

## · 煤田物探 ·

文章编号: 1001-1986(2001)01-0049-03

## 频率域单程方程三维叠前正演中的波场替换

周亚同<sup>1</sup>, 董恩清<sup>1</sup>, 贺振华<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电信学院, 陕西 西安 710049; 2. 成都理工学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 利用定位原理进行三维叠前正演, 仅靠单程声波方程的延拓即可形成复杂地质条件下的正演记录, 运算效率高无多次反射出现。但速度模型中对于过大或过小的速度常使波场在延拓时有频率和波数成分的损失, 这种损失引起波场畸变并严重影响正演记录的质量。本文采用波场替换技术, 在每次延拓时用零相位子波形成一个同时保留了原波场的动力学特征与空间位置信息的新波场, 然后用新波场取代原畸变波场并参与正演记录合成。在频率域单程方程三维叠前正演中特别适合做波场替换, 因为震源脉冲与接收响应(均可视为点脉冲)的延拓波场在形态上相似, 而且在延拓波场中每道记录之振幅包络只有一个极值点。理论试算结果表明, 采用波场替换技术后最终正演记录质量比替换前有了很大改善。

**关键词:** 三维叠前正演; 单程方程; 定位原理; 波场替换; 频波损失

中图分类号: P631.4 14 文献标识码: A

## 1 波场延拓中的频率 波数损失

利用定位原理进行三维共炮记录叠前正演时离不开波场延拓。因相移法能够适应地下速度的垂向变化且方便易行, 故在正演中波场延拓常用相移法实现。但因速度模型中对于速度过大或过小常使波场在延拓时有频率、波数成分的损失, 这种损失引起波场畸变并严重影响最终正演记录的质量。下面以点脉冲的波场延拓为例说明在延拓过程中波场频波成分损失的情况。图 1 为某三维水平层状地质模型, 各层深度与速度参数均已标于图中。某点脉冲位于地表, 其  $x$ 、 $y$  坐标分别为 20 m 和 32 m, 设该点脉冲

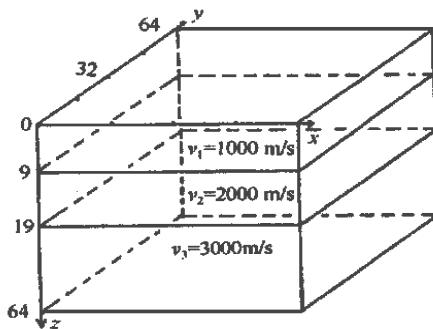


图 1 三维水平层状模型(地面有一点脉冲)

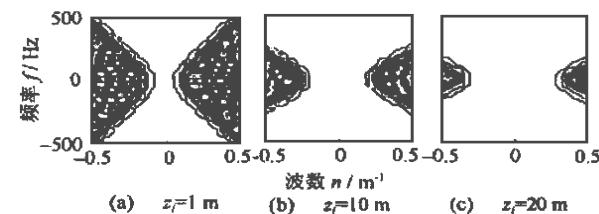


图 2 不同深度  $z_i$  处波场三维振幅谱沿  $k_y$  方向的切片的初始波场值为  $P(x=20, y=32, z=0, t=0)=1.0$ 。现将该波场沿  $z$  方向延拓得到各深度  $z_i$  处的波场  $P(x, y, z_i, t)$ , 同时求出  $P(x, y, z_i, t)$  的三维振幅谱  $|P|(k_x, k_y, z_i, w)$ 。波场延拓时  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的空间采样率均为 1 m, 时间采样率为 1 ms。

图 2 即为不同深度  $z_i$  处  $|P|(k_x, k_y, z_i, w)$  沿  $k_y$  方向的切片  $|\bar{P}|(k_x, n\Delta k_y, z_i, w)$ , 图中白色区域代表着  $|\bar{P}|(k_x, n\Delta k_y, z_i, w)=0$ , 其中  $n=8, \Delta k_y$  为  $k_y$  的离散采样间隔。比较图 2(a)、(b)、(c) 可看出, 频波损失随着深度的增加越来越严重, 因频波损失而造成的波场畸变也自然会越来越厉害。

