

文章编号:1000-4653(2025)02-0091-07

开阔水域两船智能避碰算法评价方法研究

罗艳雯¹, 赵轩², 陈国权¹, 马吉林², 李丽娜¹

(1. 集美大学 航海学院, 福建 厦门 361021;

2. 中国船级社, 北京 100000)

摘要:目前国内外仍未形成针对船舶智能避碰算法的统一测评标准体系,建立主客观结合的智能避碰算法评价方法对实现船舶智能避碰具有重要意义。提出一种开阔水域下两船避碰算法能力的综合评价方法:首先,基于对《国际海上避碰规则》和专家经验的合理量化,以合规性、安全性、经济性三个核心指标构建算法评价体系;其次,根据收集的问卷调查结果,使用层次分析法及专家估测法确定指标权重,选择合适的隶属度函数建立评价模型并开发了智能避碰算法模糊综合评价系统;最后,利用构建的评价系统对典型场景进行评测。测试结果表明:评价结果公平公正,能较客观地反映算法的优劣,并能根据评分结果提供算法的改进方向。

关键词:船舶智能避碰;模糊综合评价;指标体系;指标函数;优化建议

中图分类号:U675.96

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.012

Research into the evaluation method of an intelligent collision avoidance algorithm for two vessels in open water

LUO Yanwen¹, ZHAO Xuan², CHEN Guoquan¹, MA Jilin², LI Li'na¹

(1. College of Navigation, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. China Classification Society, Beijing 100000, China)

Abstract: Currently, there is still no unified evaluation standard system for intelligent collision avoidance algorithms for vessels, either domestically or internationally. The development of an intelligent collision avoidance algorithm evaluation method that combines subjective and objective criteria is therefore of great significance for the realization of intelligent collision avoidance for vessels. This paper proposes a comprehensive evaluation method for the collision avoidance capability of two vessels in open water. Firstly, an algorithm evaluation system based on three core indexes of safety, compliance and economy is constructed using the reasonable quantification of the "International Regulations for Collision Avoidance at Sea" and experts' experience. Secondly, the weights of the indexes are determined using the hierarchical analysis method and the expert estimation method based on the results of the questionnaires collected, and an appropriate subordination function is established by choosing a suitable evaluation model and developing a fuzzy evaluation model for the intelligent collision avoidance algorithm. Secondly, an evaluation model and a fuzzy comprehensive evaluation system for the intelligent collision avoidance algorithm are developed. Finally, the constructed evaluation system is used to evaluate typical scenarios. The evaluation system is then used to evaluate typical scenarios. The test results demonstrate that the evaluation is fair and impartial, objectively reflecting the algorithm's strengths and weaknesses, and providing direction for improvement based on the scoring results.

收稿日期:2024-07-07

基金项目:国家自然科学基金(51879119,52371369);福建省自然科学基金(2022J01323);福建省科技计划对外合作项目(2023J0019);福建省科技厅(3502ZCQXT2021007)

作者简介:罗艳雯(1997—),女,硕士研究生,研究方向为船舶智能避碰评价。E-mail:2985938403@qq.com

通信作者:陈国权(1981—),男,教授,博士,研究方向为交通运输工程。E-mail:cgg0802@foxmail.com

引用格式:罗艳雯,赵轩,陈国权,等.开阔水域两船智能避碰算法评价方法研究[J].中国航海,2025,48(2):91-97.

LUO Y W, ZHAO X, CHEN G Q, et al. Research into the evaluation method of an intelligent collision avoidance algorithm for two vessels in open water[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 91-97. (in Chinese)

Key words: vessel intelligent collision avoidance; fuzzy comprehensive evaluation; indicator system; indicator function; optimization suggestion

船舶智能避碰研究始于20世纪五六十年代,国内外许多学者致力于船舶自动避碰算法的研究,但现有的算法仍停留在理论分析与仿真验证阶段,绝大多数的研究缺少算法有效性的标准测试过程。从避碰算法实用性、可用性角度出发,测试工作是非常关键的一个环节。船舶智能避碰算法实际应用必须接受各国船级社的全面评测,但现阶段国际海事组织尚未提出统一的标准,这对船舶智能避碰算法的评测带来了一定的挑战性。

