

随钻地震波场高阶交错网格有限差分数值模拟

邓瑞¹, 张亮²

1. 长江大学地球物理与石油资源学院; 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北荆州 434023
2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要 随钻 VSP 是利用钻头振动噪声作为震源, 在地面布设检波器进行信号接收的一种新的物探技术。基于随钻地震波场的空间传播特征, 从一阶速度-应力波动方程出发, 利用高阶交错网格有限差分, 模拟出不同炮点深度和不同偏移距情形的随钻地震波场, 研究随钻地震波场的空间传播规律和特征。结果表明, 数值模拟可以有效的解决现场试验周期长, 费用高, 地下结构未知因素多等问题, 为随钻地震技术研究提供了一种高效的手段。

关键词 随钻地震; 时距曲线; 高阶交错网格; 数值模拟; 速度-应力方程

中图分类号 TQ050.4*25

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.08.006

High-order Staggered Finite-difference Numerical Simulation of While-drilling Seismic Wave Field

DENG Rui¹, ZHANG Liang²

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei Province, China
2. Zhanjiang Branch, Zhonghai Petroleum (China) Co., Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong Province, China

Abstract The while-drilling Vertical Seismic Profile (VSP) is a new kind of geophysical prospecting techniques which uses the noise of drill vibration as its seismic source and receives signal by the wave detector deployed on the earth. The vibration of rock-drill is random and continuous, and the wave signal is weak. However, the noise in the well field is strong, and the waves of different times and seismic phases superpose and interfere with each other. As a result, these factors make the SNR of while-drilling seismic data too low and result in the complexity of wave field, in the meantime, make the data processing much more difficult. By using high-order staggered grid FD, it could simulate while-drilling seismic wave field with the different shotpoint depth and different offset distance from the first-order velocity-stress wave equations. Finally, the study on the spatial propagation regulation and characteristics of while-drilling seismic field is able to guide the processing and interpretation of practical while-drilling seismic data.

Keywords while-drilling seismic; time-distance curve; high-order staggered grid; numerical simulation; velocity-stress wave equations

0 引言

随钻垂直地震剖面 (Vertical Seismic Profile, VSP) 技术是石油工程和勘探地球物理相结合的技术, 原理是利用钻头振动噪声作为震源, 在地面布置检波器进行测量^[1-2]。在钻进过程中, 旋转钻头冲击井底岩石产生振动, 形成钻头波场。钻头震源波的部分能量沿钻杆自下而上传播, 在钻杆顶端安装的

参考传感器接收向上传播的振动波, 该信号称为参考信号或导航信号。同时, 钻头震源波的其余能量向地层中传播, 以直达波和反射波的形式传播到地面, 由地面的检波器接收来自地层的各种地震波。将参考信号经过预处理后与地面检波器信号进行互相关和时移以及各种去噪处理, 得到与逆 VSP (即 RVSP) 类似的地震资料^[3-5]。随钻 VSP 不仅具有地面地震与井

收稿日期: 2012-02-03; 修回日期: 2012-03-09

作者简介: 邓瑞, 讲师, 研究方向为油气藏动态监测和模拟, 电子信箱: dengrui@yangtzeu.edu.cn

中地震的一些优点,而且具有不占用钻井时间、不干扰钻井工作、在深度方向可以连续测量、无检波器下井风险、勘探效率高等特点,最重要的是它能实时预测井筒周围、钻头前方地层的构造细节,并达到减少钻探风险的目的^[6-7]。正是由于随钻 VSP 的这些优点,早在 1936 年,Weatherby 就提出利用钻头信号作为震源^[8],至 20 世纪 90 年代,随钻地震技术在国内外获得了较大发展^[9-11]。国内开展的随钻地震技术探索研究也取得了一定进展。1996 年,在江汉油田范 3 井 2250m 左右井段上获得了有效实测信号,并对其进行了特征分析。杨进等^[12]给出了利用随钻地震(SWD)采集数据进行地层压力计算的理论模型,通过对南中国海域某试验井 SWD 采集信息的处理和分析,阐述了预测地层孔隙压力和确定技术套管的下入深度的方法。杨微等^[13]利用高灵敏度流动数字地震仪连续检测钻井过程中的钻头振动信号,现场试验获得了高信噪比信号。王鹏等^[14]在 Seismod 地震波场模拟软件和 Matlab 信号分析软件的基础上,利用交错网格高阶有限差分求解钻头随钻地震的黏弹性介质地震波动方程,对 SWD 波场传播、直达波与反射波时距曲线特征、数据处理方法等进行了数值实验。

