

doi: 10.11720/wtyht.2019.1420

罗天柱, 胡明顺, 韩迪, 等. VSP 初至逐层递推层速度反演研究及应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(3): 608-617. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1420>

Luo T Z, Hu M S, Han D, et al. Research and application of interval velocity inversion for VSP data by layer-by-layer recursion algorithm[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 608-617. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1420>

VSP 初至逐层递推层速度反演研究及应用

罗天柱¹, 胡明顺^{1,2}, 韩迪¹, 任义强¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 利用 VSP 资料准确获取地层速度, 对地震数据时深转换和偏移成像具有重要的作用。受激发接收条件变化、近源动态干扰和初至拾取误差等因素, VSP 资料初至时间往往含有一定程度的随机干扰。笔者研究了当 VSP 资料初至时间存在随机噪声干扰和仅有深部接收数据的情况下, 不同井源距 VSP 资料逐层递推反演层速度的误差特性。研究表明: ①井源距越大, 其对应资料初至反演速度误差越小; ②当仅有深部资料时, 井源距越小, 其资料反演结果与实际地层速度更接近。为此, 提出初至时间平滑后再反演, 多井源距反演结果求平均的方法, 从而提高层速度反演精度。利用该研究结论, 在某海上 Walkaway-VSP 资料处理中, 取得了较好的效果。

关键词: 逐层递推反演; VSP; 层速度; 井源距; 误差分析

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)03-0608-10

0 引言

20 世纪 50 年代末, 垂直地震剖面(vertical seismic profiling, 即 VSP)方法由苏联科学界在 1959 年提出, 该方法一经提出便成为研究热点。与地面地震相比, VSP 资料的信噪比高, 分辨率高, 波的运动学和动力学特征明显。能够提供地下地层结构同地面测量参数之间最直接的对应关系, 可以为地面地震资料处理解释提供精确的时深转换及速度模型, 为零相位子波分析提供支持^[1-2]。

用 VSP 资料求取地层速度的常用方法是根据初至时间进行速度反演。基于初至旅行时的层析成像方法能够获得地下复杂介质速度^[3-4], 并且该方法不断改进, 近年来提出 VSP 双加权层析反演方法。该方法以零井源距 VSP 速度作为相对稳定值填充井径附近速度网格, 并通过零井源距 VSP 速度加权外推建立初始速度模型, 形成一种基于置信度

和射线长度的 VSP 初至旅行时双加权层析反演的算法^[5]。利用层析方法, 根据 VSP 资料可以研究地下薄互层储层速度参数^[6], 检测岩墙松动等地质异常体^[7]。理论上, 层析成像的方法具有适应横向速度变化的能力, 然而, 对于深度偏移成像和时深转换^[8], 较为精确的层速度信息尤为重要, 因此研究和发展层速度直接估算具有实际意义。

在利用 VSP 资料求地层速度方面, Stewart 在 1984 年提出最小平方反演法估算层速度^[9]。王成礼和叶谷清在 1988 年提出的利用非零井源距 VSP 资料计算层速度^[10]。何惺华研究了采用零交叉点拾取初至, 从而提高层速度计算精度的方法^[11]。陈信平讨论了由 VSP 初至时间反演层速度的算法和误差估计^[12]。庄东海等研究了利用射线追踪折线法求取大偏移距 VSP 层速度^[13]。李文杰等利用 VSP 资料受干扰程度小, 信噪比高, 高频成分丰富以及能精确地分离出上、下行波的特点, 提出了一种利用 VSP 资料上、下行波的波场值反演深部地层层

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-04-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2015QNB22, 2015XKMS036); 江苏省自然科学基金项目(BK20160245); 国家重点研发计划项目(2017YFC0804105); 国家级大学生创新训练计划项目(201710290023)

作者简介: 罗天柱(1997-), 男, 本科, 主要研究方向为地震勘探。Email: 392717416@qq.com

通讯作者: 胡明顺(1985-), 男, 四川德阳人, 博士, 讲师, 主要从事地震勘探及成像方法研究。Email: dejekdm@163.com

速度的方法^[14]。高志凌等提出了一种用非零偏 VSP 三分量合成偏振角计算层速度的方法,它通过计算合成偏振角得到的 P 波入射角和 P 波的视时差,沿 P 波传播路径计算得到地震波层速度^[15]。郭世英和孙赞东研究了基于最小二乘迭代法的 VSP 旅行时反演层速度法,改进了反演中雅可比矩阵计算方法,提高了反演的稳定性和收敛速度^[16]。刘颖宇等首次利用中途 VSP 反演的地层层速度估算储层物性并总结了其使用条件^[17]。

其中,由于 VSP 逐层递推反演层速度具有快速准确的特性,受到广泛研究^[18-20]。实际的 VSP 资料可能往往受多种因素影响使得初至旅行时分析有一定的误差。一方面,同一炮数据不同深度井中水听器接收条件可能存在不一致的问题,地表激发有动态干扰导致信噪比不高,加之初至时间拾取也存在一定的人为误差,从而使得初至时间并不准确,含有一定的随机误差。因此,有必要研究在初至时间含一定随机误差的情况下,逐层递推反演算法层速度反演精度和抗干扰的能力。文中将通过数值模拟研究当存在随机噪声干扰和仅有 VSP 深部数据的情况下,不同井源距 VSP 资料逐层递推反演层速度的误差特性,分析逐层递推算法的适用性,并总结出相应的改进措施。

1 逐层递推反演原理

逐层递推反演从假设上可分为直线法和折线法,直线法假设地震波在地下沿直线传播,在偏移距较小或零偏时,能够发挥其算法简单、运算时间短、计算结果精确的优点^[20]。但偏移距逐渐增大,实际地震射线在地下沿曲线传播,假设与实际严重不符,

