

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0203

机场飞行区多层异质链序风险传播模型研究

吴维^{1,2,*}, 吴泽萱¹, 王兴隆¹

(1. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 为探究机场飞行区风险发生机制及风险传播特性, 增强机场飞行区安全管控能力, 采用复杂网络理论, 依据风险致因间的因果链序关系, 构建多层异质网络风险传播模型。采用多层次因果图 (AcciMap) 理论分析机场飞行区运行风险传播的致因链; 基于风险致因特征构建3层异质风险传播网络并根据网络特征设计概率-触发传播模型、容量-阻抗传播模型、容量-负荷传播模型; 利用复杂网络理论设计风险传播评价指标, 对风险网络传播特征进行分析。结果表明: 多层风险网络中节点风险传播能力与节点度弱相关, 节点风险灵敏指数可提升风险节点排序准确性; 对风险灵敏指数排序前15%的节点进行风险控制, 可有效降低风险扩散近32%; 网络风险传播结构存在高连通和松散状态, 对风险扩散指数排序前15%的节点进行控制, 可以有效降低网络结构鲁棒性指数使风险网络结构由高连通进入到松散状态; 所建模型可有效识别风险扩散过程并进行精准控制, 以提升机场飞行区风险控制水平。

关键词: 航空运输; 机场运行; 复杂网络; 风险传播; 控制策略

中图分类号: U8; V355.2

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2024)07-2225-12

随着机场航班量的不断增长和机场地面运行环境的日益复杂, 机场飞行区不安全事件持续增加。由于机场飞行区航空器与机场保障车辆密度大、作用种类多, 极易出现航空器滑行冲突、地面剐蹭、跑道侵入和滑行路线错误等不安全事件, 造成飞行区运行性能急剧下降, 航班正常性降低、运输量减少, 给旅客、机场和航空公司都带来较大损失。为此, 很多学者针对机场飞行区安全问题开展了相关研究。

风险评估方面的研究。Shyur^[1]和Stamatelatos^[2]利用贝叶斯网络研究飞行区设备出现故障的概率, 通过故障树建模来进行概率风险评估; Tamasi和Demichela^[3]考虑了飞行区事件的脆弱性构建危险分类, 以定性和定量的方式对航空安全进行风险评估; 孙殿阁等^[4]将Bow-tie技术应用于民用机场进行安全风险评估; 倪晓梅等^[5]提出基于卷积神经网络

(convolutional neural network, CNN)的民航风险评估模型以对文本格式的事件概要进行充分挖掘; 陈芳等^[6]提出基于毕达哥拉斯模糊、试验与评估实验室、贝叶斯网络和模糊损失率的管制单位动态风险评估模型。

多风险演变与耦合方面的研究。Saumell-Mendiola等^[7]采用异质平均场方法研究了耦合网络中风险易感后的恢复问题; 张仕杰等^[8]基于复杂网络理论提出列车辅助驾驶系统危险致因传播模型; Parshani等^[9]研究在完全依存型多层网络中随机攻击的情况下的网络结构风险变化趋势; 肖琴等^[10]构建了基于尖点突变理论的风险耦合模型, 分析飞行签派员人因差错风险。

机场运行风险方面的研究。夏正洪等^[11]分析了机场热点时空分布特征并研究了地面运行风险; 武喜萍等^[12]研究了空中交通网络抗毁性与延误传

收稿日期: 2023-04-24; 录用日期: 2023-06-16; 网络出版时间: 2023-07-04 16:18

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230704.1137.001

基金项目: 天津市应用基础多元投入基金面上项目(21JCYBJC00700); 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122025098)

*通信作者. E-mail: wuw@cauc.edu.cn

引用格式: 吴维, 吴泽萱, 王兴隆. 机场飞行区多层异质链序风险传播模型研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(7): 2225-2236.

WU W, WU Z X, WANG X L. Research on multi-layer heterogeneous chain sequence risk propagation model in airport movement area[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(7): 2225-2236 (in Chinese).

播特征;王兴隆等^[13]建立了空中交通相依网络模型,分析其脆弱性表现规律;吴维等^[14]建立跑道侵入风险事件风控网络模型,从多因素作用对跑道侵入风险控制脆弱性进行动态推演分析;Wu和Law^[15]综合考虑多种因素利用贝叶斯网络模型构建了机场延误传播网络。

构建多层网络传播风险方面的研究。王岩韬和刘毓^[16]利用传染病(susceptible, infected, and recovered, SIR)模型结合多层网络,对航班运行风险演变、风险扩散进行分析;冯芬玲等^[17]针对多层复杂网络问题采用改进优劣解距离(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)方法识别风险关键节点;孙兴龙等^[18]综合路径的权重和网络整体价值提出一种改进的融合算法,对多层网络进行评估;孙娟等^[19]严格推导出三层、多层的单向耦合星形网络的特征值谱,得出了层数对多层网络同步能力至关重要的结论;Tang等^[20]探讨了节点动力学参数的不断变化对不同耦合强度复杂动力网络拓扑识别的影响;冯慧琳等^[21]分析了资源配置对机场航班延误及运行效率的影响。

综上所述,机场飞行区运行风险具有类型多样、致因多源、影响多态的特征,目前对网络风险的研究主要集中在多层单一风险传播方面,鲜有针对飞行区多层异质网络的风险耦合一体建模,未能全面刻画运行风险的异质传播规律。基于此,在上述研究基础上,结合机场飞行区运行风险致因多源、影响多态所带来的风险异质性传播问题,本文构建了多层异质网络风险传播模型。按照飞行区风险传播的致因链及不同致因要素的异质性,将机场飞行区运行风险传播模型分为3层,包括设备与环境层,设计以设备为主体的风险概率触发传播模型;指挥与决策层,设计以人为主导的容量-阻抗风险传播模型;运行与执行层,设计以航空器等为主体的容量-负荷传播模型,并结合复杂网络理论构建了3类指标对风险传播进行评价,为精准、精细刻画机场飞行区运行风险传播并实施控制提供支撑。

1 基于 AcciMap 识别风险事件致因

根据美国联邦航空局(Federal Aeronautics Administration, FAA)和中国民航局网站发布面板数据,选取236个机场飞行区运行不安全事件数据作为样本,对事件进行文本分析,同时参照《大型民用运输机场运行安全保障能力综合评价管理办法》^[22]中的不安全事件指标样例,按照多层次因果图(accident analyse mapping, AcciMap)提取完整的事故致因

链。AcciMap可以有效分析风险事件致因关系,从风险演变过程、人员活动、设备与环境等多维度探究风险形成的深层次原因。从数据统计看,机场飞行区不安全事件主要包括航空器刮蹭、航空器滑行冲突、滑行错误、保障车辆刮蹭、跑道侵入、冲出跑道、鸟击、外来物入侵等有后果事件,还包括航空器未按规定执行指令、停错机位、超速等无后果事件。

采用 AcciMap 方法的主要流程包括:①根据风险致因之间属性类别与时间逻辑顺序建立层次结构图,将识别的致因要素记录其中;②基于因果逻辑关系对每个致因要素进行回溯,建立致因关系表;③按照建立的致因关系所对应的因果链构建致因网络;④按照系统论理论对致因间关系的逻辑性、完整性进行完善,确定最终网络。

