

基于级联失效的船舶碰撞事故关键致因链识别

朱怀伟, 刘建舟, 柴田

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 基于级联失效理论, 提出一种船舶碰撞事故关键致因链识别方法。首先将船舶碰撞事故致因因素抽象为网络模型, 然后设计基于级联失效理论的致因链识别方法, 最后利用100起船舶碰撞事故对该方法进行案例分析。结果表明: 该方法能够有效识别船舶碰撞事故关键致因链, 可为船舶需求优先级管理提供一定的理论依据和决策支持。

[关键词] 船舶碰撞事故; 致因链; 级联失效; 复杂网络

[中图分类号] U 698.6

Identification of Key Causal Chains of Ship Collisions Based on Cascade Failure

ZHU Huaiwei, LIU Jianzhou, CHAI Tian

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361012, China)

Abstract: In order to reveal the evolution pattern of ship collision causes and effectively prevent ship collision accidents, this paper proposed a key causal chain identification method based on the cascade failure theory. Firstly, the causal factors of ship collision are abstracted into a network model. Secondly, the causal chain identification method based on the cascade failure theory is designed. Finally, 100 ship collision accidents are used to analyze this method in a case study. The results of the case study show that this method can effectively identify the key causal chains of ship accidents. It can provide some theoretical basis and decision support for ship demand priority management.

Keywords: ship collision; causal chain; cascade failure; complex network

0 引言

由于水上环境复杂多变, 水上交通事故频频发生。根据相关研究^[1-2]可知, 船舶碰撞事故为水上交通事故首害, 船舶碰撞事故的发生会造成人员伤亡和环境污染。明确船舶碰撞事故致因演化规律, 针对性地干预, 是预防船舶碰撞事故的有效方法^[3]。目前常用的船舶碰撞事故致因分析方法, 主要包括贝叶斯网络法、事故树法和层次分析法。贝叶斯网络法是一种基于概率的分析方法, 是用概率来预测事故发生的可能性^[4]; 然而, 由于船舶航行环境复杂, 一些与外部干扰相关的事故致因发生的概率难以估计。事故树法是一种自上而下的演绎式失效分析法, 主要利用事故致因因素间的因果关系进行建模和分析^[5]; 然而, 事故树法是基于致因因素间线性关系的, 对于船舶碰撞事故致因因素之

[收稿日期] 2022-09-30

[基金项目] 福建省中青年教育科研项目 (JAT200239)

[作者简介] 第一作者: 朱怀伟, 从事海事安全管理研究。通信作者: 柴田, 教授, 从事海上交通安全与应急管理方面的研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

间复杂的非线性关系难以适用。层次分析法是一种可以将复杂的多种元素进行分层和排序的方法^[6];然而,该方法难以分析处于同一层级元素的内在联系。

近年来,有学者^[7-8]将复杂网络应用于船舶碰撞事故致因分析研究中。复杂网络是一种基于图论对复杂系统进行抽象建模的数学方法,考虑了节点之间复杂的耦合关系。相比于事故树法和层次分析法,复杂网络能够对复杂的非线性系统进行建模,并能够分析事故致因因素间的内在关系。同时,相比于贝叶斯网络法,复杂网络可以利用拓扑结构对事故致因进行重要度分析,既能实现对事故致因因素的量化分析,又可以避免部分事故致因概率难以获取的问题。但是,复杂网络拓扑结构仅局限于对事故致因的重要性排序,难以模拟事故致因的演化规律。

级联失效是一种异常信息在网络中传播的现象。在真实网络中,由于受到外部环境的影响,网络中少数节点会发生故障,该故障会随着节点之间的耦合关系在网络中传播,并产生连锁反应引发网络中其他节点相继发生故障,进而使故障传播至整个网络。目前,对复杂网络级联失效现象的研究方法有很多,常用的模型有:负荷—容量模型、二值影响模型、沙堆模型、OPA模型、CASCADE模型等^[9]。鉴于此,本文运用复杂网络级联失效理论对船舶碰撞事故致因开展研究,挖掘船舶碰撞事故关键致因链,明确船舶碰撞风险的传播路径,以期在理论上丰富船舶碰撞事故致因分析的相关研究,在实践上为船舶安全管理提供新思路。

