

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104001

涡流脉冲热像对钢轨滚动接触疲劳裂纹表面长度的量化评估研究*

杨延强¹ 朱俊臻^{2,3} 冯辅周^{2,3} 王红军⁴

(1. 中国铁路兰州局集团有限公司兰州高铁基础设施段 兰州 730000; 2. 陆军装甲兵学院 车辆工程系 北京 100072; 3. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 4. 北京信息科技大学 机电工程学院 北京 100192)

摘要: 涡流脉冲热像技术作为一种新型的无损检测技术,兼具有感应加热非接触、高效和红外热像快速直观等优点,已应用于不同领域关键部件的缺陷检测与评估。针对钢轨踏面存在的滚动接触疲劳裂纹,利用涡流脉冲热像开展裂纹表面长度量化研究分析。针对滚动接触疲劳裂纹形貌分布复杂这一特点,设计了一套结合裂纹响应提取和裂纹识别的流程。并通过线性拟合参数对比分析了在裂纹响应提取中使用的不同方法的性能。试验结果表明,采用加热前期的热像数据进行主成分分析得到的热模对裂纹长度量化效果最好,具有最高的拟合优度 92.8%,灵敏度 5.91,和最小的残差 2-范数 2.24。

关键词: 涡流脉冲热像; 钢轨滚动接触疲劳裂纹; 缺陷量化

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Study of eddy current pulsed thermography for quantifying surface lengths of rolling contact fatigue cracks in rails

Yang Yanqiang¹ Zhu Junzhen^{2,3} Feng Fuzhou^{2,3} Wang Hongjun⁴

(1. High-Speed Rail Infrastructure Section, Lanzhou Railway Bureau, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Vehicle Engineering, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China; 3. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 4. Mechanical Electrical Engineering School, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: By combining the advantages of eddy current pulse excitation and infrared thermography, eddy current pulsed thermography (ECPT) has been used for testing and evaluating defects of key components in many areas. This paper focuses on using ECPT to test rolling contact fatigue (RCF) cracks and quantify their surface lengths. Due to the complex surface shapes of RCF cracks, a crack shape extraction procedure is designed which mainly includes crack response extraction and crack identification. Fitting parameters are utilized to evaluate the performances of four methods used in the crack response extraction step. Experimental results show that PCA-based thermal pattern in the early heating stage has the best performance for surface length quantification with its R^2 , sensitivity, and 2-norm of residuals of 92.8%, 5.91, and 2.24, respectively.

Keywords: eddy current pulsed thermography; rolling contact fatigue cracks; defect quantification

0 引言

中国目前拥有世界上最庞大的铁路网,随着客货运量的持续增加,铁路网现今面临着更多风险与挑战,如负荷不断攀升、行车速度提高等。这些问题使得钢轨极易萌生滚动接触疲劳缺陷,由于缺乏及时有效的检查维护,

疲劳缺陷已成为钢轨健康服役的主要威胁。在不同类型的疲劳缺陷中,滚动接触疲劳裂纹可能对钢轨造成的危害最大,尤其是裂纹的扩展后期可直接导致钢轨断裂,造成列车脱轨等严重事故^[1]。一般而言,滚动接触疲劳裂纹常以群集的方式出现并分布于轨头内侧(轮轨接触侧),如图 1(a)所示。就单个裂纹而言,其扩展周期可大体分为如下 3 个阶段:裂纹萌生(阶段 I);裂纹沿一定倾

收稿日期: 2021-02-25 Received Date: 2021-02-25

* 基金项目: 国家自然科学基金(51875576, 52005510)、无损检测技术教育部重点实验室开放基金(EW201980445)项目资助

斜角度向钢轨内部扩展(阶段 II);裂纹继续扩展形成水平或垂直方向分支(阶段 III)^[2]。处于前两个阶段的裂纹可以通过打磨方式消除,但是当裂纹发展至第3阶段,已无法通过打磨去除,只能更换钢轨。因此,裂纹的检测和量化旨在为预防性打磨提供指导。由于裂纹分布复杂且排列密集,单一无损检测方法,如涡流、超声、漏磁等,很难有效实现多裂纹的识别与量化。涡流方法主要受限于探头大小和提离的影响^[3]。超声方法在进行表面及近表面缺陷检测时,噪声大且信号复杂^[4]。漏磁方法一般无法检测平行于磁场方向的裂纹^[5]。

