DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2022.05.022

基于航线大数据与水流条件模拟的船舶航线优化方法

祝孟伟[1]，罗羚源[1]，毛雄磊[1]，金健灵[2 3]，廖江花[2 3]

（1. 长江重庆航道局，重庆 401121；2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心，重庆 400074；
3. 重庆交通大学河海学院，重庆 400074）

摘　要：针对当前内河船舶航线规划手段较为落后的情况，采用物联网、大数据与航道水流条件数学模型相结合的方式，对航道水深、流速、比降等影响船舶上滩的水流指标进行实时输出，并在此基础上结合船舶历史航行路径数据，完成不同水流条件下不同船型的的优化航线实时动态输出。

关键词：船舶航线规划；大数据；二维水流数学模型

中图分类号：TP391　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006—7973（2022）05-0063-03

1 引言

三峡蓄水以来，库区航运效益提高，国务院及长江上游沿线各省市纷纷提出了以长江黄金水道为代表的系列航运发展战略及规划，加之近年来“一带一路”、西部陆海新通道铁水联运等战略的实施，长江上游航运量及航运需求得到显著提升，往来船舶日益增多，如何在维持航道通航效率的同时有效保障过往船舶的航行安全成为了航道管理部门直接面临的问题。其中，航线安全是内河航运安全的最直接保障，航线规划的精准化和智能化是航运发展的重要支撑。但当前内河航道及航路管理维护的数字化、智能化水平不高，整体水平相较于美国密西西比河及欧洲莱茵河等率先在全球完成数字化的内河航道而言差距明显。围绕当前国际形势和服务国家发展战略，深度融合物联网、云计算、大数据管理、新一代移动通信等现代信息技术，促进航运产业的集成化创新应用，并推进航运规划管理的智能化转型已经成为航运产业的主要发展方向。

当前，内河船舶航线规划并没有真正普及，船舶航线的界定更多是依靠船舶驾驶人员在航标划定的河面适航范围内进行经验性的操作，这种方式过于单一和绝对，没有针对不同船型提供与之相适应的航行范围，无法充分利用水深条件。此外，航标的设定也多依靠操作人员的经验，各环节对人员经验的依赖也存在着极大的安全隐患，难以满足于日益增加的航运安全保障需求。因此，在当前航运发展与物联网、云计算、大数据管理、新一代移动通信等现代信息技术深度融合的大趋势下，结合大数据分析和人工智能等前沿技术，提出一种安全、智能具有推广价值的内河船舶航线规划技术，对我国航运产业的安全保障和智能化发展有着至关重要的作用。

2 技术思路

本文针对内河航线规划手段不足且人工依赖程度过高的现状，将传统的二维水流数学模型与新兴的大数据分析技术相结合，基于近十年来河道地形、水位、流量和船舶 AIS 数据，将船舶历史经验数据与计算的水流条件（流速、水深、比降等）进行匹配。对任意河段仅需根据其水位、流量和船型参数即可快速查询对应的历史航线数据集，并在此数据集的基础上进行最优路径计算和输出，完成该河段船舶航线的优化。

3 航道边界条件实时快速提取方法

水深、流速和比降等指标是船舶航线规划的重要参数，其在河道内的沿程分布数据的科学性和准确性直接决定了航线规划的合理性。本文在已知目标河段入口流量和出口水位以及河道地形的基础上，建立河道二维水流数学模型，计算和存储不同水位流量条件下的河道比降和水深、流速分布，并将计算出的水流条件作为船舶历史航线的筛选基准，船舶航线的优化工作均在此水位流量条件区间的历史航线内进行。

