

桥梁钢结构低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测研究

宋改芳

临汾市政府工程建设服务中心 山西临汾 041000

摘要: 钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹往往隐藏在焊缝内部或表面以下,且形态复杂多样,导致难以全面、准确地识别和定位这些隐蔽的裂纹缺陷,从而无法实现有效的焊接裂纹缺陷定量检测。为此,提出钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测研究。基于激光超声波技术联合B扫描成像技术,获取钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹图像,然后,使用多模态特征融合算法完成裂纹缺陷图像的ROI区域提取,以减少误检和隐蔽裂纹缺陷漏检的情况;再根据提取的裂纹缺陷目标区域,对裂纹边缘实施有效提取,根据提取的裂纹边缘曲线,获取裂纹的长度、深度、宽度等尺寸,实现裂纹缺陷的定量检测。结果表明:利用该方法开展低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测时,检测精度高、效果好。

关键词: 钢结构桥梁;低合金钢焊接位置;裂纹缺陷;定量检测方法;特征点提取

Quantitative detection of welding crack defects in low alloy steel for steel structure bridges

SONG Gaifang

Linfen Municipal Government Engineering Construction Service Center, Linfen 041000, Shanxi, China

Abstract: Low alloy steel welding cracks in steel structure bridges are often hidden inside or below the surface of the weld seam, and their complex and diverse shapes make it difficult to comprehensively and accurately identify and locate these hidden crack defects, thus making it impossible to achieve effective quantitative detection of welding crack defects. Therefore, a quantitative detection study on welding crack defects in low-alloy steel for steel structure bridges is proposed. Based on laser ultrasound technology combined with B-scan imaging technology, low-alloy steel welding crack images of steel structure bridges are obtained. Then, a multimodal feature fusion algorithm is used to extract the ROI region of crack defect images, in order to reduce false detections and hidden crack defect omissions. Based on the extracted crack defect target area, effective extraction of crack edges is carried out. According to the extracted crack edge curve, the depth, width, and other dimensions of the crack are obtained to achieve quantitative detection of crack defects. The results show that using this method for quantitative detection of welding crack defects in low-alloy steel has high detection accuracy and good results.

Keywords: steel structure bridge; welding position of low alloy steel; crack defects; quantitative detection methods; feature point extraction

1 序言

现代交通网络中,桥梁作为其中的典型交通

节点枢纽,被广泛应用于世界各地^[1, 2]。其中,钢结构桥梁作为近年来科技化的典型代表,因其高强

度、高韧性特性,受到人们的欢迎^[3]。然而,在钢结构桥梁建造过程中,特别是在焊接环节,由于材料、工艺、环境等多种因素的影响,常会产生裂纹缺陷。这些裂纹缺陷不仅会影响桥梁的整体性能和承载能力,还可能导致结构失效^[4, 5]。钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷进行准确、高效的定量检测成为必要。传统的裂纹检测方法,如目视检测,往往受限于人为因素和环境条件,检测效率和准确性难以保证^[6]。随着科技的进步和图像处理技术的发展,无损检测技术因其非接触、高效率、高精度等优点,逐渐成为裂纹缺陷检测的主流方法^[7-9]。其中,基于图像处理和机器学习算法的定量检测方法,能够实现对裂纹长度、宽度、面积等参数的精确测量,为裂纹的评估和修复提供科学依据^[10, 11]。

王传钊等^[12]首先利用涡流成像技术获取焊缝缺陷图像,根据独立成分分析法对图像序列展开处理,联合改进区域生成算法提取缺陷特征;最后通过提取的特征,使用分类算法对特征展开分类,通过分类结果实现裂纹缺陷检测。该方法未充分考虑隐藏在焊缝内部或表面以下焊接裂纹,导致根据所获取的裂纹缺陷图像,难以全面检测到隐蔽的裂纹缺陷,使得最终钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测效果不佳。冯沐祺等^[13]首先通过激光超声波线扫描裂纹,获取裂纹波形;使用小波变换方法对波形实施降噪,处理后展开B扫描成像,获取裂纹图像;再设计一种绘制扫描位置-最大幅值差图的方法,利用该方法确定裂纹的起始和终止位置,从而实现裂纹长度信息的获取,实现裂纹缺陷定量检测。然而该方法没有考虑到裂纹的多样性和复杂性,无法有效地提取裂纹的感兴趣区域(Region of Interest, ROI),导致该方法在裂纹缺陷检测时效果差。郝柏桥等^[14]首先基于非负矩阵分解算法分解裂纹缺陷图像,获取裂纹缺陷数据集目标域特征空间;再以余弦相似度衡量缺陷数据集源域样本;建立深度模型的检测模型,将样本数据输入其中,通过模型实现裂纹缺陷检测。余弦相似度通常用于衡量文本数据或高维稀疏数据的相似性,从而导致该方法在衡量缺陷样本时可能难以准确反映裂纹特征的相似性,使该方法检测性能低。SHI等^[15]提出了一种以形状感知模块(SAM)为核心的形状感知网络(SA-NET)。FS-RPN预测与特征图上的每个位

