

开阔水域船舶碰撞频率建模及应用*

柴田^{1,2},熊德琪¹,张杏谷²,翁金贤³

(1. 大连海事大学环境科学与工程学院 大连 116026; 2. 集美大学航海学院 厦门 361021;
3. 上海海事大学交通运输学院 上海 201306)

摘要:船舶碰撞频率可用潜在碰撞船舶数与致事故系数乘积表示。以往潜在碰撞船舶数计算模型对船舶动态因素考虑较少,基于交通冲突技术,通过构建动态船舶领域模型、设计碰撞冲突判断标准算法、使用船舶碰撞冲突数代替潜在碰撞船舶数,提出一种开阔水域船舶碰撞频率模型。结果表明,台湾海峡碰撞频率高发区位于牛山岛(24°46.8'N~25°30.0'N)、兄弟屿(23°22.8'N~25°49.2'N)和厦门湾口(24°08.4'N~24°33.6'N)这3个海域。研究海域船舶碰撞频率为5.0687起/年、与目标海域15年商船平均碰撞频率4.8667起/年高度吻合。研究发现交叉冲突是台湾海峡船舶碰撞冲突主要类型,而夜间发生船舶碰撞频率2.7870起/年,高于白天2.2817起/年。该模型为计算船舶碰撞频率提供一种新方法,也为后续研究船舶碰撞定量风险评估提供基础数据。

关键词: 开阔水域;碰撞冲突;船舶碰撞频率;致事故系数;船舶自动识别系统

中图分类号: TH113.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.80

Modeling vessel collision frequency in open seas

Chai Tian^{1,2}, Xiong Deqi¹, Zhang Xinggu², Weng Jinxian³

(1. Environmental Science and Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Navigation Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The frequency of vessel collision is defined as the product of vessel traffic conflicts and causation factors. In the previous studies, the dynamic effects of influencing factors on the ship domain were usually ignored. Using the traffic conflict technique, this study first proposes a dynamic ship domain model and then develops a model to estimate the vessel collision frequency in open seas. Model results show that the most collision risky areas are Niusha Island (24°46.8'N ~ 25°30.0'N), Xiongd Island (23°22.8'N ~ 25°49.2'N) and Xiamen Bay Waters (24°08.4'N ~ 24°33.6'N). The collision frequency of the Taiwan Strait is 5.0687/year, which is very close to the mean value of 4.8667/year based on 15 years' historical accident data. Studies indicate that the crossing collision conflict is the major collision type in the Taiwan Strait. In addition, the vessel collision frequency during the nighttime period is slightly bigger than the daylight period. This work not only provides a new method to estimate collision frequency, but also provides a theoretical basis for the quantitative risk assessment of vessel collision in the future.

Keywords: open sea; collision conflict; vessel collision frequency; causation factors; automatic identification system

0 引 言

近年来随着中国港口货物吞吐量稳步增长,中国沿海航行的船舶数量也在逐步增加。以台湾海峡为例,

2012~2014年3年间每天通过厦门至台中观测门线的船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)船舶数高达413艘次。开阔水域不受航行边界及水深限制,船舶密度和流量的增加,必然导致海上交通事故发生概率的增大,其中船舶碰撞事故又位列各类事故之首^[1]。

为提高海上船舶航行安全,国内外研究人员一直致力于船舶碰撞事故发生规律研究,如通过研究找出碰撞频率高发区域或碰撞事故高发船型等,以便为管理部门制定安全保障措施提供理论参考。

20世纪70年代日本学者 Fujii Y 等人^[2-3]及英国学者 MacDuff T^[4]首次给出了船舶碰撞频率为存在潜在碰撞危险船舶数与致事故系数乘积的概念,即 $F = N \times P$ 。从此,船舶碰撞频率建模及应用成了国内外研究的热点问题。计算船舶碰撞频率的前提和基础是获取潜在碰撞船舶数, Pedersen P^[5]在对 Fujii Y 和 MacDuff T 碰撞频率模型改进后建立了 Pedersen 模型,该模型将碰撞频率模型分为交叉航路和顺直航路两大类型进行研究,认为当会遇两船接近到其碰撞直径 D 时就发生了潜在碰撞事件,并在此基础上再根据研究水域内船舶交通量及其交通分布特征来计算船舶碰撞频率,该研究在欧洲水域得到了广泛的应用^[6-8]。我国学者杨君兰等人^[9]、杜磊等人^[10]、黄纯等人^[11]也使用其原理计算了研究水域船舶碰撞频率。考虑到当两艘船舶在接近碰撞直径时已不可避免地会发生碰撞事故,这样 Pedersen 模型将会低估研究水域的船舶碰撞频率, Montewka J 等人^[12]在 Pedersen 模型的基础上用最小碰撞距离 (minimum distance to collision, MDTC) 来替代碰撞直径 D 建立了船舶碰撞频率模型;该模型在计算碰撞频率时考虑了船舶操纵特性,优化了 Pedersen 模型;但该模型在计算碰撞频率时仍然假定航路中航行船舶轨迹分布具规律性,这与开阔水域船舶自由航行特点不符,另外该模型在会遇局面划分时与国际海上避碰规则差异较大,不能准确反映船舶会遇真实态势。考虑到船舶领域与碰撞直径、最小碰撞距离机理一致,学者们应用船舶领域原理计算潜在船舶碰撞数进而计算船舶碰撞频率。Fowler T 等人^[13]将船舶领域尺度设定 0.5 nmi、Weng J. X. 等人^[14]在评估新加坡海峡船舶碰撞风险时将海峡内船舶领域半径确定为 3 倍船长值,认为会遇中两艘船舶间距小于设定的船舶领域值就会发生潜在碰撞危险事件。船舶领域的引用,考虑了开阔水域船舶自由航行特点,但船舶领域尺度与船舶类型、速度及会遇态势等因素密切相关,用固定值量化船舶领域尺度显得过于简单。

