

# 大风浪条件下考虑避碰脆弱性的多船避碰决策

胡宴才,张强,吴恒涛

山东交通学院 航运学院,山东 威海 264209

**摘要:**为解决大风浪影响下船舶操纵能力降低、产生避碰脆弱性、碰撞事故发生概率增大的问题,考虑船舶长度,分析大风浪因素,获得船舶避碰脆弱性;选取船舶碰撞危险度指标进行模糊推理得到基本的碰撞危险度,提出考虑船舶综合碰撞危险度的多船避碰决策方法。利用多船会遇构建避碰决策模糊案例库,提供对应的避碰决策,并利用仿真试验验证避碰决策方法的有效性。结果表明:多船避碰决策方法可准确计算不同长度船舶的避碰脆弱性,提供周围船舶的综合碰撞危险度,进行有效的多船避碰决策。此方法可为大风浪条件下的船舶航行安全提供重要的理论依据和数据参考。

**关键词:**多船避碰;模糊推理;案例推理;避碰脆弱性;碰撞危险度

**中图分类号:**U692.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2023)01-0093-09

**引用格式:**胡宴才,张强,吴恒涛.大风浪条件下考虑避碰脆弱性的多船避碰决策[J].山东交通学院学报,2023,31(1):93-101.

HU Yancai, ZHANG Qiang, WU Hengtao. Multi-vessels collision avoidance decisions considering the vulnerability of collision avoidance under heavy storm wave[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023,31(1):93-101.

## 0 引言

船舶避碰系统研究是提高船舶航行安全性的重要课题,对船舶进行避碰决策可为避碰行动提供依据。为减少人为避碰失误,研究人员提出多种船舶碰撞危险度评估方法。碰撞危险度是描述航行船舶碰撞危险程度的重要参数,在船舶自动避碰系统中起承上启下的作用,是船舶采取避碰决策的重要依据,研究碰撞危险度可推动智能船舶航行避碰决策水平的快速发展。

为构建准确可靠的碰撞危险度评估系统,Tu等<sup>[1]</sup>通过检测侵犯他船领域的可能性,将船舶领域评估船舶航行安全的标准结合最近会遇距离(distance to closest point of approach,DCPA)和到达最近会遇距离的时间(time to closest point of approach,TCPA)等危险指数,计算碰撞危险度。罗捷等<sup>[2]</sup>采用遗传极限学习计算法计算船舶碰撞危险度,提高了船舶避碰的成功率。利用智能方法与传统方法的差异性、互补性,将2类方法相结合进行避碰研究<sup>[3]</sup>。Zhou等<sup>[4]</sup>提出动态模糊船舶领域的概念,考虑本船和他船相关因素确定船舶航行碰撞危险度。但在评估碰撞危险度时,上述方法未充分考虑环境条件,如风、浪等外部因素的有效融合问题,影响碰撞危险度计算的准确性<sup>[5]</sup>。

Andrew等<sup>[6]</sup>构建了可分析已识别危险度因素的特定模型。Dang等<sup>[7]</sup>、Szlacpzyński等<sup>[8]</sup>、Jo等<sup>[9]</sup>、Zhang等<sup>[10]</sup>针对海上航行时的恶劣天气因素进行研究。考虑船舶的运动特性,谢鸿伟等<sup>[11]</sup>针对开阔水

**收稿日期:**2022-03-24

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51911540478);山东省重点研究发展计划资助项目(2019JZZY020712);山东省研究生教育教改研究项目(SDYJG19217);山东交通学院“攀登计划”重点科研创新团队资助项目(SDJTUC1802);山东交通学院博士科研启动基金项目(BS201902052)。

**第一作者简介:**胡宴才(1987—),男,山东烟台人,工学博士,主要研究方向为船舶避碰、船舶运动控制,E-mail:yancai@126.com。

域多船会遇情况,提出一种考虑船舶运动数学模型的自主避碰方法。针对避碰路径规划问题,贾立校等<sup>[12]</sup>提出综合考虑速度和安全性的船舶智能避碰方法。周凤杰<sup>[13]</sup>、曾勇等<sup>[14]</sup>采用粒子群-遗传混合优化算法的船舶避碰决策方法,取得了较好的避碰决策和规划效果。也有学者提出了碰撞危险度模糊评估、自主水面船舶实时避碰和不确定危险度回归模型等方法,解决考虑避碰脆弱性的船舶避碰问题<sup>[15-16]</sup>。船舶碰撞危险度被视为宏观的危险度,是指发生海上事故的可能性或海上事故的危险程度,而避碰脆弱性是指发生碰撞事故的可能性或发生碰撞事故的风险程度,避碰脆弱性增大意味着发生海上碰撞事故的可能性增大。

但考虑船员驾驶经验案例,解决基于案例库推理的大风浪因素影响的多船避碰问题的文献较少。为提升船舶避碰决策的智能化和精确性,本文在大风浪下船舶避碰脆弱性评估的基础上研究避碰决策,考虑避碰脆弱性,提出一种多船避碰模糊决策避碰方法。

