

各向同性介质长偏移距地震同相轴动校正

尤建军^{1,2}, 陈 强³, 张超谟⁴, 常 旭²

(1. 中油测井技术有限公司, 北京 100101; 2. 中国科学院地质与地球物理所, 北京 100029;
3. 上海工程技术大学, 上海 200336; 4. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 荆州 434023)

摘 要 传统二阶动校正方法基于较小最大偏移距与目标层深度比和地震波沿直线传播假设, 进行长偏移距地震资料处理时, 这些假设不再成立. 高阶项动校正公式能提高长偏移距校正精度, 文中对几种典型的高阶项动校正方法进行了比较, 并提出了优化四阶、优化六阶动校正方法. 模型计算表明, 高阶项动校正方法能取得较常规动校正方法好的动校正结果, 但并非阶数越高动校正精度就越高; 在纵向速度变化剧烈时, 高阶动校正或优化高阶动校正方法一般不能适用于最大偏移距与目标层深度大于 3.5 的地震反射同相轴, 优化四阶和优化六阶动校正公式由于考虑了无穷大偏移距的影响, 具有更稳定、更加精确动校正效果, 适合于实际的各向同性长偏移距地震资料处理.

关键词 各向同性, 长偏移距离, 高阶动校正, 地震同相轴

中图分类号 P631 文献标识码 A 文章编号 1004-2903(2008)04-1173-06

NMO correction of long-spread seismic events in homogeneous and isotropic media

YOU Jian-jun^{1,2}, CHEN Qiang³, ZHANG Chao-mo⁴, CHANG Xu²

(1. China National Logging Corporation, Beijing 100101, China; 2. Institute of Geology and Geophysics China Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Computer Center Shanghai University of Engineer science, Shanghai 200336, China; 4. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract The second-order Normal moveout equation is based upon two hypotheses. They are the small offset and simple straight-ray model. These hypotheses are invalid when seismic events with long-spread are processed. Normal moveout formulae with higher-order terms can improve NMO precision. In this paper, we compare several higher-order NMO formulae and propose optimal fourth-order NMO formula and optimal sixth-order NMO formula. The numerical computation results show that higher-order formulae can get better NMO output and the NMO precision is not improved with higher values of the maximal order at all time, if vertical velocity gradient is strong. None of the formulae can achieve satisfying NMO result when the ratio of maximal offset to objective depth is more than 3.5. Optimal fourth-order and optimal sixth-order formulae are more steady and more precise and more appropriate for field seismic data processing because the influence of infinite offset is corrected in those formulae.

Keywords homogeneous and isotropic, long-spread seismic data, higher-order terms, normal-moveout correction, seismic events

0 引 言

随着广角勘探技术广泛应用及勘探目标深度增加, 长偏移距同相轴精确动校正成为地震资料精细处理的关键技术. 基于水平层状、各向同性、小偏移距假设的双曲动校方法不能适用于长偏移距地震同

相轴动校正处理. 当前工业上应用的地震数据处理方法均基于均匀各向介质假设, 研究更加精确的均匀各向同性介质长偏移距同相轴高阶动校正方法具有重要的现实意义. 早在 1969 年 Taner 和 Koehler^[1] 提出了基于泰勒展开的四阶动校正公式, Al-Chalabi^[2] 给出了多层模型时距曲线级数展开近似

收稿日期 2007-11-10; 修回日期 2008-02-20.

作者简介 尤建军, 男, 1977 生, 湖北黄冈人, 中国科学院地质地球物理所博士, 现就职于中油测井技术服务有限公司, 主要从事地震资料处理、综合解释和测井资料解释方面的研究工作. (E-mail: youjn2000@mail.iggcas.ac.cn)

式, H. HAKE^[3]给出了P波及SV波时距曲线的三项泰勒展开近似,并给出了各阶项系数的准确表达式, Castle^[4]提出了时移双曲动校正公式. 上述动校正公式都是基于泰勒近似,在较大偏移距时并不收敛. 本文在比较各种高阶动校正方法的基础上,提出了增加无穷大偏移距修正项的优化四阶和优化六阶动校正公式,通过比较五中动校正方法的应用效果,确定最稳定、最精确的长偏移距动校正方法,以期对实际长偏移距地震资料处理具有一定的指导意义.

