

重磁联合反演在隐伏金属矿资源勘查中的分辨率提升研究

汝亮

山东省煤田地质规划勘察研究院

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2185

[摘要] 鉴于浅部矿产资源持续枯竭,深部隐伏金属矿的勘查成为矿产资源勘探关键趋势。重磁联合反演技术,在深部矿产资源勘查当中有着关键的意义,基于此,本文对重磁联合反演分辨率提升于隐伏金属矿勘查工作的重要意义做了系统分析。全面归纳了分辨率提升所需关键技术,包括含有数据预处理及质量的控制、多元数据交融、高精度反演算法运用、约束条件的集成、人工智能辅助解析等五类技术,就各项技术的特点以及应用方面的瓶颈,提出了相应的优化途径,为重磁联合反演在深部隐伏矿产勘查应用效果的提升,给予理论与技术层面支撑。

[关键词] 重磁联合反演; 隐伏金属矿; 分辨率提升; 地球物理勘探; 深部找矿

中图分类号: P183 文献标识码: A

Study on resolution improvement of heavy magnetization joint inversion in hidden metal mineral resources exploration

Liang Ru

Shandong Geological Planning and Investigation Institute of Coal Field

[Abstract] With the continuous depletion of shallow mineral resources, deep concealed metal deposits have become a critical focus in mineral exploration. Heavy-Magnetic (HM) joint inversion technology plays a pivotal role in deep mineral resource exploration. This paper systematically analyzes the significance of enhancing resolution through HM joint inversion for concealed metal deposit exploration. It comprehensively summarizes five key technologies required for resolution improvement: data preprocessing and quality control, multi-source data fusion, high-precision inversion algorithms, constraint integration, and AI-assisted analysis. The paper proposes optimization approaches for each technology's characteristics and application bottlenecks, providing theoretical and technical support to enhance the effectiveness of HM joint inversion in deep concealed mineral exploration.

[Key words] heavy magnetism combined inversion; hidden metal ore; resolution enhancement; geophysical exploration; deep prospecting

引言

我国金属矿产资源需求持续上扬,浅部容易辨认的矿床日渐式微,保障国家资源安全战略重点聚焦于深部隐伏矿产资源勘查。其中重磁勘探方法凭借探测深度深、横向分辨率高、成本相对低廉等优点,对深部找矿意义重大。并且重磁联合反演技术借助对重力场与磁场信息的综合运用,可更精准地揭示地下地质体空间分布特点。伴随勘探深度的进一步增加,对矿体定位精度的要求愈发提高,传统重磁反演方法在垂向分辨率提升、异常体边界精准识别、多解性有效控制等方面面临重大挑战。因此怎样有效增进重磁联合反演分辨率水平,已成为影响深部隐伏矿产勘查成效的关键技术症结。

1 重磁联合反演分辨率提升在隐伏金属矿勘查中的意义

1.1 提高深部隐伏矿体识别精度

深部隐伏金属矿体往往有着较大的埋藏深度、规模相对小,地表物探异常表现得微弱,受多种地质因素的干扰,提升重磁联合反演的分辨率,可明显提升对深部地质体边界的勾勒能力,提升对矿体顶底板界面、厚度的多样变化、产状等关键参数的反演精度,在山东省胶东地区开展深部金矿的勘查工作期间,高分辨率重磁联合反演技术可鉴别埋深大于1000米的矿化蚀变带,该类精细化的地球物理解析成效,为后续钻探验证给出精准靶区定位^[1]。

1.2 降低勘查风险与投资成本

隐伏金属矿勘查具有高投入与高风险的基本属性,钻探成本呈指数级的增长态势,提升重磁联合反演分辨率,可更精准地测定矿体空间位置,降低无效钻孔频次,依靠高精度的地球物理

反演成果,能对钻孔布置方案做进一步优化,实现以最小的工程规模获取最大地质信息量。以河北省承德地区铁矿勘查为例,传统方式钻探见矿率约30%,当采用高分辨率重磁联合反演技术后,提高至75%以上,此项技术升级大幅减少了勘查方面的资金占用,也让找矿周期得以缩短^[2]。

