# 飞行器集群协同制导新进展

吕金虎 [1] 于江龙 [1] 董希旺 [1, 2, 3]

**摘 要** 协同制导是飞行器集群遂行协同任务中最关键的环节之一, 也是飞行器制导控制领域近年来最重要的研究方向之一. 协同制导经历了从简单约束到复杂约束、单一任务到复杂任务的发展过程. 首先, 从协同制导的发展历程和任务级别角度进行分类, 将现有协同制导方法概括为打击时间/角度约束下的协同制导、编队构型约束下的协同制导、角色和任务互补下的协同制导、博弈对抗条件下的协同制导等四类协同制导方法; 其次, 总结国内外学者对相关领域理论成果的最新进展, 从研究方法层面综述相关成果的优缺点和适用范围; 最后, 对协同制导领域的技术挑战与难点进行深入分析, 并对协同制导技术的未来发展进行前瞻性展望.

**关键词** 飞行器集群, 协同制导, 新进展, 发展展望

**引用格式** 吕金虎, 于江龙, 董希旺. 飞行器集群协同制导新进展. 自动化学报, 2025, **51**(4): 727−743

**DOI** 10.16383/j.aas.c240499 **CSTR** 32138.14.j.aas.c240499

## New Progress in Cooperative Guidance for Aircraft Swarm System

LÜ Jin-Hu[1] YU Jiang-Long[1] DONG Xi-Wang[1, 2, 3]

**Abstract** Cooperative guidance is one of the most critical links in the execution of cooperative tasks for aircraft swarm system, and is also one of the most important research directions in the field of aircraft guidance and control in recent years. Cooperative guidance has evolved from simple constraints to complex constraints, from single tasks to complex tasks. First, this paper classifies the cooperative guidance issues from the perspective of its development history and task level, summarizing existing cooperative guidance methods into four categories: Cooperative guidance under impact time/angle constraint, cooperative guidance under formation constraint, cooperative guidance under role and task complementarity, and cooperative guidance under game adversarial conditions. Second, the paper summarizes the latest progress in related fields theoretical results by domestic and foreign scholars, and reviews the advantages and disadvantages and applicable scope of related research methods from the perspective of research method. Finally, the paper conducts in-depth analysis of the technical challenges and difficulties in the field of cooperative guidance, and provides a forward-looking perspective on the future development of cooperative guidance technology.

**Key words** Aircraft swarm system, cooperative guidance, new progress, development prospects

**Citation** Lü Jin-Hu, Yu Jiang-Long, Dong Xi-Wang. New progress in cooperative guidance for aircraft swarm system. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(4): 727−743

近年来, 在俄乌、巴以、伊以等冲突中, 飞行器集群作战初具形态, 在未来高强度、高烈度战场中, 飞行器集群必将实现更高级别的自主协同能力. 协同制导技术是飞行器集群遂行自主协同任务、实现“1 + 1 > 2”协同效能的最关键的环节之一.

协同制导技术属于复杂网络化系统[1−4] 的关键技术之一, 也是飞行器制导控制领域近年来最重要的研究方向之一, 具有重要的学术研究意义和工程应用价值. 它是利用飞行器之间的交互信息, 导引和控制飞行器集群按一定协同规律, 在满足一定的时间、空间、任务约束下, 到达目标点、预定轨道、完成协同任务的技术和方法. 协同制导的本质是通过低成本性飞行器之间的信息交互, 将有限的个体能力聚集起来, 克服单一飞行器能力上的不足, 在整体上涌现出功能和机制更为强大和复杂的制导行为[5].

自 2006 年 Jeon 等[6] 首次提出时间协同制导概念以来, 协同制导经历了近 20 年的快速发展历程, 如图 1 所示. 学术界和工业界的专家深入探讨协同制导领域的方法分类[7]、约束分类[8]、架构分类[9]、流

收稿日期 2024-07-12 录用日期 2024-10-16
Manuscript received July 12, 2024; accepted October 16, 2024
国家自然科学基金 (62141604, U2241217, 62103016, 62473029) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (62141604, U2241217, 62103016, 62473029)
本文责任编委 温广辉
Recommended by Associate Editor WEN Guang-Hui
1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191 2. 北京航空航天大学无人系统研究院 北京 100191 3. 北京航空航天大学人工智能学院 北京 100191
1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191 2. Institute of Unmanned System, Beihang University, Beijing 100191 3. Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191

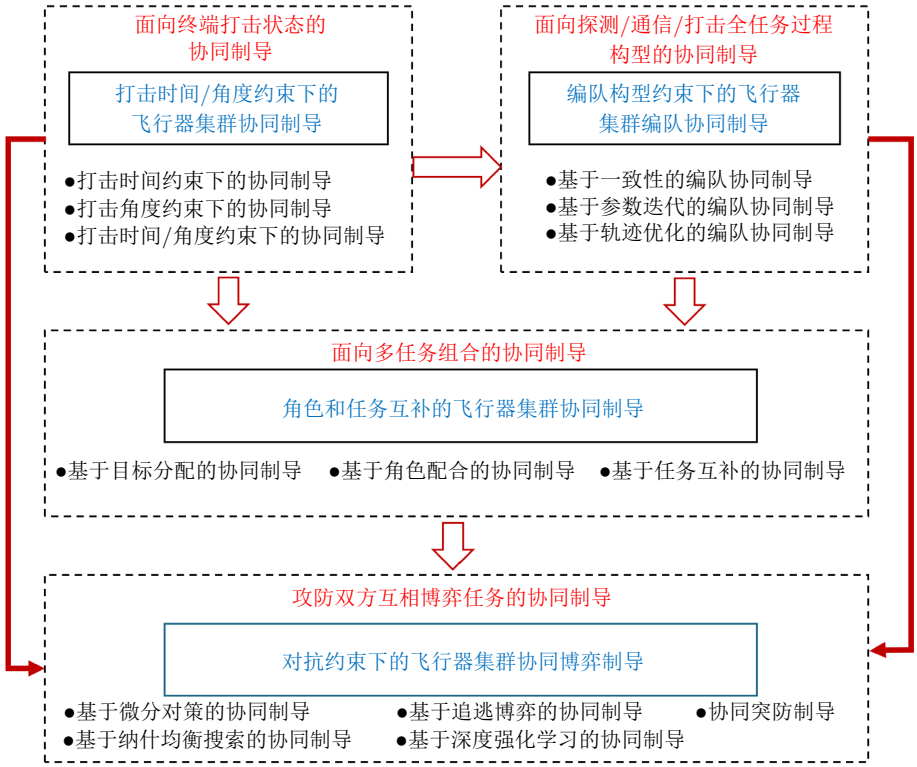



图 1 飞行器集群协同制导发展历程

Fig. 1 Development process of aircraft swarm system cooperative guidance

程分类[10], 提供相关分支的深刻认知、总结和展望. 协同制导理论和技术也成为贯穿“十三五” (2016—2020 年) 规划和“十四五” (2021—2025 年) 规划期间的研究热点.

从协同制导的发展历程和任务级别来看, 打击时间/角度约束下的协同制导方法是最早出现的协同制导方法, 这也是单飞行器打击制导任务的延伸和发展. 飞行器集群在执行更加复杂的制导任务时, 不仅需要在终端保持约束, 而且需要在全过程/某一段过程保持特定的构型, 便于执行协同探测、协同侦察和协同通信任务, 因此, 编队构型约束下的编队协同制导方法进而产生, 用于解决上述复杂协同制导任务. 然而, 前两类协同制导方法中, 飞行器的角色和任务较为单一, 在未来飞行器集群立体作战场景下, 飞行器集群需要根据态势环境以不同角色执行不同的协同制导任务, 实现功能互补与有机协作, 这类需求也催生了角色和任务互补的协同制导方法. 近年来, 随着进攻方和防御方飞行器集群的性能提升, 双方均具备集群协同能力, 伴随着人工智能技术的快速发展, 对抗条件下的协同博弈制导成为协同制导的前沿热点, 也是未来智能空战博弈、反无人机集群场景的关键技术之一.

近年来, 人工智能技术、信息存储与传输技术以及实时计算技术在软件层面和硬件层面飞速发展, 协同制导的工程实现已具备软硬件基础. 然而在实际应用中, 飞行器集群将面临智能对抗和强电磁对抗的任务场景, 这对飞行器集群协同制导系统中的个体机动能力、信息传输能力和智能协作能力提出更高的要求. 具体表现在以下三个方面.

1) 弱机动能力下的高精协同制导挑战. 随着任务约束的逐渐复杂, 有限机动能力的飞行器需要在更加先进的协同制导律的作用下, 实现高精度协同制导.

2) 强通信对抗下的鲁棒协同制导挑战. 电磁通信对抗是协同制导技术, 也是其他协同技术面临的最大挑战之一. 飞行器需要在对抗环境下满足自主通信约束以实现制导信息的交互.

3) 不确定任务下的智能协同制导挑战. 协同制导的内涵不只是包含协同拦截/打击, 未来还将会涵盖协同博弈对抗制导、协同探测制导、协同突防制导等更多的样式, 人工智能技术的引入将会使协同制导理论更加丰富.

基于上述发展机遇与挑战, 本文从协同制导的发展历程和任务级别角度进行归纳总结, 将其划分为打击时间/角度约束下的协同制导、编队构型约束下的协同制导、角色和任务互补下的协同制导、博弈对抗条件下的协同制导等四类协同制导方法. 这种分类不仅为协同制导技术的发展历程提供一个

相对清晰的框架, 而且有助于深入理解相关协同制导方法设计初衷和发展思路. 本文综述了国内外的相关研究成果, 对技术挑战与难点进行深入分析, 并对协同制导技术的未来发展进行了前瞻性展望.

## 1　打击时间/角度约束下的飞行器集群协同制导

协同制导最原始的概念就是通过飞行器之间的信息交互与协调控制[8, 11−12], 实现终端时空约束下的协同打击, 即飞行器集群能够同时地且带有期望角度约束地对目标进行协同打击. 另外, 终端时空约束下的协同制导, 也能保证飞行器集群实现对期望中间航迹点的同时到达, 通过中段过程的轨迹机动调整保障终端时间、空间等约束下的协同构型的精确实现, 为飞行器在特定位置执行协同任务提供保障. 随着任务约束的逐渐复杂, 终端时空约束下的飞行器集群协同制导方法对飞行器的机动能力、通信能力要求较高. 终端时空约束下的飞行器集群协同制导技术包括打击时间约束下的协同制导、打击角度约束下的协同制导、打击时间和角度约束下的协同制导, 如图 2 所示.

### 1.1　打击时间约束下的协同制导

时间约束下的协同制导, 主要是构造合适的一致性协调变量, 形成剩余飞行时间误差动力学系统, 然后构造反馈控制项实现飞行器集群对目标的同时命中. 相关协同制导方法与经典协同控制方法较为类似, 从解析协同制导、数值优化协同制导、智能协同制导的角度发展.

#### 1.1.1　基于误差反馈的打击时间约束下协同制导方法

在基于误差反馈的打击时间约束下协同制导的问题中, 首先建立剩余飞行时间动力学模型, 然后以设定的期望剩余飞行时间或者通过局部信息交互得到的平均剩余飞行时间作为跟踪指令, 构建剩余飞行时间跟踪误差动力学模型. 文献 [13−14] 较早地提出一种基于期望剩余飞行时间误差反馈的偏置比例导引律形式, 实现了对静止目标带有期望打击时间的打击, 并且扩展成为经典的时间一致协同制导. 基于上述架构, 文献 [15] 较早地构建了双层协同制导架构, 顶层为协调变量层, 通过一致性协调算法得到期望剩余飞行时间指令; 底层则采用打击时间控制制导律实现协同制导. 剩余飞行时间获取方法主要有两种, 其中之一是在比例导引法的基础上, 根据比例导引的弹道特性和小空间假设, 给出经典的时间估计; 此外, 作为 $N = 2$ 的特殊比例导引律, 通过圆弧制导律可以推导出更加准确的待飞时间, 成为当前另一主要使用工具[16].

