



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406509

引用格式:傅宁,宋子豪,徐梅.面向雷暴天气场景的航路网络节点重要度评估方法:以京津冀地区航班运行为例[J].科学与技术工程,2025,25(22):9595-9603.

Fu Ning, Song Zihao, Xu Mei. Evaluation methods for node importance in air route networks under thunderstorm weather[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(22): 9595-9603.

面向雷暴天气场景的航路网络节点重要度评估方法: 以京津冀地区航班运行为例

傅宁¹, 宋子豪^{1*}, 徐梅²

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 天津市气象信息中心, 天津 300300)

摘要 航路网络作为民航运输网络的运行载体,承担着保障航空器安全高效运行的重要任务。当重要航路点因雷暴扰动失效时,易连锁反应至相邻节点最终导致网络性能的显著下降。针对现有复杂网络节点重要度评估模型未有效考虑雷暴扰动的问题,面向雷暴天气场景,将雷暴扰动特性纳入航路点重要度评估体系,利用博弈论方法对评估指标进行组合赋权,基于引力模型理论改进了 TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)综合评价方法,建立基于博弈论-改进 TOPSIS 法的节点重要度评估模型,进而采用 K 中心点算法实现航路点聚类分级。以京津冀地区航班运行为例,对雷暴天气场景下的航路网络节点重要度进行评估,结果表明:在京津冀航路网络内,南部地区的航路点更易受雷暴天气影响且分布较为密集,该航路网络包含 9 个重要航路点,当航路网络中的重要航路点因雷暴影响而失效时,会对航路网络性能产生显著的负面影响。提出的基于博弈论-改进 TOPSIS 法的节点重要度评估模型可以有效识别出雷雨季节或雷暴高发地区航路网络中的重要航路点,从而为雷暴场景下航路网络结构优化与资源配置提供有效依据。

关键词 雷暴; 航路网络; 节点重要度; 博弈论-改进 TOPSIS 法; K-medoids 聚类
中图分类号 V355; 文献标志码 A

Evaluation Methods for Node Importance in Air Route Networks under Thunderstorm Weather

FU Ning¹, SONG Zi-hao^{1*}, XU Mei²

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Tianjin Meteorological Information Center, Tianjin 300300, China)

[Abstract] As the operational carrier of civil aviation transportation network, the air route network undertakes the important task of ensuring the safe and efficient operation of aircraft. When important waypoints fail due to thunderstorm disturbances, it is easy to chain reaction to adjacent nodes, ultimately leading to a significant decrease in network performance. Aiming at the problem that existing complex network node importance evaluation models do not effectively consider thunderstorm disturbances, the characteristics of thunderstorm disturbances were incorporated into the waypoint importance evaluation system for thunderstorm weather scenarios. The evaluation indicators were weighted using game theory methods, and the TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution) comprehensive evaluation method was improved based on gravity model theory. A node importance evaluation model based on game theory improved TOPSIS method was established, and the K-medoids algorithm was then used to achieve waypoint clustering and grading. Taking flight operations in the Beijing-Tianjin-Hebei region as an example, the importance of air route network nodes in thunderstorm weather scenarios was evaluated. The results show that within the Beijing-Tianjin-Hebei route network, route points in the southern region are more susceptible to thunderstorm weather and are more densely distributed. The route network contains 9 important route points. When important route points in the route network fail due to thunderstorm impact, it will have a significant negative impact on the performance of the route network. The proposed node importance evaluation model based on game theory-improved TOPSIS method can effectively identify important waypoints in the route network during thunderstorm seasons or areas with high thunderstorm incidence, providing effective basis for optimizing the route network structure and resource allocation in thunderstorm scenarios.

[Keywords] thunderstorm; route network; node importance; game theory-improved TOPSIS method; K-medoids clustering

收稿日期: 2024-08-30; 修订日期: 2025-05-12

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1600103)

第一作者: 傅宁(1978—),女,汉族,辽宁大连人,硕士,副教授。研究方向:航空气象预报和服务技术。E-mail:nfu@cauc.edu.cn。

*通信作者: 宋子豪(1999—),男,汉族,河南周口人,硕士研究生。研究方向:交通运输规划与管理。E-mail:1974913773@qq.com。

航路网络作为空中交通系统的核心运行载体,一旦网络中的重要节点遭遇扰动,不仅会大幅降低航班运行效率和安全性,还会造成旅客、机场和航空公司等多方主体不同程度的时间和经济损失。雷暴是影响航班正常运行的重要因素^[1],强雷暴天气极易导致航路网络产生明显扰动,当航路网络节点受到强雷暴影响时,会连锁反应至相邻节点,导致运行能力下降,甚至引发网络崩溃。因此,探究科学有效的雷暴天气下航路网络节点重要性评估方法,准确快速地识别出雷雨季节或雷雨高发地区的航路网络关键节点,具有重要的理论和现实意义。

