

引用格式:李耀宇,金帅,马满好,等.无人空战指控建模仿真方法研究[J].指挥控制与仿真,2024,46(1):85-92.LI Y Y, JIN S, MA M H, et al. Unmanned air combat oriented command and control simulation evaluation research[J]. Command Control & Simulation, 2024, 46(1): 85-92.

无人空战指控建模仿真方法研究

李耀宇¹, 金帅¹, 马满好¹, 任伟²

(1. 国防科学技术大学信息系统工程重点实验室, 湖南长沙 410073; 2. 31675 部队, 河北张家口 075001)

摘要:针对当前无人空战仿真中,缺乏支持全流程作战指挥控制建模与仿真这一问题,结合当前无人空战仿真系统相关研究,系统梳理和研究指控模型构建方法,通过探索不同仿真层级不同类型的无人机指挥控制建模原理和方法,设计并且构建了一套适合指挥信息系统装备特点的指控模型仿真系统。通过进行符合预设约束的理想设定,对目标作战任务进行了效能评估和对比,可为无人空战相关指挥信息系统装备的论证、评估方式提供理论和现实指导。

关键词:无人空战; 指挥控制; 仿真评估

中图分类号: E917

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2024.01.011

Unmanned air combat oriented command and control simulation evaluation research

LI Yaoyu¹, JIN Shuai¹, MA Manhao¹, REN Wei²

(1. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Unit 31675 of PLA, Zhangjiakou 075001, China)

Abstract: For the lack of command and control modeling principles and mechanisms in the current end-to-end campaign tactical level simulation for unmanned air combat, this paper systematically combs and studies the recent research in unmanned air campaign tactical simulation. Combined with the relevant research, this paper explored the principles and methods of different C2 modeling at different simulation levels and established a C2 simulation system suitable for the characteristics of CISE in unmanned air combat. Further, theoretical and practical guidance is provided for innovative demonstration and evaluation methods of CISE through the effectiveness evaluation support of unmanned air combat tasks.

Key words: unmanned air combat; command and control; simulation evaluation

当前无人武器,特别是无人机和作战系统的日趋复杂化,应用也日趋广泛。无人指挥信息系统装备如何融入作战体系、支撑作战任务发挥效能是当前急需解决的问题。如何通过仿真建模,评估无人空战指挥信息系统装备的效能以及如何评估无人空战指挥控制流程等,是当前研究的一个重点。

美军对于空战,以及相关的导弹战研究较早,以先进仿真集成与建模框架(EADSIM)和扩展防空仿真系统(AFSIM)最具代表性。扩展防空仿真系统(EADSIM)是支持空战、导弹战和空间战的多对多仿真系统,它向作战人员提供一整套的分析、训练和作战规划支持^[1]。EADSIM由作为美国导弹防御局(MDA)执行代理的陆军空间与导弹防御司令部(SMDC)建模与仿真司(MSD)未来战争中心(FWC)管理。先进仿真

集成与建模框架(AFSIM)可提供灵活的综合防空系统仿真能力,同时可进行作战研究、装备论证、模拟训练等领域的仿真实践。EADSIM和AFSIM是当前美军最成熟、应用最广泛的任务级仿真系统代表^[2]。

当前针对无人空战指挥控制仿真与建模的专项研究虽然不多,但是相关领域的研究,还是获得了一定的进展,文献[3]对基于群体智能的多无人机空战系统进行了研究,并针对飞机的空气动力学模型和飞机路径上的威胁区域进行了建模。文献[4]结合当前流行的深度学习和强化学习研究,提出一种无人机近距离空战格斗自主决策模型,采取并改进了奖励函数,避免了智能体被敌机诱导坠地的问题,同时可以有效引导智能体向最优解收敛。文献[5]提出一种分层决策多机空战对抗方法,根据战术动作类型设计分层动作决策网络,降低了动作决策空间维度,在多机空战仿真环境中进行了实验验证,比现有多机空战决策方法表现较好。

针对某些具体环节的研究和探索,研究人员都取得了比较好的成果,但还是缺乏一个能够在实现空战仿真建模基本功能的前提下,兼顾战争和武器装备的

收稿日期: 2023-03-31

修回日期: 2023-05-31

作者简介: 李耀宇(1984—),男,博士,副教授,研究方向为军事运筹、任务规划、建模与仿真。

金帅(1983—),男,硕士,工程师。

复杂性,模型与数据的组织调度高,支持全流程的建模仿真方法与系统。

本文通过研究现有仿真系统中的指控模型构建方法、指控模型作战指挥规则、信息流转关系、指令消息处理方法及运行调度机制,针对典型无人空战任务背景,设计并实现了一套指控仿真系统,聚焦仿真服务作战计划评估,实现人不在环仿真中不同指挥层级不同类型指挥所对完成典型作战任务的影响程度,达到从作战全流程场景设定下验证无人空战指控设定的有效性的。

