

组合砌体墙损伤红外热像检测方法研究

Research on the Infrared Thermal Image Detection Approach for Composite Masonry Wall Damage

李 瑞, 陈 飞

(江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210000)

摘 要: 轻钢芯柱-保温夹层组合砌体墙的裸露部分受自然因素影响易出现墙体损伤, 影响墙体的使用寿命, 为此提出组合砌体墙损伤红外热像检测方法。该方法通过超声红外热成像技术, 获取组合砌体墙损伤的红外图像, 基于双边滤波方法, 提升了组合砌体墙损伤图像的低照度; 基于图像处理技术和形态学检测技术, 对组合砌体墙损伤边缘进行精准提取, 确定损伤程度, 实现精确检测。结果表明: 当图像数量为 20~100 张时, 该方法检测的 mAP 值与召回率均高于 90.00%, 墙体损伤检测较为完整且损伤支线明显, 直观表现了检测效果; 准确度均高于 95.00%, 提升了墙体损伤检测方法的检测完整性; 平均 IoU 均高于 85.00%, 有效提高了损伤区域与标定区域之间的重叠率。该方法的检测效果好、性能高。

关键词: 轻钢芯柱-保温夹层组合砌体墙; 红外热像检测技术; 墙体损伤检测; 损伤边缘提取; 小波变换
中图分类号: TP69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 05-0092-05
DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.017

LI Rui, CHEN Fei

(Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210000, China)

Abstract: The exposed part of the light steel core column insulation sandwich composite masonry wall is prone to wall damage due to natural factors, which affects the service life of the wall. Therefore, an infrared thermal imaging detection method for damage of composite masonry walls is proposed. This method uses ultrasonic infrared thermal imaging technology to obtain infrared images of damage to composite masonry walls, filtering out pixels below the optimal threshold. Based on the bilateral filtering method, Based on image processing technology and morphological detection technology, accurate extraction of damaged edges in composite masonry walls is carried out to determine the severity of the damage and achieve precise detection. The results showed that when the number of images was 20 to 100, the mAP value and recall rate detected by our method were both higher than 90.00%. The wall damage detection was relatively complete and the damage branches were obvious, which intuitively demonstrated the detection effect; The accuracy is higher than 95.00%, which improves the completeness of the wall damage detection method; The average IoU is higher than 85.00%, effectively improving the overlap rate between the damaged area and the calibration area. This method has good detection effect and high detection performance.

Keywords: light steel core column-thermal insulation sandwich composite masonry wall; infrared thermal image detection technology; wall damage detection; damage edge extraction; wavelet transform

0 引言

轻钢芯柱-保温夹层组合砌体墙由轻钢、粉煤灰砌块轻质保温材料构成,被广泛应用于建筑工程中。但自然环境、人为破坏等外部因素,导致轻质墙体受到损伤而产生裂缝^[1-2],从而减少墙体使用寿命。损伤一般发生在粘合板与粉煤灰砌块加固板的粘合末端,并存在高应变趋势。初始损伤裂缝极其细微,人工肉眼难以发现,但一段时间后细微的裂缝会因为高应变持续快速延展,变成难以修复的损伤,严重影响墙体结构的安全性,因此应及时检测。

缪盾^[3]基于微分算子损伤识别方法对墙体损伤位置图像展开损伤程度识别,结合 Canny 算法引入导向滤波以及同态滤波实施噪声消除,增强墙体损伤位置边缘信息。在此基础上,采用边界像素测量方法对损伤裂缝实施长度、宽度的计算,根据像素的解析度获取实际损伤长度;最后手工对比实际测量值与图像测量值,修正测量误差,实现对墙体的损伤检测。许颖等^[4]基于红外辐射定律及主动红外热成像原理,对墙体损伤位置实施光热源定位,根据定位结果推导墙体损伤位置在激光热激励下的表面温度场,以此确定墙体表面损伤位置以及无损伤位置的温差变化;最后建立固定温度阈值,当检测出的温度超出固定阈值时,即可认定该位置发生损伤。林丽等^[5]基于超声红外热成像技术,获取损伤位置红外热图像并建立图像数据集;再采用卷积神经网络对裂缝实施超图像特征提取及识别分类,实现损伤检测。

上述方法未能对图像损伤边缘实施提取处理,而砌体组合墙的损伤具有细微延展性特征,难以检测出边缘完整的细微裂缝损伤,检测性能较差。为解决上述问题,提出了组合砌体墙损伤红外热像检测方法。

