

飞行器集群协同控制技术分析与展望

马自茹 孙羽萌

航天二院 北京 100080

摘要：针对高超声速滑翔飞行器滑翔段轴向过载不可控导致编队位置控制困难的问题，提出一种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。在协同制导架构基础上，基于多智能体一致性理论设计分布式集群编队控制策略，由编队中各飞行器的绝对位置和相对位置生成协调变量，采用动态逆方法生成基本编队控制指令；通过设计侧向机动控制指令，对编队队形进行调整，并采用双阶段预测校正控制算法实现编队集群的侧向机动控制。仿真结果表明：该方法能够实现欠驱动高超声速飞行器集群的编队队形生成和保持、良好的编队队形调节能力及对初始位置误差的鲁棒性。

关键词：高超声速飞行器；协同编队；预测校正

1 前言

近年来，随着高超声速飞行器技术的快速发展，高超声速飞行器已成为一种重要的防区外打击手段。高超声速飞行器具有较多优点，如突防能力强、机动性高、毁伤效果好等。各国在加速研制高超声速飞行器的同时，也在积极推进该类飞行器的防御体系建设。目前，提升单飞行器的任务能力逐渐进入了瓶颈期，而多飞行器协同制导技术正在快速发展，因此编队控制方法的相关研究具有重要意义。对于飞行器协同编队问题，近年来已有大量研究。基于改进一致性算法设计了无人机集结-成形策略，考虑到无人机的机动性能约束，对一致性算法进行改进以实现无人机速度、航向和飞行高度的控制，进而设计了编队队形控制算法。为了研究固定翼无人机编队的结构，制定了一套合作控制规则，通过调节无人机速度和倾斜角度来控制机翼状态。同时，提出了一项基于增强人工潜望镜的避障控制方法，以解决训练无人机避障问题。研究小型固定翼无人机集群时侧重于它们在复杂环境中的训练控制挑战。在复杂条件下，成功实现了大规模、强健的集群形成与转换。此外，设计了基于虚拟结构和人工潜在场的训练规划和控制算法，解决了多四旋翼无人机的训练保持、碰撞预防和通信难题。另外，结合图论和人工势场理论，提出了一种基于二阶模型训练系统的分布式训练控制策略。发展了“机器系统”和“身体姿势”训练的理念，并采用了非线性控制算法。采用定向可切换的通信拓扑，分布式训练控制器根据本地邻居信息构建。最后，针对高超音速飞行器的训练控制问题，提出了一种基于一致飞行速度方向的训练策略，忽略了过程约束。在进行封闭式模型训练的基础上，充分考虑了参数不确定性、系统非线性以及外界干扰的影响。为了解决导弹动态模型中的不确定性问题，研发了一种全球自适应训练控制方法，逐步适应时间变化。引入了基于相干理论的训练控制框架，借助三枚高超音速导弹来构建通信拓扑。通过水平平面上的相对位置限制条件，详细推导和验证了分布训练控制策略。另外，提出了一项高速车辆快速训练实施方法，融合了伪光谱技术和自适应策略。总的来说，研究对协同训练问题采用了相干算法、虚拟结构法以及人工电位场法。这些方法考虑了消除干扰和系统非线性等挑战，并提出了解决方案。然而，目前许多算法都主要针对完全训练的无人机或低速导弹。就高超音速再入滑翔飞行器而言，其在滑翔阶段的轴向过载是无法有效控制的，这增加了其控制难度。

