



## 接收函数方法研究进展

安张辉<sup>1,2</sup>, 周民都<sup>1,2</sup>, 吴庆举<sup>3</sup>, 柏琳<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 远震 P 波波形数据中包含了大量的地震台站下方地壳和上地幔速度间断面所产生的 PS 转换波及其多次反射波的信息, 由此提取的接收函数是了解地壳上地幔速度精细结构的重要步骤之一。本文介绍了目前在提高接收函数结果的稳定性和精度方面的研究进展, 包括石油勘探中一些成熟的地震反射处理方法逐步渗透到接收函数的研究领域。这些处理方法以前所未有的分辨率展示了地壳上地幔结构的横向非均匀性。

**关键词:** 接收函数 S 波速度结构 反褶积 横向非均匀性

中图分类号: P315.3<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)04-0362-03

### 0 引言

地震波资料的主要用途之一是研究地球内部的速度结构, 地球内部结构认识的深化也促进了地震学研究方法的发展, 地球物理学家越来越意识到地震波波形信息对于揭示地球内部精细结构的重要性。远震 P 波波形数据中包含了大量地震台站下方地壳和上地幔速度间断面所产生的 PS 转换波及其多次反射波的信息, 在远震体波波形模拟基础上发展起来的接收函数方法<sup>[1-2]</sup>, 已逐步成为地球内部物理、地壳上地幔结构研究的重要手段, 特别是反演台站下方 S 波速度结构的有效手段。本文简单介绍了接收函数方法的基本原理, 并较为详细地叙述了该方法的研究进展。

### 1 接收函数的基本原理

接收函数的数学概念是指用三分量远震 P 波波形的水平分量和垂向分量, 在频率域相除并反变换回时间域所得到的时间序列。Langston 把远震平面 P 波产生的地表位移响应在时间域表示成三项(入射平面波的有效震源时间函数, 仪器的脉冲响应和介质结构脉冲响应)的褶积形式<sup>[3]</sup>。对许多波形简单的远震事件的观测和典型地壳模型的理论计算表明<sup>[4-7]</sup>, 深源远震地表位移的垂直分量表现为有效震源时间函数与仪器响应的褶积, 这样地表位移的垂直分量可认为与接收介质无关。在三分量地震仪的脉冲响应一致的情况下, 用垂直分量对径向分量和切向分量分别作反褶积处理, 就可以得到径向和切向的接收函数。

### 2 接收函数方法的研究进展

刘启元、陈九辉等在提取远震接收函数时认识到, 时间域中接收函数的垂直分量近似为  $\delta$  函数的等效震源假定仅适用于地壳结构比较光滑的情况下。等效震源假定的失效通常表现为接收函数的信噪比大大下降。解决上述问题的唯一办法在于避开等效震源的假定, 尽可能有效地估计接收函数的垂直分量<sup>[8]</sup>。Shamway 和 Der<sup>[9]</sup>曾提出线性回归模型的多道数据的最大或然性反褶积方法。刘启元和 Kind 曾利用最大或然性反褶积原理给出了由单个台站记录的三分量远震体波波形数据估计远震接收函数的复谱比方法<sup>[2,10]</sup>。2001 年又把上述方法扩展到由多个台站组成的台阵观测情况, 以避免等效震源的假定, 并进一步估计三分量接收函数。这对在复杂构造环境条件下获取高信噪比的接收函数估计无疑具有重要的实际意义<sup>[11]</sup>。

经过近二十年的不断发展和完善, 接收函数在反褶积方法上取得了长足的进步。如多道反褶积方法, 用其求接收函数不仅运算稳定、精度高, 而且更能反应不同方位角、不同震中距的远震 P 波所携带的地下介质结构的信息<sup>[12]</sup>。同时由传统的 S 波速度反演向泊松比及各向异性参数的估算方向拓展, 解释方法也从传统的水平分层介质模型逐步向横向非均匀介质模型发展<sup>[13]</sup>, 研究范围也由地壳向上地幔深入<sup>[14]</sup>。

为了压制介质散射所产生的“噪声”, 提高接收函数的稳定性, 杨毅等提出了接收函数的单台多震频率域叠加平滑算法

(RFSSMS方法)<sup>[15]</sup>。这种方法要求选择的单台多个远震事件必须限定在一定的震中距和方位角内,用以确保P波在台站下方上地幔间断面发生折射转成S波之后所经过的路径基本相同,然后对这些地震记录的复谱分别在R和Z向进行同频叠加,使散射作用得到有效的压制,对叠加后的Z向在频率域进行加权平均,最后将经上述处理的R和Z分量在频率域相除,并将其结果反变换到时间域,便得到了接收函数。

