

# 有限参数下船舶结构碰撞损伤等级的贝叶斯估计

吕明冬<sup>1</sup>, 苑志江<sup>1</sup>, 张尚悦<sup>1</sup>, 蒋晓刚<sup>1</sup>, 安中昌<sup>2</sup>

(1. 海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018; 2. 中国人民解放军海军研究院, 北京 100071)

**摘要:**船舶碰撞对船舶结构、船上人员生命安全带来巨大威胁,快速分析船舶结构碰撞损伤等级能为紧急避险、损管救援提供有效依据。有限元法能准确地计算船舶结构碰撞损伤等级,但耗时长、需要参数多,无法在有限参数下实现船舶结构碰撞损伤等级的快速分析。基于贝叶斯网络模型建立多损伤因素联合作用下船舶结构碰撞损伤程度风险分析模型,以2015—2020年的202起船舶碰撞事故为数据样本,采用统计分析方法建立船舶损伤因素与结构碰撞损伤等级的统计关系,实现多要素联合作用下船舶结构碰撞损伤等级风险快速评估。研究表明:该方法分析结果与实际案例吻合良好,可在参数有限的条件下快速估计出船舶结构碰撞损伤等级。

**关键词:**船舶碰撞;结构碰撞损伤等级;贝叶斯估计

中图分类号:U661.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.006

## Bayesian estimation of collision damage level of ship structures under limited parameters

LYU Mingdong<sup>1</sup>, YUAN Zhijiang<sup>1</sup>, ZHANG Shangyue<sup>1</sup>, JIANG Xiaogang<sup>1</sup>, AN Zhongchang<sup>2</sup>

(1. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Naval Research Institute, Beijing 100071, China)

**Abstract:** Ship collisions pose significant risks to ship structures and the safety of lives on board. Rapid analysis of the extent of structural damage from collisions can provide a critical basis for emergency risk mitigation and damage control and rescue operations. While the Finite Element Method (FEM) can accurately calculate the degree of structural collision damage, it is time-consuming and requires numerous parameters, making it unsuitable for rapid damage assessment under limited input conditions. Using a dataset of 202 ship collision accidents that occurred between 2015 and 2019, this study applies statistical analysis to establish relationships between damage factors and damage levels. A Bayesian network model is developed to analyze the risk of collision damage grades under the combined influence of multiple factors. The results demonstrate that the proposed method agrees well with actual accident cases and can rapidly estimate the collision damage level of ship structures even when only limited parameters are available.

**Key words:** ship collision; collision damage grades; Bayesian estimation

船舶碰撞会对船舶结构、船上人员生命安全和海洋环境带来巨大威胁。根据中华人民共和国海事局公布的202起船舶碰撞案例<sup>[1]</sup>,共有143艘船舶沉没,超100人丧生,对人民的生命财产造成巨大损失。

有限元法用于解决计算大变形、非线性问题,是

当前评估船舶碰撞损伤的常用方法。LIU等<sup>[2]</sup>总结近10a船舶碰撞分析的技术进展,并提出有限元技术评估船舶碰撞损伤的难点。XIE等<sup>[3]</sup>基于有限元数值模拟对复合材料的船舶结构损伤进行研究与分析。吴晶<sup>[4]</sup>结合有限元法与BP-GA改进神经网络算法,对船舶的碰撞过程进行风险评估。OZGUC<sup>[5]</sup>

收稿日期:2024-06-29

作者简介:吕明冬(1990—),男,讲师,研究方向为船舶安全保障。E-mail: 1213730780@qq.com

通信作者:张尚悦(1970—),男,教授,研究方向为船舶海上航行安全。E-mail: dlzhangshangyue@163.com

引用格式:吕明冬,苑志江,张尚悦,等.有限参数下船舶结构碰撞损伤等级的贝叶斯估计[J].中国航海,2025,48(3):49-56.

LYU M D, YUAN Z J, ZHANG S Y, et al. Bayesian estimation of collision damage level of ship structures under limited parameters[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 49-56. (in Chinese)

采用有限元法对船舶与浮式生产储卸油装置的碰撞损伤进行预测研究。刘敬贤等<sup>[6-8]</sup>采用有限元法分析典型的碰撞事故案例。PAN等<sup>[9]</sup>采用有限元法分析楔形艏部撞击桥墩时的碰撞损伤。采用有限元仿真技术可较为准确地计算船舶碰撞损伤,但有限元计算需要船体结构详细参数,计算时间长,无法在有限参数条件下,快速得到船舶碰撞损伤等级,在事故发生前做到预警,在事故发生后迅速给出损伤等级为损管救援提供参考。

