# 微屈多次波正演模拟及其

# 在中原油田深层地震资料解释中的应用

# 姚姚<sup>1</sup>,蔡其新<sup>2</sup>,张果<sup>1</sup>,董桥樑<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学,湖北 武汉 430074;2. 中国石油化工集团 中原油田分公司,河南 濮阳 457000)

摘要:对微屈多次波的压制或利用是地震资料处理、解释中的一个难题。正演模拟是压制或利用微屈多次波的基础。笔者利用层状介质非线性模型理论,发展了一种正演模拟微屈多次波的方法。利用这一方法在中原油田深层 地震资料解释中作了初步应用,取得了一些有用的成果。该方法也可以在地震子波分析处理和提高地震资料分辨 率中发挥作用。

关键词:非线性模型;微屈多次波;正演模拟;地震资料解释

**中图分类号:** P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2004)05-0443-04

多次波是地震记录中无处不在的一种特殊波。 长期以来,人们将多次波视作干扰,千方百计试图消 除它,但到目前为止还没有一种能完全有效地消除 多次波的方法。从另一角度而言,多次波可能不是 干扰,而是一种可以加以利用的有效波。正确地模 拟出全部多次波是压制多次波或利用多次波的基 础。目前,模拟长程多次波的问题已经解决,但微屈 多次波的正演模拟问题还比较困难。因此,为了彻 底解决多次波的压制或利用问题,必须解决微屈多 次波的正演模拟问题。众所周知,我国东部油田以 陆相薄互层沉积为主。在这种陆相薄互层地层中, 每一个单层的层厚非常薄,微屈多次波问题十分严 重。它们会引起地震资料处理、解释中的许多问题。 为了解决这些问题,必须对微屈多次波进行细致的 分析,首先必须能正确地模拟它们。因此,正确地模 拟微屈多次波是我国东部油田地震资料处理、解释 工作中一个亟待解决的重要问题。另外,高分辨率 勘探中的提高地震资料分辨率的一个重要工作是消 除地震子波的影响。在我国东部油田陆相薄互层地 层中,所谓的地震子波实际上是入射波与一系列微 屈多次波叠加的结果。因此,正确地模拟微屈多次 波也可以在子波分析处理以及提高地震资料分辨率 中发挥较大作用。

笔者利用层状介质非线性模型理论,发展了一 种正演模拟微屈多次波的方法。用其在中原油田深 层地震资料解释,取得了初步应用效果。 1 层状介质非线性模型理论<sup>[2,3]</sup>

常规合成地震记录的计算方法是反射系数序列 与地震子波进行褶积,即

$$y_t = r_t * S_t \tag{1}$$

写成 Z 变换的形式为

$$Y(Z) = R(Z)S(Z)$$
(2)

实际上,这是一个没有物理意义的的计算方法,因为 它假设地震波由上方入射到界面上时完全反射没有 透射作用,而由下方入射到界面上时完全透射没有 反射作用。实际层状介质中,当地震波由上方入射 或下方入射到每个界面时,均有并且只有部分能量 发生反射和透射。因此,物理上有意义的合成地震 记录的计算应当考虑真实的反射、透射作用。这就 是层状介质非线性模型。

设层状介质中每一层的时间"厚度"均为  $\Delta \tau$ / 2。每一层中应该既有上行波,又有下行波。第 n 层 介质顶、底上、下行波的 Z 变换关系为(图 1 左)

 $U_n^{\text{tom}} = U_n(Z)Z^{-1/2}; D_n^{\text{tom}} = D_n(Z)Z^{-1/2}$  (3) 第 *n* 层介质底界面即第 *n* 个界面的上面有第 *n* 层底 的上、下行波,下面有第 *n*+1 层顶的上、下行波,如图



图1 第 n 层中上下行波和第 n 个界面上下各波间关系

1 右所示。方向各不相同的 4 个波通过连续性边界 条件相互联系,其 *2* 变换形式为

$$U_{n}^{\text{tom}}(Z) = D_{n}^{\text{tom}}(Z)r_{n}^{'} + U_{n+1}(Z)t_{n}$$

$$D_{n+1}(Z) = D_{n}^{\text{tom}}(Z)t_{n}^{'} + U_{n+1}(Z)r_{n}$$
(4)

将(3)代入(4)式,可以得到第n+1层顶的上、下行 波与第n层顶的上、下行波之间的关系。采用矩阵 形式可写为

$$\begin{bmatrix} U_{n+1}(Z) \\ D_{n+1}(Z) \end{bmatrix} = \boldsymbol{M}_n \begin{bmatrix} U_n(Z) \\ D_n(Z) \end{bmatrix}, \qquad (5)$$

式中,层矩阵为 $M_n = \frac{Z^{-1/2}}{t_n} \begin{bmatrix} 1 & r_n Z \\ r_n & Z \end{bmatrix}$ 。

若层状介质有 N 层,对于整个 N 层构造可以得到

$$\begin{bmatrix} U_{N+1}(Z) \\ D_{N+1} \end{bmatrix} = (M)_N \begin{bmatrix} U_1(Z) \\ D_1(Z) \end{bmatrix}, \qquad (6)$$

式中, $(M)_N$  是 N 个层矩阵之连乘积,称为 N 层构 造系统矩阵

$$(\mathbf{M})_{\mathbf{N}} = \prod_{n=1}^{N} M_{n} = \frac{Z^{-N/2}}{T_{N}} \begin{bmatrix} F_{N}(Z) & Z^{N}G_{N}(Z^{-1}) \\ G_{N}(Z) & Z^{N}F_{N}(Z^{-1}) \end{bmatrix}$$
(7)  
$$\vec{\mathbf{x}} \mathbf{\oplus}, T_{N} = t_{1} \cdot t_{2} \cdots t_{N-1} \cdot t_{N},$$
  
$$F_{N}(Z) = 1 + f_{1}Z + f_{2}Z^{2} + \cdots + f_{N-2}Z^{N-2} + r_{1}r_{N}Z^{N-1}$$
(8)

$$G_{N}(Z) = rN + g_{1}Z + g_{2}Z^{2} + \dots + g_{N-2}Z^{N-2} + r_{1}Z^{N-1}$$
(9)

由 N 个层矩阵连乘构成的  $F_N(Z) = G_N(Z)$ 都是最高阶 为 N-1 的 Z 的多项式,而  $F_N(Z^{-1}) = G_N(Z^{-1})$ 则是它 们的复共轭多项式。式(8)和(9)中仅写出第一项与第 N 项系数的具体形式,其余系数可以采用迭代方法求 出。它们有递推关系

$$F_{n+1}(Z) = F_n(Z) + r_{n+1}ZG_n(Z) ,$$
  

$$G_{n+1}(Z) = r_{n+1}F_n(Z) + ZG_n(Z) ,$$
(10)

据层矩阵定义有  $F_1(Z)$ +1 和  $G_1(Z) = r_1$ 。以其为 初值用(10)式递推计算可得各项系数值。

将(6)式整理后可以得到用层状构造系统"输入"D<sub>1</sub>(Z)和 U<sub>N+1</sub>(Z)表示层状构造系统"输出"U<sub>1</sub>(Z)和 D<sub>N+1</sub>(Z)的表达式,用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} U_1(Z) \\ D_{N+1} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}_N) \begin{bmatrix} D_1(Z) \\ U_{N+1}(Z) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$(\mathbf{A}_{N}) = \begin{bmatrix} -\frac{Z^{N}G_{N}(Z^{-1})}{F_{N}(Z)} & \frac{Z^{N/2}T_{N}}{F_{N}(Z)} \\ \frac{Z^{N/2}T_{N}}{F_{N}(Z)} & \frac{G_{N}(Z)}{F_{N}(Z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{0}^{N}(Z) & T_{N}^{0}(Z) \\ T_{0}^{N}(Z) & R_{N}^{0}(Z) \end{bmatrix}$$

称为该系统的特遇矩阵。其中的非零元素分别称为

反射、透射传递函数; $R_0^N(Z)$ 、 $T_N^0(Z)$ 分别称为上方 入射的反射、透射传递函数, $R_N^0(Z)$ 、 $T_N^0(Z)$ 分别称 为下方入射的反射、透射传递函数。我们进行合成 记录计算时只需考虑上方入射反射传递函数。注 意,它的 Z 变换形式不再是一个简单的多项式,而 是一个有理分式,即

$$R_0^N(Z) = -\frac{Z^N G_N(Z^{-1})}{F_N(Z)} = \frac{A(Z)}{B(Z)} \,. \tag{13}$$

因为反射传递函数不是一个简单的多项式,而是一个 不具有线性关系的有理分式,故称这一理论为层状介 质非线性模型理论,而将原褶积模型称为层状介质线 性模型理论。显然,直接使用层状介质非线性模型理 论公式(13)计算包括一切多次波和透射影响的合成 地震记录需要在频率域中做递推计算,比较复杂,也 无法单独计算多次波。为此,我们发展了一种比较简 单的在时间域中直接进行计算的方法。

#### 2 微屈多次反射的正演模拟

利用多项式除法将(13)式展开,一般可以得到 一个无穷级数  $R_0^N(Z) = r'_0 + r'_1 Z + r'_2 Z + \cdots$ 。我 们将式中的  $r'_i$ 称为拟似反射系数。注意,拟似反射 系数与原真实界面反射系数是不同的,它包含了所 有的一次反射、多次反射和透射影响。因此,包含所 有一次反射、多次反射和透射影响的合成记录的计 算应为

$$Y_{0}(Z) = R_{0}^{N}(Z)S(Z)$$
(14)

这一计算在频率域中是乘积,在时间域中仍然是褶 积。但是,与地震子波褶积的不是原真实界面反射 系数序列,而是新的拟似反射系数序列。拟似反射 系数序列的 Z 变换是一个无穷级数反映了实际地 层中多次反射是永无止境的。当然,实际计算时不 能取无穷多项,只能截断使用;这也符合实际,因为 实际地层中经过太多次数的反射,能量已经可以忽 略不计了。

为了计算单纯的多次发射,我们还需要计算只 考虑一次反射和透射影响的合成。这一计算是通过 将地震子波与另一个所谓的透射-反射系数序列褶 积得到。写成 Z 变换的形式为

 $Y_1(Z) = R_1^N(Z)S(Z)$ (15) 式中,  $R_1^N(Z) = r''_0 + r''_1Z + r''_2Z^2 + \dots + r''_NZ^N$  是一 个多项式, 其系数为所谓的透射-反射系数

$$r''_{i} = \sum_{k=1}^{i=1} r_{i}(1-r_{k}^{2}) , \qquad (16)$$

因此,只包含纯多次反射的合成记录的计算应为

$$R_{2}^{N}(Z) = R_{0}^{N}(Z) - R_{1}^{N}(Z)$$
  
=  $(r'_{0} - r''_{0}) + (r'_{1} - r''_{1})Z +$   
 $\cdots + (r'_{N} - r''_{N})Z^{N} + r'_{N+1}Z^{N+1}$  时。  
(18)

#### 3 在中原油田深层地震资料解释中的应用

中原油田东濮凹陷东部地区油气源条件好,储 层发育,盖层稳定,是油气勘探有利的地区。经过多 年的地震勘探,凹陷东部的杜一桥一白地区取得了 丰硕的成果,对中原油田的增储上产发挥了很大的 作用。但该区3500m以下的深层地震资料普遍存 在反射能量弱、信噪比低、分辨率低、基底内幕反射 不清等问题,使深层圈闭不易落实,难以进行高精度 层位标定和储层预测。为了解决这些问题,需要对 工区多次波分布情况和地震反射波的时空变化进行 研究。我们选择了该地区的前梨园洼陷工区利用上 述方法做了分析。

3.1 工区多次波分布情况的分析

利用工区内不同位置处的多口井的声波测井资 料计算层状介质真实界面反射系数序列,对于上部 声波测井资料缺少的部分使用工区一般的时间-深 度表资料补上;使用上述方法分别计算了各口井的 单纯多次反射系数序列。

分析计算结果,可以将它们分为3类。第一类 为计算出的真实界面反射系数序列值较小,单纯多 次反射系数序列值也比较小(图2)。这一类二口井 分别位于工区北部边缘和最西南处。第三类为计算 出的真实界面反射系数序列中有很大的反射系数 值,而单纯多次反射系数序列的值也相当大(图3)。 这一类二口井位于工区内西部。

上述二类的井数均比较少,绝大部分井的计算 结果介于一、三类之间:计算出的真实界面反射系数 序列的值属于中等,单纯多次反射系数序列值较大 (图 4)。上述计算结果说明工区除了南、北部少量 地区外,大部分地区的层间微曲多次反射严重;而第 三类井附近地区的多次波非常强烈,反映岩性比较 特殊,估计可能有火成岩或膏盐层存在。

