

水库气枪震源不同组合激发效率的对比研究

李孝宾¹, 叶 泵¹, 杨 军¹, 陈 蒙^{2,3}, 金明培¹, 王宝善²

(1. 中国地震局滇西地震预报实验场, 云南 大理 671000; 2. 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 100081; 3. 南洋理工大学, 新加坡 639798)

摘要: 为研究气枪的激发特性, 并为气枪发射台的堪选、建设提供参考依据, 在宾川地震信号发射台进行了不同气枪组合的激发试验, 并对试验数据进行了分析。结果表明: (1) 单支气枪激发 100 多次的叠加信号可以被在 150 km 外的地震台记录到; (2) 单支气枪激发与 4 支气枪同时激发的信号频率基本相同, 且衰减基本一致, 但 4 支气枪同时激发信号的均方根振幅约为单支气枪的 4 倍; (3) 当气枪组合激发的信号的信噪比达到 10 dB 时, 相关系数可以达到 0.99 以上; (4) 4 支气枪同时激发的激发效率是单支气枪的 4 倍。从分析结果可看出, 宾川地震信号发射台在牺牲一定效率的情况下, 单支气枪激发信号可以替代 4 支气枪组合的激发信号。

关键词: 气枪激发; 地震信号; 激发效率; 信噪比; 信号叠加

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2016)03-0458-08

0 引言

大容量气枪震源具有绿色环保、重复性好、激发能量大、能量转换效率高等优点 (陈颢等, 2007a, b)。作为一种高效经济的主动震源, 近些年一些地球科学家将其从海洋搬到陆地, 用于内陆地球深部结构的探测。2006、2007 年, 在陈颢院士的带领下, 在河北遵义上关湖水库进行了 2 次大容量气枪的激发试验 (陈颢等, 2007b; 林建民等, 2008, 2010; Chen *et al.*, 2008), 用 4 支容量分别为 1 500 in³ 和 4 支容量分别为 2 000 in³ 的气枪组进行了试验, 试验表明了小水体中大容量气枪依然保持了较好的能量转换效率 (Wang *et al.*, 2010), 单次激发分别在距离为 110 km 和 185 km 的台站可以清晰的记录到信号 (林建民等, 2008, 2010; Chen *et al.*, 2008), 这 2 次试验不但得出了一些可喜的研究成果, 更证明陆地水库大容量气枪进行地下深部结构探测的可行性。

由于气枪激发受到水库水体、形状以及水位等因素的影响, 激发产生的信号除了主脉冲、气泡脉冲、气泡震荡和水面虚反射外, 还存在很多近源固液界面的反射、折射和绕射等干扰与信号叠加在一起, 若水库形状不规则且界面不平滑,

气枪信号会变的比较复杂, 激发质量也会受到一定影响。由于水库大容量气枪激发的影响因素较多, 前人在海洋中进行气枪激发试验得到的理论基础不能完全适用, 林建民等 (2010) 对水库中近场的水听器接收到的气枪信号进行了分析, 得出了气枪沉放深度、工作压力等激发条件与近场信号的关系。Chen 等 (2014) 于 2011 年在宾川地震信号发射台做了类似的试验, 不但分析了水中近场 OBS 水听器的信号, 还分析了远场陆地地震仪记录的信号, 总结了气枪沉放深度、工作压力、水库水位变化对激发的影响。但他们并未对不同气枪组合的激发效率进行详细研究。

宾川地震信号发射台自 2011 年开始试验至今, 产出了大量的试验数据, 得到了很好的试验效果。同时, 也发现了一些问题, 最突出的是气枪震源的稳定性, 水库水位的季节性变化会影响气枪震源的激发稳定性 (Chen *et al.*, 2014)。其次, 要实现“地下云图”的构建需要在一定探测区域尺度内建设多个气枪发射台, 让气枪信号多角度的扫描整个探测区域。而在一个较小的区域内遴选多个适合建设气枪发射台的水体较为困难, 如果能够精简气枪激发系统, 使其具备更好的流动性, 能在更小的水体中进行气枪激发, 那么这些问题就能得到解决。为此, 研究气枪数量与激发效率

* 收稿日期: 2015-10-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41474048)、云南省陈颢院士工作站 (2014IC007) 专项经费、云南省地震局青年基金资助项目 (201307) 和云南省地震局“传帮带”项目联合资助。

关系,讨论使用更少数量气枪组合在更小的水体中激发达到现有激发效果具有重要的现实意义。

2013年,在宾川地震信号发射台开展了单支气枪激发(以下简称单枪激发)与4支气枪同时激发(以下简称4枪激发)激发效率的对比研究试验。本文对这些试验数据进行对比分析,讨论气枪源的激发效率与气枪数量的经验关系,为在较小水体中建设气枪发射台提供一些参考依据。

