

分布式防空反导杀伤网超网络构建与节点价值评估方法

何欣¹, 范成礼², 谭梦蝶¹, 李炳涛¹

(1. 空军工程大学研究生院, 西安, 710051; 2. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 聚焦分布式防空反导杀伤网节点异质、链路多重的复杂网络特性, 针对防空反导杀伤网节点价值评估存在的节点功能异质性研究不充分、评估指标单一化等问题, 构建了侦察、指控和火力子网的超网络模型, 提出了基于超网络理论的节点价值评估方法。该方法综合考虑节点拓扑结构、性能指标和连接关系, 通过改进加权的专家打分和熵-灰色关联-TOPSIS算法得到杀伤网的整体效能, 并采用节点删除法衡量节点价值重要度, 实现了对节点价值的量化分析。通过案例验证了方法的有效性, 为防空反导杀伤网节点价值评估提供了新思路。

关键词 防空反导; 杀伤网; 超网络; 节点价值评估

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.04.011

中图分类号 TJ76 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)04-0089-11

A Hyper-Network Construction and A Method of Evaluating Node Value on Distributed Air Defense and Antimissile Kill Web

HE Xin¹, FAN Chengli², TAN Mengdie¹, LI Bingtao¹

(1. Graduate School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract The distributed air defense and antimissile kill web are characterized by complex networks of heterogeneous nodes and multiple links, and are aimed at the problems that research on the functional heterogeneity of nodes is insufficient, and assessment indexes are homogeneous in value evaluation of nodes, a hyper-network model is constructed for the reconnaissance, accusation and fire sub-network, and a method of node value evaluation is proposed based on the theory of hyper-network. The node topology, performance index and connection relationship are taken into consideration by the method comprehensively from obtaining the overall effectiveness of the kill web through the improving weighted expert scoring and entropy-grey correlation-TOPSIS algorithm to measuring the node value importance by node deletion method, achieving the quantitative analysis of the node value. The method is valid, providing a new idea for the value evaluation of the nodes in air defense and antimissile kill web.

Key words air defense and antimissile; kill web; hyper-network; node value evaluation

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2025JC-YBMS-804, 2025JC-YBMS-691)

作者简介: 何欣(1993-), 男, 陕西咸阳人, 硕士生, 研究方向为防空反导作战建模与仿真。E-mail: dovotion7777@qq.com

通信作者: 范成礼(1988-), 女, 四川眉山人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为防空反导作战建模与仿真。E-mail: ffq516@163.com

引用格式: 何欣, 范成礼, 谭梦蝶, 等. 分布式防空反导杀伤网超网络构建与节点价值评估方法[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(4): 89-99.
HE Xin, FAN Chengli, TAN Mengdie, et al. A Hyper-Network Construction and A Method of Evaluating Node Value on Distributed Air Defense and Antimissile Kill Web[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(4): 89-99.

分布式作战作为一种新兴的作战模式,正逐步成为现代战争的重要特征。其将战场上分散部署的各作战单元的信息和火力资源进行一体化整合与综合运用,能够最大化地提升作战体系的整体效能和生存能力。分布式防空反导杀伤网是以防空反导力量为主,聚合多域作战力量,形成要素空间分散、功能跨域分布、体系弹性重构、效能多域聚合的杀伤网络,其核心是把多域分布的侦察、指控、火力等力量要素功能解耦、分散配置、动态入网,以实现各力量要素功能互补、资源弹性调配和跨域协同,提升防空反导体系作战效能。目前,对于如何构建分布式防空反导杀伤网,精准有效地评估关键节点价值重要度,仍是该领域的研究焦点。

近年来,国内外学者在防空反导杀伤网体系建模以及节点价值评估领域的研究已经呈现出多元化趋势。在杀伤网模型构建方面,文献[1~3]基于观察-定向-决策-行动(OODA)循环理论构建杀伤网模型。文献[4]建立了基于信息供需均衡的作战体系超网络模型,包括感知层、指挥层和火力层的优化条件分析。文献[5]基于复杂网络理论构建了防空反导体系网络模型。文献[6]提出了一种基于作战任务域、逻辑功能域和资源实体域的海上编队云作战体系分析模型。文献[7]基于复杂网络构建杀伤网模型,结合多目标优化融合智能与人类决策,辅助杀伤网设计决策。在节点价值评估方法方面,文献[8~11]探讨了如何根据网络的拓扑结构来评定节点的关键性。文献[12]提出了杀伤网能力指数的概念,基于该指数的贡献率,建立了节点重要度评估模型。文献[13~14]考虑军事作战目标价值特性和网络结构特性的节点重要度识别方法。

综上所述,现有研究成果存在一些局限性:①模型构建时各个单元网络间的功能联系及交互机制未能给予充分的考量;②节点评估指标属性较为单一,仅考虑拓扑性的指标,如节点的度、介数等,或仅考虑节点性能度量指标,没有充分结合考虑;③现有研究多关注节点的局部特性及其对相邻节点的影响,而较少评估节点在整个系统中的价值。

针对上述研究局限性,本文引入超网络理论,构建了反映分布式防空反导杀伤网复杂网络特性的超网络模型,将熵权法、灰色关联分析法和(technique for order preference by sinlaring to ideal solution,

TOPSIS)法结合,综合考虑节点拓扑结构、性能指标和连接关系得到整体效能,最后利用节点删除法,通过对比删除节点前后超网络整体效能下降程度来衡量节点的价值重要度。

1 相关理论

定义 1 超网络

超网络定义为“网络的网络”,是一种构建于多层次与多属性框架之上的超网络结构,它将具有不同性能、层级划分或功能定位的子网依据特定关联机制相互连接而成^[11]。

定义 2 节点度值

一个节点 v_i 的度值是该节点与其直接相邻的节点的数量。节点的度值越大,则说明该节点在网络中的重要程度越高。

定义 3 节点介数

介数是一个衡量节点重要性的关键网络指标,它指的是通过网络中某节点的最短路径数量与网络中全部最短路径数量的比例。

定义 4 超度

超度是一个关键指标,它衡量一个节点与不同子网中的其他节点的连接数。

定义 5 紧密度

紧密度是一个关键度量指标,它表示一个节点到网络中所有其他节点的平均距离的倒数^[15],可有效评估节点在网络中的中心性和快速接入其他节点的能力。

2 防空反导杀伤网体系超网络模型构建

2.1 基于超网络模型总体结构

构建防空反导杀伤网超网络模型 H ,根据承担不同的职能和功能,分为侦察子网 S 、指控子网 C 和火力子网 A ,则 $H=SUUA$ 。每个子网由节点集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 和边集合 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 组成^[16],节点集合依次划分为侦察节点 V_S 、指控节点 V_C 和火力节点 V_A ,即: $V=(V_S, V_C, V_A)$ 。边集合 E 依次划分为 E_S 、 E_C 和 E_A ,同时不同类型节点之间的相互作用构建了子网之间的联系。图 1 为防空反导杀伤网超网络模型构建示意图。

