

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.14

高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷 图像检测改进

王力军

中国石油大学(华东)基建处, 山东 青岛 266580

摘要: 针对无人机采集的高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹图像中边界像素近似性干扰问题, 提出一种通过求出相似性裂纹缺陷像素边值的近似解的思路, 设计高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷检测改进方法。首先, 计算原始图像的灰度均值, 调节不同区域的均值参数增强图像的平均灰度。然后根据钢梁柱节点疑似裂纹缺陷区域给出J积分线性公式, 推导得出像素的渐变公式, 确定缺陷大体区域。计算缺陷像素区域与裂纹强度因子的线性关系, 由此确定缺陷点的边界梯度区域。最后通过设定图像中正常点的像素最值梯度, 计算高梯度区域和低梯度区域的像素方差, 通过方差数值对比实现焊接裂纹缺陷检测。实验结果表明: 所提方法检测精度始终高于95%, 最高达98%, 较传统卷积神经网络方法约提升20%。研究结果为钢结构焊接质量的无损检测提供了高精度、低复杂度的解决方案, 具有工程推广价值。

关键词: 钢结构梁柱节点; 焊接裂纹缺陷; J积分线性公式; 像素最值梯度; 低梯度区域

中图分类号: TG441.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0100-07

Improvement of Image Detection for Welding Crack Defects in Steel Structure Beam and Column Nodes of High rise Buildings

WANG Lijun

Infrastructure Department, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Abstract: To address the issue of approximate interference of boundary pixels in UAV-captured images of welding crack defects at steel structure beam-column joints in high-rise buildings, this study proposes an improved detection method based on the concept of deriving approximate solutions for pixel boundary values of similar crack defects. Firstly, the grayscale mean of the original image is calculated, and the mean parameters of different regions are adjusted to enhance the average grayscale. Subsequently, a J-integral linear formula is introduced for suspected crack defect areas in steel beam-column nodes, from which a pixel gradient formula is derived to identify the general defect regions. The linear relationship between defect pixel regions and crack intensity factors is established to determine boundary gradient regions of defect points. Finally, by setting the maximum pixel gradient of normal points and calculating pixel variances in high-gradient and low-gradient regions, welding crack defects are detected through variance comparisons. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves a detection accuracy consistently above 95%, peaking at 98%, representing an approximately 20% improvement over traditional convolutional neural network methods. This research provides a high-precision, low-complexity solution for non-destructive testing of steel structure welding quality, with significant potential for engineering applications.

Keywords: steel structure beam column nodes; welding crack defects; J-integral linear formula; pixel maximum gradient; low gradient region

收稿日期: 2024-08-29 修回日期: 2025-03-01

基金项目: 山东省技术创新项目(202350101362)

作者简介: 王力军(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事建筑工程技术智能管理。E-mail: youdh564@163.com。

引用格式:王力军. 高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测改进[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 100–106.

Citation: WANG Lijun. Improvement of Image Detection for Welding Crack Defects in Steel Structure Beam and Column Nodes of High rise Buildings[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 100–106.

0 引言

高层建筑钢结构梁柱是一种由钢管制成的桁架结构,主要应用在各种工业建筑、民用建筑、海洋工程以及塔桅工程中,这种结构具备自身重量较小、轻质高强、空间利用率高以及施工周期较短的特点,可构成各种不同外形的建筑,在各个领域都得到了广泛应用。但由于钢结构梁柱节点位置采用焊机连接方式,在实际应用中,经常在空气中暴露,长期受到波浪载荷、受风载荷、疲劳载荷以及振动载荷的作用,导致节点出现裂纹、断裂等缺陷。为保证高层建筑钢结构梁柱应用的稳定性和寿命,需要不定时对梁柱节点焊接裂纹进行缺陷检测,通过检测结果判定裂纹的形态和参数,帮助进行合理修复,提高建筑的使用寿命和安全性。在这一课题上,以无人机配合人工智能图像识别的方法逐渐取得主导位置,由于该方法不受距离的影响,相关学者一直在这一领域展开研究。