1 墙体损伤红外图像预处理

1.1 技术原理

采用超声红外热成像技术^[6-7]对墙体损伤位置实施探测,获取损伤红外图像。超声红外热成像装置使用超声脉冲作为激励源,将产生的振动能量注入组合砌体墙内部,振动能量在墙体内快速传播,损

伤位置因为裂纹、脱粘等原因会发生摩擦以及塑性变形出现局部升温,红外成像仪就可获取该位置表面红外热图像。超声红外热成像系统结构如图 1 所示。

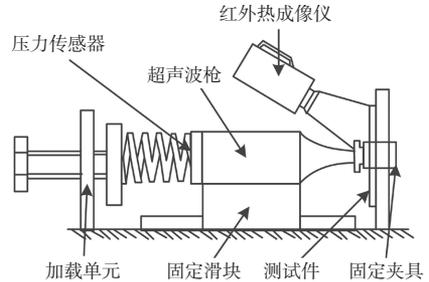


图 1 超声红外热成像系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of ultrasonic infrared thermal imaging system

1.2 图像去噪

获取的图像存在大量噪声,需要对获取的图像实施去噪处理。设定获取的红外图像为 $x_{i,j}$, 图像阈值为 T , 以此建立图像的软硬阈值函数:

$$\begin{cases} \alpha(\chi) = \text{sgn}(\chi) \max(|\chi| - T, 0) \\ \beta(\chi) = \begin{cases} \chi & |\chi| > T \\ 0 & |\chi| \leq T \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: χ 为图像的小波阈值; $\alpha(\chi)$ 为软阈值函数; $\beta(\chi)$ 为硬阈值函数; $\text{sgn}(\chi)$ 为阶跃函数。

阈值选取, 设定图像的噪声标准差为 δ , 将小波系数中的高频系数数量设定为 N , 最佳阈值为:

$$T = \delta \sqrt{2 \lg N} \quad (2)$$

式中: T 为选取的最佳阈值。基于选取的最佳阈值, 确定砌体墙损伤红外图像 $x_{i,j}$ 的噪声图像表述形式为:

$$z_{i,j} = x_{i,j} + \varepsilon_{i,j} \quad (3)$$

式中: $z_{i,j}$ 为标记噪声图像; i, j 为图像灰度值, $i, j = 1, 2, \dots, m, m \in M$; $\varepsilon_{i,j}$ 为图像噪声, dB。

获取噪声图像后, 对图像实施小波变换, 从而实现图像的去噪^[8-9], 具体流程如下:

(1) 图像小波变换。设定图像中含有噪声图像的小波系数为 $Q_{z_{i,j}}$, 噪声小波系数记作 $Q_{\varepsilon_{i,j}}$, 实现原始图像的小波变换公式为:

$$Q_{z_{i,j}} = Q_{x_{i,j}} + Q_{\varepsilon_{i,j}} \quad (4)$$

(2) 噪声方差估计。基于小波变换结果可知, 损伤图像的小波变换结果服从高斯分布状态, 所以将小波分解层数标记成 o , 因此完成损伤图像的噪声

建筑结构

方差以及损伤图像小波系数方差的估计公式为:

$$\begin{cases} \delta_{\varepsilon_{i,j}}^2(s,o) = \frac{\text{Median}(|Q_{z_{i,j}}(s)|)}{A} \\ \delta_{z_{i,j}}^2(s,o) = \frac{1}{M^2(J)} \sum_{i,j=1}^{M(J)} Q_{z_{i,j}}^2(s) \end{cases} \quad (5)$$

式中: A 为常数; o 为小波分解层数, 层; s 为预估系数; $\text{Median}(|Q_{z_{i,j}}(s)|)$ 为中位函数; $\delta_{\varepsilon_{i,j}}^2(s,o)$ 为噪声方差, dB; $\delta_{z_{i,j}}^2(s,o)$ 为小波系数方差; $M(\cdot)$ 为正态分布的小波分解层数。

(3) 确定最佳噪声阈值。基于噪声方差及小波系数方差的计算结果, 建立损伤红外图像的最佳噪声阈值为:

$$T(s,o) = \frac{\delta_{\varepsilon_{i,j}}^2(s,o)}{\delta_{Q_{z_{i,j}}}^2(s,o)} \quad (6)$$

式中: $T(x,o)$ 为原始损伤图像的最佳阈值。图像中高于该阈值的部分即为图像的噪声, 小于该阈值的部分为图像完整像素, 最后将低于最佳阈值的像素滤除, 实现图像的有效去噪。

