



滑翔式高超声速飞行器时间协同与编队控制技术研究综述

胡砚洋, 王温, 白成超*

哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001

*联系人, E-mail: baichengchao@hit.edu.cn

收稿日期: 2024-08-13; 接受日期: 2024-12-26; 网络出版日期: 2025-06-12

国家自然科学基金重大研究计划(编号: 92371111)、中国科协青年人才托举工程(编号: 2021QNRC001)、黑龙江省自然科学基金优秀青年基金(编号: YQ2022F012)、中央高校基本科研业务费专项资金(编号: HIT.OCEF.2023010)和思源联盟开放基金(编号: HTKJ2022KL012003)资助项目

摘要 随着反导拦截能力的大幅提升, 单个滑翔式高超声速飞行器的效能逐渐降低, 多机高速协同作为打破制约的有效途径, 其研究价值和战略意义越来越受到关注. 一方面, 多个飞行器通过时间协同控制同时到达目标, 使拦截系统能力达到饱和, 实现有效突防. 另一方面, 在飞行过程中, 多个飞行器通过编队飞行以执行协同探测等更加丰富的任务. 基于上述迫切需求, 本文对滑翔式高超声速飞行器时间协同控制与编队控制两类典型协同模式进行了深入归纳总结, 首先在算法层面分析了轨迹规划、协同制导、深度学习、强化学习等在时间协同控制中的应用, 其次对编队控制中的队形保持、队形重构及通信优化三个核心技术深入分析, 最后, 对滑翔式高超声速飞行器时间协同与编队控制技术未来研究方向和研究趋势提出了展望.

关键词 滑翔式高超声速飞行器, 时间一致性控制, 编队控制, 自主协同

PACS: 02.30.Yy, 07.05.Dz, 07.05.Mh, 96.12.De

1 引言

滑翔式高超声速飞行器是一类飞行速度大于5马赫的新型飞行器, 凭借其强机动能力、大范围航程等优异性能取得了各国关注, 在过去的几十年中实现了从理论研究、实验验证到实际应用的发展转变. 然而, 随着雷达探测^[1]、轨迹预测^[2]、反导拦截^[3]等技术的发展, 单个滑翔式高超声速飞行器将不能满足未来

需求.

学者们针对多个滑翔式高超声速飞行器的协同技术开展了一系列研究, 具体的研究内容按照飞行任务类型可分为时间协同控制和编队控制. 其中, 时间协同控制期望多个飞行器在满足攻击角度、攻击速度等约束下同时到达目标, 通过饱和打击来突破反导系统拦截极限, 而对飞行过程中各飞行器的相对位置关系不加以约束. 编队控制则关注飞行器飞行过程中的编

引用格式: 胡砚洋, 王温, 白成超. 滑翔式高超声速飞行器时间协同与编队控制技术研究综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 294502

Hu Y Y, Wang W, Bai C C. Time coordination and formation control techniques for hypersonic gliding vehicles: A survey (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 294502, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0325](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0325)

队保持、重构以及飞行器间的通信优化问题, 而不考虑终端条件约束.

在以上两类任务的研究中, 滑翔式高超声速飞行器自身的飞行特点, 以及多飞行器间的信息交互、协同决策等问题, 给其协同带来了巨大挑战. 由于滑翔式高超声速飞行器再入过程无动力驱动, 其重力势能、动能相互转化, 且不断被气动阻力消耗, 势能与动能之和严格单调递减, 纵向飞行空域跨度极大, 大气密度和声速等参数强时变以及模型本身的强非线性, 导致控制性能在飞行过程中的不同时间、不同空间位置以及不同姿态下均不一致, 从而使单体控制难度显著增加^[4,5]. 同时从滑翔式高超声速飞行器协同的角度来看, 通信严苛、约束耦合和环境变化等问题也带来了信息感知不全、协同规划复杂和控制能力受限的问题^[6]. 因此, 滑翔式高超声速飞行器在协同过程中面临巨大的困难. 现有的研究仍存在诸多亟待解决的问题和技术瓶颈, 迫切需要进一步深入探讨和突破.

2 时间一致性控制

时间协同在滑翔式高超声速飞行器协同中也指时间一致性控制, 是指多个滑翔式高超声速飞行器同时到达目标. 各飞行器以预设的时间、落点角度到达目标, 其整体研究时间脉络如图1所示.

其中, 学者们主要从解析方法与智能方法两方面展开研究. 在解析方法中, 传统的轨迹规划方法、制导方法均被应用于滑翔式高超声速飞行器集群的协同

打击中. 其中, 剩余时间预测作为协同制导的重要因素, 得到了高度重视. 同时, 针对禁飞区展开协同绕飞也成为新颖的研究问题. 在以上传统方法的研究基础上, 深度神经网络、强化学习等智能方法也逐渐被应用于滑翔式高超声速飞行器的协同过程, 提高了其在线预测与在线决策的能力.

2.1 解析方法

轨迹规划方法在时间一致性控制中取得了广泛的应用, 通过对多个飞行器的轨迹协同规划, 可以得到满足时间约束的飞行器轨迹. 其中, 对横向平面进行规划协同是实现时间协同的有效手段, Liang等人^[7]提出了基于双层有界走廊的时间约束轨迹规划算法, 两个滑翔式高超声速飞行器在合适的窗口分离, 在纵向平面内规划相同的飞行走廊, 通过调整横向机动实现时间一致到达. 除了单平面规划, 更多的学者也考虑同时进行纵向平面和横向平面的同时规划, Shen和Lu^[8]提出了满足过程约束、终端约束的快速在线轨迹规划方法, 其中将高约束非线性轨迹规划问题分解为两个序贯单参数搜索问题. Liu等人^[9]将多个飞行器再入滑翔阶段的时间协同问题转为协同时间确定、协同时间下轨迹规划两部分, 引入飞行路径角预设剖面为软约束, 基于改进序列凸优化方法实现了多个CAV-H模型的协同轨迹规划. 除了末端时间约束, 角度约束也被纳入考虑, Wang等人^[10]将多个飞行器的时间约束、角度约束依次分解到纵向平面、横向平面, 通过牛顿迭代法规划阻力加速度-能量剖面以得到满足时间约束的纵向

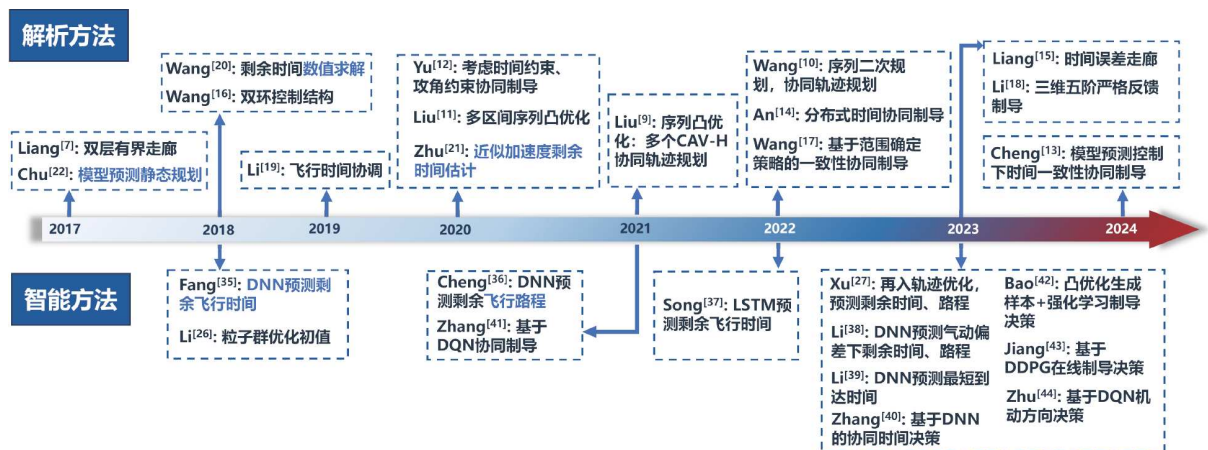


图1 (网络版彩图)滑翔式高超声速飞行器时间一致性控制方法研究进展

Figure 1 (Color online) Research progress on time-consistent control methods for hypersonic gliding vehicles.

