



上海港公共航道维护保障智慧管理 关键技术研发与应用

张复宪¹, 屈斌², 周溪召¹

(1. 上海海事大学, 上海 201306; 2. 上海中交水运设计研究有限公司, 上海 200082)

摘要: 针对上海港公共航道维护保障中存在的“点多、线长、面广”、维护作业安全风险高等难题, 采用现场调研、理论建模及系统研发, 对航道维护保障智慧管理关键技术进行研究。提出基于 AIS 轨迹数据的船舶作业异常实时检测方法, 实现对于航道维护保障全过程“一图全面感知、一键可知全局”的目标。研究成果在上海港洋山港区、外高桥港区、罗泾港区等港区的公共航道维护保障中得到全面应用, 经济和社会效益显著, 应用前景广阔。

关键词: 航道维护保障; 疏浚作业; 异常识别; 机器学习

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0142-05

Development and application of key technology for intelligent management of Shanghai Port public channel maintenance and support

ZHANG Fu-xian¹, QU Bin², ZHOU Xi-shao¹

(1. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai China Communications Water Transportations Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: Aiming at the problems of “many points, long lines, wide areas”, high safety risks in maintenance operations of the public channel of the Shanghai Port, we use on-site investigation, theoretical modeling, and system development to carry out the key technology research on the intelligent management of the channel maintenance and support, and propose a method of abnormal real-time detection of ship operation based on AIS data, which can realize the goal of “one picture full perception, one-click whole situation” for the whole process of channel maintenance and support. The result is fully applied in Yangshan Port, Waigaoqiao Port, Luojing Port and other public channel maintenance and support in Shanghai Port. This method has significant economic and social benefits and broad prospect for promotion and application.

Keywords: channel maintenance security; dredging operation; abnormality identification; machine learning

洋山深水港区进港主航道及港内水域、外高桥和罗泾港区支航道及黄浦江等共同组成了上海港公共航道, 其通畅对于保障上海航运中心的建设及正常运营意义重大^[1]。在目前的航道维护保障过程中存在以下难点有待解决: 1) 由于公共航道涉及的范围广、参建单位众多, 单一工程运泥往返可达数千批次, 传统的依靠人力进行工程管

理存在薄弱环节; 2) 工程地点多位于长江、东海等水面, 工程实体位于水下, 无法直观地检验工程进度及质量; 3) 维护疏浚抛泥区范围无可可视化的标志, 传统的监控手段无法对船舶作业规范性做到有效监管, 在生态环保要求愈加严格的背景下, 给维护保障管理提出了更高的要求。因此, 为提升上海港公共航道维护保障管理能力, 开展

收稿日期: 2020-12-10

作者简介: 张复宪(1976—), 男, 博士研究生, 工程师, 从事港航产业组织与发展方向研究。

维护保障智慧管理系统的研发与应用工作。

1 维护保障智慧管理系统开发

1.1 系统简介

本系统重点关注疏浚工程管理水平提升, 通过应用大数据处理^[2-3]、模式识别和机器学习等

技术, 解决疏浚抛泥周期识别、关键区域电子围栏、航线异常判别、疏浚船舶行为机器学习及异常行为报警等多个技术难题, 实现智能监测抛泥周期识别和异常判定功能, 有效提升上海公共航道维护保障管理水平及智能化程度, 系统界面见图 1。