2 轻钢芯柱-保温夹层组合砌体墙损伤检测

原始墙体损伤图像在完成去噪后, 对整体图像实施低照度增强处理, 最后通过增强后图像的形态学边缘检测提取图像中损伤边缘, 完成损伤检测。

2.1 图像增强

图像完成去噪后, 通过双边滤波方法完成组合墙体损伤图像的低照度增强^[10-11]。具体过程如下:

(1) 降噪处理: 通过同时考虑像素的空间距离和亮度差异, 有效去噪并保留关键的边缘信息。

(2) 低频与高频分量处理: 双边滤波平滑图像得到低频分量, 高频分量则由原图减去低频分量获得, 有助于保留关键图像细节。

(3) 高频分量增强: 增强高频分量以突出低照度图像的细节和边缘, 关键在于从噪声和暗部中提取信息。

(4) 图像合成: 将增强的高频分量与低频分量融合, 生成细节丰富、边缘清晰的低照度增强图像。

2.1.1 照度估计

设定损伤图像的像素集合为 Ψ , 对去噪图像实施双边滤波处理, 完成图像的照度估计, 公式为:

$$B_\phi = \frac{1}{l(\phi)} \sum_{p \in \Psi} g(p-\phi) h(I_p - I_\phi) I_p \quad (7)$$

式中: B_ϕ 为图像中 ϕ 点的双边滤波输出结果; g 、 h 为高斯函数; $g(p-\phi)$ 为图像 p 点的空间域贡献值; $h(I_p - I_\phi)$ 为亮度域权值贡献; I_p 为图像亮度值; $l(\phi)$ 为标准化因子; I_ϕ 为图像像素点 ϕ 的亮度。

2.1.2 照度图像压缩

图像完成照度估计后, 通过直方图截取方法对照度图像两端像素实施截取, 然后将剩下的像素压缩至 $[0, 1]$ 区间内, 基于改进的 Gamma 校正方法实施校正处理, 根据线性拉伸计算出最终的照度图像。

设定控制参数为 γ , 图像的原始像素值为 b , 图像压缩结果公式为:

$$y(\gamma) = \gamma^{b\lambda+b} \quad (8)$$

式中: $y(\gamma)$ 为图像压缩结果。照度图像的亮度映射图如图 2 所示。

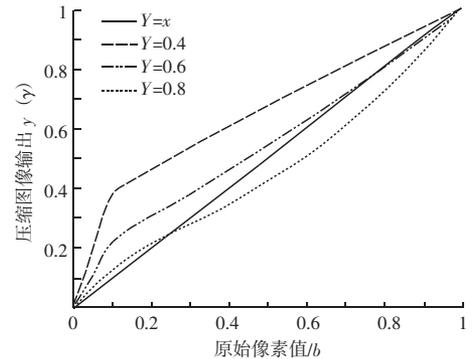


图 2 照度图像的亮度映射图

Fig. 2 Brightness map of illuminance image

2.1.3 图像增强

获取照度图像后, 在损伤图像的对数域中进行原始图像与照度图像之间的作差计算, 获取反射图像。由于反射图像中存在大量图像边缘信息, 所以结合 Sigmoid 函数对其进行增强处理, 增强公式为:

$$f(r) = \frac{2}{1 + e^{-br}} - 1 \quad (9)$$

式中: $f(r)$ 为损伤图像的增强结果; r 为反射图像亮度; e^{-br} 为 Sigmoid 函数。

2.2 提取损伤边缘

图像完成增强处理后, 对组合砌体墙的损伤特性展开分析, 构建全方位的结构元素 c , 对增强损伤图像实施膨胀腐蚀处理, 获取图像的形态学梯度,

从而实现损伤图像的边缘检测^[12]。将建立的结构元素 c 放入损伤图像中展开移动, 将结构元素的中心点记作 $c(0, 0)$, 损伤区域记作 κ_c 。移动过程中若 $c(0, 0)$ 活动到损伤区域, 则将该位置图像设定为黑色, 膨胀过程如下式所示:

$$\kappa(-1, 0) = \kappa(0, -1) = \kappa(0, 1) = f(1, 0) = 0 \quad (10)$$

图像实现膨胀后, 再次将 c 放入图像中移动, 若像素点均落在 κ 的损伤位置 κ_c , 该图像区域保留, 否则将该点剔除, 图像腐蚀公式为:

$$\begin{cases} \kappa_c(0, 0) = 0 & c \in \kappa_c \\ \kappa_c(0, 0) = 225 & c \notin \kappa_c \end{cases} \quad (11)$$