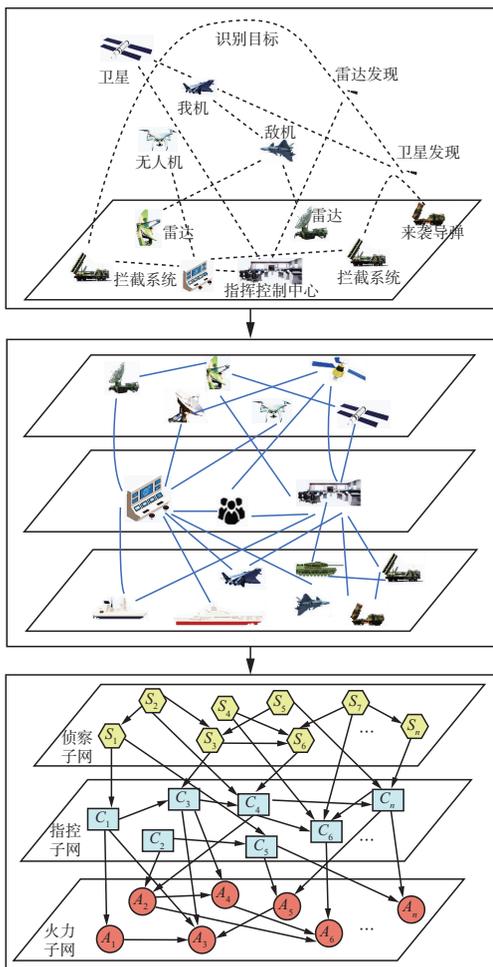


图 1 防空反导杀伤网超网络模型构建示意图

Fig. 1 Schematic diagram of constructing hyper-network model for air defense and antimissile kill web

2.2 各子网特性构建描述

侦察子网可描述为 (V_s, E_s) ,作为防空反导体系至关重要的部分,承担着收集、处理和分析战场信息的职能。 V_s 包括地面雷达、卫星接收站、预警机、声呐等探测设备节点, E_s 表示侦察节点之间的信息传输路径和协作关系,体现了节点间的实际通信链路和信息共享路径。

指控子网可描述为 (V_c, E_c) ,反映了战场指挥、控制与协调效率,可以通过指挥决策能力来表征,即指挥节点对不同作战单元和资源的调度与指令下达能力。 V_c 包括各级指挥中心、通信网络、数据处理中心等节点,负责做出决策并指挥部队行动。 E_c 表示指控节点之间的通信链路和指挥关系,承载着指挥命令、战场态势信息和决策支持数据的传输,体现指挥结构的层级性和协同性。

火力子网可描述为 (V_a, E_a) ,体现了战场上火力打击效能和响应速度,可以通过火力打击能力来表征。 V_a 包括地面防空反导武器系统、激光武器等拦截设备节点。 E_a 表示火力单元之间的信息共享、协同打击、决策反馈和火力支援等关键功能。

2.3 子网间相互关系构建

侦察子网 S 是战场信息传递与处理的平台,为指控子网 C 节点共享和交换情报数据,这种相互关系数学描述为 E_{sc} 。

指控子网 C 作为超网络体系架构的支撑与核心,确保了网络的协调运作,不仅接收侦察子网 S 的情报信息,还负责向火力子网 A 传递决策指令。这种相互关系可以通过 E_{sc} 和 E_{ca} 进行描述。

火力子网 A 接收指控子网 C 的指令和决策,执行火力打击任务并反馈打击效果。指控子网 C 向火力子网 A 提供目标信息、打击时机等。这种相互关系可以通过 E_{ca} 进行描述。

3 节点价值评估体系建立

3.1 整体评估方法

节点价值评估方法分为 4 步。第 1 步结合节点拓扑度量指标和性能度量指标计算子节点基础贡献值 NR_i ;第 2 步将同一子网下所有子节点基础贡献值 NR_i 求和得到子网性能指标得分 PM_i ;第 3 步将侦察子网、指控子网和火力子网性能指标得分 PM_i 求和得到超网络整体效能 CE ;最后通过节点删除法,删除待评估节点计算该节点体系价值重要度 SV 。图 2 为节点价值评估流程。

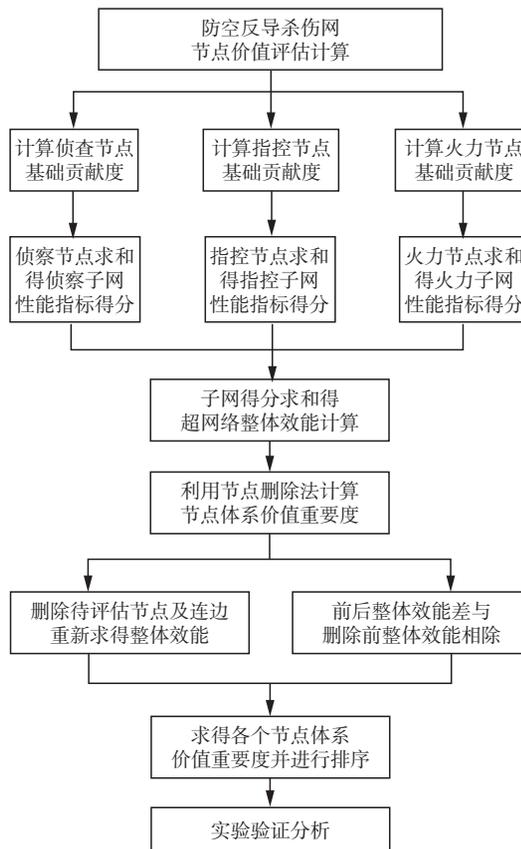


图 2 节点价值评估流程

Fig. 2 Flowchart for evaluation of nodes value

3.2 子节点基础贡献值

子节点基础贡献值是指子节点与其他节点连接关系以及自身属性共同表征的基本贡献程度,主要通过拓扑度量指标和性能度量指标进行衡量。

拓扑度量指标是用来描述和分析空间形态中节点的位置和连通性的参数指标。在这些度量指标中,度、超度、介数和紧密度等都是常用的几个关键指标,它们具有不同的含义和作用,共同刻画了网络节点特性。

性能度量指标是衡量网络节点性能的关键参数,主要表征了自身属性和功能。因此性能度量指标考虑 3 个方面,其中侦察子网主要考虑探测距离、情报融合能力等指标,指控子网主要考虑指挥决策能力、通信覆盖范围等指标,火力子网主要考虑拦截范围、火力协同作战能力等指标。图 3 为节点基础贡献值打分指标体系示意图。

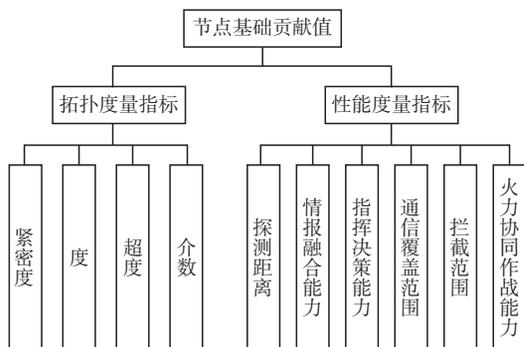


图 3 节点基础贡献值打分指标体系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the node base contribution value scoring index system

其中,探测距离、通信覆盖范围和拦截范围等指标数值可以根据系统模拟分析或者相关参考资料获取。而对于不能被量化的性能度量指标数值,如情报融合能力、指挥决策能力、火力协同作战能力等,则通过专家打分评估确定指标得分。而后将计算得到的所有指标数值输入到熵-灰色关联-TOPSIS 方法中,获取各节点的基础贡献值。

