

面波频散反演地下层状结构的蚁群算法

翟佳羽¹, 赵园园², 安丁酉¹

(1. 中国市政工程东北设计研究院, 吉林 长春 130021; 2. 深圳市工勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 介绍了一种新的算法——蚁群算法的概念和特点, 及其在瑞利波反演地下层状结构中的应用, 分析了使用蚁群算法应该注意的事项, 提出了通过对初步搜索结果中信息素浓度分布曲线的分析, 从而修改、缩小搜索范围, 以提高反演速度的方法, 并对层状介质模型以及实测数据的频散曲线进行反演, 验证了方法的有效性。

关键词: 蚁群算法; 反演; 瑞利波; 频散曲线; 信息素

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2010)04-0476-06

瑞利波勘探是近年来新兴的一种勘探方法, 由于其频散曲线对地下结构的横波速度非常敏感, 因此被广泛地应用于工程勘察领域。对于瑞利波正演频散曲线的计算已日趋完善^[1-3], 对于瑞利波的反演, 现存的反演方法主要有: 最小二乘法、遗传算法、人工神经网络算法及拟牛顿算法等。其中最小二乘法主要利用了目标函数的一阶导数信息, 应用于高度非线性化的模型—频散曲线映射过程的反演, 往往过分依赖初始模型的选择, 容易出现不收敛的现象, 遗传算法等全局搜索方法容易陷入局部极小值中, 而且反演用时较长, 效率较低, 人工神经网络训练则要花费相当长的时间, 对于拟牛顿算法同样存在初始模型选择的问题。

近年来发展起来的蚁群算法是由意大利学者 M. Dorigo 等人根据自然界中真实蚁群觅食行为提出的一种优化算法^[4]。该算法是一种基于多主体的模拟进化全局搜索算法, 该算法具有自组织性和正反馈性, 应用分布式控制, 主要特点是群体搜索策略和群体之间的信息交换, 具有潜在的并行性^[5]。而且仅利用目标函数而不是求其导数或其他附加限制, 其效率远高于传统的随机算法, 普遍应用于各种问题。针对连续空间的优化问题, 已经取得一些成果^[6-8]。笔者针对瑞利波频散曲线反演, 将有多维约束目标函数的变量进行细分, 以每只蚂蚁如何走完所有变量中不同单元的系列作为问题的最优解。将多维连续函数优化问题转化成类似组合优化问题来进行求解, 并将整个搜索过程分为粗搜及精搜过程。在搜索过程中针对算法容易过早收敛而陷

入局部极小值的缺点, 在搜索过程中利用遗传交叉、变异算子使算法跳出局部极小值, 从而得到全局最优解。

1 蚁群算法反演地球内部构造

笔者以瑞利波为例讨论应用层状介质频散曲线反演地下结构的蚁群算法。对于从实测的地震资料中所提取的频散曲线, 基于其正演算法, 通过某种方式调节模型参数达到对实际提取的频散曲线的最好拟合, 这就是频散曲线的反演问题。反演过程大致表述为如下形式: 设观测数据为 d , 而 d 的正演公式为 $\bar{D}(m)$, 其中 m 为模型参数, 定义目标函数为

$$\Phi(m) = \|d - \bar{D}(m)\|_2^2.$$

目标函数的意义相当于用给定的模型计算的理论观测数据 $\bar{D}(m)$ 对观测数据 d 的拟合程度, 反演过程实际上就是采用某种方式搜索使函数取得极小值的模型参数 m^* , 使得目标函数 $\Phi(m^*)$ 变为极小的过程, 若 m^* 有多个, 则取目标函数值最小的那一个作为反演的结果。

1.1 蚁群算法的基本思想

蚁群算法的优化过程主要包括选择、更新以及协调。本文中整个优化过程将分为粗搜过程和精搜过程, 在粗搜过程中, 首先从待求的问题中提取出一个多维约束的目标函数, 将目标函数中待求解的独立变量在其约束范围内分解为不同等份的小单元, 这样的处理极大地缩小了搜索空间, 提高了搜索效率。整个粗搜索过程既是完成每个蚂蚁走完所有的变量中的某一单元, 而构成一个可行解, 然后更新所

