doi: 10.11720/wtyht.2019.1130

郭旭,黄建平,李振春,等.基于行波分离的 VTI 介质逆时偏移[J].物探与化探,2019,43(1):100-109.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1130 Guo X, Huang J P, Li Z C, et al. Reverse time migration in VTI media based on wavefield decomposition[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019,43(1):100-109.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1130

基于行波分离的 VTI 介质逆时偏移

郭旭,黄建平,李振春,黄金强,朱峰

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580)

摘要:现阶段,各向同性介质假设已经不能满足复杂地质构造条件下的成像需求,忽略介质各向异性影响会使速度估计不准确,成像精度降低。为此,笔者从 VTI 介质一阶速度—应力方程出发,利用 Poynting 矢量特性对地震波进行方向行波分离,得出了基于上下行波分离的互相关成像条件,并将其应用在复杂 VTI 介质中。通过层状模型和 SEG/EAGE 岩丘模型测试验证了该算法的有效性以及在成像上的优越性;另外,当偏移速度不准确时,本文方法仍能够有效压制偏移噪声,成像质量更佳。

关键词: Poynting 矢量;行波分离;VTI 介质;逆时偏移;一阶方程

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2019)01-0100-10

0 引言

研究表明,实际沉积地层大多呈各向异性特征, 至少是弱各向异性^[1]。目前,较为热门的各向异性 介质类型主要有:①具有垂直对称轴的横向各向同 性(transversely isotropy with a vertical axis of symmetry, VTI)介质;②具有水平对称轴的横向各向同性 (transversely isotropy with a horizontal axis of symmetry,HTI)介质;③具有倾斜对称轴的横向各向同性 (transversely isotropy with a tilted axis of symmetry, TTI)介质;④具有3个相互正交对称面的正交各向 异性(orthorhombic anisotropy, OA)介质。在地震资 料常规处理中,为了简化处理流程,通常假设地下介 质为各向同性,对于地下大尺度构造,这种近似的影 响是可以忽略的,然而,随着油气勘探的深入,现阶 段研究重心已向小尺度目标过渡,如果忽略介质的 各向异性会导致速度提取不准确,特别是造成目标 区域成像不准确,进而影响储层预测、油藏描述、复 杂构造成像以及岩性成像等等。所以,随着对地震 资料分辨率以及成像质量要求的提高,地下介质的 各向异性在地震资料处理中的影响已经不容忽

视[2]。

近年来,许多学者围绕各向异性拟声波正演模 拟和偏移成像技术展开了大量的研究工作。从理论 上来看,偏移成像方法主要分为两类:一类是以射线 理论为指导的偏移成像方法,如 Krichhoff 偏移^[3-4]、 高斯束偏移等[5-7],该类成像方法具有灵活、计算高 效的优势,且便于获得共成像点道集,但其成像精度 问题仍亟待解决:另一类则是基于波动方程理论的 偏移成像方法,相比射线类成像方法,波动方程偏移 成像方法能够精确描述地震波在地下的传播规律, 因此备受业内关注。然而,在各向异性介质中,弹性 波纵横波是耦合在一起传播的,很难进行分离成像。 鉴于此, Alkhalifah 提出了 TI 介质声学近似, 即将沿 对称轴方向上的横波速度设为零,以此达到简化波 动方程的目的^[8]。许多研究人员在此基础上,实现 了计算高效的波动方程建模和偏移成像。Klie 和 Toro 推导了一个近似的 VTI 介质声波方程^[9]。 Zhou 推导出了 VTI 介质的二阶耦合的偏微分方 程^[10]。另外, Duveneck 等从弹性波的基本理论(胡 克定律和运动方程)出发,得到了一套 VTI 拟声波 波动方程[11]。Hestholm 在 VTI 介质条件下,构建了 一套新型的一阶偏微分形式拟声波方程^[12]。后来,

收稿日期: 2018-03-23;修回日期: 2018-12-10

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A)(XDA14010303);国家油气重大专项(2016ZX05002-005-07HZ,2016ZX05014-001-008HZ);山 东省青岛市科技计划项目(16-5-1-40-jch)及自主创新科研计划项目(理工科)(17CX05011)

