王天琦,于东凯,蔡润.基于改进蚁群算法在面波频散曲线反演中的应用[J].地震工程学报,2020,42(6):1523-1533.doi:10. 3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1523

WANG Tianqi, YU Dongkai, CAI Run, Application of the Improved Ant Colony Algorithm in the Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curves[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6):1523-1533.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1523

基于改进蚁群算法在面波频散曲线 反演中的应用

王天琦¹,于东凯²,蔡 润³

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222;

2. 重庆市二零八工程检测有限公司, 重庆 401070;

3. 中冶成都勘察研究总院有限公司,四川成都 610023)

摘要:为快速准确的反演得到近地表地层结构,将一种新颖而强大的非线性算法——蚁群算法引入 到瑞雷波频散曲线领域,并对其进行相应的改进,改进蚁群算法的优点是运算效率快、精度高、算法 简单、灵活易于实现,需要调节控制参数也较少。文中分别在无噪声、含噪声以及实测数据进行反 演测试,通过模型数据和实测数据表明,应用于瑞雷波反演中的改进蚁群算法在收敛速度与收敛精 度之间能达到良好的平衡,所得解具有较高可信度。而且算法为促进所得解快速收敛到全局最优, 在搜索中分全局搜索与局部搜索两个方式进行,能够有效地避免局部最优解产生。借助人工合成 的瑞雷波数据以及真实观测数据,验证了改进蚁群算法在反演近地表剪切波速度时的有效性和通 用性。此外,文中与遗传算法进行比较,得出改进蚁群算法具有高效性和高精度性的优点。

关键词:瑞雷波;频散曲线;非线性反演;局部搜索;改进蚁群算法

 中图分类号: P315
 文献标志码:A
 文章编号: 1000-0844(2020)06-1523-11

 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1523

Application of the Improved Ant Colony Algorithm in the Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curves

WANG Tianqi¹, YU Dongkai², CAI Run³

(1. China Water Resources Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. Chongqing 208 Engineering Testing Co., Ltd., Chongqing 401070, China;

3. Chengdu Surveying Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Chengdu 610023, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, we planned and improved the ant colony algorithm to quickly and accurately obtain the near-surface stratum structure. The ant colony algorithm is the simple algorithm, which has the advantages of fast operation efficiency and high precision. In this paper, the model data and the measured data indicated that the improved ant colony algorithm applied in Rayleigh wave inversion can achieve a better balance between the fast convergence rate and accuracy, and the solution has high credibility. This algorithm was divided into two ways, global search and local search, which can effectively avoid the generation of local optimal solution and

thereby promoting the solution rapidly converge to the global optimum. Finally, the effectiveness and versatility of the improved ant colony algorithm in the inversion of near-surface shear wave velocity were verified using the artificial Rayleigh wave data and real observation data. Moreover, by comparing with the genetic algorithm, it was found that the improved ant colony algorithm has the advantages of high efficiency and accuracy.

Keywords: Rayleigh wave; dispersion curve; nonlinear inversion; local search; improved ant colony algorithm

0 引言

1887年 Rayleigh 发现了瑞雷波的存在并揭示 了其在弹性半空间介质中的传播特征[1]。早期瑞雷 波一直被视为强干扰波,尤其对石油地震勘探而言。 直到上世纪 50 年代前后,人们发现其在层状介质中 具有频散特性[2],才开始利用瑞雷波信号来探测地 球内部结构[3-4]以及相应的工程勘探[5]。近些年来, 瑞雷波由于具有衰减慢、抗干扰能力强、信噪比高的 特点[6],已经在多个领域中获得应用[7]。相比常规 勘探方法,瑞雷波勘探具有分辨率高、应用范围广、 受场地影响小、检测设备简单、检测速度快等优 点[8]。因此,其逐渐发展成为岩土工程主要勘探方 法。由于瑞雷波频散曲线与地下介质结构和岩土力 学参数密切相关,反演瑞雷波频散曲线则能够获得 近地表地层横波速度,划分地层厚度,而且能够用于 计算土层变形模量、压实度、标准贯入击数、泊松比 等参数,其中关键因素在于准确地对瑞雷波频散曲 线进行反演[9-10]。

