

基于参数转化和遗传算法的内部多缺陷识别算法的性能分析

贾文抖, 范春利, 孙丰瑞, 杨立

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 试件或设备内部缺陷的定量识别已成为红外无损检测与传热反问题领域的一个重要研究方向。针对基于表面红外测温的试件内部多缺陷的识别问题, 提出了基于参数转化思想和遗传算法的一种新的定量识别方法, 初步研究显示了对试件内部多缺陷识别的良好适用性。针对该方法, 以二维试件内部多缺陷试件为例, 从缺陷的位置、形状、数目、网格密度、测温误差等各个方面系统地分析该方法的性能。一系列数值试验验证了该方法的有效性, 证明了在各种因素影响下该算法均具有非常优越的性能。

关键词: 红外无损检测; 多缺陷识别; 遗传算法; 参数转化; 传热反问题

中图分类号: TK124, TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)09-0762-06

Performance Analysis of the Identification Method Based on Parameter Transformation and Genetic Algorithm for Multiple Inner Defects

JIA Wen-dou, FAN Chun-li, SUN Feng-rui, YANG Li

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Quantitative identification of inner defects in one test piece is a very important research content in both infrared nondestructive testing and inverse heat conduction problem. Recently, a new method, aiming to identify the multiple defects in one single test piece, and based on parameter transformation and genetic algorithm is presented by this paper, and numerical examples have been given to prove primarily the advantages of the method. In this paper, the performance of the method is systematically studied, in consideration of the position, shape, number of the defects, grid number, the temperature measurement error and etc. A series of numerical experiments prove the effectiveness of the method. Excellent performance of the method is shown though under the influence of these factors.

Key words: infrared nondestructive inspection, multi-defect identification, genetic algorithm, parameter transformation, inverse heat conduction problem

0 引言

近年来, 红外无损检测由于非接触、无损伤、无射线伤害、适合大面积检测等优势在石油化工、电力机械、航空航天等领域都取得了非常广泛的应用^[1-4]。随着红外热像仪精度的不断提高, 零件和工业设备^[2]内部缺陷的定量检测与识别也成为了一个研究的热点, 其在一些关键零件或设备(部位)的质量控制、在线检测以及机械设备维修过程中都具有非常重要的意义。

红外无损检测是依据物体表面的温度分布特征来

诊断物体内部的缺陷信息。目前, 缺陷的定量识别已成为红外无损检测技术发展的一个新的研究方向, 而导热反问题理论则是开展缺陷定量诊断与识别的理论基础。

由于反问题计算具有不适定性、非线性、计算量大等难点, 针对缺陷定量识别的算法研究进展相对缓慢。目前, 发展的主要算法有 Levenberg-Marquardt 法^[4-5]、共轭梯度法^[2,5]、最速下降法^[6]、一维修正算法^[7]及改进的一维修正算法^[8-9]等。针对不同类型的缺陷边界, 这些算法的主要思想就是通过边界搜索, 找到使得检测表面温度和测量温度分布最吻合的边界作

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2014-08-20.

作者简介: 贾文抖(1990-), 男, 汉族, 硕士生, 主要从事缺陷红外诊断方面的工作。E-mail: jiawd163@163.com.

通讯作者: 范春利(1978-), 男, 汉族, 副教授, 主要从事导热反问题及红外无损检测方面的研究工作。E-mail: chlfan@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金, 编号: 50906099.