1 长偏移距动校正公式

常规DIX双曲动校正公式实际上忽略了时距函数泰勒展开式的高阶项,仅保留了前两项,双曲动校正公式在 $x \rightarrow 0$ 时能精确描述各向同性介质地震同相轴的时距关系,进行长偏移地震同相轴动校正时必须考虑高于二阶的项,文中用到的几种高阶动校正公式及优化高阶动校正公式如下:

(1) 常规DIX双曲动校正公式

$$t^2(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{\text{rms}}^2}, \quad (1)$$

其中 t_0 :为地震波零偏移距双程传播时间, x :偏移距, V_{rms} :均方根速度.

(2) 高阶项动校正公式

$$t^2(x) = C_0^2 + C_2 x^2 + C_4 x^4 + C_6 x^6 + \dots \quad (2)$$

$$C_0 = t_0^2, \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{1}{\mu_2}, \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{\mu_2^2 - \mu_1}{4t_0^2 \mu_2^4}, \quad (5)$$

$$C_4 = \frac{2\mu_2^4 - \mu_2 \mu_6 - \mu_2^2 \mu_4}{t_0^4 \mu_2^7}, \quad (6)$$

$$\mu_j = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta t_k V_k^j}{\sum_{k=1}^N \Delta t_k}, \quad (7)$$

式中 Δt_k :第 k 层的垂直旅行时, V_k :第 k 层层速. 本文使用式(2)的四阶和六阶式构成四次项动校正公式和六次项动校正公式.

(3) 时移双曲公式

$$t = \tau_s + \left(\tau_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

$$\tau_0 = \frac{t_0}{S}, \quad (9)$$

$$\tau_s = \tau_0(S-1), \quad (10)$$

$$v^2 = SV_{\text{nmo}}^2, \quad (11)$$

$$S = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}. \quad (12)$$

(4) 优化四次项动校正公式

上面三种动校正公式均是从地震同相轴时距曲线泰勒展式导出的,不能适用于最大偏移距同目标层深度比很大的情况,对四阶、六阶动校正公式按照Tsvankin^[5]提出的对偏移距趋近无穷大的影响增加修正项进行补偿的方法,得出优化四次、六次动校正公式.

$$t^2(x) = C_0 + C_2 x^2 + \frac{C_4 x^4}{1 + C^* x^2}, \quad (13)$$

$$C^* = \frac{C_4}{\frac{1}{V_k^2} - C_2}. \quad (14)$$

(5) 优化六次项动校正公式

$$t^2(x) = C_0 + C_2 x^2 + C_4 x^4 + \frac{C_6 x^6}{1 + C^* x^4}, \quad (15)$$

$$C^* = \frac{C_6}{\frac{1}{V_k^4} - C_4}. \quad (16)$$

2 高阶项系数的确定

运用高阶项动校正公式进行长偏移距地震资料动校正时,要从地震同相轴上确定两个或两个以上的系数,这与常规的DIX公式进行动校正是不同的,用一维相似扫描方法不能同时确定两个或两个以上的参数,所以要采用多维相似扫描法确定这些系数.但三维以上的相似扫描需要大量的计算机时,这无论是在处理时间上还是在处理成本上都难以满足实际的需要,而且对长偏移距地震同相轴时距关系描述精度取决定性影响的是动校正速度,因此本文采用二维相似系数扫描的方法确定高阶项系数.对于有两个以上的待定参数,首先使用二维相似扫描的方法确定动校正速度和四阶项系数,然后使这些系数不变化,分别对更高阶系数进行单维扫描分析,对于优化或修正公式中的优化或修正系数用前面已经取得的系数计算得到.二维相似扫描法的相似系数定义如下:

$$S(t_0, V_{\text{nmo}}, C_i) = \frac{\sum_{t'_0 = t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} \left[\sum_{x=x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} F(x, t) \right]^2}{M \sum_{t'_0 = t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} \sum_{x=x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} F^2(x, t)}, \quad (17)$$

