重构策略不仅提升了飞行器在复杂环境中的自适应能力,还为未来无人机技术的发展提供了重要的理论基础和实践指导。

关键词:变体飞行器;构形重构策略;评价指标;加权平均;自适应能力

中图分类号: TP242; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Configuration reconstruction and strategy of multi-section chain tiltrotor aircraft

Wang Xuqiao Yang Shuai

(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The multi-section chain tiltrotor aircraft possesses diverse body configurations, rich combination transformation sequences, and non-unique configuration solution sets. To enable the aircraft to achieve optimal flight performance and mission accomplishment schemes under varying mission conditions, thereby enhancing its variant execution efficiency and mission adaptability, this study investigates the configuration reconstruction and strategy of multi-link tiltrotor aircraft. Initially, the attributes of the multi-section chain tiltrotor aircraft were analyzed, identifying three key factors: passability, stability, and energy consumption, as evaluation indexes for the reconstruction strategy. Subsequently, the weights of each index were determined using analytic hierarchy process (AHP) analysis, and a reconstruction decision-making method was established based on the weighted average approach. Finally, the effectiveness and scientific validity of the reconstruction strategy were verified through experiment. The results indicated that the reconstruction strategy increased the comprehensive score by an average of 26.87%, effectively enhancing the aircraft's performance, particularly in terms of passability and stability. These findings suggest that the proposed reconstruction strategy not only improves the adaptability of the aircraft in complex environments but also provides a significant theoretical foundation and practical guidance for the advancement of drone technology in various applications.

Keywords: variant aircraft; configuration refactoring strategy; evaluation indexes; weighted average; adaptability

0 引言

变体飞行器是一种具有高度自适应能力的新型飞行器,其结构特点、飞行特点以及应用背景体现了未来航空技术的发展方向^[1]。

结构特点方面,变体飞行器能够根据飞行任务、飞行剖面或飞行环境的需求,通过变形机构改变自身的外形形状,以实现最佳的气动性能和飞行效率。这种变形能力使得变体飞行器在不同的飞行条件下都能保持最优的飞行状态,从而提高飞行器的综合性能。变体飞行器的变形方式多样,包括但不限于仿生型变体飞行器、变后掠翼飞行器、机翼前缘变弯度飞行器、机翼变后缘飞行器、折叠机翼飞行器和柔性机翼飞行器等^[2]。这些变形结构的设计和实现,依赖于智能材料和结构技术的支持,如驱动、变形、承载、传感等特点^[3]。

飞行特点方面,变体飞行器通过改变结构几何参数,有效地改善了飞行特性,如增大升力、减小阻力、增大航程与航时等^[4]。这种飞行自适应能力不仅提高了飞行器的机动性和灵活性,还能够在复杂多变的环境中保持高效的飞行性能^[5]。此外,变体飞行器的动力学建模与飞行控制技术也是其飞行特点的重要组成部分,这些技术的发展为变体飞行器提供了精确的飞行控制能力^[6]。

应用背景方面,变体飞行器的应用前景非常广阔,既可以在军事领域发挥重要作用,也可以在民用领域中得到广泛应用。在军事领域,变体飞行器可以用于执行侦察、监视、打击等多种任务,其高度的自适应能力和优异的飞行性能使其成为未来战争中的重要力量^[5]。在民用领域,变体飞行器可以通过智能变形技术,提高飞行舒适性并降低成本,满足人们对于高效、经济、舒适的航空旅行需求。

变体飞行器面临的特殊任务的应对方法主要涉及到其不同飞行环境和任务中能够主动或被动地改变外形结构,以确保始终具有最优的飞行性能。这种能力使得变体飞行器在大范围多任务需求下表现出极高的适应性和优势^[7]。国内外对变体飞行器重构策略的研究现状表明,这一领域已经取得了一系列重要进展。

在国际上,变体飞行器的研究受到了广泛的重视,美国等国家都有各自的相关研究计划,并且在某些型号的飞机上进行了初步应用,得到了显著效果^[8]。这些研究主要集中在如何设计合理可行的变形机构以实现期望的结构变形,以及在飞行中发生结构变形时如何协调变形机构的控制与飞行器自身的运动控制^[7]。例如,基于增强学习的自适应变体策略与飞行控制方法研究,提出了一种新型的变体飞行器翼型自适应控制方法,可以很好地满足变体飞行器在多任务状态下保持最优性能的

需要^[9]。

在国内,变体飞行器的研究尚处于初步探索阶段,目前局限于理论研究和地面样机模型测试,距离实际应用还需进一步努力^[10]。尽管如此,国家自然科学基金等基金项目已经将其列为资助对象,显示出国内对变体飞行器研究的重视和支持^[8]。

在技术层面,变体飞行器的研究涵盖了动力学建模、变形与飞行的特性分析、不同任务需求下的变形飞行过程与协调控制策略等多个方面。例如,通过气动仿真软件 DATCOM 获取相关工作点的纵向气动参数,建立气动参数关于结构变形的函数模型,明确结构变形能够直接改变飞行器气动特性的重要性^[7]。

综上所述,目前针对变体飞行器的自主变形策略的研究仍较为稀缺^[11]。多节链式倾转旋翼飞行器具备面向受限空间的穿越飞行能力,其本体构形形态多样、组合变换序列丰富、构形达成解集不唯一,因此迫切需要研究构形动态重构策略,使飞行器在应对不同任务条件时获得优越的飞行性能与任务达成方案,从而提高变体执行效率和任务适应性。

本文以多节链式倾转旋翼飞行器为研究对象,首先分析可重构飞行器的属性及构形重构策略的需求;其次,考虑飞行器在通过性、稳定性和能耗方面的约束,确定重构策略的评价指标并数学化,对各指标进行归一化处理,确定权重系数;然后,基于加权平均方法求解飞行器的变形策略;最终在搭建的飞行仿真环境中对重构策略的有效性和科学性进行仿真验证,以完成对变体飞行器构形重构策略的研究。

