

doi: 10.11720/wtyht.2021.1284

陈波, 朱国维, 武延辉, 等. 基于广义 S 变换的透射槽波埃里相识别[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1303-1310. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1284>

Chen B, Zhu G W, Wu Y H, et al. Research on identifying the airy phase of transmitted channel waves based on generalized S-transform[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1303-1310. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1284>

# 基于广义 S 变换的透射槽波埃里相识别

陈波<sup>1,2</sup>, 朱国维<sup>1,2</sup>, 武延辉<sup>1,2</sup>, 杨振强<sup>1,2</sup>, 周俊杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 透射槽波勘探是查明煤矿工作面地质情况的重要物探方法之一, 其频散曲线埃里相识别的合理性直接关系到后续工作面层析成像的准确性。目前, S 变换已被广泛应用到频散分析中, 然而由于 S 变换窗函数固定, 其应用效果受到限制, 为进一步提高频散曲线埃里相的识别精度, 本文将窗函数可调的广义 S 变换引入到频散曲线的分析中。对广义 S 变换的窗函数采用时间半高宽进行分析, 窗函数时间半高宽在给定频率范围内越宽, 其时间分辨率低; 频率分辨率增高, 窗函数宽度越窄, 则时间分辨率高、频率分辨率低。给出了时间半高宽与广义 S 变换参数的关系式, 可根据实际情况定量调节时频分辨率。计算表明, 在合理选择广义 S 变换参数的前提下, 广义 S 变换能有效提高时频分辨率, 改善频散曲线埃里相特征, 利于解释人员准确拾取透射槽波埃里相。

**关键词:** 广义 S 变换; 透射槽波; 频散; 埃里相

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2021)05-1303-08

## 0 引言

我国煤炭资源丰富, 分布广<sup>[1]</sup>, 但煤层赋存地质条件差, 致灾因素较多, 而地面地震勘探精度低, 无法满足煤矿企业对安全生产的需求, 因此在煤矿工作面内开展透射地震勘探为精细查明工作面内的地质情况提供了可能<sup>[2-3]</sup>。相对于围岩, 煤层速度低, 在煤层内激发地震波会产生沿煤层传播的槽波<sup>[4-5]</sup>。由于在煤层内传播的槽波携带了煤层的地质信息, 因此通过对透射槽波的分析可以查明工作面内的地质异常。频散是透射槽波的重要特征, 埃里相分布在频散曲线上速度最低能量强的位置, 其特征明显, 通过对频散曲线埃里相的分析可以获得工作面内煤层的速度及厚度<sup>[6-8]</sup>, 从而查明工作面内的地质情况。因此, 准确地从透射槽波频散曲线中识别埃里相显得尤为关键。

目前, 频散曲线的提取方法主要有基于单道分析的多次滤波法、移动时窗法、时频分析法及基于多

道分析的 F-K 域变换和拉东变换等<sup>[6]</sup>。在透射槽波的分析中, 需要对单道槽波提取频散曲线, 研究高精度的单道频散曲线的提取方法对透射槽波分析具有重要意义。Feng 和 Zhang<sup>[9]</sup>提出了时窗可变的 S 变换提取透射槽波频散曲线, 取得了较好效果, 但未讨论如何准确识别埃里相。笔者受 Li 等<sup>[10]</sup>的启发, 将广义 S 变换引入到透射槽波的频散曲线提取中, 并对参数的取值做出分析, 通过选取合理参数突出埃里相特征, 确保准确地识别出频散曲线中的埃里相。

## 1 广义 S 变换

Stockwell 等<sup>[11]</sup>提出了 S 变换, 其定义式如下:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

其逆变换为:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau \right\} e^{i2\pi ft} df, \quad (2)$$

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2021-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目“煤矿隐蔽致灾地质因素动态智能探测技术研究”(2018YFC0807800)

第一作者: 陈波(1984-), 男, 在读博士研究生, 主要从事地震信号分析及层析成像方面的研究工作。Email: chenbo20030925@qq.com

式中： $t$  为时间， $h(t)$  为待变换的时间序列信号； $f$  为频率， $\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}}$  为窗函数。在 S 变换中，窗函数是固定的，使其在应用中受到限制。因此，许多学者针对具体的应用问题对 S 变换进行一系列改进，得到了多种形式的广义 S 变换，在应用中取得了较好的效果。McFadden 等<sup>[12]</sup>提出了一种广义 S 变换处理齿轮振动信号，取得了一定效果；高静怀等<sup>[13]</sup>提出了四参数的广义 S 变换，其研究表明广义 S 变换能有效提升地震薄互层分析能力；Pinnegar 和 Mansinha<sup>[14]</sup>提出了一种窗函数尺度和形状可调节的广义 S 变换，并用于地震去噪研究，取得了较好的效果；广义 S 变换在改善地震分辨率<sup>[15-16]</sup>，提高地震储层预测精度<sup>[10,17-19]</sup>方面取得了大量研究成果；此外，张先武等<sup>[20]</sup>提出一种带有低通滤波效果的广义 S 变换，在探地雷达数据处理中取得了较好效果；邵广周等<sup>[21]</sup>应用广义 S 变换对近地表裂缝进行了研究，通过实例表明了该方法的有效性。

Li 等<sup>[10]</sup>构造了一种形式更为简洁的两参数广义 S 变换并展示了其良好的应用效果，定义式如下<sup>[10]</sup>：

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|Af + B|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 (Af+B)^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt, \quad (3)$$

式中： $\frac{|Af+B|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 (Af+B)^2}{2}}$  为窗函数，广义 S 变换的逆

