

中文引用格式:乔卫亮,邓婉怡,马晓雪,等.复杂网络下船舶碰撞风险传播演化分析[J].中国安全科学学报,2024,34(5):101-110.

英文引用格式:QIAO Weiliang, DENG Wanyi, MA Xiaoxue, et al. Evolutionary analysis of ship collision risk propagation under a complex network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 101-110.

复杂网络下船舶碰撞风险传播演化分析*

乔卫亮¹副教授,邓婉怡²,马晓雪^{**2,3}教授,韩冰⁴研究员

(1 大连海事大学轮机工程学院,辽宁大连116026;2 大连海事大学航运经济与管理学院,

辽宁大连116026;3 大连海事大学公共管理与人文艺术学院,辽宁大连116026;

4 上海船舶运输科学研究所有限公司,上海200135)

中图分类号:X928.03

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.05.0684

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1600602);博士后科学基金面上项目资助(2022M720626)。

【摘要】 为提高海运业的安全水平,针对船舶碰撞风险事件链中的风险传播演化过程,利用事件树分析法(ETA),构造有向赋权复杂网络(CN),分析网络的拓扑结构;改进传统K-壳分解算法的适应性,提出网络节点绝对重要度计算方法;利用易感-感染-恢复(SIR)模型动态模拟风险在CN中的传播演化过程,研究在不同感染率与恢复率组合的情况下,复杂网络中目标节点的动态敏感性。结果表明:大约25%的风险事件在CN中相对不活跃,绝对重要度排前10%的风险事件均与事故直接原因无关;风险事件的敏感性与重要度并不完全保持一致,部分风险事件,即使不采用针对性措施,也难以触发严重后果或碰撞事故;船舶碰撞风险管控工作应认可直接致因的客观存在,重点关注碰撞风险的传播演化过程,在碰撞风险实施管控的过程中应采用差异化管控策略。

【关键词】 复杂网络(CN); 船舶碰撞; 风险传播演化; K-壳分解算法; 易感-感染-恢复(SIR)模拟

Evolutionary analysis of ship collision risk propagation under a complex network

QIAO Weiliang¹, DENG Wanyi², MA Xiaoxue^{2,3}, HAN Bing⁴

(1 Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;

2 School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning

116026, China; 3 Public Administration and Humanities College, Dalian Maritime University,

Dalian Liaoning 116026, China; 4 Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd.,

Shanghai 200135, China)

Abstract: The event tree analysis(ETA) was applied to the risk propagation process of the risk event chains involved in ship collisions for the purpose of developing directed weighted complex, which was then analyzed according to the topological structure. The traditional K-shell decomposition algorithm was adaptively improved to propose the calculation approach for the absolute criticality of the nodes in the CN. The SIR model was utilized to simulate the risk propagation process within the CN, based on which the dynamic sensitivity of the nodes within CN was analyzed under different cases of infection rates and

recovery rates. It is pointed out that approximately 25% of the risk events are found as relatively non-active, and the top 10 critical risk events have no relation with the direct causes of the collision accidents. The sensitivity and criticality of risk events are not consistent at all times, and some risk events would not lead to serious consequences or accidents even though countermeasures are not taken. The existence of direct causes for the collision accidents should be acknowledged for the control and management of risk involved in the ship collisions, and much attention should be paid to the risk propagation process. As a result, differential strategies should be taken during the risk management and control to prevent the ship collisions.

Keywords: complex network (CN); ship collision; risk propagation; K-shell decomposition algorithm; susceptible-infected-recovered (SIR) simulation

0 引言

船舶碰撞事故已成为当前水上交通安全的主要威胁^[1]。模糊理论^[2]、统计学方法^[3]以及物理建模技术^[4]相继引入船舶碰撞事故分析,这些技术方法在实践中难以量化描述船舶碰撞事故过程中技术因素与人为因素间的交互关联。为此,基于事件链的风险分析方法开始引入船舶碰撞事故分析中^[5],以全面考虑人为失误、机器故障或外部环境扰动等相关风险因素,深刻反映碰撞事故的风险演化过程的复杂性和不确定性等特征^[6-7],并以风险事件链梳理分析为基础,结合认知可靠性和错误分析方法^[8]以及贝叶斯网络推理技术^[9],深入解析船舶碰撞致因模型。

上述研究方法大多都是静态方法,只能通过分析事故报告和工作流程研究有限数量的特定风险场景下的风险传播,很难研究存在多个不安全事件交互作用的风险系统^[10]。而复杂网络(Complex Network, CN)方法能够对这类复杂风险系统进行特征化,使用网络节点和有向边来表示风险事件和风险传播路径。与静态链条方法相比,基于网络的方法具有显著优势,充分考虑一个节点可能同时存在多个链条中的情况。网络中风险事件(网络节点)的触发和被触发过程伴随着风险在网络中的传播,风险事件的重要性评价是制定风险管理策略的重要依据。很明显,节点的重要度与节点风险传播类型关系密切,在现有的研究中,风险传播通常被分为暴露型和扩散型^[12]。然而,在实际应用中,一些具有耦合效应的风险事件可能同时具备上述2种类型的风险传播特性,但却未得到足够的关注。为更清晰了解船舶碰撞风险的传播过程,有必要重新定义风险事件的重要度,深入研究暴露型风险和扩散型风险之间的复杂相互作用。

鉴于此,笔者拟引入CN描述不同船舶碰撞风险之间错综复杂的相互关系,并动态评价其重要性。鉴于事件的重要性会随着风险系统的特性而变化,引入易感-传染-恢复(Susceptible-Infected-Recovered, SIR)模型进行模拟,分析其敏感性,以此评估相关风险事件的风险传播能力,以期提高海运业的安全水平。