## 1 大风浪条件下船舶碰撞危险度评估

大风浪条件下易造成船舶碰撞危险度评估不当而错过避碰时机,极易引发碰撞事故。采用考虑避碰脆弱性因素的船舶碰撞危险度模糊评估方法,结合基本的碰撞危险度和大风浪下不同类型船舶的避碰脆弱性,计算综合碰撞危险度,如图1所示。

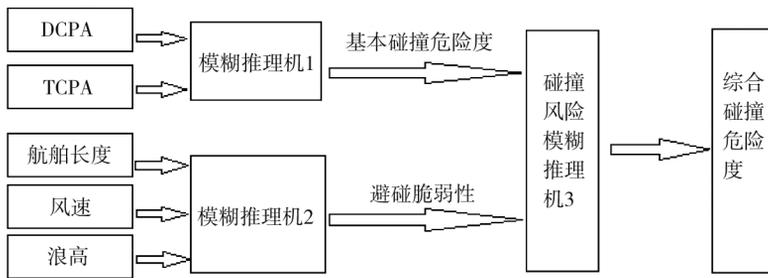


图1 大风浪条件下船舶碰撞危险度模糊评估

### 1.1 船舶基本碰撞危险度

在船舶碰撞危险度评估方法中,最近会遇距离和到达最近会遇距离的时间是确定船舶是否存在碰撞危险的根本因素。最近会遇距离  $l_{DCPA}$  通常考虑绝对值,本文将以  $l_{DCPA}(-)$  或  $l_{DCPA}(+)$  的形式区分本船左、右两舷的船舶,绘图显示本船、目标船的位置关系,相对运动线朝向本船的方向,如图2所示。

如果目标船相对运动或明显向本船左侧移动,则  $l_{DCPA}$  为负;若目标船明显向右运动,则  $l_{DCPA}$  为正。根据目标船距离确定从本船到危险船舶的距离;目标船相对方位(target relative bearing, TRB) 确定危险船舶的接近类型及根据案例库的相似性进行调整,寻求适用的解决方案;  $l_{DCPA}$  确定碰撞危险度模糊规则的输入和生成,调整新航向的输出;到达最近会遇距离的时间  $t_{TCPA}$  确定危险区域内每艘船的碰撞危险度,并通过调整查询到的来自案例库中相似的解决方案,提供避碰决策。

基本碰撞危险度与避碰脆弱性概念不同,不能在数学上对二者简单求和。本文采用模糊推理的方法将基本碰撞危险度和避碰脆弱性融合计算综合碰撞危险度,采用改进的  $l_{DCPA}$  和  $t_{TCPA}$  方法提供更合理和适用的碰撞危险度评估。用于求解基本碰撞危险度模糊规则的输入变量为  $l_{DCPA}$  和  $t_{TCPA}$ ,输出变量为基

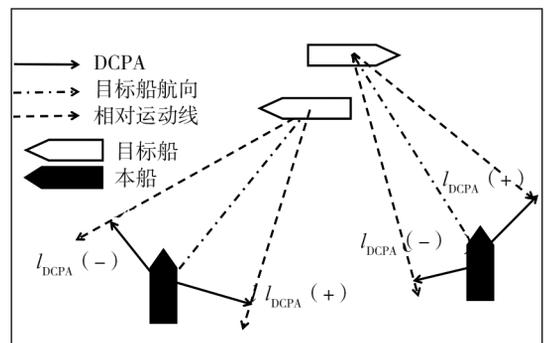


图2  $l_{DCPA}$  正、负值示意图

本安全指数  $S_{index}$  和基本碰撞危险度  $C_r$ ,形式为

$$(l_{DCPA}, t_{TCPA}) \rightarrow S_{index} \rightarrow C_r$$

采用简洁的模糊推理模型,将  $l_{DCPA}$ 、 $t_{TCPA}$  和  $S_{index}$  的隶属度函数分别分为 5、8、8 个语言值。计算  $C_r$  时有 2 个输入和 1 个输出,可由推理规则确定。根据模糊逻辑推理规则,采用危险度指标  $l_{DCPA}$  和  $t_{TCPA}$  作为模糊推理输入,得到  $C_r$ 。模糊规则的输出变量  $S_{index}$  可用于求解  $C_r$ ,计算公式为

$$C_r = \begin{cases} 1 - S_{index}, & S_{index} \geq 0 \\ -0.5 - S_{index}, & S_{index} < 0 \end{cases}$$