为实现船舶碰撞损伤等级的快速评估,各国学者一直都在开展船舶碰撞事故的研究工作,从大量的案例统计中发现规律,作为船舶碰撞风险分析与规范依据。约在2000年,欧洲开展名为“HARDER”的联合研究,建立和更新世界船舶碰撞和搁浅事故数据库。<sup>[10-11]</sup> BROWN等<sup>[12-13]</sup>建立SIMCOL模型,通过该模型可评估不同碰撞因素对船舶结构可能造成的损伤,并能评估各种碰撞因素与结构破坏范围之间的敏感性。张艳艳<sup>[14]</sup>通过贝叶斯网络模型对海上船舶的碰撞态势进行研究,对各项因素影响下船舶碰撞事故的发生、发展和生成最终结果的内在规律进行研究。本文基于2015—2020 6 a的202起船舶碰撞事故为样本,建立各损伤要素与碰撞损伤等级的先验关系,在此基础上建立多要素联合作用下船舶损伤贝叶斯网络模型,计算有限参数下的船舶碰撞损伤等级,并通过典型案例对模型进行检验。

## 1 结构碰撞损伤等级划分与碰撞损伤先验概率计算

### 1.1 结构碰撞损伤等级划分

李慧<sup>[15]</sup>结合《水上交通事故分级标准》将船舶结构损伤分为小变形、大变形而未破裂、破裂而未进水、破裂进水和沉没等5个等级。实际案例调查中破口面积与船舶沉没有密切关系,本文充分考虑破口面积,根据实际案例将船舶损伤等级分为刮蹭、撞伤、严重撞伤、撞沉等4个结构碰撞损伤等级(简称碰撞等级),具体定义如下。

1) 刮蹭:碰撞船舶未出现破口,船舶结构出现变形范围不超过 $3\text{ m}^2$ ,定义为事件 $H_1$ 。

2) 撞伤:碰撞船舶未出现破口,变形范围超过 $3\text{ m}^2$ ,或出现破口,破口范围不超过 $3\text{ m}^2$ ,定义为事件 $H_2$ 。

3) 严重撞伤:碰撞船舶破口范围超过 $3\text{ m}^2$ ,但未造成船舶沉没,定义为事件 $H_3$ 。

4) 撞沉:碰撞导致船舶沉没,定义为事件 $H_4$ 。

本文对中国海事局公布的202个碰撞案例,共计404艘碰撞船舶进行统计,各个碰撞损伤等级下的船舶数量分布见表1。

表1 各碰撞等级下船舶数量分布  
Tab.1 Number distribution of ships under different collision structures damage levels

| 单位:艘次    |     |
|----------|-----|
| 碰撞结构损伤等级 | 数量  |
| 刮蹭       | 122 |
| 撞伤       | 98  |
| 严重撞伤     | 28  |
| 撞沉       | 143 |
| 不明       | 19  |

由表1可知:出现严重撞伤的船舶数量较少,若船舶破口范围超过 $3\text{ m}^2$ ,达到严重损伤程度的,极有可能会造成船舶沉没。

### 1.2 各因素作用下结构碰撞损伤等级的先验概率

PEDERSEN等<sup>[16-17]</sup>认为船舶碰撞损伤的严重程度是由碰撞场景、碰撞船的吨位、两船的航速和碰撞夹角联合作用决定的。

独立分析碰撞场景(事件 $E_1$ )、相撞船舶吨位比(事件 $E_2$ )、碰撞航速(事件 $E_3$ )和碰撞夹角(事件 $E_4$ )对船舶碰撞等级的影响,作为各要素联合作用下结构碰撞损伤的计算基础。

各因素独立作用下的舰船损伤先验概率为

$$P(H_i | E_j) = \frac{P(H_i, E_j)}{P(E_j)} \quad (1)$$

式(1)中: $P(H_i | E_j)$ 为碰撞损伤影响因素 $E_j$ 发生的条件下碰撞损伤等级 $H_i$ 发生的概率; $P(H_i, E_j)$ 为碰撞损伤影响因素 $E_j$ 与船舶碰撞等级 $H_i$ 联合作用下发生的概率; $P(E_j)$ 为船舶碰撞影响因素 $E_j$ 发生的概率。

#### 1.2.1 碰撞场景

对于船舶碰撞而言,碰撞场景是指相撞船舶碰撞部位的组合。大多数调查报告对碰撞位置记录模糊,通过报告只能推断出碰撞的大致部位。李慧等<sup>[18]</sup>将碰撞部位分为艏球鼻首段、舳货舱段和艉机舱段等3个碰撞区间段。参考文献[18]的划分方法,为方便推断事故报告中的碰撞位置,将碰撞部位分为艏部、舳部和艉部,碰撞部位示意图1。艏位(事件 $B_1$ )定义为艏尖舱壁到艏最前端,舳位(事件 $B_2$ )为艏尖舱壁到尾尖舱壁部分,艉位(事件 $B_3$ )为艉尖舱壁到艉部最后端。