1 风险传播演化的CN构建

针对每起事故报告,利用事件树(Event Tree Analysis, ETA)方法,提炼与梳理事故过程中的节点性风险事件,将所有风险事件分为事故触发事件与风险传播演化事件,从事故触发事件的出现直至发生事故(顶部事件),每起事故可梳理成一条风险事件链。触发事件、风险传播演化事件和顶部事件3种事件之间的关系如下:

1) 顶部事件。风险在网络中传播的终点,对应于实际中造成的事故后果,如人员伤亡、财产损失和环境污染等。具体来说,由于风险传播有方向性,风险一旦达到顶部事件,风险就不会再传播到其他节点。

2) 触发事件,也被称为风险源,是风险最初形成的事件。对应于ETA中的初始事件,如人员操作失误、天气因素等。

3) 风险传播演化事件,在风险传播链上位于触发事件和顶部事件之间的事件,共同构成风险从触发事件到顶部事件的传播网络。

所有在事故链中涉及的危险事件都是事故或损失的原因和条件,并被视为已开发的CN中的节点,事件之间的因果逻辑关联形成网络中的有向边。由于风险事件具有多样性与复杂性,为增加CN的适用性,合并相似事件,因此,源自不同事故报告的相同风险事件可共享一个节点,从而形成有向CN的

拓扑结构。选择风险事件作为刻画海事事故的基本单元,而非传统的从因素或致因入手海事事故分析,是出于多维度因素的综合考量:海事事故往往涉及多种因素,包括船舶操作、气象条件、导航规则、人员因素等。传统的因素或致因分析通常侧重于将事故分解为单一因素或因果链,但无法全面考虑多维度的影响。使用风险事件作为基本单元允许更好地综合考虑这些因素,以便更全面地理解事故的复杂性。

1.1 权相关的网络特性参数

取 $G = (V, E)$ 表示有向赋权 CN, 其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示该 CN 中所有节点的集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示网络中有向边的结合。该 CN 可用一个邻接矩阵 $A_{N \times M}$ 表示, 其元素为:

$$A_{(i,j)} = \begin{cases} a_{i,j} \cdot w_{i,j} & v_i \rightarrow v_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, 事件 v_j 被事件 v_i 触发时, $a_{i,j} = 1$, 否则, $a_{i,j} = 0$; $w_{i,j}$ 为 CN 中 2 个相邻节点 v_i 与 v_j 之间边的权重, 表示事件 v_i 触发事件 v_j 的频率。权分为出权与入权, 分别用 $w_{i,j}$ 与 $w_{j,i}$ 表示, 对于节点 v_i , 出权表示事件 v_i 触发事件 v_j 的频率, 入权表示事件 v_j 触发事件 v_i 的频率。基于权参数, 得到节点强度与交叉权, 用于表征有向赋权 CN 的基本特征:

$$T_w(i) = \sum_{v_j \in V} w_{j,i} + \sum_{v_j \in V} w_{i,j} \quad (2)$$

$$C_w(i) = \sum_{v_j \in V} w_{j,i} \cdot \sum_{v_j \in V} w_{i,j} \quad (3)$$

式中: $T_w(i)$ 为节点 v_i 的节点强度; $C_w(i)$ 为节点 v_i 的交叉权。

1.2 度相关的网络特性参数

将节点 v_i 与其他节点连接的有向边数量定义为节点的度, 用 $d(i)$ 表示。节点的度有出度与入度之分, 节点 v_i 的出度是指该节点指向其他节点的有向边数量, 而入度则是指其他节点指向该节点的有向边数量, 计算式为:

$$d_r(i) = \sum_{v_j \in V} a_{j,i} \quad (4)$$

$$d_o(i) = \sum_{v_j \in V} a_{i,j} \quad (5)$$

式中 $d_r(i)$ 与 $d_o(i)$ 分别为节点 v_i 的入度与出度。该节点的总度为:

$$T_d(i) = d_r(i) + d_o(i) = \sum_{v_j \in V} a_{j,i} + \sum_{v_j \in V} a_{i,j} \quad (6)$$

为差异化区分具有相同总度的节点, 引入交叉度:

$$C_d(i) = d_r(i) \cdot d_o(i) = \sum_{v_j \in V} a_{j,i} \cdot \sum_{v_j \in V} a_{i,j} \quad (7)$$

2 风险节点“重要度-敏感度”评价算法

2.1 重要度计算方法

目前针对 CN 中节点重要度计算的方法包括基于路径的方法、H 指数和 K-壳分解等^[11], 但现有方法无法描述 CN 内不同节点的风险转移特征。为此, 在传统 K-壳分解算法的基础上, 从风险传播演化的视角, 构建节点重要度评价模型, 量化风险节点对事故的贡献度。为描述风险在 CN 内部的传播演化过程, 基于节点的权与度相关参数, 定义如下控制方程:

$$f_1(w_{i,j}, w_{j,i}) = \left| \sum_{v_j \in V} w_{i,j} - \sum_{v_j \in V} w_{j,i} \right| \quad (8)$$

$$f_2(w_{i,j}, w_{j,i}) = \left| \sum_{v_j \in V} w_{i,j} + \sum_{v_j \in V} w_{j,i} \right| \quad (9)$$

$$f_3[d_r(i), d_o(i)] = |d_r(i) - d_o(i)| \quad (10)$$

$$f_4[d_r(i), d_o(i)] = |d_r(i) + d_o(i)| \quad (11)$$

其中, $\sum_{v_j \in V} w_{j,i}$ 和 $d_r(i)$ 用于量化节点 i 的暴露型

风险; $\sum_{v_j \in V} w_{i,j}$ 和 $d_o(i)$ 用于量化节点 i 的扩散型型风险。对于节点 i 而言, f_1 与 f_3 的值越小(暴露型风险和扩散型风险越接近)的同时, f_2 与 f_4 的值(自身数值)越大, 表示该节点的风险传播能力越强。为此, 需要定义一个平衡系数, 以定量描述式(8)一式(11)中节点出入权以及出入度间的综合特性。参考 MA Xiaoxue 等^[12]的研究, 定义权平衡系数为:

$$B_w(i) = \frac{\sum_{v_j \in V} w_{i,j} \cdot \sum_{v_j \in V} w_{j,i}}{\left(\sum_{v_j \in V} w_{i,j}\right)^2 + \left(\sum_{v_j \in V} w_{j,i}\right)^2} \quad (12)$$

