

基于特征图的路面冻融裂缝红外检测算法

Infrared detection algorithm for pavement freeze-thaw cracks based on feature maps

张建勋

(平顶山龙泽公路工程有限公司, 平顶山 467000)

摘要: 针对冻融裂缝特征收敛效果差, 路面冻融裂缝检测精准度低的问题, 设计了基于特征图的路面冻融裂缝红外检测算法。基于红外热成像原理, 联合异性温度场重构和双边滤波理论方法, 形成新的路面冻融裂缝红外热图像温度场重构方法, 构建冻融裂缝特征矩阵, 将路面冻融裂缝红外图像作为输入, 优化卷积神经网络的卷积核权值, 构建基于特征图的检测方法, 获取最佳路面冻融裂缝红外成像检测结果。结果表明: 该算法温度场重构后可使路面冻融裂缝红外图像更加清晰, 并保留图像的边缘信息和轮廓, 且在不同类型噪声干扰下, 温度场重构后图像始终具有较高的峰值信噪比。该方法可检测到了不同类型的路面冻融裂缝, 可以提升道路安全运维效果。

关键词: 路面冻融裂缝; 卷积神经网络; 红外成像; 热图像消噪; 裂缝检测; 机器学习

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 02-0164-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.028

ZHANG Jianxun

(Pingdingshan Longze Highway Engineering Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor convergence effect of freeze-thaw crack characteristics and low accuracy of pavement freeze-thaw crack detection, an infrared detection algorithm for pavement freeze-thaw cracks based on feature maps was designed. Based on the principle of infrared thermal imaging, a new method for reconstructing the temperature field of pavement freeze-thaw crack infrared thermal images is formed by combining anisotropic temperature field reconstruction and bilateral filtering theory. A freeze-thaw crack feature matrix is constructed, and the pavement freeze-thaw crack infrared image is used as input to optimize the convolution kernel weights of the convolutional neural network. A feature map based detection method is constructed to obtain the best pavement freeze-thaw crack infrared imaging detection results. The results show that the algorithm can make the infrared images of road freeze-thaw cracks clearer after temperature field reconstruction, and preserve the edge information and contour of the image. Moreover, under different types of noise interference, the reconstructed temperature field image always has a high peak signal-to-noise ratio. This method has detected different types of pavement freeze-thaw cracks, which can improve the effectiveness of road safety operation and maintenance.

Key words: road freeze-thaw cracks; convolutional neural network; infrared imaging; thermal image denoising; crack detection; machine learning

0 引言

随着我国基础设施建设的快速推进, 对路面结构耐久性提出了更高要求。而在复杂地质环境的施工质量控制中, 路面冻融裂缝的实时监测直接影响

支护结构的安全性与耐久性。路面冻融循环作用导致的裂缝病害日益突出^[1-2]，严重威胁道路服役安全与行车舒适性。要有效实现路面冻融裂缝检测，关键是将冻融裂缝因材料损伤的不可见信息转化为量化指标，捕捉冻融裂缝的细微热力学特征变异，但是目前没有可供借鉴的路面冻融裂缝检测体系，因此对设计和施工提出了更高的要求。

众多学者在相关领域进行了研究，旨在为道路养护决策提供可靠的技术支撑。李太文等^[3]提供了一个基于 Faster R-CNN 技术的路面裂纹识别方法，通过收集路面裂纹图像形成 Pascal VOC 数据集，并利用 google 公司所提供的 TensorFlow 深度学习框架，对数据集中路面裂纹图像进行 Faster R-CNN 训练，完成路面裂纹识别；马跃坤等^[4]提供了一个可以检验多种裂纹特性的裂缝检验算法，先对原始裂纹图像进行尺寸降维等预处理，然后利用图像截面倾斜度等得到完善的裂缝二维图像；白锋等^[5]提出改进模型 AC-YOLO，在主干网络引入动态大卷积核注意力机制 LSK-attention 来扩展模型的感受野，提高对路面裂缝范围检测的准确性；赵志宏等^[6]提出一种扩展 LG Block 模块 Extend-LG Block，加强图像的细节特征提取能力的同时保持原有的抽象特征提取能力；张明星等^[7]提出一种改进 U-Net 的路面裂缝分割方法，从而识别狭窄裂缝、解决分割精度低等问题；邓治林等^[8]提出了一种 FE-Unet 模型，采用通道注意力模块增强判别特征提取和预测一致性，焦点损失使模型专注难分类细小裂缝；龚芳媛等^[9]提出了一种基于改进 YOLOv5 的路面裂缝检测算法，检测裂缝的平均精度均值较高；李禹萱等^[10]提出一种基于 Swin-Transformer 主干网络的道路裂缝检测方法，可以自适应调整网络感受野，实现多尺度的裂缝检测；刘震等^[11]提出一种基于改进的 YOLOv8 和 AutoAugment 增强的裂缝自动识别方法。

