

# 隐蔽致灾地质体电磁异常特征与辨识方法研究

于家鑫

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2367

**[摘要]** 在工程建设与地质灾害防治领域,隐蔽致灾地质体因其赋存状态的隐蔽性与致灾机理的复杂性,已成为威胁工程安全与人民生命财产安全的重大隐患。高效、精准地探测与识别此类地质体是当前地质工程与地球物理勘探面临的核心技术挑战。电磁勘探方法以其对地下电性结构敏感、探测深度大、效率高等优势,成为揭示隐蔽致灾地质体空间展布与物性特征的关键技术手段。然而,隐蔽致灾地质体电磁响应的复杂性、多解性以及背景干扰等因素,制约了其探测精度与辨识可靠性。因此,系统研究不同类型隐蔽致灾地质体(如富水破碎带、岩溶塌陷、老空区、含导水构造等)的电磁异常特征,并发展与之相适应的、高分辨率的综合辨识方法体系,对于提升地质灾害预警预报能力、保障重大工程安全具有迫切的现实需求与深远的科学意义。

**[关键词]** 隐蔽致灾地质体; 电磁勘探; 异常特征; 正演模拟

**中图分类号:** P25 **文献标识码:** A

## Research on Electromagnetic Anomaly Characteristics and Identification Method of Hidden Disastrous Geological Masses

Jiaxin Yu

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd.

**[Abstract]** In the field of engineering construction and geological disaster prevention, concealed disaster-causing geological bodies have become major hazards threatening engineering safety and public life and property security due to their concealed occurrence states and complex disaster mechanisms. Efficient and accurate detection and identification of such geological bodies represent core technical challenges in current geological engineering and geophysical exploration. Electromagnetic exploration methods, with their advantages of sensitivity to underground electrical structures, large detection depth, and high efficiency, have become key technical means for revealing the spatial distribution and physical properties of concealed disaster-causing geological bodies. However, factors such as the complexity of electromagnetic responses, multiple solutions, and background interference of concealed disaster-causing geological bodies constrain detection accuracy and identification reliability. Therefore, systematic research on electromagnetic anomaly characteristics of different types of concealed disaster-causing geological bodies (e.g., water-rich fracture zones, karst collapse, old goaf areas, water-conducting structures, etc.) and the development of corresponding high-resolution comprehensive identification method systems are urgently needed for enhancing geological disaster early warning capabilities and ensuring the safety of major engineering projects, which holds both practical demands and profound scientific significance.

**[Key words]** concealed hazard geological body; electromagnetic exploration; anomaly characteristics; forward modeling simulation

### 引言

随着我国基础设施建设的深入推进与国土资源开发的持续发展,人类工程活动与地质环境的相互作用日益紧密。在矿山开采、隧道掘进、水利水电工程、城市地下空间开发及重大线性

工程建设过程中,各类隐蔽致灾地质体构成了潜在且极具破坏性的安全风险源。这些地质体,如隐伏断层、破碎带、富水异常区、岩溶洞穴、采空区及软弱夹层等,其空间位置、几何形态与赋存状态往往难以通过地表调查或常规地质手段直接查明,具

有极强的隐蔽性与突发致灾性。一旦被工程活动所揭露或扰动,极易诱发突水突泥、冒顶塌方、岩爆、地表沉降等灾难性事故,造成严重的人员伤亡与经济损失。因此,发展能够穿透覆盖层、精确探测深部地质隐患的地球物理技术,特别是对地下介质电性差异敏感的电磁勘探方法,已成为工程地质与防灾减灾领域的前沿课题。电磁法通过观测天然或人工源激发的地下电磁场分布与变化,反演推断地下电性结构的分布,为识别具有电性差异的隐蔽致灾地质体提供了物理基础。本研究聚焦于隐蔽致灾地质体电磁异常特征的系统性研究与高精度判识方法的探索,旨在深化对典型致灾体电磁响应规律的理论认识,并推动电磁探测技术从“异常发现”向“特征识别”与“智能判识”的跨越,为地质灾害的精细探测与风险防控提供关键技术支撑。