当 $\sum_{v_j \in N} w_{i,j} = \sum_{v_j \in N} w_{j,i}$ 时, 节点 v_i 的权平衡系数 $B_w(i)$ 可取最大值, 此时式(8)接近最小值。考虑总权与交叉权的影响后, 形成权平衡因子:

$$\Psi_w(i) = B_w(i) \cdot [T_w(i) + C_w(i)] = \left[1 - \left(\frac{\sum_{v_j \in V} w_{i,j}}{\sum_{v_j \in V} w_{i,j} + \sum_{v_j \in V} w_{j,i}} - 0.5 \right)^2 \right]$$

$$\left(\sum_{v_j \in V} w_{i,j} \cdot \sum_{v_j \in V} w_{j,i} + \sum_{v_j \in V} w_{i,j} + \sum_{v_j \in V} w_{j,i} \right) \quad (13)$$

权平衡因子可用于描述被触发的节点(风险事件)继续触发其他节点的能力, 在一定程度上反映风险经过目标节点后继续在 CN 中传播演化的水平。

类似地,目标节点的度相关参数也可评价节点的风险传递能力,度平衡系数与度平衡因子可定义为:

$$B_d(i) = \left[1 - \left(\frac{d_r(i)}{d_o(i) + d_r(i)} - 0.5 \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$\Psi_d(i) = B_d(i) \cdot [T_d(i) + C_d(i)] = \left[1 - \left(\frac{d_r(i)}{d_r(i) + d_o(i)} - 0.5 \right)^2 \right] [d_r(i) \cdot d_o(i) + d_r(i) + d_o(i)] \quad (15)$$

耦合权平衡因子与度平衡因子,可计算得到目标节点的基本重要度:

$$\Psi_b(i) = \Psi_d(i) \cdot \Psi_w(i) \quad (16)$$

根据上述计算方法的基本原理,基本重要度是基于 CN 局部信息进行的计算,结果容易受到目标节点相邻节点的影响,为此,引入基于 CN 全局信息的 K-壳分解算法确定目标节点的绝对重要度。传统的 K-壳分解算法适用于无向无权 CN,根据每个节点在网络中的中心度值,为其分配一个层序号 ξ_k ,基于 ξ_k 得到目标节点的重要度排序。 ξ_k 较小的节点位于 CN 的外围,而 ξ_k 较大的节点则接近 CN 的中心。将式(16)作为 K-壳分解算法中的分解函数,改进传统 K-壳分解算法,以适用有向赋权 CN。对于无向网络,K-壳分解算法每次剪掉度最小的节点。而对于有向网络,K-壳分解算法每次剪掉的是基于式(16)计算的基本重要度最小的节点,这是两者的主要区别。在这种情况下,很难区分同一层中节点的重要度,为此,引入迭代因子,用于区分位于同一层节点的重要度,其计算式为:

$$\Psi_k(i) = \xi_k(i) + \Gamma_{\xi_k}(i) \quad (17)$$

式中: $\Psi_k(i)$ 为基于改进 K-壳分解算法得到的节点绝对重要度(静态重要度),相应的层序号用 $\xi_k(i)$ 表示; $\Gamma_{\xi_k}(i)$ 为迭代因子。其计算公式为:

$$\Gamma_{\xi_k}(i) = \begin{cases} \frac{(\sigma_i - 1)}{\gamma} \cdot (\Psi_{k+1} - \Psi_k), & \xi_k \text{ 不是最外层} \\ \frac{(\sigma_i - 1)}{\gamma} \cdot (\Psi_k - \Psi_{k-1}), & \xi_k \text{ 是最外层} \end{cases} \quad (18)$$

式中: γ 为层 ξ_k 中包含的网络节点数; σ_i 为节点 v_i 进入相应层的序号; Ψ_k 为传统 K-壳分解算法得到的节点静态重要度。将有向网络的 K-壳分解算法应用于给定的有向网络邻接矩阵的步骤为:

1) 输入参数。定义有向网络的邻接矩阵,将式(17)作为分解函数。

2) 初始化节点和关键性信息。创建一个原始节点列表包含所有网络节点的编号(从 1 到节点总

数)。初始化一个空的存储列表用于存储每个 K-壳层次的节点集合。初始化一个空的矩阵,其维度为节点总数的 3 倍。矩阵的第 1 列存储节点编号,第 2 列存储节点的关键性,第 3 列存储节点所属的 K-壳层次。

3) 进行主循环。不断处理节点,直到所有节点都被处理完毕。检查是否有节点满足特定条件,如果是,则将这些节点添加到列表中,并从原始节点列表中移除这些节点。

计算节点的关键性,将关键性信息存储在矩阵中,同时。将与这些节点相关的边从邻接矩阵中删除。如果仍然有其他满足条件的节点,则继续上述处理过程。

4) 记录 K-壳层次。将已经处理的节点集合添加到存储列表中,表示一个 K-壳层次。这个列表包含多个 K-壳层次的节点集合。

5) 最终处理。进一步处理节点矩阵,以确保不同 K-壳层次之间的关键性差异。最终结果存储在一个新的矩阵中,其中,包含每个节点的关键性信息。综合上述分析,利用 Matlab 软件计算 CN 中目标节点绝对重要度。

