

# 基于复杂网络的船舶碰撞危险量化模型

米佳林, 郑中义, 刘子豪

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116000)

**摘要:**为提升水上交通安全性,减少碰撞事故,提出基于复杂网络的船舶碰撞危险量化模型。通过构建复杂网络和计算关系强度反映船舶间关系,使用径向分布函数(Radial Distribution Function, RDF)分析船舶密度因素,对船舶周围的交通情况进行讨论;采用网络中心性分析船舶冲突因素;运用基于史蒂文斯幂定律的隶属度函数对密度因素和冲突因素进行整合,改进以船舶对为基础的碰撞危险量化方法。为证明模型准确性,进行实例验证并与基于船舶对叠加计算的方法对比,结果表明本模型具有一定的准确性。通过对实际水域情况的分析,讨论相应的预警机制,可用于水上交通情况的监控和危险预警。

**关键词:**船舶碰撞危险;复杂网络;径向分布函数;隶属度函数

中图分类号:U698.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.004

## Quantitative modeling of ship collision hazards based on complex networks

MI Jialin, ZHENG Zhongyi, LIU Zihao

(School of Navigation, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China)

**Abstract:** In order to improve the safety of water transportation and reduce collision accidents, a quantitative model of ship collision hazard based on complex network is proposed. By constructing the complex network and calculating the relationship strength to reflect the relationship between ships, the RDF (Radial Distribution Function) is used to analyze the density factor of the ship and discuss the traffic situation around the ship; the centrality of the network is used to analyze the conflict factor of the ship; and the affiliation function based on the power law of Stevens is used to integrate the density factor and the conflict factor to improve the collision hazard quantification method based on ship pairs. In order to prove the accuracy of the model, example verification is carried out and compared with the method based on the superposition calculation of ship pairs, and the results show that the present model has a certain degree of accuracy. By analyzing the actual water situation, the corresponding warning mechanism is discussed, which can be used for monitoring the water traffic situation and hazard warning.

**Key words:** ship collision hazard; complex network; RDF; affiliation function

随着全球航运业的发展,船舶交通日益繁忙。尤其是港口等船舶密集的区域,交通密度的增大使船舶会遇率增大,船舶间发生事故的可能性也随之增大。碰撞事故占航海伤亡事件的26.2%。如何减少碰撞事故的发生,保障海上航行安全是海事领域学者的研究热点。

碰撞危险度是相对的概念,即某一艘船舶与其他船舶之间存在的碰撞危险,取决于本船和其他船

舶的航向、航速和距离等因素。碰撞危险的量化有助于船舶正常航行和危险情况下的船舶避碰。目前,碰撞危险量化的方法可大致分为基于解析表达的方法、基于模糊数学的方法和基于机器学习的方法等3类。

1) 早期基于解析表达的方法中利用最近会遇距离(Distance to the Closest Point of Approach,  $d_{CPA}$ )和最近会遇时间(Time to the Closest Point of Ap-

收稿日期:2023-11-14

作者简介:米佳林(1997—),男,硕士生,研究方向为水上交通安全。E-mail: mjl1997@dlmu.edu.cn

通信作者:刘子豪(1993—),男,辽宁鞍山人,讲师,研究方向为海上碰撞危险。E-mail: zihaliu0407@gmail.com

引用格式:米佳林,郑中义,刘子豪.基于复杂网络的船舶碰撞危险量化模型[J].中国航海,2025,48(1):26-33.

MI J L, ZHENG Z Y, LIU Z H. Quantitative modeling of ship collision hazards based on complex networks[J]. Navigation of China, 2025, 48(1):26-33. (in Chinese)

proach,  $t_{CPA}$ ) 构建负指数函数来计算碰撞危险指数 (Collision Risk Index,  $I_{CR}$ )<sup>[1]</sup>。在后续研究中通过不同会遇船舶的临界安全会遇距离来确定碰撞危险的大小<sup>[2]</sup>。CHENG 等<sup>[3]</sup>创新地将避碰行动协调程度与  $d_{CPA}$  和  $t_{CPA}$  结合得出与碰撞危险之间的关系。

2) 早期的通过模糊推理计算碰撞危险度的研究包含  $d_{CPA}$ 、 $t_{CPA}$ 、两船距离、相对方位和船速比<sup>[4]</sup>。在后续的研究中还将船舶领域侵犯程度纳入到模型中,使其更加全面<sup>[5]</sup>。江行等<sup>[6]</sup>基于四元船舶领域和《国际海上避碰规则》对船舶碰撞危险度模糊评价模型进行改进,将本船作为直航船时的是否处于紧迫局面作为参数这一状况融入到碰撞危险度评价中。

3) 基于机器学习的方法中,最常见的是基于神经网络的方法。早期采用  $d_{CPA}$  和  $t_{CPA}$  作为输入变量,后续研究中,为提升计算效率,直接采用航向、相对舷角、相对距离、速度和安全通过距离这 5 个原始数据作为输入变量并进一步改进神经网络,以循环神经网络的方法进行研究<sup>[7]</sup>。研究人员还将机器学习与 D-S 理论相结合计算  $I_{CR}$ ,以提高计算效率和预测精度。基于模型精度和计算时间,对不同的模型进行比较,选取最有效率的模型<sup>[8]</sup>。

