

Walkaway VSP 井旁各向异性速度模型反演方法

侯爱源*^{①②} 耿伟峰^② 张文波^②

(^①中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100; ^②东方地球物理公司物探技术研究中心, 河北涿州 072751)

侯爱源, 耿伟峰, 张文波. Walkaway VSP 井旁各向异性速度模型反演方法. 石油地球物理勘探, 2016, 51(2): 301-305.

摘要 针对一个井源距 VSP 初至反演的井旁速度模型不能用于同一口井多个不同井源距 VSP 数据的偏移成像这一问题, 本文介绍了一种使用 Walkaway VSP 的初至旅行时反演井旁各向异性模型的层速度和各向异性参数的方法。该方法根据声波测井速度的变化趋势对井旁一维速度模型进行分层, 以零井源距 VSP 初至时间反演的速度作为初始速度模型, 用一种接近沉积岩特性的多层各向异性介质模型描述和定义井旁速度模型各向异性参数, 利用不同井源距 VSP 的多条 VSP 初至时距曲线反演井旁水平层状各向异性速度模型的层速度和各向异性参数, 得到 Walkaway VSP 偏移成像的井旁各向异性速度模型。将该模型用于 Walkaway VSP 实际数据的偏移成像处理, 取得了较好的效果。

关键词 井旁速度模型 各向异性 Walkaway VSP 偏移成像 反演

中图分类号: P631 **文献标识码**: A **doi**: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.02.013

1 引言

井旁 VSP 速度模型的精度对 Walkaway VSP 偏移成像至关重要。建立 VSP 速度模型的主要方法有: ①直接利用零井源距 VSP 初至时间求得 VSP 层速度, 作为水平层状模型的速度; ②考虑模型的纵横向速度变化, 用 VSP 旅行时层析反演出模型的速度^[1-3]; ③用零井源距 VSP 初至时间或声波测曲线求得 VSP 层速度, 以过井地震剖面解释的构造形态作为约束, 建立初始的速度模型, 再利用 Walkaway VSP 或三维 VSP 的初至旅行时同时反演 VTI 或 TTI 模型的速度和 Thomsen 的弱各向异性参数^[4-9]。第一种方法过于简单; 第二种方法没有考虑地下介质的各向异性, 且反演的运算速度较慢; 第三种方法需要同时反演过多的参数, 且受到解释人员在解释地震剖面时的人为影响。

本文介绍一种用于 Walkaway VSP 偏移成像的井旁速度模型反演方法, 该方法以声波测井速度

约束井旁 VSP 速度模型的深度分层, 利用零井源距 VSP 初至时间反演的各向同性速度模型作为初始模型, 在考虑模型各向异性时, 定义了一种水平层状各向异性井旁速度模型, 利用 Walkaway VSP 多条初至时间—深度时距曲线反演各向异性介质速度模型的层速度和各向异性参数。

2 VSP 井旁各向异性速度模型反演方法

2.1 初始速度模型的建立

声波测井速度通常比较准确地反映沿井的深度方向的层速度变化。根据声波测井速度的变化趋势, 对井旁速度模型进行分层, 以确定井旁模型各层的深度和厚度。

对于分层后的水平层状各向同性初始速度模型, 由于零井源距 VSP 的实际炮点离井口有一定的距离, 可根据斯奈尔定律计算模型的 VSP 初至时间 $T_k(v)$, 利用 $T_k(v)$ 和从零井源距 VSP 实际观测的

* 河北省涿州市东方地球物理公司物探技术研究中心, 072751. Email: houaiyuan@cnpc.com.cn

本文于 2015 年 7 月 20 日收到, 最终修改稿于 2016 年 1 月 12 日收到。

本研究受国家科技重大专项(2011ZX05019-00)项目资助。

初至时间构建如下的目标函数

$$R(\mathbf{v}) = \sum_{k=1}^K [T_k^0 - T_k(\mathbf{v})]^2 \quad (1)$$

式中: T_k^0 为第 k 个 VSP 接收点实际观测的初至时间; K 为 VSP 接收点个数; $\mathbf{v}=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 为 n 层速度模型的层速度。由式(1), 令 $R(\mathbf{v}) \rightarrow \min$, 反演求得模型的层速度 $\mathbf{v}=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。该水平层状各向同性速度模型作为后续各向异性速度模型反演的初始速度模型。

