

# 地空多元复杂网络用频优选模型研究

徐雪飞, 李建华, 沈迪, 郭蓉, 杨迎辉

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 针对地空多元复杂网络用频规划和指配问题, 提出了一种地空多元复杂网络用频优选模型。首先, 将地空多元复杂网络节点以及节点之间关系进行抽象, 从角色功能、移动能力和网络结构三方面提出了表现节点重要性的属性指标; 然后, 将节点作为决策的基本对象, 并将节点属性作为影响决策方案的核心要素, 利用灰关联投影多属性决策方法对每个决策方案距离理想决策方案的接近程度进行计算, 得出决策方案的重要度序列; 最后, 通过对地空多元复杂用频网络进行实例计算, 验证了模型的有效性和合理性。

**关键词:** 地空多元复杂网络; 用频优选; 指标; 多属性决策

中图分类号: TN 915

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.01.13

## Research of air-ground multi-element frequency optimization model in complex networks

XU Xue-fei, LI Jian-hua, SHEN Di, GUO Rong, YANG Ying-hui

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Aiming at the frequency planning and assigned problems of air-ground multi-variant complex networks, A frequency optimization model is proposed. Firstly, abstract the nodes and relationships in complex networks, the importance attributes of nodes are proposed from the aspects of role function, movement ability and network structure. Secondly, take each node as the basic object to make a decision, and the note's property is deemed as a key element to influence the solution, then, a multi-criteria decision grey relation projection method is taken to calculate the closest between the solution and the ideal solution to obtain the importance sequence of the solution. Finally, the model's effectiveness and rationality are confirmed according to the example of air-ground multi-variant frequency complex networks.

**Keywords:** air-ground multi-element frequency complex networks; frequency optimization; aspects; multi-criteria decision

## 0 引言

未来战争是构建于海、陆、空、天、地多维的网络化战争。空中平台通过和地面指挥控制平台信息交联, 构成了地空多元复杂网络结构。在这个复杂网络中, 海量的信息交互造成了频谱资源的紧张, 可能引发行频干扰和冲突。为了提高通信用频利用效率, 有必要对地空多元复杂网络中的用频问题展开研究, 通过对地空多元复杂网络中的节点重要性进行度量排序, 进而为地空多元复杂网络中频谱管控奠定基础。

复杂网络节点重要性度量和评估的研究最早可以追溯到对于社会网络的相关研究<sup>[1]</sup>。随后, 针对于 Internet 风险传播控制、电力交通网络拥塞控制等相关领域的研究逐渐丰富起来<sup>[2-3]</sup>。现阶段, 关于复杂网络节点重要性的研究

已经成为复杂网络研究领域中最基本的问题, 越来越多的文献从不同角度和不同方面提出了各种复杂网络节点重要性的评估方法。文献[4]首次将度数中心性、介数中心性和接近中心性等指标进行综合比较, 并基于博弈论提出一种有效的节点重要性评估方法。文献[5]综合考虑节点邻居节点的个数以及邻居节之间的密切程度二者之间的关系, 提出一种基于度与集聚系数的网络节点重要性评价方法, 并运用该方法对美国航空网络、西部电力网络和不同参数的 BA 网络进行节点的选择性摘除的蓄意攻击模拟仿真, 仿真结果收到了较好的结果。但是该方法并未考虑到网络动力学特性以及网络结构对于节点重要性的影响。为此, 文献[6]提出一种基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法, 该方法将复杂网络中每一个节点作为一

个方案,并将多个重要性评价指标作为该方案的属性,通过计算每个方案到理想方案的接近程度,从而得到该节点的重要性综合评价结果。此外,在军事应用领域,文献[7]提出一种 CIS 节点重要度评估方法,综合考虑了作战任务需求和网络拓扑结构对节点重要性的影响,并运用依赖度和影响度指标共同计算节点重要度。文献[8]基于复杂网络中改进的节点重要度评估指标和方法,建立了武器装备重要度评估模型,并分别利用网络拓扑结构重要度和网络节点自修复程度两个评估指标对模型进行构建。

上述的多种节点重要度评估方法都是针对特定问题提出,能够较好的对不同条件中复杂网络中节点复杂度进行判断和评估。但是,在地空复杂用频网络中,节点的属性多元化并极易受到大量不确定因素的影响。因此,需要从不同角度,利用多属性对节点重要性进行衡量。本文构建一种地空多元复杂网络用频优选模型(air-ground multi-element frequency optimization model in complex networks)。对复杂网络中包含的各类节点以及节点之间的用频关系进行抽象。然后将复杂网络中节点属性和节点关系进行综合,运用基于灰关联投影多属性决策方法对多指标进行综合评估,形成节点优选方案。最后,通过对地空多元复杂用频网络进行实例计算分析,验证了模型和方法的有效性和适应性。

