

# 基于模糊贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策方法

陈厚忠<sup>1,2</sup>, 李智厚<sup>1,2</sup>, 韩雕<sup>3,4,5</sup>, 徐延龙<sup>1,2</sup>

1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
4. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;
5. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**客滚运输作为水路交通系统的重要组成部分,在内河、沿海甚至跨海峡之间的水路运输服务中扮演着重要角色。近年来,客滚船碰撞事故时有发生,为降低因碰撞造成的损失,提出基于模糊贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策模型。通过引入模糊逻辑对确定的客滚船碰撞应急决策变量进行定量或定性的模糊化处理,并结合改进的IF-THEN规则获得置信规则库,再将其转换为条件概率表,从而建立完整的贝叶斯网络推理结构,最终通过效用值确定最优应急决策方案。案例验证的结果表明所提出的应急决策模型有效可行,且符合实际应用场景。研究成果为船舶决策者在发生客滚船碰撞事故时提供应急决策的判断依据。

**关键词:**客滚船碰撞事故;应急决策;模糊逻辑;贝叶斯网络

中图分类号:U698.6 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.006

## An emergency decision-making method for Ro-Ro passenger ship collisions based on fuzzy Bayesian network

CHEN Houzhong<sup>1,2</sup>, LI Zhihou<sup>1,2</sup>, HAN Diao<sup>3,4,5</sup>, XU Yanlong<sup>1,2</sup>

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Hubei Inland Shipping Technology Key Laboratory, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. Intelligent Transport Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
5. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** As an important component of the waterway transportation system, Ro-Ro passenger ship transportation plays a significant role in inland river, coastal, and even cross-strait transport services. In recent years, collisions involving Ro-Ro passenger ships have occurred from time to time. To mitigate the losses caused by such accidents, this paper proposes an emergency decision-making model for Ro-Ro passenger ship collisions based on a fuzzy Bayesian network. The identified emergency decision variables for RoPax ship collisions are fuzzified by introducing fuzzy logic. Combined with improved IF-THEN rules, confidence rule bases are established and then converted into a conditional probability table, thereby constructing a complete Bayesian network inference structure. Ultimately, the optimal emergency decision scheme is determined through utility value evaluation. The results demonstrate that the proposed emergency decision-making model is effective and feasible, aligning with practical application requirements. This study provides ship decision-makers with a

收稿日期:2024-11-02

第一作者:陈厚忠(1976—),男,副教授,博士,研究方向为海事安全与保障。E-mail:chzwhut@163.com

通信作者:韩雕(1996—),男,博士生,研究方向为海事安全与智能航运。E-mail:diao.han@whut.edu.cn

引用格式:陈厚忠,李智厚,韩雕,等.基于模糊贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策方法[J].中国航海,2025,48(4):47-58.

CHEN H Z, LI Z H, HAN D, et al. An emergency decision-making method for Ro-Ro passenger ship collisions based on fuzzy Bayesian network[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 47-58. (in Chinese)

reference basis for emergency response in the event of a RoPax ship collision.

**Key words:** Ro-Ro passenger ship collision; emergency decision-making; fuzzy logic; Bayesian network

客滚运输作为水路运输的重要组成部分,在内河、沿海甚至跨海峡之间的运输服务中发挥着不可或缺的作用;这种运输方式通常能同时运输大量的旅客和车辆等货物,成为一种便捷的交通选择方案。由于客滚船上层建筑高大、车辆舱室未设横向舱壁的特殊构造,使其与一般船舶相比具有抗沉性差、稳性弱的特点<sup>[1-2]</sup>;同时,若客滚船在航行中与他船发生碰撞,可能会导致因绑扎不牢的滚装车辆或货物发生移位或颠倒,从而进一步降低船舶稳性<sup>[1]</sup>,是客滚船发生碰撞时容易翻沉的主要原因之一。此外,滚装车辆在撞击时容易引发火灾/爆炸事故,从而加重了旅客的事故恐慌心理<sup>[3]</sup>,使事故的应急处置和救援工作难度进一步加剧。因此,客滚运输的航行安全成为水上交通安全的重要挑战之一。

1) 目前,关于客滚船航行安全的研究已由国内外学者从不同的角度发表了见解。船舶通航风险评估一直以来都是船舶航行安全的重要研究内容,对于这个主题许多学者主要从风险的角度对客滚船的运输安全进行研究;使用的风险评价方法有可拓学理论<sup>[2]</sup>、预先危险性分析法<sup>[4]</sup>、贝叶斯网络<sup>[5-8]</sup>、综合安全评估<sup>[9]</sup>和脆性联系理论<sup>[10]</sup>,这些研究成果为客滚船的航行安全和风险防控提供有价值的参考依据。近年来,在全球节能减排的号召下,应用新能源技术的电动车辆的使用量逐年攀升。同时,根据应急管理部消防救援局公布的数据显示由新能源车辆导致的火灾事故数也在快速增加<sup>[11]</sup>。在这种背景下,WU等<sup>[12]</sup>开发一种数据驱动的贝叶斯网络模型来分析电动车辆在客滚船运输途中发生火灾的概率,并利用敏感性分析的结果发现关键的火灾因素,为电动车辆在客滚船运输途中的安全管理提供有效的监管措施;周东东<sup>[13]</sup>通过事故统计资料建立客滚船火灾故障树,旨在保障客滚船的航行安全。

2) 一些学者从事故应急的角度着手,对客滚船发生事故后的应急决策及处置响应能力进行研究。李若哲等<sup>[14]</sup>基于全球航运信息系统(Global Integrated Shipping Information System, GISIS)数据库统计分析客滚船碰撞事故的原因,并建立事故致因分析模型来衡量不同事故场景导致事故发生的重要度;MONTEWKA等<sup>[15]</sup>和胡甚平等<sup>[16]</sup>结合客滚船事故的应急特征建立客滚船航行安全韧性分析模型,研究结果可作为事故应急决策支持系统的工具应用。为充分挖掘客滚船碰撞事故的影响因素,基于GISIS数据库检索了近10 a的客滚船事故数据,统

计发现客滚船碰撞事故位居第二(占21.1%),仅次于火灾/爆炸事故(占21.6%),GISIS数据库客滚船事故统计见图1。因此,有必要开发一个有效的客滚船碰撞应急决策方法来为相关人员提供决策支持,以保障水上交通安全。

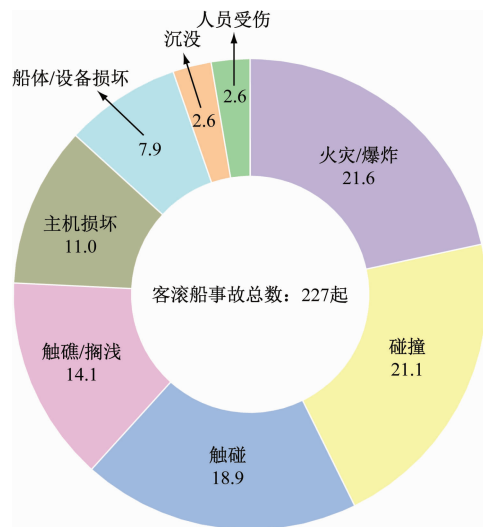


图1 GISIS数据库客滚船事故统计(2014—2024)(单位:%)  
Fig. 1 Statistics of RoPax ship accidents in GISIS database (2014—2024) (Unit:%)