综上,通过动态船舶领域建模构建了开阔水域船舶碰撞频率模型,以期研究海上船舶碰撞频率提供一种新方法,也为后续船舶碰撞定量风险评估提供基础数据。

1 碰撞频率建模

根据文献[2-4]提出的船舶碰撞频率概念, Pedersen P 等人通过定义船舶碰撞直径来确定潜在碰撞船舶数、Mantewka J 等人^[12]给出 MDTC 值来计算潜在碰撞船舶

数,本文使用船舶领域替代碰撞直径,进而计算船舶碰撞频率。研究水域船舶碰撞频率为碰撞冲突事件数与致事故系数间的乘积,即:

$$F_{\text{collision}} = N_{\text{conflict}} P_{\text{causation}} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{collision}}$ 研究水域船舶碰撞频率; N_{conflict} 研究水域碰撞冲突事件总数; $P_{\text{causation}}$ 致事故系数,表示存在碰撞冲突的船舶因避让或操作不当而导致发生碰撞事故的概率或频率。

船舶领域表示的是一艘船舶周围有效区域,该船驾驶员将其他船舶和静止目标保持在该区域之外,并将船舶入侵他船领域范围定义为一次船舶冲突事件(见图1(a));考虑到会遇船舶尺度不一、领域半径不一特点,当把船舶看成质点时,一船入侵到以另一船为圆心、两船领域半径平均值的区域范围内时也视为发生了碰撞冲突事件(见图1(b))。

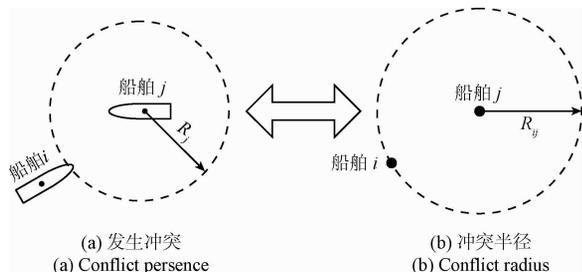


图1 船舶碰撞冲突定义

Fig. 1 Definition of vessel conflict

1.1 动态船舶领域

因船舶领域尺度与驾驶员心理、船舶条件(船长、速度、操纵性能等)以及通航环境(船舶密度、会遇态势、自然环境等)等因素有关,学者们建立了类型各异的船舶领域模型。Fujii Y 等人^[15]建立了椭圆形船舶领域模型, Goodwin E 等人^[16]构建了面积不规则的3个扇形组成的船舶领域模型, Wang N 等人^[17]构建了边界模糊的泛化四元船舶领域模型, Davis P. V. 等人^[18]提出了较为实用的圆形船舶领域模型。为便于计算机模拟和计算^[19-22],在文献[17-18]基础上本文构建了不同类型船舶、不同相对速度下的圆形船舶领域尺度模型,具体如下:

$$R = \begin{cases} R_H = \begin{pmatrix} 5.6250 - 0.6126S_0 - 0.6024S_{B-C} - \\ 0.5610D_{\text{Day}} - 0.4950V_S - 0.2454V_M \end{pmatrix} L \\ R_C = \begin{pmatrix} 4.1090 - 0.0468S_0 - 0.2172S_{B-C} - \\ 0.6882D_{\text{Day}} + 0.6468V_S + 0.2688V_M \end{pmatrix} L \\ R_O = \begin{pmatrix} 5.1504 + 0.1854S_0 + 0.4458S_{B-C} - \\ 0.4128D_{\text{Day}} - 0.4596V_S - 0.2298V_M \end{pmatrix} L \end{cases}$$

基准类型: S_C and V_L

(2)

