

数字孪生赋能下的高速公路隧道机电设备智能运维管理体系构建与应用

柯 贤

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650200

摘要：高速公路隧道机电设备关乎隧道通行安全与效率，运维质量影响高速整体运营。传统运维模式响应滞后、排查低效、管理粗放，难适应设备智能化发展。本文引入数字孪生技术，结合隧道机电设备运维特点，分析其赋能运维的可行性，梳理现状与挑战，构建智能运维管理体系，明确架构、关键技术与优化流程，探讨发展趋势。该体系可实现全生命周期智能运维，提升故障诊断与预测精度，降低成本，为运维升级提供参考，推动高速运维智能化转型。

关键词：数字孪生；高速公路隧道；机电设备；智能运维

引言：高速公路隧道是交通路网关键节点，封闭性与复杂环境对机电设备可靠性和稳定性要求极高。隧道机电设备涵盖多系统，长期高负荷运行易故障，传统人工与常规管理模式无法满足现代化需求。数字孪生技术快速发展，构建物理与虚拟模型实时映射，实现全生命周期动态监控与智能调控，为机电设备运维升级提供新路径。本文聚焦于此，梳理技术、分析困境、构建体系，为运维高质量发展提供支撑。

1 数字孪生与隧道机电设备运维技术基础

1.1 数字孪生技术概述

数字孪生技术是融合物联网、大数据、人工智能、三维建模等的综合性技术。其核心是构建物理实体与虚拟模型的对应关系，实现实时数据同步、动态映射与协同交互。该技术由物理实体层、虚拟模型层、数据传输层、数据处理层和应用服务层五大模块构成完整体系。物理实体层是基础，包含待运维设备；虚拟模型层用三维建模精准复刻物理实体；数据传输层靠物联网、5G 等实现数据实时传输；数据处理层借助大数据、人工智能算法分析处理数据；应用服务层基于处理后的数据提供运维服务。它具有实时性、可视化、可预测性、可交互性等特点，已应用于工业制造、交通基建等领域，为设备运维升级提供关键技术支撑。

1.2 高速公路隧道机电设备特点分析

高速公路隧道机电设备是复杂综合系统，包含监控、通风、照明、消防、供配电等多个子系统，各子系统相互关联、协同保障隧道安全通畅。其核心特点有三：一是系统性强，设备种类多、接口复杂，任一设备故障都可能影响整体运行，对运维协同性要求高；二是运行环境恶劣，隧道内光线暗、湿度大、粉尘多，车辆通行产生的

震动、噪声等加速设备老化损耗，故障发生率高；三是运维要求高，隧道是交通咽喉，机电设备故障可能引发拥堵和安全事故，需快速响应、精准排查、高效处置，实现故障早发现、诊断、解决^[1]。此外，设备分布分散、安装位置特殊，人工运维难度大、效率低、成本高，凸显智能化运维的必要性。

1.3 数字孪生赋能运维的可行性

数字孪生技术与高速公路隧道机电设备运维需求高度匹配，赋能运维在技术、场景和实践层面均具备可行性。技术上，物联网、大数据、三维建模等配套技术成熟，能为数字孪生模型构建、数据采集传输与处理提供有力支撑，实现机电设备全维度数据实时采集和虚拟模型精准映射，满足运维技术要求。场景适配方面，数字孪生的可视化与实时性，可应对隧道机电设备分布分散、运行环境复杂、人工监控难的问题，通过虚拟模型远程可视化监控设备运行状态，精准掌握参数与健康状况。实践上，它能实现机电设备全生命周期运维管控，提前预测故障、优化方案，降低成本与故障处置时间，契合运维智能化、精细化需求。

2 高速公路隧道机电设备运维现状与挑战分析

2.1 运维现状调查

结合当前高速公路隧道机电设备运维实践，通过实地调研、数据统计等方式，梳理得出当前运维工作的整体现状。目前，我国高速公路隧道机电设备运维已逐步摆脱传统纯人工运维模式，部分隧道引入了智能化监控设备，实现了部分设备运行参数的实时监测与简单故障报警。运维管理模式以定期巡检、故障维修为主，即通过运维人员定期对设备进行排查，发现故障后及时组织维修处置。但整体来看，运维智能化水平仍偏低，多数

隧道的智能化监控仅局限于单一子系统,未实现各子系统的协同联动,数据无法有效共享,形成“信息孤岛”。同时,运维数据的利用率较低,未通过数据分析实现故障预测与运维优化,运维工作仍以被动处置为主,主动防控能力不足,难以适应机电设备高可靠性、高安全性的运维需求。

