

一种基于层析成像技术提高浅地表面波

勘探水平分辨率的方法

尹晓菲1 胥鸿睿2* 夏江海3 孙石达4王芃1

1 中国地震局地震预测研究所地震中长期综合预测研究室,北京 100036

2 中国地质大学(武汉)地球内部成像与探测实验室, 武汉 430074

3浙江大学地球科学学院,杭州 310027

4 华中科技大学物理学院基本物理量测量教育部重点实验室, 武汉 430074

摘要

在高频面波方法中,水平分辨率是指水平方向上分辨异常体的能力。异常体在水平方向上的长度可用水平方向上 横波速度的异常尺度来确定。面波多道分析(MASW)方法被广泛应用于浅地表横波速度结构的探测,然而该方法确 定的横波速度是整个检波器排列的平均计算结果,因此水平分辨率较差。另外,采用共中心点(CMP)多次覆盖的方 式采集数据亦增加了野外的工作量。我们在MASW方法的基础上,应用面波层析成像方法,提出一套提高面波勘探水 平分辨率的完整方法的技术流程。首先,利用波场分离技术获得准确的基阶或高阶模式面波,采用相位扫描的互相关 方法测量多道面波记录中任意两道之间的面波走时: 然后根据面波层析成像方法, 获得高分辨率的各目标网格内的纯 路径相速度频散曲线:最后反演所有目标网格内的纯路径相速度频散曲线,得到研究区域的拟 套方法具有一定的抗噪能力,理论上它可以准确地提取相邻两道之间面波的相速度频散曲线:同时由于该方法最少只 需要1个排列就可以获得拟二维横波速度结构,因此它显著减小了野外工作量。理论模型和实际资料都证实了这套方 法可有效提高面波勘探的水平分辨率。

关键词:水平分辨率;纯路径相速度频散曲线;面波层析成像方法;拟二维横波速度结构.

3.理论模型试验

Source R1

 V_{p} =800 m/s, V_{s} =200 m/s,

p=2.0g/cm³

一个三层的断层模型(图4a):其中第一层的横波速度为200 m/s,层厚5 m;第二层为地表以下5 m—10 m的地层, 包含两部分,第一部分(位于断层模型的左边,水平位置0 m—24 m)的横波速度为200 m/s,第二部分(位于断层模 型的右边,水平位置24 m—49 m)的横波速度为400 m/s;半空间的横波速度等于400 m/s。根据有限差分数值模拟的方 法合成炮集记录(图4b),震源设置为主频为20 Hz的高斯子波(延迟时间60 ms),共50道地震记录;道间距1 m,最 小偏移距为6 m, 选择1 ms的采样率和1000 ms的记录时长; 断层位于检波器排列的中点。利用相位扫描的互相关方法 提取基阶模式面波相速度频散曲线(图4c)

对测量的面波旅行时按照网格剖分进行旅行时反演,得到不同频率时所有目标网格的相速度分布。将每一个网格 的纯路径相速度频散曲线进行反演,得到每个目标网格的一维横波速度剖面。这里以第一个网格的纯路径相速度频散 曲线的反演为例,如图5a-b,对反演结果进行正演计算得到的相速度频散曲线与纯路径相速度频散曲线完全吻合,对 应的横波速度结构的拟合效果也较好,表明反演结果稳定可靠。插值计算后得到研究区域的拟二维横波速度结构,如 图5c,可见断层位于第25道的位置上,第一部分(Trace<25)是表层层厚为10 m的两层模型;中间部分(Trace=25) 位于垂直断层,上层和下层转换点的位置位于5 m和10 m; 第三部分(Trace>25)是表层层厚为5 m的两层模型。反演 结果与理论模型能够较好地吻合。

5 m

5 m

V_p=1200 m/s / ٍ=400 m/s

p=2.0g/cm

S-wave velocity (m/s) 200 300 400 50

🗕 - Initial

15 25 35 Frequency (Hz)

≥ 200

Final

30

True mod Initial 🔶 - Inverted

利用高分辨率线

基于高频近似的假设,面波沿直射线传播(Um et al., 1987),在利用高分辨率线性拉东变换(Luo et al., 2008b, 2009b)对面波记录进行准确的模式分离的前提下,本文提出利用面波旅行时层析成像的方法提高面波勘探的水平分 辨率,该方法共包括四个步骤(图1):(1)对于仅含某一特定模式面波的炮集记录(本文主要研究基阶模式面波) 利用相位扫描的互相关方法提取相邻两道之间的面波相速度频散曲线: (2) 根据走时、两道间的距离和面波相速度 的关系,直接测量任意两道间的面波走时。通过检测板的测试将研究区域剖分为大小相等或不等的网格,然后把测量 得到的面波旅行时作为输入数据,反演面波的走时获得不同频率时每个网格中的相速度分布; (3)既而得到每个网 格的纯路径相速度频散曲线,反演纯路径相速度频散曲线得到每个目标网格的一维横波速度剖面;最后将研究区域的 所有一维横波速度剖面按顺序排列, 生成拟二维横波速度结构