例如,宋飞^[1]等人提出一种基于红外热成像节点缺陷检测技术。该方法结合脉冲热成像以及相位法的技术原理,建立节点裂纹的热感应模型,通过模型分析并输出不同位置节点的温度响应,根据温差峰值对比完成缺陷检测。红外热成像技术高度依赖于物体表面的温度分布,而室外高层建筑钢结构梁柱节点的温度容易受到背景噪声的影响,导致检测结果的准确性下降;杨中雨^[2]等人提出了一种改进型卷积神经网络识别算法。采用灰度拉伸与中值排序的方式完成图像预处理,在卷积神经网络中通过自适应矩估计的方式避免算法陷入局部最优解,实现缺陷图像检测。将该方法用于高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷检测中,未充分考虑到复杂背景环境干扰的影响,从而影响了缺陷识别的准确性;丛明^[3]给出基于 RetinaNet–AACIDD 的铸件缺陷检测方法。采用深度学习算法建立通道注意力模块,在模块中输入铸件的现场数据,提取铸件边缘像素特征和深层语义信息并向下传递,

利用检测锚框进行对比识别。该方法在高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷检测中,忽略了背景噪声对边缘像素的影响,干扰裂纹的检测,导致检测结果的误差较大,特征判定困难;Yang^[4]等人采用一维超声信号的铸件节点缺陷检测方法。利用一维超声检测信号的多域表征,提高特征表征和模型特征提取性能,采用目标优化算法计算种群的空间关系,对缺陷目标进行权衡搜索,完成检测。该方法在高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷检测中,一维超声信号易受到噪声的干扰,这些噪声可能掩盖或扭曲真实的缺陷信号,影响检测的准确性。

综上所述,现有方法均易受噪音干扰影响,且当前以智能图像为基础的建筑梁柱节点焊接裂纹缺陷检测方法,同样面临着无人机采集图像边界像素的近似性干扰问题。在面对这种干扰,当前算法通过循环迭代或者忽略干扰来解决这一问题,在效率和准确性上存在明显弊端。基于此,本研究给出了一种高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测改进方法,通过计算图像灰度均值,调整参数增强灰度,基于J积分公式推导像素渐变公式以确定缺陷区域,分析缺陷区域与裂纹强度关系,界定边界梯度区域,最终实现裂纹缺陷检测。该检测方法可以为同类型焊接裂纹检测提供参考和借鉴。

1 梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测增强

为提高通过无人机采集的高层建筑梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测的准确性和适用性,需要预先进行图像增强处理,使得图像中各个节点灰度表现更为明显,提高缺陷点的对比性。操作步骤为:

(1)计算原图像 $f(x,y)$ 的全局均值参数 m_G 和方差值 σ_G 。

(2)挑选合适大小区域计算图像的局部灰度均值 m_{S_y} 和方差值 σ_{S_y} 。

(3)对图像进行灰度增强,得到处理后图像的

数学表达式为:

$$g(x, y) = k \frac{m_G [f(x, y) - m_{s_y}]}{\sigma_{s_y}} + m_{s_y}, 0 < k < 1 \quad (1)$$

式中 k 为图像的尺度值。

该步骤增强了节点焊接裂纹缺陷图像的对比度,使得图像中局部位置的灰度表现更为明显。在此基础上,确定模板大小并对图像进行像素扩展,随后求解图像中心点的均值,并赋予原值权重,迭代重复该步骤直至处理完图像中的所有像素点。经过这些步骤操作后再进行缺陷检测可以做到事半功倍的效果。

2 裂纹缺陷像素边值的近似求解

为保证高层建筑钢梁柱节点焊接裂纹缺陷检测的有效性和实用性,缺陷点的边缘像素可能会由多种因素影响导致相似,不同成因产生的缺陷的边缘像素也存在较大相似性,若忽略这种相似性直接进行检测,会降低检测精准度。对此,基于上述增强处理后的梁柱节点焊接裂纹缺陷图像,采用J积分算法对焊接裂纹的像素边值进行求解^[5]分析。采用线性积分函数描述缺陷点的边缘像素变化,钢梁柱节点结构的边缘像素示意如图1所示。