会造成随深度增加误差增大至不可忽略的现象。因此,折线法具有更强的适应性,文中仅讨论基于水平层状介质射线追踪折线法的逐层递推反演方法^[2]。

基于水平层状介质模型的 VSP 层速度逐层递推反演原理如图 1,井中布置 m 个检波器,以检波器所在深度为速度分层界面,共将地层划分为 $m+1$ 层。设井源距为 x_0 ,第 k 个检波器的深度为 z_k ,其射线路径如图 1。射线路径与第 k 层地层的底界面的交点到井孔的水平距离为 x_k ,入射角为 θ_k ,第 k 个检波器接收到的初至波旅行时为 t_k 。计算第 $n(1 < n < m+1)$ 层层速度的逐层递推反演算法如下:

1) 计算第 1 层速度

$$v_1 = \frac{\sqrt{x_0^2 + z_1^2}}{t_1}, \tag{1}$$

2) 设置入射角初始值 θ_1 ,令 $p=0^\circ, q=90^\circ$

$$\theta_1 = \frac{p+q}{2}, \tag{2}$$

3) 根据 Snell 定律有

$$\theta_k = \arcsin\left(\frac{v_k \sin \theta_1}{v_1}\right) (k < n)。 \tag{3}$$

4) 判断是否发生全反射,若发生全反射,则令 $q=\theta_1$,重新按步骤(1)设置初始角度 θ_1 ,并计算 θ_k ;若不发生全反射,由几何关系有:

$$x_k = x_0 - \sum_{i=1}^k (z_i - z_{i-1}) \tan \theta_i。 \tag{4}$$

5) 第 n 个检波器接收到的射线在从第 $n-1$ 个界面到第 n 个界面(第 n 层中)的传播时间为:

$$T = t_n - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i - z_{i-1}}{v_i \cos \theta_i}。 \tag{5}$$

6) 在第 n 层中,速度 v_n 和时间 T 满足

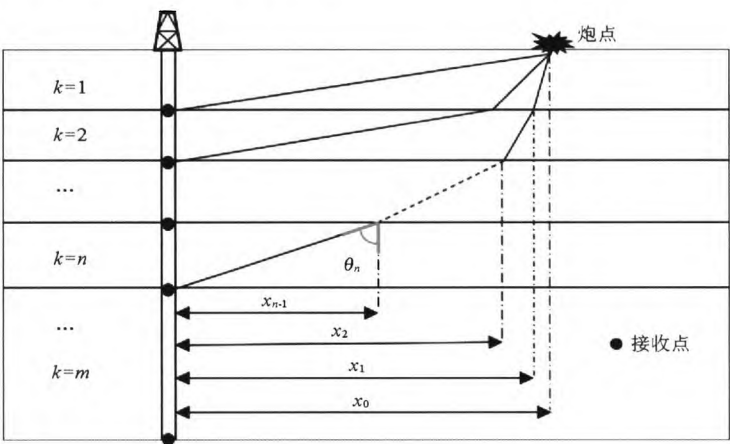


图 1 逐层递推反演层速度基本原理示意

Fig.1 Schematic diagram of principle of the interlayer velocity inversion by layer-by-layer recursion algorithm

$$Tv_n = \frac{x_{n-1}}{\sin\theta_n}, \tag{6}$$

$$v_n = \frac{x_{n-1}}{T\sin\theta_n} \approx \frac{\sqrt{x_{n-1}^2 + (z_n - z_{n-1})^2}}{T}。 \tag{11}$$

通过移项得:

$$v_n \sin\theta_n = \frac{x_{n-1}}{T}。 \tag{7}$$

根据 Snell 定律,可得:

$$\left(\frac{v_1}{\sin\theta_1}\sin\theta_n\right)\sin\theta_n = \frac{x_{n-1}}{T}, \tag{8}$$

化简得:

$$\theta_n = \arcsin\sqrt{\frac{\sin\theta_1 x_{n-1}}{v_1 T}}。 \tag{9}$$

7)射线入射到井中的深度可表示为:

$$H = z_{n-1} + x_{n-1}\cot\theta_n, \tag{10}$$

将 H 与 z_n 比较,判断两者之差是否满足精度要求,若不满足精度时,校正初始出射方向 θ_1 ,继续追踪,再比较;若满足精度要求则可计算第 n 层速度:

2 数值模拟试验

2.1 模型参数

建立图 2 所示 7 层水平均匀层状介质模型,其中井孔位于 $X=0\text{ m}$,井中检波器布置深度范围为 $200\sim4\,000\text{ m}$,道距 10 m ,共 381 道。炮点布设含大、中、小三种不同井源距,分别为 $400、2\,000、4\,000\text{ m}$,从而分析不同井源距条件下的逐层递推层速度反演精度的问题。采用射线追踪的方法,理论计算出各炮的初至旅行时如图 3 所示。

