

# 基于多属性决策的 PCAS-SNIF 关键节点分析

王 瑛, 张 泽, 张 滢, 李 杰, 闫孟达, 岳龙飞

(空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051)

**摘要** 预先计划的近距空中支援(PCAS)是一种典型的空军进攻作战样式,研究 PCAS 信息流过程对于提高 PCAS 的作战效能具有重要意义。针对 PCAS 作战过程难以建模分析的问题,引入超网络理论,通过研究 PCAS 作战的基本流程以及作战网络中各节点之间的交互关系,构建了“两层五网”的 PCAS 信息流转超网络模型,然后,仿真分析了 PCAS 信息流转超网络节点的度中心性、介数、聚类系数和接近中心性 4 个方面的拓扑特性,通过多属性决策节点重要性综合评价方法得出网络关键节点;最后,通过网络攻击实验验证了超网络模型和多属性决策算法的合理性和有效性,为研究作战信息流转问题提供了新的思路。

**关键词** 近距空中支援;超网络;信息流转;多属性决策;关键节点

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.014

**中图分类号** C934;E82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0090-07

## An Analysis of Key Nodes of PCAS-SNIF Based on Multi-Attribute Decision-Making

WANG Ying, ZHANG Ze, ZHANG Ying, LI Jie, YAN Mengda, YUE Longfei

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract** Pre-planned close air support (PCAS) is a typical air force offensive operation style which can be considered as a pivotal role in modern war. It is of great significance to study the information flow process of PCAS for improving the combat effectiveness of PCAS. Aimed at the problems that modeling and analyzing are difficult in the combat process of PCAS, the super-network theory is introduced. Through studying the basic operation process of PCAS and the interaction between nodes in the combat network, a super-network model of information flow of PCAS with two layers and five networks is constructed. Then, the topological characteristics of PCAS information flow super-network nodes from four aspects of degree centrality, intermediate number, clustering coefficient and closeness centrality are analyzed. The key nodes of the network are obtained by the comprehensive evaluation method of the importance of multi-attribute decision nodes. Finally, the rationality and effectiveness of the super-network model and the multi-attribute decision making algorithm are verified through the network attack experiment, and these give the research of operational information flow with a new idea.

**Key words** close air support; super-network; information flow; multi-attribute decision-making; key nodes

收稿日期: 2021-06-22

基金项目: 国家社会科学基金军事学项目(2019-SKJJ-C-025)

作者简介: 王 瑛(1982—),女,河南洛阳人,副教授,研究方向为作战任务规划。E-mail:karenjjj@163.com

通信作者: 张 泽(1995—),女,陕西西安人,硕士生,研究方向为作战信息流转。E-mail:zhangzezz19@163.com.

**引用格式:** 王瑛,张泽,张滢,等.基于多属性决策的 PCAS-SNIF 关键节点分析[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(6):90-96.  
WANG Ying, ZHANG Ze, ZHANG Ying, et al. An Analysis of Key Nodes of PCAS-SNIF Based on Multi-Attribute Decision-Making[J].  
Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 90-96.

近距离空中支援<sup>[1-2]</sup> (close air support, CAS)是空军保持地面兵力优势和扩展战果的主要手段,也是空军作战重要样式,识别作战中关键节点对改进作战方式、提高作战能力具有重要意义。CAS 包括预先计划的近距离空中支援(preplanned close air support, PCAS)和即时性的近距离空中支援(immediate close air support, ICAS),PCAS<sup>[3]</sup>指陆军和空军根据预先制定的作战计划和攻击目标申请火力打击,在制定 PCAS 计划中考虑的问题越全面,方案越详细,在作战过程中申请 PCAS 的负担和压力越小,越能把握住战场的主动权,因此本文主要研究 PCAS 中的关键节点。

目前,国内外针对如何识别网络中的关键节点进行了大量研究,比如文献[4]通过复杂网络理论构建飞行冲突态势网络模型,选取拓扑指标结合 AHP 方法评估节点的冲突等级,找出威胁等级高的位置;文献[5]根据网络结构和传播动力学,回顾节点重要性排序方法,分析节点排序指标的优缺点和适用环境,指出领域中待解决的问题和发展方向。

综合分析已有的研究,主要存在以下两方面问题:①衡量节点重要性的指标相对单一,难以说明节点的重要程度,结果具有片面性;②侧重对节点宏观的介绍,未具体分析网络中的关键节点。

