

基于灰狼算法的轨道交通钢轨缺陷的 稀疏全聚焦成像方法

钱鲁斌 吴鸿博 高春翔 韦正波 邢宇辉

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海)

摘要 [目的] 采用超声相控阵技术可实现轨道交通钢轨缺陷的高精度成像检测, 但广泛应用的全矩阵捕获全聚焦成像方法存在计算耗时长、实时性不高的缺点。为缩短成像计算时间, 采用稀疏矩阵替代全矩阵进行超声成像, 但传统智能优化算法在解决稀疏阵列设计问题时存在收敛慢、易陷入局部最优的问题。为提高收敛性能和全局搜索能力, 提出基于灰狼算法的轨道交通钢轨缺陷的稀疏全聚焦成像方法。[方法] 对优化算法下的稀疏阵列性能进行了分析; 利用超声相控阵仪器在钢轨试样上采集超声信号, 通过稀疏矩阵进行全聚焦成像, 以分析成像质量和成像时间。[结果及结论] 利用优化算法得到的稀疏阵列具有较高的旁瓣抑制能力, PSL (峰值旁瓣水平) 可达到 -12.83 dB; 当 PSL 阈值为 -6 dB 时, 稀疏阵列主瓣宽度与全阵列 2.8° 的主瓣宽度相当; 稀疏率为 75% 时, 钢轨成像性能指标质量接近全阵列, 成像时间缩短了 56.35%。

关键词 轨道交通; 钢轨缺陷; 稀疏全聚焦成像方法; 灰狼算法

中图分类号 U213.4⁺3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.03.021

Sparse Total Focus Imaging of Rail Transit Rail Defects Based on Grey Wolf Algorithm

QIAN Lubin, WU Hongbo, GAO Chunxiang, WEI Zhengbo, XING Yuhui

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Using the ultrasonic phased array technology can realize high-precision imaging detection of rail transit rail defects. However, the widely used FMC-TFM (full matrix capture-total focusing method) has the disadvantages of long computation time and low real-time performance. To reduce imaging calculation time, the sparse matrix is used to replace the full matrix for ultrasonic imaging. But the traditional intelligent optimization algorithm faces the trouble of slow convergence and is easy to fall into the local optimum when solving the sparse array design problem. Therefore, the sparse total focusing imaging method of rail defects based on the grey

wolf algorithm is proposed to improve convergence performance and global search ability. [Method] The sparse array performance under optimization algorithm is analyzed. The ultrasonic phased array instrument is used to collect ultrasonic signals on the rail samples. Total focusing imaging is realized through the sparse matrix to analyze the imaging quality and time. [Result & Conclusion] The sparse array obtained by optimization algorithm has high sidelobe inhibition, and the PSL (peak sidelobe level) can reach -12.83 dB. At the PSL threshold of -6 dB, the width of the main lobe of the sparse array is comparable to that of the main lobe of 2.8° of the full array. When the sparsity rate is 75%, the quality of the rail imaging performance indicators is close to full array, and the imaging time is shortened by 56.35%.

Key words urban rail transit; rail defect; sparse total focus imaging method; grey wolf algorithm

0 引言

钢轨探伤对轨道交通安全运营起着至关重要的作用^[1]。目前, 国内外常用的钢轨探伤技术主要包括超声检测、涡流检测、漏磁检测及视觉检测等。其中, 超声检测已广泛应用于钢轨缺陷检测, 其具有穿透能力强、缺陷定位准确等优点, 但该方法存在检测盲区, 且逐点式检测方式效率低^[1]。

超声相控阵是一种新型的无损检测技术, 可实现大面积快速电子扫查^[2-3]。特别是将 FMC-TFM (全矩阵捕获-全聚焦成像)^[4]方法用于超声相控阵检测信号的后处理, 可实现缺陷的可视化表征。但该方法使用全矩阵数据, 数据量庞大, 实时性难以保证。如果使用稀疏矩阵代替全矩阵数据, 可提高超声相控阵成像的实时性。因此, 稀疏阵列的设计成为 TFM 成像质量的关键。利用智能优化算法可以很好地解决超声阵列稀疏问题。文献[5]运用遗传算法进行阵列稀疏设计, 但采用二进制编码和标

志位组成染色体进行进化,收敛速度慢。文献[6]利用粒子群算法处理阵列方向图,但经常出现迭代次数大且收敛度低的情况。

本文将基于狼群群体协作机制进行优化的灰狼算法用于解决超声阵列稀疏优化问题。构建了基于灰狼算法的超声阵列稀疏设计方法,提高了求解精度和收敛速度。利用超声相控阵仪器在钢轨试样上采集超声信号,通过稀疏矩阵进行全聚焦成像,以分析成像的质量和计算时间。

