

杨宸, 刘怀山, 赵明鑫, 等. 宽频立体枪阵优化设计[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 85-92.

YANG Chen, LIU Huaishan, ZHAO Mingxin, et al. Optimization design of the broadband stereo gun array[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(10): 85-92.

宽频立体枪阵优化设计

杨宸¹, 刘怀山^{1,2*}, 赵明鑫¹, 杨熙镭¹, 李枫林¹, 张罗成¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国海洋大学海底科学与探测教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要:在海洋油气勘探这一过程中,震源设计是关键环节,其性能的优劣直接影响采集信号的质量。气枪以其质量可靠、组合灵活、安全环保等优势成为海洋勘探领域应用最广泛的激发震源,然而,随着勘探环境的复杂化,平面阵列的激发子波难以满足高分辨率勘探需求。因此,在立体阵列的基础上,分析不同容量气枪子波信号与时间关系,通过优化沉放深度,使不同容量单枪激发产生的振幅在接收时同相叠加,达到拓宽频带和压制陷波效应,进而改进震源的性能。将优化的立体阵列与常规阵列进行属性对比,证明宽频立体气枪阵列拥有更强的振幅能量和更宽的有效频带,可明显压制陷波效应,对复杂地质目标有较好的识别效果。

关键词:宽频; 气枪震源; 立体阵列

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.150

0 引言

21 世纪以来,随着海洋强国战略部署,海洋地震勘探逐渐成为热门领域,震源设计是影响勘探结果的重要因素。海洋地震勘探的震源有很多种,包括电火花震源、空气枪震源和炸药震源等,其中,空气枪震源以其安全环保、可回收利用、性价比高等优势,成为了海洋地震勘探中应用最广泛的震源^[1]。

在气枪震源应用的初期多用单枪作为激发震源,但是单枪震源激发产生的能量弱,难以穿透较深地层,不利于对深层岩性的信息接收。GILES^[2]在陆地炸药震源组合的基础上提出了气枪震源进行组合激发,将多个气枪组合形成容量更大、激发能量更强的相干枪;SAFAR^[3]提出将多个容量相同的气枪同时激发,利用相干枪能量叠加提高气枪性能的方法;PARKES 等^[4]在单个相干枪的基础上将不同容量的相干枪组合在一排成调谐阵列;LAWS

等^[5]基于调谐阵列改进把多个气枪调谐阵列排列组合,以此反映更深层的地质模型。国内在气枪阵列设计方面也出现了很多新理念。陈浩林等^[6]基于气枪理论实现了子波数值模拟;李绪宣^[7]对气枪平面阵列和立体阵列进行了初步属性对比;王建花等^[8]对多子阵气枪震源组合设计优化,取得更理想的子波波形;唐松华等^[9]针对四子阵立体枪阵的不同排列方式进行优选,在中生界深层地震反射取得较好应用;吴志强等^[10]在此基础上开展了针对性的沉放深度试验,形成一套统一的数据处理流程;张鹏等^[11]对气枪平面阵列进行对称设计,能量在各个方向均匀辐射,形成点震源的激发效果;杨博等^[12]采用上下源组合的思想设计立体枪阵,并与平面阵列对比,显示延迟激发立体阵列的优越性;祁江豪等^[13]针对大容量气枪激发信号主频低的特点,缓解了高速屏蔽层对地震波的阻滞作用。以上研究从多方面对气枪震源性能进行了分析,取得了一定的效果,但是针对中深层复杂地质体的高穿透能力和高分辨率的宽频气枪阵列仍需深入研究。

对气枪阵列激发地震子波的质量评价通常根据地震子波频谱进行描述^[3]。低频信号能穿透更深的地层,而高频信号能识别更薄的地层。因此,拥有更宽的频带有利于取得更高质量的数据,增加的低频信号削弱了子波旁瓣,使振幅信息更加真实准

收稿日期: 2022-05-11

资助项目: 国家自然科学基金(91958206)

作者简介: 杨宸(1997—),男,硕士,主要从事海洋地球物理勘探方面的研究工作. E-mail: 1057176030@qq.com

* 通讯作者: 刘怀山(1962—),男,博士,教授,主要从事海洋地球物理勘探数据采集方面的研究工作. E-mail: lhs@ouc.edu.cn

确^[14], 扩宽高频能提高子波分辨率。平面阵列子波信号通常难以兼顾低频和低频能量。气枪压力大小影响产生子波的频宽, 压力大的单枪产生低频, 压力小的单枪产生高频。在立体枪阵中, 根据不同容量单枪激发子波传播差异, 不同容量的单枪按照不同深度排列, 结合不同容量单枪激发子波信号到达主峰值的时间关系, 使子波到达主峰值时间长的单枪沉放深度深, 子波到达主峰值时间短的单枪沉放深度浅, 致使所有单枪产生的子波在同一时刻到达主峰值, 使得能量叠加, 激发的子波能量兼顾了高频和低频, 拓宽了子波频带, 提高了气枪子波的能量穿透能力和分辨率。

