

数字孪生技术在重载铁路运输系统动态优化与智能转型中的应用

于 洋

国能朔黄铁路发展有限责任公司机辆分公司 河北 沧州 062350

摘 要：数字孪生技术凭借其强大的虚拟映射与实时交互能力，在重载铁路运输系统动态优化与智能转型中展现出巨大潜力。本文阐述了该技术在运营效率、安全风险、能耗环保等方面的动态优化作用，以及在智能决策支持、人员培训模拟、系统迭代改进等智能转型领域的应用。通过构建精准数字孪生模型，实现数据实时分析与反馈，助力重载铁路运输系统提升运行效率、保障安全、降低成本，推动行业智能化发展。

关键词：数字孪生技术；重载铁路运输；动态优化；智能转型

引言：重载铁路运输系统作为国家经济的重要支撑，面临着提升运营效率、保障安全运行、降低能耗环保压力等挑战。数字孪生技术作为新兴信息技术，为解决这些问题提供了新途径。它通过构建物理实体的虚拟镜像，实现虚拟与现实世界的实时交互与协同。本文将深入探讨数字孪生技术在重载铁路运输系统动态优化与智能转型中的应用，为行业发展提供理论参考与实践借鉴。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术作为新一代信息技术的重要分支，正深刻改变着工业制造、智慧城市、医疗健康等多个领域的运作模式。该技术通过构建物理实体在虚拟空间中的精准映射，即“数字孪生体”，实现了对物理世界的实时镜像与模拟。数字孪生体不仅能够同步反映物理实体的运行状态、性能参数，还能基于大数据分析、人工智能算法，对物理实体的未来行为进行预测与优化。在实际应用中，数字孪生技术助力企业实现产品设计、生产制造、运维服务的全生命周期管理，提升效率与质量；在智慧城市建设中，它为城市规划、交通管理、能源分配等提供了科学决策依据。随着物联网、云计算、边缘计算等技术的不断融合，数字孪生技术正朝着更高精度、更强交互性、更广泛应用场景的方向发展，成为推动数字化转型、实现可持续发展的关键力量。

2 重载铁路现有运输系统存在的问题

2.1 调度灵活性不足

当前重载铁路运输系统在调度方面存在显著灵活性不足的问题。传统调度模式主要依赖人工经验和固定调度规则，难以快速响应复杂多变的运输需求^[1]。当遇到突发状况，如线路故障、恶劣天气或临时运输任务调整时，调度人员往往需要花费大量时间重新制定计划，导

致运输效率大幅降低。各运输环节之间的信息传递存在延迟和误差，使得不同部门之间协调困难，无法实现高效协同作业。

2.2 设备故障预测与维护成本高

重载铁路运输系统设备众多且运行环境复杂，设备故障预测与维护面临巨大挑战。一方面，现有故障预测技术手段相对落后，主要依赖定期检修和人工巡检，难以提前准确发现设备潜在故障隐患。许多设备故障在早期阶段症状不明显，等到故障发生时往往已经造成了较为严重的后果，不仅影响运输安全，还增加了维修难度和成本。另一方面，由于缺乏精准的故障预测，设备维护往往采用“一刀切”的定期维护模式，导致过度维护或维护不足的情况时有发生。过度维护不仅浪费了大量的人力、物力和财力，还可能因频繁拆装设备而引入新的故障风险；维护不足则会使设备带病运行，加速设备老化，缩短设备使用寿命，进一步增加维修成本和停机时间，给运输生产带来不利影响。

2.3 能耗与环境影响大

重载铁路运输系统在运行过程中能耗巨大，且对环境造成了一定影响。从能耗方面来看，重载列车自身重量大、牵引功率高，在运行过程中需要消耗大量的能源。由于列车运行调度不够优化，存在空驶、低效运行等现象，进一步加剧了能源浪费。铁路沿线的供电设备、信号设备等辅助设施也需要消耗大量电能，整体能源利用效率有待提高。在环境影响方面，重载铁路运输产生的噪声、振动和粉尘等污染物对周边生态环境和居民生活造成了一定干扰。特别是列车在通过居民区、学校等敏感区域时，噪声和振动问题尤为突出，引发了社会各界的广泛关注。而且，列车运行过程中排放的废气

