

邵叶, 周青云. 气枪震源波形走时变化分析的反褶积处理[J]. 华南地震, 2019, 39 (2): 86–91. [SHAO Ye, ZHOU Qingyun. Deconvolution Processing for Travel Time Variation Analysis of Air Gun Source Waveform[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 86–91]

气枪震源波形走时变化分析的反褶积处理

邵 叶¹, 周青云²

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用云南省宾川主动源基地周边 10 km 范围内 7 个流动台站 2017 年 2 月气枪震源集中激发时段记录的气枪信号, 使用干涉法计算了直接使用波形和将波形与参考台反褶积后的格林函数两种处理方法下气枪信号的走时变化。使用了气枪震源附近不同方位角的两个参考台的数据, 以分析不同参考台对走时变化结果的影响。结果表明: 反褶积能较为有效的压制气枪震源的时间、空间和频谱轻微不重复性导致的走时变化; 反褶积能降低一些来源不明的伪走时变化; 使用 CKT2 的数据反褶积的结果略优于 CKT0, 其可能原因是气枪阵列沿方位角的非均匀辐射。

关键词: 气枪震源; 走时变化; 反褶积; 波速变化

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)02-0086-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.02.013

Deconvolution Processing for Travel Time Variation Analysis of Air Gun Source Waveform

SHAO Ye¹, ZHOU Qingyun²

(1. *Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China*; 2. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China*)

Abstract: Using the airgun signals recorded by seven mobile stations within 10 km range around the active source base of Binchuan, Yunnan Province, during the concentrated excitation period of the air gun source in February 2017, the travel time variation of the airgun signals under two processing methods, i.e. the direct waveform and the deconvolution of the waveform with the Green's function of the reference station, is calculated by the interference method. The data of two reference stations with different azimuths near the air gun source are used to analyze the influence of different reference stations on the results of travel time variation. The results show that deconvolution can effectively suppress the travel time variation caused by slight non-repetition of time, space and frequency spectrum of air gun source; deconvolution can reduce some pseudo-travel time variation caused by unknown sources; data deconvolution using CKT2 is slightly better than CKT0, which may be due to the non-uniform radiation of air gun array along azimuth.

收稿日期: 2018-05-15

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH18042Y); 云南省地震科技专项(2018ZX02) 共同资助。

作者简介: 邵 叶(1987-), 女, 工程师, 主要从事地震预测研究。

E-mail: 0852shaoye@163.com.

Keywords: Air gun source; Travel time variation; Deconvolution; Velocity variation

0 引言

人类对地球内部的认识绝大部分来源于地震波。地震波根据来源的不同,可分为天然震源地震波和人工震源地震波,前者主要研究区域乃至全球尺度的地下介质信息,后者主要研究几百米到几千米范围内地壳介质的精细结构。近年来,利用人工震源研究地下介质结构及变化已引起越来越多学者的关注。

和天然地震相比,人工震源具有分辨率高、震中位置准和重复性较高等优势,这些优势有助于地壳介质小范围精细结构及微小变化方面的研究。人工震源包括爆炸震源、锤击震源、铁轨震源等,是勘探地震学研究中使用的主要震源,同时这些手段在近年来也越来越多的被用于地震前兆观测^[1]。然而,随着社会和科学的发展,这些震源的使用受到越来越多的限制,例如爆破震源的环境污染、锤击震源的扰民及探测距离限制、铁轨震源的不确定性等。前述人工震源均为陆地激发震源,重复激发会对激发环境造成不可逆转的影响,从而影响到震源的重复性。气枪震源是近年来从海洋勘探领域引进的新型主动震源:通过向水中短时间内释放大量高压气体,气体在水中震荡来产生地震波,整个过程对激发环境无影响,可以弥补前述震源的不足^[2-5]。

理想的人工地震波为脉冲波,接收台站的波形直接反应介质的信息,例如室内小尺度岩石超声实验^[6];若能获取人工地震波的震源时间函数,也可以将接收的地震信号与震源时间函数反褶积以压缩子波提取反射系数^[7]。有别于其它主动震源,气枪震源具有很强的方向性^[8],不同方向的气枪信号差异极大,同时目前尚无法获得较准确的震源时间函数,只能将距离气枪震源 50 m 以外陆地上架设的地震仪记录的信号当作是震源时间函数。