2.2 井旁各向异性速度模型的反演

在 Walkaway VSP 采集中同一口井有很多不同井源距的炮点。在 VSP 数据处理中如果将小井源距 VSP 所求的井旁速度模型用于大井源距 VSP 的初至时间正演, 正演的大井源距 VSP 初至时间很难与实际的初至时间吻合。这是因为小井源距 VSP 的地震波近似垂直传播, 而大井源距 VSP 的地震波是在介于垂直和水平方向的某个方向传播。正是由于地下介质的各向异性, 导致了这种现象的出现。这就给 VSP 资料处理带来一个问题: 同一个井旁速度模型不能同时用于同一口井多个不同井源距 VSP 数据的偏移成像。为解决这一问题, 可以用一种接近沉积岩特性的多层各向异性介质模型描述其各向异性。因此, 井旁速度模型中引入一个各向异性参数 a_n , 并且假设同一层内各向异性参数 a_n 为常数, 如图 1 所示。由此, 可以利用不同井源距 VSP 的多条 VSP 初至时距曲线反演井旁水平层状各向异性速度模型的层速度和各向异性参数, 得到用于 Walkaway VSP 偏移成像的井旁各向异性速度模型。

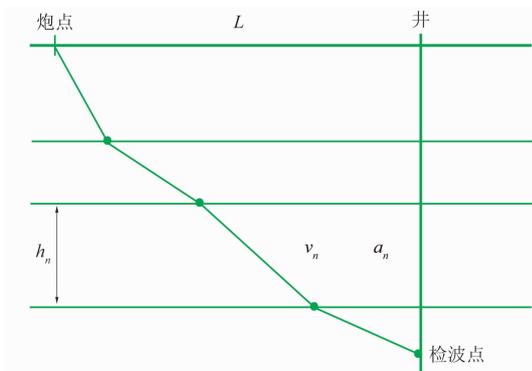


图 1 井旁水平层状各向异性速度模型

假设已分成 n 层的模型, 定义各层的各向异性参数为

$$\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) = \left[\frac{v_1^{\parallel}}{v_1}, \frac{v_2^{\parallel}}{v_2}, \dots, \frac{v_n^{\parallel}}{v_n} \right] \quad (2)$$

式中 $\mathbf{v}=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 是模型每一层沿垂直方向传播的纵波层速度, 可以由零井源距 VSP 初至时间反演求得。 $\mathbf{v}^{\parallel}=(v_1^{\parallel}, v_2^{\parallel}, \dots, v_n^{\parallel})$ 是模型各层沿水平方向传播的纵波层速度。

对于水平层状各向异性速度模型, 根据

$$L = \sum_{n=1}^N \frac{h_n v_n a_n^2 p}{\sqrt{1 - v_n^2 a_n^2 p^2}} \quad (3)$$

可以求出射线参数 p 。式中: L 是井源距; N 是速度模型的层数; h_n 为模型第 n 层的厚度。通过

$$t = \sum_{n=1}^N \frac{h_n}{v_n \sqrt{1 - v_n^2 a_n^2 p^2}} \quad (4)$$

求出 VSP 初至旅行时。考虑共有 J 个炮点的 Walkaway VSP, 构建目标函数

$$R(\mathbf{v}, \mathbf{A}) = \sum_{j=1}^J \left\{ \sum_{m=1}^M [T_{j,m}^0 - T_{j,m}(\mathbf{v}, \mathbf{A})]^2 \right\} \quad (5)$$

式中: M 为 VSP 接收点个数; $T_{j,m}^0$ 为第 j 个炮点、第 m 个接收点实际观测的 Walkaway VSP 初至时间; $T_{j,m}(\mathbf{v}, \mathbf{A})$ 为由速度模型求出的第 j 个炮点、第 m 个接收点的 Walkaway VSP 初至时间。由式(5), 令 $R(\mathbf{v}, \mathbf{A}) \rightarrow \min$, 求得沿垂直方向传播的纵波层速度 $\mathbf{v}=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 和各向异性参数 $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。

