

船舶柴油发动机故障诊断及其智能化发展

王涵

(中交一航局第一工程有限公司船舶分公司)

摘要: 为应对船舶柴油发动机在远海及高负载工况下的故障诊断难题,文章针对船舶柴油发动机故障诊断与维护传统方法的局限性,结合人工智能、物联网、大数据等新兴技术,对其智能化发展进行了探讨。传统方法在实时性、精准性和远程协同方面存在不足,而智能化技术显著提升了故障诊断的精度与效率。通过引入深度学习、神经网络等算法,结合大数据分析和物联网技术,实现了多源异构数据的融合与实时监控,故障识别准确率显著提高。

关键词: 船舶柴油发动机;故障诊断;智能化;预测性维护

0 引言

柴油发动机在海上交通运输领域广泛应用,是众多船舶的核心动力装置。随着船舶大型化、远洋航线拓展以及环境标准提高,柴油发动机的运行环境愈加复杂,检修与维护要求也随之提升。基于传统经验和简单检测仪器的检修维护方式在实时性、精准性和远程协同方面存在明显不足。近年来,人工智能、物联网及大数据分析等技术在工业领域的成功实践,促进了船舶柴油发动机故障诊断与维护向智能化方向升级。

1 柴油发动机故障诊断技术概述

1.1 传统故障诊断方法

传统柴油发动机故障诊断主要依赖于人工经验、常规测量仪器(如压力计、振动计、排气分析仪等)以及对部件状态的现场检查和测试^[1]。对于中小型船舶而言,这些方法操作简便、成本较低、可在一定程度上满足常规检查需求。但在船舶实际运行过程中,仍会遇到以下困难:

- 1) 环境恶劣,干扰因素多:机舱温度高、噪声大、振动强,很多传感器或检测仪器易受环境干扰而使测量结果出现偏差。
- 2) 依赖人工经验:对于某些罕见故障或早期微小征兆,仅依靠经验判断往往不足,若船员经验有限或疲劳作业,就容易出现误判或漏判。
- 3) 缺乏实时与远程监控能力:在远洋航行阶段,如果故障诊断仅依赖于人工巡检,很难及时发现故障隐患,也无法与岸基专家共享实时数据。

在航修实践中发现左右主机润滑油自清滤器拆检时有铜色金属粉末或高温水中气体含量异常

等现象,仅凭肉眼和简单仪器难以及时溯源。这暴露出传统诊断方法在面对非线性、耦合型故障时的不足。

1.2 现代故障诊断技术

随着计算机技术与数字化传感器的发展,现代柴油发动机故障诊断技术逐渐走向数字化和自动化,主要技术包括:

- 1) 基于模型的诊断:根据柴油机热力学、动力学模型,与实际运行数据进行比对,判断系统偏差。但该方法对于船舶这种长时间、高负荷、航行环境多变的场景,模型的建立和参数标定难度较大。
- 2) 信号处理技术:傅里叶变换、小波变换等可提取振动、噪声等信号特征,用于故障识别。但环境干扰严重和噪声大时,对信号处理算法的鲁棒性提出更高要求。
- 3) 多维数据融合:将多个传感器(温度、振动、压力、排放等)数据进行综合分析,能够更全面地描述柴油机运行状态,但数据融合过程要求算法强大,且数据传输与存储的可靠性也需保证。

在实际操作中发现,仅通过振动或排气分析等单一维度的信息,很难精准定位船舶柴油发动机复杂故障的根本原因;同时,海上多源数据的采集和融合还要考虑网络带宽限制和传感器可能失效等实际问题,这些都是现代诊断技术在船舶应用中需要面临的挑战。

