

基于多源数据融合的智能起锚机健康监测平台研究

毕淑慧, 李艳春, 王洪林, 蔡 敏

武汉船用机械有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年3月31日; 发布日期: 2025年4月7日

摘 要

传统锚绞机由于数据利用率低、设备故障处理滞后而导致作业效率低下, 为此, 本文提出了一种基于多源数据融合的智能起锚机健康监测平台。该平台架构涵盖数据采集层、传输层、处理层、应用层, 实现数据采集、状态监测、历史数据查询等功能。针对数据采集层的多源数据, 系统利用主成分分析和高斯混合模型进行健康状态评估, 识别异常数据并及时预警, 提高了起锚机故障处理的响应度。该平台能极大地满足未来船海设备信息化、智能化、高效化的发展需求。

关键词

智能化起锚机, 健康检测, 多源数据融合

Research on Health Monitoring Platform of Intelligent Windlass Based on Multi-Source Data Fusion

Shuhui Bi, Yanchun Li, Honglin Wang, Min Cai

Wuhan Marine Machinery Plant Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Mar. 31st, 2025; published: Apr. 7th, 2025

Abstract

Due to the low utilization rate of data and the lag in handling equipment failures, traditional anchor windlasses have low operating efficiency. For this reason, an intelligent anchor windlass health monitoring platform based on multi-source data fusion has been proposed in this paper. The platform architecture covers the data acquisition layer, transmission layer, processing layer, and application layer,

文章引用: 毕淑慧, 李艳春, 王洪林, 蔡敏. 基于多源数据融合的智能起锚机健康监测平台研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 106-113. DOI: 10.12677/met.2025.142011

realizing functions such as data acquisition, status monitoring, and historical data query. For the multi-source data in the data acquisition layer, the system uses principal component analysis and Gaussian mixture models to conduct health status assessments, identify abnormal data and issue timely warnings, improving the responsiveness in handling anchor windlass failures. This platform can greatly meet the development needs of informatization, intelligence, and high efficiency of future marine equipment.

Keywords

Intelligent Windlass, Health Monitoring, Multi-Source Data Fusion

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航运市场的不断发展和无人船研究的不断深入, 各大主流船东对智能化、数字化的需求与日俱增。传统锚绞机在自动化、智能化方面存在不足, 难以满足无人船高效、精准、安全的作业需求, 因此智能化锚绞机的发展成为无人船技术进步的必然要求。2019年12月3日, CCS发布的《智能船舶规范 2.0》提出了明确的要求: 要求自主操作船舶的锚泊设备应能有自主决策系统或遥控控制收链、放链、刹车、离合、操作掣链器、锚链冲洗装置和锚链水装置、锚和锚链系留装置、能遥控操作弃锚装置等, 能监测锚链放出长度、速度和锚链拉力。同时, 未来船舶智能运维应具有数据集成化、岸船一体化、决策智能化的发展趋势, 将船舶子系统数据采集、传输和处理进行有机融合, 通过船-云-岸通信网络系统实现岸船一体化, 依据实时传输获得的监测数据能够实现决策智能化[1]。船用配套设备智能集成与远程运维系统将物联网、工业云等技术相结合, 通过对设备状态的实时监测与分析, 实现对设备的远程诊断与维护, 从而降低设备运维成本, 并通过各类传感器装置实现预防式维护[2]。船海工程机电设备智能化功能架构分为船舶总体层、系统层、设备层、传感层, 设备层智能化要素包括故障诊断、寿命预测、远程操控等; 传感层实现设备数据采集, 功能要素包括数据采集、传感分析、信号识别等[3]。郑辉[4]针对液压起货机与锚绞机仿真系统进行了开发, 为智能锚绞机的训练与应用提供了新的平台。邹川[5]对船舶液压锚绞机及起货机系统进行了仿真研究, 为智能锚绞机的性能优化提供了理论支持。锚绞机工况复杂, 智能控制系统能使锚绞机稳定运行, 减少设备故障[6]。