李丽娜从定性、定量的角度构建了拟人智能避碰决策方法评价标准,评价包含了《国际海上避碰规则》(以下简称《规则》)和专家经验,虽未提出具体评价指标,但其框架为后续建立评判标准奠定理论基础^[1]。孙峰等人基于《规则》提出了智能避碰策略的测试评价方法,虽然全文对于评价指标考虑较完善,但目前仅停留在定性研究阶段,并未对具体场景进行评价^[2]。

层次分析法复杂度低且具有整合专家知识的能力,可用于多指标动态过程的综合性能评价。王德龙采用专家评价法与模糊隶属度函数从安全性及合规性两个指标对学员的避碰操作行为进行定量评价,其主要评价依据是两船间的最小会遇时间(t_{CPA})以及最小会遇距离(d_{CPA}),未考虑不同船型的阈值变化以及《规则》的具体内涵要求^[3]。WOERNER基于对《规则》的解读,从安全性和合规性建立评价指标函数,并对作者团队研发的开阔水域两船避碰决策系统进行综合评价。相较于王德龙的工作,后者的智能避碰评价算法考虑了不同船舶会遇情况下的阈值变化,对安全性的评价更加准确^[4]。赵玺沿用WOERNER建立的船舶避碰算法评价指标函数开展相应的评价工作,为提高测试结果的合理性与准确性,对部分评价指标函数进行改进,但未考虑不同指标的权重占比^[5]。LOVOLL提出了一种主客观相结合的自主船舶避碰性能评价方法,评价指标分别为是否遵守《规则》与避让过程是否安全^[6]。以上研究者尽管都提出了《规则》遵守的指标评价问题,但是在实际的研究中没有对《规则》要求做量化处理。

智能避碰算法是指基于已准确获取的目标位置、航向和速度等信息,可智能分析当前航行态势和局面并给出避碰决策方案的智能算法。鉴于智能避碰算法评测的特点,本文采用层次分析法和模糊函数相融合的方式对开阔水域下两船的智能船舶避碰

算法进行分析与评价。从安全性、合规性以及经济性三个指标评价进行深入研究,基于船舶碰撞危险及危险度评价体系^[7-11],建立了测试评价体系,利用船舶智能操控仿真测试平台开发智能避碰算法自动评价系统。

1 评价模型的建立

智能避碰算法评价方法的核心是评价模型的构建,即评价指标体系的建立、主要指标、评价函数构建和评价指标权重的确定。

1.1 评价指标体系的建立

评价指标体系的建立首先需要确定评价方法,文献^[12]分析了常用评价方法的优缺点,考虑到《规则》中关于船舶避碰方法具有一定的模糊性,为了能合理地体现船舶避碰评价测试的公平公正性,选择模糊综合评价法,评价船舶智能避碰算法的综合性能。如图1所示,本文从合规性、安全性和经济性三个方面对船舶避碰过程和结果进行评价,建立船舶智能避碰决策算法体系。

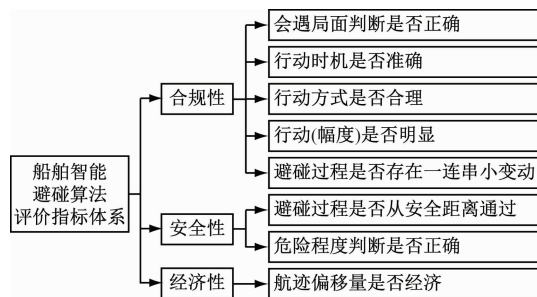


图1 船舶智能避碰算法评价体系

Fig. 1 Evaluation system of intelligent collision avoidance decision-making algorithm for vessels

1.1.1 评价指标体系

有效的船舶智能避碰算法包括会遇局面的正确判断、避碰时机和方式的确定、积极有效的避碰方式以及避碰全过程中两船均不会进入各自的船舶安全领域。根据《规则》第7、8、13、14、15、16、17条,结合海上实际避碰经验以及“绿色航海”的要求,提炼出评价合规性、安全性、经济性的指标体系。从评价指标体系建立原则和流程上对其进行合理性论证^[13]。即评价指标体系需具有完备性,各评价指标应具备独立性。评价指标体系中前7个评价指标涵盖了船舶避碰过程中每个阶段的情况,保证评价的连贯性,且每个避碰阶段内,评价指标的含义不同,最后一个指标以航迹偏移量体现船舶避碰过程的优

