引用格式:董奕含,喻志超,胡天跃,等.基于改进蜣螂优化算法的瑞雷波频散曲线反演方法[J].油气地质与采收率,2023,30 (4):86-97.

DONG Yihan, YU Zhichao, HU Tianyue, et al. Inversion of Rayleigh wave dispersion curve based on improved dung beetle optimizer algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 86-97.

基于改进蜣螂优化算法的瑞雷波频散曲线反演方法

董奕含1,喻志超2,胡天跃1,何 川1

(1.北京大学地球与空间科学学院,北京100871;2.中国科学院地质与地球物理所,北京100029)

摘要:瑞雷波勘探方法是一种常用的近地表勘探技术,频散曲线反演是瑞雷波勘探数据处理流程中的关键步骤之一。作为一 个典型的多参数、多极值、高度非线性的地球物理优化问题,频散曲线的准确、高效反演对计算近地表横波速度场,进而获取地 层结构信息具有重要意义。提出一种基于改进的蜣螂优化算法的瑞雷波频散曲线反演方法,使用 Halton 序列初始化种群个 体的位置,更好地控制初始化种群的空间分布;通过种群划分,对不同的子种群采用不同的搜索策略,一方面避免反演搜索陷 入局部最优,同时实现算法的快速收敛。使用3个理论地质模型和实际资料,对改进蜣螂优化算法应用于频散曲线反演以获 取地下横波速度分布的有效性进行验证。结果表明,与使用当前较为主流的改进自适应遗传算法进行频散曲线反演相比,新 方法有效、稳定且能够快速收敛得到最优解。

关键词:瑞雷波勘探;频散曲线;蜣螂优化算法;非线性反演;Halton序列

文章编号:1009-9603(2023)04-0086-12DOI:10.13673/j.pgre.202304038中图分类号:TE19文献标识码:A

文献标识码:A

Inversion of Rayleigh wave dispersion curve based on improved dung beetle optimizer algorithm

DONG Yihan¹, YU Zhichao², HU Tianyue¹, HE Chuan¹

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing City, 100871, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing City, 100029, China)

Abstract: The Rayleigh wave exploration method is a commonly used near-surface exploration technique, and dispersion curve inversion is one of the key steps in the data processing of Rayleigh wave exploration. As a typical multi-parameter, multi-extreme, and highly nonlinear geophysical optimization problem, accurate and efficient inversion of dispersion curves is of great significance for calculating near-surface S-wave velocity fields and obtaining stratigraphic structure information. We propose a method for the Rayleigh wave dispersion curve inversion based on improved dung beetle optimizer (DBO) algorithm. The method uses Halton sequence to initialize the position of the population, so as to better control the spatial distribution of the initialized population, and it adopts different search strategies for different sub-populations by population division, so as to avoid the inversion search falling into the local optimum and realize the fast convergence of the algorithm. In this paper, three theoretical geological models and a set of practical data are used to verify the effectiveness of the improved DBO algorithm applied to the inversion of dispersion curves to obtain the subsurface S-wave velocity distribution. The results show that the new method is more effective and stable than the current mainstream improved adaptive genetic algorithm for dispersion curve inversion and can converge to the optimal solution quickly. **Key words**: Rayleigh wave exploration; dispersion curve; dung beetle optimizer algorithm; nonlinear algorithm; Halton sequence

瑞雷波是地震勘探中常用的地震波类型之一, 利用其在层状介质中的频散特性能够获得地下介 质的信息,如地层厚度、岩性、介质的变化等^[14]。瑞 雷波勘探的流程通常包括数据的采集、处理和解

收稿日期:2023-04-14。

作者简介:董奕含(1997一),女,陕西凤翔人,在读硕士研究生,从事瑞雷波勘探技术与应用研究。E-mail:yhdong@pku.edu.cn。

通信作者:何川(1974—),男,江苏宜兴人,研究员,博士。E-mail:chuanhe_pku@163.com。

基金项目:中国石油化工集团公司资助项目"高酸性气田集输管道泄漏微震实时监测与报警技术"(322083)。

释,瑞雷波频散曲线的提取是数据处理中的关键步骤,其对后续的地层结构反演起到至关重要的作用^[5]。通过频散曲线可以将瑞雷波的相速度转化为 横波速度,进而实现对地下结构的速度分层,这在 工程地质勘查^[68]、环境探测^[9]、城市地下空间探测^[10] 等众多领域得到了广泛应用。

瑞雷波频散曲线反演为典型的多参数、多极 值、高度非线性的地球物理优化问题,频散曲线的 高精度、高效率反演方法为重点研究内容。常用的 频散曲线反演方法主要分为局部线性化方法和全 局非线性方法。局部线性化方法中最常用的是最 小二乘法^[11],其在初始模型建立不够精准的情况下 存在难以通过反演获得准确地层模型结构的不足。 以模拟退火算法(Simulated Annealing,简称SA)^[12]、 遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)^[13]、蒙特卡 罗法(Monte Carlo, 简称 MC)^[14]、群体智能优化算 法[15-17]等为代表的全局非线性方法对初始模型依赖 性较小,可进行全局寻优,是反演方法的主要发展 方向。具体到瑞雷波频散曲线反演方法,其受样本 规模的影响,收敛速度不确定,尤其在面对复杂地 质模型时,还需合理设置初始参数,避免反演搜索 过早陷入局部极小值[18]。

