

网络化作战体系中目标重要度评估方法

鲁磊^{1,3}, 卢厚清¹, 卢天鸣², 张挺³

(1. 陆军工程大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 中国电子科技集团第二十八研究所, 江苏 南京 210007;
3. 61175 部队, 江苏 南京 210049)

摘要: 针对网络化作战体系中目标重要度评估问题, 结合层次分析和复杂网络方法, 从目标节点特征、网络指标积极效应、网络指标消极效应 3 个方面提出新的评估方法。从能力视角描述目标自身特征; 基于复杂网络理论, 从积极效应层面描述目标的资源关联性、流转时效性、协同性和连通关键性, 从消极效应层面描述目标的离散度; 构建效能函数计算目标的网络关键度; 根据目标自身特征和网络关键度给出目标的评估分。该方法综合考虑了目标自身特征以及目标在作战体系中的地位和作用, 实验表明评估结果准确、可靠。

关键词: 战场目标; 目标重要度; 复杂网络; 积极效应; 消极效应

中图分类号: TP391.9 **DOI:** 10.12018/j.issn.2097-0730.20220809001

Method to Evaluate Importance of Targets in Networked Operation System

LU Lei^{1,3}, LU Houqing¹, LU Tianming², ZHANG Ting³

(1. College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

2. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

3. Unit 61175 of PLA, Nanjing 210049, China)

Abstract: Aiming at the problem of evaluating the importance of targets in the networked operation system, combined with the analytic hierarchy process and complex network methods, a new evaluation method is proposed from three aspects: target node characteristics, positive effects of network indicators, and negative effects of network indicators. Firstly, this paper describes the characteristics of the target from the perspective of capability. Based on the complex network theory, it describes the resource relevance, circulation timeliness, synergy and connectivity criticality of the target from the positive effect, and describes the dispersion of the target from the negative effect. Secondly, the efficiency function is constructed to calculate the network criticality of the target. Finally, the evaluation score of the target is given according to the target's own characteristics and network criticality. This method comprehensively considers the characteristics of the target itself and the status and role of the target in the operation system, and the evaluation results are accurate and reliable.

Key words: battlefield targets; importance of target; complex networks; positive effects; negative effects

网络化作战体系^[1]以信息流和逻辑流为纽带, 以网络为中心涵盖侦察预警、指挥控制、防空反导、火力打击、信息攻击和综合保障等多个作战要素。研究复杂异构的作战网络和关联结构, 确定网络中

的关键节点和要害部位, 并进行作战目标选择、排序和评估^[2], 是执行精确打击等作战行动的重要依据。

如何从动态的目标体系中发现敌方的关键目标进行打击, 是提升作战效能的重要研究课题。常见

的方法有层次分析法和基于复杂网络的方法。

层次分析法用以解决具有分层交错评价指标的目标系统,而目标值又难于定量描述的决策问题。首先构建目标价值指标体系,而后通过定性、定量相结合的方法建立起目标价值分析模型,最后计算各个目标的综合价值。房茂燕等^[3]认为战场目标的重要度由 4 个方面组成:目标在作战中所起的作用、目标本身已具有的价值、打击可行性和打击紧迫性,并将这 4 个方面细化成确定性评价指标和模糊性评价指标,最后通过确定指标权值对目标进行评估排序。张勇涛等^[4]将目标信息转换成 9 个主成分指标:作战意图一致性、目标信息可靠性、目标对敌有用性、目标打击紧迫性、目标威胁程度、目标打击有利度、目标打击易毁度、目标打击风险性和目标打击效费比,根据主成分加权系数对目标进行评估排序。张世燎等^[5]在确定登陆作战中敌方目标重要度时采用了 5 个指标:达成意图程度、目标的价值性、作战主动性、行动可行性和作战资源耗费,运用三角模糊数多指标群决策理论,以定性定量相结合的方式解决登陆作战中打击目标选择问题。层次分析法在实际中得到广泛应用,但也有明显的不足之处:(1) 只考虑目标个体价值,没有分析该目标在作战体系中的作用和地位,没有从体系的整体角度评估目标;(2) 指标的确定常常采用专家赋值,或者通过专家比较各指标的重要性,不能动态客观地描述目标。

