涡流脉冲热像技术中检测条件的粒子群优化

孙吉伟,冯辅周,闵庆旭,徐 超,朱俊臻

(陆军装甲兵学院 车辆工程系,北京 100072)

摘 要:涡流脉冲热像检测中的检测条件优化是最大化裂纹区域生热量以充分发挥检测系统性能的重要保证。针对检测条件选择人工依赖性强等问题,以含有特定尺寸疲劳裂纹的金属平板试件为研究对象,采用仿真和实验相结合的方法,分析了检测条件对裂纹热响应的影响特点,结果表明:裂纹热响应随着激励时间、激励强度的增加而增强;随着提离距离的增加呈现先增强后减弱的趋势。基于仿真与实验结果,提出了一种用于估算特定检测条件下裂纹热响应的多元非线性回归模型,确定了裂纹热响应与不同检测条件之间的定量化关系。最终引入粒子群优化算法进行了检测条件优化,给出了热响应分布图和检出概率分布图。研究成果为涡流脉冲热像检测中的检测条件优化提供理论指导。

关键词:涡流脉冲热像; 检测条件优化; 粒子群优化; 检出概率

中图分类号:TH878 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0818005

Optimization of eddy current pulsed thermography detection condition using particle swarm optimization

Sun Jiwei, Feng Fuzhou, Min Qingxu, Xu Chao, Zhu Junzhen

(1. Department of Vehicle Engineering, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: Optimization of detection conditions is defined as maximizing the amount of heat generated in crack area, in order to perform better in the Eddy Current Pulsed Thermography (ECPT). Aiming at standardizing the method of optimization in ECPT, and a single metal plate specimen with a specific crack was taken as the investigated subject. Response signal increased with the excitation time and excitation intensity, and it had a tendency to enhance first and then weaken with the increase of lift-off distance analyzed by results of simulation and experiment. A multivariate nonlinear regression model was proposed to estimate response signal under specific detection conditions, and the quantitative relation between response signal and different detection conditions was determined. Finally, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was introduced to optimize the detection conditions, and the distribution of response signal and Probability of Detection (POD) with different detection conditions were drawn. The research results provide theoretical guidance for optimization of detection conditions in ECPT.

Key words: ECPT; optimization of detection conditions; PSO; POD

收稿日期:2018-03-20; **修订日期**:2018-04-26

基金项目:军队科研计划项目

作者简介:孙吉伟(1994-),男,硕士生,主要从事红外无损检测技术方面的研究。Email:whusjw@163.com

导师简介:冯辅周(1971-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事故障诊断及无损检测技术方面的研究。Email:fengfuzhou@tsinghua.org.cn

0 引 言

涡流脉冲热像 (Eddy Current Pulsed Thermography,ECPT)是一种将涡流脉冲和红外热成像相结合的新型无损检测技术[1],具有检测面积大、效率高、成像结果直观等特点[2],可在短时间内完成对大型金属试件表面以及亚表面裂纹的检测[3]。在涡流脉冲热像检测中,激励时间、激励强度和线圈提离距离等检测条件是影响裂纹生热的重要因素。因此,在使用涡流脉冲热像检测系统时,需要确定各检测条件的具体参数, 从而发挥其最佳性能使得缺陷生热最大化,即检测条件优化。检测条件优化的关键在于建立不同检测条件与裂纹热响应之间的定量化关系[4]。然而在实际检测过程中,由于检测系统性能的变化、人工操作的误差、环境的干扰等因素必然会影响检测的结果, 实际操作过程中检测条件优化需要通过建立检测条件和裂纹检出概率 (Probability of Detection,POD)[5-7]之间的关系来实现。GAO 等[8]围绕航空发动机的扇叶裂纹检测问题, 提出了一套基于混合效应模型的检测条件优化方案。傅惠民等给出了一种基于 POD 曲线的单裂纹尺寸检测方法[9],有效地提高了裂纹热响应及检出概率[10]。