置相对应的锚盒形状,并根据预测的锚盒形状对齐特征图。然后,根据对齐的特征图来预测锚框的偏移量和前景分类得分。TR Head使用仅包含一个回归分支的一级检测头,通过微调建议区域来进一步提高建议区域的质量。它采用由一个分类分支和一个回归分支组成的二级检测头来预测缺陷的类别和盒子,实现缺陷检测。该方法由于构建模型自身参数存在问题,导致该方法在裂纹缺陷检测时,检测效果不理想。

基于上述,为提高焊接裂纹缺陷定量检测的效果,本文提出了钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测方法。

2 钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷图像ROI区域提取

钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹定量检测时,首先基于激光超声波技术联合B扫描成像技术,获取钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹图像;使用多模态特征融合算法完成裂纹缺陷图像的ROI区域提取^[16, 17],更准确地反映裂纹缺陷的特征,以应对由于钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹往往隐藏在焊缝内部或表面以下,且形态复杂多样,所导致的难以全面、准确检测隐蔽裂纹缺陷的问题,从而实现有效的焊接裂纹缺陷定量检测。

2.1 焊接裂纹图像获取

使用激光超声波技术对钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹展开激光超声波线扫描检测,获取低合金钢的波形状态数据^[18],通过小波包变换算法有效去除波形数据噪声,具体实现过程描述如下。

使用激光超声波线扫描检测技术对钢结构桥梁低合金钢焊接部位进行检测,得到包含噪声的低合金钢的波形状态数据。假设采集到的波形数据为离散信号 $x(n)$,其中 $n=0, 1, 2, \dots, N$ 为数据点的总数。

对采集到的波形数据 $x(n)$ 进行小波包分解。小波包分解将信号分解到不同的频带中,分解的层数为 J 。设 $W_{j,k}$ 表示在第 j 层($j=0, 1, 2, \dots, J$)、第 k 个节点($k=0, 1, 2, \dots, 2^j-1$)的小波包系数。

通过迭代计算得到小波包系数,即

$$W_{j,k} = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) h(2n-k) \quad (1)$$

式中 $h()$ ——滤波器系数。

采用软阈值处理方法对小波包系数进行阈值处理, 则

$$\bar{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(W_{j,k})(|W_{j,k}| - \lambda), & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\bar{W}_{j,k}$ ——去噪后的小波包系数;

$\text{sign}()$ ——符号函数;

λ ——阈值。

对经过阈值处理后的小波包系数 $\bar{W}_{j,k}$ 进行逆小波包变换, 得到去噪后的波形数据 $\tilde{x}(n)$ 。之后, 联合扫描成像算法, 实现裂纹状态数据的成像处理, 完成整体裂纹的成像图像。

2.2 感兴趣区域提取

针对钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷图像, 设计一种融合多模态特征的目标区域提取算法。

提取流程如下。

步骤1: 裂纹缺陷图像特征提取。提取特征包括裂纹缺陷图像对比度以及熵特征图像。

步骤2: 特征提取后, 对其实施多模态特征融合, 获取融合后的多模态特征图像。

步骤3: 对多模态特征图像实施预浸没以及区域填充, 实现目标区域提取。

(1) 特征提取

1) 对比度特征提取。对比度是图像中反映清晰度以及纹理深浅的量化指标。采用灰度共生矩阵获取低合金钢裂纹缺陷图像的对比度特征图。首先将图像实施和分量实施线性加权, 组成新的分量, 并将图像转换成灰度图像 $I_1(x, y)$, 则

