

# 基于改进克里金法的基桩缺陷空间插值研究

于喆<sup>1,2</sup>, 王奎华<sup>1,2\*</sup>, 吴君涛<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;  
2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 克里金插值法应用于基桩缺陷空间插值时, 传统的邻近点搜索模式存在不适用的问题, 导致变异函数拟合精度不足, 从而使得基桩横截面波速预测结果出现较大误差。本文提出了一种针对基桩缺陷空间插值的区域化搜索克里金插值法, 该方法针对基桩横截面划分了三角形搜索区域, 改进了邻近点搜索模式, 简化了拟合变异函数的过程, 从而提高克里金插值法的预测精度。通过建立预设不同位置缺陷的桩身模型, 对比了改进克里金法对于不同搜索模式和不同空间插值方法插值结果的性能, 数值模拟结果表明, 相比于普通克里金插值法、反距离加权插值法和薄板样条插值法, 该方法对缺陷区域波速的预测精度提高 20% 以上, 同时能够准确识别出缺陷位置和大小形状, 更好地识别出缺陷靠近声测管的工况。

**关键词:** 桩基础; 层析成像; 克里金插值法; 变异函数; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)05-0376-07

## Research on spatial interpolation of pile defects based on improved Kriging method

YU Zhe<sup>1,2</sup>, WANG Kui-hua<sup>1,2\*</sup>, WU Jun-tao<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;  
2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** When applying the Kriging interpolation method to spatially interpolate foundation pile defects, the traditional near-point search model is unsuitable, leading to inaccuracies in the variation function fitting and causing substantial errors in the prediction of foundation pile cross-section wave velocity. A regional search Kriging interpolation method is proposed in this work for the spatial interpolation of foundation pile defects. The method involves dividing the triangle search area for the cross-section of the foundation pile, improving the search mode of adjacent points, and simplifying the process of fitting the variogram. These improvements enhance the prediction accuracy of the Kriging interpolation method. We conducted numerical simulations comparing our improved Kriging method with different search patterns and the interpolation results obtained from other spatial interpolation methods, including ordinary Kriging, inverse distance weighted interpolation, and thin plate spline interpolation methods. The results demonstrate that our method significantly increases the prediction accuracy of the wave velocity of defect area by more than 20%. Additionally, our method accurately identifies the location and size of defects while better characterizing defects located near the acoustic tube.

**Key words:** pile foundation; tomographic imaging; Kriging interpolation method; variation function; numerical simulation

## 0 引言

作为地下隐蔽工程, 桩基础一般位于地下或水下, 其施工质量较难控制, 易出现缩颈、夹泥、蜂

窝、沉渣甚至断桩等缺陷。同时基桩的质量直接影响到其承载力以及上部结构的稳定性, 因此基桩质量检测工作成为工程质量控制中最为关键的一环。基桩质量检测的内容可分为完整性检测和单桩承

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LXZ22E080001)。

作者简介: 于喆 (1997—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事桩基检测理论研究。E-mail: 21912147@zju.edu.cn。

\*通信作者: 王奎华 (1965—), 男, 江苏滨海人, 博士, 教授, 主要从事桩基振动理论及土工测试方法的研究。E-mail: zdwkh0618@zju.edu.cn。

承载力检测, 目前工程中针对基桩完整性采用的方法主要有钻芯法、低应变法<sup>[1-3]</sup>、旁孔透射法<sup>[4-6]</sup>和声波透射法<sup>[7-9]</sup>, 再对缺陷桩进行处理<sup>[10-11]</sup>。但这些方法均无法对缺陷的形状大小和位置进行准确定量分析, 从而无法对含非规则缺陷的基桩进行评估。基于声波透射法的基桩层析成像技术利用超声波在被测基桩中传播的几何运动学原理, 并通过计算机反演技术, 重构基桩内部的声学参数分布情况, 进而直观展示出基桩的内部结构图像, 准确反映出缺陷的形状大小和位置, 受到了研究者的广泛关注。

基桩层析成像技术建立在声波透射法的基础上, 实际工程中综合成本和规范的要求, 单桩一般埋设 2~3 根声测管, 大直径的桥梁桩等重要桩基础埋设 4 根声测管, 检测范围只占基桩横截面的一半左右, 依旧不能完全反映出基桩内部缺陷的形状大小和位置, 无法为桩基础质量评估和维护加固提供准确数据。为此, 一些研究者在多个二维超声波层析成像剖面的基础上, 使用空间插值法计算得到剖面外离散单元的波速, 从而获得基桩整体详细精确的质量情况, 有代表性的空间插值方法有反距离加权插值法 (IDW)、样条插值法 (TS) 和克里金插值法 (Kriging), 分别从几何关系、函数关系和空间统计学的角度上探讨了对未知区域的预测。

