

doi: 10.11720/wtyht.2020.1319

智敏, 朱建刚. 基于程函方程的克希霍夫全平面域偏移成像方法[J]. 物探与化探, 2020, 44(4): 756–762. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1319>

Zhi M, Zhu J G. Kirchhoff full plane imaging method based on Eikonal equation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 756–762. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1319>

基于程函方程的克希霍夫全平面域偏移成像方法

智敏, 朱建刚

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 本文分别以直射线和弯曲射线初至波层析反演技术重建的速度为偏移速度, 采用波前扩展外推方式求解程函方程, 求取了成像区域内各节点初至波时间场, 应用克希霍夫积分偏移技术对复杂模型叠前数据进行全平面偏移成像, 成像结果表明: 弯曲射线层析反演方法获得的速度场较直射线路析结果对速度异常体的刻画更准确, 以弯曲射线层析反演速度场作为偏移速度可以获得较好的偏移成像结果。

关键词: 程函方程; 克希霍夫积分法; 全平面偏移成像; 弯曲射线层析反演; 直射线路析反演

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)04-0756-07

0 引言

克希霍夫积分偏移是一种基于波动方程积分分解的偏移成像方法, 与其他偏移方法相比, 该方法能够适应非规则观测系统, 具有较高的计算效率^[1]。目前主流处理系统的克希霍夫偏移模块主要针对于地面地震数据成像, 要求炮检点均位于地表, 波场信息来自地下半空间, 属于半空间成像方法。对于某些特殊地震观测系统, 如煤矿井下槽波观测系统, 地震信号可能来自以炮检点为焦点的完整椭圆上, 属于全平面域偏移成像, 主流处理软件并不适用。王季、姬广忠等基于直射线路析重构的槽波速度场, 采用直射线路析克希霍夫积分偏移方法对井下反射槽波数据进行了偏移成像, 取得了一定的效果^[2-3], 该方法与地面地震直射线路析偏移成像一样, 将绕射点与炮检点之间的射线路径视为直线, 没有考虑速度场变化引起的射线弯曲及旅行时变化, 造成成像点与原绕射点不重合, 降低了成像分辨率。

针对直射线路析成像速度的这一缺陷, 本文采用弯曲射线层析成像方法反演成像区域速度。对于

弯曲射线层析成像, 射线追踪的精度直接影响着成像精度。常用的射线追踪方法有试射法、旅行时线性插值法(LTI)、快速步进法(FMM)、有限差分求解程函方程法。试射法对于简单速度模型具有较高精度, 但不能处理折射波问题, 对于复杂构造常存在追踪盲区, 并且计算效率低下^[4]。LTI、FMM 算法及有限差分法均首先计算从震源传至各节点的最小旅行时, 并基于旅行时间采用反向追踪技术求取各检波点到炮点的射线路径。在计算最小旅行时时, LTI 算法常采用按列(行)扫描的方式计算全局最小旅行时^[5], 该方法未能考虑来自各个方向的射线, 对于横向速度变化较大的介质, 计算结果往往并非全局最小, 叶佩等采用了全方位循环法求得了网格节点的全局最小旅行时^[6], 张建中等采用 Dijkstra 算法逐点计算了各节点的最小旅行时^[7]; FMM 算法通过上风差分近似和窄带技术近似模拟地震波前的传播, 具有计算精度高、运算速度快、无条件稳定的优点, 可以计算网格节点的全局最小旅行时, 但该方法近源区域网格节点旅行计算误差较大, 并对后续节点的计算精度有影响, 需要对近源区的网格进行行加密处理, 以提高近源区旅行时的计算精度^[8]; 有限

收稿日期: 2019-06-24; **修回日期:** 2020-03-24

基金项目: 国家重点研发计划课题“井下随掘巷道地质异常体动态探测技术与装备”(2018YFC0807804); 贵州省科技重大专项“薄煤层无人/少人采掘系统研究与应用示范”([2018]3003-1)

作者简介: 智敏(1984-), 男, 汉族, 江苏盐城人, 2011年毕业于煤炭科学研究总院地球探测与信息技术专业, 主要从事地震资料处理方面的研究工作。Email: zhimin@cctegxian.com