可由相移延拓公式出发来探讨延拓过程中波场频波损失的原因。由相移延拓公式,

$$\bar{P}(k_x, k_y, z_i + \Delta z_i, w) = P(k_x, k_y, z_i, w) e^{-ikz_i \Delta z_i}, \quad (1)$$

式中  $P(k_x, k_y, z_i, w)$ 、 $\bar{P}(k_x, k_y, z_i + \Delta z_i, w)$  分别为波

收稿日期: 2000-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 49894190-30)

作者简介: 周亚同(1973-), 男, 湖北松滋市人, 西安交通大学在读博士生, 从事小波场、图象信号处理、波动方程反演研究。

场  $P(x, y, z_i, t)$  和  $P(x, y, z_i + \Delta z_i, t)$  的三维傅氏谱,  $\Delta z_i$  是波场从深度  $z_i$  延拓到  $z_i + \Delta z_i$  时的距离。从(1)式知波场延拓是通过对波场的傅氏谱乘上相移因子  $e^{-ikz_i \Delta z_i}$  实现的, 式中

$$kz_i(w, k_x, k_y) = \frac{w}{v(z_i)} [1 - \left(\frac{v(z_i)k_x}{w}\right)^2 - \left(\frac{v(z_i)k_y}{w}\right)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

将(2)式离散化后有

$$kz_i(j\Delta w, m\Delta k_x, n\Delta k_y) = \frac{j\Delta w}{v(z_i)} SQ(j\Delta w, m\Delta k_x, n\Delta k_y), \quad (3)$$

其中

$$SQ(j\Delta w, m\Delta k_x, n\Delta k_y) = 1 - \left[\frac{v(z_i)m\Delta k_x}{j\Delta w}\right]^2 - \left[\frac{v(z_i)n\Delta k_y}{j\Delta w}\right]^2. \quad (4)$$

(3)、(4)式中  $j = -J, \dots, 0, \dots, J; m = -M, \dots, 0, \dots, M; n = -N, \dots, 0, \dots, N$ 。  $J$  是奈奎斯特频率对应的采样点号,  $M, N$  分别是  $x, y$  方向上奈奎斯特波数对应的采样点号。对某个取值组合  $[v(z_i), j^* \Delta w, m^* \Delta k_x, n^* \Delta k_y]$  而言, 它代入(4)式后可能使得

$SQ(j^* \Delta w, m^* \Delta k_x, n^* \Delta k_y)$  小于 0, 从而使相移因子  $e^{-ikz_i \Delta z_i}$  无实际意义, 因此该取值组合  $[v(z_i), j^* \Delta w, m^* \Delta k_x, n^* \Delta k_y]$  对应的频率和波数成分  $(j^* \Delta w, m^* \Delta k_x, n^* \Delta k_y)$  必须舍弃, 也即频波成分  $(j^* \Delta w, m^* \Delta k_x, n^* \Delta k_y)$  不得不被损失掉。将(1)式中  $P(k_x, k_y, z_i, w)$  离散后记为  $P(m\Delta k_x, n\Delta k_y, z_i, j\Delta w)$ , 舍弃频波成分  $(j^* \Delta w, m^* \Delta k_x, n^* \Delta k_y)$  意味着令  $P(m^* \Delta k_x, n^* \Delta k_y, z_i, j^* \Delta w) = 0$ , 这相当于对  $P(m\Delta k_x, n\Delta k_y, z_i, j\Delta w)$  做了三维点阻滤波。又由(1)式知:  $P(m\Delta k_x, n\Delta k_y, z_i, j\Delta w)$  的频波损失会传递给  $P(m\Delta k_x, n\Delta k_y, z_i + \Delta z_i, j\Delta w)$ , 因此波场向下延拓越深, 波场频波损失越严重。

