

doi: 10.11720/wtyht.2017.1.22

赵小龙, 吴国忱. 基于非稳态匹配的角度域叠前道集去调谐方法[J]. 物探与化探, 2017, 41(1): 141-146. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.22>
Zhao X L, Wu G C. A non-stationary match method for detuning pre-stack seismic gather in incident angle domain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(1): 141-146. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.22>

基于非稳态匹配的角度域叠前道集去调谐方法

赵小龙¹, 吴国忱^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 海洋国家实验室 海洋矿产
资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 地层调谐效应改变了不同偏移距处反射波的干涉模式, 使得远偏移距数据振幅和频率信息发生畸变, 将会降低 AVO/AVA 分析及反演的置信度和分辨率。文中首先给出了调谐作用下反射波合成记录, 通过正演模拟说明了调谐对叠前道集的影响。考虑到不同地层厚度下调谐效应的差异性, 借助局域 Lamoureux 窗实现地震数据的自适应分解, 利用角度数据之间的差异, 构建了角度域地震数据的非平稳匹配目标函数, 形成了非平稳匹配去调谐方法, 实现了叠前道集的振幅和波形拉伸校正。本文方法在实际应用中取得了较好的效果, 能够有效地改善大角度地震数据品质, 为储层预测与流体识别奠定了数据基础。

关键词: 调谐效应; 波形拉伸; 非稳态分解; 匹配算子

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2017)01-0141-06

0 引言

对于零偏移距地震数据, 地层顶底反射波相互干涉, 引起振幅和频率等性质变化, 可以利用调谐振幅或频率信息估计地层厚度和识别尖灭线等^[1-2]。对于叠前地震资料, 随着偏移距的增加, 所接收到相邻界面反射波的旅行时时差减小, 可等效成一个类“楔形体”, 发生与偏移距和入射角度有关的调谐效应^[3-4]。同时, 叠前道集经过动校正或成像后, 波形会发生与偏移距有关的拉伸畸变, 使得地震数据频率向低频移动。

叠前道集数据的调谐作用和波形拉伸将会降低后续 AVO/AVA 分析与反演的可靠性和精度^[5-7]。Zhang 等^[8]通过匹配追踪算法实现了无拉伸动校正, 能够解决同相轴交错的道集动校正问题。Zhu^[9]为了避免成像后大角度地震数据拉伸, 给出了无拉伸成像条件。新的处理技术从方法本身避免了波形拉伸, 但尚未推广到大范围工业应用, 发展消除 AVO 调谐和波形拉伸的后处理方法尤为重

要^[10-15]。

刘仕友等人^[16]对叠前 CRP 道集振幅和频率特征进行优化处理, 拓宽了道集可利用的角度范围, 大角度资料参与反演提高了密度反演的稳定性。周鹏等人^[17]通过不同角度子波与参考道子波的振幅谱差异, 求取了简化子波拉伸因子, 进而改善了动校正拉伸引起的远道频率降低现象。李芳等人^[18]假设地层顶底弹性性质微小变化, 实现了相位拟合法去调谐方法, 取得了良好效果。Perez 和 Marfurt^[19]构建了稳态谱整形算子, 消除了共角度成像道集拉伸畸变, 但是算子仅与入射角有关。

考虑地震数据具有的非稳态特征^[20-21], 上述求取稳态匹配算子的方法, 应用到物性变化剧烈的地区存在一定局限性。Castoro 等^[22]给出了一种时变频率域滤波方法, 处理动校正拉伸问题, 但不能实现地震数据的自适应分解, 处理效果会受时窗影响。Lamoureux 时窗(下文简称为 L 时窗)由 CREWS 研究组提出^[23], 比高斯窗具有更好的局域特性, Wang 等^[24]给出了一种基于自适应优化局域 L 时窗(或称分子窗)反褶积方法, 戴永寿等人^[25]对局域 L 时窗

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2016-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)重大专项(2013CB228604); 国家自然科学基金-石油化工基金联合重点项目(U1562215)