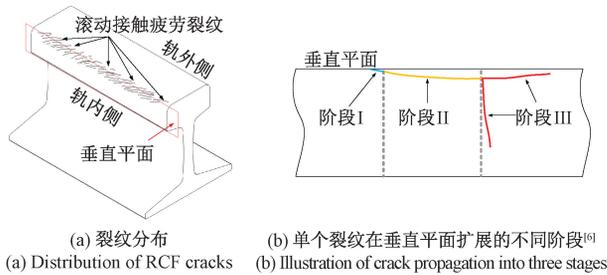


图1 钢轨滚动接触疲劳裂纹示意图

Fig.1 Illustration of RCF cracks in rails

结合感应加热与红外热像方法的优势,本文采用涡流脉冲热像技术对滚动接触疲劳裂纹进行识别与表面长度量化。针对裂纹形貌分布复杂的问题,设计了一套裂纹形状提取流程,其核心步骤为裂纹响应提取和裂纹识别。裂纹响应提取步骤包括4个不同的提取方法。裂纹识别主要基于直方图均衡和 Frangi 滤波。最后,通过线性拟合参数对比分析了裂纹响应提取步骤中采用的不同方法的性能。试验结果表明,采用加热前期的热像数据进行主成分分析得到的热模对表面长度量化效果最好。

1 涡流脉冲热像裂纹检测基本原理

1.1 涡流脉冲热像技术

感应加热情况下的热扩散方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{q(x, y, z, t)}{\rho C_p} \quad (1)$$

式中: α 、 ρ 和 C_p 分别为热扩散系数、密度和比热容; q 为焦耳热源密度。

在加热过程中, q 可认为恒定不变,表述为:

$$q = \frac{1}{\sigma} |J_s|^2 \quad (2)$$

式中: σ 为电导率; J_s 为电流密度。

在一定深度范围内,滚动接触疲劳裂纹会扰动涡流场的分布,涡流密度增加或减小的区域会产生焦耳热分布变化,从而造成异常温度分布。进而可从热像图中判

断缺陷的存在^[6-9]。凭借这一优势,涡流脉冲热像对表面疲劳裂纹的检测具有很好的灵敏度、可靠性和可重复性^[10]。另外,涡流脉冲热像可以同时利用感应加热阶段和热扩散阶段^[11]。在起始加热阶段,感应(焦耳)加热起主导作用,主要用于表面及近表面缺陷检测。在随后的加热和冷却阶段,主要以热扩散为主,其有利于发现亚表面缺陷。

1.2 裂纹表面长度识别流程设计

由于滚动接触疲劳裂纹形貌分布复杂,本文设计了一套结合裂纹响应提取和裂纹识别的流程,如图2所示。该流程主要包括3个步骤:1)热像序列预处理,主要进行感兴趣区域(ROI)截取,减背景和热像序列降噪处理;2)裂纹热响应提取,采用包括激励结束时刻热像图 I_{T-200} 、最大一阶微分成像 $I_{diff-30}$ 、基于主成分分析的一阶微分热模 $I_{diff-PCA}$ 和基于主成分分析的加热前期热模 I_{ET-PCA} 4种方法提取裂纹热响应信号;3)热响应质量评估,具体通过图像信噪比(SNR)、信息熵(IE)和平均梯度值(AG)来客观评估裂纹热响应程度;4)裂纹识别,综合运用了一系列图像处理方法,关键是利用 Frangi 滤波提取裂纹分布^[12]。