在以往的研究中,研究主体通常是船舶对,但在实际情况中,通常是多船的复杂会遇。将多船分解为多个船舶对进行研究,不能反映复杂会遇情况,会缺失信息。因此,本文通过构建海上交通复杂网络,反映交通系统的拓扑特性;使用径向分布函数(Radial Distribution Function, RDF)分析船舶密度因素,克服传统密度的局限性,反映船舶周围的交通情况;使用复杂网络的度中心性分析船舶冲突因素,将多船纳入系统中;基于史蒂文斯幂定律的隶属度函数将二者结合得到船舶碰撞危险度。最后,对该模型进行实例验证,与以船舶对为基础进行计算并叠加的模型方法进行对比,验证了模型的可行性和准确性。

## 1 碰撞危险量化模型

### 1.1 复杂网络构建

复杂网络反映区域内多船间的关系,将有关系的船舶进行连接,最终形成复杂网络。为减少不必要的联系使研究过分复杂,本文设置了 6 n mile 和 1 n mile 两个距离阈值<sup>[9]</sup>。

1) 当两船距离大于 6 n mile 时,影响很小,不构建关系。

2) 当两船距离大于 1 n mile 小于 6 n mile 时,

且具有趋近态势时构建关系。

3) 当两船距离小于 1 n mile 时,构建关系,此时两船相距很近,即便没有趋近态势也可能因为避碰等原因,产生没有预料到的碰撞危险,这样就得到了复杂网络中的邻接网络。

### 1.2 关系强度计算

在复杂网络中,边权重用船舶间关系强度而非距离来衡量。在以往的研究中,一些学者通过目标船是否处于本船最小碰撞距离内对碰撞危险进行分析<sup>[9]</sup>,碰撞危险度非 0 即 1。然而,碰撞危险度应相对连续,可表征不同程度的碰撞危险。其次,距离具有迷惑性,尤其是在涉及状态变化率时。所以,本文采用关系强度来表征船舶间关系,设置边权重。

关系强度由  $d_{CPA}$  和  $t_{CPA}$  组成,包含了距离、相对方位和速度等参数。因其呈负相关关系,采用负指数方程来建立表达式,有

$$S_t = -\alpha_t \exp(\beta_t \times t_{CPA}) \quad (1)$$

$$S_d = -\alpha_d \exp(\beta_d \times d_{CPA}) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $\alpha$  和  $\beta$  为系数,可通过设定两组相应的自变量和因变量计算获得。在求得两个参数对关系强度的影响程度后对其加权求和。

权重的设定应与构建关系强度的目的相关。关系强度是为了表现船舶间的关系强弱,在复杂网络的构建中通过关系强度来对船舶间关系进行区分以反映紧迫程度的不同。在关系强度的构建中使用  $d_{CPA}$  来反映空间的紧迫性,即最近的会遇距离;用  $t_{CPA}$  反映时间的紧迫性,即到达最近会遇距离所用时间,二者同为关系强度构建中重要的参数,因此,权重都为 1/2,有

$$S = \sqrt{\omega_d S_d^2 + \omega_t S_t^2} \quad (3)$$

### 1.3 碰撞危险度

本文将碰撞危险度视为由密度因素和冲突因素组成。其中:密度因素体现了本船周围交通情况,反映船舶当前的状态;冲突因素体现船舶的交通特征,反映会遇的过程和结果,从当前、过程和结果等 3 个方面,体现船舶遭受碰撞危险的全过程,分析较为完善。

#### 1.3.1 密度因素

船舶密度一直是海上交通工程领域的重要研究内容。在密度高的水域,机动空间有限,船舶发生会遇的概率增加且避碰更困难,导致碰撞危险增加。在较小区域内多船会遇的复杂情况也会造成识别压力,不利于避碰和交通检测的进行。所以,学者常把船舶密度作为碰撞危险的标志,二者的相关性极强。

但船舶密度具有局限性,其不能很好地反映船

船舶的集聚性和复杂性,精度有限,无法反映出船舶的具体分布情况。集聚性表示船舶的聚集情况,复杂性表示船舶分布的有序程度,船舶密度局限性见图1。

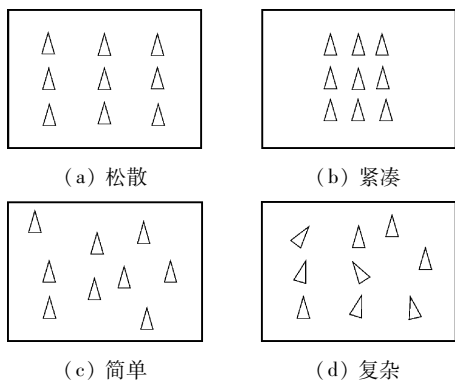


图1 船舶密度局限性

Fig.1 Limitations of ship density

图1中:单位水域面积的情况下,图1a所示情景所对应的船舶密度与图1b相同,而图1b所示情景中船舶向中心聚集,其船舶间距离更小,因此可以认为其碰撞危险相比于图1a更大;同理,图1c和图1d的船舶密度也相同,但在水域中,图1c中的船舶分布散乱,情况较图1a和1b更为复杂,而图1d中的船舶方向也发生了变化,造成船舶交叉会遇情况的发生,这都可能会导致碰撞危险的增大,而船舶密度不能很好地反映碰撞危险的变化。因此,船舶密度不能有效地区分上述4种情景,具有较强的局限性。

集聚性与复杂性对船舶交通安全具有重大影响,关乎碰撞危险。因此,LIU等<sup>[10]</sup>提出基于RDF的船舶密度模型,把船舶交通系统转换为粒子系统,通过计算船舶周围其他船舶在空间中的分布概率来对不同位置的密度变化情况进行详细的表征,船舶交通粒子系统见图2。