也对空气质量产生了一定影响,不符合当前绿色可持续发展的要求。

3 数字孪生技术在重载铁路运输系统的构建

3.1 系统建模与数据集成

数字孪生技术在重载铁路运输系统的构建中,系统建模与数据集成是基础且关键的一环。系统建模需全面涵盖重载铁路运输的各个要素,包括列车、轨道、信号系统、供电设备等物理实体。通过高精度三维建模技术,精准还原这些实体的几何形状、物理特性和运行状态,构建出逼真的虚拟模型。要深入分析各实体之间的相互作用关系和运行逻辑,建立复杂的系统动力学模型,以模拟重载铁路运输系统的动态行为。数据集成方面,需整合来自不同数据源的信息,如列车运行监测数据、轨道状态检测数据、信号系统控制数据等。这些数据具有多源、异构、海量等特点,需要采用先进的数据融合技术进行清洗、转换和融合,确保数据的准确性、一致性和完整性。

3.2 数字孪生平台架构设计

数字孪生平台架构设计是确保重载铁路运输系统数字孪生高效运行的核心。该架构通常采用分层设计模式,包括感知层、网络层、平台层和应用层。感知层负责采集各类传感器数据,实现对重载铁路运输系统物理实体的实时监测;网络层采用高速、稳定的通信技术,确保数据的高效传输;平台层是数字孪生系统的核心,具备强大的数据处理、分析和建模能力,能够实现对虚拟模型的实时更新和优化;应用层则根据实际业务需求,开发各种应用功能,如智能调度、故障预测、能耗管理等^[2]。在架构设计中,还需注重系统的可扩展性、可靠性和安全性。采用模块化设计思想,方便系统的功能扩展和升级;采用分布式架构和冗余备份技术,提高系统的可靠性和容错能力;加强数据安全防护,采用加密技术、访问控制等手段,保障数据的安全性和隐私性。

3.3 虚拟与现实世界的同步机制

虚拟与现实世界的同步机制是数字孪生技术在重载铁路运输系统中实现精准映射和实时交互的关键。同步机制需要确保虚拟模型能够实时反映现实世界中重载铁路运输系统的状态变化,同时虚拟模型的分析结果能够及时反馈到现实世界,指导实际运行。为实现实时同步,需要建立高效的数据传输和更新机制。通过高速网络技术,将感知层采集到的实时数据快速传输到平台层,平台层对数据进行实时处理和分析后,及时更新虚拟模型的状态。采用事件驱动的同步策略,当现实世界中发生重要事件(如列车故障、轨道异常等)时,能够

迅速触发虚拟模型的更新和响应。另外,还需建立双向反馈机制,将虚拟模型的分析结果(如优化调度方案、故障预警信息等)实时反馈给现实世界的控制系统和操作人员,实现虚拟与现实世界的紧密协同和闭环控制,提高重载铁路运输系统的运行效率和安全性。

4 数字孪生在重载铁路运输系统的动态优化

4.1 运营效率优化

数字孪生技术为重载铁路运输系统的运营效率优化提供了强大助力。通过构建精确的数字孪生模型,能够实时模拟列车运行、线路调度、货流组织等复杂运营场景。借助先进的数据分析和算法,可对列车运行时刻表进行动态优化,依据实时货流、天气状况、设备状态等因素,精准调整列车出发、到达和会让时间,减少列车在站停留和区间运行时间,提高线路通过能力。在列车编组方面,数字孪生模型可模拟不同编组方案对运输效率的影响,结合货物种类、运输需求和线路条件,实现智能编组,使列车载重和运行速度达到最佳匹配,提升运输能力。同时对运输资源进行统一调配,如合理分配机车车辆、维修设备等,避免资源闲置和浪费,提高整体运营效率,降低运输成本,增强重载铁路运输的市场竞争力。

4.2 安全风险管控

在重载铁路运输系统中,安全是重中之重。数字孪生技术可实现对安全风险的全方位、实时监测与预警。通过对物理实体及其运行环境的数字孪生建模,能够实时获取列车运行状态、轨道几何尺寸、信号设备工作情况等关键数据,并运用大数据分析和机器学习算法,对这些数据进行深度挖掘和分析,提前发现潜在的安全隐患。例如,通过对轨道应力、变形等数据的监测和分析,可预测轨道故障的发生概率,提前安排维修计划;对列车运行数据的实时监测,能够及时发现列车异常行为,如超速、制动异常等,并迅速发出预警信号^[3]。数字孪生技术还可模拟各种突发安全事件,如自然灾害、设备故障等,评估其对运输系统的影响,制定相应的应急预案,提高应对突发事件的能力,保障重载铁路运输的安全稳定运行。