误差反馈方法的优点是直观、物理意义明显, 在对制导时间要求严格的场景中将会有较大应用价值. 然而现有的方法中, 剩余飞行时间的估计方法多是针对静止目标, 对于运动或机动目标的拦截场景, 剩余飞行时间的估计准确性有待提高.

#### 1.1.2　基于轨迹跟踪的打击时间约束下协同制导方法

基于轨迹跟踪技术的打击时间约束下协同制导方法, 一般根据双层协同制导架构进行设计, 在设定期望剩余飞行时间或者通过局部信息交互得到平均剩余飞行时间作为指令以后, 构建带有期望飞行时间指令构型的参数化轨迹模型, 通过优化轨迹参数可以获得带有期望打击时间指令的轨迹解析表达式, 在制导层面可以设计轨迹跟踪协同制导律实现飞行器集群同时打击. 由于参数化轨迹模型的自变量不同, 协同制导模型也会不同. 目前较多的学者

图 2　终端时空约束下的飞行器集群协同制导方法

Fig. 2　Cooperative guidance methods for aircraft swarm system under terminal spatio-temporal constraints

采用前置角作为自变量, 文献 [17] 构建前置角参数化轨迹模型, 同时引入打击时间指令作为优化代价函数或者约束条件, 通过参数优化方法可以得到带有期望打击时间指令的轨迹解析表达式. 文献 [18] 则直接将过载曲线进行参数化设计, 通过闭环系统动力学分析求解剩余飞行时间, 进而优化过载参数模型.

上述策略中, 前置角参数化模型能够处理视场约束, 这是因为前置角在一定条件下可以与视场角关联, 通过对前置角轨迹的规划, 能够同时保障目标在视场范围之内. 视线角、过载参数化模型的优点在于参考轨迹的跟踪控制更加方便. 然而此类方法也大多适用于静止或者慢速目标的协同制导场景.

#### 1.1.3 基于一致性理论的打击时间约束下协同制导方法

针对打击时间约束下协同打击问题, 一致性理论是当前工作的主要研究基础. 文献 [19] 通过反馈线性化, 在不依靠剩余飞行时间估计的前提下提出基于一致性理论的时间协同制导方法, 并结合比例导引律给出两段式的协同制导律. 为寻求更快的收敛速度, 文献 [20] 分别针对有限时间和固定时间协同制导律进行研究, 得到收敛更快的制导律, 从而满足多变的战场需求; 其次, 将最优控制理论应用于协同制导问题可以扩展多导弹系统的能力边界, 从而胜任更多的制导任务. 文献 [21] 以模型预测控制方法为基础, 提出协同制导的最优控制方案, 可以为协同制导律的发展提供更多基础.

基于一致性理论的制导方法在打击机动目标的场景中也能使时间误差快速收敛, 而且有较高的鲁棒性. 但是此种方法需要飞行器之间进行实时信息交互, 对多枚导弹之间的通信拓扑连通性有一定的要求.

#### 1.1.4 基于优化技术的打击时间约束下协同制导方法

由于针对固定目标的制导系统本质是自治系统, 因此可利用优化方法, 将打击时间作为约束, 进行优化设计. 文献 [22] 将带有打击时间约束的制导问题转化为带有终端约束的连续系统最优控制问题, 通过数值方法得到打击时间控制制导律, 并可以直接扩展为打击时间约束下协同制导律. 文献 [23] 则将协同制导系统进行离散化, 构建多约束离散的最优控制问题, 通过参数迭代优化获得打击时间协同制导律指令.

基于优化技术的打击时间约束下协同制导方法的优点较多, 且能够同时处理复杂多约束条件. 当飞行器规模增大的时候, 基于优化技术的协同制导算法实时性、制导精度、稳定性将会受到一定局限, 但是随着弹载计算机技术的发展, 这一类方法在未来具有较大的应用前景.

#### 1.1.5 基于智能学习的打击时间约束下协同制导方法

在上述四类方法中, 为实现打击时间的协调一致, 不可避免地需要使用剩余飞行时间这一状态变量. 然而剩余飞行时间与轨迹是耦合的, 这就使得剩余飞行时间只能通过近似估计得到. 剩余飞行时间在轨迹相对平直的情况下近似误差较小, 然而在轨迹较为弯曲或者目标存在运动/机动的情况下, 其近似误差则可能会变大. 对于这种具有非随机不确定性因素的协同制导模型, 人工智能技术有一定的解决可行性. 文献 [24] 利用强化学习方法, 将打击时间协同制导问题用数值优化的方式进行智能求解, 通过离线大规模训练以及在线使用的方式, 实现飞行器集群对目标的同时打击. 此外, 深度神经网络有较强的估计能力[25], 可以对剩余飞行时间进行估计, 在比例导引制导律的基础上加入时间约束偏置项, 实现打击时间协调一致.

随着人工智能技术的发展, 智能导弹是未来导弹的发展方向, 智能协同制导也将会成为未来智能导弹的重要技术基础.

第 1.1 节介绍了五类打击时间约束下的协同制导方法, 前三类大多适用于协同打击静止目标; 后两类由于能够进行在线迭代优化, 因此在协同打击机动目标场景中具有应用前景. 另外, 对于运动或机动目标的拦截问题, 可以结合轨迹预测技术, 获得精准的预测命中点, 并可以在一定程度上将机动目标协同制导问题转化为慢速/静止预测目标的协同制导问题.

### 1.2 打击角度约束下的协同制导

在有些战场环境中, 为实现对目标要害部位的精确毁伤, 对制导律提出带有期望打击空间约束的需求, 如, 滑翔制导炸弹需要以大空间命中目标; 高超声速滑翔飞行器需要以特定打击空间实现对障碍区的规避以及对目标多方向打击; 反坦克导弹需要以特定角度打击装甲目标的薄弱部位. 打击角度约束协同制导主要有以下几种方法.

#### 1.2.1 基于偏置比例导引的打击角度约束下协同制导方法

基于偏置比例导引的打击角度约束下协同制导律一般由两部分组成, 分别为基本导引项和偏置比例导引项. 控制落角最直接的设计思路是进行指令补偿[26]. 偏置比例导引的优点是制导形式简单、易

于工程实现, 但是设计时变偏置项通常采用小空间线性化假设模型, 导致当目标机动时制导精度较低, 并且有效发射区较窄. 这种方法适用于目标静止或低速运动.

#### 1.2.2 基于变结构控制的打击角度约束下协同制导方法

在基于变结构控制的打击角度约束下协同制导的问题中, 通过设计滑模面以及趋近律, 可以改善趋近运动的动态品质[27]. 变结构控制的优点是能够克服系统的不确定性, 具有很强的鲁棒性, 尤其是对制导系统这样的非线性系统的控制具有良好的控制效果. 但是当状态轨迹到达滑动模态面后会在其两侧往返穿越地趋近平衡点, 从而产生抖振, 使制导指令快速变化. 这种方法适用于导弹的过载响应时间较短的情况, 有很高的动态性能.

#### 1.2.3 基于最优控制的打击角度约束下协同制导方法

在基于最优控制的打击角度约束下协同制导的问题中, 根据目标与导弹之间的态势, 计算得到最优的空间分布, 应用最优控制理论, 考虑终端空间约束, 设计二次型性能指标, 另外还可以在性能指标中加入终端位置误差项、过载积分项等[28]. 最优制导方法理论上具有最优性, 并且便于处理各种约束, 如能量最少、特定落角等, 但其对建模精度要求较高, 并且存在剩余时间准确估计难、求解过程复杂、实时性差等问题.

#### 1.2.4 基于智能学习的打击角度约束下协同制导方法

在目标机动较大或者终端打击角度指令变化较大的情况下, 经典的解析协同制导往往得不到期望的终端打击角度. 飞行器的状态与最终打击角度之间存在映射关系, 因此可以设计深度监督学习网络, 在飞行过程中基于观测信息实时预测最终打击角度. 文献 [29] 根据落角误差与控制指令之间的映射关系设计深度强化学习模型, 在比例导引律的基础上增加偏置项, 基于预测落角误差实时输出偏置项, 校正落角误差.

第 1.2 节介绍了四类打击角度约束下的协同制导方法, 前三类鲁棒性较好, 适用于协同打击静止目标、协同拦截机动目标. 对于一些智能机动博弈场景, 由于目标机动较大或者终端打击角度指令变化较大, 可以探索智能协同制导方法的应用.

### 1.3 打击时间和角度约束下的协同制导

对大型军舰、物资运输车、指挥机构等具有重大军事价值的目标, 若多枚导弹能够对目标或者其要害部位实现同时精确命中, 则能够以期望的打击空间命中目标, 提升突防效能和对目标的毁伤效能. 然而此类方法对目标的机动能力要求较高. 这种同时考虑时间约束与角度约束的协同制导方法从技术实现空间上来看主要有三类.

#### 1.3.1 基于两阶段式的打击时间和角度约束下协同制导方法

基于两阶段式的打击时间和角度约束下协同制导方法采用分段制导, 先对打击时间进行控制, 再控制打击空间. 在第一阶段使打击时间误差收敛至零, 同时使打击角度趋近于期望值, 当时间约束偏差满足条件后, 进入打击角度控制阶段, 使导弹以期望空间命中目标. 同时, 设计两种制导律的切换条件, 通过制导律的切换, 完成对打击时间和落角的控制[30]. 两阶段式制导方法的优点是设计简单、可靠性高, 但是只能使时间约束和空间约束之中的一个获得较好的控制效果, 适用于对约束精度不高的场合.

#### 1.3.2 基于推力控制的打击时间和角度约束下协同制导方法

当飞行器具备速度调节能力 (或推力控制能力) 时, 则可以基于推力控制的方法在视线方向和视线法向上分别进行控制. 在视线方向设计打击时间约束协同制导律, 保证各飞行器能够同时击中目标; 在视线法向上设计打击角度约束协同制导律, 使各拦截弹的视线角能够在固定时间内收敛至期望值, 实现空间上的协同. 在此基础上, 有学者研究了复杂多约束条件下的协同制导问题. 文献 [31] 研究飞行速度带有上下界约束的协同制导问题. 文献 [32] 则研究无相对速度测量情况下的打击协同制导问题.

此种方法对时间约束和角度约束实现解耦, 控制效果好, 但是需要推力可控, 只适用于轴向速度可控的飞行器.

#### 1.3.3 基于智能学习的打击时间和角度约束下协同制导方法

在基于智能控制的打击空间协同制导中, 根据目标与飞行器之间的态势, 计算最优协同时间以及最优空间分布, 为每枚飞行器规划最优打击时间以及最优打击空间, 每枚飞行器按照期望时间和角度打击目标. 应用智能方法, 如深度强化学习[33]、自适应动态规划[34−35] 等, 设计制导控制器网络, 其中输入为当前态势, 输出为制导指令. 对初始条件及目标运动情况进行仿真并得到数据样本, 利用迭代优化算法对网络进行训练, 最终使网络收敛到最优值.

智能控制方法由大量数据训练得到, 可以对时间约束和空间约束同时达到较好的控制效果. 但其

对数据样本质量要求较高, 并且存在需要参数多、对计算机计算能力要求较高等问题. 这种方法需要导弹计算机算力高, 且导引信息较为精准.

第 1.3 节介绍了三类打击时间和角度约束下的协同制导方法. 本节相关方法的协同制导任务是实现对运动目标、静止目标、虚拟目标 (如预测命中点、中末交班点) 带有期望打击时间或者打击角度约束的协同打击. 第一类实用性较好, 但是对初始条件要求较高、协同打击可行域较小; 第二类对飞行器能力要求较高; 第三类对环境适应性依赖于样本数据的大小.

