

doi: 10.7690/bgzdh.2024.06.011

面向多目标的弹药智能任务规划系统研究综述

李伟光, 陈 栋

(陆军炮兵防空兵学院高过载弹药制导控制与信息感知实验室, 合肥 230000)

摘要: 针对现代高技术战争中多目标、多弹种、多层级指挥决策困难和弹药使用效费比低的问题, 提出基于多目标的弹药智能任务规划系统。阐述系统基本思想和工作流程, 重点分析弹药智能任务规划系统相关关键技术及算法的研究现状, 并对算法优缺点进行分析比较, 指出当前研究存在的薄弱环节, 提出发展展望。结果表明, 该研究对解决后续相关问题具有一定参考意义。

关键词: 多目标; 弹药; 智能任务规划; 威胁分析; 目标分配

中图分类号: TJ41 **文献标志码:** A

Review of Multi-target-oriented Intelligent Mission Planning System for Ammunition

Li Weiguang, Chen Dong

(Laboratory of Guidance Control and Information Perception Technology of High Overload Projectiles, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230000, China)

Abstract: Aiming at the problems of multi-target, multi-type of ammunition, multi-level command decision-making and low cost-effectiveness ratio of ammunition use in modern high-tech warfare, an ammunition intelligent mission planning system based on multi-target is proposed. The basic idea and work flow of the system are described, and the research status of the key technologies and algorithms related to the ammunition intelligent mission planning system are analyzed, and the advantages and disadvantages of the algorithms are analyzed and compared, the weak links of the current research are pointed out, and the development prospects are put forward. The results show that the study has a certain reference significance for solving the follow-up related problems.

Keywords: multi-target; ammunition; intelligent mission planning; threat analysis; target assignment

0 引言

随着科学技术的不断进步, 现代战争已经发展到系统、体系和信息的对抗, 战争伊始将对敌方重要军事设施展开打击, 新的战争形态和新技术的发展促使弹药的信息化、智能化、体系化能力不断提升。在近几年局部战争中, 弹群协同联合作战崭露头角, 既做到了弹药之间的优势互补, 又实现了整体打击的效能倍增。在实战环境中, 打击目标众多、弹药种类多元、战场环境复杂多变, 对作战计划的科学拟制、可用资源的优化调度、整体进程的精准调控提出了更高要求, 指挥员及指挥机关将面临前所未有的压力。智能任务规划系统的出现让弹药有了灵魂和大脑, 计算方式由人算变机算, 作业方式由手工变键盘, 信息传递由延时变实时或近实时, 大大加快筹划作业速度、缩短筹划决策进程; 因此, 研究弹药智能任务规划系统可有效提高指挥员决策速度和准确性, 有利于发挥弹药作战运用的最佳火

力效能, 对打赢智能化、信息化战争有着十分重要的意义。当前, 国内外针对弹药任务规划系统研究较少, 通过查阅相关文献, 仅有美国的战斧巡航导弹任务规划系统、俄罗斯的花岗岩反舰导弹任务规划系统, 国内主要集中于理论和算法层面, 还需持续研究探索。

1 弹药智能任务规划系统的概念及思路流程

1.1 弹药智能任务规划系统概念

弹药智能任务规划系统是指针对目标威胁程度, 综合分析敌方目标特点、防御措施、战场环境, 结合我方弹药特点、打击能力、运用环境, 科学判断打击目标, 编配弹药使用方案, 进行毁伤效果评估, 使打击任务成功概率和弹药运用效能最大化的一套包含硬件、软件、模型和数据的作战信息系统^[1]。通过弹药智能任务规划系统可迅速制定出弹药编配使用方案, 与以往人工拟制方案相比, 既加快了速度, 又提高了准确度。

收稿日期: 2024-02-23; 修回日期: 2024-03-25

第一作者: 李伟光(1988—), 男, 吉林人, 硕士。

1.2 基本思路流程

弹药智能任务规划的基本思路是将多种弹药通过任务规划系统协同控制，通过研判各目标威胁程度，智能进行目标分配，在实施打击过程中弹药之间相互配合协作，共同执行作战任务，完成单个弹药无法完成的作战任务，最大限度地发挥弹药群体打击效能。

