

〈无损检测〉

基于卤素灯激励的红外热成像裂纹无损检测研究

金玫秀, 朱士虎, 王 通, 庄飞飞

(江苏师范大学 物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 钢轨安全状态的监测对保证列车的安全运行至关重要, 针对钢轨裂纹的检测, 本文阐述了几种不同的裂纹检测技术。重点分析了红外热成像检测技术在钢轨裂纹检测中的应用, 该检测技术包括外激励加热、红外图像采集以及图像处理三部分。本文将常用激励方式进行了介绍和对比, 详细阐述了卤素灯作为激励在裂纹检测中的应用; 其次, 搭建了基于卤素灯激励的红外热成像检测实验平台; 然后, 对采集到的红外图像进行增强处理, 并提出改进图像处理算法; 最后, 本文对该技术未来的应用前景做出展望。

关键词: 钢轨裂纹; 红外热成像; 激励; 图像处理

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2022)04-0421-07

Nondestructive Crack Testing via Infrared Thermal Imaging Using Halogen Lamp Excitation

JIN Meixiu, ZHU Shihu, WANG Tong, ZHUANG Feifei

(School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The monitoring of rail safety status is crucial to ensure the safe operation of trains. Aiming at rail crack detection, this study quantitatively compares different crack detection technologies and analyzes the application of infrared thermal imaging technology in rail crack detection. The proposed detection technology comprises three parts: external excitation heating, infrared image acquisition and image processing. Firstly, the common excitation methods are introduced and compared. The application of halogen lamps as excitation sources in crack detection is described in detail. Secondly, a halogen lamp excitation based infrared thermal imaging detection experimental platform is developed. Thirdly, an improved image processing algorithm is proposed to enhance the collected infrared image. Finally, this study discusses the prospects of applying the proposed technology in the future.

Key words: rail crack, infrared thermal imaging, excitation, image processing

0 引言

随着经济的快速发展, 我国的铁路运输也随之快速雄起, 并作为国民经济发展的重要支柱, 是社会经济发展不可或缺的一部分, 凭借安全、经济、速度快、运能大等特点占据了我国综合交通体系中骨干的地位, 对社会经济发展和民生改善起到了重大作用^[1]。钢轨作为铁路运行的重要部件, 钢轨安全状态的监测对于保证列车的安全运行至关重要。在钢轨使用过程中随着使用年限的增长, 钢轨会逐渐老化进而出现损

伤, 轨道裂纹是轨道损伤的主要表现形式, 列车在损伤钢轨上行驶易导致交通事故的发生, 钢轨裂纹损伤在铁路运行中有巨大的安全隐患^[2]。在科学水平和自动化技术不断发展和成熟的推动下, 多种非接触式无损检测方法逐渐被提出, 并应用在轨道交通系统安全状态检测领域。

1 裂纹常用检测技术

1.1 超声波检测

超声检测主要是基于接收通过被检测工件的超

收稿日期: 2021-08-08; 修订日期: 2021-11-19.

作者简介: 金玫秀 (1999-), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向: 传感器检测与图像处理。E-mail: 519392925@qq.com.

通信作者: 朱士虎 (1970-), 男, 江苏淮安人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 信息处理与电路设计。E-mail: zshoo@126.com.

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX20_0906)。

声波, 对其进行处理分析, 并根据所接收的超声波特征, 评估被检测工件内部缺陷的特性^[3]。不足是存在不易实现非接触测量及检测盲区的问题, 而且对形状复杂的工件不易检测。

1.2 激光检测

激光检测是激光扫描物体时, 使得物体表面热波具有横向传播特性, 当遇到裂纹缺陷时横向传导会受到阻碍^[4]。由于激光器波长单一, 而不同材料对光波吸收频率不一致, 使得单一激光器的可检测种类有限, 只能检测到裂纹长度和宽度信息, 不能得到裂纹深度信息。

1.3 电磁检测

电磁检测是一种多物理场耦合的, 利用材料电磁热效应进行检测和评估的一类无损检测技术^[5]。电磁热成像检测具有检测距离较远、检测效率高、热成像结果直观、但其对于在表面和内部具有复杂裂纹的试件在检测时存在不确定性等特点。