## 2 编队构型约束下的飞行器集群编队协同制导

带有打击时间/角度约束下的飞行器集群协同制导, 本质上面向协同打击任务. 而飞行器集群编队控制是协同制导的重要分支之一. 制导的任务是使得飞行器飞向“目标”或者“轨道”, 制导问题的本质是生成带有空间约束的轨迹. 第 1 节研究的是在打击时间或者打击角度约束下, 飞行器飞向“目标”的问题. 那么从制导的定义来看, 必然还有一类问题是飞行器协同飞向“轨道”的问题, 这恰恰是编队飞行的描述. 因此, 飞行器集群编队控制问题, 本质上是属于轨迹层的广义协同制导问题. 飞行器集群在执行更加复杂的制导任务时, 不仅需要在终端保持时空约束, 而且需要在全过程/某一段过程保持特定的构型, 便于执行协同探测、协同侦察、协同通信任务. 编队构型约束下的飞行器集群编队协同制导方法难度较大, 对飞行器的机动能力要求更高 (尤其是无动力飞行器). 而且编队构型是和探测/通信等任务密切相关的, 需要进行一体化设计. 如图 3 所示, 飞行器集群编队协同制导方法主要分为以下三类方法: 基于一致性的编队协同制导方法、基于参数迭代的编队协同制导方法和基于轨迹优化的编队协同制导方法. 下面对这三类方法进行详细介绍.

### 2.1 基于一致性的编队协同制导

在当前飞行器集群编队制导方法的研究中, 无论针对的是静止目标还是运动/机动目标, 其核心是选择一致性协调变量, 建立对应的编队制导误差动力学, 在局部或全局通信的作用下, 通过合适的一致性误差反馈控制律实现相关变量达到一致[36].

一般来说, 基于一致性的飞行器编队制导可以分为惯性坐标系下的编队制导方法和局部坐标系下的编队制导方法.

文献 [37] 研究基于一致性的二阶集群系统编队控制问题, 并将所提出的控制协议应用于多无人机的目标编队围捕制导场景, 同时给出基于四旋翼无人机集群协同平台的编队飞行实验验证. 此外, 在过载约束[38]、有限时间收敛约束[39]、状态约束[40]等多约束条件下惯性坐标系下的飞行器编队制导问题, 目前已经取得丰硕成果. 在局部坐标系下的编队制导问题中, 学者大多将领导者作为中心节点, 构建其他飞行器相对中心节点的局部误差动力学系统[41], 从而可以设计分布式编队制导律.

值得注意的是, 编队制导问题中的“编队”既可以是固定的也可以是随时间变化的. 如果是固定编队构型或者是若干构型进行切换与重构, 则飞行器集群将会实现宏观编队飞行, 适用于飞行器集群中制导编队飞行场景; 如果是时变编队构型, 而且编队尺寸随着剩余飞行时间逐渐收敛至零, 那么飞行器集群将会以特定的构型 (同时并带有期望角度) 协同打击目标[42], 适用于飞行器集群末制导协同打击场景.

基于一致性的编队协同制导方法可以很好地完成对目标的饱和打击, 实现起来较为方便, 在缓变编队制导的场景下具有应用价值. 此种方法一般要求飞行器具备三个方向的速度或者过载调整能力. 对于更加复杂的编队制导问题, 基于一致性的编队制导方法较为简单, 其对复杂编队构型保持的适应性相对较弱. 同样, 此种方法也十分依赖飞行器之

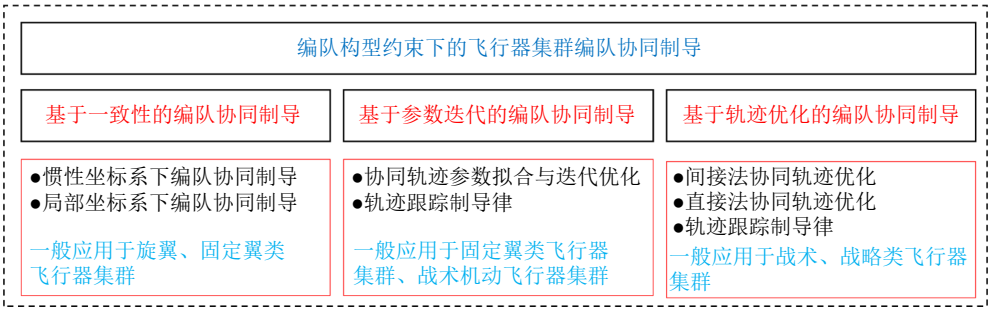



图 3 编队构型约束下的飞行器集群编队协同制导方法

Fig. 3 Cooperative guidance methods for aircraft swarm system formation under formation configuration constraints

间的实时信息交互, 因此在电磁对抗环境下仍具有一定局限性.

### 2.2 基于参数迭代的编队协同制导

在基于一致性的编队协同制导方法研究中, 大多数学者假设飞行器速度恒定或可控, 从而大大简化飞行器的动力学模型, 然而该方法对再入飞行器并不适用. 针对于飞行器集群编队协同制导问题, 大多采用协同轨迹规划方法为协同制导任务设计对应参考轨迹, 基于轨迹跟踪律精确跟踪参考轨迹, 进而完成飞行器集群协同制导任务.

文献 [43] 基于高度–速度剖面设计协同参考轨迹, 存在两个轨迹参数, 将剩余航程和飞行时间表示为两个轨迹参数的函数, 通过牛顿迭代法校正两个高度系数来满足航程和时间约束. 文献 [44] 将阻力加速度–能量走廊边界拟合成四段二次曲线的形式, 保证边界光滑且连续, 将阻力加速度剖面设计成分段多项式形式, 同样采用牛顿迭代法求解对应剖面参数. 文献 [45] 通过参数迭代方法构造特殊的攻角剖面, 通过气动阻力调节速度达到编队目的.

基于参数迭代可以为飞行器集群编队协同制导快速规划参考轨迹, 计算量较小, 一般具有实时性, 在飞行器编队飞行中段执行探测、突防任务等场景下具有应用价值.

### 2.3 基于轨迹优化的编队协同制导

在飞行器集群执行更加复杂的编队制导任务, 或者其受到的约束更加多样时, 简单的一致性算法、参数迭代算法往往会失效. 为在复杂约束条件下实现编队协同任务, 轨迹优化方法是可行途径之一. 众多学者将轨迹优化方法应用于协同制导问题中, 为飞行器集群编队制导提供一条最优参考轨迹. 轨迹优化的目的在于在满足众多约束的轨迹中选择一条最优轨迹, 强调最优性. 目前有很多方法来求解轨迹优化问题, 这些方法主要分为两类: 间接法和直接法.

间接法是基于变分法或极小值原理将轨迹优化问题转化为两点边值问题, 然后利用牛顿法等数值优化方法进行求解. 文献 [46] 通过改进的间接法进一步完善轨迹优化问题. 使用间接法可以得到精确最优解, 但其对于迭代初始猜测值较为敏感, 只有初始猜测值与真实值足够接近时才能保证收敛.

直接法是将状态变量和控制变量离散化处理, 将轨迹优化问题转化为非线性规划问题, 并采用优化算法进行求解. 文献 [47] 考虑终端约束、控制约束、状态约束等, 选取控制量和调节时间作为指标函数, 采用高斯伪谱法为飞行器集群编队中的从飞行器生成快速编队轨迹. 相比之下, 属于配点法的凸优化方法在求解轨迹优化问题的效率方面具有较大优势. 文献 [48–49] 采用序列凸优化方法进行求解, 可以为飞行器编队提供高精度、强鲁棒的参考轨迹. 同样, 可以设计基于轨迹跟踪律精确跟踪参考轨迹, 进而完成飞行器集群协同制导任务.

基于轨迹优化的编队协同制导方法能够同时处理复杂多约束条件, 优点较多, 应用场景较为广泛. 但相较于其他方法, 实时性较差、计算量较大. 随着弹载计算机硬件技术的发展, 这一问题会迎刃而解, 因此这类方法在未来将有更大的应用场景.

本节介绍了三类编队构型约束下的飞行器集群编队协同制导方法. 本节相关方法的协同制导任务是设计带有编队构型约束的协同轨迹, 并且飞行器集群能够通过轨迹跟踪方法实现协同制导. 基于一致性的编队协同制导方法能够实现全飞行过程编队, 而且具有解析制导指令, 硬件适应性较好, 然而此种方法对飞行器的能力要求较高, 一般要求飞行器具备三个方向的速度或者过载调整能力, 而且协同制导律设计难度较大、技巧较高, 一般应用于旋翼、固定翼类飞行器集群. 基于参数迭代的编队协同制导方法和基于轨迹优化的编队协同制导方法本质上为基于数值轨迹优化–在线轨迹跟踪的编队制导方法, 这两种方法由于引入在线/离线优化方法, 因此任务适用性较好. 基于参数迭代的编队协同制导方法由于优化参数较少, 更适用于在线协同制导, 一般应用于固定翼类飞行器集群、战术机动飞行器集群; 基于轨迹优化的编队协同制导方法计算量大, 更适用于离线协同制导, 但是这种方法处理的约束最全面, 而且任务适应性最好, 一般应用于战术、战略类飞行器集群离线协同制导轨迹设计.

## 3 角色和任务互补的飞行器集群协同制导

协同制导的内涵不只是包含协同打击和编队制导等单一任务, 未来还将会赋予飞行器协同博弈对抗、协同探测、协同突防等新任务和新角色. 第 1 节和第 2 节介绍的协同制导方法中, 飞行器的角色和任务较为单一, 而在未来飞行器集群立体作战场景中, 在综合决策系统的支撑下, 飞行器将会根据态势环境执行不同角色下的协同制导任务. 复杂的任务通过指令分解与分配, 实现同一角色的飞行器集群间协同配合, 以及不同角色的飞行器之间任务互补与协作. 角色和任务互补的飞行器集群协同制导模式, 是协同制导与协同决策的有机融合, 已经成

为协同制导的重要发展方向之一. 从技术实现的角度来看, 角色和任务互补的协同制导策略可以归纳为三类: 基于目标分配的协同制导策略、基于角色配合的协同制导策略和基于任务互补的协同制导策略, 如图 4 所示.

### 3.1 基于目标分配的协同制导

在多对多的攻防对抗场景中, 目标分配与制导律设计之间的融合显得尤为关键. 通过将目标分配问题与制导律的闭环系统相结合, 可以将“群对群”复杂任务拆解为多个“一对一”或者“多对一”子任务, 促进制导信息的高效利用, 这也是“群对群”协同对抗最为关键的技术[50].

文献 [51] 针对多对多进攻场景提出分配–制导一体化算法, 利用双曲正切函数和综合相对距离构造指标函数, 所设计的目标分配模型保证每个目标至少分配一个进攻者. 在分配问题建模后基于最优控制得到集群的协同制导律, 实现协同分配和协同打击. 文献 [52] 在目标分配建模时综合考虑脱靶量和目标拦截概率, 并通过数学规划分析分配问题的精确解. 在考虑速度衰减的基础上, 利用循环神经网络通过离线训练、在线应用的方式实时估算针对机动目标的脱靶量, 形成脱靶量智能估计–分配算法–比例导引制导律的协同框架.

分配–制导算法除了对目标直接进行分配, 还可以根据目标机动区域利用区域覆盖策略实行阵位分配. 文献 [53] 首先建立导弹的可达域、可行域以及目标的逃逸域, 然后给出协同制导律形式, 研究区域覆盖关系, 最后设计数值算法来实现对多弹的覆盖区域的分配、以及多弹初始拦截阵位的配置. 文献 [54] 针对末制导多协同合围拦截制导问题, 采用维诺分割和覆盖控制理论, 提出形式简单、解算效率高的分配–制导算法, 使得拦截飞行器在拦截过程中实现目标动态分配.

在多对多的攻防对抗、协同探测和资源再分配等领域中, 分配–制导具有战略意义. 分配–制导一体化设计不仅能够优化作战资源、提高作战效率, 而且能够增强飞行器集群适应性和灵活性, 从而在复杂多变的战场环境中保持竞争优势.

