

多智能体飞行器集群对抗虚实交互验证方法研究

文 晓

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：针对多智能体飞行器集群红蓝对抗场景下纯虚拟仿真可信度不高、全实物试验成本高且风险大、虚实交互数据同步性差和对抗场景还原度低等问题，结合数字孪生和分布式协同控制技术，对红蓝集群对抗的虚实交互验证方法进行梳理和阐述。通过创建物理实体、虚拟-孪生模型、数据交互、对抗推演和评价等模块化架构，达成复杂战场环境动态映射、红蓝飞行器虚实状态实时同步及对抗指令双向交互；采用异构通信适配协议和时空同步机制，消除虚实间协同偏差和对抗时序错乱的问题；最后搭建一个高逼真度、可复用、强实时的虚实仿真平台，可以较好地还原红蓝对抗中的干扰因素和集群协同特性。相较于数字环境下仿真验证，基于虚实仿真平台达到的验证结果置信度更高，试验成本更低，为多智能体飞行器集群红蓝对抗算法优化、战术验证、系统定型等提供关键技术支撑。

【关键词】：多智能体飞行器；集群红蓝对抗；虚实交互；数字孪生

DOI:10.12417/3041-0630.26.06.066

1 引言

伴随着无人系统智能化、集群化技术的迅猛发展，多智能体飞行器集群依靠分布式感知、自主协同决策、规模化突防等主要特点，已经成为未来空天地一体化红蓝对抗的主要装备形态。红蓝对抗属于集群作战的典型情况，有着很强的动态博弈特性、不确定性和耦合性，攻防策略会不断发生改变，牵涉到诸多要素且相互影响，使得对集群协同控制算法、对抗决策策略以及系统稳定性和鲁棒性验证更加困难。虚实交互验证技术把物理实体和虚拟孪生模型结合起来，达成战场环境动态映射和红蓝方真实实体和虚拟孪生模型间的双向映射和协同互动，为平衡验证可信度、试验成本和场景灵活性赋予了可行途径。目前，国内外相关研究大多集中在多机协同编队虚实仿真上，集群红蓝强对抗环境下的相关验证方法研究处在起步阶段，在异构红蓝智能体对抗交互、红蓝时空精准同步、效能量化评估等方面存在明显不足。因此，本文面向多智能体飞行器集群红蓝对抗场景，系统地梳理了虚实交互验证技术体系，从核心特性、技术短板、方法设计和应用价值等几个方面进行了综述，可为相关领域的研究和工程应用提供理论和技术支持。

2 多智能体飞行器集群红蓝对抗核心特性及现有验证技术的不足

2.1 集群红蓝对抗核心特性

多智能体飞行器集群红蓝对抗属于典型的分布式多智能体博弈场景，其核心特性决定着虚实交互验证方法的设计逻辑，主要体现在三个方面。

(1) 群体自主性与去中心化博弈。红蓝双方各自具有独立的感知、决策、执行能力，不需要中心节点全程控制，红蓝方集群通过局部交互来完成自身全局协同，攻防战术、目标分

配、路径规划等都会随着对抗态势的变化而变化，表现出去中心化的交互特点。

(2) 动态博弈性、强对抗迭代。红蓝双方的战术策略会不断地进行实时的博弈，红方友机群和蓝方目标群之间会出现进攻、防御、突防、拦截、干扰、机动等作战手段，战场空情态势在不断变化、更新升级，需要验证系统具备快速实时反应、场景精准重构能力。

(3) 环境耦合性、非线性特性。红蓝对抗受风场、电磁干扰、通信丢包、地形遮挡等真实环境因素的影响，各环境影响因素间耦合性强，且红蓝方真实飞行器与虚拟智能体的行为都是非线性且不确定的，如何很好地在数字空间中再现复杂的环境耦合效应和实时映射真实战场空间是富有挑战的。

2.2 现有虚实交互验证技术在红蓝对抗场景的短板

现有的虚实交互验证技术大多被应用在民用无人机编队、工业机器人协同等领域，直接迁移至多智能体飞行器集群红蓝对抗场景时会遇到诸多不足，主要集中在四个方面。

(1) 交互模式和红蓝集群对抗需求背离。现有技术大多采用中心化交互架构，与红蓝对抗去中心化的博弈特征相违背，无法支持红方“孪生+虚拟”集群和蓝方“孪生+虚拟”集群的分布式协同对抗。