1 系统架构设计

文献[6]根据 OODA 空战理论提出了仿真系统的功能要求,设计了仿真系统的工作原理、多层次模块化的技术方案和各功能模型之间的数据交互关系。该仿真系统模块化程度高,数据交互的实时性和稳定性强,能够为无人机空战战术决策算法的开发和验证提供高效可靠的支撑。

通过借鉴和学习当前空战相关仿真系统的架构,本文系统总体主要架构和核心组件如图 1 所示,主要包括三个主要部分:仿真准备、仿真运行和仿真分析。

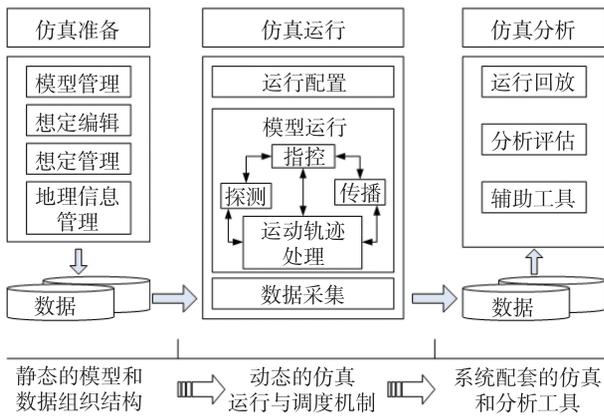


图 1 系统总体架构

Fig. 1 System architecture

仿真准备模块。提供模型管理、想定编辑/管理、地理信息管理等功能,重点支撑对仿真所需的静态模型和数据的组织和管理。

仿真运行模块。主要提供仿真引擎和调度(基于离散事件的调度机制),包括运动轨迹处理、指控、探测和传播;指控是整个运行模型体系的核心,模拟了各类指挥控制决策、航迹处理、消息处理,是实现交战管理和控制的核心模型;运动轨迹处理模块实现各类战场实体的运动模型;探测模型对各类传感器进行建模;传播模型模拟了通信链路的连通性,用以确定消息传递是否能够执行。

仿真分析模块。提供运行回放、分析评估和辅助分析工具,用以支撑仿真运行后的事后数据分析和评估。模型与数据组织结构如图 2 所示。

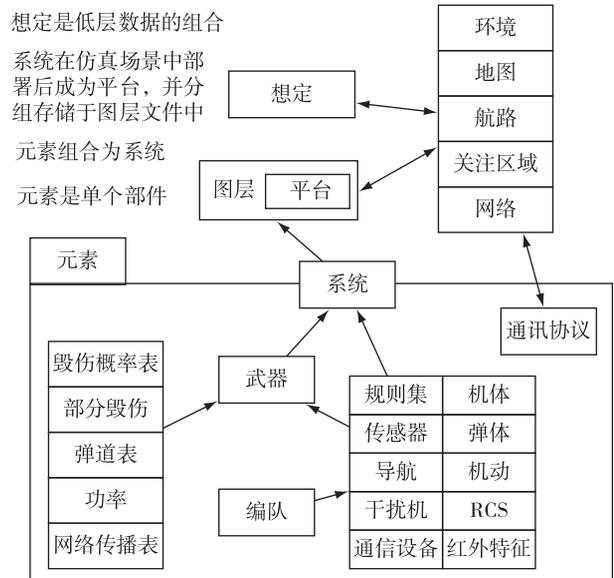


图 2 模型与数据组织结构

Fig. 2 Model and data organization

采用组件化建模思想,按照元素、系统和平台的层次结构,最终由平台与环境、地图、区域、航路、低空穿越航线、网络等要素共同构建完整的仿真实想定。元素模型是基础元模型,各元素组合增加部分参数构成系统模型,系统模型部署于想定场景之中即为平台模型。

2 指控建模

针对空战的指控建模,文献[7-8]提出了一些有价值的建设性方案,也提出了有价值的组织结构方式。结合之前的研究,本文系统仿真对象的行为模型通过规则集来控制,系统内置了规则集,可通过选择规则并设置相应阶段的控制参数,建立对抗双方战场实体的指挥、控制、通信、决策等规则模型。对于每一类规则集,总体结构相同,共分为 3 个模块:战斗管理、消息处理和航迹处理。

如图 3 所示,战斗管理阶段将参战平台的决策和交战过程划分为若干作战阶段进行管理,涵盖任务分配、决策或交战的一系列行为;消息处理模块决定了指定平台对其他平台发来消息的响应,这些信息反过来又会影响到作战管理阶段所执行的行为;航迹处理模块相对于规则集的其他两个模块来说相对独立,主要用于决定对航迹数据的处理。

