

文章编号: 1672-8785(2012)10-0033-06

三维试件固定深度内热源几何分布识别研究

曹明宇 范春利 孙丰瑞

(海军工程大学动力工程系, 湖北武汉 430033)

摘 要: 基于表面测温技术的传热反问题研究是红外无损检测技术从定性到定量发展的理论基础, 同时也是其中一个重点和难点问题。为了研究三维试件固定深度上内热源的几何分布问题, 通过将三维试件简化为一维模型, 建立了一维问题中检测表面温度和内部固定深度的内热源的解析解关系。然后利用改进的一维修正算法对内热源不断进行修正, 在给定的收敛条件下得到三维试件固定深度上的内热源的分布, 使得计算温度的分布和检测温度的分布吻合得最好。数值实验结果表明, 该方法具有有效性和简便性。

关键词: 导热反问题; 固定深度内热源; 几何分布识别; 改进的一维修正算法

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.10.008

Geometry Identification of Fixed-depth Internal Heat Sources in Three-dimensional Test-piece Based on Surface Temperature Measurement

CAO Ming-yu, FAN Chun-li, SUN Feng-rui

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

Abstract: The inverse heat conduction problem based on surface temperature measurement is not only the key theoretical basis for the quantitative development of thermographic nondestructive techniques, but also an important and difficult issue. To identify the geometry of fixed-depth internal heat sources in a three-dimensional test-piece, the three-dimensional test-piece is simplified to a one-dimensional model so that establishing the relationship between the measured temperature and the internal heat sources in one-dimensional problem. The internal heat sources obtained can be corrected by the modified one-dimensional correction method until reaching the stopping criterions thus the result identified can make the error between the calculation temperature distribution and measured temperature distribution to be minimum. Numerical test cases show that the method is effective and simple.

Key words: inverse heat conduction problem; fixed depth internal heat source; geometry identification; modified one-dimensional correction method

0 引言

近些年来, 随着红外热像仪技术的不断发展并趋于成熟, 红外热像检测技术也因其自身的优点而得到了广泛的应用。以检测表面的温

度分布为标准的缺陷几何形状识别就是其中的重点研究问题。

各国研究人员已经针对基于导热反问题的缺陷几何形状识别问题提出了一些行之有效的

收稿日期: 2012-08-22

作者简介: 曹明宇(1988-), 男, 山东冠县人, 硕士研究生, 主要从事基于红外测温的缺陷形状识别算法研究。

E-mail: mingyu0601@126.com

算法。目前发展的算法主要包括共轭梯度法、最速下降法、虚拟边界法以及改进的一维修正算法。

Huang 等人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中^[3]。其中,大量的数值试验都取得了较好的效果,证明该算法具有有效性。另外, Huang 等人还利用最速下降法对二维多个缺陷^[4]和三维边界面上的缺陷^[5]的形状进行了反演识别,并取得了较好的效果。

李斌等人^[6-7]则通过用边界元法以及将改进的边界元法和共轭梯度法相结合,讨论了二维不规则边界形状初值、测量点等因素对识别结果的影响,验证了算法的有效性。

Fan 等人对已有的一维修正算法进行了改进,并通过研究试件分界面的形状识别问题^[8]和圆管内表面边界形状识别问题^[9],取得了比改进前更好的效果,验证了该算法在缺陷形状识别问题中的有效性。此外, Fan 等人^[10-11]还提出了一种转化思想,即将边界形状的识别问题转化为有效导热系数的分布问题,大大减小了运算的复杂程度。他们通过大量数值试验证明了该方法的有效性。

本文针对三维试件固定深度内热源几何分布进行的识别研究也是缺陷几何形状识别问题中的一种。通过将内热源的几何分布问题转化为内热源数值大小的识别问题,再利用改进的一维修正算法将三维问题简化为一维问题,并对内热源数值进行修正,从而大大简化识别的复杂程度。然后通过大量的算例来验证算法的有效性。

