

基于 VTI 介质模型的井间地震建模方法

张文波¹, 郭敏¹, 李桂花²

(1 东方地球物理公司 物探技术研究中心, 河北 涿州 072751; 2 山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 针对井间地震数据各向异性特征明显、常规的基于各向同性介质的建模方法难以满足井间地震高精度和高分辨率成像的需要这一问题, 在理论分析 VTI 介质中波场特征的基础上, 给出了基于 VTI 介质模型的井间地震建模方法和实现过程, 利用该建模方法得到的模型模拟出的合成井间地震记录与实际井间地震记录在波场的运动学特征和动力学特征方面都有较好的一致性, 并验证了该方法的有效性。

关键词: 井间地震; 建模方法; VTI 介质; 相速度; 群速度

中图分类号: P631.8⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)03-0301-04

Modelling Method for Cross-hole Seismic Based on VTI Model

ZHANG Wen-bo¹, GUO Min¹, LI Gui-hua²

(1 Research Center of Geophysical Prospecting Technology, Bureau of Geophysical Prospecting, Zhuozhou 072751, Hebei, China;

2 School of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510 Shandong, China)

Abstract Aiming to this problem that the feature of anisotropy is prominent and extensive for cross-hole seismic wave field and the conventional modelling method based on isotropy theory can't meet the needs of high accuracy and resolution imaging for cross-hole seismic data anymore, this paper theoretically analyzes the wave characteristic in VTI medium and presents a modelling method for VTI medium. Using the model established by this method, the modelling result of synthetic cross-hole seismic recorded by finite difference method is well coincident with the real cross-hole seismic records in both kinematical and dynamical characteristic, which proves the availability of this method.

Key words: cross-hole seismic; modelling method; VTI medium; phase velocity; group velocity

0 引言

随着油气勘探和开发的迫切需要以及井中地震采集设备性能的提高, 井间地震以其高精度和高分辨率^[1]的特点正在成为解决构造精细成像、储层描述、油藏动态监测等问题的一种关键技术。由于是在井中激发和井中接收, 井间地震通常接收来自各个方向的射线, 地震波的射线传播方向与地层层理的夹角分布在很大范围内, 井间地震记录波场表现出明显的各向异性特征。目前, 建立井间地震反射成像所需要的速度模型做法主要有: 直接利用零偏 VSP 初至时间计算 VSP 层速度, 得

到水平层状速度模型^[2]; 考虑模型的纵横向速度变化, 用旅行时层析反演的的方法建立速度模型^[3-5]。这两种方法得到的速度模型都是各向同性介质模型, 这种模型与实际地质模型差别较大, 难以满足井间地震资料反射成像处理的要求。针对这一问题, 在理论分析 VTI 介质中波场特征的基础上, 给出了 VTI 介质模型条件下综合利用测井曲线和实际井间地震记录提供的信息计算弹性参数的建模方法和实现过程。

1 VTI 介质中波场特征理论

根据弹性波理论, 在各向异性介质中, 在空间

收稿日期: 2008-02-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB202208)

作者简介: 张文波(1974-), 男, 山东冠县人, 工程师, 工学博士, 从事地震速度建模与成像研究。E-mail: zhangwenbo@bpg.com.cn

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的任意方向上,存在着 3 种类型的波,分别为准压缩波 q^p 、准切变波 q^{s_1} 和 q^{s_2} [6]。对于 VTI 介质,如图 1,假设 VTI 介质层理平行 XY 平面,VTI 介质弹性系数为 $C_{11} \sim C_{13}$ 、 C_{33} 、 C_{44} ,介质密度为 ρ ,波的传播方向与 Z 轴的夹角为 φ ,则在 XZ 平面内,这 3 种类型的波的相速度有如下特征:

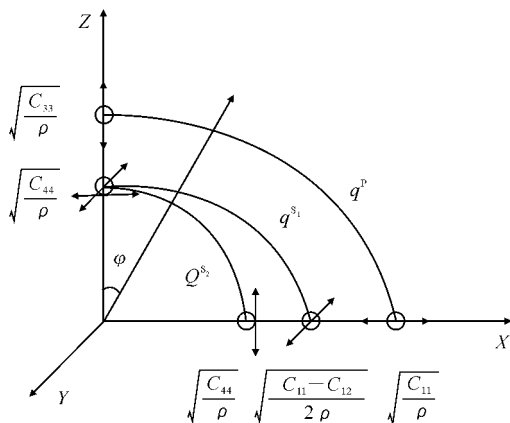


图 1 VTI 介质中 3 种波的相速度和极化方向

Fig. 1 Phase Velocity and Polarization of 3 Kinds Wave in VTI Medium

(1) 准压缩波 q^p 的相速度 $C_1 = \sqrt{\frac{P+q}{2\rho}}$, 在平

行层理方向上 ($\varphi = 90^\circ$) 为 $\sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}$, 在垂直层理方向上 ($\varphi = 0^\circ$) 为 $\sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}$ 。

(2) 准切变波 q^{s_1} 的相速度 $C_2 =$

$\sqrt{\frac{1}{2\rho}(C_{11}-C_{12})\sin^2\varphi + \frac{C_{44}}{\rho}\cos^2\varphi}$, 在平行层理方向上 ($\varphi = 90^\circ$) 为 $\sqrt{\frac{C_{11}-C_{12}}{2\rho}}$, 在垂直层理方向上 ($\varphi = 0^\circ$) 为 $\sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}$ 。

(3) 准切变波 q^{s_2} 相速度 $C_3 = \sqrt{\frac{P-q}{2\rho}}$, 在平行

层理方向上 ($\varphi = 90^\circ$) 为 $\sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}$, 在垂直层理方向上 ($\varphi = 0^\circ$) 为 $\sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}$ 。

其中: $P = C_{22}\sin^2\varphi + C_{33}\cos^2\varphi + C_{44}$, $q = \{[(C_{22} - C_{44})\sin^2\varphi - (C_{33} - C_{44})\cos^2\varphi]^2 + 4(C_{23} + C_{44})\sin^2\varphi\cos^2\varphi\}^{1/2}$, $C_{22} = C_{11}$, $C_{23} = C_{13}$, 可以看出, 在 VTI 介质中, 3 种类型波相速度都随空间角 φ 变化。

2 用群速度表示 VTI 介质弹性参数

根据 Thomsen [7] 给出的相速度与相角关系有

$$v_p^2(\theta) = \alpha_0^2 [1 + \epsilon \sin^2\theta + D^*(\theta)] \quad (1)$$

$$v_{sv}^2(\theta) = \beta_0^2 \left[1 + \frac{\alpha_0^2}{\beta_0^2} \epsilon \sin^2\theta - \frac{\alpha_0^2}{\beta_0^2} D^*(\theta) \right] \quad (2)$$

式中: θ 为相角; $v_p(\theta)$ 为 P 波相速度, $v_{sv}(\theta)$ 为 SV 波相速度。

$$\epsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (3)$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}} \quad (4)$$

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (5)$$

$$D^*(\theta) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\beta_0^2}{\alpha_0^2} \right) \left\{ \left[1 + \frac{4\delta^*}{(1 - \beta_0^2/\alpha_0^2)^2} \sin^2(\theta) \cdot \cos^2(\theta) + \frac{4(1 - \beta_0^2/\alpha_0^2 + \epsilon)}{(1 - \beta_0^2/\alpha_0^2)^2} \sin^4(\theta) \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$\delta^* = \frac{1}{2C_{33}^2} [2(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} + C_{44})(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})] \quad (7)$$

又因为在各向异性介质中群速度与相速度的关系为 [8]

$$V^2[\psi(\theta)] = v^2(\theta) + \left[\frac{dv(\theta)}{d\theta} \right]^2 \quad (8)$$

群角与相角的关系为

$$\tan[\psi(\theta)] = \frac{\tan\theta + 1/v(\theta) \cdot v'(\theta)}{1 - \tan\theta/v(\theta) \cdot v'(\theta)} \quad (9)$$