1 试验情况

宾川地震信号发射台处于由红河断裂、剑川—丽江断裂和程海断裂围成的三角形块体内(王彬等,2015)(图1),其激发系统由4支Btolt 1 500LL型气枪组列构成,单支容量2 000 in³,总容量达8 000 in³(图2),震源系统常规激发时由4枪激发;接收系统由激发台周围150 km范围内分布的40多个流动测震台构成,每个流动测震台都是由Reftek 130B数据采集器和频带范围2 s~100 Hz的短周期Guralp CMG—40T地震计组成(Wang *et al.*, 2012)。

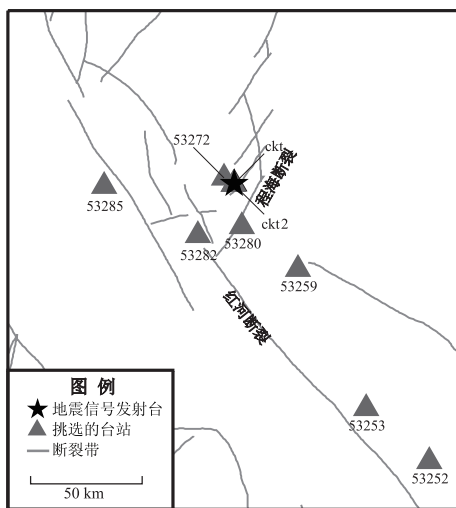


图1 宾川地震信号发射台及周边流动台分布情况
Fig. 1 Location of Binchuan Transmitting Seismic Stations (TSS) and distribution of flow seismic stations in its surrounding area

2013年10~12月期间,在宾川地震信号发射台分别做了2组试验,本文根据4支气枪所处的位置对其进行了编号(图2)。第1组试验为相同位置单枪重复性激发试验,1号枪和3号枪各激发了

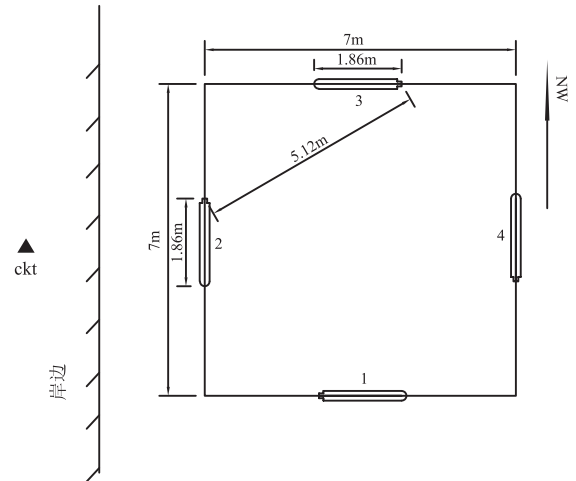


图2 气枪组俯视图
Fig. 2 Top view of airgun array

49次;第2组试验为同一时间段4号枪单枪激发与4枪激发的对比试验,为了增加样本的数量,这组试验分别在4天内进行;2015年3月,笔者又进行了第3组试验,在同一时段不同位置的单枪激发进行对比试验。以上试验时间都在GMT时间14时(即北京时间22时)以后进行,人类活动较少,能有效的降低人为噪声干扰。具体试验情况及参数详见表1,并挑选了部分信噪比较好的台站的数据进行了分析(图1)。试验的目的:(1)单枪激发的重复性是否与4枪激发相当;(2)相同激发条件下,对比单枪和4枪的激发效率;(3)不同位置单枪激发信号之间是否存在较大差异。

2 对比分析

2.1 单枪和4枪激发震源信号对比

要了解一个震源的特性,需要从“源”入手。水库大容量气枪震源,对于陆地上的地震仪来说,气枪产生的水泡与水库的液、壁相互作用耦合共同构成了一个特殊的震源系统,距离激发浮台水平距离50 m的参考台刚好处于这个震源系统的外沿(图2),本文近似地将参考台接收到的激发信号看作源信号。讨论单枪与4枪激发信号的效率,首先要对比气枪源信号。试验中所计算的振幅如无注明均表示均方根振幅。

