

## 采用混沌-LM 混合解法的材料缺陷单面红外检测定量辨识

吕事桂, 杨立, 范春利, 王为清

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 针对缺陷定量辨识的非线性、不适宜性提出了采用混沌-LM(Levenberg-Marquardt)混合解法结合单面红外检测技术对缺陷进行定量辨识的新算法, 并提出了相对敏感系数分析缺陷可检测性的新概念。通过相对敏感系数分析发现, 缺陷尺寸、位置的不同描述参数的可检测性并不相同, 而且采用检测面达到最大温差时刻点的瞬态检测比稳态检测更具优越性。文中采用数值实验对瞬态和稳态检测均进行了检验, 实验结果与相对敏感系数分析结论一致。此外, 数值实验还证明了混沌-LM 混合解法的有效性, 表明了辨识结果的稳定性和全局最优性。

**关键词:** 传热反问题; 缺陷辨识; 混沌算法; Levenberg-Marquardt 法; 红外检测; 全局最优  
**中图分类号:** TK38   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0317-07

## Material defect quantitative identification with single-side infrared inspection based on Chaos-LM hybrid algorithm

Lv Shigui, Yang Li, Fan Chunli, Wang Weiqing

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

**Abstract:** In order to overcome the difficulty of nonlinearity and ill-posedness of the defect quantitative identification with the single-side infrared inspection, a new algorithm(Chaos-LM hybrid algorithm), which combined the chaos algorithm with the Levenberg-Marquardt method, was introduced in this paper. And a new concept of relative sensitivity coefficient was also brought forward to analyze the defect inspectability. Through analyzing the relative sensitivity coefficient, it was found that the inspectability of different parameters describing the size and position of the defect was different, and the inspection carried out at the time with maximum surface temperature difference was more desirable than that in steady heat transfer state. Both of the transient and steady inspections were tested by a series of numerical experiments, and the experimental results are consistent with the analysis of relative sensitivity coefficient. Besides, the numerical experiments have certified the effectiveness of the Chaos-LM hybrid algorithm, and show that the identification results are stable and globally optimal.

**Key words:** inverse heat transfer; defect identification; chaos algorithm;  
Levenberg-Marquardt method; infrared inspection; global optimum

收稿日期: 2012-06-15; 修订日期: 2012-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(50906099)

作者简介: 吕事桂(1986-), 男, 博士生, 主要从事红外检测与故障诊断方面的研究。Email: shiguilv@hotmail.com

导师简介: 杨立(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事热物理测量技术与设备红外检测方面的研究。

Email: liyang39@hotmail.com

## 0 引言

红外热成像无损检测技术(IRNDT)具有非接触、快速、检测范围大、温度分辨率高等优点,已在金属、陶瓷、复合材料等的无损检测中得到了广泛的应用并取得了显著的成果<sup>[1]</sup>。传统的红外检测诊断方法有表面温度判断法、相对温差判断法、同类比较法、热谱图分析法、档案分析法等<sup>[2-3]</sup>,这些检测诊断方法多为参照已有标准对检测物体作出定性故障判断,其诊断结果具有一定经验性,势必影响故障判断的可靠性。因此,有必要加强红外无损检测技术从定性到定量转变的研究,使目前基本上处于经验层次的红外热像检测诊断技术逐步上升为具有完整理论体系的红外热诊断学。

材料内部缺陷是一种常见的故障模式,其定量辨识问题本质上是一个导热反问题,于慧等人从理论上证明了利用红外检测技术与导热反问题相结合的方法对设备内部缺陷进行定量诊断的可行性<sup>[4]</sup>。随着传热反问题理论不断发展,目前很多算法得到了发展和应用,主要有遗传算法<sup>[5]</sup>、内部匹配算法<sup>[6]</sup>和数值搜索算法<sup>[7]</sup>等。其中 Levenberg-Marquardt(LM)算法因求解思路简单、收敛速度较快,在材料缺陷辨识上得到了较广应用<sup>[8]</sup>,但由于缺陷定量辨识的非线性、不适定特点,检测面温度与内部缺陷的映射关系是非凸的,具有多极值性,在没有足够多先验信息给出好的待辨识参数初始假设时,采用 LM 算法求解不能保证全局收敛性。范春利等采用 LM 算法对矩形内部中心缺陷的尺寸、方位等进行了双面法红外检测定量辨识研究,在保证待辨识参数初始假设在其真实值附近的前提下,分析了测温误差对整体识别相对误差的影响<sup>[9]</sup>,这种给定辨识参数初始假设范围的材料缺陷定量辨识在实际运用上存在一定的局限性。混沌是存在于非线性系统中的一种较为普遍的现象,其运动具有遍历性,在一定范围内按其“自身规律”不重复地遍历所有状态,因此,利用混沌变量进行优化搜索能够跳出局部最优解,但是某些状态需要很长时间才能达到,如果最优值在这些状态时,计算量很大。目前,有关利用混沌进行优化的研究还较少,参考文献[10]联合采用混沌优化算法和梯度正则化方法求解了材料热传导系数随温度