1 变体旋翼飞行器重构策略需求分析

1.1 构形动态重构分析

可重构旋翼飞行器的设计旨在通过改变机体构型来适应不同的飞行环境和任务需求。这种设计通常采用模块化结构,如链式模块化结构,或具备横向倾转能力的链式旋翼机体结构,以及四旋翼飞行器增加倾转自由度的设计^[12-14]。这些设计允许飞行器在狭窄空间中通过构型变换实现连续运动作业的能力,提高其环境适应能力。

多节链式布局的飞行器在穿越窄空间的方面具有较大的天然优势。通过链式机臂的旋转关节,改变机臂相对飞行器机体的位置从而实现改变飞行器自身几何特征参数。

受此启发,设计了模块化的机臂旋转装置^[15]。将旋转关节分为 A、B 两部分,如图 1(a)、(b)所示。A 部分与被驱动机臂相连,B 部分可与另一机臂相固连,如图 1 所示。A 和 B 相连构成机臂的旋转关节,如图 2 所示。B

部分中含有一个数字舵机,为旋转关节提供扭矩。

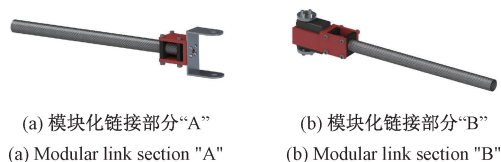


图1 模块化链接部分“A”

Fig. 1 Modular connection part “A”



图2 模块化旋转关节

Fig. 2 Modular rotary joint

通过机臂和模块化的旋转关节的连接,可得到具备可重构的飞行器本体,如图3所示。本飞行器具有3个旋转关节和4个机臂。加入机臂旋转关节之后,多节链式飞行器可实现以下几种典型状态的构形及其状态之间的连续变换,如图4所示,图4(a)~(d)分别为飞行器的4种典型构型。

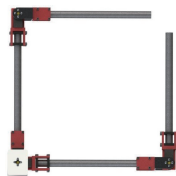


图3 引入机臂旋转关节的可重构机体

Fig. 3 The reconfigurable body is introduced into the rotating joint of the arm

可重构旋翼飞行器构形重构问题的分析涉及多个方面,包括设计原理、动力学建模、控制策略、气动性能优化以及实验验证等。通过综合考虑这些因素,可以设计出能够适应复杂环境和任务需求的高效、稳定的重构策略。未来的研究应探索更高效的变形机构设计、更精确的动力学和气动模型,以及更先进的控制策略,以推动可重构旋翼飞行器技术的发展。

1.2 飞行器重构策略评价指标分析

可重构旋翼飞行器构形重构策略评价指标的需求分析主要涉及到飞行器在不同环境和任务需求下,通过改变其结构或构型来适应特定条件的能力。这种能力对于提高飞行器的灵活性、效率 and 安全性至关重要。

首先,可动态重构的旋翼飞行器通过改变机体构形实现对空间变化的运动应对,提高飞行器在复杂环境下连续运动作业的能力。这种设计允许飞行器通过旋转关节实现构形的2维变化,从而在遇到空间限制时能够调整其形状以适应狭窄的空间。此外,通过几何运算和航

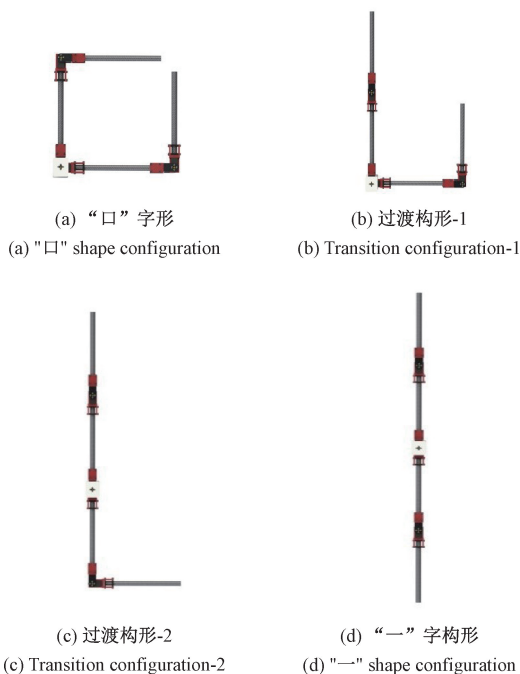


图4 可重构机体的4种典型构形

Fig. 4 Four typical configurations of the reconfigurable body

向控制的方式,飞行器的通过半径可以显著缩小,最大可达67%。这表明,在设计可重构旋翼飞行器时,必须考虑到如何有效地通过狭窄空间的能力,这对于确保飞行器能够在各种环境下的有效性和灵活性至关重要。

其次,稳定性是评估任何飞行器设计的重要指标。研究表明,在构形变换过程中,飞行器姿态稳定,无明显突变,各轴向最大变化量在 4° 以内。这意味着即使在进行构形重构时,飞行器也能保持良好的稳定性,这对于确保飞行安全至关重要。此外,濒近临界构形时飞行器操控顺畅,跟踪控制响应能够在0.1 s内完成^[16],进一步证明了其稳定性和快速响应能力对构形重构的重要性。

此外,能耗是衡量飞行器经济性和环境影响的重要指标。从可重构旋翼飞行器的设计理念来看,通过优化机体构形和采用高效的驱动方案,可以有效降低能耗。例如,采用基于四面体单元的变形翼骨架设计,具有多自由度、分布式驱动等特点,这种设计有助于提高能量利用效率,从而降低能耗。

