

红外成像检测中一种新型噪声抑制方法的理论模拟

杨黎俊 耿完楨 姜铃珍 邹立勋 洪 晶
(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)
崔振阳 卢元军
(东北电力科学试验研究院, 沈阳 110001)

摘 要 根据线性微分方程的特点及两个合理的近似, 提出了一种新型的用计算机辅助去除红外成像检测中高功率噪声的方法. 仿真结果表明该方法有良好的抑制噪声效果.

关键词 红外成像, 噪声抑制, 无损检测.

1 引 言

利用传统的检测方法检测大面积是不现实的, 因此, 人们往往利用红外成像技术大面积扫描及非接触检测的特点, 开发新型的红外无损检测技术^[1, 2]. 在红外成像无损检测中, 被检物体导热系数相对较小的稳态情形已有很多报道^[3, 4]. 当被检物体的导热系数变大时, 例如大多数的金属, 稳态时产生的对应于表面下缺陷的温差会变得很小而不易探测, 且极容易被噪声淹没. 在这种情况下, 就需要一个加热或冷却的加载过程, 以获得一个动态温度分布, 进而表征缺陷. 精确表征缺陷的形状意味着利用动态的温度演化过程来求解动态微分方程的反问题. 这相对于稳态过程的反问题求解要困难得多^[5, 6], 这方面仍有很多问题没有解决. 更重要的是, 金属管外壁厚呈随机分布的低导热系数(LTC)层所导致的噪声又给检测过程添加了额外的困难. 噪声能否被很好地抑制就成为缺陷能否被检出的根本所在.

一般情况下, 低功率的噪声可由通常的滤波或其它一些图像处理技术得到消除^[7, 8]; 利用锁相技术则可将低功率振荡信号从高功率噪声中提取出来^[9]. 然而, 这里所遇到的信号与噪声的关系与上述两种都不同: 即噪声具有很大的功率但信号却不具有振荡特性. 在文献 [10] 中, 作者曾提出用二次加载的方法解决大功率噪声问题, 但该法实现时较难, 且不易控制, 需要内外加载的两种信号进行匹配. 本文则提出一种新型的只要单面加载信号, 且实现起来较容易的方法. 即充分利用线性微分方程的特点, 采用两个合理的近似条件, 通过计算机辅助的方法来抑制大功率噪声. 这种方法对管外表面附有一层热物性基本一致但厚度随机分布的情形非常适用.

2 噪声抑制的理论基础

2.1 理论分析

对于所考虑的问题, 写出柱坐标系下三维动态导热控制微分方程为

$$LT + V = 0 \tag{1}$$

式中 L 表示微分算子, 其形式如下:

$$L = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) - \rho c \frac{\partial}{\partial t},$$

式中 ρ 、 c 、 k 和 T 分别为体密度、热容、导热系数及温度, r 、 θ 和 z 为空间坐标, t 为时间变量, V 为单位体积的产热率.

为清楚起见, 先用图 1 中两种二维结构的温度分布来说明去除噪声的思想. 两种结构外表面覆盖有相同厚度分布的低导热系数层, 所不同的是图 1(a) 结构的内表面带有缺陷. 两种

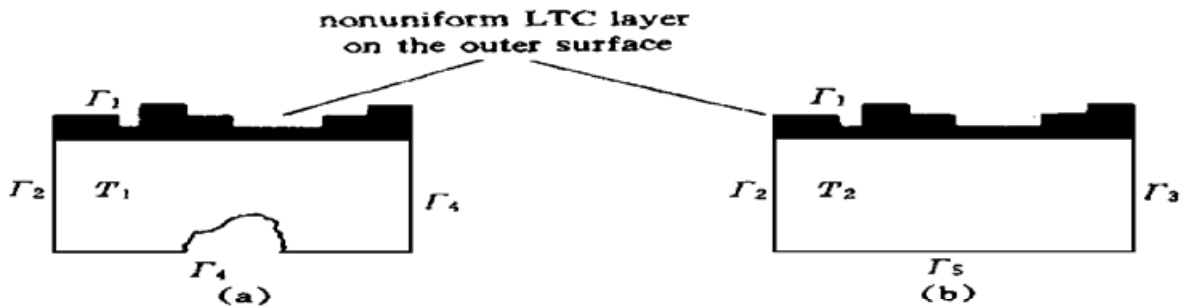


Fig. 1 Schematics of theoretical analysis

结构的控制微分方程及边界条件分别为

$$\left. \begin{aligned} <_1 + V = 0 \\ \Gamma_1: &u_1T_1 + c_1 = 0 \\ \Gamma_2, \Gamma_3: &u_2T_1 + c_2 = 0 \\ \Gamma_4: &u_3T_1 + c_3 = 0 \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