在电磁检测中, 磁场被用于激励, 检测的则是电磁场信号, 因此, 根据检测激励和检测方式的不同又分为常见的涡流检测和漏磁检测。其中, 涡流检测利用电磁感应基本原理, 在激励线圈上施加电信号, 将传感器沿着钢轨移动, 在交变磁场的作用下其表面会形成涡流, 而此时涡流将产生反向磁场, 通过测量线圈来检测涡流反向磁场的变化, 以获取钢轨裂纹的相关信息^[6]。涡流检测技术具有可实现性强、设备自动化程度高、非接触、高速检测等优点, 但其检测范围仅限于钢轨表面及近表面的裂纹, 不适用于形状复杂的零件, 测试结果也易于受到材料本身及其他因素的干扰。漏磁检测技术是利用磁现象检测具有磁性材料表面和近表面损伤的一种新型的无损检测方法, 该方法是由磁粉检测技术发展而来^[7]。该检测技术适用于检测钢轨表面及近表面的裂纹, 但其检测范围有限, 对于钢轨头部核伤以及轨腰和轨底处的裂纹无法进行有效的检测, 且受噪声的影响。

1.4 红外热成像检测

红外热成像检测技术按其检测方式可分为主动式和被动式^[8]。主动式红外热成像检测技术是通过主动对物体施加可控热激励, 使物体内部的缺陷和损伤以表面温场变化的差异表现出来的一种无损检测方法。被动式红外热成像检测技术利用一切高于绝对温度的物体都会向外发射电磁波原理, 通过探测被测物体的热辐射, 然后获取温度信息的检测方式。加入热激励使被测物内部产生温度梯度, 对于有裂纹或缺陷的被测物, 当热量在内部传播时, 由于裂纹缺陷的阻挡, 热量积聚导致表面温度高的局部热区, 通过用红

外热像仪连续观测和记录物体表面的温度场变化, 并对序列热图结果进行运算和处理, 以实现物体内部异性结构定性和定量的表征^[9]。

主动式红外热成像检测的核心是采用了主动式控制热激励的方法, 与被动式红外热成像检测相比, 主动给被测物体加热, 使其内部产生温差, 克服了被动式检测灵敏度不足问题, 同时具有检测效率高、检测信息丰富完整的优点^[10-11]。热激励加热完成后, 使用红外热像仪实时的采集热图像, 然后分析处理图像信息, 应用在钢轨裂纹检测上具有重要研究意义。

红外热成像检测技术具有非接触性、适用面广、检测速度快、测量结果显示形象直观、定量测量等优点^[12], 可有效解决传统检测方式存在的诸多问题, 故在轨道交通系统状态检测领域得到了越来越多的关注和应用。因此, 将红外热成像无损检测技术应用到钢轨裂纹检测具有重要的现实意义和实用价值。

2 红外热成像检测技术

2.1 红外检测常用激励方式

针对被测物体的材质、结构和缺陷类型以及特定的检测环境和条件, 目前常用的热激励方式有: 卤素灯、超声波、激光、电磁感应、THz波等, 在检测中加入激励的作用是将能量注入到检测对象, 使得检测对象缺陷处与无缺陷位置产生误差, 并反映到材料表面。如表1^[13-14]所示为红外检测常用激励方式的对比。

2.2 基于卤素灯激励的红外热成像裂纹检测

钢轨作为金属其热辐射能量很低, 因此需要从外部施加一个热激励。顾桂梅等^[15]曾将卤素灯作为热激励应用在红外热成像裂纹检测, 并取得较好结果; 李玉杰等^[16]将卤素灯加热红外成像检测技术应用到复合材料检测, 缺陷位置误差小于0.3℃; 周正干等^[17]使用锁相红外热成像检测技术, 检测钛合金的蜂窝结构的预制脱焊缺陷, 用卤素灯作为激励, 为钛合金蜂窝结构实际检测提供了工艺指导。如表1所示, 卤素灯能以较高的温度运作, 作为加热激励源效率更高, 能够把大部分电能转化为热能; 而且卤素灯操作简单, 功率可根据需要调整, 热度容易控制, 更适合使用到钢轨轨底裂纹红外热成像检测系统中, 因此选择卤素灯作为激励源。