的变化规律,结果表明其计算量远比经典遗传算法和单纯采用混沌优化方法小。另外,前人材料缺陷定量辨识的研究多局限于稳态单一情况,缺乏对稳、瞬态定量辨识以及缺陷不同方位描述尺寸可检测性的比较研究。

文中在前期研究的基础上<sup>[9]</sup>,将恒温冷却单面红外检测方法应用于材料内部矩形缺陷的定量辨识中,综合考虑 LM 算法快速收敛和混沌优化算法全局最优解的优点,采用混沌-LM 混合解法解决了定量辨识对待辨识参数初始假设的依赖性,同时针对前人研究的局限性,通过数值模拟实验比较分析了稳瞬态红外检测缺陷定量识别的优劣性及缺陷不同方位描述尺寸的可检测性。

## 1 单面红外检测物理数学模型

主动式红外检测通过对被测目标施加冷或热激励,使其失去热平衡并在内部温度尚不均匀、具有导热的过程中即进行检测。单面红外检测是主动式红外检测的一种,它对被测目标的冷或热激励施加和红外检测均在被测目标的同一侧进行。文中以内部带有矩形缺陷的二维试件为研究对象,在红外检测面采用恒温冷却对流换热为冷激励模式对试件进行冷却,与红外检测面相对的另一面与环境间进行自然对流换热,记录检测面达到最大温差即热特征最为显著时的温度分布,并以此对内部缺陷进行定量辨识。试件的检测示意图如图 1 所示,试件  $x$ 、 $y$  方向的尺寸分别为  $L_x$ 、 $L_y$ ,表面  $y=0$  及  $y=L_y$  为绝热面, $x=0$  及  $x=L_x$  为对流换热面,其中  $x=0$  表面既为恒温冷却面也是红外检测面。

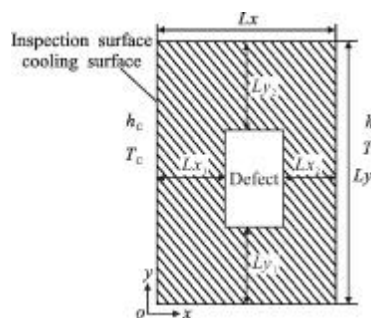


图 1 带缺陷试件的检测示意图

Fig.1 Inspection schematic of test piece with defect

试件和缺陷内部的二维传热方程为:

$$\rho c = \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

初始边界条件:

$$\begin{cases} T = T_0 (\tau = 0) \\ h_c (T_c - T) = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} (\tau \geq 0, x = 0) \\ h_s (T - T_s) = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} (\tau \geq 0, x = Lx) \\ -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} = 0 (\tau \geq 0, y = 0, y = Ly) \end{cases} \quad (2)$$

式中:对于试件中无缺陷区域和缺陷区域,导热系数  $\lambda$  分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ; 密度  $\rho$  分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ; 比热容  $c$  分别为  $c_1$  和  $c_2$ ;  $T_0$  为试件冷却的初始温度;  $h_c$ 、 $T_c$  分别为检测表面  $x=0$  处的对流换热系数及冷却介质温度;  $h_s$ 、 $T_s$  ( $T_s > T_c$ ) 分别为  $x=Lx$  表面与环境间的自然对流换热系数及环境温度。矩形缺陷的尺寸大小及位置可通过  $Lx_1$ 、 $Lx_2$ 、 $Ly_1$ 、 $Ly_2$  参数确定。

