

横波可控震源组合激振效果分析

黄志强 游正涛 李刚 付铭威 王若豪 帅军 张国旭

(西南石油大学机电工程学院, 成都 610500)

摘要: 受振动器结构限制,横波可控震源激振时存在下传大地能量低和横波信号下传深度浅等问题。为此,通过三维有限元数值模拟创新性地研究了不同组合的横波可控震源振动器对激振效果的影响。首先,基于三维九分量资料和两大组合类型,考虑了8种组合横波可控震源振动器激振方式,建立了振动器-大地有限元模型,构建了组合横波可控震源振动器激振效果评价体系;其次,基于该评价体系,详细地分析了各种横波可控震源振动器组合激振方式对大地的下传能量、横波信号下传深度和组合激发波间的相互干涉影响。结果表明,相较于单个横波可控震源,两台SHY横波可控震源并排组合同向激振时,传入大地能量提升86.36%,大地粒子位移振幅平均提升73.40%;两台SHX横波可控震源单排组合同向激振时,传入大地能量提升97.48%,大地粒子位移振幅平均提升58.61%,较大幅度地提升了激振效果。研究成果可为提升横波可控震源激振效果提供指导,也可为横波可控震源组合激发设计研究提供参考。

关键词: 横波可控震源; 组合横波振动器; 组合激振效果; 地震勘探; 有限元法

中图分类号: TE132 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.05.007

0 引言

根据产生的地震波传播方式不同,可控震源分为纵波可控震源和横波可控震源^[1-2]。横波相较纵波拥有更高垂直分辨率、反演地层信息更加完整等优点^[3]。然而,受振动器结构影响,横波激发难度大、传播稳定性差,导致横波可控震源相较于纵波可控震源的激振效果较弱^{[4]106520},主要表现为传入大地能量低、横波信号下传深度浅等^{[5]41-50},限制了横波勘探效果。

为提升横波可控震源的勘探效果,国内外研究者主要从反演成像、振动器系统和平板结构等3个方面进行深入研究。为探究横波反演成像对勘探效果的影响,VANNESTE等^[6-8]提出新的反演方法,分析出高分辨率的数据;王波等^[9]基于建立的理论数学模型提出一种高精度的垂直横向等参数介质水平偏振横波反射系数近似方程,开发了一种水平偏振横波反演方法,该新型反演方法能够获得准确、高分辨的横波各向异性参数。尽管反演成像方法的改进可获得更完善的反演数据图像,但未改变横波信号下传深度浅等关键问题,对横波勘探效果提升较弱。因此,研究者针对振动器系统参数和平板结构对横波激振性能的影响进行了深入研究。KLOKOV等^[10]提出了一种提取垂直力振动器发射横波的方法,该方法改变了原有

横波激发系统。POLOM等^[11]在冰川使用可激发横波和纵波的小型ELVIS振动器系统,该研究方法结合了横波与压缩波的运用,为冰下结构提供潜在的新型研究方法。PENG等^{[4]106520}分析了振动器-大地系统中的非线性作用^[12]、粗糙接触界面^[13]和振动器动态刚度^[14]对激振效果的影响,从而提升了横波勘探质量。平板齿作为横波可控震源振动器的关键结构,欧倩茹^{[5]41-50}^{[15]55-70}通过设计不同形状、不同锥度的平板齿,改善了波传播深度较浅、大地捕获能量少等问题。此外,平板齿布局方式的改进^[16]等对横波可控震源激振效果的提升也有正面影响。然而,上述研究均基于单个可控震源系统参数进行改进,未考虑横波可控震源组合激振的效果,对传入大地能量、横波信号下传深度的提升均较小。

针对以上问题,本文基于三维九分量原理构建了不同组合横波可控震源振动器-大地耦合激振三维数值仿真模型;建立了组合激振效果评价体系;从传入大地能量、横波信号下传深度两方面,分析了各组合激振方式对激振强度的影响,以及激发波之间相互干涉响应对组合激振信号质量的影响。结果表明,振动器组合激振对横波可控震源效果改善显著,为横波可控震源激振效果的改善等提供了参考。

收稿日期: 2023-10-24 修回日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902326); 四川省科学与技术项目(22GJHZ0284); 南充市-西南石油大学市校科技战略合作专项(SXHZ048); 企业横向合作项目(JSTKY-22-002)

作者简介: 黄志强,男,1968年生,四川眉山人,博士,教授; 主要研究方向为石油天然气装备; E-mail: huangzq@swpu.edu.cn。

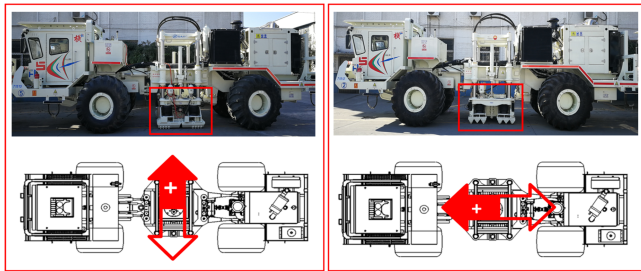
引用格式: 黄志强,游正涛,李刚,等. 横波可控震源组合激振效果分析[J]. 机械强度, 2025, 47(5): 55-62.

HUANG Zhiqiang, YOU Zhengtao, LI Gang, et al. Analysis of combined excitation effect of shear-wave vibroseis[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(5): 55-62.