劣,总体符合《规则》及“绿色航海”要求,评价指标体系具有完备性且评价指标相互独立。

1) 合规性

《规则》中对两船避碰行动进行了较为明确的规定,根据会遇局面确定避让责任后,行动应正确、及时、明显,切忌采取多次小变动,具体表现为图1中合规性下的五个子指标,将这些指标以隶属度函数的形式量化为对合规性的评价。

2) 安全性

在《规则》中“安全距离”可定义为安全会遇距离(d_{SA}),当两船形成会遇局面后,比较 d_{CPA} 与 d_{SA} 的值确定危险程度,并且应确保采取避碰行动后目标船在安全距离外驶过,具体表现为图1中安全性下的两个指标,将这些指标以隶属度函数的形式量化为对安全性的评价。

3) 经济性

同一场景下,改向角小且回原航向/线时间短即避碰过程中的航迹偏移量小,避让成本越小。在忽略因转向导致的船速变化的情况下,回航时间与航迹偏移量近似成正比关系。因此,采用航迹偏移量作为经济性考察指标基本合理。如图1所示,将航迹偏移量指标以隶属度函数的形式量化为对经济性的评价。

1.1.2 评价模型

基于建立的评价指标体系,应用模糊理论对各个评价子指标确定合适的隶属度函数,在确定单个评价指标的隶属度值 u 后,利用模糊综合评价方法即可得到总成绩 S ,具体模型如式(1)所示。

$$S = \omega_c \times S_c + \omega_s \times S_s + \omega_e \times S_e \quad (1)$$

$$S_c = \sum_{i=1}^5 (u_{ci} \times \omega_{ci}) \quad (2)$$

$$S_s = \sum_{j=1}^2 (u_{sj} \times \omega_{sj}) \quad (3)$$

$$S_e = \sum_{m=1}^1 (u_{em} \times \omega_{em}) \quad (4)$$

式(1)~(4)中: u_{ci} 、 u_{sj} 和 u_{em} 分别表示合规性、安全性和经济性各指标隶属度值($i=1,2,\dots,5$; $j=1,2$; $m=1$),分别一一对应图1中各个指标,如 u_{c1} 表示图1中合规性的会遇局面判断是否正确隶属度值。各指标对应权重 ω_c 、 ω_s 、 ω_e 、 ω_{ci} 、 ω_{sj} 、 ω_{em} 来自专家问卷结果。

1.2 主要指标评价函数的构建

基于建立的评价体系,通过解读《规则》、专家知识及船员经验,基于模糊数学理论建立模糊隶属度函数,确定指标量化标准。考虑三个一级指标中

对应的二级指标的标准确定过程具有相似性,限于篇幅,仅从三个一级指标层中各自抽取一个具有代表性的子指标展开论述。

1.2.1 行动时机

《规则》中所提到安全的距离即为安全会遇距离,采用文献[9]理论研究提出不同碰撞危险等级及衡量避让方案安全度的三个重要定义:碰撞临界距离($d_{A_{col}}$),即两船保向保速不采取避让措施刚好不致碰撞的会遇距离;安全会遇临界距离($d_{SA_{c}}$),即两船保向保速不采取避让措施且能通过时的最小容忍距离;安全会遇理想距离($d_{SA_{pref}}$),即避碰期望达到的安全会遇距离,也称 d_{SA} 的模糊外边界。在此基础上,根据驾驶人员在不同危险等级的操船行为以及专家学者对紧迫局面和紧迫危险的理解,定义了以下4个不同距离阈值^[8],表中 A_{Ci} 表示习惯改向角^[14], A_{Cm} 表示不大于 90° 的最大避让改向角。船舶碰撞危险度的具体约定如表1所示。

表1 船舶碰撞危险度评判阈值名称及其含义
Tab.1 Names of vessel collision risk assessment thresholds and their meanings

变量	中文名称	含义
d_{egd}	一般危险 临界距离	本船改向 A_{Ci} 恰好能在 $d_{SA_{pref}}$ 上通过的两船距离
d_{eqs-c}	紧迫局面最大 临界距离	本船改向 A_{Cm} 恰好能在 $d_{SA_{pref}}$ 上通过的两船距离
d_{eqs}	紧迫局面最 小临界距离	本船改向 A_{Cm} 能在 $d_{SA_{c}}$ 上通过的两船距离
d_{id}	临界紧迫 危险距离	本船改向 A_{Cm} 恰好能在 $d_{A_{col}}$ 通过的两船距离

