Journal of System Simulation

Volume 29 | Issue 4 Article 8

6-3-2020

Forestry Fire Spatial Diffusion Model Based on Integration of Multi-Agent Algorithm with Cellular Automata

Zhao Di
Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China;

Zhisheng Xu
Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Forestry Fire Spatial Diffusion Model Based on Integration of Multi-Agent Algorithm with Cellular Automata

Abstract

Abstract: In view of the existing ultrasonic detection signal attenuation, directional difference, complex propagation paths, and characteristics of the components of complex, *a kind of intelligent concrete defect nondestructive detection algorithm based on multi resolution singular entropy was put forward. By using the wavelet algorithm, the ultrasonic signal was decomposed into high, low frequency components of multi scales for each component, then each component was decomposed by singular spectrum analysis, at the same time using the information entropy theory, the calculation of singular entropy as the characteristic defect detection value, using the GA-SVM algorithm was used to train the singular entropy, so as to achieve the purpose of identification of defects in concrete.* The simulation results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of the identification of the defects, and it can provide a new effective way to identify the defects of the concrete.

Keywords

Wavelet, SSA, Entropy of information, GA, SVM

Recommended Citation

Zhao Di, Xu Zhisheng. Forestry Fire Spatial Diffusion Model Based on Integration of Multi-Agent Algorithm with Cellular Automata[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 761-766.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss4/8

第 29 卷第 4 期 系统仿真学报© Vol. 29 No. 4
2017 年 4 月 Journal of System Simulation Apr., 2017

基于多分辨率奇异熵的混凝土缺陷检测

赵迪，徐志胜
（中南大学防灾科学与安全技术研究所，长沙 410075）

摘要：针对超声波检测信号存在衰减大、指向性差、传播路径复杂，以及构成复杂的特点，*提出一种基于多分辨率奇异熵的混凝土缺陷智能无损检测算法。该算法利用小波算法，将超声波信号分解为多个尺度下的高、低频分量，针对各个分量进行奇异谱分解，同时利用信息熵理论，计算奇异熵作为缺陷检测的特征值，利用 GA-SVM 算法对奇异熵进行训练，从而达到辨识混凝土缺陷的目的。*仿真实验结果表明表明采用该方法能够有效的提升混凝土缺陷辨识的精确度，提供了一种新的辨识混凝土缺陷的有效途径。

关键词：小波变换；奇异谱分析；信息熵；遗传算法；支持向量机
中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2017) 04-0761-06
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704008

Forestry Fire Spatial Diffusion Model Based on Integration of Multi-Agent Algorithm with Cellular Automata

Zhao Di, Xu Zhisheng
(Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

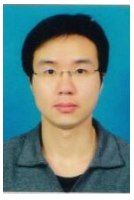
Abstract: In view of the existing ultrasonic detection signal attenuation, directional difference, complex propagation paths, and characteristics of the components of complex, *a kind of intelligent concrete defect nondestructive detection algorithm based on multi resolution singular entropy was put forward. By using the wavelet algorithm, the ultrasonic signal was decomposed into high, low frequency components of multi scales for each component, then each component was decomposed by singular spectrum analysis, at the same time using the information entropy theory, the calculation of singular entropy as the characteristic defect detection value, using the GA-SVM algorithm was used to train the singular entropy, so as to achieve the purpose of identification of defects in concrete.* The simulation results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of the identification of the defects, and it can provide a new effective way to identify the defects of the concrete.