## 1 地空多元复杂网络结构抽象

### 1.1 节点属性指标

地空多元复杂网络是网络中心战的具体表现形式之一,是包含多种作战指挥实体的复杂网络结构。在地空多元复杂网络中,网络中的作战指挥实体抽象为不同任务类型的节点,节点之间依靠通信用频关系构成复杂的网络结构。为了研究地空多元复杂网络节点用频情况,将网络中的实体从能够反映用频效能的角度进行抽象,形成能够反映用频特征的网络节点属性指标。

#### 1.1.1 角色功能属性(role functional, RF)

地空多元复杂网络节点功能角色是对其基本功能以及扮演角色的描述,按照现阶段指挥作战网络中实体的划分方法,可以表示为以下多元组:

$$RF = (CG, OF) \tag{1}$$

式中,CG 表示指挥等级,按照一般惯例可划分为高、中、低 3 个等级;OF 表示作战功能,包括指挥控制、火力打击、情报侦察以及其他功能。

#### 1.1.2 移动能力属性(movement ability, MA)

地空多元复杂网络节点空间位置属性是网络拓扑结构的基础,是对其空间位置和移动情况的基本描述,可以表示为以下多元组:

$$MA = (SC, MS) \tag{2}$$

式中,SC 表示节点的空间坐标;MS 表示节点的移动速率。

#### 1.1.3 网络结构属性(network structure, NS)

地空多元复杂网络节点网络结构属性是对节点在网络中相互关系的反映,是对其相互用频关系的基本描述,可以表示为以下多元组:

$$NS = (DC, BC, CC, T) \tag{3}$$

式中,DC 表示节点度中心性;BC 表示节点介数中心性;CC 表示节点接近中心性;T 表示时间维。

以上 3 个属性指标分别从不同角度对节点重要性进行衡量,为了更进一步研究节点之间相互的重要性差异,引入节点之间的关系作为节点重要性判别的精细化。

### 1.2 节点之间关系

在地空多元复杂网络中,节点依靠相互之间的通信用频关系构成复杂网络的边。根据通信用频的基本特性,把节点之间的关系抽象成两类,用来对节点之间的重要度进行定性衡量,具体关系定义如下:

#### 定义 1 合作关系(cooperation relationship, CR)

合作关系是指付出一定的代价使对手获得利益的行为。地空多元复杂网络中,节点的合作关系主要是指两个直接或者间接进行通信的节点,互相利用自身可以运用的频谱资源完成信息交互的行为,表示为

$$CR = (CR_{direct}, CR_{indirect}) \tag{4}$$

式中, $CR_{direct}$  表示节点之间用频的直接合作关系; $CR_{indirect}$  表示节点之间用频的间接合作关系,如图 1 所示。

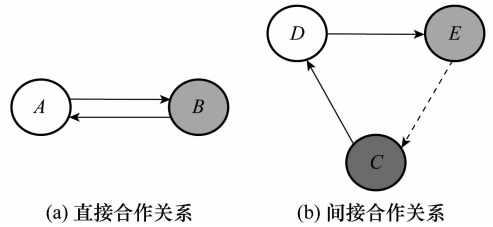


图 1 节点间用频合作关系

#### 定义 2 背叛关系(defection relationship, DR)

背叛关系是指不付出任何代价却可以从合作者处获益的行为。地空多元复杂网络中,节点的背叛关系并非严格意义层面的背叛,而是一种基于频谱资源共享的利益相互协调关系,可以称之为合作-竞争关系(cooperation-competition relationship,  $C_{CR}$ ),表示为

$$C_{CR} = (C_{CR_{direct}}, C_{CR_{indirect}}) \tag{5}$$

式中, $C_{CR_{direct}}$  表示节点间的直接合作-竞争关系; $C_{CR_{indirect}}$  表示节点间的间接合作-竞争关系,如图 2 所示。