反距离加权插值法认为样本点对未知点的影响与二者的距离相关, 样本点距离未知点越近, 样本点对未知点影响权重越大, 样本点距离未知点越远, 则样本点对未知点影响权重越小, 即样本点对未知点影响权重与二者之间的距离呈逆相关关系, 因此被称为“反距离加权”。该方法因原理简单和计算便捷被应用于计算未知单元的波速, 从而实现三维成像<sup>[12]</sup>, 但样本点在空间中的局部分布特征对反距离加权插值法的影响较大, 反距离加权插值法适用于样本点数量多、分布均匀的空间数据<sup>[13]</sup>。

样条插值法的原理是计算得到一个通过所有样本点同时曲率最小的光滑曲面, 从而对未知点进行预测。样条插值法由于建立在通过所有样本点的平滑曲面的基础上, 所以适用于变化缓慢的空间结构, 例如气温、污染物浓度、信号强度等, 对样本点密度大、数量多的空间数据会有较好的插值效果<sup>[13]</sup>, 对于变化剧烈的空间结构, 应用时要谨慎考虑。

克里金插值法基于变异函数理论, 能够对有限区域内的变量进行线性无偏最优估计, 较好地处理空间的随机性, 被广泛应用在地质、气象、信号、土壤等领域<sup>[14-17]</sup>。传统克里金插值法应用于基桩缺陷空间插值时, 传统邻近点搜索方式不适用于基桩

横截面上特殊的样本点和未知点的分布特征, 无法拟合出精度较高的变异函数, 从而导致最终的预测结果出现较大误差。

基于上述问题, 本文提出了一种针对基桩缺陷空间插值的区域化搜索克里金插值法, 改进了邻近点搜索方式, 简化了拟合变异函数的过程, 从而提高克里金插值法的预测精度。本文采用数值模拟对预设不同缺陷位置的基桩模型进行了试验, 验证了改进克里金插值法相比于其他空间插值法的优越性。

## 1 克里金插值法应用于基桩缺陷空间插值的不足

基桩缺陷空间插值的样本点来源于通过声测管层析成像得到的声测管连线沿深度方向剖面的桩身混凝土波速分布, 该样本点的采样方法决定了基桩缺陷成像空间插值的特点, 样本点和未知点在桩身截面上的分布如图 1 所示。

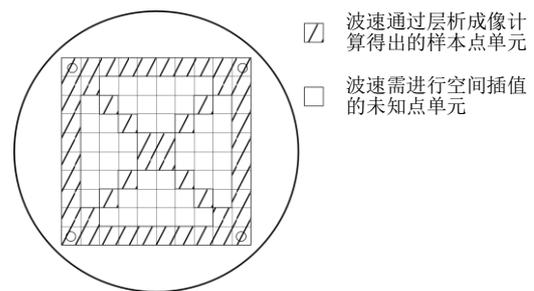


图 1 层析成像数据在桩身截面的分布

Fig. 1 Distribution of tomographic imaging data in pile section

图 1 为 1 根埋设了 4 根声测管的基桩横截面, 每对声测管连线沿深度方向的剖面离散为  $10 \times 10$  的网格并进行层析成像, 因此在基桩横截面中形成以 4 根声测管为顶点的  $10 \times 10$  网格, 并假设网格中单个单元内的波速均匀分布且保持一致。使用声波透射法并通过层析成像计算得到 6 个沿深度方向剖面的混凝土波速, 其作为样本点在基桩横截面上呈正方形框体型和“X”型分布, 需要进行波速空间插值的未知点集中分布于基桩横截面网格的中心。样本点和未知点均集中分布, 极其不均匀, 并且夹泥和缩颈这类缺陷不是在基桩横截面中随机存在, 而是出现在基桩横截面四周的概率比较大, 这就导致基桩横截面大部分为平缓的波速正常区域, 边界可能存在具有空间结构性的低速异常区域。基桩横截面上样本点和未知点的分布特征和整体的空间结构性给克里金插值法邻近点搜索方式的确定增加了困难, 因此也就导致了由离散半方差函数拟合变异