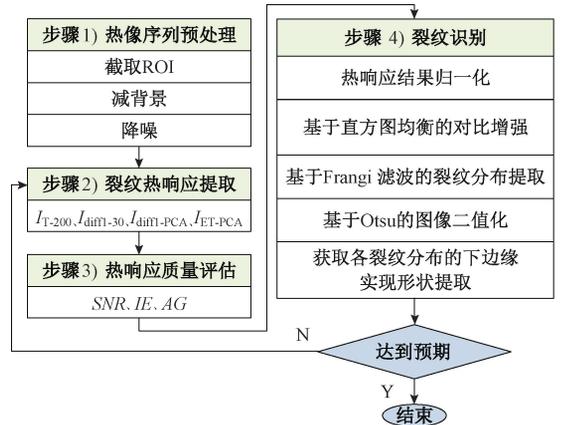


图2 裂纹形状提取流程

Fig.2 Diagram of crack shape extraction

步骤2)中采用的主成分分析(PCA)是一种多元统计分析技术,可将原始热像数据 T 转换为的一组不相关的主成分分量,这些分量按照方差递减的方式进行排序。对于热像数据,主成分分析目的就是增强缺陷与非缺陷区域的对比度。主成分分析可简单表述为:

$$T = URV^T \quad (3)$$

式中: U 由一组经验正交函数(EOF)构成,其每一列为一个 EOF。通常,2~3 个 EOF 就可以代表 T 的空间变化性; R 是含有 T 的奇异值的对角矩阵; V 是一正交矩阵,其列向量描述 T 的时间变化。

针对步骤3),图像信噪比根据如下公式计算:

$$SNR = \sqrt{\frac{\sigma_{img}^2}{\sigma_{bg}^2} - 1} \quad (4)$$

式中： σ_{img} 为整幅图像的标准差； σ_{bg} 为图像背景区域的标准差，本文选取背景区域位于图像的右下方，大小为 10×10 pixels。

信息熵用来描述图像信息的丰富程度，其计算公式如下：

$$IE = - \sum_{k=1}^L P_k \log_2(P_k) \quad (5)$$

式中： L 为整幅图像的最大灰度值； P_k 为灰度值为 k 的像素数量。

平均梯度值用于描述图像细节和清晰度。平均梯度越大，图像的边缘越锐利，图像越清晰。平均梯度的计算公式如下：

$$AG = \frac{1}{p_x \times p_y} \sum_{i=1}^{p_x} \sum_{j=1}^{p_y} \sqrt{\frac{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2}{2}} \quad (6)$$

式中： p_x 和 p_y 分别为图像列数和行数； ΔI_x 和 ΔI_y 分别为水平和垂直方向上的梯度值。

2 试验研究

根据图 2 所示的裂纹形状提取流程，对一块含有滚动接触疲劳裂纹的钢轨试件详细开展试验研究。

2.1 涡流脉冲热像系统

试验采用的涡流脉冲热像系统如图 3 所示，主要由感应加热装置（激励单元和线圈）、热像仪、信号发生器和工作站组成。激励单元选用 Cheltenham Induction Heating Easyheat 224，其工作激励频率与电流分别为 230 kHz 和 400 A，激励脉冲长度为 200 ms。激励线圈采用矩形线圈的底部。热像仪型号为 FLIR A655sc，其采集频率和空间分辨率分别设定为 200 Hz 和 640×120 pixels，热像采集时长为 1 s。信号发生器为 Agilent 33500B，其功能是同步触发激励单元和热像仪。工作站用于存储处理来自热像仪的数据。



图 3 涡流脉冲热像系统
Fig. 3 ECPT configuration

2.2 被测试件

被测钢轨试件如图 4 所示，该试件从一截 PD3 钢轨中切取，含有的裂纹呈群集分布且形貌复杂。由于及时发现，大部分裂纹都处于扩展阶段 I。图 4(b) 所示为放大后的裂纹区域，裂纹的表面长度 (SL) 用黄白虚线交替标注。经光学显微测量后，得到的 SL 如表 1 所示。