### 1 隐蔽致灾地质体类型及其电磁探测物理基础

隐蔽致灾地质体种类繁多,根据其成因机制与物质组成,主要可归纳为构造类(如断层、破碎带)、岩溶类(如溶洞、暗河)、采掘类(如老窖、采空区)以及含水异常类(如富水体、含水裂隙带)等。这些地质体之所以能够被电磁方法所探测,其根本在于它们与周围完整基岩或正常地层之间存在显著的电性差异,包括电阻率(或电导率)、介电常数和磁导率等参数的差异。例如,富含地下水的破碎带或岩溶管道,由于其内部孔隙、裂隙充满导电性较好的地下水,其电阻率通常远低于完整、干燥的围岩,表现为明显的低阻异常;反之,被空气填充的干燥溶洞或采空区,则表现为显著的高阻异常<sup>[1]</sup>。某些含磁性矿物的断层泥或构造岩,可能引起局部的磁异常或激发极化异常。电磁勘探正是通过观测和分析这些由目标体引起的、叠加在背景场之上的电磁异常信号(如视电阻率异常、相位异常、场强衰减异常、极化率异常等),来推断目标体的存在、位置、规模和性质。不同电磁方法(如大地电磁法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法、频率域电磁法等)基于不同的场源频率与观测方式,对不同尺度、不同深度、不同电性特征的目标体具有不同的探测灵敏度与分辨率。因此,研究不同方法对不同类型隐蔽致灾地质体的响应能力,是选择合适探测技术、设计优化观测方案的前提,也是构建特征判识方法体系的物理基础。系统地梳理和明确各类致灾体与围岩之间的典型电性差异模型,是后续进行正演模拟、特征分析和建立判识标志的逻辑起点。

## 2 隐蔽致灾地质体电磁响应正演模拟与异常特征分析

### 2.1 典型地质体电性模型构建与正演方法

为系统研究隐蔽致灾地质体的电磁异常特征,首要任务是建立一系列能够代表实际地质情况的典型电性-几何模型。这些模型涵盖不同埋深、不同规模、不同产状(如直立、倾斜、水平)、不同组合形态(如单一异常体、多个异常体组合、层状异常)以及不同电性参数对比度的地质体,例如低阻薄板状体模拟含水断层,高阻球体或立方体模拟岩溶洞穴,低阻块体模拟富水破碎带,层状低阻体模拟含水软弱层等<sup>[2]</sup>。针对这些模型,需选用适当的电磁正演模拟方法进行计算。常用的数值模拟方法包括有

限差分法、有限元法和积分方程法等,它们能够精确计算给定地电模型在特定场源激励下产生的电磁场空间分布。正演模拟过程需要系统地改变模型的关键参数(如目标体电阻率、尺寸、埋深、围岩电阻率等),以及观测系统的参数(如频率、测点间距、发射-接收距等),以生成大量的电磁响应数据集。这一系统的正演模拟工作,旨在剥离出单一或多个因素变化对电磁响应的影响规律,为理解复杂异常的形成机理提供“纯净”的理论样本,是从源头上把握隐蔽致灾地质体电磁异常特征本质的关键步骤。

