

波场延拓法 VSP 正演模拟

乐友喜¹, 罗焕宏¹, 郭旭光^{1,2}, 傅晓宁^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东) 地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油 新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 波场延拓法模拟 VSP, 可以根据具体情况的需要同时对上、下行波场进行模拟, 也可以只模拟上行波场或下行波场。对多次波能够有效地控制, 通常在只关注一次波的情况下, 可以不对多次波进行模拟。该方法相对其他波动方程正演模拟方法, 有更高的计算效率。采用分步 Fourier 法延拓波场, 既保证了延拓过程的稳定性, 又不失较为复杂模型的模拟精度。模型试验表明, 该方法能够有效地对 VSP 波场进行模拟, 模拟的结果正确、可靠。

关键词: VSP; 波场延拓; 正演; 多次波

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2008)06-0693-03

VSP 在井中进行观测, 与地面地震相比, VSP 资料有较高的信噪比和分辨率, 波的动力学特征更明显^[1], 能够更为直接地反应井附近的地层、岩性等地质现象, 在解决特殊地质体方面有特殊的优势。

正演模拟是研究地震波场的有效手段, 地震波场的模拟技术主要分为两大类^[2], 一是基于运动学理论的射线追踪方法, 射线理论是对波动理论的高频近似, 主要考虑了波传播过程中运动学特征, 而缺少动力学特征, 其计算效率较高; 二是波动方程法正演模拟, 根据对波动方程的求解方法的不同, 主要分为有限差分法、伪谱法以及有限元法, 各种方法对波动方程的近似程度不同, 其效果和效率方面也不同。这些方法都是基于双程波方程, 从 $t=0$ 时刻开始, 在时间方向上对波场进行递推, 直到最大记录时间。波场延拓正演方法基于单程波方程^[3], 从 $z=z_m$ 开始, 在频率域对波场进行深度递推。这种方法能够适应任意复杂模型, 有较高的精度, 而且计算效率较时间方向递推方法高。其最大的优点就是只对我们所关心的反射波场进行模拟, 其他一些波场可以根据需要进行记录。

1 方法原理

1.1 波场延拓

这里采用分步 Fourier 法进行波场延拓, 在相移法的基础上, 把速度场分解为常速背景和变速扰动 2 部分: 对常速背景在频率—波数域采用相移法; 对层内的变速扰动, 在频率—空间域采用时移校

正^[4-5]。其波场延拓公式如下

$$\begin{cases} \tilde{u}_0(x, y, z + \Delta z, \omega) = \tilde{u}(x, y, z, \omega) e^{-ik_0 \Delta z} \text{ 有层有,} \\ \tilde{u}(x, y, z + \Delta z, \omega) = \tilde{u}_0(x, y, z, \omega + \Delta z, \omega) e^{-i\omega \Delta z(x, y, z) \Delta z}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tilde{u}_0(x, y, z - \Delta z, \omega) = \tilde{u}(x, y, z, \omega) e^{-ik_0 \Delta z}, \\ \tilde{u}(x, y, z - \Delta z, \omega) = \tilde{u}_0(x, y, z, \omega - \Delta z, \omega) e^{-i\omega \Delta z(x, y, z) \Delta z}. \end{cases} \quad (2)$$

由深度 z 向深度 $z + \Delta z$ 延拓时采用式(1), 由深度 z 向深度 $z - \Delta z$ 延拓时采用式(2)。延拓过程可以写成如下的简单形式

$$\tilde{u}(x, y, z + \Delta z, \omega) = \tilde{u}(x, y, z, \omega) e^{-iA \Delta z}, \quad (3)$$

$$\tilde{u}(x, y, z - \Delta z, \omega) = \tilde{u}(x, y, z, \omega) e^{-iA \Delta z}, \quad (4)$$

