

陈佳、李孝宾、杨军等,2016,云南宾川大容量气枪震源波形频谱特征分析,中国地震,32(2),216~221。

# 云南宾川大容量气枪震源波形频谱特征分析

陈佳 李孝宾 杨军 叶泵

中国地震局滇西地震预报实验场办公室,云南省大理市洱海公园滨海大道 671000

**摘要** 2011 年云南省地震局、中国地震局地球物理研究所在云南省宾川县大银甸水库开展了大容量气枪激发实验。为了深入研究气枪震源激发波形的特征,本文对不同距离台站记录的波形进行了频谱分析,对气枪激发震源的能量进行了计算,并将彩凤台气枪信号的波形、频谱特征与天然地震进行了对比分析。结果表明,1 次激发相当于  $M_L 0.7$  的天然地震。对相近震级天然地震波形的频谱与气枪激发波形的频谱进行对比后发现,气枪震源激发波形频率小于 15Hz,主频多数集中在 2~5Hz;气枪震源激发的地震波中低频信号较相当震级的天然地震明显;1 次激发释放的能量为  $8.90 \times 10^6 \text{J}$ ,相当于 2.4kg 硝铵炸药的当量。

**关键词:** 气枪震源 频谱特征 天然地震 对比

[文章编号] 1001-4683(2016)02-0216-06 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

传统的利用天然地震探测地下结构的方法是一种被动探测方法。采用人工震源主动激发探测深部地下结构,可将被动监测变为对地下状态和结构的主动探测(陈颀等,2005)。有关学者很早就开始使用炸药、重锤等工具进行陆地地下结构的勘探研究,而 95% 以上的海上地震勘探中使用了气枪震源(何汉漪,2001)。由于气枪震源(唐杰等,2009;林建民等,2010)性能卓越(如绿色环保、可重复性好、可控性强、子波可测等),近几年地球物理学家开始利用气枪震源进行陆地深至地下几十千米的地壳及上地幔顶部的区域尺度深部探测。

2011 年云南省地震局和中国地震局地球物理研究所在云南宾川县大银甸水库进行了大容量气枪震源实验,以探测周围地下结构,监测地震的孕育发生过程,这是在云南首次开展的气枪实验,对其激发波形特征进行研究,特别是进行与天然地震的对比研究很有必要。鉴于此,本文从不同距离台站记录的气枪单次激发信号的频谱特征、气枪信号与相近震级天然地震频谱特征的对比分析以及气枪震源能量特征等方面开展了相关研究。所得结果不仅可为接收台站的参数设置提供借鉴,而且可促进大容量气枪震源的广泛普及,为今后利用气枪信号研究地下结构、介质状态及其变化提供依据。

## 1 气枪震源激发地震波的频谱特征

### 1.1 快速傅里叶变换

信号  $f(t)$  傅里叶变换定义为(程佩青,2001)

[收稿日期] 2016-05-13; [修定日期] 2016-06-03

[项目类别] 国家自然科学基金(41474048)、云南省陈颀院士工作站专项经费和云南省“传帮带”项目共同资助

[作者简介] 陈佳,女,1982 年生,工程师,主要从事地震预测及数字地震学研究。E-mail: sarmar88@163.com

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt \quad (1)$$

$f(t)$  为原始信号,  $F(\omega)$  为经过傅里叶变换后的频率域内信号。从物理意义上讲, 傅里叶变换的实质是把原信号  $f(t)$  的波形分解成许多不同频率的正弦波的叠加。信号函数  $f(t)$  与其傅里叶变换  $F(\omega)$  是同一信号的 2 种不同表现形式, 前者显示了时间信息, 后者显示了频率信息, 经过傅里叶变换即实现了信号的时域和频域之间的互相转换。

