

doi: 10.11720/wtyht.2024.1132

秦长春, 王国顺, 李婧. 主动源面波采集装置改进及在地铁施工勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 264-271. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1132>Qin C C, Wang G S, Li J. Improvement in active-source surface wave acquisition device and its application in subway construction exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 264-271. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1132>

# 主动源面波采集装置改进及在地铁施工勘察中的应用

秦长春<sup>1</sup>, 王国顺<sup>2</sup>, 李婧<sup>1</sup>

(1. 陕西地矿第二综合物探大队有限公司, 陕西 西安 710016; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 随着城市的快速发展, 地铁隧道的加速施工, 对隧道掘进前方不良地质体探测的需求越来越迫切。传统的电磁类方法在高电磁干扰的城镇环境中, 难以取得良好的探测效果。主动源面波勘探因抗干扰能力强、采集装置便捷、施工成本低等特点, 在城市浅地表勘察、工程物探中越来越受人们的青睐。而传统的主动源反射地震法仅能采用激发能量有限的重锤作为震源, 且采集信号极易被城市活动干扰, 同时城市柏油或水泥路面不利于检波器的放置以及锤击震源信号的激发, 本文针对这一问题, 分别对检波器装置和震源装置进行了低成本改进, 改进后的面波采集装置使用起来方便高效。经实际工程探测验证, 装置改进后所采集的面波信号能量强、信噪比高, 数据质量好, 反演成像效果好, 揭示的地质缺陷与实际情况对应良好。改进后的采集装置在城市主动源面波勘探中, 具有良好的推广价值和借鉴意义。

**关键词:** 主动源面波; 采集装置; 地铁工程; 城市环境; 工程勘察**中图分类号:** P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2024)01-0264-08

## 0 引言

随着城市的发展、人口的聚集以及市政建设的快速发展<sup>[1]</sup>, 大量地铁、隧道的修建以及其他地下空间的开发利用, 形成了越来越多的人工地下空洞<sup>[2]</sup>。另一方面, 由于城市地下管线的错综分布, 尤其是下水管道的渗漏, 往往造成城市浅地表结构软化, 造成路面塌陷, 引发地质灾害, 造成人员伤亡。因此, 随着城市的快速发展, 地铁隧道的加速施工, 对隧道掘进前方不良地质体探测的需求也越来越迫切。传统的电磁类方法在高电磁干扰的城镇环境中, 难以取得良好的探测效果。而传统的主动源反射地震法仅能采用激发能量有限的重锤作为震源, 且采集信号极易被城市活动干扰。主动源面波勘探因抗干扰能力强、采集装置便捷、施工成本低等特点, 在城市浅地表勘察、工程物探中越来越受人们

的青睐。主动源面波勘探中的瑞利波勘探作为一种工程地质勘探方法<sup>[3-5]</sup>, 在工程地质勘查与检测中得到广泛的应用<sup>[6-8]</sup>, 而且可以利用瑞利波的频散特征<sup>[9-10]</sup>, 反演地下地质结构, 获取层状介质的横波速度<sup>[11-13]</sup>。但在城市环境下, 城市的柏油路面或水泥路面造成常规检波器的尾锥无法插入地下, 给检波器的放置造成了极大困难。另一方面, 坚硬的城市路面给常规锤击震源激发造成了严重问题。锤击会造成铁板弹跳, 引起二次激发问题。锤击能量有限, 极易被坚硬路面限制而无法穿透地下, 造成检波器接收不到来自震源产生的面波信号, 无法达到高分辨成像的目的, 需寻求与锤击震源近似的震源子波<sup>[14-16]</sup>。

本文针对上述问题, 分别对检波器装置和震源装置进行了低成本改进, 使得城市环境中的面波采集工作能够快速、高效地进行。最后通过实际地铁工程探测试验来验证改进后的面波仪器装置在城市

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-12-26

基金项目: 陕西省地质勘查基金项目(61201707319)

第一作者: 秦长春(1984-), 男, 地球物理勘查与遥感高级工程师, 2006年本科毕业于中国地质大学(武汉)地球物理学专业, 获学士学位, 2014年7月获中国地质大学(北京)地质工程领域工程硕士学位, 长期从事地球物理勘查及相关研究工作。Email: 1006324483@qq.com

地铁勘查中的应用效果。

## 1 检波器装置的改进

如图 1 所示,常规检波器往往带有一个 8~10 cm 的尾锥,在城市环境中无法插进坚硬的路面。工程施工中常见的做法是在每个检波器位置放置适量的湿土,将检波器插入湿土中进行数据采集。这样的做法可以改善数据采集质量,但费时、费力,增加了采集成本。