变换形式与式(2)相同；当  $A=1, B=0$  时，广义 S 变换即变为标准 S 变换。为定量考查广义 S 变换  $A$  和  $B$  取值对窗函数时间宽度的影响，计算窗函数时间半高宽(temporal full width at half maximum, temporal FWHM)随频率变化图如图 1 所示。由图 1 可知，当  $A>1, B=0$  时，广义 S 变换窗函数宽度在 0~200 Hz 频率范围内比 S 变换窄，说明其时间分辨率比 S 变换高，根据海森堡不确定性原理，其频率分辨率降低；当  $A<1, B=0$  时，广义 S 变换窗函数宽度在 0~200 Hz 频率范围内比 S 变换宽，其时间分辨率比 S 变换低，频率分辨率增高；因此，可以根据实际问题合理选择  $A$  和  $B$  值调节时频分辨率。文献[10]未给出推导过程，直接给出了  $A, B$  值与时间半高宽及频率的关系式：

$$A = \frac{2.355 \times \left( \frac{1}{t_{FWHM1}} - \frac{1}{t_{FWHM2}} \right)}{f_1 - f_2}, \quad (4)$$

$$B = \frac{2.355}{t_{FWHM1}} - Af_1. \quad (5)$$

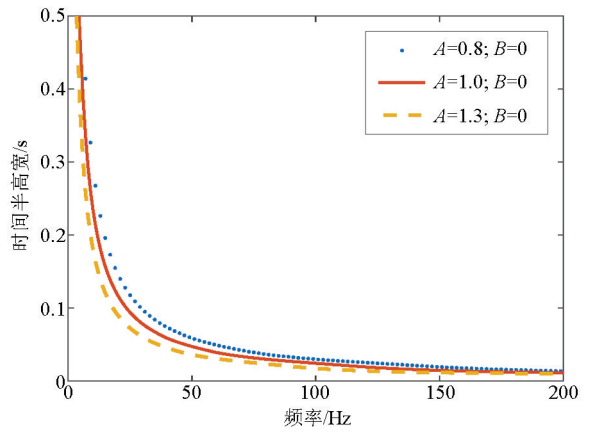


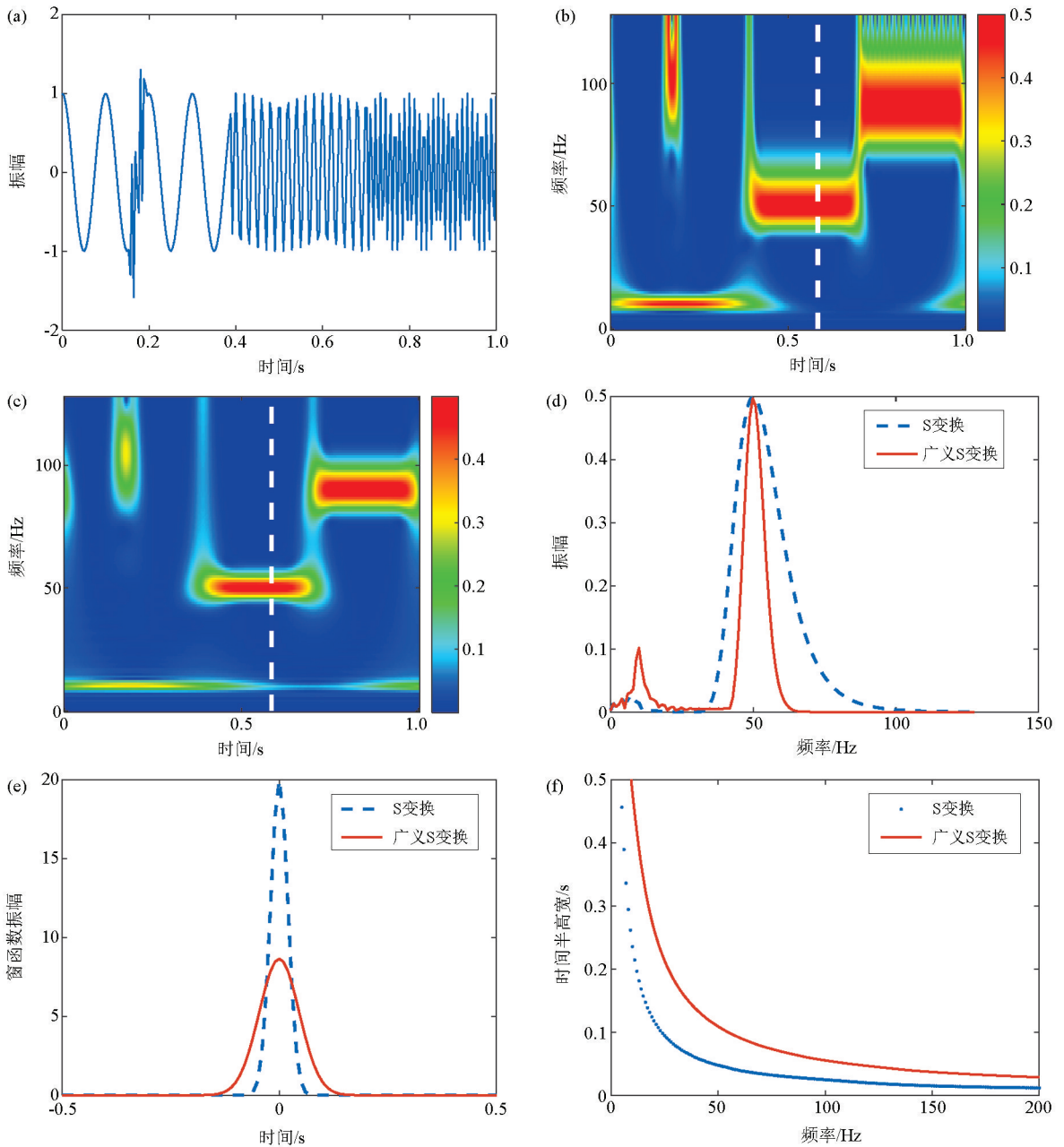
图 1 广义 S 变换窗函数时间半高宽随频率变化  
Fig. 1 Temporal FWHM of generalized S-transform window versus frequency