2. 智能化起锚机健康检测平台设计

2.1. 功能分析

智能化起锚机健康检测平台应涵盖数据采集、数据处理、健康检测与故障处理等功能。

1) 数据采集

数据采集是智能锚绞机实现健康检测和故障诊断处理的基础。智能化起锚机在机械、液压、电器部分集成高精度传感器, 全面采集系统及周围环境的数据。通过高精度传感器和实时数据传输技术, 确保数据采集的准确性和实时性, 为后续的数据处理和健康检测提供可靠的数据支持。

2) 数据处理

数据处理对采集到的数据进行清洗、整理和分析, 将传感器采集的数据进行转换处理, 以提取出对

起锚机健康状态评估有价值的信息。健康检测则需基于数据处理结果，建立健康评估模型，实时监测起锚机的运行状态，并预测潜在故障。

3) 健康检测

对数据处理结果进行趋势分析和异常识别，实现智能化起锚机状态健康监测。根据数据处理结果对锚绞机的整体健康状况进行评估，预测潜在风险；对于非正常的工作状态或环境变化，自动识别并诊断常见故障，提前发出预警信号。

4) 故障处理

针对健康检测平台预警信号进行故障诊断处理。通过对起锚机作业工况的全面分析，研究制定智能化起抛锚控制策略，实现起锚机进行智能化起抛锚的控制，以确保船舶的安全锚泊并提高锚绞机的可靠性和使用寿命。

2.2. 设计原则

1) 安全性

设计首先要确保智能化起锚机操作和使用过程中的安全性。包括防止过载、过速、过热等异常情况，以及确保在紧急情况下能够及时、可靠地控制锚绞机运行。

2) 标准化

结构方面严格按照标准化、模块化原则进行设计，功能配置方面进行标准化、模块化设计；实现功能可选配，满足用户的个性化需求；针对智能数据交互需求，对数据接口进行标准化、模块化设计，实现数据接口的标准化和数据格式的规范统一。

3) 可扩展性

智能化锚绞机功能随着技术的进步和需求的变化将会不断扩展和升级，在设计时应考虑系统的可扩展性，预留接口和升级空间，以便未来添加和升级新功能。

2.3. 系统组成

针对智能化起锚机健康检测平台功能，设计了智能化起锚机健康检测平台的系统框架。数据采集模块采集锚链的长度、液压系统工作压力、锚链张力等状态信息；采集后的数据处理后在平台状态监测与预警模块显示，故障诊断与处理模块由岸基控制模块、船基控制模块、驾驶室设备及控制模块、船艏甲板设备及控制模块、艏部舱室设备及控制模块组成，机舱控制单元接收、处理机旁控制台、驾驶室控制台、岸基平台发出的控制指令，驱动液压系统电磁阀、液压马达手柄驱动器，控制锚机的制动器、离合器、止链器、液压马达等执行机构，实现锚机的收、放锚操作。

智能化起锚机健康检测平台可分为传感层、设备层、系统层、应用层，如图 1 所示。

传感层是智能化起锚机健康检测平台的基础，主要负责采集和处理数据。这一层集成了多种高精度传感器，用于实时监测锚绞机的各种关键参数，传感器采集到的数据经过初步处理后，会传输到设备层进行进一步的分析和处理。

设备层是智能化起锚机健康检测平台的核心，主要负责状态监控和自动控制。可实时监测锚绞机的工作状态和健康状况，实现故障诊断与预警、健康评估、异常检测等。同时，设备层还可实现锚绞机的自动控制。

系统层是智能化起锚机健康检测平台的中枢，主要负责设备管控和运行管理。对设备层进行统一的管理和控制，包括设备的启停、工作模式的切换、参数的调整等。同时，系统层还负责运行管理，如数据存储、日志记录、报警处理等，确保锚绞机的正常运行和数据的可追溯性。

