

杨微、王宝善、葛洪魁等, 2013, 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究, 中国地震, 29(4), 399 ~ 410。

· 研究论文 ·

大容量气枪震源主动探测 技术系统及试验研究

杨微¹⁾ 王宝善¹⁾ 葛洪魁²⁾ 王伟涛¹⁾ 陈颀¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京市民族大学南路 5 号 100081

2) 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249

摘要 针对地下介质动态变化监测研究中的信噪比、震源可重复性和波速精确测量等关键问题, 利用大容量气枪震源, 构建了一套高性能的主动探测技术系统, 该系统包括气枪震源激发和信号接收, 并在河北、云南和新疆等地的内陆水库和人工水体等不同激发环境, 开展了探索性试验研究。试验结果表明: ①气枪震源激发频率低, 能量强, 具有高度的可重复性、可通过叠加提高信噪比、探测距离大、绿色环保等特征, 是一种理想的低频震源; ②该探测技术系统操作简单, 易控制, 自动化程度高, 探测精度高, 能观测到固体潮引起的连续变化, 可应用于区域尺度地下介质动态变化监测和开展 4D 地震学研究; ③气枪震源激发产生的信号震相丰富, 有较强的 S 波, 为研究地壳介质特性、应力分布及其动态变化等提供了新的技术路线。

关键词: 大容量气枪 人工震源 重复性 主动探测 动态变化

[文章编号] 1001-4683 (2013) 04-0399-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

随着地震台站资料的密集化和地下结构探测能力的提高, 高分辨率的地球内部结构成像已逐渐变得清晰, 但是由于通过直接观测的方法获得地下介质的动态变化比较困难, 因此对于地下介质动态变化的认识仍相对薄弱。迄今为止, 地震波是所知唯一能够穿透地球内部的振动(陈颀等, 2005), 在地震波的观测中, 其波速是测量精度最高、最可靠的参数, 测量方法亦相对成熟。从原理上讲, 地下深部应力随时间的变化可以通过地震波速度的变化来反映。

目前, 国内外相关学者分别利用重复地震、噪声和人工震源等研究地下介质的动态变化(Schaff et al, 2004; Brenguier et al, 2008; Siliver et al, 2007; Niu et al, 2008; 陈颀等, 2006、

[收稿日期] 2013-06-30; [修定日期] 2013-07-15

[项目类别] 地震行业科研专项(201208004)、国家自然科学基金(41174040, 41204047)和中央级科研院所基本科研业务专项(DQJB12C09)共同资助

[作者简介] 杨微, 男, 1982 年生, 助理研究员, 中国地震局地球物理研究所博士研究生, 主要从事人工震源主动探测方面的研究工作。E-mail: weiyang05@163.com

2007a; 林建民等, 2006; Wang et al, 2008; 王伟涛等, 2009)。重复地震发生的时间和地点不可控制, 加之天然地震定位精度有限, 因此无法进行长期的动态监测; 而噪声源能量弱, 需要长时间叠加才能获得可靠的测量, 这些因素限制了利用天然源测量地下介质变化的时间和空间的精度及分辨率(王宝善等, 2011)。人工震源具有震源位置已知、激发时间可控、观测系统分布灵活方便、可以进行密集观测等优点, 在区域尺度研究中有望弥补天然源在精度上的不足。

地震孕育过程中地震波速度变化很小, 也很缓慢。因此, 利用人工震源进行动态监测的关键问题有: ①信噪比; ②震源可重复性; ③波速的精确测量。探测技术系统通常需要较大的探测深度和较高的精度, 而震源是产生地震信号的源头, 其产生的信号质量将直接影响探测效果。因此, 选择合适的人工震源是一个非常关键的问题。传统人工震源探测深度有限, 而大容量气枪震源的出现和高精度测量系统的发展为深部高精度动态监测创造了条件。

利用气枪震源进行地下深部介质动态监测研究时, 最好的方法是将气枪震源移植到陆地水域进行激发。但到目前为止, 国内外关于大容量气枪用于陆地的研究报道极少, 可借鉴的经验也很少。为了利用大容量气枪震源, 我们设计并加工了气瓶组和气控系统, 搭建了气枪激发平台, 配备了起吊装置、空气压缩机等关键设备, 构建了一套气枪震源激发系统。近几年已将该套探测技术系统分别在河北、云南和新疆等地开展探索性试验研究。

1 气枪震源主动探测技术系统

1.1 气枪震源

气枪震源是由美国 Bolt 公司的 Stephen Chelminski 在 1964 年发明的。在 20 世纪 60 年代末至 70 年代初, Ziolkowski 和 Schulze-Gattermann 等人根据气泡振荡的衰减方式、振荡周期和振荡模型等理论建立了气枪阵列的理论模型, 为建立气枪阵列打下了良好的理论基础(罗桂纯等, 2006、2007; 陈浩林等, 2008)。1983 年 Bolt 公司的气枪专利失效, 气枪理论和技术得到迅猛的发展, 尤其在海洋学科应用上获得巨大成功(Lutter et al, 1999; Fuis et al, 2003; Okaya et al, 2002; Qiu et al, 2001; Calvert, 2004; McIntosh et al, 2005; Melhuish et al, 2005; 丘学林等, 2003、2007; 赵明辉等, 2004、2008; Chen et al, 2008)。

到目前为止, 气枪震源经历了近半个世纪的改进和发展, 在结构设计上从复杂趋向简单, 其工作压力从高压(5000psi, pound per square inch, 1psi = 6.89kPa)向低压(2000psi)转变, 稳定性和可靠性得到明显改善, 操作方便且更易控制。目前, 国际上气枪生产厂家及气枪类型主要有: ①美国 ION 公司生产的套筒(SLEEVE)枪; ②法国 CGG 公司生产的 G 枪和 GI(Generator 和 Injection)枪; ③美国 Bolt 公司生产的长命(Long Life)枪。与套筒枪和 G 枪相比, 长命枪吸收了两者的优点, 并在单枪容量上可从 5in^3 到 2000in^3 , 具有更高的可靠性, 50 万震次无需大修。另外, Bolt 公司可根据用户需求制作更大容量的气枪, 单枪容量可到 8000in^3 。

气枪震源有多种, 但其基本原理一致。气枪通常有两个气室: 控制气室和起爆气室。空气压缩机将高压空气注入这两个气室中, 梭阀将排气口封住, 并达到一个平衡状态。当点火激发时, 电磁阀自动打开, 梭阀失去平衡将排气口打开, 起爆气室的高压空气瞬间释放到水里产生强大的冲击力, 然后电磁阀自动关闭, 梭阀再次将排气口封住, 高压空气继续注入到

起爆气室,进入到下一次点火激发状态。

气枪震源激发系统由空气压缩机、气瓶组、气控系统、气枪、电控系统、激发平台及辅助设备等组成(图 1),根据气枪组合容量的大小和空气压缩机的排气量,激发系统可按设定好的时间间隔进行自动激发。

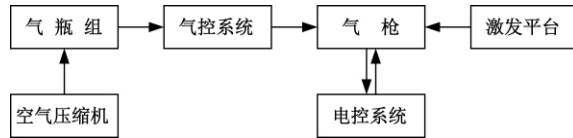


图 1 气枪激发系统示意图

(1) 空气压缩机。为气枪震源提供高压空气,出气压力要高于气枪激发的工作压力,气枪的工作压力为 2000psi (~13.8MPa),空气压缩机的出气压力一般选在 20~25MPa 之间。根据理想气体状态方程,在气体量不变的情况下, $\frac{PV}{T} = C$,其中 P 是压强, V 是体积, T 是热力学温度(开尔文), C 表示常数。压缩机的排气量可由气枪的总容量和激发时间间隔决定。在构建的技术系统中,考虑到设备运输和安装等问题,我们选用出气压力为 25MPa,排气量为 $1\text{m}^3/\text{min}$ 的电动风冷压缩机。当气枪组合容量较大或要求激发间隔较小时,可用多台压缩机同时供气或选用排气量更大的压缩机。

(2) 气瓶组。储气瓶是压缩机与气枪之间联系的中间环节,它可保证在气枪激发的很短时间内迅速地为气枪补充压力。考虑到 25MPa 的压缩空气属于高压气体,会给操作人员带来潜在危险,因此将气瓶组的安全泄气压力与空气压缩机的自动停机压力(出气压力)保持一致,实现压缩机自动停、开机和自动供气,降低操作人员的危险。

(3) 气控系统。用于控制气枪调式,出、入水和激发压力的调节,实时显示气瓶组和气枪的压力,具有滤油、滤水、将气枪和连接管中的高压空气排空等功能。气控系统由空气过滤器、减压阀、截止阀、泄压阀、消音器、压力表和管汇等组成。

(4) 气枪。深部介质动态探测与石油高分辨率勘探不同,要求震源具有更高能量和更低频率。气枪震源的激发能量随总容量的增大而增大,其主频随单枪容量的增大而减小。因此,在试验中选用 Bolt 公司生产的长命枪,激发压力为 2000psi,单枪容量分别为 1500、2000 in^3 (型号:1500LL),分别采用 4 条和 6 条气枪进行组合激发。大容量气枪激发对水深的要求为气枪到水面不低于 8m,到水底不低于 3m。

(5) 电控系统。控制气枪的激发和对枪阵同步误差进行实时质量监控和报警,可进行自动激发和自检,具有无线传输、遥控发射等可选功能。我们选用美国 Real Time Systems 公司生产的气枪控制器及配备的专用软件用于气枪激发控制。气枪激发的同步精度为 0.1ms,可同时控制 4~32 条枪。在试验过程中,采用 GPS 时间自动激发方式,在 GPS 模式下气枪控制器间的精度为 $1\mu\text{s}$ 。