目前,围绕超声红外热像技术展开的检测条件优化研究较多, 而针对涡流脉冲热像技术相对较少,并且已有的研究仅限于单一参数对裂纹热响应的优化选择[11-12],对于多参数的综合优化研究还很不深入。因此,文中在前期研究的基础上[13],增加了检测条件对裂纹生热影响的仿真分析,完善了多元非线性回归模型,并引入了粒子群优化算法,研究了涡流热像技术中的检测条件优化问题,给出了不同检测条件的热响应分布图以及检出概率分布云图,可为涡流热像技术现场应用中最优检测条件的选择提供理论指导。

1 实验装置及试件

文中设计了一套可以定量控制提离距离、激励时间、激励强度等检测条件参数的涡流脉冲热像检测系统,其组成如图 1 所示,主要部件包括红外热像仪、高频激励电源(功率为 3 kW)、矩形电磁线圈及其支座、水冷装置、采集控制终端(PC)和其他辅助设备(三维运动平台等)。

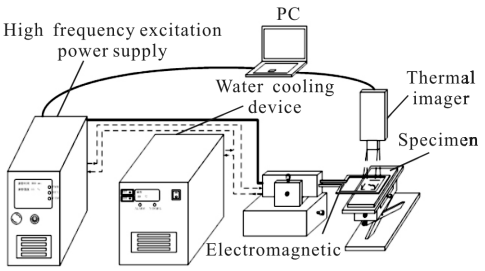


图 1 涡流脉冲热像系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of ECPT system

为了获得实际应用中常见的疲劳裂纹, 文中以 370 mm×5 mm×100 mm 的 45 钢平板为原材料,经过疲劳拉伸实验获得如图 2 所示的裂纹,并采用线切割的方式获得 a、b 两个尺寸为240 mm×5 mm×47.4 mm 的含疲劳裂纹平板试件, 文中选择的试件 b 所含裂纹的长度为 9.3 mm, 裂纹方向与试件长度方向垂直,如图所示位于 120 mm 处。为避免试件表面的热发射率影响,造成误检现象,在其待测表面喷涂哑光漆以提高其热发射率。

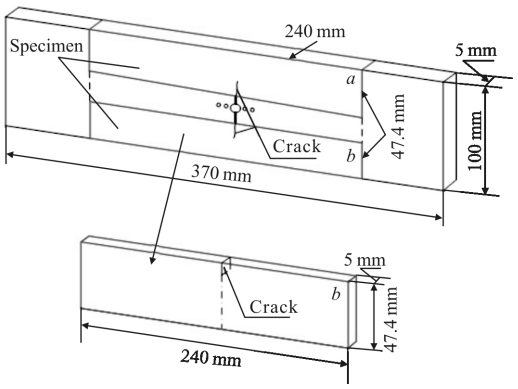


图 2 含疲劳裂纹的 45 钢平板试件

Fig.2 45 steel plate specimen with fatigue crack

2 仿真模型的建立

在涡流脉冲热像检测的仿真计算中, 主要对电磁线圈、被测对象和介质层三个部分进行建模。按照每一部分的实际尺寸建立有限元模型, 线圈材料为高纯铜(线圈中 350 A 的激励电流对应 100%的激励强度),被测试件材料为 45 钢,线圈与被测试件之间的介质层为空气。图 3 给出了仿真示意图,表 1 给出了各部分的具体物理参数。

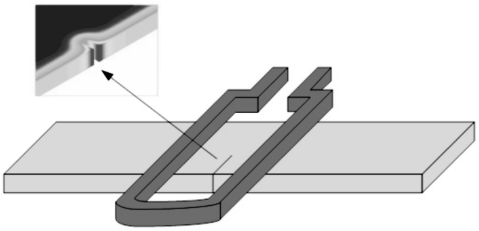


图 3 涡流脉冲热像检测仿真示意图

Fig.3 Simulation diagram of ECPT

表 1 模型各部分材料的物理参数

Tab.1 Physical parameters for each part of model material

Material	Copper	45 steel	Air
Density/kg·m^{-3}	8 700	7 750	1.2
Pyroconductivity/W·(m·K)$^{-1}$	400	50.2	0.025 7
Conductive S/m	5.9e^{7}	5.0e^{6}	1.0e^{-5}
Relative permeability	1	400	1
Specific heat capacity/J·(kg·K)$^{-1}$	385	480	1 000

