

基于局部相似度的叠前非稳态相位校正方法

刘玉金^{*} 李振春 周卿

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266555)

刘玉金,李振春,周卿.基于局部相似度的叠前非稳态相位校正方法.石油地球物理勘探,2014,49(3):468-474.

摘要 针对叠前常相位校正方法没有考虑子波相位随时间和空间变化以及精度有限的问题,在整形最小二乘反演的框架下,提出了一种基于局部相似度的叠前非稳态相位校正方法。通过计算相位旋转后的地震道与优化后的模型道之间的局部相似度,估算各地震道与模型道之间的局部相位差;再进行相位校正,即可得到相位一致的叠前道集。理论模型和实际资料处理结果表明,本文方法可以有效校正叠前道集中相位不一致现象,改善叠加效果,提高速度分析的精度,具有较高的实用价值。

关键词 叠前相位校正 局部相似度 非稳态 整形最小二乘反演

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

由于受近地表(如低、降速带风化层的横向厚度和速度的变化,地震排列上炮点的耦合和检波点耦合条件的差异等)以及地下介质的非均一性和地下构造的复杂性等因素的影响,叠前道集中地震子波的相位往往不一致^[1],而且随时间和空间变化,具有严重的非稳态性。如果不对其进行一致性处理,会在一定程度上降低速度分析的精度,并影响叠加效果。因此在常规地震数据处理中,为了使叠前道集中的有效反射能量实现同相叠加,有必要对叠前数据的相位进行校正。

关于子波的零相位化,国外研究起步较早。Levy 等^[2]、Longbottom 等^[3]、White^[4] 在 Wiggins^[5,6] 提出的盲反褶积的基础上,提出最大方差模准则进行常相位估计。相对盲反褶积方法,该方法自由参数变少,算法更加稳定。周兴元^[7] 从理论上证明了常相位校正只是在不改变地震道包络的前提下改变子波的波形。为了考虑地震子波相位的时变性,Baan^[8] 和陈必远等^[9] 采用滑动时窗方法对子波相位进行估计,但是该方法有效的前提是相位变化分段平稳。针对这一问题,Baan 等^[10,11]、Fomel^[12] 和刘玉金等^[13] 等进一步将相位估计看作一个最优

化反演问题,利用局部地震属性的概念进行非稳态相位估计,从而提高相位估计的精度,改善相位校正的稳定性。针对子波相位易受复杂地表因素的影响,国九英等^[14]、高少武等^[15] 分别提出了地表一致性相位校正方法。另外,李合群等^[16] 同时对相位和时差进行了局部调整从而改善叠加质量。为了消除相位不一致性对叠加产生的影响,宋宗平等^[17]、单联瑜等^[18] 在叠前道集中利用常相位校正技术提高叠加剖面质量。

综上所述,以往关于相位校正的研究主要集中于常相位校正,Bann 等^[10,11] 和 Fomel^[12] 提出的非稳态相位校正方法虽然考虑了相位随时间和空间变化,但是并没有考虑相位对叠加结果的影响。本文在 Fomel 方法^[12] 的基础上,提出了一种新的叠前非稳态相位校正方法,通过引入优化后的模型道,对叠前道集进行零相位化,实现对叠前道集的相位一致性校正。最后通过理论模型和实际资料处理验证本文方法能够有效改善速度谱的聚焦程度,提高叠加剖面的质量。

2 方法原理

2.1 非稳态相位校正的基本原理

叠前相位校正的目的是使得共中心点道集各道

* 山东省青岛市中国石油大学工科楼 C 座地球科学与技术学院,266555。Email:einsteinliu@126.com

本文于 2012 年 7 月 24 日收到,最终修改稿于 2014 年 2 月 27 日收到。

本项目受国家自然科学基金(41374122)、国家科技重大专项课题(2011ZX05006-002)和中国石油大学(华东)优秀博士论文培育计划联合资助。

地震记录的相位属性保持一致,从而在一定程度上消除复杂近地表及复杂地下构造对子波波形产生的影响,改善水平叠加质量。该方法首先需要在每个 CMP 道集中建立高品质的模型道,然后根据模型道对 CMP 道集中各地震道进行相移,使得相移后的地震道与模型道之间的相似度达到最大,从而将 CMP 道集内各地震道相位校正一致,最终改善叠加效果。