2.2 敏感度计算方法

一般认为,风险是对事故可能性和后果严重性的综合描述。在 CN 理论框架下,风险描述为节点和有向边的协同效应。具体而言,可能性对应于风险事件(节点)触发另一事件的频率,通过边的权重来量化;严重性可抽象为节点对的风险削弱或放大能力。第 2.1 节计算目标节点重要度的过程中,未考虑严重性对节点重要度的影响,认为风险事件的严重性为常量。为此,引入具有可调参数的 SIR 模型,分析 CN 中涉及的目标节点的动态敏感性。由于 SIR 模型具备表现传播过程的能力,被广泛应用于传播过程的模拟,如病毒传播、信息传播和风险传播。在文中模拟 SIR 模型,以动态描述基于船舶碰撞事故所开发的定向加权 CN 内风险事件危害事件的传播过程。

在 SIR 模型中,节点的风险传递能力通过目标节点的平均传播范围进行量化,目标节点的敏感度取决于权相关参数、感染率和恢复率,SIR 模型中涉及的所有节点被标记为 3 种不同的状态。用 α 表示节点的感染率,用 $S(i) \xrightarrow{\alpha} I(i)$ 表示从状态 S 转换为状态 I 。类似地,从状态 I 转换为 R 可标记为 $I(i) \xrightarrow{\beta} R(i)$,这一过程的概率被定义为恢复率 β 。节点

一旦恢复,受感染的节点将获得终生免疫,不再感染其他节点。目标节点的感染率用于评估节点的风险防御能力,而恢复率用于表征节点对风险的削弱能力。SIR模型的感染率和恢复率对应于节点的不同风险状态,用于模拟与有向加权CN相关的不同场景。在当前研究中,暂不考虑顶事件升级的情况及“致因的致因”,因此,设定顶事件不具备R状态,触发事件不具备S状态,而演化事件兼具SIR模型的3种状态。依次假定除顶事件的每个节点为传染源,以概率 α 去感染周围邻居,找到所有已经感染节点,以概率 β 去恢复,下一步继续感染邻居,这个过程运行1000次后做统计,得到感染源的影响力,再更换新的初始节点。算法的主要逻辑如下:

- 1) 初始化一个与邻接矩阵同样大小的全0矩阵,用于记录感染事件的次数。
- 2) 循环进行模拟,输入模拟的次数。
- 3) 对于每次模拟,在每个时间步骤中,遍历网络中的每个节点。
- 4) 用一个由0、1、2构成的列向量表示每个节点的状态,3个数字分别对应SIR模型的3种状态。
- 5) 在每个时间步骤中,遍历每个节点,根据SIR模型的规则,进行以下操作:①对于易感受者节点,根据感染率 α 和连接的感染者节点判断是否被感染。②对于感染者节点,根据康复率 β 判断是否康复。③模拟中的每个时间步骤迭代,直到达到最大迭代次数或没有感染事件发生。④每次模拟完成后,将感染事件记录在全0矩阵中,其中,第*i*行第*j*列元素记录节点*i*感染节点*j*的总次数。

最终,完成所有模拟后,输出矩阵包含多次模拟的平均感染次数。有向赋权CN中目标节点的感染率为^[13]:

$$P_{i,j} = \alpha \cdot \frac{w_{i,j}}{\sum_{v_j \in V} w_{j,i}} \quad (19)$$

式中: $P_{i,j}$ 为节点 v_j 被节点 v_i 传染的概率; α 为节点 v_i 对相邻节点的传染率; $w_{i,j}$ 为节点 v_i 到 v_j 的总的权重。SIR的仿真流程为:

- 1) 所有节点的初始状态定义为S。
- 2) 统一生成一个介于0~1的随机数。假设随机数落在区间 $[0, P_{i,j})$ 之外,相邻的节点将被感染,导致状态从S转换为I。
- 3) 启动此过程节点的状态将更新为R,并且不再感染其他节点或被感染。
- 4) 连续重复上述步骤,直到所有被感染的节点

都尝试以I状态感染其相邻节点。

5) 继续重复上述步骤,直到CN中没有感染的节点,或所有节点都已被感染。

通过影响力矩阵 \mathbf{B} 获得基于SIR模型的节点 v_i 在设定感染率与恢复率 (α, β) 下的风险传播指数,其计算式为:

$$\Omega(i) = \sum_{v_j \in V} b_{i,j} + \sum_{v_j \in V} b_{j,i} \quad (20)$$

式中: b 为 \mathbf{B} 的元素; $\sum_{v_j \in V} b_{i,j}$ 为被节点 v_i 感染的节点总数,而 $\sum_{v_j \in V} b_{j,i}$ 代表节点 v_i 被其他节点感染的总数。目标节点的动态重要度用 (α, β) 下目标节点的影响力表征,即风险传播指数 $\Omega(i)$,然而, (α, β) 的取值具有模糊性,很难唯一确定节点的动态重要度,受统计物理学系综平均的启发,计算节点的动态重要度。用 (α_p, β_q) , $p = 1, 2, \dots, n$; $q = 1, 2, \dots, m$ 表征目标节点特征,通过SIR模型模拟获得目标节点对应于每组 (α_p, β_q) 的传播指数 $\Omega_k(i)$, $k = 1, 2, \dots, n \cdot m$ 。基于SIR模型模拟得到风险传播指数近似等于最接近于节点中所有动态重要度的值,采用最小二乘法,定义距离函数:

$$f[\Psi_{\text{SIR}}(i)] = [\Psi_{\text{SIR}}(i) - \Omega_1(i)]^2 + [\Psi_{\text{SIR}}(i) - \Omega_2(i)]^2 + \dots + [\Psi_{\text{SIR}}(i) - \Omega_{n \cdot m}(i)]^2 \quad (21)$$

当且仅当:

$$\Psi_{\text{SIR}}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{n \cdot m} \Omega_k(i)}{n \cdot m} \quad (22)$$

$f[\Psi_{\text{SIR}}(i)]$ 可以取得最小值。式(22)即为网络节点的动态重要度,通过排序每个节点的动态重要度获得相应的重要度序号,用 ξ_{SIR} 表示。