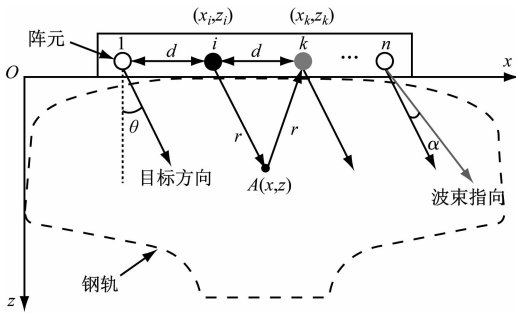
1 稀疏全聚焦成像方法

图1为均匀线性阵列的全聚焦成像示意图。以线性阵列在试样表面的移动方向为 x 轴,以试样的竖直方向为 z 轴,建立1个直角坐标系,并在成像区域内划分网格。稀疏全聚焦成像方法在保证阵列孔径大小不变的同时,以阵列方向图的主瓣宽度更窄、旁瓣峰值最小为目标,通过减少阵列中阵元的数量,对线性阵列中各传感器的位置进行优化的方法^[7]。均匀线性阵列中相应阵元的工作状态采用 f_n 表示,则有:

$$f_n = \begin{cases} 0, & \text{无阵元} \\ 1, & \text{有阵元} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

n ——均匀线性阵列中阵元的编号。



注:○—一般阵元,●—激发阵元,●—接收阵元; r —阵元至成像点的距离; θ —波束俯仰向最大指向角; α —波束指向角; $A(x, z)$ —成像点坐标; d —相邻阵元间距; i, k, n —阵元编号。

图1 均匀线性阵列的全聚焦成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of total focus imaging of a uniform linear array

相邻阵元间距为 d 的 N 个阵元均匀线性阵列中,假定阵元方向图足够宽,则稀疏阵列方向图函数 $F(\theta)$ 可以表示为:

$$F(\theta) = \left[\sum_{n=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \alpha)} \right] f_n \quad (2)$$

式中:

λ ——波长。

M_{LW} (主瓣宽度)可以利用 -6 dB法从式(3)的阵列方向图函数中获取。 P_{SL} (峰值旁瓣水平)可由式(3)计算获得:

$$P_{SL} = \max_{\theta \in S} (F_{dB}(\theta)) = \max_{\theta \in S} \left| \frac{F(\theta)}{\max F(\theta)} \right| \quad (3)$$

式中:

$\max(\cdot)$ ——最大值函数;

$F_{dB}(\theta)$ ——量纲一化的方向图函数;

S ——方向图的旁瓣区间。

如果方向图主瓣的零功率点为 $2\phi_0$ (ϕ_0 为波束方位向最大指向角),则:

$$S = \{ \theta_{\min} \leq \theta \leq \alpha - \phi_0 \cup \alpha + \phi_0 \leq \theta \leq \theta_{\max} \} \quad (4)$$

式中:

$\theta_{\min}, \theta_{\max}$ ——最小、最大波束指向角。

根据TFM成像原理,图1所示的成像区域内目标聚焦点 A 的幅值 $I(x, z)$ 为:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N B_{ik}(t_{ik}(x, z)) \quad (5)$$

其中:

$$t_{ik}(x, z) = (\sqrt{(x - x_k)^2 + (z - z_k)^2} + \sqrt{(x - x_i)^2 + (z - z_i)^2}) / c \quad (6)$$

式中:

B_{ik} ——第 i 阵元发射、第 k 阵元接收到的散射信号;

$t_{ik}(x, z)$ ——第 i 阵元到点 (x, z) 并被第 k 阵元接收的声波传播时间;

x_i, z_i ——激励阵元的坐标;

x_k, z_k ——接收阵元的坐标;

c ——超声波在试样中传播的速度。

2 稀疏阵列设计

2.1 灰狼算法流程每代

灰狼算法^[7-8]通过模拟灰狼群体捕食行为,将优化问题转换为寻找1组解空间中的狼群,其中每只狼代表1个潜在解,狼群的目标是在搜索过程中寻找全局最优解。灰狼算法中存在能够自适应调整的收敛因子以及信息反馈机制,能够在局部寻优与全局搜索之间实现平衡。图2为基于灰狼算法进行超声阵列稀疏设计的流程,其中的关键步骤如下:

步骤1 对群体进行初始化,将其随机生成0、1的二值矩阵,每1行均为1个独立的个体。将群体规模设为50,最大迭代数设为200。设定收敛因子 a , a 随迭代次数从2线性减小到0。确定系数向量 A 和系数向量 C :

$$A = 2ar_1 - a \quad (7)$$

$$C = 2r_2 \quad (8)$$

式(7)—式(8)中, r_1 和 r_2 为模在 $[0,1]$ 之间的随机向量。

步骤2 设置适应度评价函数。以减小主瓣宽度、降低旁瓣电平为稀疏阵列优化的目标设计适应度评价函数。分别计算每个阵列的峰值旁瓣水平和主瓣宽度,采用式(9)确定适应度评价函数,并选择适应度最好的前3匹狼 β_0 、 β_1 和 β_2 。

$$g = 0.2P_{SL} + 0.8|M_{SL,full} - M_{SL}| \quad (9)$$

式中:

g ——适应度评价函数值;

$M_{SL,full}$ ——全阵列阵元主瓣宽度。

步骤3 在狩猎过程中,确定个体与猎物间的距离 D 为:

$$D = |CX_p(n) - X(n)| \quad (10)$$

确定灰狼的更新位置为:

$$X(m+1) = X_p(m) - AD \quad (11)$$

式中:

m ——目前的迭代次数;

X_p 、 X ——猎物的位置向量和灰狼的位置向量。

步骤4 狩猎活动开始,随着 a 从2线性减小到0, A 和 C 的值逐渐减小,在此过程中:当 $|A| < 1$ 时,狼群向猎物发起攻击(陷入局部最优);当 $|A| > 1$ 时,灰狼与猎物分离,希望找到更合适的猎物(全局最优)。完成以上狩猎活动后,计算全部灰狼的适应度。

步骤5 保留更新计算后的 β_0 、 β_1 和 β_2 的适应度和位置,当未达到最大迭代次数时,返回步骤3。

步骤6 当达到最大迭代次数时,输出当前 β_0 狼的 M_{LW} 和 P_{SL} ,解码输出最佳阵元位置。

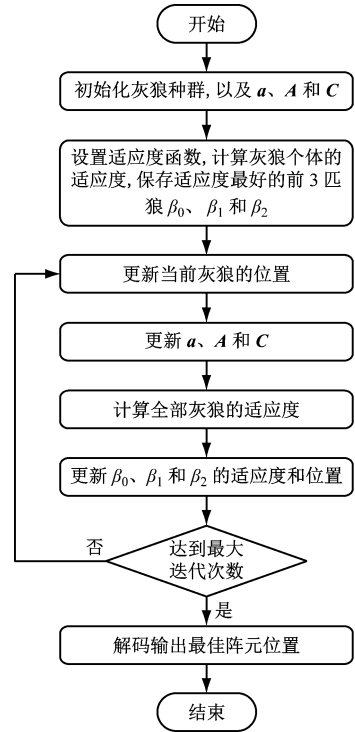


图2 基于灰狼算法的超声阵列稀疏设计流程图

Fig. 2 Flow chart of ultrasonic array sparse design based on Grey Wolf Algorithm

2.2 优化算法下的稀疏阵列性能分析

表1为计算机参数与性能。在表1所示的计算机平台上,分别利用遗传算法和灰狼算法对32阵元的相控阵阵元位置进行稀疏优化。当初始种群规模为50,迭代次数为200时,稀疏率为50%的稀疏阵列静态方向图如图3所示。其中,图3b)为图3a)在方向角处于 $-25^\circ \sim 25^\circ$ 范围内的局部放大图。两种优化算法下的稀疏阵列性能指标与运行时间见表2。由表2可以看出:经灰狼算法优化得到的稀疏阵列具有更高的旁瓣抑制能力,当 M_{LW} 相同时, P_{SL} 达到 -12.83 dB。

遗传算法和灰狼算法下的适应度收敛曲线如图4所示。由图4可见:相比遗传算法,灰狼算法下的最终适应度约为 -2.92 ,收敛更快,优化效果更佳。因此,本文所提出的灰狼算法能够更好地解决超声阵列稀疏优化问题,在阵列有效孔不变时,可利用该算法对32阵元的线性阵列进行稀疏优化设计。稀疏阵列的阵元分布及性能指标取值,见表3。

