

基于有效导热系数法的交界面形状识别算法

曹明宇, 范春利, 王文栋

(海军工程大学 动力工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 基于表面测温的边界形状识别算法研究是红外无损检测技术从定性到定量发展的理论基础, 同时也是传热反问题研究的一个重点也是难点问题。对于交界面形状的识别, 常规的边界识别算法, 由于交界面要在迭代过程中不断变化, 所以计算相对复杂, 不利于算法的实际应用。在原有边界形状识别研究工作的基础上, 通过将交界面形状的识别问题转化为有效导热系数的分布问题, 将计算温度和检测温度的吻合程度作为判别条件, 利用改进的一维修正算法反演识别有效导热系数的分布, 再转化为真实的交界面形状。数值实验表明该方法大大降低了交界面形状识别的复杂性, 是解决交界面形状识别问题的行之有效的计算方法。

关键词: 交界面识别; 导热反问题; 有效导热系数; 改进的一维修正算法

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2305-08

Algorithm of identification of interfacial geometry based on method of effective thermal conductivity

Cao Mingyu, Fan Chunli, Wang Wendong

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

Abstract: The boundary shape identification based on the surface temperature measurement is not only a key theoretical basis for quantitative development of thermographic nondestructive technique, but also an important and difficult issue in the research of inverse heat conduction problem. When identifying the boundary shape, for ordinary algorithms, the boundary shape continually changes during the iterative process, which increases the calculation complexity and restricts practical application of the algorithm. Based on previous algorithm researches, the identification problem of interfacial geometry has been transformed into that of the distribution of effective thermal conductivities. The distribution result obtained based on the modified one-dimensional correction method is then converted to the desired boundary shape. Numerical test cases have proved that the algorithm with the transform theory which greatly reduced the calculational complexity of the identification process, is an effective method in dealing with identification problem of interfacial geometry.

Key words: interfacial geometry identification; inverse heat conduction problem; effective thermal conductivity; modified one-dimensional correction method

收稿日期: 2013-01-19; 修订日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(50906099)

作者简介: 曹明宇(1988-), 男, 硕士生, 主要从事基于红外测温的缺陷形状识别算法方面的研究。Email: mingyu0601@126.com

导师简介: 范春利(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事传热传质、传热反问题等方面的研究。Email: chlfan@163.com

0 引言

近年来,随着红外热像仪技术不断发展并趋于成熟,红外热像检测技术因其自身的非接触、无损伤、效率高、操作简单等优点得到了广泛的应用。其中对检测对象边界和交界面边界的检测识别是其中一个重要的分支。而依据传热反问题,以检测表面的温度分布为初始条件的定性识别方法是其中的重点研究问题。

各国研究人员对基于导热反问题的试件边界识别问题已经提出了一些行之有效的算法。目前发展的主要算法有共轭梯度法、L-M 法、虚拟边界法、改进的一维修正算法。

共轭梯度法是在边界形状识别问题中应用十分广泛的一类方法。Huang 等将共轭梯度法应用到不规则边界形状的识别问题^[1-2]和瞬态情况下不规则边界形状的识别问题^[3],大量的数值试验都取得了较好的效果,证明了算法的有效性。Fan 等^[4-5]也利用共轭梯度法对试件内部单个缺陷的问题进行了讨论,并提出了一种多次测量综合法,成功解决了算法中试件的初始假设对反演识别的影响问题。李斌^[6-7]等则通过边界元法以及改进的边界元法和共轭梯度法相结合,对二维不规则边界形状进行了识别研究,讨论了初值、测量点等因素对识别结果的影响,验证了算法的有效性。

L-M 法因其简单高效的特点,在一些待识别参数较少的问题中都取得了较好的识别效果。Huang 等^[1]利用 L-M 法对平板边界的识别问题进行了研究,证明该算法在一维边界形状识别等方面识别效果较好。

Chen 等^[8]和 Su 等^[9]提出了虚拟边界方法来识别炉膛内壁的边界形状,通过数值试验,证明算法的有效性,识别结果能够满足工程实际的需要。

另一种常用的方法是一维修正算法。Fan 等对已有的一维修正算法进行了改进,通过改变迭代修正过程并给定收敛条件,克服了已有算法的一些不足,通过研究试件分界面的形状识别问题^[10]和圆管内表面边界形状识别问题^[11],较改进前取得了更好的效果,验证了该算法在缺陷形状识别问题中的有效性。