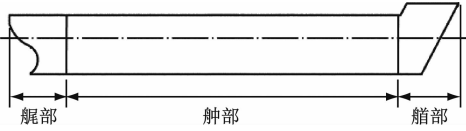


图1 碰撞部位示意

Fig.1 Schematic diagram of collision site

根据实际案例统计结果,结合碰撞部位的定义,两船相撞的场景可以分为舦-舦碰撞、舦-舩碰撞、舩-舩碰撞、舦-舦碰撞4种场景见图2。

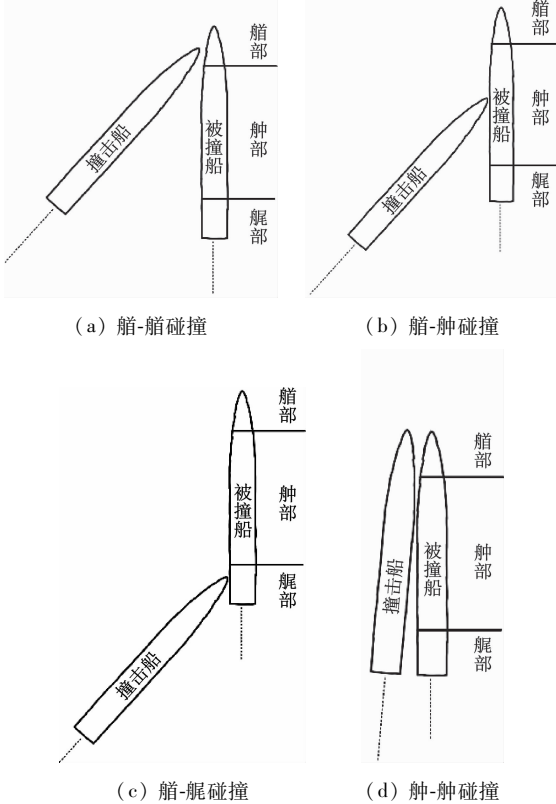


图2 两船相撞的碰撞场景

Fig.2 The collision scene of two ships

各碰撞场景下的船舶碰撞等级统计数据见表2。

基于表2的统计数据与式(1)可进一步计算不同碰撞场景下的碰撞等级先验概率见表3。

以舦-舦碰撞态势下,结构碰撞损伤等级为刚蹭为例,代入式(1),有

$$P(H_1 | E_1 = \text{舦-舦碰撞}) = \frac{P(H_1, E_1 = \text{舦-舦碰撞})}{P(E_1 = \text{舦-舦碰撞})} = 17/58 = 29\% \quad (2)$$

各个碰撞场景中船舶撞沉为事件  $H_4$ ,碰撞场景为事件  $E_1$ ,统计  $P(H_4 | E_1)$  发生的概率如表3所示,由于舦-舦碰撞发生案例较少,不作统计。由表3可知:3种碰撞场景中,舦-舦碰撞、舦-舩碰撞船舶沉没程度更高,迎撞部位为舦部和舩部的船更易造成沉没。

表2 不同碰撞场景下的碰撞损伤等级船舶数量  
Tab.2 The number of ship collision damage levels in different collision scenes 单位:艘次

| 数量/艘 | 舦-舦碰撞  |        | 舦-舩碰撞 |    |
|------|--------|--------|-------|----|
|      | 舦(大吨位) | 舦(小吨位) | 舦     | 舩  |
| 刚蹭   | 10     | 7      | 62    | 5  |
| 撞伤   | 12     | 8      | 50    | 8  |
| 严重撞伤 | 2      | 3      | 3     | 15 |
| 撞沉   | 5      | 11     | 1     | 87 |

| 数量/艘 | 舦-舩碰撞 |    | 舩-舩碰撞  |        |
|------|-------|----|--------|--------|
|      | 舦     | 舩  | 舦(大吨位) | 舦(小吨位) |
| 刚蹭   | 20    | 1  | 0      | 0      |
| 撞伤   | 6     | 4  | 2      | 2      |
| 严重撞伤 | 0     | 3  | 0      | 0      |
| 撞沉   | 0     | 19 | 0      | 0      |

表3 不同碰撞场景下的碰撞等级先验概率

Tab.3 Prior probability of ship collision damage levels in different collision scenes 单位:%

| 先验概率           | 舦-舦碰撞 | 舦-舩碰撞 | 舦-舩碰撞 |
|----------------|-------|-------|-------|
| $P(H_1   E_1)$ | 29    | 29    | 40    |
| $P(H_2   E_1)$ | 34    | 25    | 19    |
| $P(H_3   E_1)$ | 9     | 8     | 6     |
| $P(H_4   E_1)$ | 28    | 38    | 36    |

### 1.2.2 吨位比

碰撞船舶吨位对船舶碰撞损伤有显著影响,将大吨位船定义为  $D_1$ ,小吨位船定义为  $D_2$ ,PEDERSEN等<sup>[19]</sup>通过能量分析方法,得出碰撞船之间的吨位比对结构碰撞损伤等级有决定性意义,以吨位比为变量,建立船舶吨位与结构损伤等级的先验概率,不同吨位比条件下各碰撞等级船舶数量见表4。