针对上述问题,LU等对模拟退火算法进行改进,提出了热浴模拟退火算法(Heat-bath SA),并对理论以及实际地震记录进行反演^[19]。SOCCO等提出了一种改进的蒙特卡罗(Improved Monte Carlo,简称 IMC)算法,利用瑞雷波正演无量纲化的特性对模型空间的采样过程进行优化,通过统计以得到最终反演结果^[20]。LÜ等提出了改进的粒子群(Improved Eliminate Particle Swarm Optimization,简称 IEPSO)算法,通过加入局部-全局信息共享项以提高算法的全局搜索能力^[21]。吴聪等提出了改进自适应遗传算法(New Improved Adaptive Genetic Algorithm,简称 NIAGA),将原算法中的交叉概率和变异概率进行自适应化,使其能够根据个体适应度、迭代次数等参数的变化进行自我调整,达到抑制算法早熟收敛、提高全局探索的目的^[22]。

蜣螂优化(Dung Beetle Optimizer,简称 DBO) 算法是2022年提出的一种全新的群体智能优化算 法^[23]。该算法受蜣螂生活习性的启发,通过模拟蜣 螂种群的滚球、跳舞、产卵、觅食、偷窃5种行为模 式,实现对空间的高效探索与开发。DBO算法含参 数较少,对模型参数初始设置没有特殊要求,该算 法通用性较强,在处理复杂高维优化问题时,具备 高收敛速度、高精确度、高稳定性的特点。然而, DBO算法在种群初始化的处理中,可能存在因种群 聚集而降低算法收敛性能的不足。为了提高初始 化种群的质量,保证频散曲线反演的效率和准确 性,笔者提出基于改进DBO算法的瑞雷波频散曲线 反演方法,该方法采用Halton序列初始化种群的位 置,使种群的初始分布更加均匀;然后将种群分为4 种不同的子种群,每个子种群对应不同的搜索策 略,避免了反演搜索陷入局部最优解,实现了算法 的快速收敛。首先简要介绍瑞雷波频散曲线反演 目标函数以及DBO算法的基本原理;然后针对 DBO算法初始化种群分布不均匀的缺点,提出基于 改进DBO算法的瑞雷波频散曲线反演方法的处理 流程;最后,使用3种典型的理论地质模型和实际资 料对方法的有效性进行了验证。

1 方法原理

1.1 瑞雷波频散曲线反演目标函数

瑞雷波频散曲线反演本质上是通过某种策略 不断更新地层模型参数,使目标函数最小化的过 程。传统瑞雷波频散曲线反演目标函数一般设定 为均方差函数,其表达式为:

$$F_{1} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{M} \left[\boldsymbol{c}_{obs}(m) - \boldsymbol{c}_{cal}(m) \right]^{2}}{M}}$$
(1)

此外,反演目标函数也可以通过实测与理论计 算的频散曲线值的相对误差计算得到,其表达式 为:

$$F_{2} = \frac{100}{M} \sum_{m=1}^{M} \frac{|c_{obs}(m) - c_{cal}(m)|}{c_{obs}(m)}$$
(2)

该目标函数受所有采样频率点信息的共同影响,经过多次试验测试,采用25~35个频率点即可获得较为准确的反演结果,且可以保证计算效率。 本文采用由(2)式确定的瑞雷波频散曲线反演目标函数*F*₂₀

1.2 DBO算法

蜣螂是自然界常见的昆虫,在自然界中扮演着 分解者的角色。蜣螂依赖粪球生存,根据蜣螂个体 对粪球利用方式的不同,可以将蜣螂种群划分为滚 球蜣螂、产卵蜣螂、小蜣螂、窃贼蜣螂4个子种群,不 同的蜣螂子种群对应不同的行为模式。

1.2.1 滚球蜣螂行为模式

滚球蜣螂负责将粪便滚成球,运送到安全的地 方。滚球蜣螂在滚动粪球的过程中,可以实现对全 空间的探索。滚球蜣螂的行为模式有滚球行为和 跳舞行为2种。

当前方无障碍时,实施滚球行为,其移动路径 受到光源强度的影响,位置更新的计算公式为:

$$\boldsymbol{X}_{\text{rolling}}^{t+1} = \boldsymbol{X}_{\text{rolling}}^{t} + \alpha \cdot \boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{X}_{\text{rolling}}^{t-1} + \boldsymbol{b} \cdot \left| \boldsymbol{X}_{\text{rolling}}^{t} - \boldsymbol{X}^{\text{worst}} \right| (3)$$

当前方出现障碍时,实施跳舞行为,获取新的 滚球方向,位置更新的计算公式为:

$$X_{\text{rolling}}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{rolling}}^{t} + \tan\theta \left| X_{\text{rolling}}^{t} - X_{\text{rolling}}^{t-1} \right| & \theta \neq 0, \frac{\pi}{2}, \pi \\ X_{\text{rolling}}^{t} & \theta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi \end{cases}$$

$$(4)$$

1.2.2 产卵蜣螂行为模式

产卵蜣螂负责将粪球滚到适合产卵的安全区 域,产下卵球以繁殖后代。产卵蜣螂的移动范围被 严格限制在安全区域内,实现对区域的局部开发。 当产卵蜣螂处于安全区域时,实施产卵行为,位置 更新的计算公式为:

$$\boldsymbol{X}_{\text{spawning}}^{t+1} = \boldsymbol{X}^* + \boldsymbol{b}_1 \cdot (\boldsymbol{X}_{\text{spawning}}^t - \boldsymbol{L}_{\text{b}}^*) + \boldsymbol{b}_2 \cdot (\boldsymbol{X}_{\text{spawning}}^t - \boldsymbol{U}_{\text{b}}^*)$$
(5)

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{b}}^{*} = \max\left(\boldsymbol{X}^{*} - \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{X}^{*}, \boldsymbol{L}_{\mathrm{b}}\right) \tag{6}$$

$$U_{\rm b}^* = \min\left(X^* + R \cdot X^*, U_{\rm b}\right) \tag{7}$$

$$R = 1 - \frac{t}{T_{\text{max}}} \tag{8}$$

需要注意,产卵蜣螂的位置被严格限制在安全 区域内。若 $X_{spawning}^{t}(j) > U_{b}^{*}(j), 则 X_{spawning}^{t}(j) = U_{b}^{*}(j);若<math>X_{spawning}^{t}(j) < L_{b}^{*}(j), 则 X_{spawning}^{t}(j) = L_{b}^{*}(j)$ 。 1.2.3 小蜣螂行为模式