规则集的组合可以形成柔性指挥所规则,基于柔性指挥所规则,可以自由搭配构建各级各类指挥所。仿真系统主要包含以下 3 类指挥决策模型:威胁评估



图 3 指控规则集总体结构

Fig. 3 C2 rule set architecture

模型、火力分配模型、冲突消解模型。上述模型主要用来模拟集中式架构指控系统基于作战飞机、防空反导武器系统、地地导弹系统等的作战指挥决策过程,作战对象包括敌作战飞机、战术弹道导弹、巡航导弹等。

2.1 威胁评估模型

威胁评估模型是系统的重要组成部分,相关研究也有一些进展,文献[9-10]提出了各自的解决方案,针对空战过程中多时刻态势信息,提出基于变权理论的态势权重解析方法,并结合基于正态累积分布生成时间序列权重的算法,解决了属性参数与权值动态匹配的问题,具备可行性和有效性。

综合前人的研究,威胁评估模型主要模拟 3 方面的功能:确定哪些目标具有威胁;评估对哪些威胁目标具有交战能力;对威胁目标进行优先级排序,作为火力优化分配的输入。

1) 威胁判定

仿真系统采用不同的方法判定敌战术弹道导弹、作战飞机、巡航导弹是否具有威胁性。对于战术弹道导弹,如果我方保护资产处于敌导弹预测弹着点为中心的毁伤区域内,则判定敌导弹为威胁目标。如图 4 所示,弹道导弹毁伤区域用一个长方形表示,其长宽由用户设定。对于同一优先级水平的战术弹道导弹,根据预测的导弹着地时间进行排序。导弹着地时间越早的紧急目标,优先级越高。

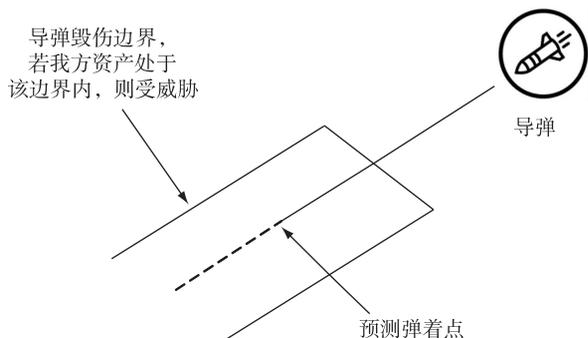


图 4 敌战术弹道导弹威胁判定

Fig. 4 Enemy tactical ballistic missile threat determination

对于作战飞机及巡航导弹,上级指令拦截的目标航迹直接认定为威胁目标;否则,通过用户设定的威胁距离致命距离两个参数来评估目标是否具有威胁。如

图 5 所示,目标具有威胁需满足以下两个条件:

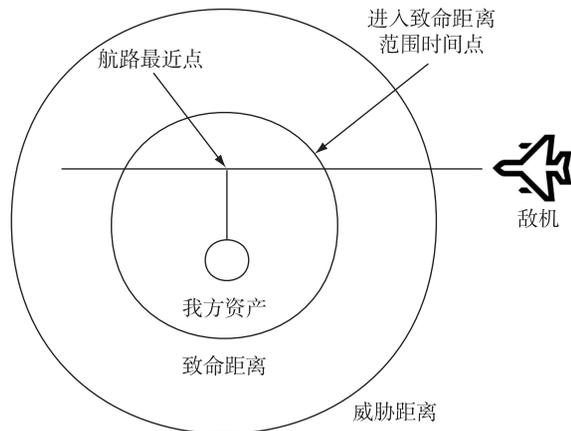


图 5 敌作战飞机威胁判定

Fig. 5 Enemy aircraft threat determination

- ① 目标到我方资产的地面距离进入威胁距离范围;
- ② 目标航路最近点到我方资产的地面距离小于致命距离。

航路最近点假设目标保持当前状态飞行,目标航路上距离我方保护资产最近的点。一旦目标越过并驶离航路最近点,将不再视为威胁。

如果目标已经进入致命距离范围,通过目标到我方保护资产的距离远近来比较威胁程度高低。定义威胁距离比=目标和资产地面距离/致命距离,威胁距离比越小,则威胁程度越高。如果目标在致命距离范围外,威胁距离范围内,通过预测的目标进入致命距离范围时间比较威胁程度高低,进入时间越早,威胁程度越高。

2) 拦截可行性约束

本文仿真系统中,用户可设置目标拦截评估距离、资产最小允许距离 2 个参数,用于触发目标拦截相关动作。如果威胁目标航迹进入拦截评估距离范围,则触发目标拦截点预测;如果预测拦截点在我方保护资产最小允许距离范围内,则判定威胁目标需拦截。

威胁目标是否具有可拦截性,需满足以下约束:

- ① 武器攻击包线约束:最大高度、最小高度、最大距离、最小距离、最大拦截距离。预测拦截点需要在拦截武器攻击包线内,才具备可拦截性。
- ② 传感器约束:视场范围、最大探测距离。如果拦截武器飞行过程中需要目标航迹,则目标需在提供目标航迹传感器视场范围、最大探测距离范围内,才具有可拦截性。
- ③ 角度约束:拦截武器的最大俯仰角、最小俯仰角、最大方位角、最小方位角。预测拦截点需要在拦截武器角度约束内,才具有可拦截性。

④拦截点约束:拦截时目标速度和拦截武器速度夹角、相对速度。拦截时需满足相对速度、夹角要求,才具有可拦截性。

⑤主动导引头照射角约束:主动导引头开机时刻,目标相对拦截武器位置矢量与预测拦截点相对拦截武器位置矢量的夹角。用来评估主动导引头开机后,是否能一直捕获目标。

⑥杀伤概率约束:用户定义杀伤概率门限。根据拦截武器性能参数以及预测的拦截点,计算此次拦截杀伤概率。若杀伤概率高于用户设定门限,才具有可拦截性。

⑦传感器资源约束:包括占空比、系统占用率等传感器资源。若为本次拦截提供交战支持的传感器资源不足,则不具可拦截性。

⑧地形遮挡:在交班前,传感器需要能够跟踪目标,将控制指令/目标航迹等传输给拦截武器,如果被地形遮挡,则不具可拦截性。

3) 预测拦截点计算

本文仿真系统假设拦截武器以直线匀速飞行或按照飞行表飞行;敌导弹按照既定弹道及速度飞行,敌作战飞机按照直线匀速飞行、或按照飞行表飞行。飞行表由用户提供,定义到达空间某位置所需飞行时间、到达该位置时的航向角及速度矢量等参数。不同类型武器装备具有不同飞行表,同一类型拦截武器可针对不同类型目标设置不同的飞行表。

拦截点计算方法:从探测到导弹的时刻 t_0 开始,首先,以 Δ_0 秒为迭代单元不断步进(Δ_0 初始值可设 1 秒),计算在第 i 步,导弹在 $t_i = t_0 + i\Delta_0$ 时刻的位置 $P(t_i)$,计算拦截武器及导弹到达 $P(t_i)$ 的时间差 Δ_i 。如果 Δ_i 大于 $\Delta_0(V_{in} + V_{im})/V_{in}$,则继续以 Δ_0 迭代推进,式中, V_{in} 为拦截武器速度, V_{im} 为弹道导弹速度;否则,重新以 t_{i-1} 为起始时刻,以原始迭代单元的一半, $\Delta_0/2$ 秒为迭代单元推进。重复以上过程,直到某 t_n 时刻,拦截武器及导弹到达位置 $P(t_n)$ 的时间差 Δ_i 小于用户设定拦截误差门限 Δ_r (系统默认值为 0.15 s),则拦截时间为 t_n ,拦截点位置为 $P(t_n)$ 。

整个拦截过程需满足武器攻击包线、传感器等约束,否则,不具可拦截性。同时,考虑了武器发射平台的初始速度、发射准备时间、拦截武器最大飞行时间等因素对拦截时间及拦截点的计算的影响。

4) 威胁排序

仿真系统提供两种威胁排序方法:基于资产威胁排序;基于资产及目标交战优先级威胁排序方法。

①基于资产威胁排序:基于资产威胁排序是一种多层次分类排序的方法。如表 1 所示,第一层排序,设

定 6 种威胁类型,将目标按照威胁类型归类。第一栏由上到下,各类型目标威胁程度依次递减。属于同一种威胁类型的目标,根据下一层排序中相应评估指标进行分类及排序。

对平台自身构成威胁的敌战术弹道导弹具有最高优先级,按照预测着地时间先后排序,撞地时间越早优先级越高。对于上级命令拦截的敌战术导弹,按照接收到任务命令时间先后排序,以体现上级指挥官对敌目标优先级排序、作战意图,接收任务命令时间越早优先级越高。同理,对于上级命令拦截的敌作战飞机,包括战斗机、轰炸机等,也按照接收到命令时间先后排序。

对平台所辖资产构成威胁的目标,首先,按照我方资产高、中、低 3 个保护优先等级,将威胁目标分为相应 3 个拦截优先级水平;其次,同一优先级水平中,战术弹道导弹目标优先级高于作战飞机目标。如果有多枚导弹,按照预测着地时间先后排序。如果有多架敌作战飞机,位于致命距离范围内目标优先级高于该距离范围外目标;致命距离范围内目标按照相对我方保护资产距离排序,距离越近,优先级越高;致命距离范围外目标按照进入该距离范围预测时间前后排序,越早进入优先级越高。