式中： $f_1, f_2$  为频率， $t_{FWHM1}, t_{FWHM2}$  为窗函数时间半高宽。当频率为  $f_1$  时，窗函数的时间半高宽为  $t_{FWHM1}$ ；当频率为  $f_2$  时，窗函数的时间半高宽为  $t_{FWHM2}$ 。附录 A 给出了详细推导，可以通过给定两个频率点的时间半高宽快速确定  $A$  和  $B$ 。

为检验广义 S 变换在提高信号时频分辨率方面的性能，利用合成信号进行了初步测试，图 2a 为频率呈阶梯变化的非平稳信号<sup>[22]</sup>，其中前部分为低频并包含一个高频信号，中间部分为中频，后部分为高频，信号的具体表达式如式(6)所示：

$$h(nT) = \begin{cases} \cos(2\pi nT \times 10) & n = [0, 99], T = 1/255 \\ \cos(2\pi nT \times 50) & n = [100, 179] \\ \cos(2\pi nT \times 90) & n = [180, 255] \\ h(nT) + \cos(2\pi nT \times 100) & n = [40, 49] \end{cases} \quad (6)$$

图 2b、2c 分别为图 2a 所示信号的 S 变换和广义 S 变换结果，从变换的结果可以看到，广义 S 变换信号的频率分辨率显著提高，在时频域中，阶梯状信号的能量聚集性更好，即频率分辨率提高，由海森堡不确定性原理，其时间分辨率降低，图 2c 中持续时间较短的高频信号能量相对发散，表明了其时间分辨率降低。图 2d 展示了图 2b 和图 2c 虚线处的线谱，相比 S 变换，广义 S 变换信号能量更集中，频率分辨率得到大幅提高。图 2e 为 50 Hz 时的 S 变换和广义 S 变换窗函数比较，广义 S 变换窗函数呈现出“矮”、“宽”特征，图 2f 为窗函数时间半高宽对比图，广义 S 变换窗函数整体比 S 变换宽，因此，其频率分辨率高于 S 变换。任取两点，由式(4)和式(5)即可确定  $A, B$  值，本例中  $A=0.4239, B=0.471$ 。



a—频率阶梯变化的非平稳信号;b—图 2a 的 S 变换结果;c—图 2a 的广义 S 变换结果;d—图 2b、图 2c 虚线处的线谱;e—50 Hz 时的 S 变换和广义 S 变换窗函数振幅随时间变化;f—S 变换和广义 S 变换窗函数时间半高宽对比

a—non-stationary signal with frequency step change;b—S-transform results of Fig. 2a;c—generalized S-transform results of Fig. 2a;d—line spectra at dotted lines in Fig. 2b and Fig. 2c;e—S-transform and generalized S-transform window amplitude versus time at 50 Hz;f—comparison of the temporal FWHM between S-transform and generalized S-transform

图 2 频率阶梯变化的非平稳信号的 S 变换和广义 S 变换 ( $A=0.4239, B=0.471$ ) 对比分析

Fig. 2 Comparison of S-transform and generalized S-transform ( $A=0.4239, B=0.471$ ) for non-stationary signal with frequency step change

表 1 合成 Love 型槽波物性参数

Table 1 Physical parameters of synthetic Love channel waves

岩性	厚度/m	横波速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )
顶板砂岩	$\infty$	1800	2600
煤层	2.4	1000	1300
底板砂岩	$\infty$	1800	2600

