

纪念应崇福院士诞辰 100 周年

各向异性联合反演的数值研究*

宋云红^{1,2,3} 陈浩^{1,2,3†} 张晋言⁴ 王颖^{1,3} 王秀明^{1,2,3}

(1 中国科学院声学研究所 声场与声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 北京市海洋深部钻探测量工程技术研究中心 北京 100190)

(4 中石化胜利石油工程有限公司测井公司 东营 257061)

摘要 目前正交偶极子声波测井中广泛应用的各向异性反演方法为多参数联合反演的方法。该方法的目标函数由两部分构成:一是基于四分量旋转得到的快慢横波的波形匹配函数(简称主函数),二是主函数对方位求导后得到的辅助函数。该文深入研究了主函数与辅助函数以及二者的和(简称综合函数)随各向异性参数的变化特性与规律。数值模拟表明,主函数的最小值总是出现在各向异性大小为 0、方位与快慢横波方位成 45° 的方位处,且在快慢横波方位上的地层各向异性大小附近存在极小值,该极值小于慢横波方位上的极小值;辅助函数在快慢横波方位上的值非常小,但在这两个方位上随各向异性大小变化不明显;综合函数可以反演出各向异性参数,但对方位的特性被弱化。

关键词 正交偶极,各向异性,联合反演,分步反演

中图法分类号: P631.5+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)05-0794-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.027

Simulation of simultaneous inversion of formation shear-wave anisotropy

SONG Yunhong^{1,2,3} CHEN Hao^{1,2,3} ZHANG Jinyan⁴ WANG Ying^{1,3} WANG Xiuming^{1,2,3}

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Engineering Research Center for Offshore Drilling Exploration and Measurement, Beijing 100190, China)

(4 Well Logging Company of Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Dongying 257061, China)

Abstract In view of the four-component data of the cross-dipole acoustic wave measurement, simultaneous inversion method is widely used to inverse the formation shear-wave anisotropy. The objective function of this method consists of two parts: one part is the fitting function (referred to as the principal function) based on the fast and slow shear waves' waveform matching obtained by four-component rotation; the other part is the auxiliary fitting function obtained after the principal function derivation of azimuth (abbreviated auxiliary function). In this paper, the characteristics and laws of the variation of the principal and auxiliary functions, and the sum of the two functions (called comprehensive function) with the anisotropic parameters are further studied. The results of numerical simulation show that the change rule of principal function is not so obvious and the anisotropic parameters cannot be obtained. However, the minimum value of principal function always

2018-06-13 收稿; 2018-07-16 定稿

*国家自然科学基金项目 (11574347, 11774373, 11734017, 91630309)

作者简介: 宋云红 (1991-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 研究方向: 声波测井方法研究。

† 通讯作者 E-mail: chh@mail.ioa.ac.cn

appears at where the anisotropy is zero, and the azimuth 45° with fast or slow azimuth. Moreover, there is a local minimum value around the formation anisotropy at fast azimuth, and it is smaller than the minimum value in the slow azimuth. The value of auxiliary function in the fast and slow azimuth is very small, while it does not change significantly with the anisotropy in these two orientations. The comprehensive function can inverse the anisotropy and azimuth, but the azimuth sensitivity is weakened.