近年来,地震台阵观测技术的发展正促进接收函数向高分辨率的偏移成像方向发展。吴庆举、田小波等<sup>[16]</sup>提出了一种接收函数的克希霍夫偏移成像方法,将地震反射的叠前克希霍夫偏移,引入到接收函数偏移成像,实现了接收函数的叠前偏移。该方法引入了P-S转换波的振幅信息,能够适应介质的横向变化,并能有效地压制多次波,从而能对地壳上地幔间断面进行可靠成像。另外石油工业成熟的地震反射处理方法,如动校正、速度分析、偏移叠加等,正逐步渗透到接收函数的研究领域<sup>[14,17]</sup>。这种“拟反射技术”将浅层结构的处理方法推广到地壳上地幔的深部结构研究<sup>[18]</sup>,以前所未有的分辨率展示了地壳上地幔结构的横向非均匀性,显示出接收函数在地壳上地幔横向非均匀性研究领域的巨大潜力,拓宽了接收函数的研究空间和思想空间<sup>[11]</sup>。

在非均匀介质中接收函数的模拟与成像研究方面。用弹性波动方程的有限差分方法模拟非均匀介质中的接收函数,并采用波动方程实现接收函数的成像研究,试图将接收函数的波动方程成像方法应用于地壳上地幔横向非均匀性的研究。随着偏移成像方法在接收函数中的引入,需要合成的接收函数不只是个别台站的接收函数,而是对应众多远震事件、一个区域台网或一个台阵的接收函数场。不同台站对不同事件的不同响应为接收函数研究地下介质结构的横向非均匀性创造了条件,波动方程有限差分合成接收函数恰能满足这种要求,对各种界面及一些特殊构造无需作特殊处理,方法使用方便,能得到观测区域内较为完全的波动响应,从而揭示横向非均匀介质的波场特征<sup>[19]</sup>。

### 3 讨论

接收函数方法的普遍应用主要是由于远震P-S转换波震相初动明显,反演方法是线性反演。但地壳内部的多次反射波走时和P-S转换波相当,这样就降低了接收函数的分辨率。人们在开展P-S转换波研究的同时也进行了其它震相的研究,把这些震相结合起来考虑可以更准确地得到地球内部的信息,如:P-S转换波震相和S-P转换波震相联合反演,P-S转换波震相和面波的联合反演。线性的反演方法使得其结果对初始模型有一定的依赖性,随着观测手段和方法技术的不断完善,还有数字资料的不断积累,我们可以进行非线性反演方法的研究。这样以来我们就可以更多、更准确地得到地球内部的信息。

### [ 参考文献 ]

- [ 1 ] Owens T J, G Zandt, S R Taylor. Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms[ J ]. J. Geophys. Res., 1984, **89**: 7783 - 7795.
- [ 2 ] 刘启元, Kind R. 远震接收函数及非线性复谱波形反演[ J ]. 中国地球物理学会年刊, 1992: 18.
- [ 3 ] Langston C A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves[ J ]. J. Geophys. Res., 1979, **84**: 4749 - 4762.
- [ 4 ] Burdick L J, D V Helmberger. Time functions appropriate for deep earthquakes[ J ]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1974, **64**: 1419 - 1428.
- [ 5 ] Burdick L J, C A Langston. Modelling crustal structure through the use of converted phases in teleseismic body waves[ J ]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1977, **67**: 677 - 691.
- [ 6 ] Langston C A. Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves[ J ]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1977, **67**: 1029 - 1050.
- [ 7 ] Langston C A. The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter[ J ]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1977, **67**: 1029 - 1050.
- [ 8 ] 刘启元, 陈九辉. 分离远震接收函数的多道最大或然性反褶积方法[ J ]. 中国地球物理学会年刊, 2001: 396.
- [ 9 ] Shamway R H, Der Z A. Deconvolution of multiple time series[ J ]. Technometrics, 1985, **27**: 385 - 393.
- [ 10 ] 刘启元, Kind R, 李顺成. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演[ J ]. 地球物理学报, 1996, **39**(4): 502 - 513.
- [ 11 ] 刘启元, Kind R, 陈九辉, 等. 大别山碰撞造山带深部细结构的宽频带流动地震台阵研究[ J ]. 中国地球物理学会年刊, 2002: 461.
- [ 12 ] 田小波, 吴庆举, 曾融生. 多道反褶积方法求取接收函数[ J ]. 中国地球物理学会年刊, 2001: 397.
- [ 13 ] 陈九辉, 刘启元. 合成三维横向非均匀介质远震体波接收函数的 Maslov 方法[ J ]. 地球物理学报, 1999, **42**: 84 - 93.
- [ 14 ] Kosarev G, R Kind, S V Soblev, et al. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet[ J ]. Science, 1999, **283**: 1306 - 1309.
- [ 15 ] 杨毅, 周蕙兰. 用于研究上地幔间断面的接收函数的稳定性[ J ]. 中国地球物理学会年刊, 2002: 319.

