

基于相控震源的深部矿体微弱信号增强方法

密士文, 朱自强, 彭凌星

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 为有效探测深部矿体, 研究地震波微弱信号增强技术至关重要。采用有限差分法, 对不同震源激发方式产生的地震波场响应进行数值模拟。震源方向特征、单炮记录和单道反射波的对比结果表明: 相对于单震源和组合震源, 相控震源可以明显改变地震波场能量的分布, 增强深部矿体微弱的反射信号。延迟参数不同, 对微弱信号的增强能力也不同, 可以根据需要设置合适的延迟参数。总体来说, 相控震源可以为深部矿体勘探提供有利条件。

关键词: 深部矿体; 相控; 地震波; 数值模拟; 微弱信号

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Improving method for weak signals from deep mineral resources based on phased array sources

MI Shi-wen, ZHU Zi-qiang, PENG Ling-xing

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To explore deep mineral resources effectively, the technology of improving weak signals is an essential technology for seismic waves. Finite-difference method was used for the numerical simulation of wave propagation and response of detector for different sources. By contrast of sources directional character, single shot records and single-channel reflected waves, the results show that phased array sources can change energy direction of seismic field obviously and enhance the reflected weak signals from deep mineral resources. For different delay parameters, the ability of improving weak signals is also different. Suitable delay parameters can be chosen in accordance with needs. On the whole, phased array sources can effectively improve the quality of seismic data from deep mineral resources.

Key words: deep mineral resources; phased array; seismic wave; numerical simulation; weak signals

随着传播距离的增加, 地震波数据信噪比急剧降低。地表检波器接收到的目标反射能量相对较弱, 经常淹没在背景噪声中, 从波形上无法直观识别异常信号。目前的地震解释技术难以有效提取微弱信号, 在探测深部或小规模地质体方面存在一定的问题。因此, 如何从包含强背景噪声的地震信号中提取有效的微弱信号, 或者增强有效信号的信噪比, 就成了目前地震勘探亟需解决的问题之一。

微弱信号是指幅度很弱的信号或者被噪声淹没的信号。弱信号在常规的时空域中不易识别, 需要用一定的检测手段才能将其提取出来。为提高弱信号的识别能力, 一方面可以采用各种噪声压制技术, 提取弱

信号; 另一方面, 可以采用增加弱信号的能量方法, 提高信噪比。在弱信号的提取方面有很多方法, 已经广泛应用于交通、通讯和图像处理等领域^[1-5]。在地震勘探领域, 穆星^[6]建立了适合储层目标弱信号分离的地震盲源信号混叠模型, 提出了分离 2 种弱信号的新方法。Curvelet 变换^[7-8]是在小波变换基础上发展起来的一种新的多尺度变换, 近年来广泛应用于地震数据去噪领域, 可以较好地压制其中的随机噪声, 增强弱信号的能量。为增加信号的能量, 最简单的办法就是增加震源的功率, 相控震源技术恰好可以做到这一点。相控阵技术已经广泛应用于超声波检测领域^[9-10], 通过设置不同的延迟时间, 使阵列的能量聚焦到某一

方向或某个点上。该技术的核心是波束形成,通过动态聚焦、幅度变迹和动态孔径等方法,可以控制波束的聚焦范围和聚焦效果^[11-13]。但该方法在地震勘探领域的应用起步较晚,目前国内相关研究不多。姜弢等^[14-16]对地震波相控震源的方向特征及对信噪比的改善进行了系统的研究,研究成果非常有创新性。徐峰等^[17]也进行了类似的研究,根据相控理论,利用不同的激发时间和激发深度,达到激发定向地震波束的目的,使检波器接收的反射信号增强,信噪比提高,改善了地震勘探效果。为了更好地了解相控震源对弱信号的增强能力,必须进行波场正演模拟。徐峰等^[17]应用射线追踪方法得到合成单炮记录,该方法只能反映地震波的运动学特征,且对复杂模型的模拟能力有限。姜弢等^[14-16]虽然利用有限差分求解波动方程,但是没有直接模拟相控震源的波场,而是采用先求解相控震源的每个单元形成的地震波场,然后将各相控单元的波场延时叠加,得到相控震源的波场。他们的研究方法与相控阵理论有些差别,基于此,本文作者借助超声波相控阵相关理论,对地震波相控震源波场进行模拟。同时通过震源方向特征、单炮记录和单道波形的对比,定性和定量地分析相控震源对深部矿体弱信号的增强能力。

1 相控震源基本理论

相控震源主要是利用各震源激发地震波时间的不同,改变由各震源发射的地震波到达物体内部某点时的相位关系,达到在某特定方向或某点同相叠加的目的,从而使目标区域的反射信号能量增强,基本原理如图1所示。

