

高精度重力与电磁法联合反演的进展及应用

——以金矿深部隐伏矿体探测为例

冯坚 孙晓旭

辽宁省地质矿产研究院有限责任公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i4.1792

[摘要] 本文综述了高精度重力法与电磁法联合反演技术在金矿深部隐伏矿体探测中的最新进展及其应用效果。面对浅部矿产资源日益枯竭的现状,深部探测成为矿产资源勘查的重要方向,并且由于单一地球物理方法在复杂地质条件下的局限性,使得高精度重力与电磁法联合反演技术应运而生,其主要是通过综合利用两种方法的互补优势,来提高探测精度与减少解释多解性。基于此,本文首先概述了高精度重力法和电磁法的基本原理、技术特点及其在金矿探测中的应用现状;随后深入探讨了高精度重力与电磁法联合反演的理论基础、数据处理与融合技术,以及近年来在关键技术上的突破,为矿产资源勘探开发的进一步深入提供了参考。

[关键词] 高精度重力法; 电磁法; 联合反演; 金矿; 探测技术

中图分类号: P412 **文献标识码:** A

Progress and application of high-precision gravity and electromagnetic joint inversion

——Taking the exploration of hidden ore bodies in deep gold mines as an example

Jian Feng Xiaoxu Sun

Liaoning Geological and Mineral Research Institute Co., Ltd

[Abstract] This article reviews the latest progress and application effects of high-precision gravity method and electromagnetic method combined inversion technology in the detection of hidden ore bodies in deep gold mines. Faced with the increasing depletion of shallow mineral resources, deep exploration has become an important direction for mineral resource exploration. Due to the limitations of a single geophysical method in complex geological conditions, high-precision gravity and electromagnetic method combined inversion technology has emerged, aiming to improve detection accuracy and reduce interpretation ambiguity by comprehensively utilizing the complementary advantages of the two methods. This article first outlines the basic principles, technical characteristics, and application status of high-precision gravity and electromagnetic methods in gold exploration; Subsequently, the theoretical basis, data processing and fusion techniques of high-precision gravity and electromagnetic joint inversion were deeply explored, as well as breakthroughs in key technologies in recent years, providing reference for further exploration and development of mineral resources.

[Key words] high-precision gravity method; Electromagnetic method; Joint inversion; gold mine; Detection technology

引言

随着全球经济的快速发展,使得矿产资源的需求日益增长,导致地表及浅部矿产资源已逐渐趋于枯竭,迫使矿产勘查工作向深部拓展。金矿作为重要的战略金属资源,其深部隐伏矿体的探测对于保障国家资源安全、促进经济发展具有重要意义。然

而深部矿体探测面临诸多挑战,使得传统单一的地球物理方法难以满足高精度探测的需求,因此高精度重力与电磁法联合反演技术应运而生,并且成为解决深部隐伏矿体探测难题的有效手段。本文旨在综述该技术在金矿深部隐伏矿体探测中的最新进展及其应用,为矿产资源勘查提供理论支持和技术参考。

1 高精度重力法概述

1.1 重力法基本原理

重力法作为地球物理勘探中的一种重要手段,其基本原理基于牛顿的万有引力定律,在地球表面及近地空间,任何物体都受到地球引力的作用,这种引力作用在空间上形成的场即为重力场。重力场的变化与地下岩矿体的密度分布密切相关,因为不同岩矿体的密度存在差异,它们对周围重力场的贡献也不同,当存在高密度矿体时其周围的重力场会相对增强,形成所谓的“重力正异常”;反之低密度区域则会引起重力场的减弱,形成“重力负异常”。

1.2 高精度重力勘探技术的发展

近年来随着科学技术的不断进步,在仪器设备方面,现代重力仪的精度和稳定性显著提高,能够捕捉到更加微弱的重力信号变化,例如绝对重力仪和相对重力仪的精度已分别达到微伽(μGal)和纳伽(nGal)级别,极大地提高了重力测量的精度和可靠性。

同时,自动化、智能化的数据采集系统使得大规模、高效率的重力测量成为可能,而先进的数据处理技术和算法,如小波分析、滤波技术、重力梯度测量等,则进一步提高了重力异常数据的信噪比,降低了干扰因素对结果的影响。

1.3 重力法在金矿探测中的综合应用

1.3.1 岩性变化的识别与有利成矿岩性组合区分

在金矿探测过程中,地下岩性的不同,尤其是其密度的显著差异,会在重力场上产生可观测的响应特征,地质人员通过详细分析重力测量数据,能够识别出这些由岩性变化引起的重力异常,进而区分出有利于金矿成矿的岩性组合。

1.3.2 地下构造特征的揭示与金矿控矿因素探索

重力法不仅在岩性识别上有所建树,还能深入揭示地下构造特征如断裂、褶皱等,这些构造是地质作用过程中形成的重要结构,它们不仅控制了岩浆活动和矿液运移的路径,还常常作为金矿等金属矿产的储矿空间,通过重力测量地质人员可以准确地描绘出这些构造的形态、规模和分布规律,从而深入探索金矿的控矿因素。