因此,本文使用超网络理论,建立 PCAS“两层五网”超网络模型,基于 TOPSIS 的多属性决策法,选取度中心性、介数、聚类系数和接近中心性四个拓扑指标,识别网络中的关键节点,通过网络弹性对关键节点进行评价验证。

## 1 PCAS 信息流转超网络模型构建

超网络通常指规模巨大、连接复杂、节点具有异质性的网络,或网络中嵌套网络,且存在虚拟节点的边和流等的大型网络<sup>[6]</sup>。

PCAS 信息流转超网络(PCAS super-network of information flowing, PCAS-SNIF)是指在 PCAS 作战中,作战信息在不同作战节点之间交互流通构成不同功能的子网络,子网络根据一定的关联映射规则相连所构成的多层网络。PCAS-SNIF 模型具体的建模流程及步骤如图 1 所示。

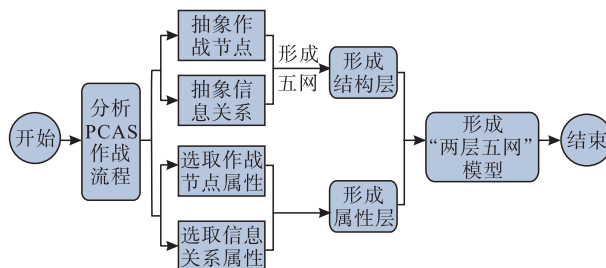


图 1 PCAS-SNIF 模型构建流程

### 1.1 PCAS 作战过程描述

分析文献[7]中的 PCAS 作战流程,划分作战单元。作战力量包括空军、陆军和陆空联合,以外军某次近距离空中支援任务为例,PCAS 作战力量的军种包括空军、陆军和陆空联合,作战节点分为申请、情报、指控、协调和火力五大类,具体如下表 1 所示:

表 1 作战力量具体情况

节点类型	作战单元	节点编号	简称	职能	军种	数量
申请节点	空中联络官	$N_1$	A-L	提交空中任务申请	空	1
	作战参谋部	$N_2$	A-S	负责向指控中心提交战术反馈	空	1
	作战指挥所	$N_3$	A-G	审批作战申请	空	1
	联合空中作战中心	$N_4$	A-W	联合作战申请中心	空	1
情报节点	控制中心	$N_5$	I-C	作战识别,信息传输	空	1
	空中情报中心	$N_6$	I-A	监视目标,传输信息	空	1
	地面情报中心	$N_7$	I-G	提供战场态势,作战规划等信息	空	1
指控节点	联合指挥所	$N_8$	C-J	控制机构,发布作战指令	陆空	1
	空中指挥所	$N_9$	C-A	分配作战资源,下达任务	空	1
	陆上指挥所	$N_{10}$	C-G	地面作战指挥机构,传达作战指令	陆	1
	联队空中指挥所	$N_{11}$	C-W	向联队提供指挥与控制	空	1
	联合控制员	$N_{12}$	C-C	负责陆军和空军的命令传达	空	1
	战术控制中心	$N_{13}$	C-T	调整战术,传达作战指令	空	1
	火力中心	$N_{14}$	C-F	实施火力控制	陆	1

续表

节点类型	作战单元	节点编号	简称	职能	军种	数量
协调节点	地面协调中心	$N_{15}$	H-G	支援空中指挥机构,传达指令	陆	1
	战场协调中心	$N_{16}$	H-B	交换作战情报及数据,提供战场支援	陆	1
	空中协调组	$N_{17}$	H-C	支援火力中心,传达作战指令	空	1
	联合空中协调中心	$N_{18}$	H-J	负责向地面作战中心提供作战支援	空	1
	火力协调员	$N_{19}$	H-F	提供火力支援,传达火力任务	空	1
	武器协调中心	$N_{20}$	H-A	支援火力中心(营),传达作战指令	空	1
火力节点	火力支援中心	$N_{21}-N_{28}$	G-F	实施火力打击计划	空	8

1.2 PCAS 作战要素抽象

1.2.1 作战节点抽象

根据功能不同,将作战节点( $N$ )分为申请节点( $N_A$ )、情报节点( $N_I$ )、指控节点( $N_C$ )、协调节点( $N_H$ )和火力节点( $N_G$ )5类共28个,有 $N=N_A \cup N_I \cup N_C \cup N_H \cup N_G$ 。节点属性选取探测( $Dc$ )、指控( $C2$ )、调度( $Di$ )、火力( $Fr$ )、通信能力( $Co$ )、机动速度( $Mo$ ,单位:km/s)、作战半径( $Ra$ ,单位: $10^3$  km)、高度( $Hi$ ,单位:km)、信息质量( $Iq$ )和抗毁性( $Su$ )等10个。

1.2.2 作战信息抽象

根据功能不同,将作战信息( $I$ )分为申请信息( $I_A$ )、情报信息( $I_I$ )、指控信息( $I_C$ )、协调信息( $I_H$ )和火力信息( $I_G$ )5类共122个,有 $I=I_A \cup I_I \cup I_C \cup I_H \cup I_G$ 。选取探测( $Dc$ )、指控( $C2$ )、调度( $Di$ )、火力( $Fr$ )、时延( $Dl$ ,单位:ms)、带宽( $Bd$ ,单位:Mbps)和机密性( $Se$ )等7个信息关系属性<sup>[8]</sup>。

根据作战流程,绘制PCAS作战信息流转见图2。

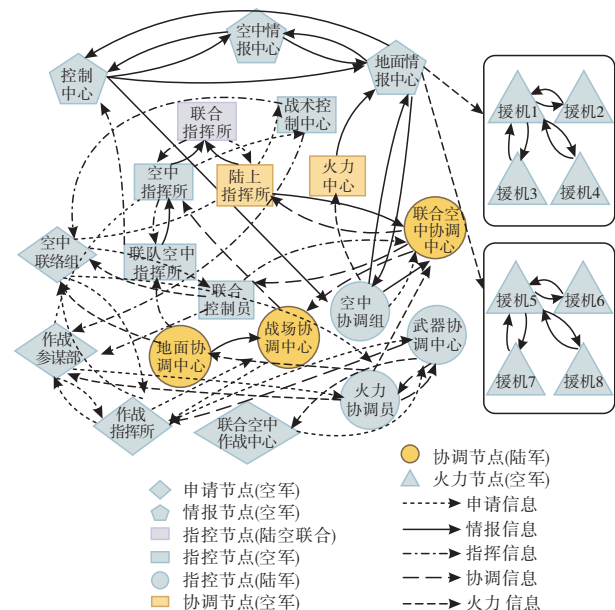


图2 PCAS 信息流转基本过程

1.2.3 网络关联映射规则

关联映射指网络 $W_M$ 与网络 $W_N$ 之间的节点交互流通构成复合网络 $W_{M+N}$ 。根据关联映射规则,作战信息在作战节点之间的交互用超边连接构成子网络,形成集申请网( $W_A$ )、情报网( $W_I$ )、指控网( $W_C$ )、协调网( $W_H$ )和火力网( $W_G$ )为一体的作战网络( $W$ );根据关联映射规则,将子网络之间的信息流动用超边连接构成超网络。

1.3 PCAS-SNIF 模型

申请网、情报网、指控网、协调网和火力网共同构成“五网”模型,属于结构层;节点属性和信息关系属性共同构成属性层,将属性与“五网”之间的信息流动用超边相连,构成PCAS-SNIF模型。PCAS-SNIF模型图如图3所示。

图3中,每个子网络都担负不同的职能,申请子网负责向指挥机构提交申请,反馈申请结果,情报子网负责探测情报信息,监视敌方目标,指控子网负责发布作战命令,配置作战资源,协调子网负责支援作战任务协同、提供战场火力支援等工作,火力子网主要进行火力打击任务。属性层是节点属性和信息关系属性的集合,反映了各个子网所具有的属性特征。

2 多属性决策关键节点排序算法

在PCAS-SNIF中,个别作战单元担任关键节点的作用,对信息传输、指挥控制和火力打击有重要影响。因此,为了提高作战效能,需找出网络的关键节点,进一步提高信息传输效率和网络的抗毁性。

2.1 拓扑指标

为了评估节点在PCAS-SNIF中的重要程度,选取节点的度中心性、介数、聚类系数和接近中心性4个拓扑指标评价节点的重要程度。

1) 节点的度中心性

度中心性<sup>[9-10]</sup>定义为与该节点相连的边数与节点 $v$ 可能存在的最大边数的比率。度中心性表示为:

$$DC_v = \frac{k_v}{N-1} \quad (1)$$

式中:  $k_v$  为与节点  $v$  关联的边数;  $N$  表示超网络中节点的总数。度中心性代表了节点在网络中与其他节点直接通信的能力,值越大,说明此节点越重要。

2)介数

节点  $v$  的介数<sup>[11]</sup>是指经过该节点的最短路径的数量占整个网络中所有最短路径的数量的比例。

介数体现了节点和边在整个网络交互传输中的重要程度,反映了节点在信息流动中的作用,表达式为:

$$B_v = \frac{2 \cdot \sum_{s < t} g_v^{(st)} / n^{(st)}}{n(n-1)} \quad (2)$$

式中:  $g_v^{(st)}$  表示节点  $s$  和  $t$  之间的最短路径经过节点  $v$  的个数;  $n^{(st)}$  指节点  $s$  和  $t$  之间所有的最短路径数。

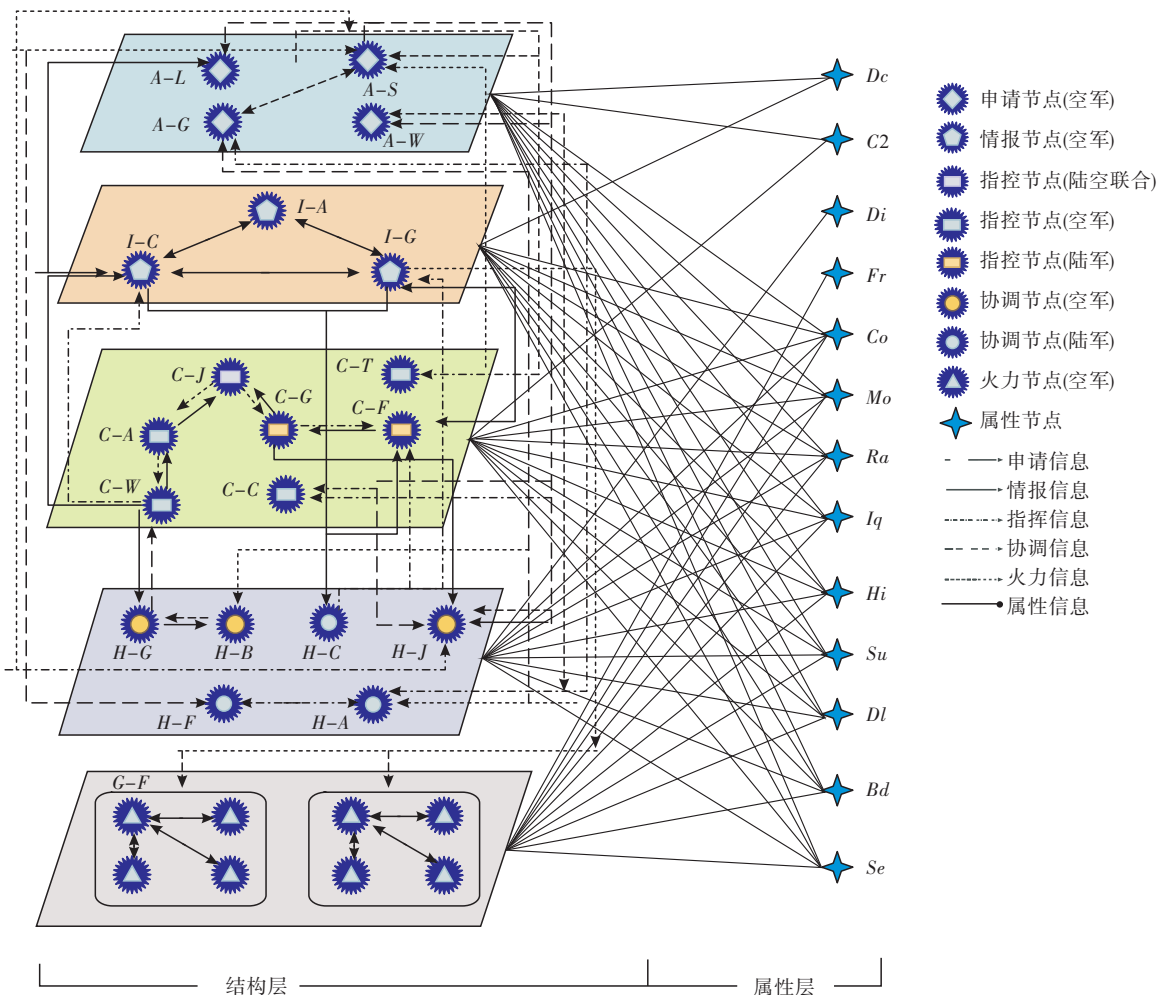


图 3 PCAS-SNIF 模型

3)聚类系数

聚类系数<sup>[12]</sup>是指节点  $v$  所有邻居节点之间的实际连边条数与理论连边总条数的比例,集聚系数可以描述网络中节点的集聚情况,反映网络的紧密程度。超网络中聚类系数可以表示为:

$$C_v = \frac{6 \times \Delta_{net}}{L_{net-2}} \quad (3)$$

式中:  $\Delta_{net}$  表示超三角形的数目;  $L_{net-2}$  表示长度为 2 的路径数目。超三角形指的 3 个不同的顶点和 3 个不同的超边构成的序列,顶点是相邻的;2 路指步长为 2 的路,在路中顶点和超边是相异的。

4)接近中心性

节点  $v$  的接近中心性指其到网络中其余节点距

离之和的倒数,  $d_{uv}$  表示节点  $v$  到节点  $u$  之间最短路径所含边的数量,接近中心性可表示为

$$CC_v = \frac{N}{\sum_{u=1}^N d_{uv}} \quad (4)$$

节点接近中心性的值越大,说明节点重要性越高,在网络中处于中心位置。

2.2 多属性决策的节点重要性综合评价方法

基于 TOPSIS 的多属性决策的节点重要性综合评价方法是将超网络中的每个节点看作一个方案,将评价节点重要性的指标看作各方案的属性,决策准则是评价各方案在超网络中的重要程度<sup>[13-14]</sup>。

设超网络中的决策方案为  $A = \{A_1, A_2, \dots,$

$A_N\}$ ,重要程度指标为  $m$  个,方案属性集合为  $G=(G_1, G_2, \dots, G_m)$ ,第  $i$  个节点的第  $j$  个指标的值为  $A_i(S_j)(i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, m)$ ,构成决策矩阵:

$$X = \begin{pmatrix} A_1(S_1) & \dots & A_1(S_m) \\ \vdots & & \vdots \\ A_N(S_1) & \dots & A_N(S_m) \end{pmatrix} \quad (5)$$

基于 TOPSIS 的节点重要性综合评价算法步骤如下所述:

1)利用效益型指标(6)对矩阵做标准化处理,得到规范化矩阵(7):

$$h_{ij} = A_i(S_j)/A_i(S_j)^{\max} \quad (6)$$

$$H = (h_{ij})_{N \times m} \quad (7)$$

2)指标权重  $w_j(j=1, 2, \dots, m, \sum w_j=1)$  与规范化矩阵  $H$  构成加权规范化矩阵(8):

$$Y = (y_{ij}) = (w_j h_{ij}) = \begin{pmatrix} w_1 h_{11} & \dots & w_m h_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ w_1 h_{N1} & \dots & w_m h_{Nm} \end{pmatrix} \quad (8)$$

3)确定正、负理想决策方案,分别为:

$$A^+ = \{\max_{i \in J}(y_{i1}, \dots, y_{im})\} = \{y_1^{\max}, \dots, y_m^{\max}\} \quad (9)$$

$$A^- = \{\min_{i \in J}(y_{i1}, \dots, y_{im})\} = \{y_1^{\min}, \dots, y_m^{\min}\} \quad (10)$$

其中,  $J = \{1, 2, \dots, N\}$ 。

4)确定每个方案  $A_i$  到正理想方案  $A^+$  和负理想方案  $A^-$  的距离,分别为:

$$L_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\max})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$L_i^- = \left[ \sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\min})^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