图 1 常规检波器

Fig. 1 Conventional detector

为解决这一问题,在五金维修点订做了如图 2 所示的三角支架,支架高度略高于尾锥长度,支架顶面为一个 5cm×5cm 的薄钢板,钢板中间钻有小孔,小孔的大小刚好能够卡住尾锥与检波器连接处。支架的 3 个腿呈三角形分布,焊接在钢板下面,既保证了支架的稳定性又保证了检波器尽可能地与地面耦合。图 3 为检波器放置在支架上的状态,实际操作

表明检波器可以很好地卡在支架上,无松动现象。图 4 为使用 15 磅锤击震源时,检波器安装在三角支架上在坚硬路面上采集的面波记录与检波器插入路旁泥土中采集的面波记录对比。由图 4 可知,两种地震数据面波均较发育,同相轴连续,具有较高的信噪比。可见采集装置改进后,数据质量与传统采集方法相当,为城市环境面波数据采集提供了有效的数据采集方法。



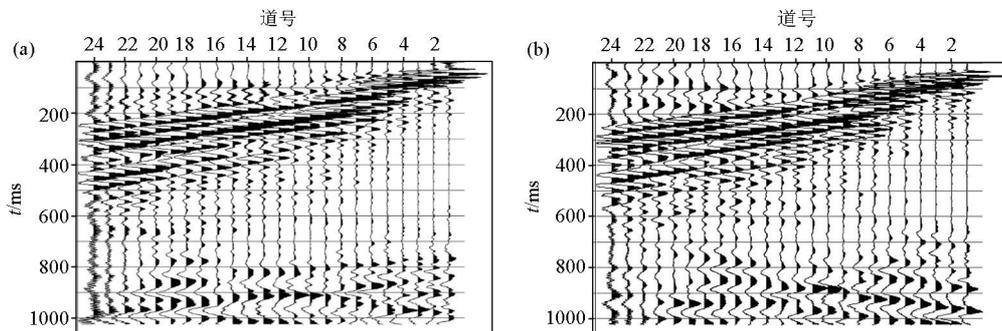
图 2 三角支架

Fig. 2 Triangular bracket



图 3 安装了检波器的三角支架

Fig. 3 Triangular bracket where the geophone is installed



a—检波器在三角支架上在坚硬路面的面波记录;b—检波器插入泥土中的面波记录

a—surface waves records on hard pavement when the geophone is on a triangular bracket;b—surface wave records when the geophone is inserted into the soil

图 4 面波记录对比

Fig. 4 Comparison of surface wave records

## 2 震源装置的改进及优点

常规面波勘探常采用如图 5 所示的重锤作为震源,如在坚硬路面上锤击激发容易产生二次击震且激发能量难以穿透地下,从而导致采集记录信号弱,噪声干扰严重,存在二次激发同相轴等问题,给后续的资料处理解释造成极大困难。

### 2.1 震源装置的改进

针对锤击震源激发能量弱的问题,我们购置了国标重型 63.5 kg 触探仪,仅利用其 63.5 kg 的穿心重锤作为震源,如图 6 所示。当然也可以到五金加工企业定制重锤,但其制作成本并不比直接购置整套触探仪花费低。



图 5 普通重锤

Fig. 5 Normal heavy hammer



图 6 穿心重锤

Fig. 6 Perforated heavy hammer

重锤问题解决后,还面临野外施工起重的问题,我们又购置了消防应急救援三脚架,如图 7 所示,该三脚架配备手动绞盘,可将重锤轻松升起。为解决重锤用三脚架升起后自由下落的问题,我们又购置了 100 kg 永磁起重器,如图 8 所示,该设备配有吊环和磁力切换手柄。配合三脚架绞盘,可将触探仪重锤轻松升起,再通过磁力切换手柄,使重锤脱磁,