作者简介:郭旭(1994-),男,硕士在读,主要从事各向异性偏移成像工作。Email:guozexu1028@163.com

(a.,

Fletcher、Crawley、Zhan、徐文才等学者又将 VTI 介质的逆时偏移推广到 TTI 介质中^[13-16]。

逆时偏移(reverse time migration, RTM)是地震 偏移的重要发展,在成像精度和对复杂构造的适应 力上具有明显优势,是目前地震成像的重要手段。 但是在利用双程波方程进行逆时偏移时,会产生大 量的低频噪声。多年来,针对逆时偏移去噪问题的 研究从未停止过。Baysal 等提出采用无反射波动方 程代替传统波动方程的方法来进行逆时偏移的去 噪^[17], Fletcher 等提出了一种加入方向阻尼因子来 消除成像噪声的方法^[18], Yoon 等提出了利用 Poynting 矢量来提高基于互相关成像条件方法的成像效 果^[19],Guitton 等引进了最小二乘方法以消除成像噪 声^[20],Fei 等提出了一种通过波场分解成上下行波, 然后在最终成像时只采用震源波场的下行波场和检 波点波场的上行波场进行互相关成像[21],不仅去除 了相同的波场分量进行互相关成像成像时所产生的 低频噪声,还去除了震源波场的上行波场和检波点 波场的下行波场进行互相关成像所产生的虚假同相 轴等干扰。Liu 等提出了一种通过波场分解成上下 行波和左右行波,然后在最终成像时,只保留方向相 反的波场分量的方法^[22],该方法虽能有效去噪,但 面对速度梯度强,反射界面复杂时,偏移结果仍会产 生虚假同相轴等干扰。近年来,陈婷和何兵寿、陈可 洋、韩文功等、李沁慈等、Guo 等人利用 Poynting 矢 量的优势进行去噪问题的研究^[23-29]。但从总体上 看,国内外学者对于逆时偏移去噪的研究大多仍停 留在各向同性阶段。

然而,随着成像精度的不断提高,各向同性逆时 偏移已经不能满足复杂地质构造条件下的成像要 求,因此,笔者利用波场分离互相关成像的优势,发 展了一种基于各向异性 VTI 介质的波场分离互相关 成像方法。最后通过模型测试验证了本方法的正确 性和优越性。

1 方法原理

1.1 波动方程

VTI 介质拟声波方程表征了地震波在各向异性 介质中的传播规律,是后续正演模拟、偏移成像以及 波形反演的研究基础。常用的二维 VTI 介质拟声波 一阶速度—应力方程为^[11]:

$$\begin{vmatrix}
\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial v_{xx}}{\partial x}, \\
\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}, \\
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = \rho v_p^2 \left[(1 + 2\varepsilon) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \sqrt{1 + 2\delta} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right], \\
\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \rho v_p^2 \left[\sqrt{1 + 2\delta} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \circ$$
(1)

其中: σ_{xx} 、 σ_{zz} 表示应力分量; v_{x} 、 v_{z} 表示质点速度分量; ρ 为密度; ε 、 δ 为表征各向异性特征的 Thomsen 参数; v_{p} 表示沿对称轴方向的 qP 波速度。

1.2 Poynting 矢量

Poynting 矢量的概念最早出现于电磁学领域, 是由 Yoon 等^[19]引入到地震勘探当中的,并给出了 Poynting 矢量的计算公式:

$$P^{y} = -pv = -p(v_{x}, v_{z}) = (-pv_{x}, -pv_{z}) = (P^{y}_{x}, P^{y}_{z})_{\circ}$$
(2)

其中,p 表示应力。在其基础上,这里给出了 VTI 介 质波动方程(1)条件下的 Poynting 矢量计算公式, 写成分量形式如下:

$$\begin{cases} P_x^y = -\sigma_{xx}v_x, \\ P_z^y = -\sigma_{zz}v_z \, \circ \end{cases}$$
(3)

由于利用式(1)构建逆时偏移算法时, σ_{xx} 、 σ_{zx} 、 v_x 、 v_z 都已经计算出来,所以,在求取 Poynting 矢量的过程中,基本不增加额外计算量。由于 Poynting 矢量能够计算出地震波的传播方向,现通过式(3) 来计算地下地震波的传播方向。这里所用模型为各向异性均匀介质模型,如图 1 所示,Thomsen 参数 ε = 0.24、 δ = 0.1,模型速度为 3 000 m/s,模型网格大小



