第 9 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

瞬变电磁法浅层异常体响应特征及影响因素研究

蒙超
中煤科工西安研究院（集团）有限公司
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2504

[摘　要] 瞬变电磁法作为一种人工源时间域电磁探测方法,在近地表工程与环境地质勘查中具有重要应用价值。本文系统研究了瞬变电磁法浅层异常体的电磁响应特征及其影响因素,重点分析了观测系统与装置参数、异常体物理性质及地层背景条件对探测能力的控制作用。结果表明,异常体与围岩的电性对比度越大,可识别性越强；异常体规模、埋深与装置参数共同决定横向与纵向分辨；低阻覆盖层会显著衰减信号,相邻异常体随埋深增加趋于融合,易造成误判。研究可为瞬变电磁法浅层探测的优化设计和盲区识别提供理论参考。
[关键词] 瞬变电磁法；浅层探测；响应特征；影响因素；电性差异；装置参数
中图分类号：P631　**文献标识码**：A

Response Characteristics and Influencing Factors of Shallow Anomalous Bodies in Transient Electromagnetic Method

Chao Meng
CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd.

[Abstract] Transient electromagnetic method, as an artificial source time-domain electromagnetic detection method, has important application value in near surface engineering and environmental geological exploration. This paper systematically studies the electromagnetic response characteristics and influencing factors of shallow anomalous bodies using transient electromagnetic method, with a focus on analyzing the control effects of observation system and device parameters, physical properties of anomalous bodies, and geological background conditions on detection capability. The results indicate that the greater the electrical contrast between the anomalous body and the surrounding rock, the stronger the recognizability. The size, burial depth, and device parameters of the anomalous body jointly determine the horizontal and vertical resolution. The low resistance cover layer will significantly attenuate the signal, and adjacent anomalous bodies tend to merge with increasing burial depth, which can easily cause misjudgment. The research can provide theoretical reference for the optimization design and blind spot identification of transient electromagnetic shallow detection.
[Key words] Transient electromagnetic method; Shallow detection; Response characteristics; Influencing factors; Electrical contrast; Device parameters

1 绪论

随着我国社会经济持续发展与城镇化进程加快,环境与工程地质问题的有效应对有赖于对近地表地层的精确探测和定量化评价。当前,针对地下水资源勘查、工程地基稳定性评估、地下隐蔽设施定位及堤坝安全隐患排查等问题,提出了迫切需求,相关研究成为工程领域关注的重点方向[1]。瞬变电磁法作为地球物理勘探的重要方法之一,凭借其能够有效克服高阻屏蔽层阻碍、实现对掩埋构造和低阻异常体精确成像的独特优势,相较于传统直流电法展现出显著优势[2]。此外,该方法兼具良好的横向分辨率与低阻敏感性,野外作业灵活、地形适应能力强、探测范围较大,在地质工程、矿产勘查及地下水探测等领域获得了广泛应用。

瞬变电磁法在实际浅层探测应用中仍面临显著的技术瓶颈。受发射电流关断时间、一次场干扰、接收装置响应速度及浅层地表电性不均匀等多因素的综合影响,该方法浅层探测能力存在固有局限,具体表现为一定深度范围内的探测盲区,直接制约了对近地表异常体的有效识别与精细刻画能力。同时,浅层异常体(如空洞、富水破碎带、金属管线等)的瞬变响应特征受

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

异常体几何形态、规模、电性差异、埋深以及观测装置参数的多重耦合控制,其响应规律尚不清晰,进一步加大了从实测数据到地质解释的难度。

针对上述问题,本文围绕瞬变电磁法浅层异常体的响应特征开展研究,分析发射回线边长、接收位置、异常体电性差异及埋深等因素对响应规律的控制作用。研究有助于揭示浅层典型异常体的响应规律,分析各因素对探测结果的影响机制,为浅层探测盲区的识别与校正提供理论依据。

