

## PLS 的红外无损检测电磁激励的数学模型

周建民, 蔡莉, 杨君, 符正晴, 胡林海, 李鹏

(华东交通大学机电工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 主动式电磁激励红外无损检测中, 电磁激励参数的选择是决定无损检测效果的重要因素之一。研究首先通过正交实验分析了激励功率、线圈总长、线圈等效直径、提离距离、激励时间等电磁激励参数对材料激励热效应的影响; 基于偏最小二乘构建了各参数与材料激励热效应的数学模型, 并分析了二者之间的关系; 最后利用 15 组验证样本对模型进行了验证。研究表明; 所构建数学模型的平均误差为 9.79%, 各激励参数中, 提离距离对材料激励热效应的影响最大, 其次分别为线圈总长、线圈等效直径、激励时间和激励功率。

**关键词:** 红外无损检测; 电磁激励; 偏最小二乘

**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3633-05

## Infrared nondestructive testing electromagnetic excitation model based on partial least-squares regression

Zhou Jianmin, Cai Li, Yang Jun, Fu Zhengqing, Hu Linhai, Li Peng

(School of Mechatronical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In the method of active electromagnetic excitation infrared nondestructive detection, the selection of electromagnetic excitation parameter is one of the important factors that determine nondestructive testing effect. Firstly, the relation between electromagnetic excitation parameters (excitation power, coil length, coil equivalent diameter, lift-off distance, excitation time, etc) and excitation thermal effect was analyzed through orthogonal test. The mathematical model between parameters and excitation thermal effect was built based on the partial least-squares regression. Lastly, the model was verified by 15 experiment samples. The result shows that the average error of mathematical model is 9.79%; lift-off distance affects most among the excitation parameters, followed by coil length, coil equivalent diameter, excitation time and excitation power.

**Key words:** infrared nondestructive testing; electromagnetic excitation; partial least-squares regression

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51175175); 江西省教育厅科技项目(GJJ13342); 研究生创新专项资金项目(YC2012-X005)

作者简介: 周建民(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电检测技术方面的研究。Email: hotzjm@163.com

## 0 引言

电磁激励红外无损检测技术由于克服了传统红外无损检测技术加热不均匀、响应速度慢等缺点,成为近年来快速兴起的新型无损检测手段<sup>[1]</sup>。为获得理想的激励热效应,保证无损检测的准确性,研究电磁激励的数学模型进而分析电磁激励参数与激励热效应的关系,已成为该技术的研究重点。目前,相关研究主要以分析单一电磁激励参数(线圈截面形状、提离高度、激励位置等)与激励热效应的关系为主<sup>[2-5]</sup>,然而,对于多参数对热效应的综合影响以及电磁激励的数学模型研究较少。

该研究选取激励功率、激励线圈总长、激励线圈等效直径、提离距离、激励时间作为激励参数,将激励前后材料表面平均温度差作为表征激励热效应的指标。将偏最小二乘回归方法引入电磁激励的复杂相关多参数的回归分析中,构建了多激励参数与激励热效应的数学模型,并分析了激励参数对热效应的影响,最终通过实验验证了该模型具有良好的效果。

## 1 实验部分

### 1.1 试件及仪器

实验选取 45 号钢板作为被激励试件。钢板尺寸为 220 mm×170 mm×18 mm。

激励源由电磁感应加热主机与电磁激励线圈两部分组成。激励系统示意图如图 1 所示。电磁感应加热主机选用厦门飞如电子有限公司生产的 2.5 kW 电磁感应加热控制板与继电器等组装而成的电磁感应加热器。该主机可提供的最大激励功率为 599 W,继电器控制激励时间最大为 6 000 s。

