

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-11

# 智能变体飞行器未来作战关键技术

曹鑫<sup>1</sup>, 李聪健<sup>1</sup>, 高川<sup>1</sup>, 魏政磊<sup>2</sup>, 汪路路<sup>1</sup>, 马晓永<sup>1</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 绵阳 621000)

(2. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所, 绵阳 621000)

**摘要:** 智能变体飞行器是未来先进飞行器的重要发展方向之一,也是航空航天领域的创新研究前沿。近年来,随着新型材料与结构、智能控制与感知等新兴技术的发展,智能变体飞行器迎来了新的飞跃,在未来智能化作战方面将具有重要价值。本文从智能变体飞行器的概念与内涵出发,梳理变体飞行器及变体结构的发展历程;针对未来智能化作战需求,从多学科综合设计与优化、先进材料结构与综合变体、大尺度机翼变体、智能协同控制方法四个方面对大尺度变体技术进行深入剖析,从智能感知技术、态势评估与意图识别技术、自主战术机动决策技术、自主机动轨迹生成技术四个方面对 OODA 自主闭环技术进行详细分析;基于上述分析,对智能变体飞行器未来作战关键技术需求进行总结与展望,为其未来的技术发展与作战运用提供参考。

**关键词:** 智能变体飞行器;未来作战;关键技术;大尺度变体;OODA 自主闭环

中图分类号: V212.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Key technologies for future combat of intelligent variant aircraft

CAO Xin<sup>1</sup>, LI Congjian<sup>1</sup>, GAO Chuan<sup>1</sup>, WEI Zhenglei<sup>2</sup>, WANG Lulu<sup>1</sup>, MA Xiaoyong<sup>1</sup>

(1. High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

(2. Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Intelligent variant aircraft is one of the important development directions of advanced aircraft in the future, and it is also an innovative research frontier in the aerospace field. In recent years, with the development of emerging technologies such as new materials and structures, intelligent control and perception, intelligent variant aircraft has ushered in a new leap, which will have important military value in future intelligent combat. Starting from the concept and connotation of intelligent variant aircraft, this paper summarized the development history of variant aircraft and variant structures. Aiming at the future intelligent combat requirements, the large-scale variant technology was deeply analyzed from four aspects: multidisciplinary integrated design and optimization, advanced material structure and integrated variant, large-scale wing variant, and intelligent cooperative control method. It also analyzed the OODA autonomous closed-loop technology in detail from four aspects: intelligent perception technology, situation assessment and target intention recognition technology, autonomous tactical maneuver decision-making technology, and autonomous maneuver trajectory generation technology. Finally, based on the above analysis, the future operational key technology requirements of intelligent variant aircraft were summarized and prospect-ed to provide reference for its future technological development and combat application.

**Key words:** intelligent variant aircraft; future combat; key technologies; large-scale variants; OODA autonomous closed-loop

收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-09-24

通信作者: 马晓永(1979-), 男, 博士, 副研究员。E-mail: studentcaoxin@163.com

引用格式: 曹鑫, 李聪健, 高川, 等. 智能变体飞行器未来作战关键技术[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-11.

CAO Xin, LI Congjian, GAO Chuan, et al. Key technologies for future combat of intelligent variant aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-11. (in Chinese)

## 0 引言

变体飞行器,是一类可以实现在空间和时间上连续变形的飞行器,能够针对实际的飞行状态和环境改变外形结构,使其在不同的飞行过程中始终保持优异的飞行性能<sup>[1-2]</sup>。相对于传统固定外形飞行器一般只能针对特定的任务需求进行性能设计或折中优化,变体飞行器可通过采用变后掠翼、斜置翼、伸缩翼以及折叠翼等变体技术<sup>[3]</sup>,实现气动外形与结构的适时改变,达到在不同飞行状态下均能保持最佳空气动力学性能的目的。在军事作战方面,这些特点将成为先进飞行器作战能力的基础<sup>[4-7]</sup>。

近年来,随着新型材料与结构、智能控制与感知等新兴技术的发展,变体飞行器迎来了新的飞跃<sup>[8-11]</sup>。为提高飞行器气动总体性能,满足广域飞行、一机多能、自主作战、智能协同等复杂的未来智能化战争需求<sup>[12-13]</sup>,智能变体飞行器应运而生。通过对变体飞行器进行“赋智”,一方面可通过结合智能协同控制技术提高变体的快捷性与可靠性;另一方面,通过全方位集成光、电磁、声学等多种手段可进行全态势感知,结合智能算法进行判断与决策,最终可进行自主任务规划与实施,实现智能变体飞行器 OODA 自主闭环(第一个 O 是观察 Observe,即态势感知;第二个 O 是判断 Orient,包括分析、调整与预测;D 是决定 Decide,即决策与规划;A 是行动 Act)。智能变体飞行器能够根据 OODA 给出的飞行任务与作战目标,遂行自主变体与智能作战,即能够智能、适时、自主改变飞机气动外形或结构布局,以满足不同响应要求,实现飞行器在整个任务剖面的气动布局和飞行性能保持最优,飞行器的总体性能得到提升,从而更好、更快、更高标准地完成既定作战任务。智能变体飞行器将在作战样式、战术战法等战场运用方面取得跨越式突破。

当前,新兴技术发展迅速,战争形态也在发生深刻变化,正加速向智能化战争迈进。未来智能化战争决定了作战飞行器的任务使命、发展方向和技术特征。随着未来复杂作战要求不断提高,对“变体”与“智能”涉及到的大尺度变体、OODA 自主闭环等关键技术需求也在不断增强。本文将从智能变体飞行器的概念与内涵入手,介绍变体飞行器及其变体结构的发展历程,并针对未来智

