

基于贝叶斯网络的近海渔船碰撞事故致因分析

张曼铃,丁天明,丁超君,艾万政

浙江海洋大学船舶与海运学院,浙江 舟山 316022

摘要:为减小近海渔船碰撞事故发生的概率,保障渔船航行安全,从渔船视角出发,根据渔船碰撞事故样本数据,采用鱼刺图法分析近海渔船碰撞事故的原因,并将事故原因作为贝叶斯网络的节点进行推理和验证,通过后验概率推理和敏感性分析探究事故致因链。结果表明:人为因素对近海渔船碰撞事故的影响程度最大;其次是管理因素,其中未按规定显示号灯号型、未采取有效的避让行动、瞭望疏忽及配员不符合要求的敏感度较高,对近海渔船碰撞事故的影响程度较大。

关键词:渔船;碰撞事故;鱼刺图;贝叶斯网络;致因分析

中图分类号:U698.6

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)01-0110-06

引用格式:张曼铃,丁天明,丁超君,等.基于贝叶斯网络的近海渔船碰撞事故致因分析[J].山东交通学院学报,2023,32(1):110-115.

ZHANG Manling, DING Tianming, DING Chaojun, et al. Cause analysis of collision accidents of offshore fishing vessels based on Bayesian networks[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 32(1): 110-115.

0 引言

碰撞事故是船舶海上交通事故的主要类型,根据中国海事局对碰撞事故的统计发现,近海渔船碰撞事故所占比例最高^[1]。我国是海洋渔业大国,近海作业的渔船较多,一定程度上增大了近海渔船碰撞事故的发生概率。一旦发生渔船碰撞事故,极易造成渔船船员群死群伤,人员损失和经济损失较严重,对海洋环境存在重大威胁。因此,研究近海渔船碰撞事故致因,降低事故发生概率具有重要的现实意义^[2-3]。

可采用定性分析研究近海渔船碰撞事故致因问题^[4-7]。王彦亮等^[8]基于事故树理论分析石碑山海域商渔船碰撞事故的影响因素;李凯等^[9]采用层次分析法研究引发长江口定线制水域商渔船碰撞事故发生的因素。定性分析直观简洁,但过于依赖主观判断。近海渔船碰撞事故的原因较复杂,将定性分析与定量分析相结合得到的结果更精确。

不考虑他船因素,仅从渔船视角出发,本文汇总整理近海渔船碰撞事故案例,根据事故样本数据,采用鱼刺图法从“人-机-环-管”4方面分析近海渔船碰撞事故的致因因素,确定贝叶斯网络的节点,根据贝叶斯网络对样本数据的机器学习,建立近海渔船碰撞事故的贝叶斯网络,并对其进行推理分析和验证。根据分析结果,提出可行性建议,进一步加强渔业船舶安全风险管控,也为渔业主管部门制定管理制度提供参考。

1 贝叶斯网络理论

贝叶斯网络是基于概率论和图论的推理模型^[10],包括有向无环图(directed acyclic graph, DAG)^[11]

收稿日期:2022-06-15

基金项目:浙江海洋大学人才引进科研基金项目(JX 631180823)

第一作者简介:张曼铃(1998—),女,安徽阜南人,工学硕士,主要研究方向为海上安全技术,E-mail:1113462371@qq.com。

和条件概率表(conditional probability table, CPT)2 个组件, DAG 表示节点间存在的关系, CPT 表示节点间关系的强度^[12]。

DAG 由节点及连接节点的有向边构成, 节点为随机变量。采用单向箭头连接各节点(由根节点指向叶节点)表示节点间的因果关系^[13], 每个节点的 CPT 包含所有可能出现的根节点集合^[14]。节点概率分布描述叶节点与根节点间的相关性, 事件发生的联合概率分布

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) ,$$

式中: X 为贝叶斯网络中的变量集, $X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\}$; $P_a(X_i)$ 为变量 X_i 的根节点集。