### 2.2 单一典型地质体电磁异常特征规律

基于系统的正演模拟结果,可以对单一类型隐蔽致灾地质体的电磁异常特征进行归纳总结。对于低阻型致灾体(如富水破碎带),其异常特征在不同电磁方法中表现多样。在频率域电磁法的视电阻率断面图上,常表现为沿测线连续的、向下延伸的低阻闭合或半闭合异常区,相位断面图上则可能出现相应的异常变化;在瞬变电磁法的晚期道信号或视电阻率-深度剖面上,表现为衰减速度慢于背景或电阻率值低于背景的异常区域。对于高阻型致灾体(如干溶洞、老空区),其异常特征则相反,表现为视电阻率高值异常,瞬变电磁衰减速度可能更快。异常特征的明显程度、形态和幅值,与目标体的大小、埋深、电性对比度密切相关。一般而言,目标体规模越大、埋深越浅、与围岩电性差异越大,产生的异常幅值越大、范围越广、形态越清晰。此外,目标体的产状对异常形态有显著影响,如板状体的倾向会使其引起的异常在剖面上呈现不对称性。这些针对单一理想模型的异常特征规律,构成了识别复杂实际异常中目标体“信号”的基础“图谱”,是后续进行异常分解与特征提取的理论依据<sup>[3]</sup>。

### 2.3 复杂条件下多地质体耦合电磁响应特征

实际地质环境中,隐蔽致灾地质体往往不是孤立存在的,可能以组合形式出现,如断层伴生富水带、多层采空区、串珠状溶洞等,并且受到起伏地形、近地表电性不均匀体(如覆盖层厚度变化)以及人文设施(如电缆、管道)的强烈干扰。这些因素相互耦合,使得实测电磁响应变得极为复杂。多地质体的组合会引起异常的叠加、畸变或屏蔽效应。例如,一个浅部的高阻不均匀体可能对深部低阻目标的探测信号产生屏蔽;两个相邻的低阻体可能使其异常连成一片,难以区分边界。地形起伏会严重扭曲电磁场的分布,在视电阻率断面图上产生与地形相关的假异常,可能掩盖或混淆由地质体引起的真实异常。近地表的局部电性不均匀体(如粘土层透镜体)会产生强烈的、类似浅部地质体的干扰异常。对这些复杂条件下耦合响应特征的研究,主要通过构建包含多种干扰因素的综合性模型进行正演模拟来实现。通过对比分析纯净模型响应与复杂模型响应,可以揭示干扰对目标异常的畸变规律,这对于发展有效的干扰压制技术和提高在复杂条件下识别目标异常的能力至关重要,是从理想走向实际应用必须跨越的桥梁。

## 3 隐蔽致灾地质体电磁异常综合判识方法体系

### 3.1 基于多参量数据融合的异常增强与提取技术

面对复杂的实测电磁数据,直接从原始观测数据中识别目标异常往往十分困难。因此,需要发展多参量数据融合与处理技术,以增强目标异常、压制干扰、提取更能反映地质体本质的特征信息。这包括:一是多方法数据融合,即将来自不同电磁方法(如CSAMT与TEM)或同一方法不同观测参数(如多频率、多分量)的数据进行联合反演或协同解释,利用不同方法对同一地质体响应的互补性,减少多解性,获得更可靠的地电模型。二是多地球物理数据融合,即结合重力、磁法、地震等其他物探方法的数据,进行联合约束反演或信息互补解释。例如,利用高精度磁法确定构造位置,再通过电磁法判断其含水性。三是基于正演响应的特征提取技术,从实测数据中提取对目标体几何或电性参数敏感的特征量,如特定模式的响应曲线、衰减时间常数、视电阻率断面上的梯度变化特征等,将其作为判识的输入特征<sup>[4]</sup>。这些数据融合与特征提取技术,旨在从海量、混杂的数据中提炼出与隐蔽致灾地质体关联性更强、抗干扰能力更高的“净化”异常信息,为后续的定性判识与定量解释奠定基础。

