

工业 4.0 背景下智能工厂机电设备预测性维护关键技术研究

时 坤

扬州曙光光电自控有限责任公司 江苏扬州

【摘要】在工业 4.0 背景下，智能工厂的建设对机电设备的高效稳定运行提出了更高要求。预测性维护作为关键手段，能够通过多源数据采集、实时状态监测与智能算法分析，实现设备故障的提前预警与维护优化。本文以设备全生命周期管理为逻辑主线，探讨传感技术、数据驱动建模与人工智能在预测性维护中的协同应用，重点分析其在故障模式识别、健康状态评估及决策支持中的作用，为实现智能工厂的高可靠性与低成本运维提供技术支持。

【关键词】工业 4.0；智能工厂；机电设备；预测性维护；人工智能

【收稿日期】2025 年 11 月 5 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 6 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250228

Research on key technologies of predictive maintenance of electromechanical equipment in smart factory under industry 4.0

Kun Shi

Yangzhou Shuguang Optoelectronics Automatic control Co., Ltd. Yangzhou, Jiangsu

【Abstract】In the context of Industry 4.0, the construction of smart factories imposes higher demands on the efficient and stable operation of electromechanical equipment. Predictive maintenance, as a key approach, can achieve early equipment failure warnings and maintenance optimization through multi-source data collection, real-time condition monitoring, and intelligent algorithm analysis. This paper focuses on the entire lifecycle management of equipment as the logical thread, exploring the collaborative application of sensing technology, data-driven modeling, and artificial intelligence in predictive maintenance. It emphasizes their roles in fault pattern recognition, health status assessment, and decision support, providing technical support for achieving high reliability and cost-effective operation in smart factories.

【Keywords】Industry 4.0; Smart factory; Electromechanical equipment; Predictive maintenance; Artificial intelligence

引言

工业 4.0 驱动下，制造体系正逐步迈向数字化与智能化，机电设备作为智能工厂的核心环节，其运行状态直接影响生产效率与产品质量。传统的定期维护模式难以适应复杂多变的生产需求，而预测性维护凭借实时监测与智能分析，展现出高效可靠的优势。通过融合传感器网络、大数据处理与人工智能算法，设备运行的潜在隐患能够被提前发现并加以处置，从而实现生产过程的连续性与资源利用率的提升。这一转变不仅是技术进步的必然结果，也是智能工厂可持续发展的重要路径。

1 工业 4.0 驱动下智能工厂机电设备维护困境

在工业 4.0 的深度推进下，智能工厂的建设逐渐成为制造业升级的重要方向。然而，作为智能工厂运转核

心的机电设备，在长期高负荷、复杂工况和多维协同的环境中运行时，往往面临突发性故障率高、维护成本居高不下以及停机损失严重等现实困境。传统的定期检修与事后维修模式，难以满足智能化生产的连续性与高效率要求^[1]。设备一旦出现意外停机，不仅会打乱整个生产链条，还可能造成供应链延误与资源浪费，使智能工厂原本追求的柔性生产与高效协同难以实现。这种矛盾凸显出在工业 4.0 语境下，传统维护模式与智能工厂运行需求之间存在深层次不匹配。

随着智能制造水平的提升，机电设备的结构与功能趋于复杂化，其控制系统、传动系统与感知单元高度集成，任何细小的隐患都可能引发系统性连锁反应。多样化的生产任务和不确定性的运行环境，使得设备状态呈现动态非线性特征，单一依赖人工经验或静态计划

的维护手段已无法捕捉潜在风险。生产环节中高精度与高稳定性的要求不断提升,机电设备的运行容错空间被压缩,突发性故障对产品质量和生产安全的影响被进一步放大。这种背景下,维护策略从“以时间为导向”逐渐转向“以状态为导向”,但在实际应用中,受限于传感器布设不足、数据采集不完整以及算法精度不高,预测性维护的全面落地仍然存在障碍。

维护困境不仅体现在技术层面,还涉及经济与管理维度。在成本控制方面,过度维修会造成资源浪费,而延迟维修则会加剧设备损伤,两者均不利于工厂整体效益。维护计划的科学性不足,还容易导致人员调度不合理与备件供应不及时,从而形成新的瓶颈^[2]。随着智能工厂向大规模协同与全生命周期管理迈进,机电设备维护亟需摆脱传统路径依赖,构建基于实时数据驱动的预测机制与决策支持体系,才能在保障设备可靠性的同时,实现运维成本的动态优化。工业 4.0 不仅推动了智能工厂的发展,也迫使机电设备维护模式进入了一个必须创新突破的关键阶段。