基于《规则》中对不同会遇局面下“让路船”和“直航船”的定义及行动标准,不同危险程度下船舶的避让行动时机根据《规则》要求会发生避让责任与义务的自动转化。结合指标特点,选择 k 次抛物线型函数^[15]作为被测船行动时机的隶属度函数。

1) 碰撞危险局面

当两船存在碰撞危险时,让路船应“积极地”、“及早地”、“大幅度地”采取行动,而直航船正常情况应保向保速,仅当发觉让路船“显然”没有按照规则采取行动时,直航船即可单独采取行动。由此,结合表2以及所选隶属度函数类型,确定碰撞危险局面下让路船与直航船行动时机隶属度函数如式(5)与式(6)。考虑到船舶操纵性、船员反应时间等客观因素影响存在一定的偏差,需加入上述因素允许的误差值 Δ 。

表2 各指标权重

Tab.2 Weighting of indicators

一级指标	权重	二级指标	权重
合规性	0.36	局面判断	0.36×0.40
		行动方式	0.36×0.24
		行动时机	0.36×0.19
		行动幅度	0.36×0.10
		避碰过程	0.36×0.07
安全性	0.40	危险度判断	0.40×0.47
		安全距离	0.40×0.53
经济性	0.24	航迹偏移量	0.24×1.00

让路船

$$u_{c2} = \begin{cases} 1, & R \geq d_{cqs_c}(A_{Cm}, d_{SA_pref}) \\ \frac{R - d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm})}{d_{cqs_c}(A_{Cm}, d_{SA_pref}) - d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm})}, & d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) \leq R < d_{cqs_c}(A_{Cm}, d_{SA_pref}) \\ 0, & R < d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) \end{cases} \quad (5)$$

直航船

$$u_{c2} = \begin{cases} 1, & d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) - \Delta \leq R < d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) + \Delta \\ \frac{R - d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm})}{d_{cqs}(d_{A_col}, A_{Cm}) - d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm})}, & d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm}) \leq R < d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) - \Delta \\ 0, & d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm}) > R \cup R > d_{cqs}(d_{A_col}, A_{Cm}) + \Delta \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta = f(K_p, T_p, L, B, T) \quad (7)$$

式(7)中: K_p 、 T_p 表示船舶操纵性参数, L 表示船长, B 表示船宽, T 表示舵机响应时间。

2) 紧迫局面

在紧迫局面时,两船都有采取行动的义务,应立即采取最有效的避碰行动以化解危险,结合表2及所选隶属度函数类型,确定紧迫局面下被测船行动时机隶属度函数如式(8)。

$$u_{c2} = \begin{cases} 1, & R \geq d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) - \Delta \\ \frac{R - d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm})}{d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) - d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm})}, & d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm}) \leq R < d_{cqs}(d_{SA_c}, A_{Cm}) - \Delta \\ 0, & R < d_{id}(d_{A_col}, A_{Cm}) \end{cases} \quad (8)$$

式(5)、(6)、(8)中 R 为施舵时两船距离。

1.2.2 危险程度判断

《规则》第7条规定:“每一船都应使用适合当

时环境和情况的一切有效手段判定是否存在碰撞危险,如有任何怀疑,则应认为存在这种危险”。

基于船舶碰撞危险度评判阈值模型建立危险程度评判标准,并解读《规则》第7条,即对将低等级危险判断为高等级危险的容忍度更高,但反之则影响较大,由此得出危险判断是否正确的隶属度函数如式(9)。

$$u_{s1} = \begin{cases} 1, & D_L = j_{d_D_L} \\ 0.8, & (D_L < j_{d_D_L}) \cap (D_L \neq 0) \cap (j_{d_D_L} \neq 0) \\ 0.5, & (D_L > j_{d_D_L}) \cap (j_{d_D_L} \neq 0) \\ 0, & (D_L \neq 0) \cap (j_{d_D_L} = 0) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: D_L 为实际危险等级, $j_{d_D_L}$ 表示船舶避碰算法判断危险等级。

