

利用聚类分析方法研究新疆呼图壁 大容量气枪震源重复性*

苏金波¹, 王海涛¹, 王 琼¹, 张文来¹, 冀战波², 魏芸芸¹, 陈 昊³, 张文秀¹

(1. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为研究造成新疆呼图壁大容量气枪震源重复性波动的原因, 利用2015—2016年新疆呼图壁气枪震源激发池岸边的一台地震仪记录的3 214次激发信号, 采用聚类分析中层次聚类方法和波形信号互相关技术, 以相关系数大于0.95、对应相似度距离为0.05为标准对气枪震源信号进行聚类分析, 将信号分成了2类。对可能造成气枪信号重复性波动的几种原因进行讨论, 结果表明这种信号的重复性波动是气枪激发时压力不同造成的, 建议通过控制激发压力的方法来解决这一问题。

关键词: 气枪震源; 信号重复性; 波形信号互相关; 聚类分析

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)04-0613-06

0 引言

利用人工震源激发地震波是进行介质结构探测和介质变化监测的一种手段, 目前已经广泛应用于石油勘探、矿产资源调查以及地球动力学研究等领域(王宝善等, 2016)。对介质变化进行长时间连续监测依赖于重复性震源, 其中气枪震源是通过在水下瞬间释放高压空气进而激发地震波的一种新型震源。研究表明, 气枪震源对近场破坏小、重复性高、低频成分丰富, 是进行地下介质结构探测和介质变化监测研究的理想震源(Wang *et al.*, 2013)。

新疆呼图壁大容量气枪震源信号发射台于2013年8月正式运行, 是世界上首个基于人工激发池的大容量气枪震源信号发射系统(苏金波等, 2016)。该系统由一个上表面直径100 m、下表面直径15 m、深15 m的倒圆台形激发池和6条单枪容量为2 000 in³的大容量气枪组成, 具有激发能量大、水位稳定、震源重复性好等优点。在3年多的运行中, 已经完成了7 000次左右的有效激发,

积累了大量的数据(魏斌等, 2016)。

气枪震源在水体中激发, 其能量来源是高压空气的瞬间释放, 高压空气的释放不会对近场产生破坏, 也不会改变水体的性质, 每次激发时气枪本身和周围水体的耦合条件完全一致, 这是气枪震源具有高度重复性的主要原因(杨微等, 2016)。为了获得地下介质随时间的变化情况, 陈颢院士等提出建设地震信号发射台, 开展4D地震学方面的研究, 而气枪震源作为一种新型重复震源, 在4D地震学的研究中的应用已经取得了比较大的进展(张云鹏等, 2016)。气枪信号的高重复性, 使其在地壳介质结构的精细探测和动态监测方面具有一定的优势(武安绪等, 2016)。但是, 通过对距离呼图壁气枪震源激发池20 m处的一个地震仪记录到气枪信号的分析发现, 气枪信号的稳定性有一定的浮动。本文将利用聚类分析方法和波形互相关技术, 对这一问题进行分析和讨论。

1 研究方法——聚类分析

聚类分析也称群分析或点群分析, 是一种研

* 收稿日期: 2017-04-11.

基金项目: 2015年行业专项(地震行业专项201508008)、国家自然科学基金——呼图壁储气田充放气引起地下应力变化的地震学观测(41474051)、新疆地震科学基金(201714)和中国地震局监测、预测、科研三结合课题(CEA-JC/3JH-173101)联合资助。

究多要素事件分类的方法,也是一种新兴的多元统计方法。其基本原理是根据样本自身属性,使用数学方法,按照某种相似性或者差异性的指标定量地确定样本之间的亲疏关系,并按照这种亲疏关系的程度对样本进行聚类。简而言之,聚类分析就是按照事件彼此不同的属性进行辨认,最终将相似属性的事件划为一类。

许多研究人员将这种统计方法应用在地震学中的相似地震研究上。Peng 和 Benzon (2005) 利用聚类分析中的等价聚类方法对重复地震进行识别;王伟涛和王宝善(2012)提出一种基于聚类分析的多尺度相似地震快速识别方法,利用聚类分析中的层次聚类方法,对汶川地震东北端余震序列进行研究。

等价聚类分析方法的原理为:先设定一个相关系数阈值 β ,当事件 A 和事件 B 的相关系数大于 β ,事件 B 和事件 C 的相关系数也大于 β 时,A、B、C 被视为一个等价类。得到这样的两两事件的相关系数之后,可以据此对重复地震进行快速识别和分析。但是,此种方法没有对 A 和 C 的相关性做出限制,在进行等价类分析的时候,有可能将原本分别属于两个丛集的事件合并成为一个比较大的丛集,得出错误结果(Maurer, Deichmann, 2007)。

为了避免等价聚类分析可能导致的上述问题,我们选用层次聚类分析的方法来对呼图壁气枪震源信号进行聚类。假设有 N 个气枪信号,首先选取合适的相关窗口计算任意 2 个信号的相关系数 C ,并定义 2 个信号的相似度距离为 D ($D = 1 - C$),这样可以构建一个相似度距离的矩阵 M 。初始状态下,每个信号自成一类,共有 N 类,之后将具有最小距离的 2 个信号合并成为一类,这时有 $N - 1$ 个信号。如此循环计算类之间的距离并执行合并操作,最后所有信号被归为一类。

2 个信号之间的距离由二者的相关系数来确定(矩阵 M 中对应元素),2 个类之间的距离则定义为分别属于 2 个类中的信号相关系数距离的最大值,这种方法称为聚类分析中的最大距离法(Lance, Williams, 1967)。如图 1 所示,选择一个相似度距离的阈值为 α ,得到这个标准下类别数目和各类中的信号。根据上述最大距离法,得到的每一类中的事件的相似度距离都小于 α ,这样就可

以避免等价聚类中的类别合并问题(王伟涛,王宝善,2012)。

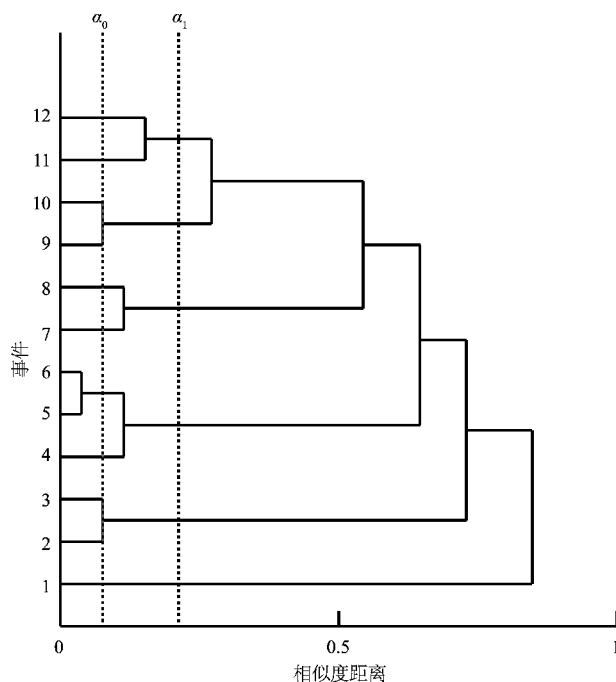


图 1 基于相似度距离的层次聚类原理图
(王伟涛,王宝善,2012)

Fig. 1 Schematic illustration of similarity distance hierarchical clustering (Wang, Wang, 2012)

2 数据处理与结果

为了对呼图壁大容量气枪震源的特性进行分析,我们在距离激发池岸边 20 m 处架设了一套宽频带地震仪(地震仪型号 CMG-40T,数采型号 Q330s+),利用这个地震仪记录到的信号(图 2)可对震源的频率特征、能量特征、重复性等进行研究,本研究所用波形数据均为该仪器记录。

本文应用的聚类分析的方法需要计算两两信号之间的互相关系数,2013 年 8 月以来,呼图壁气枪震源已经进行了约 7 000 次的激发,如果对所有的波形信号进行两两互相关计算,共需要进行约 2 500 万次,计算量较大。选取 2015 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 30 日共 3 214 次激发的波形信号,这样既可以将季节、水温等不确定因素包括进来,又降低了计算成本。气枪震源的优势频率主要集中在 2~8 Hz,具有丰富的低频有效能量,这是气枪震源能够进行地壳结构探测的原因之一(杨微

等, 2013), 所以本文只讨论在这一频带范围内的气枪信号。具体数据处理流程如下:

(1) 根据气枪激发时刻, 截取激发后 3 s 的波形数据。

(2) 对截取的波形数据进行 2 ~ 8 Hz 滤波。

(3) 对滤波后的信号进行两两互相关计算, 求取两两信号之间相关系数的最大值, 这些最大值组成相似度矩阵 M 。

(4) 利用聚类分析中的最大距离法, 以相关系数大于 0.95、对应相似度距离为 0.05 为标准对所有信号进行聚类。

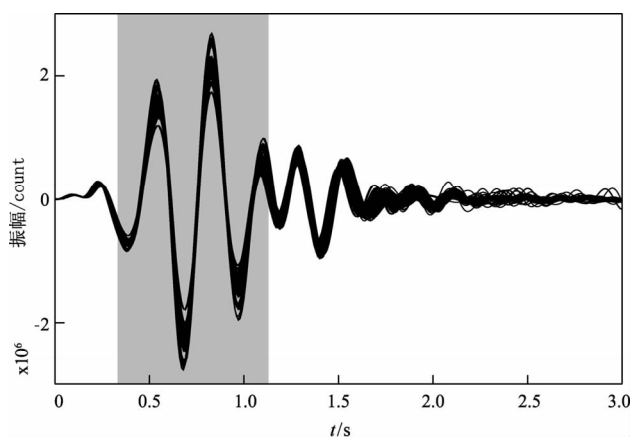


图2 2015年激发池边地震仪垂直向500次记录, 经过2~8 Hz滤波后的信号重复性示意图

Fig. 2 Signal repeatability sketch map showing 500 times record of seismic instrument beside the excitation pool after 2 ~ 8 Hz filtering process in 2015

根据上述数据处理方法, 最终得到波形信号聚类结果如图3所示, 从图中可以看出, 3 214 条气枪激发信号被分成了2类, 分别包括1 056 条和2 158 条。2类中的气枪信号波形均表现了很高的重复性。

将图3中2个聚类中的信号按照激发时间进行分布, 可以得出2个聚类中信号的时间分布, 如图4所示, 图中每个黑点代表一次气枪激发(图中有2段2个聚类都没有数据的部分, 是由于气枪系统在这段时间发生故障无法进行正常实验造成的)。为了进一步对比2个聚类中信号的差异, 将2个聚类中的所有信号分别进行线性叠加(图5), 两个叠加后信号的相关系数为0.988。

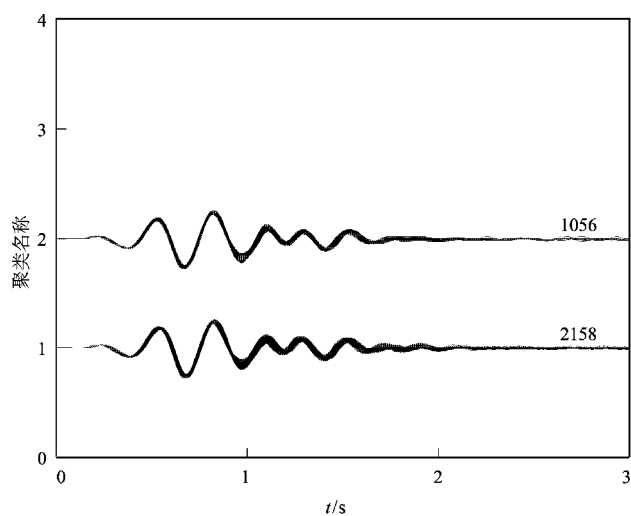


图3 2015年1月至2016年12月3 214次气枪激发信号聚类分析结果

Fig. 3 Cluster analysis result of 3124 airgun triggering signals between January 2015 to December 2016

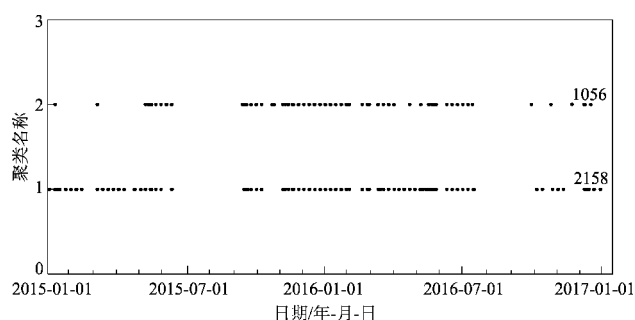


图4 不同聚类信号的时间分布

Fig. 4 Temporal distribution of different clustered signals

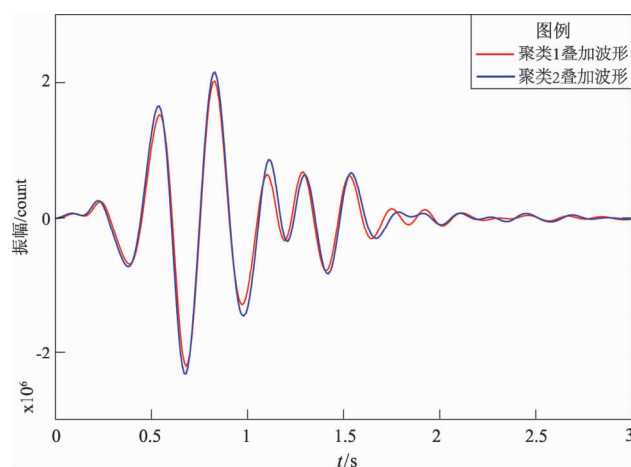


图5 聚类分析得出2类信号叠加后对比图

Fig. 5 Comparison of signals in two clusters after stacking

3 分析与讨论

气枪震源重复性波动可能由多种因素造成。结合气枪震源系统工作原理和呼图壁气枪震源的具体情况,对影响呼图壁气枪震源重复性的因素进行讨论。

(1) 激发池水位因素。气枪信号中的低频成分主要是气枪中的高压气体瞬间释放,形成的气泡在水体中来回震荡产生的脉冲信号。所以,水体的形状和激发池中的水体容量对气泡脉冲会造成较大影响(李孝宾等,2016)。不同于水库气枪震源,呼图壁气枪震源的水体是人工开挖的激发池,配备有补水系统,在夏季蒸发量较大时可以对激发池进行补水,使激发池中水位长期保持稳定状态(苏金波等,2015),且呼图壁地区常年干旱少雨,所以降雨对水位造成的影响可以忽略。因此可以排除激发池水位对气枪信号的影响。

(2) 季节因素。呼图壁气枪震源所在地区气候较为恶劣,冬季最低气温低至零下 30℃ 左右,且全年有近 4 个月平均气温在 0℃ 以下(蒲红铮等,2015)。在这样的温度条件下,每年有 4 个月左右的时间激发池表面会覆盖一层冰层,冰层最厚可达 20 cm。冬季实验时,气泡震荡和上升会将吊装气枪的浮台周围的冰面破开,但无法将激发池的上覆冰层整体破开。当气泡震荡上升至表

面时,上覆冰层可能对其震荡方式造成一定影响。但是,从图 4 可以看出 2 个聚类在时间上的分布跟季节变化没有明显的关系。如 2015 年 7 月至 2016 年 7 月,2 个聚类在这段时间分布较为均匀。据此,可以判断季节因素对信号重复性的影响较小。

(3) 激发压力影响。可以将气枪震源看成一种比较均匀的膨胀源,气枪每次激发时内部空气压力如果存在差异,其信号重复性也将受到影响。气枪内的高压空气是由活塞式空气压缩机(以下简称空压机)产生并输送至储气钢瓶,钢瓶通过气缆和配气开关与气枪连接,依靠钢瓶和气枪之间的压强差给气枪配气,当气枪内的气体压强达到 15 MPa 时,进行一次激发。在实际工作中可以根据空压机的效率,计算每次激发后气枪重新充气至 15 MPa 的时间来设置气枪控制系统,使其按照规定时间自动激发。但是空压机的效率是不稳定的,当每次激发的时间间隔确定后,有时无法保证在经过这段时间后气枪内的压力达到 15 MPa,那么气枪就会在压强小于或大于 15 MPa 的情况下进行激发,而且这种过程将逐渐累加,最后造成每次激发时枪内压力的差异。

