

基于红外测温的内部点热源的识别

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: 基于表面测温的内热源识别问题在红外无损检测、微生物发酵、弹药和食物存储等领域都有重要的应用。利用遗传算法对导热反问题中热源项的反演问题进行了识别研究, 系统地分析了多种因素对热源参数识别结果的影响。通过具体算例的求解, 证明了该方法可以很好地解决内部点热源参数识别的问题。同时识别多个点热源的强度和位置时, 结果都比较准确; 在测温信息减少到依靠一边测温时, 仅有远处的点热源的位置识别结果出现偏差; 在测温误差的标准差不超过 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 热源强度和位置的识别结果都是准确的。

关键词: 点热源; 传热反问题; 遗传算法; 红外测温

中图分类号: TK124 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)03-0837-08

Identification of inner point heat sources based on thermographic temperature measurement

Jia Wendou, Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li

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

Abstract: Identification of inner heat source based on surface temperature measurement can find many applications such as in thermographic nondestructive deflection, in microbial fermentation and in ammunition and food storage fields. Genetic algorithm was used to study the identification problem of the heat source term. The factors affecting the identification results were analyzed. Numerical examples proved that the method can provide a good solution to the parameter identification problem of inner point heat source. The identification results of position and strength are accurate when multiple point heat sources are identified simultaneously. Only the identification result of the position has a deviation when the point heat source is far from the unique temperature measurement boundary. The identification results of positions and strengths of point heat sources are accurate when the standard deviation of the temperature measurement error does not exceed $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: point heat source; inverse heat conduction problem; genetic algorithm; thermographic temperature measurement

收稿日期: 2014-07-21; 修订日期: 2014-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(50906099, 51479203)

作者简介: 贾文抖(1990-), 男, 硕士生, 主要从事缺陷故障红外热诊断方面的研究。Email: jiawd163@163.com

导师简介: 范春利(1978-), 男, 副教授, 主要从事传热传质、传热反问题及红外无损检测等方面的研究。Email: chlfan@163.com

0 引言

在涉及热工过程的实际生产和日常生活中,及时掌握和了解设备和零件的热源属性是十分必要的。例如,基于外部测温的内部热源参数的识别在诸如钢铁、水泥、陶瓷、微生物发酵、能源、航空航天等行业领域中都有重要的应用,尤其是温度的控制对这些工业生产和装备的正常运行具有重要的意义。再如,某些需要长期存储的具有内热源的物质,如核废料、弹药、煤炭和粮食等,一旦保存不当就容易出现内部发热的现象,且在某些情况下内部测温点的布置又比较困难,因此依靠表面测温及时、准确地确定物质内部发热位置和强度对于存储工作有很大的益处。

红外无损检测技术是通过检测到表面温度分布异常的现象来诊断内部的缺陷位置、大小等信息,目前该技术已得到广泛的应用研究^[1-3]。内热源型缺陷的识别研究一直都是红外无损检测研究领域的一个重要方面,也是许多研究者关注的热点。其中,Huang等^[4]以及 Neto等^[5]主要是利用共轭梯度法(CGM)对一维和二维模型内部的单个或两个点热源的强度进行研究。Niliet等^[6]利用边界元法开展了有关点热源识别的研究工作,并取得了较好的识别效果。范春利等^[7]对二维不规则形状发热型缺陷进行研究,利用共轭梯度法有效地对热源缺陷边界形状做出了定量识别。黄慧兰等^[8]利用有限元模拟了焊接过程中点热源在薄板中的温度分布,并与实际测量值做了比较。曹明宇等^[9]利用的改进的一维修正算法对三维内部固定深度热源的几何分布和热源强度做了有效的反演识别。刘彬等^[10]通过实验研究得到了葡萄酒发酵过程中产热量与温度之间的关系,并对获得的内热源关系式的传热模型进行了计算,与控温发酵实验中的实验结果比较,得到了较好的吻合。