根据式(1)~(9)可以计算得到

$$V_P(0^\circ) = v_P(0^\circ) = \alpha_0 \quad (10)$$

$$V_P(90^\circ) = v_P(90^\circ) = \alpha_0 \sqrt{2\epsilon + 1} \quad (11)$$

$$V_{SV}(0^\circ) = v_{SV}(0^\circ) = \beta_0 \quad (12)$$

$$V_{SV}(90^\circ) = v_{SV}(90^\circ) = \beta_0 \quad (13)$$

由式(4)~(5)可以得到

$$C_{33} = \rho \alpha_0^2 = \rho V_P(0^\circ) \quad (14)$$

$$C_{44} = \rho \beta_0^2 = \rho V_P(90^\circ) \quad (15)$$

由式(3)、式(10)~(11)得

$$\frac{V_P(0^\circ)}{V_P(90^\circ)} = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 \sqrt{2\epsilon + 1}} = \frac{1}{\sqrt{2\epsilon + 1}} = \sqrt{\frac{C_{11}}{C_{33}}} \quad (16)$$

进而可得

$$C_{11} = C_{33} \frac{V_P^2(90^\circ)}{V_P^2(0^\circ)} = \rho \frac{V_P^2(90^\circ)}{V_P^2(0^\circ)} \quad (17)$$

因为在弱各向异性条件下式(1)可简化为

$$v_p(\theta) = \alpha_0 [1 + \delta \sin^2\theta \cos^2\theta + \epsilon \sin^4\theta] \quad (18)$$

分别将 $\theta=90^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 代入式 (18), 可以得到

$$\delta=4\left[\frac{v_p(45^\circ)}{V_p(0^\circ)}-1\right]-\left[\frac{V_p(90^\circ)}{V_p(0^\circ)}-1\right] \quad (19)$$

Thomsen 给出的弱各向异性条件下各向异性参数 δ 与弹性系数之间的关系为

$$\delta=\frac{(C_{13}+C_{44})^2-(C_{33}+C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33}+C_{44})} \quad (20)$$

利用式 (19) ~ (20), 可以求出弹性系数 C_{13} 的表达式, 为了方便计算, 取 $v_p(45^\circ)=\frac{V_p(90^\circ)+V_p(0^\circ)}{2}$, 可以得到

$$C_{13}=\sqrt{2C_{33}(C_{33}-C_{44})\delta}+(C_{33}-C_{44})^2-C_{44} \quad (21)$$

3 建模实现过程

建模实现过程^[9-10] 分 4 个步骤。

(1)综合利用已有的过井地面地震剖面上的标志层位、测井曲线上的声波速度和密度特征、地下反射界面在实际井间地震记录上的反应位置以及初至波层析成像剖面等确定模型的构造形态。

(2)利用测井曲线和实际井间地震记录上各种波型的速度信息, 确定地震模型各个层位的模型参数。二维情况下需要确定的模型参数为密度 ρ 和弹性系数 C_{11} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 。密度可读取密度测井曲线上相应深度上的数据求得。弹性系数 C_{11} 、 C_{33} 、 C_{13} 、 C_{44} 分别由式 (14) ~ (15)、(17)、(21) 确定。其中:

α_0 为横向各向同性介质中 P 波 (准压缩波 q^p) 的垂直速度, 可由声波测井曲线上相应深度上的测井速度得到。

β_0 为横向各向同性介质中慢横波 (准切变波 q^s) 的垂直速度, 在图 1 上可以看出, 慢横波的垂直速度与水平速度是相等的。所以, 在激发点所在的井段上, β_0 可由井间距 H 除以实际井间地震记录炮点所在位置上慢横波的初至时间得到。在激发点以外的井段上, 可利用在激发井段上统计出来的多个炮点处的 P 波初至时间 T_p 和慢横波的初至时间 T_s 的比值 R_{ps} , 用公式 $\beta_0=\alpha_0 R_{ps}$ 求得。

$V_p(90^\circ)$ 为 P 波的水平速度, 在激发井段可由井间距除以实际井间地震记录上炮点所在位置上 P 波初至时间 T_p 得到。在激发点以外的井段上, 可利用在激发井段上统计出来的多个炮点处的 P 波垂直速度和 P 波水平速度的比值 R_{pp} , 用公式 $V_p(90^\circ)=\frac{\alpha_0}{R_{pp}}$ 求得。

有了 α_0 、 β_0 和 $V_p(90^\circ)$ 就可以分别计算出各个层位上的弹性系数 C_{11} 、 C_{33} 、 C_{13} 、 C_{44} , 从而得到全部模型参数。