为识别算法的解。

目前,对于内部缺陷的研究,大多集中在单个缺陷的识别问题上。对于试件内部存在多个、不规则缺陷的识别问题,目前还少有报道。Huang^[6]针对试件内部3个缺陷的识别进行了研究。然而,在该研究中,试件内部缺陷的个数是已知的,并且要知道缺陷的大概位置和形状,从而可以给出一个比较精确的初始假设,此外,文中温度测量点也取在试件内部距离缺陷边界较近的位置。所有这些条件在实际的缺陷检测与识别过程中都是未知的或是难以施行的。因此,该算法无法应用到实际的红外无损检测工作中来。基于表面测温,对试件内部个数、形状、位置均未知的多缺陷进行识别的研究,目前国内外还未见报道。为此,我们在近期研究工作中提出了基于参数转化思想和遗传算法的内部多缺陷识别方法^[10]。该方法将缺陷的识别问题转化为试件内部导热系数分布的识别问题,进而利用遗传算法对代表缺陷、非缺陷的0-1分布的全局寻优能力^[11-12],来间接地得到缺陷的形状和分布。该方法大大降低了缺陷识别计算的复杂性,使得多缺陷识别成为可能。初步的数值实验结果证明了该算法在求解多缺陷识别问题中的有效性。然而,该研究还停留在初步阶段,对算法的识别性能、影响因素等还缺乏系统的分析和讨论。

本文在原有研究的基础上,以带有内部缺陷的二维试件为例,通过分析试件内部的传热机理,系统地分析缺陷的位置、大小、形状、网格密度以及温度测量误差等因素对识别算法计算结果的影响,从而对该算法进行系统全面的分析和评估。

1 数理模型的建立

本文所研究缺陷试件的二维模型如图1所示。试件为正方形,内部缺陷以黑色表示。对该模型的假设如下:

- 1) 稳态传热;
- 2) 试件和缺陷部分的导热系数各自均匀分布(其可行性分析见^[10]);
- 3) 缺陷和试件材料交界面处的温度 T 、热流 q 分别相等;
- 4) 四周边界条件为对流换热,上边界和左边界加热,下边界和右边界散热。

依据试件、缺陷参数以及边界条件等求解检测表面(本模型中,检测表面为正方形试件的4个外边界)的导热微分方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

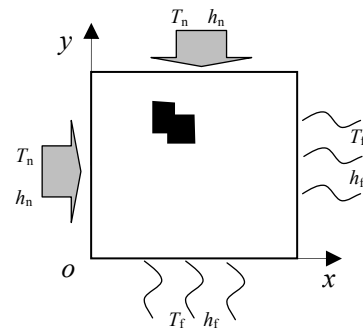


图1 二维试件示意图

Fig.1 Schematic of two-dimensional test-piece

边界条件:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{x=0} = -h_n(T_n - T) \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{x=L_x} = -h_f(T - T_f) \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=0} = -h_f(T_f - T) \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=L_y} = -h_n(T - T_n) \quad (5)$$

试件 x 、 y 方向尺寸为 $L_x=L_y=0.4$ m。试件导热系数 $\lambda_1=1.5 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$;缺陷部分导热系数 $\lambda_2=0.03 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$;加热和散热侧表面传热系数分别为 $h_n=40 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ 和 $h_f=10 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$;流体温度 $T_n=200^\circ\text{C}$; $T_f=25^\circ\text{C}$ 。

缺陷识别的导热反问题描述为:在已知试件形状、物性、边界条件的情况下,依据检测表面的温度分布来对试件内部缺陷的大小、形状和位置等参数进行识别。

2 求解方法的描述

2.1 参数转化思想

参数转化思想是将缺陷的识别问题转化为有效导热系数分布的识别问题。如图2所示,数字1代表该区域试件材料的导热系数为 λ_1 ,数字0代表该区域缺陷的导热系数为 λ_2 ,这样只需设定适当的目标函数,采用适当的最优化算法得到最优的0-1分布,便可以得出内部缺陷的分布情况。

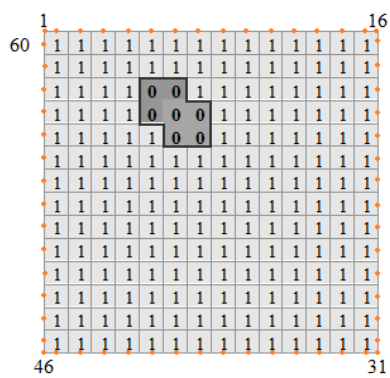


图2 网格划分下的导热系数分布

Fig.2 The conductivity distribution to be identified

2.2 遗传算法

作为一种人工智能算法,遗传算法具有自组织性、自适应性、自学习性;本质并行性;计算时无需辅助信息等优点,使得该方法在求解工程应用中的反问题时具有独特的优势。尤其对于本文的 0-1 序列分布进行识别更具优势。遗传算法的 3 个基本操作:

1)选择:选择操作是从当前种群选出优良的个体,使它们作为父代繁殖下一代个体,体现了达尔文的适者生存的原则;

2)交叉:交叉是遗传算法中最重要的遗传操作,通过交叉操作可以得到下一代个体,下代个体组合了父代的特性,交叉体现信息交换的思想;

3)变异:变异操作是对从种群中随机选择的个体以一定的概率随机地改变基因组上的某个基因,变为其等位基因,变异为新个体的产生提供了机会。

基本遗传算法可以表示为:

SGA {C,f,P₀,M,Φ,Γ,ψ,MG}

式中: C 为个体编码方式; f 为个体适应度评价函数; P₀ 为初始种群; M 为种群大小; Φ 为选择算子; Γ 为交叉算子; ψ 为变异算子; MG 为算法终止条件。

文中采用二进制编码,种群数选为 4,子种群中个体数目为 60,选择率为 0.8,离散重组的交叉概率为 1,变异率选为 0.7/Lind (这里 Lind 代表染色体的长度),每进化 20 代在种群间迁徙一次,即在各种群间按一定的规则交换一定数目的个体,迁徙率为 0.2。

2.3 后处理方法的利用

2.3.1 多次识别统计

在计算中发现遗传算法易出现早熟现象,从而收敛到局部较优解,为克服这一不足,采取多次识别,设定阈值,对识别结果进行统计处理:

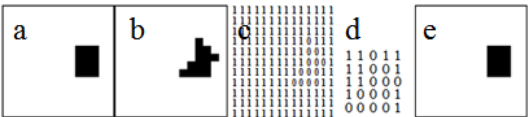
$$R(i,j)=\sum_{k=1}^N R_k(i,j) \tag{6}$$

$$R_n(i,j)=\begin{cases} 1 & R(i,j)\geq \frac{2}{3}N \\ 0 & R(i,j)< \frac{2}{3}N \end{cases} \tag{7}$$

式中: N 是识别次数; R_k(i,j)是单次识别结果的 0-1 分布; R(i,j)是 N 次结果对应位置的 0-1 分布之和; R_n(i,j)是统计后的 0-1 分布; 2/3N 是设定的阈值。

2.3.2 缩小范围二次识别

通过研究发现初次识别能够找到缺陷的大致位置,所得结果往往是一种近似解,为了提高识别精度,在初次识别的基础上,缩小识别范围(选取为能包括所有缺陷的最小的矩形区域),进行二次识别。图 3 为某次识别过程,(a)是真实缺陷;(b)是初次识别结果;(c)是初次识别对应的 0-1 数组分布;(d)是选取的二次识别的区域;(e)为最终的识别结果。可以看出,缩小范围二次识别,有助于提高识别的针对性和精确性,避免计算资源的浪费。

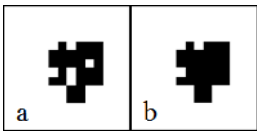


(a) 缺陷形状; (b) 初次识别结果; (c) 初次识别结果的 0-1 分布; (d) 缩小范围的 0-1 分布; (e) 二次识别结果
(a) defect geometry; (b) initial identification result; (c) 0-1 distribution of initial result; (d) downsized 0-1 distribution; (e) new result after secondary identification

图3 二次识别过程

Fig.3 Secondary identification process of defect geometry

对于二维识别问题,识别结果中有时会出现如图 4(a)所示的结果,因为缺陷(黑色区域)中间被架空的试件部分(白色区域)几乎是不可能存在的,应将被包围的白色部分转化为缺陷,如图 4(b)所示,就像围棋中被包围的棋子被对方吃掉一样。



(a) 初始识别结果; (b) 围棋规则处理后的结果
(a) original identification; (b) new result based on go rule