能作战进行关键技术剖析与需求分析,最后对未来应用前景进行总结与展望。

## 1 概念与内涵

智能变体飞行器,顾名思义,即结合人工智能技术与变体技术的飞行器,是当前航空航天飞行器研究领域的创新前沿,也是最有可能产生重大技术变革和颠覆性影响的技术领域之一,在未来作战中将处于重要地位<sup>[14-16]</sup>。

早期,“智能”和“变体”为两个独立研究领域,“变体”的研究远早于“智能”。“变体”,从飞行器气动布局变化尺度方面分类,可分为大尺度变体和中小尺度变体。大尺度变体主要是指飞行器气动布局、平面形状等发生显著变化,如翼面大面积展开、变后掠翼等;中小尺度变体主要是指局部外形发生变化,如翼面或机体鼓包、翼型变化等。按照变体的方式分类,变体飞行器又可分为基于机械式结构的变体和基于功能材料的局部变体等。新型变体材料与变体结构/机构是变体飞行器研制的重要内容<sup>[17-18]</sup>,例如中小尺度的机翼、翼型的变形研究,各种变体技术都是通过改变机翼/翼型结构参数,从而达到提升全机气动性能的目的。此外,业界时常也把发动机、进气道、尾喷口等局部变形、模态转换等也归类于变体范畴,广义的变体飞行器也包括各种组合式飞行器、蜂群等。

“智能”,一方面体现在变体及其控制技术的智能化,另一方面则主要体现在飞行器的自适应智能飞行,即通过对飞行器飞行状态感知和相关信息收集,自主变体以获得最佳的飞行和气动效率。智能技术的核心是感知和算法决策<sup>[17]</sup>,从最初的离线仿真学习,到高度自动化的在线任务规划,实现飞行器的自主起飞、降落和飞行任务,逐步发展为在线深度强化学习,进而达到完全自主的自适应智能变体飞行。这是智能变体的主要发展技术路线,其核心内容为机器学习中的深度强化学习算法,包括深度神经网络、模糊数学等计算模型。

美军曾为了深入研究无人机自主作战能力,定义了 10 个自主控制级别对无人机自主程度进行量化衡量,具体分级情况和部分无人机所处的自主性层级如图 1 所示<sup>[19]</sup>。

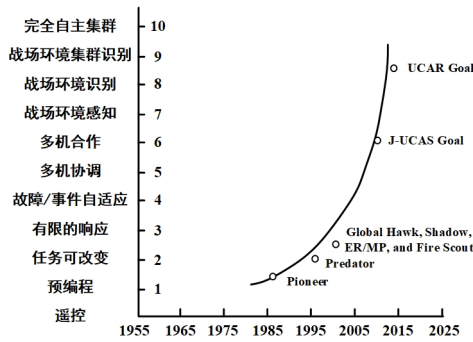


图1 美军无人机自主控制等级<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Autonomous control level of U. S. military UAV<sup>[18]</sup>

“全球鹰”“影子”和“火力哨兵”等典型无人机目前仅处于第2、3等级；DARPA计划的联合无人空战系统(J-UCAS)与无人战斗武装旋翼飞机(UCAR)的设计自主等级分别为6和8,但距离等级10的完全自主集群还有很大差距。根据上述美军无人机自主等级可知以及OODA闭环理论可知,当前人类仍不同程度的出现在的无人装备的OODA回路之中,距离完全智能仍有差距。智能

变体飞行器将不断追求人类从OODA环中的更高的解放程度,最终将人类从OODA环中完全解放出来,实现更高层次的“智能”。

## 2 变体飞行器与变体结构发展历程

### 2.1 变体飞行器

历史上变形飞行器的大致发展变化情况如图2所示。20世纪60~70年代发展的变后掠翼飞机可归类于大尺度变体,属于机械变体类型,代表作有前苏联的MG-23、Tu-160,美国的F-111、B-1b等<sup>[3]</sup>,主要是通过机械式的变后掠翼技术,实现飞机的起降和跨超声速飞行能力,但也暴露了变后掠机构重量代价太大、维护成本较高等缺点。尽管如此,近几年来俄罗斯国防部仍逐步加大Tu-160M战略轰炸机的生产和列装,加之美国B-1b轰炸机曾经的出色表现,说明第一代变后掠翼飞机仍旧具有一定的性能优势。

1903	1931	1931	1932	1937	1947	1951
Wright Flyer <i>Twist</i>	Pterodactyl IV <i>Sweep</i>	MAK-10 <i>Span</i>	IS-1 <i>Bi-to monoplane</i>	LIG-7 <i>Chord</i>	MAK-123 <i>Span</i>	X 5 <i>Sweep</i>
1952	1964	1964	1966	1967	1967	1969
XF10F <i>Sweep</i>	F 111 <i>Sweep</i>	XB 70 <i>Span bending</i>	Su 17 IG <i>Sweep</i>	MIG 23 <i>Sweep</i>	SU 24 <i>Sweep</i>	Tu 22 M <i>Sweep</i>
1970	1972	1974	1974	1979	1981	1985
F 14 <i>Sweep</i>	FS 29 <i>Span</i>	B 1 <i>Sweep</i>	Tornado <i>Sweep</i>	AD 1 <i>Obliquing</i>	Tu 160 <i>Sweep</i>	AFTI/F 111 <i>M.A.W.</i>
1993	1994	2001	2002	2003	2004	2005
FLYRT <i>Span</i>	MOTHRA <i>Camber</i>	AAL <i>Pitch</i>	F/A 18 <i>A.A.W.</i>	Virginia Tech <i>Span</i>	Univ. of Florida <i>Twist</i>	Univ. of Florida <i>Gull</i>










