

基于波速修正的堆石坝面板损伤声发射源组合定位方法

徐晓阳^{1,2}, 苏怀智^{1,2}, 闫潇群², 姚可夫²

(1. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为提高堆石坝混凝土面板损伤声发射源定位精度,提出了一种基于波速修正的堆石坝面板损伤声发射源组合定位方法——BSO-IGeiger 法。该方法利用波速修正对已知恒定波速时差法 (Geiger 法) 进行改进并建立定位目标函数,通过基于学习淘汰机制的天牛群搜索算法 (BSO) 求解定位目标函数,同时给出了一种传感器阵列健康监测网络布设方式进行区域定位和传感器存活检测,以保障堆石坝面板声源定位的可靠性。试验验证结果表明,BSO-IGeiger 法定位效果明显优于 Geiger 法和未知恒定波速时差法。

关键词:混凝土面板堆石坝;损伤定位;声发射;传感器阵列布设;天牛群搜索算法

中图分类号:TV331 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0086-06

A combined locating method of acoustic emission sources for rockfill dam face slab damage based on wave velocity correction//XU Xiaoyang^{1,2}, SU Huaizhi^{1,2}, YAN Xiaoqun², YAO Kefu² (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To improve the accuracy of acoustic emission source locating for concrete panel damage in rockfill dams, a combined acoustic emission source locating method based on wave velocity correction, BSO-IGeiger method, is proposed. Wave velocity correction is used to improve the known constant wave velocity time difference method (Geiger method) and a localization objective function is established. The localization objective function is solved using the learning elimination mechanism-based beetle herd search algorithm (BSO). At the same time, a sensor array health monitoring network layout method is developed for area localization and sensor survival detection to ensure the reliability of the sound source localization of the rockfill dam panel. The experimental verification results show that the locating effect of BSO-IGeiger method is significantly better than that of Geiger method and the unknown constant wave velocity time difference method.

Key words: concrete face rockfill dam; damage locating; acoustic emission; sensor array layout; beetle herd search algorithm

自 21 世纪初天生桥一级面板堆石坝(178 m)完建以来,我国不断学习研究和积累工程经验,先后修建了洪家渡坝(179.5 m)、三板溪坝(185 m)、水布垭坝(233 m)、瀑布沟坝(186 m)和江坪河坝(221 m)等一系列高面板堆石坝^[1],当前世界第一高坝——双江口大坝(314 m)也已在建设中^[2]。高面板堆石坝面临着高水头、高渗压、强震和复杂地质条件等恶劣环境因素和力学因素组合作用的挑战,因此布设可靠仪器对工程进行原位监测,准确高效地挖掘混凝土结构监测数据的信息并明确其安全状态对于指导

高面板堆石坝运行和维护、反馈设计和施工以及开展除险加固具有重大意义^[3]。

作为面板堆石坝重要防渗体之一的混凝土面板,其长期可靠服役十分重要^[4]。现有高面板堆石坝的面板均发生了不同程度的损伤,其中服役时间长的天生桥一级坝和高水头的水布垭坝面板产生了较多裂缝,因此对堆石坝面板损伤进行实时监测具有重要意义^[5-6]。声发射(acoustic emission, AE)传感技术作为一种无损检测技术,灵敏度高,整体检测能力强^[7-9],对结构体形状、监测区域接近程度和环

境要求低,被广泛用于材料损伤诊断的研究^[10-11]。利用声发射进行混凝土面板损伤定位是损伤诊断的主要内容之一,其主要存在 2 个问题^[12]:面板尺寸较大,服役环境存在差异性,传感器的合理布设及可靠性需要进一步研究;土工混凝土为多相非均质材料,声发射波在传播过程中会经历显著衰减和波速变化,进而影响声发射源定位精度。何兆益等^[13-15]充分考虑混凝土结构对声发射波速的影响,利用变波速和穷举法进行声源定位;黄逸群等^[16]利用混凝土细观模型所测定平均波速和时差法进行声源定位。

土工混凝土损伤声发射源定位常用的方法有区域定位法和时差法。区域定位是一种快速、方便的定位方法,但抗干扰能力差,定位精度低,通常会作为精准定位的辅助手段。针对声发射技术应用于堆石坝混凝土面板定位所存在的问题,本文给出了一种声发射传感器阵列布设方式,并基于区域定位、修正波速、Geiger 法和天牛群算法提出了一种声发射源组合定位方法,最后通过试验进行了验证。

