

王顺,廖武林,姚运生,等.测线方位对微动线形台阵探测效果影响研究[J].地震工程学报,2023,45(2):483-490.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210922001

WANG Shun, LIAO Wulin, YAO Yunsheng, et al. Influence of line orientation on the detection effect of a microtremor linear array[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 483-490. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210922001

测线方位对微动线形台阵探测效果影响研究

王 顺¹, 廖武林¹, 姚运生², 张 驰³, 李井冈¹

(1. 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 湖北 武汉 430071;

2. 防灾科技学院, 河北 廊坊 065201; 3. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

摘要: 微动探测技术是一种经济环保、可靠实用并广泛应用于资源勘探及工程地质领域的新型物探技术。为了探讨测线方位对线形台阵探测结果的影响,研究利用武汉中心地震台实测的小尺度密集台阵数据,对比分析了多时段双重圆形、T形和不同方向线形台阵微动探测结果。研究发现不同方向的线形台阵探测结果具有明显差异,测线方位从北向东变化时实测相速度逐渐增加,且在NE45°角左右时与双重圆形结果最接近。数值模拟结果也显示当测线与主噪声源中心线夹角在30°~55°范围内时,线形台阵探测效果较好,且随着夹角增加实测相速度逐渐增加。在测区周边存在主噪声源时,实测和模拟结果均表明有限地增长观测时间难以弥补线形台阵方位分布的不足。因此,在微动探测实践前应考虑测区周边可能存在的噪声源分布,选择合适的台阵形式进行探测。

关键词: 微动探测; 线形台阵; 噪声源分布

中图分类号: P315.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)02-0483-08

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210922001

Influence of line orientation on the detection effect of a microtremor linear array

WANG Shun¹, LIAO Wulin¹, YAO Yunsheng², ZHANG Chi³, LI Jinggang¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China;

3. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: As a recent geophysical prospecting technique, microtremor survey technology is economical, environmentally friendly, practical, and widely used in resource exploration and engineering geology. To study the influence of line orientation on the results of a linear array, the microtremor survey results of a multisession double-circular linear array, T-shaped linear array, and linear arrays in different directions were compared and analyzed using the small-scale dense array data measured by the Wuhan Central Seismic Station. The results show that the results of linear arrays in different directions are remarkably different: The measured phase velocity increases

收稿日期: 2021-09-22

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(0799216); 湖北省重点基金创新团队项目(2021CFA035); 国家自然科学基金(42174177, 62106239)

第一作者简介: 王 顺(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微动探测理论及应用研究。E-mail: 1016264633@qq.com。

通信作者: 廖武林(1976—), 男, 副研究员, 主要研究方向为水库诱发地震和微动探测。E-mail: 9456677@qq.com。

gradually with a change in line orientation from north to east, and the results are closest to those of the double-circular linear array at approximately NE45°. The numerical simulation results also show that the results of the linear array are good when the angle between the survey line and the centerline of the main noise source is within a range of 30°—55°, and the measured phase velocity increases gradually with an increase in this angle. When a main noise source is present near the survey area, the measured and simulated results show that an increase in observation time cannot overcome the deficiency of the orientation distribution of the linear array. Therefore, the possible noise source distribution near the survey area should be considered before a microtremor survey.

Keywords: microtremor survey; linear array; noise source distribution

0 引言

随着能源需求和城镇化的快速推进,常规的勘探手段容易受到周边环境 and 人文干扰等影响,因此亟需发展一种抗干扰能力强,简便高效且经济环保的勘探手段^[1]。微动探测技术不依靠专门的震源,适用于人口稠密的城市与平原地区,近年来已成为国内外地球物理勘探新的研究热点之一^[2]。

微动探测技术根据获取野外数据的观测台站方式可分为微动阵列法和微动单台法。微动阵列法通过台阵(台站数量 ≥ 3)观测记录的微动信号提取瑞雷波相速度频散曲线,经反演获取横波速度结构^[3]。微动单台法是基于三分量台站记录的微动信号,计算水平分量与垂直分量傅里叶谱的比值,以此获得共振频率、估算沉积层厚度以及场地放大因子等^[4]。常规微动阵列法通常将观测系统布设成嵌套三角形或同心圆,该方法容易受到测试环境的限制。为了克服这个局限,1993 年,Ling 等^[5]发展出基于不规则台阵的拓展空间自相关方法(Extended Spatial Auto-correlation Method, ESPAC),其允许台阵形式多样化,可以布设为 T 形、线形或呈网状的任意形状。不少学者从理论或实际观测做了大量不同台阵的探测效果比较研究,认为多重圆形台阵探测结果更加可靠,其他台阵频散谱能量集中度相对偏低,但也能取得较好的效果^[6-8]。受场地影响小、布设简单的线形台阵是微动勘探野外布设的理想台阵,也是研究的重点。理论模拟显示噪声源不均匀会导致线形台阵经空间自相关法得到的面波相速度偏离真实值^[9]。对比垂直道路和平行道路线形台阵的观测结果显示垂直于道路的线形台阵频散图谱能量集中度更高,且提取出来的相速度偏小^[10],但该研究仅给出两种方向的直线形台阵的观测结果,未对测线方位与整体相速度的关系给出定量分析研究。也有人提出长时间观测能弥补噪声源空间分布的不均匀性^[11],该结论是否具有普适性还需更多观测数据来