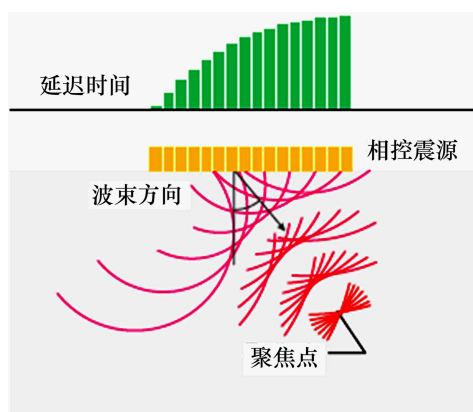


图1 相控震源基本原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic principle of phased array sources

除各震源的激发时间外,相控震源还有两个重要参数:震源间距和震源数量。为了使主波束变窄,提高分辨率,可以通过控制震源数量和间距实现。在震源间距不变的情况下,增加震源数量,可以使主波束变窄,能量更集中;在震源数量一定时,适当增加震源间距,也可以使主波束宽度变窄,波束的聚焦性增强,分别如图2和3所示。需要说明的是,图中 0° 表示波束的聚焦角度,并不是真正的 0° 方向。

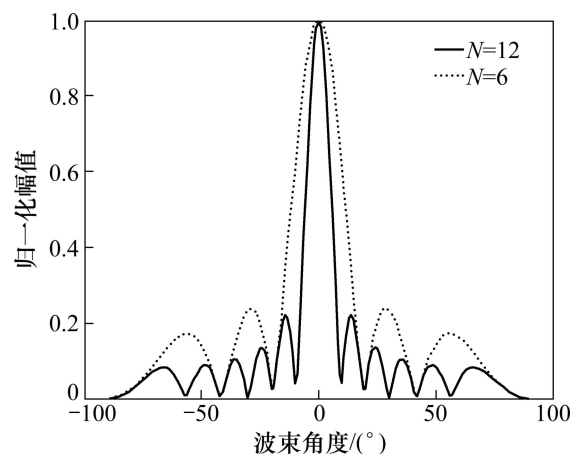


图2 震源数量(N)对波束形状的影响

Fig. 2 Influence of number of sources (N) on beam shape

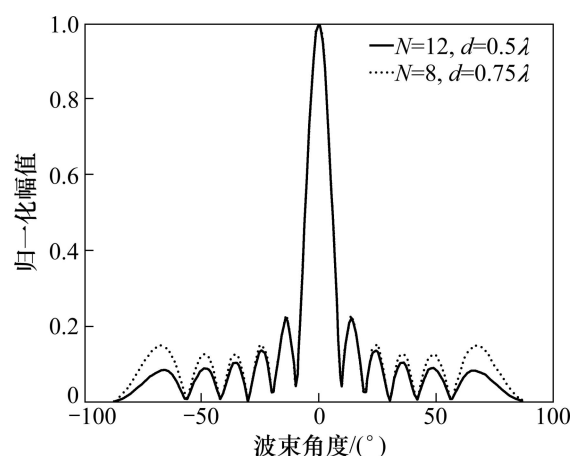


图3 震源间距(d)和数量(N)对波束形状的影响

Fig. 3 Influence of distance (d) and number (N) of sources on beam shape

图2所示为震源数量 N 分别为6和12时形成的波束形状的对比。由图2可见:采用12个震源激发的地震波波束能量更加集中,且旁瓣幅度更低。图3所示为震源数量为12、间距为 0.5λ (λ 为超声波波长)和震源数量为8、间距为 0.75λ 时,形成的波束形状的对比。由图3可见:两种情况激发的波束形状基本相同,主波束宽度没有本质区别。仅在离波束中心较远处,

震源数量较少的情况下,旁瓣幅度会稍微增大。因此,适当增大震源间距和减少震源数量,可以在不影响波束聚焦效果的情况下节约成本。但是,震源数量较少时,检波器接收到的地震波数据信噪比会降低。而且震源间距的选择要求(小于半波长),过大的间距会出现栅瓣,且旁瓣的幅度也会增大^[11-13]。

根据相控阵聚焦准则,相控震源形成的波束方向 θ 由各震源延迟激发时间 τ 、地震波速度 v 和震源间距 d 决定,其定义如下^[13]:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{v\tau}{d}\right) \quad (1)$$

需要指出的是:通过式(1)计算出来的是在均匀介质中形成的波束传播角度,在非均匀介质中,随着地震波的折射,波束角度将发生变化。一般规定, θ 为波束与竖直向下方向的夹角。