1 横波可控震源组合激发方式

1.1 横波可控震源的分类

横波可控震源车主要由振动器系统、控制系统和驱动系统组成。其中振动器是用于激发横波地震信号的装置,为横波可控震源车的核心部件。为解决横波可控震源勘探效率低的问题^[17],东方地球物理勘探公司专门研发设计两种振动器类型的横波可控震源。如图 1 所示,SHY 横波可控震源车的振动器激振方向垂直于车行驶方向,SHX 横波可控震源车的振动器激振方向平行于行驶方向。



(a) SHY 横波可控震源 (a) SHY shear-wave vibroseis
(b) SHX 横波可控震源 (b) SHX shear-wave vibroseis

图 1 横波可控震源类型

Fig. 1 Type of shear-wave vibroseis

1.2 横波可控震源的组合激发方式

结合三维九分量地震反射资料^[18]和实际工程运用,将两台横波可控震源车的组合类型考虑为并排组合和单排组合,其中并排组合振动器相邻边缘间隔考虑为 3 m,单排组合中两个振动器的中心间距为 13 m。

基于上述两种横波可控震源和两种组合类型,提出 4 种单排组合激发方式和 4 种并排组合激发方式。如图 2 所示(其中“+”代表横波可控震源振动器激振起始方向),并排组合激发方式分为两台 SHX 横波可控震源振动器同向组合激发和反向组合激发、两台 SHY 横波可控震源振动器同向组合激发和反向组合激发。

如图 3 所示,单排组合激发方式分为两台 SHX 横波可控震源振动器同向组合激发和反向组合激发、两台 SHY 横波可控震源振动器同向组合激发和反向组合激发。

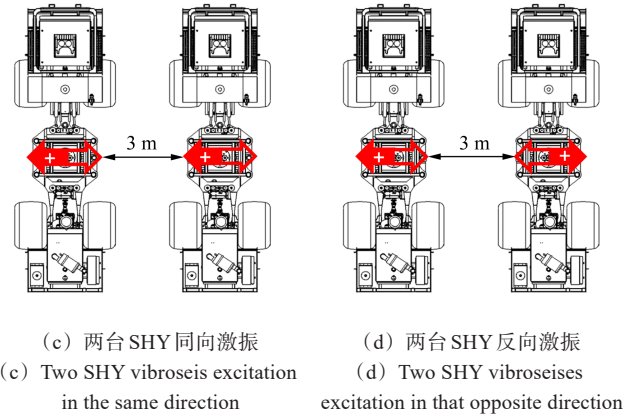


图 2 并排组合激发方式

Fig. 2 Side-by-side combination of excitation modes

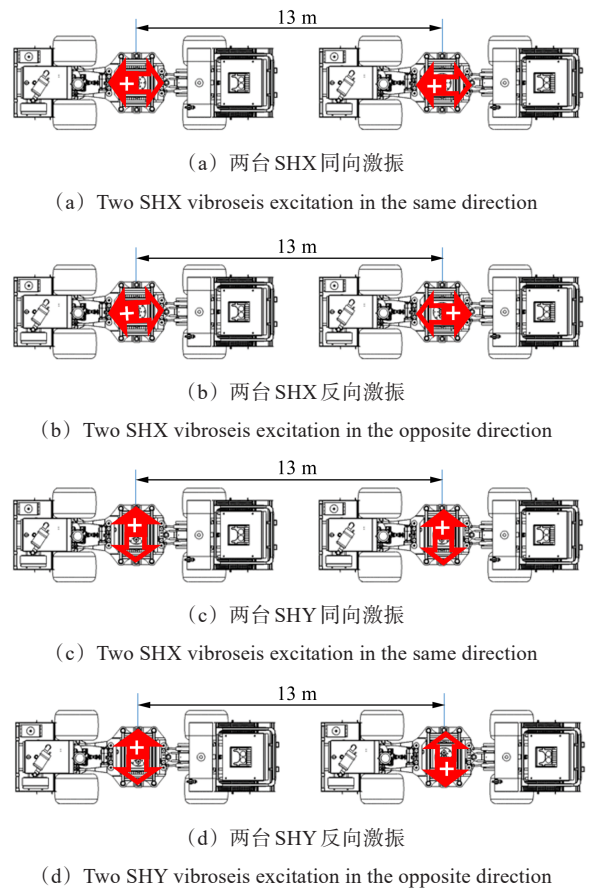


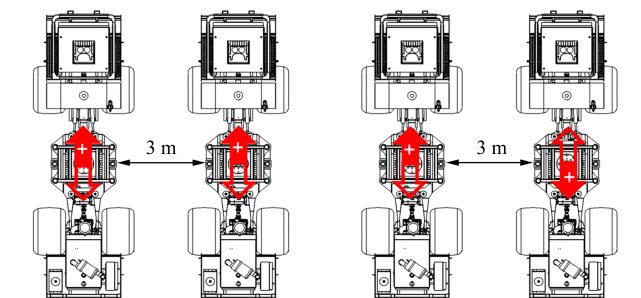
图 3 单排组合激发方式

Fig. 3 Single-row combined excitation modes

2 组合振动器-大地有限元模型构建与验证

2.1 几何模型建立与网格划分

为模拟组合横波可控震源实际激振情况,基于有限元法构建了不同组合方式下横波可控震源振动器-大地耦合激振三维数值仿真模型。振动器作为横波可控震源的关键部件,主要由箱体、活塞杆、重锤和平板等组成(图 4)。在保证仿真精度和最大化模拟横波可控震源振动器的工作状态前提下,合理简化了振动器结构^[19]¹³⁴⁹⁻¹³⁵⁸,去除了顶部箱体结构。同时,为降低激振时



(a) Two SHX vibroseis excitation in the same direction
(b) Two SHX vibroseis excitation in that opposite direction