式中: R_H 、 R_C 和 R_O 分别表示对遇、交叉和追越态势下的船舶领域半径; S_O 船型为油船和化学品船, $S_{B,C}$ 船型为散货船和杂货船, S_C 船型为集装箱船; D_{day} 表示航行环境为白天; L 为本船船长; V 为不同会遇态势下两船相对速度(单位 kn), V_S 、 V_M 、 V_L 分别表示相对速度较小、中等和较大,对遇、交叉和追越态势的具体量化指标分别为:

$$V_H = \{V_S \in (0, 15]; V_M \in (15, 25]; V_L \in (25, +\infty)\} \quad (3)$$

$$V_C = \{V_S \in (0, 8]; V_M \in (8, 15]; V_L \in (15, +\infty)\} \quad (4)$$

$$V_O = \{V_S \in (0, 1]; V_M \in (1, 3]; V_L \in (3, +\infty)\} \quad (5)$$

1.2 碰撞频率建模

船舶发生碰撞冲突事件过程具体如图 2 所示,即船舶 i 在 ΔT 间隔后进入了以船 j 为圆心半径为 R_j 的范围内就发生了船舶碰撞冲突事件。图 2 所示为发生碰撞冲突事件的两船运动态势,船舶 i 和船舶 j 是否发生碰撞冲突用式(6)判断:

$$I(i, j, t) = \begin{cases} 1, & 0 < L_{ij}^t \leq |V_{ij}^t| \cdot \Delta T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$|V_{ij}^t| = \sqrt{(|v_i^t| \cos \alpha_i^t - |v_j^t| \cos \alpha_j^t)^2 + (|v_i^t| \sin \alpha_i^t - |v_j^t| \sin \alpha_j^t)^2} \quad (7)$$

式中: (x_i^t, y_i^t) 为船舶 i 在 t 时刻所处的位置, v_i^t 和 α_i^t 分别为船舶 i 在 t 时刻船舶速度和航向。 (x_j^t, y_j^t) 为船舶 j 在 t 时刻所处的位置, v_j^t 和 α_j^t 分别为船舶 j 在 t 时刻船舶速度和航向。

t 时刻船舶 i 和船舶 j 之间距离 D_{ij}^t 用式(8)计算。

$$D_{ij}^t = \sqrt{(x_i^t - x_j^t)^2 + (y_i^t - y_j^t)^2} \quad (8)$$

$$\sqrt{(x_i^t - x_j^t + |v_i^t| \sin \alpha_i^t \Delta T - |v_j^t| \sin \alpha_j^t \Delta T)^2 + (y_i^t - y_j^t + |v_i^t| \cos \alpha_i^t \Delta T - |v_j^t| \cos \alpha_j^t \Delta T)^2} \leq R_j \quad (10)$$

$$\sqrt{(D_{ij}^t)^2 + |v_{ij}^t \Delta T|^2 + 2\Delta T[(x_i^t - x_j^t)(|v_i^t| \sin \alpha_i^t - |v_j^t| \sin \alpha_j^t) + (y_i^t - y_j^t)(|v_i^t| \cos \alpha_i^t - |v_j^t| \cos \alpha_j^t)]} \leq R_j \quad (11)$$

根据图 2 中船舶 i 和船舶 j 在 t 时刻相对位置所构成的三角形,可得:

$$L_{ij}^t = D_{ij}^t \cos \theta_{ij}^t - \sqrt{R_j^2 - (D_{ij}^t \sin \theta_{ij}^t)^2} \quad (12)$$

式中: L_{ij}^t 为 $t \sim t + \Delta T$ 时间内船舶 i 相对于船舶 j 的航行距离, θ_{ij}^t 为两艘船舶相对速度 V_{ij}^t 与两船位置点连线间的夹角。根据图 2, θ_{ij}^t 可用式(13)计算。

$$\theta_{ij}^t =$$

$$\arccos \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{|v_i^t| \sin \alpha_i^t - |v_j^t| \sin \alpha_j^t}{|v_{ij}^t|} - \frac{x_j^t - x_i^t}{D_{ij}^t} \right)^2 + \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \left(\frac{|v_i^t| \cos \alpha_i^t - |v_j^t| \cos \alpha_j^t}{|v_{ij}^t|} - \frac{y_j^t - y_i^t}{D_{ij}^t} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: ΔT 为时间间隔; $I(i, j, t) = 1$, 表示船舶 i 和船舶 j 在 $t \sim t + \Delta T$ 内将发生碰撞冲突; L_{ij}^t 为在 $t \sim t + \Delta T$ 内两船航行的最大相对距离; $|V_{ij}^t|$ 为在 $t \sim t + \Delta T$ 内船舶 i 与船舶 j 相对速度的绝对值。

