

# 水体形状对陆地气枪激发信号的影响<sup>\*</sup>

胡久鹏<sup>1</sup>, 王宝善<sup>1</sup>, 陈 颢<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 分析比较4处不同形状水体气枪激发信号的主要特征, 得到水体形状对气枪激发波形影响的关系, 并利用数值方法模拟不同陆地水体中气枪激发的过程。研究表明: 不同水体形状对气枪信号存在一定程度的影响, 并且对高频信号成分影响较强, 对低频信号成分影响较弱。在进行的4组实验中, 马刨泉实验信号气枪能量转化为低频能量的效率高, 所激发信号波形尖锐。

**关键词:** 水体形状; 气枪震源; 数值模拟

**中图分类号:** P315.31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)04-0543-07

## 0 引言

近年来海洋勘探引入气枪震源作为陆地结构探测及介质变化监测的人工震源 (Chen *et al*, 2008; Wang *et al*, 2010)。随着云南宾川和新疆呼图壁气枪地震信号发射台站 (王彬等, 2015, 苏金波等, 2016) 的建立, 陆地气枪震源为区域尺度问题的地震学观测提供了有力的工具。陆地气枪震源通常是在一个水库或者人工水池中激发的, 相对于海洋环境, 陆地气枪的激发环境为尺度较小的有限水体。有限水体中存在的固液边界会对气枪信号造成一定的影响。林建民等 (2010) 讨论了陆地有限水体中气枪激发信号的子波特征, 分析了气枪震源沉放深度、工作压力等不同激发条件对气枪信号的影响, 陈蒙 (2015) 提出气枪所处水体的水位变化会影响激发信号的能量。由此可见, 了解陆地气枪震源的激发与传播机制, 对于应用气枪震源勘测地下精细结构与介质的细微变化具有重要意义。

陆地气枪与传统气枪的差别在于多了固液边界的影响。固液边界对气枪信号的影响可分为两种模式: 一是对气泡发育的影响, 二是对信号传播的影响。前者较为复杂, 本文仅做初步探讨。而固液边界对信号传播的影响则主要

体现在水体形状上。随着陆地气枪工作在全国的开展, 出现激发水体形状各不相同的情况, 不同形状陆地有限水体对气枪激发信号的影响成为亟需解决的问题。

为解决上述问题, 本文综合分析了北京房山区马刨泉、云南宾川县大银甸水井、水库和新疆呼图壁县人工水池4个陆地气枪实验 (Yang *et al*, 2013)。以上各个实验的水体环境相差很大, 各具代表性。利用各实验参考台站的数据, 对比分析不同水体形状情况下气枪激发信号的主要特征, 得到水体形状对气枪激发波形影响的关系。此外, 数值模拟是研究信号传播性质的有效方法, 可以规避实验中复杂的干扰因素, 唐杰等 (2009, 2011) 曾利用数值模拟的方法讨论了气枪信号对激发条件的响应。因此, 本文利用数值方法模拟不同陆地水体中气枪激发的过程, 作为对实验数据的补充验证。

## 1 数据选取及研究方法

选取北京房山牛口峪马刨泉实验 (简称马刨泉)、云南宾川大银甸人工井实验 (简称宾川水井)、云南宾川大银甸水库实验 (简称宾川水库) 和新疆呼图壁人造水池实验 (简称呼图壁水池) 进行分析。各个实验的水体形状描述如下:

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-04-11.

**基金项目:** 中央公益类科研院所基本科研业务专项 (DQJB16A01)、国家自然科学基金国家自然科学基金资助项目 (41674058)、地震行业专项 (201508008) 和云南省陈颢院士工作站 (2014IC007) 联合资助。

- (1) 马刨泉：天然水池，坡度较陡。水面开口近似为椭圆形，长轴约 37 m，短轴约 25 m，水深约 15 m。
- (2) 宾川水井：人工井，井壁垂直。直径约 5 m，井深约 20 m。
- (3) 宾川水库：中型水库，水面开阔。气枪位置距离岸边一侧约 50 m，距离另一侧约 2 000 m，水深约 20 m。
- (4) 呼图壁水池：人工水池，坡度较缓。水