## 2 LM-混沌混合求解方法

导热反问题通常是通过优化算法使得目标函数  $S(P)$  最小化进行求解:

$$S(P) = [Y - T(P)]^T \cdot [Y - T(P)] = \sum_{i=1}^m [Y_i - T_i]^2 \quad (3)$$

式中:  $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  是待辨识参数向量,对于缺陷定量辨识,  $P = (Lx_1, Lx_2, Ly_1, Ly_2)$ ;  $Y_i$  为试件检测面离散温度测量值;  $T_i$  为辨识参数向量  $P$  对应测温点处的真实温度;  $m$  为测温点数。

目标函数  $S(P)$  达到最小化时,优化算法满足的迭代收敛条件为:

$$S(P) < \varepsilon \quad (4)$$

式中:当不考虑测温误差时,  $\varepsilon$  为很小的正数;当考虑测温误差时,  $\varepsilon = m\sigma^2$ ,  $\sigma$  为测温误差的标准差,  $m$  为测温点个数。

### 2.1 LM 优化算法

通过对公式(3)两边求导得目标函数  $S(P)$  最小化的条件:

$$\nabla S(P) = 2 \left[ -\frac{\partial T(P)}{\partial P} \right] [Y - T(P)] = 0 \quad (5)$$

对于非线性定量辨识反问题,公式(4)通过对  $T(P)$  泰勒级数展开去掉高阶项,并在结果中加入衰减参数  $\mu^k$  来调节收敛速度,从而得到 LM 算法的参数迭代方法:

$$\Delta P = [(J^k)^T J^k + \mu^k \Omega^k]^{-1} (J^k)^T [Y - T(P^k)] \quad (6)$$

式中:  $\Delta P = P^{k+1} - P^k$ ;  $J(P) = \left[ \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right]^T$ ;  $\Omega^k = \text{diag}[(J^k)^T J^k]$ ;

$k$  为迭代次数。

当  $\mu^k=0$  时为高斯牛顿法,当  $\mu^k \rightarrow \infty$  时则为最速下降法。为了提高收敛速度,迭代开始采用最速下降法,然后降低  $\mu^k$  通过高斯牛顿法得到反问题的解。

通过 LM 算法定量辨识材料内部缺陷尺寸、方位的迭代求解步骤如下:

(1) 给出缺陷尺寸、方位描述参数向量  $P$  的初始假设  $P^0$  作为开始迭代计算的输入条件。

(2) 在辨识参数向量  $P^k$  下求解方程(1)、(2)得到测温点处温度  $T(P^k)$ ,  $k=0, 1, 2, \dots$ 。

(3) 求解辨识参数向量  $P^k$  下的目标函数  $S(P^k)$ ,并验证其是否满足收敛标准(4),如果满足则停止迭代过程,并把  $P^k$  作为最终缺陷定量辨识结果,否则继续。

(4) 采用迭代公式(6)修正辨识参数向量  $P^k$  得到下一次迭代的辨识参数向量  $P^{k+1}$ 。

(5) 令  $k=k+1$ ,返回步骤(2)。

### 2.2 混沌优化算法

混沌优化算法利用混沌变量的遍历性,对全局范围内进行搜索得到最优解,混沌优化算法的主要步骤如下:

(1) 随机生成  $n$  个具有微小差异的初值  $t_i^0 \in [0, 1]$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ,置  $k=0$ 。

(2) 按照 Logistic 映射公式(7)进行混沌运动得到混沌变量  $t_i^{k+1} \in [0, 1]$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

$$t^{k+1} = 4t^k(1-t^k) \quad 0 \leq t^0 \leq 1 \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

(3)  $p_i^k = c_i + d_i \cdot t_i^k$ ,即求与区间  $[0, 1]$  内混沌变量值对应的区间  $[p_i^l, p_i^u]$  内待辨识参数值。其中,  $c_i$ 、 $d_i$  为常数,  $p_i^l$ 、 $p_i^u$  是  $p_i$  的边界约束值。

(4) 若  $k=1$ ,则令  $P^* = P^1$ ,并求  $S^* = S(P^*)$ ,其中  $P^* = (p_1^*, \dots, p_n^*)$ ,否则转(5)。