3 检测条件的影响分析

将激励结束时刻裂纹区域各像素点的温升均值视作热响应。为准确描述不同检测条件对裂纹热响应的影响,同时采用实验与仿真两种方法进行分析。

3.1 激励时间对裂纹热响应的影响

保持提离距离(10 mm)、激励强度(30%、60%、100%)等检测条件不变,以 20 ms 为梯度逐步调节激励时间(0~500 ms),实验结果如图 4 所示。根据图像初步判断:在三种检测水平下,热响应都随着激励时间的增加而增强。从生热原理分析,在 500 ms 激励时间内,激励时间的增加必然导致裂纹区域的焦耳热的积累增加,热响应也就越强。

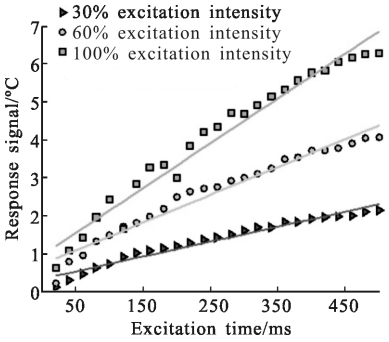


图 4 实验条件下热响应随激励时间变化的散点图及拟合曲线

Fig.4 Scattered plots and fitting curves of response signal with excitation time under experimental conditions

在涡流脉冲热像检测的实际操作中,实验结果受到诸多因素的干扰,为了具体探究热响应与激励时间的关系,文中在进行实验分析的同时进行了建模仿真,结果如图 5 所示,热响应与激励时间满足正相关。

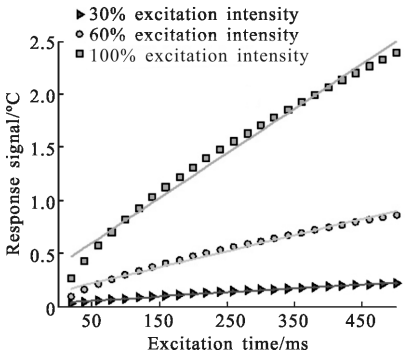


图 5 仿真条件下热响应随激励时间变化的散点图及拟合曲线

Fig.5 Scattered plots and fitting curves of response signal with excitation time under simulation

由上述实验与仿真的分析可得:在 0~500 ms 的激励时间范围内,热响应随着激励时间的增加而增强。

3.2 激励强度对裂纹热响应的影响

为了探究裂纹热响应与激励强度之间的关系,在实验中保持提离距离(10 mm)、激励时间(50、100、200 ms)不变,以 4%的梯度逐步调节激励强度(0~100%),得到实验结果如图 6 所示。由图可知:热响应随激励强度的增加逐渐增强。

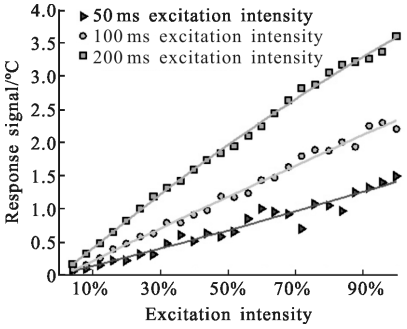


图 6 实验条件下热响应随激励强度变化的散点图及拟合曲线

Fig.6 Scattered plots and fitting curves of response signal with excitation intensity under experimental conditions

图 7 给出了激励强度对热响应的仿真结果。采用多项式对该结果回归分析，回归结果是两者之间存在系数为正的二次函数关系。

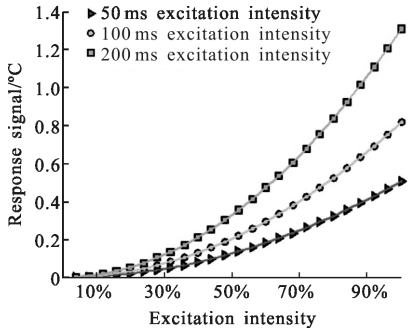


图 7 仿真条件下热响应随激励强度变化的散点图及拟合曲线

Fig.7 Scattered plots and fitting curves of response signal with excitation intensity under simulation

