

# 航道适航性分析模型设计与应用

杨必成, 翁佳静, 王山东

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100)

**摘要:** 为完善航运体系的安全性建设, 需构建航道适航性分析模型并将其应用于船舶航行途中, 旨在评估航道路线规划的合理性, 为船舶的安全航行提供自动化、智能化的引导。由于以往的二维航道数据难以满足空间分析的需求, 将由 AIS 航迹线数据与船舶型号参数所构建的三维航迹带、三维水下地形及三维航道要素模型作空间运算求得船舶可通航区域。在此基础上引入船舶碰撞危险度参数作为预警与决策分析的依据, 构建适航性分析模型。以京杭运河的三维航道为研究对象进行模拟试验, 验证模型的可靠性及稳定性。

**关键词:** 适航性; 三维航迹带; 碰撞危险度参数

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0147-07

## Design and application of seaworthiness analysis model for waterways

YANG Bi-cheng, WENG Jia-jing, WANG Shan-dong

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** For the improvement in the safety construction of the shipping system, it is necessary to build a seaworthiness analysis model for waterways and apply it to ships during navigation to evaluate the rationality of route planning and provide automatic and intelligent guidance for safe navigation of ships. Since the previous two-dimensional (2D) data cannot meet the needs of spatial analysis, we can obtain the navigable area of ships by performing spatial operations on the 3D track zone, 3D underwater terrain, and 3D waterway element model that are constructed by AIS track line data and ship model parameters. On this basis, the collision risk index (CRI) for ships is introduced as the basis of early warning and decision analysis, and the seaworthiness analysis model is built. Taking the three-dimensional waterway of the Beijing-Hangzhou Canal (the Grand Canal) as the research object, we conduct the simulation experiment to verify the reliability and stability of the model.

**Keywords:** seaworthiness; 3D track zone; collision risk index (CRI)

航运安全体系建设是我国航运事业发展的根本保障, 而航道的适航性分析是其重要组成部分。Kozerska<sup>[1]</sup>从水下自然要素以及水上运输参数(如桥梁等)两个方面对可通航水域进行探讨研究; Kantarzhi 等<sup>[2]</sup>应用 ARTEMIS 模型研究波浪条件对适航区域的影响; 杨保岑等<sup>[3]</sup>对 ArcGIS 进行二次开发, 利用数学模型动态计算可通航区域。随着三维可视化分析技术的飞速发展, 数字航道相较于普通的二维电子航道图, 其丰富的三维信息使

得航道的适航性分析更加立体、直观<sup>[4]</sup>。本文以京杭运河的三维航道为研究对象, 构建航道适航性分析模型, 为船舶在航道中的安全行驶提供参考。

## 1 技术路线

利用水深点数据及边界提取技术构建航道水下三维地形; 依据各航道要素的参考规范构建航道物标以及船舶的三维模型; 依据 AIS 定位数据

以及船舶型号参数构建船舶的三维航迹带模型；将三者进行布尔空间运算构建船舶的可通航区域模型，引入船舶碰撞危险度参数，构建完整的适航性分析模型。在模拟试验中依据该模型判断当前船舶行驶路线是否安全，并依此实施具体的避碰决策。技术路线见图 1。

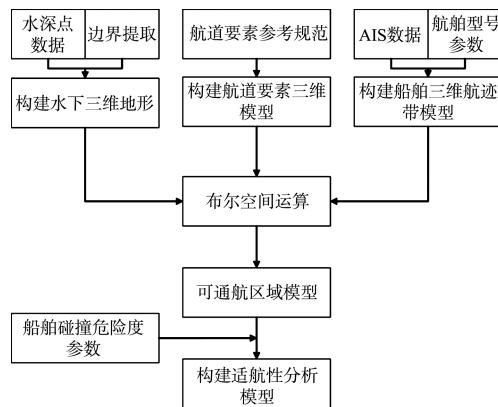


图 1 技术路线

## 2 空间要素的三维建模

### 2.1 通航要素分析

航道通航影响因素主要包括航道水深、航道宽度、航道曲率半径、净空尺度<sup>[5]</sup>。而这些影响因素的具体分析需要依托实地的三维航道地形信息，本文以京杭运河水深点数据为源数据，依据水深的定义<sup>[6]</sup>对其高程信息进行换算，采取双线性多项式内插法加密水深点，最后利用预处理后数据构建水下地形不规则三角网模型，效果见图 2。