3.1 平面二维水流数学模型基本方程

$$\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{1}{J}\left[\frac{\partial(h_2 q)}{\partial \xi}+\frac{\partial(h_1 p)}{\partial \eta}\right]=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\beta\left(\frac{1}{J}\frac{\partial(h_2 qU)}{\partial \xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial(h_1 pU)}{\partial \eta}-\frac{pV}{J}\frac{\partial h_2}{\partial \xi}+\frac{qV}{J}\frac{\partial h_1}{\partial \eta}\right)-fp+\frac{gH}{h_1}\frac{\partial Z}{\partial \xi}+\frac{qg|q|}{(CH)^2}$$
$$=\frac{\nu_e H}{h_1}\frac{\partial E}{\partial \xi}-\frac{\nu_e H}{h_2}\frac{\partial F}{\partial \eta}+\frac{1}{J}\frac{\partial(h_2 D_{11})}{\partial \xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial(h_1 D_{12})}{\partial \eta}+\frac{1}{J}\frac{\partial h_1}{\partial \eta}D_{12}-\frac{1}{J}\frac{\partial h_2}{\partial \xi}D_{22} \qquad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\beta\left(\frac{1}{J}\frac{\partial(h_2qV)}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial(h_1pV)}{\partial\eta}+\frac{pU}{J}\frac{\partial h_2}{\partial\xi}-\frac{qU}{J}\frac{\partial h_1}{\partial\eta}\right)+fq+\frac{gH}{h_2}\frac{\partial Z}{\partial\eta}+\frac{pg\sqrt{q}}{(CH)^2}$$
$$=\frac{\nu_e H}{h_2}\frac{\partial E}{\partial\eta}+\frac{\nu_e H}{h_1}\frac{\partial F}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial(h_2D_{12})}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial(h_1D_{22})}{\partial\eta}-\frac{1}{J}\frac{\partial h_1}{\partial\eta}D_{11}+\frac{1}{j}\frac{\partial h_2}{\partial\xi}D_{12} \quad (3)$$

3.2 求解方法

本模型在传统二维水流模型的基础上引入了 de Vriend(1977) 年提出的纵、横向流速分布公式，将可能由河道弯曲而引起的横向二次流纳入了模型，同时忽略了其余的次生二次流进而大幅缩短模型运算时间，并在此基础之上将流速分布代入到弥散应力项，得到在水流方向、横向方向和水流方向横向方向上的水深平均流速与时均流速。本模型水流模块采用 ADI 法对上述方程进行有限差分法离散，模型整体采用中心差分的方法进行计算。其中，水流连续方程中 $\partial I/\partial t$ 为向前差分，动量方程中对流项结合一阶迎风采用 quick 差分。

3.3 网格构建

选择长江涪陵——重庆主城鹅公岩河段为案例进行二维数学模型构建，该河段长约 140km(图 1)；主城区由于有嘉陵江入汇，嘉陵江支流模拟范围为朝天门河口至李子坝约 8km。在计算区域内，共布置 3255 × 60 个网格点，采用正交曲线体系下的结构网格，沿河道方向间距为 15–93m，平均约为 40m，河宽方向间距范围为 31–50m，平均约 40m（ 图 2 ）。

图 1 重庆至涪陵段网格整体示意图

图 2 重庆至涪陵数值模拟计算网格局部示意图

3.4 水文、地形资料选取

本模型采用 2009–2016 年水文资料作为水流计算的进出口边界条件，该时期坝前水位过程相较于蓄水初期开始变得稳定（ 图 3 ）；进口条件为寸滩水文站的实测流量过程（ 含朱沱、北碚 ），出口边界条件为清溪场水文站的实测水位过程。河段计算初始地形采用 2009 年实测，测图比例为 1:5000。主城区由于有嘉陵江入汇，嘉陵江支流模拟范围为朝天门河口至李子坝约 8 km，计算初始地形采用 2015 年 6 月实测，测图比例为 1:2000。

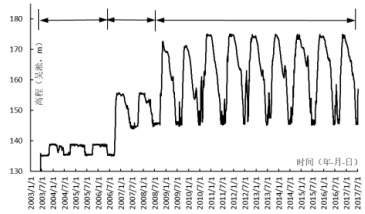

图 3 三峡水库蓄水运用以来坝前水位变化过程

3.5 模型验证

选取寸滩、铜锣峡、鱼嘴、羊角背、太洪岗、麻柳嘴、扇沱、长寿、卫东、大河口、北拱作为模型验证测点进行数模验证，图 4 为沿程水位各站点计算值与实测值的比较。通过选取典型流量下的水位进行对比，计算水位与实测水位基本吻合，除个别站点个别时间误差稍大，其余站点最大误差小于 0.1m，误差一般均在 0.1% 以内，能满足推移质计算的精度。