函数这一过程的误差增大。

克里金插值法的邻近点搜索有两种模式，一是固定搜索数量，搜索并选取距离待预测未知点最近的  $n$  个样本点；二是固定搜索距离，搜索并选取距离待预测未知点  $d$  以内所有样本点。由于前文所述的基桩横截面上样本点和未知点的分布特点，选择固定搜索数量模式时，会出现最大搜索距离下搜索超出预设搜索数量，且无法在相同距离下从多个样本点中选择出满足预设搜索数量和空间分布的有限个样本点。而使用固定搜索距离模式时，假设搜索距离确定为两倍网格单元边长，图 2 所示缺陷位置下缺陷周围关键未知点构造的离散半方差函数如图 3 所示。可以看出，使用常用的球状模型等或是不常用的空洞效应模型等变异函数模型，离散半方差函

数的拟合会十分困难，均会产生较大的残差，相关系数  $R^2$  会更加接近 0，无法拟合出精度较高的变异函数，从而导致最终的预测结果出现较大的误差。

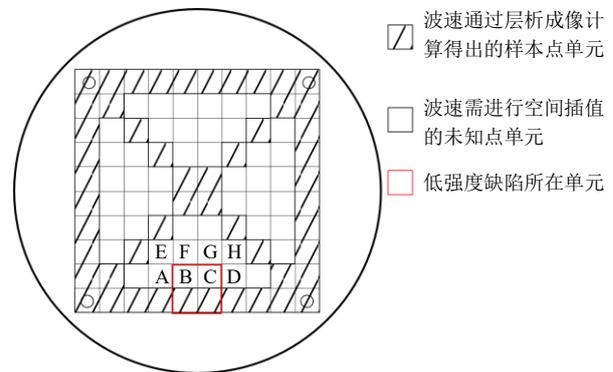


图 2 缺陷周围关键未知点分布

Fig. 2 Distribution of key unknown points around defects

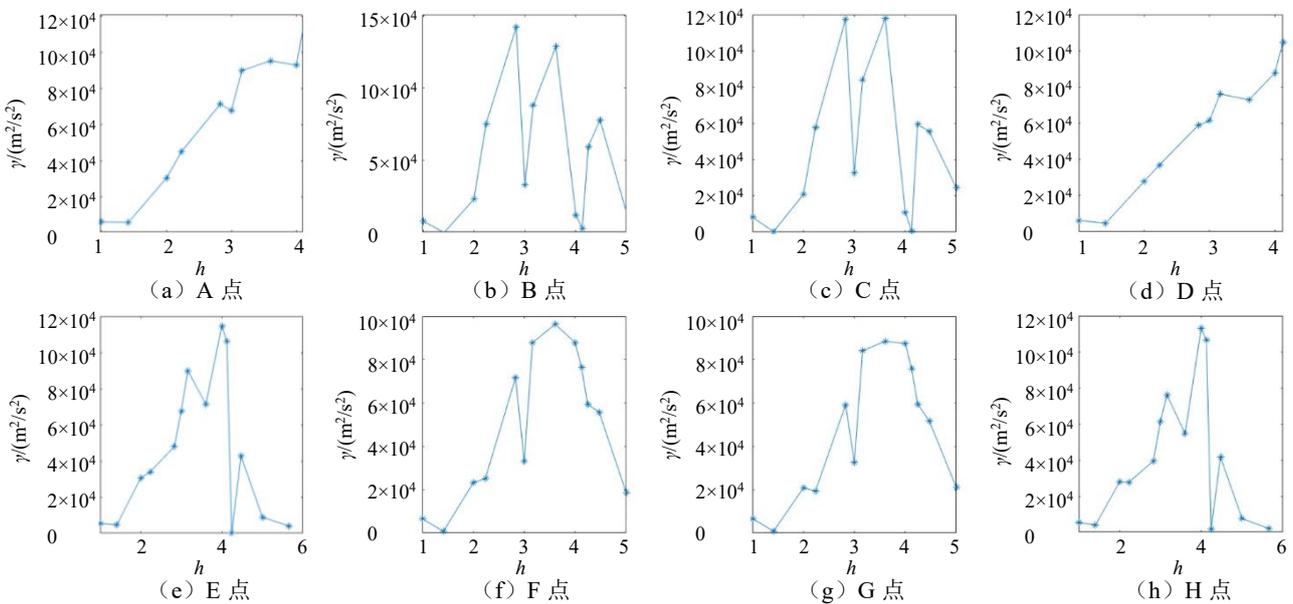


图 3 缺陷周围关键未知点构造的离散半方差函数

Fig. 3 Discrete semi-variance functions constructed at key unknown points around defects