单个平板齿之间存在的相互干扰对组合激振研究的影响,根据圣维南原理和对称原则^{[5]41-50},将原有 4 块平板齿简化为 1 块平板齿。考虑到有限元法广泛应用于模拟土壤-结构系统的相互作用^{[4]106520[20-22]},研究组合横波可控震源振动器-大地仿真模型采用有限元分析法。李琴等^[23]通过有限元分析表明,可控震源平板捕获的大地大约为 1 个半径为 1.8 m 的半球。考虑到各组合类型的间距分别为 3、13 m,本文建立的大地模型为直径 40 m、厚度 20 m 的圆柱体。

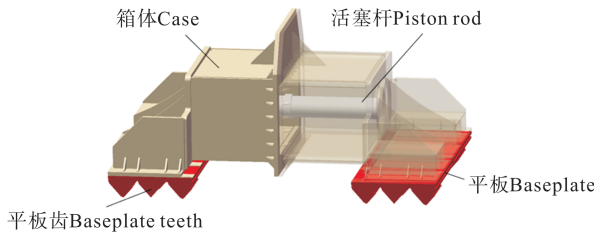


图 4 振动器的结构

Fig. 4 Structure of the vibrator

网格质量和数量直接影响数值仿真模型分析的计算可靠性及效率。根据振动器平板及大地模型的尺寸,合理选择网格尺寸和类型,在确保计算精度的同时缩短求解时间。其中,振动器平板作为能量传递的媒介,可采用较小四面体网格单元以提高计算精度。耦合地表则采用较大四面体网格单元以保证计算精度及效率。

2.2 材料模型与载荷类型

振动器的材料为 45 钢,采用线弹性材料模型。横波信号向下传播时,介质可被视为一个无限均匀弹性半空间体^{[15]55-70},因此,大地模型采用弹性土。各材料的密度、弹性模量、泊松比等相关材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料 Material	密度 Density/(kg/m ³)	弹性模量 Modulus of elasticity/Pa	泊松比 Poisson ratio
弹性土 Elastic soil	1 800	2.7×10 ⁷	0.32
45 钢 45 steel	7 850	2.12×10 ¹¹	0.31

横波可控震源载荷包括静态载荷、动态载荷。为准确模拟横波可控震源的载荷施加情况,按照先静态载荷、后动态载荷的顺序加载。其中,静态载荷为横波可控震源车身重力,以保证横波可控震源振动器激振过程中平板齿与大地紧密耦合;动态载荷为作用在活塞杆上的周期性的正弦液压力,为横波可控震源振动器的激振力,峰值为 200 kN,激振频率为 50 Hz。为获得稳定激振响应结果,共加载 5 个周期。静态载荷和动态载荷均施加在振动器平板表面,其中静载荷垂直于振动器平板表面竖直向下,动载荷平行于振动器平板表面。

2.3 边界条件与接触设置

横波可控震源振动器工作时,大地作为 1 个半无限

空间弹性体^[24],整体几乎不发生位移变化,为避免耦合大地模型在振动过程中产生整体位移,将其底面和侧面施加完全固定约束条件。在实际作业过程中,振动器激发的横波信号会向无穷远处传播,而仿真分析中大地模型的计算域有限,横波信号会在模型边界产生反射,从而引入与实际不符的反射波^{[19]1349-1358}。因此,为更好地模拟横波信号真实传播特性,在 Ls-Dyna 软件中将大地模型除上表面外的侧面与底面均设置无反射边界条件^[25-26],使应力波到达边界时被完全吸收。

静载荷的存在,使整体车身对平板施加了较大压力,平板齿与大地之间相互紧密耦合。因此,为真实反映平板齿与大地之间的相互作用情况,仿真分析中平板齿与大地之间采用绑定接触类型。

2.4 模型验证

为确保组合横波可控震源振动器-大地有限元仿真分析的准确性和有效性,需对建立的有限元模型进行验证分析。横波在无限弹性均匀介质中的波速为

$$v_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1 + \mu)\rho}} \quad (1)$$

式中, G_s 为剪切模量; ρ 为密度; E 为弹性模量; μ 为泊松比。

将表 1 中横波可控震源振动器-大地有限元模型材料参数代入式(1),通过计算得到横波理论波速 $v_s = 205.15 \text{ m/s}$ 。提取耦合大地有限元模型中心点 B_1 和点 B_2 沿激振方向的位移数据,并绘制该方向大地粒子位移随时间变化曲线(图 5)。 B_1 和 B_2 两点响应时间差为 0.005 s,根据式(2)得出有限元模型中横波传播速度:

$$v = \frac{S_{B_1 B_2}}{\Delta T} = 199.60 \text{ m/s} \quad (2)$$

式中, v 为有限元模型横波波速; $S_{B_1 B_2}$ 为 B_1 、 B_2 两点距离; ΔT 为 B_1 、 B_2 两点横波响应时间差。

对比横波理论波速结果与有限元激振模型横波波速结果,误差为 2.71%。说明所建立的有限元仿真模型可有效地模拟横波可控震源组合振动器的传播。

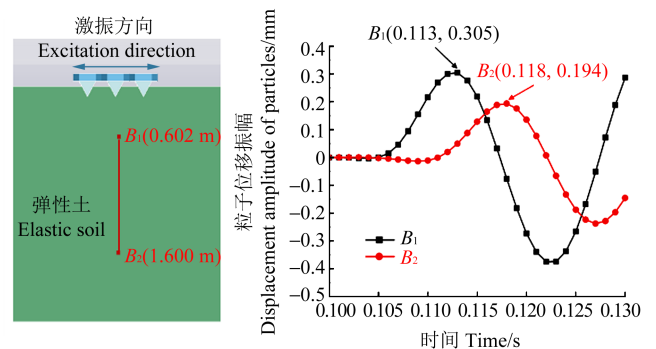


图 5 不同深度中心点沿激振方向的大地粒子位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of earth particles of central points along the excitation direction at different depths

