

Adaptive design and collaborative maintenance system construction of intelligent mechanical equipment driven by artificial intelligence

Ke Zheng Meng Li Xiaoli Wu Changlu Shen Yuejing Su

Wenzhou Jiagu Packaging Co., Ltd., Yueqing, Zhejiang, 325619, China

Abstract

The current industrial sector is undergoing a critical phase of intelligent transformation and upgrading. Traditional design models and maintenance strategies for machinery are increasingly unable to adapt to the complex and ever-changing working conditions and dynamic demands. Due to the unpredictability of operating environments and the increased interconnectivity of failures, static design frameworks and decentralized maintenance models face bottlenecks such as delayed response and resource wastage. Breakthrough developments in artificial intelligence offer new solutions to these challenges. By constructing multidimensional sensing networks and employing dynamic optimization algorithms, equipment can now adapt to its environment and make design adjustments. This paper focuses on the deep integration of artificial intelligence in dynamic modeling methods and collaborative decision-making mechanisms, aiming to establish a closed-loop system that covers the entire lifecycle of intelligent machinery from design to operation and maintenance. The goal is to achieve continuous evolution of equipment performance through data-driven and knowledge-integrated approaches, providing theoretical support and technical paradigms for the development of industrial intelligence.

Keywords

artificial intelligence; intelligent machinery; adaptive design; collaborative maintenance

人工智能驱动的智能机械设备自适应设计与协同维修体系构建

郑克 李猛 吴小莉 沈昌禄 苏岳景

温州嘉固包装有限公司, 中国·浙江 乐清 325619

摘要

当前工业领域正经历智能化转型升级的关键阶段,传统机械设备的设计模式与维护策略已然难以去适应复杂多变的工况以及动态变化的需求。由于设备运行环境的不可预测性和故障之间关联性的增强,使得静态的设计框架与分散式的维修模式面临着诸如响应迟滞、资源浪费的瓶颈问题。人工智能技术突破性的发展为解决上述矛盾提供了全新的路径,借助构建多维感知网络以及动态优化算法的方式,让设备拥有了能够适应环境并进行设计调整的能力。本文聚焦于深度融合人工智能的动态建模方法以及协同决策机制,致力于建立能够覆盖设备全生命周期的智能机械设计到运维的闭环体系,目的在于通过数据驱动以及知识融合的手段,实现设备性能的持续不断进化,为工业智能化的发展提供理论支撑与技术范式。

关键词

人工智能; 智能机械; 自适应设计; 协同维修

1 引言

机械装备的智能化发展正推动工业生产力向高阶形态跃迁,然而现有设备系统内部在应对多变工况时存在深层次矛盾:设计方面固化且维护存在割裂。传统设计方法以固定参数以及经验规则为依赖,在动态环境下要实现实时性能优

化是较为困难的;而孤立式的维修模式由于全局信息共享的缺乏,致使其维护效能处在低下的水平。本文以构建设备全生命周期智能化为目标,着重在两大技术领域实现突破,其一是动态环境下的自适应设计优化领域,其二是多主体协同维修领域。通过建立数据-知识双驱动的协同优化模型,对设备自主演进和系统协调维护二者的融合机制展开探索。

2 智能机械设备自适应设计的理论基础

2.1 自适应设计的目标

智能机械设备自适应设计的目标在于建立动态响应机

【作者简介】郑克(1982-),男,中国浙江乐清人,本科,高级工程师,从事无人干预的情况下能自主地驱动智能机器实现控制目标的自动控制技术研究。

制以应对复杂工况下的不确定性挑战,设备需具备实时感知运行状态与环境参数的能力,通过内置算法模型持续优化结构参数与运动轨迹,这种能力使机械系统在外部扰动或负载突变时维持预定性能指标。动态适应能力的深化拓展至全生命周期维度,设计过程中嵌入可重构模块与容错策略,当部件磨损或材料性能退化时,系统能自主调整传动比、补偿间隙误差并重新分配载荷,该特性显著延长了设备在非稳态工况中的有效服役周期。第三个目标聚焦于多物理场耦合作用下的性能平衡优化,在有限空间约束内协调热力学特性、振动模态与能耗效率的交互影响,借助数字孪生技术构建虚实联动的仿真验证环境,为机械结构的拓扑优化与材料选择提供迭代依据,使得最终设计方案既能满足峰值性能需求,又可适应不同作业场景的差异化要求。