该检测系统采用卤素灯作为热激励源, 加入激励后热流会在试件内部传递, 加热完成后用热像仪采集试件表面的红外热图像, 接着由计算机中的分析软件处理采集到的裂纹图像, 根据热图像中温度分布情况, 判断是否存在缺陷^[18]。由导热理论可知, 裂纹处的材料属性属于空气, 空气对于热流来说是隔热性缺

陷,如果试件内部存在裂纹,当热流经过裂纹处时空气会阻碍热流的传递,热量会在裂纹处累积,因此裂纹处对应的试件表面的温度会高于无裂纹处^[19]。

由傅里叶定律知热流密度与温度梯度之间的关系表达式为:

$$q = -\lambda \nabla T = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度; ∇T 为温度梯度; λ 为材料的导热系数,表示物体导热能力的大小;式中的符号是因为热量传递方向与温度梯度的方向相反。

表1 红外检测常用激励方式

Table 1 Common excitation methods of infrared detection

Excitation modes	Advantages	Disadvantages	Scope of application
Ultrasonic excitation	It is not limited by the shape of the tested object, has the characteristics of selective heating for closed crack defects, and only produces temperature rise in the crack defect area. It belongs to internal excitation and can detect internal micro cracks ^[13]	The excitation effect is greatly affected by the coupling effect and excitation direction, and the mechanical wave vibration may damage the internal interface of the material	Defects such as closed cracks on the surface or sub surface of parts with complex shape
Laser excitation	High energy density, high-intensity energy input to tiny areas	Low efficiency and small single excitation area; high energy will lead to thermal stress on the local surface of the material	Defect detection of small parts or small areas
Halogen lamp excitation	It can operate at a higher temperature, with larger excitation area and higher efficiency. In addition, the halogen lamp has the advantages of low cost, long service life, good seismic resistance and easy heat control	The detection depth is shallow	Rapid detection of surface defects in large areas
Pulse excitation	It can quickly obtain the original thermal image, and is not sensitive to uneven illumination. Simultaneously, there is no need for reference points	Due to the uneven distribution of heat flow on the surface of the test piece, and greatly affected by the reflectivity of the surface of the test piece and the surrounding environmental noise, it is difficult to accurately judge the defects according to the original thermal image of the surface of the test piece ^[14]	Can be used for composite material with defects inside
Electromagnetic excitation	It is not limited by the shape of the detection image, does not produce mechanical vibration, and will not damage the internal structure of the material	Affected by the surface skin effect of induced current, the excitation depth is shallow	Surface and subsurface defect detection of with high-conductivity materials

在给定边界条件下,可以得到热波在截止中的传播函数,因此,直角坐标系下, t 时刻沿 x, y, z 方向的热传导微分方程为:

$$\nabla[\lambda \nabla T(x, y, z, t)] - \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = -f(x, y, z, t) \quad (2)$$

在非稳态导热条件下,给定第二类边界条件

$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -f(x, y, z, t)$ 代入(2)式得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q \\ &= \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{\rho c} \end{aligned} \quad (3)$$

式中： ρ 为材料密度； c 为比热容； $\alpha=\lambda/\rho c$ 为材料的扩散系数； ρc 为体热容，表示物体存储热量的能力； $f(x,y,z,t)$ 为热源函数。

根据上述原理，使用红外热像仪采集热图像，然后分析被测物体表面的温度变化情况，从而对物体内部的热特性状态做出判断。

如图1为卤素灯激励红外热成像检测原理图。在搭建实验台时，将4个50W的卤素灯排放在被测对象正上方的三脚架上，成水平45°，为避免光污染了及能量的扩散，在卤素灯外面分别加装了黑色的遮罩，使加热灯筒内部形成均匀的光环境。实验中使用的是FLIR E5热像仪，其热灵敏度是0.10℃，像素160×120，待加热5s后进行图像采集，将红外热像仪连接计算机，频率设置为每0.4s采集一次，采集12帧的热图像，如图2为采集的热图像序列。