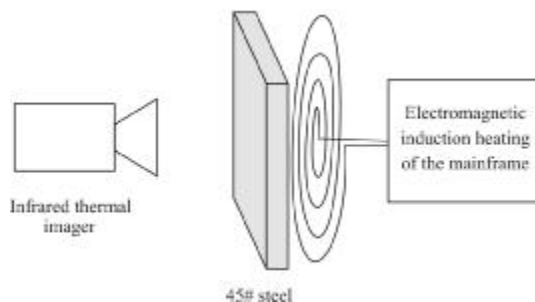


图 1 激励系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of excitation system

红外热像仪选用加拿大 CANTRONIC 公司生产的 IR970 型红外热像仪。该热像仪的分辨率为 320×240,测温范围为 -20 ~ 1200 °C。

### 1.2 实验方案

#### (1) 参数的选择

电磁激励的原理是在感应线圈内通交变电流使其周围产生交变磁场,该交变磁场使零件内部产生涡流。由于涡流具有热效应,可使零件加热至特定的温度。当被激励试件表面有缺陷时,其表面温度场将发生变化,用红外热像仪可获取表面温度场信息<sup>[6-7]</sup>,从而对试件进行缺陷检测<sup>[8]</sup>。

电磁激励加热速度和最终加热温度是由加热比功率  $P_0$  和激励时间  $t$  决定的。在单位时间内向零件单位表面积供给的能量称为加热比功率  $P_0$ 。 $P_0$  可由公式(1)表示<sup>[9]</sup>:

$$P_0 = K_0 I \sqrt{\rho \mu f} \quad (1)$$

对于确定尺寸的指定被激励试件,电导率  $\rho$  和磁导率  $\mu$  为定值; $K_0$  为决定于激励线圈几何尺寸(如激励线圈总长  $L_1$  和激励线圈等效直径  $d_1$ )的系数,可表示为  $K_0 = g(L_1, d_1)$ ;  $f$  为激励电流频率(Hz);  $I$  为激励电流(A)。另外提离距离  $d_2$  表征激励线圈与被激励试件的距离,对电磁激励的热效应也有一定程度的影响。

对于确定尺寸的指定被激励试件在等激励频率条件下,由公式(1)选取激励功率  $W (W \propto I)$ 、激励线圈总长  $L_1$ 、激励线圈等效直径  $d_1$ 、提离距离  $d_2$ 、激励时间  $t$ (s) 5 个影响激励热效应的参数。其中激励功率  $W$  与激励时间  $t$  由电磁感应加热主机控制。激励线圈采用截面积为 4 mm<sup>2</sup> 的高温线绕制成圆形平板型线圈。

激励线圈总长  $L_1$  为圆形平板型线圈的总长。激励线圈等效直径  $d_1$  为该平板型线圈等效成圆柱型线圈后的直径,  $d_1$  可由公式(2)计算:

$$d_1 = \frac{L_1}{N \times \pi} \quad (2)$$

式中:  $N$  为线圈绕制匝数。

#### (2) 参数水平的选择

对激励功率  $W$ (W)、激励线圈总长  $L_1$ (m)、激励

线圈等效直径  $d_1(m)$ 、提离距离  $d_2(m)$ 、激励时间  $t(s)$  5 个影响激励热效应的参数的水平选取如表 1 所示。

表 1 参数水平选取表

Tab.1 Parameters level selection table

Parameters	1	2	3
W/W	200	400	599
$L_1/m$	2.739 65	3.234 2	3.760 15
$d_1/m$	0.109 06	0.114 44	0.119 75
$d_2/m$	0	0.007	0.012
t/s	300	360	420

(3) 电磁激励实验

按图 1 搭建电磁激励实验平台。查询常用正交表选取三水平四因素正交表  $L_9(3^4)$  设计 9 组电磁激励实验 (激励线圈总长  $L_1$  和激励线圈等效直径  $d_1$  的水平值是对应关系, 因此视为一个因素设计正交实验)。

电磁激励前先用红外热像仪获取钢板表面初始温度信息, 即“初始红外图”。第一组正交实验前获取的初始红外热图如图 2(a) 所示。电磁激励后再利用红外热像仪获取某时刻钢板表面温度场信息。第一组正交实验得红外热图如图 2(b) 所示。由此可得一系列表征钢板表面温度场信息的红外热图。