小蜣螂需要寻找食物,其活动范围被严格限制 在最佳觅食区。当小蜣螂处于该区域时,实施觅食 行为,位置更新的计算公式为:

$$X_{\text{small}}^{t+1} = X_{\text{small}}^{t} + C_1 \cdot (X_{\text{small}}^{t} - L_{\text{b}}^{\text{best}}) + C_2 \cdot (X_{\text{small}}^{t} - U_{\text{b}}^{\text{best}})$$
(9)

其中:

$$L_{\rm b}^{\rm best} = \max(\boldsymbol{X}^{\rm best} - \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{X}^{\rm best}, \boldsymbol{L}_{\rm b})$$
(10)

$$\boldsymbol{U}_{\rm b}^{\rm best} = \min(\boldsymbol{X}^{\rm best} + \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{X}^{\rm best}, \boldsymbol{U}_{\rm b})$$
(11)

1.2.4 窃贼蜣螂行为模式

窃贼蜣螂会与其他个体竞争食物,偷取粪球。 窃贼蜣螂位于最佳食物源附近时,实施偷窃行为, 位置更新的计算公式为:

$$\boldsymbol{X}_{\text{thief}}^{t+1} = \boldsymbol{X}^{\text{best}} + S \cdot \boldsymbol{g} \cdot \left(\left| \boldsymbol{X}_{\text{thief}}^{t} - \boldsymbol{X}^{*} \right| + \left| \boldsymbol{X}_{\text{thief}}^{t} - \boldsymbol{X}^{\text{best}} \right| \right)$$
(12)

综上所述,蜣螂优化算法正是通过对蜣螂种群 的滚球、跳舞、产卵、觅食和偷窃5种行为进行建模, 然后基于4个子种群执行不同的搜索方法,从而进 行全局探索和局部开发。

1.3 DBO 算法改进

DBO算法的种群初始化采用随机法生成,无法 保证种群中的个体均匀分布,可能导致种群搜索速 度慢,算法难以收敛。针对上述问题,引入 Halton 序列初始化种群个体的位置,可以更好地控制个体 的分布情况,避免在搜索空间的某些区域过于密集 或过于稀疏的情况,使得算法更加完善和稳定;同 时,由于 Halton 序列具有较好的遍历性,能够更好 地覆盖整个搜索空间,因此可以更快地发现全局最 优解,提高算法的收敛速度和精度。

二维 Halton 序列的实现过程为选定 2 个不同的 质数 p_1 和 p_2 ,对于任意的正整数n,分别以 p_1 和 p_2 作 为基础量不断对其切分和组合,以得到二维 Halton 序列H(n),切分过程可以描述为:

$$n = y_0 + y_1 p^1 + \dots + y_r p^r$$
(13)

$$\Phi_p(n) = y_0 p^{-1} + y_1 p^{-2} + \dots + y_r p^{-r-1} \quad (14)$$

$$H(n) = [\Phi_{p_1}(n), \Phi_{p_2}(n)]$$
(15)

为验证 Halton 序列初始化的优越性,取 Halton 序列产生的初始种群与随机方法产生的初始种群 进行对比。种群个数取100,取值范围为[0,1]。由 随机方法和 Halton 序列初始化种群分布对比(图1) 可以看出,Halton序列产生的种群分布更加均匀,初 始解质量更高。

2 方法流程

基于改进 DBO 算法提出一种新的频散曲线反 演方法,具体流程(图 2)为:①设定待反演模型的基 本结构,包括采样频率 $f_M = [f_1, f_2, \dots, f_M]^T$,地层数量 d,地层横波速度 $V_s = [V_{s_1}, V_{s_2}, \dots, V_{s_d}]^T$,地层数速 度 $V_P = [V_{P_1}, V_{P_2}, \dots, V_{P_d}]^T$, 地 层 密 度 $\rho =$ $[\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_d]^T$,地层厚度 $H = [H_1, H_2, \dots, H_d]^T$,以及 横波速度的搜索范围 $U_b^{v_s}$ 和 $L_b^{v_s}$ 与地层厚度的搜索 范围 U_b^{u} 和 L_b^{u} 。初始化 DBO 算法参数,包括蜣螂 种群总数 N,空间搜索维度 D = 2d - 1,最大迭代次 数 T_{max} ;根据具体问题,确定滚球蜣螂、产卵蜣螂(卵 球)、小蜣螂、窃贼蜣螂的数量以及权重系数k, b, S等。②利用 Halton 序列初始化蜣螂种群的位置 X^0 , 每只蜣螂个体对速度模型进行正演模拟,采用快速 矢量传递算法^[24]计算得到瑞雷波相速度的理论值 c_{rel} ,进而计算该值与实测值 c_{rel} 的目标函数 F_2 。③





