

基于数字孪生的冶金机电设备全生命周期运维系统构建与应用

刘宏涛

首钢京唐钢铁联合有限责任公司 河北 唐山 063200

摘要：本文聚焦基于数字孪生的冶金机电设备全生命周期运维系统。先阐述数字孪生与冶金设备运维的理论基础，接着分析运维需求并设计体系架构与工作流程。深入探讨数字孪生驱动的高保真建模、虚实映射及全生命周期智能运维策略，涵盖设计反馈、状态监测、寿命预测等方面。旨在推动冶金设备运维智能化转型，提升运行效率、降低成本，实现绿色运维。

关键词：数字孪生；冶金机电设备；全生命周期；运维策略

引言：冶金生产中，机电设备运维至关重要，但面临极端工况、结构复杂等难题，传统运维模式难满足高质量发展需求。数字孪生融合多种技术，能构建物理与虚拟模型映射，实现闭环管理。将其与冶金设备运维深度融合，可搭建协同桥梁，为全生命周期运维提供支撑，推动运维从“被动维修”向“主动预测”转型，契合行业数字化升级趋势。

1 数字孪生与冶金设备运维理论基础

数字孪生是融合物联网、大数据、人工智能、仿真建模等技术的新型数字化技术，核心是构建物理实体与虚拟模型的一一映射，实现虚拟仿真、实时监控、动态优化的闭环管理。冶金设备运维作为保障冶金生产连续稳定运行的核心环节，面临高温、高压、强腐蚀的极端工况，以及设备结构复杂、故障隐蔽性强、运维成本高、非计划停机损失大等痛点，传统基于经验的运维模式已难以适配现代冶金产业高质量发展需求。数字孪生技术与冶金设备运维的深度融合，搭建了物理设备、虚拟模型与运维数据的协同桥梁，其理论基础涵盖多领域建模理论、数据融合理论、虚实同步理论等^[1]。通过将冶金设备的几何特征、物理特性、运行参数、故障规律等映射至虚拟模型，实现运维过程的可视化、数字化与智能化，为设备全生命周期运维提供精准的数据支撑与技术保障，推动冶金设备运维从“被动维修”向“主动预测”转型，助力提升设备运行效率、降低运维成本，契合钢铁行业数字化转型升级的发展趋势。

2 冶金机电设备全生命周期运维需求与体系架构设计

2.1 全生命周期运维业务需求模型

冶金机电设备全生命周期运维业务需求模型，围绕设备从设计到报废再制造的全流程，结合行业特点构建

多维度需求体系。业务层面，涵盖设计可运维性、运行实时监测与预警、维护精准维修与成本控制、报废绿色处置与资源回收等核心需求。用户层面，生产企业要降低停机率、提设备综合效率；运维人员想简化流程、提故障处置效率；管理部门需运维数据可视化、优化资源配置。该模型以“数据驱动、精准运维、绿色高效”为核心，整合多源异构数据，明确各阶段目标、流程与指标，解决传统运维脱节、数据孤岛等问题，为系统架构和工作流程优化提供需求导向。

2.2 系统总体架构设计

基于全生命周期运维需求，构建“感知层-数据层-模型层-应用层”四层架构。感知层部署在设备关键部位，用传感器等实时采集运行参数与运维信息，提供基础数据。数据层用数据湖等技术汇聚、清洗、融合、存储多源数据，打破信息孤岛。模型层是核心，构建数字孪生等模型，实现设备虚实映射与趋势预判。应用层面向不同场景，开发可运维性评价等功能模块，提供可视化界面与决策支持，实现运维数字化、智能化管控，架构兼顾扩展性与实用性，适配复杂工况。

2.3 系统工作流程设计

系统围绕设备全生命周期构建闭环运维流程。设计阶段，用可运维性评价模块结合虚拟仿真评估方案，优化设计。安装阶段，部署感知设备并初始化虚拟模型。运行阶段，感知层采集数据经处理后传至模型层，虚拟模型同步状态，异常检测模块预警^[2]。故障或性能退化时，调用故障诊断模型定位原因，结合寿命预测生成维修方案，运维人员维修并反馈数据。报废阶段，用报废与再制造评估模块分析残值与可行性，形成绿色处置方案，归档全生命周期数据，为后续设计、运维优化提供参考，形