(5) 计算  $S(P^k)$ ,其中  $P^k = (p_1^k, \dots, p_n^k)$ ;如果  $S(P^k) < S^*$ ,则  $p_i^* = p_i^k$ ,  $S^* = S(P^k)$ ,否则  $P^*$  和  $S^*$  保持不变。

(6) 若  $S^* < \varepsilon$  或经过若干步搜索后  $S^*$  保持不变,则计算结束;否则,令  $k=k+1$  并返回到步骤(2)。

### 2.3 混沌-LM 混合解法

LM 算法必须具备足够多的先验信息以给出好的待辨识参数初始假设,但收敛速度快,混沌优化算

法不依赖待辨识参数的初始假设,能够跳出局部最优达到全局最优,但计算耗时较长。综合考虑二者的优势,提出混沌-LM混合求解方法对材料内部缺陷尺寸、方位进行定量识别,其计算步骤如下:

(1) 给定缺陷尺寸、方位描述参数向量  $\mathbf{P}$  的初始假设值  $\mathbf{p}_i^0$ 、常数  $\mathbf{c}_i, \mathbf{d}_i (i=1, \dots, n)$  及混沌迭代求解的中间收敛标准  $\varepsilon^*$ , 置  $k=0$ 。

(2) 据公式  $\mathbf{p}_i^0 = \mathbf{c}_i + \mathbf{d}_i \cdot \mathbf{t}_i^0$  计算出  $\mathbf{t}_i^0 \in [0, 1], i=1, 2, \dots, n$ , 采用中间收敛标准  $\varepsilon = \varepsilon^*$  进入混沌优化算法执行步骤(2)~(6), 最终得到  $\mathbf{P}^*$ 。

(3) 重新置  $k=0$  并令  $\mathbf{P}^0 = \mathbf{P}^*$ , 然后进入 LM 优化算法执行步骤(2)~(5), 最终得到缺陷尺寸、方位的定量辨识结果  $\mathbf{P}^k$ , 这里 LM 优化算法的收敛标准  $\varepsilon$  根据公式(4)来确定。

### 3 算例及分析

为了验证基于混沌-LM混合解法材料内部缺陷恒温冷却单面红外检测辨识的有效性,并对稳、瞬态红外检测定量辨识及缺陷不同方位描述尺寸可检测性进行比较研究,文中以尺寸  $L_x=0.1\text{ m}, L_y=0.6\text{ m}$ , 导热系数为  $\lambda_1=36\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , 密度为  $\rho_1=7800\text{ kg}/\text{m}^3$ , 比热容  $c_1=460\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$  的钢试件为研究对象,其内部缺陷的导热系数为  $\lambda_2=0.03\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , 密度为  $\rho_2=1\text{ kg}/\text{m}^3$ , 比热容为  $c_2=460\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。这里试件冷却初始温度  $T_0=150\text{ }^\circ\text{C}$ , 恒温冷却对流换热系数  $h_c=2000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$  及介质温度  $T_c=15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x=L_x$  表面与环境间的自然对流换热系数  $h_s=11.6\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$  及环境温度  $T_s=30\text{ }^\circ\text{C}$ 。

如公式(8)所示,检测表面  $x=0$  的红外检测温度通过已知的缺陷尺寸和方位参数求解传热方程(1)、(2)得到真实温度的基础上,叠加一个随机测量误差来模拟,然后通过混沌-LM混合解法,得到这些参数的定量辨识结果,并和已知的参数值进行比较来验证混合解法的有效性。

$$Y = Y_{\text{true}} + \omega \cdot \sigma \quad (8)$$

式中:  $Y$  为红外检测温度;  $Y_{\text{true}}$  为通过已知的缺陷尺寸和方位参数求解传热方程(1)、(2)得到的真实温度;  $\sigma$  为实际检测误差的标准差;  $\omega$  为  $-1.0 \sim 1.0$  之间的随机数。

为了比较评价材料内部缺陷不同尺寸、方位描述参数定量辨识的准确性,定义参数定量辨识相对

误差:

$$Er_i = \left| \frac{\mathbf{p}_i^e - \mathbf{p}_i}{\mathbf{p}_i} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $Er_i$  表示缺陷第  $i$  个尺寸、方位描述参数  $\mathbf{p}_i$  的辨识相对误差;  $\mathbf{p}_i^e$  为  $\mathbf{p}_i$  的定量辨识结果。