$l_{DCPA}$ 、 $t_{TCPA}$  和  $S_{index}$  的模糊隶属度函数如图 3 所示。

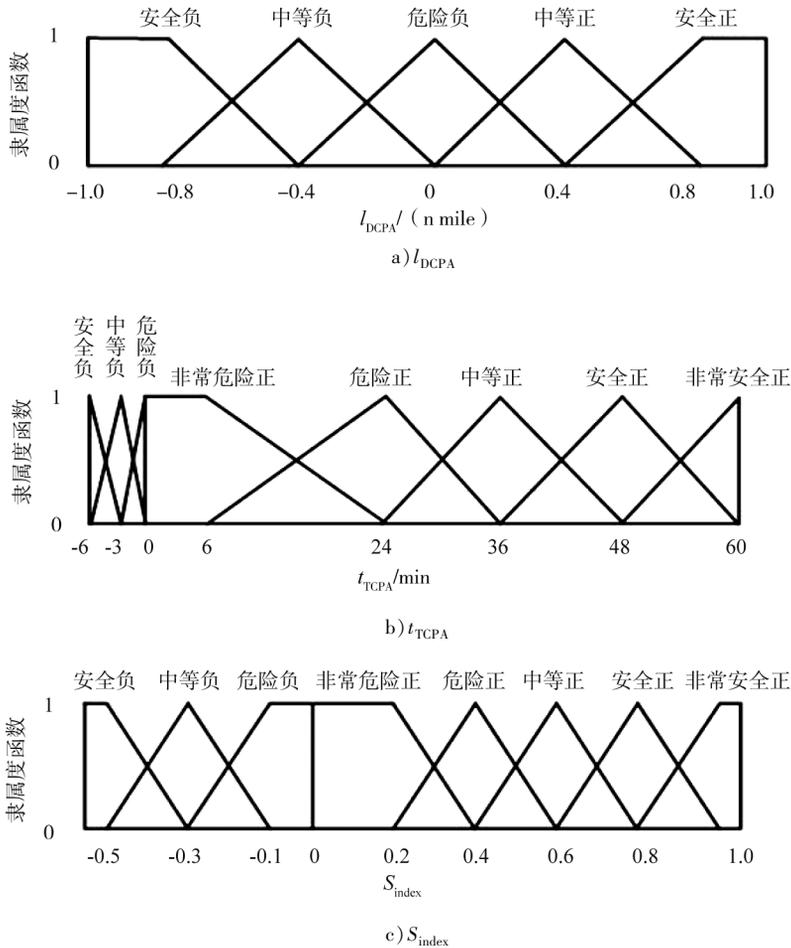


图 3  $l_{DCPA}$ 、 $t_{TCPA}$  和  $S_{index}$  的模糊隶属度函数

### 1.2 大风浪脆弱性危险度评估

评估小型船舶实际航行中大风浪因素影响碰撞危险度的程度,需考虑碰撞危险因素和避碰脆弱性因素。

采用模糊推理方法,通过模糊隶属函数和推理规则,结合风速  $v$  和浪高  $h$  推算大风浪造成的避碰脆弱性  $V_w$ ,推理关系为:

$$(v, h) \rightarrow V_w$$

根据 Beaufort 风浪标准<sup>[17]</sup>和专家们提出的意见,考虑船长度,确定大风浪条件下  $v$  和  $h$  等 2 个重要变量的隶属度函数。以小型船舶为基准,设置  $v$  和  $h$  的 3 种语言值为小、中、大。根据专家和船长的问卷,为模糊引擎设计模糊规则,如表 1 所示。