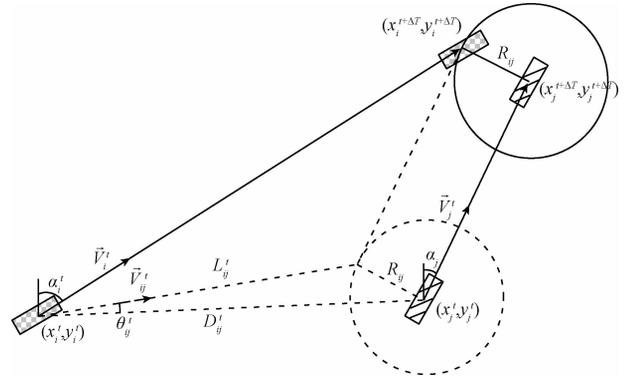


图 2 船舶位置、船舶速度和船舶碰撞冲突间的相互关系

Fig. 2 Relationships among ship positions, ship speeds and ship conflicts

船舶 i 和船舶 j 在 t 时的相对速度 V_{ij}^t 如下:

根据式(6)判断两船是否发生碰撞冲突事件可用式(9)来具体确定。

$$\sqrt{(x_i^{t+\Delta T} - x_j^{t+\Delta T})^2 + (y_i^{t+\Delta T} - y_j^{t+\Delta T})^2} \leq R_j \quad (9)$$

假设船舶 i 和船舶 j 在 $t \sim t + \Delta T$ 时间内,保向保速航行,式(9)等价于式(10)和(11)。

当且仅当满足式(14)条件,在 ΔT 内,船舶 i 和船舶 j 才发生碰撞冲突事件。

$$0 < L_{ij}^t \leq |V_{ij}^t| \cdot \Delta T \quad (14)$$

根据国际海上避碰规则对会遇船舶态势的分类,本文将船舶冲突类型分 3 类,分别为对遇冲突、交叉冲突和追越冲突。

开阔水域航行船舶发生碰撞冲突事件数可通过式(15)计算。

$$N_{\text{conflict}}^m = \sum (I(S_{\text{type},i} = m) \sum_{i=0}^T \sum_{k=1}^{N(i)} I(i, k, t)) + \sum (I(S_{\text{type},j} = m) \sum_{i=0}^T \sum_{k=1}^{N(i)} I(k, j, t)) \quad (15)$$

式中: N_{conflict}^m 为研究水域统计时间段内发生所有类型船

船舶碰撞冲突事件数;当船舶 i 属于 m 类型的船舶时 $I(S_{\text{type},i} = m) = 1$, 否则为 0; 当船舶 j 也属于 m 类型的船舶时 $I(S_{\text{type},j} = m) = 1$, 否则为 0; $N(t)$ 为在 ΔT 内发生碰撞冲突的船舶数。

开阔水域内船舶碰撞频率按式 (16) 计算。

$$F_{\text{collision}} = N_{\text{conflict}}^{\text{head}} \times P_{\text{causation}}^{\text{head}} + N_{\text{conflict}}^{\text{cross}} \times P_{\text{causation}}^{\text{cross}} + N_{\text{conflict}}^{\text{over}} \times P_{\text{causation}}^{\text{over}} \quad (16)$$

式中: $N_{\text{conflict}}^{\text{head}}$ 为对遇碰撞冲突事件数, $p_{\text{causation}}^{\text{head}}$ 为对遇态势下的致事故系数, $N_{\text{conflict}}^{\text{cross}}$ 为交叉碰撞冲突事件数, $p_{\text{causation}}^{\text{cross}}$ 为交叉态势下的致事故系数, $N_{\text{conflict}}^{\text{over}}$ 为追越碰撞冲突事件数, $p_{\text{causation}}^{\text{over}}$ 为追越态势下的致事故系数。

2 应用实例

2.1 实验对象

以台湾海峡水域为研究对象, 具体水域为 A(25°36.0'N/119°54.1'E)、B(25°25.0'N/120°53.1'E)、C(23°02.3'N/118°02.7'E) 和 D(23°24.2'N/117°08.2'E) 4 点连线围成的四边形水域。

2.2 数据收集及处理

AIS 可记录船舶行为, 国际海事组织要求 300 GT 及以上的国际航行船舶、500 GT 及以上的非国际航行船舶以及所有客船必须在 2002 年前安装 AIS 设备。本研究使用的台湾海峡 2014 年 AIS 船舶原始数据来源于东海航海保障中心。2014 年研究区域内共有不同类型 AIS 商船 16785 艘, 船位记录总数约 77795 万条、日均船位

约 213 万个。

AIS 可准确记录船舶动态和静态信息, 由于传输、信息编码等因素, AIS 系统仍存在少量错误记录, 本文使用文献[23-25]提出的方法对异常船位和速度信息进行清洗。船长数据是计算船舶碰撞频率必要条件、类型数据是研究船型风险的基础, 通过船舶国际海事组织 (international maritime organization, IMO) 编号从劳氏船级社在线查询系统获取船长和船舶类型静态信息, 无 IMO 编号的用海上移动服务识别码 (maritime mobile service identify, MMSI) 从船队在线网 (www. hifleet) 、船讯网 (www. shipxy. com) 以及 www. vesseltracker. com 获取船长和船舶类型静态信息。对于既无 IMO 编号又无 MMSI 号的船舶, 使用文献[14]提出的方法来确定船舶尺度, 并将其类型定为杂货船及其他。