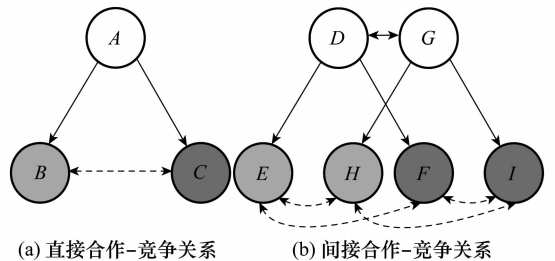


图 2 节点间用频背叛关系

## 2 基于灰关联投影多属性决策节点重要度评估方法

多属性决策问题是多目标决策问题的一个重要分支,属

于运筹学的研究范畴<sup>[9-10]</sup>。灰关联多属性决策<sup>[11-12]</sup>作为灰理论重要的组成部分,通过对未知系统发展形态进行量化分析,从而有效确定系统中各个决策方案的排序。基于灰关联投影多属性决策节点重要度评估方法<sup>[13-15]</sup>的核心思想是将地空多元复杂网络中的节点或节点组作为一个方案,将反映节点或节点组重要度的属性指标分别作为各方案的属性,则节点或节点组的重要度评估就可以等效为一个多属性决策问题<sup>[16-18]</sup>。在多属性决策过程中,由于节点的属性指标中包含着大量的不确定信息,同时,属性指标之间存在着不确定的灰色关系。因此,通过运用灰理论将定性的属性指标进行白化,同时,引入决策方案和理想方案之间的夹角作为评价参数,最后,通过对各决策方案的投影值进行对比,形成排序评估方案。

### 2.1 决策矩阵

假设地空多元复杂网络中共有  $N$  个节点,则对应的决策方案集合为

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\} \quad (6)$$

评价每一个节点的属性指标有  $M$  个,则对应的决策方案集合为

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_M\} \quad (7)$$

则节点  $i$  的属性指标  $j$  可表示为

$$A_i(S_j), i \in [1, N], j \in [1, M] \quad (8)$$

进一步地,决策矩阵  $Y$  可表示为

$$Y = \begin{pmatrix} A_1(S_1) & \dots & A_1(S_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_N(S_1) & \dots & A_N(S_M) \end{pmatrix} \quad (9)$$

由于节点的各个属性指标的量纲和单位不同,为了消除不可公度性,要对属性指标进行无量纲规范化处理,即

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{A_i(S_j)}{A_i(S_j)^{\max}} - \text{效益型} \\ \frac{A_i(S_j)^{\min}}{A_i(S_j)} - \text{成本型} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $A_i(S_j)^{\max}$  和  $A_i(S_j)^{\min}$  分别表示节点  $i$  属性指标的最大值和最小值。在根据式(10)对每类属性指标进行无量纲规范化处理之前,需要对每类属性指标内部进行无量纲规范化预处理,预处理之后再统一进行无量纲规范化处理,从而保证各类属性指标的公平性和有效性。

规范化的决策矩阵  $Y$  进一步可表示为

$$Y = (r_{ij})_{N \times M} \quad (11)$$

### 2.2 理想决策矩阵

设正理想决策方案为  $A^+$ , 负理想决策方案为  $A^-$ , 则可表示为

$$A^+ = A_{0j}^+ = \max_{i \in L} \{y_{i1}, \dots, y_{iM}\} \quad (12)$$

$$A^- = A_{0j}^- = \min_{i \in L} \{y_{i1}, \dots, y_{iM}\} \quad (13)$$

式中,  $L \in \{1, \dots, N\}$ 。

对理想决策方案  $A = \{A^+, A^-\}$  进行初值化处理,记  $A'$  为  $A$  的生成方案,则

$$A'_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{0j}}, i \in [1, N], j \in [1, M] \quad (14)$$

式中,  $A_{ij}$  表示决策方案  $i$ ,  $A_{0j}$  表示决策方案初始值。从式(14)

中可以得出,  $A'_{0j} = 1$ , 且  $A'_{0j}$  即为理想方案。

### 2.3 加权灰关联理想决策矩阵

记  $(S, \Gamma)$  为灰关联空间,  $\zeta$  为关联映射,  $\gamma_{ij}$  为子因素  $a'_{ij}$  关于母因素  $a'_{0j}$  的灰关联系数,则可以表示为

$$\gamma_{ij} = \frac{\min_N \min_M |a'_{0j} - a'_{ij}| + \lambda \max_N \max_M |a'_{0j} - a'_{ij}|}{|a'_{0j} - a'_{ij}| + \lambda \max_N \max_M |a'_{0j} - a'_{ij}|} \quad (15)$$

式中,  $\lambda$  为分辨系数,通常  $\lambda = 0.5$ 。

对理想决策方案  $A$  所有行向量分别运用式(15)求得灰关联系数,求得  $(M+1)N$  个灰关联系数组成的灰关联理想决策矩阵  $G^\pm$  为

$$G^\pm = \begin{pmatrix} g_{01}^\pm & g_{02}^\pm & \dots & g_{0N}^\pm \\ g_{11}^\pm & g_{12}^\pm & \dots & g_{1N}^\pm \\ g_{21}^\pm & g_{22}^\pm & \dots & g_{2N}^\pm \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M1}^\pm & g_{M2}^\pm & \dots & g_{MN}^\pm \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中,  $g_{01}^\pm = g_{02}^\pm = \dots = g_{0N}^\pm = 1$ 。

