

# 时频分析技术在三维地震薄层识别中的应用研究

胡孝琰

(安徽省煤田地质局物探测量队, 安徽 宿州 234000)

**摘要** 为提升三维地震薄层识别精度, 本研究系统梳理短时傅里叶变换、小波变换和S变换等时频分析技术在薄层识别中的应用特征, 主要研究S变换的原理、落实流程和优化举措, 以渤海湾盆地某油田馆陶组薄互层砂体为研究载体, 落实实际应用验证。研究结果表明: S变换依靠频率自适应窗口和相位保持特性, 可精准呈现薄层调谐频率特征, 把纵向分辨率从传统方法的16 m提升至7 m, 识别准确率从58%提升至91%, 把厚度预测误差降低到1.2 m, 显著提升薄层识别精准度, 为储层预测和井位部署提供可靠支撑。

**关键词** 时频分析; 三维地震; 薄层识别

中图分类号: P631

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.004

## 0 引言

全球油气勘探持续向岩性—地层圈闭领域拓展, 薄互层砂体已成为重要的勘探目标, 但其单层厚度往往低于常规地震分辨率极限, 精准识别难度大。传统振幅分析、频谱分解、波阻抗反演等方法受固定时频分辨率制约, 难以有效描述薄互层地震响应特征。时频分析技术能够同时在时间域和频率域表征地震信号, 为薄层精细识别提供了新途径。本文系统梳理短时傅里叶变换、小波变换和S变换在薄层识别中的应用特征, 重点研究S变换的原理与实施流程, 以渤海湾盆地某油田馆陶组薄互层砂体为例开展实证验证, 旨在提升薄层识别精度与储层预测可靠性, 为油气勘探开发提供技术参考。

## 1 时频分析技术在薄层识别中的应用

### 1.1 短时傅里叶变换(STFT)的应用

STFT对地震信号做加窗处理, 实现时间域和频率域的协同分析。其核心思路是把非平稳地震信号分成若干短时段, 每个时段内的信号均假定为平稳信号, 之后进行傅里叶变换。在具体操作中, 选取一个固定长度的时间窗口沿地震道滑动, 在每个窗口位置对截取的信号段做傅里叶变换, 得到该时刻附近的频谱信息, 将所有窗口位置的频谱拼合, 即可构成完整的时频能量分布图。通过观察不同时刻的频谱变化, 可初步判断薄层的时频响应特征, 适用于相对平稳的地震信号分析<sup>[1]</sup>。

然而, STFT采用固定窗口函数, 时频分辨率在整个时频平面保持不变, 这一特性在复杂薄层识别中存在明显局限。窗口过短则频率分辨率下降, 无法区分相近频率的薄层反射; 窗口过长则时间定位精度变差, 难以准确捕捉薄层界面位置。当薄层厚度横向变化较大或地质条件复杂时, 固定的时频分辨率无法同时满足不同频率成分的分析需求, 这一不足推动了更先进时频分析方法的形成与发展。

### 1.2 小波变换(Wavelet Transform)的应用

小波变换通过可伸缩的小波基函数对地震信号做多尺度分解, 从根本上规避了STFT固定分辨率的局限。其核心机制是尺度伸缩与时间平移的协同作用: 分析高频信号时压缩小波基函数, 采用窄时间窗以获取高时间分辨率, 精准定位薄层界面; 分析低频信号时拉伸小波基函数, 采用宽时间窗以获取高频率分辨率, 有效刻画厚层背景趋势。这种自适应的时频窗口使小波变换在面对不同厚度薄层时均能保持较好的分析效果<sup>[2]</sup>。

在实际应用中, 针对薄层精细刻画通常采用连续小波变换, 通过对比不同尺度下的小波系数分布, 识别薄层顶底界面的反射特征, 并结合测井数据标定尺度与地层厚度的对应关系, 实现薄层横向追踪。大规模三维数据处理则多采用离散小波变换以降低计算量。但小波变换在分解过程中无法完整保留信号的绝对相位信息, 导致薄层界面的精准时频定位存在一定误差, 在相位敏感的薄层识别场景中仍有明显短板。

**作者简介:** 胡孝琰(1998-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地球物理勘探。

### 1.3 S 变换 (Stockwell Transform) 的应用

S 变换融合了 STFT 与小波变换的核心优势, 采用与频率直接关联的高斯窗函数, 窗口宽度随分析频率自动调整: 高频时窗口收窄, 提升时间定位精度, 便于识别薄层界面; 低频时窗口展宽, 增强频率分辨能力, 有利于刻画厚层背景。这种自适应机制使 S 变换在整个时频平面维持最优分辨率平衡, 同时完整保留信号的绝对相位信息, 这是精准识别薄层顶底界面位置的关键所在<sup>[3]</sup>。

