

# 基于红外热成像的水运工程 混凝土裂缝检测研究

胡庆闯

(舟山市水运工程检测中心有限公司, 浙江 舟山 316000)

**摘要** 针对水运工程混凝土裂缝传统检测方法效率低、覆盖范围有限且环境适应性不足的问题, 本研究构建了一种基于红外热成像技术的高效、非接触式裂缝识别体系。通过提取裂缝区域的红外热像特征, 融合图像处理与深度学习算法, 建立了从特征增强到智能识别的完整方法链条, 并针对温湿度、风速等现场干扰因素提出了系统校正策略, 旨在为水运工程混凝土结构的智能化巡检与数字化运维提供技术参考。研究结果表明, 该方法可显著提升裂缝检测的效率与识别精度, 有效克服复杂环境下的干扰, 实现了对微裂缝的可靠辨识。

**关键词** 红外热成像; 混凝土裂缝; 水运工程; 裂缝检测; 算法优化

中图分类号: TV36

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.003

## 0 引言

水运工程混凝土结构长期处于高盐、高湿与干湿交替的侵蚀环境中, 裂缝的萌生与发展直接影响结构的耐久性与服役安全。传统检测方法(目视检查与超声波探测等)普遍存在效率低、覆盖范围小、对运营干扰大等问题, 难以适应当前“不停航、少干扰”的工程维护需求<sup>[1]</sup>。红外热成像技术基于物体表面的红外辐射差异成像, 能够非接触、大面积地捕捉混凝土裂缝与完好区域之间的温差特征, 具有显著的技术优势<sup>[2]</sup>。基于此, 本研究聚焦红外热成像技术在水运工程特殊环境下的适用性提升, 通过系统研究裂缝红外特征提取方法、构建抗干扰识别算法, 并建立现场环境校正体系, 以期形成一套可靠、高效的混凝土裂缝检测方法, 为结构早期损伤识别与预防性维护提供技术支持。

## 1 水运工程混凝土裂缝检测现状与红外热成像技术基础

### 1.1 水运工程混凝土裂缝的危害及传统检测方法分析

水运工程混凝土裂缝具有隐蔽性与渐进性, 对结构服役安全构成长期威胁。裂缝贯通保护层后, 氯离子扩散系数可提高 2~3 个数量级, 显著加速钢筋锈蚀进程; 在干湿交替的潮汐区, 缝内静水压力峰值可达 0.15 MPa, 易诱发局部剥落<sup>[3]</sup>。单条长 0.5 m、宽 0.3 mm

的裂缝即可使面板有效截面惯性矩降低 4.7%, 极限承载力下降 6% 以上<sup>[4]</sup>。在传统检测方法中, 目视法仅能识别开口宽度大于 0.2 mm 的表面裂缝, 且受环境光照与视角影响显著; 超声波法对浅层微裂缝的反射信号信噪比常低于 6 dB, 需耦合剂辅助, 在潮差较大的码头面作业效率低下; 冲击回波法虽可定量裂缝深度, 但需钻孔布设传感器, 对结构表面造成破坏。上述方法在检测效率、覆盖范围及环境适应性方面存在明显不足, 难以满足水运工程“不停航”维护需求。因此, 引入非接触、高效率的红外热成像技术以提升裂缝早期识别能力具有重要的工程意义。

### 1.2 红外热成像技术的原理及其在结构检测中的应用特性

红外热成像技术基于普朗克辐射定律, 通过接收物体表面在 0.9~14 μm 波段的红外辐射, 将其转换为温度分布图像。混凝土裂缝因内部空气填充导致热扩散系数降低, 在主动或被动热激励下, 裂缝区域与周围健康混凝土之间形成可检测的温差  $\Delta T$ 。该温差与裂缝深度  $d$ 、宽度  $w$  呈负指数关系, 即使温差低至 0.05 K, 也可被现代非制冷型微测辐射热计(320×256 像素)可靠识别。在水运工程现场, 可利用太阳辐射作为天然热源, 配合手持式热像仪, 在 20 m 视距内实现快速大面积扫描, 空间分辨率可达 1.5 mm, 满足规范对 0.1 mm 级裂缝的检出要求<sup>[5]</sup>。与超声波等接触式方法相比,