图4 围棋规则 Fig.4 Go rule

2.4 收敛条件

通过遗传算法识别试件内部 0-1 分布的两个迭代收敛条件如下(当计算满足任意一个条件即停止计算):

1) 所测温度与计算温度相吻合

由于边界测温点序列中 T_i (1≤i≤m, m 为表面测

温点数目) 数目较少, 为了提高识别精度, 人为添加不同温差序列 $\tilde{T}_i T_j (i \neq j)$ 到测温序列 T 中, 得到温度序列 D :

$$D\{T_1, T_2, \dots, T_m, \tilde{T}_2 T_1, \tilde{T}_3 T_1, \dots, \tilde{T}_m T_1, \tilde{T}_3 T_2, \tilde{T}_4 T_2, \dots\} \quad (8)$$

由此, 收敛判断条件为:

$$f(D_i^k) = \sum_{i=1}^m [D_i^k - D_{oi}]^2 < \varepsilon \quad (9)$$

其中, 当不考虑测温温差时, ε 是一个任意小的正数; 当考虑温差时, $\varepsilon = m\sigma^2$, m 为测温点数目, σ 是温度测量的平均标准偏差。

2) 最大进化代数:

本文算例最大进化代数设置为:

$$MG = 350 \quad (10)$$

3 算法流程

利用遗传算法初始化函数随机产生种群大小为 M 的二进制 0-1 数组作为初始种群 P_0 。按下面计算流程寻求最优的 0-1 分布:

1) 对父代种群 P_i , 计算出种群的适应度 f_i ;

2) 在父代种群 P_i 中依次进行选择、交叉重组、变异等操作生成子代候选群体 P'_i , 并计算群体 P'_i 的适应度 f'_i ;

3) 基于适应度大小按一定的比例将种群 P'_i 重插入到 P_i 中, 得到子代种群 P_{i+1} ;

4) 判断是否满足迁徙条件, 若满足, 则进行迁徙操作, 否则继续到下一步;

5) 判断是否满足收敛条件(9)或(10), 若满足, 则计算结束, 否则返回到步骤 2) 继续。

计算结束后, 依据最优的 0-1 数组在试件网格上的位置分布, 即可得到缺陷的分布情况。

4 实例计算及分析

本节以第 1 节中所描述的二维方形试件为例进行数值算例的求解, 依据网格无关性试验确定试件网格密度划分为 14×14 , 测温点分布如图 2 所示, 在边缘网格外边界中点和试件角点布置测温点, 按顺时针顺序编号, 第一个测温点位于左上角, 共 60 个测温点。

实际测温中, 表面温度必含有测量误差。本文通过在精确的温度计算结果中添加随机误差值来模拟真实的温度测量值:

$$Y_i = T_{oi} + \omega_i \times \sigma \quad (11)$$

式中: T_{oi} 代表真实缺陷下试件表面温度分布计算值; ω_i 是介于 -1 和 1 之间的随机数序列中的一个元素; σ 代表了温度测量的平均标准偏差, 取为表面平均温度

(约为 132°C) 1% 以内。

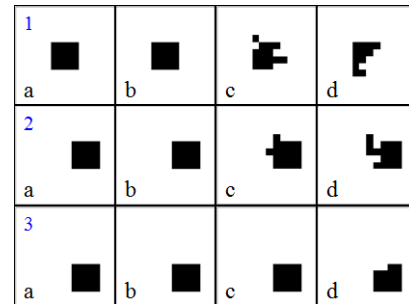
识别结果误差采用下式进行描述:

$$e_{\text{ARE}} = \frac{N_d}{N_u} \times 100\% \quad (12)$$

式中: N_d 为识别错误的网格数; N_u 试件离散后包含的总的网格数。

4.1 算例 1: 不同位置缺陷的识别

同一缺陷位于试件内 3 个不同位置时, 识别结果如图 5 所示, 其中, 1、2、3 分别代表缺陷在试件的中间、靠近一边和靠近一角 3 种情况。每个算例中(a)代表实际缺陷, (b)、(c)、(d)分别是在随机温差为 σ 为 0°C 、 0.5°C 、 1.0°C 时的识别结果; 表 1 列出各自的识别误差; 图 6 是 σ 为 0°C 时, 各缺陷引起的表面温度变化的曲线图。