差分求解程函方程法是一种计算精度高、运算量小的旅行时计算方法^[9],对于速度变化大的介质,采用传统的波前矩形扩展方可能因往返波传播的因果关系导致计算不稳定,潘纪顺等通过在算法中额外考虑首波、体波和散射波对旅行时影响的方式有效地解决了这一问题^[10]。本文采用有限差分法求解程函方程的方法求取成像平面内各节点的初至波旅行时场,算法上借鉴了潘纪顺的处理方法,波前扩展方法采用 Disjkstra 算法逐点计算各节点的全局最小旅行,射线反向追踪采用了 Aldridge 提出的最速下降法求取射线路径的方法^[11],并基于全局最小旅行时对二维复杂速度模型进行全平面域克希霍夫空间域偏移成像,通过对偏移结果的对比分析,认为该方法可以较真实地反映异常速度体的形态大小和位置,成像结果分辨率较高。

1 方法原理

与常规地面地震克希霍夫积分法叠前深度偏移类似,全平面域克希霍夫积分叠前偏移成像方法由偏移速度求取和克希霍夫积分偏移两部分组成,两者在实现过程中均涉及成像区域旅行时场计算,本文采用有限差分求解程函方程的方法计算节点旅行时。

1.1 有限差分程函方程初至旅行时计算

旅行时计算是积分法偏移成像的重要组成部分,其计算精度直接影响着成像效果,在高频近似下,平面波波前的传播符合程函方程式(1)^[9]:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 = s^2(x, z), \quad (1)$$

式中, t 为初至时间; $s(x, y)$ 为平面模型的慢度场。

采用有限差分近似方法求解式(1),将速度模型离散成规则的矩形网格(图 1 所示), X 、 Y 方向网格边长分别为 Δx 、 Δy ,将每个网格单元内的慢度视

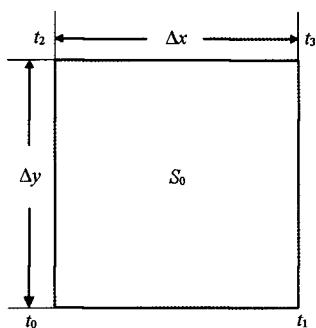


图 1 矩形网格剖分示意

Fig.1 Diagram of rectangular mesh partition

为常数,将方程中的两个时间微分算子用有限差分算子近似,如式(2)~(3)所示^[9,12]:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x}(t_0 + t_2 - t_1 - t_3), \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta y}(t_0 + t_1 - t_2 - t_3), \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1),经推导可以得到式(4)^[9]:

$$t_3 = \frac{A(t_0 + t_1 - t_2) + B\sqrt{Cs_0^2 - (t_1 - t_2)^2}}{C}, \quad (4)$$

式中, $A = \Delta x^2 - \Delta z^2$, $B = 2\Delta x\Delta z$, $C = \Delta x^2 + \Delta z^2$,已知矩形网格 3 个节点旅行时 t_0 、 t_1 、 t_2 可以利用式(4)得到旅行时 t_3 ,计算中常常会出现根号下为负值而出现计算不稳定的情况,此时可将节点 0、1、2 视为散射源,按直射传播方式,分别计算节点 3 的初至时间,结合节点 3 的已有旅行时间,取 5 个值里面的最小值作为节点 3 的全局最小旅行时。

在旅行时场外推过程中,笔者采用 Dijkstra 算法逐点计算所有节点的全局最小旅行时,将所有计算节点分成 3 个子集,分别用 P 、 Q 、 R 表示,其中 P 为尚未计算旅行时的节点集合(节点旅行时为无穷大), Q 为已计算旅行时的节点集合(不确定是否为全局最小旅行时), R 为已确定为全局最小旅行时节点的集合,采用如下方法对各节点的集合属性进行更新:

1) 将所有节点置于 P 集合,且所有节点旅行时均置为无穷大,计算炮点所在网格 4 个节点的旅行时,将其置于 Q 集;

2) 在 Q 集中选取旅行时最小的节点作为次级震源,并将其置于 R 集,计算该节点周围 8 个节点的旅行时,若待计算节点属于 P 集合,则将其置于 Q 集合,更新该节点旅行时;若节点属于 Q 集合,则将计算结果与先前结果比较,取小值作为该节点旅行时;若节点属于 R 集,则不改变原值;

