

AIS 技术在长江干线航标动态监控中的应用分析

石晓光, 乔雪竹

(长江重庆航道局, 重庆 400000)

摘要: 随着内河航运智能化发展, AIS 技术在长江干线航标监控中发挥着重要作用。系统采用“感知-传输-处理-应用”四层分布式架构通过部署 AIS 应答器, 卫星导航定位模块与倾斜传感器等多源传感设备, 实现航标状态的精准感知。运用边缘计算与机器学习算法进行实时数据分析构建智能预警机制。在长江重庆段 120 公里试验航段的验证结果表明, 系统设备在线率达 98.7%, 位置监测精度 1.2 米, 故障预警准确率 92.3%, 异常响应时间从 4~6 小时缩短至 2.8 分钟。系统建设投资 2800 万元, 年节约人工成本 720 万元, 监控效率提升 325%, 为长江航运安全管理提供了智能化技术支撑。

关键词: AIS 技术; 长江干线; 航标监控; 动态监测; 智能航运; 安全管理

中图分类号: U675.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2025) 21—0076—04

长江作为中国内河航运的黄金水道, 全长 6300 余公里, 年货运量超过 30 亿吨, 承担着全国 80% 以上的内河货运量, 是连接东中西部经济发展的重要纽带。航标设施作为水上交通安全的重要保障, 其安全可靠运行直接关系到数十万艘船舶的航行安全与亿万吨货物的顺

利运输。传统航标监控主要依赖人工巡检方式存在响应滞后, 成本高昂, 监控盲区与恶劣天气下巡检困难等问题, 难以满足日益增长的航运密度与现代航运发展需求。据统计, 人工巡检模式下故障发现时间平均需要 4~6 小时, 严重影响航行安全与通航效率。近年来, 自动识别

载深度达到要求后, 溢流口溢出低浓度泥浆。一个装舱作业循环由耙头下放、泵吸装舱、低浓度泥浆溢流、停泵收耙、航行并抛泥、返航放耙等步骤构成。

以上过程中, 根据疏浚区域水深、风浪条件、耙吸挖泥船油水装载量、疏浚土质等因素, 通过溢流筒升降操作进行泥舱实际装载深度调节, 以确保挖泥船满足吃水要求, 保证疏浚工效。为增加装舱方量, 提高装载泥浆浓度, 可适当延长溢流时间。为快速排除上层低浓度泥浆, 提高耙吸挖泥船泥浆装载浓度, 优化装舱量, 还可在前次高溢流档位达到满载状态后即调低溢流筒, 随后将溢流筒调高至比前次略高位置, 保持高溢流档位满载, 循环数次。

4 结论

综上所述, 对于不同地质条件的航道河床, 应采取不同且针对性强的疏浚施工工艺。该新建航道 20K+000~30K+988 段岩石类河床适用耙吸挖泥船开挖疏浚工艺, 并对耙头、耙齿、泥泵等装置进行改进, 对对地压力、入岩角度等施工参数进行优

化; 30K+988~37K+088 地质段则采用改进后的装舱溢流施工工艺。按照以上思路改进疏浚工艺后, 20K+000~30K+988 航道段珊瑚礁石土质日疏浚清淤及装舱工效提高至 $3.6 \times 10^4 \text{m}^3$; 30K+988~37K+088 航道段日产量提高至 $1.75 \times 10^4 \text{m}^3$, 疏浚工效均显著提高, 耙吸挖泥船耙头及耙齿磨损程度明显降低, 经济效益十分显著。

参考文献:

- [1] 邢文强. 自航耙吸挖泥船在航道疏浚项目中的应用[J]. 中国水运, 2024, (13): 96-98.
- [2] 陈少军, 孙慧, 赵国权, 等. 大型耙吸挖泥船外海取砂装舱施工工艺优化[J]. 水运工程, 2024, (05): 226-230.
- [3] 郭赞. 耙吸挖泥船吹填中粗砂造陆施工问题探析[J]. 珠江水运, 2024, (02): 55-57.
- [4] 魏必文, 周成海. 航道维护施工中耙吸装驳工艺的应用[J]. 珠江水运, 2023, (21): 83-85.
- [5] 曾斌华, 何欢翔. 耙吸挖泥船航道疏浚扫浅施工探讨[J]. 珠江水运, 2022, (22): 25-27.