(a) 真实缺陷; (b) $\sigma=0^\circ\text{C}$; (c) $\sigma=0.5^\circ\text{C}$; (d) $\sigma=1.0^\circ\text{C}$

(a) true defect; (b) $\sigma=0^\circ\text{C}$; (c) $\sigma=0.5^\circ\text{C}$; (d) $\sigma=1.0^\circ\text{C}$

图 5 算例 1 识别结果

Fig.5 Identification results of numerical case 1

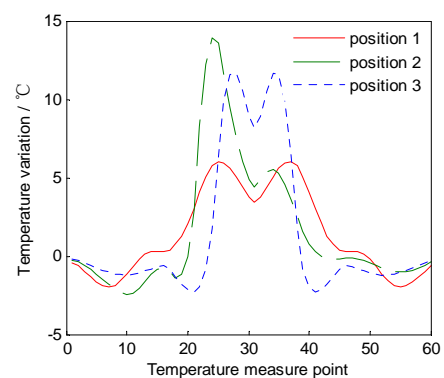


图 6 测温点温度变化

Fig.6 Temperature variation of measurement point

由图 5 可知, 在所考虑的随机温差范围内, 各处缺陷的位置均能准确地识别出来, 缺陷的形状也都能比较清楚地识别出来; 尤其是缺陷位于位置 3 (靠近角落) 处时, 对缺陷的位置、形状均能做出精确的识别, 在测温误差 $\sigma=1.0^\circ\text{C}$ 时, 识别误差仅有 1.02%, 优于另外两种位置下的识别结果。这是因为当缺陷靠

近试件角落时，由缺陷存在引起的表面温度变化最为明显（如图6所示），使得缺陷信息充分体现在检测表面的温度分布上，因而容易识别。此外，对同一位置处的缺陷，随着随机温差的增加，识别误差也随之加大，但最大识别误差仍能控制在4.08%以内，识别效果较好。

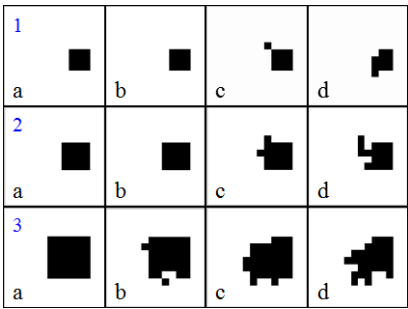
表1 算例1识别结果的平均相对误差

Table 1 Average relative errors of case 1			
Random temperature error $\sigma/^{\circ}\text{C}$	Average relative error $e_{\text{ARE}}/(\%)$		
	Position 1	Position 2	Position 3
0	0	0	0
0.5	2.55	1.02	0
1.0	4.08	2.55	1.02

4.2 算例2：不同大小缺陷的识别

靠近试件右侧边界设置3个大小不同的缺陷，在不同随机温差下识别结果如图7所示，其中(a)代表实际缺陷，(b)、(c)、(d)分别是在随机温差为 $\sigma=0^{\circ}\text{C}$ 、 0.5°C 、 1.0°C 时的识别结果，识别误差在表2中列出，图8是在 $\sigma=0^{\circ}\text{C}$ 时，各缺陷引起的表面温度变化的曲线图。

从图7可以看出在所考虑的温差范围内，识别结果均都能准确给出大小不同的缺陷的位置，缺陷的形状也能较好地识别。缺陷较小时对形状的识别好于缺陷较大时，这是因为缺陷小时所影响到的表面温度变化集中分布在较小的区域（如图8所示），内部缺陷的信息反映集中，易于识别；而缺陷较大时，缺陷的存在对于整个试件的表面温度都产生影响，缺陷信息在表面温度上的反映相对分散，边界形状描述的准确性下降。此外，识别精度受随机测温误差影响，随机误差越大，识别误差也越大，这是因为测温误差使原来的温度变化量产生了不同程度的随机波动，识别结果也会发生一定的偏离。