全局优化算法,如遗传算法^[11]、模拟退火 法^[12]、粒子群算法^[13]近年来广泛用于瑞雷波频散 曲线反演研究。全局优化算法的优点在于对初始模 型要求较低,反演运算之前不必针对工区进行繁重 的调研工作;并且运算中不需要进行大量的求导操 作,反演效率得到一定保障,比较适合瑞雷波频散曲 线反演问题,但也存在计算量大、效率低及易早熟收 敛等缺陷^[14-15]。

本文针对上述传统算法的缺陷,结合粒子群算 法全局最优解引导思路,提出了一种新型的瑞雷波 反演算法——改进蚁群优化算法。蚁群算法是一种 全局优化算法,其原本是为解决旅行商问题而提出 的,它借鉴了自然界中蚂蚁群体的典型觅食行为特 征:观察小区域范围内情况及判断出是否有食物等 信息素轨迹;通过路径时释放自己的信息素;遗留的 信息素数量随时间流逝而逐步减少^[16]。依据上述 觅食行为的特点,本文将蚂蚁的觅食行为视为反演 中求解目标函数的极值问题,并对蚁群算法进行改进,应用于瑞雷波频散曲线的反演研究中。

1 蚁群算法的基本原理及改进策略

1.1 蚁群算法基本原理

由自然界中蚂蚁群体的觅食行为发展而来的蚁 群算法(Ant conlony algorithm, ACO)是一种新型 全局优化算法,算法根据不同的优化问题将蚂蚁算 子赋予不同的可行解,在建立解决方案的过程中各 个算子均携带关于问题特征及自身行为的信息,通 过协作,算子之间利用信息素进行信息的交换,各个 算子均可以得出一个解决方案,算法则通过算子之 间的相互协作得到处理问题的最优解。

作为一种智能优化算法,蚁群算法主要包括信息素的累积、算子的禁忌搜索行为以及群体的协作 三种行为方式。算法运行时,蚂蚁算子搜索到全局 最优解需要经过大范围的全局搜索以及小范围的局 部搜索两个过程。在搜索过程中,算法在每次移动 之前要找到本次信息素含量最小值对应的最优蚂蚁 算子,而后对其他蚂蚁算子进行判断,当较接近时进 行局部搜索,反之则进行全局搜索,所有蚂蚁都移动 一次即为对解进行一次优化,通过一定次数的优化 或者当解的质量满足要求时便可对结果进行输出。 以经典的 TSP 问题为例,蚂蚁的移动、全局搜索以 及局部范围内的搜索遵循以下公式。

$$\begin{cases} p_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} \frac{\left[\tau_{ij}(t)\right]^{\alpha} \left[\eta_{ik}(t)\right]^{\beta}}{\sum \left[\tau_{ij}(t)\right]^{\alpha} \left[\eta_{ik}(t)\right]^{\beta}}, & j, s \in \text{allowed} \\ \\ 0 & , \text{ else} \end{cases} \\ \eta_{j}(t) = \frac{1}{d_{ij}} \end{cases}$$

(1)

式(1) 表示蚂蚁算子的移动策略,其中 i 和 j 分 别表示两个城市; $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻位于路径(i,j) 上的信息素含量; $\eta_{ij}(t)$ 表示启发函数,即从一个城 市转移到另一个城市的期望程度,可表示为距离的 倒数;上标 α 以及 β 分别表示轨迹以及能见度的相对 重要性。式(1)表示蚂蚁算子在一次移动中由城市 *i*转移至城市*j*的概率。另外,在蚂蚁算子的移动中 涉及到的局部调整以及全局调整策略如下:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+h) = (1-\omega)\tau_{ij}(t) + \omega\tau_0 \\ \tau_0 = \frac{1}{nl_{\min}} \end{cases}$$
(2)

式(2)为局部调整策略中 ω 表示位于0至1内的随机数; l_{min} 表示集合C中两个最近元素之间的距离。

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t) \\ \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_{ij}^{k}(t) \end{cases}$$
(3)

式(3) 表示全局调整策略,其中 ρ 表示信息素的挥发系数; $\Delta \tau_{ij}(t)$ 表示本次循环中路径(i,j) 上信息素的增量; $\Delta \tau_{ij}^{k}(t)$ 表示第k 只蚂蚁算子在本次循环中留在路径上的信息素含量。

1.2 改进策略

蚁群算法存在后期收敛能力较低的缺陷,因此, 本文借鉴全局寻优能力较强的粒子群算法对本算法 进行相应的改进,在算法进行遍历过程中引入粒子 群算法中的全局最优解引导策略以增强算法全局寻 优能力,提高反演精度。