面直径约 100 m、水池底直径约 20 m，池深约 20 m。

实验选取 Bolt 公司生产的 Long Life 气枪，实验时工作压力均设置为 15 MPa，马刨泉实验和宾川水井实验采用单枪激发，宾川水库实验和呼图壁水池实验采用气枪组激发。实验所用接收仪器为 CMG-40T 和 Reftek130 数采，采样频率为 100 Hz。在实验过程中，均在气枪点附近架设参考台站。各个实验的详细信息见表 1。

表 1 陆地有限水体气枪实验参数  
Tab. 1 Parameters for airgun experiments in limited water on land

实验地点	水体形状	水体参数/m <sup>2</sup>	气枪容量/in <sup>3</sup>	激发压力/MPa	沉放深度/m	炮检距/m
马刨泉	天然水池	20 × 20	1 × 2 000	15	12	950
宾川水井	人工水池	5 × 20	1 × 2 000	15	12	20
宾川水库	水库	2 000 × 30	4 × 2 000	15	15	40
呼图壁水池	人工水池	100 × 20	6 × 2 000	15	15	50

气枪信号可以分为压力脉冲和气泡脉冲。压力脉冲是较高频信号，为气枪激发时高压气体瞬间冲击水体产生。气泡脉冲是较低频信号，为气枪释放的气体形成的气泡震荡产生。本文将选取参考台站的数据进行分析，讨论压力脉冲和气泡脉冲的特征。

常用的数值模拟方法包括有限差分法、有限元法、伪谱法和谱元法等。其中谱元法 (Tromp *et al.*, 2008) 是有限元与伪谱法结合的产物，具有计算速度较快和精度较高的优点，近年来成为地震学数值模拟的重要工具。其程序提供外部接口，可以借助第三方软件进行建模的工作，得到高质量的网格，保证计算的精度。本文用谱元法进行数值模拟，得到水体形状与气枪信号特征的一般规律。

2 实验结果分析

2.1 气枪信号频谱特性

我们从参考台记录数据中截取气枪的激发信号。为了避免干扰因素的影响，只选取某一较短时间窗口内的实验数据，得到实验记录数据如下：马刨泉水池 30 条，宾川水井 16 条，宾川水库 23 条，呼图壁水池 23 条。各组实验信号具有很高的信噪比和极好的相关性 (图 1)。

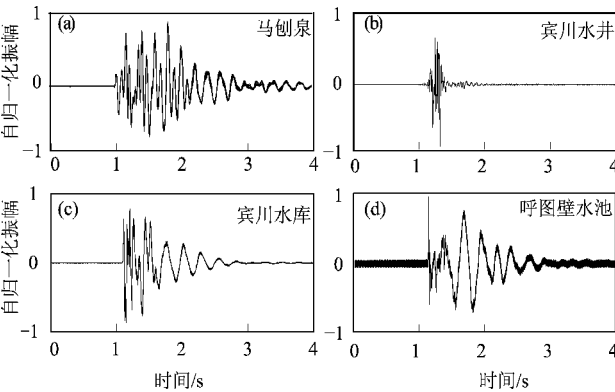


图 1 自归一化的各实验多次气枪信号  
Fig. 1 Self-normalized multiple airgun signals for each experiment

由于各实验的具体实验条件不同，因此对所有数据进行自归一化处理以方便讨论。从图 1 中可以看到，气枪信号的重复性非常好。马刨泉实验的接收台站距离震源最远，气枪信号可能经过地层反射等影响，持续时间较长，波形较复杂 (图 1a)；呼图壁气枪信号压力脉冲 (1 s 处) 与气泡脉冲 (1 ~ 3 s 处) 很明显 (图 1d)；宾川水库气枪实验压力脉冲较为复杂，可能信号经过水底的多次反射导致 (图 1c)；宾川水井气枪实验信号中没有低频的成分 (图 1b)。得益于气枪信号的高相关性，我们将各实验数据多次叠加求平均作为标准信号。接着，对标准波形数据进行频谱分析 (图