设灰关联理想决策矩阵  $G^\pm$  在加权向量  $W$  的作用下构造出加权灰关联理想决策矩阵  $W'$  为

$$W' = G^\pm W = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_N \\ w_1 g_{11}^\pm & w_2 g_{12}^\pm & \dots & w_N g_{1N}^\pm \\ w_1 g_{21}^\pm & w_2 g_{22}^\pm & \dots & w_N g_{2N}^\pm \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 g_{M1}^\pm & w_2 g_{M2}^\pm & \dots & w_N g_{MN}^\pm \end{pmatrix} \quad (17)$$

将每一个决策方案看做一个向量,则决策方案  $A_i$  与理想方案  $A^*$  之间的夹角  $\theta_i$  的余弦为

$$\cos \theta_i = \frac{A_i A^*}{\|A_i\| \|A^*\|} = \frac{\sum_{j=1}^N w_i g_{ij} w_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (w_i g_{ij})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (w_j)^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, M; 0 < \gamma_i \leq 1 \quad (18)$$

运用式(18)可以求得决策方案  $A_i$  在理想方案  $A^*$  的投影为

$$D_i = \sum_{j=1}^N g_{ij} \cdot \left[ (w_j)^2 / \sqrt{\sum_{j=1}^N (w_j)^2} \right] \quad (19)$$

再引入新的指标权重向量  $\bar{W}$ , 其中  $\bar{W}$  可表示为

$$\bar{W} = \{\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_N\} \quad (20)$$

$$\bar{w}_j = (w_j)^2 / \sqrt{\sum_{j=1}^N (w_j)^2} \quad (21)$$

将式(20), 式(21)代入式(19), 得出

$$D_i^\pm = \sum_{j=1}^N g_{ij}^\pm \cdot \bar{w}_j, i \in [1, M] \quad (22)$$

对式(22)进行变换,可得灰关联投影系数  $E_i$  为

$$E_i = \frac{D_i^{\pm 2}}{D_i^{\pm 2} + D_i^{\mp 2}}, 0 < E_i < 1 \quad (23)$$

## 3 基于灰关联投影多属性决策步骤

基于上述分析,基于灰关联投影多属性决策方法步骤

总结如下:

步骤 1 根据已知的方案集 A 和属性指标集 S, 构造出方案集 A 对属性指标集 S 的决策矩阵 Y, 并对其进行规范化处理;

步骤 2 分别构建正理想决策矩阵 A<sup>+</sup> 和负理想决策矩阵 A<sup>-</sup>, 然后对其进行初值化处理, 得到生成方案矩阵 A';

步骤 3 根据式(18), 构建 (M+1)N 个 γ 组成的灰关联理想决策矩阵 G<sup>±</sup>;

步骤 4 利用 AHP 法计算 N 个指标的权向量 W, 并计算灰关联投影权向量 W̄;

步骤 5 计算各决策方案 A<sub>i</sub> 对正、负理想方案的灰关联投影值 D<sub>i</sub><sup>±</sup>;

步骤 6 将正、负理想方案的灰关联投影值 D<sub>i</sub><sup>±</sup> 转换为灰关联投影系数 E<sub>i</sub>;

步骤 7 根据灰关联投影系数 E<sub>i</sub> 数值和节点关系对比判别, 得出决策方案的重要度排序。

对基于灰关联投影多属性决策的时间复杂度分析如下:

假设地空多元复杂网络中共有 n 个节点, 每一个节点的属性指标有 m 个, 方案中元素总数为 m × n 个。下面分别对每个步骤进行时间复杂度进行分析。

步骤 1 构造出决策矩阵, 并对其进行规范化处理, 该步骤属于简单矩阵运算, 故其时间复杂度为 O(mn);

步骤 2 构建正理想决策矩阵和负理想决策矩阵, 并进行初值化处理, 其最复杂运算为最值运算, 故其时间复杂度为 O((mn)<sup>2</sup>);

步骤 3 构建灰关联理想决策矩阵, 由于其最复杂运算为式(18)的运算, 故其复杂度为 O((mn)<sup>6</sup>);

步骤 4 计算指标的权向量和灰关联投影权向量, 故其时间复杂度为 O(mn<sup>7</sup>);

步骤 5 计算各决策方案对正、负理想方案的灰关联投影值, 故其时间复杂度为 O(mn<sup>2</sup>);