3 数据处理实例

C 井 Walkaway VSP 采用可控震源激发、线性扫描, 扫描频率为 8~96Hz, 扫描长度为 16s, 使用 16 级三分量检波器, 在 4300~1760m 深度内提升 8 次组成 128 级的井中接收系统, 检波器间距为 20m。炮点距为 50m, 共激发 131 炮, 最大井源距为 3547.45m。

图 2 为 Walkaway VSP 第 40 炮(井源距为 2051m)的三分量原始记录。该记录显示 Walkaway VSP 原始数据的信噪比较高, 可以看见清晰的 PP 波和 PSV 上行波。

偏移前主要进行了三分量的旋转、初至拾取、 $f-k$ 滤波和中值滤波的波场分离、反褶积, 得到如图 3 所示的波场分离及反褶积后上行 PP 波记录。

在零井源距 VSP 的初至拾取后,用声波测井速度对 VSP 井旁速度模型进行深度约束分层,就可以利用式(1)反演模型的层速度 $\mathbf{v}=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。图 4

为声波测井曲线转换的速度以及用零井源距 VSP (实际井源距为 49.58m)初至时间反演的井旁速度模型的层速度。

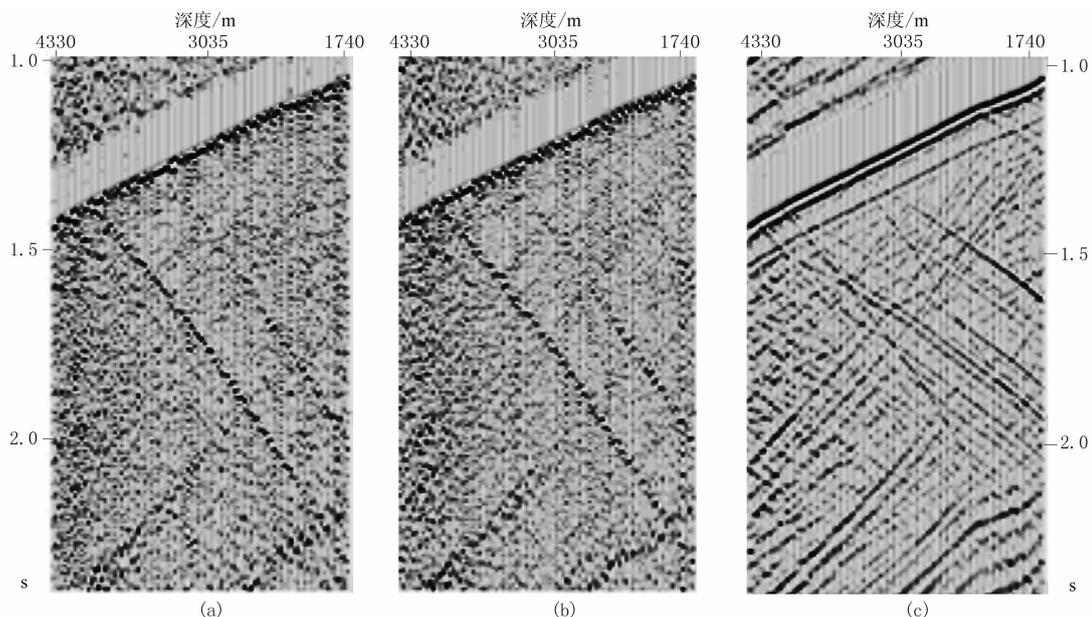