系统（AIS）技术在海事领域广泛应用，具有实时性强覆盖范围广与数据精度高等优势，为航标动态监控提供了全新的技术路径。长江干线地理环境复杂，水位变化幅度大，气候条件多变对航标监控系统的可靠性，适应性与智能化水平提出了更高要求构建基于 AIS 技术的智能化航标监控系统，实现设备状态的实时感知，异常预警与智能运维对提升长江航运安全保障水平推进内河航运现代化具有重要的理论价值与实践意义。

1 AIS 航标监控系统架构设计

1.1 系统架构与关键技术组成

长江干线 AIS 航标监控系统采用“感知 - 传输 - 处理 - 应用”四层分布式架构，底层感知网络通过部署在航标设备上的 AIS 应答器，卫星定位模块，倾斜传感器与太阳能电压监测器等多源传感设备实现航标位置，姿态与供电状态的精准感知（图 1）。

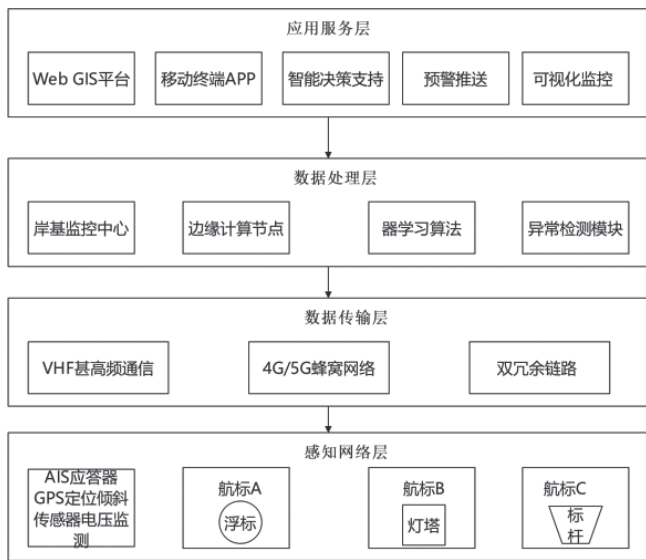


图 1 AIS 航标监控系统架构

数据传输层基于 VHF 甚高频通信与 4G/5G 蜂窝网络构建双冗余通信链路，确保恶劣气象条件下数据传输的可靠性。数据处理层运用边缘计算技术在岸基监控中心部署高性能服务器集群集成机器学习算法对海量监测数据进行实时分析与异常检测。应用服务层通过 Web GIS 平台与移动端 APP 为航道管理部门提供可视化监控界面与智能决策支持实现航标状态的动态展示与预警信息的及时推送。

1.2 功能模块设计

AIS 航标监控系统功能模块架构围绕“监 - 控 - 管 -

维”四大核心业务流程构建，形成高度集成的智能化管控体系（图 2）。实时监测模块集成多维度传感器数据融合算法建立航标设备健康度评估模型通过机器学习技术识别设备异常模式，实现故障预测与预警功能该模块能够实时采集卫星定位数据位置，设备倾斜角度，电池电压与信号强度等关键参数构建设备运行状态全景画像。智能控制模块运用自适应控制策略根据航道交通流量密度，实时气象条件动态调节航标灯光亮度与闪烁频率，优化助航效果确保不同环境下的最佳可视性。数据管理模块构建分布式数据库集群，采用时序数据压缩存储技术，数据压缩率达 75% 建立航标运行状态历史档案与趋势分析机制为设备维护决策提供数据支撑。运维支撑模块整合 GIS 地理信息系统与 BIM 三维建模技术，生成航标设备数字孪生模型实现设备状态的三维可视化展示为维护人员提供精准的空间定位与路径规划显著提升运维效率与决策准确性。