2.2 存在问题与挑战

当前高速公路隧道机电设备运维工作虽取得一定进展,但结合调研情况来看,仍存在诸多突出问题,面临严峻挑战。一是运维模式粗放,多数隧道仍采用“定期巡检+故障维修”的被动运维模式,缺乏对设备健康状态的主动监测与故障预测,往往是设备出现故障后才进行处置,易造成故障扩大,影响隧道通行安全;二是数据共享不足,各机电系统独立运行,数据采集标准不统一,缺乏有效的数据融合机制,形成“信息孤岛”,导致运维人员无法全面掌握设备运行状态,难以实现协同运维;三是故障排查低效,隧道机电设备种类多、分布广,人工巡检效率低,且故障排查依赖运维人员的专业经验,易出现排查不精准、处置不及时的问题,增加运维成本与安全风险;四是运维团队专业能力不足,数字孪生、人工智能等新技术在运维领域的应用日益广泛,需要具备跨学科知识的复合型运维人才,但当前多数运维人员专业技能单一,难以适应智能化运维工作的需求;五是运维成本居高不下,人工巡检、故障维修的人力、物力投入较大,且设备过度维修与维修不及时并存,进一步推高了运维成本^[2]。

3 数字孪生赋能下的智能运维管理体系构建

3.1 体系架构设计

基于数字孪生技术,结合高速公路隧道机电设备运维需求,构建“五层两域”智能运维管理体系架构,实现设备全生命周期、全流程智能化运维管控。“五层”指物理实体层、数据采集层、数字孪生核心层、智能应用层与管理层;“两域”为虚拟运维域和物理运维域,二者通过数据传输实时联动。物理实体层包含隧道所有机电设备及其配套设施,是体系运行的物理基础;数据采集层借助物联网传感器等,采集并初步处理设备运行与环境参数等全维度数据;数字孪生核心层是核心,含虚拟模型构建等模块,实现物理与虚拟模型实时映射;智能应用层提供故障诊断等运维服务;管理层负责整体管控。该架构实现数据全流程闭环,通过虚拟运维域仿真优化指导物理运维域工作,提升运维效率与质量。

3.2 关键技术

3.2.1 数据采集与融合技术

数据采集与融合技术是数字孪生赋能智能运维的基础,核心是实现隧道机电设备全维度、高精度、实时性的数据采集与多源数据的有效融合。数据采集采用“固定传感器+移动采集设备”的组合方式,在机电设备关键部位安装温度、湿度、振动、电压等各类传感器,实时采集设备运行参数,同时通过移动采集设备补充采集特殊位置设备的数据,确保采集数据的全面性。采集的数据包括设备运行数据、环境数据、运维记录数据等多类型数据,由于不同数据的采集标准、格式存在差异,需采用数据融合技术进行处理^[3]。通过数据清洗、转换、标准化等步骤,消除数据噪声与冗余,实现多源数据的统一整合;采用边缘计算与云计算相结合的方式,对采集的数据进行实时处理与存储,边缘计算实现现场数据的快速分析与应急响应,云计算实现海量数据的深度挖掘与长期存储,为后续故障诊断、预测预警提供高质量的数据支撑。

3.2.2 数字孪生模型构建技术

数字孪生模型构建技术是实现物理实体与虚拟模型实时映射的核心,需遵循精准性、实时性、可交互性的原则,构建隧道机电设备的全维度虚拟模型。首先,通过三维扫描、BIM技术等手段,精准获取隧道整体结构、机电设备的外形尺寸、安装位置等几何参数,构建几何模型,确保虚拟模型与物理实体的几何结构完全一致。其次,基于设备说明书、运行参数等资料,为虚拟模型赋予物理属性、运行规则等,构建物理模型,实现虚拟模型对物理实体运行状态的精准仿真。最后,建立虚拟模型与物理实体的数据关联,通过数据传输层实现二者的实时数据同步,使虚拟模型能够实时反映物理设备的运行状态,实现设备运行过程的可视化监控、仿真模拟与状态追溯。

3.2.3 故障诊断与预测技术

故障诊断与预测技术是智能运维体系的核心功能之一,依托数字孪生模型与多源数据,实现机电设备故障的精准诊断与提前预测。故障诊断采用“虚拟仿真+智能算法”的方式,通过虚拟模型模拟设备运行状态,对比分析物理设备与虚拟模型的运行参数差异,精准定位故障位置、故障类型与故障原因;结合人工智能算法,对采集的设备运行数据进行深度挖掘,识别故障特征,实现故障的自动诊断与分级预警,为运维人员提供针对性的处置建议。故障预测基于设备运行数据与历史运维记录,通过大数据分析、机器学习等算法,构建设备寿命预测模型与故障预测模型,识别设备老化、损耗的规律,提前预测潜在故障的发生时间、类型与影响范围,实现