基于机场飞行区运行风险事件,利用 AcciMap 的结构模型并根据风险致因的主体、属性类别、风险传播特点和逻辑顺序,将风险事件致因分为4层。

管理与监督层 A1。管理与监督层 A1 运行风险事件包含规章制度健全程度 d1、监督检查落实程度 d2 和管理机制科学程度 d3。

设备与环境层 A2。设备与环境层 A2 运行风险事件包含维修不及时 c1、电磁干扰 c2、能源供给故障 c3、监视设备故障 c4、监视设备失效 c5、通信设备不稳定 c6、通信设备故障 c7、通信延迟 c8、自动化设备失效 c9、无监视信息 c10、关键监视信息缺失 c11、通信质量下降 c12、通信中断 c13 和自动化辅助功能失效 c14。

指挥与决策层 A3。指挥与决策层 A3 运行风险事件包含调配冲突指令不合理 b1、排序指令不合理 b2、工作流程指令不合理 b3、信息通报指令不合理 b4、纠正后的调配冲突指令 b5、纠正后的排序指令 b6、纠正后的工作流程指令 b7、纠正后的信息通报指令 b8、疲劳程度高 b9、繁忙程度高 b10、工作经验不足 b11、双岗制人员工作年限 b12、双岗制人员工作负荷 b13、双岗制人员工作时长 b14、双岗制工作状态 b15、飞行员工作年限 b16、飞行员工作负荷 b17、飞行员工作时长 b18 和飞行员工作状态 b19。

运行与执行层 A4。运行与执行层 A4 运行风险事件包含地面上航空器间小于规定安全间隔 a1、地面上航空器与障碍物小于规定安全间隔 a2、地面车辆未按规定运行 a3、跑道侵入 a4、地面人员未及时执行指令 a5、航空器机坪刮蹭 a6、车辆、设备人员刮蹭 a7、车辆与航空器运行冲突 a8、航空器

间发生碰撞 a9、滑行冲突 a10、活动区存在障碍物 a11 和外来物损伤航空器 a12。

构建的机场飞行区风险事件 AcciMap 层次结构如图 1 所示, 图中节点表示可能导致风险事件的原因或致因, 边表示 2 个节点之间可能存在的因果

关系或依赖关系, 如航空器间隔小于规定间隔可引起航空器间运行冲突, 航空器间运行冲突可导致机坪航空器间刮蹭等。通过分析事件与逻辑推理获取致因节点与连边, 并通过历史事件数据对网络进行完善。

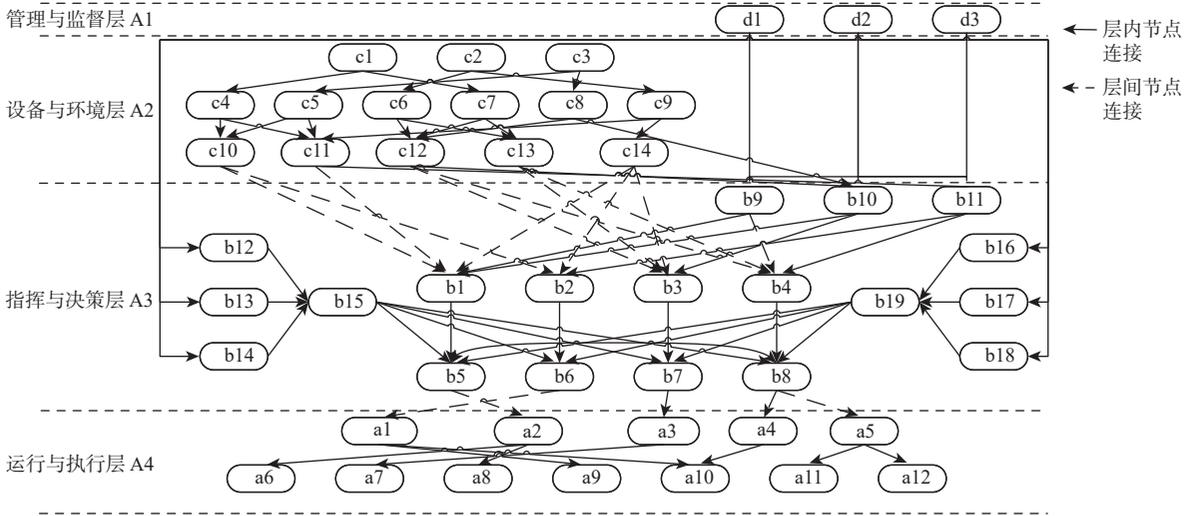


图 1 机场飞行区风险事件 AcciMap 结构模型

Fig. 1 AcciMap structural model for analyzing risk events in airport movement area

2 构建多层异质网络

由 AcciMap 方法构建风险网络在风险传递过程中存在明显的异质性和时序性, 为此, 根据构建 AcciMap 层次结构特征和风险转化过程, 将 4 层网络聚合组成 3 层相依网络。因果链第 1 层为设备与环境层, 该层由设备、环境和管理等因素构成, 风险传播的最大特征是随机性强具有明显概率性质, 体现为触发-发生的概率传播; 第 2 层为指挥与决策层, 该层在获取足够信息后, 由管制员、运行指挥

员、巡查员等决策主体构成, 由于该层以人为主导在风险形成和传播过程中存在一定包容性且采取冗余设置方式, 因此其对前序节点风险传播具有一定阻抗作用, 体现为负荷-阻抗-超容-发生的传递模式; 第 3 层为运行与执行层, 主要由航空器、保障车辆、作业人员、预警装置等组成, 该层主要是执行指令并有一定容错能力, 风险传播体现为负荷-超容-发生的传递模式。基于此构建的机场飞行区具有异质、时序、多层的链式传播的风险传播网络, 如图 2 所示。