5)计算理想方案的贴近度  $Q_i$ 。将贴近度从大

到小排序,贴近度越大表明节点在网络中越重要:

$$Q_i = L_i^- / (L_i^+ + L_i^-), 0 \leq Q_i \leq 1 \quad (13)$$

### 3 关键节点识别流程

PCAS-SNIF 模型关键节点识别包括两方面,分别是模型构建和关键节点识别。

1)模型构建:分析 PCAS 作战过程,完成作战信息流转图,基于超网络理论构建 PCAS-SNIF 模型。

2)关键节点识别:选取度中心性、介数、聚类系数和接近中心性 4 个拓扑指标,基于 TOPSIS 的多属性决策法对节点重要性排序,确定关键节点。

关键节点识别流程如图 4 所示。

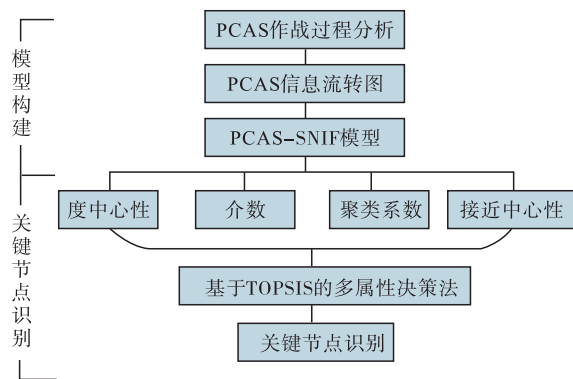


图 4 关键节点识别流程图

### 4 仿真分析

#### 4.1 拓扑指标计算及分析

经式(1)~(4)和 MATLAB 软件运算可得节点的度中心性、介数、聚类系数和接近中心性见表 3。

表 3 拓扑指标计算结果

$N$	DC	B	C	CC	$N$	DC	B	C	CC
$N_1$	0.370	190.782	0	0.386	$N_{15}$	0.148	11.233	0	0.287
$N_2$	0.296	15.427	0	0.278	$N_{16}$	0.222	39.278	0	0.284
$N_3$	0.370	93.746	0	0.351	$N_{17}$	0.222	6.000	0.667	0.369
$N_4$	0.148	2.786	0	0.257	$N_{18}$	0.370	84.091	0	0.333
$N_5$	0.148	0	1.000	0.346	$N_{19}$	0.296	37.468	0	0.325
$N_6$	0.370	273.756	0.200	0.429	$N_{20}$	0.222	11.067	0	0.273
$N_7$	0.444	348.833	0.200	0.422	$N_{21}$	0.296	150.000	0	0.321
$N_8$	0.148	12.267	0	0.290	$N_{22}$	0.074	0	0	0.246
$N_9$	0.222	29.567	0	0.303	$N_{23}$	0.074	0	0	0.246
$N_{10}$	0.222	99.300	0	0.355	$N_{24}$	0.074	0	0	0.246
$N_{11}$	0.222	77.256	0	0.338	$N_{25}$	0.296	150.000	0	0.321
$N_{12}$	0.222	16.478	0	0.318	$N_{26}$	0.074	0	0	0.246
$N_{13}$	0.148	6.833	0	0.287	$N_{27}$	0.074	0	0	0.246
$N_{14}$	0.222	85.833	0.333	0.365	$N_{28}$	0.074	0	0	0.246



4.2 多属性决策关键节点排序

在 PCAS-SNIF 超网络中,选定节点的度中心性  $DC$ ,介数  $B$ ,聚类系数  $C$  和接近中心性  $CC$  为评价指标,指标值越大,说明节点越重要。由表(3)得到决策矩阵  $X$ ,对矩阵  $X$  做标准化处理得到矩阵  $H$ 。根据专家打分情况,确定指标权重分别为  $w_{DC}=0.279, w_B=0.286, w_C=0.107, w_{CC}=0.328$ ,由公式(7)计算得到加权规范化矩阵  $Y$ :

$$Y = \begin{pmatrix} 0.232 & 0.156 & 0 & 0.295 \\ 0.186 & 0.013 & 0 & 0.213 \\ 0.232 & 0.077 & 0 & 0.268 \\ 0.093 & 0.002 & 0 & 0.196 \\ 0.093 & 0 & 0.107 & 0.265 \\ 0.232 & 0.225 & 0.021 & 0.328 \\ 0.279 & 0.286 & 0.021 & 0.323 \\ 0.093 & 0.010 & 0 & 0.222 \\ 0.140 & 0.024 & 0 & 0.232 \\ 0.140 & 0.082 & 0 & 0.272 \\ 0.140 & 0.063 & 0 & 0.258 \\ 0.140 & 0.013 & 0 & 0.243 \\ 0.093 & 0.006 & 0 & 0.219 \\ 0.140 & 0.070 & 0.036 & 0.279 \\ 0.093 & 0.009 & 0 & 0.219 \\ 0.140 & 0.032 & 0 & 0.217 \\ 0.140 & 0.005 & 0.071 & 0.282 \\ 0.232 & 0.069 & 0 & 0.255 \\ 0.186 & 0.031 & 0 & 0.249 \\ 0.140 & 0.009 & 0 & 0.209 \\ 0.186 & 0.123 & 0 & 0.245 \\ 0.047 & 0 & 0 & 0.188 \\ 0.047 & 0 & 0 & 0.188 \\ 0.047 & 0 & 0 & 0.188 \\ 0.186 & 0.123 & 0 & 0.245 \\ 0.047 & 0 & 0 & 0.188 \\ 0.047 & 0 & 0 & 0.188 \\ 0.047 & 0 & 0 & 0.188 \end{pmatrix}$$

