第 35 卷 第 2 期(248~255)	中 国 地 震	Vol. 35 No. 2
2019年6月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Jun. 2019

杨仁虎、凌云、常旭等,2019,逆时偏移中波形光滑性分析与波形校正研究,中国地震,35(2),248~255.

# 逆时偏移中波形光滑性分析 与波形校正研究

杨仁虎<sup>1)</sup> 凌云<sup>2)</sup> 常旭<sup>3)</sup> 丰叶<sup>4)</sup>

1) 防灾科技学院, 河北三河 065201

2) 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 河北涿州 072751

3) 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

4) 以色列特拉维夫大学地球物理系, 特拉维夫

摘要 针对 RTM 成像波形不光滑的问题进行研究,利用简单模型分析了空间、时间采样间 隔对成像波形光滑性的影响。结果表明,空间采样间隔对波形光滑性的影响较大,而时间采样 间隔的改变并不能改变波形光滑性。利用三次样条插值,在空间上对 RTM 成像波形进行插值, 可以解决波形不光滑问题。通过复杂模型进行验证,也证明了该方法的有效性。同时对 RTM 成 像剖面沿层地震属性(瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位)进行了分析,结果表明波形经过光滑校正 后可以提高地震属性的横向空变稳定性。

关键词: 逆时偏移 波形光滑性 三次样条插值 地震属性 [文章编号] 1001-4683(2019)02-0248-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

# 0 引言

СМҮК

随着油气勘探技术的发展,如何进行复杂岩性油气藏成像已成为一个亟待解决的问题。 叠前深度偏移在复杂构造成像中起着至关重要的作用。逆时偏移(reverse time migration,简称 RTM)是一种基于双程波动方程的先进叠前深度偏移方法,能利用回转波和多次反射波 对复杂构造进行成像。RTM 的主要特点是能够解决任意横向变速和高陡倾角等复杂地质构 造成像问题,特别是盐丘和潜山侧翼成像。因此,该方法克服了常规地震偏移(Kirchhoff 积 分法偏移、有限差分法偏移、频率波数域波动方程偏移等)对高陡倾角和横向变速大等复杂 地质构造成像效果不好的缺陷,但同时会产生低频噪声污染和大量的计算量、存储量 (Fletcher et al, 2006; Guitton et al, 2007; Symes, 2007; Chattopadhyay et al, 2008; Jones, 2008; Costa et al, 2009; Xu et al, 2011; Nguyen et al, 2013; Weibull et al, 2013)。

在实际地震数据采集中,由于受采集成本或地形的约束,一般情况下道间距和时间采样间隔较大,这会影响 RTM 成像波形的光滑性。对于 RTM 成像构造解释,波形的光滑性通常可以忽略不计。然而对于储层成像精细解释,因其需要更高的分辨率和更精确的成像,故波

[项目类别]中央高校基本科研业务费专项(ZY20180239)、国家自然科学基金项目(41390455)共同资助

<sup>[</sup>收稿日期] 2018-11-12; [修定日期] 2019-01-28

<sup>[</sup>作者简介] 杨仁虎,男,1979年生,博士,主要从事地震波传播与成像等方面的研究。E-mail:yangrenhu2@163.com

形不光滑性的影响不能忽视。如果采用很小的空间采样间隔,可能有助于减少波形的不光 滑性,但计算、存储成本随空间采样间隔呈4次方增长(三维)或3次方增长(二维)。因此, 这在实践中是不可行的。

在本文中,我们首先分析了空间、时间采样间隔对 RTM 成像波形光滑性的影响;然后采 用三次样条插值对不光滑的成像波形进行空间插值,以解决 RTM 波形不光滑的问题。最后 利用复杂模型进行验证,并对 RTM 波形校正前后的地震属性(瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相 位等)进行了分析。