3.2 地震反射波时空分析

众所周知,我国东部油田以陆相薄互层沉积为 主。中原油田东濮凹陷的沉积也不例外。在这种陆 相薄互层地层种病因为每一个单层的层厚非常薄,波





在其中的双程旅行时大大地小于地震子波的延续时间,故在记录上见到的每一个"地震反射波"都不是 一个单纯的地震子波,而是多个不同时延、不同幅度 的地震子波的复合(它们既包括了各个薄层顶、底面 的一次波,也包括了多次波)。这种复合的"地震反 射波"与单纯的地震子波有所不同,是随时间(深度) 和空间变化而变化的。为了在解释工作中更好地识 别地震反射波,应当计算并研究这种复合地震波的 时空变化规律。

在研究工区多次波分布情况时,为了计算各口 井单纯多次反射系数序列,首先需要计算各口井拟 似反射系数序列。将拟似反射系数序列与地震子波 褶积可以得到包含了所有一次反射、多次反射和透 射影响的合成地震记录。根据各口井的地质资料由 合成地震记录上分别取不同标准层附近的波即为该 标准层处的复合"地震反射波"。对它们作频谱分 析,即可得到它们的频率响应。

分析上述复合波形及其频谱可以发现:从波形上 看,复合波形的相位一般比原始波形的相位多,而且各相 位之间的相对能量关系也与原始波形完全不同。从频谱 上看,复合波形的频谱一般比原始波形的频谱要窄,而且 复合波形主频的位置发生了一定的变动。当然,由于各 口井所处的位置不同,标准层不同,其复合波形的形状和



图 8 第三类复合地震反射波及其谱

频谱的变化是各不相同的,这就是地震反射波的时空 变化。首先,可以将这些复合地震反射波分为三大类: 第一类复合波形特征是二、三个幅度有正、负相位相间 变化的;其频谱与原子波(图 5)的频谱相比,形状没有 太大变化,但宽度变窄了,主频变高了(图 6)。第二类 复合波形(图 7)与原子波十分接近,只不过二者相位或 者相同,或者相反;它们的频谱与原子波的频谱相比非 常接近。第三类复合波形(图 8)与原子波相比差别就 较大了,主要表现在各相位的能量变化不规律,忽大忽 小;在它们的频谱上出现多个峰值的现象。其次,分析 反射波的空间变化。对于 T<sup>1</sup>6 层,属于第一类的占 37. 8%,属于第二类的占 25%,其他 37.8%属第三类。对 于 T<sup>2</sup>6 层,属于第一类的仅占 12.5%,勉强可以属于第 二类的占 25%,其他 62.5%均属于第三类。这说明 T<sup>2</sup>6 层反射波横向变化比 Ti 层复杂。而对于 Ti 层,属于 第一类的占 37.8%,属于第二类的占 12.5%,其他 50% 属于第三类。这说明 Ti 层反射波横向变化比 Ti 层复 杂,但比 Ti 层简单。上述认识对波的对比追踪有一定 的实际参考价值,说明同一测线上相同标准层的反射 波形在横向上是变化的,不可能形成"铁轨"式的反射 同相轴;而且不同标准层反射波形的变化情况不同。 最后,分析反射波的时变情况。总的来看,各口井不同 标准层的反射波均有属于同一类的情况,说明时变不 是太大(因引起时变的主要原因为吸收,没有考虑),但 都有一定的时变。举 W244 井为例,其 Ti 层和 Ti 层 反射波均属于第二类而 Ti 层反射波属于第三类。而 Q6 井 Ti 层和 Ti 层反射波属于第一类而 Ti 层反射波 属于第二类。

#### 4 结论与建议

(1)利用层状介质非线性模型可以计算微曲多次 反射。它可以在压制或利用多次波以及子波分析处 理和提高地震资料分辨率等工作中发挥作用。应进 一步开展研究工作。

(2)根据笔者提出的计算微曲多次反射的方法对 中原油田前梨园洼陷工区多次波分布情况和地震反 射波的时空变化进行了分析。分析结果对该区地震 资料的解释有一定的帮助作用。

(3)今后进一步的研究方向包括研究地震反射波 的时空变化时包括进吸收的影响,如何在模拟减去 法中利用这一方法压制多次波等。

#### 参考文献:

- [1] 姚姚, 詹正彬, 钱绍湖. 地震勘探新技术与新方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [2] 许云. 地震层状构造理论及其应用[M]. 北京.石油工业出版社,1981.
- [3] Weglein A. Multiple attenuation: an overview of recent advances and the road ahead(1999)[J]. Leading EDGE, 1999, 18(1); 40-44.