作者简介: 赵小龙(1989-), 男, 在读博士研究生, 现从事地球物理理论与方法方面的研究工作。Email: xlzhaoupc@gmail.com

求取的优化过程进行了改进。Xie 和 Liu^[26] 提出了振幅—频率分配方法,利用地震振幅和频率信息,将非平稳地震分解到多个平稳时段,并分时段进行提高分辨率处理,获得了较好的应用效果。

文中首先给出了含调谐效应的反射波合成记录,通过数值模拟分析了调谐作用与波形拉伸对叠前道集数据时频特征的影响,分析了不同地层厚度引起的调谐效应相异,说明去调谐处理工作需要以非稳态形式展开。其次,笔者借助局域 L 时窗实现了地震数据的自适应分解,得到了各个相对平稳时段内的角度道集数据。最后,针对不同局域 L 时窗段内角度道集数据,构建了非平稳匹配目标函数,优化求解得到非稳态匹配算子,将非平稳匹配算子作用到角度道集,消除了地层调谐引起的道集振幅和波形畸变,实现了叠前角度道集非平稳去调谐处理。实际数据处理结果展示了本文方法具有良好的应用效果,改善了中小角度地震数据与大角度地震数据对应性,部分角度叠加数据振幅和分辨率得到改善,砂体展布更为清晰。

1 含调谐效应的反射波记录

由于地层顶底反射波在不同偏移距处的正常时差不同,随着偏移距的增加,顶底反射波逐渐靠近,导致波的干涉模式发生变化,原本在中小偏移距

(中小角度)道集可分辨的地层在远偏移距(大角度)道集变得不可区分。假设炮—检排列方向性与偏移距无关,并忽略上覆地层的粘弹性衰减和透射影响,对于入射角为 θ 的角道集 $\bar{s}(\theta, t)$ 可以近似为:

$$\bar{s}(\theta, t) = \frac{1}{\alpha_\theta} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{r}(\theta, f) \hat{w}(f/\alpha_\theta) e^{i2\pi ft} df, \quad (1)$$

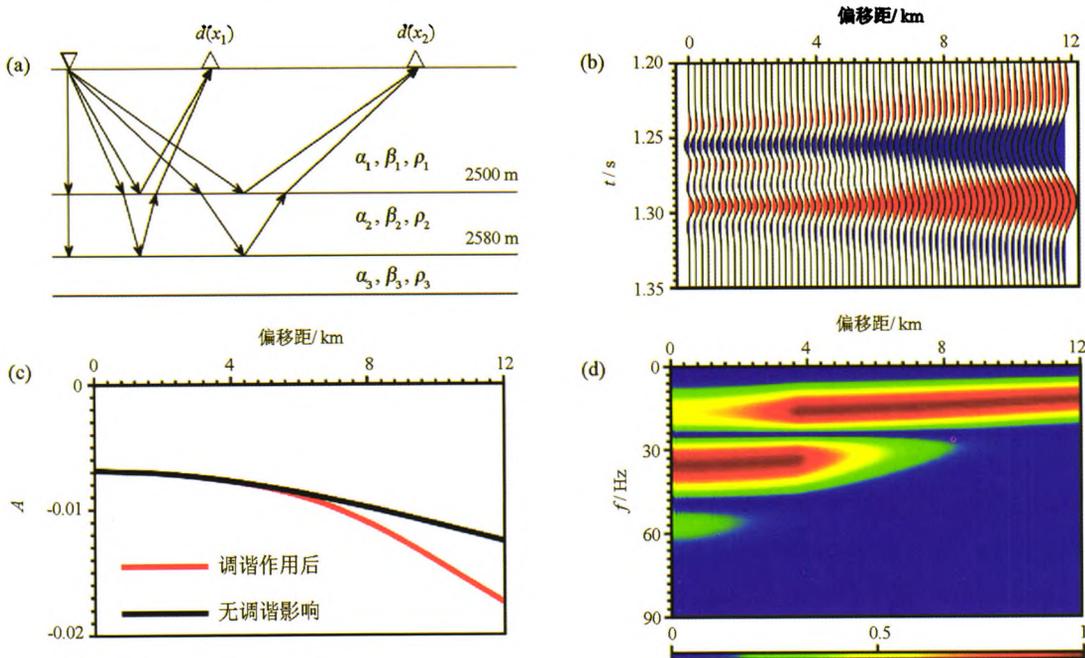
其中: $\bar{\cdot}$ 记作受调谐和拉伸作用; $\hat{\cdot}$ 记作傅里叶变换后; $\hat{r}(\theta, f)$ 和 $\hat{w}(f)$ 分别表示为傅里叶变换后的角度反射系数和子波; α_θ 为与入射角有关的拉伸因子。