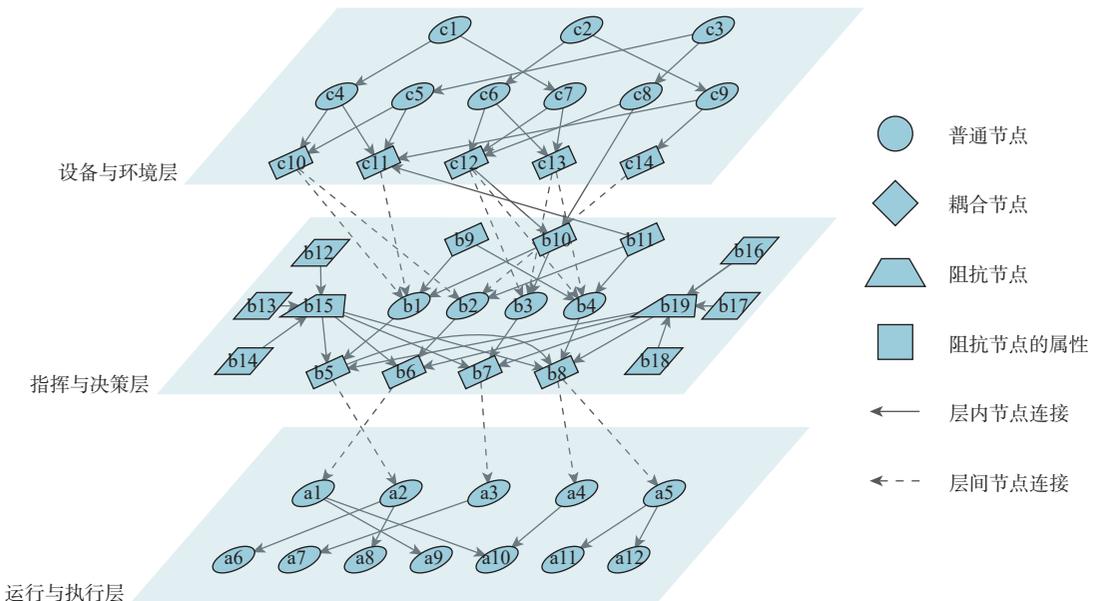


图 2 多层链序风险传播网络

Fig. 2 Multilayered network for cascade risk propagation

图2中的风险传播网络为 $G=(V, E)$,该网络包括A、B、C这3层,其中A层为设备与环境层,B层为指挥与决策层,C层为运行与执行层, V 为3层网络中所有的节点集合, E 为3层网络中节点间有风险传播连边集合。由于风险传播过程具有强的因果性,因此,连边为有向边,根据节点间连边关系构建节点风险传播的邻接矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} V_{m \times m}^A & V_{m \times n}^{AB} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & V_{n \times n}^B & V_{n \times k}^{BC} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{k \times k}^C \end{bmatrix} = [a_{ij}]_{(m+n+k) \times (m+n+k)} \quad (1)$$

式中: m 、 n 、 k 分别为A、B、C这3层网络中的节点数; $V_{m \times m}^A$ 、 $V_{n \times n}^B$ 、 $V_{k \times k}^C$ 分别为A、B、C这3层网络的邻接矩阵, $V_{m \times n}^{AB}$ 、 $V_{n \times k}^{BC}$ 分别为AB层、BC层间耦合节点的邻接矩阵; a_{ij} 表示节点 i 和节点 j 是否有风险传播关系,如果边 E_{ij} 有风险传播关系则 a_{ij} 为1,否则为0。

3 基于网络特征的风险传播模型

由于A、B、C这3层网络在风险传播过程中具有迥异的传播特征,为有效描述风险在不同层间的传播过程,构建了以下3层网络的风险传播模型。

3.1 设备与环境层风险传播模型

该层主要风险源来自于设备运行情况,以及由设备产生的风险。设备运行质量、可靠性下降会造成相应功能的缺失产生潜在风险,但设备故障以及故障后风险传递具有一定的随机性,为此,该层风险传播为概率传播模型,即风险节点 i 以一定概率感染节点 j ,使得节点 j 状态发生改变。记 $S_i^A(t)$ 为A层节点 i 在 t 时刻风险状态为

$$S_i^A(t) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_i^A(t)$ 值为0表示节点状态安全, $S_i^A(t)$ 值为1表示节点状态危险; $i \in [1, m]$ 。

可知节点 i 的邻居节点 j 在 $t+1$ 时刻风险状态由节点本身状态 $S_j^A(t)$ 和 $S_i^A(t)$ 决定。为此,要定义节点 i 向节点 j 风险传播概率。节点是否被传染成风险节点受节点自身的抗风险能力影响,为此,应根据飞行区运行对设备、人员、管理制度等方面的投入情况设置致因节点的抗风险能力,如采取冗余设置、增加培训等都会增强节点的抗风险能力,节点受邻居节点风险传播就由节点在所有邻居节点抗风险能力决定。A层内风险节点 i 向节点 j 风险传播概率 P_{ij}^A 为

$$P_{ij}^A = \frac{\lambda_j^A (1 - \phi_j^A)}{\sum_{j \in \theta_i^A} \phi_j^A \lambda_j^A} \quad i, j \in [1, m] \quad (3)$$

式中: λ_j^A 为节点 j 的防护水平; ϕ_j^A 为 j 节点风险敏感度; θ_i^A 为节点 i 在A层后续邻居节点的集合。

根据机场飞行区风险事件的因果时间链特征,飞行区中通信设备、监视设备和自动化设备在整个风险网络中作为主要的传感器,发挥感知作用。网络结构和风险传播过程中,机场管理部门会根据设备在后续工作中的作用(连边数量),增加设备维护和可靠性,使其具有较好的防护水平,节点的抗风险能力与其在网络结构中的重要程度有关,即节点度越大重视程度越高,防护水平为

$$\lambda_i^A = \varpi \frac{D_i^A}{\sum_i D_i^A} \quad (4)$$

式中: D_i^A 为A层节点 i 的度; $\sum_i D_i^A$ 为A层所有节点度数之和; ϖ 为网络规模修正系数。

在风险网络中,部分致因节点起到“承上启下”的作用,在风险形成过程中发挥关键作用,其风险变化对机场飞行区风险传播影响较大,为度量这种变化引入节点的介数中心性,其计算式为

$$G_i^A = \frac{G_i^A}{\sum_i G_i^A} \quad (5)$$

式中: G_i^A 为节点 i 的介数中心性; $\sum_i G_i^A$ 为A层所有节点介数中心性之和。

由此可知, $t+1$ 时刻节点 i 传染节点 j 的概率 $f_{ij}^A(t+1)$ 为

$$f_{ij}^A(t+1) = S_i^A(t) P_{ij}^A \quad i, j \in [1, m] \quad (6)$$

节点 j 相连的致因节点都可能引起节点 j 风险变化,为此,需要求解与节点 j 相连所有风险节点的影响,可得节点 j 被传染概率 $f_j^A(t+1)$ 为

$$f_j^A(t+1) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{ij}^A f_{ij}^A(t+1)) \quad (7)$$

节点的自身防护能力可在一定程度上降低风险的形成,因此,考虑节点的防护能力,节点 j 在 $t+1$ 时刻成为风险节点的概率 $P_j^A(t+1)$ 为

$$P_j^A(t+1) = f_j^A(t+1) / \lambda_j^A \quad (8)$$

3.2 指挥与决策层风险传播模型

该层主要是管制人员、监控人员和保障人员根据业务范畴进行的决策指挥,其主要风险是人员基于掌握信息和业务技能做出的决策风险。为提高机场飞行区运行安全性,管理部门在组织结构和运行环节上都采取冗余设置,如管制员与飞行员复诵、交叉检查、设备动态监控预警等手段,采取的冗余设置对风险传播具有明显的阻抗作用,因此,

本层风险传播类型为负荷-阻抗型。

3.2.1 指挥与决策层容量函数

节点容量指风险致因的已有抗风险水平, 即该节点成为风险节点需要满足的触发条件, 该条件的量化表征即容量。其中, 包括冗余配置、应急干预及地面车辆和航空器的安全防护配置等多种形式。该层节点分为具有纠错能力的阻抗型节点和非阻抗型节点。阻抗型节点可有效抑制风险的形成, 如双岗制工作状态、飞行员协作状态等节点具有抑制风险传播作用, 在风险网络中采用提高阻抗型风险节点的容量, 以表征其提高应对风险能力, 故 B 层节点综合考虑阻抗型节点和非阻抗节点, 容量计算式为

$$C_i^B = (1 + \lambda_i^B) R_i^B + \sum_{y \in \varphi_i^B} H_i^B (1 + \lambda_y^B) R_y^B / |\varphi_i^B| \quad (9)$$