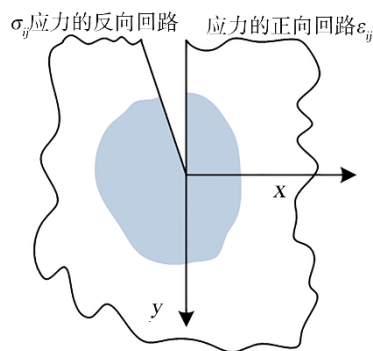


图1 J积分结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of J integral structure

根据图1给出J积分线性公式为:

$$\begin{cases} J = \int_{x=1}^{+\infty} \left(\frac{W\sigma_x \partial u_x}{\partial x} + \frac{T_i \sigma_y \partial u_y}{\partial y} \right) dx \\ T_i = m_j \sigma_{ij} g(x, y) \\ W = \int_{i,j=1}^m \varepsilon_{ij} ds_i ds_j \end{cases} \quad (2)$$

式中 s_i 为焊接裂纹点的弧形像元^[6]; W 为应变能; ∂ 为总应变能分量; ε_{ij} 为正向应力回路的裂纹分量; σ_{ij} 为反向应力回路的裂纹分量; s_j 为正向和反向点位移^[7]; σ_x, σ_y 分别为在水平和垂直方向上延伸的应力分量; u_x, u_y 为在水平和垂直方向上延伸的边缘像素渐变参数; m_j 为节点质量; m 质量数^[8]; i, j 为正向和反向回路; T_i 为周期参数。

在弹性条件下,得到J积分的边缘像素渐变数学解^[9]为:

$$\begin{cases} \sigma_{ij}(r, \theta) = A \left(\frac{J}{AI_n} \right)^{\frac{n}{n+1}} r^{\frac{n}{n+1}} \sigma_{ij}(\theta, n) \\ \varepsilon_{ij}(r, \theta) = A \left(\frac{J}{AI_n} \right)^{\frac{n}{n+1}} r^{\frac{n}{n+1}} \varepsilon_{ij}(\theta, n) \end{cases} \quad (3)$$

式中 A 为建筑材料的质量常数; I_n 为边缘像素渐变函数; $\sigma_{ij}(\theta, n)$ 为正回路分量的角因子^[10]; $\varepsilon_{ij}(\theta, n)$ 为反回路分量的角因子; $r^{\frac{n}{n+1}}$ 为弹塑性变化的半径; n 为裂纹反应弧元。建立基于J积分的边缘像素与像素突变强度因子^[11]的线性关系:

$$\begin{cases} J_\sigma = \frac{1}{E} K_I^2 \sigma_{ij}(r, \theta) \\ J_\varepsilon = \frac{1}{E} K_I^2 \varepsilon_{ij}(r, \theta) - \frac{v^2}{E} K_I^2 \varepsilon_{ij}(r, \theta) \end{cases} \quad (4)$$

式中 E 为应力; J_σ 为弹性边缘像素的积分值; J_ε 为正常像素的积分值; K_I^2 为平面应力。通过上述过程分析可得,建筑钢梁节点的缺陷与边缘像素变化存在一定的线性关系,可计算梯度区域,可通过线性对比初步确定裂纹的缺陷梯度特征变化,提高图像检测的准确性^[12-13]。

3 梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测方法设计

根据上述获取到的梯度变化区域,可以初步确定焊接裂纹缺陷的像元变化,以此为基础进行缺陷图像检测。当裂纹由于外部变化而扩展时,裂纹区域的像素强度也会发生变化。这种变化在图像上表现为像素强度的梯度增加。以图像中不同像素点的梯度关系为依据,通过计算低梯度区域和高梯度区域的峰值和像素个数。通常情况下,梯度峰值的

大小代表了图像像素点的特征变化,稳定点的点梯度幅值变化不大,而存在缺陷的点梯度幅值波动范围较大。给出一个最值梯度参数 $H_{\max}$,其表示图像中最大像素点的标准梯度值,对应方差为 $\sigma_{\max}$,计算像素最值梯度 $H_{\max}$ 与该方差 $\sigma_{\max}$ 之间对比关系:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^a N_i \cdot (H_i - H_{\max})^2}{N(J_{\sigma} - J_{\epsilon})}} \quad (5)$$

