

高利君,李海英,杨威,等.基于多级分数阶微积分的地震数据解释性高分辨率处理方法[J].世界核地质科学,2025,42(3):552-564. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.007

GAO Lijun, LI Haiying, YANG Wei, et al. An interpretative high resolution processing method based on multi-level fractional calculus [J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3): 552-564 (in Chinese).

基于多级分数阶微积分的地震数据解释性高分辨率处理方法

高利君^{1,2}, 李海英², 杨威², 龚伟², 李卿卿¹

1 深层油气全国重点实验室, 中国石油大学(华东), 山东 青岛, 266580

2 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐, 830011

摘要 在地震勘探中, 高分辨率地震反射成像数据体是实现沉积盆地薄层砂体和断裂构造精细识别的关键手段。而实际地震成像剖面往往面临低频与高频信号缺失, 进而导致地震成像分辨率低, 无法有效实现油气及铀煤等矿产资源的识别。在信号处理中, 有效信号的积分及微分算法分别反应其低频和高频成分。基于此原理, 提出一种基于多级分数阶微积分方法的解释性高分辨率处理方法。通过分别计算有效信号的不同分数阶成分, 获得地震成像剖面中缺失的低频及高频成分, 通过引入多元高斯理论与贝叶斯理论, 以及统计学反演改进加权系数的求解过程, 建立了宽频高分辨率地震成像剖面。与传统微积分高分辨率处理方法相比, 本方法能有效提高加权系数的求解准确性, 并且有效避免了加权系数计算误差对精度的影响。陆上及海上实际数据处理结果表明, 本方法能够有效提升地震数据的分辨率和频带范围, 提高地震成像对砂体等构造的高分辨率识别。

关键词 多元高斯; 多级分数阶微积分; 高分辨率; 地震数据

中图分类号 P631 文献标志码 A 文章编号 1672-0636 (2025) 03-0552-13

An interpretative high-resolution seismic data processing method based on multi-level fractional calculus

GAO Lijun^{1, 2}, LI Haiying², YANG Wei², GONG Wei², LI Qingqing¹

1 Key Laboratory of Deep Oil & Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

2 Sinopec Northwest China Petroleum Bureau, Urumqi 830011, China

Abstract: In seismic exploration, high-resolution seismic reflection imaging data volumes are critical tools for achieving fine identification of thin sandstone bodies and fault structures in sedimentary basins. However, actual seismic imaging profiles often face the loss of low- and high-frequency signals, leading to low seismic imaging resolution and ineffective identification of oil, gas, uranium, coal, and other mineral resources. In signal processing, integral and differential algorithms of effective signals respectively reflect their low- and

基金项目: 中国石油化工集团公司重点项目: 超深-特深层钻井地质工程一体化研究与应用(编号: P24136)及中国石油化工集团公司科研项目超深-特深层碳酸盐岩圈闭识别描述与评价技术研究(编号: P24009)联合资助

收稿日期: 2025-05-26 改回日期: 2025-05-31

第一作者: 高利君, 男, 1988年生, 高级工程师, 在读博士研究生。研究方向: 地震数据高分辨率处理。E-mail: gaolij.xbsj@sinopec.com

Supported by the study on identification, description and evaluation technology of ultra-deep and super-deep carbonate rock traps (No.P24009) and Integrated research and application of ultra-deep and super-deep drilling geological engineering (No.P24136)

Received date: 2025-05-26 **revised date:** 2025-05-31

First author: GAO Lijun, male, born in 1988, senior engineer, PhD's candidate, focusing on seismic imaging process. E-mail: gaolij.xbsj@sinopec.com

high-frequency components. Based on this principle, this paper proposes an interpretative high-resolution processing method using multi-level fractional calculus. By separately calculating different fractional-order components of effective signals, the missing low- and high-frequency components in seismic imaging profiles are obtained. Through the introduction of multivariate Gaussian theory, Bayesian theory, and statistical inversion to improve the solving process of weighting coefficients, a broadband high-resolution seismic imaging profile is established. Compared with traditional calculus-based high-resolution processing methods, this method effectively enhances the accuracy of weighting coefficient determination and avoids the impact of calculation errors on precision. Processing results from both onshore and offshore actual data demonstrate that the proposed method significantly improves the resolution and frequency bandwidth of seismic data, thereby enhancing high-resolution identification of sand bodies and related structures.

Keywords: multivariate Gaussian; multi-level fractional-order calculus; resolution; seismic data

随着铀矿及油气等国家战略资源勘探面临愈加复杂的地质问题,对地震数据处理与解释要求逐步提高,如何提高地震成像分辨率成为亟待解决的关键问题^[1-4]。地震勘探的主要目标是最大程度地保留有效信号,并深入挖掘数据中的信息,以实现更加精准的沉积地层识别。近年来,“两宽一高”三维地震勘探技术取得了显著进展,使得地震数据中的信号变得更加丰富。该技术不仅拓宽了高频信号的范围,还延伸至低频信号,而低频成分在地震数据处理中的重要性日益显现^[5-6]。

在地震信号中,低频信号通常有助于压制子波旁瓣,而高频信号可提高对薄层的识别精度。低频及高频信号的有效恢复,能够建立宽频地震信号,从而保真保幅地提高地震数据的分辨率^[7]。地震波在地下传播时,低频成分衰减较慢,具有较强的穿透能力,有助于提高对深层地层或玄武岩下层的成像质量^[8]。此外,低频信号在反演过程中也对初始速度建模起到了积极作用,从而提升地震反演精度^[9]。然而,由于地面噪声、近地表散射噪声及地面检波器的影响,地震资料中往往缺失有效低频信号(5 Hz以下),而高频信号由于地层强衰减,导致信号缺失。因此,在地震数据处理过程中,保护有效低频信号,恢复高频信号,形成有效宽频信号数据体,成为后续地震资料解释的关键。

现有高分辨率处理技术体系主要分三类:反褶积技术通过子波压缩提升时间分辨率,但其效能受限于稳态子波、白噪声反射系

数等传统假设的适用条件,尽管现代方法已突破部分限制,但子波精确提取的瓶颈仍制约其应用深度^[10];吸收补偿技术广泛采用的反Q滤波方法,依据理论衰减模型(如Kjartansson模型),对不同频率成分进行振幅补偿和相位校正^[11-12],其核心难点在于Q场参数的空间变异性与补偿算法的数值稳定性之间的矛盾,理想化模型与实际地层参数的偏差常导致补偿失真;时频谱恢复技术方面,汪小将等(2009)提出基于希尔伯特-黄变换(HHT)的时频域补偿因子动态计算方法,在保持振幅特征的同时有效提升了分辨率^[13]。考虑到地震子波的时变特性,利用时变子波模型对数据进行分段处理,在有效提升分辨率的同时,保留了相对能量特性^[14]。尚新民等(2014)通过改进S变换与谱模拟的耦合,降低了非白噪声反射系数对振幅谱的干扰^[15]。王元君等(2015)发展的广义S变换动态反褶积方法,在变Q条件下实现了深部能量补偿^[16-17]。值得注意的是,压缩感知理论在低频重建中的应用虽拓展了有效频带^[18],但频率恢复因子提取的精度问题仍未得到根本解决。

分数阶微积分方法,作为一种将传统整数阶微积分扩展至非整数阶的数学工具,自其提出以来历经长时间的发展。最早于1695年,Hospital和Leibnitz在信中首次提出分数阶微分的概念,标志着这一数学分支的诞生。1819年,Lacroix首次提出幂函数的分数阶微分定义,为该理论的发展奠定了基础。1832年,Liouville给出了著名的第一和第二分数阶公