从图 5 中可以发现,将不同聚类中的信号进行叠加后,其信号的差异主要集中在 0.5 ~ 1.3 s 之间的振幅上。这段信号主要是由气枪激发产生气泡在水体中的自由震荡产生的,称为气泡脉冲。类

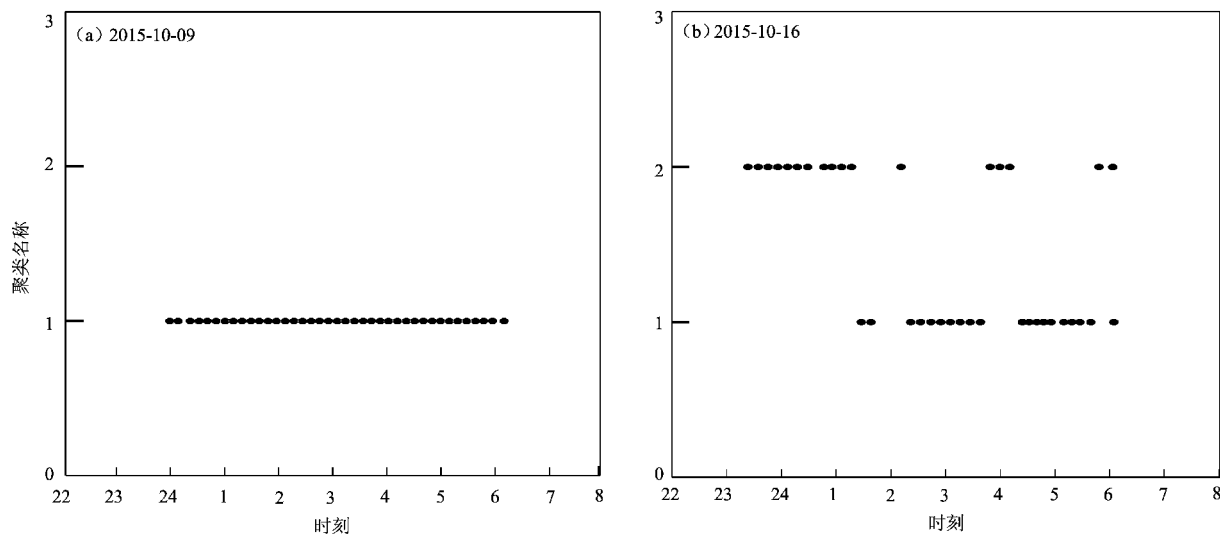


图 6 气枪实验信号聚类的时间分布

Fig. 6 Temporal distribution of clustered airgun test signals

似于炸药震源,气枪震源是一个均匀的膨胀源,气枪内的气压相当于炸药震源的炸药当量,不同当量的炸药爆破产生的信号存在振幅差异(林建民等,2008),同理,气枪震源在不同气压下激发,其信号也将存在振幅差异。由此可以判断,这段信号的振幅差异主要是气枪激发时的气体压力不同造成的。

图6为2015年2次气枪实验情况,聚类分析结果显示2015年10月9日的实验被分成了1类,如图6a所示,图中每个点代表一次激发,共37次激发;而2015年10月16日的实验却被分成了2类,如图6b所示,共40次激发。两次实验时间间隔很近,可以排除季节等因素的干扰,造成这种差异的原因只能是气枪激发时的压力不同。图6a的激发压力比较稳定,而图6b中的激发压力不稳定,造成了信号重复性的差异。

4 结论与讨论

本文利用2015—2016年新疆呼图壁气枪震源激发池岸边的一台地震仪记录的3 214次激发信号,采用聚类分析中层次聚类方法和波形信号互相关技术,对新疆呼图壁气枪震源信号重复性波动现象进行了研究,通过对可能造成信号重复性波动的原因进行分析与讨论,初步得出结论:呼图壁气枪震源的重复性波动主要是气枪激发时气枪内空气压力差异造成的。