表 1 大风浪造成的  $V_w$  的模糊推理规则

$h$	$v$ 小	$v$ 中	$v$ 大
小	0	0.25	0.50
中	0.50	0.50	0.75
大	0.75	1.00	1.00

采用三角隶属度函数的模糊逻辑描述大风浪,大风浪脆弱性为0~1。如果脆弱性接近0,表明发生事故的可能性较小;脆弱性接近1,表明发生事故的可能性较大,如图4所示。

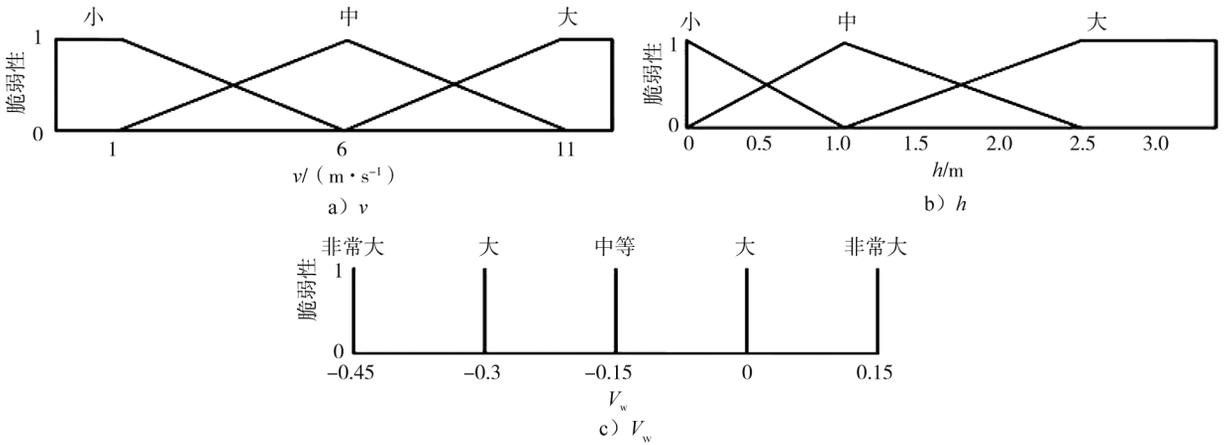


图4 小型基准船不同参量的脆弱性隶属度函数

船长采用非常小、小、中等、大、非常大5个语言值标示,如图5a)所示。通常认定长约18 m的船为小型船舶,船长超过160 m为大型船。考虑到船长,采用模糊校正修改值调整  $V_w$ ,如图5b)所示。

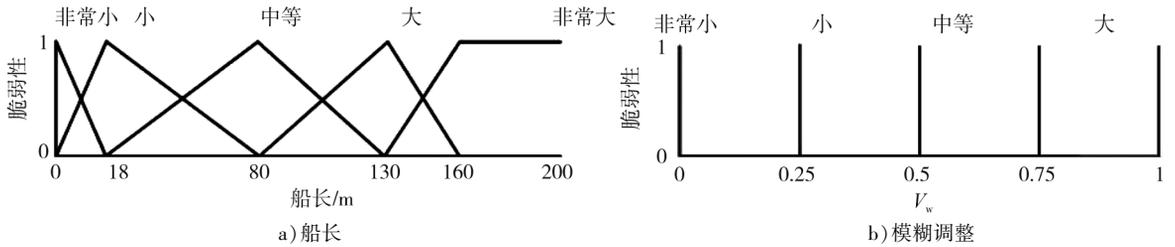


图5 船长和模糊调整的模糊隶属度函数

## 2 船舶综合碰撞危险度评估与避碰决策

采用具有模糊案例库的避碰决策方案求解最佳的避碰航向,船舶避碰决策流程如图6所示。在案例库中存储了经典决策案例。根据当前遇到的情况,从案例库中检索相似案例,获得与经验丰富的船员处置相似情况的避碰决策措施,再进行相似度调整获得合适避碰方案。该避碰决策方法包含大风浪条件下避碰脆弱性危险度评估模块(模块1)、综合危险度评估与新案例索引模块(模块2)和案例检索决策模块(模块3)3个模块。

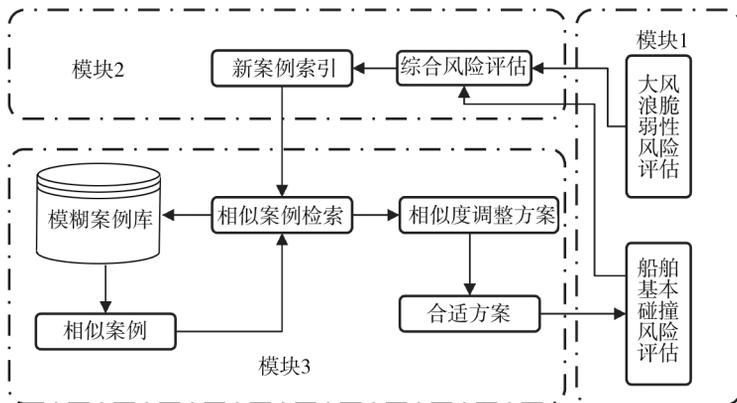


图6 船舶避碰决策流程图

在模块 1 中评估脆弱性危险度指标和  $C_r$  指标,模块 2 融合模块 1 的 2 个评估结果,获得综合碰撞危险度,根据综合碰撞危险度的模糊推理规则确定在大风浪影响下最危险的会遇船舶,如表 2 所示。

表 2 综合碰撞危险度的模糊推理规则

脆弱性	$C_r$ 非常小	$C_r$ 小	$C_r$ 中等	$C_r$ 大	$C_r$ 非常大
小	非常小	小	中等	大	非常大
中	小	中等	大	非常大	非常大
大	中等	大	非常大	非常大	非常大

在模块 3 避碰案例库中检索新案例的相似案例,根据案例会遇情况的相似度优化避碰决策,获得合适的避碰方案。

在避碰决策前进行案例检索,船舶避碰模糊推理库结构如图 7 所示,A、B 为目标船。根据  $t_{TCPA}$ 、目标船相对方位  $\theta_{TRB}$  和  $L_{DCPA}$  检索避碰决策系统案例库中的案例。当检索到类似情况时,将  $L_{DCPA}$  作为输入参数,求解本船为避免碰撞采用的输出航向  $H_{output}$ 。在考虑碰撞规则的基础上,根据检索的  $t_{TCPA}$ 、 $\theta_{TRB}$  调整转向,获得输出决策航向。