$$I_1(x, y) = 0.299R_{r0} + 0.587G_{r0} \quad (3)$$

式中 R_{r0} 、 G_{r0} ——裂纹成像图像的输入 R 、 G 分量的描述。

设定灰度图像 $I_1(x, y)$ 中图像尺度为 $M \times N$, 中心在点 (x, y) 上, 上下距离为 Z 的窗口描述成 $Z_{x,y}$ 。滑动像素块内灰度级 i 与灰度级 j 的移动关系概率标记成 $Q(i, j)$ 形式, 以此获取裂纹缺陷图像的对比度 $C(x, y)$, 计算不同方向的对比度值, 获取对比度均值 $C'(x, y)$ 。再将均值作为像素点 (x, y) 在 $Z_{x,y}$ 上的灰度共生矩阵 $c_1(x, y)$, 并对矩阵实施二值化处理获取对比度特征图 $c_2(x, y)$, 则

$$\begin{cases} C'(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \frac{Z_{x,y} I_1(x, y)}{Q(i, j)} = \frac{1}{4} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N C(x, y) \\ c_1(x, y) = C'(x, y) \\ c_2(x, y) = \begin{cases} l_{\max}; & 0 < K_0 < C'(x, y) \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $l_{\max}$ ——灰度最大等级;

K_0 ——阈值。

(2) 熵特征图像获取

1) 基于上述建立的灰度共生矩阵, 计算图像熵值 $e_s(x, y)$, 基于不同方向均值 $e'_s(x, y)$, 获取裂纹缺陷图像熵特征图像 $e_1(x, y)$, 则

$$\begin{cases} e_s(x, y) = - \sum_{i,j}^L Q(i, j) \log Q(i, j) \\ e'_s(x, y) = - \frac{1}{4} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N e_s(x, y) \\ e_1(x, y) = e'_s(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

式中 L ——灰度级总数标。

2) 获取多模态特征图像。完成特征图像获取后, 对对比度特征图实施中值滤波处理, 获取新的特征图像 $Q_{\text{idm}}(x, y) = \text{Med}[c_2(x, y)]$ 。

并对熵特征图像展开形态学腐蚀, 通过腐蚀结果令图像内区域连通, 边缘连接, 其过程为

$$e_2(x, y) = e_1(x, y) \ominus B \quad (6)$$

式中 B ——核函数矩阵;

$\ominus$ ——腐蚀符号。

完成特征图像处理后, 对焊接裂纹缺陷对比度以及熵特征图像实施加权处理, 获取加权后特征图像 $f_{\text{idm}}(x, y)$ 、 $f_{\text{ent}}(x, y)$, 完成特征图像融合, 实现裂纹缺陷图像的多模态特征图像 $f(x, y)$, 则

$$f(x, y) = f_{\text{idm}}(x, y) + f_{\text{ent}}(x, y) \quad (7)$$

最后, 基于裂纹缺陷图像的多模态特征图像 $f(x, y)$ 实施预浸没及区域填充处理, 突出裂纹缺陷目标, 实现缺陷图像目标区域的有效提取。

3 裂纹缺陷定量检测算法

完成目标区域提取后, 基于提取的裂纹缺陷目标区域, 对裂纹边缘实施有效提取, 并根据提取的裂纹边缘曲线, 获取裂纹的长度、深度、宽度等尺寸, 实现钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷的定量检测^[19, 20]。

3.1 钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷边缘提取方法

(1) 目标区域图像梯度幅值、方向计算 基于上述提取的钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷目标区域图像,使用Canny边缘检测算法提取裂纹缺陷目标图像中的边缘信息,完成裂纹缺陷的边缘有效检测。

首先,利用二维高斯函数中的一阶导数对目标裂纹缺陷图像展开图像平滑处理。过程中,设定目标区域图像 (x, y) 位置像素值为 $\alpha(x, y)$, 沿着 x, y 两个方向设定梯度算子为 $G_x(x, y)$ 、 $G_y(x, y)$, 图像的平滑过程见式 (8), 即

$$\zeta(x, y) = \alpha(x, y) \omega \beta^2 \{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2\} \quad (8)$$

式中 $\zeta(x, y)$ ——图像平滑结果;

ω ——权重因子;