通过查阅文献发现,对于客滚船碰撞事故应急决策的研究与常规船舶碰撞事故的应急决策类似<sup>[17-20]</sup>。值得注意的是,在这些研究成果中,WU等<sup>[17]</sup>从船舶决策者(通常为船长)角度出发,对船舶碰撞事故的应急决策进行建模,但其考虑的是一般货船;王庆珺<sup>[18]</sup>考虑到客滚船在发生碰撞事故后的应急处置决策需在船岸协同的帮助下进行,从而建立一个贝叶斯网络3层决策框架来获取最佳应急决策方案,但其建立的模型输入参数具有很强的主观性;张荀<sup>[19]</sup>以一般货船为研究对象,旨在通过评估船舶碰撞事故的不同态势来制定相应的应急决策方案,但其更宏观,是整个碰撞事故应急救援的决策方案;上述文献均是对船舶发生碰撞事故后的应急决策开展研究,张明阳<sup>[20]</sup>从预防发生船舶碰撞事故的角度提出破冰船护航下的避碰决策方法。

基于上述分析,本文提出一个基于模糊贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策模型,旨在为船舶决策者在发生碰撞事故时提供应急决策的判断依据。考虑到本文搜集的客滚船碰撞事故样本数据有限,此时如果单凭统计的样本数据来确定贝叶斯网络的条件概率表是不恰当的<sup>[21]</sup>;因此,引入模糊逻辑对客滚船碰撞应急决策变量进行模糊化处理,并结合改

进的 IF-THEN 规则获得置信规则库,再将其结果转换为条件概率表,以建立完整的贝叶斯网络推理结构。最后,为验证本文提出的决策模型的通用性和有效性,选取 2 个典型的客滚船碰撞事故案例进行验证。

## 1 建立基于模糊贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策模型

### 1.1 客滚船碰撞应急决策框架的构建

客滚船发生碰撞事故后的应急决策是一个复杂的问题,受到多种因素的影响。本文将模糊逻辑和贝叶斯网络结合建立通用的客滚船碰撞事故应急决策框架见图 2。

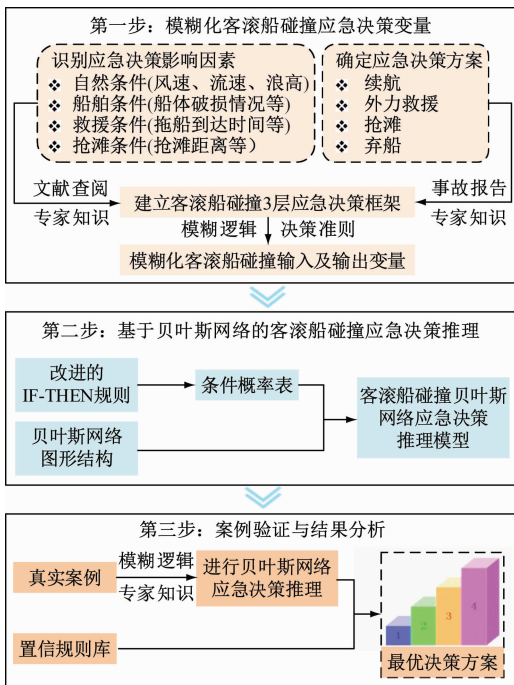


图 2 通用的客滚船碰撞事故应急决策框架

Fig. 2 A general emergency decision framework for RoPax ship collisions

1) 从以往的文献资料、事故案例和专家知识中识别影响因素及其属性,并确定可能存在的决策方案,以此建立客滚船碰撞包括输入层(影响因素)、推理层(决策属性)和输出层(决策方案)等 3 层应急决策框架(见第 1.6.2 节)。

2) 引入模糊逻辑对影响因素进行模糊化处理,通过改进 IF-THEN 规则准确描述影响因素与决策属性的推理关系,并将建立的置信规则库转换为贝叶斯网络的条件概率表,以进行客滚船碰撞的贝叶斯应急决策推理。

3) 基于真实的客滚船碰撞事故案例,获取各影响因素的模糊化值,结合置信规则库进行决策推理

得出最优决策方案,并对结果进行比较分析。

### 1.2 客滚船碰撞应急决策变量的识别

客滚船与一般船舶相比,在船舶结构和操纵性能方面有着显著的特点。

1) 上层建筑高大:为满足同时载运旅客和车辆的功能,客滚船一般设有宽大的车辆舱室,并设计多层旅客舱室,使船体一般较为高大<sup>[1-2]</sup>。

2) 车辆舱室未设横向舱壁:为方便车辆的进出和停放,客滚船一般采用纵骨架式结构;一旦发生碰撞事故,滚装车辆可能发生移位或颠倒,从而降低船舶稳性;若发生破舱进水,会加速船舶倾覆速度<sup>[1]</sup>;遭受撞击的车辆(新能源电车)可能会发生火灾/爆炸<sup>[11-13]</sup>,火势在这种宽大舱室中会迅速蔓延并难以控制,进一步加大事故救援的难度和旅客生命财产的损失。

3) 船舶稳性较差:客滚船上层建筑高大,且同时载有大量旅客和车辆货物,在发生事故时,由于不可控因素较多而比较难以控制稳性高度,导致稳性较差<sup>[1]</sup>。

4) 操纵性能较好:由于客滚船靠离码头较为频繁,其一般设有侧推器以克服船舶低速运动时的欠驱动性,使其具有较好的操纵性能<sup>[1-2]</sup>。

客滚船具有同时运输旅客和滚装货物的特殊功能属性,若其发生碰撞事故,船舶决策者必须在充分考虑和评估各种变量影响的前提下才能做出恰当的决策方案,以最大限度地保障生命财产的安全。同时,客滚船与他船发生碰撞后需在短时间内做出应急决策,导致如果直接建立包含所有相关影响因素的应急决策模型是不切实际的。在这种情景下,主要从之前的研究论文中识别客滚船碰撞应急决策方案选择的主要影响因素。

结合客滚运输的特性,调查发现关于客滚船碰撞应急决策方案选择的影响因素主要包括风、浪、碰撞速度、碰撞角度、滚装车辆移位情况、滚装车辆数量、是否引发火灾和人员伤亡情况等 19 个影响因素,客滚船碰撞事故应急决策变量选择的解释见表 1。船舶总吨越大代表其抗沉性也就越好,发生碰撞的两艘船舶吨位越大,造成的船体破损程度越大;若碰撞中两船的总吨相差较大,此时较小的船舶可能被撞沉,本文提出的客滚船应急决策方法对该结果将无意义。因此,在文献[1]和文献[17]研究的基础上,选取“船舶总吨比”(相撞船舶总吨与客滚船总吨的比值,即相撞船舶总吨相对客滚船总吨的倍数)作为应急决策方案的模糊推理变量。此外,抢滩距离是客滚船发生碰撞后是否进行抢滩决策时须

考虑的必要变量之一<sup>[18]</sup>,但由于客滚船航行环境和船舶状况的复杂多变性,导致其在模糊化过程中难以进行定量描述。因此,为方便建模过程,选用抢滩

条件代替抢滩距离来推理客滚船碰撞应急决策方案的选择。

表1 客滚船碰撞事故应急决策变量选择的解释

Tab.1 Explanation of the selected emergency decision variables for RoPax ship collisions