步骤 6 将正、负理想方案的灰关联投影值转换为灰关联投影系数, 故其时间复杂度为 O(m<sup>2</sup>); 所以, 基于灰关联投影多属性决策的时间复杂度为

$$O(mn) + O((mn)^2) + O((mn)^6) + O(mn^7) + O(mn^2) + O(m^2)$$

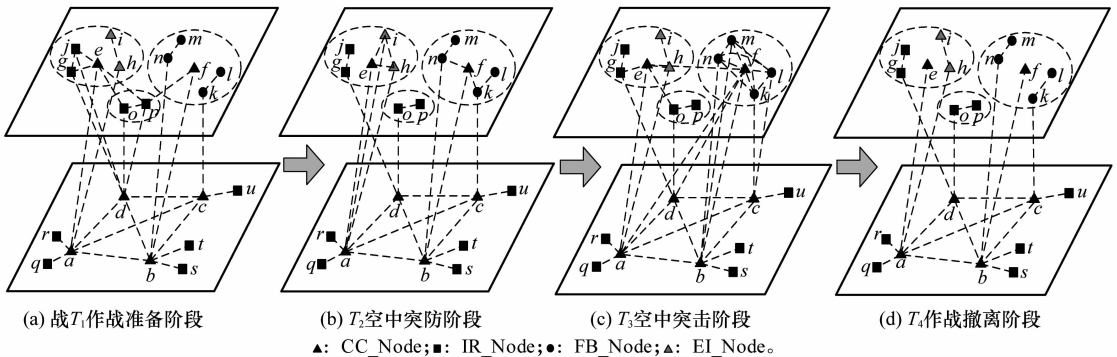


图 4 不同作战阶段地空多元复杂网络结构演化

根据分析结果可知, 基于灰关联投影多属性决策的时间复杂度与节点数和属性指标数紧密相关, 因此当给定节点数量和属性指标数量时, 算法运行时间波动性较小。

### 4 实验与分析

本文基于文献[8, 19]中作战体系复杂网络的结构, 将地空多元复杂网络中的实体划分为指挥控制节点、火力打击节点、传感器节点、侦察监视节点等, 并基于网络中实体的通信关系, 构建地空多元复杂网络结构如图 3 所示。

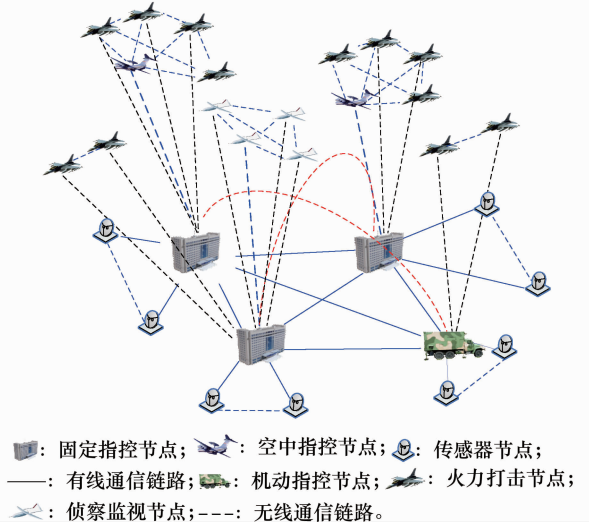


图 3 地空多元复杂网络结构示意图

选取空中进攻作战作为典型场景进行实例验证。为了进行比较全面的对比分析, 按照作战实施过程, 将空中进攻作战划分为作战准备、空中突防、空中突击和作战撤离 4 个阶段。同时, 为了便于表示, 将固定指挥所、车载指控中心和预警机统称为指挥控制节点 (command-control node, CC\_node); 将歼击机、轰炸机统称为火力打击节点 (firepower-blownode, FB\_node); 将侦察机和传感器统称为情报侦察节点 (intelligence-reconnaissance node, IR\_node); 将干扰机等统称为电子干扰节点 (electronic-interference node, EI\_node)。4 个阶段的复杂网络可以用一组随时间演化的复杂网络结构进行表示, 具体复杂网络结构如图 4 所示。

由于篇幅有限,仅针对  $T_3$  空中突击阶段进行分析研究。由  $CC\_Node$ 、 $FB\_Node$ 、 $IR\_Node$  和  $EI\_Node$  4 类节点组成的节点集合为