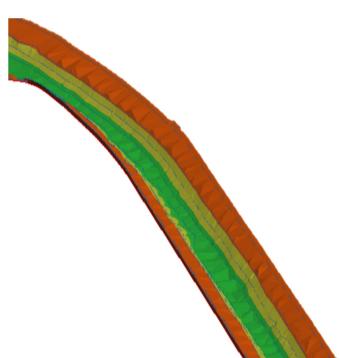


图 2 三维水下地形模型

由于航道边界水位随季节变更，需获取航道模型的边界线作为后续适航性分析中的航道宽度依据，采用广度优先算法<sup>[7]</sup>提取格网模型的边缘

点。提取效果见图 3。

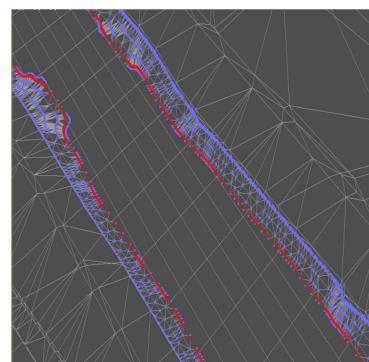


图 3 航道边缘提取效果

### 2.2 航道要素三维建模

利用外部链接 CAD 数据图纸对诸多航道要素进行三维建模，流程见图 4，成果见图 5。

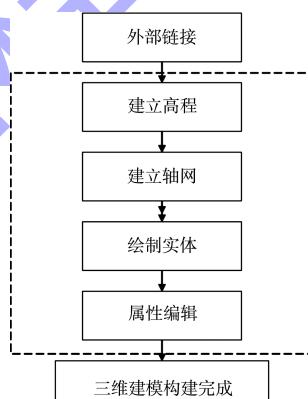


图 4 航道要素建模流程



图 5 船闸模型

### 2.3 三维航迹带参数化建模

AIS 技术是一种船舶定位技术，通过对卫星传回的信息进行解析获取船舶的历史迹点，依据这些数据信息对船舶的历史轨迹进行拟合，并统计其航迹带宽度以及通航水深信息作为三维航迹带建模参数。本文采用最小二乘法<sup>[8]</sup>进行轨迹点拟合，轨迹点的拟合效果与最小二乘的参数设置有关，故以整体方差的统计值作为调优依据，迭代获取最优的参数个数估计。图 6b) 的拟合效果优于图 6a)。

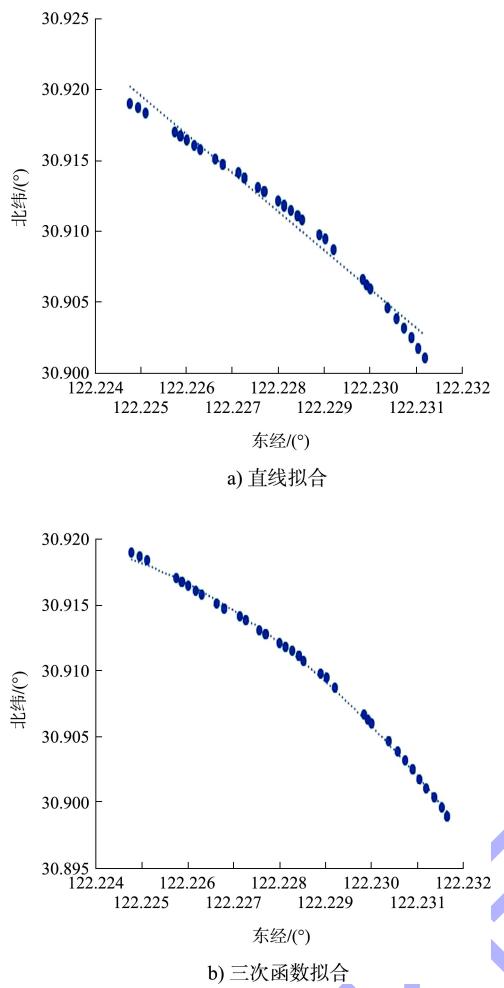


图 6 最小二乘拟合

而在流速、风速等因素的影响下船舶在行驶过程中的轨迹线通常为曲线, 船舶航迹带宽度由船舶的航迹安全缓冲带的偏移量、船舶本身占用空间相加所得<sup>[9]</sup>, 见图 7。