有些学者将震源附近架设台站接收到的信号作为震源子波,通过反褶积处理得到格林函数后计算波速变化^[9-12],而有些学者认为反褶积会降低气枪信号的信噪比^[13],因此利用接收台站或接收器接收到的波形直接计算波速的变化^[14-16]。由于无法获得准确的震源时间函数,两种处理方法孰优孰劣尚无定论。为研究这个问题,本文使用 2017

年 2 月期间云南宾川主动源基地集中实验期间云南大银甸气枪阵列激发、震源附近的参考台及震中距较近台站接收的地震波,对比分析直接使用波形和使用反褶积格林函数的差异,以及不同参考台走时变化计算的结果。

1 宾川主动源实验基地及本次实验概况

宾川主动源实验基地位于云南省大理州宾川县城南西约 7 km 的大银甸水库内。基地始建于 2011 年,建成于 2012 年,目前有两套激发系统,一套是 4 支容量为 2000 in³ 组成的气枪阵列及配套系统,用于丰水期在大银甸水库内激发,一套是容量为 250 in³ 单支气枪及配套系统,用于枯水期水库水位不足时在人工挖掘的测井中补充激发^[17-18]。基地的气枪震源可连续激发,激发压力为 9 MPa 时可 5 min 激发一次,15 MPa 时可 15 min 激发一次。

2017 年 2 月期间,团队开展了加密实验,并改变了水库气枪的激发环境,包括改变激发压力(15 MPa、12 MPa、9 MPa)、沉放深度(12 m、10 m、8 m)和水平位置(± 7 m)等等。总共激发了 161 次,每次激发条件见图 1。

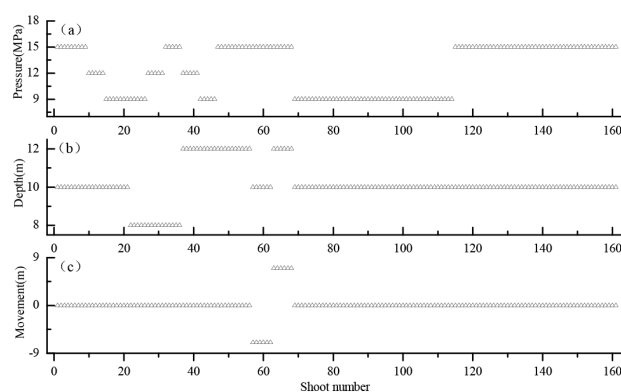


图 1 实验期间各枪激发环境图

Fig.1 Chart of the shooting environment of each gun during the experiment

2 数据选取及研究方法

气枪信号的接收台网主要由 45 个固定台及 40 个流动台组成。为保证数据质量,本文选择单枪信号具有高信噪比的台站,具体来说即震中距 10 km 范围内的 53264、53265、53268、53272、

53273、53277、53278 七个流动台和 CKT0、CKT2 两个参考台(图 2), 其中 CKT0 和 CKT4 位置紧邻。十套仪器为同一型号, 地震计为 Guralp-40T, 数据采集器为 Reftek130B, 采样率为 100。实验期间, 各工况下共激发 161 枪。



图 2 宾川气枪发射台及流动地震观测台网。图中红色三角形为本文使用的流动台站, 黄色三角形为参考台。

Fig.2 Binchuan air gun launch station and mobile seismic observatory network. The red triangle is the mobile station used in this paper, and the yellow triangle is the reference station.

