

# 图像域最小二乘偏移在非重复性时移地震处理中的应用

胡瑞卿\* 高凯 章炎艳 于璐 张丽娟

东方地球物理公司研究院

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2175

**[摘要]** 时移地震资料处理对多期数据的一致性和准确性有极高要求,而多期地震由于采集年代跨越较大导致观测系统差异较大。相对于克希霍夫偏移,最小二乘偏移在改善两期地震观测系统一致性有独特的优势。本文聚焦这一问题,引入图像域最小二乘偏移算法。阐述了该算法通过计算点扩散函数并进行反褶积,消除成像系统模糊效应的原理及针对陆上三维地震资料的实现步骤,包括点扩散函数计算、偏移反褶积及全变分正则化去噪等关键环节。结合实际试验区数据验证,该算法能有效改善不同观测系统下的成像照明不均与分辨率损失问题,提升资料一致性,为时移地震属性对比提供可靠数据支撑,尤其在非重复性时移地震处理中表现突出。

**[关键词]** 图像域最小二乘偏移算法; 时移地震; 属性对比; 观测系统差异

**中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

## Application of Least-Squares Migration in the Image Domain to Non-Repetitive Time-Lapse Seismic Processing

Ruiqing Hu\* Kai Gao Yanyan Zhang Lu Yu Lijuan Zhang

Geophysical Research Institute, BGP, Baoding

**[Abstract]** Time-lapse seismic data processing has extremely high requirements for data consistency and accuracy. However, data collected by different observation systems often have imaging deviations due to differences in shot spacing, shot line spacing, etc., which seriously affect the effect of attribute comparison. Focusing on this problem, this paper introduces the least-squares migration algorithm in the image domain. It expounds the principle of the algorithm to eliminate the blurring effect of the imaging system by calculating the point spread function and performing deconvolution, as well as the implementation steps for onshore 3D seismic data, including key links such as point spread function calculation, migration deconvolution, and total variation regularization denoising. Verified with data from actual test areas, the algorithm can effectively improve the problems of uneven imaging illumination and resolution loss under different observation systems, enhance data consistency, and provide reliable data support for time-lapse seismic attribute comparison, especially showing outstanding performance in non-repetitive time-lapse seismic processing.

**[Key words]** image domain least squares migration algorithm; Time-lapse earthquake; Attribute comparison; Differences in observation systems

### 引言

在地震勘探领域,准确获取地下地质结构信息对于油气资源的勘探与开发至关重要。不同观测系统采集的地震资料在成像过程中往往存在差异,这会影响到对地下构造的准确认识<sup>[1-3]</sup>。时移地震作为一种监测油气藏动态变化的重要技术,要求能够精确对比不同时地震数据的属性差异,以确定储层的变化情况<sup>[4]</sup>。然而,传统的地震成像方法难以满足这一需求,因此需要开发更为先进的算法来解决这些问题<sup>[5]</sup>。图像域最小二乘偏移算法的出现,为提高地震成像质量和实现时移地震属性精确对比提供了

新的途径<sup>[6]</sup>。

### 1 不同观测系统采集资料成像差异问题分析

#### 1.1 观测系统差异对成像的影响

陆上地震采集的观测系统差异主要体现在炮点与检波点的空间分布参数上,如炮间距、炮线距、检波点距等,这些参数的不同直接改变地震波的覆盖次数、照明范围和能量分布特征,进而导致成像结果出现显著差异。当观测系统参数设置使得采样密度较高时(如小间距组合),地下反射点能被更多地地震波射线覆盖,覆盖次数增加,有助于压制随机噪声,提升成像信噪比,

