

数字孪生场景下轨道交通机电设备数字化维修仿真研究

栾治国 葛旭东 钟 敏

中车城市交通规划设计研究院有限公司 江苏 南京 211800

摘 要：本文聚焦数字孪生场景下轨道交通机电设备数字化维修仿真展开研究。先阐述数字孪生、轨道交通机电设备维修及数字化维修仿真相关理论，接着介绍机电设备数字孪生模型构建，涵盖物理、行为模型构建及模型集成。随后探讨数字化维修仿真关键技术与应用场景，包括多维度模型构建、故障诊断与预测等。最后指出现有系统不足与优化方向，提出标准化建设建议，为轨道交通机电设备维修提供新思路与技术支持。

关键词：数字孪生；轨道交通；机电设备；数字化维修仿真

1 数字孪生与轨道交通机电设备维修相关理论

1.1 数字孪生技术理论基础

数字孪生技术理论基础以多物理域建模、数据融合与实时映射为核心，构建物理实体与数字虚体的全生命周期关联。其核心内涵包括物理实体、数字虚体、数据链路与服务应用四大要素，通过三维建模技术构建几何模型，结合传感器技术采集物理实体状态数据，经边缘计算与云计算实现数据实时传输与处理。该理论强调虚体对实体的动态仿真与精准映射，借助机理模型与数据驱动模型的融合，实现状态感知、趋势预测与决策优化。同时，全生命周期管理理论贯穿其中，覆盖设备设计、制造、运行、维修至报废的全过程数据集成，为后续维修应用提供完整的数据与模型支撑，确保数字虚体与物理实体的同步演化。

1.2 轨道交通机电设备维修理论基础

轨道交通机电设备维修理论基础历经了漫长且不断革新的发展历程，从最初简单的事后维修模式，逐步过渡到预防性维修，再到如今更为先进的预测性维修阶段。当前，以可靠性为中心的维修（RCM）和全员生产维护（TPM）成为该领域的核心理论。RCM理论着重对设备故障模式及其影响展开深入分析，精准识别出关键维修项目，进而科学确定合理的维修周期与方式，力求以最低的成本保障设备的可靠性，避免过度维修或维修不足带来的损失^[1]。TPM则强调全员参与的理念，将维修工作全面融入设备全生命周期，通过自主保养与专业维修的有机结合，提升设备的综合效率，延长设备使用寿命。另外，故障诊断理论为维修工作提供了坚实的技术支撑，涵盖基于信号处理的故障检测、基于机理分析的故障定位以及基于智能算法的故障识别等多种方法。鉴于轨道交通机电设备运行环境的特殊性，其维修必须满足高安全性、高可靠性与高时效性的严格要求，因此理

论体系需紧密结合实际，实现维修资源的优化配置与维修过程的高效管控，确保轨道交通的安全稳定运行。

1.3 数字化维修仿真实论基础

数字化维修仿真实论基础以系统仿真、虚拟现实与维修工程理论融合为核心，通过数字模型模拟维修全过程，实现维修流程优化与效果验证。系统仿真实论提供建模与求解方法，借助离散事件仿真或连续系统仿真，复现维修资源调度、流程时序等动态过程。虚拟现实技术构建沉浸式仿真环境，通过三维可视化与交互技术，模拟设备结构、故障场景及维修操作，提升仿真的直观性与实操性。维修工程理论为仿真提供流程规范与评价标准，包括维修任务分解、维修动作分析、维修工时测算等。该理论强调多学科融合，整合机械工程、计算机科学、管理学等知识，通过仿真分析维修过程中的瓶颈问题，预测维修效果，为实际维修方案制定提供数据支撑，降低维修试错成本，提升维修方案科学性。

2 轨道交通机电设备数字孪生模型构建

2.1 机电设备物理模型构建

机电设备物理模型构建以精准复现设备几何特征、结构关系与物理属性为目标，采用多源数据融合与分层建模方法。首先通过三维激光扫描、摄影测量等技术采集设备实体数据，获取零部件尺寸、形状、装配关系等几何信息，生成点云数据并经去噪、拼接处理后转化为三维几何模型。随后基于CAD软件进行精细化建模，区分机械结构、电气元件、液压管路等不同系统，明确各零部件材质、重量、强度等物理属性。针对复杂机电设备，采用模块化建模策略，按功能划分牵引系统、制动系统、供电系统等子模块，分别建模后进行装配。同时融入设备几何公差、装配间隙等细节信息，确保模型与实体在几何精度和物理特性上高度一致，为后续行为建模与仿真分析提供精准的几何与物理基础。