2 瞬变电磁法基本原理

瞬变电磁法(TEM)基于电磁感应理论,通过在时间域内观测人工源激发的二次场来实现地下探测,其核心在于研究一次场关断后二次场随时间衰减的全过程,进而获取地下介质的电性分布信息[3]。瞬变电磁法的基本原理可表述如下：首先通过不接地回线或接地导线向地下发送稳定的恒定电流,进而在发射源周围建立起一次磁场。当电流突然切断时,一次磁场随之消失,这一剧烈变化依据法拉第电磁感应定律,在导电地层中激发出感应涡流,该涡流随时间衰减,并在此过程中不断产生新的磁场,即二次场,从而构成瞬变电磁响应的物理基础。由于地下介质存在电阻率差异,二次电流在传导过程中因焦耳热损耗而逐渐衰减,其产生的二次磁场亦随时间变化。因二次电流的分布与传播路径受地下介质电性分布的控制,故其所产生的二次场携带了丰富的地质体信息,通过接收装置观测该二次场随时间的变化规律,便可反演推断地下介质的电性结构与地质异常体的空间赋存状态。

3 瞬变电磁法工作装置

瞬变电磁法的现场工作系统由发射单元与接收单元共同组成,其勘探流程贯穿发射、电磁感应和信号接收三个连续环节[4]。依据施工环境差异,现有装置体系已发展出测深、航空、钻井及剖面四种模式。实际勘查中以地面作业最为常见,重点阐述基于不接地回线发射的剖面装置类型。

3.1中心回线与重叠回线装置

这两类装置均属于发收距为零的同中心装置。其中,当发射与接收线圈尺寸一致且完全重叠时,称为重叠回线装置;当以小尺寸多匝线圈作为接收端,并放置在发射线圈中心点采集信号时,则为中心回线装置。两类装置因收发距为零,一次场与二次场在空间上高度重叠,接收线圈所测信号与地下介质的感应响应最为直接,对浅层地电信息反应灵敏,是当前工程与环境地质勘查中应用最为广泛的装置形式之一。

3.2偶极装置

偶极装置以发射与接收线圈间保持固定距离为基本特征,测量时两者沿测线同步移动,亦可采取分段推进的方式作业。发射线圈多为小尺寸多匝结构,用于记录磁场三分量的感应电动势。从实际应用效果看,该装置的探测深度不足,限制了其在深部探测中的适用范围；加之偶极距在野外复杂地形条件下难以精确控制和重复保持,导致数据质量不稳定且施工效率偏低。因此,除少数特殊场景外,该类装置目前已逐渐被其他装置形式所取代。

3.3大定源回线装置

大定源回线装置以大尺寸矩形线圈作为发射源,测线沿垂直于发射线圈长边方向布设,各测点按序进行感应电动势的测量[5]。该类装置可在发射线圈内部与外部同时进行测量,一次布设发射线圈即可完成较大范围内的测点采集,具有工作效率高、覆盖范围广的显著优势,尤其适用于面积性普查和区域性地质调查任务。但在浅层精细探测中,大定源装置因发射回线尺寸较大,早期信号受关断时间和一次场耦合效应影响较为明显,其浅层分辨能力需要结合具体装置参数加以评估。

4 异常体影响因素及响应特征

瞬变电磁法浅层异常体的响应特征受装置参数(回线边长、接收位置、关断时间)、异常体性质(电性差异、规模、埋深)、地层背景(覆盖层电阻率、多异常体干扰)等因素的影响,各因素共同决定了异常体的可探测性与解释精度。

4.1观测系统与装置参数

瞬变电磁法的观测系统与装置参数是影响浅层异常体响应特征的重要因素,其中发射回线边长、接收位置以及发射电流关断时间三者构成了装置层面影响浅层探测能力的核心参数体系。

