

天然源面波法在抽蓄电站勘察中的应用研究

赵越顺, 韩松, 薛哈鹏

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065

DOI:10.61369/EPTSM.2025030008

摘 要 : 天然源面波法具有无需人工震源、对环境影响小、能有效获取地下地质结构信息等优势。本文介绍了天然源面波的频散特性、基本原理以及处理反演方法,并深入分析了其在电站上水库渗漏、地下厂房围岩稳定、高压岔管围岩渗透等地质勘察关键问题中的应用效果,同时总结实际工程应用中台阵选择、测试时间等应用要点。天然源面波法可以有效探测地下横波速度的分布特征,同时也探讨其在复杂地质条件下存在的局限性,为抽水蓄能电站勘察技术的发展提供参考。

关 键 词 : 天然源面波法; 抽水蓄能电站; 地质勘察

Research on the Application of Natural Source Surface Wave Method in the Investigation of Pumped Storage Power Stations

Zhao Yueshun, Han Song, Xue Hanpeng

Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract : The natural source surface wave method has advantages such as no need for artificial seismic sources, minimal environmental impact, and effective acquisition of underground geological structure information. This paper introduces the dispersion characteristics, basic principles, and inversion processing methods of natural source surface waves. It also provides an in-depth analysis of their application effects in key geological investigation issues such as reservoir leakage, surrounding rock stability of underground powerhouses, and surrounding rock permeability of high-pressure bifurcation pipes in power stations. Additionally, it summarizes practical engineering application points including array selection and test duration. The natural source surface wave method can effectively detect the distribution characteristics of underground shear wave velocity. However, its limitations under complex geological conditions are also discussed, providing a reference for the development of pumped storage power station investigation technology.

Keywords : natural source surface wave method; pumped storage power station; geological investigation

引言

地球内部结构与地质信息的探测对资源勘探、工程建设和地质灾害预防意义重大。天然源面波法作为地球物理勘探的重要手段,利用自然环境中持续存在的微弱震动(如微动)作为信号源,从中提取面波信息来反演地下介质特性。与传统的地球物理探测方法相比,微动探测方法具有无需人工震源、抗电磁干扰能力强、对环境影响小、操作简便等优点,因此在工程地质勘察、地震学研究、城市地下空间探测等领域得到了广泛的应用。同时对未来研究方向与发展趋势进行展望,旨在推动天然源面波法在更多领域的深入应用与技术革新^[1]。

一、天然源面波法基本原理

(一) 方法概述

天然源面波法是一种基于背景噪声成像理论的地球物理探测技术,它利用地球表面广泛存在的天然微弱振动作为信号源来研

究地下介质结构^[2]。微动信号包含多种波动成分,其中面波能量占据主导地位,超过总能量的70%。该方法通过特定的观测系统采集微动信号,进而提取面波频散曲线,经过反演过程获取地下横波速度结构信息,以此来推断地下地质构造和岩土体特性。

天然源面波勘探基于平稳随机过程理论,从微动信号提取面

作者简介:

赵越顺(1992.12-),男,山西稷山人,硕士研究生,研究方向:主要从事水利水电工程地球物理勘察工作。E-mail: 1132589811@qq.com。

韩松(1991.09-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:主要从事水环境勘察工作及工程物探检测工作。

薛哈鹏(1997.11-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:主要从事水环境勘察工作及工程物探检测工作。

波频散曲线，再通过反演得到地下横波速度结构。面波在分层介质中传播时，不同频率成分有不同相速度，形成频散特性。通过分析频散曲线，可推断地下介质的分层结构和横波速度分布。不同频率面波能量穿透深度不同，高频面波反映浅部地层信息，低频面波可探测深部地层。

（二）处理方法

1. 空间自相关法（SPAC）

空间自相关法^[4]（SPAC）最初由 Aki 在 1957 年提出，该方法基于微动信号在时空上符合平稳随机过程的假设，并且假定微动中面波的某一振动模式（通常为基阶模式）占主导地位。在实际观测时，采用特定的观测阵列，如圆形阵列，其中一个台站位于圆心，其他台站均匀分布在以圆心为中心的圆周上。通过计算中心测点与圆周上各测点之间信号的空间自相关系数，并对不同频率成分进行方向平均，得到标准化自相关函数方位平均值。该值与面波的波数和频率相关，利用理论公式可以建立起空间自相关系数与面波频散曲线之间的联系，从而从微动信号中提取出面波频散曲线。早期 SPAC 法主要应用于微动探测的理论研究，随着技术的发展，其在实际工程中的应用逐渐增多。但传统 SPAC 法受限于圆形阵列的几何形状，在复杂地形或特定场地条件下实施存在困难。为克服这一局限性，扩展空间自相关法（ESPAC）应运而生，ESPAC 法突破了圆形阵列的限制，可以采用更灵活的阵列形式，如矩形、三角形等不规则阵列，通过对不同阵列几何形状下信号的相关性分析，同样能够准确提取面波频散曲线，大大提高了该方法在实际应用中的适应性。并且，SPAC 法在低频段具有较高的分辨率，对于探测较深地层的结构信息具有优势，适用于深层地质构造研究以及大面积区域的地质普查工作。