3.2.1 基于改进加权法的专家打分

基于改进加权法的专家打分是一种优化算法,对于不能被量化的性能度量指标可通过该方法确定最终得分。在此需特别阐明,该方法是通过提高专家的权值方法来抑制非理性偏好^[17],以取得更客观的数据。虽然仍存在一定程度的人为主观判断,但较以往单纯依赖宏观层面定性分析的评价模式,已实现了主观性影响最小化。

在专家打分系统中,由 S 位专家参与打分。以下是相关参数的详细描述:

1) P_i^j 表示 j 次迭代时第 i 位专家的权值修正值。该修正值通常根据专家的打分与群体共识的接

近程度进行调整。

2) u_i^j 表示 j 次迭代时第 i 位专家的权值校正。该校正值被用于调整专家的初始权值,目的是更准确地反映其打分的精确度和可靠性。

3) y_i^j 表示 j 次迭代时第 i 位专家的加权打分值。

4) \bar{X}^j 表示第 j 次迭代中,所有专家加权打分值的平均数。现定义校正值 u_i^j 如下:

$$u_i^j = \frac{X_{\max}^0 - X_{\min}^0}{X^{j-1}} - \sqrt{\frac{2 |X_i^0 - \bar{X}^{j-1}|}{X^{j-1}}} \quad (1)$$

式中: X_{\max}^0 、 X_{\min}^0 分别为专家给出的最高打分和最低打分。

结合改进加权法的专家打分公式^[17]进行计算,以此确定收敛值式(2)和最终打分结果式(3),计算式如下所示:

$$|\bar{X}^{\sigma+1} - \bar{X}^{\sigma}| \leq \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\bar{X}^{\sigma+1} + \bar{X}^{\sigma}}{2} \quad (3)$$

式中: σ 为最后的迭代次数, ϵ 在本文取 0.01。

3.2.2 熵-灰色关联-TOPSIS 方法的节点基础贡献值计算

该方法是对所有拓扑度量指标和性能度量指标进行量化处理以此求得节点基础贡献值。将熵权法、灰色关联分析法和 TOPSIS 法结合,充分发挥各自优势,综合考虑评价指标与最优值的差距,以及打分与理想解的接近程度以弥补关联度相似的不足,从而得出更为可靠的分值结果。图 4 为熵-灰色关联-TOPSIS 节点算法流程。

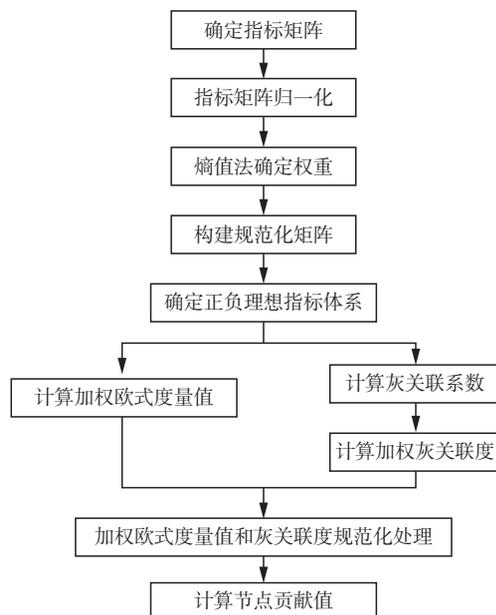


图 4 熵-灰色关联-TOPSIS 节点算法流程

Fig. 4 Flowchart of entropy-gray correlation-topsis node algorithm

假设防空反导杀伤网中共有 n 个节点和 m 项指标,第 i 个节点中的第 j 项指标值为 y_{ij} ,进行排列构成节点指标值矩阵 \mathbf{Y} ,利用最大最小归一化法生成归一化矩阵 \mathbf{Y}' 。

而后利用熵权法可得权重 j 更新后的指标值,形成新的规范化矩阵 \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = (k_{ij})_{n \times m} = (\omega_j \times y'_{ij}) = \begin{pmatrix} \omega_1 y'_{11} & \cdots & \omega_m y'_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \omega_1 y_{n1} & \cdots & \omega_m y_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

计算加权欧氏度量值和加权灰色关联度的规范化处理:

$$D_i^+ = \frac{d_i^+}{\max d_i^+}, D_i^- = \frac{d_i^-}{\min d_i^-} \quad (5)$$

$$R_i^+ = \frac{r_i^+}{\max r_i^+}, R_i^- = \frac{r_i^-}{\min r_i^-} \quad (6)$$

计算综合相对接近值 BI_i^+ 和 BI_i^- :

$$BI_i^+ = \alpha D_i^- + \beta R_i^+ \quad (7)$$

$$BI_i^- = \alpha D_i^+ + \beta R_i^- \quad (8)$$

式中: $\alpha + \beta = 1, \alpha \in (0, 1), \beta \in (0, 1)$,一般常取值 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

确定相对贴正值,即节点基础贡献值 NR_i 。计算式如下:

$$NR_i = \frac{BI_i^+}{BI_i^+ + BI_i^-} \quad (9)$$

3.3 子网性能指标得分

子网性能指标得分主要衡量子网的整体性能水平。在构建防空反导杀伤网超网络模型时,还需充分考虑各子网对整个系统的影响力。为了量化这种影响力,使用“超度”来描述子网之间的关联程度。因此要将 3.2 节所得节点基础贡献值与相对应超度值相乘得到节点指标得分,再将同一子网下的所有节点指标得分求和得到子网性能指标得分。计算步骤如下:

1)将每个节点基础贡献值 NR_i 与超度 $n_H(i)$ 相乘,得到节点指标得分:

$$PM_i = n_H(i) \times NR_i \quad (10)$$

2)计算子网性能指标得分:

$$PM = \sum_{i=1}^n PM_i \quad (11)$$

3.4 超网络整体效能

超网络整体效能是衡量其整体作战能力和效能的综合性指标。结合 3.3 节求得的子网性能指标得

分,将 3 个子网性能指标得分求和便可得到超网络整体效能。但在子网间存在着作战效能、信息共享和资源整合等复杂联系,为确保防空反导体系高效稳定运行以及连通性,通过引入“关联度”来量化反映子网连接的紧密程度。计算步骤如下:

1)计算防空反导杀伤网超网络总边数 r ;

2)边的标记,对于每一条边,如果这条边连接子网 sn_1 和 sn_2 ,则设置 $b_i^{sn_1 sn_2} = 1$,如果这条不连接这 2 个子网,则设置为 0;

3)量化各子网之间的关联度 $R^{sn_1 sn_2}$,可通过以下公式计算:

$$R^{sn_1 sn_2} = \sum_{i=1}^r b_i^{sn_1 sn_2} \quad (12)$$

4)根据各子网功能重要性获得子网性能指标得分,分别为 PM^S, PM^C 和 PM^A ;

5)超网络整体效能的计算:

$$CE = PM^S (R_{SC}^{sn_1 sn_2} + R_{SA}^{sn_1 sn_2}) + PM^C (R_{CA}^{sn_1 sn_2} + R_{CS}^{sn_1 sn_2}) + PM^A (R_{AS}^{sn_1 sn_2} + R_{AC}^{sn_1 sn_2}) \quad (13)$$

