

电 子 科 技 大 学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

专业学位硕士学位论文

MASTER THESIS FOR PROFESSIONAL DEGREE



论文题目 基于多属性决策的复杂装备威胁评估

专业学位类别	工 程 硕 士
学 号	201922010443
作者姓名	宋颖
指导教师	李桓 高级工程师
学 院	信息与通信工程学院

分类号 _____ 密级 _____ 公开 _____
UDC ^{注1} _____

学 位 论 文

基于多属性决策的复杂装备威胁评估

(题名和副题名)

宋 颖

(作者姓名)

指导教师 李 桓 高级工程师

电子科技大学 成 都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别 硕士 专业学位类别 工程硕士

专业学位领域 电子与通信工程

提交论文日期 2022 年 3 月 31 日 论文答辩日期 2022 年 6 月 1 日

学位授予单位和日期 电子科技大学 2022 年 6 月

答辩委员会主席 邵怀宗

评阅人 罗俊海、潘晔

注 1: 注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

摘 要

在高层次跨域联合作战的大背景下，战争形态的变化和科学技术的飞速发展使得现代战役的作战手段与作战装备日新月异。面对瞬息万变的战场态势，我方指挥员需依据战场情报对战场空间态势进行威胁评估后为火力打击分配提供战略决策支持，以获取战争的主动权。因此，现代战争迫切需要多域作战目标威胁评估方法以应对错综复杂的战场环境。本文针对战场环境中作战目标种类繁多规模庞大、威胁评估指标复杂多样等特点，以多域作战为背景对基于多属性决策的敌方目标和集群的威胁评估手段进行了深入研究，主要研究内容如下：

（1）针对现有的威胁评估场景单一而无法把握整体战场态势的问题，本文以多域联合作战为背景，分析了作战目标的静态能力属性与动态态势属性，然后结合作战经验提出并实现了对多域作战目标的威胁属性要素提取与威胁度量化建模，最后通过仿真场景案例采用多属性决策方法评估多域作战目标分别对我方空域、海域、地域的威胁度排序，验证了威胁评估决策的有效性与实用性。

（2）针对传统的多目标威胁评估手段无法综合评估集群威胁特征的问题，本文提出了两种集群威胁评估方法。首先本文引入了 DBSCAN 算法对多域目标按照其态势属性进行聚类分群，并提出基于属性权重的 DBSCAN 聚类算法，通过将每个集群簇与威胁评价测度中所认为的集群威胁最大点的距离作比较得出集群威胁度排序；其次本文在分析了第一种集群威胁评估模式的不足后又提出基于作战目标的空间位置的 DBSCAN 算法对目标进行聚类分群，然后采用指挥层次的集群特征评估指标通过多属性决策方法评估空间集群威胁；最后通过实验结果验证了集群威胁评估方法的科学合理性。

（3）本文在实验室项目的基础上搭建了作战概念模型动态推演可视化平台，并基于三四章研究成果在平台上嵌入威胁评估插件。本文对可视化平台的功能组成、体系架构与已实现的仿真案例进行了概述展示，然后详细介绍了威胁评估插件的设计，最后通过仿真场景案例实现了作战威胁评估的可视化展示，对作战指挥决策具有重要意义。

关键词：多属性决策，多域作战，目标威胁评估，集群威胁评估

ABSTRACT

Under the background of high-level cross-domain joint operations, the changes of war form and the rapid development of science and technology have made the combat methods and combat equipment of modern campaigns change with each passing day. Faced with the ever-changing battlefield situation, our commanders need to assess the threat of the battlefield space situation based on battlefield intelligence and provide strategic decision support for the allocation of firepower in order to gain the initiative in the war. Therefore, the target threat assessment method of multi-domain combat space is urgently needed in modern warfare to deal with the complex battlefield environment. Aiming at the characteristics of various cross-domain combat targets and complex threat assessment indicators in modern warfare, this thesis studies the threat assessment method of enemy targets and clusters based on multi-attribute decision-making in multi-domain operations. The main research contents are as follows:

(1) Aiming at the problem that the existing threat assessment scenarios are single and cannot grasp the overall battlefield situation, this thesis takes multi-domain operations as the background, firstly carries out threat analysis from two aspects of the static capability attribute and dynamic situation attribute of the combat target, and then combines combat experience to propose and realizes the extraction of threat attributes and quantitative modeling of threat degree of multi domain combat targets. Finally, the multi-attribute decision-making method is used to evaluate the threat ranking of our airspace, sea area and land area by multi-domain combat targets through simulation scenarios case, which verifies the effectiveness and practicability of the threat assessment decision.

(2) Aiming at the problem that traditional multi-objective threat assessment methods cannot comprehensively evaluate the characteristics of cluster threats, this thesis proposes two methods for analyzing cluster threats. Firstly, we introduce the DBSCAN algorithm to cluster multi-domain targets according to their state attributes, and propose a DBSCAN clustering algorithm based on attribute weights. By comparing the distance between each cluster and the maximum threat point in the threat assessment measure, we get the rank of cluster threat degree; secondly, after analyzing the shortcomings of the first cluster threat assessment mode, we propose DBSCAN algorithm based on the spatial location of combat targets to cluster and classify targets, and evaluate cluster threat by multi-attribute

decision making method using cluster feature evaluation index at command level. Finally, We verify the effectiveness of the cluster threat assessment method through a simulation case.

(3) We built a visual platform for dynamic deduction of combat concept model based on the laboratory project, and embedded threat assessment plug-in on the platform based on the research results of Chapter 3 and 4. This thesis gives an overview of the function composition, architecture and simulation cases of the visual platform, and then introduces the design of threat assessment plug-in in detail. Finally, this thesis realizes the visualization display of combat threat assessment through simulation scenarios, which is of great significance to combat command decision-making.

Keywords: Multi-attribute Decision-making, Multi-domain Operations, Target Threat Assessment, Cluster Threat Assessment

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 论文研究内容与结构安排	7
第二章 相关理论基础	9
2.1 引言	9
2.2 多属性决策基本理论及算法	9
2.2.1 多属性决策基本理论	9
2.2.2 多属性决策流程及算法	13
2.3 基于多属性决策的威胁评估框架	21
2.4 本章小结	22
第三章 多域作战下目标威胁评估	23
3.1 引言	23
3.2 多域作战下目标威胁属性建模	23
3.2.1 目标威胁要素提取	23
3.2.2 目标威胁度建模方法研究	27
3.3 多属性决策威胁评估实验结果及分析	39
3.4 本章小结	50
第四章 多域作战下集群威胁评估	51
4.1 引言	51
4.2 多域作战下集群特征威胁评估	51
4.2.1 目标分群理念及功能模型	51
4.2.2 基于属性权重的 DBSCAN 聚类算法威胁评估	52
4.2.3 基于空间位置的 DBSCAN 聚类算法研究	59
4.2.4 集群威胁评估指标	60
4.2.5 聚类结果及威胁评估	64
4.3 本章小结	70
第五章 作战概念模型动态推演可视化平台	71
5.1 引言	71
5.2 平台相关介绍	71

5.2.1 平台功能组成与体系架构	71
5.2.2 平台案例展示	74
5.3 威胁评估插件	76
5.3.1 插件集成方式	76
5.3.2 仿真案例展示	78
5.4 本章小结	82
第六章 全文总结与展望	83
6.1 全文总结	83
6.2 后续工作展望	84
致 谢	85
参考文献	86
攻读专业硕士学位期间取得的成果	90

图目录

图 1-1 信息化战场态势示意图	1
图 1-2 信息融合模型图	2
图 2-1 多属性决策的组成要素	10
图 2-2 多属性决策流程	12
图 2-3 威胁评估指标体系框架	21
图 2-4 基于多属性决策的威胁评估框架	22
图 3-1 作战目标能力属性要素	24
图 3-2 作战目标态势属性要素	26
图 3-3 我方为空域时目标威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 空域目标威胁度排序图	42
图 3-4 我方为海域时目标威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 海域目标威胁度排序图	46
图 3-5 我方为地域时目标威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 地域目标威胁度排序图	50
图 4-1 信息优势与决策优势关系图	51
图 4-2 目标分群概念图	53
图 4-3 兵力聚合功能模型图	53
图 4-4 基于属性权重的 DBSCAN 分群算法流程图	56
图 4-5 基于空间位置的 DBSCAN 聚类流程	60
图 4-6 群目标探测范围示意图	61
图 4-7 集群目标信息交互示意图	62
图 4-8 目标空间位置分群结果图	67
图 4-9 集群威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 集群威胁度 排序图	70
图 5-1 作战平台模块组成图	71
图 5-2 平台功能示意图	72
图 5-3 平台体系架构图	73
图 5-4 可视化模型文件配置图	74

图 5-5 UPDM 项目配置图.....	75
图 5-6 仿真数据输出图	75
图 5-7 仿真综合态势显示图.....	76
图 5-8 态势细节效果图	76
图 5-9 输入数据示例图	77
图 5-10 数据处理流程图一	78
图 5-11 数据处理流程图二	78
图 5-12 仿真模型属性配置	79
图 5-13 仿真模型可视化配置.....	79
图 5-14 敌方部分目标态势图.....	79
图 5-15 威胁评估界面	80
图 5-16 空域威胁度排序	80
图 5-17 我方空间位置选择	81
图 5-18 目标威胁评估结果显示图。(a) 地域威胁度排序图；(b) 海域威胁度排序图.....	81
图 5-19 集群分析参数填写	82
图 5-20 集群威胁评估结果	82

表目录

表 1-1 威胁评估方法优缺点对比.....	6
表 2-1 决策问题对比表	10
表 2-2 属性决策矩阵表	13
表 3-1 空空战飞机 RCS 威胁指数.....	30
表 3-2 空海战高度威胁指数.....	31
表 3-3 空海战飞机 RCS 威胁指数.....	31
表 3-4 空地战高度威胁指数.....	32
表 3-5 空地战飞机 RCS 威胁指数.....	32
表 3-6 导弹 RCS 威胁指数.....	39
表 3-7 空域目标固有威胁度.....	39
表 3-8 空域目标态势信息	40
表 3-9 海域目标固有威胁度.....	43
表 3-10 海域目标态势信息	44
表 3-11 地域目标固有威胁度.....	47
表 3-12 地域目标态势信息	48
表 4-1 目标分群算法优缺点对比.....	54
表 4-2 目标态势信息表	57
表 4-3 目标态势信息分群表.....	58
表 4-4 集群威胁评估表	58
表 4-5 战场环境因素评估表.....	64
表 4-6 目标位置信息表	65
表 4-7 位置坐标的两次转化.....	66
表 4-8 目标空间位置分群表.....	68
表 4-9 专家打分表	69
表 4-10 集群信息分析表	69
表 4-11 集群打击难度评估表.....	69
表 4-12 集群特征威胁评估	69

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

近世纪以来，科技文化的进步带动了军事变革，随着战争形态由冷兵器时代向信息化条件的转变^[1]，世界各大军事强国将活动领域已向多维空间开拓迈进，现代战争已然转型为全方位领域一体化作战的高科技战争。

2021年3月31日，美国签署了新的联合作战概念^[2]，概述了美国至2030年的新的作战方式。新版的CCJO将进一步推动“跨域协同作战”能力发展作为实现全球一体化作战的重要途径，将作战信息网络化渗透到多维作战空间领域，实现作战力量的深度联合。如图1-1



图 1-1 信息化战场态势示意图

在高层次跨域联合作战的大背景下，战争形态的变化和科学技术的飞速发展使得现代战役的作战手段与装备日新月异，空天防御系统的侦察监视使作战领域空间逐渐趋于透明化，以信息技术为核心的现代化装备将电子对抗的强大力量作用于多个作战领域，例如军事设备的精准化以及指挥控制系统的自动化等，具有覆盖范围广、打击精度高、毁伤效能强的实战特点，为作战取胜提供精确高效的支持。现代化作战装备体系间依靠信息流交互实现整体联动、功能互补，在面对敌方作战威胁时能以最快反应时间进行火力分配，采取有效打击，作战样式由传统的机械化接触式作战样式演变为可远程伪装式的无人编队协同作战、分布式智能集群攻击战、网络中心战等。

战场态势瞬息万变，“知己知彼，百战不殆”，战场上的军事情报从古至今都是作战致胜的必要条件。在双方交战过程中，我方指挥员需依据战场情报对战场空间态势进行分析后迅速做出准确决策，取得战争的主动权。作战情况的突发性、参与兵种部队的繁杂以及多种战斗样式的无缝切换，使得我方作战体系面临的战

场威胁度直线上升，因此对敌方目标威胁源作出快速准确的威胁评估^[3]，是我方战场指挥人员实现自动化指挥决策系统战略部署的重要一环。

早在 19 世纪 80 年代中期，由美国 C3 技术委员会成立的联合信息融合专家实验室制定了一种将信息进行融合处理的通用模型——JDL 模型^[4]，该模型展示了对传感器的输入数据预处理后进行特征提取、态势评估、威胁估计、融合优化等过程，并支持人机交互、数据管理等。其模型结构如下图1-2所示：

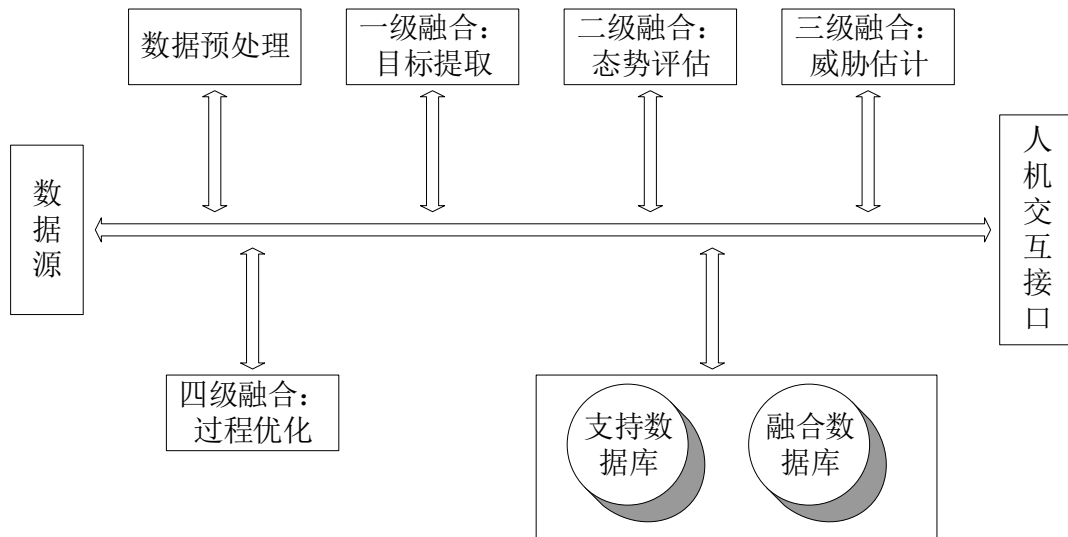


图 1-2 信息融合模型图

由上图可知，威胁估计是在信息融合模型的二级处理基础上进行的，即需要对敌目标特征如属性及状态进行态势估计，然后结合实际作战情况，根据敌我双方作战效能、装备性能、行动能力与作战意图等多方面因素对作战指标属性的聚合威胁程度进行量化，做出合理的敌群目标排序，为我方火力打击分配提供战略决策支持。

威胁评估是指作战时根据战场态势，如敌方作战意图、装备杀伤能力等推断敌方来袭目标对我方保卫目标可能造成的威胁等级程度。在信息化战争错综复杂的战场环境中，威胁评估需要依赖于通过预警雷达探测识别获取的敌方目标原始数据，经过战场数据的预处理得到目标类型、航向角、速度、位置等关键信息，帮助指挥者快速分析判断敌方作战平台规模与所处战场区域的威胁等级，对我方指挥决策有重要参考价值。信息化战争时代的大背景下，战争致胜的关键因素依赖作战系统整体化、指挥系统自动化及作战人员协调化等多维组合因素，这对战场态势预测与威胁评估提出了更高的要求。合理的目标威胁评估可以为己方复杂装备防御系统火力打击分配提供参考依据，有效缩短指挥人员态势感知的时间并减少主观臆断的风险，优化作战策略，提高我方作战效率和质量。

威胁评估的重点在于基于我方防御基础定性并定量估计作战双方对抗结果,是对作战场景数据高度融合的过程。战争因素的不确定性与复杂性使得威胁评估成为多层次、多角度、多目标的问题。因此,对战场态势进行精准预判,分析敌方多目标来袭的威胁因素,建立一套科学有效的威胁评估模型,是我方自我防御的基础,是实施高效目标分配与火力打击的先决条件,更是取得战争先机的重要保障,在作战领域具有十分重要的研究意义。

1.2 国内外研究现状

关于威胁评估的研究课题十分广泛与复杂,例如对作战需求想定的理论与方法描述、装备建模验证体系、对作战双发交战过程及战场环境的仿真推演等,威胁评估大体上可以分为三个步骤:提取威胁要素、计算量化威胁程度、评估威胁等级。在这套评估流程中,有诸多不确定因素,例如针对复杂装备的侦察和打击系统,像防热红外、防激光、防雷达和防毫米等伪装技术可以达到欺骗与迷惑的目的,电磁信号辐射会隐藏来袭目标的物理特征,雷达反射截面积接收到的返回波形也容易遭受变形,再加上战场环境、作战天气的不稳定,往往会造成威胁评估的结果不够科学合理。因此在认清战场态势后,对于战场目标威胁的评估需在信息不完备与不确定条件下进行,涉及多维因素的融合。

对于应用于作战领域的威胁评估方法,相关领域的国内外学者使用了许多方法进行一定的探索性研究。包括基于知识的专家决策系统方法、基于动静态分析的贝叶斯网络推理(Bayes network)、云模型方法、神经网络方法、集对分析法、变权理论法、灰主成分关联法分析法、D-S 证据理论方法、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、模糊集方法、多属性决策方法,以及将这些方法系统性混合衍生出的新方法等,在这之中,基于模糊集、贝叶斯网络、BP 神经网络、多属性决策的目标威胁评估方法是目标威胁方向的研究热点,下面依据国内外研究情况对这些方法的研究情况进行介绍。

国外对作战领域的威胁评估来源研究起步较国内较早,起初由美国国防部于1984年提出了JDL的信息融合模型,首次定义了威胁评估的含义,威胁程度因此被量化;1997年Antony^[5]认为确定敌方作战企图后实施火力打击应属于态势评估的范围,并不是威胁估计,威胁评估应该是获得敌方战场信息后计算其威胁能力值,以作为态势预测的条件。是否获取战场威胁值是区分威胁估计和态势预测的关键;1999年AlanN.Steinberg^[6]考虑了我方作战因素,认为威胁估计不仅需要物理状态,还需要信息和感知状态,评估结果需要融合敌方威胁量化等级程度和我方防御及打击能力,因此对JDL模型进行了拓展;2000年Gonsalves^[7]等人提出

基于遗传算法的威胁分析方法用于预测来袭目标的战场意图,但由于算法迭代次数过多,抗干扰性差,推广能力不足,不具备实时性;2001年Gugerty^[8]在Antony的基础上提出用智能虚拟顾问框架为现实场景的态势感知做技术辅助,将威胁分析分为目标威胁属性值的获取与其对我方威胁等级评估判定两个阶段,这种思想在如今的威胁评估中也广泛应用;2002年Wright^[9]等人运用贝叶斯理论构建贝叶斯网络,提取战场威胁因素作为目标节点,战场态势作为关键节点,构建威胁评估体系解决了作战的不确定性问题,但贝叶斯网络精度及性能主要依赖的是专家给定的先验概率和条件概率,主观性较强,对于样本数据的训练计算也较为复杂,因此不能满足作战需求;同年Qu C和He Y^[10]认为威胁评估是一个推理决策的过程,而决策理论可为其提供方法;2009年Justin M.beaver等^[11]构建了一个威胁分析模型,可用于处理文本、数字、图像等多种类型的数。同年Lin Z^[12]指出威胁评估是对多目标多属性的综合决策;2015年Ehsan^[13]等人运用模糊集理论对威胁过程进行了精确的描述,并首次引入了11个威胁评估属性参数,通过构建多个动态仿真场景表明了评估方法的准确性;2016年Ehsan等人^[14]又在动态模糊集基础上加入了D-S证据理论,修复了数据的不确定性和系统可靠性差的漏洞;2017年José等人^[15]建立自动识别空中目标的框架,用贝叶斯网络对敌方目标进行检测、分类,并评估威胁等级。

战场空间威胁分析对建设国家安全,提升综合国力有十分重要的价值,我国威胁分析研究虽然起步较晚,但是近年来也取得了丰硕的成果,在C3I指控系统中得到了较好的应用。

(1) 模糊集方法

对于康托尔集合描述问题仅限于“非此即彼”的缺点,模糊集方法引入隶属度函数刻画语义描述的模糊性,避免了定性评估结果的偏差性,然后经过综合判定、模糊测度等方法获得威胁评估度量,最终转化为威胁评估值。2011年段锁力等人^[16]针对当时较为成熟决策方法中主观性太强的问题,利用IFS与区间粗糙集构建决策模型,推理验证了辐射威胁源程度;2012年杜继永等人^[17]引入模糊数学构建FAHP数学模型,采用二级模糊的多属性决策对空中目标实现了威胁评估;2014年黄洁等人^[18]用IFS描述属性指标的模糊性,并利用模糊测度建模,最后引入Choquet积分进行威胁评估;2016年郝娜等人^[19]在陈建建等^[20]将IFS和OWA算子结合决策的基础上针对模糊集信息排序只考虑了指标特征属性的问题对算法进行改进,使得排序更为合理。2019年肖力铭等人^[21]针对威胁评估过程中专家知识经验主观性过强、评估指标间的关联无法评价的问题,提出了基于FAHP的空中目标威胁评估方法,定性并定量的刻画了威胁等级;2021年孙德鹏等人^[22]系统

的通过模糊集中不同形式的量化方法对地面作战目标科学性的威胁评估,该方法极大程度的保留属性指标的模糊关联性并降低工程应用的难度;2021年任耀军^[23]将三角模糊数与毕达哥拉斯犹豫模糊集结合,研究了其相关性质,充分考虑决策因子之间的关系,提高了评估结果的可靠性;

(2) 贝叶斯网络方法

贝叶斯网络法是采用有向无环图构建推理性结构模型,通过先验知识或者样本学习得到每个节点的先验概率与条件概率,当有输入数据时,贝叶斯网络可以以观测事件的角度逐层推理得到预测的威胁状态。2010年孟光磊等^[24]针对兼具离散与连续类型的评估属性适应性不强的问题,建立了混合型贝叶斯网络,提出了一种主客观数据结合的网络学习法,提高了网络模型的准确合理性;2014年刘振^[25]等人在允许节点概率容错的情况下提出了变结构区间概率的动态贝叶斯网络,提高了贝叶斯网络应用的自主性;2016年王巍^[26]针对构建条件概率表工作量过大的问题引入了云模型理论,通过构建云贝叶斯网络模型,使决策者的赋权结果可以自动转换为云模型的参数,决策过程更加简便;2019年杨海燕等人^[27]对动态贝叶网络进行模糊化处理,将生成的动态威胁值通过解模糊用概率形式转化表达,简化网络结构的同时又可借助贝叶斯网络的表达及推理能力对战场威胁进行实时评估;2021年高擎峰等人^[28]通过构建闭环的动态云贝叶斯网络,能够很好的适应复杂的战场环境。

(3) 神经网络方法

神经网络自身的参数学习与测度能力可以适应战场的快节奏与高信息量的涌入。将神经网络运用于目标威胁评估,利用其强大的泛化、表达及处理能力,可以有效解决输入信息与威胁等级评估的非线性模糊关系。2000年高尚^[29]将神经网络运用于目标威胁评估,建立了基于神经网络的目标威胁评估模型;邱浪波等^[30]在高尚的基础上通过建立基于BP神经网络模型的威胁评估算法引用小样假定验证了该方法的优越性。随着神经网络的发展,研究人员普遍认为BP神经网络更适用于威胁评估。2016年李卉^[31]采用蝙蝠算法优化BP神经网络模型,验证了有效性;2017年黄璇等人^[32]针对BP神经网络应用于目标威胁评估领域中收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点,利用改进的粒子群算法对BP神经网络的初始权值进行优化,采用300组数据集和60组测试集运行除了良好的结果。2018年李寒雨^[33]等利用差分进化算法对BP神经网络进行优化,提升了网络模型的预测能力与算法收敛速度;2019年张峰^[34]提出了BP-Adaboost算法,通过75组数据样本验证了该算法的合理性;同年陈侠等^[35]将模糊理论引入神经网络,解决了目标信息不全面情况下的评估精度问题;2021年刘李楠^[36]运用量子粒子群算法优化BP

神经网络，获取了更佳的网络初始权值和阈值，减小了实验误差。

（4）多属性决策方法

多属性决策方法应用于有多个目标且每个目标有多种评估属性的情况下，通过对原始数据样本的规范化处理，赋以属性指标相应的权重，在建立好评价测度后得出目标的优劣排序。2014 年潘科等人^[37]运用熵值法对确定评估指标权重，然后基于多属性决策对决策信息进行规范化处理，采用理想解进行目标威胁度排序；程明等^[38]将模糊区间数与精确数进行混合，提出了一种新的决策方法，并证明了可靠性；王毅等^[39]考虑属性信息的不确定性，将属性值设定为区间数并在权重未知的情况下引入决策者的偏好信息，对此进行了深入研究探索；2018 年王君等人^[40]针对目标威胁评估中权重系数失衡造成评估结果不准确的问题，引入了变权理论分析法，并证明该方法的合理性；2019 年侯思尧等人^[41]中将主客观权重结合后对目标威胁评估因子进行综合赋权，获取了有效权重比，并经过线性规划比较得到合理权重值；同年奚之飞^[42]利用主成分分析法通过分析因子的关联性生成灰色关联系数矩阵，使得重新构成的威胁评估体系中各分量独立，然后用极大熵模型确定原始因子属性权重，与以累计贡献率得到的客观权重融合成为主成分权重，表现了评估因素的耦合相关性。2021 年杨军佳等人^[43]通过熵权法与 AHP 法赋予组合权重，并运用最小二乘组合优化模型时刻更新权重，采用集对分析法进行目标的威胁度评判。

以上的研究方法在作战领域取得了逐步的发展，获得了一定的研究成果，并且在实际的工程应用中的成绩也是瞩目的，四种主要方法的优缺点对比如下表 1-1：

表 1-1 威胁评估方法优缺点对比

	优点	缺点
模糊集方法	构建隶属度函数表达目标属性的不确定性；定量定性指标统一处理	难以确定隶属度函数
贝叶斯网络方法	擅长处理不确定信息；图形化结构符合人类思维模式；考虑到了因素间的相互关系	需要依据历史或专家经验确定结构模型与节点概率参数，工作量繁琐，主观性太强
神经网络方法	解决输入信息与威胁等级计算的非线性模糊关系，自身具有良好的学习与推理能力	网络普适性差；训练数据过于理想化；训练数据多样性不足
多属性决策方法	考虑因素全面且处理方法简便；具有良好的时效性与准确性，能够较好适应战场态势变化	不同多属性决策方法适应性不同，需要慎重选择

由于作战信息的保密性，我们无法得到足够的数据样本，因此依靠样本学习获取相关参数的贝叶斯网络方法与神经网络方法不能够很好的满足作战需求；并

且作战威胁度评估是需要给指挥决策者提供较为精确的参考意见，模糊语言的出现会带来“亦此亦彼”的混淆，而且对于决定模糊集方法评价的有效合理性的关键点——隶属度函数也难以确定。综上所述，我们选择多属性决策方法对战场目标威胁进行评估，战场目标与其威胁属性的复杂多样正与多属性决策问题的多成员化、多维度化、多层次化特点相契合，可以达到对战场态势的全局把握。该方法处理方式简便，具有良好的时效性与准确性。

1.3 论文研究内容与结构安排

本文依据现有威胁评估场景单一，难以协助指挥决策者把握整体战场态势及缺乏对智能化集群作战样式的威胁评估方法的问题，深入开展并研究多域作战背景下基于多属性决策的多目标与集群威胁评估方法，并在实验室项目的基础上搭建了作战概念模型动态推演可视化平台，设计完成了威胁评估插件，对指挥作战决策具有重要意义。

本文的章节内容及结构安排如下：

第一章主要阐述介绍了战场威胁评估的背景及研究意义，在查阅大量文献的基础上对现有的主流威胁评估方法的优缺点进行了对比，并基于多域作战的威胁评估背景选择多属性决策方法，最后对本文的研究内容与章节安排进行了概述性介绍。