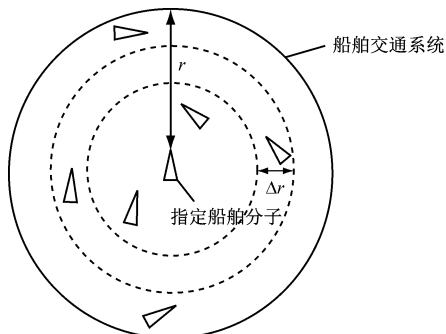


图2 船舶交通粒子系统

Fig.2 Ship traffic particle system

对于一个船舶分子,RDF可表征其周围的船舶分子的空间分布概率为

$$G_i(r) = \frac{N_i(r, \Delta r)}{\lambda \rho S(r, \Delta r)} \quad (4)$$

式(4)中: $G_i(r)$ 为船舶分子*i*的RDF; $N_i(r, \Delta r)$ 为距离船舶分子*i*为*r*处且宽度为 $\Delta r$ 的圆环内船舶分子数量; $\rho$ 为船舶分子密度,由 $N/S$ 获得, $N$ 为船舶数量, $S$ 为区域面积; $\lambda$ 为调整系数,径向分布函数图像见图3。

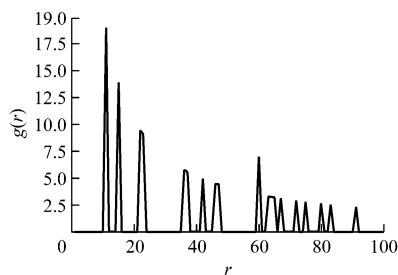


图3 径向分布函数图像

Fig.3 Radial distribution function image

综上所述,RDF可以形象地反映出周围船舶的密集程度。通过RDF对一定距离*r*的积分来表征本船周围的船舶密度,船舶*i*周围的船舶密度 $D_i$ 为

$$D_i = \int_0^r \frac{N_i(r, \Delta r) S}{2N\lambda \pi r \Delta r} dr \quad (5)$$

分析密度因素时,除应考虑离本船距离越远处,因计算水域变大,空间分布概率变小外,还应考虑不同距离内船舶所产生的影响不同。距离越近的船舶,其对本船碰撞危险的影响就越大,船舶间距离的影响见图4。因此,采用距离的负指数函数对式(5)进行修正,见式(6)。随着距离的增大,该距离上的船舶所产生的影响迅速减小。

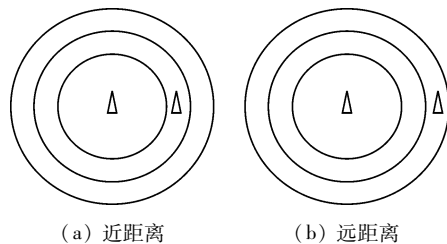


图4 船舶间距离的影响

Fig.4 Impact of distance between ships

$$D_i = \int_0^r \frac{N_i(r, \Delta r) S}{2N\lambda \pi r \Delta r} e^{-r} dr \quad (6)$$

以往的研究中常忽略航行状态造成的危险。组织良好的交通比混乱的交通更安全,更易于避碰操纵,可用秩序度来表示船舶航行的有序程度。在本模型中,具有相同位置分布的船舶交通系统也会因船舶的航行状态不同而产生很大差异。船舶的速度和航向是影响海上交通安全的重要交通特性。不同的速度和航向更易形成复杂局面,相近的速度和

航向会表现出一定的有序性,船舶有序性见图5。

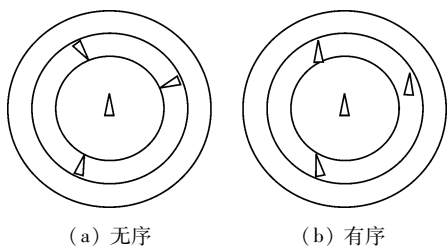


图5 船舶有序性

Fig.5 Orderliness of ships

船舶的航行状态通过船舶速度矢量进行计算。建立速度平面坐标系见图6。图6中:船舶的横向速度和纵向速度对应坐标系中的横纵坐标。通过在速度坐标系中计算两船速度矢量的直线距离 $D$ 来衡量二者航行状态的差别。如果距离较小,说明秩序度较高,航行较为安全;反之则秩序度较低,影响航行安全。

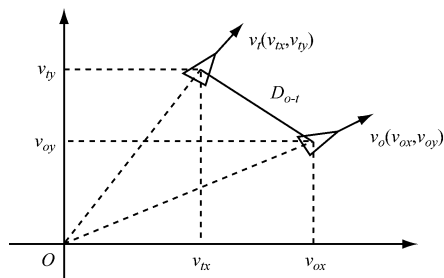


图6 速度平面坐标系

Fig.6 Velocity plane coordinate system

除此之外,还需要区分两船的会遇角度。对遇情况下,相同大小的速度矢量之间的 $D$ 相对较大,但基于文献[11]的研究,其危险程度小于交叉的会遇状态。因此,还需对会遇态势进行分析。采用其结论,使用系数 $\alpha$ 对 $D$ 进行修正为

$$D_i = \int_0^r \frac{S \sum D_i \partial_i(r, \Delta r)}{2N\lambda \pi r \Delta r} e^{-r} dr \quad (7)$$

式(7)中: $D_i \partial_i(r, \Delta r)$ 对 $N_i(r, \Delta r)$ 进行改进,表示距离船舶分子 $i$ 为 $r$ 处且宽度为 $\Delta r$ 圆环内其他船舶分子基于船舶航行状态对船舶分子 $i$ 造成的影响,用以取代船舶数量,区分船舶分子间的差异。