2.2 机电设备行为模型构建

机电设备行为模型构建聚焦设备运行状态、故障演化与操作响应的动态仿真,采用机理建模与数据驱动建模相结合的方式。机理建模基于设备工作原理,构建电气、机械、液压等多域耦合的数学模型,描述电压、电流、转速、压力等关键参数间的因果关系,复现设备正常运行时的动态特性^[2]。数据驱动建模通过采集设备运行过程中的传感器数据,利用机器学习、深度学习算法挖掘参数变化规律,建立故障演化模型与操作响应模型。针对典型故障场景,如轴承磨损、电机过载等,通过故障注入试验获取数据,构建故障模式与特征参数的映射关系。同时整合维修操作行为数据,建立维修动作与设备状态变化的关联模型,实现对设备运行、故障、维修等全行为的精准仿真,为维修分析提供动态支撑。

2.3 机电设备数字孪生模型集成

机电设备数字孪生模型集成以实现多模型协同运行与数据互通为核心,采用统一数据标准与集成框架。首先建立标准化数据接口,制定几何模型、行为模型、状态数据等的统一格式,解决不同建模工具生成模型的兼容性问题,确保物理模型、行为模型等各类子模型的数据交互顺畅。基于数字孪生平台构建集成框架,采用分布式架构实现各子模型的分布式部署与协同调用,通过模型管理系统对模型进行版本控制、权限管理与动态更新。引入数据中台技术,整合传感器实时数据、历史运行数据、维修记录等多源数据,经数据清洗、融合处理后为各模型提供统一数据支撑。同时构建模型交互机制,实现几何模型与行为模型的实时联动,当物理设备状态变化时,通过数据链路驱动数字模型同步更新,确保集成后的数字孪生模型能够全面反映设备的几何特征与动态行为。

3 数字化维修仿真关键技术与场景应用

3.1 多维度数字孪生模型构建

多维度数字孪生模型构建是一项综合性的复杂工程,它深度融合了几何、物理、行为、运维等多维度信息,并采用多尺度建模与跨学科融合技术。在几何维度,借助高精度测量技术,能够构建出全尺寸的三维模型,该模型不仅细致呈现零部件的结构,还精准刻画了零部件间的装配关系以及整体的空间布局。物理维度上,运用材料力学、热力学等理论,建立起物理属性模型,可精准反映设备的力学性能、热传导特性等关键物理属性。行为维度整合多域耦合机理与数据驱动模型,能逼真复现设备运行、故障、维修等动态过程。运维维度则融入设备全生命周期数据,涵盖设计参数、制造记

录、运行数据、维修历史等。关键技术方面,多源数据融合技术可整合激光扫描、传感器、历史数据等各类信息;跨学科建模技术能融合机械、电气、计算机等多学科知识;模型轻量化技术通过简化冗余信息提升模型运行效率。构建过程中,必须确保各维度数据的一致性,如此才能实现模型对设备全方位特征的精准刻画,为后续的故障诊断、维修方案制定等提供坚实基础。

3.2 故障诊断与预测仿真

故障诊断与预测仿真紧密依托数字孪生模型,巧妙结合智能算法与机理分析,实现故障的精准识别与趋势预测。在故障诊断仿真环节,将实时采集的设备运行数据输入数字孪生模型,与模型中正常运行状态的数据进行细致对比分析。利用先进的故障特征提取算法,从海量数据中识别出异常信号,再结合机理模型精准定位故障部位并剖析故障原因。预测仿真则是基于数字孪生模型构建故障演化模型,整合设备历史故障数据和运行工况数据,采用时序预测算法、退化模型等,科学预测故障发生的时间以及发展趋势^[3]。针对轨道机电设备常见的机械磨损、电气老化等故障,通过仿真模拟不同工况下故障的演化过程,明确故障临界阈值。同时,开展故障注入仿真,验证诊断算法的准确性与可靠性,优化诊断参数,从而提升故障诊断的精准度和预测的提前量,为预防性维修提供科学、可靠的依据,保障设备的安全稳定运行。

3.3 维修方案仿真优化

维修方案仿真优化以数字孪生模型为重要载体,通过模拟不同维修方案的实施过程,实现方案的量化评估与优化。首先,基于故障诊断与预测结果,在数字孪生模型中精心构建维修场景,该场景涵盖故障设备状态、维修资源配置、维修流程等关键要素。通过仿真模拟不同维修方案的实施过程,如不同维修人员配置、维修工具选择、工序安排等,采集维修时间、成本、资源利用率、维修后设备可靠性等关键指标。采用多目标优化算法,以维修效率最高、成本最低、可靠性最高为目标,对维修方案进行全面优化。针对复杂维修任务,如牵引系统大修,通过仿真能够敏锐发现流程瓶颈,优化工序衔接;通过模拟维修操作,验证方案可行性,有效避免维修过程中出现干涉、返工等问题。优化后的方案可通过数字孪生模型进行再次验证,确保其在实际应用中具备有效性与经济性的,提高维修工作的质量和效率。