(3)将各个层位上的模型参数按照给定的剖分网格大小进行离散, 得到离散的横向各向同性介质的参数模型。

(4)对生成的模型做波动方程正演模拟, 将得到的井间地震合成记录与实际井间地震记录进行对比, 修改模型参数, 直至合成记录与实际记录达到需要的符合程度。

4 建模实例

利用本文给出的基于横向各向同性介质的建模方法, 根据某井区提供的井间地震施工用到的两口井的声波测井曲线、密度测井曲线、过井地面地震剖面以及由初至波层析反演得到的剖面, 建立了两井间的构造模型 (图 2), 所建模型各个层位的弹性参数如表 1。为了验证所建立的模型是否与实际地质模型相符, 使用与采集实际井间地震记录相同的观测系统和采集参数, 利用交错网格高阶差分算法对所建模型做波动方程正演模拟。图 3 为实际的井间地震记录水平分量与波动方程正演模拟得到的合成记录的水平分量的对比图, 图 4 为实际的井间地震记录垂直分量与波动方程正演模拟得到

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameters of Geological Model					
层位	密度/ 10 ³ kg · m ⁻³	弹性系数/ 10 ¹⁰ Pa			
		C_{11}	C_{13}	C_{33}	C_{44}
1	2. 150	2. 524	0. 843	1. 291	0. 211
2	2. 200	3. 254	1. 137	1. 664	0. 238
3	2. 320	5. 246	1. 747	2. 682	0. 442
4	2. 250	3. 091	1. 040	1. 580	0. 253
5	2. 180	2. 665	0. 877	1. 363	0. 231
6	2. 210	2. 833	0. 895	1. 448	0. 271
7	2. 220	2. 936	0. 927	1. 501	0. 281
8	2. 220	2. 865	0. 960	1. 464	0. 304
9	2. 210	3. 198	1. 008	1. 635	0. 308
10	2. 200	3. 254	1. 028	1. 664	0. 312
11	2. 400	5. 916	1. 773	3. 025	0. 630
12	2. 380	5. 070	1. 504	2. 592	0. 550
13	2. 450	6. 210	2. 302	3. 175	0. 365
14	2. 500	7. 062	2. 698	3. 610	0. 360

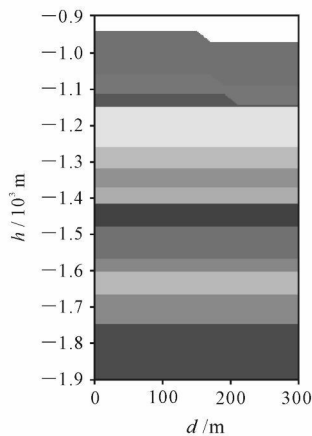


图 2 地质模型
Fig. 2 Geological Model

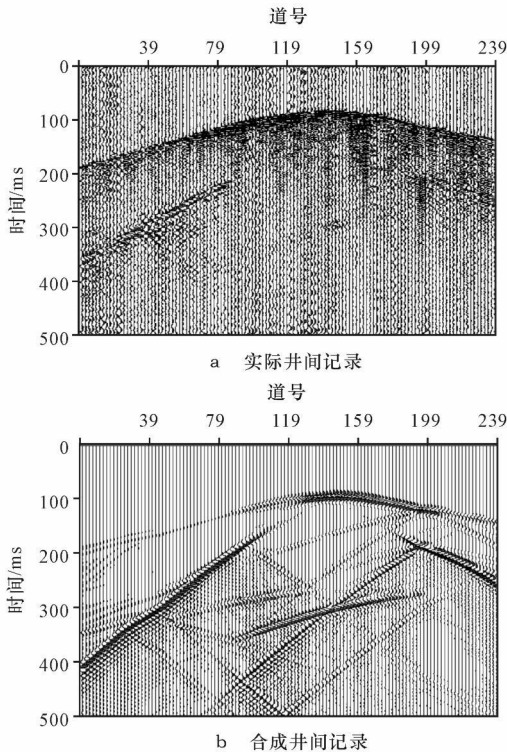


图 3 井间地震记录(水平分量)

Fig. 3 Cross-hole Seismic Record in Horizontal Direction
的合成记录的垂直分量的对比图。可以看出, 利用该模型模拟出的合成井间地震记录与实际井间地震记录在波场的运动学特征和动力学特征方面都能得到较好的吻合。

