

doi:10.11720/wtyht.2016.5.26

刘云祯,梅汝吾,叶佩,等.WD 智能天然源面波数据采集处理系统及其应用试验[J].物探与化探,2016,40(5):1007-1015.http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.5.26

Liu Y Z, Mei R W, Ye P, et al. Data acquisition and processing system of WD intelligent natural source surface wave and its application test[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(5):1007-1015.http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.5.26

WD 智能天然源面波数据采集处理系统及其应用试验

刘云祯¹,梅汝吾¹,叶佩²,金荣杰¹

(1.北京市水电物探研究所,北京 100027;2.中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘 要:我国自主研发的 WD 智能天然源面波数据采集处理系统,改变了迄今为止现场仪器只采集天然微振动波形记录的现状。该系统利用大数据计算、筛选、叠加、归一化等技术,创先性研制出现场仪器在采集微震信号的同时,可直接显示勘探成果的面波频散曲线;信号采集过程中,无需震源,无需人工控制;装置系统安置在地面,10~30 min 可获得上百米深度地层的面波频散曲线,得知土层软硬。在不同岩性地区的试验结果证实,该系统能快速、准确地进行地层划分,操作便捷,适应性强,为天然源面波勘探广泛应用于工程勘查提供了技术保障。

关键词:天然源面波勘探;WD 智能勘探仪;天然源面波数据采集系统;工程勘查;无源勘探

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2016)05-1007-09

在地球表面,无论何时何地都存在一种天然的微弱震动,称之为“微动”。微动是一种由体波和面波组成的复杂振动,并且面波的能量占信号总能量的 70% 以上^[1]。天然源面波勘探方法是指利用微动中的面波来推断地壳浅部的横波速度结构,其理论基础是由 Aki^[2] 和 Capon^[3] 建立的;北海道大学冈田广等经过十多年的研究与实践,系统提出一种叫做“微动勘探法”的地球物理勘探新方法^[4]。有资料记载,早在 1995 年 1 月,在日本兵库县南部地震多发的阪神地区,就开展了利用微动信息的天然源面波勘探,所得到的速度与地震测井的 S 波速度构造对比具有很好的对应关系^[5]。20 世纪 90 年代,该方法在国内也有一些成功应用的实例,如北京地质勘察技术院在北京丰台、延庆和小汤山一带的地热探井中,用该方法进行了地层层位预测^[4-6]。但是之后近十年,该方法在国内鲜有报道。在美国 2001 年发生“911”恐怖事件之后,各国也加强了安保,国内对于炸药的管控也是越来越严,这使得利用炸药震源可勘察较大深度的瞬态面波的应用受到一定制约,天然源面波勘探又逐渐被人们所重视^[7-8],但一直未能如瞬态面波一样得到突破,被业内广泛应用。

微动的震源主要来自于自然现象和人类活动,

前者由天气、气压及海浪、潮汐等变化产生,后者由车辆行驶、机器及人类日常生活、生产活动等产生。目前,天然源面波勘探的工作方法是数据采集和数据处理分开进行,传统的仪器现场只采集天然微振动波形信息,回室内或在室外进行处理后,才能看到采集资料能否满意,但很多时候由于各种原因(如干扰太强、观测系统布置不合理、仪器参数设置不合适等),导致采集到的数据都是无效的,不得不重新进行信号采集,这不仅降低了野外施工效率,也对现场施工人员有较高的专业技术要求。这在一定程度上制约了天然源面波勘探的应用,该方法目前仍无法广泛应用于工程勘查。

我国自主研发的 WD 智能天然源面波数据采集系统,改变传统现场仪器只采集天然微振动波形记录的现状,在信号采集同时,直接显示勘探成果的面波频散曲线逐渐迭代生成的过程,一般情况下观测 10~30 min,看到频散曲线趋于稳定后测点采集工作完成。该系统改变了以往天然源面波现场盲目采集的被动局面,具有易于操作、适应性强等优点。在不同地区的应用试验显示其能快速、准确地判断土层软硬,进行地质分层和提供地层的横波速度,为天然源面波勘探广泛应用于工程勘查提供了科学的技术保障。

1 研究背景

自美国发生“911”事件以来,国内外安全形势面临巨大压力,国内对炸药的监管日趋规范、严格,常规地震波勘探逐渐限制使用炸药震源,是我们开始研究天然源面波勘探的重要原因;另外,近年来,生态环境保护逐渐被重视,施工过程中的环保要求和经济核算也是促使天然源面波勘探研究加快的重

要因素。
目前,国内外的微动勘探技术在应用中都是现场采集数据,事后进行数据处理,仪器的作用是数据的采集器和存储器。常规的微动勘探技术的方法流程分为 3 个步骤(见图 1):①采集数据;②提取频散曲线;③频散曲线反演^[8]。这种工作流程与常规地震波勘探的通行做法相同。

