

基于船舶碰撞频率测算的青岛航段航标效能评估

项 鹭¹, 张其毅², 邵进兴¹, 柴 田³, 熊振南³

(1. 厦门航标处, 福建 厦门 361012; 2. 福州航标处, 福建 福州 350005;
3. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究厦门港主航道青岛航段航标配布优化对通航安全的影响, 以近2年AIS数据为基础, 采用IWRAP (IALA waterway risk assessment program) MK II软件, 定量评估青岛航段船舶碰撞风险。评估结果显示, 航标优化后的目标航段2016年追越和对遇船舶碰撞频率分别为0.1033起/年和0.2417起/年, 比2015年的0.1221起/年和0.3384起/年分别下降了15.4%和28.6%。研究表明, IWRAP MK II软件不但可用于评估航道通航风险, 还可以评估优化后的航标效能, 为航标效能评估提供一种新方法。

[关键词] 航标效能; 船舶碰撞频率; IWRAP; 青岛航段; 配布优化

[中图分类号] U 676.1

Efficiency Assessment on Navigation Aids of Qingyu Channel Based on Ship Collision Frequency

XIANG Lu¹, ZHANG Qiyi², SHAO Jinxing¹, CHAI Tian³, XIONG Zhennan³

(1. Xiamen Aids to Navigation Department, Xiamen 361012, China; 2. Fuzhou Aids to Navigation Department, Fuzhou 350005, China; 3. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to better study the influence on ship safety from the optimization of navigation aids distribution in Qingyu channel of Xiamen Port, the IWRAP MK II software is used to evaluate the risk of ship collision by using AIS data. According to the results of the assessment, after the optimization the collision frequencies of overtaking and head-on situations in 2016 are 0.1033 per year and 0.2417 per year respectively, which are 15.4% and 28.6% lower than the 0.1221 per year and 0.3384 per year of 2015. The results show that the IWRAP MK II software can be used not only to evaluate the navigation risk but also to evaluate the efficiency of optimized navigation aids, which provides a new method for the evaluation of the latter.

Keywords: navigation aids efficiency assessment; ship collision frequency; IWRAP (IALA waterway risk assessment program); Qingyu channel; distribution optimization

0 引言

厦门港是我国沿海运输体系的重要枢纽, 随着腹地经济的发展, 进出厦门港的船舶数量逐年增加, 2015—2017年通过青岛断面观测门线的AIS (Automatic Identification System, 船舶自动识别系统) 船舶数高达200艘次/日; 同时船舶大型化趋势也较明显, 日均进出厦门湾水域的船长200 m以上船

[收稿日期] 2018-03-07

[修回日期] 2018-06-18

[基金项目] 福建省教育厅项目 (JA15269); 福建省自然科学基金项目 (2016J01243)

[作者简介] 项鹭 (1961—), 男, 教授级高级工程师, 从事航标工程研究。通信作者: 熊振南 (1965—), 男, 教授, 从事海上交通安全研究, E-mail: 1965znxiong@163.com。

数量也从 2015 年的 15.4 艘次增加到 2017 年的 19.9 艘次。上述因素为进出港船舶交通流组织增加了难度,同时也增大了航行风险。如何科学地评价厦门湾水域船舶航行风险,并采取相应的风险减缓措施,已成为涉海部门关注的重点问题。

国际航标协会 (IALA) 较早认识到风险管理的重要性,提出了航标风险管理指南,将质量保证和质量管理,风险评估和风险管理,服务水平列为航标服务的三个重要问题^[1]。根据成员国提出的“最小安全距离”(MSD)模型,IALA 开发了通用水路风险评估模型,该评估模型即为最早的 IWRAP 风险模型,通过交通流量、交通流分布特征函数以及船舶碰撞几何数计算船舶碰撞频率^[2]。该模型在欧洲水域得到广泛地应用^[3]。杜磊^[4]和黄纯等^[5]分别用该模型的原理研究了深圳水域和长江口水域船舶航行风险,研究表明,IWRAP 对于评估沿海水域船舶碰撞和搁浅风险具有良好的适用性。借鉴 IWRAP 风险模型的原理,柴田等^[6]建立了开阔水域船舶碰撞风险频率模型,为计算开阔水域自由航行的船舶碰撞风险提供了一种新方法。本文目标海域是厦门港主航道青屿航段,交通流轨迹分布具有一定规律和特征,适合使用 IWRAP 评估船舶航行风险。