目前,针对反问题研究常用的启发式搜索算法易陷入局部极值,遗传算法因具有良好的全局搜索性能被广泛应用到工程最优设计与求解之中,且已显示出了其优异的搜索性能。在前期的缺陷形状识别工作^[11]中,遗传算法在导热反问题求解中应用的可行性已得到充分证明。文中针对以往导热反问题求解易局部收敛的特点,利用遗传算法在仅依靠外

部测温信息的条件下寻求全局最优解,并系统地分析点热源数目、边界测温信息的选取、测温误差等因素对热源项参数识别结果的影响。

1 模型建立及问题描述

内部含有线热源的三维模型如图 1 所示,线热源沿长度方向贯穿模型的两端,若忽略端部的影响,可以在试件中部截取一个横截面进行分析,这样就可以将线热源的三维模型简化为点热源的二维模型。

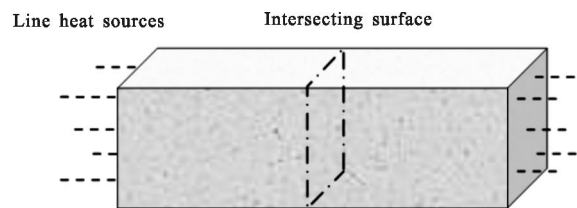


图 1 含线热源的三维模型

Fig.1 Three-dimensional model with liner heat source

简化后的二维模型尺寸及点热源的位置如图 2 所示, Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 、 Γ_4 分别对应试件模型的四条边界,内部含有五个热源,分别标号 1~5,热源强度分别为 $q_1=1.0 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $q_2=0.4 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $q_3=0.6 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $q_4=0.8 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $q_5=1.0 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,热源发热面积大小为 $0.004 \text{ m} \times 0.004 \text{ m}$,由于每个热源面积相对于整个试件模型的面积是很小的,约占 0.16%,可将它们看作点热源处理。试件材料的导热系数 $\lambda=1.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{C})^{-1}$,环境与试件间的表面传热系数 $h_f=10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{C})^{-1}$,环境温度 $t_f=25 \text{ C}$ 。

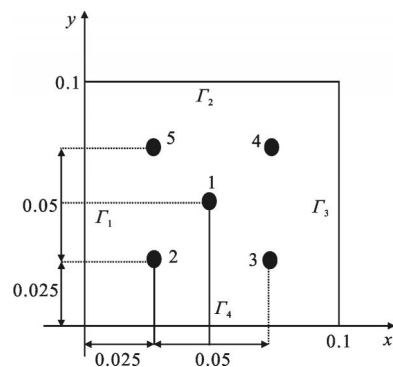


图 2 热源识别问题的二维模型

Fig.2 Two-dimensional model of heat source identification

稳态导热过程中,含内热源的导热微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q = 0 \quad (1)$$

模型试件四周处在环境中, 温度分布达到稳定时, 其边界条件为:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial t}{\partial x} |_{x=0} &= h(t-t_f) \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial x} |_{x=L_x} &= -h(t-t_f) \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial y} |_{y=0} &= h(t-t_f) \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial y} |_{y=L_y} &= -h(t-t_f) \end{aligned} \quad (2)$$

文中所研究的热源识别问题属于导热微分方程热源项反演问题, 即内热源的有关参数为所求参数, 其他参数均属已知。测温边界为试件四个边界, 依靠试件边界测量温度对内热源的有关参数进行反演求解。