在第1组试验中,将参考台记录到的同一支气枪同一天晚上激发的49次信号进行两两相关得到1 176个相关系数,将相关系数作成点图,如图

表 1 试验激发参数
Tab. 1 The transmitting parameters in experiments

分组	时间/年-月-日	枪数	位置	水深/m	枪深/m	压力/MPa	激发次数
1	2013-10-31	1	1	20.00	8.00	15	49
	2013-11-01	1	3	20.00	8.00	15	49
2	2013-11-21	1	4	20.40	10.00	15	13
		4					15
	2013-12-04	1	4	19.60	10.00	15	15
		4					18
	2013-12-19	1	4	19.40	10.00	15	22
		4					16
	2013-12-26	1	4	19.50	10.00	15	11
		4					18
3	2015-03-12	1	1	15.9	8.00	15	3
	2015-03-12	1	2	15.9	8.00	15	3
	2015-03-12	1	3	15.9	8.00	15	3

3 所示。从图 3a、b 中可以看出，1 号和 3 号气枪的激发信号的相关系数都在 0.90 以上，且集中在 0.98。为了与 4 枪的激发信号进行对比，本文筛选了第 2 组试验中激发条件比较接近的 2 天的试验数据进行对比，其中 2013 年 12 月 19 日和 26 日，4 号气枪共激发 33 次，4 枪激发共 32 次，分别用这 2 天单枪和 4 枪激发的参考台信号进行互相关分

析，从图 3c、d 中可以看出，4 号气枪和 4 枪的参考台信号相关性分别在 0.90 以上和 0.96 以上。在相关性上，4 号枪的激发信号较为离散，这可能因为试验分别在 2 天进行，激发条件有了细微的变化（水位和浮台位置的变化），而单枪较 4 枪激发对这些变化更敏感。

第 2 组试验为在相同激发条件下，对 4 号枪和

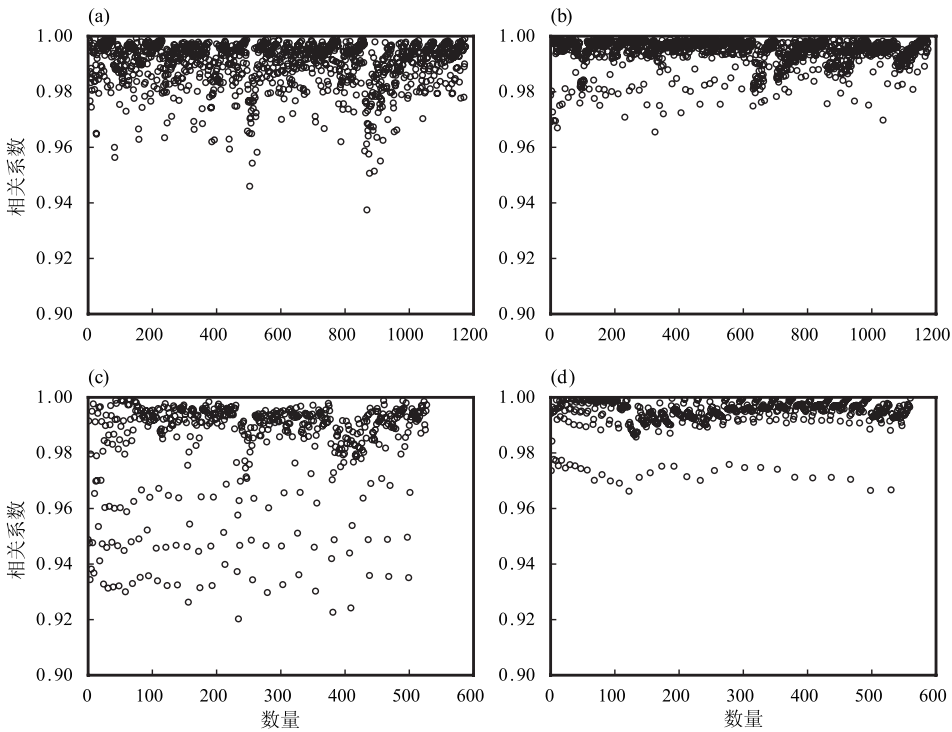


图 3 1 号 (a)、3 号 (b)、4 号 (c) 气枪激发及 4 枪 (d) 激发时参考台信号相关系数分布
Fig. 3 Distribution of correlation coefficient of signals recorded by the reference station when the No. 1 airgun (a), the No. 3 airgun (b), the No. 4 airgun (c) excited, and four airguns excited at the same time (d)

4 枪的激发信号对比 (图 4a), 从功率谱密度对比 (图 4b) 可以看出, 在参考台的数据采集器为 100 Hz 采样的情况下, 接收到的气枪信号主要功率集中在 30 Hz 以下, 4 枪激发信号的功率谱密度要比单枪的高约 10 ~ 20 dB/Hz, 其最大功率都出现在 3.50 Hz。从时频特性上看, 4 枪 (图 4c) 和单枪 (图 4d) 激发信号都在 1 s 左右出现了能量最大值, 并且集中在 8 Hz 以下, 将 8 Hz 以下的有助于远距离传播的低频成分产生的能量放大, 4 枪激发信号的能量集中在 3 ~ 4 Hz (图 4c), 单枪激发信