1 宽频子波原理

气枪震源在不断地尝试更新中得到发展, 但是大量的现场试验耗资巨大, 基于气枪子波理论来设计震源模型模拟信号是气枪震源设计的主要思路。为了满足更加复杂的气压条件, 基于范德瓦尔斯(范式)非理想气体方程建立气枪模型^[15]:

$$\left(P_g + \frac{m_g^2 \alpha}{V_g^2}\right)(V_g - m_g \beta) = m_g R_g T_g \quad (1)$$

式中: P_g 为气室压力, Pa;

V_g 为气枪容量, 单位为 cu.in(1 cu.in=1.67×10⁻⁵ m³);

T_g 为气室温度;

R_g 为普适气体常量;

m_g 为气室内气体物质质量;

α 、 β 为范德瓦尔斯常数, $\alpha=0.1404 \text{ m}^6 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-2}$, $\beta=3.764 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$, 该结果是由空气的主要组成成分——氮气和氧气各自的修正量值以及二者在空气中的大致比例(4:1)计算得来的^[16]。

实际情况中气枪激发时的内部压力过大, 理想

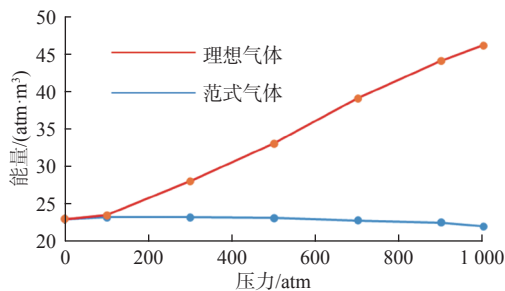


图1 理想气体方程和范氏气体方程在不同压强下对比
Fig.1 Comparison between ideal gas equation and the van der Waals gas equation at different pressures

气体方程无法准确反映压强及容量关系, 范式非理想气体方程有效解决了这个问题(图1)。

影响激发地震子波频带宽度的参数主要有气枪容量、气枪沉放深度以及枪阵组合方式。气枪阵列由于气枪容量的不同组合而导致子波主脉冲到达峰值的时间延长^[16]。根据气泡振荡理论, 空气枪内储存的高压气体在海水中释放的瞬间产生气泡, 气泡初始时体积小、气泡内部压强大; 随着时间推移, 气泡向外膨胀, 体积变大, 内部压强也变小。当气泡膨胀到内部压力小于外部海水压力时, 气泡由于力的作用开始收缩, 在不断地收缩过程中, 气泡内部压力又开始大于外部海水压力, 由此气泡又开始膨胀, 循环往复; 气泡膨胀收缩过程会产生压力波, 压力波在水中传播形成了空气枪震源子波^[17]。气泡在第1次膨胀过程中形成的子波即为主脉冲, 气泡体积膨胀到最大时产生的振幅能量为主峰值, 之后气泡振荡生成的子波为气泡干扰信号。

上述物理过程可以用海水势函数 $\phi(r, t)$ 来描述, 表示的波动方程为:

$$\Delta^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{2c^2} \left[\frac{d}{dt} (\Delta \phi)^2 + \frac{\partial}{\partial t} (\Delta \phi)^2 \right] \quad (2)$$

式中: c 为水中声波速度, m/s;

t 为时间, s;

r 为水体质点到气泡中心的距离, m。

在海水内的气泡运动过程中, 声波在水中的传播速度远大于质点的运动速度^[18], 方程中声波能量对势函数影响占较大比重, 因此方程右边视为零, 进一步通过势函数描述质点运动速度, 其与质点的振动的时间(t)以及质点与气泡中心点的距离(r)存在函数关系。则方程变为常规运动方程:

$$\Delta^2 \phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3)$$

质点在振荡的过程中受到的压力 $p(r, t)$ 可由通过流体密度表示压力关系的努贝利方程得出

$$p(r, t) = p_0 - \rho \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m³;

p_0 为静水压力, Pa。

为了方便计算, 将公式(4)用压力差 $\Delta(a)$ 的概念来表示, 即气泡内部压力同气泡外部压力的差值:

$$\Delta(a) = \frac{1}{\rho} (p_a - p_0) \quad (5)$$

式中: p_a 和 p_0 分别为气泡内、外部压力。

$\Delta(a)$ 较小时产生高频, $\Delta(a)$ 较大时产生低频,控制压力差 $\Delta(a)$ 能有效增加产生子波的频宽。

气枪初始激发时,产生的气泡被海水包围,可以视为气泡外充斥着无限的流体。同时,假设气泡运动过程为理想的均匀过程,气泡始终保持形状为球体。气泡起始半径为 a_0 。由此,气泡内压 p_a 可用绝热方程通过气泡半径 $a(t)$ 表示:

$$p_a = k \left[\frac{4\pi}{3} a^3 \right]^{-\gamma} \quad (6)$$

式中: k 为绝热过程常量;