以及

$$\left. \begin{aligned} <_2 + V = 0 \\ \Gamma_1: &u_1T_2 + c_1 = 0 \\ \Gamma_2, \Gamma_3: &u_2T_2 + c_2 = 0 \\ \Gamma_5: &u_3T_2 + c_3 = 0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

其中 T_1 、 T_2 分别为两结构的温度场; $\Gamma_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 为边界形状; $c_i (i = 1, 2, 3)$ 为常数; $u_i (i = 1, 2, 3)$ 为边界条件算子. 在边界 Γ_2 和 Γ_3 上, $u_2 = -k \frac{\partial}{\partial n}$, $c_2 = 0$, 即为绝热边界条件(式中 $\frac{\partial}{\partial n}$ 表示法线方向上的方向导数); 在边界 Γ_4 和 Γ_5 上, $u_3 = -k \frac{\partial}{\partial n} - \alpha_1$, $c_3 \neq 0$, α_1 为常数, 故为对流换热条件; 在边界 Γ_1 上, $u_1 = -k \frac{\partial}{\partial n}$, $c_1 \neq 0$ (热流恒定) 或 $u_1 = -k \frac{\partial}{\partial n} - \alpha_2$, α_2 为常数(对流换热边界条件).

由于钢管及低导热系数层在热加载前后的温度变化范围内, 导热系数的变化不大, 所以可按常数处理. 这样, 无论是控制微分算子 L 还是边界条件算子 $u_i (i = 1, 2, 3)$ 都成为线性算子, 进而叠加原理成立. 对应于每一结构的温度分布(T_1 或 T_2) 都可看成各个边界条件 u_i 独立地作用于控制微分方程后所得到的解的叠加结果. 由(2)式及(3)式可知, 在边界 Γ_1 、 Γ_2

和 Γ_3 上, 边界条件分别对 T_1 和 T_2 的贡献是一样的. 因此, 若取 $T = T_1 - T_2$, 则三个同样边界上同样的边界条件所产生的影响将互相抵消, 低导热系数层的影响自然也就不存在了. T 中不为零的部分只能是由边界 Γ_4 和 Γ_5 的差别造成的, 而边界 Γ_4 和 Γ_5 的差别则正是在缺陷处的差别, 所以 T 表示的温度分布就是由缺陷所产生的畸变温度信号.

2.2 数值计算验证^[11]

由于上述结构无法得到解析解, 因此本文用控制容积导出的差分方法计算一段金属管壁在各种边界条件下外表面的动态温度分布. 在计算中, 本文采用了 Visual C++ 2.0 以上版本的编程语言, 程序中的静态数组可以大大超过普通的磁盘操作系统(DOS)的限制, 进而差分方法中的节点数增大, 可以反映出缺陷的细节和低导热系数层的随机分布情况.

下面计算一段内壁弧长为 115.2 mm 的水冷壁管的一部分, 其内径 r_i 和外径 r_o 分别为 55.00 mm 和 60.00 mm, 管子的长度也取为 115.2 mm; 在管壁内表面中央有一规则缺陷, 其对应的弧长和长度都取为 22.20 mm, 深度为 1.10 mm; 管壁外表面覆盖有一层如图 2(a) 所示的随机分布的低导热系数层, 其厚度范围为 0~ 1.02 mm, 注意为作图方便起见, 图中已将管壁的曲面展开为平面. 管壁、水、低导热系数层及空气的导热系数分别为 $40 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $0.65 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 及 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; 管壁内外表面与空气之间的对流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 而内表面与水之间的对流换热系数设为 $10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (可由水流的速度来调节); 管壁、低导热系数层及空气的体密度分别为 $7840 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $2800 \text{ kg}/\text{m}^3$ 及 $1.025 \text{ kg}/\text{m}^3$; 管壁、水及空气的比热分别为 $460 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 及 $1013 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; 管壁及周围环境的初始温度都设为 20°C ; 而管壁其它部分均设为