式中 H_i 为正常像素点的梯度幅值; a 为像素数目; N_i 为与对应的像素数目; N 为总数目。

当图像中存在裂纹缺陷的灰度特征时,计算其像素点的梯度峰值 $H_{\max}$,通过峰值 $H_{\max}$ 和方差对比确定缺陷点是否处于边缘区域。当像素梯度 H_i 分布在较远位置时, $\sigma_{\max}$ 较大;反之,则较小。所以,可以通过梯度分布来确定裂纹缺陷的像素点,结合 $H_{\max}$ 、 $\sigma_{\max}$ 得到高 T_h 、低 T_l 的检测阈值。计算公式为:

$$T_h = H_{\max} + (1 - \beta) \cdot \sigma_{\max} \quad (6)$$

$$T_l = H_{\max} + (1 + \beta) \cdot \sigma_{\max} \quad (7)$$

式中 β 为检测阈值的调整参数,根据高层建筑钢结构梁结构的实际情况设定。通过 β 的调节,可获取图像中不同区域的裂纹缺陷峰值,实现精准高效的焊接裂纹缺陷检测。

4 性能测试

4.1 测试环境

为验证文中提出高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测研究应用的有效性。针对某高层建筑收集含气孔、麻点以及裂纹焊接缺陷的图像,大板梁的钢结构梁柱节点,尺寸为8 600 mm×1 500 mm×36 mm×12 mm,工作应力为220 MPa,钢梁高度7 mm、载荷力100 MPa,试验环境如图2所示。

4.2 测试指标

焊接裂纹是钢结构中常见的缺陷之一,可能严重影响结构的承载能力和安全性。通过精确的图像检测,可以及时发现并评估裂纹的严重程度,从而采取相应的修复或加固措施,确保建筑的安全运行。则检测精度 J 表达式如下

$$J = \frac{TP}{TP + FP} \quad (8)$$



图2 试验环境

Fig. 2 Test environment

式中 TP 为正确检测的裂纹缺陷图像数量, FP 为错误检测的裂纹缺陷图像数量。

4.3 检测图像灰度增强结果对比

对本方法图像灰度增强效果进行测试,待增强和增强后的焊接裂纹缺陷图像对比如图3所示,并根据详细的像素值参数补充验证结果如图4所示。



(a)待增强图像

(b)增强后图像

图3 灰度增强算法试验结果

Fig. 3 Experimental results of grayscale enhancement algorithm

待增强前的图像灰度表现不均匀,灰度值数值较小,代表图像的像素亮度较低(见图4a),这种情况会导致图像中不同位置亮度不一,观察困难且不清晰,进行缺陷检测会影响判定精准度;反观所提方法的增强结果,可以看出对原始图像的灰度数值实现了有效改善,处理后的像素数值与灰度值之间分布较为均匀,二者达到平衡状态。表明,此时图像像素更高,像素点更为清晰直观,在此基础上进行裂纹缺陷检测,可大大提升检测精准度和效率。

4.4 梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测结果

以图2的原始图像为例,与文献[2]检测方法、文献[3]检测方法分别进行主观和客观两方面的对比分析,其客观方面利用梯度进行检测效果衡量。这两方面所得到的试验结果如图5、图6所示。

图5中蓝色虚线框为实际缺陷结果,红色实线

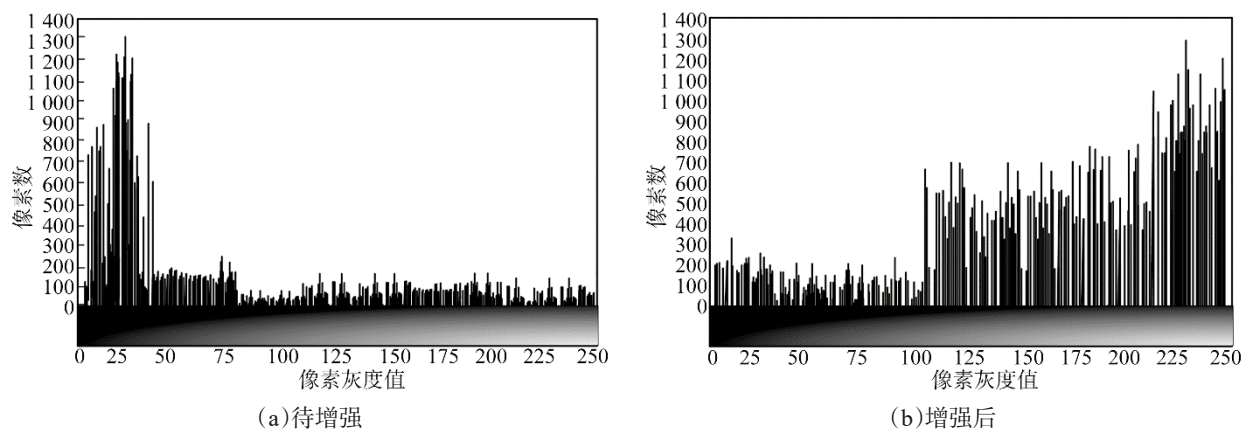


图4 基于像素灰度分布曲线的对比结果

Fig. 4 Comparison results based on pixel grayscale distribution curves

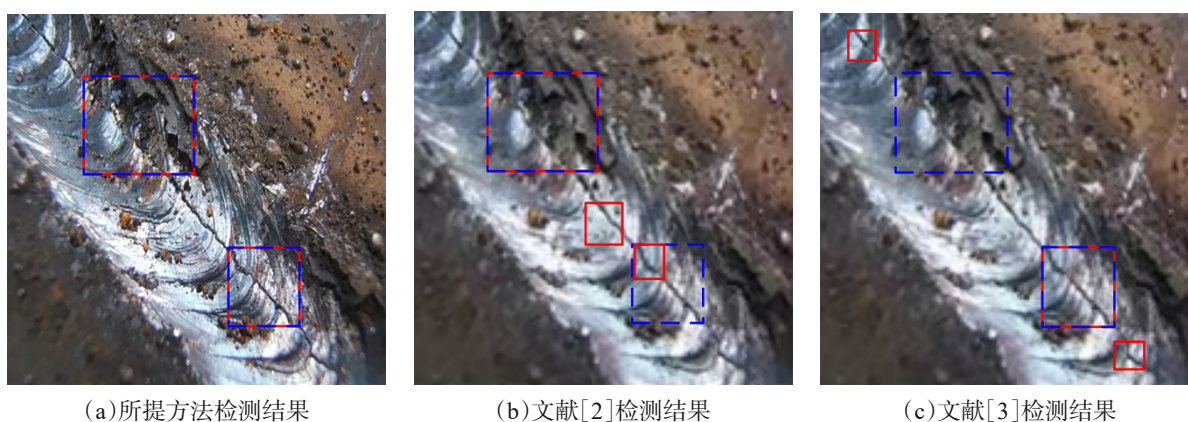


图5 焊接裂纹缺陷图像检测结果

Fig. 5 Welding crack defect image detection results

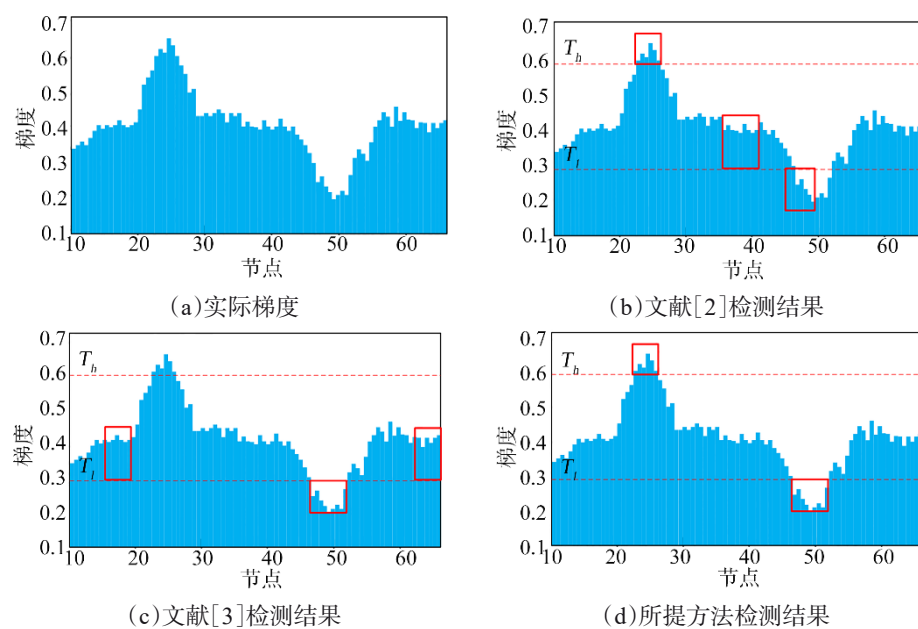


图6 三种方法裂纹缺陷图像检测客观结果

Fig. 6 Objective results of three methods for crack defect image detection

框为检测结果。由图5、图6可以看出,三种方法中本研究所提方法的检测结果精准度最高,检测结果与实际结果一致,对于其中的裂纹点都实现了全检测,框选到的位置不存在偏差;反观另外两种方法都存在错误检测和漏检现象,综合对比发现所提方法的实用价值更高、性能表现更为优异。

4.5 梁柱节点焊接裂纹缺陷检测精度分析

为进一步验证设计方法的实用性,与基于文献[2]检测方法、文献[3]的检测方法进行检测精度对比分析,得到试验结果如图7所示。

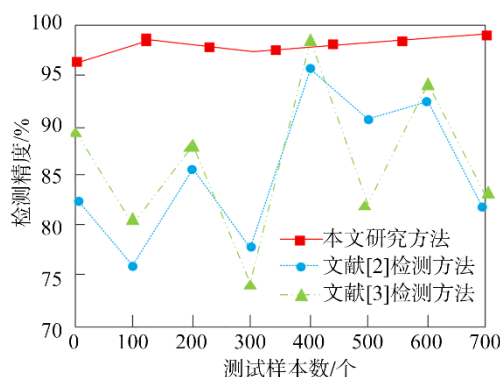


图7 缺陷检测精度

Fig. 7 Defect detection accuracy

根据图7可以看出,本文方法的检测精度始终高于95%,且最高时达到了98%。文献[2]检测方法的检测精度在75%~95%之间波动,文献[3]的检测方法的检测精度在73%~97%之间波动。两种对比方法检测精度波动过大,具有不稳定性,而本文方法检测结果波动较小,具有稳定性,且检测精度较高,能够为高层建筑提供有效帮助。

5 结论

本文提出一种高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹缺陷图像检测研究。计算图像灰度均值,调整参数增强灰度。基于J积分公式推导像素渐变公式,以确定缺陷区域。分析缺陷区域与裂纹强度关系,界定边界梯度区域,实现裂纹缺陷检测。试验结果表明,所提方法处理后的像素数值与灰度值之间分布较为均匀,二者达到平衡状态。检测结果最为精准,对于其中的裂纹点都实现了全检测,框选到的位置不存在偏差。检测精度始终高于95%,且

最高时达到了98%。表明所提方法能够为高层建筑钢结构梁柱节点焊接裂纹检测提供有效帮助。

参考文献:

- [1] 宋飞,殷晨波,杜雪雪,等. 基于红外热成像检测技术的焊接裂纹深度定量识别研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(19): 128-132+138.
SONG F, YIN C B, DU X X, et al. Quantitative Identification of Welding Crack Depth Based on Infrared Thermography Test[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(19): 128-132+138.