由式(1)可以推导出去调谐作用后的角道集 $\bar{s}(\theta, f)$:

$$\bar{s}(\theta, f) = \bar{s}(\theta, f) \frac{\hat{w}(f)}{\bar{w}(f)} = \bar{s}(\theta, f) \hat{h}(f), \quad (2)$$

式(2)是实现去调谐的正演方程,这里 $\bar{\cdot}$ 记作去调谐后, $\bar{w}(f)$ 为调谐子波, $\hat{h}(f)$ 为引入的去调谐算子,在下文中称之为匹配算子。为了更好地认识调谐效应对叠前道集的作用,笔者通过正演模拟进行分析,对实际道集的处理有指导意义。

选取一维三层模型实验,如图 1a 所示,纵、横波速度和密度分别为: $\alpha_1 = 4 \text{ km/s}, \beta_1 = 1.76 \text{ km/s}, \rho_1 = 2.4 \text{ kg/m}^3$; $\alpha_2 = 3.95 \text{ km/s}, \beta_2 = 2.528 \text{ km/s}, \rho_2 = 2.0 \text{ kg/m}^3$; $\alpha_3 = 4 \text{ km/s}, \beta_3 = 1.76 \text{ km/s}, \rho_3 = 2.4 \text{ kg/m}^3$; 最大偏移距为 12000 m,使用 30 Hz 的 Ricker 子波。经动校正得到如图 1b 所示的 CMP 道集,随着偏移距的增加,地层顶底对应的反射波旅行时差逐渐减小,



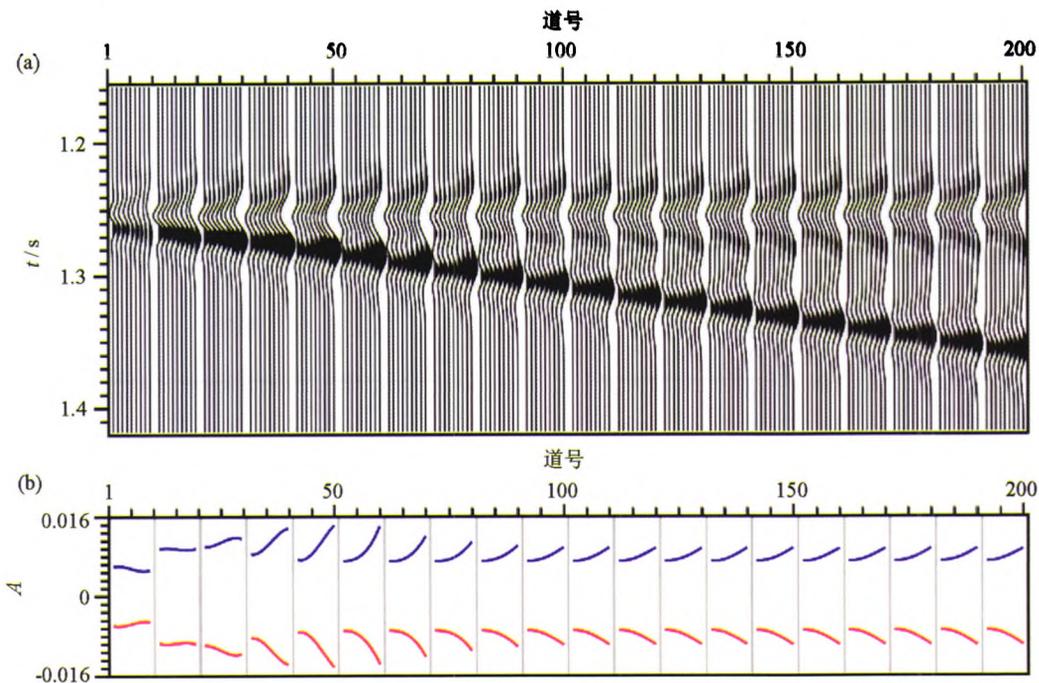
a—三层模型及传播示意;b—动校正后的 CMP 道集;c—调谐作用下的 AV0 曲线;d—图 b 中各道对应的归一化振幅谱