由相位扫描的互相关方法计算任意两道之间的相速度频散曲线。为了保证研究区域的射线分布均匀,进行大量的 检测板测试,选择最合适的网格剖分。然后对测量的旅行时按照剖分的目标网格进行层析成像,得到每一个目标网格 的纯路径相速度频散曲线。最后,反演每一个目标网格的纯路径相速度频散曲线获得每个网格的一维横波速度剖面, 将所有目标网格的一维横波速度剖面插值后得到的拟二维横波速度结构。由图7a可见,距表层4 m以下地层为基岩 (这与钻井的结果一致);从第1098道到第1130道(地下4 m—8 m)的范围,横波速度较大,说明该区域的基岩坚固 且不易断裂,根据地质露头信息推断该区域的基岩以石灰岩为主;从第1134道到第1145道(地下4 m—8 m)的范围, 横波速度较低,先验地质信息表明该研究区域的基岩为页岩(岩石的硬度较低,且易断裂) 引入关于该区域的MASW的结果(图7b),通过对比发现: (1)面波层析成像方法获得的拟二维横波速度结构 同MASW方法的结果均显示表层4 m以下为基岩;从第1098道到第1130道的基岩对应的横波速度较大,而从第1134道 到第1145道的范围对应较小的横波速度。(2)两者的结果存在不同点:从第1126道到第1134道的范围, 层析成像的结 果表明该区域的基岩为一个高速块体,而MASW方法没有显示相同区域中异常块体的存在;在地下4 m以上的地层, 面波层析成像方法获得的横波速度结构比MASW方法的结果可反映更多水平方向上横波速度变化的信息。 为了进一步验证面波层析成像方法计算的可靠性,用面波层析成像方法计算得到的横波速度结构反推MASW方法 的结果(图7c)。将从第1098道到第1118道共20个网格的纯路径相速度频散曲线的平均值作为第1108道所在网格的纯 路径相速度频散曲线,以此类推,分别得到从第1108道到第1124道所在网格的纯路径相速度频散曲线,并进行反演获 得拟二维横波速度结构。结果表明,由层析成像的结果通过平均效应反推得到的拟二维横波速度结构与MASW方法得 到的拟二维横波速度结构高度吻合,证明MASW方法得到的拟二维横波速度结构是一个平均化的结果,层析成像方法。 得到的拟二维横波速度结构比MASW方法的结果的水平分辨率更高。

首先,将研究区域剖分为1 m网格大小的49个网格。由于地震排列的道间距为1 m,可使得每个目标网格与相邻两 个地震记录道对应,例如第一个网格位于第一道和第二道之间,第二个网格位于第二道和第三道之间,以此类推。然 后,计算研究区域内任意两道之间的面波旅行时。利用L曲线法选择阻尼因子,将阻尼因子以500为间隔从500增加到 最终选择6000作为最佳阻尼因子(图3a,由红色的矩形标注)。对求得的面波旅行时按照合适的剖分网格进行 15000, 层析成像,得到所有目标网格的纯路径相速度频散曲线(图3b)。将计算的相速度(相位扫描的互相关方法计算的相 速度频散曲线或纯路径相速度频散曲线)同Knopoff方法计算的理论解析解对比。

红色的实心圆形加实线表示直接用相位扫描的互相关方法计算得到的相速度频散曲线同理论解析解之间的相对误 差随不同频率的变化: 蓝色实线表示纯路径相速度频散曲线与理论解析解之间的相对误差(图3c)。从图3c中可见: (1)在整个频率范围内,直接利用相位扫描的互相关方法提取的相速度频散曲线的扰动较大,且同理论解析解的平 均相对误差为10.30%; (2) 层析成像方法获得的纯路径相速度频散曲线与理论解析解吻合较好, 频散数据与理论解 析解的平均相对误差为3.74%。研究表明面波层析成像方法可提高频散计算的精度,该方法具有一定的抗噪能力。

在检波器排列的不同水平位置上,相位扫描的互相关方法计算得到的相邻两道(间隔1 m)的相速度频散曲线的 相对误差远大于相同位置上纯路径相速度频散曲线的相对误差(图3d)。对于排列的中间区域射线覆盖的密度大(图 面波旅行时反演得到的纯路径相速度频散曲线与理论解析解的偏差较小。然而对于排列的边缘区域,由于射线 3e), 分布较少(图3e),造成面波旅行时反演得到的纯路径相速度频散曲线与理论解析解的偏差较大。因此我们认为面波 层析成像方法可获得较精确的小台站间距的面波相速度频散曲线(平均相对误差小于3.0%);纯路径相速度频散曲线 的精度主要与研究区域的射线覆盖情况有关:表现为中间区域精度较高,而边缘区域精度较低。