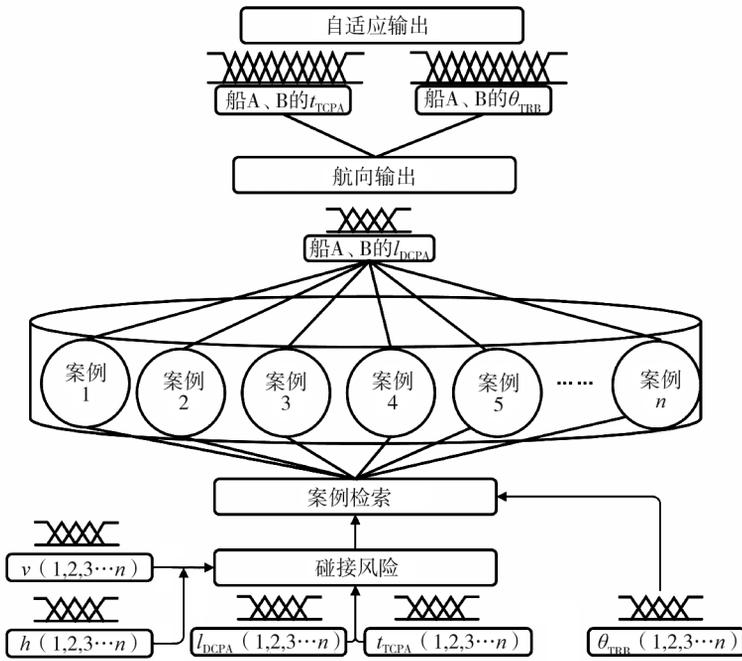


图 7 船舶避碰模糊推理库结构

采用  $t_{TCPA}$  和  $\theta_{TRB}$  作为相似度调整的输入参数,与案例库中的案例参数比较,计算参数间的相似度,调整所选案例的解决方案,相似度

$$S_{im}(T,S) = \sum_{i=1}^n f(T_i, S_i) \times w,$$

式中: $w$  为重要性加权, $f$  为相似性函数, $T$ 、 $S$  分别为输入参数和检索案例参数, $T_i$ 、 $S_i$  分别为第  $i$  个案例的输入参数和检索案例参数。

采用参数  $T_i$  与  $S_i$  之差作为相似性模糊推理计算的输入变量,即求解相似度的模糊规则的输入、输出变量为

$$(T_i - S_i) \rightarrow S_{im}。$$

由  $H_{output}$  和案例相似度计算获得决策航向  $H_{new}$ ,即

$$H_{\text{output}} \cdot S_{\text{im}} \rightarrow H_{\text{new}}$$

### 3 仿真应用

为验证模糊避碰决策方案的有效性,在仿真试验中设置会遇情况,识别最危险的2艘船舶,并根据案例库中存储的案例进行推理和调整,采取安全的航向,避免与区域中的其他船舶相撞。

本船周围 10 n mile 范围内探测到 6 艘目标船,分别为 A~F,如图 8 所示,详细信息如表 3 所示。采用模糊推理方法,以  $t_{\text{TCPA}}$ 、 $l_{\text{DCPA}}$  和  $\theta_{\text{TRB}}$  作为重要风险指数确定碰撞危险度。

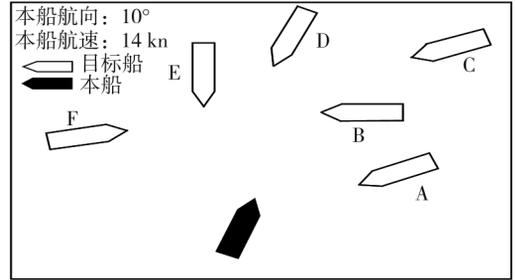


图 8 船舶会遇情形

表 3 本船附近目标船舶的重要风险指数

目标船	航向/(°)	航速/kn	方位/(°)	距离/n mile	船长/m	$l_{\text{DCPA}}$ /n mile	$t_{\text{TCPA}}$ /min	$\theta_{\text{TRB}}$ /(°)
A	240	20	050	5.0	200	0.89	9.55	40
B	270	15	015	6.0	120	-3.58	12.99	5
C	260	10	025	7.5	150	-1.73	22.12	15
D	195	25	357	9.0	170	-2.51	13.31	-13
E	180	25	350	6.1	50	-1.43	9.15	-20
F	087	37	290	7.0	200	0.13	11.50	-80

风浪脆弱性条件( $v, h$ )为  $V_1(14 \text{ m/s}, 3 \text{ m})$ 、 $V_2(10 \text{ m/s}, 2 \text{ m})$ 、 $V_3(6 \text{ m/s}, 1.5 \text{ m})$ 、 $V_4(4 \text{ m/s}, 1 \text{ m})$ 。船长分别为 5、10、20、50、80、100、120、150、170、200 m 的 10 种船舶在 4 种风浪脆弱性条件下的避碰脆弱性仿真结果如表 4 所示。