### 3.2 基于角色配合的协同制导

在飞行器集群作战中, 基于角色配合的协同制导发挥着不可或缺的作用. 各飞行器根据其特定的角色定位, 对制导任务进行有针对性的侧重分配, 实现对目标的有效压制或使集群能够执行特殊任务. 基于角色配合的协同制导的实现形式主要涵盖引诱突防、围捕打击、领–从配合、多体配合等多个方面.

引诱突防是指通过特定的飞行器执行诱饵任务, 分散敌方注意力, 为飞行器集群创造突破机会. 文献 [55] 将我方飞行器按价值进行分类, 考虑脱靶量、能量消耗和拦截角度等关键指标, 基于最优控制理论提出带有引诱角色的显式协同制导律, 有效减小引诱者和拦截器的脱靶量, 为其他飞行器突防创造有利条件. 文献 [56] 认为飞行器具有一阶动力学特性, 然后建立反拦截模型, 利用微分线性矩阵不等式给出有限时间协同制导律形式, 保证引诱者在有限时间内以特点交会角拦截进攻飞行器, 从而实现突防任务.

近年来, 研究者提出基于目标逃逸域覆盖策略的协同围捕制导策略[57−59], 借鉴狼群围捕鹿等大机动猎物的领–从分工作战、多方向协同围捕作战战术, 设计带有全程打击角度约束的时变围捕编队构型, 以目标来袭方位为基准建立起围捕态势, 使得多枚飞行器从不同方向包围住目标 (飞行器与目标的距离不一定相同), 保证至少有一枚飞行器能够从合适的角度实现对目标的拦截. 此种方法物理意义直观, 在拦截无人机、滑翔飞行器、机动弹头等场景中具有较好的应用意义.

领–从配合模式[60] 是最具代表性的角色配合协同制导模式. 领导者和跟随者在硬件配置、算法功能方面都能进行异构配置, 从而能实现多角色配合

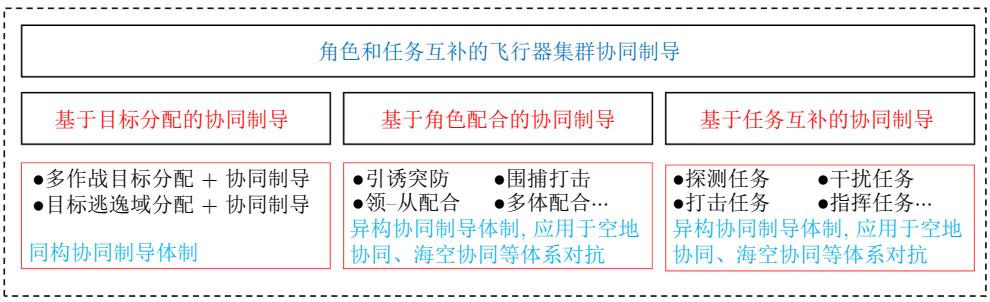



图 4 角色和任务互补的飞行器集群协同制导方法

Fig. 4 Role- and mission-complementary methods for cooperative guidance of aircraft swarm system

协同. 文献 [61] 利用最优控制为主飞行器设计微分博弈制导律, 可以为跟随者提供参考轨迹. 文献 [62] 将此思路扩展到多领导者–多跟随者模式, 领导者生成带有协同探测约束的参考轨迹, 为跟随者层提供综合参考轨迹. 此外, 文献 [63–64] 研究一类异构功能配置的协同制导问题, 多领导者负责协同定位, 无导引头的多跟随者在多个领弹导引下实现对目标的协同制导.

多体配合以三体配合制导[65] 为主 (详见第 4.2 节), 拦截飞行器、打击飞行器和保卫飞行器三方互相博弈, 保卫飞行器负责与拦截飞行器碰撞从而实现对打击飞行器的保护. 近年来, 四体配合制导也成为研究热点[66–67]. 在此场景下, 来袭两枚拦截飞行器分别锁定进攻方的两枚飞行器, 那么进攻方的两枚飞行器可以互相配合, 实现对来袭两枚飞行器的牵引, 诱导其相互碰撞, 从而实现协同突防任务. 这类四体协同配合模式, 未来可以扩展到多体协同配合模式, 且配合模式多种多样, 更加符合“群对群”博弈制导问题的本质, 将会是未来研究的热点.

基于角色配合的协同制导策略是飞行器集群作战中的关键技术, 通过优化角色分配和任务执行, 可显著提升作战效率. 其在多目标打击、复杂环境作战、防御警戒以及侦察监视等方面的应用前景广阔, 后续研究除了要探索更多的角色配合战术, 还要应对通信依赖、系统复杂性和计算要求等挑战, 进而增加集群协同的鲁棒性. 随着人工智能和无人系统的进一步集成, 协同制导律有望实现更高水平的智能化和多域作战能力, 成为未来战争和国际军事合作中的重要支撑.

### 3.3 基于任务互补的协同制导

随着现代战争形态的演变, 战场环境变得日益复杂, 作战空间的广阔性要求飞行器能够在不同的高度和速度下执行任务. 这种需求催生了对高低空、高低速异构飞行器任务互补的需求, 以实现更为复杂的作战任务.

文献 [68] 提出海上无人机和反舰导弹的任务互补协同制导方案, 海上无人机集群可利用卫星中继或空中战机组网通信系统, 显著降低被发现和拦截的风险. 文献 [69] 提出空海一体化设计样式, 从而打破武器发射平台和目标制导平台固定的配属关系, 这种任务互补方式可以更有效地分配防空资源, 从而提高对多方位、多层次威胁的响应能力. 文献 [70] 研究体系对抗下的战术任务互补协同制导样式.

任务互补的协同制导可以在大空域作战场景中发挥异构飞行器的不同优势. 低空飞行器可以利用地形遮蔽进行隐蔽接近, 而高空飞行器则可以提供战场监视和指挥控制; 高速飞行器能够迅速穿透敌方防线, 执行快速打击任务, 而低速飞行器则可以进行持久监视和精确打击. 这种高低搭配、快慢结合的作战模式, 不仅能够提高作战效率, 而且能够增加敌方的防御难度, 从而获得战场上的主动性.

本节介绍了三类角色和任务互补的飞行器集群协同制导方法. 本节相关方法的协同制导任务是在复杂作战环境下, 飞行器集群之间互相配合完成协同探测、协同干扰、协同诱骗、协同掩护、协同打击等多样化协同任务. 基于目标分配的协同制导方法, 本质上为同构协同制导体制, 适用于大规模多对多场景, 一般应用于同构飞行器集群协同打击多目标场景, 如多机动导弹协同打击水面/陆地目标、多反坦克导弹协同打击装甲目标、多防空导弹协同拦截空中机动目标. 基于角色配合的协同制导和基于任务互补的协同制导本质上为异构协同制导体制, 这两种体制下的角色、任务组合模式多种多样, 将会在空地协同、海空协同作战场景中的体系对抗方面得到广泛应用.

## 4 对抗条件下的飞行器集群协同博弈制导

随着进攻方和防御方飞行器集群技术的发展和飞行器机动能力的提高, 博弈对抗场景日趋复杂, 固化任务和角色的协同制导系统难以满足高动态环境下的协同对抗需求. 将博弈理论引入协同制导问题, 建立起协同博弈制导理论架构, 通过获取战场实时态势, 利用敌我双方信息建立最优协同博弈制导策略. 随着人工智能技术的不断发展, 智能协同博弈制导理论将会成为人工智能与协同制导领域结合的前沿热点. 从方法技术角度上, 主要分为以下五类方法: 基于微分对策的协同博弈制导、基于追逃博弈的协同博弈制导、基于纳什均衡搜索的协同博弈制导、协同突防与协同反制制导、基于深度强化学习的协同博弈制导, 如图 5 所示. 下面对这五类方法进行详细介绍.

### 4.1 基于微分对策的协同博弈制导

针对协同制导问题时间连续、策略连续的特点, 研究者将微分对策理论引入制导问题. 微分对策, 又称微分博弈, 相比于一般的博弈场景, 微分博弈场景具有状态空间连续、策略动作空间连续等重要特点[71]. 微分博弈理论源自于博弈论和控制论, 它将博弈论从静态博弈发展为动态博弈, 也将控制论从单边控制问题发展为双边控制问题. 在微分对策

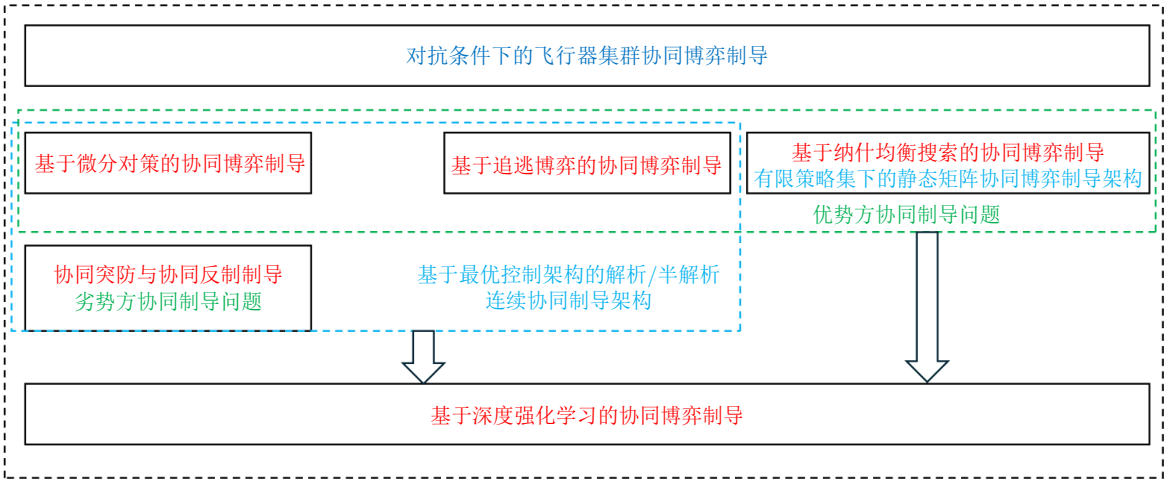



图 5 对抗条件下的飞行器集群协同博弈制导方法

Fig. 5 Cooperative game guidance methods for aircraft swarm system under adversarial conditions

制导问题中, 每个参与者的制导策略随时间连续变化, 导弹通过选择合适的竞争或合作制导策略来最小化或最大化性能指标, 由此最大化本方的收益.

微分对策制导理论最早由 Issacs 开创. 冷战初期, 在美国空军资助之下, 成立了由 Issacs 博士牵头的实验室研究通过导弹拦截飞行器的问题, 后来 Issacs 博士发表专著《Differential Game》, 标志着“微分博弈”理论的开创. 目前的微分对策制导律主要分为两大类: 线性二次型微分对策制导律与非线性微分对策制导律.

线性二次型微分对策制导问题, 即选择线性二次型函数作为性能指标, 由此求解微分对策问题获得最优制导律. 文献 [72] 针对博弈双方具有理想动力学的博弈情景, 将零控脱靶量和双方控制输入的二次惩罚项加入代价函数, 建立线性二次微分对策模型. 对于多枚导弹打击一个目标的协同制导问题, 文献 [73] 基于二次型微分对策理论, 得到两枚导弹打击一个目标的角度协同制导律.

非线性微分对策制导问题, 即不使用线性化手段, 在非线性弹目模型上进行求解的微分对策问题. 文献 [74] 将状态相关的 Riccati 方程方法推广到非线性零和微分博弈中, 提出一种反馈解法, 得到与碰撞角约束制导问题的状态相关 Riccati 方程的解析解, 从而解得微分对策制导律. 随着微分对策理论的发展, 基于微分对策的协同制导方法具有较广的应用前景. 但由于线性模型与实际模型有较大差异, 线性微分对策制导律存在一定的局限性, 而非线性微分对策制导模型又面临着难以求解的问题.

### 4.2 基于追逃博弈的协同博弈制导

所谓追逃问题, 即指场景中含有追捕者和逃逸者两方的博弈问题, 追捕者希望实现对逃逸者的抓捕, 逃逸者则尽可能实现逃逸或推迟被抓捕的时间, 双方在已知信息的基础上利用各自能力展开博弈, 从而构成追逃博弈问题.