$i \in [m+1, m+n]$

式中: C_i^B 为节点 j 的容量; λ_j^B 为节点 j 的防护水平; R_i 为节点 i 的可达邻居节点数量, 当无可达邻居节点时为风险链终点, 容量为 0; R_y 为节点 y 的可达邻居节点数量; φ_i^B 为节点 i 前序邻居节点集合; H_i^B 表示节点 i 是否为阻抗型节点, 取值为 0 或 1, 分别表示非阻抗节点或阻抗型节点; $|\varphi_i^B|$ 为集合中的元素数量。

3.2.2 指挥与决策层节点初始负荷

节点初始负荷是指机场飞行区在正常运行时, 各个风险致因节点会存在一定的潜在风险程度, 其表征了某一时刻节点潜在的风险程度。负荷代表节点随着相邻节点及自身防护情况的变化, 在某一时刻相对于自身容量所处的风险程度。当节点负荷超过其容量时(过载), 就会出现设备故障、功能失效、人员差错等风险, 进而导致相邻的作业环节发生问题, 诱发风险的相继传播。阻抗型节点本身具有潜在风险负荷, 根据节点阻抗能力提高其容量的同时, 其潜在初始风险负荷也会有一定程度的增加, 如考虑到双岗制班组人员配合默契程度不同会有初始风险, 故 B 层节点初始负荷计算式为

$$L_i^B(0) = C_i^B \left(1 + \sum_{y \in \varphi_i^B} H_i^B \lambda_y^B \right) / \left(\lambda_i^B + \sum_{y \in \varphi_i^B} H_i^B \lambda_y^B \right) \quad (10)$$

3.2.3 指挥与决策层风险传播规则

当某个节点负荷超过容量时, 就会将风险传递给其邻居节点, 此时需要将风险按比例分配给邻居节点。按照复杂网络理论及风险传播过程, 不同邻居节点承接的风险与前序邻居节点和该节点因果强度有关。2 个节点因果关系就是网络中的连边, 按照复杂网络理论, 该强度与该边在整个网络中介数成正比, 即通过该边的因果链数量。节点 i 和节

点 j 间因果强度 μ_{ij}^B 为

$$\mu_{ij}^B = \begin{cases} V_i R_j & V_i > 0 \\ R_j & V_i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_i 为节点 i 直接或者间接致因节点数; R_j 为节点 j 的可达邻居节点数量; $i, j \in [m+1, m+n]$ 。

由此可得, 节点 i 和节点 j 间风险分配比例为

$$\Delta L_{ij}^B(t) = L_i^B(t) \frac{\mu_{ij}^B}{\sum_{w \in \theta_i^B} \mu_{iw}^B} \quad (12)$$

式中: ΔL_{ij}^B 为节点 i 向节点 j 传播的风险增量; $L_i^B(t)$ 为 t 时刻节点 i 的负荷值; θ_i^B 为节点 i 的在 B 层后续邻居节点集合。节点 j 在 $t+1$ 时刻的负荷值为

$$L_j^B(t+1) = L_j^B(t) + \sum_{r \in \varphi_j^B} \Delta L_{rj}^B(t) \quad (13)$$

式中: φ_j^B 为节点 j 在 B 层内的前序邻居节点集合。

3.2.4 指挥与决策层层间风险传播

设计 A 层与 B 层衔接的节点风险传播, 是由于 2 层间衔接节点具有阻抗能力。即在风险传播时, 该节点所承受的前序风险因其自身的阻抗能力会抵消一部分, 因此, 针对 AB 层的衔接节点 j 的风险传播规则为

$$L_j^{AB}(t+1) = L_j^{AB}(t) + \frac{\delta_{AB} \sum_{r \in \varphi_j^A} \Delta f_{rj}^A(t+1) + \sum_{i=m+1}^{m+n} a_{ij}^B \Delta L_{ij}^B(t+1)}{\exp(H_j^B \kappa_j \lambda_j^B)} \quad (14)$$

式中: $L_j^{AB}(t+1)$ 为节点 j 在 $t+1$ 时刻 A 层与 B 层衔接节点的负荷值; $\sum_{r \in \varphi_j^A} \Delta f_{rj}^A(t+1)$ 为节点 j 在 A 层网络中的邻节点传递的负荷增量; δ_{AB} 为 A 层风险发生概率与 B 层负荷的转换当量; $\sum_{i=m+1}^{m+n} a_{ij}^B \Delta L_{ij}^B(t+1)$ 为节点 j 在 B 层网络中的邻居节点传递的负荷增量; φ_j^A 为节点 j 相连的 A 层中前序节点集合; a_{ij}^B 为 B 层中连边的邻接矩阵对应元素; $\exp(H_j^B \kappa_j \lambda_j^B)$ 为节点 j 对风险的阻抗能力, H_j^B 为节点 j 是否具有风险阻抗能力, 对应值为 1 或 0, 只有阻抗节点才能降低风险传播负荷; λ_j^B 为节点 j 的防护水平; κ_j 为对节点阻抗能力的修正系数。

3.3 运行与执行层风险传播模型

该层主要是航空器、保障车辆、执行保障人员为主体, 由于上述主体需要有人参与执行, 人员在其中对风险有一定的包容性, 因此, 本层风险传播为容量-负荷型。

3.3.1 运行与执行层容量函数

该层节点是机场飞行区各项活动的执行主体,

其中包括驾驶人员、引导人员、车辆和保障设施,其风险容量与主体性质及其他节点业务联系有关,即由该节点所处的风险链数量(即可达邻居节点数量)及自身防护水平决定,计算式为

$$C_i^C = (1 + \lambda_i^C) R_i^{Cf} \quad i \in [m+n+1, m+n+k] \quad (15)$$

3.3.2 运行与执行层节点初始负荷

机场飞行区运行时,每个节点都有其自身潜在风险负荷 $L_i^B(t)$,该负荷与节点自身防护水平及该节点在风险网络中连接边数量有关,也即节点初始负荷是容量与防护水平的函数,即

$$L_i^C(0) = C_i^C / \lambda_i^C \quad i \in [m+n+1, m+n+k] \quad (16)$$

3.3.3 运行与执行层风险传播规则

本层内风险传播规则与运行决策层相同,故不再赘述。

3.3.4 运行与执行层层间风险传播

C层与B层的衔接节点具有风险耦合特征,不仅有B层的层内部风险传播,也有C层的层间风险传播,因此,针对B、C层的耦合节点 j 设计风险传播规则为

$$L_j^{BC}(t+1) = L_j^{BC}(t) + \frac{\delta_{BC} \sum_{r \in \psi_j^B} \Delta L_{rj}^B(t+1) + \sum_{i=m+n+1}^{m+n+k} a_{ij} \Delta L_{ij}^C(t+1)}{\exp(H_j^C \kappa_j \lambda_j^C)} \quad (17)$$