上述研究方法获得了裂缝自动识别结果，但没有对冻融裂缝红外热图像进行温度场重构。为了提高路面冻融裂缝检测精度，提出基于特征图的路面冻融裂缝红外检测算法。应用红外成像检测技术，结合异性温度场重构与双边滤波理论，提出路面冻融裂缝红外热图像温度场的重构方法。在此基础上，构建冻融裂缝的特征矩阵，将路面冻融裂缝的红外

图像作为输入数据，通过优化卷积神经网络的卷积核权值，建立了基于特征图的裂缝检测方法，从而获取到最优的路面冻融裂缝红外成像检测结果。

1 路面冻融裂缝自动检测

1.1 冻融裂缝红外热图像温度场重构

将温度场重构和双边滤波理论联合，形成新的路面冻融裂缝红外热图像温度场重构方法，高效率消除路面冻融裂缝红外热图像噪声，完整保留图像的边缘信息，为路面冻融裂缝的红外热图像检测提供良好数据基础。

设路面冻融裂缝红外图像采样点是 θ ，得到各采样点的各项异性高斯权值公式如下：

$$c(\theta) = \exp(-\theta^T D \theta) \quad (1)$$

式中： D 为各项异性宽带矩阵， $D \in R^{2 \times 2}$ 。 D 表达式为：

$$D = E_v \left[\frac{\mu}{1+k} \right]^{-1} N \quad (2)$$

式中： k 为曲率； μ 为邻域的总体范围调整数据； E_v 为红外图像原始采样点； N 为法向值，其计算公式为：

$$N = \frac{1}{m_N} \sum c_N(\theta) s_N(\theta) \quad (3)$$

式中： m_N 为归一化因子； $c_N(\theta)$ 、 $s_N(\theta)$ 分别为为各项异性距离和法向相似权重函数。联合异性消噪和双边滤波理论^[12]，形成了路面冻融裂缝红外图像重构公式：

$$E_\gamma = E_\theta + \frac{N}{m_N} \sum N_\gamma(\theta) \cdot \left\| D_\theta D_\gamma \right\| \quad (4)$$

式中： E_θ 为 E_v 的邻域点； $E_\gamma(\theta)$ 是 E_θ 和 E_v 切线的有符号距离； $N_\gamma(\theta)$ 为采样点和领域点的法向差异； D_θ 为位置带宽矩阵； D_γ 为法向相似性带宽矩阵。设阈值 ε ，当 $\|E_\gamma\| \geq \varepsilon$ 时，温度场重构完成。

1.2 路面冻融裂缝红外检测算法

1.2.1 基于卷积核权值优化算法的冻融裂缝特征矩阵

目标函数减小的过程就是优化 S 的过程，设目标函数 $J(A, S)$ 并给予 S 的初始值， S 的最佳初始值可以抑制更新过程中收敛效果差的问题，得到具备最佳收敛速度的最优结果， S 的初始化和特征更新情况如下：

$$S = G(W^T X), S_c = \frac{S}{A_c}$$

(5)

式中： W^T 为随机正交矩阵； X 为加权变换得到的路面冻融裂缝红外热图像样本矩阵； S_c 为 S 的第 c 个特征矩阵； A_c 为 S_c 在矩阵 A 中对照的基矩阵。

目标函数 $J(A, S)$ 的表达如下：

$$J(A, S) = \|AS - X\|_2^2 = \gamma \|A\|_2^2$$

(6)

式中： $\|AS - X\|_2^2$ 为基矩阵和特征集得到的重构数据集之间的误差； γ 为稀疏系数； $\|A\|_2^2$ 为控制项， $J(A, S)$ 为稀疏控制项和误差项的和。

引入随机初始化矩阵 A ，对 $J(A, S)$ 的局部最小值进行二次计算，随机采样获取的特征矩阵 S ，得到卷积核的初始权值^[13]，作为最终的卷积核权值优化结果，得到冻融裂缝特征图。

1.2.2 基于特征图的检测算法

对卷积层产生的路面冻融裂缝红外热图像结果进行处理，采用激活函数 Sigmoid 描述最大池化函数，公式为：

$$P_{i,m} = \max q_{i(m-1)s+n}$$

(7)

