doi: 10.11720/wtyht.2022.1517

刘铁华,刘铁,张邦,等. 基于非均匀介质的谱比曲线正演技术及应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1276-1282. http://doi. org/10. 11720/ wtyht. 2022. 1517

Liu T H, Liu T, Zhang B, et al. Inhomogeneous media-based forward modeling technique of spectrum ratio curves and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1276-1282. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2022. 1517

# 基于非均匀介质的谱比曲线正演技术及应用

# 刘铁华,刘铁,张邦,卞友艳,张占荣,化希瑞

(中铁第四勘察设计研究院有限公司,湖北武汉 430063)

**摘要:**微动勘探技术具有较强的空间适应能力和抗机械干扰能力,在复杂城市环境的地质勘探中被广泛应用。微动特征曲线的正演模拟均基于水平层状介质模型,而实际地层为典型非均匀地质模型,导致特征曲线拟合度不理想,有必要基于非均匀介质条件进行正演研究。水平层状介质假设的地质模型无法满足微动特征曲线的高精度正演要求,需基于非均匀模型进行正演。本文提出的动态优选法微动特征曲线正演技术,在等效水平层状介质理论特征曲线的基础上,计算随频率变化的孔径范围和优选系数,可实现非均匀介质的高精度特征曲线正演。以谱比曲线为例,采用动态优选法微动特征曲线正演技术能够更好地反演非均匀介质的横波分布,具有更高的横向分辨率和勘探精度。

## 0 引言

随着城镇化和城市圈的发展,城市人口、交通等 压力越来越大,许多城市为建设集约型城市,亟须开 发地下空间,实现城市开发的可持续发展,而开展针 对城市地下空间的勘探是地下空间开发的前提。在 复杂城市环境中,常用地球物理勘探技术受建筑交 通阻碍、干扰强的因素限制明显,微动技术因其具有 狭小空间适应性和强抗机械干扰能力<sup>[1]</sup>,在复杂城 市环境中具有突出应用优势。

微动是指地层表面发育的天然微弱振动,其信 号为包含体波(P波和S波)和面波的综合波场,在 城市环境中,面波占微动信号总能量的 70%以 上<sup>[2]</sup>,通常利用微动信号中的面波信息来研究地下 横波速度结构工程。应用中,常利用垂直分量微动 信号中的瑞利波成分,开展基于频散曲线的面波勘 探(微动勘探),按照装置和数据采集方式不同,面 波勘探存在主动源面波和被动源面波两种技术路 线<sup>[3]</sup>,其均是基于采集的数据提取频散曲线后实现 地层结构反演的。此外,还可利用三分量微动信号 的水平分量与垂直分量的比值关系(谱比曲线),根 据谱比曲线特征开展微动谱比法勘探<sup>[4-5]</sup>。微动谱 比法仅需单点三分量微动数据即可,相较于面波法 具有更强的场地适应性,两类方法在数据采集和处 理流程上具有一定的相似性,实际应用中结合微动 谱比法和面波法的多源频率域地震勘探技术既保留 了面波勘探技术的速度稳定性,又继承了微动谱比 法的强场地适应性和高横向分辨率特点<sup>[6]</sup>。

在开展微动勘探工作时,核心技术体现在微动 信号的特征曲线(频散曲线和谱比曲线)反演过程 中,最终获得勘探范围内的速度结构。现有的特征 曲线正演方法均是建立在水平层状介质模型基础 上,其基本假设为:①多层层状介质中,瑞利波的相 速度存在频散特性,微动水平分量和垂直分量的比 值关系可依据面波和体波在不同方向的贡献表示; ②面波的能量和探测深度主要集中于一个波长范围 内,且不同波长具有不同的穿透深度;③瑞利波的质

收稿日期: 2021-09-16; 修回日期: 2022-07-22

基金项目:湖北省重点研发计划项目"城市地下空间精细化探测与感知关键技术及装备"(2021BAA050)、国家重点研发计划项目"城市地下 空间精细探测技术与开发利用研究示范"课题一"城市地下空间开发地下全要素信息精准探测技术与装备"(2019YFC0605101) 第一作者:刘铁华(1983-),男,高级工程师,主要从事工程地球物理勘探技术应用研究工作。