图 2 Walkaway VSP 第 40 炮的原始记录

(a)水平分量 1; (b)水平分量 2; (c)垂直分量

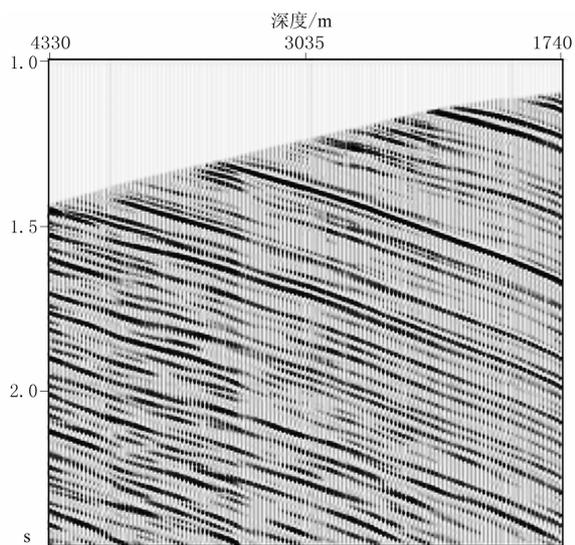


图 3 波场分离及反褶积后的上行 PP 波

如果直接用图 4 的速度模型计算出 Walkaway VSP 其他炮点位置的记录初至时间,将很难与该炮点位置的记录实际所观测的初至时间吻合,这就意味着图 4 的速度模型无法对 Walkaway VSP 其他炮点的记录偏移成像。图 5 是第 118 炮(井源距为 1850m)的垂直分量记录放大显示,可见用图 4 的速度模型计算的初至与实际观测的初至的最大误差为

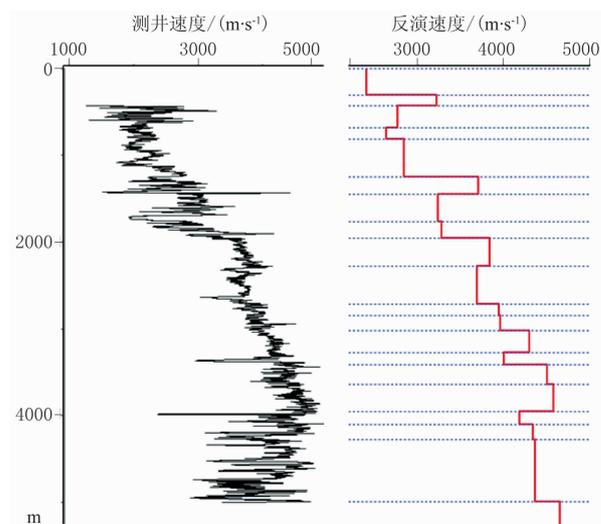


图 4 分层声波测井速度(左)和零井源距 VSP 初至时间反演的井旁速度模型层速度(右)

23ms(图 8 绿色曲线)。

C 井 Walkaway VSP 共拾取了 131 条初至—深度的时距曲线,以图 4 的速度模型作为初始速度模型,取如图 6 的近、中、远井源距(井源距从 49.58~2600m)10 条初至—深度的时距曲线用于层速度和各向异性参数反演,获得新的层速度和各向异性参数 \mathbf{A} 。图 7 为最终反演的井旁速度模型层速度

