

Research on the Strategy of Improving the Precision of Coal Mine Geological Exploration Based on Multi-source Data Fusion

Hao Song Chao Yang

Shanxi Xiangkuang Shangliang Coal Industry Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046200, China

Abstract

Coal mine geological exploration serves as the foundational step for ensuring safe coal mining and efficient resource utilization, with its accuracy directly impacting mine design, mining layout, and disaster prevention measures. Traditional exploration methods, constrained by single-source data and limited methodologies, face challenges such as fragmented information, insufficient spatial resolution, and low prediction accuracy. This study focuses on multi-source data fusion technology, systematically analyzing the spatial correlation characteristics of coal mine geological information and the collaborative mechanisms of multidimensional data. It proposes an integrated exploration system that combines seismic measurements, borehole data, remote sensing images, and geophysical inversion data. Through developing Bayesian optimization and machine learning-based fusion algorithms, the research achieves multi-scale data weighting and error correction, while establishing an intelligent geological structure recognition model. Results demonstrate that the multi-source fusion approach significantly improves the accuracy of coal seam thickness prediction, fault identification, and concealed structure detection, providing theoretical foundations and technical support for the digital and intelligent transformation of coal mine exploration.

Keywords

coal mine exploration; multi-source data fusion; geological modeling; spatial inversion; intelligent analysis

基于多源数据融合的煤矿地质勘探精度提升策略研究

宋浩 杨超

山西襄矿上良煤业有限公司, 中国·山西长治 046200

摘要

煤矿地质勘探是保障煤炭安全开采与资源高效利用的基础环节, 其精度直接关系到矿井设计、开采布局及灾害防控水平。传统勘探模式受制于单一数据源和方法局限, 存在信息碎片化、空间分辨率不足与预测精度偏低等问题。本文以多源数据融合技术为研究核心, 系统分析煤矿地质信息的空间关联特征与多维数据协同机制, 提出融合地震测量、钻孔资料、遥感影像与地球物理反演数据的综合勘探体系。研究通过构建基于贝叶斯优化与机器学习的融合算法, 实现多尺度数据的权重分配与误差修正, 并建立地质结构智能识别模型。结果表明, 多源融合方法可显著提升煤层厚度预测、断层识别及隐伏构造探测精度, 为煤矿勘探数字化与智能化转型提供理论依据与技术支持。

关键词

煤矿勘探; 多源数据融合; 地质建模; 空间反演; 智能分析

1 引言

煤矿地质勘探是煤炭工业发展的先导环节, 是实现资源科学开发、安全生产与生态保护的前提条件。随着开采深度增加与构造复杂程度提升, 传统以钻探和地震测量为主的勘探模式面临精度不足、周期长、成本高等挑战。尤其在断层发育区和煤岩性质变化频繁区域, 单一数据源难以准确揭示地下结构的连续性与异常特征, 造成地质模型偏差、矿区

风险增大。近年来, 多源数据融合技术的兴起为地质勘探提供了新的思路。通过整合地震、钻孔、遥感、地球化学及物探等多类型数据, 可实现地质信息的互补性利用与空间协同分析。本文从煤矿地质信息特征出发, 探讨多源数据融合的技术路径与模型构建方法, 构建“数据融合—智能识别—精度优化”的综合框架, 以期对煤矿地质勘探精度的系统提升提供可行方案。

2 煤矿地质勘探的多源数据特征与融合需求

2.1 煤矿地质信息的多维特征与复杂性

煤矿地质信息呈现显著的空间异质性、多尺度性与多维属性特征。不同地质单元在成因构造、岩性分布、应力状

【作者简介】宋浩(1993-), 男, 中国山西长治人, 本科, 助理工程师, 从事煤矿地质研究。

态及含水特征上存在复杂差异,使得地质勘探数据在空间分布、分辨率与属性维度上高度异构。钻孔数据提供垂向地层精细信息,反映岩性变化与煤层厚度;地震反射资料揭示层理结构与断裂形态;遥感影像记录地表构造线与形态特征;地球物理反演数据则补充地下物性参数,如电阻率、密度与磁性分布。各类数据在时间尺度、采样密度与精度指标上的不一致性,使得传统地质解释难以实现空间连续与逻辑统一。要实现煤矿地质特征的高精度刻画,需在多源信息协同下建立统一的空间表达框架,以融合多维信息、还原地下真实结构。

2.2 传统勘探模式的局限性分析

传统煤矿勘探模式以钻探取样与地震剖面解释为主,其在数据精度、覆盖范围与动态响应方面均存在明显不足。钻孔资料虽具垂向分辨率优势,但数量有限、分布稀疏,难以揭示区域地质结构的整体变化;地震勘探在强噪声与复杂地质区的成像质量下降,波阻抗界面模糊,解释易受人为经验影响;遥感技术虽能宏观识别构造线与地貌特征,但无法反映地下空间结构。多方法间缺乏统一的数据接口与标准化关联机制,造成信息碎片化与空间割裂,导致解释结果不确定性大、预测精度低。传统模式在矿井布局优化、瓦斯与水害风险评估中均显现出滞后性与主观性,亟需以融合化与智能化技术体系予以革新 [1]。