地震道 $x(t)$ 在时间域的相位旋转公式为

$$x_{\text{rot}}(t) = x(t)\cos\phi(t) + H[x(t)]\sin\phi(t) \quad (1)$$

式中: $\phi(t)$ 为相位旋转角度; $H[\cdot]$ 表示希尔伯特变换。对该地震道进行一系列的相位旋转之后,采用不同的相位判别准则,即可得到不同的相位校正方法。

本文采用的是模型道最大相似度准则,该准则是指地震道经过相位旋转后与模型道的相似度达到最大时对应的旋转角度为所求的相位角。为了考虑子波相位的非稳态特性(随时间和空间变化),本文将在局部地震属性的框架下进行非稳态相位校正。相对于滑动时窗方法,该方法不仅更加稳定,而且具有更高的精度^[13]。叠前相位校正中标准道的选取非常关键,一般是利用测井资料合成地震记录。当不存在测井数据时,需要构建模型道进行叠前相位校正,本文的模型道构建方法同样采用局部相似度方法。

2.2 局部相似度

两个时间序列 a_i 和 b_i 的相似系数定义为

$$c[a, b] = \frac{\sum_{i=1}^N a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N a_i^2 \sum_{i=1}^N b_i^2}} \quad (2)$$

上式仅用一个参数来描述两个信号之间的相关性,具有一定的局限性。采用局部地震属性^[19]的思想,可以将相似系数改为随时间变化的函数,从而描述两个信号相似度的局部变化。式(2)可以看作两个最小二乘反演问题解的乘积,即

$$c^2 = c_1 c_2 \quad (3)$$

$$c_1 = (\mathbf{a}^\top \mathbf{a})^{-1} (\mathbf{a}^\top \mathbf{b}) \quad (4)$$

$$c_2 = (\mathbf{b}^\top \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{b}^\top \mathbf{a}) \quad (5)$$

式中: \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 分别是信号 $a(t)$ 、 $b(t)$ 的向量表示; $\mathbf{x}^\top \mathbf{y}$ 表示向量 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 点乘。由向量 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的元素作为主对角线分别构造对角矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} ,对方程局部化后相当

于对反演加入正则化条件,标量 c_1 和 c_2 变为向量 \mathbf{c}_1 和 \mathbf{c}_2 ,利用整型正则化,式(4)、式(5)变为

$$\mathbf{c}_1 = [\lambda^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}(\mathbf{A}^\top \mathbf{A} - \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{S} \mathbf{A}^\top \mathbf{b}] \quad (6)$$

$$\mathbf{c}_2 = [\lambda^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}(\mathbf{B}^\top \mathbf{B} - \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{S} \mathbf{B}^\top \mathbf{b}] \quad (7)$$

式中: \mathbf{S} 为平滑算子;向量 \mathbf{c}_1 和 \mathbf{c}_2 各元素对应相乘后得到随时间变化的局部相似度,关于整形正则化反演的具体细节可以参考文献[20]。

2.3 模型道的建立

常规的叠前相位校正方法一般采用水平叠加道作为模型道,水平叠加^[21]的公式为

$$\bar{x}_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i,j}(t) \quad j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (8)$$

式中: N 为叠加次数; $x_{i,j}(t)$ 为第 j 个 CMP 道集中的第 i 道地震数据; M 为 CMP 道集数;该式也是 CMP 道集最优的非偏估计值。当 CMP 道集中存在时间、相位不一致且信噪比较低的道时,式(8)往往难以得到较好的叠加结果。为此,本文采用基于局部相似度的叠加方法构建模型道,该方法首先采用水平叠加道作为模型道,然后根据 CMP 道集中各道与模型道之间的局部相似度进行加权,最后根据权系数进行归一化得到最终的叠加结果^[22],即

$$\bar{x}_j(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_{i,j}(t)} \sum_{i=1}^N w_{i,j}(t) x_{i,j}(t) \quad j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (9)$$

式中 $w_{i,j}(t)$ 为 CMP 道集中各道与模型道之间的局部相似度。

为了进一步压制随机噪声,可以设定一定的阈值去除相似度较小的值,得到信噪比更高的叠加结果。通过式(9)得到信噪比较高的叠加道之后,计算其包络,再通过局部相似度准则对叠加道零相位化,该结果即可作为 CMP 道集叠前相位校正的模型道。

