DOI:10.13203/j.whugis20260026 文章编号:1671-8860(2026)03-0632-01

隧道突涌水多物理场耦合的高精度数字孪生模拟方法

何 杨 西南交通大学地球科学与工程学院,四川 成都,611756

Multi-field Coupling High-Precision Digital Twin Simulation Method of Tunnel Water Inrush Disaster

HE Yang Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

中图分类号:TP208 文献标识码:D

在全球基础设施建设蓬勃发展,特别是中国“一带一路”倡议与“交通强国”等国家重大战略驱动下,铁路工程正加速向艰险山区等极端复杂环境延伸。在此背景下,隧道建设所面临的高温涌水灾害,以其高发性、突发性和巨大破坏性,对工程安全与可持续发展构成严重威胁。尤其是在穿越高地应力、高水压、高地温等复杂不良地质体时,多物理场的强耦合作用使灾害机制更加隐蔽复杂,传统防治手段面临严峻挑战,亟需实现灾害的精准预测与智能防控。然而,传统数值模拟方法在应对该挑战时,普遍存在三大技术瓶颈:一是数据多源异质且不完备,导致高保真几何模型构建困难,影响模拟准确性;二是模型参数高度不确定,依赖经验取值导致模拟结果可靠性低;三是数值求解计算密集,难以满足实时模拟需求。针对上述难题,提出一种隧道突涌水多物理场耦合的高精度数字孪生模拟方法,旨在实现不完备数据条件下隧道突涌水的高精度、实时模拟分析。主要研究内容如下:

1)提出了集成学习增强的隧道突涌水环境数字孪生建模方法。系统定义突涌水环境中的关键几何要素,明确需建模的核心对象与层级;体素化融合地震波反射和瞬变电磁等超前地质预报数据,并基于Stacking集成学习算法构建围岩-富水分级数字孪生模型。实验结果表明,该方法对围岩完整性与富水性等级识别的平均精度均值分别达到0.95和0.94,实现了对破碎带与富水区空间分布的高精度智能识别;推导节理参数化建模公式,完成掌子面主导节理、隧道洞身结构及炮孔分布的精细化建模。该方法实现了隧道突涌水环境高保真数字孪生建模,为后续突涌水多物理场耦合模拟分析提供可靠几何基础。

2)提出了基于高斯过程-差分进化的多物理场耦合模型参数智能率定方法。构建涵盖温度-渗流-应力耦合模型、损伤-流-固耦合模型和温度-湿度-气流耦合模型的机理模型库,为数值模型参数率定提供物理基础;通过样本空间构建、高斯过程代理模型训练与评估以及基于差分进化算法的参数优化3个步骤,实现了数值模型参数的智能率定。实验结果表明,经该方法率定后的数值模型对拱顶沉降、涌水量和围岩温度的预测平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)分别为2.4%、14.8%和2.7%,显著提升了突涌水模拟的可靠性。

3)提出了轻量化代理模型驱动的突涌水过程实时模拟方法。基于机理模型库构建突涌水演化过程的损伤-流-固耦合模型与温度-湿度-气流耦合数值模型,结合拉丁超立方采样法进行参数空间采样,模拟生成蕴含多物理场耦合机制的数据集,并采用分层数据格式进行高效管理与存储;基于Temporal Fusion Transformer框架构建轻量化代理模型,通过门控残差网络与多头自注意力机制深度学习物理场演化规律。实验结果显示,该代理模型在保证温湿度预测MAPE分别为0.22%和0.88%的前提下,将单步推演时间压缩至5.6 ms,实现了隧道突涌水演化过程的实时模拟。

基于上述研究成果,设计研发了隧道突涌水模拟数字孪生原型系统,并开展综合应用与实验分析以验证所提方法的有效性。原型系统应用结果表明,围岩富水区与破碎带预测模块的预测结果与现场物探预报结论基本一致;围岩环境多物理场可靠预测模块基于参数率定后的数值模型,对模拟开挖的关键指标进行了预测,拱顶沉降、涌水量和围岩温度的MAPE分别为2.3%、10.4%和2.6%;隧道热湿环境实时预测分析模块通过代理模型实现了实时预测,整个计算与可视化过程耗时不足1 min。实验结果充分验证了方法在实现高精度、实时模拟方面的可行性与工程应用价值。

作者简介:何杨,2025年12月毕业于西南交通大学,获工学博士学位(指导教师:朱庆教授,丁雨淋教授),研究方向为数字孪生、隧道工程灾害防控。heyang2014@whu.edu.cn

引文格式:HE Yang.Multi-field Coupling High-Precision Digital Twin Simulation Method of Tunnel Water Inrush Disaster[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(3):632.DOI:10.13203/j.whugis20260026(何杨.隧道突涌水多物理场耦合的高精度数字孪生模拟方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(3):632.DOI:10.13203/j.whugis20260026)