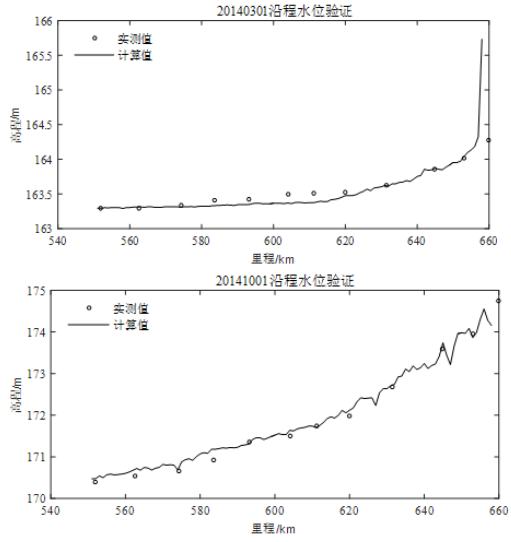

图 4 数模计算与实测沿程水位比较图（ 2014.10.1 ）

4 船舶航线动态优化技术

基于船舶 AIS 航线历史数据资源，以船型、水流条件、上下行状态对航线数据进行分级建库存储。根据同一水流条件下的相同船型的路径数据集聚类划分该组合条件下的经验适航区域，进一步采用蚁群算法等优化计算模型在经验适航区内寻找路径最短、航线顺滑的最优航线。

4.1 数据获取

船舶的历史通行数据能够很好的反应控制河段的有关环境因素对船舶航行产生的影响。利用 AIS 船舶自

动识别系统采集研究河段内船舶的通行数据，构建历史数据库，并进行研究分析，总结有关规律。

AIS 消息信息丰富，包括船舶动态信息、静态信息、航向相关信息和信息更新率等，这些信息对于船舶最优航线规划研究，具有重要意义。本文设计的规划方法主要使用船名、对地航向、经度、纬度、时间、对地航速等 AIS 信息。

4.2 数据处理

受外部环境、船舶传感器故障、人为因素等原因的影响，AIS 数据可能会存在一定偏差，错误的航点会给整个航线规划带来严重的影响。故通过删除经纬度偏移明显、船速失常、航程过短的航线数据对这部分错误的信息进行清理是在进行统计分析和数据挖掘之前的必要步骤（图 5）。在对数据进行清理后采用数学函数拟合的方式，对每条航线整体进行修正、平滑处理，确保航线数据的合理性。本文采用 5 阶傅里叶函数对航迹点的经、纬度数据进行拟合修正，该方法在对长距离航线的拟合上具有更好的切合度。

图 5 错误航线清理（长寿王家滩河段）

4.3 分级建库

根据船舶船型、水文条件、上下行情况等参数对船舶历史航线数据进行分级建库，保证不同船型的船舶在不同条件下能获取相应的最优航线。考虑到上游来流量的年内变化以及三峡工程调度方式，并结合河段滩险的特征（弯、险、浅），初步考虑认识性试验中流量级和水位组合原则如下：

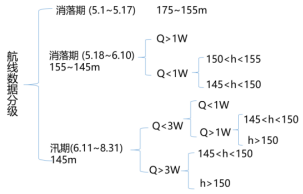

图 6 数据分级存储

4.4 经验最优航线获取

船舶最优航线的获取是基于当日寸滩流量和清溪场水位数据，利用本文第 3 章中建立的二维水流数学模型计算河段沿程比降和水深流速分布，针对不同目标滩段的位置输出对应的航道边界条件，并在分级数据库中查询对应航线数据，计算每种船型在相同航程、不同水文条件下的航行时间，时间最短的航线即为该分类船舶数据中的全局最优航线（图 7）。

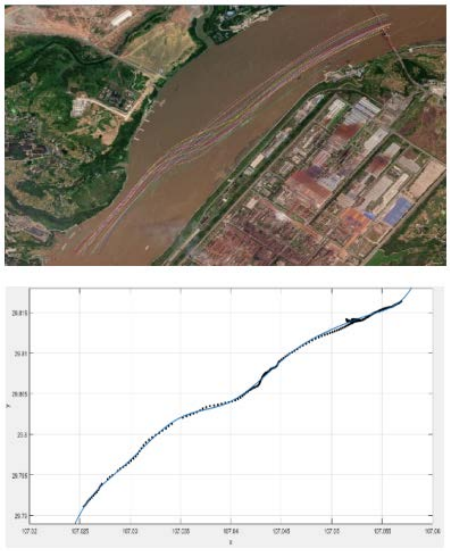

图 7 最优航线提取

5 结论

本文结合内河航运业的智能化转型趋势，针对内河船舶航线规划人工依赖程度过高的现象，开展基于船舶航行历史路径数据和河道二维数学模型的船舶航线优化方法研究。通过对航线历史数据的分类分级存储、调用和分析，实现了适应多船型的航线优化输出，能够为更加合理且充分地利用航道水深资源提供思路和参考。