2006	2006	2007	2007	2007	2008	2010
						
MFX 1	Univ. of Florida	Virginia Tech	Univ. of Florida	MFX 2	Delft Univ.	Virignia tech
Sweep & Span	Sweep	Camber	Folding	Sweep & span	Sweep	Camber

图2 变体飞机发展历史<sup>[15]</sup>Fig. 2 Development history of variant aircraft<sup>[15]</sup>

以智能材料为代表的变体技术是变体飞行器发展的第二阶段,国外早在20世纪80年代就开始一系列持续的智能材料研究,如美国空军、DARPA(美国国防部高级研究计划局)、NASA(美国航空航天局)和波音公司等“柔性复合材料自适应机翼”“主动气动弹性机翼”“变体飞行器结构”项目,以及欧洲多家单位合作的“主动气动弹性飞机结构”等项目,都旨在通过发展先进智能材料,实现机翼的可连续气动外形变化,以获得更好的气动收益,满足低、跨超声速飞行器对变体技术的要求<sup>[20]</sup>,目前已成功在湾流公务机和F/A-18A战斗机上进行了测试验证。此外,还提出了许多变体飞行器新概念布局及部分研究成果,典型代表作有美国NextGen Aeronautics公司的“滑动蒙皮”方案<sup>[21]</sup>、Lockheed Martin公司的“折叠机翼”等大尺度变体方案<sup>[22]</sup>,并进行了模型飞行验证等研究。近年来,国内许多学者也开展了变体飞行器及相关技术研究工作,并提出了部分新型变体布局概念,呈现出设计仿生化、全局智能化、高速跨域化的发展趋势<sup>[23-27]</sup>。

## 2.2 变体结构

材料结构是实现变体的关键。在材料结构方面,早期的飞机主要依靠传统的铝合金材料,在变后掠飞机应用中,由于受到当时材料强度、刚度、承载和疲劳等限制,变后掠驱动机构过于笨重,不仅增加了结构重量,维护成本也过高。随着材料、

结构、制造技术的进步,复合材料及其多尺度结构,成为先进飞行器尤其是智能变体飞行器的主要选择。复合材料具有天然抗疲劳性能优异的特点,一般金属的疲劳强度为抗拉强度的40%~50%,而复合材料可高达70%~80%,加之匹配先进的增材制造技术,将会在航空航天领域得到广泛应用。

此外,近年来出现了形状记忆合金、形状记忆聚合物、多稳态金属等新型功能材料和变形结构/机构,以及剪切式变后掠翼<sup>[28]</sup>、斜置翼<sup>[29]</sup>、滑动蒙皮<sup>[30]</sup>、单元变体,折叠翼<sup>[31]</sup>、伸缩翼、菱形变体<sup>[23]</sup>等新型布局概念,并且局部变体技术在部分型号和飞机上得到了技术验证<sup>[11]</sup>。通过比较这些变体技术可以发现,剪切式变后掠翼相对于传统的旋转式变后掠翼虽然气动特性更优,但仍存在重量代价较高,效费比不足的缺点;斜置翼则存在气动不对称带来其它更复杂的气动问题;滑动蒙皮和单元变体由于材料结构技术不成熟,目前还无法推广应用;折叠翼则更多应用在舰载机方面,在飞行变体中还存在折叠融合等技术缺陷;伸缩翼是一种基于机械套筒原理的变体机翼结构,具有较强的承弯能力,经过多年研究,被证明是具有较高工程实用价值的变体技术<sup>[24,32-37]</sup>;菱形变体是一种新型布局概念,充分利用气动力变体特性,较容易实现从大展弦比到小展弦比模式的变化,具有较好的应用前景。上述几种变体技术优缺点如图3所示。

变体方式	图示	优点	缺点	前景
剪切式变后掠		机械变体, 易实现	结构重量与维护问题	★★
斜置翼		变化范围大, 易实现	气动力严重不对称	★
折叠翼		结构简单, 易实现(舰载)	折叠融合问题	★★
滑动蒙皮		气动外形变化连续	材料结构成熟度低	★
单元变体		适用范围广泛	材料结构成熟度低	★★
伸缩翼		可适用于高、低速情况	机翼存储空间占用	★★★
菱形变体		机构+气动力变体, 易实现	气动弹性/颤振问题	★★★

图3 典型变体技术的优缺点

Fig. 3 Advantages and disadvantages of large-scale variant techniques

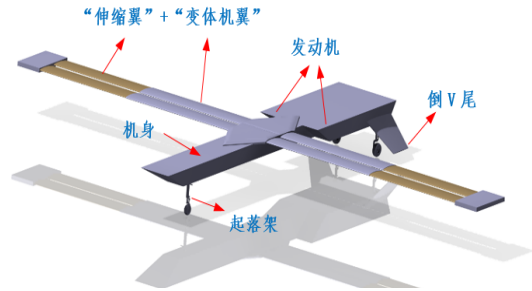
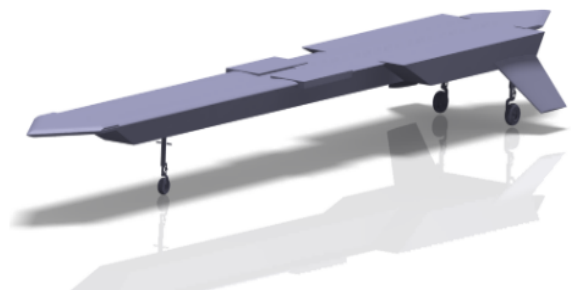
## 2.3 机/弹一体新型智能变体飞行器