## 1 波形光滑性分析

RTM 通常采用源波场和接收波场互相关作为成像条件,其公式可以写为(Symes,2007; Chattopadhyay et al,2008; Claerbout, 1971)

$$\boldsymbol{I}(\vec{\boldsymbol{X}}) = \int_{0}^{t_{\text{max}}} \boldsymbol{P}_{s}(\vec{\boldsymbol{X}}, t) \boldsymbol{P}_{r}(\vec{\boldsymbol{X}}, t) \,\mathrm{d}t$$
(1)

其中,  $I(\vec{X})$  为 RTM 成像;  $P_s(\vec{X},t) \ P_r(\vec{X},t)$  分别为源波场和接收波场;  $\vec{X}$  为空间坐标矢量; 2-D:  $\vec{X} = (x,z)$ , 3-D:  $\vec{X} = (x,y,z)$ ;  $t \in (0, t_{max})$ , 为时间。互相关成像条件(式(1))在源为 脉冲时等价于准确的反射率成像公式, 而在源为短区间子波时是反射率成像公式的一个合 理近似(Claerbout, 1971)。

为了计算源波场和接收波场,这里采用一阶应力-速度声波方程,其2-D公式为

$$\begin{aligned} \dot{v}_{x} &= \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x} \\ \dot{v}_{z} &= \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial z} \\ \dot{\sigma} &= K \left( \frac{\partial v_{x}}{\partial x} + \frac{\partial v_{z}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$
(2)

其中, $v_x$ 、 $v_z$ 分别为水平、垂直质点振动速度; $\sigma$ 为声波应力场,这里代表源波场 $P_s(\vec{X},t)$ 或 接收波场 $P_r(\vec{X},t)$ ; $K = \rho v_p^2$ 为杨氏模量, $v_p$ 为地震纵波速度; $\rho$ 为密度;字母上面的点表示对 时间求导。

这里采用交错网格有限差分方法(时间二阶,空间四阶)进行求解,求解公式如下(Yang et al,2015)

$$\begin{cases} \frac{vx_{i,k}^{n+1} - vx_{i,k}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{-a_{1}\sigma_{i+3/2,k}^{n+1/2} + a_{2}\sigma_{i+1/2,k}^{n+1/2} - a_{2}\sigma_{i-1/2,k}^{n+1/2} + a_{1}\sigma_{i-3/2,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ \frac{vz_{i,k}^{n+1} - vz_{i,k}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{-a_{1}\sigma_{i,k+3/2}^{n+1/2} + a_{2}\sigma_{i,k+1/2}^{n+1/2} - a_{2}\sigma_{i,k-1/2}^{n+1/2} + a_{1}\sigma_{i,k-3/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ \frac{\sigma_{i,k}^{n+1/2} - \sigma_{i,k}^{n-1/2}}{\Delta t} = K \begin{pmatrix} \frac{-a_{1}vx_{i+3/2,k}^{n} + a_{2}vx_{i+1/2,k}^{n} - a_{2}vx_{i-1/2,k}^{n} + a_{1}vx_{i-3/2,k}^{n}}{\Delta x} \\ + \frac{-a_{1}vz_{i,k+3/2}^{n} + a_{2}vz_{i,k+1/2}^{n} - a_{2}vz_{i,k-1/2}^{n} + a_{1}vz_{i,k-3/2}^{n}}{\Delta z} \end{pmatrix}. \end{cases}$$
(3)

