

陈惠芳、林彬华、金星等, 2016, 水库大容量气枪震源激发条件优化实验研究, 中国地震, 32(2), 241~248。

水库大容量气枪震源激发条件优化实验研究

陈惠芳¹⁾ 林彬华^{1,2)} 金星^{1,2)} 巫立华¹⁾ 蔡辉腾¹⁾

1) 福建省地震局, 福州市华鸿路 7 号 350003

2) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150040

摘要 通过人工拾取震相, 统计记录台站数、台站最远观测距离、接收能量等 3 个参数, 自主研发了最优工况处理软件来研判工况激发效果, 并确定棉花滩水库最优工况为水深 25m, 枪阵沉放深度 9m, 枪阵尺寸 7m×7m。对定点 300 次激发的每 10 次累计叠加结果进行分析后发现, 叠加 1090 次时激发效果快速增强, 100150 次时缓慢增强, 160240 次时快速增强, 250300 次时缓慢增强, 即随着叠加次数的增加, 激发效果增强, 传播距离和记录台数也逐步增加。

关键词: 最优工况 叠加分析 激发效果 观测距离

[文章编号] 1001-4683(2016)02-0241-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

人工震源的激发位置、深度以及激发时间等都精确已知, 并且可根据研究需要在空间、时间域上进行主动控制、激发, 故利用人工震源进行地下结构探测研究具有较好的前景。截至目前, 常用的人工震源有炸药爆破、水中气枪激发、落重或锤击、电火花、可控震源等(陈蒙等, 2014), 其中气枪震源由于具有绿色环保、精度高、重复性好、经济适用等诸多优点, 已成为重要的人工震源(罗桂纯等, 2007)。Brocher 等(1995)、Fisher 等(2003)在 LARSE 计划和 Okaya 等(2002)在 SIGHT 计划中, 丘学林等(2003)、赵明辉等(2004)在南海东北部海陆联合勘探计划中以及陈颀等(2007)在上关水库大容量气枪激发实验中的气枪信号的探测距离均超过 200km, 这些都是利用气枪震源进行深部地球物理探测的成功实例。

然而在气枪震源实验中所需要花费的人力、物力、财力成本较高, 因此需要对数据进行现场人工分析以及时调整震源激发条件, 确定实验最优工况。这样既增强了气枪震源的激发效果, 也为后续定点激发实验提供了参考。而在大容量气枪震源实验中, 不同的枪阵尺寸、沉放深度所激发出的子波特性不同, 激发效果也不同。由于单个气枪的子波性能较差, 为了达到提高信号能量及初泡比、压制干扰的目的, 李绪宣等(2012)研究认为, 不同气枪阵列组合可以明显提高子波性能。唐杰(2008)提出气枪沉放较浅时, 虚反射的信号主振幅与从激发源直接传播的信号主振幅的出现时间差距不大, 有可能正负振幅相加使得信号减弱, 故需结合实验效果进行分析。即在实际作业中, 气枪的沉放深度要根据不同的地质条件、作

[收稿日期] 2016-02-25; [修定日期] 2016-03-10

[项目类别] 国家自然科学基金(41474071)、中国地震局公益性行业科研专项(2015419015)联合资助

[作者简介] 陈惠芳, 女, 1981 年生, 工程师, 主要从事地震观测、主动源探测等方面研究。E-mail: huifangchenfj@163.com

业方法来确定。那么将多个子阵列按照沉放深度、枪阵尺寸等参数进行不同工况实验,通过人工分析对比激发效果(探测距离和记录台站数量),优选出最优气枪阵列参数,使设计参数处于最优工况,则是提高气枪激发效率的有效途径。另外,气枪信号具有可重复性的特征,可以采用叠加的方法增强信噪比,线性叠加能使信噪比增强 \sqrt{N} 倍(林建民等,2008)。当气枪激发达到一定次数后,信噪比的增强速率降低,此时再增加激发次数是不经济的。因此,在实际操作中需要根据实际情况权衡气枪的激发次数。本文对棉花滩水库不同实验工况进行了人工分析,采用福建省地震局自主研发的最优工况处理软件管理工况激发的信息,绘制激发效果图,确定具有最优枪深、枪阵尺寸的工况。此外,还对定点300次激发的每10次累计叠加结果进行分析,确定了叠加次数与激发效果之间的关系。

