

# 基于驾驶员状态的动态船舶领域研究

刘东琴, 郑中义, 谯森

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**为克服基于分析型的模糊四元船舶领域(Fuzzy Quaternion Ship Domain,  $F_{QSD}$ )模型边界难以确定、考虑因素不充分和难以用于实际等问题,增加驾驶员人为因素对船舶领域影响的考虑,建立基于驾驶员状态的动态四元船舶领域模型,对基于分析型的模糊四元船舶领域进行改进。计算驾驶员状态的可靠度,获得船舶领域的形状函数 $K$ 值并确定领域的边界,经过计算机仿真验证模型的有效性后,得到不同驾驶员状态下的船舶领域形状。结果表明:不同驾驶员状态下的船舶领域形状和领域面积是动态变化的,驾驶员状态为优秀时,船舶领域形状呈不规则菱形,领域面积最小;驾驶员状态为差时,船舶领域形状近似呈矩形,领域面积最大。相比传统的基于分析型的船舶领域,所建立的领域模型边界是动态变化的,更符合实际航行情况且灵活性更强。

**关键词:**模糊四元船舶领域;驾驶员状态的可靠度;驾驶员状态;动态四元船舶领域

中图分类号:U675.9

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.006

## Research on the dynamic ship domain based on the ship navigator's state

LIU Dongqin, ZHENG Zhongyi, QIAO Sen

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** To address the issues of the analytical-based  $F_{QSD}$  (Fuzzy Quaternion Ship Domain) model, such as the difficulty in defining its boundary, insufficient consideration of influencing factors, and challenges in practical application, this paper incorporates the human factor of ship navigator and establishes a  $D_{QSD}$  (Dynamic Quaternion Ship Domain) based on the ship navigator's state to enhance the analytical-based fuzzy quaternion ship domain. The shape parameter  $K$  value of the fuzzy quaternion ship domain is calculated according to the ship navigator's state, and the dynamic ship domain model under different ship navigator states is obtained through computer simulation. The results show that the shape and area of the ship domain dynamically change under different driving states. When the ship navigator's state is excellent, the ship domain shape is an irregular rhombus, and the domain area is the smallest. When the ship navigator's state is poor, the ship domain shape is approximately rectangular, and the domain area is the largest. Compared with the traditional analysis-based ship domain, the proposed model determines the fuzzy boundary of the ship domain according to the ship navigator's state, making the dynamic ship domain more flexible and adaptable.

**Key words:** fuzzy quaternion ship domain; the reliability of ship navigator's state; ship navigator's state; dynamic quaternion ship domain

船舶领域是海上交通安全研究的重要部分,在《海上交通工程》中,将船舶领域定义为绝大多数后继船舶驾驶员避免进入前一艘在航船舶周围的领域<sup>[1]</sup>。为确定船舶领域的边界,文献[2]进行海上交通观测,归纳出船舶领域的几何形状大致为椭圆

形,通过进一步的分析得到通常情况下船舶领域的长轴为8.0倍船长,短轴为3.2倍船长。GOODWIN<sup>[3]</sup>对北海南部水域的海上交通观测数据进行统计分析,考虑《国际海上避碰规则》对船舶避让行为的影响,建立开阔水域的船舶领域模型为3个面积

收稿日期:2023-10-06

作者简介:刘东琴(1997—),女,硕士,研究方向为海上交通安全理论及应用技术。E-mail:2020249594@qq.com

通信作者:郑中义(1964—),男,教授,博士,研究方向为海上交通安全理论及应用技术。E-mail:dlzzy@dlnu.edu.cn

引用格式:刘东琴,郑中义,谯森.基于驾驶员状态的动态船舶领域研究[J].中国航海,2025,48(1):43-49.