可重构旋翼飞行器的构形重构策略需要综合考虑窄间隙条件、稳定性和能耗这3个关键因素。通过对机体构形的动态调整,不仅可以提高飞行器在复杂环境下的适应性和通过能力,还可以确保飞行器的稳定性和经济性。未来的研究应继续探索更高效的动力系统和控制策略,以进一步优化飞行器的性能和降低能耗。

2 多节链式飞行器构形重构策略

2.1 飞行器构形重构策略评价指标

可重构飞行器构形重构策略评价指标的制定是一个复杂的过程,需要综合考虑多个方面的因素。可重构飞行器变形策略的指标应包括变形效率和精度、气动性能优化、结构设计与材料应用、控制系统的鲁棒性和可靠性、适应性和灵活性以及经济性和工程化可行性等多个方面。这些指标共同构成了一个全面的可重构飞行器变形策略的框架。经过以上的需求分析,本文综合考虑将飞行器各构形的通过性、稳定性和能耗 3 个关键因素作为飞行器构形重构策略的 3 个评价指标。

1) 构形通过性评价指标分析

通过性指标主要关注飞行器在特定任务或环境下的表现能力,包括其适应性和灵活性。变体飞行器的研究表明,通过在飞行过程中自主改变气动外形来提高飞行效率和增强机动性,可以优化不同飞行环境和任务条件下的适应性。因此,通过性指标可以通过评估飞行器在不同飞行条件下尺寸大小来量化获取。

获取的方式是在 Solidworks 中将飞行器的三维模型生成工程图,测量每个视图的尺寸大小,将飞行器与窄间隙的尺寸大小比较从而获取飞行器的通过性。分别获取 4 种典型构形的工程图如图 5 所示。

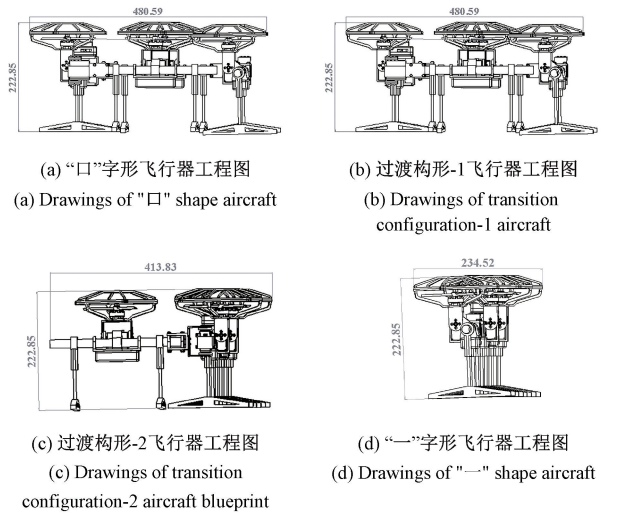


图 5 4 种典型构型的工程图
Fig. 5 Drawings of four typical configurations

并计算得到每个构形的穿越窄间隙时所对应的通过尺寸大小,再通过与窄间隙的尺寸大小 0.2 m^2 比较得到每个构形的通过性的数据。比较方法分别计算各飞行器构形的通过尺寸与窄间隙尺寸之间的比例,得到各构形具体通过性归一化数值如表 1 所示。

表 1 飞行器各构形尺寸
Table 1 The size table of each configuration of the aircraft

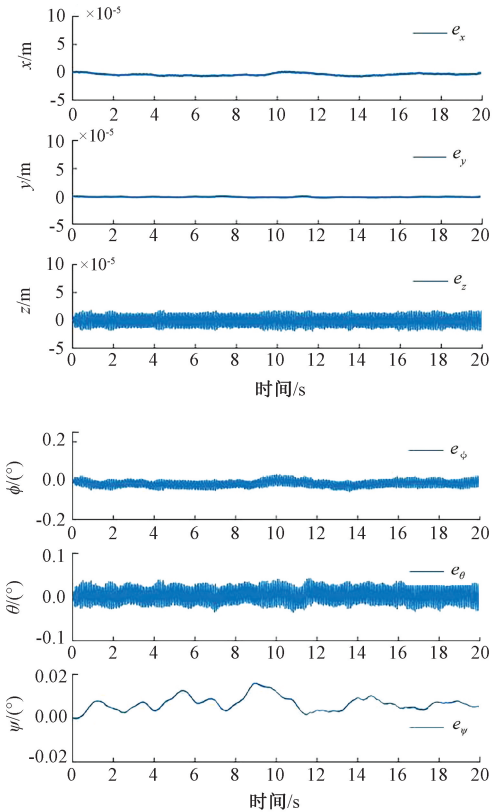
飞行器构形	通过尺寸/ m^2	比例	通过性归一化数值
“口”字形	0.107	0.669	0.000
过渡构形-1	0.107	0.669	0.000
过渡构形-2	0.092	0.575	0.275
“一”字形	0.052	0.325	1.000

2) 构形稳定性评价指标分析

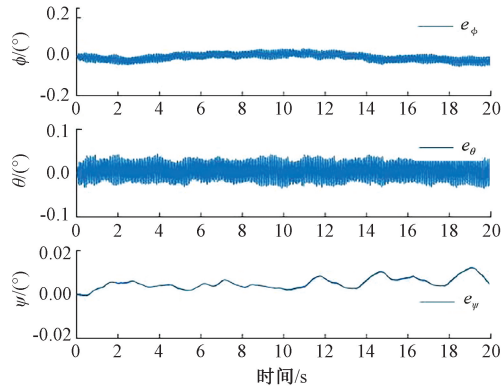
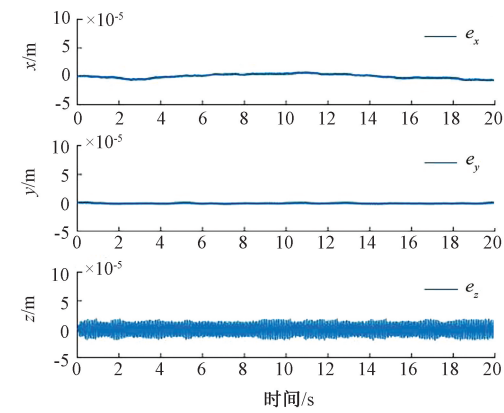
稳定性指标关注飞行器在面对各种内外部干扰时保持正常运行的能力。稳定性指标可以通过评估飞行器在特定飞行条件下的动态稳定性和操纵性来量化获取。