2.3 碰撞冲突事件检测算法

根据 2.2 节船舶碰撞冲突原理, 使用 AIS 信息进行编程统计船舶碰撞冲突事件数时规定如下。

规则 1: 船舶 i 入侵到以船舶 j 圆心、 $R_{ij} = (R_i + R_j) / 2$ 为半径的区域内就发生碰撞冲突事件。

规则 2: 对遇冲突指本船和他船真航向差的绝对值在 $[174^\circ, 184^\circ]$ 的冲突。

规则 3: 交叉冲突指本船和他船真航向差的绝对值在 $[67.5^\circ, 174^\circ]$ 或 $(184^\circ, 292.5^\circ]$ 的冲突。

规则 4: 追越冲突指本船和他船真航向差的绝对值在 $[0^\circ, 67.5^\circ]$ 或 $(292.5^\circ, 360^\circ)$ 的冲突。

基于 AIS 信息的碰撞冲突事件检测算法如图 3 所示。

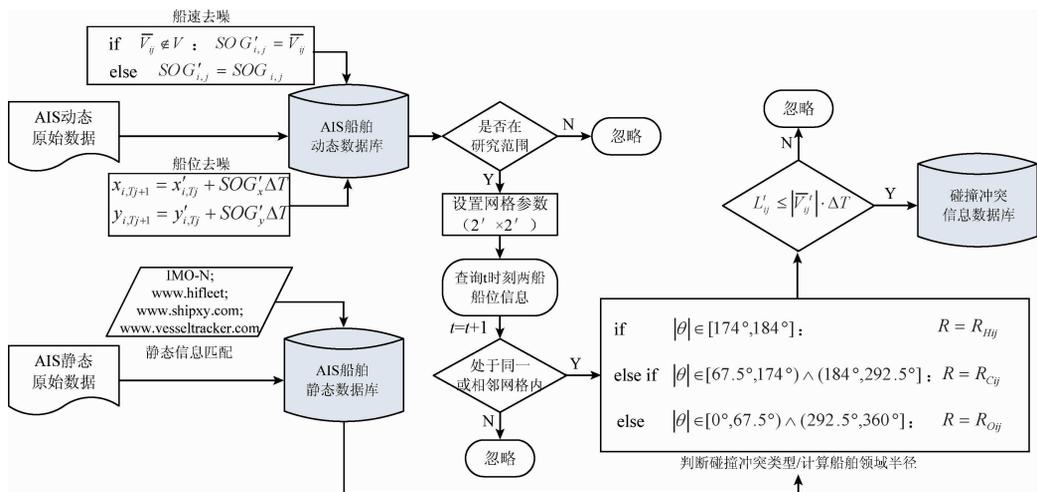


图3 碰撞冲突事件检测算法流程

Fig. 3 Algorithm flowchart of collision conflict candidate detection

从碰撞冲突原理、碰撞频率定义以及碰撞冲突事件检测过程 (见图 3) 可知, 动态船舶领域尺度 R 的大小直接关系到船舶碰撞冲突事件的多少、进而影响研究水域

船舶碰撞频率的高低。当 R 越大研究水域内产生碰撞冲突事件就越多、船舶碰撞频率就越大; 反之研究水域内碰撞频率就越小。

2.4 致事故系数

致事故系数与众多因素密切相关,要获得目标海域准确船舶碰撞频率,必须谨慎选择致事故系数。表1所示为不同文献中使用的致事故系数,考虑到台湾海峡能见度小于1 km 的频率为3%,2014年福建沿海厦门管辖海域实现了船舶交通服务(vessel traffic service, VTS)全覆盖,本文对遇和追越态势下致事故系数取 4.9×10^{-5} ,交叉态势下白天取 6.83×10^{-5} 、夜间取 8.48×10^{-5} 。

表1 致事故系数
Table 1 Causation factors

类型	致事故系数	备注
交叉态势	9.5×10^{-5}	多佛海峡,有 TSS ^[5]
	1.3×10^{-4}	日本海峡 ^[26]
	8.48×10^{-5}	能见度良好 ^[14]
	6.83×10^{-5}	能见度良好,有 VTS ^[14]
对遇/追越态势	4.9×10^{-5}	日本海峡 ^[26]

注:通航分隔带(traffic separation scheme, TSS)

2.5 计算结果

2.5.1 船舶碰撞频率

根据上文提出的计算船舶碰撞冲突事件步骤,再结合经清洗处理后的研究区域2014年AIS船舶数据信息,计算得到目标海域2014年全年共发生船舶碰撞冲突事件81 336起、日均222.8起,卷入碰撞冲突船舶的类型及碰撞冲突事件数月分布具体如表2和3所示。