3 横波振动器组合激振效果分析

3.1 横波振动器组合激振效果评价体系的建立

基于前文学者对横波激振效果的研究,针对横波可控震源现存下传能量低、下传深度浅等问题,建立了横波可控震源组合振动器激振效果评价体系,以评价不同组合振动器的激振效果,如图6所示。其中,评价体系包括激振强度与激发信号质量两大类。激振强度从传入大地能量和大地粒子位移振幅两个方面进行评价,激发信号质量中通过提取组合激发波间相互干涉情况进行评价。

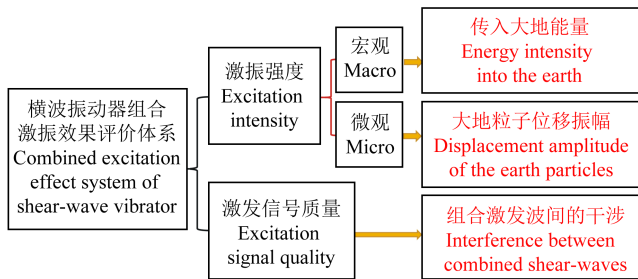


图6 横波可控震源振动器组合激振效果评价体系

Fig. 6 Evaluation system of combined excitation effect of the shear-wave vibroseis vibrator

3.1.1 激振强度

工作过程中,传入大地能量的多少属于从宏观角度评价组合振动器激振的强弱。提高整体粒子传递能力的核心在于提高激振过程中整个大地获取的能量,传入大地的能量越多,表示激振强度越强。因此,将传入大地能量作为横波可控震源振动器组合激振效果评价指标之一。

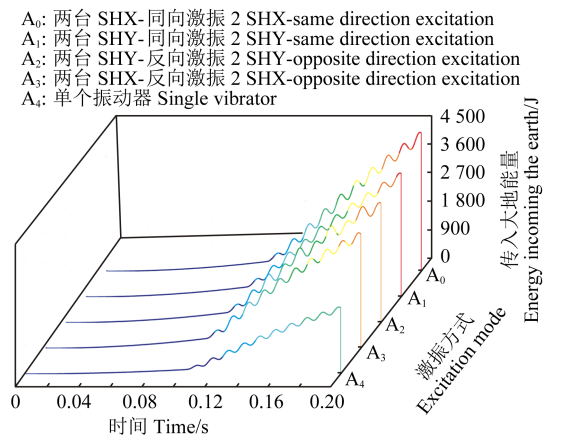
从微观角度看,大地粒子位移振幅可以评价横波可控震源振动器组合激振性能的强弱,从大地粒子位移振幅可看出横波信号下传的深度。波的运动实质为粒子的运动^{[4]106520},大地运动微观上看是粒子沿激振方向的有效振动。研究组合横波可控震源振动器激振强度的关键在于掌握大地粒子在激振方向上有效运动的强弱。相同深度的大地粒子在激振方向上振幅越大,横波激振强度越强,该横波信号下传深度越深。因此,将大地粒子沿激振方向的运动强度作为横波可控震源振动器组合激振效果评价的指标。

3.1.2 激振信号质量

为分析横波可控震源最佳激振效果组合方式,还应考虑横波可控震源振动器组合激发波间信号质量相互干涉情况。激振信号质量的好坏通过组合激发波间相互干涉的大小来评价,组合激发波幅值的大小和发生谐波畸变的程度直接反映该组合激发波相互干涉的强弱,也反映出输出信号精度的高低,将影响横波可控震源振动器的勘探精度。

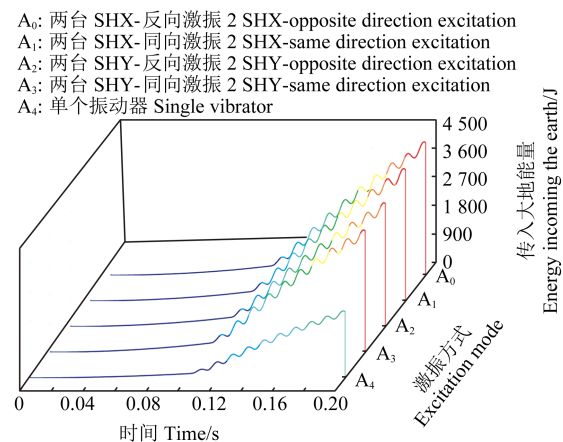
3.2 传入大地能量分析

为分析各横波可控震源组合振动器-大地耦合激振系统的大地能量传递特性,计算了单个振动器和组合振动器系统中传入大地能量随载荷加载时间的变化,如图7所示。由图7可知,各系统在施加静态载荷阶段(0~0.1 s)大地均无能量传递,施加动态载荷阶段(0.1~0.2 s)传入大地能量稳步上升。8种组合激振方式均远强于单个横波可控震源振动器,因此,各组合激振方式对横波可控震源激振强度增加均较大。此外,并排组合(间距为3 m)中两台SHX横波可控震源组合振动器同向激振时,传入大地能量最大,表明组合振动器距离较小对能量传递有一定正面影响;单排组合(间距为13 m)中两台SHX横波可控震源组合振动器同向与反向激振时,传入大地的能量均较大且相差无几。然而,8种组合激振方式传入大地能量相差较小,且总体维持在一个较高水平,组合振动器系统较单个横波可控震源振动器平均传入大地能量增幅超过75%。