**MYK** 

35 卷

此处,  $a_1 = \frac{1}{24}, a_2 = \frac{9}{8}$ 。

本文采用一个简单层状模型分析空间、时间采样间隔对 RTM 波形光滑性的影响。模型 大小为 800m×400m,上层速度为 2000m/s,下层速度为 3000m/s。震源采用主频 45Hz 的 Ricker 子波,震源位置在(400m,0m),检波器位置在(200m,0m)。我们首先计算和分析了在 相同时间采样间隔(0.25ms)的情况下,不同空间采样间隔(1m×1m、2m×2m、4m×4m)时的 RTM 成像和波形(图 1)。从图 1可以看出,空间采样间隔对波形光滑性的影响较大,随着空 间采样间隔的增大,波形的不光滑性增加,即使在空间网格为 1m×1m 时,在中心峰值处仍然 看到波形的不光滑性。然后,计算和分析了在相同空间采样间隔(4m×4m)的情况下,不同 时间采样间隔(0.25、1.00、4.00ms)时的 RTM 成像和波形(图 2)。从图 2可以看出,几种波形 不光滑程度相当,也就是说时间采样间隔对波形的光滑性影响很小,当然其前提是采样间隔 不能过大而引起频散。对于基于互相关成像条件的深度偏移,波场采样间隔应为采样定理 所给值的 50%(Zhang et al,2003)。



图 1 不同空间采样间隔的 RTM 成像与波形对比(简单层状模型) 时间采样间隔均为 0.25ms; 图(a)、(b)、(c)是空间采样间隔分别为 1m×1m、2m×2m 和 4m×4m 的 RTM 成像; 图(d)、(e)、(f)是空间采样间隔分别为 1m×1m、2m×2m、4m×4m 的 RTM 成像波形放大

## 2 波形校正方法

在实际数据采集中,常常采用较大的空间采样间隔来减少 RTM 计算、存储成本,但这会 导致 RTM 成像波形不光滑。如果采用先插值后成像的方法,势必造成 RTM 计算、存储量过 大,成本太高。因此,本文采用先成像后插值的方法,利用三次样条函数对不光滑的 RTM 波 形进行空间插值,以得到光滑的波形。为了方便起见,只考虑垂向深度插值,因为在实际数 据采集中主要考虑垂向波形。RTM 波形校正公式如下

#### 杨仁虎等: 逆时偏移中波形光滑性分析与波形校正研究

251



图 2 不同时间采样间隔的 RTM 成像与波形对比(简单层状模型)

空间采样间隔均为 4m×4m;图(a)、(b)、(c)是时间采样间隔分别为 0.25、1.00、4.00ms 的 RTM 成像;图(d)、(e)、(f)是时间采样间隔分别为 0.25、1.00、4.00ms 的 RTM 成像波形放大

$$\tilde{I}(z) = M_{i} \frac{(z_{i+1} - z)^{3}}{6h_{i}} + M_{i+1} \frac{(z - z_{i})^{3}}{6h_{i}} + \left[I(z_{i}) - \frac{M_{i}h_{i}^{2}}{6}\right] \frac{z_{i+1} - z}{h_{i}} + \left[I(z_{i+1}) - \frac{M_{i+1}h_{i}^{2}}{6}\right] \frac{z - z_{i}}{h_{i}}, (i = 0, 1, \dots, n)$$
(4)

其中,  $I(z_i)$  为插值前的 RTM 成像;  $\tilde{I}(z)$  为插值后的 RTM 成像;  $z \in [z_i, z_{i+1}]$  为垂向插值区 间;  $h_i = z_{i+1} - z_i$  为垂向空间插值间隔。参数  $M_i$  计算公式为

$$\begin{pmatrix} 2 & \lambda_{1} & & \\ \mu_{2} & 2 & \lambda_{2} & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \mu_{n-2} & 2 & \lambda_{n-2} \\ & & & \mu_{n-1} & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{1} \\ M_{2} \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{1} - \mu_{1}M_{0} \\ d_{2} \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} - \lambda_{n-1}M_{n} \end{pmatrix}.$$
(5)

这里采用自然边界条件

$$\begin{cases} I''(z_0) = M_0 = 0\\ I''(z_n) = M_n = 0 \end{cases}$$
(6)