(6) 激发平台。提供气枪的吊升、沉放、工作人员的近场操作和承受气枪激发的冲击力。

(7) 气缆和炮缆。用于给气枪输送高压空气和控制气枪电磁阀,高压气缆的口径大小

可根据气枪容量和激发时间间隔决定。若激发时间间隔小,则需要压缩机供气量大,同时要求高压气缆的口径粗。

1.2 信号接收

在接收地震信号时,一般采用固定台或流动台接收的方式。其观测仪器都能记录 1 ~ 30Hz 的地震信号,而气枪激发信号的主要能量正好位于此频率区间。固定台站是为了接收天然地震信号而布设的,台站噪声低,基本呈网状分布;而流动台站能根据观测目的布设测线,观测位置相对灵活,在空间上能随意组合和密集布置,且同一条测线的数据同相轴、易追踪,便于进行震相研究和进一步的结构研究。

地震孕育过程中的地震波速度变化很小,也很缓慢,速度异常的变化范围有限,若要研究地震孕育过程的动力学信息,需要开展时间和空间高分辨率的连续观测。图 2 为主动探测技术系统信号接收示意图。由图 2 可见,若在空间上布设的台站数量不够,不可能获得波速异常区的范围和集中区域,对地下介质的动力学信息就了解的不够清楚。

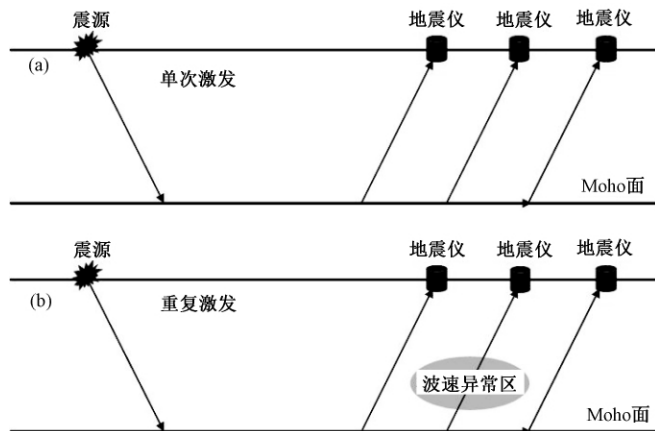


图 2 主动探测技术系统信号接收示意图

对于气枪震源激发和信号接收,我们采用 GPS 时间进行同步。观测仪器的高精度时间服务是精确测量速度的前提保障。在探测精度上,将大气压或固体潮引起的波速变化作为技术系统的一种连续标定信号,而引起的波速变化范围在 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$,在千米级的探测距离上达到这样的精度,除了要求 GPS 的授时精度高之外,对其守时精度也提出了较高的要求。

在信号接收上,建议观测仪器性能及布设要求如下:

(1) 观测仪器尽量保持一致,动态范围大,数据采集器的存储空间大,采样率高,GPS 时间的授时和守时服务精度高,每个对钟周期的累积误差要小于 0.1ms;

(2) 接收台站要有一定的数量,布设方式上要线与面相结合,固定台和流动台相结合,且具有一定的密集度。

2 野外试验

近些年,与多家单位合作将构建的大容量气枪震源主动探测技术系统分别在河北省遵化市上关湖水库(40°13'N,117°43'E)、云南省宾川县大银甸水库(25°48'N,100°30'E)和新疆维吾尔自治区呼图壁县人工水体(44°36'N,86°95'E)进行了探索性试验研究,具体的试验参数见表1。

表1 大容量气枪震源野外试验参数

试验地点	水体环境	试验时间	气枪型号	气枪容量 (in ³)	沉放深度	激发方式	观测类型
河北遵化	上关湖水库(中型水库),总库容为3600万m ³	2006年11月	Bolt 1500LL	4×1500	激发点水深18m,气枪沉放深度11.5m	GPS自动激发,5分钟激发1次	固定台;流动台:① PDS-1; ② Guralp-40T配 Reftek-130B
云南宾川	大银甸水库(中型水库),总库容为4085万m ³	2012年11月	Bolt 1500LL	4×2000	激发点水深15m,气枪沉放深度10m	GPS自动激发,40分钟激发1次	固定台;流动台:① PDS-1; ② Guralp-40T配 Reftek-130B
新疆呼图壁	人工水体,近似圆锥形,开口直径100m,容量为4.5万m ³	2013年5月	Bolt 1500LL	6×2000	激发点水深13m,气枪沉放深度9.5m	GPS自动激发,20分钟激发1次	固定台;流动台:Guralp-6TD