3) 重复步骤 2) 直至所有节点均属于 R 集为止,即可求得成像区域内所有节点的全局最小旅行时。

1.2 初至波层析成像反演速度场

偏移速度场的计算精度直接影响着偏移成像效果,是克希霍夫积分法偏移成像的关键,对于非地面地震观测系统,采用地面地震观测系统的偏移速度分析方法获取偏移速度比较困难,通常采用初至波层析反演方法获得偏移速度,其中直射层析成像方法应用比较普遍,如文献[2-3]中的井下槽波绕射偏移成像,当反演区域速度差异较小时,可近似认为射线在介质中沿直射传播,如图 2 所示,炮检点间

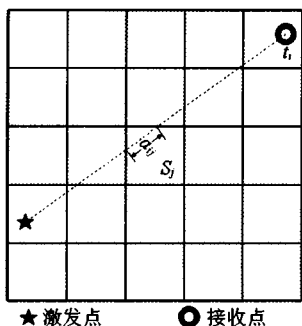


图 2 离散网格中直线层析反演示意

Fig.2 Sketch of straight-ray tomography inversion in regular grids

的射线路径为直线, $a_{i,j}$ 为第 i 条射线在第 j 个网格中的射线长度, S_j 为第 j 个网格的慢度, t_i 为第 i 条射线的初至时, 利用直线层析反演方法可以获得较可靠的成像速度, 当成像区域速度变化较大时, 由于实际射线路径常绕过低速区, 并向高速区集中, 射线路径发生较大弯曲, 不满足直线假设条件, 常导致高速异常体偏大, 低速异常体偏小^[13]。

为了克服直线层析的这一缺陷, 将成像区域进行网格剖分后, 采用有限差分法求得各成像网格节点的全局最小旅行时, 应用最速下降法反向求取炮检点间的射线路径^[11], 在网格单元内认为射线路径为直线段, 这样整体而言, 炮检点之间的射线路径则是由一系列的直线段首尾依次连接形成的弯曲射线(图 3), 不妨设二维平面被剖分成 N 个网格, 每个网格的慢度为 s_j , 获得了 M 条射线, 假设第 i 条射线在第 j 个网格的射线长度为 $a_{i,j}$, 该射线的初至波旅行时为 t_i , 则可以得到该射线的旅行时方程如式(5)所示:

$$\sum_{j=1}^N a_{i,j} S_j = t_i, \quad (5)$$

式中, $a_{i,j}$ 为第 i 条射线在第 j 个网格中的射线长度, S_j 为第 j 个网格的慢度, t_i 为第 i 条射线的初至时,

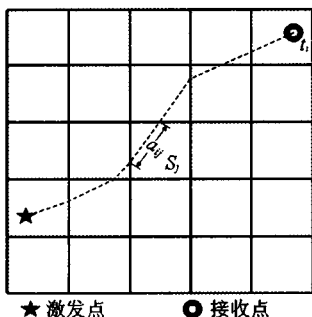


图 3 离散网格中弯曲射线层析反演示意

Fig.3 Sketch of curve-ray tomography inversion in regular grids

将所有射线方程联立可以得到线性方程组(6):

$$A \cdot S = T, \quad (6)$$

其中, $A = (a_{i,j})_{M,N}$ 为射线路径矩阵, $S = (s_j)_N$ 为慢度, 列向量 $T = (t_i)_M$ 为初至时间列向量, 式中 A 通常为一大型稀疏病态矩阵, 可采用 ART、SVD、SIRT、LSQR、LSCG 等算法对其进行求解, 本文采用 LSCG 算法对慢度场进行更新, 该算法是共轭梯度法的一种改进算法, 对于大型线性方程组 $Ax = b$, 可将其转化为二次函数的极小点问题如式(7)所示^[14]:

$$f(x) = \frac{1}{2} x^T A^T A x - (A^T b)^T x. \quad (7)$$

函数 $f(x)$ 的梯度 $g(x)$ 为:

$$g(x) = \nabla f(x) = A^T A x - A^T b. \quad (8)$$

对于任意非零向量 p 和实数 t , 有:

$$f(x + tp) - f(x) \approx t g^T(x) p + \frac{1}{2} t^2 p^T A^T A p, \quad (9)$$

于是有:

$$\left. \frac{df(u + tp)}{dt} \right|_{t=0} = g^T(u) p = 0. \quad (10)$$

考虑到 p 的随机性, 必须有 $g(u) = 0$ 成立, 因而 u 为方程组的解, 对于共轭向量序列 $\{p^{(k)}\}$, 假定 $x^{(0)}$ 是任一给定的初始向量, 对于 $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, 以 $x^{(k)}$ 作为起点, 沿方向向量 $p^{(k)}$ 求函数 $f(x)$ 在直线 $x = x^{(k)} + tp^{(k)}$ 上的极小点, 可以得到:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k p^{(k)}, \quad (11)$$

