

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.02.043

基于增强鲸鱼优化算法的面波频散曲线反演

周顺心^{1,2}

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海市 200032;2.上海市工程结构安全重点实验室,上海市 200032)

摘要: 增强鲸鱼优化算法是一种新型群体智能优化算法,相比于传统算法,其性能更加卓越。面波频散曲线反演横波速度可以对浅部的地层进行精确刻画,是工程物探领域一种可靠的手段。利用面波可以有效地识别当地层中出现含高速层或含低速层,但是面波频散曲线反演是一个多极值、非线性的问题。使用增强鲸鱼优化算法,相较于传统线性反演,其可以更快地逼近极值或跳出局部最小值,收敛速度更快,满足工程物探的需求。

关键词: 面波;频散曲线;鲸鱼算法

中图分类号: U418

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)02-0193-04

0 引言

随着城市发展和时间流逝,部分地下隐蔽工程资料缺失,无法准确定位,城市建设中为避免破坏原有市政设施,需要一种无损检测的物探手段。鉴于面波在层状介质中具有特殊的频散特性,可以利用面波频散曲线反演浅层介质的横波速度和层厚度。

面波频散曲线的反演是一个非线性和具有多解性问题^[1]。Ganji V(1998)提出了基于最小二乘的频散曲线反演思路^[2]。Socco等(2008)尝试使用MCMC反演面波频散曲线^[3]。虽然线性算法的收敛速度快,但依赖初始模型,精度也较低。非线性算法的计算量大效率低。近年来,智能群体算法的提出在一定程度上弥补了传统非线性算法的缺点。2016年Mirjalili提出了鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)。Nadimi-Shahraki(2022)在Mirjalili的基础上提出了增强鲸鱼优化算法(Enhanced Whale Optimization Algorithm, E-WOA)。E-WOA相对于WOA增强了其搜索能力和增加了种群多样性。基于该算法具有依赖参数少,寻优能力强等优点,通过2种常见地层模型试算和实际数据验证了基于E-WOA算法反演面波频散曲线的可行性和实用性。

1 增强鲸鱼优化算法

1.1 算法原理

WOA是通过模拟座头鲸捕猎行为来寻优的算法。如图1所示,在算法执行过程中,通过包围猎物、螺旋泡网攻击、搜索猎物三种方式逐步逼近问题的最优解^[4]。



图1 座头鲸的捕猎行为示意图

假设D维搜索空间中有一个鲸鱼种群,将其表示为 $X^t=(X_1^t, X_2^t, \dots, X_N^t)$ 。其中, $X_i^t=(X_{i,1}^t, X_{i,2}^t, \dots, X_{i,D}^t)$ 表示第i条鲸鱼在第t次迭代中的位置。在第一次迭代($t=1$)时,矩阵在搜索范围内随机选择初始位置启动。当 $t>1$ 时,随机使用包围猎物、搜索猎物和螺旋泡网攻击三种行为用于更新位置。其中,包围猎物和搜索猎物概率都定义为50%。通过这种行为模型,鲸鱼可以在空间中逐步搜索直至找到最优解:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \text{包围猎} & (\rho_i < 0.5) \text{ 且 } (|A_i^t| < 1) \\ \text{搜索猎物} & (\rho_i < 0.5) \text{ 且 } (|A_i^t| \geq 1) \\ \text{螺旋气泡网} & \rho_i \geq 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$A_i^t = 2 \times a_i^t \times \text{rand} - a_i^t \quad (2)$$

$$a_i^t = 2 - t \times \left(\frac{2}{T_{\max}} \right) \quad (3)$$

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 2020年上海市科委优秀技术带头人计划项目(20XD1432400); 上海建科集团科研创新项目(KY10000038.20210052)

作者简介: 周顺心(1996—),男,硕士,工程师,从事道路物探、岩土勘察物探工作。

其中,系数向量 A_i^t 表示每头鲸鱼在包围猎物和寻找猎物的两种方法之间进行选择; ρ_i^t 为 $(0,1)$ 中的随机值, a_i^t 是控制参数; rand 在 $(0,1)$ 内均匀分布; T_{\max} 是最大迭代次数。