现有的交界面形状的识别问题研究中,一般是通过比较每次迭代得到的计算温度的分布和检测温度分布的吻合程度,再对交界面形状进行修正。所以,按照常规的算法,每迭代一次都要对求解区域重新进行网格划分,这样就大大增加了计算过程的复杂性,同时也延长了计算时间,这就对识别算法的实际应用带来了很大的不便。

为了克服这一困难,Fan 等^[12-13]提出了一种转化思想,将边界形状的识别问题转化为有效导热系数的分布问题,从而在一定程度上大大减少了运算的复杂程度。通过大量数值试验,证明了该方法的有效性。

文中就是利用这一转化思想,将两种材料交界面形状的识别问题转化为了有效导热系数的分布问题,通过改进的一维修正算法求解有效导热系数分布,再转化为真实的交界面形状。通过这一转化过程就避免了在每次迭代过程中重新划分网格的步骤,这在一定程度上大大降低了计算的复杂度,减少了计算时间。通过大量的算例来验证算法的有效性。

1 模型及问题描述

文中要研究的二维模型的示意图如图 1 所示,其中对该模型的假设如下:

(1) 稳态传热;(2) 两材料的交界面完全接触,不存在接触热阻;(3) 模型的左右两边界为绝热条件,上边界为对流换热边界条件加热,下边界为对流换热条件散热到环境中。

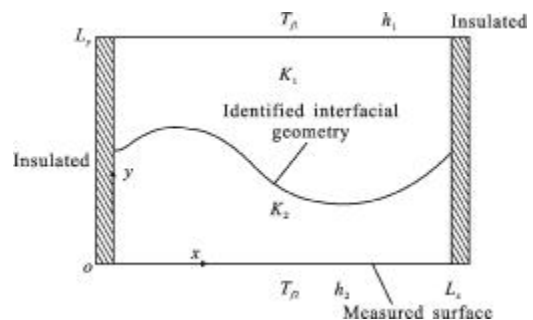


图 1 待识别交界面的二维模型示意图

Fig.1 Two-dimensional model with boundaries to be identified

模型的参数如表 1 所示。

表1 模型参数

Tab.1 Model parameters

Parameter	Specification
Length L_x/m	0.3
Width L_y/m	0.4
Thermal conductivity close to heating surface	K_1 heating surface
Thermal conductivity close to cooling surface	K_2 heating surface
Heating heat transfer coefficient	$h_1=1\ 000\ W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$
Heating bulk temperature	$T_{n1}=373\ K$
Cooling heat transfer coefficient	$h_2=10\ W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$
Cooling bulk temperature	$T_{n2}=283\ K$

检测表面的温度分布可以通过二维导热微分方程及相应边界条件求得。

导热微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

边界条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0 & \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} &= 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= h_2(T - T_{n2}) & \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} &= h_1(T_{n1} - T) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: K 为导热系数。

2 基于改进的一维修正算法的两材料交界面有效导热系数法

文中的核心思想即是两种不同导热系数材料的模型看做只有一种有效导热系数,从而将交界面的识别问题转化成了求解有效导热系数分布 K 的识别问题。如图2所示,此时的有效导热系数分布 K 被离散为了 K_i ,其中 $i=1,2,\dots,n-1,n$ 。将转化后的二

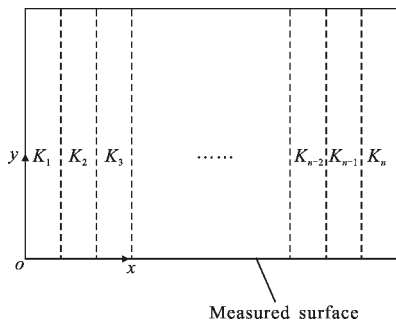


图2 迭代识别的有效导热系数分布示意图

Fig.2 Effective thermal conductivity distribution for iterative identification

维模型简化为一维问题,再以计算温度与检测温度的趋近程度为目标,利用改进的一维修正算法在迭代过程中不断修正有效导热系数的分布,最后根据热阻相等的原则将有效导热系数分布转化成真实的交界面形状。