由于研究对象是以船舶为中心的圆环,无法反映本船与周围船舶之间的相对分布情况。在距离本船同一距离区间内的其他船舶,其分布可能在本船的一侧,也可能分散在本船的周围,船舶中心性见图7,相同的RDF,碰撞危险也可能有很大不同。图7中:处在中间部分的船舶易受到来自多方向船舶的影响,其在进行避碰操作时需要考虑多个方向的限制,

对碰撞危险的认知难度更大,避碰难度相对更高。

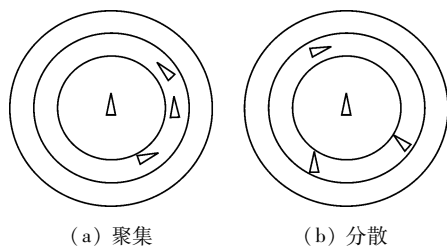


图7 船舶中心性

Fig.7 Centrality of ships

为解决这一问题,需考虑本船的中心性。中心性是指船舶在船舶交通系统中所处位置的中心程度,可表示船舶的分布情况,在本文中使用复杂网络中的紧密中心度来表征。紧密中心度越大,表明该船舶与其他船舶更加接近,也就说明该船舶节点在网络中所处位置越靠近中心,也易有更多的船舶被包含在研究范围内,所以其所受密度因素的影响很大概率高于网络边缘位置的船舶。紧密中心度 $C_{C,i}$ <sup>[12]</sup>为

$$C_{C,i} = \frac{N}{\sum_{j=1}^N d_{ij}} \quad (8)$$

式(8)中: $d_{ij}$ 为节点 $i$ 到节点 $j$ 的距离; $C_{C,i}$ 在邻接网络中计算,最终得到的船舶密度为

$$D_i = C_{C,i} \times \int_0^r \frac{S \sum D_i \partial_i(r, \Delta r)}{2N\lambda \pi r \Delta r} e^{-r} dr \quad (9)$$

### 1.3.2 冲突因素

船舶间冲突是造成碰撞事故的重要原因,在多船会遇的复杂情况中更是如此。船舶间距离较远,但有趋近态势时极易造成冲突。船舶运动趋势见图8,图8中:两船相互趋近,两船间距离逐渐减小如图8a所示, $d_{CPA}$ 与 $t_{CPA}$ 为正且值较小,此时会产生两船汇聚所造成的冲突,可能会导致碰撞危险的产生;两船相对位置发生变化,虽然两船的速度大小和方向均没有发生改变,但因为两船处于相离态势,两船间距离逐渐增大如图8b所示,此时 $d_{CPA}$ 与 $t_{CPA}$ 为负值,两船已驶过最近会遇点,不会造成冲突,碰撞危险逐渐减小。

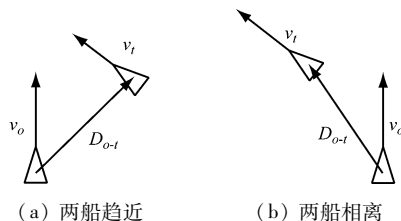


图8 船舶运动趋势

Fig.8 Ship movement trends

在复杂网络的构建中已把具有冲突的船舶相连,对冲突情况进行总结,并通过关系强度的引入,使用  $d_{\text{CPA}}$  和  $t_{\text{CPA}}$  两个重要参数对冲突的紧迫性进行计算,以此来表现船舶间的关系强弱,对不同船舶间冲突强弱进行有效区分,得到不同的边权重,获得权重网络,因此,可依据权重网络进行冲突因素的研究。

对于一个船舶分子,其与周围船舶冲突的严重情况可由该节点的度中心性来表示。节点的度表示与该节点相连的连边数量,度越大,说明该节点与其他节点的直接关联能力越大。在船舶交通复杂网络中,本船的度越大,说明与其具有关联的船舶越多,本船对多船造成影响,同时,多船也影响着本船。

因为每艘船舶的运动状态及位置参数等不同,对本船的影响也是不同的。为区分不同船舶造成的影响,使用关系强度对节点的度中心性进行改进,将权重纳入考虑。一个包含  $N$  个节点的网络中,节点最大可能的度值为  $N-1$ ,为便于比较对该指标进行归一化处理,改进后的度中心性为

$$C_i = \frac{k_i}{N-1} \times \frac{\sum_{j \in N_i} \omega_{ij}}{k_i} = \frac{\sum_{j \in N_i} \omega_{ij}}{N-1} \quad (10)$$

式(10)中: $k_i$  为节点  $i$  的度; $N_i$  为节点  $i$  的邻点集合; $\omega_{ij}$  为连接节点  $i$  和节点  $j$  之间的边权重。

### 1.3.3 碰撞危险度

碰撞危险度由密度因素和冲突因素导致的危险度组成。为进行归一化处理,消除两因素中变量差异导致的量纲不同,本文引入模糊隶属函数和史蒂文斯幂定律,以此建立密度因素、冲突因素和碰撞危险度之间的关系。史蒂文斯幂定律的一般形式<sup>[13]</sup>为

$$\varphi(I) = kI^a \quad (11)$$

式(11)中: $I$  为物理刺激的强度增长; $\varphi(I)$  为感觉强度的增长; $k$  为一个常量,由式(11)中所使用的单位来决定; $a$  为一个指数,由所受到的刺激类型来决定。

根据史蒂文斯幂定律,本文将碰撞危险度的密度因素和冲突因素都考虑为一种外界刺激,将碰撞危险视作一种感觉强度,构建关系为

$$R_{D,i} = \begin{cases} 1, & D_i \geq D_{\max} \\ \left( \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \right)^{0.33}, & D_{\min} < D_i \leq D_{\max} \\ 0, & D_i < D_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

$$R_{C,i} = \begin{cases} 1, & C_i \geq C_{\max} \\ \left( \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \right)^{0.33}, & C_{\min} < C_i \leq C_{\max} \\ 0, & C_i < C_{\min} \end{cases} \quad (13)$$