第二章首先从多属性决策的组成成分、特性分析、决策步骤三个方面对多属性决策基本理论进行了介绍，然后介绍了多属性决策方法的流程与相关算法，选择基于标准 0-1 变换法、CRITIC 法、VIKOR 法的多属性决策方法，最后提出了基于多属性决策的复杂装备威胁评估框架。

第三章提出了基于多域作战的威胁度建模与评估方法，首先对作战目标的静态能力属性与动态态势属性进行分析，然后结合作战经验对目标威胁要素属性提取并建模，构建目标威胁属性决策矩阵，最后基于多属性决策方法通过仿真场景案例评估敌方目标分别对我方空域、海域、地域的威胁程度，三种不同的排序结果验证了威胁评估决策的科学合理性。

第四章基于集群作战样式提出了两种威胁评估方法。首先基于作战目标的态势属性引入 DBSCAN 算法对大规模目标进行分群，并基于 CRITIC 法得到的属性权重对 DBSCAN 算法进行改进，通过计算集群簇与威胁评价测度中威胁最大点的距离对作战集群进行威胁度排序，分析了此决策模式的不足后提出将大规模目标进行以我方为基准的空间位置坐标转换，并采用基于空间位置的 DBSCAN 算法对目标进行分群，通过构建集群特征威胁评估指标对目标聚类后形成的作战集群进

行指挥决策层面的态势预测与威胁评估，最后建立仿真作战场景对集群威胁评估方法的有效性进行了验证。

第五章在实验室项目的基础上采用 MBSE 语言、CIF 仿真语言及 java 构建搭建了作战概念模型动态推演可视化平台，并基于三四章的研究成果，在平台上设计与内嵌威胁评估插件。此章节首先分析介绍了仿真平台的功能组成、体系架构与工作流程，然后详细讨论了威胁评估插件的设计与研发方案，最后通过实际仿真案例实现了作战概念可视化模型的仿真推演与威胁评估，对作战指挥决策具有重要意义。

第六章是对全篇论文工作内容及创新点进行了回顾与总结，并对未来研究方向进行了展望。

第二章 相关理论基础

2.1 引言

多属性决策是当代科学决策理论的重要组成部分，成为多领域专家的热点研究课题。作战威胁评估是为指挥官提供有效目标分配和火力打击的重要前提。基于复杂装备面临的多域目标威胁，将多属性决策与多目标威胁评估相结合，探索面向多域作战的威胁评估手段是本文的重要研究方向。本章在详细介绍多属性决策理论及其一般问题研究的基础上，重点阐述多属性决策的相关算法及流程，并提出基于多属性决策的复杂装备威胁评估框架，为后续章节研究多域作战时敌方目标威胁奠定理论基础。

2.2 多属性决策基本理论及算法

2.2.1 多属性决策基本理论

经典的多准则决策^[44]依据决策空间类型，可以划分为两个重要领域：当决策空间连续（空间内有无限个备选方案）时为多目标决策^[45]，注重对未知方案的设计规划；当决策空间离散（空间内为有限个备选方案）时为多属性决策，注重对已知方案的评价选择^[46]。

多目标决策取决于科学系统的从多个相互矛盾且不可共度的目标中选择最佳方案，属于未知的方案设计及优化问题。多目标最优化处理关键是找出非劣解，当非劣解只有一个，即为最优方案；若存在多个非劣解，则选择“较好解”为最优方案。其数学模型可以表示为有 n 个目标，决策准则 DR 是对方案集 X 优劣排序的评价测度， DR 取决于决策的目标和决策者的主观依赖信息，表示第 j 个约束条件，其中， $j=1,2,\dots,m$ ； $f_i(x)$ 第 i 个目标函数， $i=1,2,3,\dots,n$ ，则多目标决策的基本步骤为

$$DR_{x \in X} [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)], x \in X = [x | g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m] \quad (2-1)$$

由式2-1可得，依据 DR 准则在方案集 X 中寻求出最优解，根据任务需求对目标函数进行最大或最小的优化。

多属性决策^[47]是当代决策科学中不可或缺的重要基石，它的思想和方法泛用于诸多领域，如社会、经济、管理和军事等。多属性决策^[48]是对一组拥有多个属性评价指标的备选方案进行评价选择；决策的目的是从中找到符合决策者意图偏好的方案并对备选方案进行综合评价排序。多属性决策问题注重于对已知方案的评价与选择，决策者通过已有的样本数据信息进行分析整合，对有限个方案给出

科学合理的排序评价。其概念模型也可用数学语言进行表示： x_i 为第 i 个方案， a_j 为第 j 个属性， $u_{ij} = f(x_i, a_j)$ ，表示在第 i 个方案在第 j 个属性下的效用函数值，用决策准则为 DR 进行判决的过程如下：

$$DR_{x \in X} [b_1(u), b_2(u), \dots, b_n(u)], u \in U = [u | u_{ij} = f(x_i, a_j), i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n] \quad (2-2)$$

由式2-2可知，多属性决策的方案对比、排序、评价等结果由决策准则与效用函数准则共同决定。

根据以上分析，总结出多属性决策问题和多目标决策问题的对比表格如下：

表 2-1 决策问题对比表

	多目标决策 MODM	多属性决策 MCDM
方案集	无限	有限
属性集	目标函数集合	属性集合
表征形式	显性目标形式	隐形属性形式
决策变量	连续型为主	离散型
决策形势	求解多目标最优规划问题	通过属性或属性间的比较做权衡

综上所述，复杂装备的威胁评估问题涉及多成员化、多维度化、多层次化，具有多目标、多属性的特征，隶属于多属性决策领域，接下来本小节主要围绕多属性决策的组成成分、特性分析、决策步骤进行展开介绍。

2.2.1.1 组成成分

完整的多属性决策过程^[49]包含要素有决策属性、决策目标、决策者、偏好信息、指标权重和备选方案。如图2-1所示：

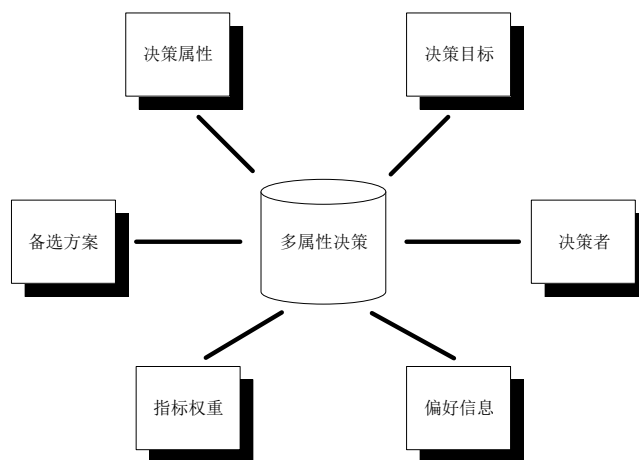


图 2-1 多属性决策的组成要素

(1) 决策属性

每个评价方案都有多个属性，用来构成每个方案不同的现有状态，属性有定性与定量之分，有的属性可以通过数值量化，如舰艇飞机等敌方目标的速度、距离，经过作战公式或者专家打分得到威胁隶属度，但是有的属性需要通过语言描述，具有极大的不确定性，如敌方威胁目标的探测能力、机动性能等，数据预处理前需要用模糊理论进行间接量化。

(2) 决策目标

决策目标是指决策过程中符合方案最优化的规则，代表了衡量评价对象好坏的价值观。在本文中决策目标是对对象属性值的客观描述，如战斗机的飞行高度的高低，速度的大小，距离的远近等，我们认为飞行高度越高，速度越大，距离越近是评价此架飞机对我方领域威胁度最大的一组最优解。多属性决策问题中一定涉及多个决策目标，需要多维且辩证的去看待组合问题。

(3) 决策者

决策者可以是个人也可以是一个群体机构，符合决策者的偏好信息直接或间接影响了最优决策方案的判决结果。决策者与构建的决策模型共同组成了有机的系统对备选方案进行评价优选。

(4) 偏好信息

传统的依据历史数据及经验进行的决策结果依赖于决策者的主观视角偏好，效用函数中的属性权重值过于主观会削减最优解的合理性与科学性，在评定时应注重主客观的结合，使得评价更为全面有效。

(5) 指标权重

指标权重描述的是决策目标间的相对重要性，每个属性权重都客观反映了评价目标的一方面。作为效能矩阵的数据输入，指标权重的获取影响决策结果。例如，在双方交战时，我方天基卫星探测到两枚弹道导弹，传感器数据显示其分别携带多枚核弹弹头和多枚常规弹头，则可按杀伤力的大小对应分配权重。

(6) 备选方案

备选方案即决策对象，是被决策者评价的主体。在多属性决策问题上，备选方案为有限个数已知目标对象。在本文中，备选方案指的是我方探测到的敌方大批威胁目标，如敌舰敌机等。

2.2.1.2 特性分析

结合多属性决策^[50]的六个要素，总结其有以下4个特点：

(1) 决策问题的目标及目标属性不只一个。本文的工作是对敌方来袭目标进行威胁度排序，以提供给指挥者有效的火力打击与目标分配决策结果。衡量某一个

目标的威胁度可以从其物理属性如速度、航向角、距离，或者从能力属性的角度如机动性能、抗干扰能力等。威胁度的排序涉及多个目标及目标属性。

(2) 多属性决策问题中目标属性不可公度且涉及的多个目标属性相互独立，无法进行简单的归一化处理。

(3) 决策目标具有矛盾性。若在备选方案中存在一组最优解，使得每个目标属性都达到最优，则可忽略目标属性的不可公度性，但这种情况很少。大量现象显示目标属性间的不一致性会造成冲突，即当采用一种方案使某一目标属性达到最优时，会造成其余属性值往较差方向削减。简而言之，如果某一敌方目标的威胁度最大，但是其速度不一定最大，距离也不一定最近，受多个属性共同约束。

(4) 决策者的偏好会影响决策结果，不同的决策指挥者会有不同的见解看法。

2.2.1.3 决策步骤

多属性决策问题可定义为在给定的有限个已知决策信息的备选方案中，依据每个目标的多个属性值，利用对象组决策信息进行有效评价与优劣排序，其具体决策步骤如下：

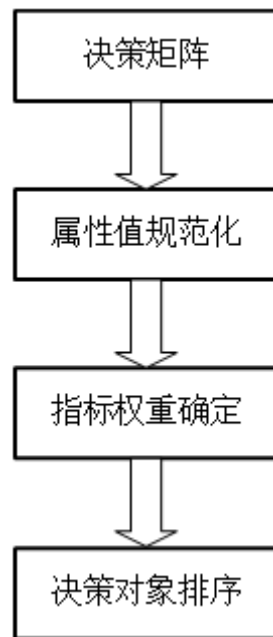


图 2-2 多属性决策流程

如图2-2所示，多属性决策的系统流程为构建决策矩阵，规范化属性值，确定属性权重，决策对象优劣排序。下一节中将根据前文多属性决策的组成要素及特性分析给出决策的具体步骤及相关流程算法。

2.2.2 多属性决策流程及算法

2.2.2.1 决策矩阵构建

在多属性决策问题的分析中，构建的决策矩阵是决策对象属性信息的数学表征模型，用矩阵格式反映备选方案目标与其属性信息之间的联系。用表2-2来表示 m 个方案 n 个属性的决策矩阵

表 2-2 属性决策矩阵表

决策矩阵表					
	y_1	...	y_j	...	y_n
x_1	y_{11}	...	y_{1j}	...	y_{1n}
..
x_i	y_{i1}	y_{ij}	...	y_{in}	
...	
x_m	y_{m1}	...	y_{mj}	...	y_{mn}

可供参考选择的备选方案集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ，用 $Y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}\}$ 表示这组备选方案 x_i 的 n 个属性值，其中 y_{ij} 是第 i 方案的第 j 个属性值。则生成矩阵 Y_{ij} ：

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{12n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \cdots & Y_{mn} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

决策矩阵中的每个元素 y_{ij} 构成了决策信息的原始样本数据矩阵，代表的是方案 x_i 在 y_j 上的原始样本值，每个方案的目标属性值集合构成目标属性决策矩阵，为后续数据规范化处理及综合效用值计算提供了决策分析的基本信息。例如在某一时刻我方侦察机观测到敌机的空战数据，给出范例表如下所示：

敌方目标编号	角度 $\theta/$	速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	电子对抗性能
目标 1	-50	330	强
目标 2	15	315	弱
目标 3	45	320	中

由实例分析可知，目标属性矩阵中的属性值有如下特点：

- (1) 矩阵中的属性定性与定量共存，定性指标用语言刻画属性好坏，定量指标用确切数值进行数学表达。
- (2) 矩阵中的属性值无统一量纲约束，不同属性单位不同。

(3) 矩阵中的属性值特性兼具确定性及不确定性。

(4) 矩阵中每个属性符合最优解的优化方向不同，效益型指标如速度需要正向优化；成本型指标如角度属于负向优化。

2.2.2.2 属性值规范化

属性值的规范化包括指标的标准化、归一化、正向化等，可根据不同的多属性决策方法进行选择。由前文可知，针对原始属性样本值无统一量纲约束及衡量标准的特点，需要提前进行数据的预处理得到目标属性决策矩阵，这是多属性决策环节的分析基础。指标属性分类各种各样，定量与定性指标的无量纲化的方法也不尽相同。考虑到属性指标优劣导向性的不同，可以分为正向效益型指标和负向成本型指标。

(1) 定量型指标的规范化

定量型指标的规范化方法有许多，例如线性变换法、标准 0-1 变换法、向量变化法等。我们设原始样本决策矩阵为 $Y = \{y_{ij}\}$ ，记规范化后的决策矩阵为 $Z = \{z_{ij}\}$ ，设 y_{jmax} 是矩阵 Y 中第 j 列的最大值，设 y_{jmin} 是矩阵 Y 中第 j 列的最小值。

1) 向量变换法

向量变换法不需考虑属性指标的优劣导向性，对于效益型与成本型指标，均采用式2-4进行归一化变换：

$$z_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2} \quad (2-4)$$

变换后得到的矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 为归一化后的标准矩阵，其列向量模为 1，从变换后得到的属性值大小上没有正逆向之分。从物理学的角度，该变换的原理是建立在单属性值与此属性所有样本点能量和的基础上。但是变化方法不能很好的反映指标与评价测度间的关系，使用向量变化法处理后损失了波动性指标的意义。

2) 线性变换法

若 j 为效益型属性指标，则

$$z_{ij} = y_{ij} / y_{jmax} \quad (2-5)$$

若 j 为成本性属性指标，则

$$z_{ij} = 1 - y_{ij} / y_{jmax} \quad (2-6)$$

线性变换法中属性值的规范化变换关系不是严格的线性变换，只是变换方式类似简单线性关系，因而成为线性变换法。变换方式较为粗糙，无法达到最优属

性值为 1 且最差属性值为 0 同时并存的情况，简单的利用属性指标列中的最大值进行计算容易造成规范化后的数据失真。

3) 标准 0-1 变换法

对于线性变换规范后最优值为 1 最差值为 0 不能并存的情况，采用标准的 0-1 变换对其进行改善，保证每个属性值经过归一化变化后其取值在 $[0,1]$ 中，且可满足最优与最劣值分别为 1 和 0。具体运算如下：

若 j 为效益型属性指标，则令：

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - y_{jmin}}{y_{jmax} - y_{jmin}} \quad (2-7)$$

若 j 为成本性属性指标，则令：

$$z_{ij} = \frac{y_{jmax} - y_{ij}}{y_{jmax} - y_{jmin}} \quad (2-8)$$

该运算结果是根据指标属性与其当列最大值（最小值）之差与属性最大值与最小值之差相比得到，避免了线性变换结果粗疏简略的缺点，相对而言客观合理一些；属性指标的最大值与最小值灵敏度较高，当加入新数值时结果发生变化，符合战场数据的变化复杂的特点；并且在之后的计算步骤中考虑方差因素影响，会增加数据间的联系关系，提升稳定性。因此本文选择标准 0-1 变换法对属性指标进行标准化处理。

（2）定性型指标的规范化

定性指标的原始状态需要用不确定型语言进行表达，比如“好”、“一般”、“较差”等。定性指标在规范化处理前，需要将模糊语言描述转化为确切数值量化，这种对应关系很大程度依赖于决策者的主观偏好。著名心理认知心理学家 G.A.Miller 认为正常人能够区分 5 至 9 级间的指标属性的语言描述。定性指标可按决策者意图以不同级别赋予不同量值，然后对其进行规范化处理，规范化方式与定量型指标类似。

2.2.2.3 指标权重的确定

指标权重表示的是决策属性间的相对重要性程度。确定指标权重的方法大体上可分为两种，即依赖决策者的主观偏好或意图的主观赋权法，如专家打分法、Delphi 法、比较法；与根据客观样本信息进行建模测算的客观赋权法，如 CRITIC 法、标准离差法、熵权法等。

（1）主观赋权法

1) 专家打分法

专家打分法是早期出现且应用范围较广的一种权重确定方法。其主要步骤是：依据决策对象选取评估属性指标，并在定性定量分析的基础上依据主观经验与偏好对每个指标的量值定级打分。专家打分法在缺乏数据样本统计分析的情况下也可以评估权值，具有使用性简单、直观性强的优点，但缺乏系统性与客观准确性。

2) Delphi 法

Delphi 法在专家赋权法上进行了改进，在判定专家意见接近正态分布的理论基础上对样本数据进行相应处理，并将专家意见的权威系数、变异协调系数纳入考虑范围中，使得评估结果更加合理，但缺点是需要耗费大量的人力和时间。

3) 比较法

比较法主要有相对比较法和连环比率法两种。相对比较法是将所有评价指标按行与列构成正方形表，然后依据三级标度 0、0.5、1 进行两两比较后评分计入相应位置，经求和归一化后得到指标权重；连环比率法是将评价指标按顺序排列后两两环比赋值，并确保最后一个指标权重为 1，再依据比率修改各指标后归一化得到权重。比较法在使用时更注重指标间的可比性与比较的一致传递性，容易导致误差的传递。

(2) 客观赋权法

1) 熵权法

香农于 1948 年最早提出了熵权法并引入信息论。熵权法依据指标变异性程度确定客观权重。当某个指标的信息熵越小，说明其变异程度越大，则可以提供更多的信息量，在指挥决策层次可以起到更大的作用，因而权重也越大，反之权重越小。信息量代表了对信源发出的某个信号所含信息的度量；信息熵是对一个信源所含信息的度量，是信息量的期望。

熵权法主要步骤如下：

步骤 1：计算第 j 个属性下第 i 个方案的属性值比重为 p_{ij} ：

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{m=1}^m y_{ij} \quad (2-9)$$

步骤 2：计算第 j 个属性的熵值 e_j ：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (2-10)$$

其中， $k = 1 / \ln m$ 。

步骤 3: 计算第 j 个指标的熵权值 ω_j :

$$\omega_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (2-11)$$

熵权法减少了人为判断的主观性。但是熵权法忽视了指标本身间的正负相关关系与指标变化的突然性，并且熵权法所具有的严格数学意义使其需要满足方案数大于评价指标数的条件，这会忽视决策者的主观意愿。

2) 标准离差法

标准离差法的思想与熵权法类似，一般认为某个指标的标准差越大则其变异程度越大，则权重也越大；反之权重越小。标准离差法相对于熵权法引入了标准差，考虑到了指标间的对比强度关系，但是没有考虑指标间的冲突性关系。

3) CRITIC 法

CRITIC 法基于指标间的对比度与冲突性计算客观权重。指标间的对比强度通过标准差体现，标准差越大，则指标属性的差距越大；而冲突性通过指标间的关联关系体现，若指标之间相关性越强，则有较低的冲突性。当评估指标较多时，该方法可以客观的消除一些关联性较强的指标影响，减少信息的重叠，从而得到更科学的结果。

CRITIC 法步骤如下：

步骤 1: 用标准 0-1 变换处理原始样本矩阵 Y_{ij} ，如式2-7和式2-8；

步骤 2: 计算各属性指标的标准差 σ_j :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (z_{ij} - Z_j)^2}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2-12)$$

其中 Z_j 为第 j 个属性指标的平均值；

步骤 3: 计算各属性指标的冲突性量化值 T_j :

$$T_j = \sum_{k=1}^{k=1} (1 - r_{jk}) \quad (2-13)$$

其中

$$r = \frac{\sum (y - \bar{y})(z - \bar{z})}{\sqrt{\sum (y - \bar{y})^2 \sum (z - \bar{z})^2}} \quad (2-14)$$

步骤 4: 计算各属性指标的信息量 C_j :

$$C_j = \sigma_j \times T_j \quad (2-15)$$

步骤 5: 计算权重 ω_j :

$$\omega_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j \quad (2-16)$$

综上所述, 主观赋权法容易忽视评估指标数据的客观合理性, 而客观赋权法中熵权法与标准离差法考虑了指标的差异性对比程度, 忽略了 CRITIC 法中所考虑的指标间的冲突性。因此本文选择 CRITIC 法对属性指标赋权。

2.2.2.4 决策对象排序

决策的最终目标是对已知的有限个备选方案作优劣排序。多属性决策排序法主要有以下几种。

(1) SAW 法

SAW (Simple Additive Weighting) 法在决策对象排序中较为常用, 该方法在确定了各指标的权重信息后, 对各方案中的指标权重求和并计算平均值, 依据结果排序, 平均值最大的方案最优。但是该方法有限制条件, H.J.Einhorn 和 W.McCoach 对此给出了相应的理论解释, 即当指标属性相互独立时, 才可满足线性相加形式, 故此方法的应用范围很窄。

(2) ELECTRE 法

ELECTRE (Elimination et Choice Translating Reality) 法的本质是将方案进行选择与淘汰, 其大致步骤是先经过对和谐与非和谐指标的定义和运算, 以确定其阈值, 进而对计算所得指数加以检测, 然后再根据其他条件判断级别为不劣于关系。ELECTRE 法是用弱支配关系淘汰劣方案, 它只能给出方案的部分排序, 不能把握全局态势。

(3) AHP 法

层级分析程序法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 按照决策问题构建层次结构模型, 通过求解判断矩阵的特征向量得出每一层次的每个元素相对于上一层次某一元素的优先权重, 最后通过加权和依次求得备选方案对于总目标方案的权重, 最佳方案为权重最大者。层次分析法具有体系完整性和简明性的优点, 但是定性成分过多导致结果不具备客观性, 且求解过程复杂, 指标计算统计量庞大。

(4) 模糊类多属性决策方法

模糊类多属性决策法是针对权重信息未知或部分已知的情况采取区间数、集结模糊算子、直觉模糊集、灰色关联分析等办法并加入决策者的偏好值对指标权重与方案等级进行排序, 但难以确定模糊理论集中隶属度函数。

(5) TOPSIS 方法

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 法是依据现有的备选方案与理想化最优方案的接近程度进行排序的方法, 其核心思想是将检测决策目标与正理想解(最优解)与负理想解间(最劣解)的欧式距离作比较, 若某一个方案最靠近最优解且最远离最劣解, 则该方案最优, 并依次排序。在诸多评价方法中, TOPSIS 法可以最大限度利用原始数据信息, 增加了科学性, 并且排序结果可以精准反映每个方案之间的差异性程度, 该方法对数据分布以及样本大小没有过多限制。利用 TOPSIS 方法对备选方案进行综合评价, 可以得到良好的可比性结果。

TOPSIS 法步骤如下:

步骤 1: 将矩阵 Y_{ij} 规范化处理得到决策矩阵 Z'_{ij}

$$z'_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2} \quad (2-17)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$

步骤 2: 构造加权后的决策矩阵 Z_{ij} , 其元素 z_{ij} 为

$$z_{ij} = \omega_j z'_{ij} \quad (2-18)$$

步骤 3: 确定正理想解与负理想解:

正理想解:

$$Z^* = \left\{ \left(\max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^+ \right), \left(\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^- \right) \right\} = \{z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*\} \quad (2-19)$$

负理想解:

$$Z^- = \left\{ \left(\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^+ \right), \left(\max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^- \right) \right\} = \{z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-\} \quad (2-20)$$

其中, J^+ 是效益型指标属性, J^- 为成本型指标属性。

步骤 4: 计算各备选方案点分别到正负理想解的欧式距离:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^*)^2} \quad (2-21)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (2-22)$$

步骤 5: 计算各方案的贴近度

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (2-23)$$

步骤 6: 按照贴近度大小对方案的优劣进行排序, 贴近度最大则为最优方案。

(5) VIKOR 方法

VIKOR 方法在 TOPSIS 的基础上进行了改进^[51], 考虑到 TOPSIS 法不能有效区分正负理想解中垂线上的多个目标, 因此通过 VIKOR 方法进行折衷值排序。VIKOR 方法的优点在于将最大化群体效益与最小化反对意见的个别遗憾纳入考虑计算范围内, 因而决策者可以接受 VIKOR 方法的妥协解。

VIKOR 方法的步骤如下:

步骤 1: 在得到目标属性权重 ω_j 以后, 计算最大化群效益 S_i :

$$S_i = \sum_{j=1}^n \omega_j (Z^* - z_{ij}) / (Z^* - Z^-) \quad (2-24)$$

其中, Z^*, Z^- 由式2-19和式2-20得到。

步骤 2: 计算最小化个体遗憾 R_i :

$$R_i = \max_j [\omega_j (Z^* - z_{ij}) / (Z^* - Z^-)] \quad (2-25)$$

步骤 3: 计算利益比率 Q_i :

$$Q_i = v (S_i - S^+) / (S^- - S^+) + (1 - v) (R_i - R^+) / (R^- - R^+) \quad (2-26)$$

其中, v 为决策机制数, 其值体现了策略的重要程度或是决策者的主观偏好。 $v < 0.5$ 表示选取最大化群体效益的决策机制; $v > 0.5$ 表示选取最小化个体遗憾的决策机制; $v = 0.5$ 表示兼顾大多数群体化效益与少数个体化遗憾。一般 v 取 0.5。

步骤 4: 按照 Q_i 值对决策标准进行评判, 设 P_i 为排名第 i 的方案, 则:

1) 可接受优势为, $Q(P_2) - Q(P_1) \geq DQ, DQ = 1 / (m - 1)$, 则 P_1 为最优方案;

2) 决策的可靠程度: 在 S_i 和 R_i 中, P_1 仍为最优方案;

满足条件 1) 和 2) 则 P_1 最优。若不满足条件 1), 则需在方案集中挑选妥协方案。

综上所述我们选择 VIKOR 对决策对象进行排序。

2.3 基于多属性决策的威胁评估框架

目标威胁建模评估是军方战场上实现有效目标分配和火力打击的重要前提，是战争取胜的关键所在。建立一套适合多域作战的目标威胁评估模型是将多属性决策与军事作战相结合的应用基础。作为多属性决策技术的数据输入——原始样本矩阵，需要对多域作战时面临的战场威胁进行全面分析来构建决策矩阵，主要分为战场威胁要素提取与目标属性威胁度建模两部分。

(1) 战场威胁要素提取

在敌我对抗时，敌方威胁目标的能力属性与运动态势属性往往体现了其作战意图，对敌方威胁属性要素的提取对识别其干扰打击手段与保护我军阵地至关重要。本文经过调研发现现有的威胁评估场景都是基于单向空间域，如国土防御、空战、海面目标等单一作战领域等，而忽略了面对信息化条件作战背景下多域作战中多军种联合兵力调配的威胁评估问题；并且，当下所研究的目标威胁评估对象大多限于分队级以下的底层化的具有多种属性的敌方多目标，而随着军方作战体制的改善与优化，战术单元逐步形成支持侦察预警、火力分配、打击支援的规模级别化的作战编队，集群作战^[52]是战场形态的主战力量。