4.3 能耗与环保优化

随着环保要求的日益提高,重载铁路运输系统的能耗与环保优化成为重要课题。数字孪生技术为实现这一目标提供了有效途径。通过建立能耗数字孪生模型,可实时监测列车运行过程中的能耗情况,包括牵引能耗、辅助设备能耗等,并分析能耗与列车运行速度、载重、线路条件等因素的关系。基于这些分析结果,可制定个

性化的节能运行策略,如优化列车运行曲线,使列车在满足运输需求的前提下,以最低能耗运行;合理调整列车编组和运行速度,减少不必要的能耗。数字孪生技术还可对铁路沿线的环境影响进行模拟和评估,如噪声、振动、粉尘等污染物的扩散情况。根据评估结果,采取相应的环保措施,如优化线路设计、安装降噪设备等,降低重载铁路运输对环境的影响,实现绿色、可持续发展。

5 数字孪生在重载铁路运输系统的智能转型

5.1 智能决策支持系统

数字孪生技术为重载铁路运输系统构建了强大的智能决策支持系统。通过将物理世界中的列车、轨道、信号等设备以及运输流程精准映射到虚拟数字空间,形成高度仿真的数字孪生模型。该模型能够实时整合来自各类传感器、监控系统以及业务系统的海量数据,包括列车运行状态、线路状况、货流信息等。基于这些数据,智能决策支持系统运用先进的数据分析算法和人工智能模型,对运输过程中的各种复杂情况进行模拟和预测。系统还能根据历史数据和实时反馈,不断优化决策模型,提高决策的准确性和及时性,使重载铁路运输系统在面对各种不确定性时能够做出更加合理、高效的决策,保障运输的安全、稳定和高效运行。

5.2 人员培训与模拟演练

数字孪生技术为重载铁路运输系统的人员培训与模拟演练提供了全新的手段。利用数字孪生模型,可以构建高度逼真的虚拟培训环境,涵盖列车驾驶、调度指挥、设备维护等多个岗位的培训需求。在虚拟环境中,学员可以进行各种实际操作和应急演练,如列车故障处理、信号系统故障排除等。系统能够实时反馈学员的操作情况,并给予准确的评估和指导。通过反复的模拟演练,学员可以积累丰富的实践经验,提高应对实际问题的能力。同时数字孪生技术还可以实现跨地域、跨时间的培训与演练,打破传统培训在时间和空间上的限制,提高培训效率和效果,为重载铁路运输系统培养更多高素质的专业人才。

5.3 系统迭代与持续改进

数字孪生技术为重载铁路运输系统的持续迭代与改进提供了有力支撑。在数字孪生模型中,可以实时监测和分析运输系统的运行数据,发现潜在的问题和优化空间。通过对列车运行效率、设备故障率、能耗水平等指标的持续跟踪,系统能够自动生成改进建议和优化方案。例如,根据列车运行数据的分析结果,可以调整列车的运行参数和调度策略,提高运输效率;针对设备故障的预警信息,可以提前制定维护计划,降低设备故障率。同时数字孪生技术还支持系统的快速迭代和升级^[4]。在虚拟环境中进行新功能、新技术的测试和验证,确保其在实际应用中的可靠性和稳定性。通过不断收集用户反馈和实际运行数据,对数字孪生模型进行持续优化和更新,使其更加贴合实际运输场景,为重载铁路运输系统的持续改进提供源源不断的动力,推动系统向更加智能化、高效化方向发展。

结束语

数字孪生技术为重载铁路运输系统的动态优化与智能转型带来了前所未有的机遇与变革。通过构建高度仿真的数字孪生模型,实现对运输系统的精准监测、智能决策与持续优化。未来,随着技术的不断进步,数字孪生将在重载铁路领域发挥更大作用,推动行业向更高效、更安全、更环保的方向发展,助力我国铁路运输事业迈向新的高度。

参考文献

- [1]刘淼,崔妍.基于数据中台的重载铁路智能化应用研究[J].铁路计算机应用,2023,32(12):67-72.
- [2]武威,马小宁,殷新贝,张崇振,刘军,栾中.面向重载铁路基础设施智能运维的朔黄铁路智能大脑平台总体设计及关键技术研究[J].铁道运输与经济,2023,45(11):11-21+57. DOI:10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2023.11.02.
- [3]刘淼,崔妍.基于数据中台的重载铁路智能化应用研究[J].铁路计算机应用,2023,32(12):67-72.
- [4]童瑞咏,毛保华,杜鹏,等.重载铁路回程运输组织与定价综合优化[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(02):217-224.