2 智能工厂预测性维护的技术需求与核心挑战

在智能工厂的运行场景中,机电设备预测性维护的实施需要建立在多层次技术支撑的基础上。复杂工艺流程对设备稳定性提出严格要求,预测性维护必须具备高速数据采集、全方位状态感知以及实时信息处理的能力。传感器网络和工业物联网技术在这一过程中扮演核心角色,它们能够实现设备振动、温度、电流、电压等关键参数的连续监测,为后续健康评估提供基础数据^[3]。同时,大数据平台的引入使得多源异构信息能够高效融合和存储,为机电设备全生命周期建模创造条件。只有在技术架构上实现多维度信息交互与实时处理,预测性维护才能真正适应智能工厂的动态生产需求。

面对复杂的设备系统与高度耦合的工况环境,预测性维护对算法模型的准确性和鲁棒性提出了更高要求。传统的基于阈值或经验的判断方式已难以满足实际需求,需要依靠机器学习、深度学习和数字孪生技术对设备运行规律进行挖掘与模拟。通过对历史故障模式与实时数据的对比,能够实现早期隐患的识别与故障趋势预测。然而,算法训练往往受到样本数据质量的限制,噪声干扰与数据缺失可能导致误判,降低模型的可靠性。同时,设备运行工况的非线性与多变性使模型泛化能力不足,预测结果在不同场景中可能出现偏差。这些问题对预测性维护的实际推广构成了明显挑战,需要在算法优化与数据处理方面持续突破。

除了技术层面的限制,智能工厂预测性维护还面临组织管理与经济成本的制约。传感器布设、网络搭建和平台建设需要大量资金投入,维护系统的部署和运行也对人力资源提出更高要求。设备管理部门需要具备跨学科知识,既要理解机械结构与电气特性,又要熟悉信息技术与人工智能方法,这对人员素质与培训体系提出挑战^[4]。不同厂商设备之间的数据标准不统一,接口兼容性差,导致信息孤岛问题频繁出现,难以形成统一的维护体系。在成本与标准的双重制约下,预测性维护在智能工厂中的全面普及仍存在障碍。如何在降低投入与保证可靠性之间找到平衡点,成为智能工厂亟待解决的核心问题。

3 机电设备预测性维护关键技术路径与实现方法

机电设备预测性维护的实现离不开多维度关键技术路径的构建,其中核心在于建立全面而精准的状态感知体系。通过布设多类型传感器,能够对设备的温度、振动、声学信号、电流电压波动等进行实时采集,形成覆盖运行过程的全息数据链。结合工业物联网技术,监测数据在不同环节实现高速传输与共享,保障信息在设备、车间与控制中心之间高效流动^[5]。这一过程中,边缘计算的引入有效缓解了大规模数据处理压力,使现场数据能够被快速过滤与初步分析,减少延时并提高监测的响应速度,为后续深度建模提供高质量输入。

在数据驱动的分析层面,预测性维护依托人工智能与大数据算法实现故障模式识别与寿命预测。机器学习方法能够通过历史样本的训练,总结出典型故障特征向量,从而在运行过程中进行比对与诊断。深度学习算法则在复杂的非线性工况中表现出更强的特征提取能力,能够识别出微弱且潜伏的异常信号。数字孪生技术的应用进一步强化了预测性维护的科学性,通过构建设备虚拟映射模型,对物理实体运行进行动态仿真与验证,使潜在风险能够在虚拟环境中被提前发现。这些方法的有机结合,不仅提升了预测的准确率,还拓展了维护策略的智能化水平。

在维护策略执行环节,智能决策支持系统成为连接预测结果与实际运维的关键纽带。通过多维度数据与算法输出,系统能够为管理层提供基于健康指数的维修建议,实现维修计划的动态优化与资源调配的合理化。结合云计算平台,预测性维护的成果可以跨部门共享,形成设备管理与生产调度的一体化联动,减少重复检修与备件浪费^[6]。同时,增强现实与远程运维技术的应用,使维护人员能够在虚拟指引下快速完成操作,降低人工失误率并提升安全性。通过感知、分析与决策