通过求解传热方程(1)、(2)可得到内部带有矩形缺陷的试件检测面温度分布特征。图2给出了位于材料内部不同深度  $L_{x1}$ 、大小为  $0.05\text{ m} \times 0.076\text{ m}$  的缺陷在检测面达到最大温差时刻点的温度分布特征以及该对应时刻点内部不存在缺陷的试件检测面温度分布特征。从图中可看出:含有内部缺陷的试件检测面温度出现了异常分布,检测面最大温差随着缺陷深度  $L_{x1}$  增大而减小,当深度达  $0.045\text{ m}$  时,检测面的最大温差  $\Delta T_{\text{max}}=7.57\text{ }^\circ\text{C}$  远大于红外热像仪检测的临界温度值  $0.2\text{ }^\circ\text{C}^{[1]}$ , 故通过红外检测很容易判断出材料内部存在缺陷,但这种判断是定性的,仍需结合反问题算法对缺陷尺寸、方位进行定量辨识。

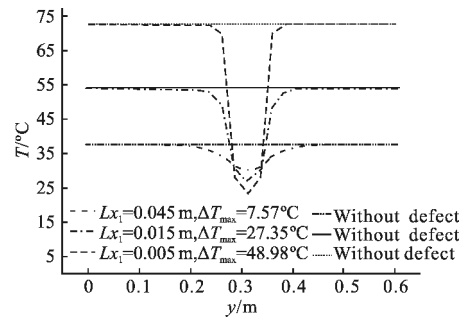


图2 检测表面的温度分布

Fig.2 Temperature distribution at inspection surface

为比较研究各辨识参数定量辨识的可检测性,文中定义如下  $\mathbf{p}_i$  的相对敏感系数:

$$J_r(\mathbf{p}_i) = \max(|J(\mathbf{p}_i)|) \times (Er_i \times \mathbf{p}_i) \quad (10)$$

式中:  $\max(|J(\mathbf{p}_i)|)$  反映了  $\mathbf{p}_i$  单位扰动情况下检测面的最大温度变化;  $(Er_i \times \mathbf{p}_i)$  表示  $\mathbf{p}_i$  辨识相对误差为  $Er_i$  时的最大允许扰动量。

图3、图4分别给出了在不同冷却介质温度  $T_c$ 、对流换热系数  $h_c$  条件下的相对敏感系数。从图中可看出:在相同的冷却条件下检测面温度对各辨识参数的敏感性并不一致;  $y$  方向的缺陷尺寸、方位描述参数  $L_{y1}, L_{y2}$  相对敏感系数比较大,可检测性很好;  $x$  方向上,表示距检测面深度的缺陷尺寸、方位描述参数  $L_{x1}$  仍有较大的相对敏感系数,其可检

测性仍较高, 而表示距试件背面深度的缺陷尺寸、方位描述参数  $Lx_2$  的相对敏感系数很小, 其很难被定量辨识出来。

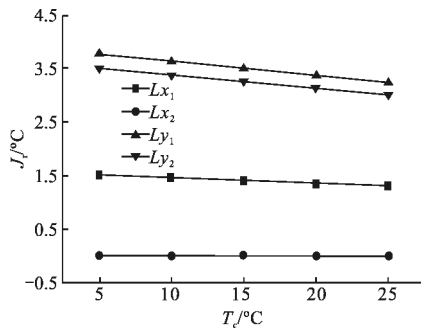


图 3 不同冷却介质温度下的相对敏感系数

Fig.3 Relative sensitivity coefficient with different cooling medium temperature

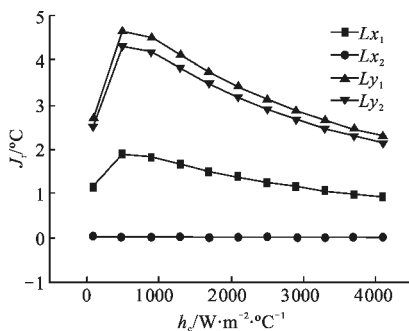


图 4 不同冷却换热系数下的相对敏感系数

Fig.4 Relative sensitivity coefficient with different coefficient of heat transfer