Fig.1 The homogeneous model

为 301×301, 网格间距均为 10 m, 时间采样间隔为 1 ms, 采用主频为 25 Hz 的雷克子波作为震源, 震源激 发位置位于模型中心, 即网格(151, 151)处, 记录 *t* = 400 ms 时的波场快照。通过式(3)可以计算出地震 波场传播的每个时间步长的 Poynting 矢量值, 即可

得到 Poynting 矢量的水平分量 P_x 以及垂直分量 P_y ,分别如下图 2b、2c 所示,图中黑色为正值,白色 为负值,可以根据图 2 中所示大致判断地下地震波 的传播方向,进而分别得到了上行波、下行波、左行 波、右行波,如图 3 所示。









a—up-going wave snapshot;b—down-going wave snapshot;c—left-going wave snapshot;d—right-going wave snapshot
图 3 地震波场分离的行波波场快照(t=400 ms)



1.3 互相关成像条件

逆时偏移在震源波场正向传播和检波点波场反 向传播使用零延迟互相关成像条件,用公式表示为:

$$I^{1}(x,z) = \int_{0}^{t_{\max}} S(x,z,t) R(x,z,t) dt , \qquad (4)$$

式(4)即为常规互相关成像条件。

在逆时偏移的震源波场正向外推和检波点波场 反向延拓过程中,通常使用的为全波场信息,包括震 源波场的上行波和下行波,以及检波点波场的上行 波和下行波,用公式表示为:

$$\begin{cases} S(x,z,t) = S_{d}(x,z,t) + S_{u}(x,z,t) ,\\ R(x,z,t) = R_{d}(x,z,t) + R_{u}(x,z,t) , \end{cases}$$
(5)

其中,S(x,z,t)、R(x,z,t)分别为震源波场和检波点 波场。下标 d 代表相应地震波场的下行波, 下标 u 代表相应地震波场的上行波。

将式(5)代入式(4)中,那么成像条件(式4)则 可以表示成如下形式:

$$\begin{split} I(x,z) &= \int_{0}^{t_{\max}} S(x,z,t) R(x,z,t) \, \mathrm{d}t \\ &= \int_{0}^{t_{\max}} S_{\mathrm{u}}(x,z,t) R_{\mathrm{u}}(x,z,t) \, \mathrm{d}t \\ &+ \int_{0}^{t_{\max}} S_{\mathrm{d}}(x,z,t) R_{\mathrm{d}}(x,z,t) \, \mathrm{d}t \\ &+ \int_{0}^{t_{\max}} S_{\mathrm{u}}(x,z,t) R_{\mathrm{d}}(x,z,t) \, \mathrm{d}t \\ &+ \int_{0}^{t_{\max}} S_{\mathrm{d}}(x,z,t) R_{\mathrm{u}}(x,z,t) \, \mathrm{d}t \\ &+ \int_{0}^{t_{\max}} S_{\mathrm{d}}(x,z,t) R_{\mathrm{u}}(x,z,t) \, \mathrm{d}t \\ &= I_{\mathrm{uu}}(x,z) + I_{\mathrm{dd}}(x,z) + I_{\mathrm{ud}}(x,z) + I_{\mathrm{du}}(x,z) \end{split}$$

其中, I_m(x, z) 表示震源波场上行波和检波点波场上 行波的互相关成像, $I_{dd}(x,z)$ 表示震源波场下行波和 检波点波场下行波的互相关成像, $I_{nd}(x,z)$ 表示震源 波场上行波和检波点波场下行波的互相关成像, Iam (x,z)表示震源波场下行波和检波点波场上行波的 互相关成像。由于成像值 $I_{\mu\nu}(x,z)$ 和 $I_{dd}(x,z)$ 均包 含大量的低频噪声,故直接将其舍去。另外,Fei等 人指出,成像值 $I_{ud}(x,z)$ 虽然包含部分有效信息,但 是在速度突变区域会产生成像干扰^[21],权衡利弊, 将其也舍去,故文中只用 I_{du}(x,z)这一项作为最终 成像结果,并将其应用在复杂各向异性介质中。该 成像条件如下:

 $I^{2}(x,z) = I_{du}(x,z) = \int_{0}^{t_{max}} S_{d}(x,z,t) R_{u}(x,z,t) dt \quad (6)$ 即只用震源波场的下行波和检波点波场的上行波进 行互相关成像。

2 模型测试

2.1 三层模型

为了更直观地展示噪声成像成分,并验证成像 条件在 VTI 介质情况下成像的正确性,现利用一简 单3层模型进行测试分析。如图4所示,该各向异 性参数模型分为3层,模型参数如下:网格大小为 301×201、纵横向采样间隔均为8m、模型第2层为 各向异性介质,即 ε =0.2, δ =0.1,其余两层均为各向 同性介质,即 $\varepsilon=0,\delta=0$;计算参数设置如下:观测系 统为全速度场接收,采用主频为 25 Hz 的雷克子波 作为震源,共激发1炮,震源激发位置为网格坐标 (151,1)处,301 道接收,道间隔为8m,记录的时间 长度为 1.5 s, 时间采样间隔为 1 ms, 采样点数为 1500。所用炮记录是由高阶有限差分正演模拟得 到。



图 4 三层模型 Fig.4 A three-layer model

对该3层模型进行单炮偏移成像测试,将1¹(x, z)、 $I_{uu}(x,z)$ 、 $I_{dd}(x,z)$ 、 $I_{ud}(x,z)$ 、 $I_{du}(x,z)$ 分别进行成 像,并将结果展示如图5所示。观察图5不难发现, 成像结果图 5a、b 和 c 均表示成像噪声,在最终成像 结果中,应将其舍去,仅保留绝对有效的部分,即如 图 5d 所示,图 5e 为常规互相关成像结果,是图 5a、 b、c、d 成像值之和;图 5f 为图 5a、b、c 成像值之和, 即为成像噪声部分,亦是常规方法结果(图 5e)与本 文方法成像结果(图 5d)之差。对比图 5d、e、f 成像 结果可以看出,在运用新的行波分离成像条件后,在 保证成像精度的基础上,压制了偏移噪声,减少了成 像干扰,且成像质量得以显著提升。

· 103 ·



 $\begin{aligned} \mathbf{a} & - I_{uu}(x,z); \mathbf{b} - I_{dd}(x,z); \mathbf{c} - I_{ud}(x,z); \mathbf{d} - I_{du}(x,z); \mathbf{e} - I(x,z); \mathbf{f} - \mathbb{R} \neq \mathbf{d} \ \angle \mathbf{E} \\ \mathbf{a} - I_{uu}(x,z); \mathbf{b} - I_{dd}(x,z); \mathbf{c} - I_{ud}(x,z); \mathbf{d} - I_{du}(x,z); \mathbf{e} - I(x,z); \mathbf{f} - \mathbf{the} \ \text{difference between figure e and figure d} \end{aligned}$

图 5 三层模型不同成像条件成像结果对比

Fig. 5 Comparison of imaging results under different imaging conditions for the three-layer model

2.2 SEG/EAGE 盐丘模型

为了验证该成像条件对复杂各向异性模型的适 用性,文中对 2D SEG/EAGE 盐丘模型进行了逆时 偏移成像测试。盐丘模型作为典型的标准复杂模 型,含有强横向变速和陡倾断层等复杂构造。该模 型速度场如图 6 所示,其中图 6a 为真实速度场,图 6b 为偏移速度场。各向异性参数 $\varepsilon_{\lambda}\delta$ 与速度 V_{p0} 均 为线性关系^[30]:

$$\begin{cases} \varepsilon(x,z) = 0.606(V_{p0}(x,z) - V_{p0,\min})/V_{p0,\max}, \\ \delta(x,z) = 0.485(V_{p0}(x,z) - V_{p0,\min})/V_{p0,\max} \end{cases}$$
(7)