具体是指在蚁群算法进行一次迭代之后将信息 素的更新策略进行调整,若本次出现更优解时,执行 新的更新策略,见式(4a);反之,则执行原更新策略, 见式(4b)。

 $\begin{cases} \tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t)' & (4a) \\ \tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) & (4b) \\ \vec{\tau} + \tau_{ij}(t) \ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} + \vec{\tau} \\ \vec{\tau} + \vec{$

2 改进蚁群算法在面波处理中的应用

本文在 Matlab 中实现改进蚁群算法的反演程序 执行瑞雷波的非线性反演工作。现阶段研究中主要 关注的是水平层状介质的半空间中瑞雷面波的传播: 反演中各层的剪切波速度(vs)及层厚度(H)影响着 瑞雷波的频散曲线^[17],将其作为要确定的参数,评价 反演算法的好坏就在于其反演所得到的横波速度、层 厚度的精确程度以及所需的工作量的多少。

蚂蚁数量和最大循环次数是改进蚁群算法的两 个重要参数。在我们的反演程序中设定蚂蚁数量为 10 * *d*,其中 *d* 表示该地层的层数;最大循环次数根 据不同情况确定,经过对程序的一系列的测试,在有 噪声和真实数据状态下最大循环次数均取50次,在 理论模型情况下取100次。另外,反演算法在初始 条件下对所有蚂蚁的赋值是随机性的,并且规定在 全局最优解附近找到模型参数。对初始模型进行 20次反演,每次反演中设置的初始模型均不相同, 即蚂蚁算子通过不同的路径得到反演解,以此验证 改进蚁群算法的反演能力,而20次反演获得的解的 均值产生模型参数。

通过反演模型是否能精确的解释观测资料来确 定拟合函数。对于层状介质而言,本文定义拟合函数 φ_j ,其中 *j* 表示地层的层数,即为观测到的相速度 *v* ^{ches}与经过反演得到的介质模型的正演模拟所得到的 相速度 *v*^{chel}之间的均方差。拟合函数可表示如下:

$$\varphi_{j} = \sqrt{\frac{\left\{\sum_{i=1}^{M} \left(v_{R}^{\text{obs}} - v_{R}^{\text{cal}}\right)^{2}\right\}}{M}}$$
(5)

其中:M表示正演模拟所得到基阶波相速度向量的 长度。

本文利用四种近地表勘探中常遇到的理论地质 模型进行了反演试算,分别是两层速度递增模型、四 层速度递增模型、四层含低速软弱夹层模型和四层含 高速硬夹层模型。首先对模型所携带的地层参数进 行频散曲线正演模拟得到相对应的频散曲线,以此来 模拟实际工作中测量得到的频散数据;然后根据改进 蚁群算法对该频散曲线进行反演计算,得到反演模 型,由反演所得到的剪切波速度剖面模型与实际模型 相比十分接近,从而证明了改进蚁群算法对瑞雷波进 行反演的可靠性;而后对正演得到的频散曲线中加入 15%的白噪声,模拟实际工作所得到的含有噪声污染 的频散曲线,所得反演模型接近真实模型,进一步验 证了本算法的稳定性;最后对意大利东北部一个处理 厂所采集到的实测资料进行反演,通过对比反演模型 与钻孔数据,检验了本算法的实用性与可靠性。

3 理论模型反演

3.1 无噪声数据反演

本文使用不同的理论模型进行反演试验,模型 均为近地表反演中经常遇见的情形。模型 A 表示 在半空间介质之上存在一均匀介质层,剪切波速度 随着深度增加而增大;模型 B 为多层介质结构,剪 切波速度随地层深度的增加而增加;模型 C 为在两 个较硬地层之间夹杂有低速软弱地层,低速软弱层 剪切波速度低于相邻地层横波速度;模型 D 为在两 个较软地层之间夹杂着高速硬夹层,高速硬夹层剪 切波速度高于相邻地层横波速度。在现阶段近地表 反演频散曲线分析中,频率范围通常取 5~100 Hz, 图1表示四个理论模型的频散曲线,将作为测量数 据用于无噪声数据的反演过程。



图1 四个理论模型正演模拟的频散曲线



3.1.1 两层模型反演

图 2 和图 3 分别表示应用改进蚁群算法对简单 的双层介质模型(模型 A)进行反演的结果,通过这 几张图我们可以对该算法的反演准确度、反演效率 有一个直观的认识,其中搜索所需各参数列于表 1。