2.2 人工智能在动态优化中的作用

人工智能是智能学科重要的组成部分,它企图了解智能的实质,并生产一种新的能以与人类智能相似的方式做出反应的智能机器。人工智能是十分广泛的科学,包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理、专家系统、机器学习、计算机视觉等。在复杂工况下,深度学习算法通过持续解析设备与环境的多模态交互信息,构建起具备时间序列敏感性的特征提取网络,这使得机械系统能够实时捕捉压力波动、温度变化等动态扰动因素,并自主生成补偿性参数调整策略。强化学习框架的引入进一步强化了设备应对不确定性的能力,通过建立多目标优化函数与设备物理约束条件的动态平衡机制,系统在迭代中逐步形成兼顾能耗效率与结构稳定性的最优运行轨迹。迁移学习技术则突破了传统优化模型在跨场景应用中的局限性,借助历史工况数据与实时监测信息的跨区域关联分析,设备能够快速识别新型负载特征并激活预置的适应性调节模式,显著提升了机械装备在变工况环境中的生存能力。

3 智能机械自适应设计体系构建

3.1 数据驱动的设计框架

数据采集模块在机械本体嵌入异构传感器阵列,持续捕获振动频谱、温度梯度与应力分布等多源异构信号,原始数据流经边缘计算节点进行降噪与特征提取后转化为标准化工程语义。仿真平台依托数字孪生模型构建虚实映射关系,将物理空间的运行参数同步至虚拟环境进行多维度性能推演,针对极端工况下的扭矩过载或热变形效应生成参数化修正方案。优化引擎基于贝叶斯优化算法解析历史数据与仿真结果的关联规律,在传动系统刚度匹配与能耗阈值约束条件下迭代输出最优设计参数集,修正后的参数通过现场可编程门阵列实时注入控制单元,驱动执行机构完成动态补偿与精度校准。设备运维数据库持续积累不同作业场景下的齿轮磨损特征与轴承失效模式,为后续设计迭代提供材料疲劳特性与界面摩擦系数的修正基准,这种闭环框架使采矿机械的

截割头角度调整周期从传统经验驱动の数周缩短为数据驱动的72小时^[12]。详细流程如图1所示:

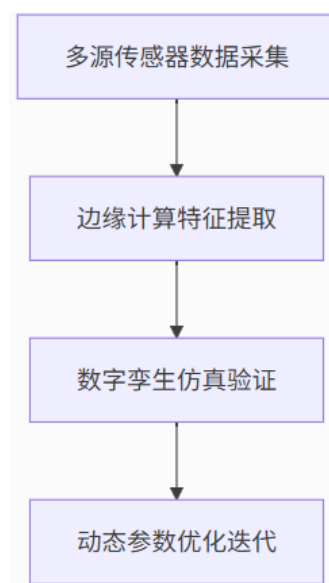


图1 数据驱动的自适应设计框架流程图

3.2 动态环境下的性能优化模型

动态性能优化依托于嵌入式传感器网络的密集部署,在设备本体关键应力集中区域布设振动加速度计与应变片阵列,实时捕获切削力突变、关节轴承游隙变化等微观状态特征。自适应算法依据主轴温升曲线与刀具磨损量的在线监测数据,动态调整进给速率补偿系数与冷却液喷射策略,使加工精度维持在工艺要求范围内波动。针对野外作业机械遭遇的复杂地形扰动,控制系统融合激光雷达点云数据与悬挂液压缸压力反馈信号,重构车身姿态预测模型并生成多目标优化下的配重分配方案。边缘计算节点部署在设备控制柜内部署强化学习代理,通过分析历史维修工单中轴承失效与齿轮箱振动频谱的关联特征,自主更新寿命预测模型的劣化速率参数。多物理场耦合仿真模块嵌入设计流程,将实时采集的电机谐波分量与散热器风道流场数据进行联合求解,输出兼顾电磁兼容性与热稳定性的结构轻量化设计方案。知识图谱技术整合设备说明书中的公差配合表与现场安装日志中的装配应力记录,构建动态设计规则库,为不同海拔气压环境下的密封件选型提供匹配度排序建议。

3.3 基于仿真的设计验证与迭代方法

仿真模型构建阶段需整合机械系统的几何约束与物理场边界条件,基于实际工况下的载荷谱与材料本构关系建立高保真虚拟原型,模型校验过程引入激光扫描点云与应变片实测数据交叉验证传动链动态响应特性。多物理场耦合分析模块在虚拟环境中模拟极端温度梯度与交变载荷叠加作用下的应力集中现象,针对齿轮箱热变形导致的啮合错位问题生成拓扑优化建议,采用降阶模型加速计算流程以平衡精度与效率的矛盾。参数修正引擎根据台架试验反馈的振动频谱

特征动态调整轴承预紧力阈值与减速器齿侧间隙补偿量,设计迭代过程中嵌入蒙特卡洛抽样方法量化制造公差对系统可靠性的影响范围,使得深海钻探设备的密封结构刚度系数在七次迭代后达到海底高压环境的稳定性要求。