Keywords: Wavelet; SSA; Entropy of information; GA; SVM

引言

混凝土是一种常用的建筑材料，在房屋、桥梁、隧道、水工建筑、机场、矿井以及军用工程诸多方面，应用极其广泛。在混凝土构件施工时，由于施工操作、材料配比及后期养护不当或因环境因素的影响而造成出现蜂窝、空洞、裂缝等缺陷。这些缺陷轻则影响混凝土构件的美观，重则会危及混凝土构件的使用寿命。

混凝土无损检测技术(Nondestructive Testing，NDT)，能够利用声、热、电、磁和射线等方法，在不破坏不影响结构使用性能和混凝土内部结构



收稿日期：2016-03-09 修回日期：2016-05-18；
基金项目：国家自然科学基金(51208525)；
作者简介：赵迪(1982-)，男，湖南怀化，博士生，研究方向为火灾无损检测；徐志胜(1962-)，男，山东潍坊，教授，博导，研究方向为消防工程、土木工程防灾减灾。

Published by Journal of System Simulation, 2017

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 4, Art. 8

的前提下，根据材料性能、结构质量有关的物理量的测量结果，进而确定或评价混凝土结构性能。

关于混凝土无损检测技术的研究最早开始于上世纪 30 年代，其中表面压痕法、共振法奠定了混凝土无损检测的基础，近年来，随着现代电子技术和计算机科学的发展，混凝土无损检测技术突破了原有的技术限制，引入了红外热谱、电子散斑干涉、超声脉冲回波等新技术[1-3]。其中超声脉冲回波在混凝土的内部缺陷辨识中最为具有成本低、精度相对较高的特点[4]，然而常规的超声脉冲回波混凝土无损检测方法中，反映内部缺陷的超声信号异常值从时域信号中很难发现，缺陷的具体位置和尺寸难以确定；同时采用超声检测信号在传统的在时域或频域中判断混凝土的缺陷[5]，与检测者个人的经验有很大的关系，缺陷判断方法难于标准化。

因此研究一种针对混凝土的内部缺陷检超声波信号的先进分析算法，对混凝土施工过程中的质量监控以及竣工后的质量评估都有重要的意义。

针对上述问题，本文从时域和频域的联合分布角度，将作为频域分析有效工具的小波，以及时域的奇异谱分析算法相结合，从不同分辨率提取超声波信号的奇异熵作为特征信号，并利用支持向量机(Support Vector Machine，SVM)对特征信号进行分析、学习，实现混凝土智能无损检测，从而达到缺陷识别标准化，以及提升缺陷辨识精度的目的。

1 混凝土智能无损检测的提出

超声波进行混凝土无损检测，是利用超声脉冲在混凝土中的传播特性实现缺陷辨识的。当混凝土无缺陷时，混凝土是连续体，超声波在其中正常传播，直到遇到另一个表面反射回来。而有缺陷空洞、蜂窝区存在时，混凝土连续性中断，缺陷区与混凝土之间成为声阻抗不同的界面，在该界面上，超声波传播情况发生变化，发生反射、散射与绕射，使超声波的声学参数发生变化，从而达到检测缺陷的目的。

但是声波在混凝土中的传播过程具有衰减大、指向性差、传播路径复杂，以及经混凝土介质特性调制后声波的构成复杂的特点，使超声波检测信号成为宽频带混叠的非平稳时变信号，频率成分较为复杂。同时缺陷的大小、位置不固定，难以直接从时域或频域角度描述缺陷信号的特征。

随着信息论的发展，信息熵作为一种评价系统和信号不确定程度的指标，逐渐应用于信号分析和状态监测领域，本文以信息熵作为量化缺陷信号特征，将时域、频域分析方法相结合，提出一种多分辨率奇异熵的混凝土缺陷智能无损检测算法，其原理见图 1。主要分为基于多分辨率奇异熵的缺陷特征提取，基于 GA-SVM 的缺陷智能识别两个部分。