Key words Cross-dipole, Anisotropy, Simultaneous inversion, Stepwise inversion

1 引言

在油气藏勘探开发过程中,经常遇到具有各向异性特性的地层。波在各向异性介质中的传播较为复杂。然而,在很多情况下,地层的各向异性可以用比较简单的横向各向同性(Transverse isotropy, TI)来进行模拟。横向各向同性介质有一个对称轴,与对称轴垂直平面上的任意方向上介质的性质(波的慢度等)都相同。对于钻井与测井来讲,常见的TI介质有两种:一种是地层的对称轴与井轴重合,称为VTI介质;另外一种是在与井轴垂直的平面上所有方向性质均不相同,称为HTI介质,也叫做环向各向异性介质^[1]。环向各向异性通常是由裂缝、孔隙等构造的存在或者地应力的诱导而产生的^[2]。准确获取各向异性的大小和方位等参数^[3-4],对于判断地应力方向、识别裂缝^[5]、设计水压致裂和定向射孔^[6]等方案都具有非常重要的作用和意义。Ellefsen等^[7-8]和Sinha等^[9]利用摄动理论对井周的HTI地层声场进行了近似理论分析。Cheng等^[10]利用有限差分对HTI地层中偶极子的传播进行了数值模拟。雷雨等^[11]利用不同速度混合的阵列信号简化模拟了HTI地层中正交偶极子的速度变化规律。Alford^[12]提出了各向异性地层中极化方向的快慢横波波列与任意方位的四分量数据之间的旋转关系,基于此可以由四分量数据推出快横波或者慢横波相对于X向源的方位与快慢横波波列。结合阵列波形数据处理可以得到快横波相对于X向源的方位(简称快横波方位)与各向异性大小。但该方法在弱各向异性下易受噪声干扰,出现 90° 方位差。Tang等^[3]提出了将各向异性的三个参数联合反演,同时得到各向异性大小和方位。该方法包括基于四分量旋转得到的快慢横波波列匹配拟合函数(简称主函数)以及主函数对方位求导后得到的辅助拟合函数(简称辅助函数)两部分,能够准确反演得到各向异性大小和方位。但是主函数和辅助函数各自对反演目标函数的影响并没有具体探讨。

本文中,通过遍历的方法,分别研究在不同各向异性条件下联合反演方法主函数、辅助函数以及二者相加的综合函数随各向异性参数的变化特性和规律,为进一步发展新反演方法提供基础。

2 联合反演方法

正交偶极子声波测井得到的数据为四个分量的偶极子声波阵列数据,从发射到接收经过了发射方向投影到快慢主轴方向、快慢主轴方向投影到接收方向两次投影,如图1所示,测得四分量数据 XX 、 XY 、 YY 和 YX ,第一个字母表示声源发射方向,第二个字母表示接收器的接收指向。

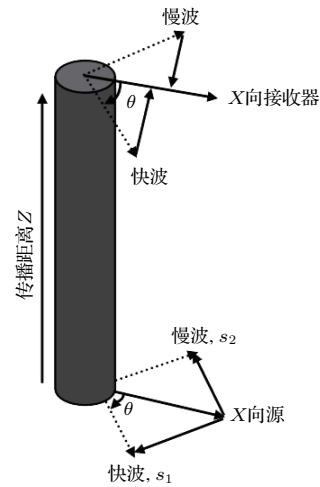


图1 环向各向异性地层中的横波测量

Fig. 1 Borehole shear-wave measurement in a HTI formation

快横波和慢横波可以用测得的四分量数据表示^[3]:

$$\begin{cases} FP(t) = XX(t) \cos^2 \theta + [XY(t) + YX(t)] \\ \quad \times \sin \theta \cos \theta + YY(t) \sin^2 \theta, \\ SP(t) = XX(t) \sin^2 \theta - [XY(t) + YX(t)] \\ \quad \times \sin \theta \cos \theta + YY(t) \cos^2 \theta, \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $FP(t)$ 和 $SP(t)$ 分别表示快横波和慢横波, θ 表示快横波方位。研究证明,快慢横波波列的

极性相同且波形相似,而慢横波相对快横波时间上有一滞后,如图2所示。利用快慢横波波列的相似性以及它们之间的时间差,可以反演出地层的各向异性。

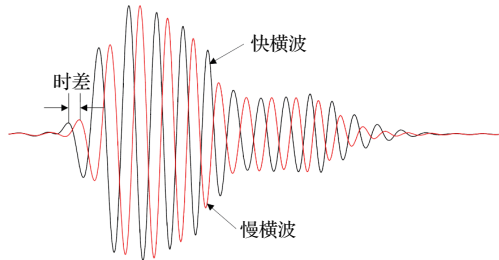


图2 快横波和慢横波波列示意图

Fig. 2 The diagram of the fast and slow shear waves

为了使联合反演方法对快横波方位敏感,将式(1)对 θ 求导,得到两个辅助波列 $FP^\theta(t)$ 和 $SP^\theta(t)$,表示如下:

$$\begin{cases} FP^\theta(t) = -\sin 2\theta[XX(t) - YY(t)] \\ \quad + \cos 2\theta[XY(t) + YX(t)], \\ SP^\theta(t) = \sin 2\theta[XX(t) - YY(t)] \\ \quad - \cos 2\theta[XY(t) + YX(t)]. \end{cases} \quad (2)$$