轨迹, 通过序列二次规划方法得到倾侧角反转点以满足角度约束, 同时实现了时间、角度约束. 上述方法均在飞行前完成所有规划, 也有学者考虑在飞行过程多次进行轨迹规划, Liu等人^[11]通过航点设置将飞行过程分为若干区间, 在飞行器到达每一个航点时进行信息交互并重新计算到达时间, 对协同飞行轨迹进行序列凸优化, 其中每个飞行器采用LQR (Linear Quadratic Regulator)跟踪既定轨迹. 通过轨迹协同规划, 多个飞行器可充分考虑热流密度、动压、过载、控制量等过程约束, 实现有安全保障的飞行, 并具有良好的终端精度, 但规划时间往往较长, 难以在线实时调整协同轨迹, 一旦任务出现变化、外部环境产生较大扰动, 将对飞行器的协同带来较大影响.

除了轨迹规划, 设计协同制导律也是实现多个滑翔式高超声速飞行器时间一致性协同的方式. 滑翔式高超声速飞行器的横向制导与纵向制导往往被单独研究分析, 准平衡滑翔是常见的纵向平面制导方式. 许多协同制导律的设计均在纵向平面基于准平衡滑翔条件假设展开. Yu等人^[12]在同时考虑滑翔式高超声速飞行器的时间约束和攻角约束的情况下, 对准平衡滑翔假设下的滑翔飞行阶段和末制导阶段展开了研究. 文中将滑翔飞行阶段再次分为两个阶段, 在第一阶段中预设了攻角剖面, 通过算法确定倾斜角, 在第二阶段中将倾斜角固定为零常值倾斜角, 通过控制攻角的变化实现到达时间的协同. 在末制导阶段则基于最优制导律设计了时间一致性的协同制导律. Cheng等人^[13]在满足准平衡滑翔等约束下, 基于模型预测控制提出时间一致性协同制导方法, 通过倾侧角反转序列优化实现攻击角度、飞行时间协同, 同时每一时刻满足飞行器间等距离约束. 在准平衡滑翔假设下, 飞行器的纵向平面飞行过程可以提前确定, 因此可通过横向平面的制导实现时间一致性协同, 制导过程相对解耦、简洁. 除了准平衡滑翔制导方式, 滑翔式高超声速飞行器也已有大量的其他纵向平面制导方式.

在原有纵向制导方法的基础上, 学者们又提出横向制导方法以实现多飞行器的协同. An等人^[14]提出了分布式时间协同制导方法, 各飞行器通过有限时间控制器, 在横向平面进行机动, 在纵向平面均采用比例引导法, 实现攻击角约束下的末端时间一致性, 此外, 文中设计了自适应制导权重函数以更好实现系统的有限时间一致性. Liang等人^[15]在原有纵向制导方法基础

上, 提出了侧向再入制导方法, 其中采用闭环轨迹预测器预测终端时间, 利用时间误差走廊修改终端时间, 利用航向走廊减少终端时间误差, 并设计了基于可行性指标的终端时间确定方法. 其中, 利用数值积分在线完成终端时间计算, 并考虑空气密度偏差影响设计了最优协同到达时间计算方法. 以上方法在实现多个飞行器协同的过程中, 均采用横向平面制导进行飞行时间的协同, 尽管在问题求解过程中较为简洁, 但无法充分发挥纵向平面制导对协同飞行的作用.

为了进一步充分利用纵向平面制导, 也有许多学者通过同时设计新的纵向平面、横向平面制导方式来提高多个滑翔式高超声速飞行器协同能力. Wang等人^[16]提出了调整速度横向前置角的多飞行器协同方案, 设计了双环控制器结构, 其中考虑速度斜坡角饱和及未知不确定性, 基于动态逆理论、动态面控制理论和扩张状态观测器设计了双回路三通道控制器, 实现了无需剩余时间估计下的时间协同制导. Wang等人^[17]提出了基于范围确定策略的滑翔式高超声速飞行器时间一致性协同制导方法, 根据飞行时间约束生成纵向飞行剖面, 同时在侧向飞行剖面上通过飞行器与参考点之间的视距建立航向误差走廊, 以控制倾侧角反转时间并更新横向轨迹, 从而满足终端约束. Li等人^[18]针对STT控制下的滑翔式高超声速飞行器在同时满足时间约束、攻击角度约束下协同抵达地面移动位置的问题, 建立了非匹配不确定性的三维五阶严格反馈的制导控制一体化模型, 避免了传统滑模控制中切换项导致的抖振问题, 将固定时间约束转化为弹目距离约束实现了时间协同, 且该时间提前确定, 飞行器集群无需在飞行过程中进行通信. Li等人^[19]首先分析各滑翔式高超声速飞行器再入飞行时间范围, 生成协调飞行时间. 利用预测横向制导进行再入时间的粗调整, 在纵向剖面中设计二次倾侧角幅度剖面, 使其满足距离和时间约束以完成时间协同再入制导. 在以上这几种纵向平面、横向平面同时设计的制导方式中, 为了降低飞行过程通信需求, 所有飞行器的到达时间均在初始时确定, 各飞行器在飞行过程专注自身的飞行状态即可. 以上方法通过同时考虑纵向运动、侧向运动对飞行时间的影响, 可以很好地扩展协同飞行的可飞行时间范围.

在协同制导过程中, 剩余飞行时间或剩余飞行路程往往是一项重要参量, 需要将其作为协同信息输入

协同算法, 其估计的准确程度将影响单个飞行器是否能按照计划时间到达目标, 并进一步影响多个飞行器的到达时间一致性精度. 不同的学者针对剩余时间的预测提出了不同的方法, Wang和Zhang^[20]提出了无简化条件下的剩余时间估计数值求解方法, 提高了三维空间中比例导引法的剩余时间预测精度, 实现了多个滑翔式高超声速飞行器的时间协同末制导. Zhu等人^[21]提出了基于比例导引法的时间一致性协同制导律, 利用近似加速度形式扩展了常速度的估计方法以实现剩余时间估计, 将时间误差输入垂直平面制导律实现末端到达时间一致. 此外, Li等人^[19]在横向平面制导中设计了横向误差阻尼系数, 仿真结果表明该阻尼系数与飞行时间成正比, 则可通过调整该系数来估计剩余飞行器时间. 可见现有剩余时间估计的解析方法包括直接数值求解、常值速度形式估计、近似加速度形式估计等.

在考虑末端时间约束的同时, 禁飞区约束也逐渐被考虑. Chu等人^[22]将有障碍环境下的滑翔式高超声速飞行器再入飞行过程建模为具有强末端约束的有限时域最优控制问题, 基于模型预测静态规划方法(Model Predictive Static Programming, MPSP)进行求解, 根据时间步长将制导过程划分为若干子制导区间, 并在进入新的区间时更新制导指令, 该方法具有较快的求解速度, 使其可用于在线协同制导以提高轨迹精度. Yu等人^[23]提出了禁飞区约束下的时间协同制导方法, 首先推导了剩余时间数值解求解方法, 在纵向平面内同时考虑能量、时间需求, 在横向平面考虑禁飞区约束规划倾侧角时序, 同时在最后两次倾侧角反转间的飞行阶段用在线多目标优化方法以更好满足终端约束, 此外还提出了改进的拟牛顿法以减小仿真计算量. 该方法可以在大量较小的障碍物区间规避威胁并同时到达目标. Wang等人^[24]考虑禁飞区不可提前预知、存在动态移动情况下, 采用分段解析多项式高度-速度剖面计算倾侧角幅值, 引入人工势场法进行飞行器在线航路规划并绕飞威胁区, 通过若干路径到达点逐步导引飞行器飞向目标. 禁飞区约束进一步增加了多个飞行器的协同难度, 限制了多个飞行器协同的时间区间, 给时间一致性协同带来了更多难题. 对于较小的禁飞区而言, 对制导方法加以修正即可完成禁飞区绕飞; 但在面临较大的飞行区时, 需要采用轨迹规划、航路点设置等方法, 并与制导方法结合, 通过较大的横向

机动以避开威胁区域.