有路径上的信息素。在精搜过程中,将上述粗搜得到的可行解进行单元细化,以构成初始群体,依据某种概率进行交叉和变异操作,最终找到多变量优化问题的全局最优解。

1.2 待优化的目标函数

对于速度递增型层状介质,从实测的波形信号中,提取出瑞利波最大模频散曲线 d 作为实测数据,给定一个层状介质模型,运用最大模频散曲线正演算法^[9],计算出相速度值,然后将理论计算出的相速度值与观测相速度的差值的平方根值作为目标函数,即

$$\min \Phi(m) = \sum_{j=1}^N \|d_j - \bar{D}_f(m)\|_2^2 \quad (1)$$

评价实际的地层结构与理论的地层结构拟合程度好坏的准则。式中, $m = (v_s, v_p, \rho, h)$, v_s 为横波速度, v_p 为纵波速度, ρ 为地层密度, h 为厚度, f 表示频率。由文献[10]可知,层状介质中,计算瑞利波的频散曲线需要横波速度、纵波速度、介质密度、每一层的层厚四个参数。通过研究发现横波速度和层厚对瑞利波相速度影响较大,而纵波速度和密度对瑞利波相速度影响较小,相对于横波速度和厚度的影响可以忽略。下文中所有模型的底层密度都取 1200 kg/m^3 , 因为纵波速度大约为横波速度的两倍,所以文中设置纵波速度取对应横波速度的 2 倍。这样,模型 m 中的参数只剩下 v_s 和 h 。优化反演分析的计算工作就是求解上述目标函数,寻找一组适当的 m^* , 使相应的目标函数值为最小,则模型 m^* 就可以近似地作为实际的地层结构。

1.3 蚁群算法求解参数的步骤

(1) 对变量的约束区域进行单元划分。首先根据横波速度和层厚定义域的大小,确定蚁群的规模,即蚁群 N 的大小。然后将参数 i 的定义域进行 k_i 等分,如参数 i 的定义域为 $[\text{Start}_i, \text{End}_i]$, 则任一参数的每等份为 $(\text{Start}_i - \text{End}_i)/k_i$, 任意参数的任意位置 j 的初始坐标为

$$x_j = \text{Start}_i + j(\text{End}_i - \text{Start}_i)/k_i,$$

则目标函数每一变量有 k_i 个单元。

(2) 参数初始化。设蚂蚁数量为 m , t 时刻在第 i 变量第 j 单元残留的信息量为 $\tau_{ij}(t)$, 且 $\tau_{ij}(0) = C$ (C 为常数), 设置 α, β, ρ 的初始值。

(3) 按某种方法计算下一可行点。每一个蚂蚁根据 g_0 和伪随机比例的选择规则确定第 i 个分量的第 j 个单元大的位置

$$j = \begin{cases} \arg\max |\tau_{ij}| & 1 \leq j \leq N \\ J, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $g_0 = \max[\text{dis}(i), g_{\min}]$, g_{\min} 为最小阈值, $\text{dis}(i)$ 为变量 i 的信息素集中度, 表示某次搜索中变量 i 中未被选择的单元数和总单元数的比值, g 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数; J 是根据式(3)转移概率决定的随机变量。

蚂蚁转移到第 i 变量第 j 单元的概率按下式计算

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t) / \sum_{s \in \text{allowed}_k} \tau_{is}^\beta(t) \eta_{is}^\beta(t) & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_{ij}^k 表示 t 时刻蚂蚁 k 转移到第 i 变量第 j 单元的概率; allowed_k 表示蚂蚁 k 还未访问过的其他变量的子单元, 以保证搜索到的解的合法性, η_{ij} 为先验知识, α, β 表示残留信息与期望的相对重要程度。