2)。图2a、b分别为单枪激发的马刨泉实验和宾川水井实验。马刨泉实验信号高频部分衰减很快，接收信号的频率在25 Hz以下。宾川水井实验信号低频成分很少。

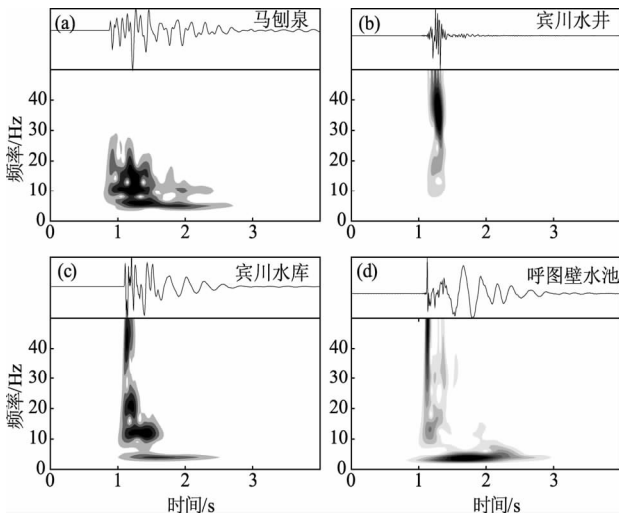


图2 气枪实验参考台站信号频谱图

Fig. 2 Spectrograms of signal of reference stations in four airgun experiments

图2c、d分别为宾川水库实验和呼图壁水池实验。此2组实验为在较大体积水体中使用气枪组进行的激发实验，气泡脉冲较为完整。参考Johnson (1994) 等关于气泡震荡周期的计算：

$$T = 2\pi r_0 \sqrt{\frac{1}{3\gamma p_0}} \quad (1)$$

式中： $r_0$ 为气泡平衡状态下半径，单位为m， $\gamma$ 为热力学常量，通常取值1.13， $p_0$ 为气泡深度处静水压力，单位为Pa。为方便计算，本文按单条枪的情况来估算气枪气泡的震荡周期。我们取气枪容积2 000 in<sup>3</sup>，气枪深度10 m，可得 $T$ 约为0.3 s，对应频率约3~4 Hz。也就是，图2中5 Hz以下的信号为气泡脉冲信号。图2c、d中，均包含气泡脉冲信号和较高频的压力脉冲信号，但压力脉冲信号有明显差异。宾川水库实验波形比较复杂，可能由水库底部复杂形状造成；而呼图壁水池为形状对称的人工水体，信号经水底的反射路径简单，波形相对简单。

## 2.2 气枪信号高频性质

为研究不同水体形状对高频压力脉冲的影响，我们对标准信号进行拐角频率为8 Hz的高通滤波后进行比较分析，发现各实验差异较大（图3）。

呼图壁水池实验（图3d）的高频信号成分持续时间很短，其余3组实验（图3a~c）持续时间较长。宾川水库实验信号（图3c）高频成分存在等振幅的3~4个波峰，印证了信号可能经过水底边界的多次反射。

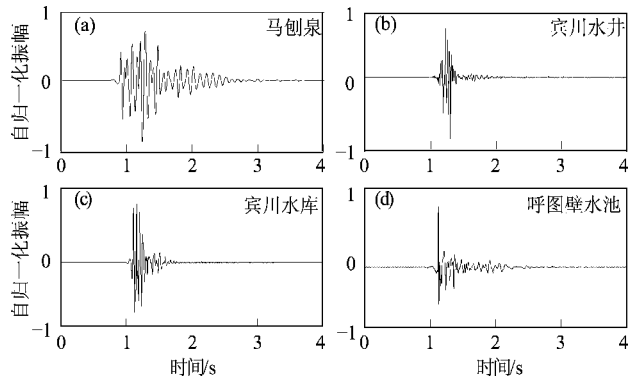


图3 参考台站信号高通滤波后波形

Fig. 3 Waveforms of signal of reference station after high-pass filtered

结合信号的频谱图，对比图2中各个信号8 Hz以上的部分可以发现：除马刨泉实验数据（图2a）炮检距较远、高频部分衰减很快外，其余实验的压力脉冲信号集中在30~40 Hz，这是由于压力脉冲信号主要取决于所用气枪的规格及工作条件。马刨泉实验和宾川水库实验的信号具有较强的10 Hz以及20 Hz信号的成分（图2a、c），而宾川水井实验与呼图壁水池实验此频段信号很弱（图2b、d）。结合实验场地条件（宾川水库及马刨泉水池由自然条件形成，水底界面复杂；而呼图壁水池和宾川水井为人工水体，水体形状规则），可以推断出气枪实验中10 Hz及20 Hz信号部分为不规则水体形状所引起。