4 风险传播模型应用与结果分析

4.1 风险传播分析指标

为有效评价风险在网络传播中的特征、影响程度和发展趋势,本文从节点、网络和结构3个维度构建了分析指标,包括节点风险灵敏指数、网络风险扩散指数和网络结构鲁棒性指数。上述3个指数的定义及计算式如下。

节点风险灵敏指数从节点风险传播视角提出,以分析网络中节点风险变化对整个网络风险变化的影响程度。该指标综合考虑网络拓扑结构和节点重要性,表征某一节点风险负荷变化对整个风险网络风险负荷的影响,计算式为

$$X_i = (\Delta L_i / L_i) \left(\sum_{j \neq i} |\Delta L_j| / L_j \right) \quad (18)$$

式中: X_i 为节点 i 的风险灵敏指数; ΔL_i 为节点 i 的风险负荷增量; L_i 为节点 i 的风险负荷值。

网络风险扩散指数从网络风险传播视角提出,以分析网络中风险强度及潜在扩散程度,该指标考虑风险发生后网络中被触发风险节点负荷值及该节点在网络中风险传播能力。该传播能力强弱由

被触发节点在网络中的介数大小决定,表征网络中某一周期整个网络风险继续扩散的程度,计算式为

$$I = \sum_i b_i L_i \left(1 + \frac{|L_i - C_i|}{L_i - C_i} \right) \quad (19)$$

式中: I 为网络中风险指数; b_i 为网络中节点 i 的介数。

网络结构鲁棒性指数从网络结构视角分析风险传播后网络中被触发的节点数及连通情况,反映致因节点失效后对风险网络整体结构影响。该指标考虑被触发节点数及其间的连通能力,反映网络的风险易感程度,计算式为

$$O = \frac{U}{N} \cdot \frac{T}{N-T} \quad (20)$$

式中: O 为风险网络结构鲁棒性指数; U 为最大连通子图节点数; T 为网络中被触发节点总数; N 为网络中节点总数。在结构鲁棒性指数中,包括连通性和被触发节点的影响,即最大连通子图大小并通过被触发节点数与未被触发节点比值进行修正,以更全面地反映网络中被触发风险节点的结构特征。

4.2 案例网络参数设置

风险传播模型阻抗节点与机场具体环境有关,选取西安咸阳国际机场、天津滨海国际机场和上海虹桥机场作为典型机场进行分析,对3座机场的人员、设备、风险事件进行统计并计算平均值,获取阻抗型节点的参数,如表1所示。

表1 阻抗节点参数

Table 1 Impedance node parameters

工作年限/a	κ_{j1}	工作负荷	κ_{j2}	工作时长/h	κ_{j3}
0~6	0.15	0~0.3	0.25	1~2	0.25
6~15	0.25	0.3~0.7	0	3~4	0
15~30	0.4	0.7~1	-0.2	5~6	-0.1

注: κ_{j1} 、 κ_{j2} 、 κ_{j3} 为工作年限、工作负荷、工作时间的修正参数。

阻抗节点主要以人的决策为核心,根据机场飞行区人决策特征和文献[23],考虑人的决策受工作年限、工作负荷和工作时长影响确定其对应的风险阻抗能力参数 κ_j 。

4.3 应用结果与分析

按照设计的评价指标对风险网络进行分析。

4.3.1 节点风险灵敏指数分析

对风险网络中的节点进行逐个分析,分析步骤如下。

步骤1 计算每个节点的初始风险负荷。

步骤2 选定一个评价节点,将该节点风险负荷增加其初始风险负荷的20%,获取网络风险负荷增加情况计算出此时节点风险灵敏指数。

步骤 3 将所有节点风险恢复为初始风险节点, 将步骤 2 中选定节点风险负荷增加其初始风险负荷的 40%, 获取网络风险负荷增加情况计算出此时节点风险灵敏指数。

步骤 4 将所有节点风险恢复为初始风险节点, 将步骤 2 中选定节点风险负荷增加其初始风险负荷的 60%, 获取网络风险负荷增加情况计算出此时节点风险灵敏指数;

步骤 5 选取其他节点, 重复步骤 2 以后步骤。

图 3 为节点风险灵敏指数图, 由图可知, 节点风险灵敏指数排序受节点负荷增加程度较小, 节点 c1、c3 和 c9 对应的风险灵敏指数最大, 上述节点都属于设备与环境层, 是机场飞行区业务运行的基础, 传播链最长, 说明上述节点对网络风险波动贡

献最大, 维修不及时又是其中影响程度最高的, 说明现有业务链中增强设备可靠性仍是需要重点解决的问题。图 3 也表明在节点增加负荷较低时, 节点风险灵敏指数区分度较低; 当节点负荷增加值超过 40% 时以上时, 节点风险灵敏指数对节点的区分程度更高, 更能有效识别节点对网络风险演变贡献量。通过对节点灵敏指数的分析, 可识别节点对风险贡献程度, 对其采取相应措施可快速控制风险传播。

由图 3 可知, 节点的风险灵敏指数与节点度存在弱相关性, 节点 b8、b1、c12 的度值最高, 但节点的风险灵敏指数排序较低; 节点 c1、c3、b9 的灵敏指数较高, 但节点的度值较低, 因此, 机场飞行区风险传播网络不能简单以复杂网络理论中节点的度