基于表4的统计数据与式(1),可进一步计算不同吨位比条件下的船舶碰撞等级的先验概率见表5。

以吨位比1~2为例,结构碰撞损伤等级为刚蹭为例,代入式(1),有

$$P(H_1 | E_2 = 1 \sim 2) = \frac{P(H_1, E_2 = 1 \sim 2)}{P(E_2 = 1 \sim 2)} = \frac{19/72}{26\%} = 26\% \quad (3)$$

由表4可知:随着吨位比增加,吨位较小的船舶被撞沉的概率显著增加,当吨位比超过10时,小吨位船与大吨位船撞沉比接近10:1。由表5可知:吨

表4 不同吨位比条件下各碰撞等级船舶数量  
Tab.4 The number of ship collision damage levels

in different tonnage ratio 单位:艘次

| 吨位比  | 1~2 |     | 2~3 |     |
|------|-----|-----|-----|-----|
|      | 大吨位 | 小吨位 | 大吨位 | 小吨位 |
| 刮蹭   | 8   | 11  | 8   | 8   |
| 撞伤   | 12  | 13  | 10  | 3   |
| 严重撞伤 | 4   | 4   | 0   | 3   |
| 撞沉   | 12  | 8   | 5   | 9   |

| 吨位比  | 3~10 |     | 10~ |     |
|------|------|-----|-----|-----|
|      | 大吨位  | 小吨位 | 大吨位 | 小吨位 |
| 刮蹭   | 15   | 4   | 56  | 3   |
| 撞伤   | 8    | 6   | 20  | 14  |
| 严重撞伤 | 3    | 2   | 2   | 8   |
| 撞沉   | 2    | 16  | 6   | 59  |

表5 不同吨位比条件下的船舶碰撞等级先验概率

Tab.5 Prior probability of ship collision damage levels in different tonnage ratio 单位:%

| 吨位比            | 1~2 | 2~3 | 3~10 | 10~ |
|----------------|-----|-----|------|-----|
| $P(H_1   E_2)$ | 26  | 35  | 34   | 35  |
| $P(H_2   E_2)$ | 35  | 28  | 25   | 20  |
| $P(H_3   E_2)$ | 11  | 7   | 9    | 6   |
| $P(H_4   E_2)$ | 28  | 30  | 32   | 39  |

位相近的船舶相撞出现沉船概率不超过30%,当吨位比超过10时,船舶相撞时出现船舶沉没的概率接近40%,船舶沉没概率明显增加。

### 1.2.3 碰撞航速与碰撞夹角

通常情况下,两船相撞时,撞击船以航速 $\bar{v}_1$ ,被撞船以航速 $\bar{v}_2$ 航行,两船航向夹角为 $\alpha$ 。航海学上,通常将一船看作静止,另一船看作以 $\bar{v}_1$ 与 $\bar{v}_r$ 的矢量和航行,根据相对运动原理, $\bar{v}_r$ 与 $\bar{v}_2$ 大小相等,方向相反,称为牵连速度。将被撞船作为静止船,从被撞船看过去,撞击船是以 $\bar{v}_1$ 与 $\bar{v}_r$ 的矢量和,即航速 $\bar{v}$ 撞击到被撞船的,航速碰撞夹角为 $\varphi = \theta + \alpha$ 。

两船相撞的航速矢量关系见图3。根据图3的矢量关系,航速和撞击夹角计算分别为

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\alpha} \quad (4)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{v_1^2 + v^2 - v_2^2}{2vv_1}\right) \quad (5)$$

不同航速范围内各碰撞等级船舶数量见表6。基于表6的统计数据,可进一步计算出不同航速范

围的船舶碰撞等级的先验概率,具体概率见表7。

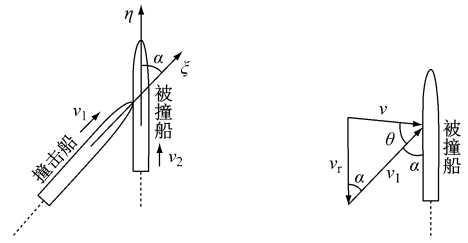


图3 两船相撞的航速矢量关系  
Fig.3 Speed vector relationship between two ships

表6 不同航速范围内各碰撞等级船舶数量

Tab.6 The number of ship collision damage levels in different speed ranges 单位:艘次

| 航速范围 v/kn | 0~5 | 5~10 |
|-----------|-----|------|
| 刮蹭        | 13  | 30   |
| 撞伤        | 15  | 28   |
| 严重撞伤      | 4   | 1    |
| 撞沉        | 16  | 30   |

| 航速范围 v/kn | 10~15 | 15~ |
|-----------|-------|-----|
| 刮蹭        | 21    | 5   |
| 撞伤        | 16    | 7   |
| 严重撞伤      | 7     | 4   |
| 撞沉        | 24    | 4   |