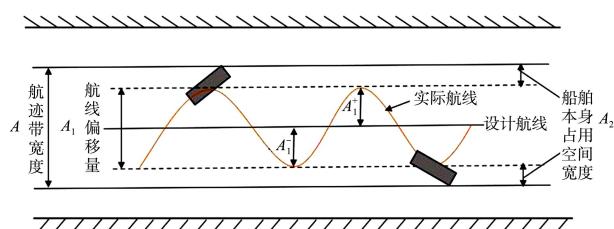


图 7 航迹带宽度

依据 JTS 166—2020《海港总平面设计规范》<sup>[10]</sup>, 可通过式(1)计算航迹带宽度 A:

$$A = n(L \sin \gamma + B) \quad (1)$$

式中: L 为设计船长; B 为设计船宽; n 为船舶漂移倍数;  $\gamma$  为风、流压差角。见表 1。

表 1 船舶漂移倍数

风力	横流/(m·s <sup>-1</sup> )	n	$\gamma/(^{\circ})$
$v \leq 0.10$		1.81	3
$0.10 < v \leq 0.25$		1.75	5
横风 $\leq 7$ 级	$0.25 < v \leq 0.50$	1.69	7
	$0.50 < v \leq 0.75$	1.59	10
	$0.75 < v \leq 1.0$	1.45	14

船体下沉量  $D_0$  可由式(2)通航水深计算公式<sup>[11]</sup>获得:

$$D_0 = T + Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (2)$$

式中: T 为满载吃水;  $Z_0$  为船体下沉量;  $Z_1$  为最小富余深度;  $Z_2$  为波浪富余深度;  $Z_3$  为船舶纵倾富余深度。

利用 Huuska 公式<sup>[12]</sup>计算船舶下沉量  $Z_0$ :

$$Z_0 = 2.4 \cdot \frac{\nabla}{L_{PP}^2} \cdot \frac{Fr_h^2}{\sqrt{1 - Fr_h^2}} \quad (3)$$

$$Fr_h = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad (4)$$

式中:  $\nabla$  为排水量;  $Fr_h$  为水深傅汝德数; U 为船舶航速; H 为水深。

通过对 9 种实际船舶的航迹点进行拟合, 获取实测的航迹带数据, 与式(1)计算所得的航迹带宽度进行比较, 发现实测拟合的内容和规范公式计算的结果基本一致。可将规范公式计算所得的航迹带宽应用于后续的航迹带建模。

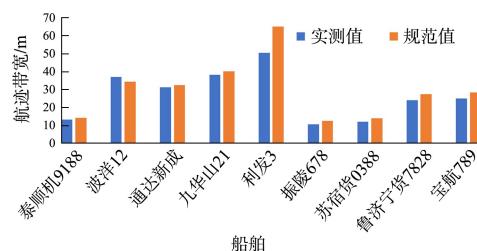


图 8 航迹带对比

本文以宝航 789 的船舶参数为试验对象, 构建三维航迹带。为了提高航迹带的拟合建模效果, 以航迹线中的转向点为依据进行分段建模。最终效果见图 9。



a) 侧视图

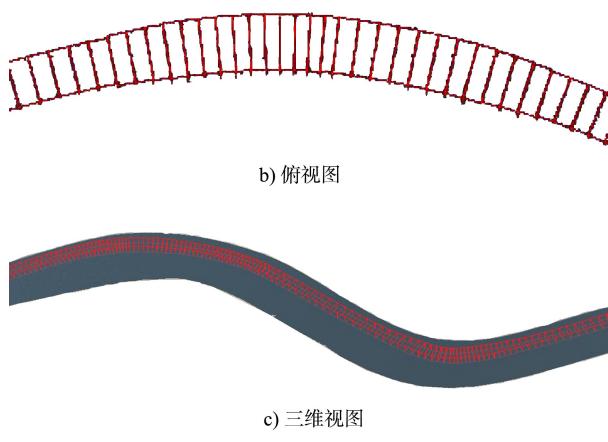


图 9 航迹带

## 2.4 可通航区域建模

可通航区域是一个封闭式空间，在这个空间内两侧的等深线、净空线均应满足通航需求，将航道要素模型与航迹带模型进行布尔空间运算<sup>[13]</sup>，求出安全的航行范围。布尔运算规则见图 10。