4 智能机械设备协同维修体系的核心架构

4.1 故障预测与健康管理

状态监测网络在机械关键节点部署三轴振动传感器与红外热像仪阵列,采集转子不平衡度与轴承温升速率的时域特征,原始信号经小波包分解后提取出反映齿轮裂纹萌生趋势的边频带能量因子。故障特征库整合矿山机械十年维保记录中的行星轮系点蚀图谱与液压阀卡滞波形模板,建立基于马氏距离的异常检测模型识别早期故障模式,当破碎机主轴振动熵值超过阈值时触发三级预警机制。维修决策引擎调用历史工况数据与剩余寿命预测曲线,结合现场备件库存与人员资质矩阵生成多目标优化方案,针对风电齿轮箱的行星架微裂纹优先安排激光熔覆作业而非整体更换,使单次维修成本下降的同时将发电机组停机周期压缩至传统模式的四分之一。知识图谱持续吸收维修人员现场标注的螺栓松动扭矩阈值与密封件老化关联规则,通过在线学习机制动态更新离心压缩机喘振预测模型的权重参数,为后续同类型设备的预防性维护提供变工况下的决策依据。

4.2 多主体协同维修

多主体围绕维修机器人、云端知识管理平台和现场工程师三方构建任务分配逻辑,维修机器人搭载多光谱成像探头对齿轮箱表面微裂纹进行螺旋扫描检测,结合螺栓预紧力传感器的历史松脱数据生成初步维修方案。云端平台整合设备制造商提供的公差配合参数库与历年故障维修案例记录,运用图卷积神经网络挖掘不同润滑剂型号与轴承失效模式的潜在关联,向工程师手持终端推送备件选型决策树。当液压系统压力脉动超出设定阈值时,维修机器人自动调用数字孪生模型中的活塞杆配合间隙仿真数据,联动工程师调整密封圈压缩量的同时,向云端反馈实际磨损形貌与理论预测的偏差量用于模型迭代。针对野外作业场景通信不畅的难题,开发具备边缘计算能力的移动维修舱,内置六轴机械臂的轨迹规划模块能够直接解析设备控制器上传的关节磨损热力图,在离线状态下完成减速器齿轮副的快速对位更换。维修过程质量控制引入声发射技术,通过捕捉螺栓紧固过程中的应力波特征频谱,实时比对云端标准工艺数据库中的扭矩-

频率映射关系,动态修正电动扳手的旋转角度补偿值。

4.3 维修知识图谱与决策支持模型

维修知识图谱本体构建阶段融合设备 BOM 结构、失效模式库与历史维修工单数据,采用属性图模型定义轴承座松动与液压油污染间的因果推理路径,本体节点嵌入材料疲劳系数与装配工艺偏差的量化关系。决策支持模型基于规则引擎与贝叶斯网络构建双层推理机制,当盾构机主驱动密封压力波动时,模型遍历图谱中推进液压缸漏液案例与当前扭矩波动模式进行相似度匹配,输出带置信度评级的螺栓预紧力复查方案。维修案例数据库采用时态图结构存储不同气候条件下风机偏航齿轮的润滑周期调整记录,在高原低温场景中为新装机组推荐抗凝脂添加剂注入量时,系统自动筛选海拔 3000 米以上电站的齿轮箱冬季运维日志作为参照基准。在线学习模块解析维修人员对推荐方案的采纳率与修复效果评分,动态修正知识图谱中输送带接头硫化温度与环境湿度的关联权重,使水泥生产线托辊更换策略能够适应雨季空气含水量剧增的工况特征^[3]。

5 结语

工业设备的技术范式正被人工智能与机械装备的深度耦合所重塑,本文构建的自适应设计体系与协同维修架构为设备智能化提供了可行路径。理论分析显示,设备环境适应能力的显著提升可通过基于动态感知的设计参数优化达成,而知识图谱支撑的多主体协同机制可有效破解传统维修中的信息孤岛问题。对于产业化推广而言,技术标准的统一性与系统兼容性应成为重点关注对象,建议优先在流程工业与高端装备领域开展示范应用。未来技术发展的着力方向应是突破设备自主进化能力,通过引入群体智能算法来建立设备集群的协同学习机制,从而让系统具备从局部优化到全局进化的跃迁能力。

参考文献

- [1] 徐涛. 机械设备智能化软件开发测试存在问题与对策 [J]. 机械管理开发, 2025, 40 (03): 236-237+264. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2025.03.084.
- [2] 丁梦斐. 基于人工智能的机械制造加工设备安全检测技术 [J]. 模具制造, 2025, 25 (02): 268-270. DOI:10.13596/j.cnki.44-1542/th.2025.02.087.
- [3] 李伟,臧翔宇,孙百弘. 人工智能技术在机械设备管理中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54 (01): 87-89.