

基于线形台阵的微动探测技术在城市地铁孤石探测中的应用

陈少华^{1,2}

¹深圳市勘察研究院有限公司, 广东 深圳

²深圳市鼎强土木工程咨询有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月27日

摘 要

孤石影响地铁盾构施工是常见地质现象, 微动探测则是孤石探测的有效手段, 但是, 当场地面积有限时, 圆形、嵌套三角形等微动探测台阵难以展开。本文在深圳地铁在建地铁站点内部道路布设直线形微动探测台阵, 采用扩展的空间互相关算法从微动数据中提取了面波相速度频散曲线, 并进行了反演。反演结果表明, 探测区域地表存在5 m厚硬化层, 在20~30 m深地层处存在孤石, 与钻孔验证结果一致, 表明当场地条件不利于布设圆形、嵌套三角形等微动台阵布设时, 直线形台阵也能够有效的进行城市地铁施工区域的孤石探测。

关键词

孤石探测, 微动方法, 扩展的空间自相关方法, 城市地下空间探测

The Microtremor Survey Technology Based on Linear Array and Its Application in the Boulder Detection in Urban Subways

Shaohua Chen^{1,2}

¹Shenzhen Investigation & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²Shenzhen Dingqiang Civil Engineering Consulting Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: September 8, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 27, 2025

Abstract

Boulders are a common geological phenomenon that affects subway shield tunneling construction.

文章引用: 陈少华. 基于线形台阵的微动探测技术在城市地铁孤石探测中的应用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(10): 1436-1442. DOI: 10.12677/ag.2025.1510133

Microtremor survey technology serves as an effective method for detecting these boulders. However, when the available site area is limited, it becomes difficult to deploy conventional microtremor arrays such as circular or nested triangular configurations. In this study, a linear microtremor array was deployed along the internal roads of an under-construction station on Shenzhen Metro Line 19. The phase velocity dispersion curves of surface waves were extracted from the microtremor data using an extended spatial autocorrelation algorithm and were subsequently inverted. The inversion results reveal the presence of a 5-meter-thick hardened surface layer and cushion layer at the top, and a boulder was detected at a depth of 20~30 meters, which is consistent with borehole verification data. These findings demonstrate that linear arrays can effectively detect boulders in urban subway construction areas where site conditions are unsuitable for deploying circular or nested triangular microtremor arrays.

Keywords

Boulder Detection, Microtremor Technology, Extended Spatial Auto-Correlation Method, Urban Subsurface Exploration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

盾构法是常见的隧道开挖技术, 相比其他地下挖掘技术, 盾构法建设速度快, 安全性高。但是, 隧道的盾构施工对地质环境有一定的要求。其中, 孤石是影响盾构施工的主要地质现象之一。在花岗岩发育地区, 孤石是普遍存在地质现象, 当盾构设备施工过程中遇到比较大的孤石时, 容易出现卡机问题, 极大地增加施工成本, 在极端情况下, 甚至会造成地面塌陷、危害地表建筑的安全。因此, 在城市地铁盾构施工的过程中, 通常需要预先对孤石进行探测, 然后采用爆破或密集钻孔破碎等方式进行其进行处理, 确保盾构设备安全穿越孤石区[1] [2]。

探地雷达、高密度电法、瞬变电磁以及跨孔 CT 等方法常见的浅地表地球物理探测方法, 这些方法均有应用于在隧道施工的孤石探测中[3]-[6]。然而, 在城市环境中, 受限于复杂的电磁背景干扰及地表情况, 以及部分孤石较深的埋深, 诸多物探方法难以达到预期效果[7]。微动探测技术通过地震仪记录的城市背景噪声进行地下结构的探测, 天然具备较强的抗干扰能力, 是城市物探的首选方法, 在城市地铁施工过程中取得了良好的应用效果[8]-[15]。传统的微动探测方法基于空间自相关方法(SPAC), 需使用圆形台阵进行数据的采集, 限制了在施工现场狭小的情况下的应用, 本文在有限的城市地铁施工场地中, 布设线性台阵, 利用扩展的空间自相关方法(ESPAC)进行孤石探测, 为解决施工场地面积受限情况下的孤石探测提供相关参考。