3 船舶碰撞风险传播演进的CN分析

3.1 有向赋权CN的拓扑结构分析

基于收集到的225份船舶碰撞事故官方调查报告,利用ETA方法梳理每份事故报告,形成事件链,225条事件链交织形成CN,如图1所示。该CN由56个节点和323条有向边组成,包括1个顶级事件,45个风险传播演化事件和10个事故触发事件,详细分类情况见表1。

针对构建的有向赋权CN,利用度分布 $P(d)$ 和权重分布 $P(w)$ 分析其拓扑特性。通过计算度分布函数的一阶矩,获得度在节点之间的分布信息,该一阶

表 1 CN 中的节点名称及类别

Table 1 Node names and categories in CN

类别	代号	节点
顶事件	[22]	碰撞
风险传播演化事件	[2]	适任能力不足
	[3]	不清楚船舶位置
	[5]	船舶间沟通协调不畅
	[7]	船上缺少指导监督
	[8]	船舶作业时未穿戴好防护用品
	[9]	船舶偏移
	[10]	风浪
	[11]	过度依赖助航仪器
	[13]	忽视报警事件或警告
	[14]	驾驶台团队沟通协调不当
	[15]	教育培训不足
	[17]	锚泊位置选择不当
	[18]	能见度不良
	[20]	疲劳
	[21]	偏离既定航道/航线
	[23]	设备故障
	[25]	态势感知丧失
	[26]	通航环境复杂
	[27]	未重视可疑事件
	[28]	未尽到特殊情况下要求的戒备
	[29]	未及早地采取有效避碰行动
	[30]	未采用安全航速
	[31]	未配备设备资源
	[32]	未能对当时危险局面作出充分估计
	[33]	未按要求交接班
	[34]	未遵循海员通常做法/习惯航法
	[35]	未保持正规瞭望
	[36]	避碰行动时机不对/错过
	[37]	未充分利用助航仪器
	[38]	未正确显示号灯号型
	[39]	未充分履行停泊值班安全职责
	[40]	未通知船长
	[41]	未正确发出声响和灯光信号
	[42]	未遵守船舶在互见中的行动规则
	[43]	未控制好船位
	[44]	未遵守狭水道等特殊水域航行规则
	[45]	未充分估计当前环境对船舶操纵的影响
	[46]	未发现潜在风险
	[47]	未严格执行计划航线
	[48]	未遵守能见度不良下的行动规则
	[49]	未保持报警系统处于常开工作状态
	[53]	值班水手操舵失误
	[52]	应急处置措施不当
	[54]	走锚
	[56]	走锚靠泊失败/偏离正常泊位

续表 1

类别	代号	节点
顶事件	[22]	碰撞
事故触发事件	[1]	安全意识淡薄
	[4]	不熟悉航道环境
	[6]	船岸沟通不畅
	[12]	货物条件
	[16]	交通流密度大
	[19]	配员不足
	[24]	设备维护保养不足
	[50]	酗酒或值班作业前 4h 内饮酒
	[51]	压力
	[55]	盲目自信

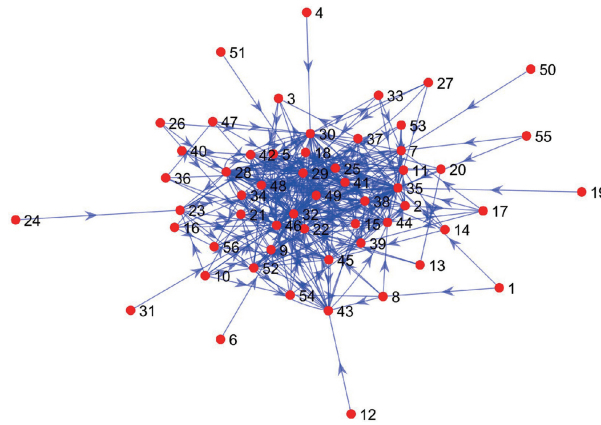


图 1 船舶碰撞风险事件的有向 CN

Fig. 1 Directed weighted CN developed from ship collisions

矩称为平均入度 $\langle d_r \rangle$ 和平均出度 $\langle d_o \rangle$ ，其计算公式为：

$$\langle d_r \rangle = \sum_{d_r} d_r p(d_r) = 5.768 \quad (23)$$

$$\langle d_o \rangle = \sum_{d_o} d_o p(d_o) = 5.768 \quad (24)$$

同样地，得到平均入权 $\langle w_r \rangle$ 和平均出权 $\langle w_o \rangle$ 如下：

$$\langle w_r \rangle = \sum_{w_r} w_r p(w_r) = 0.103 \quad (25)$$

$$\langle w_o \rangle = \sum_{w_o} w_o p(w_o) = 0.103 \quad (26)$$

根据式(23)一式(26)的结果，面向船舶碰撞事故所构建的 CN，其入度和入权的平均值均等于出度和出权平均值，表明该 CN 的拓扑结构有助于控制风险的传播演化。根据 CN 中所有节点的度和权分布信息，绘制度分布 $P(d_r, d_o)$ 和权分布 $P(w_r, w_o)$ ，如图 2 所示，其中， $P(d_r, d_o)$ 表示随机 CN 中选择的节点具有出度为 d_r 和入度为 d_o 的概率，以此

类比权分布图的含义。图 2a 中,大多数节点的入度和出度均小于 5,具有 $d_o = 3$ 和 $d_i = 2$ 的节点占节点总数的近 25%;从图 2b 可以看出,大多数节点都集中于横坐标 $1 < w_i < 6$ 与纵坐标 $1 < w_o < 6$ 所构成的坐标区域。从图 2 可以看出,网络的拓扑结构较为稀疏,这意味着在这个 CN 中,风险的传播演化相对不活跃。由于风险传播的活跃程度与网络密度呈正相关(节点的平均度越高,网络越密集),因此,在当前的风险系统中,对于网络中相关风险事件的管控相对容易。

