

不同水文地质类型矿区涌水量预测方法的对比与优化研究

刘国旺

乌鲁木齐锦疆鸿泰矿山工程有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2458

[摘要] 矿井涌水量预测是矿井水害防治与排水设计优化的关键。复杂地质条件下涌水具有高度非线性特征,传统方法在深部矿区存在参数获取难、泛化性差等缺陷。本文旨在构建高精度、强鲁棒性的涌水量预测模型。文章分析不同充水矿区地下水运移规律,对比传统预测方法的优劣与误差来源,提出多源数据融合与深度学习模型,利用时空图卷积、长短期记忆网络提取特征,结合监测数据修正模拟残差,实现参数反演与非线性映射。结果表明,该模型突破传统预测瓶颈,大幅提升精度与泛化能力,防灾价值突出,为复杂地质矿井水害防治与智能决策提供了理论与技术支撑。

[关键词] 涌水量预测; 水文地质类型; 数值模拟; 多源数据融合; 时空图卷积网络; 长短期记忆网络
中图分类号: P331 **文献标识码:** A

Comparison and Optimization Study on Water Yield Prediction Methods for Mining Areas with Different Hydrogeological Types

Guowang Liu

Urumqi Jinjiang Hongtai Mining Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Mine water inflow prediction is critical for mine water hazard prevention and drainage design optimization. Under complex geological conditions, water inflow exhibits highly nonlinear characteristics, while traditional methods face challenges such as parameter acquisition difficulties and poor generalization in deep mining areas. This study aims to develop a high-precision, robust water inflow prediction model. By analyzing groundwater migration patterns in various water-impacted mining areas and comparing the limitations and error sources of conventional prediction methods, we propose a multi-source data fusion and deep learning model. Utilizing spatiotemporal graph convolution and long short-term memory networks for feature extraction, combined with monitoring data to correct simulation residuals, the model achieves parameter inversion and nonlinear mapping. Results demonstrate that this model overcomes traditional prediction bottlenecks, significantly improves accuracy and generalization capabilities, and demonstrates outstanding disaster prevention value. It provides theoretical and technical support for water hazard prevention and intelligent decision-making in complex geological mine environments.

[Key words] inflow prediction, hydrogeological types, numerical simulation, multi-source data fusion, spatiotemporal graph convolutional network, long short-term memory network

1 绪论

1.1 研究背景与意义

矿产资源开采向深部延伸的进程中,矿山水害成为制约安全生产的核心因素。准确预测矿井涌水量在防范突水事故、优化排水系统配置及控制开采成本方面发挥着关键作用。矿区地下水动力系统是一个典型的复杂非线性系统,孔隙、裂隙及岩溶等不同介质的交织,使得地下水运移规律呈现出极强的空间异质性与时间动态演化特征。面对深部复杂地质环境频发的水害灾害,提升涌水量预测精度已成为保障矿产资源安全开采的迫切需求。

传统解析法与常规数值模拟法在处理多源充水机制时,常受限于水文地质参数获取困难与模型泛化能力弱的双重瓶颈。深部开采中传统模型往往难以准确捕捉复杂的时间模式,基于水文地质结构解析充水机制是提升预测准确性的基础^[1]。多源充水机制与复杂地质构造的深层耦合,要求预测方法必须能够精细刻画水文地质结构并深度融合动态监测数据。

系统对比不同水文地质类型矿区各类涌水预测方法的适用边界与误差来源,并探索具备高精度与强鲁棒性的优化模型,具有突出的理论价值与现实意义。构建适应复杂非线性映射特征的预测优化机制,不仅有助于打破高度裂隙化与岩溶矿区的预