(4) 信息素的更新。当蚂蚁 k 走完所有变量后, 必须对所走过路径上的信息素进行更新, 即

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k, \quad (5)$$

式中, $1-\rho$ 表示信息素消逝程度, $\Delta\tau_{ij}$ 表示所有蚂蚁本次循环留在 i 变量第 j 单元上的信息素; 计算方法如下

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k \\ 0 \end{cases}, \quad (6)$$

其中, L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走过路径的总长度; Q 为正常数。

蚂蚁 k 由式(2)选择构造路径, 由式(4)、(5)进行信息素的更新, 这两个步骤重复迭代搜索整个空间, 最终搜索到信息素较浓的路径, 形成较短的闭合(最优)路径, 进而找到函数的近似解, 同时完成了粗搜过程。

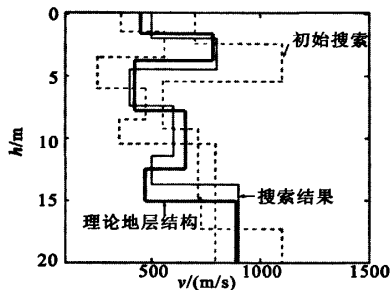
精搜过程根据粗搜产生的可行解缩小搜索区间及进行单元细化, 并对每个解得的分量进行交叉变异操作, 并更新信息素, 最终搜索到信息素较浓的各变量子单元组成的路径为问题的最优解, 从而结束精搜过程。

2 面波反演计算实例

为了验证蚁群算法反演地下层状结构的能力, 笔者从理论上进行了反演模拟, 即先给出一个已知的层状介质模型, 然后计算出其最大模频散曲线, 假定其为实测的频散曲线, 采用频率波数分析的方法来获取瑞利波的频散曲线。该方法采用二维傅氏变换将时域中的多道信号变换到频率波数域中, 由于各个模式的频散特征不同, 时域中叠加在一起的信

号在频率波数域中将会分开,在频率波数域中,拾取能量极大值所对应的频率波数值,即可获得瑞利波的频散曲线。根据获得的频散曲线用蚁群算法进行反演拟合,看反演结果与给定的模型相差多少,由此在一定程度上可以检验蚁群算法反演的可行性。下面以模型 1 为例,说明蚁群算法的反演过程。首先根据假定的模型算出其频散曲线作为实测的频散曲线,然后按半波长理论给出反演初始范围,即找出分层点,认为各点的相速度值是对应深度 h 以上介质的平均瑞利波速度,以此作为初始的搜索范围。

研究表明,越靠近地面,横波速度结构反演的精度越高,例如如图 1a 第一、二层反演的效果都很好,而且第三层低速度也能很好的反演出来,如果还想提高精度,就要增加反演步数,但同时反演速度也会越来越慢。从图中还可以看出,层数越多,地下结构越复杂,反演结果的误差也大。



1 初始搜索范围、初始搜索结果及理论地层结构曲线对比

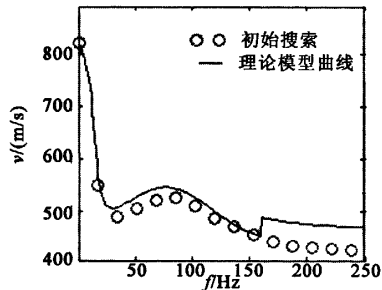


图 2 初始搜索结果和理论模型频散曲线对比

除了初步搜索的最佳模型个体外,观察模型变量在搜索范围内的信息素浓度的分布图也有助于了解对搜索结果的评价。图 3a 中点划线、虚线、实线分别表示第一层、第二层、第三层横波速度信息素浓度分布曲线。图 3b 中点划线、实线、虚线分别表示第四层、第五层、第六层信息素浓度分布曲线。