式,进一步完善了分数阶微积分的理论体系。进入 19 世纪,分数阶微积分的应用逐渐扩展。1841 年, Gregory 首次将分数阶微积分应用于热力学方程,开展了相关的运算规则研究。1847 年, Riemann 提出了著名的 Riemann-Liouville 理论,深入探讨了分数阶微积分的性质。1867 年, Grumwald 统一了 Liouville 和 Riemann 的理论,提出了 Grumwald-Letnikov 公式。尽管早期分数阶微积分主要是数学理论研究的对象,由于缺乏实际的工业应用背景,应用领域的扩展较为缓慢。然而,20 世纪末至 21 世纪初,分数阶微积分在地球物理学,尤其是地震信号处理中的应用取得了显著进展。1994 年,赵圣亮等人提出基于微分补偿地震频率的新方法,通过对地震记录道进行微分,使用差分代替微分进行地震信号处理,补偿了地震波传播过程中高频成分的衰减,从而提升了地震资料的分辨率,并确保处理前后能量一致^[19]。地震勘探中,地表因素限制了地震子波的持续时间,导致子波延续时间较长,频带范围变窄,难以准确识别小尺度地层特征。为解决这一问题,许多地球物理学者研究了信号微分。1997 年,云美厚等人通过对雷克子波进行 1 阶和 2 阶微分,发现虽然求导无法直接提升子波的分辨率,但能够改善剖面的视觉分辨率,并在增强高频的同时压制低频成分,放大了高频噪声。随后的研究提出了多级微分频谱整形滤波器的设计,强调通过微分扩展地震记录的频带,从而显著提升地震数据的分辨率^[20]。1998 年,余德平等人在赵圣亮和云美厚的研究基础上,通过比较分析 1 阶和 2 阶导数滤波器的振幅和相位特性,提出空间域微分法可以在三维地震数据中得到应用,显著改善断层和储集层信息的显示效果^[21]。2014 年,SAJID 等人采用 2、4 和 6 阶微分变换,在时间域内对地震记录进行多次加权相加,从而获得更高分辨率的地震剖面,效果优于传统谱白化算法和 Gabor 反褶积方法^[22]。郭欣等人针对薄互层识别的难题,提出了一种新型的多阶微分方法,论证了微分可以通过揭示变化率来突出薄层的细节信息,虽然一阶微分提升薄层的高频信息的能力有限,但是通过信号的逐次多阶微分,可以逐步提升

不同频段的高频信息。随后通过多阶微分信息的融合,达到提高地震分辨率的目的,经过模型试算表明随着信号微分阶数的提高,分辨薄层的能力逐步增强,当微分阶数达到 24 阶时,可以分辨 $\lambda/20$ 厚度的薄互层^[23]。

可以发现,不管在国内还是国外,使用分数阶微积分对地震信号进行处理的研究较少,且大多采用整数阶的微积分,其原因:1)分数阶的物理意义不明;2)其形式较为复杂,相比于常规整数阶微积分较为明确简单便捷的方式,更加难以应用,且其在频率域的分数阶微积分理论已经比较完善,而时间域相关研究比较少,也较繁琐,并且仍然存在的问题还未得到较好地解决;3)分数阶目前主要在图像处理方面的应用较多,在地震勘探领域,从事该方面研究的人员人数较少。

基于上述研究现状,本文将结合微分、积分方法分别在增强信号高频、低频信息的能力,在分析分数阶微积分对信号作用的基础上,实现时间域信号和频率域信号的分数阶微分、积分,充分利用分数阶微分信号在不同频带的优势,进一步发展了多级分数阶微分融合方法,实现不同分数阶微分结果的融合,有效拓宽叠后地震成像剖面的频带范围,实现地震精细解释。相较于传统提高分辨率的处理方法,本文提出的多级分数阶微积分方法不依赖特定假设,适用性强,在提升地震数据的频率分辨能力方面,较有优势。

1 方法原理

分数阶微积分(Fractional Calculus)是对传统整数阶微积分的自然扩展,传统微积分运算,如 1 阶微分、2 阶微分以及 1 阶和高阶积分,通常定义为整数阶次的运算,而分数阶微积分则是将这些经典运算推广至非整数阶次,这里的“分数”不仅涵盖了有理分数,还包括无理小数和复数阶次,因此,“分数阶”作为一个术语,具有广泛的适用性,值得注意的是,当运算阶次为整数时,分数阶微积分实际上会退化为传统的整数阶微积分^[24]。

传统的基于整数阶微积分的地震信号频带拓展方法存在显著的理论与应用局限性,主

要体现在以下三方面:数学框架的离散性、物理表征的局限性以及统计约束的缺失性。传统方法采用离散的整数阶次构建频率成分,其本质是对整数阶微分(高频提升)和积分(高频衰减)算子的机械组合。这种离散阶次特性导致频谱调整表现出阶跃化的特征,在频带能量调控中无法实现阶次参数的连续渐变,难以有效匹配地下介质的非均质连续属性。

此外,整数阶微积分在频域中表现为线性滤波特性,其固定的斜率特征与地震信号的非平稳特性存在本质矛盾,且往往会在高频处指数级放大噪声。传统的多阶频谱融合方法多依赖于经验性加权或最小二乘优化,假设系数间独立无关的简化模型忽略了地质过程的物理关联性。同时,缺乏对参数不确定性的贝叶斯量化,易受噪声干扰导致过拟合,从而影响薄互层识别的精度,出现虚假同相轴。

针对上述问题,提出基于多级分数阶微积分的连续阶次频带构建方法以提高地震数据频带宽度,进而提高地震数据分辨率,但传统方法在其加权系数序列的求解方面缺少约束,精度较低。为解决此问题,本文基于多元高斯理论与贝叶斯理论,通过统计学反演的思路开展不同阶数频带成分加权系数的求解。在计算中引入多元高斯分布的假设,能有效改善加权系数求解稳定性与精度,避免多级分数阶微积分方法精度受计算误差的影响。

1.1 多级分数阶微积分地震信号频率成分构建

在地震信号的处理过程中,微分处理能够增强高频成分。具体而言,微分处理会放大信号中变化较快的部分,尤其是高频信号,因为其变化速度较快。因此,微分处理会导致频谱向高频扩展,实现高频成分的增强,从而提高信号的分辨率并强化高频特征。相反,积分处理则会抑制高频成分,增强低频部分。积分是对信号的平滑处理,低频部分的变化较为平稳,因此,积分处理有助于保留低频成分,这对于分析地震信号中的低频特征至关重要。

本文提出的基于多级分数阶微积分的频带构建方法,采用了非整数阶次(如0.5阶、1.5阶)频域算子,通过频域中的直接处理,有效提

升了计算效率。相比传统的整数阶框架,这一方法不仅克服了频谱离散化的缺陷,而且通过非线性频域处理提升了对地震信号复杂结构的表征能力,为后续高精度加权融合奠定了基础。

分数阶微积分的数学本质在于将微分与积分运算推广至非整数阶次。对于时间域地震数据 $s(t)$,其分数阶 μ 阶微积分在频域可显式表达为:

$$S^\mu(f) = S(f)(i2\pi f)^\mu. \quad (1)$$

式(1)中: $S^\mu(f)$ —分数阶 μ 阶微积分运算后的频率成分; $S(f)$ —时间域地震数据 $s(t)$ 的傅里叶变换频率成分; μ —分数阶阶次(实数), $\mu > 0$ 为微分阶次, $\mu < 0$ 为积分阶次。