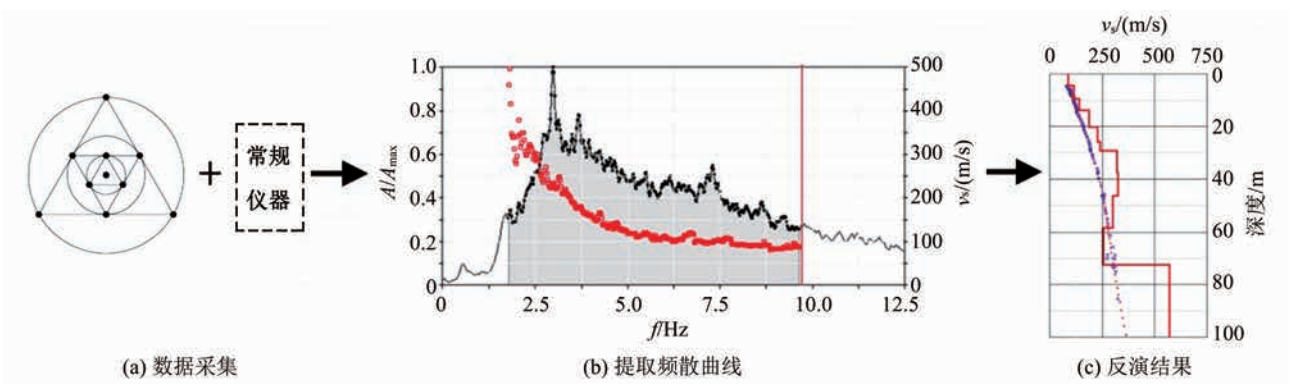


图 1 常规微动勘探流程

1.1 发现问题

常规地震波勘探采用现场数据采集和事后数据处理分开做,重要原因是野外采集的数据可辨识、可复测校对、可评价质量。换言之,保证采集记录质量,处理成果质量也就具有了可靠基础。图 2 为常规地震勘探波形记录。该波形具有以下特点:①1 个已知震源点的一次地震波传播记录;②各种波的传播规律明确,如直达、折射、面波、反射、声波等;③可判断采集记录质量及是否达到目的,无需进行处理后再来判别采集记录是否有效,可保证野外记录采集的质量及有效性。

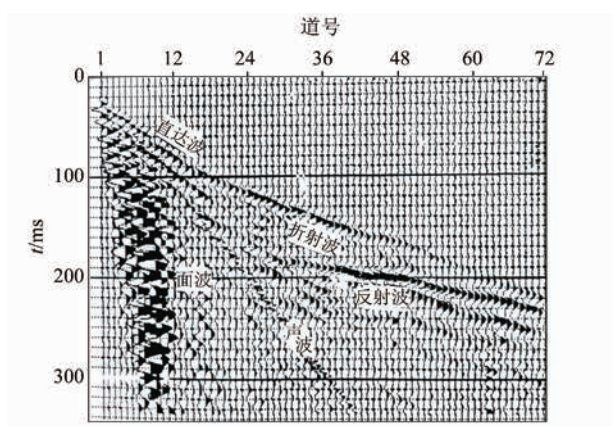


图 2 常规地震勘探波形记录

天然源面波勘探若采用常规地震勘探方法,即数据采集与处理分开做,则是不适宜的。其主要原因是由于天然源震动记录的特点与常规地震勘探波形记录不同。由图 3 可见,天然源震动记录的特点

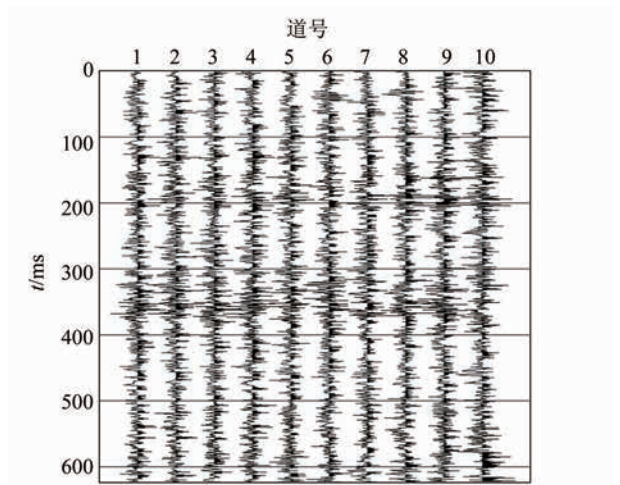


图 3 常规微动勘探采集到的波形记录

为:①无数个未知震源点、长时间的地震波记录;②无规律的随机信号;③无法认识有效信号和噪声信号;④无法判断记录质量及是否达到目的。因此对野外采集到的数据处理后能否得到想要的成果不确定,即数据采集具有盲目性,工作处于被动状态。

1.2 解决问题

1.2.1 初期措施

为克服这种被动局面,采集试验时派专人到现场,数据采集完毕马上进行处理,如果能得到合格成果,则移动装置到下一个点,否则就重新采集,直至获得满意的处理结果。这样虽能保证各测量点野外资料采集的有效性,但施工效率不高,并且对技术人

员专业水平要求较高,不便推广应用。

1.2.2 分析原因

为此,技术研发团队从微动的采集和处理入手分析资料不能确保每次均获得目的层信息的深层原因。总结归纳主要有以下几条:①微动震源传播的信号是随机变化的,即有效信号不是随时都有;②在环境噪声中,有效信号的波需要具有一定的信噪比方可被使用;③采集时段人为确定,有效信号是否在时段内,具有随机性;④程序处理简单、功能单一;⑤现场无法判断采集记录的质量。由此看出:在固定的时间内,面对不确定的信号,是否能采集到有效信号需要巧合,存在概率。因此,业界有人形容天然源面波勘探是:采集靠天时,处理靠专家。

1.2.3 解决方案

根据天然源微动勘查特点,制定出“采集信号,及时提取,筛选剔除,累积叠加,实时显示成果曲线”的总体思路,经过几年的软硬件开发、编程调试优化与大量现场试验,研发出具有完全自主知识产权的 WD 智能勘探仪(图 4),并获得专利授权。WD 智能天然源面波勘探系统的智能优势表现在仪器的显示屏上,采集开始时,会看到显示屏有两个窗口,一个窗口显示噪声般的微动信号,另一个窗口显示面波频散数据及其不断被刷新迭代的过程(图 5)。

图 6 是一次长采集过程被刷新迭代的 4 个截图,由左往右分别是迭代 10、30、200、701 次后的显示结果。由图 6 可见,开始时频散曲线跳动大,显得有些乱,随着迭代次数不断增加,频散曲线变得逐渐收敛,最终趋于稳定;当频散曲线趋于稳定,野外采集完成,从频散曲线上可比较直观地看到是否采集到有效信息,使得野外信号采集不再盲目被动。