实现自由下落。

经 3 种设备优化组合后即构成了我们优化改进后的震源装置,如图 9 所示,该装置可实现手动绞盘起升,手动脱磁下落,野外操作简便、省力、快捷。



图 7 应急救援三脚架

Fig. 7 Emergency rescue tripod



图 8 永磁起重器

Fig. 8 Permanent magnet crane



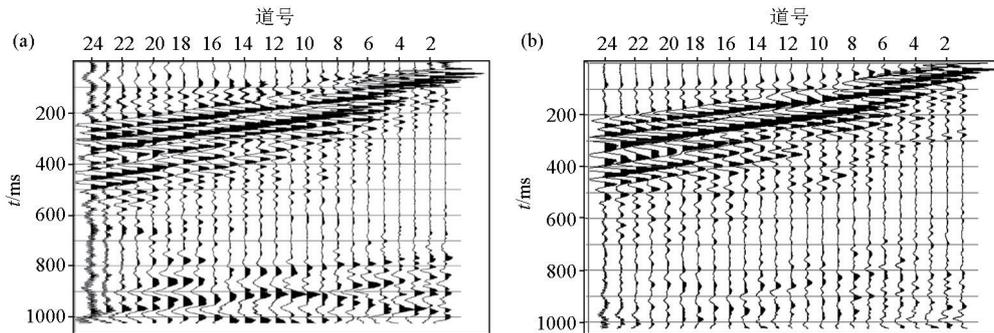
图 9 优化改进后的震源装置系统

Fig. 9 Optimized and improved source device system

图 10 为利用 15 磅锤击震源和利用优化改进后的震源装置系统在同一测点水泥路面上采集的面波记录对比:采用 15 磅锤击震源时,地面不仅要垫厚层土壤,还需放置铁板,且采集的面波记录能量较低,信噪比差,易存在二次击震问题;利用改进后震源采集时,只需在地面垫适量的土壤,无需其他工序,且面波记录能量显著增强,信噪比显著提高,说明改进后的采集装置在城市环境中与常规采集装置相比具有突出的优势。

图 11 为利用 15 磅锤击震源,检波器在泥土中

采集的面波记录(图 11a)、在水泥路面上采集的面波记录(图 11b),和利用优化改进后的震源装置系统在水泥路面上采集的面波记录(图 11c)对比。由图 11 可见,利用 15 磅锤击震源采集的两种地震数据面波均较发育,同相轴连续,具有较高的信噪比,但和利用优化改进后的震源装置系统采集的地震数据相比,采集的面波记录能量较低,信噪比较低,且施工过程中易存在二次击震问题;改进震源后,面波记录能量显著增强,信噪比显著提高,不存在二次击震,说明改进后的采集装置优势突出。

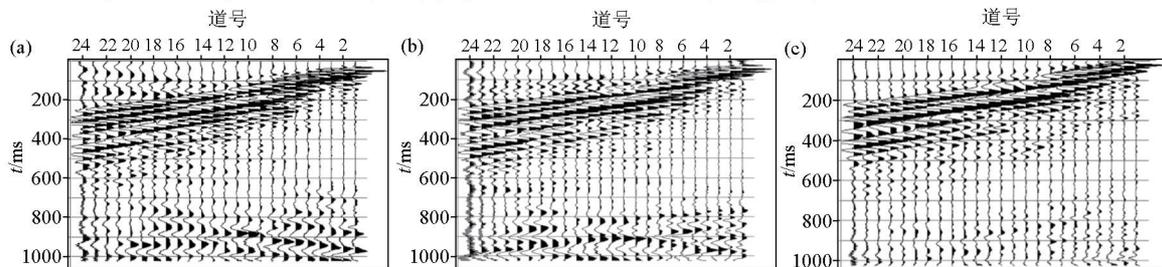


a—利用 15 磅锤击震源的面波记录;b—利用改进后震源的面波记录

a—surface wave records obtained by hammering the source with 15 pounds;b—surface wave records obtained by improved hypocenter

图 10 面波记录对比

Fig. 10 Comparison of surface wave records



a—泥土中的面波记录;b—水泥路面上的面波记录;c—水泥路面上改进后震源的面波记录

a—surface wave records in soil;b—surface wave records on cement pavement;c—surface wave records on cement pavement obtained by improved hypocenter

图 11 面波记录对比

Fig. 11 Comparison of surface wave records

## 2.2 装置改进的优点

综上所述,装置改进有如下优点:

1) 装置改进的费用低。加工每一个三脚支架需 10 元,48 个三脚支架共需 480 元。国标重型 63.5 kg 触探仪购置价格 800 元。消防应急救援三脚架购置价格在 600 元。永磁起重器购置价格在 200 元。仪器装置的改进共花费 2 080 元。

2) 省时省力。测量 50 个点的单条剖面在装置未改进之前需要花费 3~4 h,且使用重锤敲击特别消耗施工人员体力;改进后测量只需要 2 h,且节省施工人员体力,实现了机械化震源。