3.4 沉浸式维修培训仿真

沉浸式维修培训仿真巧妙结合虚拟现实(VR)、增强现实(AR)技术与数字孪生模型,构建出高度逼真的

维修培训环境。基于高精度数字孪生模型搭建虚拟维修场景,该场景细致还原设备结构、故障状态、操作空间等细节。通过VR设备,为培训人员提供沉浸式的视觉与听觉体验,借助力反馈设备模拟维修操作手感,让培训人员仿佛置身于真实的维修现场。培训内容丰富多样,涵盖设备结构认知、常见故障维修流程、应急处理等多个模块。培训人员可在虚拟环境中进行反复操作练习,如零部件拆卸安装、故障排查、工具使用等。系统具备强大的操作记录与评估功能,能够实时监测培训人员操作步骤、时间、准确性等数据,生成详细的评估报告并指出错误操作。同时,可模拟罕见故障场景,为培训人员提供平时难以接触的实战机会,有效提升培训效果,降低实物培训成本,缩短培训周期,为企业培养高素质的维修人才。

4 优化策略与发展展望

4.1 现有系统的不足与优化方向

现有轨道交通机电设备数字孪生维修系统存在多方面不足,模型方面,部分系统多维度融合度不足,几何模型与行为模型联动性差,动态更新效率低;数据方面,存在多源数据标准不统一、数据传输延迟、边缘端数据处理能力不足等问题;应用方面,故障预测精度受数据质量影响较大,复杂场景维修仿真真实性有待提升,不同系统间兼容性差。优化方向聚焦核心短板,模型层面,采用模型自适应更新技术,结合实时数据实现模型动态优化,提升多维度模型融合度;数据层面,建立统一数据标准体系,引入边缘计算技术提升数据处理实时性,采用数据质量评估与优化技术保障数据可靠性;应用层面,融合多模态智能算法提升故障预测精度,结合数字孪生与AR/VR技术增强仿真真实性,开发标准化接口实现系统间互联互通,提升系统整体实用性与可靠性。

4.2 数字孪生维修的标准化建设建议

数字孪生维修标准化建设需覆盖模型、数据、流程、

评估等全流程,构建系统性标准体系。模型标准方面,制定数字孪生模型分类与编码标准,明确不同类型机电设备模型的构建规范、精度要求、轻量化准则,统一模型数据格式与接口标准,确保模型可复用与互操作^[4]。数据标准方面,规范多源数据采集标准,明确传感器数据、运行数据、维修数据等的采集范围、频率、精度;建立数据质量评价标准,制定数据清洗、融合、存储的技术规范,保障数据一致性与可靠性。流程标准方面,制定数字孪生维修流程规范,明确故障诊断、方案仿真、维修实施、效果评估等各环节的操作流程与技术要求;建立模型开发与更新流程标准,规范模型设计、验证、迭代的全流程。评估标准方面,构建数字孪生维修系统性能评估指标体系,包括模型精度、仿真效率、故障诊断准确率等,制定评估方法与流程。同时建立标准更新机制,结合技术发展与应用需求动态优化标准体系。

结束语

数字孪生技术在轨道交通机电设备数字化维修仿真领域展现出巨大潜力与价值。尽管当前系统存在模型融合度、数据质量、应用真实性等方面的不足,但通过针对性优化策略与标准化建设,有望逐步完善。未来,随着技术持续发展,数字孪生维修将更精准、高效、智能,为轨道交通安全稳定运行提供更强有力的保障,推动行业向智能化、数字化方向不断迈进。

参考文献

- [1]方宜,卓建成,杜梦飞.数字孪生在轨道交通智能建造业中的应用发展[J].高速铁路技术,2024,15(01):68-73+78.
- [2]石健,刘冬,王少萍.基于数字孪生的机电液系统PHM关键技术综述[J].机械工程学报,2024,60(04):66-81.
- [3]李军,赵亚鹏.轨道交通机电设备维修与管理存在的问题及对策[J].设备管理与维修,2022(20):20-22.
- [4]赵文亮.数字化平台系统在轨道交通运维中的应用综述[J].山西建筑,2024,50(10):195-198.