作者简介: 胡庆闯(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水运工程检测。

红外热成像无需耦合剂,避免了高盐雾环境对探头的腐蚀;与目视检查相比,其不受潮汐、光照变化影响,显著提升了检测效率与安全性。此外,长波红外对水汽的穿透能力较强,在高湿环境中仍能稳定成像,为水运工程不停航检测提供了可行的技术路径。

## 2 红外热成像技术在水运工程混凝土裂缝检测中的关键技术

### 2.1 水运工程混凝土裂缝的红外热成像特征提取方法

水运工程混凝土结构在红外热像中展现出独特的裂缝特征,这主要源于裂缝内部空气的热阻效应与外部环境的耦合作用。裂缝区域由于热扩散系数降低,在自然或主动热激励下常表现为连续的线状低温带,其两侧因热流聚集而形成环状热斑,横向热流密度 $q$ 可达背景区域的2.8倍,这为裂缝的初步定位提供了显著的热信号依据。尤其在昼夜温差显著的潮汐区,裂缝尖端因热弹性效应可能引发局部温升异常,该现象对于识别尚未完全张开的隐性微裂纹具有重要指示价值。

为系统、可靠地提取上述特征,本研究构建了一套层次化的图像处理流程。首先,采用自适应高斯滤波对原始红外热像进行预处理,以抑制由海面反射、盐雾附着等引起的随机噪声,提升图像信噪比。在此基础上,依据傅里叶热传导定律计算热流密度矢量场:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (1)$$

式(1)中, $\vec{q}$ 为热流密度矢量(单位: $W/m^2$ ); $k$ 是混凝土导热系数(单位: $W/(m \cdot K)$ ); $\nabla T$ 表示温度梯度(单位: $K/m$ )。结合Canny边缘检测算法与形态学闭运算,实现对裂缝轮廓的精细化提取与连接,增强断续裂缝的连续性表达。为有效区分结构性裂缝与非结构性的温度缝或表面纹理,本研究建立了基于热斑分布与几何形态的识别模型。当提取出的低温带长宽比大于5且两侧伴有对称性热斑时,判定其为结构性裂缝。该方法在盐雾侵蚀、表面粗糙的实际工程场景中,仍保持86%以上的检出率,单幅图像处理时间低于0.8 s,具有良好的鲁棒性与实时性,为后续移动巡检与智能诊断奠定了坚实的基础。

### 2.2 基于红外热像的混凝土裂缝识别算法优化

针对水运工程复杂环境(盐雾、海面反光、温湿度波动等)给红外热像带来的显著噪声干扰,本研究设计了一种多层次、渐进优化的裂缝智能识别算法。算法以U-Net分割网络为基本框架,通过引入自适应预处理、轻量化结构与注意力增强机制,系统提升其

在噪声环境下的识别精度与实时性。首先,在编码器前端嵌入自适应形态学滤波层,其数学表达为:

$$g(x, y) = \bigcup_{s \in S} \{f \ominus s\} \oplus s \quad (2)$$

式(2)中, $g(x, y)$ 为去噪后图像; $f$ 为原始热像; $S$ 为结构元素集合; $\ominus$ 和 $\oplus$ 分别表示形态学腐蚀与膨胀运算。这一层可以结合图像局部的特性动态选用结构元素,很好地抑制盐雾附着以及海面镜面反射带来的散斑噪声,把图像信噪比提高到12 dB以上,为后续开展特征提取的相关工作奠定清晰的数据基础。接下来,在解码路径中运用深度可分离卷积模块替代标准卷积,在保持特征提取能力的前提下,极大程度上降低参数量以及计算复杂度,让模型推理速度提升约3.2倍,契合移动巡检设备的实时处理要求。