目前,复杂网络节点重要性评估方法主要分为3类:网络结构分析法、系统科学分析法及多指标综合分析法^[2]。网络结构分析法利用复杂网络的结构特征属性评估节点重要性,主要评估指标包括:度中心性、紧密中心性、特征向量中心性、 K -shell分解、 H -index等^[3-8],此外有学者对部分网络结构指标加以改进,形成新的重要性评价指标,例如, Yang等^[9]提出了扩展邻域 K -shell总和指标,通过计算给定节点两阶以内邻居的 K -Shell指数之和识别重要节点; Xu等^[10]基于网络的邻域信息,提出一种综合考虑邻域拓扑、邻域节点数量和质量的邻域聚类 H -index度量指标。系统科学分析法通过研究删除节点后网络性能的变化程度评估节点重要性,其变化程度通过性能指标进行量化,主要评估指标包括最大连通子图下降率、网络效率^[11]和冗余度^[12]等。为克服单一度量方法的局限性,研究学者利用节点及网络信息,结合多属性决策方法提出了用于评价节点重要性的多指标综合分析法,主要评估方法包括:灰色关联分析、TOPSIS法、多准则妥协解排序法和层次分析法等^[13-16],此类方法提高了复杂网络节点重要性评估的准确性。

近年来,交通强国战略加速推进,航空网络作为典型的交通网络,成为当前复杂网络研究的热点。在航空网络节点重要性评估方面,目前研究大多聚焦于机场网络,对航路网络关注较少。已有的航路网络节点重要性评估研究主要有两类。一是通过研究节点中心性特征指标值大小或节点移除后网络性能变化情况判断节点的关键程度。例如,蒋一森^[17]结合紧密中心性与介数中心性对航路网络节点重要性进行评估,得到航路网络中的关键节点; Kim等^[18]分别利用度中心性、紧密中心性和介数中心性识别了东北亚航线网络中的重要节点;张轶宁等^[19]选取网络效率和聚类系数等特征指标,从脆弱性角度对蓄意扰动下的广州-珠海地区航路网络节点进行重要性评估。二是基于节点拓扑结构

及交通特性等建立综合指标体系,利用多属性决策方法综合评估节点重要性。例如, Fang等^[20]通过对航路节点中心度指标与流量指标组合加权,得到华东地区航路点重要性排序;李亚飞等^[21]在上述两种指标基础上添加改航可达性指标,并采用TOPSIS法识别了中国航路网络中的关键节点。然而,当航路网络涉及雷暴天气场景时,已有研究所构建的航路节点重要性评估体系存在局限性,无法有效评估雷雨季节或雷雨高发地区航路网络节点的重要程度,并且此类研究中多数重要性评估方法忽略了航路邻居节点间的相互影响。

据此,现提出面向雷暴天气场景的航路网络节点重要性评估方法。首先,在网络拓扑结构特性、交通特性、鲁棒性基础上融合雷暴扰动特性,构建航路节点重要性评价指标体系;其次,结合引力模型,建立基于博弈论-改进TOPSIS法的航路网络节点重要性评估模型,并利用 K -medoids算法实现雷暴天气下航路网络节点的聚类分级;以京津冀地区航班运行为例,进行航路节点重要性评估及聚类分级,并通过计算不同类别航路节点失效对航路网络性能的影响验证了航路节点重要性评估方法的有效性,以期为雷暴天气场景下航路网络的结构优化及资源配置等提供参考。

1 雷暴天气下航路网络节点重要性评估指标体系

为了更好地评估雷暴天气下的航路网络节点重要性,需要从现有信息中恰当且全面地选取评估指标,以便提高节点重要性评估结果的准确性。因此,在考虑航路网络拓扑结构特性、交通特性与鲁棒性的基础上,将雷暴扰动特性纳入节点重要性评估过程,构建了涵盖4种特性指标的节点重要性综合评估指标体系,具体评价指标及其之间的关系如图1所示。

2 雷暴天气下的航路网络节点重要性评估

在复杂网络节点重要性评估相关研究中,常采用TOPSIS法评估节点重要性。TOPSIS法是一种常用的多指标综合分析方法,能够根据节点与理想目标的接近程度对节点重要性进行排序,适用于评价指标较多的多属性决策问题。然而,传统的TOPSIS法以欧氏距离来衡量节点与理想目标的接近程度,当指标之间存在高度相关性或者指标尺度差异较大时,无法准确反映指标间的实际差异,且未考虑邻居节点信息对节点重要性的影响。因此以相

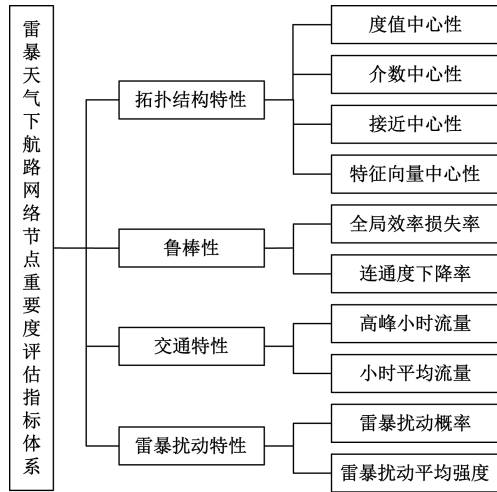


图1 雷暴天气下航路网络节点重要度评估指标体系
Fig.1 Evaluation index system for node importance in air route networks under thunderstorm weather

对熵代替欧氏距离,并引入引力模型,提出了一种基于博弈论-改进 TOPSIS 法的航路网络节点重要度评估方法,并根据重要性评估结果对雷暴天气下的航路网络节点进行聚类并实现分级,进而更加清晰直观地识别出雷雨季节或雷雨高发地区航路网络中的关键节点。