利用大容量气枪震源进行区域地下介质的监测是一种精度很高的地球物理监测手段,该手段主要依赖气枪震源的高度重复性(王宝善等,2011),减小信号重复性波动对后续研究十分有利。通过以上结论,可以对气枪实验提出建议:在气枪激发实验时,尽量保证在同一压力下激发,这样可以在一定程度上提高信号的重复性。

感谢2位审稿专家对本文提出修改意见。本文使用了中国地震局地球物理研究所的王伟涛副研究员的聚类分析计算程序,论文撰写过程中得到了中国地震局地球物理研究所的王宝善研究员的悉心指导,新疆维吾尔自治区地震局前兆台中

心的翟世龙工程师、贾路工程师也在气枪实验方面给予了很大帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献:

- 李孝宾,叶泵,杨军,等.2016.水库气枪震源不同组合激发效率的对比研究[J].地震研究,39(3):458-465.
- 林建民,王宝善,葛洪魁,等.2008.大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析[J].地球物理学报,51(1):206-212.
- 蒲红铮,韩添丁,成鹏,等.2015.天山南北坡流域气温时空变化特征[J].高原气象,34(3):753-761.
- 苏金波,王宝善,王海涛,等.2015.利用大容量气枪震源资料研究北天山地区介质衰减特征[J].地震研究,38(4):598-605.
- 苏金波,王琼,王海涛,等.2016.新疆地震台网对新疆呼图壁大容量气枪震源信号的接收能力及其影响因素分析[J].中国地震,32(2):202-208.
- 王宝善,葛洪魁,王彬,等.2016.利用人工重复震源进行地下介质结构及其变化研究的探索和进展[J].中国地震,32(2):168-179.
- 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[J].地球科学进展,26(3):249-256.
- 王伟涛,王宝善.2012.基于聚类分析的多尺度相似地震快速识别方法及其在汶川地震东北端余震序列分析中的应用[J].地球物理学报,55(6):1952-1962.
- 魏斌,苏金波,王海涛,等.2016.新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究[J].中国地震,32(2):222-230.
- 武安绪,叶泵,李红,等.2016.气枪震源弱信号提取的可靠性初步分析[J].中国地震,32(2):319-330.
- 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[J].中国地震,29(4):399-410.
- 杨微,王宝善,刘政一,等.2016.不同激发环境下井中气枪震源特征研究[J].中国地震,32(2):231-240.
- 张云鹏,王宝善,王伟涛,等.2016.安徽气枪实验固定台层析成像初步结果[J].中国地震,32(2):331-342.
- LANCE G N, WILLIAMS W T. 1967. A General Theory of Classificatory Sorting Strategies 1. Hierarchical Systems[J]. Computer Journal, 9(4):373.
- MAURER H, DEICHMANN N. 2007. Microearthquake cluster detection based on waveform similarities, with an application to the western Swiss Alps[J]. Geophysical Journal International, 123(2):588-600.
- PENG Z, BENZION Y. 2005. Spatiotemporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 M7.4 İzmit and M7.1 Düzce, Turkey, earthquake sequences[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 160(3):1027-1043.
- WANG B, GE H K, WEI Y, et al. 2013. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 93(5):49-50.

A study on the Repeatability of Large Volum Arigun Seismic Source in Hutubi, Xinjiang using Cluster Analysis Method

SU Jinbo¹, WANG Haitao¹, WANG Qiong¹, ZHANG Wenlai¹, JI Zhanbo¹,
WEI Yunyun¹, CHEN Hao¹, ZHANG Wenxiu¹

(1. *Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China*)

(2. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(3. *Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, 730000, Gansu, China*)

Abstract

Use the hierarchical clustering method in clustering analysis and waveform cross – correlation technique to study the uniformity of large volum arigun seismic source in Hutubi, Xinjiang. The signal is analyzed by the condition of the correlation coefficient that is greater than 0.95, and the corresponding similarity distance that is 0.05. The 3124 shots of Hutubi airgun seismic source between 2015 and 2016 is divide into two clusters. The repeatability analysis of several reasons of airgun source signal is discussed. Our final conclusion is the signal fluctuation is due to the different pressure caused by the airgun excitation. We propose to solve this problem by controlling the excitation pressure.

Keywords: airgun seismic source; signal repeatability; wave cross – correlation; cluster analysis