(2) 时空同步精度不够。在红蓝对抗时会出现时间顺序混乱，真实空间从数据采集到注入虚拟空间存在通信和传输延迟等问题，会导致红蓝双方“孪生+虚拟”集群和真实空间中红蓝方真实实体的决策不一致、运动不同步等现象，从而造成虚实间攻防互动断裂，不能准确模拟出真实对抗环境。

(3) 环境模拟不全面，对抗真实性缺失。目前多数虚实

试验方式会简化物理环境的模拟,站在己方角度实现自身装备虚实结合实验,忽略红蓝对抗中电磁干扰、敌方对抗策略等重要因素,不能真实的再现红蓝博弈对抗复杂的战场环境。

(4) 红蓝对抗专用效能评价指标体系缺失。现有的验证指标大多只关注单机或单装性能,不足以衡量红方集群和蓝方目标群之间的对抗博弈效果,无法更好地支持算法和战术的改进迭代。

3 多智能体飞行器集群红蓝对抗虚实交互验证方法设计

3.1 总体架构设计

验证系统自上而下分为物理实体层、虚拟孪生层、数据交互层、对抗推演与评估层,各层之间通过高速通信网络实现数据贯通和红蓝协同联动,架构逻辑和功能如下所示:

(1) 物理实体层红蓝真实对抗基准:作为验证系统物理上的主要部分,该层上架设少量红蓝方真实的飞行器智能体、地面测控终端、通信基站和环境感知设备。红方真实飞行器和红方真实飞行器均配备自主飞控模块、感知传感器、通信模块,可以独立完成基本对抗动作,实时获取飞行状态、环境干扰等真实的参数,给虚拟孪生模型赋予参数校准参照;红方虚拟孪生层会接收到蓝方物理实体层和虚拟层发出的对抗命令,促使红方“孪生+虚拟”集群同蓝方“孪生+虚拟”集群开展协同对抗仿真。该层用少量的实机来模拟真实的物理特性,大大降低红蓝对抗试验的成本和安全风险。

(2) 虚拟孪生层红蓝双方虚拟对抗主体与场景构建:依靠实时物理实体数据构建与红蓝方物理实体对应的孪生模型,同时批量创建红方虚拟对抗智能体和蓝方虚拟对抗智能体,同步构建复杂战场环境模型。孪生模型准确再现红蓝方飞行器动力学特性、通信规律和操纵响应,环境模型包含风场、电磁干扰、地形遮挡等真实约束条件。蓝方虚拟集群可以根据红方拦截动作预设不同的攻防战术(迂回机动、集中突防、编队打击、电子干扰等),红方虚拟集群可以根据蓝方作战任务实施作战拦截和编队对抗,从而达到大规模、多场景红蓝对抗模拟。可通过改变智能体数量、战术规则和场景参数,快速模拟其他极端对抗场景。

(3) 数据交互层红蓝虚实数据同步枢纽:数据交互作为红蓝双向和各自虚实空间交互的桥梁,采用异构通信适配协议及时空同步机制来打破虚实数据交互壁垒,使虚实间状态数据、决策指令、战场环境数据可以实时传输并且精确同步。通过数据滤波、时延补偿、误差校正等技术消除虚实节时空误差,保证红蓝方集群在虚实空间有相同态势,给红蓝闭环对抗推演提供可靠依据。

对抗推演与评估层红蓝对抗闭环与效能量化

本层完成红蓝对抗场景的动态推演和全流程效能量化评价,创建红蓝集群对抗专用效能指标体系(攻防成功率、协同协同效率、抗干扰能力等)。通过实时采集红蓝对抗态势、集群状态、环境参数等数据,对对抗结果进行量化分析,评价红蓝方算法、战术的不足之处并给出改进意见,达到设计-验证迭代闭环的目的。

3.2 核心技术实现

3.2.1 红蓝异构智能体异构协同控制策略

对于红蓝集群对抗去中心化博弈的特点,采用混合式协同控制策略来可兼顾红方全局对抗目标和蓝方局部自主决策作战单元划分,把红蓝集群分成若干作战单元,每个作战单元包含一个红方和蓝方真实智能体作为核心节点,其余为红蓝方虚拟智能体,核心节点是整个单元内虚实数据交互中心。分布式协同机制采用分布式通信实现红蓝全局对抗协同,红蓝双方真实智能体根据环境的变化和相互的对抗指令作出动作,红蓝方利用孪生模型运行仿真算法来模仿红蓝方真实实体运动。通过统一映射规则,构建红蓝智能体身份标识和状态映射体系,红蓝双方的虚拟智能体可立即获取对方虚拟智能体的位置、速度、姿态等状态参数,保证红蓝的动作同步和战术协调,避免红蓝对抗行为脱节。