贝叶斯网络的理论基础是贝叶斯公式^[15], 表达式为:

$$P(M|N) = P(N|M)P(M)/P(N) ,$$

式中: $P(M)$ 为事件 M 的先验概率, $P(N)$ 为事件 N 的先验概率, $P(N|M)$ 为事件 M 发生的前提下事件 N 发生的概率, $P(M|N)$ 为事件 N 发生的前提下事件 M 发生的概率。

贝叶斯网络方法处理不确定性问题的能力较强, 在对近海渔船碰撞事故进行推理、预测和分析方面的优势明显, 随样本信息的增加, 得到的结果更精确。

2 贝叶斯网络模型构建与分析

2.1 确定贝叶斯网络节点

以中国海事局网站上的近海渔船碰撞事故调查报告为分析基础, 不考虑输出功率小于 44.1 kW 且船长不足 12 m 的小型捕捞渔船碰撞, 经筛选获得 75 起事故的调查报告, 随机选取其中 74 起事故进行统计分析, 并建立近海渔船碰撞事故的贝叶斯网络, 余下 1 起事故用来进行模型验证。

基于事故致因分析中的人-机-环-管(men, machine, medium, management, 4M)要素战略理论, 4M 要素是事故致因, 即从 4 要素角度分类归纳近海渔船碰撞事故的原因, 结合 74 起海事调查报告中海事调查官对事故原因(包括直接原因和间接原因)的分析, 剔除部分低频事件, 采用鱼刺图法分析近海渔船碰撞事故发生的原因, 确定贝叶斯网络的 17 个网络节点, 如图 1 所示。

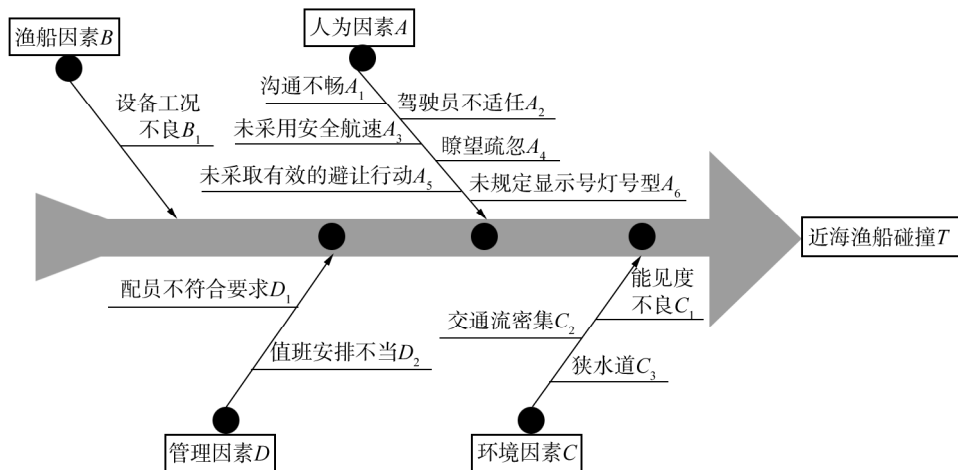


图 1 近海渔船碰撞事故致因鱼刺图

将近海渔船碰撞事故作为输出节点, 按 4M 要素对 74 起海事调查报告中的事故原因进行系统划分和分析, 并对相应的节点命名。

1) 人为因素 A

沟通不畅 A_1 : 未与他船沟通和协调避让, 未按航行规定值守甚高频无线电, 未按规定开启甚高频, 在

航行过程中未保持通信值守频道畅通,存在重大语言沟通障碍问题。驾驶员不适任 A_2 : 渔船驾驶员未持有相应的船舶驾驶员证书,不具备驾驶船舶的资质,操作技能差,业务水平低。未采用安全航速 A_3 : 未根据当时通航水域环境特征和实际通航船只密度严格采用船舶安全航速。瞭望疏忽 A_4 : 未充分采用一切有效手段进行连续正规瞭望,未提前预判和估计碰撞危险。未采取有效避让行动 A_5 : 未及早采取避让行动,不注意采用良好的驾驶船艺、盲目转向,未履行相应船义务,也未按规定采取相应减速、停车或倒车等避让措施及时控制船。未按规定显示号灯号型 A_6 : 渔船锚泊完毕后未按规定显示锚泊号型,拖网捕捞的作业渔船未按规定显示拖网作业号灯。