## 2 合成数据应用

利用文献[23]给出的 Love 型槽波计算方法合成槽波,计算参数如表 1 所示。

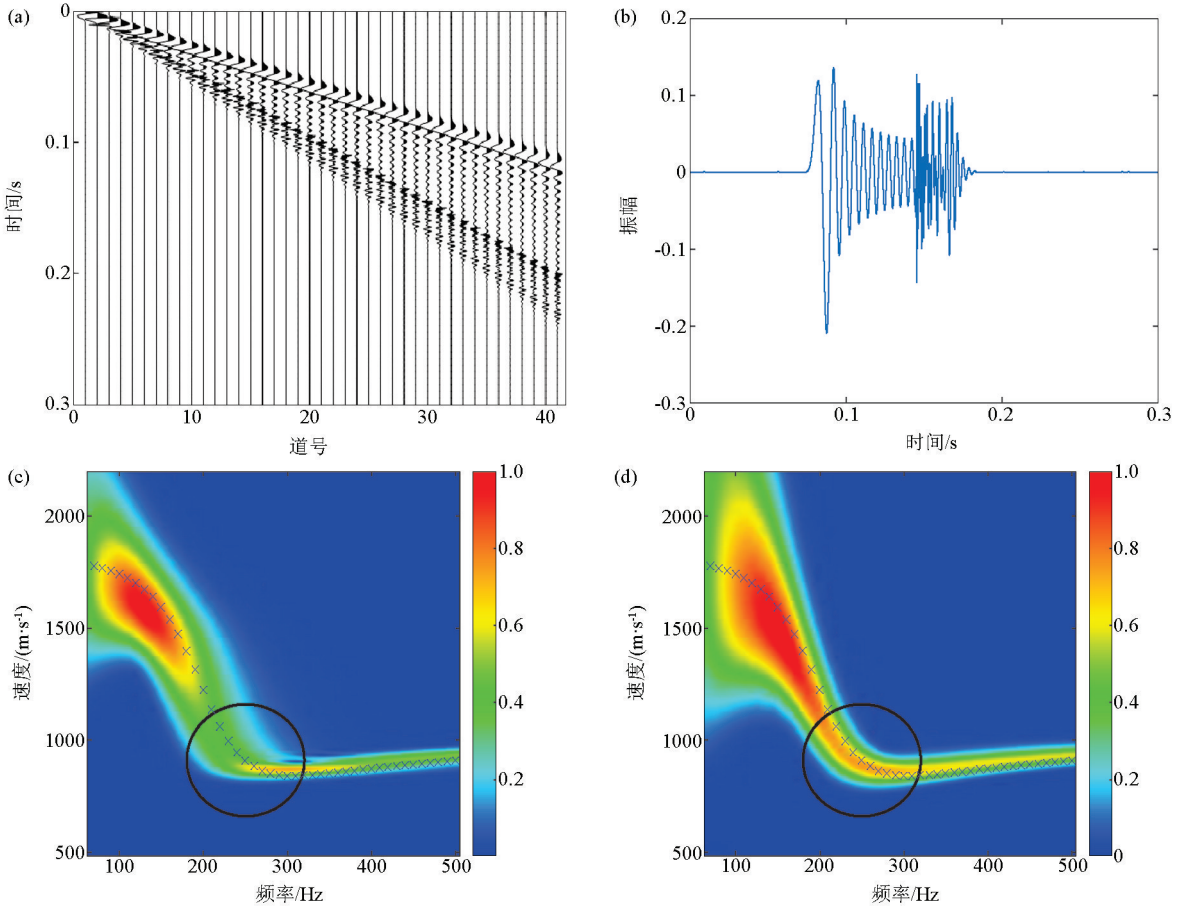
合成的 Love 型槽波如图 3a 所示,道间距为 5 m,共 41 道。取第 30 道进行群速度频散曲线提取,

提取过程简述如下:

首先将地震道变换到时频域  $S(t, f)$ , 然后用炮检距  $x$  除以  $t$ , 即得  $v = x/t$ , 最后对  $S(v, f)$  重新排序并插值得到群速度频散曲线图。

图 3b 为第 30 道 Love 型槽波记录, 图 3c 为图 3b 数据 S 变换提取的群速度频散曲线图, 其中星号线为 Love 型槽波群速度理论频散曲线<sup>[24-25]</sup> (下同), 由图可见, 提取的频散曲线与理论频散曲线一

致性较好, 说明了提取的频散曲线的正确性。在本例中, 广义 S 变换的目的是适度提高提取的频散曲线频率分辨率, 突出埃里相特征。图 3d 为图 3b 数据广义 S 变换结果, 从图可知, 频散曲线埃里相(图 3c、3d 黑色圆圈所示区域, 下同)能量聚集性明显比 S 变换更好, 更利于准确快速拾取埃里相。本例中, 广义 S 变换  $A$ 、 $B$  值与图 2 一致, 广义 S 变换的目的都是适度提高频率分辨率。