### 3.2 人工智能驱动的智能判识模型构建

传统的地球物理资料解释高度依赖解释人员的经验,存在主观性强、效率低、知识传承难等问题。人工智能技术,特别是机器学习和深度学习,为隐蔽致灾地质体的自动、智能判识提供了革命性工具。智能判识模型的构建主要包括两个路径:一是基于大量正演模拟数据驱动的监督学习模型。利用前述正演模拟生成的海量“模型-响应”配对数据作为训练集,训练卷积神经网络、循环神经网络或它们的变体等深度学习模型,使其学习从电磁响应数据(如图像化的视电阻率断面、时间序列曲线)到地质体参数(如类型、位置、大小)或存在概率的复杂非线性映射关系。训练好的模型可直接对新的实测数据进行快速判识与初步解释。二是结合先验地质知识的混合智能模型。将地质构造规律、区域地层信息等先验知识以规则、约束条件或知识图谱的形式融入机器学习模型,例如在损失函数中加入模型复杂度约束(体现奥卡姆剃刀原理),或利用图神经网络建模地质体之间的空间关联关系,从而引导模型产生更加符合地质规律的解释结果。人工智能判识模型能够快速处理大规模数据,发现人眼难以察觉的微弱模式关联,是实现隐蔽致灾地质体高效、批量、标准化识别的重要发展方向<sup>[5]</sup>。

### 3.3 地质-地球物理协同的定量解释与不确定性评估

无论采用何种先进的判识方法,最终的解释结果必须回归地质意义。地质-地球物理协同解释强调将地球物理异常与区域地质背景、钻探资料、工程揭露信息等进行深度融合和迭代验证。在人工智能模型给出初步判识结果后,需要结合地质人员对

区域构造格架、岩性分布、水文地质条件的认识,对判识结果进行地质合理性分析,必要时通过针对性的补充探测或反演优化进行修正。同时,对解释结果进行不确定性评估至关重要。地球物理反演与判识本质上是不适定问题,存在固有的多解性。不确定性评估可以通过统计方法(如马尔科夫链蒙特卡罗方法)或基于深度学习生成模型来量化模型参数的后验概率分布,从而给出目标体存在概率、深度范围、规模大小的置信区间,而非单一的确解。这种“概率化”或“范围化”的解释成果,更能客观反映地球物理探测的局限性,为工程决策提供风险可控的参考依据,避免因解释结果的绝对化而导致的误判风险。

## 4 结论

本研究聚焦于隐蔽致灾地质体电磁探测的核心难题,通过系统性的正演模拟,厘清了不同类型致灾体的典型电磁异常模式及其受几何参数、电性对比度与产状的控制规律,同时揭示了多体耦合、地形起伏等复杂条件对异常信号的叠加与畸变效应。在此基础上,研究构建了一套从多源数据融合处理到人工智能判识的综合方法体系,该体系通过融合多参量信息以压制干扰、增强目标异常,并利用深度学习模型挖掘响应特征与地质体属性的内在关联,初步实现了从“异常发现”到“特征识别”的进阶。研究进一步强调,任何地球物理判识都必须回归地质语境,通过地质-地球物理协同解释与严格的不确定性评估,方能形成风险可控的可靠结论。展望未来,研究需向高保真三维正演模拟、弱信号超分辨提取、物理约束的可解释人工智能、空地井一体化协同探测及实时动态智能预警等方向深化,以推动该技术向更高精度、更强智能与更实用化方向发展,从而为重大工程安全与地质灾害防控提供更为坚实的技术支撑。

## [参考文献]

- [1]张中.隧道富水构造瞬变电磁场响应特征及其超前判识研究[D].成都理工大学,2021.
- [2]黄涛.网格剖分对多相介地质体瞬变电磁异常响应特征的影响[J].凿岩机械气动工具,2025,51(10):105-107.
- [3]杨森鑫,谭捍东,梁盛军,等.对称非各向同性体大地电磁法二维异常特征[J].物探与化探,2019,43(04):794-803.
- [4]罗国平.不同装置瞬变电磁含水异常特征分析[J].中国煤炭地质,2015,27(03):70-76.
- [5]宋守根,汤井田,何继善.小波变换与电磁法勘探中高维地质体的特征刻画[J].中国有色金属学报,1993,(04):1-5.

## 作者简介:

于家鑫(2000--),男,汉族,甘肃武威县人,本科,助理工程师,从事水利水电工程物探勘察与检测工作。