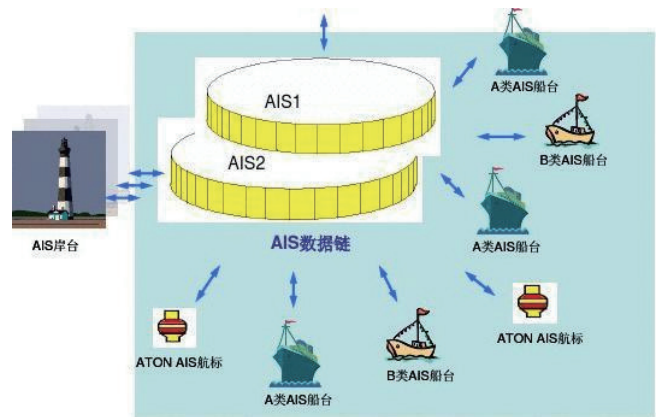


图 2 AIS 航标监控系统

2 长江干线 AIS 航标监控关键技术实现

2.1 AIS 设备选型与部署策略

长江干线 AIS 航标监控设备选型遵循“分层适配，冗余配置”原则针对不同航段水文特征制定差异化部署方案。主航道关键节点采用 Class A 级 AIS 应答器，发射功率 12.5W，有效覆盖半径达 20 海里确保高密度船舶交通区域信号稳定传输。支流汇入口与浅滩险段部署 Class B 级设备，功率 2W，覆盖半径 8 海里降低成本同时满足区域监控需求。设备部署采用“三点定位”策略每 3~5 公里设置一个监控节点形成网格化覆盖格局。考虑长江汛期水位变化幅度达 15 米的实际情况，将航标设备安装高度设定为历史最高水位上方 3 米并配置自动升降调节机构。供电系统采用太阳能板与锂电池组合方

案，太阳能板功率 100W，电池容量 200Ah 确保连续阴雨天气下 7 天自主供电。通信链路建立 VHF 主用 4G 备用的双通道传输模式信号切换时间控制在 2 秒以内。

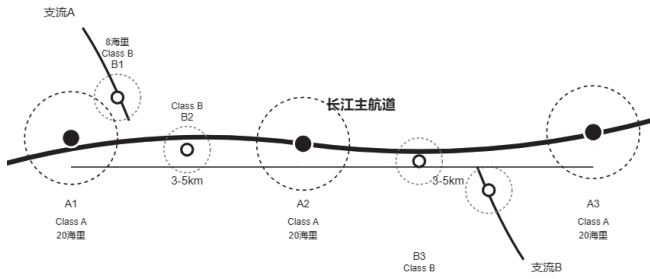


图 3 长江干线 AIS 设备点位分布图

2.2 多参数实时监测技术

多参数实时监测技术构建基于物联网架构的分布式传感器网络，实现航标设备状态的全维度感知与智能分析（表 1）。位置监测采用双频 GPS 接收机与北斗卫星导航系统融合定位，定位精度提升至亚米级通过卡尔曼滤波算法消除多路径误差影响。

$$\theta = \arctan(\sqrt{ax^2 + ay^2}/az)$$

其中： θ ：航标设备相对于垂直方向的倾斜角度（单位：度）； ax ：MEMS 三轴加速度计 X 轴方向的重力加速度分量（单位： m/s^2 ）； y ：MEMS 三轴加速度计 Y 轴方向的重力加速度分量（单位： m/s^2 ）； \arctan ：反正切函数，用于将加速度比值转换为角度值。