2 相控震源波场正演模拟方法

地震波场模拟方法有如下 3 类:波动方程数值解法、射线追踪法和积分方程法。本文作者采用计算速度快、易于编程实现的有限差分法求解波动方程。为提高计算精度、降低频散,采用空间十阶、时间二阶的高阶交错网格模拟。震源采用主频为 50 Hz 的雷克子波,空间步长 $dx=dz=5$ m,时间采样步长 $dt=0.5$ ms,边界为 PML 吸收边界。其详细方法及过程,可参考相关文献^[18-23]。这里重点介绍相控震源的实现,在正演模拟中设介质密度为常数,则声波方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中: u 为网格节点处的波场值; v 为介质纵波速度。

葛利华等^[16]所采用的方法没有在地震波的传播过程中实现波场同相叠加,与相控阵的出发点存在一点出入,在本研究中称其为波场延时叠加法。借鉴超声波相控阵的模拟方法,本文作者采用如下方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + s(x, t) \quad (3)$$

$$s(x, t) = \begin{cases} s(t - \tau_i), & x = x_{s_i} \\ 0, & x \neq x_{s_i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_{s_i} 表示第 i 个震源的位置; τ_i 为其对应的延迟激发时间。也就是说,在模拟过程中,先判断该点是否为震源点:如果是,则在对应的时刻 τ_i 加入震源 $s(t)$ ^[13];如果不是,则正常计算。

3 相控震源正演模拟结果

结合具体模型,通过方向特征图、单炮记录和单道数据的对比,讨论相控震源对深部矿体微弱信号的增强能力。建立如图 4 所示的模型,模型长度和深度均为 1.2 km,模型中设置一个背斜状的矿体,速度为 3 600 m/s。其余 3 层介质速度从上到下分别为 1 600、2 000 和 2 800 m/s。

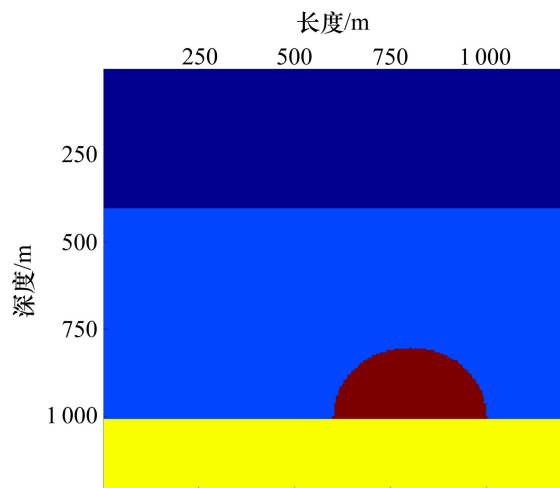


图 4 背斜状矿体的地质模型

Fig. 4 Geologic model of anticline-like orebody

采用单震源模拟时,震源坐标为(100,0)。相控震源由 9 个震源组成,第 1 个震源坐标为(100,0),其余震源依次向右间隔 10 m 布置。为了对比不同延迟时间对相控震源的聚焦方向的影响,模拟中分别采用 1、2.5 和 3.5 ms 3 个延迟参数,下面分别称其为 1 ms 相控震源、2.5 ms 相控震源和 3.5 ms 相控震源。此外,还进行组合震源的模拟,即将 9 个震源同时激发,不设置延迟时间。组合震源本质上属于相控震源,是延迟时间为 0 的特殊相控震源。

3.1 波场能量方向特征对比

为描述地震波能量在地下半空间的分布情况,引入方向特征的概念^[16]。将模型中每个网格点处的波场能量累加,得到震源的方向特征图。图 5 所示为采用不同震源激发时,地震波能量在地下半空间的分布情况。