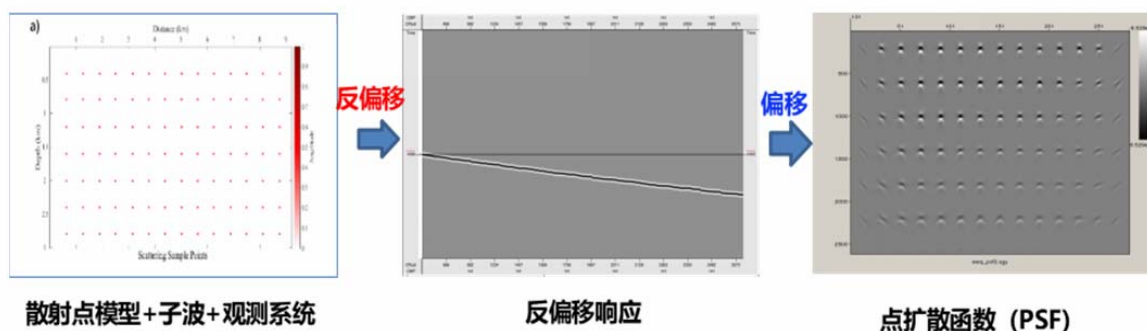


图1 点扩散函数常规计算流程

但可能增加采集成本并引入相邻激发点的干扰,对浅部地层成像产生不利影响。若采样密度较低(如大间距设置),虽能降低成本和减少干扰,但会导致覆盖次数不足,对于中深部复杂构造,可能因照明不充分造成成像能量不均,出现构造细节丢失、断点模糊等问题。

此外,观测系统的空间几何分布差异还会影响对不同走向、倾向构造的成像适应性,采样密度与构造复杂度不匹配时,易出现成像扭曲、假像等现象。

### 1.2 成像差异对时移地震属性对比的挑战

在时移地震中,需通过对比不同时期地震数据的属性(如振幅、频率、速度等)来监测储层动态变化。然而,不同观测系统(不同炮间距、炮线距)导致的成像差异,会给属性对比带来严峻挑战。

炮间距和炮线距的差异会直接改变地震波的采集面元大小和形状。面元是地震数据成像的基本单元,面元尺寸的不一致会导致同一地下位置在不同时期的成像结果中对应不同的空间采样范围,使得属性提取失去统一的空间基准。例如,早期采集采用大间距观测系统,面元尺寸较大,而后期采用小间距系统,面元更精细,此时对比两者的振幅属性,会因面元内包含的地质信息不同而产生偏差,无法真实反映储层的实际变化。

此外,成像差异还会引发振幅保真性问题。不同炮间距和炮线距下,地震波的传播路径、能量衰减规律存在差异,导致相同反射系数的地层在不同时期的成像振幅表现不同。这种由观测系统引起的振幅变化,容易被误判为储层流体饱和度、压力变化等因素导致的属性差异,从而干扰对储层变化的准确识别。例如,在气藏开发监测中,若后期采集因炮间距减小导致某区域成像振幅增强,可能会被错误认为是气藏范围扩大,而实际是观测系统差异造成的假象。

频率属性同样会受到成像差异的影响。小炮间距采集能更好地保留高频成分,成像结果具有更高的分辨率;而大炮间距采集可能因高频信号损失,导致成像频率降低。在时移对比中,这种频率差异会掩盖储层本身的频率变化特征,如储层压实导致的地层弹性参数变化引起的频率偏移,使得难以区分地质因素

和观测因素对频率属性的贡献。

## 2 图像域最小二乘偏移算法原理与实现

### 2.1 算法原理

图像域最小二乘偏移算法将地下任意点的像视为点扩散函数(PSF)与该点反射系数褶积结果。其核心思想是通过计算地下任意点的点扩散函数,对常规成像结果施加点扩散函数反褶积,从而消除成像系统对反射系数的模糊效应,达到改善成像结果的保真性和分辨率的目的。与传统的偏移方法相比,该算法能够更准确地刻画地下地质结构,提高成像的精度。

该算法之所以能够消除不同观测系统造成的影响,关键在于其对成像系统响应的量化与校正能力。不同观测系统(如不同炮间距、炮线距)本质上是成像系统的“观测条件”差异,这种差异会通过点扩散函数体现——观测系统的空间分布参数不同,会导致点扩散函数的形态(如能量分布范围、主瓣宽度、旁瓣强度)产生变化,进而使得常规偏移成像结果中混入与观测系统相关的“系统误差”。图像域最小二乘偏移算法通过精确计算不同观测系统对应的点扩散函数,能够将成像结果中由观测系统引入的模糊效应分离出来,再通过反褶积过程去除这些系统误差,使最终成像结果更接近地下真实反射系数分布,从而实现不同观测系统资料的成像一致性校正。

在具体实现过程中,首先需要构建一个描述地震波传播和成像过程的数学模型。假设地震数据 $d$ 可以通过一个线性算子 $L$ 与地下反射系数 $m$ 相关联,即,其中 $n$ 为噪声。最小二乘偏移的目标是找到一个最优的反射系数 $m$ ,使得观测数据 $d$ 与通过模型预测的数据之间的误差最小。在图像域中,通过计算点扩散函数来近似线性算子 $L$ ,进而求解反射系数 $m$ 。

### 2.2 算法实现步骤

2.2.1 数据预处理:对陆上三维地震原始共炮域资料进行预处理,涵盖静校正、动校正、切除异常值等操作,同时重点剔除非一次反射波和压制噪声,以此提升数据的可靠性和信噪比,为后续处理奠定良好基础。

2.2.2 点扩散函数(PSF)计算:以散射点模型为输入,结合地震子波和观测系统参数,先进行反偏移处理得到反偏移响应数据,再对反偏移数据进行偏移处理,最终生成点扩散函数。该过

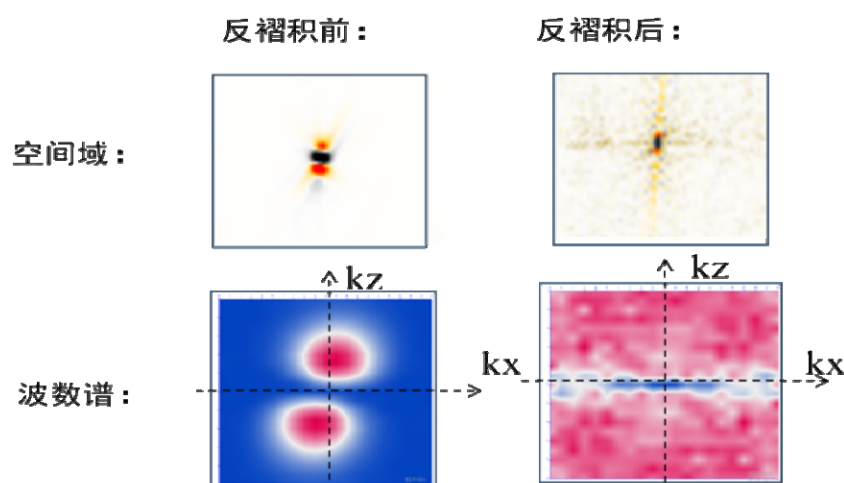


图2 单个 PSF 反褶积前后对比

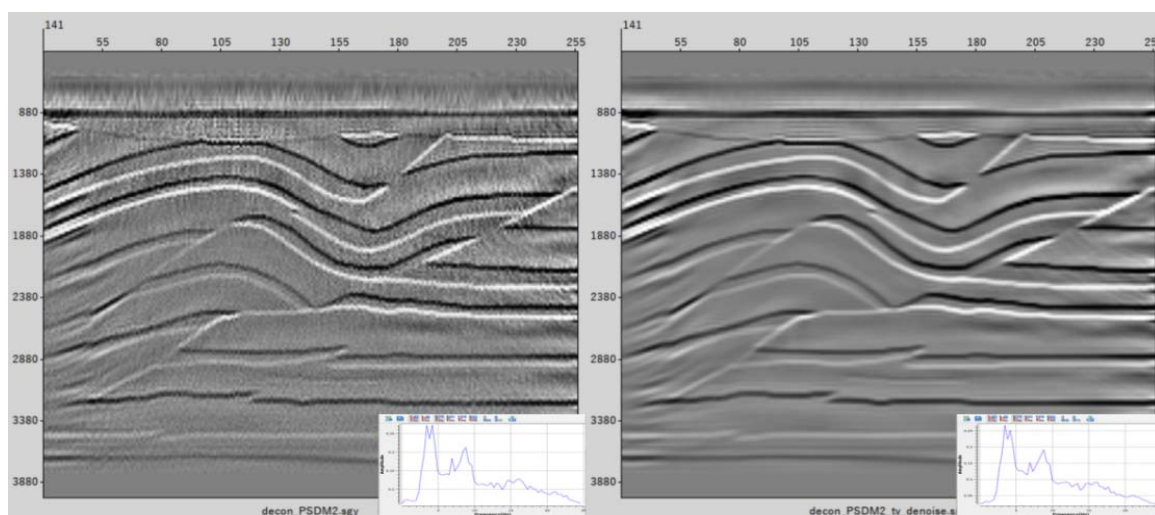


图3 全变分正则化去噪前(左)后(右)对比

程通过模拟地震波从地下散射点到地面观测的完整路径,量化不同观测系统对成像的影响,该过程如图1所示。

2.2.3正向传播波场计算:基于陆上三维地震的地质模型和速度场,利用声波方程计算震源正向传播波场。依据声波方程

$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 u$  (其中 $u$ 为波场, $v$ 为速度, $t$ 为时间, $\nabla^2$ 为拉普拉斯算子),通过有限差分数值计算方法求解该方程,得到震源在地下介质中传播的波场信息。

