

Research on Fault Prediction and Health Management of Ship Automation System

Xinhui Liu

Jiangsu Yuanwang Instrument Group Co., Ltd., Taizhou, Jiangsu, 225300, China

Abstract

With the continuous advancement of ship intelligentization and digitalization, automated systems have become increasingly vital in marine power systems, navigation, control, and monitoring operations. Their operational reliability directly impacts navigation safety and economic efficiency. In recent years, the growing complexity of ship automation systems has rendered traditional experience-based maintenance methods inadequate for meeting modern operational demands. This paper systematically analyzes the structural characteristics of ship automation systems using Prognostics and Health Management (PHM) theory, and proposes a data-driven framework integrating predictive modeling with mechanistic analysis. The proposed PHM framework and implementation strategies aim to provide theoretical support and engineering guidance for intelligent operation and maintenance management in ship automation systems.

Keywords

ship automation system; fault prediction; health management; data fusion; intelligent operation and maintenance

船舶自动化系统故障预测与健康管理研究

刘新辉

江苏远望仪器集团有限公司，中国·江苏 泰州 225300

摘要

随着船舶智能化与数字化进程的不断推进，自动化系统在船舶动力、导航、操控及监测环节中的作用日益突出，其运行可靠性直接关系到航行安全与经济性。近年来，船舶自动化系统复杂度不断增加，传统基于经验的维护方式已难以满足高效运维需求。本文基于故障预测与健康管理（Prognostics and Health Management, PHM）理论，系统分析了船舶自动化系统的构成特征，构建了数据驱动与机理融合的预测模型框架。笔者期望本文提出的PHM框架与实现策略，为船舶自动化系统的智能运维与健康管理提供理论支撑与工程指导。

关键词

船舶自动化系统；故障预测；健康管理；数据融合；智能运维

1 引言

船舶自动化系统（Ship Automation System, SAS）是现代船舶的重要组成部分，涵盖主机控制系统、推进系统自动调节装置、电力分配与监控系统、航行辅助系统以及综合报警与安全防护系统等。随着船舶装备向“智能船舶”“无人船”方向发展，其系统的集成度与复杂度显著提升。与此同时，系统元件老化、信号干扰、环境腐蚀及软件逻辑错误等问题频发，造成潜在的安全隐患。传统的周期性检修模式存在维护成本高、故障响应滞后及人机协作效率低等问题。在此背景下，故障预测与健康管理（PHM）作为一种综合运维理念，通过实时监测关键部件的状态信息，利用数据驱动与模型推理方法实现早期故障识别与寿命预测，已成为船舶装备智能

化运维的核心方向。本文从系统层面出发，构建适用于船舶自动化系统的 PHM 技术体系，并对其应用路径与关键技术进行深入研究。

2 船舶自动化的典型故障模式与影响机理

2.1 系统故障类型与分布特征

船舶自动化系统是一种集机械、电气、电子与信息技术于一体的复杂综合系统，其故障类型呈现多样化和层次化的特征。根据失效机理可分为硬件故障、软件故障、通信故障与人机交互故障四大类^[1-2]。从系统层级看，硬件故障主要集中在传感器、执行器及控制单元等关键设备；软件故障多发生在控制逻辑和数据处理算法中；通信故障主要涉及信号传输链路与网络节点的异常；而人机交互故障则与操作界面设计、报警策略及人因决策偏差密切相关。

硬件故障是最常见且最具破坏性的类型。燃油喷射系统中的压力传感器在长期高温高压下易产生零点漂移，导致

【作者简介】刘新辉（1985-），男，中国江苏泰州人，本科，工程师，从事船舶电气及自动化研究。

控制系统误判燃油供给状态，从而引起燃烧效率下降和排放指标超限。执行机构如电磁阀、液压伺服装置的卡滞或响应迟滞，会造成主机启停异常、调速失灵或阀门失控等严重后果。电气元件的热疲劳、绝缘老化及接触不良也常成为系统间歇性失效的根源。软件故障则主要表现为算法错误、数据溢出及逻辑竞争。例如，在机舱监测系统中，若温度、压力及流量信号的采样频率或时间同步处理不当，可能导致控制系统对设备运行状态判断失准，引发过度调节或执行滞后。再如，在泵阀自动控制系统中，若数据过滤与异常检测机制缺陷，异常信号未及时剔除，将可能导致功率分配紊乱或母线电压波动，严重时引发系统级故障。

