文章编号：1007-2993(2026)04-0552-07

微动在空洞探测中的应用研究

董　耀[1,2,3]　金　路[2,3]　刘　岩[4]　张　卓[2,3]　齐　坤[2,3]

（1. 河南理工大学，河南焦作　454003；2. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南郑州　450053；3. 河南省自然资源科技创新中心（地球物理深部探测研究），河南郑州　450053；4. 中兵勘察设计研究院有限公司，北京　100053）

【摘要】 针对郑州市三环内老城区地下人防工程分布广泛、年代久远且资料缺失的问题，采用天然源微动探测技术进行地下空间探测。以某中学已知地下人防工程为地质模型，通过对比圆形、菱形、十字形及直线形等多种观测系统的探测效果，评估了该技术的适用性。结果表明，二维观测装置（尤其是多重圆形和菱形装置）较一维直线形装置具有更优的探测效果，其平面定位精度高，深度误差小，能够有效识别地下防空洞的空间分布特征。该方法具有操作简便、效率高、无损检测等优势，为城市地下空间探测提供了可靠的技术手段，对微动探测技术的推广应用具有实践意义。

【关键词】 人防空洞；微动探测；观测系统；视横波速度

【中图分类号】 P631　**【文献标识码】** A　doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0062

Application research of microtremor exploration in void detection

DONG Yao[1,2,3]　JIN Lu[2,3]　LIU Yan[4]　ZHANG Zhuo[2,3]　QI Kun[2,3]

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 2. Mineral Resources Exploration Center, Bureau of Henan Geological, Zhengzhou 450053, Henan, China; 3. Henan Natural Resources Science Technology Innovation Center (Geophysical Deep Exploration Research), Zhengzhou 450053, Henan, China; 4. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China)

【Abstract】 Aiming at the problems of wide distribution, long service life and lack of data of underground civil air defense projects in the old urban areas within the third ring road of Zhengzhou City, this study adopts the natural-source microtremor exploration technology for urban underground space detection. Taking the known underground civil air defense project of a middle school as the geological model, the applicability of this technology is evaluated by comparing the detection effects of various observation arrays including circular, rhombus, cross and linear arrays. The results show that two-dimensional observation arrays, especially multi-circular and rhombus arrays, have better detection performance than one-dimensional linear arrays, with high planar positioning accuracy and small depth error, which can effectively identify the spatial distribution characteristics of underground air-raid shelters. This method has the advantages of simple operation, high efficiency and non-destructive testing. It provides a reliable technical means for urban underground space detection and is of great practical significance for the popularization and application of microtremor exploration technology.

【Key words】 underground civil air defense; microtremor exploration; observation system; apparent shear wave velocity

0　引言

在地球物理勘探领域，微动勘探技术凭借其独特优势，近年来获得了广泛的应用和长足发展[1]。该技术借助自然场源进行勘探，有效避免了人工震源对环境造成的干扰，使其在城市等人口密集、环境敏感区域的应用中极具潜力[2−3]。微动信号具备频带宽、频率低、波长长的特性，这使得勘探深度能够灵活调整，从浅部地层到深部地层都能实现精准探测[4−5]。同时，观测系统的多样性和强大的抗干扰能力，进一步拓展了微动勘探技术的应用范畴，为解决复杂地质

基金项目：2023 年河南省科技厅重点研发专项(231111320700)；豫地矿青科创〔2021〕8 号项目；河南省自然资源科研项目(2022-2)

作者简介：董　耀，男，1987 年生，硕士，高级工程师，在读博士研究生，研究方向为综合地震、电磁法、重力勘探等方面工作。E-mail: dongyaocugb@163.com