3 模型沿横轴方向有效导热系数分布识别的迭代公式

根据图2,将二维模型简化为一维问题,从而建立起检测表面的温度 T_0 与有效导热系数分布 K 的关系:

$$K_i = \frac{y_i}{\frac{T_{n1} - T_{0i}}{h_1(T_{0i} - T_{n2})} - \frac{1}{h_1}} \quad (3)$$

式中: K_i 为有效导热系数分布 K 的离散; y_i 为分界面到检测表面的距离 y 的离散值; T_{0i} 为检测表面温度 T_0 的离散值。

再以检测表面的温度分布为目标,利用修正的一维算法对有效导热系数分布进行修正^[12-13]:

$$K_i^{n+1} = K_i^n + K_i^n * (T_{0i} - T_i^n) \quad (4)$$

式中: K_i^n 为 $n-1$ 次迭代以后的有效导热系数分布 K^n 的离散值; T_i^n 为导热系数分布 K^n 所对应的计算温度 T^n 的离散值; K_i^n 为修正项 K^n 的离散值,其计算方法参见参考文献[12];“*”为两个向量的Hadamard积。

收敛条件为:

$$J(K) = \sum_{i=1}^m [T_i^n - T_{0i}]^2 < \varepsilon \quad (5)$$

该收敛条件可以保证得到的识别结果是真实交界面最接近的解。当考虑到测温误差的影响时,收敛条件常采用一个与测量误差和离散点相关的判别条件为:

$$\varepsilon = m\sigma^2 \quad (6)$$

式中: σ 为温度测量的平均标准偏差; m 为检测表面离散的测温点的个数。

4 有效导热系数分布和交界面形状的转化

依据有效导热系数分布的求解结果,利用热阻相等的原则,交界面形状可由下式计算得到:

$$y_i = \frac{L_y K_i (K_2 - K_1)}{K_i (K_2 - K_1)} \quad (7)$$

式中: y_i 为分界面到检测表面距离 y 的离散值; K_1 和

K_2 为试件的真实导热系数; K_i 是有效导热系数分布 K 的离散值; L_y 为区域的 y 方向的尺寸。

5 计算步骤

(1) 将检测表面温度 T_0 代入公式(3)计算导热系数分布的初始假设;

(2) 将等效导热系数代入公式(1)和(2)求得计算温度 T^n , n 为迭代次数;

(3) 根据公式(5)和(6)判定是否收敛, 收敛则跳到步骤 5, 否则继续;

(4) 利用公式(4)修正得到新的有效导热系数 K^n , 并返回到步骤 2;

(5) 利用公式(7)将导热系数分布识别结果转化为交界面形状识别结果。

6 算例及结果讨论

在实际应用当中, 温度场的测量必然存在一定的误差, 所以定义实际温度分布为:

$$Y_i = T_{\alpha} - \omega_i \sigma \quad (8)$$

式中: T_{α} 为根据真实的交界面形状计算得到检测表面温度分布 T_0 的离散值; Y_i 为考虑了随机误差后表面检测温度 Y 的离散值; ω_i 为一个介于 -1 和 1 之间的随机数; σ 为温度的标准偏差。

同时为了更好地说明识别结果的精度, 引入平均相对误差(ARE)的概念:

$$ARE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_i - y_{\alpha}}{y_{\alpha}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中: y_i 为离散的交界面形状的识别结果; y_{α} 为离散的真实交界面的形状。

文中是在模型沿横轴方向上选取了 m 个数据点, 通过识别出的这些数据点的位置与实际交界面的位置进行比较。在最后的处理中, 因为算例中选取的数据点较多, 所以最后识别的交界面的形状是 m 个数据点的直接输出结果, 没有再进行数据拟合。如果实际应用过程中选取的数据点较少, 则可采用 Akima 三次插值^[14-15]将离散的数据点连成光滑曲线。这种曲线拟合方法有着精度高、光滑性好等特点, 能够满足实际应用的需要。