因此本文结合现代战争多域作战的特点，依据目标威胁与集群威胁建立上下层评估指标体系框架，如图2-3所示。具体威胁要素提取本文将在三四章具体分析。

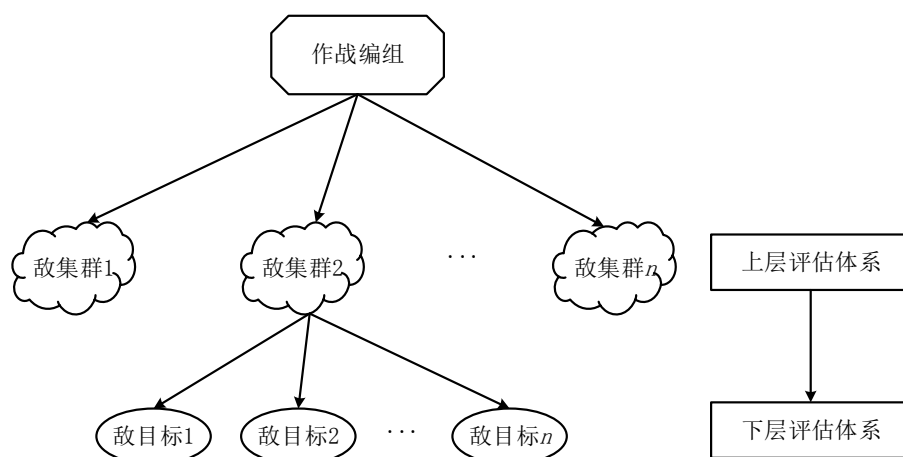


图 2-3 威胁评估指标体系框架

(2) 目标属性威胁度建模

在确定威胁指标评估体系后，我们需要对敌集群或敌目标的威胁属性进行威胁隶属度计算，构造原始样本数据矩阵，本文三四章将具体阐述。

综上所述，本文基于多属性决策，建立如下图2-4所示的威胁评估框架，主

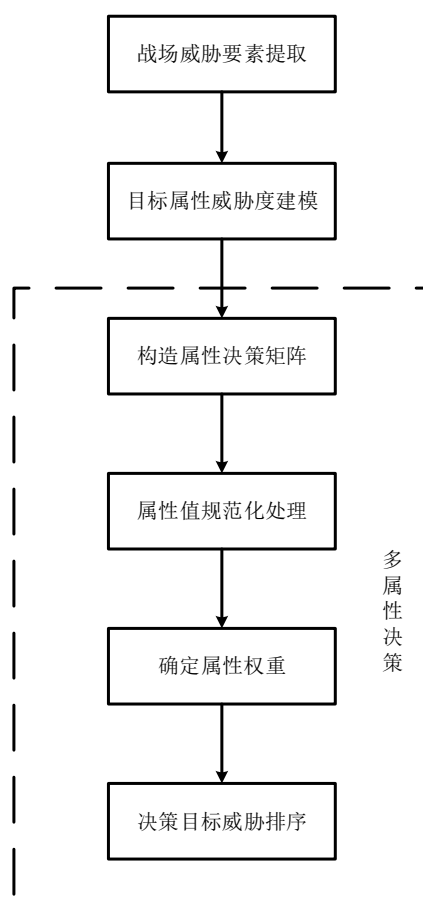


图 2-4 基于多属性决策的威胁评估框架

要包括战场威胁要素提取、目标属性威胁度建模、基于多属性决策的威胁度评估步骤。其中，基于多属性决策的威胁度评估中属性矩阵的输入数据来源于战场探测预警系统的传感器识别并获取的来袭目标的属性信息，包含了目标在我方军事数据库中的能力属性量化信息与测量获取的态势信息，通过对输入的原始样本矩阵进行处理后完成多域目标对我方不同阵地的威胁建模，得到相应的目标威胁属性矩阵后采用多属性决策流程进行威胁度评估。其中，我们在对决策矩阵中的属性值进行标准 0-1 变换处理后用 CRITIC 法计算得到目标各属性权重；最后利用 VIKOR 方法对敌方目标或集群进行威胁度的综合排序，划分威胁等级。根据上述流程，以下章节将基于多属性决策的目标与集群威胁评估方法进行详细研究。

2.4 本章小结

本章首先从组成成分、特性分析、决策步骤三方面介绍了多属性决策基本理论，然后对多属性决策的流程与其所涉及的算法进行了阐述介绍，最后结合多域作战的特点，提出复杂作战场景下基于多属性决策的威胁评估框架。

第三章 多域作战下目标威胁评估

3.1 引言

随着战场空间向多维多域演变，战场形势更加严峻。针对现有威胁评估场景大多单一不能适应多域作战威胁评估的需求，本章提出了一套适用于多域作战下的目标威胁评估模型。在指挥作战过程中，作战指挥员能够依据战场的实时态势将敌来袭目标对我方不同空间域防御构成的威胁程度进行评估与排序。由于多域作战下敌方的作战目标属性要素较多，对每个敌目标威胁评估的影响也较大，因此提出针对不同作战场景提出不同的威胁属性要素建模方法，在确保各威胁属性要素提取与评估科学合理的前提下，将要素进行威胁隶属度分类与融合分析，利用 CRITIC 法求得目标属性权重，并采用 VIKOR 法进行敌方目标威胁值排序，为指挥火力分配打击提供作战根基。

3.2 多域作战下目标威胁属性建模

多域作战下敌方目标威胁属性建模方法是目标威胁研究评估中的一个重要环节，科学合理的目标威胁评估模型使应用多属性决策理论的前提。多域作战下敌方目标威胁属性建模分析主要包括目标威胁要素的提取与目标威胁度建模方法研究。

3.2.1 目标威胁要素提取

战场作战数据纷杂多样，提取多维数据要素的关键与数据的自身性质极大程度关联，威胁要素的提取技术需要兼顾传感器获取的原始样本数据的结构完整性与独立特征性，依据要素属性的自身结构特点，采用简便的计算方法。不论是国土防御、空战或是舰艇防空作战等单一作战场景，还是陆海空多域化一体作战，战场威胁要素除了个体化地域对抗的差异，我方预警传感器提取显示的常见目标威胁属性类型大体相同。因此受敌方作战意图和威胁能力的影响，战场目标威胁属性大体上可分为静态能力属性和动态测量属性。按照目标属性的动静态划分，敌方目标的目标类型、电子干扰能力、机动性能等属于静态目标属性，是目标的固有威胁属性；而像敌方目标的速度、航向角、位置距离等属于动态目标属性，其中，按照指标属性进行分类，电子干扰能力、机动性能属于效益型指标，而目标角度、距离高度等属于成本型指标。

因此本节通过调研对作战场景中敌方多域作战目标的代表性威胁要素进行提

取,如图所示,目标属性威胁要素分为作战目标能力属性与作战目标态势属性,作战目标的能力属性是目标的固有属性,如作战平台类型、自身性能参数等;作战目标的态势属性主要指传感器测量的目标的动态属性,如作战目标的速度、航向角等。

(1) 作战目标能力属性

作战目标能力属性主要要素提取如下图所示3-1。作战目标的静态能力属性通过专家依据实际作战经验与军事数据库比对得到目标在不同空间域的固有威胁度

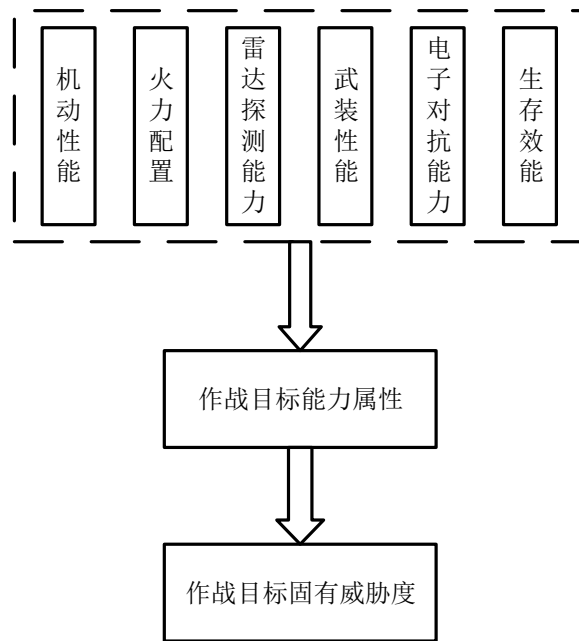


图 3-1 作战目标能力属性要素

1) 目标机动性能

作战目标的机动性能指的是目标自身配置性能,如飞机的航程系数、盘旋能力以及推重比,还有舰船的续航距离或者排水量等。在有限的作战单位时间内,机动性能越好的目标在突击与逃避时对我方的火力拦截有重大阻力。

2) 目标火力配置

在实际军事作战中,火力配置参数是目标能力属性的重要衡量要素,不同规模类型的作战目标的载弹量与战场价值均不同,直接决定了敌方来袭目标的攻击能力。根据火力配置指挥部可分析推理其作战意图与遭受火力打击后我方的毁伤指数。

3) 目标雷达探测能力

目标的雷达探测能力能帮助作战方熟知整个战场态势,机载雷达、舰载雷达或是陆基雷达等截获的有效战场情报有利于取得作战先机。通过目标搜索指示雷

达探测防御区域的多个敌方威胁目标，然后跟踪制导雷达通过接收到的作战传输数据链对威胁度最大的目标进行拦截，并在有效杀伤区击毁，对火力打击有重大指导意义。

4) 目标武装性能

敌方作战目标在进行规避、干扰、打击等作战任务时，所携带的装备是不同的，装备类型和数量一般受作战平台严格控制。指挥部在作战分析时，会依据观测到的装备对敌来袭目标的作战意图和作战任务进行预测，分析每个目标间的协同关系。因此需要对敌目标武装性能的威胁要素进行提取，为火力打击提供作战基础。

5) 目标电子干扰能力

在信息化战争的快速军事变革中，电子战尤为突出，目标的电子干扰能力在电子对抗中占据重要地位，目的是对我方的各种电子设备和遂行战场侦察指挥、通信联络进行削弱与破坏，达到对我方的时域空域与能量域的规模性覆盖。因此对目标电子干扰能力的相关数据提取对作战安全有极大战略价值。

6) 目标生存效能

当目标受到物理或功能性毁伤时会造成体系失效而导致作战任务的失败。因此目标的生存效能是实现作战目的不可或缺的组成部分。

(2) 作战目标态势属性

作战目标态势属性要素提取如下图3-2所示，下一节根据属性要素针对不同空间域进行威胁建模分析。

1) 目标角度

目标角度信息对作战目标动态属性的重要参考信息，一般认为我方目标在敌方目标行程轨迹的垂直方向上，由于反应时间最为紧迫因而威胁度最大。对于不同战场空间的目标，目标角度指标有所不同，例如空战中飞机的俯仰角、翻滚角，海战中舰艇间的舷角等。目标角度往往反映了目标的空间领域中的机动性与姿态信息。

2) 目标速度

目标速度是作战目标运动的直接物理特征，各目标的实时速度与机动平台的最大速度—例如飞机舰船的最大航行速度、导弹的关机点速度等，决定了目标的攻击意图与对我方的防御威胁程度。具有高速运动性能的目标更加容易躲避我方侦察与打击，对我方火力攻击后可以迅速撤退，对我方威胁度极大。

3) 目标距离

作战目标距离是指挥战术决策的重要信息，敌方来袭目标距离逼近我方重要

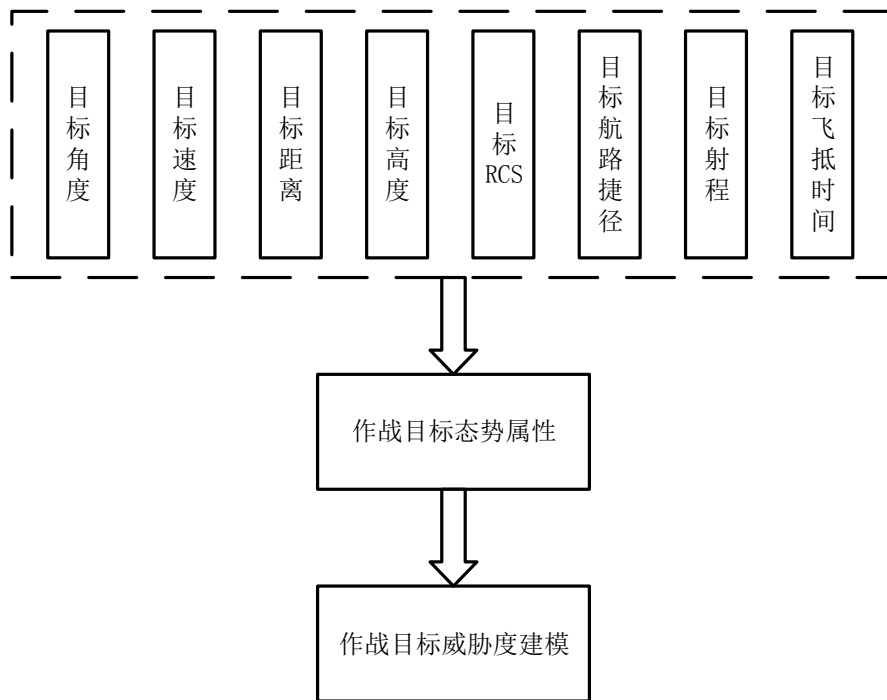


图 3-2 作战目标态势属性要素

作战平台如指挥部、军事基地等，留给我方防御打击的时间越少，采取战斗机制的紧迫程度越大，对我军的威胁度越大。

4) 目标高度

在空战中，依据目标高度信息的改变，可以判断飞机高空、中空、低空、超低空飞行，典型作战场景的历史数据显示，敌方战机通常通过降低自身的飞行高度对我方要地进行轰炸式攻击，或是实现低空和超低空的突防突围。因此目标高度是战场情报的重要信息。

5) 目标 RCS

目标的 RCS（Radar cross-section, RCS）是指雷达的反射截面积，反映的是目标在雷达接收方向上反射雷达信号能力的度量。在一般型的军事作战场景中，RCS 属于空战军机的特有属性，本文选择只在考虑空域来袭目标时提取 RCS 属性要素。目标的 RCS 越小，我方雷达能探测识别到的目标特征信息就越少，对我方威胁程度越大。

6) 目标航路捷径

作战目标的航路捷径指空中目标航向在水平面投影的垂直距离，反映了目标在攻打我方时的命中和杀伤概率与防御方的空中拦截能力，若目标是直线运动则其航路捷径为常数，航路捷径的大小标志着水平拦截作战空域的大小。

7) 目标射程

作战目标的射程一般针对于导弹作战，我方依据导弹的发射点与落地点可计算导弹完成此次作战任务的完整飞行距离。导弹的射程越大，摧毁能力越强，对我方的威胁就越大。目标射程属性在本文中仅用来评价来袭导弹的威胁度。

8) 目标飞抵时间

作战目标的飞抵时间在一般型作战场景中针对于导弹作战，由于导弹发射是针对于攻打特定目标，在我方卫星侦察系统观测到后，通过作战数据链反映给指挥部，可以计算出导弹击中目标所需要的时间。在导弹射程一定的条件下，剩余飞行时间越短，袭击的突然性越强，对我方威胁度越大。目标飞抵时间属性在本文中仅用来评价来袭导弹的威胁度。

3.2.2 目标威胁度建模方法研究

由于本文威胁度评估是基于多域作战的军事背景环境，例如我方海基雷达和陆基雷达同时观测到敌方的一架飞机，飞机对我方空海地等范围域都会构成威胁，但是威胁度的大小不同，因而针对提取的不同威胁属性要素在不同的作战环境下需要不同的威胁建模方法。本文选取基于国土、海上、空中防御的三个角度，判决敌方多域来袭目标分别对我方空域、海域、地域的威胁度排序。

3.2.2.1 作战目标能力属性

作战目标的静态能力属性用目标类型体现其固有属性，我方侦察体系通过探测确定了敌作战目标类型后，经过军事数据库比对及专家经验可得到其作战效能指数，并转化为不同作战场景下的固有威胁度。不同地域范围的目标对应的空战、海战、陆地战的能力属性威胁度分析不同。

(1) 空战能力指数

$$C = \left[\ln B + \ln \left(\sum A_1 + 1 \right) + \ln \left(\sum A_2 \right) \right] \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 \quad (3-1)$$

如式3-1所示为空域目标的空战能力属性模型，C为作战目标的空战能力指数，B为作战目标的机动性能参数， A_1 为火力配置强度参数， A_2 为作战目标的机载雷达探测能力参数， ϵ_1 为作战目标的生存效能参数， ϵ_2 为作战目标的操作性参数， ϵ_3 为作战目标续航能力参数， ϵ_4 为作战目标的电子对抗能力参数。

(2) 海战能力指数

$$F = G \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \quad (3-2)$$

如式所示3-2为海上目标的海战能力属性模型，F为作战目标的海战能力指数，

G 为作战平台指数, F_1 为作战目标的机动性能参数, F_2 为目标的火力配置强度参数, F_3 为舰载雷达探测性能参数, F_4 为作战目标的生存效能参数, F_5 为作战目标的续航能力参数, F_6 为作战目标的电子对抗能力参数。

(3) 陆地战能力指数

$$E = I \times J \times K \times L \quad (3-3)$$

如式所示3-3为陆地目标的陆地战能力属性模型, E 为作战目标的陆地战能力指数, I 为作战目标的综合火力指数, J 为作战目标的机动性能参数, K 为生存效能系数, L 为电子对抗能力参数。

3.2.2.2 作战目标态势属性

作战目标的动态态势属性为目标的角度、速度、距离、高度以及针对不同作战场景的作战目标所特有的目标 RCS、目标航路捷径、目标飞抵时间等威胁属性要素, 建立敌空我空、敌空我海、敌空我地、敌海我空、敌海我海、敌海我地、敌地我空、敌地我海、敌地我地、导弹攻击共 10 种威胁评估模型, 具体研究如下:

(1) 敌空我空

1) 角度威胁指数

依据敌方目标相对我方阵地火力单元的空战态势, 目标的速度方向与连接我方阵地的线的夹角为目标进入角, 用 θ 表示, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 。当飞机的航向角, 即相对于我方位置的目标进入角越小, 其攻击意图越大, 对我方越有威胁。如式3-4定义空空战中角度威胁指数为 Q_{aa} 。

$$Q_{aa} = (\pi - \theta) / 360 + 0.5 \quad (3-4)$$

2) 速度威胁指数

作战过程中, 敌机的速度越大, 其攻击的精准性和敏捷性越高, 留给我方反应时间越少, 在对我方目标实施打击阶段前后躲避我方拦截更容易, 威胁越大。如式3-5所示, 选取 V_{aa} 为目标速度威胁指数, 其中 v_j 代表敌方第 j 架飞机的速度, v_i 代表我方第 i 架飞机的飞行速度, 单位为 Ma。

$$V_{aa} = \begin{cases} 0.1 & v_j < 0.6v_i \\ -0.5 + v_j/v_i & 0.6v_i \leq v_j \leq 1.5v_i \\ 1.0 & v_j > 1.5v_i \end{cases} \quad (3-5)$$

3) 距离威胁指数

以我方雷达探测范围与攻击距离为界限对敌方目标与我方阵地的距离进行划分, 则敌方作战目标在不同范围区域内对我方的威胁度不同。当目标在我方雷达的探测范围之外, 则距离我方保护目标有一定距离, 认为威胁度最小; 当我方雷达探测到敌机位置信息, 但未在我方打击区域内, 威胁度逐步上升; 当敌方目标逐渐迫近我方, 甚至进入我方火力打击区域, 则且威胁度会大幅提升。选取 D_{aa} 为空空战中距离威胁指数, 基于我方探测与攻击范围计算 D_{aa} , 如式3-6:

$$D_{aa} = \begin{cases} 0.4 & d > 120 \\ 0.4 + 0.6 \times \frac{d-60}{120-60} & 60 < d \leq 120 \\ 1 & d \leq 60 \end{cases} \quad (3-6)$$

4) 高度威胁指数

在空中作战中, 敌我双方的飞行高度很大程度上决定了被对方探测雷达锁定的可能性大小, 为了取得空战先机, 敌方飞机比我方飞机的飞行高度越高, 越容易获得制空权, 威胁度越大。选取 H_{aa} 为空空战中高度威胁指数, 其中 h_j 指的是敌方飞机的飞行高度, h_i 指的是我方飞机的飞行高度。

$$H_{aa} = \begin{cases} 1 & h_j - h_i > 5km \\ 0.5 + 0.1 * (h_j - h_i) & -5km \leq h_j - h_i \leq 5km \\ 0.1 & h_i - h_j > 5km \end{cases} \quad (3-7)$$

5) 航路捷径威胁指数

敌机的航路捷径指的是敌机航向在水平面投影的垂直距离。航路捷径越小, 对我方威胁越大。为分析航路捷径的威胁隶属度, 设置上下边界阈值, 如果小于上限临界值, 则威胁度最大, 反之最小。如式3-8所示, 为目标航路捷径威胁指数函数。 p_a , p_b 为航路捷径的上下临界点, 依据目标作战样式选取不同的值。此处取 $p_a=4km$, $p_b=8km$ 。

$$Z = \begin{cases} 1 & x \leq p_a \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{p_b - p_a} \left(x - \frac{p_b + p_a}{2} \right) \right] & p_a < x < p_b \\ 0.1 & x \geq p_b \end{cases} \quad (3-8)$$

6) 飞机 RCS 威胁指数

飞机的 RCS 越小, 则飞机的隐身性能越好, 我方探测器发现能力就会变弱, 对我方的威胁程度就越大。飞机 RCS 威胁指数如表3-1所示。

(2) 敌空我海

表 3-1 空空战飞机 RCS 威胁指数

飞机 RCS/ (m^2)	威胁指数 R_{aa}
[0,1]	1
(1,10]	0.8
(10,100]	0.4

1) 角度威胁指数

在我方舰艇防空作战场景中，敌方目标是导弹或者飞机时，从我方舰艇正横位置进入，突击性更强，威胁度更大。空海战角度威胁指数如式3-9所示，其中 θ 为目标进入的方位角。

$$Q_{as} = \frac{1}{1 + k_{\theta} (\theta - 90)^2} \quad (3-9)$$

其中， k_{θ} 为目标角度的威胁系数，取 $k_{\theta}=0.0003$ 。

2) 速度威胁指数

敌机的速度不同，对我方舰艇的威胁不同。空海战中速度威胁指数如式所示3-9。取 $a=1.2Ma$ 。

$$V_{as} = \begin{cases} 0.3 & v \leq 1.1a \\ 0.3 + 0.7 \times \frac{v-1.1a}{1.8a-1.1a} & 1.1a \leq v < 1.8a \\ 1 & v \geq 1.8a \end{cases} \quad (3-10)$$

3) 距离威胁指数如式3-11为空海战中距离威胁指数。

$$D_{aa} = \begin{cases} 0.2 & d > 180 \\ 0.2 + 0.6 \times \frac{d-75}{180-75} & 75 < d \leq 180 \\ 0.8 & d \leq 75 \end{cases} \quad (3-11)$$

4) 高度威胁指数

空中飞机攻击海上舰艇时，距离水面的高度决定了该架敌机的攻击样式，当采用低空与超低空结合的饱和攻击时，此时威胁度最大，当敌机位于超高空时，威胁最小。如表3-2为空海战中高度威胁指数。

5) RCS 威胁指数

由于观测到的敌方飞机的 RCS 是可以通过军事数据库比对得到的参数，是具体类型飞机的固有属性，威胁度依据具体作战场景改变。

6) 航路捷径威胁指数

表 3-2 空海战高度威胁指数

敌机高度/ (km)	威胁指数 H_{as}
超低空 (0,0.1]	1
低空 (0.1,1]	0.8
中空 (1,7]	0.6
高空 (7,15]	0.4

表 3-3 空海战飞机 RCS 威胁指数

飞机 RCS/ (m^2)	威胁指数 R_{aa}
[0,1]	0.8
(1,10]	0.6
(10,100]	0.5

由于航路捷径计算关键在于空间水平面投影的垂直距离，模型与空空战相同，如式3-8，但是航路捷径的上下边界阈值点需要依据具体作战场景设定。此处取 $p_a=9\text{km}$ ， $p_b=17\text{km}$ 。

(3) 敌空我地

1) 角度威胁指数

由于当我方是地面或海上航行时处于同一海拔高度，所以空地战的角度威胁指数 $Q_{ag}=Q_{as}$ 。

2) 速度威胁指数

当单架空中飞机或是编队型飞机对我方陆基系统构成威胁时，依据飞机类型设置不同 a 值。此处取 $a=1.7\text{Ma}$ 。

$$V_{ag} = \begin{cases} 0.5 & v_i \leq \frac{2}{3}a \\ 0.5 + 0.5 \times \frac{v_i - \frac{2}{3}a}{a} & \frac{2}{3}a < v_i \leq \frac{5}{3}a \\ 1 & v_i > \frac{5}{3}a \end{cases} \quad (3-12)$$

3) 距离威胁指数

选取 D_{as} 为空空战中距离威胁指数，基于我方探测与攻击范围计算 D_{as} ，如式3-6：

$$D_{aa} = \begin{cases} 0.2 & d > 160 \\ 0.2 + 0.8 \times \frac{d-55}{160-55} & 55 < d \leq 160 \\ 1.0 & d \leq 55 \end{cases} \quad (3-13)$$

4) 高度威胁指数

表 3-4 空地战高度威胁指数

敌机高度/ (km)	威胁指数 H_{ag}
超低空 (0,0.1]	1
低空 (0.1,1]	0.9
中空 (1,7]	0.7
高空 (7,15]	0.5

5) RCS 威胁指数

表 3-5 空地战飞机 RCS 威胁指数

飞机 RCS/ (m^2)	威胁指数 R_{ag}
[0,1]	0.9
(1,10]	0.7
(10,100]	0.5

6) 航路捷径威胁指数

模型同式3-8所示,也需依据作战体系不同设置上下临界点值。此处取 $p_a=12\text{km}$, $p_b=20\text{km}$ 。

(4) 敌海我空

1) 角度威胁指数

若我方空中编队的方向敌方海上目标行进的方向相背离,受到敌方目标的威胁可能就越大。设我方空中编队的速度方向与连接我方编队与敌方目标的线的夹角为目标的航向角。左偏为正, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 。

$$Q_{sa} = 0.5 + |\theta| / 360 \quad (3-14)$$

2) 速度威胁指数

现代的海洋作战尤为注重协同作战的能力,速度的统一至关重要。由于作战军舰的体积规模都比较庞大,再加上海洋上的复杂气候环境,如果速度过快,军舰的行进会遭受水流的冲击而变得不稳定。经过历时经验与相关技术人员的测验,发现 30 节,即约等于 60km/h 是军舰在海上的最佳航行速度,并且同样距离下 30

节比 40 节更节省燃料。选取海空战中速度威胁指数 V_{sa} 如下：

$$V_{sa} = \begin{cases} 0.4 & 0 < v < 12 \\ 0.4 + 0.2 \times \frac{v-12}{36-12} & 12 \leq v < 36 \\ 0.6 + 0.2 \times \frac{v-36}{60-36} & 36 \leq v < 60 \\ 0.8 & v \geq 60 \end{cases} \quad (3-15)$$

3) 距离威胁指数

敌方舰艇与我方空中保护目标的距离可大体上分为近程、中程与远程。海空战中距离威胁指数 D_{sa} 如下：

$$D_{sa} = \begin{cases} 0.2 & d > 100 \\ 0.2 + 0.02 \times \frac{d-10}{100-10} & 10 \leq d < 100 \\ 0.22 & d < 10 \end{cases} \quad (3-16)$$

4) 高度威胁指数

敌舰对于我方空域的高度是无效值，高度主要通过上述距离威胁指数体现，在计算时会作特殊处理。

(5) 敌海我海

1) 角度威胁指数

敌方军舰前进方向与我方防御保护区域夹角为 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ，根据实际情况判断认为，从敌方目标的运动方向与我方行驶方向垂直时，其威胁最大；与我方行驶方向平行时，威胁最小。因此建立如下威胁隶属度函数 Q_{ss} ：

$$Q_{ss} = \begin{cases} \frac{\theta}{90} & 0 < \theta \leq 90 \\ \frac{180-\theta}{90} & 90 < \theta \leq 180. \end{cases} \quad (3-17)$$

2) 速度威胁指数

$$V_{sa} = \begin{cases} 0.6 & 0 < v < 12 \\ 0.6 + 0.2 \times \frac{v-12}{36-12} & 12 \leq v < 36 \\ 0.8 + 0.2 \times \frac{v-36}{60-36} & 36 \leq v < 60 \\ 1.0 & v \geq 60 \end{cases} \quad (3-18)$$

3) 距离威胁指数

将观测到的海上来袭目标与我方防御界限范围的距离划分为 5 个等级，对于

不同距离范围内的目标，我方防御作战阶段与目标的威胁隶属度都会相应改变。例如，当目标在 100KM 之外时，我方舰艇编队应采取外层防御机制，启动相应的告警级别；当目标在 50 至 100KM 是，我方近末端防御机制启动，告警级别上升；当目标在 10 至 50KM 时，末端防御启动，告警级别进一步上升；当目标在 10KM 之内时，防御级别和威胁程度都上升到了最高级。因此根据威胁等级的判断决策，我方可以进行相应的规避、驱逐干扰甚至是击毁目标。海海战中距离威胁指数 D_{ss} 如下：

$$D_{ss} = \begin{cases} 0.4 & d > 100 \\ 0.4 + 0.3 \times \frac{d-50}{100-50} & 50 < d \leq 100 \\ 0.7 + 0.3 \times \frac{d-10}{50-10} & 10 < d \leq 50 \\ 1.0 & d \leq 10 \end{cases} \quad (3-19)$$