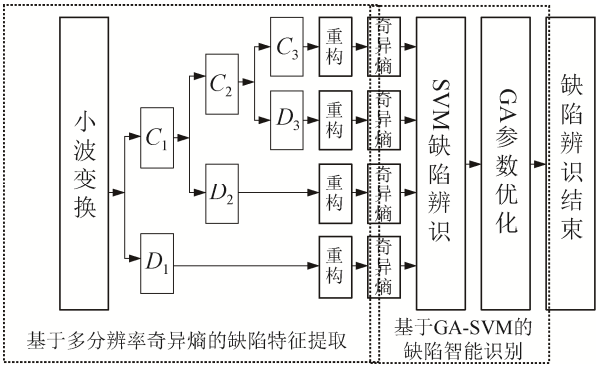


图 1 基于多分辨率奇异熵的智能缺陷识别算法

Fig. 1 Intelligent defect recognition algorithm based on multi resolution singular entropy

2 基于多分辨率奇异熵的缺陷特征提取

多分辨率奇异熵的缺陷特征提取采用超声波检测仪，具体方法为：超生测点应布置在回弹测试的同一侧区内，每一测区内布置 3 个测点。超声测试宜优先采用对测或角测，当被测构件不具备对测或角测条件时，可采用单面平测。

混凝土超声波探伤信号中蕴含着大量的时频分布信息，这些信息种类繁多、信息量巨大，无法直接作为输入特征进行后续的智能缺陷识别，目前对超声波探伤信号的特征提取方法有：一阶时间矩、一阶频率矩，以及一阶灰度矩等方法。这些方法虽然取得了一定的效果，但是提取的是时频分布中单方面信息，且容易受噪声干扰。

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss4/8
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704008

本文将小波变换的多分辨率分析能力、与奇异值分解方法的信号锐化能力相结合，从时、频域角度对信号进行分析，并利用信息熵理论实现混凝土超声波探伤信号的特征提取。

2.1 多分辨率分解

多分辨率分析(multiresolution)最早是由 S. Mallat 于 1988 年在构造正交小波基时提出的[6-7]。离散小波包变换是一种快速多分辨率的时频分析方法，针对识别超声波探伤过程中非平稳信号中的频率成分及能量时变的情况，具有良好的分析能力[8]。

原始离散探伤信号 $f(n)$ 经过尺度 $1,2,\cdots,J$ 的分解，最终分解为包含了信号从高频到低频不同频带的信息。随着分解层数的增加，可使低频和高频的成分都达到很精细的程度。

2.2 奇异谱分析

离散小波变换将混凝土超声波探伤检测信号分解为不同分辨率上的高低频分量。这些分量中依然含有大量的无关信息和噪声信息，增强了信噪比，锐化信号的奇异性。本文对各层进行重构。然后再对重构以后的时域信号进行奇异谱分析。

由于声波在混凝土中的传播过程的复杂性，超声波探伤检测信号存在随机波动，直接运用奇异谱分解，可能造成缺陷特征熵值提取结果中引入随机因素，因此构造重构延迟矩阵的延时-协变矩阵为 $\boldsymbol{T}_x$。

2.3 基于奇异熵的特征提取

按照文献[9]的奇异谱熵值公式所述方法对各层重构信号分别求出其熵值，得到 $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_J\}$，各中分辨率尺度下，熵值特征向量，共同组成了混凝土无损检测信号的特征信息。

3 基于 GA-SVM 的缺陷辨识

混凝土无损检测信号的特征，是超声波脉冲信号在混凝土样本中传播特性的集中体现，能够反映混凝土样本中缺陷尺寸、位置对超声波传播的影响。因此可以作为缺陷辨识的依据。

如何根据混凝土无损检测信号的奇异熵，精确辨识缺陷尺寸、位置是本文的关键。SVM 算法对具有小样本特征的数据具有很强的泛化能力，非常适合混凝土缺陷辨识问题。本文采用 LS-SVM，即最小二乘支持向量机，作为混凝土缺陷辨识的学习器并引入遗传算法(Genetic Algorithm，GA)对其参数进行优化。