迭代次数的变化 Fig.2 The variation of error of the improved ACO with





Fig.3 Inversion results of model A using the improved ACO

表 1 模型 A:两层速度递增地质模型参数及反演搜索范围

Table 1	Model A: parameters of a	two-layer	increasing	velocity	earth model	and se	earching ra	nge of	inversion
---------	--------------------------	-----------	------------	----------	-------------	--------	-------------	--------	-----------

层序号		模型	搜索范围			
	$v_{\rm S}/({\rm m/s})$	$v_{\rm P}/({\rm m/s})$	$ ho/(m g/cm^3)$	h/m	$v_{\rm S}/({\rm m/s})$	h/m
1	200	416	1.9	6	$100\!\sim\!300$	$3 \sim 12$
均匀半空间	500	1 041	1.9	∞	$250\!\sim\!750$	∞

图 2 表示反演 20 次过程中误差的变化特征,应 用改进蚁群算法反演 20 次彼此完全独立的迭代过 程中,误差变化的整体趋势表现一致:误差在前几次 迭代过程中急剧缩减,接着由于所得解已接近最优 解故而缓慢的缩减(由于模型较简单,包含数据较 少,故本算法能在 20 次迭代过程中快速收敛,得到 全局最优解)。事实上,大多数传统算法例如遗传算 法(GA)或者模拟退火算法(SA)特征就是迭代次数 多而导致效率低下,而改进蚁群算法的优点则是信息累计和信息更新策略,这使得其计算效率及收敛 速度大大提高。以模型 A 为例,在 Matlab2016b 中 借助改进算法反演 20 次总耗时为564 s,而借助传 统算法反演总耗时为 812 s。图 3(a)表示应用改进 蚁群反演模型正演模拟的频散曲线(红色实线)与原 模型正演模拟所得频散曲线(蓝色实点)的拟合情 况;图 3(b)则表示反演所得到的剪切波速度模型与 模型 A 的对比(两侧红色虚线表示搜索边界)。 3.1.2 多层理论模型反演

对于上述简单的双层模型而言,改进蚁群算法 能快速准确的反演得到模型的剪切波速度以及各层 的层厚度。对于多层介质模型 B 而言,表 2 给出了 四层介质上下界的参数,经过反演得到图 4、图 5,分

表 2 模型 B:四层速度递增地质模型参数及反演搜索范围

Table 2	Model B; parameters of	a four-layer	increasing ve	elocity earth	model and	searching range	of inversion
	•						

层序号		模型	搜索范围			
	$v_{\rm S}/({\rm m/s})$	$v_{\rm P}/({\rm m/s})$	$ ho/(m g/cm^3)$	h/m	$v_{\rm S}/({\rm m/s})$	h/m
1	200	663	1.9	2	100~300	1~3
2	300	995	1.9	4	$150 \sim 450$	$2 \sim 6$
3	400	1 327	1.9	6	$200 \sim 600$	$3 \sim 9$
均匀半空间	500	1 658	1.9	∞	$250 \sim 750$	∞



Fig.4 The variation of error of the improved ACO with the number of iteration

别表示在四层介质中应用本算法所得解与模型 B参数之间的误差变化、频散曲线拟合情况以及剪切波波速度剖面的对比。同双层介质误差变化规律相似,从图4中可以看出误差在前几次迭代过程中快速缩减,这个阶段算法主要进行的是全局搜索,目的是找到最优解所在的区域;之后误差缓慢的缩减,表明改进蚁群算法在之后的迭代中进行局部搜索,在最优解附近移动,对所得解不断进行优化,当误差满足规定的误差限或者迭代次数达到规定的次数时,可对结果进行输出,即为全局最优解。图5(a)表示应用改进蚁群算法反演模型正演模拟的频散曲线(红色实线)与原模型正演模拟所得到频散曲线(蓝色实点)的拟合情况; 图5(b)则表示反演所得到的剪切波模型与模型 B的对比,其中蓝色实线代表模型 B的参数,品红色点线代表反演范围。



Fig.5 Inversion results of model B using the improved ACO

在实际利用瑞雷波信号进行地球物理勘探的工作中所遇到的地层是十分复杂的,可能会含有速度异常的夹层。由于地层的多样性,有必要对含异常速度 夹层的地层进行进一步测试,因此将改进蚁群算法在 更加复杂的模型 C 和模型 D 中进行反演测试。