利用DBO算法更新横波速度-地层厚度模型,具体 步骤为:1)根据计算得出的种群中每只蜣螂个体的 目标函数值,得到最小目标函数值对应的全局最优 位置X^{best}和最大目标函数值对应的最差位置X^{worst}。 2)更新滚球蜣螂的位置。若该蜣螂个体所属种类 为滚球蜣螂,通过概率法确定该蜣螂个体接下来的 行为继续是滚球还是跳舞,给定一个滚球概率阈值 λ , $\Diamond \delta$ = rand(1), $\ddot{a} \delta < 0.9$, $\emptyset \Diamond \eta$ = rand(1), α = $1(\eta > \lambda)$ 或 $\alpha = -1(\eta \leq \lambda)$,并按照(3)式更新位置, 否则按照(4)式更新位置。进而确定当前局部最优 位置 X^* 。3)更新其他3个子种群蜣螂的位置。若该 蜣螂个体所属种类为产卵蜣螂,则按照(5)式更新 位置;若该蜣螂个体所属种类为小蜣螂,则按照(9) 式更新位置:若该蜣螂个体所属种类为窃贼蜣螂, 则按照(12)式更新位置。4)计算当前位置蜣螂个 体的目标函数值,得到最小目标函数值对应的全局 最优位置X^{best}。5)判断是否满足迭代终止条件。若 种群中最优蜣螂个体目标函数值 $F_{\rm b} < \epsilon$,或者迭代次 数达到 T_{max} 时,迭代终止,输出全局最优位置 X^{best} (横 波速度和地层厚度);否则,跳转至步骤2)进行下一 次迭代寻优。④输出最小目标函数值对应的横波 速度模型结构。

3 理论模型数据测试

为了说明改进DBO算法的有效性,对3个理论 地层模型(即四层速度递增模型、四层含低速软夹 层模型和四层含高速硬夹层模型)进行瑞雷波频散 曲线的反演测试,并与NIAGA算法在搜索效率和 搜索精度上进行对比。为了达到兼顾反演准确度 和运算时长的目的,经过多次测试,设定所有算法 的蜣螂种群总数N为210,最大迭代次数Tmax为150。





改进DBO算法的参数设置如下:滚球蜣螂、产卵蜣 螂、小蜣螂以及窃贼蜣螂的数量比例为6:6:7:11;k取值为0.1,b取值为0.3,S取值为0.5。NIAGA算法 的参数设置如下:交叉概率 p_e, p_{e1}, p_{e2} 的取值分别为 0.6,0.6,0.3;变异概率 p_m, p_{m1}, p_{m2} 的取值分别为 0.01,0.01,0.002。在测试中,对于模型 I 和模型 III, 在 5~99 Hz频率范围内计算基阶频散曲线并进行 反演;对于模型 II,考虑实际情况,仅在 5~60 Hz频 率范围内计算基阶频散曲线并进行反演。

3.1 模型 I (四层速度递增模型)

四层速度递增模型在勘探中最为常见,地质参数和反演搜索范围如表1所示。对提取的频散曲线利用改进DBO算法和NIAGA算法分别进行50次独立运算,由频散曲线反演结果(图3)可以看出,2种算法计算得到的频散曲线与理论值均无明显偏差;但通过与频散曲线理论值进行统计分析发现,改进DBO算法的结果与理论值的平均相对误差为0.01%,而NIAGA算法的结果与理论值的平均相对误差为0.01%。2个算法的目标函数随迭代次数的收敛曲线(图3c)显示,改进DBO算法的收敛过程更加连续且稳定,在第50次迭代时已经趋于收敛,且速度更快,同时也能获得比NIAGA算法更加精确的解。

表1 模型 I 地质参数及反演搜索范围 Table1 Geological parameters of model I and

	inversion search ranges						
		反演搜索	素范围				
层号	$V_{\rm S}/$	$V_{\rm P}/$	ho/	H/m	V _s /	H/m	
	$(\mathbf{m} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{s}^{\text{-1}})$	$(\mathbf{m} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{s}^{\text{-1}})$	$(g \cdot cm^{-3})$	11/111	$(m \cdot s^{-1})$	11/111	
1	200	663	2.0	3	100~300	1~5	
2	250	829	2.0	2	100~400	1~3	
3	350	1 161	2.0	5	150~500	2~8	
4	450	1 493	2.0	8	200~600	8	

通过改进DBO算法得到的地层横波速度结构 集中地分布在真实地层周围(图4a)。对比NIAGA 算法得到的地层横波速度结构(图4b)可以看出, NIAGA算法的结果与真实模型存在较为明显的差 异。统计分析50次反演结果(表2)发现,改进DBO 算法计算的地质参数与真实模型的平均相对误差 为0.76%,显著低于NIAGA算法的8.60%,说明改进 DBO算法所得结果更为准确。

3.2 模型 II (四层含低速软夹层模型)

模型 II 与人工铺就路面的地下横波速度结构 相似,其地质参数和反演搜索范围如表3所示。对 提取的频散曲线利用改进DBO算法和NIAGA算法 分别进行50次独立运算,所得频散曲线反演结果 (图5)显示,改进DBO算法的结果可以准确刻画反 映低速软夹层的"之"字形结构,而NIAGA算法的 结果在曲线形态上虽呈现出反映低速夹层的"之" 字形结构,但仍能观察到反演结果在17~49 Hz频 段处与理论值存在一定程度的偏差。通过与频散 曲线理论值统计分析发现,改进DBO算法的结果与 理论值的平均相对误差为0.03%,而NIAGA算法的 结果与理论值的平均相对误差为1.06%。由目标函



Fig.3 Inversion results of fundamental-mode Rayleigh wave dispersion curve of model I

数随迭代次数的收敛曲线(图 5c)可以看出,2种算 法都能快速收敛,改进 DBO 算法比 NIAGA 算法具 有更高的收敛速度,NIAGA 算法收敛至 0.2 左右时 即无法进一步收敛,而改进 DBO 算法可收敛至 0.08,具有更高的求解精度。

通过改进DBO算法得到的地层横波速度结构 可以准确地反映出地层含有低速夹层的特征,且各 独立运算结果也比较接近真实值(图6a)。对比NI-AGA算法得到的地层横波速度结构(图6b)可以看 出,NIAGA算法的反演结果虽能反映出地层含有低 速夹层的特征,但并未准确计算出第1层、第2层的 横波速度以及第2层、第3层的地层厚度。统计分 析50次反演结果(表4)可以看出,改进DBO算法计



