

模拟退火遗传算法在混凝土层析成像中的应用

孙 颖¹, 李秋锋¹, 黄丽霞^{1,2}, 马辉聪¹

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063; 2. 中兴软件技术(南昌)有限公司, 江西 南昌 330096)

摘 要:混凝土超声层析成像检测中, 成像结果的稳定性和精确性仍很难满足实际要求。针对这个问题, 提出一种基于模拟退火遗传算法的层析成像技术, 根据超声波在混凝土中的传播特点, 首先在反演算法中引入物理意义明确的自然权函数, 形成二次增广目标函数方程; 而后加入模拟退火搜索, 使层析过程加速, 并改善算法收敛性和稳定性; 最后通过多位变异自适应遗传算法计算最优反演层析成像结果。数值仿真实验表明, 由于利用了正确的先验信息, 加上遗传模拟退火算法在寻找函数极值方面具有优良的特性, 计算结果准确有效, 数值稳定, 成像结果能真实有效地反映对象内部缺陷, 分辨率得到了明显改善。

关键词:混凝土结构; 超声层析; 模拟退火; 遗传算法

中图分类号: O426.9

文献标识码: A

Application of Simulated Annealing Genetic Algorithm to CT Imaging of Concrete Structure

SUN Ying¹, LI Qiufeng¹, HUANG Lixia^{1,2}, MA Huicong¹

(1. Key Lab. of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. ZTE Software Technology (Nanchang) CO., LTD., Nanchang 330096, China)

Abstract: In ultrasonic computerized tomography (CT) imaging test of concrete structures, the stability and accuracy of the imaging results were still difficult to meet practical demands. A CT imaging technology based on simulated annealing genetic algorithm (SAGA) is presented here to solve the problems. Firstly, a natural weight matrix with clear physical meaning was introduced in the inverse algorithm to form the quadric broadening objective function according to the propagating character of ultrasound in concrete. And then the simulated annealing searching is added to speed up inverse process and improve the convergence and stability of the algorithm. And finally, the optimal inverse imaging results could be achieved by variable ectopic adaptive genetic algorithm. It is shown from numerical simulation experiment that because of contribution with the usage of the correct priori information and the excellent characteristic of the SAGA in searching the global minimum value of function, the calculated results are accurate and effective and the numerical value is stable, and the imaging results reflects the inner defections of the tested object reliably and exactly and image resolution is improved obviously.

Key words: concrete structures; ultrasonic CT; simulated annealing; genetic algorithm

0 引言

混凝土是一种多相复合材料, 已成为现代土木工程中最重要的结构材料之一, 被广泛应用于道路、桥梁、跑道、隧道和各类建筑等方面。由于施工方面原因, 混凝土结构内部可能存在空洞、松散、裂隙等各种缺陷, 混凝土的各种力学性质将受到一定影响, 进而给工程安全及使用带来隐患^[1-2]。目前随着重大工程耐久性问题引起广泛重视, 寻求合适的无损检测法对结构进行混凝土结构健康监测和无损检测成为一个日益重要的研究课题^[3]。由于层析成像技

术具有信息量丰富、准确、直观的独特优势, 因此在结构病害的无损检测领域发挥着越来越重要的作用。近年来, 层析成像技术已被用于混凝土的无损检测, 由于层析成像结果能精确直观地显示混凝土结构的内部状况, 适用于混凝土检测。现在用于混凝土结构检测的层析成像技术主要有超声波及电磁波层析成像, 另外以稳定电流场为场源的电阻率层析成像正处于初步研究阶段^[4-5]。由于受内部钢筋的影响, 电磁波 CT、电阻率 CT 技术存在着局限性, 而超声波所受影响小, 且在混凝土中传播的多参数

收稿日期: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11264032); 航空科学基金资助项目(2011ZE56006); 江西省自然科学基金资助项目(20122BAB201024); 江西省研究生教育创新基地和南昌航空大学研究生创新基金资助项目(YC2011001)

作者简介: 孙颖(1987-), 女, 硕士生, 主要从事超声检测及成像技术的研究。通信作者: 李秋锋(1976-), 男, 硕士生导师, 博士, 主要从事超声检测及检测信号处理等方面的研究。E-mail: qiufenglee@163.com。