1 模型构建

1.1 船舶碰撞事故致因网络模型构建

构建船舶碰撞事故致因网络模型的关键步骤,是确定网络中的节点和节点之间的连边规则。在真实网络中,一般将研究对象抽象为节点,将研究对象之间的相互关系作为连边规则,在构建船舶碰撞事故致因网络时同样如此。本研究把船舶碰撞事故致因因素抽象为网络节点,把致因因素之间的相互关系作为节点之间的连边。具体网络构建步骤为:1)收集船舶碰撞事故报告;2)分析船舶碰撞事故报告,从中提取致因因素;3)统计在同一起事故中出现的事件链;4)构建船舶碰撞事故致因网络,将事故致因因素作为网络节点,致因因素之间的作用关系作为边,若两个致因因素出现在同一条事件链中,则表示这两个致因因素之间存在作用关系,即两节点之间存在边。

1.2 网络中级联失效过程

考虑船舶碰撞事故致因网络的特点,本研究采用负荷—容量模型。在船舶碰撞事故致因网络中,各个节点都具有一定的初始危险负载,节点在初始危险负载下处于潜伏状态,该状态不会对船舶安全航行造成影响。当船舶运输系统发生扰动,节点的危险负载就会增加。当节点危险负载超过自身阈值时,该节点会由潜伏状态变为失效状态,并且失效节点的危险负载会分配到相邻节点。如果相邻节点的危险负载大于其自身阈值就会一直在网络中传播下去,直到该节点的危险负载小于其自身阈值,危险阈值在网络中的传播才结束。

Motter等^[10]在负载容量模型中,提出网络中节点的信息和能量是按照节点对之间的最短路径传播,即通过节点的最短路径数目可以反映该节点初始负载的大小。在复杂网络中,通过某节点的最短路径数可以用介数来表示,因此,本文用节点的介数来表示节点的初始负载。节点的介数计算公式^[11]为 $D_i(0) = \sum_{j,k \in V(j \neq k)} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$ 。其中: n_{jk} 表示连接点 j 和 k 的最短路径数量; $n_{jk}(i)$ 表示连接点 j 和 k 且经过点 i 的最短路径数量; V 表示网络中节点的集合。

节点容量是决定故障传播的阈值,当节点负载大于其容量时,该节点就会发生故障并将负载传播至相邻的节点。节点容量一般正比于初始负载,即: $C_i = (1 + \lambda) D_i(0)$,其中 λ 为容许系数^[11]。

节点危险负载的分配方式按照不同节点的关联度^[12]进行,其计算方法为: $I_j(k) = w_p p_{ij} + w_d \frac{d_j(k)}{\sum_{j \in v_k} d_j(k)}$ 。其中: w_p 表示传播概率对应的权重; w_d 表示节点关联度对应的权重; p_{ij} 表示节点 i 到

节点 j 的影响概率; $d_j(k)$ 表示第 k 步下行节点中节点 j 的关联度; v_k 表示第 k 步下行节点集合。

节点 i 到节点 j 的影响概率定义为: $p_{ij} = n_{ij} / n_i$ 。其中: n_{ij} 为节点 i 导致节点 j 发生的次数, n_i 为节点 i 发生的次数。

在危险负载传播过程中, 危险节点会把负载全部分配到邻居节点, 本文将危险节点的邻居节点定义为下行节点, 分配规则按照节点之间的关联度进行, 即危险节点与下行节点的关联度越强其下行节点被分配到的负载也越多, 分配后下行节点的负载为初始负载与被分配负载之和, 同时危险节点的负载全部清零, 并且不再进行危险负载的传播。危险节点负载传播后节点负荷值的变化计算式为

$$D_i(t) = 0, \quad D_j(t) = D_j(t-1) + I_{ij} D_i(t-1)。$$

(1)

其中: $D_i(t)$ 和 $D_j(t)$ 分别为 t 步后节点 i 和节点 j 的负载值; $D_j(t-1)$ 和 $D_i(t-1)$ 分别为 $t-1$ 步后节点 j 和节点 i 的负载值。