通信作者：金　路，女，1986 年生，大学本科，高级工程师，研究方向为综合地震、电磁法、重力勘探。E-mail: jinlu1986215@163.com

问题提供了新的思路与方法[6−8]。

郑州市老城区内分布着 200 多个早期民防项目, 这些老旧防空洞总面积约达 30 万 m^2, 其中 26 个位于主要城市干道下方。这些防空洞大多建于 20 世纪 60—70 年代, 建造依据多为手绘图纸。城市建设发展, 地表建筑发生了很大的变化, 仅依靠旧图纸已难以精准确定这些历史防空洞的具体位置和布局。由于长期缺乏维护与重视, 许多防空洞内部出现了不同程度的变形与坍塌, 出入口和通风井也大多被堵塞或掩埋, 特别是雨季前后防空洞极易发生坍塌, 进而引发地面事故, 造成严重的人员伤亡和经济损失。如 2021 年 7 月某区域的老旧防空洞坍塌, 导致附近道路塌陷, 车辆被困, 数人受伤, 直接经济损失达数千万元。

老旧防空洞集中在人口密集的城市区域, 建筑密度和交通流量大, 噪声控制等环境保护要求高, 给防空洞探测带来挑战。这就要求采用抗干扰能力强、施工效率高的仪器和方法进行有效探测, 同时将对周围环境的影响降至最低。因此, 准确探测这些老旧防空洞, 对保障居民生命和财产安全的城市发展举措意义重大[9]。

目前, 针对现场数据采集观测系统的研究和评估较少, 开展老旧防空洞检测的试验及相关研究, 分析圆形阵列、菱形阵列、十字形阵列、L 形阵列和线性阵列等观测系统的适用性和有效性, 对积累技术优势十分关键。本研究以郑州市老城区防空洞探测项目为依托, 针对观测系统的具体评估研究和数据采集方法利用的不足, 重点分析微动探测中瑞利面波频散特性, 以便通过反演技术进行解释。针对老旧防空洞的探测试验, 不仅能积累技术优势, 还可评估各种观测台阵的适用性和有效性[10]。

1　微动探测技术原理

1.1　方法原理

微动是地球表面持续存在的微弱振动, 主要包含体波和面波, 而面波能量占总信号能量的 70% 以上, 且主要利用面波中的瑞利波[7]。瑞利波传播时在不均匀介质中产生频散现象, 即不同频率的波以不同速度传播[11]。通过分析这种频散现象, 能够反推出地下介质的弹性参数。微动在具体应用中的类型众多, 如被动源面波、环境随机振动、天然源面波、地脉动或背景噪声等, 本质上都是无特定震源的微弱振动, 广泛存在于地球表面任何地点、任何时刻, 振幅约为 10^{-4} ~ 10^{-2} mm。微动震源一般分为人类活动和自然场两大类, 人类活动产生的信号频率大于 1 Hz, 是高频信号源, 通常叫常时微动; 自然场主要包括海浪对海岸撞击、河水流动、风、雨、气压变化等, 频率小于 1 Hz, 为低频信号源, 也叫长波微动[7,9,12]。震源距离台阵较近时, 微动波场包含体波和面波; 震源距离台阵较远时, 微动波场主要为面波信息。

1.2　瑞利波特性

微动是由体波和面波组成(见图 1), 实际应用中常利用面波信息中的瑞利波[9]。瑞利波的主要特性如下:

(1)质点运动轨迹: 质点运动轨迹为逆时针椭圆, 椭圆长短轴之比约为 3∶2。

(2)能量分布: 能量集中于地表附近, 随深度呈指数衰减, 影响深度约为一个波长, 能量主要集中在半个波长范围内[9,12−13]。

(3)频散特性: 相速度与频率有关, 在不均匀介质中传播时产生频散现象, 而体波无频散现象。

(4)与横波速度关系: 在分层介质中, 相速度与横波速度密切相关, 可用于估算横波速度, 即某个波长相速度基本上等于半个波长内各地层的横波相速度加权平均值。

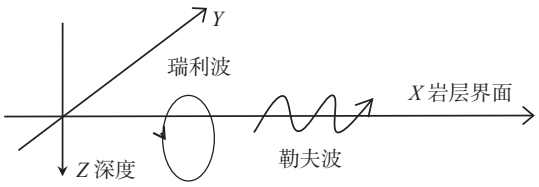


图 1　微动信息组成形式

Fig. 1　Composition of micro-motion information

2　应用试验点概况

2.1　试验点位置

项目研究区域位于河南省郑州市主城区某中学内, 该校地处市中心偏东北方向, 四周均为城市主干道。校园内建筑物较少, 地形平坦开阔, 有利于开展微动探测工作。学校门口有地铁 1 号线穿过, 为研究人类活动对微动场的影响提供了良好条件[14]。选定的人防工程位于校园中心位置, 埋深约 7 ~ 9.5 m, 宽度 2 m, 是一处可进行微动探测试验的场地, 具体微动测线位置如图 2 所示。

2.2　试验点地质概况

研究区地层主要为第四系松散沉积物[15], 自上而下依次为:

(1)全新统(Q_h): 厚度约 17 m, 主要为杂色粉土, 局部夹杂少量砖块碎屑。

(2)上更新统(Qp^3): 厚度约 23 m, 黄褐色粉质黏土, 稍密, 无光泽, 干强度低。

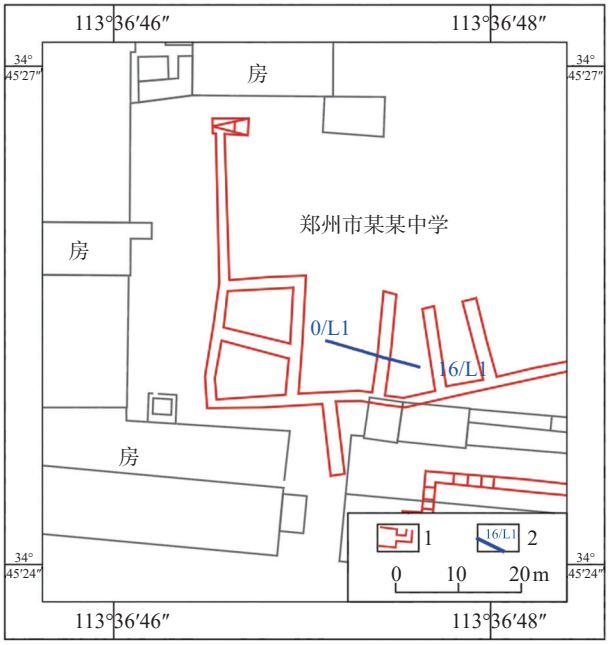


图 2 某中学微动测线位置图(1-防空洞位置；2-微动测线编号及桩号)

Fig. 2 Microtremor survey line location map of a middle school (1 - Air - raid shelter location; 2 - Microtremor survey line number and pile number)

(3)中更新统(Q_p^2)和下更新统(Q_p^1)：总厚度 60 ~ 120 m, 主要为灰、灰黄色、棕黄色粉质黏土、粉土和粉砂互层。

2.3 老旧人防空洞模型

郑州市老旧防空洞多为砖混结构, 坑道形式, 洞宽一般为 1.2 ~ 2.0 m, 高约 1.8 m, 一般埋深在地下 6 ~ 24 m。本文选择某中学老旧人防埋深 7.0 ~ 9.5 m, 宽 2.0 m, 场地较为开阔, 地表为 20 ~ 30 cm 的硬化路面, 地下为第四系松散层, 是一处理想的正演模型试验场地(见图 3)。

2.4 地球物理特征

防空洞与周围土体存在明显物理性质差异, 主要体现在以下几方面：

(1)密度：防空洞不充水时为空气密度(约 1.2 kg/m^3), 充水时为 1.0×10^3 kg/m^3。

(2)波速：防空洞纵波速度约为 1500 m/s, 远低于周围土体。

(3)波阻抗：防空洞与周围土体之间的波阻抗差异显著, 形成良好的反射界面。

此外, 塌陷防空洞由于岩土结构受到一定破坏, 产生大小不等的裂隙, 从而使防空洞的波速降低；塌陷含水防空洞与其围岩相比, 地震波在其中传播时吸收严重, 造成波速低、密度小, 同样形成良好的速度界面和波阻抗界面。

