

船舶通信设备故障预测与健康管理系统设计

李 森

海装沈阳局 辽宁沈阳 110000

摘 要：船舶通信设备是海上运输的关键保障，其稳定运行直接影响航行安全。传统维护依赖定期检查和事后维修，存在预警不及时和资源效率低的问题。本文提出故障预警与健康管控系统，融合状态监测、智能解析和决策辅助技术，实现故障早期察觉、健康动态衡量和维护前瞻规划。系统采用分层架构，建立故障预警模型，量化退化走向，为决策提供科学支撑。投入使用后，可增强可靠性，减少突发故障，提供智能解决途径。

关键词：船舶通信设备；故障预警；健康管控系统；健康动态衡量

引言

现代船舶通信设备主要承担协同指令传达、信息互通和编队协作等核心任务，是海上航行和编队协同的“中枢神经系统”^[1]。随着信息化深化，设备集成度、工作频率和系统复杂性增加，导致故障更隐蔽多样。传统定期检修难发现隐患，事后维修可能中断任务或威胁安全。

近年来，故障预测与健康管理（PHM）技术应用成熟，通过持续监控设备生命周期状态实现主动预警和健康状况动态掌控。应用于通信设备，可避免事后维护损失，并基于健康评估优化资源调配，减少非必要检修。

当前维护面临盐雾侵蚀、持续振动、电磁干扰等环境因素加速老化和故障；设备种类多、原理复杂，通用监测手段难适用；船舶空间狭小要求小型化和低能耗。本文致力于设计一套船舶通信设备故障预警与健康管控系统，从架构设计、关键技术实现及应用方法探讨，以增强通信保障能力^[2]。

1 系统设计目标

该系统旨在达成“状态明晰、故障预警、健康可控”的核心诉求，具体体现为：

- （1）动态捕捉设备核心运行参数，构建全方位的状态监控机制。
- （2）有效辨识设备潜在的故障隐患，实施早期预警并精准确定故障发生点。
- （3）对设备健康状况进行持续评估，将其退化趋势以量化形式呈现。
- （4）制定科学优化的设备维护方案，辅助实现维护资源的高效调配。

2 系统设计准则

为确保系统效能，设计过程中遵循以下关键准则：

- （1）环境适应性：系统需能在复杂的海上环境中稳定工作，具备抵抗振动、电磁干扰以及耐受盐雾侵蚀的能力^[3]。
- （2）数据实时性：保障设备状态数据的采集与分析过程快速及时，以满足故障预警对响应时间的要求。
- （3）运行可靠性：系统自身应拥有较高的稳定运行水平，防止因系统本身故障而影响对通信设备的有效监测。
- （4）功能扩展性：架构设计应支持多种不同类型通信设备的便捷接入，并为后续功能升级与模块扩展预留空间。
- （5）资源轻量化：充分考虑船舶有限的空间与能源条件，采用轻量化的设计思路，以降低系统的能耗与物理体积。

3 系统整体架构

系统采用“感知层-处理层-应用层”的三级分层架构模式，各层级协同运作，共同完成故障预测与健康管理的各项功能：

- （1）感知层：作为数据采集前端，由传感单元部署在设备和环境中，收集运行状态数据与环境参数，通过抗干扰通道上传至处理层。
- （2）处理层：核心分析中枢，负责数据处理、故障预测和健康评估，包括预处理数据、构建预测模型、量化健康状态，并采用边缘计算提高效率。
- （3）应用层：实现人机交互与决策支持，包含状态可视化、故障预警、维护建议及系统管理，提供实时状态显示、预警信息和资源调配方案。

4 关键技术设计

4.1 多维度状态感知技术

船舶通信设备故障常由多种因素交织引发,需建立多维度状态感知架构以全面捕捉设备运行信息:

(1) 电气特性监测

聚焦设备电源模块、射频电路等核心组件,实时监测电压稳定性、电流波动、功率输出等关键参数。采用非侵入式传感技术,避免干扰设备原有电路,确保监测过程不影响正常工作。重点捕捉功率异常、电压骤降等与电路故障直接相关的特征信号。

(2) 物理状态监测

针对设备核心部件的温度变化、振动强度及机械位移等物理特性参数进行持续监测。温度异常可能预示电路老化或散热失效,振动异常则可能反映机械结构松动或部件磨损。选用微型化传感元件,以适应设备内部紧凑空间的安装需求。