最后, 将图像膨胀结果与图像腐蚀结果相减, 即可完成图像的边缘提取。

2.3 计算损伤参数

设定墙体损伤的长度为骨架的不同长度和, 每段骨架长度记作 L_D , 可通过损伤区域两个相连像素点获取, 则 L_D 表示为:

$$L_D = \left[[(x_i - x_{i+1})S_H]^2 + [(y_i - y_{i+1})S_V]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中: (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) 为损伤图像的相邻像素, dB; S_H 为图像在水平方向的比例因子; S_V 为垂直方向的比例因子。由式 (12) 计算结果进一步计算得到墙体损伤长度值:

$$L = \sum_{i=0}^{n-1} L_D = \sum_{i=0}^{n-1} \left[(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

式中: n 为边缘空间的宽度; L 为损伤长度, mm。再依据骨架的相邻像素点斜率, 完成墙体损伤的宽度计算:

$$\begin{cases} \rho_D = 1 / \left[(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ W_D = \rho_D w_d \end{cases} \quad (14)$$

式中: ρ_D 为骨架的相邻像素点斜率, dB; w_d 为墙体各段损伤的水平方向宽度; W_D 为损伤宽度。

依据计算出的损伤长度以及宽度, 确定墙体的损伤程度, 实现损伤检测。

3 试验

为了验证组合砌体墙损伤红外热像检测方法的效果, 分别采用红外热像检测方法 (本文方法)、基于改进 Canny 算法的墙面裂缝自动识别及量测 (文

献 [3] 方法)、基于能耗优化的深海电动机械臂轨迹规划 (文献 [5] 方法) 测试。测试过程中, 由于墙体损伤通常以裂缝的形式表现, 因此验证时, 在相关图像集合中选取 100 张图像, 作为待检测对象。试验结果及分析如下:

(1) 损伤检测性能测试 选取 mAP 指数、损伤识别准确率、召回率以及平均 IoU 作为检测评价指标。其中, mAP 指数可以精准识别损伤检测时的检测精度, 损伤识别准确度及召回率可以直观表现墙体损伤检测方法的检测完整情况和检测效果, 而平均 IoU 则能代表图像检测时, 损伤区域与标定区域之间的重叠率。指标检测出结果越高, 说明检测方法的检测性能越好。测试结果见表 1。文献 [3] 方法由于在边界测量时未能考量损伤方向的影响, 导致平均 IoU 检测结果较差; 文献 [5] 方法在提取损伤特征时, 未能考虑噪声影响, 导致提取的特征质量较差; 而本文方法综合考量了相关影响, 所以在损伤检测时, 检测结果均高于其他两种方法, 说明本文方法在墙体损伤检测的性能好。

表 1 墙体损伤检测性能测试结果

图像数量/张	测试内容	检测性能测试结果/%		
		本文方法	文献 [3] 方法	文献 [5] 方法
20	mAP	95.00	90.32	89.03
	准确率	99.38	96.18	90.27
	召回率	98.79	92.87	87.45
	平均 IoU	95.62	80.90	82.34
50	mAP	92.73	87.18	85.96
	准确率	99.12	93.66	89.99
	召回率	97.22	87.12	88.73
	平均 IoU	93.58	75.89	79.11
100	mAP	91.00	82.38	79.63
	准确率	96.41	88.91	85.69
	召回率	93.68	87.79	84.33
	平均 IoU	86.499	73.48	75.15

(2) 图像处理效果测试 利用公式 (2) 选取的图像处理最佳阈值为 255。采用三种方法进行墙体损伤检测时, 对不同检测方法的图像处理效果展开测试, 测试结果如图 3 所示。本文方法测试的图像处理效果明显优于文献 [3] 方法以及文献 [5] 方法的图像处理效果。本文方法在处理图像时, 结合了图像照度增强方法以及图像去噪方法, 在提升图像质量的