图 1 三层模型 AV0 调谐分析

在大偏移距处顶底反射耦合成子波的一阶时间导数,形成了这种“楔形体”的调谐现象,同时波形严重拉伸,小偏移距可见的同相轴在大偏移距处缺失。从图 1c 可以看到,叠前道集表现出了典型的第三类 AVO 现象,且与偏移距有关的薄层调谐加剧了大偏移距处的 AVO 异常,引起反射波产生与地层反射系数无关的振幅异常。大偏移距地震数据受动校正拉伸影响严重,当偏移距大于 5 km 以后,频带变窄,主频率向低频移动,部分陷频消失(图 1d)。

同时,叠前道集受调谐效应的影响程度还与地层厚度有关,这里采用楔形体模型进行实验,模拟出不同地层厚度下的叠前 CMP 道集,厚度从 1 m 以

10 m 递增至 200 m,模型速度和密度参数与图 1 模型一致,最大偏移距为 8 km,使用 30 Hz 的 Ricker 子波。从图 2a 中叠前 CMP 道集看出,随着地层厚度的减小,顶底界面逐渐接近,相同偏移距上的道集受调谐效应的影响越显著。图 2b 为在 CMP 道集中拾取的 AVO 曲线,在地层厚度较大处,可以看到稳定的第三类 AVO 响应。但在接近调谐厚度附近时,AVO 异常增强,在小于调谐厚度时,AVO 异常减弱。受调谐效应的影响,AVO 异常与地层有关,在调谐厚度前后,变化模式不同。同时,可以看到大偏移距处动校正后数据波形拉伸,但动校正没有改变反射振幅大小。



a—CMP 道集 ;b—拾取 AVO 曲线,负振幅值为楔形体顶界面 AVO 曲线,正反射振幅值为底界面 AVO 曲线

图 2 楔形体模型正演及 AVO 分析

2 方法原理

2.1 局域 L 时窗分解

通过以上分析可知,当地层厚度横向变化剧烈,就难以通过一个稳态过程去描述叠前道集所受的调谐作用,同时受地层吸收等因素,使得地震数据具有非稳态特征。因此,笔者给出了一种自适应的非稳态叠前道集去调谐方法。非稳态分解后的地震记录 $\hat{s}_L(\tau_k, f)$ 可以表示为:

$$\hat{s}_L(\tau_k, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} L(t - \tau_k) s(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (3)$$

式中: $s(t)$ 为地震数据, $L(t)$ 为局域 L 时窗, τ 是 L 窗的时移量, $k=1, \dots, K$ 为 L 时窗个数。

假若按基本的 L 时窗进行分解,得到的结果过于冗余,不利于后续处理过程的质量监控。地层的沉积具有周期性和旋回性,不整合或岩性突变分界面存在,使得地震波在传播过程表现出局部稳态特征。笔者借鉴 Wang 等人给出的局域 L 时窗自适应构建方法^[24],实现了地震数据的非稳态分解,为后续非稳态匹配去调谐奠定了基础,具体方法不再详述,实现过程将在下一节中以实例形式介绍。

2.2 角度域叠前道集非稳态匹配去调谐

反射系数随入射角的变化反映了地层参数相对特征,调谐效应会使反射波发生干涉,随着观测孔径的增大,反射振幅失真,波形拉伸严重。中小角度地震数据受调谐影响程度小,将中小角度范围的叠加数据作为参考数据,根据式(2)构建非稳态角度匹