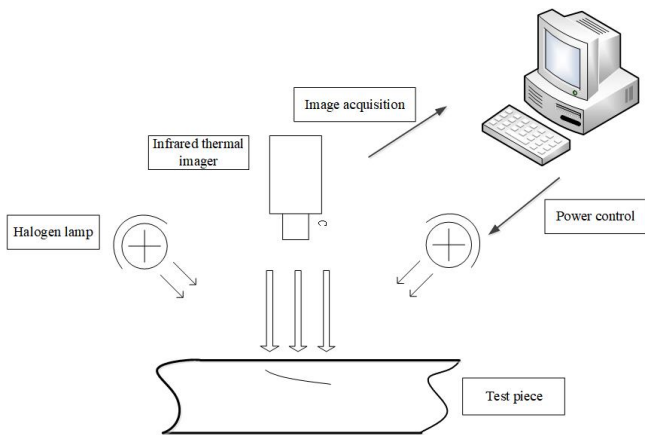


图1 卤素灯激励红外热成像检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of halogen lamp excited infrared thermal imaging detection

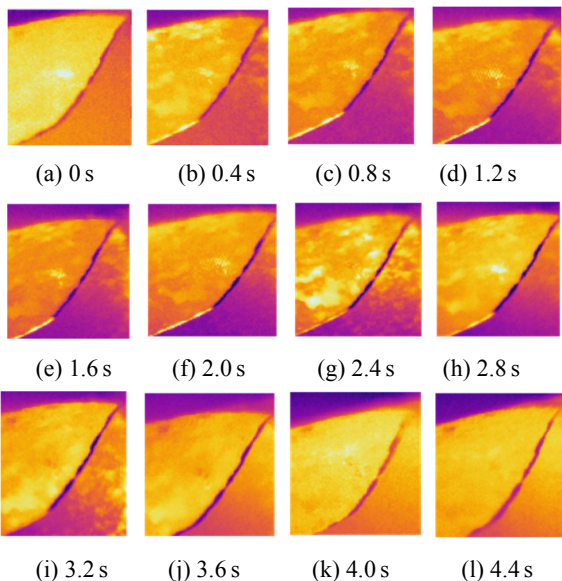


图2 热波图像序列

Fig.2 Thermal wave image sequence

根据上述基于卤素灯加热的红外热成像检测原理，总结其检测过程如下：首先根据被检测对象的材料结构及其热特性选取合适的卤素灯工作功率，并对其进行加热；由于缺陷处阻碍热波的传递，导致热波在此处进行积累，与正常区域产生差异，使用红外热像仪采集热图像，记录被测对象表面温差变化规律，同时传输到计算机；最后对采集到的红外裂纹图像进行增强处理，并根据温差变化分析试件裂纹细节信息。

3 红外热成像图像处理

3.1 钢轨裂纹特征及图像分析

钢轨中疲劳裂纹是材料承受交变载荷时引起的龟裂的缺陷，当再次经过应变时，裂纹尾部还会继续拓展，裂纹扩展到钢轨内部会带有核伤，且边缘有密集的细小裂纹，这些细小裂纹因为过于细小很难在图像中识别。

此外，红外热成像系统由于受红外自身成像波长较长、成像环境（如空气中其他热辐射源、探测距离大、操作者误差等）等影响，导致红外图像存在噪声大、对比度低、非均匀性大、空间分辨力差等缺陷^[20]。采集到的图像会存在裂纹处细节显示不清晰，为了方便后续对特征信息的提取，需要对采集到的图像进行增强处理。

3.2 图像增强处理

常用的红外图像增强算法分为两类：空间域和频率域。基于空间域增强是直接对图像灰度级做运算，可用于去除或减弱噪声，常用方法有直方图均衡化、偏微分方程、空间滤波等；基于频率域是通过修正变换系数来实现图像的增强，把图像看作一种二维信号，对其进行基于二维傅里叶变换的信号增强，代表方法代表性的有小波变换、Contourlet变换等^[21]。