2.4 叠前非稳态相位校正

采用上述方法计算得到信噪比较高、子波为零相位的模型道之后,则可以在 CMP 道集上进行非稳态相位校正,其处理流程为:①对 CMP 道集进行动校正;②采用式(9)进行叠加得到信噪比较高的叠加道;③对叠加道进行非稳态零相位校正得到零相位化后的模型道;④利用模型道对 CMP 道集各道地震数据进行非稳态相位校正;⑤对相位校正后的 CMP 道集进行反动校正;⑥对反动校正后的 CMP

道集进行速度分析和叠加;⑦对所有 CMP 道集进行循环;⑧进行动校正、叠加得到最终的叠加剖面。

3 数值试验

3.1 简单合成数据测试

为了验证本文所提出的叠前非稳态相位校正方法的正确性,首先采用简单合成数据进行试算(图 1),模拟加入随机噪声和随机相移并经过 NMO 后的 CMP 道集。由图 1a 可以看出,加入随机噪声和随机相移的道集存在明显的相位不一致现象;对该道集进行水平叠加,叠加结果如图 1c 所示,从图中可以看出,叠加道存在一定的噪声;为了进一步改善叠加效果,采用局部相似度叠加方法进行叠加。图 1b 为 CMP 道集中各道与常规叠加结果(图 1c)的局部相似度,根据该相似度进行加权叠加,并进行权系数归一化后得到图 1d 的叠加结果。对比常规叠加结果可以看出,利用局部相似度进行加权叠加可以有效提高信噪比。对图 1d 进行非稳态零相位校正,校正后的结果如图 1e 所示。从图中可以看出,子波已经校正到零相位,该结果作为后续叠前相位校正的模型道。利用模型道进行叠前非稳态相位校正,校正后的 CMP 道集如图 1f 所示,从图中可以看出,CMP 道集中各地震道均已校正到零相位,同样采用常规方法和局部相似度方法进行水平叠加,叠加结果分别为图 1h 和图 1i。图 1g 为局部相似度叠加方法的权系数,从图中可以看出,经过叠前相位校正之后各道对叠加结果的贡献更加均衡。将图 1e 和图 1i 放在同一尺度下进行显示,如图 1j 所示,从图中可以直观地看出,叠前相位校正后的叠加结果(虚线)能量更加聚焦,具有更高的信噪比。

校正,校正后的 CMP 道集如图 1f 所示,从图中可以看出,CMP 道集中各地震道均已校正到零相位,同样采用常规方法和局部相似度方法进行水平叠加,叠加结果分别为图 1h 和图 1i。图 1g 为局部相似度叠加方法的权系数,从图中可以看出,经过叠前相位校正之后各道对叠加结果的贡献更加均衡。将图 1e 和图 1i 放在同一尺度下进行显示,如图 1j 所示,从图中可以直观地看出,叠前相位校正后的叠加结果(虚线)能量更加聚焦,具有更高的信噪比。

3.2 水平层状模型叠前非稳态相位校正方法测试

为了进一步验证本文方法的有效性,采用水平层状介质模型进行测试,该模型共有四个水平层,速度随深度呈线性变化^[22]。图 2 为水平层状介质模型测试结果。从图 2b 中可以看出,动校正后道集基本拉平,但是各道之间仍然存在相位差异。从图 2c 中可以看出,常规水平叠加后的结果仍然有较为明显的随机噪声。由图 2d 可以看出,局部相似度叠加后的结果由于采用信噪比更高的叠加道作为模型道,各道与模型道之间的局部相似度在有效信号处更大,式(9)中有效信号位置处的权重得到增强。因此相对于常规水平叠加方法,基于局部相似度的叠加方法可以更有效的突出有效信号,压制随机噪声,