图 5 给出了检测面最大温差及相对敏感系数随试件冷却时间  $\tau$  的变化关系, 从图中可看出, 检测面最大温差及各待辨识参数的相对敏感系数随着冷

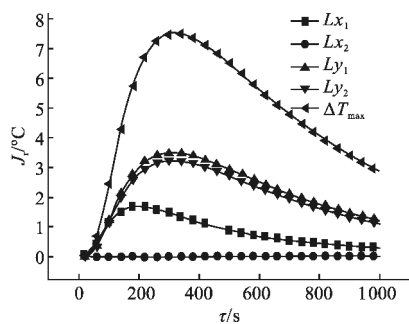


图 5 相对敏感系数和最大温差随时间的变化

Fig.5 Relative sensitivity coefficient and maximum temperature difference at different time

却时间的增加先升高再减小, 当各待辨识参数的相对敏感系数最大时为其最佳检测时刻点, 从图中可知各待辨识参数的最佳时刻点并不一致, 但均出现在最大温差时刻点附近, 为此可采用当检测面出现最大温差时作为检测时刻点。另外, 当冷却时间较长时试件趋于稳态传热状态, 各待辨识参数的相对敏感系数变得较小使得定量可检测性低。

在不考虑测温误差时 ( $\epsilon \rightarrow 0$ ), 图 6 为分别采用 LM 算法、混沌优化算法及混沌-LM 混合解法对尺寸、方位描述参数为  $Lx_1=0.045\text{ m}$ 、 $Lx_2=0.005\text{ m}$ 、 $Ly_1=0.272\text{ m}$ 、 $Ly_2=0.252\text{ m}$  的内部缺陷进行了定量识别时目标函数的变化过程, 其中 LM 算法和混沌优化算法从同一初始假设出发, 混沌-LM 混合解法先用混沌优化算法得到一个待辨识参数真实值附近的辨识结果, 再用 LM 算法对这一结果继续迭代修正。

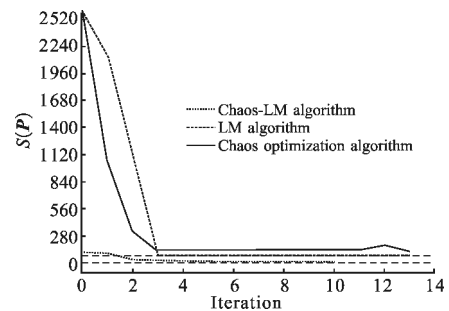


图 6 不同优化算法的定量识别结果

Fig.6 Identification results with different algorithms

从图中可看出: LM 算法迭代到一定次数时无法跳出局部最优, 目标函数  $S(P)$  保持在一个远离收敛标准  $\epsilon$  的值不变; 混沌优化算法在开始时对辨识参数修正较好, 随着迭代次数的增加, 目标函数  $S(P)$  改变量很小, 需要较长时间才能使其满足收敛标准; 而混沌-LM 算法在混沌算法辨识结果的基础上采用 LM 算法继续定量辨识能很快得到收敛, 迭代次数等于 5 时, 目标函数  $S(P)$  就已经收敛于一个接近于零的正数。由此可知, 混沌-LM 混合解法是缺陷定量辨识的有效算法, 它能够结合混沌优化算法、LM 算法二者优点。为进一步验证混沌-LM 混合解法的稳定性以及比较缺陷描述参数的可检测性, 文中采用该混合解法对不同初始假设、冷却条件和检测条件情况下的缺陷定量辨识进行了模拟实验, 实验结果见表 1~表 4。

表 1 初始假设对辨识结果的影响

Tab.1 Influence of initial assumptions on the identification results

Initial assumption	Result ( $Lx_1, Lx_2, Ly_1, Ly_2$ )	Relative error/% ( $Er_1, Er_2, Er_3, Er_4$ )
0.055 1, 0.044 3, 0.082 6, 0.094 0	0.043 6, 0.000 5, 0.275 2, 0.256 0	3.18, 89.57, 0.08, 1.59
0.083 8, 0.013 0, 0.557 1, 0.034 3	0.043 2, 0.000 5, 0.276 7, 0.256 2	4.09, 89.87, 0.60, 1.68
0.031 0, 0.007 6, 0.268 0, 0.197 0	0.044 8, 0.001 8, 0.277 8, 0.254 3	0.48, 64.49, 1.02, 0.90