公式(1)中的 $(i2\pi f)^\mu$ 可分解为幅频响应 $(2\pi f)^\mu$ 和相频响应 $e^{i\pi\mu/2}$,当 $\mu > 0$ 时,该式对应分数阶微分,其幅频响应表现为高频能量的非线性增强,同时引入 $\mu \cdot \pi / 2$ 的相位偏移。当 $\mu < 0$ 时则为分数阶积分,幅频响应为低频补偿,相位偏移为 $-|\mu| \cdot \pi / 2$ 。相较于 Riemann-Liouville 时域定义(需复杂卷积积分),公式(1)通过频域的直接处理实现了分数阶微积分的物理等效,极大提高了计算效率。

在处理过程中,每一步分数阶微积分的处理都会引入相位偏移,这会影响信号的原始特性。为此,笔者引入了相位补偿项,以消除多次微分或积分过程中出现的非必要相位变换:

$$S^\mu(f) = S(f)(i2\pi f)^{\mu_i - \mu}. \quad (2)$$

对一个地震数据进行若干次 k 阶的频率成分转化之后,可以得到一系列不同分数阶次的微分和积分频谱成分。为实现高分辨率提频,需将 k 阶频谱包络加权融合为近似白噪声。

令 k 阶频谱包络之和为白噪,即加权融合后的频谱可以表示为:

$$S_{\text{sum}} = \alpha_1 W_1 + \alpha_2 W_2 + \alpha_3 W_3 + \cdots + \alpha_k W_k \quad (3)$$

式(3)中: W_k —第 k 阶频谱分量的包络值; α —加权系数; S_{sum} —加权后的频率成分。

此时,求取加权系数之后,对不同阶数频谱进行加权平均,得到的频谱即可接近于白噪,进行傅里叶反变换,即可得到提频后的地

震数据。但传统方法在加权系数求解方面,仍存在精度不高的问题,影响分辨率提升效果。因此,本文提出了一种基于多元高斯理论的分数阶频率成分加权融合方法,以提高加权系数的精度,进而提高提频效果。

1.2 基于多元高斯理论的多级分数阶微积分频率成分加权融合

基于多元高斯理论求解分数阶微积分地震频率成分的加权系数,能够显著提高加权系数计算的精度,从而增强提频效果。传统的加权方法通常依赖于经验假设或最小二乘优化,往往忽视了地质过程中的复杂统计相关性和参数的不确定性,因此容易受到噪声干扰并产生过拟合,进而影响信号的分辨率。相比之下,基于多元高斯理论的方法能够有效处理加权系数间的统计相关性,并量化参数的不确定性,从而为信号融合提供更加精确和鲁棒的估计。

具体地,提频后的地震数据可以表示为不同阶数频率成分的加权和:

$$S_{\text{sum}} = WA + e \quad (4)$$

式(4)中: S_{sum} —加权后的频率成分; W —频率成分的矩阵; A —待求取的加权系数序列; e —误差项。

公式(4)的加权系数序列 A 是需要通过多元高斯理论求解的目标,而误差项 e 代表了加权过程中由于参数不确定性和噪声等因素带来的误差。

假设待求参数,即加权系数 A 服从高斯分布,其分布表达式为:

$$A \sim N(A', \Sigma) \quad (5)$$

式(5)中: A —待求取的加权系数序列; A' —系数序列的初始估计值; Σ —协方差矩阵,表示不同阶数频率成分对应系数之间的空间和统计相关性。

公式(5)的这一高斯分布假设能够在多维空间中充分捕捉加权系数之间的相关性,从而提高加权系数求解的精度。

令预期结果与加权结果之间的误差项 e 也服从高斯分布,可以表示为:

$$e \sim N(0, \Sigma_e) \quad (6)$$

式(6)中: Σ_e — e 的协方差矩阵,反映了加权过

程中的不确定性。

公式(6)的假设条件,能够更好地处理加权过程中的统计偏差,确保加权系数的准确性。

根据多元高斯理论,可以估计加权后预期输出的概率密度函数:

$$S_{\text{sum}} \sim N(WA', W\Sigma W^T + \Sigma_e W\Sigma W^T) \quad (7)$$

式(7)中: WA' —预期输出; Σ —统计相关性矩阵的协方差矩阵; Σ_e —误差项的协方差矩阵。

公式(7)表达了加权后的频谱在给定输入信号情况下的概率分布,通过该公式,可以定量地分析加权结果的准确性和可靠性。

在预期输出的约束下,可以得到不同分数阶微积分阶数频率成分的加权值,在多元高斯框架下,加权值以概率分布的形式给出,既可以得到加权值,还可以评估其合理性,此处加权值的概率分布可以表示为:

$$A|S_{\text{sum}} \sim N(A, \Sigma_A) \quad (8)$$

式(8)中: Σ_A —系数序列 A 的后验概率矩阵; A —优化后的加权系数。

公式(8) Σ_A 用于刻画系数序列的不确定性,可以用于评估加权系数求取准确性,该矩阵值越大,说明求解误差越大,反之,不确定性越低。

具体的加权系数计算式为:

$$\begin{cases} A = A' + \Sigma W^T \Gamma^{-1} (S_{\text{sum}} - WA') \\ \Sigma_A = \Sigma - \Sigma W^T \Gamma^{-1} W \Sigma \\ \Gamma = W \Sigma W^T + \Sigma_e \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: Γ —协方差矩阵; Γ^{-1} — Γ 的逆矩阵。

公式(9)反映了加权系数之间的统计依赖关系。通过这一方法,可以有效地优化加权系数的求解,最终提高地震数据的分辨率和精度。求解出加权系数之后,用不同分数阶微积分频率成分进行加权融合,并进行傅里叶反变换,即可得到本方法提频之后的地震数据。

2 数值模拟

在深部油气资源勘探中,地震资料的质量直接决定了地震解释的精度,特别是在复杂地质环境中,如渤海区域海上地震数据的

处理和解释,往往面临水深、海床变化和海洋噪声等多重挑战。为了克服这些问题,提升地震资料的频率带宽和分辨率,增强地下结构的细节反映尤为重要。海上地震资料的处理往往面临频率范围受限和信噪比低的困难,因而需要对频谱进行有效提升。基于此,本文提出的多级分数阶微积分提频方法,能够有效拓宽频带范围,提高数据的分辨率,尤其对复杂地质体中的断层、褶皱等构造的识别具有显著效果。通过对渤海区域的海上实际资料进行应用,验证了本方法在海洋环境中的有效性。

基于海上数据的应用,本文进一步扩展到塔里木盆地顺北地区的陆上资料中。塔里木盆地顺北地区的储集体主要由走滑断裂带控制的缝洞体系构成,被称为断溶体储层。上述储集体因碳酸盐岩在地质构造作用下形成的断裂破碎带和溶蚀作用,表现出明显的纵横向非均质性。在地震剖面上,断溶体储层展现出不同的反射特征,例如洞穴型储层呈现强烈的“串珠”反射特征,而孔洞型、孔洞-裂缝型和裂缝型储层则显示为弱或杂乱的“串珠”反射。然而,由于碳酸盐岩顶面或内幕岩性界面的强反射影响,这些储层的反射特征常常会被削弱甚至掩盖,导致识别困难。为解决这一问题,提高地震剖面的分辨率显得尤为重要。