2 求解思路及算法步骤

2.1 目标函数设置

文中所研究的热源项参数识别问题属于导热反问题领域的一个分支类型, 其求解过程可以看作一个最优化过程: 通过遗传算法不断迭代优化参数的取值, 使利用该参数计算出的表面温度与检测温度尽可能的接近, 即通过下面的目标函数的最小化来实现。

$$f(T) = \sum_{i=1}^n (T_i^m - T_i^c)^2 \quad (3)$$

式中: T^m 为通过测量得到的试件外表面离散的温度值; T^c 为反演计算过程中通过正问题求解计算得到的离散温度值; n 为离散温度点的个数。 T^m 可通过实际热源缺陷下计算的表面温度进行模拟处理:

$$T^m = Y^m + \omega \cdot \sigma \quad (4)$$

式中: Y^m 为实际缺陷下计算得到的表面离散温度; ω 为 $-1.0 \sim 1.0$ 之间的随机数; σ 为测温误差的标准差。

2.2 收敛条件设置

(1) 表面检测温度 T^m 与反演计算温度 T^c 相吻合的程度, 即:

$$f(T) < \varepsilon \quad (5)$$

式中: $\varepsilon = n \cdot \sigma^2$, σ 为随机测温误差的标准差; n 为表面测温点的数目。当 $\sigma = 0$ 时, 即不含测温误差时, ε 为一个任意小的正数。

(2) 设置的最大迭代次数:

$$MG = 300 \quad (6)$$

计算过程中, 当满足上述收敛条件中的任何一个即可终止计算。

2.3 遗传算法计算步骤

用一个数组 $p = [x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots, q_1, q_2, \dots]$ 来表示遗传算法中的一个个体, 其中数组中的 (x_j, y_j) 表示一个点热源的位置坐标, q_j 表示对应的点热源的热源强度, 计算过程中根据所求参数的类型及数目相应地调整个体 p 中的参数。

(1) 初始化种群 $P_0 = [p_1^0, p_2^0, \dots, p_s^0]$ (s 代表种群中个体的数目), 计算出种群的适应度 $f_0 = [f_1^0, f_2^0, \dots, f_s^0]$;

(2) 对种群 P_k (k 记录种群进化的代数) 的一组个体依次进行选择、交叉重组、变异等遗传操作, 生成子代候选群体 P_k' , 并计算群体 P_k' 的适应度 f_k' ;

(3) 基于适应度大小 (比较 f_0 和 f_k') 按一定的比例将种群 P_k' 重插入到 P_k 中, 得到下一代种群 P_{k+1} 和种群适应度 f_{k+1} ;

(4) 判断是否满足迁徙策略 (每隔 20 代进行一次迁徙操作), 若满足, 则在各种群间交换一定数量的个体, 否则进行下一步;

(5) 判断是否满足收敛条件 (5) 或 (6), 若满足, 则计算结束, 否则返回到步骤 (2) 继续计算到满足收敛条件为止。

计算流程图如图 3 所示。在求解过程中, 设置种群数为 4, 单个种群内个体数为 20, 选择率为 0.8, 离

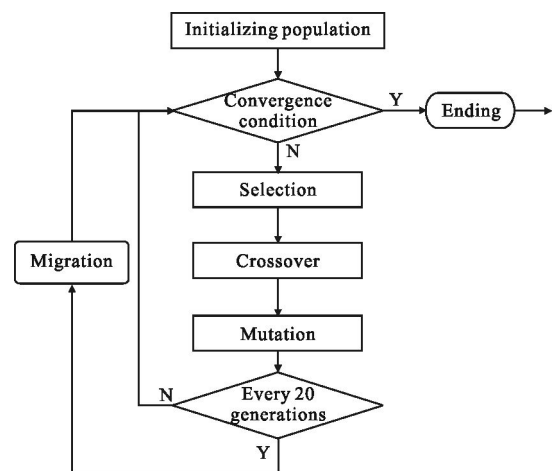


图 3 遗传算法流程图

Fig.3 Flow chart for genetic algorithm

散重组的概率为 1, 变异概率为 1, 每隔 20 代在种群间迁徙交换一定数量的个体, 以维持种群多样性, 迁徙率为 0.2。

3 算例计算及分析

针对热源强度和位置的描述参数的识别问题, 分别对热源强度、热源位置作单独和综合识别, 并从点热源的数目、测温信息的选取及测温误差等方面进行分析。

算例中热源强度的识别误差用 e 表示:

$$e = \frac{|q - q^c|}{q} \times 100\% \quad (7)$$

式中: q 为的真实的热源强度; q^c 为计算得到的热源强度。

平均识别误差 e_m :

$$e_m = \frac{\sum_{s=1}^N e_s}{N} \quad (8)$$

3.1 点热源强度的识别

3.1.1 不同的点热源数目

考虑试件内部包含不同数目的点热源, 并对热源强度作反演识别, 当内部含有一个(点热源 1)、两个(点热源 3、5)和四个(点热源 2、3、4、5)点热源处于发热状态时, 分别对这三种数目下的点热源强度进行识别。

不同数目点热源的强度识别结果见表 1, 第一行是试件内部仅含有点热源 1 时的识别结果, 第二行是内部含有点热源 3 和 5 时的识别结果, 第三行是内部含有点热源 2、3、4、5 时的识别结果。从表 1 中的数据可知, 不同数目的点热源同时处于发热状态时, 即便各个点热源的强度不同, 依然能够同时准确识别出各自的热源强度, 并且每个点热源强度的反演偏差都不超过 $11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这个差值与热源本身的强度值相比可以忽略不计。

表 1 不同数目点热源的强度识别结果

Tab.1 Identification results of strength with different numbers of point heat sources

$q_1/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_2/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_3/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_4/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_5/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
999 997	-	-	-	-
-	-	599 994	-	1 000 005
-	400 002	599 996	800 001	1 000 011

3.1.2 不同的搜索区间

在实际识别过程中, 仅能大概估计热源强度的范围, 对热源强度的取值难以准确判断, 该小节给出三个范围不同的搜索区间, 分析不同范围的搜索区间对识别结果的影响。以识别点热源 2 和 4 的热源强度为例, 下面给定的三个区间均包含所识别的点热源强度值, 分析搜索区间范围的大小对结果的影响。

不同的搜索区间所对应的识别强度见表 2。由表中数据可以看出, 在不同的搜索区间内, 点热源 2 和 4 的热源强度的识别结果差别不大, 都非常接近于真实值, 反演结果与真实值的差不超过 $7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 相比于点热源本身的强度值, 这个差值是可以忽略的。这说明在所考虑的大小不同的搜索区间内识别出的点热源强度都是十分准确的。

表 2 不同搜索区间下的强度识别结果

Tab.2 Identification results of strength in different searching intervals

Searching interval/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_2/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_4/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
(10 000, 4 000 000)	400 006	799 996
(50 000, 2 000 000)	399 993	799 996
(200 000, 1 500 000)	399 997	800 006

3.1.3 不同的测温信息

该小节分析测温信息量的选取对点热源强度识别的影响。以同时识别点热源 1、2、4 的热源强度为例, 为消除热源强度不同可能对识别结果的影响, 此处设置热源强度同为 $0.6 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。当测温边界分别为三条边界(Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3)、两条边界(Γ_2 、 Γ_3)、一条边界(Γ_2)时, 点热源强度的识别结果及平均识别误差见表 3。

表 3 不同测温边界下的强度识别结果

Tab.3 Identification results of strength with different numbers of temperature measuring boundaries

$q_1/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_2/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$q_4/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	e_m
599 942	600 027	600 028	0
596 241	603 979	600 625	0.47%
635 199	563 013	593 985	4.35%

表 3 中第一行是在三条边界(Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3)测温的情况下识别出的点热源的强度, 第二行是在两条边

界(Γ_2, Γ_3)测温的情况下识别出的热源的强度,第三行是在一条边界(Γ_2)测温的情况下识别出的热源的强度,不同测温边界时点热源的平均识别误差在最后一列中给出。由表中点热源强度识别结果及平均识别误差可知,测温信息越少,点热源强度识别结果的平均误差就越大。其中在仅依靠边界 Γ_2 测温时,点热源 2 的识别误差为 6.16%。横向比较每一行中的数据,在每次识别中,远离测温边界的点热源的强度识别结果偏离真实值较大。例如,采用两条边界(Γ_2, Γ_3)和一条边界(Γ_2)测温时,点热源 2 的反演强度偏差会比点热源 1 和 4 的识别偏差大,三条边 ($\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$) 测温时则是点热源 1 的识别偏差最大。总体而言,在测温信息选取逐步减少的情况下,即使依靠一边测温,热源强度识别结果的平均误差不超过 5%,识别结果还是比较准确的。