由于随钻地震记录利用了钻头破岩的随机连续振动,振动信号较弱,并且井场噪声强造成了不同时刻、不同震相的波相互叠加,使随钻地震资料的信噪比很低,波场非常复杂,数据处理难度大^[15-16]。地震数值模拟是在假定地下介质结构模型和相应物理参数已知的情况下,模拟研究地震波在地下各种介质中的传播规律,计算在地面或地下各观测点所应观测到的数值地震记录的一种地震模拟方法^[17-18]。因此,利用数值模拟技术进行随钻地震波场模拟,研究波场传播规律和特征,指导随钻地震资料处理方法研究,势必有效地促进随钻地震技术的发展。

本文选择弹性介质模型,应用高阶交错网格有限差分算法,模拟出不同炮点深度和不同偏移距情况下的随钻地震波场,详细分析随钻地震各种波场的空间传播特征,指导随钻地震数据采集与噪声衰减、波场分离和有效信号提取。

1 随钻地震波场空间传播特征

1.1 各种类型波的时距关系

设 α 为地层中纵波的平均传播速度, x 为检波器的偏移距,且假设波在钻头和检波器之间沿直线传播。根据图 1 所示随钻地震波场二维地震空间射线关系,得到主要地震波场的二维时距曲线特征。

直达波从深度 z 处钻头位置通过地层传播到检波点的单程旅行时间 t_d 为

$$t_d = \frac{\sqrt{x^2+z^2}}{\alpha} \quad (1)$$

反射波从钻头位置经钻头前方界面 ξ 上反射再通过地层传播到检波点的旅行时间 t_r 为

$$t_r = \frac{\sqrt{x^2+(z+2h)^2}}{\alpha} \quad (2)$$

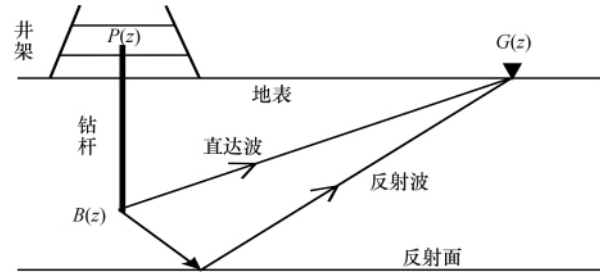


图 1 随钻地震波场二维地震空间射线关系

Fig. 1 Ray relationship of while-drilling seismic wave field in 2D seismic space

如果地震波沿钻柱传播的波速大于井旁地层的传播速度,沿钻柱传播的波能量,传入地层形成钻柱折射波(首波),则钻柱首波的时空关系为

$$t_h = \frac{z-x\tan\theta_c}{V_{DS}} + \frac{x}{\alpha\cos\theta_c} \quad (3)$$

其中,临界角 $\theta_c = \arcsin \frac{\alpha}{V_{DC}}$, V_{DS} 为纵波沿钻柱的传播速度。

1.2 互相关之后各种波的时距关系

正常钻井时,在先导信号与地面检波器记录互相关时,由于和关延迟本身的性质,在互相关后的记录上,上述来源于钻头振动的各种波场(如直达波、反射波和钻柱折射波等)在时间上是超前的,时间超前量 t_p 为钻头信号从钻头位置沿钻柱传播到钻柱顶部先导传感器所需要旅行时间,即 $t_p = l_{DS}/V_{DS} = z/V_{DS}$ (l_{DS} 为钻杆长度)。

直达波时空关系为

$$t_d = \frac{\sqrt{x^2+z^2}}{\alpha} - \frac{z}{V_{DS}} \quad (4)$$

反射波时空关系为

$$t_r = \frac{\sqrt{x^2+(z+2h)^2}}{\alpha} - \frac{z}{V_{DS}} \quad (5)$$

钻柱首波的时空关系为

$$t_h = \frac{x\cos\theta_c}{\alpha} \quad (6)$$

2 高阶交错网格有限差分

2.1 各向同性介质弹性波方程

速度-应力表示的各向同性介质弹性波方程(假定体力为零)为^[19]