$$s^{(k)} = A^T (b - A x^{(k)}), \quad (12)$$

$$\alpha_k = \frac{s^{(k)T} p^{(k)}}{p^{(k)T} A^T A p^{(k)}}, \quad (13)$$

以上 3 式中 $p^{(k)}$ 表示搜索方向, 如果取 $p^{(0)} = s^{(0)}$, 则有:

$$p^{(k+1)} = s^{(k+1)} + \beta_k p^{(k)}, \quad (14)$$

$$\beta_k = \frac{s^{(k+1)T} A^T A p^{(k)}}{p^{(k)T} A^T A p^{(k)}}. \quad (15)$$

式(11)~(15)构成了 LSCG 算法的迭代格式, 在迭代之前常给定初始解 $x^{(0)} = 0$ 。从该迭代格式可知 LSCG 算法主要由大量 Ax 、 $A^T x$ 及矢量内积运算构成, 为了提高计算速度降低内存消耗, 在程序设计中采用三元组存储方式存储距离阵 A ^[15]。为了压制迭代过程中出现的反演噪声及野值, 提高反演剖面的信噪比, 采用均值滤波器对迭代的中间结果进行了平滑处理^[16]。

1.3 克希霍夫积分偏移

应用有限差分法分别计算以炮点和检波点作为激发点时各成像网格点的旅行时场后, 可基于 Kirchhof 积分公式通过边界积分法实现地震数据成

像,对于二维全平面域偏移成像问题,其离散形式如式(16)所示^[17]:

$$P_{out} = \frac{\Delta x}{4\pi} \sum_A \frac{\cos\theta}{\nu\sqrt{r}} \frac{\partial}{\partial t} P_{in}, \tag{16}$$

值得注意的是:由于在偏移过程中对数据已做扩散补偿,因此在预处理时不应对数据再做扩散补偿处理。

2 数值模拟

2.1 模型建立

建立二维速度模型如图 4 所示,该模型横向长 1 100 m,深 700 m,背景速度 2 200 m · s⁻¹,在模型上

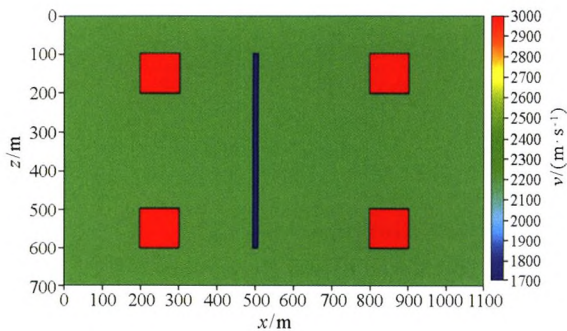
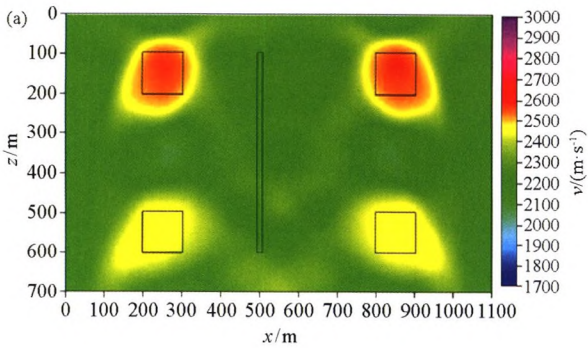


图 4 模型及观测系统

Fig.4 Model and observation system

2.2 层析反演速度结构

分别采用直线和弯曲射线层析成像方法反演得到了成像区域的速度场,反演网格大小 5 m×5 m,采用最小二乘共轭梯度(LSCG)反演算法共进行了 10 次迭代处理。采用二维平滑滤波器对迭代的中间结果进行平滑处理,以消除反演过程中的噪声及野值,提高反演剖面的信噪比。图 6 是两种层析方法获得的反演速度场(两张剖面速度色标一致),图中黑线为模型中速度异常体的边界,从该图可看到:两种层析成像方法获得图像的背景速度大约为