## 2 克里金插值法的改进

基于上述提出的不足，本文对克里金插值法的搜索模式进行了改进，提出一种针对基桩缺陷空间插值的区域化搜索克里金插值法。

改进克里金插值法的邻近点搜索模式放弃了传统的固定搜索数量和固定搜索距离模式，根据前文所述的基桩横截面上样本点和未知点的分布特点，将基桩横截面的网格空间按照对称的方式划分为 8 个搜索区域，每个搜索区域内的样本点共同构成该区域内未知点的邻近点空间，即该区域内所有未知点预测均使用该邻近点空间构成的离散半方差函数，邻近点搜索如图 4 所示。

该改进方法的优点在于考虑到了基桩横截面上样本点和未知点分布的集中性和对称性，且夹泥和缩颈导致的缺陷区域多分布于基桩横截面的四周，外直角边上的样本点可以较好反映出缺陷的位置或大小信息，而斜边上的样本点可以较好反映缺陷深入基桩内部程度的信息，该邻近点搜索模式综合考虑邻近点搜索的效率和空间结构性的反映。

离散半方差函数只包括有限个特定距离的点对的空问结构关系，无法满足传统克里金插值法下确定任意距离两点之间空问结构关系的需求，因此需要将离散半方差函数拟合合成变异函数。而在该改进方法的邻近点搜索模式下，在一个搜索区域中，任意未知点到任意邻近点的距离  $h_0$  均能在该搜索区域中的离散半方差函数中找到对应的  $h_0$ ，因此可

以直接使用该搜索区域的离散半方差函数确定该搜索区域中任意未知点与任意邻近点的空间结构关系  $\gamma(h_0)$ , 简化了离散半方差函数按照理论模型拟合变异函数的步骤, 直接消除了该步骤中带来的误差, 从而提高了最终的预测精度。

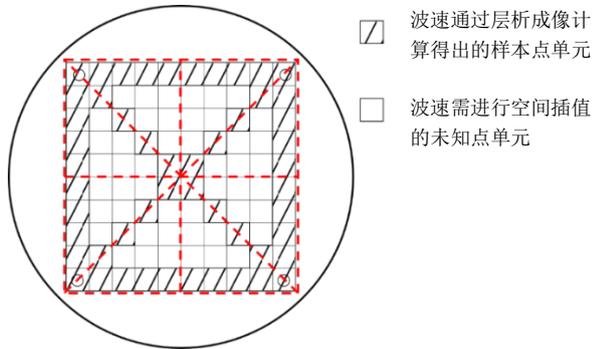


图 4 改进克里金插值法的邻近点搜索

Fig. 4 Improved Kriging interpolation method for near-point search

### 3 数值模拟与分析

#### 3.1 数值模型建立

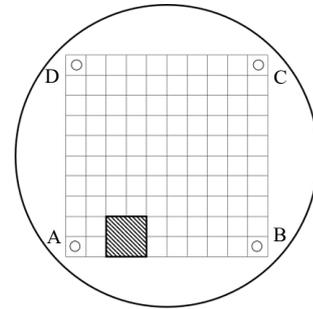
为了评估本文提出的针对基桩缺陷空间插值的区域化搜索克里金插值法的性能, 本文通过建立预设不同位置缺陷的桩身数值模型进行试验, 桩身缺陷布置如图 5 所示。在长 100 cm、直径 150 cm 的圆柱形基桩中埋设 4 根声测管 A、B、C、D, 缺陷距离桩底的高度为 50 cm, 模型一中缺陷布置在声测管 A 和声测管 B 之间靠近声测管 A 20 cm 的位置, 模型二中缺陷布置在声测管 A 和声测管 B 之间中央的位置。缺陷的大小为 20 cm×20 cm×20 cm, 缺陷部位的声速为 3 200 m/s, 桩身混凝土质量正常部位的声速为 4 000 m/s。

桩身采用左右单向声波透射法建立声测管之间桩身剖面的层析成像影像, 各声测线的声时和路径正演采用直线法确定, 其中各声测线的声时添加高斯噪声模拟实地测量和混凝土密度的随机性带来的误差, 网格单元声速反演算法采用联合迭代重建算法 (SIRT)。声测管之间的桩身剖面 and 桩身横截面中 4 根声测管包围成的区域离散为 10×10 的网格。本文采用概率统计法判别声速正常单元和声速偏低单元, 将声速偏低单元识别为缺陷单元, 概率统计法公式如下:

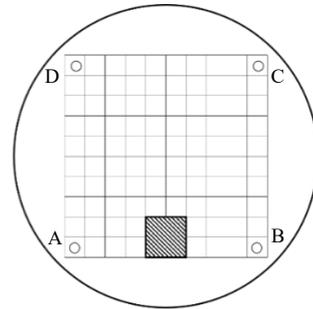
$$I_{ij} = \begin{cases} 0, & v_{ij} > \bar{v} - k\delta_v \\ -1, & v_{ij} \leq \bar{v} - k\delta_v \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_{ij}$  为网格声速判定码, -1 表示网格声速偏低,

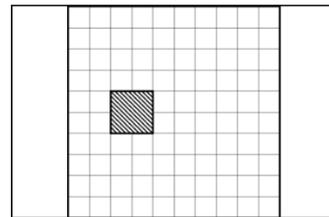
0 表示网格声速正常;  $v_{ij}$  为网格  $ij$  的声速;  $\bar{v}$  为网格平均声速;  $\delta_v$  为网格声速的标准差;  $k$  为判定系数,  $k$  越大, 判定为声速偏低区域的网格越少,  $k$  常取 1~2, 本文取值  $k=2$ 。



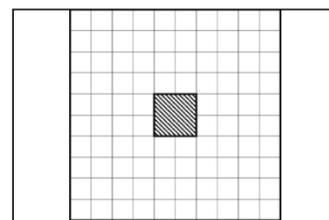
(a) 模型一距离桩底 50 cm 高的横截面



(b) 模型二距离桩底 50 cm 高的横截面



(c) 模型一声测管 A-B 剖面



(d) 模型二声测管 A-B 剖面

图 5 模型一和模型二桩身剖面图

Fig. 5 Section drawings of model 1 and model 2 piles

将声波透射法层析成像获得 6 个桩身轴向方向剖面的波速数据作为样本点, 下面使用本文提出的改进克里金插值法、普通克里金插值法、反距离加权插值法和薄板样条插值法计算对比来验证针对基桩缺陷空间插值的区域化搜索克里金插值法的精度和有效性。

#### 3.2 不同搜索模式插值精度分析

对单层桩身横截面网格中的波速未知点分别

通过本文提出的改进克里金插值法和使用固定搜索距离模式的普通克里金插值法进行插值计算，插值计算后的波速平均相对误差见图 6，缺陷识别结果 ( $k=2$ ) 见图 7。

从图 6 的预测精度可以看出，针对于模型一和模型二缺陷区域未知点的波速预测，改进克里金插值法的平均相对误差小于普通克里金插值法，性能分别提高 35%和 40%；针对于搜索区域除去缺陷的正常区域的波速预测，改进克里金插值法的平均相对误差大于普通克里金插值法；针对于正常区域的波速预测，改进克里金插值法的平均相对误差和普通克里金插值法差距不大，都小于 0.5%。

从图 7 的缺陷识别结果来看，模型一和模型二使用改进克里金插值法判断出的缺陷区域完全包括了预设缺陷，而使用普通克里金插值法时，没能识别出预设缺陷深入桩身内侧的长度。同时两种方法均会在预设缺陷角部识别出缺陷伪像，这是因为声测管剖面的层析成像数据中，在预设缺陷周围射线入射和出射方向上存在大片的低速单元，此时轴向剖面存在的低速单元面积较大，使用概率法不会将这些低速单元识别为低速异常单元。但当将波速层析成像数据代入桩身横截面中时，此时在桩身横截面中这些低速单元所占面积变得很低，从而使其被概率法识别为缺陷伪像。