战场目标体系可以用复杂网络来描述,有很多学者利用复杂网络^[6-7]来评估目标的重要度。阮树朋等^[8]通过分析防空武器目标体系网络的拓扑参数,构建了防空武器目标体系网络。经过分析发现,基于度中心性和介中心性的攻击可以较好地降低防空网络效率。胡托任等^[9]建立了以最小化网络连通度为目标函数,求解节点攻击序列的数学优化模型,提出了基于改进的遗传算法节点攻击序列求解方法,从而获得网络节点的重要度排序。杨国利等^[10]围绕 OODA(观察,调整,决策,行动)链路,汇聚作战网络中各种个体能力,计算有效火力打击能力 EFA(侦察情报、指挥控制、火力打击)、有效防护抗击能力 EDA(侦察情报、指挥控制、防空反导)和有效信息攻防能力 EIA(侦察情报、指挥控制、信息攻击),作为体系整体能力的评价指标;并以体系能力的最大化下降为目标函数,以打击目标代价为约束条件,求解作战体系关键节点。这种基于复杂网络^[11-12]的分析方法有两点不足:(1) 选择的指标单一,不足以量化描述复杂系统,难以对网络化作战体

系中的目标进行有效评估;(2) 难以结合目标的自身特征进行分析。

作战体系中目标节点具有多个网络指标^[13-14],每个网络指标对应着目标在体系中的作用。通过分析度中心性、近中心性、介中心性、聚集系数、K-Shell 核度和节点离散度等网络指标与目标节点的资源关联性、流转时效性、协同性、连通关键性的关系,构建网络关键度效能函数并结合目标自身特征,可有效评估目标的重要度。

1 复杂网络综合分析数学模型

1.1 能力视角下的目标特征

以复杂网络条件下的作战体系特点研究为基础,分析作战体系中功能和关系复杂的各类节点,通过目标特性选取、系统层次划分和网络结构关联等手段构建目标体系。对目标系统层次进行划分,将一系列性质相同或相近的单个目标,按照目标的功能特性、地位作用和位置分布等规则,划分形成多个系统层次,便于更好地研究和把握目标特性和运行规律。例如,根据目标功能特性,目标体系通常可分为:侦察预警系统、指挥控制系统、防空反导系统、火力打击系统、信息攻防系统和综合保障系统 6 类^[10]。

为有效描述目标特征,基于美国国防部体系结构框架(department of defense architecture framework, DoDAF)中能力视角的评估方法,构建完成的目标体系进行能力分析,将目标能力分为侦察预警、指挥控制、防空反导、火力打击、信息攻防和综合保障 6 大能力进行量化,建立目标作战能力量化模型,如图 1 所示。

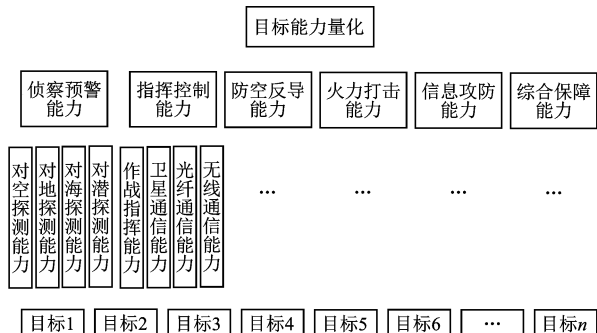


图 1 目标能力量化模型

同时,目标由子目标组成,目标的作战能力由子目标的作战能力组成。以机场为例,该目标由雷达站、通信站、战斗机、跑道等子目标组成。通过目标分解可知,该目标的能力有对空侦察能力、对空打击能力、指挥控制能力和通信能力等,如表 1 所示。层

次分析法中,指标的具体数值由目标之间比较获得。但是在作战体系中,目标较多,最后一级指标值由目标的具体参数计算,通过归一化后获得,如雷达探测半径、拦截半径和打击范围等。

表1 某机场目标能力细化表

目标	一级能力指标	二级能力指标	
机场 1	侦察预警能力	对空探测能力	
		对海探测能力	
		对潜探测能力	
	火力打击能力	对空打击能力	
		对海打击能力	
		对潜打击能力	
	指挥控制能力	作战指挥能力	
		卫星通信能力	
		光纤通信能力	
		无线通信能力	
		∴	∴