表1 计算机参数与性能

Tab. 1 Computer parameters and performance

计算机型号	操作系统	处理器型号	主频频率/GHz	内存/GB	计算软件
Lenovo Legion Y7000	Win10 × 64 位	Intel(R) Core(TM) i5-8300H	2.30	16	MATLAB

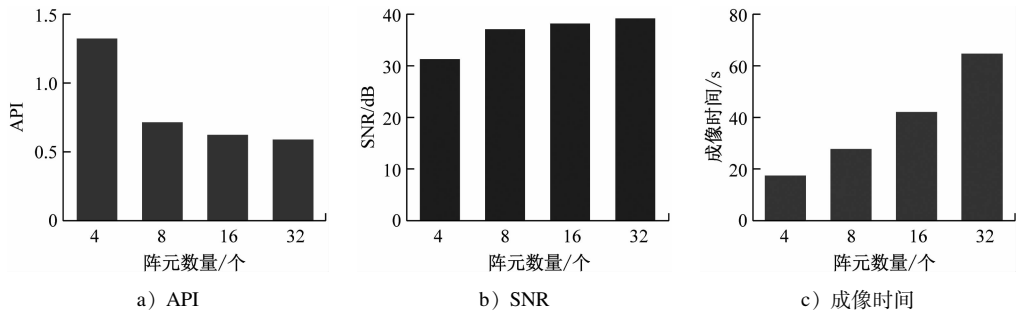


图7 不同阵元数据下稀疏阵列 TFM 的成像性能

Fig. 7 Imaging performance of sparse array TFM under different arrays

疏率为 87.5% 时的 SNR (信噪比) 比稀疏率为 0 (全阵列) 时的降低了 20.12%, 但伪像和背景噪声均较大; 使用稀疏率为 75.0% 和稀疏率为 0 时的稀疏阵列数据进行 TFM 成像的时间缩短了 56.35%, 但图像质量基本上不受影响。

4 结论

1) 在初始种群规模为 50, 迭代次数为 200 的条件下, 灰狼算法具有较强的收敛性能, 优化后的稀疏阵列性能更佳, 最终的适应度约为 -2.92 。

2) 经灰狼算法优化后的稀疏阵列旁瓣抑制能力更高, 与遗传算法相比, 在 M_{LW} 相同时, P_{SL} 达到 -12.83 dB。

3) 当稀疏率达到 75% 时, 稀疏阵列成像性能指标和成像质量与全阵列成像接近, 但成像时间却缩短了 56.35%。

参考文献

- [1] 陈修忻, 许辉, 邹钰. 钢轨超声检测典型损伤 B 显图谱特征分析[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(4): 229.
CHEN Xiuxin, XU Hui, ZOU Yu. Characteristic analysis of B-display image of typical damage in rail ultrasonic inspection[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(4): 229.
- [2] 李天骥, 石永生, 陈峰, 等. 基于超声相控阵全聚焦 DAC 图谱的钢轨缺陷定量方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 32.
LI Tianji, SHI Yongsheng, CHEN Feng, et al. Quantitative method of rail flaws based on ultrasonic phased array and total focusing DAC mappings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 32.
- [3] 兰晓峰, 张渝. 重载铁路钢轨相控阵探伤系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 47.

LAN Xiaofeng, ZHANG Yu. Research on heavy haul railway inspection system based on the phased array technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 47.

- [4] 黄文大, 李衍. 全矩阵捕获和全聚焦法相控阵成像检测技术[J]. 无损检测, 2021, 43(11): 72.
HUANG Wenda, LI Yan. FMC and TFM phased array imaging detection technology [J]. Nondestructive Testing Technologing, 2021, 43(11): 72.
- [5] 郑晖, 林春深, 杨天雪. 相控阵超声探伤中一维稀疏阵列的优化设计研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 430.
ZHENG Hui, LIN Chunshen, YANG Tianxue. Optimization design of 1D sparse array for ultrasonic phased array[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2014, 42(3): 430.
- [6] 刘东. 粒子群优化算法及其工程应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
LIU Dong. Research on particle swarm optimization and its engineering application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [7] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46.
- [8] 张晓凤, 王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(3): 30.
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Comprehensive review of grey wolf optimization algorithm [J]. Computer Science, 2019, 46(3): 30.

· 收稿日期:2023-04-28 修回日期:2023-07-11 出版日期:2024-03-10

Received:2023-04-28 Revised:2023-07-11 Published:2024-03-10

· 通信作者:钱鲁斌,助理研究员, qianlb@sues.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license