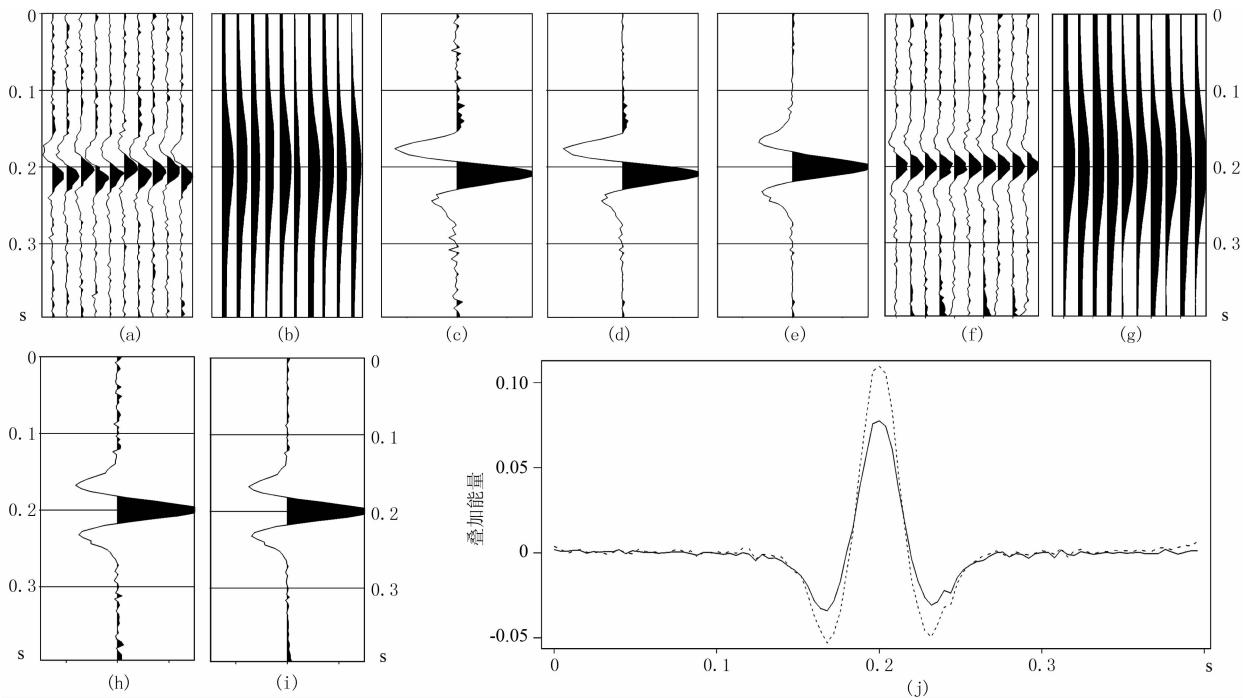


图 1 简单合成数据相位校正结果

(a)加入随机噪声和随机相移后的地震数据;(b)对图 1a 进行局部相似度叠加的加权系数;(c)常规水平叠加结果;(d)局部相似度方法叠加结果;(e)对图 1d 零相位化结果;(f)叠前相位校正后结果;(g)对图 1f 进行局部相似度叠加的加权系数;(h)图 1f 常规水平叠加;(i)对图 1f 进行局部相似度方法水平叠加;(j)叠后相位校正和叠前相位校正的叠加结果对比(实线为叠后相位校正,虚线为叠前相位校正)

使得最终的叠加结果具有更高的信噪比。对图 2d 进行非稳态零相位校正后的结果如图 2e 所示,从图中可以看出,四个子波基本校正到零相位,该结果作为叠前相位校正的模型道。根据模型道对 CMP 道

集进行叠前相位校正。从图 2f~图 2i 可以看出,本文所提出的方法可以消除 CMP 道集中相位不一致的问题(图 2g)。基于局部相似度的叠加方法可以更好的压制随机噪声(图 2i)。