号的能量主要集中在 3 ~ 6 Hz (图 4d), 而两者的能量最大值都出现在 3.5 Hz 附近, 这与功率谱密度图 (图 4b) 中的功率最大值相对应, 其信号能量持续 2 s 左右, 初步判断此能量主要是由气泡脉冲和气泡震荡产生, 可以看出单枪激发信号的能量中心频率略高于 4 枪激发信号。

在第 3 组试验中, 2 号气枪激发信号的最大振幅略高于 1 号和 3 号气枪, 且高频成分更多, 初步估计是由 2 号气枪距离岸边参考台较近所致。1 号和 3 号气枪的激发条件较为相似, 且相关系数和振幅也很接近。

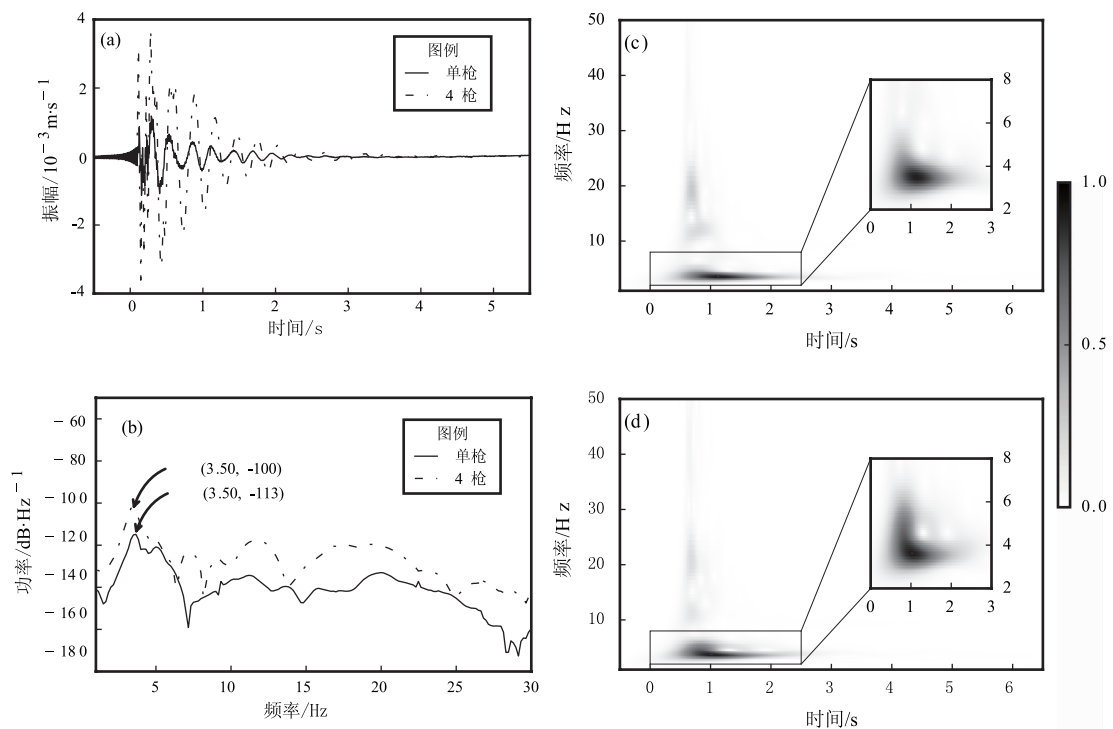


图 4 单枪激发与 4 枪激发参考台信号波形 (a) 及功率谱 (b); 4 枪 (c)、单枪 (d) 激发参考台信号时频分析

Fig. 4 Waveforms (a) and power spectrums (b) of the signal recorded by reference station when the single airgun excited and four airguns excited at the same time; time frequency analysis of the signal recorded by reference station when four airguns excited at the same time (c) and the single airgun excited (d)

2.2 单枪和 4 枪激发信号信噪比与相关性对比

由于信号的衰减, 炮检距较远的台站接收到的激发信号振幅已经淹没在背景噪声之中, 无法正确的计算信号振幅和信噪比。但相关信号的叠加能够突显信号 (Niu *et al.*, 2008; Silver *et al.*, 2007), 气枪激发信号的高重复性 (林建民等, 2008) 为气枪信号的叠加提供了有力支持 (王宝善等, 2011)。本文将挑选出的台站波形信号叠加, 经过数次叠加后, 气枪信号被突显出来, 如图 5 所示, 将图中深灰色框截选的信号作为气枪信