2) 渔船因素 B

设备工况不良 B_1 : 电子海图和通讯设备工况欠佳,船舶自动识别系统工况不良,未按规定配备和保持导航设备及甚高频无线电通信设备的正常使用。

3) 环境因素 C

能见度不良 C_1 : 主要受海上大雾、浓雾等不良天气影响,海上能见度低,渔船驾驶员视线受阻,影响船舶安全航行。交通流密集 C_2 : 常发生在传统大型渔场和大型海船习惯通道附近水域,来往船舶较多,交通流较大。狭水道 C_3 : 船舶在水宽受限、航道狭窄的水域航行时须遵守一般航行规则,还须符合狭水道航行特别要求。

4) 管理因素 D

配员不符合要求 D_1 : 船东和船长未按要求配备足够且合格的船员上船任职,职务船员持证上岗情况不满足渔船船员任职标准要求。值班安排不当 D_2 : 未安排人员值班,驾驶台值守人员安排不足,值班人员未按工作规定要求^[16]履行值班职责。

2.2 节点概率分布确定

1) 确定根节点的先验概率

所搜集和统计到的事故样本数据较简陋,只考虑各节点事件二态性的情况,即发生、不发生 2 种状态。将统计的事故样本数据输入贝叶斯网络中,通过统计概率得到各根节点的先验概率,如表 1 所示。

表 1 各根节点的先验概率

根节点	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	B_1	C_1	C_2	C_3	D_1	D_2
发生概率/%	23.7	34.2	27.6	82.9	82.9	10.5	15.8	14.5	47.4	9.21	69.7	15.8
不发生概率/%	76.3	65.8	72.4	17.1	17.1	89.5	84.2	85.5	52.6	90.8	30.3	84.2

2) 确定非根节点的条件概率

非根节点包括叶节点 T 和中间节点 $A、B、C、D$ 。根据统计学方法、贝叶斯公式和表 1 中根节点的先验概率确定非根节点的条件概率^[12]。

以中间节点 C 为例,根据贝叶斯网络对事故样本数据的机器学习得到中间节点 C 的条件概率,如表 2 所示。

2.3 构建贝叶斯网络模型

采用有向边连接根节点事件、中间节点事件及叶节点事件,根据贝叶斯网络对事故样本数据的机器学习,采用软件 Netica 计算近海渔船碰撞事故致因概率的贝叶斯网络模型,结果如表 3 所示。

由表 3 可知:各节点按引发近海渔船碰撞事故的概率从大到小排列依次为 $A、D、C、B、A_4、A_5、D_1、C_2$ 的先验概率较大,更易引发近海渔船碰撞事故。

表 2 根节点状态及中间节点 C 的条件概率

根节点状态			中间节点 C 的条件概率/%	
C_1	C_2	C_3	不发生	发生
不发生	不发生	不发生	97	3
发生	不发生	不发生	14	86
不发生	发生	不发生	3	97
不发生	不发生	发生	14	86
发生	发生	不发生	14	86
发生	不发生	发生	50	50
不发生	发生	发生	33	67
发生	发生	发生	50	50

表 3 近海渔船碰撞事故致因概率的贝叶斯网络模型分析结果

节点	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i> ₁	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>A</i> ₄	<i>A</i> ₅	<i>A</i> ₆	<i>B</i> ₁	<i>C</i> ₁	<i>C</i> ₂	<i>C</i> ₃	<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂
发生概率/%	83.2	78.8	32.7	54.9	72.2	23.7	34.2	27.6	82.9	82.9	10.5	15.8	14.5	47.4	9.2	69.7	15.8
不发生概率/%	16.8	21.2	67.3	45.1	27.8	76.3	65.8	72.4	17.1	17.1	89.5	84.2	85.5	52.6	90.8	30.3	84.2