项目组曾提出一种新型大尺度智能变体飞行器概念<sup>[6,38]</sup>, 兼顾飞机和导弹双重职能, 即通过智能变体技术实现飞机与导弹的高度融合, 同时具备飞机、导弹在空天应用领域具有各自的优势和特点, 实现机/弹一体, 可极大拓展飞行包线, 胜任更宽的应用任务, 弥补现有空天飞行器在中远距离快速奔袭/突防、空中穿透、持续滞空等综合能力不足, 以及高空长航时无人机的生存能力问题。

新型大尺度智能变体飞行器布局方案如图4所示, 该方案综合利用菱形变体和伸缩翼结构特点, 通过基于“菱形布局+气动力+轻质机构”的高效费比变体控制技术, 可以从超大展弦比变换到大长细比状态; 该变体布局飞行器主要由机体、变体机翼(菱形变体+伸缩翼)和V型尾翼构成, 机翼打开时的超大展弦比状态适用于起飞、降落和经济巡航, 并可根椐具体任务和速度需求, 智能、自适应调整展弦比以满足升阻比要求; 当需要超声速飞行时, 通过状态转换使机翼完全收拢, 进而降低超声速飞行状态的激波阻力和前向雷达散射截面, 从而实现快速达到和成功突防。

进一步, 在机/弹一体的基础上对飞行器进行赋智, 主要体现在实现飞行器的OODA自主闭环, 目前智能变体更多的是体现在飞行器的自适应智能飞行方面, 即通过对飞行器飞行状态感知和相关信息收集, 自主变体以获得最佳的飞行和气动效率。未来应用场景要求智能变体飞行器自主完成OODA闭环, 这对人工智能技术提出了很高的

要求。机/弹智能变体追求的是人类从OODA环中的更高的解放程度, 最终将人类从OODA环中完全解放出来, 实现真正的智能。在感知与决策过程中, 机/弹智能变体可根据应用需求自主切换飞行形态, 大幅提升其应用能力。

(a) 机翼展开(前翼后掠角 $0^\circ$ , 超大展弦比)(b) 机翼收拢(前翼后掠角 $90^\circ$ , 大长细比)图4 新型智能变体飞行器布局图示<sup>[19]</sup>Fig. 4 Layout diagram of new intelligent variant aircraft<sup>[19]</sup>

## 3 智能变体飞行器未来作战关键技术需求

智能变体飞行器以变体为抓手, 以智能为核心, 面对未来作战需求时, 其关键技术主要包括变体实现与OODA自主闭环两大方面。变体实现的关键是新型布局与变体结构/机构的可实现性, 主要包括多学科综合设计与优化、先进材料结构与综合变体、大尺度机翼变体、智能协同控制方法等; OODA自主闭环的关键技术则包括智能感知、态势评估与意图识别、自主战术机动决策、自主机动轨迹生成等<sup>[39]</sup>。

### 3.1 大尺度变体技术

#### 3.1.1 多学科综合设计与优化

在当前已有技术基础上, 需进一步发展新型

变体多学科综合设计与优化技术,包括从材料选型到变体结构设计、从变体机构确定到驱动设计,形成一套完整的变体气动布局方案,并对气动布局开展气动、结构、隐身多学科综合优化及性能评估<sup>[40]</sup>。开展变体总体气动布局设计时,综合考虑气动、结构、控制和电磁隐身等多学科设计方法及设计思想,以及变体过程带来的影响,开展一体化设计与优化,寻找满足各项性能指标和总体最优性能的气动布局形式;再基于目标变体结构,设计变体形式和驱动方式,进一步开展变体结构/机构与控制技术研究,根据变体方式综合开展变体驱动与控制一体化设计,形成工程上实用的变体驱动结构方案。

### 3.1.2 先进材料结构与综合变体

早期变后掠翼等变体结构重量代价过大、维护成本也过高,需发展基于现代先进材料结构的变体技术。基于最优气动布局,以工程应用为目标,需开展先进材料结构及驱动机构综合变体技术研究。在材料结构技术方面,充分发掘现代先进材料结构的最新研究成果,结合变体技术需求,推进先进轻质航空材料结构在变体结构设计中的实践应用,探索轻质航空材料的选型与变体结构设计。对于大尺度轻质变体结构驱动技术,参考传统液压或者利用分布式等驱动结构与装置<sup>[41]</sup>,结合变体飞行器布局特点,综合利用气动力开展变体驱动技术研究,形成工程上可实现的具有质量轻、效能高、响应快、易控制的高效费比变体驱动形式<sup>[42]</sup>。

### 3.1.3 大尺度机翼变体

大展弦比飞机的翼梢处通常会产生较大的气动弹性变形<sup>[43]</sup>,对于变体飞机会带来不利影响,例如导致外翼段无法正常变体伸缩等,因此大尺度变体技术中,机翼的大尺度变体是关键问题,亟需开展相关技术研究。需通过机翼气动弹性和变体结构/机构综合设计技术研究,获得大尺度变体条件下机翼承载、承载设计方法,以保证飞行器的安全飞行和机翼的灵活运动;而大尺度机翼变体气动载荷与结构特性则是保证上述要求的核心关键。基于包括材料、结构力学、气动弹性、飞行力学等多学科综合设计与优化技术研究<sup>[44]</sup>,给出大尺度机翼变体气动、载荷初步解决方案,为大尺度机翼变体控制提供数据与技术支持。