针对单枚导弹打击单个目标的问题, 文献 [75] 在存在时变加速度约束的情况下, 给出针对机动目标指定拦截角的最优制导律. 针对多对一追逃博弈问题, 文献 [76] 在多对一平面追逃运动模型的基础上, 利用线性二次性能指标, 求解导弹的最优协同拦截策略和目标的最优逃逸策略. 文献 [77] 在追逃模型基础上, 从目标飞行器的角度, 考虑使用防御飞行器保护目标免受来袭导弹的威胁, 得到目标与防御飞行器之间的协同策略.

除一般的追逃博弈问题之外, “三体追逃”是近年来博弈制导领域一个新的热点. 所谓“三体”指的是, 由一个目标飞行器和一个保护目标的防御飞行器, 以及一个打击目标的打击飞行器所组成的三方, 防御飞行器通过自己的策略尽可能阻止打击飞行器对目标的打击[78]. 文献 [79] 以打击导弹的视角为出发点研究三方博弈问题, 采用边界型微分博弈方法, 得到在尽可能躲避防御弹的条件下对目标进行打击的微分博弈制导律. 文献 [80] 讨论多个打击者试图拦截具有主动防御能力的目标的场景, 在双方零和差分博弈的框架下, 以脱靶量、相对拦截角误差和各智能体过载构成性能指标, 提出具有规避防御导弹能力的最优协同制导律.

基于追逃博弈的协同制导方法, 贴近真实博弈制导场景, 具有较广的应用前景. 与传统制导方法相比, 基于追逃博弈的协同制导方法可以获得追逃双方的双边或多边最优制导律, 为空战中的进攻和防守策略设计提供解决方案.

### 4.3 基于纳什均衡搜索的协同博弈制导

在飞行器群对群博弈对抗场景中, 由于不同飞行器性能、任务等的不同, 导致动态博弈问题的系统模型过于复杂, 即使问题的最优解存在, 但在限定时间内通常也求不到解. 因此, 有学者提出将静态博弈论思想引入协同博弈制导问题的研究中.

在协同博弈场景中, 每个参与者以其动力学和控制输入作为博弈的策略. 针对具有动力学系统的多智能体系统, 文献 [81] 由分布式反馈控制器设计对集群博弈的纳什均衡搜索算法, 其算法具有较好的鲁棒性, 且可适用于有向通信拓扑的情况. 在真实博弈对抗场景下存在着各种约束条件. 在该场景下, 带有约束条件的博弈问题均衡解被称为广义纳什均衡解 (Generalized Nash equilibrium seeking, GNE). 文献 [82] 针对 GNE 问题设计障碍函数, 并根据原对偶方法设计时变广义纳什均衡搜索算法, 实现广义纳什均衡解的动态求解.

这种博弈制导问题中, 进攻方和防御方的博弈制导律不是解析制导指令, 而是一系列策略集组成的序列, 协同制导问题转变成有限策略集下的纳什均衡解求解问题, 因此可以解决复杂任务约束下的非合作协同博弈问题. 对于基于纳什均衡理论的制导问题, 文献 [83] 将高超声速飞行器的拦截问题分为两个阶段, 通过设计拦截弹−目标策略集, 获得满足要求的均衡策略模型, 最终求解非线性规划问题获得我方获胜的博弈制导律.

相比微分对策的解析求解方法, 基于纳什均衡搜索的博弈问题求解策略可以较好地解决多任务模式下的非合作协同博弈问题, 在协同制导领域有着较好的发展前景.

### 4.4 协同突防与协同反制制导

值得注意的是, 前文所述的协同制导问题更多的是面向主动方或者优势方, 然而对于执行协同任务而被反制的弱势方 (如多枚高超声速飞行器中段飞行过程遭遇多枚拦截弹), 其协同突防问题也是未来一个重要的研究方向. 协同突防制导目前主要有以下两种研究方案.

第一种协同突防制导方法基于相对运动学模型, 通过构建与突防效能相关的状态变量, 如弹目相对距离、视线角速度等, 利用飞行器之间的策略配合, 通过理论分析和解析制导律设计, 从而实现博弈对抗场景下对来袭拦截武器的协同突防[84−85].

第二种协同突防制导方法, 则是基于轨迹规划的思路, 将规避来袭的威胁转为生成一系列对威胁保持特定距离, 且带有协同时间、空间约束的轨迹集合[86], 并且通过在线轨迹跟踪控制实现实时协同突防.

突防制导问题不仅是数学层面脱靶量最大的问题, 而且也涉及到如何从信息层面欺骗来袭武器的策略问题 (如释放诱饵、超低空飞行), 本身就是一个复杂的开放性问题. 同样, 协同突防制导问题不仅涉及单飞行器突防问题, 而且更重要的是飞行器集群之间如何配合、如何欺骗来袭武器、如何密集编队躲避敌方探测设备等, 同样是开放性的问题, 也是未来进攻性飞行器集群需要重点考虑的问题.

### 4.5 基于深度强化学习的协同博弈制导

协同博弈制导问题, 如果从输入输出角度来看, 可以视为一个多个玩家、多种策略下的多智能体协同博弈问题. 未来的协同博弈制导, 不仅是脱靶量取极值的简单数学问题, 而且更多的是多策略的高动态协同博弈对抗问题.

深度强化学习是一种可以独立探索策略的机器学习模型, 通过为智能体提供奖励促使智能体完成任务. 深度强化学习技术的发展, 为协同博弈制导问题的求解指出一条新的技术路径. 而深度强化学习将深度学习的感知能力和强化学习的决策能力结合起来, 在多智能体研究中应用广泛.

目前, 基于深度强化学习的协同博弈对抗方法大多应用于空战协同博弈对抗场景[87], 结合空战连续状态、连续动作、现有战术动作等的特点, 选择合适的智能学习网络模型, 采取自博弈的方式进行动态交互训练, 得到智能协同博弈对抗策略. 此方法不仅有助于生成新的对策案例样本, 而且有助于丰富空战战术.

空战对抗和追逃制导问题, 均属于轨迹层的协同博弈对抗问题, 在问题求解方面有共同特性. 文献 [88] 以高超声速飞行器为对象, 基于双延迟深度确定性策略梯度算法提出一种高超声速飞行器智能协同博弈制导方法, 同时提出一种快速稳定收敛的训练方法, 从而提升高超声速飞行器的博弈成功率.

随着机器学习技术的发展, 深度强化学习技术在协同制导领域展现出广泛的应用前景. 与传统博弈制导问题求解方法相比, 深度强化学习方法可以较好地解决目标未知机动、非线性制导动力学、过载受限、多种战术制导动作等复杂约束下的协同博弈制导问题.

本节介绍了五类飞行器集群协同博弈制导方法. 本节相关方法的协同制导任务是在给定的最优协同博弈效能代价函数下, 飞行器集群能够实现具有最佳性能的协同打击任务和协同突防任务. 前三种为经典的协同博弈制导方法, 本质上还是基于最

优控制架构的解析/半解析连续协同制导问题, 或者有限策略集下的静态矩阵协同博弈问题, 适用于较为传统的博弈对抗场景. 第四种方法探讨协同突防制导问题, 这是从“弱势方”的角度出发, 研究新型协同制导问题. “有矛必有盾”, 协同进攻与协同防御互相交替发展、互相促进. 然而随着进攻方和防御方的智能化程度提高, 博弈对抗程度越发激烈, 如空战博弈对抗场景, 一些机器给出的取胜策略往往超出人类的直观理解, 因此也期待如第五种方法讨论的深度强化学习技术能够给出一些新型的协同制导知识、协同制导准则. 随着算力的提升, 基于深度强化学习的协同博弈制导也将成为未来的研究热点.

## 5 协同制导技术应用场景与面临的挑战

### 5.1 协同制导技术典型应用场景

本文主要综述飞行器集群协同制导场景的一些通用理论与方法. 协同制导是精确制导技术的一类最新子技术, 因此协同制导技术大多应用于精确制导武器. 本节将综合上述方法, 在典型的飞行器集群进行应用分析.

针对倾斜转弯高速飞行器集群 (高超声速滑翔导弹等)、倾斜转弯低速飞行器集群 (固定翼无人机等), 文献 [89−90] 分别给出相关协同制导技术最新进展. 倾斜转弯飞行器集群协同制导任务, 可以分为协同中制导和协同末制导. 协同中制导阶段, 飞行器集群需要进行长距离飞行以实现协同集结与协同中末制导交班, 主要以第二类协同制导方法为主, 进行编队变换、保持; 协同末制导阶段, 由于主要打击高价值低速目标, 飞行器集群主要以第一类协同制导方法为主, 实现对目标的精确协同打击.

针对时间敏感型协同作战任务, 如协同防空[91]、协同空战[92] 等, 文献 [91−92] 综述相关协同制导技术的最新进展. 此类飞行器集群也是采用协同中制导与协同末制导. 值得注意的是, 防空/空空导弹的协同中制导飞行时间较倾斜转弯类飞行器的中制导时间更短, 而且终端约束、过程约束更强, 因此协同中制导大多采用第一类方法为主; 协同末制导阶段, 由于主要打击高速大机动目标, 因此协同末制导大多为第一类、第三类和第四类方法.

针对空面制导武器[93−94] 等中低速飞行器协同作战场景, 相关协同制导方法应根据实际作战需求进行适应性选择与设计.

### 5.2 协同制导技术面临的挑战

协同制导技术有着将近 20 年的理论研究历程, 工业界和学术界的制导控制专业专家学者在上述各领域已取得丰硕的成果. 然而协同制导技术在转向工程实现阶段, 会遇到一些技术挑战. 随着人工智能技术、信息存储与传输技术、实时计算技术在软件层面和硬件层面飞速发展, 从信息处理的底层到顶层的角度来看, 协同制导在信息获取与处理层面、个体能力层面、协同制导律分析设计层面、群体生存能力层面、协同制导任务适应性层面和协同制导战术层面, 相关技术挑战总结如下.

1) 信息获取与处理层面

协同制导技术是群体协同技术的一个分支. 协同制导技术本质是实现打击时间、打击角度、打击任务的一致性, 其所依赖的是个体之间的信息传递, 包括邻居飞行器信息、目标信息、环境状态信息等. 在未来协同作战与反协同作战场景中, 通过电磁对抗手段实现信息链路破坏是最有效的途径之一. 因此对于协同制导技术来说, 强电磁对抗等极端环境下的高精度制导信息获取是一个重要的难题. 此外, 一些先进的协同制导律往往要求具有全局环境信息、弹目全维度信息, 甚至目标机动能力信息, 这也是非常困难的.

2) 个体能力层面

协同制导技术往往要求飞行器具备更加先进的机动性能, 来实现协同制导变量的一致性. 如无动力高超声速飞行器协同制导场景, 需要飞行器进行纵向主动跳跃、横侧向主动蛇形机动, 实现协同集结与协同打击. 如拦截大机动目标场景下, 拦截弹不具备过载优势, 需要进行先进智能协同机动, 实现非传统比例导引收敛需求下的协同拦截. 如制导炸弹/炮弹/巡飞弹, 需要部分搭载雷达导引头, 实现相对距离的测量. 因此未来战场为实现多约束条件下飞行器集群协同制导, 需要飞行器本身在运动/机动能力、传感能力、动力系统能力等方面有进一步的能力提升.

3) 协同制导律分析设计层面

目前现有的协同制导律大多关注打击时间、打击角度、打击范围等终端显示状态变量, 而协同制导全过程中的探测、通信等约束保障较为困难. 基于优化方法的协同制导律能够保障过程协同约束、终端协同约束, 然而其实时性和弹载实用性尚未得到保障. 此外, 飞行器在执行协同制导指令过程中, 姿态控制系统会产生一定的时延. 协同制导律在工程实用化过程中需要满足探测、通信、中末交班、打击、防碰避障、控制系统等约束条件, 因此, 如何设计既能满足上述复杂约束又能具备解析/半解析形式的新型协同制导律, 也是一个具有挑战性的研究方向.