γ 为比热容,取值为1.0~1.4。

势函数方程的初始条件和边界条件可给出:

$$\Delta a(t)|_{r=a(t)} = - \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$a'|_{r=a(t)} = \phi_r \quad (8)$$

$$a(0) = a_0 \quad (9)$$

$$\phi(r,0)|_{r>a_0} = 0 \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial \phi(r,0)}{\partial t} \right|_{r>a_0} = 0 \quad (11)$$

式(8)中 a' 为气泡壁的速度,通过初始条件和边界条件解出势函数方程,得到通过气泡半径 $a(t)$ 表示的非线性微分方程:

$$\left(\frac{\partial a}{\partial t} - c \right) \left[a \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial a}{\partial t} \right)^2 - \Delta(a) \right] - \frac{\partial^3 a}{\partial t^3} + \frac{1}{a} \frac{\partial [a^2 \Delta(a)]}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

为了方便计算,将公式(12)进行无量纲化处理,进一步得到:

$$\left(\frac{\partial a}{\partial t} - c \right) \left[a \frac{\partial a}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial a}{\partial t} \right)^2 - a^{-3\gamma} + 1 \right] - \left(\frac{\partial a}{\partial t} \right)^3 - (3\gamma - 2) a^{-3\gamma} \frac{\partial a}{\partial t} - 2 \frac{\partial a}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

由此,关于气泡质点运动的问题即可通过 c 、 a_0 、 a' 、 γ 的值来求取,将公式(13)的计算结果针对量纲进行反变换,得到气泡半径与时间的数量关系,再引入压力差公式以及气泡内压同气泡半径的关系式,最后可获得气枪的子波波场信号^[19]。

2 立体枪阵子波特性

在海洋勘探中,气枪平面阵列以其布局灵活、性能稳定受到广泛应用,但是平面阵列激发的子波

效果受气枪沉放深度影响。平面阵列沉放深度较浅时,海水压强小,气枪内气体得到较快释放,子波拥有更丰富的频率,不易产生气泡干扰,但是能量在向深层传播过程中会受到更多的削弱,对深层地质情况的分辨能力下降。反之,平面阵列沉放深度较深时,海水压强大,气体释放慢,子波频率受限,气泡振荡影响明显,高频信号受到陷波作用被压制,频率谱频带变窄,也会影响子波分辨率^[20]。

为了解决这个难题,立体气枪震源应运而生。当各个子阵列的容量和排列方式相同时,组合成的立体延迟气枪阵列产生的子波信号为^[21]:

$$y(t) = nx(t) - x(t + \Delta t_1) - x(t + \Delta t_2) \cdots - x(t + \Delta t_n) \quad (14)$$

式中: n 为气枪子阵列的数量;

$x(t)$ 为单个子阵的子波信号;

$x(t + \Delta t_n)$ 为第 n 个子阵列的虚反射信号;

$\Delta t_1, \Delta t_2, \cdots, \Delta t_n$ 分别为各个子阵列虚反射到达的时间与一次直达波到达时间之差。

对式(14)作傅里叶变换可得该立体枪阵的远场子波频谱:

$$Y(f) = (n - e^{i2\pi f \Delta t_1} - e^{i2\pi f \Delta t_2} \cdots - e^{i2\pi f \Delta t_n}) F(f) = H(f) * F(f) \quad (15)$$

式中: $F(f)$ 为子阵列的近场子波频谱;

$H(f)$ 为该枪阵的虚反射滤波器,滤波器的振幅谱为:

$$|H(f)| = \left[n - 4\sin^2(\pi f \Delta t_1) - 4\sin^2(\pi f \Delta t_2) \cdots - 4\sin^2(\pi f \Delta t_n) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

平面阵列情况下接收到的虚反射时间相同,即各 Δt 数值相同,则平面气枪阵列的滤波器振幅可表示为:

$$|H(f)| = \left[n - 4n\sin^2(\pi f \Delta t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

对比式(16)和式(17),立体阵列相较于平面阵列,对产生的虚反射进行筛选过滤,减弱虚反射对子波的陷波作用,保证高频信号的接收,接收信号拥有更长的频宽,增强信号质量。

气枪阵列接收信号是一个与时间有关的函数,为了获取更强的能量信号,将多个平面气枪震源按照不同沉放深度激发,使子波能量增强。经过进一步的研究发现,对于气枪震源内各个单枪设置不同的激发深度,使各个气枪遵循一定的规律激发,使

接收到的有效信号同相叠加, 能量增强; 作为干扰信号的虚反射非同相消减, 增强信号质量, 这就是立体气枪阵列激发技术^[22]。

基于以上原理, 在排列方式、枪阵容量、环境参数等因素确定的情况下, 随机选取 4 种不同枪阵的

平面阵列和立体阵列进行激发, 获得如图 2 所示频谱, PSD 为功率谱密度, 表达信号功率含量与频率的关系。不同排列的枪阵经过立体设计后激发产生的子波信号相较于原枪阵都有较明显改善, 频率曲线更加平滑稳定, 低频和高频都获得拓宽。