变化特点,可根据声时间、波幅、频率等参数成像,因此在混凝土检测中得到了广泛使用^[6-7]。

超声波层析成像技术中主要包括正演计算和反演图像重建,目前,在正演计算方面,弯曲射线追踪及其改进算法已较成熟,获得了较好的路径追踪效果^[8,9]。而层析反演算法是影响图像质量的重要方面,直接决定着结果的有效性,也是当前研究的热点。对于现有的一些反演方法,在某些方面都获得了一定的实际效果,但成像结果的稳定性和精确性仍很难满足实际要求^[9-10]。本文将基于遗传模拟退火算法的层析成像技术应用于走时反演图像重建中,借以验证利用先验信息加权来改善成像质量的良好效果,并检验该算法应用于走时反演成像的准确性和稳定性。

1 模拟退火遗传反演算法

超声波层析成像是源于医学 CT 成像技术,即根据在物体外部检测到超声波信号,分析声波的实际传播路径,进而重建物体截面状况的技术。首先把被检对象检测面离散分割成单元像素,根据路径走时分别分析计算每一单元的实际声速,并形成速度分布图;然后把这一系列图像叠加起来,就可得到物体内部的图像。这是一种由数据到图像的重建技术,可通过伪彩色图像反映被测物体内部质量状况,对缺陷分析和评定,从而提高检测的可靠性^[11-12]。

通过路径正演计算可知,波速反演成像算法实质就是求解大型线性方程组,且方程组具有不相容,病态等特点,往往无法求得精确解,为便于求解方程组,需建立某种优化准则。近年来,根据最小距离准则和超声传播的先验约束准则构造自然权矩阵,形成如下二次优化增广目标函数^[10]。

$$F(x) = (T - AX)^T \cdot T^{-1} \cdot (T - AX) + \mu(X - X_0)^T \cdot D \cdot (X - X_0) \quad (1)$$

式中: A 为路径投影矩阵; X 为待求向量值; X_0 为先验模型慢度向量; T 、 D 均为对角阵, D 中对角元素值为超声穿越单元长度与其单元速度乘积。这种函数的特点是对长度小的路径加重权,增大短距离路径信息的有效性比重,对同一个像素,超声波路径穿越的次数越多,信息量越大,加重权可增大超声路径穿越多的像素的信息有效性。

遗传算法(GA)是基于自然选择和基因遗传学原理,借鉴生物学的自然选择和遗传进化机制而开发的全局优化自适应概率搜索算法,广泛应用于许

多领域中。基本 GA 在问题求解过程中首先随机产生一定个体数的初始种群,种群中每个个体基因编码表示问题可能的解,它反映问题的外部特征^[13-14]。初始种群产生后,按照遗传学物种竞争的原则从初始种群中挑选出一定数目最好的个体进化产生新的更适应问题求解的种群,如此循环直至获得合乎要求的种群或规定的迭代次数。相比于传统算法的以单个解开始搜索的过程,GA 从一个种群出发并采用随机转移规则使全局搜索过程效率更高。由于基本 GA 精度不高,只能估计极值点,本文在基本 GA 基础上改进,形成多位变异自适应遗传算法,不仅可使交叉率和变异率的取值能随适应度自动改变,当适应度一致时增加交叉率和变异率,当适应度分散时减小交叉率和变异率,且还可提高搜索精度。交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 计算公式为

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_4 & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_{\max}$ 为群体中最大适应值; f_{avg} 为群体平均适应值; f 是指父代交叉个体适应值中较大者; f' 为待变异个体适应值; k_1, k_2, k_3, k_4 为常数。

但在求解大型组合优化问题时,上述 GA 可能陷入局部最优或过早收敛,因此本文在求解过程前期加入模拟退火搜索。模拟退火(SA)最早由 Kirkpatrick 等应用于组合优化领域,它是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法。SA 算法简单,易实现,用途广泛。由于 SA 算法依据 Metropolis 准则的概率表达式为

$$P_r(i \rightarrow j) = \begin{cases} 1 & f(j) \leq f(i) \\ \exp\left(\frac{f(i) - f(j)}{t}\right) & f(j) > f(i) \end{cases} \quad (4)$$

可避免求解过程陷入局部求解中,向全局最优解所在的区域靠近,从而使反演过程加速,并改善算法收敛性和稳定性^[15-16]。本文通过将 SA 技术引入到 GA 的变异运算中,提出一种模拟退火遗传算法(SAGA)。利用 SA 技术控制遗传算法中变异的高斯分布的方差,待变异的成员按高斯概率分布函数扰动,且高斯概率分布函数的方差通过 SA 技术控制。算法主要计算步骤如下:

1) 设定初始种群、进化代和每一代中保留最优个体数,建立初始模型。

2) 设定模拟退火初始温度,当相邻两次的误差在一定限度内时,算法终止。

3) 根据 SA 算法设定搜索参数,对当前种群的每个个体进行搜索,并用搜索最优解代替当前种群的个体,直至当前种群的局部搜索完成,产生拟种群。

4) 对拟种群进行评估,确定最优向量。

5) 根据式(2)、(3)分别计算 P_c 和 P_m ,对选中向量进行重组和变异计算,获得新种群,替代当前种群,并确定下一代初始温度。

6) 当满足终止准则时,算法终止,输出最优解。否则,返回第 2)步。

2 有限元仿真实验

仿真实验是采用有限元软件 Abaqus 完成,这个软件可分析复杂的固体力学和结构力学系统,对于超声波在固体中的传播过程的建模和分析非常适用。建立的混凝土结构模型如图 1 所示。模型中各个区域处的声速安装由下式计算,即

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{(1-\delta)}{(1+\delta)(1-2\delta)}} \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量; ρ 为密度; δ 为泊松比。

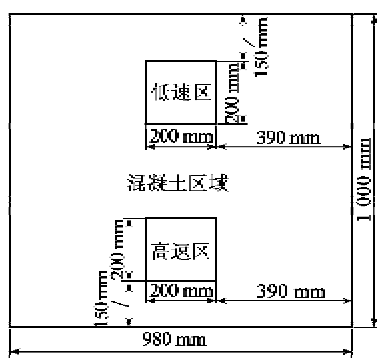


图1 ABAQUS 仿真模型

表 1 为模拟仿真中材料参数。根据表 1 中的材料参数可计算出混凝土区域声速为 3 892.7 m/s,高速区声速为 4 165.3 m/s,低速区声速为 3 869.2 m/s。

表1 模拟仿真中材料参数

模型区	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
混凝土	2 600	35 000	0.21
快速区	2 800	38 000	0.26
低速区	2 200	30 000	0.19

仿真测试方案如图 2 所示。在混凝土结构左侧激励超声信号,由上到下共 9 个激励点($T_1 \sim T_9$)。在右侧进行信号接收,也布置 9 个接收位置($R_1 \sim R_9$),总共测试 81 组走时数据。首先根据测试方案将模型划分为 9×9 像素单元,并将测试数据按照经典的弯曲射线追踪方法进行正演计算,获得声波传播路径。然后分别采用联合迭代重建技术(SIRT)和 SAGA 反演法计算各个像素单元的声速值;最后获得声速层析成像结果分别如图 3、4 所示。由图 3(a)和图 4(a)可知,每个像素单元值对应于模型相应位置的声速。由图 3(b)和图 4(b)可知,等值线图的目的为判定缺陷区域,从图 3(b)和图 4(b)中可明显分辨缺陷部位,等值线图上部分被标注出来的区域可明显分辨为低速缺陷区,图像底部被标注出来的区域可明显分辨为高速缺陷区。表 2 为两种反演算法进行数据分析。从表中数据可见 SAGA 算法计算得到的反演成像结果比 SIRT 算法准确、稳定,更接近真实声速值。