4) 群体生存能力层面

在实际作战环境中, 无论是协同进攻还是协同

防御场景, 敌方均会使用电磁武器、拦截武器等, 使得节点损伤, 导致既定的协同制导构型发生变化, 也使得飞行器集群的群体生存能力 (集体完成任务的能力) 有所下降. 这种情况下, 协同制导的时空一致性、编队构型、任务构型均需要进行自适应调整, 因此, 如何实现节点损伤情况下协同制导系统的自愈合、自适应调整, 是其生存能力和任务执行能力的保障.

5) 协同制导任务适应性层面

现有协同制导的任务相对单一, 个体任务主要以打击、探测、诱骗、防御等单任务为主. 当战场环境发生变化时 (如制导目标丢失、诱饵弹出现), 个体需要适应当前的环境、自适应执行新的协同制导任务. 人工智能技术通过离线/在线对不确定环境的探索, 具有较好的泛化能力, 然而人工智能技术应用到协同制导具体任务场景中, 可能会存在可解释性差的难点. 因此亟待需要探索可解释性的智能协同制导技术.

6) 协同制导战术层面

未来作战的一个重要场景, 就是大规模无人飞行器协同博弈对抗场景. 在这个场景下, 功能、任务单一的协同制导律不具备实用性和实战性. 在这种场景中, 必然要将进攻方的飞行器集群和防御方的飞行器集群进行战术分组. 不同于传统的目标分配场景, 此场景要求不同小组之间执行特定协同制导任务, 小组与小组之间互相配合、功能互补, 实现“大协同”制导, 从而有望从工程角度实现真正的群体协同博弈对抗.

## 6 协同制导技术未来发展展望

协同制导是一个在学术领域和工程实践领域发展迅猛的方向. 未来, 协同制导将朝着环境适应性更强、智能化水平更高、博弈对抗能力更强的方向发展.

1) 信息/能力非完备条件下的鲁棒协同制导

第一项和第二项挑战的本质实际上就是制导系统获取不到完整的制导信息, 而且飞行器的制导能力是有限的. 因此需要发展信息/能力非完备条件下的鲁棒协同制导理论与方法, 实现在电磁对抗等极端场景下高精度制导信息分布式获取, 同时保障飞行器集群在机动过载、信息获取等能力受限条件下的高精度协同制导.

在飞行器集群中单体能力有限的情况下, 需要通过个体之间真正的短板互补实现整体能力的提升. 基于上述分析, 信息/能力非完备条件下的鲁棒协同制导, 主要有异构传感器分布式制导信息融合技术、过载受限下的均势协同制导技术、欠驱动变速条件下的多约束协同制导技术、信息非完备下的分布式协同制导技术等未来发展方向.

2) 不确定环境下高安全弹性协同制导

针对第三项和第四项挑战, 飞行器集群需要适应复杂多变的环境约束, 同时保障自身的生存能力. 因此需要发展不确定环境下高安全弹性协同制导理论与方法, 实现对突发威胁、不确定约束的自适应调整.

在飞行器集群本身的生存能力受到挑战后, 需要在现有协同制导方法中设计安全保障机制. 基于上述分析, 不确定环境下高安全弹性协同制导, 主要有防碰避障约束下的高安全协同制导技术、状态受限约束下的高安全协同制导技术、节点增减下的弹性协同制导技术、信息打击下的弹性协同制导技术等未来发展方向.

3) 协同探测制导控制一体化

针对第一至四项挑战, 如果从导航、制导与控制 (Guidance-navigation-control, GNC) 大系统角度来看, 则是要求飞行器集群协同制导大系统同时兼顾探测、制导与控制的约束. 因此需要发展协同探测制导控制一体化理论与方法, 实现对飞行器制导过程中信息–轨迹–姿态统筹设计.

协同制导从工程实现角度, 必然需要兼顾姿态控制协同与信息获取处理系统的影响. 基于上述分析, 协同探测制导控制一体化, 主要有带有探测视场约束的一体化协同制导技术、带有控制时延的一体化协同制导技术、带有执行器故障的一体化协同制导技术、协同信息融合–协同制导一体化等未来发展方向.

4) 可解释智能协同制导

针对第五项挑战, 在不确定环境下, 人工智能技术具有较好的探索和泛化能力, 智能协同制导技术是未来重要发展方向. 因此需要发展可解释智能协同制导理论与方法, 实现飞行器集群在实用化协同制导技术的支撑下, 对未知环境、未知打击/拦截任务的动态自适应.

智能协同制导方法在工程落地方面, 需要具备可解释性、可重复性等基本要求. 基于上述分析, 可解释智能协同制导, 主要有数据与知识驱动的协同制导技术、带有智能容错机制的协同制导技术、基于迁移学习的多任务协同制导技术、基于可解释大模型的协同制导技术等未来发展方向.

5) 异构战术协同制导

针对第六项挑战, 飞行器集群协同制导系统需要与顶层战术战法相结合, 探索新的协同制导模式. 因此需要发展异构战术协同制导理论与方法, 真正实现飞行器集群功能、角色、任务的协同互补.

从作战战术出发, 飞行器集群中的个体可以在空地协同、海空协同作战场景中采用不同的战术, 如协同探测、协同干扰、协同诱骗、协同掩护等战术, 将智能空战对抗、生物群体博弈的概念, 进行凝练总结, 形成任务级的异构战术制导样式. 基于上述分析, 异构战术协同制导, 主要有异构战术样式设计技术、异构协同作战任务分配技术、战术任务约束下的先进制导技术、异构协同作战效能评估技术等未来发展方向.

6) 群对群协同博弈制导

针对第五项和第六项挑战, 如果从攻防对抗的角度来看, 未来低成本作战将会呈现群对群协同博弈对抗的任务场景. 因此需要发展群对群协同博弈制导理论与方法, 为未来飞行器集群协同作战与反飞行器集群协同作战场景奠定理论和技术基础.

群对群协同对抗目前尚处于发展阶段, 而且是未来飞行器集群必然会面临的任务场景. 基于上述分析, 群对群协同博弈制导, 主要有开放性的分布式架构、智能化的协同对抗技术、异构系统的跨域协同技术、多弱小目标识别跟踪、战场全局态势分布式认知技术等未来发展方向.

## 7 结束语

协同制导在学术领域和工程实践领域发展迅猛. 本文从协同制导的发展历程和任务级别角度进行归纳总结, 重点介绍不同约束条件下的协同制导理论与方法分类, 分析和总结现有协同制导方法的优缺点. 然而飞行器集群协同制导在实战化应用过程中是一项亟待突破的关键技术. 本文从信息获取层面等六个方面探讨协同制导在实用化进程中的挑战. 协同制导将朝着环境适应性更强、智能化水平更高、博弈对抗能力更强的方向发展, 信息/能力非完备条件下的鲁棒协同制导、不确定环境下高安全弹性协同制导、协同探测制导控制一体化、可解释智能协同制导、异构战术协同制导、群对群协同博弈制导, 将会成为协同制导未来面向实战场景的重要研究方向.

## References


1 Yu W W, Chen G R, Lü J H. On pinning synchronization of complex dynamical networks. *Automatica*, 2009, **45**(2): 429−435

2 Lü J H, Chen G R. A new chaotic attractor coined. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2002, **12**(3): 659−661

3 Lü J H, Chen G R. A time-varying complex dynamical network model and its controlled synchronization criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(6): 841−846

4 Zhou J, Lu J A, Lü J H. Adaptive synchronization of an uncertain complex dynamical network. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(4): 652−656

5 Xiang Jin-Wu, Dong Xi-Wang, Ding Wen-Rui, Suo Jin-Li, Shen Lin-Cheng, Xia Hui. Key technologies for autonomous cooperation of unmanned swarm systems in complex environments. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(10): Article No. 527570
(向锦武, 董希旺, 丁文锐, 索津莉, 沈林成, 夏辉. 复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术. 航空学报, 2022, **43**(10): Article No. 527570)

6 Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14**(2): 260−266

7 Zhao Bin, Liang Le-Cheng, Jiang Rui-Min, Zhou Jun. Review of guidance and integrated guidance and control methods under terminal angle constraints. *Journal of Astronautics*, 2022, **43**(5): 563−579
(赵斌, 梁乐成, 蒋瑞民, 周军. 终端角度约束制导及制导控制一体化方法综述. 宇航学报, 2022, **43**(5): 563−579)

8 Wen Guang-Hui, Zhou Jia-Ling, Lü Yue-Zu, Liu Zhao-Hui, Lü Jin-Hu. Distributed coordination control in multi-missile cooperative tasks. *Journal of Command and Control*, 2021, **7**(2): 137−145
(温广辉, 周佳玲, 吕跃祖, 刘照辉, 吕金虎. 多导弹协同作战中的分布式协调控制问题. 指挥与控制学报, 2021, **7**(2): 137−145)

9 Zhao Jian-Bo, Yang Shu-Xing. Review of multi-missile cooperative guidance. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, **38**(1): Article No. 020256
(赵建博, 杨树兴. 多导弹协同制导研究综述. 航空学报, 2017, **38**(1): Article No. 020256)

10 Zhou J L, Wu X J, Lü Y Z, Li X D, Liu Z H. Recent progress on the study of multi-vehicle coordination in cooperative attack and defense: An overview. *Asian Journal of Control*, 2022, **24**(2): 794−809

11 Tang Zhong-Nan, Xin Hong-Bo, Wang Yu-Jie, Chen Qing-Yang, Wang Peng, Yang Xi-Xiang. Coordinated variable-based guidance method and experimental verification for multi-UAVs. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, **44**(8): 1396−1405
(唐钟南, 辛宏博, 王玉杰, 陈清阳, 王鹏, 杨希祥. 基于协调变量的多机协同打击制导方法与试验验证. 工程科学学报, 2022, **44**(8): 1396−1405)

12 Wei Ming-Ying, Cui Zheng-Da, Li Yun-Qian. Review and future development of multi-missile coordinated interception. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, **41**(S1): Article No. 723804
(魏明英, 崔正达, 李运迁. 多弹协同拦截综述与展望. 航空学报, 2020, **41**(S1): Article No. 723804)

13 Hou Bo, Song Jian-Mei, Zhang Chun-Yan, Zhang Min-Qiang. Cooperative guidance law with impact angle and impact time constraints for networked missiles. *Acta Armamentarii*, 2016, **37**(3): 431−438
(侯博, 宋建梅, 张春妍, 张民强. 带落角和时间约束的网络化导弹协同制导律. 兵工学报, 2016, **37**(3): 431−438)

14 Zhou J L, Yang J Y. Distributed guidance law design for cooperative simultaneous attacks with multiple missiles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, **39**(10): 2439−2447

15 Zhao Shi-Yu, Zhou Rui. Multi-missile cooperative guidance using coordination variables. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, **29**(6): 1605−1611
(赵世钰, 周锐. 基于协调变量的多导弹协同制导. 航空学报, 2008, **29**(6): 1605−1611)

16 Tang J C, Zuo Z Y. Cooperative circular guidance of multiple missiles: A practical prescribed-time consensus approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2023, **46**(9): 1799−1813

17 Wang P Y, Guo Y N, Ma G F, Lee C H, Wie B. New look-angle tracking guidance strategy for impact time and angle control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, **45**(3): 545−557

18 Li Bin, Lin De-Fu, He Shao-Ming, Bai Bing. Time and angle control guidance law based on optimal error dynamics. *Acta*

*Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, **39**(11): Article No. 322215
(李斌, 林德福, 何绍溟, 白冰. 基于最优误差动力学的时间角度控制制导律. 航空学报, 2018, **39**(11): Article No. 322215)

19 Zhao Q L, Dong X W, Liang Z X, Bai C, Chen J, Ren Z. Distributed cooperative guidance for multiple missiles with fixed and switching communication topologies. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, **30**(4): 1570−1581