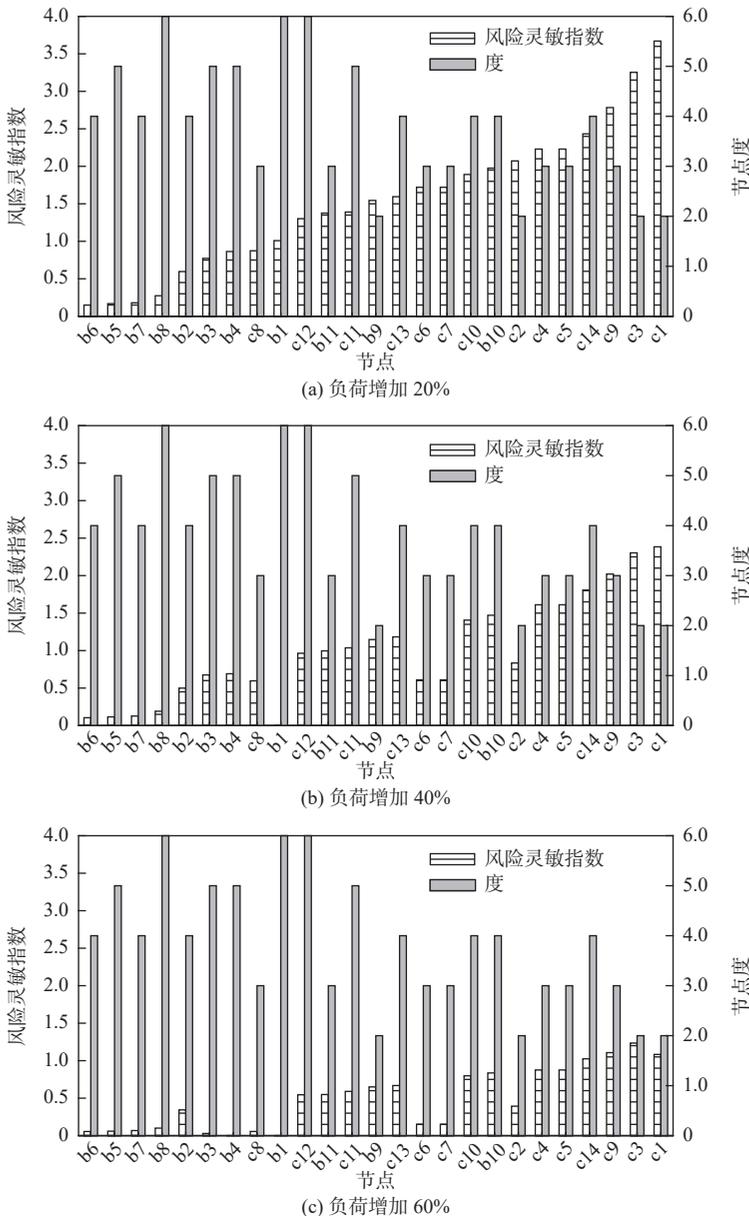


图 3 节点风险灵敏指数

Fig. 3 Node risk sensitivity index

作为评估节点重要程度的依据,尤其是类似通信质量下降影响节点多,但对风险形成的贡献程度不高。

由图3可知,存在对负荷增加程度敏感的节点和迟钝节点,通过识别2类节点采用不同策略可防止节点的风险传播。如节点b1控制其风险负荷增加不超过40%使该节点不会对网络风险传播做贡献,节点b4、c8在控制其负荷增加不过20%时也不会对网络风险传播做贡献。通过分类识别此类节点特征有针对性地制定对应措施,可付出较小成本阻断该类型节点的风险传播。因此,可以看出调配冲突指令不合理存在重大隐患,但通过采取冗余方式、双岗制、管制员与飞行员协同等方式使得节点对负荷增加敏感性降低,具有明显阻抗飞行区风险传播能力。同时,通过优化业务内容,如调整信息通报流程和复诵环节上也能使节点对风险负荷增加具有一定抵抗能力。

4.3.2 网络风险扩散指数分析

分析网络风险扩散情况,即通过对网络中的节点逐个攻击,使其达到风险阈值进而引起风险传播并造成其他节点触发,进而形成网络级联传播效应,达到分析不同节点造成的网络扩散程度,步骤如下。

步骤1 计算每个节点的初始风险负荷。

步骤2 选定一个评价节点,增加该节点风险负荷达到其风险阈值触发风险传播。

步骤3 统计不同仿真时长下(由一个节点触发下一个节点记为单位时间)的被触发节点数量以及被触发节点的介数,直到仿真周期结束。

步骤3 选取其他节点,重复步骤1后的步骤,直到所有节点被攻击。

图4为网络风险扩散指数演变图,由图可知,网络风险扩散存在3种类型,即风险扩散指数大且扩散时间长、风险扩散指数较强且扩散时间短、风险扩散指数相对固定。其中,节点c3、c1、c9、c4风

险扩散指数大且扩散时间长,该类型节点具有较长的致因链,在传播后期风险增长快,针对该类型风险应尽快切断其传播链(可对其本身或其邻居节点进行重点控制),防止其带来的后期风险的快速增加;节点c10、c14、b9、b10、b5、b8风险扩散指数较强且扩散时间短,该类型节点虽然传播链短但是影响程度高,应对该类型节点本身采取有效的风险抑制措施;节点c2、c6、c8、b6、b7是风险扩散指数相对固定节点,该类型节点影响范围小且传播链短,相对影响程度低。

结合4.3.1节点风险灵敏指数发现存在“双高”节点,即风险灵敏度指数和风险扩散指数都比较高,如节点c3、c1、c9、c10需要采用“尽早尽快”的策略,防止此类节点造成风险在网络中快速蔓延。可以看出,在机场飞行区运行风险节点中自动化设备失效、监视设备故障等具有风险影响范围大且影响程度大的特点,针对该类型节点采取尽早预防性策略;疲劳程度高、繁忙程度高等节点具有传播范围小但影响程度高的特点,针对该类型节点须加强备份和冗余管理。

4.3.3 网络结构鲁棒性指数分析

分析节点被触发后对网络结构的影响,从网络结构角度分析不同节点风险变化带来的影响,分析步骤如下。

步骤1 计算每个节点的初始风险负荷。

步骤2 选定一个评价节点,增加该节点风险负荷达到其风险阈值触发风险传播。

步骤3 统计不同仿真时长下(由一个节点触发下一个节点记为单位时间),被触发节点数量以及连通情况,直到仿真周期结束。

步骤4 选取其他节点,重复步骤1后的步骤,直到所有节点被攻击。

网络结构鲁棒性指数排名前10的节点如图5所示,从网络结构鲁棒性指数看,存在2种类型节点,一种是使得风险网络最终结构鲁棒性最强,另

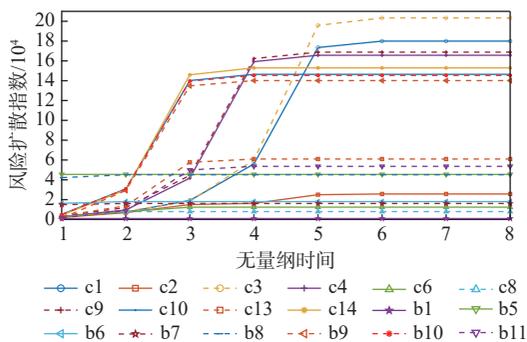


图4 网络风险扩散指数

Fig. 4 Network risk diffusion index

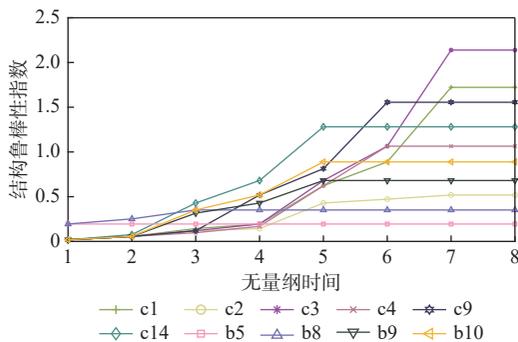


图5 网络结构鲁棒性指数

Fig. 5 Network structural robustness index

一种是使得网络结构鲁棒性指数增长最快。其中, 节点 c1、c3 使得网络中风险触发的结构鲁棒性最强, 对上述节点进行控制可以有效降低网络风险的链接关系; 节点 c4、c14、c9、b9、b10 使得网络中结构鲁棒性增长最快, 为有效控制网络中风险的快速蔓延、减少级联失效效应出现, 对这类型节点应该提前控制。

由图 5 可知, 通过结构鲁棒性指数可以分析设备与环境层、指挥与决策层等单个或多个节点致因的风险传播情况, 如能源供给故障、疲劳程度高、繁忙程度高等单个或多致因耦合使得网络