注:4条1500in³的气枪由中国科学院南海研究所提供;6条2000in³的气枪由新疆维吾尔自治区地震局提供;流动台的PDS-1型一体化数字地震仪为中国地震局地球物理勘探中心研制、生产和提供;流动台的其他观测设备由中国地震局地震科学探测台阵技术中心提供

目前常见的气枪阵激发方式有两种(罗桂纯等,2007),一种是通过叠加主脉冲,压制气泡脉冲来增加高频能量;另一种是通过压制主脉冲,加强气泡脉冲来增加低频能量。由于所采用的气枪容量均一样,考虑到要进行远距离探测,因此我们采用同时激发和相干叠加的办法,尽可能地增加低频能量。

3 气枪震源特征

3.1 能量特征

气枪震源的动力来源于高压气体的瞬间释放,激发的能量可由高压气体的容量和压力计算出来(Ronen et al, 2002),其具体关系式如下

$$E = PV \ln(P/P_0) \quad (1)$$

其中, E 为气枪释放的能量, V 为高压气体的容积, P 为工作压力, P_0 为环境压力,一般是1个大气压。

根据式(1),试验中 $6 \times 2000 \text{in}^3$ 的气枪阵激发1次所释放的能量约 $13.36 \times 10^6 \text{J}$,相当于6.8kg炸药释放的能量(1g炸药释放能量约为2000J)。根据地震台站记录的气枪信号,结合天然地震计算近震震级大小的公式,估算出相对应的关系(表2)。由表2可见,气枪阵($6 \times 2000 \text{in}^3$)激发1次相当于发生一次 $M_L 0.9$ 的天然地震,主要是因为气枪是在水中激发,气枪震源与水的耦合程度好,转换效率高。

3.2 频谱特征

在地震波传播过程中,具有高频特征的信号更容易发生衰减和散射,不能传播足够的距

离,而低频信号恰恰相反,可以地层介质中传播得更远。开展地下介质的动态变化监测,震源激发的信号需具有的足够的探测距离主要由低频能量成分决定,这就要求震源激发的信号低频能量比较强。我们对近场参考台站记录的垂向分量进行了时频分析,图3给出了 $6 \times 2000 \text{ in}^3$ 气枪阵单次激发的低频信号及时谱分析,表3给出了气枪容量与优势频率的对应关系。由图3、表3可见,优势频率主要在 $2 \sim 6 \text{ Hz}$,且随着气枪阵容的增加,优势频率向着低频靠近。说明气枪震源激发的信号具有丰富的低频有效能量,是一种适合深地壳结构探测的理想低频震源。

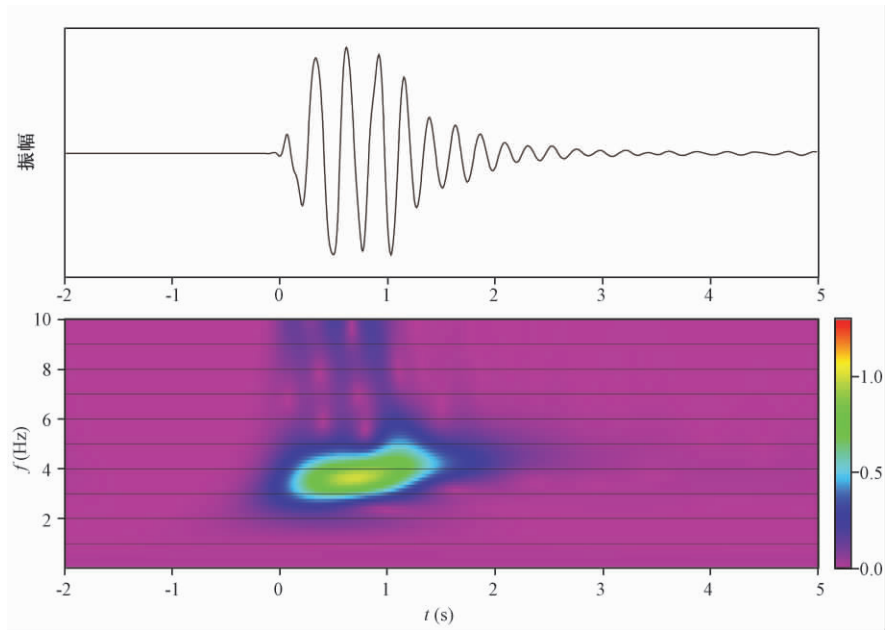


图3 $6 \times 2000 \text{ in}^3$ 气枪阵激发的低频信号波形及时频分析

表2 气枪容量与近震震级估计对应关系

气枪容量 (in^3)	能量释放 ($\times 10^6 \text{ J}$)	震级 M_L 估算
4×1500	6.68	0.5
4×2000	8.91	0.7
6×2000	13.36	0.9