β ——一阶导数。

再通过Canny算法获取平滑后图像的梯度幅值 $M[i, j]$ 及梯度方向 $\varphi[i, j]$, 则

$$\begin{cases} M[i, j] = \sqrt{\frac{Q_x[i, j]^2 + Q_y[i, j]^2}{\zeta(x, y)}} \\ \varphi[i, j] = \arctan \frac{Q_y[i, j]}{Q_x[i, j]} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $Q_x[i, j]$ 、 $Q_y[i, j]$ ——图像 x, y 方向偏导阵列。

(2) 梯度幅值的非极大值抑制算法 完成梯度幅值以及梯度方向确定后,为了在提取边缘信息时能够精准实现边缘的定位,需要细化梯度幅值,结合非极大值机制 NMS , 完成幅值局部最大变化点 $O[i, j]$ 的保存,则

$$O[i, j] = NMS(M[i, j], \delta[i, j]) \quad (10)$$

其中,图像像素邻域中心沿梯度方向 $\varphi[i, j]$ 划分的扇形区域用 $\delta[i, j]$ 描述,图像像素点的非极大值抑制即在该区域内展开。

(3) 边缘分割提取 基于上述所保存的幅值局部最大变化点 $O[i, j]$, 利用Canny算子在边缘提取时,还需要根据高低门限阈值作为调节参数,通过设定的阈值对目标区域展开图像分割,从而将钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷边缘完整地提取出来。

由于低合金钢裂纹目标、背景灰度级无明显差别,导致梯度幅值双峰分布不能有效获取,因此需

要寻找最佳分割阈值。

阈值选取步骤如下。

步骤1: 首先将目标图像梯度幅值中间灰度值作为初始阈值 T_0 。通过该阈值将图像分割成两个区域 U_1 、 U_2 , 其中灰度值大于 T_0 的像素区域为 U_1 , 灰度值小于 T_0 的像素区域为 U_2 。

步骤2: 对 U_1 、 U_2 区域的平均灰度值展开计算,并根据计算结果 ϕ_1 、 ϕ_2 完成新阈值的选取 $T = \frac{(\phi_1 + \phi_2)}{2}$ 。

步骤3: 再将新阈值与初始阈值展开差值的计算 $\Delta = |T_0 - T|$, 若计算结果大于给定值 η , 则将二者看作相等,这时需转回分割区域流程,重新选取阈值;若差值小于给定值 η , 则将其视作最佳阈值 T_{best} , 利用该值对裂纹缺陷目标区域图像展开分割,结果见式 (11), 即

$$G'(x, y) = \begin{cases} 1; & G(x, y) > T_{\text{best}} \\ 0; & G(x, y) \leq T_{\text{best}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $G(x, y)$ ——目标区域图像在位置 (x, y) 处的灰度值。

(4) 边缘连线 完成目标分割后,由于原始图像噪声等因素问题,分割后目标边缘会出现间断,从而导致获取的裂纹边缘不闭合,因此需要使用连接算法将裂纹断裂的边缘平滑地连接起来,产生一个完整的裂纹边缘。

过程中,可使用形态学膨胀算法完成边缘轮廓的连接,提取得到完整的裂纹缺陷边缘 $G''(x, y)$, 具体表示为

$$G''(x, y) = G'(x, y) \oplus S \quad (12)$$

式中 $\oplus$ ——膨胀算子;

S ——结构元素。

3.2 裂纹缺陷定量检测

完成裂纹轮廓边缘提取后,采用曲率算法找出轮廓 $G''(x, y)$ 的特征点。过程中,基于裂纹边缘轮廓,设定当前点、前一位置点及后一位置点分别为 P_i 、 P_{i-1} 、 P_{i+1} , 且令 $R_{i1} = P_i - P_{i-5}$ 、 $R_{i2} = P_{i+5} - P_i$, 以此计算轮廓曲率 κ , 则

$$\kappa = \frac{\text{sign}[(x_i - x_{i-5})(y_{i+5} - y_i) - (y_i - y_{i-5})(x_{i+5} - x_i)]}{\|R_{i1}\| \|R_{i2}\|} \frac{R_{i1} R_{i2}}{\|R_{i1}\| \|R_{i2}\|} \quad (13)$$

式中 (x_i, y_i) ——轮廓像素点。

根据上述轮廓曲率的计算结果,设定期望阈值

寻找轮廓的曲率局部极大值,完成特征点的确定。再将特征点作为裂纹轮廓的角点,展开定位处理,最后通过定位结果开展欧式距离计算,完成裂纹长度、宽度及深度等尺寸参数的获取,实现钢结构桥梁低合金钢裂纹缺陷的定量检测。具体过程如下。