## 1.2 数据选取及处理

2011 年, 我们开始在云南省宾川县大银甸水库 (25°48′33″N, 100°30′2″E) 进行大容量气枪激发实验 (陈颢, 2007; 赵明辉等, 2008; 王彬等, 2015)。日常激发水深 18m, 气枪沉放深度 10m, 并在激发点周围布置了密集的台阵。我们选取了不同距离的 4 个台站, 于 2014 年 10 月 27 日 10:00:00 单次激发 (4 只气枪同时激发), 对每个台站记录到的波形的垂直分量经傅里叶变换后得到的频谱图进行分析。图 1 给出了 4 个不同距离台站的位置。由图 1 可见, 其中有近场台站也有远场台站。台站编码分别为 53277、53260、53281 和 53259, 距气枪震源的距离分别为 0.7、4.7、21.1、47.5km。4 个台站均使用英国 GUALP 公司的 CMG-3ESPC 宽频带地震计, 频带范围 0.02~60.00s, 数据采集器为 Reftek 130B 型。

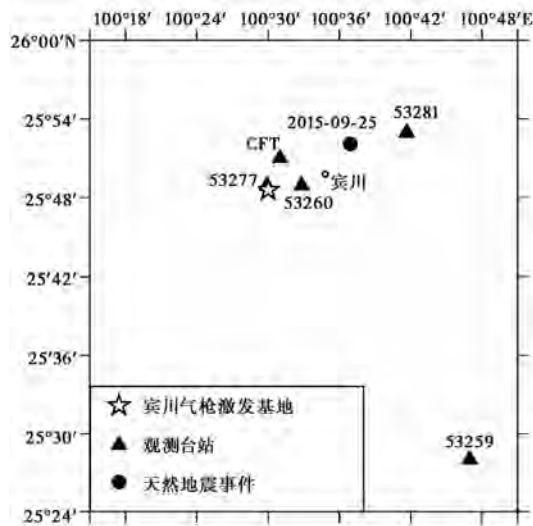


图 1 宾川气枪激发点、台站和天然地震分布

图 2 给出了 4 个台站记录的单次激发波形垂直分量和经傅里叶变换后得到的频谱。由图 2 可见, 53277 台的主频率域为 2~6Hz, 53260 台的为 2.6~4.5Hz, 53281 台的为 2.7~4.0Hz, 53259 台的为 1.5~3.8Hz。可以看出, 随着与激发源距离的增加, 气枪震源激发波形频率域稳定, 主频多数集中在 2~5Hz, 整个频率域范围小于 15Hz, 在短周期地震仪能够记录的地震信号范围内 (1~20Hz); 而且随着距离的增加, 气枪信号的高频成份迅速衰减, 低频成份则相对稳定, 这说明气枪震源是一种非常稳定且频率集中在 2~5Hz 的低频震源。