6.1 算例 A: 两种材料水平交界面

图 3 是两种材料水平交界面的识别结果, 将交

界面的位置距离检测表面的坐标值 $y=0.3 \text{ m}$ 所在的水平面作为此时交界面的形状, 取导热系数为 $K_1=300 \text{ W/mK}$, $K_2=10 \text{ W/mK}$, 图 4 是保持交界面的位置不变, 调换两种材料的导热系数, 选取 $K_1=10 \text{ W/mK}$, $K_2=300 \text{ W/mK}$ 的识别结果。图 5 是改变导热系数的值, 选取 $K_1=100 \text{ W/mK}$, $K_2=10 \text{ W/mK}$ 的识别结果。图 6 是识别 $y=0.2 \text{ m}$ 所在处的水平面, 选取 $K_1=300 \text{ W/mK}$, $K_2=10 \text{ W/mK}$ 的识别结果。图 7~10 是当检测温度存在随机误差时的识别结果。

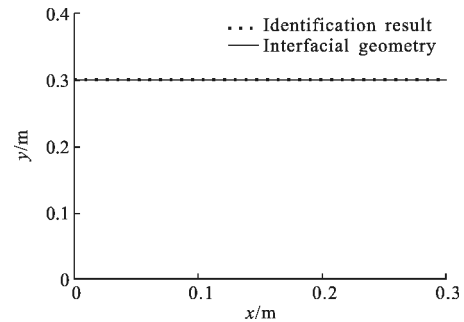


图 3 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

Fig.3 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

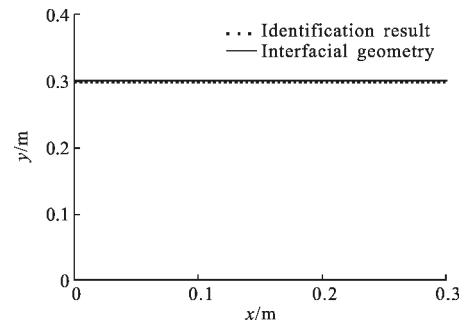


图 4 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

Fig.4 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

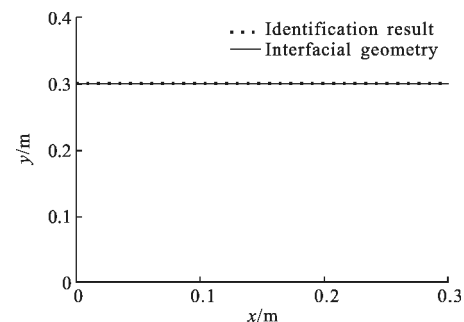


图 5 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

Fig.5 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

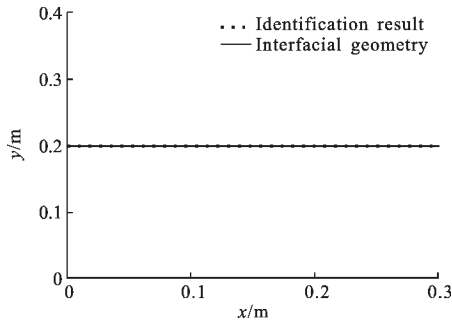


图 6 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.2 \text{ m}$)

Fig.6 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.2 \text{ m}$)

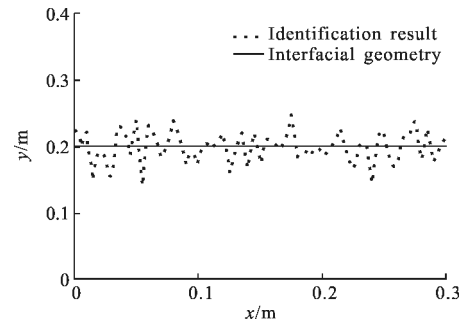


图 10 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.2 \text{ m}$)

Fig.10 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.2 \text{ m}$)