(a) 并排组合与单个振动器

(a) Side-by-side combination and single vibrator



(b) 单排组合与单个振动器

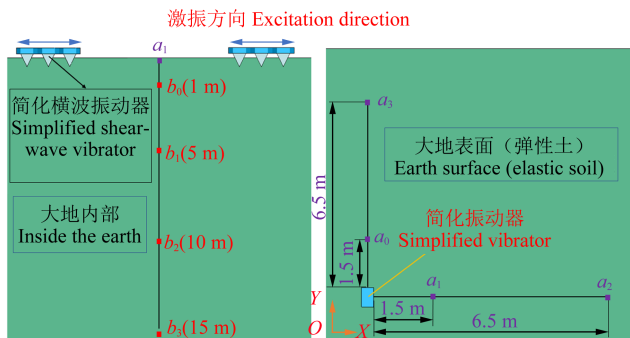
(b) Single row combination and single vibrator

图7 不同组合振动器与单个振动器激振时传入大地能量曲线

Fig. 7 Curve of energy incoming the earth under the excitation of a single vibrator and different combination vibrators

3.3 大地粒子位移振幅分析

为研究横波可控震源振动器不同组合激振方式对沿激振方向大地粒子位移振幅的影响,分别提取各组合中心节点处不同深度下沿激振方向的位移振幅。图 8(a)表示在两台 SHY 并排组合方式中,分别选取分析两台振动器中心地表 a_1 处下方深度 1、5、10、15 m 的粒子。为对比各组合激振方式与单个振动器沿激振方向的大地粒子位移振幅,需选取与各组合振动器相同地表位置进行分析研究。分别选取与各组合方式相同中心地表 a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 的不同深度处沿激振方向位移振幅研究分析,如图 8(b)所示。



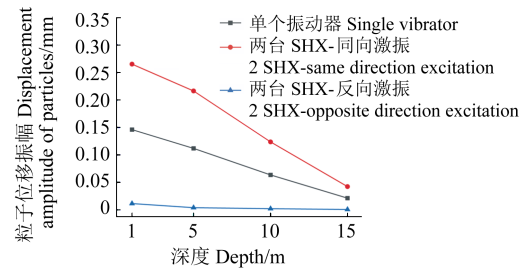
(a) 不同深度粒子的选取
(a) Selection of earth particles with different depths
(b) 不同深度大地粒子地表位置的选择(俯视图)
(b) Selection of the surface location of earth particles with different depths(top view)

图 8 各组合方式中心处不同深度大地粒子位置的选取
Fig. 8 Selection of earth particles with different depths at the center of each combination mode

3.3.1 并排组合

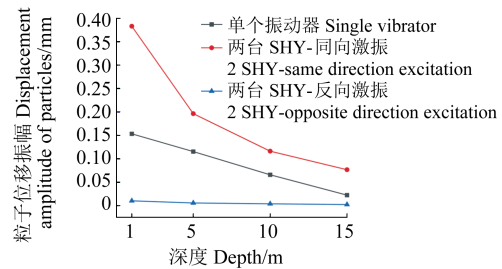
图 9 所示为单台横波可控震源振动器和 4 种并排组合(间距为 3 m)振动器分别在地表 a_0 、 a_1 点下方不同深度处沿激振方向的大地粒子位移振幅曲线。由图 9 可知,两台 SHX 与两台 SHY 振动器同向组合激振时较单台振动器各深度处大地粒子位移振幅均显著增加,表明这两种组合激振方式对横波下传深度提升均较大;两台 SHX 与两台 SHY 振动器反向组合激振时各深度处大地粒子位移振幅均较小,说明反向激振时大地粒子位移会相互抵消,导致横波下传深度较浅,实际工程中应避免此类情况。此外,两台 SHY 振动器同向激振时在深度 1~5 m 大地粒子位移振幅衰减较大,深度 5~15 m 衰减较小。因此,较两台 SHX 振动器同向激振方式,该组合方式下大地整体粒子位移衰减程度缓慢,横波信号下传深度大。

综上所述,4 种并排组合激振方式中,两台 SHY 振动器同向激振时,各深度处沿激振方向的大地粒子平均位移振幅最大,较单个横波可控震源振动器平均提升了 73.40%。



(a) 地表 a_0 处不同深度

(a) Different depths at a_0



(b) 地表 a_1 处不同深度

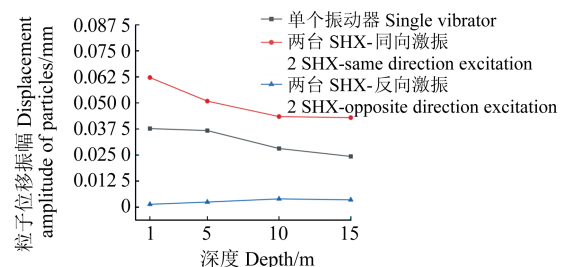
(b) Different depths at a_1

图 9 并排组合振动器与单个振动器不同深度大地粒子位移振幅
Fig. 9 Displacement amplitude of earth particles with different depths for side-by-side combination vibrators and single vibrator

3.3.2 单排组合

图 10 所示为单台横波可控震源振动器和 4 种单排组合(间距为 13 m)振动器分别在地表 a_2 、 a_3 点下方不同深度处沿激振方向的大地粒子位移振幅曲线。由图 10 可知,两台 SHX 与两台 SHY 振动器同向激振时较单台振动器各深度处大地粒子位移振幅均显著增加,表明这两种组合激振方式对横波下传深度提升均较大;与并排组合反向激振方式不同,两台 SHX 与两台 SHY 振动器反向激振时各深度处大地整体粒子位移振幅增加,说明振动器间距较大时,大地粒子位移振幅抵消程度会降低,使横波下传深度有所增加,但整体位移振幅水平较低。此外,两台 SHY 振动器同向激振时大地整体粒子位移衰减程度较大,而两台 SHX 振动器同向激振时大地整体粒子位移衰减缓慢。因此,该组合激振方式下横波信号下传深度大、激振效果好。