表7 不同航速范围内船舶碰撞等级先验概率

Tab.7 Prior probability of ship collision damage levels in different speed ranges 单位:%

| 航速范围 v/kn      | 0~5 | 5~10 | 10~15 | 15~ |
|----------------|-----|------|-------|-----|
| $P(H_1   E_3)$ | 27  | 34   | 31    | 25  |
| $P(H_2   E_3)$ | 31  | 31   | 24    | 35  |
| $P(H_3   E_3)$ | 8   | 1    | 10    | 20  |
| $P(H_4   E_3)$ | 33  | 34   | 35    | 20  |

由表6和表7可知:随着航速提高,船舶碰撞后的沉没概率并没有显著增加,而航速超过15kn时撞沉的概率降低到20%,这可能是由于统计样本量偏少造成的统计误差,在计算多因素联合作用下船舶损伤,可将航速超过15kn时撞沉的概率设置为33%。

对于碰撞夹角,案例中符合统计要求的共114例,数据量较少,为使每一个相对航速碰撞角范围内数据量较为平均,降低数据过少带来的偏差,本文并未将夹角范围进行等分,而是将114个案例大致分为7份,对应的相对航速碰撞角区间并不相等,不同

碰撞夹角造成碰撞等级船舶数量和先验概率分别见表8和表9。由表8可知:当相对航速碰撞角范围在110°~125°时,造成船舶撞沉的概率密度最大。

表8 不同碰撞夹角造成碰撞等级船舶数量

Tab.8 The number of ship collision damage

levels in different collision angle 单位:艘次

| 碰撞夹角/(°) | 0~40 | 40~85 | 85~110 | 110~125 |
|----------|------|-------|--------|---------|
| 刮蹭       | 11   | 9     | 8      | 12      |
| 撞伤       | 7    | 8     | 12     | 5       |
| 严重撞伤     | 1    | 1     | 1      | 2       |
| 撞沉       | 11   | 14    | 11     | 13      |

| 碰撞夹角/(°) | 125~135 | 135~148 | 148~180 |
|----------|---------|---------|---------|
| 刮蹭       | 8       | 11      | 10      |
| 撞伤       | 11      | 11      | 12      |
| 严重撞伤     | 5       | 4       | 5       |
| 撞沉       | 8       | 6       | 11      |

表9 不同碰撞夹角造成碰撞等级先验概率

Tab.9 Prior probability of ship collision damage

levels in different collision angle 单位:%

| 碰撞夹角/(°)       | 0~40 | 40~85 | 85~110 | 110~125 |
|----------------|------|-------|--------|---------|
| $P(H_1   E_4)$ | 37   | 28    | 25     | 38      |
| $P(H_2   E_4)$ | 23   | 25    | 38     | 16      |
| $P(H_3   E_4)$ | 3    | 3     | 3      | 6       |
| $P(H_4   E_4)$ | 37   | 44    | 34     | 41      |

| 碰撞夹角/(°)       | 125~135 | 135~148 | 148~180 |
|----------------|---------|---------|---------|
| $P(H_1   E_4)$ | 25      | 34      | 26      |
| $P(H_2   E_4)$ | 34      | 34      | 32      |
| $P(H_3   E_4)$ | 16      | 13      | 13      |
| $P(H_4   E_4)$ | 25      | 19      | 29      |

## 2 船舶碰撞等级的贝叶斯估计

贝叶斯网络模型一般有2种建立方法:已知网络结构,对网络参数进行估计,称为参数学习;不知道网络结构,要通过分析数据,同时获得网络结构和网络参数,称为结构学习。贝叶斯网络推理是指根据已确定的贝叶斯网络结构及其条件概率表,在给

定证据信息的情况下,推断某些节点取值的概率<sup>[20]</sup>。船舶碰撞等级与碰撞因素间逻辑关系相对明确,可采用参数学习方法建立贝叶斯网络模型。

船舶发生碰撞时,根据船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)信号或者电子海图信息,能获得的参数有相撞船的船名、船舶总吨、碰撞前的两船的航速和航向等有限信息。通过第1节论述,造成船舶损伤的各种因素中,碰撞场景、相撞船舶的吨位比、航速和碰撞夹角等4个变量可看成相互独立的。依照此关系建立的多因素联合作用下船舶碰撞损伤等级的贝叶斯网络模型见图4。

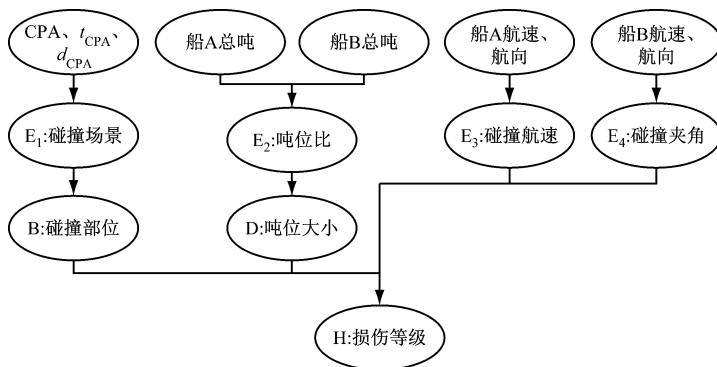


图4 多因素联合作用下船舶碰撞损伤等级的贝叶斯网络模型

Fig.4 Bayesian network model of ship collision damage risk under the combined action of multiple factors