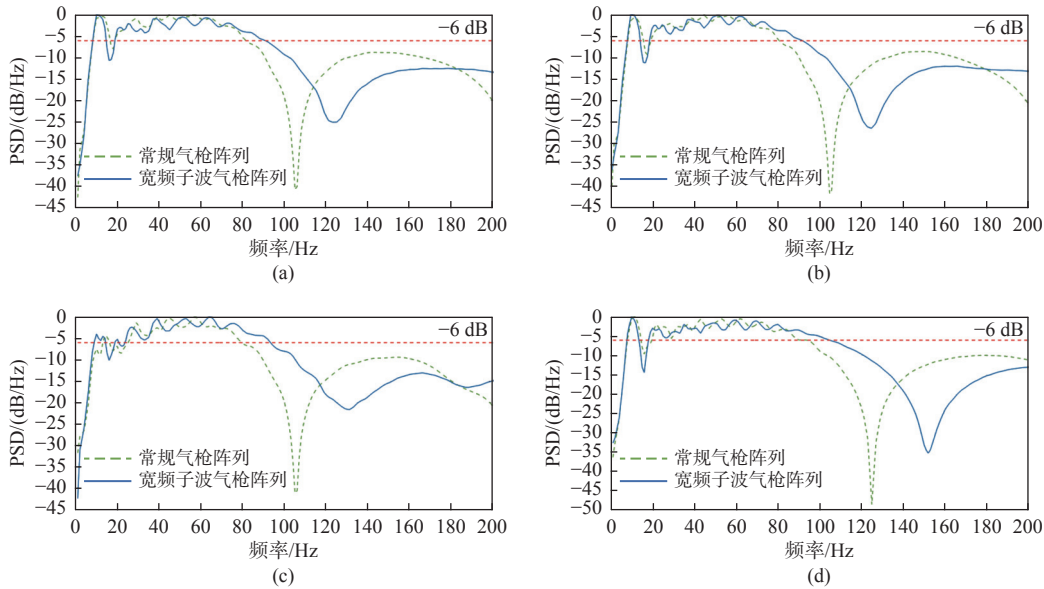


图 2 随机枪阵的平面阵列与宽频子波阵列频谱图对比

Fig.2 Spectrum contrast of planar array and broadband wavelet array of random gun array

3 宽频立体气枪阵列优化设计

通过上述原理设计平面气枪阵列, 为了兼顾方向性差异, 采取如图 3 中对称阵列设计。气枪震源的总容量为 10 180 cu.in, 一共包括 6 个子阵列, 其中, 1 子阵对称于 6 子阵, 2 子阵对称于 5 子阵, 3 子阵对称于 4 子阵, 每个子阵列经调谐枪和相干枪优化。1 子阵和 6 子阵的容量为 1 640 cu.in, 含有 14 条枪, 包括 1 个空枪; 2 子阵和 5 子阵的容量为 1 810 cu.in, 含有 14 条枪, 包括 2 个空枪; 3 子阵和 4 子阵的容量为 1 640 cu.in, 含有 14 条枪, 包括 1 个空枪。子阵列内各枪距离 2.42 m, 阵列长度 17 m, 子阵列间隔 8 m。平面阵列沉放深度为 7 m, 拖缆沉放深度为 8 m, 海水深度 20 m。气枪工作压力 2 000 psi (1 psi=6.895 kPa), 模型建立于范氏气体方程原理在非理想气体情况下的应用, 设定声波在海水中的传播速度为 1 500 m/s, 海面反射系数设为-1, 海水温度 20 ℃。该阵列产生的子波如图 4 所示。