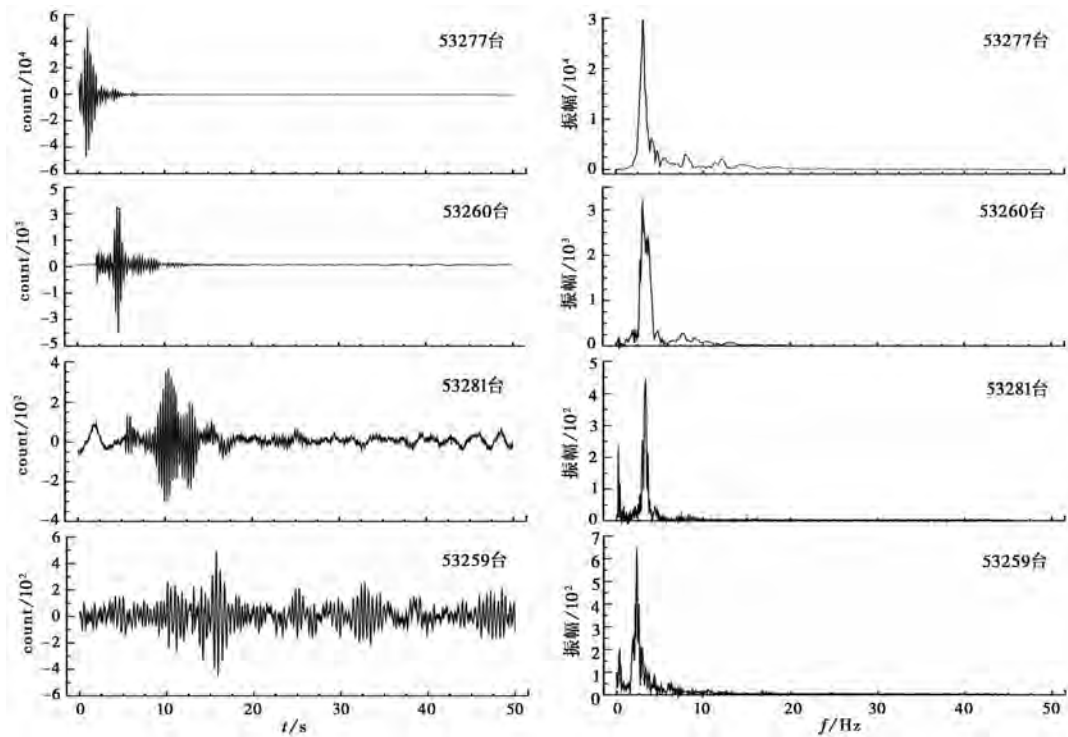


图2 各个台站记录的气枪激发波形及频谱  
左列为记录波形;右列为频谱

## 2 气枪激发地震波与天然地震波对比分析

宾川彩凤台(图1中CFT)距激发点4.7km,此台使用FSS-3M型短周期地震计,工作周期为2s,频响2~60Hz;数据采集器为EDAS-24型,采样率为100Hz。该台清楚地记录到了宾川气枪震源激发的信号(图3(a)),振幅达 $\pm 0.13\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,根据里氏近震震级定义(国家质量技术监督局,2009)

$$M_L = \lg A_\mu + R(\Delta) \quad (2)$$

其中, $M_L$ 为近震体波震级; $A_\mu$ 为水平向最大地动位移振幅的平均值,即 $A_\mu = (A_{\mu_N} + A_{\mu_E})/2$ (单位 $\mu\text{m}$ ); $R(\Delta)$ 为起算函数。由式(2)可得,1次气枪激发相当于 $M_L 0.7$ 天然地震。我们选择彩凤台记录的2015年9月25日03:10:00发生在 $100.6^\circ\text{E}$ 、 $25.8^\circ\text{N}$ 的 $M_L 0.7$ 天然地震(图1中实心圆),该地震震源深度5km,震中距彩凤台约10km,气枪震源信号选择2015年9月25日10:00:00单次激发的波形,对同一台站2种不同震源信号的频谱特征进行分析。图3为气枪激发、天然地震的信号及相应的频谱特征。由图3可见,气枪震源激发的地震波波形光滑,正弦和低频特征明显;而天然地震高频成份丰富,震相复杂且有多个主频;气枪激发信号的频率为0~15Hz,主频域为2~5Hz,而天然地震的波形信号频谱范围则很宽,达0~45Hz,主频域高达5~25Hz。由此可见,气枪震源与相近震级的天然小地震相比,能激发更多低频信号,且波形光滑。由于地震波中的低频成分比高频成分更能真实地反映地下介质的