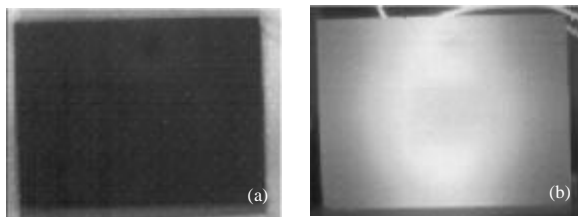


图 2 初始和激励后的红外热图

Fig.2 Infrared thermography and after initial excitation

2 模型建立

电磁激励参数的数学模型的建立步骤如图 3 所示。

(1) 将电磁激励后的红外热图与背景红外图相减, 即作去背景处理, 获得  $t$  时间段钢板表面温差红外热图, 利用红外热像仪配套的红外热图处理软件获取钢板表面平均温差  $\Delta T$ , 将  $\Delta T$  作为激励热效应指标。

(2) 将钢板表面平均温度差  $\Delta T$  为因变量, 影响电磁激励效果的 5 个参数作为偏最小二乘回归分析的自变量。9 次正交实验后, 可得因变量矩阵和自变量矩阵  $E_0$ , 标准化后的因变量矩阵。

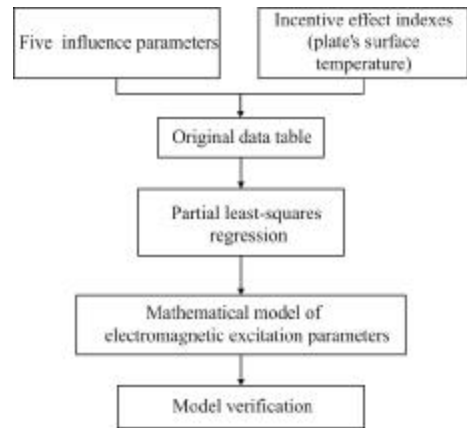


图 3 电磁激励参数的数学模型的建立步骤

Fig.3 Establishment of the mathematical model of electromagnetic excitation parameters

$F_0$  和自变量矩阵分别为  $E_0$ :

$$F_0 = \begin{bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_9 \end{bmatrix} \quad E_0 = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{15} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ x_{61} & \cdots & x_{95} \end{bmatrix}$$

首先从两个变量矩阵中分别提出第一对主成分  $t_1$  和  $u_1$ ,  $t_1$  是自变量组  $X=(x_1, \dots, x_5)^T$  的线性组合:  $t_1 = w_{11}x_1 + \dots + w_{15}x_5 = w_1^T X$ ,  $u_1$  是因变量集  $Y=y$  的线性组合:  $u_1 = v_1^T y$ 。要求  $t_1$  和  $u_1$  各自尽可能多地包含所在变量矩阵的信息且  $t_1$  和  $u_1$  相关程度达到最大。由两组变量集的标准化观测数据阵  $E_0$  和  $F_0$  可以计算第一对成分的得分向量, 记为  $\hat{t}_1 = E_0 w_1, \hat{u}_1 = F_0 v_1$ 。

然后建立  $y$  对  $t_1$  的回归及  $x_1, \dots, x_5$  对  $t_1$  的回归。假定回归模型为:

$$\begin{cases} E_0 = \hat{t}_1 \alpha_1^T + E_1 \\ F_0 = \hat{u}_1 \beta_1^T + F_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\alpha_1 = (\alpha_{11}, \dots, \alpha_{15})^T, \beta_1$  分别是偏最小二乘回归模型中的系数向量;  $E_1$  和  $F_1$  为残差阵。

最后用残差阵  $E_1$  和  $F_1$  代替  $E_0$  和  $F_0$  重复以上步骤。记  $\hat{E} = \hat{t}_1 \alpha_1^T, \hat{F}_0 = \hat{u}_1 \beta_1^T$ , 则残差阵  $E_1 = E_0 - \hat{E}$ ,