其中, A 为延拓算子。

1.2 正演记录的生成

设震源函数为 $S(x, z_m, \omega)$, 从震源激发的深度 z_m 开始, 利用式(1)将震源函数向下延拓

$$S(x, z + \Delta z, \omega) = S(x, z, \omega) e^{-iA \Delta z}. \quad (5)$$

在每一个延拓深度 z_i , 都让延拓到该深度的入射场和反射系数相关, 产生二次源(界面上产生的反射波场)

$$P_i(x, z_i, \omega) = S(x, z_i, \omega) R(x, z_i, \omega), \quad (6)$$

其中, $R(x, z_i, \omega)$ 为反射系数。

这样完成所有延拓深度后, 再从最大深度 $z_{\max}$ 开始, 将反射波场向上延拓, 对应每一个延拓深度,

都叠加该深度的反射波场

$$\begin{cases} P_r(x, z_i, \omega) = P_r(x, z_{\max}, \omega), \\ P_r(x, z_{i-1}, \omega) = P_r(x, z_{i-1}, \omega)e^{-i\omega \Delta z} + P_r(x, z_i, \omega). \end{cases} \quad (7)$$

如果,某一深度布置了检波点,当反射波场延拓到该深度后,将检波器谐振函数与反射波场相关,得到频域接收波场,然后对其进行 Fourier 反变换,即可记录到该检波点处的反射波场

$$\tilde{P}(x, \omega) = P_r(x, z_i, \omega) G(x_w, \omega), \quad (8)$$

$$\tilde{P}(x_w, \omega) \xrightarrow{\text{FFT}^{-1}} P(x_w, t). \quad (9)$$

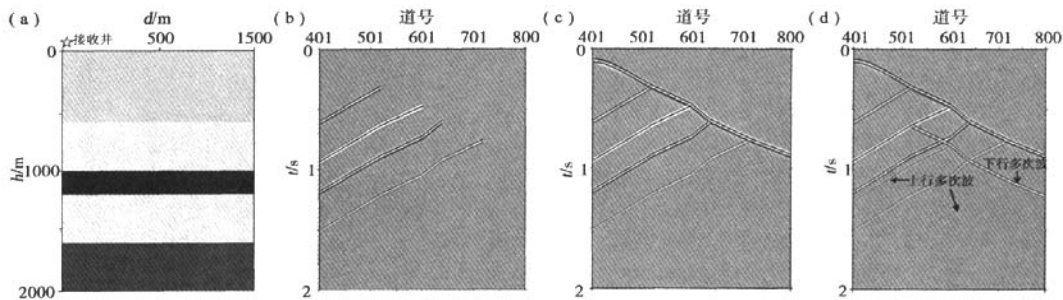
在需要记录下行波的时,只需要将向下延拓的震源函数在检波点处进行记录即可。

2 模型试算

分别设计了水平模型和复杂模型对上述的正演

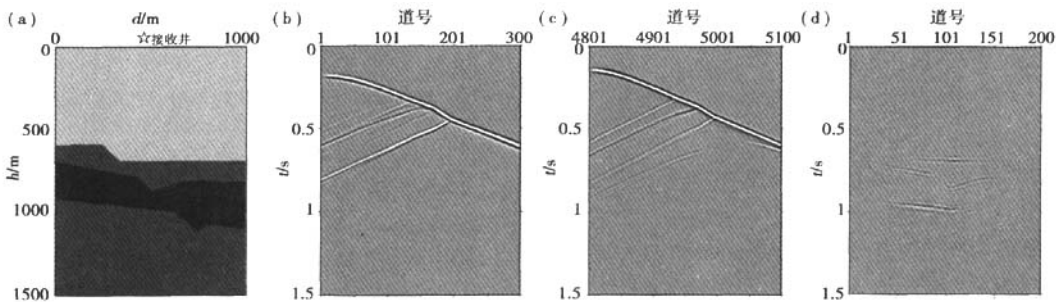
方法进行了验证,模型 1 是水平模型,速度模型如图 1a 所示,接收井位于模型最左边。图 1b 是模拟的上行波场,这样在后续一系列研究过程中,可以直接利用模拟的结果而无需做波场分离。图 1c 中对上、下行波均进行了模拟,图 1d 所示的模拟结果中包含了多次波,该多次波产生于第二个界面,可以看出,波场特征清晰,上、下行多次波出现的位置正确、可靠。