3) 信号强度大。由 15 磅左右的重锤更换为重

量为 60 kg,落锤后震动幅度大、面波信号强,检波器采集到的有用信号随之增加,有利于采集信噪比更高的信息。

## 3 主动源面波仪器装置改进后在城市地铁勘查中的应用

将本文改进后的数据采集装置应用于西安地铁勘查,因装置改进后检波器可接收到信号更强、信噪比更高的数据,大大提高了数据的精度,更有利于资料的解释。在西安地铁 10 号线施工勘查过程中发挥了重要作用。

### 3.1 地层概况

勘查区深度 60.0 m 范围内的地层主要由第四系全新统人工填土;上更新统风积新黄土、残积古土

壤,中更新统冲积粉质黏土、砂类土组成。共划分为 9 个工程地质层,地层描述见表 1。

表 1 勘查区地层综合描述

Table 1 Stratigraphic comprehensive description of the exploration area

土层编号	土层名称 与时代成因	范围值/m			岩性描述		
		层厚	层底深度	层底高程	颜色	密实度	包含物及其它特征
1-1(Q <sub>4</sub> <sup>ml</sup> )	杂填土	0.7	0.7	391.99	杂色	稍密	杂色,稍湿,土质不均,成份以建筑垃圾为主,含少量黏性土。地表 0.2m 为混凝土路面。
1-2(Q <sub>4</sub> <sup>ml</sup> )	素填土 (平均 2.44)	1.8~3.0	1.8~3.0	391.18~389.49	褐黄色	稍密	以黏性土为主,含少量碎砖块,土质疏密不均,顶部通常有 0.2~0.3 m 的砼地面。
3-1-1(Q <sub>3</sub> <sup>col</sup> )	新黄土 (平均 10.89)	9.5~13.1	12.5~14.2	380.35~378.29	褐黄色	/	土质均匀,大孔、针孔及垂直节理发育,含钙膜,偶见蜗牛壳。具湿陷性。 $I_L = 0.05$ , $a_{1-2} = 0.49$ MPa <sup>-1</sup> ,属中偏高压缩性土。
3-2(Q <sub>3</sub> <sup>cl</sup> )	古土壤 (平均 4.46)	1.1~5.2	17.0~18.5	375.98~374.19	黄褐~黄褐色	/	土质较均,局部略显团粒结构,具大孔、针孔。含较多钙质条斑,底部 0.2 m 含较多钙质结核,粒径一般 0.5~1 cm,大者 2~3 cm,具湿陷性; $I_L = 0.27$ , $a_{1-2} = 0.28$ MPa <sup>-1</sup> ,属中等压缩性土。
3-4(Q <sub>3</sub> <sup>al</sup> )	粉质黏土 (平均 4.47)	1.1~14.8	30.8~56.4	361.73~335.56	灰黄~黄灰色	/	土质均匀,含氧化铁条纹及锰质斑点,局部含钙质粉末。液性指数 $I_L = 0.25$ , $a_{1-2} = 0.23$ MPa <sup>-1</sup> ,属中等压缩性土。
3-5(Q <sub>3</sub> <sup>al</sup> )	粉土 (平均 4.47)	0.5~0.9	18.4~19.0	373.69~373.59	褐黄色	密实	厚度小,不连续。分布于 3-2 层古土壤之下。土质均匀,较纯净,含钙质条斑,具针孔。 $W = 18.5\%$ , $e = 0.543$ , $a_{1-2} = 0.13$ MPa <sup>-1</sup> ,属中偏低压缩性土。
3-6(Q <sub>3</sub> <sup>al</sup> )	细砂 (平均 3.54)	1.5~6.6	18.5~33.6	374.18~359.38	灰黄~褐黄	密实	以透镜体状分布于 3-7 层中,稍湿~饱和,颗粒成分以石英、长石为主,局部夹粉质粘土、粉土薄层。 $N = 55.4$ 击;属低压压缩性土,密实。
3-7(Q <sub>3</sub> <sup>al</sup> )	中砂 (平均 4.09)	1.2~11.2	27.5~53.0	364.49~338.96	灰黄色	密实	分布于场地中部,与 3-4 粉质黏土交互出现,局部地段相变为粗砂。颗粒成分以石英、长石为主,局部含砾,分选好,级配不良,夹粉质粘土、粉细砂、粗砂、砾砂等夹层,含砾。 $N = 58.1$ 击,密实;属低压压缩性土
3-8(Q <sub>3</sub> <sup>al</sup> )	粗砂	9.4	29.6	362.93	灰黄色	密实	以透镜体状夹于 3-7 中砂层中。颗粒成分以石英、长石为主,局部含砾,分选好,级配不良,夹粉质粘土、粉细砂、砾砂等夹层,含砾。 $N = 63.5$ 击,密实。低压压缩性土。