$F_1 = F_0 - \hat{F}_0$ 。如果残差阵  $F_1$  中元素的绝对值近似为 0, 则认为用第一个成分建立的回归式精度已满足需要了, 可以停止抽取成分。否则继续用残差阵  $E_1$  和  $F_1$  代替  $E_0$  和  $F_0$  重复以上步骤。最终可提取  $r$  个成分使得:

$$\begin{cases} E_0 = \hat{t}_1 \alpha_1^T + \dots + \hat{t}_r \alpha_r^T + E_r \\ F_0 = \hat{t}_1 \beta_1^T + \dots + \hat{t}_r \beta_r^T + E_r \end{cases} \quad (4)$$

把  $t_k = W_{k1}^* x_1 + \dots + W_{k5}^* x_5$  ( $k=1, 2, \dots, r$ ), 代  $Y = t_1 \beta_1 + \dots + t_r \beta_r$  即得因变量的偏最小二乘回归方程式为:

$$y_j = \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_5 x_5 \quad (5)$$

这里  $w_h^* = (w_{h1}^*, \dots, w_{h5}^*)^T$  满足  $t_h = E_0 w_h^*$ ,  $w_h^* \prod_{j=1}^{h-1} (I - w_j \alpha_j^T) w_h$ 。

(3) 一般情况下, 偏最小二乘法并不需要选用存在的  $r$  个成分  $t_1, t_2, \dots, t_r$  来建立回归式, 对于偏最小二乘回归建模所需提取的成分数, 可以通过交叉有效性检验来确定。定义交叉有效性为:

$$Q_h^2 = 1 - \frac{PRESS(h)}{SS|(h-1)} \quad (6)$$

在建模的每一步计算结束前, 均进行交叉有效性检验, 如果在第  $h$  步有  $Q_h^2 < 1 - 0.95^2 = 0.0975$ , 则模型达到精度要求, 可停止提取成分。

当提取两个主成分时, 交叉有效性检验  $Q_h^2 = -0.3191 < 0.0975$ , 说明模型达到精度要求, 可停止提取主成分。

获得偏最小二乘回归模型中钢板表面平均温度的回归系数对应表如表 2 所示。

表 2 回归系数对应表

Tab.2 Regression coefficients

Independent variable	Excitation power $W$	Excitation coil total length $L_1$	Excitation coil equivalent diameter $d_1$	Lift-off distance $d_2$	Excitation time $t$
Regression coefficient	0.019 8	0.350 5	0.347 0	-0.613 0	0.209 8

钢板表面平均温度的观测值/预测值图如图 4 所示。横坐标为钢板表面平均温度的预测值, 即通过第(3)步中建立的偏最小二乘回归模型计算得出的预测结果; 纵坐标为钢板表面平均温度的观测值, 即验证实验测得的钢板表面平均温度的真实值。图 4 中数据点偏离对角线的程度表征了误差值的大小。

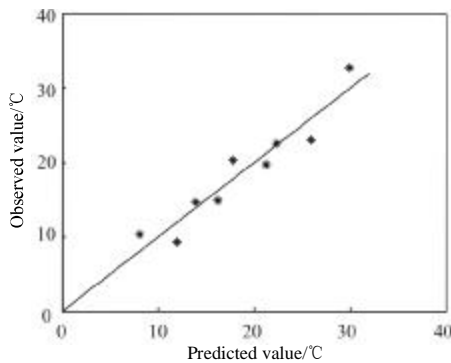


图 5 钢板表面平均温度的观测值/预测值图

Fig.5 Observed/predicted value map of steel plate surface's mean temperature

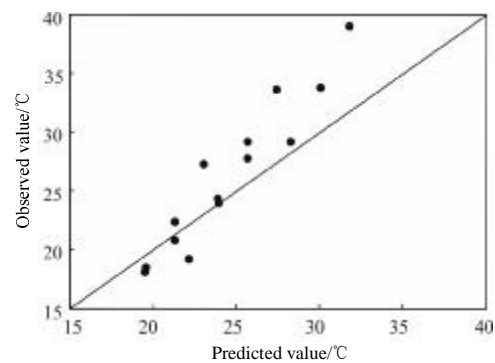


图 6 验证样本钢板表面平均温度的观测值/预测值图

Fig.6 Observed/predicted value map of steel plate surface's mean temperature for validation experiments