图4 模型 I 横波速度反演结果

Fig.4 Inversion results of S-wave velocity of model I

表2	模型Ⅰ地质参数反演结果统计	
----	---------------	--

|--|

直 灾 值 /(m·s ⁻¹)		NL	AGA算法反演结	果	改进DBO算法反演结果		
参数	英头面/(m s) 武 m	平均值/(m·s ⁻¹)	和对疗学 关/0/	标准差/(m·s ⁻¹)	平均值/(m·s ⁻¹)	和斗告夫/0/	标准差/(m·s ⁻¹)
	13, III	或m	相外 庆左/70	或m	或m	伯內 庆左/ /0	或m
V_{S1}	200.00	200.21	0.13	0.26	200.01	0.01	0.02
V_{S2}	250.00	273.58	9.89	14.48	249.84	0.73	2.27
V_{S3}	350.00	361.78	4.33	12.34	348.51	0.60	1.86
$V_{\rm S4}$	450.00	450.61	0.31	1.83	449.87	0.04	0.12
H_1	3.00	3.26	8.86	0.16	3.00	0.71	0.03
H_2	2.00	2.48	26.52	0.35	1.97	2.10	0.05
H_3	5.00	4.52	10.14	0.48	4.96	1.15	0.06

注: V_{S1}, V_{S2}, V_{S3}, V_{S4}的单位为m/s; H₁, H₂, H₃的单位为m。

表3 模型Ⅱ地质参数及反演搜索范围

	Table3 Geological parameters and inversion search ranges of model						
目旦		模型地	模型地质参数			反演搜索范围	
因为	$V_{\rm S}/({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	$V_{\rm P}/({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	$ ho/(\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-3})$	<i>H</i> /m	$V_{\rm S}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$	<i>H</i> /m	
1	200	663	2.0	2	100~300	1~3	
2	150	497	2.0	3	100~300	1~5	
3	250	829	2.0	5	125~400	2~8	
4	400	1 327	2.0	∞	200~600	∞	

算的地质参数与真实模型的平均相对误差为 1.30%,显著低于NIAGA算法的10.27%,说明改进 DBO算法所得结果更为准确。

3.3 模型Ⅲ(四层含高速硬夹层模型)

模型III为四层含高速硬夹层模型,其地质参数 和反演搜索范围如表5所示。对提取的频散曲线利 用改进DBO算法和NIAGA算法分别进行50次独 立运算,所得频散曲线反演结果(图7)显示,2种算 法计算得到的频散曲线与理论值均具有较高的拟 合度,通过与频散曲线理论值统计分析发现,改进 DBO算法的结果与理论值的平均相对误差为 0.02%,而NIAGA算法的结果与理论值的平均相对 误差为0.78%(表6)。由目标函数随迭代次数的收 敛曲线(图7c)可以看出,NIAGA算法虽然搜索效率 很高,但在第30次迭代后陷入早熟状态,改进 DBO算法可以收敛至全局最优解附近,且收敛过程 更加连续稳定。

通过改进DBO算法得到的地层横波速度结构 可以准确地反映地层包含高速夹层的特征,且各独 立运算结果比较接近真实值(图8a)。对比NIAGA 算法得到的地层横波速度结构(图8b)可以看出, NIAGA算法仅对第1层的横波速度和地层厚度的 计算结果较为准确,对第2层及以下地质参数的计 算结果与真实值存在较为明显的偏差。统计分析 50次反演结果(表6)发现,改进DBO算法计算的地 层参数与真实模型的平均相对误差为1.51%,显著 低于NIAGA算法的7.07%,说明改进DBO算法所 得结果更为准确。



直守值/(m·s ⁻¹)		NIAGA算法反演结果			改进DBO算法反演结果		
参数	其关值/(III'S) 武m	平均值/(m·s ⁻¹)	相对号主义(0/	标准差/(m·s ⁻¹)	平均值/(m·s ⁻¹)	相对出导美/0/	标准差/(m·s ⁻¹)
	12 m	或m	伯內 庆左/70	或m	或m	相对 庆左/ /0	或m
V_{S1}	200.00	181.76	9.12	1.07	199.39	0.57	1.26
$V_{\rm S2}$	150.00	166.29	10.86	0.84	149.06	0.68	0.71
$V_{\rm S3}$	250.00	258.55	7.14	16.28	249.22	0.91	2.61
$V_{\rm S4}$	400.00	402.91	0.73	2.25	399.76	0.11	0.46
H_1	2.00	2.34	17.10	0.14	2.05	3.08	0.07
H_2	3.00	3.39	12.99	0.21	2.92	3.03	0.06
H_3	5.00	4.39	13.94	0.51	5.02	0.71	0.04