2.2.4反向传播波场计算:同样结合陆上三维地震的速度模型,利用声波方程对检波点接收到的地震信号进行反向传播波场计算,追溯地震波从检波点向地下传播的路径和能量分布情况。

2.2.5逆时偏移成像剖面计算:运用互相关成像条件计算陆

上三维地震资料的逆时偏移成像剖面。互相关成像条件为

$I(x, z) = \sum_t u_s(x, z, t) u_r(x, z, t)$  其中 $I(x, z)$ 为成像结果,  $u_s(x, z, t)$ 为震源波场,  $u_r(x, z, t)$ 为检波点波场,通过该步骤得到初步的成像剖面。

2.2.6点扩散函数偏移反褶积:将点扩散函数视为模糊算子,建立目标泛函  $J = \min(p * f - \delta)$  (其中 $p$ 为点扩散函数, $f$ 为所求算子, $\delta$ 为期望输出的散射点),通过求解泛函得到校正算子。求解可在空间域采用梯度相关算法(如式  $grad = p^T * (p * f - \delta)$ 迭代更新梯度),或在波数域通过傅里叶变换求解,最终通过算子与成像结果的褶积实现分辨率提升,反褶积后波数谱显著拓宽(如图2所示)。

2.2.7全变分正则化去噪:针对反褶积引入的高波数噪声,

构建最优化问题 $\min \|m - d\| + \lambda TV(m)$  (其中  $TV(m)$  为全变分正则项), 采用split Bregman方法分解为子问题求解, 在压制噪声的同时保留有效信号(如图3所示)。

2.2.8 Hessian矩阵计算: 在成像域针对陆上三维地震资料计算对应的Hessian矩阵。Hessian矩阵能够反映成像系统的二阶导数信息, 其计算公式为  $H_{ij} = \frac{\partial^2 E}{\partial m_i \partial m_j}$  其中  $E$  为误差函数,

$m_i$  和  $m_j$  为反射系数的参数), 为后续的迭代求解提供重要的矩阵参数。

2.2.9最小二乘偏移成像求解: 采用阻尼最小二乘线性迭代方法求解陆上三维地震资料最小二乘偏移成像的方程, 经过多次迭代优化, 最终输出高精度的反射率剖面, 该剖面能更真实地反映地下地质构造特征。

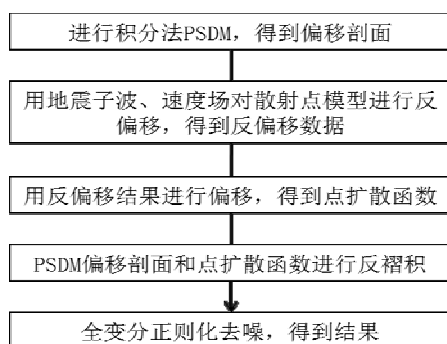


图4 最小二乘偏移流程图

### 3 算法在时移地震资料处理及属性对比中的应用

#### 3.1时移地震数据处理流程

3.1.1数据采集与整理: 在不同时间对同一工区按相同观测方式进行重复性地震观测, 获取时移地震数据。对采集到的数据进行整理, 包括数据格式转换、道头信息校正等。

3.1.2应用图像域最小二乘偏移算法进行成像: 将时移地震数据分别代入图像域最小二乘偏移算法中, 进行成像处理, 得到不同时期的高质量成像剖面。

3.1.3属性提取与对比: 从不同时期的成像剖面上提取地震属性, 如振幅、频率、相位等。通过对比这些属性的差异, 来识别储层的变化情况。例如, 可以计算不同时期振幅的差值  $\Delta A = A_{t2} - A_{t1}$  中  $A_{t1}$  和  $A_{t2}$  分别为时间  $t_1$  和  $t_2$  的振幅, 根据  $\Delta A$  的分布情况来判断储层的变化区域。

#### 3.2实例分析

以轮南三维(2008年采集)与轮古三维(2021年采集)的非重复性时移地震数据为例, 验证算法效果。两套数据因观测系统差异(如炮线距、覆盖次数)导致常规克希霍夫偏移结果存在显著成像偏差。

对两套数据分别进行克希霍夫偏移和图像域最小二乘偏移处理, 并生成差异体剖面(如图5所示)。克希霍夫偏移差异体剖面在观测系统变观区(即两套数据观测系统参数差异较大的区