3.5 节点删除法的价值评估方法

运用节点删除法对待评估节点及连边进行删除,结合 3.2、3.4 节方法重新求得整体效能,计算节点删除前后整体效能差与节点删除前整体效能的比值,得到该节点体系价值重要度,即:

$$SV = \frac{CE - CE'}{CE} \times 100\% \quad (14)$$

式中: SV 为体系价值重要度; CE 为原始网络的整体效能; CE' 为节点删除后的整体效能。 SV 的值越大,说明删除的节点对网络功能的破坏越大,则表示该节点的价值越高。对于上述节点基础贡献值,其主要衡量节点在单一维度上的贡献价值,而体系价值重要度则考虑节点在整个体系中的综合影响,更为全面准确,与节点基础贡献值无直接关联。在此需要注意删除待评估节点时,该节点的连边也随之删除,相关联的度、超度、介数和紧密度等指标都会变化,网络形态除删除节点处变化无其他形态变化。

4 实验验证与分析

为验证方法有效性,针对敌方目标 ($T_1 \sim T_7$),构建一个简单区域防空反导作战体系,其中包含 12 个侦察节点 ($S_1 \sim S_{12}$)、10 个指控节点 ($C_{13} \sim C_{22}$) 和 8 个火力节点 ($A_{23} \sim A_{30}$)。将模型置于 Python-Networkx 软件中可视化显示,如图 5 所示。

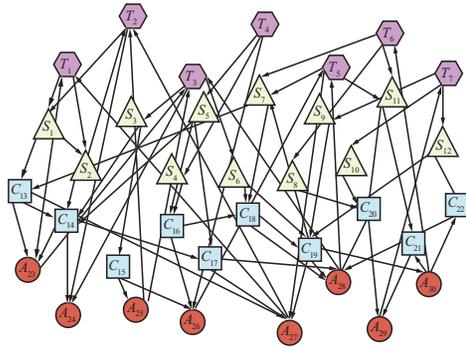


图 5 防空反导杀伤网网络可视化模型

Fig. 5 Network visualization model of air defense and anti-missile kill web

4.1 节点指标数值计算

由于不同子网指标数值具有差异性,因此在计

算子网指标得分时,需对指标进行初始化处理以保持指标的可比性。对无关联的指标设定了一个数值基准(10^{-8})。

首先,需重视不能被量化指标(如情报融合能力、指挥决策能力和火力协同作战能力指标),采用改进加权的专家打分法。具体做法是,邀请 5 位专家,对该指标进行打分评价,打分严格遵循十分制标准。

以火力子网中的 A_{23} 节点为例,在评估其火力协同作战能力时,严格遵循专家打分方法,参照式(1)~式(3)计算。其中,参数 u 和 P 分别表示权值的校正值、修正后的权值, X^0 专家初次打分,结果见表 1。

表 1 火力节点 A23 专家打分修正加权推算表(火力协同作战能力)

Tab. 1 Fire node A23 modified weighted projection table

| 次数 | 参数 | 专家 1 | 专家 2 | 专家 3 | 专家 4 | 专家 5 | $\sum P$ | $\sum PX$ | $\frac{\sum PX}{\sum P}$ | $ \overline{X^{\sigma+1}} - \overline{X^\sigma} $ |
|----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------|--------------------------|---|
| 0 | u^0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| | P^0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 5.00 | | 4.44 | 0.00 |
| | $P^0 X^0$ | 3.12 | 5.52 | 2.13 | 8.22 | 3.22 | 22.21 | | | |
| 1 | u^1 | 0.60 | 0.67 | 0.35 | 0.07 | 0.63 | | | | |
| | P^1 | 1.60 | 1.67 | 1.35 | 1.07 | 1.63 | 7.32 | | 4.25 | 0.19 |
| | $P^1 X^0$ | 4.99 | 9.24 | 2.88 | 8.77 | 5.25 | 31.12 | | | |
| 2 | u^2 | 0.70 | 0.66 | 0.43 | 0.07 | 0.74 | | | | |
| | P^2 | 2.30 | 2.33 | 1.78 | 1.13 | 2.36 | 9.92 | | 4.11 | 0.14 |
| | $P^2 X^0$ | 7.18 | 12.89 | 3.80 | 9.31 | 7.62 | 40.80 | | | |
| 3 | u^3 | 0.79 | 0.65 | 0.50 | 0.07 | 0.82 | | | | |
| | P^3 | 3.09 | 2.99 | 2.28 | 1.20 | 3.19 | 12.75 | | 4.01 | 0.10 |
| | $P^3 X^0$ | 9.63 | 16.49 | 4.86 | 9.87 | 10.26 | 51.12 | | | |
| 4 | u^4 | 0.85 | 0.65 | 0.55 | 0.07 | 0.89 | | | | |
| | P^4 | 3.94 | 3.64 | 2.83 | 1.27 | 4.08 | 15.76 | | 3.93 | 0.08 |
| | $P^4 X^0$ | 12.29 | 20.09 | 6.03 | 10.44 | 13.13 | 61.98 | | | |
| 5 | u^5 | 0.91 | 0.65 | 0.59 | 0.07 | 0.95 | | | | |
| | P^5 | 4.85 | 4.29 | 3.42 | 1.34 | 5.02 | 18.92 | | 3.87 | 0.06 |
| | $P^5 X^0$ | 15.12 | 23.67 | 7.29 | 11.03 | 16.18 | 73.29 | | | |
| 6 | u^6 | 0.95 | 0.65 | 0.62 | 0.07 | 0.99 | | | | |
| | P^6 | 5.79 | 4.94 | 4.05 | 1.42 | 6.02 | 22.21 | | 3.83 | 0.05 |
| | $P^6 X^0$ | 18.08 | 27.26 | 8.62 | 11.64 | 19.37 | 84.97 | | | |
| 7 | u^7 | 0.98 | 0.65 | 0.65 | 0.08 | 1.03 | | | | |
| | P^7 | 6.78 | 5.59 | 4.70 | 1.49 | 7.04 | 25.60 | | 3.79 | 0.04 |
| | $P^7 X^0$ | 21.15 | 30.86 | 10.01 | 12.27 | 22.68 | 96.96 | | | |
| 8 | u^8 | 1.01 | 0.65 | 0.67 | 0.08 | 1.06 | | | | |
| | P^8 | 7.79 | 6.24 | 5.37 | 1.57 | 8.11 | 29.08 | | 3.76 | 0.03 |
| | $P^8 X^0$ | 24.32 | 34.45 | 11.44 | 12.91 | 26.10 | 109.21 | | | |
| 9 | u^9 | 1.04 | 0.65 | 0.69 | 0.08 | 1.09 | | | | |
| | P^9 | 8.83 | 6.89 | 6.06 | 1.65 | 9.19 | 32.63 | | 3.73 | 0.03 |
| | $P^9 X^0$ | 27.56 | 38.05 | 12.91 | 13.56 | 29.60 | 121.68 | | | |
| 10 | u^{10} | 1.06 | 0.65 | 0.71 | 0.08 | 1.11 | | | | |
| | P^{10} | 9.89 | 7.55 | 6.77 | 1.73 | 10.30 | 36.24 | | 3.71 | 0.02 |
| | $P^{10} X^0$ | 30.87 | 41.65 | 14.42 | 14.23 | 33.18 | 134.35 | | | |
| 11 | u^{11} | 1.08 | 0.65 | 0.72 | 0.08 | 1.13 | | | | |
| | P^{11} | 10.98 | 8.20 | 7.49 | 1.81 | 11.43 | 39.91 | | 3.69 | 0.02 |
| | $P^{11} X^0$ | 34.24 | 45.26 | 15.95 | 14.91 | 36.82 | 147.18 | | | |
| 12 | u^{12} | 1.10 | 0.65 | 0.73 | 0.08 | 1.15 | | | | |
| | P^{12} | 12.07 | 8.85 | 8.22 | 1.90 | 12.58 | 43.63 | | 3.67 | 0.02 |
| | $P^{12} X^0$ | 37.66 | 48.87 | 17.51 | 15.60 | 40.51 | 160.16 | | | |
| 13 | u^{13} | 1.11 | 0.66 | 0.74 | 0.08 | 1.16 | | | | |
| | P^{13} | 13.18 | 9.51 | 8.96 | 1.98 | 13.74 | 47.38 | | 3.66 | 0.01 |
| | $P^{13} X^0$ | 41.13 | 52.49 | 19.09 | 16.29 | 44.26 | 173.2 | | | |
| 14 | u^{14} | 1.12 | 0.66 | 0.75 | 0.09 | 1.18 | | | | |
| | P^{14} | 14.31 | 10.17 | 9.72 | 2.07 | 14.92 | 51.18 | | 3.64 | 0.01 |
| | $P^{14} X^0$ | 44.64 | 56.11 | 20.69 | 16.99 | 48.05 | 186.48 | | | |