2.1 基于博弈论-改进 TOPSIS 法的航路网络节点重要度评估模型

基于博弈论-改进 TOPSIS 法的航路网络节点重要度评估模型包括三部分:一是构造初始评价矩阵并将其规范化;二是利用 CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation) 法与熵权法分别计算指标权重,基于博弈论为评价指标综合赋权;三是利用改进 TOPSIS 法计算节点重要度。评估模型主要步骤流程如图 2 所示。

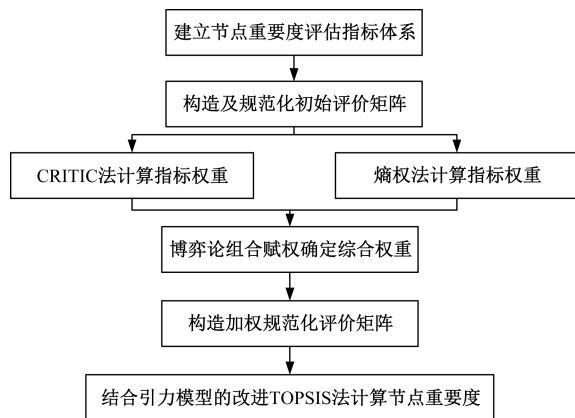


图2 基于博弈论-改进 TOPSIS 法的航路网络节点重要度评估流程

Fig.2 Process for evaluating the importance of air route network nodes based on game theory-improved TOPSIS method

2.1.1 初始评价矩阵构造及标准化

假设雷暴天气下航路网络节点重要度评估体系中,航路点数目为 N , 评估指标数目为 M , 根据航路数据、航班运行数据及雷暴数据,可构造初始评价矩阵 $X = (x_{ij})_{N \times M}$, 其中 x_{ij} 为航路点 i 第 j 项指标的值。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{11} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于指标评价体系中不同指标间量纲存在差异,为了避免量纲差异对评价结果造成影响,需要对初始评价矩阵进行标准化处理,即

$$\begin{cases} \text{效益型指标: } y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \\ \text{成本型指标: } y_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \end{cases} \quad (2)$$

标准化处理后的矩阵为 $Y = (y_{ij})_{N \times M}$ 。

2.1.2 博弈论组合赋权确定指标权重

针对复杂网络节点重要度综合评价问题,CRITIC 法及熵权法是最常用的两种客观赋权方法,其中 CRITIC 法能够综合考虑指标间的冲突性特征与对比强度,进而得到合理客观的指标权重。然而,单一的 CRITIC 无法反映各评价指标本身的离散程度,而熵权法能够有效地弥补 CRITIC 法的缺陷^[22],利用指标离散程度来确定指标权重。基于此,结合 CRITIC 法与熵权法,采用博弈论组合赋权法确定指标的综合权重,从而更加科学准确地反映评价指标的重要程度。

(1) CRITIC 法计算权重。

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{N - 1}} \quad (3)$$

$$r_{i,j} = \frac{\text{Cov}(i,j)}{\sqrt{\sigma_i \sigma_j}} \quad (4)$$

$$W_j^1 = \frac{\sigma_j \sum_{i=1}^M (1 - r_{i,j})}{\sum_{j=1}^M [\sigma_j \sum_{i=1}^M (1 - r_{i,j})]} \quad (5)$$

式中: σ_j 为各指标列标准差; \bar{y}_j 为第 j 项指标的平均值; $r_{i,j}$ 为不同指标列之间的相关系数; $\text{Cov}(i,j)$ 为第 i 项指标与第 j 项指标间的协方差; W_j^1 为由 CRITIC 法确定的第 j 项指标权重值;最终得到指标权重向量 $W_1 = (W_1^1, W_2^1, \dots, W_j^1)$ 。

(2) 熵权法计算权重。

$$e_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

$$W_j^2 = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^M (1 - e_j)} \quad (7)$$

$$P_{ij} = \frac{y_{ij} + 0.01}{\sum_{i=1}^N (y_{ij} + 0.01)} \quad (8)$$

式中: e_j 为指标 j 的信息熵; W_j^2 为由熵权法确定的第 j 项指标权重值; 最终得到指标权重向量 $W_2 = (W_1^2, W_2^2, \dots, W_M^2)$ 。

(3) 博弈论组合赋权。博弈论组合赋权法能够兼顾不同赋权方法的优势, 从而得到更加合理的指标综合权重。组合赋权步骤如下。

步骤 1 根据两种赋权方法得到的权重向量, 构造组合权重, 计算公式为

$$W = \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T \quad (9)$$

式(8)中: α_1, α_2 分别为 CRITIC 法与熵权法的线性组合系数。

步骤 2 根据矩阵微分性质, 变换式(8)为一阶导数情况下的线性方程组, 即

$$\begin{bmatrix} W_1 W_1^T & W_1 W_2^T \\ W_2 W_1^T & W_2 W_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 W_1^T \\ W_2 W_2^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

步骤 3 求解 α_1, α_2 , 并将其归一化处理, 得到 α'_1, α'_2 , 计算公式为

$$\begin{cases} \alpha'_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \\ \alpha'_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \end{cases} \quad (11)$$