弹药智能任务规划系统基本工作流程如图 1 所示，当系统接收到上级指挥信息系统指令后，迅速对需打击目标进行威胁分析，列出目标优先级，确定打击顺序；而后通过弹药与打击任务之间的映射关系进行目标分配，根据打击目标的毁伤程度确定弹药用量；同时，将不同种类弹药进行混合编配，使其实现既能侦察又能多重打击的目的。对目标按既定方案完成打击后，迅速进行毁伤效果评估，如果达到预期毁伤效果，则打击任务完成；如果没达到预期毁伤效果，需重新进行威胁分析，按上述流程继续实施打击，直至完成目标打击任务。

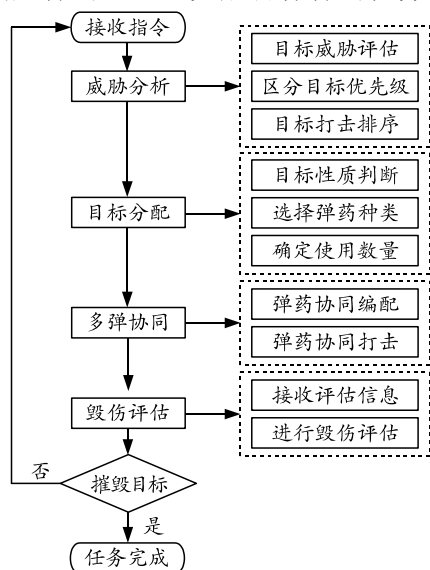


图 1 任务规划系统工作流程

2 关键技术及相关算法国内外研究现状

2.1 目标威胁分析研究现状

目标威胁分析是对敌方目标的威胁意图、杀伤能力、对抗能力以及对我方威胁程度的估计^[2]。针对目标威胁分析的算法研究国内外专家和学者均作了大量的探索和实践。当前研究已从单一目标向多目标转变，从空中目标向海上、陆地、空间等多领域目标转变，从静态分析向动态分析转变，从理想环境向复杂不确定环境转变，研究状态基本可以满足作战需求，但距精准威胁分析、打赢未来战场还

有一定差距。目前国内用于解决目标威胁分析的方法主要分为基于数学解析模型的定量计算和机器学习推理的威胁分析方法 2 大类。

2.1.1 基于数学解析模型的定量计算方法

数学解析模型的定量计算威胁分析方法是完全依靠数学模型的定量计算来实现的，通过将威胁指标量化处理、分配权重、数据融合、威胁排序过程，得出目标威胁分析结果。其特点在于模型的适应性较强，计算快速简单，但评估模型依靠人工构建，受人的主观因素影响较大。常见的有多属性决策法^[3]、模糊集方法^[4]、灰色关联分析法^[5]等。多属性决策理论善于处理多个威胁目标、多种威胁属性数据，计算简单便捷，但评估时效性不高，不适用于战场动态目标评估。模糊集方法善于处理不确定的目标属性，但目标增多时不易确定隶属度函数，实现较为困难。灰色关联分析法不严格要求样本量大小，分析时无需典型的分布规律，但其无法反应动态要素变化对威胁度的影响，导致评估不准确。

2.1.2 基于机器学习推理方法

机器学习推理的威胁分析方法是利用人工智能相关思想，使模型拥有自适应、自学习、自推理能力，通过对数据训练、逐层推理，最终得到威胁状态。其特点在于需引入专家的知识，凭经验建立推理网络，运算过程与生物的神经网络相似，但运算结果容易陷入局部最优。常见的有神经网络法^[6]和贝叶斯网络法^[7]。神经网络法具有良好的自适应、自学习能力和高度非线性映射能力，但其普适性差，需要较多样本训练，容易陷入局部最优，并且训练样本数据过于理想化，难以满足实战要求。贝叶斯理论能够较好地描述威胁评估中众多因素之间的关系，还可以反映威胁评估的连续性和累积性，是目标威胁分析应用最多的方法。

贝叶斯网络法是基于概率分析和图论的一种不确定性推理模型，并通过一个有向无环图来表示。该方法利用先验概率确定目标的威胁程度，得到的威胁评估结果既反映了当前信息又综合了事件的先验知识，量化描述了目标威胁评估过程。在复杂战场条件下，影响敌方目标威胁程度的属性因素有很多，通常主要考虑状态属性、能力属性、动态属性 3 方面。其中状态属性主要包括目标是否处于工作状态，是否准备对我实施攻击等；能力属性主要包括目标的类型、打击能力、抗干扰能力、机动能力