1.3.3 矿体位置与规模的初步推断

虽然重力法无法直接确定矿体的具体形态和产状,但它却能在一定程度上辅助确定矿体的大致位置与规模,重力异常往往与地下密度异常体(如矿体)的存在密切相关,通过对重力异常数据的综合分析,可以初步推断出矿体可能的空间位置和规模范围,这一信息有助于地质人员有针对性地部署勘探工程提高找矿效率。

1.3.4 综合地球物理方法的应用与三维地质结构模型的构建

为了更准确地确定矿体的位置和规模,重力法常常需要与其他地球物理方法(如电磁法、地震勘探等)进行综合应用,这些方法各自具有独特的探测能力和优势,通过相互补充和验证可以构建出更加完整、准确的地下三维地质结构模型,在这一模型

中矿体的空间位置、形态、产状以及与其他地质要素的关系得以清晰展现,为金矿资源的评价和开发提供了科学依据^[1]。

2 电磁法概述

2.1 电磁法基本原理

电磁法作为地球物理勘探领域中的一大分支,其理论基础深深根植于电磁感应原理,这一原理指出当变化的磁场在空间中传播时,会在导体中产生感应电流,进而形成二次磁场。电磁场的分布特征复杂多变,既受到地下介质电导率、磁导率等物性参数的影响,也随频率、时间等外部条件的改变而变化,在金属矿产勘查中电磁法正是利用这种电磁感应现象,通过观测和分析由地下矿体等导体激发的二次磁场,来推断地下地质结构和矿体分布情况的。电磁法在金属矿产勘查中的应用基础在于金属矿体通常具有良好的导电性,能够在电磁场作用下产生显著的感应响应,这种响应不仅包含了矿体的位置信息,还反映了其规模、形态及电性特征。

2.2 电磁法分类及特点

电磁法根据观测参数和测量方式的不同可以分为多种类型,其中最具代表性的包括频率域电磁法(如大地电磁法MT、可控源音频大地电磁法CSAMT)和时间域电磁法(如瞬变电磁法TEM)。

2.2.1 频率域电磁法:这类方法主要通过测量不同频率下电磁场的响应来推断地下地质结构,MT法利用天然电磁场源探测深度大,适合进行大范围的区域地质调查;而CSAMT法则采用人工可控源,通过调节发射频率来获取更丰富的地下信息,具有分辨率高、抗干扰能力强等优点。

2.2.2 时间域电磁法:TEM法则侧重于观测电磁场随时间的变化过程,通过向地下发送一次脉冲电流并测量由地下介质感应产生的二次磁场随时间的衰减曲线,可以反演出地下电性结构,TEM法具有探测深度适中、对低阻体敏感、施工灵活等特点,特别适用于复杂地形和地质条件下的矿产勘查。

2.3 电磁法在金矿深部隐伏矿体探测中的应用

2.3.1 探测深度优势: 穿透覆盖层,直达深部矿体

在金矿深部隐伏矿体的勘探中电磁法以其卓越的探测深度著称,随着勘探技术的不断进步,现代电磁法设备已能穿透数千米厚的覆盖层直接获取深部矿体的信息,这一能力对于解决金矿勘查中普遍存在的“攻深找盲”难题具有不可估量的价值,它不仅拓宽了勘探的视野还极大地提高了发现深部矿藏的可能性,为金矿资源的可持续开发提供了有力支持。

2.3.2 电阻率成像: 精准刻画矿体电性特征

电磁法的另一大优势在于其能够精确反映地下电阻率的分布特征。金矿体通常具有良好的导电性,这一特性在电磁场中会产生显著的响应,通过收集和分析电磁场数据地质人员可以构建出地下电阻率的三维图像,清晰地勾勒出矿体的边界、形态以及电性特征,这一过程不仅提高了矿体识别的准确性,还为后续的三维建模、资源量估算及开采方案设计提供了宝贵的地质信息。

2.3.3 穿透高阻层: 克服复杂地质条件的挑战

在地质条件复杂的矿区, 高阻层的存在往往成为其他物探方法难以逾越的障碍, 这些高阻层会屏蔽或干扰地下信号的传播, 使得深部矿体的信息难以被有效探测。然而电磁法凭借其良好的穿透能力, 能够在一定程度上克服这一难题, 它能够有效穿透高阻层, 捕捉到深部矿体产生的微弱电磁信号, 从而揭示出隐藏在深部之下的矿体信息, 这一特点使得电磁法在复杂地质条件下的金矿深部隐伏矿体探测中更具竞争力。

虽然电磁法在金矿深部隐伏矿体探测中表现出色, 但其并非孤立的方法, 在实际应用中电磁法常常需要与其他勘探方法(如重力法、地震勘探等)相结合, 形成综合勘探体系。通过不同方法之间的优势互补, 可以进一步提高探测的精度和可靠性, 减少解释的多解性, 为金矿资源的勘探开发提供更加全面、准确的地质信息^[2]。