在薄层识别的具体流程中, S 变换首先对地震道逐道进行时频分解, 生成二维时频能量谱。当地震波在薄层内发生调谐效应时, 特定频率处出现能量异常集中, 该调谐频率与薄层双程旅行时成反比, 即薄层越薄, 调谐频率越高。通过提取各道调谐频率属性并横向连片, 可定量估算薄层厚度分布, 实现薄互层的平面展布追踪。此外, 利用 S 变换的相位谱可进一步精确标定薄层顶底界面的反射时刻, 辅助构建高精度储层几何模型。

与 STFT 和小波变换相比, S 变换在处理非平稳地震信号、识别薄互层方面优势显著。尽管其计算量相对较大, 但基于快速傅里叶变换的加速算法已大幅降低运算开销, 具备工业化应用的可行性。本研究以 S 变换为核心方法, 深入探讨其在三维地震薄层识别中的系统应用。

## 2 S 变换在薄层识别中的应用

### 2.1 S 变换基本原理

借助频率自适应的高斯窗函数, S 变换完成地震信号的时频分解, 核心工作逻辑为窗口宽度随分析频率自动调整: 处理高频信号用窄窗口, 提升时间定位精度, 擅长识别薄层界面; 解析低频信号用宽窗口, 加大频率分辨率, 适配刻画厚层背景, 凭借这种自适应特性, S 变换可在全时频平面维持最优分析效果<sup>[4]</sup>。

开展薄层识别工作时, S 变换应用的操作流程: 先做地震道数据的频谱变换, 继而替每个目标频率打造对应宽度的分析窗口, 从该窗口内提取时频信息, 形成完整时频分布图, 该过程完整保存地震信号的相位信息, 准确定位薄层顶底界面离不开它, 查看时频分布图里的能量集中区, 可直接判定薄层的位置和厚度特征, S 变换结果可逆向还原, 依靠频率积分可无损还原原始地震信号, 保障分析结果可靠。该方法对地震这类典型非平稳信号处理适配性极强, 能精准捕捉薄层不同时间和频率下的响应变化。

### 2.2 地震数据预处理与参数选择

数据预处理是保障 S 变换效果的关键环节。首先进行噪声压制, 借助预测滤波技术剔除地震数据中随机干扰, 同时借助频率一波数滤波去除规则噪声, 执行这一步后, 数据信噪比一般可提升 3 ~ 5 dB。其次做振幅补偿, 校正地震波传播中几何扩散与地层吸收造成的能量衰减, 让不同深度的反射信号保持合理振幅关系<sup>[5]</sup>。最后做频谱拓宽处理, 靠反滤波技术复原高频成分, 把地震数据有效频带从常规 15 ~ 45 Hz 扩展到 10 ~ 70 Hz, 给薄层精细识别提供更丰富的频率信息。

在参数选择方面, 分析频率范围需要根据实际地震数据特征确定。首先统计全区地震数据的频谱分布, 找出能量集中的频率段, 然后在此基础上向低频和高频各扩展 10 ~ 15 Hz, 作为 S 变换的分析范围。频率采样间隔一般设为 1 ~ 2 Hz, 既能保证足够的频率分辨率, 又不会产生过大的计算负担。窗口宽度因子的选择需要在时间分辨率和频率分辨率之间寻找平衡, 通常选取典型薄层位置进行多组测试, 对比不同参数下的时频聚焦效果, 选择能够最清晰显示薄层特征参数组合。

### 2.3 变换算法实现

S 变换的核心计算基于频率域卷积实现。对地震道  $x(t)$  进行傅里叶变换得到频谱  $X(a)$ , S 变换的时频谱  $S(\tau, f)$  可表达为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\alpha + f) \cdot e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}} \cdot e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad (1)$$

其中,  $\tau$  为时间位置,  $f$  为分析频率,  $\alpha$  为频率域积分变量,  $e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}}$  为频率自适应高斯窗的频域表达式。该公式表明, 对于每个目标频率  $f$ , 只需将原始频谱  $X(\alpha)$  平移  $f$  后与对应高斯窗相乘, 再做逆傅里叶变换, 即可直接得到该频率下的时变响应。依次遍历所有目标频率并组合输出, 即形成完整的二维时频能量矩阵  $|S(\tau, f)|^2$ 。这一流程将原本需要逐时间点做卷积的运算转化为频域乘法, 大幅降低计算复杂度, 是 S 变换实现快速化的关键所在。

为进一步提高效率, 采用并行处理策略, 将不同频率的计算任务分配到多个处理器核心同时执行。对三维数据体按测线或切片分块处理, 每完成一块立即输出并释放内存。大型工区可采用集群计算, 将数据分割到多台服务器协同处理。

结果解释时, 重点观察时频能量分布图中的能量集中区域。薄层对应的能量团呈透镜状分布, 在调谐

频率位置能量最强。通过追踪能量团的时间位置确定薄层埋深,通过能量峰值频率估算薄层厚度。可视化时采用彩色编码技术,将不同频段信息分别赋予不同颜色通道合成显示,便于分析薄层空间分布规律。