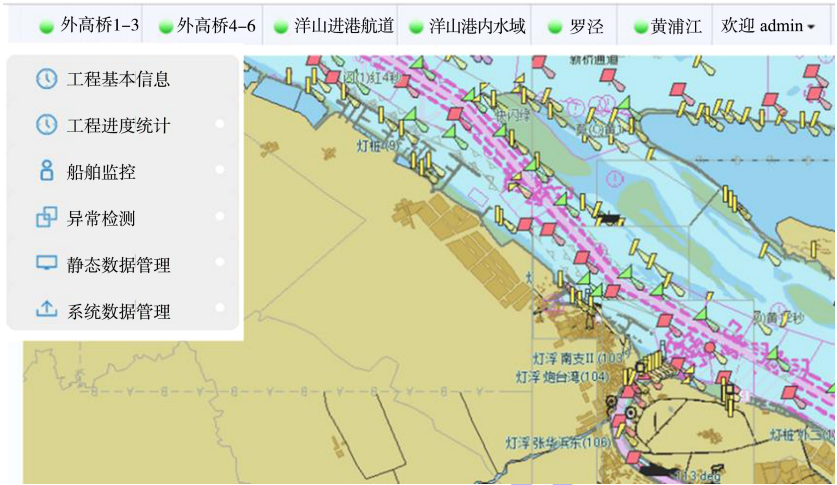


图 1 系统界面

1.2 数据来源及开发工具

本次系统开发的基础数据主要包括海图、船舶轨迹信息等。由于须在海图上绘制和显示诸多信息, 故采用 YimaEnc 公司所提供的电子海图接口, 并在该基础上进行二次开发。船舶航迹数据主要采用 AIS (船舶自动识别系统) 数据, 在对工程船舶相关信息进行录入后, 可通过 AIS 即时将船舶数据传输至系统进行分析。

系统研发上, 系统前端采用 HTML、CSS、JAVASCRIPT 这 3 种技术进行搭建, 实现的功能有两点: 1) 将后端 (数据库内) 和工程有关的数据以可视化的形式展现给用户^[4]; 2) 提供给用户良好的界面以及操作数据的方式, 捕捉用户的需求并通过后端修改数据。系统后端主要采用 mySQL 等建立关系型数据库管理系统, 并通过 JAVASCRIPT 等工具完成网页的动态效果。通过利用倒排索引及 map 映射函数等算法工具建立船舶轨迹机器学习模型, 实现对于维护保障的有效管理。

2 设计理念及主要功能

2.1 设计理念

多种信息化技术手段的成熟为航道维护保障智慧管理提供支持。本系统以“高效、智能”作为系统设计目标, 针对当前航道疏浚工程管理中存在的点多、线长、面广的困难, 紧扣工程管理的实际需求, 通过集成工程相关的要素实现统一管理, 实现船舶作业异常的自动检测, 提高工程管理的效率及准确性。

系统的核心理念以施工船舶作为抓手, 通过录入前期工程信息及采集施工过程中船舶数据、自动汇总工程进度参数、分析作业行为并判断其符合性, 从而实现对于进度、质量、安全三要素的有效管控。

2.2 主要功能

2.2.1 工程信息管理模块

工程信息管理模块包含工程基础信息和动态工程信息两部分。工程基础信息通过对于基本要素进行抽象、建模及建立数据库, 以方便在系统

中进行统一管理，提高用户的操作效率。同时，针对不同船舶对应的作业港区、抛泥区等形成的作业路线、运输路线等进行录入，为后续作业合规性判定提供基础。工程动态信息通过对船舶抛泥作业批次的自动累加，以时间、地理或施工等要素作为查询维度形成查询矩阵，通过排列组合从 9 个层面全过程、多维度实时可查询，见表 1。

表 1 系统查询功能矩阵

维度	已完成 工程量	已完成运泥 周期信息	船舶异常 信息
各港区及航道	√	√	√
各施工单位	√	√	√
各工程船舶	√	√	√

2.2.2 船舶动态管理模块及作业异常检测模块

船舶动态管理及作业异常检测模块突破疏浚运泥周期识别、关键区域电子围栏、航线异常判别、疏浚船舶行为机器学习等多个技术难题，智能监测运泥周期并对异常进行判定，实现船舶动态信息(包括运动轨迹、航次、运量等)的实时掌控，同时通过结合大数据对机器学习算法进行深度研发，对作业过程中的异常作业行为自动识别。

3 关键技术创新

对船舶轨迹的有效检测是本系统运行的核心。出于利益问题，部分施工船舶选择违规行驶或者不按照制定流程完成作业任务^[5]会给工程质量和委托方带来损失，因此亟需一种可靠可行的方法管控船舶航行异常的问题。结合已有研究^[6]，提出以下两种方法进行异常检测。