步骤 4 确定综合权重, 计算公式为

$$W' = \alpha'_1 W_1^T + \alpha'_2 W_2^T \quad (12)$$

最终得到指标权重向量 $W' = (w_1, w_2, \dots, w_M)$ 。

2.1.3 基于改进 TOPSIS 法评估节点重要度

根据博弈论组合赋权法所确定的指标权重, 结合改进 TOPSIS 法, 构建雷暴天气下的航路网络节点重要度评估模型, 具体步骤如下。

步骤 1 构造加权决策矩阵。根据得到的指标综合权重, 对标准化矩阵进行加权处理, 构造加权标准化矩阵 S , 计算公式为

$$S = (s_{ij})_{N \times M} = (y_{ij} w_j) \quad (13)$$

式(13)中: s_{ij} 为加权处理后航路点 i 的第 j 项指标值。

步骤 2 确定正、负理想解。根据加权标准化矩阵中指标列最大值与最小值, 确定正理想解 S^+ 与负理想解 S^- , 计算公式为

$$\begin{cases} S^+ = \max_{i \in \{1, 2, \dots, N\}} (s_{ij}) = \{s_1^+, s_2^+, \dots, s_M^+\} \\ S^- = \min_{i \in \{1, 2, \dots, N\}} (s_{ij}) = \{s_1^-, s_2^-, \dots, s_M^-\} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: s_j^+ 为第 j 列指标中的最大值; s_j^- 为第 j 列指标中的最小值。

步骤 3 计算各航路点与正、负理想解的相对熵。利用相对熵计算各航路点与正、负理想解的接近程度, 计算公式为

$$\begin{cases} R_i^+ = \sum_{j=1}^M \left[s_j^+ \log_2 \left(\frac{s_{ij}^+}{s_j^+} \right) + (1 - s_j^+) \log_2 \left(\frac{1 - s_{ij}^+}{1 - s_j^+} \right) \right] \\ R_i^- = \sum_{j=1}^M \left[s_j^- \log_2 \left(\frac{s_{ij}^-}{s_j^-} \right) + (1 - s_j^-) \log_2 \left(\frac{1 - s_{ij}^-}{1 - s_j^-} \right) \right] \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: R_i^+ 为航路点 i 与正理想解的相对熵, R_i^- 为航路点 i 与负理想解的相对熵。

步骤 4 计算航路点的相对贴近度。根据航路点与正、负理想解的相对熵, 计算航路点的相对贴近度, 计算公式为

$$T_i = \frac{R_i^-}{R_i^+ + R_i^-} \quad (16)$$

式(16)中: T_i 为航路点 i 的相对贴近度。

步骤 5 确定航路点的综合重要度。考虑到邻近航路点间的相互作用, 在以上步骤的基础上引入引力模型, 将航路点的相对贴近度看作其质量, 两个航路点间的最短路径长度看作两点间的距离, 从而确定航路点的综合重要度, 计算公式为

$$G(i) = \sum_{j \in \varphi_i} \frac{T_i T_j}{d_{ij}^2} \quad (17)$$

式(17)中: $G(i)$ 为航路点 i 的综合重要度; φ_i 为与航路点 i 的距离 \leq 设定值 r (通常取值为网络平均路径长度的 1/2) 的相邻节点集合; T_i 与 T_j 分别为航路点 i 与航路点 j 的相对贴近度; d_{ij}^2 为航路点 i 与航路点 j 的距离。

2.2 基于 K-medoids 算法的航路节点聚类

为更准确直观地识别雷暴天气下的关键航路节点, 引入 K-medoids 算法对航路网络中的所有节点进行聚类分析。K-medoids 是一种基于 K-means 的新型聚类算法, 其弥补了 K-means 算法聚类结果易受异常值影响的缺陷。该算法的基本思想为: 将给定数据点划分为不同的点簇, 使得各数据点到其所属的簇中心点的距离之和最小。对于给定数据点集合 $V = (v_1, v_2, \dots, v_N)$, K-medoids 聚类步骤如下。

(1) 计算不同聚类数目下的簇内聚度和簇间分离度, 采用手肘法与轮廓系数法确定最佳聚类数目 K , 即最佳点簇个数。计算公式为

$$SSE = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m_i} d^2(x_{jm_i}, x_{0 m_i}) \quad (18)$$

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (19)$$

式中:SSE 为误差平方和(用于度量簇的内聚度); m 为聚类数目; m_i 为第 i 簇中的数据点个数; x_{jm_i} 为第 i 簇中的第 j 个数据点; x_{0m_i} 为第 i 簇中的簇中心点; $S(i)$ 为轮廓系数(用于度量簇间分离度); $a(i)$ 为数据点 i 和簇内其他数据点的平均距离; $b(i)$ 为数据点 i 和最近邻簇内数据点的平均距离。

(2)从给定数据点集合 V 中随机选择 K 个数据点作为初始的簇中心点,其集合为 $V_1 = (v_1^1, v_2^1, \dots, v_k^1)$, 剩余非中心点的数据点集合为 $V_2 = (v_1^2, v_2^2, \dots, v_{N-K}^2)$ 。

(3)计算其余 $N - K$ 个数据点到各个中心点的距离,根据距离大小将其余 $N - K$ 个数据点到分配到距其最近的中心点所在簇。计算公式为

$$\text{disp}(v_i^2, v_j^1) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N-K} \sum_{j=1}^K (v_i^2 - v_j^1)^2} \quad (20)$$