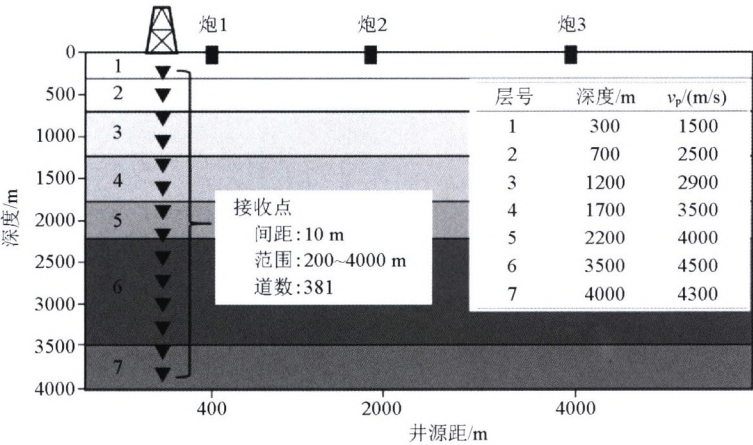


图 2 水平均匀层状介质模型
Fig.2 Horizontally homogeneous layered media model

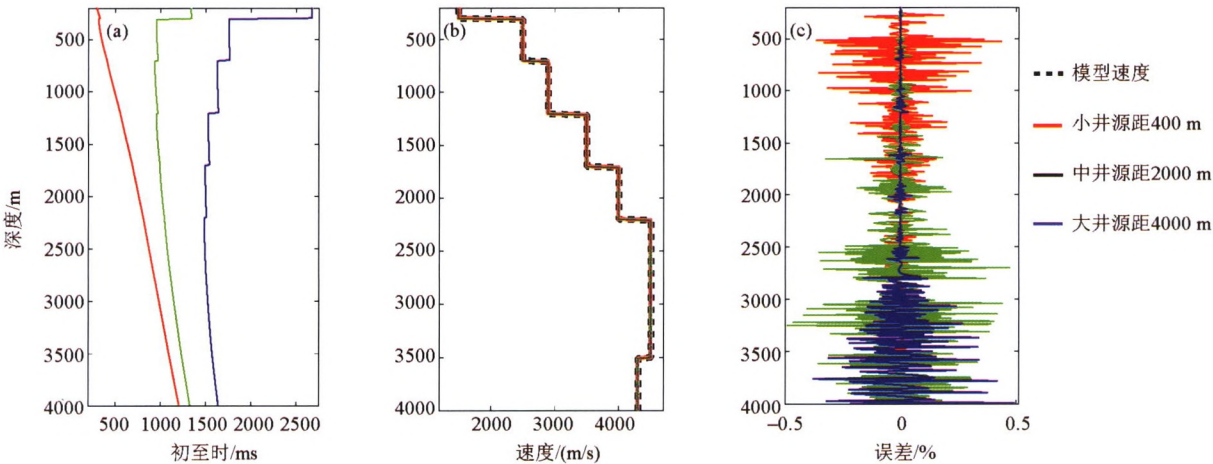


图 3 不含随机干扰初至(a)、反演层速度(b)及误差(c)
Fig.3 Inversion interval velocity(b) and error(c) from VSP first arrival time(a) without random interference

2.2 不含随机干扰初至反演误差分析

采用射线追踪,对图 2 所示模型进行正演计算,得到理论的 VSP 初至时间(图 3a);在对理论初至时间不加任何误差的情况下,进行逐层递推反演,得到不同井源距初至反演的层速度(图 3b)。可以看出,反演结果与模型吻合非常好,几乎不产生误差,最大误差小于 0.5%,如图 3c 所示。因此,可以看出该方法在初至旅行时没有误差的情况下,能够取得较好的反演结果。

图 3 所表示的不含随机干扰初至反演层速度及误差图中,出现井源距由小到大,产生反演误差较大的深度范围也由小到大的现象。其原因是文中所述不含随机干扰初至时间是用射线追踪计算所得,其计算的理论初至时间并非完全没有误差,因为在射线追踪过程中,必须严格满足斯奈尔定律,不是所有激发接收点都能有完全满足斯奈尔定律的射线路径存在,通常设定一个阈值作为收敛条件。本文设定阈值为井中接收间距的一半作为收敛条件。

在初至时间含有极小误差的情况下,逐层递推反演误差表现特征同下文所述一致。也就是,因井源距小,浅部地层的初至旅行时也很小,因此受误差影响要大,其初至反演的层速度计算误差也就较大;随着井源距增大,浅部地层的初至旅行时逐渐增大,因此受误差影响逐渐减小,其初至反演的层速度计算误差也就减小。此外,当井源距小的时候,深部地层的地震射线近似垂直,按斯奈尔定理计算的射线路径误差受影响小,受按射线逐层计算的层速度误差也小;当井源距增大,深部地层的地震射线近似水平,按斯奈尔定理计算的射线路径误差受影响大,受按射线逐层计算的层速度误差也变大。

2.3 含随机干扰初至反演误差分析

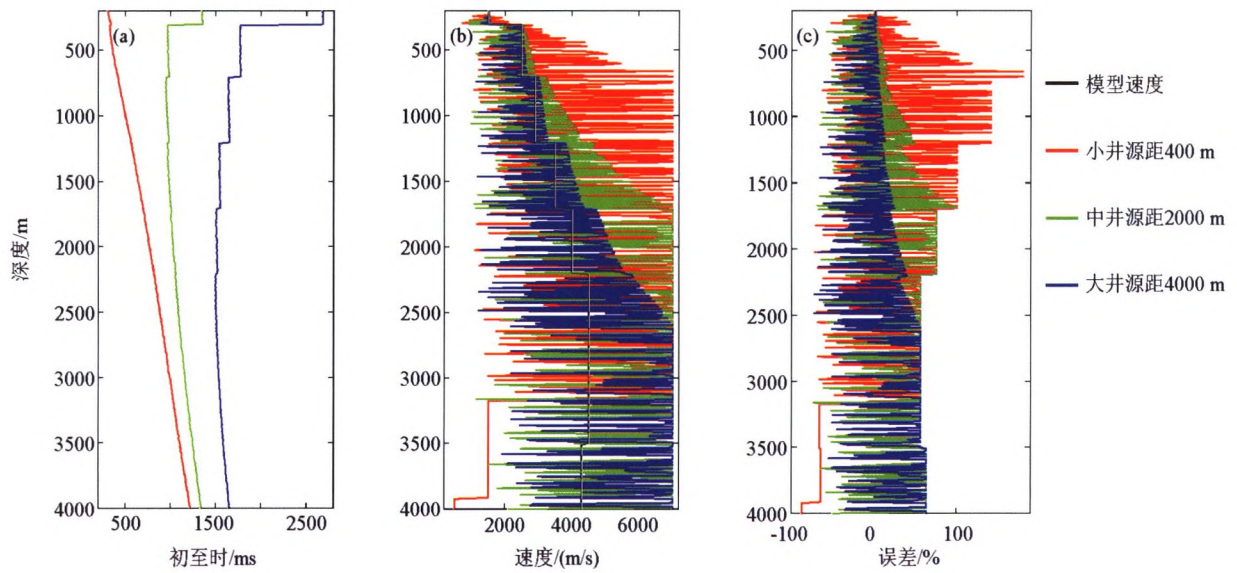
实际的 VSP 资料可能往往受多种因素影响,使得初至旅行时含有一定的误差干扰。一方面,同一炮数据所对应的不同深度的水听器接收条件可能存在不一致的情况;再者,地表不同激发炮收到的近源干扰可能存在动态变化的干扰;此外,在初至时间拾取的过程中,无法做到每一道数据初至波准确识别,容易引起人工误差。以上原因最终使得获取的初至时间信息并不十分准确,含有一定的误差,且有明显的随机性。为此,本文通过在理论初至时间基础上,添加一定强度的随机干扰,来研究逐层递推层速度反演误差特性,讨论其稳定性和收敛性。