式中: M 为cmp道集的道数, $F(x, t)$ 是沿非双曲走时曲线的地震同相轴振幅, S 是计算的相似系数.已

知 t_0 ,沿动校正公式(如方程(15))描述的走时曲线轨迹对一定范围内的 V_{nmo} 和 C_i 按照方程(15)扫描相似系数,计算窗长为 T ,所有这些相似系数中最大值所对应的 V_{nmo} 和 C_i 就为反演得到的最佳参数.

3 模型算例及比较分析

为了研究上述几种方法对均匀各向同性介质长偏移距地震同相轴时距曲线描述的精度,对图 1 所示的速度模型正演的长偏移地震记录(图 2),用上述的动校正方程分别进行动校正处理,得到的动校正结果如图 3~图 9 所示.该模型第一层深度为 1000 m,第二层深度为 2000 m,第三层深度为 3000 m,最大偏移距为 9000 m,最大偏移距与各层深度的比分别为

为 9.0、4.5、3.

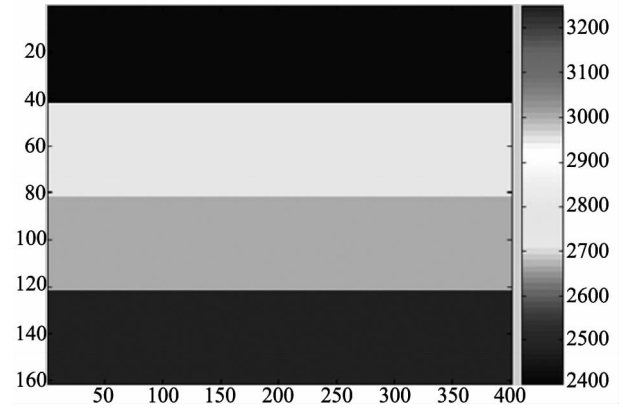


图 1 多层速度模型

Fig. 1 Multi-Layered Velocity model

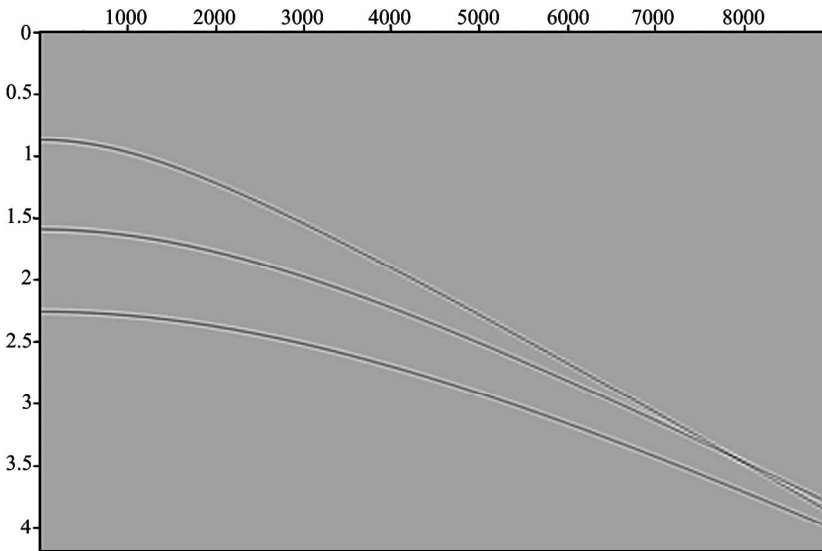


图 2 CMP 道集

Fig. 2 CMP Gathers

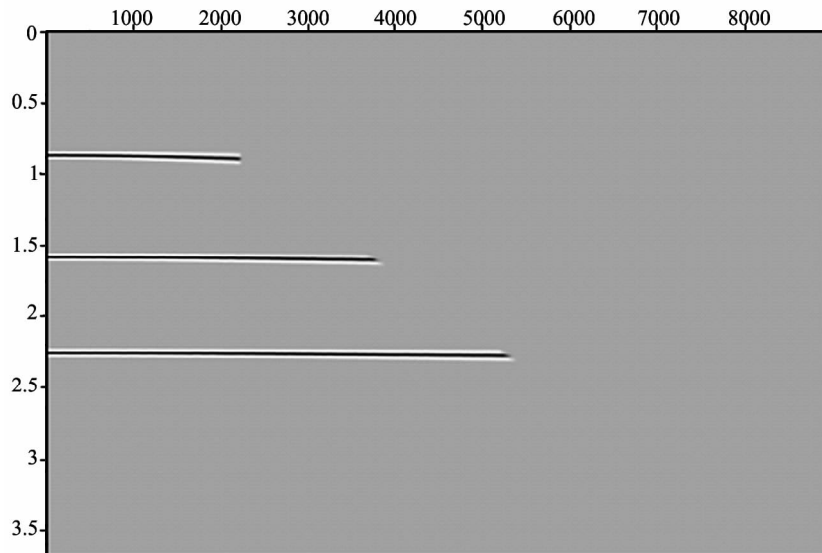


图 3 传统动校正结果(150%切除)

Fig. 3 Conventional NMO correction (with 150% muting)

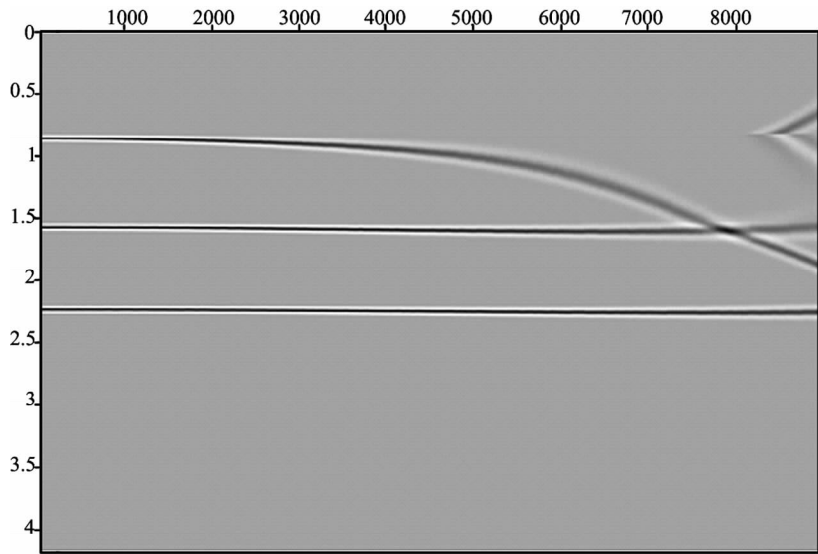


图 4 传统动校正(不加切除)

Fig. 4 Conventional NMO correction (No muting)