将目标能力细化表进行量化赋值,可得到该目标的能力向量 $\mathbf{V} = [m_1, m_2, \dots, m_n]$, 最终通过计算得到网络中所有目标的能力矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} & \dots & \mathbf{M}_{1n} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} & \dots & \mathbf{M}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{M}_{p1} & \mathbf{M}_{p2} & \dots & \mathbf{M}_{pn} \end{bmatrix}$$

1.2 目标体系网络指标

目标体系网络同样可用图 $G = (V, E)$ 表示, V 表示节点,代表网络中的各个作战目标, E 表示节点之间的有向边或无向边,不仅描述了节点之间的指挥、保障、通信、协作等关系,还表达了机动灵活的作战目标间的动态关系。

网络指标分为积极效应和消极效应两个方面。积极效应方面,目标节点在作战体系中的地位和作用可以用网络指标来描述。常用的网络指标有:度中心性、近中心性、介中心性、聚集系数和 K-Shell 核度等,这些指标分别对应目标节点的资源关联性、流转时效性、协同性和连通关键性。积极效应通常表现在目标节点的网络指标度量数值的大小。消极效应方面,当目标节点被摧毁后,作战网络连通分量越多、离散度越高、剩余的作战链条越少,剩余价值越小则该目标节点的重要度越高。

1.2.1 度中心性与资源关联性

度是单节点属性中最为基础的概念,节点的度就是该节点连接的其他节点数目,这是一个简单但在网络分析时非常重要的指标,在网络中用来描述该目标节点的资源关联性。度中心性计算公式为

$$D_{ci} = \frac{k_i}{N-1} \quad (1)$$

式中: k_i 表示现有的与节点 i 相连的边数量; $N-1$ 表示除节点 i 外的节点数量。

1.2.2 近中心性与流转时效性

网络中两点之间的距离定义为连接两点的最短路径上所包含的边数。网络的平均路径长度指网络中所有节点对的平均距离,反映了网络中节点之间的分离程度和网络的全局特性,在网络中用来描述该目标节点的流转时效性。近中心性计算公式为

$$C_{ci} = \frac{N-1}{\sum_{i \neq ci} d_{vi}} \quad (2)$$

式中 d_{vi} 表示一个节点的平均最短距离。

1.2.3 介中心性与连通关键性

介数包括节点介数和边介数,节点介数指网络中所有最短路径中经过该节点的数量比例,边介数则指网络中所有最短路径中经过该边的数量比例。介数反映了相应节点或边在整个网络中的作用和影响力,具有很强的现实意义。例如,在交通网络中,介数较高的道路拥挤的概率很大;在通信网络中,介数较高的通道使用率最高;在目标网络中用来描述该目标节点的连通关键性。介中心性的计算公式为

$$B_{ci} = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (3)$$

式中: n_{st}^i 表示连接 s 和 t , 经过节点 i 且为最短路径的数量; g_{st} 表示连接 s 和 t 的最短路径的数量。

归一化后可得

$$B_{ci} = \frac{k_i}{(N-1)(N-2)/2} \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (4)$$

1.2.4 K-Shell 核度

Kitsak 等^[15]于 2010 年提出在复杂网络中应用 K-Shell 分解算法,发现基于网络拓扑的 K-Shell 分解法可获得比度中心性、介中心性更为精确描述节点重要性的评估指标,即 K-Shell 核度指标。

K-Shell 分解方法给出了节点重要性的一种较粗颗粒度划分,其基本思想如图 2 所示。

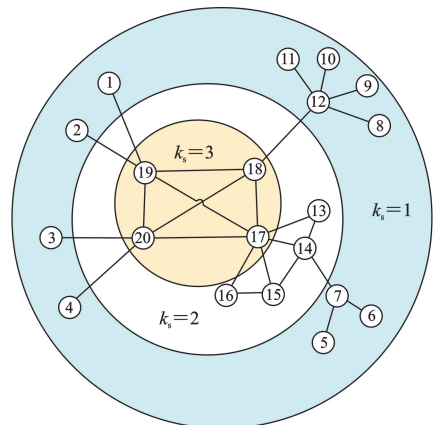


图2 K-Shell 核度算法示意

通过 K-Shell 分解将网络中的节点划分为 3 层,分别对应 $k_s = 1, 2, 3$ 。具体操作为:如同剥蛋壳般,首先定义边缘节点的 K-Shell 值为 1,然后向内部一层层进入网络的核心。第一步先剥除网络中度为 1 的所有节点,并去除这些节点的边,然后查看剩余节点中是否仍有度为 1 的节点,若存在则继续剥除节点,直至剩余节点的度都大于 1,这些被剥除节点的 K-Shell 值则为 1,即这些节点均处于 k_s 值为 1 的层;下一步依次剥除度小于或等于 k 的节点 (k 为整数, $k \geq 1$),直至所有节点都有对应的 k_s 值为止。