4) 高度威胁指数

当敌方军舰与我方舰艇在海上对峙时，处于同一海平面，高度为 0。

(6) 敌海我地

1) 角度威胁指数

以敌方威胁目标行进方向与我方保卫目标连线为基准，定义航向角，顺时针为正， θ_0 为航向角的偏差阈值， γ_θ 为角度威胁衰减系数， α_θ 为最小航向角偏差的威胁度，依据不同军事作战体系，设置不同参数值，其中 $\theta_0=90^\circ, \gamma_\theta = -0.03, \alpha_\theta=0.2$ 。海地战中角度威胁指数 Q_{sg} 如下：

$$Q_{sg} = \begin{cases} (1 - \alpha_\theta) e^{\gamma_\theta |\theta|} + \alpha_\theta & |\theta| < \theta_0 \\ \alpha_\theta & |\theta| \geq \theta_0 \end{cases} \quad (3-20)$$

2) 速度威胁指数

选取上升型指数函数形式， v_0 为速度威胁阈值， γ_v 为速度衰减系数， α_v 为最小速度威胁度，依据不同军事作战体系，设置不同参数值，其中 $v_0=50, \gamma_v = -0.055, \alpha_v=0.2$ 。海地战中角度威胁指数 V_{sg} 如下：

$$V_{sg} = \begin{cases} 1 - (1 - \alpha_v) e^{\gamma_v (v-v_0)} & v \geq v_0 \\ \alpha_v & v < v_0 \end{cases} \quad (3-21)$$

3) 距离威胁指数

我国海军将最靠近陆地 200 海里以内的海域称为近岸海域，因而当敌方的军舰与我方陆地战队的距离小于 400 公里时，选取观测到的敌方海面舰艇所处海域

为距离远近威胁, 距离威胁指数如下, 选取下降性指数函数, d_0 为距离威胁阈值, γ_d 为距离威胁衰减系数, α_d 为最近距离威胁度, 依据不同军事作战体系, 设置不同参数值。地海战中距离威胁指数 D_{gs} 如下。其中, $d_0=400, \gamma_d = -0.16, \alpha_d=0.2$ 。

$$D_{gs} = \begin{cases} 1 & d < d_0 \\ (1 - \alpha_d) e^{\gamma_d(d-d_0)} + \alpha_d & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3-22)$$

4) 高度威胁指数

当敌方军舰与我方陆基战队在沿海海域或是近岸对峙时, 处于同一海拔高度, 高度为 0。

(7) 敌地我空

1) 角度威胁指数

当敌方陆地军队对我方空中编队造成威胁时, 有 $Q_{ga}=Q_{sa}$ 。

2) 速度威胁指数

依据专家及作战经验, 武器单兵最大行进速度为 10km/h, 装甲车和中型车辆最大行进速度为 100km/h, 历史平均速度为 60km/h。地空战中的速度威胁指数如下式所示:

$$V_{ga} = \begin{cases} 0.1 & 0 < v < 10 \\ 0.1 + 0.2 \times \frac{v-10}{60-10} & 10 < v \leq 60 \\ 0.3 + 0.2 \times \frac{v-60}{100-60} & 60 < v \leq 100 \end{cases} \quad (3-23)$$

3) 距离威胁指数

当敌我双方是地空对峙时, 结合飞机的飞行高度与我方陆地战队的行进路程, 依据距离远近进行威胁评估, 地空战距离威胁指数 D_{ga} 如下:

$$D_{ga} = \begin{cases} 0.1 & d > 100 \\ 0.1 + 0.01 \times \frac{d-50}{100-50} & 50 < d \leq 100 \\ 0.11 & 0 < d \leq 50 \end{cases} \quad (3-24)$$

4) 高度威胁指数

敌方陆地目标对于我方空中目标的高度是无效值, 高度主要通过上述距离威胁指数体现, 在计算时会作特殊处理。

(8) 敌地我海

1) 角度威胁指数

由于敌地我海与敌海我地是同一作战场景的下敌我空间域发生了改变, 所以

角度威胁指数 Q_{gs} 同式3-20所示。设置不同参数值, 其中 $\theta_0=90^\circ, \gamma_\theta=-0.03, \alpha_\theta=0.3$ 。
地海战中角度威胁指数 $Q_{gs}=Q_{sg}$

2) 速度威胁指数

$$V_{ga} = \begin{cases} 0.2 & 0 < v < 10 \\ 0.2 + 0.2 \times \frac{v-10}{60-10} & 10 < v \leq 60 \\ 0.4 + 0.2 \times \frac{v-60}{100-60} & 60 < v \leq 100 \end{cases} \quad (3-25)$$

3) 距离威胁指数

$$D_{gs} = \begin{cases} 0.3 & d > 100 \\ 0.3 + 0.38 \times \frac{d-50}{100-50} & 50 < d \leq 100 \\ 0.38 & 0 < d \leq 50 \end{cases} \quad (3-26)$$

4) 高度威胁指数

敌我双方处于同一水平高度, 所以高度威胁指数为 0。

(9) 敌地我地

1) 角度威胁指数

当敌我的作战区域范围为陆地战时, 敌我处于同一作战空间, 角度威胁可同式3-17。

2) 速度威胁指数

$$V_{ga} = \begin{cases} 0.6 & 0 < v < 10 \\ 0.6 + 0.4 \times \frac{v-10}{60-10} & 10 < v \leq 60 \\ 1.0 & 60 < v \leq 100 \end{cases} \quad (3-27)$$

3) 距离威胁指数

假设陆地上指挥所、兵营和战略物资的储备区等我方重要防御区域, 考虑敌方目标与我方区域距离, 分别用 R_1, R_2, R_3 表示, 则敌方目标处于远区、中区、近区范围内的威胁度指数如下式, 取 $R_1=50\text{km}, R_2=35\text{km}, R_3=20\text{km}$ 。

$$D_{gs} = \begin{cases} 0.4 & d \geq R_1 \\ 0.4 + 0.3 \times \frac{d-R_2}{R_1-R_2} & R_2 \leq d < R_1 \\ 0.7 + 0.3 \times \frac{d-R_3}{R_2-R_3} & R_3 \leq d < R_2 \\ 1 & d < R_3 \end{cases} \quad (3-28)$$

4) 高度威胁指数

敌我双方处于同一水平高度，所以高度威胁指数为 0。

(10) 导弹攻击威胁

1) 导弹角度威胁指数

定义导弹角度为导弹处于我方方位的舷角， $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ 。当 β 为 90° ，我方目标被命中的概率最大，当 β 为 0° 或 180° 时，对我方目标的威胁度最小，导弹角度的威胁度指数 M_q 如下式所示：

$$M_q = \frac{1}{1 + 0.0005(\beta - 90)^2} \quad (3-29)$$

2) 导弹速度威胁指数

导弹速度决定了其攻击威力，尤其在导弹飞行的中段与末段阶段，增加了我方探测拦截的难度，对我方防御目标造成的冲击力越强。依据不同类型导弹飞行速度大小变化进行线性处理得式3-30，导弹速度单位为 km/s 。

$$M_v = \begin{cases} 0.4 & v < 1 \\ 0.4 + 0.3 \times \frac{v-1}{3-1} & 1 \leq v < 3 \\ 0.7 + 0.3 \times \frac{v-3}{6.5-3} & 3 \leq v < 6.5 \\ 1.0 & v \geq 6.5 \end{cases} \quad (3-30)$$

3) 导弹距离威胁指数

$$M_d = \begin{cases} 0.4 & d > 1300 \\ 0.4 + 0.3 \times \frac{d-800}{1300-800} & 800 < d \leq 1300 \\ 0.7 + 0.3 \times \frac{d-300}{800-300} & 300 < d \leq 800 \\ 1.0 & d \leq 300 \end{cases} \quad (3-31)$$

4) 导弹射程威胁指数

导弹射程指的是导弹从发射位置到落地点的大地线距离，是导弹作战威胁评估的一个重要战术指标。导弹按照射程远近分类可分为洲际导弹、远程导弹、中程导弹、近程导弹。导弹的射程越大，对我方的摧毁能力越强，因而威胁度越大。在反导作战中，敌方来袭导弹的射程信息一般依据预警雷达探测系统得到，经战场情报信息综合与预测计算处理可得到导弹的发射点与落地点的位置坐标，用相

应公式计算射程。依据导弹射程大小进行线性分类，得式3-32。

$$M_r = \begin{cases} 0.4 & d \leq 300 \\ 0.4 + 0.2 \times \frac{d-300}{1000-300} & 300 < d \leq 1000 \\ 0.6 + 0.2 \times \frac{d-1000}{5000-1000} & 1000 < d \leq 5000 \\ 0.8 + 0.2 \times \frac{d-5000}{8000-5000} & 5000 < d \leq 8000 \\ 1.0 & d > 8000 \end{cases} \quad (3-32)$$

5) 导弹高度威胁指数

按照国际惯例，“领空”一般指一个国家领土和领海垂直向上 100 公里所包含的区间，并对其享有管辖权，而超过 100 公里高空则称为“宇宙空间”，为所有国家公共自由活动空间。 h 为导弹飞行过程中距大地线平面的高度，低空飞行时由于雷达受制于地形等原因例如大山阻挡、地面反射杂波因而越难被发现，且越难被拦截，威胁就越大，隶属函数如下：

$$M_h = \begin{cases} 1 & 0 \leq h \leq 100 \\ e^{-s(h-\xi)^2} & h > 100 \end{cases} \quad (3-33)$$

其中， $s = 10^{-5}$, $\xi = 100$ 。

6) 飞抵时间

从我方预警雷达发现导弹即测量时间到导弹击中我方目标即落地时间，以秒为计量单位。在实际作战情况中，测算到的目标飞抵时间越短，我方拦截紧迫性越高，成功概率越小，因此威胁度越大。根据以往作战经验及专家意见，当飞行剩余时间低于 300s 时，我方拦截最为困难，对我方拦截弹发射以及三次拦截时间是很大考验，所以此时威胁度最高为 1；当超过 1200s 时，我方防御系统有较为充足的时间进行指挥拦截，威胁度较低，为 0.4；当时间在 300s 到 1200s 时，威胁度是一个线性变化过程。因此威胁度在不同时间范围内的归一化公式如式3-34。

$$M_t = \begin{cases} 1 & t \leq 300 \\ 1 - 0.6 \times \frac{t-300}{1200-300} & 300 < t \leq 1200 \\ 0.4 & t > 1200 \end{cases} \quad (3-34)$$

6) 导弹航路捷径威胁指数导弹航路捷径是导弹在杀伤区内的航向参数，体现了导弹的协同作战能力以及掩护能力。威胁指数如下式3-35，其中 k 为常系数， x

为航路捷径值。此处取 $k = 0.005$ 。

$$Z = e^{-k(x)^2} \tag{3-35}$$

7) 导弹 RCS 威胁指数

表 3-6 导弹 RCS 威胁指数

导弹 RCS/ (m^2)	威胁指数 R_m
[0,0.5]	1
(0.5,1]	0.8
(1,10]	0.6

3.3 多属性决策威胁评估实验结果及分析

在上述多域作战目标威胁建模研究基础上我们得到了目标属性威胁评估模型，下面将采用多属性决策方法基于我方阵地对不同敌来袭目标进行威胁度评估。

本文实验数据来源于作战案例场景的仿真想定数据，并做了脱密性处理。某时刻下我方空中编队飞行高度 h_i 为 $7km$ ，速度 v_i 为 $1.4Ma$ ，挂载雷达联合观测到 14 个敌方目标相关信息，经由作战情报数据链传输需要将目标的角度与距离转化为分别基于我方空海地三域的威胁态势信息，其余威胁态势属性数据不变。下面将结合多属性决策方法根据我方具体空间域位置评估敌方目标的威胁度。

(1) 我方为空域

表 3-7 空域目标固有威胁度

目标编号	目标类型	固有威胁度
目标 1	巡洋舰	0.6
目标 2	驱逐舰	0.5
目标 3	护卫舰	0.3
目标 4	航母	0.4
目标 5	轰炸机	0.25
目标 6	预警机	0.7
目标 7	干扰机	0.8
目标 8	歼击机	0.9
目标 9	武装单兵	0.1
目标 10	中型车辆	0.15
目标 11	装甲车辆	0.2
目标 12	对空导弹	0.98
目标 13	反舰导弹	0.01
目标 14	对地导弹	0.01

表 3-8 空域目标态势信息

	角度 /度	速度	距离 /km	高度 /km	航路捷径 /km	RCS /m ²	飞抵时间 /s	射程 /km
目标 1	160	37km/h	180	*	*	*	*	*
目标 2	-45	68km/h	9.8	*	*	*	*	*
目标 3	100	16km/h	46	*	*	*	*	*
目标 4	18	43km/h	23	*	*	*	*	*
目标 5	67	1.75Ma	180	10.9	7.4	0.36	*	*
目标 6	21	1.12Ma	98	8.5	8.1	12	*	*
目标 7	-16	1.26Ma	55	13.6	17.6	8	*	*
目标 8	12	2.24Ma	78	8.98	4.2	0.04	*	*
目标 9	132	7.4km/h	50	*	*	*	*	*
目标 10	101	58km/h	59	*	*	*	*	*
目标 11	93	93km/h	48	*	*	*	*	*
目标 12	87	3.6km/s	124	136	94	0.24	132	230
目标 13	15	6.9km/s	1087	189	122	0.56	*	*
目标 14	14	5.7km/s	1320	160	667	0.8	*	*

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 0.944 & 0.608 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 \\ 0.625 & 0.8 & 0.22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.778 & 0.433 & 0.208 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0.550 & 0.658 & 0.203 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 \\ 0.323 & 0.750 & 0.4 & 0.89 & 0.054 & 1 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.450 & 0.3 & 0.78 & 0.65 & 0.1 & 0.4 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.553 & 0.4 & 1 & 1 & 0.1 & 0.8 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0.475 & 1 & 0.58 & 0.698 & 0.994 & 1 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0.867 & 0.1 & 0.110 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0.781 & 0.292 & 0.102 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \\ 0.758 & 0.465 & 0.11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0.996 & 0.751 & 1 & 0.987 & 0 & 1 & 1 & 0.4 & 0.98 \\ 0.262 & 1 & 0.572 & 0.924 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0.257 & 0.931 & 0.4 & 0.965 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

依据专家经验结合 3.2.2.1 节中作战目标能力属性因素得出当我方为空域时敌方各目标的固有威胁度，如上表3-7；经战场数据共享后对于我方空域的目标态势信息如上表3-8：

当我方为空域时，判别敌方为多域目标及导弹威胁，根据 3.2.2.2 节中基于不

同作战场景的目标威胁度属性模型，由表3-7和表3-8计算得到目标威胁属性矩阵，如式3-36。

我们在得到目标威胁属性矩阵后，通过多属性决策流程评估敌方目标威胁程度。

首先利用 2.1.2.3 中 CRITIC 法计算各威胁属性权重：

1) 标准化后的矩阵 Z_1 为：

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 0.931 & 0.565 & 0.109 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.608 \\ 0.498 & 0.778 & 0.132 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.505 \\ 0.705 & 0.37 & 0.118 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.299 \\ 0.397 & 0.62 & 0.113 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.402 \\ 0.089 & 0.722 & 0.332 & 0.89 & 0.055 & 1 & 0 & 0 & 0.247 \\ 0.262 & 0.222 & 0.755 & 0.65 & 0.101 & 0.4 & 0 & 0 & 0.711 \\ 0.401 & 0.333 & 1 & 1 & 0.101 & 0.8 & 0 & 0 & 0.814 \\ 0.296 & 1 & 0.532 & 0.698 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0.918 \\ 0.825 & 0 & 0.009 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.093 \\ 0.709 & 0.213 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.144 \\ 0.679 & 0.406 & 0.009 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.196 \\ 1 & 0.724 & 1 & 0.987 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.007 & 1 & 0.524 & 0.924 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.924 & 0.332 & 0.965 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

2) 各威胁属性的标准差为：

$$\sigma_{j1} = [0.333, 0.314, 0.356, 0.463, 0.265, 0.427, 0.267, 0.267, 0.339]$$

3) 相关系数矩阵 R_{r1} 如式3-39所示：

4) 各属性的冲突性量化值：

$$T_{j1} = (8.694, 6.597, 4.436, 5.177, 6.633, 4.416, 4.728, 4.728, 4.786)$$

5) 各属性的信息量： $C_{j1} = (2.891, 2.072, 1.577, 2.398, 1.756, 1.885, 1.264, 1.264, 1.625)$

6) 由于评估指标中含有专家依据作战经验主观设置的目标固有威胁度，即计算客观权重的 CRITIC 方法中引入了主观的专家权重，同时需要满足 CRITIC 法所得权重和为 1，因此我们将式2-20改进为式3-38，将专家意见与目标态势信息属性指标的重要度进行主客观融合，使主观固有威胁度权重与客观态势属性权重均分占比，使得威胁评估结果更加科学有效。

$$\omega_j = \begin{cases} C_j / 2 \sum_{j=1}^n C_j & j \leq 1 \leq 8 \\ C_j / 2 \sum_{j=1}^n C_j + 0.5 & j = 9 \end{cases} \quad (3-38)$$

$$R_{r_1} = \begin{bmatrix} 1.000 & -0.512 & -0.203 & -0.559 & -0.212 & -0.386 & 0.445 & 0.445 & 0.288 \\ -0.512 & 1.000 & 0.217 & 0.480 & 0.360 & 0.480 & 0.148 & 0.148 & 0.083 \\ -0.203 & 0.217 & 1.000 & 0.832 & 0.230 & 0.786 & 0.522 & 0.522 & 0.658 \\ -0.559 & 0.480 & 0.832 & 1.000 & 0.229 & 0.898 & 0.342 & 0.342 & 0.260 \\ -0.212 & 0.360 & 0.230 & 0.229 & 1.000 & 0.483 & -0.098 & -0.098 & 0.473 \\ -0.386 & 0.480 & 0.786 & 0.898 & 0.483 & 1.000 & 0.424 & 0.424 & 0.475 \\ 0.445 & 0.148 & 0.522 & 0.342 & -0.098 & 0.424 & 1.000 & 1.000 & 0.488 \\ 0.445 & 0.148 & 0.522 & 0.342 & -0.098 & 0.424 & 1.000 & 1.000 & 0.488 \\ 0.288 & 0.083 & 0.658 & 0.260 & 0.473 & 0.475 & 0.488 & 0.488 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

改进后得到 $\omega_{j_1} = (0.086, 0.062, 0.047, 0.072, 0.052, 0.056, 0.038, 0.038, 0.549)$

然后通过 2.2.1.4 中的 VIKOR 方法对敌方目标进行威胁排序：

1) 由式2-24得：

$$S_{i_1} = (0.546, 0.625, 0.747, 0.701, 0.673, 0.463, 0.329, 0.225, 0.877, 0.846, 0.808, 0.070, 0.818, 0.830)$$

2) 由式2-25得：

$$R_{i_1} = (0.215, 0.271, 0.385, 0.328, 0.413, 0.158, 0.102, 0.061, 0.498, 0.469, 0.441, 0.052, 0.549, 0.549)$$

3) 由式2-26得：

$$Q_{i_1} = (0.458, 0.565, 0.754, 0.669, 0.737, 0.350, 0.210, 0.104, 0.949, 0.901, 0.849, 0.000, 0.963, 0.971)$$

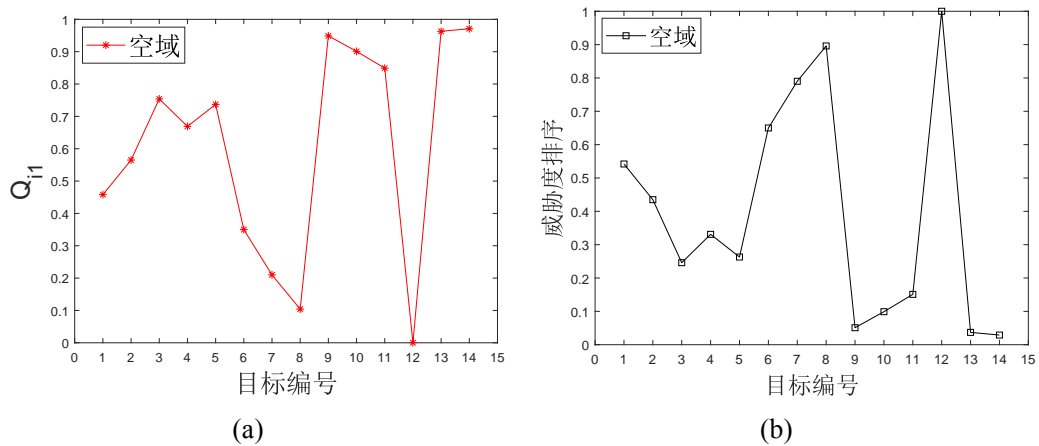


图 3-3 我方为空域时目标威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 空域目标威胁度排序图

由 $S_{i_1}, R_{i_1}, Q_{i_1}$ 可知，决策结果满足 VIKOR 法步骤 4 中的决策优势和决策可靠度；并且与表3-7中各敌方目标的固有威胁度大致相符。依据 VIKOR 方法的判断

准则，当目标的妥协决策指数 Q_{i_1} 越小，则目标的威胁程度越大，因此3-3可知，对于我方空域来说威胁度最大的是目标 12 为对空导弹，敌方空中目标如目标 8 歼击机、目标 7 干扰机、目标 6 预警机等位列前五，而目标 5 轰炸机的威胁度排名中等靠后，在专家给定的固有威胁度中，轰炸机的威胁度比目标 3 护卫舰低，但是评估结果中轰炸机的威胁程度高于护卫舰，由表3-8可知，轰炸机的相对于我方空域的角度与距离小于护卫舰，并且其速度也大于护卫舰的速度，因此轰炸机的威胁度与护卫舰高；敌方海上目标对我方空域的威胁度居中；陆地目标对我方空域的威胁度靠后；反舰导弹与对地导弹对我方空域基本没有威胁。由此可见，敌方目标的威胁评估结果与专家意见大致相同，证明了评估的有效合理性。

（2）我方为海域

表 3-9 海域目标固有威胁度

目标编号	目标类型	固有威胁度
目标 1	巡洋舰	0.4
目标 2	驱逐舰	0.3
目标 3	护卫舰	0.25
目标 4	航母	0.5
目标 5	轰炸机	0.7
目标 6	预警机	0.8
目标 7	干扰机	0.6
目标 8	歼击机	0.9
目标 9	武装单兵	0.1
目标 10	中型车辆	0.15
目标 11	装甲车辆	0.2
目标 12	对空导弹	0.01
目标 13	反舰导弹	0.98
目标 14	对地导弹	0.01

依据专家经验结合 3.2.2.1 节中作战目标能力属性因素得出当我方为海域时敌方各目标的固有威胁度，如上表3-9对于我方为海域时，目标威胁态势属性数据信息如下表3-10：当我方为海域时，判别敌方为多域目标及导弹威胁，根据 3.2.2.2 节中基于不同作战场景的目标威胁度属性模型，由表3-9和表3-10计算得到目标威胁属性矩阵，如式3-40.

表 3-10 海域目标态势信息

	角度 /度	速度	距离 /km	高度 /km	航路捷径 /km	RCS /m ²	飞抵时间 /s	射程 /km
目标 1	103	37km/h	152	0	*	*	*	*
目标 2	32	68km/h	83	0	*	*	*	*
目标 3	64	16km/h	75	0	*	*	*	*
目标 4	75	43km/h	41	0	*	*	*	*
目标 5	153	1.75Ma	136	10.9	7.4	0.36	*	*
目标 6	107	1.12Ma	178	8.5	8.1	12	*	*
目标 7	-49	1.26Ma	146	13.6	17.6	8	*	*
目标 8	34	2.24Ma	183	8.98	4.2	0.04	*	*
目标 9	95	7.4km/h	68	0	*	*	*	*
目标 10	-18	58km/h	48	0	*	*	*	*
目标 11	113	93km/h	109	0	*	*	*	*
目标 12	21	3.6km/s	356	136	94	0.24	*	*
目标 13	93	6.9km/s	510	189	122	0.56	368	620
目标 14	46	5.7km/s	1312	160	667	0.8	*	*

由表得目标威胁属性矩阵：

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 0.856 & 0.808 & 0.400 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 \\ 0.356 & 1 & 0.598 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0.711 & 0.633 & 0.55 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.833 & 0.858 & 0.932 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.456 & 0.658 & 0.549 & 0.4 & 1 & 0.8 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.92 & 0.3 & 0.789 & 0.4 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0.147 & 0.3 & 0.606 & 0.4 & 0.1 & 0.6 & 0 & 0 & 0.6 \\ 0.515 & 1 & 0.2 & 0.4 & 1 & 0.8 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0.3 & 0.2 & 0.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0.408 & 0.392 & 0.38 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \\ 0.3 & 0.565 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0.296 & 0.751 & 0.734 & 0.987 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0.996 & 1 & 0.826 & 0.924 & 0 & 0.5 & 0.955 & 0.491 & 0.98 \\ 0.508 & 0.931 & 0.4 & 0.965 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix} \quad (3-40)$$

我们在得到目标威胁属性矩阵后，通过多属性决策流程评估敌方目标对我方海域的威胁程度。

首先利用 2.1.2.3 节中 CRITIC 法计算各威胁属性权重：

1) 标准化矩阵

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 0.835 & 0.76 & 0.273 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.402 \\ 0.246 & 1 & 0.543 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.299 \\ 0.665 & 0.542 & 0.478 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.247 \\ 0.809 & 0.823 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.505 \\ 0.365 & 0.573 & 0.476 & 0.413 & 1 & 0.8 & 0 & 0 & 0.711 \\ 0.911 & 0.125 & 0.804 & 0.413 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.814 \\ 0 & 0.125 & 0.554 & 0.413 & 0.1 & 0.6 & 0 & 0 & 0.608 \\ 0.434 & 1 & 0 & 0.413 & 1 & 0.8 & 0 & 0 & 0.918 \\ 0.18 & 0 & 0.154 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.093 \\ 0.307 & 0.24 & 0.246 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.144 \\ 0.18 & 0.456 & 0.137 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.196 \\ 0.175 & 0.689 & 0.728 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.855 & 0.936 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0.426 & 0.914 & 0.273 & 0.977 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

2) 各威胁属性标准差为:

$$\sigma_{j_2} = (0.320, 0.354, 0.301, 0.391, 0.423, 0.373, 0.267, 0.267, 0.339)$$

3) 相关系数矩阵 R_{r_2} 如式3-43

$$R_{r_2} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.327 & 0.462 & 0.064 & 0.150 & -0.136 & 0.480 & 0.480 & 0.502 \\ 0.327 & 1.000 & 0.117 & 0.324 & -0.060 & 0.159 & 0.334 & 0.334 & 0.181 \\ 0.462 & 0.117 & 1.000 & 0.276 & -0.066 & 0.149 & 0.372 & 0.372 & 0.294 \\ 0.064 & 0.324 & 0.276 & 1.000 & 0.116 & 0.799 & 0.447 & 0.447 & 0.143 \\ 0.150 & -0.060 & -0.066 & 0.116 & 1.000 & 0.545 & -0.151 & -0.151 & 0.638 \\ -0.136 & 0.159 & 0.149 & 0.799 & 0.545 & 1.000 & 0.127 & 0.127 & 0.353 \\ 0.480 & 0.334 & 0.372 & 0.447 & -0.151 & 0.127 & 1.000 & 1.000 & 0.488 \\ 0.480 & 0.334 & 0.372 & 0.447 & -0.151 & 0.127 & 1.000 & 1.000 & 0.488 \\ 0.502 & 0.181 & 0.294 & 0.143 & 0.638 & 0.353 & 0.488 & 0.488 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

4) 各属性的冲突性量化值为:

$$T_{j_2} = (5.672, 6.283, 6.024, 5.384, 6.978, 5.876, 4.903, 4.903, 4.912)$$

5) 各属性的信息量为:

$$C_{j_2} = \text{为 } 1.813, 2.222, 1.814, 2.122, 2.950, 2.194, 1.310, 1.310, 1.667)$$

6) 由式3-38得到 $\omega_{j_2} = (0.052, 0.064, 0.052, 0.061, 0.085, 0.063, 0.038, 0.038, 0.548)$

然后通过 2.2.1.4 中的 VIKOR 方法对敌方目标进行威胁排序：

1) 由式2-24得：

$$S_{i_2} = (0.673, 0.731, 0.770, 0.576, 0.370, 0.315, 0.559, 0.251, 0.932, 0.877, 0.847, 0.785, 0.128, 0.814)$$

2) 由式2-25得：

$$R_{i_2} = (0.328, 0.384, 0.412, 0.271, 0.158, 0.102, 0.215, 0.082, 0.497, 0.469, 0.441, 0.548, 0.065, 0.548)$$

3) 由式2-26得：

$$Q_{i_2} = (0.617, 0.710, 0.763, 0.500, 0.258, 0.167, 0.432, 0.097, 0.949, 0.886, 0.839, 0.909, 0.013, 0.927)$$