表3 气枪容量与优势频率对应关系

气枪容量 (in^3)	优势频率 (Hz)
4×1500	4 ~ 8
4×2000	3 ~ 7
6×2000	2 ~ 6

3.3 可重复性

震源的可重复性是指震源激发位置和激发波形的可重复性。气枪是在水中激发,使用的介质为压缩空气,不会改变水的性质,且每次激发时的耦合条件完全一致,因此气枪激发位置具有完全可重复的特性。为了探究气枪震源激发的波形是否具有可重复性,对在云南宾川大银甸水库多次激发的气枪信号进行了分析。从参考台站(偏移距约60m)的记录波形中选取一个波形作为参考信号,考虑到传播到远处的能量主要是低频成分,对参考信号进行 $2 \sim 8 \text{ Hz}$ 的滤波,再利用波形互相关方法检测波形之间的相似性。图4对参考台站接收到的气枪阵激发低频段信号进行了重复性分析。由图4可见,绝大部分相关系数都大于

0.995,其余极少数的几个点稍小,但也大于0.985。结果表明气枪震源激发的信号重复性非常好,这与河北上官湖水库激发的气枪信号重复性分析的结果相一致(唐杰等,2009)。

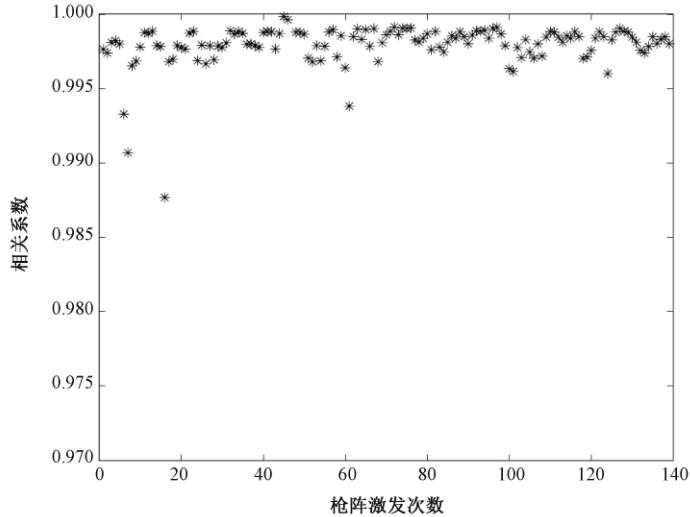


图4 参考台站接收到的气枪阵激发低频段信号重复性分析(2~8Hz滤波)

3.4 绿色环保

气枪在激发过程会产生噪声和振动。噪声主要来源于空气压缩机,但在离压缩机500m以外的地方,噪声可衰减到40dB以下。而开展气枪激发试验的场地都较偏远,不会对居民区产生干扰。 $4 \times 1500 \text{ in}^3$ 的气枪阵激发产生的振动,对距离100m的水库大坝的安全性也不会有影响(陈颀等,2007b)。

河北和云南开展试验的内陆水库年产淡水鱼数十万斤,新疆人工水体中人为放养60kg大小不一的鱼苗,但在气枪震源激发试验期间,未见一条死鱼。其主要原因可能是气枪在充气过程中产生的声音,使附近的鱼远离气枪激发点,且在第1次激发时,气枪的压力和容量都会减小。

另外,气枪激发使用的是压缩空气,不会对场地造成破坏,更不会对水体环境和水中生物产生严重的影响,因而是一种绿色环保型的震源。

3.5 低成本

气枪震源单次激发成本较低。以2013年6月在新疆呼图壁人工水体环境下气枪激发(6支 2000 in^3 气枪)试验为例,整套技术系统设备(气枪激发系统、控制和激发室的建设)和人工水体的挖掘费用,加上激发1次压缩机工作用电费,平均每次激发约30元,而70次叠加的气枪信号探测距离可达380km(王宝善等,2013)。

3.6 影响因素

在气枪震源的激发过程中,影响子波特征的因素很多。对于同一地点开展气枪震源激发试验,在能量和频谱特征上的影响因素主要有气枪容量、工作压力和沉放深度等。气枪容量越大,激发的能量越强,增加工作压力和沉放深度会导致气泡周期越长,产生的信号频率越低,信号衰减越慢,更有利于远距离传播,因此穿透能力越强。

4 探测效果

4.1 探测距离

相关检测技术是从强背景噪声中提取微弱信号的有效手段,它是以信息论和随机过程理论为基础,利用信号和噪音的统计特性发展起来的检测分析方法。在信号分析过程中,将近场流动台的记录作为参考信号,与固定台和流动台的记录分别进行互相关和滤波处理。图5(a)给出了在云南大银甸水库 $4 \times 2000\text{in}^3$ 气枪阵单次激发的走时剖面,图中显示信噪比

