

机电设备故障诊断与智能维护技术研究

张兴虎

良业科技集团股份有限公司，北京经济技术开发区，102600；

摘要：机电设备作为工业生产的关键组成，其运行状态直接影响生产效率与安全保障。在设备运行过程中，故障问题频发且类型多样，传统的人工维护模式面临效率低、反应滞后与诊断准确性不足等难题。随着智能化技术的发展，基于传感器采集、数据分析与算法驱动的智能诊断与维护手段逐渐兴起，为设备状态感知与故障预防提供了新的路径。本文围绕机电设备故障的关键表现与诊断难点展开分析，梳理了当前智能维护技术的典型应用模式与存在挑战，进一步提出融合数据驱动与模型预测的诊断维护策略，以期为企业提升设备管理水平提供理论参考与实践借鉴。

关键词：机电设备；故障诊断；智能维护；预测性维修；数据驱动

DOI：10.69979/3060-8767.25.06.084

引言

现代工业体系对机电设备的依赖程度不断提升，其运行的稳定性与连续性已成为衡量生产效率与安全管理水平的重要指标。然而，在复杂环境与高负载运行条件下，设备故障呈现多发性、隐蔽性与多元化趋势，给企业带来了频繁停机、维修成本上升与安全风险叠加等现实压力。传统依赖人工巡检与经验判断的维护模式，已难以满足高节奏生产场景下的保障需求。近年来，伴随工业互联网与人工智能技术的快速发展，基于传感器数据采集、边缘计算与机器学习算法的智能诊断技术逐渐成熟，使得对设备状态的实时监测、故障预测与远程运维成为可能。智能维护作为融合信息感知与决策优化的技术体系，不仅能提高故障响应速度，也有助于延长设备寿命与降低运行风险，成为装备制造与智慧工厂等领域关注的核心方向。但从实践层面看，智能诊断与维护技术的应用仍面临数据质量、模型适配、系统集成等多重挑战，技术成熟度与实际效益之间存在差距。本文拟在系统梳理故障诊断难点的基础上，剖析智能维护技术的运行逻辑与瓶颈问题，并探索诊断技术与维护管理的融合路径，以期构建面向实际场景的机电设备全生命周期智能保障机制。

1 机电设备故障诊断的核心问题

1.1 故障类型多样且隐蔽性强

机电设备在实际运行中，其构造复杂、部件众多，不同设备、不同用途所呈现的故障形式差异较大。常见问题包括电机过热、传动部件磨损、传感器失灵、润滑系统故障等，其中许多故障在初期并不表现为明显的异常波动，而是以微弱的信号变化或轻微性能下降为前兆^[1]。在缺乏连续监测或特征识别能力的前提下，这类隐

蔽性问题常常被忽略，直到发展为系统性故障或设备停机。

这种类型的故障诊断难度不止源自现象的不明显，也与诊断依据的不完整有关。受限于数据采集点布置、监测频率、环境干扰等因素，部分故障信号存在“弱信号一强干扰”的特征，即便具备实时采集能力，所提取的数据也可能缺乏足够区分度。这种情况下，即使使用自动化分析工具，也难以实现准确判断，容易出现误判或漏判，影响维护效率。

1.2 诊断技术手段分散且标准不足

在当前多数工业现场，机电设备的故障诊断手段主要由生产厂商或运维人员根据设备型号与应用工况自行决定，缺乏统一的诊断体系。不同设备配置不同种类的传感器与数据采集系统，所生成的数据维度、接口格式与频率参数差异显著，导致无法形成可横向比较与集成的诊断环境^[2]。这种分散性不仅增加了系统集成的复杂度，也限制了数据驱动方法的统一建模能力。

行业内虽然存在部分参考标准与设备状态评估规范，但由于设备种类繁多、运行环境差异大，标准实施常常流于形式或覆盖不全。一旦出现新型故障模式，现有规则库往往无法及时适应，技术手段与实际应用之间出现脱节，进而影响诊断精度与故障恢复时效性。

1.3 多源数据融合与建模能力不足

机电设备的运行状态往往由多维度数据共同决定，包括温度、压力、震动、电流、电压、运行频率与环境参数等。要实现精准诊断，必须从不同来源采集数据并进行时序同步、特征提取与异常识别^[3]。但在实际场景中，多源数据融合仍存在采集分布不均、同步机制薄弱与算法适配难度大的问题，影响了诊断系统的建模质量

与分析效率。

当前企业多数采用分布式数据采集架构,采集节点分布于各设备组件,但在汇总至中心服务器后,常因时间戳不一致、数据格式不统一等问题难以进行有效融合。缺乏一套标准化的数据清洗、对齐与特征提取流程,是阻碍大规模数据建模的重要因素。

有效的建模过程还需大量高质量标注数据作为支撑。然而,在实际运维场景中,设备运行异常情况少、人工标注代价高、数据隐私要求严,使得样本构建过程滞后于建模需求,制约了复杂模型的实用性。以上问题共同导致故障诊断系统难以形成具有普适性、可迁移性的诊断模型,影响智能诊断系统的推广与可靠运行。