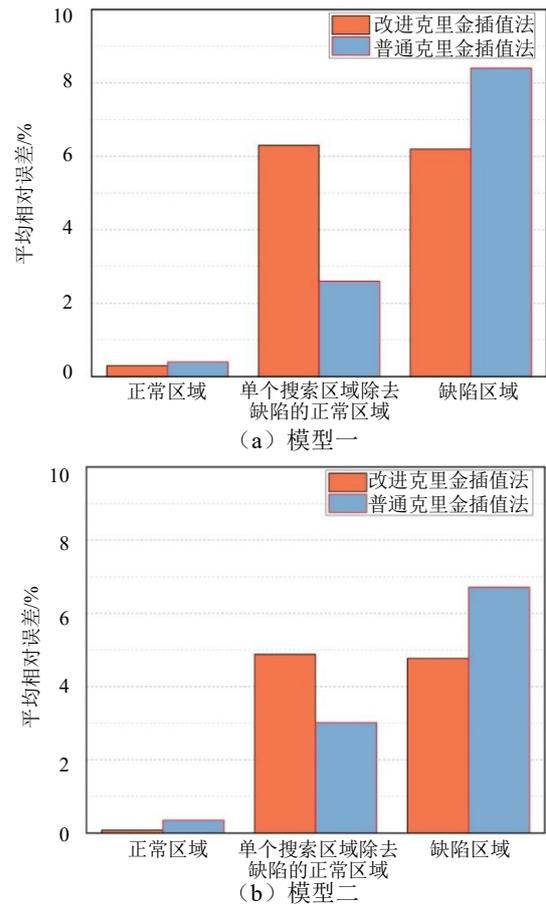


图 6 不同搜索模式插值波速平均相对误差  
Fig. 6 Average relative error of wave velocity in different search modes

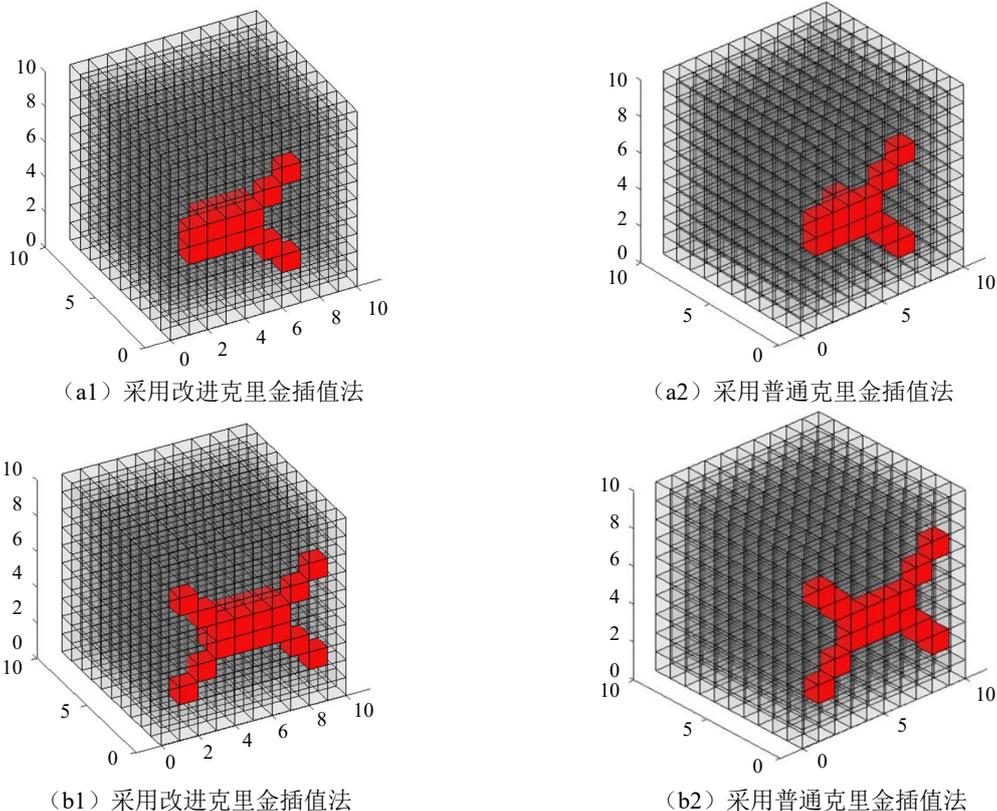


图 7 不同搜索模式插值缺陷识别结果  
Fig. 7 Defect recognition results under different search modes

### 3.3 不同空间插值方法插值精度分析

对单层桩身横截面网格中的波速未知点分别通过本文提出的改进克里金插值法、反距离加权插值法和薄板样条插值法进行插值计算, 插值计算后的波速平均相对误差见图 8, 缺陷识别结果 ( $k=2$ ) 见图 9。

从图 8 的预测精度可以看出, 针对于缺陷区域未知点的波速预测, 模型一中改进克里金插值法的平均相对误差小于反距离加权插值法和薄板样条插值法, 性能分别提高 21%和 37%左右; 模型二中改进克里金插值法的平均相对误差小于反距离加权插值法, 略大于薄板样条插值法, 性能分别提高 44%和降低 9%。针对于搜索区域除去缺陷的正常区域的波速预测, 改进克里金插值法的平均相对误差大于反距离加权插值法和薄板样条插值法; 针对于正常区域的波速预测, 改进克里金插值法、反距离加权插值法和薄板样条插值法的平均相对误差差距不大, 都小于 0.5%。