表 1 多层次分类排序方法

Tab. 1 Multi-level classification method

第一层	第二层	第三层	第四层
威胁自身导弹	弹着地时间		
上级命令拦截导弹	接收任务命令时间		
上级命令拦截飞机	接收任务命令时间		
对我方保护资产构成威胁	战术导弹威胁 作战飞机威胁	弹着地时间 致命距离范围内 致命距离范围外	威胁距离比 进入致命范围时间
导弹防御区威胁	导弹防御区优先级	弹着地时间	
飞机防御区威胁	与我方资产的距离		

不对我方任何资产构成威胁,但弹着点落入平台导弹防御区的敌战术弹道导弹,首先,根据各弹道防御区优先级排序,其次,落入同一优先级导弹防御区的导弹,按照着地时间先后排序,着地时间越早优先级越高。不对我方任何资产构成威胁,但进入我方飞机防御区/地空导弹交战区的敌作战飞机,根据距离我方资产排序,越近优先级越高。

②基于资产及目标交战优先级威胁排序:基于资产及目标交战优先级威胁排序方法,在资产威胁排序方法的基础上,增加目标交战优先级这一评估指标。在使用弹着地时间、接收任务命令时间、威胁距离比、致命距离范围进入时间评估指标进行威胁排序前,首先使用目标交战优先级排序。

目标交战优先级的定义,需综合考虑威胁目标类型、目标情报数据质量。同一目标类型,目标情报数据质量越高,则交战优先级越高。目标情报数据质量由情报收集分析中心实体提供,经过情报侦察数据融合处理。

按目标交战优先级由高到低,定义了 H++、H+、H、M、L+、L-、DS 7 个优先级类别。H++为特殊优先级类别,在所有情况下,该类别威胁目标具有最高优先级。H+优先级类别,如果目标在平台及所辖资产威胁距离范围内,具有最高优先级。H、M、L+ 3 类优先级,致命距离范围内、外目标各自按 H、M、L+ 类别排序;但是,致命距离范围内 H、M、L+ 类目标优先级高于致命距离范围外 H、M、L+ 类目标。L- 优先级,交战最低优先级类别。DS 优先级代表不可交战目标类别,用来对极低价值目标或非战斗装备进行交战限制。

2.2 火力分配模型

对于火力分配模型相关的研究,文献[11]为求解远程火力打击方案优化问题,设计一种基于剪枝的改进遗传算法,文献[12]对小精灵无人机作战运用进行了分析,建立了蓝军小精灵无人机火力分配模型,以最大化目标毁伤为目标函数,使用蜂群算法进行了求解,为研究蓝军作战问题提供参考。

本文系统采用的火力分配模型,根据威胁排序结果,选择高威胁等级目标分配给从属作战单元进行拦截。根据用户设置的火力优先级评估方法,按照目标威胁等级由高到低的选择顺序,将威胁目标分配给最优从属作战力量的最优拦截武器。用户可为各类型作战单元设置一次可分配最大目标数。

如表 2 所示,系统目前提供的火力分配优先级评估指标包括拦截方式、拦截时间、拦截发射时间、拦截武器飞行时间、杀伤概率、拦截武器类型、雷达照射支持、弹药库存量、射击机会等。用户可为这些评估指标设置优先级和门限值。若多个火力单元满足同一优先级评估指标门限值要求,则可通过次级指标进行火力单元优先级排序。

火力分配模型可选择的作战力量主要包括地面防空反导系统,各型防空作战飞机等;下级指挥所及其所辖作战力量作为整体参与目标分配,所分配到的目标由该指挥所进一步分配给从属作战力量。相较于下级

指挥所,目标优先分配给指挥所直属防空反导力量或防空作战飞机。

仿真系统在选择最优拦截武器时,首先,需检查拦截可行性;其次,对于地空拦截武器,拦截前提是敌作战飞机航迹需进入其交战区或责任区,敌弹道导弹预测弹着点需落入地空拦截武器关联的导弹防御区;对于防空作战飞机,拦截前提是威胁目标航迹需进入其交战区或责任区,还需考虑载油量是否足以支撑完成拦截任务。

表 2 火力优先级评估指标

Tab. 2 Fire priority evaluation metrics

评估指标	指标说明
拦截方式	包括地面拦截优先,空中拦截优先 2 种
拦截时间	包括最早拦截时间、最晚拦截时间优先 2 种
发射时间	包括最早发射时间、最晚发射时间优先 2 种
飞行时间	最快拦截武器优先
杀伤概率	包括最高默认杀伤概率、最高实际杀伤概率两种。实际杀伤概率根据预测拦截点,查询杀伤概率表获得
武器优先级	为拦截武器定义优先级,火力单元按其所使用的拦截武器的优先级进行排序
雷达照射支持	具有雷达照射支持的火力单元优先
弹药库存量	包括高弹药库存、低弹药库存优先 2 种
武器更换	拦截同一目标,需更替使用拦截武器