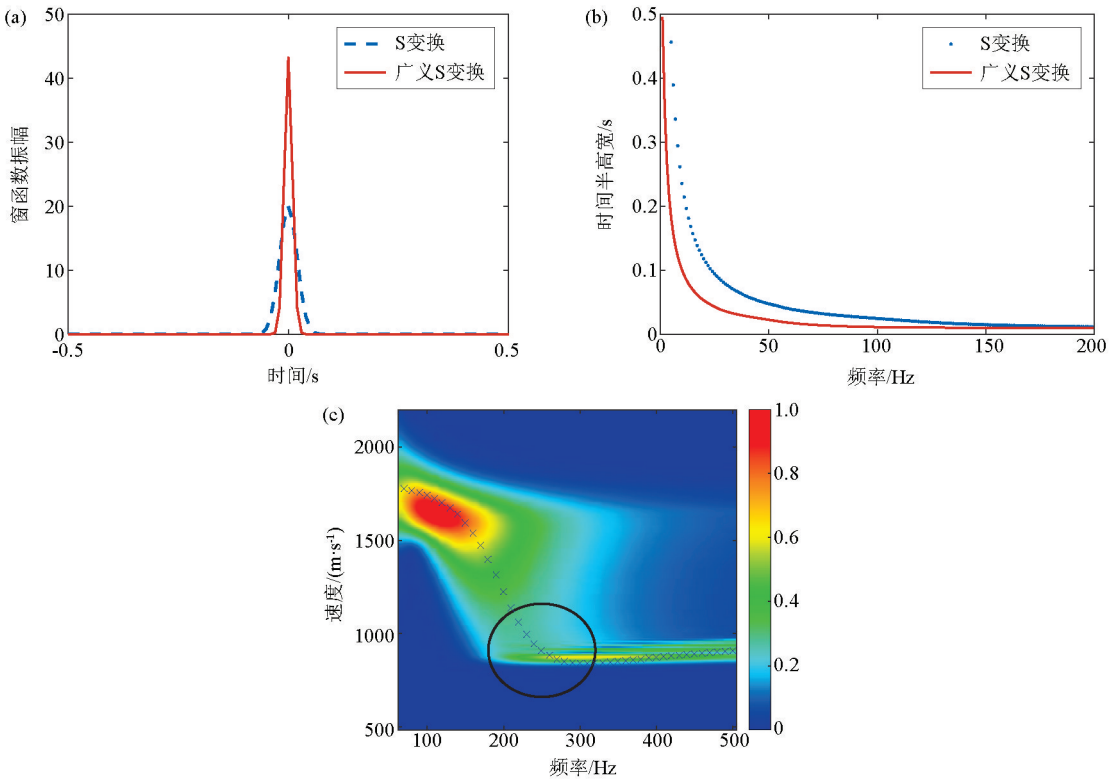


a—合成 Love 型槽波记录; b—图 3a 中第 30 道槽波记录; c—图 3b 数据 S 变换提取的频散曲线; d—图 3b 数据广义 S 变换提取的频散曲线  
a—synthetic Love channel waves; b—the 30<sup>th</sup> channel wave in Fig. 3a; c—dispersion curve of Fig. 3b extracted by S-transform; d—dispersion curve of Fig. 3b extracted by generalized S-transform

图 3 合成 Love 型槽波数据 S 变换和广义 S 变换 ( $A=0.4239, B=0.471$ ) 提取频散曲线对比分析  
Fig. 3 Comparison of the dispersion curve extracted by S-transform and generalized S-transform ( $A=0.4239, B=0.471$ ) for synthetic Love channel waves

为进一步说明广义 S 变换  $A$ 、 $B$  取值对频散曲线埃里相特征的影响, 与图 3 相反, 我们取一组值  $A=2.1195, B=2.355$ , 使广义 S 变换窗函数时间半高宽整体比 S 变换窄, 广义 S 变换窗函数呈现出“高”、“窄”特征, 如图 4a 所示, 图 4b 为窗函数时间半高宽对比, 广义 S 变换窗函数整体比 S 变换窄, 其时间分辨率高于 S 变换, 由海森堡不确定性原理, 频

率分辨率低于 S 变换。利用此广义 S 变换对图 3b 数据进行处理, 提取的群速度频散曲线如图 4c 所示 (埃里相所在区域由黑色圆圈所示), 可以看到, 相比 S 变换提取的群速度频散曲线图 3c, 图 4c 中埃里相所在区域黑色圆圈所示完全无法识别, 因此, 通过图 3、图 4 的分析可知, 利用广义 S 变换适度提高频率分辨率更有利于埃里相的识别。



a—50 Hz 时的 S 变换和广义 S 变换窗函数振幅随时间变化;b—S 变换和广义 S 变换窗函数时间半高宽对比;c—图 3b 所示数据广义 S 变换提取的频散曲线

a—S-transform and generalized S-transform window amplitude versus time at 50 Hz;b—comparison of temporal FWHM between S-transform and generalized S-transform;c—dispersion curve of Fig. 3b extracted by generalized S-transform

图 4 合成 Love 槽波数据广义 S 变换 ( $A=2.1195, B=2.355$ ) 提取频散曲线

Fig. 4 Dispersion curve extracted by generalized S-transform ( $A=2.1195, B=2.355$ ) for synthetic Love channel waves

为测试广义 S 变换在含噪情况下对数据的处理能力,在图 3a 所示的数据中加入随机噪声,得到如图 5a 所示数据。图 5a 中第 30 道槽波记录如图 5b 所示,对图 5b 所示数据进行 S 变换和广义 S 变换分析,广义 S 变换  $A, B$  值与图 3 取值一致,图 5c 为 S 变换提取的频散曲线,图 5d 为广义 S 变换提取的频散曲线,两种方法提取的频散曲线与理论频散曲线一致性均较好,但广义 S 变换提取的频散曲线埃里相更易于识别,进一步说明广义 S 变换在数据含噪情况下也能突出埃里相特征。

### 3 实际资料应用

图 6a 为某工作面第 12 炮第 10 道透射槽波记录,图 6b、6c 分别为图 6a 数据 S 变换和广义 S 变换 ( $A=0.4239, B=0.471$ ) 提取的频散曲线,从两图对比看到,相比图 6b,图 6c 埃里相能量更集中,群速度频散曲线埃里相特征更明显,可以迅速确定埃里相位于图 6c 中黑色圆圈所示区域,而从图 6b 所示频散曲线图中识别埃里相则相对困难。因此,广义