式中： $P_{i,m}$ 、 $q_{i(m-1)s+n}$ 分别为第 m 层里的第 i 个特征图、第 i 个特征图里的第 $(m-1)s+n$ 个区间的值以及邻近采样窗口重合区域尺寸。

获取整体信息，用池化层中的一维向量和上一层与本层的神经节点连接，使用 SoftMax 分类器，完成路面冻融裂缝红外成像检测，输出多个特征图中为冻融裂缝特征的概率，公式为：

$$E_j = e^{o_j} P_{i,m} \sum_{j=1}^T e^{o_j}$$

(8)

式中： o_j 为输出层输出的第 j 种检测结果； E_j 为检测路面红外成像冻融裂缝类型的第 j 种几率。

2 试验分析

2.1 试验对象和环境设置

为了验证提出算法对路面冻融裂缝的检测效果，于 2022 年 12 月对某城市在建道路的同一个路面进行无裂缝、横向裂缝、纵向裂缝以及龟裂四种不同裂缝的检测。当月温度达到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用 FLIR A700/在线式红外成像仪采集路面冻融裂缝红外图像。深度卷积神经网络需考虑数据量少时层数不宜过高，以及计算时间长短对过拟合现象概率的影响，为此

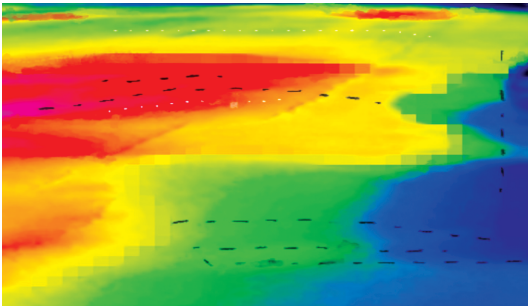
设置深度卷积神经网络结构参数，见表 1。用不同种类裂缝红外图像共 2 300 张，作为训练的数据集，21% 的数据作为验证集。

表 1 神经网络结构参数
Table 1 Neural network structure parameters

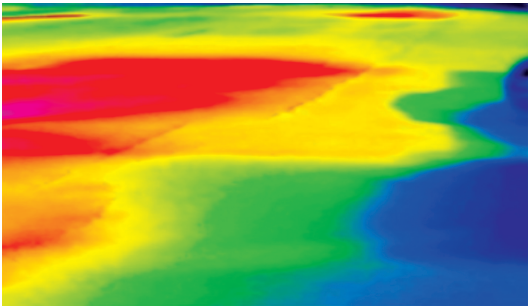
分类	神经网络结构	相应参数
卷积层	Conv1 层	卷积核（尺寸： $5 \times 5 \times 16$ ，步长 1）+ 池化层（尺寸： 2×2 ，步长 2）
	Conv2 层	卷积核（尺寸： $5 \times 5 \times 32$ ，步长 1）+ 池化层（尺寸： 2×2 ，步长 2）
	Conv3 层	卷积核（尺寸： $5 \times 5 \times 64$ ，步长 1）+ 池化层（尺寸： 2×2 ，步长 2）
全连接层	Fc1 层	设置 32 个神经元
	Fc2 层	设置 4 个神经元 + SoftMax 输出分类结果

2.2 红外热图像消噪效果

消噪前和消噪后的路面冻融裂缝红外热图像，如图 1 所示。本文算法使图像更加清晰，保留路面冻融裂缝图像的边缘信息和轮廓，为后续路面冻融裂缝红外热图像检测提供良好的数据基础。