3.2.2 虚实时空同步与数据交互机制

时空精准同步是红蓝对抗虚实交互的前提,本文使用硬件时钟同步和软件算法补偿相结合的方式,可达到微秒级的时间同步。

(1) 时钟同步:用GPS授时和局域网时钟校准来使红蓝方物理实体层和虚拟孪生层基准时钟一致,消除基本时钟误差。

(2) 时延补偿:对红蓝数据传输、处理出现的通信时延、计算时延等自适应补偿,实时计算出数据传输的偏差并加以调整,使红蓝方虚实空间中的保持一致。

(3) 双链路通信架构:采用光纤反射、高速以太网等通信方式保证数据传输的稳定性和实时性,上行链路把红蓝方真实状况和环境数据传到虚拟层,用以孪生模型动态校准和场景更新,下行链路把虚拟层仿真指令传给物理实体层,驱动实机执行对抗动作。

3.2.3 红蓝复杂对抗环境虚实融合模拟

通过创建物理环境和博弈环境融合的模拟系统,处理红蓝对抗的环境不确定性,全面还原红蓝战场环境。1)物理环境融合,把采集到的风场、电磁干扰强度、地形遮挡等数据及注入虚拟环境中,动态调整虚拟环境模型参数,消除由于仿真本身造成的理想化偏差。2)建立博弈环境,蓝方“虚拟+孪生”集

群自主切换攻防战术，模拟出各种红蓝对抗手段（电子压制、协同突防、分层拦截等），红方“虚拟+孪生”集群做出动作，形成完整的红蓝闭环博弈对抗推演，保证对抗场景真实性及复杂性。

3.3 红蓝对抗验证流程规范

为保证红蓝对抗验证的可复现性、结果可比性，制定出标准化的验证流程，分为四个阶段：

（1）想定构建阶段：搭建红蓝虚实系统，校准红蓝模型，设置时空同步，设定红蓝对抗想定，确定对抗目标和任务、红蓝智能体数量、战术规则和效能评价指标。

（2）通信连接阶段：启动红蓝虚实系统，对红方蓝虚实智能体集群进行建模，并将红蓝节点置入初始对抗态势中，建立稳定可靠的通信连接，完成系统初始化。

（3）闭环对抗阶段：开始红蓝对抗推演，红蓝双方虚拟智能体和真实智能体同时做出进攻防御动作决策和实施，数据交互层使虚实数据实时同步，并实时采集红蓝之间的对抗态势、集群状态以及指令。

（4）效果评估阶段：整理全过程数据，构建红蓝对抗专

用评价体系，并对对抗效果进行量化分析，根据红蓝方算法、战术的不足提出改进方案，重复验证，形成闭环迭代。

4 验证方法应用价值与技术展望

4.1 应用价值

本文提出的一种多智能体飞行器集群红蓝对抗虚实交互验证方法，所构建的虚实仿真系统在提升飞行器集群作战性能、降低试验成本和缩短研制周期等方面效果明显，可以很好地模拟出红蓝对抗中各种干扰因素及集群协同特点。该方法给红蓝方飞行器集群对抗算法优化、战术推演、系统定型提供高可信度验证平台，填补了集群红蓝对抗虚实交互验证技术短板，有重要的工程应用价值。

4.2 技术展望

未来多智能体飞行器集群红蓝对抗的虚实交互验证技术可以从三个方面加深研究，即边缘计算和人工智能相结合来重构红蓝对抗场景并进行战术自主优化，创建跨域虚实交互平台，实现空、天、地、海等多域红蓝集群对抗验证，创建标准化红蓝对抗虚实交互验证体系，促使技术成果走向工程化落地和产业化应用。

参考文献：

- [1] 沈东,魏瑞轩,胡明朗.基于点状 β 智能体的飞行器集群避障控制方法[J].计算机工程,2010,36(09):184-186.
- [2] 陈运翔,苟明,张建平,等.基于多智能体近端策略优化的低空异构飞行器实时三维冲突解脱方法[J/OL].交通运输工程学报,1-15 [2026-03-24].<https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.092>.
- [3] 杨浅舒,阮迪望,吴先宇,等.多智能体强化学习在飞行器协同控制中的研究进展[J].战术导弹技术,2025,(04):90-106.