使用贝叶斯网络模型计算的关键在于计算多变量联合概率分布和条件概率分布。将式(1)其推广到n个变量的联合分布 $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为

况下,  $X_1, X_2$  相互独立,有

$$P(X_1 | X_2, X_3) = P(X_1 | X_3) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可建立多因素联合作用下船舶碰撞损伤风险联合分布 $P(H, E_1, E_2, E_3, E_4)$ 为

$$P(H, E_1, E_2, E_3, E_4) =$$

$$P(H)P(E_1 | H)P(E_2 | H)P(E_3 | H)P(E_4 | H) \quad (8)$$

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = P(X_1)P(X_2 | X_1) \dots P(X_n | X_1, \dots, X_{n-1}) \quad (6)$$

式(6)将一个联合分布分解为一系列条件分布乘积,称为链规则。

同理

考虑3个随机变量  $X_1, X_2, X_3$ , 在给定  $X_3$  的情

$$P(E_1, E_2, E_3, E_4, H) = P(E_1)P(E_2)P(E_3)P(E_4)P(H | E_1, E_2, E_3, E_4) \quad (9)$$

由于

$$P(H, E_1, E_2, E_3, E_4) = P(E_1, E_2, E_3, E_4, H)$$

有

$$\frac{P(H | E_1, E_2, E_3, E_4) = P(H)P(E_1 | H)P(E_2 | H)P(E_3 | H)P(E_4 | H)}{P(E_1)P(E_2)P(E_3)P(E_4)} \quad (10)$$

考虑到具体船的撞击部位(事件  $B$ )与吨位大小(事件  $D$ ),将式(10)改为

$$\frac{P(H | E_1, B, E_2, D, E_3, E_4) = P(H)P(E_1 | H)P(B | E_1, H)P(E_2 | H)P(E_2 | H) \cdot P(D | E_1, B, E_2, H)P(E_3 | H)P(E_4 | H)}{[P(E_1)P(B | E_1)P(E_2)P(D | E_1, B, E_2)P(E_3)P(E_4)]} \quad (11)$$

### 3 计算算例

#### 3.1 美“菲兹杰拉德”号驱逐舰与“水晶”号商船相撞事故

2017年6月17日约1时30分,美“菲兹杰拉德”号驱逐舰与“水晶”号商船在东京湾海域相撞。两船相关参数见表10。两船相撞场景见图5。

表10 两船相关参数

Tab.10 Related parameters of the two ships

|         | “菲兹杰拉德”号 | “水晶”号 |
|---------|----------|-------|
| 总吨      | 9 000    | 2 900 |
| 撞击部位    | 舯部       | 艏部    |
| 航速/kn   | 20       | 18.5  |
| 航向/(°)  | 190      | 232.3 |
| 撞击场景    | 船-舯碰撞    |       |
| 吨位比     | 1.0:3.1  |       |
| 撞击速度/kn | 13       |       |
| 撞击角/(°) | 104      |       |

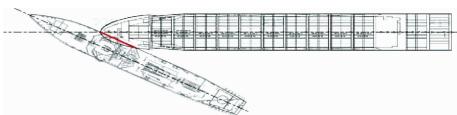


图5 两船相撞场景

Fig.5 The scene of two ships' collision

根据式(9)进行计算,可得“菲兹杰拉德”号驱逐舰与“水晶”号碰撞结构损伤风险,计算结果见

表11。

表11 两船碰撞结构损伤风险

Tab.11 Structural damage risk of collision

| 损伤风险 | “菲兹杰拉德”号 | “水晶”号 |
|------|----------|-------|
| 剐蹭   | 4.26     | 75.08 |
| 撞伤   | 6.87     | 11.78 |
| 严重撞伤 | 0.65     | 2.49  |
| 撞沉   | 79.37    | 0.33  |

由表11可知:“菲兹杰拉德”号被撞沉概率高达79%。根据调查结果<sup>[21-22]</sup>，“菲兹杰拉德”号水下部分被“水晶”号撞出4 m×5 m破口,大量海水涌入,造成7名舰员死亡,舰体上层建筑亦被造成严重损伤,见图6。由图6可知:“菲兹杰拉德”号破口是严重撞伤标准的6倍,舰船沉没风险非常高,及时有效的损管行动是舰船未发生沉没的重要原因。计算结果同时显示,“水晶”号有高达75%的概率仅受剐蹭损伤,事实上,“水晶”号仅艏部部分受轻伤,见图7。实际损伤与计算结果吻合较好。