在利用 LS-SVM 辨识混凝土缺陷信息的过程中，核函数参数 σ^2 和误差惩罚因子 C，分别影响了样本数据分布的复杂程度，以及 SVM 的经验风险比例。因此 σ^2 和 C 的选择对 LS-SVM 的性能和精度具有十分重要的作用。遗传算法具有搜索快速、易实现和计算效率高的优点，为避免经验确认 σ^2 和 C 引入的风险，本文采用 GA 对 σ^2 和 C 进行优化。实现步骤如下：

Step 1 首轮随机产生 n 组 SVM 参数染色体，组成初始种群。

Step 2 个体适应度采用适应度函数进行评估，以寻求最接近真实缺陷的 SVM 参数解作为最优个体，并将其保留至下一代种群；

Step 3 当前种群中所有个体进行交叉操作；

Step 4 检查当前种群是否符收敛条件，如果收敛条件满足，则结束优化，否则转向(Step 1)；

(1) 适应度函数

在 GA 中，为使 SVM 缺陷辨识结果的实际缺陷值偏差最小。个体适应度如下：

$$F_{\text{exact}}=\left|J_s(u)-J\right|$$

式中：$J_s(u)$ 是以 SVM 缺陷辨识模型得出的缺陷辨识值，J 是 AP 辨识结果的实际缺陷检测值。

(2) 变异策略

目前常用的变异策略中，均匀交叉变异破坏模式的概率较大，但搜索到的 SVM 参数组合较多；点式交叉变异破坏模式的概率较小，但搜索到的 SVM 参数组合较少。本文中解空间维度适中，均匀交叉会增加算法的复杂度，因此本文采用点式交叉策略。

(3) 杂交策略

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 4, Art. 8

本文采用插入式多点交叉策略：首先对父代 SVM 参数组合成的染色体进行随机选取，确定基因片段和插入点，然后将该基因相应的插入点插入另一个染色体基因片段，形成新的基因，最后删除新基因中重复的片段，得到变异后的子代染色体。

4 仿真与实验

为了验证本文方法的有效性，首先选用完好混凝土样本和有缺陷混凝土样本的超声波信号作为测试输入；其次针对基于多分辨率奇异熵的缺陷特征提取，以及基于 GA-SVM 的缺陷辨识进行仿真实验；同时为了验证本文提出算法的有效性，采用实验对比的方式，对本文提出的算法效果进行分析。

4.1 多分辨率奇异熵特征提取仿真

本文采用 MATLAB 软件分别对完好混凝土样本和有缺陷混凝土样本的超声波信号进行离散小波变换，选用 sym8 作为小波基，sym8 小波函数具有紧支集，且具有良好的连续性和对称性，因此其更适合于对连续性较好的超声波信号。并且选用的分解层数为 5 层，当分解层数取 5 时，噪声和信号表现的不同特性越明显，有利于二者的分离。变换结果如图 2 和图 3 所示。