假设初至时随机误差仅为初至波的半个主周期,当 VSP 初至波主频为 100 Hz 时,其主周期为 10 ms,半主周期为 5 ms。在图 2 所示模型对应的理论

VSP 初至旅行时基础上,添加最大误差为 5 ms 的随机时间误差,进而研究逐层递推层速度反演误差特性。图 4a 是含有随机干扰的初至时间,相比初至旅行时,这个随机误差值的大小通常是很小的,从图中初至时间和深度曲线中难以看出随机干扰的存在。图 4b 为对应图 4a 的反演结果,图 4c 为反演结果与模型速度的误差百分比。可以看出,在有初至时间随机误差干扰的影响下,不同井源距的初至反演速度与模型速度相差很大。尽管在逐层递推算法中,对反演速度的范围约束在 500~7000 m/s,且对迭代次数也进行了限制,仍无法使反演误差收敛,出现极不稳定的现象。其主要原因在于,尽管随机误差干扰的大小相比初至时间并不大,但其与每一层的地层厚度的旅行时相当。因此,随机误差干扰的存在严重影响着每一层层速度的计算,当层厚越薄,影响层速度计算越严重。因此可以认为,逐层递推层速度反演算法对初至旅行时要求很高,当初至时存在较小的随机误差干扰时,反演误差极大,且不收敛,反演结果极不可靠。从逐层递推算法原理可以知道,深部地层的速度计算是基于浅部地层计算结果推演出来的。因此,当浅层层速度计算存在误差时,对深部地层层速度是有影响的,即存在积累效应。

根据初至误差具有一定的随机特性,文中采用平滑滤波技术,先对初至时间进行平滑滤波,一定程度消除随机误差干扰的影响,然后再进行逐层递推层速度反演。本文采用平滑滤波采用的是一次 5 点平滑,平滑程度受平滑次数和平滑点数影响。当平滑次数增加或采用的平滑点数增多,平滑程度加剧;反之,平滑程度减弱。欠平滑不足于压制随机干扰的影响,过平滑会导致反演得到的层速度差异减小(层速度也将趋于渐变)。在实际应用平滑的过程中,采用的原则是:以反演得到的速度不超出给定的速度范围为标准。如给定速度范围为 300~7000 m/s,当反演的速度有超出该范围时,选择增加平滑次数或增大平滑点数。

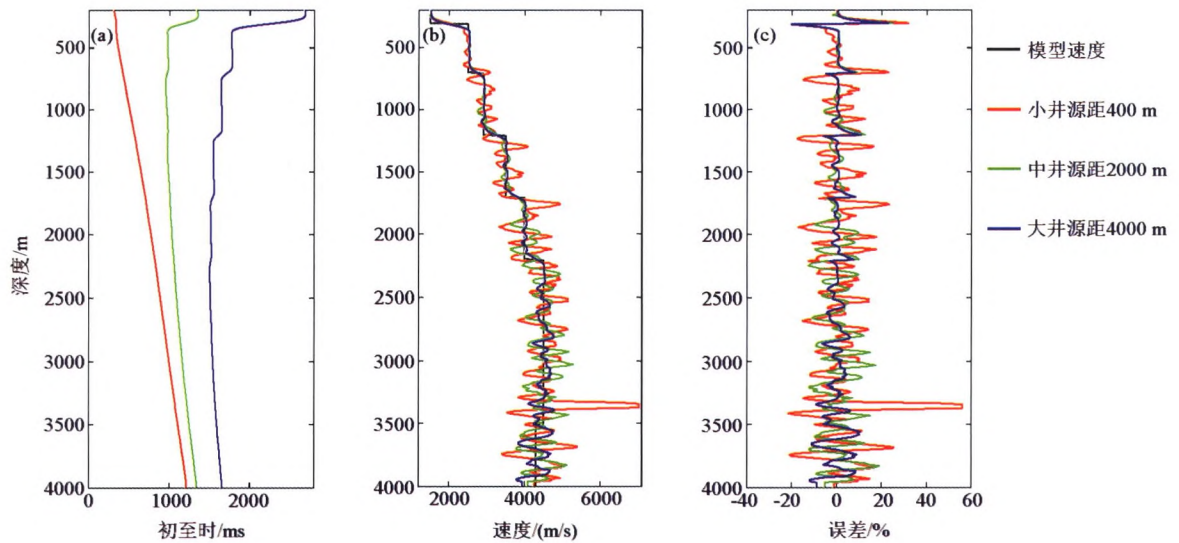
对图 4a 进行平滑滤波后得到如图 5a 所示的初至时,对其进行逐层递推反演的结果如图 5b 所示,图 5c 为反演速度误差。可以看出,相比未做初至平滑的反演结果图 4b,初至平滑后的反演结果图 5b 有较大改善,其层速度基本能够与模型速度匹配,仅在个别深度点的速度误差任然很大。实际上,不同井源距初至反演结果平均误差大多在 10% 以内,界面处最大误差达到 20% 以上。可以看出:①初至时间平滑对随机误差有一定压制作用,反演结果的准确性得到了明显的提高;②小井源距抗干扰能力不



a—含随机干扰初至旅行时;b—反演结果;c—反演误差
a—First break time with random perturbation;b—Inversion result;c—Inversion error

图 4 含随机干扰初至反演层速度及误差

Fig.4 Inversion interval velocity and error from VSP first arrival time with random interference



a—误差压制后初至时;b—反演结果;c—反演误差
a—First break time filtered by smoothing;b—Inversion result;c—Inversion error

图 5 初至平滑后反演层速度及误差

Fig.5 Inversion interval velocity and error from smoothed VSP first arrival time

如大井源距,速度反演精度随井源距增大而提高。分析其原因主要为,相同深度地层内,小井源距地震射线路径短,旅行时小。因此,在速度反演过程中,相比大井源距资料,初至时误差对小井源距资料的速度反演有更大影响。