2.2 故障演化机理与系统影响分析

船舶自动化系统的故障演化通常经历潜伏、发展、扩散与失效四个阶段，具有渐进性、隐蔽性与耦合性特征。在潜伏阶段，设备性能仅发生微小波动，如传感器输出偏差、电流纹波或油温缓慢上升，尚不足以触发报警，但已暗示潜在退化趋势。若不及时识别，该趋势将在发展阶段放大，导致局部性能下降。此时系统可能进入频繁修正状态，表现为控制响应延迟或能耗上升。

当故障进入扩散阶段，其影响范围将由局部组件扩展至系统级。在自动化系统的耦合结构中，一个子系统的异常往往会影响邻接系统的反馈扰动，使整体控制精度下降。最终，若未能通过健康监测与自愈控制加以抑制，故障将演变为全面失效或安全停机事件。在影响机理上，船舶自动化系统的故障不仅造成设备性能退化，更可能导致控制逻辑紊乱与安全风险放大。对于动力系统而言，传感器失准或执行机构响应异常会直接影响燃烧效率与推进功率，导致燃油消耗增加与排放超标^[3]。对于电力系统而言，变频器模块老化或电缆绝缘退化会引发谐波畸变和电能质量劣化，最终威胁整船供电安全；对于航行控制系统而言，信号丢失、算法漂移及延迟反馈可能造成自动舵偏航、动态定位误差或防碰撞系统误判，增加海上事故风险。为揭示这种复杂机理，近年来学者提出基于系统工程的故障传播模型（Fault Propagation Model, FPM），通过构建“信号—功能—控制”三层耦合网络，分析故障在不同层级间的传递路径。如在主机控制系统中，若温度传感器失准，温控回路误判冷却状态，控制器调整冷却阀门开度过度，冷却水泵负荷增加、电机温升上升，最终形成热退化闭环。此类机理模型为 PHM 系统的早期诊断与趋势预测提供了理论支撑。

3 船舶自动化系统故障预测模型构建

3.1 数据驱动与机理融合的建模思路

船舶自动化系统的多源耦合特性与非线性动态行为，决定了单一建模范式的局限性。传统的机理模型以控制方程和热力学关系为基础，能够揭示变量间的物理约束与能量传递逻辑，但在复杂工况和高维数据环境下，往往难以实现

实时适应^[4]。相反，纯数据驱动模型虽然具备强大的模式识别与拟合能力，却缺乏机理约束和可解释性。针对这一问题，本文提出了基于机理—数据融合（Hybrid PHM）的建模路径，以便于构建一个可解释、可迁移且具有鲁棒性的故障预测框架。

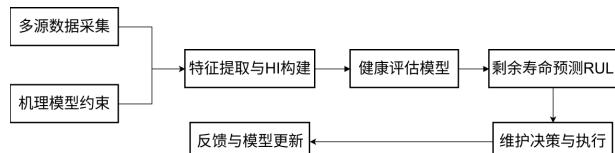


图 1 船舶自动化系统 PHM 流程示意图

模型构建的第一步是建立多源传感数据流体系，将来自主机控制、电力分配、推进调速及导航辅助等系统的温度、振动、电流、压力等数据进行同步与去噪处理。随后，基于热传导方程、能量守恒与控制逻辑约束，对特征进行物理校正，确保数据分布与实际机理一致。模型的核心部分引入了 LSTM- 贝叶斯融合结构，LSTM 层负责提取时间序列中的退化趋势特征，贝叶斯层则实现不确定性量化与概率预测，从而同时兼顾动态性与可信性。该融合模型既能适应复杂工况下的信号漂移，又能通过物理一致性约束，提升预测的解释性与泛化能力。

如上图 1 体现了从“数据采集—特征提取—健康评估—寿命预测—决策执行—模型反馈”的闭环逻辑，展示 PHM 系统在船舶自动化中的核心路径与信息流关系。

3.2 特征提取与健康指标构建

健康指标（Health Indicator, HI）是实现故障退化量化与寿命预测的核心变量。针对主机系统，可通过振动包络分析识别轴承或齿轮磨损特征，结合油液铁谱中磨屑浓度与粒径变化形成机械磨损指数；在电力系统中，则以谐波畸变率、温升速率及绝缘阻值变化率综合表征电气健康度。为实现稳定的特征表示，采用时域—频域联合分析提取信号能量分布特征，结合小波包能量熵识别非平稳扰动点，并利用主成分分析（PCA）或自编码降维方法去除冗余信息。在健康指标构建阶段，通过时间序列回归建立 HI 与退化过程的映射关系，形成单调递减的健康曲线。结合多项式或指数退化模型，可实现 HI 的连续拟合，为后续剩余寿命预测（RUL）提供输入基础。最终，模型实现了从“信号采集—特征提取—指标构建—趋势预测”的全流程闭环，为船舶自动化系统提供动态、可解释的健康演化建模方案。