3.1 基于数据统计和机器学习的异常检测

3.1.1 事件流识别

一个完整的工作流程可以划分为事件流：进入工作区域、出工作区域、进入抛泥区域、出抛泥区域，如图 2 所示。分析工作中的异常状态需要对船舶所处状态进行分析，从连续获得的船舶位置坐标信息中提取关键节点，标记为关键事件。

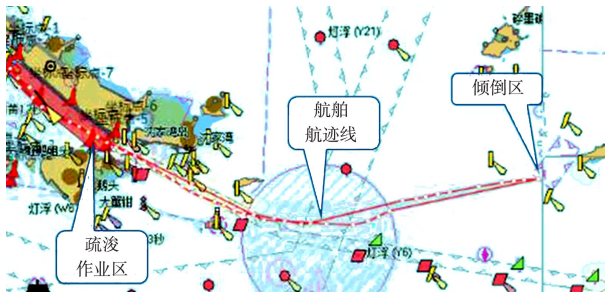


图 2 检测出的一次完整作业轨迹

关键事件识别算法中分别标注进入作业区域、离开作业区域、进入抛泥区、离开抛泥区的时间分别为 t_{indred} 、 t_{indump} 、 $t_{exitdred}$ 、 $t_{exitdump}$ 。

3.1.2 数据分析

基于收集到的船舶工作轨迹数据，对这些数据进行如上节中的事件流划分并分类统计，得到船舶正常工作状态的模式，如图 3 所示(每 60 min 划定一个区间)。可以看出，船舶在工作区内工作时间分布具有很强的规律性，在 150 和 500 min 附近分别形成两个正态分布，由于(0~360 min)占全部船舶行为记录总量的 80% 以上，最终机器学习算法中正常工作状态下的船舶在工作区内停留时间的阈值为不超过 6 h。

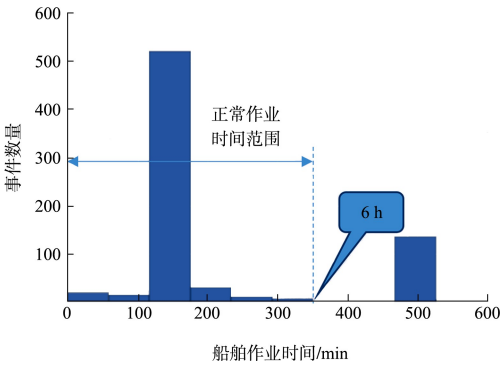


图 3 船舶在工作区内停留时间

3.1.3 异常识别

根据统计数据，可以得到船舶正常工作的模式以及机器学习算法的阈值，结合事件流判别即可识别船舶工作状态的异常情况。

3.2 基于网格化轨迹和倒排索引的异常检测

本方法的核心思想为：

- 1) 将船舶轨迹原始历史数据进行分析，提取其中关键特征，并通过网格化、倒排索引等手段

对提取出的轨迹特征进行存储及索引, 然后根据异常点易于隔离特性对轨迹进行分类, 从而检测船舶航行异常。

2) 通过将完整工作流程划分为事件流, 依据 AIS 坐标相对位置和预设区域的关系将轨迹数据处理划分, 识别其中关键事件, 检测流程从而进行异常分析。首先对船舶轨迹倒排索引数据库的建立进行简要说明。由于船舶位置坐标是以经纬度的形式进行定位, 而经度和纬度的值都属于连续域。定义一个映射函数 map :

$$\text{map}(p_i): R^2 \rightarrow G \tag{1}$$

式中: p_i 为疏浚船舶轨迹位置点; R 为工程地理区域的边长; G 为网格矩阵。 map 函数将属于连续域的 AIS 坐标映射到网格矩阵 G 内的一个网格中, 网格矩阵 G 是将地理区域分解为若干个网格得到的, g_{ij} 表示矩阵 G 中第 i 行、第 j 列的网格, 如图 4 所示, $\text{map}(p_1) = g_{23}$ 。