为得到多节链式倾转旋翼飞行器在不同典型构型下的控制稳定性,基于 MATLAB/Simulink 搭建了多节链式倾转旋翼飞行器仿真环境,设计仿真实验得到飞行器在不同构形下的位姿控制的稳定性。图 6 所示分别为在 4 种典型构型下飞行器的位置和姿态的跟踪误差曲线。

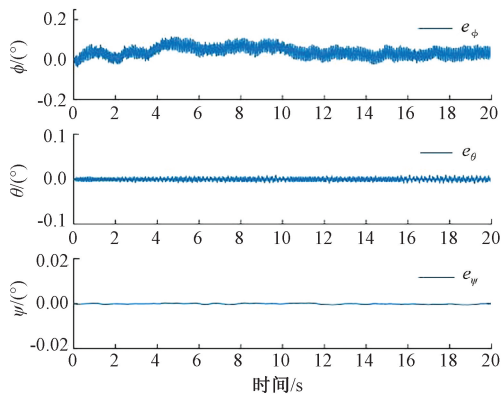
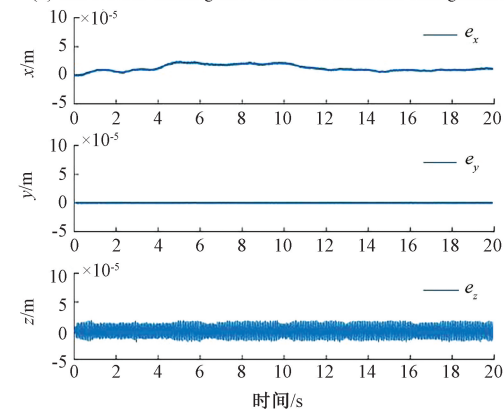
图 6(a)~(d)为飞行器在“口”字形、过渡构形 1、2、以及“一”字形构形下的位置误差及姿态误差数据,对不同状态下仿真数据横向对比,可以发现随着飞行器的机械关节的展开,飞行器的控制坐标系原点到飞行器机体坐标系原点的位置矢径不断变小,飞行器俯仰轴力臂逐渐变小,相当于系统的阻尼增大,从而导致系统的超调变



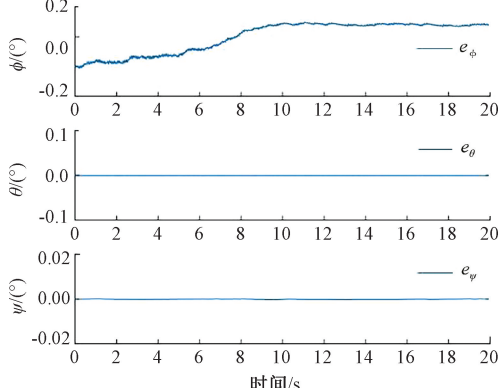
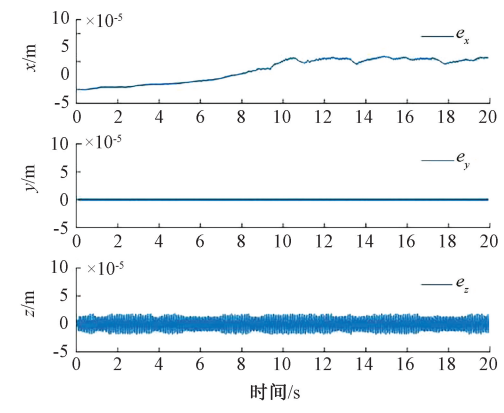
(a) The attitude tracking error curves of “口” shape aircraft



(b) 过渡构形-1 飞行器位姿跟踪误差曲线
(b) The attitude tracking error curves of transition configuration-1



(c) 过渡构形-2 飞行器位姿跟踪误差曲线
(c) The attitude tracking error curves of transition configuration-2



(d) “一”字形飞行器位姿跟踪误差曲线
(d) The attitude tracking error curves of “一” shape aircraft

图 6 4 种典型构形飞行器位姿跟踪误差曲线
Fig. 6 The attitude tracking error curves of four typical configurations

小。飞行器偏航轴随着多旋翼飞行器 1 号和 4 号的电机位置与飞行器机体坐标系原点的位置矢径不断变大,相当于增大了系统的开环增益,使得飞行器偏航的误差变小。以上数据反应的情况显示出飞行器的稳定性发生变化。

对比飞行器的各个状态下的仿真数据,进行归一化处理得到不同构形下的稳定性的数据如表 2 所示。

表 2 飞行器各构形稳定性归一化数值	
Table 2 The numerical table of the stability normalization of each configuration of the aircraft	
飞行器构形	稳定性归一化数值
“口”字形	1.000
过渡构形-1	0.750
过渡构形-2	0.750
“一”字形	0.000

3) 构形能耗评价指标分析
能耗指标主要关注飞行器在执行变形任务过程中的

能源消耗效率。综合模块化航电重构模型可靠性评估研究提出了基于马尔可夫过程建立的可靠度数学模型,分析计算出可靠度结果,并结合工程实例验证了重构手段对于可靠度的提升效果^[17]。这些研究表明,能耗指标可以通过评估飞行器在特定任务条件下的能源消耗效率来量化获取。