1) 根据上述计算的轮廓曲率值,设定角点区域范围为 n ,选取范围内点 P_k 及其左边 $m+1$ 个点拟合曲线,并计算左斜率。与此同时,同样选取角点范围内点 P_k 及其右边 $m+1$ 个点拟合曲线,完成右斜率的计算。

2) 计算角点区域中全部点的左右斜率,获取左右斜率差分值 $\Delta\lambda_k$,完成角点获取(特征点)。

3) 完成特征点确定后,对特征点之间开展欧式距离计算,通过计算结果获取裂纹尺寸值 D_{ij} ,过程见式(14),即

$$\begin{cases} \mathcal{Q}_i = \max \Delta\lambda_k \\ D_{ij} = G_R \|\mathcal{Q}_a - \mathcal{Q}_b\|_2^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\mathcal{Q}_i$ ——寻找的特征点;

$a、b$ ——不同特征点的标识, $a、b \in i$;

G_R ——度量系数矩阵。

4 试验

为了验证上述桥梁低合金钢裂纹缺陷的定量检测方法的整体有效性,对此方法展开测试。

4.1 试验结果及分析

分别采用钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测研究(本文所提方法)、基于激光超声波的轨道钢表面裂纹双侧扫描检测(文献[4]方法)、基于深度迁移学习的脉冲涡流热成像裂纹缺陷检测(文献[5]方法)开展裂纹缺陷检测,以此验证上述3种方法在桥梁低合金钢裂纹缺陷检测时的有效性。

焊接裂纹缺陷检测方法验证时,首先选取某城市钢结构桥梁上的低合金钢零件作为测试对象,联合计算机仿真软件对上述3种方法开展裂纹缺陷检测,其试验场景如图1所示。

应用不同方法展开检测,并对其结果进行对比,以完成所提方法的缺陷定量检测效果测试验证。

开展裂纹缺陷定量检测时,选取3个不同零件裂纹作为测试对象,使用JUT800数字式超声波检测仪检测裂纹缺陷,设定超声波检测仪具体数值见表1。

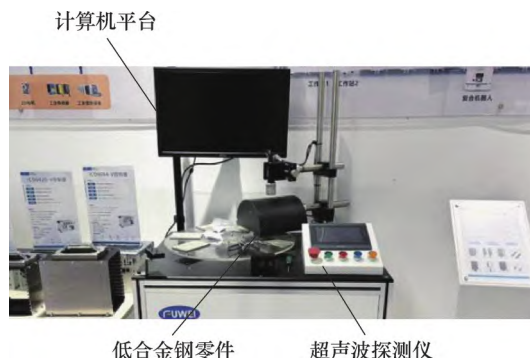


图1 焊接裂纹缺陷定量检测试验场景

表1 设定超声波检测仪具体数值

检测范围 /mm	频带选择 /MHz	声速范围 / (m/s)	垂直型误差 (%)	探头零偏 /μs
5000	0.5~4	0~9999	≤3	0~999.99

基于上述设置,为验证所提方法的检测效果,分别从裂纹缺陷图像获取、裂纹缺陷轮廓提取效果以及检测精度三方面展开对比分析。

4.2 结果分析

(1) 有效性分析 开展钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测时,低合金钢零件焊接裂纹缺陷图像获取质量是整个裂纹缺陷定量检测的关键。因此,以某一零件裂纹为例,利用所提方法、文献[4]方法及文献[5]方法开展裂纹缺陷图像采集时,对不同方法采集的低合金钢零件焊接裂纹缺陷图像质量展开测试,结果如图2所示。



a) 本文所提方法



b) 文献[4]方法



c) 文献[5]方法

图2 不同方法的裂纹缺陷图像质量测试结果

分析图2可知,对钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测时,可明显看出相比于文献[4]方法和文献[5]方法,本文所提方法通过超声波技术采集的裂纹缺陷图像质量是3种方法中最高的,这主要是因为该方法展开激光超声波线扫描检测,获取低合金钢的波形状态数据,并通过小波包变换算法有效去除波形数据噪声,联合扫描成像算法,实现裂纹状态数据的成像处理,完成整体裂纹的成像图像采集。因此该方法获取裂纹缺陷图像时,图像质量好、清晰度高。由此,基于上述分析可知,采用本文所提方法具有有效性,可为钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测提供可靠的支撑。