$$A = \{a, b, \dots, u\}$$

(1) 根据地空节点特征属性,将  $T_3$  空中突击阶段节点属性值用表 1 表示。

表 1  $T_3$  空中突击阶段节点属性值

	CG	OF	SC	MS	DC	BC	CC
a	7.5	1.0	1.0	0.0	8.000	108.983	14.000
b	9.5	1.0	1.0	0.0	8.000	95.067	14.250
c	8.0	1.0	1.0	0.0	6.000	58.000	13.250
d	7.5	1.0	1.0	0.0	6.000	77.067	13.083
e	7.0	1.0	1.0	5.0	5.000	83.000	13.000
f	8.5	1.0	7.0	5.0	8.000	63.250	14.333
g	3.5	1.0	9.0	3.0	3.000	39.250	10.667
h	3.0	1.0	7.0	3.0	3.000	38.000	11.000
i	3.0	1.0	7.0	3.0	1.000	0.000	7.917
j	3.5	1.0	9.0	3.0	1.000	0.000	7.750
k	6.5	1.0	5.0	7.0	5.000	3.567	11.583
l	6.0	1.0	5.0	7.0	5.000	3.567	11.583
m	6.0	1.0	5.0	7.0	5.000	3.000	11.750
n	6.5	1.0	5.0	7.0	5.000	3.000	11.750
o	3.5	1.0	9.0	3.0	3.000	39.250	10.667
p	3.5	1.0	9.0	3.0	1.000	0.000	7.750
q	3.0	1.0	3.0	0.0	1.000	0.000	9.083
r	3.0	1.0	3.0	0.0	1.000	0.000	9.083
s	3.0	1.0	3.0	0.0	1.000	0.000	9.117
t	3.0	1.0	3.0	0.0	1.000	0.000	9.117
u	3.0	1.0	3.0	0.0	1.000	0.000	8.783

对节点属性关系表的计算,得出正决策矩阵  $Y^+$  和负决策矩阵  $Y^-$  分别为

$$Y^+ = \begin{bmatrix} 9.5 & 1.0 & 9.0 & 7.0 & 8.000 & 108.983 & 14.333 \\ 7.5 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 8.000 & 108.983 & 14.000 \\ 9.5 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 8.000 & 95.067 & 14.250 \\ 8.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 6.000 & 58.000 & 13.250 \\ 7.5 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 6.000 & 77.067 & 13.083 \\ 7.0 & 1.0 & 1.0 & 5.0 & 5.000 & 83.000 & 13.000 \\ 8.5 & 1.0 & 7.0 & 5.0 & 8.000 & 63.250 & 14.333 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 3.000 & 39.250 & 10.667 \\ 3.0 & 1.0 & 7.0 & 3.0 & 3.000 & 38.000 & 11.000 \\ 3.0 & 1.0 & 7.0 & 3.0 & 1.000 & 0.000 & 7.917 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 1.000 & 0.000 & 7.750 \\ 6.5 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.567 & 11.583 \\ 6.0 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.567 & 11.583 \\ 6.0 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.000 & 11.750 \\ 6.5 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.000 & 11.750 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 3.000 & 39.250 & 10.667 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 1.000 & 0.000 & 7.750 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.083 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.083 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.117 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.117 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 8.783 \end{bmatrix}$$

$$Y^- = \begin{bmatrix} 3.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 7.750 \\ 7.5 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 8.000 & 108.983 & 14.000 \\ 9.5 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 8.000 & 95.067 & 14.250 \\ 8.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 6.000 & 58.000 & 13.250 \\ 7.5 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 6.000 & 77.067 & 13.083 \\ 7.0 & 1.0 & 1.0 & 5.0 & 5.000 & 83.000 & 13.000 \\ 8.5 & 1.0 & 7.0 & 5.0 & 8.000 & 63.250 & 14.333 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 3.000 & 39.250 & 10.667 \\ 3.0 & 1.0 & 7.0 & 3.0 & 3.000 & 38.000 & 11.000 \\ 3.0 & 1.0 & 7.0 & 3.0 & 1.000 & 0.000 & 7.917 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 1.000 & 0.000 & 7.750 \\ 6.5 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.567 & 11.583 \\ 6.0 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.567 & 11.583 \\ 6.0 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.000 & 11.750 \\ 6.5 & 1.0 & 5.0 & 7.0 & 5.000 & 3.000 & 11.750 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 3.000 & 39.250 & 10.667 \\ 3.5 & 1.0 & 9.0 & 3.0 & 1.000 & 0.000 & 7.750 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.083 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.083 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.117 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 9.117 \\ 3.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 & 1.000 & 0.000 & 8.783 \end{bmatrix}$$

(2) 对  $Y^+$  和  $Y^-$  分别进行初值化处理,得到正理想决策矩阵  $A^+$  和负理想决策矩阵  $A^-$ ;

(3) 计算得出正灰关联理想决策矩阵  $G^+$  和负灰关联理想决策矩阵  $G^-$ ;