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} &= c_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial t} &= c_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} &= c_{44} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{44} \frac{\partial v_x}{\partial x} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, c_{ij} 为介质的弹性参数, 各向同性介质情况下, $c_{11}=c_{33}=\lambda+2\mu$, $c_{13}=\lambda$, $c_{44}=\mu$; v_x, v_z 为速度分量; τ_{xx}, τ_{zz} 为正应力; τ_{xz} 为切应力; ρ 为介质密度。

2.2 时间上 2M 阶差分近似

交错网格求解一阶弹性波方程时, 速度和应力分别 $t+(\Delta t/2)$ 和 t 时刻计算, 利用 Taylor 公式, 将速度和应力对时间的一阶导数展成如下 2M 阶精度的时间差分近似, 如:

$$v_x \left| t + \frac{\Delta t}{2} \right| = v_x \left| t - \frac{\Delta t}{2} \right| + 2 \sum_{m=1}^M \frac{1}{(2m-1)!} \left| \frac{\Delta t}{2} \right|^{2m-1} \frac{\partial^{2m-1} v_x}{\partial t^{2m-1}} + O(\Delta t^{2M}) \quad (8)$$

其中, Δt 为时间步长。当 $M=1$ 时, 即为传统的二阶精度差分格式。

如 $2M=4$, 时间四阶近似时, 由式(1)可将式(2)整理为

$$v_x \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = v_x \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \frac{\Delta t}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right] + \frac{\Delta t^3}{24\rho^2} \left[c_{11} \frac{\partial^3 \sigma_{xx}}{\partial x^3} + (c_{11} + c_{13} + c_{44}) \frac{\partial^3 \sigma_{xz}}{\partial x^2 \partial z} + (c_{13} + c_{44}) \frac{\partial^3 \sigma_{zz}}{\partial x \partial z^2} + c_{44} \frac{\partial^3 \sigma_{xx}}{\partial x \partial z^2} + c_{44} \frac{\partial^3 \sigma_{xz}}{\partial z^3} \right] \quad (9)$$

同理, 可以得到其他 4 个方程的 4 阶时间差分精度近似^[20]。

2.3 空间上 2N 阶差分近似

交错网格技术中, 变量的导数是在相应的变量网格点的半程上计算的, 为引入空间的 2N 阶近似空间的一阶偏导数。

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \sum_{n=1}^N C_n^N \left\{ f \left[x + \frac{\Delta x}{2} (2n-1) \right] - f \left[x - \frac{\Delta x}{2} (2n-1) \right] \right\} + O(\Delta x^{2N}) \quad (10)$$

其中, C_n^N 为待定系数, 可由 Taylor 公式展开后通过解方程组求出^[21]。

图 2 给出了交错网格单元的空间交错策略, 利用式(9)、(10)及交错网格的空间分布即可对式(7)进行空间差分近似。

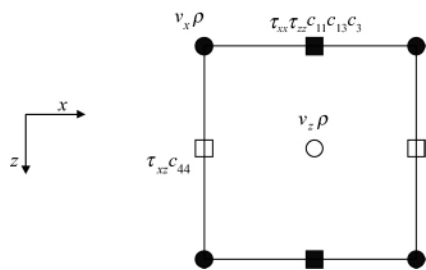


图 2 交错网格单元空间交错示意

Fig. 2 Elementary cells of staggered grids

3 数值模拟

3.1 层状介质模型

交错网格高阶差分法层状介质模型的计算区域为 $3000\text{m} \times 3000\text{m}$, 如图 3 所示。随钻产生的震动采用主频 30Hz 的 Ricker 子波模拟, 分别位于 100, 125, 150, 175m。网格大小

$\Delta x = \Delta z = 10\text{m}$, 时间步长 $\Delta t = 1\text{ms}$, 记录长度 $t = 2000\text{ms}$ 。介质 1 和介质 2 的参数见表 1。完全匹配层的层数 $\delta = 100$, 理论反射系数 $R = 10^{-6}$ 。