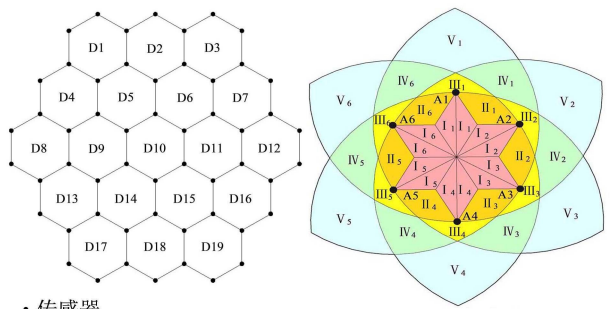
1 声发射传感器阵列布设及区域可靠度划分

考虑到堆石坝面板监测区域较大和声发射信号衰减明显,以提高声发射源定位精度和可靠性为目标,给出一种适用于大体积堆石坝混凝土面板的声发射传感器阵列布设方式,并依据可靠性对监测区域进行划分。

堆石坝面板的水位变化区和完全浸润区环境条件复杂,考虑到声发射传感器有可能失去工作能力,故建立以 6 传感器单元为基本结构的传感器阵列布设方式,如图 1(a)所示。二维定位所需传感器数量应不小于 3,6 传感器单元可以有效保障传感器阵列的定位能力。定义传感器的有效监测距离为 $2L$ (L 为相邻传感器距离),将可感知同一源信号的传感器数量作为可靠度衡量标准,对阵列单元附近进行区域划分,如图 1(b)所示,划分结果见表 1。对某已定位声源,将其视为位于传感器阵列单元内部 I 区或 II 区,可对阵列单元传感器进行存活检测;将其视为相邻传感器阵列单元外部 III 区、IV 区或 V 区,可对相邻阵列单元传感器进行存活检测。

2 基于波速修正的时差定位法

时差定位法利用传感器阵列对同一源信号的感知时刻建立定位方程,定位快、精度高,是较为常用的声发射源定位方法。时差定位法按照目标函数迭



• 传感器
D1~D19: 传感器阵列单元
(a) 声发射传感器阵列布设 (b) 传感器阵列单元附近区域划分

图 1 分布式声发射传感器阵列

表 1 传感器阵列单元附近区域划分

可靠度等级	可靠度区分	划分区域	细分区域
1	源信号位于多个传感器三角形内	I	I ₁ 、I ₂ 、I ₃ 、I ₄ 、I ₅ 、I ₆
2	半径 2L 圆内传感器数量为 6	II	II ₁ 、II ₂ 、II ₃ 、II ₄ 、II ₅ 、II ₆
3	半径 2L 圆内传感器数量为 5	III	III ₁ 、III ₂ 、III ₃ 、III ₄ 、III ₅ 、III ₆
4	半径 2L 圆内传感器数量为 4	IV	IV ₁ 、IV ₂ 、IV ₃ 、IV ₄ 、IV ₅ 、IV ₆
5	半径 2L 圆内传感器数量为 3	V	V ₁ 、V ₂ 、V ₃ 、V ₄ 、V ₅ 、V ₆

代求解过程主要分为穷举法、最小二乘法、单纯形法和 Geiger 法等,其中 Geiger 法更易与寻优算法结合,应用也更为广泛,因此本文选用 Geiger 法进行迭代求解。由于混凝土面板内声发射波的传播速度非恒定,所以需要利用修正波速对 Geiger 法进行改进,改进算法描述如下:建立目标函数方程,给定初始解,不断迭代求解声源的位置修正量,叠加至解析解,并根据解析解所对应修正波速对目标函数进行动态调整,当解析解满足一定要求时终止迭代,该解析解即被认为是全局最优解。

对于 n 个传感器组成的阵列,定义辅助变量 R_i 为第 i 个传感器与 AE 源位置之间的距离:

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

式中: (x, y, z) 为 AE 源位置坐标; (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个传感器位置坐标。

则 Geiger 法目标函数为

$$f_{\min} = \sum_{i=1}^n \left[R_i/v_p - (t_i - t_0) \right]^2 \tag{2}$$

式中: v_p 为 P 波波速,需先测定; t_0 为 AE 源发生时间; t_i 为当信号在介质内均速传播时,信号 P 波传播到第 i 个传感器的时间。

目标函数可以简化成矩阵形式:

$$G\Delta\theta = H \tag{3}$$

式中: G 为参数矩阵; $\Delta\theta$ 为修正量矩阵; H 为时差

矩阵。

波速修正仅需在目标函数的迭代求解过程中,利用波速修正矩阵对 $\mathbf{G}$ 进行调整即可:

$$\mathbf{G}_r = \mathbf{G}_{r-1} \mathbf{V}_r \quad (4)$$

式中: $\mathbf{G}_{r-1}$ 、 $\mathbf{G}_r$ 分别为第 $r-1$ 次和第 r 次迭代时参数矩阵; $\mathbf{V}_r$ 为第 r 次迭代时波速修正矩阵。