1 船舶碰撞频率数学建模

IWRAP (IALA waterway risk assessment program) 建立了船舶碰撞和搁浅概率模型^[3,7],该模型碰撞频率为 λ_{Col} (或搁浅频率 λ_{Grnd})。

$$\lambda_{Col} = N_G \times P_C \tag{1}$$

其中: N_G 为碰撞或搁浅船只的几何数; P_C 为事故系数。

IWRAP MK II 软件在计算船舶碰撞事故频率时,将碰撞分成 2 类 5 小种^[1],即,发生在直线航段上的碰撞(追越和对遇)和发生在交叉航线上的碰撞(交叉、汇合和弯道碰撞)。图 1 为船舶对遇碰撞几何数预测模型,其中: μ 、 σ 为分布参数。

本研究目标海域为厦门港主航道青屿航段,计算青屿航段内对遇和追越碰撞几何数,其中对遇碰撞几何数如式 (2) 所示:

$$N_G^{head-on} = L_w \sum_{i,j} P_{G_{i,j}}^{head-on} (V_{ij} / (V_i^{(1)} V_j^{(2)})) / (Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}) \tag{2}$$

式中: L_w 为航段长度 (m); $Q_i^{(1)}$ 是航道 1 中第 i 类船舶数量 (艘); $Q_j^{(2)}$ 是航道 2 中第 j 类船舶数量 (艘); $V_{ij} = V_i^{(1)} + V_j^{(2)}$ 是船舶的相对速度 (m/s); $P_G^{head-on}$ 是对遇条件下发生船舶碰撞事故概率,

$$P_G^{head-on} = P[y_i^{(1)} + y_j^{(2)} < (B_i^{(1)} + B_j^{(2)})/2] - P[y_i^{(1)} + y_j^{(2)} < - (B_i^{(1)} + B_j^{(2)})/2] = \int_{-\infty - y_i - \bar{B}}^{\infty - y_i + \bar{B}} \int_{-\infty - y_j - \bar{B}}^{\infty - y_j + \bar{B}} f^{(1)}(y_i) f^{(2)}(y_j) dy_i dy_j \tag{3}$$

式中: y_i 为航道 1 中第 i 类船舶航行轨迹与航道中线的垂直距离; y_j 为航道 2 中第 j 类船舶航行轨迹与航道中线的垂直距离; $f_i^{(1)}(y_i)$ 为航道 1 中第 i 类船舶航行轨迹与航道中线垂直距离的分布函数; $f_j^{(2)}(y_j)$ 为航道 2 中第 j 类船舶航行轨迹与航道中线垂直距离的分布函数; $B_i^{(1)}$ 为第 i 类船舶宽度 (m); $B_j^{(2)}$ 为第 j 类船舶宽度 (m); $\bar{B} = (B_i^{(1)} + B_j^{(2)})/2$ 为船舶宽度平均值。

若航道上交通 $f_i^{(1)}(y)$ 和 $f_j^{(2)}(y)$ 为典型正态分布,其分布参数分别为 (μ_i, σ_i) 和 (μ_j, σ_j) ,则船舶发生碰撞事故概率可简化为:

$$P_{G_{i,j}}^{head-on} = \Phi[(B_{ij} - \mu_{ij})/\sigma_{ij}] - \Phi[-(B_{ij} + \mu_{ij})/\sigma_{ij}] \tag{4}$$

其中: $\mu_{ij} = \mu_i^{(1)} + \mu_j^{(2)}$ 。根据式 (4) 和图 1 可以得:直线航段两艘相遇船舶碰撞概率取决于沿直线航行的船舶轨迹分布值 μ , μ 越大,碰撞概率越小。