注:表 1 中, $I_L$  表示液性指数, $a_{1-2}$  表示压缩系数, $W$  表示天然含水量, $e$  表示孔隙比, $N$  表示标贯击数。

### 3.2 面波观测系统

在研究已有工作资料和现场调查的基础上,确定了面波方法的可行性,即地下各岩层存在剪切波速度差异。在实际工作前,认真地做了多参数现场试验,确定最佳的工作参数,得到了较好的实验记录。根据实验得到的采集参数,展开实际工作,在每个测点根据实际情况采集了 2 炮记录,保证数据充足,质量过关。

本文涉及项目使用时的仪器设备主要有 Geopenminiseis48A 工程地震仪,24 道接收线 2 根,4.5 Hz 垂直检波器 48 个,检波器三角支架 48 个,炮线 1 根,优化组合震源 1 套,外触发线 1 根。数据采集时,落锤下方垫有湿土,接收道距 0.5 m,偏移距 4 m,24 道接收,激发点距 2 m。

面波勘查测线布置如图 12 所示,Line1 测线长度 15 m,采集了 31 个测点的数据,每个测点 2 炮;Line2 测线长度 3 m,采集了 7 个测点的数据,每个测点 2 炮。

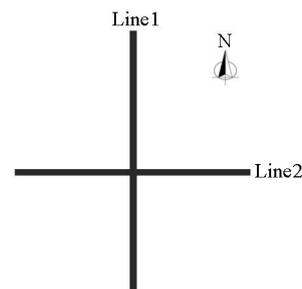


图 12 测线布置方位示意

Fig. 12 Schematic diagram of the orientation of the survey line layout

图 13 为每条测线上其中一点的面波记录和对应的频散曲线,由图可见,利用改进后的震源系统采集的面波记录能量强、信噪比高,频散曲线收敛性好。

### 3.3 剖面推断及解释

#### 1) Line1 推断及解释

将采集的 1 线面波数据进行反演,反演结果如图 14 所示,测线为 SN 走向,桩号从 1 011(南端起始点)~1 131(北端终止点),两个桩号之间间距为 0.5 m。由剖面反演图可见,在地表以下 0~5 m 是一个高速层,根据前期岩土工程勘察结果显示该层为人工填土层,其中桩号 1 075~1 087 下方出现明显高速异常,推断为施工压实紧压结果;在地表以下 5~10 m 范围内为一个低速层—①异常区,根据前期岩土工程勘察结果可知,该层主要由湿陷性黄土组成,湿陷性黄土具自重湿陷性,自稳性一般,遇水易软化,浸水后对坑壁稳定不利;在地表以下 10~22 m 间断出现 3 个低速异常区②③④,与原状地层不一致,故在此深度圈定 3 个低速异常区,②异常区位于南端起点北向 6 m 左右,区块大小(横向×纵向)约 6 m×5 m,结合异常区周边速度分析,推断该区为渗水区。③异常区位于②异常区北向 8 m 左右,异常区大小约 15 m×8 m,该异常上方低速层出现局部下沉现象。④异常区位于终点附近,区块大小约 15 m×10 m,上方低速层偶见速度不连续现象。③④异