3 基于学习淘汰机制的天牛群搜索算法

声源定位目标函数的求解,通常需要借助寻优算法。天牛须搜索算法 (beetle antennae search algorithm, BAS) 与目标函数求解的迭代特点相似,在单体求解时具有非常快的收敛速度。为了弥补单体搜索能力的不足,利用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 增强天牛须搜索算法的求解能力,得到天牛群搜索算法 (BAS-PSO, BSO)。为了加快群搜索的收敛速度,利用学习机制指导天牛单体进行有目性的移动。为了解决算法在解空间局部过度搜索的问题,在迭代停滞时利用淘汰机制调整算法结构,以避免算法求解过程陷入局部最优。基于以上考虑,提出了一种基于学习淘汰机制的天牛群搜索算法 (learn and eliminate mechanism BSO, LAEM-BSO)。

3.1 天牛群搜索算法

天牛群搜索算法不但克服了单体搜索的局限性,而且增强了算法的搜索效率^[17]。Tent 映射随机性和分布规律好,利用其所对应混沌序列生成初始天牛群^[18]:

$$y_{m+1,j} = \begin{cases} y_{m,j}/\mu & 0 \leq y_{m,j} \leq \mu \\ (1 - y_{m,j})/(1 - \mu) & \mu < y_{m,j} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: μ 为混沌形态控制参数, $0 \leq \mu \leq 1$, 一般可取 0.5; m, j 分别为天牛序号和混沌变量序号。

通过给式(5)赋 J 个初值,可以得到 J 个混沌变量 $y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{1,J}$, 然后进行迭代得到数量为 M 的初始天牛群,天牛个体将均匀分布在解空间中,并且保证群体拥有丰富的信息量,使算法更容易收敛。

天牛利用触须感知食物气味,根据气味强弱进行空间移动,完成觅食。天牛简化模型如图 2 所示,天牛左右须对称位于质心两侧,单次移动步长与天牛两须距离呈线性关系,步长与两须距离均需根据迭代进度进行自适应变化。

考虑到声源定位目标函数解析解为 4 维,设天牛个体空间位置为 $\mathbf{X}$,则左右两须位置分别定义为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_l = \mathbf{X} - l\mathbf{d} \\ \mathbf{X}_r = \mathbf{X} + l\mathbf{d} \end{cases} \quad (6)$$

式中: l 为天牛质心与触须的距离, l 越大,触须感知

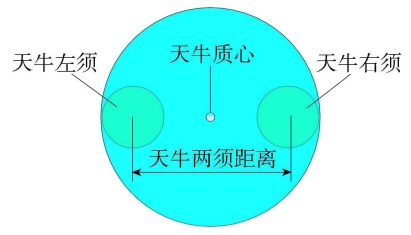


图 2 天牛简化模型

范围越大, l 越小,触须感知精度越高; $\mathbf{d}$ 为随机方向的四维单位向量,决定天牛在解空间中的朝向。

算法迭代过程中,天牛不断对左须位置 $\mathbf{X}_l$ 与右须位置 $\mathbf{X}_r$ 附近位置表征气味的适应度函数进行比较,依照不断偏向高适应度方向的规则进行移动。当前位置个体 $\mathbf{X}_k$ 到下一步移动位置 $\mathbf{X}_{k+1}$ 更新规则如下:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \delta_k \text{sign}[f(\mathbf{X}_r) - f(\mathbf{X}_l)] \mathbf{d} \quad (7)$$

式中: k 为算法迭代次数; $f(\mathbf{X})$ 为 $\mathbf{X}$ 的适应度函数; δ_k 为搜索步长大小,随着迭代进度而变化; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数,决定天牛下次迭代的移动方向。

3.2 学习机制

天牛单体搜索具有一定局限性,难以在局部最优区域之间进行移动。天牛个体需要在迭代过程中及时与种群进行信息交流和反馈,以避免自身陷入局部最优,同时可以增强算法搜索能力并加快收敛。为此特引入一种学习机制,让天牛个体在迭代过程中不断学习群体经验,使天牛群体具有向最优个体聚拢的趋势,尤其对于声发射源定位具有明显单调性的目标函数,该学习机制可以在不影响精度的前提下极大加快收敛速度。