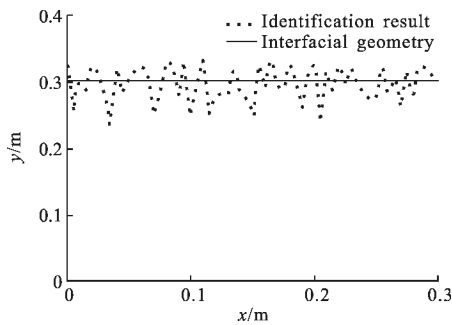


图 7 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

Fig.7 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

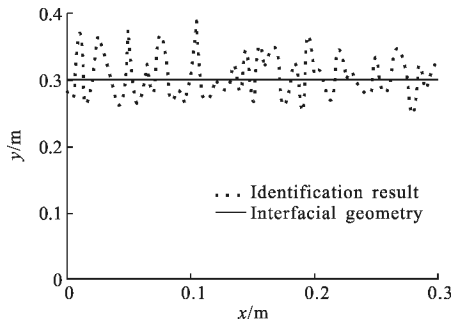


图 8 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

Fig.8 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

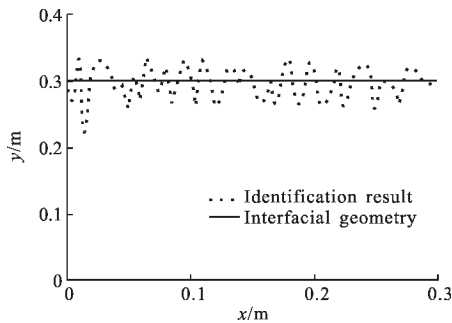


图 9 算例 A 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

Fig.9 Case A identification result ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=100 \text{ W/mK}, y=0.3 \text{ m}$)

对于两种材料水平交界面的识别,从不同算例试验的结果可以看出,在不考虑随机误差的情况下,不论材料导热系数的大小,交界面的位置如何变化,都可以十分精确地识别出真实的交界面形状。在加入了随机误差后,识别结果呈现出带有尖角的锯齿状的交界面,分布在真实交界面附近。识别误差最大为 10.33%,计算结果比较精确,可以满足实际工程的需要。表 2 为算例 A 在不同条件下识别结果的平均相对误差。

表 2 算例 A 平均相对误差

Tab.2 Average relative error of case A

$\sigma/^\circ\text{C}$	$K_1/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$K_2/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	y/m	ARE
0	300	10	0.2	0
0.1	300	10	0.2	7.44%
0	10	300	0.3	0
0.1	10	300	0.3	10.33%
0	100	10	0.3	0
0.1	100	10	0.3	7.68%
0	300	10	0.2	0
0.1	300	10	0.2	10.25%

6.2 算例 B:具有一定斜率的交界面

图 11 是具有一定斜率交界面的识别结果,选取导热系数 $K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$,图 12 是保持交界面的位置不变,调换两种材料的导热系数,选取 $K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}$ 的识别结果。图 13 是改变导热系数的值,选取 $K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$ 的识别结果。图 14~16 是检测表面温度加入随机误差后的识别结果。表 3 为算例 B 在不同条件下识别结果的平均相对误差。

从识别结果可以看出,在不加入随机误差时识别结果较好,加入随机误差后,识别精度随之有所降

低。而且当 K_2 选取较小值时, 识别结果较好, 反之识别结果较差。

表 3 算例 B 平均相对误差

Tab.3 Average relative error of case B

$\sigma/^\circ\text{C}$	$K_1/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$K_2/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	ARE
0	300	10	5.03%
0.1			13.22%
0	10	300	17.00%
0.1			19.78%
0	100	10	4.36%
0.1			13.92%

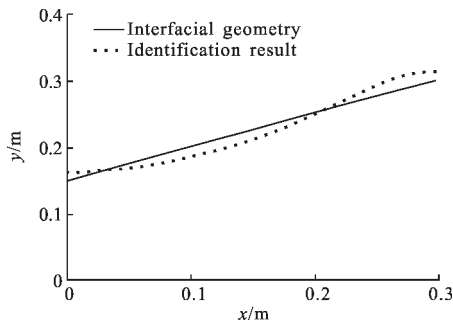


图 11 算例 B 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

Fig.11 Case B identification result ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

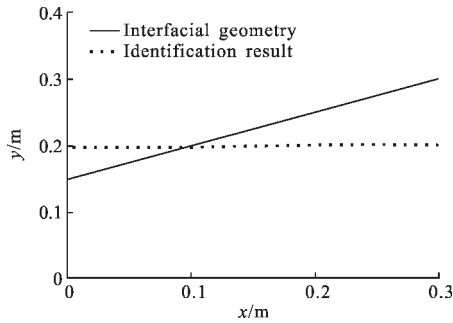


图 12 算例 B 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}$)