表3提供了对模型C进行反演所需的一些参数,图6为应用改进蚁群算法非线性反演模型C所得的结果。由图可看出,含低速软弱夹层的地层能被准确地反演出来,其中异常夹层的剪切波速度以

及层厚度与实际模型十分接近,误差很小,在实际应 用中对后续的勘探、开发等方面能够提供反演的准 确性保障。通过图 6 我们可以得出以下结论:改进 蚁群算法对于含有异常速度夹层的地层反演效果良 好,能较准确反演出各层的剪切波速度以及层厚度, 对异常夹层的反演达到较准确的精度,在算法运行 过程中有效避免了局部最优解所可能造成的干扰。 同时我们也对含有高速硬夹层的模型 D 进行反演 的测试,反演结果见图 7。从图 7(a)中可以看出,反

表 3 模型 C:四层含低速软夹层地质模型参数及反演搜索范围

Table 3 Model C: parameters of a four-layer earth model with low velocity soft interlayer and searching range of inversion

日应日		模型	搜索范围			
压庁亏	v _s /(m/s)	$v_{\rm P}/({\rm m/s})$	$ ho/(m g/cm^3)$	h/m	$v_{\rm S}/({\rm m/s})$	h/m
1	200	663	1.9	2	100~300	1~3
2	160	673	1.9	4	$100 \sim 300$	$2 \sim 6$
3	300	1 102	1.9	6	$150 \sim 450$	$3 \sim 9$
均匀半空间	400	1 470	1.9	∞	$200 \sim 600$	∞











表 4 模型 D:四层含高速硬夹层地质模型参数及反演搜索范围

Table 4 Model D: parameters of a four-layer earth model with high velocity soft interlayer and searching range of inversion

日应旦		模型	搜索范围			
压序写	$v_{\rm S}/({\rm m/s})$	$v_{\rm P}/({ m m/s})$	$ ho/(m g/cm^3)$	h/m	$v_{\rm S}/({\rm m/s})$	h/m
1	150	498	1.9	2	$50 \sim 300$	$1 \sim 3$
2	250	829	1.9	4	$100\!\sim\!400$	$2 \sim 6$
3	200	841	1.9	6	$100\!\sim\!400$	$3 \sim 9$
均匀半空间	400	1 470	1.9	\sim	200~600	\sim

演所得模型经过正演模拟得到的频散曲线与模型数据对应的频散曲线拟合度较高;从图 7(b)中可以看出,高速硬夹层能被准确地反演出来,剪切波速度和 各层层厚度与模型对应的参数十分接近,反演效果 能达到实际工作中的要求。

3.2 随机噪声对改进蚁群算法的影响

实际的地震勘探记录存在噪声,含噪数据会影响反演结果,因此需进行含噪数据反演。在理论模型经过正演模拟所得到的频散曲线中加入15%的白噪声,将含噪数据输入至改进蚁群算法反演程序

中,结果如图 8(a)、9(a)、10(a)所示,蓝色实线为加 入噪声后的频散曲线,红色虚线为反演所得模型经 过正演模拟得到的频散曲线。

改进蚁群算法对文中三种多层介质模型含噪声 数据的反演结果分别在图 8(b)、9(b)、10(b)中展示出 来。其中,不含噪声的数据反演结果与真实模型是最 吻合的,其平均误差仅分别为 2.2%、3.1%和 3.0%,含 15%随机噪声数据的反演结果则和真实模型存在偏 差,其平均误差分别增加到 3.7%、4.5%和 4.6%,由此 看见噪声会影响反演结果但并未完全偏离真实模







Fig.10 Inversion results of model D with noise

型,说明改进蚁群算法具备良好的抗噪能力。

4 同其他算法对比

为了进一步验证算法的能力,将改进蚁群算法 反演的结果同相对较成熟的反演算法——遗传算法 (GA)进行对比。使用遗传算法对无噪声的第四个 数据(模型 D)进行反演为例,为更好地进行对比,排 除其他因素干扰,采用相同的反演次数、相同的搜索 空间、相同的搜索算子数目、相同的迭代次数(遗传 代数),遗传算法的几个参数设置为:选择、交叉和突 变概率分别为 0.8、0.6 和 0.02^[18]。