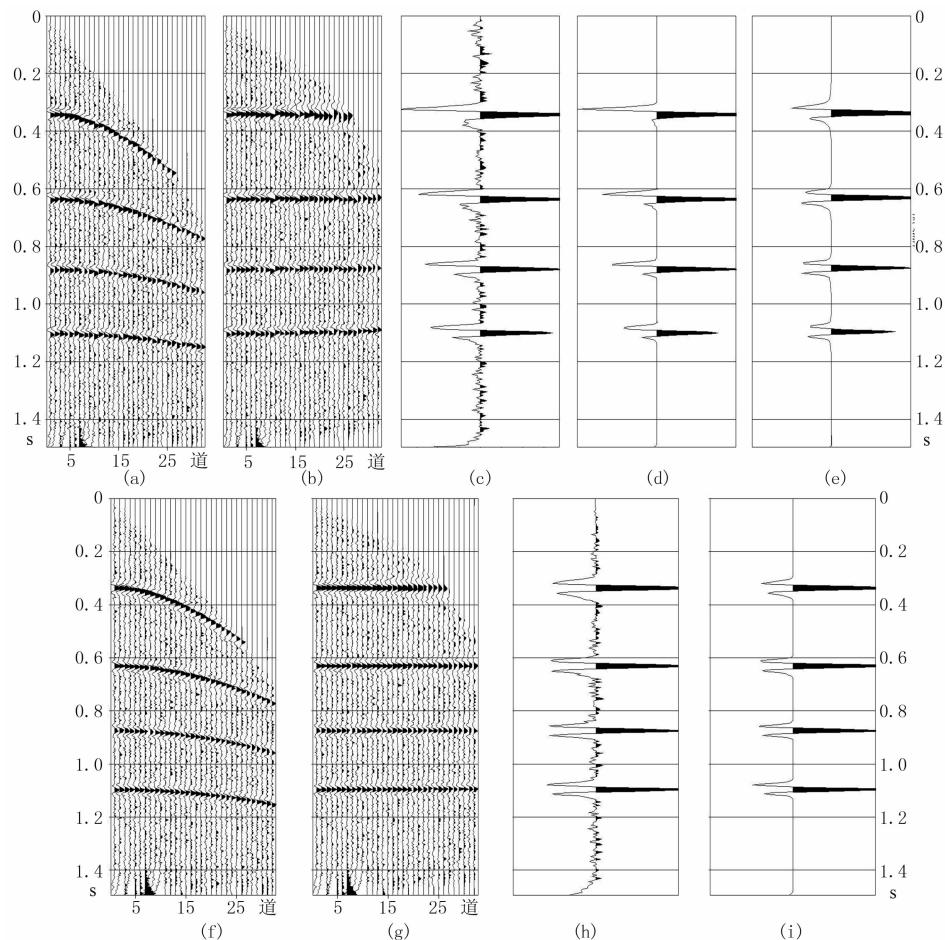


图 2 水平层状介质模型测试结果

(a) 输入的 CMP 道集; (b) 动校正后的 CMP 道集; (c) 常规方法对图 2b 水平叠加后的结果; (d) 局部相似度方法对图 2b 叠加后的结果; (e) 对图 2d 进行非稳态零相位校正后的结果; (f) 进行叠前非稳态相位校正并做反动校正后的 CMP 道集; (g) 叠前非稳态相位校正后的 CMP 道集; (h) 常规方法对图 2g 水平叠加后的结果; (i) 局部相似度方法对图 2g 水平叠加后的结果。

图 3 为水平层状介质模型相位校正前、后叠加速度谱及叠加剖面对比。从图 3a~图 3d 中可以看出,经过相位校正后的速度谱能量团更加聚焦,有利于精细速度分析(图 3b)。由于叠前相位校正可以有效消除叠前道集之间的相位差异,更有利于道集的同相叠加,因此能够有效提高叠加剖面的信噪比(图 3d)。另外从图中也可以看出,使用本文的相位校正方法可以对地震子波进行零相位化,改善同相轴的连续性。

3.3 实际资料处理

为了验证非稳态叠前相位校正算法对二维实际

资料的适用性,对墨西哥湾一个二维实际资料^[23]进行叠前相位校正处理。图 4 为该探区海上实际资料叠前非稳态相位校正前、后结果的对比。从图中可以看出,叠前非稳态相位校正后的 CMP 道集内各道之间的相位得到较好的一致性处理,尤其是如图中箭头所示,同相轴连续性明显变好(图 4c),这将有利于后续的速度分析和叠加;经过叠前非稳态相位校正后的速度谱能量团更加聚焦,更有利与精细速度分析(图 4f)。