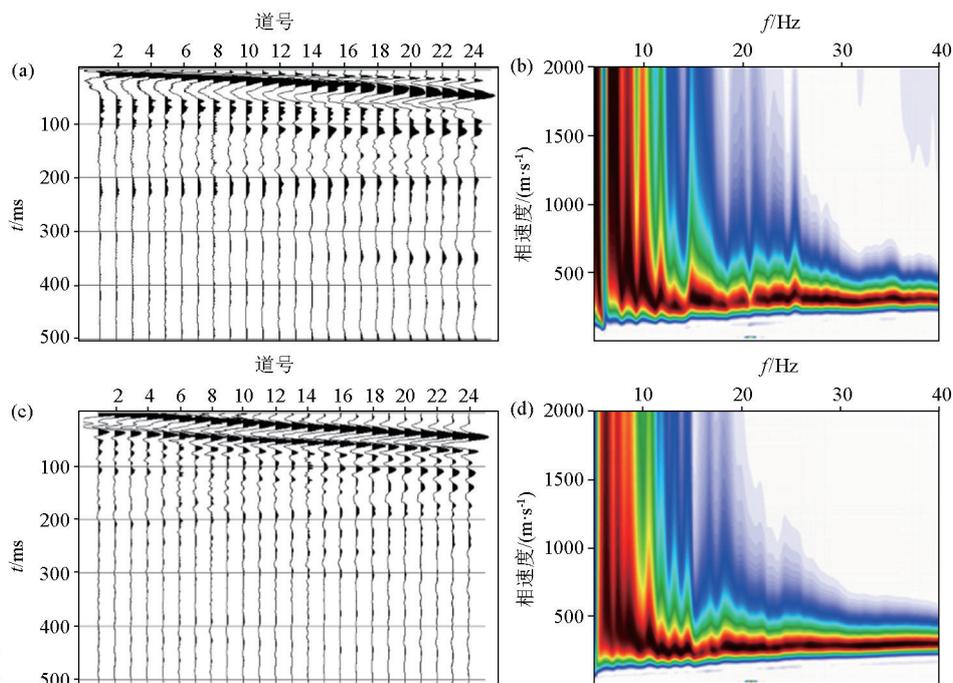
常区在水平方向上表现为不连续,因新黄土具自重湿陷性,自稳性一般,遇水易软化,推测③④低速异常区为含水区。

#### 2) Line2 推断及解释

将采集的 2 线面波数据进行反演,反演结果如图 15 所示,测线为 EW 走向,桩号从 1 011(西端起始点)~1 035(东端终止点),两个桩号之间间距为 0.5 m。由剖面反演图可见,在地表以下 0~5 m 是一个高速层,根据前期岩土工程勘察结果显示该层为人工填土层;在地表以下 5~10 m 范围内为一个低速层—①异常区,根据前期岩土工程勘察结果可知,该层主要由湿陷性黄土组成,湿陷性黄土具自重湿陷性,自稳性一般,遇水易软化,浸水后对坑壁稳定不利;在地表以下 12~22 m 存在一个低速异常区②,该异常位于西端起点东向 5 m 左右,区块大小 4 m×9 m,异常上方低速层出现局部下沉现象。因新黄土具自重湿陷性,自稳性一般,遇水易软化,推测低速异常区域②为含水区。

#### 3) 综合分析

测线布设上,本次任务布设的 1 线第 17 测点和 2 线第 4 测点重合,1 线③异常区与 2 线②异常区垂直交叉,探测结果基本一致。经综合分析,推断此区域为含水区。区域大小:南北宽 15 m,东西宽 4 m,垂向深度 9 m(地表以下 12~21 m)。



a—1 线 2 测点的面波记录;b—1 线 2 测点的频散曲线;c—2 线 2 测点的面波记录;d—2 线 2 测点的频散曲线

a—surface wave records of 1 Line 2 point;b—dispersion curve of 1 Line 2 point;c—surface wave records of 2 Line 2 point;d—dispersion curve of 2 Line 2 point

图 13 面波记录和对应的频散曲线

Fig. 13 Surface wave records and corresponding dispersion curve

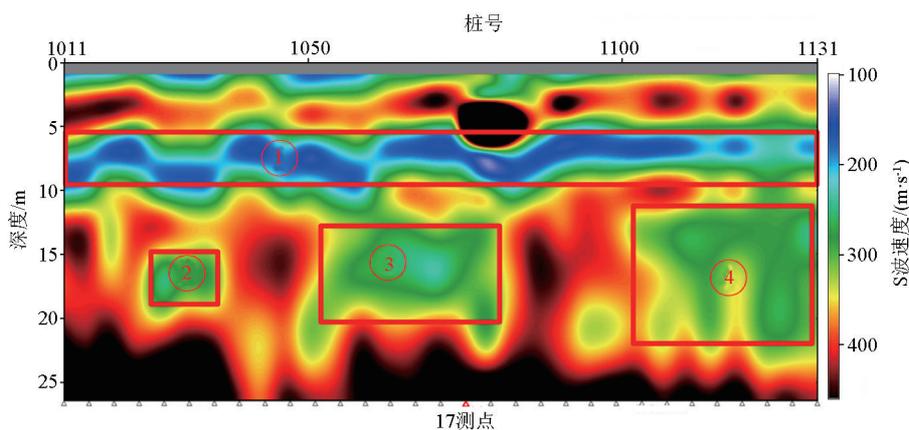


图 14 Line1 面波频散曲线反演二维横波速度—深度剖面

Fig. 14 1 Line surface wave dispersion curve inverts two-dimensional shear wave velocity-depth profile