# THE FORWARD SIMULATION OF PEG-LEG MULTIPLE WAVE AND ITS APPLICATION TO THE DEEP SEISMIC DATA INTERPRETATION IN THE ZHONGYUAN OILFIELD

YAO Yao<sup>1</sup>, CAI Qi-xin<sup>2</sup>, ZHANG Guo<sup>1</sup>, DONG Qiao-liang<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Zhongyuan Oil field Branch Company, SINOPEC, Puyang 457000, China)

28 卷

基本达到了精确反演的要求。

由于区域剖分网格的数量是二维剖分的数十 倍,反演计算量较大;以目前的计算机速度来说,计 算时间较长,故目前不宜在野外做实时反演。

参考文献:

- [1] 单娜琳,阮百尧,程志平.二维有限元反演法在金矿电法勘探中的应用[J].桂林工学院学报,2000,20:14-21.
- [2] 单娜琳,阮百尧,程志平,等.激发极化数据二维有限元反演法 在金矿勘探中的应用[J].长春科技大学学报,2000,30(2):194 -197.
- [3] 熊彬,阮百尧,黄俊革.直流电阻率测深中二维反演程序对三维

数据的近似解释[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2003 (1).

- [4] 黄俊革,阮百尧,鲍光淑.三维地电断面激发极化法有限元数值 模拟[J].地球科学——中国地质大学学报,2003,28(3):323-326.
- [5] 黄俊革.三维电阻率/极化率有限元正演模拟与反演成像[D]. 中南大学,2003.
- [6] 阮百尧. 视电阻率对模型电阻率的偏导数矩阵计算方法[J]. 地 质与勘探,2001,37:39-41.
- [7] 阮百尧,村上裕,徐世浙.电阻率/激发极化法数据的二维反演 程序[J].物探化探计算技术,1999,21:116-125.
- [8] 黄俊革,阮百尧,鲍光淑.齐次边界条件下三维地电断面电阻率 有限元数值模拟法[J].桂林工学院学报,2002,22(1):11-14.

# AN ANALYTICAL COMPARISON BETWEEN 2D AND 3D INVERSIONS IN DC RESISTIVITY SOUNDING

#### HUANG Jun-ge, RUAN Bai-yao

(Department of Resource and Environment Engineering Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract**: The results of 3D inversion are analytically compared with the results of applying 2D inversion program to conducting inversion of 3D geological bodies in DC resistivity sounding. The methods for modeling and confirmation of prior information are compared, followed by a comparative analysis of several inversion examples of typical models. In 2D inversion, the precision of location, shape and resistivity is relatively low in that only single section information is taken into consideration. The results of 3D inversion are in good accord with the practical models because such an inversion has synthesized the information of several sections.

Key words: resistivity sounding; 2D; 3D; inversion

作者简介:黄俊革(1966一),男,博士,2003年7月中南大学信息物理工程学院毕业,副教授,现在桂林工学院资环系任教,主 要研究方向为电法勘探和数值模拟与反演成像技术。

#### 上接 446 页

**Abstract**: The suppression or utilization of the peg-leg multiple wave is a difficult problem in seismic data processing and interpretation. The forward simulation constitutes the basis of suppressing or utilizing peg-leg multiple wave. Using the nonlinear model theory of layered media, the authors developed a method for forward simulation of peg-leg multiple wave. The tentative application of this method to deep seismic data interpretation in the Zhongyuan oilfield yielded some useful results. This method can also play its role in the analysis and processing of seismic elementary wave and the improvement of seismic data resolution. **Key words**; nonlinear model; peg-leg multiple wave; forward simulation; seismic data interpretation

作者简介:姚姚(1945-),男,1967年北京地质学院本科毕业,1981年武汉地质学院硕士研究生毕业,现任中国地质大学教授,博士生导师,中国地球物理学会海洋专业委员会委员,中国石油学会石油物探专业委员会委员,湖北省石油学会理事兼石油物探专业委员会副主任,主要研究方向为复杂非均匀介质地震波场的正、反演问题,共出版了专著、教材5本,公开发表了论文 62篇。 万方数据