LIU D Q, ZHENG Z Y, QIAO S. Research on the dynamic ship domain based on the ship navigator's state[J]. Navigation of China, 2025, 48(1):43-49. (in Chinese)

和大小不同的扇形合成。DAVIS等<sup>[4]</sup>将GOODWIN模型的3个扇形面积相加并用1个面积相等的圆代替原来的领域模型,将圆心置于左下方,使3个扇形能保留平滑边界前的大小比例。早期的船舶领域研究的主要方法是交通观测和数理统计,SZLAPC-ZYNSKI等<sup>[5]</sup>将这种领域归纳为经验型的船舶领域。随着信息技术的发展,船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)可获得比雷达更为丰富的数据源,这种经验方法仍在继续使用。ZHANG等<sup>[6]</sup>对船舶周围水域进行网格划分,然后利用AIS数据计算各时刻船舶的网格密度,确定不同类型船舶的船舶领域形状和大小。文献[7]通过对AIS数据的统计分析,确定了船舶领域的形状是一个椭圆,其半轴半径分别为0.90 n mile和0.45 n mile。

在经验型船舶领域研究的基础上,分析型船舶领域的研究得到了发展,主要的代表是模糊船舶领域。如:ZHAO等<sup>[8]</sup>对FUJII、GOODWIN和GOLDWELL的船舶领域模型进行批判性分析,并引入模糊领域,与清晰的领域不同,模糊领域可在不同的安全级别之间变化;WANG<sup>[9]</sup>构建完整的基于分析型的船舶领域模型,提出模糊四元船舶领域(Fuzzy Quaternion Ship Domain,  $F_{QSD}$ ),模型大小由4个半径(前、后、右舷和左舷)确定,形状由另一个索引参数建模。 $F_{QSD}$ 的优点在于模型考虑船舶速度、一定的船舶操纵和船长。该方法不需要大量数据,不受水域类型和特定水域的影响。但模糊四元船舶领域模型缺乏对驾驶员人为因素的考虑,其得到的是一个“期望的船舶领域”。

船舶发生会遇时,驾驶员会采取避碰操纵来保证本船的领域范围不被他船侵犯,故驾驶员对船舶领域形状的影响不可忽视,驾驶员的操纵决策受到驾驶员状态的影响,因此,船舶领域的形状是动态变化的,但在基于分析型船舶领域的研究过程中,很少有学者考虑到驾驶员的状态。本文将对模糊四元船舶领域进行改进,考虑驾驶员的状态对船舶领域形状的影响,获得不同驾驶状态下的船舶领域的形状,最终确定 $F_{QSD}$ 的动态边界,动态四元船舶领域(Dynamic Quaternion Ship Domain,  $D_{QSD}$ )能更有效地应用于船舶避碰决策和海上交通安全的研究。

## 1 基于分析型的模糊四元船舶领域

### 1.1 模糊四元船舶领域模型

$F_{QSD}$ 主要的思想是船舶领域的大小由四元数决定,即船舶前后半径、右舷和左舷半径等4个半径,其半径大小考虑船舶操纵、船舶的航速和船长。模

糊四元船舶领域 $F_{QSD}$ 可描述为:

$$F_{QSD,K} = \left\{ (x,y) \mid \begin{cases} f_K(x,y;Q) \leq 1, Q = \\ \{R_{fore}, R_{aft}, R_{star}, R_{port}\}, K \geq 1 \end{cases} \right\} \quad (1)$$

$$f_K(x,y,Q) = \left( \frac{2x}{(1 + \operatorname{sgn} x)R_{fore} - (1 - \operatorname{sgn} x)R_{aft}} \right)^K + \left( \frac{2y}{(1 + \operatorname{sgn} y)R_{star} - (1 - \operatorname{sgn} y)R_{port}} \right)^K \quad (2)$$

$$\operatorname{sgn}^* = \dots \begin{cases} 1, & * \geq 0 \\ -1, & * \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: $R_{fore}$ 为船舶领域前轴的半径; $R_{aft}$ 为船舶领域后轴的半径; $R_{star}$ 为船舶领域右舷半径; $R_{port}$ 为船舶领域左舷半径; $*$ 为 $x$ 变量或者 $y$ 变量; $K$ 为船舶领域形状系数。

$R_{fore}$ 、 $R_{aft}$ 、 $R_{star}$ 和 $R_{port}$ 可由船长 $L$ ,船舶回旋圈中进距 $AD$ 的增益系数 $k_{AD}$ 和旋回初径 $DT$ 的增益系数 $k_{DT}$ 确定,解析式为

$$\begin{cases} R_{fore} = (1 + 1.34\sqrt{k_{AD}^2 + (k_{DT}/2)^2})L \\ R_{aft} = (1 + 0.67\sqrt{k_{AD}^2 + (k_{DT}/2)^2})L \\ R_{star} = (0.2 + k_{DT})L \\ R_{port} = (0.2 + 0.75k_{DT})L \end{cases} \quad (4)$$