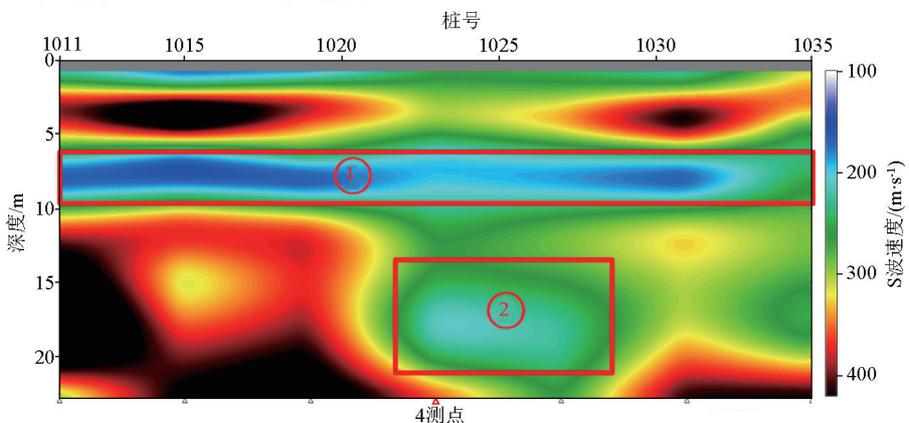


图 15 Line2 面波频散曲线反演二维横波速度—深度剖面

Fig. 15 2 Line surface wave dispersion curve inverts two-dimensional shear wave velocity-depth profile

### 3.4 工程验证

为保障地铁施工安全,对 1 线、2 线的低速异常区分别进行了处理,其中 1、2 线重合点附近的钻孔结果显示垂向 12.2~20.8 m 处为含水区,对该区域进行注浆,注入的水泥方量与所推测的含水区体积大小基本一致。

## 4 结论

本文中改进的采集装置成本低廉,工作省力、方便、快捷。实际工作表明,使用该装置采集的面波信号能量强、信噪比高、数据质量好,反演成像效果佳。钻探、注浆等工程验证处理结果揭示的地质缺陷与推断地下不良病害体基本一致,解释推断准确可靠。综上所述,改进后的采集装置在城市主动源面波勘探中,具有良好的推广价值和借鉴意义。

### 参考文献 (References):

[1] 秦长春,毛鹏宇,韩要记,等. 确定地下金属管线弯头位置和埋深的实用技术 [J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(5): 655-659.

- Qin C C, M P Y, H Y J, et al. Practical Techniques for determining the elbow position and depth of underground metal pipes [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(5): 655-659.
- [2] 黄果,刘争平,刘茂洋. 地下空洞的面波场地效应数值模拟研究 [J]. 地震工程学报, 2021, 43(2): 468-475.
- Huang G, Liu Z P, Liu M Y. Numerical simulation of site effect of surface wave in underground cavities [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 468-475.
- [3] 杨道煌,刘江平,程飞,等. 超声面波法在混凝土强度检测中的应用研究 [J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 626-634.
- Yang D H, Liu J P, Cheng F, et al. The application of ultrasonic surface wave method to concrete strength testing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 626-634.
- [4] 杨成林. 瑞雷波法勘探原理及其应用 [J]. 物探与化探, 1989, 13(6): 465-468.
- Yang C L. The principle and application of Rayleigh wave exploration method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1989, 13(6): 465-468.
- [5] 刘云祯,王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例 [J]. 物探与化探, 1996, 20(1): 28-34.
- Liu Y Z, Wang Z D. Data collection and processing system of transient surface wave method and examples of its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(1): 28-34.
- [6] 赵勇刚,刘江. 瞬态面波剖面法在滑坡探查中的应用 [J]. 物