表 4 大风浪条件下不同长度船舶的避碰脆弱性仿真结果

船长/m	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	船长/m	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
5	1.00	0.96	0.70	0.61	100	0.90	0.82	0.56	0.48
10	1.00	0.92	0.66	0.58	120	0.83	0.75	0.48	0.40
20	1.00	0.85	0.58	0.50	150	0.76	0.68	0.41	0.33
50	1.00	0.85	0.36	0.27	170	0.55	0.61	0.35	0.26
80	0.98	0.84	0.50	0.50	200	0.55	0.40	0.13	0.05

根据求解得到的碰撞危险度和相关参数,对目标船进行分类,结果如表 5 所示。在碰撞危险度相同时,先比较  $l_{\text{DCPA}}$ ,若  $l_{\text{DCPA}}$  也相同,再比较  $t_{\text{TCPA}}$  判断船舶碰撞危险度的大小。

表 5 根据碰撞危险度排序的目标船

目标船	船长/m	$C_r$	$V_w$	综合碰撞危险度	$l_{\text{DCPA}}$
F	200	0.73	0.40	0.84	0.13
E	50	0.20	0.85	0.60	-1.43
B	120	0.20	0.75	0.56	-3.58
C	150	0.20	0.68	0.54	-1.73
D	170	0.20	0.61	0.50	-2.51
A	200	0.20	0.40	0.41	0.89

由表 5 可知:船舶 F、E 是最危险的目标。这 2 艘船的详细信息将用于编制索引。根据案例库检索推理得到转向避碰解决方案,转向系统执行航向。通过调整新航向的避碰措施可获得目标船  $l_{DCPA}$  的变化。

在不考虑避碰脆弱性时,船 F、A 为最危险目标,船 E、A 的  $C_r$  相同,但船 A 的  $l_{DCPA}$  更小;在考虑避碰脆弱性危险度后,船 E 长度较短,受风浪影响较大,避碰脆弱性危险度较大,综合碰撞危险度比船 A 大,因此优先考虑船 F、E。

自动避碰系统连续获取周围的目标船舶信息,如图 8 所示,计算新的  $l_{DCPA}$ 、 $t_{TCPA}$  和  $\theta_{TRB}$  用作检索案例库的输入,获得解决方案后连续调整航向,直到获得低碰撞危险度为止。对 6 艘目标船测试避碰方法,本船航向、目标船的综合碰撞危险度、目标船的  $l_{DCPA}$  和  $t_{TCPA}$ 、目标船与本船的距离的避碰仿真结果如图 9~13 所示。