5 讨论

(1)在井间地震观测条件下, 通常接收来自各个方向的射线, 地震波的射线传播方向与地层层理的夹角分布在很大范围内, 井间地震记录波场表现

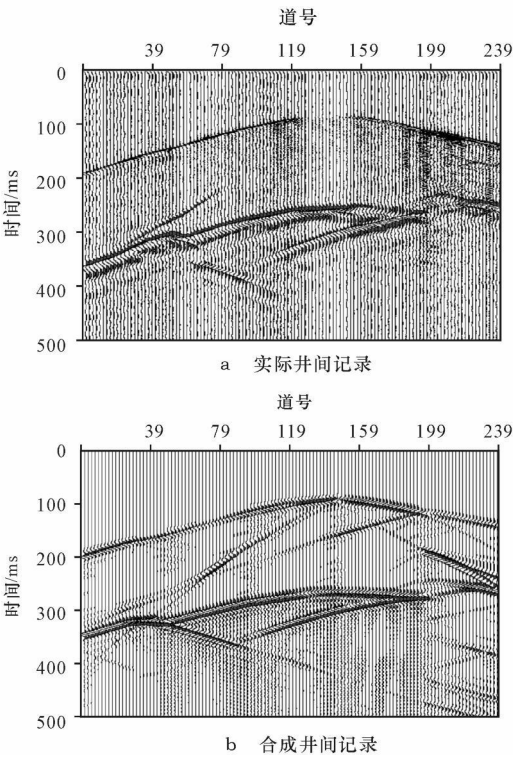


图 4 井间地震记录(垂直分量)
Fig. 4 Cross-hole Seismic Record in Vertical Direction

出明显的各向异性特征, 因此在对井间地震资料进行处理时, 要考虑各向异性因素的影响。

(2)根据弹性波理论, 在各向异性介质中, 在空间任意方向上存在着准压缩波 q^0 、准切变波 q^1 和 q^2 3 种类型的波, 在 VTI 介质情况下, 这 3 种类型波的极化方向和相速度随传播方向变化的特征在理论上是明确的, 而在实际井间地震观测中, 通常采用 3 分量井下检波器接收, 可以完整记录到这 3 种类型的波。因此, 通过利用记录到的 3 个分量上的 3 种类型的波的极化方向和速度信息, 并结合地面地震和测井资料提供的信息, 可以给出以密度和弹性参数表示的井间 VTI 介质模型。

(3)为了得到更接近实际地质情况的模型, 在充分利用测井数据和井间地震记录信息的同时, 还应当采集的数据: 第一, 激发井和接收井(或至少一口井)的零偏移距 VSP 数据, 用来得到 P 波(准压缩波 q^0)的垂直速度, 或用来修正由测井数据得到的纵波速度; 第二, 在全部接收井段, 以小的炮点距在炮点附近有限的接收点(10 道左右)上采集多炮的井间地震记录, 用来得到慢横波(准切变波 q^2)的垂直速度和 P 波的水平速度。

(下转第 318 页)