由图 5(a)~(e)可见:采用单震源激发时地震波能量无方向性,在地下半空间均匀扩散;组合震源激发的地震波能量垂直向下,其正下方的地质界面反射较强,

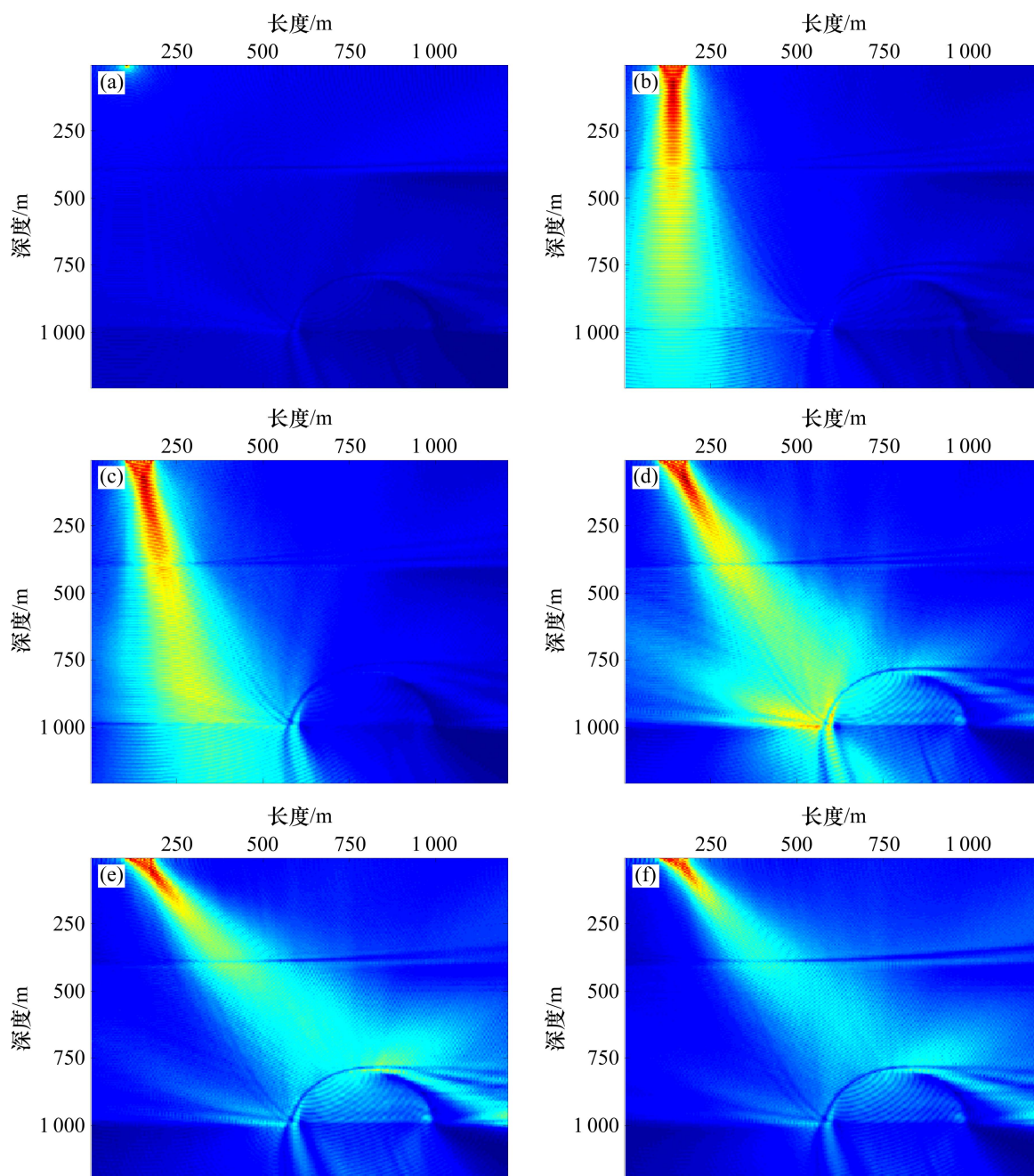


图5 不同震源能量方向特征图: (a) 单震源; (b) 组合震源; (c) 1 ms 相控震源; (d) 2.5 ms 相控震源; (e) 3.5 ms 相控震源; (f) 延时叠加法

Fig. 5 Directional character maps of different sources: (a) Single source; (b) Combination sources; (c) 1 ms phased array sources; (d) 2.5 ms phased array sources; (e) 3.5 ms phased array sources; (f) Delay and sum

但旁侧目标的反应较弱; 延迟参数不同的相控震源能量分布不同, 且地震波能量空间分布区别较明显。当采用 1 ms 的延迟参数时, 地震波能量没有集中在矿体区域; 当采用 2.5 ms 的延迟参数时, 地震波能量集中在矿体左侧; 当采用 3.5 ms 的延迟参数时, 地震波能量集中在矿体上部。因此, 可以得出如下结论。

1) 与单震源和组合震源相比, 相控震源具有改变

地震波能量方向的能力, 进而可以改善目标区域的信噪比, 增强对目标的识别能力。

2) 对尺寸较大的目标体来说, 存在多个延迟时间均可以改善该目标的识别能力。因为不同的延迟时间将使相控震源能量照射在目标体的不同位置。

3) 对固定的探测目标来说, 存在一组最优的延迟时间, 使相控震源对该目标的探测能力最强。

4) 在不知道探测目标位置的情况下, 可以通过改变延迟参数的方法, 试探性地利用相控震源进行探测。利用超声波相控阵常用的动态聚焦和动态孔径方法, 完成整个地下半空间的相控震源探测。

图 5(f)所示是按照文献[16]所述方法模拟的结果, 各参数设置与图 5(e)相同。对比图 5(e)和 5(f)发现, 地震波能量空间分布基本相同, 只是图 5(e)的能量稍强于图 5(f)的能量。这是因为本文作者所用模拟方法,