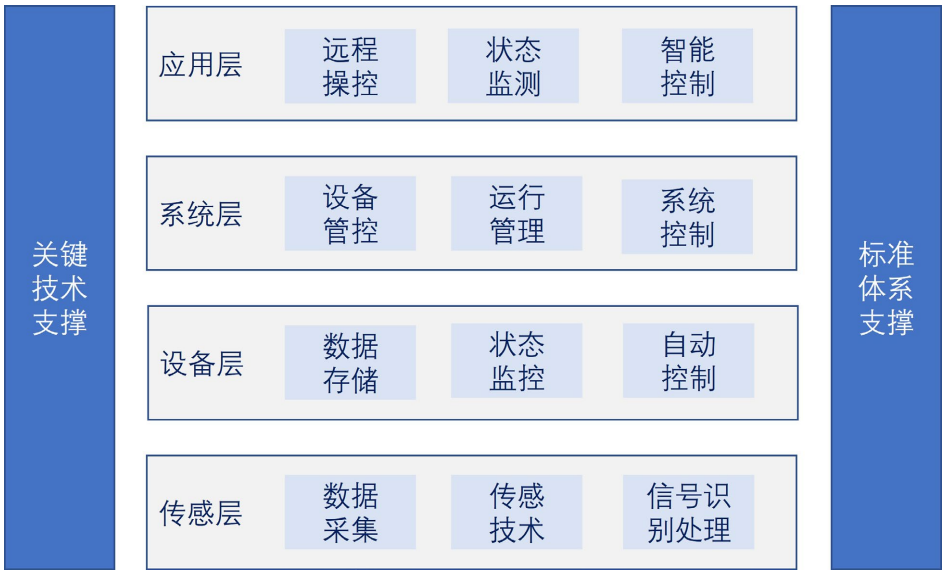


Figure 1. Composition of an intelligent windlass system
图 1. 智能化起锚机系统组成

应用层是智能化起锚机健康检测平台的顶层，主要负责远程操控和智能控制。这一层通过卫星信号或互联网连接，实现岸基控制中心对锚绞机的远程监控和操作。操作人员可以在远离船舶的情况下，实时查看锚绞机的工作状态和船舶的锚泊情况，并进行必要的远程操作和维护。

3. 多源数据融合技术研究

3.1. 多源数据采集

采集智能化起锚机多源异构数据，是实现起锚机故障诊断、安全预警与健康管理的 premise。智能化起锚机在起锚机机械本体、电器部件和液压系统上部署了多种传感器，形成了数据采集网络，如图 1 所示。数据采集网络采集起锚机锚链长度、锚链速度、振动与噪音数据；起锚机制动器、离合器与止链器安装有接近开关，分别收集刹车、离合器与止链器状态数据。智能化起锚机液压系统配置的传感器如表 1 所示，液压系统配置有温度开关、液位开关、压差开关、压力传感器，采集泵站温度、液位、压力数据，在泵站设备出现高油温、低液位、滤器堵塞、过载等情况时可及时预警。同时，主泵站配置了油颗粒度监测传感器监测液压油油品，防止因液压油质量问题造成设备损坏。

Table 1. Data acquisition network for intelligent windlass
表 1. 智能化起锚机数据采集网络

序号	数据类别	传感器
1	锚链长度	计数器、编码器
2	收放锚速度	编码器
3	振动与噪音	振动传感器
4	刹车状态	接近开关
5	离合器状态	接近开关
6	止链器状态	接近开关
7	电机温度	温度传感器

续表

8	泵组温度	温度传感器
9	泵组液位	液位开关
10	主泵油颗粒度	油颗粒度监测传感器
11	泵站压力监测	压力传感器
12	泵站滤器堵塞	压差开关

3.2. 多源数据处理

3.2.1. 主成分分析法

在数据进入融合分析之前须对其进行处理,以确保数据的有效性和分析的准确性。

主成分分析(PCA)通过线性变换将数据从高维空间投影到低维空间,从而降低数据的维度,提取出最具信息量的特征。PCA 的主要步骤如下:对每个特征进行零均值化处理,即:

$$x'_i = x_i - \mu_i \quad u_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