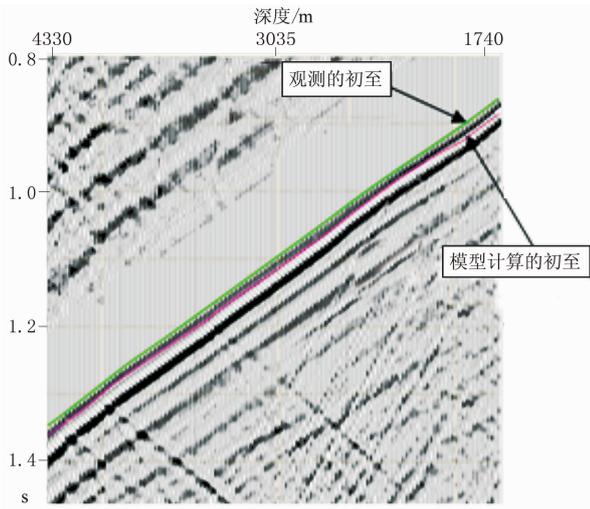


图5 第118炮的垂直分量记录放大显示

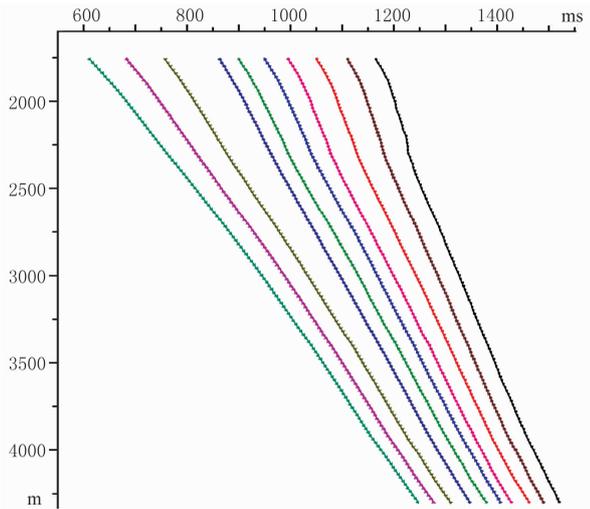


图6 Walkaway VSP的10条初至—深度的时距曲线

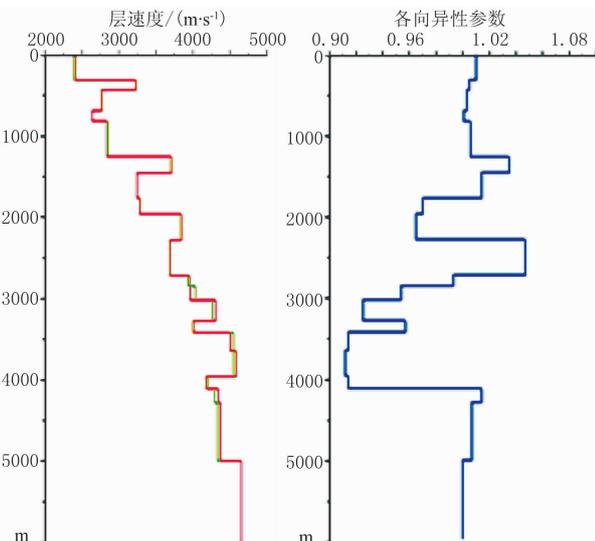


图7 井旁速度模型的最终层速度(左)和各向异性系数(右)

(左)和各向异性系数(右)。

用图7的各向异性速度模型计算出 Walkaway VSP 所有炮点及检波点位置的初至,这些初至与实际观测的初至吻合得很好。图8为第118炮点(井源距为1850m)不同速度模型计算的初至与实际拾取初至的误差。由图8可见,用图7的最终各向异性速度模型计算的初至与实际拾取初至的误差很小(图8红色曲线)。

Walkaway VSP 的上行波用图7的各向异性速度模型进行 Kirchhoff 积分法偏移,最后完成 Walkaway VSP 的成像,得到 VSP 偏移剖面。图9为 Walkaway VSP 偏移剖面与过井地面地震剖面的