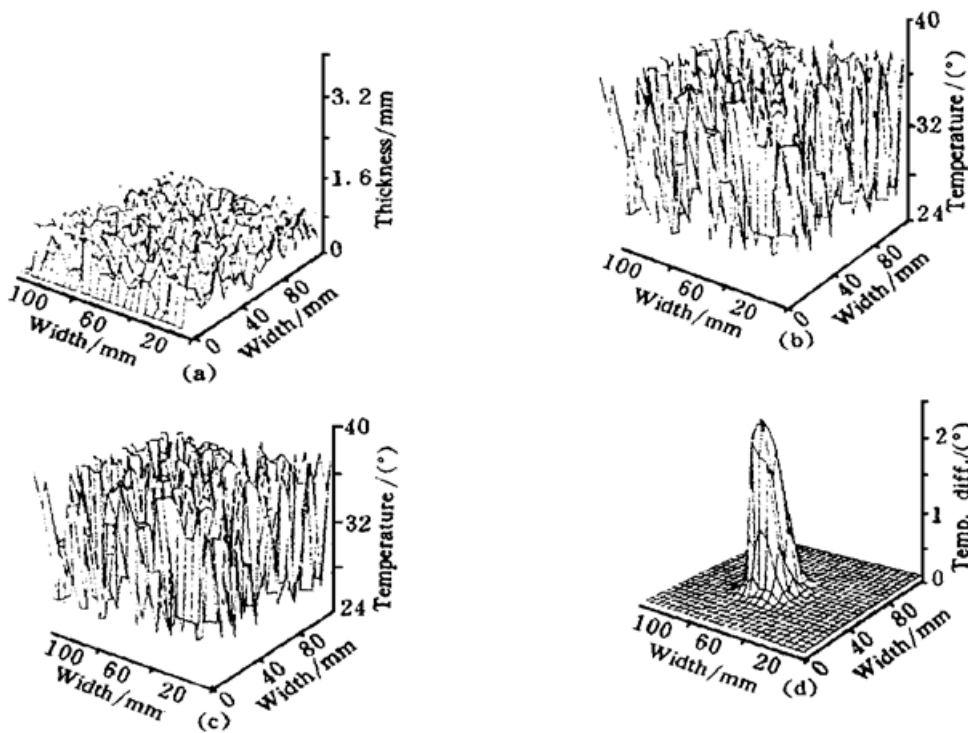


Fig. 2 Graphics of numerical illustration. (a) Randomly distributed LTC layer on the outer surface of the tube. (b) Outer surface temperature profile $T_1|_{r_1}$ 3 seconds after the tube is filled with water of 50°C , (c) Outer surface temperature profile $T_2|_{r_1}$ of a tube without defect under the same heat-loading conditions, (d) Temperature difference $T|_{r_1} = (T_2 - T_1)|_{r_1}$

绝热条件.

假定管内迅速装满 50°C 的热水, 则可计算得到 3 秒钟后管外表面的温度场如图 2(b) 所示, 即内表面有缺陷时外表面在某一时刻的温度分布 $T_1|_{r_1}$; 然后利用同样已知的低导热系数层厚度分布, 计算得到内表面无缺陷时在同样条件下管壁外表面的温度分布 $T_2|_{r_1}$, 如图 2(c) 所示; 两图相减便得到图 2(d), 即 $T|_{r_1} = (T_2 - T_1)|_{r_1}$. 显然在图 2(d) 中已消除了低导热系数层的影响, 温度分布仅仅反映缺陷的信息.

当管壁内表面有缺陷时, 得到如图 2(b) 所对应的结果是很容易的, 仅需在管内快速充满热水后用热像仪记录即可. 但在实际检测中, 当存在缺陷时, 是无法得到没有缺陷时同样加载条件下的温度分布的. 因此, 作者设想用计算机模拟的方法来产生无缺陷时的温度分布. 此时, 所需确定的最主要的未知参数是管壁外表面随机分布的低导热系数层的厚度分布. 本文提出通过两个近似条件求出低导热系数层的厚度分布, 进而用计算机模拟的方法求出内表面无缺陷时管壁外表面的温度分布.

3 计算机辅助消除噪声

3.1 求解低导热系数层的相对厚度分布

由于钢管导热系数远大于低导热系数层的导热系数, 因此加载经过长时间后, 即达到平衡时, 由缺陷产生的非均匀效应相对于低导热系数层所产生的非均匀效应是可以忽略不计的, 这可由图 3(a) 的模拟计算结果得到证明.