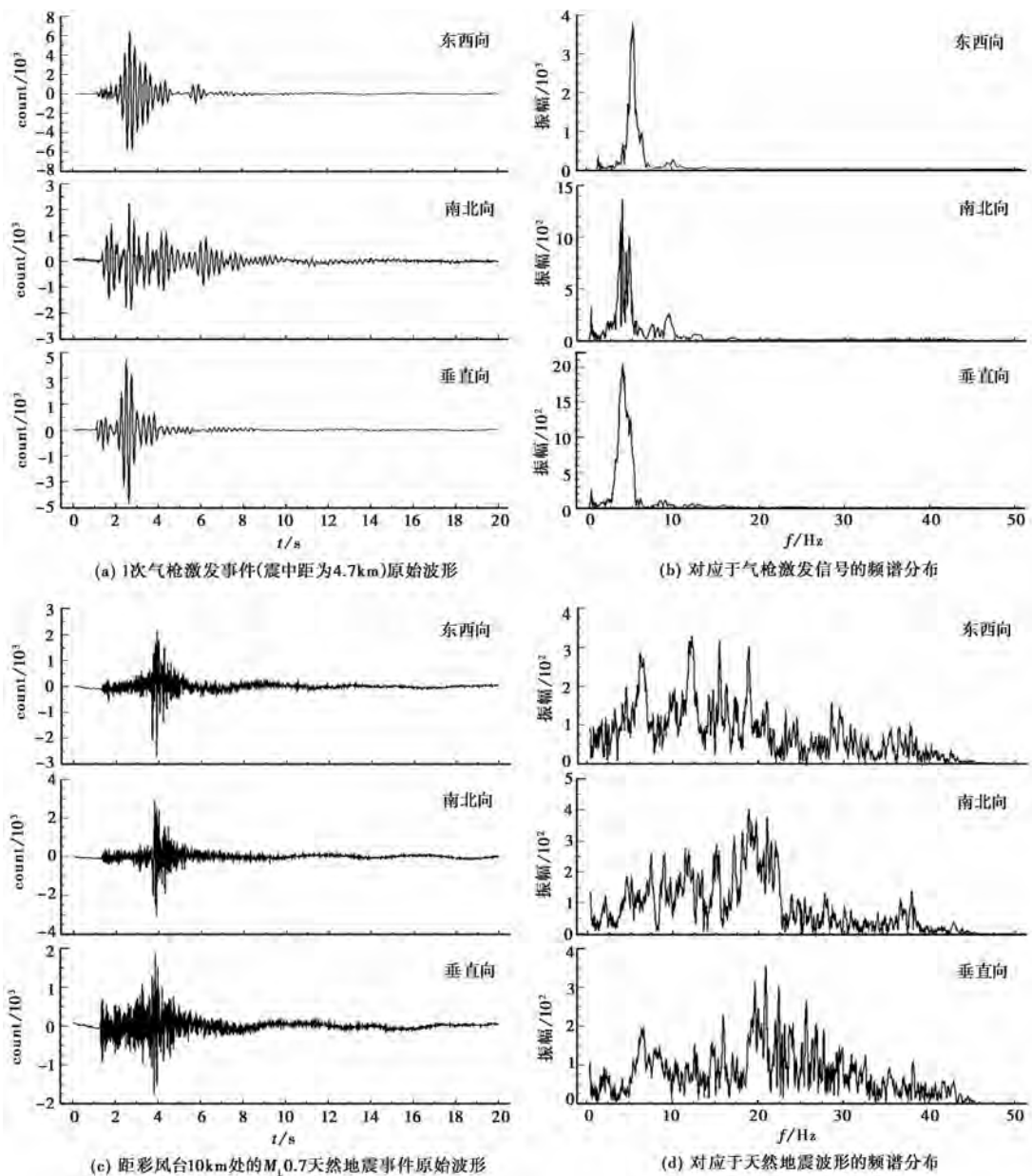


图3 彩凤台气枪激发信号、天然地震及相应的频谱特征

状况(何汉漪,1999),故气枪震源激发的波形对研究地下结构更为有效。

### 3 气枪激发震源能量分析

大银甸水库大容量气枪激发实验(陈颢等,2007;赵明辉等,2008)使用的气枪源为4条单枪容量为 $2000 \text{ in}^3$ 的气枪组成的、总容量为 $8000 \text{ in}^3$ 的气枪阵,工作压力 $15 \text{ MPa}$ 。气枪震源的动力来源于高压气体,枪阵释放的总能量可由高压气体的容量和压力计算得到(陈颢,

2007),具体如下

$$E = P \cdot V \cdot \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (3)$$

其中, $E$ 为释放的能量; $V$ 为高压气体的容量; $P$ 为压力; $P_0$ 是环境压力,一般为1个大气压。如果枪阵的容量为 $8000 \text{ in}^3$ ,工作压力为 $2000 \text{ psi}$ (pound per square inch,  $1 \text{ psi} = 6.8927 \times 10^7 \text{ Pa}$ ),1个大气压相当于 $14.5 \text{ psi}$ ,则由式(3)计算得到气枪枪阵释放的能量为 $7.88 \times 10^7 \text{ lb} \cdot \text{in}$ (磅·英寸),即 $8.90 \times 10^6 \text{ J}$ 。TNT炸药的爆热为 $4.2 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ,宾川气枪枪阵释放的能量相当于 $2.1 \text{ kg TNT}$ 炸药当量(约 $2.4 \text{ kg}$ 硝酸炸药当量),而张尉等(2009)根据硝酸铵爆破实验得出1次 $25 \text{ kg}$ 炸药的井下爆破才相当于 $M_L 0.69$ 的天然地震释放的能量,而宾川气枪激发相当于 $0.7$ 级天然地震,可见气枪震源比爆破震源可利用的能量更高。