关于遗传算法和改进蚁群算法的反演结果在图 11 中展示,表 5 展示了这两种不同算法中衡量反演 效果的三个参数:AVE、STD 和OAE。这三个统计 结果分别代表:多次反演中最后一次迭代所获得最 小均方差的平均值(Average, AVE)和标准偏差 (Standard Deviation,STD)以及由算法反演所得模 型参数的总体平均误差(Overall Average Error, OAE)。表 5 表示改进蚁群算法在模型参数总体误 差(OAE)和均方根误差(AVE)方面优于遗传算法, 说明改进蚁群算法所得解具有较高的精确性,而且 在标准误差(STD)方面也优于遗传算法,说明本算 法同时具备较高的稳定性,这对实际应用中的反演 工作是非常重要的。从图 11 中可以看出,蚁群的搜 索倾向于最初60次的迭代中广泛探索搜索空间中 的区域,以确定最优解所在区间,并在接下来 40 次 迭代中搜索最优空间;同样的,在前 70 次迭代中,遗 传算法具有快速的初始收敛,随后在接近最小均方 根误差的 30 次迭代中逐渐减慢的改进。

从表 5 可以看出,改进蚁群算法反演将所得结 果的平均值(AVE)、标准偏差(STD)以及模型参数 的总体误差(OAE)都控制在较优异的范畴内,具有





表 5 无噪声模型 D 的反演统计结果

Table 5	Statistics	of	inversion	results	from	model 1	D
---------	------------	----	-----------	---------	------	---------	---

模型号	遗传算法			蚁群算法		
	AVE	STD	$O\!AE$	AVE	STD	$O\!AE$
模型 C	3.540	0.540	3.96%	2.358	0.057	2.2%

良好的保真度。本算法能有效地解决一般算法容易 陷入的局部最优解的停滞问题,提高反演精度的原 因就在于这种算法的全局搜索思路及更新策略。当 一个蚂蚁模型与本次迭代的最优解之间相差较大时 要进行全局搜索,这促进了对于空间的探索,利于找 出全局最优解所在区间,从而有效地避免算法过早 陷入局部最优解。此外,由于引入信息素衰减因子 (又称挥发系数,一般取 0.9 左右),从而在极大程度 上避免了信息素的无限累加,对局部最优解的形成 也有一定的抑制作用。同时,当蚂蚁模型与最优解 之间差距较小时,蚂蚁会在全局搜索确定的区间内进 行小范围内的局部移动,对生成解不断进行优化,使 之向最优解靠拢。上述这些搜索机制有利于改进蚁 群算法在进行快速收敛的同时避免陷入局部最优。

在这里,对遗传算法的低精度反演结果也进行 简要的说明。一般而言,遗传算法是基于各种突变 机制设计的,遗传的变异保留了入口的多样性,同时 促进开发,这是该算法反演低精度的第一个原因。 该方法对于个体的选择是通过固定的途径进行的, 这就导致随机性较差以至于容易陷入局部最优解 中,这是该算法反演精度低的第二个原因。由于最 好个体的染色体也有可能被交互破坏,这是导致该 算法反演精度低的第三个原因。

5 实例分析

上一节验证了改进蚁群算法在理论模型中反演 具有高效性,所得到的解具有高精度性。为了更好 地验证算法的表现,我们通过实例来测试该算法的 适应性以及抗干扰能力。本实例来自于意大利北部 一个废物处理厂所采集到的数据,该地区主要由位 于断裂的石灰石基层上的 18 m 厚的松散沉积物序 列组成^[11]。由于上覆地层的岩土工程性差,地震记 录呈现一种有限的光谱含量,并且包含大量的地滚 波,具有较低的信噪比。

同反演含噪声模型的策略一样,我们认为剪切 波速度(v_s)和各层厚度(h)均为未知量,同时,密度 (ρ)和泊松比(Poisson)使用相关地层单位所通常采 用的估计数值(对于各种粉质岩,泊松比取 0.40~ 0.45,砾石取 0.25,石灰岩基岩取 0.20;密度一般取 2.0 g/cm³ 左右)。通过改进蚁群算法非线性反演 地层真实模型所需的一些参数(搜索空间、泊松比以 及密度)在表 6 中列出,反演采用 Dal Moro 等^[11]所 提出的五层地下结构,以通过所提出的逆过程来执 行观测到的频散曲线的反演。

表 6 基于改进蚁群算法的面波反演所采用的搜索空间、 泊松比和密度

 Table 6
 Search space, Poisson's ratio, and density adopted for surface wave inversion based on the improved ACO algorithm