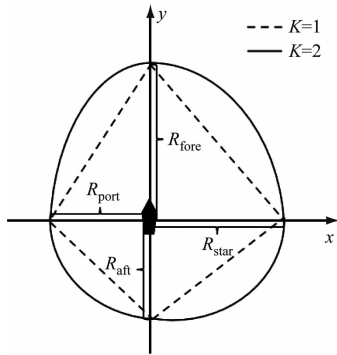
增益系数 $k_{AD}$ 和 $k_{DT}$ 可根据船舶的长度和航速,使用经验公式进行估算,解析式为

$$\begin{cases} k_{AD} = \frac{AD}{L} = 10^{0.359 \lg V_{own} + 0.095} \\ k_{DT} = \frac{DT}{L} = 10^{0.544 \lg V_{own} - 0.079} \end{cases} \quad (5)$$

$K=1$ 和 $K=2$ 下的船舶领域模型见图1。图1中:在 $K$ 的取值不同时,所得到的领域大小和形状都有所不同,当 $K=2$ 时,得到的模型是传统的四元船舶领域,当 $K=1$ 时,得到 $F_{QSD}$ 的最小边界,即此时的船舶领域模型是最小的船舶领域模型。对于模糊船舶领域而言,其领域边界是模糊的,并且领域的形状会受到驾驶员状态的影响。本文将通过对船舶驾驶员驾驶状态因素的综合考虑求取 $K$ 的动态值,确定模糊船舶领域的动态边界,最终得到动态船舶领域。

### 1.2 模糊四元船舶领域的局限性

$F_{QSD}$ 是一种基于分析型的船舶领域模型<sup>[10]</sup>。与基于交通观测数理统计或者AIS数据所求得的船舶领域模型不同,模糊四元船舶领域模型不是通过在实际航行过程涉及各种影响因素作用的结果,其模型大小需考虑船舶的长度、航行速度和一定的船舶操纵,缺乏对船舶领域人为影响因素的综合考虑,

图1  $K=1$  和  $K=2$  下的船舶领域模型Fig. 1 Ship domain model under  $K=1$  and  $K=2$ 

同时,模型的建立涉及多种参数,就目前而言这种领域是比较复杂的船舶领域,其得到的是一个“期望的船舶领域”,加上边界模糊不清,难以用于实际航行。

### 1.3 动态船舶领域

由于船舶领域的大小和形状受到多种因素的影响,为对模糊四元船舶领域进行改进,使其能运用到实际避碰危险研究,在模糊四元船舶领域的基础上建立  $D_{QSD}$  模型,将  $K$  看作是驾驶员状态相关的函数  $K(\Gamma)$ ,其中  $\Gamma$  是由驾驶员状态确定的变量。船舶领域的形状变化函数  $K(\Gamma)$  可确定动态船舶领域边界。船舶领域是驾驶员避让操纵的结果,所以  $K(\Gamma)$  主要受驾驶员的状态(知识技能、心理素质和生理素质)的影响。故本文所建立的动态船舶领域的模型如下:

$$D_{QSD,K(\Gamma)} = \{(x,y) | f_{K(\Gamma)}(x,y;Q) \leq 1, Q = \{R_{fore}, R_{aft}, R_{star}, R_{port}\}, K(\Gamma) \geq 1\} \quad (6)$$

$$f_{K(\Gamma)}(x,y,Q) = \left( \frac{2x}{(1 + \text{sgn } x)R_{fore} - (1 - \text{sgn } x)R_{aft}} \right)^{K(\Gamma)} + \left( \frac{2y}{(1 + \text{sgn } y)R_{star} - (1 - \text{sgn } y)R_{port}} \right)^{K(\Gamma)} \quad (7)$$

本文将通过对船舶驾驶员状态影响因素分析,确定动态船舶领域的形状函数  $K(\Gamma)$ ,从而得到不同条件下的动态船舶领域的边界。

## 2 基于驾驶员状态确定领域的边界形状

### 2.1 驾驶员状态的可靠度计算

$K(\Gamma)$  主要受驾驶员状态的影响。驾驶员状态集合为  $\Gamma = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3\}$ ,其中  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  分别为驾驶员的知识技能、心理素质和生理素质的变量,  $0 < \delta_i < 1$ 。驾驶员状态的权重为

$$T = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}, 0 < \gamma_i < 1 \quad (8)$$