1 实验概况

2015年“福建及台湾海峡地壳深部构造陆海联测实验计划”完成了1条NW向陆海联测剖面(HX07)和1条NE向海域剖面(HX13)的探测(图1),形成横跨台湾海峡和福建南部的陆海联合探测剖面。陆上利用移动式水库气枪震源系统在龙岩永定棉花滩水库(24.76°N , 116.53°E)进行定点多次激发(图1),气枪震源由4支单枪容量为 2000in^3 的Bolt气枪组合而成,总容量为 8000in^3 ,工作压力为 2000psi 。实验地震观测网主要由测震固定台网、流动台网组成。测震固定台网有211个台,其中福建88个、台湾16个、浙江24个、江西24个、广东43个、湖南16个(图1)。流动台网由布设在流动测线上的40套实时传输宽频带测震仪、5套实时传输强震仪、2套布设在浮台上的强震仪以及分别布设在岸边、附近民居、水库大坝的强震仪各1套,共50套仪器组成 230km 长的流动测线。现场指挥部设在厦门地震勘测中心,通过MPLS、SDH、卫星、蜂窝数据、科研专网等方式将观测台网数据流实时传输到现场指挥部供人工分析系统使用,现场分析人员则及时对气枪激发数据进行分析,确定最优工况。

2 分析处理方法

MSDP地震交互分析处理软件是在信息技术高度发展的背景下,地震记录从模拟向数字化转变的产物,是基于数据库管理的人机交互处理系统。该软件利用地震数据库的技术对台网日常处理的地震波形、定位结果、震相数据等进行统一管理,具有测震台网所承担的地震速报、地震编目和数据服务等功能,产出的数据格式统一、规范,能够快速实现地震速报和统一编目。本文的人工分析先采用MSDP地震交互分析处理软件进行震相拾取、定位,生成震相PHASE文件,然后采用福建省地震局自主研发的最优工况处理软件读取PHASE文件,再对气枪激发信息进行管理和分析。

2.1 接收能量的计算

为了评价不同工况的激发效果,本文引入接收能量 C 来定量评价最优工况。接收能量的定义为:首先,计算某个台站 s 在某个工况 k 下的幅值平方,将其与其他工况的该台站幅值平方进行比较,得到比值 R_k 。若 R_k 大于1,则说明该工况较优;若 R_k 小于1,则说明该工况不如对比的工况;若 R_k 等于1,则说明与对比的工况激发效果相近。依次将该工况与不同工况作比较,得到均值 $\overline{R_k}$ 。其次,依次对所有台站作如上计算,得到每个台站的 $\overline{R_k^i}$,对所有 $\overline{R_k^i}$ 平