图 4 自主研发的 WD 智能勘探仪

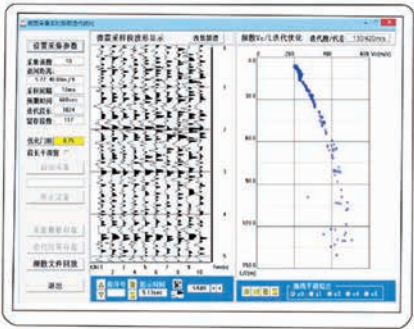
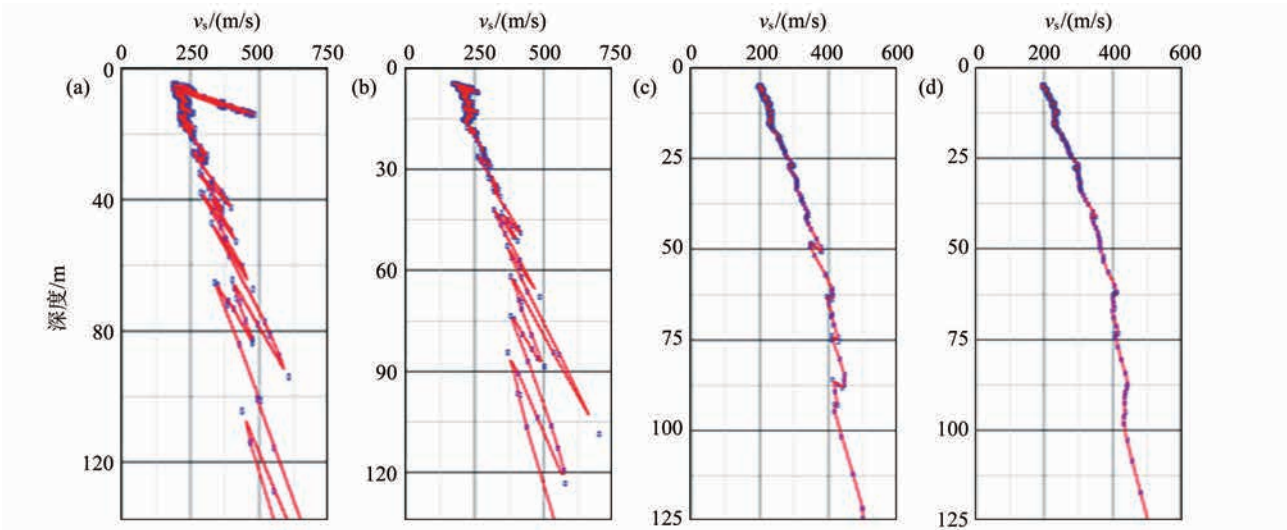


图 5 WD 智能勘探仪显示屏

该仪器的天然源面波采集系统具有以下特点:①在不中断采集的前提下,对数据分段进行实时计算处理;②筛选微动信号,去除干扰波,选用有效波,提取面波频散数据;③刷新叠加与实时显示频散曲线;④数据采集和获得成果的全过程实现智能化。

WD 智能勘探仪的成功研制,改变了以往现场仪器只采集天然微动波形记录的现状,简化了微动勘探的操作流程(图 7),降低了微动勘探的技术门槛,为该方法的推广应用提供了科学的技术保障。



a—迭代 10 次;b—迭代 30 次;c—迭代 200 次;d—迭代 701 次

图 6 WD 智能勘探仪一次长采集过程中不同迭代次数下的显示结果

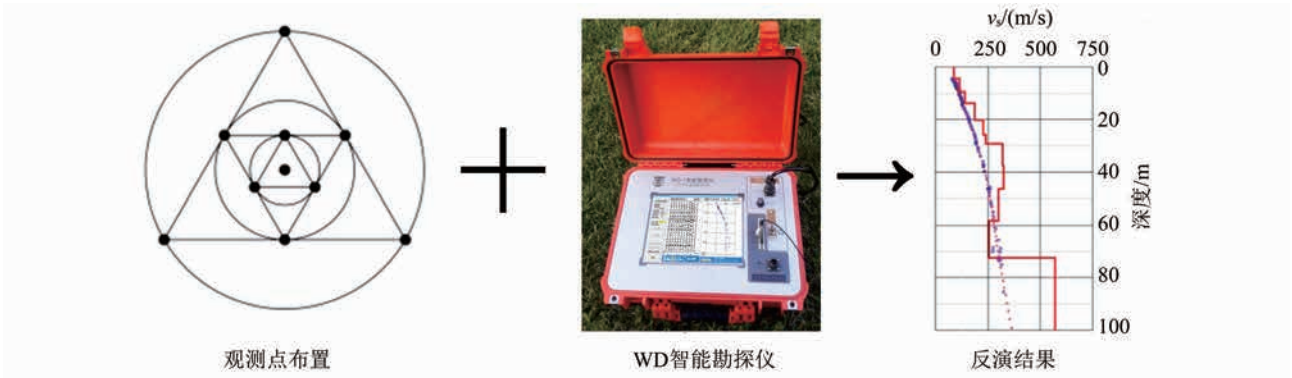


图 7 WD 智能勘探仪勘探流程

2 系统介绍

2.1 系统框架

图 8 为 WD 智能天然源面波数据采集系统框架。与常规仪器比较可以发现,该系统在数据缓存器模块以外,增加了数字滤波、速度滤波、异常波过滤和空间自相关等模块。增加模块为智能系统使用,与控制板的多任务功能共同完成实时采集处理系统。