地震波走时变化测量常用的方法包括移动窗互谱、伸缩法和干涉测量法等, 本文使用干涉测量法。如果 $x(t)$ 、 $y(t)$ 是能量有限信号, 则他们的时延相关系数定义为^[19]:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{\int_{t-T/2}^{t+T/2} x(t)y(t-\tau)dt}{\sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} x^2(t)dt \int_{t-T/2}^{t+T/2} y^2(t)dt}} \quad (1)$$

式中 T 为地震波持续时间。当相关系数取得最大值时, 对应的 τ 就是两个信号的时延。

本文的数据处理流程如图 3 所示。首先, 对原始波形进行预处理, 包括去趋势、去均值、3~5 Hz 带通滤波^[20-21]、手动挑选; 第二步, 将每一枪的台站波形和参考台波形反褶积, 得到格林函数; 第三步, 将单台所有格林函数叠加作为模板, 用每一枪的信号与模板干涉; 最后, 余弦插值后选择相关系数较高的窗口提取走时变化。刘自凤等^[10]对各步骤有过详细的描述, 详见刘自凤等^[10]。直接用波形而非格林函数提取走时变化的, 无需处理参考台的数据及反褶积。

3 实验结果

3.1 反褶积和直接使用波形计算的走时变化

本文使用的台站的计算结果均相近或相同, 因此这里仅展示距离气枪震源最近的台站 53277 的结果(图 4)。从图中可以看出:

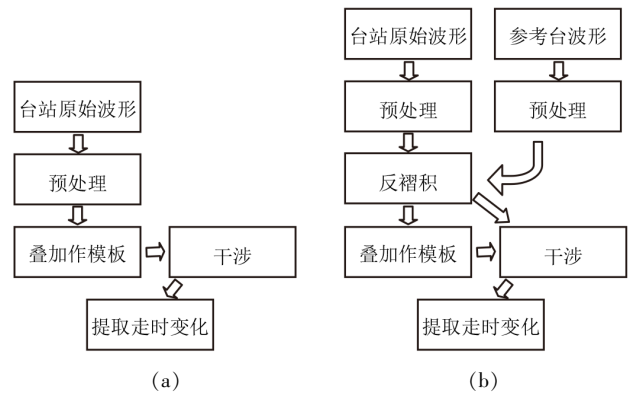


图 3 使用记录波形(a)和格林函数(b)计算走时变化的数据处理流程图

Fig.3 Data processing flow chart for calculating travel time variation by using recorded waveform(a) and Green Function (b)

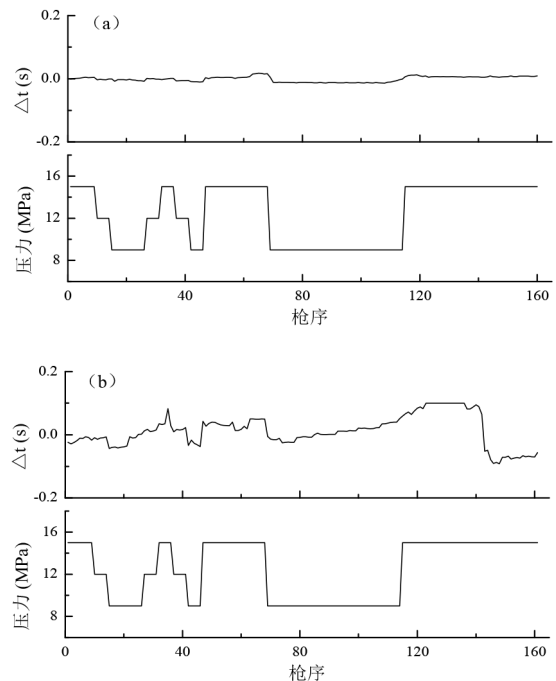


图 4 台站 53277 使用格林函数(a)和原始波形(b)计算的走时变化及各枪激发压力图。时间窗 3.9~4.2 s。

Fig.4 Variation of travel time and pressure charts of gun excitation by using Green Functions (a) and waveforms (b) in 53277 station. The time window is 3.9~4.2 s.