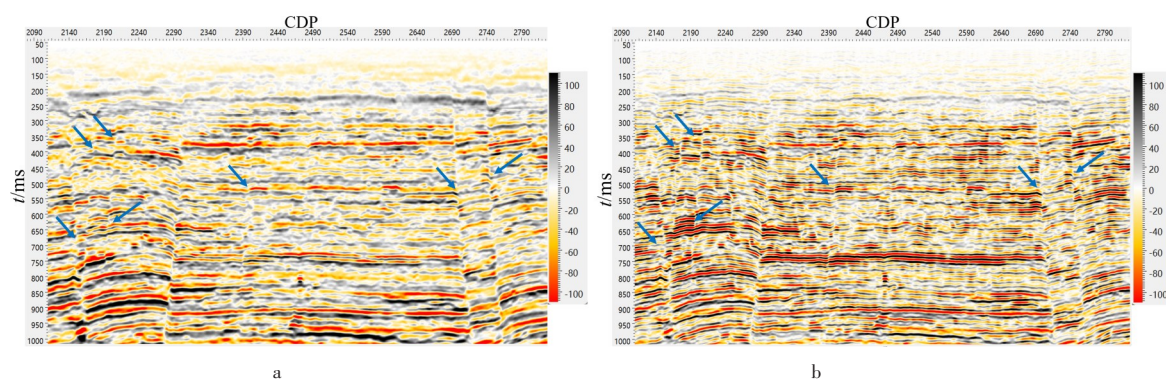
综上所述,本节将首先通过对渤海海上实际资料的应用,验证多级分数阶微积分提频方法的有效性。然后,将本方法应用于顺

北地区的陆上数据,进一步验证本方法在复杂地质环境中的适用性,分析提频前后的频谱特征、相干属性和蚂蚁追踪属性。通过海上和陆上两种不同环境下的资料应用测试,验证本方法的普适性和效果。

2.1 多级分数阶微积分提频方法海上实际资料应用

本小节通过渤海区域海上实际资料,测试本方法在复杂海洋环境下的应用效果。图1展示了渤海区域海上实际资料的叠加剖面,其中图1a为未经处理的原始叠后数据的叠加剖面,图1b则为经过多级分数阶微积分提频处理后的叠加剖面。从两幅图的对比中可以明显看出,经过分数阶提频处理后的叠加剖面在整体分辨率上得到显著提升,尤其在断点和断层的识别上,精度明显提高。图1中蓝色箭头标注的区域,原始数据中的断裂信息模糊不清,而提频后,断裂的识别精度与分辨率大幅提高,细节更加清晰,尤其是对于一些小尺度的断裂和地质构造,多级分数阶微积分提频方法能够有效地增强对断裂的识别能力。

为进一步验证本方法的效果,笔者对处理前后的叠加剖面进行了频谱分析,分析结果如图2所示。图2a展示了原始叠后数据的频谱图,图2b为经过多级分数阶微积分提频处理后的频谱图。从频谱对比中可明显发现,多级分数阶微积分提频方法有效拓宽了数据的频带范围,原始数据的频谱较为集中,主要集中在30 Hz附近,而经过提频处理后,

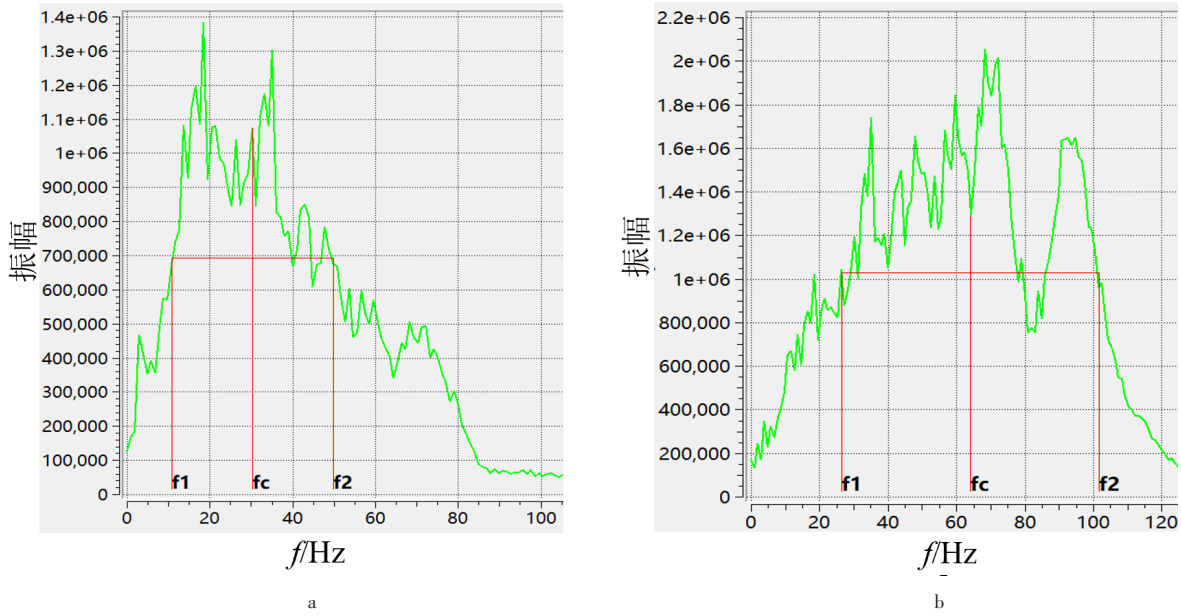


a—原始数据; b—多级分数阶提频方法数据。

a—Original seismic data; b—Seismic data after multi-level fractional calculus.

图1 海上资料提频前后地震剖面对比

Fig. 1 Comparison of seismic profiles before and after frequency enhancement of marine data



a—原始数据频谱；b—多级分数阶提频方法数据频谱。

a—Frequency spectrum of the original seismic data；b— Frequency spectrum of seismic data after multi-level fractional calculus.

图2 海上资料提频前后频谱对比

Fig. 2 Spectrum comparison before and after frequency enhancement of maritime data

数据的中心频率提升至 63 Hz,绝对带宽增大至 75 Hz。这一变化不仅表明了分数阶提频方法对数据频带的有效扩展,还进一步说明本方法能够提高地震数据的分辨率,提供更为丰富的频率成分。对于海洋数据而言,频率的提高意味着地震波能够穿透更深的地层,并提供更加清晰的地下结构图像,尤其在复杂的地质环境中,频率的提升有助于区分不同地质层和构造体。

2.2 多级分数阶微积分提频方法陆上实际应用

进一步将该方法应用于塔里木盆地顺北地区的陆上实际数据,以验证多级分数阶微积分方法在不同地质环境下的适用性。图 3 展示了工区原始叠后数据 Inline1910 的一个叠加剖面,图 4 是经过常规提频方法处理后的叠加剖面,而图 5 则是经过多级分数阶微积分提频方法处理后的叠加剖面。通过对比