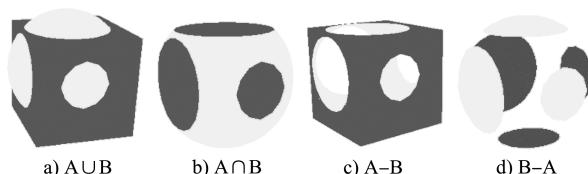


图 10 布尔运算规则

将空间航迹带模型与桥梁空间体作为运算的参数，算法流程见图 11。

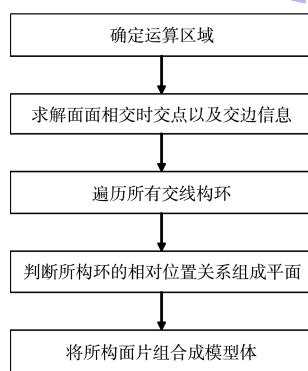


图 11 三维航迹带模型与桥梁空间体布尔运算流程

依据求出的空间运算结果构建航道的适航水域模型，主要分为 3 种情况：天然水域(指水域开阔、无水工设施等建筑物的航段)、设有桥梁的航段、存在临水建筑的航段。

1) 对于顺直天然水域进行适航性建模只需考虑水位变化，利用变化的水位值更新航道三维水下地形并与船舶的航迹带求差，若是弯曲航道可采用切角法加宽航道<sup>[14]</sup>。

2) 对于设有桥梁的航段进行适航性建模，需要根据其桥梁建筑物的空间包围盒大小构造分层次的八叉树空间包围盒。若是拱桥则还需将包围盒和空洞模型进行求差运算，最后再将桥梁模型与航迹带模型求差分析。

3) 对于港区航段进行安全水域建模，由于停泊水域为船舶提供停靠作业的空间，但其空间内船舶的行为可能影响相邻航道中船舶的行驶空间，故通过将停泊水域的空间包围盒与航道的适航空间进行布尔差运算，即可获得港区内的运动空间。

## 3 适航空间应用分析

### 3.1 船舶避碰参数计算

在确定了整个水域的适航空间之后，可计算船舶会遇的 CRI 值(碰撞危险度参数)<sup>[15-16]</sup>，这是一种评判船舶碰撞危险度的度量值，其范围为 0~1。通常还可以从时间空间两个方面将碰撞危险度进行划分，可划分为时间碰撞危险度 (time collision risk, TCR) 和空间碰撞危险度 (space collision risk, SCR)。

空间碰撞危险度一般通过比较最近相遇距离 DCPA、绝对安全会遇距离  $d_1$ 、双方安全通过的最小距离  $d_2$  的大小，代入不同的式子即可求得空间碰撞危险度的隶属度值  $\gamma_{DCPA}$ ，可将其作为空间碰撞危险度的参考值。

$$\gamma_{DCPA} = \begin{cases} 1 & (|DCPA| < d_1) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{\pi}{d_2 - d_1} (|DCPA| - \frac{d_2 + d_1}{2}) \right] & (d_1 \leqslant (|DCPA| \leqslant d_2)) \\ 0 & (d_2 < |DCPA|) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $d_1$ 、 $d_2$  的计算可参考文献<sup>[17]</sup>, 计算公式为:

$$\rho(\theta_T) = \begin{cases} 1.1 - 0.2 \theta_T / 180 & (0^\circ \leq \theta_T < 112.5^\circ) \\ 1.1 - 0.4 \theta_T / 180 & (112.5^\circ \leq \theta_T < 180^\circ) \\ 1.1 - 0.4(360 - \theta_T) / 180 & (180^\circ \leq \theta_T < 247.5^\circ) \\ 1.1 - 0.4(360 - \theta_T) / 180 & (247.5^\circ \leq \theta_T < 360^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

$$d_1 = 1.5\rho(\theta_T) \quad (7)$$

$$d_2 = 2d_1 \quad (8)$$

式中:  $\theta_T$  为两船相对方位角。

时间碰撞危险度指的一种时间紧急程度的度量值, 表示船舶为避免碰撞应急响应的时间需求。

$$\gamma_{TCPA} = \begin{cases} 1 & (TCPA \leq t_1) \\ \left( \frac{t_2 - TCPA}{t_2 - t_1} \right)^2 & (t_1 \leq TCPA \leq t_2) \\ 0 & (t_2 < TCPA) \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$t_1 = \frac{\sqrt{D_1^2 - DCPA^2}}{v_R} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{D_2^2 - DCPA^2}}{v_R} \quad (11)$$

式中:  $t_1$  为船只采取避让行为的时间;  $t_2$  为船只到障碍物所需时间;  $D_1$  为遇见障碍物采取避让行为的最短反应时间;  $D_2$  为遇见障碍物采取避让行为的最长反应时间;  $v_R$  为船舶航行速度。