2. 频率-波数法（F-K）

频率-波数法（F-K）起源于利用观测台网数据监测核试验的研究工作。该方法通过对微动信号进行时空域的二维傅里叶变换，将信号从时间-空间域转换到频率-波数域。在频率-波数域中，不同频率和传播方向的面波会呈现出不同的能量分布特征，根据这些特征可以识别并提取出面波的频散曲线。相较于 SPAC 法，F-K 法对台站的几何形状要求相对较低，在数据处理过程中能够同时考虑多个台站的信号信息，对于复杂波形的分析能力较强。在实际应用中，F-K 法能够快速处理大量的微动数据，在大面积区域的微动探测项目中具有较高的效率。然而，该方法在低信噪比环境下，由于噪声干扰容易导致频散曲线提取的准确性下降，且对高频信号的分辨率相对较低，在浅层精细结构探测方面存在一定局限性。

3. 其他方法

除了上述两种主要方法外，还有一些针对特定观测场景和需求发展起来的微动阵列方法。无中心圆形阵列法（CCA）摒弃了传统圆形阵列中必须有中心台站的限制，通过多个同心圆布置台站，利用各同心圆上观测信号之间的关系来提取面波频散曲线。这种方法在一些无法设置中心台站的特殊场地（如障碍物较多的区域）具有应用优势，同时也能在一定程度上增加数据采集的冗余度，提高频散曲线提取的可靠性。两点空间自相关法

（2s-SPAC）是对 SPAC 法的简化，该方法仅利用两个测点之间的微动信号相关性来提取频散曲线，适用于场地狭窄、无法布置大规模阵列的情况，具有操作简便、成本低的特点，但探测精度相对有限，一般用于初步的地质调查或对精度要求不高的工程。折射微动法（ReMi）则结合了微动探测和面波折射原理，通过分析微动信号中面波的折射现象来获取地下介质的速度结构信息，在浅层地层分层和速度结构反演方面具有较好的效果，特别适用于工程地质勘察中对浅层岩土体性质的研究。

二、天然源面波法在抽蓄电站勘察中的应用

（一）台阵选择

通过对比直线型台阵与内嵌三角形台阵采集到的数据频散能量图，直线阵列的相速度分辨率一般，但在高频部分分辨率较好，能量团局部发生跳动、错断；内嵌三角形的相速度能量团连续性较好，分辨率较高。从理论上来说，内嵌三角形阵列效果是最佳的，但是兼顾到野外工作的便捷性和经济性，因直线阵列布置简单快捷，满足探测需求的同时选择采用直线排列进行探测^[5]。

（二）对上水库渗漏的探测

通过天然源面波法探测结果与地质资料对比分析，发现上水库库盆边缘某区域地下横波速度异常，结合该区域地形及地层岩性特征，推断该区域存在可能的渗漏通道。后续通过钻孔验证，在相应位置发现了岩石破碎带，证实了天然源面波法探测结果的准确性，为上水库防渗处理提供了重要依据。

（三）对地下厂房围岩稳定性的评估

在地下厂房选址区域，利用天然源面波法获取的地下横波速度分布信息，评估围岩的完整性和稳定性。根据横波速度的变化情况，划分出不同的围岩类别，与传统的地质勘察方法（如钻孔取芯、地质测绘等）结果相互印证。结果表明，天然源面波法能够有效识别出地下厂房区域的断层、破碎带等不良地质体，为地下厂房的设计和施工提供了详细的地质信息。

（四）对高压岔管围岩渗透及渗透稳定的研究

在高压岔管位置，利用天然源面波法探测围岩的渗透性。通过反演得到的横波速度与岩石的渗透性存在一定相关性，根据横波速度分布情况，评估围岩的渗透稳定性。结果表明，某区域围岩横波速度较低，推断该区域渗透性较强，可能存在渗透风险。通过后续的压水试验验证，该区域的透水率较高，与天然源面波法的探测结果一致，为高压岔管的设计和施工提供了关键的渗透稳定性参数。

三、天然源面波法应用优势与局限性

（一）应用优势

（1）无需人工震源：与传统地震勘探需人工可控震源不同，天然源面波法利用自然界存在的微弱震动，无需人工激发震源，减少了勘探成本和对环境的干扰，尤其适用于对环境保护要求严

格的地区以及城市周边的抽水蓄能电站勘察。

(2) 连续观测与高效性：该方法装置可连续对地观测几分钟至十几分钟，即可获得分析地层的面波曲线，相比一些传统勘察方法，数据采集效率较高，能够快速获取地下地质结构的初步信息，为后续详细勘察提供指导。