天牛个体的移动依赖于基于适应度函数的自我感知和基于群体历史最优经验的社会认知。天牛个体学习群体经验的方式如图 3 所示,天牛移动方向由感知方向和群最优方向共同决定。

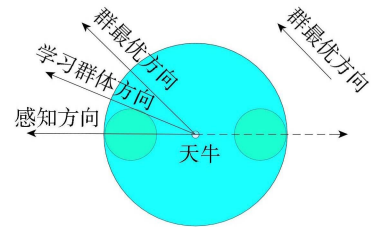


图 3 天牛个体学习机制

序号为 m 的天牛个体在空间中的朝向 $\mathbf{d}$ 、左右触须位置 $\mathbf{X}_{lm,k}$ 和 $\mathbf{X}_{rm,k}$ 分别为

$$\mathbf{d} = \text{rand}(1, 4) / \|\text{rand}(1, 4)\| \quad (8)$$

$$\mathbf{X}_{lm,k} = \mathbf{X}_{m,k} - l\mathbf{d} \quad (9)$$

$$\mathbf{X}_{rm,k} = \mathbf{X}_{m,k} + l\mathbf{d} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{X}_{m,k}$ 为 m 号天牛第 k 次迭代空间位置。

设第 k 次迭代种群最优个体为 $X_{\text{gbest},k}$, 群学习方向单位向量 e 为

$$e = (X_{\text{gbest},k} - X_{m,k}) / \|(X_{\text{gbest},k} - X_{m,k})\| \quad (11)$$

天牛个体的位置更新规则更改为

$$X_{m,k+1} = X_{m,k} + \alpha_k \delta_k \text{sign} \left(f(X_{rm,k}) - f(X_{lm,k}) \right) d + \beta_k \delta_k e \quad (12)$$

式中 α_k, β_k 分别为感知系数和群学习系数。

当 $\beta_k/\alpha_k < 1$ 时, 天牛个体的移动更加依靠自我感知, 其越小, 群体搜索范围越大; 当 $\beta_k/\alpha_k > 1$ 时, 群体经验主导天牛个体的移动, β_k/α_k 越大, 群体收敛速度越快。根据声源定位测试, β_k/α_k 在迭代后期不宜过大。

为保障较优解的独立感知能力、较劣解对群体经验的快速学习和迭代后期 β_k/α_k 不过大, 第 k 次迭代感知系数 α_k 和群学习系数 β_k 分别为

$$\alpha_k = (f_k - f_{\min,k}) / (f_{\max,k} - f_{\min,k}) \quad (13)$$

$$\beta_k = r_k (f_{\max,k} - f_k) / (f_{\max,k} - f_{\min,k}) \quad (14)$$

式中: $f_k, f_{\min,k}, f_{\max,k}$ 分别为第 k 次迭代时个体适应函数值、群体最小适应函数值、群体最大适应函数值; r_k 为群学习修正系数, 根据迭代次数进行自适应变化。

3.3 淘汰机制

群搜索算法可能在迭代后期陷入局部最优, 导致搜索能力下降。为此引入淘汰机制^[19], 用于迭代后期对相似度高度的天牛进行竞技、淘汰和回归, 提高算法收敛速度和精度。

天牛的属性为其所在的 4 维空间位置, 定义编号为 a 和 m 的两只天牛的空间相似度:

$$\Delta X = \|X_{a,k} - X_{m,k}\| \quad (15)$$

设定相似判定函数:

$$f_s(X_{a,k}, X_{m,k}) = \begin{cases} 1 & \Delta X \leq \lambda_X \delta_{\max,k} \\ 0 & \Delta X > \lambda_X \delta_{\max,k} \end{cases} \quad (16)$$

式中: λ_X 为相似度阈值系数; $\delta_{\max,k}$ 为群体最大步长。

对于 a 号天牛, 可以统计得到其所在位置的空间密集度:

$$F_s(X_{a,k}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_s(X_{a,k}, X_{m,k}) \quad (17)$$