图 4a 中实线、点划线、虚线分别表示第一层、第二层、第三层层厚的信息素浓度分布曲线。图 4b 中实线、虚线分别表示第四层、第五层层厚信息素浓度

分布曲线。

从信息浓度分布曲线中可以看出,速度、层厚大多收敛于理论模型,主峰大部分呈单峰分布,除主峰外,还存在次峰,两外主峰仍和理论值有一定的差距,根据初步搜索的最佳模型和信息素浓度分布曲线,可以进一步缩小搜索范围,进行第二步搜索,得到图 5 和图 6 结果。

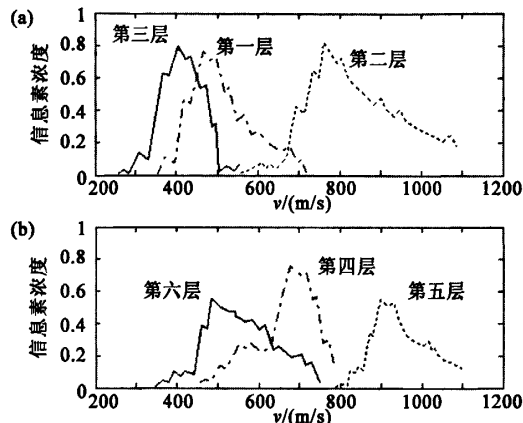


图 3 不同层位横波速度信息素浓度分布曲线

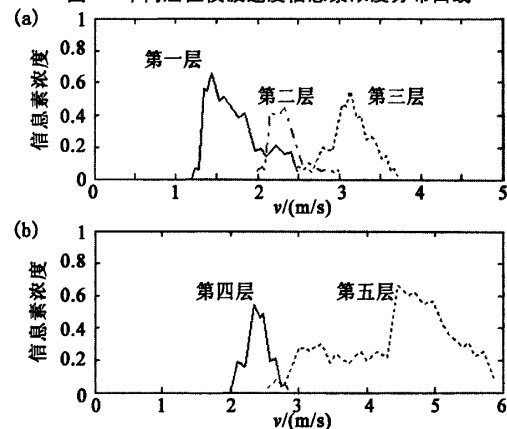


图 4 不同层位层厚信息素浓度分布曲线

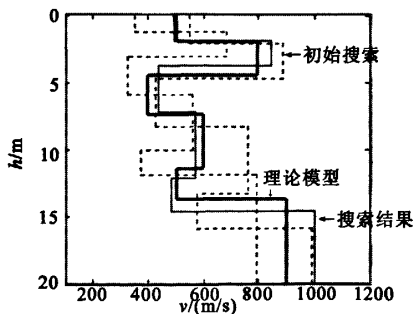


图 5 第二步搜索范围(虚线)和搜索结果(细实线)及理论模型(粗实线)曲线对比

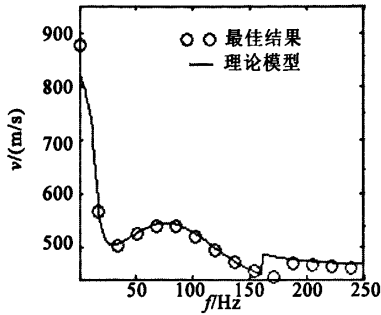


图6 最佳结果(圆圈线)与理论模型频散曲线(实线)比较

图7a中实线表示第一层横波速度信息素浓度分布曲线;点划线表示第二层横波速度信息素浓度分布曲线;虚线表示第三层横波速度信息素浓度分布曲线。图7b中实线表示第四层横波速度信息素浓度分布曲线;虚线表示第五层横波速度信息素浓度分布曲线;点划线表示第六层横波速度信息素浓度分布曲线。