驾驶员状态的可靠度计算是参考人的可靠度模型的

计算过程。人的可靠度模型是一种专门针对复杂系统中人员可靠性的评估方法,旨在识别潜在的人为错误与人为失误以及来自工作环境、系统设计和和其他因素的干扰因素<sup>[11]</sup>。其解析表达式为

$$R(t) = P(T < t) = \int_0^t E(\tau) d\tau \quad (9)$$

式(9)中: $E(\tau)$  为人为失误率,可以是常数或函数; $t$  为时间。在本文中,取  $E(\tau)$  为负指数分布概率密度函数,负指数分布常用于可靠度分析,适用性广,在可靠性设计中占有重要地位。负指数概率密度函数的解析表达式为<sup>[12]</sup>

$$E(t) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda t), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $\lambda > 0$  为模型的一个参数,常被称为率参数。

综合式(9)和式(10)得出可靠度模型的解析表达式为

$$R(t) = \begin{cases} 1 - \exp(-\lambda t), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

参考人的可靠度模型的研究方法,本文认为驾驶员所处的情景环境和其他因素(系统设计等)是相同的,在相同情境环境等情况下,不同驾驶员会产生不同的驾驶状态。在此条件下,该算法可获取驾驶员状态的可靠度与驾驶员状态之间的变化关系。故本文将参数  $t$  看作是驾驶员的状态变量  $\rho$ 。 $\rho$  的表达式为

$$\rho(\Gamma) = T \times \Gamma^T \quad (12)$$

因而驾驶员的可靠度算法可表述为

$$R(\Gamma) = 1 - \exp(-\lambda \rho(\Gamma)) \quad (13)$$

### 2.2 参数估计

#### 2.2.1 驾驶员状态分布

船舶驾驶员状态可靠度模型是利用负指数概率密度函数确定的,算法中的  $\lambda$  控制模型的图像。在实际驾驶过程中,驾驶员的  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  都服从高斯分布,即驾驶员状态处于中等水平的偏多,驾驶员驾驶状态分布见图2。本文所建立的模型为驾驶员状

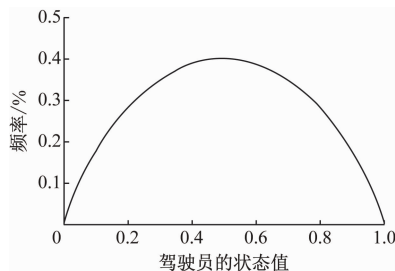


图2 驾驶员驾驶状态分布

Fig. 2 Distribution of ship navigator's driving states

态的可靠度随着驾驶员状态变化而变化,可靠度与驾驶员的状态呈现负指数分布,通常驾驶员的状态越佳,可靠度越高,驾驶员状态的可靠度与驾驶员状态关系见图3。

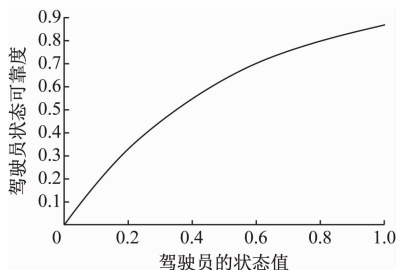


图3 驾驶员状态的可靠度与驾驶员状态关系

Fig. 3 Ship navigators Relationship between reliability and status

## 2.2.2 最大似然估计法

对于给定的独立同分布样本数据  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $\lambda$  的似然函数为

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^n \lambda \exp(-\lambda x_i) = \lambda^n \exp\left(-\lambda \sum_{i=1}^n x_i\right) = \lambda^n \exp(-\lambda n\bar{x}) \quad (14)$$

式(14)中:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  为样本均值。

对  $\lambda$  的似然函数对数求导,其表达式为

$$\frac{d}{d\lambda} \ln L(\lambda) = \frac{d}{d\lambda} (n \ln(\lambda) - \lambda n\bar{x}) = \frac{n}{\lambda} - n\bar{x} \quad (15)$$