1 模型及正问题描述

本文的研究对象是固定深度上带有内热源的三维试件(见图1)。对该物理模型的假设如下:(1)稳态传热;(2)试件固定深度上的内热源均被当作均匀体内热源;(3)试件的底部为绝热的边界条件,其余暴露在空气中的各面则构成自然对流的边界条件。

表1列出了模型参数。

导热微分方程及边界条件为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = h(T_f - T), \quad \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0} = h(T_f - T),$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=L_x} = h(T - T_f),$$

$$\frac{\partial T}{\partial y}|_{y=L_y} = h(T - T_f), \quad \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=L_z} = h(T - T_f) \quad (2)$$

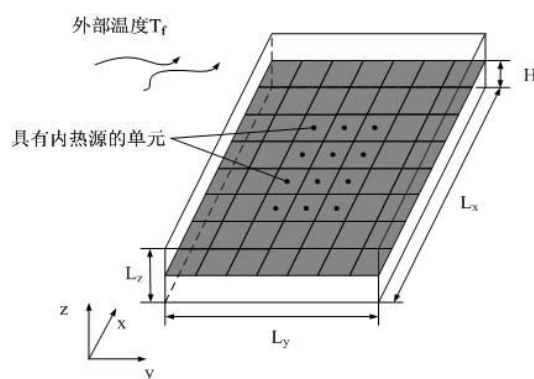


图1 三维试件固定深度内的热源分布示意图

表1 试件参数

参数	数值
长	$L_x = 6 \text{ cm}$
宽	$L_y = 5 \text{ cm}$
高	$L_z = 1.5 \text{ cm}$
热源深度	$H = 0.75 \text{ cm}$
导热系数	$\lambda = 0.25 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
对流换热系数	$h = 10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
外部空气温度	$T_f = 293 \text{ K}$

2 反问题描述

本文利用改进的一维修正算法对待求参数进行反演识别。改进的一维修正算法的基本原理是,通过将二维、三维的问题近似为一维模型进行处理。利用一维问题的解析解建立关于检测表面温度和待求参数之间的关系,再利用 Taylor 公式对待求参数进行修正,最终得到较为精确的参数数值。本文即是对试件内部一定深度上的

内热源的数值大小进行反演, 从而对固定深度上的内热源的大小和几何分布有一个较为精确的估计。

通过简化的一维模型建立检测表面温度和内热源之间的关系:

$$q_v = \frac{(T_o - T_f)h}{\delta} \quad (3)$$

对内热源进行修正的公式为

$$q_v^{n+1} = q_v^n + q_v'^n * (T_o - T^n) \quad (4)$$

式中, q_v 为待修正的内热源; q_v' 修正项的计算方法见文献 [8-9]; T_o 为检测温度; T^n 为计算温度; 上标 n 为迭代次数; 符号 “*” 为两个向量的 Hadamard 积, 也就是由两个向量的各个元素的乘积组成一个新向量的计算方法。

收敛条件为

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

式中, T_i^n 为第 n 次迭代后检测表面的计算温度, T_{oi} 为检测温度。通过检验两者的吻合程度对迭代过程进行判断。该收敛条件可以保证得到所识别结果与真实边界最接近的解。但考虑到测温误差的影响, 收敛数通常采用一个与测量误差及离散点相关的判别条件:

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

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。

3 计算步骤

3.1 步骤一

将检测表面温度 T_o 代入式 (3), 得到内热源的初步大小 q_v 。

3.2 步骤二

将 q_v^n 代入式 (1) 和式 (2), 求得检测表面的计算温度 T^n , 其中 n 为迭代次数。

3.3 步骤三

根据式 (5) 和式 (6) 判断是否收敛。若收敛, 则输出结果 q_v^n , 否则继续。

3.4 步骤四

通过式 (4) 修正得到新的 q_v^{n+1} 并返回步骤二。

4 算例及结果讨论

为了验证改进的一维修正算法对固定深度上内热源的几何分布进行识别的有效性, 本节通过一些具体的算例对算法进行分析和讨论。

因为在实际测温环节中都存在随机误差, 所以在处理检测温度时采用式 (7):

$$Y_i = T_{oi} + \omega_i \sigma \quad (7)$$

式中, T_{oi} 为检测温度的分布; ω_i 为 $-1.0 \sim +1.0$ 之间的随机数; σ 为温度测量的标准偏差。

识别结果和真实的内热源几何分布的吻合程度可通过平均相对误差 (ARE) 来定义:

$$ARE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{q_{vi} - q_{v oi}}{q_{v oi}} \right| \times 100\% \quad (8)$$