建筑结构

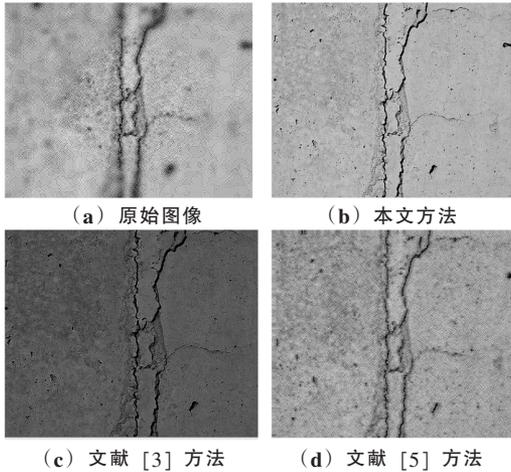


图3 不同方法的图像处理效果测试结果

Fig.3 Test results of image processing effects of different methods

同时增加图像整体亮度,所以图像处理效果较好。

(3) 整体检测效果测试 3种损伤检测方法测试结果如图4所示。本文方法检测出的墙体损伤较为完整,且损伤支线明显;文献[3]方法虽然能够检测出完整的墙体损伤,但是该方法无法检测出损伤边缘的支线;文献[5]方法在墙体损伤检测时,检测效果远不如本文方法以及[3]方法的检测结果。

综上所述,利用本方法开展砌体损伤检测时,检测性能高、检测效果、去噪效果都较为优秀。

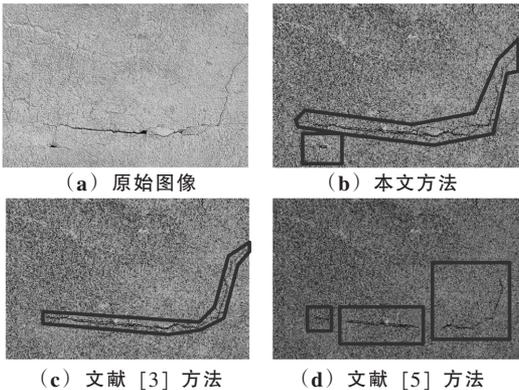


图4 不同检测方法的检测效果测试结果

Fig.4 Test results of different detection methods

4 结论

针对轻钢芯柱-保温夹层组合砌体墙损伤检测的需求,提出了一种基于超声红外热成像技术的损伤检测方法。通过对获取的红外图像进行去噪、增强处理,结合形态学检测技术,对墙体损伤边缘的精准

提取和损伤程度的准确评估。研究得到以下结论:

(1) 在20~100张图像的测试范围内,实现了超过90%的mAP值和召回率,以及超过95%的准确度,提高了墙体损伤检测的完整性和准确性。

(2) 能够有效提取损伤边缘,为损伤程度的定量分析提供了准确的数据支持。

(3) 采用小波变换和双边滤波技术,有效降低了图像噪声,增强了图像质量。

该方法在损伤检测的mAP值、召回率、准确度和平均IoU等关键指标上均优于现有技术,显示了较高的检测性能。

参考文献

- [1] 李元齐, 吴雨杭. 冷弯型钢轻钢集成体系建筑工业化建造技术发展现状与展望[J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(3): 1-19.
- [2] 钱正昊, 王静峰, 汪皖黔, 等. 冷弯薄壁型钢填充墙板-装配式混凝土框架结构抗震性能数值分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(7): 105-114.
- [3] 缪盾. 基于改进Canny算法的墙面裂缝自动识别及量测[J]. 工程勘察, 2021, 49(10): 49-53.
- [4] 许颖, 王青原, 罗聪聪, 等. 基于激光热激励红外热成像纤维增强聚合物复合材料加固混凝土结构界面损伤无损检测[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 472-481.
- [5] 林丽, 刘新, 朱俊臻, 等. 基于CNN的金属疲劳裂纹超声红外热像检测与识别方法研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 465-473.
- [6] 习小文, 苏清风, 袁雅妮, 等. 超声红外热成像技术在航空发动机叶片裂纹的对比研究[J]. 红外技术, 2021, 43(2): 186-191.
- [7] 赵磊, 曹广忠, 梁芳萍, 等. 基于Arduino的磁编码器轴角解算系统设计[J]. 自动化仪表, 2022, 43(2): 6-11.
- [8] 陈伟, 陈克松, 纪青春, 等. 基于1D-CNN+GRU的光伏阵列故障诊断方法研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(6): 13-17.
- [9] 孙洁琪, 李亚峰, 张文博, 等. 基于离散小波变换的双域特征融合深度卷积神经网络[J]. 计算机科学, 2022, 49(Z1): 434-440.
- [10] 秦钟, 杨建国, 王海默, 等. 基于Retinex理论的低照度下输电线路图像增强方法及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 150-157.
- [11] 魏敏, 胡晓峰, 林敏. 基于四稳随机共振的低照度图像增强方法[J]. 液晶与显示, 2022, 37(7): 871-879.
- [12] 王冬云, 唐楚, 鄂世举, 等. 基于导向滤波Retinex和自适应Canny的图像边缘检测[J]. 光学精密工程, 2021, 29(2): 443-451.