20 Kumar S R, Mukherjee D. Cooperative saLüo guidance using finite-time consensus over directed cycles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, **56**(2): 1504−1514

21 Kang S, Wang J N, Li G, Shan J Y, Petersen I R. Optimal cooperative guidance law for saLüo attack: An MPC-based consensus perspective. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, **54**(5): 2397−2410

22 Erer K S, Tekin R. Impact time and angle control based on constrained optimal solutions. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, **39**(10): 2448−2454

23 Zhang Yu-Qing, Chen Chang-Feng, Zhang Yang, Yu Jiang-Long, Dong Xi-Wang, Ren Zhang. Time-coordination entry trajectory planning for multihypersonic vehicles. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, **46**(9): 1554−1564
(张钰清, 陈长风, 张扬, 于江龙, 董希旺, 任章. 带有时间约束的多飞行器协同轨迹规划. 工程科学学报, 2024, **46**(9): 1554−1564)

24 Chen Zhong-Yuan, Wei Wen-Shu, Chen Wan-Chun. Reinforcement learning-based intelligent guidance law for cooperative attack of multiple missiles. *Acta Armamentarii*, 2021, **42**(8): 1638−1647
(陈中原, 韦文书, 陈万春. 基于强化学习的多发导弹协同打击智能制导律. 兵工学报, 2021, **42**(8): 1638−1647)

25 Jin Ze-Yu, Liu Kai, Yin Zhong-Jie, Wang Long. Impact time cooperation guidance law design based on time-to-go estimating model using neural network. *Tactical Missile Technology*, 2021(4): 103−109
(金泽宇, 刘凯, 尹中杰, 王龙. 基于神经网络剩余时间模型的协同制导律设计. 战术导弹技术, 2021(4): 103−109)

26 Kim B S, Lee J G, Han H S. Biased PNG law for impact with angular constraint. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, **34**(1): 277−288

27 Zhang Bao-Feng. Design of Multi-missile Cooperative Guidance Law With Attack Angle Constraint [Master thesis], Harbin Institute of Technology, China, 2013.
(张保峰. 带打击角度约束的多导弹协同导引律设计 [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2013.)

28 Jiang H, An Z, Yu Y N, Chen S S, Xiong F F. Cooperative guidance with multiple constraints using convex optimization. *Aerospace Science and Technology*, 2018, **79**: 426−440

29 Liu Zi-Chao, Wang Jiang, He Shao-Ming, Li Yu-Fei. A computational guidance algorithm for impact angle control based on predictor-corrector concept. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(8): Article No. 325433
(刘子超, 王江, 何绍溟, 李宇飞. 基于预测校正的落角约束计算制导方法. 航空学报, 2022, **43**(8): Article No. 325433)

30 Zhang You-An, Liang Yong, Liu Jing-Mao, Sun Yu-Mei. Trajectory reshaping based impact angle and time control. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, **39**(9): Article No. 322009
(张友安, 梁勇, 刘京茂, 孙玉梅. 基于轨迹成型的打击角度与时间控制. 航空学报, 2018, **39**(9): Article No. 322009)

31 Chen Y D, Wang J N, Shan J Y, Xin M. Cooperative guidance for multiple powered missiles with constrained impact and bounded speed. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, **44**(4): 825−841

32 Lyu T, Li C J, Guo Y N, Ma G F. Three-dimensional finite-time cooperative guidance for multiple missiles without radial velocity measurements. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, **32**(5): 1294−1304

33 Liu Zi-Chao, Wang Jiang, He Shao-Ming. Time and angle control guidance law based on deep learning. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, **45**(11): 3579−3587
(刘子超, 王江, 何绍溟. 基于深度学习的时间角度控制制导律. 系统工程与电子技术, 2023, **45**(11): 3579−3587)

34 Sun J L, Long T. Event-triggered distributed zero-sum differential game for nonlinear multi-agent systems using adaptive dynamic programming. *ISA Transactions*, 2021, **110**: 39−52

35 Long T, Cao Y, Sun J L, Xu G T. Adaptive event-triggered distributed optimal guidance design via adaptive dynamic programming. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, **35**(7): 113−127

36 Ren Zhang, Yu Jiang-Long. Research on the autonomous cooperative guidance control for the formation interception of multiple near space interceptors. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, **5**(2): 1−6
(任章, 于江龙. 多临近空间拦截器编队拦截自主协同制导控制技术研究. 导航定位与授时, 2018, **5**(2): 1−6)

37 Dong X W, Li Y F, Lu C, Hu G Q, Li Q D, Ren Z. Time-varying formation tracking for UAV swarm systems with switching directed topologies. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, **30**(12): 3674−3685

38 Yan Hong-Lei, Lu Yuan, Guo Jie, Tang Sheng-Jing, Li Xiang. Cluster cooperative formation control method for underactuated hypersonic vehicle. *Air and Space Defense*, 2024, **7**(1): 56−62
(阎宏磊, 陆远, 郭杰, 唐胜景, 李响. 欠驱动高超滑翔飞行器集群协同编队控制方法. 空天防御, 2024, **7**(1): 56−62)

39 Wang Li-Nan, Wen Guang-Hui, Yi Xiao-Jian. Finite-time attitude consensus control of multiple unmanned aerial vehicles under state constraints. *Modern Defense Technology*, 2024, **52**(2): 124−131
(王利楠, 温广辉, 伊枭剑. 状态约束下的多飞行器有限时间姿态一致性控制. 现代防御技术, 2024, **52**(2): 124−131)

40 Wu Xian-Feng, Chen Bao-Wen, Sun Jing-Guang. Design of distributed missile formation saturation controller with obstacle avoidance constraints. *Aerospace Control*, 2024, **42**(2): 3−9
(吴险峰, 陈宝文, 孙经广. 带有避障约束的分布式导弹编队饱和控制器设计. 航天控制, 2024, **42**(2): 3−9)

41 Yu Huang-Chao, Cao Su, Peng Yu-Fan, Wang Xiang-Ke. Pose tracking control of fixed-wing unmanned aerial vehicle towards maneuvering flight. *Control Theory and Applications*, 2023, **40**(12): 2217−2224
(喻煌超, 曹粟, 彭羽凡, 王祥科. 面向机动飞行的固定翼无人机位姿跟踪控制. 控制理论与应用, 2023, **40**(12): 2217−2224)

42 Yu J L, Dong X W, Li Q D, Lü J H, Ren Z. Distributed adaptive cooperative time-varying formation tracking guidance for multiple aerial vehicles system. *Aerospace Science and Technology*, 2021, **117**: Article No. 106925

43 Wang Xiao, Guo Jie, Tang Sheng-Jing, Qi Shuai. Time-cooperative entry guidance based on analytical profile. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, **40**(3): Article No. 322565
(王肖, 郭杰, 唐胜景, 祁帅. 基于解析剖面的时间协同再入制导. 航空学报, 2019, **40**(3): Article No. 322565)

44 Wang Pei-Chen, Yan Xun-Liang, Nan Wen-Jiang, Li Xin-Guo. A rapid and near analytic planning method for gliding trajectory under time constraints. *Acta Armamentarii*, 2024, **45**(7): 2294−2305
(王培臣, 闫循良, 南汶江, 李新国. 考虑时间约束的近解析滑翔轨迹快速规划方法. 兵工学报, 2024, **45**(7): 2294−2305)

45 Shen Xin, Li Xiang, Zhang Hou-Jun, Guo Yu-Heng, Liu Xu. A formation guidance method for reentry unpowered gliding flight. *Flight Dynamics*, 2023, **41**(4): 74−80
(沈馨, 李响, 张后军, 郭宇恒, 刘旭. 一种无动力条件下的再入滑翔飞行编队制导方法. 飞行力学, 2023, **41**(4): 74−80)

46 Li Hui-Feng, Li Zhao-Ying. Indirect method of optimal ascent guidance for hypersonic vehicle. *Journal of Astronautics*, 2011, **32**(2): 297−302
(李惠峰, 李昭莹. 高超声速飞行器上升段最优制导间接法研究. 宇航学报, 2011, **32**(2): 297−302)

47 Liu Dong-Ze. Research on Multi-missile Cooperative Guidance

and Control Technology [Master thesis], Beijing Institute of Technology, China, 2016.
(刘冬责. 多导弹协同制导与控制技术研究 [硕士学位论文], 北京理工大学, 中国, 2016.)

48 Wang Zi-Yang. Research on Cooperative Guidance and Formation Flight With Multiple Constraints [Master thesis], Beijing Institute of Technology, China, 2018.
(王紫扬. 多约束协同制导及编队飞行方法研究 [硕士学位论文], 北京理工大学, 中国, 2018.)

49 Hong H C, Maity A, Holzapfel F. Free final-time constrained sequential quadratic programming-based flight vehicle guidance. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, **44**(1): 181−189

50 Jiang Yong, Wang Lin-Bo, Wang Meng-Yi. Planning and guidance challenges in a "group-to-group" collaborative confrontation. *Scientia Sinica Technologica*, 2024, **54**(3): 377−390
(江涌, 王林波, 王蒙一. "群对群"协同对抗的规划与制导问题研究. 中国科学: 技术科学, 2024, **54**(3): 377−390)

51 Yang L Y, Zhao G, Wu B B, Yan G R. Assembly sequence planning for aircraft component based on improved clashes matrix. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, **88−89**: 22−28

52 Zhai J P, Yang J Y. An integrated cooperative guidance design for target assignment and simultaneous attack on multiple targets. *International Journal of Control*, 2024, **97**(10): 2175−2188

53 Xiao Wei, Yu Jiang-Long, Dong Xi-Wang, Li Qing-Dong, Ren Zhang. Cooperative interception against highly maneuvering target with acceleration constraints. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, **41**(S1): Article No. 723777
(肖惟, 于江龙, 董希旺, 李清东, 任章. 过载约束下的大机动目标协同拦截. 航空学报, 2020, **41**(S1): Article No. 723777)

54 Wang Han, Jiang Ji-Xiang, Cheng Lin, Liang Hai-Zhao. Cooperative encirclement guidance strategy for intercepting multiple maneuverable targets. *Flight Dynamics*, 2024, **42**(5): 64−71
(王翰, 姜吉祥, 程林, 梁海朝. 基于覆盖控制的多机动目标合围拦截制导方法. 飞行力学, 2024, **42**(5): 64−71)

55 Wang Shao-Bo, Guo Yang, Wang Shi-Cheng, Liu Zhi-Guo, Zhang Shuai. Cooperative optimal guidance method for multi-aircraft with luring role. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, **41**(2): Article No. 323402
(王少博, 郭杨, 王仕成, 刘志国, 张帅. 带有引诱角色的多飞行器协同最优制导方法. 航空学报, 2020, **41**(2): Article No. 323402)

56 Zhang Shuai, Guo Yang, Wang Shi-Cheng. Finite time cooperative guidance method with a lure role. *Journal of Astronautics*, 2018, **39**(3): 308−317
(张帅, 郭杨, 王仕成. 带有引诱角色的有限时间协同制导方法. 宇航学报, 2018, **39**(3): 308−317)

57 Yu Jiang-Long, Dong Xi-Wang, Li Qing-Dong, Lü Jin-Hu, Ren Zhang. Distributed cooperative encirclement hunting guidance method for intercepting maneuvering target. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(9): Article No. 325817
(于江龙, 董希旺, 李清东, 吕金虎, 任章. 拦截机动目标的分布式协同围捕制导方法. 航空学报, 2022, **43**(9): Article No. 325817)

58 Jiang Yong, Wang Lin-Bo, Wang Meng-Yi, Song Xun, An Peng-Fei, Yu Jiang-Long. Coverage-based cooperative encirclement strategy against high-speed and highly maneuvering targets. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, **46**(7): 1169−1178
(江涌, 王林波, 王蒙一, 宋勋, 安鹏飞, 于江龙. 基于覆盖理论的高速强机动目标协同围捕策略. 工程科学学报, 2024, **46**(7): 1169−1178)