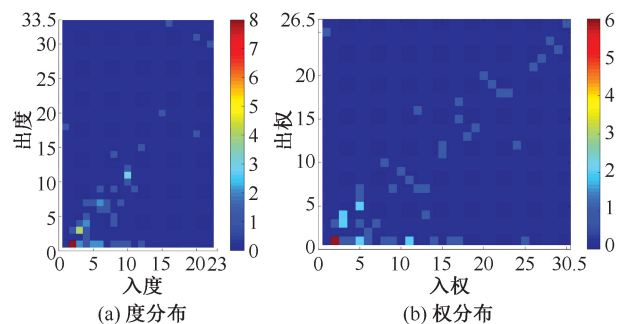


图 2 CN 的度与权分布

Fig. 2 Degree and weight distribution of CN

3.2 目标节点的重要度评价

针对构建的 CN,利用软件 Matlab 实现 2.1 节中建立的目标节点重要度算法流程,得到船舶碰撞事故中各风险事件的重要度,重要度排名前 10 位和后 10 位的风险事件见表 2。

表 2 重要度位列前 10 位和后 10 位的风险事件

Table 2 Top 10 and least 10 risk events in terms of criticality

前 10 位			后 10 位		
层序号	节点代号	重要度	层序号	节点代号	重要度
40	[32]	1.000 0	1	[4]	0.214 4
39	[46]	0.942 1	2	[6]	0.214 4
38	[35]	0.942 1	3	[12]	0.214 4
37	[29]	0.942 1	4	[31]	0.214 4
36	[30]	0.884 3	5	[50]	0.214 4
35	[28]	0.797 5	6	[51]	0.214 4
34	[44]	0.710 7	7	[19]	0.214 4
33	[41]	0.703 7	8	[24]	0.214 5
32	[48]	0.674 1	9	[1]	0.214 7
31	[14]	2.106 8	10	[55]	0.240 3

从表 2 可以看出,重要度位列前 10 位的风险事件大多属于风险传播演化事件,表明尽管在大多数情况下,事故触发事件是造成船舶碰撞事故的直接原因,但有效管控风险传播演化事件才是阻止风险

传播、防止事故发生的关键。另外,碰撞事故中重要度位列后 10 位的风险事件几乎被归类为事故触发事件,结果表明:即使事故触发事件是造成船舶碰撞事故发生的直接原因,但对此类风险事件实施风险管理可能收效甚微,这也符合 HOLLNAGEL^[14] 提出的 Safety-II 概念下风险常态化管控的基本原理。

3.3 目标节点的敏感度分析

通过 SIR 模型模拟风险事件在 CN 中的传播,并从 CN 全局以及单个节点 2 个层级实施敏感度分析。假定从被感染节点到易感节点的感染概率 $P_{i,j}$ 是关于 α 和 w 的函数,根据式(20)计算。将 α 和 β 都设置为 $[0.1, 1]$,且间隔为 0.02。对于每个节点,对已开发的 SIR 模型进行 1 000 次仿真,直到遍历 CN 中的所有节点为止,结果是从已开发的 CN 中抽取 10^7 次样本,这足以确保结果的可靠性。

3.3.1 CN 的全局动态表征

SIR 模型模拟结果如图 3 所示。 Ψ_{SIR} 表示在不同的 α 和 β 下 CN 的风险连通性, Ψ_{SIR} 越大表示该 CN 的风险传播能力越强。从图 3a 中可以看出, Ψ_{SIR} 与 α 和 β 都没有线性关系,且随着 α 和 β 的变化, Ψ_{SIR} 的变化在空间中发生了扭曲,表明网络节点对 α 和 β 的敏感度各不相同。此外,当 α 越来越大且 β 越来越小时,网络节点能够达到活跃的状态,网络具有更好的连通性,即在风险事件严重且难以纠正的情况下,网络中风险传播能力将会持续增加。从图 3b 可以看出,当 β 趋向于 0 时,即使 α 极低也会存在一些活跃的网络节点,表明在该 CN 中存在一类风险传播演化事件,如果不采取针对性的安全措施,这些事件将导致风险在 CN 中的持续传播,这证明了人为干预在风险管理和控制中的关键作用。此外,大多数活跃的节点集中于图 3b 的右侧或底部,表明:只有在 $0 \leq \beta \leq 0.2$ 内风险才可能传播到整个 CN 中,并且 CN 中目标节点的状态将随着风险的增加而变得更加活跃,即风险传播能力将变得更强。

3.3.2 基于感染率 α 的目标节点敏感度分析

为研究 α 对目标节点重要度的影响,取 $\beta = 0.1$ 进行 SIR 模型模拟,结果如图 4a 所示。图 4a 为 α 与每层中目标节点动态重要度间的非线性关联,图中,目标节点动态重要度与 α 和存在非线性正相关性,位于内层且 α 较高的网络节点对于风险的传播演化更为关键。沿 Y 轴的起伏表明节点重要度在 α 不同的情况下可能会发生变化,并且动态重要度 Ψ_{SIR} 不会随节点序号 ξ_{SIR} 均匀增加,这与从图 3 中