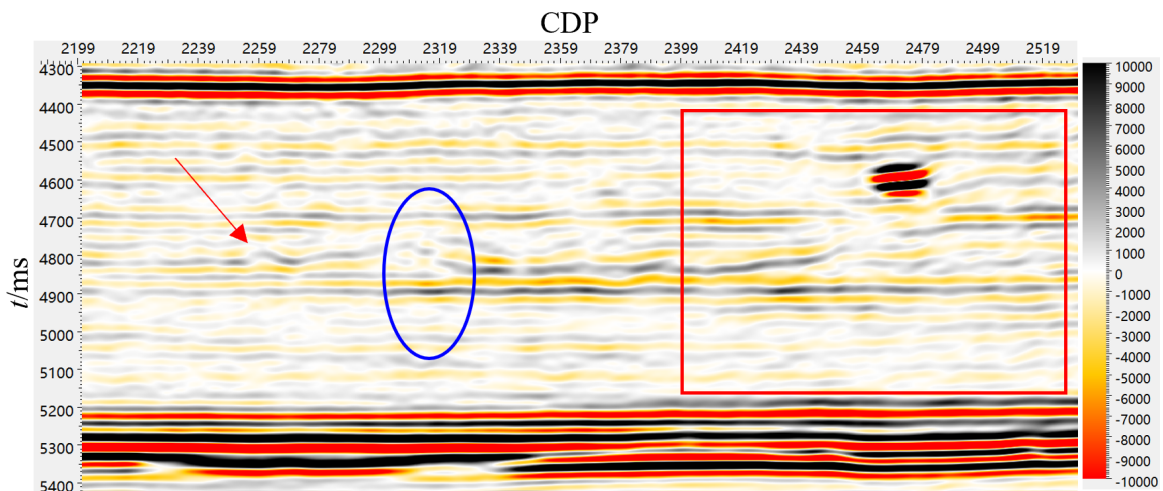


图3 原始叠后数据剖面

Fig. 3 Original post-stack data profile

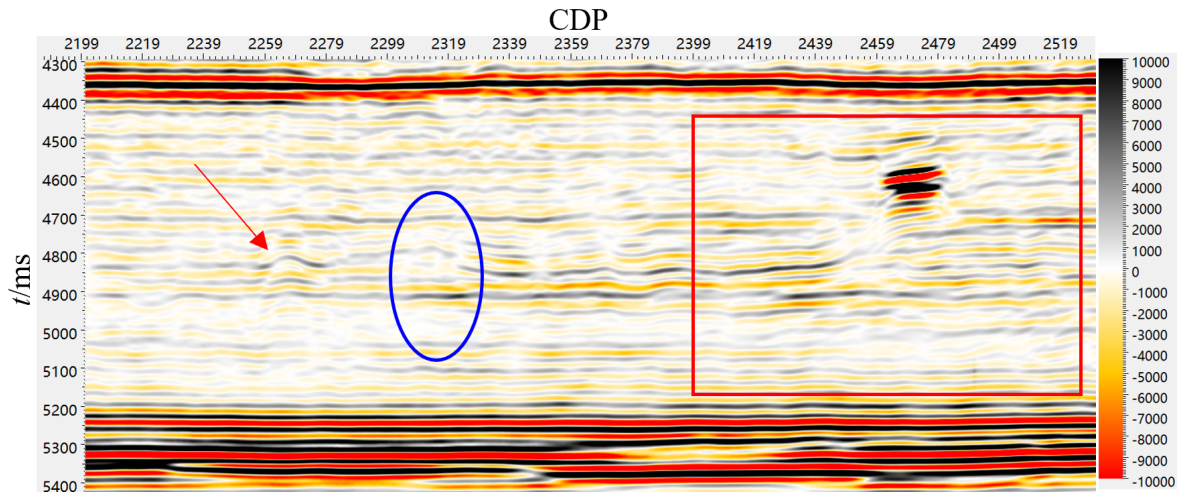


图4 常规提频方法剖面

Fig. 4 Conventional frequency boosting method profile

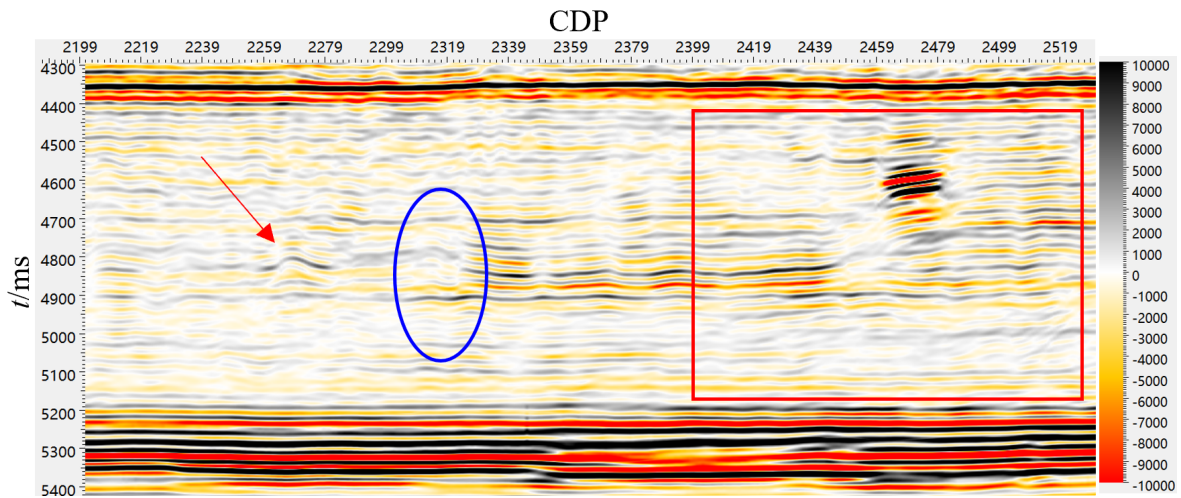


图5 多级分数阶微积分提频方法剖面

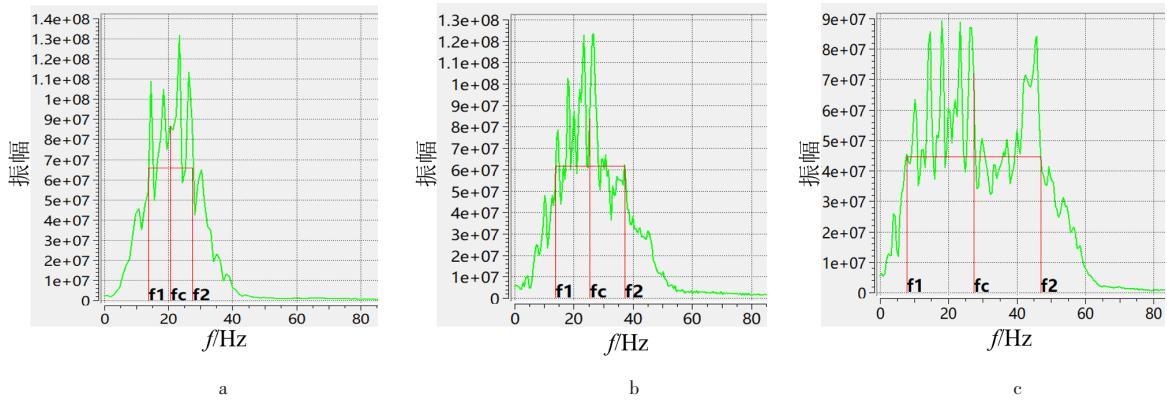
Fig. 5 Fractional calculus frequency boosting method profile

图3~5,可以清晰地观察到:经过多级分数阶微积分提频处理后的叠加剖面在断层的识别分辨率上有效提升,特别是在蓝色椭圆框内的区域。此外,从红色箭头所指示的部分可以看出,多级分数阶微积分提频处理对背斜构造的识别效果也得到了有效增强。经处理后的叠加剖面展现出更高的分辨率,使得地质构造的细节更加清晰,便于后续分析与解释。

进一步对图3~5中红框所示的数据进行频谱分析,结果如图6所示。图6a展示了原始数据的频谱图,频带范围主要集中在13~25 Hz之间。图6b则展示了经过常规提频方法处理的数据的频谱图,其频带范围有所扩大,主要

集中在15~38 Hz。图6c展示了经过分数阶提频处理后的叠加剖面的频谱图,主要频带范围扩展到了10~45 Hz。这一结果表明,分数阶提频方法有效地增强了地震资料的频带范围,尤其是在高频段的数据上表现突出,提高了地震资料的分辨率。

多级分数阶微积分提频方法不仅拓宽了频带,更重要的是通过优化频率域的处理,使得地震数据在时间-频率尺度上能够更准确反映地下结构的细节特征。图7展示了原始叠后数据与经过多级分数阶提频处理后的结果对比。图7a展示原始叠后数据的叠加剖面,而图7b则展示经过提频处理后的叠加剖面。从图7中的红色箭头所指的部分可以看出,经