### 3.1.4 智能协同控制方法

控制技术是实现大尺度变体技术的基础。与固定飞行器不同,大尺度变体飞行器的布局与结构在变形过程中将发生显著变化,空气动力学特性将随之快速改变,进而引起系统的快速时变和强耦合效应,这对控制系统提出了很高的要求<sup>[45]</sup>。控制系统的目标是保持飞行器处于最佳飞行性能及其系统稳定性,但由于变形过程中气动特性发生变化,影响飞行控制的稳定边界,需将变形量作为控制系统的新输入,解决变形与飞行耦合的协同控制的问题<sup>[46]</sup>。变体飞行器的控制模型为多刚体模型或柔性多体模型<sup>[47]</sup>,具有快时变、强非线性、多自由度的特点。对于变形与飞行耦合的协同控制问题,传统的线性控制方法适用性存在明显不足<sup>[46]</sup>。

当前主要的解决方法主要分为开环变形—飞行控制和变形飞行一体化控制 2 种策略<sup>[48]</sup>,但并不能满足自主变形、自适应飞行等未来智能化作战需求。为实现变体飞行器的智能协同控制,其控制方法正不断与神经网络、深度学习等先进智能方法相融合<sup>[49-54]</sup>。神经网络、深度学习等人工智能方法具有学习和处理非线性及复杂关系的能力,可用来识别并解决变形飞机这类复杂动力系统中的变形与飞行耦合控制问题<sup>[55]</sup>。当前,变体飞行器的控制与智能方法的融合仍需进一步加强,不断提高变体飞行器的自主决策能力,真正实现智能协同控制。

## 3.2 OODA 自主闭环关键技术

### 3.2.1 智能感知技术

智能变体态势感知是战术决策与机动控制的前提,这对智能感知系统能够在信息复杂、任务多变的高对抗环境中发挥前端作用提出了很高要求<sup>[56]</sup>。智能感知技术包括信息采集与融合、信息快速处理、复杂环境认知与推理等技术<sup>[57]</sup>。信息采集与融合、以及快速处理技术主要是感知系统将获得的信息,利用特定的方法与规则,实现对信息数据的结构化,从而获取准确的战场态势。然而在高对抗的复杂环境下,智能变体感知系统通常难以实现高可靠、强实时环境感知,因而感知系统应加强复杂环境认知,并进行自我学习与推理,从而实现对其所处的目标环境的感知到识别,再



到理解的完整过程,这也是智能变体飞行器应用系统实现 OODA 自主闭环的基础。

### 3.2.2 态势评估与意图识别技术

态势评估是将态势感知获取的战场信息进行评估,是智能 OODA 自主闭环不可缺少的重要环节。态势评估的关键是实现目标意图的识别,意图识别的结果将直接影响智能系统的决策<sup>[58]</sup>。意图识别系统由目标的行动特征提取、任务类型判别和作战意图识别三级架构组成,每级都以前级结果为输入,逐级判断,形成完整的意图识别系统<sup>[59]</sup>。当智能变体飞行识别出目标可能得意图后,需依据双方武器装备、设备性能等,以定量或半定量的形式,分析与评估自己对抗的胜算,从而确定出目标的威胁等级,实现战场的态势评估<sup>[60]</sup>。

### 3.2.3 自主战术机动决策技术

智能变体的自主战术机动决策是按照一定的信息处理机制将输入参数进行处理,并输出变体方案、作战战术或者某种机动动作等决策结果的复杂动态过程。输入参数主要为战场态势感知获取的相关参数,例如我方智能变体飞行器的性能参数、武器装备数量以及敌方相关性能参数等双方态势参数;输出的决策结果需能被后续执行层识别并执行。通常,上述输入输出过程是往复循环动态迭代的,需经过多轮识别与决策,直至决策任务完全结束<sup>[61]</sup>。机/弹智能变体的自主战术机动决策的准确与否取决于决策过程中的目标态势函数与决策模型,因此开展智能变体飞行器决策研究的关键在于如何构建一个可快速处理、精度较高、稳定可靠的决策模型<sup>[62]</sup>。当前,综合运用大数据方法和深度学习等方法提取大量优秀飞行员的作战经验,结合先进的推理决策算法,将自主战术机动决策技术完美融入到自主 OODA 闭环中去,是实现智能变体飞行实时自主决策的重要途径与方法。

### 3.2.4 自主机动轨迹生成技术

智能变体自主机动轨迹生成是前述智能感知、态势评估与自主决策环节形成的结果转化为变体控制与飞行控制系统能够执行的机动轨迹指令与引导指令,该环节是 OODA 智能闭环的最后一环,也是前述决策层与最终执行层之间的串联接口<sup>[63]</sup>。机动轨迹的生成通常基于某一算法,根据智能变体的决策结果进行参考轨迹规划,智能

变体根据该参考轨迹执行,从而实现 OODA 完整闭环<sup>[64]</sup>。针对战场环境复杂多变的特点,需分别针对攻击占位和躲避敌机攻击的机动行为分别进行目标函数设计,使智能变体飞行器能够在作战过程中根据当前战场态势,同时结合自主战术机动决策结果,在攻击与躲避行为的目标函数之间进行自主切换,并通过规划模块将机动行为转换为飞行轨迹,最后送入执行层进行实施<sup>[65]</sup>。

## 4 小结与展望

智能变体飞行器经过几十年的发展,在新型变体材料、变体结构/机构、智能控制等方面均取得了突破性进展。但随着未来战争形态正向智能化战争迈进,面对新的任务使命与发展要求,智能变体飞行器所涉及的“变体”与“智能”相关技术仍有广阔发展空间。

1) 需进一步发展新型智能变体多学科综合设计与优化技术。开展变体飞行器总体气动布局设计时,综合考虑气动、结构、控制和电磁隐身等多学科设计方法及设计思想,以及变体过程带来的一系列影响,开展气动总体与变体结构/机构、控制技术一体化设计与优化。对于涉及大尺度机翼变体时,还需关注机翼气动弹性和变体结构/机构综合设计技术研究,以期获得大尺度变体条件下机翼转载/承载设计方法。