从图 5b 中还可以看出,由于初至误差是随机的,其反演层速度误差也基本呈现较明显的随机特性,但同时发现多个反演结果的期望值与理论模型十分接近。为此,考虑对多个不同井源距资料反演

结果进行平均处理,可能会提高反演层速度的精度。文中在图 2 所示模型上,理论计算了 8 个不同井源距(50、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000m)的 VSP 初至旅行时,然后添加最大误差为 5 ms 的随机误差干扰,再对初至进行平滑滤波后,进而采用逐层递推反演算法,反演计算层速度。图 6a 为将 8 个不同井源距资料反演结果进行算数平均处理得到的速度—深度曲线,相比图 5b 所示结果,其速度精度有明显提高。图 6b 为加权平均结果,速度

精度比图 6a 更高一些。加权平均主要根据井源距的大小来确定权重。因为上文分析得出,大井源距资料反演结果与实际模型速度跟接近。因此,井源距越大,权重设定就越大,可以按如下公式计算:

$$A_i = X_i / \sum_{j=1}^N X_j,$$

(12)

其中, A_i 为第 i 个井源距资料反演结果的权重; X_i 第 i 个井源距资料井源距; N 为参与平均的反演结果个数。对加权平均结果进一步做平滑处理,可以提高层速度与理论模型的吻合度。

图 6c 所示为对图 6b 结果再进行平滑后的速度—深度曲线,可以看出通过对反演结果进一步平滑处理,可以降低速度误差,但同时也模糊了不同地层的分界面。

2.4 仅有深部资料的初至反演误差分析

考虑生产成本和采集仪器的限制,实际 VSP 调查大多仅在目的层深度段附近布设接收器,一般浅部不布设检波器记录数据。因此,有必要研究在缺乏深部数据的情况下,逐层递推层速度反演受到的影响以及呈现的误差特性。为此,在图 2 所示模型参数中,将井中接收深度范围限制在 1 500~4 000 m,分别正演计算井源距 400、2 000、4 000 m 的 VSP 理论初至时间,如图 7a 所示。对应图 7a 的反演结果如图 7b 所示,图 7c 为反演速度误差。可以看出,对于仅有深部资料时,反演结果比理论模型速度总体偏小。相比小井源距,大井源距初至反演结果误差更大。浅部误差最大,随着深度增加,反演误差逐渐减小,不断逼近模型速度。

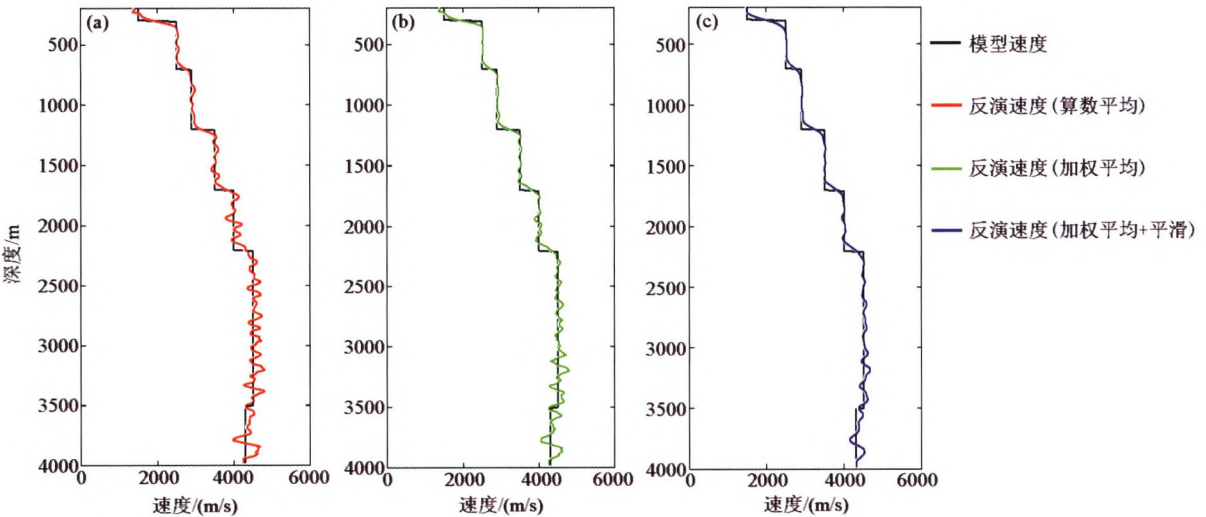


图 6 多井源距资料反演结果平均处理效果

Fig.6 Average of inversion results from multiple shots of VSP data with different offset