(1)反褶积能降低震源不重复的影响。实验期间无明显大气降水及其它自然环境变动,水库水位保持恒定,附近也无地震发生,因此计算得到的走时变化可认为均来自于震源处。波形计算的走时变化幅度为 ± 0.1 s,反褶积后计算的走时变化降至 ± 0.015 s。

(2)反褶积能消除一些来源不明的伪走时变化。在第70~115枪激发时,我们保持气枪的激发压力、沉放深度和位置恒定。各种因素都恒定的情况下,走时变化应为0,即使考虑潮汐应力,变化幅度也仅应在 10^{-3} s左右^[22]。该时段内,波形计算的变化幅度减小0.1 s,先反褶积后计算则基本保持不变。

(3)反褶积仍无法完全消除震源变化的影响。反褶积后,波速变化仍有约 $\pm 4 \times 10^{-3}$ (走时变化/震相到时),而地震孕育导致的波速变化量在 10^{-4} 量级^[15],前者比后者大一个数量级。为确保后续研究的可靠性,应保持震源处激发条件不变。

3.2 不同参考台对走时变化计算的影响

宾川实验基地内架设有两个参考台,一个位于气枪阵列西向的CKT0,距离阵列50 m左右,另一个位于西南向的CKT2,距离阵列110 m左右,二者记录到的波形差异较大(图5)。将CKT0

和CKT2的波形作为震源时间函数,分别与震源附近的7个接收台站信号反褶积,并计算走时变化。图6a展示了台站53277时间窗1.5~1.8 s的走时变化计算结果,可以看出两个参考台没有特别明显的优劣。为进一步研究二者的差别,我们将所有台站、所有时间窗的走时变化结果与激发压力计算相关系数,计算结果展示于图6b~6f中。在各台站接收波形的较大震幅时间窗内,台站53264(3~10 s)、53265(2.5~8 s)、53273(4~7 s)和53278(2~7.5 s)与CKT2反褶积后计算的走时变化与激发压力之间的相关系数(图中蓝线)略高,并且更加稳定;台站53268、53272和53277的计算结果表明二者差别不大;整体来说,CKT2略优于CKT0。

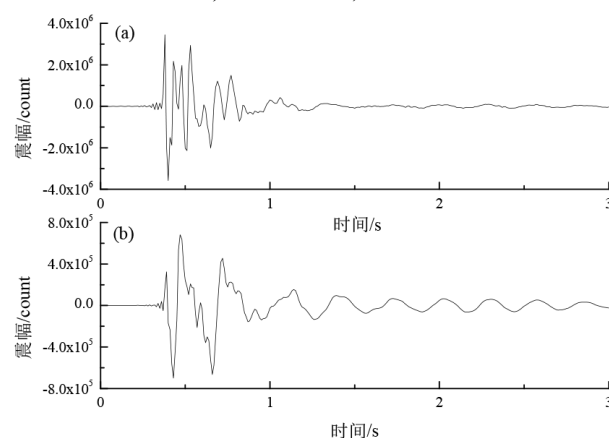


图5 CKT0(a)与CKT2(b)的波形

Fig.5 Waveforms of CKT0 (a) and CKT2 (b)