由于位于同一密集空间的天牛之间相似程度高, 如不进行筛选, 不但浪费算力, 而且容易陷入局部最优。淘汰机制对高密度程度空间的天牛个体进行筛选, 保留一定数量适应函数值较高的个体, 其余淘汰出种群。若 b 号天牛被淘汰, 其位置更新为

$$X_{b,k+1} = X_{b,k} + r_g (X_{c,k} - X_{d,k}) \quad (18)$$

式中: r_g 为不大于 1 的随机正数; $X_{c,k}, X_{d,k}$ 为任意 2 个未淘汰天牛个体。

当 $F_s(X_{b,k+1})$ 小于种群平均值时, b 号天牛回归

种群。

4 组合定位实现方法

综上, 考虑到堆石坝混凝土面板的声源定位特点和声发射波传播特性, 结合区域定位、波速修正、Geiger 法和天牛群搜索算法, 提出了一种基于波速修正的堆石坝面板声发射源组合定位方法 (BSO-IGeiger 法), 其实现过程如下: ①根据堆石坝混凝土面板的监测需求, 进行声发射传感器阵列布设; ②通过采集到信号的传感器确定声源所在的传感器阵列单元区域 D , 并提取阵列单元各传感器感知信号的到达时刻 t_i ; ③利用到达时刻及传感器坐标建立目标函数; ④利用混沌序列生成初始天牛种群, 设定种群数量 M 、天牛个体位置 X 、算法参数和自适应变化规则; ⑤计算天牛个体的适应度函数值 $f(X)$, 选出种群最优个体 $X_{\text{gbest},k}$, 确定个体感知方向和群体最优方向, 得到种群的最大适应度函数值 $f_{\max,k}$ 和最小适应度函数值 $f_{\min,k}$; ⑥利用式 (12) 更新天牛位置, 并更新矩阵 G ; ⑦通过空间密集度筛选出高度相似的一部分个体, 进行保留、淘汰和回归; ⑧更新天牛种群的历史最优解; ⑨当历史最优解对应适应度函数满足指定精度要求或其他迭代要求时, 停止迭代, 否则返回步骤⑤; ⑩重复步骤②~⑨, 直至完成所有声源的定位。

5 试验验证

堆石坝混凝土面板的长宽可达数十或上百米, 而面板厚度通常在 1 m 左右, 因此面板声源定位可视为二维平面定位问题。

5.1 方案设计

根据 QJ 2914—1997《复合材料结构件声发射检测方法》, 使用 Nielson 源测试法, 笔芯选用直径为 0.5 mm 的 HB 型号, 笔芯伸长量为 2.5 mm, 其与试件表面的夹角为 30°。

将混凝土板上大小为 300 mm×360 mm 的平面空间划分为 12×8 个矩形区域, 每个区域大小为 25 mm×45 mm。在对应点位上布置 6 个传感器, 分别记为 A1、A2、A3、A4、A5、A6, 构成近似正六边形, 如图 4(a) 所示, 其布置坐标 (x, y) (单位为 mm) 分别为 (0, 180)、(150, 90)、(150, -90)、(0, -180)、(-150, -90)、(-150, 90)。

传感器阵列所形成六边形可看作由多个近似正三角形组成, 根据三角形顶点位置均匀布置断铅点。按照断铅点相对传感器位置可分为中心断铅点、内部断铅点和外侧断铅点, 定位试验实物如图 4(b) 所示。

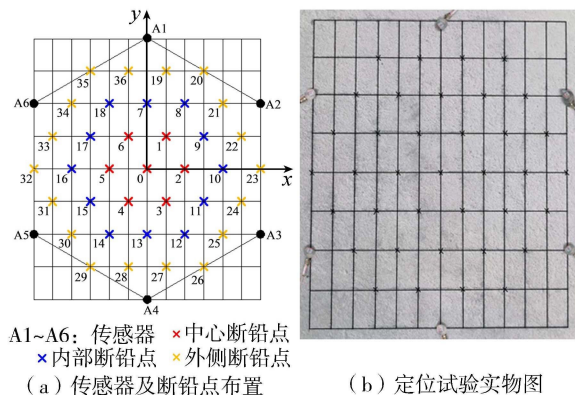


图4 分布式声发射传感器阵列

试验利用凡士林作为耦合剂,将 R6α 声发射传感器连接到 PAC 前置放大器(增益 40 dB,频率范围 20 ~ 1 200 kHz),再连接到 SAMOS™ 声发射采集系统。采集参数设置如下:阈值 40 dB,峰值定义时间 50 μs,撞击定义时间 200 μs,撞击锁定时间 300 μs,采样率 1 MHz。

5.2 波速函数测定

在混凝土板上沿直线等间距布置 5 个传感器,分别记为 B1、B2、B3、B4、B5,间距为 100 mm,传感器坐标(x, y) (单位为 mm)分别为(0, 0)、(100, 0)、(200, 0)、(300, 0)、(400, 0)。在传感器 B1 处进行 3 次断铅,利用 B 系列传感器感知信号的到达时刻,可以得到 AE 源信号传播不同距离时的平均波速。定义 $v(R)$ 为信号传播距离为 R 时的平均波速,3 次断铅信号不同传播距离的平均波速计算结果如图 5 所示。