2 智能化故障诊断技术

2.1 人工智能的引入

人工智能的发展为柴油发动机的故障诊断提

供了新思路。基于机器学习、深度学习的算法可以处理海量、多维度的传感器数据，自动识别复杂非线性关系。

1) 数据驱动故障诊断

利用历史运行数据进行训练，提取关键故障特征并识别故障模式。对于船舶而言，这需要长期、稳定且高质量的数据积累。

2) 神经网络和深度学习

通过构建深度神经网络，自动提取与故障相关的高维特征，理论上可比传统手段更准确^[2]。但算法复杂度高，需要强大的计算资源，并且模型解释性尚存不足。

若能收集到足够长周期的润滑油检测数据和金属屑屑成分分析数据，就可能利用深度学习来识别不同部件磨损特征——例如连杆衬套、增压器轴承或轴瓦等磨损产生的金属微粒成分特征，从而帮助船员或维修人员更准确地判断导致“铜色粉末”出现的原因。

2.2 大数据与物联网技术

船舶柴油发动机的故障诊断需要基于大量传感器数据和长时间运行工况数据，物联网的兴起让实时数据采集成为可能。近年来，已有不少船舶公司尝试通过卫星、5G或其他海上专用通信方式将数据回传到岸基分析中心，利用大数据平台对多艘船舶的发动机运行数据进行挖掘和模式识别，以实现更精确的故障预测与维护决策。

然而，船舶远洋航行时带宽有限且费用昂贵，数据上传量往往受限，部分高频数据必须在船上完成本地处理。除此之外，海上严酷的环境也会影响传感器精度与寿命，因此物联网的部署与维护仍需因地制宜，兼顾可靠性与实用性。

2.3 故障诊断系统的智能化发展

随着人工智能与大数据、物联网技术的进一步融合，船舶柴油发动机故障诊断系统正向智能化方向迈进。智能化诊断系统通常由船上传感器网络、边缘计算设备、岸基大数据分析平台和专家决策支持系统组成：

1) 船上实时监控：利用高精度传感器采集发动机关键参数并进行初步分析，一旦出现异常可在第一时间警报或采取应急措施。

2) 岸基大数据平台：将定期或实时上传的数据进行深度挖掘，通过与其他船舶或不同航次的数据对比来识别普遍性故障模式或罕见特殊故障。

3) 专家与AI协同决策：将大数据分析结果与专家经验相结合，给出更加权威且具备可操作性的检修建议。

不过现有系统的智能化水平仍有待提高，尤其在面对复杂、罕见或跨系统耦合故障时，需要更深层的算法和更完善的知识库支撑^[3]。

3 柴油发动机维护的智能化发展

3.1 预测性维护与自适应维护

1) 预测性维护

通过实时监测柴油发动机的健康状态并结合历史故障数据，预测故障发生的时间窗口，提前安排检修，减少突发故障的概率。例如可以通过持续监测润滑油中金属元素的浓度、粒度分布对关键部件磨损进行追踪，一旦检测到铜元素异常升高，就可在引发更大故障前提前检查或更换相关零件。

2) 自适应维护

自适应维护更强调对运行状态和环境的动态适应性。船舶在不同海况、不同负载工况下的发动机磨损情况差别较大，如果能够结合智能算法实现对发动机的自适应维护策略调整，例如自动改变保养周期或优化保养清单，就能在降低维护成本的同时有效保障安全。

在一次航行中发现的“铜色粉末”问题，如果能通过高频率数据采集、趋势分析及与同型号发动机历史数据对比，或许可以更早期地捕捉到潜在的异常磨损迹象，缩短排查范围和故障处理时间。此外，在航次密集或连续高负载情况下，自适应维护能让船舶管理人员及时调整检修计划，防止故障在最关键的航行期间爆发。

3.2 智能化维护管理平台

借助物联网、云计算和大数据分析，将船舶上的故障诊断与维护管理上升到系统平台层面：

1) 实时数据采集与传输：实时采集温度、燃油消耗、排放、振动、润滑油金属含量等数据并传输；

2) 大数据分析：对设备运行数据进行故障风险识别，自动生成维修策略；

3) 远程专家支持：在船岸协同下，实现异地会诊并即时决策。

智能化平台不仅能显著提升故障预防、减少停机时间并提高维护效率，还可以更准确地找到潜在故障源头，减轻船员的重复劳动。但系统的

稳定性、海上数据传输成本以及平台与主机厂家数据接口不统一等问题依然存在。

4 面临的挑战与发展趋势

4.1 技术与数据融合的难题

1) 多源异构数据融合: 润滑油、振动、温度、排放等信息来源差异巨大, 如何统一分析、去噪和筛选是需要面临的挑战。

2) 算法泛化能力: 船舶运行环境复杂且变化频繁, 很难有一套固定算法适用于所有航线、所有负载工况; 一旦某些传感器信号波动或数据丢失, 就可能影响系统诊断的准确度。