通过上述分析可知：热响应随着激励强度的升高逐渐增强，但热响应与激励强度的关系还不确定。因此，在下文建立多元非线性回归模型时，将一次项、二次项都加入到假设中。

3.3 提离距离对裂纹热响应的影响

保持激励时间(100 ms)、激励强度(30%、60%、100%)不变，以 1 mm 的梯度逐步调节提离距离(0~25 mm)，实验结果如图 8 所示。由图可知：无论哪种水平的检测条件，热响应都随着提离距离的增加先增强后减弱；在激励强度为 30%、60%、100%时，分别在提离距离为 5、8、11 mm 处取得最值。从图 8 中可以初步确定：热响应与提离距离之间具有系数为负的二次函数关系。

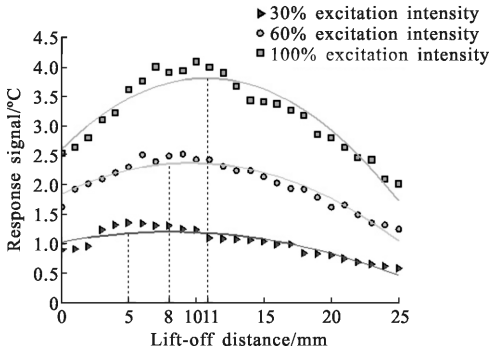


图 8 实验条件下热响应随提离距离变化的散点图及拟合曲线

Fig.8 Scattered plots and fitting curves of response signal with lift-off distance under experimental conditions

提离距离对裂纹热响应的仿真结果如图 9 所示，随着提离距离的增加，裂纹热响应逐渐减弱。由于受到 comsol 软件本身的限制，在提离距离小于 0.2 mm 时，无法进行仿真分析。另外，实验结果受系统精度和环境等因素的干扰。虽然仿真和实验结果并不完全对应，仍然可以建立热响应与提离距离之间的回归关系。因此，将实验结果呈现的负二次项和仿真结果呈现的负一次项都考虑在内，建立尽可能全面的非线性回归模型。

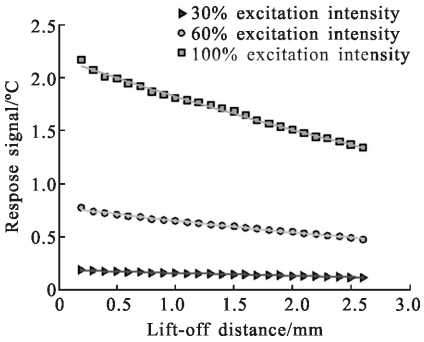


图 9 仿真条件下热响应随提离距离变化的散点图及拟合曲线

Fig.9 Scattered plots and fitting curves of response signal with lift-off distance under simulation

4 建立非线性回归模型

为了能更准确、更具体地描述热响应与不同检测条件的定量化关系，同时满足节约实验成本、提高检测效率的需求，通过正交实验方案设计，分别在激励时间、激励强度和提离距离这三个检测条件中选定五个水平，制定的测试方案如表 2 所示。

表 2 测试方案

Tab.2 Test plan

No.	Excitation time/ms	Excitation intensity	Lift-off distance/mm
1	100	20%	5
2	200	40%	10
3	300	60%	15
4	400	80%	20
5	500	100%	25

基于第 3 节得到的分析结果：裂纹热响与激励时间成存在一次函数关系，而与激励强度、提离距离具有二次函数关系。采用多元非线性回归模型来定

量化描述热响应与不同检测条件之间的关系，假设的模型为：

$$\hat{r}=\beta_0+\beta_1T+\beta_2L+\beta_3I+\beta_4L^2+\beta_5I^2+\beta_6TL+\beta_7TI+\beta_8LI+\beta_9TI^2+\beta_{10}TL^2+\beta_{11}L^2I^2+\beta_{12}TLI+\beta_{13}TLI^2+\beta_{14}TL^2I+\beta_{15}TL^2I^2+\sigma \quad (1)$$