1.2.3 航迹偏移量

由航迹偏移量定义及经济性测算标准可知,同一场景下,若所采取决策导致航迹偏移量越大,即离原设计航线越远,所需额外付出的能耗将会更多,分析指标特点,选择结合半矩形分布与正态分布隶属函数^[15],得出经济性中航迹偏移量的隶属度函数如式(10)。

$$u_{c1} = \begin{cases} 1, & L_{ac} \leq L_{op} \\ e^{-(L_{ac}-L_{op})^2}, & L_{ac} > L_{op} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: L_{ac} 表示船舶实际航迹偏移量, L_{op} 表示最佳航迹偏移量,对于让路船 L_{op} ,为 A_{Ci} 下由文献[9]中阈值确定恢复原航向时机下的航迹偏移量,一般场景下直航船的 L_{op} 是指改向 A_{Cm} ,并且能在 d_{SA_c} 阈值圈通过后恢复原航向时的航迹偏移量。

1.3 评价指标权重的确定

1.3.1 层次分析法确定合规性各因素权重

合规性权重的确定采用层次分析法^[16]。邀请船舶避碰相关专家进行问卷填写。调查问卷具体对象包括:1)高校从事避碰规则教学与研究的教授;2)海事局相关从业者;3)一线船长;4)具有一定资历的避碰算法设计者;5)海事保险专业人员;6)检验部门;7)海事律师。回收数据39份,利用层次分析法计算出每份调查问卷的一致性比率,剔除问卷填写时间低于一分钟以及合规性中判断矩阵不满足一致性比率小于0.1的数据,剩余25份数据。对25份数据进行平均化处理,选择特征值法计算权重 ω_c 、 ω_s 、 ω_e 、 ω_{ci} 、 ω_{sj} 、 ω_{em} 。具体权重数据如表2所示。

1.3.2 专家估测法确定其余因素权重

专家估测法取决于评价对象领域中的专家知识

与经验,各个评价指标的权重由专家做出主观判断^[16],采用第1.3.1节层次分析法筛选后的25份数据确定除合规性各指标权重外的其余因素权重,考虑到问卷对象并非权重确定方面的专家,直接给出权重存在困难,故以五分制让专家打分,再进行归一化处理,计算得到权重如表2所示。

在船舶避碰过程中,安全避让且遵守《规则》是强条件,实际问卷结果显示安全性、合规性权重均超过1/3。在合规性中会遇局面判断是否正确直接决定后续的避让行为,问卷处理结果也验证了该指标的重要性。问卷处理结果整体符合专家认知,具有合理性。

1.4 评价模型优化

在原有专家权重处理结果的基础上,对各个指标的权重进行分析,虽然从调查问卷所获得的权重可以反映出该指标的相对权重,但通过列举正反实例进行专家评分与模型评分比对,再针对个别场景存在的明显差异,分析各指标特点,结合相关技术咨询会专家的建议,对“行动方式”和“安全距离”两个指标增设“一票否决权”选项。

1.4.1 “行动方式”增设“一票否决权”

某些指标零分对算法的合理评价有很大的影响,其一为避让行动方式中,若避让行动方向错误,如对遇局面中采取左让措施,在目标船不采取行动时,可能会成功避让,但若目标船采取合规行动,将会形成新的危险,在评价时应加大对对此行为的惩罚,故赋予此指标“一票否决权能力”,即行动方式隶属度值为零时,合规性得零分, S_c 计算公式调整为式(11)。

$$S_c = \begin{cases} 0, & u_{c3} = 0 \\ \sum_{i=1}^5 (u_{ci} \times \omega_{ci}), & u_{c3} \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

1.4.2 “安全距离”增设“一票否决权”

安全距离中当 $d_{CPA} < d_{A_{col}}$ 时,发生碰撞,避碰算法完全失效,此时“一票否决权”不仅针对安全性分数为零,而且总分为零, S 计算公式调整为式(12)。

$$S = \begin{cases} 0, & u_{s2} = 0 \\ \omega_c \times S_c + \omega_s \times S_s + \omega_e \times S_e, & u_{s2} \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

2 自动评价系统设计与实现

2.1 系统设计

本文基于前文中所提出的评价模型开发自动评分系统。首先,将场景运行后各指标评价函数计算

或取值所需的数据,经数据处理系统处理后传入搭载评价模型及参考答案库的评分系统中,其中参考答案库是通过解析《规则》、海员通常做法以及现有船舶碰撞危险度动态评估和避碰决策方案量化模型及其算法等研究基础^[14],逐个确定第1.2节中各评价指标所需参考数据建立的;其次,经评分系统评分后,将数据传入结果输出界面;最后输出各指标分数及结果。自动评价系统的模块如图2所示。