2. 微动探测基本原理

微动是地球地表存在的微弱震动, 主要来源于风速、海浪、潮汐等自然现象和车辆、人类活动等人文噪音。Aki (1957)发现如果微动信号在时空上符合平稳随机过程, 则其空间自相关系数 $\rho(\omega, r)$ 等同于第一类零阶贝塞尔函数[16]:

$$\rho(\omega, r) = J_0(rk) \quad (1)$$

其中, $k = 2\pi f/c$, c 为面波相速度。因此, 使用第一类零阶贝塞尔函数 J_0 拟空间自相关函数, 即可获得

面波相速度频散曲线。基于此, Aki (1957)提出了使用圆形台阵提取微动空间自相关系数的 SPAC 方法 (Spatial Auto-Correlation Method), 利用微动信号探测地下空间结构。该方法通过以下公式计算空间自相关系数:

$$\rho(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{Real} \left\{ \frac{S_A(r, \omega) S_O^*(\omega)}{\sqrt{S_A(r, \omega) S_A^*(r, \omega) S_O(\omega) S_O^*(\omega)}} \right\} d\theta, \quad (2)$$

其中, ω 是角频率, $S_O(\omega)$ 和 $S_A(r, \omega)$ 分别为圆心 O 点和圆周上 A 点(图 1)记录到的微动数据傅立叶变换, * 则代表复数共轭。

在实际工作中, 通过使用奇数个地震仪, 例如, 5, 7, 9, 组成的圆形台阵, 即可实现空间自相关系数的提取[17]。即便如此, 圆形台阵的布设方式也极大的限制了未动探测方法的应用。基于空间自相关系数 $\rho(\omega, r)$ 是关于频率和距离两个自变量的函数, Ling (1994)提出了扩展的空间自相关法(ESPAC 法, Extended Spatial Auto-Correlation Method), 即采用固定的频率求不同距离 r 空间互相关系数, 然后通过贝塞尔函数拟合距离 - 空间自相关系数曲线, 获得面波频散曲线[18]。基于该方法, 微动探测台阵可以布设成任意形状, 目前常用的微动探测台阵有嵌套三角形、L 形、十字形及直线形等(图 1)。

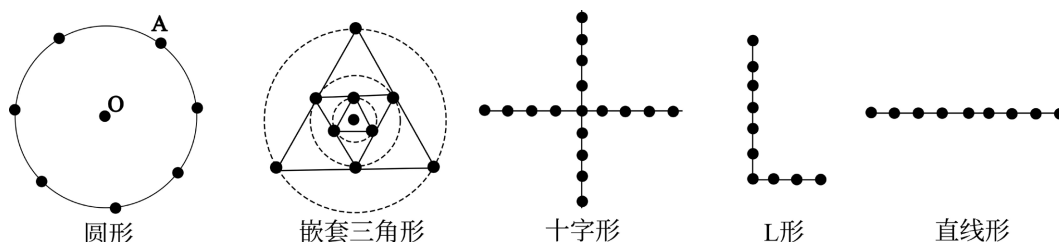


Figure 1. Observation diagram of microtremor detection array

图 1. 常用微动探测台阵观测示意图

3. 数据采集及数据处理

3.1. 测区概况



Figure 2. Survey area and data acquisition

图 2. 测区场地及数据采集作业图

本次测量位于深圳市地铁拟建站点内部,该站点位于城区内部,地表已经经过多年的人工建设和改造,且该站点已开始施工建设,场地内可供微动仪器布设空间有限,难以完成圆形、嵌套三角形等传统微动观测系统布设(图 2)。根据前期勘察报告,该地铁沿线地区地表为第四纪堆积层、冲洪积黏性土、淤泥质黏性土、中粗砂、残坡积砂质,下伏石炭系下统测水组粉砂岩、燕山四期花岗岩。经专家组论证,该盾构路径前方可能存在孤石、硬夹层等异常情况,为保证后续盾构施工的顺利进行,需对盾构路径前方的地下空间结构进行详细探测。

3.2. 数据采集

根据任务目标及测区概况,沿施工场地内部道路布设直线形微动测线,测线长 23 m,共设有 24 个测点,测点间距 1 m。每个测点由呈线性排列的 9 个检波器组成,其道间距也为 1 m(图 2)。检波器为劳雷的 Atom 型微动勘探检波器,带宽 0.2~1650 Hz,设置采样间隔 1 ms,采样时长 16 分钟。单个测点的微动信号如图 3 所示。