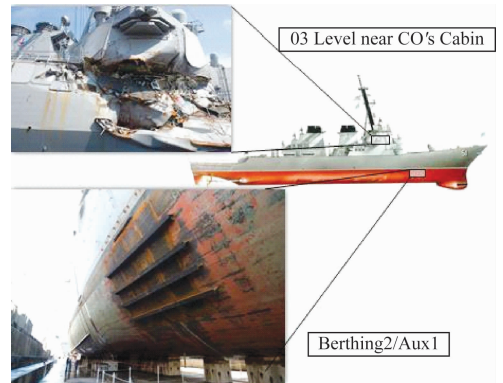


图6 “菲兹杰拉德”号受损情况

Fig.6 Damage to the FITZGERALD

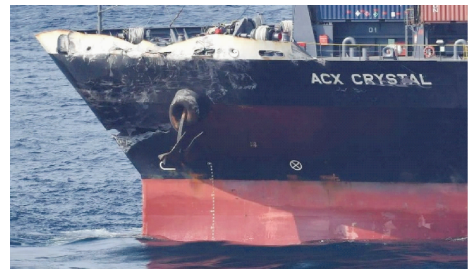


图7 “水晶”号受损情况

Fig.7 Damage to the CRYSTAL

#### 3.2 缅甸籍渔船与韩国籍货船撞击事故

2009年9月18日凌晨约1点,1艘缅甸籍渔船(简称船A)在仰光河与韩国籍货船(简称船B)发生碰撞事故,文献[6]提供相关参数见表12。

表 12 船 A 与船 B 相关参数

Tab. 12 Related parameters of the two ship A and ship B

| 参数      | 船 A    | 船 B    |
|---------|--------|--------|
| 总吨      | 224    | 42 195 |
| 撞击部位    | 舦部     | 舦部     |
| 航速/kn   | 0      | 14. 14 |
| 航向/(°)  | 0      | 85     |
| 撞击场景    | 舦-舦碰撞  |        |
| 吨位比     | 1: 188 |        |
| 撞击速度/kn | 14. 14 |        |
| 撞击角/(°) | 85     |        |

根据式(11)可计算两船碰撞结构损伤风险,计算结果见表 13。

表 13 两船碰撞结构损伤风险

Tab. 13 Structural damage risk of collision between two ships

| 损伤风险 | 单位:%   |        |
|------|--------|--------|
|      | 船 A    | 船 B    |
| 刚蹭   | 0. 33  | 73. 00 |
| 撞伤   | 4. 99  | 22. 82 |
| 严重撞伤 | 10. 15 | 0. 14  |
| 撞沉   | 86. 03 | 0. 26  |

由表 13 可知:船 A 有 86. 03% 概率被撞沉,船 B 则有 73% 概率仅受刚蹭伤,根据文献[6]提供的实际勘察损伤与仿真结果,船 A 在两船碰撞时沉没,船 B 舦部有 3 处局部凹陷,较好地验证了计算结果。

### 3.3 “嘉禾 128”轮与“桂钦渔 22668”轮碰撞事故

2023 年 3 月 17 日,“嘉禾 128”轮与西行渔船“桂钦渔 22668”在琼州海峡西口发生碰撞,相撞船舶相关参数见文献[23]和表 14。

根据式(11)可计算两船碰撞结构损伤风险,计算结果见表 15。

由表 15 可知:“嘉禾 128”轮有 80. 78% 概率被撞沉,“桂钦渔 22668”轮有 85. 75% 概率受到刚蹭或撞伤,根据文献[23]提供的实际勘察损伤结果,“嘉禾 128”轮在两船碰撞时沉没,“桂钦渔 22668”轮船水线附近有大面积刮擦、变形和破损痕迹,较好验证了计算结果。

## 4 结束语

本文基于电子海图或 AIS 提供有限信息参数,

表 14 “嘉禾 128”轮与“桂钦渔 22668”船相关参数

Tab. 14 Related parameters of the two ship “Jiahe 128” and ship “Guiqinyu 22668”

| 参数      | 桂钦渔 22668  | 嘉禾 128 |
|---------|------------|--------|
| 总吨      | 282        | 498    |
| 撞击部位    | 舦部         | 舦部     |
| 航速/kn   | 8. 8       | 8. 6   |
| 航向/(°)  | 223. 5     | 123. 4 |
| 撞击场景    | 舦-舦碰撞      |        |
| 吨位比     | 1. 0: 1. 8 |        |
| 撞击速度/kn | 11. 17     |        |
| 撞击角/(°) | 149        |        |

表 15 两船碰撞结构损伤风险

Tab. 15 Structural damage risk of collision between two ships

| 损伤风险 | 单位:%      |        |
|------|-----------|--------|
|      | 桂钦渔 22668 | 嘉禾 128 |
| 刚蹭   | 42. 75    | 0. 30  |
| 撞伤   | 43. 00    | 1. 15  |
| 严重撞伤 | 0. 56     | 17. 50 |
| 撞沉   | 0. 28     | 80. 78 |

以海事局公布的 202 起船舶碰撞案例为样本,统计分析相关因素对船舶碰撞等级的影响,建立多要素联合作用下的结构碰撞损伤等级估计的贝叶斯网络模型,通过实际案由由有限元仿真检验,该估计与实际结果吻合良好。