(4) 根据  $T_3$  空中突击阶段通信优先等级,设权重向量  $W = \{0.2, 0.05, 0.05, 0.1, 0.3, 0.1, 0.2\}$ , 得出灰关联投影权重向量

$$\bar{W} = \{1.0519, 0.0657, 0.0657, 0.2630, 2.3669, 0.2630, 1.0519\}$$

(5) 计算求得正理想方案的灰关联投影值分别为

$$D^+ = \{4.5523, 4.8452, 3.6041, 3.5567, 3.2332, 4.4159, 2.0531, 2.1087, 2.1814, 2.2156, 3.1733, 3.1340, 3.1529, 3.1922, 2.0531, 2.2156, 2.1811, 2.1811, 2.1828, 2.1828, 2.1668\}$$

$$D^- = \{4.9524, 4.9523, 4.9523, 4.9524, 4.9242, 4.9162, 4.9176, 4.9166, 4.9523, 4.9521, 4.8168, 4.8168, 4.8282, 4.8281, 4.9176, 4.9521, 4.6669, 4.6669, 4.6636, 4.6636, 4.6976\}$$

(6) 灰关联投影系数为

$$E = \{0.4580, 0.4891, 0.3463, 0.3403, 0.3012, 0.4465, 0.1484, 0.1554, 0.1625, 0.1668, 0.3027, 0.2974, 0.2990, 0.3042, 0.1484, 0.1668, 0.1793, 0.1793, 0.1797, 0.1797, 0.1754\}$$

由实验结果可以得出,  $T_3$  空中突击阶段节点重要度由高到低依次为

$$b > a > f > c > d > n > k > e > m > l > s = t > q = r > u > j = p > i > h > g = o$$

同理可以得出

$$T_1 \text{ 作战准备阶段灰关联投影系数 } E = \{0.4310, 0.4465, 0.3553, 0.4708, 0.3821, 0.1735, 0.3027, 0.1457, 0.1428, 0.3027, 0.1127, 0.1074, 0.1074, 0.1127, 0.3027, 0.3027, 0.1853, 0.1853, 0.1917, 0.1917, 0.1884\}$$

$$T_2 \text{ 空中突防阶段灰关联投影系数 } E = \{0.4470, 0.4421,$$

0.357 5,0.341 3,0.365 2,0.241 5,0.173 4,0.356 4,0.157 3,  
 0.271 8,0.252 7,0.252 7,0.271 8,0.173 4,0.166 8,0.156 4,  
 0.183 8,0.183 8,0.189 0,0.189 0,0.185 2}

$T_4$  作战撤离阶段灰关联投影系数  $E = \{0.408 0, 0.435 7,$   
 $0.346 1, 0.310 8, 0.287 4, 0.275 5, 0.176 7, 0.132 8, 0.129 8,$   
 $0.302 7, 0.200 6, 0.245 7, 0.245 7, 0.200 6, 0.126 7, 0.113 2,$   
 $0.102 8, 0.102 8, 0.116 1, 0.116 1, 0.106 7\}$

为了比较空中进攻作战不同阶段节点的重要度变化情况,将  $T_1$  作战准备阶段、 $T_2$  空中突防阶段、 $T_3$  空中突击阶段和  $T_4$  作战撤离阶段灰关联投影系数进行分析对比,结果如图 5 所示。

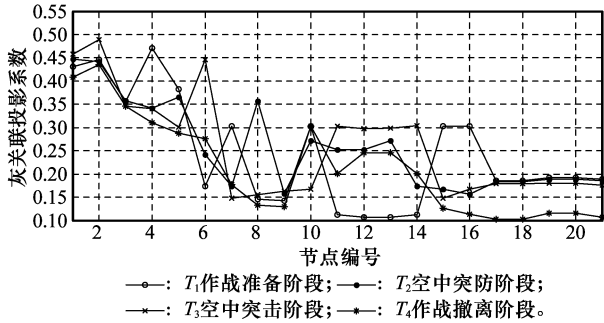


图 5 不同作战阶段节点灰关联投影系数变化

通过对图 5 进行分析,可以得出:随着空中进攻作战过程的演化,CC\_Node、FB\_Node、IR\_Node 和 EI\_Node 4 类节点的重要度整体呈现出下降的趋势,这是由于一个作战过程的开始与结束是一个能量聚合和释放的过程,通过一个作战过程的演化,节点之间的关系从密切变得稀疏;同时,随着作战过程的演化,同一个节点在不同作战阶段的重要度呈现出变化的趋势,这是由于在不同作战阶段中,由于节点的本质属性不同,所承担的作战任务不同,所以其重要度随着作战阶段进行变化。因此,在对地空多元复杂网络进行用频规划和指配过程中,可以根据不同作战阶段的特点,有针对性的制定频率规划和指配策略,从而有效加强重要节点的用频保障能力。

### 5 结 论

本文首先对地空多元复杂网络中节点的属性指标和节点间关系进行分析描述,得出能够表示节点重要性的属性指标;然后,构建了地空多元复杂网络用频优选模型,运用灰关联投影多属性决策方法对地空多元复杂网络节点重要度进行综合排序;最后,通过对空中进攻作战场景进行实例分析,较好的验证了模型的科学性和合理性。下一步,将继续对复杂网络中的节点属性指标进行细化分析,进一步提高模型的普适性和有效性。

### 参考文献:

[1] Freeman L C. Centrality in social network conceptual clarification[J]. *Social Network*, 1979, 1(3): 215 - 239.