从图 9 的缺陷识别结果来看, 模型一和模型二使用改进克里金插值法判断出的缺陷区域完全包括了预设缺陷。在模型一中, 使用反距离加权插值法和薄板样条插值法均没能识别出预设缺陷深入桩身内侧的长度, 在模型二中, 使用反距离加权插值法和薄板样条插值法比较好地识别出了预设缺陷的位置和大小。使用 3 种方法依旧在预设缺陷角部识别出缺陷伪像, 说明出现缺陷伪像与空间插值方法无

关, 主要受到声测管剖面层析成像结果的影响。

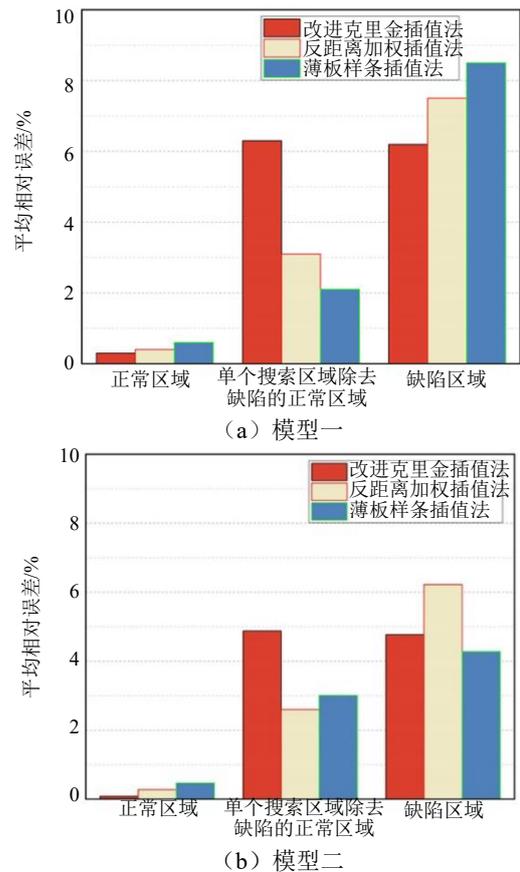


图 8 不同空间插值方法插值波速平均相对误差  
Fig. 8 Average relative errors of wave velocities interpolated by different spatial interpolation methods