(1)包围猎物方法

$$X_i^{t+1} = X_{best}^t - A_i^t \times D^t \quad (4)$$

$$D^t = |C_i^t \times X_{best}^t - X_i^t| \quad (5)$$

$$C_i^t = 2 \times \text{rand} \quad (6)$$

其中, X_{best}^t 是最好的座头鲸的位置; X_i^t 是鲸鱼的当前位置

(2)搜索猎物方法

$$X_i^{t+1} = X_{rnd}^t - A_i^t \times D^t \quad (7)$$

$$D^t = |C_i^t \times X_{rnd}^t - X_i^t| \quad (8)$$

其中, X_{rnd}^t 从鲸鱼种群中随机选择。

(3)螺旋泡网攻击方法

$$X_i^{t+1} = D^t \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + X_{best}^t \quad (9)$$

$$D^t = |X_{best}^t - X_i^t| \quad (10)$$

其中, b 参数是对数螺旋的形状; l 是 $[-1,1]$ 中的随机数。

1.2 增强鲸鱼优化算法

增强鲸鱼优化算法(E-WOA)通过引入池化机制和新的搜索策略来提高 WOA 的性能^[5]。

(1)池化机制:通过将每次迭代的最差解与当前最优的解交叉来维持种群多样性。通过给定矩阵 $\text{pool} = (p_1, p_2, p_3, p_k)$, 其中 $p_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,D})$, 通过式(11)将 t 第次迭代中的最差解 X_{worst}^t 和当前随机位置 X_{best}^t 相结合。

$$p_i^t = B_i^t \times X_{brnd}^t + \overline{B}_i^t \times X_{worst}^t \quad (11)$$

其中, X_{brnd}^t 是最优位置 X_{best}^t 附近的随机位置,通过式(14)计算得; B_i^t 是一个二进制随机数, $\overline{B}_i^t = 1 - B_i^t$ 。

(2)迁移搜索策略:通过随机分离座头鲸的一部分,以覆盖未探索的区域;

$$X_i^{t+1} = X_{rnd}^t - X_{brnd}^t \quad (12)$$

$$X_{rnd}^t = \text{rand} \times (ub - lb) + lb \quad (13)$$

$$X_{brnd}^t = \text{rand} \times (ub_{best} - lb_{best}) + lb_{best} \quad (14)$$

其中, X_{rnd}^t 是搜索空间内的随机位置; rand 是 $(0,1)$ 之间均匀分布的随机数; ub 和 lb 是解的上下限; ub_{best} 和 lb_{best} 是 X_{best}^t 的上下限。

(3)优选策略:通过大步长将鲸鱼分布在搜索空间的不同区域内。

$$X_i^{t+1} = X_i^t + A_i^t \times (C_i^t \times p_{rnd1}^t - p_{rnd2}^t) \quad (15)$$

其中, X_i^t 是鲸鱼的当前位置; p_{rnd1}^t 和 p_{rnd2}^t 是从第 t 次迭代中随机选择; A_i^t 通过柯西分布进行采样。

2 基于增强鲸鱼优化算法的面波频散曲线反演

在采用增强鲸鱼优化算法对面波频散曲线进行反演中,以均方差评价观测得的频散曲线与反演的频散曲线之间的相似程度,相似度反映反演结果的好坏。目标函数(E)可写为^[6]:

$$E = \text{sqrt}((\sum(V^{obs} - V^{theo}))/m) \quad (16)$$

其中, V^{obs} 为实测面波相速度; V^{theo} 为反演得到面波相速度; m 表示频散曲线的采样点数。

当反演的目标函数收敛稳定时,认为得到的横波速度与层厚度为最优结果。

3 含噪模型试算

本研究通过设计不同的四层模型,其中第二层分别为速度递增和高速两种情况,来检验基于增强鲸鱼优化算法在面波频散曲线反演中的可行性,具体参数见表1和表2。为了提高反演效率并减少计算量,本研究仅考虑横波速度和厚度的反演。因为面波频散特性受纵波速度和密度影响较小,同时假设泊松比和密度等参数已知,因此纵波速度可以通过公式计算得出。初始模型在宽泛的搜索范围中随机生成,以模拟缺少足够先验信息的实际工程情况。将模型正演得到的频散曲线作为观测曲线,并加入15%的随机噪声,来测试增强鲸鱼优化算法的寻优能力和抗噪性。

表1 四层速度递增模型参数

层号	模型			搜索范围		
	地层厚度/m	P波速度 / (m·s ⁻¹)	S波速度 / (m·s ⁻¹)	密度 / (g·cm ⁻³)	S波速度 / (m·s ⁻¹)	地层厚度 /m
1	3	374	200	1.8	100~400	2~5
2	4	561	300	1.8	200~500	3~5
3	5	748	400	1.8	250~600	3~7
4	∞	935	500	1.8	300~700	∞

表2 四层含高速层模型参数

层号	模型			搜索范围		
	地层厚度/m	P波速度 / (m·s ⁻¹)	S波速度 / (m·s ⁻¹)	密度 / (g·cm ⁻³)	S波速度 / (m·s ⁻¹)	地层厚度 /m
1	3	374	200	1.8	100~400	2~5
2	4	842	450	1.8	150~500	3~6
3	5	468	250	1.8	200~600	3~7
4	∞	935	500	1.8	250~700	∞

3.1 四层速度递增模型反演结果

绿色为设定的搜索范围。

图2为增强鲸鱼算法在速度递增模型反演结果,从图2中可以看出真实模型与反演结果之间的频散曲线吻合度非常高,反演得到横波速度与真实值基本一致,虽然层厚度略有出入,但是反演结果仍然可靠。

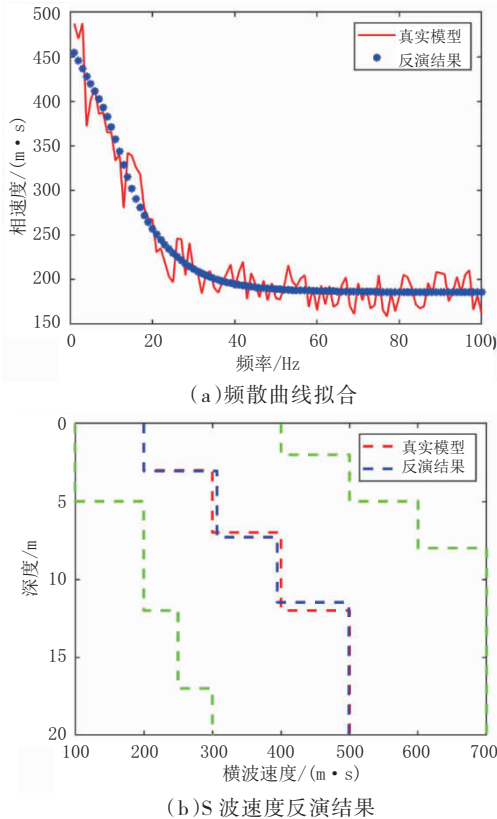


图2 四层速度递增模型反演结果

3.2 四层含高速层模型反演结果

对于表2所示的经典的四层介质含高速层模型,图3为增强鲸鱼算法在速度递增模型反演结果,从图3和图3中可以看出真实模型与反演结果之间的频散曲线非常吻合。除了在第二层高速层横波速度误差相对较大,其它层横波速度误差很小,层厚度基本吻合,反演结果准确体现了整体地层的趋势。

4 工程实例

上一节中,增强鲸鱼算法在含噪模型中的反演测试验证了其可靠性和抗噪性。为了更好验证算法,选择了一个上海的工程实例。该项目需要探明区域内的泵站井室的大致埋深,图4为泵站井室设计示意图。