(a) 真实缺陷；(b) $\sigma=0^{\circ}\text{C}$ ；(c) $\sigma=0.5^{\circ}\text{C}$ ；(d) $\sigma=1.0^{\circ}\text{C}$
(a) true defect; (b) $\sigma=0^{\circ}\text{C}$; (c) $\sigma=0.5^{\circ}\text{C}$; (d) $\sigma=1.0^{\circ}\text{C}$

图7 算例2识别结果

Fig.7 Identification of numerical case 2

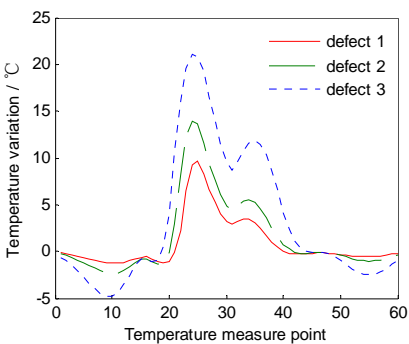


图8 缺陷引起的测温点温度变化

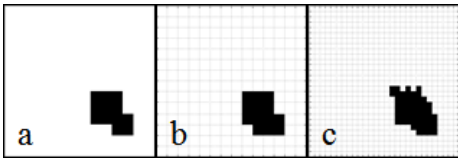
Fig.8 Temperature variation of measurement points

表2 算例2平均相对误差

Table 2 Average relative error of case 2			
Random temperature error $\sigma/^{\circ}\text{C}$	Average relative error $e_{\text{ARE}}/(\%)$		
	Defect 1	Defect 2	Defect 3
0	0	0	2.04
0.5	0.51	1.02	3.57
1.0	1.02	2.55	5.61

4.3 算例3：不同网格密度下的缺陷识别

对于同一个缺陷，分别考虑 14×14 和 28×28 两种网格密度，图9中(a)是真实缺陷，(b)是在 14×14 网格密度下的识别结果，(c)是在 28×28 网格密度下的识别结果。表3中列出了各自的识别误差。



(a) 真实缺陷；(b) 14×14 网格；(c) 28×28 网格
(a) true defect; (b) 14×14 grids; (c) 28×28 grids

图9 算例3识别结果

Fig.9 Identification of numerical case 3

表3 算例3平均相对误差

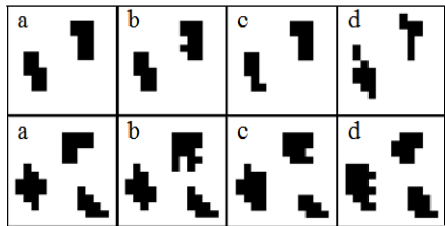
Table 3 Average relative error of case 3	
Mesh density	Average relative error $e_{\text{ARE}}/(\%)$
(b) 14×14	0.51
(c) 28×28	1.15

网格数加密到原来的4倍时，在进化150代中，计算时间由原来的223.6s增加到1882.7s，耗时变为原来的8.4倍，远大于网格加密的倍数4。由图9可知，在不同的网格密度下都可以比较准确地识别出缺陷的位置和大致形状，但稠密网格密度下的识别精度略有下降，之所以出现这种现象，是因为网格加密后直接导致计算过程中每条染色体上基因数目变大，寻优的

空间范围呈指数关系急剧增加, 且遗传算法寻优本身具有一定的随机性, 考虑到计算时间的消耗, 在不增加进化代数的情况下出现网格加密识别精度略有下降的现象是正常的, 因此, 我们认为在稀疏和稠密网格下, 算法都是适用的。

4.4 算例 4: 不同数目的多缺陷识别

在试件中设置不同数目的复杂型缺陷, 图 10 中(a)是真实缺陷, (b)、(c)、(d)分别是在测温误差 σ 在 0℃、0.5℃、1℃时的识别结果, 识别误差见表 4。