- 探与化探,2007,31(S1):116-118.
- Zhao Y G, Liu J. The application of the transient surface wave to the landslide exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(S1): 116-118.
- [7] 刘江平,罗银河,何伟兵. 相邻道瞬态瑞雷面波法与压实度检测 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(11): 1652-1659.
- Liu J P, Luo Y H, He W B. Method of neighboring trace transient Rayleigh wave and its application in compactness inspection [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(11): 1652-1659.
- [8] 郑立宁,谢强,冯治国,等. 瞬态瑞雷面波法岩溶路基注浆质量检测现场试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(12): 1934-1937.
- Zheng L N, Xie Q, Feng Z G, et al. Field tests on grouting effect of Karst roadbed based on transient Rayleigh wave method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(12): 1934-1937.
- [9] 杨天春,肖巧玲. 多层层状介质的瑞利面波频散特性 [J]. *物探与化探*, 2009, 33(3): 299-303.
- Yang T C, Xiao Q L. Dispersion characteristics of Rayleigh waves in multilayered media [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 33(3): 299-303.
- [10] Tsai W H, Lin Y, Cheng C C. Detecting the depth of weak layer in concrete using R-wave dispersion techniques [J]. *NDT&E International*, 2018, 98: 161-170.
- [11] 宋先海,肖柏勋,黄荣荣,等. 用等厚薄层权重自适应迭代阻尼最小二乘法反演瑞雷波频散曲线 [J]. *物探与化探*, 2003, 27(3): 212-216.
- Song X H, Xiao B X, Huang R R, et al. The inversion of dispersion curves using self-adaptively iterative damping least square method by combining equal thinner layers with weighting matrix [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(3): 212-216.
- [12] 凡友华,刘雪峰,陈晓非. 面波频散反演地下层状结构的拟牛顿法 [J]. *物探与化探*, 2006, 30(5): 456-459.
- Fan Y H, Liu X F, Chen X F. The QUASI Newton method in the inversion of the dispersion curve of Rayleigh wave in multilayered media [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2006, 30(5): 456-459.
- [13] 程飞,刘江平,毛茂,等. 参数自适应差分演化算法在面波频散曲线反演中的应用 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(1): 147-154.
- Cheng F, Liu J P, Mao M, et al. Self-adapting control parameters-based differential evolution algorithm for inversion of Rayleigh wave dispersion curves [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(1): 147-154.
- [14] 邵广周,岳亮,李远林,等. 被动源瑞利波两道法提取频散曲线的质量控制方法 [J]. *物探与化探*, 2019, 43(6): 1297-1308.
- Shao G Z, Yue L, Li Y L, et al. A study of quality control of extracting dispersion curves by two-channel method of passive Rayleigh waves [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(6): 1297-1308.
- [15] 吴华,李庆春,邵广周. 瑞利波波波形反演的发展现状及展望 [J]. *物探与化探*, 2018, 42(6): 1103-1111.
- Wu H, Li Q C, Shao G Z. Development status and prospect of Rayleigh waveform inversion [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(6): 1103-1111.
- [16] 邵广周,李远林,岳亮. 主动源与被动源面波联合勘探在黄土覆盖区三维成像中的应用 [J]. *物探与化探*, 2022, 46(4): 897-903.
- Shao G Z, Li Y L, Yue L. Joint application of active and passive surface wave in 3D imaging of loess covered area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(4): 897-903.

## Improvement in active-source surface wave acquisition device and its application in subway construction exploration

QIN Chang-Chun<sup>1</sup>, WANG Guo-Shun<sup>2</sup>, LI Jing<sup>1</sup>

(1. The Second Geophysical Brigade, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710016, China; 2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With the rapid development of cities and the accelerated construction of subway tunnels, there is an urgent demand for the detection of unfavorable geological bodies ahead of tunnel excavation. It is difficult for traditional electromagnetic methods to yield excellent detection results in an urban environment with high electromagnetic interference. Active-source surface wave exploration has gained increasing popularity in shallow superficial exploration and engineering geophysical prospecting in cities due to its strong anti-interference, convenient acquisition devices, and low construction cost. However, the traditional active-source reflection seismic method uses only a heavy hammer with limited excitation energy as a seismic source, and the collected signals are prone to be disturbed by urban activities. Meanwhile, the asphalt or cement pavement in urban areas is unfavorable for the placement of geophones and the excitation of seismic signals from a hammer. Given these, this study improved the geophones and seismic source devices at low costs, obtaining a more efficient and user-friendly surface wave acquisition device. As confirmed by practical engineering exploration, the improved device can collect surface-wave signals with strong energy and high signal-to-noise ratios, resulting in high-quality data, desirable inversion and imaging results, and high consistency between the geological defects and actual geological conditions. The improved acquisition device can be extensively promoted and referenced in active-source surface wave exploration in cities.

**Key words:** active source surface wave; acquisition device; subway project; urban environment; engineering exploration

(本文编辑:叶佩)