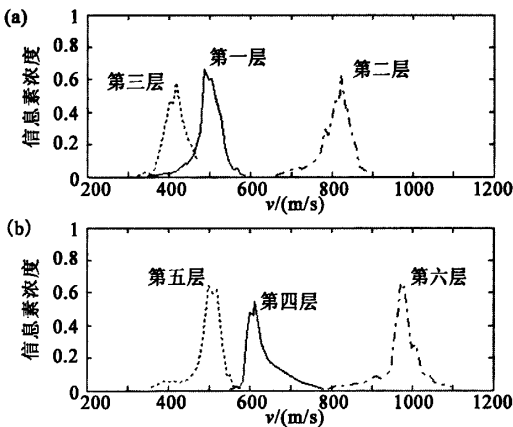


图7 不同层位横波速度信息素浓度分布曲线

图8a中实线表示第一层层厚信息素浓度分布曲线;点划线表示第二层层厚信息素浓度分布曲线;虚线表示第三层层厚信息素浓度分布曲线。图8b中虚线表示第四层层厚信息素浓度分布曲线;实线表示第五层层厚信息素浓度分布曲线。

从图中可以看出结果与理论值吻合得很好,厚度最大偏差不超过0.5 m,横波速度最大偏差不超过50 m/s,信息素浓度分布曲线次峰数量明显减小,速度和层厚基本都收敛于单峰范围内。

3 对实测数据频散曲线反演

为了进一步验证反演算法的有效性,笔者应用蚁群算法对实测数据进行反演,勘察路段为北京杏石口路段,勘探场地周围没有明显的地势起伏,比较

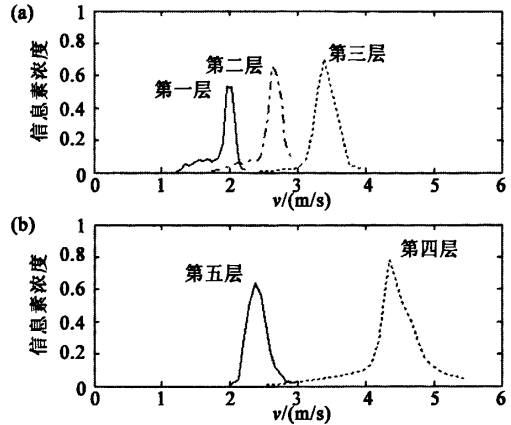


图8 不同层位层厚信息素浓度分布曲线

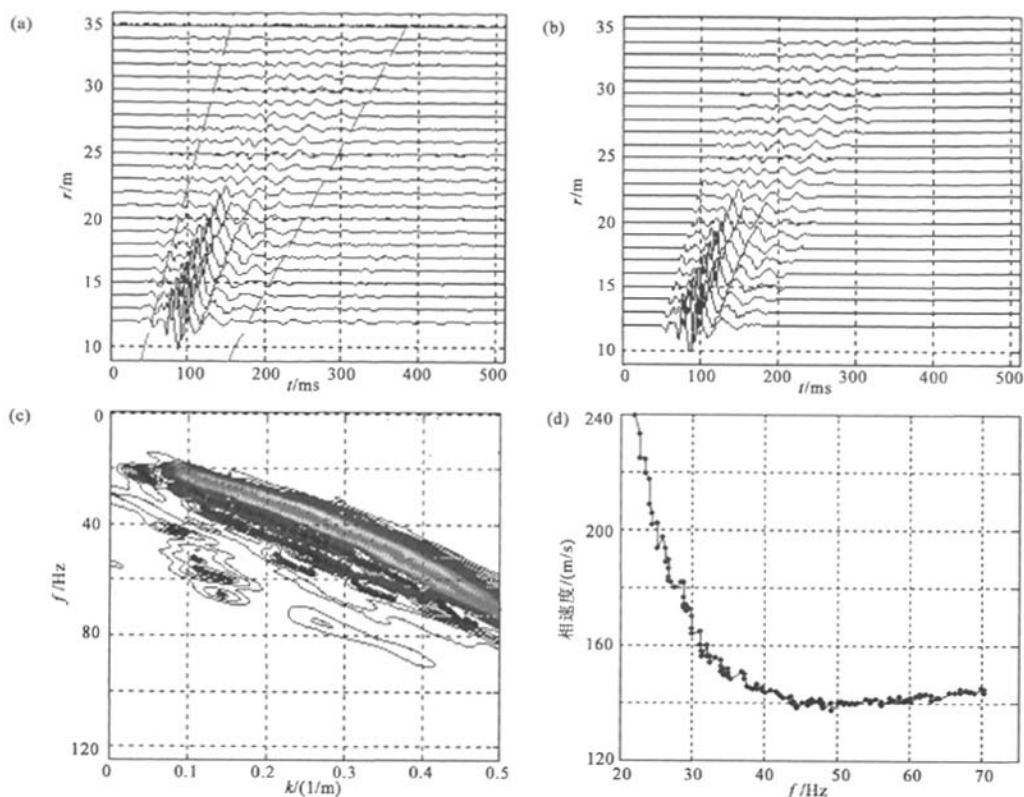
平坦,地基被分层碾压多次,仪器采用SWS-1A多功能面波仪,拾振器为SWS-R4面波拾振器(国产),激振器采用特制的瑞利波锤,以自由落体方式激振,实际所提取的波形信号如图9所示。