实现了地震波在传播过程中的相干叠加, 因此聚焦效果更好。这也说明了本文作者所用模拟方法是正确的。

3.2 单炮记录对比

为了直观地了解相控震源对矿体微弱信号的增强能力, 将地表检波器接收到的单炮记录进行对比分析。采用不同震源激发得到的单炮记录如图 6 所示。

由图 6(a)~(f)可见: 采用单震源仅能明显识别第一

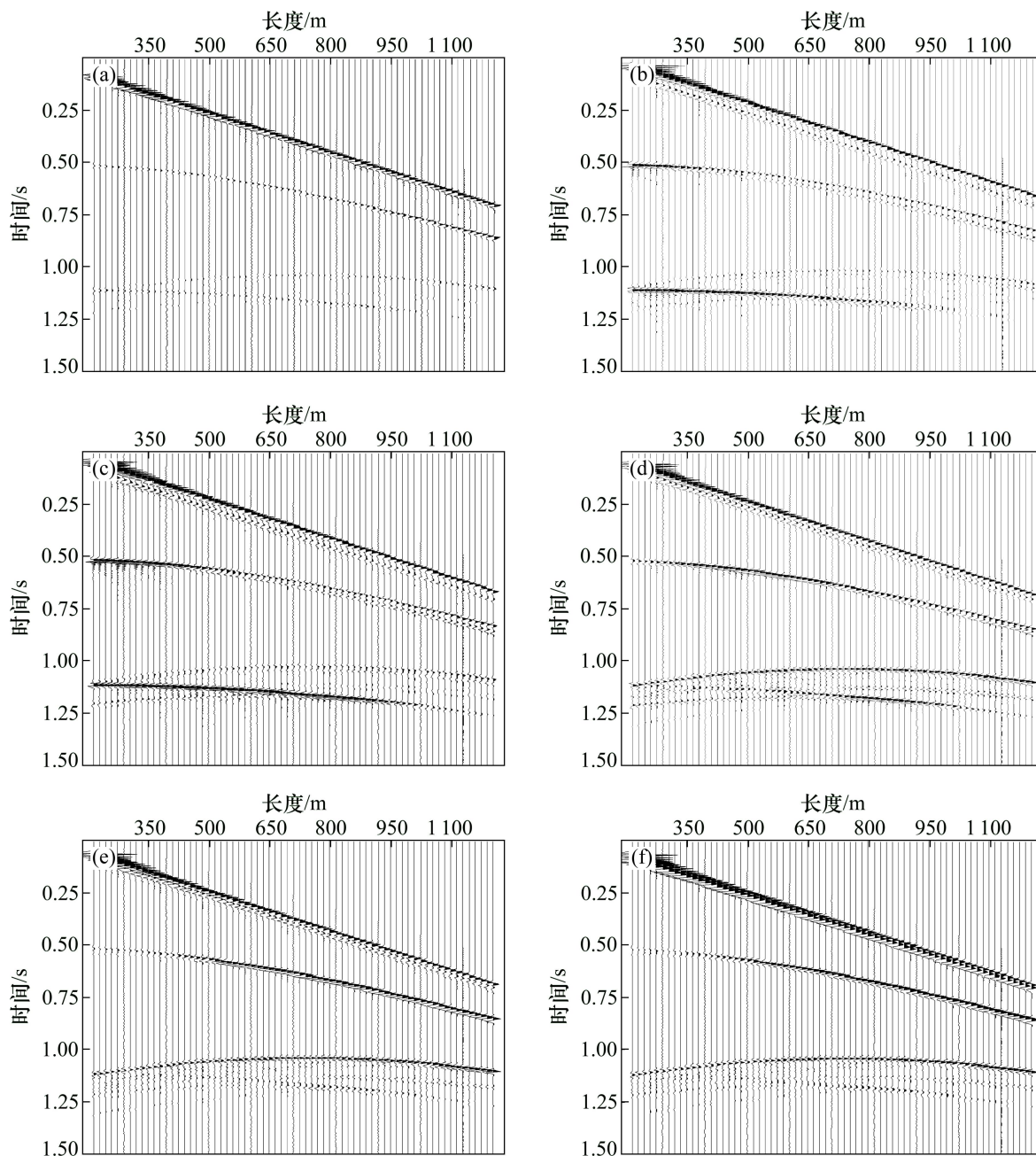


图 6 不同震源的单炮记录: (a) 单震源; (b) 组合震源; (c) 1 ms 相控震源; (d) 2.5 ms 相控震源; (e) 3.5 ms 相控震源; (f) 延时叠加法