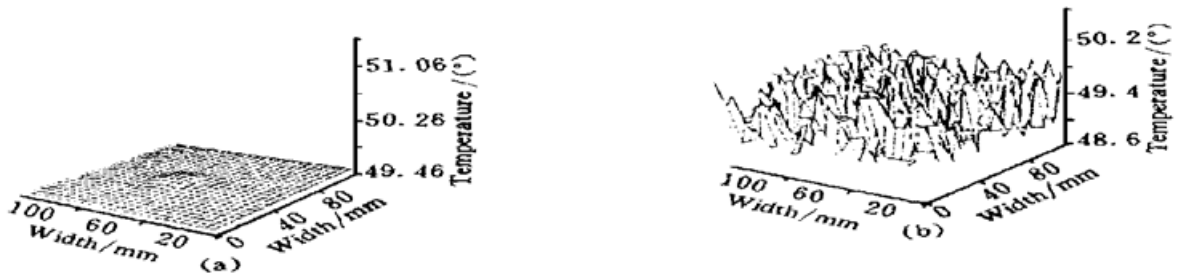


Fig. 3 Steady-state outer-surface temperature profiles of tubes without and with LTC layer

图 3(a) 是管壁外表面无低导热系数层时管内加 50°C 热水达到平衡的温度分布, 由缺陷产生的最大温差仅为 0.06°C . 图 3(b) 是当缺陷与低导热系数层共存时, 加载达到平衡后外表面的温度分布. 比较图 3(a) 及图 3(b) 可以认为, 加载平衡后外表面的温差分布主要是由导热系数相对很小的且厚度随机分布的低导热系数层产生的, 而与金属管内壁缺陷没有关系. 这是本文用到的第一个近似条件.

另外, 由于低导热系数层相对较薄(不大于 1 mm), 故可用一维导热模型来计算相对厚度. 即可认为图 3(b) 中各点的温差与对应点处的低导热系数层厚度成正比关系. 这是本文用到的第二个近似条件. 这样图 3(b) 实际就确定了低导热系数层各点厚度的相对分布.

3.2 实际检测过程的计算机模拟

所考虑的缺陷及钢管与 2.2 节中的数值计算验证样品一样, 管内加热水 3 秒后管壁外表面的温度分布已经得到, 即 $T_1|_{r_1}$ 如图 2(b) 所示. 这一分布在实际检测中很容易测到. 下面关键是用计算机求出内表面无缺陷时同样加载条件下外表面的温度分布以去除图 2(b) 中的噪声. 计算此分布所需的参量中, 钢管的导热系数为已知量, 外表面与空气的对流换热及辐

射换热相对于内表面与热水的对流换热均可忽略不记, 因此问题的关键是要确定以下三个参量, 即低导热系数层的随机厚度分布、热水与管内表面的对流换热系数及低导热系数层的导热系数. 本文用搜索法来确定这些参量. 首先, 利用由加载平衡后外表面的温度分布[如图 3 (b)]近似求出低导热系数层的相对厚度分布, 将其乘以一系列由小到大的常数因子便得到一系列不同的低导热系数层厚度分布. 同样, 在合理的范围内, 也可以将对流换热系数及低导热系数层的导热系数取一系列值. 分别在上述三个参量的一系列值中取定一个值, 便可求出内表面无缺陷时管内加热水 3 秒钟后管壁外表面的一个温度分布 $T_{2mns}(\mu, \nu)$, 其中角标 m 、 n 和 s 分别表征上述三个参量, (μ, ν) 表征外表面上的一点. 然后从中选择一组 m 、 n 和 s 的值使得下式成立:

$$\sum_{\mu} \sum_{\nu} |T_1(\mu, \nu) - T_{2mns}(\mu, \nu)|^2 = \text{极小值}, \quad m, n, s = 1, 2, \dots, Y \quad (6)$$

由该组值所确定的便是所需要的上述三个参量的值. 将上式作为确定三个参量的条件是因为所考虑的是大功率噪声, 检测中低导热系数层产生的噪声功率远大于信号功率. 图 4(a) 就是按照上述条件确定的参量求得的管壁内表面无缺陷时的管壁外表面的温度分布. 从图 2 (b) 中减去图 4(a) 即可得到能明显看出缺陷信息的图 4(b). 由于利用平衡态的温度分布求出低导热系数层的相对厚度分布时存在误差, 因此图 4(b) 中仍存在噪声, 但相对原图 2(b) 而言, 噪声已得到了很大程度上的抑制, 且几乎都成为脉冲形噪声, 用一般的滤波方法是很容易处理掉这些噪声的.

