

文章编号: 1672-8785(2012)04-0038-04

基于红外热波检测理论模型的红外热像数据拟合方法

张 勇 张金玉 黄建祥

(第二炮兵工程大学 501 教研室, 陕西 西安 710025)

摘 要: 在分析脉冲红外热波无损检测基本原理和热传导模型的基础上, 提出了一种基于红外热传递模型的非线性参数拟合方法, 并将其与传统的多项式法进行了对比。实验结果表明, 该理论模型的拟合效果明显优于常用的低阶多项式。另外, 在相同拟合效果的情况下, 该模型的参数较少, 具有更高的热像存储和压缩效率, 是一种很有前途的红外热像数据处理方法。

关键词: 红外热波; 理论模型; 数据拟合

中图分类号: TP911.73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.04.007

Infrared Thermal Imaging Data Fitting Method Based on Theoretical Model of Infrared Thermal Wave Detection

ZHANG Yong, ZHANG Jin-yu, HUANG Jian-xiang

(Section 501, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: After the basic principle of infrared thermal wave nondestructive detection and a heat transfer model are analyzed, a nonlinear parameter fitting method based on an infrared heat transfer model is proposed. The method is compared with the traditional polynomial method. The experimental result shows that its effectiveness is better than that of the common low-order polynomial fitting. In addition, for the same fitting effectiveness, the new method has less parameters and higher storage and compression rates. It is a promising processing method for infrared thermal image data.

Key words: infrared thermal wave; theoretical model; data fitting

0 引言

作为一种新兴的无损检测手段, 红外热波无损检测技术近年来受到了国内外的广泛关注。该技术已经广泛应用于航空航天、电力、材料、医学和建筑等无损检测领域。其中, 脉冲加热法由于具有检测速度快、面积大和频率范围广等特点应用得最为广泛。

由于不同时刻的热波图像所反映的是物体

内部不同深度处的热学性质, 因此对热波图像序列进行分析与处理是利用热波无损检测技术进行缺陷识别和定性定量分析的关键环节。近年来, 人们为热波图像处理研究出了许多能够降低噪声干扰和增强缺陷对比度的处理算法, 比如微分法、多项式拟合法^[1-2]、正则化方法、PCA 方法^[3]、相关系数法^[4]和脉冲相位法^[5-6]等。其中, 多项式拟合法是一种最基本的热像数

收稿日期: 2012-02-14

基金项目: 自然科学基金项目 (51075390)

作者简介: 张勇 (1986-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为红外热波图像处理。E-mail: zy15902985797@163.com

据拟合方法。本文针对实际检测数据, 提出一种基于红外热波检测理论模型的红外热像数据拟合方法, 并通过将其与多项式拟合进行对比来检验其实际效果。

1 红外热波无损检测原理

假设一个无限大的试件, 在其某一位置上存在缺陷, 缺陷深度为 d 。对试件表面进行脉冲加热。如果忽略试件的三维传热, 仅考虑沿缺陷方向上的一维传热, 那么试件就可以分为不含缺陷区域 I 和含缺陷区域 II (见图 1)。

图 1 中, 脉冲热源均匀作用于试件表面。脉冲热能可以看作是 δ 函数, 试件表面单位面积上吸收的热能为 I_0 。此时, 热传导方程的一维形式可以表示为

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 为 t 时刻距试件表面 x 处的温度, c 为试件的比热容, ρ 为试件的密度, k 为试件的热传导系数。

假设试件为热无限厚物体, 而且热脉冲作用前试件的温度分布为零, 则通过求解式 (1) 可得:

$$T(x, t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi \rho c k t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \quad (2)$$

式中, a 为热扩散系数, $a = k/\rho c$ 。

在式 (2) 中, 令 $x = 0$, 则可得到热脉冲作用后试件无缺陷区域的表面温度随时间的变化关系为

$$T_1(0, t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi \rho c k t}} \quad (3)$$

当热波传播至试件内部缺陷处时, 将会发生反射现象, 即热波反射回试件表面。因此, 试件含缺陷部分的表面温度随时间的变化关系可以表示为

$$T_2(0, t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi \rho c k t}} \left[1 + 2 \exp\left(-\frac{d^2}{at}\right) \right] \quad (4)$$

根据式 (3) 和式 (4) 可以得到区域 I 和区域 II 的温度差为

$$\Delta T(0, t) = T_2(0, t) - T_1(0, t)$$

$$= \frac{2I_0}{\sqrt{\pi \rho c k t}} \exp\left(-\frac{d^2}{at}\right) \quad (5)$$

将式 (5) 对时间求导, 并令导数等于零, 即 $d\Delta T(0, t)/dt = 0$, 可以求得最大温度差所对应的时间为

$$t_{\max} = \frac{2d^2}{a} \quad (6)$$

此时间简称峰值时间。从式 (6) 中可以看出, 峰值时间 $t_{\max}$ 与缺陷深度 d 的平方成正比。由此可知, 当脉冲热源对试件施加热激励之后, 通过红外热像仪记录下试件表面的温度分布情况, 找出最大温度差所对应的峰值时间, 就可以通过式 (6) 计算出缺陷深度, 从而实现对试件的无损检测。

