

基于细化分层法探讨面波频散 曲线反演参数的简化

邵广周^{1,2}, 李庆春^{1,2}

(1. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 常规频散曲线反演过程中需要不停地改变分层数、层厚度和层速度等参数, 实现过程相对繁琐, 而采用细化分层法对反演参数进行简化则避免了上述缺点。具体思路为: 根据目的层探测深度(如 20 m)将地下介质分为若干个(20 个)厚度为 1 m 的薄层和 1 个均匀半空间层(共 21 层), 这样在反演中分层数和层厚度均为已知参量, 反演过程只需修改速度参数即可, 避免了改变分层数和层厚度等参数, 显著简化了反演计算过程。正演计算和反演结果均表明: 细化分层与实际分层计算出的频散曲线是等效的, 细化分层反演结果的总体效果与真实模型非常接近, 这说明细化分层方法用于频散曲线反演是切实可行且有效的; 将地下介质划分为 1 m 厚的薄层, 反演后每层均可得到 1 个横波速度, 能满足反演分辨率的要求; 由于实际地下介质的速度是随深度渐变的, 细化分层后比按频散曲线拐点分层(每分层的厚度可能是几米或几十米, 同一分层内介质的横波速度相等)更接近实际情况。

关键词: 面波; 频散曲线; 细化分层; 反演; 横波速度; 瑞雷波

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)03-0317-04

Study on Parameter Simplifying in Dispersion Curves Inversion of Surface Wave Based on Subdividing Layer Method

SHAO Guang-zhou^{1,2}, LI Qing-chun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Geological Engineering and

Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Such parameters as layer numbers, thickness and velocity of each layer need to be modified constantly in the conventional inversion of dispersion curves, and the realization process is relatively troublesome. Aiming at this disadvantage, a subdividing layer method to inverse the dispersion curves of surface wave is introduced. The detailed thought is as follows: according to the depth of objective layer (such as 20 m), the underground media will be subdivided into several thin layers (20 layers) with the thickness of 1 m and a half space layer (totally 21 layers). Then the numbers and thickness of layers are known variables in the inversion, only shear velocities need to be modified in calculation, so the inversion process is greatly simplified. The forward and inversion results indicate that the dispersion curve computed by subdividing layer method is equivalent with that by actual layer; the result inverted by subdividing layer method is similar with that by actual model. The results show that the subdividing layer method is feasible and effective in dispersion curves inversion; the underground media are subdivided into several thin layers with the thickness of 1 m, and each thin layer could get a shear velocity after inversion, so that the inversion resolution could reach; because the actual velocity of underground media changes gradually with the depth increasing, subdividing layer is more close to the actual situation than the conventional layer with the inflexion of dispersion curve (the thickness of each layer may be several meters, and the shear velocity was equal in the same layer).

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41004043); 中央高校基本科研业务费专项项目(CHD2010JC057); 交通部国家西部交通建设科技项目(200731881262); 国家高技术研究发展计划项目(2007AA06Z103)

作者简介: 邵广周(1977-), 男, 山东单县人, 讲师, 工学博士, 从事地球物理教学与研究。E-mail: shao_gz@chd.edu.cn

Key words: surface wave; dispersion curve; subdividing layer; inversion; shear velocity; rayleigh wave

0 引言

自 20 世纪 50 年代初发现瑞雷波在层状介质中具有频散特性以来,面波的理论研究及应用得到了极大的重视与发展^[1-5]。近年来,瑞雷面波勘探作为一种新型的有效手段,在陆地地区的浅层工程地质勘察中得到广泛应用和发展^[6-8]。目前面波的研究和应用主要集中在工程场地的近地表速度结构探测^[9-10]以及利用天然地震记录反演地球内部结构等方面^[11],其基本原理是利用瑞雷波的频散曲线反演地下介质的速度分布。因此,反演地下速度结构是面波勘探的最终目的,而反演结果的好坏受反演算法和反演参数个数影响。