CRI 值可通过上述求得的两个危险度数值计算得到:

$$\gamma = \gamma_{DCPA} \oplus \gamma_{TCPA} \quad (12)$$

其中,  $\oplus$  为合成算子, 含义如下:  $\gamma_{DCPA} = 0$ ,  $\gamma = 0$ ;  $\gamma_{DCPA} \neq 0$ ,  $\gamma_{TCPA} = 0$ ,  $\gamma = 0$ ;  $\gamma_{DCPA} \neq 0$ ,  $\gamma_{TCPA} \neq 0$ ,  $\gamma = 0.5 \gamma_{DCPA} + 0.5 \gamma_{TCPA}$ 。

上述的避碰参数计算均需在已确定的适航空间内进行, 若超出范围则危险度为 1, 应采取相应的避碰决策。决策分析的主要流程见图 12。

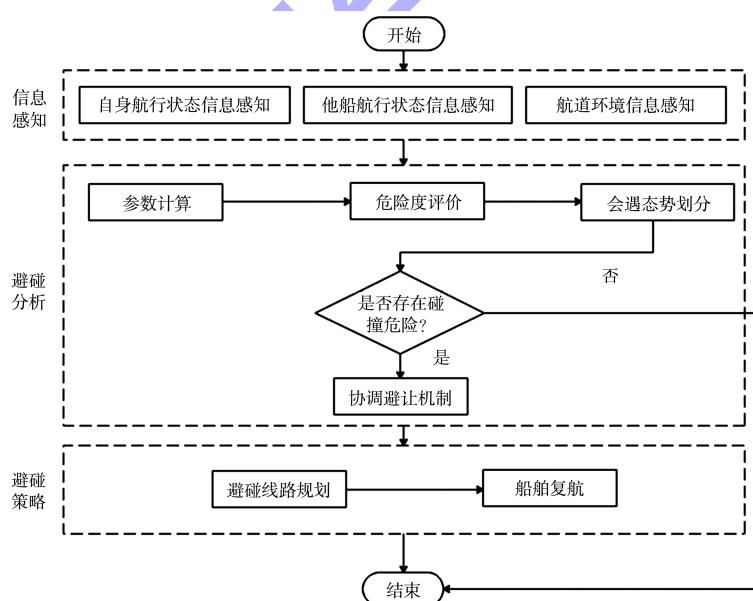


图 12 避险决策

### 3.2 路线避碰决策

当船舶收到预警信息, 将执行协调避让机制, 依据实际情况, 规划合理路线, 本文以鲁济宁货 7828 和宝航 789 为模拟试验对象, 模拟场景可分

为追越局面、相向而行、交叉局面 3 种。

#### 3.2.1 追越局面

宝航 789 行驶速度大于鲁济宁货 7828, 且航向几乎一致, 当  $CRI > 0.4$  时, 通过采取相应的措

施, 避免船舶碰撞。具体决策内容为: 鲁济宁货 7828 保持原速度不变, 宝航 789 左侧超越, 直到 CRI 值  $<0.4$ , 在超越之前判断在适航空间中是否存在合适的超越位置, 该位置需与鲁济宁货 7828 保持一定的安全距离。见图 13。



图 13 追越局面

### 3.2.2 相向而行

同样在两船相向而行时, 设置 0.4 为 CRI 阈值。通过 CRI 值分析当前船舶行驶安全性, 当其大于阈值时, 上行船只鲁济宁货 7828 作出避让, 避让的横向安全距离应为宝航 789 航迹带的 1.5 倍, 直到危险解除(即  $CRI < 0.4$ )。见图 14。



图 14 相向而行

### 3.2.3 交叉局面

当鲁济宁货 7828 与宝航 789 的行驶路线相互交叉时, 试验中作出的具体决策为: 向右横向行驶船只鲁济宁货 7828 应保持原航线不变, 上行船只宝航 789 在 CRI 值大于 0.4 时应当减速让行, 避让直至 CRI 值小于 0.4。见图 15。



图 15 交叉局面

## 4 平台应用

将上述研究内容应用于实际开发, 开发平台为 Unity3D, 应用研究区域为京杭大运河淮阴船闸至淮安船闸航段, 基于航务管理处的水情信息进行统计分析, 根据季节年份的变化更新适航区域,