图 5 为该探区海上实际资料叠前相位校正前、后叠加剖面对比。从图中可以看出,经过非稳态相

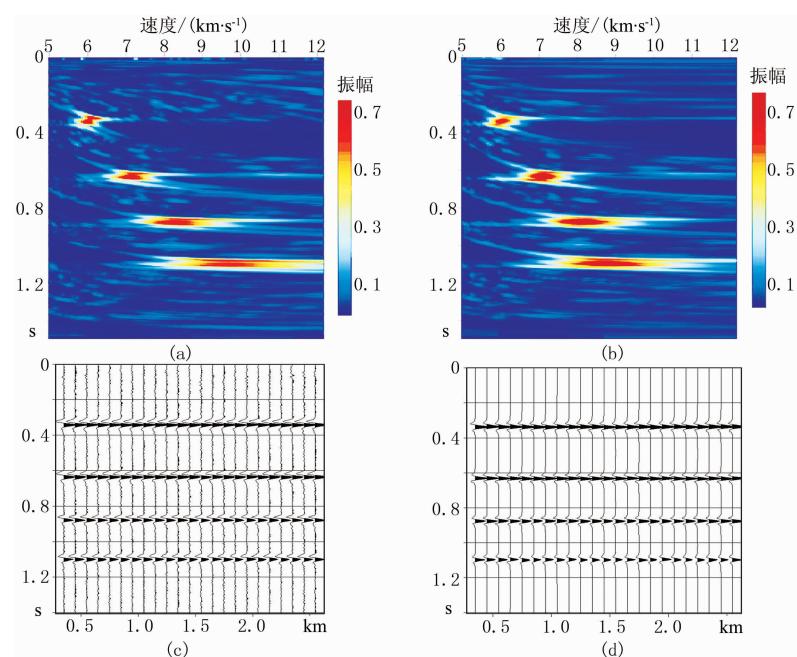


图3 水平层状介质模型相位校正前、后叠加速度谱及叠加剖面对比

(a)相位校正前 CMP 道集叠加速度谱; (b)相位校正后 CMP 道集叠加速度谱;
(c)叠前相位校正前的叠加剖面; (d)叠前相位校正后的叠加剖面

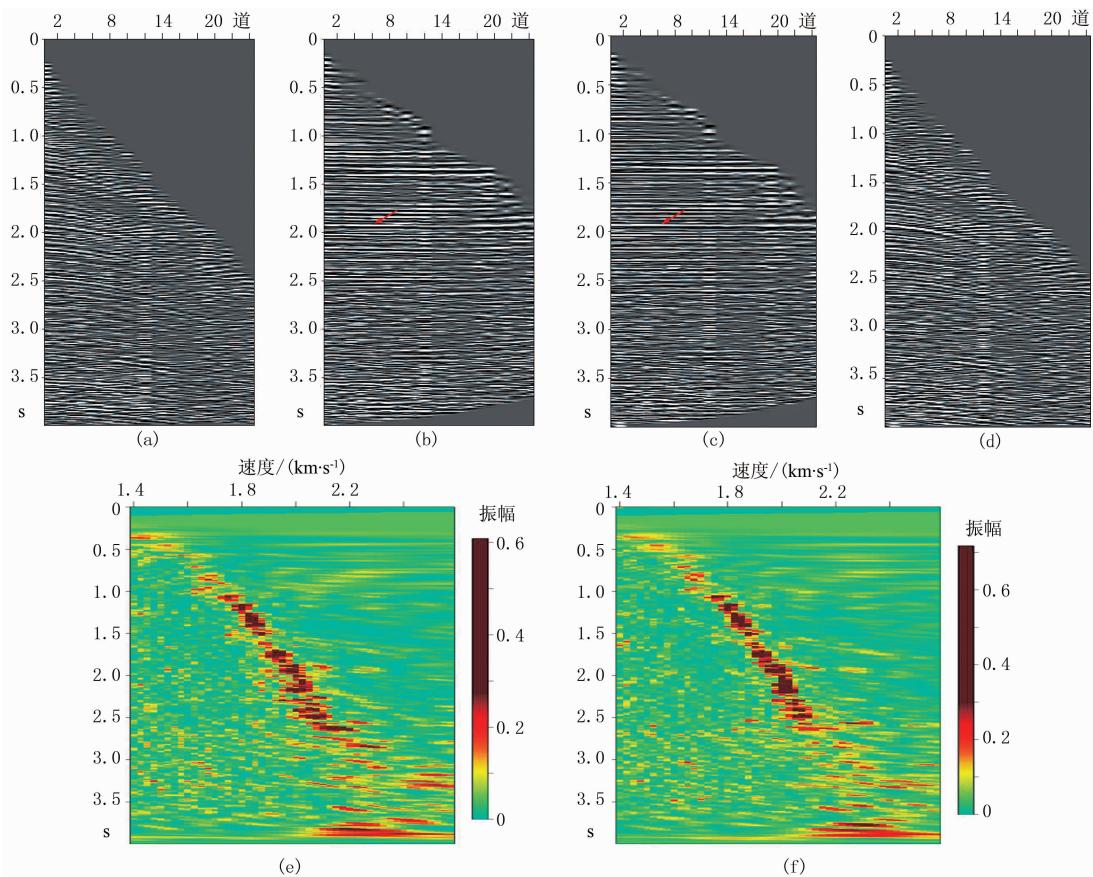


图4 该探区海上实际资料叠前非稳态相位校正前、后结果对比

(a)原始 CMP 道集; (b)动校正后的 CMP 道集; (c)对图 4b 进行非稳态相位校正后的 CMP 道集; (d)对图 4c 进行反动校正后的 CMP 道集; (e)叠前非稳态相位校正前的叠加速度谱; (f)叠前非稳态相位校正后的叠加速度谱