气泡在海水中振荡运动的速度随时间变化, 并且其初始压力也会影响初始速度, 表现为不同容量单枪激发产生的子波信号到达主峰值时间不同。

通过模型试验分析, 在气枪阵列沉放 7 m 时, 不同容量的单枪激发时间如图 5 所示。小容量气枪激发时初始压力弱, 产生的子波到达主峰值所需时间短,

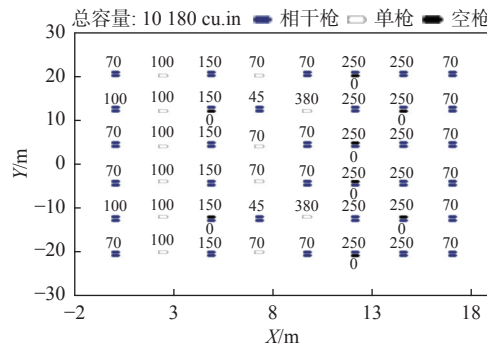


图 3 平面气枪阵列平面图

Fig.3 Plan of planar air gun array

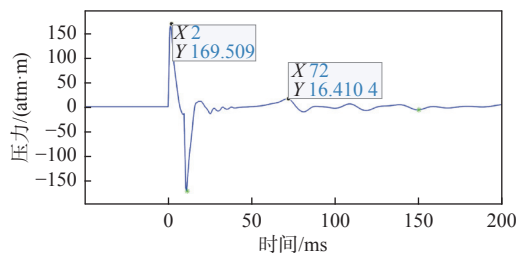


图 4 平面气枪阵列子波

Fig.4 Planar air gun array wavelets

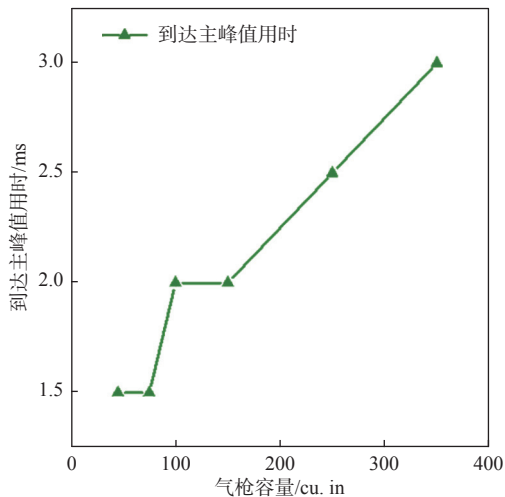


图 5 不同气枪容量激发后子波到达主峰值时间

Fig.5 Time statistics from excitation to main peak value of air guns with different capacities

45、70 cu.in 的气枪用时 1.5 ms 到达主峰值, 100、150 cu.in 的气枪到达主峰值用时 2.0 ms, 大容量气枪具有足够强的激发压力, 气泡多次膨胀收缩, 所需时间也线性增加。

基于上述宽频子波构造方法研究, 通过改变不同容量气枪的沉放深度形成宽频子波, 容量大的气枪沉放深, 容量小的气枪沉放浅。在平面气枪阵列的基础上, 由图 5 所得数据结合声波在海水中的传播速度, 设计以下改进方案进行激发:

容量为 250 cu.in 的气枪保持正常沉放深度, 容量为 150 和 100 cu.in 的气枪在平面沉放深度基础上提升 1 m, 容量为 45 和 70 cu.in 的气枪在平面沉放深度基础上提升 2 m。

4 宽频立体气枪阵列同常规阵列属性模拟

为了更准确分析气枪震源的性能, 需要对气枪阵列产生的子波波场和频谱中各种属性进行分析评价。评价气枪阵列性能可以通过子波波场的主峰值、气泡比、气泡周期、频率域的有效频带宽度等方面来描述^[23]。

梯形沉放立体阵列和平行四边形沉放立体阵列是常见的立体枪阵优化方案。梯形沉放立体阵列是指两侧子阵沉放深度浅, 中间子阵沉放深度深的设计方案; 而平行四边形沉放立体阵列是指子阵沉放深度呈交错分布的设计方案。为了保持与文中宽频子波气枪阵列处于同一深度, 采取如下设计方案: 在平面阵列基础上, 将 1 子阵和 6 子阵沉放

深度提升 2 m, 2 子阵和 5 子阵沉放深度提升 1 m, 3 子阵和 4 子阵沉放深度不变, 完成梯形沉放立体阵列; 在平面阵列基础上, 将 1 子阵和 4 子阵沉放深度提升 2 m, 2 子阵和 5 子阵沉放深度提升 1 m, 3 子阵和 6 子阵沉放深度不变, 完成平行四边形沉放立体阵列; 将平面阵列同梯形沉放立体阵列、平行四边形沉放立体阵列以及宽频子波立体阵列进行上述属性的对比。

主峰值是气枪激发瞬间释放高压气体产生的第 1 个脉冲的振幅值, 也称为主脉冲, 其单位为 bar·m。它指代在距震源中心点单位距离处的声压值作为度量单位来描述气枪的脉冲压力大小, 数值越大则表示气枪震源激发产生的能量越强。如图 6 所示, 平面气枪阵列主峰值为 169.51 bar·m, 梯形沉放立体枪阵主峰值为 150.06 bar·m, 平行四边形沉放立体枪阵主峰值为 151.75 bar·m, 宽频子波气枪阵列主峰值为 176.02 bar·m, 主峰值提高明显。通过对比发现, 宽频子波主脉冲更加尖锐, 虚反射得到较好的压制, 处理干扰信号更加平滑。

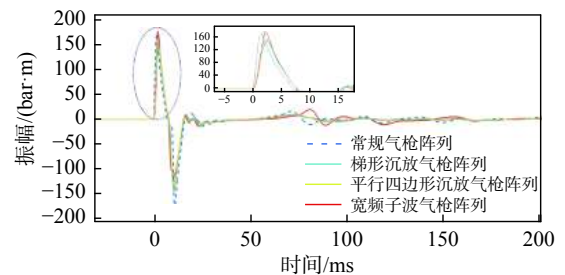


图 6 平面气枪阵列子波与 3 种立体气枪阵列子波

Fig.6 Planar air gun array wavelets and three stereoscopic air gun arrays wavelets