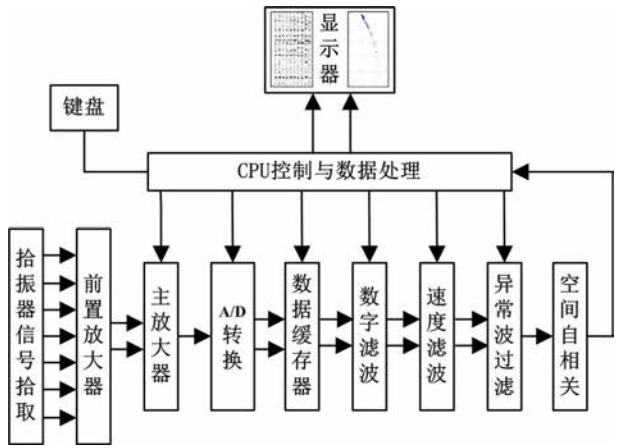


图 8 WD 智能天然源面波数据采集系统框架

2.2 系统主要技术指标

表 1 系统主要技术指标

参数	主要技术指标
道数	10 道,并可扩展为 48 道
模数转换	24 bit
采样间隔	可选 5、10、20、50、100 ms 档
采样长度	600~3 600 s
动态范围	120 db
内置 CPU 板	1.66 GHz
RAM	1 G
固态硬盘	120 G
显示屏	1280×768
外置电源	DC12V
体积	400×300×160 mm
重量	7 kg
使用环境	-5~55 ℃

2.3 系统特点与运行环境

与 WD 智能微动勘探系统相配套的天然源面波处理系统为 WD5.0 版本,该处理系统与智能仪器中的实时处理系统相匹配,具有功能更强,处理更细化的特点。频散曲线的后处理方便快捷,并增加地质绘图等方便解释的功能。

天然源面波处理系统的主要功能模块及处理流程见图 9。处理流程分为三部分:第一部分为选择处理参数;第二部分为智能提取面波频散曲线;第三部分为速度分层计算与地质成图与解释。

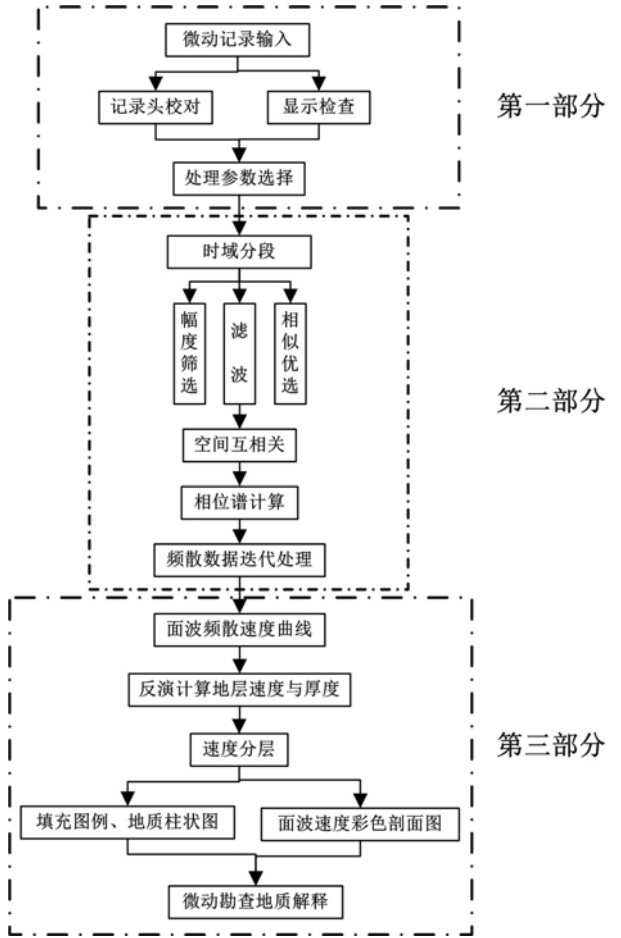


图 9 天然源面波处理系统的主要功能模块及处理流程

2.4 使用注意事项

常见的拾振器布置方式主要有 4 种:十字线布置;L 线布置;圆周上的等边三角形布置;嵌套式等边三角形布置。试验证明嵌套式等边三角形布置采集效果要好一些,因为在同等数量拾振器条件下,拾振器连线构成的指向多,有利于适应天然微动震源传播方向的不确定性,构成的不等长的线段多,有利于适应不同波长的天然源面波的采集。

在使用该仪器进行野外勘探时,建议使用嵌套式等边三角形布置方式,拾振器布置在嵌套的等边三角形的顶点和最小三角形的中点。该布置方式的探测深度与最大边长有关系,一般情况下最大边长的 3 ~ 5 倍为可实现的勘探深度。图 10 为天然源面波剖面勘探线上 3 个测点的嵌套式等边三角形布置,三角形中心点的连线为勘探测线,测点的间距可根据需要调整。