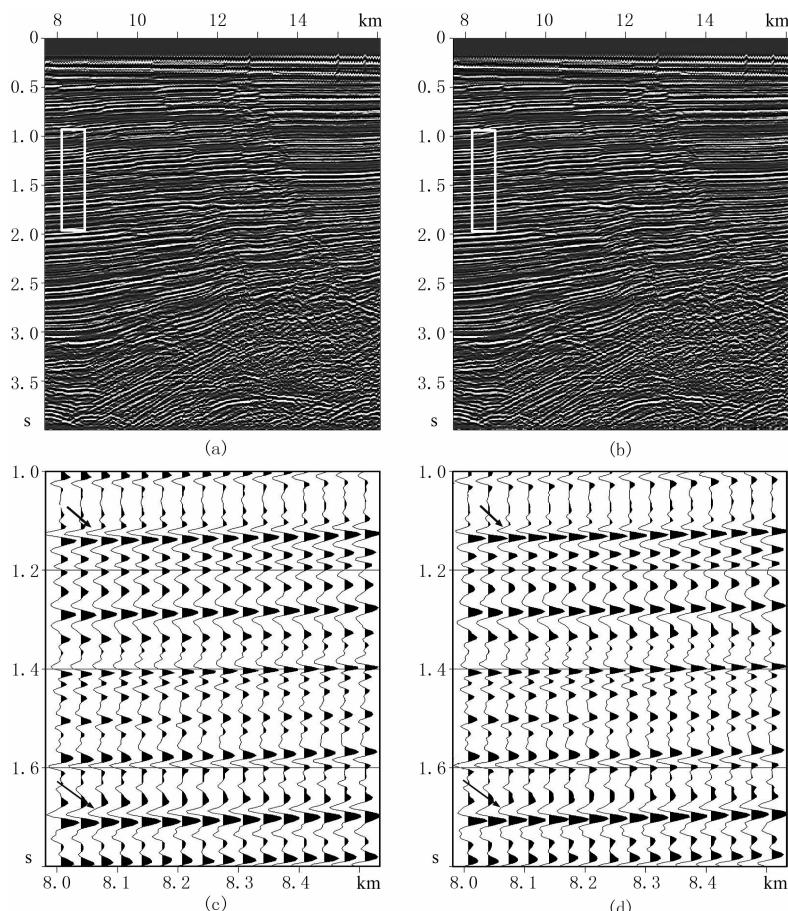


图 5 该探区海上实际资料叠前非稳态相位校正前、后叠加剖面对比
(a) 原始叠加剖面; (b) 叠前非稳态相位校正后的叠加剖面; (c) 原始叠加剖面
方框内局部放大图; (d) 相位校正后叠加结果方框内局部放大图

位校正后的叠加剖面上的反射波同相轴更加连续, 子波校正到零相位, 具有更高的分辨率(图 5c、图 5d 箭头处)。

4 结论与讨论

本文在局部地震属性的理论框架下, 提出了基于局部相似度的叠前非稳态相位校正方法。利用局部相似度水平叠加^[22] 和非稳态相位校正后得到的模型道, 对叠前道集中各道进行非稳态相位估计并进行零相位化。从理论模型和实际资料处理结果可以得出如下几点结论及认识:

(1) 基于局部相似度的相位校正方法可以很好的描述子波相位的非稳定性, 相对于滑动时窗方法, 此法通过平滑半径控制相位变化的局部性, 因此非稳态相位校正方法更加稳定可靠;

(2) 采用局部相似度叠加方法可以在一定程度

上消除 CMP 道集中时间、相位不一致对叠加的影响, 相对于常规叠加方法, 此法得到的叠加结果具有更高的信噪比, 进一步对其进行非稳态零相位校正, 可以得到子波为零相位的高质量模型道;

(3) 基于局部相似度的叠前非稳态相位校正方法可以有效校正 CMP 道集中波形不一致的问题, 从而实现同相叠加, 改善叠加质量;

(4) 叠前非稳态相位校正后, 再做反动校正和速度分析, 可以改善速度谱的聚焦程度, 提高速度分析的精度。

本文主要讨论了叠前相位校正对 CMP 叠加的改善作用, 事实上, 该方法同样适用于共成像点道集叠加, 从而可以改善偏移成像的效果。

感谢中国石油大学(华东)地震传播与成像(SWPI)课题组的资助。感谢开源工具包 Madagascar(http://www.ahay.org/wiki/Main_Page)的所有开发人员。文中所有成果均可在 Madagascar 环