Fig. 6 Single-shot records of different sources: (a) Single source; (b) Combination sources; (c) 1 ms phased array sources; (d) 2.5 ms phased array sources; (e) 3.5 ms phased array sources; (f) Delay and sum

个水平界面,第二个水平界面和矿体的反射较弱;由于能量主要集中在正下方,组合震源正下方地层反射较强,但其旁侧的地层和矿体反射较弱;对于相控震源,当采用1 ms的延迟参数时,两水平地层界面的反射波同相轴较为清楚,但对矿体的识别能力较弱;当采用2.5 ms的延迟参数时,不但能明显识别两水平地层界面,而且矿体上界面的反射也较强,甚至还能够看到矿体底部的反射;当采用3.5 ms的延迟参数时,可以明显分辨第一个水平界面,对矿体上界面的反映也非常明显,但是第二个水平界面和矿体底部的反射较弱;延时叠加法获得的结果与图6(e)基本相同,无明显区别。因此可以得出如下结论。

- 1) 相控震源可以增强深部目标的反射能量,提高地震波对深部矿体的识别能力。
- 2) 不同延迟参数的相控震源对下方地质目标的反映能力不同,可以根据探测目的选择合适的延迟参数。
- 3) 由于不同的延迟参数对目标的探测部位不同,

因此,要完成一个目标体的探测,需要利用不同的延迟时间进行多次组合探测。

3.3 单道反射波对比

通过对比矿体的反射波,来定量地说明相控震源对矿体微弱信号的增强能力。图7所示为地表750 m和900 m处检波器接收到的矿体反射波形。

由图7(a)和(b)可见:在750 m处3.5 ms相控震源探测到的矿体的最大反射波振幅约为0.05,而采用单震源和组合震源时约为0.007,最大振幅比约为7:1;在900 m处3.5 ms相控震源探测到的矿体的最大反射波振幅约为0.06,而采用单震源时约为0.008,最大振幅比约为7.5:1,组合震源基本没有获得矿体的反射。由图7(c)和(d)可见:3.5 ms相控震源探测到的矿体的反射波最大振幅约为0.06,而1 ms相控震源基本没有矿体的反射。