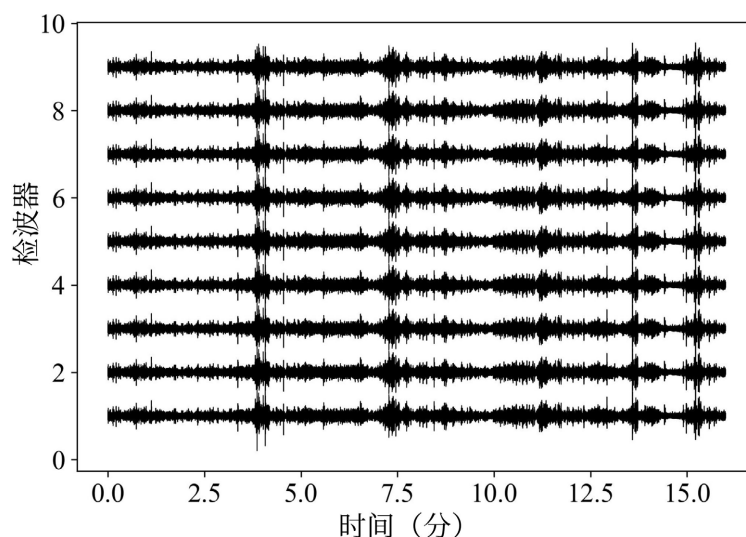


Figure 3. Microtremor recording at a single measurement point
图 3. 单个测点的微动信号记录

3.3. 数据处理

本文按照 ESPAC 方法对 9 个检波器组成的噪声信号进行处理[18][19]。首先,分别对 9 个检波器记录到的噪声数据做傅立叶变换,然后计算同一频率不同距离下的空间自相关系数,再拟合贝塞尔函数获得面波相速度频散曲线(图 4)。

图 5 给出了沿测线的面波相速度频散曲线,沿测线,频散曲线的高频部分的相速度明显高于低频部分,表明该地区地表速度较高,可能存在较厚的硬化层。在频散曲线的较低频部分,测线左端 10 Hz 左右存在高速能量团,表明该区域可能存在孤石或硬质夹层。本文根据岩土勘察资料及岩性和速度的经验关系估算工作区域的一维 S 波速度结构模型作为初始模型,速度结构模型的层厚为 3 m、层数为 15 层,然后使用粒子群算法对各测点的频散曲线进行了反演。反演过程中,本文在初始模型上叠加 30% 的随机扰动构建粒子群反演算法种群的初始位置,种群个数为 150 个,迭代次数 200 次。通过粒子群反演算法调整速度结构模型各层的 S 波速度值,获得各测点下方的一维 S 波速度结构,然后通过最近邻点法插值和高斯平滑得到测线下方的二维 S 波速度结构(图 6)。

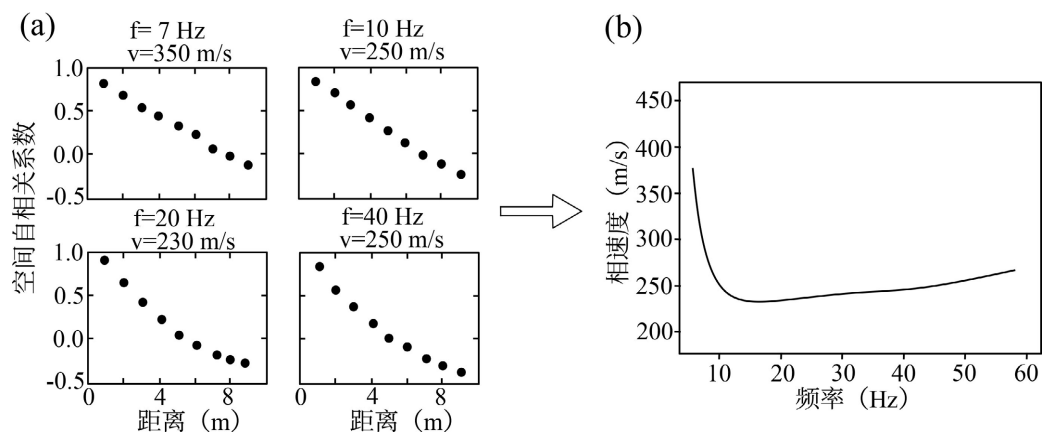


Figure 4. Flowchart of the ESPAC method for calculating surface wave phase velocity dispersion curves. (a) Spatial autocorrelation coefficients at different distances for the same frequency. (b) Surface wave phase velocity dispersion curve obtained by fitting the spatial autocorrelation coefficients with the Bessel function

图 4. ESPAC 方法计算面波相速度频散曲线流程图。(a) 同一频率下不同距离的空间自相关系数。(b) 使用贝塞尔函数拟合空间自相关系数获得的面波相速度频散曲线