为了进一步强化网络对裂缝边缘以及细微特征的感知能力,在跳跃连接处集成通道注意力机制,该机制借助自适应权重调整工作,增强对裂缝相关特征的响应,把边缘特征的提取强度提高40%。最后,借助多特征融合模块,把经过上述步骤处理后的热像数据以及热流梯度场、纹理结构信息开展层级融合工作,来实现信息互补,从而把宽度为0.1 mm级微裂缝的检出率从78%显著提升至93%。优化后的模型总参数量仅有1.7 M,在嵌入式硬件平台上得以实现每秒25帧的实时处理效能,完全适配搭载在码头巡检机器人等移动平台的部署场景,为水运工程现场快速、智能化的裂缝检测工作提供了可靠的算法支撑。

### 2.3 现场检测环境因素对红外热成像结果的影响及校正策略

水运工程现场的环境因素复杂多变,尤其是温湿度以及风速,会对红外热成像检测结果的可靠性以及准确性产生显著的影响。高湿度的环境会增强大气里水分子对长波红外辐射的吸收作用,导致热像仪接收到的辐射信号出现衰减,测温的偏差也会随之增大。其借助大气透射率经验公式来对这一过程开展量化描述:

$$\tau = e^{-\alpha RH \cdot d} \quad (3)$$

式(3)中, $RH$ 为相对湿度(单位:%); $d$ 为检测距离(单位:m); $\alpha$ 为水汽吸收系数(单位: $\%^{-1} \cdot m^{-1}$ )。实测的数据表明,在相对湿度高于85%的夏季工况下,由湿度引发的测温误差可以达到1.8 K,极大程度上干扰裂缝与背景温差的识别工作。同时,持续的海风会借助对流换热效应加速混凝土表面的散热工作,弱化裂缝因热阻效应形成的温差。相关数据显示,6 m/s的风速可把该温差降低约0.6 K,进一步提升微裂缝的漏检风险。

为了有效抑制上述的环境干扰,本研究构建了一套系统化的三级校正策略:首先,在检测现场开展移动黑体参考板的布设工作,借助实时比对测量值,动态补偿因大气衰减引起的辐射偏差;其次,在构件的迎风侧开展高精度温度传感器阵列的部署工作,实时监测风致温漂,并且据此对热像图进行梯度校正;最后,结合现场的气象数据以及日照轨迹,合理开展检测时间窗口的规划工作,避免因阴影或直射光造成的局部温差假象。经实际验证,该综合校正体系可把环境因素导致的温度测量不确定度从 $\pm 1.5\text{ K}$ 显著降低至 $\pm 0.3\text{ K}$ ,不仅契合了规范对检测精度的要求,也为复杂环境下的裂缝可靠识别提供了关键的技术支持。

### 3 红外热成像技术在水运工程混凝土裂缝检测中的实践应用与效果评估

#### 3.1 某港口码头混凝土结构裂缝检测的现场试验设计

试验在华东某集装箱码头 3 号泊位进行,该高桩梁板结构已服役 12 年,潮差达 3.8 m,具有典型的氯盐侵蚀与机械冲击耦合特征。检测区域为 $120\text{ m}\times 18\text{ m}$ 的连续面板,划分为 6 条纵向测线。采用 $640\times 512$ 像素非制冷热像仪,搭配 $19\text{ mm f}/1.0$ 镜头,在 15 m 距离内可实现 $1\text{ mm}$ 的空间分辨率。热激励采用自然日照辅以人工卤素灯阵列,确保混凝土表面温升速率平缓( $< 2\text{ K}/\text{min}$ )。数据采集遵循“三同步”原则:热像仪与可见光相机同步触发,同步记录环境参数与黑体参考温度,并采用 GNSS-RTK 为每帧热像赋予精确坐标。整个检测过程在退潮后 45min 内完成,覆盖面积 $2\ 160\text{ m}^2$ ,高效满足了码头“即检即离”的运营要求,并为后续算法验证提供了高质量数据集。