点振动在传播面上作椭圆运动,同时具有水平分量 和垂直分量的位移。目前,微动特征曲线正演主要 基于水平层状介质的假设前提,但实际地层,尤其是 浅表地层应该看作为非均匀介质,在存在横向变化 较大情况下导致理论谱比曲线与实测谱比曲线拟合 度较低,最终导致勘探精度降低。例如,基岩面起伏 显著的地层中,观测到的谱比曲线为宽单峰特征,与 理论窄单峰谱比曲线存在明显差异。所以,有必要 基于非均匀介质假设条件进行微动信号的特征曲线 的正演。

1 微动勘探技术

#### 1.1 层状介质中的面波传播

地震波有两种基本的类型:一种是在地球介质 内传播的地震波(体波),另一种是沿介质表面传播 的地震波(面波)。体波包括纵波(P波)和横波(S 波)两种,瑞利波、勒夫波、导波和斯通利波是4种 不同类型的面波,工程应用中主要基于瑞利波和勒 夫波的频散特性进行地质勘探。

瑞利波最早是由英国物理学家 Rayleigh 于 1885年在理论上推导出,后在天然地震记录上得到 证实,分布于自由表面上或者表面为疏松的覆盖层 内<sup>[7]</sup>。Haskell发现层状介质中瑞利波存在频散特 性<sup>[8]</sup>,即不同频率成分的瑞利波具有不同的相速 度,并推导了瑞利波的频散方程。瑞利波是通过 P 和 SV 波在自由表面上的叠加形成的,能量主要集 中在一个波长的范围内且不同波长的瑞利波穿透深 度也不同,与体波相比,瑞利波具有能量衰减慢、振 幅大、质点振动存在椭圆极化等特征<sup>[9]</sup>。此后,人 们开始利用其频散特性来研究地壳、上地幔等深部 介质中横波速度结构<sup>[10-16]</sup>,近年来瑞利波探测的应 用领域逐渐扩展到浅部工程地球物理勘探。

勒夫面波产生于介质表面的低速覆盖层以及该 层与下面介质的分界面上,是一种 SH 型波,具有频 散现象,是面波中传播速度最快的一种波,由波与自 由表面相互作用的结果。勒夫波使介质在水平方向 发生形变,且只有在剪切刚度随深度增加而增大的 情况下才会出现。

## 1.2 层状介质中的频散特征曲线正演

在均匀半空间中,自由界面上的边界条件是法 向与切向的应力必须为零,界面一侧为自由空间,无 介质约束质点的振动,当 SV 波大于临界角入射到 自由表面时,与反射 P 波沿着自由表面前进,相互 干涉便形成了瑞利波。对于不同的介质,瑞利波水 平和垂直方向的主要能量均大部分集中在深度小于 一个波长内,即认为瑞利波的穿透深度约为一个波 长。在自由表面上,瑞利波质点的振动轨迹为一逆 进的椭圆。大约在 0.2 倍波长的深度时,水平位移 极性反转,这就是说从此处看是其动轨迹为一顺时 针转动的椭圆。

目前计算多层层状介质中瑞利波频散曲线的方 法主要包括<sup>[17-20]</sup>:Haskell 算法、Knopoff 算法、Abo-Zena 算法、广义反射—透射系数算法和快速矢量传 递算法。考虑到实际地层的分层性,可以利用图 1 所示的水平层状介质模型来近似模拟实际地下介 质,在层状介质模型中,沿水平方向介质是均匀的而 沿垂直方向介质是非均匀的。瑞利波在 n 层水平层 状介质模型中传播,x 轴与瑞利波的传播方向一致, z 轴垂直向下并从自由表面起算,界面序号及层序 号如图 1 所示。