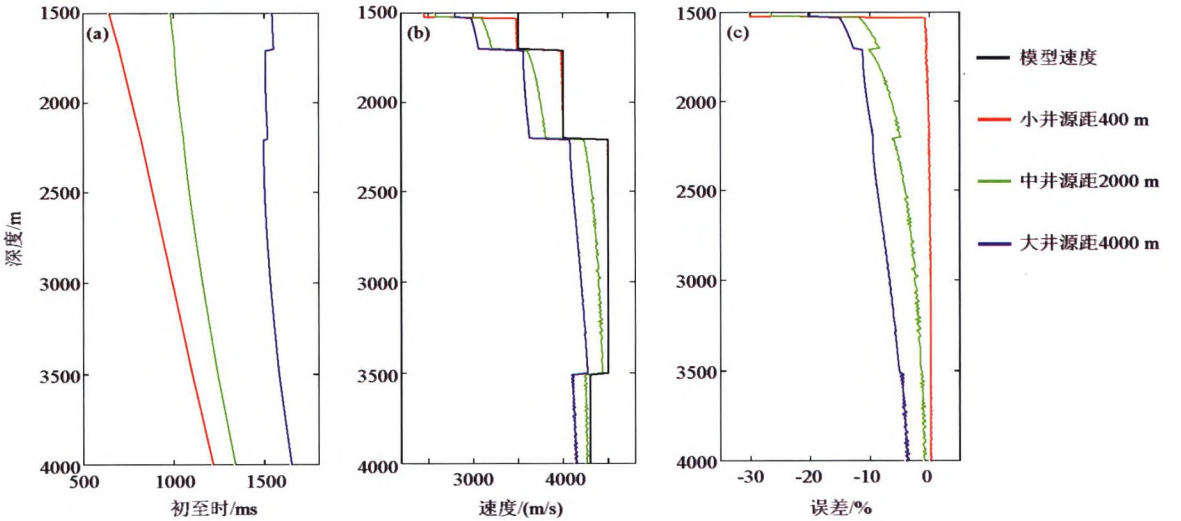


图 7 仅有深部资料的初至反演结果与误差

Fig.7 Inversion interval velocity and error from only deep VSP data

由逐层递推算法原理知道,接近地表的第一层厚度是由最浅水听器深度所决定,且其层速度由最浅水听器接收的初至波旅行时计算所得,其速度反映的是第一层的平均速度。当接收排列位于较深范围时,在运用逐层递推反演算法时,将浅部很厚深度段视为单一速度地层,地震波沿直线传播。而实际情况是浅层存在多个地层,且层速度大多存在变化,以速度递增为主,地震波遵循斯奈尔定律,并非沿直线传播。用直线代替折线,将存在很大误差。当浅部为速度递增地层时,第一层的平均速度将小于第二层的层速度,使得计算得到的深部地层层速度均偏小。当井源距越大,速度偏离真实地层速度越严重。因此,当仅有深部数据时,小井源距资料反演计算的结果更接近于实际地层速度,大井源距资料反演结果不可靠,但都能反映出速度随深度的相对变化规律。

3 实际资料应用

某海域海底深度约 2 600 m,该区前期已做二维地震勘探,发现盐丘构造。为进一步对盐丘底辟结构进行更高分辨率探测,开展了 Walkaway-VSP 调查。该资料接收排列深度范围为 4 561~5 671 m,道距 15 m,共 75 道。井口偏离炮线垂直距离 120 m,共采集 482 炮,最小井源距 122 m,最大井源距 6 012 m,炮点激发深度为-6 m。由于该资料仅在目的层附近较深层段接收,浅部很大范围无数据可利用。

图 8a~c 为井源距分别为 123、2 715、5 538 m 三炮 VSP 原始地震记录,图中蓝色短线为拾取的初至波。对初至时间平滑后,进行逐层递推层速度反演,9a 所示为反演结果。可以看出,不同井源距初至时逐层递推反演层速度不同,井源距越大,对应反演速

度越小。由上述理论模拟分析知道,当浅部为速度递增的地层时,对于仅有深部数据时,采用逐层递推算法进行层速度反演,小井源距资料反演结果比大井源距资料反演结果更接近实际情况。此种情况,不宜采用大井源距资料反演结果。

但是,相比大井源距资料,小井源距资料反演结果受初至随机误差影响更大,主要表现为反演层速度出现随机波动。根据上文理论模拟分析认识到,可以通过对多炮小井源距资料反演结果进行平均处理,来降低随机时间误差带来的影响,获取较为准确的层速度信息。图 9b 所示为井源距分别为 122、123、127、128、148、150、164、166、182、188、198 m 的 13 炮 VSP 资料初至旅行时。由于该数据的接收排列沉放在 4 561~5 671 m 深度范围,井源距在 200 m 以内的 VSP 初至旅行时大小几乎相同,仅存在很小的随机误差干扰,如图 9b 椭圆圈定部分较为明显的初至时间随机误差。对初至时平滑滤波后,进行逐层递推反演计算得到层速度如图 9c 所示。可以看出,由于井源距十分接近,反演结果也非常相似,仅在初至旅行时存在随机误差干扰的深度范围(椭圆圈定区域),其对应深度段的反演结果也有相应的随机误差。由于缺少浅部资料,不宜按式(12)计算权重,选择将全部 13 炮 VSP 资料反演结果进行算数平均,得到如图 9c 中箭头所指的加粗蓝色曲线所示。根据前述理论分析知道,平均后的结果与实际地层情况应该更吻合。

利用反演得到的层速度信息,可进一步计算出该区域的均方根速度,进而对该 Walkaway-VSP 资料进行 CDP 变换叠加成像处理,处理结果如图 10 所示(未做偏移)。可以看出,该成像结果对盐丘底辟结构的各层位相互关系刻画较为清晰,能够为后期油藏描述和油气开采提供可靠的地质依据。