式中, q_{vi} 为识别出的热源分布的离散结果, $q_{v oi}$ 为真实的热源分布的离散结果。

4.1 算例一

首先讨论在固定的深度上, 中间区域有一部分集中等值内热源的情况, 内热源的大小为 400 kW/m^3 。图 2(A) 所示为真实的内热源几何形状分布及大小。图 2(B)、图 2(C)、图 2(D) 所示分别为随机误差 $\sigma=0$ 、 0.2 、 0.3 时内热源的识别结果。表 2 列出了各识别结果的平均相对误差。在不加入随机误差时, 识别结果较为精确, 误差只有 2.7% ; 随着随机误差的加入, 识别误差也有所增加, 但基本在 10% 以内。

4.2 算例二

为了检验网格的疏密程度对识别精度的影响, 我们对算例一的模型的 x 、 y 方向的网格加密一倍。图 3(A) 所示为此时的真实内热源几何形状分布及大小, 图 3(B) 所示为识别结果。表 2 列出了结果识别误差。可以看出, 采用改进的一维算法对加密后网格进行识别的结果仍然可以保证收敛的精度。在划分网格以后, 各网格所对应的识别项都是按照和对应网格的检测温度进行对比而不断改进的, 所以在此研究问题上网格的疏密程度对于对应点识别精度的影响不大。

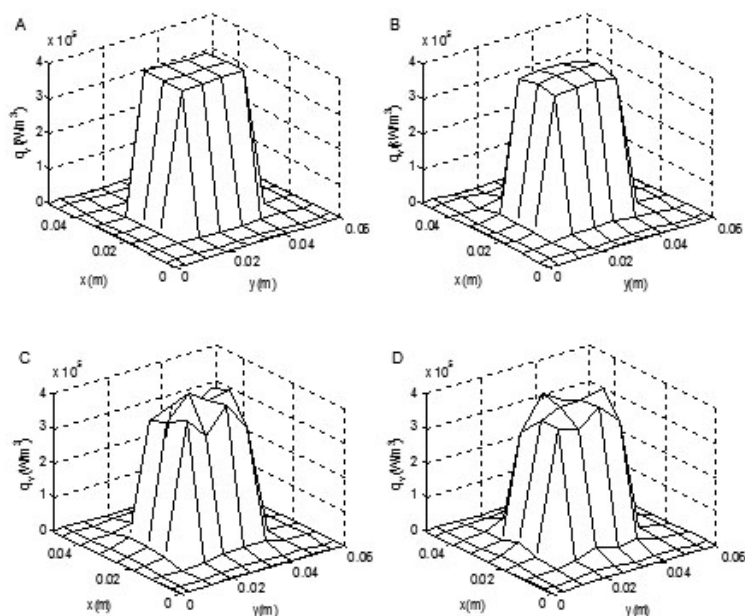


图 2 算例一的识别结果 (A : 真实形状; B : $\sigma=0\text{ }^{\circ}\text{C}$; C : $\sigma=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; D : $\sigma=0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

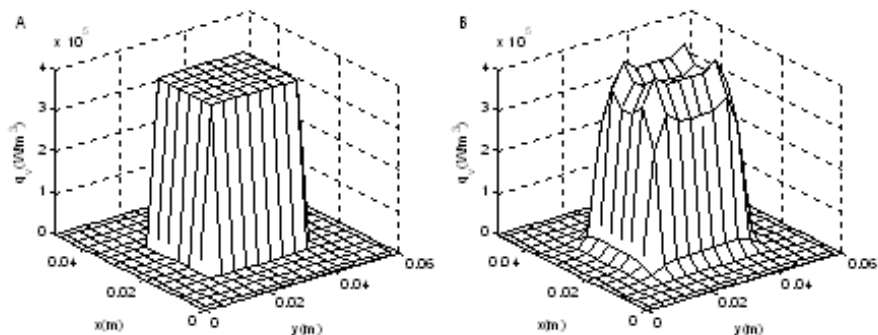


图 3 算例二的识别结果: 网格加密为 16×18 (A : 真实形状; B : $\sigma=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