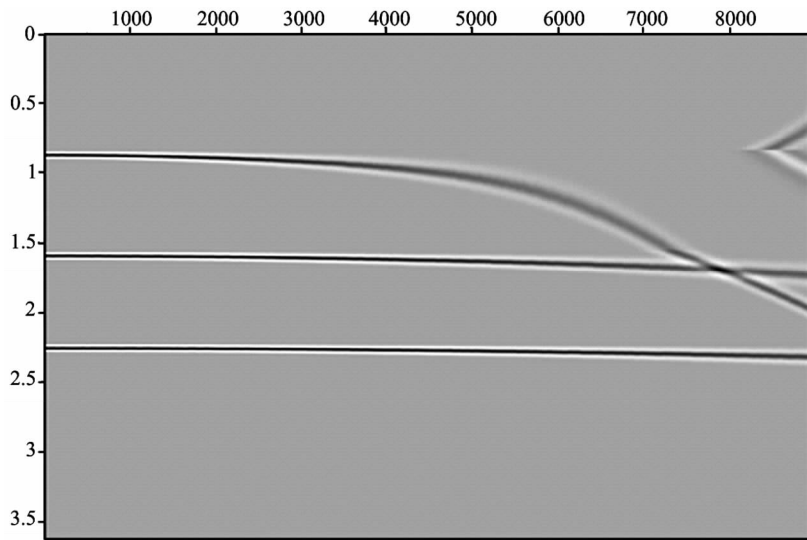


图 5 四阶动校正

Fig. 5 Four-order NMO correction

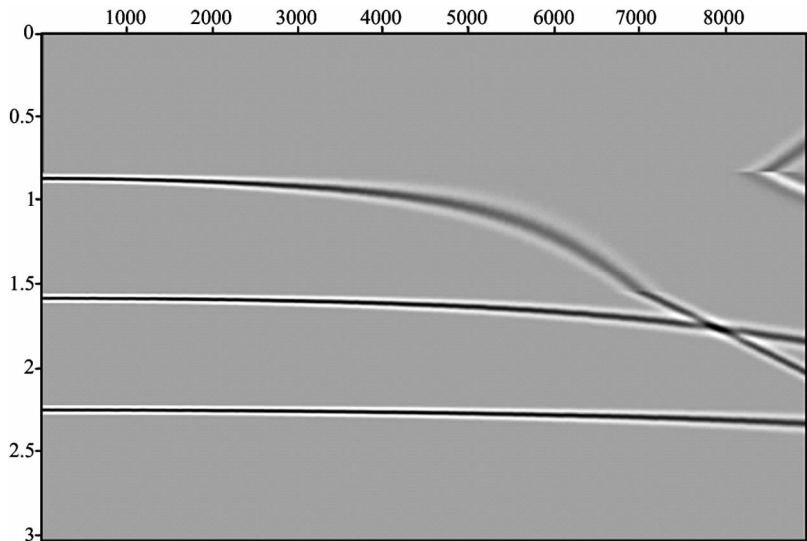


图 6 六阶动校正

Fig. 6 Six-order NMO correction

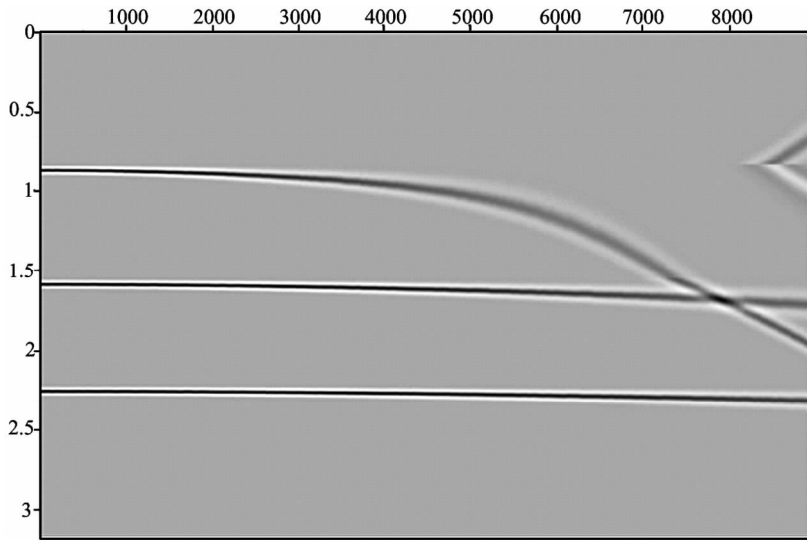


图 7 四阶优化动校正

Fig. 7 Four-order optimal NMO correction

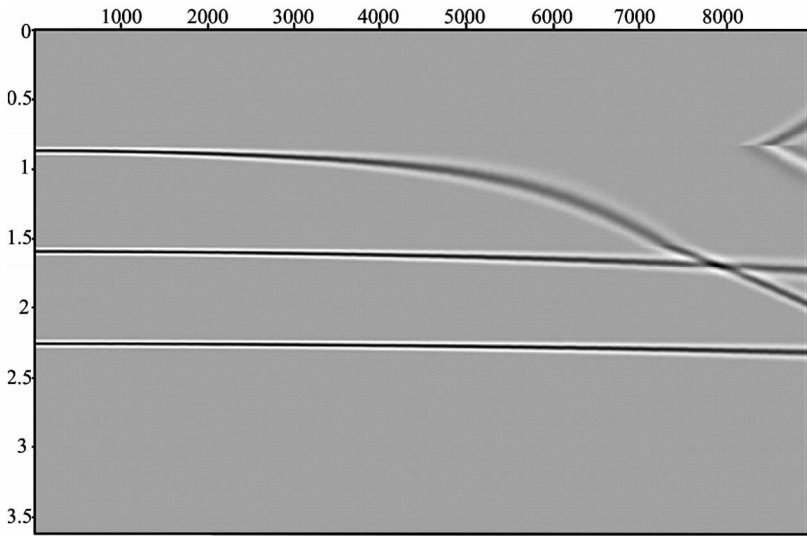


图 8 六阶优化动校正

Fig. 8 Six-order optimal NMO correction

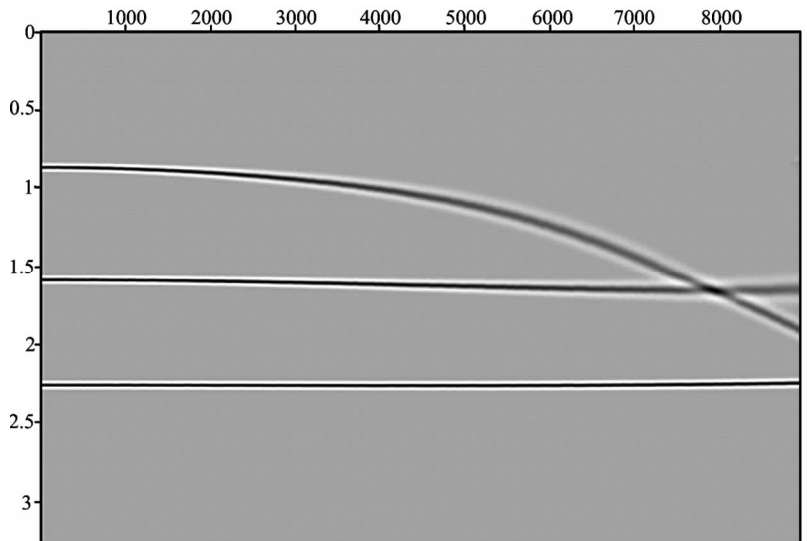


图 9 时移双曲动校正

Fig. 9 Time-shifted hyperbola NMO correction

从上面的动校正结果可以看出:

(1)当最大偏移距大于目标同相轴深度时,双曲动校正方法不能校正同相轴;