表 1 可知第 13 次迭代时, $|\overline{X^{\sigma+1}} - \overline{X^\sigma}| = 0.01$, 满足所设条件,故可得 A_{23} 节点火力协同作战能力分值为 $(\overline{X^{13}} + \overline{X^{12}})/2 = (3.66 + 3.67)/2 = 3.665$ 。针对其他节点的情报融合能力、指挥决策能力、火力协同作战能力等不能被量化性能度量指标,同样参照式(1)~式(3)分别计算出对应指标分值。

对于性能度量指标中探测距离、通信覆盖范围以及拦截范围指标数值计算,通过查询相关参考资料、作战标准等方法获取。其次结合节点交互关系,利用 Python 编程软件计算节点度、介数和紧密度等拓扑度量指标见表 2。

表 2 Python 求解节点度、介数和紧密度

Tab. 2 Python solves for nodal degree, median, and tightness

| 节点度 | 介数/ 10^{-3} | 紧密度/ 10^{-2} | 节点度 | 介数/ 10^{-3} | 紧密度/ 10^{-2} |
|-------|------------------|-------------------|----------|------------------|-------------------|
| S_1 | 2 | 0.00 | C_{16} | 2 | 1.01 |
| S_2 | 2 | 4.03 | C_{17} | 4 | 5.04 |

续表

| 节点度 | 介数/ 10^{-3} | 紧密度/ 10^{-2} | 节点度 | 介数/ 10^{-3} | 紧密度/ 10^{-2} |
|----------|------------------|-------------------|----------|------------------|-------------------|
| S_3 | 2 | 0 | C_{18} | 3 | 3.02 |
| S_4 | 1 | 0 | C_{19} | 4 | 3.36 |
| S_5 | 3 | 4.03 | C_{20} | 5 | 5.54 |
| S_6 | 2 | 0 | C_{21} | 4 | 2.86 |
| S_7 | 2 | 0 | C_{22} | 2 | 3.36 |
| S_8 | 1 | 0 | A_{23} | 2 | 0 |
| S_9 | 1 | 0 | A_{24} | 1 | 0 |
| S_{10} | 2 | 0 | A_{25} | 1 | 0 |
| S_{11} | 2 | 0 | A_{26} | 1 | 0 |
| S_{12} | 3 | 0 | A_{27} | 2 | 0 |
| C_{13} | 4 | 4.03 | A_{28} | 3 | 0 |
| C_{14} | 6 | 11.09 | A_{29} | 2 | 0 |
| C_{15} | 2 | 1.01 | A_{30} | 3 | 0 |

结合上述计算结果整合得到各节点指标数值如表 3 所示。

表 3 超网络节点指标数值

Tab. 3 Value of hypernetwork node metrics

| 节点 | 度 | 介数/ 10^{-3} | 紧密度/ 10^{-2} | 探测距离 | 情报融合能力 | 指挥决策能力 | 通信覆盖范围 | 拦截范围 | 火力协同作战能力 |
|----------|---|---------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| S_1 | 2 | 0 | 0 | 150 | 4.32 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_2 | 2 | 4.03 | 3.13 | 120 | 3.63 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_3 | 2 | 0 | 0 | 150 | 4.43 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_4 | 1 | 0 | 0 | 100 | 4.18 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_5 | 3 | 4.03 | 3.13 | 100 | 3.94 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_6 | 2 | 0 | 0 | 150 | 4.37 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_7 | 2 | 0 | 0 | 500 | 4.54 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_8 | 1 | 0 | 0 | 500 | 5.53 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_9 | 1 | 0 | 0 | 300 | 4.63 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_{10} | 2 | 0 | 0 | 300 | 5.32 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_{11} | 2 | 0 | 0 | 150 | 4.12 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| S_{12} | 3 | 0 | 0 | 120 | 4.29 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{13} | 4 | 4.03 | 6.25 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 3.73 | 120 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{14} | 6 | 11.09 | 7.03 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 3.46 | 110 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{15} | 2 | 1.01 | 3.13 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 4.13 | 100 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{16} | 2 | 1.01 | 3.13 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 4.18 | 120 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{17} | 4 | 5.04 | 7.03 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 4.38 | 130 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{18} | 3 | 3.02 | 7.03 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 4.37 | 800 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{19} | 4 | 3.36 | 6.25 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 4.54 | 800 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{20} | 5 | 5.54 | 9.38 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 5.53 | 1 200 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{21} | 4 | 2.86 | 6.25 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 4.30 | 1 200 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| C_{22} | 2 | 3.36 | 3.13 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 4.96 | 800 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} |
| A_{23} | 2 | 0 | 11.25 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 100 | 3.66 |
| A_{24} | 1 | 0 | 6.25 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 30 | 4.54 |
| A_{25} | 1 | 0 | 4.17 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 50 | 4.13 |
| A_{26} | 1 | 0 | 4.17 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 40 | 3.92 |
| A_{27} | 2 | 0 | 11.25 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 150 | 4.47 |
| A_{28} | 3 | 0 | 18.91 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 200 | 4.34 |
| A_{29} | 2 | 0 | 11.25 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 250 | 4.54 |
| A_{30} | 3 | 0 | 12.5 | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 1×10^{-8} | 50 | 5.21 |