气泡比是主脉冲振幅值同第 1 个气泡脉冲振幅值的比值。平面气枪阵列气泡比为 10.32, 梯形沉放立体枪阵列气泡比为 15.83, 平行四边形沉放立体枪阵列气泡比为 15.25, 宽频子波气枪阵列气泡比为 9.01。

气泡周期指产生主脉冲时间同产生第 1 个气泡脉冲时间的间隔, 单位为 ms。平面气枪阵列气泡周期为 70 ms, 梯形沉放和平行四边形沉放立体枪阵列气泡周期均为 69 ms, 宽频子波气枪阵列气泡周期为 79 ms。

子波的频谱数据涵盖丰富的有效信息, 它能够反映子波的频带宽度、信号的能量分布、气泡振荡效应、虚反射的影响以及陷波作用等。在海洋勘探中, 接收信号中 > -6 dB 的子波能量强度方可分析出准确的信息, 所以有效频带宽度一般取 -6 dB 作

为标准,即拾取在-6 dB 处的高、低频率差,子波的主频为有效频带宽度的中值。如图 7 所示,平面气枪阵列的有效频宽为 13~79 Hz,梯形沉放立体气枪阵列的有效频宽为 12~94 Hz,平行四边形沉放立体气枪阵列的有效频宽为 12~95 Hz,宽频子波气枪阵列的有效频宽为 9~93 Hz,相较于平面阵列,宽频子波阵列有效频宽增多 27.27%,在立体气枪阵中,宽频子波在低频方面效果更好。由图 7 中对比可以看出,宽频子波气枪阵列有效频宽扩宽,低频部分增多,低频能量更丰富,子波信号能够穿透更深地层,并且在陷波点位置处能量减弱明显,很好地抑制了陷波作用。

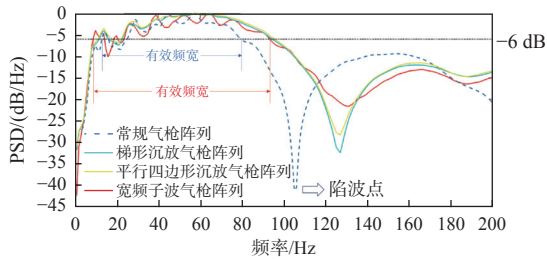


图 7 平面气枪阵列与 3 种立体气枪阵列频谱

Fig.7 Spectrum of planar air gun array and three stereoscopic air gun arrays

平面气枪阵列和 3 种立体气枪阵列参数如表 1 所示。

气枪子波波场属性,包括振幅、相位、频率、瞬时属性等,是描述气枪阵列震源性能的关键参数。其中,通过子波的瞬时属性可以有效拾取波形,有

表 1 平面阵列和 3 种立体气枪阵列子波及频谱参数对比

Table 1 Comparison of wavelet and spectral parameters between planar array and three stereoscopic arrays

阵列	主峰值 /bar·m	气泡周期 /ms	气泡比	有效频带宽度 /Hz
平面阵列	169.51	70	10.32	66
梯形沉放气枪阵列	150.06	69	15.83	82
平行四边形沉放气枪阵列	151.75	69	15.25	83
宽频子波气枪阵列	176.02	79	9.01	84

利于研究子波的细节及对比分析。子波的瞬时属性包括瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率 3 种属性。瞬时振幅反应子波强度的瞬间变化,主要表征地层波阻抗的差异。而子波的波形主要由相位属性表征,接收信号中包含的虚反射、气泡脉冲等干扰波会影响子波相位进而改变子波波形的。瞬时相位是描述地震剖面上同相轴连续性的量度,不同于通过能量强弱来描述的信号质量,相位是通过一致连续的状态来区分不同的传播介质,因此,瞬时相位能够较好地识别地质异常及分辨地层。瞬时频率指相位在单位时间内的变化率,也适用于识别地质形态,分析地层的岩性变化。但由于相位的变化比振幅能量的变化即时迅速,因此,瞬时频率的图像会更加嘈杂。

图 8 为 4 种气枪阵列的瞬时属性图,第 1 行为 200 Hz 能谱,向下依次为瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率;第 1 列为平行四边形立体阵列,向右依次为梯形立体阵列、宽频子波立体阵列。通过对比能