式中: x_i 是第 i 个特征的原始数据; u_i 是该特征的均值; x'_i 是中心化后的数据。

计算数据的协方差矩阵 C , 它表示不同特征之间的相关性:

$$C = \frac{1}{n-1} X^T X$$

式中: X 是中心化后的数据矩阵; X^T 是其转置。

对协方差矩阵进行特征值分解, 得到特征值和对应的特征向量:

$$Cv_i = \lambda_i v_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, d$$

将数据投影到由特征向量组成的新空间中, 选择前 k 个最大的特征值对应的特征向量构成的子空间进行降维:

$$X_{\text{reduced}} = X \cdot V_k$$

式中: V_k 是前 k 个特征向量构成的矩阵; X_{reduced} 是降维后的数据。

主成分分析(PCA)主要用于降低起锚机数据的维度, 提高数据处理效率, 并帮助识别和突出最关键的监测变量, 便于识别异常数据并诊断故障。

3.2.2. 高斯混合模型(GMM)分类

高斯混合模型(GMM)是一种基于概率的模型, 用于数据的聚类分析与分类。数据来自多个高斯分布的混合模型, GMM 通过期望最大化(EM)算法对参数进行估计。

通过迭代重复, 算法逐渐收敛, 最终找到能够最大化整个数据集对数似然的参数。起锚机状态数据的多维特性被有效压缩并分类, 能够高效识别起锚机健康状态。

3.2.3. 小波降噪处理

小波降噪技术主要用于处理起锚机振动、噪声、温度等数据以及沉降监测数据, 去除噪声干扰, 提高数据质量, 确保数据处理和故障诊断结果的准确性。

小波变换将信号分解为不同频率的成分。对于一维信号 $x(t)$, 其离散小波变换表示为:

$$W_X(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

式中: $\Psi(t)$ 是小波基函数; a 和 b 分别是尺度和平移参数。

在小波变换的系数中, 低频成分包含了信号的主要信息, 而高频成分通常代表噪声。因此, 可以通过阈值方法去除高频噪声。软阈值去噪公式如下所示:

$$W(a, b) = \text{sign}(W(a, b)) \cdot \max(|W(a, b)| - \lambda, 0)$$

3.2.4. 趋势分析与健康状态评估

趋势分析可以用来识别数据的长期变化模式, 帮助发现起锚机的潜在风险和异常情况。可以使用滑动平均方法来分析数据的趋势:

$$SMA_t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t x_i$$

式中: SMA_t 是时间窗口 N 的简单移动平均值; x_i 是第 i 个时刻的观测数据。

分析起锚机监测数据的趋势, 帮助识别起锚机的作业模式和状态, 及时发现潜在的异常变化。针对锚链长度、速度进行分析并依据 GPS 与锚点坐标的距离、锚链长度、张力过小持续时间进行综合判断船舶是否走锚, 若出现异常则发送“走锚警报”; 分析泵站温度、压力、温度、油位及油品数据, 通过长期的数据趋势综合分析, 评估起锚机泵站的健康状态, 在高油温、低液位、压力及油品等异常情况下及时报警, 确保其长期稳定运行。

除此之外, 根据不同工况下锚绞机健康状态评估模型和设备健康状态数据采集结果, 进行设备健康状态评价和基于健康状态评价结果的可视化维修维护决策。通过锚绞机可靠性设计(FMECA、FTA)及故障经验积累, 识别锚绞机等典型故障模式, 分析故障原因和影响因子, 基于故障模式建立负载、速度、锚链长度与驱动电机电流转速、减速机高速轴承温度等采集数据与故障模式间的健康状态判定模型, 与实时采集数据比对, 对锚绞机核心部件进行健康状态评价, 从而优化船舶机械设备运行状态并给出机械操作、维护等优化建议。