式(12)和式(13)中: $R_{D,i}$  和  $R_{C,i}$  分别为密度因素和冲突因素对碰撞危险隶属度大小,值越大,表征更高的碰撞危险; $D_{\min}$  和  $C_{\min}$  是隶属度函数的下边界,通常设定为零; $D_{\max}$  和  $C_{\max}$  为上边界,根据实际应用来确定; $a$  为 0.33,根据史蒂文斯幂定律由所受刺激类型决定,因为密度因素和冲突因素本质上反映周围船舶的分布情况和航行状况,可视作一种视觉刺激,所以采用光感刺激下的史蒂文斯幂定律指数 0.33 作为隶属度函数的指数。

因为两种危险度反映了碰撞危险度的两个方面,二者没有明显的叠加关系,所以加权相加构建碰撞危险度为

$$R_i = \omega_1 R_{D,i} + \omega_2 R_{C,i} \quad (14)$$

式(14)中: $\omega_1$  和  $\omega_2$  为因素权重,满足  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ,权重的设定应根据实际水域的情况进行具体分析。本文所研究的水域为开阔水域,在模型验证中所选用的水域处于西北-东南与西南-东北两条交通流交汇区域,船舶数量较多,相对密集,且交叉会遇及对遇情况较多,因此,密度因素与冲突因素均非常重要,本文在验证过程中将权重都设定为 0.5,即两因素的影响相等。当研究水域发生变化时,应根据具体情况灵活调整两因素所占权重。例如,在研究船舶在锚地的碰撞危险时,密度因素应有相应的提高。

## 2 验证与讨论

### 2.1 模型结果验证

本文选取位于 121.5°E ~ 122°E 和 38.1°N ~ 38.3°N 附近的水域进行实例验证。船舶分布及船舶间关系见图 9。

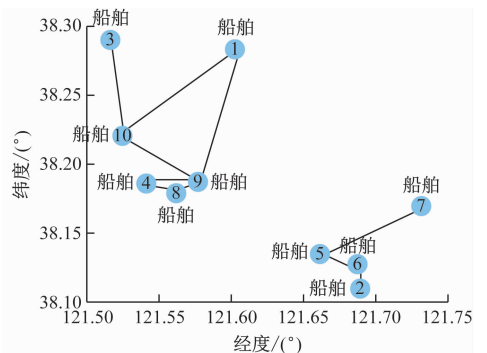


图9 船舶分布及船舶间关系

Fig. 9 Ship distribution and inter ship relationships

为检验模型的有效性,选取各船舶到 6 n mile 内其他船舶间的平均距离进行比较,并且为弥补船舶数量对平均距离的影响,又选取了 6 n mile 内船舶数量这一参数,其验证结果见表 1。

表 1 验证结果  
Tab. 1 Validation results

船舶编号	碰撞危险度	平均距离/n mile	船舶数量/艘
1	0.372	5.111	5
2	0.520	2.237	3
3	0.283	4.110	5
4	0.731	1.612	6
5	0.492	3.557	6
6	0.618	1.830	5
7	0.310	3.687	3
8	0.834	2.506	7
9	0.963	3.301	7
10	0.558	3.502	5

由表 1 可知:船舶碰撞危险度与平均距离之间的关系大致呈负相关,但并不明显,皮尔逊相关系数仅为  $-0.553$ 。造成这一现象的原因一方面是所选研究区域内船舶数量较少,其规律性不大;另一方面,平均距离在一定程度上可反映碰撞危险的大小,但仍有弊端。比如考虑因素不全面,计算平均距离时,缺少了船舶自身特性与运动状态,这些都是造成碰撞危险的重要原因;其次,计算平均距离时易被船舶数量所影响,当船舶到本船的距离一致时,周围船舶数量越大,其碰撞危险越高,但平均距离不变,因此,平均距离不能很好地反映这种情况。

船舶碰撞危险度与 6 n mile 内船舶数量呈现一个较为明显的正相关关系,其皮尔逊相关系数为  $0.718$ 。确定 6 n mile 为半径,船舶数量可被认为是船舶密度,船舶密度与碰撞危险可视为正相关关系,因此,当船舶碰撞危险度与船舶密度呈正相关关系时,船舶碰撞危险度可作为船舶碰撞危险的表征,说明本模型具有一定的准确性。

## 2.2 对比分析

用以船舶对为基础进行计算并叠加的模型方法作为验证方法,表达式见式(15)~式(18)。<sup>[14]</sup>

$$I_{CR,d} = a_d \exp(b_d \times d_{CPA}) \quad (15)$$

$$I_{CR,t} = a_t \exp(b_t \times t_{CPA}) \quad (16)$$

$$I_{CR} = \alpha_1 I_{CR,d} + \alpha_2 I_{CR,t} \quad (17)$$

$$I_{CR,i} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n I_{CR} \quad (18)$$

式(15)~式(18)中: $I_{CR,d}$ 和 $I_{CR,t}$ 分别为 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 表示的碰撞危险; $I_{CR,i}$ 为多船会遇中船舶*i*的碰撞危险;其他参数详见文献[14]。

使用该方法进行计算的对比结果见表 2。由表 2 可知:两种方法的计算结果具有一定的正相关关系,且都得出船舶 9 为碰撞危险最大的船舶,但在其他船舶的碰撞危险排序上不尽相同。