2.4 后验概率推理

由表 3 可知,叶节点 *T* 的先验概率为 83.2%。贝叶斯网络的不确定性推理能力较强,能正向推理、由因推果,还能实现逆向推理,由结果推导原因^[17]。将叶节点的概率设置为 100%,由贝叶斯网络推导近海渔船碰撞事故发生条件下的各节点后验概率,如表 4 所示。

表 4 贝叶斯网络各节点后验概率

节点	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i> ₁	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>A</i> ₄	<i>A</i> ₅	<i>A</i> ₆	<i>B</i> ₁	<i>C</i> ₁	<i>C</i> ₂	<i>C</i> ₃	<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂
发生概率/%	100	86.2	31.3	56.2	74.3	23.0	33.8	27.0	84.1	84.1	9.5	15.2	14.7	48.3	9.3	71.6	16.0
不发生概率/%	0	13.8	68.7	43.8	25.7	77.0	66.2	73.0	15.9	15.9	90.5	84.8	85.3	51.7	90.7	28.4	84.0

由表 4 可知:由 *A* 引发近海渔船碰撞事故的概率最大,其次是 *D*。将 *A* 的节点概率设置为 100% 后发现,*A* 事件中由 *A*₅ 引发渔船碰撞事故的概率最大,由此得到整个事故的致因链。同理可将 *B*、*C* 和 *D* 的节点概率分别设置为 100%,可得到 *B* 事件中由 *B*₁、*C* 事件中由 *C*₂、*D* 事件中由 *D*₁ 引发近海渔船碰撞事故的概率最大。

2.5 敏感性分析

判断各节点对叶节点的影响程度^[18],对叶节点近海渔船碰撞事故进行贝叶斯网络敏感性分析,结果如表 5 所示。相关度信息为各节点因素对叶节点的依赖程度,数值越大,敏感性越强^[19-20]。

表 5 叶节点的贝叶斯网络敏感性分析结果

节点	相关度信息	相关度信息百分比/%	相关度指标变异系数	节点	相关度信息	相关度信息百分比/%	相关度指标变异系数
<i>T</i>	0.653 35	100.000	0.139 846 1	<i>C</i> ₂	0.001 31	0.201	0.000 253 3
<i>A</i>	0.096 34	14.700	0.022 177 2	<i>A</i> ₁	0.000 98	0.150	0.000 194 6
<i>D</i>	0.007 69	1.180	0.001 567 0	<i>B</i> ₁	0.000 96	0.147	0.000 193 8
<i>D</i> ₁	0.005 37	0.822	0.001 081 0	<i>A</i> ₃	0.000 71	0.108	0.000 139 7
<i>A</i> ₆	0.003 85	0.589	0.000 822 8	<i>A</i> ₂	0.000 22	0.034	0.000 043 6
<i>A</i> ₅	0.003 52	0.539	0.000 727 6	<i>D</i> ₂	0.000 15	0.023	0.000 028 4
<i>A</i> ₄	0.003 22	0.493	0.000 664 4	<i>C</i> ₁	0.000 14	0.021	0.000 025 8
<i>B</i>	0.003 22	0.493	0.000 640 5	<i>C</i> ₃	0.000 03	0.005	0.000 006 6
<i>C</i>	0.002 55	0.391	0.000 497 2				

由表 5 可知:*A* 和 *D* 的敏感性较高,对近海渔船碰撞事故的影响较大;根节点 *D*₁、*A*₆、*A*₅、*A*₄ 的敏感度比其他根节点大,这 4 个因素的小幅变化都会对近海渔船碰撞事故产生较大影响。

3 实例验证

以近海渔船碰撞事故样本中余下 1 起事故作为验证贝叶斯网络有效性的模型,确保结论的可靠性。样本事故为:2019-03-12 凌晨,从渔场返回舟山沈家门的浙江岱山籍钢质渔船与一艘巴哈马籍散货船在

