

数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的应用探索

董轶¹, 赵东昕², 史彦明², 郭晓威²

1. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222

2. 河北铸诚工矿机械有限公司, 河北 邢台 055450

DOI: 10.61369/SSSD.2025080041

摘要 : 本文围绕数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的应用进行分析, 详细阐述数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的应用价值, 并分析当前地铁隧道智能化注浆设备运维现状和面临的挑战, 最后提出数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的创新应用策略, 以此为推动行业数字化转型提供一些有价值的借鉴和参考。

关键词 : 数字孪生技术; 地铁隧道; 智能化注浆设备

Exploration of Digital Twin Technology in Operation and Maintenance of Intelligent Grouting Equipment for Subway Tunnels

Dong Yi¹, Zhao Dongxin², Shi Yanming², Guo Xiaowei²

1.China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222

2.Hebei Zhucheng Industrial and Mining Machinery Co., Ltd., Xingtai, Hebei 055450

Abstract : This paper analyzes the application of digital twin technology in the operation and maintenance of intelligent grouting equipment for subway tunnels, elaborates on the application value of digital twin technology in this field, and analyzes the current situation and challenges faced by the operation and maintenance of intelligent grouting equipment for subway tunnels. Finally, it puts forward innovative application strategies of digital twin technology in the operation and maintenance of intelligent grouting equipment for subway tunnels, aiming to provide some valuable references for promoting the digital transformation of the industry.

Keywords : digital twin technology; subway tunnels; intelligent grouting equipment

引言

当前, 我国轨道交通领域飞速发展, 地铁已经成为城市公共交通的重要组成部分。而作为地铁系统的重要组成部分, 地铁隧道的结构安全与稳定直接影响到地铁的整体运营状态。注浆设备是确保地铁隧道结构安全的重要设备, 承担着多重重要任务, 如加固隧道结构、防止渗漏水等。然而, 在传统的注浆设备运维方式存在一些问题, 如效率低下、故障发现不及时等, 难以满足现代化地铁隧道运维的需要。

数字孪生技术是一种创新型技术, 它通过构建物理实体的虚拟景象, 能够对注浆设备进行实时监控和优化调度, 及时发现其潜在故障, 能够为地铁隧道智能化注浆设备运维提供新的解决方案。通过深入研究数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运用中的应用, 能够有效提升地铁隧道运维质量, 降低维修成本, 为地铁系统的健康运行提供重要保障。

一、数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的应用价值

数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的应用具有重要价值。对此, 本文就以下几个方面进行简要分析。

(一) 提升设备运维管理效率

数字孪生技术能够对智能注浆设备的运行状态进行实时监控。通过收集和分析设备的运行数据, 并通过虚拟模型进行分析

和处理, 工作人员则能够随时了解设备的运行状态, 及时发现异常情况, 并采取行之有效的方式进行处理, 极大地缩短设备停机时间, 提升设备运维管理效率。例如, 通过运用数字孪生模型, 能够对注浆设备的参数, 如压力、流量等进行实时监控, 当参数超过正常阈值时, 系统自动向工作人员发出预警信息, 提醒工作人员尽快检修设备, 从而有效避免设备停机情况的发生。

(二) 降低设备运维成本

通过运用数字孪生技术, 能够提前发现注浆设备的潜在故

障，并向运维人员发送预警信息，及时检修设备，避免造成更为严重的损坏，进而有效降低维修成本。同时，运用数字孪生技术还能够优化运维资源的分配，根据设备的运行状态以及检修的紧急程度，可以优化资源配置，合理开展维修计划，提升运维资源的利用率。

（三）增强安全性与可靠性

数字孪生技术能够实时监控注浆设备的运行状态，利用数字模型对设备各种参数进行收集和分析，从而能够及时发现设备的潜藏风险，并进行评估和预警。当检测到设备存在一些安全隐患后，能够及时发送预警信息，并协同工作人员采取行之有效的方式进行处理，从而保障地铁隧道的安全运行。

（四）优化决策支持

数字孪生技术能够为制定运维决策提供数据支撑。通过对注浆设备的运行数据进行深度分析，运维人员能够准确掌握设备的运行状态、运行规律，并快速做出故障诊断，并以此为参考，制定出更为科学有效的运维计划，从而为地铁隧道的正常运行提供坚实保障。例如，可以利用数字孪生模型对注浆设备进行快速诊断，并对其剩余使用寿命进行预测，从而帮助运维工作人员制定科学合理的维修计划，从而提升设备的可靠性。