(3) 环境参数监测

采集设备工作环境的温湿度、盐雾浓度等环境指标,分析其对设备老化的加速效应。海洋环境特有的高湿度与高盐雾极易造成设备腐蚀并降低绝缘性能,环境参数监测结果可为设备健康评估提供重要环境影响依据。

(4) 信号质量监测

实时跟踪通信信号的强度、频率稳定性、误码率等性能指标,直接表征设备当前的通信效能。信号质量的异常波动通常是设备故障的早期预警信号,通过持续分析信号特征可及时识别潜在的通信功能退化问题^[4]。

4.2 故障预测模型构建

结合船舶通信设备故障特征,构建融合多源感知数据的故障预测模型,实现从数据到故障预警的精准转化:

(1) 特征提取优化

对多维度感知数据进行时域与频域联合分析,提取反映设备状态的敏感特征。时域分析关注参数均值、峰值、波动范围等统计特性;频域分析通过信号分解技术识别故障相关的特征频率成分。针对不同类型感知数据(如电气、物理、环境数据)采用差异化特征提取策略,确保特征参数对故障的敏感性与稳定性。

(2) 动态异常检测

基于设备正常运行状态下的特征分布,建立基线模型。

通过实时特征与基线的动态比对识别异常状态,采用自适应阈值调整机制,结合设备工作模式切换与环境变化动态优化判断阈值,降低误报与漏报率。当异常持续时间或偏离程度超过设定阈值时,触发潜在故障风险预警。

(3) 多特征关联故障定位

通过多维度特征的关联性分析实现故障精准定位。不同故障类型对应特定的特征组合模式,例如功放故障可能伴随功率输出下降与温度升高,天线故障可能表现为信号强度衰减与驻波比异常。建立故障类型与特征组合的映射关系库,通过特征匹配算法实现故障部位的快速定位。

4.3 健康状态评估体系

构建量化的健康状态评估体系,动态反映设备退化趋势,为维护决策提供数据支撑:

(1) 综合健康指数(HI)构建

筛选与设备核心性能强相关的关键参数,采用层次分析法(AHP)确定各参数权重,融合形成综合健康指数(HI)。HI取值范围为0-1,1代表设备处于理想健康状态,0代表完全故障状态。通过HI的变化速率与趋势曲线,量化评估设备的退化程度。

(2) 健康等级动态划分

基于健康指数值将设备状态划分为四个等级:健康($HI \geq 0.8$)、轻度退化($0.6 \leq HI < 0.8$)、中度退化($0.4 \leq HI < 0.6$)、严重退化($HI < 0.4$)。不同健康等级对应差异化的维护策略,为维护优先级排序提供明确依据。

(3) 退化趋势预测

基于历史健康指数数据,采用趋势外推算法预测设备未来健康状态变化。结合设备使用年限、工作负荷强度等因素修正预测结果,为长期维护规划提供参考。当预测HI将在短期内降至临界值时,自动触发维护预警。

4.4 维护决策支持机制

基于设备健康状态评估结果与任务需求,生成科学的维护策略,实现精准维护与资源优化配置:

(1) 维护需求动态分析

综合考量设备健康等级、故障风险等级、任务重要性及维护资源可用性,确定维护的必要性与紧急程度。例如,关键通信设备若处于轻度退化状态但即将执行重要任务,需优先安排维护;非关键设备可在健康指数降至中度退化区间后再启动维护。

(2) 标准化维护方案生成

根据故障类型与设备型号，自动匹配预设的标准化维护流程与操作规范。维护方案内容包括具体维护项目、所需工具清单、操作步骤及安全注意事项。针对复杂故障场景，提供多备选方案及优劣对比分析，辅助维护人员决策。

(3) 资源调配优化建议

结合维护方案与船舶现有资源配置，提出人员、备件及工具的最优调配建议。优化维护人员排班计划，避免与其他任务冲突；根据备件库存状态提前规划备件准备，防止因备件短缺导致维护延误。

5 系统功能模块设计

5.1 状态监测模块

作为系统运行的基石，状态监测模块承担设备运行状态数据的获取、传送与保存职责，支持多种类型感知数据接入，并采用标准化数据格式进行存储与管控；借助实时监测任务调度机制，保障数据获取的连续性和时效性。其核心功能包括：感知参数配置（允许用户依据设备类型和监测要求，对需监测参数的种类、采样频率及数据精度进行配置）、实时数据显示（通过仪表盘、曲线等形式实时呈现设备状态参数，直观展示运行状况）、数据存储管理（利用时序数据库存储历史监测数据，支持查询、导出与备份操作），以及异常告警（具备数据异常识别功能，当数据超出正常范围、传输中断或感知单元故障时，通过声音、灯光或消息等方式发出告警并记录异常详情，提醒运维人员处理，以便系统维护）。