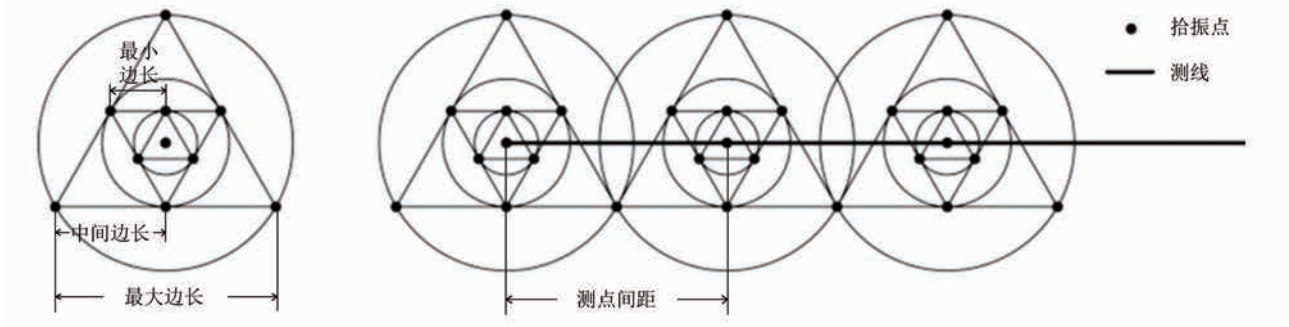


图 10 嵌套式等边三角形布置野外数据采集示意

3 应用试验

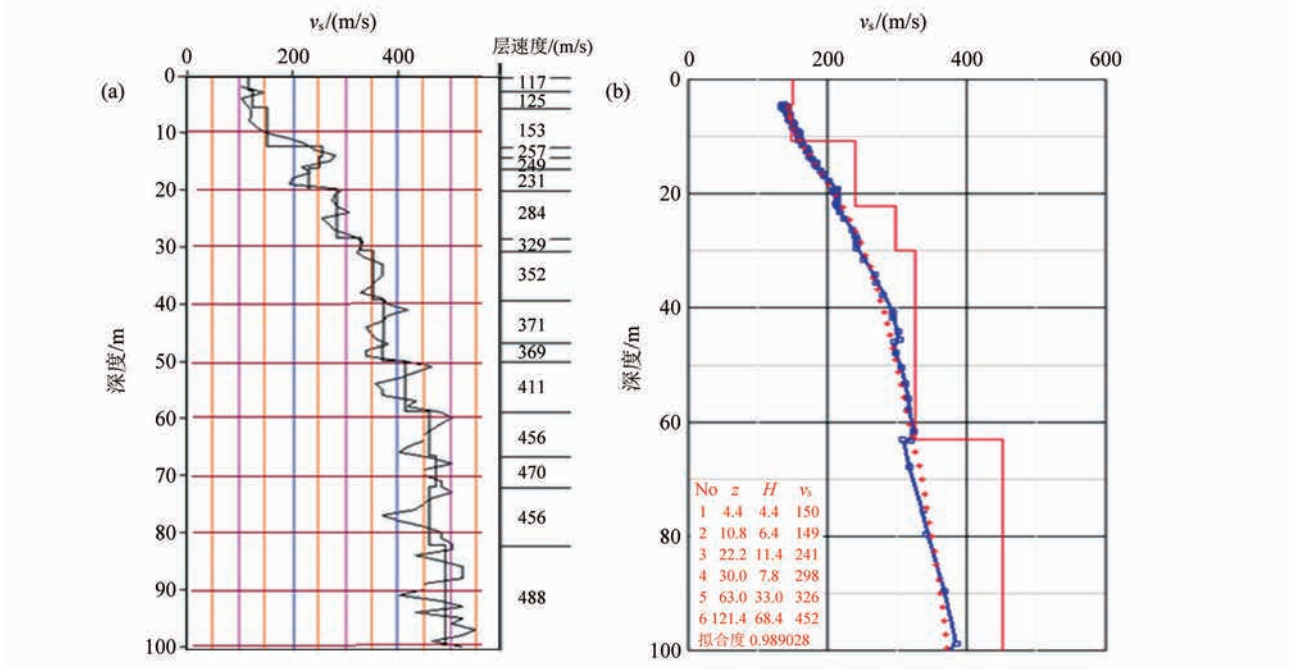
为试验该系统的应用效果,在不同的地方进行了试验,下面给出几个典型的试验实例。

3.1 与孔中波速测井曲线对比实验

为验证该采集系统所获得的面波频散曲线的准确性,2014 年 9 月 28 日,在天津城建大学进行了测试,该校区内有一个百米深的钻孔,并且有孔中横波

测井资料。测点布置在大学主楼前的广场上,利用 WD 智能勘探仪,按照嵌套三角形方式安置 10 支拾振器,最小边长 20 m,最大边长 80 m,中间边长 40 m,拾振器频率为 1 Hz;采集 10 通道,采样间隔 10 ms,采样点数 60 000。

测试结果见图 11,图 11a 为早先采用悬挂式波速测井仪获得的钻孔横波测井曲线,该曲线是在钻孔中通过逐点激发和接收地震波,通过检测地震波



a—孔中横波测井曲线;b—天然源面波波速分层结果

万方数据 图 11 天津城建大学天然源面波勘探成果曲线与已知钻孔孔中横波测井曲线对比

传播时间获得孔壁周围介质的速度。这种成果属于直接检测,速度曲线受测点岩性和钻孔条件等影响表现为锯齿状。测井横波速度的准确性,在数据点离散较小情况下具有定量评价地层的精度,在数据点离散较大情况下具有定性评价精度。图 11b 是在地面利用地球的微弱振动,采用天然源面波勘探方法获得面波频散曲线,通过反演计算获得地层的厚度和横波速度。通过对比图 11a、b 可知,两条曲线的速度均随深度的增加而增加,形态基本一致,所划

表 2 然源面波勘探获得速度与已知钻孔中横波测井速度对比

深度范围/m	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~100
孔中测井速度/(m/s)	130	240	280	350	370	410	460	450	480
天然源面波速度/(m/s)	150	240	290	330	330	330	450	450	450

3.2 与单孔法地震波测井曲线对比实验

常规获得地层横波速度的物探方法有两种,一是孔中波速测井法,二是单孔法地震波测井法。在完成与孔中波速测井曲线对比实验以后,又在上海岩土工程勘察设计研究院有限公司进行实验,因为该院在上海世博园场地曾承担过一个百米钻孔的单孔法地震波测井任务,有完整的地震横波测井资料。

2015 年 3 月 27 日,在上海世博园广场采用嵌套三角形方式,布置 10 个 1 Hz 拾振器,最小边长 15 m,最大边长 60 m,中间边长 30 m;采样间隔 10 ms,采样长度 360 000 点,即采集 1 h。实验结果见图