一般来说,用面波频散曲线反演地层结构要求计算的参数很多。对瑞雷波来说,每层有 4 个待定参数,即层厚 h 、密度 ρ 、横波速度 β 、纵波速度 α 。对于 n 层模型,就需要反演 $4n$ 个参数。如果将所有模型参数都作为独立变量进行反演,当地下分层较多时,反演计算量大且困难。因此,反演计算前需要对反演参数进行一定简化以减少反演参数的个数,从而减小反演结果非唯一性。目前通常采用的简化方法是在反演中每层待反演的参数只考虑厚度及横波速度,从而将每层 4 个参数减少为 2 个参数。理论研究表明,面波频散的相速度值对于纵波速度、横波速度及密度变化的敏感度是不一样的^[5]。虽然在某些频率范围内密度是一个重要的变量,但起主要作用的是横波速度,而纵波速度对瑞雷波相速度影响较小。因此每层待反演的参数实际上可以只考虑厚度及横波速度,而密度和纵波速度作为非独立变量,由横波速度及地层结构的先验信息给出。这样的简化方法目前在面波反演中被普遍采用,虽然取得了一定的效果,但在反演算法实现过程中需要不停地改变分层数、层厚度和层速度等参数,实现过程相对繁琐。针对这一缺点,笔者采用细化分层法对面波反演参数进行简化。具体思路为:根据目的层探测深度(如 20 m)将地下介质分为若干个(20 个)厚度为 1 m 的薄层和 1 个均匀半空间层(共 21 层),这样在反演中分层数和层厚度均为已知参数,反演过程只需修改速度参数即可,显著简化了反演计算过程。该方法是一种适用于浅层速度结构探测的面波反演参数简化方法。

1 细化分层与实际分层的等效性

上述参数简化方法可行性的前提条件为细化分层后计算所得的理论频散曲线应与实际分层计算所得的理论频散曲线一致。为验证细化分层与实际分层的等效性,将实际分层模型和细化分层后的模型分别利用 Thomson-Haskell 算法来计算其理论频散曲线。表 1 为一个地下实际分层为 3 层的地质模型,表 2 为其对应的细化分层模型。

表 1 地下实际分层为 3 层的地质模型

Tab. 1 Geological Model of Actual Underground

Layer Divided into 3					
层数	厚度 /m	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	10	0.3	1 800	150	281
2	10	0.3	1 800	250	468
3(半空间)	$+\infty$	0.3	1 800	350	655

表 2 地下实际分层细化为 21 层后的地质模型

Tab. 2 Geological Model of Actual Underground

Layer Divided into 21					
层数	厚度 /m	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1	0.3	1 800	150	281
2	1	0.3	1 800	150	281
3	1	0.3	1 800	150	281
4	1	0.3	1 800	150	281
5	1	0.3	1 800	150	281
6	1	0.3	1 800	150	281
7	1	0.3	1 800	150	281
8	1	0.3	1 800	150	281
9	1	0.3	1 800	150	281
10	1	0.3	1 800	150	281
11	1	0.3	1 800	250	468
12	1	0.3	1 800	250	468
13	1	0.3	1 800	250	468
14	1	0.3	1 800	250	468
15	1	0.3	1 800	250	468
16	1	0.3	1 800	250	468
17	1	0.3	1 800	250	468
18	1	0.3	1 800	250	468
19	1	0.3	1 800	250	468
20	1	0.3	1 800	250	468
21(半空间)	$+\infty$	0.3	1 800	350	655

图1为3层地质模型和21层地质模型对应的多模式频散曲线,其中线类频散曲线对应3层地质模型,点类频散曲线对应21层地质模型。由图1可以看出,将半空间上的厚度为10 m、横波速度分别为150 m/s和250 m/s的2层分别细分为厚度为1 m、横波速度为150 m/s的10层和厚度为1 m、横波速度为250 m/s的10层(共20层),所得到的各阶模式频散曲线完全重合。这说明两种分层对于计算频散曲线来说是等效的。因此,在反演计算时,事先根据目的层探测深度将地下介质分为若干个厚度为1 m的薄层和1个均匀半空间层,并不影响实际反演结果。