综合利用以上快慢横波波列和辅助波列,得到联合反演方法综合目标函数:

$$\begin{aligned} E(\delta s, \theta, s_2) = & \sum_{m,n=1}^N \int_T \{SP_n[t - s_2(m-n)d \\ & + \delta s z_m] - FP_m(t)\}^2 dt \\ & + \sum_{m,n=1}^N \int_T \{SP_n^\theta[t - s_2(m-n)d \\ & + \delta s z_m] - FP_m^\theta(t)\}^2 dt, \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, δs 、 θ 和 s_2 分别表示快慢横波慢度差、快横波方位和慢横波慢度, m 和 n 表示接收器在阵列中的位置, N 为接收器个数, T 为弯曲波时窗, d 表示接收器间隔, z_m 表示第 m 个接收器与声源之间的距离, FP_m 和 SP_n 分别表示快慢横波的第 m 和第 n 道波形, FP_m^θ 和 SP_n^θ 表示辅助波形的第 m 和第 n 道波形。

式(3)中参与三参数联合反演,计算量很大,耗时较长,为了进一步减少计算量,Tang等^[1]研究了

三个参数之间的关系,发现之间的关系可以表示为

$$s_2 = s(\theta) + \frac{\delta s}{2} \{1 - \tanh[8(\theta/90 - 0.5)]\}, \quad (4)$$

其中, $s(\theta)$ 表示与快波方位夹角 θ 方位上的同向分量慢度。将式(4)代入式(3),反演目标函数参数就能缩减到两个,在一定程度上提高了反演速度。本文反演所用的都是两参数联合反演。

下面我们将通过对快慢横波波列与辅助波列分别求取目标函数,也就是将式(3)分成单独的两部分:主函数(式(5))和辅助函数(式(6)),来考察两个单独反演目标函数以及二者之和,也就是综合函数随各向异性参数的变化特性和规律。

$$Ep(\delta s, \theta, s_2) = \sum_{m,n=1}^N \int_T \{SP_n[t - s_2(m-n)d + \delta s z_m] - FP_m(t)\}^2 dt, \quad (5)$$

$$Ea(\delta s, \theta, s_2) = \sum_{m,n=1}^N \int_T \{SP_n^\theta[t - s_2(m-n)d + \delta s z_m] - FP_m^\theta(t)\}^2 dt. \quad (6)$$

3 数值算例反演结果

为了对联合反演算法及主函数和辅助函数随各向异性参数的变化特性和规律进行考察,利用有限差分算法数值模拟了快地层和慢地层中环向各向异性 $\text{ani} = 1\%$ 和 $\text{ani} = 25\%$ 地层下的四分量数据。在以下时域有限差分(Finite-difference time-domain, FDTD)计算中,所用均为井孔HTI模型,充液井孔半径0.1 m,采用无分裂完全匹配层(Perfectly matched layer, PML)作为吸收边界。地层参数如表1所示。

表1 有限差分模拟中各向异性地层参数

Table 1 The formation properties used in FDTD

	快横波速度/ (m·s ⁻¹)	慢横波速度/ (m·s ⁻¹)	大小/%	方位/(°)
慢地层1	1055	1044	1	171
慢地层2	1279	1044	25	171
快地层1	2525	2500	1	171
快地层2	3062	2500	25	171