配目标函数:

$$J(\hat{h}_L(\tau_k, f)) = \|\hat{h}_L(\tau_k, f)\hat{s}_L(\theta_1, \tau_k, f) - \hat{s}_L(\theta_2, \tau_k, f)\|_2 + \lambda R(\hat{h}_L(\tau_k, f)) \quad (4)$$

式中: $\hat{h}_L(\tau_k, f)$ 为非平稳匹配算子, $J(\hat{h}_L(\tau_k, f))$ 为目标函数, $\hat{s}_L(\theta_1, \tau_k, f)$ 为根据式(3)得到局域 L 时窗分解后的大角度数据, 同样地, $\hat{s}_L(\theta_2, \tau_k, f)$ 为分解后的小角度数据, $R(\hat{h}_L(\tau_k, f))$ 为正则约束项, λ 为约束权值。

由地震数据本身的时频特征, 能够自适应构建地震数据相对平稳时间段所对应的局域 L 时窗, 从式(4)中可以看到, 非稳态匹配是在 K 个 L 时窗段内实现的。从而, 大角度数据与小角度数据间非稳态匹配算子的求取就等价于解如下问题:

$$\hat{h}_L(\tau_k, f) = \operatorname{argmin}\{J(\hat{h}_L(\tau_k, f))\} \quad (4)$$

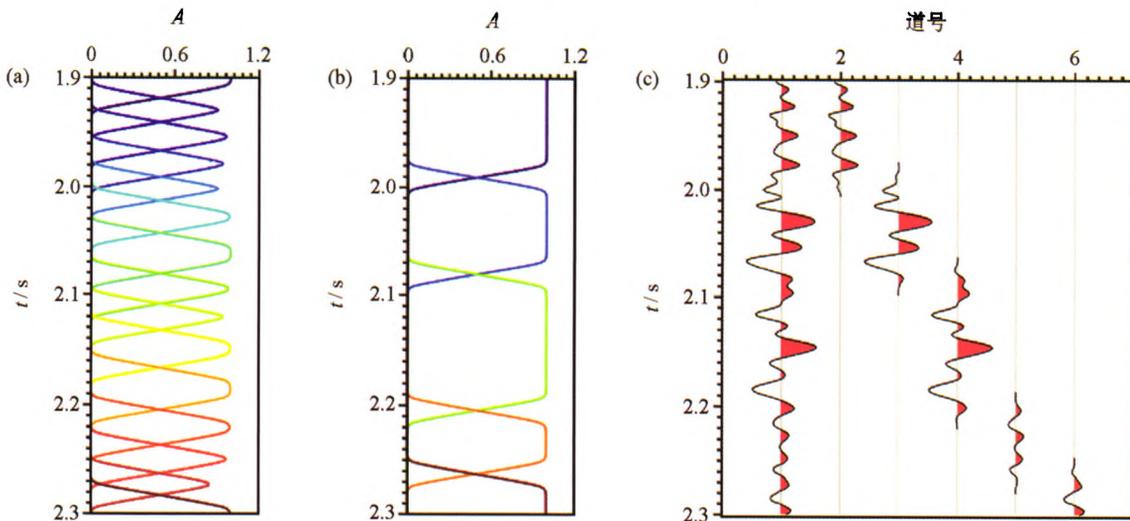
$\operatorname{argmin}\{\cdot\}$ 表示使得目标函数最小所对应的参数, 即待求解的非平稳匹配算子 $\hat{h}_L(\tau_k, f)$ 。通过优化求解公式(4), 即可得到非稳态匹配算子, 再将不同局域 L 时窗段地震数据代入式(2), 就得到去调谐后

角度地震数据。

3 实际应用

研究工区发育滩坝砂储层, 砂体厚度薄, 目标层对应的入射角度范围为 $6^\circ \sim 42^\circ$, 叠前道集的 AVO/AVA 特征与井旁合成叠前数据差异较大, 且大角度地震数据分辨率较低, 储层预测及流体识别难度较大。