4.2 整体效能计算

根据表 3 数值,依照 3.2、3.3、3.4 节公式计算超网络整体效能。首先运用熵-灰色关联-TOPSIS 方法,计算指标权重: $w_j = [0.21, 0.06, 0.17, 0.08, 0.13, 0.05, 0.03, 0.09]$,根据最大最小归一化法形成归一化矩阵 Y' ,如表 4 所示。

表 4 归一化矩阵

Tab. 4 Normalized matrix

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|---|---|
| 1/5 | 0 | 0 | 2/7 | 7/9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 1/3 | 1/6 | 1/4 | 2/3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 0 | 2/7 | 4/5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1/5 | 3/4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2/5 | 1/3 | 1/6 | 1/5 | 5/7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 0 | 2/7 | 4/5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 0 | 1 | 5/6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 3/5 | 5/6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 0 | 3/5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 0 | 2/7 | 3/4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2/5 | 0 | 0 | 1/4 | 7/9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

续表

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|---|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 3/5 | 1/3 | 1/3 | 0 | 0 | 2/3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 3/8 | 0 | 0 | 5/8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 1/6 | 0 | 0 | 3/4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 1/6 | 0 | 0 | 3/4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3/5 | 4/9 | 3/8 | 0 | 0 | 4/5 | 1/9 | 0 | 0 | 0 |
| 2/5 | 1/4 | 3/8 | 0 | 0 | 4/5 | 2/3 | 0 | 0 | 0 |
| 3/5 | 1/3 | 1/3 | 0 | 0 | 5/6 | 2/3 | 0 | 0 | 0 |
| 4/5 | 1/2 | 1/2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3/5 | 1/4 | 1/3 | 0 | 0 | 7/9 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 1/3 | 1/6 | 0 | 0 | 8/9 | 2/3 | 0 | 0 | 0 |
| 1/5 | 0 | 3/5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2/5 | 5/7 | 0 |
| 0 | 0 | 1/3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1/8 | 7/8 | 0 |
| 0 | 0 | 2/9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1/5 | 4/5 | 0 |
| 0 | 0 | 2/9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1/6 | 3/4 | 0 |
| 1/5 | 0 | 3/5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3/5 | 6/7 | 0 |
| 2/5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4/5 | 5/6 | 0 |
| 1/5 | 0 | 3/5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7/8 | 0 |
| 2/5 | 0 | 2/3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1/5 | 1 | 0 |

根据 3.2.2 节灰色关联计算公式,得到加权欧式度量值和灰色关联度,如表 5 所示。

表 5 加权欧式度量值和灰色关联度

Tab. 5 Weighted euclidean metrics and grey linkage

| 节点 | d^+ | d^- | r^+ | r^- | 节点 | d^+ | d^- | r^+ | r^- |
|----------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
| S_1 | 0.305 | 0.152 | 0.418 | 0.798 | C_{16} | 0.321 | 0.112 | 0.398 | 0.802 |
| S_2 | 0.293 | 0.293 | 0.410 | 0.743 | C_{17} | 0.267 | 0.177 | 0.457 | 0.697 |
| S_3 | 0.305 | 0.156 | 0.422 | 0.797 | C_{18} | 0.267 | 0.152 | 0.443 | 0.707 |
| S_4 | 0.332 | 0.140 | 0.400 | 0.866 | C_{19} | 0.268 | 0.178 | 0.466 | 0.688 |
| S_5 | 0.269 | 0.161 | 0.432 | 0.709 | C_{20} | 0.244 | 0.235 | 0.570 | 0.639 |
| S_6 | 0.305 | 0.154 | 0.419 | 0.798 | C_{21} | 0.269 | 0.178 | 0.479 | 0.687 |
| S_7 | 0.305 | 0.176 | 0.471 | 0.773 | C_{22} | 0.315 | 0.134 | 0.434 | 0.764 |
| S_8 | 0.323 | 0.201 | 0.509 | 0.824 | A_{23} | 0.312 | 0.127 | 0.411 | 0.783 |
| S_9 | 0.326 | 0.162 | 0.429 | 0.841 | A_{24} | 0.347 | 0.099 | 0.393 | 0.869 |
| S_{10} | 0.299 | 0.189 | 0.472 | 0.776 | A_{25} | 0.354 | 0.083 | 0.379 | 0.884 |
| S_{11} | 0.306 | 0.146 | 0.411 | 0.800 | A_{26} | 0.354 | 0.080 | 0.376 | 0.886 |
| S_{12} | 0.286 | 0.167 | 0.430 | 0.769 | A_{27} | 0.311 | 0.135 | 0.428 | 0.776 |
| C_{13} | 0.273 | 0.165 | 0.439 | 0.711 | A_{28} | 0.282 | 0.203 | 0.519 | 0.721 |
| C_{14} | 0.255 | 0.241 | 0.564 | 0.669 | A_{29} | 0.310 | 0.138 | 0.442 | 0.772 |
| C_{15} | 0.321 | 0.111 | 0.397 | 0.804 | A_{30} | 0.288 | 0.167 | 0.467 | 0.742 |

结合表 5 数据计算得到节点基础贡献值,根据 3.3、3.4 节公式计算超度、指标得分、子网性能指标

得分、关联度和整体效能,超网络整体效能如表 6 所示。

表 6 超网络整体效能

Tab. 6 Integrated performance of hypernetwork

| 节点 | NR _i | n _H (i) | PM _i | PM | R | CE |
|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------|----|--------|
| S ₁ | 0.66 | 1 | 0.66 | | | |
| S ₂ | 0.76 | 1 | 0.76 | | | |
| S ₃ | 0.67 | 2 | 1.33 | | | |
| S ₄ | 0.65 | 1 | 0.65 | | | |
| S ₅ | 0.67 | 2 | 1.35 | | | |
| S ₆ | 0.66 | 1 | 0.66 | | | |
| S ₇ | 0.67 | 1 | 0.67 | 11.47 | 18 | |
| S ₈ | 0.68 | 1 | 0.68 | | | |
| S ₉ | 0.67 | 1 | 0.67 | | | |
| S ₁₀ | 0.68 | 1 | 0.68 | | | |
| S ₁₁ | 0.66 | 2 | 1.32 | | | |
| S ₁₂ | 0.68 | 3 | 2.03 | | | |
| C ₁₃ | 0.67 | 4 | 2.69 | | | |
| C ₁₄ | 0.70 | 6 | 4.22 | | | 640.92 |
| C ₁₅ | 0.62 | 2 | 1.25 | | | |
| C ₁₆ | 0.62 | 2 | 1.25 | | | |
| C ₁₇ | 0.68 | 4 | 2.72 | | | |
| C ₁₈ | 0.66 | 3 | 1.99 | 23.61 | 18 | |
| C ₁₉ | 0.68 | 3 | 2.03 | | | |
| C ₂₀ | 0.70 | 5 | 3.50 | | | |
| C ₂₁ | 0.67 | 4 | 2.70 | | | |
| C ₂₂ | 0.63 | 2 | 1.27 | | | |
| A ₂₃ | 0.64 | 1 | 0.64 | | | |
| A ₂₄ | 0.61 | 1 | 0.61 | | | |
| A ₂₅ | 0.59 | 1 | 0.59 | | | |
| A ₂₆ | 0.59 | 1 | 0.59 | | | |
| A ₂₇ | 0.64 | 3 | 1.92 | 9.59 | 1 | |
| A ₂₈ | 0.68 | 2 | 1.36 | | | |
| A ₂₉ | 0.63 | 3 | 1.88 | | | |
| A ₃₀ | 0.67 | 3 | 2.00 | | | |

