

船舶机电设备故障诊断与智能维修技术研究

闫玉洲

天津港航工程有限公司, 天津 300457

DOI:10.61369/ERA.2026050035

摘 要 : 船舶机电设备构成了船舶动力以及作业支持方面的关键要素, 它的稳定运行会深刻地影响到航行安全以及任务的达成, 鉴于海洋环境所引发的故障机理变得复杂化、强噪声干扰之下诊断精度不够、传统维修模式比较滞后等难题, 本文把船舶机电设备故障诊断以及智能维修技术的研究现状进行了全面梳理。针对典型机电设备在多物理场耦合环境当中的故障演化机理开展了深入分析工作; 故障诊断方法所进行的技术演进, 是从信号降噪以及特征增强这个方面开展的, 接着进行多源信息融合, 然后就涉及到智能诊断模型; 智能维修技术框架的核心要素当中, 涵盖了数字孪生以及物联网。预测性维护开展了该框架的关键支撑工作; 当前面临的挑战当中囊括了数据失衡、边缘适配存在局限以及多故障耦合这样的问题, 未来的趋势则是指向了数字孪生驱动以及群体协同管理方面。把机理模型以及数据驱动进行融合的混合智能范式, 被当作是突破船舶复杂工况下可靠诊断瓶颈的关键路径。

关 键 词 : 船舶机电设备; 故障诊断; 智能维修; 多源信息融合; 数字孪生; 预测性维护

Research on Fault Diagnosis and Intelligent Maintenance Technology for Marine Electromechanical Equipment

Yan Yuzhou

Tianjin Port Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457

Abstract : Marine electromechanical equipment constitutes a critical component of ship power and operational support, and its stable operation significantly impacts navigation safety and mission accomplishment. Given the challenges posed by the complex fault mechanisms induced by the marine environment, insufficient diagnostic accuracy under strong noise interference, and the lagging nature of traditional maintenance modes, this paper comprehensively reviews the current research status of fault diagnosis and intelligent maintenance technologies for marine electromechanical equipment. In-depth analysis is conducted on the fault evolution mechanisms of typical electromechanical equipment in multi-physical field coupling environments. The technical evolution of fault diagnosis methods begins with signal denoising and feature enhancement, followed by multi-source information fusion, and then involves intelligent diagnostic models. The core elements of the intelligent maintenance technology framework encompass digital twins and the Internet of Things (IoT). Predictive maintenance provides crucial support for this framework. Current challenges include data imbalance, limitations in edge adaptation, and multi-fault coupling, while future trends point towards digital twin-driven and collaborative group management approaches. The hybrid intelligent paradigm, which integrates mechanism models with data-driven methods, is regarded as a key pathway to overcome the bottleneck of reliable diagnosis under complex ship operating conditions.

Keywords : marine electromechanical equipment; fault diagnosis; intelligent maintenance; multi-source information fusion; digital twin; predictive maintenance

引言

船舶主推进电机、辅助发电机组、舵机以及泵浦系统等关键装备, 构成了船舶动力输出、能量转换以及作业支持方面所的核心基础, 船舶的航行安全以及任务达成率, 直接受到它运行可靠程度的制约, 并且还会对运营成本造成显著的影响。全球贸易运输当中依赖海运的比例超过了八成, 船舶机电设备要是突发故障, 时常会引发非计划停航以及安全事故, 船舶机电设备, 长时间面临着高盐雾、高湿热、强振动以及电磁干扰耦合的极端海洋环境, 这和陆用设备形成了鲜明的对比。南海舰船的辅助电机绝缘电阻出现了显著的下降情况, 在三年时间内其降幅达到了40%, 这一降幅远远超过了陆基设备。美国海军研究署的数据揭示出了这一现象, 也就是海上环境会加

剧设备的老化。全电力推进以及综合电力系统等创新技术,极大程度上提高了机电系统的复杂程度。中压变频驱动所带来的高频谐波,还进一步加剧了轴承电蚀的潜在风险,这样一来,绝缘性能的局部放电起始电压得以降低了15%至20%。传统的船舶维护模式会面临船舶可靠性方面的挑战,船舶机电设备的运维模式正在发生极为深刻的变革。鉴于物联网、人工智能以及数字孪生技术的发展进步,推动它从事后开展维修工作转向事前进行预警工作,并且从单点开展监测工作迈向系统进行协同工作。故障诊断技术经过了一系列的演变,早期是依靠阈值告警以及机理模型来进行解析,现在已经发展成集成了多物理场仿真、多元信息整合以及深度学习算法的智能化诊断框架;