首先, 需要进行局域 L 时窗自适应分解, 在每一个角度道集中, 以中小角度叠加数据为参考道, 根据数据包络变化特征确定初始局域 L 时窗(图 3a), 再通过不同初始局域 L 时窗分解后地震数据的频率相似度, 确定出最终的局域 L 时窗(图 3b), 图 3c 展示了优化局域 L 时窗分解后的中小角度叠加数据, 其中第一道为输入数据, 最后一道为分解重构后地震数据与输入数据的残差, 可以看到分解数据能够完全重构回原始数据。5 个局域 L 时窗分解后的地震数据具有的不同特征, 与地层对应关系一致。

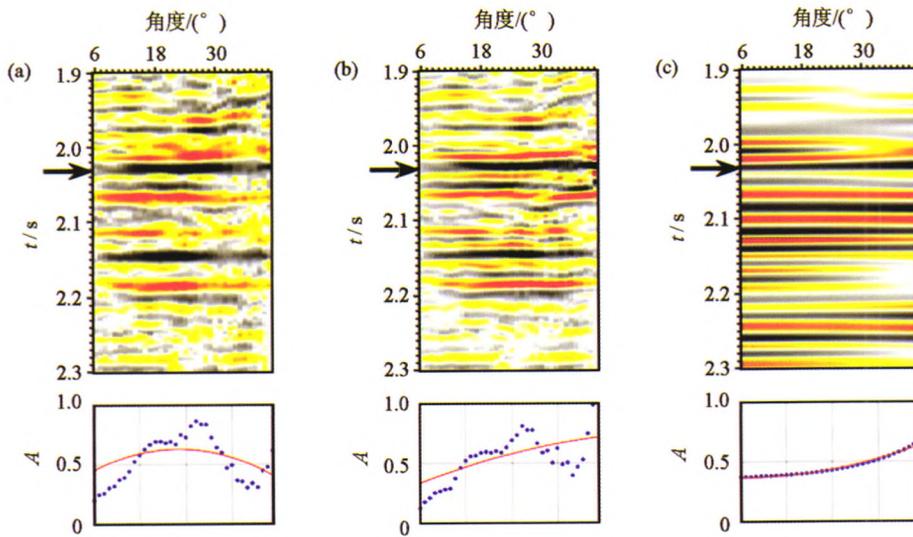


a—初始局域 L 时窗; b—根据频率相似度优化后的局域 L 时窗; c—数据分解结果, 最后一道为重构数据与输入数据的残差

图 3 局域 L 时窗与地震数据分解

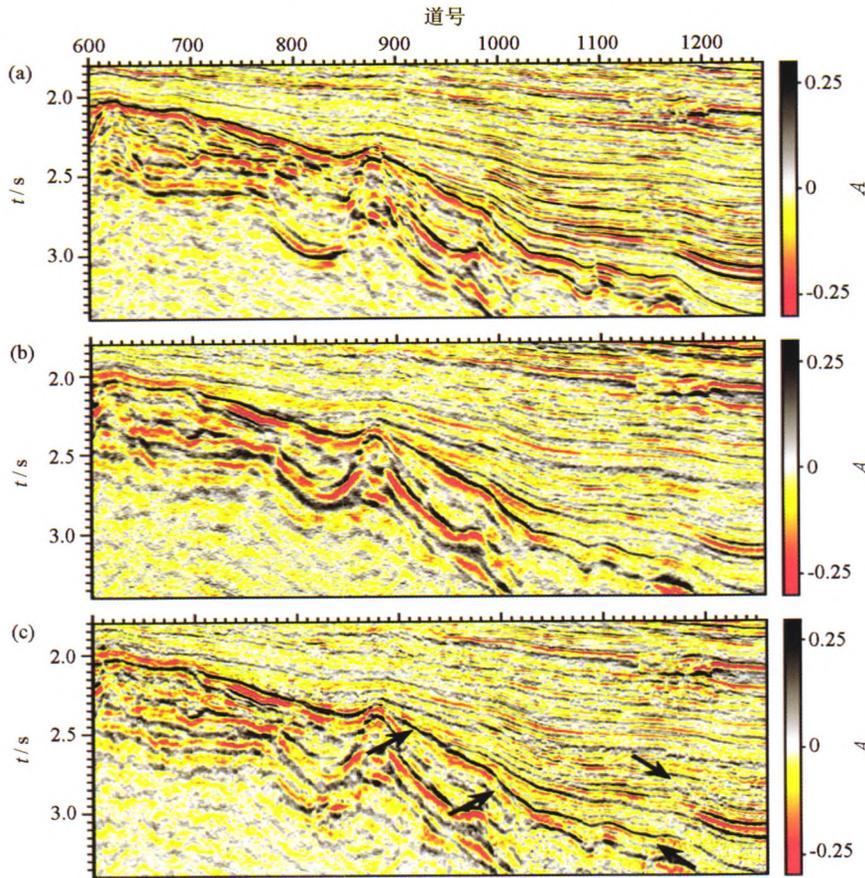
图 4a 展示目的层段内的角度道集数据, 箭头所指位置为储层底界面反射, 在原始道集中拾取的 AVA 曲线先增大再减小, 井旁合成叠前道集的 AVA 曲线(图 4c)表现出了第三类低阻砂岩底, 实际道集与合成记录不符。使用中小角度叠加数据确定的局域 L 时窗, 对角度道集进行分解并求解非稳态匹配算子, 进行去调谐处理, 得到处理后的道集(图 4b), 可以看到目的层对应的 AVA 曲线得到校正, 且同轴横向一致性和分辨率得到改善。