号, 并计算其均方根振幅, 再取很长的一段没有气枪信号的部分作为背景噪声, 并求出噪声振幅, 研究地震信号在传播过程中的变化。从图 6a 可以看出, 单枪和 4 枪激发信号的振幅随着炮检距的增加而降低, 且变化趋势基本一致, 炮检距小于 20 km 时衰减剧烈, 变化趋势明显, 炮检距大于 20 km 的台站观测到的信号振幅变化趋于平缓。从图 6b 可以看出, 所挑选的台站的背景噪声基本处于 $0 \sim 0.05 \text{ m/s}$ 的稳定区间, 此时, 台站的信噪比和振幅的变化趋势一致, 并且单枪和 4 枪激发信

号的变化趋势也是一致的 (图 6c); 从图 6c、d 中可以看出, 单枪和 4 枪激发信号的相关系数在信噪比大于 10 dB 时变化不大, 平均相关系数可达到 0.99, 当信噪比小于 10 dB 时, 二者相关系数骤减, 且稳定性也很差。相关系数随炮检距的增大而降低, 主要是由信号随炮检距增大导致的信噪比降低引起的, 所以台站接收到信号的相关性主要取决于信号的信噪比。

从图 6 综合看出, 单枪和 4 枪的激发信号的变化规律基本一致, 其区别主要体现在这 2 种激发方式产生信号的振幅导致信噪比的不同。

2.3 单枪与 4 枪激发效率的对比

信号的振幅代表了信号的能量, 频率可以反应出信号的抗衰减能力, 相关系数体现了信号的相似程度, 信噪比体现了信号的优劣。从以上试验分析中可以看出几种激发方式, 信号的频率和

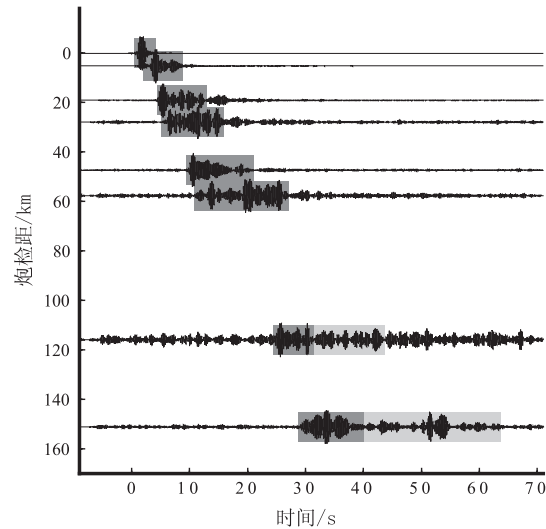


图 5 单枪激发信号叠加后的剖面图
Fig. 5 Profile of the stacking of signals excited by the single airgun