地层的快横波方位为 X 轴方向,慢横波方位为 Y 。下面用遍历的方式观察主函数、辅助函数、综合函数以及各向异性大小随快慢横波慢度差和快横波方位的变化趋势。

图3给出了主函数和各向异性大小随角度和快慢横波慢度差的分布图。图中颜色表示主函数大小,等高线表示各向异性大小,红色星标为函数的最小值处。从图3可以看出,在四种不同各向异性强度和不同类型的地层中,主函数的最小值均出现在了与主轴方位 (81° 和 171°) 夹角 45° (36° 和 126°) 的方位上,快慢横波慢度差为0的位置。主函数的这一特性可以用来确定快慢横波方位。这个现象出现的原因与同向分量在 45° 上的特征有关。两个同向分量的大小可以表示成

$$\begin{cases} XX(t) = [S(t - s_1z) \cos \theta] \cos \theta \\ \quad + [S(t - s_2z) \sin \theta] \sin \theta, \\ YY(t) = [S(t - s_1z) \sin \theta] \sin \theta \\ \quad + [S(t - s_2z) \cos \theta] \cos \theta. \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,当 $\theta = 45^\circ$ 时, XX 、 YY 分别为

$$\begin{cases} XX(t) = [S(t - s_1z) + S(t - s_2z)]/2, \\ YY(t) = [S(t - s_1z) + S(t - s_2z)]/2. \end{cases} \quad (8)$$

所以理想条件下,在与主轴方位夹角 45° 的方位上,同向分量 $XX = YY$ 。也就是说理想条件下,在该方位上,同向分量不存在慢度差,且波形完全一致。这比快横波与慢横波的波形相似更加严格,所以在该方位慢度差为0的位置上,主函数获得最小值。

此外,从图3可以看出,在快横波方位 (171°) 处,在各地层自身的各向异性大小附近存在该方位上的极小值,且快横波方位 (171°) 上的极小值比慢横波方位 (81°) 上的极小值要小。也就是说,如果首先确定了快慢横波方位,那么在这两个方位上一维遍历快慢横波慢度差,比较两个极小值就可以反演得到各向异性大小。主函数这一特性可用于确定快慢横波方位后单独进行各向异性大小反演。因此,单独采用主函数通过分步反演方法可以得到各向异性大小和方位。