东海水域发生碰撞。事故发生水域能见度良好,但通航环境复杂,是大型海船习惯通道,也是东海传统作业渔场,交通流密集。仅从事故渔船角度分析造成本起事故的原因:瞭望疏忽,未充分利用一切有效手段保持正规瞭望,未充分估计本船与他船间的碰撞危险;未采取有效的避让行动,未正确履行直航船义务,作为处于交叉相遇危险局面中的直航船,紧迫局面已形成后,船长误认为对方商船未采取让路行动,便独自采取大幅度左转的避让措施。

将样本事故报告中的“交通流密集、瞭望疏忽、未采取有效的避让行动”作为节点输入贝叶斯网络模型,设置节点的概率为100%,得到事故验证贝叶斯网络,如表6所示。由表6可知:近海渔船碰撞事故发生的概率为87.2%,说明建立的贝叶斯网络适用该起事故。

表6 事故验证贝叶斯网络

节点	T	A	B	C	D	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	D ₁	D ₂
发生概率/%	87.2	85.6	32.7	92.3	72.2	23.7	34.2	27.6	100	100	10.5	15.8	14.5	100	9.2	69.7	15.8
不发生概率/%	12.8	14.4	67.3	7.7	27.8	76.3	65.8	72.4	0	0	89.5	84.2	85.5	0	90.8	30.3	84.2

4 对策和建议

1) 增强渔船驾驶员的安全责任意识

人为因素中未按规定显示号灯号型、未采用安全航速、瞭望疏忽等问题是渔船驾驶员安全意识薄弱的问题。渔船监督管理部门须着力做好渔船船员的海上安全教育工作,督促渔船在出海航行、作业捕捞和停靠锚泊时按规定采用安全航速,悬挂相应号灯号型和严格执行驾驶台值班瞭望制度^[16]。遇有其他船舶可能发生迫近危险时,渔船驾驶员须按相关规则^[21]及时发出声、光信号,及早起锚采取相应的避碰措施,必要时可使用船舶自动识别系统等通信设备对船舶间可能产生的危险局面进行即时沟通和联系。

2) 提高渔船驾驶员的专业技能水平

渔船监督管理部门需加强对渔船驾驶员航海技能和相关规则的培训,重点加强渔船和商船会遇情况下的避让方法培训,提高渔船驾驶员的操作技能水平、知识理论水平和安全责任意识,杜绝不按规定避让,不按规定履行直航船或让路船义务等违规违章行为。尚有部分渔船驾驶人员对雷达性能未完全熟悉,不熟悉雷达设备的基本导航参数的正确设置、远近量程功能的准确切换、航行信息数据的读取等基本功能操作,建议渔政主管部门加强渔船驾驶人员对航海仪器的正确使用规范培训,避免发生类似事故。

3) 重视复杂环境的航行安全

在能见度不良航行情况下,部分渔船驾驶员未鸣放雾号,也未采取相应的雾航措施;或在狭水道航行时,未遵守狭水道航行的特别要求,最终引发碰撞事故。需提高渔船驾驶员应对不同复杂局面的处理能力,严格遵守在交通流密集、能见度不良等特殊通航环境下航行的操作规程。

4) 严格落实渔船安全管理责任

渔船所有人需严格按照规定落实渔船安全管理生产主体责任和安全管理责任,为每艘船舶配备足够且合格的船员,禁止聘用未经相关专业培训和未持有相应适任考核证书的不合格人员。渔业主管部门需加强对出海渔船船舶配员情况的日常跟踪监管,充分利用网络信息化平台等技术手段,重点核查长期连续在外作业的渔船配员情况和渔民持证情况,着力消除渔船配员人证不一致的安全隐患,保证渔船配员始终满足最低安全配员要求。渔政部门还需加强辖区内的渔船管理,督促并检查渔船配备海上通用甚高频设备情况,增强渔船和他船间的海上有效联系。

5 结束语

根据74起近海渔船碰撞事故调查报告,按人-机-环-管要素战略理论分析近海渔船碰撞事故中渔

船一方的过失原因,建立近海渔船碰撞事故的贝叶斯网络,通过后验概率推理和敏感性分析,找到近海渔船碰撞事故的致因链,结果表明:人为因素对近海渔船碰撞事故的影响程度最大,其次是管理因素,其中未按规定显示号灯号型、未采取有效的避让行动、瞭望疏忽及配员不符合要求的敏感度较高。