## 4 结论

(1)通过对不同震中距台站接收到的气枪震源激发的地震波进行分析后发现,大容量气枪震源激发的地震波具有丰富的 $10 \text{ Hz}$ 以下的低频信号(主频 $2 \sim 5 \text{ Hz}$ ),这种信号的传播距离远,穿透深度大(林建民等,2008)。

(2)在宾川开展的大容量气枪激发实验中,1次激发可以产生与 $0.7$ 级天然地震能量相同的地震波,且气枪激发地震波更光滑,正弦和低频特征明显。频谱上,天然地震波形主频很宽,为 $5 \sim 25 \text{ Hz}$ ;而气枪震源波形则频域更低,能量主要集中在 $2 \sim 5 \text{ Hz}$ 。由于地震波中的低频成分比高频成分更能真实地反映地下介质的状况(何汉漪,1999),故气枪震源是研究地下结构更为有效的震源。

(3)宾川气枪枪阵释放的能量相当于 $2.1 \text{ kg TNT}$ 炸药当量(约 $2.4 \text{ kg}$ 硝酸炸药当量),若换算为炸药爆破,则需要 $25 \text{ kg}$ 炸药才能达到宾川大容量气枪激发的效果。所以,气枪震源比爆破震源更经济、更有效。

气枪震源是一种绿色环保、经济实用、高度可重复、精确可控的人工震源(张尉等,2009)。这种释放能量强、重复性好、探测精度高、绿色环保的枪阵组合震源可对地下介质结构和介质物性变化进行有效的探测(罗桂纯等,2006、2007;王彬等,2015)。

**致谢:** 谨向在云南宾川大容量气枪实验中作出贡献的所有单位和个人表示衷心的感谢。感谢两位审稿专家的辛勤付出。

## 参考文献

- 陈颢、张先康、丘学林等,2007,陆地人工激发地震波的一种新方法,科学通报,52,1317~1321。  
 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,22(5),441~446。  
 程佩青,2001,数字信号处理教程,71~83,北京:清华大学出版社。  
 国家质量技术监督局,2009,中华人民共和国国家标准:地震震级的规定(GB 17740-1999),1~2,北京:中国标准出版社。  
 何汉漪,1999,海上高分辨率地震实例研究,地球物理学报,42(1),120~126。  
 何汉漪,2001,海上高分辨率地震技术及其应用,1~129,北京:地质出版社。  
 林建民、王宝善、葛洪魁,2008,大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析,地球物理学报,51(1),206~212。  
 林建民、王宝善、葛洪魁等,2010,大容量气枪震源子波激发特性分析,地球物理学报,53(2),342~349,DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.012。

- 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。
- 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。
- 王彬、吴国华、苏有锦等,2015,宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果,地震研究,38(1),1~6。
- 张尉、陈棋福、丘学林等,2009,首都圈数字地震台网对微弱爆破信号的检测能力,地球物理学报,52(3),681~690。
- 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。

## Large volume air-gun source spectrum characteristics of Binchuan, Yunnan

*Chen Jia Li Xiaobin Yang Jun Ye Beng*

Office of the Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, Dali 671000, Yunnan, China

**Abstract** A field experiment using large air gun source was conducted in the Dayindian reservoir of Binchuan, Yunnan by Earthquake Administration of Yunnan Province and Institute of Geophysics, CEA in 2011 in order to further study the characteristics of its spectrum. Firstly, we analyzed the spectrum features of each station from different distances. Secondly, we calculated the energy of air-gun excitation. Thirdly, we compared the characteristics of air-gun signal with the natural seismic wave. The result indicated that an excitation can result in a level equivalent to that of a  $M_L 0.7$  nature earthquake. The signals of air-gun have a 2~6Hz dominant frequency and less than 15Hz. The signals by air gun have a stable frequency and is rich in low frequencies. The release energy by air gun which is equal to 2.4kg ammonium nitrate explosive energy is  $8.90 \times 10^6$  J.

**Key words:** Air-gun sources; Frequency feature; Natural earthquake; Contrast