

航保船舶智能机舱方案设计与研究

王玉强 曹 阳

北海航海保障中心天津航标处 天津 300211

摘要: 本文通过对航保船舶智能机舱建设需求,综合利用现有的热工参数监测装置和监测手段,通过增加振动、缸压等在线监测传感器、油液监测装置,实现机舱关键设备的振动、缸压、油液、热工参数等健康状态特征参数的提取与分析。基于典型故障模式,研究建立状态评估指标体系;采用层次分析、时间序列、一类支持向量机、ARMA等方法,建立健康状态评估模型,实现健康状态评估;并根据当前评估与预测结果,结合约束条件,为设备使用管理和维修决策提供科学有效的意见建议。

关键词: 智能机舱; 健康状态评估; 状态监测; 故障预警; 维修决策

引言

目前,航保船舶的主动力监控系统已经实现了对柴油机、齿轮箱、桨轴等主动力装置关键部件的状态监测。但现有系统存在明显的局限性:一方面,监测手段较为单一,主要依靠温度、压力、流量等传统热工参数,缺乏对设备振动、缸压、油液特性等重要指标的全面监测;另一方面,监测方式相对简单,以参数数值显示和越限报警为主,无法实现对设备整体运行状态的综合评估。更为关键的是,当前的故障诊断和预警主要依赖操作人员的个人经验,这不仅对维护人员的技术水平和工作经验提出了很高要求,也难以保证诊断结果的准确性和一致性。随着人工智能技术的快速发展,大数据分析、机器学习、深度学习等先进技术在工业领域的应用日趋成熟,为解决上述问题提供了新的技术手段。因此,本文针对航保船舶机舱设备运行安全可靠性的迫切需求,研究设计一套基于多源信息融合的智能健康管理系统^[1]。

1 系统方案设计

1.1 设计原则与总体架构

智能机舱系统的设计必须在综合分析现有技术水平和工程实践经验的基础上,遵循先进性、实用性、开放性和安全性的基本原则。在先进性方面,系统应采用成熟可靠的新技术,确保具有较长的技术生命周期。在实用性方面,系统设计要贴近用户需求,操作界面简单直观,便于维护管理。

本文提出一种基于分层架构的智能机舱系统设计方案,如图1。该方案采用“4+1”架构模式,包括数据采集层、数据处理层、模型算法层、应用展示层四个功能层和一个系统管理平台。这种分层设计可以实现功能模块的解耦和灵活组合,便于系统的开发维护和功能扩展。

在网络架构上采用分布式设计,通过工业以太网等现场总线技术实现各层级的数据传输和控制交互。

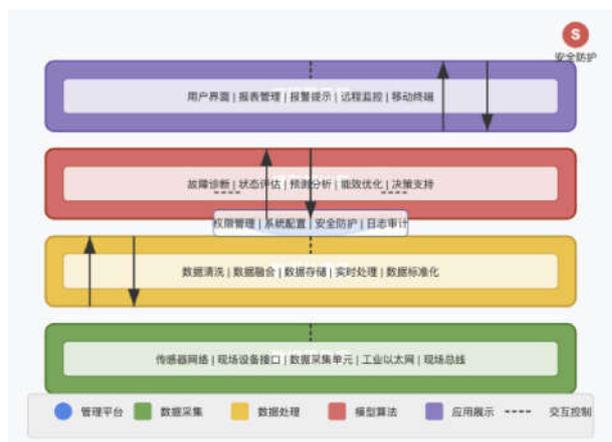


图1 智能机舱系统总体架构图

1.2 系统功能设计

系统的功能设计以设备全生命周期健康管理为主线,构建一个完整的监测、分析、评估、决策闭环。在数据采集层,系统配置多种类型的传感器,包括温度传感器、压力传感器、振动传感器、油液传感器等。这些传感器采用分布式布置方案,实现对关键设备运行状态的全面感知。每类传感器都经过严格选型和适应性验证,确保在恶劣的海况环境下仍能可靠工作^[2]。

根据故障情况形成柴油机故障诊断特征参数与监测配置,主要涉及振动监测法、热工参数分析法、缸压分析法、油液分析法等。振动传感器主要监测振动频率特征、振动幅值、波形因数等参数;缸内压力传感器监测缸内峰值压力、最大压力升高率、着火点等参数;油液传感器监测动力粘度、介电常数、密度、水分等参数;热工参数传感器监测滑油进口压力、轴承温度、各缸排温等参数。

数据处理层承担着数据清洗、特征提取和信息融合等重要功能。考虑到船舶设备数据的特点，系统需设计一套专门的数据预处理流程，包括异常值处理、缺失值补充、噪声滤除等步骤。在特征提取环节，系统不仅提取传统的时域、频域特征，还需引入小波分析、经验模态分解等高级信号处理方法，以获取更丰富的特征信息。

在模型算法层，系统构建一个多层次的评估体系。首先是状态评估模型，通过建立设备性能基线，实时评估设备的运行状态。其次是故障诊断模型，采用机器学习算法对异常状态进行识别和定位。再次是性能预测模型，基于历史数据分析设备的性能退化趋势，预测剩余使用寿命。最后是决策优化模型，结合设备状态、任务需求和资源约束，生成最优的维修决策建议，如图2。



图2 智能机舱系统功能图

2 系统设计要点

2.1 关键技术实现

为保证系统功能的有效实现，在数据采集方面，需开发一种基于边缘计算的智能采集终端，可以实现数据的就地处理和特征提取，大大减少数据传输量。采集终端采用模块化设计，支持多种类型传感器的即插即用，并具备自诊断和自校准功能。

在状态评估方面，提出一种基于多源数据融合的健康评估方法。该方法首先建立设备的多维健康指标体系，包括振动特征、温度特征、油液特征等。然后通过数据标准化和特征选择，构建评估特征空间。最后采用改进的支持向量机算法进行状态分类，实现对设备健康状态的准确评估^[3]。

从历史数据中提取柴油机各稳定工况下的各热工参数，筛选出质量良好的数据用于基线的建立。热工参数的基线由各工况下的各热工参数的期望值、上限和下限构成。其中，期望值为各典型工况下各参数点正常状态

下的算术平均值。基线上、下限为各典型工况下各参数点正常状态下的算术平均值 $\pm 3-5$ 倍方差/标准差。当柴油机在稳定工况下运行，监测到的实时数据与基线上、下限相比较，在基线范围内视为健康，超出基线但是未达到操作限值的状态视为亚健康，超出操作限值的视为故障，如图3。

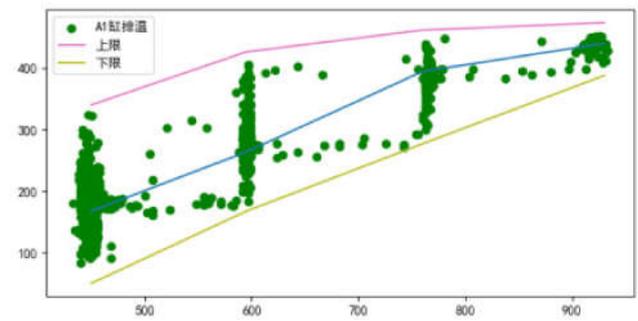


图3 热工参数基线建立示意图

在故障诊断方面，创新性地提出一种基于深度学习的智能诊断方法。该方法首先利用卷积神经网络对设备的振动信号进行特征学习，自动提取故障特征，避免了传统方法中人工特征工程的局限性。然后采用长短时记忆网络(LSTM)对设备的时序特征进行建模，捕捉故障发展的动态特征。最后通过注意力机制对不同特征的重要性进行自适应加权，提高诊断的准确性。

该方法通过机器学习算法学习正常状态下样本特征，创建基于正常数据的模型，在高维样本空间中，采用核函数(RBF，径向基函数)划分超平面，实现原空间至特征空间的映射。通过支持向量机的方法，系统能够有效识别设备运行状态的异常模式。

在性能预测方面，开发一种混合预测模型。该模型结合了物理模型和数据驱动模型的优势，既考虑设备退化的物理机理，又充分利用历史数据中蕴含的统计规律。具体来说，首先基于设备的物理特性建立退化过程模型，确定关键的影响因素和退化机理。然后利用机器学习算法对历史数据进行分析，建立退化参数与性能指标之间的映射关系。最后通过粒子滤波算法对模型参数进行实时更新，不断提高预测的准确性，如图4。

决策支持系统的设计采用基于知识图谱的智能推理方法。系统首先构建了一个包含设备知识、故障案例、维修规程等信息的知识库。通过本体建模和关系挖掘，将这些离散的知识连接成一个语义网络。当系统需要进行决策时，可以基于当前的状态评估结果和故障诊断结果，在知识图谱中进行推理，找到最相似的历史案例和最适用的处理方案^[4]。

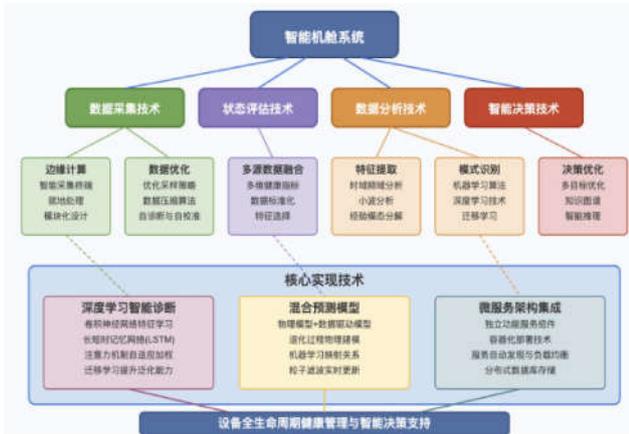


图4 智能机舱系统关键技术实现路径图

2.2 系统实现环境

系统的实现要基于当前主流的软硬件技术平台，在充分考虑航保船舶实际应用环境的基础上进行开发部署。硬件平台采用分布式架构，在机舱各关键位置部署数据采集单元，通过工业级交换机组成监测网络。中心服务器采用高性能工作站，配备冗余电源和硬盘阵列，确保系统的稳定运行。考虑到机舱环境的特殊性，所有硬件设备都经过防腐、防震、防电磁干扰等特殊处理，以适应恶劣的工作环境。

软件平台采用微服务架构，使用Docker容器技术进行部署。系统开发采用Java语言，数据库使用PostgreSQL进行数据存储，采用Redis实现数据缓存，通过RabbitMQ实现消息队列。系统接口采用RESTful风格设计，提供标准的API接口，便于与其他系统进行集成。

2.3 关键功能实现

在数据采集功能的实现中，重点需解决多源异构数据的采集与同步问题。系统支持多种工业协议，包括Modbus、OPC、PROFIBUS等，可以对接不同厂家的设备和传感器。为了保证数据的实时性和可靠性，采用基于时间戳的数据同步机制。同时，在采集端实现了数据预处理功能，包括信号滤波、异常检测和压缩，有效减少数据传输量^[5]。

状态评估功能的实现采用分层设计思路。底层是基础数据处理模块，负责数据清洗和特征提取；中层是状态评估模块，实现设备状态的实时评估；上层是趋势分析模块，完成性能退化预测。系统采用流式计算框架处理实时数据流，支持多种评估算法的并行执行。评估结果通过规则引擎进行综合判断，生成状态评估报告，如图5。

故障诊断功能的实现重点关注诊断的准确性和实时性。系统构建一个包含多种诊断算法的诊断引擎，可以根据不同类型的故障选择最适合的诊断方法。诊断过程

采用多线程并行处理，提高诊断速度。同时，系统还需实现诊断知识的在线学习功能，可以不断积累和更新诊断经验，提高诊断准确率。

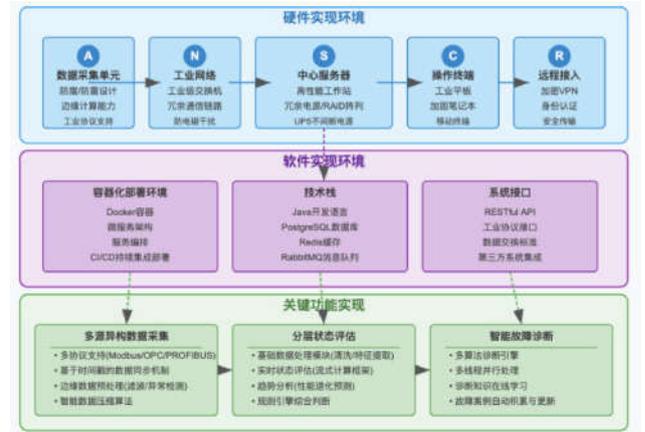


图5 智能机舱系统功能实现图

结束语

系统设计在多个方面体现出特色和创新：第一是监测手段的综合性，通过多源信息融合实现对设备状态的全面感知；第二是诊断方法的智能性，采用深度学习等先进算法提高故障诊断的准确性；第三是预测功能的实用性，通过混合预测模型提高预测的可靠性；第四是决策过程的科学性，基于知识图谱实现智能化决策支持。

系统开发完成装船应用后，预防性维护效果将十分明显，系统将及时发出预警信息，人员查实是否存在潜在故障，通过及时处理这些潜在问题，可避免后续重大故障的发生。系统的故障诊断功能为维修人员提供了准确的故障定位和原因分析，降低故障诊断时间。同时，系统的决策支持功能为维修工作提供了科学的维修方案，维修效率和一次成功率将会显著提升。

未来仍需围绕算法持续优化、系统适应性提升、应用范围扩展等方向展开，通过持续的技术创新和实践积累，进一步提升系统的性能和应用价值。

参考文献

- [1] 张明, 李强, 王华. 船舶智能机舱状态监测技术研究进展[J]. 船舶工程, 2022, 44(3): 1-8.
- [2] 刘云, 陈伟, 赵勇. 基于多源信息融合的设备健康状态评估方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(12): 210-220.
- [3] 郑建, 孙明, 李林. 船舶设备智能诊断技术研究[J]. 船舶工程, 2021, 43(5): 12-18.
- [4] 陈晓明, 王涛, 张力. 面向船舶机舱的多源数据融合技术[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(4): 897-908.
- [5] 李杰, 王明, 赵强. 基于深度学习的设备故障预测技术研究[J]. 控制工程, 2020, 27(6): 1056-1062.