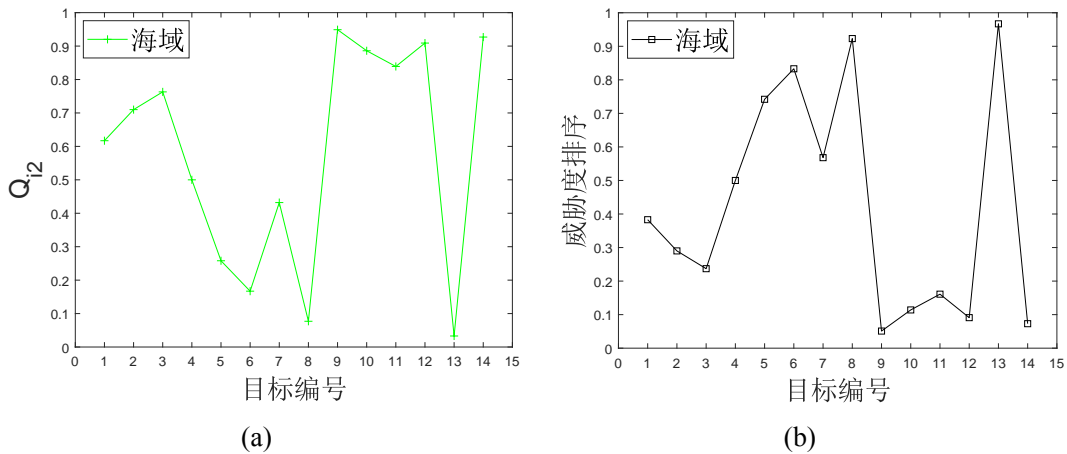


图 3-4 我方为海域时目标威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 海域目标威胁度排序图

由由 $S_{i_2}, R_{i_2}, Q_{i_2}$ 可知，决策结果满足 VIKOR 法步骤 4 中的决策优势和决策可靠度；并且与表3-9中各敌方目标的固有威胁度大致相符。依据 VIKOR 方法的判断准则，当目标的妥协决策指数 Q_{i_2} 越小，则目标的威胁程度越大，因此由3-4可知因此对于我方海域来说，威胁程度最大的是目标 13 为反舰导弹，敌方空中目标对我方海域的威胁度排序靠前，依次为目标 8 歼击机、目标 6 预警机、目标 5 轰炸机、目标 7 干扰机；敌方海上目标对我方海域的威胁度居中，其中目标 4 航母威胁最大，巡洋舰、驱逐舰、护卫舰威胁程度依次靠后；由于敌方地面目标对我方海域只能依靠远距离打击手段，因此对我方海域威胁最小；对空导弹与对地导弹对我方海域基本没有威胁。由此可见，敌方目标的威胁评估结果与专家意见大致相同，证明了威胁评估方法的科学可行性。

(3) 我方地域

依据专家经验结合 3.2.2.1 节中作战目标能力属性因素得出当我方为地域时敌方各目标的威胁程度，如表3-11；经战场数据共享后对于我方地域的目标态势信息如表3-12。

表 3-11 地域目标固有威胁度

目标编号	目标类型	固有威胁度
目标 1	巡洋舰	0.25
目标 2	驱逐舰	0.2
目标 3	护卫舰	0.15
目标 4	航母	0.3
目标 5	轰炸机	0.9
目标 6	预警机	0.6
目标 7	干扰机	0.7
目标 8	歼击机	0.8
目标 9	武装单兵	0.1
目标 10	中型车辆	0.4
目标 11	装甲车辆	0.5
目标 12	对空导弹	0.01
目标 13	反舰导弹	0.01
目标 14	对地导弹	0.98

当我方为地域时，判别敌方为多域目标及导弹威胁，根据 3.2.2.2 节中基于不同作战场景的目标威胁属性模型，由表3-11和表3-12计算得到威胁属性矩阵，如式3-43。

$$Y_3 = \begin{bmatrix} 0.098 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.056 & 0.814 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0.35 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \\ 0.179 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0.965 & 0.681 & 0.337 & 0.5 & 1 & 0.9 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0.944 & 0.5 & 0.726 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.6 \\ 0.199 & 0.537 & 0.253 & 0.5 & 0.206 & 0.7 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.743 & 0.825 & 0.558 & 0.5 & 1 & 0.9 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0.822 & 0.6 & 0.54 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0.867 & 0.984 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 \\ 0.789 & 1 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.273 & 0.751 & 0.755 & 0.987 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0.257 & 1 & 0.435 & 0.924 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0.998 & 0.931 & 0.558 & 0.965 & 0 & 0.5 & 0.604 & 1 & 0.98 \end{bmatrix} \quad (3-43)$$

我们在得到目标威胁属性矩阵后，通过多属性决策流程评估敌方目标的威胁程度。

表 3-12 地域目标态势信息

	角度 /度	速度	距离 /km	高度 /km	航路捷径 /km	RCS /m ²	飞抵时间 /s	射程 /km
目标 1	63	37km/h	395	0	*	*	*	*
目标 2	82	68km/h	280	0	*	*	*	*
目标 3	96	16km/h	340	0	*	*	*	*
目标 4	43	43km/h	260	0	*	*	*	*
目标 5	101	1.75Ma	73	10.9	7.4	0.36	*	*
目标 6	76	1.12Ma	124	8.5	8.1	12	*	*
目标 7	-26	1.26Ma	62	13.6	17.6	8	*	*
目标 8	124	2.24Ma	102	8.98	4.2	0.04	*	*
目标 9	74	7.4km/h	42	0	*	*	*	*
目标 10	102	58km/h	65	0	*	*	*	*
目标 11	71	93km/h	125	0	*	*	*	*
目标 12	17	3.6km/s	392	136	94	0.24	*	*
目标 13	14	6.9km/s	858	189	122	0.56	*	*
目标 14	92	5.7km/s	1063	160	667	0.8	894	9120

首先利用 2.1.2.3 中 CRITIC 法计算各威胁属性权重：

1) 标准化后的矩阵 Z_3 如式3-44所示。

2) 各威胁属性的标准差为：

$$\sigma_{j_3} = (0.385, 0.406, 0.364, 0.403, 0.421, 0.399, 0.267, 0.267, 0.339)$$

3) 相关系数矩阵 R_{r_3} 如式3-45所示：

4) 各属性的冲突性量化值为：

$$T_{j_3} = (6.086, 7.301, 10.685, 5.743, 6.839, 6.122, 5.546, 5.546, 5.525)$$

5) 各属性的信息量为：

$$C_{j_3} = (2.340, 2.962, 3.891, 2.316, 2.882, 2.445, 1.482, 1.482, 1.875)$$

6) 由式3-38得到 $\omega_{j_3} = (0.054, 0.068, 0.090, 0.053, 0.066, 0.056, 0.034, 0.034, 0.543)$

然后通过 2.2.1.4 中的 VIKOR 方法对敌方目标进行威胁排序：

1) 由式2-24得：

$$S_{i_3} = (0.773, 0.761, 0.815, 0.741, 0.270, 0.440, 0.520, 0.293, 0.858, 0.651, 0.598, 0.783, 0.820, 0.158)$$

2) 由式2-25得：

$$R_{i_3} = (0.409, 0.437, 0.465, 0.381, 0.080, 0.213, 0.157, 0.101, 0.493, 0.325, 0.269, 0.543, 0.543, 0.066)$$

3) 由式2-26得：

$$Q_{i_3} = (0.799, 0.819, 0.887, 0.746, 0.094, 0.355, 0.353, 0.132, 0.947, 0.623, 0.526, 0.947, 0.973, 0.000)$$

$$Z_3 = \begin{bmatrix} 0.045 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.247 \\ 0 & 0.628 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.196 \\ 0.312 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.144 \\ 0.131 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.299 \\ 0.965 & 0.363 & 0.112 & 0.507 & 1 & 0.9 & 0 & 0 & 0.918 \\ 0.943 & 0 & 0.633 & 0.507 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.608 \\ 0.152 & 0.075 & 0 & 0.507 & 0.206 & 0.7 & 0 & 0 & 0.711 \\ 0.729 & 0.651 & 0.408 & 0.507 & 1 & 0.9 & 0 & 0 & 0.814 \\ 0.813 & 0.2 & 0.384 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.093 \\ 0.861 & 0.968 & 0.196 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.402 \\ 0.778 & 1 & 0.196 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.505 \\ 0.231 & 0.503 & 0.672 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.214 & 1 & 0.243 & 0.936 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.863 & 0.408 & 0.977 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-44)$$

$$R_{r_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0.296 & -0.536 & 0.144 & 0.487 & 0.189 & 0.365 & 0.365 & 0.606 \\ 0.296 & 1 & -0.472 & 0.295 & -0.181 & 0.079 & 0.295 & 0.295 & 0.091 \\ -0.536 & -0.472 & 1 & -0.354 & -0.255 & -0.427 & -0.087 & -0.087 & -0.465 \\ 0.144 & 0.295 & -0.354 & 1 & 0.223 & 0.818 & 0.446 & 0.446 & 0.240 \\ 0.487 & -0.181 & -0.255 & 0.223 & 1 & 0.594 & -0.156 & -0.156 & 0.606 \\ 0.189 & 0.079 & -0.427 & 0.818 & 0.594 & 1 & 0.103 & 0.103 & 0.42 \\ 0.365 & 0.295 & -0.087 & 0.446 & -0.156 & 0.103 & 1 & 1 & 0.488 \\ 0.365 & 0.295 & -0.087 & 0.446 & -0.156 & 0.103 & 1 & 1 & 0.488 \\ 0.606 & 0.091 & -0.465 & 0.240 & 0.606 & 0.420 & 0.488 & 0.488 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-45)$$

由由 $S_{i_3}, R_{i_3}, Q_{i_3}$ 可知，决策结果满足 VIKOR 法步骤 4 中的决策优势和决策可靠度；并且与表3-11中各敌方目标的固有威胁度排序大致相符。依据 VIKOR 方法的判断准则，当目标的妥协决策指数 Q_{i_3} 越小，则目标的威胁程度越大，因此3-5可知。因此对于我方地域来说威胁度最大的是目标 14 为对地导弹；敌方空中目标对我方的威胁程度最大，依次为目标 5 轰炸机、目标 8 歼击机、目标 7 干扰机和目标 6 预警机；敌方陆地目标如目标 11 装甲车辆、目标 10 中型车辆对我方地域的威胁度居中；敌方海面目标对我方地域目标威胁度靠后，海面目标中目标 4 航母对我方地域威胁度最大；对空导弹和反舰导弹对我方地域基本没有威胁。由此可

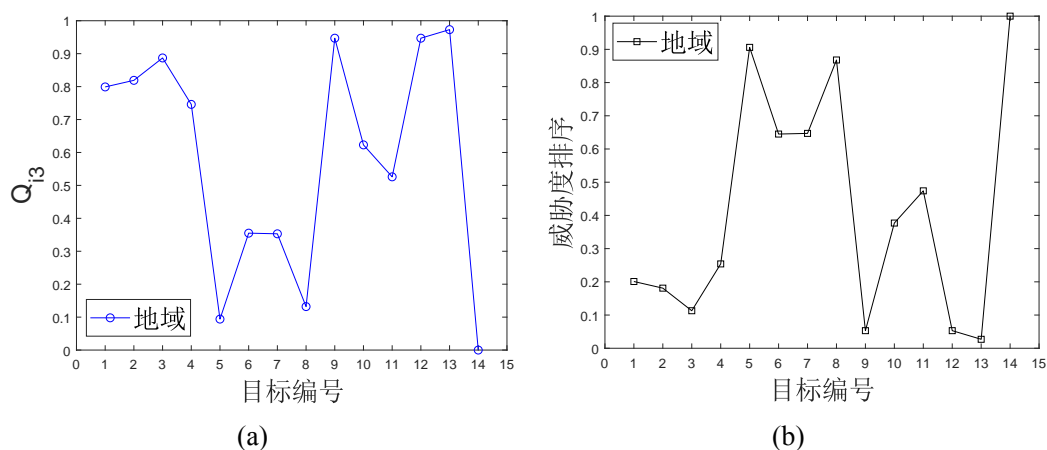


图 3-5 我方为地域时目标威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 地域目标威胁度排序图

见，敌方目标的威胁评估方法与专家意见大致相同，证明了该威胁评估方法的科学有效性。

结合我方空域、海域、地域对敌方多域来袭的 14 个目标的威胁程度评估，结果表明导弹威胁度最大，敌方空中目标歼击机、预警机、干扰机、轰炸机对我方任一空间域的威胁程度排序都靠前，因此对于我方指挥决策中心应优先分配火力打击敌方导弹与空中目标。

3.4 本章小结

本章针对威胁评估场景单一的问题，构建了一套基于多域作战的威胁评估模型。

首先，本章对敌方多域来袭目标进行威胁属性要素提取，通过分析其静态能力属性与动态态势属性等威胁特征，建立了一套基于多域作战的威胁度评估模型，然后采用多属性决策流程评估敌方多个目标对于我方不同空间域威胁程度。

实验结果表明，本章提出的威胁评估模型可以实现对我方多域的目标威胁度评估，且得出的威胁度排序与专家意见相符，证实了评估模型的科学有效性。并且，依据威胁评估结果我们得出导弹与敌方空中目标对我方任一空间域威胁程度都较大的结论，为指挥人员提供了目标分配与火力打击的决策支持。

第四章 多域作战下集群威胁评估

4.1 引言

智能化集群作战样式^[53]已是现代化战场中的主力，作战集群可以灵活合成能力聚优的作战单元。评估集群威胁并不是将多个目标威胁度简单叠加，集群化作战面对的战场威胁属于决策层级的信息融合分析，对于情报数据的处理具有不确定性的特征，传统的目标威胁评估方法已经不能适应集群特征威胁评估的需求。本章将在第三章中对单目标威胁属性评估研究的基础上，对敌方来袭目标分别进行两次基于属性权重与空间位置的目标分群，从不同角度评估集群威胁，为指挥人员的兵力调配与部署提供决策分析。

4.2 多域作战下集群特征威胁评估

4.2.1 目标分群理念及功能模型

信息化战争中需要完备的信息基础设施为指挥控制中心提供信息优势，信息优势减少了决策人员的思考认知压力，打赢指挥控制战离不开决策优势。



图 4-1 信息优势与决策优势关系图

信息优势的产生来源于对战场情报的精确融合处理，而将战场目标态势进行分类分析的前提是对多目标分群聚合。目标分群是对目标对象自有的属性特点按照空间、功能等类似特征分类形成多个集群的过程。通过获取敌方来袭目标的相关状态信息，进行深层抽取与同类聚合，我们可以从军事战略的角度对目标聚类为指挥层次的作战集群，最终构成具有协同作用的作战推演军事体系。目标分群的实质是态势推理预测的过程，而它需要底层状态信息数据的融合进行驱动。在第三章中，我们基于战场传感器可以计算得到作战层次敌方多个目标的静态能力属性与运动态势属性，它将战场空间态势抽象凝聚为多个目标的集合：

$$Z = \{X_1, X_2, \dots, X_N\} \quad (4-1)$$

其中敌方第 j 个目标 ($j = 1, 2, \dots, N$) 的状态可以表示为如下的一个多元一维数组:

$$X_j = (a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn}) \quad (4-2)$$

其中 $a_{jk}, k = 1, 3, \dots, n$, 为该目标的 n 类属性。

而在第四章中基于作战层次识别到的敌方目标间存在统一协调的群体性为, 我们将作战目标逐步聚合划分为多个集群, 通过更高层次的威胁评估指标, 基于集群特征进行群威胁排序。将式4-1抽象为如下集群作战的形式:

$$Z = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m\} \quad (4-3)$$

其中, m 为作战集群的数量, $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m$ 为 m 个作战集群。对于任意一个作战集群 $\psi_j, j = 1, 2, \dots, m$, 其状态属性都可以用以下组合表示:

$$\psi_j = (M_{\psi_j}, T_{\psi_j}) \quad (4-4)$$

其中, M_{ψ_j} 表示集群内目标集合, T_{ψ_j} 表示集群的状态属性。

因此从上述理念的描述我们可知, 用集群作战的形式4-7提供战场态势将大大减少指挥决策人员的聚焦目标数量与认知压力, 有助于他们把握对整体战场态势的理解, 提高决策的速度以应对瞬息变换的负责战场环境。如图4-2给出了基于JDL融合模型的第一级数据融合的步骤, 通过对战场上敌方作战实体的关系的抽取进行层次信息的融合与筛选, 抓住目标状态属性与态势预测及威胁估计的主要关系, 作为目标分群的依据。

目标分群的过程是对敌方兵力进行聚合的过程, 它的实现方式是将第一级数据融合所输出的诸多单目标的状态信息依据指挥方所选择的具有代表性的类似属性关系划分到多个作战集群中。在得到具有相邻物理特性关系的作战集群后, 指挥人员依据当前战场态势信息与作战历史经验对敌方的作战意图、打击难度等上层评估指标进行态势预测, 获得概率意义上的敌方群体作战能力。态势预测的结果为威胁估计提供了数据输入, 奠定了分析基础。基于敌方兵力聚合的集群功能模型如图4-3:

4.2.2 基于属性权重的 DBSCAN 聚类算法威胁评估

本文中运用的是 DBSCAN 算法对目标分群, 属于基于密度划分聚类方法, 与其余的基于网格、层次、划分聚类算法对比如下表所示:

DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 是一个比

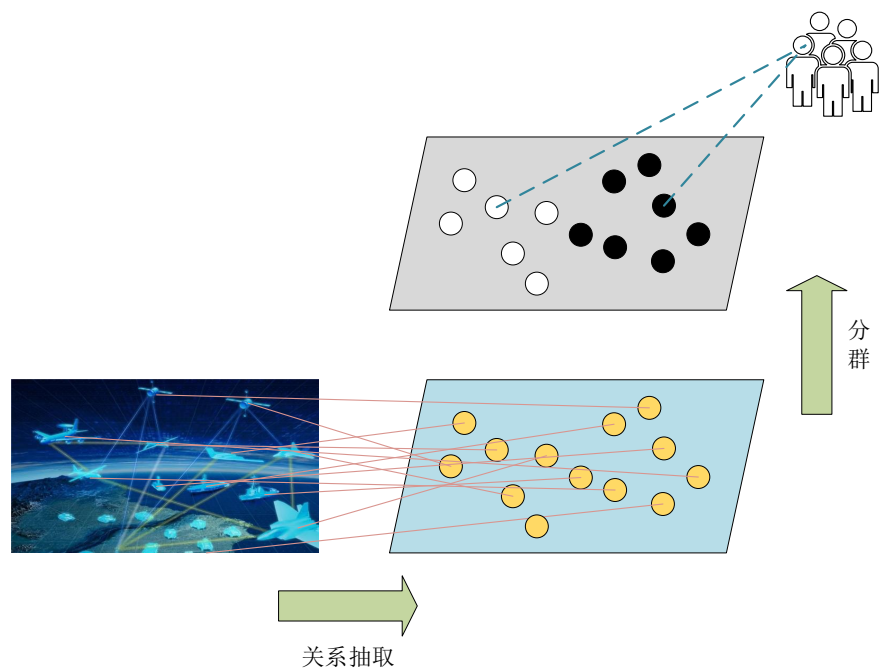


图 4-2 目标分群概念图

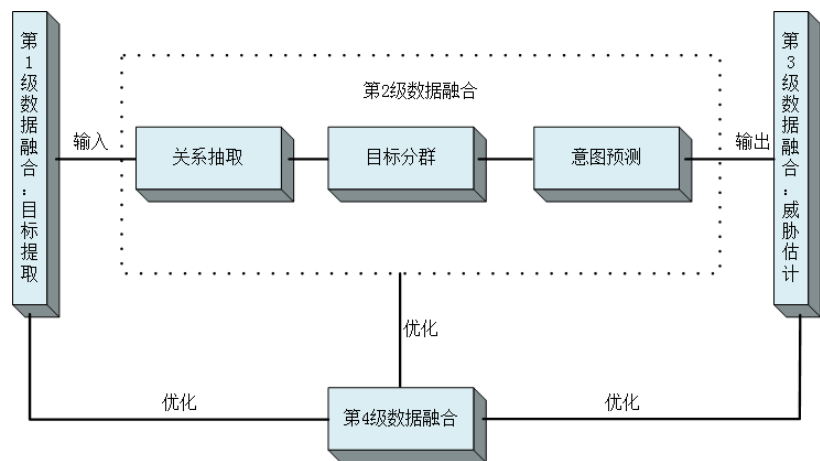


图 4-3 兵力聚合功能模型图

较有代表性的基于最大密度的聚类划分算法，与划分和层次聚类方法不同，它将簇定义为密度相连的点的最大集合，能够把具有足够高密度的区域划分为簇，因而在任意给定的样本点邻域范围内，必然可以划分到与该样本点具有同一类相似特征的多个数据点对象，它可在噪声的空间数据库中发现任意形状的聚类，对噪声数据不敏感；并且 DBSCAN 聚类方法不需要提前预置聚类的数目，符合战场态势的未知性，并且本文中数据维度是 3 维，输入参数 eps 和 $Minpts$ 由作战历史数据与专家经验共同得出，避免了 DBSCAN 算法使用缺陷。因此本文选择 DBSCAN 算法对目标进行聚类分群。

表 4-1 目标分群算法优缺点对比

	优点	缺点
基于网格聚类	适应于各类型数据处理	聚类准确率与聚类质量不高
基于层次聚类	不需要事先设置群的个数	复杂度较高；效率较低
基于划分聚类	实现简单，且空间、时间复杂度不高	需要事先设置类别数，对噪声点敏感，不适应对未知类别数样本的群划分问题
（基于密度聚类）DBSCAN	适应对未知类别数样本的群划分问题；可忽略聚类时数据间形状影响；对离群点有较好鲁棒性	不能很好反映高维数据聚类；对输入参数较为敏感

本章基于作战目标的运动态势属性权重对传统的 DBSCAN 聚类算法进行改进。我们选取所得作战目标的速度、距离、角度信息作为 DBSCAN 算法的数据样本类型，然后对每个作战目标的三类样本信息进行规范化处理并控制其取值范围为 0 至 100，接着采用 CRITIC 方法计算各属性权重，保证其权重和趋近于 1。每个目标属性的权重值代表了该属性的重要程度。

DBSCAN 算法使用了两个参数：半径 eps 和密度阈值 $Minpts$ ，这两个参数需要使用方主动选择。 eps 为以对象 p 为中心的圆形区域的领域半径，它限制了核心点在空间中的搜索范围；密度阈值 $Minpts$ 表示在给定对象集中，使对象 p 成为核心点的密度限定值，即以 p 为核心， eps 为半径的圆形区域中最少数据点的个数。如果满足对象 p 的 eps 邻域内对象个数大于密度阈值，则定义 p 为核心点。

以下是算法流程的详细步骤：

输入：样本集 $D = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ ，邻域参数，样本距离度量方式

输出：簇划分 C

步骤一：输入敌方目标的多维原始数据样本集合 $D = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ ，同时设置算法的相关邻域参数 $epsMinpts$ ，以及选取的目标属性对应的维数权重值；

步骤二：初始化核心对象集合 Ω 为空集，初始化聚类簇数值 $k=0$ ，设置未访问的数据样本量 $\tau = \text{原始数据样本集合 } D$ ，当前簇划分 C 为空集；

步骤三：将输入的多维作战数据样本进行规范化处理，并乘以属性要素对应的维数权重值；

步骤四：对于 $j=1,2,\dots,m$ ，按照以下流程找出所有核心点对象：

（1）通过欧式距离的度量方式，找到以中心对象点 p 的邻域半径范围内所有子样本集 $N_{\epsilon}(p_j)$ ；

（2）如果该子样本集合 $N_{\epsilon}(p_j)$ 中数据对象的个数 k 满足 $k \geq Minpts$ ，则将数据对象确认为一个核心点，将样本点 p 加到集合 $\Omega = \Omega \cup p$ 中；

步骤五：判断样本集合中是否有核心对象，如果 $\Omega = \varnothing$ ，则算法结束；否则

转入步骤六;

步骤六: 在对象集合 Ω 中随机任意选择核心对象 p' , 初始化当前簇核心对象队列 $\Omega_{cur} = \{p'\}$, 设置初始化的样本数据集 $C_h = \{p'\}$, 对类别变量序号进行初始化 $h=h+1$, 更新未判断访问的样本集合 $\tau = \tau - \{p'\}$;

步骤七: 如果当前核心点对象队列 $\Omega_{cur} = \varnothing$, 则当前聚类簇集合 C_h 已经全部生成完毕, 更新得到新的簇集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_h\}$ 与新的核心对象集合 $\Omega = \Omega - C_h$, 转入步骤五;

步骤八: 选取当前簇核心对象集合 Ω_{cur} 中的一个核心点 q , 以其为中心, 通过设置的邻域阈值 eps , 找出所有以该邻域值为半径的邻域范围内的子样本集合 $N_{eps}(q)$, 令 $\Delta = N_{eps}(q) \cap \tau$, 更新当前时刻的簇样本集合 $C_h = C_h \cup \Delta$, 并更新处理未访问处理的样本集合 $\tau = \tau - \Delta$, 转入步骤七;

步骤九: 输出聚类结果: 划分簇 C_1, C_2, \dots, C_h 。

图4-4是基于属性权重的 DBSCAN 算法聚类分群的流程框图。

4.2.2.1 聚类结果及威胁分析

在某一时刻我方岸基探测雷达观测到 30 个敌方多域来袭目标, 如下表:

基于 CRITIC 方法计算各态势属性 (角度, 速度, 距离) 的权重为:

$$\omega_j = (0.265, 0.390, 0.345)$$

依据专家经验取 eps 为 $\sqrt{200}$, $Minpts$ 为 4。按照基于属性权重的 DBSCAN 算法的聚类结果如表4-3。

按照威胁评估的评价测度, 我们认为目标角度越小, 距离越近, 速度越大, 则该目标对我方的威胁度越大。事先我们已将敌方目标的速度信息进行倒数处理, 则通过 DBSCAN 算法将目标的角度、速度、距离信息聚类后坐标系原点的威胁度最大, 以坐标原点为中心, 距离坐标原点的集群簇越近, 集群威胁越大。设某集群簇中心 χ 与坐标原点 O 的中心距离为 D :

$$D = \sqrt{\|\chi - O\|^2} \quad (4-5)$$

其中 χ 为群内目标态势信息的各自平均值。

由式4-5计算得每个集群簇中心与原点距离如表4-4。

由表4-4可知, 编号为 1 集群威胁度最大, 在编号为 1 的集群中有 8 个空中目标、1 个海上目标与 2 个地面目标, 基于第三章中我方地域的威胁评估, 空中目标对我方地域威胁度最大; 由表4-2可知, 目标 15、目标 24 与目标 30 的速度较大, 且与我方保卫阵地的距离较近, 并且依据 CRITIC 法得到的态势属性权重可知当前时刻, 敌方目标的速度与距离这两个威胁属性更重要, 所以编号为 1 的集群威