综上所述,4 种单排组合激振方式中,两台 SHX 振动器同向激振时,各深度处沿激振方向的大地粒子平均位移振幅最大,较单个横波可控震源振动器平均提升了 58.61%。



(a) 地表 a_2 处不同深度

(a) Different depths at a_2

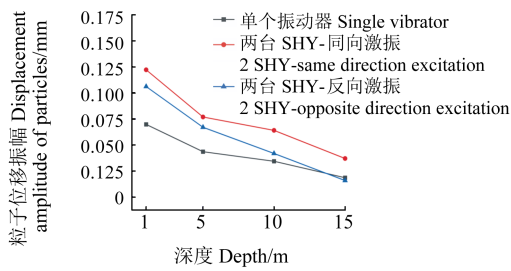
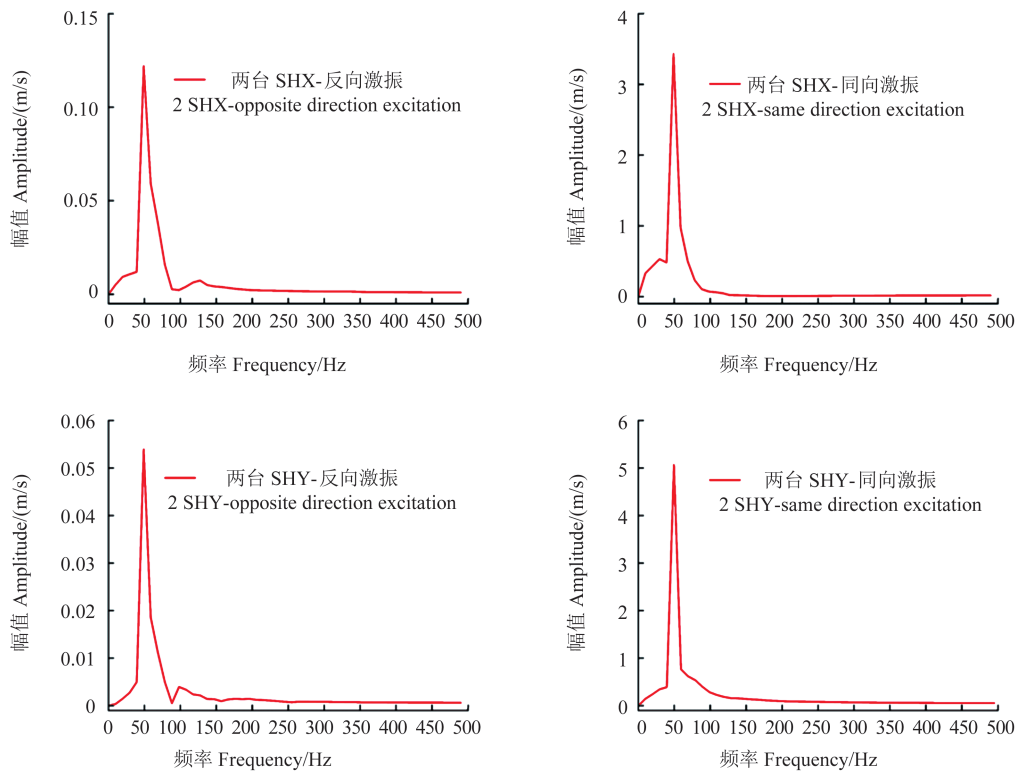
(b) 地表 a_3 处不同深度(b) Different depths at a_3

图 10 单排组合振动器与单个振动器不同深度大地粒子位移振幅
Fig. 10 Displacement amplitudes of earth particles with different depths for a single-row combination vibrators and single vibrator

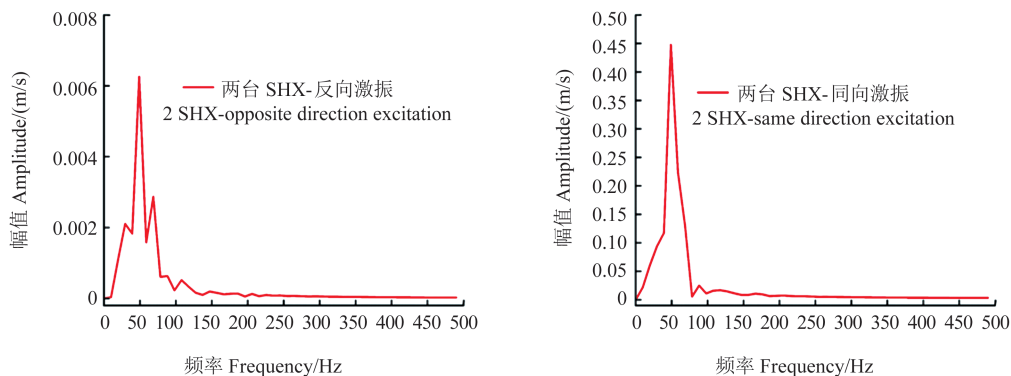
3.4 组合激发波间干涉分析

为分析横波可控震源振动器各组合激发方式间波的相互干涉情况,分别提取 4 种并排组合激发方式和 4 种单排组合激发方式的中心地表下 1 m 处沿激振方向的剪切速度,将提取的速度通过傅里叶变换获得剪切速度的幅频特性曲线(图 11)。图 11(a)所示为 4 种并排组合激发方式。由图 11(a)可知,两台 SHY 振动器同向激发产生的低次谐波与高次谐波最少,该组合间相互干涉最小,幅值最大,表明并排组合中该组合激发波的质量最好。图 11(b)所示为 4 种单排组合激发方式。由图 11(b)可知,两台 SHX 振动器同向激发产生的低次谐波与高次谐波最少,该组合间相互干涉最小,幅值较大,表明该组合方式激发波质量最好。