2.5 观测系统布设

在试验点布设 5 种不同类型的观测系统：

(1)多重圆形：半径分别为 1, 2, 4 m。

(2)十字形：由 17 个检波器组成, 交叉线长 8 m, 检波器道间距为 1 m。

(3)菱形：由 7 个检波器组成, 轴线长 4 m, 相邻检波器道间距为 1 m。

(4)L 形：由 13 个检波器组成, 长边 8 m, 相邻检波器道间距为 1 m。

(5)直线形：道距 1 m, 共 16 个检波器。

在试验点布设测线 1 条, 长度分别为 16 m。使

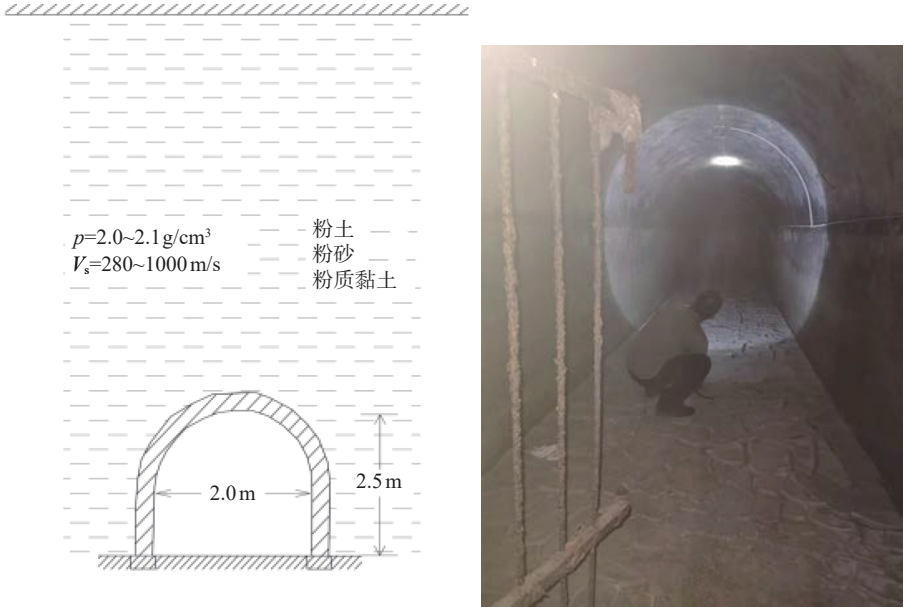
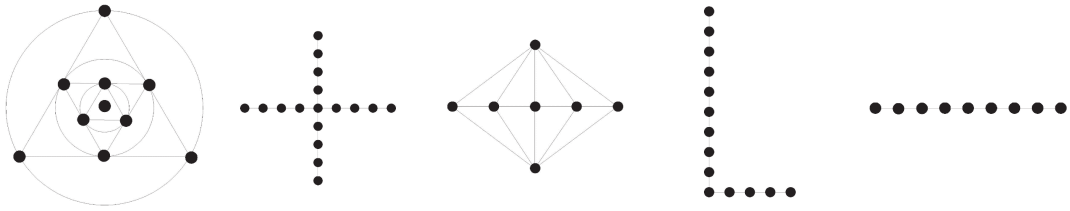