1.2.5 K-Shell2 核度与协同性

K-Shell 核度对同样的 k_s 值并没有区分,为了更好地描述目标在网络中的地位作用,定义了 K-Shell2 核度,在目标网络中用来描述该目标节点的协同性。如图 3 所示,与 K-Shell 核度类似,K-Shell2 核度采用层层剥离的方式计算。

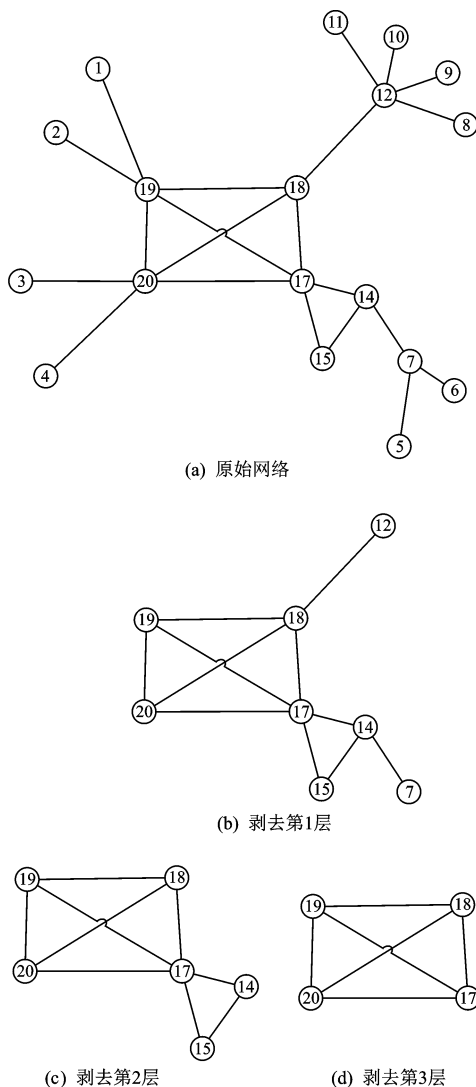


图 3 K-Shell2 核度算法示意

首先直接剥去边缘节点,由于网络最小度为 1,被剥去的节点 K-Shell2 核度为 1,设置一个变量 total,记录 total=1;然后再剥去第 2 层,最小度还是为 1,记录 total=1+1=2,即被剥去的节点 K-Shell2 核度为 2;再剥去第 3 层,最小度为 2,记录 total=2+2=4,即被剥去的节点 K-Shell2 核度为 4;最后第 4 层可全部剥去,最小度为 3,记录 total=4+3=7,即剩下节点 K-Shell2 核度为 7。

1.2.6 节点离散度

构建整数线性规划模型求解消极层面关键节点群,当节点集合被毁坏移除后,使得网络离散程度最大化。表达形式为

$$\min \sum_{i,j \in V} u_{ij} \tag{5}$$

$$u_{ij} + v_i + v_j \geq 1 \quad \forall (i, j) \in V \tag{6}$$

$$u_{ij} + u_{jk} - u_{ki} \geq 1 \quad \forall (i, j, k) \in V \tag{7}$$

$$u_{ij} - u_{jk} + u_{ki} \geq 1 \quad \forall (i, j, k) \in V \tag{8}$$

$$-u_{ij} + u_{jk} + u_{ki} \geq 1 \quad \forall (i, j, k) \in V \tag{9}$$

$$\sum_{i \in V} v_i \leq K \tag{10}$$

$$u_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \tag{11}$$

$$v_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \tag{12}$$

目标函数式(5)是在删除节点后的网络中,最小化剩余节点的连接对数量。

式(6)保证节点 i 和 j 开始时连接,若节点 i 和 j 作为关键节点被删除,则节点 i 和 j 将不再连接;否则,始终连接。

式(7~9)共同表明对于三元组 (i, j, k) ,如果节点 i 和 j ,节点 j 和 k 分别都在同一个连通分支,那么节点 i 和 k 也必然在同一个连通分支。