多节链式倾转旋翼飞行器的能耗包括构形变形能耗、低匀速飞行能耗。这两部分的能耗在不同的构形下有所不同,因此讨论分析不同构形下的飞行器的能耗是有必要的。

飞行器在悬停状态下的变形的能耗通过将变形过程中每个关节的旋转能耗累加得到,即:

$$P = \sum P_i$$

(1)

式中: P_i 表示第 i 个关节旋转 90° 的能耗; P 表示完成变形任务各个关节旋转的能耗总和。

飞行的能耗则包括穿越窄间隙前后两段飞行过程的能耗,因此计算各个构形状态下单位时间内低匀速飞行的能耗,最终计算各构形总能耗数据并归一化处理得到如表 3 所示。

表 3 飞行器各构形能耗归一化数值

Table 3 The numerical table of normalized energy consumption for each configuration of the aircraft

飞行器构形	飞行能耗
“口”字形	1.000
过渡构形-1	0.571
过渡构形-2	0.286
“一”字构形	0.000

2.2 飞行器构形重构策略获取

为了建立可重构飞行器构形重构策略,采用基于层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 的方法来综合考虑通过性、稳定性和能耗这 3 个指标的权重,通过线性归一化和加权平均方法法的组合,建立一个综合的策略模型,综合考虑通过性、稳定性和能耗这 3 个指标,并基于它们的相对重要性对飞行器进行评估,得到评价结果,确定可重构飞行器构形重构策略。

1) 基于 AHP 的评价指标权重设计

利用 AHP-熵权法对 3 个指标进行权重分析,首先需要明确的是,AHP 和熵权法各自的优势。AHP 是一种通过构建层次结构模型,将复杂的策略问题分解为多个层次的子问题,并通过成对比较的方式确定各因素之间的相对重要性,从而获得各因素的权重的方法。而熵权法则是一种基于信息熵的概念,通过计算各指标所含信息量的大小来确定其权重的方法,它能够有效反映指标数据的分散程度,具有客观性。

结合 AHP 和熵权法进行 3 个指标的权重分析,可以充分利用两者的优点,既考虑了专家的经验 and 主观判断,又兼顾了数据的客观性和信息量的大小。具体步骤如图 7 所示。

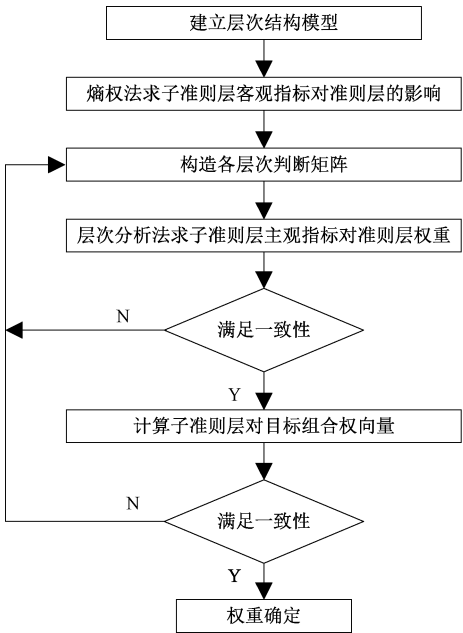


图 7 基于 AHP 方法的评价指标权重获取步骤
Fig. 7 The steps of obtaining the weight of evaluation index based on AHP method

通过构形策略的需求,比较矩阵 A 如下 (使用 1~9 的尺度,其中 1 表示相等,3 表示有轻微优势,5 表示明显优势,7 表示强烈优势,9 表示极端优势):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

(2)

计算比较矩阵的最大特征值和对应的特征向量,然后标准化得到权重向量。这里省略详细计算步骤,计算结果最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.1$ 和特征向量 $\alpha = [0.43 \ 0.29 \ 0.28]^T$ 。

计算一致性指标 CI 和一致性比率 CR 。在这里,省略详细计算步骤,一致性指标 $CI = 0.1$;一致性比率 $CR = 0.04$ 。

在整个层次结构中,对所有权重向量进行一致性检验,确保各层次之间的权重分配是相对一致的。

将准则层下的权重向量汇总,得到最终的权重向量。这个向量反映了“通过性”、“稳定性”、“能耗”3 个评价指标的相对重要性。最终得到 3 个指标的权重向量 $\omega = [0.43 \ 0.29 \ 0.28]^T$

2) 基于加权平均的构形重构策略

使用线性归一化方法对指标进行归一化,并基于加权平均法来建立评价体系。

对通过性、稳定性和能耗指标进行线性归一化,将它们映射到 $[0,1]$ 的范围内。将得到的通过性、稳定性和能耗指标的具体值;通过性指标值 p 、稳定性指标值 s 、能耗指标值 e 。

对给定的指标值进行线性归一化,将其映射到 $[0,1]$ 的范围内,以便进行比较和加权求和。通过性指标的取值范围是 $[p_{\min},p_{\max}]$,稳定性指标的取值范围是 $[s_{\min},s_{\max}]$,能耗指标的取值范围是 $[e_{\min},e_{\max}]$ 。

归一化的通过性值 np ：

$$np = \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \tag{3}$$

归一化的稳定性值 ns ：

$$ns = \frac{s - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \tag{4}$$

归一化的能耗值 ne ：

$$ne = \frac{e - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \tag{5}$$

使用指标的归一化值和相应的权重,计算综合评分 m ：

$$m = \omega_1 \times np + \omega_2 \times ns + \omega_3 \times ne \tag{6}$$

由于各指标都经过归一化处理,因此综合评分 m 的计算结果与飞行器性能表现是正相关的,即综合评分 m 数值越高表示飞行器的性能越好。根据式(6)计算得到的综合评分如表 4 所示。

表 4 飞行器各构形综合评分

Table 4 The numerical table of normalized energy consumption for each configuration of the aircraft