此外, 也有学者将滑翔式高超声速飞行器与其他类型飞行器结合, 实现优势互补的协同策略. Zhao等人^[25]考虑滑翔式高超声速飞行器与常规飞行器异构协同作战, 常规飞行器从正面飞行, 滑翔式高超声速飞行器利用高速性绕飞至雷达盲区, 从目标两侧飞行, 在该研究中作者具体推导了协同飞行策略可行域的解析解.

2.2 智能方法

在时间一致性协同控制研究中, 启发式智能优化算法得到了应用. Li等人^[26]提出了一种多约束下滑翔式高超声速飞行器再入轨迹的快速生成方法, 结合了梯度搜索与粒子群优化算法, 通过调整相邻两代最佳历史位置得到的随机梯度, 提高了算法的优化性能. Xu等人^[27]将滑翔式高超声速飞行器的时间协同问题转变为考虑时间的再入轨迹优化问题, 在准平衡滑翔条件的假设下, 通过数值积分的方法预测飞行器的剩余飞行时间, 之后结合剩余飞行时间和剩余路程计算倾斜角指令, 最后采用群智能优化算法优化轨迹参数, 得到满足时间约束的协同制导轨迹. 通过群智能优化算法, 多个飞行器的最优初值问题可以得到求解.

此外, 随着深度学习^[28-30]、强化学习^[31]的快速发展, 也有许多学者将深度神经网络、强化学习应用于滑翔式高超声速飞行器的气动力预测^[32]、轨迹快速生成^[33]、智能再入制导^[34]等各个领域, 并进一步应用于滑翔式高超声速飞行器协同中, 包括剩余时间预测、智能协同制导等.

在智能剩余时间预测方面, Fang等人^[35]设计了双层制导结构, 包括上层时间协调与下层时间可控再入制导, 其中利用BP神经网络进行剩余飞行时间预测, 具体网络架构如图2所示, 包含输入层、隐藏层、输出层这三层网络. Cheng等人^[36]提出了智能预测校正再入制导方法, 利用深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)实现从飞行状态到剩余飞行路程的预测, 并在准平衡滑翔假设、既定倾侧角反转次数条件下, 实现在线轨迹校正与横向制导. Song等人^[37]设计了满足终端、路径约束的纵向平面预测校正制导律, 利用LSTM (Long Short-Term Memory)神经网络进行剩余飞行时间的预测, 创新性地提出了“时间势场”的概念, 并将该势场力与避障势场相结合, 满足飞行器集群的

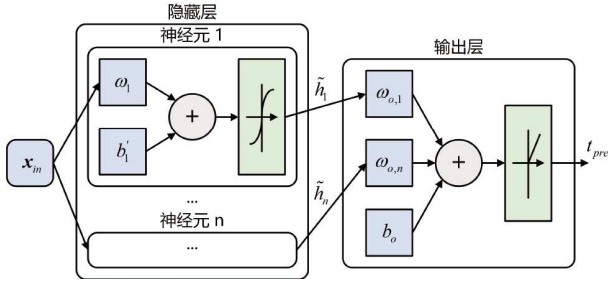


图 2 (网络版彩图) 剩余时间预测BP神经网络^[35]

Figure 2 (Color online) BP neural network for remaining time prediction [35].

路径避障约束与到达时间约束. Li等人^[38]利用深度神经网络预测剩余路程、剩余时间, 该网络同时考虑了气动偏差, 通过卡尔曼滤波得到实时参数气动数据以提高神经网络预测精度, 在横向平面上采用时间、距离双参数下的侧角剖面设计方法以实现时间协同. Li等人^[39]采用深度神经网络预测飞行器的最短到达时间, 降低了在线准确预测剩余时间的计算量. 相比于数值解析的剩余时间预测方式, 上述预测方式均依靠深度神经网络实现从当前飞行状态到剩余时间的直接映射, 无需精确描述剩余飞行时间的计算数学模型, 极大简化了预测问题, 且预测效率有所提升. 但训练深度神经网络的过程需要大量飞行数据样本, 且样本质量将直接影响预测精度, 其泛化性也受限于训练样本的丰富程度.

在智能协同制导方面, Zhang等人^[40]训练了深度神经网络多层感知器, 实现协同时间决策, 并优化得到各飞行器最优的初始航向角, 减少横向机动消耗,

设计速度相关的攻角、侧滑角剖面函数, 并采用人工蜂群算法对其优化. 除了协同时间决策, 强化学习被更多地应用在制导决策上, Zhang等人^[41]提出了基于深度Q网络(Deep Q-network, DQN)深度强化学习算法的横程机动再入协同制导方法, 将横纵制导解耦后, 通过纵程解析解计算纵向升降比得到倾侧角模值, 在横向制导中利用智能决策器实现自主倾侧角反转, 实现飞行器滑翔阶段的横向机动能力充分利用. 在该研究中, 横向机动决策输出为离散的倾侧角正负号指令, 后续的计算仍通过解析方法完成. 此外, 也有学者设计决策为连续的制导指令, Bao等人^[42]基于深度强化学习设计了飞行器滑翔阶段的轨迹快速生成方法, 首先通过凸优化方法生成大量离线轨迹样本, 用以对深度神经网络进行预训练以提高其后续训练收敛效率, 其次采用强化学习训练该网络, 实现在线快速飞行控制决策, 结果表明该智能方法在面对外界扰动性时具有较好的鲁棒性. Jiang等人^[43]在考虑飞行器准平衡滑翔情况下, 将倾侧角值与倾侧角方向耦合为单变量, 设计了DDPG深度强化学习训练下的在线制导方法, 根据终端约束设计飞行过程稠密奖励以提高学习效率, 实现了再入过程快速制导决策. Zhu等人^[44]采用纵向最优制导律以满足高度和速度倾角约束, 根据侧向机动控制终端速度大小和位置, 使用DQN训练得到机动方向决策策略, 滑翔式高超声速飞行器依靠该智能的决策方法能够更好地应对复杂环境, 其具体决策网络框架如图3所示, 共输入飞行器的六个状态以实现Q函

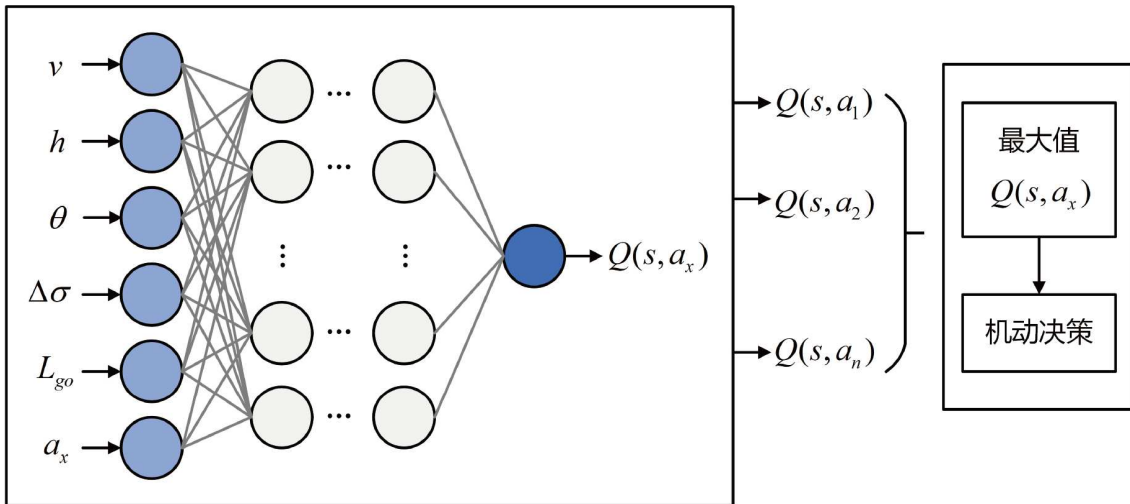


图 3 (网络版彩图) 基于DQN的智能机动决策^[44]

Figure 3 (Color online) Intelligent decision of maneuvering direction via DQN [44].