[2] Albert R, Jeong H. The Internet's achills' hell: error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406: 387 - 482.

[3] Wang J W, Rong L L. Cascade-based attack vulnerability on the US power grid[J]. *Safety Science*, 2009, 47(3): 1331 - 1336.

[4] Gómez D, González-Arangüena E, Manuel C, et al. Centrality and power in social networks: a game theoretic approach[J]. *Mathematical Social Sciences*, 2003, 46(1): 27 - 54.

[5] Ren Z M, Shao F, Liu J G, et al. Node importance measurement based on the degree and clustering coefficient information[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 128901. (任卓明, 邵凤, 刘建国, 等. 基于度与集聚系数的网络节点重要性度量方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 128901.)

[6] Yu H, Liu Z, Li Y J. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 020204. (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): 020204.)

[7] Wang X, Yao P Y, Zhou X X, et al. A new evaluation on node importance in command information system [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(4): 38 - 42. (王欣, 姚佩阳, 周翔翔, 等. 指挥信息系统网络节点重要度评估方法[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(4): 38 - 42.)

[8] Zhang Y, Yang H W, Bai Y. Evaluation method for weapons important degree based on complex networks[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2012, 26(1): 5 - 9. (张勇, 杨宏伟, 白勇. 基于复杂网络的武器装备重要度评估方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26(1): 5 - 9.)

[9] Von Neumann M J, Oskar M. *Theory of games and economic behavior*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1944.

[10] Koopmans T C. *Activity analysis of production and allocation*[M]. New York: Wiley, 1951.

[11] Liu S F. On Perron-Frobenius theorem of grey non-negative matrix and its proof[J]. *The Journal of Grey System*, 1989, 1(2): 157 - 166.

[12] Liu S F, Lin Y. *An introduction to grey systems theory*[M]. Grove City: IIGSS Academic Publisher, 1998.

[13] Wang Y M. A new method for multiindices decision and evaluation-a projection method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1999, 21(3): 1 - 4. (王应名. 多指标决策与评价的新方法-投影法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(3): 1 - 4.)

[14] Lv F, Cui X H. Multi-criteria decision grey relation projection method and its application[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2002, 22(1): 103 - 107. (吕锋, 崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 103 - 107.)

[15] Ke H F, Chen Y G, Xia B. An algorithm of multiple criteria decision-making based on similarity to ideal grey relation projection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(9): 1757 - 1761. (柯宏发, 陈永光, 夏斌. 一种基于逼近与理想灰关联投影的多目标决策算法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1757 - 1761.)

[16] Cui J G, Fu K Y, Chen X C, et al. Multiple attribute maintenance decision making of aircraft based on grey-fuzziness and analytical hierarchy process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica*

*tica Sinica*, 2014, 35(2): 478 - 486. (崔建国, 傅康毅, 陈希成, 等. 基于灰色模糊与层次分析的多属性飞机维修决策方法[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 478 - 486.)

- [17] Hu L F, Wang C X, Zhu J, et al. Approach for grey fuzzy MADA in closed world[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(2): 246 - 250. (胡丽芳, 王晨熙, 朱靖, 等. 闭世界框架下灰色模糊多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 246 - 250.)
- [18] Qi Z H, Wang Z Y, Zhang W H. Multiple attribute decision evaluating approach to penetration effectiveness of missile based on interval numbers[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(11): 1700 - 1703. (齐照辉, 王祖尧, 张为华. 基于区间数多属性决策的导弹突防效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(11): 1700 - 1703.)
- [19] Jin W X, Xiao T Y. Research on the combat SoS complex network[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2009, 6(4): 12 - 25. (金伟新, 肖田元. 作战体系复杂网络研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(4): 12 - 25.)

## 作者简介:

**徐雪飞**(1986 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空天信息系统规划与建设。

E-mail: xxf19861128@sina.com

**李建华**(1965 -), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为空天信息系统规划与建设。

E-mail: KGDLJH@163.com

**沈迪**(1986 -), 男, 博士, 主要研究方向为空天信息系统规划与建设。

E-mail: hanshanyueyin@sina.com

**郭蓉**(1990 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术。

E-mail: berylflying@163.com

**杨迎辉**(1988 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空天信息系统规划与建设。

E-mail: yangyinghui.good@163.com