3.2.1 直方图均衡化

直方图均衡化处理的主要目的是把原始图像的灰度级均匀地映射到整个灰度级范围内，得到一个灰度级分布均匀的图像，这样就增加了像素灰度级的动态范围从而达到增强图像整体对比度的效果^[22]。假设图像中像素总数是 N ，图像的灰度级数是 L ，灰度级空间是 $[0, L-1]$ ，用 n_k 表示第 k 级灰度（第 k 个灰度级，像素值为 k ）在图像内的像素点个数，那么该图像中灰度级为 r_k （第 k 个灰度级）出现的概率为：

$$P(r_k) = n_k/N \quad (k=0,1,\dots,L-1) \quad (4)$$

根据灰度级概率，对其进行均衡化处理的计算公式为：

$$s_k = T(r_k) = (L-1) \sum_{j=0}^k P_r(r_j) = (L-1) \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{N}$$

$$(k=0,1,\dots,L-1) \quad (5)$$

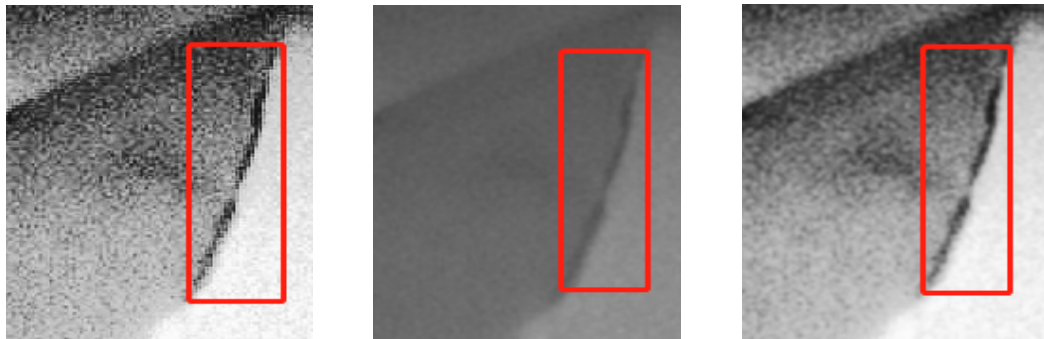
式中: $\sum_{j=0}^k P_r(r_j)$ 表示累计概率, 将该值与灰度级的最大值 $L-1$ 相乘即得到均衡化后的新灰度级。

该方法更适用于背景和前景都太亮或者太暗的图像, 其优势在于它是一个相当直观的技术并且是可逆操作, 如果已知均衡化函数, 那么就可以恢复原始的直方图, 并且计算量也不大。但该方法存在的缺点是变换后图像的灰度级减少, 一些细节消失以及某些图像经处理后对比度不自然的过分增强。

3.2.2 高斯滤波

高斯滤波器是一种线性滤波器, 有效抑制噪声和平滑图像的同时, 能够更多地保留图像的总灰度分布特征。高斯滤波后图像被平滑的程度取决于标准差 σ , 其输出是领域内各个像素的加权平均, 离中心越近的像素权重越高^[23]。因此, 它的平滑效果更好, 但也会导致图像比较模糊。高斯核参数为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$



(a) 直方图均衡化 (a) Histogram equalization (b) 高斯滤波 (b) Gaussian filtered (c) 本文算法 (c) Algorithm proposed this paper

图3 图像增强结果

Fig.3 Image enhancement results

图4为直方图均衡化、高斯滤波以及直方图均衡化和高斯滤波相结合的图像增强算法的直方图对比结果。其中, x 轴为灰度级, y 轴为灰度级出现的频率, 可以很直观地看出经过本文提出的直方图均衡化和高斯滤波相结合算法处理后, 直方图内灰度级分布更加均衡, 图像也更加清晰, 裂纹细节展示更加清晰。

3.3 Canny 边缘检测

边缘检测的实质是采用某种算法提取图像中目标与背景之间的边界线, 针对裂纹红外图像中裂纹边缘细节部分采用 Canny 边缘检测的图像分割来获取,

式中: (x,y) 表示像素点坐标; σ 为高斯分布的标准差。图像的平滑程度由参数 σ 决定, 标准差越小, 高斯图像越窄小, 平滑效果不明显; 标准差越大, 高斯图像越矮宽, 滤波效果比较明显。