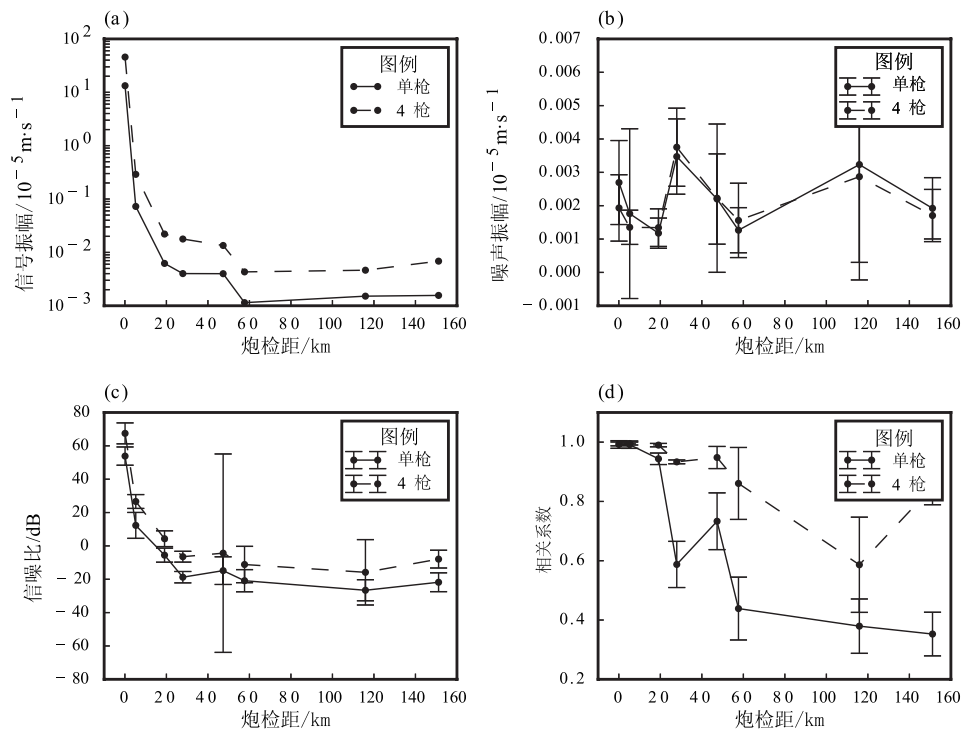


图 6 单枪激发与 4 枪激发信号随距离变化的对比分析
(a) 单枪激发与 4 枪激发信号振幅随距离的变化情况; (b) 单枪和 4 枪激发时段各台站背景噪声振幅; 单枪激发与 4 枪激发信号的信噪比 (c) 和相关系数 (d) 随距离的变化情况
Fig. 6 Comparison analysis of the signal varies with distance when the single airgun and four airguns excited
(a) amplitude of signal varies with distance when the single airgun and four airguns excited; (b) amplitude of background noise of each station in the period of single airgun and four airguns excited; singnal noise ratios (c) and correlation coefficients (d) of signals varies with distance when the single airgun and four airguns excited

相关性都基本一致, 只有信号的振幅有所不同, 在噪声较为稳定的情况下, 我们以信噪比作为激发效率比较的标尺, 单枪激发信号叠加多少次相当于一次 4 枪激发信号的信噪比。Silver (2007)

的研究表明,当信噪比定义为

$$SNR = \frac{\sqrt{A_{\text{signal}}^2}}{\sqrt{A_{\text{noise}}^2}} \quad (1)$$

其中, A_{signal} 为信号振幅, A_{noise} 为噪声振幅, 信噪比与叠加次数的关系为

$$SNR = \sqrt{N} \times SNR_0 \quad (2)$$

其中, SNR_0 是原始信号的信噪比, N 为叠加次数, SNR 为叠加后的信噪比。若将信噪比以 dB 形式表示时, 信噪比的定义为

$$SNR_{\text{dB}} = 20 \times \log_{10} \frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \quad (3)$$

由式 (2) 和式 (3) 可以得到叠加次数与信噪比的关系为

$$SNR_{\text{dB}} = SNR_{\text{dB}_0} + 10 \times \log_{10} N \quad (4)$$

其中, SNR_{dB_0} 为原始信号的信噪比。图 7 为炮检距依次递增的 8 个流动台记录到波形的信噪比和叠加次数的关系, 图中, “○” 符号组成的曲线表示实际计算得到的叠加次数和信噪比的关系, 黑实线表示由式 (4) 得到的理论曲线。从图中可以看出每个台的 2 条曲线还是比较接近的, 形成差别的主要原因是现实生活中噪声信号来源复杂, 不可能完全符合理想状态。

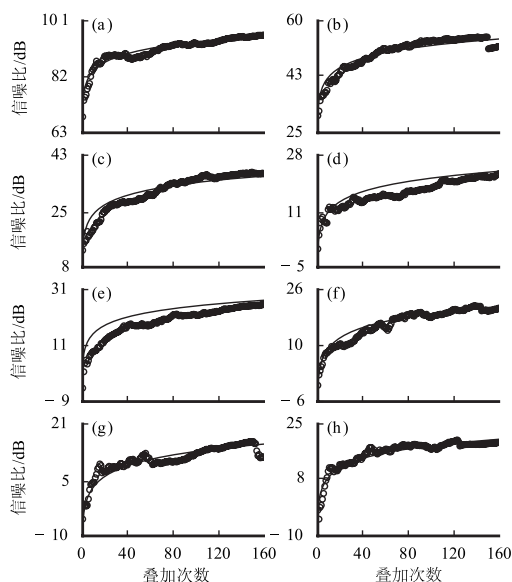


图 7 不同距离台站的信噪比与叠加次数的关系
(a) ckt2; (b) 53272; (c) 53280; (d) 53282; (e) 53259;
(f) 53285; (g) 53253; (h) 53252

Fig. 7 Relationship between SNR of each station in different distance and stacking number