3.1.4 不同的测温误差

在实际温度测量的过程中,测温误差是不可避免的,下面通过在温度 Y^m 中添加不同的测温误差考察该算法还能否有效计算出热源强度。以同时识别点热源 1 和 3 的热源强度为例,设置随机测温误差的标准差分别为 $\sigma=0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$,此时 σ 的大小分别占表面平均温度的 1.9%和 3.8%。

不同测温误差时的热源强度识别结果及平均识别误差见表 4。从表 4 中的计算数据可以看出,测温误差增大,热源强度识别结果的偏差也就越大,但即使在测温误差的平均值达到 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,热源强度的识别误差也不超过 4%,识别结果十分准确。

表 4 不同测温误差下的强度识别结果

Tab.4 Identification results of strength under different temperature measurement errors

$\sigma/^\circ\text{C}$	$q_1/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$q_3/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$e_m/\%$
0.5	991 223	605 635	0.91
1.0	983 092	632 426	3.55

3.2 点热源位置的识别

将每一个发热的单元格看作一个点热源,当所求得的点热源坐标(x, y)落在单元格区域内,即认为识别出了点热源的真实位置。

3.2.1 不同的点热源数目

考虑试件内部包含不同数目的点热源,并对热

源位置作反演识别,当内部含有一个(点热源 1)、两个(点热源 3、5)和四个(点热源 2、3、4、5)点热源处于发热状态时,分别对这三种数目下的点热源位置进行识别。

图 4 中给出了不同数目点热源的位置识别结果,图 4(a)为点热源 1 的识别结果,图 4(b)为点热源 3、5 的识别结果,图 4(c)为点热源 2、3、4、5 的识别结果。从图中可以看出,对不同数目的点热源同时进行位置识别时,都能对它们的热源位置做出准确的定位,即使当点热源的个数达到四个仍能保证位置识别的准确性。在计算中发现,随着点热源数目的增加,识别到热源的准确位置时相应的迭代次数会明显增加。

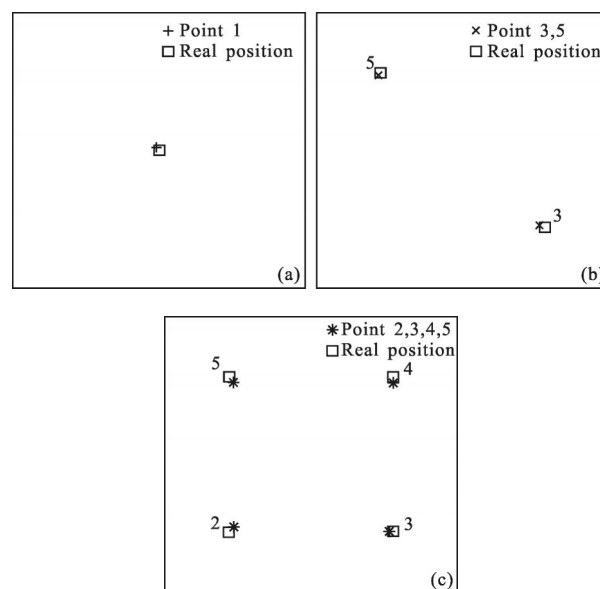


图 4 不同数目点热源的位置识别结果

Fig.4 Identification result of location with different number of point heat sources