表 2 对比结果

Tab. 2 Comparison results

船舶编号	碰撞危险度	验证危险度
1	0.372	0.101
2	0.520	0.178
3	0.283	0.116
4	0.731	0.163
5	0.492	0.179
6	0.618	0.224
7	0.310	0.179
8	0.834	0.166
9	0.963	0.282
10	0.558	0.210

10 艘船舶大致分为两个区域,船舶 9 周围船舶数量较多,与船舶 8、船舶 4 相距很近,且与较远处的船舶 1、船舶 10 也具有一定的关系如图 8 所示,因此本文方法结果较大。因为船舶 9 与其他船舶间多呈趋近态势且距离较近,与其他船舶的 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 较小,导致使用验证方法得出的结果较大。在两种方法中,船舶 1、船舶 3 的碰撞危险度均较小,这也符合实际情况,两船与其他船舶均相距较远,关系较弱,发生碰撞的可能性很低,即便是他船需要进行避碰操作也很难对两船产生影响。

在两种方法的比较中,船舶 7 的差异较大。本文方法的结果很小,但验证方法的结果较大。船舶 7 距离船舶 2、船舶 5 和船舶 6 较远,因距离其他船舶的距离过大而不用考虑。虽然船舶 7 与船舶 5 呈对遇的会遇局面,但距离较远且关系较小使本文方法的结果很小。而使用验证方法计算时,船舶 7 与船舶 2、船舶 6 间的 $t_{CPA}$ 值为负,当 $t_{CPA}$ 值小于零时,说明二者已经驶过了最近会遇点,处于相互驶离的状态。使用负的 $t_{CPA}$ 值会导致两船间的碰撞危险度较大,和实际情况有很大偏差。

在船舶 8 的计算中,本文方法的结果很大,处于 10 艘船舶中的第二位。基于验证方法计算,结果较

小,处于第七位。造成这一结果的主要原因是船舶8与其他船舶间的 $t_{CPA}$ 较大,但验证方法忽视了当前船舶8周围的情况,船舶4、船舶9均与船舶8距离较近,对其航行和避碰的影响较大。而船舶10因为与其他船舶的 $d_{CPA}$ 较小,使用验证方法计算时具有很高的碰撞危险度,但其周围船舶与其距离较远,关系较弱,且与船舶4、船舶8和船舶9的速度方向大致相同,具有一定秩序性,所以使用本文方法计算时其碰撞危险度较小。

为进一步验证本文模型的合理性,研究船舶的航行轨迹,对船舶避让行动进行分析。以船舶4、船舶8和船舶9为例,3艘船的船舶信息见表3。

表3 船舶信息  
Tab.3 Ship information

船舶编号	经度/(°)	纬度/(°)	航速/kn	航向/(°)
4	121.541	38.187	14.5	94.3
8	121.562	38.184	9.7	306.9
9	121.575	38.186	10.9	290.4

本船序号	目标船序号	$d_{CPA}/n\ mile$	$t_{CPA}/min$
4	8	0.152	2.622
4	9	0.127	2.848
8	9	0.302	7.983

选取图9所示时刻前后10个时刻点的数据进行轨迹绘制见图10。由图10可知:在图9所示时刻前,3艘船皆保向保速航行。该时刻后,船舶4未采取行动,根据相关避碰责任的有关研究,船舶4、船舶8和船舶9处于交叉会遇的情形,船舶4为让路船,由于船舶4没有采取相应行动,船舶8向右转向避让。船舶8采取避让行动后,因距离船舶9较近,转向后的情况紧迫导致船舶9也采取了相应的避让行动。最终,船舶8和船舶9在驶过后复航,继续保持原有的航向行驶。船舶8与船舶9的避让行为也说明了在实际情形中,两艘船舶确实基于当前危险局面采取了相应措施,也侧面反映两船在本文模型中的高碰撞危险度的合理性。

### 2.3 结果讨论

基于以上的分析,可看出本文方法与验证方法具有一定的相似之处,但验证方法存在着一定的缺陷,本文方法对这些缺陷进行了一定的完善。二者相似性主要有以下两点:

1) 二者均是以 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 为基础的解析方法。简单明了,具有理论依据。而这两个参数也是计算碰撞危险最为重要的参数,其占比达到80%。<sup>[11]</sup>关

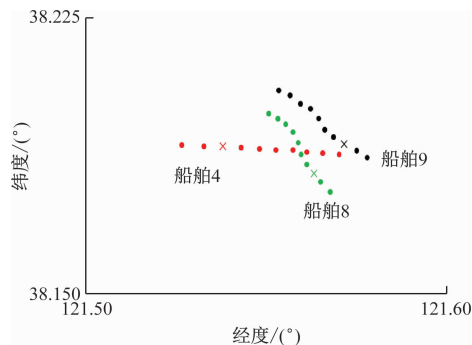


图10 船舶轨迹图

Fig. 10 Ship trajectory map

系强度的计算与本文的验证方法具有一定的相似性,二者都以 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 为基础,对船舶间碰撞危险的空间和时间紧迫性具有较好地描述。

2) 二者都进行了聚类。验证方法在计算时常以聚类为基础,这就排除了影响极小甚至没有影响的船舶。本文方法通过构建复杂网络如图9所示,在一定程度上也是通过船舶间关系对区域内船舶聚类,将10艘船舶划分为两个区域。

本文方法对验证方法的改进主要有以下3点:

1) 验证方法无法避免因 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 为负值导致的计算结果偏大。 $d_{CPA}$ 为负表示目标船舶从本船艏部经过, $t_{CPA}$ 为负表示已经驶过最近会遇点,这两种情况都很大程度上降低了碰撞危险度,因此计算结果出现了较大偏差。本文方法虽然在关系强度的计算上仍然不可避免地使用这两个参数,但使用趋近和相离作为构建船舶间关系的标准,在一定程度上减少这种情况的发生,使结果更准确。

2) 验证方法没有考虑船舶当前情况,这就导致当周围船舶密集时,反而碰撞危险度较低。缺少对船舶当前情况的分析,分析不充分,容易忽略潜在的危险。

3) 在验证方法中,将复杂会遇分解为船舶对,再对各船舶对的碰撞危险求平均值。其中存在两点缺陷:

① 公式中缺少权重值,直接计算平均值意味着各船对本船的影响权重是一样的,这不符合实际情况。因为距离、航向和航速的不同,对本船产生的影响是不一样的。本文方法通过在密度因素的分析中考虑因距离不同和分布情况差异而导致的不同影响,并使用秩序度来反映船舶航向和航速这些交通状态不同而产生的差异,对这一点进行了完善。

② 以船舶对为研究对象,对碰撞危险度进行叠加计算,其科学性有待商榷。将多船会遇情况分解为多个船舶对,忽视了其会遇的复杂情况和多船会

遇的耦合特性。在本文方法中,将多个目标船舶视作一个整体进行分析。在密度因素中通过 RDF 将本船周围的目标船舶都纳入模型中;在冲突因素中通过构建的复杂网络,根据关系强度的不同计算本船的改进度中心性,也具有使用  $d_{CPA}$  和  $t_{CPA}$  参数研究碰撞危险紧迫性的优势,是对前人研究的一个借鉴和改进。以改进度中心性为参数进行碰撞危险量化,是通过复杂网络所得到的一个较为新颖的指标,即通过与他船的关联程度来衡量本船的碰撞危险。

## 2.4 监管与预警应用

碰撞危险度量化模型很重要的研究目的为监管提供决策依据,进行有效的避碰决策服务,因此,本文模型还应结合水域实际情况构建相应的预警机制。以图 9 所示水域为例,该水域处于西北-东南与西南-东北两条交通流交汇区域,交叉会遇的情况较多。根据对该水域一段时间内的检测,其交叉会遇次数高于对遇情况,追越次数极少,可忽略不计。通过对该水域每小时一次的船舶情况记录,计算得到 10 d 内该水域 240 个时刻点的平均船舶数量取整数为 7 艘,船舶平均速度约为 14.3 kn,平均船长约为 200 m。

根据上述基本情况,7 艘船舶中 1 艘设定为本船,因为剩余船舶不可能均处于本船周围,因此取半数即 3 艘船舶位于船舶周围构建场景。选用藤井的船舶领域模型<sup>[15]</sup>,设定极限场景见图 11。在本次的设定场景中,为更贴近实际情况,减小极限情况下的碰撞危险度值以便于研究,将船舶领域范围进行相应的扩大,3 艘船舶均位于本船船舶领域的边界上。计算可得本船的碰撞危险度为 0.894。通常情况下,船舶领域被视为船舶航行过程中不应被侵犯的领域,该场景模拟了相对极限状态下的碰撞危险,为方便计算保留一位小数取整为 0.9。

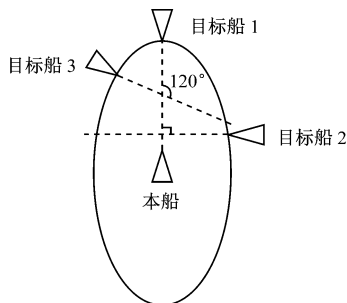


图 11 极限场景

Fig. 11 Extreme scenario

阈值的确定可根据实际应用的的水域进行确定。在本文研究的水域中,选定 0.82 作为另一个阈值。因为,在研究水域 10 d 内 240 个时刻点的 1 642 条

船舶碰撞危险度数据中,约 90% 的数据小于该值,意味着大多数船舶在正常航行过程中,其碰撞危险度低于该值。因此,当碰撞危险度小于该值时,可视作航行较为安全。使用该值作为阈值利于海事管理部门对船舶的碰撞危险进行大致区分,也可以极大减轻工作量。根据极限值和阈值,可设定该水域的预警机制如下:船舶的碰撞危险度低于 0.82 时,碰撞危险较小,海事管理部门可对水域进行正常监控;当船舶的碰撞危险度高于 0.82 低于 0.90 时,海事管理部门应重点关注该船舶,观察其后续航行状态;当重点关注船舶的碰撞危险度持续上升,且超过 0.90 时,海事管理部门应视情况进行必要的避碰干预,以免碰撞事故的发生。船舶 9 的碰撞危险度高于临界值 0.90 如表 2 所示,一方面是因为其周围船舶数量较多,另一方面也说明了当前情况的危险性极大,证明避让分析中该船进行避让行动的合理性和必要性。

## 3 结束语

本文基于 RDF 和复杂网络,从密度因素与冲突因素两个方面入手,构建船舶碰撞危险度模型。将本船周围的船舶分布和交通状况视作一个整体进行分析,改进以船舶对为基础进行计算并叠加的模型方法。为证明模型的有效性,选择一块实际水域进行实例验证并将结果与使用船舶对为基础进行叠加计算的方法进行对比,并进行避让行动分析作为佐证。结果表明:模型所涉及的因素较为全面,可有效地反映和区分船舶的交通情况,所得碰撞危险度较为准确。

本文还有很多需要改进的地方。例如,在秩序度的分析中没有考虑避碰责任。避碰决策以及避碰中的协调也是需要考虑的重要因素。关系强度的计算中只包含  $d_{CPA}$  和  $t_{CPA}$  两个参数,考虑因素并不全面。预警机制的构建中考虑因素较少,仅适用于特定水域,局限性较大。在以后的工作中将对以上问题进行进一步讨论和完善。

## 参 考 文 献

- [1] ZHEN R, RIVEIRO M, JIN Y X. A novel analytic framework of real-time multi-vessel collision risk assessment for maritime traffic surveillance [J]. Ocean Engineering, 2017, 145:492-501.
- [2] 陈传仁,李国定,李福生. 不同水域船舶会遇危险评判阈值[J]. 中国航海,2020,43(4):27-32.