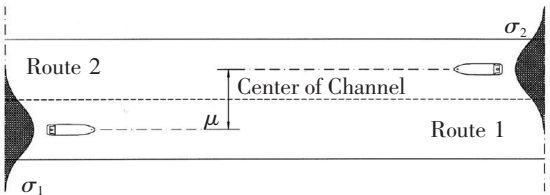


图 1 双向航道中船舶对遇碰撞几何数预测模型
Fig.1 Estimation model of the potential number of ship collision in two way route

在直线上发生追越碰撞事故的几何数同样按公式（2）计算，此时相对速度 $V_{ij} = V_i^{(1)} - V_j^{(2)}$ ， $V_{ij} > 0$ ，追越情况下船舶碰撞概率按式（5）计算：

$$P_{G_{ij}}^{overtaking} = P[y_i^{(1)} - y_j^{(2)} < (B_i^{(1)} + B_j^{(2)})/2] - P[y_i^{(1)} - y_j^{(2)} < -(B_i^{(1)} + B_j^{(2)})/2]。 \tag{5}$$

若追越下 $f_i^{(1)}(y)$ 和 $f_j^{(2)}(y)$ 为典型正态分布，发生追越碰撞事故概率可根据式（4）计算，其中 $\mu_{ij} = \mu_i^{(1)} - \mu_j^{(2)}$ 。

致事故系数受通航环境、人为因素和船机性能等因素影响，不同海域使用的致事故系数相异，IWRAP 采用 IALA 推荐的致事故系数，见表 1^[2]。

表 1 IALA 推荐默认致事故系数
Tab.1 Default values of IALA settings

事故类型 Accident type	P_c	事故类型 Accident type	P_c	事故类型 Accident type	P_c
对遇碰撞 Head-on collision	5×10^{-5}	追越碰撞 Collision in overtaking	1.1×10^{-4}	交叉碰撞 Collision in crossing	1.3×10^{-4}
弯道碰撞 Bend collision	1.3×10^{-4}	汇合碰撞 Merging collision	1.3×10^{-4}	搁浅事故 Grounding	1.6×10^{-4}

2 厦门港水域测试情况

本文使用 IWRAP MK II 软件对不同航标配布方案下的厦门港主航道青屿航段船舶碰撞频率进行定量计算，评估航标配布效能。

2.1 厦门港附近水域地形数据建模

根据 IWRAP MK II 软件自身提供的制图工具，结合 Google 地图和中国海事局最新出版的海图，本文构建了包含岛屿、浅滩、暗礁和陆地在内的目标水域地形图，见图 2。

为保障进出厦门水域船舶的安全，2015 年底厦门航标处对青屿航段航标进行了调整：主航道新设 13 号灯浮，位置 $24^{\circ}20'55.3''N$ ， $118^{\circ}09'56.4''E$ ，右侧标；调整 16 号灯浮至 $24^{\circ}21'59.9''N$ ， $118^{\circ}07'59.3''E$ 。调整后青屿航段航标配布见图 3。青屿航段相关浮标调整后，该航段航标基本采取对标布设方式。本文使用航标配布前后的 2015 年和 2016 年青屿航段船舶 AIS 数据，比较航标调整前后船舶航行轨迹变化情况。

2.2 航段交通流分布建模

将厦门港青屿附近水域的岛屿、暗礁、陆地等都选定后，设置若干个交通流统计截面，每航段都必须输入交通横向分布特征值。通过 AIS 交通流统计截面，获取船舶轨迹分布特征值，若交通流分布呈典型正态分布，



图 2 厦门港主航道青屿附近水域地形建模图
Fig.2 Illustration of model for Qingyu island water



图 3 厦门港主航道青屿航段航标布置图
Fig.3 Distribution of aids to navigation in Qingyu Channel

则易获取其均值和方差这两个特征参数；若交通流不呈现标准正态分布，则需要对其分布态势进行拟合。IWRAP MKII 提供 6 种船舶轨迹数学分布模型，为确定驶过青岛航道截面的船舶轨迹分布模型，本文在利用航经观测门线的 AIS 船舶交通流数据基础上，通过数理统计方法拟合航经统计门线的船舶轨迹分布特征，青岛航段进港 AIS 船舶交通流特征分布情况见图 4。