式中：T、L、I 分别表示激励时间、激励强度和提离距离；σ 为误差项；β_0~β_{15} 为该回归模型的系数。

文中采用 R 语言中的 lm() 函数估算出公式(1)中的各项系数，并采用 AIC 准则的“吝啬原则”对回归模型的变量进行筛选，得到的结果如表 3 所示。同时，采用 t 检验和 p 值法(当 $p\leqslant0.01$ 时，相应项是高度显著的，用“***”表示)对各项系数的估计值进行显著性检验。从表 3 可以看出：拟合模型冗长复杂，并且存在许多不显著和显著程度不高的项，难以准确描述不同检测条件与裂纹热响应之间定量化关系的要求。针对表 3 中显著性不高的对应项，采用 drop1() 函数进行尝试性删除，最终得到的结果如表4 所示。

表 3 AIC 准则筛选后的各项系数估计值

Tab.3 Estimated values of the coefficients filtered by the AIC criteria

Parameters	Estimated values	Standard deviation	t	p	Significance level
β_0	−2.292e−01	4.054e−01	−0.565	0.573 041	−
β_1	−1.332e−04	1.024e−03	−0.130	0.896 719	−
β_2	7.099e−02	4.131e−02	1.718	0.088 542	−
β_3	−7.560e−01	1.033e+00	−0.732	0.465 765	−
β_4	−2.928e−03	1.209e−03	2.422	0.017 050	−
β_5	1.123e+00	7.556e−01	1.486	0.140 003	−
β_6	−1.245e−04	1.115e−04	−1.117	0.266 319	−
β_7	1.027e−02	2.787e−03	3.684	0.000 356	−
β_8	5.692e−02	3.842e−02	1.482	0.141 282	−
β_9	−7.066e−03	2.546e−03	−2.775	0.006 478	−
β_{10}	8.088e−06	4.074e−06	1.985	0.049 583	−
β_{11}	−1.575e−03	1.027e−03	−1.533	0.128 130	−
β_{13}	−1.979e−05	3.788e−06	−5.223	8.31e−07	−
β_{14}	5.451e−04	9.470e−05	5.756	7.77e−08	−
σ	0.223 6	−	−	−	−

表 4 drop1()函数筛选后的各项系数估计值

Tab.4 Estimated values of the coefficients filtered by the drop1( )

Parameters	Estimated values	Standard deviation	t	p	Significance level
β_0	3.803e−01	5.257e−02	7.234	4.67e−11	−
β_7	4.940e−03	3.876e−04	12.744	<2e−16	−
β_{13}	3.637e−04	3.816e−05	9.531	<2e−16	−
β_{14}	−1.560e−05	1.142e−06	−9.100	2.24e−15	−
σ	0.292	−	−	−	−

表 4 给出了最优拟合模型各项系数的估计值，并且每个估计值的 t 检验结果都满足 $p<0.01$ 的条件，即表现为高度显著。因此，可以确定的最优拟合模型公式为：

$$r=\beta_0+\beta_7TI+\beta_{13}TLI^2+\beta_{14}TL^2I+\sigma \quad (2)$$

从公式(2)中可以看出：热响应受三个检测条件共同影响，其中热响应与激励时间成正比，与激励强度、提离距离存在二次函数的关系。

5 检测条件优化

在已有的研究中，检测条件的优化选择大都根据个人经验，为了快速、准确地确定最优的检测条件，文中引入了粒子群优化算法[14-15]。

在应用粒子群算法过程中，将热响应的最大值设置为寻优结果的适应度，在激励时间为(0~500 ms)、激励强度(0~100%)和提离距离(0~25 mm)的解空间内，采用 300 个粒子进行 1 000 次的迭代寻优。为达到较好的寻优性能，在执行粒子群寻优算法时引入了线性权值递减策略，其适应度曲线、最优解以及最优检测条件的参数如图 10 所示。