影响因素	解释	来源
风速	不利风况可能会增加船舶碰撞的可能性,也会影响客滚船碰撞事故的救援条件。	[1]、[17]、[18]
流速	流速越快使碰撞两船更加难以控制,船体破损时也可能增加进水速度。	
浪高	大风浪使救援变得困难,也可能增加船舶进水量。	
船舶总吨比	船舶总吨比表征相撞船舶总吨相对客滚船总吨的倍数,其值越大,客滚船总吨越小于相撞船舶总吨,客滚船相对越危险,反之越安全。	[1]、[17]
碰撞角度	发生的碰撞角度越大,造成的船体破损程度越高。	[17]、[18]
碰撞速度	发生的碰撞速度越快,造成的船体破损程度越高。	
碰撞部位	船体破损在水线面以上时,应急处置较为容易;船体破损在水线面以下时,应急处置困难,也增加了船舶沉没的可能性。	
破损舱室	根据船舶抗沉性,若车辆舱室发生破舱进水,船舶沉没的可能性越大。	[18]
机械损坏情况	主机、舵机和辅机是否完好决定了船舶能否续航的条件。	[3]、[14]、[17]、[18]
排水及堵漏措施	发生碰撞后,若船舶进水,船员应第一时间进行排水及堵漏操作。	[18]
船舶稳性	被撞船舶稳性状态平衡、动态平衡和失去稳性。	
驳船到达时间	驳船的到达时间是非常重要的,驳船可接收乘客、协助事故船舶调整稳定性。	
拖船到达时间	拖船的到达时间是非常重要的,因为在紧急情况下的时间是有限的,到达时间是根据到港口的距离来确定的。	[17]、[18]
抢滩条件	客滚船碰撞后航行性能受到限制,抢滩距离的远近影响是否进行抢滩决策的选择。	[1]
滚装车辆数量	滚装车辆数量越多,发生火灾/爆炸的可能性也就越大;滚装车辆在发生碰撞时可能出现移位或颠倒的现象,将进一步降低船舶稳性可能导致客滚船倾覆。	
滚装车辆移位情况	滚装车辆在撞击时由于惯性会往一侧偏移,致使客滚船重心发生偏移而降低船舶稳性;若滚装车辆发生移位的程度较大,在调整稳性时的工作难度也较大。	
是否引发火灾	受撞击的滚装车辆容易引发火灾/爆炸,对旅客生命财产造成很大的威胁,会增加旅客的心理恐慌,增加事故应急处置的难度。	[9]、[10]
人员伤亡情况	人员伤亡会对旅客的心理表现和事故的应急处置产生不利影响。	[22]
旅客心理恐慌	事故的发生会影响旅客的心理情绪,影响到事故应急处置的决策判断,严重时会影响事故的应急决策结果。	[3]

### 1.3 客滚船碰撞应急决策方案的确定

船舶发生碰撞事故后的应急处置一直都是各方相关部门与海事当局重点关注的问题,事故的处置措施也通常取决于船舶决策者的决策方案。通过分析相关事故报告和查阅文献资料,确定客滚船发生碰撞事故后,船长的应急决策有续航、外力救援、抢滩和弃船等4种方案。

1) 续航:发生碰撞后,第一时间须查明船体破损程度、进水情况和机械设备损坏情况(尤其是主

机、舵机等关于控制船舶运动的机械设备)等影响船舶航行安全的隐患;须对存在的安全隐患采取相应的干预措施,例如,若发现船体进水,则根据碰撞应急预案须关闭水密门并利用一切可能的方法进行排水及堵漏,尽最大努力使船舶不再进水且能保持正常的稳性。经过仔细检查,若船舶机械设备完好、船体未破损或船体破损后经过干预措施的实施使船舶具有正常的稳性,此时船舶决策者通常选择继续航行至最近的码头,以便进行更深入的事故调查和

更详细的船舶定损与检修。

2) 外力救援:通常情况下,发生碰撞后若发现船体进水,单凭船员自身采取相应的措施来干预进水往往非常困难,因为依靠人力来进行排水和堵漏操作存在较高的风险,实施较困难,尤其是船舶破损位置在水线面以下时,单凭船员自身力量干预进水使船舶不再进水是不切实际的,但船员仍须尽最大努力使船舶缓慢进水且能保持一定的稳性。此时,船舶不具备续航的条件,为避免船舶沉没,船舶决策者通常会分析外力救援条件和抢滩条件做出相应的决策方案,若外力救援条件优于抢滩条件时寻求外力救援,以利用外力救援来调整船舶稳性和进水量,从而防止船舶沉没。

3) 抢滩:根据上述外力救援决策方案的分析,若抢滩条件优于外力救援条件时选择抢滩决策方案,因为当船舶有下沉趋势但外力救援力量又无法赶到时,为防止船舶沉没,抢滩成为唯一的决策方案。

4) 弃船:在上述决策方案均失效时,船舶沉没趋势明显,船舶决策者可决定弃船,并迅速组织乘客以及船舶按弃船方案部署实施。

## 1.4 客滚船碰撞应急决策变量的模糊化

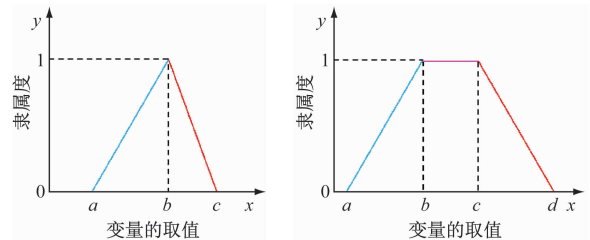
### 1.4.1 模糊逻辑预备知识

模糊逻辑引入模糊集合的概念,通过隶属度函数决定给定元素属于集合的隶属程度,隶属度值为介于0和1之间的任何实数,隶属度为0表示给定元素完全不属于集合,而隶属度为1表示元素完全属于集合,隶属度在0和1之间的值则表示元素属于集合的程度。此外,模糊逻辑使用IF-THEN规则定义条件和结果之间的关系,然后进行模糊推理来求解决策结论。模糊逻辑使用语言变量定性或定量地描述影响因素,可处理具有不确定性和模糊性的信息,已被广泛应用于海事风险评估与决策等领域<sup>[18]</sup>。

模糊逻辑使用的隶属度函数中,由于三角形和梯形隶属度函数的计算过程简单、效率高的优点被广泛使用<sup>[23-24]</sup>。此外,在定量评估的实际应用中,模糊隶属函数总把语言变量转换成模糊值来进行推理计算。因此,本文将同时使用三角形和梯形隶属度函数来定义影响因素的不同状态,应用好、中和差等3个语言变量来描述输入变量,其中,每个定量的影响因素的状态为好和差时使用梯形隶属度函数进行定义,状态为中时使用三角形隶属度函数进行定义。三角形和梯形隶属度函数的表达式及其函数图像分别见式(1)、式(2)和图3。

$$y_{tri} = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x-a)/(b-a), & a \leq x < b \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{tra} = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x-a)/(b-a), & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x < c \\ (d-x)/(d-c), & c \leq x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2)$$



(a) 三角形隶属度函数

(b) 梯形隶属度函数

图3 三角形和梯形隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of triangles and trapezoids

### 1.4.2 模糊化客滚船碰撞应急决策变量

为获取第1.6.2节构建的客滚船碰撞应急决策模型中贝叶斯网络的条件概率表,先应对输入变量和输出变量进行模糊化处理。因语言变量的数量会干扰影响因素描述的准确性,语言变量过多会显著增加推理规则的数量,过少又会导致难以准确描述和区分影响因素的影响程度<sup>[21,23,24]</sup>。因此,引入好、中和差等3个语言变量来模糊化客滚船碰撞应急决策的输入变量,见表2。