## 图 1 层状介质模型示意 Fig. 1 Schematic diagram of layered medium model

对于层状介质模型中,第 m 层介质,其参数分 别为: $\rho_m$ ,第 m 层的密度;  $d_m$ ,第 m 层的厚度;  $\lambda_m$ 、  $\mu_m$ ,第 m 层的拉梅系数; c,相速度;  $\omega$ ,角频率;  $\alpha_m$ , $\beta_m$ ,第 m 层的纵波和横波速度;  $\gamma_m = 2(\beta_m/c)^2$ 。 基于介质中应力应变连续原则,使用迭代矩阵求解, 由地表已知边界条件开始,不断由地层参数递推出 新的矩阵,即根据 m 层的矩阵递推得到 m+1 层的矩 阵。考虑到自由表面处应力为 0 的条件,满足以下 公式:

$$F_{R}(\boldsymbol{\omega}, c) = \left[ V^{(n-1)} W^{(n-1)} R^{(n-1)} S^{(n-1)} \right] \\ \cdot \begin{cases} T^{\mathcal{E}} \stackrel{\text{s}}{=} n - 1 \text{ 为偶数} \\ T^{0} \stackrel{\text{s}}{=} n - 1 \text{ 为奇数} \end{cases}$$
(1)

其中,

$$T^{E} = \begin{bmatrix} -(1-c^{2}/\alpha_{n}^{2})^{1/2} \\ -(1-c^{2}/\alpha_{n}^{2})^{1/2}(1-c^{2}/\beta_{n}^{2})^{1/2} \\ 1 \\ -(1-c^{2}/\beta_{n}^{2})^{1/2} \end{bmatrix}$$
(2)

$$\left[ - (1 - c^2 / \beta_n^2)^{1/2} \right]$$

$$T^{0} = \begin{bmatrix} 1 \\ -(1 - c^{2}/\alpha_{n}^{2})^{1/2}(1 - c^{2}/\beta_{n}^{2})^{1/2} \\ -(1 - c^{2}/\alpha_{n}^{2})^{1/2} \end{bmatrix}$$
(3)

$$f^{(0)} = 0$$
 (4)

$$W^{(0)} = (\gamma_1 - 1)^2 , \qquad (5)$$

$$R^{(0)} = \gamma_1^2 \quad . \tag{6}$$

$$S^{(0)} = 0 \quad (7)$$

式(1)为相速度与频率的函数,求解时根据式(4)~ (7)条件使用层状模型递推公式建立针对当前模型 的矩阵方程组,再逐一求解一定范围内的各频率对 应的相速度值,通常情况下可以求解出至少1个解。 对于某一个固定频率 ω,其最低的相速度值 c 被称 为基阶波相速度,称具有较高相速度值 c 的瑞利波 为高阶模式瑞利波,根据相速度的大小依次被命名 为一阶波、二阶波等,即在多层层状介质传播时瑞利 波存在多种模式,如图 2 所示。



## 1.3 层状介质中的谱比特征曲线正演

微动信号的谱比特征曲线表示水平和垂直分量 的能量在各个频率上的比值,大多数研究者倾向于 微动谱比特征的垂向信号主要成分为瑞利面波,水 平成分为瑞利面波和勒夫波面波及它们的高阶分 量,微动谱比可以用瑞利面波基阶椭圆率解释,用体 波解释微动谱比的观点将被放弃。此外,Arai和Tokimatsu 基于扩散场理论,假设环境噪声为扩散场, 在弹性介质中,点 P 处的谱比曲线计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$[H/V](\omega) = \sqrt{\frac{E_1(P,\omega) + E_2(P,\omega)}{E_3(P,\omega)}} , (8)$$
$$E(P,\omega) = 2\pi\mu E k^{-1} Im [C_1(P,P)] , (9)$$

其中,横波波数 $k = \omega/\beta$ ,横波平均能量密度 $E_s = \rho\omega^2$  $S^2$ ,  $S^2$ 为横波平均谱密度。