二、地铁隧道智能化注浆设备运维的现状与挑战

（一）现状

当前，地铁隧道智能化注浆设备的运维工作依旧沿用传统的管理模式和技术手段。尽管部分企业已经认识到信息技术的重要性，并逐步引入信息化管理系统，但从整体角度来看，依旧处于初步探索阶段。并且，当前的运维方式以人工定期巡检和维护为主，过于依赖运维工作人员的专业素养和综合能力，缺乏对注浆设备运行状态的实时、精准把控，导致故障响应速度较慢，维护成本较高。除此之外，由于数据采集的手段存在一定限制，设备的历史运行数据并未能够得到充分利用，导致运维计划以及决策的制定缺乏充足的科学依据，影响其精准性和科学性的提升。同时，行业内部并未形成一个完善、健全、统一的标准和规范，各个企业之间的运维经验、数据资源等难以实现共享，导致整体运维水平较低，难以获得有效提升^[1]。

（二）挑战

1. 设备采集数据方面

由于地铁隧道环境复杂，常处于地下较深位置，空间有限，并且注浆设备分布较为广泛，导致数据采集工作面临多重阻碍。数字信号在传输过程中容易受到多种因素的影响，导致其完整性和准确性受到一定影响，从而影响评估结果的准确性和科学性。

2. 故障诊断与预测方面

在以往的故障诊断中，主要采用人工方式，较为依赖工作人员的专业素养和综合能力，这种诊断方式受人为因素影响较大，非常容易因个人素养的差异导致诊断结果不准确。同时，人工诊断效率较低，难以满足现代地铁隧道注浆设备的运行需要。除此之外，由于缺乏系统化的数据支撑，故障诊断往往仅停留在表

面，无法实现对设备的潜藏隐患进行精准定位和识别，这也给注浆设备的运行带来更多不确定性。

3. 运维成本方面

传统的运维工作往往需要耗费大量的资源，导致整体运维成本较高。同时由于注浆设备分布较广、数量较多，故障率较高，导致设备停机时间不断增加，从而进一步提升了运维成本。

三、数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的应用策略

（一）构建科学精准的数字孪生模型

1. 多维度数据采集和分析

为了将数字孪生技术的作用充分发挥出来，应构建更为精准、科学的数字孪生模型，并全面采集和分析注浆设备的各种数据。除传统的设备运行参数外，还应对其结构数据、环境参数等进行收集和分析^[2]。例如，可以利用各种传感器设备，对注浆设备的振动数据进行收集和分析，从而协助运维人员精准掌握设备的磨损情况，为快速做出故障诊断、制定维修计划奠定基础。

2. 精细化建模与仿真

根据收集到的各种数据，可以利用先进的建模技术构建精细化的数字孪生模型。不仅要对接注浆设备的物理结构进行建模，同时还要对其性能特征、运行逻辑等进行仿真^[3]。例如，可以利用有限元分析方法对设备的结构强度进行仿真分析，从而精准预测设备在不同情况下的变形情况。同时，还可以构建设备历史运行数据库，并结合先进的人工智能技术对设备的性能进行预测，从而使模型能够更为精准地反映出设备的运行状态。

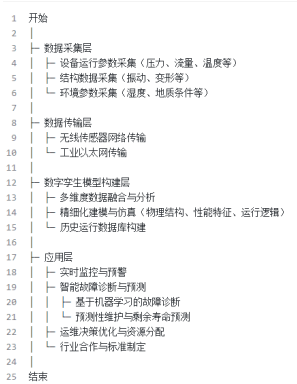


图1 数字孪生技术在地铁隧道智能化注浆设备运维中的整体流程图

（二）实现实时数据交互与动态更新

1. 构建高速稳定的数据传输网络

注浆设备常处于地底深处，所处环境较为复杂，严重影响数据传输的稳定性和可靠性。对此，有必要构建高速、稳定的数据传输网络，以此为地铁隧道的持续运行提供保障^[4]。针对地铁的复杂环境，可以采用具有较强抗干扰能力的通信技术，如无线传感器网络、工业以太网等。同时，根据地铁隧道实际情况，合理设计和规划网络拓扑结构，确保数据传输安全、稳定、可靠。

2. 数字孪生模型实时革新

随着注浆设备的不断运行，其工作状态也会随之不断发生变

化。对此，数字孪生模型应实施革新，确保其始终与物理设备保持一致。通过将实时收集的设备数据与历史数据进行全面分析，能够及时发现设备的状态变化^[5]。

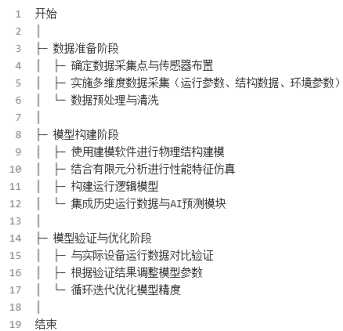


图2 数字孪生模型构建技术路线图

（三）智能故障诊断与预测

1. 基于机器学习的故障诊断

在新时期，可以将机器学习算法与数字孪生技术进行充分融合，实现对设备运行数据的深度分析和挖掘，进而完成故障的快速、准确诊断，可以在故障发生的初期进行快速识别，从而为运维工作提供强大助力。例如，可以利用机器学习算法，对设备的压力、温度、湿度、振动等数据进行深入分析，快速、精准定位故障源，生成准确的故障报告，帮助运维人员做出决策提供依据^[6]。