图7表明:通过设置适当的延迟参数,相控震源可以使深部矿体的最大振幅提高数倍;但是,如果延

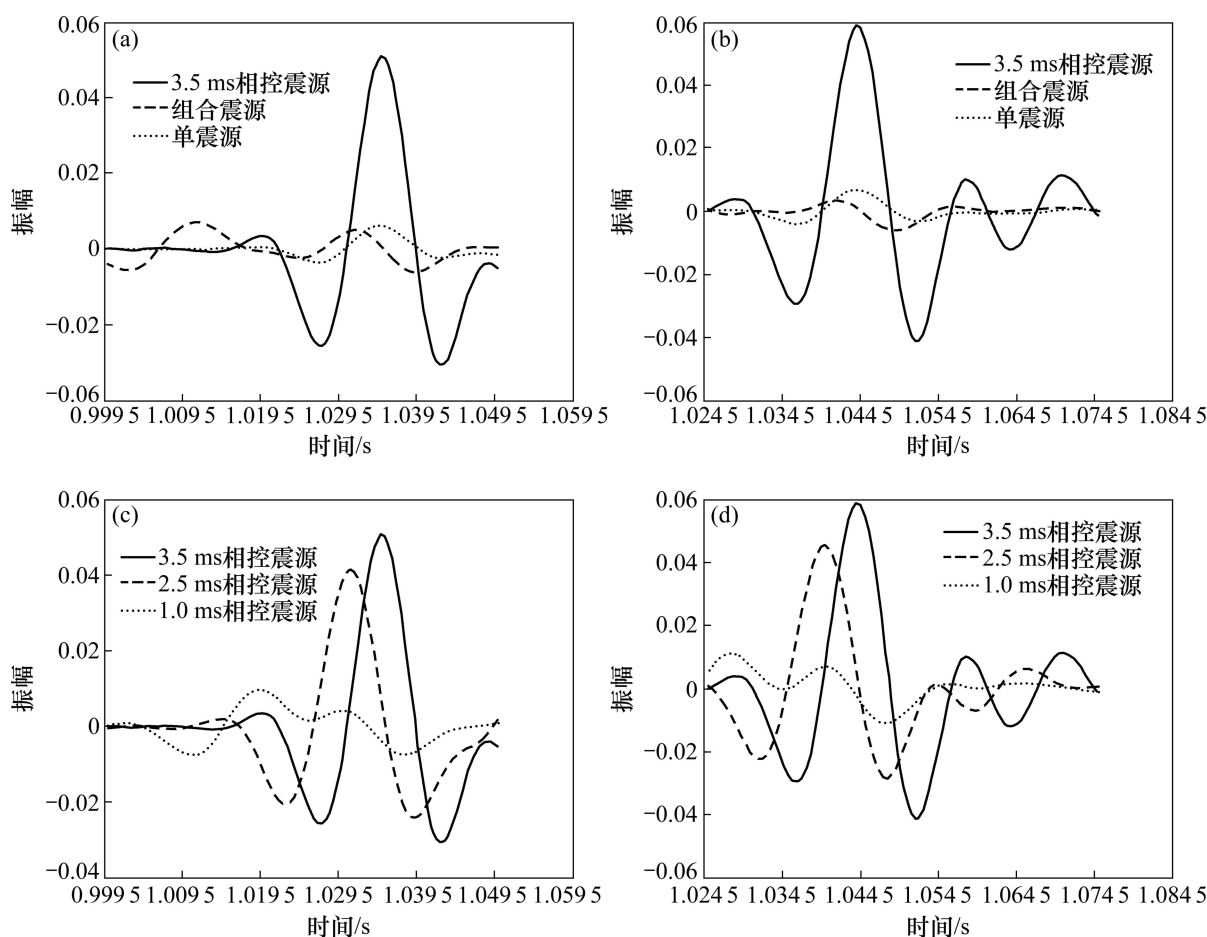


图7 矿体反射波对比: (a) 750 m处不同震源; (b) 900 m处不同震源; (c) 750 m处不同相控震源; (d) 900 m处不同相控震源
Fig. 7 Contrast of different reflected waves from mining: (a) Different sources at 750 m; (b) Different sources at 900 m; (c) Different phased array sources at 750 m; (d) Different phased array sources at 900 m

迟参数设置不合理,探测效果可能还不如单震源和组合震源的。在不同接收位置,相控震源对数据信噪比的增强能力不同。

4 结论

1) 相控震源激发的地震波具有方向性,该方向与地层速度、震源延迟激发参数和震源间距有关。可以根据需要控制地震波能量的主要传播方向。

2) 相控震源可以明显地增强深部矿体微弱信号,但需要设置适当的延迟参数;否则,可能还会起到相反的作用。

3) 相控震源激发的波场能量主要集中在主波束方向,旁瓣能量较弱。因此,如果探测目标的规模较大,必须采用多个不同的延迟参数进行组合探测才能达到完整识别异常的目的。

4) 与单震源和组合震源相比,由于相控震源可以控制地震波能量的传播方向,因此在倾斜地层、背斜和向斜等复杂地层的探测中存在较大优势。

5) 对于地下未知的探测目标,可以利用组合震源的方式进行初步探测,在有异常反射的地方再用相控震源进行重点探测。这样既可以提高探测准确性,又可以提高效率。

REFERENCES

- [1] 钱波,郭宁,余明东. 弱振动波信号的检测[J]. 西昌学院学报: 自然科学版, 2005, 19(1): 113-116.
QIAN Bo, GUO Ning, YU Ming-dong. Detecting of weak vibration wave signal[J]. Journal of Xichang College: Natural Science Edition, 2005, 19(1): 113-116.
- [2] 马宁,陈莉,王晓军. 小波变换在弱信号检测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(3): 257-258.
MA Ning, CHEN Li, WANG Xiao-jun. Application of wavelet transform in weak signal monitoring[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(3): 257-258.
- [3] 曾刚,侯祥博. 应用小波变换和双谱方法实现弱信号检测[J]. 电声技术, 2009, 33(6): 60-62.
ZENG Gang, HOU Xiang-bo. Detection of weak signals based on wavelet transform and bispectrum analysis[J]. Audio Engineering, 2009, 33(6): 60-62.
- [4] 魏崇毓,李玲娟,朱卫娟. 一种弱信号检测新方法分析[J]. 现代电子技术, 2012, 35(5): 60-64.
WEI Chong-yu, LI Ling-jun, ZHU Wei-juan. Analysis of a new method for weak signal detection[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(5): 60-64.
- [5] 王启智,岳玫君,张锦中,吕新正. 基于多通道分段自相关的弱信号检测算法及实现[J]. 雷达与对抗, 2009(3): 28-32.
WANG Qi-zhi, YUE Mei-jun, ZHANG Jin-zhong, LÜ Xin-zheng. The algorithm and implementation based on multi-channel sectional self-correlation for weak signal detection[J]. Radar & Ecm, 2009(3): 28-32.
- [6] 穆星. 基于盲信号处理技术的地震弱信号分离方法[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 47-49.
MU Xing. Seismic weak signal separation based on blind signal processing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 47-49.
- [7] 仝中飞. Curvelet 阈值迭代法在地震数据去噪和插值中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009: 7-55.
TONG Zhong-fei. The study on seismic data denoising and interpolation with Curvelet thresholding iterative method[D]. Changchun: Jilin University, 2009: 7-55.
- [8] 韩佳君. Curvelet 变换组合法压制地震随机噪声研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010: 9-55.
HAN Jia-jun. The study on attenuating seismic random noise with Curvelet combinatorial method[D]. Changchun: Jilin University, 2010: 9-55.
- [9] 王伏喜,周晓峰,鄂楠,李斌. 超声波相控阵检测技术在钛合金厚板焊缝中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s964-s966.
WANG Fu-xi, ZHOU Xiao-feng, E Nan, LI Bin. Application of phased array ultrasonic testing technology on inspection of titanium thick welds[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s964-s966.
- [10] ZHANG Bi-xing, LIU Dong-dong, SHI Fang-fang, HE Feng-dong. Ultrasonic focusing and scanning with multiple waves[J]. Chin Phys B, 2013, 22(1): 1-6.
- [11] 詹湘琳,陈世利,张宇,李健,曹周末,靳世久. 超声相控阵在管道缺陷检测中的优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1581-1582.
ZHAN Xiang-lin, CHEN Shi-li, ZHANG Yu, CAO Zhou-mo, JIN Shi-jiu. Optimum design of ultrasonic phase array in flaw detection of pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1581-1582.
- [12] 范兵,郑坚,艾春安. 超声相控阵探头声场特性仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(7): 121-123.
FAN Bing, ZHENG Jian, AI Chun-an. Simulation analysis on sound field characteristic of ultrasonic phased array probe[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(7): 121-123.
- [13] 彭虎. 超声成像算法导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 68-132.
PENG Hu. Introduction to ultrasonic imaging algorithm[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2008: 68-132.
- [14] 姜弢,林君,杨冬,陈祖斌. 相控震源定向地震波信号分析[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1551-1556.