最终获取参数  $\lambda$  的最大似然估计值为

$$\hat{\lambda} = 1/\bar{x} \quad (16)$$

## 2.3 形状函数 $K(\Gamma)$

船舶领域是驾驶员避碰操纵的结果,因此,动态船舶领域的形状主要受到驾驶员状态的影响。驾驶员的状态越好,领域所包括的范围就越小,驾驶员的状态越差,领域包括的范围会更大一些。基于驾驶员状态的可靠度,  $K(\Gamma)$  为

$$K(\Gamma) = \frac{\alpha}{\exp(1 - \exp(-\lambda\rho(\Gamma)))} \quad (17)$$

式(17)中:  $\alpha$  的值由驾驶员状态的最高可靠度  $R_{\max}$  和 FQSD 极限边界系数  $K_{\min}$  确定。  $\alpha$  的表达式为

$$\alpha = \frac{K_{\min}}{R_{\max}} \quad (18)$$

## 2.4 驾驶员状态权重的确定

要计算形状参数,需对驾驶员状态 ( $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$ ) 权重进行确定,驾驶员状态的权重向量如式(8)所示。由于人的性格特点是比较稳定的,船舶驾驶员的知识技能、心理素质和生理素质对形状函数的权重是相对稳定的。因此,本文参考国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 对人为因

素的定义和分类,提取与驾驶员状态 (知识技能、心理素质和生理素质) 有关的指标<sup>[13]</sup>,结合 FAN 等<sup>[14-15]</sup>所统计的 2012 年 1 月—2017 年 12 月期间英国海事调查局 (Marine Accident Investigation Branch, MAIB) 和交通安全委员会 (Traffic Safety Board, TSB) 发布的共 161 起涉及 208 艘船舶的事故报告,得到的 32 种人为错误风险因素和对应频率的统计结果,确定人为因素权重值。

统计有关驾驶员的知识技能、心理素质和生理素质的风险因素所造成的事故频率,归一化事故频率作为各个指标的影响权重见表 1,经计算,驾驶员状态的权重为

$$T = \{0.636, 0.219, 0.145\} \quad (19)$$

表 1 造成海事事故的驾驶员状态风险因素

Tab. 1 The ship navigator's state risk factors that cause maritime accidents

		单位: %	
驾驶员状态	风险因素	频率	权重
知识技能	航海相关的知识不足 (船舶技术和设备知识、通信知识、航海气象知识和海事法规知识等)	70.19	63.6
	船舶操纵方面技能不足	80.29	
	语言沟通能力不足	30.77	
	观察能力、判断能力不足	42.30	
	缺少安全氛围	24.52	
心理素质	压力大	4.81	21.9
	情景感知不足	24.04	
	个人责任感和警觉状态低	21.63	
	情绪管理能力低	1.92	
生理素质	工作负荷过大	25.96	14.5
	工作环境恶劣	17.31	
	药物、酒精的影响	6.73	
	身体健康因素	0.96	

## 3 模型仿真

### 3.1 试验场景设置

为验证所提出的动态船舶领域模型的有效性,本文选择 Container 船舶进行仿真,试验船舶参数信息见表 2,在开阔水域中,船舶可看作以自身的设计速度航行。同时,本文对驾驶员在航行过程中的航行状态进行分类,航行状态分类见表 3,驾驶员的航

表 2 试验船舶参数信息

Tab.2 Experimental ship parameter information

船舶类型	Container
船长 $L/m$	175.0
船宽 $B/m$	25.4
吃水 $d/m$	8.5
设计速度 $v_0/kn$	15.0

行状态(知识技能、心理素质和生理素质)可分为6种情况。本文所仿真的过程包括驾驶员航行过程中

表 3 航行状态分类

Tab.3 Navigation status classification

驾驶员状态	差	较差	中等	较好	良好	优秀
$\delta_1$	(0,0.1]	(0.1,0.3]	(0.3,0.5]	(0.5,0.7]	(0.7,0.9]	(0.9,1.0]
$\delta_2$	(0,0.1]	(0.1,0.3]	(0.3,0.5]	(0.5,0.7]	(0.7,0.9]	(0.9,1.0]
$\delta_3$	(0,0.1]	(0.1,0.3]	(0.3,0.5]	(0.5,0.7]	(0.7,0.9]	(0.9,1.0]