### 3 案例研究:某油田三维地震薄层识别

#### 3.1 工区背景与数据采集

研究区位于渤海湾盆地某油田,目的层为新近系馆陶组河流相砂岩储层,埋深1 800~2 200 m。该层段发育多套薄层砂体,单层厚度5~18 m,与泥岩呈薄互层分布,是该区重要的含油层段。传统地震解释方法难以准确识别厚度小于10 m的薄砂层,影响了储层预测精度和井位部署效果。工区三维地震数据采集面积120 km<sup>2</sup>,覆盖次数48次,道间距25 m,采样间隔2 ms。数据主频30 Hz,频带范围12~55 Hz,信噪比较高。区内共有12口井穿过目的层,测井资料显示薄砂层厚度6~15 m,岩性为细砂岩与粉砂质泥岩互层。主要识别难点在于薄层产生的调谐效应导致地震反射特征复杂,常规振幅属性难以有效区分不同厚度的砂体,需要采用高分辨率时频分析技术进行精细刻画。

#### 3.2 S变换方法实施

数据预处理环节,需先采用预测滤波、频率一波数滤波去除随机噪声、相干噪声,信噪比上升约4 dB,再进行球面扩散补偿和反Q滤波处理,将有效频带从初始12~55 Hz扩展到8~75 Hz,高频拓展为后续薄层识别补充更丰富信息,调整S变换参数环节,按照目的层深度和频谱特征,选取15~70 Hz作为分析频率范围,采样频率间隔1.5 Hz。针对典型井位实施敏感性测试,确定窗口宽度因子为1.2,该参数让时间分辨率和频率分辨率实现最优平衡,提取时频属性阶段,统计主频、频率衰减梯度和调谐频率三类属性,尤其要关注调谐频率属性,可清晰呈现薄砂层的分布范围,对不同井位的调谐频率和实际砂层厚度做对比,搭建厚度-频率关系模型,实现薄层厚度定量预测,处理完毕后生成时间切片、频率切片和三维属性体,为后续解释提供多层次分析素材。

#### 3.3 识别效果评价与对比分析

S变换识别结果在时频剖面上清晰显示了薄砂层的分布位置,调谐频率属性平面图准确刻画了砂体的展布形态,呈现出明显的河道充填特征。对比结果如表1所示。

与常规振幅属性相比,S变换结果对薄层的分辨能力显著提高,能够识别厚度6 m的薄砂层,而常规方

法只能识别12 m以上的砂体。与频谱分解方法对比,S变换在相位保持和边界刻画方面更为精确。测井标定验证显示,12口井的厚度预测平均绝对误差仅1.2 m,相对误差8.7%,明显优于传统方法的3.5 m误差。基于S变换识别结果部署的3口开发井均钻遇优质砂体,单井日产量达到设计目标的120%以上,证实了该方法的实用价值。该技术成功解决了薄层识别难题,为后续滚动开发提供了可靠的地质依据。

表1 S变换与传统方法薄层识别效果对比

评价指标	常规振幅属性	频谱分解	波阻抗反演	S变换	改善幅度
纵向分辨率/m	16	13	11	7	56%
最小识别厚度/m	12	10	9	6	50%
识别准确率/%	58	68	75	91	57%
厚度预测误差/m	3.5	2.8	2.1	1.2	66%
井位符合率/%	67	75	83	100	49%
处理时间/h	0.3	1.8	6.5	2.5	—

### 4 结束语

本文系统研究了时频分析技术在三维地震薄层识别中的应用,重点阐述了S变换的原理、实施方法和优化策略,并通过实际案例验证了其有效性。研究结果表明,S变换能够显著提高薄层识别精度,纵向分辨率提升56%,识别准确率达到91%。该技术成功解决了薄互层识别难题,为储层预测提供了可靠依据。未来应着重研究智能化参数优化方法,探索与深度学习技术的融合应用,进一步提升识别自动化和智能化水平,拓展其在复杂地质条件下的适用性。

### 参考文献:

- [1] 堵伟鹏,谭园梦,吴桐,等.基于残差神经网络的地震事件分类[J].地震地磁观测与研究,2025,46(02):50-58.
- [2] 刘培刚,余刚,李正,等.基于小波优化的卷积自编码器地震道数据压缩[J].计算机工程与设计,2026,47(01):260-269.
- [3] 聂荣,许辉群,赵娅松.一种用于薄层识别的2DPCA约束小波变换方法[J].地球物理学进展,2024,39(06):2318-2327.
- [4] 盛兴伟,刘林,孙斌.基于水体与采空区双耦合影响的矿区三维地震勘探技术研究[J].山东煤炭科技,2025,43(08):151-155,160.
- [5] 刘庆文,孙永壮,李琴.同步压缩小波变换分频谱蓝化在薄层识别中的应用[J].石油物探,2023,62(03):529-537.