3 高精度重力与电磁法联合反演技术

3.1 联合反演的理论基础

高精度重力与电磁法联合反演技术其理论基础根植于两种地球物理方法的互补性之上。重力法通过测量地球表面或空中由地下密度差异引起的重力异常, 来推断地下地质体的分布和性质, 而电磁法则利用地下岩矿石的导电性、导磁性差异, 通过观测和分析电磁场的变化来揭示地下结构。这两种方法各自具有独特的优势同时也存在一定的局限性, 重力法对于大尺度、低密度的地质体敏感, 而电磁法则能更精细地反映高导电性矿体的存在, 因此将两者结合进行联合反演, 能够充分利用各自的信息优势, 实现对地下地质结构更全面、更准确的成像。

联合反演的数学模型与算法是实现这一目标的关键, 它要求建立一个能够同时处理重力与电磁数据的统一框架, 通过数学手段将两种不同物理量的测量数据融合起来, 形成对地下地质体更一致的描述, 这一过程中需要解决数据标准化、误差分配、权重设置等一系列复杂问题, 确保联合反演结果的可靠性和稳定性, 同时算法的选择也至关重要, 高效的优化算法能够显著提升反演的速度和精度。

3.2 数据处理与融合技术

数据处理与融合技术是确保反演成功的重要环节, 首先需要对原始数据进行严格的预处理和质量控制, 包括去噪、校正、插值等步骤, 以消除或减弱各种干扰因素对测量结果的影响, 这一过程对于提高数据质量和可靠性至关重要, 数据融合技术旨在将经过预处理的重力与电磁数据有效地结合在一起, 形成一个综合的数据集。这一过程中需要充分考虑两种数据的物理意义和相关性, 采用合适的数据融合策略以确保融合后的数据能够真实反映地下地质结构的信息, 在此基础上利用联合反演算法对融合后的数据进行处理, 通过迭代优化等数学手段, 逐步逼近地下地质体的真实形态和物性参数。

3.3 关键技术突破: 高精度重力与电磁法联合反演技术的飞跃

3.3.1 三维数值模拟技术的革新

近年来三维数值模拟技术在高精度重力与电磁法联合反演中扮演了至关重要的角色, 该技术通过高度精细化的数学模型, 能够模拟出地下复杂地质结构(如断裂带、褶皱、岩性变化等)对重力场和电磁场的综合影响。这一过程不仅涉及复杂物理场的数值计算, 还需考虑多种介质间的相互作用, 以及地表起伏、地形变化等因素对观测数据的影响。通过不断优化算法和增强计算能力, 三维数值模拟技术现已能够生成更加贴近实际地质情况的正演模型, 为后续的反演提供了坚实的数据基础^[3]。

3.3.2 三维反演技术的突破

与三维数值模拟相辅相成的是三维反演技术, 它在联合反演中实现了从观测数据到地下地质结构的高精度重建, 该技术利用先进的数学方法和优化算法, 在三维空间内对地下地质体的物性参数(如密度、电导率等)进行反演计算, 从而生成高精度的地下结构图像。这一技术突破不仅提高了反演的精度, 还使得对地下复杂结构(如深部矿体、隐伏断裂等)的精细刻画成为可能, 三维反演技术的应用也促进了地球物理勘探从二维向三维的全面升级。

3.3.3 多源数据联合反演算法的优化

面对地球物理数据的多样性和复杂性, 多源数据联合反演算法的优化成为当前研究的热点。传统算法在处理多种类型(如重力、电磁、地震等)和多尺度(如不同分辨率、不同深度范围)的数据时往往力不从心, 为此研究者们积极探索新的算法思路和技术手段, 如引入人工智能和机器学习技术来自动识别和提取数据中的有用信息, 优化反演过程中的参数选择和迭代策略; 同时开发多尺度、多分辨率的反演策略以更好地适应不同数据源的特点和互补性。这些创新不仅提高了联合反演的效率和准确性, 还为未来地球物理勘探的智能化发展开辟了新途径。

4 结论

综上所述, 高精度重力与电磁法联合反演技术在金矿深部隐伏矿体探测中展现出了显著的优势和潜力。通过综合利用重力法与电磁法的互补优势, 该技术有效提高了探测精度, 减少了解释多解性, 为深部矿体的精确定位提供了有力支持。在实际应用中联合反演技术不仅成功揭示了多个金矿深部隐伏矿体的存在, 还准确推断了矿体的规模、形态及产状, 为矿产资源的后续开发和利用奠定了坚实基础。

[参考文献]

- [1]李建国, 赵斌, 孙少伟, 等. 地震初至波速度层析反演在贵金属矿探测中的应用[J]. 现代地质, 2012, 26(6): 7.
- [2]常慧娟, 陈建平, 于萍萍. 矿床模型指导下的隐伏矿体正反演预测研究[J]. 地质学报, 2015, 39(3): 10.
- [3]颜廷杰. 江西朱溪钨铜多金属矿深部找矿地球物理方法综合研究[D]. 吉林大学, 2017.