根据船舶碰撞频率定义计算得目标海域船舶年碰撞频率5.068 7起/年,其中发生对遇碰撞的频率为1.342 7起/年、交叉碰撞的频率为3.009 8起/年、追越碰撞的频率为0.716 2起/年,具体如表4所示。

表2 2014年台湾海峡卷入碰撞冲突事件的不同类型船舶数

Table 2 Numbers of collision conflicts in the Taiwan Strait in 2014

船型	会遇态势					
	对遇		交叉		追越	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
集装箱	2 562	3 855	8 091	9 029	1 865	2 156
客滚船	132	199	333	470	120	138
油船	403	573	1 107	1 008	282	325
化学品船	449	647	1 118	1 060	398	439
散货船	15 928	19 896	21 332	20 854	8 570	8 981
杂货船	4 610	5 550	7 335	6 899	3 011	2 947
合计	24 084	30 720	39 316	39 320	14 246	14 986
总计	54 804		71 494		29 232	

表3 2014年台湾海峡水域船舶碰撞冲突事件数月分布

Table 3 The monthly distribution of collision conflicts in the Taiwan Strait in 2014

态势	1月	2月	3月	4月	5月	6月
对遇	2 128	1 782	2 285	2 523	2 530	2 323
交叉	3 254	2 668	3 194	3 138	3 346	3 035
追越	1 479	1 023	1 180	1 184	1 147	1 126
合计	6 861	5 473	6 659	6 845	7 023	6 484
态势	7月	8月	9月	10月	11月	12月
对遇	2 370	2 478	2 354	2 262	2 169	2 198
交叉	3 186	3 454	3 346	3 644	3 532	3 521
追越	1 202	1 162	1 175	1 318	1 260	1 360
合计	6 758	7 094	6 875	7 224	6 961	7 079

表4 台湾海峡船舶碰撞频率

Table 4 Vessel collision frequency in the Taiwan Strait

类型	时间	致事故系数	冲突数	频率(起/年)
对遇	白天	4.9×10^{-5}	12 042	0.590 1
	夜间	4.9×10^{-5}	15 360	0.752 6
交叉	白天	6.83×10^{-5}	19 658	1.342 6
	夜间	8.48×10^{-5}	19 660	1.667 2
追越	白天	4.9×10^{-5}	7 123	0.349 0
	夜间	4.9×10^{-5}	7 493	0.367 2
总计			81 336	5.068 7

2.5.2 碰撞冲突时空分布

根据碰撞冲突船位信息绘制了研究水域船舶冲突空间分布,具体如图4和5所示。碰撞冲突船位空间分布特点如下:

- 1)对遇、交叉和追越碰撞冲突事件都一致地密集分布在海坛海峡东南东甲岛至牛山岛连线内外两侧区域(纬度范围在 $24^{\circ}46.8'N \sim 25^{\circ}30.0'N$),碰撞冲突事件时空分布呈现明显内外航路脉络。3种碰撞冲突事件一致密集在该区的主要原因是首先牛山岛东北濒临中国东海、外海风大浪高致使大中型船舶靠近牛山岛航行,使船舶交通密度增大。其次东甲岛与牛山岛连线内侧航道突然变窄、船舶交通密集、船舶间距变小。再次该区域是台湾海峡北口交汇区,也是进出海坛海峡、闽江口水域的关键交通枢纽区,众多船舶在此集聚,必然会产生碰撞冲突。
- 2)交叉和追越碰撞冲突在湄洲湾乌丘屿附近具有一

致的密集性(纬度范围在 $25^{\circ}01.2'N \sim 25^{\circ}07.2'N$),这与乌丘岛西侧水域航路窄、船流大,航经台湾海峡的船舶常在乌丘岛附近转向以及进出湄洲湾水域船舶在此转向关系密切。

3) 厦门湾口附近是发生船舶交叉碰撞冲突事件的集汇区(纬度范围在 $24^{\circ}10.8'N \sim 24^{\circ}15.6'N$),厦门港目前仍然是海峡西岸福建沿海吞吐量第一大港、各类船舶交通流量大,进出厦门港的船舶与海峡内北上南下船舶在湾口附近水域交汇、产生交叉碰撞冲突的可能性大。

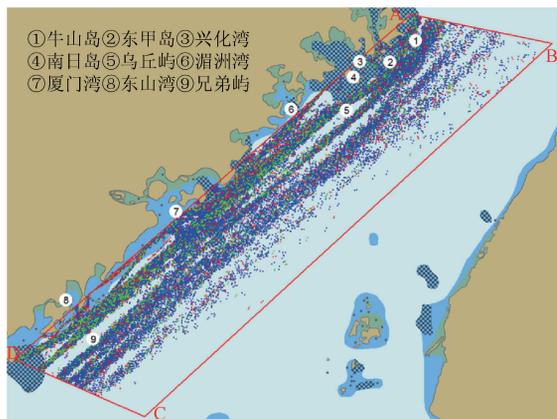


图4 研究水域碰撞冲突船位空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of vessel collision conflict position in the Taiwan Strait