将处理前后的角度道集进行部分叠加, 图 5a 为小角度叠加数据, 叠加范围为 $6^\circ \sim 17^\circ$, 图 5b 为处理前的大角度叠加数据, 叠加范围为 $30^\circ \sim 41^\circ$ 。对比图 5a、b, 可以看到, 大角度叠加数据品质要远低于小角度叠加数据, 两者对应性较差。经过本文处理后得到的大角度叠加数据如图 5c 所示, 大角度地震数据的振幅特征和分辨率得到改善, 图中箭头所指为恢复的小砂体及砂体尖灭更为清晰, 与小角度数据对应。



a—处理前道集;b—处理后道集;c—井旁合成道集

图4 处理前后的叠前角度道集及目的层底 AVA 曲线



a—原始的小角度叠加数据;b—处理前的大角度叠加数据;c—处理后的大角度叠加数据

图5 处理前后的部分角度叠加数据对比

4 结论与认识

针对消除调谐效应对叠前道集影响这一问题,从正演模拟出发,利用角度域地震数据的差异,提出了非稳态匹配去调谐的方法,得到以下结论与认识:调谐效应将会降低叠前道集品质,后续去调谐的方

法是必要的,特别是目标面向储层与流体表征的任务。调谐程度与地层厚度有关,以及地震数据受吸收衰减作用,使得去调谐应以非稳态或局部稳态形式进行。笔者利用不同局域 L 时窗内叠前角度道集间的匹配关系,优化求取的非稳态匹配算子,实现了角度道集的非平稳去调谐处理。基于局域 L 时窗的非稳态匹配去调谐方法具有一定的应用效果,

下一步研究工作可以将衰减作用引入本文方法,应用到叠前道集衰减补偿。

参考文献:

- [1] 李雪英,文慧俭,陈树民,等.等厚薄互层时频特征的正演模拟[J].地球物理学报,2013,56(3):1033-1042.
- [2] Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization [J]. The Leading Edge, 1999, 18(3): 353-360.
- [3] Bakke N E, Ursin B. Thin-bed AVO effects [J]. Geophysical Prospecting, 1998, 46(6): 571-587.
- [4] Chopra S, Castagna J. AVO [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2014.
- [5] Singleton S. The effects of seismic data conditioning on prestack simultaneous impedance inversion [J]. The Leading Edge, 2009, 28(7): 772-781.
- [6] 陈建江,印兴耀.基于贝叶斯理论的 AVO 三参数波形反演[J].地球物理学报,2007,50(4):1251-1260.
- [7] 吴国忱,田军.基于尺度约束项的 AVO 反演方法[J].石油地球物理勘探,2014,49(1):1157-1164, 1190.
- [8] Zhang B, Zhang K, Guo S, et al. Nonstretching NMO correction of prestack time-migrated gathers using a matching-pursuit algorithm [J]. Geophysics, 2013, 78(1): U9-U18.
- [9] Zhu X, McMechan G A. Stretch-free migration imaging condition [J]. Geophysics, 2013, 78(4): S203-S210.
- [10] 李国发,张小明,彭更新,等.与炮检距有关的地层吸收对 AVO 分析的影响及其补偿方法[J].石油地球物理勘探,2014,49(1):89-94.
- [11] 刘力辉.基于岩性预测的 CRP 道集优化处理[J].石油物探,2013,52(5):482-488.
- [12] 陆自清,郭媛.叠前反演中部分叠加道集的优化校正[J].石油地球物理勘探,2015,50(1):67-70.
- [13] 许自龙,孟繁举,唐勇,等.叠前反演数据优化处理技术[J].石油物探,2014,53(4):404-411.
- [14] 苏世龙,贺振华,戴晓云,等.岩性油气藏地震保幅处理技术及其应用——以东部某油田岩性气藏为例[J].物探与化探,2015,39(1):54-59.
- [15] 王艳香,王圣,张军舵,等.道集波形校正[J].地球物理学进展,2014,29(5):2266-2271.
- [16] 刘仕友,周家雄,孙万元,等.基于优化处理的宽角度道集密度反演及应用[J].物探与化探,2016,40(2):417-422.
- [17] 周鹏,张益明,刘志斌,等.地震道集优化方法及应用[J].石油地球物理勘探,2016,51(2):232-237.
- [18] 李芳,曹思远,姚健.相位拟合法的调谐效应研究[J].地球物理学进展,2010,25(6):2130-2136.
- [19] Perez G, Marfurt K. Improving lateral and vertical resolution of seismic images by correcting for wavelet stretch in common-angle migration [J]. Geophysics, 2007, 72(6): C95-C104.
- [20] Chai X, Wang S, Wei J, et al. Reflectivity inversion for attenuated seismic data: Physical modeling and field data experiments [J]. Geophysics, 2016, 81(1): T11-T24.
- [21] 张繁昌,李传辉.非平稳地震信号匹配追踪时频分析[J].物探与化探,2011,35(4):546-552.
- [22] Castoro A, White R, Thomas R. Thin-bed AVO: Compensating for the effects of NMO on reflectivity sequences [J]. Geophysics, 2001, 66(6): 1714-1720.
- [23] Margrave G F, Lamoureux M P, Henley D C. Gabor deconvolution: Estimating reflectivity by nonstationary deconvolution of seismic data [J]. Geophysics, 2011, 76(3): W15-W30.
- [24] Wang L, Gao J, Zhao W, et al. Enhancing resolution of nonstationary seismic data by molecular-Gabor transform [J]. Geophysics, 2013, 78(1): V31-V41.
- [25] 戴永寿,王晓波,丁进杰,等.自适应分段的时变子波估计方法[J].石油地球物理勘探,2015,50(4):607-612.
- [26] Xie Y, Liu G. Resolution enhancement of non-stationary seismic data using amplitude-frequency partition [J]. Geophysical Journal International, 2014, 200(2): 771-776.

A non-stationary match method for detuning pre-stack seismic gather in incident angle domain

ZHAO Xiao-Long¹, WU Guo-Chen^{1,2}

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Under the layer tuning effects, the interference patterns are changing with different offsets of seismic reflections and, as a result, the amplitude and frequency information is distorted, and this will worsen the confidence and resolution of the AVO/AVA analysis and inversion. Firstly, the authors gave the seismic reflection equations with tuning effects, with the modeling examples illustrating characteristics of the tuned seismic gather. Secondly, in consideration of the different detuning levels caused by the changing layer-thickness, the authors constructed the self-adaptive non-stationary decomposition via local Lamoureux time window. Finally, the authors built the non-stationary cost function for matching seismic angle gather to correct the amplitude and waveform stretch. Field application demonstrates the feasibility of the proposed method in improving the quality of seismic data with larger angle, with the high-quality data causing the success of reservoir prediction and hydrocarbon identification.

Key words: tuning effects; wavelet stretch; non-stationary decomposition; match operator

(本文编辑:叶佩)