一、船舶机电设备故障机理与特性分析

船舶机电设备故障的演变过程当中,明显体现出了多物理场相互开展耦合的特性。在船舶实际的运行过程中,电气设备产生的故障类型主要包含了显性故障和隐性故障两个方面。^[1]来对这一机理开展建模工作,构成了智能诊断的物理基础,由于设备的功能定位不一样,它们所主导的故障模式也各不相同,因此对其进行分析时,需要把分析工作开展在电磁-热-机械耦合的框架当中。

(一)主推进电机的典型故障机理

那么船舶动力的核心功能是由主推进电机来承担的,它出现的故障主要表现为两种类型,也就是轴承电蚀以及转子偏心,轴电压放电会引发轴承电蚀。它如同系统的“触角”,直接接触机电设备,将设备振动产生的机械信号转化为电信号,常见的有加速度传感器。^[2]也就是说,变频器共模电压会在轴承油膜当中形成击穿电场,使得瞬时电流密度达到每平方米十的九次方安培量级,这样滚道表面就会产生电蚀坑。电蚀坑的扩展速率遵循 $dDdt=k \cdot J^2 \cdot \exp(-EaRT)$ 这样的规律。电流密度 J 也就是 J ,会直接受到PWM脉冲宽度的影响,转子偏心的主要缘由是推进负载冲击所引发,它的不平衡磁拉力能够表达为 F_{ecc} 等于 μ_0 乘以 π 乘以 r 乘以 I 乘以 N 的平方乘以 I 的平方,再除以 $4g$ 的平方,然后乘以 δ ,该力会加剧振动,进而促成机电耦合的正向反馈循环。

(二)辅助设备的故障特征

辅助电机以及泵组在机舱的高温环境当中持续开展运转工作,故障大多是由绝缘性能衰退以及散热功能丧失所引发的,绝缘材料的老化进程是遵循阿伦尼乌斯公式的,要是温度上升十摄氏度,它的耐用年限差不多会减半。船舶发电机故障形式主要为线路断开、缺乏磁力和绝缘体损坏等。^[3]热带海域的船舶经常会面临冷却管路堵塞的故障,生物污损也就是造成这个故障的主要缘由,齿轮箱以及轴承当作旋转机械的关键组件,它的故障信号通常会被强烈的背景噪声所掩盖。特别是在信噪比低至-12 dB的极端工况当中,传统技术很难有效地去识别故障特征。操作人员对设备不正确或不规范的使用可能导致设备性能下降、零部件磨损或损坏,甚至引发短路、过载等故障。^[4]

(三)综合电力系统的特殊故障模式

综合电力系统开展广泛的部署工作后,带来了新型的故障模

式,在中压直流系统当中,功率电子器件的开关动作所引发的瞬态过程,不但会产生电磁干扰,而且会让永磁同步电机在高温以及谐波的共同作用下,出现不可逆的磁性衰减情况。船舶接触器和继电器设备中存在很多装置,同时涵盖了电磁系统、触头系统,还有灭弧装置等。^[5]英国“伊丽莎白女王”级航母的推进电机,曾因为冷却系统失效而引发了永磁体退磁问题。此类故障展现出显著的非线性耦合特性,局部问题借助电力电子装置得以迅速扩散,从而触发系统性的连锁效应。

二、智能故障诊断关键技术

(一)信号降噪与特征增强

机舱内存在着高强度噪声这样的环境,会显著地干扰到故障判断的准确性,研究者们开展了多层次降噪策略的构建工作,这种方法从自适应分解拓展到信息熵度量方面,哈尔滨工程大学研究团队引入了CEEMDAN技术,把带噪信号开展拆解工作,拆成若干本征模态函数,并且凭借去趋势波动分析来实现噪声与信息分量的自动区分,进行经验小波变换降噪之后,当信噪比低至-12 dB的时候,诊断精度仍然能够超过九成。层次离散熵开展了信息熵理论适用范围的拓展工作,这一进展主要是在特征增强方面出现的,多尺度复杂度度量能够去捕捉早期故障微弱信息所出现的突变,进而破解非平稳非线性信号故障特征被淹没这个方面的问题。基于MGOA-MOMEDA-HWPE来开展的诊断框架当中,凭借改进的蝗虫算法去开展多点最优最小熵解卷积滤波器的优化工作,这样极大程度上提高了周期性脉冲特征的提取效能。