分的层位能很好地对应,而且对应深度地层的横波速度基本一致,差异主要表现在 30 m 以下的分段中,由天然源面波得到的横波速度比悬挂式测井仪得到的横波速度略低一些,对比结果见表 2。

表 2 中仅对 100 m 深度以浅的速度进行了对比,本次实验中使用智能微动勘探系统在地面观测 10 min,获得地层横波速度的深度是 240 m,同时还得到了该场地卓越周期等参数。

12,其中图 12a 是单孔法地震波测井曲线,通过在钻孔旁叩板激发横波,在钻孔中逐点移动三分量探头接收地震波传播时间,再通过分析时距曲线的斜率获得地层横波速度;图 12b 是利用天然源面波勘探方法获得的频散曲线与计算得到的横波速度曲线。通过对比图 12a、b 可知,两条成果曲线的速度结构层划分基本一致,即 0~10、10~20、20~40、40~60、60~100 m 的 5 个速度层,而且对应地层的横波速度基本吻合,详见表 3。其差异主要表现在由天然源面波得到的横波速度比单孔法地震波测井得到的横波速度略高一些。

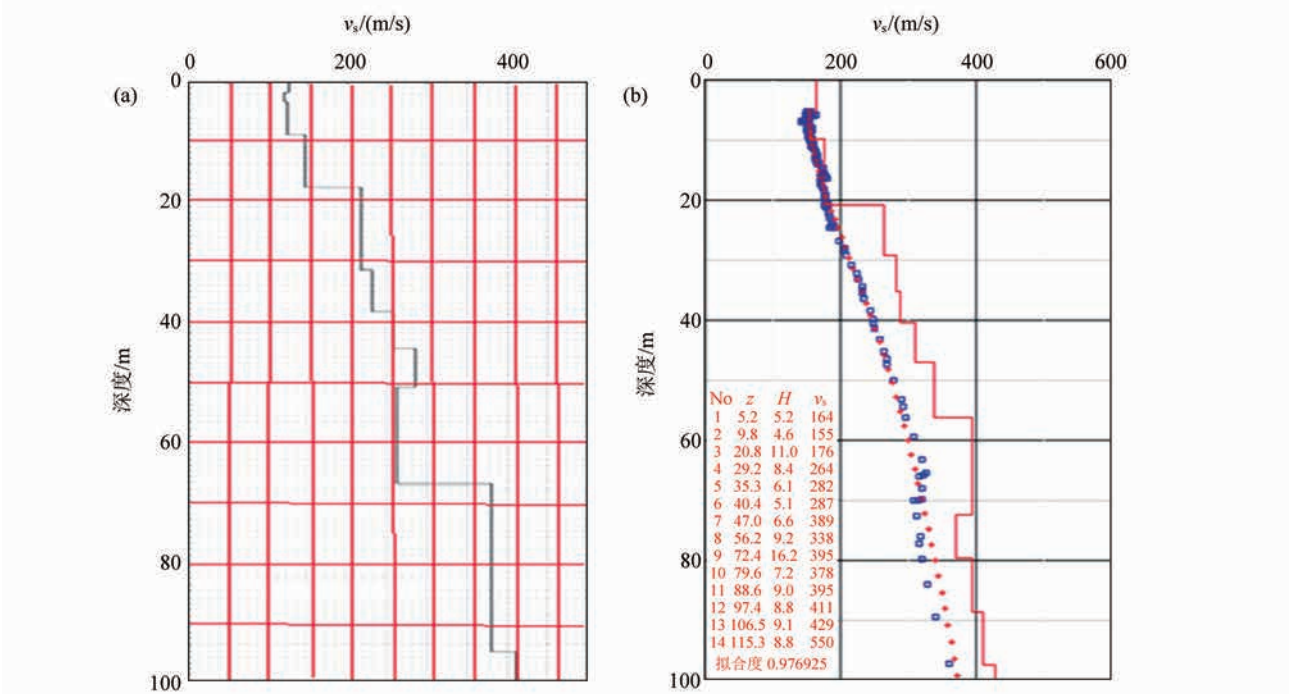


图 12 上海世博园广场天然源面波勘探成果曲线与单孔法地震横波测井曲线对比实验

表 3 天然源面波勘探获得速度与单孔法地震波测井横波速度对比

深度范围/m	0~10	10~20	20~40	40~60	60~100
孔旁地震波测井速度/(m/s)	130	160	220	270	380
天然源面波速度/(m/s)	150	170	270	320	390

上海岩土工程勘察设计研究院有限公司在采用单孔法地震波测井的过程中,为了克服三分量探头的水平分量与横波叩板方向不一致的情况,在每个测点通过转动电缆和多次叩板激震采集到 x 或 y 水平分量幅度较大的记录,再由每个测点水平分量幅度大的记录合成为孔旁地震波测井记录,横波同向轴整齐、起跳明显,因此单孔法地震波测井时距曲线应该是准确的。

3.3 与人工源多道瞬态面波频散曲线对比实验

人工源面波有稳态和瞬态两种方法,自从 20 世纪 90 年代刘云祯等人发明了多道瞬态面波技术^[9]以后,多道瞬态面波勘察技术广泛地应用于工程勘察,稳态面波方法的应用少见。在研究天然源面波技术取得进展以后,开始考虑天然源面波与人工源面波勘察成果的一致性问题的。

为了获得较大深度的人工源面波资料,2014 年 7 月 8 日在陕西渭南某公路工地进行了实验。借用山东天路重工科技公司的重型机械锤作为面波震源,锤头冲击力为 3 吨米。采集仪器为 SWS-6 多功能工程勘探仪,采集的多道瞬态面波记录为 24 道,检波器频率为 4 Hz,道间距为 2 m,采样间隔 0.5 ms,采样点数 2 048。之后,在同一地点,利用 WD 智能勘探仪获得天然源面波频散曲线,使用 10 个 1 Hz 拾振器,采用嵌套式等边三角形布置,最小边长 4 m,最大边长 16 m,中间边长 8 m,采样间隔 10 ms,采样长度 60 000 点,即 10 min。

