

# 多源测量数据融合的矿山地质三维建模研究

刘 观

新疆喀拉通克矿业有限责任公司 新疆 阿勒泰 836100

**摘 要：**矿山地质三维建模是资源勘探、开采设计与灾害预警的核心技术，但单一数据源受限于空间分辨率、覆盖范围及地质解释不确定性，难以满足复杂地质条件下的高精度建模需求。本文针对基于多源测量数据融合的矿山地质三维建模进行了研究，涉及多源测量数据的特征、多源数据融合关键技术、矿山地质三维建模方法等方面，旨在为矿山智能化开采提供可靠的地质信息支撑。

**关键词：**矿山地质；三维建模；多源测量数据

## 引言

矿山地质三维建模是连接地质勘探与矿山生产的关键桥梁，其精度直接影响资源储量评估、开采方案设计与安全生产决策。传统建模方法多依赖单一数据源，存在数据覆盖不全、地质解释主观性强等问题，难以准确刻画复杂地质构造及非均质矿体特征。随着物联网、无人机与人工智能技术的快速发展，多源测量数据的获取能力显著增强，如何有效融合这些异构数据并构建高精度三维地质模型成为研究热点。

### 1 多源测量数据的特征

一方面，数据类型具有显著的异构性，涵盖地质勘探、地球物理探测、遥感监测及开采动态监测等多个领域。地质勘探数据通常以离散点形式存在，包括钻孔位置、深度、岩性分层及样品化验结果，其空间分布受勘探工程布局限制，存在局部密集与全局稀疏的矛盾。地球物理数据通过物理场响应反演地下结构，具有连续覆盖特性但分辨率受探测深度影响，重力数据反映大范围密度差异，磁法数据揭示磁性体分布，电法数据刻画电阻率变化，地震数据则提供地层界面信息，不同物理参数的量化单位与数值范围差异显著。遥感数据以面状信息为主，光学影像提供地表纹理与植被覆盖特征，合成孔径雷达数据穿透云层获取地形起伏，激光雷达点云精确描述地表高程与微地形，无人机倾斜摄影通过多视角影像重建三维表面模型，各类数据在空间基准、投影方式及坐标系统上存在初始不一致性。开采监测数据包含位移传感器记录的岩体移动轨迹、应力计测量的地压变化、水文孔监测的地下水动态及生产系统运行参数，这些数据具有高时效性但分布局限于特定工程区域<sup>[1]</sup>。另一方面，数据精度呈现梯度变化特征，接触式测量如全站仪测距精度可达毫米级，非接触式遥感数据受大气干扰与几何畸变影响精度降至分米至米级，地球物理反演结

果受模型简化与多解性制约存在相对误差。此外，数据更新频率差异明显，地质勘探数据在勘探阶段集中获取后长期稳定，遥感数据可按日或周级更新，而开采监测数据实现实时或准实时采集。

## 2 多源数据融合关键技术

### 2.1 数据预处理

数据预处理是多源测量数据融合与矿山地质三维建模的关键基础环节，其核心目标在于消除数据噪声、统一空间基准并实现语义一致性，为后续建模提供高质量数据输入。(1) 数据清洗通过滤波算法与统计方法去除原始数据中的随机误差与系统偏差，针对地质钻孔数据中的深度测量漂移、地球物理数据中的仪器噪声以及遥感影像中的像素级异常值，采用滑动平均滤波、小波变换或基于邻域统计的离群点检测方法进行修正，同时结合地质先验知识对明显违背岩性分布规律的异常采样点进行人工复核与剔除，确保数据可靠性。(2) 坐标统一与空间配准通过几何变换将不同来源数据映射至同一坐标框架，针对点云、网格、矢量等多元数据类型，首先利用控制点或基准面进行粗配准，消除全局平移、旋转与缩放差异，随后采用ICP算法通过迭代最近点搜索实现精细配准，对于特征明显的地质体边界或人工地物，提取线特征或面特征进行基于几何约束的匹配优化，提升配准精度至亚米级甚至厘米级。(3) 语义对齐聚焦于解决不同数据源间地质概念与属性编码的异构性，针对地质勘探中的岩性分层代码、地球物理反演中的物性参数以及遥感解译中的地物类别，建立统一的地质语义本体库，通过定义标准化的分层命名规则与属性映射关系表，将离散的地质描述转换为结构化知识图谱。对于存在多义性的术语采用上下文关联分析与专家知识推理进行消歧，并开发自动化语义转换工具，支持钻孔数据与三维地质模型间的岩性属性自动传递、地球物理异常区与地