59 Chen S W, Wang W, Fan J F. Three-dimensional piecewise cooperative guidance with smooth switching topology. *Aerospace Science and Technology*, 2024, **150**: Article No. 109181

60 Ge Yun-Peng, Liang Zhuo, Lü Rui, Tu Hai-Feng, Yan Da-Wei. A cooperative guidance method for unpowered vehicle based on master-slave mode. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, **31**(4): 418−424
(葛云鹏, 梁卓, 吕瑞, 涂海峰, 严大卫. 一种基于主从模式的无动力飞行器协同制导方法. 中国惯性技术学报, 2023, **31**(4): 418−424)

61 Tan M H, Shen H. Three-dimensional cooperative game guidance law for a leader-follower system with impact angles constraint. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, **60**(1): 405−420

62 Yu J L, Dong X W, Li Q D, Lü J H, Ren Z. Task coupling based layered cooperative guidance: Theories and applications. *Control Engineering Practice*, 2022, **121**: Article No. 105050

63 Zhao J B, Yang S X, Xiong F F. Cooperative guidance of seekerless missile with two leaders. *Aerospace Science and Technology*, 2019, **88**: 308−315

64 Zhang Bang-Chu, Wu Xun, Hu Sen, Zhu Wei-Yu. Networked collaborative guidance technology for hypersonic missiles without seeker under system support. *Tactical Missile Technology*, 2023(5): 114−123
(张邦楚, 伍勋, 胡森, 朱威禹. 体系保障下无导引头高超声速导弹网络化协同制导技术. 战术导弹技术, 2023(5): 114−123)

65 Chen Wei-Yi, He Fan, Li Yi-Yuan, Dong Hai-Di. Robust optimal predictive guidance law for active defense in three-body confrontation. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2024, **44**(6): 645−654
(陈维义, 何凡, 李逸源, 董海迪. 三体对抗中的主动防御鲁棒最优预测制导律研究. 北京理工大学学报, 2024, **44**(6): 645−654)

66 Li Yi. Cooperative Guidance Law for Two-on-two Attack-defense Confrontation [Master thesis], Harbin Institute of Technology, China, 2022.
(李毅. 二对二攻防对抗协同制导律研究 [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2022.)

67 Tan Z W, Fonod R, Shima T. Cooperative guidance law for target pair to lure two pursuers into collision. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, **41**(8): 1687−1699

68 Yang Guang-Chao, Zhou Chuan-Rui, Xing Wen-Ge. Research on the collaborative combat mode and countermeasures of UAV swarm and anti-ship missile in naval battlefield. *Tactical Missile Technology*, 2024, **1**(1): 141−149
(杨广超, 周传睿, 邢文革. 海战场无人机集群与反舰导弹协同作战样式与反制策略研究. 战术导弹技术, 2024, **1**(1): 141−149)

69 Zhang Long, Fu Xue-Qing, Ming Xiao. Design of air-sea integrated and coordinated air defense operation style. *Flight Control and Detection*, 2024, **7**(2): 51−56
(张龙, 傅学庆, 明晓. 空海一体化协同防空作战样式设计. 飞控与探测, 2024, **7**(2): 51−56)

70 Xu Sheng-Li, Zhang Di, Zhao Hong-Yu. Research on the multi-missile cooperative technology based on systemic confrontation. *Tactical Missile Technology*, 2019(1): 79−86
(徐胜利, 张迪, 赵宏宇. 基于体系对抗的多弹协同制导技术研究. 战术导弹技术, 2019(1): 79−86)

71 Sun Jing-Liang, Liu Chun-Sheng. An overview on the adaptive dynamic programming based missile guidance law. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(7): 1101−1113
(孙景亮, 刘春生. 基于自适应动态规划的导弹制导律研究综述. 自动化学报, 2017, **43**(7): 1101−1113)

72 Ho Y, Bryson A, Baron S. Differential games and optimal pursuit-evasion strategies. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, **10**(4): 385−389

73 Hua Wen-Hua, Zhang Yong-Jun, Zhang Jin-Peng, Meng Qing-Ling. Differential game guidance law for double missiles with cooperative intercept angle. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, **24**(6): 838−844
(花文华, 张拥军, 张金鹏, 孟庆龄. 双导弹拦截角度协同的微分对策制导律. 中国惯性技术学报, 2016, **24**(6): 838−844)

74 Bardhan R, Ghose D. Nonlinear differential games-based impact-angle-constrained guidance law. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, **38**(3): 384−402

75 Taub I, Shima T. Intercept angle missile guidance under time varying acceleration bounds. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, **36**(3): 686−699

76 Guo Zhi-Qiang, Zhou Shao-Lei. Research on cooperative differential game guidance law for multi-missile. *Journal of Ordnance*

*Equipment Engineering*, 2019, **40**(5): 21−25
(郭志强, 周绍磊. 多弹协同微分对策制导律研究. 兵器装备工程学报, 2019, **40**(5): 21−25)

77 Perelman T, Shima T, Rusnak T. Cooperative differential games strategies for active aircraft protection from a homing missile. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, **34**(3): 761−773

78 Shima T. Optimal cooperative pursuit and evasion strategies against a homing missile. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, **34**(2): 414−425

79 Rubinsky S, Gutman S. Three-player pursuit and evasion conflict. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, **37**(1): 98−110

80 Liu F, Dong X W, Li Q D, Ren Z. Cooperative differential games guidance laws for multiple attackers against an active defense target. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, **35**(5): 374−389

81 Guo M C, de Persis C. Linear quadratic network games with dynamic players: Stabilization and output convergence to Nash equilibrium. *Automatica*, 2021, **130**: Article No. 109711

82 Liu Fei, Dong Xi-Wang, Hua Yong-Zhao, Yu Jiang-Long, Ren Zhang. Swarm confrontation method based on Nash equilibrium seeking in multi coalition non-cooperative games. *Journal of Command and Control*, 2023, **9**(6): 673−682
(刘飞, 董希旺, 化永朝, 于江龙, 任章. 基于多联盟非合作博弈纳什均衡搜索的集群对抗方法. 指挥与控制学报, 2023, **9**(6): 673−682)

83 Wang Xin, Yan Jie, Meng Ting-Wei. High-speed target multi-stage interception scheme based on game theory. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(9): Article No. 325598
(王鑫, 闫杰, 孟廷伟. 高速目标分阶段博弈拦截制导策略. 航空学报, 2022, **43**(9): Article No. 325598)

84 Xiao Zeng-Bo, Lei Hu-Min, Teng Jiang-Chuan, Zhang Xu, Chen Zhi-Xiang. Cooperative guidance strategy in anti-interception for target aircrafts. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(12): 1486−1492
(肖增博, 雷虎民, 滕江川, 张旭, 陈治湘. 目标飞行器反拦截协同制导策略. 兵工学报, 2011, **32**(12): 1486−1492)

85 Chen Jie-Qing, Sun Rui-Sheng, Chen Wei. Research on cooperative penetration game guidance of supersonic missile group. *Unmanned Systems Technology*, 2021, **4**(6): 65−74
(陈洁卿, 孙瑞胜, 陈伟. 超声速导弹群协同博弈突防制导研究. 无人系统技术, 2021, **4**(6): 65−74)

86 Chen Zi-Rong. Research on Integrated Route Planning Method of UAV Obstacle-avoidance Penetration and Cooperative Search [Master thesis], National University of Defense Technology, China, 2017.
(陈仔荣. 无人机避障突防与协同搜索一体化规划方法研究 [硕士学位论文], 国防科技大学, 中国, 2017.)

87 Li Shou-Yi, Chen Mou, Wang Yu-Hui, Wu Qing-Xian, He Jian-Liang. Human-computer gaming decision-making method in air combat under an incomplete strategy set. *Scientia Sinica Informationis*, 2022, **52**(12): 2239−2253
(李守义, 陈谋, 王玉惠, 吴庆宪, 贺建良. 非完备策略集下人机对抗空战决策方法. 中国科学: 信息科学, 2022, **52**(12): 2239−2253)

88 Ni Wei-Lin, Wang Yong-Hai, Xu Cong, Chi Feng-Hua, Liang Hai-Zhao. Cooperative game guidance method for hypersonic vehicles based on reinforcement learning. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, **44**(S2): Article No. 729400
(倪炜霖, 王永海, 徐聪, 赤丰华, 梁海朝. 基于强化学习的高超飞行器协同博弈制导方法. 航空学报, 2023, **44**(S2): Article No. 729400)

89 Guo Ming-Kun, Yang Feng, Liu Kai, Xia Guang-Qing, Yang Jing-Nan. Review on cooperative guidance technology for hypersonic flight vehicle. *Aerospace Technology*, 2022(2): 75−84
(郭明坤, 杨峰, 刘凯, 夏广庆, 杨竞楠. 高超声速飞行器协同制导技术研究进展. 空天技术, 2022(2): 75−84)

90 Wang Xiang-Ke, Liu Zhi-Hong, Cong Yi-Rui, Li Jie, Chen Hao. Miniature fixed-wing UAV swarms: Review and outlook. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, **41**(4): Article No. 023732
(王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 李杰, 陈浩. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展. 航空学报, 2020, **41**(4): Article No. 023732)

91 Wang Yue, Zhao Kai, Liu Xue-Chao, Yang Wei, Yao Tong. Combat modes and key technologies of a multi air defense weapon platform in integrated cooperative operations. *Journal of Gun Launch and Control*, 2022, **43**(3): 91−95
(王越, 赵凯, 刘学超, 杨维, 姚桐. 多防空武器平台一体化协同作战样式与关键技术探讨. 火炮发射与控制学报, 2022, **43**(3): 91−95)

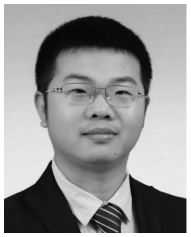
92 Xiao Bing-Song, Fang Yang-Wang, Xu Yun-Shan, Zeng Xian-Wei, Hu Shi-Guo. Modes and critical technologies in cooperative engagement for aviation weapon system. *Fire Control and Command Control*, 2010, **35**(4): 5−8
(肖冰松, 方洋旺, 许蕴山, 曾宪伟, 胡诗国. 航空武器系统协同作战样式及关键技术. 火力与指挥控制, 2010, **35**(4): 5−8)

93 Zhang Ting, Shuai Huan, Yan Yan, Zhu Hao-Kun, Liu Chuang. Present situation and development of intelligent technology for guided bomb. *Navigation and Control*, 2022, **21**(2): 21−29
(张婷, 帅欢, 闫妍, 朱豪坤, 刘闯. 制导炸弹智能技术现状与发展思考. 导航与控制, 2022, **21**(2): 21−29)

94 Jia Guang-Xin, Zhang Pin, Wang Yong-Wei, Xu Jing. Research and analysis of distributed intelligent collaboration for air surface precision guidance. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(5): 85−89
(贾广新, 张品, 王永伟, 许静. 空面精确制导分布式智能协同的研究分析. 飞航导弹, 2021(5): 85−89)

**吕金虎** 北京航空航天大学教授. 主要研究方向为复杂系统, 协同制导控制, 工业互联网, 大数据.
E-mail: lvjinhu@buaa.edu.cn
(**LÜ Jin-Hu** Professor at Beihang University. His research interest covers complex systems, cooperative guidance and control, industrial internet, and big data.)

**于江龙** 北京航空航天大学副教授. 主要研究方向为飞行器集群, 协同制导. 本文通信作者.
E-mail: sdjxyjl@buaa.edu.cn
(**YU Jiang-Long** Associate professor at Beihang University. His research interest covers aircraft swarm system and cooperative guidance. Corresponding author of this paper.)



**董希旺** 北京航空航天大学教授. 主要研究方向为集群智能, 协同控制, 协同制导.
E-mail: xwdong@buaa.edu.cn
(**DONG Xi-Wang** Professor at Beihang University. His research interest covers swarm intelligence, cooperative control, and cooperative guidance.)