2 智能维护技术的应用现状与挑战

2.1 状态监测与预测性维护初步普及

在许多现代化企业中,传统的定期检修与被动维修模式已逐步被状态感知与预测性维护所取代。尤其在制造、能源、交通等行业,企业开始通过部署振动传感器、热成像探头、电流监控模块等手段,实时获取设备运行状态,并据此判断是否存在性能衰退或异常趋势。这种模式可有效降低因突发性故障带来的停产风险,也可减少冗余性检修带来的资源浪费^[4]。

预测性维护技术的核心,在于通过历史与实时数据的比对分析,对设备未来可能出现的问题做出预警。这一过程通常依赖统计模型、时间序列分析或简单的机器学习算法,结合设备生命周期规律、负荷变化曲线与使用环境参数,对某类故障的发生概率进行预测,并据此安排维护计划。相比传统事后维修方式,该模式在维修节奏、零部件库存管理与运维调度方面具有明显优势。

尽管如此,大多数企业目前仍处于“半智能”阶段,系统所具备的预测能力多局限于特定场景或单一设备,缺乏对复杂系统状态的全面理解能力。同时,预测性维护往往依赖历史数据进行模型训练与规则配置,在面对突发性、不规律或非典型性问题时,系统的预警准确率仍有待提升。这种应用层的局限,表明智能维护仍处于从经验依赖向知识驱动过渡的初期阶段。

2.2 维护体系智能化水平参差不齐

从不同类型企业的维护实践来看,智能化维护体系建设存在明显不平衡现象。大型制造企业、高端装备制造领域或国家重大工程单位通常具备较高信息化基础,其设备本身配置较完整的监测模块,且具备较强的IT运维团队与数据分析能力,因此较早实现了部分设备的自动监测、故障预判与远程维护^[5]。此类企业常常在项目初期就将智能维护能力纳入整体建设方案,实现信息系统与生产系统的深度融合。

而在中小型制造企业或传统机电行业中,出于成本

控制与技术储备不足等因素影响,设备更新缓慢、缺乏可用数据源的问题依然突出。许多设备未内嵌智能接口,维护手段仍以人工巡查与定期更换为主,信息化水平较低。即便引入了某些智能模块,由于缺乏系统集成与运维协同机制,实际使用效果往往大打折扣。

此外,即便同一企业内部,不同部门或车间所采用的维护方案与技术标准也可能存在差异。部分设备由外包团队维护,无法与内部系统建立联通机制,形成“信息孤岛”;部分老旧系统缺乏更新路径,造成新旧系统之间数据断层。这种技术水平的不均衡,导致整体智能化维护能力存在短板,制约了新技术价值的释放。

2.3 技术适配性与落地实施难点突出

在实际推动智能维护落地过程中,许多企业面临技术适配性不足与实施阻力大的双重挑战。一方面,智能维护技术往往基于算法模型、数据接口与平台支持等前提条件,但企业现有设备架构、运行逻辑与控制系统多样化严重,难以实现标准化接入。例如,一套面向风电电机的预测模型,未必适用于汽车焊接臂或注塑机,算法泛化能力弱,导致重复建设成本居高不下。

技术方案的通用化程度不高,要求企业在部署前进行大量定制化适配,包括设备接口改造、采集节点部署、数据结构梳理与信息平台整合等,周期长、投入大、维护难。而一些维护系统则受限于操作门槛高、可视化程度差、响应链条长,导致现场使用人员接受度不高,影响系统实效。

另一方面,智能维护的实施过程常常伴随组织管理结构的调整与流程重塑,涉及生产管理、设备管理、IT运维、安全保障等多个部门的协调与支持。在组织机制尚未成熟的情况下,新系统引入往往面临责任边界模糊、响应流程混乱、数据使用权限不清等问题。即便系统建成,也可能因后续管理跟不上而效果不佳,甚至成为“信息化摆设”。

3 故障诊断与智能维护融合路径探索

3.1 构建以数据为基础的故障智能识别体系

实现诊断与维护的深度融合,首要在于构建以数据为驱动的故障识别体系。不同于传统基于物理模型或专家经验判断的方式,数据驱动体系强调通过对设备运行全周期、多维度数据的系统采集与特征建模,实现对潜在故障状态的提前感知与准确判断。这一体系的核心在于数据结构的标准化与平台化处理能力。

首先,在数据采集层面,应构建具备多元传感能力的边缘采集节点,确保能够覆盖温度、震动、电流、电压、油质、噪音等关键指标,同时具备抗干扰能力与本地缓存功能,保障数据在异常环境下的连续性与完整性。其次,在数据处理层面,需借助工业网关与中间件,实