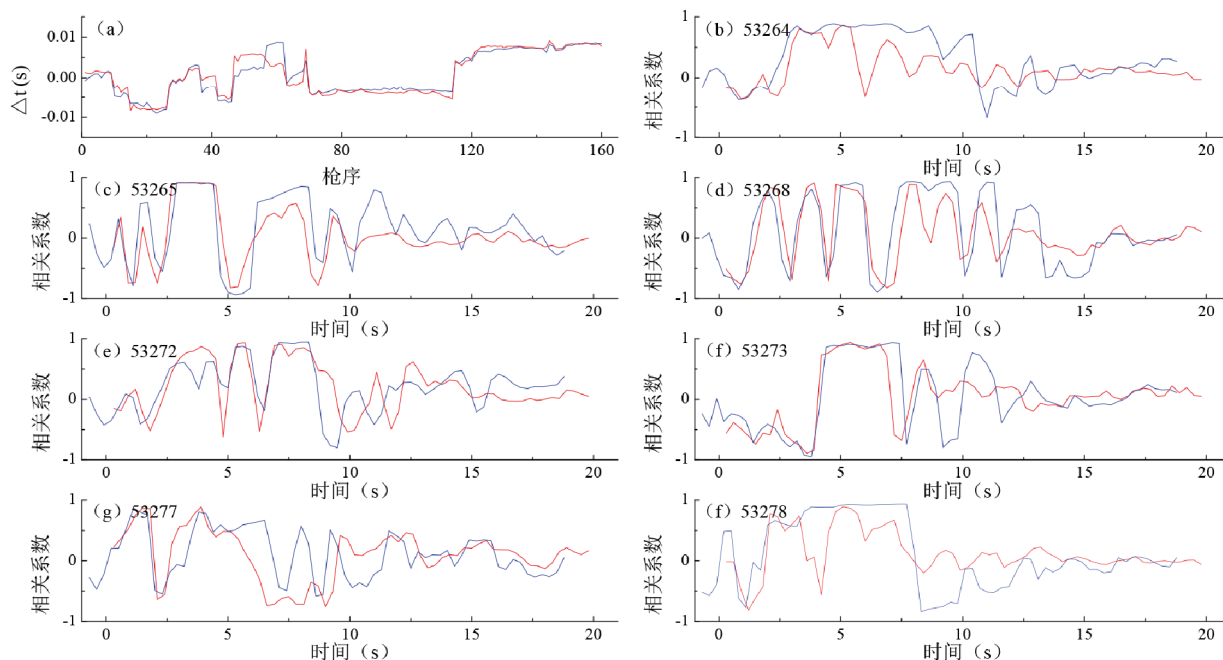


图6 使用CKT0和CKT2作为震源时间函数,计算得到的:(a)53277台时间窗1.5~1.8 s的走时变化;(b~f)7个台站个时间窗走时变化与激发压力变化的相关系数图。红色为CKT0,蓝色为CKT2。

Fig.6 Using CKT0 and CKT2 as source time functions, we get: (a) travel time variation from time windows 1.5 s to 1.8 s of 53277 station, and (b~f) the correlation coefficient maps of the travel time and excitation pressure of each time window of 7 stations. CKT0 is in red and CKT2 is in blue.

4 讨论与结论

如果气枪震源具有极高的时间、空间重复性和时频一致性,就可以像室内小尺度岩石物理实验一样,直接使用原始波形就能计算介质波速变化。但实际工作中,气枪激发时的空间位置难以稳定,激发信号的时频谱往往也会有差异,因此在气枪震源计算走时变化的过程中有必要进行反褶积运算,以消除震源附近造成的走时变化。

地震子波的直接观测法常见于海上地震勘探:震源发出的地震波在传播到含盐量不同的两层分界面时会发生反射,海面下的检波器记录到的反射波即是地震子波。气枪震源旁的参考台架设于陆地上,虽然距离较近,但是其接收到的地震波是气枪子波与反射、虚反射、折射等产生子波的干涉结果,可能与气枪子波有一定的差异。我们曾尝试过用水听器直接记录,但效果不佳。下一步将尝试能否得到更加接近于气枪子波的震源时间函数。

在暂时不能得到准确的震源时间函数之前,我们尝试用不同距离和方位角的两个参考台来对比分析,发现北东向和南西向的四个台站使用 CKT2 进行反褶积效果略好一些,北西向和南东向的 3 个台站使用两个参考台差别不大。推测造成这种现象的原因可能是震源的非各向同性:南西、北东向的台站方位角与 CKT2 接近或对称,北西、南东向的台站与两个参考台均不同向。更准确的结论可能还需要更加密集的台阵数据。

受水库水位和激发压力等因素的影响,气枪震源可能会在震源处产生一些伪走时变化,这些变化和传播路径上介质状态无关,会在走时变化分析中引入误差。通过技术手段去除或减小这些因素的影响在气枪震源走时变化分析中十分必要。本文使用改变气枪激发压力的手段,人为的在震源处制造走时变化。利用宾川主动源基地气枪阵列及附近 7 个地震台的数据,使用干涉法计算波形和格林函数的走时变化,对比分析发现:

(1)使用反褶积能有效降低震源不重复的影响。

(2)使用波形计算走时变化会引入一些来源不明的伪走时变化,反褶积能有效的降低这些不明因素的影响。

(3)反褶积无法完全消除震源变化的影响,残留波速变化可能仍大于地震孕育导致的波速变化。

(4)北东和南西向台站反褶积时,选择 CKT2

效果稍好于 CKT0,其可能原因是气枪阵列沿方位角的非均匀辐射。

致谢:感谢云南省地震局主动源团队提供数据。本文使用了中国地震局地球物理研究所王宝善老师提供的走时变化计算程序。

参考文献:

- [1] 王宝善,葛洪魁,王彬,等. 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, 2016, 32(2):168-179.
- [2] 陈颢,朱日祥. 设立“地下明灯研究计划”的建议[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5):485-489.
- [3] 陈蒙. 利用水库大容量非调制气枪阵列进行区域尺度地下结构探测和监测 [D]. 北京:中国地震局地球物理研究所, 2014.
- [4] 姚道平,张艺峰,闫培,等. 台湾海峡大容量气枪震源海陆联测初探[J]. 地震学报, 2016, 38(2): 167-178.
- [5] 林彬华,金星,李军,等. 台网噪声评估及其对气枪震源激发效果影响的研究[J]. 地震学报, 2017, 39(3): 330-342.
- [6] 谢凡,任雅琼,王宝善. 利用超声尾波观测 1.5 m 长岩石断层黏滑实验的波速变化[J]. 地球物理学报, 2017, 60(4):1470-1478.
- [7] Sheriff R E, Geldart L P. Exploration Seismology (Second Edition)[M]. Cambridge University Press, 1995.
- [8] 周青云. 宾川地震信号发射台气枪震源能量激发方向性初步研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(7):754-759.
- [9] 杨微,葛洪魁,王宝善,等. 由精密控制人工震源观测到的绵竹 5.6 级地震前后波速变化[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5):1149-1157.
- [10] 刘自凤,苏有锦,王宝善,等. 宾川主动源地震波走时变化分析方法研究[J]. 地震研究, 2015, 38(4):591-597.
- [11] 魏芸芸,王海涛,苏金波,等. 新疆 2 次中强地震前气枪震源反射波震相走时异常变化初步研究[J]. 中国地震, 2016, 32(2):270-281.
- [12] 陈佳,叶泵,高琼,王军,等. 利用气枪震源信号研究 2016 年云龙 M_s 5.0 地震前后波速变化特征[J]. 地震研究, 2017, 40(4):550-556.
- [13] 黄亦磊,运乃丹,周仕勇. 台差法提高低信噪比下走时变化探测精度的研究[J]. 地震研究, 2017, 40(4):595-604.
- [14] Niu F, Silver P G, Daley T M, et al. Preseismic Velocity Changes Observed from Active Source Monitoring at the Parkfield SAFOD Drill Site [J]. Nature, 2008, 454(7201):204-208.
- [15] Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al. Continuous Subsurface Velocity Measurement with Coda Wave Interferometry [J].

- Journal of Geophysical Research, 2008 (113):B12313.
- [16] 张元生,王宝善,陈颢,等. 两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化[J]. 地球物理学报,2017, 60(10): 3815–3822.
- [17] 王彬,吴国华,苏有锦,等. 宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果[J]. 地震研究,2015, 38(1): 1–6.
- [18] 王彬,李孝宾,刘自凤,等. 宾川地震信号发射台的震源系统、观测系统和观测结果[J]. 中国地震,2016, 32(2):193–201.
- [19] Snieder R, Grêt A, Douma H, et al. Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity[J]. Science,2002, 295 (5563): 253–255.
- [20] 陈佳,李孝宾,杨军,等. 云南宾川大容量气枪震源波形频谱特征分析[J]. 中国地震,2016, 32(2):216–221.
- [21] 栾奕,杨宏峰,王宝善. 大容量气枪主动源波形资料处理(一):云南宾川 [J]. 中国地震,2016, 32(2):305–318.
- [22] 周青云,刘自凤,贺素歌. 气枪震源地震波走时变化影响因素分析及地震相关的走时变化[J]. 地震,2018, 38(3):144–157.