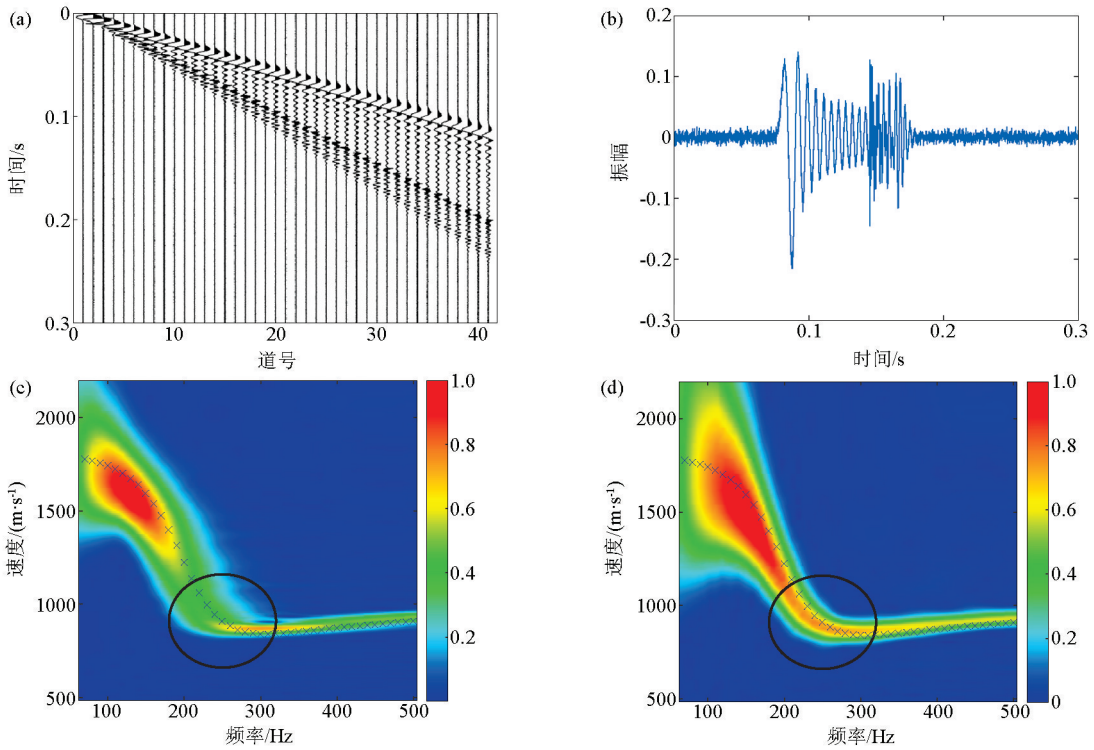
S 变换提取的频散曲线更有利于准确拾取透射槽波埃里相,使解释人员能较快速地识别埃里相频率及速度,从而为下一步工作面层析成像研究奠定坚实基础。

### 4 结论

1) 讨论了广义 S 变换中参数的取值与时频分辨率的关系,并推导了其参数与窗函数时间半高宽的具体表达式,为定量表征时频分辨率奠定基础。

2) 广义 S 变换的数值试验表明,通过合理选择参数,广义 S 变换能够有效提高时间或频率分辨率,根据海森堡不确定性原理,在提高频率分辨率的同时,时间分辨率会有所下降,反之亦然,因此,需根据实际情况合理选择参数,提高时频分辨率。

3) 将广义 S 变换引入到透射槽波频散曲线提取中,研究认为广义 S 变换能有效改善频散曲线的时频分辨率,通过选取合适的参数能进一步有效突出频散曲线中埃里相特征,使解释人员能准确快捷地识别透射槽波埃里相。



a—图 3a 加入随机噪声后的 Love 型槽波记录;b—图 5a 中第 30 道槽波记录;c—图 5b 数据 S 变换提取的频散曲线;d—图 5b 数据广义 S 变换提取的频散曲线

a—synthetic Love channel waves with adding random noise to Fig. 3a;b—the 30<sup>th</sup> channel wave in Fig. 5a;c—dispersion curve of Fig. 5b extracted by S-transform;d—dispersion curve of Fig. 5b extracted by generalized S-transform

**图 5 合成 Love 槽波数据中加入随机噪声后 S 变换和广义 S 变换 ( $A=0.4239, B=0.471$ ) 提取频散曲线对比分析**  
**Fig. 5 Comparison of the dispersion curve extracted by S-transform and generalized S-transform**  
**( $A=0.4239, B=0.471$ ) for synthetic Love channel waves with adding random noise**

**参考文献 (References):**

[1] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625 - 1636.  
 Wu Q, Tu K, Zeng Y F, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625 - 1636.

[2] 胡国泽, 滕吉文, 皮娇龙, 等. 井下槽波地震勘探——预防煤矿灾害的一种地球物理方法[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 439 - 451.  
 Hu G Z, Teng J W, Pi J L, et al. In-seam seismic exploration techniques—a geophysical method predicting coal-mine disaster[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 439 - 451.

[3] 张强, 雍自春, 龙自阳, 等. 槽波地震探测技术在金家渠煤矿首采工作面断层探查中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(s1): 33 - 36.  
 Zhang Q, Yong Z C, Long Z Y, et al. Application of channel wave seismic technique in detection of faults in the first working of Jinjiaqu Colliery[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(s1): 33 - 36.

[4] Evison F F. A coal seam as a guide for seismic energy[J]. Nature,

1955, 176(4495): 1224 - 1225.

[5] Krey T C. Channel waves as a tool of applied geophysics in coal mining[J]. Geophysics, 1963, 28(5): 701 - 714.