式(10)保证作为关键节点被删除的节点总数不大于 k 值。

约束式(11)中 u_{ij} 表示节点 i 和 j 是否在同一个连通分支,若在同一个连通分支,则 $u_{ij} = 1$;否则 $u_{ij} = 0$ 。

式(12)中 v_i 表示节点是否作为关键节点被删除,若被删除,则 $v_i = 1$;否则 $v_i = 0$ 。

离散度为

$$L_{ci} = |v_i - 0.4| \tag{13}$$

式中:当 v_i 是关键节点时,离散度为 0.6;非关键节点时,离散度为 0.4。

1.3 节点网络关键度效能函数

网络化作战体系中,目标节点网络关键度效能函数是用来计算目标节点在目标网络体系效能的指标。其表达式为

$$E_{ci} = B_{ci}^{w_1} + C_{ci}^{w_2} + D_{ci}^{w_3} + K_{ci}^{w_4} + L_{ci} \quad (14)$$

式中： w_1, w_2, w_3, w_4 为权重系数， $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ ； K_{ci} 为 K-Shell2 核度。 E_{ci} 的值由该目标节点在网络中的信息流转、协同效应、节点的连通关键性和节点资源之间的关联性综合计算得出。

1.4 目标作战能力模型拓展

结合图 1，将目标在网络中的能力用网络关键度进行拓展，如图 4 所示。目标的特征采用自身能力和网络关键度综合描述，其中网络关键度由效能函数计算得出。

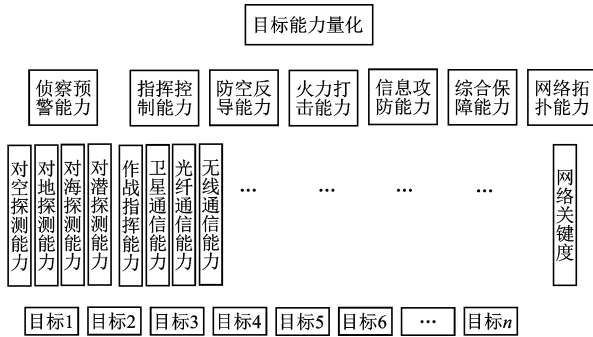


图 4 目标能力量化拓展模型结构

结合目标的能力矩阵 M ，得到目标能力的增广矩阵 M^+ 。

1.5 打击意图

在不同的作战阶段，随着对敌方目标打击意图的变化，对目标的评估和排序也随之改变。在模型中，打击意图可用目标各指标能力的权重向量 W 表示，通过调整 W 中的权重系数适应不同打击意图。当需要打击敌方防空反导体系时，提高目标的侦察能力、指挥能力和火力打击能力的权重；当需要打击敌方通信体系时，提高目标通信能力的权重；当需要物理摧毁目标时，减小网络关键度的权重；当需要使目标失联、失能、失效时，增加网络关键度的权重。

1.6 目标评估与选择

每次行动能打击的目标数量是有限的，假定目标打击数量为 x ，将每个目标的量化能力表示为行向量 M_k ，所有目标的能力矩阵为 M ，打击意图表示为列向量 W 。评估分 $S_{score} = MW$ ，得到所有目标评估量化分值的列向量。评分最高的前 i 个目标就是需要打击的目标。

2 实验分析

A 方需要打击 B 方具有防空反导能力的目标，假定 B 方目标分布如图 5 所示，其中 1~4 号目标为

预警节点，5~8 号目标为指挥控制节点，9~14 号目标为火力节点，15~24 号目标为通信节点。

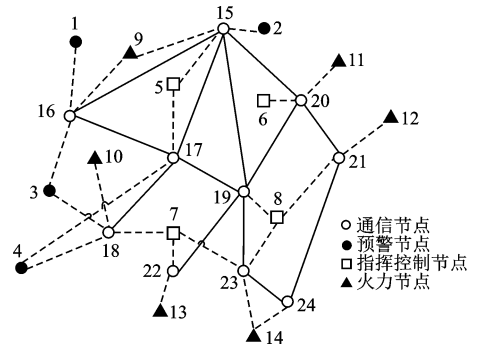


图 5 B 方目标体系分布结构示意图

根据目标分类特征和所在目标网络的角色地位，通过量化赋值确定 B 方的目标列表能力值；根据目标网络拓扑结构，计算得到目标的网络拓扑能力值，具体包括度中心性、近中心性、介中心性和 K-Shell2 指标，并根据网络指标计算节点关键度，其中设定 w_1, w_2, w_3, w_4 的值分别为 0.2、0.2、0.3、0.3；能力指标合并后生成目标的整体能力值如表 2 所示。