仿真系统允许将同一个威胁目标分配给多个地导发射单元。发射单元数量依据威胁目标类型设定,根据数量依次选择拦截该威胁目标的最优、次优等发射单元。对于防空作战飞机,威胁目标会首先分配给长机;其次,以威胁目标为中心,将用户设定编组距离内,且满足相对速度和航向角度约束的威胁目标作为目标组,然后,根据火力优先级评估方法,选择一组作战飞机前去拦截该目标组。拦截战机编队数量与目标组数量成正比,比值由用户设定。如果拦截飞机距拦截点比较远,到达拦截点所需时间很长,用户可选择是否允许地导系统在拦截飞机飞行过程中伺机拦截威胁目标。

2.3 冲突消解模型

文献[13]针对机动作战任务过程中,有限资源处置中出现冲突的问题,从概念逻辑出发,在约束条件下,构建了合理的资源冲突消解数学模型,结合实际,提出了不同的冲突消解求解策略,并利用实例分析求解,最终找到最优的模型解策略,为应用提供了参考借鉴。

本系统指控节点基于从属作战力量的交战报告进行冲突消解。各类作战实体,包括地面防空反导系统、作战飞机等,在执行武器分配、跟踪锁定目标、准备发

射导弹、发射导弹等动作后,都会向上级指控节点发送报告,该类报告统称为交战报告。交战报告包含发送报告平台、交战动作类型、拦截目标、拦截武器类型、武器发射准备时间、武器发射时间、杀伤概率、拦截时间等信息。当 2 个以上从属作战实体都准备与同一个威胁目标交战时,需要进行冲突消解。

本文系统提供 4 种冲突消解方法供用户选择:

1) 首战优先:第一个向上级指挥官报告准备与该威胁目标交战的作战单元优先,指挥官一旦收到后续针对该目标的交战报告,即向消息源作战单元发送停止交战命令。

2) 最早拦截优先:具有最早拦截能力的作战单元优先。

3) 高杀伤概率优先:根据拦截武器类型、到威胁目标距离,威胁目标离轴方位俯仰角等参数,计算杀伤概率。杀伤概率高的作战单元优先。

4) 多层次优先级排序:和火力分配使用相同的一组优先级评估指标,用户可为这些评估指标设置优先级和门限值。优先级高的作战单元优先。若多个作战单元满足同一优先级评估指标门限值要求,则可通过次级指标进行作战单元之间的冲突消解。

处于同一协同交战编组且相互之间信息连通的地导作战单元,可以不通过上级指控节点,自行进行冲突消解。同一协同交战编组的所有地导作战单元,使用优先级设置和门限值相同的一组优先级评估指标,各自进行多层次优先级排序,然后交换交战优先级数据,优先级最高者执行交战,优先级低者自行停止交战。

3 无人机防空反导仿真案例

3.1 作战想定

蓝方组织海上力量,对红方某军事目标实施火力打击。红方准确判断敌人动向,积极部署应对,以信息系统为核心构建高效联动防御体系,组织对蓝方来袭导弹的有效拦截,挫败其企图。

1) 蓝方主要作战力量。F-1 型飞机 4 架和 F-2 型无人机 12 架。

2) 红方主要作战力量。无人机(J-1、J-2 型飞机等)外线部署,进袭要点封控;地防力量(C 型)要地布控;预警力量(L-1 型雷达、L-2 型雷达、预警机 Y 型等)尽远发现、精准预警、连续跟踪。

3) 任务想定。本次试验重点评估指控流程的改变对整个作战体系的支撑情况,以及对整个作战效能的影响。

想定 1:预警机为指挥所提供情报态势,作为指控的情报支撑,指挥模式:各类传感器将探测收集到的目

标情报态势发送至空情中心或海情中心并报指挥所提供情报支撑。

想定 2:预警机直接为地导部队和战斗机编队提供情报态势支撑。

想定中涉及的红方侦察类装备能力参数如表 3 所示。

表 3 红方侦察类装备能力参数

Tab. 3 Reconnaissance equipment capability parameters of red corner

装备名称	机动速度/ kn	扫描频率	最大探测 距离/km	探测 精度	扫描范围/ (°)
Y 型预警机	300	6	470	25	360
L-1 型雷达	0	6	100	20	120
L-2 型雷达	0	6	100	20	120

想定中涉及的红方决策类装备能力参数如表 4 所示。

表 4 红方决策类装备能力参数

Tab. 4 Decision-making equipment capability parameters of red corner

装备名称	决策时间/ s	吞吐量/ 条	可视化能力
指挥所	6	150	1
空情中心	2	120	0.95
海情中心	2	120	0.8

想定中涉及的红方影响类装备能力参数如表 5 所示。

表 5 红方影响类装备能力参数

Tab. 5 Impact equipment capability parameters of red corner

装备名称	机动速度/ kn	作战半径/ km	打击精度	有效射程/ km	载弹量	武器装填时间
J-1	1 326	1 000	0.55	33	8	—
J-2	1 553	1 500	0.65	33	8	—
C 型地导	0	200	0.65	200	15	500