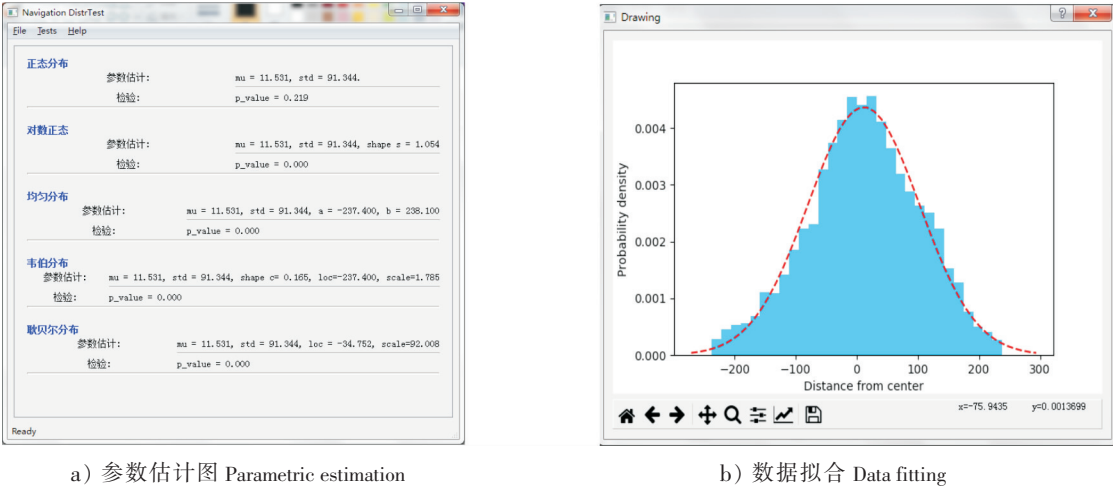


图 4 厦门港航段交通分布参数估计及数据拟合图

Fig.4 Illustration of parametric estimation and mathematical fitting model

在 IWRAP 提供的 14 种船型基础上，参考文献 [4]，再结合青岛航段实际 AIS 船舶类型特点，将航经青岛航道截面的船舶分为集装箱船、客/滚船、油船、化学品船、散货船、杂货船及其他 6 类。根据分类对青岛航段截面 AIS 船舶数据进行采集分类，形成本次定量计算的基本船舶尺度参数，使用 IWRAP 软件统计功能，获取的船舶种类信息见图 5。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	船长	集装箱船	客/滚船	油船	化学品船	散货船	杂货船及其他船	
2	0-25	0	0	0	0	0	0	
3	25-50	0	0	0	0	0	1958	
4	50-75	1	0	15	0	116	186	
5	75-100	115	1	19	18	616	735	
6	100-125	26	1	4	23	533	622	
7	125-150	300	22	5	16	243	480	
8	150-175	324	3	1	7	142	168	
9	175-200	256	105	9	11	276	43	
10	200-225	216	11	0	0	33	24	
11	225-250	136	8	4	0	90	2	
12	250-275	407	1	0	0	34	0	
13	275-300	347	4	1	0	41	0	
14	300-325	98	4	0	0	6	0	
15	325-350	336	0	0	0	0	0	
16	350-375	356	0	0	0	0	0	
17	375-400	25	0	0	0	0	0	
18	>400	14	0	0	0	0	0	

图 5 青岛航段船舶数量图

Fig.5 Classification of ships inQingyu Channel

2.3 评估结果分析

在地形、航道以及交通流分布相关信息建模完成后，对青岛航段 AIS 船舶发生对遇和追越碰撞频率进行计算。其中对遇是指本船和他船真航向差的绝对值在[170°,190°]间的会遇状态，追越是指本船和他船真航向差的绝对值在[0°,10°)或(350°,360°)间的会遇状态。