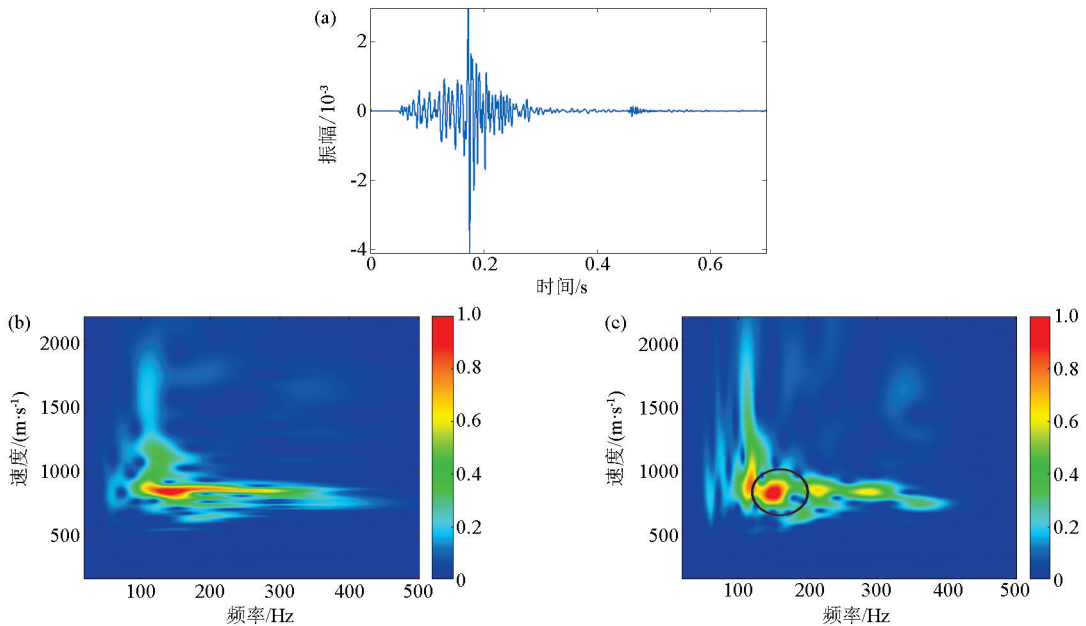
[6] 王伟, 高星, 李松营, 等. 槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用——以河南义马矿区为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1054 - 1062.  
 Wang W, Gao X, Li S Y, et al. Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: An example from Henan Yima Mining area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1054 - 1062.

[7] 乐勇, 王伟, 申青春, 等. 槽波地震勘探技术在工作面小构造探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 74 - 77.  
 Le Y, Wang W, Shen Q C, et al. Application of ISS in detection of small structures in working face[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(4): 74 - 77.

[8] 傅皓淳. 煤田槽波地震勘探中层析成像技术应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.  
 Fu H C. Study on seismic tomography in In-Seam seismic exploration in coal field [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[9] Feng L, Zhang Y. Dispersion calculation method based on S-transform and coordinate rotation for Love channel waves with two components[J]. Acta Geophysica, 2017, 65(4): 757 - 764.

[10] Li D, Castagna J, Goloshubin G. Investigation of generalized S-



a—某工作面第 12 炮第 10 道透射槽波记录;b—图 6a 数据 S 变换提取的频散曲线;c—图 6a 数据广义 S 变换提取的频散曲线

a—the 10<sup>th</sup> transmitted channel wave of the 12<sup>th</sup> shot in a coal mining face;b—dispersion curve of Fig. 6a extracted by S-transform;c—dispersion curve of Fig. 6a extracted by generalized S-transform

图 6 实际槽波数据的 S 变换和广义 S 变换 ( $A=0.4239, B=0.471$ ) 提取频散曲线对比分析

### Fig. 6 Comparison of the dispersion curve extracted by S-transform and generalized S-transform ( $A=0.4239, B=0.471$ ) for real data

transform analysis windows for time-frequency analysis of seismic reflection data [J]. *Geophysics*, 2016, 81(3): V235 - V247.

[11] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum; The S transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998 - 1001.

[12] McFadden P D, Cook J G, Forster L M, et al. Decomposition of gear vibration signals by the generalized S transform [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1999, 13: 691 - 707.

[13] 高静怀, 陈文超, 李幼铭, 等. 广义 S 变换与薄互层地震响应分析 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 526 - 532.

Gao J H, Chen W C, Li Y M, et al. Generalized S transform and seismic response analysis of thin interbeds [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(4): 526 - 532.

[14] Pinnegar R, Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape [J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 381 - 385.

[15] 刘喜武, 年静波, 刘洪. 基于广义 S 变换的吸收衰减补偿方法 [J]. *石油物探*, 2006, 45(1): 9 - 14.

Liu X W, Nian J B, Liu H. Generalized S-transform based compensation for stratigraphic absorption of seismic attenuation [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(1): 9 - 14.

[16] Tian J, Song W, Yang F. Enhancing the resolution of seismic data based on the generalized S-transform [J]. *Petroleum Science*, 2009, 6: 153 - 157.

[17] 陈学华, 贺振华, 黄德济, 等. 时频域油气储层低频阴影检测 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(1): 215 - 221.

Chen X H, He Z H, Huang D J, et al. Low frequency shadow detection of gas reservoirs in time-frequency domain [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 215 - 221.

[18] 夏亚良, 魏小东, 叶玉峰, 等. 广义 S 变换多频解释技术及其在薄层评价中的应用 [J]. *物探与化探*, 2019, 43(1): 168 - 175.

Xia Y L, Wei X D, Ye Y F, et al. Generalized S transform multi-frequency interpretation technique and its application in thin reservoir evaluation [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(1): 168 - 175.

[19] 安鹏, 于志龙, 刘专, 等. 敏感频率地震属性在薄层砂体预测中的应用——以松辽盆地肇源地区为例 [J]. *物探与化探*, 2020, 44(2): 321 - 328.

An P, Yu Z L, Liu Z, et al. The application of sensitive frequency seismic attributes to thin sand body prediction: Exemplified by Zhaoyuan area in Songliao Basin [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(2): 321 - 328.

[20] 张先武, 高云泽, 方广有. 带有低通滤波的广义 S 变换在探地雷达层位识别中的应用 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1): 309 - 316.