为了符合地下实际地质构造条件,这里将盐丘体内部设为各向同性介质,即ε=0,δ=0。盐丘模型 网格大小为1290×300,纵横向采样间隔均为10m。 观测系统设置为全速度场接收,采用主频为20 Hz 的雷克子波作为震源,震源激发位置为第1~1288 个网格点,共激发323炮,炮间距为40m,每炮1290 道接收,道间隔为10m,记录的时间长度为3.6s,时 间采样间隔为0.9ms,时间采样点数为4000,观测 记录由各向异性介质模型经高阶有限差分方法模拟 得到。分别采用常规互相关VTI-RTM成像算法、本 文行波分离VTI-RTM成像算法以及本文行波分离 各向同性 RTM成像算法对该地震记录进行偏移成 像测试,测试结果如图7所示。其中,前两种算法 (常规互相关 VTI-RTM成像算法、本文行波分离 VTI-RTM成像算法)主要用来测试本文行波分离 XTI-RTM成像算法)主要用来测试本文行波分离算 法的优越性,后两种算法(本文行波分离VTI-RTM 成像算法以及本文行波分离各向同性 RTM 成像算 法)用以验证 VTI介质偏移成像的必要性。



a—常规互相关 VTI-RTM;b—图 a 滤波后;c—本文行波分离 VTI-RTM;d—图 c 滤波后;e—本文行波分离后各向同性 RTM;f—图 e 滤波后; g—图 a 与图 c 之差

a-conventional cross-correlation VTI-RTM; b-figure a after filtering; c-directional wave separation VTI-RTM; d-figure c after filtering; e-directional wave separation Isotropic-RTM; f-figure e after filtering; g-the difference between figure a and figure c

图 7 盐丘模型逆时偏移成像结果



基于常规互相关方法的 VTI 逆时偏移算法得到 的成像结果如图 7a、b 所示,基于本文行波分离方法 的 VTI 逆时偏移算法得到的成像结果如图 7c、d 所 示,基于本文行波分离方法的各向同性逆时偏移算 法得到的成像结果如图 7e、f 所示。从两种成像条 件结果图(图 7a、c)可以看出,图 7a 中,浅层包含了 大量的低频噪声,致使地下构造形态难以识别,严重 干扰了成像效果,成像质量较差,图 7g 即为常规互 相关 VTI-RTM 方法与本文行波分离 VTI-RTM 方法 的成像值之差,而本文方法(图 7c)可以有效压制偏 移噪声,使成像剖面更加清晰,成像质量得以显著提 高。为进一步展示本文方法的优越性,现取图 7b、d 中的盐丘顶部白色矩形框部分进行局部放大对比, 所得放大结果如图 8a、b 所示,通过对比不难发现, 常规方法(图 8a)在盐丘顶部含有偏移成像假象,如 图中箭头所指处,影响后续的解释工作;而本文方法 (图 8b)在正确成像的基础上,可以有效去除偏移结 果中的成像假象,获得更符合地下地质构造情况的 较为理想的偏移结果,为后续进行解释工作打下了 基础。

图 7e、d 为本文方法 VTI 逆时偏移成像结果,图 7e、f 为本文方法各向同性逆时偏移成像结果。从各 向同性偏移结果可以看出,由于忽略了地下介质各 向异性的影响,反射波没有正确归位,在地下层位分 界面附近出现偏移干扰,同时,偏移剖面中存在明显 发育的绕射波,地下地层界面明显被淹没,偏移剖面 分辨率较低,整体成像质量较差,为后续解释工作造 成干扰;而 VTI 逆时偏移算法因其考虑了各向异性 的影响,在对应逆时偏移结果中,绕射波完全收敛, 反射波得到准确的归位,断层面刻画清晰,偏移剖面 有较高的分辨率,整体成像质量较优。为进一步观 察分析各向异性对成像结果的影响,现取图 7d、f 中 黑色矩形框部分进行放大,结果如图9所示,第一行 为各向同性偏移结果,第二行为 VTI 逆时偏移成像 结果。第一列为盐丘陡倾构造部分,主要测试分析 两种算法对陡倾边界的成像能力;由图 9a、d 可以看 出,各向同性偏移算法忽略了各向异性的影响.致使 绕射波不收敛,陡倾构造没有准确归位;而 VTI 偏移 结果中绕射波完全收敛,同相轴能量较强,陡倾层位 刻画清晰。第二列为盐丘右翼部分,主要测试分析 两种算法对横向变速带的适应能力:观察分析图 9b、e可知,各向同性界面中层位缠叠在一起,分辨 率较低,成像质量较差;而 VTI 偏移结果中,能够对 盐丘周边目标区域进行清晰准确成像,成像分辨率 明显提升。第三列为盐丘底部构造部分,由于高速 体的屏蔽遮挡通常会造成高速体下部构造出现照明 不足的情况,从而影响整体成像质量,这里主要是测 试分析两种算法对盐下成像的能力;对比图 9c、f 可 以发现,各向同性成像结果中,成像区域较为散乱, 真实构造难以准确识别;而 VTI 偏移结果中,构造层 位信息更为准确,同相轴连续性更好,分辨率更高, 成像质量更好,便于后续解释工作的开展。