图 13 是人工源多道瞬态面波与天然源面波频散曲线对比,可以看出在 10~65 m 范围两条曲线吻合程度相当好,两种方法同深度点的视速度差不大于 5%。深度 65 m 以下,人工源面波的频散曲线逐渐偏离天然源频散曲线,即自深度 65 m 起瞬态面波呈现出收敛,频散曲线不可靠,此种现象是由于人工震源的低频频率太弱造成的,在《多道瞬态面波勘察技术规程》第 6.2.2 节中有明确规定,不收敛的起点可解释为地层界线,但不收敛的频散曲线不能用于计算横波速度^[10],所以二者的对比应在人工源面波频散曲线的有效段进行。由此也可看出天然源面波具有明显的勘察深度优势。

3.4 使用不同频率拾振器的对比实验

天然源面波勘察技术针对不同的勘察深度和分辨精度要求,会选用不同频率的拾振器或不同边长

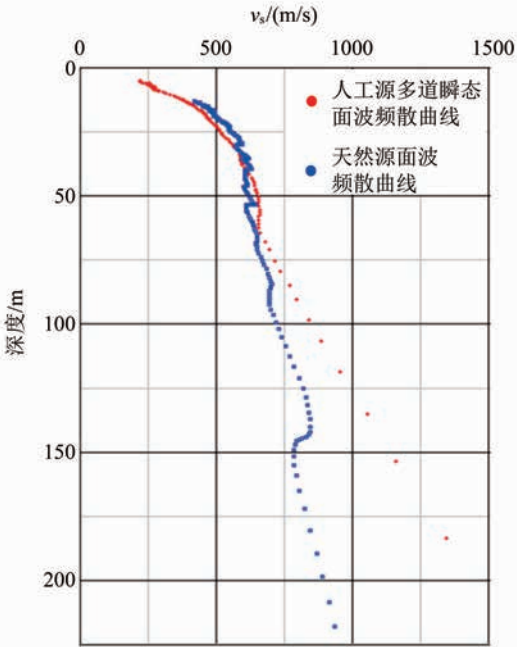
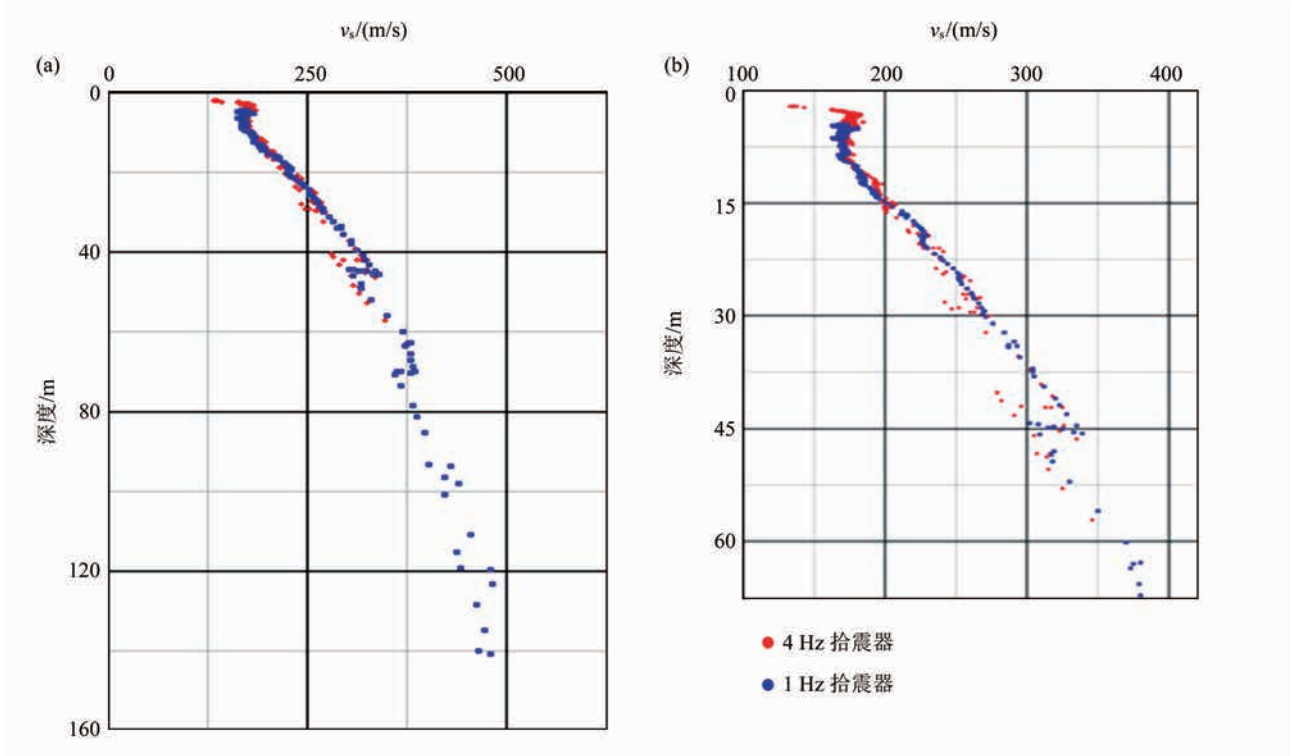


图 13 陕西渭南某公路天然源面波勘探与人工源多道瞬态面波频散曲线对比实验

的嵌套式三角形布置。因此,使用不同频率拾振器得到的频散曲线成果的一致性,是一个必须面对的问题。为此,分别利用 1 Hz 与 4 Hz 拾振器,采用相同边长的嵌套式三角形布置和使用相同数量的拾振器,在多地进行过对比实验。