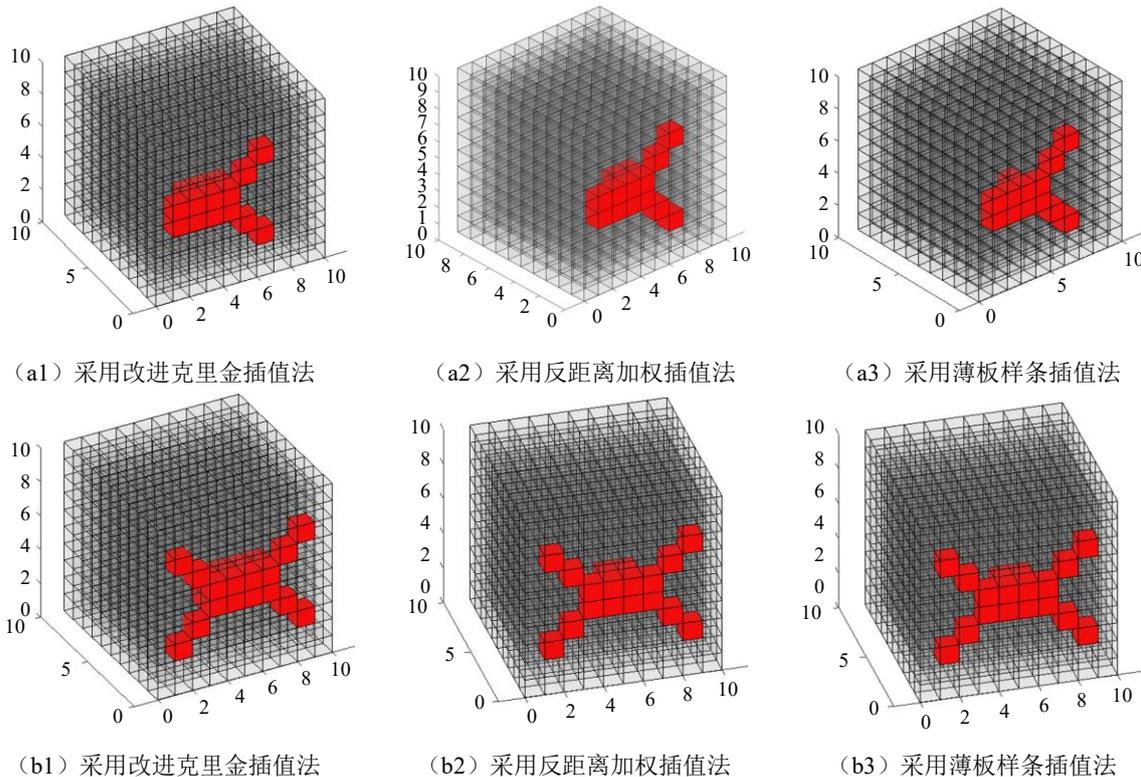


图 9 不同空间插值方法插值缺陷识别结果

Fig. 9 Defect recognition results under different spatial interpolation methods

## 4 结 论

(1) 本文针对克里金插值法应用于基桩缺陷空间插值遇到的问题,提出了一种针对基桩缺陷空间插值的区域化搜索克里金插值法,改进了邻近点搜索模式,简化了拟合变异函数的过程,从而提高克里金插值法的预测精度。

(2) 通过建立预设不同位置缺陷的桩身模型,对比了改进克里金法对于不同搜索模式和不同空间插值方法插值结果的性能。

(3) 试验结果表明,相比于普通克里金法、反距离加权法和薄板样条法,改进克里金法的预测精度提高了20%以上;改进克里金法能够准确识别出真实的缺陷位置和大小形状,普通克里金法、反距离加权法和薄板样条法的识别结果均出现遗漏,同时改进克里金法对缺陷更靠近声测管的工况有更好的识别精度。

## 参考文献

- [1] 吴文兵, 邓国栋, 张家生, 等. 考虑横向惯性效应时桩侧土-管桩-土塞纵向耦合振动特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 993-1002.  
WU Wen-bing, DENG Guo-dong, ZHANG Jia-sheng, et al. Vertical dynamic response of soil surrounding pile-pipe pile-soil plug by considering lateral inertial effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 993-1002.
- [2] WANG K, WU W, ZHANG Z, et al. Vertical dynamic response of an inhomogeneous viscoelastic pile[J]. Computers & Geotechnics, 2010, 37(4): 536-544.
- [3] WU J, NAGGAR M H E, WANG K, et al. Lateral vibration characteristics of an extended pile shaft under low-strain integrity test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105812.
- [4] WU J, WANG K, NAGGAR M H E. Dynamic soil reactions around pile-fictitious soil pile coupled model and its application in parallel seismic method[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110: 44-56.
- [5] WU J, WANG K, NAGGAR M H E. Half-space dynamic soil model excited by known longitudinal vibration of a defective pile[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 403-412.
- [6] SACK D A, SLAUGHTER S H, OLSON L D. Combined measurement of unknown foundation depths and soil properties with nondestructive evaluation methods[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1868(1): 76-80.
- [7] 段文旭. 低应变法和声波透射法在桩基检测中的综合应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.  
DUAN Wen-xu. Low strain and sonic transmission method integrated application research in pile foundation inspection[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [8] 李廷, 徐振华, 罗俊. 基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3165-3172.  
LI Yan, XU Zhen-hua, LUO Jun. Study of analysis method for collected data of integrity testing of piles by ultrasonic crosshole testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3165-3172.
- [9] 邓国文, 王齐仁, 化得钧, 等. 声波透射法在基桩检测中的应用[J]. 工程勘察, 2013, 41(6): 92-95.  
DENG Guo-wen, WANG Qi-ren, HUA De-jun, et al. Application of crosshole sonic logging in pile foundation detection[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(6): 92-95.
- [10] 李晓勇. 既有高层建筑物纠偏及桩基补强案例分析[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 143-147.  
LI Xiao-yong. Case study on rectification and pile foundation reinforcement for existing high-rise buildings[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(2): 143-147.
- [11] 袁强. 某高层建筑钻孔灌注桩承载力缺陷原因分析及处理方案[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 227-230.  
YUAN Qiang. Analysis and treatment plans of insufficient bearing capacity of bored pile of a high-rise building in China[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 227-230.
- [12] 张建龙, 薛忠军, 陈卫红, 等. 三维 CT 成像技术在超声透射法检测基桩完整性中的应用研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2018, 14(7): 226-230.  
ZHANG Jian-long, XUE Zhong-jun, CHEN Wei-hong, et al. Application research of 3D CT imaging technology in ultrasonic transmission method to test the integrity of foundation pile[J]. Highway Traffic Technology: Applied Technology Edition, 2018, 14(7): 226-230.