进一步利用该模拟记录对常规互相关 VTI-RTM 算法、本文行波分离 VTI-RTM 算法以及本文 行波分离各向同性 RTM 算法的运算速度进行测试 对比。表1为上述三种算法对二维 SEG/EAGE salt 模型的计算量与运算时间对比,可以很明显地看出, 相对于常规算法,本文算法的计算效率在可接受范 围内。



a—图 7b 局部放大;b—图 7d 局部放大

a-magnified view of the figure 7b; b-magnified view of the figure 7d

图 8 盐丘顶部白色矩形框放大

Fig. 8 Magnified view of the white rectangular frame on top of the salt



图 9 盐丘内部黑色矩形框放大

Fig.9 Magnified view of black rectangular frame inside the salt

表1 SEG/EAGE salt 模型偏移方法计算效率对比

Table.1 Computational efficiency comparison of different migration methods for SEG/EAGE salt model

偏移方法	计算量	平均每炮计算时间/s
常规互相关 VTI-RTM 算法	$\partial \sigma_{xx}/\partial x$, $\partial \sigma_{zz}/\partial z$, $\partial v_x/\partial x$, $\partial v_z/\partial z$	1398.53
本文行波分离 VTI-RTM 算法	$\partial \sigma_{xx} / \partial x, \partial \sigma_{zz} / \partial z, \partial v_x / \partial x, \partial v_z / \partial z, \sigma_{zz} v_z$	1571.14
本文行波分离各向同性 RTM 算法	$\partial p/\partial x$, $\partial p/\partial z$, $\partial v_x/\partial x$, $\partial v_z/\partial z$, pv_z	1537.28

2.3 不准确偏移速度场成像测试

为了测试本文方法对偏移速度的敏感性,在测试过程中,假设各向异性参数是正确的,成像误差仅源于速度误差。将图 6a 所示真实速度场乘以 97%

并平滑作为真实速度场进行偏移成像测试,不准确 偏移速度场如图 10 所示。分别采用常规方法以及 本文方法对各向异性成像算法进行偏移成像测试, 测试结果如图 11 所示。



图 10 不准确偏移速度场 Fig.10 Inaccurate migration velocity model



a—常规方法;b—本文方法

a-conventional method; b-our method

图 11 速度存在 3%误差时成像结果对比

Fig.11 Comparison of imaging results with 3% error in velocity

图 11a 和图 11b 分别为常规方法和本文方法的 VTI 逆时偏移成像结果。当偏移速度不准确时,两 种成像结果成像位置发生错动,同相轴弯曲,连续性 较差。但是,常规成像剖面上残留较多偏移噪声,成 像质量较差,而本文方法仍能够有效压制偏移噪声, 成像分辨率较高,成像质量更佳。

3 结论与认识

文中基于 VTI 介质一阶速度一应力方程,利用 Poynting 矢量的特性将地震波场分离成上下行波, 推导出了基于方向行波分离的互相关成像条件,并 将其应用在 VTI 介质中。通过模型试算分析得到如 下几点认识:

1)利用 Poynting 矢量分离上下行波,通过对比 层状模型下的单炮逆时偏移成像结果,说明地震波 场成像的有效部分为震源的下行波场和检波点的上 行波场进行互相关成像,即相当于单程波成像。

2) 依据 Poynting 矢量的特性进行方向行波分离,只需消耗少许内存,基本不增加额外计算量,该 方法简单易行、便于实现,且行之有效。

3)通过与常规互相关偏移成像方法进行比较,可以看出,该方法不仅能够压制低频噪声,使成像结果更为清晰,深部能量得到改善,而且还能消除成像剖面中的偏移假象,使成像结果更为精确。