设置 5 个速度异常体,其中 4 个正方形速度异常体边长均为 100 m,速度为 3 000 m · s⁻¹,模型中间长条状异常体长 500 m、宽 10 m、速度 1 700 m · s⁻¹。在模型左侧及顶部每隔 20 m 激发一单炮,地震子波为主频 60 Hz 的 Ricker 子波,共激发了 92 张模拟记录,并于模型顶部及右侧每隔 10 m 安置检波器接收地震信号,记录长度 1 500 ms,采样间隔 0.5 ms;图 5 为激发点位于(0 m,120 m)处的模拟单炮记录。由该单炮记录可以看出,对于图 4 的简单模型,地震波场特征比较复杂,单炮记录上发育有直达波、反射波、绕射波等。

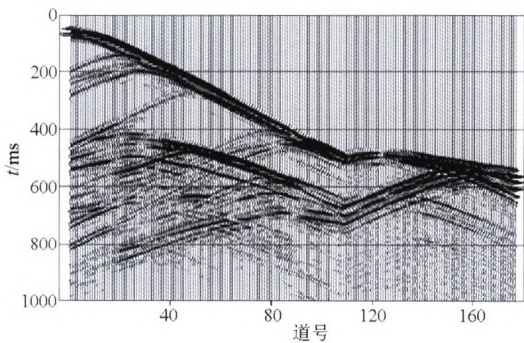


图 5 模拟单炮记录

Fig.5 Simulate single shot record

2 200m · s⁻¹,与模型的背景速度一致,两种方法 4 个高速异常体在成像速度平面上均有显示;直线层析剖面上高速异常体速度大约为 2 600 m · s⁻¹,较模型速度低了约 400 m · s⁻¹,异常体的边界比较模糊,且较真实尺寸偏大,形态畸变严重,模型中间的长条形低速异常体在反演剖面上并无明显异常;在弯曲射线层析成像剖面上,模型顶部两高速异常体的显示较直线层析方法的分辨率高,边界形态刻画清晰,异常体速度大致为 2 800 m · s⁻¹,精度较直线方法有所提高,异常体大小与其实际尺寸较接近,模

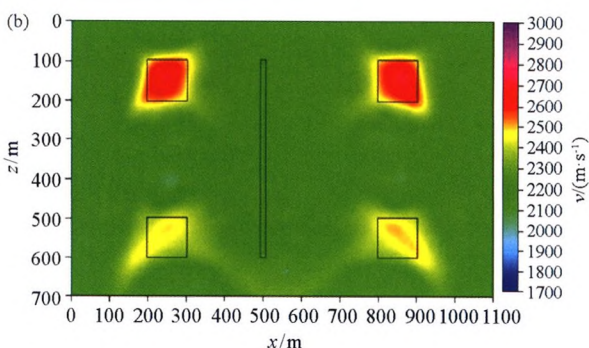


图 6 直线(a)与弯曲射线(b)层析反演速度结构

Fig.6 Velocity structure by straight(a) and curve ray(b) tomography inversion

型底部两速度异常体由于观测方位的限制,畸变较严重,但仍较直线成像方法更加收敛,模型中间的条形低速异常体成像也有所改善,异常体速度大约为 $1\,900\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,较真实速度略高。

图 7 为炮点位于 $(500\text{ m},0\text{ m})$ 处直线层析和

弯曲射线层析速度模型初至波时间等值线图,由该图可见弯曲射线层成结果的等时线与理论等时线的吻合程度明显优于直线法,由于模型底部没有炮点和接收点,观测方位受限,两种反演方法获得的速度均不够准确,初至时间的误差较大。

