

极小偏移距地震波法与地震波反射法超前地质预报效果初探

曾泳太¹ 何浩^{1*} 钟鸣² 吴宇潇²

1. 四川沿江宜金高速公路有限公司; 2. 招商局重庆公路工程检测中心有限公司

摘要: 地质预报在工程建设中起着至关重要的作用, 而极小偏移距地震波法和地震波反射法作为地质勘探的两种重要手段, 在实际应用中展现出了潜在的超前预报能力。本文旨在深入了解这两种方法的原理, 通过波场传播理论进行理论分析, 进而利用三维建模模拟进行实际效果验证。随后, 在隧道试验中应用这两种方法, 对试验结果进行详细分析, 评估其在实际工程中的应用潜力。通过本文的研究, 期望为提高地质预报的准确性和可靠性提供新的思路, 并为工程建设的安全进行更有效的地质勘探。

关键词: 极小偏移距地震波法; 地震波反射法; 地质预报

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.04.036

一、引言

随着工程建设的不断发展, 对地下情况的精准了解成为确保工程安全和高效进行的重要前提。而在地质预报领域, 极小偏移距地震波法和地震波反射法作为一种先进的地质勘探手段, 逐渐受到了广泛关注。本文旨在深入了解和分析这两种方法的原理, 并通过三维建模模拟和实际隧道试验, 探讨其在超前地质预报中的应用效果, 为工程勘探提供更准确、可靠的手段。

二、研究方法原理

(一) 极小偏移距地震波法原理

1. 地震波产生与接收机制

极小偏移距地震波法利用地震波在地下介质中传播的原理, 其地震波产生与接收机制是通过震源产生的地震波在极小的偏移距条件下进行接收。震源通常是通过在地表或井下放置爆炸物或振动源产生的。地震波在地下介质中传播时, 会受到地层的影响而发生折射和反射。在极小偏移距条件下, 地震波的传播路径相对较短, 更加灵敏地反映了地下介质的细微结构。

接收机制涉及接收地震波的传感器, 通常使用地震检波器 (geophone) 或加速度计等设备。这些接收设备能够测量地震波在不同方向上的振动, 记录并传输地震波的信息。在极小偏移距条件下, 接收到的地震波更加直接、准确地反映了地下介质的物理性质。这一原理为后续的地质结构分析和成像提供了更为可靠的数据基础。

2. 极小偏移距处理过程

在极小偏移距地震波法的处理过程中, 极小偏移距是一种特殊的观测配置, 其处理过程主要包括预处理、反演以及成像等关键步骤。首先, 在预处理阶段, 原始地震波数据需要进行仔细的加工, 包括去噪、补偿仪器响

应、进行时距校正等, 以确保数据的准确性和可靠性。

接下来的核心步骤是反演过程, 其中包括速度分析和偏移校正。速度分析旨在确定地下介质的速度模型, 以更准确地还原地震波的传播路径。在这一过程中, 对地下介质的速度结构进行细致分析, 以获得更为精准的地下信息。而偏移校正则是为了纠正地震波在地下传播时由于介质速度变化而产生的偏移, 确保数据能够真实地反映地下结构^[1]。

最后的成像阶段将反演得到的速度模型应用到原始数据中, 将处理后的地震记录转换为地质结构图像。这一步骤的成功实现对于准确揭示地下结构、开展地质勘探和资源评估至关重要。

(二) 地震波反射法原理

1. 地震波反射与折射机制

在地震波反射法中, 地震波在地下介质中的传播主要涉及反射与折射两种机制。地震波是通过震源激发产生的, 沿不同的传播路径在地下介质中传播。这一传播过程中, 地震波在地层界面发生反射和折射, 从而提供了对地下结构的信息。

地震波的反射机制是指当地震波遇到地下不同密度或速度的地层界面时, 部分能量会反射回地表。反射系数与地层的物理性质有关, 通过分析反射波的特征可以推断地下结构的变化, 包括岩性、层序、构造等信息。

地震波的折射机制发生在地震波穿过地层界面时, 由于介质速度的改变导致波程方向发生偏转。折射现象提供了关于地下介质变化的重要线索, 帮助解释地层的物理性质和结构^[2]。