式(20)中: $\text{disp}(v_i^2, v_j^1)$ 为数据点 v_i^2 与中心点 v_j^1 间的距离。

(4)在每一簇中,计算每个数据点与其他点距离之和,选取距离之和最小的点作为新的簇中心点。

(5)重复步骤(3)与步骤(4),直至中心点不再改变或达到最大迭代次数,得到聚类结果。

3 实例分析

3.1 航路网络构建及数据获取

使用京津冀地区航班运行数据进行实例分析。绘制京津冀地区航路网络拓扑结构,如图 3 所示。利用华北地区 2023 年 8 月的航班运行数据,统计后得到各航路点的流量信息。使用 2018—2023 年京津冀地区自动站数据,对该地区 6 年来雷暴天气下各航路点的受扰情况进行统计分析,航路点受扰概率情况如图 4 所示,航路点符号大小反映了其受雷暴天气影响的概率,可见,在京津冀航路网络中,南部地区航路点受雷暴天气影响的概率明显高于北部地区,且该区域航路点分布较为密集。

3.2 雷暴天气下航路网络节点重要度评估

根据所构建的航路网络与获取的数据,得到所有航路点各评价指标值,从而形成雷暴天气下的航路点重要度评估问题的初始评价矩阵 X 。由各评价指标定义可知,所有指标均为效益型指标,故应用式(2)对初始评价矩阵进行标准化处理,得到标准化评价矩阵 Y 。

通过 CRITIC 法与熵权法分别计算各指标权重值,基于博弈论思想,将两种权重看作博弈双方,形成优势互补的最终组合权重,如表 1 所示,其中最

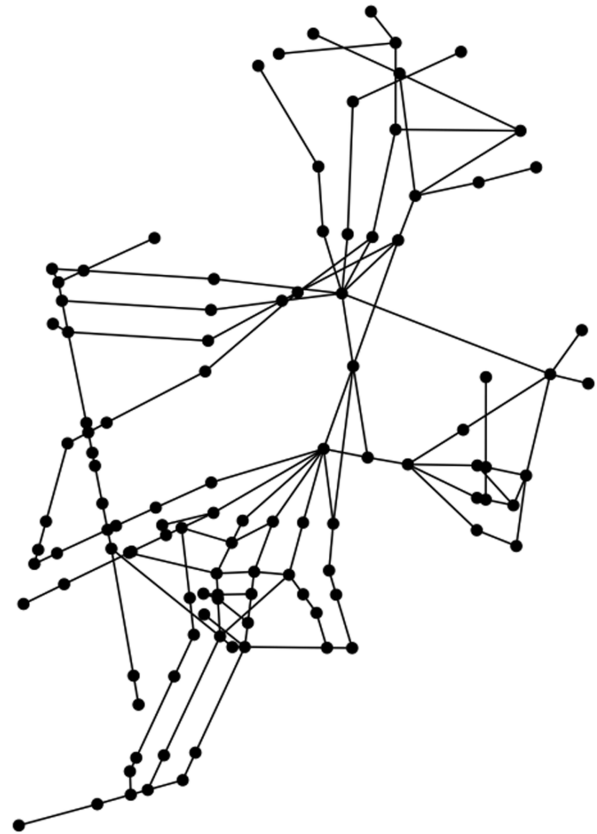


图 3 京津冀地区航路网络拓扑结构

Fig. 3 Topological structure of air route network in Beijing Tianjin Hebei Region

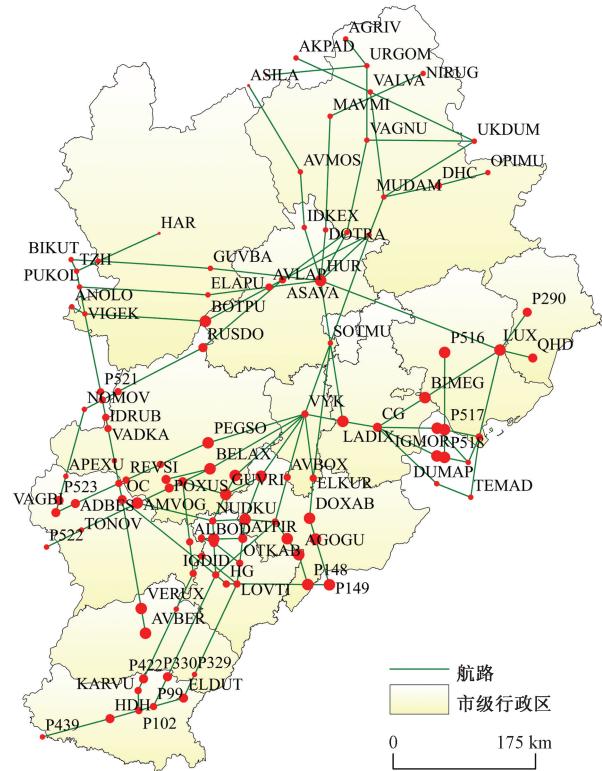


图 4 航路点受扰概率情况

Fig. 4 Probability of disturbance to air route nodes

表1 节点重要度指标权重

Table 1 Node importance index weight

指标	CRITIC 法权重	熵权法权重	组合权重
度中心性	0.078 2	0.079 9	0.079 3
介数中心性	0.090 8	0.029 0	0.050 6
接近中心性	0.066 0	0.167 4	0.131 9
特征向量中心性	0.092 9	0.184 3	0.152 3
全局效率损失率	0.061 9	0.108 7	0.092 3
连通度下降率	0.059 6	0.087 3	0.077 6
高峰小时流量	0.131 0	0.126 8	0.128 3
平均小时流量	0.118 1	0.169 9	0.151 8
雷暴扰动概率	0.141 0	0.017 6	0.060 8
雷暴扰动平均强度	0.160 5	0.029 1	0.075 1