## 2 三维叠前正演中的波场替换

### 2.1 定位原理

利用定位原理进行三维叠前正演的好处在于仅用单程声波方程的延拓即可形成正演记录, 而一般的频率域正演方法要求使用全程声波方程, 运算速度慢且多次波不易控制。如图3所示为震源  $S$  接收点  $G$  和反射点  $R$  的空间位置分布, 定位原理以这三点为基础按如下方式表述<sup>[1]</sup>:

震动自点  $S$  出发传播到深度为  $h$  的  $R$  点, 反射后回到地面点  $G$  的位置是任意的, 如将震源和地震记录分别自  $S$  和假设的  $G$  点向下延拓且能使延拓后的震源和记录在  $R$  点重合, 则上述  $G$  点的位置可唯一确定。

### 2.2 采用波场替换技术的三维叠前正演步骤

波场畸变影响正演记录质量, 如果将波场中的

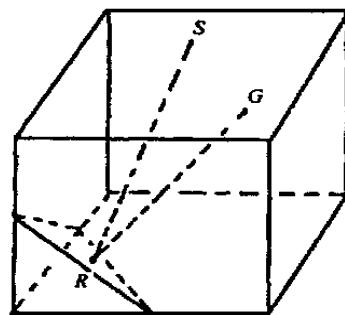


图 3 震源  $S$  接收点  $G$  反射点  $R$  的空间位置分布图

每一道记录看作是某子波与反射系数序列的褶积, 则波场畸变体现在: 波场中的双曲线型同相轴有相位错动; 子波旁瓣能量过强; 子波不是零相位的。针对以上原因, 可在正演时的波场延拓中采用波场替换技术。

设第  $i$  个检波器处的地震接收响应为  $G(x_i, y_i, z_0, t)$ , 震源为  $S(x_s, y_s, z_0, t)$ , 由于二者初始值均可用点脉冲代替, 因此二者的延拓波场形态一致。 $(x_s, y_s, z_0)$ 、 $(x_i, y_i, z_0)$  分别为震源和检波器坐标, 另设  $R(x, y, z)$  为界面反射系数, 则基本定位原理的、采用波场替换技术的三维叠前正演步骤为:

a. 将震源波场向下延拓深度间隔  $\Delta z_i$ , 即  $S(x, y, z_i, t) \rightarrow S(x, y, z_{i+1}, t)$ , 其中  $z_{i+1} = z_i + \Delta z_i, i=0$  时  $S(x, y, z_i, t)$  即为初始震源脉冲; 同理将接收响应向下延拓深度间隔  $\Delta z_i$ , 即  $G(x, y, z_i, t) \rightarrow G(x, y, z_{i+1}, t)$ ,  $i=0$  时  $G(x, y, z_i, t)$  为初始接收响应。

b. 寻找  $S(x, y, z_{i+1}, t)$  和  $G(x, y, z_{i+1}, t)$  之替换波场  $\hat{P}(x, y, z_{i+1}, t)$ 、 $\hat{G}(x, y, z_{i+1}, t)$ , 并令  $\hat{P}(x, y, z_{i+1}, t) = \hat{S}(x, y, z_{i+1}, t)^* \hat{G}(x, y, z_{i+1}, t)^*$   $R(x, y, z_{i+1})$ ,

$$\hat{P} \sum (x_i, y_i, z_{i+1}, t) = \sum_{m=1}^{MX} \sum_{n=1}^{NY} \hat{P}(x_m, y_n, z_{i+1}, t),$$

式中  $MX, NY$ — $x, y$  方向的总采样点数;  
 $\hat{P} \sum (x_i, y_i, z_{i+1}, t)$ —深度  $z_{i+1}$  处所有可能的反射点在检波器  $G$  处引起的反射记录。

c. 重复步骤 a~b 可得所有深度上的反射记录, 将其叠加就是检波器  $G$  处的完整记录:

$$P_{G_i}(x_i, y_i, t) = \sum_{z_{i+1}=z_0}^{z_{\max}} \hat{P} \sum (x_i, y_i, z_{i+1}, t),$$