(a) 消噪前



(b) 消噪后

图 1 噪声消除后的图像

Fig. 1 Image after noise cancellation

2.3 卷积神经网络性能测试

为验证卷积神经网络的冻融路面裂缝检测效果，统计训练集、验证集的冻融路面裂缝检测的损失值和准确率，采用梯度下降方法，当梯度向量无限接

近 0 或者目标函数值不再减小时，迭代停止。如图 2 所示。

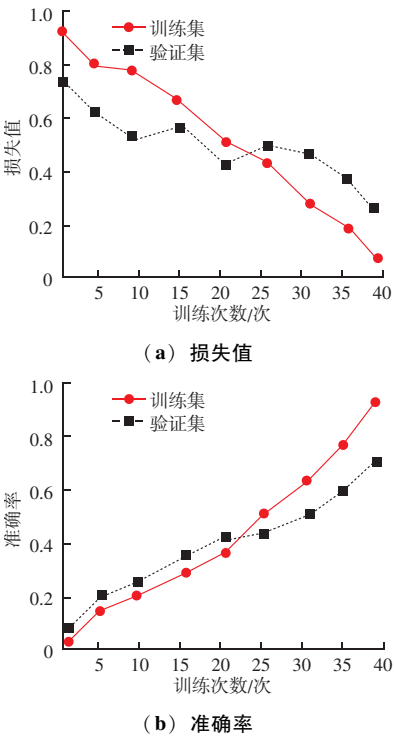


图 2 精度变化
Fig. 2 Changes in accuracy

本文算法应用的卷积神经网络检测道路冻融裂缝时，随着训练次数的增加，训练集和验证集训练的损失值一直降低，同时检测准确率均不断提升，且训练集、验证集损失值和准确率波动趋势基本一致。这说明本文提出算法应用卷积神经网络的训练和测试效果较好，具备较低训练损失和较高检测准确率，可显著提升冻融路面裂缝检测效果。

2.4 裂缝检测结果

为测试本文提出算法效果，选取文献 [3] Faster R-CNN 检测算法、文献 [4] 红外热成像检测算法进行对比，对 10 条路面进行冻融裂缝检测，裂缝等级分为：横向裂缝 (A)、纵向裂缝 (B)、无裂缝 (C)、龟裂 (D)，统计三种算法的检测结果，见表 2。

结果表明，本文提出算法检测 10 条路面的冻融裂缝结果同实际结果一致，而文献 [3] 算法第 1 路面和第 3 路面与实际情况相同，其他检测错误；文献 [4] 算法第 6 路面和第 10 路面与实际情况相同，其他检测错误。经过试验对比，本文提出算法的裂缝检测准确率高，与实际路面情况检测基本

一致。

表 2 不同路面冻融裂缝检测算法结果
Table 2 Results of freeze-thaw crack detection on different road surfaces

路面编号	实际情况	文献 [3] 算法	文献 [4] 算法	本文提出算法
1	A	A	D	A
2	C	A	B	C
3	B	B	C	B
4	C	B	D	C
5	C	D	A	C
6	A	C	A	A
7	C	A	D	C
8	C	C	A	C
9	C	D	B	C
10	B	A	B	B

2.5 温度场重构效果对比

为进一步验证本文提出算法的图像温度场重构能力，同样以文献 [3]、[4] 算法为对比，向路面冻融裂缝图像中添加噪声强度为 0.1 的不同类型噪声，以峰值信噪比为指标，分析不同算法在路面冻融裂缝检测时的图像降噪效果，见表 3。

表 3 图像峰值信噪比
Table 3 Peak signal to noise ratio of images

噪声类别	本文提出算法	文献 [3] 算法	文献 [4] 算法
高斯噪声	37.78	33.54	34.15
椒盐噪声	36.98	32.45	33.67
死线噪声	35.67	30.14	31.76
混合噪声	34.76	29.65	28.46

由表 3 可知，三种算法的冻融路面裂缝图像温度场重构后的峰值信噪比不同，其中，文献 [4] 算法在冻融路面裂缝图像存在混合噪声情况下，温度场重构后图像的峰值信噪比最低，仅达到 28.46；文献 [3] 算法的峰值信噪比，在添加高斯、椒盐与死线噪声情况下最低，而本文提出方法在添加不同类型噪声干扰下，温度场重构后图像始终具有较高的峰值信噪比，说明本文提出算法具有较好的图像温度场重构能力，更有助于实现精准的路面冻融裂缝检测。

3 结束语

通过机器学习技术中的深度卷积神经网络分析处理路面冻融裂缝图像，并通过实验对机器学习的路面冻融裂缝红外图像检测效果以及路面冻融裂缝图像降噪效果进行验证，提出算法在添加不同类型噪声干扰下，温度场重构后图像始终具有较高的峰值信噪比，温度场重构效果好，可实现不同类型路

研究与应用

面冻融裂缝红外图像的精准检测,体现了良好的鲁棒性,推动智能道路维护技术的发展。

参考文献

- [1] 黄俊博, 宁宝宽, 李明烁, 等. 既有裂缝混凝土的冻融劣化及损伤特性分析 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (1): 142-147.
- [2] 郭香蓉, 李鸿. 一种基于集成学习的路面裂缝检测仿真算法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (2): 121-125.
- [3] 李太文, 范昕炜. 基于 Faster R-CNN 的道路裂缝识别 [J]. 电子技术应用, 2020, 46 (7): 53-56, 59.
- [4] 马跃坤, 李再伟, 赵彦旭, 等. 无砟轨道板表面裂缝的红外热成像检测方法 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (3): 579-587.
- [5] 白锋, 马庆禄, 赵敏. 面向航拍路面裂缝检测的 AC-YOLO [J]. 计算机工程与应用, 2025, 61 (1): 153-164.
- [6] 赵志宏, 何朋, 郝子晔. 一种道路裂缝检测的变尺度 VS-UNet 模型 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2024, 51 (6): 63-72.