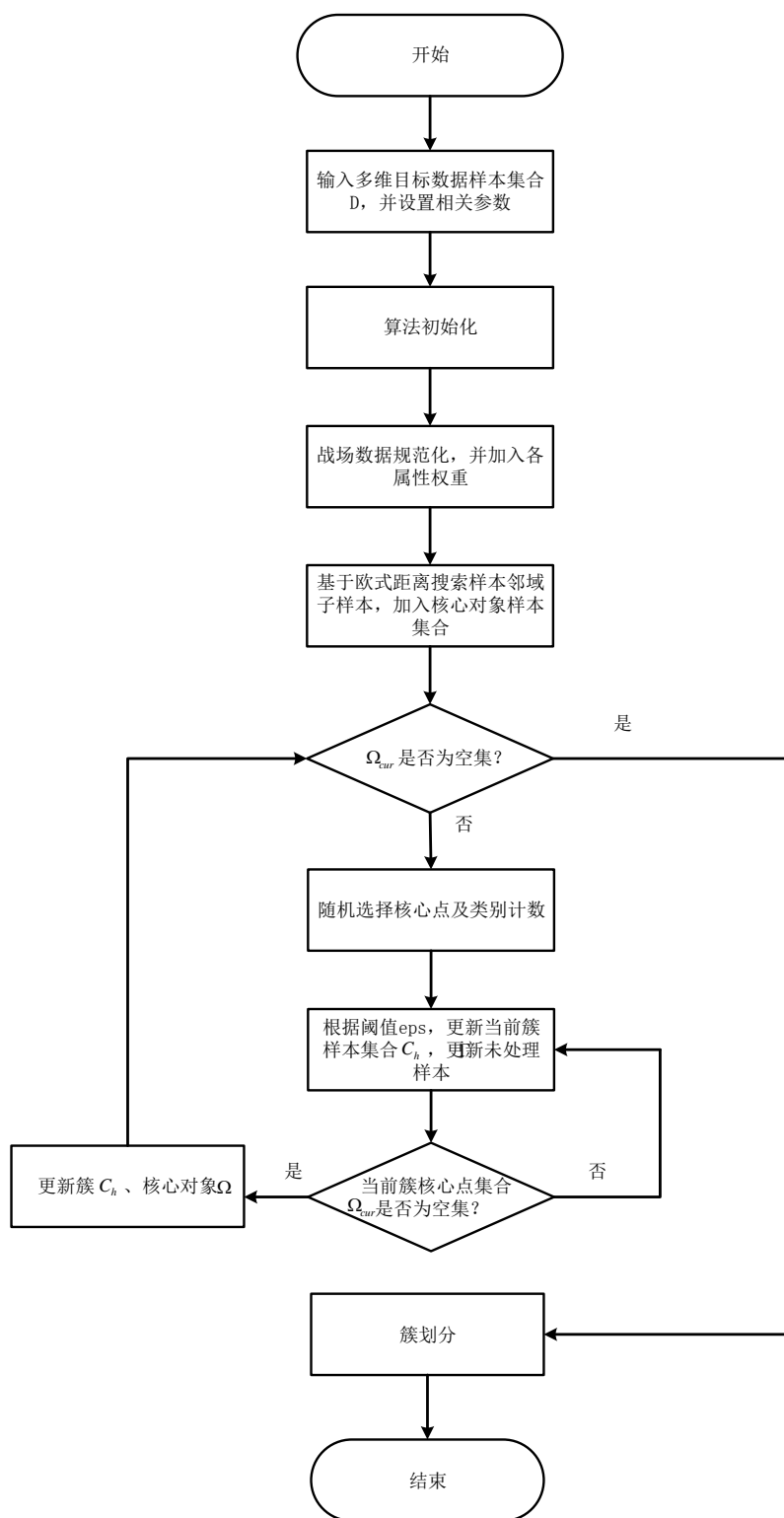


图 4-4 基于属性权重的 DBSCAN 分群算法流程图

胁度最大是合理的。编号为 2 的集群内有 2 个空中目标，4 个海上目标，5 个地面目标，其中空中的两个敌方目标距离我方较远，速度大小在其余空中目标里面居

表 4-2 目标态势信息表

目标编号	目标角度/度	目标速度	目标距离 /km
目标 1	-15	1.55Ma	62
目标 2	146	1.12Ma	395
目标 3	152	1.62Ma	434
目标 4	54	1.95Ma	236
目标 5	10	2.64Ma	291
目标 6	-21	0.74Ma	274
目标 7	24	1.63Ma	145
目标 8	126	0.79Ma	200
目标 9	27	1.45Ma	179
目标 10	39	1.52Ma	162
目标 11	128	37km/h	238
目标 12	75	68km/h	387
目标 13	126	38km/h	205
目标 14	146	53km/h	432
目标 15	65	56km/h	46
目标 16	98	67km/h	374
目标 17	142	32km/h	72
目标 18	151	27km/h	39
目标 19	134	53km/h	395
目标 20	-9	24km/h	151
目标 21	62	67km/h	361
目标 22	148	58km/h	607
目标 23	73	97km/h	519
目标 24	61	79km/h	37
目标 25	39	26km/h	256
目标 26	137	75km/h	374
目标 27	116	94km/h	413
目标 28	149	32km/h	112
目标 29	187	40km/h	149
目标 30	32	82km/h	71

中，并且其角度较大，因此被划分到了第二梯度威胁集群；在编号为 3 的集群内有 6 个目标，其中有 4 个海上目标，2 个陆地目标，相对于第一与第二威胁度集群来说，其速度较小，距离也较远；编号为 5 和 4 的两个集群属于离群点，分别为 1 个海上目标和 1 个陆地目标；因此我们认为集群 1 威胁度最大，应优先分配火力攻打集群 1 内的目标，为地面作战指挥人员提供了决策支持。

本小节中我们对集群威胁评估作了探索性分析。作为指挥决策层面的威胁评估，我们基于第三章的威胁评估思路按照目标态势属性进行聚类分析，通过对其态势属性的综合评判，把握整体战场威胁评估。

表 4-3 目标态势信息分群表

集群编号	目标角度	目标速度	目标距离
1	0.763	0.205	1.514
2	21.25	0.396	21.679
2	22.013	0.184	24.041
1	9.543	0.103	12.051
1	3.945	0	15.381
1	0	0.749	14.352
1	5.726	0.181	6.54
1	18.705	0.683	9.871
1	6.108	0.239	8.599
1	7.635	0.215	7.57
3	18.959	25.205	12.172
2	12.216	13.581	21.195
3	18.705	24.534	10.174
2	21.25	17.508	23.92
1	10.943	16.554	0.545
2	15.142	13.789	20.408
3	20.741	29.189	2.119
3	21.886	34.648	0.121
2	19.723	17.508	21.679
4	1.527	39.016	6.903
2	10.561	13.789	19.62
2	21.504	15.973	34.517
2	11.961	9.434	29.188
1	10.434	11.65	0
5	7.635	35.992	13.262
2	20.105	12.287	20.408
2	17.433	9.744	22.769
3	21.632	29.189	4.542
3	26.467	23.293	6.782
1	6.744	11.213	2.059

表 4-4 集群威胁评估表

集群编号	D	角度平均值	速度平均值	距离平均值
1	10.909	7.322	3.799	7.135
2	31.496	17.56	11.29	23.584
3	35.496	21.398	27.676	5.985
5	39.115	7.635	35.992	13.262
4	39.648	1.527	39.016	6.903

但是在真实的战场环境中，敌方来袭目标的位置信息更能反映集群威胁程度，例如集群的阵列排置反映了敌方军力战略部署策略；当集群内多个具有探测能力的目标聚集后集群的探测范围与威慑范围变大等；集群内的多个目标协同完成作战任务等。因此下一节中我们选取所获取的敌方目标的位置信息进行聚类，并依据作战经验选取决策层面的上层威胁评估指标进行威胁度评估。

4.2.3 基于空间位置的 DBSCAN 聚类算法研究

在已知我方防御点与来袭敌方目标的位置信息后，需要将空间大地坐标系信息转化为空间直角坐标系信息。空间大地坐标系是通过经度纬度和高度描述目标的位置信息，例如对于空间大地中的某点 $A(B, L, H)$ ，将其向空间直角坐标系变换的转化公式为：

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (4-6)$$

式中，

$$N = \frac{a}{W} \quad (4-7)$$

a 为椭球的长半轴, N 为椭球的卯酉圈曲率半径, $a=6378.137\text{km}$

$$W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \quad (4-8)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (4-9)$$

e 为椭球的第一偏心率, b 为椭球的短半轴 $b = 6356.752314\text{km}$

由于在实际作战中我方雷达探测扫描是以我方防御地为中心，因此需要经过第二次坐标变化将空间直角坐标系平移转化为以我方位置为原点。设经由式4-6进行坐标转化后，我方位置信息为 $A' = (x_1, y_1, z_1)$ ，敌方某一目标位置信息为 $B' = (x_2, y_2, z_2)$ ，则当我方坐标为 $(0, 0, 0)$ 时，敌方目标的位置坐标为 $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ 。

将我方防御位置与敌方目标的位置信息经由两次坐标转化后得到的位置数据采用 DBSCAN 算法对目标进行空间位置上的聚类分群，具体流程如图4-5。

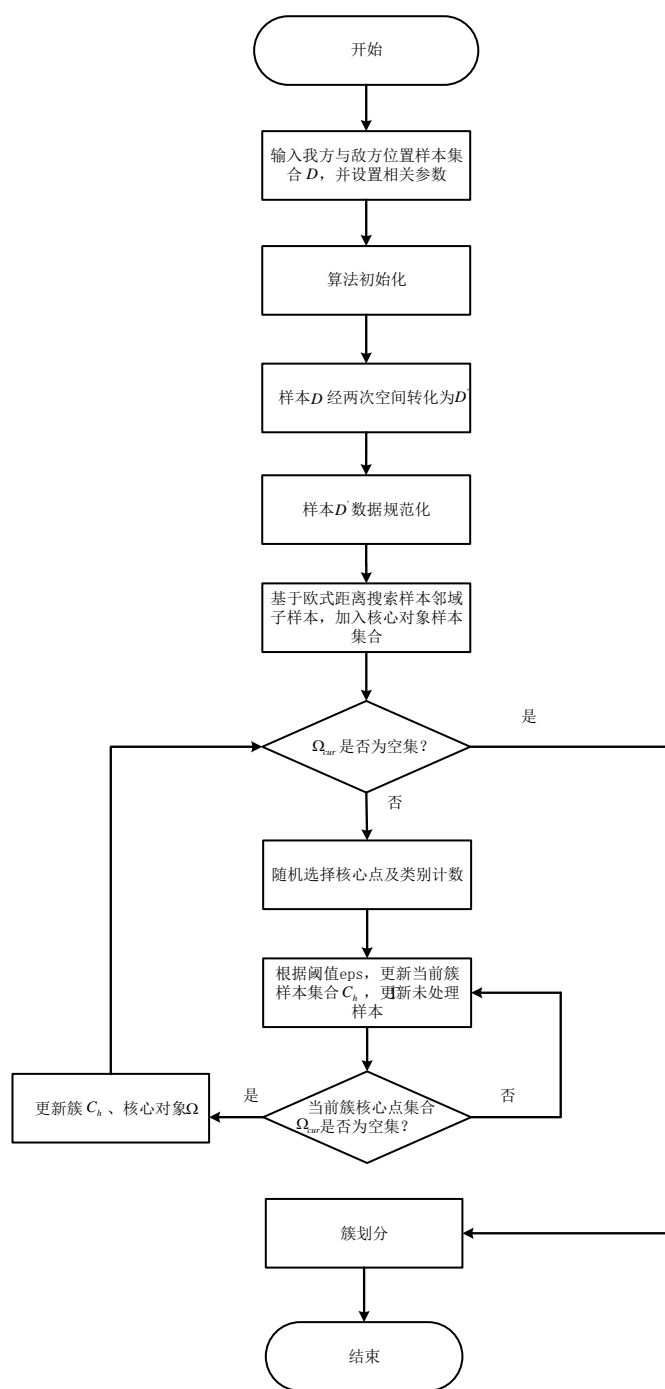


图 4-5 基于空间位置的 DBSCAN 聚类流程

4.2.4 集群威胁评估指标

智能化集群作战必将是未来战场的主要力量。在评估集群威胁之前, 需要对实现目标分群后的多个集群的群结构与群特点进行更高抽象层析的体系分析。群特征的融合不是简单的多个单目标特征的线性相加, 而是呈现总体特征大于部分

特征的趋势，本节从多个集群作战特征的角度进行分析，系统的提取各作战特征的有效信息，提高作战威胁评估的科学性。

4.2.4.1 集群规模特征

集群作战中，交战双方会携带不同的武器种类，敌方集群目标类型多样使得各目标属性在融合成群特征时会发生整体大于部分的情况。集群规模代表了每个集群中作战平台、参战人员与装备的数量多少，集群规模的庞大程度增加了相对于单体作战难以具备的优势。集群规模特征会影响集群探测范围和集群威慑范围。

(1) 对集群探测范围的影响

由于每个作战集群中作战目标类型不同，因此群目标所载雷达协同探测的范围^[54]会有所改变。当集群作战时，作战目标间可以通过战场数据链实现信息交互于共享，通过多个传感器探测范围的融合扩大集群的探测范围。下图4-6可以直观的反映群作战探测范围的变化是区别于单体作战探测范围的简单叠加。 d 为单目

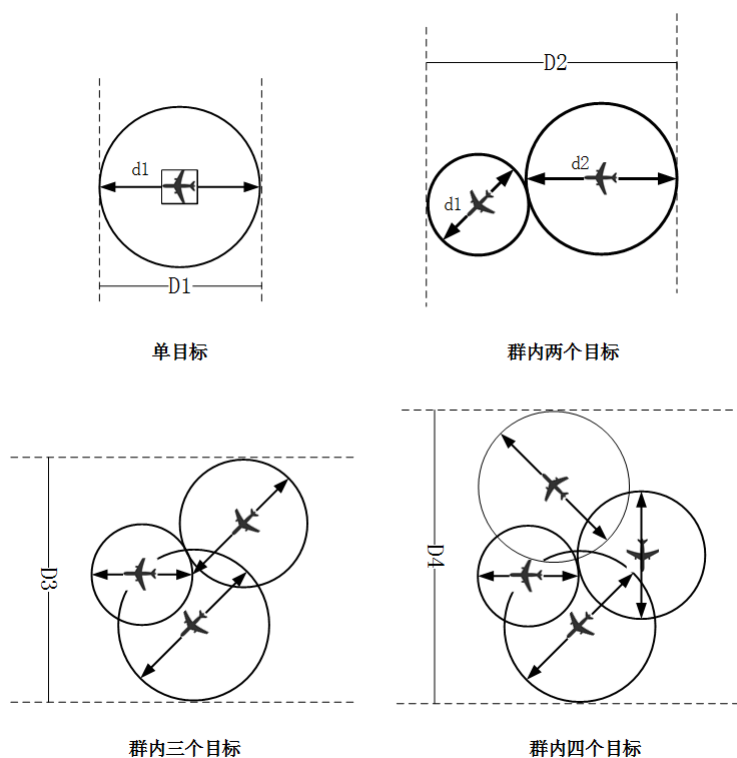


图 4-6 群目标探测范围示意图

标的探测范围直径， $d_1 d_2 d_3 d_4$ 分别代表了不同类型作战目标的探测范围直径，而 $D_1 D_2 D_3 D_4$ 为目标分群后取所在集群最远边界距离为新的探测范围直径，当集群的探测能力逐渐增大时，对我方的威胁度也逐上升。

(2) 对集群威慑力范围的影响

当集群的探测范围变大后，敌方集群对我方的威慑范围也会扩大。当敌方联合攻击距离变大后，其战略部署也会发生改变。例如歼击机、预警机以及巡洋舰、驱逐舰还有陆地上的装甲车等，其续航能力包括其最大航程以及续航时间等，续航能力在一定程度上也决定了作战目标的作战半径。不同的作战平台的续航能力以及作战半径都不同。如果集群中有运输补给类的作战平台，则其效能发挥的范围会大步提升，不仅降低了敌方作战时间的紧迫性，还提高了其集群的打击能力。

综上所述可看出集群规模越大，其对我方探测能力与产生威胁的势力范围越大。假设当前作战时刻下我方对目标分群后产生 M 个集群。我们依据群内目标数目对集群规模特征 I_1 进行威胁度量化。

4.2.4.2 集群攻击意图特征

一般来说集群在空间的排列阵队是根据此作战集群的任务特征与作战意图^[55]进行指挥布局的。因此对敌方的某个集群进行意图预测时，我们可将敌方集群目标抽象为作战网络，集群中的每一个目标看做网络中的作战节点，而连接网络节点的边代表了作战目标间的信息交互能力。如图4-7所示为集群队列示意图。

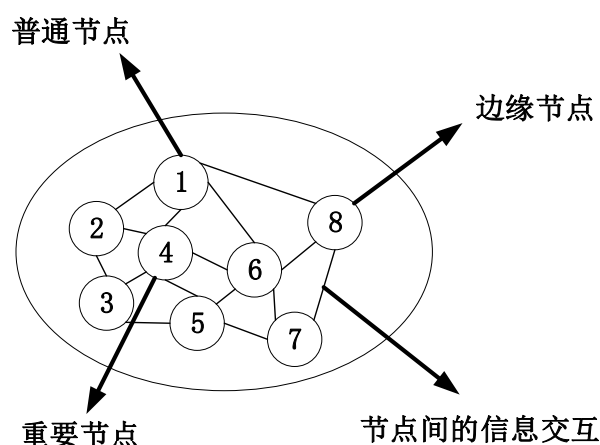


图 4-7 集群目标信息交互示意图

作战集群会依据战场态势组成不同队列以达到作战目的，完成本次作战的协同任务，集群的攻击意图特征与其担负的作战任务息息相关。集群作战中任务协同使得即使集群中的单个目标受到损伤也不会影响群体作战任务的丧失。作战时集群内可以多个目标担负同一种作战任务，或者负责多个作战任务，甚至是多个集群共同协作完成同一种作战任务。以下将根据任务协同的方式探索性分析集群攻击意图特征。

（1）集群单任务作战

当多个同类型的作战目标形成集群时，它们往往担任的是单一作战任务，可

以形成独立的作战群体对陆海空进行全方位的多域打击，例如协同侦察由各侦察力量依据当前战势对周围信息实行搜索探测，或是对某个目标实行特定的跟踪监视；协同机动是在作战中的额空间变换与战斗样式改变的频率极快，有利于获取战场优势；协同攻击是依据战略战术的配合，形成火力覆盖的全方位打击等。

（2）集群多任务作战

根据作战任务的分配机制对作战目标担任的作战任务进行分组，依据作战平台类型实现侦察打击、指挥控制、拦截防御等多种作战模式的任意组合，作战任务的分级与并行开展使得联合作战效能增强，一方面可以实现互不干涉的协同作战，另一方面也实现了作战任务的有机结合与互补。作战集群通过内部的协调合作成为了利益共同体。

（3）多个集群同任务作战

当作战任务比较繁重或是需要多个参战平台协同作战时，作战部署会扩大到几个集群，例如敌方在被我方近乎压制时需要集中火力攻打我方，则会涉及多个集群共同实现打击任务。

结合历史作战经验，本文依据集群中心点目标与我方的距离远近大体上判断敌方集群的作战任务，并将敌方作战任务如侦察、机动、攻击等转化为对我方攻击意图特征 I_2 的强弱程度。敌方集群与我方距离越近，威胁越大。

4.2.4.3 集群打击难度特征

我方对于敌方集群的打击难度主要考虑以下三个方面：

（1）集群的空间密度

作战集群的兵力聚合与划分都是按照一定的战略战术进行选择的。对于第 j 个集群目标，对于集群分布的空间密度来说，密度越小，集群中的每个目标排列越疏散，我方对集群的打击越困难。集群的空间密度大小 Φ 表示如下：

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \|x - x'\|^2} \quad (4-10)$$

其中， m 为当前集群中目标总数量， x' 为当前集群的簇中心 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 。

（2）我方弹药的毁伤威力

我方作战平台所携带的弹头有多种类型，例如核弹头、常规弹头等，不同类型的弹头产生的威力大小不同，并且在弹药爆炸后剩余的碎片也会对周围产生一定的冲击波。此处的弹药毁伤威力指的是我方定向战斗部指利用目标方位信息改变爆破方向以取得最大毁伤效果。由我方武器平台的作战效能决定，通过毁伤概

率^[56] 如式4-12评估我方弹药毁伤威力。

$$\mathfrak{R} = \frac{A^2}{A^2 + \frac{CEP^2}{1.386}} \cdot \exp \left\{ \frac{-R_{tb}^2}{A^2 + \frac{CEP^2}{1.386}} \right\} (1 - \varrho) \quad (4-11)$$

$$P = 1 - \prod_{g=1}^G (1 - \mathfrak{R})^{N_i} \quad (4-12)$$

式4-12中, A 为我方弹药的杀伤范围, CEP 为圆概率误差, R_{tb} 为脱靶量, ϱ 为作战目标的干扰效果因子, N_i 表示我方使用的第 i 种型号弹药的数量。

(3) 战场环境因素

战场气候条件、地形形势等战场环境因素制约着兵力的投入量和战略战术的选择, 贯穿影响作战的每个环节。如表4-5我们用战场环境系数量化战场能见度。

表 4-5 战场环境因素评估表

战场能见度	战场环境系数 δ
非常好	1
较好	0.8
一般	0.6
较差	0.4
恶劣	0.2

本文依据敌方集群的空间密度、我方弹药的毁伤威力与战场环境因素构建集群打击难度评估模型如式4-13, 打击难度 I_3 与与集群的空间密度、我方弹药的毁伤威力和战场环境因素为反比关系。当 I_3 越大, 我方的打击难度越大, 因而敌方集群对我方的威胁度越大。

$$I_3 = \frac{1}{\Phi \cdot P \cdot \delta} \quad (4-13)$$

4.2.5 聚类结果及威胁评估

在某时刻在我方为 (120.6247, 25.8576, 9) 的防御点位置观测到 30 个敌方来袭目标位置如下表4-6:

将表4-6中目标的大地系坐标按照式4-6经由两次坐标转化为以我方为原点的空间直角坐标系坐标如下表4-7。第一次转化后的坐标为 (x, y, z), 第二次转化后的坐标为 (x', y', z') 我方防御点位置坐标经由第一次和第二次坐标转化后分别为 (-2937.111, -1423.499, 5476.651) 和 (0, 0, 0);

最后采用基于空间位置的 DBSCAN 算法对目标进行分群, 取 $eps = \sqrt{210}$, $Minpts = 3$ 。

表 4-6 目标位置信息表

目标编号	目标经度	目标纬度	目标高度
目标 1	124.7115	23.7687	12
目标 2	128.9587	23.7019	14
目标 3	125.8214	23.9412	13
目标 4	128.7335	24.8067	12
目标 5	125.4753	24.5321	10
目标 6	126.5138	25.5221	7
目标 7	125.3671	23.8914	12
目标 8	126.9697	25.5621	8
目标 9	124.0247	24.5321	8
目标 10	124.4094	24.3971	7
目标 11	128.5825	25.1643	18
目标 12	126.5522	24.1518	17
目标 13	125.6044	24.3821	11
目标 14	128.5742	24.3771	16
目标 15	128.4726	24.292	9
目标 16	124.7473	23.6121	0
目标 17	129.2279	26.2773	0
目标 18	129.162	26.3123	0
目标 19	126.7637	24.6495	0
目标 20	126.6868	24.662	0
目标 21	128.8763	24.5746	0
目标 22	125.8654	24.1217	0
目标 23	124.8599	24.3171	0
目标 24	129.8763	26.3296	0
目标 25	126.8324	24.3421	0
目标 26	125.8434	24.3471	0
目标 27	125.6994	24.4396	0
目标 28	129.3213	26.2945	0
目标 29	126.1235	24.3196	0
目标 30	127.0906	24.3521	0

空间聚类图如图4-8；具体分群结果如下表4-8。

将目标分群后，我们依据 10 位拥有不同作战经验的专家对集群的威胁程度进行打分，如下表4-9，分数越高，代表集群的威胁度越大。从表中我们计算出集群 2 的得分为 63，集群 5 的得分为 60，集群 3 得分 55，集群 4 得分 47，集群 1 得分 41。专家打分表用于验证评估结果的合理性。

目标聚类分群后，我们可以得到敌方集群的相关信息如下表4-10。在得到集群的相关信息后我们将结合决策层次的威胁评估指标对敌方集群进行威胁评估。

依据集群打击难度的威胁特征，结合集群的空间密度与某时刻我方对自身弹

表 4-7 位置坐标的两次转化

目标编号	x	y	z	x'	y'	z'
目标 1	-3340.62	-1471.21	5234.137	-403.509	-47.71	-242.515
目标 2	-3691.64	-1620.66	4952.789	-754.524	-197.161	-523.862
目标 3	-3429.37	-1522.64	5163.732	-492.26	-99.14	-312.919
目标 4	-3640.75	-1682.78	4966.931	-703.636	-259.278	-509.72
目标 5	-3383.27	-1544.14	5183.709	-446.162	-120.637	-292.942
目标 6	-3439.28	-1642.08	5113.493	-502.169	-218.582	-363.158
目标 7	-3392.37	-1502.68	5192.307	-455.259	-79.183	-284.345
目标 8	-3475.52	-1662.36	5084.008	-538.407	-238.864	-392.644
目标 9	-3260.99	-1488.33	5273.907	-323.876	-64.825	-202.744
目标 10	-3296.36	-1495.1	5249.057	-359.251	-71.596	-227.595
目标 11	-3621.62	-1701.45	4982.104	-684.509	-277.95	-494.547
目标 12	-3486.15	-1563.21	5118.988	-549.035	-139.713	-357.664
目标 13	-3398.54	-1540.36	5176.185	-461.424	-116.864	-300.466
目标 14	-3642.86	-1650.72	4981.116	-705.745	-227.218	-495.535
目标 15	-3633.22	-1639.85	4982.673	-696.113	-216.353	-493.979
目标 16	-3341.38	-1460.65	5222.01	-404.267	-37.153	-254.641
目标 17	-3628.11	-1791.34	4923.073	-690.999	-367.836	-553.578
目标 18	-3621.9	-1791.02	4927.693	-684.792	-367.524	-548.959
目标 19	-3480.46	-1597.12	5091.325	-543.344	-173.616	-385.326
目标 20	-3473.85	-1595	5096.426	-536.74	-171.503	-380.226
目标 21	-3652.01	-1670.06	4947.644	-714.895	-246.562	-529.007
目标 22	-3421.25	-1531.95	5150.334	-484.137	-108.454	-326.318
目标 23	-3332.56	-1505.91	5214.882	-395.45	-82.407	-261.77
目标 24	-3676.51	-1819.41	4877.276	-739.399	-395.909	-599.376
目标 25	-3494.57	-1580.95	5086.761	-557.459	-157.452	-389.891
目标 26	-3413.38	-1544.58	5151.763	-476.27	-121.081	-324.889
目标 27	-3399.01	-1544.69	5161.1	-461.894	-121.191	-315.552
目标 28	-3634.81	-1796	4916.515	-697.7	-372.502	-560.136
目标 29	-3437.19	-1553.37	5133.508	-500.075	-129.865	-343.143
目标 30	-3515.28	-1591.06	5069.54	-578.172	-167.561	-407.111

炮毁伤概率的计算与对战场环境因素的评估，计算得某时刻下我方对敌方集群打击难度的威胁评估值如表4-11：

综上所述后采用多属性决策方法对表4-12进行集群威胁评估。

首先利用 2.1.2.3 节中 CRITIC 法计算各集群威胁属性权重：

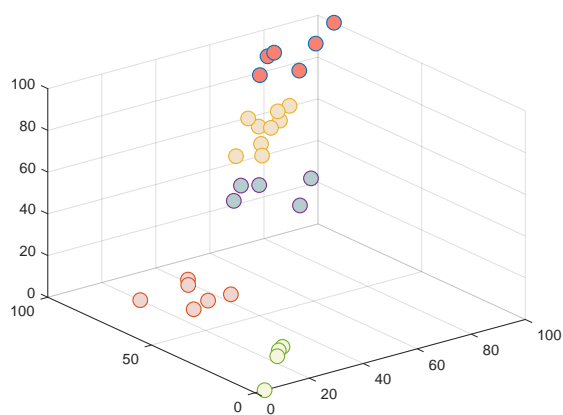


图 4-8 目标空间位置分群结果图

1) 原始样本矩阵 Y 为:

$$Y = \begin{bmatrix} 6 & 153.88 & 0.405 \\ 6 & 50.912 & 0.515 \\ 9 & 118.899 & 0.602 \\ 5 & 92.179 & 0.33 \\ 4 & 15.684 & 0.24 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

2) 正向标准化矩阵 Z 为:

$$Z = \begin{bmatrix} 0.4 & 1 & 0.5 \\ 0.4 & 0.745 & 0.75 \\ 1 & 0.253 & 1 \\ 0.2 & 0.447 & 0.25 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

3) 各集群威胁属性的标准差 $\sigma_j = (0.374, 0.395, 0.395)$

4) 相关系数矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -0.571 & 0.930 \\ -0.571 & 1 & -0.480 \\ 0.930 & -0.480 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

5) 各集群威胁属性的冲突性量化值 $T_j = (1.642, 3.050, 1.549)$

6) 各集群威胁属性的信息量 $C_j = (0.6142, 1.2039, 0.6123)$

表 4-8 目标空间位置分群表

集群编号	x''	y''	z''
1	81.509	97.057	89.973
2	0	55.399	19.039
3	60.9	82.722	72.222
2	11.817	38.085	22.604
3	71.604	76.73	77.259
4	58.599	49.428	59.556
1	69.492	88.285	79.427
4	50.184	43.775	52.122
1	100	92.287	100
1	91.786	90.399	93.735
2	16.258	32.88	26.43
3	47.716	71.412	60.941
3	68.06	77.781	75.362
2	11.327	47.021	26.181
2	13.564	50.05	26.573
1	81.333	100	86.916
5	14.751	7.825	11.547
5	16.192	7.912	12.711
4	49.038	61.962	53.967
3	50.571	62.551	55.253
2	9.202	41.629	17.742
3	62.786	80.125	68.844
1	83.38	87.386	85.118
5	3.512	0	0
4	45.76	66.468	52.816
3	64.613	76.606	69.205
3	67.951	76.575	71.559
5	13.195	6.524	9.893
3	59.085	74.157	64.602
4	40.95	63.65	48.474