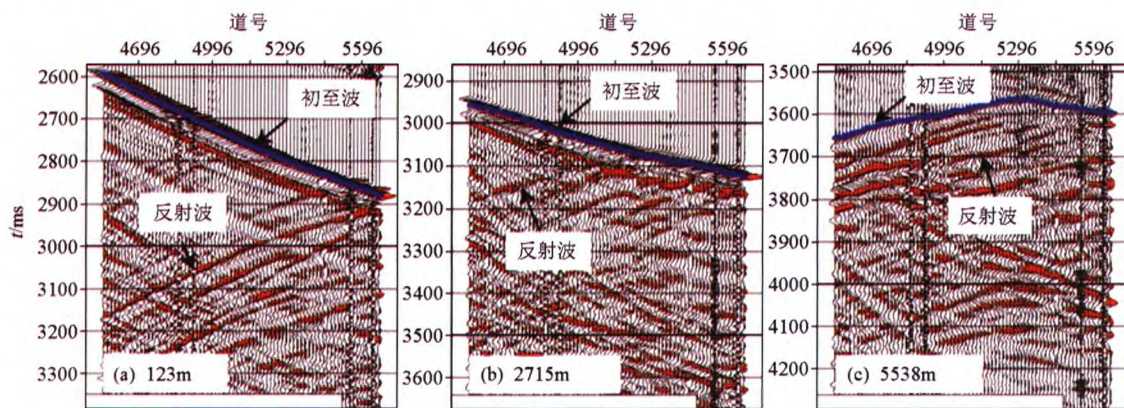


图 8 不同井源距 VSP 单炮地震记录

Fig.8 Single shot seismic records with different offset

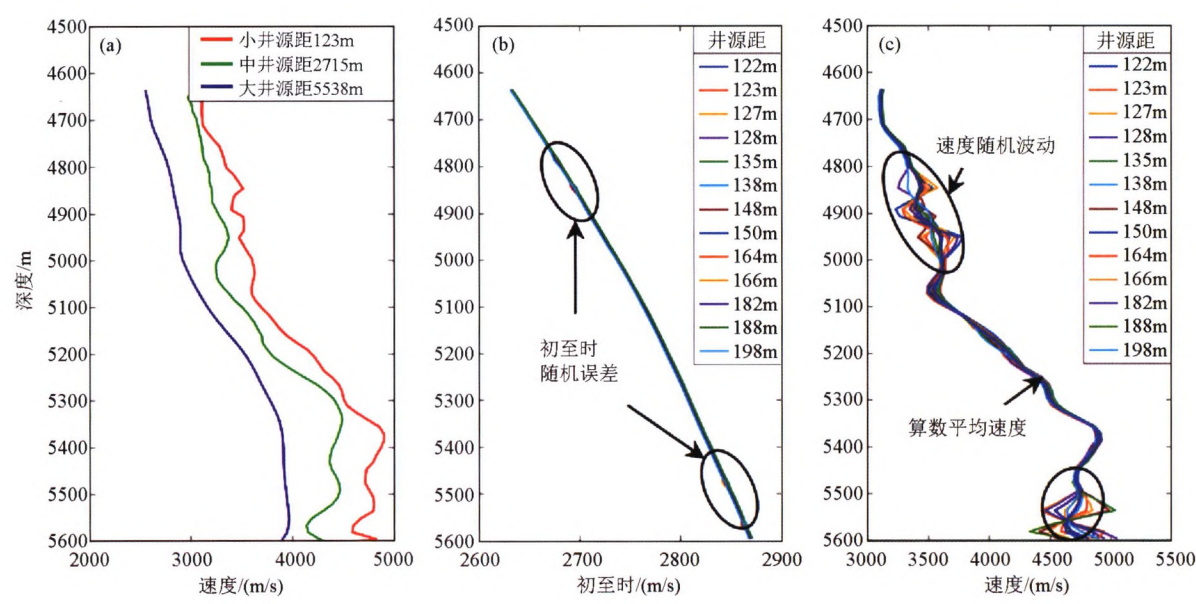


图 9 不同井源距资料初至时间及层速度反演结果

Fig.9 First arrival time of VSP data with offset and corresponding inversion results

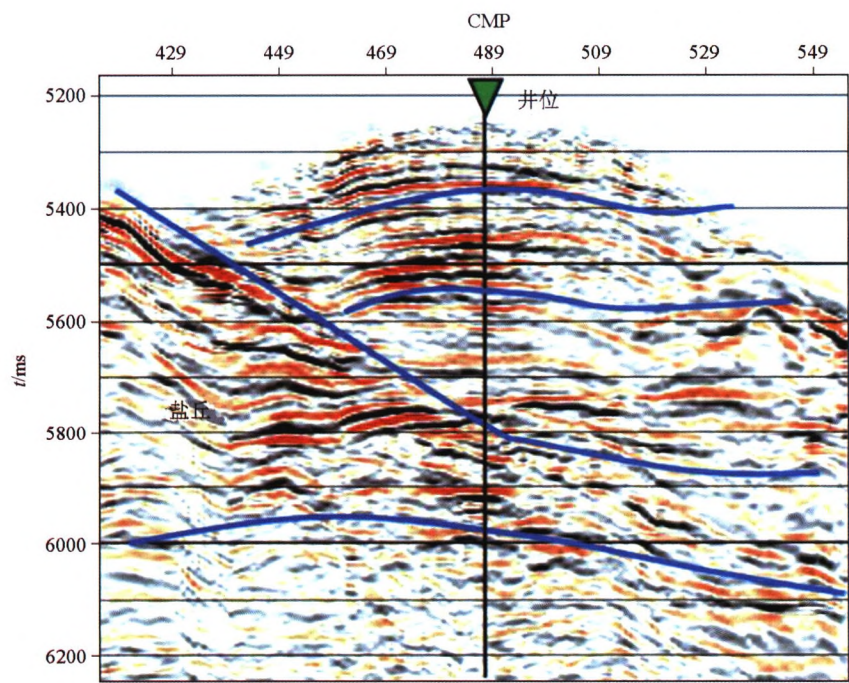


图 10 Walkaway-VSP CDP 变换叠加成像结果

Fig.10 Walkaway-VSP CDP transform stacked profile

4 结论

文中通过理论数值模拟分析,研究了当 VSP 资料初至时间存在随机噪声干扰和仅有深部接收数据情况下,不同井源距 VSP 资料逐层递推反演层速度的误差特性。研究表明:①小井源距抗噪能力不如大井源距,速度反演误差随井源距增大而减小;②当

初至含有随机误差影响时,平滑处理能够降低层速度反演的误差,提高反演的稳定性和收敛性;③当浅部为速度递增地层且仅有深部 VSP 资料时,反演层速度均小于实际地层速度,井源距越小,其资料反演结果与实际地层速度更接近;④多炮数据反演结果平均处理,可以进一步降低随机误差的影响,得到更可靠的层速度信息。利用以上研究结论,在某海上 Walkaway-VSP 资料处理中,取得了较好的效果。

参考文献 (References):