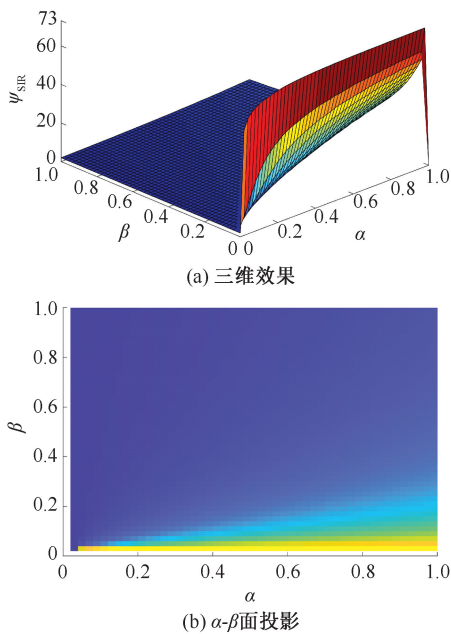


图3 Ψ_{SIR} 随着 α 和 β 的变化趋势

Fig. 3 Variation of Ψ_{SIR} versus of α and β

得出的结论相似。值得注意的是,在图 4a 中还可以观察到沿 X 轴的起伏现象,该现象在理想状态下不会出现。为此,将图 4a 投影到 $X-Z$ 轴上得到图 4b,即使存在波动起伏,SIR 模型的性能也相对稳定。图 4a 的模拟结果表明:在感染率 α 较小的情况下,不同节点之间的关键性差异相对较弱,但随着感染率的增加,上述差异将变得非常明显,需要引起足够的重视。因此,在事故触发事件开始传播风险的初期,必须及时控制由触发事件引发的风险传播演化事件的数量,否则碰撞事故的可能性将增加。

另外,CN 中目标节点的风险传播能力与其敏感度和动态重要度密切相关,为此,以感染率 α 和 ξ_{SIR} 为变量,SIR 模拟结果如图 5a 所示。控制 α 处于较低水平的话,可有效阻止风险传播过程。另外,无论 [4] 不熟悉航道环境、[6] 船岸沟通不畅和 [12] 货物条件的重要程度如何,此类节点的风险传播能力始终保持在较低水平。但是,在某些情况下,必须特别注意某些节点,例如:[46] 未发现潜在风险、[35] 未保持正规瞭望和 [32] 未能对当时危险局面作出充分估计可能导致船舶碰撞事故的发生。针对另一种极限情况 $\beta=1$,进行 SIR 模型模拟分析,结果如图 5b 所示。通过比较图 5a 和图 5b 获得的另一个重要发现,恢复率 β 的提高可大大降低目标节点的风险传播能力。另外,某些节点的风险传播能力在 α 开始增加的情况下很容易增加,如 [31] 未配备设备资源、[56] 走锚靠泊失败/偏离正常泊位、

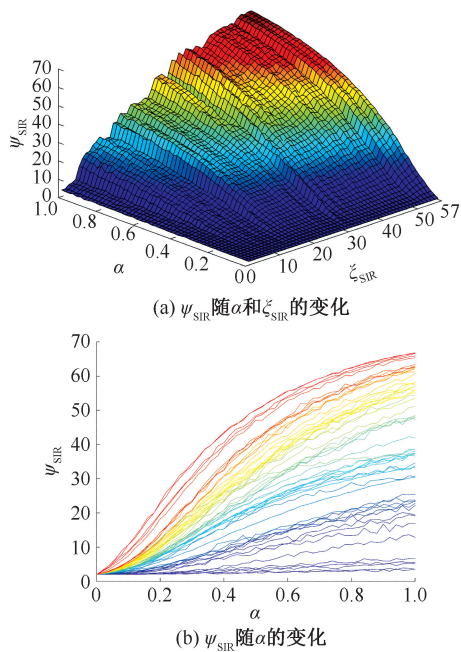


图4 基于感染率 α 的节点敏感度分析结果

Fig. 4 Results for nodes criticality analysis based on α

[55] 盲目自信。

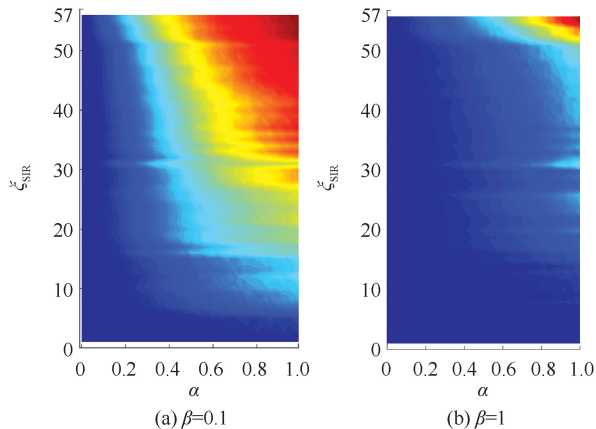


图5 不同 β 下网络节点的风险传播能力分布

Fig. 5 Risk propagation of nodes in CN with different β

3.3.3 基于恢复率 β 的目标节点敏感度分析

在假设 α 不变的情况下,分析目标节点恢复率 β 对 CN 风险传播能力的影响。在 $\alpha=1$ 的情况下,SIR 模型模拟结果如图 6a 所示。可以发现,恢复率较低的目标节点具有较高的风险传播能力;另外,值得注意的是,无论 β 如何变化,[14] 驾驶台团队沟通协调不当、[16] 交通流密度大、[27] 未重视可疑事件、[53] 值班水手操舵失误等风险事件的重要性排名保持稳定且相对较低。因此,在当前的体系下,即使没有人为干预或纠正这些风险事件,也不太可

能引发严重的后果,无需过多投入资源管理此类风险事件。分别设置 $\alpha = 1, \alpha = 0.3$ 和 $\alpha = 0.7$, 将图 6a 投影到 $X-Y$, 得到图 6b、图 6c。