2) 变体飞行器的协同控制技术应与人工智能方法进一步加强融合,真正实现智能协同控制。变体飞行器的控制系统具有快时变、强非线性、多自由度的特点,传统的线性控制方法适用性存在明显不足。神经网络、深度学习等人工智能方法具有学习和处理非线性及复杂关系的能力,可用于识别并解决变形飞机这类复杂动力系统中的变形与飞行耦合控制问题,为此需加强变体飞行器的控制与神经网络、深度学习等先进智能方法的融合,不断提高变体飞行器的自主决策能力,真正实现智能协同控制。

3) 未来智能化战争要求智能变体飞行器能够自主完成 OODA 闭环,将人类从 OODA 环中完全解放出来,实现真正的智能。在感知与态势评估过程中,应不断加强复杂环境认知技术的提升,并要求能够进行自我学习与推理,进而实现对其所处的目标环境的感知到识别,再到理解的完整过

程;还需增强对目标意图的识别,以便确定出目标的威胁等级,实现准确的战场态势评估。对于决策与轨迹生成环节,其关键在于如何构建一个可快速处理、精度较高、稳定可靠的决策模型,需综合运用大数据和深度学习等方法提取大量优秀飞行员的作战经验,结合先进的推理决策算法,将自主战术机动决策与机动行为轨迹快速规划完美融入 OODA 闭环中去,最终实现智能变体飞行器的自主 OODA 完整闭环。

## 5 结束语

智能变体飞行器是航空航天领域的创新研究前沿,是未来飞行器发展的重要趋势与方向,将成为未来智能化战争的新质作战力量,具有重要的军事价值。本文梳理了变体飞行器发展历程,重点关注智能变体飞行器未来发展方向,并针对未来智能化作战需求,对智能变体飞行器大尺度变体技术、智能 OODA 自主闭环等关键技术进行了深入剖析与未来展望,为智能变体飞行器未来的技术发展与作战运用提供参考。

### 参考文献

- [1] 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 Ziyang, LIU Pan, LU Yuping. 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. (in Chinese)
- [2] 杨森,刘峰,聂瑞,等.变体飞行器智能材料驱动器和柔性蒙皮研究进展[J].航空工程进展,2024,15(3):1-12,26.  
YANG Sen, LIU Feng, NIE Rui, et al. Review of smart materials actuator and flexible skin for morphing aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 1-12, 26. (in Chinese)
- [3] SANDERS B, EASTEP F E, FORSTER E. Aerodynamic and aeroelastic characteristics of wings with conformal control surfaces for morphing aircraft[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(1): 94-99.
- [4] IVANCO T, SCOTT R, LOVE M, et al. Validation of the lockheed martin morphing concept with wind tunnel testing [C] // 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii: AIAA, 2007: 2235-2247.
- [5] MIAO S, MA X Y, CHEN C, et al. The aerodynamic characteristics of a diamond joined-wing morphing aircraft [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2022: 1467310.
- [6] 马晓永,苏继川,钟世东.一种全向机动新概念飞行器布局设计[C]//第十七届全国计算流体力学会议.杭州:中国力学学会,2017:186-189.  
MA Xiaoyong, SU Jichuan, ZHONG Shidong. A new concept aircraft layout design for omnidirectional maneuver [C] // The 17th national conference on computational fluid dynamics. Hangzhou: CSTAM, 2017: 186-189. (in Chinese)
- [7] CAVALLARO R, DEMASI L. Challenges, ideas, and innovations of joined-wing configurations: a concept from the past, an opportunity for the future [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2016, 87: 1-93.
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] EGUEA J P, BRAVO-MOSQUERA P D, CATALANO F M. Camber morphing winglet influence on aircraft drag breakdown and tip vortex structure [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119: 107148.
- [11] AUTERI F, SAVINO A, ZANOTTI A, et al. Experimental evaluation of the aerodynamic performance of a large-scale high-lift morphing wing [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 124: 107515.
- [12] 蔡明春,吕寿坤.智能化战争形态及其支撑技术体系[J].国防科技,2017,38(1):94-98.  
CAI Mingchun, LYU Shoukun. Preliminary probing into intelligent warfare and its supporting technology system [J]. National Defense Science & Technology, 2017, 38(1): 94-98. (in Chinese)
- [13] 李风雷,卢昊,宋闯,等.智能化战争与无人系统技术的发展[J].无人系统技术,2018,1(2):14-23.  
LI Fenglei, LU Hao, SONG Chuang, et al. Development of intelligent warfare and unmanned system technology [J]. Unmanned Systems Technology, 2018, 1(2): 14-23. (in Chinese)
- [14] 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 mor-