(二)多源信息融合

单一传感器的信息很难全面地反映出复杂机电设备的运行状态,多模态数据融合开展了振动、温度、声发射以及电流等多源信号的整合工作,从而极大程度上提高了诊断方面的鲁棒性和准确性。在船舶机电设备的振动监测过程中,首先获取各重点区域位置的振动监测参数,然后利用大数据分析技术对振动数据进行标签识别,一旦发现振动异常,系统将进入专家系统进行振动故障诊断。^[6]现有的方法会基于融合层级来开展划分,能够分成三类,数据层融合也就是直接去开展原始信号的整合工作;多模态特征提取完成之后,在特征这个方面开展融合工作并且做出决策;决策层融合会把各单模态诊断结果进行综合,比如运用D-S

证据理论。在船舶旋转机械故障诊断这个领域当中，把振动监测以及电流监测结合起来使用，已经成为了主流的配置方案，马士基航运的实践显示，运用振动以及电流复合监测技术来开展电机运维工作，辅助电机的运维成本大约降低了三成，非计划停机时间减少了近一半。把注意力机制融入贝叶斯残差高效通道网络，借助变分贝叶斯理论来开展对噪声干扰的建模工作，引导网络将注意力聚焦在故障的差异特征上。

（三）智能诊断模型

目前，当下的故障诊断模型主要被划分成机理模型驱动以及数据驱动这两大范式，海洋环境十分复杂，开展机理模型的构建工作面临着挑战，不过它的可解释性优势还是相当显著的；深度学习开展依赖工作时需要大量标注样本，不过它的诊断精度是比较高的。进行物理仿真数据以及训练样本的扩充，将混合模型的潜力展现出来了；神经网络可以开展捕捉机理模型所遗漏的残差特征的工作，典型算法囊括了卷积神经网络故障分类模型、长短期记忆网络剩余寿命预测模型，以及图神经网络在开展复杂系统拓扑关系处理工作当中的应用。那么，在面对故障样本稀缺这一困境时，迁移学习以及生成对抗网络也就是 GAN 来实现了跨工况以及跨设备的知识迁移和样本扩充工作，《中国舰船研究》2025 年专题当中，基于麻雀搜索算法来开展极限学习机也就是 ELM 的优化以及基于鲸鱼优化随机森林也就是 WOA - RF 等方法，都展现了良好的工程适配性。

三、智能维修技术体系

（一）物联网与边缘计算架构

智能维修得以实现，是依靠全域感知以及实时传输能力，船舶设备维护系统凭借传感器网络来构建三层框架，感知层对振动、温度、电流以及声发射监测进行整合；船舶局域网以及卫星通讯协同开展运作，使得网络层级的数据汇集得以实现；对船舶机械设备的运行参数和性能加以了解，在获得信息之后进行综合分析，采用数据终端技术对相关数据进行筛选，最终实现信息采集。^[7]开展了应用层状态的评估工作，完成之后，制定了维修决策。海洋通信稳定性不足以及数据安全方面存在的风险，构成了工程推广的主要缘由，为了实现突破船岸通信瓶颈并且缓解云计算延迟的目的，边缘计算已经发展成为关键的技术方面，船端开展轻量化诊断模型的部署工作，能够实时去提取故障方面的特征并且进行异常预警，只把压缩后的健康特征以及决策结果上传给岸端。

（二）数字孪生驱动运维

数字孪生技术开展了为物理设备创建虚拟副本的工作，得以实现对它全生命周期状态进行映射以及动态推演，李卫所设计的船舶机电智能运维框架，囊括了感知、传输、孪生以及应用这四个层面的协同。孪生层会把多源异构数据进行融合，并且运用三维可视化技术，要开展高保真机理模型的构建工作，需要深入去

理解系统内在的运行规律；进行维护策略的生成工作时，把应用层知识图谱的推理过程以及动态优化算法进行了融合。数字孪生的核心价值在于预测能力 -- 基于当前状态推演未来退化轨迹，从而将维修模式从 " 事后响应 " 转变为 " 事前干预 "，维修策略生成的准确率得到了显著的提升，主要原因是对改进型 KD 树算法以及鲸鱼优化方法进行了结合运用。舰船柴油机剩余寿命预测也就是一种结合 LSTM 以及云重心评判的方法，在装备健康状态评估当中得以实现应用。