对于输入变量,利用不同的方法对定量和定性的影响因素进行模糊化。碰撞部位、破损舱室数量、滚装车辆移位情况和人员伤亡情况是定性描述的影响因素;机械设备损坏情况和是否引发火灾只有2个语言变量的选项。而对于其他定量的输入变量,应用三角形和梯形隶属度函数来进行模糊化处理。这些输入变量模糊化准则中各项数值的分类标准是根据专家经验及文献[9]、文献[10]、文献[17]、文献[18]、文献[21]和文献[23]共同确定的。将船舶总吨比(相撞船舶总吨与客滚船总吨的比值)的模糊化值定义在0~4之间,船舶总吨比越大,表明客滚船总吨越大于相撞船舶总吨,客滚船就越安全,反之就越危险。结合第1.2节对抢滩条件的描述和解释,使用3个语言变量(即抢滩距离较近、抢滩距离一般和抢滩距离较远)来定性描述抢滩条件。客滚船的舱室结构从下往上通常依次分为水密舱室、车辆舱室、旅客舱室和驾驶室,但由于客滚船较为高大,最上层的驾驶室在发生碰撞事故时与他船接触的可能性不大,因此,使用水密舱、车辆舱和旅客舱来定性描述破损舱室。

表2 客滚船碰撞事故应急决策输入变量的模糊化准则

Tab.2 Fuzzy criteria for input variables of emergency decision-making for RoPax ship collisions

影响因素	语言变量		
	好	中	差
风速/(蒲氏风级)	慢(0,0,2,4)	中(2,4,6)	快(4,6,12,12)
流速/(m/s)	慢(0,0,0.5,1)	中(0.5,1,1.5)	快(1,1.5,2,2)
浪高/m	低(0,0,0.5,1)	中(0.5,1,1.5)	高(1,1.5,2,2)
船舶总吨比	小(0,0,1,2)	中(1,2,3)	大(2,3,4,4)
碰撞速度/kn	慢(0,0,3,5)	中(3,5,7)	快(5,7,10,10)
碰撞角度/(°)	小(0,0,30,45)	中(30,45,60)	大(45,60,90,90)
拖船到达时间/min	短(0,0,15,30)	中(15,30,45)	长(30,45,60,60)
驳船到达时间/min	短(0,0,15,30)	中(15,30,45)	长(30,45,60,60)
抢滩条件	抢滩距离较近	抢滩距离一般	抢滩距离较远
碰撞部位	水线面以上	水线面附近	水线面以下
破损舱室	旅客舱	水密舱	汽车舱
排水及堵漏措施	容易	一般	困难
机械设备损坏情况	\	完好	损坏
船舶稳性	平衡	动态平衡	失去稳性
滚装车辆数量/辆	少(0,0,50,100)	中(50,100,150)	多(100,150,200,200)
滚装车辆移位情况	未发生移位	少量发生移位	大量发生移位
是否引发火灾	\	否	是
人员伤亡情况	轻伤或未受伤	重伤	人员死亡
旅客心理恐慌	轻微	一般	严重

此外,对于输出变量,即自然条件、船体破损程度、船舶进水情况、稳性调整响应时间和旅客心理表现等均应用标准的三角形隶属度函数进行模糊化,且使用4个语言变量进行描述(即很好、好、中和差)。标准的三角形隶属度函数见图4。

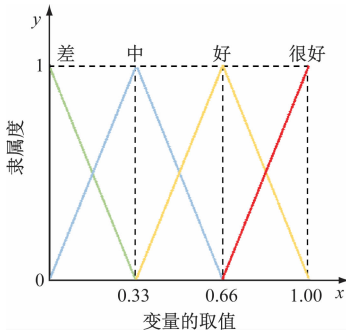


图4 标准的三角形隶属度函数

Fig.4 The standard triangle membership function

### 1.5 客滚船碰撞应急决策推理规则的构建

在对客滚船碰撞应急决策的影响因素进行模糊化处理后,需将其结果进行模糊推理,从而得到相应的决策准则变量。在这个过程中,利用 IF-THEN 规则建立输入变量(即确定的19个影响因素)和输出变量(即自然条件、船体破损程度、船舶条件和旅客心理表现等9个决策准则变量)之间的推理关系。

在传统的 IF-THEN 规则中,采用100%置信度来描述从输入变量到输出变量的推理结果<sup>[24]</sup>,定义如下:

$$R_k: \text{IF } X_{1k}(i), X_{2k}(j), \dots, \text{ and } X_{nk}(e),$$

$$\text{THEN } (Y_k(m), \beta_{km}), m = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式(3)中: $R_k$ 为第 $k$ 条推理规则; $X_{ne}(e)$ 为对应第 $k$ 条推理规则下第 $n$ 个输入变量选择的第 $e$ 个语言变量; $Y_k(m)$ 为对应第 $k$ 条推理规则下输出变量选择的第 $m$ 个语言变量; $\beta_{km}$ 为对应分配的权重(即置信度)。

为直观说明传统 IF-THEN 规则的用法,以输出变量中的船体破损程度为例,应用传统 IF-THEN 规则的某个推理规则如下:

$R_1$ : IF 船舶总吨为大,碰撞速度为快,碰撞角度为大, THEN 船体破损程度为(大,1),(中,0),(小,0),(很小,0)。

综上所述,应用传统的 IF-THEN 规则的输出变量的结果是100%的置信度。然而,在实际情况下,事件发生的表现形式通常具有较强的模糊性,无法100%确定。因此,对传统的 IF-THEN 规则进行改进,即对输出变量的不同语言变量分配不同的置信度(即权重),得到更符合实际的模糊 IF-THEN 推理

规则。结合第 1.4.2 节对输出变量的语言变量的定义得出本文的 9 个输出变量均有 4 个语言变量,因此,式(3)中的  $m=1,2,3,4$ 。本文改进的 IF-THEN 规则为

$$R_k: \text{IF } X_{1k}(i), X_{2k}(j), \dots, \text{ and } X_{nk}(e), \\ \text{THEN } \{(Y_k(1), \beta_{k1}), (Y_k(2), \beta_{k2}), \\ (Y_k(3), \beta_{k3}), (Y_k(4), \beta_{k4})\} \quad (4)$$

因此,上述对船体破损程度的描述情况,与改进的 IF-THEN 规则结合相应的置信度,可改写为

$R_1: \text{IF}$  船舶总吨为大,碰撞速度为快,碰撞角度为大,THEN 船体破损程度为(大,0.9),(中,0.1),(小,0),(很小,0)。

通过引入这种具有置信度的 IF-THEN 规则,可建立符合实际应用的应急决策推理规则,从而形成模糊推理规则库。根据这一推理规则,建立的输入变量船体破损程度的置信规则库见表 3,由于篇幅限制,仅给出了船体破损程度的置信规则库。在获得推理规则库后,其结果可转化为条件概率表输入