等；动态属性主要包括目标的距离、方位、速度等实时变动的信息。根据贝叶斯网络法，建立基于贝叶斯网络的威胁评估指标体系，如图 2 所示。

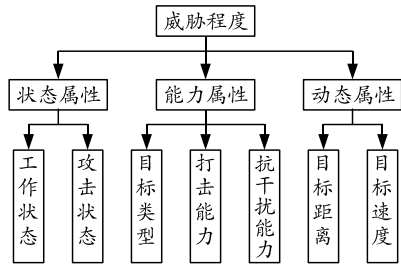


图 2 目标威胁评估指标体系

根据专家对关联节点因果关系的认知，建立条件概率矩阵，考虑条件概率矩阵的确定有一定的人为影响，可以通过反复调试样本数据的方法适度修正矩阵数据，以提高威胁评估的准确性。为进一步提高贝叶斯网络法实用性，不少学者对其进行了改进。侯夷等^[8]针对传统的贝叶斯网络不能将时间因素对评估结果的影响反映到模型中去的问题，提出动态贝叶斯网络，根据专家知识和历史样本数据设置模型参数，引入时间因素，使模型适应战场实时变化要求。杨爱武等^[9]针对贝叶斯网络不能满足条件独立性假设的问题，提出一种基于加权动态云贝叶斯网络的目标威胁评估模型，结合云模型良好的知识表达能力，将连续观测变量划分不同的区间离散化，通过加权方式弱化贝叶斯网络条件独立假设性。孟光磊等^[10]针对贝叶斯网络不具备不确定性推理能力的问题，提出一种基于混合贝叶斯网威胁评估模型，将主观经验和客观数据进行连续型网络参数学习，提高了模型的准确性。

综上所述，目标威胁评估的方法各具特点，分别适用于不同的作战领域，但受战场环境复杂、数据测量困难等因素影响，很难确保接收信息的准确度和威胁评估实时性的要求，任何方法都不能保证评估结果完全准确。常见的威胁评估方法适用领域与优缺点如表 1 所示。

表 1 目标威胁分析方法对比

方法	目标数量	优越性	局限性
多属性决策法	单/多目标	计算便捷、迅速	以静态评估为主，时效性不高
模糊集方法	单/多目标	善于处理不确定信息	只能表示单一隶属度
灰色关联分析法	单/多目标	不要求样本量大小	动态要素在时间维度上的变化体现
神经网络法	单/多目标	分析简单具有较强的自学习能力	不充分、易陷入局部极值
贝叶斯网络法	单/多目标	准确度高、准确率高、鲁棒性强	需依据历史经验和专家知识建立模型

2.2 目标分配研究现状

多目标弹药分配问题是如何把不同毁伤能力和经济价值的弹药，分配到不同威胁态势和性质的目标，从而达到毁伤效果最大、我方重要目标损失最小以及弹药消耗成本最低的目的。国内外学者对目标分配问题研究起步较早，相关模型较为成熟。传统的目标分配有枚举、割平面、分支界定、遍历搜索等方法^[11]，但上述方法当目标增多时计算量庞大，求解十分困难，逐步退出历史舞台。智能优化算法对目标函数的凸性、连续性和解析表达式要求较低，在相当一段时间内被广泛研究与应用，比较代表性的算法有遗传算法^[12]、蚁群算法^[13]、模拟退火算法^[14]、粒子群算法^[15]等，这些算法虽然具有较好的实用性，但随着战争模式的转变，也逐渐暴露出问题，被衍生出来的融合算法所取代，各算法的优缺点如表 2 所示。