飞行器构形	综合评分
“口”字形	0.570
过渡构形-1	0.587
过渡构形-2	0.416
“一”字形构形	0.430

对 m 进行排序比较不同旋翼飞行器构形的综合评分,较高的评分 m 表示飞行器性能较好,进而获取变体飞行器构形的重构策略,即以最高评分的“X”构形作为构形重构的策略结果。

3 实验论证与分析

3.1 方法有效性论证

有效性实验条件设定,随机采用各重构构形与经重

构策略获取的“X”构形进行穿越窄间隙比较实验。

对于每种构形方式,使用相同的窄间隙条件即设置窄间隙尺寸相同,记录通过性、稳定性、能耗数据。对于每个实验步骤,记录各构形通过窄间隙时的通过性、稳定性、能耗数据。确保实验数据记录准确、完整,并能够直观地反映构形在不同条件下的性能表现。

对实验数据进行分析,比较不同构形的性能表现。使用统计方法, t 检验或方差分析,评估各组数据之间的差异是否具有统计学意义。

根据实验结果,得出不同构形在窄间隙条件下的性能表现,评估决策前后构形的差异和决策的效果。

通过以上有效性实验设计,对决策前后构形的性能进行全面的比较和评估,从而验证重构策略的有效性。

不同构形在窄间隙条件下的通过性、稳定性和能耗归一化数据表现如表 5 所示。

表 5 不同构形在窄间隙下的飞行性能表现

Table 5 The flight performance of aircraft of different configurations under narrow gaps

构形	通过性	稳定性	能耗
“口”字构形	0.000	1.000	1.000
“口”字构形→过渡构形-1	0.000	0.750	0.571
“口”字构形→过渡构形-2	0.275	0.750	0.286
“口”字构形→“一”字构形	1.000	0.000	0.000
“口”字构形→“X”构形	0.000	0.750	0.571

通过性数据分析,使用方差分析 (analysis of variance,ANOVA) 比较不同构形之间通过性的差异是否具有统计学意义。

方差分析结果显示 F 值为 6.5, p 值为 0.003,表明不同构形之间的通过性存在显著差异($p<0.05$)。

稳定性数据分析,使用 t 检验比较不同构形之间稳定性的差异是否具有统计学意义。 t 检验结果显示稳定性数据的差异具有统计学意义($p<0.05$)。

能耗数据分析,使用 t 检验比较不同构形之间能耗的差异是否具有统计学意义。

t 检验结果表明能耗数据的差异不具有统计学意义($p>0.05$)。

有效性实验数据分析,比较决策前后构形的数据,使用 t 检验确定差异是否具有统计学意义。

通过性和稳定性数据的差异在统计上具有显著性($p<0.05$),而能耗数据的差异则不显著($p>0.05$)。

决策后的“X”构形相比于未经决策的构形,综合评分平均提高了 26.87%。在通过性和稳定性上有显著提升,而在能耗上的改进不显著。这表明重构策略能够有效地改善飞行器的性能,但可能对能耗的改进效果有限。

3.2 方法科学性论证

科学性实验条件设定为不同初始条件下的窄间隙条件。

设定初始构形,决策后的构形(X 字构形)和未决策的构形。

设定窄间隙条件,3 种不同尺寸的窄间隙分别为 0.15、0.20 和 0.25 m²。

记录每个实验条件下飞行器的通过性、稳定性和能耗数据如表 6 所示。

表 6 不同初始条件下飞行器各构形飞行性能表现
Table 6 The flight performance of each configuration of the aircraft under different initial conditions

构形	窄间隙尺寸	通过性	稳定性	能耗
X 构形	0.15	1.000	0.750	0.571
X 构形	0.20	0.000	0.750	0.571
X 构形	0.25	1.000	0.750	0.571
“口”字构形	0.15	1.000	1.000	1.000
“口”字构形	0.20	0.000	1.000	1.000
“口”字构形	0.25	1.000	1.000	1.000
过渡-2 构形	0.15	0.600	0.750	0.286
过渡-2 构形	0.20	0.275	0.750	0.286
过渡-2 构形	0.25	0.500	0.750	0.286
“一”字构形	0.15	0.000	0.000	0.000
“一”字构形	0.20	1.000	0.000	0.000
“一”字构形	0.25	0.000	0.000	0.000

使用方差分析来比较决策后构形和未决策构形在不同初始条件下的通过性、稳定性和能耗数据之间的差异,并评估是否具有统计学意义。根据结果,可以确定策略的有效性。

对通过性、稳定性和能耗分别进行 3 组方差分析,以评估差异是否显著。然后,可以使用 Tukey’s HSD 检验来确定具体哪些条件之间存在显著差异。

最终,得到一个数据分析报告,说明决策后构形与未决策构形在不同初始条件下的性能差异,并评估重构策略的有效性。

科学性实验数据如表 6 所示,其中窄间隙尺寸单位为 m² 通过性数据,稳定性数据,能耗数据以归一化后的数据为结果。

根据科学性实验的结果,可以初步评估重构策略的科学性,但需要综合考虑以下 3 点。

1) 通过性数据的改善,在科学性实验中,决策后的构形在通过性方面明显优于未经决策的构形,这表明重构策略在改善飞行器通过窄间隙的能力上是有效的。

2) 稳定性数据的改善,在横向对比实验中,决策后的构形在稳定性方面也表现优于未决策的构形。这表明重构策略不仅改善了通过性,还提高了飞行器的稳定性,从

而增强了其在复杂环境下的飞行能力。
3) 能耗数据的趋势,虽然能耗数据的差异在横向对比实验中并不显著,但能耗随窄间隙宽度的增加而减少的趋势。这表明重构策略在考虑到能耗的同时,也在一定程度上取得了改善。