[ 16 ] 吴庆举,田小波,张乃玲,等.接收函数的克希霍夫偏移成像[J].中国地球物理学会年刊,2002:465.

[ 17 ] Gossler J,Kind R,Wylegalla K. et al. Major crustal features from the Harz Mountains and the Baltic Shield derived from receiver functions [ J ]. Tectonophysics ,1999 **314** 321 – 333.

[ 18 ] Jones C H ,Phinney R A ,Seismic structure of the lithosphere from teleseismic converted arrivals observed at small arrays in the southern Sierra Nevada and vicinity[ J ]. J. Geophys. Res. ,1998 **103** 10065 – 10090.

[ 19 ] 田小波. 横向非均匀介质中接收函数的数值模拟与偏移成像研究 [ D ]. 中国地震局地球物理研究所. 2002.

### NEW PROGRESS IN RESEARCH OF RECEIVER FUNCTION METHOD

AN zhang – hui<sup>1 2</sup> , ZHOU min – dou<sup>1 2</sup> , WU qing – ju<sup>3</sup> , BAI Lin<sup>2</sup>  
 ( 1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction , CEA , Lanzhou 730000 , China ;  
 2. Lanzhou Institute of Seismology , CEA , Lanzhou 730000 , China ;  
 3. Institute of Geophysics , CEA , Beijing 100081 , China )

**Abstract** :The data of teleseismic P waveform include a lot of informations of P – S converted wave and P multiple reflection wave produced by the interface of crust and mantle underneath the stations. The receiver function obtained from the waveforms offers an approach to understanding of the crust and mantle fine velocity structures. In this paper , the new progress in increasing the stability and precision of the receiver function is introduced. Many mature methods in oil exploration have been lead into the receiver function research field. Application of all these methods shows the inhomogeneity of crust and upper mantle with high resolution.

**Key words** Receiver function ; S – wave velocity structure ; Deconvolution ; Transverse anisotropy

\*\*\*\*\*  
 ( 下接 370 页 )

#### [ 参考文献 ]

[ 1 ] 唐九安,杨嘉文,周志宇,等.兰州倾斜固体潮潮汐参数的观测研究[J].西北地震学报,1991,13(2):63-67.

[ 2 ] 唐九安. 计算固体潮潮汐参数的非数字滤波调和分析方法[J].地壳形变与地震,1999,19(1):49-55.

[ 3 ] 常千军,张昱,周志宇.兰州形变台潮汐形变观测结果与甘肃永登、天祝地震[J].西北地震学报,1998,20(3):33-38.

[ 4 ] 陆远忠,吴云,王炜,等.地震中短期预报的动态图象方法[M].北京:地震出版社,2001.248-251.

[ 5 ] 黎凯武.日月引潮力触发地震的一个证据——论邢台、河间和唐山地震的时间特性[J].地震学报,1998,20(5):545-551.

### ANALYSIS ON PRECURSOR EFFECT TO EARTHQUAKE OF FSQ WATER TUBE TILTMETER IN LANZHOU DEFORMATION STATION

SHEN Xu-zhang<sup>1 2</sup> , CHANG Qian-jun<sup>1</sup> , MEI Xiu-ping<sup>1</sup>  
 ( 1. Lanzhou Institute of Seismology , CEA , Lanzhou 730000 , China ;  
 2. Laboratory of Computational Geodynamics , Graduate School of the Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China )

**Abstract** :Taking the recording data of FSQ water tube tiltmeter at Lanzhou deformation station as research object , analysis on the data with methods of configuration analyzing , curve fit , remainder analyzing , dynamic analyzing of tide factor , tide ellipse and tide slanting angle is done , from both non-tidal part and tidal part of recording. The relationship between abnormalities in the data and medium – strong earthquakes in regions near the station is researched also. The result shows that the records of FSQ water tube tiltmeter at Lanzhou deformation station has good medium-short response to earthquake occurred in neighboring regions.

**Key words** FSQ water tube tiltmeter ; Tide ; Precursory effect to earthquake ; Abnormity ; Lanzhou deformation station