由于理论和实际的计算结果基本一致, 我们可以由式 (4) 推导出单枪信噪比、叠加次数与 4 枪激发信号信噪比的关系, 即

$$N = \left(\frac{SNR_4}{SNR_1} \right)^2 \quad (5)$$

其中, SNR_4 为 4 枪激发信号的信噪比, SNR_1 为单枪激发信号的信噪比, N 为叠加次数。理论上, 若台站的背景噪声为振幅恒定的白噪声时, 信噪比只与信号振幅有关。由图 8a 可知, 单枪与 4 枪激发信号的振幅比不随炮检距的增大而有规律变化, 其范围大概为 3.6 ~ 4.4 倍, 于是可得:

$$k \times A_1 = A_4, (3.6 \leq k \leq 4.4) \quad (6)$$

将信号振幅和噪声振幅信息带入式 (4), 取 k 为平均值 4, 可以得到

$$n = \left(\frac{A_4}{A_{\text{noise}}} \div \frac{A_1}{A_{\text{noise}}} \right)^2 = \left(\frac{A_4}{A_1} \right)^2 = \left(\frac{4 \times A_1}{A_1} \right)^2 = 16 \quad (7)$$

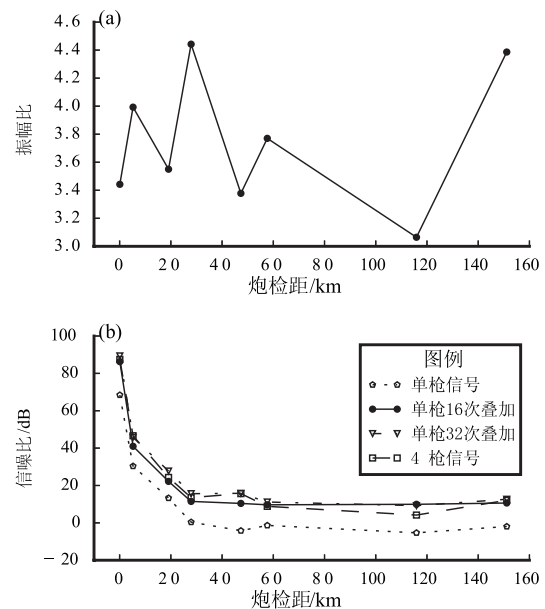


图 8 单枪和 4 枪激发信号在不同距离激发效率的对比分析

(a) 单枪和 4 枪激发信号在不同距离台站的振幅比; (b) 单枪激发信号不同叠加次数与 4 枪激发信号的信噪比对比
Fig. 8 Comparison analysis of the excitation efficiency

of the signal in different distance when the single airgun and four airguns excited

(a) amplitude ratio of signal recorded by stations in different distance when the single airgun and four airguns signals excited;

(b) comparison of SNR between the single airgun in different stacking number and four airguns excited

其中, n 为单枪信号叠加的次数, A_4 为 4 枪激发信号的振幅, A_1 为单枪激发信号的振幅, A_{noise} 为噪声振幅, 得到的理论结果是 16 次单枪激发的结果叠加后的信噪比与 1 次 4 枪激发的结果相当。

从图 8b 可以看出, 单枪激发信号经过 16 次叠加的信噪比已经基本高于单次 4 枪激发的信号, 随着炮检距的增大两者的变化趋势基本一致。在单枪信号经过 100 次叠加后, 其信号可以在炮检距为 150 km 的台站识别出来 (图 5)。

3 讨论与结论

从以上的分析研究可以发现, 宾川地震信号发射台单枪和 4 枪激发信号的周期基本一致, 这点可以从 4 枪激发的相干性来考虑, 当气枪组相邻枪之间的距离为气泡半径 2 倍左右时, 气枪组可以形成相干枪阵 (陈浩林等, 2003)。Johnson (1994) 和 Ziolkowski (1970) 的经验公式为

$$\bar{a} = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P_0 V_0}{P_a + \rho_w g h}\right)^{\frac{1}{3\gamma}} \quad (8)$$

其中, \bar{a} 为平衡气泡半径, $\gamma = 1.13$ 为热容比, P_0 为气枪压力, V_0 为气枪容量 $2\,000\text{ in}^3$, P_a 为大气压强, $\rho_w = 1\,000\text{ kg/m}^3$ 为水的密度, $g = 9.8\text{ N/kg}$, h 为气枪的深度。由式 (8) 可以计算出平衡气泡半径。当气枪压力为 15 MPa, 枪深为 10 m 时, 计算得到气泡的平衡半径 $\bar{a} \approx 0.809\,6\text{ m}$, 其 2 倍为 $1.619\,2\text{ m}$ 。从图 2 可以看出, 4 支气枪悬挂于边长为 7 m 的正方形浮台, 相邻枪之间枪口的距离约为 5.12 m, 这个距离远远大于相干枪 $1.619\,2\text{ m}$ 的距离, 所以此枪阵为不相干枪阵, 这也就说明了 4 枪和单枪激发信号的频率只存在微小差别的原因。