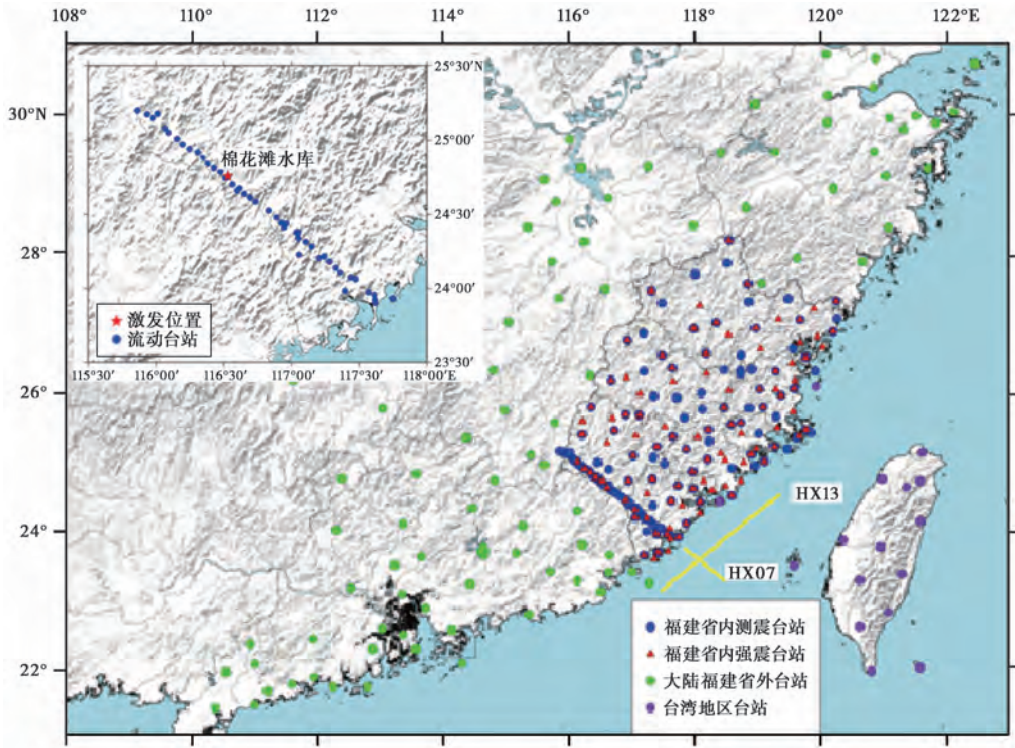


图 1 实验地震观测网台站及实验概况分布

均即可得到该工况的接收能量 C_k 。 C_k 值越大,表示工况 k 效果越好; C_k 值越小,则表示工况 k 的效果越差。具体可表示如下

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{A_i^2}{A_k^2} \right) \quad (1)$$

式中, A_i 为第 i 工况 s 台记录到的峰值; A_k 为第 k 工况 s 台记录到的峰值; m 为第 s 台记录的工况总数; n 为第 k 工况参与计算的台站总数。

2.2 最优工况处理

最优工况的选择是指设计中在一个规定的目标下考虑所有的决策变量,同时考虑它们之间的影响和制约,最终确定这些变量,以获得综合的最优效果。由于单个气枪的子波性能较差,为了达到提高信号能量及初泡比、压制干扰的目的,实际使用中将相同容量的气枪按照一定的规则进行组合形成气枪阵列。为了进一步提高气枪阵列的性能,又将气枪子阵列按照沉放深度、枪阵尺寸、水深等参数进行不同工况实验,通过人工分析激发效果(探测的最优距离和记录台站数量),优选出最优气枪阵列参数。最优工况处理流程见图 2。

福建省地震局自主研发的最优工况处理软件集震相读取、数据处理、信息管理、资料存储、界面显示等功能于一体,可以根据拾取的震相信息得到记录到信号的台站个数、最远传播距离及接收能量等 3 个参数,并将其作为评价标准来确定最优工况。同时,该软件可以管理所有工况的枪阵尺寸、枪深、水深等信息,并绘制激发效果台站分布图(图 3)。