(2)对长偏移距同相轴采用非双曲方法能取得较传统的DIX动校正方法更好的动校正效果,但并非双曲动校正公式的阶数越高越好,总体来说优化四次项和优化六次项动校正公式更加稳定,能取得优的动校正效果;

(3)时移动双曲线动校正公式仅能适用于最大偏移距同目标深度比不大于2.0的同相轴,在更大的偏移距处出现明显的过校正或校正不足;

(4)第一层纵向速度变化剧烈的模型,当最大偏移距与目标层深度的比大于3.5时,仅用高阶动校正公式无法取得满意的动校正结果。

4 结 论

最大偏移距与目标层深度比大于1.0时,常规动校正方法会产生严重的远道动校拉伸,均匀各向同性介质长偏移地震同相轴必须采用非双曲动校正方法进行动校正处理。本文通过对常规DIX双曲动校正公式、四阶动校正、六阶动校正、优化四阶、优化六阶、时移双曲动校正公式动校结果进行对比分析得出:优化四阶、优化六阶动校公式进行长偏移地震资料动校正处理时最稳定,能取得最好的动校正结果,适用于实际均匀各向同性长偏移距资料的动校正处理。

参 考 文 献 (References):

[1] Taner, Koehler F. Velocity spectra digital computer derivation and application of velocity functions[J]. *Geophysics*, 1969, 34(6): 859~881.