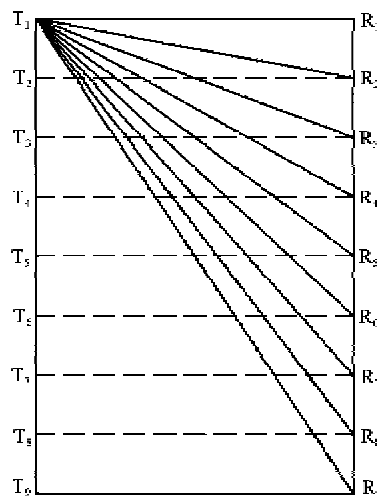


图2 信号激励与接收方式示意图

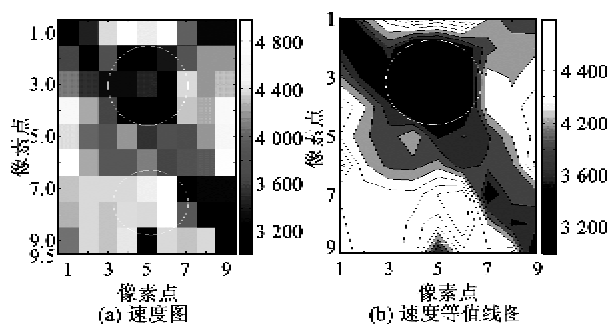


图3 SIRT 算法超声层析成像图

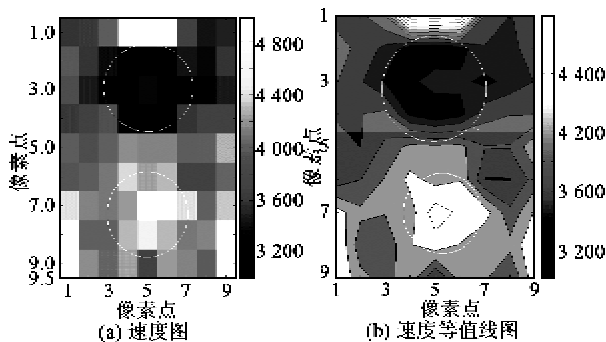


图4 SAGA算法超声层析成像图

表2 模拟试件声速反演信息

算法	模型背景 速度/(m/s)	反演背景平 均速度/(m/s)	相对真 实误差/%
SIRT 算法		4 077.1	4.74
改进模拟退 火遗传算法	3 892.7	3 840.3	1.351

算法	反演缺陷平均声速 (低/高速)/(m/s)	缺陷-背景误差 (低/高速)/%
SIRT 算法	3 923.6/4 058.7	1.41/2.56
改进模拟退 火遗传算法	3 830.2/4 196.4	1.01/0.75

3 结束语

本文针对混凝土超声层析反演成像的准确性和稳定性的实际要求,提出一种基于模拟退火遗传算法的反演图像重建技术。首先对慢度向量引入自然权矩阵进行先验约束,利用先验信息形成二次优化增广目标函数,可使反演图像惟一且稳定。而后采用模拟退火遗传算法来搜索二次优化增广目标函数的全局最优解,搜索精度得到提高。数值仿真结果表明,在同等测试条件下,SAGA反演效果比传统的SIRT法更精确,更稳定。

参考文献:

- [1] 张吉,师学明,陈晓玲,等. 超声波CT技术在混凝土无损检测中的应用现状及发展趋势[J]. 工程地球物理学报,2008,5(5):596-601.
ZHANG Ji, SHI Xueming, CHEN Xiaoling, et al. Development of ultrasonic wave computer tomography technology and its application to non-destructive detection of concrete[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(5): 596-601.
- [2] CHANG Y F, WANG C Y, HSIEH C H. Feasibility of detecting embedded cracks in concrete structures by reflection seismology[J]. NDT & E International, 2001, 34(1):39-48.
- [3] 王振宇,刘国华. 混凝土构件层析成像的试验研究[J].

土木工程学报,2005,38(6):110-114.

WANG Zhenyu, LIU Guohua. An experimental study on acoustic travel time tomography of concrete component[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(6): 110-114.

- [4] WANG H Q. Improvement and realization of linear travel-time interpolation ray tracing algorithm[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2010, 46(9):690-697.
- [5] 董清华. 混凝土无损检测中的层析成像技术[J]. 无损检测, 2006, 28(1):31-33.
DONG Qinghua. Tomographic techniques for nondestructive testing of concrete[J]. NDT, 2006, 28(1):31-33.
- [6] LI Qiufeng, SHI Lihua, LIANG Dakai. Research on 2D imaging technique for concrete cross section[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2010, 29(1):85-96.
- [7] CHAIX J F, GARNIER V, CORNELOUP G. Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media: Theoretical analysis and experimental validation[J]. Ultrasonics, 2006, 44(2):200-210.
- [8] 李秋峰,马辉聪,陈文生,等. 改进层析算法在混凝土超声成像中的应用[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(2):104-108.
LI Qiufeng, MA Huicong, CHEN Wensheng, et al. Application of improved computerized tomography algorithm in concrete ultrasonic imaging[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(2):104-108.
- [9] 刘国华,王振宇,孙坚. 弹性波层析成像及其在土木工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5):76-82.
LIU Guohua, WANG Zhenyu, SUN Jian. Elastic wave tomography and its application to civil engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5):76-82.
- [10] 黄政宇,纪学灵,黄靛,等. 基于混沌模拟退火回火算法的结构混凝土超声层析成像[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(1):1-5.
HUANG Zhengyu, JI Xuelling, HUANG Liang, et al. Ultrasonic computerized tomography for structural concrete based on chaotic simulated annealing and re-annealing algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(1):1-5.
- [11] 吕学勤,陈树果,林静. 求解0/1背包问题的自适应遗传退火算法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2013, 25(1):138-142.
LV Xueqin, CHEN Shuguo, LIN Jing. Adaptive genetic annealing algorithm of solving 0/1 knapsack[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2013, 25(1):138-142.

(下转第495页)