图 14 是 2010 年 5 月 27 日在河北燕郊用不同频率拾振器进行对比实验的结果,图 14b 是图 14a 深度 60 m 以内的放大显示。对比图 14a、b 可知,使用 1 Hz 拾振器探测的深度为 140 m,使用 4 Hz 拾振器探测的深度为 60 m,两种拾振器获得的频散曲线在共有深度段基本吻合,曲线对地层表现的特征基本一致。由图 14b 可知,4 Hz 的频散数据对地层表现的特征更敏感一些,1 Hz 最浅的频散数据深度为 4.5 m,4 Hz 最浅的频散数据深度为 2 m。对比 30 m 深度以内两条频散数据,大部分数据表现出重合,亦见少部分 4 Hz 数据在 1 Hz 数据左右摆动的现象。以 1 Hz 数据为中心统计:速度在 160~180 m/s 区间,速度差为 5 m/s 左右;速度在 180~250 m/s 区间,速度差不大于 10 m/s。

由图 14 的对比结果可得到如下认识:应根据勘察深度选择拾振器,在满足深度勘察的前提下,频率高的拾振器对地层界面和速度的表现会灵敏一些;对于一般无特殊要求的勘察,不同频率的拾振器不



a—不同频率拾振器获取的频散曲线;b—图 a 深度 60m 以内部分放大显示

图 14 河北燕郊某地天然源面波勘探不同频率拾振器获取频散曲线对比实验

会影响勘查成果的质量。

4 结论

我国自主研发的 WD 智能天然源面波数据采集处理系统,改变了传统仪器现场只采集微动信号波形的工作模式,实现了在野外采集微动信号时实时显示勘探成果面波频散曲线,确保了野外采集数据的有效性,提高了勘探效率。

从上面几个应用试验不难看出,该系统可准确、快速获取上百米地层的横波速度曲线,进而辨识地下地层性质,可满足常见的工程勘查需要。在信号采集时,该系统所具有的无需震源、无需人工控制、操作便捷、实时显示勘探成果曲线等特点,极大地降低了野外资料采集的技术门槛,为天然源面波勘探广泛应用于工程勘查提供了科学的技术保障。

当然,智能天然源面波勘探的研究和应用实践目前尚处于起步阶段,还不能说十分成熟,需要更多的科研工作者加入,并加大推广应用,在实际工作中不断总结经验,不断完善和优化天然源面波智能勘查系统,使之更好地用于工程勘查,服务于国民经济发展。

致谢: 感谢河北省地质研究院天然源面波勘探技术以及进行

的现场试验工作中,李哲生、刘金光、杜冬菊、黄永进等专家曾给予热情的支持;在稿件的撰写过程中,沈效群高工提供了很多好的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献:

[1] Toksoz M N, Lacos R T. Microtremors—mode structure and sources [J]. Science, 1968, 159: 872–873.

[2] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors [J]. Bull. Earthq. Res. Inst., 1957, 35: 415–456.

[3] Capon J. Application of detection and estimation theory to large array seismology [J]. Proc. IEEE, 1969, 58: 760–770.

[4] 王振东. 微动的空间自相关法及其实用技术 [J]. 物探与化探, 1986, 10(2): 123–133.

[5] 王振东. 技术培训资料: 面波勘探技术 [R]. 1998.

[6] 冉伟彦, 王振东. 长波微动法及其新进展 [J]. 物探与化探, 1994, 18(1): 28–34.

[7] 刘宝亨. 微动面波勘探法简介 [J]. 铁路地质与路基, 1997, (1): 10–14.

[8] 李传金, 徐佩芬, 凌甦群. 微动勘探法圆形阵列台站数量和分布方式研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7): 27–31.

[9] 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.

[10] 刘云祯, 梅汝吾, 任书考, 等. JGJ/T143–2004 多道瞬态面波勘察技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

Data acquisition and processing system of
WD intelligent natural source surface wave and its application test

LIU Yun-Zhen¹, MEI Ru-Wu¹, YE Pei², JIN Rong-Jie¹

(1. Beijing Institute of Geophysical Exploration for Water, Beijing 100027, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper introduces the data acquisition and processing system of WD intelligent natural source surface wave designed and developed independently by Chinese researchers, which has changed the situation that the in-site instrument can only collect natural microvibration wave form record. Utilizing such techniques as large data calculation, sieving, stacking and normalization, this system has innovatively developed the direct demonstration of surface wave frequency-discretion curves of exploration results simultaneously with the acquisition of the micro seismic signal. During the signal acquisition, seismic source and human control are not needed. The equipment is installed on the ground, and can obtain transverse wave velocity curve of the strata within one hundred meters in 5~30 minutes and reflect the hardness of the strata. Test results in areas of different lithologic characters have proved that this system can divide strata rapidly and accurately. With the advantages of easy operation and high adaptability, this system provides technological guarantee for extensively applying the natural source surface wave exploration to the engineering exploration.

Key words: natural source surface wave exploration; WD intelligent exploration instrument; data acquisition system of natural source surface wave; engineering exploration; exploration without source

作者简介: 刘云祯(1947-),男,北京市水电物探研究所所长,中国建筑学会工程勘察分会副会长,1994年发明多道瞬态面波技术与高密度地震映像技术,并推广至国内广泛应用和输出国外,公开发表学术论文数篇,长期从事人工源及天然源面波勘探的数据采集处理系统及仪器研发工作。E-mail:ccsws@vip.163.com

通讯作者: 叶佩(1986-),男,工程师,2011年毕业于长安大学物探系,获硕士学位,主要从事地球物理数据处理与解释工作。E-mail:286472091@qq.com