(2) 裂纹缺陷轮廓提取效果测试 使用上述3种方法开展裂纹缺陷检测时,基于上述各方法所获得的裂纹缺陷图像,继续进行裂纹缺陷轮廓提取测试,则不同方法提取的裂纹轮廓完整度结果如图3所示。

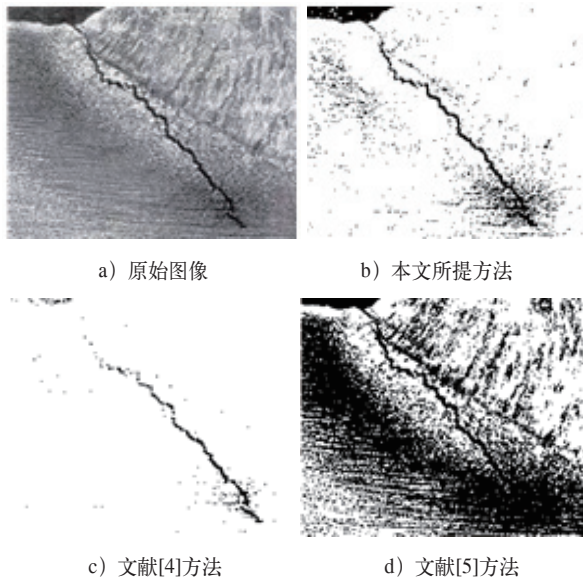


图3 不同方法的裂纹轮廓完整度测试结果

分析图3可知,开展钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测时,文献[4]方法以及文献[5]方法提取的裂纹轮廓均与实际轮廓存在差距;而本文所提方法提取的轮廓不仅边缘清晰,且轮廓完整度较高。由此可知,利用本文所提方法开展钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测时,其提取的裂纹缺陷轮廓,有助于提高检测的准确性、效率和可靠性,使得检测效果好、精度高。

裂纹缺陷定量检测精度 在上述分析的基础上,

为进一步验证本文所提方法的定量检测效果,通过上述JUT800数字式超声波探测仪器检测钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷实际值,并将其与本文所提方法缺陷定量结果展开测试,以此验证本文所提方法的实际检测精度,结果见表2。

表2 所提方法裂纹缺陷定位精度测试结果 (mm)

零件编码	裂纹特征参数	裂纹缺陷定位精度测试结果	
		实际裂纹值	所提方法测试结果
1	深度	0.035	0.034
	长度	0.58	0.579
	宽度	0.14	0.14
2	深度	0.064	0.063
	长度	0.83	0.83
	宽度	0.23	0.23
3	深度	0.062	0.062
	长度	0.55	0.548
	宽度	0.087	0.086

分析表2可知,利用本文所提方法开展钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测时,经由本文所提方法提取出的钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹深度、长度及宽度与实际值基本一致,其误差结果 $<0.03\text{mm}$ 。由此可认定,基于所提方法进行钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测时,检测精度高、性能好。

5 结束语

钢结构桥梁长时间处于外部露天条件下,在自身应力以及各项干扰因素影响下,会使桥梁结构中低合金钢焊接位置出现裂纹缺陷,因此对裂纹缺陷定量检测就显得尤为重要。针对传统裂纹缺陷检测方法中存在的问题,提出钢结构桥梁低合金钢焊接裂纹缺陷定量检测方法。该方法先获取裂纹缺陷图像目标区域;在此区域内,完成裂纹的边缘轮廓提取,确定轮廓特征点,计算轮廓尺度,实现裂纹缺陷的定量检测。由于该方法在轮廓提取时,还存在一定冗余度,今后会针对该项缺陷继续优化检测方法。

参考文献:

- [1] 申全军,王孜健,邢小亮,等.基于横风作用的大跨径桥梁交通运行安全影响分析[J].中外公路,

- 2024, 44 (3) : 115-122.
- [2] 曾过生, 石雪飞. 扩建桥梁不中断交通拼接时机及管制措施研究[J]. 公路, 2023, 68 (8) : 179-184.
- [3] 魏祎, 张太科, 阮欣, 等. 混合交通流作用下大跨径桥梁车辆荷载效应分析[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (12) : 1859-1867.
- [4] 陈梦成, 方苇, 杨超, 等. 钢结构中疲劳裂纹增长概率模型和Bayesian动态预测[J]. 铁道学报, 2021, 43 (7) : 177-184.
- [5] 陈悦, 潘学豪, 邓淋方. 考虑残余应力影响的典型钢结构对接焊缝缺陷定位研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26 (4) : 112-120.
- [6] 周建庭, 夏润川, 张洪. 桥梁内部钢结构病害检测研究与应用[J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (10) : 20-28.
- [7] 彭森, 何连海, 马志华, 等. 钢结构桥梁对接焊缝缺陷的TOFD检测图像特征[J]. 无损检测, 2021, 43 (12) : 49-53.
- [8] 王玲, 杨建平, 郭小华. 里氏硬度无损检测钢材牌号的试验[J]. 工业建筑, 2022, 52 (12) : 195-199.
- [9] 杨忠华, 付泽宇, 付海霞. 泵塔区钢结构焊缝表面缺陷的超声红外热成像检测[J]. 无损检测, 2021, 43 (11) : 53-57.
- [10] 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.
- [11] 肖奇, 冯健, 汪刚, 等. 基于多频平衡电磁技术的管道内外缺陷检测与全角度表面裂纹识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (14) : 5703-5713.
- [12] 王传钊, 姜秀海, 晁永生, 等. 基于涡流脉冲热成像的角焊缝表面裂纹检测[J]. 激光与红外, 2022, 52 (10) : 1498-1505.
- [13] 冯沐祺, 徐启明, 战宇, 等. 基于激光超声的轨道钢表面裂纹双侧扫描检测[J]. 中国激光, 2024, 05 (14) : 1-19.
- [14] 郝柏桥, 范玉刚, 宋执环. 基于深度迁移学习的脉冲涡流热成像裂纹缺陷检测[J]. 光学学报, 2023, 43 (4) : 146-154.
- [15] SHI L, ZU H, TAI J, et al. A welding defect detection model based on a shape-aware network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2022, 43 (5) : 6147-6162.
- [16] 毛科技, 汪敏豪, 陈立建, 等. 结合目标检测与匹配修正的手腕骨兴趣区域提取[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27 (3) : 973-987.
- [17] 刘凤, 刘浩哲, 张文天, 等. 一种鲁棒的基于对抗结构的生物特征ROI提取方法[J]. 自动化学报, 2023, 49 (6) : 1339-1353.
- [18] 赵雪山, 段珍珍, 周广浩, 等. 不锈钢激光焊接头超声导波检测与质量评价技术[J]. 电焊机, 2024, 54 (5) : 142-147, 159.
- [19] 仇静博, 燕雪峰, 汪俊, 等. 基于全卷积神经网络的单幅隧道图像裂纹提取算法[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44 (5) : 845-854.
- [20] 于微波, 周旺, 杨宏韬. 基于DSnet网络的零件边缘轮廓提取[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023 (2) : 169-173, 177.

(收稿日期: 20250209)

(上接第38页)

吊具。同时, 制定了合理的组焊顺序及缝焊焊接参数, 确保了该项目不锈钢车体波纹板缝焊质量满足要求, 保证了该项目地铁车辆的正常交付节点, 得到了业主的好评, 实现了产品质量和生产效益的双提升。

参考文献:

- [1] 郭毅, 龚仙龙, 丁洁琼, 等. 不锈钢地铁车体底架边梁MAG焊接变形控制浅析[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (7) : 41-44.
- [2] 程典阳, 韩晓辉. 轨道车辆不锈钢波纹板自动焊缝

工艺开发[J]. 电焊机, 2008 (6) : 62-64.

- [3] 陈锋, 徐国梁. 地铁不锈钢车体研究[J]. 铁道车辆, 2007 (3) : 28-30.
- [4] 丁成钢, 史春元, 都本刚, 等. SUS301L不锈钢电阻点焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2006 (11) : 28-29.
- [5] 姚明哲, 杨志勇, 马秋红, 等. 不锈钢轨道车辆的特点[J]. 装备机械, 2015 (3) : 15-17.
- [6] 朱志民. 香港轻轨不锈钢车体焊接工艺[J]. 金属加工 (热加工), 2011 (6) : 22-24.

(收稿日期: 20250116)