1.3 推动地球物理勘探技术创新发展

对重磁联合反演分辨率提升的研究,推动了地球物理勘探理论方法及技术装备创新进程,从理论的方面考量,带动了正反演算法革新、多参数联合反演理论的完善;就设备层面而言,促进了高精度重磁测量仪器研发、大数据处理平台建设工作开展,这些创新成果不仅应用于矿产勘查范畴,还延伸至工程地质、环境地质等多个范畴,靠着持续的技术创新努力,我国地球物理勘探技术水平达成整体提升,增强我国在深部资源勘查范畴的核心竞争实力^[3]。

1.4 支撑国家矿产资源安全保障战略

矿产资源是国民经济发展的物质凭借,深部找矿是守护国家资源安全的战略手段,重磁联合反演分辨率提升后,直接关联深部矿产资源发现效率与资源量评估精准与否,依托技术突破,能更有效地探明深部资源潜力。在山东、河北等关键成矿地带,采用高分辨率重磁联合反演技术开展工作,新识别出多个大中型隐伏矿床,推广应用此类技术成果,在落实新一轮找矿突破战略行动、搭建国家资源安全保障体系方面有重大战略意义^[4]。

2 重磁联合反演分辨率提升技术种类分析

2.1 数据预处理与质量控制技术

数据预处理及质量把控是提高重磁联合反演分辨率的基础步骤,该技术体系含有观测数据的噪声消除、异常分拆、数据网格化等关键操作,针对重磁数据内出现的噪声干扰,采用如小波变换、经验模态分解之类的信号处理手段,提取可用信号。依靠位场分离的相关技术,实现区域场、局部场的合理分离,展现目标地质体局部异常特征的显著度,处于数据网格化实施阶段,采用像克里金插值这样的高精度算法,让数据空间分布维持连续特性。

2.2 多元地球物理数据融合技术

多元地球物理数据融合技术以整合重力、磁法、电法等多种地球物理方法观测数据为途径,达成信息互补及约束强化,该技术的核心所在是构建不同物性参数之间的耦合联系,依靠岩石物性统计分析,归纳密度、磁化率等参数之间的经验关系。以采用交叉梯度约束等联合反演算法的方式,保证各方法反演结果的一致性达成,采用多尺度数据融合的办法,完成从区域空间到局部空间的地质信息筛选提取。

2.3 高精度反演算法优化技术

高精度反演算法优化技术借助改良传统反演算法数学模型,增进反演结果的精度及稳定性,就正演计算而言,采用高阶有限元等数值途径提升场值计算准确性,从反演算法角度,促成聚焦反演、稀疏反演等新型算法的诞生。获得更具辨识度的地质体

边界,依靠引入正则化举措,兼顾反演的分辨率和稳定性,采用全局性的优化算法,冲破局部极值困境,提升反演的全局收敛能力。

2.4 约束条件集成反演技术

约束条件集成反演技术借助引入地质、钻探等先验信息作为约束,改善反演的多解局面,此技术把各类约束信息转变为数学范畴的约束条件,纳入反演流程,地质约束涵盖地层界面、断层位置等内容,支配反演的结构属性。钻孔约束采用已知的钻孔地质数据,用作刚性约束要素,物性约束凭借岩石物性测试数据,把控反演参数取值的范围大小,采用多种约束条件的综合利用,增强反演准确度。

2.5 人工智能辅助解释技术

人工智能辅助解释技术借助机器学习、深度学习之类方法,实现重磁数据的智能加工,该技术借助神经网络呈现出的非线性映射能力,设立地球物理场跟地质参数的关联模型,实施大量样本数据的训练工作。引导神经网络把握场-源对应关系的规律,采用卷积神经网络以识别异常,采用循环神经网络来开展空间序列数据的处理工作,采用迁移学习手段,把成功经验迁移至新勘探区域。

3 重磁联合反演分辨率提升技术优化策略

3.1 数据预处理与质量控制的标准化流程与精度提升方案

要保障反演质量,数据预处理与质量控制标准化流程的建立必不可少,创建严苛的野外数据采集制度,涉及测点布设疏密程度、仪器校准频率、环境干扰监测方面的技术要求,从源头处保障数据质量可靠,创建多级别的质量把控体系,采用交叉验证、统计分析等办法找出异常数据点,剔除粗差及系统性误差要素。开展自适应去噪算法的开发,按照噪声特性自动选定恰当滤波参数,去除噪声时最大程度留存有效信号成分,就山东省、河北省等地区特殊地质环境而言,开发契合需求的预处理技术,诸如考虑到地形起伏态势的曲面延展方法,确立数据质量衡量指标体系,囊括诸如信噪比、分辨率的定量指标,为后续各类处理提供可靠的凭据支撑。