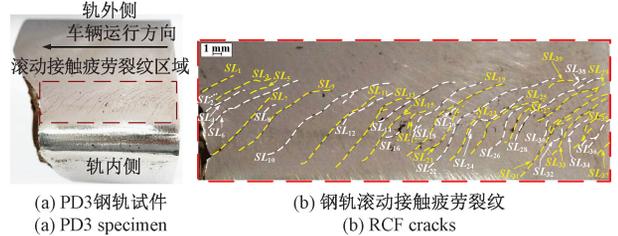


图 4 钢轨试件

Fig. 4 Cut-off specimen from a PD3 rail

表 1 裂纹的表面长度

Table 1 Crack surface length

编号	长度/mm									
$SL_1 \sim SL_{10}$	5.8	2.9	7.7	7.1	2.0	16.4	13.2	2.6	17.2	19.6
$SL_{11} \sim SL_{20}$	14.1	8.7	13.3	11.5	10.6	2.1	5.1	13.2	22.3	1.3
$SL_{21} \sim SL_{30}$	8.3	23.7	7.8	8.2	11.6	6.6	5.3	13.4	9.5	2.2
$SL_{31} \sim SL_{39}$	15.3	1.7	9.6	3.4	5.6	5.4	2.1	1.9	3.2	

2.3 试验结果分析

对被测试件进行涡流脉冲热像检测后，执行图 2 所示的步骤 1) 完成数据预处理，进入步骤 2)。图 5 所示为步骤 2) 中不同方法得到的裂纹响应提取结果。图 5(a) 为 200 ms 激励结束时刻的热像图，表示为 I_{T-200} 。图 5(b) 所示为将热像数据进行一阶微分后再选取最大微分值对应时间 (30 ms) 得到的结果，表示为 $I_{diff-30}$ 。图 5(c) 为将一阶微分数据进行分析后得到的热模图，表示为 $I_{diff-PCA}$ 。对比图 5(b) 和 (a) 可以明显看出， I_{T-200} 无法识别一些微小裂纹，这是由于激励后期热扩散效应造成的。为避免热扩散效应同时提高裂纹热响应对比度，可将加热初始阶段的两组热像数据 (0~15 ms 和 15~30 ms) 分别进行主成分分析后再融合得到热模图，如图 5(d) 所示，表示为 I_{ET-PCA} 。

步骤 3) 对上一步得到的结果进行客观评估，根据式 (4)~(6)，计算后得到的各评估指标如表 2 所示。可以看出 I_{T-200} 和 $I_{diff-PCA}$ 具有较高信噪比和信息熵值，反映出利用这两种方法提取裂纹热响应，在图像对比度和信息丰富程度上具有一定优势。此外，还可以得到 I_{ET-PCA} 具有最大的平均梯度值，表明采用该方法提取裂纹热响应，可以展现裂纹的更多细节特征。