注: V_{S1} , V_{S2} , V_{S3} , V_{S4} 的单位为m/s; H_1 , H_2 , H_3 的单位为m。

Table5 Geological parameters and inversion search ranges of model Ⅲ							
		模型地	」 L质参数		反演搜索	素范围	
层号	$V_{\rm S}/$ (m·s ⁻¹)	$\frac{V_{\rm P}}{(\rm m\cdot s^{-1})}$	ho/ (g·cm ⁻³)	<i>H</i> /m	$\frac{V_{\rm S}}{(\rm m\cdot s^{-1})}$	<i>H/</i> m	
1	160	531	2.0	2	60~300	1~3	
2	260	862	2.0	3	100~400	1~5	
3	200	663	2.0	5	100~400	2~8	
4	400	1 327	2.0	œ	200~600	8	
40					 一 反演值 - 平均值 理论值 		
型 型 20	0 -	****	* * * * * *				
10	0 0	20	40	60	80	100	
40	a—	-改进DBC	────────────────────────────────────	Hz 阶频散曲	由线反演结果 一 反演值	1	
(30 	0				 平均值 理论值 		
相 速 50	0 -	> • • • •	e a a a a	* • • •			
10	0		I		I		
	0 Ъ	20 —NIAGA	40 频率/ 算法的基阶	60 [′] Hz ↑频散曲	80 线反演结果	100	
小目标函数值	6 - 5 - 4 - 3 -			_	改进DBO算 NIAGA算法	法 去	
漸			+				
	0		50 迭代》	10 欠数	00	150	
	c—卍 図 7 ゼ	女进DBO第 費 刑Ⅲ 苴 □	I法与NIAG 公理室波 #	A算法的 而 勘 曲 4	的迭代过程和 长反演结里	比	
Fig	i≊i/19 7 Inver	<王Ⅲ本 sion resu	如晒囲収型 lts of funds	メ fl X 西 ビ amental	×区頃纪禾 -mode Ravi	eigh	
1 15	W	ave disne	rsion curve	of mod	lel Ⅲ		

表5 模型Ⅲ地质参数及反演搜索范围

总之,以上3个模型的频散曲线反演结果分析 表明,改进DBO算法可以有效反演地层的横波速度 结构,且与NIAGA算法相比,改进DBO算法具有更优的寻解能力,反演结果能够更接近真实值。

4 实际资料测试

为了说明提出的方法在实际资料频散曲线反 演中的适用性,对冰岛西南部Amarbæli地区(图9) 的地震数据进行了处理和分析。该地区地表以时 代较新(距今地质年龄小于0.7 Ma)的溢流玄武岩 和火山玻璃角砾岩互层为主^[25]。地震数据由质量为 6.3 kg的重锤锤击地面激发作为主动震源,24个4.5 Hz的垂向检波器以1m的间隔、最小炮检距为10m 的线性排列构成观测系统采集得到。图9a为采集 到的时长为0.8 s的地震记录,采样间隔为1ms。对 该地震记录利用相移法得到瑞雷波频散能量图(图 9b),可以观察到明显连续的基阶频散能量。

在实际面波勘探中,通常最大勘探深度为瑞雷 波最大波长的三分之一至二分之一。在对该实际 资料频散曲线的反演过程中,以8~40 Hz的基阶频 散曲线为研究对象,并选择12m作为本次反演的最 大勘探深度,反演最大勘探深度以上地层的横波速 度和地层厚度以及模型的纵波速度和密度设为合 理的固定值。由于缺少Amarbæli地区的测井数据, 将Olafsdotir等反演得到的横波速度结构作为基准 值^[26],据此将勘探空间划分为6层,各层横波速度和 地层厚度的反演搜索范围、纵波速度和密度的设定 如表7所示。

使用改进DBO算法与NIAGA算法对提取的基阶频散曲线进行反演并对比结果,算法的参数设置与理论地层模型测试保持一致。改进DBO算法频散曲线反演得到的结果在整个频段都能很好地与基准值吻合(图10a),30次独立运算结果的平均相对误差为0.16%。NIAGA算法频散曲线反演的结果在10Hz以下与基准值的拟合度稍差(图10b),平均相对误差为0.31%。由目标函数随迭代次数的收敛曲线(图10c)可以看到,改进DBO算法在迭代初期,最小目标函数值即优于NIAGA算法;在第50次迭代后2种算法都趋于稳定收敛,NIAGA算法最终收敛于0.36,而改进DBO算法可以收敛至0.06,具备更高的收敛精度,其反演结果更加可靠。

改进DBO算法反演得到的横波速度(图11a)显示,各独立运算结果的平均值与基准值接近。NIA-GA算法得到的横波速度结构(图11b)显示,与基准值的拟合情况并不理想,特别是第3层、第4层和第5层的地质参数计算结果偏差明显。2种算法结果

. . . .

表6 模型Ⅲ地质参数反演结果统计									
	Iable6 Statistics of geological parameter inversion results of model III								
	百 灾估/(m.c-1)	NI	AGA算法反演结	果	改适	进DBO 算法反演结	吉果		
参数	其头直/(III-S-) 武 m	平均值/(m·s ⁻¹)	相对误关/0/	标准差/(m·s ⁻¹)	平均值/(m·s ⁻¹)	相对提美/0/	标准差/(m·s ⁻¹)		
	13, III	或m	相对 庆左/%	或m	或m	相对 庆左7%	或m		
V_{S1}	160	159.39	0.38	0.26	160.00	0.01	0.02		
$V_{\rm S2}$	260	238.64	8.22	0.89	260.45	0.48	1.53		
$V_{\rm S3}$	200	217.80	8.90	3.00	200.49	1.08	2.52		
$V_{\rm S4}$	400	394.84	2.43	11.39	400.11	0.09	0.53		
H_1	2.00	1.85	7.68	0.02	2.00	0.28	0.01		
H_2	3.00	3.43	14.37	0.19	2.96	4.56	0.16		
H_3	5.00	5.35	7.51	0.31	5.06	4.09	0.24		

注: V_{s1} , V_{s2} , V_{s3} , V_{s4} 的单位为m/s; H_1 , H_2 , H_3 的单位为m。







对比表明,改进DBO算法所得结果优于NIAGA算法,反演所得速度模型的可靠性更高。

5 结论

提出一种基于改进DBO算法的频散曲线反演

方法。该方法利用 Halton 序列进行种群初始化,优 化了种群的空间分布,对不同子种群设置不同的搜 索策略及更新规则,有利于算法在局部和全局的搜 索。通过3个典型的地质模型测试验证方法的有效 性和稳定性。对实际资料的处理结果表明,基于改 进蜣螂优化算法的瑞雷波频散曲线反演方法能够 .