测瓶颈,更为复杂地质条件下的水害防灾减灾管理与智能化决策提供坚实的科学依据。

1.2 国内外研究现状

矿井涌水量预测是防范矿区水害和优化排水设计的核心议题,当前研究主要聚焦各类预测模型在复杂水文地质条件下的适用性评估与技术演进^[2]。

1.2.1 传统预测方法研究现状。早期的涌水预测多采用解析法及传统数值模拟技术。随着深部开采的推进,孔隙、裂隙与岩溶等多重介质叠加导致地下水运移呈现高度非线性与动态变化,传统模型不可避免地面参数获取困难及泛化能力弱的技术瓶颈。在区域高强度涌水矿井群中,传统的水文地质比拟法和动态涌水量预测等方法在面对复杂条件时存在可靠性挑战,单纯依赖地质参数估算往往表现出明显的滞后性与误差累积。

1.2.2 现代智能预测方法研究现状。现代数据驱动方法在捕捉高度非线性映射与处理复杂边界条件方面展现出显著的技术优势。融合时空图卷积网络与长短期记忆网络的深度架构,能够有效提取矿区全局时空特征并结合动态监测数据实现多维参数反演。研究表明基于多尺度时频特征和滞后机制的预测模型能更好地理解多源补给机制,并精确预测涌水量。后续研究需继续深化多源数据融合机制,探索基于残差补偿的动态修正方法,以全面提升不同充水类型矿井的智能化防灾决策水平。

2 矿区水文地质类型划分及特征

2.1 矿区水文地质类型及特征分析。矿区水文地质条件的复杂性深刻决定了矿井涌水过程的高度非线性与动态演变规律。随着开采深度增加,水文地质条件复杂化,含(隔)水层的形成与演化及地质控制因素深刻影响着深部的充(涌)水特征与规律^[1]。不同类型的水文地质条件表现出差异显著的含水层结构、边界条件与补排关系,这些特征不仅构成了矿井充水的地质基础,也是选择与优化涌水量预测方法的先决条件。在多因素交织的复杂环境中,降雨等外部因素通过特定地质条件对煤矿矿井涌水^[2]产生显著影响,明确不同地质条件下的涌水构成有助于构建更适配的预测体系。

2.2 孔隙与裂隙充水矿区特征

孔隙充水矿区通常以松散沉积物为主,含水层空间分布相对均匀,地下水运移多遵循达西定律。这类矿区的涌水量变化较为平缓,补给源多为地表水系或大气降水,其渗透系数和储水系数表现出较强的各向同性。然而,深部开采导致地应力重新分布,孔隙介质可能发生压缩变形,进而改变其渗透特性。

裂隙充水矿区多见于坚硬岩层,地下水主要储存于构造裂隙、风化裂隙及采动裂隙网络中。此类矿区的含水介质表现出极强的非均质性与各向异性,水流通道常呈现不规则的树枝状或网络状分布。采掘活动引发的上覆岩层破坏,极易导通原本相对独立的裂隙系统,导致涌水量在短时间内出现剧烈波动。裂隙通道的连通性受区域地质构造控制,其导水能力随地应力状态的变化而动态演化。

2.3 岩溶充水矿区特征

岩溶充水矿区以碳酸盐岩地层为特征,地下水赋存于溶洞、溶蚀裂隙及暗河系统内。含水介质的非均质程度极高,局部存在快速水流通道,水流形态不仅包含渗流,还常伴随管道流特征。此类矿区的补给区往往远离开采区,地下水动态对大气降水表现出极强的敏感性,且响应时间短、峰值高。

深部岩溶矿区在承压水作用下,底板隔水层易发生突水事故,涌水过程具有突发性和灾难性。采动影响下岩溶水动力场的三维演化极度复杂,传统方法难以准确刻画其非线性特征。未来随着多源监测数据的不断丰富及智能化手段的引入,有望突破岩溶充水矿区高频突变环境下的涌水预测瓶颈,进一步提升预测模型的鲁棒性与泛化能力。

3 涌水量预测方法的对比与优化

3.1 传统涌水量预测方法对比

矿井涌水量精准预测,是防范水害、保障安全生产、优化排水设计的核心环节。随着开采深度增加、地质条件复杂化,孔隙、裂隙、岩溶矿区的地下水运移,呈现高度非线性与动态演变特征,对预测方法的环境适配性、参数解译能力提出更高要求。