优组合权重系数分别为 0.349 9 和 0.650 1。可以看出,由于 CRITIC 法与熵权法侧重不同,两种方法所得权重结果存在一定差异,其中尤以雷暴扰动概率与雷暴扰动平均强度两项指标最为突出,而博弈论组合赋权方法有效平衡了不同赋权方法间计算结果的偏差,得到的组合权重介于两种权重之间,最大程度克服了单一赋权方法的片面性。从指标权重角度分析,权重值较大的指标有特征向量中心性(0.152 3)、平均小时流量(0.151 8)、接近中心性(0.131 9)、高峰小时流量(0.128 3),说明航路点的网络结构特性与交通特性对节点重要度评估结果影响较大。根据航路网络实际运行情况可知,航路点的重要程度主要取决于航路点在网络中的位置优势及其实际交通价值(即流量),因此在航路点重要度评估问题中,节点的网络结构特性与交通特性是至关重要的影响因素,这与组合权重结果一致,体现了博弈论组合赋权的合理性。

结合各指标组合权重,根据 2.1 节设计的改进 TOPSIS 法,应用式(13)~式(17),计算得到雷暴天气下航路节点的重要度排序情况,由于航路网络中节点数目较多,仅列出综合重要度排名前 25 的航路点,如表 2 所示,其中航路点 VYK、SOTMU 和 HUR 是京津冀航路网络中最重要节点,三者的综合重要度值均大于 2。结合初始评价数据可知,综合重要度排名靠前的航路点往往有着较大的中心性与航班流量。

3.3 基于 K-medoids 聚类的航路节点分类

为了方便民航从业人员更加直观地判断雷暴天气下航路网络中的关键节点,根据航路点综合重要度值,使用 K-medoids 聚类算法进行重要程度等级划分。应用式(18)~式(19),计算不同聚类数目对应的误差平方和 SSE 与轮廓系数,如图 5 所示。

表2 雷暴天气下航路网络节点重要度排名(前 25)

Table 2 Ranking of importance of air route network nodes under thunderstorm weather(Top 25)

航路点序号	航路点名称	综合重要度	排名
5	VYK	2.624 5	1
2	SOTMU	2.235 5	2
1	HUR	2.064 5	3
3	LADIX	1.435 0	4
22	BELAX	0.895 2	5
4	CG	0.877 2	6
7	BUMDU	0.858 0	7
18	ELKUR	0.703 8	8
19	AVBOX	0.698 0	9
20	OMDEK	0.520 7	10
25	TEKIL	0.492 1	11
6	PEGSO	0.437 9	12
13	GUVBA	0.411 9	13
26	GUVRI	0.390 9	14
81	LUX	0.375 8	15
32	ATPIR	0.359 5	16
29	BONLU	0.326 2	17
9	DOTRA	0.322 4	18
8	OSUBA	0.319 9	19
12	AVLAP	0.300 4	20
21	DUGEB	0.279 9	21
31	BEKDO	0.266 8	22
45	LEBUN	0.266 7	23
11	ASAVA	0.259 7	24
35	OC	0.241 3	25

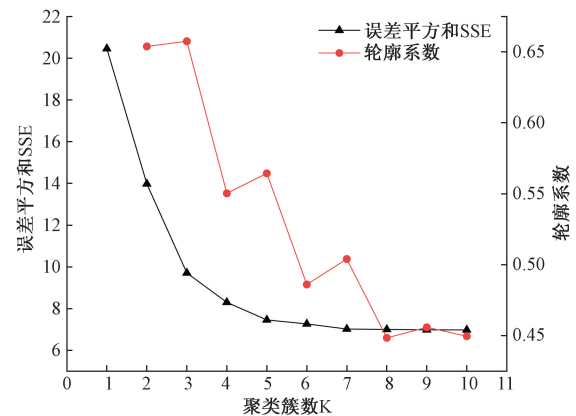


图5 手肘图

Fig. 5 Elbow diagram

由图 5 可知,误差平方和曲线在 $K = 3$ 处斜率变化最大,依照手肘法原理确定“肘点”为 3,同时在该点处轮廓系数最大,即当聚类数目为 3 时,簇的内聚度和分离度达到最优。因此,选取 $K = 3$ 对雷暴天气下的航路点重要度进行聚类分析。根据 2.2 节中 K-medoids 算法步骤,得到航路点重要度最终聚类结果,如图 6 所示。

聚类结果显示,K-medoids 算法基于节点综合重要度将雷暴天气下的航路点分为 3 类:重要航路点

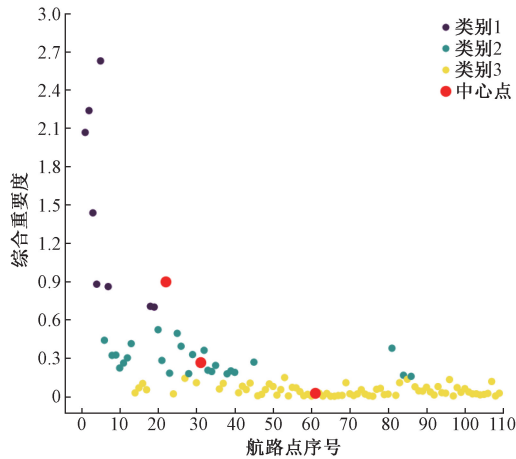


图6 航路节点聚类结果

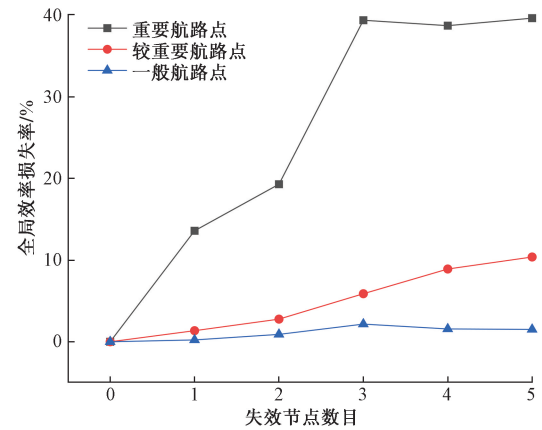
Fig. 6 Clustering results of air route nodes