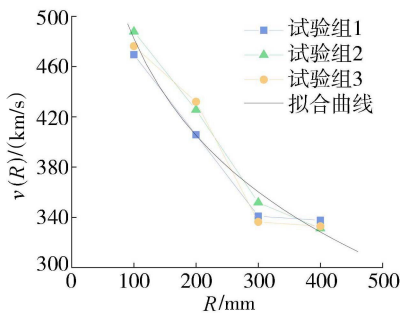


图5 波速与传播距离关系

由图 5 可见,平均波速随着传播距离增加而逐渐减小,即发生波速衰减。平均波速 $v(R)$ 与 R 表现出对数关系,由此可建立波速衰减模型:

$$v(R) = p \ln R + q \quad (19)$$

式中 p, q 为波速衰减系数。

通过拟合可以得到波速衰减系数: $p = -1\,111$ 、 $q = 9\,939$,拟合曲线如图 5 所示。

5.3 试验结果分析

时差定位法根据波速设定条件分为已知波速法、未知波速法和波速修正法,其中已知波速法和未

知波速法均假定波速为恒定。选取已知恒定波速时差法 (Geiger 法)、未知恒定波速时差法 (以 UWS 法进行简称) 和基于波速修正的组合定位法 (BSO-IGeiger 法) 分别对 37 个断铅信号进行定位计算,根据各方法最优解(x, y) 和实际断铅点(x_c, y_c) 的位置可以计算得到最优解误差:

$$\Delta R = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \quad (20)$$

Geiger 法和 UWS 法均采用混沌量子粒子群算法进行求解,设置参数:种群规模为 100,最大迭代次数为 200,映射参数为 0.5,惯性权重为 0.9,加速因子为 1.5,收缩因子为 0.9。BSO-IGeiger 法设置参数:种群规模为 100,最大迭代次数为 200,映射参数为 0.5,步长衰减系数为 0.95,触距衰减系数为 0.95,相似度阈值系数 λ_x 为 0.2。

利用不同定位方法得到二维定位结果如图 6 所示,不同位置断铅点平均最优解误差见表 2,最优解误差如图 7 所示。由图 6 可知,BSO-IGeiger 法大多定位结果均比 Geiger 法和 UWS 法更加靠近实际断铅点,定位效果更好,而 Geiger 法和 UWS 法定位效果差异不明显。由表 2 可知,BSO-Geiger 法总平均最优解误差小于 Geiger 法和 UWS 法;Geiger 法外部断铅点定位误差明显高于中心断铅点和内部断铅点,相差 0.8 mm 左右,UWS 法和 BSO-IGeiger 法不同位置断铅点差距不明显,均在 0.4 mm 以内,说明已知恒定波速假设对靠近非中心区域定位精度影响较大。由图 7 可知,Geiger 法和 UWS 法最优解误差相差并不大,均在 3 ~ 8 mm 之间,限制其定位精度的原因主要为恒定波速的假设,BSO-IGeiger 法误差在 2 ~ 5 mm 之间,利用波速修正可以有效提高声发射源定位精度。综上,BSO-IGeiger 法具有较为优秀的定位效果。

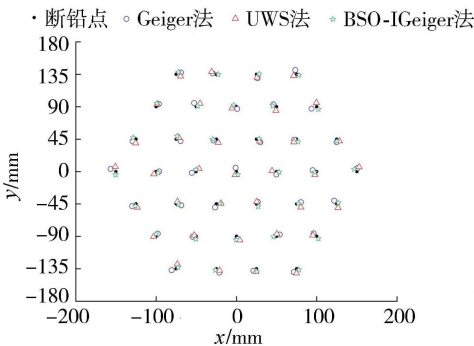


图6 不同定位方法计算结果二维分布

表2 不同位置断铅点平均最优解误差 单位:mm

断铅点	Geiger 法	UWS 法	BSO-IGeiger 法
中心断铅点	4.823	5.053	3.872
内部断铅点	4.873	5.013	3.544
外部断铅点	5.634	5.223	3.494
总平均	5.11	5.096	3.637