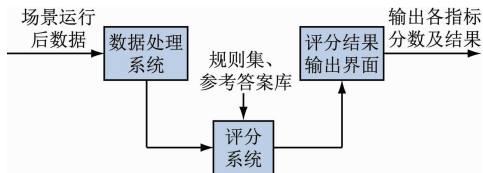


图2 自动评价系统

Fig.2 Evaluation systems

2.2 实例仿真

为了验证评价方法的有效性,从文献[14]的两船16种交会特征入手,考虑不同要素构建两船场景库,共计58个,其中对遇场景9个,右交叉相遇场景18个,右正横交叉相遇场景6个,被追越场景8个,追越他船场景3个,左交叉相遇场景12个,特殊场景2个。随机选取部分场景在搭载评价系统的船舶智能操控仿真测试平台上对团队研发的船舶拟人智能避碰决策算法进行场景测试及评价。危险等级分为三级,其中每种危险等级应用船舶拟人智能避碰决策(PIDVCA)的船舶危险度评价阈值模型量化进行计算,详见参考文献[14]。

场景一:右交叉相遇——目标船速度(V_t) > 本船速度(V_o)、目标船航向(C_t)与本船航向(C_o)差介于 $270^\circ \sim 360^\circ$ 、初始危险等级为一级。

本船船型为船长198 m、宽为32.25 m的散货船,目标船为船长228 m、宽为26.5 m的散货船,本船与右舷来船目标船形成右交叉相遇局面。初始场景如图3所示,场景测试轨迹和评分结果如图4所

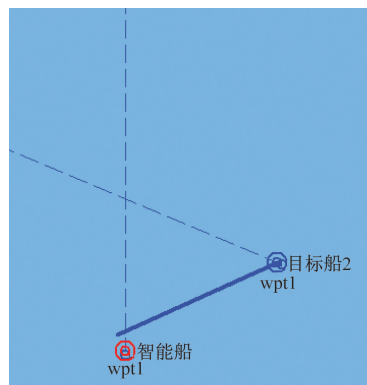


图3 右交叉初始时刻情况

Fig.3 Initial moments of right crossing



图4 右交叉相遇局面场景测试轨迹和评分结果

Fig.4 Results of right crossing encounter situation scoring

示,wpt1表示航路点。行动时机、安全距离和航迹偏移量的单位为n mile。

场景一中本船为让路船,初始时刻本船碰撞危险等级为一级,处于碰撞危险局面,此时本船应执行最优避碰措施以化解碰撞风险。本船立即采取右转30°决策,符合《规则》中相关要求,具体指标也均满足标准值,因此,未出现扣分。

场景二:本船左后被追越—— $V_1 > V_0$ 、 $C_1 - C_0$ 。介于 $0 \sim 90^\circ$,相对方位 $B_1 = 203^\circ < 210^\circ$,初始危险等级为二级。

本船船型为船长198 m、宽为32.25 m的散货船,目标船为船长228 m、宽为26.5 m的散货船,追越本船的目标船与本船构成碰撞危险。初始场景如

图5所示。场景测试轨迹和评分结果如图6所示。

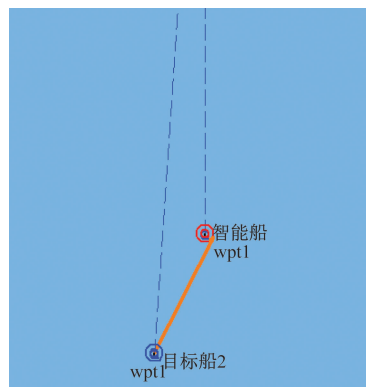


图5 被追越初始时刻情况

Fig.5 Initial moments of being overtaken



图6 被追越局面场景测试轨迹和评分结果

Fig.6 Results of the completion scoring of being overtaken position test

场景二中本船为直航船,此场景初始时刻碰撞危险等级实际应为二级,但由于本场景存在两种策略,即小角度右让和大角度左让,因算法仿真软件存在代码评判阈值条件与理论不符,导致小角度右让26°时机计算错误而引起危险等级判断错误及决策不合理。从图6中参考答案可以看到,行动时机应为两船相距1.76 n mile时,但实际行动时机为两船相距1.91 n mile时,早于参考答案值,危险等级的错误识别,导致本船避让行动时机提前。若时机正确,改向幅度通过几何关系计算应为26°,采取90°大角度改向虽然成功解除危险,但大角度改向使航