有限参数下船舶结构碰撞损伤等级的贝叶斯估计可内嵌于电子海图当中,评估航道内他船与本船相撞后碰撞损伤等级,提高船上人员的防范意识,也可用于事故发生后快速评估碰撞损伤等级,为现场损管救援提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国海事局. 事故调查报告[EB/OL]. [2023-12-26]. <https://www.msa.gov.cn/page/outer/shiguyufang.jsp>, 2024.
- [2] LIU B, SOARES C G. Recent developments in ship collision analysis and challenges to an accidental limit state design method [J]. Ocean Engineering, 2023, 270:1-8.
- [3] XIE H B, LIU Z J, SONG Y, et al. Research and analysis on damage of marine ship structures by composite materials based on fem numerical simulation [J]. Key Engineering Materials, 2020, 852:129-138.

- [4] 吴晶. BP-GA 算法在船舶碰撞风险评估中的应用[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(7):94-97.  
WU J. Risk assessment and damage research of BP-GA algorithm in ship collision process[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(7):94-97. (in Chinese)
- [5] OZGUC O. Structural damage of ship-FPSO collisions[J]. Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2019, 18(1):1-35.
- [6] 刘敬贤, 刘超, 李范春, 等. 定量分析对船舶碰撞事故的推演与调查[J]. 中国航海, 2022, 45(1):13-17.  
LIU J X, LIU C, LI F C, et al. Quantitative analysis in maritime accident rehearsal and investigation [J]. Navigation of China, 2022, 45(1):13-17. (in Chinese)
- [7] 张磊, 赵晓博, 甘浪雄, 等. 船舶碰撞事故反演有限元仿真[J]. 中国航海, 2018, 41(1):78-83.  
ZHANG L, ZHAO X B, GAN L X. Finite element simulation for ship collision accident investigation[J]. Navigation of China, 2018, 41(1):78-83. (in Chinese)
- [8] 王艳华. 船舶碰撞过程船体表面动力学数值仿真[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(3):21-24.  
WANG Y H. Numerical simulation of hull surface dynamics during ship collision[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(3):21-24.
- [9] PAN J, WANG T, HUANG S W, et al. Investigation of assessment method of axial crushing force of rake bow for bridge against ship collision [J]. Ocean Engineering, 2023, 269(1):1-15.
- [10] VASSALOS D. European research on collision and grounding [C] // 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships. Denmark: Copenhagen, 2001:293-301.
- [11] LAUBENSTEIN L, MAINS C, TAGG R, et al. Updated probabilistic extent of damage based on actual collision data[C] // 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships. Denmark: Copenhagen, 2001. 93-100.
- [12] BROWN A J. Collision scenarios and probabilistic collision damage[J]. Marine Structures, 2002, 15(4-5):335-364.
- [13] BROWN A J, CHEN D. Probabilistic method for prediction ship collision damage[J]. Ocean Engineering International, 2002(6):54-55.
- [14] 张艳艳. 海上船舶碰撞事故态势研究[D]. 厦门:集美大学, 2017.  
ZHANG Y Y. Study on ship collision accident situation at sea[D]. Xiamen: Jimei University. (in Chinese)
- [15] 李慧. 船舶碰撞危险区间及不同态势下的损伤研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.  
LI H. Research on dangerous zone and damage in different situation of ship-ship collision [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] PEDERSEN P T, ZHANG S. On impact mechanics in ship collisions[J]. Marine Structures, 1998, 11(10):429-449.
- [17] ZHANG S, PEDERSEN P T. A method for ship collision damage and energy absorption analysis and its validation [J]. Ships Offshore Structures, 2017, 12(1):1-11.
- [18] 李慧, 甘浪雄, 张磊, 等. 船舶碰撞损伤临界态势界定研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(3):380-389.  
LI H, GAN L X, ZHANG L. Definition of critical situation for ship-ship collision damage[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(3):380-389. (in Chinese)
- [19] PEDERSEN P T, ZHANG S. Effect of ship structure and size on grounding and collision damage distributions[J]. Ocean Engineering, 2000, 27(11):1161-1179.
- [20] 菅小艳. 贝叶斯网基础及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2019.  
JIAN X Y. The foundation and application of bayesian network[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2019.
- [21] Department of the Navy. Report on the collision between USS FITZGERALD (DDG 62) and motor vessel [EB/OL]. [2024-02-20]. <https://www.defense.gov/>.
- [22] ECKSTEIN M. Five years later: inside the navy's data-driven quest to avert a future fitzgerald or mccain collision[J]. Navy Times, 2022, 24(3):380-389.
- [23] 中华人民共和国海事局. 琼州海峡“3·17”“嘉禾128”轮与“桂钦渔 22668”轮碰撞事故调查报告[EB/OL]. [2023-12-28]. <https://www.msa.gov.cn/public/documents/document/mdmw/nj3/~ edisp/20230904030627921.pdf>.