- [1] 郭建.VSP 技术应用现状及发展趋势[J].油气藏评价与开发, 2004, 27(1): 1-8.
Guo J. The application status and development trends of VSP technology[J]. Progress in Exploration Geophysics (in Chinese), 2004, 27(1): 1-8.
- [2] 孙赞东. 三维三分量 VSP 方法原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 171-185.
Sun Z D. Principle and application of 3D three-component VSP method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 171-185.
- [3] 李远钦. 曲线 Radon 变换反投影与 VSP 层析成像[J]. 石油地球物理勘探, 1994, 29(s2): 42-45.
Li Y Q. Curved Radon transform back projection and VSP tomography[J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1994, 29(s2): 42-45.
- [4] Huang G N, Liu Y. Variable damping constraint tomography and its application in VSP Data [J]. Applied Geophysics, 2012, 9(2): 177-185
- [5] 侯爱源, 李庆忠, 张文波. 复杂区深井 VSP 层析求速度场的方法[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(6): 1150-1155.
Hou A Y, Li Q Z, Zhang W B. A method for velocity field with deep-well VSP tomography in complex areas[J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2017, 52(6): 1150-1155.
- [6] 吴如山, 李幼铭. 关于在陆相薄互层油储地球物理研究中开展跨井和 VSP 层析 [J]. 地球科学进展, 1990, 5(3): 32-39.
Wu R S, Li Y M. Cross-well and VSP tomography in geophysical research for terrestrial thin interlayer reservoirs [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 1990, 5(3): 32-39.
- [7] 何正勤, 吴庆举, 冯锐, 等. 反向 VSP 透射层析成像法在岩墙松动层检测中的应用[J]. 物探与化探, 2001, 25(1): 50-53.
He Z Q, Wu Q J, Feng R, et al. Reverse VSP transmission tomography application in testing of loose rock layer[J]. Geophysical & Geochemical Exploration (in Chinese), 2001, 25(1): 50-53.
- [8] 殷文, 唐建云, 朱剑兵, 等. VSP 时差分析及时深关系校正[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2823-2830.
Yin W, Tang J Y, Zhu J B, et al. Analysis of VSP travel-time difference and calibration of time-depth relationship[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2014, 29(6): 2823-2830.
- [9] Stewart R. VSP interval velocity from travel time inversion[J]. Geophysical Prospecting, 1984, 32(4): 602-628.
- [10] 王成礼, 叶古清. 利用非零井源距 VSP 资料计算层速度[J]. 石油地球物理勘探, 1988, 23(5): 616-619.
Wang C L, Ye G Q. The calculation of interval velocity using non-zero-offset VSP data[J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1988, 23(5): 616-619.
- [11] 何惺华. 从 VSP 资料求取速度参数的方法[J]. 石油物探, 1991, 30(1): 97-108.
He X H. An approach to determine velocity parameter from VSP data[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum (in Chinese), 1991, 30(1): 97-108.
- [12] 陈信平. 由 VSP 初至时间反演层速度的算法和误差估计[J]. 石油地球物理勘探, 1992, 27(6): 744-752.
Chen X P. Method for interval velocity inversion using VSP first break time and the error estimation[J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1992, 27(6): 744-752.
- [13] 庄东海, 肖春燕. VSP 资料求层速度的射线追踪折线性[J]. 石油天然气学报, 1994, 16(4): 50-53.
Zhang D H, Xiao C Y. Interval velocity inversion from VSP data by polyline ray tracing[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute (in Chinese), 1994, 16(4): 50-53.
- [14] 李文杰, 魏修成, 刘洋. 利用 VSP 资料反演地层层速度的一种新途径[J]. 石油物探, 2004, 43(2): 126-129.
Li W J, Wei X C, Liu Y. A new way to invert interval velocity by using VSP data[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum (in Chinese), 2004, 43(2): 126-129.
- [15] 高志凌, 王举红. 非零偏 VSP 层速度的计算方法[C]//中国地球物理学会年会, 2006.
Gao Z L, Wang J H. Non-zero offset VSP layer velocity calculation method [C]//Chinese Geophysical Society Annual Meeting (in Chinese), 2006.
- [16] 郭世英, 孙赞东. VSP 速度反演中雅可比矩阵计算的一种新方法[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 6-9.
Wu S Y, Sun Z D. A new approach for Jacobian matrix calculation in VSP velocity inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2010, 45(1): 6-9.
- [17] 刘颖宇, 田洪, 李东, 等. 中途 VSP 地层层速度反演技术的拓展应用[J]. 中国海上油气, 2011, 23(3): 163-165.
Liu Y Y, Tian H, Li D, et al. Extended applications of interval velocity inversion on intermediate VSP[J]. China Offshore Oil and Gas (in Chinese), 2011, 23(3): 163-165.
- [18] 胡建华, 刘家琦, 王玉岭. 用 VSP 初至旅行时反演层速度的新方法——快速逐层校正法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1991, 23(6): 9-14.
Hu J H, Liu J Q, Wang Y L. A new method for retrieving layer velocity with the first arrival time of VSP-Fast layer-by-layer Correction[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (in Chinese), 1991, 23(6): 9-14.
- [19] 山秀明, 李龙俊, 冯振明, 等. 逐层向下的递推反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(2): 214-220.
Shan X M, Li L J, Feng Z M, et al. A new method for layer-by-layer downward recursion inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1997, 32(2): 214-220.
- [20] 周珺, 谢春辉, 杨鹏. VSP 初至逐层递推反演层速度[J]. 物探与化探, 2012, 36(2): 242-245.
Zhou J, Xie C H, Yang P. Layer-by layer recursion inversion of interval velocity from VSP data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 2012, 36(2): 242-245.

Research and application of interval velocity inversion for VSP data by layer-by-layer recursion algorithm

LUO Tian-Zhu¹, HU Ming-Shun^{1,2}, HAN Di¹, REN Yi-Qiang¹

(1.School of Resource and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The use of VSP data to accurately acquire formation velocities plays an important role in time-depth conversion and migration imaging of seismic data. Due to factors such as changes in receive and excitation conditions, near-source dynamic interference, and first arrival time pick-up errors, the first arrival time of VSP data often contains a certain degree of random interference. The authors studied the error characteristics of inverting interval velocity for VSP data with different offsets by layer-by-layer recursion algorithm when VSP data have random noise at the first arrival time and only deep data are received. Some conclusions have been reached: ①The larger the offset, the smaller the inversion velocity error of the corresponding data; ②When the data is only recorded from the deep level, the smaller the offset, the closer the inversion result to the actual formation velocity. For this reason, the first arrival time should be smoothed before being inverted by layer-by-layer recursion algorithm, and then the average of inversion results is taken from multi offset VSP data as the final interval velocity. This method can improve the inversion accuracy of the interval velocity. By using this research conclusion, good results were obtained in the processing of marine Walkaway-VSP data.

Key words: layer-by-layer recursion; VSP; interval velocity; offset; error analysis

(本文编辑:叶佩)