- [7] 张明星, 徐健, 刘秀平, 等. 改进 U-Net 的路面裂缝检测方法 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60 (24): 306-313.
- [8] 邓治林, 罗仁泽, 费越, 等. 基于 FE-Unet 的机场道面裂缝检测 [J]. 光子学报, 2023, 52 (1): 34-42.
- [9] 龚芳媛, 方冰杰, 程雪佼, 等. 基于改进 YOLOv5 的路面裂缝检测算法 [J]. 大连理工大学学报, 2024, 64 (3): 314-322.
- [10] 李禹萱, 宋伟东, 孙尚宇, 等. 基于改进 Swin-Transformer 的农村路面裂缝检测算法 [J]. 北京交通大学学报, 2024, 48 (5): 88-97.
- [11] 刘震, 顾兴宇, 李骏, 等. 探地雷达数值模拟与道路裂缝图像检测的深度学习增强方法 [J]. 地球物理学报, 2024, 67 (6): 2455-2471.
- [12] 何礼. 基于深度学习的光学元件表面缺陷检测技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [13] 孙朝云, 马志丹, 李伟, 等. 基于深度卷积神经网络融合模型的路面裂缝识别方法 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2020, 40 (4): 1-13.

(上接第 66 页)

- 续施工引起的地表变形现场试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (3): 982-988, 996.
- [7] 张子新, 李佳宇. MJS 法地基处理技术综述与应用 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39 (6): 1-11.
- [8] 姚志雄, 夏华灿, 吴波, 等. MJS 工法桩在滨海地区软基加固工程中的应用 [J]. 人民长江, 2023, 54 (10): 141-149.
- [9] 陈光辉, 李永胜, 赵建勋, 等. MJS 加固桩在砂层地质施工技术研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 2): 2043-2045.
- [10] 徐敏, 王敬敬, 徐国胜. MJS 工法桩加固施工对运营隧道的影响研究 [J]. 地基处理, 2023, 5 (增刊 1): 131-137.
- [11] 邵耀锋, 何猷豪, 郭健宝, 等. MJS 加固范围对隧道和地表变形影响 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (增刊 2): 1402-1406.

(上接第 159 页)

- [8] 金娇, 高玉超, 李锐, 等. 有机蒙脱土改性沥青抗老化性及其分子模拟试验研究 [J]. 中国公路学报, 2022: 1-19.
- [9] 胡栋梁, 顾兴宇, 孙丽君, 等. 基于量子化学的沥青热老化与紫外老化机理 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23 (2): 141-152.
- [10] 屈鑫, 丁鹤洋, 汪海年. 道路沥青老化评价方法研究进展 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (6): 205-220.
- [11] 袁浩, 王黎明, 宋子坤, 等. 超声处置对 SBS 改性沥青抗疲劳和耐老化能力影响的分析 [J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53 (4): 25-28, 88.
- [12] 黄开棧. 填料对 SBS 改性沥青涂盖料老化性能的影响 [J]. 福

- [12] 王怀东, 袁云辉, 王二丽. MJS 工法在盾构上跨隧道工程中的应用研究 [J]. 现代交通技术, 2021, 18 (6): 22-27.
- [13] 牛自强. MJS 工法与管幕法处理基坑上跨运营地铁扰动效应研究 [J]. 铁道建筑技术, 2022 (3): 120-124.
- [14] 张文博, 张康, 陈卫军. MJS 工法在富水砂层隧道密贴下穿既有车站工程中的应用 [J]. 现代城市轨道交通, 2018 (10): 35-38.
- [15] 王中兵, 王自强. 承压富水软土地层中暗挖车站下穿运营车站的水平 MJS 加固 [J]. 建筑施工, 2022, 44 (7): 1489-1492.
- [16] 王恩波, 曾文博, 张喆, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道结构的扰动效应分析 [J]. 甘肃科学学报, 2024, 36 (5): 16-23.

建建材, 2023 (4): 11-13.

- [13] 齐辉, 吴银芳, 徐懿梦, 等. 沥青混合料动态模量预测模型构建研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (6): 79-83, 134.
- [14] VURAL KÖK B, GÜRÇAY ÖZDEMİR N. Performance evaluation of crumb rubber and bio-based polyurethane compound in terms of rheological and aging properties of asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2023, 389: 131759.
- [15] XIANG H, HE Z, TANG H, et al. Effects of thermo-oxidative aging on the macrophysical properties and microstructure of asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2023, 395: 132315.