数的估计与智能决策. 以上方法均将强化学习应用于飞行器协同过程的在线决策中, 利用强化学习在复杂空间的探索能力充分发挥了飞行器性能, 同时得益于其决策快速性, 适用于飞行过程的实时在线决策.

以上研究表明, 在滑翔式高超声速飞行器的时间一致性协同问题中, 轨迹规划、协同制导、群智能优化算法、深度学习、强化学习等方法均得到了应用, 不同方法各自存在其优劣势, 具体如表1所示.

此外, 剩余时间预测作为时间一致性协同中的重要问题, 解析方法、智能方法均在此得到了很好的应用, 几类典型方法的优缺点对比如表2所示.

3 编队控制

除了协同打击任务, 多个滑翔式高超声速飞行器在飞行过程中可保持一定的编队构型以实现更加丰富的任务类型, 如协同探测等. 在编队控制过程中, 飞行器间的某一相对值保持不变. 例如通过保持相对位置为一固定值、保持相对速度变化量为零.

然而, 由于滑翔式高超声速飞行器的欠驱动特性, 其速度方向的过载控制能力极其有限, 常通过纵向平面与横向平面的机动来保持一定的队形. 此外, 滑翔

式高超声速飞行器的高动态特性带来了巨大的通信需求, 通信时延将给协同控制带来巨大的挑战. 基于以上问题, 学者们分别对滑翔式高超声速飞行器的编队控制方法与编队通信优化展开了相关研究, 研究时间脉络如图4所示.

3.1 编队队形控制

编队控制方法在无人机等飞行器上已得到广泛的应用, 包括编队保持^[45]、编队重构^[46]等, 并考虑了障碍规避^[46]、通信时延^[47]等各种问题. 相比于无人机, 滑翔式高超声速飞行器的飞行空域更大, 气动参数变化较为剧烈, 且无动力滑翔的特性导致其控制能力不足, 因此, 无人机集群的编队控制方法无法被直接应用于多个滑翔式高超声速飞行器.

Shui等人^[48]提出了基于飞行速度方向一致性的编队策略, 在飞行器定攻角滑翔的飞行阶段, 通过控制飞行器弹道倾角、航向角实现飞行速度一致性, 而不考虑严格的编队队形. 此外, 采用遗传算法、序列二次规划算法优化初始条件, 提高了编队控制效果. Shen等人^[49]设计了“领队-跟随”协同框架下的编队制导方法, 其中飞行器采用准平衡滑翔, 不考虑严格的飞行高度约束. 在以上方法中, 由于定攻角滑翔、准平衡滑翔

表 1 时间一致性控制各类方法对比

Table 1 Comparison of various methods of time consistency control

	方法	优点	缺点
解析方法	轨迹规划	充分考虑热流密度、动压、过载等过程约束	规划时间长, 难以在线实时使用
	基于原有纵向制导, 单独横向制导	设计过程简单, 方法解耦, 通过侧向机动调整飞行时间	无法充分利用飞行器能力, 难以考虑过程约束
智能方法	同时设计纵向、横向平面制导	充分利用飞行器能力, 同时利用纵向、侧向机动调整飞行时间	设计过程复杂, 难以考虑过程约束
	群智能优化算法与规划方法结合	可进一步优化多个飞行器的初值	计算时间较长
	智能协同制导	充分挖掘飞行器能力边界, 模型耦合对制导决策的影响较小	决策安全性有待提高, 在决策机理无法解释

表 2 剩余时间预测方法对比

Table 2 Comparison of remaining time prediction methods

	方法	优点	缺点
剩余时间预测	解析方法	直接数值求解 计算时间长	通过模型计算, 计算精度高
	近似加速度估计	通过简化模型计算, 计算速度快	计算误差较大
智能方法	深度神经网络预测	计算速度快, 预测精度高	对训练数据要求高, 离线训练时间长, 模型泛化性有限

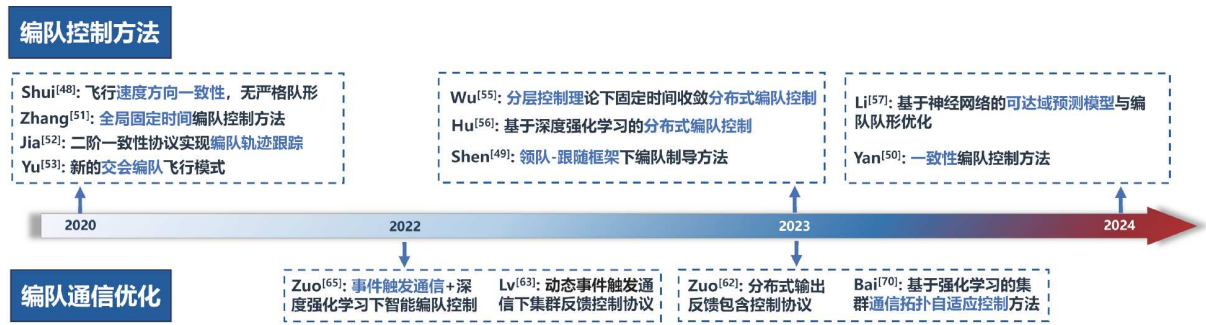


图 4 (网络版彩图)滑翔式高超声速飞行器编队控制方法研究进展

Figure 4 (Color online) Research progress on formation control methods for hypersonic gliding vehicles.

约束,纵向平面飞行过程已基本确定,飞行器仅可通过航向角来进行协调,因此无法实现严格编队队形控制。为此,学者们设计算法使得飞行器在横向平面、纵向平面内同时协调,以达到固定的编队队形, Yan 等人^[50]提出了基于一致性编队控制和预测校正理论的协同编队控制方法,采用动态逆方法生成编队控制指令,通过侧向机动实现编队队形调整。尽管该方法能够不断减小编队控制误差,但其收敛速度较慢,且误差在收敛过程存在振荡情况。为了能够在固定时间内达到符合精度的编队队形, Zhang 等人^[51]基于固定时间稳定性理论提出了全局固定时间编队控制方法,并采用分层控制策略——第一层在纵向平面与横向平面内分别计算航向速度的期望值,第二层计算真实攻角与倾侧角控制指令的期望值——在预置时间内形成期望编队构型。此外,编队控制也可为时间协同提供初始条件, Jia 等人^[52]设计了解析制导方法,将滑翔阶段分为编队保持阶段和时间协同阶段,在编队保持阶段中使用二阶一致性协议实现轨迹跟踪,在时间协同阶段中,基于准平衡假设与匀减速假设解析计算剩余时间,设计一阶一致性时间协同制导策略。

除了上述编队保持控制,无编队构型下的编队重构问题也得到了关注, Yu 等人^[53]提出了一种新的交会编队飞行模式,飞行器集群在较长时间内自由飞行(交会飞行阶段),并在编队开始前完成交会,随后保持编队飞行到达目标(编队飞行阶段)。将飞行过程的制导方案分成离线规划层和在线制导层,通过轨迹模拟与解析解混合的方法快速生成所有飞行器的参考轨迹,各飞行器在交会阶段弱跟踪轨迹,而在编队阶段强跟踪轨迹以保持编队。在有障碍环境中,多个飞行器在完成障碍规避后也需要重构队形并保持新的队形,

Zhang 等人^[54]采用分层控制方法,采用模型预测控制设计分布式虚拟控制器,并解算攻角、侧滑角实际控制指令,实现了三架飞行器避障后的编队重构保持。Wu 等人^[55]根据分层控制理论,设计了保持综合性能的反馈控制律以跟踪虚拟控制输入,利用人工势函数达到滑翔式高超声速飞行器之间的避撞,实现固定时间下收敛的分布式编队控制。其中,收敛时间可根据需求设定,而非取决于控制参数、系统初始条件。以上研究表明,为了使滑翔式高超声速飞行器更好地完成编队控制,需要飞行器充分利用纵向平面、横向平面的机动能力,仅通过横向平面的机动能力协调难以实现严格的编队队形控制。此外,为了更好地面对环境变化、任务变更等实际需求,编队重构、重组织方法也需要更多学者在未来进行探索。

与此同时,智能方法被应用于编队控制中,智能方法的初步应用验证了其提高编队能力的可行性, Hu 等人^[56]设计了基于深度强化学习的滑翔式高超声速飞行器集群分布式编队控制方法,该方法在考虑环境禁飞区约束下,提高了滑翔式高超声速飞行器在外界扰动下的自主决策能力。Li 等人^[57]借助神经网络建立飞行器实时可达域的预测模型,并采用加入启发式信息的遗传算法得到优化编队队形,实现了高速飞行器集群分组动态队形优化、队形重构。由此可见,智能算法在未来有望进一步充分探索飞行器的能力边界,使其在更复杂、动态的环境中实现各类编队任务。

3.2 编队通信优化

在高超声速飞行器编队飞行过程中,不同飞行器之间需要进行更多的信息交互,以满足过程队形约束。然而,通信黑障一直是高超声速飞行器在近空间飞行

任务中存在的巨大威胁,在高速、高温影响下,飞行器表面形成等离子鞘层对电磁波通信造成了严重干扰.