表 2 目标分配智能优化算法对比

方法	优越性	局限性
蚁群算法	鲁棒性好、可信度高、易于同其他优化算法结合	收敛速度较慢、实时性较差
遗传算法	具有良好的全局搜索能力、自适应能力	迭代时间长、容易过早收敛
模拟退火算法	初值鲁棒性强，通用性好，容易实现	全局搜索能力较弱，限于求解小
粒子群算法	参数少，快速收敛于最优解，易于实现	规模组合优化问题易陷入局部最优，且实时性较弱
人工神经网络算法	并行分布处理能力，容错性好	容易陷入局部极小，有时得不到稳定解，甚至网络不收敛
禁忌搜索算法	能通过局部邻域搜索确保局部最优	其对初始解具有较强的依赖性全局寻，优能力偏弱，且搜索过程是单进程操作

当前目标分配问题研究已从单一任务分配向复杂多任务分配转变，从静态计划分配向动态即时分配转变，从动态战场条件向对抗条件下转变。随着信息技术和人工智能的迅猛发展，基于神经网络的动态目标分配算法使弹目分配问题更迅速、更精准、更匹配。

假设战场上有 N 个敌方目标，我方有 M 种不同类型弹药，每个目标需要一种或多种弹药实施攻击，假设目标之间不存在互相依赖关系。如图 3 所示， $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ 为 N 个目标集合， $\{att(T_k), def(T_k)\}$ 为打击第 K 个目标所需的攻击能力和突防能力， $U = \{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ 为多类型弹药集合， $\{att(U_s), def(U_s)\}$ 为第 S 类型弹药具备的攻击能力和突防能力，依据上述数据能构建出弹药与目标的映射关系。

采用基于神经网络的动态目标分配算法,可将仿真、专家知识、机器学习结合起来,生成大样本量的仿真数据,采用多层神经网络对样本数据进行学习,建立弹药与目标分配函数,形成智能化的弹目分配模型。利用该模型可以针对大量的来袭目标进行快速的决策判断和进行较为准确的目标分配。

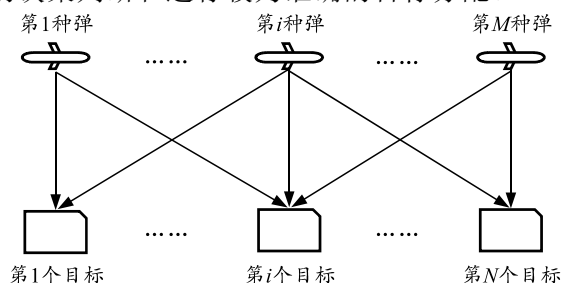


图3 多弹对多目标分配

关于目标分配问题有一些较新的方法,邱少明等^[16]提出一种改进的鲸鱼优化算法,通过引入差分进化算法的变异策略和自适应变量,提高了算法全局搜索和寻优能力。陈杰等^[17]提出一种改进狼群算法,通过引入次头狼概念对狼群的召唤与围攻行为做出改进,并对狼群算法的更新机制做出了优化,提高算法的全局寻优能力。各类方法都有一定的实用性,但在实际应用中也都存在一定的局限性:1) 信息获取难。战场环境条件恶劣,各类侦察手段容易受干扰和破坏,建模需要的信息数据获取困难,并且无法保证信息的准确度。2) 约束条件少。对发现概率、命中概率、毁伤概率等不确定性因素和地形地貌、气候环境、武器性能等约束条件还没有完全考虑进来,对决策结果存在一定影响。3) 目标规模小。当前的算法与实际联合作战目标规模相比有一定差距,针对小规模目标分配还能胜任,但针对当前大规模、高动态、强对抗条件下的联合作战还没有十分有效的求解算法。在今后的研究中,应该在算法实时性需求、处理不确定因素能力以及算法偏好度上下功夫。

2.3 多弹协同研究现状

多弹协同是将具有自主作战能力的弹药(具有相同能力的飞行器)通过协同技术组成一体化、智能化的“综合体”,通过发挥综合资源优势,提高弹群的探测、导航、打击和规避风险能力,使其作战效能远远大于弹药各自独立作战的效能,是整个智能任务规划系统打击效能的“放大器”。虽然对其研究起步相对较晚,但由于其在攻击和防御战中所表现出来的特有优势使其倍受重视,目前各个国家均在

积极发展相关作战理论和装备实践探索。最早的弹药协同雏形就是“饱和式攻击”,即不同频段制导弹药从不同方向和高度同时对目标打击,使敌方防御系统达到饱和状态,无法对所有弹药拦截,从而提高了弹药突防能力。这种作战方式对弹药消耗较大,效费比低,不符合现代精确作战需求,必将被取代。当前弹群协同作战方式主要有“领弹-从弹”型和弹群集智型2大类。