4) 通过与各向同性偏移成像方法进行对比,可 以看出,在 VTI 介质条件下,该方法能够使绕射波完 全收敛,反射波正确归位,在同相轴的能量和成像位 置的准确性上具有明显优势。

5)本文方法在偏移速度不准确时,成像结果中 偏移噪声更少,成像质量更好。

另外,本文方法研究测试是在弱各向异性条件 下进行的,是否适用于强各向异性情况有待进一步 研究。

致谢:感谢中国石油大学(华东)地震波传播与 成像实验室(http://swpi.upc.edu.cn//)给予的支持 与帮助。感谢审稿专家的宝贵意见。

参考文献(References):

- Tsvankin I, Thomsen L. Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media [J]. Geophysics, 1994, 59(8): 1290 - 1304.
- [2] 吴国忱.各向异性介质地震波传播与成像[M].东营:中国石油 大学出版社,2006.

Wu G C. Seismic wave propagation and imaging in anisotropic media[M].Dongying:China University of Petroleum Press, 2006.

[3] 黄中玉,曲寿利,王于静,等.层状各向异性介质转换波克希霍 夫叠前时间偏移[J].地球物理学报,2009,52(12):3109-3115.

Huang Z Y, Qu S L, Wang Y J, et al. Kirchhoff prestack time migration of PS-wave data for the layered anisotropic medium [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(12):3109-3115.

- [4] 周巍,王鹏燕,杨勤勇,等.各向异性克希霍夫叠前深度偏移
 [J].石油物探,2012,51(5):476-485.
 Zhou W, Wang P Y, Yang Q Y, et al. Research on anisotropic kirchhoff pre-stack depth migration[J].GPP,2012,51(5):476-485.
- [5] Hill N R.Prestack Gaussian-beam migration [J]. Geophysics, 2001, 66(4):1240-1250.
- [6] Gray S H. Gaussian beam migration of common-shot records [J]. Geophysics, 2005, 70(4):71-77.
- [7] 张凯,段新意,李振春,等.角度域各向异性高斯束逆时偏移
 [J].石油地球物理勘探,2015,50(5):912-918.
 Zhang K, Duan X Y, Li Z C, et al. Angle domain reverse time migration with Gaussian beams in anisotropic media[J].OGP,2015, 50(5):912-918.
- [8] Alkhalifah T. Acoustic approximations for processing in transversely isotropic media[J].Geophysics, 1998, 63(2):623-631.
- [9] Klie H, Toro W.A new acoustic wave equation for modeling in anisotropic media[C]//Expanded Abstracts of the 71st Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2001:1171-1174.
- [10] Zhou H, Zhang G, Bloor R. An anisotropic acoustic wave equation for VTI media [C]//68th EAGE Conference and Exhibition,

2006a.

- [11] Duveneck E P, Milcik P, Bakker P M, et al. Acoustic VTI wave equations and their application for anisotropic reverse-time migration
 [C]//Expanded Abstracts of the 78th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2008:2186 - 2189.
- [12] Hestholm S. Acoustic VTI modeling using high-order finite differences[J].Geophysics, 2009, 74(5): T67 ~ T73.
- [13] Fletcher R P, Du X, Fowler P J. Reverse time migration in tilted transversely isotropic (TTI) media[J].Geophysics, 2009, 74(6): WCA179 - WCA187.
- [14] Crawley S, Brandsberg-Dahl S, McClean J, et al. TTI reverse time migration using the pseudo-analytic method[J]. The Leading Edge, 2010,29(11):1378 ~ 1384.
- [15] Zhan G, Pestana R C, Stoffa P L. Decoupled equations for reverse time migration in tilted transversely isotropic media [J]. Geophysics, 2012, 77(2): T37 - T45.
- [16] 徐文才,李振春,王姣,等.基于拟声波一阶应力—速度方程的 TI 介质叠前逆时偏移[J].地球物理学进展,2016,31(2):836-844.
 Xu W C,Li Z C, Wang J, et al. TI medium reverse time migration based on quasi acoustic first-order velocity-stress equation[J].Progress in Geophysics (in Chinese),2016,31(2):836-844.
- [17] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. Reverse time migration [J].Geophysics, 1983, 48(11): 1514 - 1524.
- [18] Fletcher R P, Fowler P J, Kitchenside P, et al. Suppressing unwanted internal reflections in prestack reverse-time migration [J]. Geophysics, 2006, 71(6); E79 ~ E82.
- [19] Yoon K, Marfurt K J. Reverse-time migration using the Poynting vector [J]. Exploration Geophysics, 2006, 37(1):102 - 107.
- [20] Guitton A, Kaelin B, Biondi B. Least-square attenuation of reverse time migration artifacts [C]//Expanded Abstracts of the 76th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2006: 2348 - 2352.
- [21] Fei T W, Luo Y, Schuster G T. De-blending reverse-time migration [C]//Expanded Abstracts of the 80th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2010;3130-3134.
- [22] Liu F Q, Zhang G Q, Morton S A, et al. An effective imaging condition for reverse-time migration using wavefield decomposition [J].