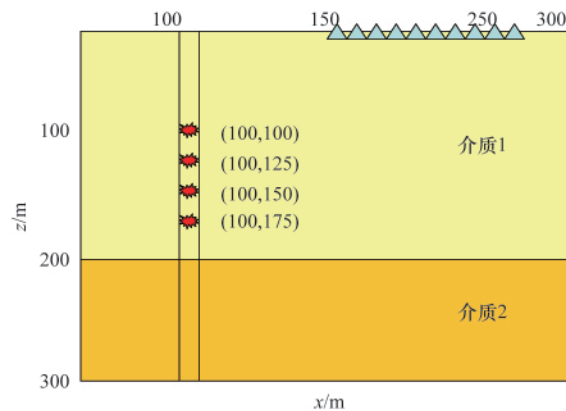


图 3 随钻地震地质模型

Fig. 3 Geological model of while-drilling seism

表 1 层状介质模型介质参数

Table 1 Physical parameters of layer media model

层状介质模型	密度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
介质 1	2500	3000	2100
介质 2	2500	4500	3200

3.2 波场模拟

图 4 为炮点位于 100m 时不同时刻的波场快照。分析波场快照可以得出, 在各向同性介质波, 地震波激发产生纵波和横波波前以球面向四周传播, 并且纵波速度大于横波速度, 见 $t=300\text{ms}$ 时的波场快照。当纵波传播到深度 200m 时, 产生反射波包括纵波和转换的横波, 透射波包括纵波和转换的横波, 见 $t=500\text{ms}$ 时的波场快照。当横波传播到深度 200m 时, 反射波包括横波和转换的纵波, 透射波包括横波和转换的纵波, 见 $t=700\text{ms}$ 时波场快照。随着传播时间的增加直达波和各种反射波被检波器接收, 炮点深度 100m 的共炮点道集见图 5。

图 5 为炮点位于 100, 125, 150, 175m 时的共炮点道集记录。从道集记录分析得到, 直达波到达检波器的时间最短, 反射波到达的时间随炮点深度的增加而减少, 并且随着钻头离反射层的深度距离减小, 直达波和反射波趋于重合。从上面分析可知, 在距发射界面较大距离的井深处提前进行随钻地震观测有利于识别反射界面。

图 6 为钻头深度相同、不同偏移距的共炮点道集记录。从图 5(a) 炮点深 100m 偏移距 500m 共炮点道集记录可以看出, 直达波的同向轴显示清晰明显, 且振幅很大, 而反射波显示不清, 振幅相对很小, 但是依然可以确定反射波的同向轴,