表 3 船体破损程度的置信规则库

Tab.3 Confidence rule library for ship damage degree

#	输入变量			输出变量(船体破损程度)			
	船舶总吨	碰撞速度	碰撞角度	大	中	小	很小
1			小	0	0	0.1	0.9
2		慢	中	0	0	0.2	0.8
3			大	0	0.1	0.2	0.7
4			小	0	0.1	0.6	0.3
5	小	中	中	0	0.4	0.5	0.1
6			大	0.1	0.6	0.3	0
7			小	0.2	0.6	0.2	0
8		快	中	0.4	0.5	0.1	0
9			大	0.5	0.4	0.1	0
10			小	0	0.1	0.2	0.7
11		慢	中	0	0.2	0.3	0.5
12			大	0	0.3	0.4	0.3
13			小	0	0.4	0.5	0.1
14	中	中	中	0.1	0.5	0.4	0
15			大	0.2	0.6	0.2	0
16			小	0.3	0.6	0.1	0
17		快	中	0.5	0.4	0.1	0
18			大	0.7	0.3	0	0
19			小	0	0.2	0.3	0.5
20		慢	中	0	0.3	0.4	0.3
21			大	0.1	0.4	0.5	0
22			小	0.2	0.2	0.6	0
23	大	中	中	0.3	0.3	0.4	0
24			大	0.5	0.4	0.1	0
25			小	0.7	0.2	0.1	0
26		快	中	0.8	0.2	0	0
27			大	0.9	0.1	0	0

到第1.6.2节建立的贝叶斯网络应急决策框架中,从而建立完整的贝叶斯网络推理结构。

## 1.6 基于贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策推理

### 1.6.1 贝叶斯网络预备知识

贝叶斯网络是一种概率图模型,通过有向无环图表达变量之间的推理关系,被广泛应用于水上交通的应急决策领域。贝叶斯网络主要由节点、有向弧和条件概率表组成。其中:节点为目标问题的影响因素;有向弧基于表示节点之间的条件依赖关系;条件概率表表示从父节点到子节点的转换逻辑。此外,贝叶斯网络还可定性或定量的描述各节点之间的关系,这也是国内外学者喜欢应用贝叶斯网络处理与分析船舶碰撞应急决策的原因之一<sup>[17,18,21]</sup>。

假设 $P_a(X_i)$ 为一系列变量 $X_i$ 的父节点,则 $X_i$ 的条件概率表可表示为 $P(X_i | P_a(X_i))$ ,然后变量集 $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 的联合概率分布 $P(X)$ 为

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) \quad (5)$$

船舶决策者在抉择客滚船碰撞应急决策时,由于时间紧迫和资源限制,往往获取的是不精确的和

模糊的决策信息,而贝叶斯网络在处理不确定信息下的应急决策问题具有较优越的性能。因为贝叶斯网络的一个特点是可进行从原因到结果或从结果到原因的双向推理,当任何变量提供新的证据 $E$ 时,贝叶斯网络模型中所有其他变量的先验概率都会进行更新,以获得不确定信息下的后验概率。变量的后验概率为

$$P(X | E) = \frac{P(X, E)}{P(E)} = \frac{P(X, E)}{\sum_X P(X, E)} \quad (6)$$

贝叶斯网络的这些优点已被国内外学者应用于海事风险评估和水上交通事故的应急决策中。因此,本文从船舶决策者的角度利用贝叶斯网络构建客滚船发生碰撞时的应急决策模型。

### 1.6.2 进行客滚船碰撞贝叶斯应急决策推理

客滚船碰撞应急决策受多种因素的影响,为了让船舶决策者在发生碰撞后能及时做出合理且最优的应急决策,通过综合考虑识别的客滚船碰撞应急决策变量和确定的决策方案,建立通用的基于贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策框架,见图5。

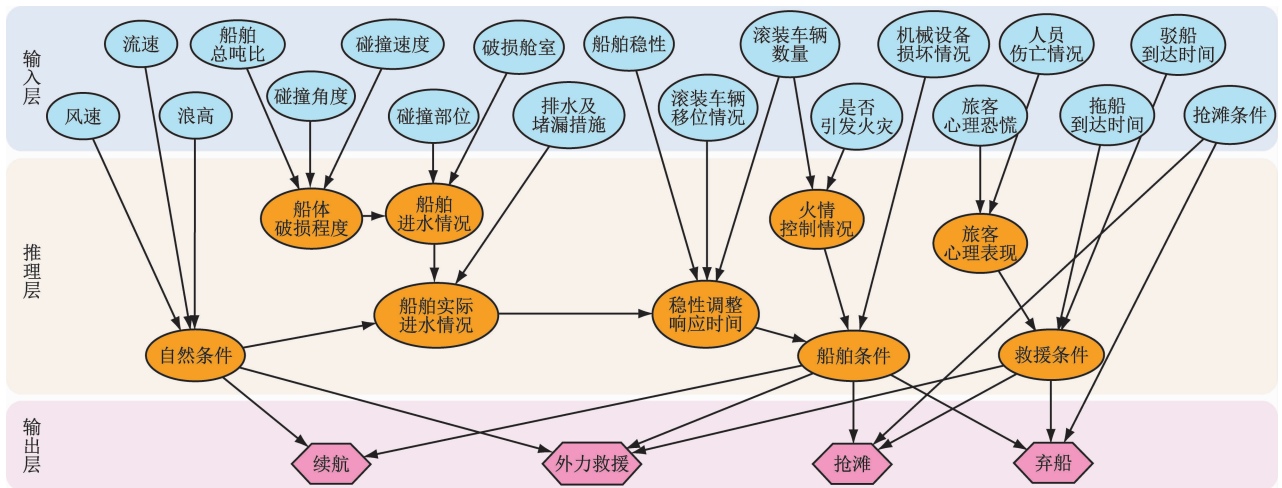


图5 基于贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策框架

Fig. 5 Emergency decision-making framework for RoPax ship collisions based on Bayesian network

1) 结合第1.2节识别的客滚船碰撞应急决策的影响因素,决策模型的输入层包括风速、流速、碰撞部位、抢滩条件、滚装车辆数量、是否引发火灾和人员伤亡情况等19个影响因素,这些影响因素将作为基于贝叶斯网络应急决策的输入变量。在实际应急决策场景中,需现场采集这些因素的数据信息,为决策推理提供数据支持。将采集的输出变量的数据信息进行模糊化后转换为三角或梯形模糊数(见第1.4.2节)作为先验概率输入到构建的贝叶斯应急决策模型中。

2) 推理层根据输出层影响因素的属性进行整合,从而得到相应的决策准则变量,包括自然条件、船体破损程度、船舶进水情况、船舶实际进水情况、船舶条件、稳性调整响应时间和旅客心理表现等9个推理变量。这些决策准则变量是船舶决策者在进行应急决策推理时的中间变量,可根据输入层中输入变量的条件概率计算获得,其条件概率表通过置信规则库获得(见第1.5节),最终为船舶决策者进行应急决策提供数据支持。

3) 输出层为续航、外力救援、抢滩和弃船等4

个决策方案,是利用决策准则变量获得的数值节点,通过计算可获得这4个决策方案的效用值。利用效用值选择最终决策方案,效用值越高表示对应的决策方案越优,最后比较得出效用值最高的决策方案即为客滚船碰撞应急决策的最佳决策方案。

## 2 客滚船碰撞事故案例验证

为充分验证本文提出的客滚船碰撞应急决策模型的通用性和可行性,引入2个真实客滚船碰撞事故案例进行验证。

### 2.1 客滚船碰撞场景描述

案例1:2018年4月5日,客滚船“尖峰岭”轮(10 940总吨)与集装箱船“鸿洋”轮(28 148总吨)在琼州海峡定线制水域发生碰撞事故<sup>[25]</sup>。事故造成“尖峰岭”轮右舷舦后部位二层客舱外板破损,水线下减摇舱舱壁外板变形,但未发生进水渗漏;“鸿洋”轮球鼻舦变形受损,舦尖舱进水,未造成水域污染和人员死亡,构成一般等级的水上交通事故。根据事故调查报告,两船碰撞的相关信息见表4。最后,由于事故未造成“尖峰岭”轮船体破损且船舶设施设备完好,故其续航安全靠泊海安港。