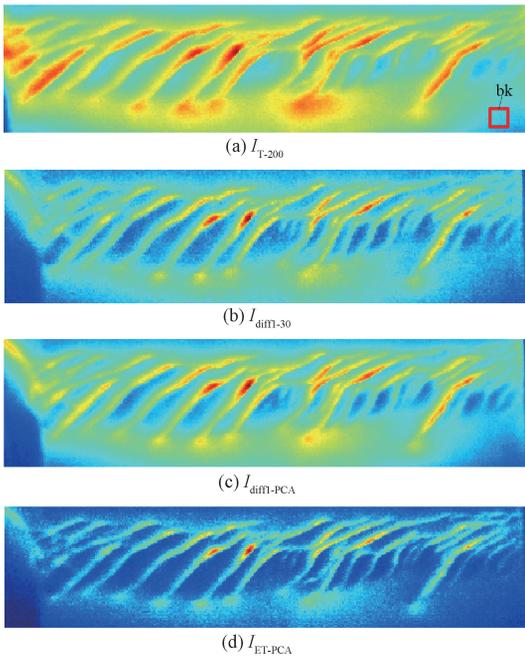


图 5 裂纹响应提取结果

Fig. 5 Crack response extraction of Specimen N_2

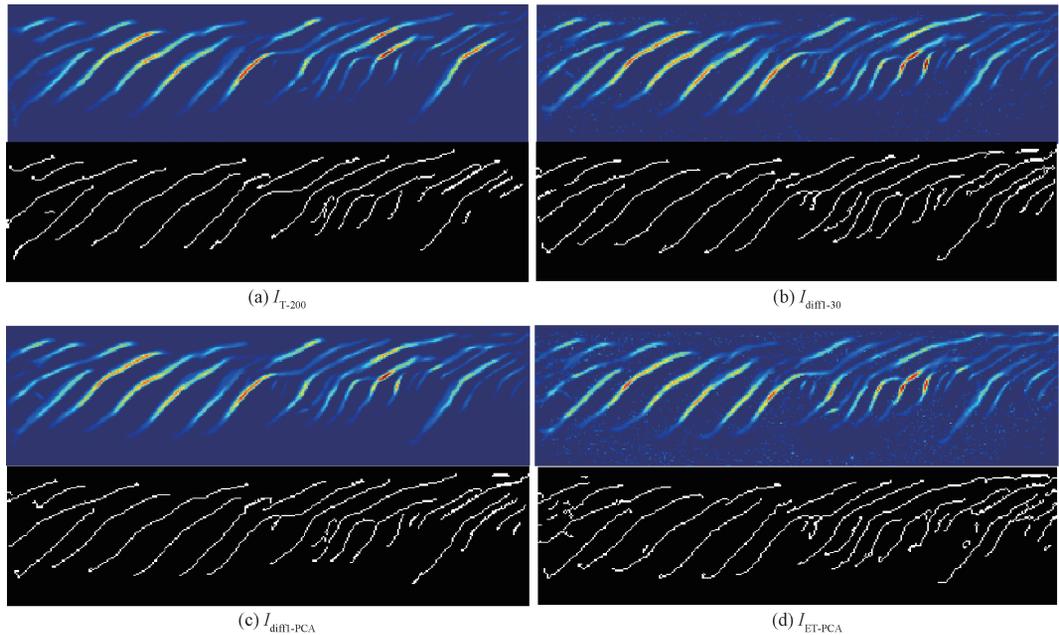


图 6 裂纹识别结果

Fig. 6 Crack shape identification. In each subfigure

表 2 关于裂纹热响应的评估指标

Table 2 Evaluation parameters of crack thermal response

方法	SNR	IE	AG
I_{T-200}	3.427	6.677	0.014
$I_{diff-30}$	3.304	6.501	0.019
$I_{diff-PCA}$	3.576	6.631	0.016
I_{ET-PCA}	3.089	6.463	0.022

将步骤 2) 得到的结果代入步骤 4), 就可以得到输出结果如图 6 所示。图 6(a) ~ (d) 中, 顶部为 Frangi 滤波得到的结果, 底部为提取各裂纹分布下边缘后的最终输出结果。通过对比可以看出, 基于 I_{ET-PCA} 的输出结果展现了更多细节信息, 包括一些微小裂纹的识别。

根据图 6 得到的裂纹形状提取结果, 可以计算出每一裂纹所占的像素长度 (PL), 如表 3 所示。需要注意的是, 如果提取的多个裂纹是相连的, 则将他们考虑为一个裂纹。在图 6(a) 中, PL_{15} 、 PL_{17} 和 PL_{18} 相连, 则考虑他们为一个总像素长度为 115 的裂纹, 对应表 1 中 SL_{15} 、 SL_{17} 和 SL_{18} 的长度之和, 即 28.9 mm。纳入这一考虑, 再结合表 1 与 3 的数据, 可以得到图 7 所示 PL 与 SL 之间对应

关系及其线性拟合。可以看出通过 I_{T-200} 、 $I_{diff-30}$ 、 $I_{diff-PCA}$ 和 I_{ET-PCA} 得到的 PL 与 SL 之间的关系都明显呈现正相关性。此外, 表 4 为根据不同方法得到的 PL 与 SL 线性拟合参数, 具体包括拟合优度 R^2 、灵敏度和残差的 2-范数

$\|e\|$ 。可以看出相比于其他裂纹响提取方法, 由 I_{ET-PCA} 构建的关系具有最高的 R^2 和最小的 $\|e\|$, 表明 I_{ET-PCA} 对表面长度量化效果最好。