- [C] //In Proc of the IEEE 1999 Int Geoscience and Remote Sensing Symposium. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hanburg; the IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999; 348-350.
- [26] Witkin A P. Scale-Space Filtering[C] // In Proc 8th Int Joint Conf Art Intell. Art Intell. Karlsruhe; the 8th Int Joint Conf Art Intell, 1983; 1019-1022.
- [27] Koenderink J J. The Structure of Images [J] . Biological Cybernetics, 1984, 50(2); 363-370.
- [28] 邱凯昌, 李德仁, 李德毅. 空间数据挖掘和知识发现的框架[J] . 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(4); 328-332.
- [29] 张讲社, 徐宗本. 基于视觉系统的聚类: 原理与算法[J] . 工程数学学报, 2000, 17(增刊); 14-20.
- [30] Andrew D J, Edwin R H. Kale Space Vector Fields for Symmetry Detection[J] . Image and Vision Computing, 1999, 17(2); 337-345.
- [31] Keller J M, Sztandera L. Spatial Relations Among Fuzzy Subsets of an Image[C] //In 1st Int Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis. Uncertainty Modeling and Analysis. Maryland; the 1st Int Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, 1990; 207-211.
- [32] Beaubouef T, Petry F E. A Rough Set Foundation for Spatial Data Mining Involving Vagueregions[C] //In Proc of the 2002 IEEE Int Conf on Fuzzy Systems. Fuzzy Systems, Honolulu; the 2002 IEEE Int Conf on Fuzzy Systems, 2002; 767-772.
- [33] 邱凯昌, 李德毅, 李德仁. 云理论及其在空间数据挖掘和知识发现中的应用[J] . 中国图象图形学报, 1999, 4(11); 930-935.
- [34] Jimenez L, Landgrebe D. Supervised Classification in High Dimensional Space; Geometrical, Statistical and Asymptotical Properties of Multivariate Data[J] . IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics, 1998, 28(1); 39-54.
- [35] Kumar J K. An Application of Spatial Prediction Using a Fuzzy Neural Network[C] //Int Joint Conf on Neural Networks. Neural Networks, Washington DC; the Int Joint Conf on Neural Networks, 1999; 4241-4246.
- [36] Barroso P L, Wilton O B, Martin K. Best Linear Unbiased Predictor Mixed Model with Incomplete Data[J] . Communications in Statistics; Theory and Methods, 1998, 27(1); 121-129.
- [37] 邱凯昌. 空间数据挖掘和知识发现的理论与方法[D] . 武汉: 武汉测绘科技大学, 1999.
- [38] 王新洲, 史文中, 王树良. 模糊空间信息处理[M] . 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [39] 胡圣武. GIS 质量评价与可靠性分析[M] . 北京: 测绘出版社, 2006.
- [40] 滕明贵. 空间数据挖掘技术及其应用研究[D] . 合肥: 中国科学技术大学, 2004.
- [41] 陈久军. 基于统计学习的图像语义挖掘研究[D] . 杭州: 浙江大学, 2006.
- [42] 曾松峰. GIS 中空间数据挖掘初步研究[D] . 南京: 南京大学, 2002.
- [43] 焦李成, 刘芳, 刘静, 等. 智能数据挖掘与知识发现[M] . 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [44] 蓝荣钦. 模糊空间数据挖掘方法及应用研究[D] . 北京: 北京科技大学, 2005.
- [45] 胡彩平, 秦小麟. 空间数据挖掘研究综述[J] . 计算机科学, 2007, 34(5); 14-19.
- [46] 张楠, 曲海平, 刘念, 等. 空间数据挖掘的研究进展[J] . 微处理机, 2007, 20(2); 1-4.

(上接第 304 页)

参考文献:

- [1] Rector J W. Cross-well Methods; Where are We, Where are We Going? [J] . Geophysics, 1995, 60(3); 627-630.
- [2] 姚忠瑞, 何悝华, 左建军, 等. 多方位 Walk-away VSP 处理方法[J] . 石油物探, 2006, 45(4); 381-384.
- [3] 马德堂, 朱光明, 张文波. 双重网格井间地震层析成像技术[J] . 地球科学与环境学报, 2005, 27(4); 83-86.
- [4] Li Y P. 3C VSP Tomography Inversion for Subsurface P- and S-wave Elocity Distribution[C] // 75th SEG Annual Meeting. Expanded Abstracts of 75 th SEG Mtg. New Orleans; Society of Exploration Geophysicists, 2006; 2625-2628.
- [5] Xin W. 3C-VSP Imaging and Absorption Coefficient Estimation[C] //74th SEG Annual Meeting. Expanded Abstracts of 74 th SEG Mtg. Houston; Society of Exploration Geophysicists, 2005; 2665-2668.
- [6] 杜世通. 地震波动力学[M] . 山东东营: 石油大学出版社, 2003.
- [7] Thomsen L. Weak Elastic Anisotropy[J] . Geophysics, 1986, 51(10); 1954-1966.
- [8] Faria E L, Stoffa P L. Traveltime Computation in Transversely Isotropic Media [J] . Geophysics, 1994, 59(2); 272-281.
- [9] 张文波. 井间地震交错网格高阶差分数值模拟及逆时偏移成像研究[D] . 西安: 长安大学, 2005.
- [10] 张文波, 朱光明, 马德堂, 等. 井间地震初至波分析[J] . 地球科学与环境学报, 2006, 28(1); 70-74.