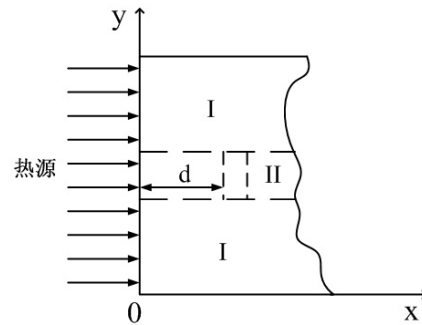


图 1 脉冲加热的示意图

2 模型的提出

对于给定的某一点的热波序列离散数据, 要进行准确拟合的最好方法就是知道其理论模型或经验公式。由前面的分析可知, 试件表面某点受到脉冲激励后, 其温度-时间关系为

$$T_2(t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi \rho c k t}} \left[1 + 2 \exp\left(-\frac{d^2}{at}\right) \right] \quad (7)$$

通过合并常数, 该模型可进一步简化为

$$y = ax^{-1/2} [1 + 2 \exp(bx^{-1})] + c \quad (8)$$

3 非线性 Levenberg-Marquardt 拟合法

Levenberg-Marquardt 算法 (简称 LM 算法) 是一种介于牛顿法与梯度下降法之间的非线性优化方法, 它能有效地处理上述非线性参数拟合问题。

考虑函数关系 $x = f(p)$ 。其中, $p \in R^{n \times 1}$ 是参数向量, $x \in R^{m \times 1}$ 是接近于真实值 $\bar{x}$ 的观测向量。由于存在测量误差, 没有严格的函数关系, 只存在估计值 $\hat{x} = f(p)$, 因此需要使估计误差 $\varepsilon = x - \hat{x}$ 尽可能小, 即求解以下最小化问题:

$$p_{opt} = \max_p \|x - f(p)\| \quad (9)$$

给定一个初始解 p_k , 考虑 $f(p)$ 在 p_k 点附近的一阶近似 $f(p_k + \delta_k) = f(p_k) + J_k \cdot \delta_k$ 。其中, J_k 为雅克比矩阵在 p_k 点的值。寻找下一个迭代点 $p_{k+1} = p_k + \delta_k$, 使得

$$\|x - f(p_{k+1})\| = \min_{\delta p_k} \|J_k \delta_k - \varepsilon_k\| \quad (10)$$

该最小化问题在本质上就是已知 J_k 和 ε_k , 求解超定线性方程 $J_k \delta_k = \varepsilon_k$ 。根据最小二乘法 (Least-Square, LS), 其 LS 解为

$$(\delta_k)_{opt} = (J_k^T J_k)^{-1} J_k^T \varepsilon_k \quad (11)$$

LM 方法即是用 $\overline{N}_k = J_k^T J_k + \lambda_k I$ 代替 $N_k = J_k^T J_k$, 可以得到:

$$(\delta_k)_{LM} = (J_k^T J_k + \lambda_k I)^{-1} J_k^T \varepsilon_k \quad (12)$$

在 LM 算法中, 每一次迭代是寻找一个合适的阻尼因子 λ_k 。 $\lambda_k I$ 被称为阻尼项。当 λ_k 很小时, 式 (12) 蜕化为 Gauss-Newton 法的最优步长计算式; 当 λ_k 很大时, 式 (12) 蜕化为梯度下降法的最优步长计算式。

4 实验结果及分析

本实验数据来源于火箭发动机的平底孔试件。采用脉冲热源对试件进行加热, 并通过热像仪采集结果, 采样频率为 50 Hz。通过选取有缺陷区域和无缺陷区域中的多个点进行实验, 发现各点的热辐射强度随时间的变化趋势大致相同。现以缺陷上方表面上的某点为例, 测得从脉冲加热开始 100 个采样周期内的热辐射强度随时间的变化情况 (见图 2)。