## 2.3 气枪信号低频性质

低频的气泡脉冲信号是陆地气枪震源应用的主要信号。我们对4个实验的标准信号进行带通滤波（2~8 Hz），得到低频的气泡脉冲成分，如图4所示。

宾川水井实验中低频成分很弱（图4b），马刨泉实验信号具有2个明显高峰（图4a），应是气枪信号在传播过程中经过了界面的反射。宾川水库实验和呼图壁水池实验相比，宾川水库实验信号振幅较小，主峰振幅与次主峰差异较小（图4c）；呼图壁水池气枪信号振幅较大，主峰突出，波形尖锐（图4d）。

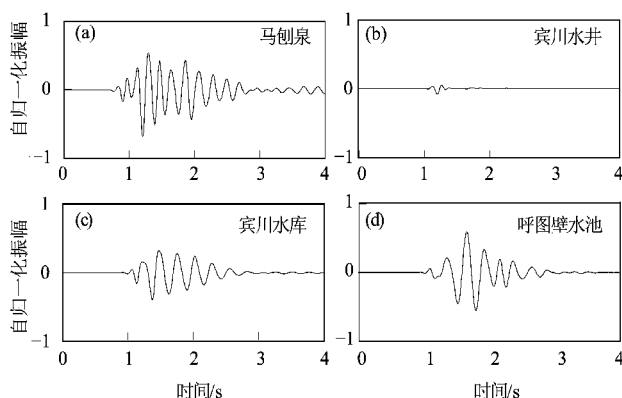


图4 参考台站带通滤波后波形

Fig. 4 Waveforms of reference station after band-pass filtered

由于实验条件差异,我们选取信号绝对振幅  $A$ 、信号相对振幅  $a$ 、优势频率  $F$  和相关系数  $C$  来描述信号的特征。各个参数计算方法如下:

(1) 绝对振幅  $A$  表示气枪信号能量的大小,取参考台站接收信号经距离补偿到炮检距为 50 m 后的结果。各个实验炮检距不同,所用气枪的个数不相同,单纯比较绝对振幅不确定性较大。

(2) 相对振幅  $a$  代表气泡脉冲能量占气枪释放的全部能量的比例,本文  $a$  取为炮检距 50 m 处,气泡脉冲振幅相对于压力脉冲振幅的比值。此处  $A$  和  $a$  的计算要去除距离衰减的影响。

(3) 优势频率  $f$  可以取非压力脉冲信号的频率组分,相关系数  $c$  取为各个实验的原始信号与标准信号的相关系数平均值。

(4) 信号特征  $\Omega$  代表信号的聚拢程度。由波形的上包络线  $\Omega_1$  和下包络线  $\Omega_2$ ,得到平均的包络线  $\Omega_0$ ,并取  $\Omega_0$  的高与宽的比值作为波形的形状参数  $\Omega$ 。对于马刨泉实验数据只按波形前半部分计算以去除反射的影响。

计算得到各个实验的具体参数如表 2 所示。

表2 各实验的气枪信号波形参数

Tab. 2 Waveform parameters of airgun signal for each experiment

实验名称	绝对振幅 $A$ ( $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	相对振幅 $a$	频率 $F$ Hz	相关系数 $C$	波形参数 $\Omega$
马刨泉	0.5	0.763	5/10/15/45	0.990 77	1.42
宾川水井	3.9	—	0/38	0.996 29	—
宾川水库	1.86	0.447	4/12/20	0.996 42	1.05
呼图壁水池	1.7	0.719	4/30	0.995 05	1.33

由表 2 可见,所有信号的相关性非常好,相关系数在 0.99 以上。这说明气枪对近场环境的破坏很小(王宝善等, 2011)。除宾川水井实验没有气泡脉冲外,其余 3 组实验的主频均在 4 ~ 5 Hz。气枪组激发信号的主频与单个气枪激发信号的主频相差不大,说明气枪组激发的形式不会明显改变气枪信号的主频特征。

信号的绝对振幅变化规律不明显,这可能是由于距离补偿计算时引入了较大的误差。而宾川水井实验的记录振幅比宾川水库实验大,这是由于宾川水井实验中气枪能量释放的时间远小于宾川水库实验,使得水井中实验的能量转化率更高,造成 1 枪信号比 4 枪信号产生的绝对振幅更大。