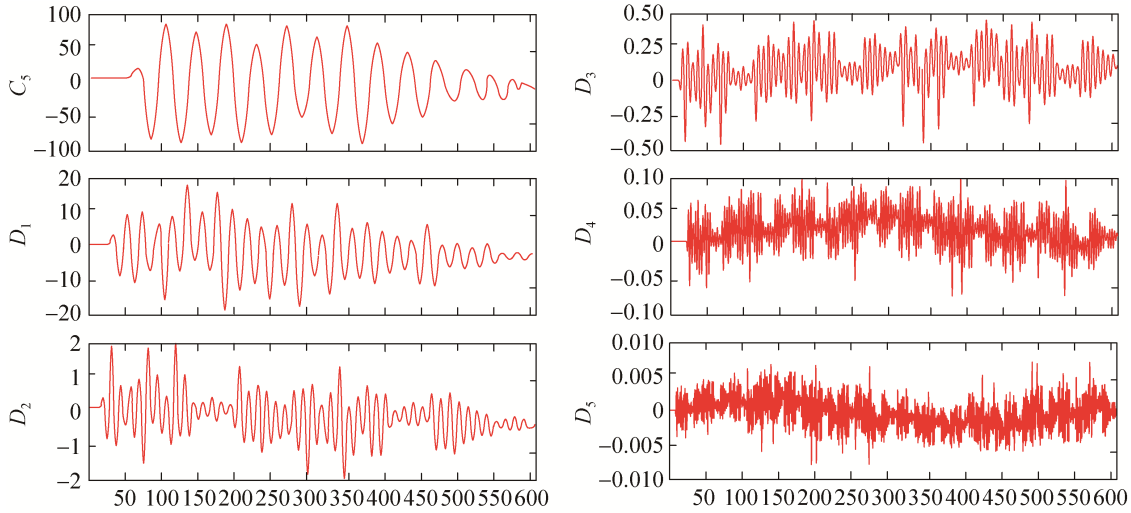


图 2 完好混凝土样本离散小波变换

Fig. 2 Discrete wavelet transform of intact concrete sample

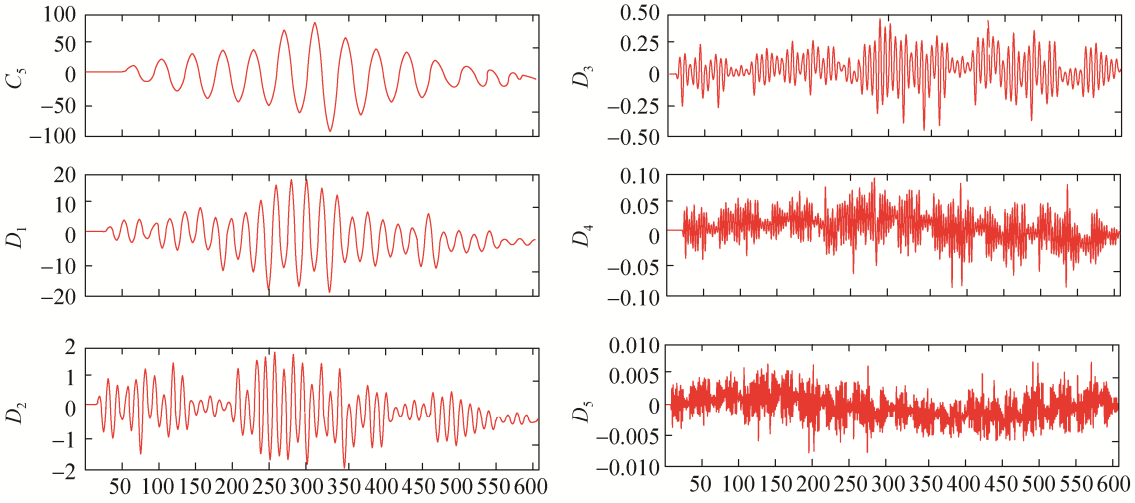


图 3 缺陷混凝土样本离散小波变换

Fig. 3 Discrete wavelet transform

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss4/8
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704008

图 2~3 中横轴为时间轴，信号长度是 512(即 512 个离散数据)，采样间隔为 1 μs；C_5 代表第 5 层的近似系数，即分解出的第三层低频信号。D1 至 D5 代表第 1 层~第 5 层的细节系数，从图中不难看出，低频部分的频率占据了原始信号的所有有效频率的 99%，两个样本的小波变换结果差异并不大。

对小波变换结果在各个尺度上进行重构和，并在不同的嵌入维度下，进行奇异熵提取，得到结果见表 1。

表 1 不同嵌入维度下的奇异熵值
Tab. 1 The singular entropy under different embedding dimensions

		HCD5	HCD4	HCD3	HCD2	HCD1
M=16	完好样本	1.89	2.23	3.11	3.56	4.02
	缺陷样本	0.83	1.02	1.08	1.13	1.23
M=32	完好样本	1.68	2.16	3.10	3.23	3.54
	缺陷样本	0.95	1.02	1.12	1.15	1.30
M=64	完好样本	1.54	2.08	2.98	2.17	3.48
	缺陷样本	0.98	1.05	1.15	1.17	1.34