表7	Arnarbali地区模型地质参数及反演搜索系	包围
Table7	Geological parameters and inversion search	ranges
	of model in Arnarbæli region	

层号	$V_{\rm S}/({ m m}\cdot{ m s}^{-1})$	<i>H</i> /m	$ ho/(g\cdot cm^{-3})$	$V_{\rm P}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$
1	37 ~ 112	0.5 ~ 1.5	1.85	1 440
2	45 ~ 135	0.5 ~ 1.5	1.85	1 440
3	75 ~ 225	1 ~ 3	1.85	1 440
4	$90 \sim 270$	1 ~ 3	1.85	1 440
5	$120 \sim 360$	2 ~ 6	1.85	1 440
6	145 ~ 435	00	1.85	1 440





Fig.10 Inversion results of fundamental-mode Rayleigh wave dispersion curve in Arnarbæli region

有效获得准确的地层横波速度,与NIAGA算法结 果对比表明,改进DBO算法具有效率更高、结果更 可靠的优点。



当然,改进DBO算法也存在一些不足,比如子种群的数量设置基于经验,实测数据计算耗时相对较长,对这些问题进行深入研究将大幅提高算法的求解能力。

符号解释

b---滚球系数,常数,且b∈(0,1);

 b_1, b_2 ——产卵系数,为1×D维独立随机向量;

 c_{cal} ——瑞雷波相速度的理论值,m/s;

 $c_{cal}(m)$ ——瑞雷波相速度的理论值的第m个分量,m/s; c_{obs} ——瑞雷波相速度的实测值,m/s;

 $c_{obs}(m)$ ——瑞雷波相速度的实测值的第m个分量,m/s;

C1——觅食系数,服从正态分布的随机数;

 C_2 ——觅食向量,属于(0,1)的1×D维随机向量;

- d——地层数量;
- D---空间搜索维度;
- f_M ——第M个采样频率,Hz;

 f_M ——采样频率,Hz;

F1----传统瑞雷波频散曲线反演目标函数;

F2---本文采用的瑞雷波频散曲线反演目标函数;

F_b——蜣螂种群中最优蜣螂个体目标函数值;

g---偷窃向量,服从正态分布的1×D维随机向量;

H——地层厚度,m;

H,——第d层地层厚度,m; H(n)——二维 Halton 序列; *i*——蜣螂个体位置序号; k──偏转系数,常数,且k∈(0,0.2]; L,——搜索空间的下界,维度为D; L_{h}^{best} 一觅食区域的下界,维度为D; L,"——地层厚度搜索范围的下界,m; L,^Vs——横波速度搜索范围的下界,m/s; L*--安全区域的下界,维度为D; $L_{h}^{*}(j)$ ——安全区域的下界的第j个分量; *m*——采样频率序号; M——频散曲线的频率点总数; *n*——任意正整数; N——蜣螂种群总数; p,p1,p2---大于等于2的质数,表示 Halton 序列基础 昰. *p*_c,*p*_{c1},*p*_{c2}——交叉概率; *p*_m,*p*_{m1},*p*_{m2}——变异概率; *p*^r, *p*^{-r-1}——Halton 序列切分项; r----由n和p决定的常量; R——区域控制系数; S---偷窃系数,常数; t——当前迭代次数; T_{max}——最大迭代次数; U,——搜索空间的上界,维度为D; U_{h}^{best} ——觅食区域的上界,维度为D; U_b^{*H*}——地层厚度搜索范围的上界,m; U, ^vs——横波速度搜索范围的上界, m/s; U^{*}——安全区域的上界,维度为D; $U_{h}^{*}(i)$ —安全区域的上界的第i个分量; Vp-----地层纵波速度,m/s; $V_{\rm p}$ ——第d层纵波速度,m/s; V_s——地层横波速度,m/s; *V*_s——第*d*层横波速度,m/s; X^{best}——全局最优位置向量,维度为D; X_{t-1}^{t-1} ——第t-1次迭代时滚球蜣螂个体的位置向量, 维度为D: X_{rolling}^{t} ——第t次迭代时滚球蜣螂个体的位置向量,维度 为D; X_{rolling}^{t+1} 第t+1次迭代时滚球蜣螂个体的位置向量, 维度为D;

在第*t*次迭代与第*t*-1次迭代时的 位置差异;

- |X^t_{rolling} X^{worst} |→ 光源强度信息,其为模拟自然环境 中光源强度的变化,数值越高代表 光源强度越弱;
- X^t_{small}——第t次迭代时小蜣螂个体的位置向量,维度为

D: X_{small}^{t+1} ——第t+1次迭代时小蜣螂个体的位置向量,维 度为D: X_{spawning}^{t} ——第t次迭代时产卵蜣螂个体的位置向量,维 度为D: $X_{\text{spawning}}^{t}(j)$ ——第t次迭代时产卵蜣螂个体的第j个位置 分量; $X_{\text{snawning}}^{t+1}$ 第t+1次迭代时产卵蜣螂个体的位置向 量,维度为D; X_{thiaf}^{t} ——第t次迭代时窃贼蜣螂个体的位置向量,维度 为D: X_{thisf}^{t+1} ——第t+1次迭代时窃贼蜣螂个体的位置向量, 维度为D: X^{worst}——全局最差位置向量,维度为D; X*——当前局部最优位置向量,维度为D; X⁰——蜣螂种群初始位置; y_0, y_1, y_r ——常数, Halton 序列切分项系数; α——自然环境系数,整数,取值为-1或1,分别代表偏 离和未偏离原来方向; δ----滚球概率系数,属于(0,1)的随机数; ϵ ——允许误差阈值,常数; η---滚球偏转概率系数,属于(0,1)的随机数; θ ——偏转角度,且 $\theta \in [0, \pi];$ ρ ——地层密度,g/cm³; ρ_{d} ——第d层地层密度,g/cm³; λ ——滚球概率阈值,常数; $\Phi_{n}(n)$ ——以p为基础量的Halton序列函数; $\Phi_{p_1}(n)$ ——以 p_1 为基础量的Halton序列函数; $\Phi_{p_2}(n)$ ——以 p_2 为基础量的Halton序列函数。

参考文献

[1] 杨河山,张世明,曹小朋,等.基于Hadoop分布式文件系统的 地震勘探大数据样本采集及存储优化[J].油气地质与采收率, 2022,29(1):121-127.