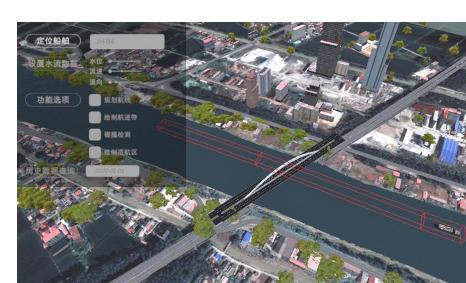
获取通航船舶的船型数据桥梁数据, 分析大型内河港口与助航设施情况, 将航道地形、航道影像、航道设施建筑物等要素进行三维可视化, 并设计航线查询、模拟航行、绘制航迹带、显示适航区域、预警与决策等诸多功能见图 16。为验证系统的可靠性, 采用模拟试验的形式。试验证明, 船舶可依据适航性分析模型做出合理有效的预警与避险。



a) 显示航线



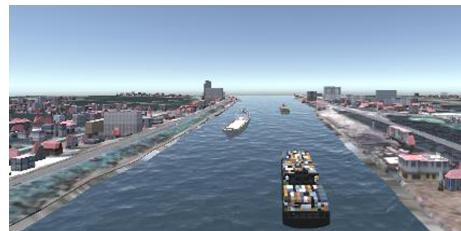
b) 模拟航行



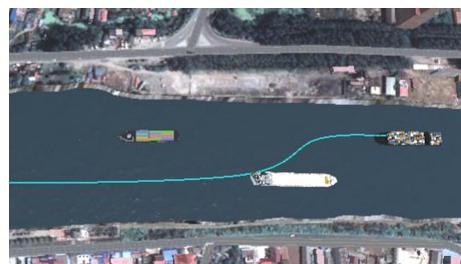
c) 绘制航迹带



d) 适航区域平面



e) 会遇局面判定



f) 避碰决策

图 16 航道适航性分析模型诸多功能

## 5 结论

- 1) 航道适航性分析模型的空间基础可采用三维航道技术构建, 在该项技术的引入过程中可考虑多源数据的信息提取与融合。
- 2) 可以在可通航区域引入 CRI 值作为船舶避险依据。进而构建适航性分析模型。模拟试验证明该适航性分析模型符合可靠性及稳定性的要求。

## 参考文献:

- [1] KOZERSKA M. Inland waterway transport in Poland—the current state and prospects for development [J]. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2016, 47( 119): 136-140.
- [2] KANTARZHI I G, ANSHAKOV A S. Numerical analysis of the wave conditions of a port with a navigation channel [J]. *Power technology and engineering*, 2019, 52( 6): 648-651.
- [3] 杨保岑, 吴溪, 李伟凡, 等. 长江电子航道图可航水域动态计算模型研究[J]. *水运工程*, 2016( 1): 83-88.
- [4] PORATHE T. 3-D Nautical Charts and Safe Navigation[D]. Gavle: University of Gavle, 2006.
- [5] 长江航道局, 中交水运规划设计院有限公司. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [6] 贾帅东, 曹鸿博, 占祥生. 与岸线协调的水深自动选取方法[J]. *海洋测绘*, 2018, 38( 3): 48-51.
- [7] SWAINE M. Breadth-first search[J]. *Dr. Dobb's journal: software tools for the professional programmer*, 2000, 25( 6): 100-102.
- [8] 邹乐强. 最小二乘法原理及其简单应用[J]. *科技信息*, 2010( 23): 282-283.
- [9] 曾昆. 基于实态的船舶航迹带宽度和操纵参数的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [10] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 河港总体设计规范: JTS 166—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [11] 中交水运规划设计院有限公司. 海轮航道通航标准: JTS 180-3—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [12] 洪碧光, 于洋. 船舶在浅水中航行下沉量的计算方法[J]. *大连海事大学学报*, 2003, 29( 2): 1-5.
- [13] 赖文, 谢步瀛, 王祎, 等. 三维布尔运算的降维算法[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2008, 34( 3): 315-317.
- [14] 李冰. 大窑湾水域内航路布局调整方案研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [15] 周江华, 吴春杰. 船舶碰撞危险度模型的构建[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2004, 17( 1): 61-65.
- [16] 贾立校. 船舶碰撞危险度模型应用与验证[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38( 10): 16-18.
- [17] 魏灵康. 基于避碰规则的无人船路径规划技术研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020. (本文编辑 武亚庆)

## 征订通知

2023年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 请登录《水运工程》杂志社官方网站 [www.sygc.com.cn](http://www.sygc.com.cn) 首页下载中心下载“2023年《水运工程》征订通知单”, 有关要求和反馈信息一应俱全。