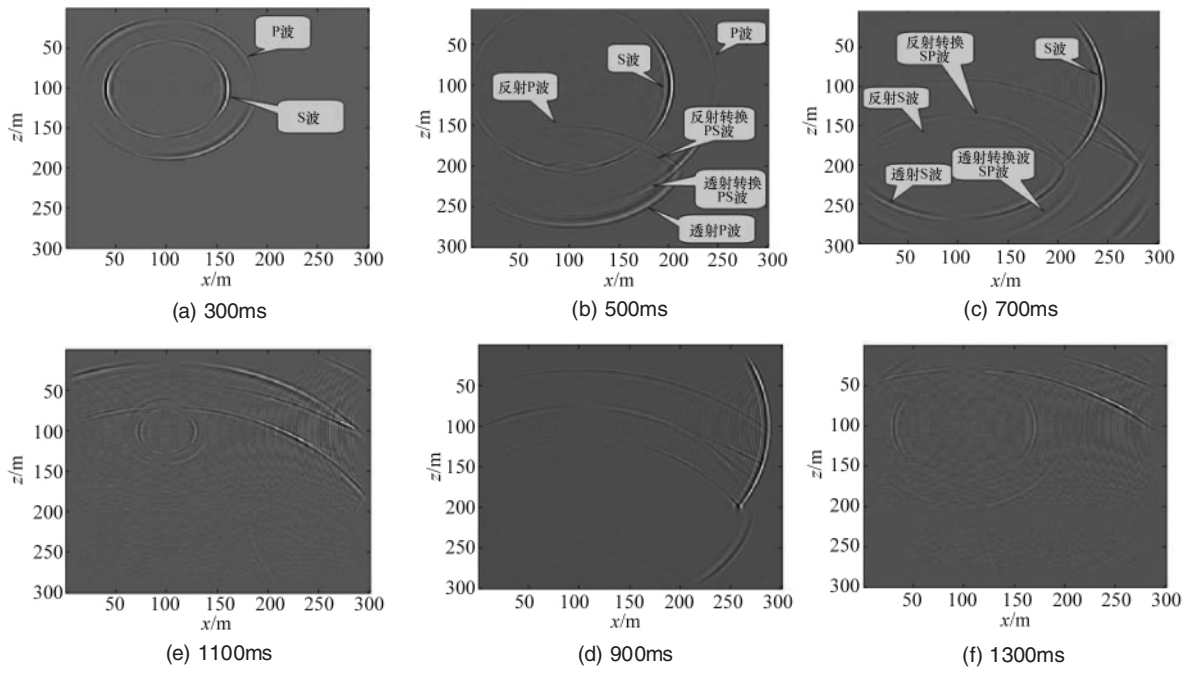


图4 层状介质波场快照

Fig. 4 Snapshots of layer media model

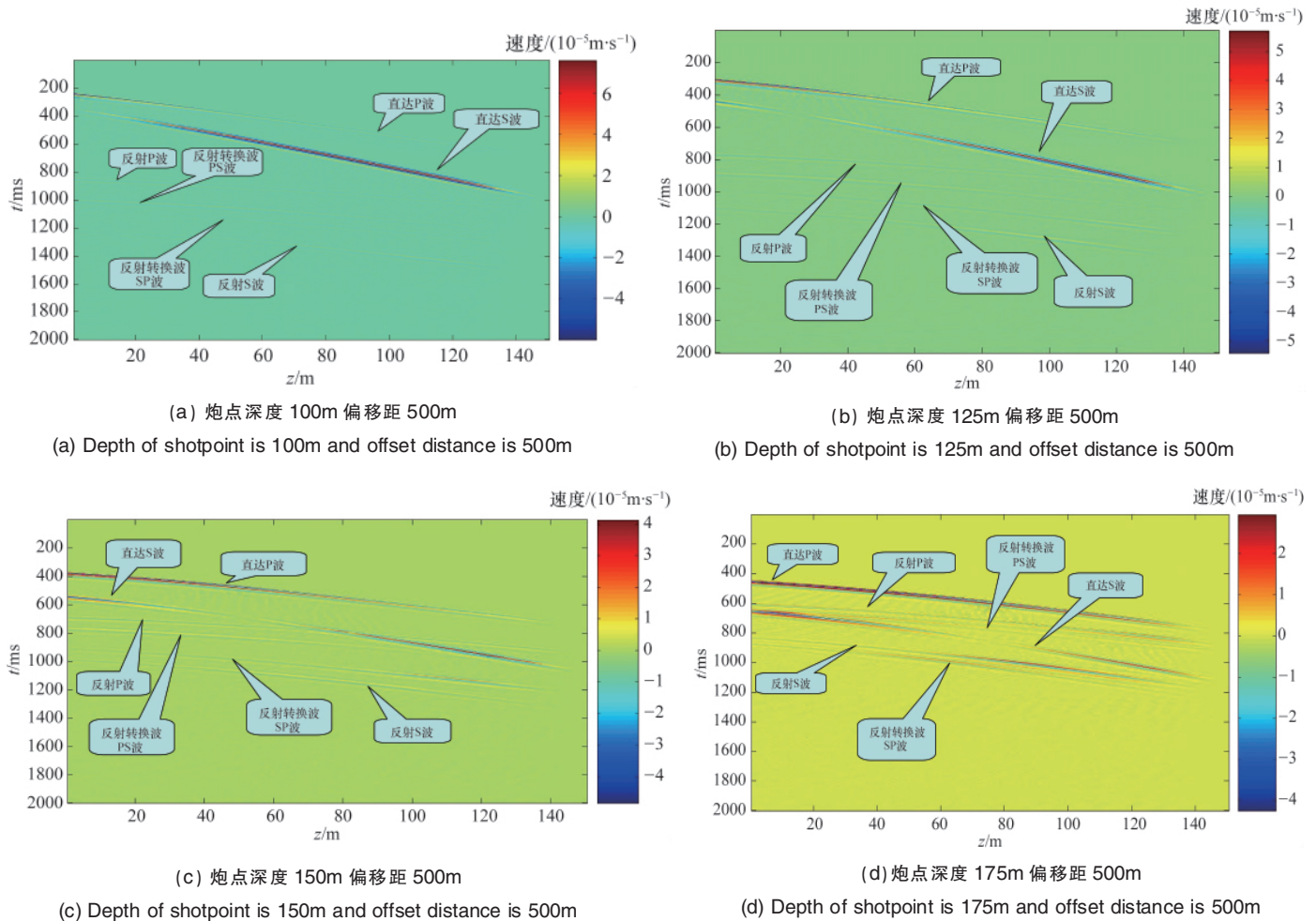


图5 不同炮点深度相同偏移距层状介质共炮点道集

Fig. 5 Common source gathering of different shotpoints and common offset distance