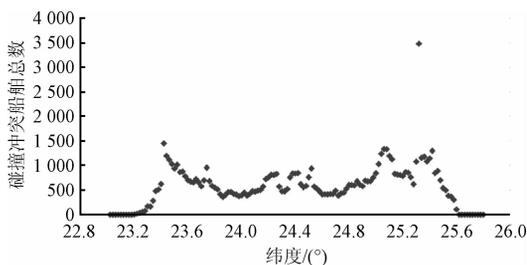


图5 台湾海峡船舶碰撞冲突事件数空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of vessel collision conflict numbers in the Taiwan Strait

3 结论

文章构建了开阔水域船舶碰撞频率模型,并使用2014年AIS船舶数据对台湾海峡水域进行工程试验,计算结果表明台湾海峡水域发生船舶碰撞频率为年5.0687起/年、与2000~2014年15年间目标海域实际发生商船碰撞频率的4.8667次/年吻合度高。白天发生船舶

碰撞频率比夜间低。从冲突类型来看,交叉冲突事件最多达39318起/年、占48.34%,追越冲突事件数最少14616起/年、占17.97%,交叉冲突事件是追越冲突事件的2.7倍,可见交叉冲突是台湾海峡内彼此互相关注的主要类型。卷入碰撞冲突的船型主要是散货船、杂货船和集装箱船。从碰撞冲突事件空间分布来看,海峡内冲突事件汇集区主要集中在纬度 $24^{\circ}46.8'N \sim 25^{\circ}30.0'N$ 的牛山岛附近海域、 $23^{\circ}22.8'N \sim 25^{\circ}49.2'N$ 的兄弟屿附近海域以及 $24^{\circ}08.4'N \sim 24^{\circ}33.6'N$ 的厦门湾口附近海区的3个区域。

工程上将风险定义为不希望事件发生的概率或频率与事故后果的乘积。船舶碰撞频率建模是船舶碰撞风险评估的前提和基础,其精度会影响船舶碰撞风险程度的量化。以后可结合船舶碰撞事故后果进行定量风险评估的深入研究,为船舶碰撞风险承受水平的决策和标准制定提供依据^[27-29]。

参考文献

- [1] EMRE A. A marine accident analyzing model to evaluate potential operational causes in cargo ships [J]. Safety Science, 2017, 92(2): 17-25.
- [2] FUJII Y, YAMANOUCI H, MIZUKI N. On the fundamental of marine traffic control. Part I: Probability of collision and evasive actions [J]. Electronic Navigation Research Institute Papers, 1970, 2(1): 1-16.
- [3] FUJII Y, YAMANOUCI H, MIZUKI N. Some factors affecting the frequency of accidents in marine traffic. II: The probability of stranding, III: The effect of darkness on the probability of stranding [J]. Journal of Navigation, 1974, 27(2): 239-247.
- [4] MACDUFF T. The probability of vessel collision [J]. Ocean Industry, 1974, 9(1): 144-148.
- [5] PEDERSEN P. Collision and grounding mechanics [C]. West European Confederation of Maritime Technology Societies (WEMT), 1995: 125-157.
- [6] PEDERSEN P. Collision risk for fixed offshore structures close to high-density shipping lanes [J]. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2002, 216(1): 29-44.
- [7] KUJALA P, HANNIMEN M, AROLA T, et al. Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(8): 1349-1357.
- [8] MERRICK JRW, VAN DORP JR, HARRALD J, et al. A systems approach to managing oil transportation risk in