根据图5的设计图纸资料,右侧泵站井室深度10.13 m,与图6(b)反演结果中的低速层厚度11.67 m非常接近,故推测3.5 m处为井室顶部,验证了增强鲸鱼算法的可靠性。

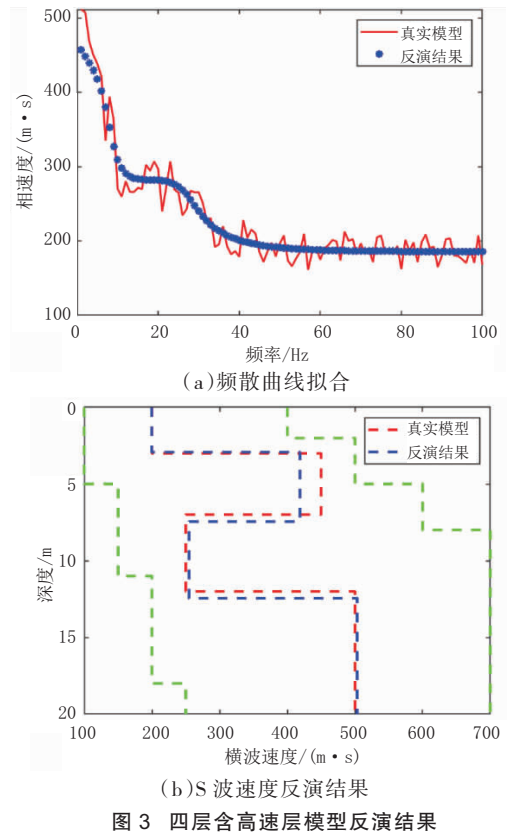
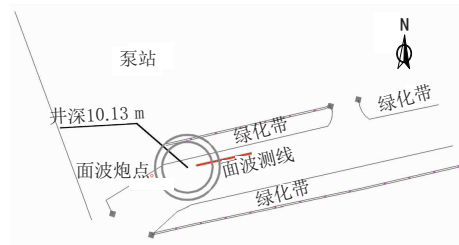
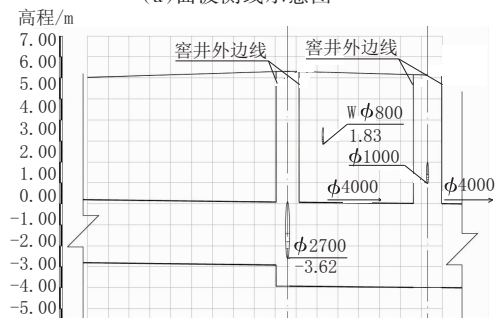


图3 四层含高速层模型反演结果



(a)面波测线示意图



(b)泵站井室设计图

图4 面波测线及泵站井室设计示意图

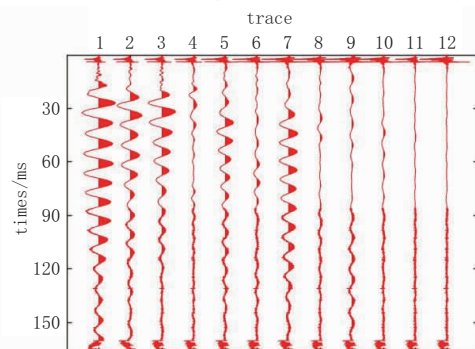
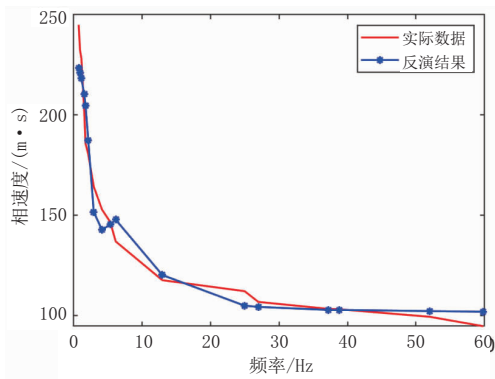
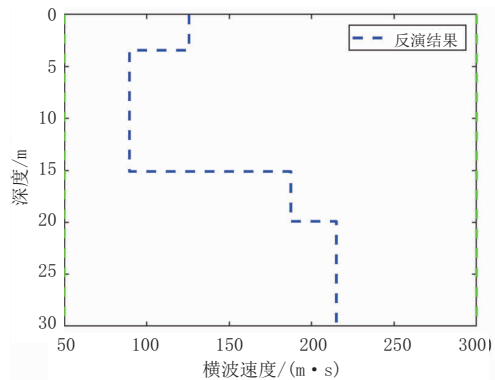