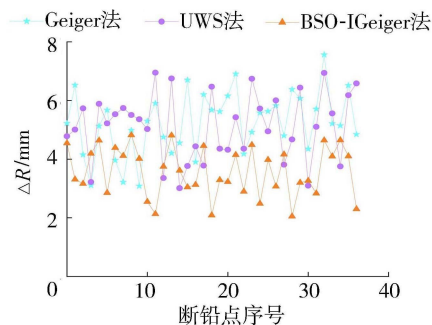


图7 不同定位方法最优解误差

6 结 论

a. 以6传感器单元建立的声发射传感器阵列监测网络可以在保障定位可靠性的同时,对传感器进行存活检测。

b. 利用波速修正对 Geiger 法进行改进,并根据定位目标函数特点提出了一种基于学习淘汰机制的天牛群搜索算法,将二者结合并应用于声发射传感器阵列监测网络,从而提出了 BSO-IGeiger 法。

c. 试验结果表明,BSO-IGeiger 法定位效果明显优于 Geiger 法和 UWS 法,可为堆石坝面板损伤的实时监测提供有益参考。

参考文献:

[1] 周雄雄. 高心墙堆石坝湿化变形与数值模拟方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.

[2] 周伟, 马刚, 刘嘉英, 等. 高堆石坝筑坝材料宏细观变形分析研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2018, 48(10): 1068-1080. (ZHOU Wei, MA Gang, LIU Jiaying et al. Review of macro and mesoscopic analysis on rockfill materials in high dams [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(10): 1068-1080. (in Chinese))

[3] 顾冲时, 苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 1-12. (GU Chongshi, SU Huaizhi. Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 1-12. (in Chinese))

[4] 李忠贵. 面板堆石坝临时断面挡水度汛对坝体影响浅析[J]. 红水河, 2022, 41(3): 47-50. (LI Zhonggui. Review of temporary section water retaining and flood protection on dam body of rockfill dam with face slab[J]. Hongshui River, 2022, 41(3): 47-50. (in Chinese))

[5] 王建军, 李卓, 方艺翔, 等. 狭窄河谷高面板堆石坝变形控制与结构安全[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 67-73. (WANG Jianjun, LI Zhuo, FANG Yixiang, et al. Deformation control and structure safety of high concrete faced rockfill dams in a narrow valley [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 67-73. (in Chinese))

[6] 沈扬, 李明昊, 任秋兵, 等. 面板堆石坝水平位移监测统计模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 89-97. (SHEN Yang, LI Minghao, REN Qiubing, et al. Statistical model for horizontal displacement monitoring of concrete faced rockfill dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 89-97. (in Chinese))

[7] 王岩, 路桂娟, 王瑶, 等. 声发射技术在土木工程中的应用研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 89-94. (WANG Yan, LU Guijuan, WANG Yao, et al. Research review of applications of acoustic emission technique in civil engineering [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 89-94. (in Chinese))

[8] 苏怀智, 周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth rockfill dam leakage detection modes and method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 1-10. (in Chinese))

[9] 明攀, 耿晓明, 陆俊, 等. 基于声发射监测的堤防管涌试验[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 33-38. (MING Pan, GENG Xiaoming, LU Jun, et al. Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 33-38. (in Chinese))

[10] 陈杨, 邓李政, 黄丽达, 等. 基于声发射监测的滑坡过程预警模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(6): 1052-1058. (CHEN Yang, DENG Lizheng, HUANG Lida, et al. Landslide early warning model based on acoustic emission monitoring [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(6): 1052-1058. (in Chinese))

[11] 邵俊波. 基于声发射技术的土木结构损伤机理研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.

[12] 姚可夫, 苏怀智, 杨立夫, 等. 堆石坝面板声发射源组合定位方法[J]. 水力发电学报, 2021, 40(7): 131-140. (YAO Kefu, SU Huaizhi, YANG Lifu, et al. Pattern recognition combination model for locating damage in concrete faced rockfill dams using acoustic emission and its experimental verification [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(7): 131-140. (in Chinese))

[13] 何兆益, 杨康, 李冬雪, 等. 基于波速衰减的混凝土损伤声发射定位优化算法试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(10): 91-96. (HE Zhaoyi, YANG Kang, LI Dongxue, et al. Experimental study on optimization algorithm for acoustic emission location of concrete damage location based on wave velocity [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(10): 91-96. (in Chinese))

(下转第 104 页)