7) 依据式2-20得到各属性权重为 (0.253,0.495,0.252)

然后通过 2.2.1.4 节的 VIKOR 方法对集群进行威胁排序:

1) 由式2-24得 $S_i = (0.773, 0.341, 0.370, 0.665, 0.504)$

2) 由式2-25得: $R_i = (0.496, 0.151, 0.370, 0.28475, 0.253)$

3) 由式2-26得: $Q_i = (1, 0, 0.352, 0.554, 0.335)$

由 S_i , R_i , Q_i 可知, 评估结果满足 VIKOR 方法中步骤 4 的决策优势和决策可靠度。由图5-5可知, 集群 2 的威胁度最高, 集群 3 和集群 5 的威胁度相近, 为第二梯度威胁, 集群 4 的威胁度次之, 集群 1 的威胁度最低。评估结果与表4-9中相

表 4-9 专家打分表

	集群 1	集群 2	集群 3	集群 4	集群 5
专家 1	7	8	6	5	7
专家 2	2	5	7	4	6
专家 3	5	5	4	6	7
专家 4	4	7	6	3	8
专家 5	3	6	5	4	4
专家 6	4	7	6	7	5
专家 7	3	4	5	3	7
专家 8	6	6	4	5	3
专家 9	5	8	7	6	8
专家 10	2	7	5	4	5

表 4-10 集群信息分析表

集群编号	空间密度 Φ	与我方距离	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
1	12.37834	153.88	84.583	92.569	89.195
2	9.78615	50.912	10.361	44.177	23.095
3	11.43938	118.899	61.476	75.407	68.361
4	11.17091	92.179	48.906	57.057	53.387
5	7.78291	15.684	11.913	5.565	8.538

表 4-11 集群打击难度评估表

	集群空间密度	我方毁伤概率	战场环境因素	集群打击难度值 I_3
集群 1	12.37834	0.51	0.4	0.403
集群 2	9.78615	0.33	0.6	0.515
集群 3	11.43938	0.243	0.6	0.602
集群 4	11.17091	0.678	0.4	0.33
集群 5	7.78291	0.9	0.6	0.24

表 4-12 集群特征威胁评估

	集群规模 I_1	集群攻击意图 I_2	集群打击难度 I_3
集群 1	6	153.88	0.405
集群 2	6	50.912	0.515
集群 3	9	118.899	0.602
集群 4	5	92.179	0.33
集群 5	4	15.684	0.24

同，故排序结果合理。因此作为指挥决策人员，应优先打击由 5 个空中目标和 1 个海上目标组成的集群 2。

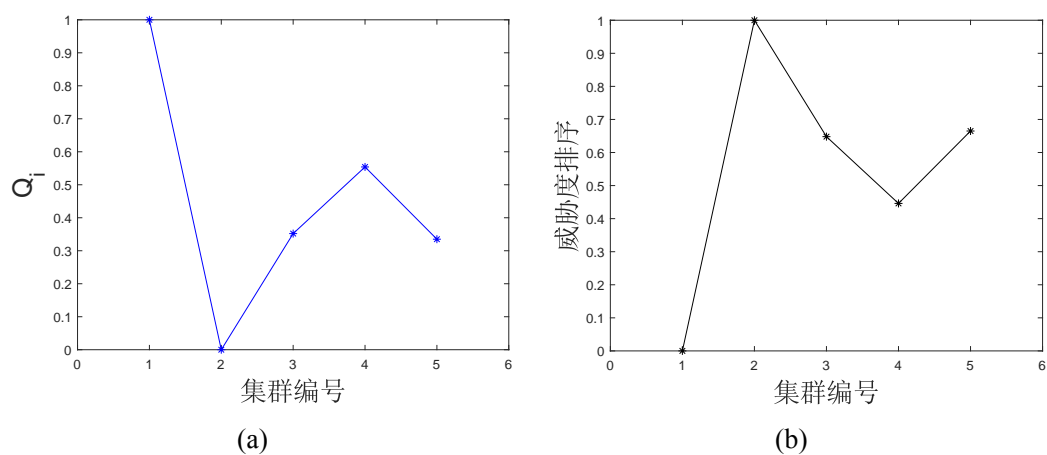


图 4-9 集群威胁评估结果图。(a) 妥协决策指数排序图；(b) 集群威胁度排序图

4.3 本章小结

本章针对单目标威胁评估方法已经不能适应集群特征威胁的问题，首先提出了基于威胁属性权重的 DBSCAN 聚类算法对目标分群并评估集群威胁，然后对此决策模式的不足进行了分析，并提出了基于空间位置的 DBSCAN 算法进行目标分群，采用上层评估指标对敌方集群进行了威胁评估，并验证了评估方法的合理性。

第五章 作战概念模型动态推演可视化平台

5.1 引言

在信息化战争背景下，联合作战力量已由“平台对抗”逐步发展为“体系对抗”，由于作战规模任务与作战数据愈发的庞大复杂，威胁评估需要依赖于体系活动流程仿真进行信息共享，实现作战概念推演。因此本文在实验室项目的基础上搭建了作战概念模型动态推演可视化平台，该系统集体系建模模块、混合状态机联动仿真模块、综合态势显示模块于一体，对海、陆、空等多维战场空间态势在战略战术层进行可视化呈现；并基于三四章研究成果设计平台威胁评估插件，通过对敌方来袭目标的作战能力属性、态势属性、位置信息、战场环境等多要素的综合评估，实现作战概念可视化模型的仿真推演与威胁评估，从而辅助用户指挥决策。

5.2 平台相关介绍

5.2.1 平台功能组成与体系架构

作战概念模型动态推演可视化平台采用 MBSE 建模语言、CIF 仿真语言及 java 语言编写开发，为实现多域作战环境下作战概念推演与威胁评估提供了有力的软件工具和环境支撑。平台主要由体系建模模块、混合状态机仿真模块和综合态势显示模块共同组成，如图5-1所示：

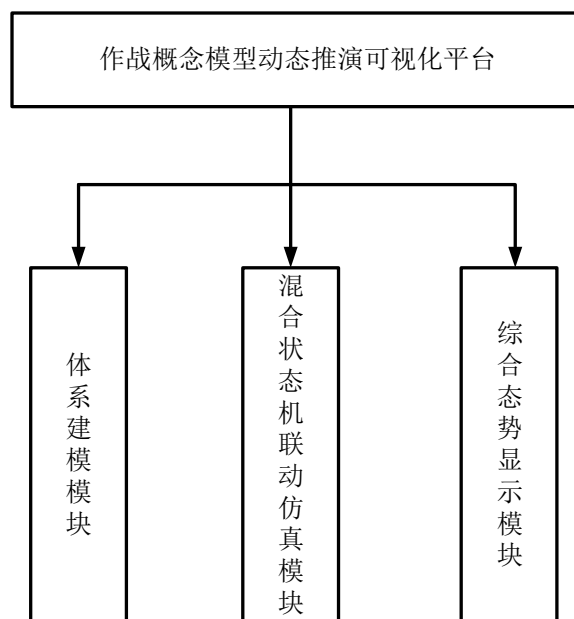


图 5-1 作战平台模块组成图

其中，体系建模模块依据体系建模规范形成模型库，并对元模型实现统一显示与管理，分为架构驱动组件、代码生成组件、元模型库管理组件、元模型开发组件、辅助模型构建组件 5 个部分；混合状态机仿真模块用于对体系建模的形式化表达，能够对系统行为及体系活动流程建立的模型进行参数仿真，同时能够对接综合态势显示模块以可视化方式展现仿真过程，分为算子模型管理组件、混合状态机仿真组件 2 个部分；综合态势显示模块负责接收仿真数据，控制场景中的静态、动态模型并驱动前端进行态势显示，分为异构数据处理组件、态势显示组件 2 个部分。

综上所述，平台功能示意图如下：

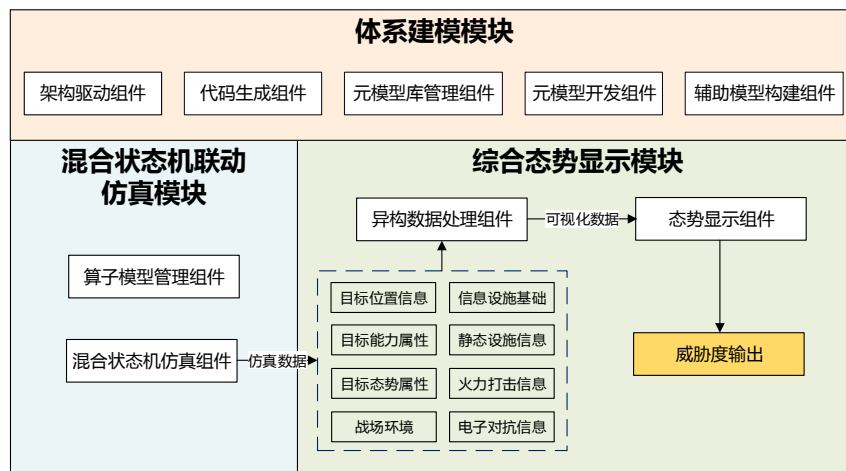


图 5-2 平台功能示意图

作战概念模型动态推演可视化平台基于前后端分离开发，其总体架构图如图5-3所示。

平台系统架构自顶向下，在应用层、前后端均带有自己的核心模块，整个系统由四部分组成，包括应用层、态势显示前端、体系建模和仿真前端以及后端。其中应用层指的是态势显示的页面，能够基于对象模型与动态数据进行可视化推演。页面数据来源可分为两部分，一是混合状态机仿真动态仿真产生的系统运作流程数据，用于动态推演时与模型对象进行绑定，使得模型对象能够基于数据运动，以及信息线和动态效果在合适的时间进行展示；二是配置数据，配置数据主要用于模型对象、信息线和动态效果的初始化，涉及构建这些对象或效果的基础参数，在页面收到配置数据后，能够进行自适应处理，识别数归属于哪个模型对象，或哪条信息线，或哪个动态效果。并且能够使用渲染引擎将处理后的配置数据进行静态渲染，在地图上展示模型对象的基本图案。

态势显示前端主要涉及模型对象、信息线以及动态效果的参数配置，以及排

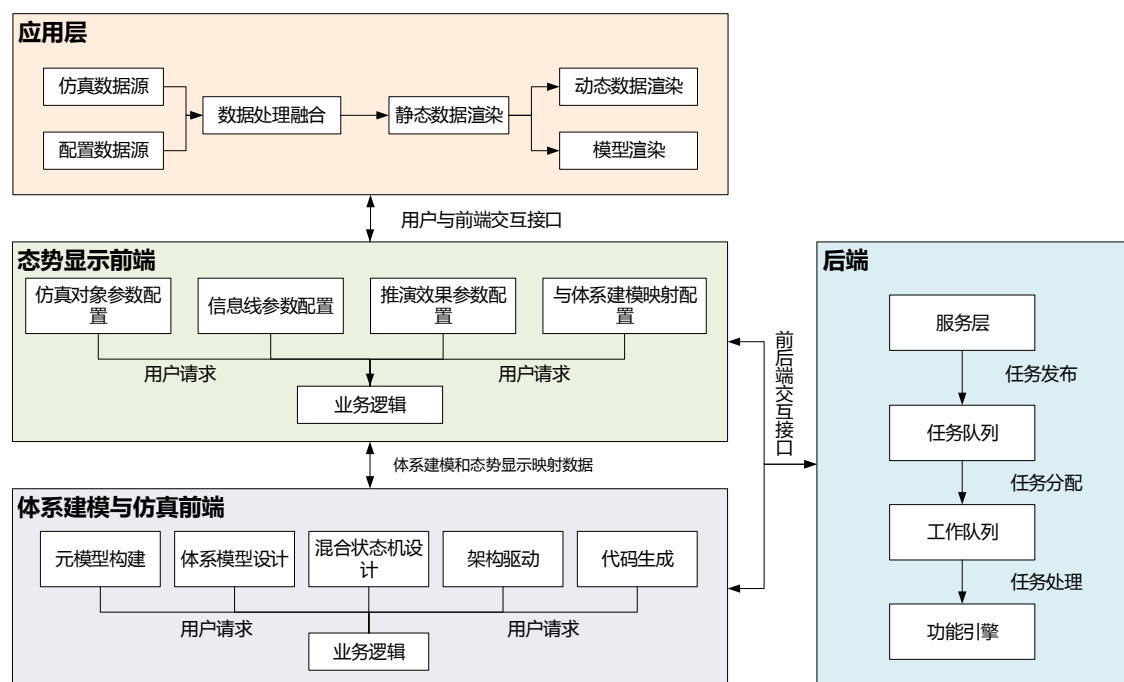


图 5-3 平台体系架构图

至数据的存储读取和传输处理。参数配置以图像化配置页面的形式让用户填写空缺数据，包括 ID、名称、经纬度、颜色等等，并且能够将配置信息存储为 visual 文件，进行成果保存与数据读取。当需要将配置数据传输至页面进行渲染时，还需要进行数据的前置处理，提取重要的数据信息并生成指定格式的数据传输至前端。同时态势显示前端涉及到与体系建模和仿真前端的交互，主要是模型对象、信息线和动态效果与体系建模及仿真相关数据信息的绑定。

体系建模与仿真前端具备基于 DoDAF 的体系建模功能和混合状态机仿真功能，能够对复杂装备体系进行结构、功能、概念、背景、使命、流程等多领域分析。同时，支持算子模型的构建与管理，算子模型是混合状态机仿真代码的模板化文件，具备较高的抽象性，能够基于算子模板完成模型对象的仿真代码的定制化开发。

后端主要涉及用户请求的任务分配与数据处理等工作，数据处理主要与混合状态机仿真相关，在进行混合状态机仿真时会生成大量的数据，但这些数据不具备层次结构性，不利于其他模块的应用，因此在仿真数据传输时需要进行前置处理，进行格式化解析工作。

5.2.2 平台案例展示

平台的重要功能是综合态势显示模块将体系建模模块与混合状态机联动仿真模块输出的仿真想定数据和仿真控制数据用于控制场景中的静态、动态模型并实时驱动仿真效果显示，实现作战概念模型的动态可视化推演。

(1) 首先进行可视化界面的资源数据配置，包括需要显示的雷达站、舰艇、飞机等仿真模型以及综合态势显示需要用到的动静态效果等；

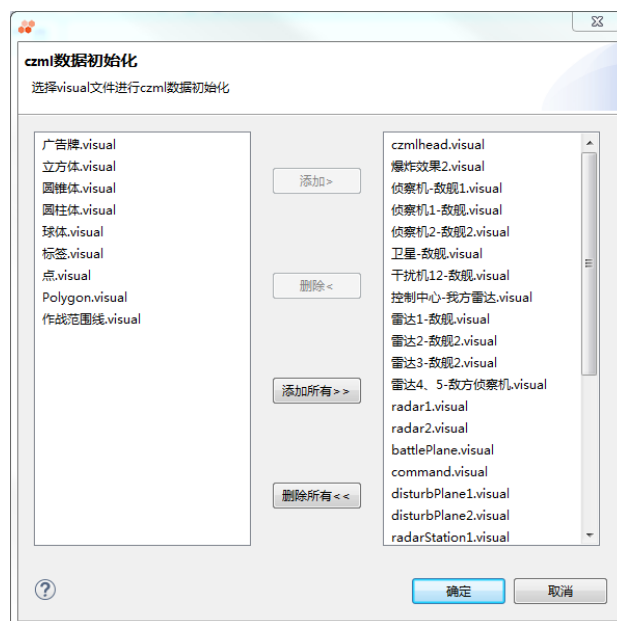


图 5-4 可视化模型文件配置图

(2) 导入体系建模模块输出的 UPDM 模型库文件以及内嵌的体系活动流程仿真代码，用来驱动前端可视化界面的模型动态推演，如图5-5；

(3) 选择 UPDM 文件中的 test.sim 仿真文件并设置输入输出及仿真参数，点击“确定”开始仿真。如图5-6，SVG 可视化界面为仿真自带输出的二维作战概念推演图；而输出的仿真数据通过异构数据的处理传给前端界面，进行作战概念的三维综合态势显示；

(4) 综合态势显示模块中的异构数据处理组件分为仿真数据接收、异构数据处理以及数据传输三个部分：仿真数据接收部分负责工具仿真部分生成数据的预处理和传输，通过 WebSocket 技术进行模块间的数据交互。异构数据处理部分针对接收到的仿真数据进行分类处理，数据传输部分负责将打包或处理好的数据推送到态势显示模块；然后态势显示模块针对异构出数据处理模块传输的静动态仿真数据进行前端的渲染展示，可以自适应数据处理并实时对数据的二维、三维进行展示，实现作战概念模型的动态可视化推演。如图5-7为某时刻我方对敌方入侵

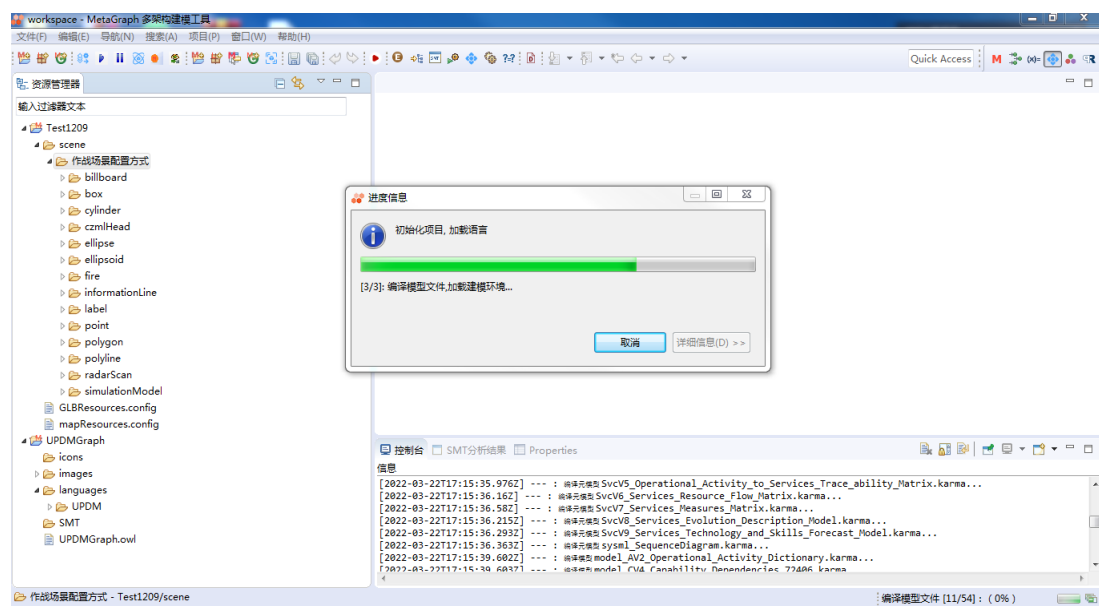


图 5-5 UPDM 项目配置图

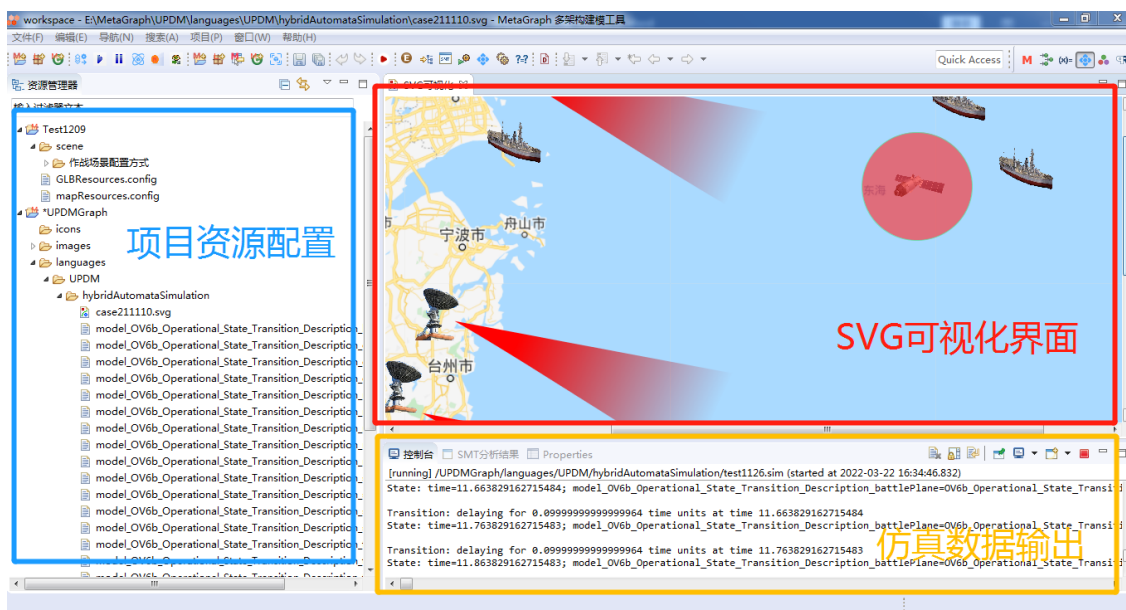


图 5-6 仿真数据输出图

目标进行警告拦截作战推演仿真截图；关于作战概念推演中一些细节效果图，如仿真模型、雷达扫描效果、击毁效果等如图5-8所示。



图 5-7 仿真综合态势显示图

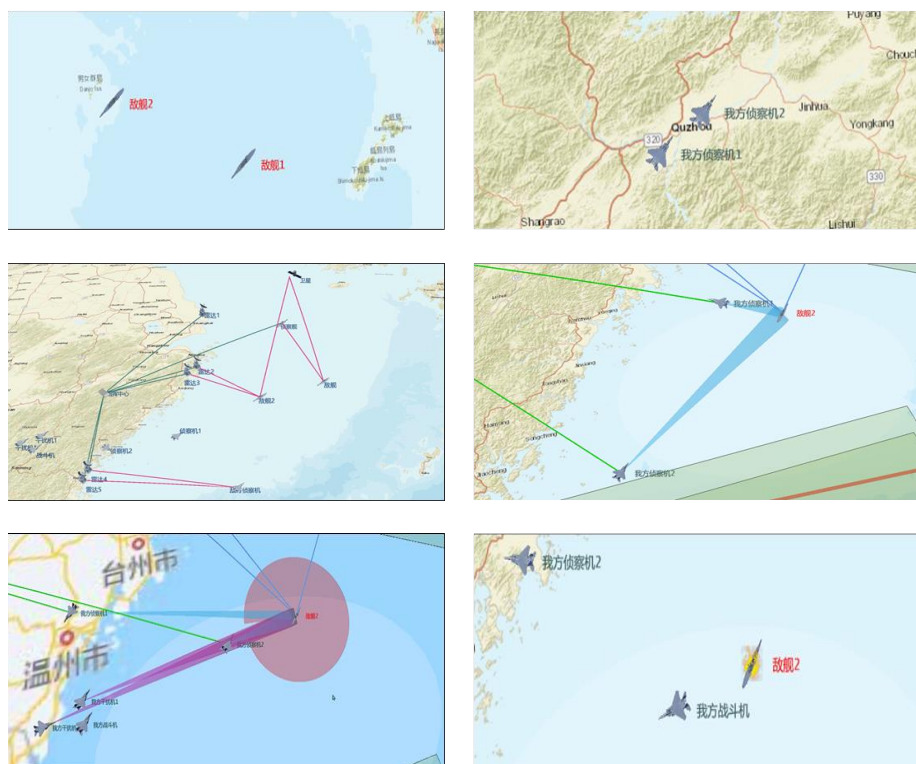


图 5-8 态势细节效果图

5.3 威胁评估插件

5.3.1 插件集成方式

本文将三四章中基于多属性决策对多目标以及集群的威胁评估方法以插件形式嵌入可视化平台中。

(1) 输入数据类型逻辑判断

在将威胁评估算法集成为可视化平台插件前，威胁评估算法内部需要增加输入数据标签类型，以便在多目标威胁评估时可让目标顺利进入 3.2.2.2 节中基于不同作战场景的威胁度评估流程，因此我们将增加目标类型标签，设定目标类型选择为 Air、Sea、Ground 及 Missile。然后我们需要对输入数据进行分流处理，我们将输入数据分为两类，第一类是多目标威胁评估方法需要的敌方目标威胁属性信息，第二类是集群威胁评估方法需要的敌方目标位置属性信息。我们对数据进行逻辑判断处理，当目标仅有第一类属性数据，第二类属性值为 * 时，采用多目标威胁评估方法输出目标的威胁度排序；当目标仅有第二类属性数据，第一类属性为 * 时，采用集群威胁评估方法输出目标的威胁度排序；当目标同时具有第一类和第二类属性数据时，此目标会分别进入多目标与集群威胁评估方法，参与多目标与集群威胁度排序。如图 5-9 所示为可视化后台导出的某时刻输入的敌方目标属性数据，红色部分的目标只进行集群威胁度评估；黄色部分的目标只进行多目标威胁评估；蓝色部分的目标既进行多目标威胁评估又进行集群威胁评估。

[干扰机目标]	*	*	*	*	*	*	*	*	Air	*	124.0247	24.5321	8]
[轰炸机目标]	*	*	*	*	*	*	*	*	Air	*	126.5522	24.1518	17]
[预警机目标]	*	*	*	*	*	*	*	*	Sea	*	128.7335	24.8067	12]
[巡洋舰目标]	*	*	*	*	*	*	*	*	Sea	*	127.0906	24.3521	0]
[驱逐舰目标]	*	*	*	*	*	*	*	*	Sea	*	125.8434	24.3471	0]
[歼击机目标]	*	*	*	*	*	*	*	*	Air	*	124.7115	23.7687	12]
[舰艇目标]	*	*	*	*	*	*	*	*	Sea	*	128.8763	24.5746	0]
[航母目标]	18.	43.	23.	0.	*	*	*	*	Sea	0.4.	126.7637	24.6495	0]
[对地导弹目标]	14,	20520,	1320,	60,	667,	0.8,	*	*	Missile	0.01,	*	*	*
[武装单兵目标]	132,	7.4,	50,	0,	*	*	*	*	Ground	0.1,	*	*	*
[中型车辆目标]	101,	58,	59,	0,	*	*	*	*	Ground	0.15,	*	*	*
[装甲车辆目标]	93,	93,	48,	0,	*	*	*	*	Ground	0.2,	*	*	*
[干扰机目标]	-16,	1544,	55,	13.6,	17.6,	8,	*	*	Air	0.8,	125.3671	23.8914	12]
[巡洋舰目标]	160,	37,	180,	0,	*	*	*	*	Sea	0.6,	124.7473	23.6121	0]
[护卫舰目标]	100,	16,	46,	0,	*	*	*	*	Sea	0.3,	129.162	26.3123	0]
[预警机目标]	21.	1372.	98.	8.5.	8.1.	12.	*	*	Air	0.7.	126.5138	25.5221.	7]

图 5-9 输入数据示例图

(2) 仿真数据处理流程

威胁评估插件的数据来源于可视化平台上输出的仿真想定数据。针对仿真想定数据，我们按照图 5-10 对数据进行处理，首先通过可视化平台后端用 swt 编辑异构模型数据.visual 文件，产生仿真模型的基础信息，每个仿真模型我们创建了三种标识符，分别对应我方空海地三域对此敌方目标的观测信息，以便在威胁评估时依据标识符寻找目标对应空间域的属性信息。然后我们将编辑后的多种数据文件统一传输至可视化模块后端进行分类处理，最后通过 websocket 与前端建立通信，将数据传输到前端。

当可视化平台前端接收到可视化平台后端传入的仿真数据后，我们按照 5-11 对数据进行处理，首先由前端向后端发送 Ajax 请求，调用后端的威胁评估算法，传

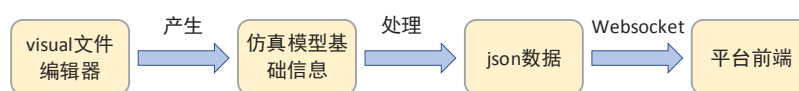


图 5-10 数据处理流程图一

输的数据为 json 格式，包含仿真模型的威胁属性数据与我方空间域视角以及我方目标的属性信息，威胁属性数据如目标的速度高度距离等及目标的经纬高度信息都封装为一个 list 输入，我方空间域视角以 string 形式输入，我方属性信息以 double 浮点数类型输入。在经过威胁评估后，评估结果输出为一个 map 包含两个键值对，分别对应多目标与集群威胁评估的结果值，然后将威胁评估的输出结果以 json 格式传回前端，并在前端以文本形式渲染展示。