根据表 6 可得, 侦察子网性能指标得分 PM_S = 11.47, 指控子网性能指标得分 PM_C = 23.61, 火力子网性能指标得分 PM_A = 9.59, 超网络整体效能 CE = 640.92。子节点基础贡献值排序如图 6。

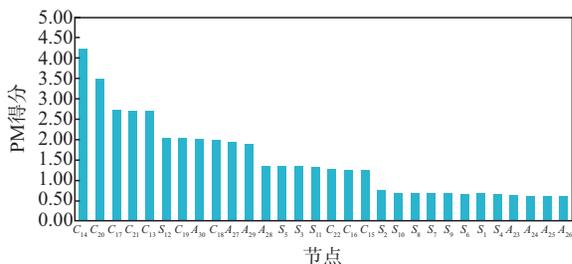


图 6 子节点基础贡献值 PM 排序

Fig. 6 Node base score PM sort

最后, 利用节点删除法依次删除节点 S₁ ~ A₃₀, 重复上述计算过程, 分别求出删除各个节点后的整体效能, 得到各个节点的体系价值重要度 SV, 对体

系价值重要度 SV 进行排序如图 7 所示。

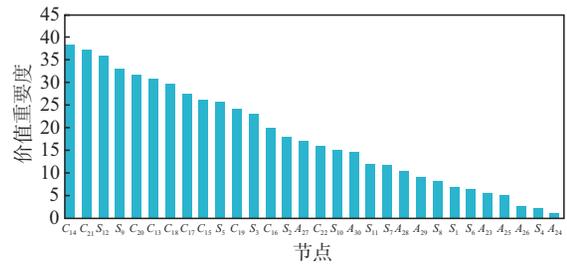


图 7 节点体系价值重要度排序

Fig. 7 Nodalsystem value importance ordering

4.3 数据结果分析

由图 6 和图 7 分析可得, 防空反导杀伤网体系价值与节点性能属性、位置分布以及连接节点数目密切相关。在整体结构中, C₁₄、C₁₇ 和 C₁₉ 等节点展现出较高的超度、度以及介数特性, 同时具有较高性能度量指标数值, 一旦移除其节点, 对整个网络造成较为显著的影响, 由此反映出 C₁₄、C₁₇ 和 C₁₉ 在网络体系中具有较高的价值地位。在侦察子网中, S₁₂ 的度和超度都为最大, 删除后会引起超网络整体效能的大幅度下降, 因此其在子节点基础贡献值和体系价值中, 处于高价值水平; 在指控子网中, 无论是基础贡献值还是体系价值, 指控节点(如 C₁₄、C₂₀、C₁₇)均表现出色, 显著高于侦察节点和火力节点; 而对于火力子网的火力节点来说, 通过分析比对, 无论是节点基础贡献值还是体系价值重要度, 基本都处于整个网络体系的较低水平, 其中 A₂₃、A₂₄、A₂₅ 和 A₂₆ 在整个超网络中, 都处于后 5 名的位置。通过将节点基础贡献值和体系价值重要度综合比较, 其重要性可表现为: 指控子网(节点) > 侦察子网(节点) > 火力子网(节点)。

综上所述, 在防空反导体系中, 总体上看指控节点的价值高于侦察节点的价值, 火力节点的价值最低。因为指控节点在战争中扮演者至关重要的角色, 它是整个作战体系的中枢, 负责信息的处理和决策, 因此指控节点价值高, 符合实际。而侦察节点负责监测战场动态, 并将获取的情报信息传递给指控节点, 为其决策过程提供必要的支持。对于火力节点来说, 它们则根据指控节点下达指令, 对敌方实施火力打击。与侦察节点和指控节点相比, 火力节点的价值在某些情况下会被忽略, 主要因为火力打击的效果往往取决于侦察节点提供的信息准确性和指控节点制定的作战策略的有效性上。该实验结果符合客观事实, 也证明了构建的节点价值评估模型有一定的借鉴性。

4.4 与现有评估方法综合对比分析

在所设实验案例场景不变的基础上, 将本文超

网络整体效能节点价值评估方法和基于 TOPSIS 多属性决策算法的节点价值评估方法^[11]、基于杀伤网能力指数贡献率算法的节点价值评估方法^[12]进行对比分析。

结合基于 TOPSIS 多属性决策算法的节点价值评估方法(后称方法 1),选取节点度中心性、介数和接近中心性等拓扑指标,经公式计算、效益型指标标准化及结合指标权重,用 TOPSIS 法进行综合评价得出节点价值计算结果;结合基于杀伤网能力指数贡献率算法的节点价值评估方法(后称方法 2),从杀伤网能力生成机理出发,综合侦察节点、指控节点和火力节点各自结构特征和属性,考虑杀伤链数量、质量(长度、侦察及打击距离、打击目标权重等)确定杀伤网能力指数,用节点移除法以移除节点前后能力指数比值,从而得出节点价值计算结果。

根据图 7 节点体系价值重要度进行大小排序,以此作为排序基准,对 2 种现有方法计算结果进行大小排序,对比如图 8 和图 9 所示。

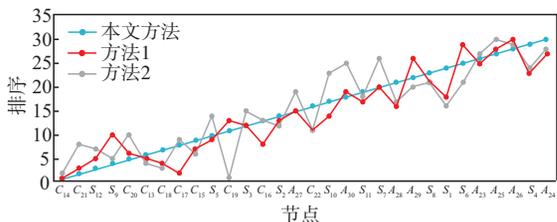


图 8 本文方法与现有方法节点价值排序变化图

Fig. 8 Plot of changes in the ranking of the research methods in this paper versus existing methods

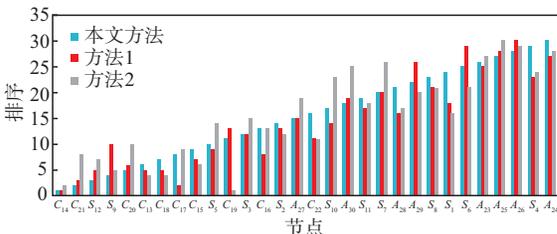


图 9 本文方法与现有方法节点价值排序对比图

Fig. 9 Comparison of this paper's method with existing methods for ranking node values

由图 8 可知,不同方法计算出来的节点价值排序也不相同,但总体趋势大致相同,符合实际。由图 9 可知,部分节点排序结果没有太大变化,其中 C_{14} 和 C_{13} 相对靠前, A_{23} 、 A_{24} 、 A_{25} 和 A_{26} 仍处于很靠后的位置。在排序差异较大的节点中,着重关注价值较高节点,对于节点 C_{20} 和 C_{21} ,仅从方法 1 结果分析,排序相对靠后,因其拓扑结构属性值一般,符合该方法评价结果。但通过方法 2 结果,受其它性能属性等指标影响,其排序在整个网络价值中得到大幅度变化,符合该方法的评估结果;同时,对比本文方法,关注相连接的节点情况,上述节点 C_{20} 与排