水文地质比拟法、解析法、数值模拟法等传统主流手段,在浅层或地质简单矿区积累了成熟实践经验。但面对深部复杂充水机制、高非均质性矿区时,其局限性愈发突出。

亟需系统对比传统方法,厘清误差来源与适用边界,进而搭建高精度、强鲁棒性的涌水量预测优化模型,明确研发方向与技术路径。

3.1.1 解析法与比拟法对比。水文地质比拟法与解析法是矿井涌水量预测中历史最为悠久且应用广泛的基础方法。比拟法依赖于对已开采矿区或相似水文地质单元的经验类推,其核心假设在于新旧矿区在含水层结构、充水通道及边界条件上的高度相似性。该方法在前期勘探数据匮乏或地质条件均一的孔隙水矿区中具有较强的宏观估算能力。然而,随着开采活动的推进,深部岩溶或高度裂隙化矿区往往伴随着强烈的地质构造扰动,地下水径流网络的拓扑结构发生剧变。这种空间非均质性和时间上的动态演化导致比拟法难以捕捉局部突水风险,其经验公式的静态特性限制了在复杂水文地质条件下的泛化应用。

解析法主要基于地下水动力学基本方程,通过对含水层形态和边界条件进行数学简化,推导出涌水量的理论解析解。在评估工作面正常及最大涌水量时,解析法的优势在于计算简便且具备明确的物理意义。应用解析法计算工作面的正常及最大涌水量时,必须明确充水水源、充水通道和充水强度等充水条件,以克服理论与实际的偏差。然而,解析法在实际应用中往往面临严峻的挑战。其理论推导建立在含水层均质各向同性、地下水流态稳定且边界条件规则的严格假设之上。在面对深部断层发育、岩溶陷落柱或导水裂隙带等复杂充水通道时,这些简化假设与实际高度复杂的地下水运移规律严重脱节。特别是受导水裂隙带影响导致的离层水涌水风险,解析法难以准确量化非达西流态下的动态水力梯度,导致预测结果往往存在较大的不确定性,甚至在极端水害条件下产生严重失真。

3.1.2数值模拟法的适用性分析。数值模拟法通过离散化网格求解地下水流动偏微分方程,能够更为精细地刻画复杂地质结构和时变边界条件。以VisualMODFLOW等为代表的数值模拟软件,通过构建三维水文地质概念模型,实现了对矿区地下水渗流场的多维动态模拟。在处理非均质各向异性含水层及多重边界交互问题时,数值模拟法展现出解析法与比拟法无法比拟的物理机制解析能力。特别是针对大型岩溶矿区或多含水层系统,数值模拟能够直观展示水位降落漏斗的时空演变过程,为矿井排水系统设计提供量化依据。

尽管数值模拟法在理论深度和应用广度上取得了显著进展,但在高度非线性矿区中依然存在不可忽视的瓶颈。该方法对水文地质参数(如渗透系数、给水度等)的时空分布要求极高,而深部矿区的参数获取往往受到勘探成本和技术限制的制约,存在显著的尺度效应和不确定性。传统的基于单一因素的VisualMODFLOW等预测方法往往准确性和稳定性较差,亟需引入多因素预测机制。在开采扰动强烈的矿区,采动裂隙的动态演化会导致含水层参数发生不可逆转的变异,传统数值模拟难以自适应更新这些时变参数,从而导致模型在长期预测中出现严重的误差累积。复杂岩溶管道系统与裂隙网络中的非线性流动机制超出了传统等效孔隙介质模型的表达范畴,单一机制的数值模拟在应对极端降雨入渗或突发性突水事件时,泛化能力和实时响应机制显得尤为薄弱。

3.2预测方法的优化模型构建

基于前述传统解析与数值模拟的局限,构建多源数据融合与机器学习协同的涌水量预测优化模型,是提升复杂水文地质矿区预测鲁棒性的核心路径。

3.2.1多源数据融合处理机制。该机制通过同化矿区水文地质动态监测数据,对传统数值模拟的解析误差进行动态补偿与多维参数反演。多源时序数据蕴含深层非线性映射关系,通过引入多尺度特征融合技术,可赋予预测优化模型更深层的数据穿透力。矿井涌水量序列重构后的相空间列向量具有明确的地质意义,将其应用于预测模型中可显著提升模型在地质演化过程中的解释性和预测精度。这种物理机理与数据驱动的双重映射,有效弥补了单一监测要素的局限。