(类别1)、较重要航路点(类别2)和一般航路点(类别3),3类航路点数量依次为9、26和74。此外,图中红色点代表3类航路点簇的簇中心点,其航路点序号依次为22(BELAX)、31(BEKDO)、61(DHC)。在3类航路点中,重要航路点数量较少,仅有9个,按照重要度排序依次为VYK、SOTMU、HUR、LADIX、BELAX、CG、BUMDU、ELKUR、AVBOX,并且此类航路点综合重要度显著高于其余两类航路点,说明在京津冀地区航路网络中,少数航路点对网络的整体稳定和效率具有决定性影响。

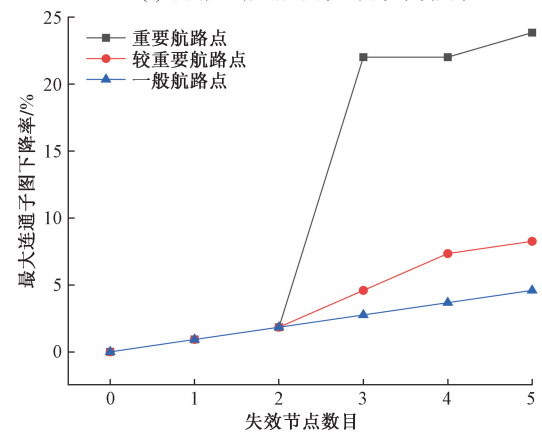
3.4 不同类别节点失效对航路网络的影响

为了科学评估雷暴天气下不同类别的航路点失效对航路网络运行的影响,以全局效率损失率与最大连通子图下降率为关键衡量指标,选取各类中综合重要度排名前五的节点,探讨了不同类别航路点因雷暴天气而失效时航路网络的性能变化情况,如图7所示。

由图7可以看出,重要航路点的失效对航路网络性能产生了显著的负面影响。在图7(a)中,随着失效节点数目的增加,各类航路点的全局效率损失率呈现上升趋势,当失效节点数目达到5时,重要航路点的全局效率损失率达到了39.64%,而其余两类航路点全局效率损失率仅有10.38%和1.51%。在图7(b)中,当受雷暴天气影响而失效的航路点数目较少时,3类航路点的最大连通子图下降率保持一致,但随着失效节点数目的增加,重要航路点的最大连通子图下降率显著高于其余两类航路点,这是由于重要航路点的失效会导致网络中出现较多孤立节点,进而导致航路网络连通性大幅下降。综合两图分析,重要航路点对航路网络的稳定性和效率至关重要,相比之下,较重要航路点和一般航路点的失效虽然对航路网络性能有一定影响,但其影



(a) 不同类型航路点失效全局效率损失率



(b) 不同类别航路点失效最大连通子图下降率

图7 不同类别航路点失效网络性能变化情况

Fig. 7 Performance changes in air route network following the failure of different categories of nodes

响程度相对较小。因此,在航路网络管理和维护策略中,应优先考虑保护和优化那些对网络性能有重大影响的重要航路点,而对于较重要航路点和一般航路点,仅需要进行适度的管理和监控,以确保网络的稳定性和可靠性。此外,为了提高航路网络的抗风险能力,可在网络中引入冗余设计。

4 结论

针对雷暴天气场景下航路网络重要节点难以有效识别的问题,构建了一套考虑雷暴扰动概率和扰动平均强度的雷暴天气场景下航路节点重要度评估指标体系,结合引力模型理论,建立一种基于博弈论-改进TOPSIS法的航路网络节点重要度评估模型,并采用K-medoids算法实现航路节点聚类分级。以京津冀航路网络为例展开分析,开展雷暴场景下的航路网络节点重要度评估方法验证,得到以下结论。

(1)在京津冀航路网络中,南部地区航路点受雷暴天气影响的概率明显高于北部地区,且该区域航路点分布较为密集。

(2)航路点 VYK、SOTMU 和 HUR 是雷暴天气场景下京津冀航路网络中最重要节点,三者在网络中均有着显著的位置优势及实际交通价值。

(3)根据 *K-medoids* 聚类分析结果,京津冀地区航路网络包括 9 个重要航路点、26 个较重要航路点及 74 个一般航路点。当航路网络中的重要航路点因雷暴影响而失效时,会对航路网络性能产生显著的负面影响,相比之下,较重要航路点和一般航路点的失效虽然会导致网络性能下降,但其影响程度相对较小。

本文建立的面向雷暴天气场景的航路网络节点重要度评估模型,能够有效识别雷雨季节或雷雨高发地区航路网络中的重要航路点,有利于合理优化雷暴天气场景下的航路网络结构及资源配置,保障航空器在航路网络中的安全高效运行。