YANG Heshan, ZHANG Shiming, CAO Xiaopeng, et al. HDFS-based collection and storage optimization of seismic exploration big data samples [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 121-127.

- [2] HASKELL N A. The dispersion of surface waves on multilayered media [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, 43(1):17-34.
- [3] 刘曾勤,吕睿.油气区带风险评价方法[J].石油实验地质, 2022,44(6):1081-1087.
 LIU Zengqin, LÜ Rui. Play risk evaluation for hydrocarbon exploration [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(6): 1081-1087.
- [4] 印长海,师江波,郑剑锋,等.四川盆地合川-潼南地区茅二段 滩相白云岩储层特征、主控因素及勘探意义[J].大庆石油地质 与开发,2023,42(1):1-10.

YIN Changhai, SHI Jiangbo, ZHENG Jianfeng, et al. Characteristics, controlling factors and exploration significance of shoal facies dolomite reservoirs in 2nd member of Maokou Formation in Hechuan-Tongnan area of Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42 (1): 1-10.

- [5] PARK C B, MILLER R D, XIA J. Multichannel analysis of surface waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 800-808.
- [6] 高旭,于静,李学良,等.自适应权重蜻蜓算法及其在瑞雷波频 散曲线反演中的应用[J].石油地球物理勘探,2021,56(4):745-757.

GAO Xu, YU Jing, LI Xueliang, et al. Rayleigh wave dispersion curve inversion based on adaptive weight dragonfly algorithm [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(4): 745-757.

- [7] MILLER R D, XIA J, PARK C B, et al. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock [J]. The Leading Edge, 1999, 18(12): 1 392-1 396.
- [8] 祁生文,孙进忠,何华.瑞雷波勘探的研究现状及展望[J].地球 物理学进展,2002,17(4):630-635.
 QI Shengwen, SUN Jinzhong, HE Hua. Review of Rayleigh wave exploration [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(4): 630-635.
- [9] XIA J, MILLER R D, PARK C B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 1 390-1 395.
- [10] CHENG Feng, XIA Jianghai, LUO Yinhe, et al. Multichannel analysis of passive surface waves based on crosscorrelations [J]. Geophysics, 2016, 81(5): 57-66.
- [11] DORMAN J, EWING M. Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in the New York-Pennsylvania area [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(13): 5 227-5 241.
- [12] BEATY K S, SCHMITT D R, SACCHI M. Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure [J]. Geophysical Journal International, 2002, 151(2): 622-631.
- [13] LEI Yuhang, SHEN Hongyan, LI Xinxin, et al. Inversion of Rayleigh wave dispersion curves via adaptive GA and nested DLS [J]. Geophysical Journal International, 2019, 218 (1): 547-559.
- [14] MARASCHINI M, FOTI S. A Monte Carlo multimodal inversion of surface waves [J]. Geophysical Journal International, 2010, 182(3): 1 557-1 566.
- [15] SONG Xianhai, TANG Li, LÜ Xiaochun, et al. Application of particle swarm optimization to interpret Rayleigh wave dispersion curves [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 84(1): 1-13.

- [16] SONG Xianhai, LI Lei, ZHANG Xueqiang, et al. Differential evolution algorithm for nonlinear inversion of high-frequency Rayleigh wave dispersion curves [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 109: 47-61.
- [17] SONG Xianhai, TANG Li, ZHAO Sutao, et al. Grey wolf optimizer for parameter estimation in surface waves [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 75: 147-157.
- [18] FOTI S, COMINA C, BOIERO D, et al. Non-uniqueness in surface-wave inversion and consequences on seismic site response analyses [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(6): 982-993.
- [19] LU Yongxu, PENG Suping, DU Wenfeng, et al. Rayleigh wave inversion using heat-bath simulated annealing algorithm [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 134: 267-280.
- [20] SOCCO L V, BOIERO D. Improved Monte Carlo inversion of surface wave data [J]. Geophysical Prospecting, 2008, 56(3): 357-371.
- [21] LÜ Xueying, WANG Yitian, DENG Junyi, et al. Improved particle swarm optimization algorithm based on last-eliminated principle and enhanced information sharing [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2018; 1-17.
- [22] 吴聪,陈侃松,姚静.基于改进自适应遗传算法的物流配送路 径优化研究[J].计算机测量与控制,2018,26(2):236-240.
 WU Cong, CHEN Kansong, YAO Jing. Study on optimization of logistics distribution route based on improved adaptive genetic algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26 (2): 236-240.
- [23] XUE Jiankai, SHEN Bo. Dung beetle optimizer: A new metaheuristic algorithm for global optimization [J]. The Journal of Supercomputing, 2022: 1-32.
- [24] 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,2002,29(5):25-30.
 FAN Youhua, LIU Jiaqi, XIAO Baixun. Fast vector-transfer algorithm for computation of Rayleigh wave dispersion curves [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2002, 29(5): 25-30.
- [25] OLAFSDOTTIR E A, ERLINGSSON S, BESSASON B. Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(2): 217-233.
- [26] GREEN R A, HALLDORSSON B, KURTULUS A, et al. A unique liquefaction case study from the 29 May 2008, Mw6. 3 Olfus earthquake, southwest Iceland [C]. Lisbon: Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012: 24-28.