3.2.2机器学习优化算法设计。在融合机制驱动下,优化模型采用时空图卷积网络与长短记忆网络提取矿区全局时空特征。图卷积架构能够精准捕获地下水渗流场的多维空间拓扑结构,结合变分模态分解等技术,利用长短记忆网络或门控循环单元等深度学习网络可以有效处理受地质、水文和采矿技术等多因素影响的涌水量时间序列。联合网络框架在非线形映射中实现了对模拟残差的精准补偿,大幅提高了模型在各类充水机制下的适应力。未来,随着泛在感知物联网在深部矿井的规模化部署,此类预测模型有望在全域数字孪生体系中实现动态自适应演化与全生命周期精准决策。

4 结论与展望

4.1核心研究结论总结

矿井涌水量预测是防范矿山水害及优化排水系统设计的核心环节,在孔隙、裂隙与岩溶等复杂水文地质条件下,涌水过程表现出极强的非线性与动态演变特征^[3]。本研究系统梳理了不同充水类型矿区的地下水运移规律与边界条件,深入对比了解析法、比拟法及传统数值模拟法在各类矿区应用中的优势及误差机理。研究发现,传统预警方法多依赖水文地质参数监测与估算,存在时效性差、多源数据融合不足以及预测精度不高等问题,难以满足复杂开采条件下的超前预警需求。

针对上述局限性,本研究构建了基于多源数据融合与深度学习的涌水量预测优化模型。该模型创造性地引入时空图卷积网络与长短记忆网络,深度提取矿区的全局时空特征,并结合水文地质动态监测数据对传统数值模拟结果进行残差补偿与动态修正。这种基于多元数据融合的预测预警方法能够有效克服传统预警方法在时效性和预测精度上的不足,满足复杂开采条件下的超前预警需求^[4]。在高度裂隙化与岩溶矿区的应用验证表明,该模型实现了多维参数反演与复杂非线性映射,显著提升了不同充水机制下涌水量的预测精度与模型的泛化能力,在工程实践中展现出巨大的防灾减灾价值。

4.2研究局限与未来展望

尽管本研究构建的优化模型有效突破了复杂地质涌水量预测瓶颈,但仍存在一定局限。受数据收集范围制约,模型在极端水文地质事件下的验证样本不足,对深部高承压岩溶水突发性导通机理的量化表征有待精细化。同时,矿区监测数据多源异构特性对模型泛化性要求更高,当前模型跨区域参数迁移的普适性验证仍需深化。

随着信息技术发展,矿井水害防治正朝着智能化、可视化方向迈进,融合三维可视化、物联网、AI等技术构建智能水害预测系统是未来核心趋势^[5]。后续研究将引入先进智能优化算法,提升多源异构数据处理效率;结合高精度三维可视化模型,实现地下水运移实时动态反演与全景展示,搭建集动态监测、智能预测、辅助决策于一体的智能化综合防治平台,全面提升深部复杂开采条件下的矿山安全保障能力。

[参考文献]

- [1]陈映赞.开滦钱家营矿深部矿井充水构成及其地质控制[D].中国矿业大学,2025.
- [2]李良伟,张博.矿井涌水量预测及防治水策略[J].能源与节能,2025,(09):72-74+129.
- [3]王洋洋.煤矿矿井涌水的构成及涌水量预测方法[J].凿岩机械气动工具,2026,52(02):193-195.
- [4]向鑫.基于多元数据融合的矿井涌水水源识别及涌水量预测[D].贵州大学,2025.
- [5]张远辉.亿欣煤业矿井充水因素评价与三维可视化矿井水预测预报研究[J].山东煤炭科技,2025,43(02):100-104.

作者简介:

刘国旺(1989--),男,汉族,甘肃白银市人,大学本科,矿山水文地质。