层 序号	v_s /(m • s ⁻¹)	h/m	ho/(g • cm ⁻³)	泊松比
1	$60\!\sim\!400$	$1 \sim 5$	1.9	0.45
2	$100\!\sim\!400$	$1\!\sim\!5$	1.9	0.45
3	$100\!\sim\!400$	$2 \sim 8$	2.0	0.45
4	$300\!\sim\!1\ 000$	$2 \sim 8$	2.2	0.25
5	$900\!\sim\!2\ 500$	Half-space	2.4	0.20

改进蚁群算法对于本实例的反演结果见图 12。 与之前算法反演理论模型过程相似,从图 12(a)可 以看到,反演误差在前面 20 次迭代过程中急速缩 小,稳定于一个常数附近,这说明本算法大致完成了 对全局的搜索转而对存在最优解的局部范围进行搜 索。在图 12(b)中,由本算法反演模型正演模拟得 到的频散曲线与实测数据拟合良好。在图 12(c) 中,通过改进蚁群算法反演所构建的地下地质模型 与钻孔资料吻合良好,尤其是在第 1、3、4 个地层,与 钻孔资料的误差均不超过 3%,在其余地层中,误差 虽有起伏,但均处于允许范围内,分析误差增大原 因,可能由于P波速度或层密度的设定存在偏差。

6 结论

本文基于蚁群算法提出了一种新颖的面波反演 方案,称为改进蚁群算法。拟在研究发现改进蚁群 算法在无噪声、含15%随机噪声以及实测野外真实 数据方面的瑞雷波频散曲线的反演性能。人工蚂蚁 之间通过正反馈式的信息传递和累积来保证反演程 序的快速寻优过程,改进策略也增强原蚁群算法的 全局寻优能力,该算法的最大优点就在于其快捷、简 单、灵活、稳健,且易于实现,此外,调节控制的参数 也较少。在反演过程中,我们采用更广泛的搜索空 间边界来模拟没有先验信息可用的更为现实的情 况,以研究算法性能。为进一步验证,我们比较了相 同情况下蚁群算法与其他算法的反演效果,可以看 出改进蚁群算法在提高收敛速度的情况下有效地避 免了局部最优解,提高了反演精度。通过理论模型



图 12 应用改进蚁群算法对野外数据的反演结果

Fig.12 Inversion results of field data by using the improved ACO algorithm

试算和实测资料分析的结果表明:

利用本文提出的改进蚁群算法对瑞雷波频散曲 线进行反演,能有效地缩减达到最优解所需的迭代 次数,提高收敛速度。以文中模型 D 为例,算法所 得解收敛到最优解附近时仅迭代了 40 步。

除了提高收敛速度之外,利用改进蚁群算法对 瑞雷波频散曲线进行反演能有效地避免解陷入局部 最优,寻找到全局最优解,提高解的精度。以文中模 型 B 为例,算法所得解与真实解的误差仅为 2.2%。

同时,改进蚁群算法应用于求解近地表剪切波 速度以及层厚度的研究还不是很成熟,算法中参数 变化及改进策略的选择对所得解、收敛速度包括收 敛精度所造成的影响研究不够深入。在将蚁群算法 应用于地球物理反演的研究中,改善蚂蚁算子移动 的策略以及将蚁群算法与其他算法(如遗传算法)进 行融合将是未来研究的主题。

参考文献(References)

- [1] 陈祥,孙进忠.改进的等效半空间法及瑞雷波频散曲线反演
 [J].地球物理学报,2006,49(2):569-576.
 CHEN Xiang,SUN Jinzhong. An Improved Equivalent Homogenous Half-space Method and Reverse Fitting Analysis of Rayleigh Wave Dispersion Curve[J]. Chinese Journal of Geophysics,2006,49(2):569-576.
- [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.
 LI Qingchun,SHAO Guangzhou,LIU Jinlan, et al.Past,Present and Future of Rayleigh Surface Wave Exploration[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2006,28(3):74-77.
- [3] 石耀霖,金文.面波频散反演地球内部构造的遗传算法[J].地 球物理学报,1995,38(2):189-198.
 SHI Yaolin,JIN Wen.Genetic Algorithms Inversion of Lithospheric Structure from Surface Wave Dispersion [J]. Chinese Journal of Geophysics,1995,38(2):189-198.
- [4] 林志平,林俊宏,吴柏林,等.浅地表地球物理技术在岩土工程 中的应用与挑战[J].地球物理学报,2015,58(8):2664-2680.