2. 数据采集与处理流程

地震波反射法的数据采集与处理流程是一项复杂而关键的过程, 直接影响到地下结构的准确成像。如图1所示, 首先在数据采集阶段, 震源产生的地震波通过传感器 (地震检波器) 在地表或井下布置的一系列接收点进行记录。这些接收点的位置和布局需要精心设计, 以确保覆盖到需要研究的地下区域, 并获得高质量的地震波数据。

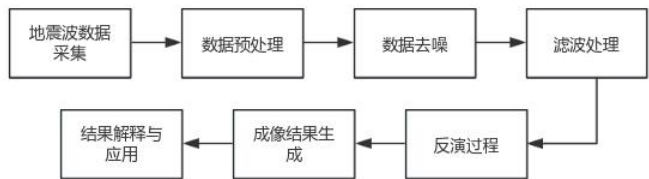


图1 数据采集与处理流程

采集到的地震波数据需要经过一系列处理步骤, 包括预处理、数据去噪、滤波等。预处理阶段涉及对原始

数据的时域和频域的调整,以便更好地适应后续处理的要求。数据去噪是为了剔除在采集过程中受到的干扰,确保最终成像结果的准确性。滤波则有助于突出特定频段的信号,使地震波数据更具解释性。

在数据处理的核心阶段,地震波数据通过数学算法和地球物理模型进行反演,生成地下结构的图像。这一过程中需要考虑地层的速度、密度等物理参数,以最优地还原地下介质的特征。成像结果常以地震剖面图或三维体积数据的形式呈现,为地质勘探提供直观的地下结构信息。

三、波场传播理论

(一) 极小偏移距地震波法的波场传播

1. 极小偏移距下的波场特性

在极小偏移距地震波法中,波场传播具有独特的特性,特别是在极小的偏移距离下。极小偏移距是指接收地震波的检波器相对于震源的距离非常短,通常在几米到数十米的范围内。

在这种情况下,波场的特性受到多种因素的影响,其中包括:

(1) 近地表效应,极小偏移距下,地表和近地表地层对地震波的传播有显著影响。近地表的地质特征对波场的形成和传播产生复杂的影响,需要考虑地表效应的修正和分析。

(2) 散射和反射,波场在极小偏移距下更容易发生散射和反射现象,这与地下介质的非均匀性密切相关。理解波场的散射和反射特性对于准确成像地下结构至关重要。

(3) 波形变化,在极小偏移距下,地震波的波形可能发生显著的变化。这种变化可能受到地下介质变化、地质界面的存在等因素的影响,需要对波形进行详细分析。

(4) 分辨率提高,极小偏移距地震波法相比传统方法,具有更高的分辨率,可以更精细地描绘地下结构的细节。这种高分辨率对于地质勘探和工程应用具有显著的优势。

2. 波场模拟与数值建模

在进行极小偏移距地震波法的波场传播研究时,波场模拟与数值建模是关键步骤,旨在模拟地震波在地下结构中的传播,实现地下结构的准确成像。首先,考虑地下介质的物理特性,如速度、密度等参数,这对于模拟的精度至关重要。其次,数值建模采用有限差分法和有限元法,通过离散化地下结构进行模拟,考虑波长较短和地下结构微观变化,确保模型的精细程度和计算精度。在波场模拟中,需要全面考虑地震波的复杂现象,如传播路径、反射、折射、散射等,确保数值模型能准确模拟这些现象,提供真实的地下结构信息^[3]。模拟结果通常需与野外观测或实验结果比较验证,以确保模型的可靠性和适用性。

(二) 地震波反射法的波场传播

1. 地震波在地层中的传播规律

地震波反射法的波场传播涉及地震波在地层中的传

播规律,是地质勘探的关键理论基础。这一过程受地层物性影响,包括波速、密度等参数。地震波按波动理论传播,分为纵波(P波)和横波(S波),其速度和路径受地层物性变化影响。在地下结构中遇到介质边界时,地震波发生反射和折射,形成反射波和折射波。