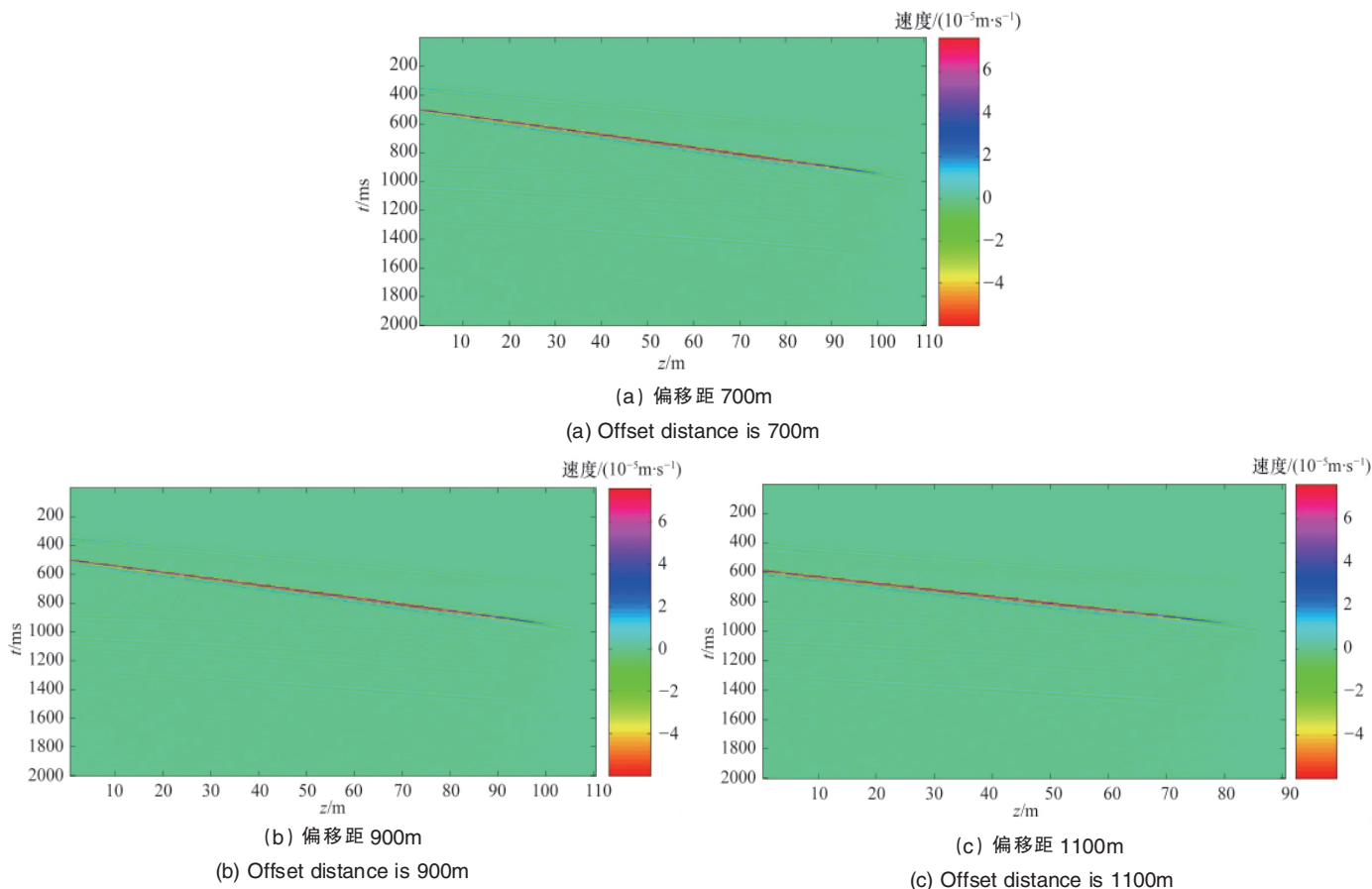


图 6 相同炮点深度 (100m) 不同偏移距的层状介质共炮点道集

Fig. 6 Common source gathering of different offset distances and common shotpoint

只不过和直达波相比能量偏低。并且可以看出，直达波的振幅随着偏移距的增加逐渐减小，反射波振幅随着偏移距的增加逐渐增大，最后甚至达到反射波的能量强于直达波的能量。说明大的偏移距有利于获得高信噪比的有效信号，因此，在进行随钻地震观测时，应适当加大偏移距。

4 结论

综上所述，随钻地震波场复杂，信噪比低，不利于波场特征和波的传播规律的分析研究，给后续的数据处理带来很大难度。用有限差分数值模拟方法对其研究可得到以下结论：

(1) 通过对随钻地震进行数值模拟，可以在模拟剖面上看到各种波的特征(直达 P 波，直达 S 波，反射 P 波，反射 S 波，反射转换波 SP 波，反射转换波 PS 波)，有利于对随钻地震波场特征、传播规律和数据处理方法等进行研究。

(2) 随着钻头越接近反射界面，反射波和直达波的时距曲线越接近，这一特点可以用来识别反射信号。直达波振幅随着偏移距的增大逐渐减小，同时反射波振幅逐渐加大，说明大偏移距有利于获得高信噪比的反射信号。

(3) 通过对直达波和反射波的时距曲线特征分析，利用其与干扰波的视速度差异进行波场分离，可以有有效的压制干扰波场，对数据处理具有指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 王滨涛, 吴锡令, 杨春来, 等. 随钻电磁波传播测井传感器参数优化设计[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 36-40.
Wang Bintaoy, Wu Xiling, Yang Chunlai, et al. Science and Technology Review, 2010, 28(18): 36-40.
- [2] 王林飞. 随钻地震勘探关键技术研究[D]. 北京: 中国海洋大学, 2009.
Wang Linfei. Study of the key technologies of seismic exploration while drilling[D]. Beijing: Ocean University of China, 2009.
- [3] 姜宇东. 随钻地震技术综述[J]. 石油物探, 2004, 43(2): 202-208.
Jiang Yudong. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43 (2): 202-208.
- [4] 苟量, 杨举勇, 罗斌, 等. 随钻 VSP 技术研究及初步应用效果 [J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(2): 183-189.
Gou Liang, Yang Juyong, Luo Bin, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(2): 183-189.
- [5] 张绍槐, 韩继勇, 朱根法. 随钻地震技术的理论及工程应用[J]. 石油学报, 1999, 20(2): 67-72.
Zhang Shaohua, Han Jiyong, Zhu Genfa. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20 (2): 67-72.
- [6] Rector J W, Hardage B A. Radiation pattern and seismic waves generated by a working roller-cone drill bit [J]. Geophysics, 1992, 57 (10): 1319-1333.
- [7] 田玉昆. 相关技术在随钻地震中的应用[D]. 北京: 中国海洋大学, 2010.
Tian Yukun. Application of correlation technology in seismic while drilling[D]. Beijing: Ocean University of China, 2010.