表 2 不同冷却介质温度下的辨识结果

Tab.2 Identification results with different cooling medium temperatures

$T_c/^\circ\text{C}$	Result ( $Lx_1, Lx_2, Ly_1, Ly_2$ )	Relative error/% ( $Er_1, Er_2, Er_3, Er_4$ )
5	0.043 3, 0.0187, 0.276 8, 0.2539	3.83, >100, 0.65, 0.75
15	0.043 6, 0.000 5, 0.275 2, 0.256 0	3.18, 89.57, 0.08, 1.59
25	0.042 4, 0.000 6, 0.280 1, 0.254 7	5.80, 88.57, 1.84, 1.08

表 3 不同冷却换热系数下的辨识结果

Tab.3 Identification results with different coefficient of heat transfer

$h_c/W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Result ( $Lx_1, Lx_2, Ly_1, Ly_2$ )	Relative error/% ( $Er_1, Er_2, Er_3, Er_4$ )
1 000	0.044 8, $\leq 0.005$ , 0.274 4, 0.251 4	0.44, $\approx 100$ , 0.21, 0.24
2 000	0.043 6, 0.000 5, 0.275 2, 0.256 0	3.18, 89.57, 0.08, 1.59
3 000	0.043 4, 0.000 5, 0.279 1, 0.254 1	3.51, 90.29, 1.51, 0.85

表 4 稳瞬态条件下的辨识结果比较

Tab.4 Identification results with different heat transfer states

$\sigma/^\circ\text{C}$	Result ( $Lx_1, Lx_2, Ly_1, Ly_2$ )	Relative error/% ( $Er_1, Er_2, Er_3, Er_4$ )
0	Steady: 0.045 0, 0.005 0, 0.275 0, 0.252 0	1.29e-5, 9.65e-6, 1.89e-6, 1.2e-7
	Unsteady: 0.045 0, 0.005 0, 0.275 0, 0.252 0	4.2e-7, 1.05e-5, 1.5e-7, 1.6e-7
	Steady: 0.033 0, 0.058 1, 0.137 5, 0.025 7	0.267 7, >100, 0.500 0, 0.897 9
0.25	Unsteady: 0.043 6, 0.000 5, 0.275 2, 0.256 0	3.18, 89.57, 0.08, 1.59
	Steady: 0.001 8, 0.092 6, 0.350 0, 0.000 1	0.959 5, >100, 0.272 7, 0.999 6
0.50	Unsteady: 0.044 6, 0.000 1, 0.277 7, 0.250 0	0.99, 98.58, 0.98, 0.79

材料内部缺陷的定量辨识是以给定的某个初始假设通过混沌-LM 混合解法对初始假设进行不断修正达到收敛条件来获得辨识结果的, 因此为得到可靠的辨识结果要求反问题算法对不同的初始假设均能得到稳定的结果。表 1 给出了不同初始假设的情况下, 通过混沌-LM 混合解法定量辨识缺陷尺寸、方位描述参数的结果, 从表中可以看出: 各待辨识参数的辨识精度受初始假设影响小,  $Ly_1$ 、 $Ly_2$  参数能比较准确地辨识出来, 最大相对误差小于 2%;  $Lx_1$  的辨识精度有所降低但仍能准确地定量检测出来, 其相对误差保持在 5% 以内, 而  $Lx_2$  的辨识精度却很低, 但这不是算法的原因, 而是由于检测面温度对参数  $Lx_2$  的敏感性很低所致(如图 3~图 5 所示)。由此可知, 混沌-LM 混合解法定量辨识材料缺陷的结果是稳定的。

为考察恒温冷却单面红外检测条件下材料内部缺陷不同尺寸、方位描述参数的可检测性, 表 2、表 3 分别通过改变冷却介质温度和冷却换热系数对不同冷却条件时的材料内部缺陷定量辨识检测进行了模拟实验。同表 1 一样, 实验发现缺陷描述参数  $Ly_1$ 、 $Ly_2$  均能很准确得到定量辨识,  $Lx_1$  的辨识精度有所降低但仍能准确定量检测出来且最大相对误差不超过 6%,  $Lx_2$  的可检测性差, 很难被定量辨识出来。这些实验结果与文中之前各待辨识参数相对敏感系数的理论分析相一致, 说明了缺陷不同尺寸、方位描述参数具有不同的可检测性。