#### 3.2 红外热成像检测结果与传统检测方法的对比分析

在相同检测面积( $2\ 160\text{ m}^2$ )下,红外热成像耗时 45 min,而传统超声波 A 扫耗时 320 分钟,效率提升约 7.1 倍。红外法对宽度 $\geq 0.1\text{ mm}$ 裂缝的识别率达到 93%,高于超声法的 76%;经环境校正后,其误报率与超声法处于同一水平(约每 235 米一处)。在空间分辨率方面,红外法在 15 m 视距下可分辨 $1\text{ mm}$ 裂缝,优于超声法的检测极限(约 $0.3\text{ mm}$ )。经济性对比分析显示,红外法的现场直接检测成本(主要包括设备能耗与人工工时)约为 $0.8\text{ 元}/\text{m}^2$ ,仅为超声法现场检测成本(约 $1.9\text{ 元}/\text{m}^2$ )的 42%。此外,红外检测无需搭设脚手架或使用耦合剂,作业安全性显著提高。差异根源在于红外技术基于辐射传热成像,对表面及近

表面缺陷极为敏感,而超声法则受材料不均匀性与界面水分的影响较大。

#### 3.3 红外热成像技术在水运工程裂缝检测中的应用价值与推广建议

红外热成像技术在水运工程裂缝检测中展现出突出的经济、安全与技术价值。在经济性方面,即使考虑设备折旧、数据处理、人员培训等全周期成本,单次检测的综合成本亦可控制在 $4.8\text{ 元}/\text{m}^2$ 左右,相较于传统方法仍具有明显优势。大规模年度巡检可节约费用百万元以上。在安全效益方面,非接触检测使人员暴露于高危环境的时间缩短 70%。在技术方面,其高识别率与实时处理能力为结构数字化运维与数字孪生模型构建提供了数据基础。为促进该技术的推广应用,建议如下:一是建立行业培训体系,将红外检测技术纳入检测人员继续教育课程;二是编制专项检测规程,明确设备、环境与判读标准;三是推动设备国产化与智能化升级,集成 5G 与 AI 技术以进一步降低成本、提升性能。通过政策、标准与产业协同,红外热成像有望在五年内成为水运基础设施智能巡检的主流手段。

### 4 结束语

本研究系统阐述了红外热成像技术在水运工程混凝土裂缝检测中的基本原理、关键方法与实施策略,通过算法优化与环境校正,显著提升了复杂条件下裂缝识别的准确性与鲁棒性,验证了该技术在工程实际中的可行性与有效性。然而,目前该技术在推广中仍面临标准规范缺乏、专业人才不足等挑战。未来研究可进一步围绕智能检测装备的集成化开发、行业标准体系的建立,以及与数字孪生、物联网等技术的深度融合展开,以推动红外热成像技术在水运基础设施运维中的规模化、智能化应用,为工程结构的长寿命安全服役提供持续技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 徐国栋. 水运工程混凝土结构抗冻性能监测方法设计研究[J]. 智能城市, 2025, 11(05): 158-160.
- [2] 何健, 张佳, 王航, 等. 基于红外热成像的钢管混凝土脱空缺陷检测研究[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(07): 73-80.
- [3] 周其国. 水运工程混凝土实体检测分析[J]. 汽车博览, 2023(08): 215-217.
- [4] 倪兰妹. 水运工程混凝土中水泥氯离子检测与耐久性评估[J]. 电脑应用文粹, 2024(04): 202-204.
- [5] 倪晓飞, 檀佩佩, 杨玉俊, 等. 钢管梁积水的红外热成像检测[J]. 无损检测, 2025, 47(09): 38-43.