为了解决黑障环境下的通信问题,学者们分别对等离子鞘层的气动热化学行为^[58]、飞行器外形结构^[59,60]等展开了研究,为解决黑障中的电磁波通信提供技术建议. 对于具体的电磁波通信而言,高频波通信具有较高的通信带宽,可更好满足高速数据传输需求,但其穿透性较差,传播距离有限;低频波穿透能力较强,然而低带宽限制了其传输数据量.

为此,在进行编队飞行这一类高实时性协同任务过程中,学者们通过降低通信需求并改进协同算法,缓解了通信问题对协同带来的影响. 事件触发机制是一个有效的解决手段,通过设计合理的事件触发条件,能够有效缓解系统通信压力,减少不必要的通信资源浪费, Tang等人^[61]根据跟踪误差设计了触发函数,在保证精度的情况下降低了高超声速飞行器自身对通信频率的需求. Zuo等人^[62]针对通信资源受限情况下的飞行器集群,提出分布式输出反馈包含控制协议以减小集群内部通信量,采用切换事件触发信息传输机制进行集群内信息的调度,设计误差相关的单调递减功率项函数实现事件触发. Lv等人^[63]提出考虑动态事件触发通信的高速飞行器集群反馈控制协议,跟随者的输出收敛于领导者所张成的凸包内,领导者使集群保持几何空间构型. 在不涉及任何中间控制律的情况下设计了非递归输出反馈器,且无需全状态信息. 该控制方法在保持期望航迹的同时降低了通信带宽. 随后, Lv等人^[64]进一步设计了一种分布式输出反馈控制策略,利用一个有界的时变增益和一个预定义的事件补偿器,实现预定时间内的双方共识达成. 其中,通过引入预定义时间内部动态变量,设计了新的动态事件触发机制,有效降低了智能体间的通信频率,并在多个高超声速飞行器协同过程中进行了验证. 为了进一步提高编队通信优化的智能水平, Zuo等人^[65]采用多领导者-多跟随者的协同编队框架,在基于事件触发通信的分布式包含控制基础上,加入了神经网络使得所有飞行器具有分布式协作学习能力,进一步提高了高速飞行器集群编队控制的鲁棒性. 其权重优化下的通信拓扑如图5所示,其中包含了3个领导飞行器和4个跟随飞行器.

除了事件触发通信,通过自适应调整通信拓扑也能有效改善集群的通信质量. 此类研究在无人机集群

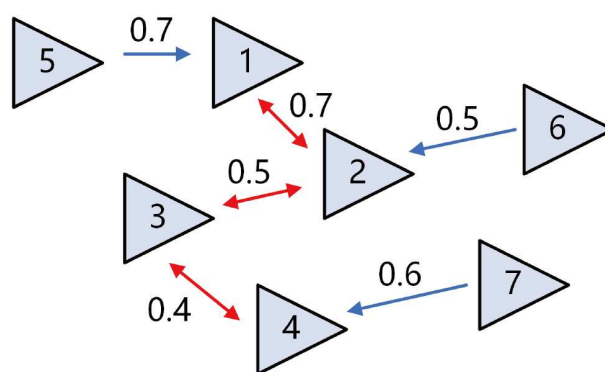


图 5 (网络版彩图)权重优化下的高速飞行器集群通信拓扑^[65]

Figure 5 (Color online) High-speed cluster communication topology under weight optimization [65].

中取得了大量研究进展,学者们对于无人机飞行自组网开展了广泛的研究,根据飞行器的状态进行动态通信拓扑优化可有效优化网络路径^[66,67],降低通信延迟并提高通信质量^[68]. 同时优化通信协议以提高应对网络攻击的能力^[69]. 面向高速飞行器集群, Bai等人^[70]设计了基于强化学习的集群通信拓扑自适应控制方法,高速飞行器集群能根据环境自主调整拓扑结构,使集群能够在较低的通信量下实现编队控制. 尽管目前自适应通信拓扑优化方法的研究更多集中于低速无人机集群,且高速飞行器与低速飞行器的规模体量相差较大,但其中考虑飞行器速度、能量等约束进行拓扑优化的设计思想^[68]、拓扑评估方法^[71]等,均可以为未来高速飞行器集群的通信自适应通信拓扑提供一定借鉴与参考.

以上研究表明,目前以滑翔式高超声速飞行器为对象进行编队的研究较少,在旋翼无人机、固定翼无人机、导弹等其他飞行器模型中已有较多编队协同研究,其中主要的区别如表3所示.

4 总结与展望

随着未来反导技术的不断发展,以及滑翔式高超声速飞行器执行任务种类增加、形式增多,单个滑翔式高超声速飞行器将难以满足未来的探测、运输、打击任务需求. 与此同时,人工智能技术将充分挖掘滑翔式高超声速飞行器能力边界,提高其自主水平,开展滑翔式高超声速飞行器集群自主协同技术研究具有重大

表 3 不同类型飞行器编队协同差异对比

Table 3 Comparison of differences in collaboration between different types of aircraft formations

	旋翼无人机	固定翼无人机	导弹	滑翔式高超声速飞行器
动力特性	动力稳定, 可为编队提供稳定过载	动力稳定, 可为编队提供稳定过载	动力变化, 编队过程过载变化	无动力, 且飞行空域跨度大, 可用过载变化大
模型特性	可悬停, 编队生成、变化响应速度快	不可悬停, 可通过无人机盘旋等方式实现编队变换	不可悬停, 以打击任务为主, 编队保持必要性不大	不可悬停, 飞行空域跨度大, 编队难度大
编队规模	视任务情况而定, 可大可小, 且均以实现一定实际验证、应用			现有研究中规模均为个位数

意义. 本文从时间一致性协同、编队控制两个技术方面梳理了滑翔式高超声速飞行器集群协同的研究现状, 通过归纳总结, 可将主要技术内容分为传统方法、智能方法以及结合方法三种类型. 并分析得到如下结论:

(1) 时间一致性控制已广泛应用, 但安全性和实时性无法兼备. 现有滑翔式高超声速飞行器的任务需求以协同抵达目标位置为主, 具体实现方法包括协同轨迹规划与协同制导. 协同规划方法往往通过多个飞行器到达时间规划、单个飞行器在固定时间下轨迹规划两部分进行解耦, 飞行器飞行过程不进行通信交互且无法修改到达时间, 且规划计算无法实时完成, 因此实时性不佳. 但规划过程可考虑各飞行器的热流、动压、过载约束, 确保无环境扰动下的协同过程安全性. 协同制导方法往往需要实时解算剩余飞行时间、剩余飞行路程等信息, 并将其引入制导过程实时解算制导指令, 具有更好的动态环境调节能力, 且可在线修改到达时间, 但难以考虑飞行器各类约束. 两种方法彼此优劣的平衡需要在未来研究中进一步解决.

(2) 编队控制研究较少, 但其需求日益增多, 将成为新的研究热点. 由于滑翔式高超声速飞行器的欠驱动特性, 转弯半径较大, 编队保持过程仅进行有限次横向机动, 且仅仅通过横向机动难以实现严格的编队队形保持, 需要通过横向、纵向平面的综合设计来提高编队保持效果. 尽管现有针对其编队控制方法的研究相对较少, 但随着未来协同探测、空中组网等任务种类的不断丰富化, 其编队控制问题以及具有禁飞区等约束下的协同飞行控制问题将成为新的研究热点. 此外, 对于此类高动态、非线性飞行器模型而言, 其协同过程对通信相应速率要求高, 如何提高通信稳定性并保障通信质量, 以及研究能够满足通信延迟的协同方法将进一步提高其协同能力.