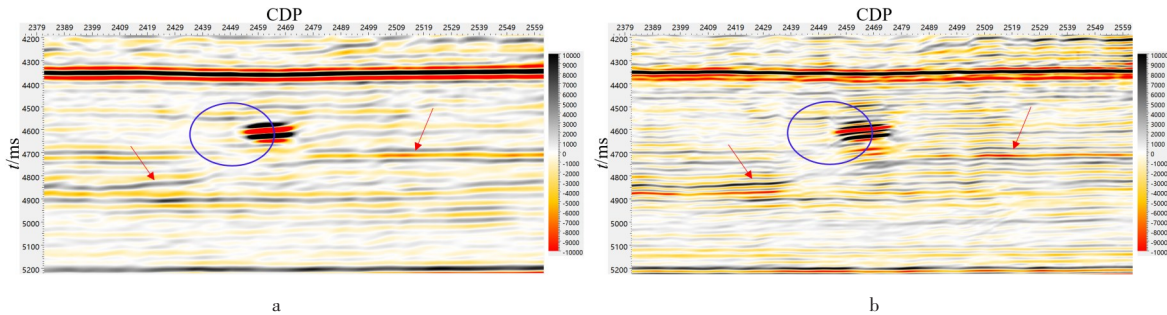


a—原始数据频谱；b—常规提频方法数据频谱；c—多级分数阶提频方法数据频谱。

a—Frequency spectrum of the original seismic data；b—Frequency spectrum of seismic data using conventional method；c—Frequency spectrum of seismic data after multi-level fractional calculus.

图 6 提频前后频谱对比

Fig. 6 Spectrum comparison before and after frequency enhancement



a—原始数据；b—多级分数阶提频方法数据。

a—Original seismic data；b—Seismic data after multi-level fractional calculus.

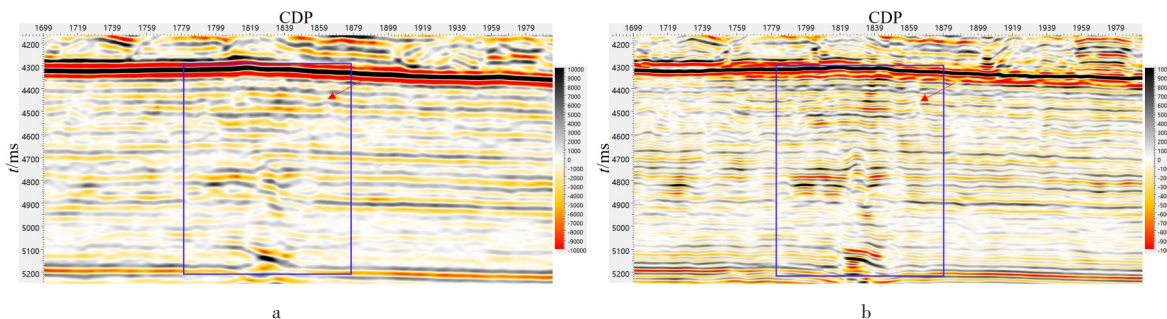
图 7 提频前后地震剖面对比

Fig. 7 Comparison of seismic profiles before and after frequency enhancement

过提频处理后的叠加剖面同相轴更加细致，分辨率提高。此外，通过蓝色椭圆框的分析，提频处理后叠加剖面的垂直分辨率也得到了明显提升。这些对比结果进一步验证了多级分数阶微积分提频方法在地震数据处理中的

有效性。

图 8 展示了工区 Xline1817 的叠加剖面，其中图 8a 为未经处理的原始叠后数据的叠加剖面，图 8b 则是经过多级分数阶微积分提频处理后的叠加剖面。从两幅图的对比中可以明显

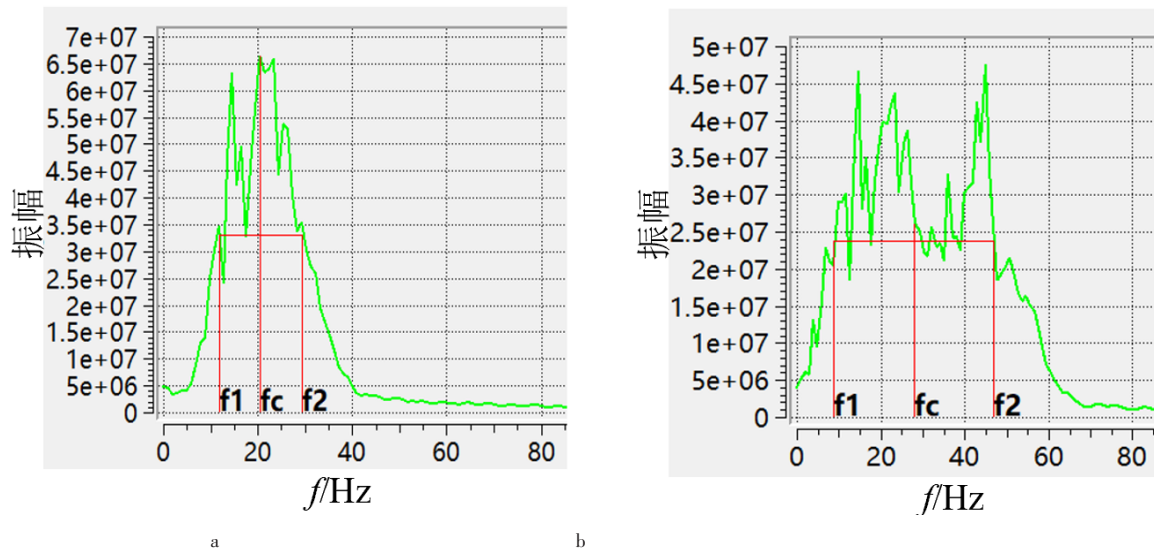


a—原始数据；b—多级分数阶提频方法数据。

a—Original seismic data；b—Seismic data after multi-level fractional calculus.

图 8 提频前后地震剖面对比

Fig. 8 Comparison of seismic profiles before and after frequency enhancement



a—原始数据频谱；b—多级分数阶提频方法数据频谱。

a—Frequency spectrum of the original seismic data; b—Frequency spectrum of seismic data after multi-level fractional calculus.

图9 提频前后频谱对比

Fig. 9 Spectrum comparison before and after frequency enhancement

看出,经过分数阶提频处理后的叠加剖面在整体分辨率上得到了有效提升。处理后的数据中,断点和小尺度断层的识别精度得到了增强。尤其是在细节特征的展现上,经过提频处理后的剖面能够清晰地揭示出原始叠后数据中难以辨认的结构,进一步证明了本方法在地震数据处理中的有效性和优势。