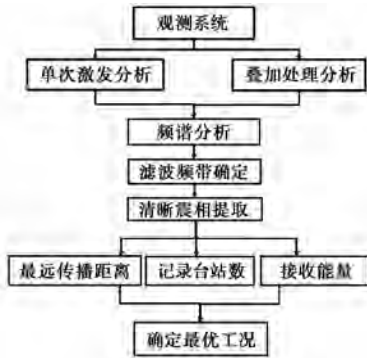


图2 最优工况处理流程

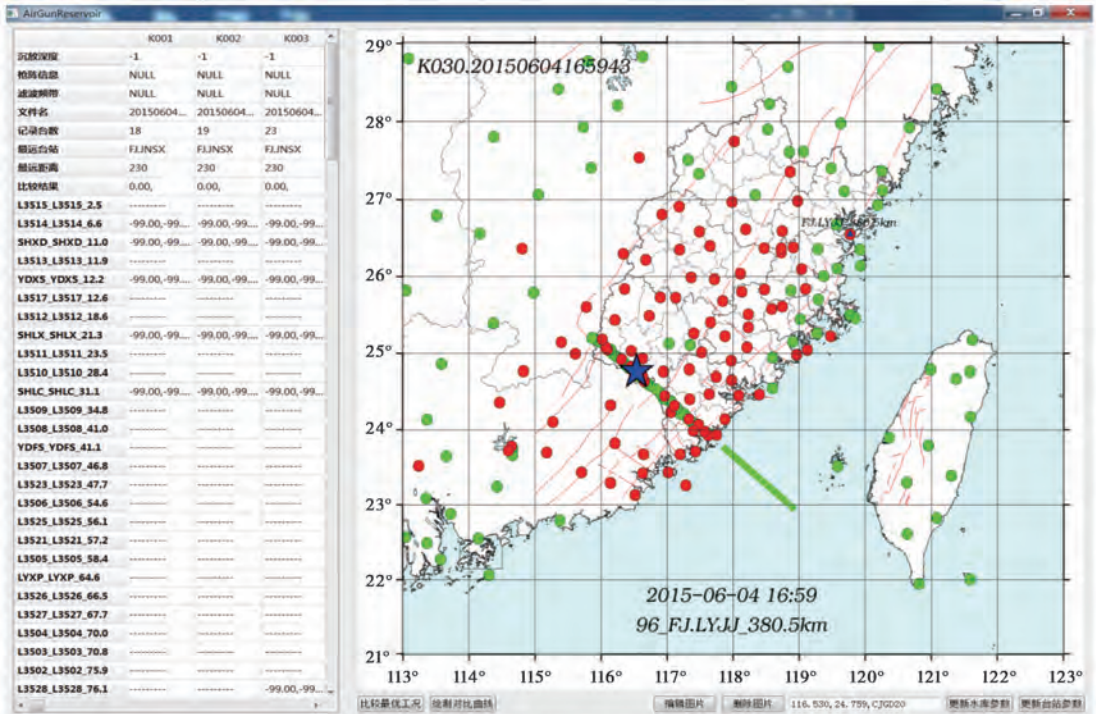


图3 最优工况处理软件显示界面

左侧为不同工况如 K01、K02、K03 的信息,如工况的沉降深度、枪阵尺寸、滤波频带、记录台数、最远传播距离等。右侧彩图显示工况激发时台网接收到信号的台站(红色圆圈)、未接收到信号的台站(绿色圆圈)、棉花滩水库的位置(蓝色五角星);下方第 1 行显示激发时间,第 2 行第 1 组数字表示记录到信号的总台数,大写英文表示接收到信号的最远台站名(福建_罗源鉴江),第 3 组数字表示从实验位置到接收到信号的最远台站的传播距离

3 实验结果

3.1 实验工况总览

棉花滩水库激发点浮台布设在水深 25m 处,浮台架设 4 杆单枪,通过调整枪阵的平面尺

寸、枪阵沉放深度等确定最优枪阵尺寸。根据 2014 年街面水库实验的经验, 先进行枪阵沉放深度 10m, 不同枪阵尺寸 8m×8m、8m×6m、8m×10m 的实验, 得到初定枪阵尺寸为 8m×8m; 然后进行枪阵尺寸 8m×8m、不同枪阵沉放深度 8、9、11m 的实验, 确定枪阵沉放深度为 9m; 最后进行枪阵沉放深度 9m, 不同枪阵尺寸 7m×7m、8m×8m、9m×9m 的实验, 确定枪阵尺寸为 7m×7m。最终确定实验的最优工况为水深 25m、枪阵沉放深度 9m、枪阵尺寸 7m×7m (表 1)。

3.2 实验工况激发效果

按照确定的最优工况进行气枪激发实验, 对气枪波形进行人工震相拾取、定位, 生成 PHASE 文件, 然后利用最优工况处理软件直接读取 PHASE 文件产出的记录台数、最远观测距离及接收能量等 (表 2)。由表 2 可见, 对于不同的枪阵沉放深度、枪阵尺寸而言, 无论是记录台数还是最远传播距离, 叠加 16 次后的激发效果明显优于单次激发。沉放深度 9m、枪阵尺寸 7m×7m 的工况 K08 信号传播距离最远。工况 K08 单次及叠加后的传播距离均最远, 这是因为单次激发的接收能量值最大, 故激发效果最好。因此, 棉花滩水库固定点重复激发采用枪阵沉放深度 9m、枪阵尺寸 7m×7m 的工况。

表 1 棉花滩水库实验工况

水深/m	沉放深度/m	枪阵尺寸	实验目的
25	10	8m×8m	初定枪阵尺寸
		8m×6m	
		8m×10m	
25	9	8m×8m	确定沉放深度
		10	
25	9	7m×7m	确定枪阵尺寸
		8m×8m	
		9m×9m	

注: “_”处为各个工况中较优者

表 2 棉花滩水库实验工况激发效果表

工况号	工况情况		记录台数		最远传播距离/km		接收能量
	枪阵尺寸	沉放深度/m	单次	叠加 16 次	单次	叠加 16 次	单次
K01	8m×8m	10	7	40	97	284	1.01
K02	8m×6m	10	5	36	21	284	0.85
K03	8m×10m	10	6	32	97	272	1.03
K04	8m×8m	8	5	36	41	230	1.09
K05	8m×8m	11	8	36	97	229	1.08
K06	8m×8m	9	10	67	97	284	1.16
K07	9m×9m	9	7	60	106	300	1.09
K08	7m×7m	9	7	60	109	314	1.17