4 健康状态评估与剩余寿命预测技术

4.1 健康状态评估模型

面向船舶自动化系统的健康状态评估应在“多源数据—知识先验—算法推断”的统一框架下进行，以实现对设备劣化进程的连续刻画与状态边界的可解释判定^[5]。具体而言，原始信号经由边缘节点完成去噪、同步与异常点修正后，构

建包含振动谱密度、谐波畸变率、温升梯度、油液颗粒特征及通信质量指标等在内的特征矩阵，通过时—频—统计的多视角筛选与主成分压缩获得低冗余表征；在此基础上，引入机理先验（如热-电耦合约束、控制逻辑阈值与安全联锁条件）作为特征有效域与模型可行域的物理边界，进而采用两类互补方法进行状态判别。其一，基于概率图模型的隐状态识别，以隐马尔可夫/半马尔可夫模型获取“健康—轻度退化—重度退化—故障”的时序转移与滞后特性；其二，基于监督学习的判别模型，以支持向量机、随机森林或轻量化卷积网络实现端到端特征到健康等级的映射，并通过阈值回溯与混淆矩阵约束实现误报/漏报的工程权衡。为解决工况漂移与传感器漂移导致的域外样本问题，评估过程中引入领域自适应与小样本增广策略（如 MMD 约束或对抗式特征对齐），并以专家知识库进行结果校核与规则重写；最终，健康指标（HI）以归一化的 [0,1] 区间输出并绑定风险等级与处置建议，实现“数据—模型—规则”的闭环一致与人机协同决策。

4.2 剩余寿命预测（RUL）方法

RUL 预测以连续退化信号与健康指标序列为输入，在不确定性量化与工况鲁棒性约束下给出到达失效阈值的时间估计。针对机械与电力电子部件退化机理差异，构建“统计退化—深度时序—机理校正”的混合式路线。第一，利用 Gamma/Weibull 等统计退化模型对长期趋势进行先验拟合，获得粗粒度寿命先验分布；第二，以 LSTM/TCN 对非平稳多变量序列进行时序建模，捕捉短时冲击与耦合扰动下的局部加速劣化，并在训练阶段加入蒙特卡洛 dropout 或贝叶斯层实现区间预测；为确保可解释性与外推可靠性，在网络损失函数中叠加机理一致性项（如热循环累计损伤、铜损/铁损功率约束、控制阈值越界惩罚），并以多场景工况（航速、负载、海况等级）进行条件化训练，输出分位数 RUL 与置信区间。在线应用时，系统持续滚动更新 HI 与模型后验，通过粒子滤波/卡尔曼滤波实现 RUL 的递推校正，并以动

态阈值策略联动维护决策。当 RUL 低于计划维护窗口或不确定度超限时触发预警；若 RUL 在置信区间内趋稳，则延长检修周期以优化可用性与备件策略。该方法在工程实践中可与岸端 CMMS/ERP 对接，形成“预测—排程—物资—验证”的闭环运维流程，兼顾寿命利用率、停机风险与全寿命周期成本。

5 结语

船舶自动化系统的智能化与复杂化使得传统的被动维护模式已难以适应现代航运的安全与经济需求。基于 PHM 理念的故障预测与健康管理技术，通过融合机理模型与数据驱动方法，实现了系统状态的实时监测与寿命预测。本文从系统结构、故障模式、建模方法、健康评估及实施架构五个方面进行了系统研究，构建了完整的技术体系。研究结果表明，应用 PHM 技术不仅能有效降低船舶故障率与维护成本，还能为智能航运与无人船的自主运行提供关键支撑。未来研究可进一步结合人工智能、数字孪生与边缘计算技术，实现船舶全生命周期的智能健康管理与协同优化。

参考文献

- [1] 夏玉玫. 船舶电气自动化控制技术及其应用[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(07):118-120.DOI:10.19727/j.cnki.cbwzysc.2025.07.036.
- [2] 鲍硕. 船舶电气系统的可靠性保障技术[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(07):124-126.DOI:10.19727/j.cnki.cbwzysc.2025.07.038.
- [3] 扶子澜. 船舶自动化系统安全性分析[J]. 中国航务周刊, 2025, (23):51-53.
- [4] 韩丽冰, 金国喜, 孙辉. 船舶电气自动化系统故障诊断技术研究[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(04):87-89.DOI:10.19727/j.cnki.cbwzysc.2025.04.028.
- [5] 梁崇博. 船舶电气自动化故障排除及发展趋势[J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(01):10-12.DOI:10.19727/j.cnki.cbwzysc.2022.01.004.