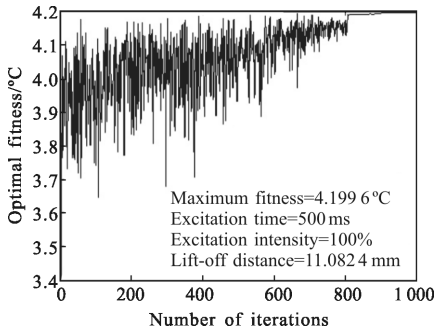
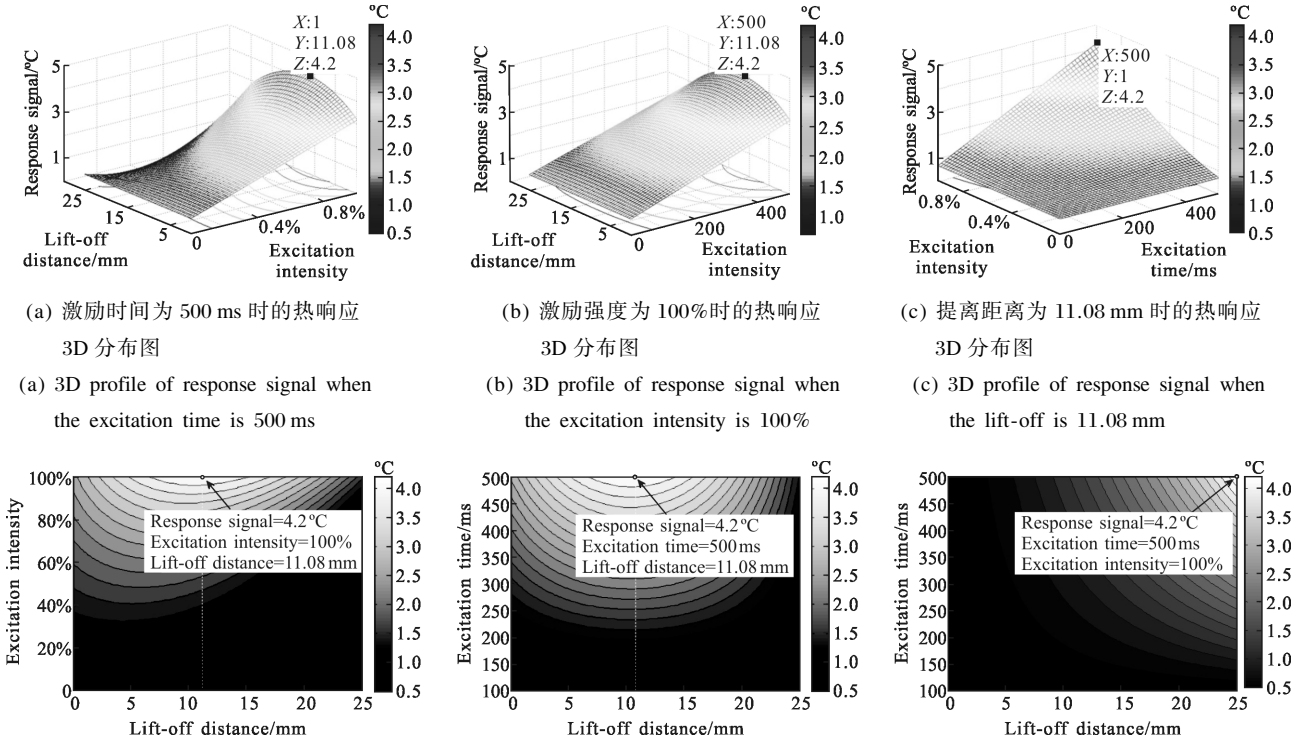