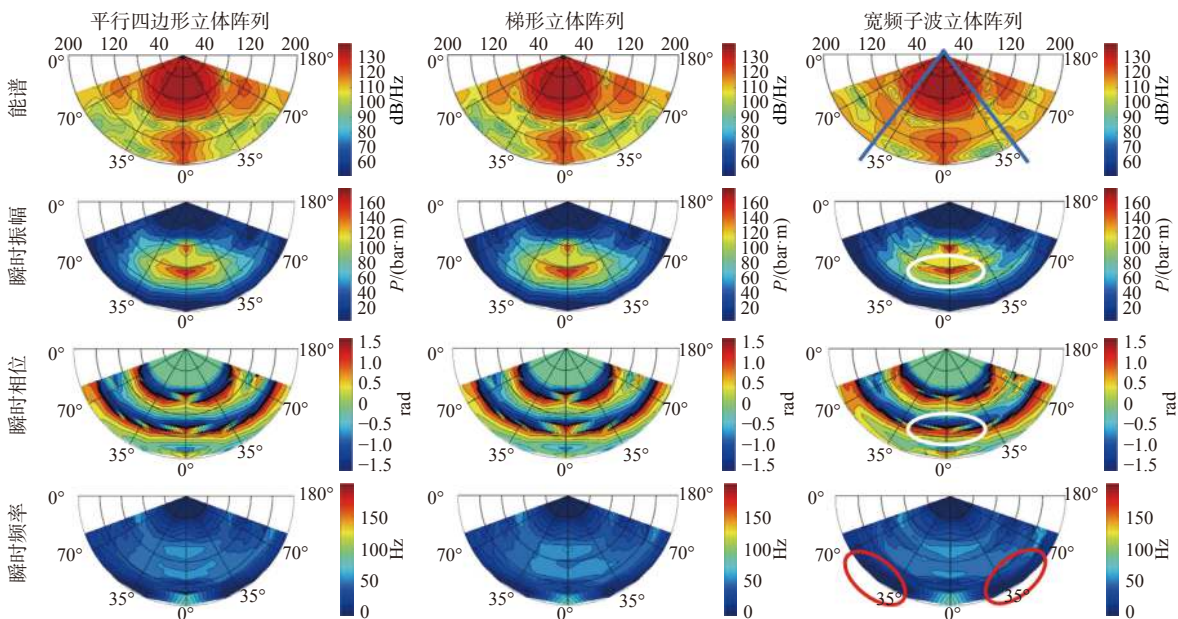


图 8 平面气枪阵列与 3 种立体气枪阵列属性对比

Fig.8 Comparison between planar air gun array and three stereoscopic arrays

够看出, 宽频子波气枪阵列能量辐射范围更广。右侧宽频子波气枪阵列瞬时振幅能量集中于阵列正下方, 振幅大小明显更加均匀, 传递效果增强。瞬时相位中右图相位变化均匀, 拥有较好的连续性, 相较于平面阵列显示更多的子波细节。宽频子波气枪阵列的瞬时频率更加丰富, 低频信号增强, 利于穿透更深地层。

将平面气枪和宽频子波气枪阵列的子波数据对 marmousi 模型进行地震褶积成像, 对比发现, 在波阻抗差异较大的界面, 宽频子波阵列子波褶积得到的地震记录同相轴能量明显增强。例如, 在图 9 约 1 700 ms 处, 宽频子波褶积比平面阵列子波褶积得到的地震记录同相轴振幅能量更强。宽频子波褶积得到的地震记录针对潜山内部层位能够清晰成像, 在图 9 中 2 100~2 500 ms 处的潜山内部, 宽频子波褶积得到的地震记录相较于平面阵列气枪子波褶积得到的地震记录, 识别到的层位特征更清晰。所以, 宽频子波气枪阵列产生的子波拥有更强的能量, 针对中深层及潜山具有更好的探测效果。

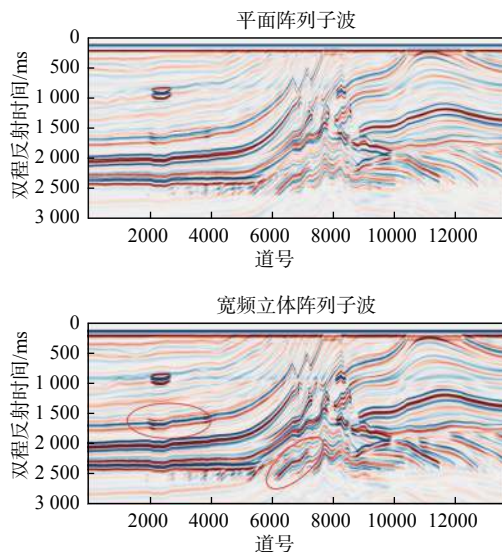


图 9 平面气枪阵列子波 (上) 与宽频子波气枪阵列子波 (下) 对 marmousi 模型的地震褶积成像

Fig.9 Seismic convolution imaging of marmousi model is performed by planar and broadband air gun array wavelet

5 结论

本文基于范式气体方程, 从兼顾高频和低频、拓宽子波频带的角度设计优化立体气枪阵列, 并建立模型进行模拟分析, 综合子波波场和频率域属性同平面阵列对比, 验证了优化后的阵列具有更高的性能。

(1) 宽频立体气枪阵列相较于平面气枪阵列拥有更强的主脉冲, 能量更强。低频信号和低频信号都得到有效拓宽, 提高了子波的分辨率以及能量下传能力, 有利于复杂地质目标的勘探。