(3) 全面获取地质结构信息：通过对天然源面波信号的处理和反演，能够得到地下一定深度范围内的横波速度分布，从而全面了解地下地质结构，包括地层划分、岩性变化、断层和破碎带等信息，为抽水蓄能电站的地质勘察提供丰富的数据支持。

(二) 局限性

(1) 受地质条件复杂性影响：在地质条件复杂区域，如存在强烈褶皱、断层交错、岩性变化剧烈等情况，天然源面波信号的传播和频散特性会受到干扰，导致频散曲线的提取和反演结果误差较大，影响对地下地质结构的准确判断。

(2) 对深部地质信息探测能力有限：虽然天然源面波法能够获取一定深度的地质信息，但随着勘探深度增加，信号能量衰减，噪声干扰增大，对深部地质结构的分辨率降低，对于超深部地质情况的探测能力相对较弱。

(3) 依赖信号处理与反演技术：该方法的勘探结果准确性很大程度上依赖于信号处理和反演技术。不同的信号处理方法和反演算法对结果有一定影响，若选择不当或参数设置不合理，可能导致反演结果与实际地质情况偏差较大。

四、未来研究方向与发展趋势

(一) 方法改进与创新

数据处理方法优化：深入研究时间-频率分析方法，提高从微动信号中提取面波频散曲线的精度和稳定性，从而更准确地反演地下横波速度结构。例如，探索新的算法以增强对微弱信号和复杂地质条件下信号的处理能力，减少干扰因素影响。

台阵设计创新：继续优化观测台阵布局，如研究不规则台阵在不同地质条件下的适用性和优化方案，提高台阵对复杂地形和场地条件的适应性，降低环境因素对勘探结果的影响，像在城市建筑物密集区、山区等特殊区域实现更高效勘探。

(二) 拓展应用领域

特殊地质区域勘探：针对深海、冻土、沙漠等特殊地质区域，研究天然源面波法的适应性和改进措施，为这些地区的地质调查、资源勘探提供有效技术手段。比如，研究在深海环境中如何克服海水干扰，获取可靠的面波信号进行地质结构探测。

多领域融合应用：与城市规划、基础设施建设、地质灾害监测预警等领域深度融合。在城市建设中，用于精细探测地下空洞、地下管线分布等；在地质灾害防治方面，实时监测活断层活动性、潜在滑坡体变化等，为灾害预警和防治提供依据。

(三) 融合发展

与其他地球物理方法结合：将天然源面波法与高密度电法、探地雷达、浅层反射地震法等结合，综合利用不同地球物理方法的优势，实现对地下地质结构的多参数、全方位探测，提高勘探结果的准确性和可靠性。如先用天然源面波法确定大致地质结构，再用高密度电法对局部异常区域进行详细探测。

与新兴技术结合：引入人工智能、大数据分析等新兴技术，对大量的天然源面波勘探数据进行智能化处理和分析，利用机器学习算法（如深度学习）自动识别微动信号特征、优化频散曲线提取，训练反演模型智能匹配地质结构，实现数据采集、处理和解释的智能化与自动化，提升处理效率与反演精度，降低人为经验依赖，辅助地质专家做出更科学的决策。

五、结束语

天然源面波法作为一种有效的地球物理勘探方法，在抽水蓄能电站勘察中展现出独特优势，能够在地形选址、上水库渗漏探测、地下厂房围岩稳定性评估以及高压岔管围岩渗透等方面提供有价值的地质信息，为抽水蓄能电站的规划、设计和施工提供重要技术支持。然而，该方法也存在受地质条件影响、深部探测能力有限以及依赖技术手段等局限性。未来，随着信号处理技术、反演算法的不断改进和完善，以及与其他地球物理勘探方法的联合应用，天然源面波法有望在抽水蓄能电站勘察中发挥更大作用，进一步提高地质勘察的准确性和可靠性，推动抽水蓄能电站建设行业的发展。

参考文献

- [1] 沈阳, 张慧利, 巩一帆, 等. 天然源面波法在城市道路应急检测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(06): 1006-1013.
- [2] 陈实, 金荣杰, 李延清, 等. 天然源面波技术在城市规划区场地评价中的应用 [J]. 物探与化探, 2023, 47(01): 264-271.
- [3] 梁坤, 周波帆, 杨正刚, 等. 复杂工况条件下天然源面波方法的探测效果研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2023, 45(S1): 88-95.
- [4] 王梦迟. 基于 SPAC 法天然源面波勘探技术研究 [D]. 吉林大学, 2018.
- [5] 王河, 陈宗刚, 张明财, 等. 微动台阵探测技术在抽水蓄能工程场地勘查中的应用 [J/OL]. CT 理论与应用研究, 2025. <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.192>.