Fig.12 Case B identification result ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}$)

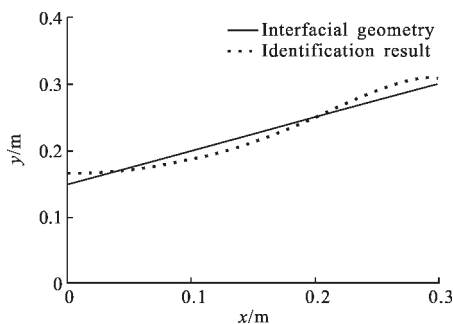


图 13 算例 B 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

Fig.13 Case B identification result ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

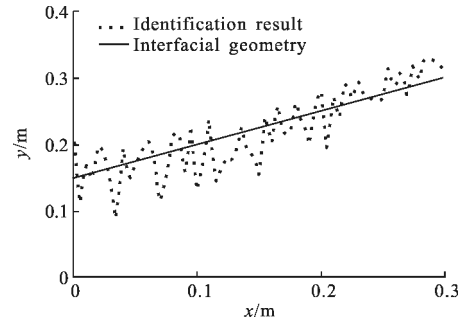


图 14 算例 B 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

Fig.14 Case B identification result ($\varepsilon=0, K_1=300 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

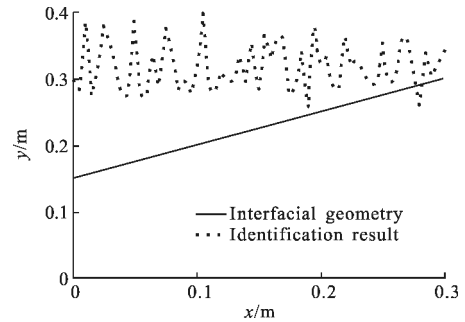


图 15 算例 B 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}$)

Fig.15 Case B identification result ($\varepsilon=0, K_1=10 \text{ W/mK}, K_2=300 \text{ W/mK}$)

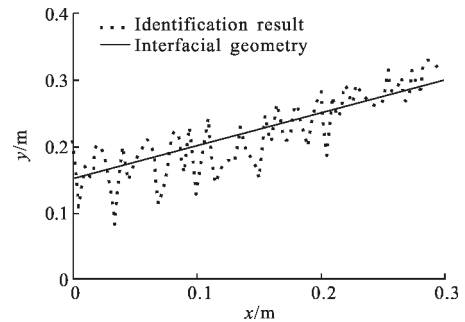


图 16 算例 B 识别结果 ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

Fig.16 Case B identification result ($\varepsilon=0, K_1=100 \text{ W/mK}, K_2=10 \text{ W/mK}$)

图 11 和图 12 中识别形状与真实形状相差较大是因为检测表面温度分布不同所致。如图 17 所示, 是图 11 算例的检测表面温度场的分布。在该算例

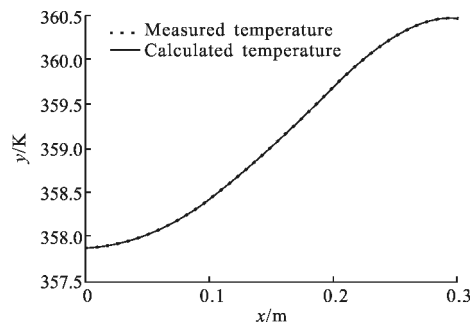


图 17 图 11 算例检测面温度分布

Fig.17 Measured temperature distribution of Fig.11

中,选取 $K_1=300\text{ W/mK}$, $K_2=10\text{ W/mK}$,因为此时检测表面一侧的导热系数 K_2 较小,导热性能较差,在达到稳态后,检测表面的温度分布较为陡峭,最大温差在 2 K 以上,能够较为明显地反映出交界面形状的变化。所以最终的识别结果较好,能够较为精确地识别出真实的交界面形状。