2. 预测性维护与剩余寿命预测

还可以利用预算算法，对注浆设备的历史运行数据进行深度分析，从而精准预测出设备的剩余使用寿命。例如，可以利用回归分析、时间序列分析等方法，对注浆设备的性能退化趋势进行精准分析，进而准确预测出设备的剩余使用寿命^[7]。同时，根据预测结果，运维人员能够制定更为精准的检修计划，高效开展运维管理工作，从而提升运维效率，降低成本，有效减少故障的发生。

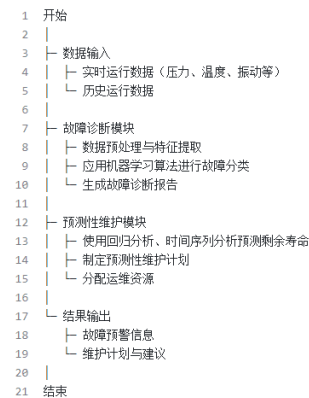


图3 智能故障诊断与预测流程图

（四）优化运维决策与资源配置

1. 优化运维决策

数字孪生技术的应用能够为运维决策优化提供数据支持。通过对注浆设备的运行数据进行分析，能够帮助工作人员掌握故障的发生规律，从而为合理制定运维计划提供数据支撑^[8]。

2. 运维资源分配与调度

利用数字孪生技术能够实现对运维资源的科学分配和调度。例如，当注浆设备发生故障后，系统能够对该故障的破坏程度、

维修等级、影响范围等进行评估，并自动调配运维资源，从而实现故障的快速响应同时，提升运维资源的利用率^[9]。

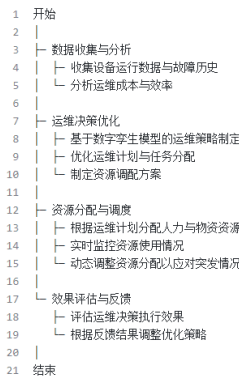


图4 运维决策优化与资源配置流程图

（五）加强行业合作与标准制定

1. 加强行业沟通和交流

企业之间应加强沟通和交流，共享运维经验和数据资源，从而为提升整体运维水平奠定坚实的基础。通过构建行业平台或企业沟通平台，企业能够共同开展数字孪生技术的研究，并分享研究成果和应用经验，解决共性难题，从而推动整体运维水平的不断提升^[10]。

2. 完善行业标准和规范

政府、行业、企业等应开展深入合作，集合多方资源和力量，共同推动地铁隧道智能注浆设备运维行业标准的建立和完善，从而推动行业实现持续、健康发展。例如，制定数字孪生模型的数据标准，确保不同企业之间的数字孪生系统能够实现数据共享。

四、结束语

总之，在新时期，将数字孪生技术应用在地铁隧道智能化注浆设备运维之中具有重要的现实意义。对此，针对当前地铁隧道智能化注浆设备运维的现状与挑战，应采取多种方式和手段，以此将数字孪生技术的作用充分发挥出来，从而推动地铁隧道智能化注浆设备运维向更高效、更智能的方向发展。

参考文献

- [1] 付艳斌, 黄焯磊, 郭泽, 等. 基于数字孪生的既有隧道结构变形高效预警方法 [J/OL]. 铁道标准设计, 1-12. <https://doi.org/10.13238/j.issn.>
- [2] 马亮, 朱双宝, 刘延普. 基于数字孪生的隧道智能巡检技术探讨 [J]. 交通世界, 2024, (24): 131-133.
- [3] 郭志宏. 基于数字孪生的隧道智能巡检技术研究与应用 [J]. 中国设备工程, 2024, (13): 199-202.
- [4] 冯祥喜. 面向地铁隧道智能安全检测的技术研究 [D]. 安徽理工大学, 2024. DOI: 10.26918/d.cnki.ghncc.2024.000699.
- [5] 肖婧仪, 肖剑平, 刘美春. 基于数字孪生的地铁隧道智能监测系统建设探讨 [J]. 地理空间信息, 2024, 22(05): 111-115+126.
- [6] 顾亦宁, 艾青, 王少纯, 等. 基于代理模型的地铁隧道结构变形预测数字孪生方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(09): 133-137.
- [7] 林刚, 王仰君, 张帆. 建筑碳中和行动 [M]. 化学工业出版社: 202306: 257.
- [8] 梁亚成, 虞赛君, 马迪迪, 等. 基于数字孪生的隧道智能巡检技术研究与运用 [J]. 北京测绘, 2022, 36(07): 870-874.
- [9] 李乐. 基于BIM与多源监测的地铁施工安全风险智能化预警研究 [D]. 中国矿业大学(北京), 2022. DOI: 10.27624/d.cnki.gzkb.2022.000180.
- [10] 周红, 基于BIM的厦门地铁三号线过海通道施工风险集成控制与系统研发. 福建, 厦门大学, 2017-12-01.