案例2:2018年10月7日,突尼斯籍客滚船“ULYSSE”(17 907总吨)与塞浦路斯籍集装箱船“CSL VIRGINIA”(54 592总吨)在科西嘉海峡TSS保护区发生碰撞<sup>[26]</sup>。事故造成“ULYSSE”水密舱在吃水线以上严重受损,“CSL VIRGINIA”油箱破裂;发生碰撞后两船嵌在一起,无法依靠自身力量分离,需等待外力救援。此次事故未造成人员伤亡,导致约520 m<sup>3</sup>的油污染,但在事故应急响应下实施有效的防污染措施,相关事故参数如表4所示。几天后,两船被成功拉开后,在拖船协助下驶向突尼斯进行维修。该事故调查程序是由塞浦路斯、意大利和突尼斯的调查委员会联合进行,其事故调查报告可在GISIS数据库中查询获得。

### 2.2 计算客滚船碰撞应急决策变量的模糊值

结合表2建立的客滚船碰撞事故应急决策输入变量的模糊化准则,并根据实际案例数据对各个决策变量进行模糊化处理见表5。以风速为例,在选择的案例1中,其值为5级,依据式(1)和式(2),计算可得其模糊隶属度分别为 $(6-5)/(6-4)=0.5$ , $(5-4)/(6-4)=0.5$ ,即风速的模糊隶属度分别为(慢,0)、(中,0.5)、(快,0.5)。此外,其他影响因素也用同样的方法进行计算即可得到其各自的模糊化值。

表4 客滚船碰撞的相关信息

Tab.4 Relevant information of RoPax ship collisions

影响因素	参数值	
	案例1	案例2
风速/(蒲氏风级)	5	3
流速/(m/s)	0.51	0.45
浪高/m	0.9	1.1
船舶总吨比	2.57	3.05
碰撞速度/kn	11.7	19.0
碰撞角度/(°)	约70	79
碰撞部位	水线面以下	水线面以上
破损舱室	旅客舱	水密舱
机械损坏情况	完好	完好
排水及堵漏措施	一般	容易
船舶稳性	平衡	平衡
驳船到达时间/min	约50	约58
拖船到达时间/min	约50	约58
抢滩条件	抢滩距离一般	抢滩距离较远
滚装车辆数量/辆	66	128
滚装车辆移位情况	未发生移位	未发生移位
是否引发火灾	否	否
人员伤亡情况	轻伤	未受伤
旅客心理恐慌	轻微	一般

### 2.3 获取最优应急决策方案

结合第1.6.2节建立的基于贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策框架,将表5所示的19个影响因素的模糊化结果及建立的决策属性变量的置信规则库输入到GeNIe软件中,案例推理结果分别见图6和图7。

事故案例中不同应急决策方案的效用值见图8,效用值越高表示其对应的应急决策方案是最优选择。由图8可知:事故案例1的最优应急决策方案为“续航”(效用值:0.531 19);事故案例2的最优应急决策方案为“外力救援”(效用值:0.491 77)。从推理结果来看,其输出的最优应急决策方案与实际案例相符合,表明所建立的基于模糊贝叶斯网络的客滚船碰撞应急决策模型是有效且符合实际应用的。研究结果可为客滚船发生碰撞事故时船舶决策者的应急决策提供参考依据。

表5 客滚船碰撞应急决策变量的模糊化值

Tab.5 Fuzzy values of emergency decision variables for RoPax ship collisions

影响因素	模糊化值	
	案例1	案例2
风速/(蒲氏风级)	(慢,0);(中,0.5);(快,0.5)	(慢,0.5);(中,0.5);(快,0)
流速/(m/s)	(慢,0.98);(中,0.02);(快,0)	(慢,1);(中,0);(快,0)
浪高/m	(低,0.2);(中,0.8);(高,0)	(低,0.8);(中,0.2);(高,0)
船舶总吨比	(小,0);(中,0.43);(大,0.57)	(小,0);(中,0);(大,1)
碰撞角度/(°)	(小,0);(中,0);(大,1)	(小,0);(中,0);(大,1)
碰撞速度/kn	(慢,0);(中,0);(快,1)	(慢,0);(中,0);(快,1)
碰撞部位	(水线面以上,0);(水线面附近,0); (水线面以下,1)	(水线面以上,1);(水线面附近,0); (水线面以下,0)
破损舱室	(旅客舱,1);(水密舱,0);(车辆舱,0)	(旅客舱,0);(水密舱,1);(车辆舱,0)
机械损坏情况	(完好,1);(损坏,0)	(完好,1);(损坏,0)
排水及堵漏措施	(容易,0);(一般,1);(困难,0)	(容易,1);(一般,0);(困难,0)
船舶稳性	(平衡,1);(动态平衡,0);(失去稳性,0)	(平衡,1);(动态平衡,0);(失去稳性,0)
驳船到达时间/min	(短,0);(中,0);(长,1)	(短,0);(中,0);(长,1)
拖船到达时间/min	(短,0);(中,0);(长,1)	(短,0);(中,0);(长,1)
抢滩条件	(抢滩距离较近,0);(抢滩距离一般,1); (抢滩距离较远,0)	(抢滩距离较近,0);(抢滩距离一般,0); (抢滩距离较远,1)
滚装车辆数量/辆	(少,0.68);(中,0.32);(多,0)	(少,0);(中,0.44);(多,0.56)
滚装车辆移位情况	(未移位,1);(少量移位,0);(大量移位,0)	(未移位,1);(少量移位,0);(大量移位,0)
是否引发火灾	(是,0);(否,1)	(是,0);(否,1)
人员伤亡情况	(轻伤或未受伤,1);(重伤,0);(人员死亡,0)	(轻伤或未受伤,1);(重伤,0);(人员死亡,0)
旅客心理恐慌	(轻微,1);(一般,0);(严重,0)	(轻微,0);(一般,1);(严重,0)