质构造的智能关联，确保多源数据在地质解释层面的一致性。

## 2.2 融合方法与模型

(1) 基于几何的融合方法侧重空间形态的统一表达，点云与体素化建模通过将离散点数据转换为规则或非规则体素网格，利用八叉树结构实现空间分割与层次化存储，在保留地质体边界细节的同时降低计算复杂度，适用于复杂断层与矿体形态的精细化建模。TIN构建则基于邻近点集生成不规则三角面片，通过Delaunay准则优化拓扑关系，有效拟合起伏地表与地层界面，结合约束条件处理可保留钻孔轨迹或地质剖面等关键特征，形成连续且拓扑一致的三维表面模型。(2) 基于属性的融合方法聚焦物理参数的协同反演，克里金插值利用空间自相关性构建变异函数模型，通过加权平均实现属性场的连续估计，适用于地球物理数据的平滑插值。神经网络反演通过构建输入与输出间的非线性映射关系，利用反向传播算法优化网络参数，可处理高维异构数据并捕捉复杂地质规律。多物理场耦合则通过建立地质体物性参数与多源探测响应的定量关系，采用有限元或有限差分法求解耦合方程组，实现多物理场协同反演与属性场重建。(3) 混合融合方法整合几何与属性信息并量化不确定性，贝叶斯框架通过先验分布与似然函数构建后验概率模型，结合马尔可夫链蒙特卡洛采样实现参数估计与不确定性传播，适用于多源数据置信度差异较大的场景。D-S证据理论通过基本概率分配函数融合多源证据，利用Dempster组合规则处理冲突信息，生成支持不同地质假设的信任度函数，有效解决数据源可靠性不均的问题<sup>[2]</sup>。模糊逻辑集成则通过隶属度函数量化地质属性的模糊性，建立多源数据与地质解释间的模糊规则库，采用加权平均或最大隶属度原则生成综合解释结果，适用于语义异构性强的地质概念融合。

## 2.3 不确定性量化与权重分配

(1) 数据置信度评估需综合考虑精度、可靠性与时效性三方面因素：第一，精度通过仪器标定误差、采样分辨率及数据处理算法误差传递分析确定，如激光雷达点云的高程精度受测距误差与扫描角影响，地球物理反演结果的精度受模型复杂度与正则化约束制约。第二，可靠性由数据来源的可信度、采集环境稳定性及质量控制流程决定，如长期监测数据的可靠性高于单次探测数据，受人为干扰少的区域数据可靠性更高<sup>[3]</sup>。第三，时效性反映数据对当前地质状态的表征能力，实时监测数据时效性最强，历史勘探数据需结合地质演化速率进行时效性衰减校正。(2) 动态权重调整算法通过量化数据置信度

与地质特征相关性实现权重优化，熵权法基于信息熵理论计算各数据源的权重，将数据离散程度作为置信度指标，离散程度高的数据源赋予更高权重以保留细节信息，同时通过熵值修正避免单一数据主导融合结果。机器学习优化方法利用神经网络或支持向量机构建数据置信度与融合权重的非线性映射关系，以模型预测误差最小化为目标函数，通过梯度下降或遗传算法迭代优化权重参数，可自适应处理多源数据间的复杂交互作用。(3) 动态调整机制通过实时监测数据更新或模型性能反馈实现权重迭代优化，如采用滑动窗口法计算近期数据权重，或基于模型验证误差反向调整数据源权重，确保融合结果始终反映最新地质信息。

## 3 矿山地质三维建模方法

### 3.1 建模流程设计

(1) 数据分层与地质体识别是建模的基础环节，首先依据地质勘探数据中的岩性编码、地球物理反演的物性参数及遥感解译的地貌特征，对原始数据进行地质语义分层，将空间数据划分为断层、矿体、围岩等关键地质体类别，通过聚类分析或机器学习算法提取各层数据的特征模式，结合地质先验知识识别断层产状、矿体形态及围岩接触关系。(2) 表面模型构建基于分层后的地质体边界数据，采用TIN或网格化方法实现曲面拟合。对于地形表面或地层界面等连续曲面，通过Delaunay三角剖分生成不规则三角网，利用最小二乘法优化三角面片形态，确保曲面平滑且忠实于原始数据<sup>[4]</sup>。对于存在断裂或褶皱的复杂地质界面，引入约束条件控制三角网生成，保留断层线或褶皱轴线等关键地质特征。(3) 体模型构建在表面模型基础上扩展三维空间，体素化方法将建模区域划分为规则立方体单元，通过空间索引技术快速定位地质体所在体素，结合属性插值赋予每个体素岩性、品位等地质参数，适用于矿体储量计算与空间分析。三维栅格方法则构建覆盖整个建模区域的正交栅格，利用克里金插值或神经网络反演计算每个栅格单元的地质属性，支持多物理场耦合分析与动态更新，最终形成包含几何形态与属性分布的完整三维地质体模型。