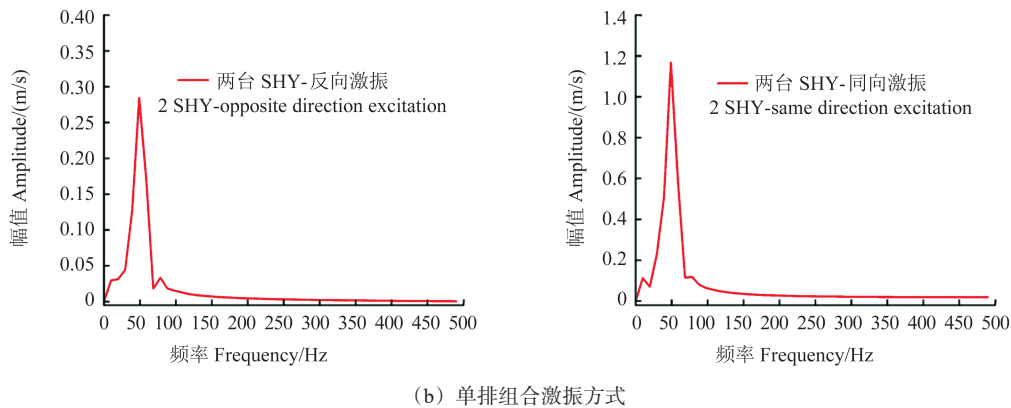


(a) 并排组合激发方式

(a) Side-by-side combined excitation mode



(b) 单排组合激发方式



(b) 单排组合激振方式
(b) Single-row combined excitation mode
图 11 8 种组合激发波间干扰的速度幅频特性曲线

Fig. 11 Velocity amplitude-frequency characteristic curve of interference between eight-combined-excitation waves

4 结论

为提高横波可控震源振动器勘探效果,构建了横波可控震源振动器不同组合方式激振模型,建立了激振效果评价体系,研究了包括并排组合与单排组合在内的 8 种组合激振方式的激振效果。主要结论如下:

1) 横波可控震源主要分为 SHX 和 SHY 两类,根据三维九分量原理将组合类型分为并排与单排两大类,提出了并排与单排组合中各自 4 种不同的组合激振方式。

2) 4 种并排组合中,两台 SHY 振动器同向组合激振相较于单个振动器激振,传入大地能量提升了 86.36%,各深度沿激振方向的大地粒子位移振幅平均提升了 73.40%,组合激振波之间的相互干涉最小,激振信号质量最好。

3) 4 种单排组合中,两台 SHX 振动器同向组合激振相较于单个振动器激振,传入大地能量提升了 97.48%,各深度沿激振方向大地粒子位移振幅平均提升了 58.61%,组合激振波之间的相互干涉最小,激振信号质量最好。

4) 振动器并排组合与单排组合的同向激发均较大地提升了传入大地能量与横波信号下传深度,进而提高横波勘探效果。研究成果为横波可控震源激振效果提升提供了指导,也为横波可控震源组合激发设计研究提供了参考。

参考文献(References)

- [1] CALDWELL J. Marine multicomponent seismology[J]. The Leading Edge, 1999, 18(11): 1274-1282.
- [2] STEWART R R, GAISER J E, BROWN R J, et al. Converted-wave seismic exploration: applications[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 40-57.
- [3] JØRSTAD A, MUKERJI T, MAVKO G. Model-based shear-wave velocity estimation versus empirical regressions[J]. Geophysical Prospecting, 1999, 47(5): 785-797.
- [4] PENG X, HUANG Z Q, LÓPEZ-QUEROL S, et al. Nonlinear 3D finite element analysis of a shear-wave vibrator-ground interaction system[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 141: 106520.
- [5] 欧倩茹. 横波可控震源振动器激发效果与平板齿结构设计[D]. 成都:西南石油大学, 2019: 41-50.
OU Qianru. Excitation effect of shear wave vibroseis vibrator and structural design of flat teech[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019: 41-50. (In Chinese)
- [6] VANNESTE M, MADSHUS C, SOCCO V L, et al. On the use of the Norwegian Geotechnical Institute's prototype seabed-coupled shear wave vibrator for shallow soil characterization-I: acquisition and processing of multimodal surface waves [J]. Geophysical Journal International, 2011, 185(1): 221-236.
- [7] BHARADWAJ P, DRIJKONINGEN G, MULDER W, et al. A shear-wave seismic system using full-waveform inversion to look ahead of a tunnel-boring machine [J]. Near Surface Geophysics, 2017, 15(3): 210-225.
- [8] KRAWCZYK C M, POLOM U, TRABS S, et al. Sinkholes in the city of hamburg-new urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsrosion structures [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 78: 133-143.
- [9] 王波, 张峰, 代福材, 等. VTI 介质 SH-SH 波地震反演方法研究 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(5): 2112-2122.
WANG Bo, ZHANG Feng, DAI Fucui, et al. Study on seismic inversion method of SH-SH wave in VTI media [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(5): 2112-2122. (In Chinese)
- [10] KLOKOV A, HARDAGE B. SV-P and S-S imaging at a CO2 storage site using vertical seismic profiling data [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 46: 259-270.
- [11] POLOM U, HOFSTEDTE C, DIEZ A, et al. First glacier-vibroseismic experiment-results from cold firm of Colle Gnifetti [J]. Near Surface Geophysics, 2014, 12(4): 493-504.
- [12] PENG X, HUANG Z Q, HAO L. Modeling of nonlinear interaction and its effects on the dynamics of a vibrator-ground system [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132: 106064.
- [13] HUANG Z Q, PENG X, LI G, et al. Response of a two-degree-of-freedom vibration system with rough contact interfaces [J]. Shock & Vibration, 2019, 2019(1): 1-13.
- [14] HUANG Z Q, PENG X, LI G. Optimization of the dynamic stiffness of the seismic vibrator [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(11): 1-11.
- [15] 朱振友. 横波可控震源振动器多频激振性能研究与平板齿优化