(3) 智能方法展现了巨大潜力, 其与传统方法组合

将充分提高集群协同能力. 近年来, 启发式优化算法、深度神经网络、强化学习等智能方法均被应用于滑翔式高超声速飞行器集群协同任务中, 主要包括多飞行器的初始条件优化、剩余时间及剩余路程等信息的预测、在线智能制导指令决策等. 智能方法得益于其对广泛空间的探索能力, 在最优策略的搜索上展现出了非凡的效果, 且深度神经网络在训练完成后可在线快速使用, 但由于其不可解释、泛化性差, 以及对训练样本质量的高要求等问题, 目前仍难以替代全部的传统方法.

通过上述分析, 滑翔式高超声速飞行器的集群协同在时间一致性协同、编队控制上均取得了较多研究成果, 且较多借鉴了无人机集群、导弹集群协同的理论和技術, 并重新结合滑翔式高超声速飞行器的模型特点进行设计. 整体上而言, 滑翔式高超声速飞行器由于其独特的强非线性模型、快时变气动参数、无动力推进等特点, 尽管其协同规模一般较小, 但其协同难度远大于其他类型飞行器.

从时间一致性协同、编队控制和智能技术的发展趋势而言, 其未来可能的发展趋势如图6所示, 具体如下.

(1) 兼顾实时性与安全性. 在协同规划方法中, 通过动态规划等方法可提高飞行器在线决策的能力, 以应对任务变更、参数扰动等外界影响, 通过同时考虑多个飞行器的约束, 可确保各飞行器在再入滑翔与末制导过程实时管理能量, 并在扰动下仍能通过横纵向机动保障到达时间. 在协同制导方法中, 通过预测手段预估未来热流、动压、过程等信息, 综合以上安全约束进行制导回路的设计, 可提高制导过程安全性. 此外, 应对有拦截器情况下的实时协同博弈制导, 也将是未来的重点发展方向.

(2) 拓展编队协同样式. 现有滑翔式高超声速飞行器的编队控制中, 仅仅考虑编队保持本身, 而对于编队

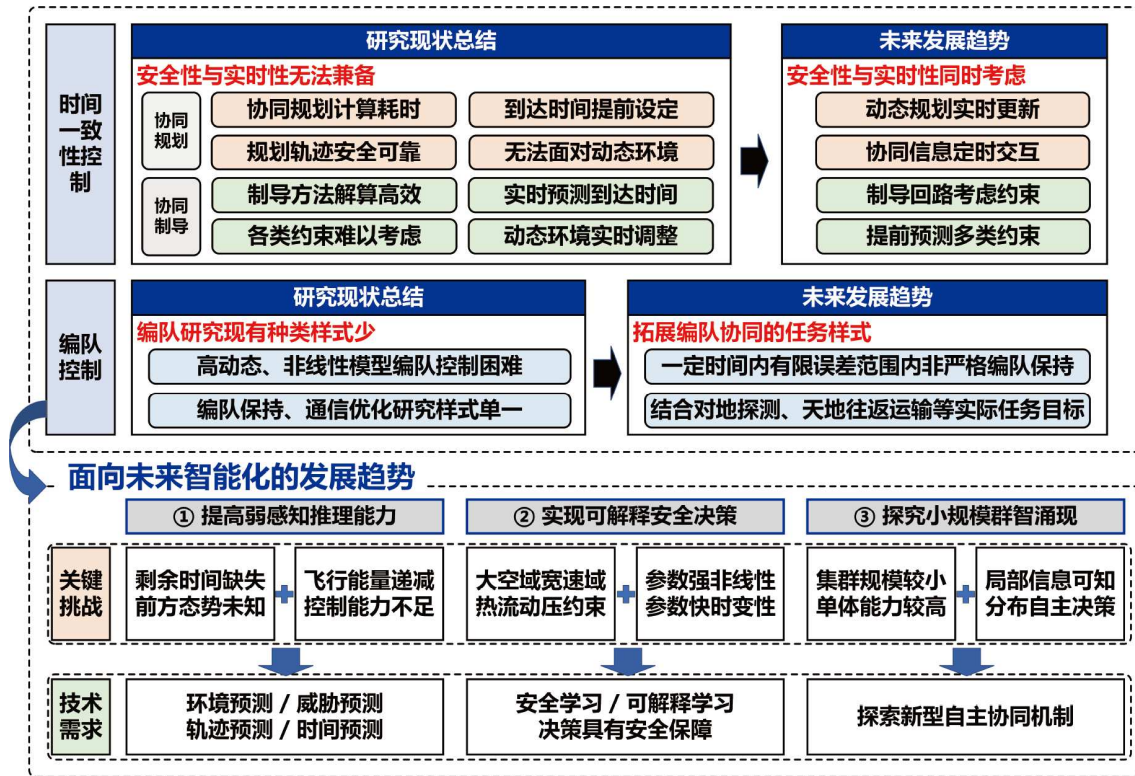


图 6 (网络版彩图)未来发展趋势展望

Figure 6 (Color online) Outlook for future development trends.

过程可执行的其他任务种类未进行分析,可进一步结合对地探测、天地往返运输等实际任务类型扩展编队保持目标,并实现更加丰富的编队类型.此外,可考虑滑翔式高超声速飞行器独特的非线性模型与欠驱动特征,设计时变编队构型序列.同时可根据其他任务需求放宽全过程严格编队保持,而实现一定时间范围内的有限误差编队保持.

(3) 挖掘智能方法应用.通过智能方法的充分使用,滑翔式高超声速飞行器在预测、决策和群体智能方面仍具有广阔发展空间,将进一步提高自主协同能力,具体包括:

① 提高未知环境下推理能力.由于滑翔式高超声速飞行器的控制能力有限且时变,飞行器仅仅通过当前状态进行在线决策无法充分考虑未来环境情况与自身性能.飞行器需要根据未来的部分信息来作当前的实时决策,因此更有必要提高飞行器的推理预测能力.无论是在协同环境,还是在对抗博弈环境,都应当开展对剩余飞行时间、剩余飞行航程、环境威胁变化、目标移动趋势以及其他信息的预测,来弥补飞行器自身

控制能力的不足.

② 实现复杂环境下可解释安全智能决策.滑翔式高超声速飞行器的飞行环境极度不安全,在空域上横跨太空、高空和低空,飞行速度变化剧烈,控制能力随着高度变化而变化,在协同过程中更容易产生飞行器控制性能不足导致的飞行轨迹偏差,且其执行任务的重要性一般较高,需确保飞行过程决策安全可靠.因此,智能体在学习过程需要避免危险区域,如何提高智能体决策安全性与可解释性是高速集群中亟待解决的问题.

③ 探究高性能飞行器的小规模群智涌现.现有群智涌现机制更多在于大规模智能体,且单个智能体能力极其有限.滑翔式高超声速飞行器本身能力较强,且目前该领域的集群研究一般个体数量较少,但其规划、决策、控制等各模块均可作为单独智能体分析,可以将飞行器本身考虑为多个智能体的群体集合.在较小规模下实现群智涌现,实现群体能力的大幅增长,将是一个可供探索的新思路,即通过“强强联手”显著提高群体能力,同样实现“1+1远大于2”.