而当调换了两种材料的导热系数,如图 18 所示,是图 12 算例的检测表面温度场的分布。在该算例中, $K_1=10\text{ W/mK}$, $K_2=300\text{ W/mK}$,因为选取 K_2 值较大,导热性能较好,在达到稳态后,检测表面的温度分布较为平直,最大温差在 0.2 K 以下,不能够较为明显地反映出交界面形状的变化。所以最终的识别结果较差。对于选取导热系数 K_2 较大的情形,利用传热反问题方法进行定量识别是无意义的。因此,后面的算例只讨论 K_1 较大的情形。

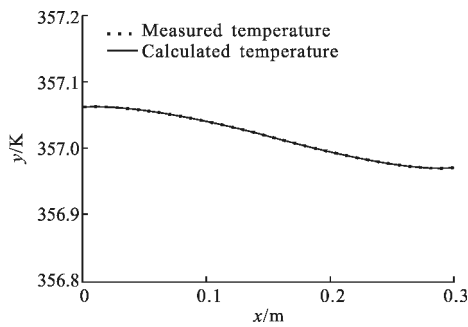


图 18 图 12 算例检测面温度分布

Fig.18 Measured temperature distribution of Fig.12

6.3 算例 C: 具有凸起的交界面

图 19 是具有突起的交界面的识别结果,选取 $K_1=300\text{ W/mK}$, $K_2=10\text{ W/mK}$ 。图 20 是改变导热系数的值,选取 $K_1=100\text{ W/mK}$, $K_2=10\text{ W/mK}$ 的识别结果。图 21~22 是检测表面温度加入随机误差后的识别结果。表 4 为算例 C 在不同条件下识别结果的平均相对误差。

表 4 算例 C 平均相对误差

Tab.4 Average relative error of case C

$\sigma/^\circ\text{C}$	$K_1/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$K_2/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	ARE
0	300	10	16.60%
0.1			18.03%
0	10	300	15.08%
0.1			17.08%

因为稳态导热问题在达到动态平衡后,检测表面的温度因为热扩散作用必然会形成一条平缓的曲线形状

的温度分布,不会出现真实形状中的形状突变,所以识别结果误差相对较大。在加入了随机误差后,误差进一步加大,但仍能控制在 20%以内,满足实际工程应用。

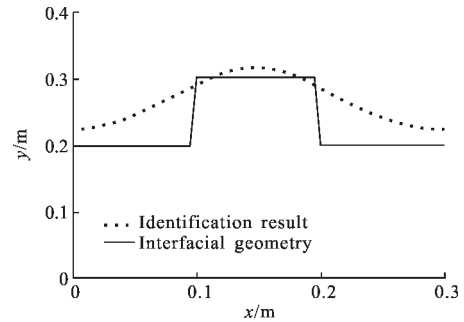


图 19 算例 C 识别结果($\varepsilon=0, K_1=300\text{ W/mK}, K_2=10\text{ W/mK}$)

Fig.19 Case C identification result($\varepsilon=0, K_1=300\text{ W/mK}, K_2=10\text{ W/mK}$)

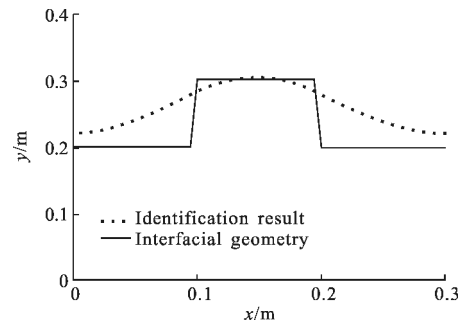


图 20 算例 C 识别结果($\varepsilon=0, K_1=10\text{ W/mK}, K_2=300\text{ W/mK}$)

Fig.20 Case C identification result($\varepsilon=0, K_1=10\text{ W/mK}, K_2=300\text{ W/mK}$)

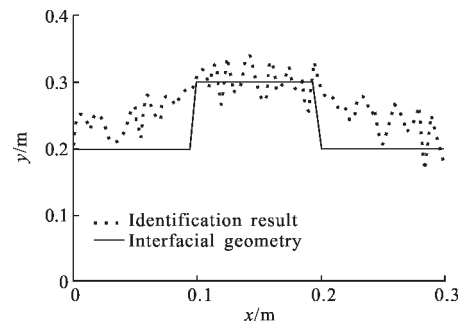


图 21 算例 C 识别结果($\varepsilon=0, K_1=300\text{ W/mK}, K_2=10\text{ W/mK}$)