LIN Zhiping, LIN Junhong, WU Bailin, et al. Applications and Challenges of Near Surface Geophysics in Geotechnical Engineering[J].Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2664-2680.

- [5] 朱翔鹏,张学强,严哲.瑞雷波在探测地下防空洞的应用研究
 [J].工程地球物理学报,2007,4(1):58-61.
 ZHU Xiangpeng,ZHANG Xueqiang,YAN Zhe. Application of Rayleigh Wave in Inspecting Underground Air-Raid Shelter
 [J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2007,4(1):58-61.
- [6] 常冬梅,刘雪峰.黏弹性介质中瑞利波频散曲线和衰减系数曲 线的反演[J].地震工程学报,2015,37(3):739-742. CHANG Dongmei, LIU Xuefeng. Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curves and Attenuation Coefficient Curves in Viscoelastic Medium[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015,37(3):739-742.
- [7] 程飞,刘江平,毛茂,等.参数自适应差分演化算法在面波频散曲线反演中的应用[J].岩土工程学报,2016,38(1):147-154.
 CHENG Fei, LIU Jiangping, MAO Mao, et al. Self-adapting Control Parameters-based Differential Evolution Algorithm for Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(1):147-154.
- [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):630-635,662.
 QI Shengwen, SUN Jinzhong, HE Hua. Review of Rayleigh Wave Exploration[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(4): 630-635,662.
- [9] 丁怀军.基于 SVD 算法的瑞雷波频散曲线的快速稳定反演.J].
 工程地球物理学报,2004,1(4):304-308.
 DING Huaijun. A Fast and Reliable Method for Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curves Based on Svd Algorithm[J].
 Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(4): 304-
- 308.
 [10] 于东凯,宋先海,江东威,等.改进蜂群算法及其在面波频散曲 线反演中的应用[J].地球物理学报,2018,61(4):1482-1495.
 YU Dongkai,SONG Xianhai,JIANG Dongwei, et al.Improvement of Artificial Bee Colony and Its Application in Rayleigh Wave Inversion[J].Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61

(4):1482-1495.

- [11] DAL MORO G, PIPAN M, GABRIELLI P.Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion Via Genetic Algorithms and Marginal Posterior Probability Density Estimation[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 61(1):39-55.
- [12] 崔建文.一种改进的全局优化算法及其在面波频散曲线反演中的应用[J].地球物理学报,2004,47(3):521-527.
 CUI Jianwen. An Improved Global Optimization Method and Its Application to the Inversion of Surface Wave Dispersion Curves[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 521-527.
- [13] 张晓煜,李向.基于粒子群算法的地震预报方法研究[J].地震 工程学报,2014,36(1):69-74.
 ZHANG Xiaoyu, LI Xiang. EarthquakePrediction Method Based on Particle Swarm Optimization[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1):69-74.
- [14] 毛承英.基于改进遗传算法的瑞雷波频散曲线反演[D].长沙: 中南大学,2010.
- [15] 欧阳森,王建华,宋政湘,等.一种新的改进遗传算法及其应用
 [J].系统仿真学报,2003,15(8):1066-1068,1073.
 OUYANG Sen, WANG Jianhua, SONG Zhengxiang, et al. A
 New Improved Genetic Algorithm and Its Application[J].Acta Simulata Systematica Sinica,2003,15(8):1066-1068,1073.
- [16] 李士勇.蚁群优化算法及其应用研究进展[J].计算机测量与 控制,2003,11(12):911-913,917.
 LIShiyong.Progresses in Ant Colony Optimization Algorithm with Applications[J].Computer Automated Measurement &. Control,2003,11(12):911-913,917.
- [17] LUO Y H,XIA J H,XU Y X, et al. Analysis of Group-velocity Dispersion of High-frequency Rayleigh Waves for Nearsurface Applications[J].Journal of Applied Geophysics, 2011, 74(2-3):157-165.
- [18] 晋思,邵嘉琪,支剑丽.遗传算法在瑞雷波频散曲线反演中的应用研究[J].人民长江,2015,46(3):31-33.
 JIN Si, SHAOJiaqi, ZHI Jianli. Application of Genetic Algorithm in Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curves[J].
 Yangtze River,2015,46(3):31-33.