表 2 B 方目标整体能力值

目标	对空 侦察 能力	对空 打击 能力	通信 能力	指挥 能力	度中 心性	近中 心性	介中 心性	K- Shell2	离 散度	节 点 关 键 度
1	1	0	0	0	1/23	23/79	0	1	0.4	2.57
2	1	0	0	0	1/23	23/67	0	1	0.4	2.60
3	1	0	0	0	2/23	23/70	7.833 333	3	0.4	4.58
4	1	0	0	0	2/23	23/66	0	3	0.4	3.08
5	0	0	0	1	2/23	23/62	0	3	0.6	3.29
6	0	0	0	1	1/23	23/72	0	1	0.4	2.59
7	0	0	0	1	2/23	23/69	14.0	3	0.4	4.77
8	0	0	0	2	3/23	23/59	15.333 33	9	0.6	5.63
9	0	2	0	0	2/23	23/64	0	3	0.4	3.09
10	0	3	0	0	1/23	23/83	0	1	0.4	2.56
11	0	2	0	0	1/23	23/72	0	1	0.4	2.59
12	0	3	0	0	1/23	23/85	0	1	0.4	2.56
13	0	2	0	0	1/23	23/81	0	1	0.4	2.57
14	0	3	0	0	2/23	23/78	0	3	0.4	3.05
15	0	0	1	0	7/23	23/45	160.0	11	0.6	6.99
16	0	0	1	0	5/23	23/57	74.833 33	6	0.6	6.15
17	0	0	1	0	6/23	23/48	129.333 30	8	0.6	6.64
18	0	0	1	0	5/23	23/61	72.333 33	4	0.6	5.93
19	0	0	1	0	6/23	23/44	203.666 70	11	0.6	7.10
20	0	0	1	0	5/23	23/50	138.166 70	11	0.6	6.82
21	0	0	1	0	4/23	23/63	62.5	8	0.6	6.16
22	0	0	1	0	3/23	23/59	66.5	3	0.6	5.68
23	0	0	1	0	4/23	23/59	60.5	8	0.6	6.16
24	0	0	1	0	3/23	23/73	9.0	6	0.6	5.20

根据打击意图，能力权重关系如表 3 所示。根据能力项权重关系赋值表构建打击意图列向量 $W = [0.2, 0.2, 0.2, 0.3, 0.1]$ 。依据目标整体能力值列表构建矩阵 M ，通过矩阵运算 $S_{score} = MW$ ，可得到目

标的量化评分结果,如表4所示。

表3 能力项权重关系赋值

能力项	权重
对空侦察能力	0.2
对空打击能力	0.2
通信能力	0.2
指挥能力	0.3
节点关键度	0.1

表4 B方目标量化评分表

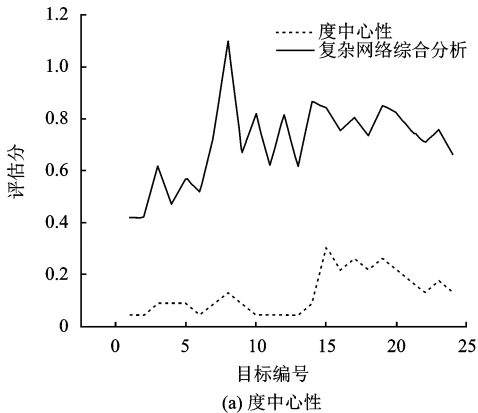
目标	对空侦察能力	对空打击能力	通信能力	指挥能力	节点关键度	评估分
1	1	0	0	0	2.57	0.457
2	1	0	0	0	2.60	0.460
3	1	0	0	0	4.58	0.658
4	1	0	0	0	3.08	0.508
5	0	0	0	1	3.29	0.629
6	0	0	0	1	2.59	0.559
7	0	0	0	1	4.77	0.777
8	0	0	0	2	5.63	1.163
9	0	2	0	0	3.09	0.709
10	0	3	0	0	2.56	0.856
11	0	2	0	0	2.59	0.659
12	0	3	0	0	2.56	0.856
13	0	2	0	0	2.57	0.657
14	0	3	0	0	3.05	0.905
15	0	0	1	0	6.99	0.899
16	0	0	1	0	6.15	0.815
17	0	0	1	0	6.64	0.864
18	0	0	1	0	5.93	0.793
19	0	0	1	0	7.10	0.910
20	0	0	1	0	6.82	0.882
21	0	0	1	0	6.16	0.816
22	0	0	1	0	5.68	0.768
23	0	0	1	0	6.16	0.816
24	0	0	1	0	5.20	0.720