4. 智能化起锚机健康检测平台实现

智能化起锚机健康监测平台对起锚机健康状态的全面、实时监测体系, 为设备的运行效率、安全性和可靠性提供了有力保障。智能化起锚机健康监测平台主要包括状态监控、健康监测、实时报警、远程操控等界面。



Figure 2. Windlass status monitoring interface

图 2. 锚机状态监控界面

状态监控界面实时显示起锚机的各项运行参数，如图 2 所示，使管理人员能够随时掌握设备的实时运行状态。平台监控显示起锚机设备工作状态、运行状态、视频监控。平台收集制动器、离合器、止链器、泵站压力、泵站油温等工作状态信息和锚链速度、张力、长度和船舶位置、航速、水深等运行状态信息。

健康监测界面根据设备实时状态数据判断设备健康状态，如图 3 所示，为故障排查、性能评估及设备改进提供重要参考。设备健康状态通过采集船端系统设备实时状态数据表获得，将设备健康状态分为健康、异常和故障三种情况。



Figure 3. Windlass health monitoring interface
图 3. 锚机健康监测界面

平台收集起锚机异常数据并在实时报警界面显示，如图 4 所示，及时提醒管理人员采取相应措施并有效避免潜在故障的发生。详细记录起锚机在运行过程中触发的所有报警事件，包括报警时间、报警类型、报警名称、报警设备等信息。管理人员可以通过该界面进行报警事件的统一管理，包括查看、分类、筛选和导出等操作，为故障排查、性能评估及设备改进提供重要参考。



Figure 4. Real-time alarm interface for windlass
图 4. 锚机实时报警界面

远程操控界面可实现一键备锚、一键抛锚、一键收锚，如图 5 所示，通过远程操控提高工作效率和

操作灵活性。按下一键备锚按钮，锚机会自动合上离合器，松开刹车，拔出止链器插销，打开止链器，将锚链下放到设定长度，并自动合上刹车，为一键抛锚做准备。按下一键抛锚按钮，锚机会自动松开刹车，并根据锚链下方的长度自动调整刹车比例阀开度，控制刹车速度，当锚链下方达到设定长度时，并自动合上刹车，完成自动抛锚作业。按下一键收锚作业，锚机会自动将放出的所有锚链收回，并合上刹车，关闭止链器闸刀，插入止链器插销，松开离合器。



Figure 5. Remote control interface for windlass
图 5. 锚机远程操控界面

智能化起锚机健康监测平台作为现代船舶作业的关键技术创新，通过集成健康监测、异常报警以及远程控制功能，显著提升了起锚作业的安全性、效率与智能化水平。本研究通过对平台的设计原理、关键技术及其实际应用进行分析，验证了其在实时监测设备状态、及时发现并预警潜在故障以及实现远程精准操控方面的有效性。未来，随着物联网、大数据与人工智能技术的不断发展，智能化起锚机平台将进一步优化算法模型，提升数据分析精度，增强系统自适应能力，以更好地服务航运业的智能化转型。本研究不仅为智能化起锚机平台的发展提供了理论依据与实践指导，也为其他领域智能化设备的研发与推广积累了宝贵经验。

参考文献

- [1] 张瑞, 田亚辉, 汤敏, 等. 船用设备智能运维探究[J]. 珠江水运, 2022(7): 98-100.
- [2] 徐卫东, 刘佳, 陈宇航. 主流船型船用配套设备智能集成与远程运维新模式研究[J]. 航海, 2021(5): 24-29.
- [3] 汤敏, 曾力, 李飒, 等. 船海工程机电设备智能化新模式[J]. 船舶工程, 2019, 41(S1): 128-133.
- [4] 郑辉. 液压起货机与锚绞机仿真训练系统的开发[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- [5] 邹川. 船舶液压锚绞机及起货机系统仿真研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [6] 吴磊, 张永林, 李新鹏. 三速锚绞机智能控制系统设计研究[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(1): 86-88.