图 3 试验点防空洞

Fig. 3 Air-raid shelter at the test point

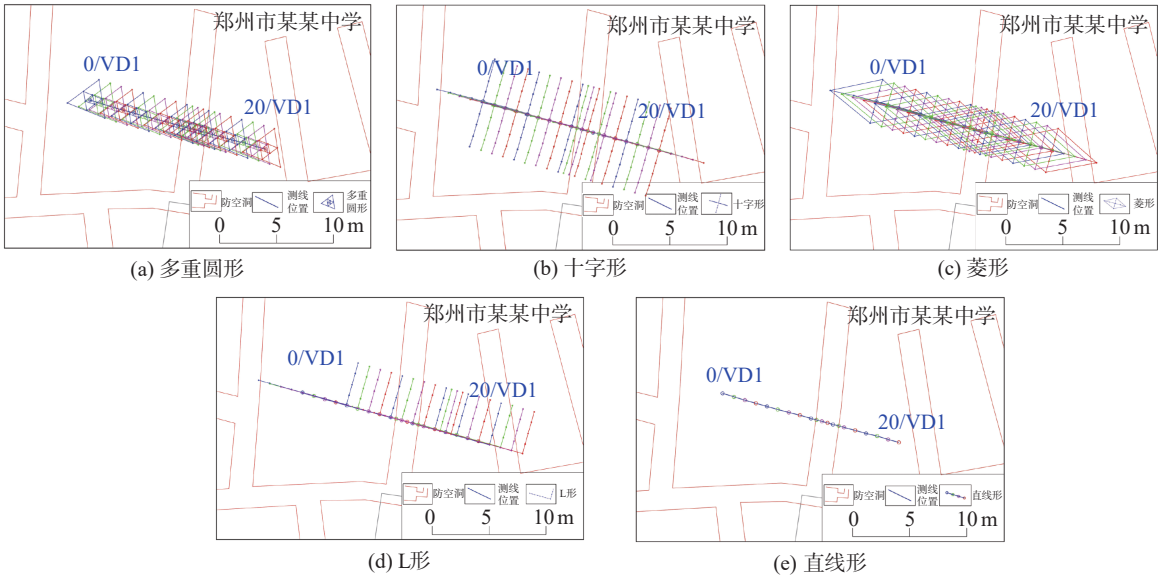
用 mole 设备, 通过不同的观测台阵(见图 4), 获取微动面波中的瑞利波[16]。图 4 中 5 种观测系统中心点重合, 单点采集时间均大于等于 30 min, 采样率均设置为 50 Hz, 其检波器摆放方式如图 5 所示。



(a) 多重圆形　(b) 十字形　(c) 菱形　(d) L形　(e) 直线形

图 4　试验点采用的台阵形式图

Fig. 4　Array form diagram adopted at the test point



(a) 多重圆形　(b) 十字形　(c) 菱形

(d) L形　(e) 直线形

图 5　观测系统及其检波器摆放方式

Fig. 5　Observation system and its geophone layout

3　数据分析与结果

3.1　防空洞异常特征分析

(1)多重圆形观测系统

多重圆形观测系统得到的视 S 波速度剖面如图 6(a)所示。防空洞平面位置 8 ~ 10 m、深度 7 ~ 9.5 m 处出现闭合低速区(V_x=220 ~ 260 m/s), 与实际洞体吻合度达 95%, 边界清晰度指数为 0.82; 由于部分检波器位于第二个防空洞上方, 造成低速异常范围向大桩号方向略有扩大。

(2)十字形观测系统

十字形观测系统的结果如图 6(b)所示。低速异常清晰可见, 范围与实际防空洞位置最为接近, 两侧呈弱低速反应, 异常形态完整, 平面定位误差 0.3 m, 深度偏差 0.5 m, 与实际洞体吻合度达 82%, 边界清晰度指数 0.75。在实际探测中, 其确定的防空洞边界与实际边界误差在可接受范围内。

(3)菱形观测系统的结果如图 6(c)所示。同样在 8 ~ 10 m 深度出现低速异常, 且范围略小于多重圆形系统, 水平方向异常区面积偏大 12.5%, 深度误差>0.5 m, 与实际洞体吻合度达 73%, 边界清晰度指数 0.68。与实际防空洞位置吻合度较高, 在实际应用中依然可参考选用。

(4)L 形观测系统

L 形观测系统的结果如图 6(d)所示。在 8 ~ 10 m 深度出现梯级带状反应, 异常形态不够圈闭, 效果一般。

(5)直线形观测系统

直线形观测系统的结果如图 6(e)所示。在 8 ~ 10 m 深度出现相对高速及梯级带状反应, 深度误差较大, 效果一般。

从同一条测线上 5 种不同装置类型下反演得出的横波速度反演剖面可知, 未充水类型防空洞呈现横波速度低速反应。5 种装置类型在地层高、低速区分层方面具有较强的统一性, 分层界面效果较好。但微