(a) 真实缺陷; (b) $\sigma=0^{\circ}\text{C}$; (c) $\sigma=0.5^{\circ}\text{C}$; (d) $\sigma=1.0^{\circ}\text{C}$
(a) true defect; (b) $\sigma=0^{\circ}\text{C}$; (c) $\sigma=0.5^{\circ}\text{C}$; (d) $\sigma=1.0^{\circ}\text{C}$
图 10 算例 4 识别结果

Fig.10 Identification results of numerical case 4

表 4 算例 4 平均相对误差

Table 4 Average relative error of case 4		
Random temperature error $\sigma/^{\circ}\text{C}$	Average relative error $e_{\text{ARE}}/(\%)$	
	Two defects	Three defects
0	0.51	4.08
0.5	1.02	4.08
1.0	5.1	6.12

由图 10 可知, 在不同数目缺陷的识别中, 对缺陷的数目及位置可以做出准确的判断, 缺陷的形状也能较好的识别出来; 缺陷数目越多, 识别误差也就越大, 这是由于多个缺陷的存在综合影响表面温度的分布, 且这种影响结果也并非各个缺陷单独存在时产生影响的简单叠加, 这使得识别难度进一步增加, 识别结果误差增大。此外, 识别结果还受测温误差的影响, 随着随机温差的增加, 识别误差也逐步变大, 在温差达到 1℃时, 识别的误差为 6.12%, 识别结果仍比较精确。

5 结论

通过多个算例对参数转化结合遗传算法识别内部缺陷的方法进行了系统地分析和讨论, 证明了该方法的有效性和高效性。主要结论如下:

1) 当缺陷数目、位置及大小等参数未知时, 该方法具有较好的识别效果, 对缺陷的多参数同时进行识

别, 识别误差不超过 7%。

2) 在所考虑的不同温度测量误差范围内, 对内部缺陷的识别均能获得满意的结果, 尤其是对缺陷的数目和位置判断准确, 受测温误差的影响很小, 缺陷形状的识别受随机温差影响相对较大, 但仍然比较精确。

3) 识别中, 网格划分的密度对识别结果的影响相对较小, 但是对计算的耗时影响较大, 因此在划分网格时应同时考虑计算的精度、计算耗时以及对复杂缺陷本身描述的合理性, 做出合理的选择。

参考文献:

[1] 金光熙, 徐丹, 潘凤红. 红外热像技术在石化热设备热损检测上的应用[J]. 红外技术, 2009, 31(11): 668-671.

[2] 范春利, 孙丰瑞, 杨立. 边界形状的红外识别算法[J]. 化工学报, 2010, 11(61): 2783-2788.

[3] 陈林, 杨立, 范春利, 等. 红外锁相无损检测及其数值模拟[J]. 红外技术, 2013, 35(2): 119-122.

[4] 范春利, 孙丰瑞, 杨立, 等. 电气设备零件内部三维缺陷的定量红外识别算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 159-164.

[5] Huang C H, Chao B H. An inverse geometry problem in identifying irregular boundary configurations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(9): 2045-2053.

[6] Huang C H, Chaing C C. Shape identification problem in estimating geometry of multiple cavities[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, 12(2): 270-277.

[7] Yang L J, Geng W Z, Jiang L Z, et al. Profile reconstruction in dynamic infrared thermography: adaptability and stability[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 20(4): 623-634.

[8] Fan C L, Sun F R, Yang L. An Algorithm Study on Inverse Identification of Interfacial Configuration in a Multiple Region Domain[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2009, 131: 021301.

[9] 曹明宇, 范春利, 王文栋. 基于有效导热系数法的交界面形状识别算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 4(9): 2305-2312.

[10] 曹明宇. 基于红外测温技术的内部缺陷形状识别的算法演究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2012.

[11] Mera N S, Elliott L, Ingham D B. Detection of subsurface cavities in IR-CAT by a real coded genetic algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2002, 2: 129-139.

[12] 梅林, 吴立德, 王裕文. 一种基于遗传算法的红外无损检测缺陷的新方法[J]. 光学学报, 2002, 22(12): 1452-1456.