层次分析法与复杂网络评估法如图6所示。层次分析法只根据目标节点自身作战能力作出评估,没有考虑其在作战体系中的作用,也无法从摧毁作战体系的角度对目标进行评估。当目标能力值接近时难以区分。度中心性、近中心性和K-Shell2核度等单个网络指标也难以精确评估目标的重要度。而综合了目标自身特征,网络积极效应指标和消极效应指标的复杂网络评估法能有效区分节点的重要度。

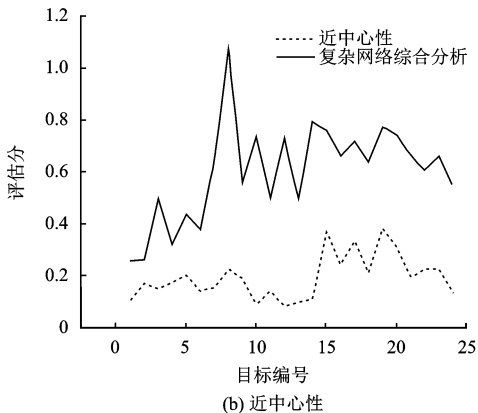
根据复杂网络综合评估得分排序,前6位打击的目标为:8,19,14,15,20,17。可以看出,8号由于指挥能力为2,级别最高,评估分第1;14号空中作战能力最强,评估分第3;19,15,20,10号节点处在目标网络的重要位置,在打击评估中排名靠前。分析结果中,既有需要重点打击的高附加值目标,又有网络中具有重要位置和作用的目标。

在体系破击思想指导下,关键目标选取贵在精而不在多,在打击成本有限的前提下,以破坏敌方从指挥节点到战斗单元,从传感器到发射器的链接为

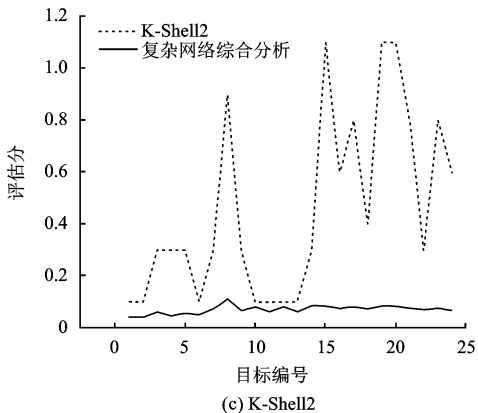
原则,精选敌方作战体系的关键节点给予重点打击,以达到毁点断链、破网瘫面的目的。



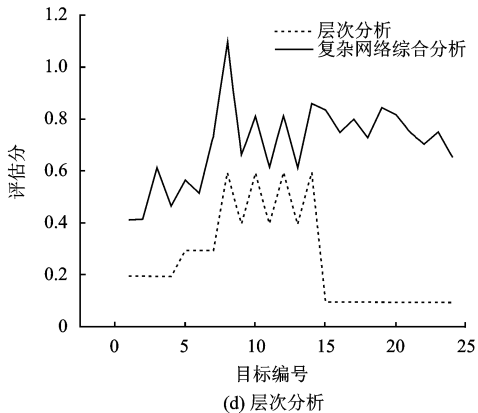
(a) 度中心性



(b) 近中心性



(c) K-Shell2



(d) 层次分析

图6 层次分析法与复杂网络评估法分析对比

3 结论

聚焦信息化条件下的联合作战指挥,深入研究“打什么”这一核心问题。根据网络拓扑性质,从积极效应和消极效应两个层面选取网络指标,设计了网络节点关键度效能函数和目标节点作战能力的量化方法,既考虑目标自身的能力,也考虑目标在作战网络中的地位和作用。结合打击意图,有效地评估了目标。在实际应用中,目标之间的联系会动态变化,计算复杂度随着网络节点数、目标破击数以及整体性能指标计算量的增加而大幅提升,下一步将重点研究在保留结果准确性的同时提高计算效率。