证明。本文利用在武汉中心地震台开展的长时间密集台阵观测,分析不同台阵探测的效果,重点分析直线形台阵探测的影响因素及频散曲线随方位的变化规律,为弥补直线形台阵探测的不足,提高直线形台阵探测的可靠性提供思路和依据。

1 MSPAC 探测方法

微动是指地球上每时每刻都存在的非地震引起的微小振动^[12]。微动是由体波和面波组成的复杂信号,其中瑞雷波的能量占信号总能量的 70% 以上^[13]。作为微动信号中的主要成分的瑞雷波其在不均匀介质中传播时会发生频散现象^[14]。早期微动被认为是一种无法利用的噪声信号,随着对浅层面波的深入研究,微动逐渐被用作瑞雷波勘探的天然信号源。通过野外采集微动信号,可以从微动信号中提取频散曲线来反演地下地层结构。目前微动阵列法中常用的提取频散曲线的方法是空间自相关法(Spatial Auto-correlation Method, SPAC)。

从台阵记录的微动数据中提取面波频散曲线的 SPAC 法最早由 Aki 提出,他认为尽管微动信号的振幅和形态随时间变化,但在一定时空范围内具有统计稳定性,可以用时间与空间上的平稳随机过程描述^[15]。早期 SPAC 法中台阵常布设成嵌套三角形或者圆形,但在城市区域进行观测时,由于施工环境与条件等的限制,不易布置圆形或者嵌套三角形的台阵,为了在实际勘探中不受台阵布设形式的限制,很多学者对 SPAC 法进行了改进^[9,16],其中 Betti 发展了修正空间自相关法(Modified Spatial Auto-coorelation Method, MSPAC)。

假设存在一个不规则 SPAC 法圆形阵列,圆周上分布有 n 个台站,可以获得 $n(n+1)/2$ 个台站对信息(站间距 r , 方位角 φ)。该阵列方位分布较均匀,但我们不能用恒定半径圆形台阵的方法计算该台阵的方位平均空间自相关系数。因此我们在平面

(r, φ) 中设置半径分别为 $r_1, r_2 (r_1 < r_2)$ 的圆环,在圆环范围内的方位平均空间自相关系数 $\overline{\rho_{r_1, r_2}(\omega)}$:

$$\overline{\rho_{r_1, r_2}(\omega)} = \frac{2}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \int_0^\pi \int_{r_1}^{r_2} \rho(r, \varphi, \omega) r dr d\varphi = \frac{2}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \int_0^\pi \int_{r_1}^{r_2} \cos\left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \cos(\theta - \varphi)\right) r dr d\varphi \tag{1}$$

式中: ω 为角频率; $\rho(r, \varphi, \omega)$ 为空间自相关系数,其等价于第一类零阶贝塞尔函数; $c(\omega)$ 为瑞雷波相速度; θ 为波传播方位。

由贝塞尔函数 J_0, J_1 定义可知,每个环中的 MSPAC 系数可写成^[16]:

$$\overline{\rho_{r_1, r_2}(\omega)} = \frac{2}{(r_2^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^{r_2} r J_0\left(\frac{\omega r}{c_R(\omega)}\right) dr = \frac{2}{(r_2^2 - r_1^2)} \frac{c(\omega)}{\omega} \left[r J_1\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \right]_{r_1}^{r_2} \tag{2}$$

2 数据及结果

2.1 数据来源

为检验 IGU-16HR 型三分量节点地震仪仪器

性能,同时研究影响微动探测的因素,项目组于 2020 年 7 月—8 月在武汉中心地震台布设了一个由 150 套仪器组成的密集台阵。受场地影响,该密集台阵东西向台站间距 1 m,长度 30 m,南北向台站间距 2 m,长度为 8 m。IGU-16HR 型三分量节点地震仪授时精度误差小于 15 μ s,灵敏度不低于 75 V/m/s,自然频率为 5 Hz。本次观测采样间隔设置为 1 ms,测点位置采用测绳确定,仪器位置精度为 cm 级。从观测结果看,仪器一致性好,满足微动探测要求。

2.2 台站选取

根据密集台阵中台站位置分布情况选择了多组双重圆形台阵、T 形台阵和不同方向的线形台阵,具体台阵情况如下:双重圆形台阵内圆半径为 2 m,外圆半径 4 m,圆周上等间距布设有 4 台地震仪[图 1(a)];T 形台阵其两边边长均为 8 m,相邻台站间隔 2 m[图 1(b)];线形台阵除东西向和南北向线形台站站间距为 2 m 外,其余台阵间距在 2.23~4.47 m 之间[图 1(c)]。

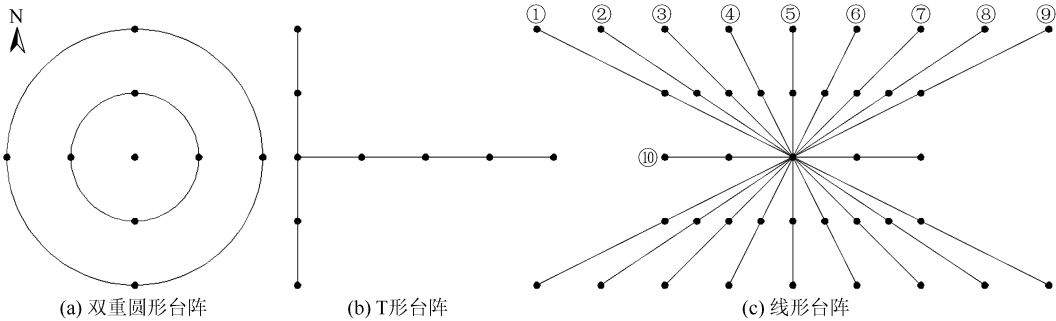


图 1 台阵测点布局

Fig.1 Layout of array points

2.3 数据处理流程

在进行数据分析之前,首先采用 ObsPy 软件包^[17]对单台微动数据进行预处理,原始数据采样率 1 000 Hz,根据本文需求对微动数据重采样至 100 Hz,同时进行去均值、去趋势项等预处理,最后对垂直向微动数据进行 1~50 Hz 的带通滤波以提高信噪比。图 2 给出了预处理之后的双重圆形台阵 10 min 的垂直向微动波形记录。

对经过预处理的数据,使用 STA/LTA 算法剔除瞬变信号,保留稳定的微动数据^[18]。长时窗为 30 s,短时窗为 1.0 s,STA/LTA 的下限为 0.2,上限为 2.5,实际计算中剔除不在该范围内的异常数据。

本文通过修正空间自相关法得到不同时段相同频段的修正空间自相关系数 ρ ,拟合零阶贝塞尔函

数,得到频散曲线图谱,根据图谱的能量集中度挑选合理的频散曲线,分析其变化规律并给出解释。

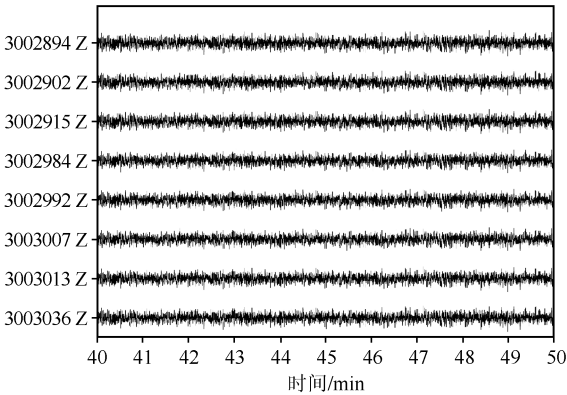


图 2 预处理后的微动波形记录

Fig.2 Microtremor record after preprocessing

2.4 数据处理结果

在野外进行探测施工时,一般台阵同步观测时长在半小时左右即可得到较好的结果。本文根据 30 分钟一个时间段使用 MSPAC 法计算自相关系数,然后根据贝塞尔函数的拟合效果获取频散图谱^[19]。选择多时间段进行处理分析,图 3 是其中

一个时段的部分台阵的频散图谱结果。我们发现不同台阵的频散图谱能量集中度具有明显差异,双重圆形台阵、⑥号和⑦号线形台阵的频散图谱能量最高,T 形台阵的频散图谱较好,而①号线形台阵的频散图谱能量集中度最低,不能有效地提取频散曲线。

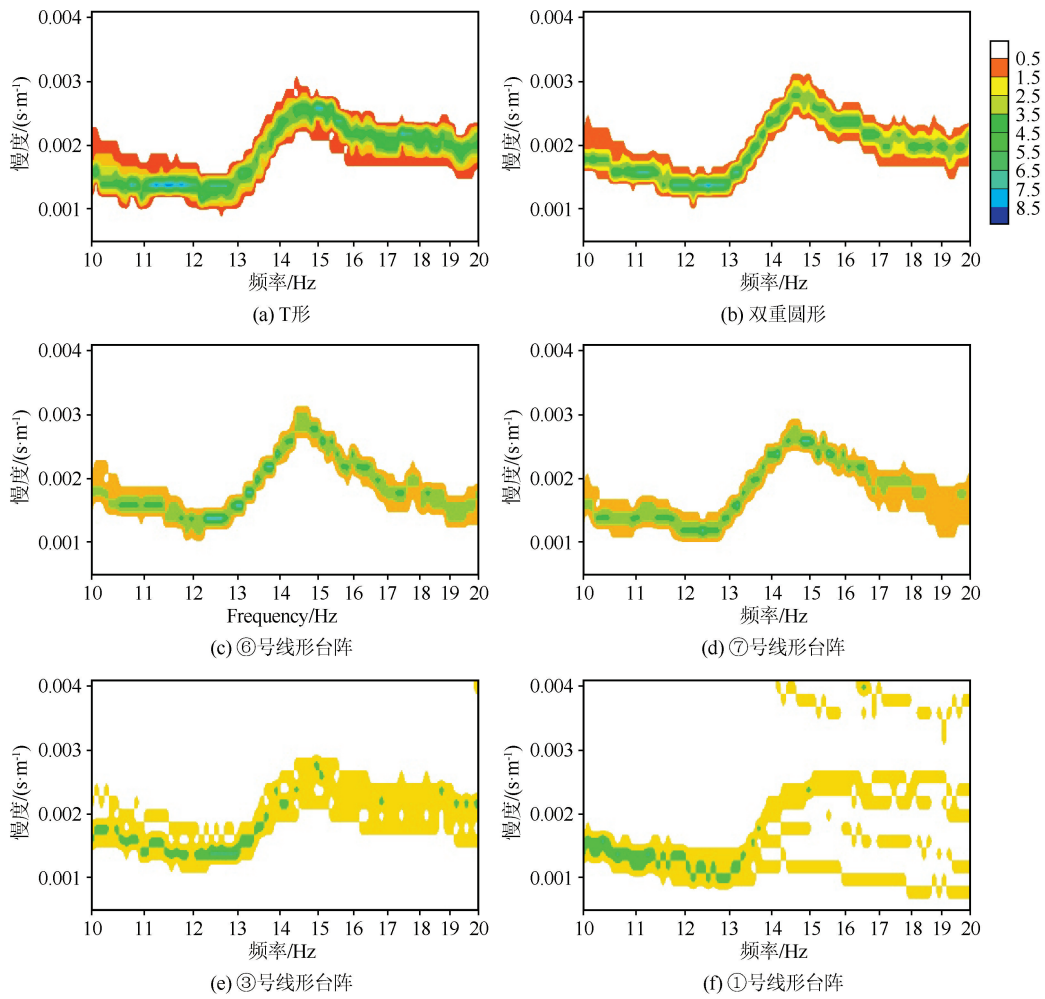


图 3 各台阵的频散图谱

Fig.3 Dispersion spectra of different arrays

由图 3 可知,同一时段不同方向的线形台阵得到的频散图谱在能量集中度上存在着较大的差异。针对线形台阵出现的情况,对同一时段的不同方向的线形台阵的探测结果进行对比分析。根据频散图谱能量集中度的差异,可以大致分为三类:第一种是能量集中度与圆形或 T 形台阵接近[图 3(c)、图 3(d)],第二种是能量集中度稍差但可以挑选频散曲线[图 3(e)],第三种就是频散图谱集中度很差,基本上不能提取频散曲线[图 3(f)]。

多个时段 T 形台阵的频散图谱能量集中度均相比同时段的双重圆形台阵略微偏低,提取出的

12~15 Hz 频散曲线与双重圆形一致,如图 4 所示。

3 讨论

3.1 观测时间长度对观测结果的影响

从不同时段的双重圆形台阵和 T 形台阵的处理结果可以看出,同时段双重圆形台阵的频散图谱能量集中度更高,不同时段两种台阵中 T 形台阵的频散图谱差异更大,但各时段均能提取出 12~15 Hz 的频散曲线且数值相近。一般来说嵌套等边三角形和双重圆形台阵的探测精度和可靠性较高,T 形和 L 形台阵频散图谱能量集中度在一定程度上

受到方位影响^[6-7],对比处理时长分别为 5 分钟、10 分钟、15 分钟、20 分钟、25 分钟、30 分钟、1 小时、3 小时、1 天、3 天的不同台阵微动数据,结果表明,当

有效记录时长达到 30 分钟左右,得到的结果已比较稳定,继续增加观测时间对于观测结果提升有限(图 5)。

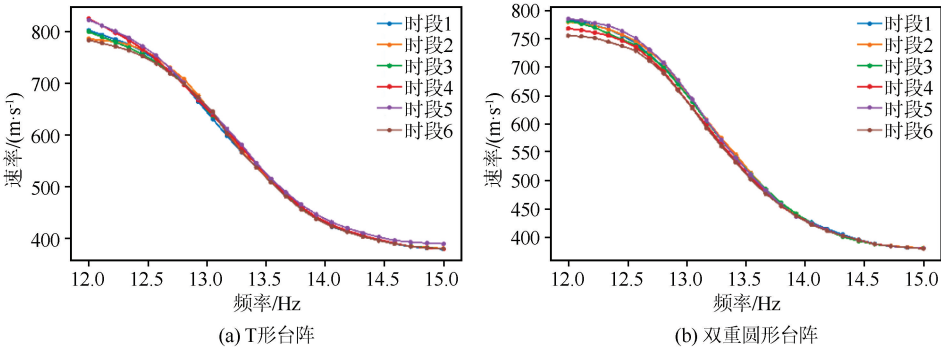


图 4 多时段的频散曲线对比

Fig.4 Comparison between dispersion curves under different periods

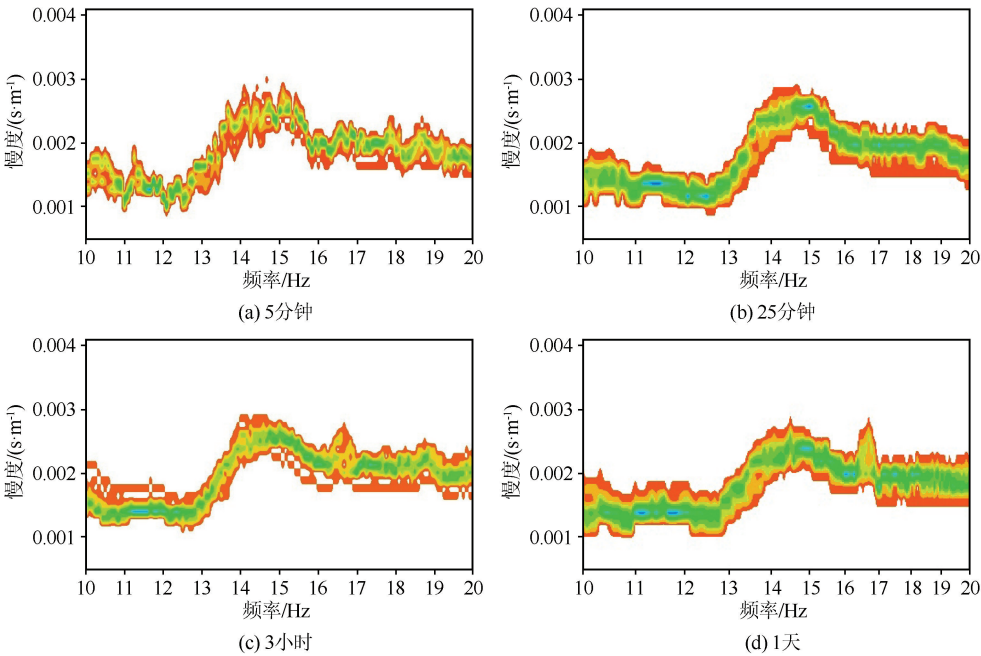


图 5 T 形台阵不同长度时间段的频散图谱

Fig.5 Dispersion spectra of T-shaped array with different lengths of time

双重圆形台阵和 T 形台阵观测结果显示,不同时长的观测记录计算结果比较一致,我们尝试使用时长分别为 30 分钟、1 小时、3 小时、1 天、3 天的①号线形台阵数据记录数据,使用同种方法计算,讨论长时间观测是否能弥补线形台阵受方位的影响。结果如图 6 所示,我们发现在测区使用较长时间的微动记录仍不能取得比较好的结果,这与可以通过增长记录时间,利用时间的平均来代替台站的方位平均的结论不一致^[11]。我们认为,可能是因为测区周边主噪声源的方位相对固定,造成有限地增长观测记录时间不能弥补线形台阵方位分布的不足,这与

我们数值模拟的结果一致。

3.2 测线方位对直线形台阵观测结果的影响

同一时段不同方向线形台阵的频散图谱能量集中度存在明显差异,经分析发现同时段,⑤号、⑥号和⑦号线形台阵的频散图谱能量集中度较高,③号、④号、⑧号、⑨号和⑩号的频散图谱频段能量集中度较差,但能提取频散曲线,①号和②号线形台阵出现频散图谱能量不集中,无法挑选频散曲线。从频散谱能量集中度较高的线形台阵提取出 12~15 Hz 的频散曲线,并将其与同时段双重圆形台阵和 T 形台阵的频散曲线进行对比(图 7),发现变化趋势基本一致,但

在相速度上存在一定偏差。我们以双重圆形台阵的频散曲线作为基准相速度,其中 T 形台阵、③号线形台阵和⑦号线形台阵的差异很小,整体相速度偏差小于 1%,④号、⑤号和⑥号线形台阵整体偏差在 4.3%~11.6%之间,⑧号、⑨号和⑩号的偏差较大,在 15%

~24%之间。我们发现,随测线方位从南北向向东西向变化时实测相速度逐渐增加,且在 NE45°角左右时与双重圆形结果最接近,在 NW45°~NE45°之间时偏差量小于 15%。对比多个时段不同方向的线形台阵结果,得到的变化规律基本一致。

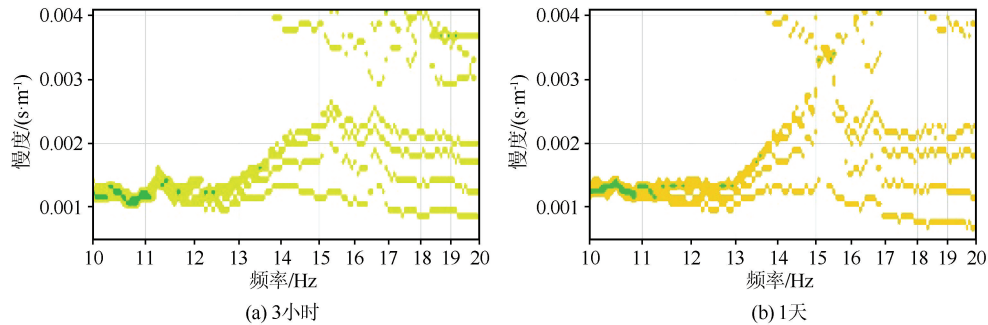


图 6 ①号线形台阵不同长度时间段的频散图谱
Fig.6 Dispersion spectra of the first linear array with different lengths of time

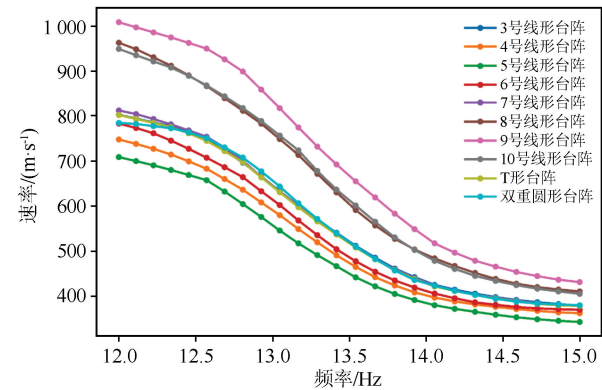


图 7 各台阵的频散曲线
Fig.7 Dispersion curves of different arrays

部分学者通过实测^[8,10]和模拟^[9]研究表明,当主要噪声源沿线入射时,线形台阵的频散图谱能量集中度高,计算得到的面波相速度会略低于真实值,但缺乏不同角度时的模拟结果。为进一步分析探测结果随测线方向呈规律性变化的原因,采用Lawrence^[20]

提出的瑞雷波数值模拟方法模拟噪声源不均匀分布下的理论微动记录,并通过前文中的分析方法提取频散曲线。图 8 为震源分布示意图以及对应的接收器的设置情况。通过改变测线方向,使其与噪声源相对集中区域中心线所成夹角在 0°~90°间变化,且按 5°的步长逐渐增加,得到 19 组分析结果。通过对比各向线形台阵频散曲线(图 9)及其与理论频散曲线整体偏差(表 1),我们发现当夹角为 45°时,计算得到的相速度与理论相速度整体偏差为 1.4%;夹角为 0°时,计算得到的相速度最低,随着夹角的增大,相速度增大,在夹角大于 45°时,增长更快。在计算时段测区周边存在主噪声源,主噪声源中心线与测线夹角在 30°~55°范围内时偏差量小于 15%,探测结果较为可靠,偏离这个范围的线形台阵可能出现相速度偏差较大的情况。相较于数值模拟,实测数据中偏差量小于 15%的角度范围更大,我们认为,实际观测时主要噪声源分布范围更广与数值模拟

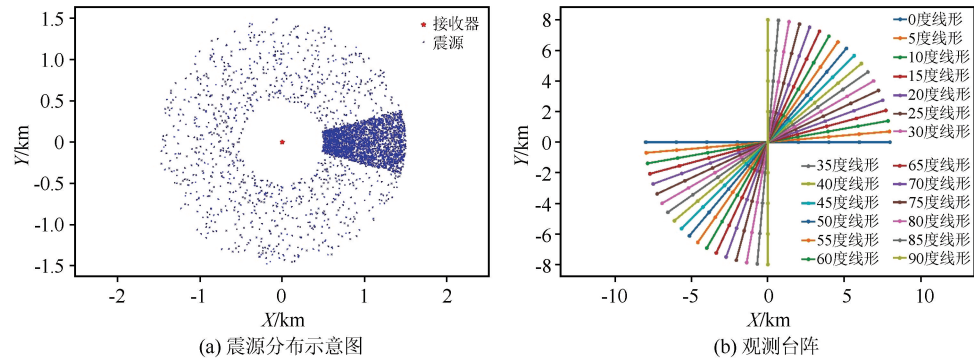


图 8 震源分布及台阵示意图
Fig.8 Schematic diagram of seismic source distribution and array

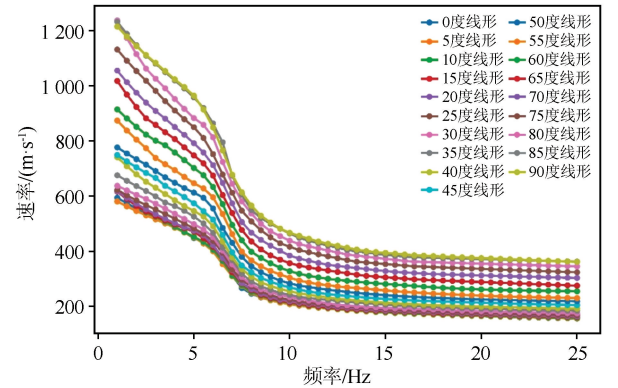


图 9 各台阵的频散曲线

Fig.9 Dispersion curves of different arrays

表 1 各台阵频散曲线偏差量

Table 1 Deviation of the dispersion curve of each array			
台阵	偏差量	台阵	偏差量
0 度线形	0.227 5	50 度线形	−0.045 3
5 度线形	0.231 6	55 度线形	−0.121 3
10 度线形	0.218 1	60 度线形	−0.211 1
15 度线形	0.206 1	65 度线形	−0.311 9
20 度线形	0.193 7	70 度线形	−0.399 3
25 度线形	0.173 7	75 度线形	−0.504 4
30 度线形	0.146 2	80 度线形	−0.589 3
35 度线形	0.105 5	85 度线形	−0.666 7
40 度线形	0.061 3	90 度线形	−0.677 5
45 度线形	0.014 0		

中噪声源分布情况略有不同,导致实测数据中可用范围比数值模拟大。

4 结论

本文基于在武汉中心地震台的实测密集台阵数据,对微动勘探中常用的 3 种台阵形式进行研究,获取不同时间段多种台站组合的频散图谱,通过对比分析可以获得以下结论:(1)在研究区域,双重圆形台阵和 T 形台阵 30 分钟左右的观测记录能取得较好的结果,线形台阵的探测结果与台阵方向有关;(2)在测区周边主噪声源的方位固定时,有限地增长观测记录时间难以弥补线形台阵方位分布的不足;(3)当测线与主噪声源中心线夹角在 30°~55°范围内时,线形台阵探测效果较好,且随着测线与主噪声源中心线夹角增加实测相速度逐渐增加,夹角在 45°时,探测效果最好。该结果显示,在实际工程中,线形台阵具有一定的探测效果,但存在主要噪声源时,得到的结果可能存在一定的偏差。由于该偏差随夹角呈现规律性的变化,在未来进行二维或三维微动探测时,可以通过在剖面起点设置多组不同方位的线形台阵观测确定探测区域周边是否存在主要

噪声源及其可能的方位,并设计最有利台阵从而进行相关校正,获得更接近该区域的探测结果。

参考文献(References)

[1] 刘铁华,刘铁,程光华,等.复杂城市环境下地球物理勘探技术研究进展[J].工程地球物理学报,2020,17(6):711-720.
LIU Tiehua,LIU Tie,CHENG Guanghua,et al.Research progress of geophysical exploration technology in complex urban environment[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020,17(6):711-720.

[2] XU P,LING S,RAN W,et al.Estimating Cenozoic thickness in the Beijing plain area using array microtremor data[J].Seismological Research Letters,2013,84(6):1039-1047.

[3] 田宝卿,丁志峰.微动探测方法研究进展与展望[J].地球物理学进展,2021,36(3):1306-1316.
TIAN Baoqing,DING Zhifeng.Review and prospect prediction for microtremor survey method[J].Progress in Geophysics, 2021,36(3):1306-1316.

[4] 彭菲,王伟君,寇华东.三河—平谷地区地脉动 H/V 谱比法探测:场地响应、浅层沉积结构及其反映的断层活动[J].地球物理学报,2020,63(10):3775-3790.
PENG Fei,WANG Weijun,KOU Huadong.Microtremor H/V spectral ratio investigation in the Sanhe—Pinggu area:site responses,shallow sedimentary structure,and fault activity revealed[J].Chinese Journal of Geophysics,2020,63(10):3775-3790.

[5] LING S,OKADA H.An extended use of the spatial autocorrelation method for the estimation of geological structure using microtremors[J].Geological Survey of Japan,1993,89:44-48.

[6] 李娜,何正勤,叶太兰,等.天然源面波勘探台阵对比试验[J].地震学报,2015,37(2):323-334,370.
LI Na,HE Zhengqin,YE Tailan,et al.Test for comparison of array layout in natural source surface wave exploration[J].Acta Seismologica Sinica,2015,37(2):323-334,370.

[7] 李井冈,谢朋,王秋良,等.不同台阵形式对微动探测结果的影响[J].大地测量与地球动力学,2020,40(1):98-103.
LI Jinggang,XIE Peng,WANG Qiuliang,et al.Influence of different array type on the results of microtremor survey[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2020,40(1):98-103.

[8] 陈基炜,赵东东,宗全兵,等.基于线形台阵的高精度微动技术在城区岩性地层精细划分中的应用[J].物探与化探,2021,45(2):536-545.
CHEN Jiwei,ZHAO Dongdong,ZONG Quanbing,et al.High precision microtremor technology based on linear array and its application to the fine division of lithostratigraphy[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2021,45(2):536-545.

[9] 徐宗博.高频背景噪声波场模拟与面波成像[D].武汉:中国地质大学,2016.
XU Zongbo.High-frequency ambient seismic noise simulation and surface-wave imaging[D].Wuhan:China University of Geosciences,2016.

[10] 姜文龙,涂善波,何效周,等.基于车辆振动噪声的城市面波观测方法研究及其应用[J].地球物理学进展,2020,35(4):1557-1564.
JIANG Wenlong, TU Shanbo, HE Xiaozhou, et al. Research and application of passive source surface wave observation method based on vehicle vibration noise[J].Progress in Geophysics,2020,35(4):1557-1564.

[11] CHAVEZ-GARCIA F J, RODRIGUEZ M, STEPHENSON W R. An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors; exploiting stationarity of noise[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2005,95(1):277-293.

[12] LI J, YOKOI T. Assessing the applicability of L-shape array for microtremor survey[J]. Bulletin of IISEE,2010,44:1-6.

[13] TOKSÓZ M N, LACOSS R T. Microseisms; mode structure and sources[J]. Science,1968,159(3817):872-873.

[14] 丁连靖,冉伟彦.天然源面波频率-波数法的应用[J].物探与化探,2005,29(2):138-141,145.
DING Lianjing, RAN Weiyan. The application of natural source surface wave frequency-waves method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2005,29(2):138-141,145.

[15] AKI K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bulletin, Earthquake Research Institute,1957,35,415-456.

[16] BETTIG B, BARD P, SCHERBAUM F, et al. Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): application to the Grenoble area[J]. Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata,2001,42(3):281-304.

[17] BEYREUTHER M, BARSCH R, KRISCHER L, et al. ObsPy: a python toolbox for seismology[J]. Seismological Research Letters,2010,81(3):530-533.

[18] ATAKAN K, DUVAL A M, Theodoulidis N, et al. 2004. The *H/V* spectral ratio technique: experimental conditions, data processing and empirical reliability assessment[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: [s.n.],2004:2268.

[19] WATHELET M, CHATELAIN J L, CORNOU C, et al. Geopsy: a user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing[J]. Seismological Research Letters,2020,91(3):1878-1889.

[20] LAWRENCE J F, DENOLLE M, SEATS K J, et al. A numeric evaluation of attenuation from ambient noise correlation functions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2013,118(12):6134-6145.