动数据采集时，台阵装置有检波器位于异常体影响范围内会造成空间自相关系数计算误差，导致异常体范围扩大，影响异常范围的圈定。

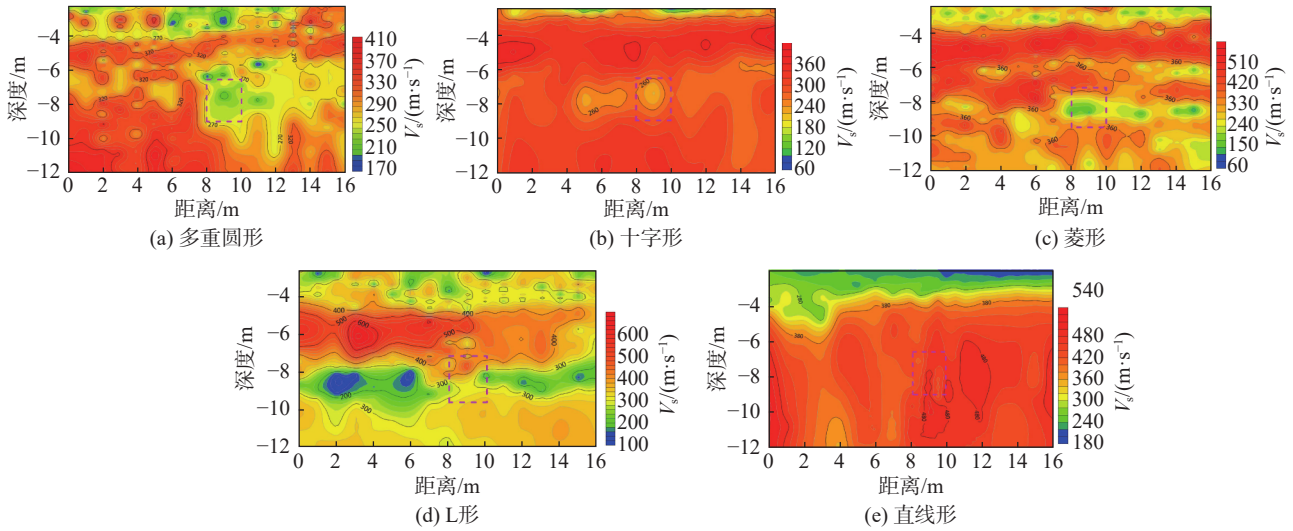


图 6 不同台阵微动视横波速度剖面图

Fig. 6 Microtremor apparent S-wave velocity profiles of different arrays

3.2 台阵性能定量评价

为系统评估不同观测台阵的探测效能，本研究采用信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)及数据利用率三项指标进行量化分析(见表 1)。SNR 通过功率谱密度比计算，反映信号抗干扰能力；RMSE 基于反演深度与实测值的偏差统计，衡量定位精度；数据利用率指有效频散点数占总采集数据的百分比。结果表明：二维台阵性能显著优于一维台阵，其中多重圆形台阵 SNR 达 12.3 dB(较直线形提升 112%)，RMSE 仅 0.38 m(误差降低 73%)，数据利用率 92.5%。其优势源于对称式几何设计可多向压制环境噪声，并提高空间自相关函数计算稳定性，尤其适用于城市复杂环境下的高精度探测需求。

表 1 对比台阵效能评价表

Tab. 1 Comparative array effectiveness evaluation table

台阵类形	信噪比SNR /dB	均方根误差RMSE/m	数据利用率/%
多重圆形	12.3	0.38	92.5
十字形	10.7	0.52	88.2
菱形	9.8	0.61	85.4
L形	6.2	1.24	73.6
直线形	5.8	1.45	68.9