- [8] Weatherby B B. Method of making sub-surface determinations: US, 753293[P]. 1934-11-16.
- [9] Rector J W, Marion B P. The use of drill-bit energy as a downhole seismic source[J]. *Geophysics*, 1991, 56(5): 628-634.
- [10] Haldorsen J B U, Miller D E, Walsh J J. Walk-away VSP using drill noise as a source[J]. *Geophysics*, 1995, 60(4): 978-997.
- [11] 陆斌, 葛洪魁, 吴何珍, 等. 独立成分分析在随钻地震信号处理中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 15-22.
Lu Bin, Ge Hongkui, Wu Hezhen, et al. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(1): 15-22.
- [12] 杨进, 李中, 谢玉洪. 随钻地震技术在套管下入深度确定中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 41-43.
Yang Jin, Li Zhong, Xie Yuhong. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2007, 31(5): 41-43.
- [13] 杨微, 葛洪魁, 宁靖, 等. 流动地震仪检测钻头振动信号的现场试验[J]. 地球物理学进展, 2007, 2(22): 622-628.
Yang Wei, Ge Hongkui, Ning Jing, et al. *Progress in Geophysics*, 2007, 2(22): 622-628.
- [14] 王鹏, 葛洪魁, 陆斌, 等. 随钻地震波场传播与数据处理方法的数值试验[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(2): 5-9.
Wang Peng, Ge Hongkui, Lu Bin, et al. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(2): 5-9.
- [15] 罗斌, 王宝彬. 随钻地震波场空间传播特征研究及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(1): 58-64.
Luo Bin, Wang Baobin. *Oil Geophysical Prospecting*, 2005, 40 (1): 58-64.
- [16] 朱键, 高韶燕. 随钻地震资料反演预测超高压层段[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(1): 38-43.
Zhu Jian, Gao Shaoyan. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38 (1): 38-43.
- [17] 钱进. 含裂隙煤储层地震数值模拟与反演方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2010.
Qian Jin. *Seismic numerical simulation and inversion of fractured coal reservoirs* [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2010.
- [18] Poletto F, Dordolo G. A new approach to offshore drill-bit reverse vertical seismic profiling (RVSP)[J]. *Geophysics*, 2002, 67(4): 1071-1075.
- [19] 牟永光, 裴正林. 三维复杂介质地震数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
Mou Yongguang, Pei Zhenglin. *Simulation numerical earthquake of three-dimensional complex medium* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [20] 李国平, 程利敏, 孟令媛, 等. 非均匀介质交错网格高阶差分地震波数值模拟[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 220-225.
Li Guoping, Chen Limin, Meng Lingyuan, et al. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(4): 220-225.
- [21] 董良国, 马在田, 曹景忠, 等. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分解法[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 411-419.
Dong Lianguo, Ma Zaitian, Cao Jingzhong, et al. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(6): 411-419.

(责任编辑 朱宇)



 科技
 导报
 SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。

· 科学共同体介绍 ·

中国微生物学会

中国微生物学会 (Chinese Society for Microbiology) 成立于 1952 年 12 月 18 日, 首任理事长为著名微生物学家**汤飞凡**。**余贺**、**朱既明**、**焦瑞身**、**李季伦**等历任学会理事长。1928 年, 由我国现代医学的先驱**伍连德**、**谢和平**和**林宗扬**等发起, 即在北京成立过中国微生物学会。1937 年改称中国病理学微生物学会, 移会址于上海, 有会员 50 多人。1949 年新中国成立后, 于 1950 年在中华医学会首都大会上成立过中华微生物学会。

中国微生物学会是由全国微生物学

科技工作者和单位自愿组成、中国民政部依法登记的全国性、学术性、公益性法人社会团体, 是非营利性的社会组织, 是发展我国微生物学科事业的社会力量, 接受中国科协的领导, 挂靠中国科学院微生物研究所。学会成立之初全国有 19 个省级分会, 会员 189 名; 目前已有会员近 1.5 万人, 成立了 18 个专业委员会和 5 个工作委员会。

我国是国际微生物学会联合会的发起国之一, 1980 年经批准, 中国微生物学会正式加入该组织。此外, 学会还加强与

欧美、日本微生物学界, 国际民间学术组织的联系和交往, 承办国际大型学术会议如“国际生物防治与生物技术研讨会”、“国际工业微生物和生物技术研讨会”等。学会主办《微生物学报》、《生物工程学报》、《病毒学报》、《中国病毒学》、《微生物学杂志》等刊物。

中国微生物学会于 2011 年 10 月在福建省福州市举行第十次全国会员代表大会, 选举**赵国屏**任名誉理事长, **邓子新**任理事长, **东秀珠**任秘书长。

(责任编辑 徐子政(实习生), 秦政)