当瑞利波沿自由表面传播时,介质质点运动轨 迹是椭圆形的,水平分量和垂直分量的振幅比称为 椭圆率,在半无限均匀弹性介质中传播时,自由表面 上瑞利波的质点运动轨迹呈现出逆向椭圆,垂直分 量幅度约为水平分量振幅的1.5倍。然而,当瑞利 波在多层层状介质中传播时,椭圆率不是固定值,不 同频率的瑞利波所对应的椭圆率是不同的,例如当 水平层状介质中存在一个波阻抗比(相邻两层介质 中横波速度比值)较大(比值大于3)的界面时,椭圆 率曲线会在特定的频率值上呈现奇异点,如峰值和 谷值,椭圆率曲线与地下介质中横波速度结构密切 相关。张立对多层层状介质中瑞利波在水平分量和 垂直分量的位移公式进行推导[22],根据已给定的地 层模型参数,利用瑞利面波速度频散方程计算相应 频率下的相速度,即获得频散数据,然后将不同频率 所对应的相速度求得所研究频带范围每个单一频率 成分所对应的每层瑞利面波质点位移的水平分量和 垂直分量,进而求得质点椭圆运动轨迹(由水平分 量和垂直分量合成) 随深度的变化特征。z=0 m 处 的地表,其椭圆极化特征曲线相当于野外采集数据 水平分量和垂直分量的谱比特征曲线。

## 2 基于非均匀介质的特征曲线正演技术

#### 2.1 层状介质特征曲线正演缺陷及对策

上文介绍了微动信号特征曲线的正演方法,现 有技术均是建立在水平层状介质的基础上,是对现 实地质结构的近似。实际地层并非为水平地层结构 时,实测特征曲线往往与一维水平模型计算的理论 特征曲线存在差异。如图3所示,为某地面水平下 覆基岩为单斜构造情况下的实测谱比曲线,其表现 为较宽的单峰形态,并非理论上的狭窄单峰特征。



Fig. 3 Schematic diagram of measured spectral ratio curve

出现实测特征曲线与理论特征曲线差异的情况,本质上是理论特征曲线计算时采用的一维水平 层状模型假设导致的,需要构建一套基于非均匀介 质模型的特征曲线正演方法,本文在研究面波传播 特征和曲线形态特征的基础上,提出了动态优选技 术的正演方法,可适用于非均匀介质模型下的谱比 曲线正演,频散曲线正演的适用性还有待进一步研 究。

#### 2.2 动态优选法正演原理

由面波的波场传播理论可知,面波的能量和探 测深度主要集中于一个波长范围内,且不同波长具 有不同的穿透深度。即可认为,非均匀介质中地表 某点的特征曲线是由来自不同深度范围的介质在不 同频率按椎体形态由一定比例组成的。

如图 4 所示,在求取 C7 点处特征曲线时,对其 存在贡献信号的空间范围如图中绿色阴影区域所 示,该点的特征曲线可表示为:

$$C(x_0, f) = \max_{x_b \le x \le x_e} A(x, f) \cdot \left[1 - \lambda \frac{2(x - x_0)}{x_e - x_b}\right], \quad (10)$$

其中,  $x_b = x_0 - 0.25 \tan(\theta) V(x,z)/f$ ,  $x_e = x_0 + 0.25 \tan(\theta) V(x,z)/f$ 。A(x,f) 为特征曲线,是关于频率 f 和空间坐标 x 的函数; V(x,z) 是模型给出的 横波速度; z 为当前测点不同深度的垂向坐标值;  $x_0$  为当前测点的横向坐标值;  $\theta$  为孔径系数,为小于 90 的角度,当  $\theta$  取 45 时表示影响区域为以测点为 圆心的向下 45°角的圆锥体;  $\lambda$  为优选系数,小于 1 且趋于 1,通常位于 0.9~1.0 之间。