2 船舶碰撞事故关键致因链识别过程

基于上述网络模型构建, 本文识别船舶碰撞事故关键致因链的具体步骤为:

- 1) $t=0$, 网络中节点在初始负载下都处于正常状态。计算网络中各个节点的初始负载、安全阈值和节点之间的关联度。
- 2) $t=t+1$, 为了模拟节点因系统环境发生变化而发生的扰动, 本文将计算出的初始节点的 2 倍负载分配于初始节点, 使其负载大于自身的安全阈值。
- 3) 遍历初始危险节点的下行节点, 按照公式 (1) 计算下行节点的危险负载值。
- 4) 判断此时下行节点的危险负载是否超过自身安全阈值。如果超过自身安全阈值, 节点的状态转为失效状态, 则危险负载传播开始; 如果没有超过自身的安全阈值, 或危险负载已经传播至事故节点, 则危险负载传播结束。
- 5) 如果下行节点中有多个节点的负载超过自身的安全阈值, 则选择与上行节点关联度最高的下行节点作为新一轮危险负荷传播的起始节点。
- 6) 返回步骤 3), 直到危险负载传播结束。

3 案例分析

3.1 网络构造

本文从中国海事局官网收集了 2021—2022 年在中国沿海发生的 100 起船舶碰撞事故报告。根据事故报告中对事故经过的描述, 以及专家对事故原因的分析, 从人—船—环境—管理 4 个方面中提取了 40 个事故致因 (见表 1) 和一个事故节点 (用字母 C 表示)。

根据 1.1 网络模型构建步骤, 以这些致因因素为节点, 建立船舶碰撞事故致因网络模型 (见图 1)。

3.2 致因链识别

以节点 P1 (瞭望不当) 为例, 分析该致因节点的危险负载在网络中的传播过程。

1) $t=0$, 网络中各个节点的负载都处于初始状态, 此时各个节点处于潜伏状态, 船舶运输系统正常运行。

2) $t=1$, 将额外的负载 $2 D_{P1}(0)$ 分配于节点 P1, 使其负载大于自身的容量, 此时该节点由潜伏状态转变为失效状态, 危险负载开始在网络中传播。经过第一次传播后, 节点 P1 的下行节点的危险负载、安全阈值和关联度如表 2 所示。

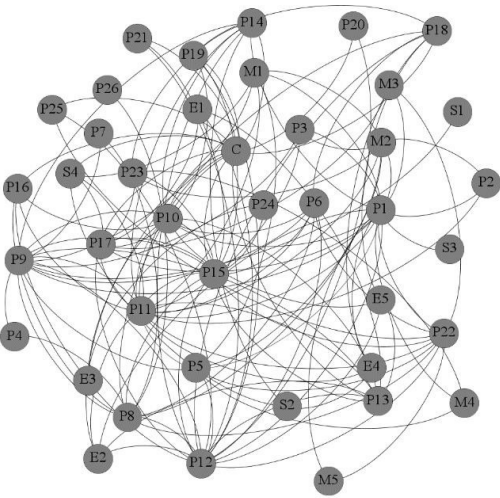


图 1 船舶碰撞事故致因网络模型

Fig.1 Ship collision causation network model

表 1 从 100 份船舶碰撞事故报告中提取到的 40 个事故致因因素
Tab. 1 40 accident causal factors extracted from 100 ship collision reports

致因分类	编号	致因因素	致因分类	编号	致因因素
人为因素	P1	瞭望不当	人为因素	P21	通航分道航行不当
	P2	值班不当		P22	知识经验培训不足
	P3	AIS 使用不当		P23	安全意识淡薄
	P4	VHF 使用不当		P24	应急能力弱
	P5	雷达使用不当		P25	海上航行技能不足
	P6	未按规定显示号灯号型		P26	语言障碍
	P7	操纵信号灯使用不当	船舶因素	S1	航海仪器失灵
	P8	沟通不充分		S2	主辅机故障
	P9	使用不充分的资料进行判断		S3	积载不当
	P10	局面判断失误		S4	船舶不适航
	P11	未及早发现来船	环境因素	E1	通航密度大
	P12	碰撞危险估计不足		E2	能见度不良
	P13	未使用安全航速		E3	台风天气
	P14	未及早采取行动		E4	风浪较大
	P15	避碰行动不当		E5	航道环境复杂
	P16	未采取避让措施	管理因素	M1	配员不足
	P17	未使用良好船艺		M2	驾驶台资源管理不当
	P18	船舶操作不当		M3	无证船员
	P19	横越不当		M4	疲劳驾驶
	P20	追越不当		M5	酒后驾驶