3.2.2 不同的测温信息

在三条测温边界($\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$)、两条测温边界(Γ_2, Γ_3)和一条测温边界(Γ_2)上测取温度信息时,对点热源 1、2 和 4 的热源位置进行识别,同样,为避免热源强度不同可能对识别结果造成的影响,三个点热源的热源强度设置为 $0.6 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

不同测温边界数目时点热源位置的识别结果如图 5 所示。从图中可以看出,随着测温信息的减少,三个点热源识别结果逐步偏离了真实位置。在依靠两边和三边测温时,热源位置识别结果是比较准确

的,在仅依靠边界 T_2 测温时,识别出的点热源 1、4 的位置还是比较准确的,点热源 2 的位置偏离比较严重,这是因为此时的测温边界离点热源 2 较远。

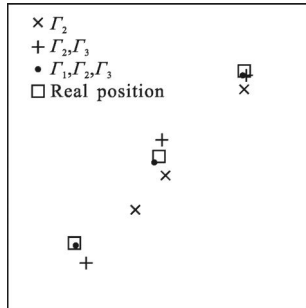


图 5 不同测温边界数目时的点热源的位置识别结果
Fig.5 Identification results of location when the numbers of temperature measuring boundaries are different

3.2.3 不同的测温误差

设置随机测温误差的标准差分别为 $\sigma=0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$, σ 最大时占表面温度平均值的 5.37%,在测量温度中含有不同大小的测温误差时识别点热源 1 和 5 的热源位置。

图 6 中给出了在不同的测温误差时点热源 1 和 5 的热源位置的识别结果。当测温误差的标准差 σ 在 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 以内时,能够准确识别出点热源 1 和 5 的热源位置,当 σ 达到 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,识别出的热源位置不在实际热源位置上,但仍落在了真实位置的附近。因此,测温误差在 5% 以内识别出的点热源的位置都是比较准确的。

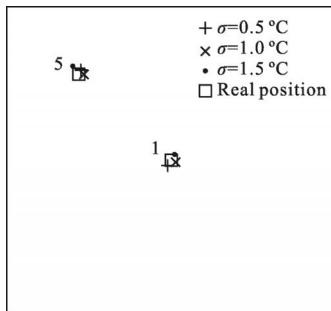


图 6 不同测温误差时点热源的位置识别结果
Fig.6 Identification result of location under different temperature measurement errors

3.3 点热源位置和强度的综合识别

3.3.1 不同的点热源数目

当内部处于发热状态的点热源的数目为一个

(点热源 1)、两个(点热源 3 和 5)、三个(点热源 1、2 和 4)时,分别对不同数目点热源位置和强度做出综合识别。

综合识别不同数目点热源时点热源位置识别结果见图 7,其中图 7(a)是试件内部含有点热源 1 时热源位置识别结果,图 7(b)是试件内部含有点热源 3、5 时热源位置识别结果,图 7(c)是试件内部含有点热源 1、2、4 时热源位置识别结果。从图中可以看出,试件内部点热源的数目不超过两个时,能够准确识别出点热源的位置,当综合识别点热源 1、2、4 时,识别出的热源位置能够定位到真实位置附近,也是比较准确的。

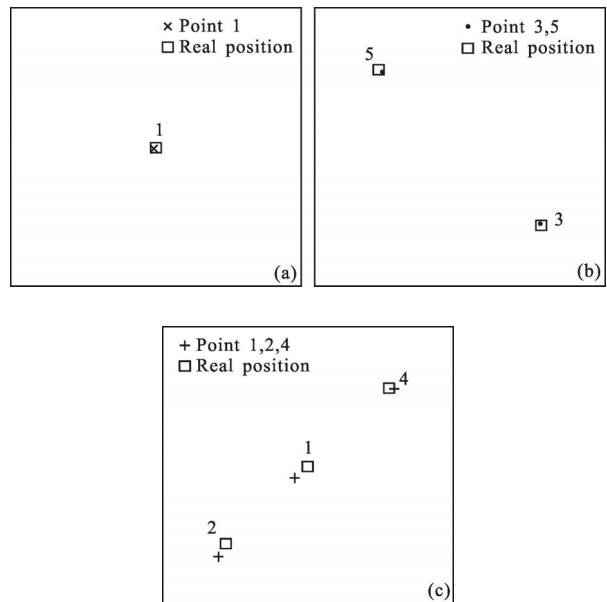


图 7 不同数目点热源的综合识别时的位置识别结果
Fig.7 Comprehensive identification results of location with different numbers of point heat sources