5.2 故障预测模块

故障预测模块作为系统的核心分析部分，基于状态监测数据实现对故障的早期识别与预测，其运用分布式计算架构以提升数据分析效率与并行处理能力，通过预设的特征提取算法与故障预测模型自动完成数据处理与故障判定，并支持模型的更新与优化，用户可根据实际场景调整参数或导入新模型；其核心功能包括：自动处理监测数据并提取反映设备状态的特征参数，开展趋势分析；在识别到潜在故障时发出预警信息，明确故障类型、风险等级及可能发生时间；通过多维度特征分析确定故障具体位置，为维护工作提供精准指导；支持预测模型的添加、删除、修改与验证，便于模型迭代优化。

5.3 健康评估模块

健康评估模块依据故障预测结果和历史数据，通过健

康指数计算模型量化评估设备健康状态，实时更新并直观展示健康等级与退化趋势；核心功能包括实时计算健康指数以动态反映状况、绘制曲线分析退化速度与趋势并预测未来状态、定期生成含健康指数、退化分析及故障预警的健康报告（支持导出与打印），以及通过颜色标识和状态图标展示健康等级以利快速识别，为维护决策提供依据。

5.4 维护决策模块

维护决策模块结合规则推理与案例推理，根据健康评估结果和任务需求制定维护策略与资源调配建议，并通过与船舶管理系统接口实现信息共享与协同，以提高维护效率。其核心功能包括：综合分析设备健康状态、任务计划与维护资源以判断维护需求及紧急程度，根据故障类型与设备型号生成方案及操作指导，基于方案与资源库存提出人员、备件、工具调配建议以优化资源利用，以及记录维护过程信息形成档案

6 系统应用与优势

该系统适用于各类船舶通信设备（涵盖短波电台、卫星通信终端、数据链设备等）的维护管理，日常航行可实时监测设备状态、发现潜在故障，任务前通过健康评估确保设备良好状态，维护阶段提供维护方案与资源调配建议；其能提升设备可靠性（通过实时监测与故障预测提前处理故障、捕捉隐蔽性故障），优化维护资源配置（基于健康状态与故障风险决策，避免不必要检修，合理调配人员、备件与工具），增强任务保障能力（任务前全面健康评估排除故障，保障稳定运行），并积累维护经验知识（记录状态数据、故障信息与维护记录，为设计改进与策略优化提供依据）。

7 结论与展望

船舶通信设备故障预测与健康管理系统的设计，打破了传统维护模式的制约，实现了设备维护从“被动应对”向“主动预防”的转型^[5]。系统通过多维度状态感知、智能故障预测与动态健康评估，为船舶通信设备的维护提供了科学有效的解决方案，可显著提升设备的可靠性与维护效率，保障海上通信的稳定畅通。

未来，随着人工智能、物联网等技术的进步，该系统可进一步优化与完善：引入深度学习算法提高故障预测的准确性与泛化能力；结合数字孪生技术构建设备虚拟映射模型，实现故障的可视化模拟与预测；加强与船舶其他系统的协同，构建全舰装备健康管理体系，提升船舶整体的运维水

平。通过持续的技术创新与应用实践,该系统将为船舶通信保障提供更加强有力的支持,助力海上运输能力的提升。

参考文献:

- [1] 申乃军. 基于人工神经网络的舰船通信信道均衡控制方法 [J]. 中国新通信, 2022, 24(10): 7-9.
- [2] 田秀娟. 大数据分析下舰船通信网络链路故障恢复方法 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(14): 157-159.
- [3] 刘庆杰, 王晨, 王小英. 基于 MESH 网络的舰船无线

通信多信道分配方法 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(04): 127-129.

[4] 李宝华, 华翔. 集群时变拓扑下的链路修复 [J]. 西安工业大学学报, 2022, 42(01): 81-87.

[5] 贾琼. 基于贝叶斯网络的飞机通信导航系统故障检测方法 [J]. 长江信息通信, 2024, 37(12): 136-138.

作者姓名: 李森 (1976.04—), 男, 汉族, 辽宁葫芦岛, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 机电控制自动化专业。