Fig.21 Case C identification result($\varepsilon=0, K_1=300\text{ W/mK}, K_2=10\text{ W/mK}$)

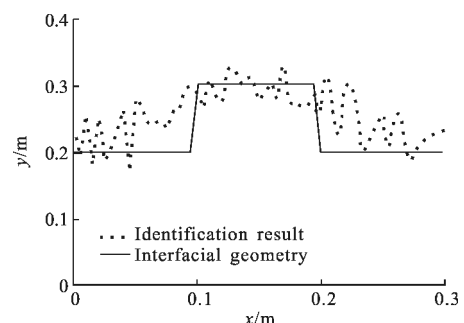


图 22 算例 C 识别结果($\varepsilon=0.1, K_1=10\text{ W/mK}, K_2=300\text{ W/mK}$)

Fig.22 Case C identification result($\varepsilon=0.1, K_1=10\text{ W/mK}, K_2=300\text{ W/mK}$)

7 结 论

文中的重点是研究两种材料交界面形状的识别问题。为了简化计算的复杂度,文中将交界面形状识别问题转化为了有效导热系数的分布问题。通过改进的一维修正算法求解有效导热系数的分布,最后再转化为真实的交界面形状。通过多个算例的计算,验证了算法的有效性,并得到以下结论:

(1) 识别两种不同导热系数的材料交界面时,靠近检测表面一侧材料的导热系数相对另一侧较小时,检测表面温度分布的最大温差较大,可以有效反应出交界面不同形状的变化,所以识别结果比较精确;反之,若检测表面一侧材料的导热系数较大,温度分布趋近于一条直线,此时就没有定量识别的意义;(2) 交界面的位置的变化对识别结果影响不大,识别精度主要受导热系数、识别交界面的形状等因素的影响;(3) 加入随机误差后,算法没有明显放大温度测量误差,识别结果仍能满足工程实际需要。

参考文献:

- [1] 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: 2045-2053.
- [2] Huang C H, Chaing M T. A three-dimensional inverse geometry problem in identifying irregular boundary Configurations[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48: 502-513.
- [3] Huang C H, Tsai C C. A transient inverse two-dimensional geometry problem in estimation time-dependent irregular boundary configurations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41: 1707-1718.
- [4] Fan C L, Sun F R, Yang L. An algorithm study on identification of the subsurface defect for infrared thermography [J]. *J Eng Thermophys*, 2007, 28: 304-306. (in Chinese)
- [5] Fan C L, Sun F R, Yang L. A quantitative identification technique for a two-dimensional subsurface defect based on surface temperature measurement [J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2009, 38: 223-233.
- [6] Li B, Liu L H. An algorithm for geometry boundary identification of heat conduction problem based on boundary element discretization [C]//*Proceedings of CSEE*, 2008: 20. (in Chinese)
- [7] Li B, Liu L H. Geometry boundary identification of unsteady heat conduction based on dual reciprocity boundary element method[C]//*Proceedings of the CSEE*, 2009: 5.
- [8] Chen C K, Su C R. Inverse estimation for temperatures of outer surface and geometry of inner surface of furnace with two layer walls [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49: 301-310.
- [9] Su C R, Chen C K. Geometry estimation of the furnace inner wall by an inverse approach [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 50: 3767-3773.
- [10] 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.
- [11] Fan C L, Sun F R, Yang L. A new computational scheme on quantitative inner pipe boundary identification based on the estimation of effective thermal conductivity [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41: 205501.
- [12] Fan C L, Sun F R, Yang L. Conductivity-based scheme for identification of an inner pipe boundary from temperature measurements [J]. *AIAA J Thermophy Heat Transfer*, 2009, 23: 197-199.
- [13] Fan C L, Zhang M X, Hu S X, et al. Identification of plate surface geometry: a numerical and experimental study [J]. *Numerical Heat Transfer B*, 2012, 61: 52-70.
- [14] Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures[J]. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1970, 17(4): 589-602.
- [15] Li B. Boundary element method for inverse geometry problem of heat conduction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.