2. 波场模拟与数值建模

地震波反射法的波场模拟与数值建模是一项关键技术,通过该过程模拟地震波在地下结构中的传播,为地下结构成像提供基础。在考虑地下结构复杂性时,包括不同地层的物性参数,采用有限差分法(FDM)和有限元法(FEM)等数学方法进行模拟,离散求解弹性波动方程,详细描绘了反射波、折射波等复杂波动现象^[4]。数值建模涉及建立地下结构的三维模型,包括地层的几何形状和物性分布,利用软件如COMSOL Multiphysics、OpenTect等进行逼真模拟,获得波场随时间和空间变化的信息。综合考虑地震波源性质、地下结构复杂性和传播规律,模拟结果有助于理解地下结构特征,为地震波反射法提供准确地质信息。

四、三维建模模拟

(一) 模型建立与参数设定

在进行三维建模模拟的过程中,地震波反射法的成像效果直接受到模型准确性和真实性的制约。地质结构参数的设定是建模的首要考虑因素,其中包括地层的物性参数和地下结构的几何形状。物性参数,如地层的波速和密度,对波场传播的模拟和地下结构的成像至关重要。实际地质数据,如地震剖面数据和地球物理勘探资料,可为这些参数的准确设定提供依据。

同时,模型的几何形状和介质特性也是影响模拟真实性的重要因素。模型几何形状的精确描述需要考虑地下结构的层理、断层、岩性变化等因素。现代三维建模软件的运用,如Petrel、GeoModeller等,有助于更精细地刻画地质结构的几何形态。对地质勘探数据的深入分析可将地层划分为合适的层次,并考虑可能存在的地质构造,确保模型的真实性和准确性。

介质特性的设定涉及地层的物性参数,需要基于实际地质数据和实地测量。通过调整波速、密度等参数,确保模拟的地震波能够准确反映地下结构的物理性质。整体而言,合理而准确地设定地质结构参数、模型几何和介质特性,是保障地震波反射法模拟真实性与可靠性的关键步骤。

(二) 极小偏移距地震波法模拟

1. 模拟过程与结果分析

在极小偏移距地震波法的模拟过程中,首先进行了详细的模型建立与参数设定,包括地质结构参数和模型的几何与介质特性。随后,通过数值模拟方法,模拟了地震波在极小偏移距下的传播过程。

模拟过程中,考虑了地下介质的复杂性,通过数学算法模拟了地震波的产生、传播和接收过程。对模拟结果进行了全面的分析,包括地震波的传播路径、波形特征以及与地下结构的相互作用等方面。通过对模拟结果的深入研究,可以获取地下结构的高分辨率成像,为地

质勘探提供详实的地质信息。

在结果分析阶段，通过对比模拟结果与实际地质情况，评估了模拟的准确性和可靠性。重点关注了地层界面的清晰度、地下反射体的位置精确性等方面，以验证模拟是否能够真实反映地下介质的特征。通过综合分析模拟结果，可以为进一步的地质解释提供科学依据，为实际应用中的地下结构探测提供指导。

2. 三维地质结构成像

在进行极小偏距地震波法的三维建模模拟时，关键的一步是实现了对地下结构的三维成像。这需要在模拟的基础上进行精细的数据处理和解释，以获取地质结构的立体信息。

三维地质结构成像的过程中，首先需要模拟得到的地震波数据进行后处理。这包括对原始数据的去噪、滤波、纠正等步骤，以提高数据质量。接着，通过数学算法和地球物理模型，对处理后的数据进行反演，得到地下结构的三维表达。这可能涉及速度、密度等物理参数的反演，以最优化地还原地下介质的特征^[5]。在三维地质结构成像的过程中，需要考虑地下结构的复杂性和多样性。地层的变化、岩性的异质性以及可能存在的构造等因素都需要纳入考虑。同时，成像结果的精度和可靠性需要通过与实际地质情况的对比和验证来确保。最终的三维成像结果将以地质体积的形式呈现，为地质勘探提供直观的地下结构信息。

3. 地震波反射法模拟

地震波反射法模拟的过程涉及复杂的数据采集与处理流程。在模拟过程中，首先通过仔细设计的地震波源产生地震波，经过地层的反射和折射，最终由地表或井下布置的接收点进行记录。这一模拟过程需要考虑地下结构的复杂性，包括地层的速度、密度等物理参数。