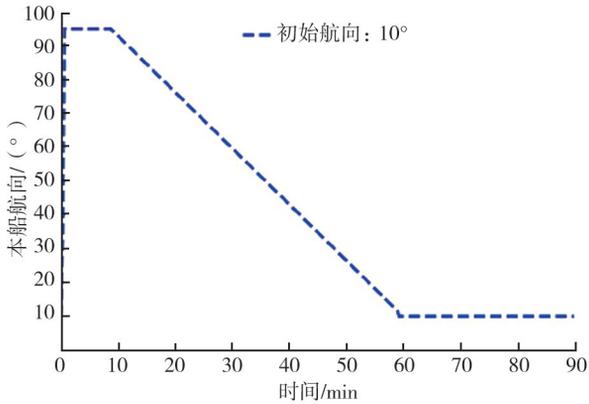


图 9 本船航向

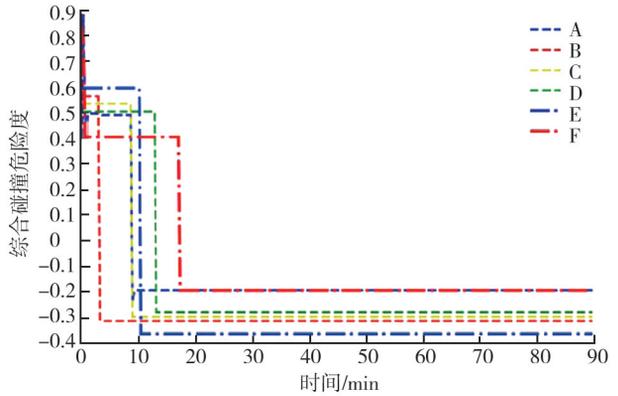


图 10 目标船的综合碰撞危险度

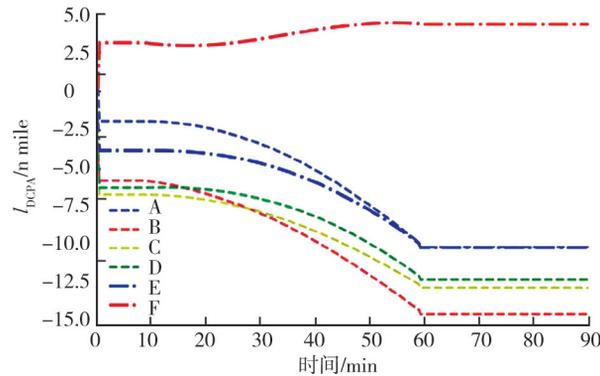


图 11 目标船的  $l_{DCPA}$

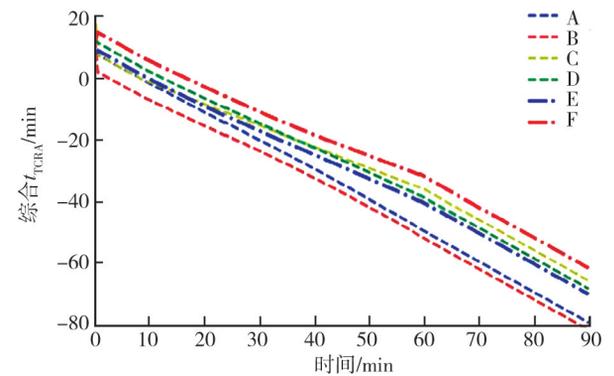


图 12 目标船的  $t_{TCPA}$

由图 9 可知:根据本船当前会遇情况推荐避碰航向,将初始阶段航向  $010^\circ$  调整到  $030^\circ$ , 然后输出航向  $095^\circ$ , 达到避让危险目标船的效果,  $59 \text{ min}$  后本船恢复初始航向。

由图 10 可知:随航向的调整,目标船的综合碰撞危险度逐渐减小,目标船 F 的综合碰撞危险度最先减小到安全范围,所有船舶的碰撞危险度变负。

由图 11 可知:在本船执行避碰航向后,  $l_{DCPA}$  立刻增大,A 船航向在相对运动线右侧,其他船的航向在相对运动线左侧。

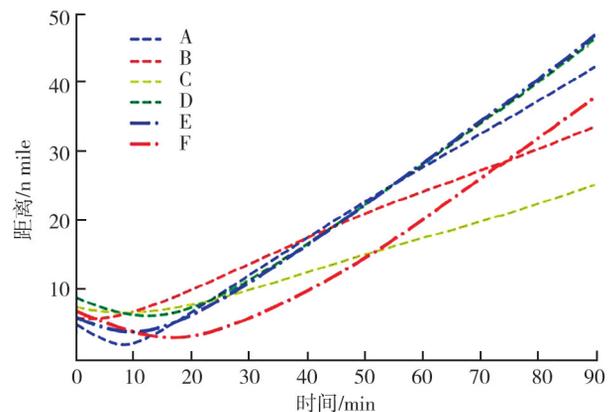


图 13 目标船与本船的距离

由图 12、13 可知:目标船的  $t_{TCPA}$  逐渐减小,先遇到船 B,后遇到船 F。会遇后,  $t_{TCPA}$  变负,绝对值增大。在案例库中检索到类似情况,采用新航向并应用在船舶会遇实例时,新  $t_{DCPA}$  比原  $t_{DCPA}$  明显改善,验证了算法的有效性。在避碰初期,系统输出是本船变化较大的新航向角,避碰效果良好。与仅考虑基本碰撞危险度方法相比,本文采用的研究方法优先考虑了避碰脆弱性大的船 E。经过避让后,危险目标船的碰撞危险度逐渐减少,本船沿安全航线航行,避免与附近的目标船发生碰撞。最后,在确定没有碰撞危险时,本船将恢复原定航向。

## 4 结语

针对多船会遇的船舶碰撞危险度综合评估避碰决策问题,考虑大风浪的影响,提出了船舶避碰脆弱性的概念,提出一种考虑避碰脆弱性的模糊推理避碰方法,采用模糊推理校正测量风浪脆弱性对不同船长的影响。将船舶避碰脆弱性与基本碰撞危险度结合,得到综合碰撞危险度,结合碰撞参数检索模糊案例库,寻找相似案例,制定避碰决策航向。仿真试验结果验证了考虑脆弱性避碰策略的有效性,提高了危险度评估和避碰决策的准确性。