由矩阵  $Y$  可得正理想决策方案为:

$$A^+ = \{0.279, 0.286, 0.107, 0.328\}$$

负理想决策方案为:

$$A^- = \{0.047, 0, 0, 0.188\}$$

由式(11~12)计算得到每个方案到  $A^+$  和  $A^-$  的距离分别为  $L_i^+$  和  $L_i^-$ ,由式(13)计算得到理想方案的贴近度  $Q_i$ ,如表 4 所示。

由表 4 可得贴近度  $Q_i$  排序大小,节点贴近度排名前 5 的节点贴近度远高于其他节点,由于节点数量众多,此处仅分析贴近度排名前 5 的节点,分别为:

$$Q_7 > Q_6 > Q_1 > Q_3 > Q_{21} = Q_{25}$$

在 PCAS 中,  $N_7$  为地面情报中心,与情报、指

控、协调和火力节点之间均有信息交流,担任重要的侦察任务,删除该节点将导致信息传输中断,因此是最重要的节点;  $N_6$  是控制中心,是将信息传输到指挥所的纽带,删除该节点将导致信息传输受阻,是次重要的节点;  $N_1$  是空中联络官,  $N_1$  断开网络无法提交 PCAS 申请;  $N_3$  是作战参谋官,负责审核作战申请的可行性,决定作战申请是否实施;  $N_{21}$  和  $N_{25}$  均是援机中的长机,负责接收火力信息,是火力网的核心。因此,这 6 个节点是网络信息流通的关键节点,一旦遭遇损毁将导致 PCAS 作战无法顺利进行。

表 4 PCAS-SNIF 的多属性决策评价结果

$N$	$L_i^+$	$L_i^-$	$Q_i$	$N$	$L_i^+$	$L_i^-$	$Q_i$
$N_1$	0.177	0.266	0.599	$N_{15}$	0.367	0.057	0.134
$N_2$	0.329	0.142	0.302	$N_{16}$	0.328	0.103	0.238
$N_3$	0.247	0.217	0.467	$N_{17}$	0.319	0.150	0.320
$N_4$	0.379	0.047	0.111	$N_{18}$	0.257	0.209	0.448
$N_5$	0.347	0.140	0.287	$N_{19}$	0.303	0.155	0.339
$N_6$	0.115	0.324	0.738	$N_{20}$	0.349	0.096	0.215
$N_7$	0.086	0.393	0.821	$N_{21}$	0.231	0.195	0.457
$N_8$	0.365	0.058	0.137	$N_{22}$	0.409	0	0
$N_9$	0.330	0.105	0.242	$N_{23}$	0.409	0	0
$N_{10}$	0.276	0.149	0.351	$N_{24}$	0.409	0	0
$N_{11}$	0.292	0.133	0.312	$N_{25}$	0.231	0.195	0.457
$N_{12}$	0.335	0.109	0.245	$N_{26}$	0.409	0	0
$N_{13}$	0.369	0.056	0.132	$N_{27}$	0.409	0	0
$N_{14}$	0.271	0.152	0.360	$N_{28}$	0.409	0	0

4.3 关键节点重要度评价验证

为验证关键节点的准确性,通过按度中心性、介数、聚类系数、接近中心性、贴近度攻击和随机攻击 6 种情况,考察节点遭受损毁后不可修复的情况。网络弹性可以定义为网络在受到干扰后,发生故障或产生问题最终能够回到初始状态或最佳状态的能力<sup>[15]</sup>,可以表示为:

$$R_s = \frac{V_{W-Y}}{n} \frac{|N| + V_{W-Y}}{L_{W-Y}} \quad (5)$$

式中:  $W-Y$  代表从网络  $W$  中移除网络  $Y$  后构成的新网络;  $|N|$  指网络中所包含的节点总数;  $V_{W-Y}$  表示  $W-Y$  中最大连通子网包含的节点数;  $L_{W-Y}$  表示  $W-Y$  最大连通子网的平均最短路径。