名相对靠前的 S_{12} 相互关联,对于 C_{20} 的打击摧毁一定程度上影响到了 S_{12} 的价值变化,从而影响到整个网络体系的变化;再比如对于 C_{14} 和 S_3 节点,两个节点也是相互关联,其中 C_{14} 价值排序首位, S_3 排序则在中上游位置,打击摧毁 C_{14} 也直接影响了 S_3 价值变化,造成整个体系较大变化,符合本文超网络整体效能节点价值评估方法结果特征。

综上所述,3 种方法都可作为节点价值评估参考方法。但面对错综复杂的防空反导杀伤网,方法 1 由于其依赖的拓扑结构相对较为单一,对一些具有特殊性能属性且拓扑结构并不突出的节点,评估结果可能会偏离实际情况,无法充分体现节点在整个体系的综合价值;而对于方法 2,虽考虑了杀伤链数量以及质量等自身特征属性因素,但在一定程度上会忽略节点间的连接关系和子网间的协作关系。相比之下,本文利用超网络整体效能评估节点价值的方法,综合考虑了节点拓扑结构、性能指标和连接关系等多方面因素,能够更好的反映节点在整个体系中的价值重要度情况,更为全面准确且客观的甄选出重要价值节点。

5 结语

本文提出了一种基于超网络理论的防空反导杀伤网节点价值评估方法,构建了由侦察、指控和火力子网组成的防空反导杀伤网超网络模型,结合节点拓扑结构和功能特性,利用改进加权的专家打分以及熵-灰色关联-TOPSIS 算法,量化得到杀伤网整体效能,最后通过节点删除法,评估了节点体系价值重要度,实现了对节点价值重要度的量化分析。实验结果表明,指控节点在防空反导体系中的价值最高,侦察节点次之,火力节点相对较低,这与实际作战中各节点的功能作用相符。同时与现有方法进行了对比,验证了所提方法的有效性,为防空反导体系的优化与决策提供了新的思路。但本文未充分考虑性能度量指标的复杂性和多样化,也未考虑动态条件下的时序打击节点价值评估,下一步将着重考虑更全面的指标影响以及节点价值的动态评估。

参考文献

[1] 杨圩生,王钰,杨洋,等. 基于作战环的不同节点攻击策略下的作战网络效能评估[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(11):3220-3228.
 YANG W S,WANG Y,YANG Y,et al. Combat Network Effectiveness Evaluation under Different Node Attack Strategies Based on Operation Loop[J]. Sys-

- tems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3220-3228. (in Chinese)
- [2] 陈登, 陈楚湘, 周春华. 基于OODA环的杀伤网节点重要性评估[J]. 兵工学报, 2024, 45(2): 363-372.
CHEN D, CHEN C X, ZHOU C H. Importance Evaluation of Kill Network Nodes Based on OODA Loop [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(2): 363-372. (in Chinese)
- [3] 万斯来, 王国新, 明振军, 等. 基于知识推理的杀伤网智能设计方法[J]. 兵工学报, 2024, 45(4): 1025-1037.
WAN S L, WANG G X, MING Z J, et al. Knowledge Reasoning-Based Intelligent Design Method of Kill-Web [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(4): 1025-1037. (in Chinese)
- [4] XING Q H, GAO J L. A Super-Network Equilibrium Optimization Method for Operation Architecture with Fuzzy Demands [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(5): 969-982.
- [5] 李腾达, 王刚, 郭相科, 等. 基于复杂网络的防空反导体系抗毁性评估[J]. 军事运筹与评估, 2023, 37(5): 34-39.
LI T D, WANG G, GUO X K, et al. Evaluation of the Air Defense and Antimissile System's Destruction Resistance Based on Complex Network [J]. Military Operations Research and Assessments, 2023, 37(5): 34-39. (in Chinese)
- [6] 聂俊峰, 陈行军, 史红权. 面向任务驱动的海上编队云作战体系动态超网络模型[J]. 兵工学报, 2021, 42(11): 2513-2521.
NIE J F, CHEN X J, SHI H Q. Dynamic Super-Network Model of Task-Oriented Naval Fleet "Cloud Combat" System [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(11): 2513-2521. (in Chinese)
- [7] WANG L Y, CHEN L B, YANG Z W, et al. A Prospect-Theory-Based Operation Loop Decision-Making Method for Kill Web [J]. Mathematics, 2022, 10(19): 3486.
- [8] SHEN J F, J DAI J Y, WANG B, et al. Identifying Influential Nodes in Complex Networks Based on Global and Local Structure [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 541: 122481.
- [9] QIU L Q, ZHANG J Y, TIAN X B. Ranking Influential Nodes in Complex Networks Based on Local and Global Structures [J]. Applied Intelligence, 2021, 51(7): 4394-4407.
- [10] XU G Q, MENG L, TU D Q, et al. LCH: A Local Clustering H-Index Centrality Measure for Identifying and Ranking Influential Nodes in Complex Networks [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(8): 566-574.
- [11] 曹冠平, 王淑卉, 楚敏南, 等. 基于超网络的合成旅武器装备体系贡献率评估[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(3): 62-68.
CAO G P, WANG S H, CHU M N, et al. A Contribution Evaluation Method in Weaponry System for Synthetic Brigade Based on Super-Network [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(3): 62-68.
- [12] 秦长江, 吴克宇, 成清, 等. 基于杀伤网贡献率的动态体系节点重要度评估[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(6): 1732-1742.
QIN C J, WU K Y, CHENG Q, et al. Node Importance Evaluation in Dynamic System Based on Kill-Web Contribution Rate [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(6): 1732-1742. (in Chinese)
- [13] 张永夫, 刘洋, 袁禾. 一种基于兵棋推演的作战目标体系关键节点识别方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(11): 2654-2661.
ZHANG Y F, LIU Y, YUAN H. A Method for Key Node Identification in Operational Target System Based on War Gaming [J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(11): 2654-2661. (in Chinese)
- [14] 张鑫伟, 李亚雄, 赵久奋, 等. 基于复杂网络理论的熵值法军事目标价值评估[J]. 指挥控制与仿真, 2021, 43(6): 53-57.
ZHANG X W, LI Y X, ZHAO J F, et al. Evaluation Method of Military Target Based on Complex Network Theory and Entropy Method [J]. Command Control & Simulation, 2021, 43(6): 53-57. (in Chinese)
- [15] 丁君怡. 防空反导体系超网络建模与分析方法及应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
DING J Y. Research on Modeling and Analysis Method and Application of Air Defense and Anti-Missile System Based on Supernetwork [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 梁威, 孙鹏, 张杰勇, 等. 基于二项熵和邻域节点间范德华力的关键节点识别方法[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(4): 72-78.
LIANG W, SUN P, ZHANG J Y, et al. A Key Node Identification Method Based on Binomial Entropy and van Der Waals Forces between Neighboring Nodes [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(4): 72-78. (in Chinese)
- [17] 许怡岚, 郭唐仪, 唐坤, 等. 基于超网络的军事交通运输网络节点价值评估方法[J]. 兵工学报, 2024, 45(2): 552-563.
XU Y L, GUO T Y, TANG K, et al. Evaluation of Node Value of Military Transportation Network Based on Hyper-Networks [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(2): 552-563. (in Chinese)

(编辑: 刘勇)