应用蚁群算法进行反演(将 $f-v_R$ 转化为 $h-v_R$),将反演的结果与对应的单孔法测试的结果进行的对比(图10)可以看出,浅部吻合得较好,深层反演结果较差,这主要有以下几个方面的原因:①对时域信号进行了群速度截断滤波处理是人为加以判断的,不可能精确的去除纵横波的影响,导致实际提取的频散曲线有误差;②蚁群算法反演的基础是基于层状介质的频散方程,实际的地下介质不可能是完全的均匀层状结构;③推导频散方程是建立在假设地下层状介质为完全弹性的,实际的地下介质存在非弹性特征。这些原因使得实测的频散曲线具有不同于频散方程计算出的频散曲线,所以难于吻合得很好。

4 讨论

笔者在蚁群算法引入集中度的概念,从其叙述中可以看出,蚂蚁在选择某一个变量的过程中,该变量的集中度较大,则说明信息素集中在该变量的少数几个单元中,蚂蚁在选择该变量的区间时,路径就会相对集中,容易引起早熟,同样如果集中度过小,则信息素难以集中,会降低收敛的速度,所以笔者考虑集中度来确定蚂蚁选择某个变量的单元规则。

对于种群大小的选择,作为一种随机搜索算法,蚁群个体数量如果太大,则会使算法花费较长的时间,如果数量过小搜索很容易陷入局部极小值中,过大过小都会降低搜索效率。根据目标函数变量多少,及每一变量划分区间的数目,蚁群的数目在25~40之间较为合适。



a—计算所得的波形信号;b—截断滤波时波形信号;c— f - k 域幅值等值线图和极值点;d— f - v_R 坐标下最大模频散曲线

图9 杏石口 xsk101 路段场地的频散曲线提取过程

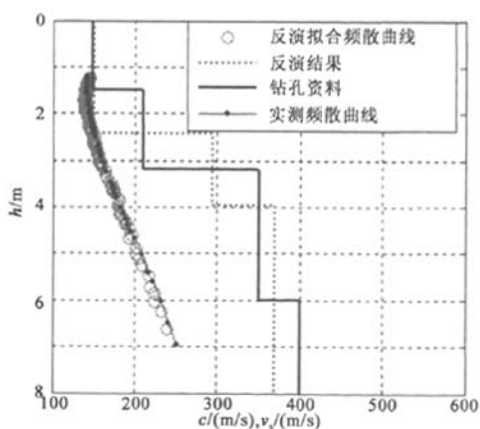


图10 实测数据 xsk101 的反演结果

蚁群算法中各参数有着非常重要的作用,合理的参数取值可以使算法较快地收敛。蚁群算法的不足之处是许多参数的设置凭经验,没有充足的理论依据,另外蚂蚁的设置往往根据试验结果在进行调整,因此应用蚁群算法时,应先进行试验,根据实验结果调整参数,然后进行搜索。针对不同的问题参