迹偏移至2.4 n mile,与参考答案1.14 n mile有较大差距。因此,本场景算法测试结果其行动时机、危险度判断及航迹偏移量均被扣分,整体评分偏低。

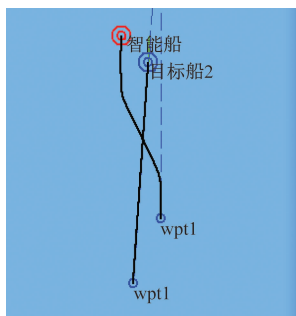
2.3 算法优化实例

针对场景二测试结果分数偏低情况,算法设计者分析评判阈值条件与理论不符导致的决策不稳定及不合理问题,进行阈值的修改与评判逻辑的调整,算法优化后重新对改场景再次进行评测。初始时刻如图7,危险等级正确识别为二级危险,行动时机在合理范围。危险等级正确识别为二级危险,行动时机在合理范围,场景决策由原有向左改向90°修改



图7 算法修改后被追越初始时刻

Fig. 7 Algorithm modified to be traced over the initial moment



一级指标	权重	分数	二级指标	权重	实际值	参考答案	分数
合规性	0.36	100	会遇局面	0.4	C	C	100
			行动时机	0.19	1.7723042	1.7610028	100
			行动方式	0.24	左转	左转	100
安全性	0.4	100	行动幅度	0.1	26	26	100
经济性	0.24	100	小变动	0.07	1次	<2次	100
S	100	100	危险等级	0.469	2	2	100
			安全距离	0.504	1.1348785	1.0188813	100
			航迹偏移量	1	1.0822844	1.1446066	100

图8 算法修改后被追越局面场景测试轨迹和评分结果

Fig. 8 Algorithm modified test completion scoring results for the pursued overrun scenario

3 结束语

本文基于《规则》、专家经验和航海惯例,从安全性、合规性、经济性三个方面考虑,建立了一套船舶智能避碰算法模糊综合自动评价系统。若被测算法可提供评价模型所需数据,在计算机具备基础执行能力的基础上,系统可用于现有船舶智能避碰算法的客观评价,利用该评测系统,算法设计者可根据评价结果发现算法存在的不足,有针对性地提升算法的避碰能力。

本文主要对被测算法避碰能力进行测试及评价,对于计算机系统软件方面的测试暂时未予以考虑。目前开发的系统仅适用于开阔水域两船智能避碰算法能力的自动评价,但该研究领域缺少权威机构发布的典型测试场景,本文选取部分测试用例,在测试场景上尚不具备完备性,如尚未涉及紧迫危险局面以及多船避碰等特殊情况的评价。在后续工作中,团队将增加计算机系统软件性能指标测试,同时开展更多复杂场景下避碰算法能力的自动评价研究,如避让重点船的识别、多船避碰时机及避碰决策等指标体系的全面梳理,最终建立通用的开阔水域船舶自动避碰评价体系与系统。

参 考 文 献

[1] 李丽娜,陈国权,邵哲平,等. 船舶拟人智能避碰决策方法及其评价标准的构建[J]. 大连海事大学学报, 2011,37(4):1-5.
 LI L N, CHEN G Q, SHAO Z P, et al. Construction of the PIDVCA system and its evaluation standard [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011,37(4):1-5. (in Chinese)

[2] 孙峰,蔡玉良,马吉林. 船舶智能避碰策略测试方法与指标研究[J]. 交通信息与安全, 2019,37(5):84-93.
 SUN F, CAI Y L, MA J L. A study of test methods and indicators for marine intelligent anti-collision strategy [J]. Transportation Information and Safety, 2019,37(5):84-93. (in Chinese)

[3] 王德龙,任鸿翔,肖方兵. 船舶操纵模拟器单船避碰自动评估系统[J]. 中国航海, 2015,38(1):44-48.
 WANG D L, REN H X, XIAO F B. Automatic assessment system for single-target collision avoidance on ship handling simulator[J]. NAVIGATION OF CHINA, 2015,38(1):44-48. (in Chinese)