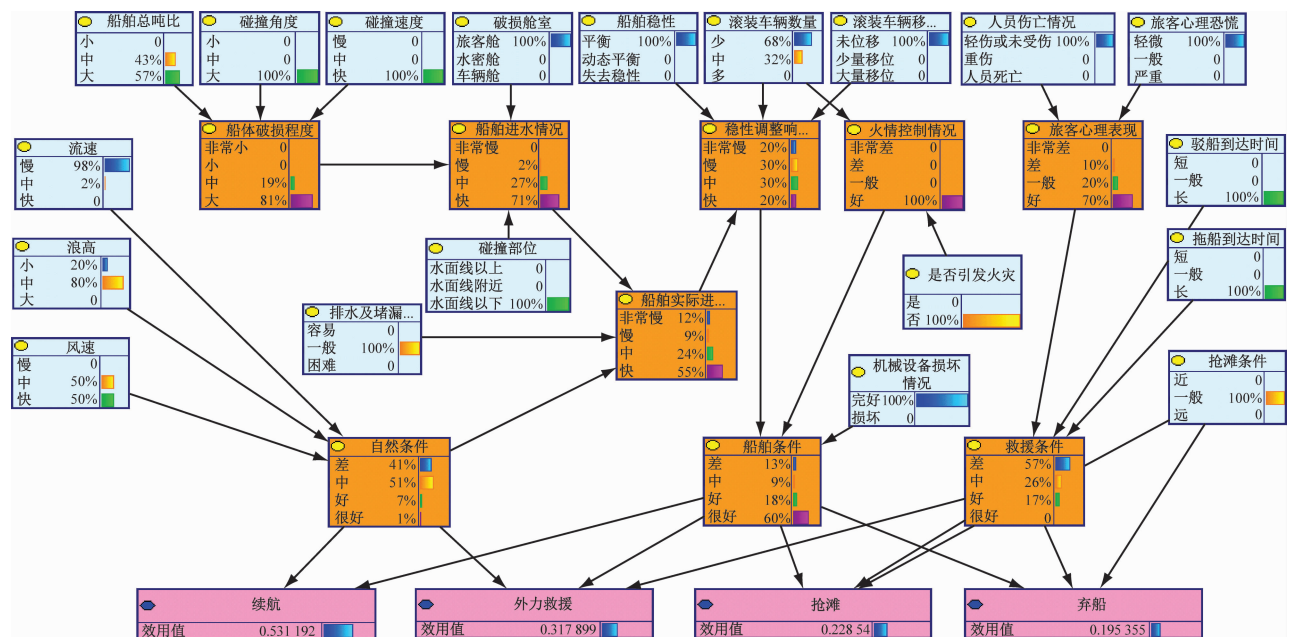


图6 案例事故的应急决策结果(案例1)

Fig.6 Emergency decision results of case accident (case 1)

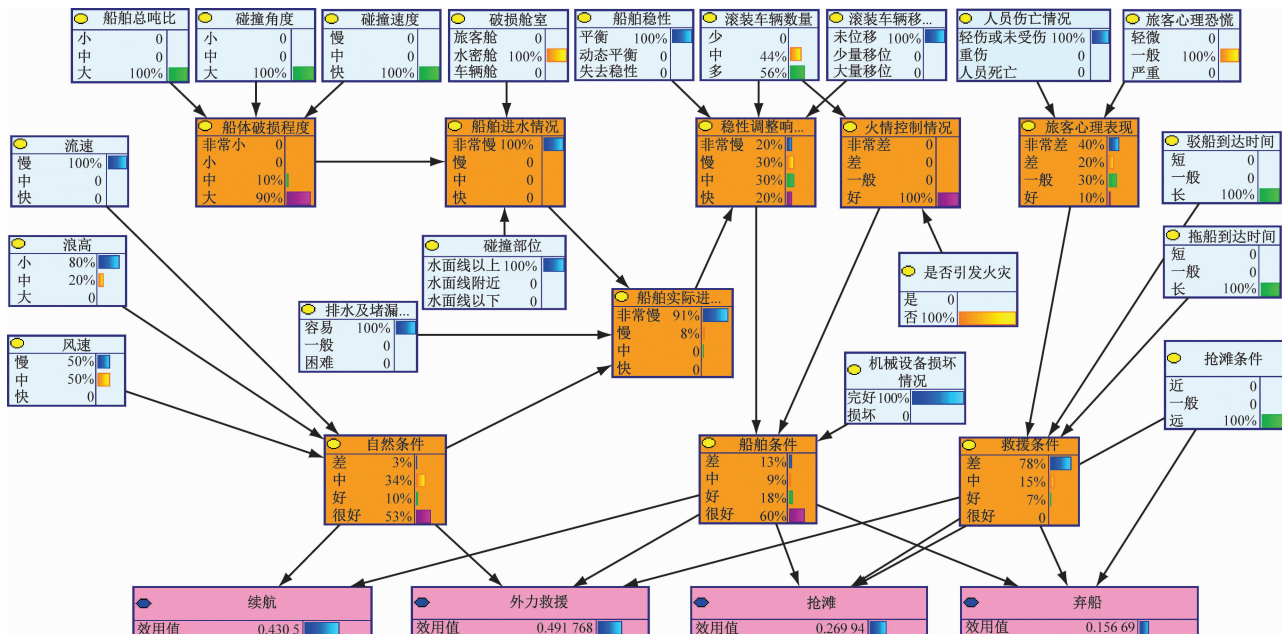


图7 案例事故的应急决策结果(案例2)

Fig. 7 Emergency decision results of case accident (case 2)

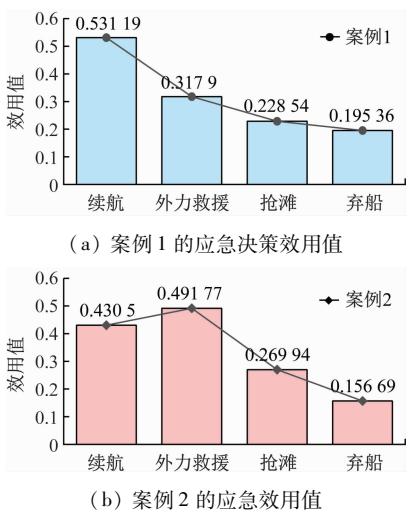


图8 案例事故的应急决策效用值

Fig. 8 Emergency decision utility value of different case accidents

### 3 结束语

本文提出一种客滚船碰撞应急决策模型,旨在为船舶决策者提供判断依据。通过结合模糊逻辑和贝叶斯网络来开发图形结构,以及对应急决策变量进行定性或定量模糊化处理。该方法的优点在于直观地揭示客滚船碰撞事故的发展、易于推理、能处理不完整的信息和模糊的信息。从将提出的方法应用于实际案例的结果来看,其确定的最优应急决策方案与真实案例一致,验证提出的应急决策模型的有效性和通用性,为客滚船碰撞事故的应急决策提供有价值的指导。由于客滚船碰撞事故应急决策的影

响因素众多,进一步的研究工作需收集更多的国内外客滚船碰撞事故案例以充实完善应急决策变量;同时,由于收集的事故数据存在不完整信息,导致在模糊化决策变量时伴有一定的主观因素,但这可通过引入机器学习、深度学习等更先进的方法来训练学习事故数据,从而克服主观因素在进行应急决策推理过程中带来的影响。

### 参考文献

[1] 胡婉玉. 载运大型车辆对短途客滚船航行安全影响评价研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.  
 HU W Y. Research on the influence of carrying large vehicles on the navigation safety of short-distance Ro-Ro passenger ship [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023. (in Chinese)

[2] 郑世民, 翁大涛, 刘广强. 跨海客滚运输船舶航行风险评估[J]. 交通运输研究, 2015, 1(4): 75-80.  
 ZHEN S M, WENG D T, LIU G Q. Sailing risk assessment of cross-sea Roll-on Roll-off passenger ships [J]. Transport Research, 2015, 1(4): 75-80. (in Chinese)

[3] VENTIKOS N P, SOTIRALIS P, ANNETIS M, et al. The development and demonstration of an enhanced risk model for the evacuation process of large passenger vessels[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(1): 84.