发射回线边长不仅从根本上决定了探测深度范围,也直接制约着浅层分辨率和早期观测数据质量。一般而言,较小的发射回线能够产生更为集中的一次场分布,对浅层地电结构的横向变化反映更为灵敏,有利于提高浅层异常体的空间分辨能力,但其激发的二次场信号强度有限,探测深度相应受限。相比之下,大回线源虽能建立更强的初始磁场,获得更大的探测深度和更强的二次场信号,但因发射线圈电感增大,电流关断时间相应延长,导致早期信号畸变更为显著,一次场残余对二次场的干扰更加突出,浅层信息的有效提取面临更大困难。

接收位置(偏离距)的选择同样是影响浅层观测质量的关键因素。当接收线圈位于发射回线中心点进行测量时,一次场对接收线圈的直接耦合效应理论上为零,所测信号主要反映地下介质的感应响应。然而,在实际非中心点测量中,随着接收点偏离发射回线中心距离的增大,一次场残余和地表浅部不均匀体引起的干扰显著增强,早期时段观测数据畸变日趋严重。这种畸变与地下异常体产生的真实响应相互叠加,直接影响对浅层目标的准确识别与定位,使得数据反演中必须引入专门的校正措施来消除这一偏差。

关断时间与一次场干扰是制约浅层探测能力的另一重要因素。理想情况下,发射电流应为阶跃关断,即瞬间从恒定值降为零。但在实际系统中,由于发射线圈电感与回路电阻的存在,电流无法实现瞬时关断,而是经历一个有限时长的衰减过程。在此期间,接收线圈不仅接收到来自地层的二次场信号,同时也会耦合到尚未完全消失的一次场残余,两者在早期时段重叠共存。一次场的强度通常远大于二次场,即便在关断结束后的一定时间内,接收线圈的固有过渡过程仍会叠加系统响应,使得这段时期的观测数据不能真实反映地下地质信息。正因如此,早期数据往

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

往需要舍弃或校正处理,这便直接构成了浅层探测盲区的物理根源——该盲区的存在并非反映地层本身不可探测,而是由关断过程及系统响应共同塑造的装置能力边界。

4.2异常体性质与电性差异

异常体自身的物理性质与几何参数是决定其能否被瞬变电磁法有效探测的核心内在因素,主要包括异常体与围岩的电性差异、异常体的形态规模以及埋深与厚度三个方面。

电性差异是决定异常体能否被有效识别的最根本物性前提。目标体与围岩间的电阻率差异越大,感应涡流在异常体内的聚集效应越显著,所激发的二次场异常响应越强烈,因而越易于从背景场中突显。定性而言,在埋深条件固定的前提下,电性对比度的提高能够显著提高可分辨的最小异常体厚度,使原本难以识别的薄层目标被有效探测,且该增强效应在深部探测场景中尤为突出。

异常体的几何形态与规模则直接制约着方法的横向分辨能力。不同形态的异常体,其内部涡流分布模式与二次场响应特征各不相同,致使观测响应的形态呈现出可辨识的差异。在埋深与电性差异均保持恒定的条件下,目标体尺寸须超过某一临界尺度,其所产生的异常响应才可被观测系统有效捕获；反之,即使电性反差足够显著,若目标体规模过小,其信号亦将被背景场的平滑作用所覆盖,无法形成可辨识的异常特征。

异常体的埋深与厚度是影响纵向分辨能力的重要因素。一般而言,埋深越浅、厚度越大,异常体在时间域响应中的反映时刻越早、幅值越强,被探测的可能性亦越高。然而,纵向分辨能力并非由埋深与厚度简单线性决定,而是与电性差异、发射回线边长等因素构成复杂的非线性耦合关系。在大回线源条件下,较小的电性差异可能导致中等厚度异常体难以被识别,而较强的电性对比则可在较大埋深条件下维持一定的分辨能力。此外,发射回线边长的变化将改变一次场的空间展布形态,进而调节不同埋深处异常体对二次场贡献的相对权重,使得最优观测参数组合随目标深度变化而呈现差异性。