参考文献:

[1] 杨国利,李云龙,王宁.网络化作战体系关键目标打击筹划研究[J].指挥与控制学报,2020,6(2):147-156.
YANG Guoli, LI Yunlong, WANG Ning. Attack planning for key targets in networked operation system of systems [J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(2): 147-156.

[2] 田福平,汶博,郑鹏鹏.基于贝叶斯网络的作战目标评估[J].火力与指挥控制,2017,42(2):79-82.
TIAN Fuping, WEN Bo, ZHENG Pengpeng. Warfare targets assessment based on Bayesian network [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(2): 79-82.

[3] 房茂燕,汪民乐,赵志辉,等.战场目标综合价值评估研究[J].四川兵工学报,2015,36(7):160-164.
FANG Maoyan, WANG Minle, ZHAO Zhihui, et al. Research on the comprehensive value evaluation of battlefield targets[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2015, 36(7): 160-164.

[4] 张勇涛,张松良.基于主成分分析的战场目标选择模型[J].指挥控制与仿真,2009,31(4):43-45,50.
ZHANG Yongtao, ZHANG Songliang. A model for the battlefield targets selection based on principal component analysis[J]. Command Control & Simulation, 2009, 31(4): 43-45, 50.

[5] 张世燎,阚亚斌,高晶.登陆作战中的打击目标选择效益评估研究[J].火力与指挥控制,2018,43(11):87-90,97.
ZHANG Shiliao, KAN Yabin, GAO Jing. Study of benefit evaluation method for selecting target in landing operations[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(11): 87-90, 97.

[6] 谢丽霞,孙红红,杨宏宇,等.基于K-shell的复杂网络关键节点识别方法[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(5):849-861.

XIE Lixia, SUN Honghong, YANG Hongyu, et al. Key node recognition in complex networks based on the K-shell method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(5): 849-861.

[7] 郑建兵.复杂网络鲁棒性度量及其应用研究[D].上海:华东师范大学,2022.
ZHENG Jianbing. Robustness metrics for complex networks and their applications[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.

[8] 阮树朋,赵文杰,雷盼飞,等.基于复杂网络的防空武器系统目标选择研究[J].指挥控制与仿真,2012,34(1):23-28.
RUAN Shupeng, ZHAO Wenjie, LEI Panfei, et al. The target selection research of air defence weapon system based on complex network[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(1): 23-28.

[9] 胡托任,王睿,黄兴河.指挥信息系统通信网络节点重要度评估方法[J].指挥信息系统与技术,2019,10(5):95-100.
HU Tuoren, WANG Rui, HUANG Xinghe. Node importance evaluation method for command information system communication network [J]. Command Information System and Technology, 2019, 10(5): 95-100.

[10] 杨国利,邹瑞涛,任步春,等.网络化作战体系中的关键目标选择研究[J].指挥与控制学报,2018,4(4):312-318.
YANG Guoli, ZOU Ruitao, REN Buchun, et al. Key targets selection in networked operation system of systems [J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(4): 312-318.

[11] LU D, YANG S K. A survey of the analysis of complex systems based on complex network theory and deep learning [J]. International Journal of Performance Engineering, 2022, 18(4): 241-250.

[12] PENG B H, GE J J, WEI G, et al. Research on identification of key brittleness factors in emergency medical resources support system based on complex network [J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2022, 131: 102350.

[13] HASHEMI R, DARABI H. The review of ecological network indicators in graph theory context: 2014-2021 [J]. International Journal of Environmental Research, 2022, 16(2): 1-26.

[14] BOVO C, ILEA V, CARLINI E M, et al. Optimal computation of network indicators for electricity market bidding zones configuration considering explicit N-1 security constraints [J]. Energies, 2021, 14(14): 1-31.

[15] KITSACK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks [J]. Nature Physics, 2010, 6(11): 888-893.