现采集数据的协议转化、格式标准化与动态校准,为后续建模提供清洁、同步、结构化的基础。

在算法应用方面,不同类型设备需构建具备针对性的识别模型,如基于频域特征的振动诊断模型、基于时序关联的功率异常识别算法、或结合图神经网络的部件热失控预测模型等。同时,通过引入联邦学习机制与知识迁移机制,可在保护数据隐私的同时提升模型泛化能力,实现跨设备、跨车间的故障预测模型协同训练与快速部署,提升诊断的准确性与普适性。

3.2 推进维护系统的流程协同与响应闭环

故障诊断结果只有在维护流程中被高效接收、处理与反馈,才能真正转化为实际价值。因此,构建以故障诊断为起点的维护响应闭环,是实现智能化维护的关键一环。在实际操作中,可从两方面着手推进流程优化:一是提升诊断结果的可用性与解释性,二是优化维护流程的信息对接与任务执行效率。

在诊断结果的呈现上,应避免仅以“异常/正常”二值输出为主,而需提供关键参数的趋势分析、异常指标的关联性判断与风险等级的综合评估。通过图表化、趋势化与语义化的展示方式,使一线维护人员能够基于数据判断问题性质与影响程度,提升响应决策的主动性与针对性。

在维护流程中,应构建自动化任务分发机制,确保当诊断系统触发风险预警后,维护工单可自动生成,并根据部件类型、设备位置与风险等级推送至相应责任人。同时应支持维护计划的动态调整与进度监控,实现从风险识别到维修执行再到结果反馈的全过程在线管理。系统应支持维修过程数据的回写功能,将维护日志、故障处理方案与更换配件等信息自动归档,为后续诊断模型优化提供真实案例与反馈数据。

在跨部门协同方面,可引入统一的数字化运维平台,实现维修、生产、仓储、安全等多个职能的任务协同与信息共享,推动传统割裂的流程向高度耦合的闭环体系转型。最终目标是形成以风险预判为源头、自动派单为中枢、维护执行为过程、知识沉淀为结果的智能化响应闭环。

3.3 强化经验沉淀与知识图谱建设机制

实现诊断与维护的一体化还需构建长期有效的知识沉淀机制,将故障识别经验、维护执行流程与异常演化路径系统化、结构化保存,进而支撑系统的持续演进与自动优化。建设设备级知识图谱与企业级维护案例库,是当前较具前瞻性的路径之一。

设备级知识图谱以单一设备为对象,将其结构构成、故障类型、影响路径、历史维护记录等信息以图结构形

式呈现,并通过关系节点标识出各参数间的因果关联与演化逻辑。在实际诊断过程中,图谱可作为推理引擎,辅助算法判断未知异常的潜在诱因,提升对复杂问题的解释能力。

企业级案例库则以实际运维记录为素材,建立问题—处理—结果的三元结构档案。通过自然语言处理与文本挖掘技术,可从维护日志中提取关键处理路径与干预手段,归纳形成可复用的处理模板,并结合上下文信息构建情境标签。未来在面对相似问题时,系统可根据标签快速检索并推送处理建议,辅助维护人员做出更合适的应对选择。

知识系统的建设并非一蹴而就,其有效性依赖于数据持续积累与反馈机制的完善。为此,企业需建立从诊断、维护到优化的完整记录制度,对每一次故障处理过程进行详尽归档。同时应设立模型更新与规则迭代机制,根据新数据不断优化算法参数与图谱结构,实现诊断系统从“可用”走向“自学习”。

4 结束语

随着制造业向智能化、数字化方向加速转型,机电设备的运行安全与维护效率日益成为企业核心竞争力的重要组成部分。传统依赖人工经验与定期检修的方式,已难以应对复杂系统中隐性故障的识别与管理需求。在此背景下,基于数据驱动与算法支持的智能维护技术为设备管理提供了新路径。

本文围绕机电设备的典型故障问题,分析了当前智能诊断技术的发展现状与应用瓶颈,并进一步探讨了从数据采集、模型识别到响应闭环与知识沉淀的一体化融合路径。未来的设备管理体系,应注重数据基础设施建设、平台型系统构建与知识系统的迭代优化,以实现从被动维护向主动感知与智能决策的全面跃升,为工业系统运行安全与效能提升提供坚实保障。

参考文献

- [1] 赵长梅,段有艳,韩珂. 机电一体化设备的故障诊断方法与预测性维护技术应用[J]. 造纸装备及材料,2025,54(02):13-15.
- [2] 代存海,陈一. 煤矿机电设备故障诊断与预测维护技术研究[J]. 山东煤炭科技,2025,43(04):189-192.
- [3] 陈汝巍,盛芸. 电力电网设备故障诊断与智能维护技术研究[J]. 中国设备工程,2025,(07):155-157.
- [4] 吴曙兵. 轮胎成型机电设备的预防性维护技术与故障诊断策略[J]. 中国轮胎资源综合利用,2025,(03):61-63.
- [5] 刘辉. 机电设备的故障诊断与智能维护技术研究[J]. 电气技术与经济,2024,(08):52-56.