实际发生渔船碰撞事故时,碰撞双方均有责任。因事故样本数和数据挖掘能力有限,可进一步考虑在他船过失的情况下对事故样本数据进行深度挖掘。

参考文献:

- [1] 张照斌. 日照市岚山港区水域渔船现状及防范商渔船碰撞风险分析[J]. 中国水运(下半月), 2023, 23(6): 14-16.
- [2] 李锋. 一起商渔船碰撞事故原因分析及应对措施[J]. 珠江水运, 2022(19): 34-36.
- [3] 郭俊东, 李凯. 长江口定线制水域商渔船碰撞风险防范措施[J]. 水运管理, 2022, 44(9): 21-25.
- [4] 王华飞, 张丽娟. 渔船与商船碰撞原因分析及预防措施[J]. 水运管理, 2019, 41(3): 24-25.
- [5] 谢启迪. 渔船与商船碰撞事故原因分析与预防措施[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(6): 25-26.
- [6] 何豪力. 浅析舟山海域渔船碰撞事故发生原因及防范措施[J]. 中国水产, 2021(2): 59-62.
- [7] YANG J X, SUN Y, SONG Q Y, et al. Laws and preventive methods of collision accidents between merchant and fishing vessels in coastal area of China[J]. Ocean and Coastal Management, 2023, 231: 1-26.
- [8] 王彦亮, 王军. 基于 FTA 的石碑山海域商渔船碰撞风险研究[J]. 珠江水运, 2021(8): 98-101.
- [9] 李凯, 郭俊东, 张博, 等. 基于层次分析法的长江口定线制水域商渔船碰撞因素研究[J]. 中国海事, 2023(10): 9-12.
- [10] 郑逸雪. 基于 FTA-BN 的地铁车站施工风险评价研究[J]. 项目管理技术, 2022, 20(2): 78-82.
- [11] 郭连琦. 基于贝叶斯网络的船舶碰撞事故人为因素分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
- [12] 刘子涛, 杜柏松, 贾帅林. 基于贝叶斯网络的船舶大风浪中倾覆事故致因分析[J]. 上海海事大学学报, 2022, 43(3): 56-61.
- [13] 石庆喜. 因果图学习与推理算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [14] 张金辉, 李国强, 罗禹贡, 等. 基于贝叶斯网络的联网环境中跟车工况下的前车运动状态预测[J]. 汽车工程, 2019, 41(3): 245-251.
- [15] XU Q W, XU K L. Risk assessment of rail haulage accidents in inclined tunnels with Bayesian network and bow-tiemodel[J]. Current Science, 2018, 114(12): 2530-2538.
- [16] 交通运输部. 中华人民共和国海船船员值班规则[S/OL]. (2020-07-20) [2022-06-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/15/content_5526921.htm.
- [17] 徐青伟, 许开立, 周方, 等. 基于贝叶斯网络的食物安全风险因素分析[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 502-504.
- [18] 强永康. 基于故障树贝叶斯网络的道路交通事故致因分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [19] 徐一旻, 田梦莹, 李治, 等. FTA-BN 在机场跑道入侵事故影响因素分析中的应用[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1361-1367.
- [20] 王鹏, 徐建良. 基于贝叶斯网络的信息系统风险评估研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(5): 131-138.
- [21] 国际海事组织. 国际海上避碰规则[S/OL]. [2022-06-10]. <https://baike.so.com/doc/6507003-6720724.html>.

Cause analysis of collision accidents of offshore fishing vessels based on Bayesian networks

ZHANG Manling, DING Tianming, DING Chaojun, AI Wanzheng

School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China

Abstract: To reduce the probability of collisions between fishing vessels in the vicinity of the coast and ensure the safety of fishing vessel navigation, an analysis of the causes of these collisions is conducted using the fishbone

(下转第 123 页)