2.3.1 领弹-从弹型

领弹-从弹型是指由一枚或多枚导弹担任“队长”角色,实现对弹群的导引与控制、对目标的侦察与评估等目的,从而提高弹群(具有相同能力的无人飞行器)整体作战效能。这种作战类型最具代表性的是俄罗斯研制的P-700“花岗岩”超声速反舰导弹。其作战方式为:领弹在高空飞行,其他导弹在低空飞行,当领弹到达预定区域后,进行搜索、识别、跟踪目标,并将目标相关信息共享给从弹,从弹接收到信息后,对目标实施打击。在此过程中,如果“队长”被拦截,群内另一枚弹爬高接任^[18]。由于该方法具有隐蔽性强、准确度高、打击效果好等优点,被广泛地应用并不断拓展。美国研发的网火导弹武器系统采用巡弋打击导弹+精确打击导弹模式,可实现战场监视、精确打击、毁伤评估、无线电中继等功能^[19]。林德福等^[20]提出了一种基于虚拟领弹-从弹架构的新型分布式协同时间控制模型,虚拟领弹用于提供期望的攻击时间信息,使各枚导弹速度可为不同常值,所有导弹以从弹的身份“跟随”虚拟领弹以达到在特定时刻同时击中目标的要求。王金强等^[21]基于领弹-从弹编队策略建立了多弹在纵平面内的协同指导模型,引入Super-Twisting控制算法和代数图论设计了鲁棒协同制导律,并利用RBF神经网络对目标机动能力进行自适应估计,提高了整个制导控制系统的稳定性和有效性。Mu X等^[22]将领弹-从弹编队模型与行为方法结合,分别设置领弹和从弹行为,使弹群在攻击目标过程中保持队形稳定,有效规避障碍并避免相互碰撞。

2.3.2 弹群集智型

弹群集智型是指以单种类弹药作战能力为基础,以多种类弹药协同交互能力为支撑,以群体综合智力为核心,由多种类弹药(具有相同能力的无人飞行器)构建成的完整作战体系。其典型代表是巡飞弹蜂群作战,是人工智能和未来战争共同推动催生

的新型作战力量,是世界各军事强国重点发展的前沿装备,其中美国尤为突出。美国研发的“山鹑”无人机蜂群项目,是一种可利用战斗机的干扰弹发射装置投放,飞往低空执行侦察任务的微型无人机,可在复杂作战环境中实施侦察、干扰等功能^[23]。美国研发的小精灵项目是可空中发射和回收的低成本灵活作战无人机群,具有很强的创新性和前瞻性,可携带侦察所需的各种探测器和具有攻击力的弹头,其投入作战的规模可调、作战效应多样、经济可行性高,具有很高的军事应用前景^[24]。俄罗斯在蜂群作战上提出了 Flock-93 蜂群概念,有“单眼视觉系统”实现侦察定位,并采用分布式架构设计,有效提升系统自愈能力^[25]。富佳伟等^[26]提出了一种弹携式蜂群无人作战系统,通过紧密嵌入周向布置,实现了单枚导弹载体可搭载 80 架小型蜂群无人机,相比传统蜂群作战,弹携式蜂群具备更高突防能力和高效的部署能力,可实现蜂群无人机对目标区域的近距离释放,提升了整体作战半径及任务成功率,并降低了成本和风险。

随着战争形态和科学技术的发展,弹群协同作战必将成为未来战场主要打击手段,也将颠覆未来战场作战样式。上述弹群协同作战方式各有所长,但也存在一定问题或者技术难题。领弹-从弹型隐蔽性强、准确度高,可实现对目标突然打击,并且相关技术易于实现,但是整个群体对“领弹”过于倚重,其抗干扰能力和应对复杂作战环境能力相对较弱,风险系数较大,一旦领弹与从弹通信中断,将无法完成打击任务。弹群集智型具有良好的系统稳定性和鲁棒性,是智能化战争的雏形,是未来弹群作战发展的方向,目前受信息互通、协同决策、飞行控制等相关技术的限制,实现起来相对比较困难,需要进行智能技术攻关,加大研发力度。