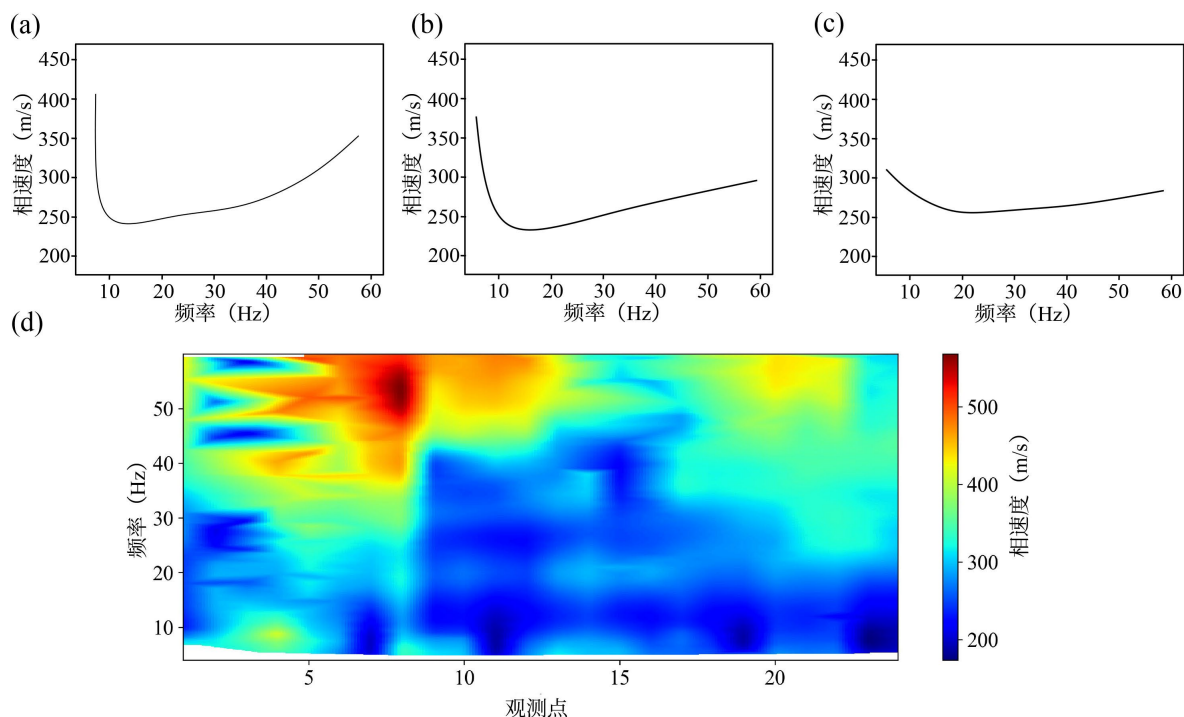


Figure 5. Surface wave dispersion curves extracted at different measurement points along the microtremor survey line. (a)~(c) show the dispersion curves obtained at positions 0 m, 15 m, and 23 m, respectively. (d) is the phase velocity profile obtained by all the dispersion curves

图 5. 微动测线不同测点位置提取的面波频散曲线。(a)~(c) 分别是 0 m, 15 m 和 23 m 位置提取的面波频散曲线。(d) 是所有面波频散曲线插值获得的相速度剖面

4. 成果解释

深圳市地铁沿线孤石微动探测场地内的 S 波速度剖面如图 6 所示。本次微动探测深度可达 30 m 左右。受地表硬化层及垫层的影响,在测线 0~5 m 深度范围内, S 波速度高于下伏地层。在 5 m 深度之下,速度整体由浅到深逐渐增加,与常见的浅地表速度结构特征一致。