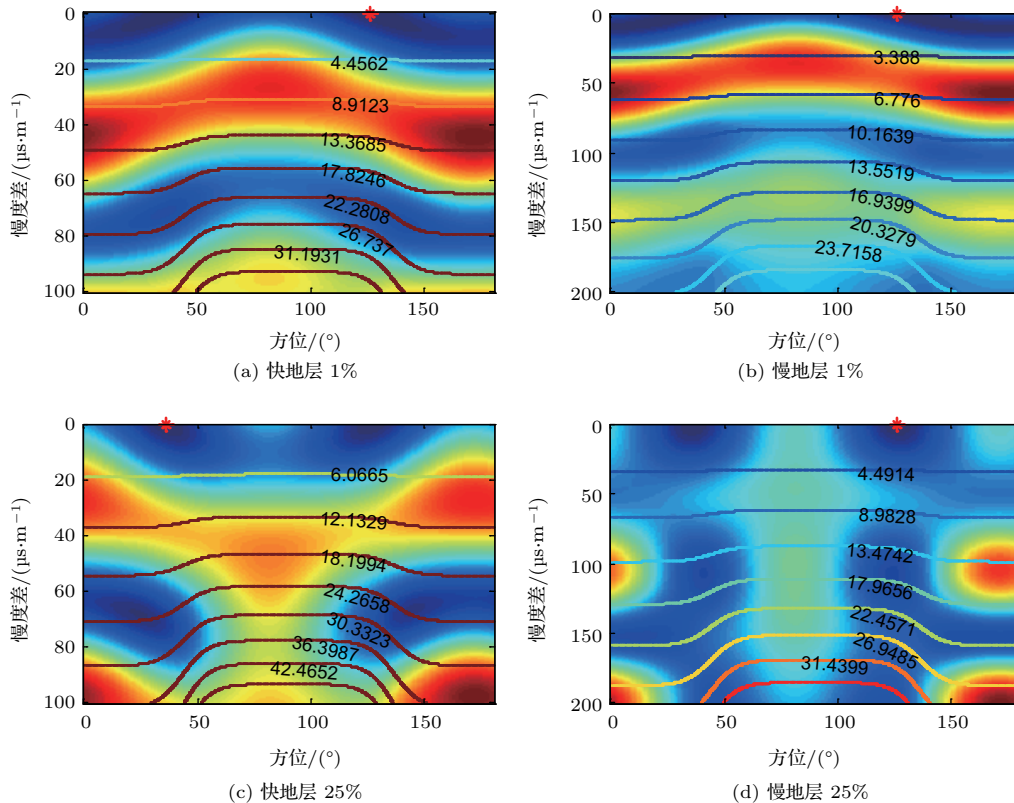


图3 主函数分布图

Fig. 3 The distribution diagram of principal function

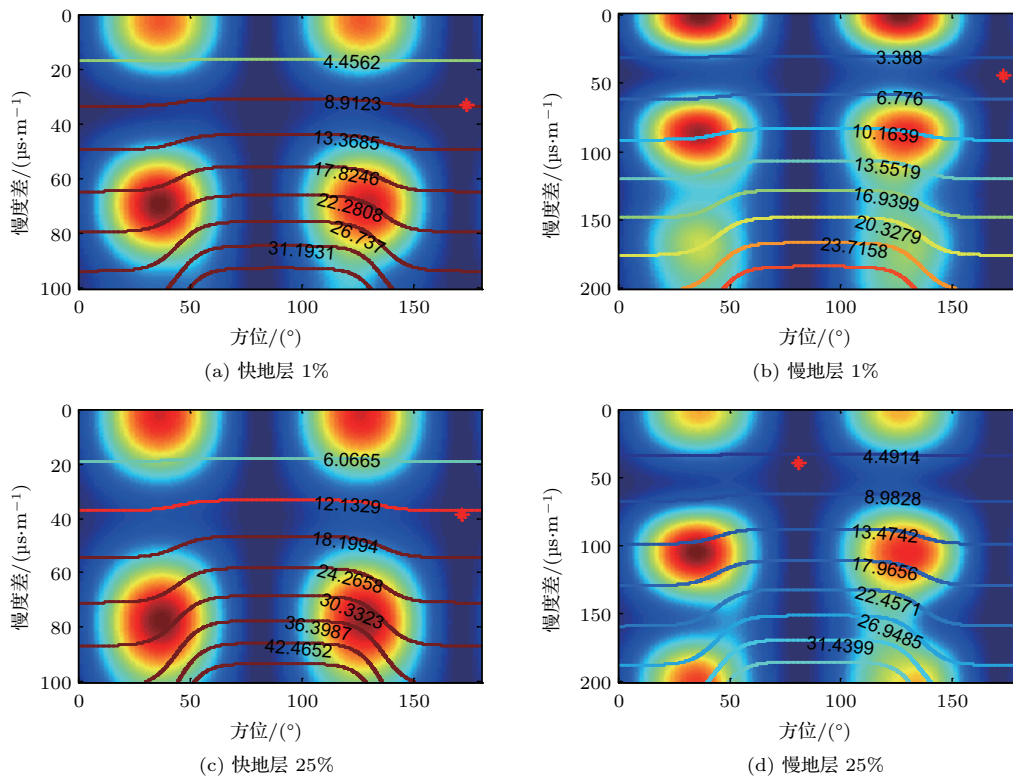


图4 辅助函数分布图

Fig. 4 The distribution diagram of auxiliary function

图4给出了辅助函数和各向异性大小随角度和快慢横波慢度差的分布图，图中标识含义与图3相同。从图4中可以看出，辅助函数最小值出现在快慢横波方位附近，且在这两个方位附近随各向异性变化不明显，几乎所有各向异性大小都对应最小值，与其他方位对比非常明显。图5给出了相对于X向源不同方位的辅助快波波形，相对于X向源的(-9,6,21,36,51,66,81)°的方位相当于相对于快横波方位的(0,15,30,45,60,75,90)°方位。由图5可以看出辅助快波在与快波方位成0°~45°方位上波形幅值逐渐增大，45°~90°方位上波形幅值逐渐减小，在45°上幅值最大，0°和90°(快慢主轴方向)上波形幅值最小。而由式(2)可以看出，辅助快波波形与辅助慢波波形只存在正负号的差别，在幅值上相同，所以辅助慢波波形的随方位的变化规律与图5相同。因为在快慢主轴方向上幅值非常小，所以辅助函数在这两个方位上有最小值。