表 4 比较了稳态检测和瞬态检测两种情况, 材料内部缺陷的定量辨识精度。可以看出: 当检测面测量温度不存在测量误差时, 稳、瞬态检测条件下缺陷都能非常准确地辨识出来。由于各待辨识参数的相对敏感系数在稳态时变得很小(如图 5 所示), 随着测温误差的增加稳态检测条件下缺陷的定量辨识精度受到较大影响难以准确辨识, 而瞬态检测条件下缺陷的定量辨识精度受到的影响相对较弱, 仍能准确辨识出缺陷描述参数  $Lx_1$ 、 $Ly_1$  和  $Ly_2$ 。由此可知, 检测面达到最大温差时的瞬态检测比稳态检测更能够定量辨识缺陷的尺寸、方位。

## 4 结 论

文中根据混沌-LM 混合解法对恒温冷却单面

红外定量检测辨识材料内部缺陷尺寸、方位的方法进行了研究,采用相对敏感系数比较分析了材料内部缺陷不同尺寸、方位描述参数的可检测性,通过数值模拟实验验证了混沌-LM混合解法的有效性及缺陷不同描述参数可检测性的差异性,得出了以下结论:

(1) 采用混沌-LM混合解法可以有效克服缺陷定量辨识的非线性、不稳定性,让最优控制解跳出局部最优使缺陷定量辨识反问题算法朝着全局最优收敛得到真实结果。

(2) 引入相对敏感系数的概念可以有效评估分析缺陷不同尺寸、方位描述参数的可检测性,为缺陷定量辨识提供可靠判据。

(3) 恒温冷却红外单面检测条件下,不同缺陷尺寸、方位描述参数的可检测性也不同:与检测面平行方向(y方向)的缺陷尺寸、方位描述参数可以很准确地得到定量辨识;与检测面垂直方向(x方向)的缺陷尺寸定量辨识受到测温误差的影响,其中表示缺陷距检测面深度的描述参数受测温误差影响较小,仍能准确识别,表示缺陷距试件背面深度的描述参数受测温误差影响较大,难以准确定量辨识。

(4) 不存在测温误差时,内部缺陷尺寸、方位可以准确地定量辨识出来,提高测温精度有利于提高缺陷描述参数的辨识精度。

(5) 在检测面达到最大温差时对试件进行瞬态条件下的检测比在稳态条件下的检测更具有优越性,其缺陷辨识精度更高、检测时间更短。

#### 参考文献:

- [1] Liu Guohua, Wu Lixin, Wu Miao, et al. Current status and applications of infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230. (in Chinese)
- [2] Li Jia, Wang Naihui, Xing Dapeng, et al. The application of Infrared diagnosis technology in the state overhaul [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2009, 46(12A): 25-28. (in Chinese)
- [3] Chen Heng. The present situation and prospect for infrared diagnostic technology in China [J]. *Laser & Infrared*, 1998, 28(5): 292-296. (in Chinese)
- [4] Yu Hui, Guan Ronghua. Feasibility to the theory of diagnosis defects in equipment' inner wall by means of infrared technique [J]. *Infrared of Laser Engineering*, 2002, 31(3): 229-232. (in Chinese)
- [5] Huang Chaojun, Liu Yafeng, Yin Jiwu, et al. Inversion parameters of shadowing function and optimization of BRDF statistical modeling on target surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 883-886.
- [6] Hsieh C K, Su K U. A methodology of predicting cavity geometry based on scanned surface temperature data-prescribed surface temperature at the cavity side [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1980, 102(2): 324-329.
- [7] Hsieh C K, Su K U. A methodology of predicting cavity geometry based on the scanned surface temperature data-prescribed heat flux at the cavity side[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1981,103(1):42-46.
- [8] 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.
- [9] Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li. A general quantitative identification algorithm of subsurface defect for infrared thermography [C]//Proceeding of The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, 2005: 341-342.
- [10] Wang Denggang, Liu Yingxi, Li Shouju. Chaos-Regularization hybrid algorithm for nonlinear two-dimensional inverse heat conduction problem [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2002, 23(8): 864-869. (in Chinese)
- [11] Terumi Inagaki, Toshimitsu Ishii, Toshikatsu Iwamoto. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography [J]. *NDT & E International*, 1999, 32(5): 247-257.