- prince William sound [J]. *Systems Engineering*, 2000, 3(3): 128-142.
- [9] 杨君兰,文元桥,黄立文. 交汇水域船舶冲突概率计算模型研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(2): 78-82.
YANG J L, WEN Y Q, HUANG L W. Research on ship conflict in intersection waterway [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(2): 78-82.
- [10] 杜磊,文元桥,肖长诗,等. 自由航行海域船舶碰撞概率计算 [J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(1): 53-59.
DU L, WEN Y Q, XIAO CH SH, et al. Collision probability calculation for ship sailing in free navigational sea area [J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(1): 53-59.
- [11] 黄纯,陈国伟,柴田. IWRAP MK II 软件在长江口水域船舶碰撞和搁浅风险评估中的应用 [J]. *中国航海*, 2017, 40(1): 99-103.
HUANG CH, CHEN G W, CHAI T. IWRAP MK II software application of ship navigation risk assessment in the yangtze river estuary area [J]. *Navigation of China*, 2017, 40(1): 99-103.
- [12] MONTEWKA J, HINZ T, KUJALA P, et al. Probability modeling of vessel collisions [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, 95(5): 573-589.
- [13] FOWLER T. G. & SORGARD, E. Modeling ship transportation risk [J]. *Risk Analysis*, 2000, 20(2): 225-244.
- [14] WENG J X, MENG Q, QU X B. Vessel collision frequency estimation in the singapore strait [J]. *Journal of Navigation*, 2012, 65(1): 207-221.
- [15] FUJII Y, TANAKA K. Traffic capacity [J]. *Journal of Navigation*, 1971, 24(4): 543-552.
- [16] GOODWIN E. A statistical study of ship domains [J]. *Journal of Navigation*, 1975, 28(3): 328-344.
- [17] WANG N. An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain [J]. *Journal of Navigation*, 2010, 63(4): 733-749.
- [18] 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.
- [19] 王慧丽,杨海忠. 基于系统辨识的车辆动力学建模方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6): 1275-1282.
WANG H L, YANG H ZH. Vehicle dynamics modeling method based on system identification [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(6): 1275-1282.
- [20] 赵文杰,吕猛. 基于多 LS-SVM 集成模型的锅炉 NO_x 排放量建模 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(7): 1037-1044.
ZHAO W J, LV M. NO_x emission modeling of coal-fired boiler based on multi LS-SVM ensemble model [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(7): 1045-1051.
- [21] 余发山,孟宪伦,崔立志. 基于模糊 PID 迭代学习的隧道通风控制算法研究 [J]. *电子测量技术*, 2017, 40(4): 5-8.
YU F SH, MENG X L, CUI L ZH. Research on fuzzy PID ILC in tunnel ventilation [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, 40(4): 5-8.
- [22] 蔡娟,李东新. 基于优化 k 均值建模的运动目标检测算法 [J]. *国外电子测量技术*, 2016, 35(12): 20-23.
CAI J, LI D X. Moving target detection algorithm based on k-means optimized modeling [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 35(12): 20-23.
- [23] 周世波,徐维祥. 一种基于偏离的局部离群点检测算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(10): 2293-2298.
ZHOU SH B, XU W X. Deviation-based local outlier detection algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(10): 2293-2298.
- [24] QU X B, MENG Q, LI S Y. Ship collision risk assessment for the Singapore strait [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43(6): 2030-2036.
- [25] DORP J R V, MERRICK J R W. On a risk management analysis of oil spill risk using maritime transportation system simulation [J]. *Annals of Operations Research*, 2009, 187(1): 249-277.
- [26] FUYII Y, MIZUKI N. Design of VTS systems for water with bridges [C]. *Proceedings of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis*, 1998: 177-190.
- [27] 林彬,安东,和麟. 基于马氏距离与组距估计的复杂系统健康评估 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(9): 2022-2026.
LIN B, SONG D, HE L. Complex system health assessment based on Mahalanobis distance and bin-width estimation technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(9): 2022-2026.
- [28] 朱伦伦,熊九龙,谢金哲,等. 基于蒙特卡罗仿真的校

准结论风险分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1045-1051.

ZHU L L, XIONG J L, XIE J ZH, et al. Calibration conclusion risk analysis based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 1045-1051.

- [29] INANLOO B, TANSEL B, SHAMS K, et al. A decision aid GIS-based risk assessment and vulnerability analysis approach for transportation and pipeline networks [J]. Safety Science, 2016, 84(4): 57-66.

作者简介



柴田, 2003 年于集美大学获得学士学位, 2006 年于大连海事大学获得硕士学位, 现为大连海事大学在读博士研究生、集美大学副教授, 主要研究方向为海上交通安全与防污染。

E-mail: chaitian2006@163.com

Chai Tian received his B. Sc. degree from Jimei University in 2003, and received his M. Sc. degree from Dalian Maritime University in 2006. Now he is a Ph. D. candidate in Dalian Maritime University and also an associate professor in Jimei University. His main research interests include maritime traffic safety and pollution prevention.



熊德琪(通讯作者), 分别在 1991 年和 1994 年于大连理工大学获得硕士学位和博士学位, 现为大连海事大学教授、博士生导师, 主要研究方向为海洋环境规划与管理。

E-mail: xiongdq@dlmu.edu.cn

Xiong Deqi (Corresponding author)

received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Dalian University of Technology in 1991 and 1994, respectively. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Dalian Maritime University. His main research interest is maritime environmental planning and management.



翁金贤, 2006 年于中山大学获得学士学位, 2011 年于新加坡国立大学获得博士学位, 现为上海海事大学教授、博士生导师, 主要研究方向为港航交通事故风险评价与管理。

E-mail: jxweng@shmtu.edu.cn

Weng Jinxian received his B. Sc. degree from SUN YAT-SEN University in 2006, and received his Ph. D. degree from National University of Singapore in 2011. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Shanghai Maritime University. His main research interest is risk assessment and management of traffic accidents in port and waterway.