#### 2.3 非均匀介质模型的特征曲线计算流程

微动信号特征曲线均是关于频率的函数,为测 点处地下空间一定范围内波场的综合反应,基于非



均匀介质的动态优选法有效实现了该条件下的特征 曲线正演,因微动谱比曲线具有更高的横向分辨率, 受不均匀性影响更为明显。本文以非均匀条件下微 动谱比曲线的正演为例,说明动态优选法实施的具 体思路:首先,计算测点附近一定影响范围内不同位 置的等效水平层状模型的谱比曲线;其次,计算随频 率变化的孔径范围和加权系数,通过动态优选法的 方式计算测点处的综合谱比曲线,计算流程如下:

1)建立等效水平层状模型。将非均匀介质按 一定距离 dx 分割成多个独立模型,再将每个独立模 型等效为水平层状模型。如图 4,可建立两层模型, 上层覆盖层速度设为 v<sub>0</sub>,下层基岩速度设为 v<sub>1</sub>。

2) 计算各等效水平层状模型的谱比曲线。计 算步骤 1) 中按固定间隔 dx 分割的等效水平层状模 型的理论谱比曲线;图 4 中 C5、C6、C7、C8、C9 五个 等效水平层状模型点对应的理论谱比曲线如图 5 所 示。





3) 计算模拟点频率 f 的影响孔径。以当前模拟 点为中心, 计算不同频率 f 的影响孔径, 计算公式为 R=0.25×k×v<sub>0</sub>/f, 其中 R 为孔径的半径; v<sub>0</sub> 为覆盖层 速度; k 为空间转换系数, 为一常数, 通常可取 1。 对于 C7 测点的影响孔径, 通过计算可能为 C5、C6、 C7、C8、C9 五处等效水平层状模型点。

4) 搜索频率 f 对应孔径内模拟点数。对孔径内 各模拟点的对应频点 f, 以步骤 3) 中计算得到的空 间 R 为半径, 搜索该范围内符合条件的模拟点的模 拟谱比曲线, 取频率 f 对应的谱比值 Q<sub>i</sub>, 1<=i<=n, n 为孔径内的模拟点个数。

5)计算 f 对应孔径内各点权系数。对步骤 4) 中各点,按各点到所计算模拟点的距离计算权值  $W_i$ =1- $\lambda r/R$ ,其中 r 为各点到模拟点的距离,i 为孔径 内点编号, $i <= n, \lambda$  为优选系数。

6)各模拟点频率f对应的综合特征值计算。对步骤4)中搜索得到孔径范围内的特征值Q,按步骤

5) 中计算得到的系数  $W_i$ , 依据大值优选原则, 选取 孔径范围内的极大值  $C(x_0, f) = \max_{x_b \leq x \leq x_e} (Q_i \times W_i)$ 。

7)综合特征曲线计算。重复步骤 3) ~ 步骤 6) 的过程,计算所有频率f 对应的综合特征值,得到综 合特征曲线,如图 6 所示。

以上步骤为双层非均匀介质条件下的特征曲线 计算简化流程,在实际正演计算中通常更为复杂,不 能简单地按照频率进行优选,需先根据模型的层速度 信息将频率域的特征曲线转化到深度域,再在深度域 进行优选,最终将优选的特征曲线转换到频率域。



Fig. 6 C7 comprehensive spectral ratio curve

## 3 应用案例分析

### 3.1 项目概况

应用项目为我国南方某滨海滩涂地貌和海冲积 平原地貌,因城市建设沿线场地经填、挖、整平等人 工改造,形成现在的较平坦的地形地貌,地层为第四 系残积土、震旦系变粒岩等。地表多为居民民房和 工业厂房,周边交通繁忙,电磁波干扰和机械干扰严 重。

勘探工作处于工程前期定测阶段,根据前期勘 探成果已经确认该段基岩深度出现有规律的变化, 采用被动源面波与微动谱比法联合的多源频率域勘 探技术进行勘探,旨在获取勘探范围内的基岩起伏 情况。勘探工作采用7道1排列线性多源频率地震 数据采集装置进行数据采集,点距约10m(根据场 地条件作适当调整)。数据采集过程中,改善耦合 条件,克服现场随机干扰,水平角度控制在2°范围 内,授时精度控制在1×10<sup>-6</sup>s内,数据质量良好。