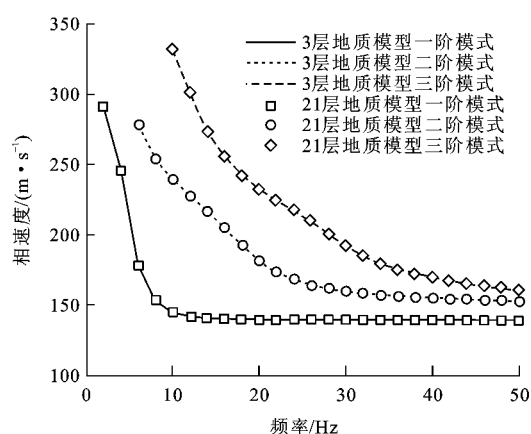


图1 两种模型对应的多模式频散曲线

Fig. 1 Multi-mode Dispersion Curves of the Two Models

2 细化分层频散曲线反演算例

为进一步验证细化分层的有效性,将表1中参数计算的频散数据作为已知观测数据,对地下的速度结构进行反演。反演时将地下介质分为20个厚度为1 m的薄层和1个均匀半空间层(共21层),每层的横波速度给定一个初始值。横波速度的初始值可给定一个常数,也可将1/2波长深度处的横波速度近似看做与瑞雷波相速度相等,用瑞雷波速度做为横波速度的初始值,其他深度处的初始速度可通过插值方法得到。每层的纵波速度由初始值根据泊松比算出。由于反演结果对密度参数不敏感,故每层的密度取为 1800 kg/m^3 ,这一取值在浅层土壤密度的常见范围内。此时反演计算中只有横波速度为独立变量,简化了反演计算过程。图2为利用阻尼最小二乘法计算的反演结果与真实模型对比结果,其中点划线为细化分层的反演结果,实线为真实模型。由图2可以看出,虽然反演时将地下介质分为21层,但反演的总体效果(大致分为3层)与真实

模型非常接近,反演结果与真实模型的平均相对误差为4.75%。

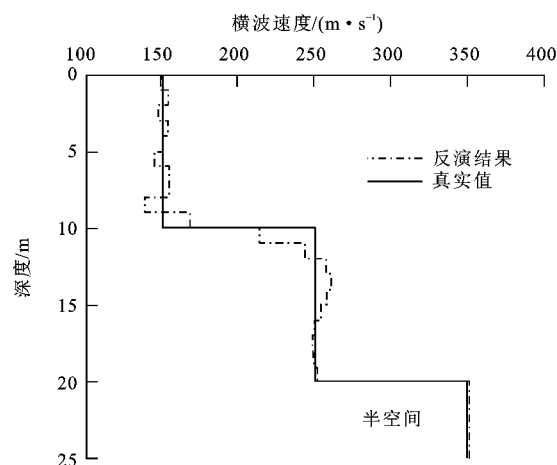


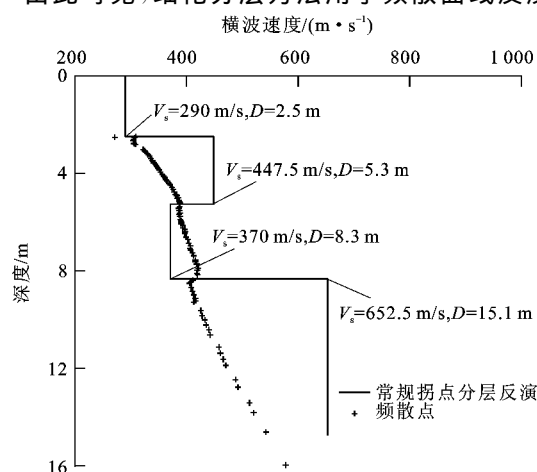
图2 细化分层反演结果与真实模型对比

Fig. 2 Contrast of the Inversion Results of Subdividing

Layer Method and the Actual Model

图3为某实测频散曲线按常规拐点分层反演结果;图4对比了该实测频散曲线常规拐点分层反演结果与细化分层反演结果。由图4可知,二者在8 m以浅反演结果基本一致。而在8 m以下差异较大,其原因可能是由于常规拐点法只提取频散曲线的基阶模式信息,导致深层拐点信息缺失所致。本文中细化分层反演则同时利用了频散曲线的基阶模式和二阶模式信息,采用阻尼最小二乘法调用频散函数进行反演。其反演结果是介质速度随深度渐变,在8 m以下随着深度增加,速度呈递增趋势,更符合实际情况。