表 3 裂纹的像素长度
Table 3 Crack pixel length

方法	序号	数值/pixels									
I_{T-200}	$PL_1 \sim PL_{10}$	30	null	37	null	null	89	65	null	77	111
	$PL_{11} \sim PL_{20}$	70	null	76	48	115 ^{a)}	null	115 ^{a)}	115 ^{a)}	87	null
	$PL_{21} \sim PL_{30}$	21	105	36	null	61	23	null	111 ^{b)}	111 ^{b)}	null
	$PL_{31} \sim PL_{39}$	69	null	39	null	22	null	null	null	null	null
$I_{diff1-30}$	$PL_1 \sim PL_{10}$	36	null	47	21	null	94	62	null	87	121
	$PL_{11} \sim PL_{20}$	87	null	81	49	149 ^{a)}	null	149 ^{a)}	149 ^{a)}	89	null
	$PL_{21} \sim PL_{30}$	36	140 ^{c)}	46	null	71	25	22	48	87	null
$I_{diff1-PCA}$	$PL_{31} \sim PL_{39}$	164 ^{d)}	null	164 ^{d)}	null	33	18	null	28	140 ^{c)}	
	$PL_1 \sim PL_{10}$	36	null	40	null	null	90	62	null	82	114
	$PL_{11} \sim PL_{20}$	78	null	85	44	130 ^{a)}	null	130 ^{a)}	130 ^{a)}	89	null
	$PL_{21} \sim PL_{30}$	26	106	44	null	72	24	15	46	91	null
I_{ET-PCA}	$PL_{31} \sim PL_{39}$	81	null	64	null	24	13	null	22	null	
	$PL_1 \sim PL_{10}$	36	8	46	8	null	102	63	null	86	128
	$PL_{11} \sim PL_{20}$	79	null	78	50	151 ^{a)}	null	151 ^{a)}	151 ^{a)}	94	null
	$PL_{21} \sim PL_{30}$	39	184 ^{e)}	47	null	47	62	18	126 ^{b)}	126 ^{b)}	8
	$PL_{31} \sim PL_{39}$	173 ^{f)}	null	173 ^{f)}	173 ^{f)}	30	26	8	184 ^{e)}	184 ^{e)}	

注: ^{a)} PL_{15} 、 PL_{17} 和 PL_{18} 相连, 考虑为一个裂纹; ^{b)} PL_{28} 和 PL_{29} 相连, 考虑为一个裂纹; ^{c)} PL_{22} 和 PL_{39} 相连, 考虑为一个裂纹; ^{d)} PL_{31} 和 PL_{33} 相连, 考虑为一个裂纹; ^{e)} PL_{22} 、 PL_{38} 和 PL_{39} 相连, 考虑为一个裂纹; ^{f)} PL_{31} 、 PL_{33} 和 PL_{34} 相连, 考虑为一个裂纹

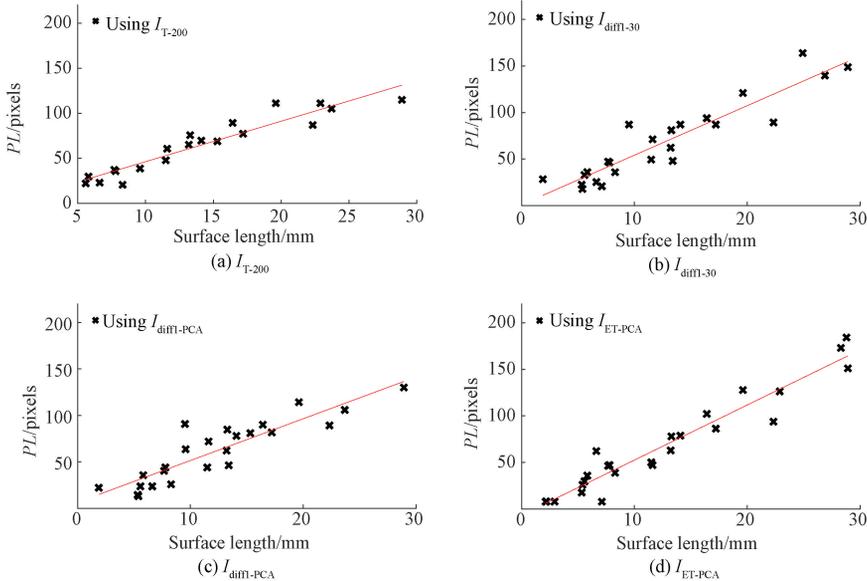


图 7 PL 与 SL 之间的关系。

Fig. 7 PL vs. SL .