图6给出了综合函数和各向异性大小随角度和快慢横波慢度差的分布图。从图6中可以看出，综合目标函数在快横波方位171°附近，各地层各向异性大小周围有最小值，能够较为准确地反演出各向

异性大小和方位。但是这是主函数和辅助函数相互影响和均衡的结果，使得函数的对比度下降。图7给出了各向异性为0时主函数、辅助函数和综合函数的一维变化曲线，明显可以看出综合函数的对比度下降。且从图6可以看出综合目标函数变化规律不明显，寻找最小值的过程是一个跳跃寻找的过程，会存在一定的稳定性问题^[13]。

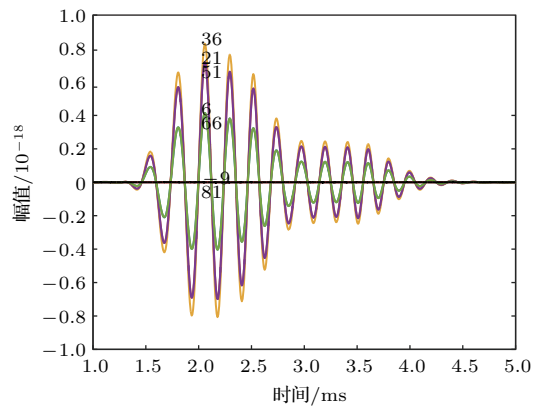


图5 相对XX不同方位的辅助快波波形

Fig. 5 Auxiliary fast waveforms of different azimuths relative to X-source direction