4.3地层背景与环境因素

地层背景与环境因素是瞬变电磁法浅层探测中不可忽视的影响因素,其中浅层覆盖层的电性特征及多个异常体之间的相互干扰最为关键。

浅层覆盖层的电阻率直接影响一次场的激发效率与二次场的传播路径。高阻覆盖层对电磁能量的损耗较小,有利于一次场向深部地层的有效耦合,同时也为二次场信号的回传提供了较为有利的通道,因而对异常体的识别相对有利。然而,在低阻覆盖层条件下,情况则截然相反,低阻介质具有较强的导电性,一方面会削弱一次场向下的穿透能力,使得激发至目标层的有效能量降低；另一方面,感应涡流在低阻层中更为发育,将消耗大量电磁场能量,导致到达深部异常体并返回至接收线圈的二次场信号遭受更强烈的衰减。这意味着在低阻覆盖地区开展浅层异常体探测时,同等规模和埋深的异常体所产生的可观测响应将显著减弱,浅层信号的信噪比大幅下降,探测难度明显增大。因此,低阻覆盖层的存在是对瞬变电磁法浅层探测能力的重要考验,在实际工程中需要结合覆盖层电性参数合理设计观测方案,必要时需通过增大发射磁矩或优化观测时间窗口等措施予以补偿。

多个异常体相邻存在时,彼此间的电磁干扰是影响识别可靠性的重要环境因素。当两个或多个异常体空间位置较为接近时,各自产生的二次场会相互叠加,使观测响应不再是各孤立异常信号的简单组合,而呈现出复杂的干涉效应。能否有效区分相邻异常体,主要取决于其埋藏深度与相互间距。一般而言,在异常体规模和间距相对固定的条件下,埋深越浅,各异常体的响应越易于分离辨识；随着埋深增加,响应逐渐融合,最终无法分辨各自的独立存在。这种分辨能力随深度减弱的现象,反映了电磁法横向分辨率随探测深度增大而逐步降低的基本规律,其物理原因在于电磁场在传播过程中扩散范围不断扩大,对空间细节的辨识能力相应下降。因此,在浅层工程勘查中,若面临多个相邻目标(如管线群、空洞群等),需充分关注这一深度衰减效应,避免将多体复合异常误判为单一地质体。

5 结论与展望

本文围绕瞬变电磁法浅层异常体响应特征及影响因素开展研究,获得以下主要结论：观测系统与装置参数对浅层探测效果具有显著控制作用。发射回线边长增大虽有利于增强信号强度和探测深度,但会延长关断时间、加剧早期信号畸变,对浅层信息提取造成不利影响。异常体与围岩的电性差异是其可识别性的决定因素。异常体的规模、形态、埋深及厚度共同控制着横向和纵向分辨能力,且与发射回线边长等装置参数存在复杂的非线性耦合关系。低阻覆盖层会显著衰减二次场信号,增大浅层探测难度；相邻异常体的分辨能力随埋深增加而降低。解释盲区的存在是早期数据缺失与解释方法局限共同叠加的结果,并非证明理论勘探盲区的存在。

[参考文献]

[1]王小勇,张志,许强平,等.FCTEM小回线瞬变电磁法与微动在地下岩溶高效精准探测中的应用研究[J].工程地球物理学报,2025,22(2):199-206.

[2]潘纪顺,张鑫,陈世仲,等.大定源回线装置瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用[J].科技创新与应用,2024,14(14):137-140.

[3]武晓适,张怀,田勇.瞬变电磁法对工作面底板富水性探测应用[J].内蒙古煤炭经济,2020,(3):155-156.

[4]于德淼.煤矿采空积水区地球物理响应特征与探测技术研究[J].煤炭新视界,2026,(1):234-236.

[5]郝延松,胡博,于润桥,等.磁性源瞬变电磁法视电阻率计算方法[J].物探与化探,2012,36(6):1034-1039.

作者简介：

蒙超(1992--),男,汉族,陕西渭南人,硕士,工程师,主要从事矿产普查与勘探、地球物理勘探方面的工作。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.