表 1 中：HCD1—HCD5 分别代表小波分解后第一层到第五层多分辨率奇异熵值。从计算结果可以看出，无论完好样本，还是缺陷样本，当嵌入维度增加时，各个尺度的奇异熵趋于稳定，相比之下，嵌入维度越大，多分辨率奇异熵值包含的信息越多。同时可以看到完好样本和缺陷样本之间的奇异熵具有明显的差异。因此多分辨率奇异熵值可以定量评价信号的复杂程度，并作为辨识混凝土缺陷的有效途径。

4.2 基于 GA-SVM 的缺陷辨识仿真

本文采用 SVM 方法对混凝土缺陷的尺寸和位置进行辨识；同时采用 GA 对 SVM 的 σ^2 和 C 进行优化。GA 算法初始染色个数 N=10，染色体编码长度为 D=32，其中 σ^2 和 C 编码分别占 16 位。经过多次试验，GA 迭代计算 8 次后，模型精度提升不大，因此选择最大迭代次数为 8。

利用基于 GA 修正的 SVM 方法得到的混凝土缺陷辨识结果，辨识精度进一步提高了，如图 4 所示，随着样本数量的不断增加，GA-SVM 对缺陷的辨识精度不断提高，当样本>10 后，SVM-GA 算法的平均辨识误差能的控制在 7%以内，远好于传统的 SVM 算法的辨识结果。

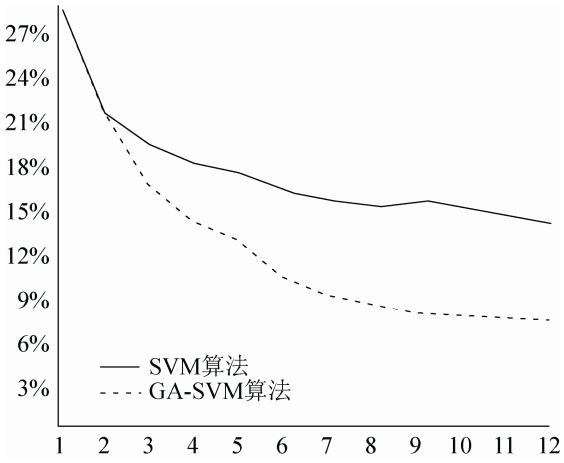


图 4 辨识模型误差对比曲线
Fig. 4 Error curve of identification model

4.3 对比实验结果分析

为了进一步说明本文算法的优势和有效性，在实验室制作了直径 1.5 m，厚 30 cm 的混凝土 200 组试块，其中 20 组为完好样本，其余为缺陷尺寸和缺陷位置随机分布的混凝土样本，抽取其中 150 组作为训练样本、50 组作为验证样本。同时采用专家分析、小波神经网络、以及本文算法进行对比实验。并采用平均绝对误差 MAE 和均方根误差指标 RMSE 对缺陷尺寸和缺陷位置的辨识精度进行评价，实验结果如表 2 所示。

表 2 混凝土缺陷辨识对别实验结果
Tab. 2 Experimental results of concrete defect identification

类型	尺寸 MAE	尺寸 RMSE	位置 MAE	位置 RMSE
专家分析	23.06%	152.5	22.4%	136.5
小波神经网络	12.45%	68.6	11.5%	72.5
本文算法	6.75%	50.4	5.64%	46.5

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 4, Art. 8

从表 2 的结果可以看出，由于将小波和奇异谱算法相结合进行熵值计算，混凝土超声波检测信号的特征更加凸显，同时基于 GA-SVM 的智能辨识方法提升了小样本数据的辨识能力，因此在样本条件相同的条件下，对 50 个混凝土验证样本进行分析，本文提出的辨识算法在在缺陷尺寸 RMSE、MAPE 以及缺陷位置的 RMSE、MAPE 四项指标远小于其它两种缺陷辨识算法。