3.2.3 结合直方图均衡和高斯滤波的图像增强算法

所采集的裂纹红外图像其低频部分主要包括了图像的灰度分布情况, 高频部分主要包括了图像中裂纹边缘和内部的微小的像素信息。针对低频灰度分布情况, 使用了直方图均衡化、高斯滤波以及两种方法结合的方式进行比较; 而裂纹边缘细节部分采用 Canny 边缘检测的图像分割来获取, 为之后图像分析奠定基础。当使用传统的直方图均衡化方法对图像进行处理的话, 虽然提高了图像的对比度, 但是会使图像过于锐化, 甚至一些细节消失, 如图3(a)所示。而直接使用高斯滤波器处理图像, 虽然降低了图像的噪声, 但图像过于模糊, 影响裂纹几何特征提取的精确性, 不利于细节的提取, 如图3(b)所示。

为了更好地解决这个问题, 提出直方图均衡化和高斯滤波相结合的红外图像增强方法, 该方法增强了图像的对比度, 降低了图像噪声, 同时对图像进行了平滑处理, 如图3(c)所示。

Canny 边缘检测是一种使用多级边缘检测算法检测边缘的方法, 在其检测过程中包括去噪、梯度的幅度和方向计算、非极大值抑制、确定边缘操作^[24]。

如图5所示, 通过该方法能快速地获取裂纹的边缘细节信息, 图像中裂纹内部及边缘细节比较明显且连续, 能满足钢轨轨底裂纹检测的要求。该算法具有较好的降噪能力和较高的检测精度, 应用范围较广, 但也存在局限性, 由于高、低阈值是通过人为设定, 使得伪边缘和边缘的连续性之间存在着矛盾, 因此在接下来学习中还要针对 Canny 边缘检测的缺点进行改

进。更能满足钢轨裂纹检测要求的实时性，也可以有效提高下一步计算裂纹几何特征的精确性。

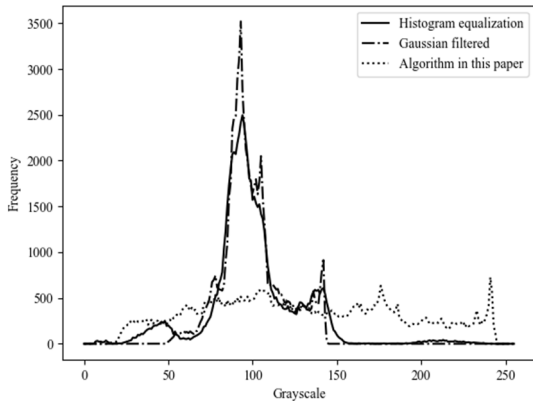


图4 图像处理算法的直方图对比

Fig.4 Histogram comparison of image processing algorithms



图5 Canny 边缘检测

Fig.5 Canny edge detection

最后为了获取裂纹损伤几何信息，需要提取热波检测图像序列中裂纹区域内细节像素点的温度变化规律，将缺陷区域图像进一步实现特征提取，获得细节像素区域的坐标，实现对特征像素点的定位，及对裂纹大小、深度的计算。

4 总结与展望

4.1 总结

红外热成像技术作为一门新兴的无损检测裂纹技术，具有非接触、检测速度快、检测面积大、定量检测等诸多优点，但也存在灵敏度不足，难以实现检测非常细微的裂纹，需经过一定的图像处理才使得检测结果更好的问题。我国对于红外热像技术的研究热度也呈现出整体上升的趋势，对于红外热像技术的裂纹检测未来的发展，还要继续攻克技术难关，不断创新。本文基于红外热成像检测系统原理，选用卤素灯作为激励，搭建了钢轨裂纹检测实验平台。对采集的红外裂纹图像存在对比度低、噪声问题，使用直方图