参考文献

- 1 Pinto J, Whyman N L, Ritchie M A, et al. Statistical analysis of hypersonic glide vehicle radar cross section. *IET Radar Sonar Navi*, 2024, 18: 158–170
- 2 Bartusiak E R, Jacobs M A, Chan M W, et al. Predicting hypersonic glide vehicle behavior with stochastic grammars. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2024, 60: 1208–1223
- 3 Sun L, Yang B, Ma J. Trajectory prediction in pipeline form for intercepting hypersonic gliding vehicles based on LSTM. *Chin J Aeronaut*, 2023, 36: 421–433
- 4 Su L, Wang J, Chen H. A real-time and optimal hypersonic entry guidance method using inverse reinforcement learning. *Aerospace*, 2023, 10: 948
- 5 Wallace B A, Si J. Reinforcement learning control of hypersonic vehicles and performance evaluations. *J Guid Control Dyn*, 2024, 47: 2587–2600
- 6 An K, Guo Z Y, Huang W, et al. Research progress of formation-cooperative control methods for low-speed and high-speed vehicle systems (in Chinese). *Aero Weapon*, 2022, 29: 53–65 [安凯, 郭振云, 黄伟, 等. 低/高速飞行器系统编队协同控制方法研究进展. *航空兵器*, 2022, 29: 53–65]
- 7 Liang Z, Yu J, Ren Z, et al. Trajectory planning for cooperative flight of two hypersonic entry vehicles. In: *Proceedings of the 21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. 2251
- 8 Shen Z, Lu P. Onboard generation of three-dimensional constrained entry trajectories. *J Guid Control Dyn*, 2003, 26: 111–121
- 9 Liu Z, Lu H R, Zheng W, et al. Rapid time-coordination trajectory planning method for multi-glide vehicles (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2021, 42: 317–331 [刘哲, 陆浩然, 郑伟, 等. 多滑翔飞行器时间协同轨迹快速规划. *航空学报*, 2021, 42: 317–331]
- 10 Wang X Y, Liang X Z, Shi R, et al. Collaborative trajectory planning method for hypersonic glide vehicle (in Chinese). *Aero Weapon*, 2022, 29: 1–10 [王新宇, 梁学智, 施锐, 等. 高超声速滑翔飞行器协同轨迹规划方法. *航空兵器*, 2022, 29: 1–10]
- 11 Liu Z, Zheng W, Wang Y, et al. A cooperative guidance method for multi-hypersonic vehicles based on convex optimization. In: *Proceedings of the 2020 Chinese Automation Congress*. Shanghai: Chinese Association of Automation, 2020. 2251–2256
- 12 Yu J, Dong X, Li Q, et al. Cooperative guidance strategy for multiple hypersonic gliding vehicles system. *Chin J Aeronaut*, 2020, 33: 990–1005
- 13 Cheng X, Song X, Wang L, et al. A model predictive solution to cooperative guidance of hypersonic reentry vehicle with impact angle and distance coordination. *Aerosp Sci Tech*, 2024, 145: 108855
- 14 An K, Guo Z, Huang W, et al. A cooperative guidance approach based on the finite-time control theory for hypersonic vehicles. *Int J Aeronaut Space Sci*, 2022, 23: 169–179
- 15 Liang Z, Lv C, Zhu S. Lateral entry guidance with terminal time constraint. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2023, 59: 2544–2553
- 16 Wang X, Zhang Y, Liu D, et al. Three-dimensional cooperative guidance and control law for multiple reentry missiles with time-varying velocities. *Aerosp Sci Tech*, 2018, 80: 127–143
- 17 Wang H, Guo J, Wang X, et al. Time-coordination entry guidance using a range-determined strategy. *Aerosp Sci Tech*, 2022, 129: 107842
- 18 Li Z, Zhang X, Zhang H, et al. Three-dimensional approximate cooperative integrated guidance and control with fixed-impact time and azimuth constraints. *Aerosp Sci Tech*, 2023, 142: 108617
- 19 Li Z, He B, Wang M, et al. Time-coordination entry guidance for multi-hypersonic vehicles. *Aerosp Sci Tech*, 2019, 89: 123–135
- 20 Wang J, Zhang R. Terminal guidance for a hypersonic vehicle with impact time control. *J Guid Control Dyn*, 2018, 41: 1790–1798
- 21 Zhu C, Xu G, Wei C, et al. Impact-time-control guidance law for hypersonic missiles in terminal phase. *IEEE Access*, 2020, 8: 44611–44621
- 22 Chu H, Li J, Dong Y, et al. Improved MPSP method-based cooperative re-entry guidance for hypersonic gliding vehicles. *MATEC Web Conf*, 2017, 114: 01002
- 23 Yu W, Chen W, Jiang Z, et al. Analytical entry guidance for coordinated flight with multiple no-fly-zone constraints. *Aerosp Sci Tech*, 2019, 84: 273–290
- 24 Wang Z, Tang S, Guo J. Entry guidance command generation for hypersonic glide vehicles under threats and multiple constraints. *IEEE Access*, 2021, 10: 1–15
- 25 Zhao Q L, Chen J, Li Q D, et al. Feasible region of hypersonic and ballistic missiles' cooperative attack strategy (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2015, 36: 2291–2300 [赵启伦, 陈建, 李清东, 等. 高超武器与常规导弹协同攻击策略可行域研究. *航空学报*, 2015, 36: 2291–

2300]

- 26 Li Z, Hu C, Ding C, et al. Stochastic gradient particle swarm optimization based entry trajectory rapid planning for hypersonic glide vehicles. *Aerosp Sci Tech*, 2018, 76: 176–186
- 27 Xu H, Cai G, Fan Y, et al. Analytic time reentry cooperative guidance for multi-hypersonic glide vehicles. *Appl Sci*, 2023, 13: 4987
- 28 LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, 521: 436–444
- 29 He W, Li Q, Ma Y, et al. Machine learning in nuclear physics at low and intermediate energies. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 282001
- 30 Yu W, Guo H, Xiao J, et al. Physical neural networks with self-learning capabilities. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2024, 67: 287501
- 31 Kaufmann E, Bauersfeld L, Loquercio A, et al. Champion-level drone racing using deep reinforcement learning. *Nature*, 2023, 620: 982–987
- 32 Ernst Z J, Robertson B E, Mavris D. Utilizing artificial neural networks for entry vehicle aerodynamic characterization. *J Spacecr Rockets*, 2024, 61: 1464–1474
- 33 Li H, Chen H, Tan C, et al. Fast trajectory generation with a deep neural network for hypersonic entry flight. *Aerospace*, 2023, 10: 931
- 34 Li X, Wang X, Zhou H. Entry guidance for spatial no-fly zones avoidance via model-based reinforcement learning. *Aerosp Sci Tech*, 2024, 153: 109405
- 35 Fang K, Zhang Q Z, Nie K, et al. Time-coordinated reentry guidance law for hypersonic vehicle (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2018, 39: 202–217 [方科, 张庆振, 倪昆, 等. 高超声速飞行器时间协同再入制导. *航空学报*, 2018, 39: 202–217]
- 36 Cheng L, Jiang F, Wang Z, et al. Multiconstrained real-time entry guidance using deep neural networks. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2020, 57: 325–340
- 37 Song J, Xu X, Tong X, et al. A time cooperation guidance for multi-hypersonic vehicles based on LSTM network and improved artificial potential field method. *Aerospace*, 2022, 9: 562
- 38 Li Z, Guo J, Tang S, et al. A deep learning-based approach to time-coordination entry guidance for multiple hypersonic vehicles. *Aeronaut J*, 2023, 127: 604–626
- 39 Li Y, Liu X, He X, et al. Cooperative optimal guidance of hypersonic glide vehicles by real-time optimization and deep learning. *Proc Inst Mech Eng Part G-J Aerosp Eng*, 2023, 237: 2266–2283
- 40 Zhang X, Liu S, Yan J, et al. Fixed-time cooperative trajectory optimisation strategy for multiple hypersonic gliding vehicles based on neural network and ABC algorithm. *Aeronaut J*, 2023, 127: 1737–1751
- 41 Zhang W, Yu W, Li J, et al. Cooperative reentry guidance for intelligent lateral maneuver of hypersonic vehicle based on downrange analytical solution. *Acta Armamentarii*, 2021, 42: 1400–1411
- 42 Bao C Y, Zhou X, Wang P, et al. A deep reinforcement learning-based approach to onboard trajectory generation for hypersonic vehicles. *Aeronaut j*, 2023, 127: 1638–1658
- 43 Jiang Q, Wang X, Bai Y, et al. Intelligent online multiconstrained reentry guidance based on hindsight experience replay. *Int J Aerosp Eng*, 2023, 2023: 1–19
- 44 Zhu J, Zhang H, Zhao S, et al. Multi-constrained intelligent gliding guidance via optimal control and DQN. *Sci China Inf Sci*, 2023, 66: 132202
- 45 Kumar Ranjan P, Sinha A, Cao Y, et al. Relational maneuvering of leader-follower unmanned aerial vehicles for flexible formation. *IEEE Trans Cybern*, 2024, 54: 5598–5609
- 46 Su Y H, Bhowmick P, Lanson A. A fixed-time formation-containment control scheme for multi-agent systems with motion planning: Applications to quadcopter UAVs. *IEEE Trans Veh Technol*, 2024, 73: 9495–9507
- 47 Pham T V, Nguyen T D. Path-following formation of fixed-wing UAVs under communication delay: A vector field approach. *Drones*, 2024, 8: 237
- 48 Shui X B, Wang X F, Lin P, et al. A formation control method of multiple hypersonic missiles (in Chinese). *Tactical Missile Technol*, 2020: 139–148 [水晓冰, 王晓芳, 林平, 等. 高超声速飞行器编队控制方法. *战术导弹技术*, 2020: 139–148]
- 49 Shen X, Li X, Zhang H J, et al. A formation guidance method for reentry unpowered gliding flight (in Chinese). *Flight Dyn*, 2023, 41: 74–80 [沈馨, 李响, 张后军, 等. 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: 74–80]
- 50 Yan H L, Lu Y, Guo J, et al. Cluster cooperative formation control method for underactuated hypersonic vehicle (in Chinese). *Air Space Def*, 2024, 7: 56–62 [阎宏磊, 陆远, 郭杰, 等. 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: 56–62]
- 51 Zhang Y, Wang X, Tang S. A globally fixed-time solution of distributed formation control for multiple hypersonic gliding vehicles. *Aerosp Sci Tech*, 2020, 98: 105643