参 考 文 献

- [1] 中国民用航空局. 2023 年民航行业发展统计公报[M]. 北京: 中国民用航空局, 2024.
Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin of civil aviation industry development in 2023[M]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2024.
- [2] 贺僚僚. 道路交通网络关键路段识别与保护策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
He Liaoliao. Research on identification of critical links and protection strategy of road traffic networks[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [3] 任晓龙, 吕琳媛. 网络重要节点排序方法综述[J]. 科学通报, 2014, 59(13): 1175-1197.
Ren Xiaolong, Lü Linyuan. Review of ranking nodes in complex networks[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(13): 1175-1197.
- [4] 郭程远, 陈鸿昶, 王庚润, 等. 复杂网络节点重要性排序算法及应用综述[J]. 信息工程大学学报, 2021, 22(3): 313-320, 358.
Guo Chengyuan, Chen Hongchang, Wang Gengrun, et al. Node importance ranking based on complex network[J]. Journal of Information Engineering University, 2021, 22(3): 313-320, 358.
- [5] 王鑫楷. 复杂网络相对重要节点识别方法研究[D]. 昆明: 云南大学, 2022.
Wang Xinkai. Research on recognition method of relatively important nodes in complex networks[D]. Kunming: Yunnan University, 2022.
- [6] 武澎, 王恒山. 基于特征向量中心性的社交信息超网络中重要节点的评判[J]. 情报理论与实践, 2014, 37(5): 107-113.
Wu Peng, Wang Hengshan. Evaluation of key nodes of social information super-network based on eigenvector centrality[J]. Information Studies: Theory & Application, 2014, 37(5): 107-113.
- [7] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nature Physics, 2010, 6(11): 888-893.
- [8] Lu L, Zhou T, Zhang Q, et al. The H-index of a network node and its relation to degree and coreness[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 10168.
- [9] Yang F, Zhang R, Yang Z, et al. Identifying the most influential spreaders in complex networks by an extended local K-Shell sum[J]. International Journal of Modern Physics C, 2017, 28(1): 925-214.
- [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] 张诗琪, 李琰, 徐天奇. 基于信息熵的电力信息耦合网络重要节点评估[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 7042-7049.
Zhang Shiqi, Li Yan, Xu Tianqi. Evaluation of important nodes in power information coupling network based on information entropy[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 7042-7049.
- [12] 王梓行, 姜大立, 漆磊, 等. 基于冗余度的复杂网络抗毁性及节点重要度评估模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2020, 17(3): 78-85.
Wang Zihang, Jiang Dali, Qi Lei, et al. Complex network invulnerability and node importance evaluation model based on redundancy[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2020, 17(3): 78-85.
- [13] 张琨, 沈海波, 张宏, 等. 基于灰色关联分析的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(4): 579-586.
Zhang Kun, Shen Haibo, Zhang Hong, et al. Synthesis evaluation method for node importance in complex networks based on grey relational analysis[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(4): 579-586.
- [14] 汪江鹏, 杨萍. 基于网络结构和功能属性的作战体系网络重要节点识别[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(7): 121-127.
Wang Jiangpeng, Yang Ping. Identification of important nodes in combat system of systems network based on network structure and function attributes[J]. Fire Control and Command Control, 2024, 49(7): 121-127.
- [15] 刘欣, 徐桂琼, 杨平乐. 基于组合赋权 VIKOR 方法的网络节点重要性评价[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(8): 2368-2371, 2377.
Liu Xin, Xu Guiqiong, Yang Ping. Node importance evaluating of network based on combination weighting VIKOR method[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(8): 2368-2371, 2377.
- [16] 薛浩, 袁逸萍, 李晓娟, 等. 基于网络特性的产品制造过程节点重要度评估[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(5): 196-201.
Xue Hao, Yuan Yiping, Li Xiaojuan, et al. Evaluation of node importance of product manufacturing[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(5): 196-201.
- [17] 蒋一森. 基于结构中心性的航路网络关键节点识别[J]. 计算机与现代化, 2018(7): 108-113.
Jiang Yisen. Key node identification of navigation network based on structural centrality[J]. Computer and Modernization, 2018(7): 108-113.
- [18] Kim S, Yoon Y. On node criticality of the Northeast Asian air route network[J]. Journal of Air Transport Management, 2019,

80: 1-10.

- [19] 张轶宁, 田文, 李宇宸, 等. 航路网络关键脆弱节点分析方法[J]. 航空计算技术, 2024, 54(3): 91-95.
Zhang Yining, Tian Wen, Li Yuchen, et al. Analysis method of key vulnerable nodes in en-route network[J]. Aeronautical Computing Technique, 2024, 54(3): 91-95.
- [20] Fang Q, Tian W, Zhou X F, et al. Evaluation of air route network congestion based on node importance[C]//Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference(ICNS). New York; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022: 1-9.
- [21] 李亚飞, 梁琛. 基于 TOPSIS 融合法的航路网关键节点识别及抗毁性研究[J]. 飞行力学, 2022, 40(6): 83-87.
Li Yafei, Liang Chen. Research on key node identification and damage resistance of airway network based on TOPSIS fusion method[J]. Flight Dynamics, 2022, 40(6): 83-87.
- [22] Malekinezhad H, Sepehri M, Pham Q B, et al. Application of entropy weighting method for urban flood hazard mapping[J]. Acta Geophysica, 2021, 69(3): 841-854.