表 2 第一次危险负载传播后下行节点状态表
Tab. 2 Downlink node states after the first dangerous load propagation

下行节点	危险负载 D_i	安全阈值 C	关联度 I_{ij}	下行节点	危险负载 D_i	安全阈值 C	关联度 I_{ij}
P9	0. 1419	0. 1511	0. 6264	M1	0. 0104	0. 0064	0. 5026
P10	0. 0417	0. 0408	0. 5922	M2	0. 0242	0. 0215	0. 5767
P11	0. 1210	0. 1281	0. 6348	M3	0. 0048	0. 0003	0. 5613
P12	0. 1866	0. 2002	0. 5548	M4	0. 0064	0. 0019	0. 5313
P14	0. 0410	0. 0400	0. 5867	M5	0. 0046	0. 0000	0. 4842
P17	0. 0416	0. 0407	0. 5309	E2	0. 0057	0. 0013	0. 4455
P2	0. 0046	0. 0000	0. 4813	E4	0. 0222	0. 0193	0. 5384
P5	0. 0222	0. 0194	0. 5967	P3	0. 0050	0. 0005	0. 4284
S3	0. 0046	0. 0000	0. 4271	P22	0. 0498	0. 0498	0. 5709

由表 2 可知，经过节点 P1 的危险负载传播后，下行节点 P10、P14、P17、P2、P5、S3、M1、M2、M3、M4、M5、E2、E4、P3 的危险负载 D_1 超过自身的安全阈值 C ，其中节点 P5 与 P1 的关联度最高，所以选择节点 P5 作为危险负载第二次传播的起始点。第一次危险负载在网络中的传播过程如图 2 所示。

3) $t=2$ ，经过第一次传播后，节点 P5 的负载大于自身阈值，此时该节点由潜伏状态转变为失效状态，节点 P5 的危险负载向下传播，下行节点的负载变化情况如表 3 所示。

表 3 第二次危险负载传播后下行节点状态表
Tab.3 Downlink node status after the second dangerous load propagation

下行节点	危险负载 D_2	安全阈值 C	关联度 I_{ij}
P9	0.1548	0.1511	0.6831
P11	0.1339	0.1281	0.7639
P12	0.1995	0.2002	0.7439
P22	0.0627	0.0498	0.5620
M1	0.0232	0.0064	0.5312
M2	0.0370	0.0215	0.5916
M4	0.0192	0.0019	0.4806

由表 3 可知，经过节点 P5 的传播后，下行节点 P9、P11、P22、M1、M2、M4 的危险负载 D_2 超过自身安全阈值 C ，其中节点 P11 与节点 P5 的关联度最高，所以选择节点 P11 作为危险负载第三次在网络中传播的起始点。第二次危险负载在网络中的传播过程如图 3 所示。

4) $t=3$ ，经过第二次传播后，节点 P11 的负载大于自身阈值，此时该节点由潜伏状态转变为失效状态，节点 P1 的危险负载向下传播，下行节点的负载变化情况如表 4 所示。

由表 4 可知，经过节点 P11 的传播后，下行节点 P2、P3、P6、P9、P10、P13、P14、P16、P17、P22、S4、M1、M2、E2、E4 的危险负载 D_3 超过自身安全阈值 C ，其中节点 P10 与节点 P11 的关联度最高，所以选择节点 P10 作为危险负载第四次在网络中传播的起点。第三次负载在网络中的传播过程如图 4 所示。

5) $t=4$ ，经过第三次传播后，节点 P10 的负载大于自身阈值，此时该节点由潜伏状态转变为失效状态，节点 P1 的危险负载向下传播，下行节点的负载变化情况如表 5 所示。