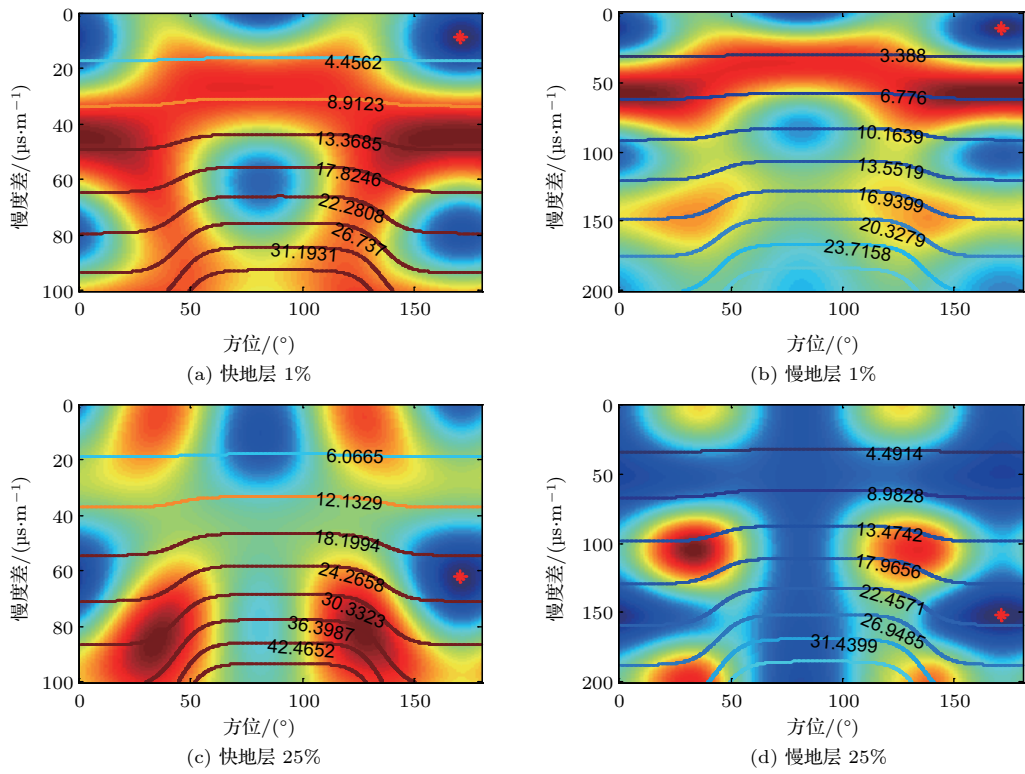


图6 综合函数分布图

Fig. 6 The distribution diagram of comprehensive function

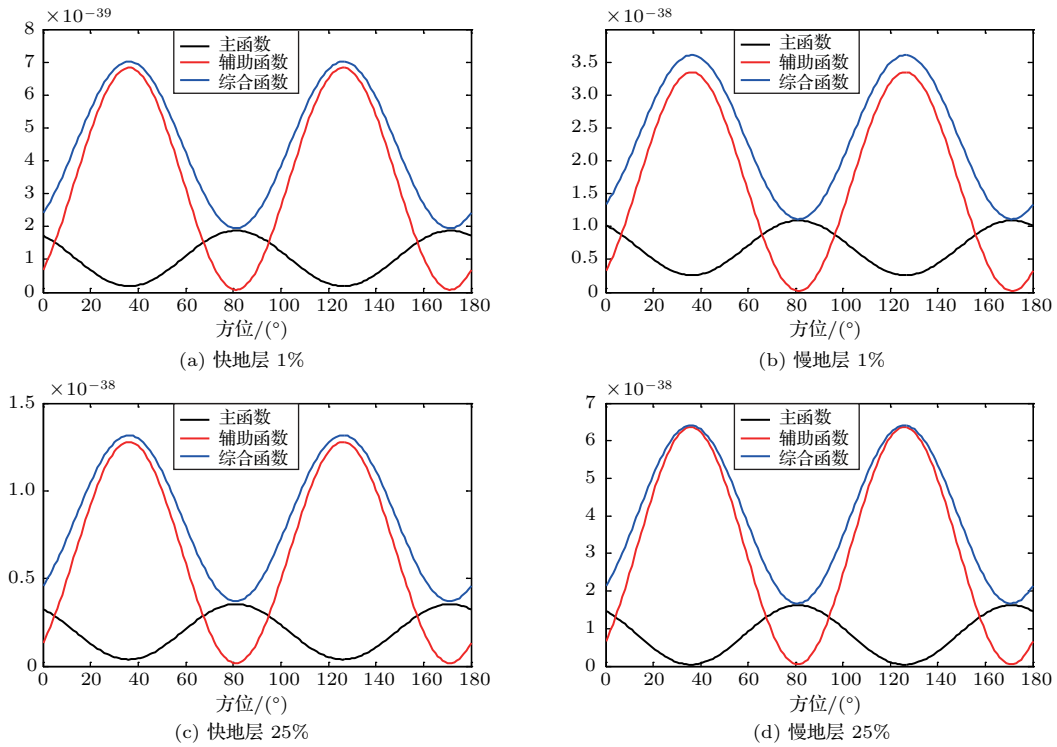


图7 $ani = 0$ 处三个函数的一维曲线

Fig. 7 The 1D curve of three objective function at $ani=0$

经过以上两种单独目标函数以及综合函数的对比分析,可以看出主函数在各向异性为0、与快慢横波方位成 45° 角方位上有最小值,在快慢横波方位各向异性真值附近有极小值,且该极小值小于慢横波方位的极小值。辅助函数无论各向异性大小,基本都在快慢横波方位取得最小值。综合函数结合以上两种目标函数,两个函数相互影响,能够较为准确地反演得到各向异性大小与方位,但是损失了对比度,且变化规律变得复杂,需跳跃寻找最小值,存在稳定性问题。所以可以根据主函数或者辅助函数的方位特性,首先确定各向异性方位,再利用主函数在快慢横波方位的极值特性进行各向异性反演,即分步反演各向异性。刘开明等^[13]就运用了分步反演的算法,但是该文中仍是运用了综合目标函数进行分步反演,损失了一定的对比度,单独采用主函数或者辅助函数来反演方位更加对比强烈。