Geophysics, 2011, 76(1):29-39.

- [23] Chen T, He B S.A normalized wavefield separation cross-correlation imaging condition for reverse time migration based on Poynting vector[J].Applied Geophysics, 2014, 11(2): 158-166.
- [24] 陈可洋,陈树民,李来林,等.地震波动方程方向行波波场分离正 演数值模拟与逆时成像[J].岩性油气藏,2014,26(4):130-136. Chen K Y,Chen S M,Li L L,et al.Directional one-way wave field separating numerical simulation of the seismic wave equation and reversetime migration[J].Lithologic Reservoirs,2014,26(4):130-136.
- [25] 陈可洋.各向异性弹性介质方向行波波场分离正演数值模拟
 [J].岩性油气藏,2014,26(5):91-96.
 Chen K Y.Wave field separating numerical simulation of anisotropic elastic medium directional one-way wave [J]. Lithologic Reservoirs,2014,26(5):91-96.
- [26] 陈可洋.基于行波分离和角度域衰减的地震波叠前逆时成像条件[J].计算物理,2016,33(2):205-211.
 Chen K Y.Seismic wave pre-stack reverse-time migration imaging condition based on one-way wave field separation and angle domain attenuation[J].Chinese Journal of Computational Physics,2016,33 (2):205-211.
- [27] 韩文功,王江川,李振春,等.基于 Poynting 矢量和方向行波波场分离的逆时偏移成像条件[J].地球物理学进展,2015,30
 (6):2660-2665.

Han W G, Wang J C, Li Z C, et al. Reverse-time migration imaging conditions based on Poynting vector and directional one-way wave field separating[J].Progress in Geophysics,2015,30(6):2660-2665.

- [28] 李沁慈,刘国峰,孟小红,等.基于 Poynting 矢量的逆时偏移去嗓[J].物探与化探,2015,39(6):1223-1232.
 Li Q C,Liu G F, Meng X H, et al. The denoising of reverse time migration based on the Poynting vector [J]. Geophysical & Geochemical Exploration,2015,39(6):1223-1232.
- [29] Guo X, Huang J P, Li Z C, et al. Reverse time migration in complex TI media using wavefield decomposition [C]//Qingdao: International Geophysical Conference, 2017:522 - 525.
- [30] Han Q Y, Wu R S. Depth imaging in strongly heterogeneous VTI media [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004: 1061-1064.

Reverse time migration in VTI media based on wavefield decomposition

GUO Xu, HUANG Jian-Ping, LI Zhen-Chun, HUANG Jin-Qiang, ZHU Feng

(School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Seismic anisotropy characterized by velocity anisotropy will inevitably affect the kinematic characteristics of underground seismic waves. Ignoring the anisotropy of the media will result in inaccurate velocity extraction and thus affect the imaging of target region. In view of such a situation, the authors carried out a study of anisotropy in this paper. According to the first-order velocity stress equation in VTI media, the authors obtained the cross-correlation imaging condition based on wavefield separation which used Poynting vector. Then the authors applied it to complex VTI media, and demonstrated the validity and superiority of the algorithm by numerical experiments. This method produces better images with less noise even for inaccurate migration velocities.

Key words: Poynting vector; wavefield separation; VTI media; RTM; first-order equation