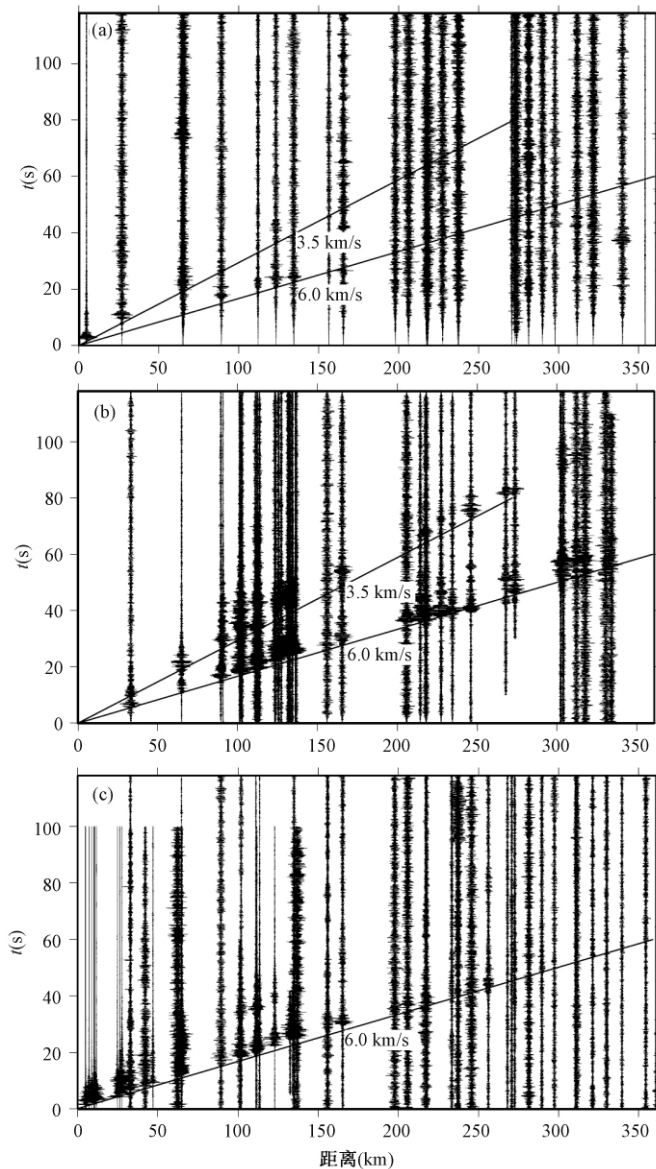


图5 (a) $4 \times 2000\text{in}^3$ 气枪阵单次激发的走时剖面;
(b) $4 \times 2000\text{in}^3$ 气枪阵 112 次叠加的走时剖面; (c) 900kg 炸药爆破的走时剖面

不够,传播距离近。由于气枪震源信号具有高度的可重复性,可通过叠加的方法来提高信噪比,图 5(b)给出了叠加 112 次后的走时剖面图,显示信噪比获得了明显的改善,在距离 260km 的台站也能追踪到有效信号。针对 3 次试验进行同样的处理过程,获得的探测距离见表 4。

表 4 气枪容量与探测距离对应关系

气枪容量 (m^3)	叠加次数	探测距离 (km)
4×1500	230	~ 200
4×2000	112	~ 260
6×2000	70	~ 380

图 5(c)是在距离大银甸水库气枪激发点约 300m 的位置,进行的 900kg 炸药的爆破记录,与图 5(b)对比分析,可得出:①叠加 112 次的气枪信号比 900kg 炸药爆破的探测距离远,得益于气枪震源的可重复性和叠加技术;②气枪记录的叠加走时剖面震相较丰富,存在较强的 S 波。气枪在水中爆破,由于液体中切变模量为零,不能传播横波,气枪产生的 S 波来自于界面的转换波。

4.2 探测精度

地震波速度的精确测量是实现地下介质动态变化监测的关键问题之一,测量结果精度的检验和标定是其重要保证。大气压或固体潮是在时域上连续的、可精确观测或计算的信号,可作为非常好的天然标定信号。在河北上关湖水库进行试验期间,开展了连续的激发和观测,将遵化台(偏移距约 7.0km)连续观测的数据与近场参考台的记录进行旋转相关法处理分析(赵雯佳,2013),得到了遵化台观测到的快波偏振方向变化曲线(图 6),与理论计算的固体潮线应变变化曲线进行对比分析发现,两者之间具有非常好的正相关性。说明所构建的大容量气枪主动探测技术系统的探测精度较高,能监测到由固体潮引起的连续变化。

5 结论

本文围绕地下介质动态变化监测的需要,以大容量气枪震源为基础,设计、加工并配备了相关设备,构建了一套人工震源主动探测技术系统,在内陆水库和人工水体等不同环境下开展了探索性试验研究,取得的成果如下:

(1) 大容量气枪震源具有激发能量强、优势频率低、可重复性好、绿色环保、易控制等特点,可通过多次叠加提高信噪比,探测距离远,穿透深度大,为岩石圈深部结构、物质组成和状态的探测研究提供了一条新的技术路径。

(2) 构建的重复探测技术系统探测精度高,能观测到由固体潮引起的地下介质连续变化,为中尺度或大尺度地下介质动态变化监测和地震孕育过程的动力学信息研究提供了可靠的技术保障。

(3) 野外试验结果表明,气枪震源激发的丰富 S 波震相为我们提供了利用 S 波信息进行地壳结构探测研究以及利用 S 波分裂等方法监测地下介质应力变化的可能。

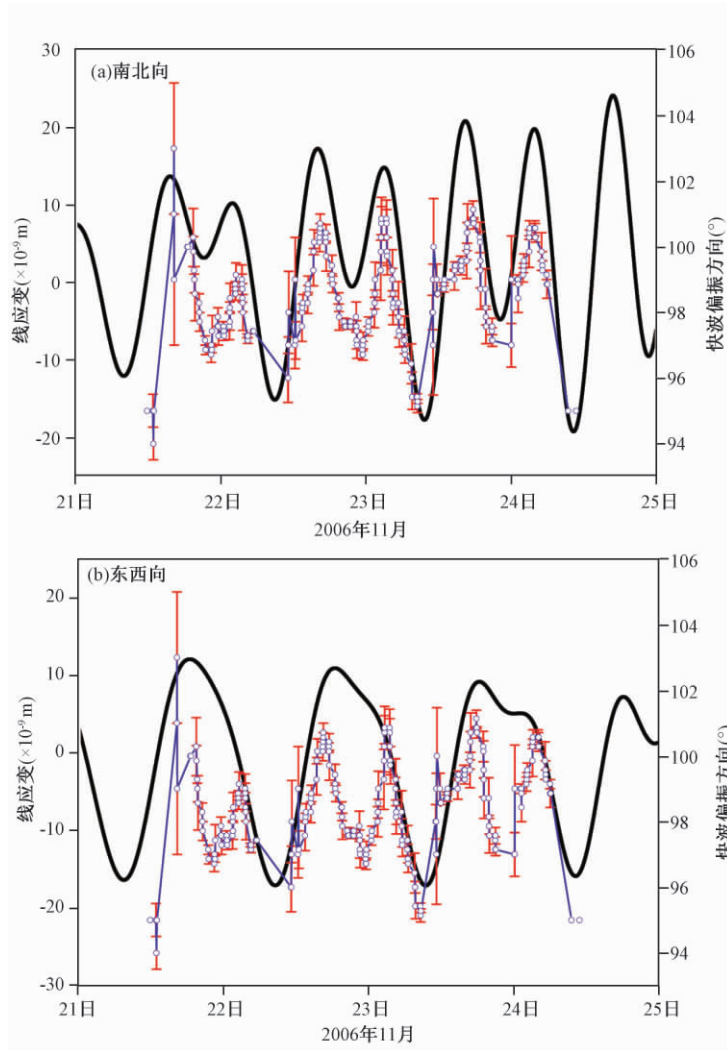


图6 由遵化台观测到的快波偏振方向变化曲线与固体潮线应变理论变化曲线(据赵雯佳(2013))

致谢: 在野外试验过程中,得到了中国地震局地球物理勘探中心、中国地震局地震预测研究所、中国地震局地球物理研究所、中国科学院南海研究所、北京市地震局、河北省地震局、云南省地震局和新疆维吾尔自治区地震局等多家单位相关研究人员的大力支持,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 陈浩林、全海燕、於国平等,2008,气枪震源理论和技术综述(上),物探装备,**18**(4),211~217。
 陈颢、王宝善、葛洪魁等,2007a,建立地震发射台的建议,地球科学进展,**22**(5),441~446。
 陈颢、张先康、丘学林等,2007b,陆地人工激发地震波的一种新方法,科学通报,**52**(1),1~5。
 陈颢、周华伟、葛洪魁,2006,华北地震台阵探测计划,大地测量与地球动力学,**25**(4),1~5。
 陈颢、朱日祥,2005,设立“地下明灯研究计划”的建议,地球科学进展,**20**(5),485~489。
 林建民、王宝善、葛洪魁等,2006,重复地震及其在人工探测中的潜在应用,中国地震,**22**(1),1~9。