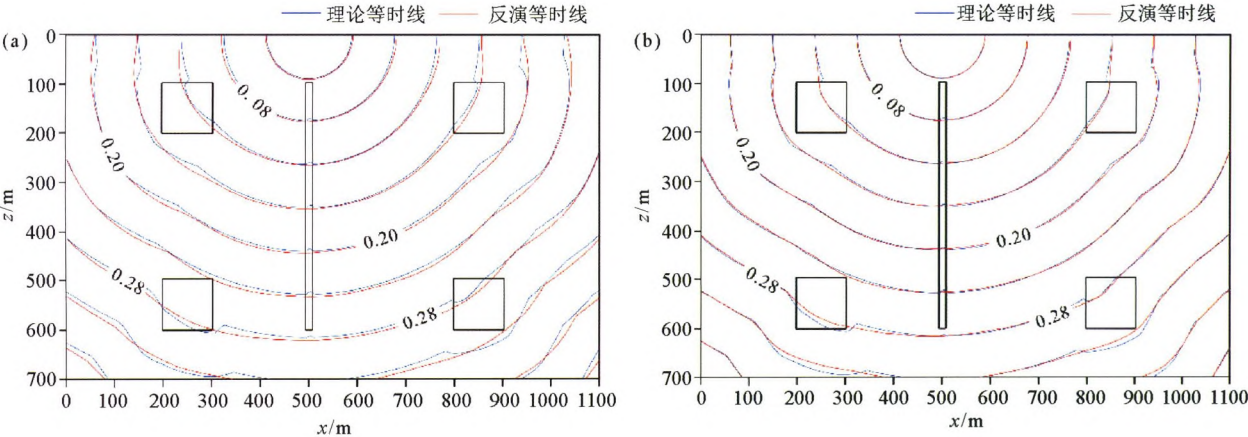


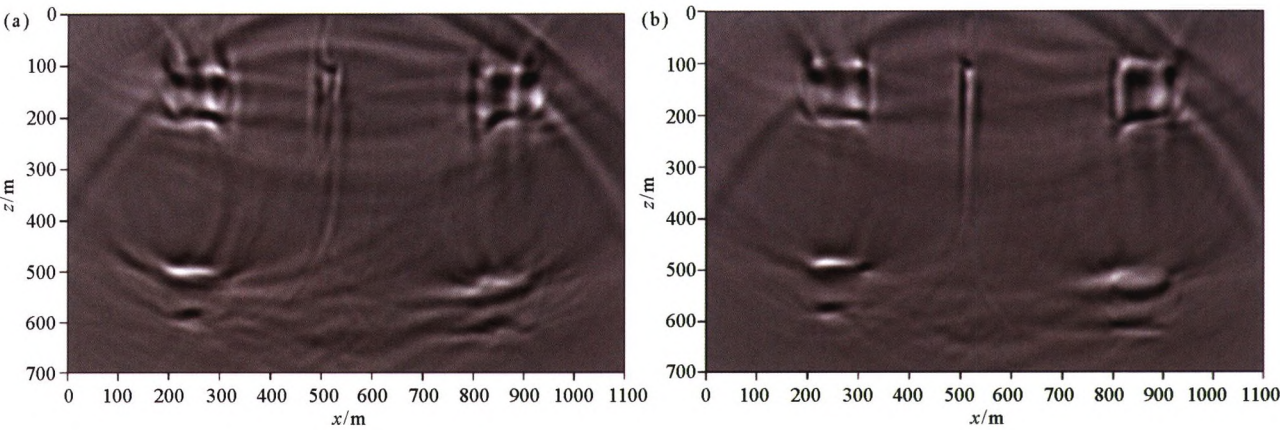
图 7 直线 (a) 与弯曲射线 (b) 层析等时线图对比

Fig.7 Comparison of isochron maps of straight (a) and curve (b) ray tomography

2.3 克希霍夫偏移成像效果对比

分别以基于直线和弯曲射线反演的速度作为偏移速度,对模拟单炮数据进行时间偏移成像,成像网格为 $5\text{ m}\times5\text{ m}$ 。图 8 是两种不同偏移速度获得的原始成像剖面,可以看到:两种方法的原始偏移剖面上均存在较强的低频背景干扰,剖面信噪比和分辨率较低,笔者借鉴逆时偏移的低频噪声压制技术,应用 Laplace 差分滤波器对原始成像剖面进行了滤波处理,结果如图 9 所示,滤波后图像的信噪比和分辨率得到一定增强,速度异常体的边界更加清楚。对

比图 9 中的两张剖面可以看出:两个偏移结果对所有速度异常体均有反映,基于直线反演速度的成像剖面上 4 个高速异常体的形态发生了严重畸变,模型中间的长条形低速异常体反射波聚焦较差;以弯曲线 CT 反演的速度为偏移速度的成像剖面上,4 个高速异常体的形状和大小均与原模型比较吻合,模型中间的长条型低速异常体上半部分成像清晰,下半部由于观测系统的原因,未能接收到有效反射波而不能成像。