气泡脉冲信号的相对振幅  $a$  与形状参数  $\Omega$  则随水体形状的不同发生较显著变化。随着水体侧壁从陡峭(马刨泉)变得平缓(呼图壁水池),直至一边侧壁完全开放(宾川水库),气泡脉冲的相对振幅  $a$  和形状参数  $\Omega$  的值均变小,说明气枪能量的转换效率降低,气枪气泡脉冲信号越来越不尖锐。

### 3 数值模拟验证

作为对实验的补充及验证,本文采用谱元法对陆地气枪激发实验进行了模拟。由于宾川水井实验没有形成完整的气泡发育,此处不再模拟。本文采取以下措施简化模型:用单一点源模拟气枪震源;固体介质简化为均匀介质;规则化水体形状,只考虑水体主要特征的二维模拟。

3 组实验都建立大小为 10 000 m × 500 m 的模型,水体均设在模型中央上部。以短轴 10 m、长轴 20 m 的椭圆形面的水体模拟马刨泉水池,以上底 2 000 m、下底 1 500 m、高 20 m 的直角梯形截面水体模拟宾川水库,以上底 100 m、下底 20 m、高 20 m 的等腰梯形截面模水体模拟呼图壁水池。震源位于水面下方 15 m 处,震源时间函数取 Ricker 子波,主频分别设为 5 Hz、8 Hz、10 Hz 以及 20 Hz,具体模型形状及详细参数见图 5。模型采用 Gmsh 建立并生成四边形网格,网格大小 5 m。水体中纵波速度设置为  $V_p = 1\,000 \text{ m/s}$ ,固体介质中纵波速度设置为  $V_p = 3\,000 \text{ m/s}$ ,横波速度设置为  $V_s = 1\,700 \text{ m/s}$ ,密度设置为  $2\,900 \text{ kg/m}^3$ 。接收台站

置于震源右侧 100 m、深 80 m 处。取震源主频为 4 Hz 与 20 Hz 时的模拟结果，经对比得到图 6。

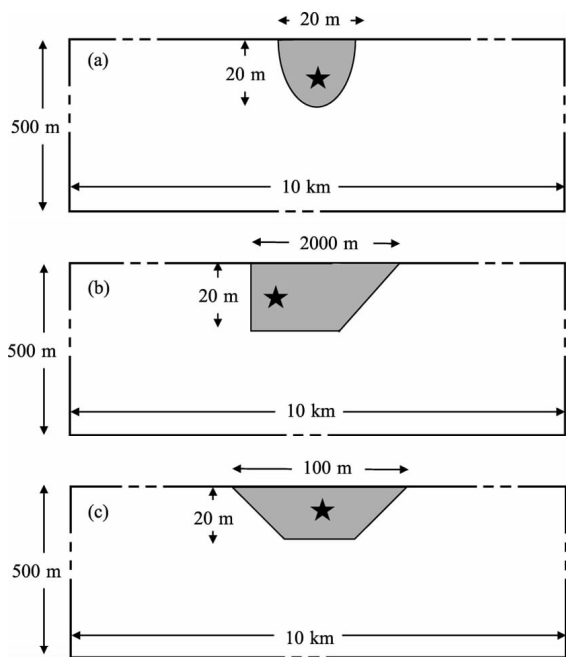


图 5 马刨泉 (a)、宾川水库 (b) 和呼图壁水池 (c) 数值模拟实验水体模型示意图  
Fig. 5 Water shape models of numerical simulations for MPQ Pool (a), DYD Reservoir (b) and HTB Pool (c)

图 5 中固体介质用白色表示，水体用灰色表示，五角星为震源位置。需要注意的是，示意图比例不代表模型实际比例，模型尺寸以图中标注的长度单位为准。

由图 6 可以看出，在震源主频为 4 Hz 时，各个模型接收到的波形十分相似，仅有振幅上较小

的差异。在震源主频为 20 Hz 时，各个实验信号差异变大。值得注意的是，主频为 20 Hz 时，以 Ric-ker 子波为震源时间函数的气枪信号包含 20 Hz 以下的成分。当对主频 20 Hz 的信号进行滤波后，得到与图 6a 相似的结果。这一现象说明，在本文研究的水体尺度内，水体形状对低频的气枪信号（8 Hz 以下）影响没有对高频气枪信号（10 Hz 以上）影响明显。其原因可以归结于气枪信号的波长与水体尺度的相对关系。对于主频为 4 Hz 的信号，信号波长在 300 m 左右，大于或远大于水体的垂直尺度，其信号对水体形状敏感度不高。而主频提高时，信号波长减小，其信号对水体形状敏感度变高。