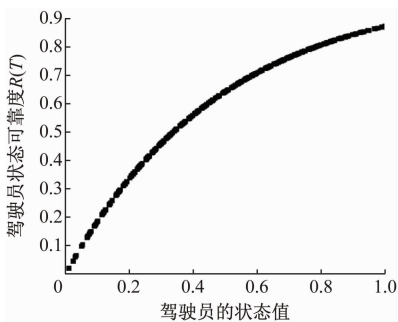


图 4 驾驶员状态与驾驶员可靠度模拟结果

Fig.4 Simulation results of navigator's status and driver reliability

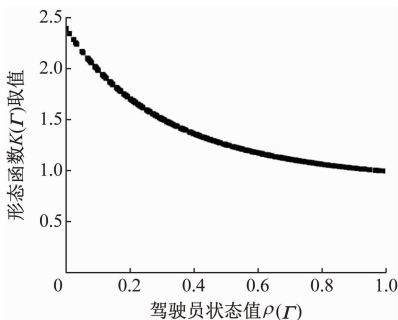


图 5 船舶领域的形状参数与驾驶员状态的模拟结果

Fig.5 Simulation the relation of ship domain between shape parameters and ship navigator's status in the ship domain

### 3.3 模型有效性验证

本文通过计算机仿真得到  $K(I)$  与驾驶员的知识技能、心理素质和生理素质的关系,用以验证动态船舶领域模型的有效性。

1) 经研究发现,形状函数越小,船舶领域的边

由差到优秀的所有状态。

### 3.2 不同驾驶状态的可靠度仿真

通过仿真得到驾驶员状态与驾驶员可靠度模拟结果见图4。图4中:驾驶员的综合状态由驾驶员的  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  共同确定,驾驶员的状态越好,其可靠度越高,当驾驶状态处于优秀时,可靠度接近于1。船舶领域的形状参数与驾驶员状态的模拟结果见图5。图5中:当驾驶员的状态越好时, $K(I)$  越小,这表明驾驶员的状态越好,船舶领域的形状边界越平滑。

界越是平滑,领域的面积越小。3种知识技能下的驾驶员状态与形状函数仿真见图6。对于3种知识技能背景下的驾驶员而言, $K(I)$  都是随着驾驶员心理素质和生理素质的增大而减小,这表明驾驶员的心理素质和生理素质越高,对应的船舶领域面积越小。驾驶员的知识技能在差、中等、优秀之间变化时, $K(I)$  的变化是十分显著的,这表明不同知识技能背景下的驾驶员对船舶领域形状的影响十分显著。同时,若驾驶员的知识技能掌握得越好,船舶领域形状系数随生理素质和心理素质变化得越缓慢,变化幅度也越小,当驾驶员的知识技能较差时, $K(I)$  变化得最剧烈,这与船舶航行时的客观事实相吻合。

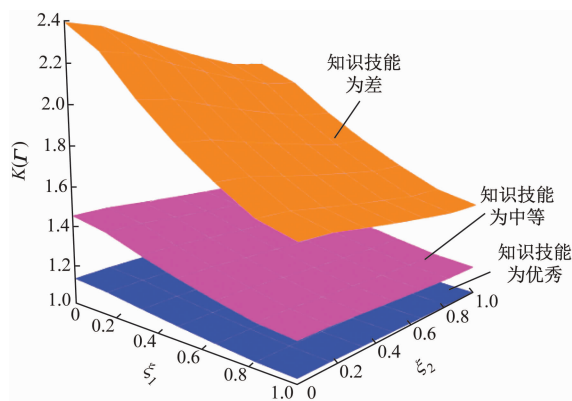


图 6 3种知识技能下的驾驶员状态与形状函数仿真

Fig.6 Simulation of ship navigator's state and shape parameter under three knowledge skills

2) 3种心理素质下驾驶员状态与形状函数仿

真见图7。驾驶员的知识技能越优,生理素质越高,形状函数越小。当生理素质在中等和差之间时,形状函数减小得最迅速,生理素质到中等以上后,形状参数变化得较平缓,符合客观航行情况。驾驶员的心理素质分别为差、中等、优秀时,形状参数的变化幅度不同,心理素质越差,变化的幅度越大,变化速度也越快,符合客观航行事实。

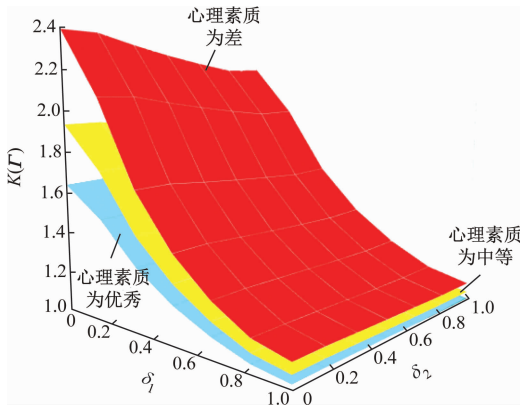


图7 3种心理素质下驾驶员状态与形状函数仿真  
Fig.7 Simulation of navigator's state and shape parameter under three psychological qualities