2 多高速飞行器集群协同关键问题

在高速武器平台网络化的背景下，针对多约束下高速飞行

器制导方法的研究已经相对成熟完善，目前研究重点主要集中于突破多飞行器协同制导控制技术难题。近年来，国内外学者已经针对传统飞行器集群协同作战开展了丰富的研究，并积累了一定的成果。但高速、高动态、高机动性的高速飞行器集群涉及学科门类更广，协同作战实施的难度更大，亟待解决的技术难点多且复杂。多高速飞行器协同作战涉及多项关键技术，其中编队通信保持是实现协同制导、协同突防、协同探测等多项协同技术的前提与信息支撑，协同制导控制是飞行器编队高效完成作战任务的核心与先决条件，在一定程度上制约了高速飞行器的突防优势与整体作战效能的发挥，故而本文主要针对高速飞行器集群在协同飞行中编队通信保持与协同制导控制两大重点问题开展研究。目前协同作战以数据链技术结合各类传感器为基础，通过构建完整的集群信息化网络体系，支撑协同探测、协同规划等协同技术应用，实现作战效能与实战化能力的提升。对于多飞行器协同飞行，确保飞行器编队正常通信成为亟须解决的问题之一。对于高速、高动态、高机动性的高速飞行器编队通信保持问题，其本质为多约束下的构型保持控制问题，一方面受飞行器载荷限制要考虑动态飞行过程中的通信距离约束，另一方面由于通信天线波束无法实现完整的三维覆盖，要考虑飞行器间的通信相对角度约束。另外多飞行器如何突破多层立体防御体系、实施有效毁伤，是亟须解决的现实问题。其中多角度同时命中强敌目标的立体合围制导是目前较为有效的作战样式。多飞行器立体合围，一方面需利用不同发射地点等手段，充分发挥高速飞行器的高机动性；另一方面需要采用多方向围捕、多波次配合的协同飞行方案，来提升整体作战的突防和打击效能，最终支撑体系效益的发挥。对于多飞行器立体合围，一方面要开展多枚飞行器的协同角度进入、协同到达时间的能力研究，另一方面要开展适用于滑翔式飞行器动力学特性的编队构型保持与制导等关键技术的研究。多高速飞行器在滑翔机动段的编队通信保持控制以及立体合围制导两大问题，涉及的关键技术主要分为编队通信保持控制技术、带飞行时间约束的协同制导控制技术以及带飞行角度约束的协同制导控制技术。

3 高速飞行器集群协同关键技术研究现状

下面就近年来关于编队通信保持控制方法、带飞行时间约束的协同制导控制方法、带飞行角度约束的协同制导控制方法研究成果分别进行介绍。

3.1 编队通信保持控制

目前有关多飞行器协同的研究一般是以各飞行器在动态飞

行过程中保持正常通信的前提下开展的。然而在实际协同作战过程中,受复杂多变的作战环境及不清晰的敌我态势等多重因素的影响,飞行器间可能出现通信拓扑切换、通信距离受限及时延等情况,影响整体作战效能的发挥。编队通信保持是实现协同制导、协同突防、协同探测等各类协同任务的基础,为其提供大量高更新率的共享信息,因此研究多高速飞行器的通信保持控制具有重要的工程价值。由于无人机等飞行器机体载荷存在限制,其可携带的传感器的数量及性能有限,从而通信距离存在极值边界,目前主要通过控制编队相对位置协同以保持通信。使用改进的A*算法不断计算,比较无人机间的距离,建立了存在通信距离约束的多无人机协同路径规划算法,从而使各无人机始终保持在允许的通信范围内。航天器编队在不同境况下的通信保持控制问题:理想情况下,为保持航天器编队间正常通信,设计了一种连续的相对位置协同控制器,使航天器编队在跟踪期望参考轨迹的同时保持编队队形不变;在考虑外界干扰与控制输入受限的情况下,设计了一种鲁棒自适应相对位置协同控制器,同时在此基础上设计了考虑避碰的自适应队形协同控制。通过分析多水下爬游机器人通信距离、航程等约束,提出了一种带通信距离约束的异构水下爬游机器人集群任务分配方法。以上方法对多高速飞行器的通信距离控制研究提供了一定启示。对于高速、高动态、高机动性的飞行器集群,电离和黑障等现象对其编队通信保持存在较大的影响,因此有必要考虑飞行器间通信距离约束;另外考虑到雷达、通信天线以及机体材料结构等约束,使得通信天线的波束指向范围存在限制且安装数量与位置有限,从而波束指向范围无法全方位覆盖三维空间,存在无法通信的区域,称为通信盲区。因此设计多高速飞行器通信保持控制方案时不仅要考虑编队相对位置协同,还需要考虑各飞行器的相对角度协同,本质上是使得各飞行器满足时变指向约束。目前针对高速飞行器集群,同时考虑各飞行器间通信距离与相对角度约束的研究相对较少,可借鉴上述领域中编队相对位置协同控制方法与相对角度协同控制方法的思路,摸索出适合高速飞行器集群通信保持的控制方案。结合相关背景及任务需求,对高速飞行器通信盲区分布进行简化建模,通过判断两飞行器是否处于视通状态,设计合理的控制策略以调整飞行器间相对距离与相对角度,最终使得多枚高速飞行器保持实时通信。