随着信号主频的增加，不同水体形状对信号的影响变大。但是不同的水体形状对不同频率的信号敏感度变化并非线性。我们对于不同主频的信号，进行窄带滤波后，整理得到其各项参数，见表 3。

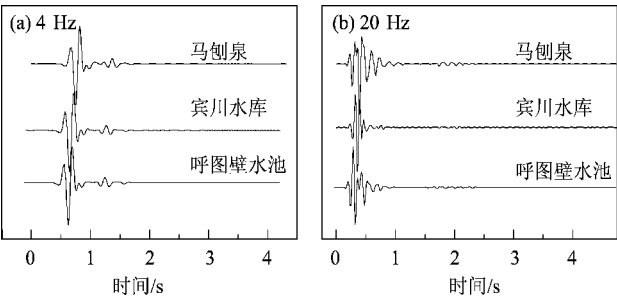


图 6 马刨泉水池、宾川水库和呼图壁水池在主频为 4 Hz 和 20 Hz 时的模拟波形图  
Fig. 6 Waveforms of simulation with main frequency at 4 Hz and 20 Hz for MPQ Pool, DYD Reservoir and HTB Pool

表 3 不同震源主频下模拟波形的性质

Tab. 3 Parameters for simulation waveform for different source at main frequency															
实验名称	3 Hz			4 Hz			8 Hz			12 Hz			20 Hz		
	$A$	$F$	$\Omega$	$A$	$F$	$\Omega$	$A$	$F$	$\Omega$	$A$	$F$	$\Omega$	$A$	$F$	$\Omega$
马刨泉	0.81	4	0.8	0.72	7	0.75	1	16	0.72	1	17	0.89	0.56	19	1
呼图壁水池	0.94	4	0.93	0.89	7	0.96	0.99	15	1	0.79	17	1	0.76	32	0.71
宾川水库	1	4	1	1	7	1	0.63	14	0.92	0.55	18	0.96	1	34	0.49

由表 3 可见，每组实验接收台站处的频率与震源所设置的主频并不相同。对于较低频率如 3 ~ 4 Hz 的信号，不同水体的接收信号频率相似；对于 8 Hz 和 12 Hz 的信号，接收信号频率出现一些差

异；对于 20 Hz 的信号，接收信号频率差异很大。一方面这是由于数值模拟水中震源的情况下，震源时间函数加载在速度势函数上，这样经微分运算得到的速度信号频率会有变化。另一方面由于

模拟中气枪震源时间函数为 Ricker 子波, 为宽频信号。模拟结果中接收信号主频的变化, 反映了水体对不同频率的信号有不同的放大作用。

从表中可以看出, 对于不同主频的信号, 不同的水体对其影响不同。对于低频的信号 (3 Hz 与 4 Hz), 因为不同水体模型信号十分相似 (图 6a), 各信号的形状参数  $\Omega$  主要取决于信号的振幅。当震源主频为 8 ~ 12 Hz 时, 马刨泉水池模型接收的信号振幅最大, 而呼图壁水池模型的形状参数  $\Omega$  的值最高, 此时的结果与实际实验相符。而随着震源频率的增加, 接收信号的性质变得不清晰。

## 4 解释和讨论

陆地有限水体中与海洋中的气枪实验存在着显著不同, 必须考虑固液界面的影响。本文通过综合对比发现, 马刨泉实验中气枪激发信号的相对振幅最大, 对应的数值模拟实验中各项参数也较为突出。另外我们发现水体形状对不同频率的信号影响不同, 这取决于信号的波长与水体尺度的相对大小。对于低频的信号, 信号波长远大于水体尺度, 信号对水体形状敏感度较低。随着频率的增加, 信号波长变小, 受水体形状的影响变大。在表 3 中, 震源主频 20 Hz 的马刨泉实验信号波形主频在 19 Hz, 与其他实验变化规律不同, 这可能是由于不同尺度的水体具有不同的本征频率, 对特定频率的信号具有放大作用。