## 3.2 勘探成果应用分析

本文选取该区域内某典型单斜—水平结构段进 行分析(图7),测线长度200m,由左往右基岩逐渐 变深,在基岩埋深渐变段谱比曲线(图7b)为较窄的 单峰结构,而末端近似水平段的谱比曲线(图7a)表



图7 典型实测数据谱比曲线

Fig. 7 Spectral ratio curves of typical measured data

应用中,首先提取了3个排列的频散曲线和谱 比曲线(每个排列由7道三分量长周期微动数据组 成),两种特征曲线采用联合反演的方式获得地层 横波速度剖面,综合解释横波速度475 m/s为土石 界面(W2与W3风化界线),如图8所示。

完成地面微动勘探后,在里程2565 m 和2760 m 处布置了两个钻孔,两处揭示的土石界面标高如 图中"十"字标所示。对比图8a、b,可明显发现非均 匀介质模型的反演横波速度剖面对横向的不均匀性 灵敏度更高,对基岩探测具有更高的探测精度。

## 4 结论

本文针对微动信号处理中的正演问题,提出了 一种新的正演方法,取得以下结论:

1)水平层状介质假设的地质模型无法满足微动特征曲线的高精度正演要求,需基于非均匀模型进行正演;

2)本文提出的动态优选法的微动特征曲线正 演技术,在等效水平层状介质理论曲线的基础上,计 算随频率变化的孔径范围和优选系数,可实现非均 匀介质的高精度谱比曲线正演;

3)通过实际应用表明,采用动态优选法微动特征 曲线正演技术后,能够更好地反演非均匀介质的横波 分布,勘探成果具有更高的横向分辨率和勘探精度。

现为较宽单峰形态,这一特征印证了前文分析结果。



a—基于非均匀介质反演的横波速度剖面;b—基于水平水层层状介质反演的横波速度剖面

a-shear wave velocity profile based on inhomogeneous medium inversion; b-shear wave velocity profile based on horizontal water layered medium inversion

#### 图 8 反演后的横波速度剖面成果

#### Fig. 8 S-wave velocity profile after inversion

#### 参考文献(References):

- Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors [J]. Bulletin of Earthquake Research Institution, 1957, 35: 415–456.
- [2] Toksöz M N, Lacoss R T. Microseisms: Mode structure and sources[J]. Science, 1968:159.
- [3] 冉伟彦,王振东.长波微动法及其新进展[J].物探与化探, 1994,18(1):28-34.

Ran W Y, Wang Z D. The long-wave microtremors method and its advances[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1994, 18(1): 28–34.

- [4] Haghshenas E, Bard P Y, Theodulidis N, et al. Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(1): 75-108.
- [5] Arai H, Tokimatsu K. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(1): 53-63.
- [6] 刘铁华,刘铁,程光华,等.复杂城市环境下地球物理勘探技术 研究进展[J].工程地球物理学报,2020,17(6):711-720.
   Liu T H, Liu Tie, Cheng G H, et al. Research progress of geophysical exploration technology in complex urban environment[J].
   Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(6):711-

720.

- [7] Rayleigh J W S. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1885, 17: 4-11.
- [8] Haskell N A. The dispersion of surface waves on multilayered[J].
   Bulletin of the seismological Society America, 1953, 43(1): 17-34.
- [9] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology: Theory and methods [M]. San Francisco: CA, 1980.
- [10] 徐佩芬,李传金,凌甦群,等.利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J].地球物理学报,2009,52(7):1923-1930.
  Xu P F, Li C J, Ling S Q, et al. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing microtremor survey methods[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52(7):1923-1930.
- [11] 王伟君,刘澜波,陈棋福,等.应用微动 H/V 谱比法和台阵技 术探测场地响应和浅层速度结构[J].地球物理学报,2009,52
   (6):1515-1525.
   Wang W J,Liu L B,Chen Q F, et al. Applications of microtremor

H/V spectral ratio and array techniques in assessing the site effect and near surface velocity structure [J]. Chinese Journal of Geophysics,2009,52(6):1515-1525.