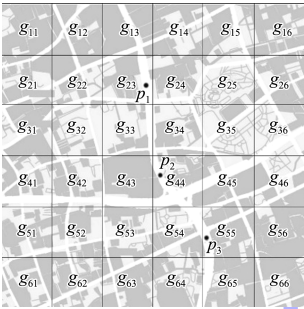


图 4 网格矩阵

3.2.1 坐标点异常检测

坐标点异常检测按照下列步骤进行: 1) 从原始的 AIS 记录当中提取出有效的船舶轨迹, 在原始数据集合的基础上生成历史轨迹网格的倒排索引表; 2) 通过已经建立的倒排索引数据库, 分别提取经过起点和终点的所有轨迹编号, 得到所有有效轨迹; 3) 利用坐标点异常检测算法对船舶实时坐标进行处理, 检测其是否存在异常并进行处理和记录。

以图 5 为例对算法进行介绍。从疏浚区域至抛泥区之间有 3 条常走的轨迹即路线 1、2、3, 分别是 100、200、150 条历史航迹记录。轨迹点自起点 $S(p_1)$ 起不断增加直到 p_4 , 到 p_5 时由于子轨迹

序列 $\langle p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 \rangle$ 没有历史轨迹支持, 因此 p_5 被加入异常轨迹点集合 χ , 接着子轨迹序列 $\langle p_5, p_6 \rangle$ 也没有轨迹支持, 因此 p_6 被加入异常点集合 χ , 接着子轨迹序列 $\langle p_6, p_7 \rangle$ 有 150 条路线 3 轨迹支持, 因此 p_7 点正常, 接着 p_8 、 p_9 、 p_{10} 又被加入异常点集合 χ , 直到最后轨迹完成, 异常轨迹点集合 $\chi = \{p_5, p_6, p_8, p_9, p_{10}\}$ 。

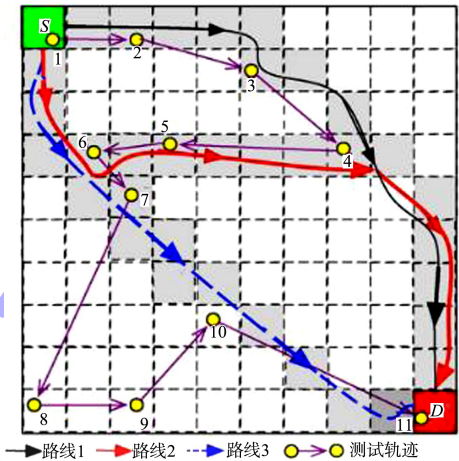


图 5 算法实例

3.2.2 船舶工作流程异常检测步骤

1) 对每条监测船舶指定具体的起始区域和目标区域, 并明确区域具体坐标信息。

2) 将历史 AIS 船舶坐标序列转化成包含地理位置信息的状态序列和距离序列。状态值集合为: $\{S_1(\text{在疏浚作业区域内}), S_2(\text{在抛泥区内}), S_3(\text{在疏浚作业区和抛泥区以外的区域})\}$ 。进而依据状态转化从状态序列中提取出标志性事件序列及其对应时间, 并将历史工作流程信息记录到数据库中。如: $S_3 \rightarrow S_1$ 记为 E_1 (进入疏浚作业区), $S_1 \rightarrow S_3$ 记为 E_2 (出疏浚作业区), $S_3 \rightarrow S_2$ 记为 E_3 (进入抛泥区), $S_2 \rightarrow S_3$ 记为 E_4 (出抛泥区)。标志性事件集合: $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_1, E_2, E_3, E_4, E_1, \dots\}$ 。一个完整的工作流程为: $E_1(t_1) \rightarrow E_2(t_2) \rightarrow E_3(t_3) \rightarrow E_4(t_4)$, 其中 t 为实际工程中每个标志性事件之间的时间间隔。

3) 识别接近目标区域的坐标点集合 P , $P = \{p_n | d_n < D\}$, 其中 d_n 为距离序列中的值, 对应坐标序列中的点到目标区域的距离; D 为距离常量。