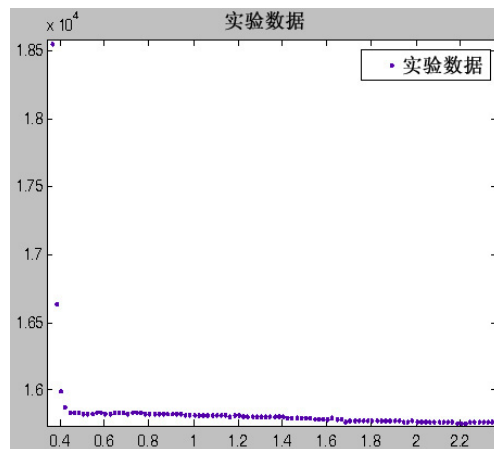


图 2 实测实验数据

同时采用理论模型和 10 次多项式对实验数据进行拟合 (结果见图 3)。

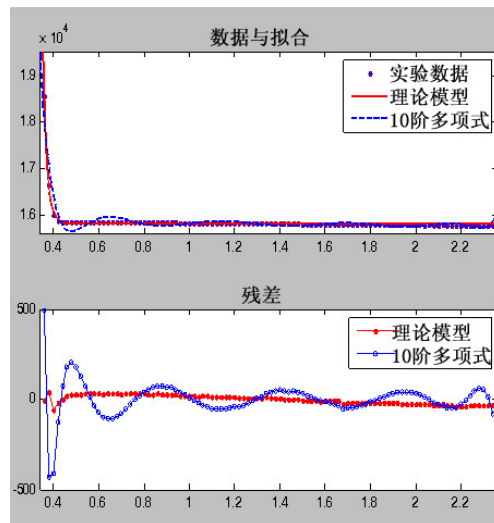


图 3 理论模型与 10 次多项式拟合的对比图

表 1 列出了拟合效果的评价参数值。

表 1 拟合效果评价表

评价参数	理论模型	10 次多项式
SSE	5.9326e+004	9.1816e+005
R-square	0.9928	0.8880
Adjusted R-square	0.9926	0.8754
RMSE	24.7306	101.5697

同时采用理论模型和 15 次、16 次多项式对实验数据进行拟合 (结果见图 4)。

表 2 列出了拟合效果的评价参数值。

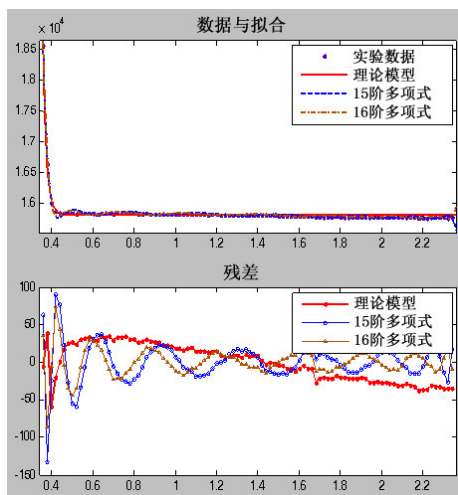


图 4 理论模型与 15 次、16 次多项式拟合的对比图

在表 1 和表 2 中, 各个拟合效果评价参数的含义及最佳拟合参考值如下:

(1) SSE 为和方差, 即拟合数据与原始数据对应点的误差的平方和, 其最佳拟合参考值为 0;

(2) R-square 为确定系数, 即拟合数据与原始数据均值之差的平方和 SSR 同原始数据与均

值之差的平方和 SST 的比值, 其最佳拟合参考值为 1;

(3) Adjusted R-square 为调整后的确定系数, 其最佳拟合参考值为 1;

(4) RMSE 为均方根, 即拟合数据和原始数据对应点误差平方和的均值的平方根, 其最佳拟合参考值为 0。

通过对以上图表中的结果进行分析可知, 当采用多项式对数据进行拟合时, 拟合曲线的后半部分会产生周期性的波动现象。这一现象在残差曲线中表现得更加明显和直观。而当采用理论模型进行拟合时, 除了少数点拟合波动较大之外, 大部分拟合曲线相对比较平稳, 不会出现周期性的波动, 拟合效果明显优于低阶多项式。针对该组实测数据, 理论模型的拟合效果介于 15 次与 16 次多项式拟合效果之间。因此, 在相同效果下, 理论模型能够大大减少拟合系数, 其效率相差 5 倍以上, 这在热波图像存储时能够节省 4 倍左右的存储空间。

表 2 拟合效果评价表

评价参数	理论模型	15 次多项式	16 次多项式
SSE	5.9326e+004	6.5674e+004	3.2544e+004
R-square	0.9928	0.9920	0.9960
Adjusted R-square	0.9926	0.9906	0.9953
RMSE	24.7306	27.9613	19.8016

5 结论

本文基于脉冲红外热波检测理论, 针对实验数据的处理提出了一种利用理论模型进行数据拟合的方法。通过采用理论模型及多项式对实测数据进行拟合, 发现理论模型的拟合效果明显优于低阶多项式 (介于 15 次多项式与 16 次多项式之间)。与多项式拟合相比, 在相同的拟合效果下, 理论模型拟合的参数数量明显少于多项式的参数数量, 可以大大节省存储空间。综上所述, 本文所提出的基于红外热波检测理论的拟合模型可以应用于红外热波检测数据处理, 并且能够获得较好的处理效果。

参考文献

- [1] Shepara S M, Hou Yulin, Ahmed T, et al. Reference-free Analysis of Falsh Thermography Data [C]. *SPIE*, 2006, **6205**: 1-7.
- [2] Ahn H S, Choi C H, Kim K B. Iterative Learning Control for a Class of Nonlinear System [J]. *Automatic*, 1993, **29**(6): 1575-1578.
- [3] 孙延春, 马齐爽. 改进 PCA 在热波图像处理中的应用 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, **34**(9): 1012-1017.
- [4] 郭兴旺, VaVilov V, 郭广平, 等. 复合材料红外无损检测的建模分析和热像处理 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, **30**(4): 363-373.
- [5] Maldague X, Marinetti S. Pulse Phase Infrared Thermography [J]. *Appl Phys*, 1996, **79**(5): 2694-2698.
- [6] 郭兴旺, 刘颖韬, 郭广平, 等. 脉冲相位法及其在复合材料无损检测中的应用 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, **31**(10): 1049-1053.