2.4 目标毁伤评估研究现状

目标毁伤评估是综合考虑作战目的、战场环境、毁伤力量等因素,对火力打击效果进行综合分析评定的过程,是实施火力协调、调整火力打击重点的主要依据和确保作战任务圆满完成的重要环节^[27]。目标毁伤评估的核心问题是评估分析的方法。根据相关文献的分析总结,毁伤评估分析方法主要有毁伤特征评估方法和模型评估方法 2 大类。

2.4.1 毁伤特征评估法

该方法是通过将目标被打击后所反映出的物理

毁伤特征和功能毁伤特征与打击前的情况进行对比,通过技术手段全面地分析评估目标毁伤结果,这种方法主要用于对目标打击后的毁伤效果进行评估。判断上述 2 种毁伤特征的技术手段可以分为 3 种: 1) 人工判读法。这种方法是最早最原始的目标毁伤评估方法,起源于第一次世界大战,此方法对人员专业水平要求很高,易受操作人员的主观因素和图片质量影响,并且判定速度慢。虽然该方法具有很大缺陷,但仍然可作为当前目标毁伤评估的重要辅助手段。2) 功能特征感知法。指挥员通过借助各种传感器感知目标被打击后的相关信息(无线电信号、红外光线、电磁波、温度等信息),通过对比打击前后的信息得出目标毁伤结果。该方法速度快、操作简单、易于实现,并且不需要大量人力资源。但不易单独使用,以敌方指挥所目标为例,当目标保持无线电静默时,仅凭功能感知不能判定目标被毁伤,需与其他方法配合使用。3) 图像分析法。该方法是通过对比毁伤前和毁伤后图像的变化情况来实现毁伤效果评估。得出的评估结果更为直观,即便图像处理方法较多,实现起来仍较为困难,且由图像变化检测获得的变化区域存在着一定的偏差,这会对毁伤评估结果造成影响^[28]。

2.4.2 模型评估法

模型评估法是指考虑影响毁伤效果因素,建立反映毁伤效果的评估模型,通过模拟弹药对目标的作用过程,得出计算结果,根据此结果评估对目标毁伤的程度,这种方法主要用于对目标打击前的毁伤效果进行评估。20 世纪中后期,美国进行了大量的实弹射击毁伤试验,开发出了针对装甲车辆的 Compartment Code 易损性模型编码等^[29]。20 世纪 80 年代,以荷兰应用科学组织(TNO)为典型代表开发出了比较系统的仿真评估模型,建立了涵盖空中和水面目标的易损性毁伤评估模型及程序^[30]。1985 年,吴大梁^[31]针对地面炮兵射击理论,建立射击效果评定模型,填补了国内射击效果评定研究的空白。蔡宏图等^[32]综合运用模糊综合评判法和层析分析法,根据层次分析确定指标权重,建立了炮兵火力毁伤评估模型,有效提高评估结果的可信度。曲婉嘉等^[33]提出了一种基于 GA-动态 BP 神经网络的评估模型,克服了神经网络在训练过程中易陷入局部最小值和后期收敛速度慢的缺点,使评估结果的可靠性和准确性明显提高。

随着精确打击作战的不断发展，目标毁伤效果评估将成为作战必不可少的环节，对战争结果起着关键作用。上述方法虽然能够判定出目标的毁伤效果，但受战场动态环境影响，均存在一定的困难。毁伤特征评估法在实际战场上对目标毁伤后的信息获取难，对获取的信息处理也十分复杂，毁伤程度的判定和等级的划分没有统一的标准，难以定性描述。模型评估法对战场众多目标的易损性不好分析，缺少相应的实验数据，并且弹药战斗部在动爆条件下的毁伤效能不确定，给评估工作带来较大困难。但随着遥感技术和侦察技术的不断提高，图像分析法将是未来目标毁伤评估的主要趋势，可结合功能感知进行人机协同毁伤评估，能充分利用人的经验优势和机器的计算能力，实现高效准确的毁伤评估结果，为指挥员决策提供依据。