在“铜色粉末”难题中, 如果能在系统中及时引入对粉末成分的多模态检测(光谱分析、颗粒形貌分析等), 并与船舶历史数据进行比对, 就可以为故障原因的判定提供更直观和有力的支撑。但目前船舶上要实现这些功能, 硬件和软件条件都不够成熟。

4.2 智能化系统的标准化与规范化

1) 接口与数据格式: 当前船舶柴油发动机的传感器、控制系统和岸基平台常由不同厂商提供, 缺乏统一的通信协议与数据标准。

2) 维护与决策标准: 不同国家和地区、不同船舶公司对柴油发动机故障诊断和维护周期都有各自规范, 导致智能化系统推广存在壁垒^[4]。

从实践角度看, 如果主机厂商、传感器制造商和船舶管理公司能统一数据采集格式, 共享一套通用的故障码和数据接口协议, 就可以大幅提升智能化系统的部署效率与诊断一致性。

4.3 数据隐私与安全

1) 数据敏感性: 船舶运营数据涉及商业机密和安全信息, 上传云端或与第三方共享时需防止泄密。

2) 网络安全: 海上网络条件脆弱, 若系统遭遇恶意攻击或数据篡改, 有可能导致柴油发动机远程监控或操控出现严重错误。

海运的国际属性决定了数据安全不容忽视, 未来需在加密传输、分布式数据处理等方面进行

深入研究, 避免因信息安全漏洞导致关键系统瘫痪或敏感信息泄露。

4.4 未来发展趋势

1) 深度学习与复杂场景适配: 更强大的深度学习与强化学习将在复杂海上运行工况下更精准地分析故障特征, 特别是与金属磨损、油液品质相关的预测。

2) 5G/卫星通信和边缘计算: 利用高带宽、低延迟通信实现实时远程诊断, 但也需要船载边缘计算来降低对网络的依赖, 提升系统鲁棒性。

3) 系统集成与多维协同: 未来的智能化系统将进一步整合发动机、电站、导航、气象等多维度数据, 让决策更全面、更科学。

4) 标准化与规范化: 随着行业对跨平台协同的需求日益增大, 针对传感器接口、数据格式、故障诊断流程的统一标准将不断完善, 推动智能化技术在海事领域的应用深度。柴油发动机故障诊断与维护的智能化发展具有广阔的前景, 未来将会在多个方面持续进步和创新。

5 结语

现代数字化与智能化技术利用信号处理、多源数据融合和人工智能算法为故障诊断提供了新思路, 大数据与物联网的广泛应用则为远程协同与实时监测奠定了基础。预测性维护和自适应维护可有效降低非计划停机、优化维修决策。随着传感器、网络通信和深度学习技术的不断成熟, 故障诊断与维护系统将进一步提升实时性与精准度, 并与船舶整体运营管理深度融合, 最终助力船舶运输行业迈向更高水平的数字化与智能化阶段。

参考文献:

- [1] 李则龙, 丁国强. 柴油发动机故障诊断技术研究与应用[J]. 珠江水运, 2024(11): 53-55.
- [2] 郭翹. 智能制造中的数字孪生技术应用与挑战[J]. 张江科技评论, 2024(3): 136-138.
- [3] 张虹, 崔宇峰, 张亮, 等. 基于大数据技术的船用柴油发动机零部件故障智能诊断[J]. 内燃机与配件, 2023(15): 73-75.
- [4] 周华卫. 船舶柴油发动机的维护现存问题及完善对策[J]. 内燃机与配件, 2021(22): 192-193.