[4] 李道科, 唐寒秋, 董斌, 等. 台湾海峡两岸客滚船通航风险评估[J]. 中国航海, 2012, 35(2): 64-67.  
 LI D K, TANG H Q, DONG B, et al. Risk assessment

- of Ro-Ro passenger/ships across the Taiwan Strait[J]. Navigation of China, 2012, 35 (2): 64-67. (in Chinese)
- [5] 冯海商, 陈厚忠. 基于动态贝叶斯网络的客滚船航行风险预测[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(9): 96-102.  
FENG H S, CHEN H Z. Risk prediction of Ro-Ro passenger ships navigation based on dynamic Bayesian network [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(9): 96-102. (in Chinese)
- [6] 陈厚忠, 赵尊荣, 郭国平, 等. 基于脆性联系理论的客滚船航行风险辨识研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(3): 490-494.  
CHEN H Z, ZHAO Z R, GUO G P, et al. Study on the risk-identification model of the Ro-Ro passenger ship's sailing based on the brittle link theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2016, 40 (3): 490-494. (in Chinese)
- [7] MONTEWKA J, EHLERS S, GOERLANDT F, et al. A framework for risk assessment for maritime transportation systems-a case study for open sea collisions involving RoPax vessels[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 124:142-157.
- [8] ZENG Q C, YANG L Y, ZHANG Q. Modeling the sailing risk of RoPax ships with Bayesian Network[J]. Transport, 2017, 32(4): 340-347.
- [9] 王伟强. 基于贝叶斯网络的渤海湾客滚船风险评估及分级[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.  
WAN W Q. Risk assessment and risk classification of Ro-Ro passenger ship based on Bayesian Network[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] 于皓然. 渤海湾客滚船航行风险模型建立与研究对策[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.  
YU H R. Establishment and research on the risk model of the Ro-Ro passenger ship in Bohai Bay[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016. (in Chinese)
- [11] 吴石. 客滚船载运新能源汽车中的火灾防控应用研究[J]. 中国海事, 2022(11): 42-44.  
WU S. Study on application of fire prevention and control in Ro-Ro passenger ships carrying new energy vehicles[J]. China Maritime Safety, 2022(11): 42-44. (in Chinese)
- [12] WU B, TANG Y H, YAN X P, et al. Bayesian network modelling for safety management of electric vehicles transported in RoPax ships[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 209:1-15.
- [13] 周东东. 琼州海峡客滚船火灾风险评估研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.  
ZHOU D D. Research on fire risk assessment of Ro-Ro passenger ships in Qiongzhou Strait[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)
- [14] 李若哲, 唐文勇, 张道坤. 基于 GIS 数据库的客滚船碰撞事故致因分析[J]. 船舶与海洋工程, 2018, 34(5): 71-76.  
LI R X, TANG W Y, ZHANG D K. Analysis of Ropax collision based on GIS database [J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, 34(5): 71-76. (in Chinese)
- [15] MONTEWKA J, MANDERBACKA T, RUPONEN P, et al. Accident susceptibility index for a passenger ship-a framework and case study[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 218:1-22.
- [16] 胡甚平, 刘伟华, 韩冰, 等. 考虑因子突变的客滚船海峡航行安全韧性动力学仿真[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3408-3418.  
HU S P, LIU W H, HAN B, et al. Dynamics simulation on safety resilience for RoPax ship navigating in strait considering factor mutations [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23 (10): 3408-3418. (in Chinese)
- [17] WU B, ZHAO C C, YIP T L, et al. A novel emergency decision-making model for collision accidents in the Yangtze River [J]. Ocean Engineering, 2021, 223: 1-13.
- [18] 王庆珺. 客渡船碰撞事故船岸协同应急处置决策研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
WANG Q J. Study on ship-shore cooperation emergency response decision-making of passenger ferry collision accident [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] 张苟. 船舶碰撞事故不同态势下的决策研究[D]. 厦门: 集美大学, 2020.  
ZHANG X. Research on the decision-making under different situations of ship collision accident [D]. Xiamen: Jimei University, 2020. (in Chinese)
- [20] 张明阳. 破冰船护航下船舶碰撞风险建模与避碰决策方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
ZHANG M Y. Study on the collision risk modeling and anti-collision decision-making methodology for ship escort operations [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [21] 杨坤, 庄元, 吕鹏飞, 等. 基于贝叶斯网络的内河搁浅船舶应急决策方法[J]. 中国航海, 2017, 40(3): 77-82.

- 制算法的拖轮自主靠泊控制[J/OL]. 中国舰船研究. (2023-05-09)[2024-03-09]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03227>.
- LIU J L, DONG Z L, LI S J, et al. Autonomous berthing control of tug based on improved backstepping sliding mode control algorithm[J/OL]. Chinese Journal of Ship Research. (2023-05-09)[2024-03-09]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03227>. (in Chinese)
- [12] 张强, 朱雅萍, 孟祥飞, 等. 欠驱动船舶自适应神经网络有限时间轨迹跟踪[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 24-31.
- ZHANG Q, ZHU Y P, MENG X F, et al. Finite time trajectory tracking of underactuated ship based on adaptive neural network[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 24-31. (in Chinese)
- [13] 张显库, 贾欣乐. 船舶运动控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- ZHANG X K, JIA X L. Ship motion control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [14] 王文新, 刘上, 张国庆, 等. 考虑舵机故障的船舶鲁棒自适应航向保持控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 116-123.
- WANG W X, LIU S, ZHANG G Q, et al. Robust adaptive course-keeping control of under-actuated ships with the rudder failure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 116-123. (in Chinese)
- [15] TRISTAN P, MOGENS B. Mathematical ship modeling for control applications[R]. Callaghan: the University of Newcastle, 2002.
- [16] SØRENSEN A J. Marine control systems: propulsion and motion control of ships and ocean structures[M]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [17] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- JIA X L, YANG Y S. Mathematical modeling of ship motion[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1999. (in Chinese)
- [19] 陈勇青. 海洋环境影响下的船舶航迹预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- CHEN Y Q. Research on vessel track prediction method considering the influence of marine environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [20] 瞿洋, 徐海祥, 余文墨, 等. 基于 ILOS 的欠驱船舶循迹控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(6): 834-838.
- QU Y, XU H X, YU W Z, et al. Integral line-of-sight guidance for path following of underactuated marine surface vessels[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 40(6): 834-838. (in Chinese)
- [21] 于立新. 基于 LOS 法的 USV 滑模控制与路径跟踪研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- YU L X. Research on USV sliding mode control and path tracking based on LOS method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [22] BØRHAUG E, PAVLOV A, PETTERSEN K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[C]. Proceedings of 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008: 4984-4991.
- [23] 左川. 从一起海上船舶碰撞事故论协议避让在船舶避碰行动中的运用条件[J]. 中国海事, 2020(12): 30-32.
- ZUO C. Discussion on the application condition of consensus collision prevention on ships collision prevention action on the base of one ship collision accident case[J]. China Maritime Safety, 2020(12): 30-32. (in Chinese)
- [24] The Investigation Boards From Cyprus, Italy And Tunisia. Marine investigation report: collision, CSL VIRGINIA struck by ULYSSE on 7 October 2018, off cap Corse [M]. French: Marine Occurrence Investigation Bureau, 2019.

(上接第 58 页)

YANG K, ZHUANG Y, LYU P F, et al. Emergency decision-making method for grounding ships handling in inland waterway based on Bayesian network [J]. Navigation of China, 2017, 40(3): 77-82. (in Chinese)

[22] ENDRINA N, RASERO J C, KONOVESSIS D. Risk analysis for RoPax vessels: a case of study for the Strait of Gibraltar [J]. Ocean Engineering, 2018, 151: 141-151.

[23] WU B, YIP T L, YAN X P, et al. Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system [J]. Ocean Engineering, 2019, 187:1-12.

[24] XUE J, YIP T L, WU B, et al. A novel fuzzy Bayesian network-based MADM model for offshore wind turbine