3) 3种生理素质下驾驶员状态与形状系数仿真见图8。形状函数随着驾驶员心理素质和知识技能的增加而迅速减小。驾驶员的生理素质分别为差、中等、优秀时,形状函数的变化幅度不同,生理素质越差,领域的形状和面积变化的幅度越大,速度也越快,完全符合客观航行事实。

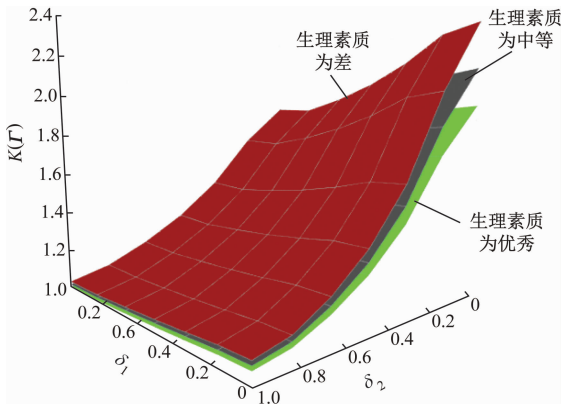


图8 3种生理素质下驾驶员状态与形状系数仿真  
Fig.8 Simulation of ship navigator's r state and shape parameter under three physical qualities

综合驾驶员的  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  与船舶领域形状函数的仿真结果及分析得出该模型算法与客观航行情况相吻合,证明该模型具有很强的可行性和适用性。

### 3.4 动态船舶领域模型仿真

1) 不同驾驶员的状态下船舶领域形状的变化见图9。船舶领域的形状和领域面积随着驾驶员状

态的变化呈动态变化,驾驶员状态变差会导致船舶领域形状不断向外扩张,领域的面积也会越来越大。当驾驶员状态最好时,船舶领域的形状最小。

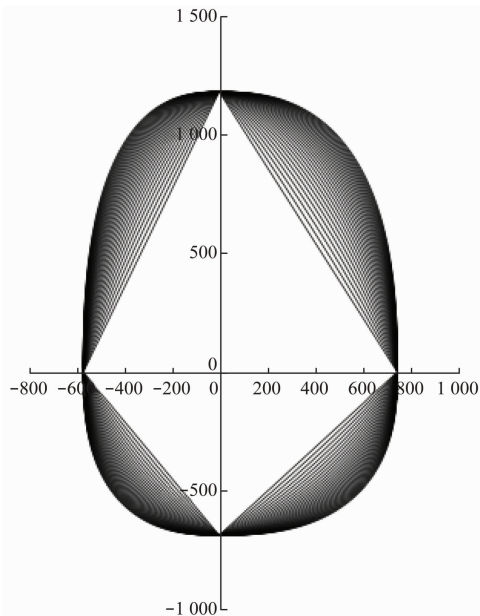


图9 不同驾驶员的状态下船舶领域形状的变化(单位:m)  
Fig.9 Changes in the shape of the ship domain under different ship navigator's states (Unit: m)

2) 5种驾驶员状态下的船舶领域形状见图10。图10中:驾驶员在状态为优秀的情况下,船舶领域是一个十分平滑的不规则菱形,此时的船舶领域最小;驾驶员状态为中等以上时,船舶领域是椭圆形;当驾驶员状态为差时,船舶领域形状接近于矩形,是面积最大的船舶领域模型。