由表 5 可知，经过节点 P10 的传播后，下行节点 P6、P9、P13、P14、P15、P16、P17、P19、E1、E5、C 的危险负载 D_4 超过自身安全阈值 C ，其中事故节点 C 与节点 P10 的关联度最高，因此事故节点 C 为此次危险传播的下行节点。第四次负载在网络中的传播过程如图 5 所示。

网络中，经过四次危险负载传播后，最终风险传播到事故节点 C，事故发生，危险负载传播结束。因此，以节点 P1 为起始节点，经过四次危险负载传播后最终得到致因链为 P1 - P5 - P11 - P10 - C。虽然在风险传播过程中有大量致因节点失效，但这条致因链是最容易发生的，即致因链中节点的相互作用最强，最容易导致船舶碰撞事故的发生。

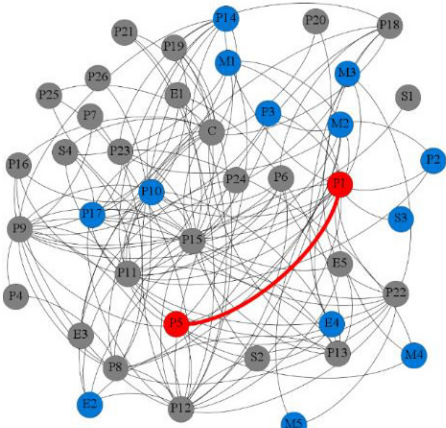


图 2 $t=1$ 致因链形成过程
Fig.2 $t=1$ causal chain forming process

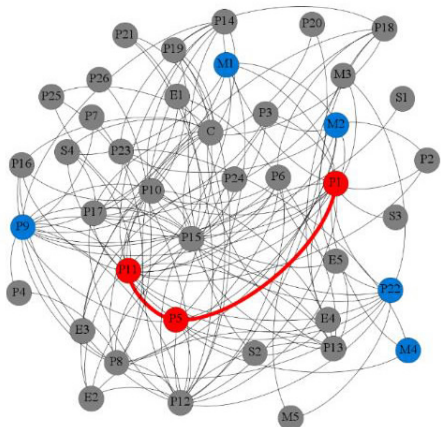


图 3 $t=2$ 致因链形成过程
Fig.3 $t=2$ causal chain forming process

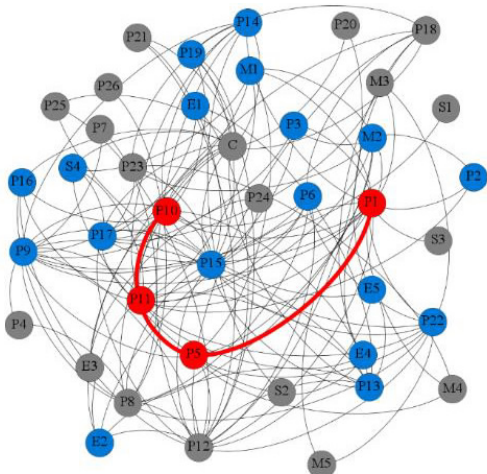


图 4 $t=3$ 致因链形成过程

Fig.4 $t=3$ causal chain forming process

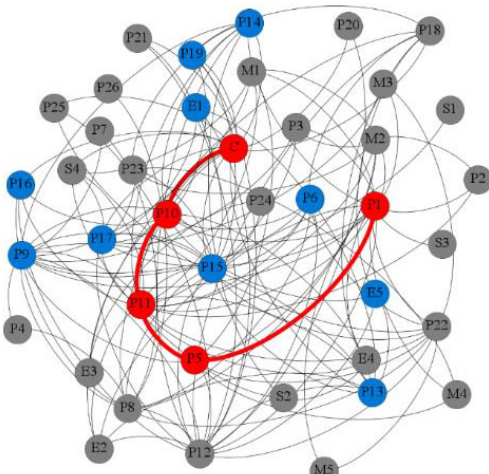


图 5 $t=4$ 致因链形成过程

Fig.5 $t=4$ causal chain forming process

表 4 第三次危险负载传播后下行节点状态表

Tab.4 Downlink node states after the third dangerous load propagation

下行节点	危险负载 D_3	安全阈值 C	关联度 I_{ij}	下行节点	危险负载 D_3	安全阈值 C	关联度 I_{ij}
P2	0.0102	0.0000	0.4980	P17	0.0472	0.0407	0.6399
P3	0.0106	0.0005	0.4940	P22	0.0683	0.0498	0.5299
P6	0.0191	0.0149	0.4579	S4	0.0178	0.0135	0.5599
P9	0.1604	0.1511	0.6098	M1	0.0288	0.0064	0.5959
P10	0.0472	0.0408	0.6578	M2	0.0426	0.0215	0.5279
P13	0.0217	0.0177	0.5539	E2	0.0113	0.0013	0.5099
P14	0.0465	0.0400	0.5179	E4	0.0277	0.0193	0.4940
P15	0.1003	0.1042	0.6238	C	0.0835	0.0857	0.6438
P16	0.0070	0.0016	0.4899				

表 5 第四次危险负载传播后下行节点状态表

Tab.5 Downlink node states after the fourth dangerous load propagation

下行节点	危险负载 D_4	安全阈值 C	关联度 I_{ij}	下行节点	危险负载 D_4	安全阈值 C	关联度 I_{ij}
P6	0.0273	0.0149	0.5497	P17	0.0554	0.0407	0.5946
P9	0.1685	0.1511	0.5719	C	0.0917	0.0857	0.7045
P13	0.0298	0.0177	0.5972	P19	0.0095	0.0014	0.5273