成闭环。

3 数字孪生驱动的设备高保真建模与虚实映射

3.1 多领域统一建模方法

数字孪生驱动的冶金设备高保真建模需突破单一领域建模的局限,采用多领域统一建模方法,整合几何、物理、控制、运维等多领域信息,构建与物理设备高度一致的虚拟模型。针对冶金设备结构复杂、工况恶劣的特点,几何建模采用参数化建模技术,精准还原设备的外形结构、零部件装配关系,确保虚拟模型与物理设备的几何一致性;物理建模基于多物理场耦合理论,模拟设备在高温、高压、重载工况下的力学、热力学、电磁学特性,还原设备运行过程中的物理行为;控制建模结合设备控制系统逻辑,实现虚拟模型与物理设备控制策略的同步;运维建模整合设备故障规律、维修记录等数据,为运维优化提供模型支撑。通过多领域模型的融合集成,采用AnsysTwinBuilder等工具实现多物理场耦合仿真,解决传统建模中各领域模型脱节、保真度不足的问题,确保虚拟模型能够精准模拟物理设备的运行状态、故障特征与性能退化过程,为后续虚实映射、智能运维提供可靠的模型基础。

3.2 数据驱动模型动态修正技术

由于冶金设备运行工况复杂多变,长期运行后会出现零部件磨损、性能退化等问题,导致初始虚拟模型与物理设备出现偏差,因此需采用数据驱动模型动态修正技术,维持模型的高保真度。该技术以冶金设备全生命周期多源数据为核心,通过边缘计算、大数据分析等技术,实时挖掘感知层采集的运行数据、故障数据与维修数据,识别模型偏差来源^[3]。基于LSTM神经网络、生成对抗网络(GAN)等算法,建立数据与模型参数的映射关系,当虚拟模型与物理设备的运行状态偏差超过阈值时,自动调整模型参数,包括几何参数、物理参数、控制参数等,实现模型的动态校准。同时,结合设备故障案例与性能退化数据,持续优化模型的仿真精度,应对故障样本缺乏、工况多变等问题,确保虚拟模型能够实时跟踪物理设备的运行状态,准确反映设备的性能变化与故障隐患,为虚实同步、智能决策提供精准的模型支撑,提升数字孪生系统的实用性与可靠性。

3.3 虚实同步通信机制

虚实同步通信机制是实现数字孪生虚拟模型与冶金物理设备实时联动的核心,其核心目标是确保物理设备与虚拟模型之间数据传输的实时性、准确性与可靠性,构建“物理-虚拟”双向交互的闭环。针对冶金生产现场数据量大、传输环境复杂的特点,采用“5G+边缘计算”

的通信架构,边缘节点就近采集设备运行数据,进行实时处理与筛选,减少数据传输延迟,确保关键数据优先传输。采用MQTT、AMQP等工业通信协议,实现感知层、数据层与模型层之间的高效数据交互,明确数据传输格式、频率与优先级,避免数据丢失与错乱。建立虚实同步校验机制,实时对比物理设备运行参数与虚拟模型仿真参数,当两者偏差超过设定阈值时,触发模型动态修正流程,同时将虚拟模型的仿真结果、故障预警信息反馈至物理设备控制系统,指导现场运维操作。

4 基于孪生数据的全生命周期智能运维策略

4.1 面向设计反馈的可运维性评价

面向设计反馈的可运维性评价是冶金机电设备全生命周期运维的前置环节,核心是基于数字孪生数据,对设备设计方案的可运维性进行全面评估,实现设计与运维的协同优化。该评价以数字孪生虚拟模型为载体,整合设备设计参数、材料特性、运维需求等数据,构建多维度可运维性评价指标体系,包括维修便利性、故障易识别性、零部件通用性、运维成本经济性等指标。通过虚拟仿真技术,模拟设备在全生命周期内的运行状态、故障场景与维修过程,量化评价各设计方案的可运维性得分,识别设计方案中存在的运维隐患,如零部件拆装困难、故障检测不便等问题。将评价结果反馈至设计环节,指导设计人员优化设备结构、选用易维护零部件、预留监测接口,提升设备后期运维的便利性与经济性。同时,建立评价结果与设计参数的关联模型,形成“设计-评价-反馈-优化”的闭环机制,减少因设计不合理导致的运维难题,降低全生命周期运维成本,为设备后续运维工作奠定良好基础。