4 讨论

4.1 观测系统对比

从整体效果来看，多重圆形、菱形和十字形观测系统在防空洞识别和定位方面表现出色，而 L 形和直线形观测系统效果相对较差。主要原因在于：

(1)多重圆形和菱形系统能够更好地捕捉面波信息，提高空间分辨率，更全面地反映地下结构特征。

(2)十字形系统虽然也是二维观测，但由于其在某些方向上的覆盖不足，导致精度略有下降。

(3)L 形和直线形系统为一维或准一维观测，难以准确刻画二维空间的异常体，无法有效分辨防空洞异常与周围地层背景。

4.2 微动探测优势

(1)无损探测：无需人工震源，对周围环境无干扰，特别适合在城市等环境敏感区域应用。

(2)高灵敏度：能探测微小的物理性质差异，有效识别防空洞与周围土体的细微差别。

(3)多功能性：可同时获取多种地球物理参数，为全面了解地下地质结构提供丰富信息。

(4)经济高效：设备简单，操作便捷，成本较低，便于大规模应用和推广。

4.3 局限性

(1)复杂地质条件适应性有限：在地质条件复杂的区域，可能难以分辨异常体，例如地层结构复杂、存在多种干扰因素时，探测结果的准确性会受到影响。

(2)深度分辨率受频率限制：深部探测能力有待提高，随着勘探深度增加，信号衰减和干扰因素增多，导致对深部地质结构的探测精度下降。

(3)易受人为噪声影响：在城市环境中，人为噪声源较多，如交通、施工等，应用时需充分考虑干扰因素，并采取有效的抗干扰措施。

5　结论

(1)二维台阵(多重圆形、十字形、菱形)可实现防空洞平面定位误差<1 m、深度偏差<1.5 m, 适用于城市复杂环境; 在场地条件允许的情况下, 优先采用多重圆形、菱形及十字形观测系统进行数据采集。

(2)一维台阵易受环境干扰, 需与二维数据联合解译以提高可靠性; 考虑直线形的方便快速的特点, 未来可通过进一步改进观测系统, 提高数据处理能力和抗干扰技术, 使其能更准确地探测地下目标。

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(6): 1006-1013. (SHEN Y, ZHANG H L, GONG Y F, et al. Application of natural source surface wave in urban road emergency detection[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(6): 1006-1013. (in Chinese))

[2] 王阳玲, 肖　扬, 郑革辉, 等. 微动探测方法在矿山采空区调查中的应用 [J]. 地质找矿论丛, 2024, 39(3): 445-450. (WANG Y L, XIAO Y, ZHENG G H, et al. Application of microdynamic survey to mined-out area[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2024, 39(3): 445-450. (in Chinese))

[3] 董　耀, 李光辉, 高鹏举, 等. 微动勘查技术在地热勘探中的应用 [J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1345-1351. (DONG Y, LI G H, GAO P J, et al. The application of fretting exploration technology in the exploration of middle and deep clean energy[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1345-1351. (in Chinese))

[4] 刘皓铭, 宋青山, 苏　栋, 等. 繁华城区盾构工程孤石微动探测方法及爆破技术研究 [J]. 岩土工程技术, 2024, 38(3): 273-278. (LIU H M, SONG Q S, SU D, et al. Research on micro-motion detection method and blasting technology for isolated rocks in shield construction in prosperous urban areas[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(3): 273-278. (in Chinese))

[5] 卓启亮, 于　强. 微动探测方法在城市工程地质勘察中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(5): 658-664. (ZHUO Q L, YU Q. The application of microtremor survey method in urban engineering geological investigation[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(5): 658-664. (in Chinese))