均衡化和高斯滤波相结合的算法进行图像增强处理，通过实验结果得出，该算法可以降低图像噪声、提高图像对比度。

4.2 展望

随着国内外学者对红外热成像检测技术的不断深入，该检测技术已广泛应用于军事、航天、医疗等领域。在今后一段时间内，红外热成像检测技术将有如下发展趋势：①更高效的检测方法。如使用先进的热像仪，可以采集到更加清晰与噪声更少的红外图像，能够更准确反映出检测物体的热辐射情况；②针对缺陷的自动识别技术。目前缺陷仍是根据人的主观判断，在效率和精确度上都有所欠缺，随着计算机技术的快速发展，自动识别技术逐渐引起大家的重视，如通过神经网络系统进行目标检测等技术；③多种检测方式相互融合。常用检测方法及无损检测技术都存在各自的优缺点，为更好实现精确的检测，可以将两种及以上检测方式相结合；④多种激励方式相融合。本文举例对比了几种激励方式，可以根据需要将优点互补的激励进行融合，而进一步提高激励效率，如使用超声波激励和卤素灯相结合，卤素灯可对被测对象表面进行大面积加热，超声波激励则对被测对象进行深层加热，两者结合既实现了裂纹表面的均匀加热，又进一步增强亚表面加热。此外，针对钢轨裂纹的红外热成像检测中要考虑到环境因素的干扰，在实际场景中提高检测效率；另一方面，对于钢轨裂纹图像处理方面，要避免红外热像仪设备和外界环境的影响，降低钢轨裂纹图像中的噪声。

参考文献：

- [1] 郭火明, 王文健, 刘腾飞, 等. 重载铁路钢轨损伤行为分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(2): 267-272.
GUO Huoming, WANG Wenjian, LIU Tengfei, et al. Analysis of Damage Behavior of Heavy-haul Railway Rails[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(2): 267-272.
- [2] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷损伤巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1763-1780.
TIAN Guiyun, GAO Bin, GAO Yunlai, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [3] Kim G, Seo M K, Kim Y I, et al. Development of phased array ultrasonic system for detecting rail cracks[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2020, 311: 112086.
- [4] JIANG Yi, WANG Haitao, CHEN Shuai, et al. Visual quantitative detection of rail surface crack based on laser ultrasonic technology[J]. *Optik*, 2021, 237: 166732.
- [5] 李浩然, 高斌, 张喜源, 等. 电磁热多物理耦合成像检测方法研究[J]. 中国测试, 2020, 46(12): 99-104.