P14	0.0547	0.0400	0.5897	E1	0.0195	0.0013	0.4873
P15	0.1085	0.1042	0.6245	E5	0.0096	0.0016	0.5199
P16	0.0152	0.0016	0.5273				

基于上述致因链识别过程，以网络中各个节点为初始危险节点，逐一对各个节点进行危险负载传播分析，最终得到 40 条致因链（见表 6）。

表 6 网络中 40 条关键致因链
Tab.6 40 key causal chains in the network

编号	致因链	编号	致因链	编号	致因链
1	P1 - P5 - P11 - P10 - C	15	P15 - P10 - C	27	S1 - P9 - P15 - P11 - P10 - C
2	P2 - P11 - P10 - C	16	P16 - P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C	28	S2 - P14 - P11 - P10 - C
3	P3 - P11 - P10 - C	17	P17 - P10 - C	29	S3 - P1 - P5 - P11 - P10 - C
4	P4 - P9 - P8 - P12 - P6 - P11 - P10 - C	18	P18 - C	30	S4 - P11 - P10 - C
5	P5 - P11 - P10 - C	19	P19 - P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C	31	M1 - P11 - P10 - C
6	P6 - P11 - P10 - C	20	P20 - P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C	32	M2 - P11 - P10 - C
7	P7 - P9 - P8 - P12 - P6 - P11 - P10 - C	21	P21 - C	33	M3 - P1 - P5 - P11 - P10 - C
8	P8 - C	22	P22 - P15 - P11 - P10 - C	34	M4 - P1 - P5 - P11 - P10 - C
9	P9 - P5 - P11 - P10 - C	23	P23 - P15 - P10 - C	35	M5 - P1 - P5 - P11 - P10 - C
10	P10 - P13 - P11 - C	24	P24 - P15 - P10 - C	36	E1 - P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C
11	P11 - P10 - C	25	P25 - P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C	37	E2 - P11 - P10 - C
12	P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C	26	P26 - P8 - P9 - P15 - P11 - P10 - C	38	E3 - P18 - P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C
13	P13 - C			39	E4 - P1 - P11 - P10 - C
14	P14 - P11 - P10 - C			40	E5 - P12 - P6 - P9 - P15 - P11 - P10 - C

由表 6 可以看出，各条致因链的形成过程并非相互独立，而存在一定的交叉情况。在 40 条致因链中，有 32 条出现相同子链（P11 - P10 - C），这一子链出现的频率高达 80%，说明这条子链为最高风险传播路径。