从被动维修向主动防控的转变,降低故障发生率与处置成本。

3.2.4 智能决策技术

智能决策技术基于数字孪生核心层的数据分析与仿真结果,为隧道机电设备运维工作提供科学、精准的决策支持,实现运维方案的优化与运维资源的合理配置。该技术融合大数据分析、人工智能、专家系统等多种技术,构建智能决策模型,结合设备运行状态、故障预警信息、历史运维数据、运维资源情况等多方面因素,对运维工作进行全面分析。针对设备潜在故障,自动生成最优检修方案,明确检修时间、检修流程、所需人员与物资;针对日常运维工作,优化巡检路线、巡检周期,合理分配运维人员与设备,提升运维效率;针对突发故障,快速生成应急处置方案,指导运维人员高效处置,最大限度降低故障对隧道通行的影响。同时,决策模型具备自学习能力,可根据运维实践反馈,不断优化决策算法,提升决策的准确性与科学性。

3.3 运维管理流程优化

基于数字孪生赋能的智能运维管理体系,对传统运维管理流程进行全面优化,构建“数据采集—实时监控—预警预测—故障处置—运维评估—持续优化”的全流程闭环运维管理流程。首先,通过数据采集层实现机电设备全维度数据的实时采集与传输,同步至数字孪生模型;其次,通过数字孪生核心层实现设备运行状态的可视化监控,智能应用层实时分析数据,对潜在故障进行预警预测,及时推送预警信息;再次,接到预警或故障信息后,智能决策模块生成最优处置方案,运维人员根据方案开展故障处置工作,处置过程实时同步至虚拟模型,实现处置过程的可视化管控;然后,故障处置完成后,对运维效果进行评估,分析故障原因、处置效率与成本,更新运维记录与设备健康档案;最后,基于运维评估结果与历史数据,对运维方案、决策模型、虚拟模型等进行持续优化,不断提升运维管理水平。

4 未来趋势

4.1 数字孪生与5G/6G通信的深度融合

未来,数字孪生和5G/6G通信深度融合,会显著提升高速公路隧道机电设备智能运维水平。5G具有低时延、高带宽、广连接特性,能解决当下数据传输时延高、海量数据传输不畅的问题,实现物理实体与虚拟模型数据实时同步,加快虚拟模型响应速度,保障故障预警、诊断

和处置及时^[4]。6G研发落地后,其超高速率、超广连接、超低时延特性,将进一步拓展数字孪生应用场景,让隧道机电设备数据采集更精准、分析更快速、协同运维更高效。二者融合可实现远程实时操控、异地协同运维,运维人员借助虚拟模型远程监控调试设备,降低运维难度与安全风险,还能实现多隧道、多区域机电设备协同管控,构建全域智能化运维网络,推动高速隧道运维向全域化、协同化转型。

4.2 自主式运维机器人协同作业

自主式运维机器人协同作业是数字孪生赋能下隧道机电设备智能运维的重要趋势,可解决隧道内部环境复杂、人工运维难且风险高的问题。自主式运维机器人配备高清摄像头、传感器、机械臂等,能自主完成巡检、数据采集、故障排查和简单维修,无需人工操作。结合数字孪生技术,机器人与虚拟模型实时联动,虚拟模型为其规划最优巡检路线,机器人将实时数据同步给虚拟模型,实现巡检可视化管控与智能调度。多个机器人可协同作业,分工负责不同区域和类型的设备运维,提高运维效率与覆盖面。机器人还有自主学习能力,能通过数据分析优化巡检和维修策略,适应不同隧道运维需求,降低人工运维成本,提升运维安全性与智能化水平。

结束语

数字孪生技术的快速发展为高速公路隧道机电设备运维升级提供了全新路径,有效破解了传统运维模式的诸多困境,推动运维工作向智能化、精细化、闭环化转型。未来,要加快数字孪生技术的落地应用,不断完善体系架构、优化关键技术,推动数字孪生与隧道机电运维的深度融合,为高速公路隧道机电设备运维高质量发展提供更有力的支撑,助力交通基础设施智能化建设。

参考文献

- [1]苏中伟.高速公路机电智能综合运维管控平台应用探究[J].交通企业管理,2025,40(6):107-109.
- [2]李臻.高速公路机电智能综合运维管控平台的研究及应用[J].汽车维修与保养,2024(8):63-65.
- [3]陈秀轩.基于数字孪生技术的高速公路隧道机电设备故障诊断研究[J].运输经理世界,2025(28):136-138.
- [4]黄志杰,刘伟成,陈玮妮.高速公路隧道机电系统中感知设备与巡检机器人协同作业模式探讨[J].车时代,2025(9):127-129.