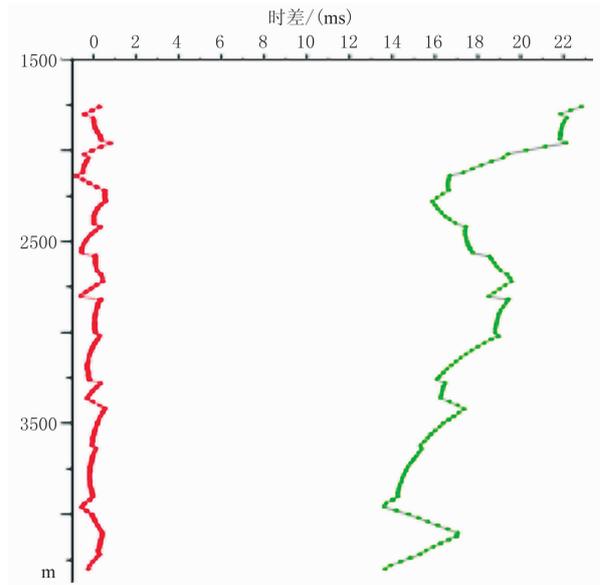


图8 第118炮不同速度模型计算的初至与实际拾取初至的差
红色曲线为图7速度模型,绿色曲线为图4速度模型

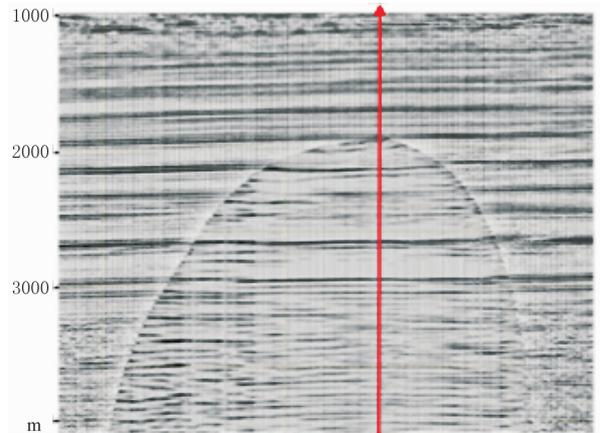


图9 Walkaway VSP 的偏移剖面与过井地面地震剖面的镶嵌显示

镶嵌显示。从图 9 可以看出, Walkaway VSP 的成像剖面与过井地面地震剖面的反射同相轴吻合得很好。

4 结束语

在 VSP 处理中, 建立 Walkaway VSP 偏移成像的井旁速度模型的方法很多, 这些方法都是利用 VSP 及其他资料建立更接近地下实际介质的速度模型, 使得 VSP 偏移成像更加可靠。实际数据的处理结果表明, 本文方法反演的井旁各向异性速度模型用于 Walkaway VSP 的偏移成像可取得较好的效果, 说明了该方法在 Walkaway VSP 偏移成像处理中具有一定的实用性。

文中提出的是一种水平层状各向异性 VSP 井旁速度模型, 这种模型以各向异性描述不同入射角的速度变化。对于大部分 Walkaway VSP 偏移成像而言, 由于成像范围离井口距离比较近, 使用这种模型还是比较适合的。但对于构造倾角较大或横向速度变化异常剧烈的情况, 用一维速度和各向异性参数存在较大误差, 需要同时考虑井旁速度模型和各向异性参数的横向变化。

参考文献

- [1] Cao Di, Hirabayashi N, Leaney S et al. An integrated 3-D tomographic inversion-application to multi-survey VSP Data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19: 1779-1782.
- [2] Li Yingping, Zhao Xiaomin, Zhou Ran et al. 3C VSP tomography inversion for subsurface P- and S-wave velocity distribution. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 24: 2625-2628.
- [3] Wei Xin, Yan Yousheng, Xu Zengkui et al. 3C-VSP imaging and absorption coefficient estimation. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 24:

2665-2668.

- [4] Stewart R R, Chiu S K L, Wilcox M A et al. Tomography-based imaging using well logs, VSP, and 3D seismic data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1987, 6: 849-851.
- [5] Zhou Ran, McAdow D, Barberan C et al. Seismic anisotropy estimation in TTI media using walkaway VSP data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23: 2525-2528.
- [6] Thomsen L. Weak elastic anisotropy. Geophysics, 1986, 51(10): 1954-1966.
- [7] 孙祥娥, 凌云, 高军等. 各向异性假设条件下三维 VSP 与地面地震数据旅行时差分析及参数求取. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 720-725.
Sun Xiang'e, Ling Yun, Gao Jun et al. Travel time-difference analysis and parameter extraction for 3D VSP data and surface seismic data in anisotropic media. OGP, 2009, 44(6): 720-725.
- [8] 李彦鹏, 陈沉忠, 徐刚等. 大阵列 3D-VSP 技术在大庆油田的应用. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 311-316.
Li Yanpeng, Chen Yuanzhong, Xu Gang et al. Large-array 3D-VSP technique applied to Daqing oil field. OGP, 2011, 46(2): 311-316.
- [9] 李文杰, 曲寿利, 魏修成等. 非零偏 VSP 弹性波叠前逆时深度偏移技术探讨. 地球物理学报, 2012, 55(1): 238-251.
Li Wenjie, Qu Shouli, Wei Xiucheng et al. Discussion about reverse-time depth migration technology of pre-stack elastic wavefield for offset VSP data. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 238-251.

(本文编辑: 金文昱)

作者简介



侯爱源 教授级高级工程师, 1966 年生; 1985 年毕业于华东石油学院物探专业, 1998 年毕业于成都理工学院数学地质专业, 获硕士学位。现在东方地球物理公司物探技术研究中心从事 VSP 方法研究。