- phing aircraft[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2019, 37(3): 426-443. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 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 summary and development trend analysis of intelligent variant aircraft[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(6): 14-23. (in Chinese)
- [17] BACHMANN T, KLÄN S, BAUMGARTNER W, et al. Morphometric characterisation of wing feathers of the barn owl *Tyto alba pratincola* and the pigeon *Columba livia* [J]. *Frontiers in Zoology*, 2007, 4(1): 23.
- [18] KUDVA J N. Overview of the DARPA smart wing project [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15(4): 261-267.
- [19] US Department of Defence. Unmanned aerial vehicle road-map 2000—2025[R]. US: Department of Defence, 2001.
- [20] 段富海, 初雨田, 关文卿, 等. 变形机翼的发展现状综述 [J]. *机电工程技术*, 2021, 50(1): 12-18.  
DUAN Fuhai, CHU Yutian, GUAN Wenqing, et al. A review of development status of morphing wing [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2021, 50(1): 12-18. (in Chinese)
- [21] 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/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii; AIAA, 2007: 1707-1720.
- [22] LOVE M, ZINK P, STROUD R, et al. Demonstration of morphing technology through ground and wind tunnel tests [C]// 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii; AIAA, 2007: 1729-1738.
- [23] 谭霄, 苗帅, 马晓永. 菱形变体飞行器典型气动特性研究 [C]// 第12届全国流动显示会议. 天津: 中国空气动力学学会, 2021: 83-85.  
TAN Xiao, MIAO Shuai, MA Xiaoyong. Research on typical aerodynamic characteristics of diamond variant aircraft [C]// The 12th national conference on flow display. Tianjin: CARS, 2021: 83-85. (in Chinese)
- [24] 李智, 董二宝, 许旻, 等. 伸缩翼变形机构设计与实验研究 [J]. *机械与电子*, 2013, 31(7): 65-68.  
LI Zhi, DONG Erbao, XU Min, et al. Structural design and experimental research for the telescopic wing [J]. *Machinery & Electronics*, 2013, 31(7): 65-68. (in Chinese)
- [25] 陈钱, 白鹏, 李锋. 飞行器变后掠过程非定常气动特性形成机理 [J]. *力学学报*, 2013, 45(3): 307-313.  
CHEN Qian, BAI Peng, LI Feng. Study on the formation mechanisms of unsteady aerodynamic characteristics of morphing flight vehicle in sweep-varying process [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(3): 307-313. (in Chinese)
- [26] CHEN Y J, YIN W L, LIU Y J, et al. Structural design and analysis of morphing skin embedded with pneumatic muscle fibers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(8): 085033.
- [27] 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 for a multifunctional morphing tail [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(5): 896-900. (in Chinese)
- [28] 陈钱, 白鹏, 尹维龙, 等. 飞机外翼段大尺度剪切式变后掠设计与分析 [J]. *空气动力学学报*, 2013, 31(1): 40-46.  
CHEN Qian, BAI Peng, YIN Weilong, et al. Design and analysis of a variable-sweep morphing aircraft with outboard wing section large-scale shearing [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(1): 40-46. (in Chinese)
- [29] 李端琪, 周华. 基于CFD的斜置翼翼型选型研究 [J]. *力学季刊*, 2013, 34(3): 361-366.  
LI Duanqi, ZHOU Hua. CFD-based studies on airfoil selection of oblique wing [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2013, 34(3): 361-366. (in Chinese)
- [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.  
WU Bin, DU Xuzhen, WANG Jiaying. Smart structure technology progress of morphing aircraft [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(12): 13-30. (in Chinese)
- [31] MILLS J, AJAJ R. Flight dynamics and control using folding wingtips: An experimental study [J]. *Aerospace*, 2017, 4(2): 19.
- [32] NEAL D, GOOD M, JOHNSTON C, et al. Design and wind-tunnel analysis of a fully adaptive aircraft configuration [C]// 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Palm Springs, California: AIAA, 2004: 1727.
- [33] SAMUEL J B, PINES D. Design and testing of a pneumatic telescopic wing for unmanned aerial vehicles [J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(4): 1088-1099.
- [34] VOCKE R D III, KOTHERA C S, WOODS B K S, et al. Development and testing of a span-extending morphing wing [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(9): 879-890.
- [35] AJAJ R M, SAAVEDRA FLORES E I, FRISWELL M I, et al. The Zigzag wingbox for a span morphing wing [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 28(1): 364-375.
- [36] AJAJ R M, FRISWELL M I, SAAVEDRA FLORES E, et al. An integrated conceptual design study using span

- morphing technology[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(8): 989-1008.
- [37] 王江华, 谷良贤, 龚春林. 伸缩弹翼巡航导弹气动外形优化研究[J]. *飞行力学*, 2009, 27(6): 37-40.  
WANG Jianghua, GU Liangxian, GONG Chunlin. Shape optimization of cruise missile based on the concept of telescopic wing[J]. *Flight Dynamics*, 2009, 27(6): 37-40. (in Chinese)
- [38] 马晓永, 王馨悦, 黄勇. 一种大尺度变体飞行器技术研究[C]// 第九届近代实验空气动力学学会暨低跨超专委会2023年学术交流会议. 西宁: 中国空气动力学会, 2023: 1-8.  
MA Xiaoyong, WANG Xinyue, HUANG Yong. Research on a large scale variant aircraft technology [C]// The 9th Modern Experimental Aerodynamics Conference. Xining: CARS, 2023: 1-8. (in Chinese)
- [39] 李永丰, 吕永玺, 史静平, 等. 深度确定性策略梯度和预测相结合的无人机空战决策研究[J]. *西北工业大学学报*, 2023, 41(1): 56-64.  
LI Yongfeng, LYU Yongxi, SHI Jingping, et al. UAV's air combat decision-making based on deep deterministic policy gradient and prediction[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2023, 41(1): 56-64. (in Chinese)
- [40] 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.  
WANG Yue, MA Jianhua, HAN Zhonghua, et al. Aerodynamics and multidisciplinary design requirements on morphing aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2024, 35(5): 16-27. (in Chinese)
- [41] 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)
- [42] 许云涛. 智能变形飞行器发展及关键技术研究[J]. *战术导弹技术*, 2017(2): 26-33, 46.  
XU Yuntao. Research on the development and key technology of smart morphing aircraft[J]. *Tactical Missile Technology*, 2017(2): 26-33, 46. (in Chinese)
- [43] 肖艳平, 黄波, 王越. 机翼气动弹性的研究综述[J]. *科技创新导报*, 2020, 17(20): 11-15.  
XIAO Yanping, HUNG Bo, WANG Yue. Summary of research on the aeroelasticity of wing[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2020, 17(20): 11-15. (in Chinese)
- [44] 倪迎鸽, 杨宇. 自适应机翼翼型变形的研究现状及关键技术[J]. *航空工程进展*, 2018, 9(3): 297-308.  
NI Yingge, YANG Yu. Research on the status and key technology in morphing airfoil of adaptive wings[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2018, 9(3): 297-308. (in Chinese)
- [45] CHU L 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.
- [46] 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.  
ZHANG Xuhui, XIE Chunlei, LIU Sijia, et al. Development needs and difficulty analysis for smart morphing aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(21): 8-34. (in Chinese)
- [47] 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): 527449.  
RAN Maopeng, WANG Chengcai, LIU Huahua, et al. Research status and future development of morphing aircraft control technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(10): 527449. (in Chinese)
- [48] 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 Ming. Research on coordinated control of deformation and flight of variant aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [49] WU Z H, LU J C, RAJPUT J, et al. Adaptive neural control based on high order integral chained differentiator for morphing aircraft [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 105: 787931.
- [50] 温暖, 刘正华, 祝令谱, 等. 深度强化学习在变体飞行器自主外形优化中的应用[J]. *宇航学报*, 2017, 38(11): 1153-1159.  
WEN Nuan, LIU Zhenghua, ZHU Lingpu, et al. Deep reinforcement learning and its application on autonomous shape optimization for morphing aircrafts[J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(11): 1153-1159. (in Chinese)
- [51] WU Z H, LU J C, ZHOU Q, et al. Modified adaptive neural dynamic surface control for morphing aircraft with input and output constraints[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 87(4): 2367-2383.
- [52] 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 Binbin, LI Yong, DAI Pei, et al. Adaptive wing morphing strategy and flight control method of a morphing aircraft based on reinforcement learning[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(4): 656-663. (in Chinese)
- [53] XU D, HUI Z, LIU Y Q, et al. Morphing control of a new bionic morphing UAV with deep reinforcement learning [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92: 232-243.
- [54] XU W F, LI Y H, PEI B 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.
- [55] PARANCHEERIVILAKKATHIL M S, PILAKKADAN