结构鲁棒性增加最快, 整个网络风险易感性越强, 风险传播范围越大。为此, 可以通过分析网络结构鲁棒性指标研判单个或多个致因节点的影响范围和程度。

4.3.4 控制策略分析

针对所选指标和风险网络传播特征, 本文采取 3 种不同控制策略, 包括随机选取 15% 的节点进行控制(重复 1 000 次计算相应指标均值)、对度值排序前 15% 节点和灵敏指数前 15% 节点进行控制, 且每种策略对节点风险控制程度相同, 计算网络的风险扩散指数情况如图 6 所示。

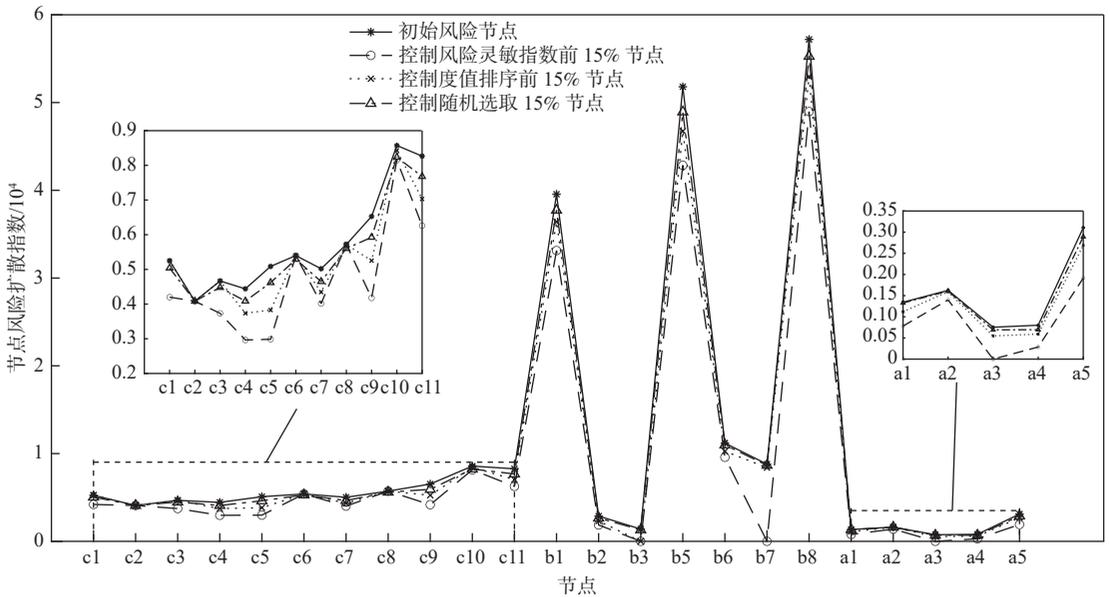


图 6 不同控制策略风险扩散指数

Fig. 6 Risk diffusion index under different control strategies

由图 6 可知, 随机选取网络中 15% 的节点进行控制并重复 1 000 次获取的数值表明, 该策略对控制网络风险传播能力有限, 大部分节点风险扩散指数变动较小, 部分节点如 c4、c11 可以降低 10%, 总的风险扩散指数降低 5%; 对度值排序前 15% 节点进行控制, 大部分节点风险扩散指数都在降低, 部分节点如 c5、b5 风险扩散指数可降低 20%, 总风险扩散指数降低 11%; 对风险灵敏指数排序前 15% 节点进行控制, 风险扩散指数降低较为明显, 如 c5、c9、b7、a3 风险扩散指数可降低 40%, 总风险扩散指数降低 32%。因此, 针对机场飞行区运行风险传播过程, 对风险灵敏指数高的节点采取针对性的控制策略, 即控制对网络贡献大的节点, 可以在风险发生后有效降低风险的扩散程度, 该控制策略明显优于随机控制策略, 也优于基于度排序的控制策略。

响, 分别对扩散指数、度值排序前 15% 节点和随机选取的 15% 的节点(重复 1 000 次取均值)进行控制, 计算风险网络结构鲁棒性指数, 如图 7 所示。由图可知, 3 种控制策略在时间上具有相同的趋势, 都是在第 7 个仿真单元网络风险结构鲁棒性指数

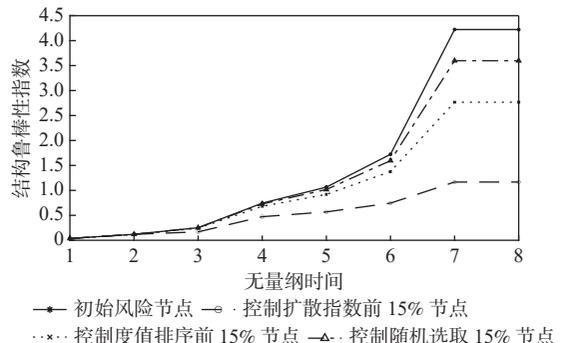


图 7 不同控制策略网络结构鲁棒性指数

Fig. 7 Network structure robustness index under different control strategies

为分析不同的控制策略对风险网络结构的影

达到最大值;但在程度上存在明显区别,控制扩散指数排序前15%节点的网络结构鲁棒性指数最低,网络中连通的风险节点数量最小,可使得结构鲁棒性指数降低48%,随机选取节点控制效果相对较差,对网络结构鲁棒性指数影响较小,网络中连通的风险节点数量依然较大。因此,针对疲劳程度高、双岗制工作状态、自动化设备失效、监视设备失效、等节点进行针对性控制可以有效缩小风险传播范围。

5 结论

1) 本文从机场飞行区风险形成过程出发,采用 AcciMap 方法融合机场飞行区风险数据识别飞行区的风险致因链,为构建机场飞行区异质链序风险网络提供基础。

2) 基于异质多层风险网络,提出构建分层风险传播模型,建立基于分层特征的节点风险传播特征,更符合机场飞行区风险传播特点,提高针对致因多源、风险迥异多层网络风险传播建模的刻画精准。

3) 针对多层风险网络传播的评价方面,综合网络结构和风险演化提出了3类指标,如针对节点重要性的评价不再单纯以复杂网络中的节点度为核心而是融合节点的风险贡献量进行评价,能够有效识别机场飞行区异质风险网络节点重要性,对精准控制风险传播发挥重要作用,如调配冲突指令不合理、通信质量下降等,虽节点度高但风险传播程度小。

4) 基于风险传播案例表明,通过对机场飞行区风险节点按照风险灵敏指数强的节点进行优先、精准控制,其控制效益最高,可以降低风险扩散指数32%,降低风险网络中结构鲁棒性指数48%,为资源匮乏或短时资源短缺的机场实施优先致因调控提供依据。

参考文献 (References)