图5 多道瞬态面波实际数据



(a) 频散曲线拟合



(b) S波速度反演结果

图6 泵站井室反演结果

5 结论

该文通过模型试算和实际数据反演进行比较:

(1)得到的频散曲线整体吻合度高,横波速度浅层误差很小,算法具有较好的抗噪性。(2)在缺少先验信息约束的情况下,反演结果符合设计资料,验证了方法的可靠性。然而,从模型试算中可以看出,反演的第二层往后总是存在误差更大的情况,需要更深入的研究来了解参数变化和改进策略(与遗传算法、Lévy飞行策略等)的结合,来获得更好的反演结果^[7]。

参考文献:

- [1] 伍敦仕.基于面波信息的近地表参数反演方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
- [2] Vahid Ganji.Automated Inversion Procedure for Spectral Analysis of Surface Waves[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(8).
- [3] Laura Valentina Socco,Daniele Boiero.Improved Monte Carlo inversion of surface wave data[J].Geophysical Prospecting, 2008, 56(3).
- [4] Seyedali Mirjalili,Andrew Lewis.The Whale Optimization Algorithm [J].Advances in Engineering Software, 2016, 95.
- [5] Mohammed H. Qais,Hany M.Hasanien, Saad Alghuwainem. Enhanced whale optimization algorithm for maximum power point tracking of variable-speed wind generators[J].Applied Soft Computing, 2020, 86:105937.
- [6] 闫月锋.石油勘探中地震面波的非线性反演方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- [7] 许德刚,王再庆,郭奕欣,等.鲸鱼优化算法研究综述[J].计算机应用研究, 2023, 40(2):328-336.

(上接第 175 页)

6 结语

在超厚软土覆盖层地区的地下连续墙工程中,采用 CSM 工法搅拌桩进行槽壁加固施工,能充分发挥其施工速度快、搅拌均匀、节省材料的优势,施工范围周边地层及结构物稳定,是一种安全可靠、节能环保的槽壁加固形式,具有推广意义。

参考文献:

- [1] 张雷.水泥土搅拌桩在深基坑围护中的应用[J].建筑安全, 2021, 36(4):13-16.
- [2] 张亚峰,龙伟义.超深淤泥质地层单轴水泥土搅拌桩技术[J].建筑技

术开发, 2021, 48(20):161-162.

- [3] 陈盛原,张伟锋,韦未.水泥土搅拌桩技术研究现状及发展前景[J].工程建设, 2020, 52(4):6-10.
- [4] 邓友生,孟丽青,蔡梦真,等.水泥土搅拌桩加固黄土路基稳定性研究[J].郑州大学学报(工学版), 2022, 43(3):59-66.
- [5] 宋珪.五轴水泥土搅拌桩止水帷幕关键施工技术研究[J].江西建材, 2022(8):232-235.
- [6] 徐鸿晟.水泥土搅拌桩在地连墙槽壁加固中的应用[J].西部交通科技, 2018(8):140-142, 159.
- [7] 蔡雷波.CSM 工法在上海地区深基坑围护止水帷幕中实践探究[J].山西建筑, 2018, 44(16):34-36.
- [8] 沈丹.五轴水泥搅拌桩与传统水泥搅拌桩的对比分析[J].山西建筑, 2015, 41(3):78-80.