3.2 带飞行时间约束的协同制导控制

为突破多层立体防御系统,实现有效毁伤,可以利用多枚高速飞行器呈多角度、多批次同时攻击单个目标,形成饱和攻击作战样式,以弥补单飞行器能力缺陷,大幅度提升系统突防概率与作战效能。这种制导方法被称为带飞行时间约束的协同制导方法。目前针对时间约束下协同制导的研究成果较多,但大多集中于基于质点运动学模型的多弹协同问题。而对于欠驱动、强机动的高速飞行器集群,其系统控制能力有限,动力学特性复杂,滑翔约束条件较多,且采用倾斜转弯(Bank-to-Turn, BTT)控制难以精确控制航向角等状态量,故而多弹时间协同制导方法无法直接应用于高速飞行器的再入时间协同制导控制。目前关于多高速飞行器时间协同制导的研究较少,现有文献一般采用滑翔制导+协同决策的复合协同制导方法(如标准轨迹跟踪法+协同决策、预测校正法+协同决策等)或高斯伪谱、凸优化等多优化方法实现多高速飞行器的时间协同。基于预测校正法的时间协同制导通常只能满足终端位置与时间协同约束,很难同时满足终端角度要求,且初值选取较大程度

上影响最终迭代解的收敛性。为同时满足终端角度约束,可采用多优化方法将问题离散化后求解。基于高斯伪谱法实现了多约束下高速飞行器的再入轨迹规划,但该方法对初值选取有较高要求,且引入时间约束后会明显提高优化计算难度,难以保证规划求解的可行性与快速性。

3.3 带飞行角度约束的协同制导控制

在上世纪70年代,首次提出了涉及飞行角度约束的制导难题,被戏称为“攻击角度控制制导法则”。根据控制技术,可以将其分为基于攻击角方向指导的不同组别,最佳控制则是基于攻击角方向控制理论的滑动模式法则。此外,还包括攻击角方向控制理论、基于静态模型的规划预测以及几何攻击角理论的控制,从而掌握了多种攻击角引导法则。相对于传统的比例制导方法,基于比例制导的攻角控制制导方式通过增加偏振项来调整攻击角,最终确保车辆能够成功以期望的角度精准击中目标。尽管这种方法简单易行,但通常只适用于静态或低速目标。最佳控制问题,以大自然启发的导法攻角控制理论为基础,被转换为飞行时间最优控制问题,其中在业绩指数中通常选择作为权重函数以控制总能量。这一指导原则一定程度上能够优化总控制能量,然而其推导基于线性模型,其适用范围有限。当前研究的重点是通过选择适当的权重函数或引导参数,以控制车辆沿所需轨迹移动,且同时实现零目标损失和零攻击角度误差。借助最优控制理论,提出了一种协作导引方法,能够同时控制攻击角度和攻击时间,以设计状态控制器。操纵目标可以被视为对导引系统的干扰,而滑动控制能够有效应对外部干扰对系统的影响。因此,在攻击移动目标时,滑动模式控制理论被认为是设计相应导引原则的最佳选择。目前,关于基于滑动模式控制的攻击角度控制导引原则的研究集中在滑动模式曲面的合理设计,以处理未知目标加速度并排除滑动指令中的异常现象。这种技术允许在移动目标上准确地打击,但保持指导指令的连贯性非常困难。有研究人员提出了一种终端滑动模式,能够满足角度和飞行的零损失约束,这种滑动方式可以在时间上调节视野的瞄准角度和误差率。然而,这种方法需要目标加速度信息作为输入,使滑动模式的计算变得更加复杂。因此,引入了一个线性膨胀状态观测器,用于实时估计目标的加速度,同时提出了一种新型的非奇异终端滑动模式表面。这种方法不再依赖目标的加速度信息,同时解决了当滑动模式的变量收敛于零时问题的挑战。

4 结束语

高速飞行器涉及总体设计、结构材料、热防护、导航、制导与控制等多项关键技术,具有巨大的军事潜在价值,逐步成为航空航天领域研究的热点。本文分析了多高速飞行器在滑翔机动段的编队通信保持控制与立体合围制导两大问题以及其中涉及的关键技术,介绍了编队通信保持控制方法、带飞行时间约束的协同制导控制方法以及带飞行角度约束的协同制导控制方法的研究成果。

参考文献

- [1] 王娜,汪振东,张丽园.目标跟踪四旋翼无人机的姿态控制算法研究[J].信息与电脑(理论版),2020,32(3):35-37.
- [2] 华和安,方勇纯,钱辰,等.基于线性滤波器的四旋翼无人机强化学习控制策略[J].电子与信息学报,2021,43(12):3407-3417.