4.3 算例三

讨论在固定深度上的大小为阶梯分布的内热源几何分布的识别问题。图 4(A) 所示为真实的内热源几何形状及大小, 图 4(B)、图 4(C)、图 4(D) 所示分别为随机误差 $\sigma=0$ 、 0.2 、 0.3 时内热源的识别结果。表 2 列出了各识别结果的平均相对误差。在不考虑随机误差时, 识别误差较小; 加入随机误差后, 识别误差有所增加, 但都保持在 12 % 以内, 满足实际工程的需要。

5 结论

本文为在固定深度上有内热源的三维试件

建立了物理和数学模型, 并利用有限体积法进行了网格划分, 然后通过改进的一维修正算法对内热源的几何分布和数值大小进行了反演识别, 最后通过不同的算例验证了该算法对该问题的有效性。同时还得出了以下结论:

(1) 该算法通过识别内热源的大小, 成功地对内热源的几何分布进行了识别, 大大降低了缺陷形状识别的复杂度;

(2) 网格划分的疏密程度和检测温度对收敛条件的影响不是太大, 识别结果都能满足实际工程的需要。

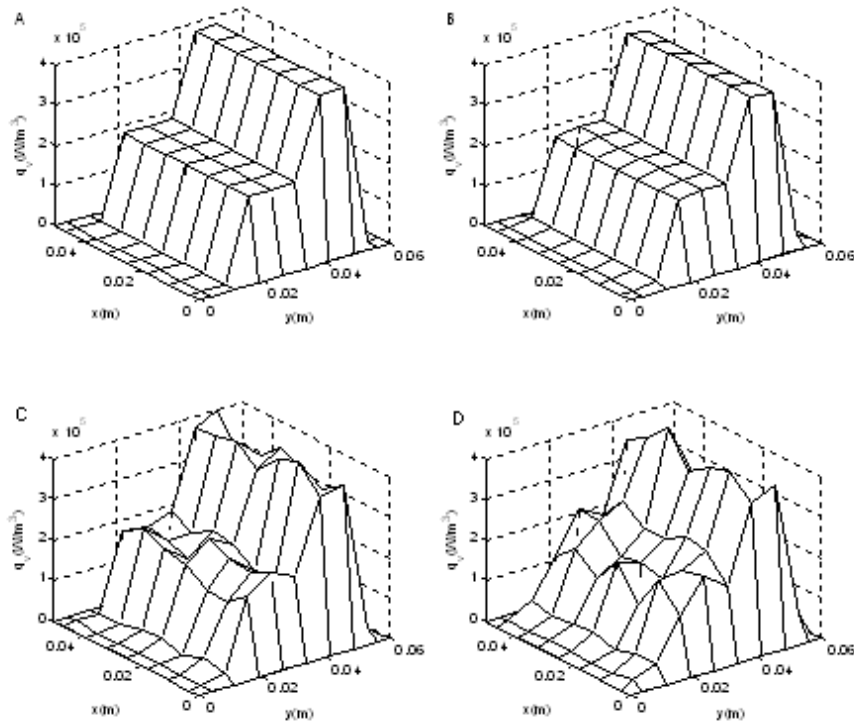


图 4 算例三的识别结果 (A : 真实形状; B : $\sigma=0\text{ }^{\circ}\text{C}$; C : $\sigma=0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; D : $\sigma=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

表 2 各算例的识别误差

算例	算例一			算例二		算例三	
随机误差 $\sigma/{}^{\circ}\text{C}$	0	0.3	0.5	0	0	0.3	0.5
平均相对误差 $e_{ARE}/\%$	2.7	8.77	10.66	9.27	2.28	8.55	11.22

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] Huang C H, Chiang C C, Chen H M. Shape Identification Problem in Estimating the Geometry of Multiple Cavities [J]. *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, **12**: 270–277.