Zhang X W, Gao Y Z, Fang G Y. Application of generalized S transform with lowpass filtering to layer recognition of Ground Penetrating Radar [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1): 309 - 316.

[21] 邵广周, 董晋, 董兆堂. 利用瑞利波广义 S 变换探测近地表裂缝 [J]. *物探与化探*, 2018, 42(2): 398 - 404.

Shao G Z, Dong J, Dong Z T. The application of generalized S-transform of Rayleigh waves to detecting near-surface fissures [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(2): 398 - 404.

[22] 陈学华, 贺振华. 改进的 S 变换及在地震信号处理中的应用 [J]. *数据采集与处理*, 2005, 20(4): 449 - 453.

Chen X H, He Z H. Improved S-transform and its application in seismic signal processing [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2005, 20(4): 449 - 453.

[23] 程久龙. Love 型槽波理论地震图的计算 [J]. *山东矿业学院学*

报,1994,13(4):349-353.

Cheng J L. Calculation of theoretical seismograms of Love channel waves[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1994,13(4):349-353.

[24] Räder D, Schott W, Dresen L, et al. Calculation of dispersion curves and amplitude-depth distributions of love channel waves in horizontally-layered media [ J ]. Geophysical Prospecting, 1985,

33;800-816.

[25] 杨真,冯涛,Wang S G. 0.9 m 薄煤层 SH 型槽波频散特征及波形模式[J]. 地球物理学报,2010,53(2):442-449.

Yang Z, Feng T, Wang S G. Dispersion characteristics and wave shape mode of SH channel wave in a 0.9 m thin coal seam [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2010,53(2):442-449.

### Research on identifying the airy phase of transmitted channel waves based on generalized S-transform

CHEN Bo<sup>1,2</sup>, ZHU Guo-Wei<sup>1,2</sup>, WU Yan-Hui<sup>1,2</sup>, YANG Zhen-Qiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Jun-Jie<sup>1,2</sup>

(1. School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Transmission seismic exploration in the coal mining face is one of the important geophysical surveys to figure out the geological hazards of coal seam. The rationality of identifying the airy phase from the transmitted channel waves is closely related to the accuracy of the tomography. Nowadays, S-transform is widely used in the analysis of dispersion curve, however, its application is limited with the fixed window. In order to improve the identification accuracy of the airy phase of the dispersion curve, this paper introduces the generalized S-transform with adjustable window into the analysis of dispersion curve. The window of generalized S-transform is analyzed by temporal full width at half maximum (temporal FWHM). For a frequency range, a wider window indicates a lower temporal resolution and a higher frequency resolution, and a narrower window indicates a higher temporal resolution and a lower frequency resolution. The time-frequency resolution can be adjusted quantitatively according to the relationship between the temporal FWHM and the parameters of generalized S-transform in application. The synthetic and real data result show that the generalized S-transform can effectively improve the time-frequency resolution and the airy phase characteristics of the dispersion curve. It is helpful for the interpreter to pick up the airy phase of the transmitted channel waves accurately.

**Key words:** generalized S-transform; transmitted channel waves; dispersion curve; airy phase

( 本文编辑:叶佩)

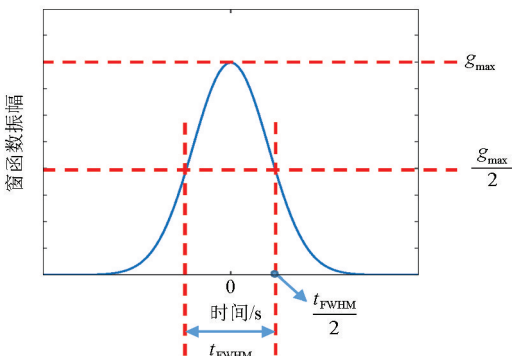
#### 附录 A:

广义 S 变换窗函数:  $g(t) = \frac{|Af+B|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2(Af+B)^2}{2}}$ 。当  $t=0$  时,

窗函数最大值为:  $g_{max} = \frac{|Af+B|}{\sqrt{2\pi}}$ , 窗函数的时间半高宽为

$t_{FWHM}$ , 如下图所示, 有:  $\frac{|Af+B|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{FWHM}/2)^2(Af+B)^2}{2}} = \frac{g_{max}}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{|Af+B|}{\sqrt{2\pi}}$

$\frac{|Af+B|}{\sqrt{2\pi}}$



设频率为  $f_1$  时, 窗函数的时间半高宽为  $t_{FWHM1}$ , 频率为  $f_2$  时, 窗函数的时间半高宽为  $t_{FWHM2}$ 。则有方程组:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \times \frac{|Af_1 + B|}{\sqrt{2\pi}} = \frac{|Af_1 + B|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{FWHM1}/2)^2(Af_1+B)^2}{2}} \\ \frac{1}{2} \times \frac{|Af_2 + B|}{\sqrt{2\pi}} = \frac{|Af_2 + B|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{FWHM2}/2)^2(Af_2+B)^2}{2}} \end{cases}$$

化简得:

$$\begin{cases} t_{FWHM1}(Af_1 + B) \approx 2.355 \\ t_{FWHM2}(Af_2 + B) \approx 2.355 \end{cases}$$

解得 A、B 为:

$$\begin{cases} A = \frac{2.355 \times \left( \frac{1}{t_{FWHM1}} - \frac{1}{t_{FWHM2}} \right)}{f_1 - f_2} \\ B = \frac{2.355}{t_{FWHM1}} - Af_1 \text{ 或 } \frac{2.355}{t_{FWHM2}} - Af_2 \end{cases}$$