由此可见,细化分层方法用于频散曲线反演是



注: V_s —横波速度; D —深度。

图3 某实测频散曲线按常规拐点分层反演结果

Fig. 3 Inversion Results of the Conventional Layer Method with the Inflexion of a Certain Dispersion Curve

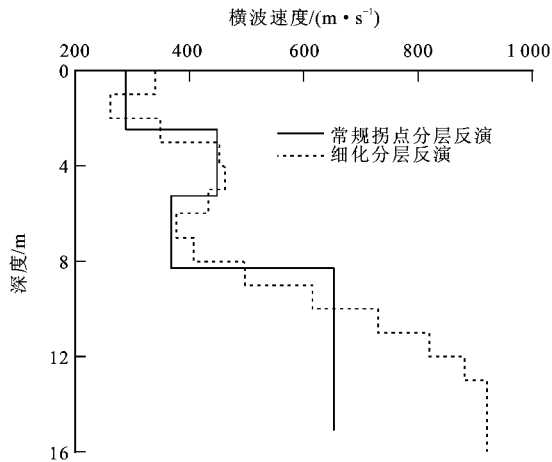


图 4 常规拐点分层反演结果与细化分层反演结果对比

Fig. 4 Contrast of the Inversion Results of Subdividing Layer Method and Conventional Layer with the Inflexion

切实可行且有效的。与同时反演横波速度和层厚度的常规反演方法相比,该方法细化分层后反演参数只有横波速度 1 个参数,在反演过程中避免了改变分层数和层厚度等参数,显著简化了反演计算过程。另一方面,将地下介质划分为 1 m 厚的薄层,反演后每层均可得到 1 个横波速度,满足了反演分辨率的要求。同时,由于实际地下介质的速度是随深度渐变的,细化分层后比按频散曲线拐点分层(每分层的厚度可能是几米或几十米,同一分层内介质的横波速度相等)更接近实际情况。

3 结语

(1)正演计算和反演结果均表明,细化分层与实际分层计算出的频散曲线是等效的,反演结果的总体效果与真实模型非常接近。说明细化分层法用于频散曲线反演是切实可行且有效的。与同时反演横波速度和层厚度的常规反演方法相比,细化分层法

避免了反演过程中改变分层数和层厚度等参数,显著简化了反演计算过程。

(2)将地下介质划分为 1 m 厚的薄层,反演后每层均可得到 1 个横波速度,满足了反演分辨率的要求。同时,由于实际地下介质的速度是随深度渐变的,细化分层后比按频散曲线拐点分层更接近实际情况。

参考文献:

- [1] Xia J H, Miller D, Park C B. Estimation of Near-surface Shear-wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves[J]. Geophysics, 1999, 64(3): 691.
- [2] 李庆春,邵广周,刘金兰,等. 瑞雷面波勘探的过去、现在和未来[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 74-77.
- [3] 邵广周,李庆春,梁志强. 液体表层层状介质导波频散曲线研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 915-920.
- [4] Shao G Z, Li Q C, Li J G. Surface Wave Extracting from Reflection Seismic Data and Structure Imaging of Shallow Seafloor[C]// Wang X B. Near-surface Geophysics and Human Activity. North Brunswick: Science Press USA Inc, 2008: 186-190.
- [5] 肖柏勋. 高模式瑞雷面波及其正反演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2000.
- [6] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [7] 辛小春. 面波新技术在工程地质勘察场地评价中的应用[J]. 北京水利, 2003(1): 25-26.
- [8] 孙 渊, 吴 迪, 张 良, 等. 弹性波法在水库坝基检测中的应用[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(4): 76-79.
- [9] Miller R D, Xia J H, Park C B, et al. Multichannel Analysis of Surface Waves to Map Bedrock[J]. The Leading Edge, 1999, 18(12): 1392-1396.
- [10] 卓乐芳. 液体-固体分界面处斯通利波的波速方程[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(1): 76-78.
- [11] 胥 颐, 刘福田, 刘建华, 等. 中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(2): 113-122.