[5] Huang C H, Chaing M T. A Transient Three-Dimensional Inverse Geometry Problem in Estimating the Space and Time-Dependent Irregular Boundary Shapes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**: 5238–5246.

[6] 李斌, 刘林华. 一种基于边界元离散的导热问题几何边界识别算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, **28**(20): 38–43.

[7] 李斌, 刘林华. 基于双倒易边界元法的非稳态导热几何边界识别 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, **29**(5): 66–71.

[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] 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.

- [10] 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.
- [11] 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.

新闻动态 News

欧洲新气象卫星开始获取地球温度

据 <http://phys.org> 网站报道, 装在最近发射的欧洲气象卫星 MSG-3 上的地球同步地球辐射收支仪 (GERB) 于今年 8 月成功启动并于次日产生第一幅图像。这些图像数据对于以新的方式验证气候模型和测量气候图形中的明显变化将是至关重要的。

该 GERB 仪器是 MSG-3 卫星上的两台仪器之一, 由欧洲气象卫星组织管理。它是在另一台旋转增强可见光与红外成像仪 (SEVIRI) 成功打开并产生第一幅图像以后再打开的。GERB 是一台用于地球辐射收支研究的可见光-红外辐射计, 能对位于大气顶层的短波和长波分量进行精确测量。

据有关人员说, 虽然该仪器还有许多测试要做, 但是其发回的第一幅图像已表明其两个通道的性能都很好, 说明该仪器正在测量由地球发射和反射的热能量。这将使人们能够将高时间分辨率地球同步辐射收支测量的气候记录延续多年。

由前两台地球同步地球辐射收支仪 GERB-1 和 GERB-2 积累的 9 年数据, 已使人们能够以新的方式测试气候模型, 从而深入了解一天的发射和反射能量通量是如何变化的以及如何响应云和气溶胶的变化。这种记录越长, 对气候的了解就越多, 这样人们便能够看到较长期的气候变化趋势。所以, GERB-3 的所有迹象都表明它将有希望再进行 3 到 5 年的测量。

GERB 仪器是通过对地球吸收的太阳辐射和发射的红外能量进行高精度度测量来判断地球是如何加热和变冷的。它每 15 分钟进行一次测量, 这使得科学家们可以对一些事件和特征, 如对流云、锋系以及气溶胶随沙尘暴或火山爆发的变化进行研究。GERB-3 是第一台从地球同步轨道对地球辐射收支进行专门测量的仪器, 它提供的数据将可以供全世界的气象学家和气候科学家使用。

图 1 所示图像是经过校正的反映反射太阳光的短波通道图像, 该通道对地球向外发射的热辐射和反射的太阳光都是敏感的。有了这些观测数据, 人们便可以计算出反射的短波通量和发射的长波通量, 然后供科学家用来研究气候。

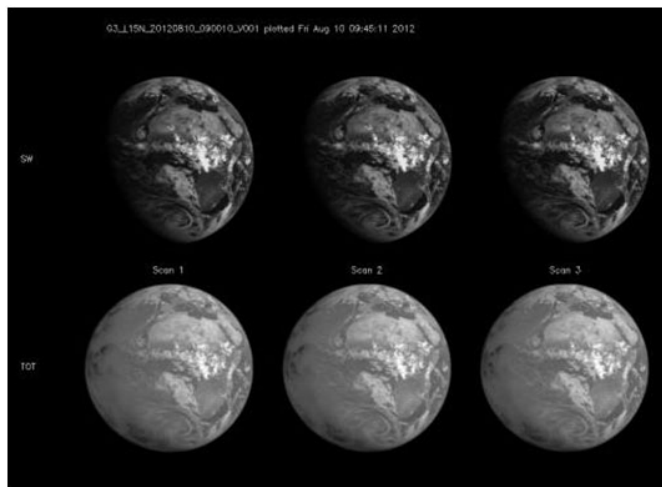


图 1 短波通道图像

□ 高国龙