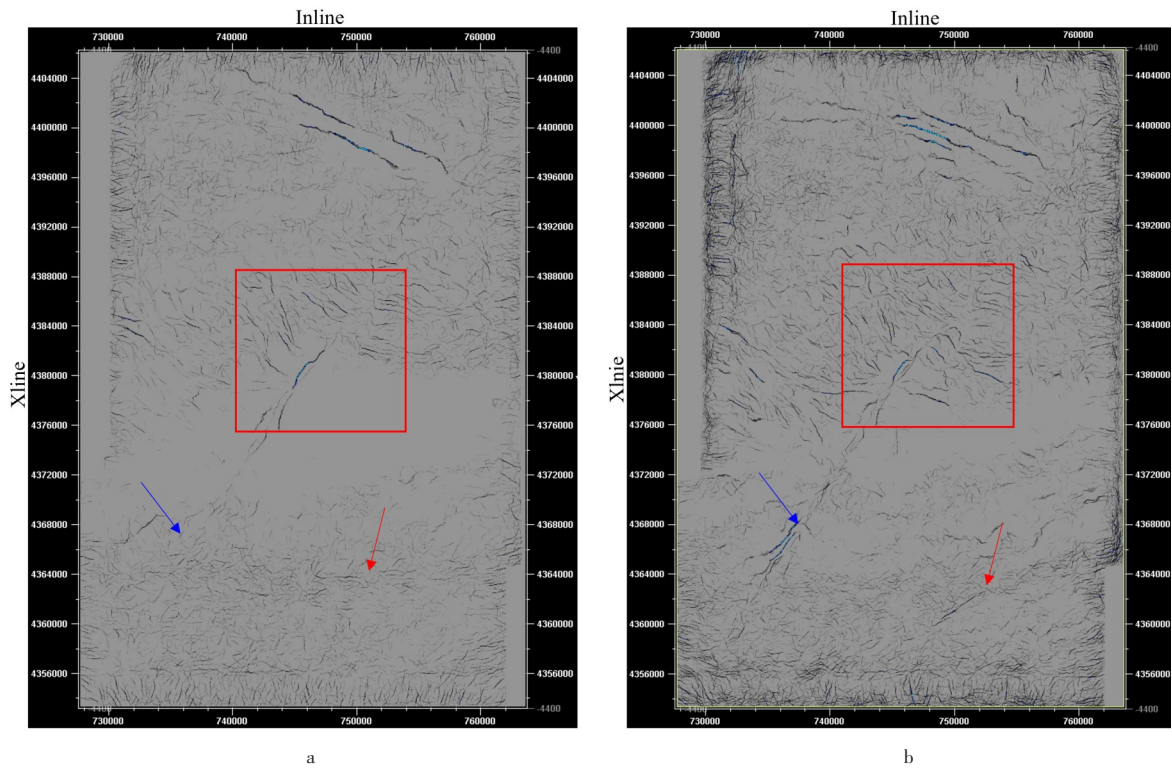
为进一步验证本方法的效果,对图8中蓝框区域进行了频谱分析,结果如图9所示。图9a展示了原始叠后数据的频谱图,图9b则为经过多级分数阶微积分提频处理后的频谱图。从频谱对比中可以清晰地看出,多级分数阶微积分提频方法有效拓宽了数据的频带范围。原始数据的中心频率为21 Hz,绝对带宽为17 Hz,而经提频处理后,数据的中心频率提升至27 Hz,绝对带宽增大至38 Hz。这一结果进一步证实了多级分数阶微积分提频方法在提高地震资料分辨率和拓宽频带范围方面的优势。

此外,使用工区数据进行了蚂蚁追踪以识别断裂。图10展示了在时间切片4 340 ms时,原始数据与经过多级分数阶微积分提频处理后的数据的蚂蚁追踪结果。图10a为原始数据的蚂蚁追踪结果,而图10b则为处理后数据的结果。从对比中可以看出,经过分

数阶提频处理后,红色箭头所指的断裂带变得更加清晰,周围的小断层也更加明显。蓝色箭头处,处理后的蚂蚁追踪结果更为聚焦,假象较少。此外,在红色矩形框内,多级分数阶提频后的数据对小断裂的识别更加清晰。

进一步对提频处理后的数据沿层位进行了相干体属性提取,图11展示了本工区T74层位的相干体切片。图11a为原始叠后数据的相干体切片,图11b则为经过多级分数阶微积分提频处理后的相干体切片。经过多级分数阶微积分提频处理后的数据在相干体断裂的识别上更加清晰,尤其对主干断裂的显示有明显增强。在红色矩形框内,原始叠后数据无法清晰识别的小断裂,在经过多级分数阶微积分提频处理后得以清楚地辨识出来。整体来看,处理后的数据在相干体上能够识别出更多的小断裂,且主干断裂的识别效果更为突出。这一结果验证了多级分数阶微积分提频方法在提高地震数据质量和识别能力方面的有效性。

通过上述应用,本方法不仅在海上地震数据处理应用中取得一定效果,也能在复杂陆上数据处理中发挥作用。通过多级分数阶微积分提频方法,能够有效增强数据的频带范围,从而提高地震资料的分辨率。

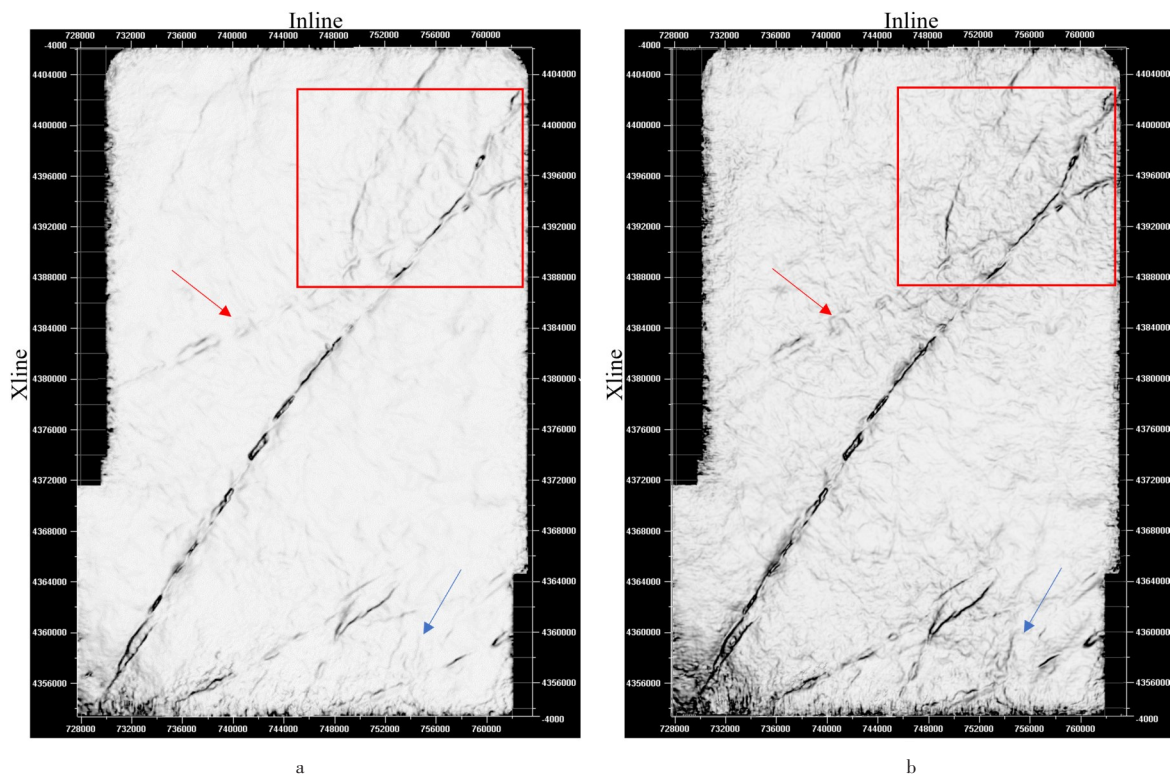


a—原始数据蚂蚁追踪属性；b—多级分数阶提频方法数据蚂蚁追踪属性。

a— Ant tracking attribute of original seismic data； b—Ant tracking attribute of seismic data processed by multi-level fractional calculus.

图 10 4 340 ms 时间切片蚂蚁追踪属性对比

Fig. 10 Comparison of ant tracking attributes with 4 340 ms time slice



a—原始数据相干属性；b—多级分数阶提频方法数据相干属性。

a—Coherence attribute of original seismic data； b—Coherence attribute of seismic data processed by multi-level fractional calculus.