图 10 适应度曲线

Fig.10 Curve of fitness with number of iterations

基于粒子群算法确定的最优检测条件，分别固定激励时间、激励强度和提离距离的值，绘制了如图 11 所示的热响应分布图，颜色越亮表示温度热响应越高。

从图 11 中可以看出：(1) 激励时间 (500 ns 内)、激励强度要尽可能的大，以最大化裂纹区域的热响应；(2) 相同的激励时间、提离距离下，热响应随着激励强度的增加而增强，并且热响应的变化率逐渐增大；(3) 相同的激励时间、激励强度下，热响应随着提离距离的增加先升高而下降，热响应随着提离距离的增加先升高而下降。然而，取得热响应最大值所对应的提离距离随着激励强度的增加而增大。通过上述分析结果，验证了拟合公式(2)的准确性与普遍性。



(a) 激励时间为 500 ms 时的热响应 3D 分布图

(a) 3D profile of response signal when the excitation time is 500 ms

(b) 激励强度为 100%时的热响应 3D 分布图

(b) 3D profile of response signal when the excitation intensity is 100%

(c) 提离距离为 11.08 mm 时的热响应 3D 分布图

(c) 3D profile of response signal when the lift-off is 11.08 mm

(d) 激励时间为 500 ms 时的热响应 2D 分布图

(d) 2D profile of response signal when the excitation time is 500 ms

(e) 激励强度为 100%时的热响应 2D 分布图

(e) 2D profile of response signal when the excitation intensity is 100%

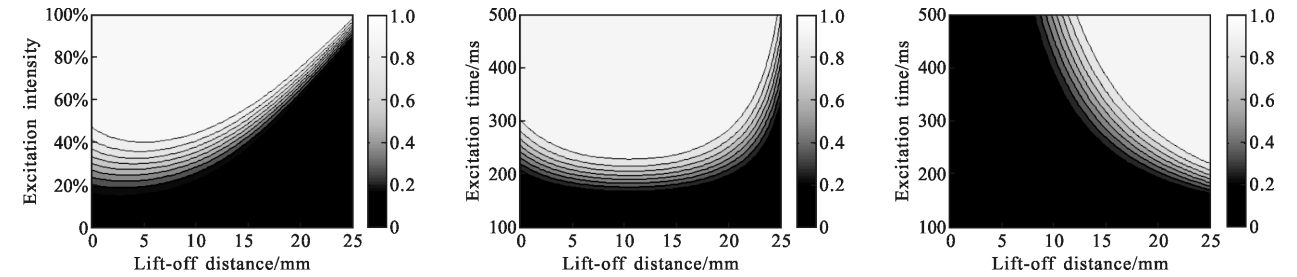
(f) 提离距离为 11.08 mm 时的热响应 2D 分布图

(f) 2D profile of response signal when the lift-off is 11.08 mm

图 11 不同检测条件下的热响应分布图

Fig.11 Response signal profile under different detection conditions

根据不同检测条件下的热响应，计算出了 POD 值[4-5]。图 12(d)~(f)给出了激励时间为 500 ms 时，POD 随检测条件的分布云图，其中热响应判定阈值为 1.2 ℃。颜色越亮表示 POD 值越大，裂纹被检出的



(a) 激励时间为 500 ms 时的 POD 分布图

(a) Profile of POD for the excitation time of 500 ms

(b) 激励强度为 100%时的 POD 分布图

(b) Profile of POD for the excitation intensity of 100%

(c) 提离距离为 11.3 mm 时的 POD 分布图

(c) Profile of POD for the lift-off of 11.3 mm

图 12 不同检测条件下的检出概率分布云图

Fig.12 POD profile under different detection conditions

概率就越高。在工程应用中,有时需要提高检测效率来节省检测时间,有时还存在检测距离限制,因此需要检测人员调节检测条件以满足实际需要，故可根据图 12 中颜色较亮的区域进行检测条件的选择。