此处,  $M_0$ 、 $M_n$ 为 RTM 成像在 2 个端点处关于深度的二阶导数值。

其他参数计算公式如下

$$\begin{cases} \mu_{i} = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_{i}} \\ \lambda_{i} = 1 - \mu_{i} \\ d_{i} = 6 I[z_{i-1}, z_{i}, z_{i+1}] \\ I[z_{i-1}, z_{i}, z_{i+1}] = \frac{I[z_{i}, z_{i+1}] - I[z_{i-1}, z_{i}]}{z_{i+1} - z_{i-1}} \\ I[z_{i}, z_{i+1}] = \frac{I(z_{i+1}) - I(z_{i})}{h_{i}} \\ (i = 1, 2, \dots n - 1) \end{cases}$$

$$(7)$$

MYK

2 期

图 3 为简单模型 RTM 成像波形校正前后的波形对比图。从图 3 可以看出,波形校正方法可以很好地解决波形不光滑问题。



图 3 波形校正前后的 RTM 成像与波形对比(简单层状模型) 图(a)、(b)分别为波形校正前后的 RTM 成像;图(c)、(d)分别为波形校正前后的 RTM 成像波形放大

### 3 波形校正应用

在进行储层解释时,通常选取储层顶底地震属性横向空变稳定性较好的反射层作为标 准层位,然后进行储层沉积演化解释,其中波形光滑性程度直接影响反射层位地震属性空变 稳定性。这里根据实际地质构造情况,构建了一个带有3个散射点的单斜模型(图4(a))。 假定散射点代表储层,其上下的单斜构造为标准层位,其可当作储层的顶底,这样就可以通 过地震属性技术进行储层沉积演化解释。如果标准层位地震属性具有稳定的空变特性,将 会得到更好的储层精细解释精度,以减少地震解释误差。单斜模型大小为 21975m×5000m, 空间采样间隔12.50m×6.25m。3 个散射点 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, 速度分别为 3500、4000、2400m/s。模型 中单斜构造速度从上到下依次为2200、2600、3000、3400、3800、5000m/s。震源子波采用主频 45Hz的 Ricker 子波,第1炮震源位于(9975m,0m),从左往右移动,炮间距为 50m,共有 241 炮,每炮799道,道间距为12.5m。图4(b)、4(c)分别为波形校正前后的RTM成像对比,从 图 4(b)、4(c)可以看出,构造成像差别不大。图 5 为波形校正前后的 RTM 成像局部放大和 散射点 P,波形对比。从图 5可以看出,波形差别较大,原始成像波形不光滑,经过波形校正 后,波形变得光滑。图6为波形校正前后的L2层拉平剖面和沿层地震属性(瞬时振幅、瞬时 频率、瞬时相位)空变稳定性对比,因为是二维剖面,故沿层地震属性只反映一个方向(横 向)的空间变化特征。从图6可以看出,波形校正后,瞬时振幅空变稳定性变化不大,但瞬时 频率和瞬时相位横向空变稳定性明显变好,特别是瞬时相位更明显一些。



图 4 波形校正前后的 RTM 成像对比(单斜构造模型) 图(a)为单斜构造模型(含3个散射点);图(b)、(c)分别为波形校正前后的 RTM 成像



图 5 波形校正前后的 RTM 成像局部放大与波形对比(单斜构造模型) 图(a)、(b)分别为波形校正前后的 RTM 成像局部放大;图(c)、(d)分别为波形校正前后的散射点 P<sub>2</sub> 波形





图 6 波形校正前后沿层 L2 地震属性横向空变稳定性对比(单斜构造模型) 图(a)、(b)分别为波形校正前后的L2 层拉平剖面;图(c)、(d)、(e)分别为波形校正前后的沿层 L2 地震属性 (瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位)横向空变稳定性对比,上面为波形校正前,下面为波形校正后