[6] 张云琦, 黄新武, 齐　坤, 等. 综合物探方法在豫北某区地热资源勘探与评价中的应用 [C]//中国地球物理学会. 2022 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题二十五: 浅地表地球物理进展、专题二十六: 应用地球物理前沿. 2022: 714-717. (ZHANG Y Q, HUANG X W, QI K, et al. Application of comprehensive geophysical methods in geothermal resource exploration and evaluation in a certain area of northern Henan[C]//Chinese Geophysical Society. Proceedings of 2022 Chinese Geoscience Union Annual Meeting—Topic 25: Progress in Shallow Surface Geophysics, Topic 26: Frontiers of Applied Geophysics. 2022: 714-717. (in Chinese))

[7] 张　星, 丁志军, 连伟章. 微动探测在矿山采空区勘查中的应用 [J]. 世界有色金属, 2021(12): 110-112. (ZHANG X, DING Z J, LIAN W Z. Application of micro motion detection in mine goaf exploration[J]. World Nonferrous Metals, 2021(12): 110-112. (in Chinese))

[8] 张　波, 刘国波, 张书香, 等. 微动探测技术在城市地铁地表沉降风险防控中的应用 [C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2021 年全国土木工程施工技术交流会论文集 (上册). 2021: 181-184. (ZHANG B, LIU G B, ZHANG S X, et al. Application of micromotion detection technology in the risk prevention and control of urban subway surface subsidence[C]// Construction Technology Magazine, Asia-Pacific Construction Science and Technology Information Research Institute Co., Ltd. Proceedings of 2021 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference (Volume 1). 2021: 181-184. (in Chinese))

[9] 董　耀, 高鹏举, 金　路, 等. 微动探测在城市地质勘查中的应用研究 [J]. 能源与环保, 2019, 41(12): 88-92. (DONG Y, GAO P J, JIN L, et al. Application research of micro-motion detection in urban geological survey[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(12): 88-92. (in Chinese))

[10] 张　雯, 张　磊, 朱尚明. 新型微动探测技术在砂卵石复合地层盾构隧道中的应用 [J]. 兰州工业学院学报, 2023, 30(6): 74-79. (ZHANG W, ZHANG L, ZHU S M. Application of new micromotion detection technology in shield tunnel of sandy cobble composite stratum[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2023, 30(6): 74-79. (in Chinese))

[11] 郭亚军, 聂伟荣, 朱继南, 等. 基于 3 个传感器的管道泄漏相关定位算法 [J]. 南京理工大学学报, 2003, 27(6): 682-685. (GUO Y J, NIE W R, ZHU J N, et al. Correlation locating algorithm based on three sensors for detecting a leaking spot[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2003, 27(6): 682-685. (in Chinese))

[12] 曹雪峰. 微动勘察方法中的数学方法研究与应用 [D].

北京: 中国地质大学 (北京), 2011. (CAO X F. The examination and application of mathematics in microtremor survey[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011. (in Chinese))

[13] 卢 川, 王肃静, 张 妍, 等. 用于微动探测的低成本自存储式数字地震检波器 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 2148-2159. (LU C, WANG S J, ZHANG Y, et al. A new low-cost no-cable digital geophone for microtremor survey[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(6): 2148-2159. (in Chinese))

[14] 雷锋国. 二维微动探测技术在广州地铁十八号线番南区间的应用研究 [J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(4): 62-65. (LEI F G. On the application of the 2-D fretting detection technology to the Fannan section of the Guangzhou Metro[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2020, 18(4): 62-65. (in Chinese))

[15] 张 卓, 裴森龙, 赵修军, 等. 郑州市隐伏构造精细探测技术应用研究 [J]. 矿产勘查, 2024, 15(S1): 364-370. (ZHANG Z, PEI S L, ZHAO X J, et al. Research on the application of fine detection technology of hidden structure in Zhengzhou City[J]. Mineral Exploration, 2024, 15(S1): 364-370. (in Chinese))

[16] 杨丽娜, 戴彦雄. 浅析瞬态面波测试在工程勘察工作中的应用 [J]. 岩土工程技术, 2018, 32(6): 303-305. (YANG L N, DAI Y X. A brief analysis of the transient surface wave test in engineering investigation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2018, 32(6): 303-305. (in Chinese))

收稿日期: 2025-02-14