- [12] ANSYS Inc.. Fluent theory guide (2023R2 edition) [M]. Canonsburg: ANSYS Inc., 2023.
- [13] 盛振邦. 船舶原理(上册 第2版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
SHENG Z B. Principles of Ships (Volume 1, 2nd Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017. (in Chinese)
- [14] 梁霄, 李巍. 船舶操纵性与耐波性 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2019.
LIANG X, LI W. Ship maneuverability and seakeeping performance [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 刘红, 郑剑. 船舶原理(第2版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020.
LIU H, ZHENG J. Principles of naval architecture (2nd Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020. (in Chinese)
- [16] 盛振邦. 船舶原理(下册 第2版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.
SHENG Z B. Principles of ships (Volume 2, 2nd Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019. (in Chinese)
- (上接第 97 页)
- [4] WOERNER K, BENJAMIN M R, NOVITZKY M, et al. Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance: toward establishing COLREGS compliance metrics[J]. Autonomous Robots, 2019, 43: 967-991.
- [5] 赵玺. 开阔水域船舶智能避碰算法的合规性测试方法[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
ZHAO X. A compliance testing method for intelligent collision avoidance algorithms for ships in open water [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)
- [6] LØVOLL E. Evaluating collision avoidance algorithms in urban and semi-restricted waters using fuzzy logic [D]. Taipei: National Taiwan Normal University, 2022.
- [7] 翁建军, 刘明俊. 船舶值班与避碰 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016.
WENG J J, LIU M J. Ship watching and collision avoidance [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [8] 李丽娜. 船舶自动避碰研究中安全会遇距离等要素的确定[J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(3): 23-26.
LI L N. Determination of factors such as safe encounter distance in automatic vessel traffic avoidance studies [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2002, 28(3): 23-26. (in Chinese)
- [9] 李丽娜, 陈国权, 李国定, 等. 一种关联避让行为的船舶碰撞危险及危险度评价方法: CN109887339A [P]. 2020-9-15.
LI L N, CHEN G Q, LI G D, et al. A method for evaluating ship collision risk and hazard degree by associating avoidance behaviors; CN109887339A [P]. 2020-9-15. (in Chinese)
- [10] 李丽娜, 陈国权, 杨凌波, 等. 船舶拟人智能避碰决策算法测试及应用[J]. 中国航海, 2022, 45(1): 1-7.
LI L N, CHEN G Q, LI G D, et al. Test and application of personifying intelligent decision-making algorithm for vessel collision avoidance [J]. Navigation of China, 2022, 45(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] 李丽娜, 王兴华, 陈国权. 一种基于PIDVCA预测复航时间的方法: ZL202010305212.6 [P]. 2022-7-26.
LI L N, WANG X H, CHEN G Q. A method for predicting resumption time based on PIDVCA; ZL202010305212.6 [P]. 2022-7-26. (in Chinese)
- [12] 马春野, 于双志, 王少洁, 等. 智能网联汽车在智慧城市应用中的评价体系研究与探索[J]. 现代交通与冶金材料, 2023, 3(3): 2-9.
MA C Y, YU S Z, WANG S J, et al. Research and exploration of evaluation system of intelligent connected vehicles in smart city applications. [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2023, 3(3): 2-9. (in Chinese)
- [13] 彭张林, 张爱萍, 王素凤, 等. 综合评价指标体系的设计原则与构建流程[J]. 科研管理, 2017, 38(增刊1): 209-215.
PENG Z L, ZHANG A P, WANG S F, et al. Designing principles and constructing processes of the comprehensive evaluation indicator system [J]. Science Research Management, 2017, 38 (Suppl. 1): 209-215. (in Chinese)
- [14] 李丽娜, 陈国权, 马吉林, 等. 船舶拟人智能避碰决策 [M]. 北京: 海洋出版社, 2023.
LI L N, CHEN G Q, MA J L, et al. Ship anthropomorphic intelligent collision avoidance decision-making [M]. Beijing: Ocean Press, 2023. (in Chinese)
- [15] 贺仲雄. 模糊数学及应用 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1985.
HE Z X, Fuzzy mathematics and applications [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1985. (in Chinese)
- [16] 刘秋艳, 吴新年. 多要素评价中指标权重的确定方法评述[J]. 知识管理论坛, 2017, 2(6): 500-510.
LIU Y Q, WU X N. Review of methods for determining indicator weights in multi-factor evaluation [J]. Knowledge Management Forum, 2017, 2(6): 500-510. (in Chinese)