3.3 固定点重复激发效果

通过上述工况实验激发效果分析可得到最优工况, 并确定出震源激发的最优条件。利用最优工况参数进行棉花滩水库定点重复激发实验, 分析每隔 10 次递增叠加的效果, 从而确定叠加效果与叠加次数间的关系。

将 10、20、30、……、300 次叠加结果进行统计, 得到传播的最远距离、记录台数随叠加次数变化结果 (图 4)。由图 4 可见, 最远距离随叠加次数的增加呈阶跃式上升, 且呈先上升较快、后较为缓慢的趋势; 叠加 1090 次时记录台数快速增加, 100150 次时缓慢增加, 160240 次时快速增加, 250300 次时增加较为缓慢。故随着叠加次数的增加, 传播距离和记录台数均逐步增加。

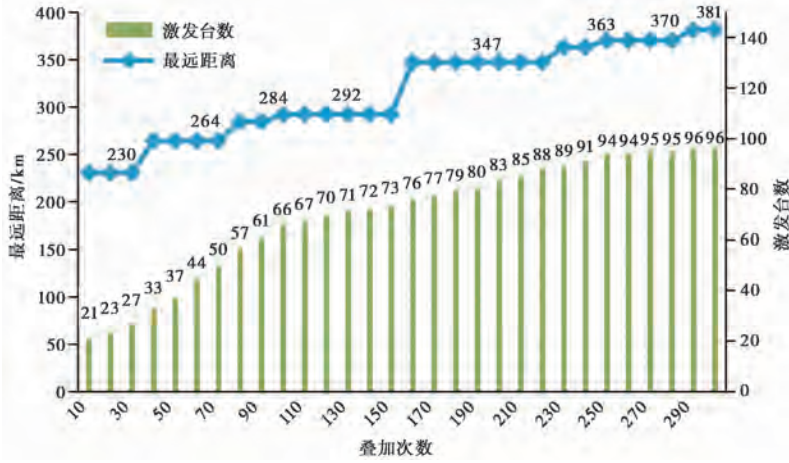


图 4 叠加效果与叠加次数间的关系

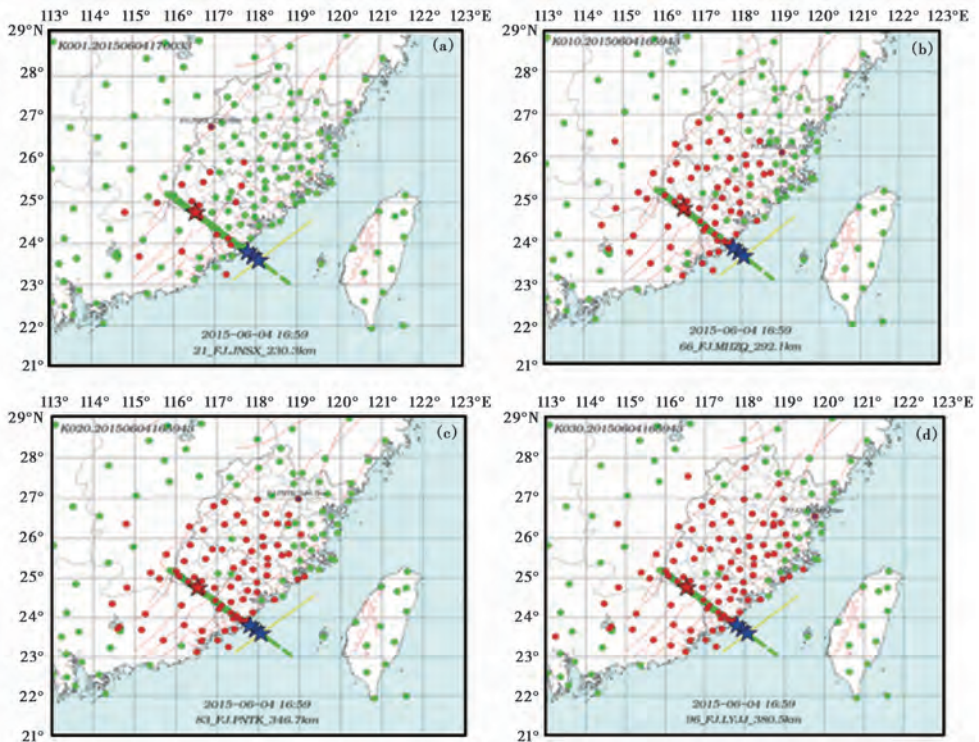


图 5 叠加效果随叠加次数的变化

红色圆圈为记录到气枪信号的台站;绿色圆圈为未记录到气枪信号的台站

(a) 叠加 10 次, 21 个台记录到清晰震相, 最远传播 230km; (b) 叠加 100 次, 66 个台记录到清晰震相, 最远传播 292km; (c) 叠加 200 次, 83 个台记录到清晰震相, 最远传播 347km; (d) 叠加 300 次, 96 个台记录到清晰震相, 最远传播 381km