- LI Haoran, GAO Bin, ZHANG Xiyuan, Research on imaging detection method of thermo-electromagnetic multi-physical coupling effects[J]. *China Measurement & Test*, 2020, **46**(12): 99-104.
- [6] YUAN F, YU Y, LIU B, et al. Investigation on velocity effect in pulsed eddy current technique for detection cracks in ferromagnetic material [C]//*IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, **56**(9): 3012341.
- [7] 杨理践, 耿浩, 高松巍. 基于多级磁化的高速漏磁检测技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, **39**(6): 148-156.
- YANG Lijian, GENG Hao, GAO Songwei. Study on high-speed magnetic flux leakage testing technology based on multistage magnetization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, **39**(6): 148-156.
- [8] XU Changhang, XIE Jing, CHEN Guoming, et al. An infrared thermal image processing framework based on superpixel algorithm to detect cracks on metal surface[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, **67**: 266-272.
- [9] 郑凯, 江海军, 陈力. 红外热波无损检测技术的研究现状与进展[J]. *红外技术*, 2018, **40**(5): 401-411.
- ZHENG Kai, JIANG Haijun, CHEN Li. Infrared thermography NDT and its development[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(5): 401-411
- [10] YUAN L, ZHU X, HONG K. Detection of material surface cracks by infrared non-destructive testing[C]//*2020 11th International Conference on Prognostics and System Health Management (PHM-2020 Jinan)*, 2020: DOI:10.1109/PHM-Jinan48558.2020.00114.
- [11] YANG J, WANG W, LIN G, et al. Infrared thermal imaging-based crack detection using deep learning[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 182060-182077.
- [12] 沈功田, 王尊祥. 红外检测技术的研究与发展现状[J]. *无损检测*, 2020, **42**(4): 1-9, 14.
- SHEN Gongtian, WANG Zunxiang, Progress of infrared testing technology[J]. *Nondestructive Testing*, 2020, **42**(4): 1-9, 14.
- [13] 徐欢, 殷晨波, 李向东, 等. 超声红外检测中裂纹微观界面生热的数值模拟[J]. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2019, **41**(4): 493-500.
- XU Huan, YIN Chenbo, LI Xiangdong, et al. Numerical simulation of the heat generated by the microcosmic interface of cracks in ultrasonic infrared detection[J]. *Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition*, 2019, **41**(4): 493-500.
- [14] CHI Wubu, ZHAO Bo, LIU Tao, et al. Infrared thermal imaging detection of debonding defects in carbon fiber reinforced polymer based on pulsed thermal wave excitation[J]. *Thermal Science*, 2020, **24**(6B): 3887 - 3892.
- [15] 顾桂梅, 贾文晶. 钢轨轨底裂纹红外热波无损检测数值模拟分析[J]. *红外技术*, 2018, **40**(3): 294-299.
- GU Guimei, JIA Wenjing. Numerical simulation analysis of infrared thermal wave nondestructive testing of rail bottom crack[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(3): 294-299.
- [16] 李玉杰, 李科, 钟安彪, 等. 卤素灯加热红外热成像检测技术仿真研究[J]. *激光与红外*, 2016, **46**(12): 1477-1480.
- LI Yujie, LI Ke, ZHONG Anbiao, et al. Simulation research of infrared image detection technology for halogen lamp heating[J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(12): 1477-1480.
- [17] 周正干, 贺鹏飞, 赵翰学, 等. 钛合金蜂窝结构蒙皮脱焊缺陷锁相红外热成像检测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, **42**(9): 1795-1802.
- ZHOU Zhenggan, HE Pengfei, ZHAO Hanxue, et al. Detection of skin desoldering defect in Ti-alloy honeycomb structure using lock-in infrared thermography test[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2016, **42**(9): 1795-1802.
- [18] 黄涛. 基于红外热波技术的钢轨疲劳裂纹深度定量检测研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- HUANG Tao. Rail Fatigue Crack Depth Quantitative Detection Based on Infrared Thermal Wave Technology[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [19] 李科, 钟安彪, 李玉杰, 等. 基于热风激励的红外成像检测技术研究[J]. *激光与红外*, 2016, **46**(7): 823-826.
- LI Ke, ZHONG Anbiao, LI Yujie. Research on infrared imaging detection based on hot wind heating[J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(7): 823-826.
- [20] 王加, 周永康, 李泽民, 等. 非制冷红外图像降噪算法综述[J]. *红外技术*, 2021, **43**(6): 557-565.
- WANG Jia, ZHOU Yongkang, LI Zemin, et al. A survey of uncooled infrared image denoising algorithms[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(6): 557-565
- [21] 王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. *中国光学*, 2017, **10**(4): 438-448.
- WANG Hao, ZHANG Ye, SHEN Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. *Chinese Optics*, 2017, **10**(4): 438-448.
- [22] 李贤阳, 阳建中, 杨竣辉, 等. 基于改进的直方图均衡化与边缘保持平滑滤波的红外图像增强算法[J]. *计算机应用与软件*, 2019, **36**(3): 96-103.
- LI Xianyang, YANG Jianzhong, YANG Junhui, et al. Infrared image enhancement algorithm based on improved histogram equalization and edge preserving smooth filtering[J]. *Computer Applications and Software*, 2019, **36**(3): 96-103.
- [23] 陈明, 谭涛. 基于形态学和高斯滤波的图像快速去雾算法[J]. *计算机应用与软件*, 2019, **36**(12): 209-213.
- CHEN Ming, TAN Tao. A fast image denoising algorithm based on morphology and Gaussian filter[J]. *Computer Applications and Software*, 2019, **36**(12): 209-213.
- [24] 宋人杰, 刘超, 王保军. 一种自适应的 Canny 边缘检测算法[J]. *南京邮电大学学报: 自然科学版*, 2018, **38**(3): 72-76.
- SONG Renjie, LIU Chao, WANG Baojun. Adaptive Canny edge detection algorithm[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*. 2018, **38**(3): 72-76.