域)存在大量非油藏区域的同相轴反射, 这些反射并非由地下地质变化引起, 而是观测系统差异导致的虚假信号, 会干扰对目的层段真实属性差异的识别。而图像域最小二乘偏移差异体剖面中, 观测系统变观区的非油藏区域几乎无同相轴反射, 虚假信号被有效压制, 目的层段的差异信号更加突出, 能够更清晰地反映地下可能的地质变化, 这表明该算法成功消除了部分由观测系统差异引起的成像偏差。

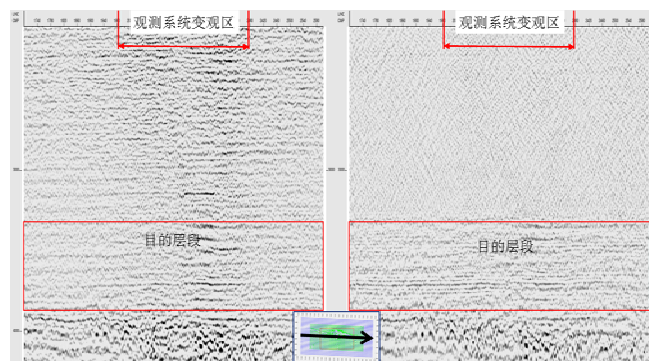


图5 克希霍夫偏移差异体剖面(左)最小二乘偏移差异体剖面(右)

分析目的层段的振幅差异平面(如图6所示), 克希霍夫偏移的振幅差异平面中, 油藏区外存在较多分散的振幅变化区域(非蓝色区域), 说明常规方法处理后油藏区外的振幅一致性较差, 仍受观测系统差异影响。而图像域最小二乘偏移的振幅差异平面中, 振幅变化主要集中在油藏区内(红色位置), 油藏区外的大部分区域呈现蓝色, 表明这些区域的振幅一致性得到显著改善, 进一步验证了该算法在消除观测系统差异、提升时移地震资料一致性方面的有效性, 能为后续的属性对比和储层动态监测提供更可靠的基础数据。

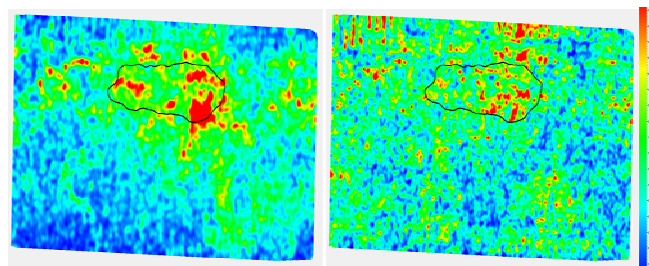


图6 克希霍夫偏移差异体平面(左)最小二乘偏移差异体平面(右)

### 4 结论

图像域最小二乘偏移算法通过点扩散函数计算、偏移反褶积及全变分去噪的协同处理, 有效解决了不同观测系统导致的成像照明不均、分辨率损失及属性偏差问题。其核心优势在于量化并校正观测系统差异引起的模糊效应, 显著提升时移地震资料的一致性。实例表明, 该算法在非重复性时移地震处理中能精准分离观测系统误差与真实地质差异, 为属性对比提供高质量数据, 对油气藏动态监测具有重要应用价值。未来可进

一步优化波数域求解效率,拓展至复杂介质条件下的大规模数据处理。

#### [参考文献]

[1]胡文瑞.论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J].石油勘探与开发,2008,35(1):1-5.

[2]凌云,高军,张汝杰,等.随时间推移(TL)地震勘探处理方法研究[J].石油地球物理勘探,2001(2):150-160.

[3]LI Chuang,HUANG Jian-ping,LI Zhen-chun,等.Preconditioned prestack plane-wave least squares reverse time migration with singular spectrum constraint[J].应用地球物理(英文

版),2017(1):1-13.

[4]李振春,郭振波,田坤.黏声介质最小平方逆时偏移[J].地球物理学报,2014,57(1):273-283.

[5]杨文采.应用地震层析成像[M].地质出版社,1993.

[6]郭念民,尚新民,刘欣欣,等.非重复性时移地震数据关键处理技术应用研究[J].石油地球物理勘探,2011,46(4):581-592.

#### 作者简介:

胡瑞卿(1989--),男,汉族,中国湖北荆门人,博士研究生,中级职称,主要从事地球物理与资源勘查技术,地球探测信息技术,地震数据处理方法。