- 设计[D]. 成都:西南石油大学,2021:55-70.
- ZHU Zhenyou. Study on multi-frequency excitation performance of shear wave vibroseis vibrator and optimization design of flat teeth [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2021: 55-70. (In Chinese)
- [16] 孙振. 横波可控震源激振板与地面耦合特征研究[D]. 长春:吉林大学,2022:43-55.
- SUN Zhen. Study on coupling characteristics between excitation plate and ground of shear wave vibroseis [D]. Changchun: Jilin University, 2022:43-55. (In Chinese)
- [17] 郝磊,刘志刚,黄玉峰,等. 一种横波可控震源振动器结构及其性能分析[J]. 物探装备,2021,31(5):311-313.
- HAO Lei, LIU Zhigang, HUANG Yufeng, et al. A kind of Swave seismic vibrator shaker and its performance analysis [J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2021, 31(5): 311-313. (In Chinese)
- [18] BELLEFLEUR G, ADAM L, WHITE D, et al. Seismic imaging and anisotropy analysis of 9C 3D-VSP data at Weyburn Field, Saskatchewan, Canada [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2003:2452.
- [19] 彭珣,郝磊. 横波可控震源振动器-大地耦合振动数值模拟[J]. 石油地球物理勘探,2023,58(6):1349-1358.
- PENG Xun, HAO Lei. Numerical simulation of shear-wave seismic vibrator-ground coupled vibration system [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(6): 1349-1358. (In Chinese)
- [20] ACHMUS M, KUO Y S, ABDEL-RAHMAN K. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 725-735.
- [21] KIM Y, JEONG S. Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 248-257.
- [22] ACHMUS M, AKDAG C T, THIEKEN K. Load-bearing behavior of suction bucket foundations in sand [J]. Applied Ocean Research, 2013, 43: 157-165.
- [23] 李琴,蒲伟,黄志强,等. 川渝地区可控震源道路激振效果分析 [J]. 工程设计学报, 2022, 29(6): 766-775.
- LI Qin, PU Wei, HUANG Zhiqiang, et al. Analysis of road excitation effect of vibroseis in Sichuan and Chongqing area [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(6): 766-775. (In Chinese)
- [24] FABRIKANT V I. Solution of contact problems for a transversely isotropic elastic layer bonded to an elastic half-space [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(11): 2487-2499.
- [25] 李裕春,时党勇,赵远. ANSYS11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:20-33.
- LI Yuchun, SHI Danyong, ZHAO Yuan. Basic theory and engineering practice of ANSYS11.0/LS-DYNA [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008: 20-33. (In Chinese)
- [26] WEI Z H, PHILLIPS T F. Characterizing the vibrator captured ground mass system using finite element analyses [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2013: 126-130.

Analysis of combined excitation effect of shear-wave vibroseis

HUANG Zhiqiang YOU Zhengtao LI Gang FU Mingwei WANG Ruohao SHUAI Jun ZHANG Guoxu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Limited by the vibrator structure, there are some problems such as low down-going earth energy and shallow down-going depth of shear-wave signals when the shear-wave vibroseis is excited. Therefore, the influence of different combinations of shear-wave vibroseis vibrators on the excitation effect was innovatively studied through the three-dimensional finite element numerical simulation. Firstly, based on three-dimensional nine-component data and two types of combinations, eight modes of vibration excitation of combined shear-wave vibroseis were considered, a vibrator-earth finite element model was established, and an evaluation system of the vibration excitation effect of the combined shear-wave vibroseis was constructed. Secondly, based on this evaluation system, the influence of the various combined excitation modes of the shear-wave vibroseis on the downward energy of the earth, the downward depth of shear-wave signals and the mutual interference between combined excitation waves was analyzed in detail. The results show that, compared with a single shear-wave vibroseis, when two SHY shear-wave vibroseises are arranged side by side for the normal excitation, the incoming earth energy is increased by 86.36%, and the displacement amplitude of earth particles is increased by 73.40% on average. When two SHX shear-wave vibroseises are excited in the normal direction, the incoming earth energy increases by 97.48%, and the displacement amplitude of earth particles increases by 58.61% on average, which greatly improves the excitation effect. The research results can provide the guidance for improving the excitation effect of the shear-wave vibroseis and the reference for the design of combined excitation mode of the shear-wave vibroseis.

Key words: Shear-wave vibroseis; Combined shear-wave vibrator; Combined excitation effect; Seismic prospecting; Finite element method

Corresponding author: HUANG Zhiqiang, E-mail: huangzq@swpu.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (41902326); Sichuan Science and Technology Project (22GJHZ0284); Nanchong-Southwest Petroleum University City-School Science and Technology Strategic Cooperation Special Project (SXHZ048); Enterprise Horizontal Cooperation Project (JSTKY-22-002)

Received: 2023-10-24 Revised: 2023-11-17