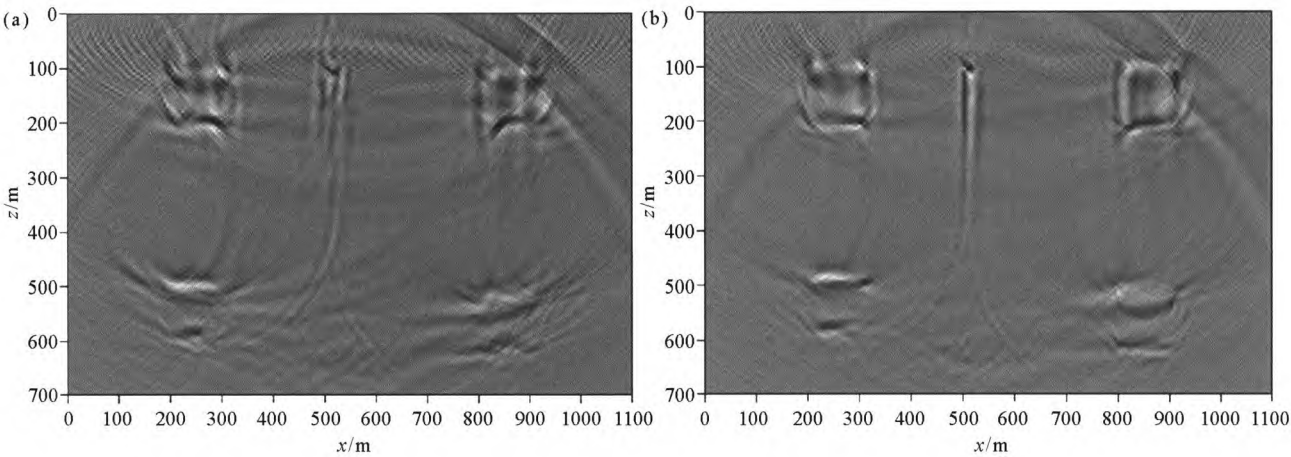


a—直线射线层析;b—弯曲射线层析

a—imaging profile of straight ray result;b—imaging profile of curve ray result

图 8 原始偏移成像剖面

Fig.8 Original migration imaging profile



a—直射射线层析;b—弯曲射线层析
a—imaging profile of straight ray result;b—imaging profile of curve ray result

图 9 Laplace 滤波后的成像剖面

Fig.9 Imaging profile after Laplace filtering

3 结论

本文以层析反演速度作为偏移速度,应用克希霍夫积分偏移方法对复杂二维模型进行了全平面偏移成像,通过对层析反演结果及偏移成像剖面的对比分析得到如下认识:

1) 对于复杂速度结构,直射射线层析反演方法获得的速度异常的形态大小会发生严重畸变,且对小构造刻画不清,而弯曲射线层析算法可以较准确地反映速度异常体的形态和位置,对小构造的刻画较直射线清晰。

2) 克希霍夫积分法偏移技术是一种观测系统适应性强的偏移成像方法,以弯射线层析反演速度作为偏移速度,采用克希霍夫叠前偏移方法可以获得较准确的偏移成像剖面。

3) 应用 Laplace 差分滤波器可以对原始偏移剖面上的低频噪声进行有效压制,提高成像剖面的信噪比和清晰度。

参考文献 (References):

[1] 宋勇.Kirchhoff 积分转换波叠前深度偏移方法研究[D].西安:长安大学,2015:4-5.
Song Y.Study of pre-stack depth migration based on kirchhoff integral method [D].Xi'an:Chang'an University,2015:4-5.
[2] 王季.反射槽波探测采空巷道的实验与方法[J].煤炭学报,2015,40(8):1879-1885.
Wang J.Experiment and method of void roadway detection using reflected in-seam wave[J].Journal of China Coal Society,2015,40(8):1879-1885.