值得指出的是, 本文各实验中的气枪容量并不相同。实验中所用到的气枪组, 可视为不相干枪阵 (李孝宾等, 2016), 其效果可视作对信号的叠加, 仅增强了信号的能量, 而对信号波形形态的影响较小。经过本文的补偿计算调整后, 不同容量气枪对本文结论的影响不显著。

虽然谱元法的数值模拟结果与实际实验吻合较好, 但依然存在一些差异。这可能是由实际实验中复杂的实验环境造成的。首先实际实验水体形状比较复杂, 例如宾川水库, 其底部极不规则; 其次, 实际中固液界面并非单一介质, 而是双相介质层; 再次实际气枪激发过程复杂, 而模拟实验中只以简单的 Ricker 子波代替。

前文提到水体形状可对气枪气泡的发育造成影响。从宾川水井实验结果可知, 水体过小可能导致气枪不能激发低频信号或者转化为低频信号的效率很低。考虑到水是可压缩液体, 因此有体积模量:

$$K = -\frac{dP}{dV}V_0 \quad (2)$$

式中:  $K$  是水的体积模量;  $V_0$  是水的体积;  $dP$  和  $dV$  分别代表压力和体积的变化量, 可以计算出气枪激发所需要最小的水体体积。取  $K$  为  $2.22 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>, 压力变化约为 15 MPa, 气泡半径为 1 m (2 000 in<sup>3</sup> 的气体在静水压力下的半径), 可以得出  $V_0$  为 78 m<sup>3</sup>, 对应半径约 7 m, 这是为保障气枪气泡脉冲的完全发育所选取水体的最小体积半径。若水体体积小于这个值, 气枪的气泡发育会受到界面的影响, 导致激发效果较差。

## 5 结论

将气枪震源用作陆地主动震源, 实现了气枪激发环境从半无限空间水体到有限水体的转变。由于固液界面的存在, 陆地有限水体气枪信号具有独特的波形形态。本文通过分析实际气枪激发实验的数据, 结合数值模拟实验, 从绝对振幅、相对振幅、频率以及形状参数等几个方面, 综合分析了水体形状对陆地大容量气枪激发信号的影响。研究发现, 不同水体形状对信号存在一定程度的影响, 并且不同水体形状对不同频率的信号具有不同程度的影响。在几十米的水体尺度内, 陆地有限水体对高频的脉冲信号影响较强, 而对低频的气泡脉冲信号影响较弱。陆地气枪信号形成完整的气泡脉冲需要足够的水体体积, 而在水体体积足够大的情况下, 水体边界越陡, 气枪能量转化为低频能量的效率越高, 所激发信号波形越尖锐, 而这也是陆地有限水体气枪应用的理想水体激发环境。

### 参考文献:

陈蒙. 2015. 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[J]. 国际地震动态, (3): 41 - 42.

- 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. 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.
- 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.
- 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[J]. 中国地震,25(1):1–10.
- 唐杰. 2011. 大容量气枪激发与场地条件的耦合效果研究[J]. 地球物理学进展,26(5):1652–1660.
- 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.
- 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.
- JOHNSONDT. 1994. Understanding air – gun bubble behavior [J]. *Geophysics*, 59(11):1729–1734.
- TROMP J, KOMATTISCH D, LIU Q. 2008. Spectral – element and adjoint methods in seismology [J]. *Communications in Computational Physics*, 3(1):1–32.
- WANG B, YANG W, YUANS, *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.
- YANG W, WANG B S, GE H K, *et al.* 2013. Characteristics and signal detection method of accurately controlled routinely operated signal system [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 37(1):50–55, 69.

## The Influence of Water Shape on Land Airgun Triggered Signals

HU Jiupeng<sup>1</sup>, WANG Baoshan<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>

(1. *Key laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(2. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China*)

### Abstract

We analyzed the data of four airgun experiments in different water shapes to obtain the influence relationship of different water shapes on waveform of airgun and carried out corresponding numerical simulations to simulate the process of airgun exciting in different water shapes. We find that water shape has an influence on airgun triggered signals. The influence on high frequency is strong but on low frequency is weak. Among our four experiments, the MPQ Pool experiment has highest energy transform efficiency and a sharp waveform.

**Keywords:** water shape; airgun source; numerical simulation