3 发展展望

随着智能弹药的不断发展，弹药智能任务规划系统必将发挥重要作用。任务规划系统和现代高技术融合将成为国内外学者的未来研究方向，人工智能、虚拟环境仿真、智能人机接口等技术都将广泛地应用到弹药智能任务规划系统中，不断提高我军弹药使用效能。

3.1 提高算法实用性

当前大多数文章和算法都在追求创新，而忽视实用价值，所做的研究大部分是在静态、理想环境、无对抗条件下进行，并且设定目标规模较小。随着高技术武器投入和战场对抗强度的不断提升，只有将能解决高对抗、高强度、高动态的算法应用到系统中，才更贴合真实战场需求，才能体现系统应用价值，后续相关算法研究中应紧贴实战，从“花样”向“实用”转变，切实解决实际应用中的问题。

3.2 提高系统信息获取和处理能力

战场态势的快速演化和激烈的博弈使得现代战争具有高度的不确定性，任务规划迫切需要及时准确地掌握战场态势、毁伤状况等信息，可将战场信息探测感知模块融入系统，使传感器直接与规划系统“对话”，减少传输层级，提高系统效率。可将量子通信技术应用到系统，其通信安全性和高效的传输性将为规划系统提供可靠的数据传输支撑，这一技术的应用将为系统增添“活力”，有效性和可靠性将大幅提升。

3.3 提高系统高新技术应用

未来智能化战场上，任务规划系统需要在敌我对抗的动态博弈中实时调整规划结果，需持续加强系统高新技术的应用。例如：可将仿真推演技术^[34]应用到系统中，其能模拟真实战场环境，并且多分支仿真技术可提供支撑“透视战场”的能力，能随机预想战局走向，可在敌我博弈方面为任务规划系统进行智能化行动预测，在自我博弈方面为任务规划系统进行大样本数据积累，在结果优选方面为任务规划系统进行定量化结果评估，进而提升系统决策的动态规划能力，可为提高我军联合作战体系化对抗能力提供技术支撑。

4 结束语

笔者针对现代战争中打击目标众多、弹药种类多样、时效性要求高的特点，提出了弹药智能任务规划系统。通过对其关键技术和算法进行研究，可实现系统的基本功能，但在战场高动态、多目标、强对抗的条件下，还存在算法实用性不够、战场形态信息难获取、自学习训练样本量不足等问题。笔者针对上述问题进行了发展展望，在后续研究中将加大相关技术研究力度，实现弹药智能任务规划系统功能。

参考文献：

- [1] 耿松涛, 操新文, 李晓宁, 等. 美军作战任务规划系统体系发展与启示[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 25-29.
- [2] 杨宗华, 韩磊. 基于区间对偶犹豫模糊熵的反辐射无人机目标威胁评估[J]. 兵工自动化, 2020, 39(12): 36-37, 61.
- [3] 孔德鹏, 常天庆, 郝娜, 等. 地面作战目标威胁评估多属性指标处理方法[J]. 自动化学报, 2021, 47(1): 161-172.
- [4] MOLODTSOV D. Soft set theory-first results[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1999, 37(4): 19-31.
- [5] 徐伟, 智军, 陈亮, 等. 基于灰色综合关联度的空中目标威胁度评估[J]. 兵工自动化, 2008(8): 86-87, 91.
- [6] 刘李楠. 基于量子粒子群优化 BP 神经网络的目标威胁估计[J]. 信息技术与信息化, 2021(8): 261-263.
- [7] FENZ S. An ontology-based approach for constructing Bayesian networks[J]. Data & Knowledge Engineering, 2012, 73(2): 73-88.
- [8] 侯夷, 任小平, 王长城, 等. 基于动态贝叶斯网络的空袭目标威胁评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(12): 77-81.

[9] 杨爱武, 李战武, 徐安, 等. 基于加权动态云贝叶斯网络空战目标威胁评估[J]. 飞行力学, 2020, 38(4): 87-94.

[10] 孟光磊, 龚光红. 基于混合贝叶斯网的空域目标威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2398-2401.

[11] 丁凡, 韩炜. 武器目标分配问题的优化算法综述[C]//2019 航空装备服务保障与维修技术论坛暨中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 航空学会, 2019: 701-704, 728.

[12] 傅勉, 程浩, 王世贵. 用混合遗传算法求解武器目标分配问题[J]. 河南工程学院学报, 2018, 30(1): 53-56, 60.