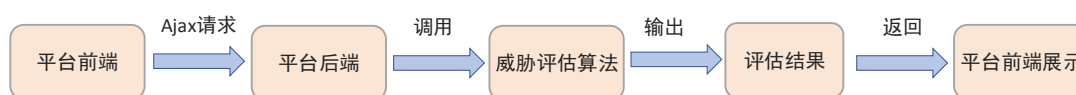


图 5-11 数据处理流程图二

5.3.2 仿真案例展示

在可视化平台上我们依据敌方目标建立了对应的仿真模型，该仿真模型中包含了关于仿真模型的基础信息配置、标签配置、在可视化界面上单独显示时的位置配置以及威胁评估算法中涉及的属性信息配置等，其中仿真模型的基础信息配置中的 ID 栏可以支持仿真模型依据体系建模和混合状态机联动仿真进行跟踪识别性的动态可视化推演，即我们依据目标的 ID 可跟踪仿真模型在一次仿真过程中输出属性数据。我们将保存为 visual 文件；

通过编辑模型的 visual 文件产生仿真模型的威胁属性与位置信息，作为多目标威胁评估与集群威胁评估的数据来源。如图5-12，例如我们可以看到可视化界面中对巡洋舰目标的属性信息及位置信息配置，点击“+”增加目标的属性信息配置，点击“-”可实现对不必要属性信息的删除，对于目标的没有的属性信息不需配置，在算法中已自动作为 * 处理。

通过“仿真对象基础配置”与“标签配置”配置仿真模型在可视化平台上的基础展示信息，如图5-13；

在仿真模型的 visual 文件中完成对仿真模型的信息配置后，平台将这些 json 格式数据统一传输到可视化模块后端处理后通过 websocket 与平台前端建立通信，完成数据的传世。在可视化平台前端我们可以观测到敌方目标的大致位置与运动态势，如图5-14所示；

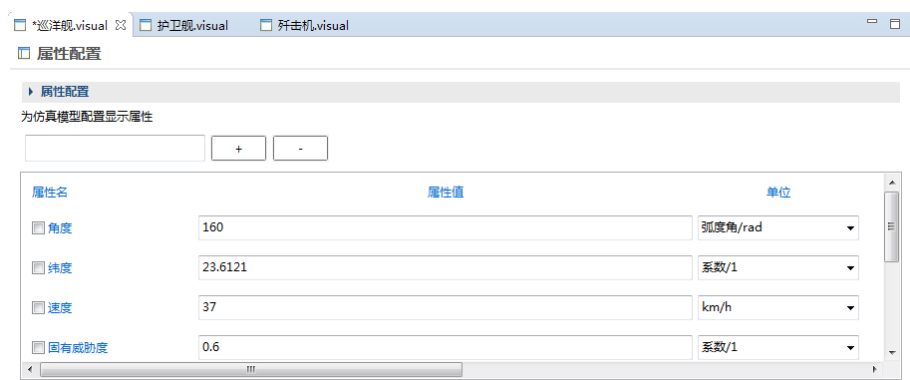


图 5-12 仿真模型属性配置



图 5-13 仿真模型可视化配置



图 5-14 敌方部分目标态势图

可视化平台前端威胁评估界面如图5-15所示，为了适配多目标威胁评估方法，我们需要设置我方战斗机的飞行高度与速度并选择我方防御的空间位置；而集群

威胁评估方法中，需要设置我方的观测基准点位置参数。在点击“确认”按钮后，前端将会向后端发送 Ajax 请求，从而调用多目标与集群威胁评估算法，并将输出的评估结果值返回前端进行显示。

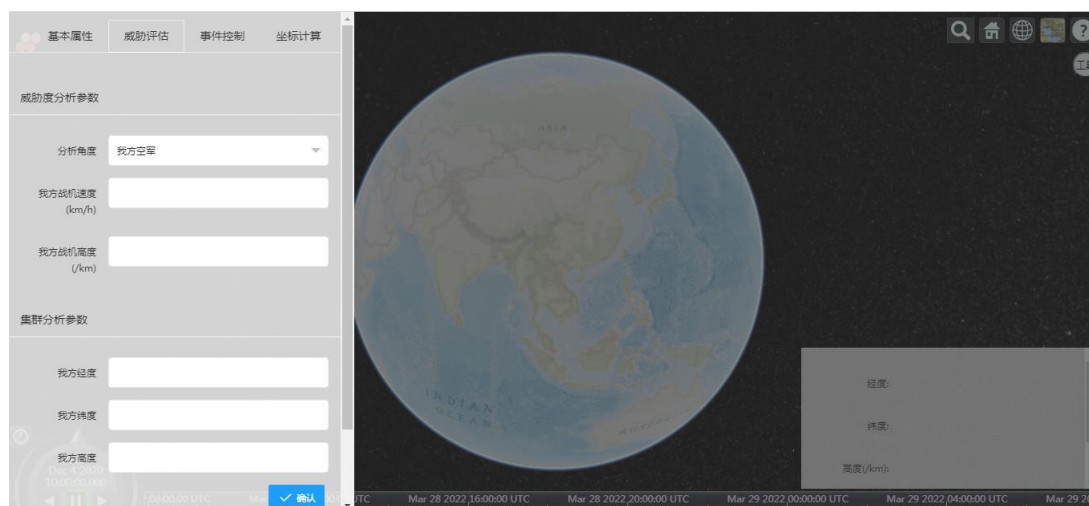


图 5-15 威胁评估界面

基于 3.3 节中我方观测的敌方目标在某一时刻的威胁属性数据，调用威胁评估算法插件后评估其对我方空域的威胁度排序结果如下图5-16；

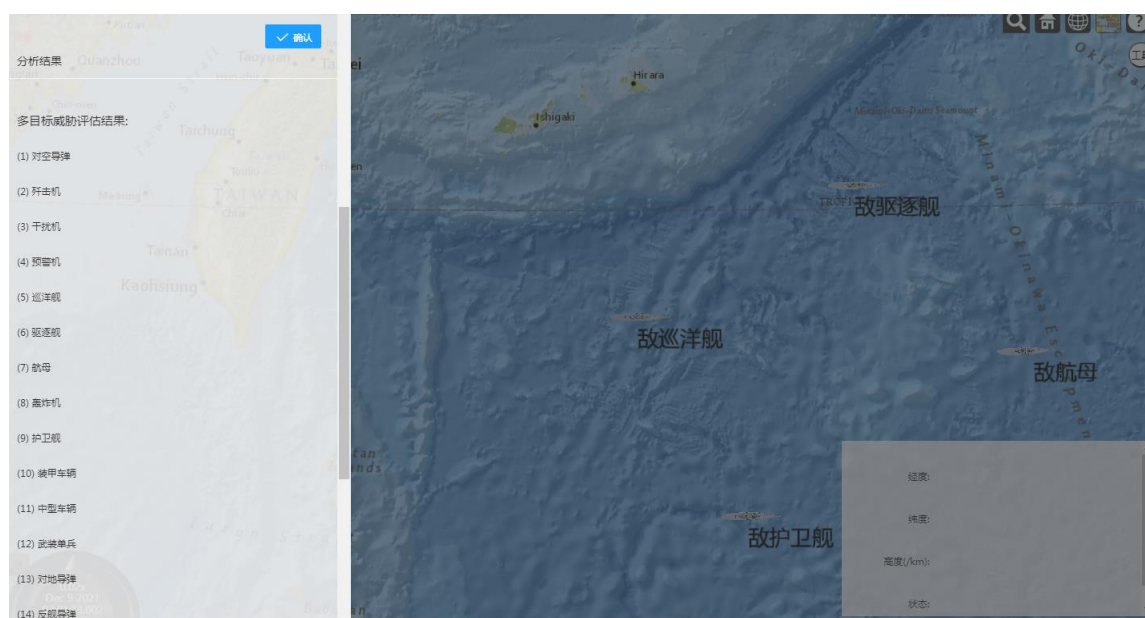


图 5-16 空域威胁度排序

当指挥决策人员需要评估同一批目标对我方海域与地域的威胁度排序时，只需在下拉框中选择我方的空间位置如图5-17所示，就可以得到这批目标对于我方

其余空间域位置的威胁评估结果，如图5-18所示。



图 5-17 我方空间位置选择

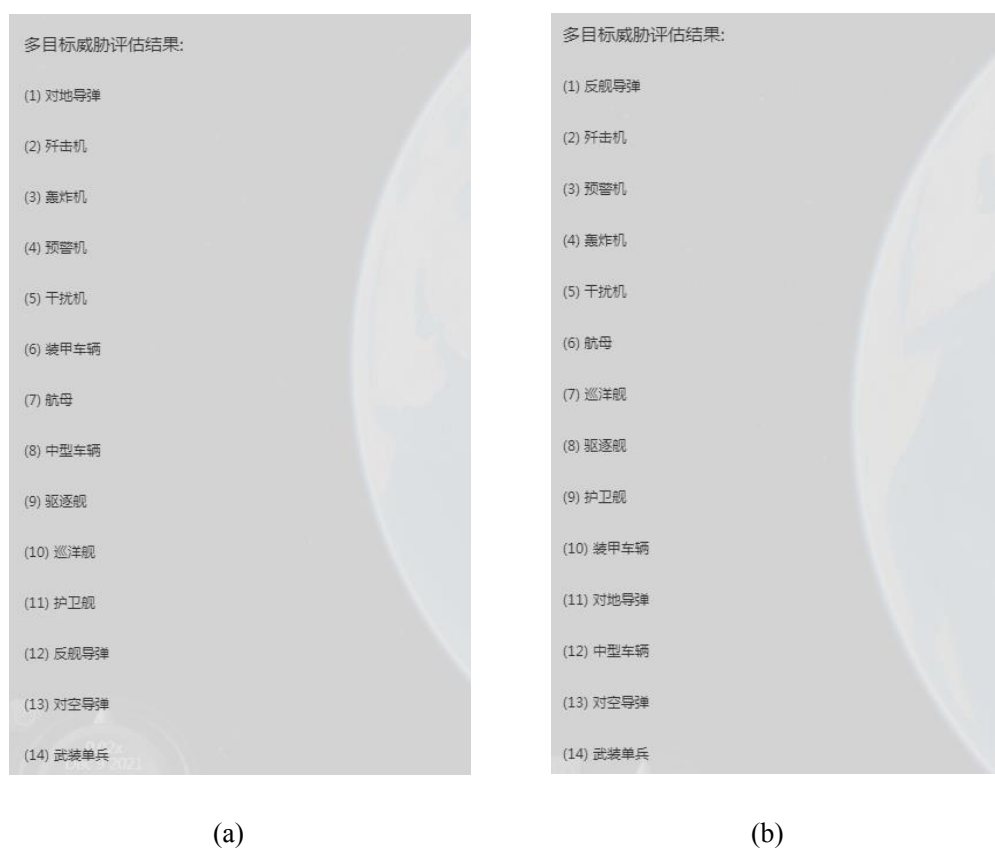


图 5-18 目标威胁评估结果显示图。(a) 地域威胁度排序图；(b) 海域威胁度排序图

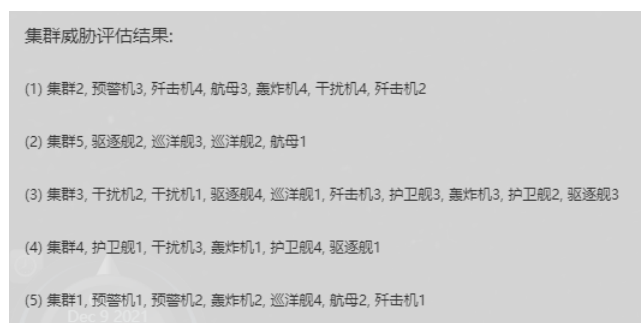
当我方观测到规模较为庞大的敌方目标群体时，敌方可能是以集群形式完成此次作战任务。因此我方指挥人员需要对敌方来袭目标进行空间位置的分群，并依据指挥决策层次的威胁评估指标对敌方多个集群进行威胁评估。在获取了敌方目标的态势属性信息后，需要选择我方观测点的基准位置，如图5-19所示，在前端

需要设置我方重要阵地的位置信息。选择将我方的位置信息带入集群威胁评估算法中可进行不同观测点位置的实时切换，实现基于我方多个防御阵地的威胁评估，使得威胁评估更加全面，为我方防御打击提供全方位化、具体化的决策评估支持。



图 5-19 集群分析参数填写

基于 4.2.5 节中敌方 30 个目标的位置信息数据，我们建立目标的.visual 文件，将目标的属性及位置信息传输到可视化平台前端，在前端接收到数据后向后端发送 Ajax 请求，同步调用集群威胁评估算法，并将集群威胁评估值返回给可视化平台前端进行展示。



集群威胁评估结果:

- (1) 集群2, 预警机3, 歼击机4, 航母3, 轰炸机4, 干扰机4, 歼击机2
- (2) 集群5, 驱逐舰2, 巡洋舰3, 巡洋舰2, 航母1
- (3) 集群3, 干扰机2, 干扰机1, 驱逐舰4, 巡洋舰1, 歼击机3, 护卫舰3, 轰炸机3, 护卫舰2, 驱逐舰3
- (4) 集群4, 护卫舰1, 干扰机3, 轰炸机1, 护卫舰4, 驱逐舰1
- (5) 集群1, 预警机1, 预警机2, 轰炸机2, 巡洋舰4, 航母2, 歼击机1

图 5-20 集群威胁评估结果

如图5-20，在某一时刻，我方将敌方的 30 个目标进行空间位置的分群通过指挥决策层次的评估指标对 5 个集群进行威胁评估，为火力打击提供决策支持。

5.4 本章小结

本章介绍了作战概念模型动态推演可视化平台的功能组成、体系架构与已完成的作战案例展示；并基于三四章的研究成果设计完成了威胁评估插件的集成，对多目标与集群威胁评估结果进行了可视化展示，为辅助用户指挥决策提供支持。

第六章 全文总结与展望

6.1 全文总结

信息化战争时代的大背景下，战争致胜的关键因素依赖作战系统整体化、指挥系统自动化及作战人员协调化等多维组合因素，这对战场态势威胁评估提出了更高的要求。本文针对现有的威胁评估场景单一的问题，提出了一种多域作战下基于多属性决策的目标威胁度建模与评估方法，并通过实验仿真案例得到多域作战目标分别对我方空域、地域、海域的威胁度排序，验证了威胁建模与评估方法的有效性；其次本文针对目前缺乏集群作战威胁评估方法的问题提出了两种角度的集群威胁评估方法，首先是基于属性权重的 DBSCAN 算法对目标分群，通过集群簇中心与基于威胁评价测度所给定的威胁最大点的距离对多个集群进行威胁度排序；然后在分析了第一种评估方法的不足之处后提出基于空间位置转化后的 DBSCAN 聚类方法，建立指挥决策层面的集群特征威胁评估指标，并结合实验仿真案例采用多属性决策方法对集群威胁进行了研究评估，验证了该方法的合理性。最后，基于上述研究成果设计完成了基于多属性决策的目标威胁评估插件，嵌入作战概念模型动态推演可视化平台，实现了作战概念模型的威胁评估仿真推演，对作战决策具有重要意义。本文主要工作如下：

（1）对现有的主流威胁评估方法进行了大量文献调研与归纳总结，通过优缺点的对比与本文工作开展的研究背景选择了多属性决策方法，然后通过对多属性决策方法的基本理论、相关流程及算法阐述介绍后提出了多域作战下基于多属性决策的威胁评估框架。

（2）现代化战争已向多兵种联合作战方向迈步，而现有的威胁评估场景大多针对国土防御、舰艇防空等单一单向的作战场景。针对此问题，本文提出了一种对于多域联合作战场景下基于多属性决策的目标威胁度建模与评估方法，通过对作战目标的静态能力属性与动态态势属性分析，结合作战经验提取目标威胁要素并建立威胁评估模型，最后采用多属性决策方法结合实验仿真案例分别得到了对我方空域、海域、地域的威胁度目标排序，验证了威胁建模与评估方法的有效性。

（3）基于兵力聚合的智能化集群作战是未来战场的主要作战样式，单目标的威胁评估方法已经不能适应性评估集群作战特征威胁。针对此问题，本文提出了两种集群威胁评估方法：第一种是对传统 DBSCAN 聚类算法加入属性权重进行改进后对大规模目标聚类分群，通过制定的威胁评价测度计算比较每个集群簇与威胁最大点的距离，并进行集群威胁批排序，然后在分析了此威胁评估方法的不

足后提出第二种威胁评估方法,即通过对敌方的空间位置进行坐标转化后采用 DBSCAN 算法以我方为基准对大规模目标聚类分群,并建立指挥决策层面的集群威胁评估指标对集群威胁度进行评估排序,最后通过仿真案例验证了集群威胁评估方法的有效性。

(4) 本文在实验室项目基础上搭建了作战概念模型动态推演可视化平台,并基于三四章的研究成果,设计开发了目标威胁评估插件。通过对平台功能组成、体系架构与工作流程的介绍以及威胁评估插件设计方案的详细讨论,构建仿真案例场景,实现可视化作战推演与威胁评估,使得军事决策语言得以形式化直观表达,对作战决策具有重要意义。

6.2 后续工作展望

本文研究了多域作战下多目标与集群威胁评估方法,但仍有一些较不完善的内容,未来还有提升改进与深入研究的空间,包括以下几个方面:

(1) 在多属性决策流程中对于评估指标权重的确定,本文中采用 CRITIC 客观赋权法与专家意见的结合赋权,今后可以将战略战术知识、专家决策系统等与客观赋权法进行结合,结合后的综合集成赋权法可以更深层次融合决策者的主观偏好判断与战场情报数据的客观观测,使得属性权重的计算结果更具有普适有效性。

(2) 在评估集群威胁时,指挥决策层次在数据预处理与高度融合处理的过程中需要融入更多人工智能领域合适的算法。下一步工作可将战场目标、评估指标、评估结果映射为知识图谱中的知识框架与实体数据,并加入可生成的战略或战术意图推理预测,通过战场目标依据时间变化构建机动决策评估模型,实现目标与集群威胁评估的实时处理,有助于把握整体战场态势,达到对多模、多源数据和多维复杂关系的高效处理与可视化展示,为作战指挥提供决策支持。

(3) 本文搭建的平台关于威胁评估插件部分缺乏对作战数据库的集成,因此难以实现对海量战场情报信息的统一管理、共享与重用,所以可以考虑在今后的研究中注重目标威胁数据库的开发与集成;并且现有的威胁评估仿真系统无法与作战概念动态可视化推演进行实时匹配,做到及时更新敌方目标与集群的威胁度,未来应加以改善,以构建更完整的目标威胁评估决策机制。

致 谢

行文至此，感慨万千，三年的研究生求学生涯已经接近尾声。回首这段充实美好旅程中的成长与收获，让我在即将到来的毕业季对一切充满感恩与不舍。

感谢我的学校与学院为莘莘学子提供了美丽的学习与丰富的教学资源。

感谢我的项目指导老师王坚教授。感谢王老师在科研工作中对我的严格要求与悉心教导，在讨论项目的开展工作与学术性科研问题时，王老师精益求精的工作作风深深感染了我，教会我如何细节的去看待学习工作中遇到的问题，培养了我拓展思维与专注科研的能力。感谢您严谨务实的治学态度，感谢您在学习与工作中给予我的珍贵建议，感谢您开阔的视野与敏锐的思维，让我深受启迪，帮助我树立了远大的学术目标。在您的指导下，我各方面的能力都得到了良好的锻炼与提升。

感谢我的导师李恒老师，您丰富的工程经验与平易近人的处事风格使我受益良多。感谢团队的杨鍊老师，感谢您对我的鼓励与关怀，使我倍感温暖。

感谢研究生期间遇到的朋友朱继飞、杨兆瑞，感谢同届的龙慧、熊江涛、马骄阳、顾旭辉、郭铖飞、渊采、王迪也、王志鹏及梁熙民同学，感谢教研室的师兄师姐与师弟师妹，科 B341 就像一个温暖的大家庭，和你们一起科研学习真的很开心，感谢大家这三年给予我的帮助。

感谢我的男朋友张赟疆，谢谢你对我的关心与鼓励，让我成为更好的自己。愿我们永葆热爱，继续奔赴下一场山海。

感谢我的父母及家人，感谢你们一路的陪伴与支持，感谢你们给予我无限的爱与鼓励，让我可以勇敢乐观的去追逐自己的梦想，你们永远是我坚强的后盾。

在研究生学习生涯中，我们经历了疫情的爆发与持续，感谢党和国家的付出，感谢所有奋战在抗疫一线的白衣天使、执勤人员，感谢每一位无私奉献的志愿者，感谢积极配合防疫政策工作的每一个人民群众。我们坚信寒冬终将逝去，暖春终将到来。待到春暖花开时，山河定然无恙，祖国定更加繁荣昌盛！

最后诚挚感谢在百忙之中批阅和评审本篇论文的各位专家们，感谢你们提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] Di Pietro R, Raponi S, Caprolu M, et al. New dimensions of information warfare[M]. Springer, 2021, 1-4.
- [2] Deptula D A. A new battle command architecture for joint all-domain operations[J]. *Æther: A Journal of Strategic Airpower & Spacepower*, 2022, 1(1): 51-56.
- [3] Penney G, Launder D, Cuthbertson J, et al. Threat assessment, sense making, and critical decision-making in police, military, ambulance, and fire services[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2022, 1-17.
- [4] Burov Y. Knowledge based situation awareness process based on ontologies[C]. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, 413-423.
- [5] Antony R T. Database support to data fusion automation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(1): 39-53.
- [6] Steinberg A N, Bowman C L. Revisions to the jdl data fusion model[M]. CRC press, 2017, 65-88.
- [7] Gonsalves P, Cunningham R, Ton N, et al. Intelligent threat assessment processor (itap) using genetic algorithms and fuzzy logic[C]. *Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion*, 2000, THB1-18.
- [8] Gugerty L J, Tirre W C. Individual differences in situation awareness[J]. *Situation awareness analysis and measurement*, 2000, 249-276.
- [9] Wright E, Mahoney S, Laskey K, et al. Multi-entity bayesian networks for situation assessment[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. FUSION 2002*.(IEEE Cat. No. 02EX5997), 2002, 804-811.
- [10] Changwen Q, You H. A method of threat assessment using multiple attribute decision making[C]. *6th International Conference on Signal Processing*, 2002., 2002, 1091-1095.
- [11] Beaver J M, Kerekes R A, Treadwell J N. An information fusion framework for threat assessment[C]. *2009 12th International Conference on Information Fusion*, 2009, 1903-1910.
- [12] Lin Z, Zhishu Y, Wenxin F. Research on threat assessment based on intuitionistic fuzzy set theory[C]. *2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2009, 494-499.
- [13] Azimirad E, Haddadnia J. Target threat assessment using fuzzy sets theory[J]. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, 2015, 1(2): 57-74.

- [14] Azimirad E, Haddadnia J. A new model for threat assessment in data fusion based on fuzzy evidence theory[J]. Int. J. Adv. Intell. Informatics, 2016, 2(2): 54.
- [15] Brancalion J F B, Kienitz K H. Threat evaluation of aerial targets in an air defense system using bayesian networks[C]. 2017 IEEE 15th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 15th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 3rd Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech), 2017, 897-900.
- [16] 段锁力, 张多林, 高生强. 基于直觉模糊区间粗糙集的辐射源威胁等级判定 [J]. 现代防御技术, 2011, 39(4): 5.
- [17] 杜继永, 张凤鸣, 杨骥, et al. 基于模糊理论的防空系统威胁评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(10): 4.
- [18] 黄洁, 李弼程, 赵拥军. 直觉模糊集 choquet 积分在目标威胁估计中的应用 [J]. 信息工程大学学报, 2014, 15(1): 6.
- [19] 郝娜, 孔德鹏, 常天庆, et al. 基于诱导有序加权直觉模糊集的混合多属性目标威胁评估方法 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 6.
- [20] 陈建建, 黄先玖. 基于 s-ifowa 算子的多属性决策方法及其应用 [J]. 南昌大学学报: 理科版, 2015, 39(5): 5.
- [21] 肖力铭, 齐海生, 屈济坤, et al. 基于直觉模糊层次分析法的空中目标威胁评估 [J]. 探测与控制学报, 2019, 41(3): 4.
- [22] 孔德鹏, 常天庆, 郝娜, et al. 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): 12.
- [23] 任耀军. 毕达哥拉斯三角犹豫模糊 muirhead 平均算子的目标威胁评估应用 [J]. 电光与控制, 2021, 28(4): 6.
- [24] 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, 4.
- [25] 刘振, 彭军, 胡云安. 一种新型动态贝叶斯网络及其在威胁评估中的应用 [J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(2): 5.
- [26] 王巍. 基于云参数贝叶斯网络的威胁评估方法 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(6): 5.
- [27] 杨海燕, 韩城, 张帅文. 基于 fdbn 的空中目标威胁评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(1): 29-33.
- [28] 高擎峰, 韩清 . 动态贝叶斯网络在空间目标威胁评估中的应用 [J]. 舰船电子工程, 2021, 41(5): 25-28.

- [29] 高尚. 基于神经网络威胁判断模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(7): 3.
- [30] 邱浪波, 刘作良, 刘明. 一种应用神经网络技术的威胁估计算法 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2002, 3(6): 4.
- [31] 李卉. 基于 ba 优化 bp 神经网络的目标威胁估计 [J]. 山西电子技术, 2016, 3.
- [32] 黄璇, 郭立红, 李姜, et al. 改进粒子群优化 bp 神经网络的目标威胁估计 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(3): 7.
- [33] 李寒雨. 基于迭代决策树和 bp 神经网络的目标威胁估计研究 [J]. 中国舰船研究院, 2018, 71.
- [34] 张峰, 胥文, 吴东岩, et al. 作战仿真中基于 bp-adaboost 目标威胁估计研究 [J]. 系统仿真技术, 2019, 15(3): 180-183.
- [35] 陈侠, 刘子龙. 基于模糊小波神经网络的空中目标威胁评估 [J]. 战术导弹技术, 2018, 7.
- [36] 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, 3.
- [37] 潘科, 潘宣宏, 郭新奇. 基于多属性决策的水面舰艇防空威胁判断分析 [J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(5): 5.
- [38] 程明, 周德云, 张 . 基于混合型多属性决策方法的目标威胁评估 [J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 3.
- [39] 王毅, 刘三阳, 张文, et al. 属性权重不确定的直觉模糊多属性决策的威胁评估方法 [J]. 电子学报, 2014, 42(12): 6.
- [40] 王君, 白华珍, 邵雷. 基于变权理论的目标威胁评估方法 [J]. 探测与控制学报, 2018, 040(002): 23-28.
- [41] 侯思尧, 李永光, 陈思静, et al. 利用主客观集成赋权法的多目标威胁评估 [J]. 电讯技术, 2019, 59(8): 6.
- [42] 奚之飞, 徐安, 寇英信, et al. 基于灰主成分的空战目标威胁评估 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 9.
- [43] 杨军佳, 武翠霞, 肖健. 空袭目标威胁动态评估 spa 法 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(5): 6.
- [44] Urošević B G, Marinović B. Ranking construction of small hydro power plants using multi-criteria decision analysis[J]. Renewable Energy, 2021, 172: 1174-1183.
- [45] Kahraman C. Multi-criteria decision making methods and fuzzy sets[M]. Springer, 2008, 1-18.
- [46] Zavadskas E K, Turskis Z, Kildienė S. State of art surveys of overviews on mcdm/madm methods[J]. Technological and economic development of economy, 2014, 20(1): 165-179.
- [47] Alinezhad A, Khalili J, et al. New methods and applications in multiple attribute decision making (madm)[M]. Springer, 2019.

- [48] Bozorg-Haddad O, Zolghadr-Asli B, Loaiciga H A. A handbook on multi-attribute decision-making methods[M]. John Wiley & Sons, 2021.
- [49] Henig M I, Buchanan J T. Solving mcdm problems: Process concepts[J]. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 1996, 5(1): 3-21.
- [50] Tzeng G H, Huang J J. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. CRC press, 2011.
- [51] Lin M, Chen Z, Xu Z, et al. Score function based on concentration degree for probabilistic linguistic term sets: an application to topsis and vikor[J]. Information Sciences, 2021, 551: 270-290.
- [52] Shi W, Li H, He W, et al. Threat assessment of air targets based on intent prediction[C]. 2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2021, 311-321.
- [53] 关莹, 熊键, 陈鸣, et al. 集群作战能力涌现初探 [J]. 电子信息对抗技术, 2019, 22-26.
- [54] 宋孝先, 付国宾, 张超. 舰载预警直升机协同探测建模与仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 5.
- [55] Teng F, Song Y, Guo X. Attention-tcn-bigru: An air target combat intention recognition model[J]. Mathematics, 2021, 9(19): 2412.
- [56] Gu H, Cheng C, Sun A, et al. Research on vulnerability and damage assessment of tactical ballistic missile[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 012054.

攻读硕士学位期间取得的成果

参与项目

2020.02-2020.07 需求工程智能加速系统

2020.08-至今 作战概念模型动态推演可视化技术