模型 2 是一个较为复杂的断层模型,速度模型如图 2a 所示。接收井位于 500 m 处,从 50 m 开始激发 20 炮,图 2b、图 2c 分别是第 1 炮、第 12 炮的模拟结果,图中的上行波场比较复杂,但是很清晰。对该模型模拟的结果进行了偏移处理,图 2d 是偏移剖面。偏移结果和速度模型完全吻合,断层也清晰可见,说明正演数据的正确性和可靠性。



a—水平模型;b—模拟的上行波场;c—模拟的上、下行波场;d—包含了多次波的模拟结果

图 1 水平模型的正演



a—复杂断层模型;b—第 1 炮的模拟结果;c—第 12 炮的模拟结果;d—偏移剖面

图 2 复杂断层模型的正演

3 结论

采用波场延拓法进行 VSP 模拟,模拟数据的信噪比高,而且可以根据需要模拟对上、下行波。可以根据速度模型的复杂程度,选取不同的波场延拓方法,当速度横向变化非常剧烈的时候,选用适应横向变速能力强的延拓方法,即可保证正演结果的精度。

参考文献:

- [1] 郭建. VSP 技术应用现状及发展趋势[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 2, 27 (1): 1.
- [2] 张永刚. 地震波场数值模拟方法[J]. 石油物探, 2003, 42 (2): 144.
- [3] 熊高君, 贺振华, 黄得济, 等. 改进的正演模拟定位原理[J]. 石油地球物理物探, 1998, 33 (6): 742.
- [4] Staffa P L. Split-step Fourier migration. [J]. Geophysics, 1990, 55 (4): 410.
- [5] 李振春. 地震成像理论与方法[D]. 北京: 石油大学研究生院, 2004.

VSP FORWARD MODELING WITH THE WAVE FIELD EXTRAPOLATION METHOD

YUE You-xi¹, LUO Huan-hong¹, GUO Xu-guang^{1,2}, FU Xiao-ning^{1,2}

(College of Earth resources & Information, China University of petroleum, Qingdao 266555, China; 2. Research Institute of Exploration and Development; PetroChina; Karamay 834000, China)

Abstract: In VSP forward modeling with the wave field extrapolation method, we can just simulate upward wave or simulate upward wave and downward wave simultaneously according to the situation, and the multiple wave can be controlled efficiently. In general, under the condition of being only concerned with the primary reflection, we needn't simulate the multiple wave. This method has high efficiency compared with other wave equation modeling methods. In this paper, the split-step Fourier method was used to extrapolate the wave field, which can guarantee the stability of wave extrapolation and the modeling accuracy for the complex model. Model test shows that this method can simulate VSP efficiently and the modeling result is correct and reliable.

Key words: VSP; wave extrapolation; modeling; multiple wave

作者简介: 乐友喜(1966 -), 男, 教授, 江苏省盐城市人, 1987 年毕业于华东石油学院物探专业, 2002 年获中国石油勘探开发研究院博士学位, 现在中国石油大学地球物理系任教, 主要研究方向为地震储层预测、信号处理与分析、模式识别、VSP 与井间地震、开发地震等, 公开发表学术论文数篇。

=====

上接 692 页

THE APPLICATION OF MAPGIS TO THE SPATIAL ANALYSIS OF REGIONAL GEOCHEMICAL DATA

LIU Jun-zhang, GONG Hong-lei, ZHANG Yu-ling, LIU Jun-heng, CHEN Jun-wei, DOU Bing-yin

(Hebei Institute of Geophysical Exploration, Langfang 065000, China)

Abstract: Using the VB program, the authors converted the Regional Exploring Data point information into a MapGis Point Document in plain code, and set up a database which joins the Point Document to the exploration data. Exemplified by the 1: 200,000 Regional Exploration Data of Hebei Province, this paper has established a provincial regional exploration spatial database, which makes it possible to carry out such spatial analyses on MapGis as intersection analysis of geological areas, condition inquiries, and analysis of buffer areas. As a result, data inquiries can be easily made in spite of spatial restriction or geological conditions, and various geological problems related to mineral exploration can be solved.

Key words: regional exploration data; MapGis point document; spatial analysis

作者简介: 刘俊长(1963 -), 男, 高级工程师, 1984 年毕业于长春地质学院岩化系, 现从事地质矿产、地球化学勘查工作。