3.2 多元地球物理数据融合的系统集成与协同优化方法

构建多维度地球物理数据融合的集成式系统平台,达成不同出处、不同尺度数据的有效聚合,创建通用型的数据格式转换端口,应对不同仪器、不同阶段数据的兼容状况,构建多源数据时空配准算法体系,依托坐标转换以及插值的手段,保证不同方法所观测数据在空间位置方面的一致。拟定分层次融合举措,完成不同层次(包含数据级、特征级、决策级)的信息融合,全面发掘各层次融合的长处,研发协同优化类算法,运用迭代优化持续调节各方法的权重系数及其约束关系,就山东省胶东金矿、河北省冀东铁矿等典型矿集区而言,搭建针对性的数据融合模型库,收集成功实施经验。

3.3 高精度反演算法优化的数学模型改进与计算效率提升

开发基于压缩感知理论的稀疏反演相关方法,借助地质体分布稀疏这一特性提高反演的精确分辨能力,构建能动态自适

应的正则化模型,基于数据特征与反演进程对正则化参数做动态调整,实现分辨率跟稳定性的极致平衡,实施多尺度反演策略开发。从粗网格起始朝着细网格不断细化,在维持稳定的基础上提高空间分辨率,从计算效率的视角出发,采用GPU并行处理技术,把具有高计算密度的任务分派到图形处理器执行,极大提升运算速率,构建预条件共轭梯度之类的快速迭代算法,借助优化迭代路径减少反演的迭代次数,加快收敛的步伐。

3.4 约束条件集成反演的地质信息融合与参数优化策略

建成地质信息数字化、参数化的体系格局,把定性地质认知转变为定量约束条件,搭建地质资料知识库体系,系统把山东省、河北省等地区的地质资料收集整理好,涉及地层的排列样式、构造的格架体系、岩浆岩的分布范围等资讯。开发灵活的约束施加模式,允准不同种类、可靠度相异的约束条件以恰当方式参与反演环节,构建约束权重自适应调校算法,按照反演残差以及约束达成程度动态调整权重系数,使用蒙特卡罗模拟等不确定性分析手段,以定量方式评估约束条件对反演结果的影响水平。

3.5 人工智能辅助解释的深度学习模型构建与应用创新

构建服务于重磁数据阐释的深度学习模型格局,涉及异常查找、目标判别、参数反演相关专用模型,构建依托区域地质特性的迁移学习架构,使新勘探区迅速与其他地区的成功模型相适配,开发大规模训练样本库体系。借正演模拟、实测数据、钻探验证等多元方式获高质量样本,构建多任务学习架构,同步开

展异常分类、深度估计、边界识别等多项工作,增进模型综合能力,建设人机协同互补的解释平台,把人工智能计算能力跟专家地质经验融合起来,达成优势的互补融合。

4 结语

重磁联合反演分辨率增强技术的探究与运用,对增强深部隐伏金属矿勘查成效意义重大。借助数据预处理与质量把控、多元数据整合、高精度反演算法、约束条件集成、人工智能辅助解读等关键技术的综合运用与不断优化,能极大增强重磁联合反演的分辨率及可靠性。在山东、河北等主要成矿区的应用实践表明,技术进步为深部找矿提供了坚实的技术后盾。

[参考文献]

- [1]关淑艳,张震,毕再星,等.重磁联合反演在隐伏矿产勘查中的应用[J].吉林地质,2023,42(01):46-49.
- [2]柳建新,赵然,郭振威.电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J].地球物理学进展,2019,34(01):151-160.
- [3]明彦伯.球坐标系重磁数据高分辨率快速联合反演方法与极地地区壳幔结构研究[D].吉林省:吉林大学,2024.
- [4]李晟宸.深部金属矿产资源勘查技术与应用[J].冶金与材料,2025,45(05):88-90.

作者简介:

汝亮(1981--),男,汉族,安徽亳州人,硕士研究生,高级工程师,现从事地球物理勘探工作。