倾斜角度监测集成 MEMS 三轴加速度计与陀螺仪，采样频率 10Hz，角度分辨率 0.1° ，建立动态阈值预警机制当倾斜角超过设定值 3° 时触发异常报警。

表 1 航标多参数实时监测数据表

| 监测参数 | 传感器类型 | 采样频率 | 测量精度 | 预警阈值 |
|----------|------------|--------|-------------------|----------------------------------|
| 卫星导航位置坐标 | 双频卫星导航接收机 | 1Hz | $\pm 0.5m$ | 偏移 $> 5m$ |
| 设备倾斜角度 | MEMS 三轴传感器 | 10Hz | $\pm 0.1^\circ$ | 倾斜 $> 3^\circ$ |
| 电池电压 | 智能电源管理芯片 | 0.1Hz | $\pm 0.01V$ | $< 10.8V$ |
| AIS 信号强度 | 射频功率检测器 | 1Hz | $\pm 0.5dBm$ | 衰减 $> 20\%$ |
| 环境温度 | 数字温湿度传感器 | 0.01Hz | $\pm 0.3^\circ C$ | $< -20^\circ C$ 或 $> 60^\circ C$ |

供电状态监测通过智能电源管理芯片实时采集电池电压，充电电流，放电电流等关键参数，运用 exponential smoothing 算法预测电池剩余寿命。信号强度监测采用射频功率检测技术，实时测量 AIS 信号发射功率与 VSWR 值当功率衰减超过 20% 时自动启动故障诊断程序。环境参数监测集成温湿度传感器，风速风向仪为设备运行状态评估提供环境基准数据，通过多元回归

分析建立环境因子与设备性能关联模型。

2.3 数据传输与处理算法

数据传输与处理算法采用“边缘预处理 + 云端深度分析”的分层计算架构有效解决海量传感器数据的实时处理与带宽优化问题。边缘节点部署轻量级数据预处理算法运用滑动窗口技术对原始数据进行降噪与压缩，数据压缩率达到 75% 显著降低网络传输负载。

$$CR = (1 - Dc/Do) \times 100\%$$

其中：CR 表示数据压缩率（%），Dc 表示压缩后数据量（KB），Do 表示原始数据量（KB）。

云端处理中心构建基于深度学习的异常检测模型，采用 LSTM 长短期记忆网络捕获航标设备状态的时序特征通过无监督学习识别异常行为模式。

$$Th(t) = \mu + \alpha \times \sigma \times e^{(-\beta t)}$$

其中： $Th(t)$ 表示 t 时刻的异常检测阈值， μ 表示历史数据均值， σ 表示标准差， α 表示调节系数（通常取值 2-3）， β 表示衰减因子，t 表示时间变量。

数据传输协议采用改进的 MQTT 协议，增加消息去重与断线重连机制，确保数据传输的可靠性。处理算法集成自适应采样策略根据设备状态动态调整数据采集频率，正常状态下采样间隔 5 分钟，异常状态下提升至 30 秒高频采样建立分布式数据同步机制采用一致性哈希算法实现多节点数据负载均衡，系统处理能力提升 40%，响应时间缩短至 500 毫秒以内。

3 应用效果分析与验证

3.1 试验段选择与监控指标设定

长江重庆段作为内河航运枢纽区域，船舶密度高，航道条件复杂成为 AIS 航标监控系统验证的理想试验段。该段选择涵盖重庆主城区约 120 公里航段，包含朝天门码头，寸滩港与果园港等重要港区节点以及铜锣峡与明月峡等典型弯曲河段。试验段部署 108 套 AIS 航标设备，建立“双密度监控网格”主航道监控密度每公里 3 套，支流汇入口及危险水域监控密度每公里 5 套。监控指标体系围绕“四个维度六项参数”构建位置精度指标要求偏移误差小于 2 米设备状态监控包括倾斜角度阈值 $\pm 2^\circ$ 电压预警值 10.5V，信号强度衰减限值 15%。通信可靠性指标设定数据传输成功率 $\geq 99.5\%$ ，响应时间 ≤ 3 秒。建立分级预警机制，黄色预警触发条件为单项指标偏离正常范围 10%~20% 橙色预警为 20%~50%