4) 根据数据库中历史工作流程计算每个工程

标志性事件之间的平均时间间隔： $E_1 \rightarrow E_2$ 为 T_1 ， $E_2 \rightarrow E_3$ 为 T_2 ， $E_3 \rightarrow E_4$ 为 T_3 、 $E_4 \rightarrow E_1$ 为 T_4 。

5) 将要进行判断的 AIS 坐标序列按照前述方法转化成状态序列，距离序列和标志性事件序列。提取标志性事件序列中的完整工作流程，计算工作流程相关时间间隔信息。如果某工作流程 $R_n = \{E_1(t_1), E_2(t_2), E_3(t_3), E_4(t_4)\}$ ，存在 $t_1 > |T_1 + x|$ 、 $t_2 > |T_2 + x|$ 、 $t_3 > |T_3 + x|$ 、 $t_4 > |T_4 + x|$ (x 为允许偏差) 其中之一，则 R_n 为异常工作流程。

4 工程应用

本系统在上海国际航运中心公共航道维护保障中进行实际运用，依托该工程不仅实现了施工船舶的实时监测、轨迹回放、作业检测等功能，同时实现了对于工程进度信息及船舶异常作业行为的实时管控。时效性上，本工程实现全过程、多维度矩阵查询，可在每日船舶 AIS 数据更新后快速了解施工信息，信息反馈及时；准确性上，系统通过技术手段，智能筛选每一批次的船舶运泥周期、依据规则智能判断运泥过程中的异常行为，为建设单位快速响应提供依据，对不规范的施工行为起到警示作用。

针对工程过程中常见的异常行为设定了判别标准，监控多种类型的作业异常。异常类型及判定规则见表 2，系统检测到的异常作业界面如图 6 所示。



图 6 系统检测到未驶入抛泥区的异常作业行为

表 2 系统检测的异常类型

异常类型	判定规则
未驶入抛泥区	抛泥船未抵达预定抛泥区便返航
抛泥区错误	船舶在非预定抛泥区内抛泥
作业位置错误	工程船舶未在指定的区域作业
作业行为异常	疏浚区内停留时间过长, 暂定大于 6 h
船舶速度异常	超出设定的航速, 如长江南槽为 15 kn
航线异常	抛泥船超过规定航线范围

5 结语

1) 针对上海港公共航道维护保障中存在的“点多、线长、面广”、维护作业安全风险高等难题，本文采用理论建模及系统研发等手段，开展航道保障智慧管理关键技术研发及应用工作。

2) 上海港公共航道保障智慧管理平台提出基于 AIS 轨迹数据的船舶作业异常实时检测方法，可以实时检测疏浚作业过程中的异常行为，通过在上海外港划定 6 个电子围栏，设置 8 条抛泥航线，异常检测准确率达 93% 以上，检测时间在毫秒级。

3) 上海港公共航道保障智慧管理系统将信息技术应用到航道的工程管理过程中，实现了对于航道维护保障全过程“一图全面感知、一键可知全局”的目标，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 周树高, 祁明良, 钱诗友, 等. 航道维护保障系统[J]. 港口科技, 2017(1): 44-48.

[2] 周俊华, 张长腾, 徐鲁宁, 等. 基于源创新和云计算的新型广东省数字航道体系架构设计[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(12): 60-62.

[3] 曹树青, 舒晓明, 梁向棋, 等. 智能航道中“大数据”研究[J]. 中国水运, 2014(10): 54-55.

[4] 陆亚刚, 邱知, 游先祥, 等. 基于 SilverLight 和 REST 的富网络地理信息系统框架设计[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 192-198.

[5] 蔡笃佳. 疏浚吹填工程的施工管理与控制[J]. 珠江水运, 2018(10): 36-37.

[6] 徐婷, 戴文伯, 鲁嘉俊. 基于自动识别系统大数据的船舶施工轨迹识别与预测[J]. 水运工程, 2019(12): 119-122, 126. (本文编辑 王璁)