为了找出致因链形成过程中的关键致因，本文统计了各个节点在致因链中出现的次数（见图 6）。

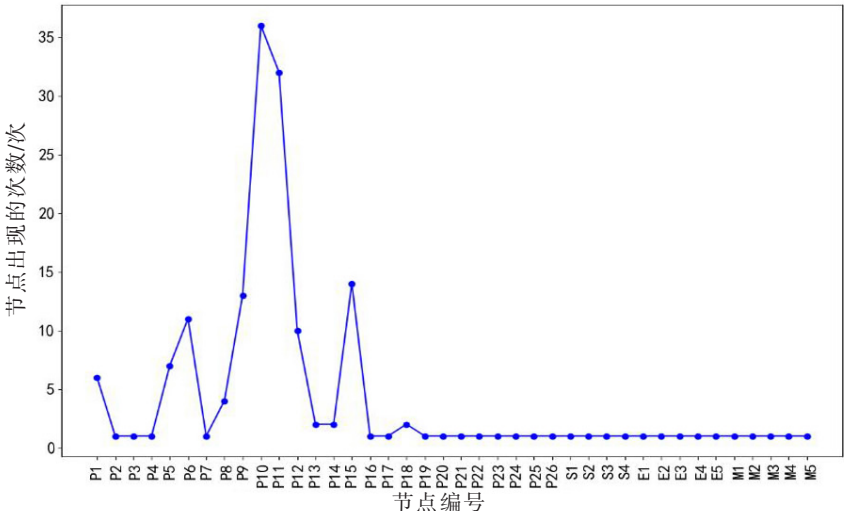


图 6 各节点在致因链中出现的次数

Fig.6 The number of times of each node appears in the causative chain

从图6中可以看出,节点P6、P9、P10、P11、P12、P15出现的次数较多,说明这些节点在致因链形成过程中具有关键作用。

尽管在实际情况中,各个致因因素都有可能发生碰撞风险传播的可能性,但最容易引发事故各个因素之间具有较强的关联性。根据级联失效理论可得到每个致因因素最容易形成的事故致因链。通过对这些关键致因链以及致因链形成过程中起关键作用的致因因素进行监控和干预,可以帮助管理者制定预防措施,进而提高船舶安全管理效率,保障船舶航行安全。

4 结论

本研究将复杂网络级联失效理论应用于船舶碰撞事故致因分析中,用于识别船舶碰撞事故关键致因链,确定船舶碰撞风险最有可能的传播路径。经案例分析表明,本方法是可行的。本方法能够有效识别船舶碰撞事故关键致因链,可为船舶需求优先级管理提供理论依据和决策支持。此外,本研究仅对中国沿海的船舶碰撞事故进行了分析,在后续研究中再将本方法应用到其他水域环境,如北极航线船舶碰撞关键致因链识别,以提升本方法的适用范围和可靠性。

[参考文献]

- [1] CHEN J, BIAN W, WAN Z, et al. Identifying factors influencing total-loss marine accidents in the world: analysis and evaluation based on ship types and sea regions[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 191: 106495.
- [2] 孙书钢. 船舶碰撞事故致因链分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [3] 冯如, 李帅. FDA事故致因模型在海上船舶碰撞事故安全管理中的运用研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(7): 179-185.
- [4] AFENYO M, KHAN F, VEITCH B, et al. Arctic shipping accident scenario analysis using Bayesian network approach[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 133: 224-230.
- [5] UGURLU H, CICEK I. Analysis and assessment of ship collision accidents using fault tree and multiple correspondence analysis[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110514.
- [6] ZHANG D, YANG X R, FAN X B. Research on risk assessment of vessel-bridge collision accident in inland waterway[C]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013: 2790-2793.
- [7] CHAI T, ZHU H, PENG L, et al. Constructing and analyzing the causation chain network for ship collision accidents[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2022: 2250118.
- [8] 李龙浩, 严庆新, 翁建军, 等. 三峡坝区船舶通航安全风险演化的复杂网络模型构建[J]. *船海工程*, 2021, 50(4): 137-140.
- [9] BASHAN A, BEREZIN Y, BULDYREV S V, et al. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(10): 667-672.
- [10] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, et al. Complex networks: structure and dynamics[J]. *Physics Reports*, 2006, 424(4/5): 175-308.
- [11] 花玲玲. 基于长短期记忆网络和复杂网络的铁路事故致因分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [12] 刘津彤. 基于有向图的数控车床故障传播机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)