表1.一个四层模型的参数				
Layer	Vs(m/s)	Vp (m/s)	density(kg/m ³)	Thickness(m)
1	190	650	1800	2.0
2	270	750	1800	2.0
3	400	1200	1900	4.0
4	600	1600	2000	Infinite







图2. 加入白噪的炮集记录及其频散分析 (a) 一个合成的四层模型的炮集记录. (b) 利用高分辨率线性拉东变换获 得频散能量图,挑选出高阶模式面波的频散能量团,黑色实心圆点表示 用Knopoff方法计算的理论频散曲线,用红色实心圆点圈出高阶模式面 波的频散能量团范围. (c) 在炮集记录(a)中加入N(0,0.1)的高斯白噪. (d) 加噪后的炮集记录对应的频散能量图.(e)利用相位扫描的互相关方法计 算任意两道之间的面波相速度频散曲线.

图3. 面波层析成像方法的抗噪能力分析 (a) 用L曲线法选择合适阻尼因子(红色的实心矩形标注最佳阻尼因子), 其中用蓝色的空心圆形表示不同阻尼因子与数据拟合度和模型长度的关 系. (b) 利用面波层析成像方法获得的纯路径相速度频散曲线. (c)由相位 扫描的互相关方法计算的任意两道之间的相速度频散曲线同理论解析解 之间的相对误差"Mode-separated data"(用红色的实心圆形加实线标 注),纯路径相速度频散曲线同理论解析解之间的相对误差"Inversion of travel-time" (用蓝色的实线标注). (d) 在地震排列的不同水平位置 上,相邻两道(间隔1 m)计算的相速度与理论解析解之间的相对误差, 其中"Mode-separated data"代表用相位扫描的互相关方法计算的相速度 频散曲线同理论解析解之间的相对误差,用蓝色的五角星加虚线标注; "Inversion of travel-time" 代表纯路径相速度频散曲线同理论解析解之 间的相对误差,用红色的矩形加虚线标注; "Residual error between" 代表两者之间的绝对误差,用黑色的圆形加虚线标注.(e)面波射线的覆 盖情况.

散能量图像,并用黑色实心圆点圈出基阶模式面波的频散能量团范围. (c) 仅包含基阶模式面波的炮集记录. (d) 基阶模式面波的炮集记录所对应的面 波频散能量图.

- 150 1114 Station Number

图7. Olathe地区采集实例中面波层析成像方法与MASW方法的结果的对比 (a) 仅利用1个排列基于面波层析成像的方法反演纯路径相速度频散曲线得 到的拟二维横波速度结构; (b) 利用13个地震排列基于MASW方法得到的拟 二维横波速度结构.; (c)利用面波层析成像得到的横波速度结构反推从第 1108道到第1124道的MASW方法的结果.

结论

本文提出利用面波层析成像的方法提高面波勘探的水平分辨率,该方法技术的研究包括特定模式面波的相速度频 散曲线的提取、面波层析成像方法的研究、纯路径相速度频散曲线精度的测试、理论和实际数据的应用。 由于高频面波勘探的水平分辨率与检波器排列的间隔有关,如何在较小的两道间得到准确的相速度频散曲线是一 个挑战。本文在层析成像的方法中使用两轮迭代反演计算,可有效地去除测量不准的走时,提高反演精度。 将高斯随机噪声加入理论模型,验证纯路径相速度频散曲线的精度.研究表明: (1)面波层析成像方法具有一 定的抗噪能力; (2)纯路径相速度频散曲线的精度与射线覆盖的密集程度有关,表现为射线覆盖密集区域的纯路径 相速度频散曲线计算的精度高,而射线覆盖稀疏区域的精度较低。由于浅层面波勘探基于一维观测系统,所以本文的 方法能够很好地分辨尺度大于或等于相邻两道之间的异常。

断层模型为浅地表地球物理研究中常见的地质体的简化,将面波层析成像方法应用于一个断层模型的研究,获得 的拟二维横波速度结构可很好地刻画该模型在水平方向的速度改变。在Olathe基岩成像的实例研究中,将该方法同 MASW方法的结果进行比较,可以看到: 仅利用1个排列基于面波层析成像技术计算得到的拟二维横波速度结构与利 用13个地震排列基于MASW方法的结果相似,并且前者刻画的细节更多。所以该方法较之于MASW方法的水平分辨率 明显提高,同时野外工作量显著减小。

尹晓菲, 胥鸿睿, 夏江海, 孙石达, 王芃. 2018. 一种基于层析成像技术提高浅地表面波勘探水平分 辨率的方法. 地球物理学报, 61(6): 2380-2395, doi: 10.6038/cjg2018L0373.