[13] LUO S, WEI Z H, MA Z Y, et al. Multi-loitering Munitions Cooperative Interference Resource Allocation Based on Hybrid Ant Colony Algorithm[C]// 第 33 届中国控制与决策会议论文集. 控制学会, 2021: 222-227.

[14] 周凌超. 基于改进模拟退火算法的导弹目标分配方法[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(1): 95-97.

[15] 陈曼, 周凤星. 改进粒子群算法的舰载武器目标分配[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(11): 72-76.

[16] 邱少明, 刘良成, 张学翠, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的武器目标分配[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(7): 27-31.

[17] 陈杰, 薛雅丽, 叶金泽. 基于改进狼群算法的多机协同目标分配研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(1): 20-29.

[18] 张小东, 张林, 胡海. 导弹弹群协同作战方式分析[J]. 飞航导弹, 2018(9): 50-54.

[19] 张尧, 阎岩, 顾鑫, 等. 网火导弹武器系统发展综述[J]. 飞航导弹, 2016(2): 39-42, 64.

[20] 林德福, 何绍溟, 王江, 等. 基于虚拟领弹-从弹的集群分布式协同制导技术研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(5): 506-515.

[21] 王金强, 刘玉祥, 任韦, 等. 拦截机动目标的自适应 S

uper-Twisting 协同制导律[J]. 飞行力学, 2022, 40(2): 74-80.

[22] MU X M, DU Y, LIU X, et al. Behavior-based formation control of multi-missiles[C]// Chinese Control and Decision Conference. Guilin, 2006.

[23] 陈士涛, 李大喜, 孙鹏, 等. 美军智能无人机集群作战样式及影响分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(11): 1113-1118.

[24] 黄雷. 美军小精灵无人机群项目发展现状综述[J]. 飞航导弹, 2018(7): 44-47.

[25] 谷康. 外军无人蜂群作战概念研究进展及分析[J]. 航空兵器, 2022, 29(1): 52-57.

[26] 富佳伟, 王辰. 高致密弹携式蜂群布局与多体分离方案[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(7): 1639-1650.

[27] 周朝阳. 毁伤评估: 指挥员决策的“参照系”[N]. 解放军报, 2016-03-24(7).

[28] 勾涛. 基于图像分析的毁伤评估系统关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.

[29] GOLAND M. Armored combat vehicle vulnerability to anti-armor weapons:a review of the army's assessment methodology[M]. Nationl Academies, 1989: 1-35.

[30] VEROLME J L, MEERTEN E VAN. Implement of a fragment shattering model in TNO's vulnerability assessment code TARVAC[C]// proceedings of 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, TX, 1999.

[31] 吴大梁. 射击效果的评定及最优化方法[M]. 南京: 南京炮兵学院, 1986: 1-353.

[32] 蔡宏图, 李云, 胡岚. 基于 Fuzzy Set&AHP 法的炮兵火力毁伤模型[J]. 信息安全与通信保密, 2014(10): 66-68.

[33] 曲婉嘉, 徐忠林, 刘颖. 基于 GA-动态 BP 神经网络的雷达毁伤效果评估[J]. 战术导弹技术, 2016(6): 51-57.

[34] 王召阳, 常家辉, 白子龙. 美军仿真技术及其应用现状分析[J]. 兵工自动化, 2021, 40(10): 66-69.

(上接第 30 页)

[6] 曲兴田, 王学旭, 孙慧超, 等. FDM 3D 打印机加热系统的模糊自适应 PID 控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 50(1): 77-83.

[7] 刘栩, 冀捐灶, 牛刚, 等. 基于预测模糊 PID 控制的航空 DC/DC 变换器设计[J]. 电测与仪表, 2009, 46(7): 66-69.

[8] IBRAHIM O, YAHAYA N Z, SAAD N, et al. Design and simulation of phase-shifted full bridge converter for

hybrid energy systems[C]// 2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS). IEEE, 2016.

[9] MURALI J K, CHANDRASEKAR V, UDAYA S V, et al. Analysis, estimation and minimization of power loss in CCM operated PSFB converter[C]// 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). IEEE, 2013.

[10] 柳彦钊. 基于 STM32 的数控开关电源设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.