- [2] 杨中雨,李鹏. 一种基于卷积神经网络的管道焊缝图像识别算法[J]. 激光杂志, 2021, 42(4): 64-67.
YANG Z Y, LI P. A Pipeline Weld Image Recognition Algorithm Based on CNN[J]. Laser Journal, 2021, 42(4): 64-67.
- [3] 丛明,孙心海,武晓轩. 基于RetinaNet-AACIDD的铝合金铸件X-ray图像缺陷检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023, (12): 151-156+160.
CONG M, SUN X H, WU X X. X-ray Image Defect Detection Method of Aluminum Alloy Castings Based on RetinaNet-AACIDD [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023, (12): 151-156+160.
- [4] Yang H Y, Wang H B, Li H H, et al. Weld Defect Cascaded Detection Model Based on Bidirectional Multi-scale Feature Fusion and Shape Pre-classification[J]. ISIJ International, 2022, 62(7): 1485-1492.
- [5] 李巍,梁斯昕,张建州. 基于梯度引导加权-延迟负梯度衰减损失的长尾图像缺陷检测[J]. 计算机应用, 2023, 43(10): 3267-3274.
LI W, LIANG S X, ZHANG J Z. Long-tailed image defect detection based on gradient-guide weighted-deferred negative gradient decay loss [J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(10): 3267-3274.
- [6] 伍缘杰,徐晓静,计效园,等. 基于图像处理的SLM铺粉缺陷检测识别与分类研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(01): 23-28.
WU Y J, XU X J, JI X Y, et al. Defect Recognition and Classification of SLM Powder Spreading Based on Image Processing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(01): 23-28.
- [7] 邹斌,方卫林,王栋. 基于深度卷积神经网络的环焊缝X射线底片公片检测算法——评《埋弧焊X射线焊缝图像缺陷检测算法研究》[J]. 中国油脂, 2023, 48(03): 153.