# 4 结论与讨论

本文对 RTM 波形光滑性问题进行了研究,针对稀疏网格导致的 RTM 波形不光滑问题, 选取三次样条插值方法进行垂向空间插值来进行波形校正。利用简单、复杂模型进行验证, 结果均表明本文给出的波形校正方法不仅提高了波形的光滑度,而且提高了沿层地震属性 (特别是瞬时频率和瞬时相位)横向空变稳定性,从而可以提高储层精细解释的精度。本文 虽然只考虑了空间垂向深度波形插值问题,但该方法可以推广到二维、三维空间波形插值情 形。同样,本文探讨的二维 RTM 波形问题,同样可以推广到三维 RTM,这样就可以提取三维 数据体的沿等时面的地震属性,更好地看出波形校正对地震属性空变稳定性的影响,当然这 需要更大的计算量和存储量及进一步的研究。

**致谢:** 在本文研究过程中得到中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司王永军博士的支持和帮助,在此表示感谢。同时审稿人的认真审阅和提出的宝贵意见,以及编辑的认真负责,使得本文更加严谨和科学,在此一并表示感谢。

#### 参考文献

Chattopadhyay S, McMechan G A, 2008, Imaging conditions for prestack reverse-time migration, Geophysics, **73**(3), S81~S89. Claerbout J F, 1971, Toward a unified theory of reflector mapping, Geophysics, **36**(3), 467~481.

Costa J C, Silva Neto F A, Alcântara M R M, et al, 2009, Obliquity-correction imaging condition for reverse time migration, Geophysics, 74(3), S57~S66.

Fletcher R P, Fowler P J, Kitchenside P, et al, 2006, Suppressing unwanted internal reflections in prestack reverse-time migration,

254

МҮК

35 卷

Guitton A, Kaelin B, Biondi B, 2007, Least-squares attenuation of reverse-time-migration artifacts, Geophysics, **72**(1), S19~S23. Jones I F, 2008, A modeling study of preprocessing considerations for reverse-time migration, Geophysics, **73**(6), T99~T106. Nguyen B D, McMechan G A, 2013, Excitation amplitude imaging condition for prestack reverse-time migration, Geophysics, **78**(1), S37~S46.

Symes W W, 2007, Reverse time migration with optimal checkpointing, Geophysics, 72(5), SM213~SM221.

Weibull W W, Arntsen B, 2013, Automatic velocity analysis with reverse-time migration, Geophysics, **78**(4), S179~S192.

Xu S, Zhang Y, Tang B, 2011, 3D angle gathers from reverse time migration, Geophysics, 76(2), S77~S92.

Yang R H, Mao W J, Chang X, 2015, An efficient seismic modeling in viscoelastic isotropic media, Geophysics, **80**(1), T63~T81. Zhang Y, Sun J C, Gray S H, 2003, Aliasing in wavefield extrapolation prestack migration, Geophysics, **68**(2), 629~633.

# Analysis of Waveform Smoothness and Waveform Correction for Reverse Time Migration

Yang Renhu<sup>1)</sup> Ling Yun<sup>2)</sup> Chang  $Xu^{3)}$  Feng  $Ye^{4)}$ 

1) Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China

2) Bureau of Geophysical Prospecting, China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751, Hebei, China

3) Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4) Department of Geophysics, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

**Abstract** In this paper, the problem of waveform unsmoothness in RTM imaging is studied, and the influence of spatial and temporal sampling intervals on waveform smoothness is analyzed by using a simple model. The results show that the spatial sampling interval has great influence on the smoothness of waveform, while the change of temporal sampling interval cannot change the smoothness of waveform. The waveform unsmoothness can be solved by interpolating RTM image waveform in space by cubic spline interpolation. The validity of the method is verified by a complex model. At the same time, the seismic properties (instantaneous amplitude, instantaneous frequency and instantaneous phase) along layers of the RTM imaging are analyzed, and the results show that the waveform can improve the lateral spatial variation stability of seismic properties after smooth correction.

Key words: Reverse time migration; Waveform smoothness; Cubic spline interpolation; Seismic attributes

2 期

Geophysics, **71**(6), E79~E82.