[2] Al-Chalabi M. Series approximation in velocity and travelt ime computation[J]. *Geophys Prosp.*, 1973, 21: 783~795.

[3] Hake H. Three-Terms Talyor series for $t^2 - x^2$ curves of P- and S-wave layered transversely isotropic Ground[J]. *Geophys Prosp.*, 1984, 32: 828~850.

[4] Richard Castle. Theory of normal moveout[J]. *Geophysics*, 1994, 59(6): 983~999.

[5] Tsvankin, Thomsen. Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media[J]. *Geophysics*, 1994, 59(8): 1290~1304.

[6] 杜丽英, 刘国明, 等. VTI 介质地震反射波合成记录的方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 58~64.
Du L Y, Liu G M, *et al.* The method of seismic and reflection wave synthetic seismogram in VTI media[J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(2): 58~64.

[7] 刘伊克, 常旭, 等. 基于波射线路径偏移压制多次波[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 697~701.
Liu Y K, Chang X, *et al.* Multiple removal by wavepath migration

[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 697~701.

[8] 常旭, 刘伊克. 地震记录的广义分维及其应用[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(6): 839~846.
Chang X, Liu Y K. The generalized fractal dimension of seismic records and its applications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(6): 839~846.

[9] 刘伊克, 常旭. 三维复杂地形近地表速度估计及地震层析静[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(2): 826~832.
Liu Y K, Chang X. Estimation of near-surface velocity and seismic tomographic static corrections[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(2): 826~832.

[10] 常旭, 王辉. 地震 CT 法隐伏矿脉空间定位研究[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(3): 408~415.
Chang X, Wang H. Locating subsurface aurifeours quartz vein by means of seismic tomography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(3): 408~415.

[11] 刘伊克, 常旭. 盆地模拟水动力油气二次运移隐式多重网格法[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(3): 342~348.
Liu Y K, Chang X. The implicit multigrid method for the secondary hydrocarbon migration driven by water. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(3): 342~348.

[12] 尤建军, 常旭, 等. VTI 介质长偏移距非双曲动校正公式优化[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1770~1778.
You J J, Chang X, *et al.* Optimization of nonhyperbolic moveout correction equation of long-offset seismic data in VTI media[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 1770~1778.

[13] 吴国忱, 梁锴. VTI 介质 qP 波方程高精度有限差分算子[J]. 2007, *地球物理学进展*, 22(3): 896~904.
Wu G C, Liang K. High precision finite difference operators for qP wave equation in VTI media[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(3): 896~904.

[14] 王维红, 裴江云, 张剑锋. 加权抛物 Radon 变换叠前地震数据重建[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 851~859.
Wang W H, Pei J Y, Zhang J F. Prestack seismic data reconstruction using weighted parabolic Radon transform[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(3): 851~859.

[15] 丁继才, 常旭, 刘伊克, 汪长永. 反射地震数据的逐层波形反演[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 574~580.
Ding J C, Chang X, Liu Y K, Wang C Y. Layer by layer waveform inversion of seismic reflection data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 574~580.

[16] 张赛民, 周竹生, 陈灵君, 周惠群. 对旅行时进行抛物型插值的地震射线追踪方法[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(1): 43~48.
Zhang S M, Zhou Z S, Chen L J, Zhou H Q. Seismic ray-tracing method of applying parabolic Interpolation to travel-time[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(1): 43~48.

[17] 李信富, 李小凡, 武晔. 分形理论在地震学中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 411~417.
Li X F, Li X F, Wu H. Application of fractal theory in seismology[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 411~417.

[18] 冯英杰, 杨长春, 吴萍. 地震波有限差分模拟综述[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 487~491.
Feng Ying-jie, Yang Chang-chun *et al.* The review of the finite-difference elastic wave motion modeling[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 487~491.