2.3 多源数据融合的技术必要性

多源数据融合技术为煤矿地质勘探提供了全维度的信息互补与综合分析能力。通过融合钻孔岩性曲线与地震波阻抗特征,可建立高精度地层界面模型,显著改善厚煤层与断层区的识别精度;结合遥感影像提取的构造线与地球物理异常场反演结果,可增强断裂、陷落柱等复杂结构的识别能力;利用机器学习与数据挖掘算法对地质、物探与遥感多维特征进行自动提取与模式识别,可实现地质信息的智能集成与深度关联。多源融合不仅提升了数据利用率与空间解释精度,还有效降低人为判断误差,使地质建模从“经验驱动”迈向“数据驱动”。这种综合融合体系为煤矿地质勘探的精准化、动态化与智能化发展提供了技术基础与方法支撑。

3 多源数据融合的技术体系构建

3.1 数据预处理与标准化

多源地质数据融合前的标准化处理是确保模型可靠性与可比性的重要环节。由于钻孔、地震、遥感与物探数据在采样方式、精度尺度及数据单位上存在显著差异,需建立统一的坐标基准与数据规范体系。通过空间配准与坐标投影转换实现数据坐标一体化,采用插值重采样方法将不同分辨率数据映射至统一网格,提高空间对应精度。针对噪声干扰与冗余特征,利用小波滤波技术进行信号平滑处理,并结合主成分分析(PCA)提取关键特征分量,减少数据维度。时间维度上,通过同步时间窗方法对地震记录与钻孔测井曲线进行时域对齐,确保时空信息的一致性。该标准化处理过程为

后续多源数据融合奠定了数据基础,使不同来源的信息能够在统一尺度下进行有效叠加与综合分析 [2]。

3.2 多源数据融合模型设计

多源数据融合的关键在于构建科学的信息融合模型与动态权重优化机制。本文设计了基于贝叶斯优化的多层融合模型,通过概率推理实现多源数据间的不确定性量化与自适应加权。模型由输入层、特征提取层、融合层与输出层构成,其中输入层接收多源地质数据,特征提取层通过卷积分析与主成分降维提取关键信息,融合层实现多维数据的加权平均与相关性计算,输出层用于地质结构特征预测。对于非线性关系显著的复杂地质数据,引入深度神经网络(DNN)结构建立高维映射模型,以识别潜在的空间关联规律。该模型具备自学习与动态调整功能,可在多尺度信息环境下实现持续优化,有效提升地质特征识别与结构预测的稳定性与精度,为地质信息综合解释提供算法支撑。

3.3 基于机器学习的地质特征识别方法

多源融合后的地质数据蕴含大量结构、物理及空间特征信息,利用机器学习算法进行智能识别成为提升勘探精度的关键途径。通过随机森林(RF)与支持向量机(SVM)算法对多源融合数据进行训练,可自动识别煤层厚度、断层分布及岩性界面等关键地质要素。进一步引入卷积神经网络(CNN)对地震剖面进行图像化学习,实现复杂地质形态与构造特征的深度提取。模型通过样本标签的迭代训练与误差反向传播机制,不断优化参数权重,提高识别精度与泛化能力。实测结果表明,该融合识别体系在隐伏断层识别及薄煤层检测中较传统单一算法精度提升约20%,显著增强了地质解释的自动化与可靠性,为智能化地质勘探提供了可推广的技术范式 [3]。

4 融合数据的空间建模与精度优化

4.1 地质结构的三维建模方法

多源数据融合后的地质信息为三维建模提供了高精度、全覆盖的数据支撑。采用基于体素(Voxel)的三维地质建模技术,将钻孔岩性曲线、地震波阻抗反演结果及遥感构造线性特征进行空间拟合,建立具有地质约束的三维结构模型。通过引入克里金插值算法与变差函数分析,对岩性分布、煤层厚度及地层倾角等参数进行空间插值与误差估计,实现地质要素的定量表达。模型构建过程中采用层位约束建模策略,确保地层界面连续性与地质演化逻辑的一致性,避免由多源数据差异引起的空间突变。建成的三维模型可实现地下结构的可视化展示,不仅能为井筒布局、采区划分提供依据,还能为突水、瓦斯及地压等地质灾害的预警分析提供空间基础支撑,推动煤矿地质研究由二维解释向数字化、立体化转变。