表 4 PL 与 SL 之间的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of PL vs. SL

方法	$R^2/\%$	灵敏度	$\ e\ $
I_{T-200}	89.6	4.49	2.31
$I_{diff1-30}$	86.3	5.32	2.31
$I_{diff1-PCA}$	79.6	4.50	2.84
I_{ET-PCA}	92.8	5.91	2.24

3 结论

本文开展了基于涡流脉冲热像对滚动接触疲劳裂纹的表面长度量化研究, 通过集成热像序列预处理, 裂纹热响应提取, 热响应质量评估和裂纹识别等环节, 设计了一套裂纹形状提取流程并重点对比分析了不同裂纹提取方法。结果表明, 采用 I_{ET-PCA} 方法可得到更多裂纹形状

细节,从而提高了对表面长度量化的效果。后续工作将着重关注裂纹的深度、角度等尺寸参数量化方法研究。

致谢

作者感谢英国纽卡斯尔大学工程学院传感器实验室提供了原始涡流脉冲热像实验数据。

参考文献

- [1] Independent Investigation Board, Train derailment at Hatfield: A final report by the independent investigation board[R]. Office of Rail Regulation, 2006.
- [2] KAPOOR A, FLETCHER D I, FRANKLIN F J. The role of wear in enhancing rail life[J]. Tribology Series, 2003, 41: 331-340.
- [3] RAJAMÄKI J, VIPPOLA M, NURMIKOLU A, et al. Limitations of eddy current inspection in railway rail evaluation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232: 121-129.
- [4] PAPAELIAS M P, ROBERTS C, DAVIS C L. A review on non-destructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineer Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222: 367-384.
- [5] ANTIPOV A G, MARKOV A A. Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, 50: 481-490.
- [6] WILSON J, TIAN G Y, ABIDIN I Z, et al. Pulsed eddy current thermography: System development and evaluation [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2010, 52: 87-90.
- [7] 左宪章,常东,钱苏敏,等. 脉冲涡流热成像裂纹检测机理仿真分析 [J]. 激光与红外, 2012, 42 (9): 998-1003.
- ZUO X ZH, CHANG D, QIAN S M, et al. Simulation analysis of crack detection mechanism using pulsed eddy current thermography [J]. Laser and Infrared, 2012, 42 (9): 998-1003.
- [8] 唐波,方旭,侯德鑫,等. 面向脉冲涡流热成像的激励电源特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (1): 208-215.
- TANG B, FANG X, HOU D X, et al. Exciting power supply characteristics for pulsed eddy current

thermography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (1): 208-215.

- [9] 杨明莉,范玉刚,毕野. 基于涡流热成像图像的边缘检测方法研究 [J]. 电子测量技术, 2019, 24: 131-137.
- YANG M L, FAN Y G, BI Y. Research on edge detection method based on eddy current thermal imaging image [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 (24): 131-137.
- [10] ALMOND D P, WEEKES B, LI T, et al. Thermographic techniques for the detection of cracks in metallic components [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, 53: 614-620.
- [11] ZHU J, MIN Q, WU J, et al. Probability of detection for eddy current pulsed thermography of angular defect quantification [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14: 5658-5666.
- [12] FRANGI A F, NIESSEN W J, VINCKEN K L, et al. Multiscale vessel enhancement filtering [C]. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 1998: 130-137.

作者简介



杨延强,2005年于兰州交通大学获得学士学位,现为兰州高铁基础设施段高级工程师,主要研究方向为高速铁路线路设备维修相关技术。

E-mail:6965445@qq.com

Yang Yanqiang received his B. Sc. degree in 2005 from Lanzhou Jiaotong University. Now he is a senior engineer in Lanzhou High-Speed Rail Infrastructure Section. His main research interests include techniques for high-speed railway line equipment maintenance.



朱俊臻(通信作者),2020年于纽卡斯尔大学获得博士学位,现为陆军装甲兵学院讲师,主要研究方向为主动红外热像。

E-mail:junzhen_zhu@foxmail.com

Zhu Junzhen (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Newcastle University in 2020. Now he is a lecture in Army Academy of Armored Forces. His main research interest includes active thermography.