- 52 Jia S, Wang X, Li F, et al. Distributed analytical formation control and cooperative guidance for gliding vehicles. [Int J Aerosp Eng](#), 2020, 2020: 1–14
- 53 Yu W, Yao Y, Chen W. Analytical cooperative entry guidance for rendezvous and formation flight. [Acta Astronaut](#), 2020, 171: 118–138
- 54 Zhang Z, Luo Y, Qu Y, et al. Distributed formation control with obstacle and collision avoidance for hypersonic gliding vehicles subject to multiple constraints. [Int J Aerosp Eng](#), 2023, 2023: 1–23
- 55 Wu X, Wei C, Chen T, et al. On novel distributed fixed-time formation tracking of multiple hypersonic flight vehicles with collision avoidance. [Aerosp Sci Tech](#), 2023, 141: 108517
- 56 Hu Y Y, He F, Bai C C. Cooperative obstacle avoidance decision method for the terminal guidance phase of hypersonic vehicles (in Chinese). *Acta Armamentarii*, 2024, 45: 3147–3160 [胡砚洋, 何凡, 白成超. 高超声速飞行器末制导段协同避障决策方法. *兵工学报*, 2024, 45: 3147–3160]
- 57 Li Y H, Zhang B, Jiang L, et al. Grouping optimization of high-speed aircraft based on real-time reachable domain (in Chinese). *Astronaut Syst Eng Technol*, 2024, 8: 28–37 [李宇航, 张兵, 姜利, 等. 基于实时可达域的高速飞行器分组队形优化. *宇航总体技术*, 2024, 8: 28–37]
- 58 Ragnoli G, Savino R, Cecere A, et al. Hypersonic boost-glide systems: Flight mechanics and plasma parameters evaluation through aero-thermochemical computational fluid dynamics. [Aerosp Sci Tech](#), 2024, 148: 109092
- 59 Liu P, Zhao Z, Yuan K, et al. Analysis on the propagation characteristics of terahertz signals in blunt-coned and sharp-coned vehicle in different sizes. [IEEE Trans Plasma Sci](#), 2024, 52: 3061–3071
- 60 Ouyang W, Liu Q, Wu Z. Difference analysis in terahertz wave propagation in thermochemical nonequilibrium plasma sheath under different hypersonic vehicle shapes. [Chin J Aeronaut](#), 2023, 36: 137–151
- 61 Tang X, Di S, Yu F, et al. Fuzzy adaptive finite-time tracking for hypersonic flight vehicles using switching event-triggered methodology. [IEEE Access](#), 2022, 10: 74280–74290
- 62 Zuo R, Li Y, Lv M, et al. Event-triggered distributed containment control for networked hypersonic flight vehicles. [IEEE Trans Syst Man Cybern Syst](#), 2023, 53: 5271–5280
- 63 Lv M, De Schutter B, Baldi S. Nonrecursive control for formation-containment of HFV swarms with dynamic event-triggered communication. [IEEE Trans Ind Inf](#), 2022, 19: 3188–3197
- 64 Lv M, Ahn C K, Wang P, et al. Event-based distributed bipartite consensus of high-order nonlinear multi-agent network: Applications to hypersonic flight vehicles. [IEEE Trans Automat Sci Eng](#), 2024, (Early Access): 1–10
- 65 Zuo R, Li Y, Lv M, et al. Learning-based distributed containment control for HFV swarms under event-triggered communication. [IEEE Trans Aerosp Electron Syst](#), 2022, 59: 568–579
- 66 Gaydamaka A, Samuylov A, Moltchanov D, et al. Dynamic topology organization and maintenance algorithms for autonomous UAV swarms. [IEEE Trans Mobile Comput](#), 2024, 23: 4423–4439
- 67 Wu K, Chin K W, Soh S. Multi-UAVs network design algorithms for computed rate maximization. [IEEE Trans Mobile Comput](#), 2024, 23: 8965–8980
- 68 Ilango P, Sivarajan N, RaviChandran A, et al. PCSSHO: An implementation of percentage of circle search and spotted hyena optimizer for multi-constraint load balancing and routing framework in FANET. [Int J Commun](#), 2024, 37: e5758
- 69 Cui Y, Liang Y, Luo Q, et al. Resilient consensus control of heterogeneous multi-UAV systems With leader of unknown input against byzantine attacks. [IEEE Trans Automat Sci Eng](#), 2024, (Early Access): 1–12
- 70 Bai C C, Wang H X, Guo J F, et al. Communication topology adaptive control method for high-speed space vehicle swarms (in Chinese). *J Astronaut*, 2023, 44: 1008–1019 [白成超, 王会霞, 郭继峰, 等. 高速飞行器集群通信拓扑自适应控制方法. *宇航学报*, 2023, 44: 1008–1019]
- 71 Ahmed G, Sheltami T, Mahmoud A, et al. Performance evaluation of three routing protocols for drone communication networks. [Arab J Sci Eng](#), 2024, 49: 13149–13161

Time coordination and formation control techniques for hypersonic gliding vehicles: A survey

HU YanYang, WANG Wen & BAI ChengChao^{*}

School of Astronautics Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

**Corresponding author (email: baichengchao@hit.edu.cn)*

With the significant improvement of anti-missile interception capability, the effectiveness of a single gliding hypersonic vehicle is gradually reduced. As an effective way to break the constraints, the research value and strategic significance of multi-aircraft high-speed cooperation have attracted more and more attention. On the one hand, multiple aircrafts reach the target at the same time through time cooperative control, so that the interception system can reach saturation and achieve effective penetration. On the other hand, during the flight process, multiple aircrafts perform more abundant tasks such as cooperative detection through formation flight. In this paper, two typical cooperative modes of time cooperative control and formation control of gliding hypersonic vehicles are summarized. Firstly, the application of trajectory planning, cooperative guidance, deep learning and reinforcement learning in time cooperative control is analyzed at the algorithm level. Secondly, the three core technologies of formation maintenance, formation reconstruction and communication optimization in formation control are analyzed in depth. Finally, the future development direction and research trend of time cooperation and formation control technology of gliding hypersonic vehicles are prospected.

hypersonic gliding vehicle, time consistency control, formation control, autonomous coordination

PACS: 02.30.Yy, 07.05.Dz, 07.05.Mh, 96.12.De

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0325](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0325)