- 罗桂纯、葛洪魁、王宝善等,2007,气枪震源激发模式及应用,中国地震,23(3),225~232。
- 罗桂纯、王宝善、葛洪魁等,2006,气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展,地球物理学进展,21(2),400~407。
- 丘学林、陈颢、朱日祥等,2007,大容量气枪震源在海陆联测中的应用:南海北部试验结果分析,科学通报,52(1),1~7。
- 丘学林、赵明辉、叶春明等,2003,南海东北部海陆联测与海底地震仪探测,大地构造与成矿学,27(4),295~300。
- 唐杰、王宝善、葛洪魁等,2009,大容量气枪震源的实验与模拟研究,中国地震,25(1),1~10。
- 王宝善、王伟涛、葛洪魁等,2011,人工震源地下介质变化动态监测,地球科学进展,26(3),249~256。
- 王宝善、杨微、王伟涛等,2013,利用大容量气枪监测北天山地壳介质变化,见:中国地球物理学会,中国地球物理第二十九届年会摘要文集,408~409,北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社。
- 王伟涛、王宝善、葛洪魁等,2009,利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化,中国地震,25(3),223~233。
- 赵明辉、丘学林、夏戡原等,2004,南海东北部海陆联测地震数据处理及初步结果,热带海洋学报,23(1),58~63。
- 赵明辉、丘学林、夏少红等,2008,大容量气枪震源及其波形特征,地球物理学报,51(2),558~565。
- 赵雯佳,2013,基于水库气枪震源的剪切波分裂初步研究,硕士论文,兰州:中国地震局兰州地震研究所。
- Brenguier F, Campillo M, Hadziioannou C, et al, 2008, Postseismic relaxation along the San Andreas Fault at Parkfield from continuous seismological observations, *Science*, **321**, 1478~1481.
- Calvert A J, 2004, Seismic reflection imaging of two megathrust share zones in the northern Cascadia subduction zone, *Nature*, **428**, 163~167.
- Chen Y, Liu L B, Ge H K, et al, 2008, Using an airgun array in a land reservoir as the seismic source for seismotectonic studies in northern China: experiments and preliminary results, *Geophysical Prospecting*, **56**, 601~612.
- Fuis G S, Clayton R W, Davis P M, et al, 2003, Fault systems of the 1971 San Fernando and 1994 Northridge earthquakes, southern California: Relocated aftershocks and seismic images from LARSE II, *Geology*, **31**(2), 171~174.
- Lutter W J, Fuis G S, Thurber C H, et al, 1999, Tomographic images of the upper crust from the Los Angeles basin to the Mojave Desert, California: Results from the Los Angeles Region Seismic Experiment, *J Geophys Res*, **104**(B11), 25543~25565.
- McIntosh K, Nakamura Y, Wang T K, et al, 2005, Crustal-scale seismic profiles across Taiwan and the western Philippine Sea, *Tectonophysics*, **401**, 23~54.
- Melhuish A, Holbrook W S, Davey F, 2005, Crustal and upper mantle seismic structure of the Australian Plate, *Tectonophysics*, **395**, 113~135.
- Niu F L, Silver P G, Daley T M, et al, 2008, Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site, *nature*, **454**, 204~208.
- Qiu X L, Ye S, Wu S, 2001, Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea, *Tectonophysics*, **341**, 179~193.
- Ronen S, 2002, Psi, pascal, bars, and decibels, *The Leading Edge*, **21**, 60~61.
- Schaff D P, Beroza G C, 2004, Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes, *J Geophys Res*, **109**, B10302, doi:10.1029/2004JB003011.
- Silver P G, Daley T M, Niu F L, et al, 2007, Active source monitoring of cross-well seismic travel time for stress-induced changes, *Bull Seism Soc Am*, **97**(1B), 281~293.
- Okaya D, Henrys S, Stem T, 2002, Double-side onshore-offshore seismic imaging of a plate boundary: "super-gathers" across South Island, New Zealand, *Tectonophysics*, **255**, 247~263.
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al, 2008, Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry, *J Geophys Res*, **113**, B12313, doi:10.1029/2007JB005023.

The active monitoring system with large volume airgun source and experiment

*Yang Wei*¹⁾ *Wang Baoshan*¹⁾ *Ge Hongkui*²⁾ *Wang Weitao*¹⁾ *Chen Yong*¹⁾

1) Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

2) Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The key issues are the signal to noise ratio (SNR), repeatability of the seismic source and accuracy in velocity measure in the dynamics monitoring of subsurface. We constructed a high-performance active monitoring system with large volume airgun source, consisting of airgun excitation and signal reception, in the experiments in inland reservoirs and artificial water body in Hebei, Yunnan and Xinjiang. The results showed that: (1) The airgun source is an ideal low-frequency source, with the characteristics of low frequency, high-repeatability, long detection distance, environmental protection and low cost. (2) The active monitoring system can be applied to the active monitoring of subsurface and 4D seismology on the regional scale, with simple structure, easy operation and maintenance, strong automation, high detection precision, and have observed the continuous change caused by the Tide. (3) The signal of airgun includes abundant seismic phase, and has strong S wave, which provides a new technology to study on the medium properties, crustal stress distribution and dynamic variety.

Key words: Airgun Active source Repeatability Active monitoring Dynamic variety