经公式(5)计算可得网络弹性如图 5 所示。

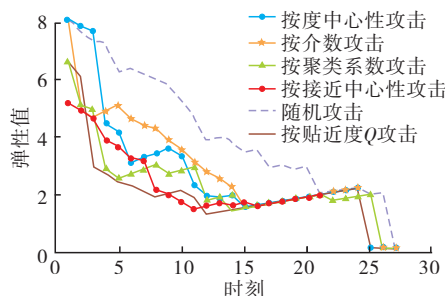


图 5 网络弹性随攻击时刻变化曲线

由图5可知,随机攻击节点弹性值下降最缓慢,弹性值最后趋于零。按贴近度攻击的效果最优,对网络破坏最强,在攻击最关键的3个节点后,弹性值迅速下降到3以下,继续攻击重要性排序第四和第五的两个节点后,弹性值降到2以下,说明关键节点遭受攻击后对网络造成很大影响,再攻击重要性靠后的节点弹性值呈平稳分布,主要因为后面节点为援机等节点,对网络稳定性影响不大。该实验验证了多属性决策关键节点排序算法的有效性,说明多属性决策筛选出的关键节点对网络极为重要,应该进行重点保护以保证作战过程顺利实施。

## 5 结语

本文针对PCAS具体作战样式,构建了PCAS信息流转超网络模型,研究作战信息在作战节点之间的交互传输过程,通过多属性决策的节点重要性综合评价方法筛选出网络中的关键节点,发现重要性排名前五的节点分别是地面情报中心、控制中心、空中联络官、作战参谋官和援机中的长机,实验验证了上述关键节点受敌方攻击对网络影响巨大,应该进行重点保护。下一步将对网络进行优化,增强网络的抗毁性和网络效率。

### 参考文献:

- [1] 姚春青. 近距离空中支援研探[J]. 中国军事科学, 2016(3):90-97.
- [2] One Exception: Close Air Support[J]. Inside the Air Force, 2014, 25(13):1-15.
- [3] 张弛, 丁轶. 预警机在美军近距离空中支援指控体系中的应用研究[J]. 信息化研究, 2020, 46(4):42-46.
- [4] 刘飞, 余敏建, 李佳威, 等. 基于复杂网络理论的飞行冲突关键点识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4):19-25.
- [5] 刘建国, 任卓明, 郭强, 等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展[J]. 物理学报, 2013, 62(17):9-18.
- [6] XI Y J, YANG Q, LIAO X. Research Review on Super-Network and Knowledge Super-Network [J]. Modern Management, 2019, 9(4):557-565.
- [7] 李永强. 现代近距离空中支援作战[M]. 北京:航空工业出版社, 2020.
- [8] 杨迎辉, 李建华, 王刚, 等. 基于超网络的作战信息流转建模及特性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(3):8-18.
- [9] IZAGUIRRE A, MONTES R G. Horvitz-Thompson Estimator under Partial Information with an Application to Network Degree Distribution[J]. Communications in Statistics - Simulation and Computation, 2021, 50(2):343-366.
- [10] VAHIDEH M, SIDHANT M, SCOTT R. Diffusion in Random Networks: Impact of Degree Distribution [J]. Operations Research, 2020, 68(6):1722-1741.
- [11] YUAN Z W, LV C C, SI S B, et al. Dynamical Robustness of Networks Based on Betweenness against Multi-Node Attack[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(5):050501.
- [12] NAKAJIMA K, SHUDO K. Measurement Error of Network Clustering Coefficients under Randomly Missing Nodes[J]. Scientific Reports, 2021, doi:10.1038/S41598-021-82367-1.
- [13] CARÍAS J F, ARRIZABALAGA S, LABAKA L, et al. Cyber Resilience Progression Model[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21):7393.
- [14] 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报, 2013, 62(2):54-62.
- [15] 王劲松, 李宗育, 徐晏琦. 基于多属性决策的复杂网络节点攻击研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(4):42-47.

(编辑:徐敏)