图 11 T74 层位相干体属性对比

Fig. 11 Comparison of the properties of coherence attributes at the T74 horizon

4 结 论

基于海上和陆地实际资料的应用研究,分析了多级分数阶微积分提频方法在提高地震数据分辨率方面的应用效果,获得如下认识:

1) 基于多元高斯-贝叶斯框架,引入了多元高斯分布假设与贝叶斯统计反演理论,通过构建加权系数的高斯概率模型,利用后验概率矩阵量化求解不确定性,有效提升了多级分数阶微积分算法加权系数序列的计算精度与稳定性,为高精度地震数据提频处理提供了坚实的理论基础。

2) 频率成分融合处理结果表明:通过构建多阶分数阶微积分频谱分量并加权融合,能够有效拓宽地震信号的频带,有效增强了地质特征的识别能力,为复杂地质构造的精确分析提供了有效手段。

3) 通过渤海区域海上资料的应用测试,验证了多级分数阶微积分提频方法能够有效提高地震数据的分辨率,增强了复杂地质构造的识别能力,为海上油气勘探提供了可靠的数据支持。

4) 基于塔里木盆地顺北地区非均质断溶体储层的叠后数据与属性分析,进一步证明了本文方法在陆地复杂数据处理中的有效性,在一定程度上提高了地震剖面的分辨率和中小尺度断裂的识别能力。

参考文献

- 1 KOEFOED O. Aspects of vertical seismic resolution [J]. *Geophysical Prospecting*, 1981, 29(1): 21-30.
- 2 李子颖,秦明宽,郭庆银,等. 渗出砂岩型铀矿成矿预测与找矿标志[J]. *铀矿地质*, 2024, 40(1): 1-15.
LI Ziyang, QIN Mingkuan, GUO Qinyin, et al. Metallogenic prediction and exploration indication of exudative sandstone-type uranium deposit [J]. *Uranium Geology*, 2024, 40(1): 1-15 (in Chinese).
- 3 宁媛丽,李金鑫,赵威,等. 砂岩型铀矿高精度三维地震勘探砂体识别关键技术研究——以松辽盆地 HLJ 地区为例[J]. *世界核地质科学*, 2024, 41(6): 1156-1167.
NING Yuanli, LI Jinxin, ZHAO Wei, et al. Study on key techniques for identifying sand bodies in high-precision 3D seismic exploration of sandstone-type uranium deposit: An example from the HLJ region in Songliao basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(6): 1156-1167 (in Chinese).
- 4 乔宝平,潘自强,程纪星,等. 砂岩型铀矿地震反射波高精度成像关键问题分析 [J]. *世界核地质科学*, 2024, 41(6): 1065-1075.
QIAO Baoping, PAN Ziqiang, CHENG Jixing, et al. The key issue analysis for high-precision seismic reflection imaging of sandstone-type uranium deposit [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(6): 1065-1075 (in Chinese).
- 5 SHERIFF R E. Aspects of seismic resolution: Chapter 1 [M]. Tulsa: AAPG (American Association of Petroleum Geologists), 1985.
- 6 SHERIFF R E. Seismic resolution a key element [J]. *AAPG Explorer*, 1997, 18(10): 44-51.
- 7 TEN KROODE F, BERGLER S, CORSTEN C, et al. Broadband seismic data: The importance of low frequencies [J]. *Geophysics*, 2013, 78(2): WA3-WA14.
- 8 ZIOLKOWSKI A, HANSEN P, GATLIFF R, et al. Use of low frequencies for sub-basalt imaging [J]. *Geophysical Prospecting*, 2003, 51(3): 169-182.
- 9 KELLY S, RAMOS-MARTÍNEZ J, TSMELZON B. The effect of improved, low-frequency bandwidth in full waveform inversion for velocity [C]//SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG, 2009: SEG-2009-3974.
- 10 MENDEL J M. Optimal seismic deconvolution: An estimation-based approach [M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- 11 ROST S, THOMAS C. Improving seismic resolution through array processing techniques [J]. *Surveys in Geophysics*, 2009, 30: 271-299.
- 12 WANG Y. Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement [J]. *Geophysics*, 2006, 71(3): V51-V60.
- 13 汪小将,陈宝书,曹思远. HHT振幅频率恢复处理技术研究与应用[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(1): 19-22.
WANG Xiaojiang, CHEN Baoshu, CAO Siyuan. A research on HHT amplitude and frequency restoration technique and its application [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(1): 19-22 (in Chinese).
- 14 高静怀,汪玲玲,赵伟. 基于反射地震记录变子波模型提高地震记录分辨率[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1289-1300.

- GAO Jinghui, WANG Lingling, ZHAO Wei. Enhancing resolution of seismic traces based on the changing wavelet model of the seismogram [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1289-1300(in Chinese).
- 15 尚新民,刁瑞,冯玉苹,等.谱模拟方法在高分辨率地震资料处理中的应用[J].物探与化探,2014,38(1):75-80.
- SHANG Xinmin, DIAO Rui, FENG Yuping, et al. The application of spectral modeling method to high resolution processing of seismic data[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2014, 38(1): 75-80(in Chinese).
- 16 ZHOU Huailai, WANG Jun, WANG Mingchun, et al. Amplitude spectrum compensation and phase spectrum correction of seismic data based on the generalized S transform [J]. Applied Geophysics, 2014, 11(4): 468-478.
- 17 王元君,周怀来.时频域动态反褶积方法研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(1):1-10.
- WANG Yuanjun, ZHOU Huailai. Research of dynamic deconvolution method in time-frequency domain[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(1):1-10(in Chinese).
- 18 张彬彬,张军华,吴永亭.地震数据低频信号保护与拓频方法研究[J].地球物理学进展,2019,34(3):1139-1144.
- ZHANG Binbin, ZHANG Junhua, WU Yongting. Research on protection and extension for seismic low frequencies[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1139-1144(in Chinese).
- 19 赵圣亮,王晓明,王建华.一种简易的频率补偿方法[J].石油地球物理勘探,1994,29(2):231-235
- ZHAO Shengliang, WANG Xiaoming, WANG Jianhua. A simple frequency compensation method [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1994, 29(2): 231-235(in Chinese).
- 20 云美厚,纪陈宇,崔景涛.求导能否提高地震记录的分辨率[J].石油地球物理勘探,1997,32(5):740-748
- YUN Meihou, JI Zhenyu, CUI Jingtao. Can derivation improve the resolution of seismogram? [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(5): 740-748(in Chinese).
- 21 余德平,曹辉,王威彬.相干数据体及其在三维地震解释中的应用[J].石油物探,1998,37(4):75-79
- SHE Deping, CAO Hui, WANG Xianbin. Coherence cube with application to 3-D seismic interpretation[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1998, 37(4): 75-79(in Chinese).
- 22 SAJID M, GHOSH D. A fast and simple method of spectral enhancement[J]. Geophysics, 2014, 79(3): V75-V80.
- 23 郭欣,雍学善,高建虎,等.基于二阶谱及多阶微分融合的频谱拓展方法[J].地球物理学进展,2016,31(5):2095-2102.
- GUO Xin, YONG Xueshan, GAO Jianhu, et al. Seismic bandwidth broadening method based on bi-spectrum and multi-order differential fusion [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2095-2102(in Chinese).
- 24 廖科.分数阶微积分运算数字滤波器设计与电路实现及其应用[D].成都:四川大学,2006.
- LIAO Ke. Digital filter design and analog circuit implementation of fractional calculus with its application[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006(in Chinese).