其中,横坐标为钢板表面平均温度的预测值,纵坐标为钢板表面平均温度的观测值。按照图中预测值(即,横坐标)由小到大的顺序,15 组实验的验证误差分别为:7.62%、4.84%、2.38%、7.90%、12.11%、18.37%、3.22%、0.35%、2.07%、15.35%、11.17%、18.48%、5.67%、15.52%、21.80%。

### 3 实验结果分析

(1) 偏最小二乘回归模型中,回归系数是一个重要的系数,各自变量对应的回归系数可表征自变量对因变量的影响趋势与程度。从表 2 回归系数对应表可得出结论提离距离对因变量即钢板表面平均温度的影响程度最大,且影响趋势为反向影响。线圈总长和线圈等效直径的影响程度几乎相同,这是由于两者呈对应关系。激励时间的影响程度较小。激励功率的影响程度最小。

(2) 偏最小二乘回归模型的准确性可用因变量的观测值/预测值图评价,当散点均匀分布 45° 对角线两侧时说明该模型的准确性较高。图 3 钢板表面平均温度的观测值/预测值图可得数据基本平均分布于 45° 对角线两侧,说明已建立的模型预测准确性较高。

(3) 用 15 组验证样本对电磁激励参数的偏最小二乘模型进行验证获得 15 组验证误差,其平均误差为 9.79%。实验结果表明,当自变量取值范围位于建模数据边缘时,将会影响模型的准确性,以第 13 组验证实验为例,验证误差达到 21.80%,其原因是该组验证样本中激励线圈总长  $L_1$  (3.760 15 m) 这一参数值即为建模临界值。以第 11 组验证实验为例,该组验证样本中激励功率  $W$  (300 W)、激励线圈总长  $L_1$  (3.2342 m)、激励线圈等效直径  $d_1$  (0.114 44 m)、提离距离  $d_2$  (0.005 m)、激励时间  $t$  (360 s) 都处在建模临界值之间,因此模型的准确性较高,验证误差为 0.35%。所以为保证模型的准确性,应避免自变量取值靠近建模临界值。

### 4 结论

文中利用偏最小二乘回归的建模方法建立了电磁激励参数数学模型,定量的分析了影响电磁激励效果的 5 个参数对激励效果的影响程度。并选取验证样本对建立的数学模型进行验证,模型的预测误差平均值为 9.79%,说明该模型可以较准确的表征电磁激励参数与激励效果关系,可为后续红外热成像检测系统激励源的研究提供有益的借鉴。

### 参考文献:

- [1] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3145-3153. (in Chinese)
- [2] Fang Junya, Li Guohua, Gao Juchun, et al. Numerical simulation study on NDT of cast steel pipe by electromagnetically excited thermography [J]. Mining Machinery, 2012, 40(7): 109-112. (in Chinese)
- [3] Gao Juchun, Li Guohua, Ma Yakun. Numerical simulation of non-destructive testing of pipe crack by electromagnetically stimulated infrared thermography [J]. Mining Machinery, 2012, 40(11): 104-109. (in Chinese)
- [4] Tsopelas N, Siakavellas N J. Influence of some parameters on the effectiveness of induction heating [J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2008, 44(12): 4711-4720.
- [5] Tsopelas N, Siakavellas N J. Performance of circular and square coils in electromagnetic - thermal non-destructive inspection [J]. NDT & E International, 2007, 40(1): 12-28.
- [6] Fan Jinxiang, Yue Yanjun. Development in new concepts and new schemes for military infrared imaging systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (1): 1-6. (in Chinese)
- [7] Liu Tao, Zhang Wei. Research on image enhancement in infrared thermal waves NDT [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1922-1927. (in Chinese)
- [8] Li Lichao, Yang Lu, Zhang Yanhua. Defect test of material using infrared image processing methods [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39: 372-376. (in Chinese)
- [9] Liu Zhiru, Lu Jinbao. The Induction Heat Treatment of Metal [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1985. (in Chinese)