- Geotechnical Engineering, 2011, 33 (Sup1): 8-13. (in Chinese))
- [7] 冯文娟, 琚晓冬. 基于 FLAC^{3D} 的抗滑桩设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (增刊 2): 256-259. (FENG Wenjuan, JU Xiaodong. Design method for anti-slide piles based on FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (Sup2): 256-259. (in Chinese))
- [8] 易庆林, 周瑞, 梁卫, 等. 三峡库区三门洞滑坡稳定分析及抗滑桩模拟研究[J]. 人民长江, 2021, 52 (11): 111-116. (YI Qinglin, ZHOU Rui, LIANG Wei, et al. Stability study on Sanmendong landslide in Three Gorges Reservoir area and simulation of anti-slide pile [J]. Yangtze River, 2021, 52 (11): 111-116. (in Chinese))
- [9] 朱岳明, 孙统立, 吴健. 安康水电站尾水边坡 2 号复合滑坡体稳定分析[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24 (4): 8-11. (ZHU Yueming, SUN Tongli, WU Jian. Stability analysis of No. 2 compound landslide on the right tailwater bank of Ankang Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24 (4): 8-11. (in Chinese))
- [10] 苏国韶, 燕柳斌, 丁雷, 等. 库水位骤降条件下涉水边坡抗滑桩加固效果[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (4): 22-26. (SU Guoshao, YAN Liubin, DING Lei, et al. Research on reinforcement effect of anti-slide pile at riverside slope under water level plummeting condition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (4): 22-26. (in Chinese))
- [11] 陈建峰, 郭小鹏, 田丹, 等. 抗滑桩锚固长度对均质边坡滑动面及抗滑能力影响研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50 (1): 42-49. (CHEN Jianfeng, GUO Xiaopeng, TIAN Dan, et al. Effect of Anti-slide piles anchorage lengths on slip surface and anti-slide capacity of homogeneous slope [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50 (1): 42-49. (in Chinese))
- [12] LI Hao, DU Qinwen. Stabilizing a post-landslide loess slope with anti-slide piles in Yan'an, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80 (22): 739.
- [13] KAHYAOGU M R, IMANÇLI G, ÖNAL O, et al. Numerical analyses of piles subjected to lateral soil movement[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16 (4): 562-570.
- [14] BENMEBAREK M A, BENMEBAREK S, RAD M M, et al. Pile optimization in slope stabilization by 2D and 3D numerical analyses[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 16 (2): 211-224.
- [15] AKGUN H, KOÇKAR M K. Design of anchorage and assessment of the stability of openings in silty, sandy limestone: a case study in Turkey [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (1): 37-49.
- [16] 刘佳龙, 贺雷, 冯自霞, 等. 岩质高挖方边坡锚杆参数优化设计研究[J]. 岩土力学, 2016, 37 (增刊 2): 375-380. (LIU Jialong, HE Lei, FENG Zixia, et al. Parameter optimization design of anchors in high cutting rock slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (Sup2): 375-380. (in Chinese))
- [17] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [18] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006, 27 (6): 950-954. (LEI Wenjie, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Analysis of pile location on landslide control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (6): 950-954. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-05-30 编辑: 俞云利)

(上接第 91 页)

- [14] 李冬雪, 杨康, 何兆益, 等. 混凝土中的声发射波速特性及其在源定位中的应用[J]. 应用声学, 2021, 40 (3): 400-406. (LI Dongxue, YANG Kang, HE Zhaoyi, et al. Acoustic emission wave velocity character in concrete and its application in source localization [J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40 (3): 400-406. (in Chinese))
- [15] LI Dongxue, YANG Kang, HE Zhaoyi, et al. Acoustic emission wave velocity attenuation of concrete and its application in crack localization [J]. Sustainability, 2022, 12 (18): 7405.
- [16] 黄逸群, 孙岳阳, 王洋, 等. 混凝土声发射信号源定位精度的细观模型计算分析[J]. 应用声学, 2022, 41 (6): 982-989. (HUANG Yiqun, SUN Yueyang, WANG Yang, et al. Analysis of the acoustic emission source positioning accuracy based on concrete mesostructure model [J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41 (6): 982-989. (in Chinese))
- [17] KALYANI D, PRADEEP S, SRIVANI P. Secured information sharing in SCM: parametric analysis on improved beetle swarm optimization [J]. Procedia Computer Science, 2022, 215: 897-908.
- [18] 张庆. 基于改进型混沌映射的粒子群算法及其在天线参数优化中的应用[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [19] 蒋莹莹, 田娜, 纪志成. 基于改进竞争粒子群算法的DFIG 参数辨识[J]. 控制工程, 2018, 25 (1): 122-130. (JIANG Yingying, TIAN Na, JI Zhicheng, et al. Improved competitive particle swarm optimization for parameter identification of DFIG [J]. Control Engineering of China, 2018, 25 (1): 122-130. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-08-09 编辑: 刘晓艳)