应用最优工况处理软件,绘出叠加次数对应的叠加效果图(图5)。由图5可见,随着叠加次数的增加,叠加效果增强,即记录台站数增加,记录范围扩大。

4 结论

本文通过不同工况实验分析激发效果,确定棉花滩水库大容量气枪实验的最优工况,然后采用最优工况参数进行300次定点重复性激发实验,分析叠加次数与叠加效果间的关系。研究得出以下结论:

(1)通过不同工况激发实验,确定棉花滩水库最优工况为水深25m、枪深9m、枪阵尺寸7m×7m。

(2)棉花滩水库单次激发时,7个台站可以观测到信号,最远传播109km;固定点300次叠加时,96个台站观测到清晰震相,最远传播381km。因此,通过叠加既可以大大提高台站记录的信噪比,又可增大气枪实验的探测范围。

(3)通过对定点300次激发的每10次累计叠加结果进行分析发现,叠加1090次时激发效果快速增强,100150次时激发效果缓慢增强,160240次时激发效果快速增强,250300次时激发效果缓慢增强。由此判断,随着叠加次数的增加,传播距离和记录台数逐步增加。

通过确定最优工况不仅提高了定点激发效果,也为定点激发提供了最佳震源激发条件。通过分析叠加效果随叠加次数的变化,可使气枪震源激发实验以较少的激发次数达到最优的激发效果,从而达到经济、高效的目的。

参考文献

- 陈蒙、陈颢、王宝善,2014,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,博士论文,北京:中国地震局地球物理研究所。
- 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(11),27~31。
- 李绪宣、王建花、杨凯等,2012,海上深水区气枪震源阵列优化组合研究与应用,中国海上油气,24(3),10~16。
- 林建民、陈颢、黄建华,2008,基于人工震源的长偏移距地震信号检测和探测研究,博士论文,合肥:中国科学技术大学。
- 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。
- 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,11(4),112~121。
- 唐杰,2008,区域尺度深部探测中的人工源震源特性及信号检测研究,博士论文,合肥:中国科学技术大学。
- 赵明辉、丘学林、叶春明等,2004,南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析,地球物理学报,47(5),845~852。
- Brocher T M, Clayton R W, Klitgord K D, et al, 1995, Multichannel seismic-reflection profiling on the R/V maurice ewing during the Los Angeles region seismic experiment(larse), California, US Geological Survey, Open-File Report, 95~228.
- Fisher M A, Normark W R, Bohannon R G, et al, 2003, Geology of the continental margin beneath Santa Monica Bay, southern California, from seismic-reflection data, Bull Seism Soc Am, 93(5), 1955~1983.
- Okaya D, Stuart H, Stern T, 2002, Double-sided onshore-offshore seismic imaging of a plate boundary: "super-gathers" across South Island, New Zealand, Tectonophysics, 355(1-4), 247~263.

The study on optimizing the excitation condition of large volume air gun source in reservoir

*Chen Huifang*¹⁾ *Lin Binhua*^{1,2)} *Jin Xing*^{1,2)} *Wu Lihua*¹⁾ *Cai Huiteng*¹⁾

1) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

2) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract We developed an optimal condition processing software to evaluate the excitation effect of operating condition on the basis of artificial picking up seismic phase, and the statistics of recording station number, the farthest observation distance and energy received. The optimal conditions of Mianhuatan Reservoir are determined through the software as the water depth of 25m, pikes sink depth of 9m and pikes size of 7m×7m. At the same time, accumulative stacking results of every 10 times are analyzed in fixed-point excitation of 300 times. It is concluded that 10 to 90 times stacking has a rapidly rising excitation effect, the excitation effect of 100 to 150 times stacking is slowly rising, that for 160 to 240 times stacking increases rapidly and 250 to 300 times stacking excitation effect is rising slowly. With the times of stacking increase, the propagation distance and the number of record stations also increase gradually.

Key words: Optimum operating condition; Stacking analyzing; Excitation effect; Observation distance