表 5 中给出了综合识别时点热源强度识别结果,第一行给出了试件内部仅含点热源 1 时的热源强度识别结果,第二行是含点热源 3、5 时的热源强度识别结果,第三是含点热源 1、2、4 时热源强度的识别结果。可以看出,试件内部的点热源数目不超过两个时,综合识别出的点热源强度都是十分准确的,强度偏差都不超过 $7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,相比于热源强度的实际值可以忽略不计。当所要识别的点热源数目达到 3 个时,热源强度的识别结果与实际值有一定的差距,其中热源 2 的强度识别误差达到 36.15%,距离真实值有一定的差距。

表 5 不同数目点热源综合识别时的强度识别结果

Tab.5 Comprehensive identification results of strength with different numbers of point heat sources

$q_1/W \cdot m^{-2}$	$q_2/W \cdot m^{-2}$	$q_3/W \cdot m^{-2}$	$q_4/W \cdot m^{-2}$	$q_5/W \cdot m^{-2}$
999 993	-	-	-	-
-	-	600 002	-	999 997
1 101 245	255 386	-	843 387	-

综合识别三个点热源的热源强度和位置之所以会出现偏差,一方面是因为此时的识别参数较多,使得识别困难加大;另一方面是因为依靠边界测温识别时,热源强度和位置之间本身是相互"牵制"的,且多个点热源之间也会相互影响彼此的识别结果,因此点热源数目较多时识别的准确性有所下降。

3.3.2 不同的测温误差

选择点热源 1 和 5 作为识别研究对象,设置随机测温误差的标准差分别为 $\sigma=0.5^\circ C$ 、 $1.0^\circ C$,在随机测温误差不同时对点热源 1 和 5 的热源位置和强度进行识别。

由图 8 中点热源的位置识别结果可以看出,在不同的测温误差水平下,综合识别点热源 1 和 5 的热源位置和强度时,在测温误差不超过 $1.0^\circ C$ 时,识别出的热源位置都在真实位置附近,识别结果比较准确。

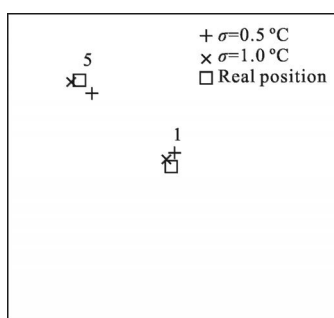


图 8 不同测温误差时综合识别的点热源位置

Fig.8 Comprehensive identification results of location under different temperature measuring errors

由表 6 中识别出的热源强度数据可以看出,随着测温误差的增加,热源强度识别结果的误差也相应地增加,在测温误差达到 $1.0^\circ C$ 时,热源强度识别误差为 17.0%,距实际值有一定的差距。

表 6 不同测温误差时综合识别的点热源强度

Tab.6 Comprehensive identification results of strength under different temperature measuring errors

$\sigma/^\circ C$	$q_1/W \cdot m^{-2}$	$q_3/W \cdot m^{-2}$	e_m
0.5	1 144 854	863 110	14.1%
1.0	828 977	1 168 183	17.0%

4 结 论

文中基于表面测温利用遗传算法对点热源的位置和强度进行识别,通过系统地分析多种因素对识别结果的影响,可以看出该方法可以较好地应用于点热源的识别工作。通过多个算例分析,主要得到以下几点结论:

(1) 单独识别点热源的位置或强度时,在仅依靠外部边界测温的情况下,该方法可以同时多个点热源进行有效识别。

(2) 单独识别点热源的强度或位置时,测温信息选取的多少对点热源强度的识别结果影响不大,对热源位置的识别结果影响较大。当测温信息集中在一条边界上时,热源强度的识别结果依然能稳定在真实值附近,此时远离测温边界的点热源位置的识别结果会有一些的偏差。

(3) 对点热源的位置和强度进行综合识别时,识别的参数较多,识别难度大,且多个点热源间的识别结果相互影响,但此时依然能够对两个点热源的强度和位置做出准确的识别。

(4) 当测量温度中测温误差的标准差不超过 $1.0^\circ C$ 时,点热源强度和位置的识别结果都比较准确,都能够稳定在真实值附近。

参考文献:

[1] Tang Qingju, Wang Yang, Liu Junyan, et al. Detecting of defects in heat-resistant alloy coating structure plates using pulsed infrared thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1685-1690. (in Chinese)
唐庆菊,王扬,刘俊岩,等. 耐热合金涂层结构板材内部缺陷的脉冲红外热成像检测 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1685-1690.

[2] Zeng Zhi, Tao Ning, Feng Lichun, et al. Effect of defect

- size on the measurement of defect depth using thermal wave imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1910–1915. (in Chinese)
- 曾智, 陶宁, 冯立春, 等. 缺陷尺寸对红外热波技术缺陷深度测量的影响研究 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1910–1915.
- [3] Yang Zhengwei, Zhang Wei, Wang Yan, et al. Application of homomorphic technology in image correction processing for infrared thermal wave inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 22–27. (in Chinese)
- 杨正伟, 张炜, 王焰, 等. 同态增晰技术在红外热波探伤图像校正中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 22–27.
- [4] Huang C H, Ozisik M N. Inverse problem of determining the unknown strength of an internal plane heat source [J]. *Journal of Franklin Institute*, 1992, 329 (4): 751–764.
- [5] Silva Neto A J, Ozisik M N. Two-dimensional inverse heat conduction problem of estimating the time-varying strength of a line heat source[J]. *J Appl Phys*, 1992, 71(11): 5357–5362.
- [6] Niliot C L, Lefevre F. A method for multiple steady line heat sources identification in a diffusive system: application to an experimental 2D problem [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44: 1425–1438.
- [7] Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li. Thermographic identification algorithm of two-dimensional irregular-shaped self-heating subsurface defects [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2009, 26(6): 897–902. (in Chinese)
- 范春利, 孙丰瑞, 杨立. 二维不规则形状发热型缺陷的红外识别算法[J]. 计算物理, 2009, 26(6): 897–902.
- [8] Huang Huilan, Yu Xichen. Finite element analysis of the point heat source heating a sheet metal [J]. *Journal of Guang Xi University*, 2002, 27(2): 114–116. (in Chinese)
- 黄慧兰, 喻锡臣. 薄板点热源加热的有限元分析 [J]. 广西大学学报, 2002, 27(2): 114–116.
- [9] Cao Mingyu, Fan Chunli, Sun Fengrui. Geometry identification of fixed-depth internal heat sources in three-dimensional test-piece based on surface temperature measurement[J]. *Infrared*, 2012, 33(10): 33–38. (in Chinese)
- 曹明宇, 范春利, 孙丰瑞. 三维试件固定深度内热源几何分布识别研究[J]. 红外, 2012, 33(10): 33–38.
- [10] Liu Bin, Tong Mingwei, Xu Yongsong. Inner heat source and heat transfer in wine fermentation [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, 58(11): 2733–2737. (in Chinese)
- 刘彬, 童明伟, 徐永松. 葡萄酒胶发酵中的内热源和传热特性[J]. 化工学报, 2007, 58(11): 2733–2737.
- [11] Cao Mingyu. The research of internal defects Identification based on infrared temperature measurement [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2012. (in Chinese)
- 曹明宇. 基于红外测温技术的内部缺陷形状识别的算法研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2012.