3.3 重构策略实测分析

可重构飞行器构形重构策略的实测是通过对飞行器重构过程进行测试,验证构形重构策略下的性能。首先,选择一组合适的性能指标,如飞行稳定性、能量消耗、任务完成率等,作为评估指标。然后,将飞行器的初始构形设置为某一构形,并运行仿真模型,记录各项性能指标。接着,根据设计的构形重构策略,对飞行器进行构形重构,并再次运行仿真模型,记录性能指标。最后,根据仿真结果,对构形重构策略进行评估,并对其进行进一步优化和改进。对实验数据进行分析,比较不同构形的性能表现。

实测数据及策略评估如表 7 所示。

表 7 不同构形在窄间隙下重构的实测数据
Table 7 The measured data of reconstruction of different configurations under narrow gaps

构形	通过性	稳定性	能耗	综合评分
“口”字构形	0.010	0.980	1.000	0.574
过渡构形-1	0.005	0.740	0.560	0.583
过渡构形-2	0.290	0.730	0.300	0.420
“一”字构形	0.990	0.010	0.005	0.430

对实测数据进行分析,将各性能指标的数据进行归一化处理后,根据各指标的权重大小计算加权平均值得到对应的综合评分值。由表 7 可知,实测综合评分与理论数据保持一致。因此,验证的重构策略的实际可行性。

4 应用效果与工程实践意义

4.1 实验平台

采用实体多节链式倾转旋翼飞行器作为实验平台,以验证所提出的构形重构策略的实际有效性。进而使飞行器具有优良的机动性和适应性,适用于气象探测、城市移动检测、高压线路特种作业等多种任务场景的应用^[18-20]。实验平台为多节链式旋翼飞行器如图 8 所示,除包含常规旋翼飞行器的结构布局构形外,还能够呈现某些特定构形,能够根据不同任务需求进行快速重构,用以应对运动空间的变化。机体由等质均匀的机臂单元首尾串接而成,机臂单元两端安装有可水平运动的电控关节,其中部安装倾转矢量机构,以更好地满足关节展开后的滚转力矩需求。

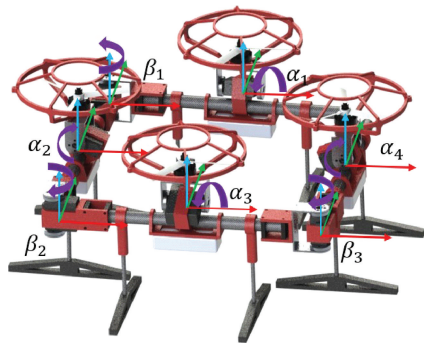


图8 多节链式倾转旋翼飞行器

Fig. 8 Multi-segment chain tilt-rotor aircraft

实验流程分为任务设定、构形重构实施和数据采集3个步骤。首先,定义飞行器需要完成的具体任务,该实验以穿越窄间隙为任务。接着,根据任务需求调整飞行器的构形。最后,利用传感器实时监测飞行器的飞行状态,包括速度、稳定性和能耗等关键指标。

4.2 重构策略实测分析

通过实物飞行器进行的测试结果显示,所提出的构形重构策略在通过性、稳定性和能耗方面均显著提升。实验结果汇总如表8所示。

表8 实物飞行器重构策略实测数据

Table 8 Measured data of physical aircraft reconstruction strategies

指标	重构策略前	重构策略后	改进百分比
通过性	0.010	0.980	1.000
稳定性(偏航率)	0.005	0.740	0.560
能耗/(W·h)	0.290	0.730	0.300

表8包括3个关键性能指标,分别为通过性、稳定性(偏航率)和能耗,这些指标是评估飞行器在执行特定任务时性能的重要依据。重构策略前、后两列分别表示在实施构形重构策略之前和之后,飞行器在各项指标上的具体数值。重构策略前的数据代表了飞行器在未进行任何优化时的性能表现,而重构策略后则反映了经过构形重构后的改进效果。

改进百分比列的数值表示各项指标在实施重构策略后的改进程度,其计算方法为:

$$\text{改进百分比} = \frac{\text{重构策略后} - \text{重构策略前}}{\text{重构策略前}} \times 100\%$$

(7)

表7中实测数据是基于多次实验的平均值,而非单次测试结果。这种方法增强了数据的可靠性和代表性,能够更准确地反映飞行器在实际应用中的性能表现。通过多次实验,能够有效降低偶然因素对结果的影响,确保

每个指标的测量更具一致性。

对结果进行分析,飞行器在通过窄间隙的任务中的通过性显著提高,达到28.57%。这意味着在复杂环境中,飞行器能够更顺利地完成任务,适应性显著增强。同时,稳定性测试中,偏航率降低了15%,表明飞行器在飞行过程中保持了更高的稳定性,这对于执行精密操作和任务至关重要,尤其是在复杂或动态环境中。此外,能耗减少了20%,显示出重构策略在提升效率的同时,也有效降低了运营成本。这对于长时间飞行和大规模应用具有重要意义。

综上所述,构形重构策略在提升飞行器性能方面的有效性,不仅在理论上得到了验证,更在实际应用中展现出良好的效果。这为未来的无人机技术发展提供了坚实的基础,并为各个领域的应用拓展了广阔的前景。

5 结论

面对运动条件受约束的窄间隙飞行任务,本文研究了多节链式倾转旋翼飞行器的动态重构策略,以实现更加安全、高效、快速的构形重构。首先,分析了构形重构策略的需求,明确链式旋转关节作为关键设计元素,并研究其设计原理与性能特性,为重构策略的设计与优化提供了重要参考。确定了通过性、稳定性和能耗3个策略指标,并利用层次分析法获取指标权重。其次,通过Solidworks生成三维模型获取通过性指标,利用MATLAB/Simulink搭建仿真环境获取稳定性指标,并计算各构形状态下的能耗指标,建立了基于加权平均法的构形重构策略。最后,进行了敏感性实验与有效性验证,结果表明该重构策略综合评分平均提高了26.87%,显著改善了飞行器在通过性和稳定性方面的性能。这一研究为未来变体飞行器的研究奠定了基础。针对现有研究,未来可进一步探索优化策略指标、引入更优的构形重构方法,如优劣解距离法,以提高结果的准确性和可靠性。

参考文献

[1] 崔尔杰,白鹏,杨基明.智能变形飞行器的发展道路[J].航空制造技术,2007(8):38-41.