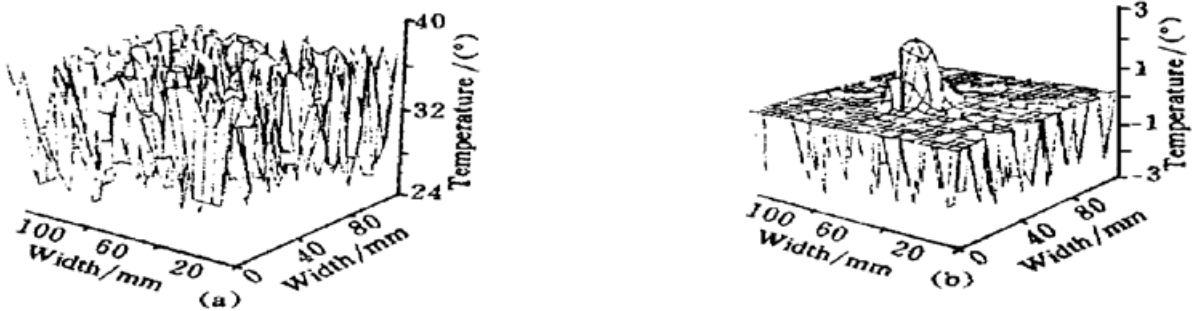


Fig. 4 Testing simulation with hot water heat-loading

结论与讨论 本文提出并用计算机模拟的方法证明了一种用于去除红外检测中大功率噪声的方法. 该方法根据低导热系数层与钢管导热系数相差甚远及线性微分方程的特点, 不仅利用加载后的瞬态温度响应, 而且还要充分利用达到平衡态后的温度分布, 通过计算机辅助的方法抑制噪声. 其突出的优点是只需单面加载信号, 而不需要内外两次加载就可以去除噪声. 另外, 在计算机辅助去噪的过程中, 一些实际检测中很难测得的参量可用搜索法得到. 尽管由于目前缺乏红外成像设备无法验证上述过程, 但从模拟的结果可以看出, 实际的检测过程中要求成像设备既有很快的动态温度响应过程, 又要有较高的静态测温精度. 最后, 由模拟过程也可看出, 上述方法的局限性在于: 该方法只适用于管外表面低导热系数层基本为同一种物质而只是厚度随机分布的情况, 如果低导热系数层的成分随管壁位置变化过大, 则低导热系数层各点发射率及导热系数的变化将会给去噪过程带来误差.

参 考 文 献

- [1] Patel P M, Almond D P, Reiter H. Thermal-wave detection and characterization of sub-surface defects. *Appl. Phys. (B)*, 1987, **43**(1) : 9~ 15
- [2] Vavilov V, Bales M J. Surface transient temperature inversion for hidden corrosion characterization: Theory and applications. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1996, **39**(2) : 355~ 371
- [3] Hsieh C K, Lin Z Z, Yang S L. An inverse problem technique for detecting irregular cavities in circular cylinders by infrared scanning. *J. Nondestructive Evaluation*, 1985, **4**(3~ 4) : 131~ 138
- [4] Kassab A J, Hsieh C K. Application of infrared scanning and inverse heat conduction methods to infrared computerized axial tomography. *Rev. Sci. Instrum.*, 1987, **58**(1) : 89~ 95
- [5] Pade O, Mandelis A. Computational thermal-wave slice tomography with backpropagation and transmission reconstruction. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, **64**(12) : 3548~ 3562
- [6] Balageas D L, Krapez J C, Cielo P. Pulsed photothermal modeling of layered materials. *J. Appl. Phys.*, 1984, **59**(2) : 348~ 357
- [7] Cielo P, Maldague X, Deom A A *et al.*. Thermographic nondestructive evaluation of industrial materials and structures. *Materials Evaluation*, 1987, **45**(4) : 452~ 465
- [8] Hughett P. Noise and artifact reduction in infrared thermography. *Proc. SPIE*, 1990, **1313** : 290~ 297
- [9] Favro L D, Ahmed T, Jin H J *et al.*. Noise suppression in IR thermal-wave video images by real-time processing in synchronism with active stimulation of the target. *Proc. SPIE*, 1990, **1331** : 302~ 306
- [10] 杨黎俊, 耿完楨, 姜铃珍等. 低导热系数物质在红外成像检测中的影响及其处理. *红外与毫米波学报*, 1997, **16**(6) : 431~ 435
- [11] 郭宽良, 孔祥谦, 陈善年. 计算传热学. 合肥: 中国科技大学出版社, 1988. 48~ 59

Simulation of a Novel Method for Noise Reduction in Infrared Imaging Testing

Yang Lijun Geng Wanzhen Jiang Linzhen Zou Lixun Hong Jing
(*Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

Cui Zhenyang Lu Yuanjun
(*Power Administration Bureau of Northeast China, Shenyang 110001*)

(Received 31 January 1998)

Abstract In the process of infrared imaging testing, the computer aided method for high power noise reduction has been proposed according to the characteristic of linear differential equation and two approximations. The method is proved effective by computer simulation.

Key words infrared imaging, noise reduction, non-destructive testing.