[3] 姬广忠.反射槽波绕射偏移成像及应用[J].煤田地质与勘探,2017,45(1):121-124.
Ji G Z.Diffraction migration imaging of reflected in-seam waves and its application[J].Coal Geology & Exploration,2017, 45(1):121-124.
[4] 王华忠,方正茂,徐兆涛,等.地震波旅行时计算[J].石油地球物理勘探,1999,34(2):155-163.
Wang H Z,Fang Z M,Xu Z T,et al.Computation of seismic travel time[J].Oil Geophysical Prospecting,1999,34(2):155-163.
[5] Asawaka E,Kawanaka T.Seismic ray tracng using linear traveltme interpolation[J].Geophysical Prospecting,1993,41:99-111.
[6] 叶佩,李庆春.旅行时线性插值射线追踪提高计算精度和效率的改进方法[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,43(1):291-298.
Ye P,Li Q C.Improvement of linear traveltme interpolation ray tracing for the Accuracy and efficiency[J].Journal of Jilin University:Earth Science Edition,2013,43(1):291-298.
[7] 李文杰,魏修成,宁俊瑞.一种改进的利用程函方程计算旅行时的方法[J].石油地球物理勘探,2008,43(5):589-594.
Li W J,Wei X C,Ning J R.A method using improved Eikonal equation to compute travel time[J].Oil Geophysical Prospecting,2008,43(5):589-594.
[8] 赵连锋,朱介寿,曹俊兴.有序波前重建法的射线追踪[J].地球物理学报,2003,46(3):415-420.
Zhao L F,Zhu J S,Cao J X.Ray tracing using ordinal wavefront reconstruction [J].Chinese Journal of Geophysics,2003,46(3):415-420.
[9] 张建中,陈世军,徐初伟.动态网格最短路径射线追踪[J].油气地球物理,2004,47(5):899-904.
Zhang J Z,Chen S J,Xu C W.A method of shortest path raytracing with dynamic networks[J].Chinese Journal of Geophysics,2004,47(5):899-904.
[10] 李永博,李庆春,吴琼,等.快速行进法射线追踪提高旅行时计算精度和效率的改进措施[J].石油地球物理勘探,2016,51

- (3):467-473.
- Li Y B, Li Q C, Wu Q, et al. Improved fast marching method for higher calculation accuracy and efficiency of traveltimes [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(3):467-473.
- [11] 李振春, 刘玉莲, 张建磊, 等. 基于矩形网格的有限差分走时计算方法[J]. 地震学报, 2004, 26(6):644-650.
- Li Z C, Liu Y L, Zhang J L, et al. Finite-difference calculate of traveltimes based on rectangular grid [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(6):644-650.
- [12] 潘纪顺, 姚振兴, 纪晨. 二维复杂介质中地震波走时和射线的计算方法及其应用[J]. 地震研究, 2006, 29(3):245-250.
- Pan J S, Yao Z X, Ji C. Computation method of seismic wave travel times and rays in 2D complicated velocity models and its application [J]. Journal of Seismology Research, 2006, 29(3):245-250.
- [13] Aldridge D F, Oldenburger D W. Two-dimensional tomographic inversion with finite-difference traveltimes [J]. Journal of Seismic Exploration, 1993, 2(3):257-274.
- [14] 杜启振, 侯波. 地震波初至旅行时计算策略[J]. 中国石油大学学报, 2009, 33(2):49-52.
- Du Q Z, Hou B. Strategies of seismic wave first break travel time calculation [J]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(2):49-52.
- [15] 王飞. 跨孔雷达走时层析反演方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014:68.
- Wang F. Research on crosshole radar traveltimes tomography [D]. Changchun: Jilin University, 2014:68.
- [16] 胡建华, 陈兴同, 曹德欣. 数值计算方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990:138.
- Hu J H, Chen X T, Cao D X. Numerical methods [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990:138.
- [17] 张东, 乔友峰, 姜麟舜, 等. 地震层析成像中 LSQR 算法的快速求解[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(6):632-635.
- Zhang D, Qiao Y F, Jiang L S, et al. Fast implementation of LSQR Algorithm in seismic tomography [J]. Computation Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 33(6):632-635.
- [18] 杨艳, 秦克伟, 张东, 等. 一种改进的近地表层析成像 SIRT 算法[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2009, 55(2):201-205.
- Yang Y, Qin K W, Zhang D, et al. Improvement of SIRT Algorithm in near-surface seismic tomography [J]. Journal of Wuhan University: Nature Science Edition, 2009, 55(2):201-205.
- [19] 陈占国. 地震散射波成像方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012:74.
- Chen Z G. A study on seismic scatter wave imaging method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012:74.

Kirchhoff full plane imaging method based on Eikonal equation

ZHI Min, ZHU Jian-Gang

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an 710077, China)

Abstract: In this paper, the first arrival wave time field of imaging area is obtained by solving the Eikonal equation by using wavefront expansion extrapolation method. The full plane migration imaging of prestack data of complex model is performed by using Kirchhoff integral migration technique. The imaging results show that the inversion method of curve ray tomography describes the anomaly velocity body more accurately than straight ray tomography result. Better migration imaging results can be obtained by using the velocity field inverted by curved ray tomography.

Key words: Eikonal equation; Kirchhoff integral method; full plane migration; curve ray tomography; straight ray tomography

(本文编辑: 叶佩)