将解析后的 AIS 数据导入计算软件，计算结果见图 6，图 7。图 6 计算结果显示，2015 年青屿航段航标未做调整时，青岛航段发生潜在追越和对遇船舶碰撞事件频率分别为 0.1221 次/年和 0.3384 次/年。图 7 结果显示，2016 年青屿航段采用对标布设配布优化后，该航段内发生潜在追越和对遇船舶碰撞事件频率分别为 0.1033 次/年和 0.2417 次/年。

青屿航段航标采用对标布设配布优化后，航标清晰地标识了航道边线，为船舶把定航向和把控船位提供了有利条件，增加了航行安全，因此使追越和对遇碰撞事故频率分别下降了 15.4% 和 28.6%，可见航标配布优化后得到了较显著的助航效能。

	qingyu2015	Unit
Drifting Allision	---	Incidents/Year
Total Allisions	---	Incidents/Year
Overtaking	0.1221	Incidents/Year
HeadOn	0.3384	Incidents/Year
Crossing	---	Incidents/Year

图 6 测试水域常规布标分析结果

Fig.6 Result of the general analysis intest water

	qingyu2016	Unit
Drifting Allision	---	Incidents/Year
Total Allisions	---	Incidents/Year
Overtaking	0.1033	Incidents/Year
HeadOn	0.2417	Incidents/Year
Crossing	---	Incidents/Year

图 7 测试水域对标布设分析结果

Fig.7 Result of the improved analysis intest water

3 结论

使用 2015 年和 2016 年船舶 AIS 数据分别对航标调整前后的厦门港主航道青屿航段对遇和追越船舶碰撞频率进行定量计算，结果显示青屿航段航标采用对标布设配布优化后，该航段船舶碰撞频率明显减小，配布优化后的航标提高了青屿航段航标助航效能，降低了船舶碰撞风险。以船舶 AIS 大数据为基础，使用 IWRAP MK II 软件评估港口受限水域船舶通航风险，可为航道航标效能评估提供一种新方法，为航标管理提供一种新手段。

[参 考 文 献]

[1] IALA. IALA Recommendation O-134 on the IALA Risk Management Tool for Ports and Restricted Waterways [EB/OL]. (2009-05-02)[2018-08-06]. <https://imo.armsa.gov.au/iala-aism/iala-publications/recommendations/O-134.pdf>.

[2] FUYII Y, MIZUKI N. Design of VTS systems for water with bridges [C] //proceedings of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis. Copehagen, Denmark: [s. n.],1998:177-190.

[3] JAKUB MONTEWKA, FLORIS GOERLANDT, PENTTI KUJALA. Determination of collision criteria and causation factors appropriate to a model for estimating the probability of maritime accidents [J]. Ocean Engineering, 2012, 40(1): 50-61.

[4] 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.

[5] 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): 79-82.

[6] 柴田,熊德琪,张杏谷,等. 开阔水域船舶碰撞频率建模及应用 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2335-2342.

[7] JAKUB MONTEWKA, HINZ T, KUJALA P, et al. Probability modeling of vessel collisions [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(5): 573-589

[8] TIAN CHAI, JINXIAN WENG, DEQI XIONG. Development of a quantitative risk assessment model for ship collisions in fairways [J]. Safety Science, 2017(91): 71-83.

[9] 杨晓东,蒋卫东. 上海港及附近水域船舶碰撞事故分析及对策 [J]. 中国航海, 2008, 31(2): 148-151.

[10] 吴春杰,胡甚平,陈锦标. 吴淞口水域船舶交通风险的模拟分析与评估 [J]. 中国航海, 2009, 32(2): 62-67.

[11] 孙超,夏大荣,张锦鹏,等. 外高桥水域通航环境风险评价 [J]. 中国航海, 2012, 35(2): 68-71.

[12] 陈智辉,熊振南. 海上石油开采平台对通航安全影响的综合评判 [J]. 中国航海, 2013, 36(4): 45-47.

[13] 张金奋,严新平,陈先桥,等. 基于概率分布的长江干线水上交通事故分析 [J]. 中国航海, 2012, 35(3): 81-84.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)