[12] 刘铁华.综合微动技术在昆明地铁勘探中适用性的量化研究

[J]. 工程地球物理学报,2019, 16(5):572-579.

Liu T H. Research and application of geological exploration methods in urban drilling blind area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019,16(5):572-579.

- [13] 张明辉,武振波,马立雪,等. 短周期密集台阵被动源地震探测 技术研究进展[J]. 地球物理学进展,2020,35(2):495-511.
  Zhang M H, Wu Z B, Ma L X, et al. Research progress of passive source detection technology based on short-period dense seismic array[J]. Progress in Geophysics,2020,35(2):495-511.
- [14] 刘铁华. 城市钻探盲区的地质勘探方法研究与应用[J]. 铁道 工程学报,2019,36(10):88-93.
   Liu T H. Analysis and application of geological exploration methods

in Urban drilling blind area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(10):88–93.

- [15] 刘伟,黄韬,王庭勇,等.综合物探方法在城市隐伏断裂探测中的应用[J].物探与化探,2021,45(4):1077-1087.
  Liu W, Huang T, Wang T Y, et al. The application of integrated geophysical prospecting methods to the exploration of urban buried fault[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45
- [16] 董耀,李光辉,高鹏举,等. 微动勘查技术在地热勘探中的应 用[J].物探与化探,2020,44(6):1345-1351.

(4): 1077 - 1087.

Dong Y, Li G H, Gao P J, et al. The application of fretting exploration technology in the exploration of middle and deep clean energy [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1345–1351.

- [17] Knopoff L. A matrix method for elastic wave problems [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54(1):431-438.
- [18] Abo-Zena A. Dispersion function computations for unlimited frequency values [J]. Geophysical Journal International, 1979, 58 (1):91-105.
- [19] Chen X. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space[J]. Geophysical Journal International, 1993, 115(2):391-409.
- [20] 凡友华,刘家琦,肖柏勋. 计算瑞利波频散曲线的快速矢量传 递算法[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2002(5):25-30.
   Fan Y H, Liu J Q, Xiao B X. Fast vector-transfer algorithm for computation of Rayleigh wave dispersion curves[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2002(5):25-30.
- [21] Arai H, Tokimatsu K. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004,94(1): 53-63.
- [22] 张立. 层状介质中瑞利面波波场特征分析和反演方法研究
  [D]. 成都:西南交通大学,2009.
  Zhang L. An Approach to the wave-field characteristic analysis and inversion algorithm of Rayleigh surface wave for layered medium
  [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.

# Inhomogeneous media-based forward modeling technique of spectrum ratio curves and its application

#### LIU Tie-Hua, LIU Tie, ZHANG Bang, BIAN You-Yan, ZHANG Zhan-Rong, HUA Xi-Rui (China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The microtremor exploration technique has been widely used in the geological exploration of a complex urban environment due to its strong spatial adaptability and anti-mechanical interference ability. The forward modeling of microtremor characteristic curves is all based on a horizontally layered medium model, while actual strata are typical inhomogeneous geological models. The inconsistency leads to the unsatisfactory fitting degree of characteristic curves. Therefore, it is necessary to conduct forward modeling research based on the condition of inhomogeneous media. Since the geological model based on the assumption of horizontally layered media cannot meet the requirements for high-precision forward modeling of microtremor characteristic curves, forward modeling needs to be conducted using an inhomogeneous model. Based on the dynamic optimization method, this study proposed the forward modeling technique of microtremor characteristic curves of equivalent horizontally layered media. Taking spectral ratio curves as an example, the forward modeling technique of microtremor characteristic curves using the dynamic optimization method can obtain the shear wave distribution of inhomogeneous media through inversion, achieving higher lateral resolution and exploration precision.

Key words: complex urban environment; frequency-domain characteristic curve; inhomogeneous media; microtremor technique; dynamic optimization method