(2) 宽频立体气枪阵列的优化设计有效地压制了震源虚反射和频率域出现的陷波效应, 提高了信号的信噪比。

(3) 宽频立体气枪阵列具有良好的瞬时属性, 能够提高资料的分辨率, 有利于获取更准确的资料解释结果。

参考文献:

- [1] 吴志强, 闫桂京, 童思友, 等. 海洋地震采集技术新进展及对我国海洋油气地震勘探的启示[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(6): 3056-3065.
- [2] GILES B F. Pneumatic acoustic energy source[J]. *Geophysical Prospecting*, 1968, 16(1): 21-53.
- [3] SAFAR M H. The radiation of acoustic waves from an air-gun[J]. *Geophysical Prospecting*, 1976, 24(4): 756-772.
- [4] PARKES G E, HATTON L, HAUGLAND T. Marine source array directivity: a new wide airgun array system[J]. *First Break*, 1984, 2(1161): 9-15.
- [5] LAWS R M, HATTON L, HAARTSEN M. Computer modelling of clustered airguns[J]. *First Break*, 1990, 8(1235): 331-338.
- [6] 陈浩林, 宁书年, 熊金良, 等. 气枪阵列子波数值模拟[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(4): 363-368.
- [7] 李绪宣, 王建花, 张金森, 等. 海上气枪震源阵列优化组合设计与应用[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 142-148.
- [8] 王建花, 李绪宣, 顾汉明. 海上多子阵立体组合气枪震源优化设计[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(2): 133-138.
- [9] 唐松华, 李斌, 张昇彪, 等. 立体阵列组合技术在南海黄盆地的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(5): 64-70.
- [10] 吴志强, 高江涛, 陈茂根, 等. 南海黄盆地地震试验数据处理分析方法与成果[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(7): 51-59.
- [11] 张鹏, 杨凯, 李欣, 等. 海上空气枪点震源阵列的优化设计及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(4): 588-599.
- [12] 杨博, 孟祥君. 基于上/下源组合思想的立体气枪阵列数值模拟与软件集成[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(7): 57-63.
- [13] 祁江豪, 吴志强, 郭兴伟, 等. 大容量气枪震源在南海海相高速屏蔽层下 VSP 资料采集中的应用: 以大陆架科学钻探 CSDP-2 井为例[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1661-1670.
- [14] CHELMINSKI S, WATSON L M, RONEN S. Low frequency pneumatic seismic sources[J]. *Geophysical Prospecting*, 2019, 67(6): 1547-1556.
- [15] 王立明, 胡毅, 王喻, 等. GI 枪结构震源子波模拟研究[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(6): 2793-2796.
- [16] 王凤帆. 海上立体气枪阵列信号模拟与设计方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [17] HUANG X, ZHANG A M, LIU Y L. Investigation on the dynamics of air-gun array bubbles based on the dual fast multipole

- boundary element method[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 124: 157-167.
- [18] 向涯, 杨润海, 谭俊卿, 等. 气枪震源信号波速变化计算中的水位影响及消除[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(4): 1470-1476.
- [19] 李绪宣, 温书亮, 顾汉明, 等. 海上气枪阵列震源子波数值模拟研究[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(4): 215-220.
- [20] 李晓东, 刘怀山. 渤海海域气枪子波时空传输特征研究[J]. *工程地球物理学报*, 2021, 18(4): 436-444.
- [21] 苏欣. 立体延迟气枪阵列的优化设计方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [22] 刘雪芹, 刘怀山, 尉佳. 气枪立体震源等效深度确定方法研究[J]. *物探化探计算技术*, 2017, 39(1): 81-89.
- [23] 李海军, 高斌, 史颖, 等. 气枪震源低频拓展方法研究[J]. *物探装备*, 2020, 30(5): 306-310.

Optimization design of the broadband stereo gun array

YANG Chen¹, LIU Huaishan^{1,2*}, ZHAO Mingxin¹, YANG Xilei¹, LI Fenglin¹, ZHANG Luocheng¹

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In offshore oil and gas exploration, seismic source design is the key to ensure good pickup of signals, for which air gun has become the most widely used excitation source in marine exploration due to its reliable quality, flexible combination, safety, and environmental protection. However, with the complexity of exploration environment, conventional excited wavelet of planar array is no longer to satisfy high-resolution exploration. Therefore, based on the stereoscopic array, we analyzed the relationship between wavelet signals and time of gas guns with different capacities. By optimizing the sinking depth, the amplitudes generated by the excitation of single gun with different capacities are superimposed in the same phase during receiving to broaden the frequency band and suppress the notch effect and improve the seismic source performance. By comparing the properties of the optimized stereoscopic array with the conventional array, it was proved that the broadband stereo air gun array had stronger amplitude energy and wider effective frequency band, which could suppress the notch effect obviously, and achieved better recognition results at complex geological targets.

Key words: broadband; air gun source; stereoscopic array