### 3.2 动态建模与更新

(1) 实时数据接入通过物联网传感器网络与无人机巡检系统实现多源异构数据的实时采集与传输。地下深部部署的应力计、位移传感器及水文监测仪以毫秒级频率上传岩体变形与地下水动态数据，地表布设的GNSS基站与倾斜仪持续监测边坡位移，无人机搭载激光雷达与多光谱相机定期扫描矿区地形，获取毫米级精度的地表形变信息与植被覆盖变化。所有数据通过5G或LoRa无

线通信协议传输至边缘计算节点进行预处理,剔除异常值并完成坐标统一后,实时注入三维建模平台,确保模型反映最新地质状态。(2)模型增量更新策略根据数据变化范围与地质影响程度动态选择局部修正或全局重构模式,当实时数据仅涉及局部区域且地质结构未发生根本性改变时,采用局部修正方法,通过定位受影响体素或三角面片,利用径向基函数插值或移动最小二乘法调整局部几何形态,同步更新关联属性。若数据反映全局性地质事件或累计误差超过阈值时,触发全局重构流程,重新执行数据分层、地质体识别与表面体模型构建全流程,此时利用历史模型作为先验约束,通过贝叶斯更新或迁移学习加速新模型训练,确保地质特征连续性。增量更新过程中引入版本控制机制记录每次修改的时间、范围与依据,支持模型回滚与历史状态对比分析。(3)为平衡更新精度与效率,开发自适应更新算法。根据数据置信度与地质复杂度动态调整更新粒度,在地质活动剧烈区域采用高分辨率局部更新,在稳定区域延长更新周期,并利用并行计算与GPU加速优化大规模体模型重构速度,已实现分钟级响应的动态建模能力,为矿山安全预警与开采优化提供实时决策支持。

### 3.3 可视化与交互技术

(1)三维渲染引擎选用Unity或Cesium等主流平台实现多尺度地质模型的高效渲染,Unity凭借其强大的实时渲染能力与跨平台兼容性,支持矿体、断层及围岩等地质体的材质贴图与光照效果定制,通过LOD技术根据视距动态调整模型精度,在保证流畅性的同时呈现地下巷道岩壁的纹理细节与矿体品位的渐变分布。Cesium则专注于Web端大规模地形与地质体的三维可视化,利用流式加载技术实现TB级模型的在线浏览,结合地形夸张与剖面切割功能,支持用户从不同视角分析矿区地质构造与开采影响范围。(2)虚拟现实技术通过构建全沉浸式虚拟矿山环境,使用户以第一视角穿越地下巷道或飞越矿区地表,HTC Vive或Oculus Rift等设备结合手柄与

体感反馈装置,实现钻孔取样、岩性识别等操作的虚拟仿真,在安全培训中模拟顶板冒落、瓦斯突出等灾害场景,提升参训人员的应急反应能力<sup>[5]</sup>。VR环境还支持多用户协同设计,不同专业的工程师可在同一虚拟空间中标注矿体边界、调整开采方案,实时共享修改结果并讨论技术细节,突破地理限制实现远程协作。(3)增强现实技术将地质模型叠加至真实物理场景,通过Microsoft HoloLens或iPad Pro等设备扫描矿区地表特征点,自动匹配预建的三维地质模型,在真实巷道壁上投影显示隐伏断层走向或邻近矿体位置,辅助现场人员快速理解地质关系。AR应用还支持实时数据融合,将传感器监测的应力、位移等参数以动态标签形式标注在对应地质体上,帮助工程师直观判断岩体稳定性。

### 结语

综上所述,本文针对矿山地质三维建模中的多源数据融合与动态更新问题,提出了一套系统化的建模方法,该方法在断层识别准确率、矿体边界优化及动态响应速度上均优于传统方法,能够为矿山开采设计、资源储量评估及灾害预警提供高精度、实时化的地质信息支持。未来,研究应融合更多类型数据,实现地质模型与开采工艺、设备状态的深度耦合,推动矿山向全智能化方向演进。

### 参考文献:

- [1]赵龙贤,史维鑫,孙华峰,等.固体矿产三维地质建模研究现状及应用前景[J].山东国土资源,2024,40(12):15-26.
- [2]王领桂,汪蒙,高川.三维地质建模在煤矿地质可视化中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2024,(13):190-192.
- [3]郭福钟,郑博文,祁生文,等.三维地质建模技术与方法综述[J].工程地质学报,2024,32(03):1143-1153.
- [4]吴锋.矿山低空航空摄影测量中多源数据融合方法研究[J].世界有色金属,2021,(13):42-43.
- [5]李海平.数字矿山中三维地质建模方法与应用[J].世界有色金属,2025,(07):58-60.