式中  $z_{\max}$  为最大延拓深度。

d. 改变检波点位置  $(x_i, y_i, z_0)$ , 重复步骤 a~c 可合成某炮点所有检波器排列的反射记录, 这些记录组成一个单炮记录。

e. 改变炮点位置  $(x_s, y_s, z_0)$ , 重复步骤 a~d 可合成多炮记录。

### 2.3 替换波场的求取

因为波场  $S(x, y, z_{i+1}, t)$  和  $G(x, y, z_{i+1}, t)$  在形态上相似, 而且波场中每道记录的振幅包络只有一个极值点, 所以波场替换特别适合于在三维叠前正演中应用。具体可按以下步骤求取  $S(x, y, z_{i+1}, t)$  和  $G(x, y, z_{i+1}, t)$  的替换波场(以  $S(x, y, z_{i+1}, t)$  为例):

- 令  $m=1, n=1$ , 找出波场中某记录道  $S(m\Delta x, n\Delta y, z_{i+1}, t)$  振幅包络上的极值点并记下其时间坐标(记为  $T_{\max}$ )和振幅值(记为  $A_{\max}$ )。由于  $S(m\Delta x, n\Delta y, z_{i+1}, t)$  的振幅包络上只有一个极值点, 故  $T_{\max}$  和  $A_{\max}$  均易求出。同时对  $S(m\Delta x, n\Delta y, z_{i+1}, t)$  作一维傅氏谱分析并找出振幅谱极大值对应的频率  $f_{\max}$

$$\text{b. 令 } S(m\Delta x, n\Delta y, z_{i+1}, t) = 0,$$

且使  $S(m\Delta x, n\Delta y, z_{i+1}, T_{\max}) = A_{\max}$ ,

然后有  $\hat{S}(m\Delta x, n\Delta y, z_{i+1}, t) = S(m\Delta x, n\Delta y, z_{i+1}, T_{\max}) * W(t)$

式中,  $W(t)$  为某零相位子波, 其主频等于  $f_{\max}$

$$\text{c. 令 } m=m+1, \text{ 重复步骤 a~b,}$$

可得  $\hat{S}(x, n\Delta y, z_{i+1}, t);$

$$\text{d. 令 } n=n+1, \text{ 重复步骤 a~c,}$$

可得  $\hat{S}(x, y, z_{i+1}, t)$

由上述四个替换步骤可知,  $\hat{S}(x, y, z_{i+1}, t)$  不仅保留了  $S(x, y, z_{i+1}, t)$  的动力学特征与空间位置信息, 而且消除了  $S(x, y, z_{i+1}, t)$  的畸变形态。

### 3 理论试算

图 4 给出一个三维水平层状模型及两反射界面对应的时距曲面。模型参数中两层深度分别为  $H_1=6 \text{ m}$ ,  $H_2=16 \text{ m}$ , 速度分别为  $V_1=700 \text{ m/s}$ ,  $V_2=800 \text{ m/s}$ , 基岩速度  $V_3=900 \text{ m/s}$ 。正演时  $x, y, z$  坐标方向上的空间采样率均为  $2 \text{ m}$ , 时间采样率为  $2 \text{ ms}$ , 最大延拓深度为  $24 \text{ m}$ 。炮点  $O$  位于地面正中央, 坐