4 结论

本文将联合反演各向异性的目标函数分成主函数和辅助函数两部分单独进行分析,并与综合函数结果进行比较,可以得出

(1) 主函数最小值出现在 45° 方位角、慢度差为0的位置。利用这一特性可单独反演方位角。主函数在快慢横波方位上地层的各向异性大小附近存在极小值,且小于慢横波方位上的极小值,该特性可用于确定快慢横波方位后,单独反演各向异性大小。由此,采用主函数进行分步反演能够得到各向异性大小和方位。

(2) 辅助函数目标函数最小值出现在快慢横波方位附近,且在这两个方位附近随各向异性大小变化不明显,因此辅助函数可单独用于快慢横波方位的反演。

(3) 综合函数是主函数和辅助函数的叠加,能够同时反演各向异性大小与方位,但是由于存在多极值且变化规律复杂,对优化算法有较强的依赖。

(4) 本文的数值模拟结果表明,主函数、辅助函数和综合函数在各向异性为0时,都在与快慢波方位成特定角度下有明显的极值,可以利用这一特性先进行方位反演。特别是辅助函数相对于主函数随方位角变化更明显,而且二者的极小和极大值出现的位置互补,综合函数变化趋势与辅助函数类似,但对方位的灵敏度下降。

参 考 文 献

- [1] Tang X M, Cheng C H A. Quantitative borehole acoustic methods[M]. San Diego: Elsevier Science Publishing Co. Inc., 2004.
- [2] 魏周拓, 范宜仁, 陈雪莲. 横波各向异性在裂缝和应力分析中的应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 217-224.
Wei Zhoutuo, Fan Yiren, Chen Xuelian. Application of shear wave anisotropy in fractures and in-situ stress analysis[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 217-224.
- [3] Tang X M, Chunduru R K. Simultaneous inversion of formation shear-wave anisotropy parameters from cross-dipole acoustic-array waveform data[J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1502-1511.
- [4] 陶果, Cheng C H, Toksoz M N. 应用正交偶极子测井资料测量EDA地层的横波各向异性[J]. 地球物理学报, 1999, 42(2): 277-286.
Tao Guo, Cheng C H, Toksoz M N. Measurements of shear-wave azimuthal anisotropy with cross-dipole logs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(2): 277-286.
- [5] 赵军, 蒲万丽, 张永忠, 等. 横波各向异性在碳酸盐岩裂缝性储层评价中的应用[J]. 测井技术, 2005, 40(2): 118-120, 184.
Zhao Jun, Pu Wanli, Zhang Yongzhong, et al. Application of shear wave anisotropy to evaluation of fractured carbonate reservoir[J]. Well Logging Technology, 2005, 40(2): 118-120, 184.
- [6] 张景和, 孙宗顺. 地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [7] Ellefsen K J, Cheng C H, Toks Z M N. Effects of anisotropy upon the normal modes in a borehole[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 89(6): 2597-2616.
- [8] Ellefsen K J, Cheng C H, Toks Z M N. Applications of perturbation theory to acoustic logging[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1991, 96(B1): 537-549.
- [9] Sinha B K, Norris A N, Chang S K. Borehole flexural modes in anisotropic formations[J]. Geophysics, 1994, 59(7): 1037-1052.
- [10] Cheng N, Cheng C H, Toksoz M N. Borehole wave propagation in three dimensions[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(6): 3483-3493.
- [11] 雷雨, 陈浩. 不同速度混合的阵列信号速度分析[J]. 应用声学, 2018, 37(2): 298-306.
Lei Yu, Chen Hao. The velocity analysis of mixed array waveforms with different velocities[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(2): 298-306.
- [12] Alford R. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilley, Texas[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1986. Society of Exploration Geophysicists, 1986: 476-479.
- [13] 刘开明, 唐晓明, 庄春喜. 交叉偶极各向异性快速处理新方法[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 690-695.
Liu Kaiming, Tang Xiaoming, Zhuang Chunxi. New method for cross dipole anisotropy fast processing[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 690-695.