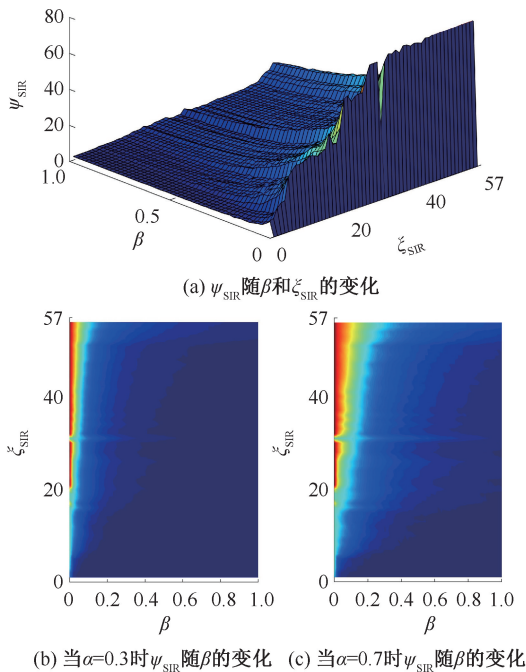


图 6 基于恢复率 β 的节点敏感度分析结果

Fig. 6 Results for nodes criticality analysis based on β

从图 6b、图 6c 可以看出, $\xi_{SIR} = 31$ 的目标节点 (即风险事件 [17] 锚泊位置选择不当) 具有高重要度和低风险传播能力的异常特征,这主要是由于该网络节点低敏感性造成的。对于不同 α , 动态重要度排名前 10 的目标节点对 β 表示出高度的敏感性,表明对于这些节点进行风险管控极为有效。另外,比较图 6b 和图 6c 所示的结果与图 5a 和图 5b 所示

的结果,可以发现敏感度较低的目标节点大部分重叠,并且无论 α 或 β 如何变化,通过运行 SIR 模型仿真确定的异常节点都是一致的,这是由于该 CN 中涉及节点的敏感性存在差异性,并且 α 和 β 的 2 个参数间高度耦合。

4 结 论

1) 利用 CN 能够展示社会-技术系统复杂关联特性的优势,提出一种能够分析风险传播演化动态特性的技术方法,通过对船舶碰撞事故的应用分析,验证了该方法的有效性,为船舶碰撞风险的预防与管理提供新的思路与途径。

2) 在传统 K-壳分解算法的基础上,改进分解函数的适应性,设计兼顾权相关与度相关参数的分解函数,以适用于有向赋权 CN,进而提出一种计算风险事件绝对重要度 (静态重要度) 的方法。

3) 基于船舶碰撞事故报告构造 CN,利用优化后的 K-壳分解算法计算了网络中风险事件的绝对重要度,结果发现,排名前 10 位的事件均是风险传播演化事件,一般被认为是事故直接原因的事故触发事件的绝对重要度要低于预期。

4) 利用 SIR 模型模拟风险在 CN 中的传播演化过程,通过敏感度分析发现,部分具有较高绝对重要度的风险事件敏感度相对较低,表现出较低的风险传播能力,这可为后续实施风险的差异化管控提供重要理论基础。

5) 文中研究是基于有限数据库挖掘尽可能多信息的有效方法,在更大数据库和更多事故报告的情况下,方法的性能将得到进一步改进。

参 考 文 献

- [1] CHAI Tian, HAN Xue. A study on ship collision conflict prediction in the Taiwan strait using the EMD-based LSSVM method[J]. PloS One, 2021, 16(5): DOI: 0.1371/journal.pone.0250948.
- [2] 刘正江,吴兆麟,邹开其,等. 基于专家问卷调查的船舶碰撞事故中人的因素的识别 [J]. 大连海事大学学报, 2003, 29(增 1):43-47.
LIU Zhengjiang, WU Zhaolin, ZOU Kaiqi, et al. Identifying the human factors in ship collisions based on the investigation by questionnaires[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2003, 29(S1): 43-47.
- [3] 李娜. Logistic 回归模型在船舶碰撞受损因素分析的应用[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(22): 141-143.
LI Na. Application of Logistic regression model in damage analysis of ship collision[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(22): 141-143.
- [4] 刘俊峰,胡志强. 船舶碰撞损伤风险分析方法及应用[J]. 船舶工程, 2017, 39(11): 23-29.
LIU Junfeng, HU Zhiqiang. A method for ship collision damage risk analysis and its application[J]. Ship Engineering, 2017, 39(11): 23-29.

- [5] AVLIJAŠ G, RADUNOVIĆ M. Application of event chain methodology in schedule risk analysis[J]. *European Project Management Journal*, 2019, 9(2): 26-34.
- [6] UĞURLU Ö, KÖSE E, YILDIRIM U, et al. Marine accident analysis for collision and grounding in oil tanker using FTA method[J]. *Maritime Policy & Management*, 2015, 42(2): 163-185.
- [7] RAIYAN A, DAS S, ISLAM M R. Event tree analysis of marine accidents in Bangladesh[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 194: 276-283.
- [8] MACRAE C. Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions[J]. *Maritime Policy & Management*, 2009, 36(1): 21-38.
- [9] 司东森,张英俊,郎坤,等. 基于改进 BN 的集装箱船舶碰撞事故致因分析[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(10): 31-37.
SI Dongsen, ZHANG Yingjun, LANG Kun, et al. Causation analysis of container ship collision accidents based on improved BN[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(10): 31-37.
- [10] 杨应柳,晋良海,邵波,等. 基于复杂网络的煤矿火灾爆炸致因研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 145-151.
YANG Yingliu, JIN Lianghai, SHAO Bo, et al. Research on causes of coal mine fire and explosion based on complex network[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 145-151.
- [11] KITSAK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(11): 888-893.
- [12] MA Xiaoxue, DENG Wanyi, QIAO Weiliang, et al. A novel methodology concentrating on risk propagation to conduct a risk analysis based on a directed complex network[J]. *Risk Analysis*, 2022, 42(12): 2 800-2 822.
- [13] GARAS A, SCHWEITZER F, HAVLIN S. A k-shell decomposition method for weighted networks[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(8): DOI: 10.1088/1367-2630/14/8/083030.
- [14] HOLLNAGEL E. *Safety-II in practice: developing the resilience potentials*[M]. London: Routledge, 2018:4-5.

作者简介: 乔卫亮 (1986—),男,山东济南人,博士,副教授,主要从事海洋运输操作性风险管控与战略性海运通道安全保障方面的研究。E-mail:xiaoqiao_fang@dlmu.edu.cn。