从振幅随炮检距的增大的衰减看, 单枪与 4 枪激发信号的衰减速度相当, 4 枪与单枪激发信号的振幅比保持在 3.6~4.4 之间, 说明单枪与 4 枪激发信号的频率的微小差异, 并不是影响信号传播的主要原因。而 4 枪和单枪激发所产生的信号 4 倍左右的振幅差异才是影响单枪激发能力的主要原因。

从 2 种激发信号的相关系数看, 相关系数与信号的信噪比高度相关, 单枪信号可以通过信号叠加, 有效地提高信噪比。

水库单枪和 4 枪激发对比试验是研究陆地单枪气枪震源可行性的第一步, 单枪的激发效率虽然

低于 4 枪, 但其具备 150 km 的信号覆盖半径, 具有更好的流动性, 占用的空间更小, 在今后气枪台网的建设、气枪流动台的建设都具有实际的应用价值, 特别是今后单枪在更小的人工水体中发射台的建立, 可以降低水库选址的困难, 并且能很好地控制气枪震源的激发条件, 使得气枪震源系统更加稳定、高效, 但在此之前, 人工水体的设计还需要更多的试验研究。

中国地震局地球物理研究所王宝善研究员对本论文进行了耐心细致的指导, 陈蒙博士在试验数据的处理方面给予很多的帮助, 中国地震局滇西地震预报实验场金明培高级工程师、杨军高级工程师、叶泵工程师等, 对本次试验能够顺利开展做了很多工作, 给予很大的支持, 在此表示由衷的感谢。

参考文献:

- 陈颢, 王宝善, 葛洪魁等. 2007a. 建立地震发射台的建议[J]. 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[J]. 科学通报, 52(11): 1317-1321.
- 陈浩林, 宁书年, 熊金良等. 2003. 气枪阵列子波数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 38(4): 363-368.
- 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.
- 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[J]. 地球物理学报, 53(2): 342-349.
- 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[J]. 地震研究, 38(1): 1-6.
- 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.
- Chen Y, Liu L, Ge H, *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[J]. Geophysical Prospecting, 56(4): 601-612.
- Chen M, Yang W, Wang W T, *et al.* 2014. Influencing factors of seismic signals generated by un-tuned large volume airgun array in a land reservoir[J]. Earthquake Science, 27(4): 365-376.
- Johnson D T. 1994. Understanding air-gun bubble behavior[J]. Geophysics, 59(11): 1729-1734.
- 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[J]. Nature, 454(7201): 204-208.
- Silver P G, Daley T M, Niu F, *et al.* 2007. Active source monitoring of Cross-Well seismic travel time for Stress-Induced changes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(1B): 281-293.
- Wang B S, Yang W T, Yuan S Y, *et al.* 2010. An experimental study on the excitation of large volume airguns in a small volume body of water[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 7(4): 388.

Wang B S, Ge H K, Yang W, *et al.* 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(5):49–50.

Ziolkowski A. 1970. A method for calculating the output pressure waveform from an air gun[J]. *Geophysical Journal International*, 21(2):137–161.

Research on Comparison of Excitation Efficiency of Air Guns with Various Combinations in Water Reservoir

LI Xiaobin¹, YE Beng¹, YANG Jun¹, CHEN Meng^{2,3}, JIN Mingpei¹, WANG Baoshan²

(1. *Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, CEA, Dali 671000, Yunnan, China*)

(2. *Seismic Observation and Geophysical Imaging Laboratory, Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China*)

(3. *Nanyang Technological University, Singapore 639798*)

Abstract

In order to study the excitation characteristic of the air gun, and provide the reference for the chosen site and construction of the air gun transmitting seismic station, we take the excitation test of air guns with various combinations at the Binchuan Transmitting Seismic Station (TSS). Analyzing the selected test data, we found the following results: (1) The stacked air gun signals excited by the single gun for more than 100 times can be clearly recorded at the seismic station with an epicentral distance of 150 km. (2) The frequencies of signals excited by single and four air guns are basically same, and their corresponding attenuations are basically similar, however the RMS amplitude of the signal excited by four air guns is about 4 time as much as that of single air gun. (3) When the SNR of signal excited by single gun reaches 10 dB, the correlation coefficient of it could reach above 0.99. (4) The excitation efficiency ratio of signals excited by single gun and four guns is 1:4. The analysis result shows that the signal excited by single gun can be replaced by the combination signal excited by four guns in case of losing some efficiency.

Key words: air gun exciting; seismic signal; excitation efficiency; SNR; signal stacking