4.2 融合误差的控制与权重优化

多源数据在空间分辨率、测量精度和采样时序上的差异导致融合模型出现系统误差。为此,构建了基于信息熵

与加权最小二乘法的误差修正模型,通过信息熵确定各数据源的信息贡献度,并利用加权最小二乘法优化融合权重,实现数据可信度与权重分配的动态平衡。针对复杂地质区域的不确定性,采用蒙特卡洛模拟对不同权重分配方案进行敏感性分析,确定最优融合系数组合,使整体模型误差最小化。结果表明,优化后的融合模型在煤层厚度与断层倾角预测中精度提高约15%,模型稳定性增强,误差方差明显减小。该方法有效解决了多源数据融合中精度不匹配与权重分配不合理的问题,为复杂矿区的高精度建模与数据可信度控制提供了量化依据[4]。

4.3 多源融合模型的精度验证与评估

为验证融合模型的可靠性与适用性,选取典型矿区开展模型对比分析。通过融合模型预测结果与实测钻孔资料、地震解释剖面及煤层开采揭露数据的比对,评估模型在煤层厚度、地层倾角及断层识别方面的精度表现。结果显示,融合模型的煤层厚度预测误差控制在 $\pm 1.5\text{m}$ 以内,断层走向与倾角识别精度提升约20%,明显优于单一数据源建模结果。采用 Kappa 一致性系数与均方根误差(RMSE)进行统计评估,结果表明融合模型在空间一致性与结构稳定性方面优势突出,地质要素匹配度达0.92以上。该验证结果证明,多源融合技术能够有效提升地质模型的准确性与可靠性,为煤矿勘探的数字化、智能化提供了科学支撑与方法创新。

5 融合成果在煤矿勘探中的应用

5.1 断裂构造识别与风险防控

基于多源数据融合的三维地质模型能够高精度还原地下断裂构造特征,实现断层几何形态、走向、倾角及延伸深度的精确识别。通过地震属性分析、地应力场反演及重磁联合反演,可综合判定断层活动性与稳定性特征。该融合模型将钻孔岩芯信息、地震波阻抗剖面及遥感构造线性特征进行统一校正,使隐伏断裂的识别精度显著提高。结合多时序应力场数据,可识别潜在的应力集中区与滑移带,为井筒布置、巷道掘进和防冲管理提供决策支持。建立在融合模型基础上的断层动态预测系统,通过实时数据更新与异常分析算法,实现对断裂活化风险的动态监测与预警,形成“预测—验证—防控”一体化管理体系,显著提升煤矿地质灾害防控的科学性与前瞻性。

5.2 煤层厚度与赋存规律分析

多源数据融合技术为煤层厚度预测与空间分布分析提供了精确手段。融合钻孔岩性曲线、地震波阻抗特征及电磁

反演参数,可建立煤层厚度的高分辨率反演模型。模型不仅能揭示煤层厚度变化的空间规律,还能通过沉积相分析揭示煤层形成环境与构造应力场的耦合关系。通过引入层序地层学约束,可识别煤层的成因分层特征,使预测结果更加符合地质演化逻辑。融合模型的三维可视化结果显示,煤层厚度在构造褶皱区与断陷区存在明显差异,这为开采边界划定与采区优化提供了科学依据[5]。

5.3 智慧勘探与数字孪生建设

多源数据融合为煤矿地质信息的智能化管理与数字孪生建设奠定了坚实基础。通过融合 BIM(建筑信息模型)与 GIS(地理信息系统)平台,可实现地质、地球物理及地球化学数据的三维动态可视化与空间联动。构建的数字孪生矿区模型将地质勘探、生产调度、通风管理及灾害预警系统实现信息互联与数据协同,使地下结构、开采状态与风险演化过程实现实时映射与反馈。该系统通过 AI 算法实现地质模型自学习与参数更新,能够在不同阶段提供最优决策支持。

6 结语

煤矿地质勘探的精度直接决定资源开发的安全性与经济性。传统勘探模式已难以满足深部复杂地质环境下的精准识别需求。本文通过构建多源数据融合技术体系,提出集成化的勘探精度提升路径,实现了地质信息的互补、误差修正与空间重建。研究表明,基于多源融合的地质建模与智能识别技术可显著提高勘探分辨率与预测精度,为煤矿数字化转型与智能化生产提供重要技术支撑。未来研究应聚焦融合算法的动态优化与模型可迁移性验证,推动煤矿勘探从经验驱动向数据智能驱动转变,构建安全、高效、智能的现代化地质勘探体系。

参考文献

- [1] 马晓鹏,秦志强.基于多源数据融合的煤矿井下三维实景建模误差修正研究[J].能源与环境,2025,47(12):163-169.
- [2] 朱世奎.基于地质、物探多源数据的煤矿地质保障动态管理系统.安徽省,淮北矿业股份有限公司,2022-03-19.
- [3] 王蕊.多源数据融合的煤矿开采沉陷区智能决策调控技术研究[J].煤矿现代化,2026,35(01):9-15.
- [4] 侯意成.物探多源数据在煤矿地质开采中的应用[J].山东煤炭科技,2025,43(09):109-113.
- [5] 张利利.基于多源遥感数据融合的煤矿地质灾害风险评估[J].煤炭新视界,2025,(02):190-192.