- J S, AJAJ R M, et al. A review of control strategies used for morphing aircraft applications [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(4): 436-463.
- [56] 黄长强. 未来空战过程智能化关键技术研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(1): 11-19.
- HUANG Changqiang. Research on key technology of future air combat process intelligentization [J]. Aero Weaponry, 2019, 26(1): 11-19. (in Chinese)
- [57] 黄汉桥, 白俊强, 周欢, 等. 智能空战体系下无人协同作战发展现状及关键技术[J]. 导航与控制, 2019, 18(1): 10-18.
- HUANG Hanqiao, BAI Junqiang, ZHOU Huan, et al. Present situation and key technologies of unmanned cooperative operation under intelligent air combat system [J]. Navigation and Control, 2019, 18(1): 10-18. (in Chinese)
- [58] 徐安, 陈星, 李战武, 等. 基于战术攻击区的超视距空战态势评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 97-102.
- XU An, CHEN Xing, LI Zhanwu, et al. A method of situation assessment for beyond-visual-range air combat based on tactical attack area [J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 97-102. (in Chinese)
- [59] 王宇航, 董宝良, 公超, 等. 基于意图识别的空中群目标动态威胁评估[J]. 计算机与现代化, 2023(12): 100-104, 111.
- WANG Yuhang, DONG Baoliang, GONG Chao, et al. Dynamic threat assessment of air swarm targets based on intent recognition [J]. Computer and Modernization, 2023 (12): 100-104, 111. (in Chinese)
- [60] 王文飞, 茹乐, 鲁博, 等. 信息缺失条件下基于 IQBA-TOPSIS 的空中目标威胁评估[J]. 电光与控制, 2023, 30(9): 99-105.
- WANG Wenfei, RU Le, LU Bo, et al. Air target threat assessment based on IQBA-TOPSIS under the condition of information shortage [J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(9): 99-105. (in Chinese)
- [61] 唐上钦, 谢磊, 王渊, 等. 无人机自主空战战术决策仿真系统设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(21): 272-278.
- TANG Shangqin, XIE Lei, WANG Yuan, et al. Design and implementation of UAV autonomous air combat tactical decision simulation system [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(21): 272-278. (in Chinese)
- [62] 吴傲, 杨任农, 梁晓龙, 等. 基于模糊推理的无人战斗机视距空战机动决策[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 898-908.
- WU Ao, YANG Rennong, LIANG Xiaolong, et al. Maneuver decision on visual range air combats of unmanned combat aerial vehicles based on fuzzy inference [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 898-908. (in Chinese)
- [63] 王杰, 丁达理, 董康生, 等. UCAV 自主空战战术机动作建模与轨迹生成[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(12): 42-49.
- WANG Jie, DING Dali, DONG Kangsheng, et al. UCAV autonomous air combat tactical maneuvering modeling and trajectory generation [J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(12): 42-49. (in Chinese)
- [64] 杨森, 张翔伦. 基于能量优化的无人机机动轨迹生成方法[J]. 航空学报, 2020, 41(s2): 724288.
- YANG Sen, ZHANG Xianglun. Generation method of UAV maneuvering trajectory based on energy optimization [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41 (s2): 724288. (in Chinese)
- [65] 刘佩, 王维嘉, 陈向, 等. 空战机动飞行轨迹生成与控制[J]. 兵工自动化, 2018, 37(11): 76-80, 96.
- LIU Pei, WANG Weijia, CHEN Xiang, et al. Air combat maneuvering flight trajectory generation and control [J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(11): 76-80, 96. (in Chinese)

(编辑:马文静)