数的设置可能也不同,对于参数的设置目前还没有统一的准则,笔者对于 α 、 β 、 ρ 的确定是先固定其中的两个,观察剩下的参数变化时,算法收敛到最优解时所需要的迭代的次数,从而设置合理的参数值。经分析,笔者认为 $0.2 \leq \alpha \leq 0.4$, $3.4 \leq \beta \leq 6.3$, $0.5 \leq \rho \leq 0.7$ 时,算法总体的性能较好。

5 结论

蚁群算法具有全局搜索,避免求函数导数,效率高,而且容易与各种问题结合,适用于不同领域的反演。目前对于面波频散曲线反演已有较为成熟的反演解法,并不是蚁群算法优点最能体现的问题,然而为了对蚁群算法能应用于地震勘察工程领域进行研究,有必要对反演问题的蚁群算法进行探讨,作为了解蚁群算法的第一步。

通过理论分析以及与遗传算法进行对比表明应用蚁群算法反演是可行的,同时可以发现该算法对浅部反演效果较好,地下结构越复杂,反演难度越大,花费的反演时间也越多。对于实测信号的反演在大多数情况下蚁群算法能够较好地解决实际问题

题。蚁群算法中每个蚂蚁的行为彼此独立,因此可以在多 CPU 的计算机上实行并行计算,这将大大的提高蚁群算法的搜索效率。

参考文献:

- [1] Chen X F. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space[J]. *Geophys J Int*, 1993, 115 - 391.
- [2] 凡友华, 刘嘉琦. 层状介质中瑞利波面波的频散研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2001, (4): 577 - 580.
- [3] 凡友华, 刘雪峰, 陈晓非. 面波频散反演地下层状结构的拟牛顿法[J]. *物探与化探*, 2006, 30(5): 456 - 459.
- [4] Dorigo M, Maniczzo V C. An ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Transaction on Systems, Man Cybernet B*, 1996, 26(1): 29 - 41.
- [5] 李士勇, 陈永强, 李研. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [6] Monmarche N, Venturini G, Slimane M. On how Pachycondyla apicalis ants suggest a new search algorithm[J]. *Future Generation Computer Systems*(S0167-739X), 2000, 16(9): 937 - 946.
- [7] 陈峻, 沈洁, 秦玲. 蚁群算法求解连续空间优化问题的一种方法[J]. *软件学报*, 2002, 13(12): 2317 - 2323.
- [8] 杨勇, 宋晓峰, 王建飞, 等. 蚁群算法求解连续空间优化问题[J]. *控制与决策*, 2003, 18(5): 573 - 576.
- [9] 凡友华. 考虑高阶模的 Rayleigh 波勘探应用研究[D]. 北京: 北京大学, 2003.
- [10] Xia J H, Miller R, Park C B. Estimation of Near-surface Shear-wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves[J]. *Geophysics*, 1999, 64(3): 692 - 700.

THE ANT COLONY ALGORITHM FOR THE INVERSION OF THE DISPERSION CURVE OF RAYLEIGH WAVE IN MULTILAYERED MEDIA

ZHAI Jia-yu¹, ZHAO Yuan-yuan², AN Ding-you¹

(1. China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute, Changchun 130021, China; 2. Shenzhen Gongkan Geotechnical Engineering Co., LTD., Shenzhen 518000, China)

Abstract: This paper deals with a new algorithm and the concept and characteristics of the ant colony algorithm. The authors applied the ant colony algorithm to Rayleigh-wave inversion so as to deduce underground structure from dispersion data, analyzed the problems worthy of attention in the use of the ant colony algorithm and employed the distributive curve of pheromone density to change and narrow the further search scope with the purpose of raising the inversion speed. The inversion analysis of the theoretical model and measured data shows that the ant colony algorithm is effective.

Key words: ant colony algorithm; inversion; Rayleigh wave; dispersion curve; pheromone

作者简介: 翟佳羽(1983 -), 男, 2009年毕业于哈尔滨工业大学, 硕士研究生, 现在中国市政工程东北设计研究院从事勘察研究工作, 公开发表学术论文数篇。