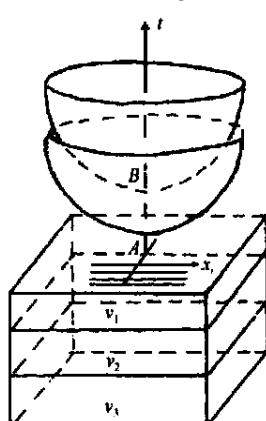


图 4 水平层状模型及两反射界面对应的时距曲面

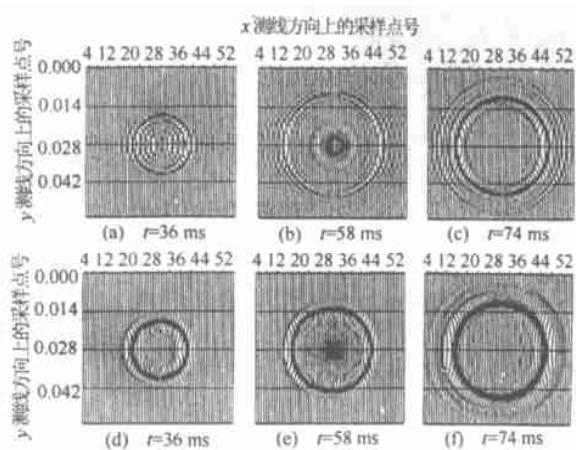


图 5 正演后所得共炮记录在不同时间上的水平切片

(a)~(c)采用波场替换前的水平切片; (d)~(f)采用波场替换后的水平切片

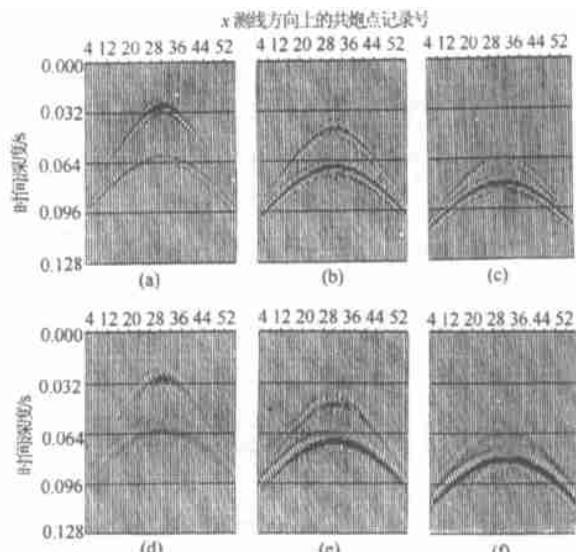


图 6 正演后所得共炮记录  $x_i$  测线方向上的纵切片

a~c—采用波场替换前的纵切片; d~f—采用波场替换后的纵切片

a d— $x_1$ 纵坐标  $50 \text{ m}$ ; b e— $x_2$ 纵坐标  $36 \text{ m}$ ; c f— $x_3$ 纵坐标  $22 \text{ m}$

标为  $(64 \text{ m}, 64 \text{ m}, 0 \text{ m})$ , 检波器呈  $55\times 55$  点阵均匀分布在炮点四周, 纵横测线上两检波点间距均为  $2 \text{ m}$

由理论计算可知, 图 4 中两个时距曲面底部  $A, B$  两点的时间坐标分别为  $t_A=17 \text{ ms}$ ,  $t_B=58 \text{ ms}$ 。图 5 是正演后所得共炮记录在不同时间上的水平切片, 从图中可以看出: 没有采用波场替换技术时, 由于波场中子波的旁瓣参与记录合成, 使得水平切片上有许多个同心圆环; 采用波场替换后的记录质量明显改善, 其中图 5(e) 中圆环内的黑斑正是时距曲面二的底部  $B$  点。图 6 是正演后所得共炮记录沿  $x_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 测线方向上的纵切片,  $x_i$  测线的位置已示意性地标于图 4 中。没有采用波场替换技术时, 由于波场中同相轴有相位错动, 使得共炮记录纵切片上的同相轴不光滑, 进行波场替换后的纵切片上的

## · 矿井物探 ·

文章编号: 1001-1986(2001)01-0052-03

## 矿井电穿透法一维正演数值模拟

韩德品,石亚 丁刘青雯 (煤炭科学研究院西安分院,陕西 西安 710054)