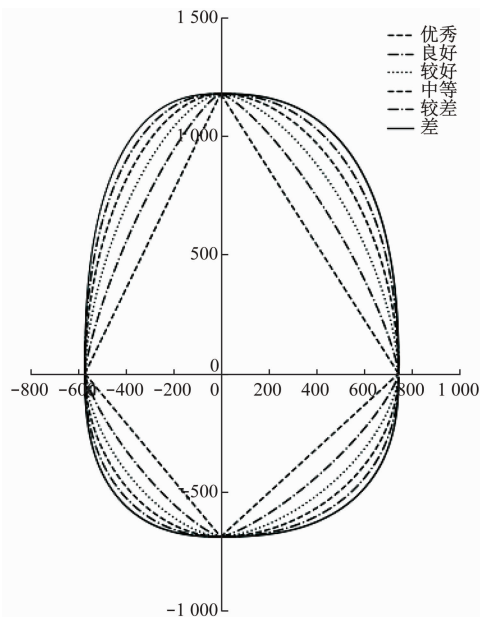


图10 5种驾驶员状态下的船舶领域形状(单位:m)  
Fig.10 Shape of ship domain under five ship navigator's states (Unit: m)

船舶领域的形状随着驾驶员的状态从差、较差、中等、较好、良好到优秀动态变化,当驾驶员的状态越好时,船舶领域的形状不断向内收缩,边界越来越平滑,领域的面积也越来越小;驾驶员的状态越差,船舶领域的形状是向外扩张,领域面积越来越大。

#### 4 结束语

本文在模糊四元船舶领域的基础上建立动态船舶领域模型,根据驾驶员状态确定领域的边界形状,在验证模型的有效性后,最终得到边界形状随着驾驶员状态变化而变化的动态船舶领域。研究结果表明:驾驶员的状态越佳,船舶领域的形状越向内收缩,领域面积也越小,驾驶员状态最优时,可得到面积最小且呈不规则菱形的船舶领域,而驾驶员状态最差时,可得到面积最大且近似矩形的船舶领域。

本文研究解决了模糊船舶领域边界难以确定的问题,突出驾驶员对船舶领域的影响,在实际的航行过程中可为驾驶员的避碰决策提供依据,同时也为船舶领域的后续研究奠定基础。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴兆麟,朱军. 海上交通工程[M]. 大连:大连海事大学出版社,2004:117.  
WU Z L, ZHU J. Marine traffic engineering [M]. Dalian: Journal of Dalian Maritime University, 2004: 117. (in Chinese)
- [2] FUJII Y. Traffic capacity [J]. Journal of Navigation, 1971, 24(4):543-552.
- [3] GOODWIN E M. A statistical study of ship domains [J]. Journal of Navigation, 1975, 28(3):328-344.
- [4] DAVIS P V, DOVE M J, STOCKEL C T. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas [J]. Journal of Navigation, 1980, 33(2):215-222.
- [5] SZLAPCZYNSKI R, SZLAPCZYNSKA J. Review of ship safety domains: models and applications [J]. Ocean Engineering, 2017, 145:277-289.
- [6] ZHANG F, PENG X, HUANG L, et al. A spatiotemporal statistical method of ship domain in the inland waters driven by trajectory data [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(4):410.
- [7] AXEL H, RINGSBERG J W, MARTIN S, et al. A revisit of the definition of the ship domain based on AIS analysis [J]. Journal of Navigation, 2019, 72(3):777-794.
- [8] ZHAO J S, WU Z L, WANG F C. Comments on ship domains [J]. Journal of Navigation, 1993, 46(3):422-436.
- [9] WANG N. An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain [J]. Journal of Navigation, 2010, 63(4):733-749.
- [10] PIETRZYKOWSKI Z, WIELGOSZ M. Effective ship domain-Impact of ship size and speed [J]. Ocean Engineering, 2021, 219:108423.
- [11] 胡立伟,孙亚南,祁首铭,等. 公路行车驾驶失误率计算方法及其简化研究 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(11):101-108.  
HU L W, SUN Y N, QI S M, et al. Study on calculation methods and simplification of driving error rate on highway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11):101-108. (in Chinese).
- [12] CHATURVEDI A, SUDEEP R B, NEERAJ J. Multi-stage procedures for the minimum risk and bounded risk point estimation of the location of negative exponential distribution under the modified LINEX loss function [J]. Sequential Analysis, 2019, 38(2):135-162.
- [13] International Maritime Organization. The human element: a guide to human behaviour in the shipping industry [M]. 2nd ed. London: International Maritime Organization Publishing, 2019.
- [14] FAN S Q, EDUARDO B, YANG Z L, et al. Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven Bayesian network [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020, 203:107070.
- [15] FAN S Q, YANG Z L, EDUARDO B, et al. Analysis of maritime transport accidents using Bayesian networks [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2020, 234(3):439-454.