未来可针对复杂环境借助模拟器进行试验,完善案例库提高获得最佳决策输出的效率。将数学船舶模型融入避碰系统,提升避碰系统的准确性,以便适应不同船舶的运动特性。

## 参考文献:

- [1] TU E, ZHANG G H, RACHMAWATI L, et al. Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation;a comprehensive survey from data tomethodology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018,19(5):1559-1582.
- [2] 罗捷,王德岭. 遗传极限学习计算法在船舶碰撞危险度确定中的应用[J]. 舰船科学技术,2021,43(9A):34-36.  
LUO Jie, WANG Deling, Application of genetic limit learning algorithm in determination of ship collision risk [J]. Ship Science and Technology, 2021,43(9A):34-36.
- [3] 李永杰,张瑞,魏慕恒,等. 船舶自主航行关键技术研究现状与展望[J]. 中国舰船研究,2021,16(1):32-44.  
LI Yongjie, ZHANG Rui, WEI Muheng, et al. State-of-the-art research and prospects of key technologies for ship autonomous navigation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021,16(1):32-44.
- [4] ZHOU Dan, ZHENG Zhongyi. Dynamic fuzzy ship domain considering the factors of own ship and other ships[J]. The Journal of Navigation, 2019,72(2):467-482.
- [5] HU Y C, ZHANG Q, PARK G K, et al. Automatic identification of ship navigation risk for collision accidents using uncertain regression model[C//2020 Chinese Automation Congress (CAC) proceedings, November 06-08,2020,Shanghai. [S. l.]:IEEE, 2020 Chinese Automation Congress (CAC): 3111 - 3116 [2022 - 01 - 30]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9326693>.
- [6] ANDREW J, JOHNSON O U. Collision riskmodelling of supply vessels and offshore platforms under uncertainty[J]. The Journal of Navigation, 2017,70(4):870-886.
- [7] DANG X K, LE A H, HO V D, et al. Analyzing the sea weather effects to the ship maneuvering in Vietnam's sea fromBinhThuan province to Ca Mau province based on fuzzy control method[J]. Telecommunication Computing Electronics and Control, 2018,16(2):533-543.
- [8] SZLAPCZYNSKI R, KRATA P. Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions[J]. Ocean Engineering, 2018,158(1):263-274.
- [9] JO G J, HU Y C, PARK G K. Building of an algorithm to generate ship's collision risk based on accident vulnerability under bad weather using fuzzylogic[J]. Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, 2018,28(4):369-374.
- [10] ZHANG Qiang, ZHANG Meijuan, HU Yancai, et al. Error-driven-based adaptive nonlinear feedback control of course-keeping for ships[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020,26(5):201-212.
- [11] 谢鸿伟,张英俊,邢胜伟. 基于模型预测控制的船舶自主避碰方法[J]. 船舶工程, 2021, 43(8): 23-28.  
XIE Hongwei, ZHANG Yingjun, XING Shengwei. A method for ship autonomous collision avoidance based on model

predictive control[J]. *Ship Engineering*, 2021,43(8):23-28.

[12] 贾立校,王建涛. 综合考虑速度和安全的船舶智能避碰研究[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(5A): 22-24.

JIA Lixiao, WANG Jiantao. Research on ship intelligent collision avoidance considering speed and safety[J]. *Ship Science and Technology*, 2021,43(5A):22-24.

[13] 周凤杰. 船舶避碰的粒子群-遗传(PSO-GA)的混合优化算法研究[J]. *船舶力学*, 2021, 25(7): 909-916.

ZHOU Fengjie. Research on hybrid optimization algorithm of particle swarm-genetic (PSO-GA) for ship collision avoidance [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2021,25(7):909-916.

[14] 曾勇,张金奋,张明阳. 基于粒子群-遗传优化算法的船舶避碰决策[J]. *中国航海*, 2020, 43(1): 1-6.

ZENG Yong, ZHANG Jinfen, ZHANG Mingyang. Collision avoidance decision-making based on particle swarm optimization and genetic algorithm[J]. *Navigation of China*, 2020,43(1):1-6.

[15] HU Y C, PARK G K, HONG T. Collision risk assessment based on the vulnerability of marine accidents using fuzzy logic [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020,12(1):541-551.

[16] HU Y C, MENG X F, ZHANG Q, et al. A real-time collision avoidance system for autonomous surface vessel using fuzzy logic[J]. *IEEE Access*, 2020,8(1):835-846.

[17] 麻辣 GIS. 关于蒲福风力等级表[EB/OL]. (2013-11-09) [2022-01-28]. <https://malagis.com/about-beaufort-scale-table-2.html>.

## Multi-vessels collision avoidance decisions considering the vulnerability of collision avoidance under heavy storm wave

*HU Yancai, ZHANG Qiang, WU Hengtao*

*Shipping College, Shandong Jiaotong University, Weihai 264209, China*

**Abstract:** In order to solve the problem that the ship's maneuvering ability is reduced, and the collision avoidance vulnerability is generated and the collision accident probability is increased under the influence of heavy storm waves, the ship's collision avoidance vulnerability is obtained by analyzing the factors of heavy storm waves and the ship's length. The basic collision risk is obtained by fuzzy reasoning and a multi-ship collision avoidance decision method considering the comprehensive collision risk is proposed. The fuzzy case base of collision avoidance decision is constructed by using multi-ship collision, the corresponding collision avoidance decision is provided, and the effectiveness of the collision avoidance decision method is verified by simulation experiments. The results show that the multi-ship collision avoidance decision-making method can accurately calculate the collision avoidance vulnerability of ships of different lengths, provide the comprehensive collision risk of surrounding ships, and make effective multi-ship collision avoidance decision. This method can provide important theoretical basis and data reference for ship navigation safety under heavy storm wave conditions.

**Keywords:** multi-vessels collision avoidance; fuzzy reasoning; case-based reasoning; collision prevention vulnerability; risk of collision

(责任编辑:王惠)