想定中涉及的红方装备通信能力参数如表 6 所示。

3.2 仿真评估

针对评估要求,作者基于本文设计实现的仿真系统分别制作了 2 个想定,每个想定随机运行 20 次(其中导弹发射数和命中数均是指 20 次仿真结果的总值,平均完成任务时间是完成所有拦截任务相对仿真时间,任务耗时为战斗机或地导完成第一次交战和最后

一次交战之间的时间间隔)。由于预警机部署位置不一样,想定1和想定2在对目标探测时间和距离上是一样的,因此取两者的平均值作为最后的探测统计结果,仿真结果如表7和表8所示。

表6 红方装备通信能力参数

Tab. 6 Communication capabilities parameters of red corner

装备名称	通信覆盖范围	传输速率	误码率	通信容量	通信延迟
指挥所	1 200	120	0.01	500	1.2
空情中心	1 000	50	0.02	300	1.5
海情中心	1 000	50	0.02	300	1.5
Y型预警机	500	100	0.01	250	1.4
L-1型雷达	100	30	0.05	100	1.5
L-2型雷达	110	35	0.05	110	1.6
J-1型飞机	1 500	40	0.08	80	2.3
J-2型飞机	2 000	40	0.08	80	2.3
C型地导	100	50	0.06	120	0.9

表7 仿真结果统计1

Tab. 7 Statistics of simulation results 1

想定	战斗机交战情况			
	击毁蓝方飞机数量	成功率	平均完成任务时间/s	完成任务平均耗时/s
想定1	7	0.534 6	1 180.07	180.22
想定2	10	0.681 8	11 31.94	110.28

表8 仿真结果统计2

Tab. 8 Statistics of simulation results 2

想定	地导部队交战情况				
	发射导弹数量	成功命中目标数量	成功率	平均完成任务时间/s	完成任务平均耗时/s
想定1	34	3	0.663 0	1 258.50	625.97
想定2	26	2	0.711 1	1 227.34	573.32

仿真系统假设及约束条件:1)武器装备功能性能参数不是实际装备参数,仅根据仿真需求自定义的相关参数,本论文旨在提供开展指控仿真的方法和流程,案例不具备实际作战意义;2)本系统重点评估不同作战指挥流程对作战任务完成的效能情况,并不对装备的组网能力、应用方式等方面进行评估和验证。

想定1与想定2比较,当预警机直接为地导部队和无人飞机提供情报支撑时,则对无人飞机和地导部队在作战时间指标下的贡献率分别为

$$\frac{180.22-110.28}{110.28} \times$$

$100\% = 63.42\%$ 和

$$\frac{625.97-573.32}{1 173.32} \times 100\% = 4.49\%$$
,在整

体作战效能下的贡献率分别为

$$\frac{68.18\%-63.46\%}{63.46\%} \times$$

$100\% = 7.44\%$ 和

$$\frac{71.11\%-66.3\%}{66.3\%} \times 100\% = 63.42\%$$
。

3.3 仿真结果分析

当指挥所分别使用2种不同的指挥模式时,预警机直接支撑作战单元作战较间接支撑其作战,对无人飞机和地导部队在作战时间指标下的贡献率分别为63.42%和4.49%,平均贡献率为33.955%,在作战效能上(即拦截成功率)的贡献率分别为7.44%和7.25%,平均贡献率为7.345%。仿真结果说明,不同指挥模式对无人飞机的作战时间效能上有了显著提升,这说明飞机可以利用预警机获得更多目标态势信息从而进行更大范围的机动拦截,进而提升完成任务的效率;但对地导部队没有显著提升,这说明地导部队的武器防御范围是固定的,而且从仿真结果来看防御时间跨度长,导致虽然完成任务时间缩短较多,但是总体的作战效能提升率并不高。

4 结束语

本文在分析了无人指控空战建模仿真相关领域研究成果的基础上,针对当前缺乏对无人指控空战整体流程效能评估方法和系统缺失这个问题,借鉴和综合研究人员在各个独立功能点上所取得的研究成果的基础上,设计并实现了一套功能流程基本完备,功能基本完整的建模仿真系统,并在此系统上进行了仿真对抗实验,实验结果表明,系统的仿真结果和数据在约束条件下,符合预期,能够支持对完整作战流程设定的效能评估。

仿真系统虽然整体流程上能够形成一个完整的闭环,但是系统内每个模块并不能够很理想地支持所需要的功能,未来需要对其中的重要功能模块进行进一步完善,包括完善规则集,引入规则集之外的,结合深度学习和强化学习的智能代理模式等,才能够使系统能够更加准确地对作战效能进行评估。

参考文献:

- [1] 唐忠,魏雁飞,薛永奎.美军EADSIM仿真系统机理与应用分析[J].航天电子对抗,2015,31(3):25-29.
TANG Z, WEI Y F, XUE Y K. Mechanism and application of EADSIM system of U.S.army[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2015, 31(3): 25-29.
- [2] 常非.美军主要推演和仿真系统模型体系与建模机制研究[J].军事运筹与系统工程,2015,29(2):75-80.
CHANG F. Research on model system and modeling

- mechanism of main deduction and simulation system of US army[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2015, 29(2): 75-80.
- [3] 周文卿,朱纪洪,匡敏驰.一种基于群体智能的无人空战系统[J]. *中国科学:信息科学*, 2020, 50(3): 363-374.
ZHOU W Q, ZHU J H, KUANG M C. An unmanned air combat system based on swarm intelligence[J]. *Scientia Sinica(Informationis)*, 2020, 50(3): 363-374.
- [4] 周攀,黄江涛,章胜,等.基于深度强化学习的智能空战决策与仿真[J]. *航空学报*, 2023, 44(4): 99-112.
ZHOU P, HUANG J T, ZHANG S, et al. Intelligent air combat decision making and simulation based on deep reinforcement learning[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(4): 99-112.
- [5] 王欢,周旭,邓亦敏,等.分层决策多机空战对抗方法[J]. *中国科学:信息科学*, 2022, 52(12): 2 225-2 238.
WANG H, ZHOU X, DENG Y M, et al. A hierarchical decision-making method for multi-aircraft air combat confrontation[J]. *Scientia Sinica(Informationis)*, 2022, 52(12): 2 225-2 238.
- [6] 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 S Q, XIE L, WANG Y, et al. Design and implementation of UAV autonomous air combat tactical decision simulation system[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(21): 272-278.
- [7] 万开方,高晓光,魏小丰,等. HLA 机群协同空战下指挥与控制系统建模与仿真[J]. *火力与指挥控制*, 2011, 36(9): 23-26, 30.
WAN K F, GAO X G, WEI X F, et al. Modeling and simulation of command and control system based on HLA technology in the cooperative air combat[J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(9): 23-26, 30.
- [8] 陈军,高晓光.机群协同空战中的指控系统建模与分析[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(10): 195-198.
CHEN J, GAO X G. Modeling and analysis of command and control system in cooperative air combat [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(10): 195-198.
- [9] 越凯强,李波,范盘龙.基于三支决策的飞机空战机动决策方法[J]. *计算机应用*, 2022, 42(2): 616-621.
YUE K Q, LI B, FAN P L. Air combat maneuver decision method based on three-way decision[J]. *Journal of Computer Applications*, 2022, 42(2): 616-621.
- [10] 张堃,张振冲,刘泽坤,等.基于 FD-TODIM 的混杂空战多目标动态威胁评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(1): 148-154.
ZHANG K, ZHANG Z C, LIU Z K, et al. Multi-target dynamic threat assessment in mixed air combat based on FD-TODIM [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(1): 148-154.
- [11] 季顺松,黄炎焱,张寒,等.基于改进遗传算法的火力分配寻优模型研究[J]. *南京理工大学学报*, 2023, 47(1): 33-40.
JIS S, HUANG Y Y, ZHANG H, et al. Research on optimization model of firepower allocation based on improved genetic algorithm[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2023, 47(1): 33-40.
- [12] 荣明,贺鹏,冯钊.基于蜂群算法的蓝军小精灵无人机火力分配模型研究[C]//第十届中国指挥控制大会论文集(上册).北京,2022: 865-869.
- [13] 张筭,朱昱,杨明映,等.机动作战中资源冲突消解模型构建及求解策略[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(2): 79-84, 90.
ZHANG S, ZHU Y, YANG M Y, et al. Model construction and solution strategy of resource conflict resolution in mobile operation[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(2): 79-84, 90.
- [14] JAAFAR H, MOHAMED Z, AHMAD M, et al. Control of an underactuated double-pendulum overhead crane using improved model reference command shaping: Design, simulation and experiment (Article) [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 151(1): 107 358.
- [15] TUAN L A. Fractional-order fast terminal back-stepping sliding mode control of crawler cranes[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019(137): 297-314.
- [16] SUN N, YANG T, FANG Y C, et al. Transportation control of double-pendulum cranes with a nonlinear quasi-PID scheme: design and experiments[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(7): 1 408-1 418.
- [17] YANG T, SUN N, CHEN H, et al. Observer-based nonlinear control for tower cranes suffering from uncertain friction and actuator constraints with experimental verification[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(7): 6 192-6 204.
- [18] SHI L K, PEI Y, YUN Q J, et al. Agent-based effectiveness evaluation method and impact analysis of airborne laser weapon system in cooperation combat[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(4): 442-454.

(责任编辑:胡前进)