- verified on networked bridge simulators [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020,21(3): 1167-1179.
- [18] CHEN P F, HUANG Y M, PAPANIMITRIOU E, et al. An improved time discretized non-linear velocity obstacle method for multi-ship encounter detection [J]. Ocean Engineering, 2020,196:106718.
- [19] LAZAROWSKA A. Verification of ship's trajectory planning algorithms using real navigational data [J]. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation,2019,13(3):559-564.
- [20] 毕修颖,赵士涛,龚翔,等. 船舶避碰双让理念行动模式研究[J]. 广州航海学院学报, 2023,31(1):1-7.
- BI X Y, ZHAO S T, GONG X, et al. Research on action mode of double ship collision avoidance [J]. Journal of Guangzhou Maritime University,2023,31(1): 1-7. (in Chinese)
- [21] 杨英超. 从碰撞事故中谈“直航船”的行动[J]. 中国海事,2020(7):34-36.
- YANG Y C. Discussion on the action of "stand-on vessel" on the view of collision accident [J]. China Maritime Safety,2020(7): 34-36. (in Chinese)
- [22] 倪生科. 基于规则的船舶智能避碰决策关键技术研究[D]. 大连:大连海事大学,2020.
- NI S K. Study on key technologies for ship intelligent decision making for collision avoidance based on rules [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [23] 毕修颖. 近距离船舶避碰行动模式研究[J]. 中国海事, 2023,10: 24-28.
- BI X Y. Research on the models of ship collision avoidance action at close-range [J]. China Maritime Safety, 2023,10: 24-28. (in Chinese)
- [24] 毕修颖,石云鹏. 直航船采取最有助于避碰行动时机研究[J]. 广州航海学院学报, 2024,32(2): 1-6.
- BI X Y, SHI Y P. Research on the opportunity of action taking best aid to avoid collision by stand-on vessel[J]. Journal of Guangzhou Maritime University, 2024, 32(2): 1-6. (in Chinese)
- [25] 毕修颖,马文耀,贾传荧. 船舶碰撞危险度及避碰决策模型[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2024: 127-132.
- BI X Y, MA W Y, JIA C Y. Ship collision risk index and collision avoidance decision-making models [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2024: 127-132. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第33页)
- CHEN C R, LI G D, LI F S. The risk threshold of ship collision in different waters [J]. China Navigation, 2020,43(4): 27-32. (in Chinese)
- [3] CHENG Z Y, LI Y, WU B. Early warning method and model of inland ship collision risk based on coordinated collision-avoidance actions [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020,2020:1-14.
- [4] 胥文,胡江强,尹建川,等. 基于模糊理论的船舶复合碰撞危险度计算[J]. 舰船科学技术,2017,39(7): 78-84.
- XU W, HU J Q, YIN J C, et al. Composite evaluation of ship collision risk index based on fuzzy theory [J]. Ship Science and Technology, 2017,39(7): 78-84. (in Chinese)
- [5] SZLAPCZYNSKI R, SZLAPCZYNSKA J. A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and collision alert systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021,214:1-21.
- [6] 江行,贾志霏,郑海涛. 基于四元船舶领域和避碰规则的碰撞危险度模型[J]. 船舶工程,2020,42(增刊1):370-375.
- JIANG X, JIA Z P, ZHENG H T. Collision risk model based on quaternion ship domain and preventing collisions regulations [J]. Ship Engineering, 2020,42 (Suppl.1): 370-375. (in Chinese)
- [7] LIU D, WANG X, CAI Y, et al. A novel framework of real-time regional collision risk prediction based on the RNN approach [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020,8(3):224.
- [8] ABEBE M, NOH Y. Developing a ship collision risk index estimation model based on dempster-shafer theory [J]. Applied Ocean Research, 2021, 113: 102735-102746.
- [9] ZHANG W B, GOERLANDT F. An advanced method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data[J]. Ocean Engineering, 2016,124(15):141-156.
- [10] LIU Z H, WU Z L, ZHENG Z Y. Modelling ship density using a molecular dynamics approach [J]. The Journal of Navigation, 2020,73(3):628-645.
- [11] MOU J M. Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data [J]. Ocean Engineering, 2010,37(5):483-490.
- [12] 郭世泽,陆哲明. 复杂网络基础理论[M]. 北京:科学出版社,2012:34-36.
- GUO S Z, LU Z M. Basic theory of complex networks [M]. Beijing: Science Press, 2012: 34-36. (in Chinese)
- [13] LIU Z H, WU Z L, ZHENG Z Y. A cooperative game approach for assessing the collision risk in multi-vessel encountering [J]. Ocean Engineering, 2019,187:1-12.
- [14] LIU Z H, WU Z L, ZHENG Z Y. A novel framework for regional collision risk identification based on AIS data [J]. Applied Ocean Research, 2019,89:261-272.
- [15] FUJII Y, TANAKA K. Traffic capacity [J]. Journal of Navigation,1971,24(4):543-552.