- ZOU B, FANG W L, WANG D. A deep convolutional neural network-based X-ray negative image detection algorithm for circumferential welds: A review of "Research on Image Defect Detection Algorithm for Submerged Arc Welding X-ray Welds"[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(03): 153.
- [8] 李可, 吴忠卿, 吉勇, 等. 改进U-Net芯片X线图像焊缝气泡缺陷检测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(06): 104-110.
- LI K, WU Z Q, JI Y, et al. Detection method of weld bubble defect in chip X-ray image based on improved U-Net network [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(06): 104-110.
- [9] 胡丹, 吕波, 王静静, 等. 焊缝表面缺陷激光视觉传感HOG-SVM的检测方法[J]. 焊接学报, 2023, 44(01): 57-62+70+131-132.
- HU D, LV B, WANG J J, et al. Study on HOG-SVM detection method of weld surface defects using laser visual sensing[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(01): 57-62+70+131-132.
- [10] 王东, 涂占宽, 代韬, 等. 钢轨厂焊接头焊缝轨腰轨底圆弧过渡区缺陷检测及分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(07): 40-44.
- WANG D, TU Z K, DAI T, et al. Detection and Analysis of Defects in Arc Transition Zone of Waist and Bottom of Rail Factory Welding Joint Weld Seam[J]. Railway Engineering, 2023, 63(07): 40-44.
- [11] 赵玥, 肖梦燕, 邱宝军, 等. 基于机器视觉的集成电路声扫图像缺陷检测软件设计[J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(10): 1806-1813.
- ZHAO Y, XIAO M Y, QIU B J, et al. Software design of acoustic scanning image defect detection based on machine vision[J]. Computer Engineering & Science, 2023, 45(10): 1806-1813.
- [12] 张德海, 祝志逢, 李艳芹, 等. 基于机器视觉的二维图像质量缺陷检测研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(23): 198-207.
- ZHANG D H, ZHU Z F, LI Y Q, et al. Research Progress of Two-dimensional Image Quality Defect Detection Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(23): 198-207.
- [13] 王鹏, 赵春晖, 周华良, 等. 基于多时相巡检图像的变电设备抗干扰缺陷检测[J]. 控制与决策, 2024, 39(03): 885-892.
- WANG P, ZHAO C H, ZHOU H L, et al. Anti-interference defect detection of substation equipment based on multitemporal inspection images[J]. Control and Decision, 2024, 39(03): 885-892.
- [14] 陈杰, 安之焕, 唐占元, 等. 基于改进YOLOv4模型的无人机巡检图像杆塔缺陷检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 155-160.
- CHEN J, AN Z H, TANG Z Y, et al. Research on tower defect detection method of UAV patrol inspection image based on improved YOLOv4 model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 155-160.
- [15] 钱鲁斌, 吴鸿博, 高春翔, 等. 基于灰狼算法的轨道交通钢轨缺陷的稀疏全聚焦成像方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(03): 120-124.
- QIAN L B, WU H B, GAO C X, et al. Sparse Full Focus Imaging Method for Rail Defects in Rail Transit Based on Grey Wolf Algorithm[J]. Urban Rail Transit Research, 2024, 27(03): 120-124.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>