CUI ER J, BAI P, YANG J M. Development path of intelligent deformable aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(8):38-41.

[2] 李雪江,刘峰,乔宇.变体飞行器发展现状与应用前景[J].飞机设计,2022,42(5):1-7,13.

LI X J, LIU F, QIAO Y. Development status and application prospect of variant aircraft [J]. Aircraft Design, 2022, 42(5):1-7,13.

[3] 郭翔鹰,陈璐璐,张伟.Z型折叠机翼的气动力计算及非线性动力学分析[J].动力学与控制学报,2018,

- 16(5): 430-439.
- GUO X Y, CHEN L L, ZHANG W. Aerodynamic calculation and nonlinear dynamic analysis of Z-Fold wing[J]. Journal of Dynamics and Control, 2018, 16(5): 430-439.
- [4] 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 J S, SUN J, LIU Y J. Application status and future prospect of smart materials and structures in morphing aircraft[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 29-45.
- [5] 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.
- RAN M P, WANG CH C, LIU H H, et al. Research status and future development of morphing aircraft control technology[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 432-449.
- [6] 甄子洋, 刘攀, 陆宇平. 变体飞行器智能变形与飞行控制技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 995-1006.
- ZHEN Z Y, LIU P, LU Y P. Research progress on intelligent deformation and flight control technology of morphing aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 995-1006.
- [7] 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, 2016.
- YIN M. Research on the coordinated control problem of deformation and flight of variant aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [8] 闫斌斌, 李勇, 戴沛, 等. 基于增强学习的变体飞行器自适应变体策略与飞行控制方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4): 656-663.
- YAN B B, LI Y, DAI P, et al. Research on adaptive variant variant strategy and flight control method of variant aircraft based on reinforcement learning[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 656-663.
- [9] 沈元. 柔性翼变体飞行器设计与特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- SHEN Y. Research on design and characteristics of flexible wing variant aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [10] 桑晨, 郭杰, 唐胜景, 等. 基于 DDPG 算法的变体飞行器自主变形决策[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 910-919.
- SANG CH, GUO J, TANG SH J, et al. Autonomous deformation decision of variant aircraft based on DDPG algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 910-919.
- [11] PEDRO C, MARCELO A. Shape memory alloy-based mechanism for aeronautical application: Theory, optimization and experiment[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 155-163.
- [12] ZHAO M, KAWASAKI K, OKADA K, et al. Transformable multirotor with two-dimensional multilinks: Modeling, control, and motion planning for aerial transformation[J]. Advanced Robotics, 2016, 30(13): 825-845.
- [13] MAKI T, ZHAO M J, SHI F, et al. Model Reference adaptive control of multirotor for missions with dynamic change of payloads during flight[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2020, 7433-7439.
- [14] ANZAI T, ZHAO M J, MUROOKA M, et al. Design modeling and control of fully actuated 2D transformable aerial robot with 1 DoF thrust vectorable link module[C]. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019: 2820-2826.
- [15] 王续乔, 来飞龙, 赵昌丽. 多节链式倾转旋翼飞行器重构控制与运动仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(5): 1523-1531.
- WANG X Q, LAI F L, ZHAO CH L. Reconstruction control and motion simulation of multi-section chain tiltrotor aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(5): 1523-1531.
- [16] 赵昌丽, 郭达, 王续乔, 等. 可动态重构的旋翼飞行器设计与运动特性分析[J]. 机器人, 2021, 43(5): 620-628.
- ZHAO CH L, GUO D, WANG X Q, et al. Design and Motion characteristics analysis of rotary-wing aircraft with dynamic reconstruction[J]. Robot, 2021, 43(5): 620-628.
- [17] 郭强, 王闯, 许政, 等. 综合模块化航电重构模型可靠性评估研究[J]. 航空计算技术, 2021, 51(6): 105-109.
- GUO Q, WANG CH, XU ZH, et al. Reliability evaluation of integrated modular avionics reconstruction model[J]. Aeronautical Computing Technology, 2021, 51(6): 105-109.
- [18] 侯天浩, 行鸿彦, 刘洋. 多旋翼无人机在气象探测中的现状与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 7-15.

HOU T H, XING H Y, LIU Y. Current status and prospects of multirotor drones in meteorological detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 7-15.

[19] 陈一洲, 林麒光, 夏京, 等. 基于无人机的城市空气质量移动式监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 1-6.

CHEN Y ZH, LIN Q G, XIA J, et al. Mobile air quality monitoring system based on drones in urban areas[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 1-6.

[20] 宋福根, 林韩, 兰生. 利用无人机对特高压线路上方电场强度实测[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2836-2843.

SONG F G, LIN H, LAN SH. Real measurement of electric field strength above ultra-high voltage lines using drones[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2836-2843.

作者简介



王续乔(通信作者)2014 年于中国民航大学获得硕士学位,现为中国民航大学高级实验师,主要研究方向为无人机控制技术与应用研究。

E-mail: wang_xu_qiao@163.com

Wang Xuqiao (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2014. Now he is a senior experimenter in Civil Aviation University of China. His main research interests include UAV control technology and application.



杨帅,2021 年于济南大学获得学士学位,现为中国民航大学硕士研究生,主要研究方向为决策方法研究。

E-mail: 1807873009@qq.com

Yang Shuai received his B. Sc. degree

from Jinan University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Civil Aviation University of China. His main research interest includes decision-making methods.