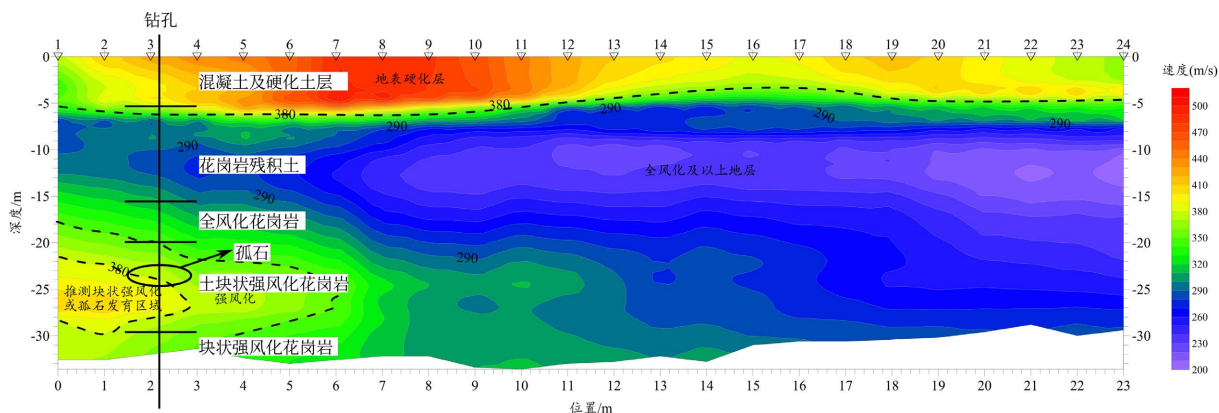


Figure 6. Microtremor survey result profile (S-wave Velocity Structure profile) and the interpretation from borehole data. The black solid lines in the figure represent the strata revealed by drilling, and the black text on a white background indicates the corresponding lithology of the boreholes. The labels above the horizontal coordinate axis indicate the observation point numbers, while those below indicate location information

图 6. 微动探测成果剖面(S 波速度结构剖面)及钻孔解释。图中黑色实线为钻孔揭示的地层, 白底黑字为相应的钻孔岩性。图中横坐标上方标注为观测点点号, 下方标注为位置信息

浅地表的岩性速度值受岩层压实程度、含水量、孔隙率等的因素影响明显, 不同地点同意岩性的速度可能存在较大差异[20], 一般情况下, 需要依据研究区域的少量钻探结果, 才能对 S 波速度剖面进行准确的岩层划分。当缺少钻孔资料时, 可根据探测目标的异常特征以及其速度结构经验值, 对探测结果进行推断。本文微动探测的探测目标是地下可能存在孤石, 为花岗岩长期风化过程中, 形成不易风化的花岗岩残留核(球状风化核)。孤石横波速度应与围岩有明显差异, 在常见的孤石探测中, 该差异达到 1~2 倍。在实际工作中, 孤石视横波速度结构的常见值在 500 m/s 左右, 但在一些情况下, 其值也可能为 380~400 m/s [10]。本文测线横向坐标约 0~4 m, 深度约 21~30 m 范围内 S 波速度明显高于周围地层层, 且其 S 波速度大于 380 m/s, 在深圳市的孤石探测研究中, 已有案例证实孤石的速度值可能为 380 m/s 左右[10], 因此, 本文推测其为块状强风化或孤石发育区域。根据微动探测结果及现场施工条件, 本文在横坐标 2 m 左右(观测点 3 附近)进行钻孔验证, 钻探结果与微动成果剖面对比图如图 6 所示。

5. 讨论

尽管在本文的微动探测指导下, 钻探探测准确的找到了孤石的位置, 但是, 对比钻探资料可以发现, 微动探测结果与实际地层存在一定偏差(图 6), 例如, 常见的孤石横波速度在 500 m/s 左右, 而本文孤石所在位置的横波速度仅为 380 m/s, 甚至更低。而且, 微动探测结果的 S 波速度峰值在深度 26 m 附近, 而孤石位置在 22~24 m 范围内。本文推测, 造成这种偏差的原因有以下两点。其一是反演分辨率的限制。本文速度结构模型的层厚为 3 m, 而孤石的厚度仅为 2 m 左右。此外, 为了消除反演过度拟合造成的假异常, 本文对反演结果进行了平滑。这些原因导致反演结果中, 孤石的 S 波速度值是其与附近围岩速度值的平均, 小于其真实横波速度值。造成本文微动探测结果与真实地层结构有偏差的另一个原因可能与噪声源的分布有关。数值研究结果[21]表明, 当噪声源分布不均匀时, 使用直线形台阵进行微动探测, 提取到的频散曲线误差较大, 从而导致反演结果的准确性降低。但是, 该影响可能是系统性的影响, 在该影响下, 也就是说, 当噪声源分布不均匀时, 可能会导致直线形微动探测的绝对 S 波速度值不准确, 但是其相对速度值仍旧可靠。本文即是主要根据沿测线的横波速度变化, 推测孤石所在的位置。