4.2 实时状态监测与异常检测

实时状态监测与异常检测是基于孪生数据的核心运维策略之一,旨在实时掌握冶金机电设备运行状态,及时发现故障隐患,避免非计划停机。依托数字孪生系统的感知层与数据层,实时采集设备振动、温度、电流、油液杂质等运行参数,结合虚拟模型的仿真数据,构建设备运行状态监测体系,实现设备运行状态的可视化监控。采用多模态数据融合技术,整合不同类型传感器数据,通过小波分析、深度学习等算法,提取设备运行状态特征,建立正常运行状态基线。当监测数据偏离基线或出现异常波动时,异常检测模块自动识别异常类型、定位异常部位,结合虚拟模型仿真,分析异常产生的原因,如零部件磨损、润滑不足等,并及时发出预警信号,推送至运维人员终端。同时将异常数据记录归档,为故障诊断、模型优化提供数据支撑,实现设备故障的早发

现、早预警、早处置,有效降低故障扩大风险,提升设备运行的稳定性与可靠性,减少非计划停机损失。

4.3 剩余寿命预测与健康管理(PHM)

剩余寿命预测与健康管理(PHM)是实现冶金设备主动运维的关键,核心是基于孪生数据,精准预测设备及零部件的剩余使用寿命,实现设备健康状态的动态管控。该策略整合设备运行数据、故障数据、维修记录、设计参数等多源孪生数据,构建PHM模型,采用统计分析、机器学习等算法,结合设备性能退化规律,精准预测设备及关键零部件的剩余寿命(RUL)。通过虚拟模型仿真,模拟设备在不同运行工况下的性能退化过程,识别影响设备寿命的关键因素,如运行负荷、工况条件等,制定针对性的健康维护策略。建立设备健康状态分级体系,根据剩余寿命预测结果与运行状态,将设备健康状态划分为正常、亚健康、故障预警、故障四个等级,实时推送健康状态报告。

4.4 智能维修决策优化

智能维修决策优化基于孪生数据与PHM结果,打破传统维修模式的经验依赖,构建科学、高效的维修决策体系,实现维修资源的优化配置与维修流程的精准管控。该策略整合设备剩余寿命预测数据、故障诊断数据、维修资源数据(人员、备件、工具)、生产计划数据等,建立多目标维修决策模型,以维修成本最低、停机损失最小、维修效率最高为目标,优化维修时机、维修方式与维修方案。通过虚拟仿真技术,模拟不同维修方案的实施效果,对比分析各方案的经济性与可行性,筛选最优维修方案。同时实现维修流程的数字化管控,自动生成维修工单,分配维修人员与备件,实时跟踪维修进度,记录维修过程数据,形成维修闭环。结合维修数据反馈,持续优化维修决策模型与维修方案,针对宝钢等企业的实践经验,优化维修周期,减少故障发生率,提升维修效率,实现“预测性维修为主、预防性维修为辅”的智能维修模式,降低综合运维成本,保障冶金生产连续稳定运行。

4.5 报废与再制造评估

报废与再制造评估是冶金机电设备全生命周期运维的收尾环节,核心是基于孪生数据,对设备报废可行性、再制造价值进行科学评估,实现资源循环利用与绿色运维。该评估整合设备全生命周期数据,包括运行年限、性能退化程度、故障记录、维修成本、零部件损耗等,构建报废与再制造评估指标体系,涵盖经济性、环保性、技术可行性三个维度^[4]。通过虚拟模型仿真,模拟设备报废后零部件的可回收性、再制造工艺的可行性,评估再制造后的设备性能与使用寿命。对达到报废标准的设备,分析其报废原因,评估残值与资源回收价值,制定绿色报废方案,确保报废过程符合环保标准;对具有再制造价值的设备,制定针对性的再制造方案,优化再制造工艺,提升再制造设备的性能,实现“变废为宝”到“化废为优”的质变。同时,将评估数据与再制造经验反馈至设计与运维环节,为后续设备设计、运维优化提供参考,推动冶金行业绿色低碳发展。

结束语

基于数字孪生的冶金机电设备全生命周期运维系统,通过多领域建模、虚实同步通信等技术,实现高保真建模与智能运维。从设计反馈到报废评估,各环节紧密协同,提升设备运行效率、降低成本,推动绿色运维。未来,随着技术发展,该系统将不断完善,为冶金行业高质量发展提供更强大动力,助力行业迈向新台阶。

参考文献

- [1]李新安.冶金机电设备安装监理标准化与规范化管理[J].山东冶金,2024,46(3):71-73.
- [2]唐敏,张继媛,宋云艳.冶金机电设备点检实训考核装置设计与实现[J].中国教育技术装备,2024(21):58-61.
- [3]李朋朋,张明明,冀锋.煤矿机电设备全生命周期管理的研究与实践[J].内蒙古煤炭经济,2025(16):118-120.
- [4]王雪峰.浅析基于全生命周期信息判别的机电设备使用寿命预测方法[J].中国设备工程,2025(10):73-75.