（三）预测性维护决策

预测性维护也就是 PdM，预防性维修是一种先进的维修策略，旨在通过定期 或实时监测设备的运行状态，及时发现潜在的问题或故障，采取相应的预防性维修措施。^[8] 依靠对设备状态开展实时监控以及对剩余寿命进行预估，这样来动态调整维修计划以及备件储备，国际海事组织 MSC.1/Circ.1580 指南已经明确给出建议，要把新建船舶配备基于状态来开展维护的系统。智能故障监测系统极大程度上对船舶机电设备的运维成本开展了优化工作，并且使备件库存周转效率得到了提升。根据船级社的统计数据显示，船舶机电设备在全寿命周期当中的运维开支能够被削减近三成。预测性维护需要去处理退化状态识别、剩余寿命预估以及维修策略优化这三项核心方面的议题，一种多任务门控网络，通过开展双向门控循环单元以及变分自编码器的整合工作，能够同时去执行状态分类和寿命预测工作。这个框架在滚动轴承寿命预测任务当中，呈现出更优的误差指标。

四、挑战与展望

故障样本的数量比较稀少，并且类别分布失衡的现象十分显著，船舶机电设备具备较高的可靠性，从而使得故障数据极为稀缺，这就造成 " 正常 " 以及 " 故障 " 样本的比例出现了严重失衡，这样就让传统的监督学习方法难以开展有效的模型训练工作。舱室空间对传感器布局开展了约束工作，某些关键状态参数很难直接去获取。模型层面复杂工况下的泛化能力不足，诊断精度会受到海况以及负载的显著影响，单一模型在开展跨设备迁移工作的时候，其性能会出现下滑，在多故障耦合的场景当中，特征混叠会使得诊断的可靠性被削弱。船载计算资源是有限的，在电气设备投入使用的初级阶段，船舶技术人员就要从总体角度出发思考问题，并针对实际情况制定了合理且简洁的监管机制。^[9] 这样就和实时性的要求产生了矛盾，深度学习模型在嵌入式平台开展部署工作时，会面临推理延迟过高方面的挑战；船岸之间的通信带宽存在着限制，大量的监测数据难以得以实现即时传输。要注意提升电气设备本身的密封性，尤其是在船舶上长期露天运行的设备，技术人员应避免其密封条损坏，在每次检修之后都要将密封条恢复，严格保障其密封性。^[10]

五、结束语

船舶机电设备正在经历关键的转型过程，它的故障诊断以及智能维修技术从过去的单点监测并且在事后去处理工作，逐渐朝着全域感知以及事前预警的新阶段迈进，本文围绕着故障机理、诊断方法以及维修体系这三个方面，开展了技术现状的梳理工作，并且指出了当下所面临的挑战以及未来的发展方向。多物理

场耦合建模开展了故障演化物理基础的构建工作，多源信息融合以及深度学习极大程度上提高了诊断的准确度，数字孪生以及物联网技术为预测性维护的实际应用提供了支撑，把机理与数据进行融合的混合智能模型，来突破小样本学习以及泛化方面的瓶颈，开展船队级协同管理工作，是得以实现船舶机电设备全寿命周期健康保障的核心路径。

参考文献

[1] 谢秉锋. 船舶电气设备故障及维护技术探析 [J]. 珠江水运, 2021, (16): 84–85.DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2021.16.033.

[2] 张帅. 船舶机电设备振动采集系统的故障诊断分析 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(02): 73–75.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2025.02.023

[3] 雷玉莹. 船舶电气设备常见故障的原因、检验技术与维修方法 [J]. 造船技术, 2024, 52(05): 68–70+82..

[4] 李陈明. 海上船舶电气设备故障成因分析及排除对策 [J]. 石化技术, 2024, 31(09): 153–154+149.

[5] 严帅. 船舶电气设备故障的处理与防治方法 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(03): 99–101.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2023.03.031.

[6] 秦瑞卿. 船舶机电设备振动采集系统的故障诊断研究 [J]. 设备管理与维修, 2024, (17): 35–37.DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001–0599.2024.09.11.

[7] 田振兴, 袁朝义, 张三华. 船舶检验中常见机械故障及处理措施 [J]. 内燃机与配件, 2022, (03): 133–135.DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674–957x.2022.03.042.

[8] 白福庆. 船舶机电设备维修中的状态监测技术研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(04): 108–110.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.04.035.

[9] 庄生建. 船舶电气设备的故障及维护措施 [J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(10): 23–24.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2021.10.012.

[10] 庄生建. 船舶电气设备的故障及维护措施 [J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(10): 23–24.DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2021.10.012.