6. 结论

本文使用 ESPAC 方法在深圳地铁在建站点内部进行了微动探测。由于场地空间有限, 不利于圆形、

嵌套三角形等形式的台站展开, 本文沿站点内部道路布设直线形台阵, 进行微动数据的采集, 然后从微动数据中提取了面波相速度曲线, 并反演得到了微动测线下方的 S 波速度结构。微动探测结果表明, 工作区域地表存在 5 m 厚的硬化层, 在微动测线左端、25~27 m 深度位置的地层中存在孤石。

根据该探测结果进行钻探验证, 在 22~24 m 深度范围内可见孤石, 表明基于直线形台阵的 ESPAC 方法是进行地铁沿线微动探测的有效方法。但是, 钻孔验证结果和微动探测结果存在一定偏差, 表明直线形台阵的 ESPAC 方法可能存在速度值反演不准确的问题, 其原因可能与噪声源分布不均匀有关。基于此, 尽管直线形微动台阵在本文的案例中获得了成功应用, 本文仍建议在不同地区开展更多的研究, 进一步验证直线形微动台阵的探测能力, 并发展噪声源不均匀分布情况下的微动信号校正技术, 以提升线形台阵的探测能力。

参考文献

- [1] 靳兆阳, 牛刚. 大直径泥水盾构突遇孤石群处理关键技术——以福州滨海快线地铁项目为例[J]. 科技和产业, 2025, 25(11): 47-53.
- [2] 卢少壮, 赵璐, 郭志峰. 大直径盾构穿越滨海孤石地层精准物探与处置技术研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(5): 195-204.
- [3] 党如姣. 孤石的物探探测方法[J]. 隧道建设, 2012, 32(S2): 56-60.
- [4] 王俊超, 师学明, 万方方, 等. 探测孤石高阻体的跨孔电阻率 CT 水槽物理模拟实验研究[J]. CT 理论与应用研究, 2012, 21(4): 647-657.
- [5] 姚金. 高密度电法在某地铁工程孤石勘察中的应用[J]. 勘察科学技术, 2015(4): 57-59+64.
- [6] 朱亚军, 龙昌东, 杨道煌. 井间电磁波 CT 技术在地下孤石探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(6): 721-725.
- [7] 杜发. “孤石”精细探测物探方法研究——以福州滨海快线为例[J]. 甘肃地质, 2022, 31(2): 70-76.
- [8] 李志华. 铁路煤矿采空区综合物探技术研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(10): 26-31.
- [9] 徐佩芬, 李传金, 凌甦群, 等. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1923-1930.
- [10] 徐佩芬, 侍文, 凌甦群, 等. 二维微动剖面探测“孤石”: 以深圳地铁 7 号线为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2120-2128.
- [11] 李广才, 李培, 姜春香, 等. 我国城市地球物理勘探方法应用进展[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1799-1814.
- [12] 刘宏岳, 黄佳坤, 孙智勇, 等. 微动探测方法在城市地铁盾构施工“孤石”探测中的应用——以福州地铁 1 号线为例[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1500-1506.
- [13] 杨坤. 地铁盾构施工不良地质体微动探测技术研究及应用[J]. 市政技术, 2018, 36(5): 82-86.
- [14] 庞林军, 赵锐, 喻征超. 微动探测技术在城市轨道交通区间盾构隧道施工中的应用技术[J]. 水利水电施工, 2016(5): 41-47+54.
- [15] 衣利伟, 黄两宜, 曹勇, 等. 微动探测技术结合深孔爆破在处理盾构孤石中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 884-891.
- [16] Aki, K. (1957) Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo.
- [17] Okada, H. (2006) Theory of Efficient Array Observations of Microtremors with Special Reference to the SPAC Method. *Exploration Geophysics*, **37**, 73-85. <https://doi.org/10.1071/eg06073>
- [18] Ling, S.Q. (1994) Research on the Estimation of Phase Velocities of Surface Waves in Microtremors. PhD Thesis, Hokkaido University.
- [19] Xu, P., Ling, S., Long, G., Qiao, G., Shen, Q., Yao, J., *et al.* (2021) ESPAC-Based 2D Mini-Array Microtremor Method and Its Application in Urban Rail Transit Construction Planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **115**, Article 104070. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104070>
- [20] Kassab, M.A. and Weller, A. (2015) Study on P-Wave and S-Wave Velocity in Dry and Wet Sandstones of Tushka Region, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, **24**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.02.001>
- [21] 杜亚楠, 龚雪, 徐佩芬, 等. 微动勘探中噪声场分布的不均匀性对圆形和直线形台阵的影响研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1007-1012.