5 结论

本文在对混凝土超声波检测信号特点充分分析的基础上，针对超声波检测信号存在衰减大、指向性差、传播路径复杂，以及经混凝土介质特性调制后声波的构成复杂的特点，提出一种基于多分辨率奇异熵的混凝土缺陷智能无损检测算法。

该算法利用小波的频域分析能力，首先将超声波信号分解为多个尺度下的高、低频分量，其次针对各个分量进行奇异谱分解，同时利用信息熵理论，计算奇异熵作为缺陷检测的特征值，最后利用 GA-SVM 算法对奇异熵进行训练，从而达到辨识混凝土缺陷的目的。

仿真实验结果表明采用本文算法能够有效的提升混凝土缺陷辨识的精确度，同时与人工经验以及小波神经网络算法相比，在缺陷尺寸 RMSE、MAPE 以及缺陷位置的 RMSE、MAPE 四项指标，占有一定的优势，从而提供了一种新的辨识混凝土缺陷的有效途径。

参考文献：

[1] 王纯纯. 无损检测技术在混凝土检测中的应用探讨[J]. 研究探讨, 2016, 25(3): 259. (Wang chunchun. Application of nondestructive testing technology in concrete testing [J]. Research, 2016, 25(3): 259.)

[2] 魏昕, 陈晨, 许英刚. 混凝土无损检测技术发展及工程应用 [J]. 教育教学论坛, 2015, 20(5): 108-109. (Wei Xin, Chen Chen, Xu Yinggang. Development and application of concrete nondestructive testing technology [J]. Education Teaching Forum, 2015, 20(5): 108-109.)

[3] 焦严令, 韩晓健, 何文俊. 冲击回波法混凝土缺陷检测的数值模拟 [J]. 江苏建筑, 2016, 15(1): 44-46, 57. (Jiao Yanling, Han Xiaojian, He Wenjun. Numerical simulating of impact echo method on the defects of concrete structure [J]. Jiangsu Construction, 2016, 15(1): 44-46, 57.)

[4] Bayagoob, Khaled H, Noorzaei. Modelling heat exchange between RCC dam and reservoir [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering and Computational Mechanics (S1353-2618), 2010, 26(5): 34-37.

[5] Williams, Sansalone, Poston R. Nondestructive evaluation of masonry structures using the impact-echo method [J]. International Journal of Masonry Research and Innovation (S2056-9459), 1997, 21(10): 41-45.

[6] 董莉娜, 胡可, 王微波. 小波消噪在 10 kV 金属氧化物避雷器在线检测中的应用 [J]. 高电压技术, 2014, 3(16): 51-55. (Dong Lina, Hu Ke, Wang Weibo. Application of Wavelet De-noise in On-line Detection of 10 kV Metal Oxide Arresters [J]. High Voltage Engineering, 2014, 3(16): 51-55.)

[7] 杨一文, 刘忠贵. 基于神经网络、多分辨分析和动力学重建理论的股市趋势预测 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 5(8): 19-23 (Yang Yiwen, Liu Zhonggui. Stock Market Trend Prediction Based on Neural Networks, Multiresolution Analysis and Dynamical Reconstruction [J]. System Engineering Theory and Practice, 2001, 5(8): 19-23.)

[8] Daisuke Sato, Laihua Xie, Zhilin Qu. Irregularly Appearing Early Afterdepolarizations in Cardiac Myocytes: Random Fluctuations or Dynamical Chaos [J]. Biophysical Journal (S0006-3495), 2010, 10(3): 56-58.

[9] 杨海博, 王海燕, 申晓红. 奇异谱技术在混沌背景下微弱信号检测中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 23(10): 101-104. (Yang Haibo, Wang Haiyan, Shen Xiaohong. Singularity spectrum method for detecting weak signals under chaotic background [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 23(10): 101-104.)

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss4/8
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704008