- [1] SHYUR H J. A quantitative model for aviation safety risk assessment[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 54(1): 34-44.
- [2] STAMATELATOS M. Probabilistic risk assessment procedures guide for managers and practitioners reliability[J]. *Engineering System Safety*, 2007, 11(1): 609-618.
- [3] TAMASI G, DEMICHELIA M. Risk assessment techniques for civil aviation security[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(8): 892-899.
- [4] 孙殿阁, 孙佳, 王森, 等. 基于 Bow-Tie 技术的民用机场安全风险分析应用研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2010, 6(4): 85-89.
SUN D G, SUN J, WANG M, et al. Application of the improved Bow-tie risk analysis technology in civil airport safety[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2010, 6(4): 85-89(in Chinese).
- [5] 倪晓梅, 王华伟, 熊明兰, 等. 基于文本挖掘的民航事件风险评估[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(6): 73-79.
NI X M, WANG H W, XIONG M L, et al. Civil aviation incident risk assessment based on text mining[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(6): 73-79(in Chinese).
- [6] 陈芳, 向千秋, 陈茜. 基于模糊 DEMATEL-BN 的管制单位动态风险评估[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(1): 35-43.
CHEN F, XIANG Q Q, CHEN X. Dynamic risk evaluation of air traffic control (ATC) based on fuzzy DEMATEL-BN[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(1): 35-43(in Chinese).
- [7] SAUMELL-MENDIOLA A, ÁNGELES SERRANO M, BOGUÑÁ M. Epidemic spreading on interconnected networks[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2012, 86(2): 026106.
- [8] 张仕杰, 唐涛, 刘金涛, 等. 基于复杂网络的列车辅助驾驶危险致因传播模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(4): 129-136.
ZHANG S J, TANG T, LIU J T, et al. Propagation model for hazard causes of intelligent driving assistance system based on complex network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(4): 129-136(in Chinese).
- [9] PARSHANI R, BULDYREV S V, HAVLIN S. Critical effect of dependency groups on the function of networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(3): 1007-1010.
- [10] 肖琴, 罗帆, 朱本林. 基于突变理论的飞行签派员人因差错风险耦合演化研究[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(2): 610-617.
XIAO Q, LUO F, ZHU B L. Identification and determination of the human error risk coupling evolution of the flight dispatcher based on the catastrophe theory[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(2): 610-617(in Chinese).
- [11] 夏正洪, 万健, 朱新平. 机场热点时空分布特征及运行风险评估[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(1): 93-98.
XIA Z H, WAN J, ZHU X P. Research on spatial and temporal distribution characteristics of airport hotspots and airport operational risk assessment[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(1): 93-98(in Chinese).
- [12] 武喜萍, 杨红雨, 韩松臣. 基于复杂网络的空中交通特征与延误传播分析[J]. *航空学报*, 2017, 38(S1): 721473.
WU X P, YANG H Y, HAN S C. Analysis of air traffic characteristics and delay propagation based on complex network[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(S1): 721473(in Chinese).
- [13] 王兴隆, 朱丽纳, 石宗北. 多层航线聚合网络建模及相关性分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(3): 1243-1249.
WANG X L, ZHU L N, SHI Z B. Multi-layer route aggregation network modeling and correlation analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(3): 1243-1249(in Chinese).
- [14] 吴维, 罗欣然, 魏明. 基于 SD 模型的跑道侵入风控网络脆弱性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(4): 41-48.
WU W, LUO X R, WEI M. Vulnerability assessment of runway intrusion risk control network based on SD model[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(4): 41-48(in Chinese).
- [15] WU C L, LAW K. Modelling the delay propagation effects of mul-

- multiple resource connections in an airline network using a Bayesian network model[J]. *Transportation Research*, 2019, 122: 62-77.
- [16] 王岩韬, 刘毓. 基于复杂网络的航班运行风险传播分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(1): 198-205.
- WANG Y T, LIU Y. Flight operation risk propagation based on complex network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(1): 198-205(in Chinese).
- [17] 冯芬玲, 蔡明旭, 贾俊杰. 基于多层复杂网络的中欧班列运输网络关键节点识别研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(6): 191-200.
- FENG F L, CAI M X, JIA J J. Key node identification of China railway express transportation network based on multi-layer complex network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(6): 191-200(in Chinese).
- [18] 孙兴龙, 李亚雄, 邱艳粉. 基于改进融合算法的交通网络节点重要性评估[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(4): 65-71.
- SUN X L, LI Y X, QIU Y F. Evaluation of node importance in traffic network based on improved fusion algorithm[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(4): 65-71(in Chinese).
- [19] 孙娟, 李晓霞, 张金浩, 等. 多层单向耦合星形网络的特征值谱及同步能力分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(18): 329-342.
- SUN J, LI X X, ZHANG J H, et al. Synchronizability and eigenvalues of multilayer star networks through unidirectionally coupling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(18): 329-342(in Chinese).
- [20] TANG L K, LU J N, WU X Q, et al. Impact of node dynamics parameters on topology identification of complex dynamical networks[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2013, 73(1): 1081-1097.
- [21] 冯慧琳, 胡荣, 王德芸, 等. 航班时刻初级市场配置优化模型研究进展[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2022, 20(4): 42-58.
- FENG H L, HU R, WANG D Y, et al. Research progress in optimization modeling of primary slot allocation[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2022, 20(4): 42-58(in Chinese).
- [22] 中国民用航空局机场司. 大型民用运输机场运行安全保障能力综合评价管理办法: AP-140-CA-2018-01 [Z]. 2018-08-22.
- AIRPORT Department of Civil Aviation Administration of China. Management measures for comprehensive evaluation of operational safety guarantee capability of large civil transport airports: AP-140-CA-2018-01 [Z]. 2018-08-22.
- [23] 衡宇铭, 吴明功, 温祥西, 等. 基于复杂网络的管制员负荷评估[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1): 52-58.
- HENG Y M, WU M G, WEN X X, et al. Controller workload evaluation based on complex network[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(1): 52-58(in Chinese).

Research on multi-layer heterogeneous chain sequence risk propagation model in airport movement area

WU Wei^{1,2,*}, WU Zexuan¹, WANG Xinglong¹

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A multi-layer heterogeneous network risk propagation model was built using complex network theory and the causal chain relationship between risk factors in order to better characterize the characteristics of operational risks' propagation in flight areas and improve the safety management capabilities of airport flight areas. The accident analysis mapping(AcciMap) theory was employed to analyze the causal chain of risk propagation. A three-layer heterogeneous risk propagation network was built. Evaluation indicators were designed using complex network theory to analyze the characteristics of risk network propagation. The results demonstrate that the node's risk propagation capability exhibits a weak correlation with the node degree, and the node's risk sensitivity index can enhance the accuracy of risk node ranking. Implementing risk control measures on the top 15% of nodes ranked by the risk sensitivity index can effectively reduce risk diffusion by approximately 32%. It is possible to reduce the robustness index of the network structure and move the risk network structure from a highly connected state to a loose state by controlling the top 15% of nodes ranked by the risk diffusion index. The built model enables the identification and precise control of risk diffusion processes, thereby enhancing the level of risk control in airport flight areas.

Keywords: air transportation; airport operations; complex network; risk propagation; control strategy

Received: 2023-04-24; **Accepted:** 2023-06-16; **Published Online:** 2023-07-04 16:18

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230704.1137.001

Foundation items: Natural Science Key project of Tianjin Municipal Education Commission (21JCYBJC00700); The Fundamental Research Funds for the Central Universities Civil Aviation University of China Special Project (3122025098)

* **Corresponding author.** E-mail: wwu@cauc.edu.cn