三位一体的技术路径,机电设备预测性维护在智能工厂中展现出系统化与可实施的实践方案。

4 预测性维护在智能工厂中的集成应用与价值体现

预测性维护在智能工厂的实践过程中不仅仅是一种单纯的设备管理手段,而是与生产计划、质量控制及供应链调度深度融合的系统化环节。通过实时监测与智能分析,设备潜在故障能够在尚未演化为突发停机之前被识别,从而避免大规模生产中断和由此带来的经济损失^[7]。更为重要的是,预测性维护能够提升生产节拍的稳定性,使柔性制造系统能够在高度自动化的条件下保持连续运转。这种状态下,设备不再是潜在风险源,而是成为支撑智能工厂可靠性和竞争力的核心资源。

在集成应用的层面,预测性维护能够与生产执行系统和企业资源计划系统形成数据交互与功能协同。通过建立健康指数模型,设备的运行状态被量化为可用于决策的指标,管理层可以基于这些指标合理安排维修窗口,避免与关键工序的生产任务冲突。数字孪生技术的引入,使得预测性维护从单一设备管理扩展至生产线甚至整个工厂的虚拟映射,运行状态与故障演化过程在仿真环境中得到验证,从而优化维护计划并降低不可控风险。与此同时,基于云平台的集中式维护数据管理使不同部门能够共享信息,避免重复投入,形成覆盖设计、制造与运维的全生命周期管理模式。

价值体现不仅反映在成本降低与可靠性提升上,更体现在生产效率与资源利用率的全面优化。通过减少计划外停机,智能工厂能够显著降低备件消耗和人工检修频率,实现维护成本与能源消耗的双重下降。预测性维护还在质量保障方面发挥作用,稳定的设备运行状态减少了工序偏差,从而提升产品一致性与合格率^[8]。在绿色制造与可持续发展目标的推动下,预测性维护通过优化能耗与减少资源浪费,进一步增强了智能工厂的社会与环境价值。由此可见,预测性维护在智能工厂的集成应用不仅是技术创新的体现,更是实现智能制造战略落地的关键支撑。

5 结语

在工业 4.0 背景下,智能工厂对机电设备的高效与

稳定提出了前所未有的要求,预测性维护成为解决传统维护模式弊端的重要路径。借助传感器网络、大数据分析、人工智能与数字孪生等关键技术,设备状态监测与故障预警得以实现,为生产连续性和运维经济性提供坚实保障。预测性维护不仅提升了机电设备的可靠性与寿命,还在生产效率、质量稳定性和资源利用率方面展现出显著价值。其在智能工厂中的集成应用,标志着制造业正向着高度智能化与可持续化迈进。

参考文献

- [1] 李美璐. 变频调速系统在矿山机电设备节能中的应用[J]. 能源与节能, 2025, (09): 82-84+344.
- [2] 张侯, 陈隆, 陈汉章. 基于无线网络通信的煤矿机电设备运行自动化监测系统[J]. 电子设计工程, 2025, 33(17): 154-157.
- [3] 吴少龙. 智能工厂梯度培育见成效 中国制造重塑生产范式[N]. 证券时报, 2025-08-29(A02).
- [4] 吴志鸿. 智能工厂信息化与知识管理融合应用[J]. 中国信息化, 2025, (08): 107-108.
- [5] 胡佳祺. 工业 4.0 背景下机械制造中自动化生产线的智能化升级[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(07): 180-182.
- [6] 刘爽爽, 吴锋炜, 刘向向. 工业 4.0 背景下机械设计制造的智能化发展趋势探究[J]. 内燃机与配件, 2025, (14): 134-136.
- [7] 叶晓黎, 赵宇航, 徐启明, 等. 工业 4.0 背景下电气设备自动化与质量管控融合发展[C]//中国机电工程协会. 机电技术领域学术交流暨科技人才高质量发展研讨会论文集. 温州永邦机械有限公司; 温州冠天科技有限公司, 2025: 129-135.
- [8] 张琪烨. 基于工业 4.0 的机械制图课程改革与创新[J]. 农机使用与维修, 2025, (07): 151-153+157.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS