

文章编号: 1001-1749(2023)06-0738-09

# 微动技术台阵探测能力分析与应用

陈实, 牛辉, 陶鹏飞, 张静, 胡尊平

(新疆维吾尔自治区地质调查院, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 基于近年来微动技术的应用成果, 提出了可用于评价微动技术观测台阵探测能力的两项指标: 探测深度、纵向分辨力。其中, 影响台阵探测深度的主要因素为台阵边长和检波器主频; 影响观测台阵纵向分辨力的主要因素为台阵形式和采样间隔。在对比试验的基础上, 建立了微动技术在厚覆盖区实现大探测深度的技术路线, 并在乌鲁木齐八钢石化断裂西段进行了验证, 探测成果与已知资料相符, 证明试验结论有效可靠。

**关键词:** 微动技术; 观测台阵; 探测深度; 纵向分辨力

**中图分类号:** P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.06.06

## 0 引言

微动技术是一项被动源探测技术, 具有无需人工震源、无损探测、抗干扰能力强、场地条件要求低等优点, 对城市复杂环境具有较强的适应能力, 已为北京、雄安、青岛、济南等城市地质调查项目提供了重要地质技术资料<sup>[1-3]</sup>。同时, 该项技术近年来广泛应用于采空区勘查、煤矿陷落柱调查、地下孤石探测、地层速度结构划分等浅表勘探工作<sup>[4-6]</sup>, 取得了良好的地质调查成果。

在采集仪器方面, 早先应用广泛的面波仪器为有线式连接, 只能应用三重圆观测模式采集天然面波信号, 设备体积大、线缆数量多, 工作效率较低, 难以开展大探测深度工作。2020年以来, 国内多家单位研制出集数据采集、数据存储、数据传输为一体的三分量式微动数据采集站, 理论上可布设任意形状的观测台阵, 大大拓展了微动技术的可适用范围。

在大量的实际工程应用之后, 微动技术的有效性得到了验证, 但也发现不同参数的观测台阵获得

的频散曲线有所差别。为了讨论不同参数观测台阵的探测能力, 基于项目组近年来的微动技术应用成果, 笔者从探测深度和纵向分辨力2个维度, 确定4类台阵参数用以评价观测台阵的探测能力。其中, 影响台阵探测深度的主要因素为台阵边长和检波器主频; 影响观测台阵纵向分辨力的主要因素为台阵形式和采样间隔。

## 1 微动技术概述

### 1.1 基本原理

微动技术法也称天然源面波法, 是从天然微动技术信号中提取瑞利面波的频散特性, 通过对频散曲线反演来推测地下的横波速度结构。在数据采集方面, 微动技术台阵形式中嵌套式三重圆台阵有利于接收不同方向、不同波长的面波信号, 数据信息丰富, 应用范围最为广泛(图1)。外业工作时, 在同心圆中心处放置检波器, 其余接收检波器均匀布置在多个半径不同的圆周上, 进行数据采集工作。

在数据处理方面, 微动技术中频散曲线的提取

方法主要有空间自相关法 (SPAC)、扩展式空间自相关法 (ESPAC) 和频率-波数 (F-K) 法<sup>[7]</sup>, 笔者选取空间自相关法提取面波频散曲线。在 SPAC 算法中, 首先给定一组平稳随机信号为微动信号, 假设微动信号是时间  $t$  和位置矢量  $X(t, \xi(r, \theta))$  的函数, 某一时刻的微动信号可以看作是平稳随机过程的样本函数, 设这一样本函数为  $X(t, r, \theta)$ 。设地表的两点微动观测信号分别为:

$$X(t, 0, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} \exp(i\omega t) d\xi(\omega, \varphi)$$

$$X(t, r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} \exp\{i\omega t + irk \cos(\theta - \varphi)\} d\xi(\omega, \varphi) \quad (1)$$

定义  $A, B$  两点的空间自相关系数  $S(r, \theta)$  为:

$$S(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_0^{2\pi} \exp\{irk \cos(\theta - \varphi)\} \cdot h(\omega, \varphi) d\varphi \right] g(\omega, r) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega, r) d\omega \quad (2)$$

式中:  $g(\omega, r)$  为空间协方差函数;  $h(\omega, \varphi)$  为频率-方位密度。取空间协方差函数  $g(\omega, r, \varphi)$  的方位平均:

$$\begin{aligned} \bar{g}(\omega, r) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(\omega, r, \varphi) d\theta = \\ &= \int_0^{2\pi} J_0(rk) h(\omega, \varphi) d\varphi = \\ &= J_0(rk) \int_0^{2\pi} h(\omega, \varphi) d\varphi = \\ &= g(\omega, 0, 0) J_0(rk) \end{aligned} \quad (3)$$

定义  $\rho(\omega, r)$  为角频率  $\omega$  的空间自相关系数, 可得到:

$$\rho(\omega, r) = \frac{\bar{g}(\omega, r)}{h_0(\omega)} = J_0(x_0) \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为瑞雷波的入射角;  $h_0(\omega)$  为中心点的频率-方位密度;  $J_0$  为零阶贝塞尔函数;  $x_0 = \frac{2\pi fr}{c(f)}$  为 0 阶贝塞尔函数的宗量;  $c(f)$  为横波的传播速度。

用空间自相关法处理天然源面波数据时, 首先

将实测微动记录分为若干个数据段, 剔除有明显干扰的数据段, 将各个有效数据段进行滤波处理并提取其功率谱, 再对不同频率分别计算中心测点与圆周上各点的空间自相关函数, 最终求出相速度获得相速度频散曲线。对于获取的面波频散曲线, 分析曲线的频点分布特征, 进行地质分层及地层速度反演工作, 并利用已知的钻孔及地质先验信息完成剖面的地质解译工作。

## 1.2 台阵探测能力

目前, 微动技术的工作方式为单点数据采集、二维剖面数据成图, 单个测点获取的频散曲线为该测点台阵范围内不同深度地层速度的综合反映。因此, 笔者根据频散曲线的形态特征评价台阵的观测能力。场地试验仪器为北京水电物探研究所 WD-1C 型智能微动勘探仪, 本套仪器为 WD-1 型智能微动仪的升级款, 实现了大边长、任意形状的观测台阵, 可在外业工作现场实时显示频散曲线, 避免盲目工作。

本次微动技术试验区位于乌鲁木齐二号台地北部, 场地平坦宽阔, 周围无建筑物或人为干扰, 并已获取场地内的钻孔资料, 非常有利于开展微动技术的场地试验。在各类采集参数的对比试验中, 为了增强检波器与地面的耦合, 所有检波器在埋设时均将 12 cm 长的尾椎拧紧并全部插入密实的地面。在数据采集时, 为了减少人类活动对面波采集的不利影响, 设立警戒线阻止行人进入测试圆圈, 以提高采集资料的信噪比。

## 2 台阵探测深度

### 2.1 最大边长

在微动技术中, 台阵探测深度与台阵边长呈正相关。为量化讨论本区最大边长与探测深度的关系, 采用嵌套式三重圆台阵布设全部 10 道检波器, 台阵最大边长分别设置为 40 m、60 m、120 m、200 m。

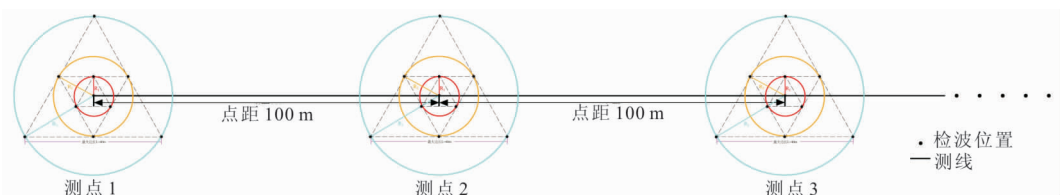


图 1 微动技术台阵测点布设方式

Fig. 1 Layout of measuring points of microtremor observation

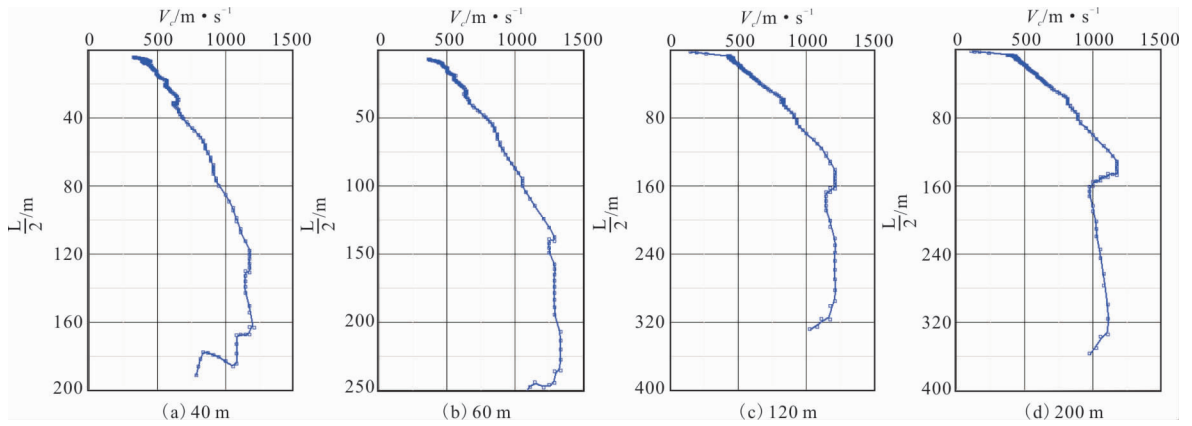


图 2 不同台阵边长频散曲线

Fig. 2 Dispersion curve of different observation side length

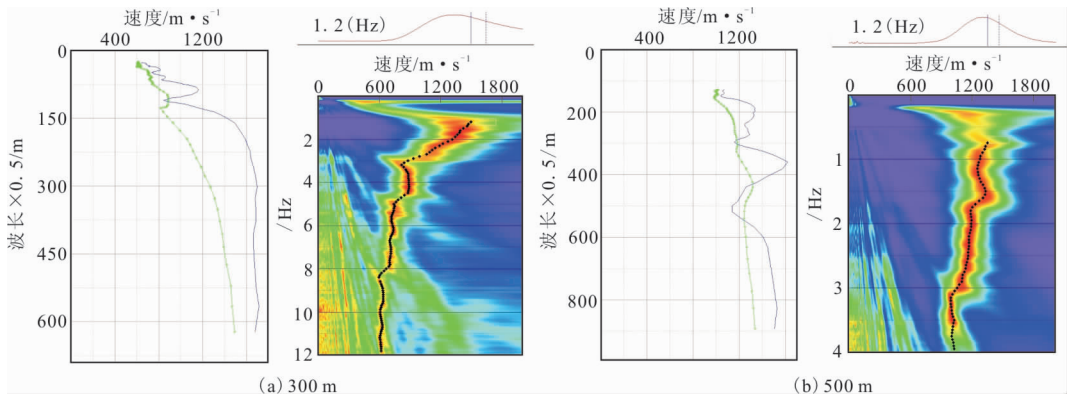


图 3 无线型仪器不同台阵边长频散曲线

Fig. 3 Dispersion curve of different observation side length of wireless instrument

表 1 不同边长台阵探测范围

Tab. 1 The detection range of different observation side length

最大边长/m	有效探测深度/m	深度系数/n
40	185	4.63
60	248	4.13
120	320	2.67
200	340	1.70
300	500	1.67
500	600	1.20

对比上述 4 条频散曲线结果可以看出(图 2),随着最大边长的增大,台阵所能采集的低频震动信号越丰富,故增大台阵最大边长能有效提高探测深度。但由于 WD-1C 型仪器为有线连接,大边长台阵的工作效率显著降低。为讨论微动技术实现大深度探测目标的技术路线,项目组选用国内新研制的无线型智能微动探测仪,布设两组 300 m 和 500 m 观测台阵。

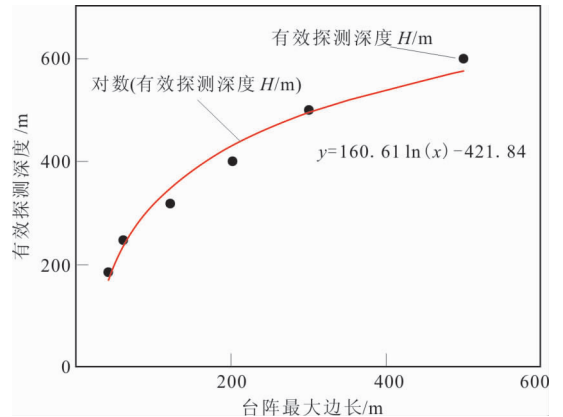


图 4 探测深度与最大边长关系图

Fig. 4 Relationship between detection depth and maximum side length

由图 3 可知,无线型微动仪可明显加大探测深度,野外施工较为便捷。但是随着台阵边长不断增大,浅部探测盲区范围不断扩大,盲区范围与台阵最小边长基本一致。但大边长无线型观测台阵也存在

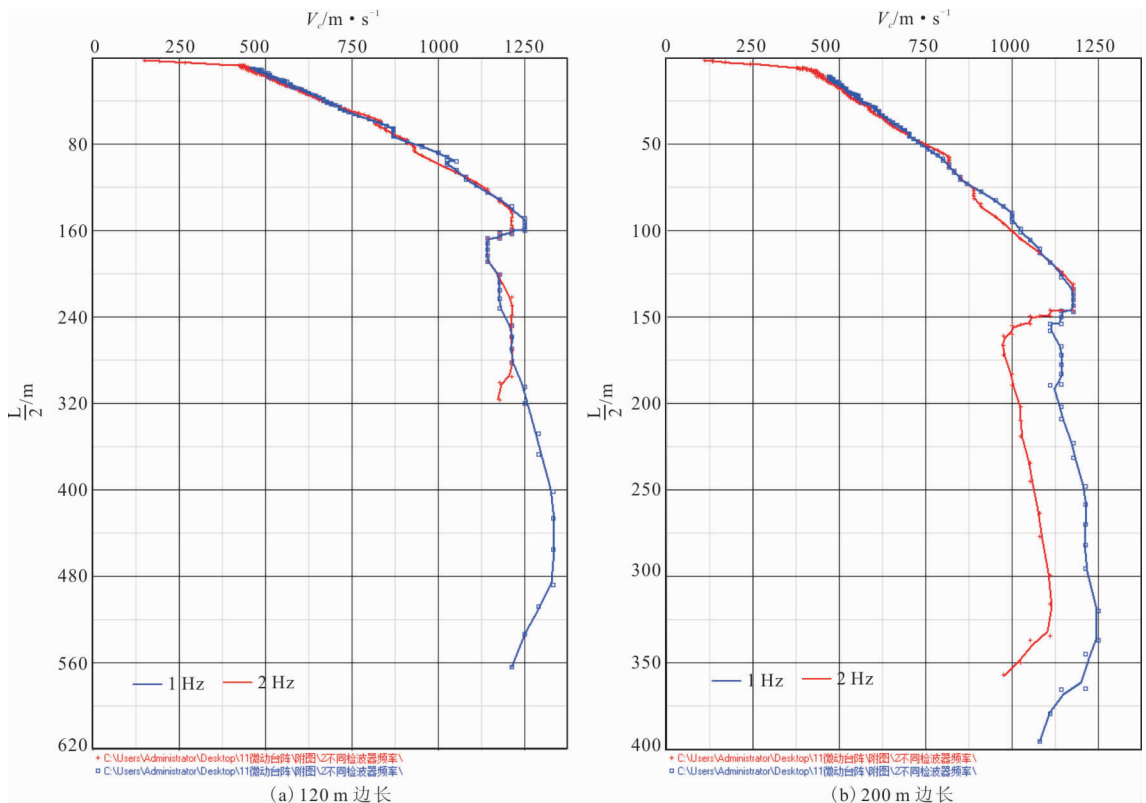


图 5 不同检波器主频频散曲线

Fig. 5 Dispersion curve of different main frequency geophones

不足之处: 当边长超过 200 m 范围后, 主机建立的局域 Wifi 网无法覆盖全部检波器, 采集现场无法实时监测频散曲线质量。

综合上述不同台阵边长的试验结果, 项目组定量统计了边长与深度的对应关系(表 1)。其中深度系数  $n$  为有效探测深度  $H$  与台阵最大边长  $L_{\max}$  的比值。

由表 1 可知, 不同连接方式的微动勘探仪器, 台阵的有效探测深度均与最大边长呈正相关。在此, 我们通过建立深度系数的衰减模型来计算本区内微动技术有效探测深度  $H$  与台阵最大边长  $L$  的经验公式。经过对比对数函数与指数函数的数学特性, 该对应关系基本满足指数线性方程。按最小二乘法求取拟合曲线常数后, 得出本区内微动技术有效探测深度  $H$  与台阵最大边长  $L$  的经验公式为式(5)。

$$H = 160.61 * \ln(L_{\max}) - 421.84 \quad (5)$$

从图 4 可以看出, 随着台阵最大边长的增加, 台阵可接收的低频数据更丰富, 故有效探测深度会同步增大。但大边长台阵也有不足之处, 深度系数随边长增大呈指数型衰减, 浅地表高频数据不足。此外, 新疆乌鲁木齐在地理位置上属于内陆远海区, 低频信号能量较弱, 故在本区的微动技术成果显示, 台

阵的勘探深度为最大边长的 2 倍~5 倍, 倍数关系略小于内地沿海地区。

## 2.2 检波器主频

目前微动技术仪器的检波器主频主要有三种: 2 Hz、1 Hz 及 0.4 Hz。本次试验选用 2 Hz 和 1 Hz 两组不同主频检波器、应用嵌套式三重圆台阵采集数据, 探讨检波器主频与探测深度的影响关系。

从图 5 可以看出, 在同边长台阵下, 不同主频检波器采集的频散曲线中浅部信息基本一致, 1 Hz 检波器由于频带范围更低, 能获取的曲线深度更大、深部地层速度更为可靠。但是 1 Hz 检波器灵敏度高、重量大、体积大, 需要埋置在地表 0.3 m 以下, 会降低野外施工效率。

## 3 台阵纵向分辨力

### 3.1 不同台阵形式

目前微动技术的采集仪器理论上可实现任意形状的观测台阵, 其中嵌套式三重圆台阵因可接收不同方向、不同波长的震动信号, 应用最为广泛<sup>[8]</sup>。本次试验分别设置嵌套式三重圆、三线式、十字型、T

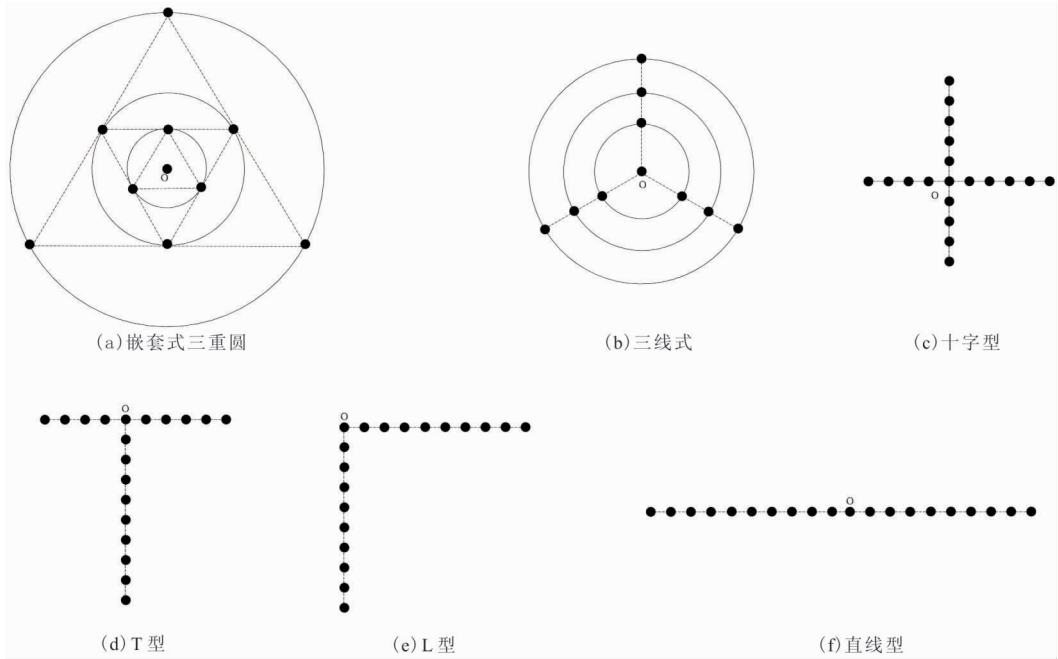


图6 微动技术常用观测台阵形式

Fig. 6 Common observation form of microtremor technology

型、L型、直线型共6种台阵,对这6种台阵依次进行微动技术勘探试验(图6)。

从图7可以看出,①嵌套式三重圆及三线式两类台阵采集的频散曲线收敛度高、一致性良好;②L型、T型及十字型采集的频散曲线在160 m以下曲线出现明显回拐,数据可靠性较低;③直线型与嵌套式三重圆台阵结果相比,深部地层(>200 m)速度大于1 500 m/s,速度值明显偏高,数据不可靠。试验对比结果表明:①在场地条件宽阔、便于布设的情况下,应该首选嵌套式三重圆或三线式台阵,这样既能确保频散曲线提取的可靠性,又能深浅兼顾;②在场地条件狭窄的情况下,当目标探测深度较浅时,可选取直线形台阵并利用其中浅部数据进行解译,这样不仅可以缩短布阵时间,而且可以保证探测的有效性。综上,要根据场地条件和探测要求等因素来合理选取台阵阵形。

### 3.2 采样间隔

采样间隔是指每秒从连续信号中提取两次信号之间的时间间隔<sup>[9]</sup>。在其他参数相同的情况下,选取5 ms、10 ms和20 ms三种采样间隔进行试验,重点对比三种曲线的垂向分辨力。分析上述试验结果可知(图8),在100 m深度以浅,两种曲线的拐点位置和幅值基本相同,但在100 m~160 m深度范围内,5 ms采样间隔下获取的频散曲线收敛程度最好。这是因为相同时间内采样间隔过大造成低频带

采样数据量较少而产生的曲线扰动,随着采样间隔的增大,曲线的垂向分辨力不断降低。因此在实际工作中,采样间隔越小,所获得的数据量越大,曲线对薄层的分辨能力也越强。

基于上述参数试验成果,笔者总结出微动技术实现大探测深度的技术路线,具体应用方式见表2。

## 4 工程应用

基于以上各类采集参数对比试验的分析结果,笔者在厚覆盖区隐伏断裂勘察项目中进行了实际应用。八钢石化断裂在地理位置上,西起八钢,向东经王家沟、轴承厂至乌鲁木齐石油化工总厂以东,全长约40 km。该断裂为乌鲁木齐市范围内的主断裂,具有覆盖层厚度变化大、次级断裂多、高倾角的复杂地质特征,断裂东段出露地表,西段断层两盘第四系厚度差异明显,沿断裂地下水形成大幅度的跌水<sup>[10]</sup>。

前人曾采用可控震源浅层地震技术分析了八钢石化断裂的分布、产状、活动性及活动年代,技术成果质量高。本项目组在2017年采用“微动技术+高密度电法”的综合物探技术,查明了该断裂中段的地质特征,断裂西段由于覆盖层厚度过大,2020年前人试验性应用三分量谐振技术及高密度电法的综合物探技术,基本查明了西段的地质特征。

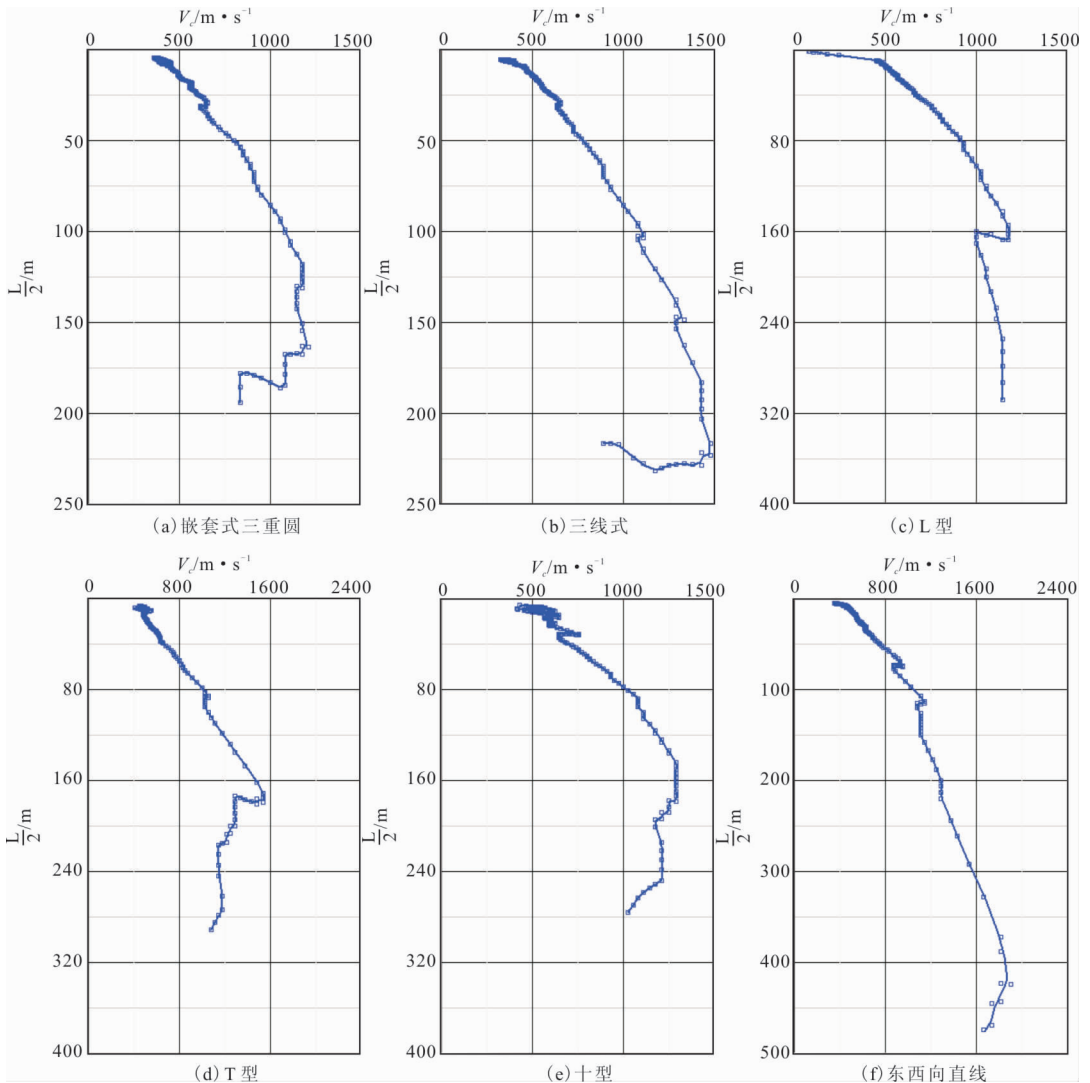


图 7 不同台阵形式频散曲线

Fig. 7 Dispersion curves of different observation forms

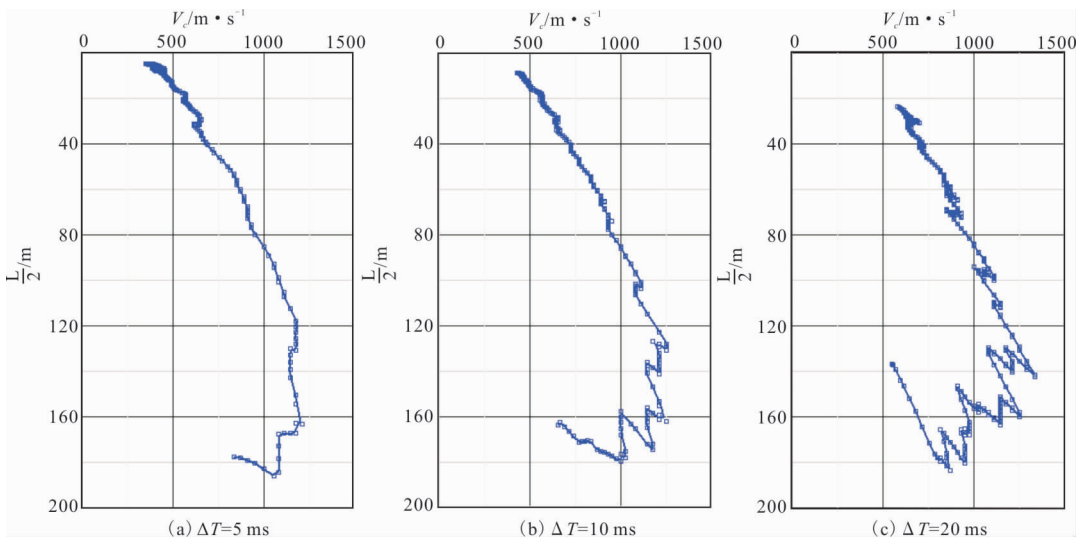


图 8 不同台阵采样间隔频散曲线

Fig. 8 Dispersion curve of different observation sampling interval



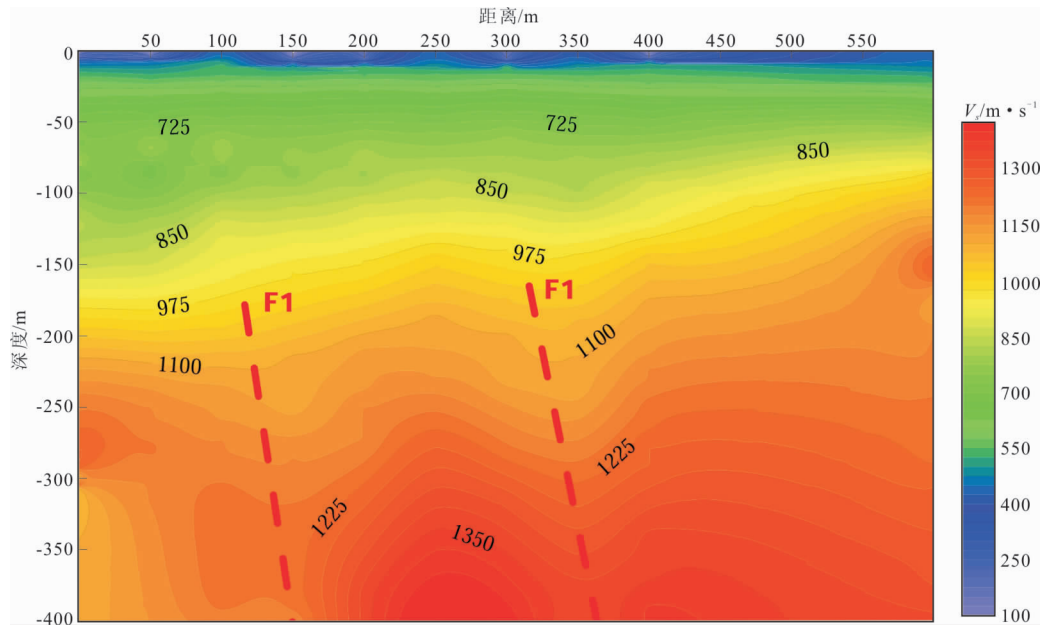


图 10 八钢石化断裂西段微动技术探测成果

Fig. 10 Microtremor technology detection results in the west section of Bagang-Shihua fault

区,但其获取的频散曲线深部地层速度明显偏大,可靠性低;④对于直线型观测台阵,若工作区震动噪声较小,不同方向获取的频散曲线一致性良好,若工作区震动噪声大且频繁,频散曲线的收敛度明显降低甚至不收敛。

基于上述场地试验结果,项目组提出了微动技术的改进建议:①对于大边长台阵,建议使用嵌套式多重圆,这样可实现从浅至深震动信号全采集;②对于直线型观测台阵,因采集道数较多,震动数据信息体量大、内容丰富,应从算法方面注重频散曲线的提取技术;③微动技术采集的信号为相对低频震动,提取的频散曲线在浅地表收敛度低,可在同测点实施人工源与天然源的数据采集,提升浅部面波频散谱的能量集中度,从而获取深度更大、精度更高的面波频散曲线。

#### 参考文献:

- [1] 陈基伟,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 J W,ZHAO D D,ZONG Q B,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. (In Chinese)
- [2] 李巧灵,雷晓东,李晨,等.微动测深法探测厚覆盖层结构——以北京城市副中心为例[J].地球物理学进展,

2019,34(4):1635-1643.

LI Q L,LEI X D,LI C,et al. Exploring thick overburden structure by microtremor survey: A case study in the subsidiary administrative center [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4):1635-1643. (In Chinese)

- [3] 王翔,王志辉,陈昌昕,等.城市地下空间地球物理探测技术与应用[J].地球物理学进展,2021,36(05):2204-2214.

WANG X,WANG Z H,CHEN C X,et al. Geophysical exploration and application for urban underground space[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(05):2204-2214. (In Chinese)

- [4] 王振东.面波勘探技术要点与最新进展[J].物探与化探,2006,30(01):1-6.

WANG Z D. Essentials and recent advances of the surface wave exploration technique [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(1):1-6. (In Chinese)

- [5] 叶太兰.微动台阵探测技术及其应用研究[J].中国地震,2004,20(01):47-52.

YE T L. The exploration technique microtremor array and its application [J]. Earthquake Research, 2004, 20(1):47-52. (In Chinese)

- [6] 孙勇军,徐佩芬,凌甦群,等.微动勘查方法及其研究进展[J].地球物理学进展,2009,24(1):326-334.

SUN Y J,XU P F,LING S Q,et al. Microtremor survey method and its progress [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(01):326-334. (In Chinese)

- [7] 王梦迟.基于SPAC法天然源面波勘探技术研究[D].

- 长春:吉林大学, 2018.
- WANG M C. Study on natural source surface wave prospecting technology based on SPAC [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (In Chinese)
- [8] 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.
- LI N, HE Z Q, YE T L, et al. Test for comparison of array layout in natural source surface wave exploration [J]. Acta Seismologica Sinica, 2015, 37(2): 323-334. (In Chinese)
- [9] 赵东.被动源面波勘探方法与应用[J].物探与化探, 2010, 34(06): 759-764.
- ZHAO D. Passive surface waves: methods and applications[J]. Geo-physical and Geochemical Exploration, 2010, 34(06): 759-764. (In Chinese)
- [10] 罗福忠,柏美祥,马新龙.乌鲁木齐市2条隐伏活动断裂分布与活动性及其对建(构)筑物的影响[J].内陆地震,2000(03):14-1,36-44.
- LUO F Z, BAI M X, MA X L. Distribution and Activity of 2 concealed faults in Urumqi and the IR effects on structures[J]. Inland Earthquake, 2000(03): 14-1, 36-44. (In Chinese)

## Analysis and application of detection ability in microtremor observation

CHEN Shi, NIU Hui, TAO Pengfei, ZHANG Jing, HU Zunping

(Xinjiang Institute of Geological Survey, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** Based on the application results of microtremor technology in recent years, this paper proposes two indicators that can be used to evaluate the detection ability of microtremor observation: detection depth and longitudinal resolution. Among them, the main factors affecting the detection depth of the observation are the side length of the observation and the dominant frequency of the geophone; The main factors affecting the longitudinal resolution of the observation observation are observation form and sampling interval. Based on comparative tests, the technical route of microtremor technology to achieve large detection depth in a thick coverage area is established, and it is verified in the west section of the petrochemical fault of Urumqi Bagang-Shihua. The detection results are consistent with the known data, which proves that the test conclusion is effective and reliable.

**Keywords:** microtremor; observation array; detection depth; longitudinal resolution