- JIANG Tao, LIN Jun, YANG Dong, CHEN Zu-bin. Analysis of directional seismic signal based on phased-array vibrator system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1551-1556.
- [15] 姜 弢, 林 君, 李桐林, 陈祖斌, 张林行. 相控震源对地震信号信噪比的改善研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1819-1825.
- JIANG Tao, LIN Jun, LI Tong-lin, CHEN Zu-bin, ZHANG Lin-hang. Boosting signal to noise ratio of seismic signals using the phased-array vibrator system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1819-1825.
- [16] 葛利华, 姜 弢, 林 君, 徐学纯, 黄大年, 贾海青. 相控震源在矿产勘探中应用的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4266-4276.
- GE Li-hua, JIANG Tao, LIN Jun, XU Xue-chun, HUANG Da-nian, JIA Hai-qing. Numerical simulation of application of the phase-array vibrator system in mineral exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4266-4276.
- [17] 徐 峰, 刘福烈, 梁向豪. 基于相控理论的炮点组合设计技术[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 170-175.
- XU Feng, LIU Fu-lie, LIANG Xiang-hao. A method for source array design based on the phased-array theory[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(2): 170-175.
- [18] 裴正林, 牟永光. 非均匀介质地震波传播交错网格高阶有限差分法模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(6): 17-21.
- PEI Zheng-lin, MU Yong-guang. A staggered-grid high-order difference method for modeling seismic wave propagation in inhomogeneous media[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2003, 27(6): 17-21.
- [19] 鲁光银, 熊 瑛, 朱自强. 隧道反射波超前探测有限差分正演模拟与偏移处理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(1): 136-141.
- LU Guang-yin, XIONG Ying, ZHU Zi-qiang. Detection simulation ahead of tunnel face and reverse-time migration with reflection wave method[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(1): 136-141.
- [20] 黄坤朋, 赵越喆. 声学 FDTD 法完全匹配层数和衰减系数对衰减性能的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 135-139.
- HUANG Kun-peng, ZHAO Yue-zhe. Attenuation ability influenced by amount and attenuation coefficient of perfectly-matched layers in acoustic FDTD method[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 135-139.
- [21] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185-200.
- [22] 董良国, 马在田, 曹景忠, 王华忠, 耿建华, 雷 兵, 许世勇. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分分解法[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 411-418.
- DONG Liang-guo, MA Zai-tian, CAO Jing-zhong, WANG Hua-zhong, GENG Jian-hua, LEI Bing, XU Shi-yong. A staggered-grid high-order difference method of one-order elastic wave equation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(5): 411-418.
- [23] 周竹生, 唐 磊. 改进 BISQ 模型的双相介质地震波场数值模拟及频散校正[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1411-1418.
- ZHOU Zhu-sheng, TANG Lei. Seismic modeling and numerical dispersion correcting in double-phase medium based on reformulated BISQ model[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(4): 1411-1418.

(编辑 陈卫萍)