6 结 论

文中利用仿真和实验方法开展了检测条件的影响分析，建立了裂纹生热与检测条件之间的多元非线性模型，并引入粒子群算法进行了检测条件的优化研究。得出的结论如下：

(1) 热响应随着激励时间、激励强度的增加而增强;从实验结果来看,随着提离距离的增加裂纹热响应具有先增强后减弱的趋势，而且取得热响应最大值所对应的提离距离随着激励强度的增加而增大,从仿真结果来看,随着提离距离的增加,热响应具有逐渐减弱的趋势。

(2) 基于正交实验结果,提出了一种用于估算特定检测条件下裂纹热响应的多元非线性回归模型。

(3) 在给定的检测条件范围内引入了粒子群算法，制定了最优检测条件优化方案；分别给出了 500 ms、100%、11.08 mm 时的裂纹热响应分布和检出概率分布云图。

研究成果为涡流脉冲热像检测的检测条件优化提供了理论支撑,为该技术的工程应用奠定了基础。虽然取得了一定的成果，但是仍然存在一些问题需要进一步研究。例如，提离距离对裂纹热响应的影响,文中仿真和实验结果并不完全对应。虽然针对这些问题给出了解释说明，但是后续仍然需要更加深入的实验和仿真分析。

参考文献：

[1] Liang Tao, Ren Wenwei, Tian Guiyun, et al. Low energy impact damage detection in CFRP using eddy current pulsed thermography[J]. ***Composite Structures***, 2016, 143: 352-361.

[2] Pan Mengchun, He Yunze, Chen Dixiang. Eddy Current Thermal Non destructive Testing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 11-12. (in Chinese)

[3] Clemente Ibarra-Castanedo, Jean-Marc Piau, Stéphane Guilbert, et al. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures[J]. ***Research in Nondestructive Evaluation***, 2009, 20(1): 1-31.

[4] Zhang Chaosheng, Song Aibin, Feng Fuzhou, et al. Research on optimization method of test conditions in sonic infrared imaging [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(2): 0204005. (in Chinese)

[5] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Song Aibin, et al. Probability of detection model for fatigue crack in ultrasonic infrared imaging [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(3): 0304005. (in Chinese)

[6] Li Jiawei. Non-destructive Testing Manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2012: 8-11. (in Chinese)

[7] Hovey P W, Berens A P. Statistical Evaluation of NDE Reliability in the Aerospace Industry [M]. US: Springer, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1988: 1761-1768.

[8] Gao C, Meeker Q W, Mayton D. Detecting cracks in aircraft engine fan blades using vibrothermography nondestructive evaluation [J]. ***Reliability Engineering and System Safety***, 2014, 131(3): 229-235.

[9] Fu Huimin, Qian Ruoli. Methods for mondestructive inspection reliability and controlling lives [J]. ***Journal of Aerospace Power***, 1994, 3(7): 227-231. (in Chinese)

[10] Liu Dengdi, Fu Huimin. Reliability of engine blade Nondestructive testing [J]. ***Journal of Aerospace Power***, 1999, 14(3): 301-304. (in Chinese)

[11] Yan Xiaomei, Sun Zhiyi, Xie Jialin, et al. Incentives parameter optimization selection method of pulsed eddy current thermal imaging defect detection for metal aluminum [J]. ***Journal of Taiyuan University of Science and Technology***, 2017, 38(4): 249-254.

[12] Hu Dezhou, Zuo Xianzhang, Wang Jianbin, et al. The optimization of excitation parameters of pulsed eddy current thermography[J]. ***Nondestructive Testing***, 2014, 36(8): 23-28. (in Chinese)

[13] Feng Fuzhou, Xu Chao, Min Qingxu, et al. Optimization method of detection conditions for metal fatigue cracks in eddy current pulsed thermography [J]. ***Journal of Academy of Armored Force Engineering***, 2017, 31(3): 89-93. (in Chinese)

[14] Wang Dongfeng, Meng Li. Performance analysis and parameter selection of PSO algorithms [J]. ***Acta Automatica Sinica***, 2016, 42(10): 1552-1561. (in Chinese)

[15] Wang Hao, Ouyang Haibin, Gao Liqun. An improved global particle swarm optimization[J]. ***Control and Decision***, 2016, 31(7): 1161-1168.