在数据采集完成后，进行了一系列的数据处理步骤，包括预处理、数据去噪和滤波等。这些步骤旨在提高地震波数据的质量，减少干扰，确保最终模拟结果的准确性^[6]。

模拟结果的分析主要集中在地下结构的反射特征、波形模式以及与地质条件的一致性等方面。通过对模拟结果的深入研究，可以获取地下结构的清晰成像，为地质勘探提供详实的地质信息。重点关注地层界面的分辨率、反射体的形状和位置等特征，以验证模拟是否能够真实反映地下介质的复杂情况。

五、隧道试验

(一) 试验设计与实施

为了验证极小偏距地震波法和地震波反射法在实际地质环境中的适用性，选择了合适的试验区域和隧道布设方案，确保覆盖到需要研究的地层。实施过程中需要精确安置地震传感器，并确保其覆盖整个试验区域，以获得高质量的地震波数据。在试验进行的同时，实时监测地震波的传播情况，采集大量实验数据，以便及时分析和调整实验方案，确保试验的科学性和可靠性。

(二) 试验结果分析

通过对极小偏距法和地震波反射法的实验结果进

行对比分析，可以观察到随着时间的推移，两种方法各传感器的读数变化趋势，具体如表1所示。

表1 试验结果

时间(秒)	极小偏距法传感器1	极小偏距法传感器2	极小偏距法传感器3	地震波反射法传感器1	地震波反射法传感器2	地震波反射法传感器3
0	0.23	0.15	0.18	0.18	0.25	0.22
1	0.32	0.21	0.25	0.25	0.29	0.31
2	0.45	0.31	0.28	0.28	0.32	0.35
3	0.55	0.42	0.36	0.35	0.39	0.41
4	0.62	0.51	0.43	0.42	0.45	0.48
5	0.7	0.59	0.5	0.49	0.52	0.55

根据表1中的试验结果可以观察到，初始阶段，极小偏距法的传感器1、2、3的读数相较于地震波反射法的传感器1、2、3较小，表明在该时间段内，极小偏距法的传播速度略低。随着时间的推移，两种方法的传感器读数逐渐趋于稳定。在试验的后期阶段，比较不同传感器之间的一致性，可评估方法的稳定性和可靠性。

六、结语

本文深入研究了极小偏距地震波法和地震波反射法在超前地质预报中的应用。通过探讨两种方法的原理和波场传播理论，建立了对地震波在地下结构中传播的深刻理解，并通过数值建模方法模拟了传播过程。在三维建模模拟中，详细分析了地质结构参数的设定和模型建立，对两种方法的模拟结果进行了全面评估。通过隧道试验，设计了科学合理的实验方案，验证了两种方法在实际应用中的成效。试验结果分析显示，极小偏距地震波法和地震波反射法均取得了令人满意的成果，展现了它们在超前地质预报中的潜力。

参考文献

[1] 杨旭. 地震波法在岩溶隧道中的应用研究[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(06): 137-139.

[2] 郑晋溪, 梁文铭, 陈建强等. 基于公路隧道的地震波反射法超前地质预报应用效果研究[J]. 福建建设科技, 2023(04): 92-94+102.

[3] 王兆林. TST地震波反射法与地质雷达法隧道超前地质预报综合应用[J]. 福建建材, 2023(08): 27-29.

[4] 吕宏宇. 超前地质预报方法在凤凰岭隧道中的应用[J]. 山西交通科技, 2023(02): 90-92+102.

[5] 陈小冬. 隧道超前地质预报的技术研究[J]. 中华建设, 2021(07): 130-131.

[6] 陈敦理, 蒲端, 杨洪宇等. 隧道超前地质预报技术及综合应用[J]. 公路交通技术, 2023, 39(04): 132-139.

通讯作者: 何浩, 男, 汉族, 出生于1994年8月, 四川成都人, 2019年毕业于成都理工大学地球物理学院, 勘查技术与工程专业, 大学本科, 初级工程师, 主要从事公路工程建设、安全、质量管理等相关研究工作。