**摘要:** 通过研究工作面两巷道间电穿透建场理论和一维正演数值模拟,结果表明6种电穿透技术对工作面顶底板内的电性变化特别敏感,而对工作面煤层内部的电性变化反应不敏感。为该方法探测工作面顶底板内的含水 导水构造提供了理论依据。

**关 键 词:** 矿井电穿透法; 一维正演; 数值模拟

**中图分类号:** P631.3 22      **文献识别码:** A

## 1 前言

矿井电穿透法是井下物探新技术,对探测井下采煤工作面顶 底板围岩中潜在的含水 导水构造,效果比较好。但其正演理论未见发表。

本文将提供6种探测采煤工作面顶 底板内部构造方法的一维正演方法。包括两种单极—偶极电穿透法和四种偶极—偶极电穿透法。通过研究井下工作面附近围岩 煤层的电性变化,探讨上述几种电

穿透方法的优缺点,找出其规律,为该技术的进一步推广应用提供理论依据。

## 2 正演数学模型及程序框图

## 2.1 正演数学模型

地电模型如图1,为了采用数字滤波法快速计算 $d$ 理论值,将文献[1]中(7)式做如下变换,设:

$$\begin{aligned} r &= e^x, \quad (x = \ln r, \text{其中: } r = AB/2), \\ \lambda &= e^{-y}, \quad (y = -\ln \lambda), \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期: 2000-01-12

基金项目: 煤炭科学基金资助项目(96地 20811)

作者简介: 韩德品(1962-),男,山东日照人,煤炭科学研究院西安分院高级工程师,地球物理勘探。

## 同相轴显得光滑

## 4 结论

在频率域单程方程三维叠前正演中,采用相移法进行波场延拓虽然可以使正演过程得以简化,但波场延拓中的畸变问题严重影响了最终正演记录的质量。本文采用波场替换技术,在每次延拓时用零相位波形成一个同时保留了原波场的动力学特征与空间位置信息的新波场,然后用新波场取代原畸变波场并参与正演记录合成。上述理论试算结果表明该方法提高了正演记录质量,具有可行性和实用性。

### Wavefield replacement in 3D prestack forward modeling based on one way acoustic wave equation of frequency domain

ZHOU Ya-tong<sup>1</sup>, DONG En-qing<sup>1</sup>, HE Zhen-hua<sup>2</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract** Based on the seismic positioning principle we can do 3D prestack forward modeling by one way acoustic wave equation in complex geological conditions. This method has very high calculating efficiency and hasn't multi-reflections in the seismic records. But unsuitable velocity in model usually result in frequency and wave number's lossing of wave-field that cause wave-field's aberration and reduce quality of seismic forward records. This paper proposes wave-field replacement technology which uses new wave-field formed by zero phase wavelet to replace old aberrant wave-field and keep old one's dynamical and spacial characteristic at the same time. It is very suitable to use this technology in 3D prestack forward modeling because the wave-field of focus and receiver's response are similar in shape and every trace's amplitude envelope in wave-field only has one extreme value. The simulation shows that the record's quality is improved when using wave-field replacement technology.

**Key words** 3D prestack forward modeling; positioning principle; one way equation; wavefield replacement; frequency and wave number lossing

## 参考文献

- [1] 贺振华,黄德济等.复杂油气藏地震波场特征方法理论及应用 [M].四川科学技术出版社,1999.
- [2] 熊高君等.转换横波共炮记录单程声波方程正演模拟 [J].物化探计算技术,1998,20(3): 213.
- [3] 贺振华等.反射地震资料偏移处理与反演方法 [M].重庆大学出版社,1989.
- [4] Takashi Furumura and Takenaka H. A wrapround elimination technique for the pseudospectral wave synthesis using an antiperiodic extension of the wavefield [J]. Geophysics, 1995, 60(1): 302.