境下再生。

参 考 文 献

- [1] 李振春等. 地震数据处理中的相位校正技术综述. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 768-774.
Li Zhenchun et al. Review of phase correction in seismic data processing. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 768-774.
- [2] Levy S, Oldenburg D W. Automatic phase correction of common-midpoint stacked data. Geophysics, 1987, 52(1): 51-59.
- [3] Longbottom J, Walden A T and White R E. Principles and application of maximum kurtosis phase estimation. Geophysical Prospecting, 1988, 36(2): 115-138.
- [4] White R E. Maximum kurtosis phase correction. Geophysical Journal, 1988, 95(2): 371-389.
- [5] Wiggins R. Minimum entropy deconvolution. Geoexploration, 1978, 16(1-2): 21-35.
- [6] Wiggins R. Entropy guided deconvolution. Geophysics, 1985, 50(12): 2720-2726.
- [7] 周兴元. 常相位校正. 石油地球物理勘探, 1989, 24(2): 119-129.
Zhou Xingyuan. Constant phase correction. OGP, 1989, 24(2): 119-129.
- [8] Baan V M. Time-varying wavelet estimation and deconvolution by kurtosis maximization. Geophysics, 2008, 73(2): V11-V18.
- [9] 陈必远等. 时空变分频常相位校正. 石油地球物理勘探, 1997, 32(1): 103-108.
Chen Biyuan et al. Time and space and subsection frequency phase correction. OGP, 1997, 32(1): 103-108.
- [10] Baan V M, Fomel S. Nonstationary phase estimation using regularized local kurtosis maximization. Geophysics, 2009, 74(6): A75-A80.
- [11] Baan V M, Perz M, Fomel S. Nonstationary phase estimation for analysis of wavelet character. EAGE 72nd Conference and Exhibition, 2010.
- [12] Fomel S. Local similarity with the envelope as a seismic phase detector. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 29: 1555-1559.
- [13] 刘玉金等. 基于局部相似度的非稳态相位校正方法研究. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 887-893.
Liu Yujin et al. Nonstationary phase correction based on local similarity. OGP, 2012, 47(6): 887-893.
- [14] 国九英, 周兴元. 二维及三维地表一致性相位校正. 石油地球物理勘探, 1995, 30(3): 345-350.
Guo Jiuying, Zhou Xingyuan. Surface consistent phase correction in 2-D and 3-D domains. OGP, 1995, 30(3): 345-350.
- [15] 高少武等. 反射波地表一致性相位校正. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4): 480-487.
Gao Shaowu et al. Surface consistent phase correction for reflection wave. OGP, 2001, 36(4): 480-487.
- [16] 李合群, 周兴元. 时差、常相位校正及加权叠加. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4): 415-418.
Li Hequn, Zhou Xingyuan. Moveout and constant phase corrections along with weighted stacking. OGP, 2000, 35(4): 415-418.
- [17] 宋宗平等. 叠前常相位校正. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(2): 69-70.
Song Zongping et al. Prestack constant phase correction. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(2): 69-70.
- [18] 单联瑜等. 相位校正判别准则的改进及应用效果分析. 石油物探, 2008, 47(3): 219-224.
Shan Lianyu et al. Improvement of discriminative criteria for phase correction and its application effect. GPP, 2008, 47(3): 219-224.
- [19] Fomel S. Local seismic attributes. Geophysics, 2007, 72(3): A29-A33.
- [20] Fomel S. Shaping regularization in geophysical-estimation problems. Geophysics, 2007, 72(2): R29-R36.
- [21] Mayne W H. Common reflection point horizontal data stacking techniques. Geophysics, 1962, 27(6): 927-938.
- [22] Liu G, Fomel S et al. Stacking seismic data using local correlation. Geophysics, 2009, 74(3): V34-V48.
- [23] Claerbout J F. Basic Earth Imaging. Stanford Exploration Project, 2005, <http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/>.

(本文编辑:金文昱)

作 者 简 介



刘玉金 博士研究生, 1986年生; 2008年毕业于中国石油大学(华东)地球物理学专业, 获理学学士学位, 同年保送本校攻读固体地球物理学硕士学位, 于2010年获直攻博士学位进入本校地质资源与地质工程专业攻读博士学位, 2012~2013年在美国莱斯大学访问交流, 一直从事地震数据预处理及反演成像方面的研究工作。