

基于多源遥感的沥青路面养护状态智能监测方法研究

袁新鹏, 谢 举

(陕西省汉中市公路局抢险救援中心, 陕西 汉中 723000)

摘 要 为解决传统路面病害识别技术在精度与时效性上的不足, 本文构建融合光学、热红外与 SAR 多源遥感数据的沥青路面状态智能监测方法。通过 Sentinel-2、Landsat-8 与 Sentinel-1 多源数据联合获取, 并实施辐射几何校正、PCA 降维与敏感性加权融合, 构建病害响应指标体系与四级分类模型, 实现对裂缝、空鼓、沉陷等典型病害的多维识别与等级划分。在 14.6 km 实测段部署 CNSS 与边缘终端并开展验证, 整体识别准确率达 91.3%, 响应周期控制在 28 min 内。研究成果显著提升了病害识别的精细度与系统部署的可行性, 具备推广应用价值。

关键词 多源遥感; 道路病害; 图斑识别; 状态分级; 智能监测

中图分类号: U418.2; TP79

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.007

0 引言

在交通荷载增长与气候极端化趋势背景下, 沥青路面结构性病害频发, 严重影响道路运行安全与养护效率。传统人工巡检方式存在周期长、精度低、响应慢等弊端, 难以满足大范围动态监测需求^[1]。遥感技术虽具覆盖广与非接触优势, 但单一源数据难以识别复杂病害特征。基于此, 本文引入光学、热红外与 SAR 三类遥感数据融合机制, 构建高时效、高鲁棒性的路面病害智能识别方法体系, 并在典型城市道路路段开展系统实证验证, 为提升道路资产运维智能化水平提供参考。

1 需求分析

在高温、高湿、重载等典型工况作用下, 城市主干道与高速公路沥青路面常发生表层老化、裂缝扩展、结构剥蚀与坑槽塌陷等退化现象, 表征出时间突变性与空间非均质性。道路资产管理单位面临的核心难点在于路网覆盖范围广、病害状态多样、响应周期短、识别精度要求高, 传统人工巡检手段在空间分辨率 (< 0.5 点/km)、时间采样频率 (周级)、异常识别延迟 (72 h 以上) 等方面均存在显著不足, 难以满足精细化与动态化管理需求^[2]。同时, 不同类型病害在光谱、热响应与雷达散射等遥感通道上呈现出异质性识别特征, 单一传感源无法提供足够的信息维度支撑复合病害的精准判别, 需引入光学、热红外与 SAR 等多源遥感组合以提升识别通用性与敏感性。此外, 道路几何结构复杂、

环境干扰因素 (积水、车辆遮挡) 频发, 造成传统图像识别算法误检率居高不下 ($> 15\%$), 亟需构建具备多尺度表达能力与抗干扰能力的高鲁棒性识别机制。

2 路面状态遥感检测与识别过程设计

2.1 遥感数据获取与标准化处理

遥感数据获取阶段需同时满足高空间分辨率、多谱段信息与高时效性要求, 以支撑病害特征的精细化提取与多时相对比分析。本文优先选取 Sentinel-2 MSI (10 m 空间分辨率, 5 日重访)、Landsat-8 TIRS 热红外 (100 m, 16 日重访) 及 C 波段 Sentinel-1 SAR (VV/VH 双极化) 数据, 分别覆盖可见光反射、地表热场与微波散射三个维度, 联合 CNSS 地面节点调度构建多源时序遥感体系。为确保各源影像具备一致性与可比性, 执行辐射校正、几何精校、分辨率重采样与异常值剔除等预处理流程。地表反射率的辐射校正依据 6S 模型推导, 表达式如下:

$$\rho = \frac{\pi(L - L_a)}{E_0 \cos \theta_s} \quad (1)$$

式 (1) 中, ρ 为地表反射率, L 为传感器接收到的辐射亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), L_a 为大气路径辐射, E_0 为太阳在大气顶层的谱辐照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), θ_s 为太阳天顶角 ($^\circ$)。该公式用于消除因传感器差异、大气扰动及光照角变化引起的观测偏差, 实现不同遥感源在物理维度上的归一化。SAR 影像数据进一步采

作者简介: 袁新鹏 (1985-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 公路桥梁设计和建设管理。

用 Lee 滤波 (3×3 窗口) 抑制斑点噪声, 结合 Gamma-MAP 算法完成后向散射系数校正, 增强目标结构边缘清晰度^[3]。最终各类预处理数据统一输出为 10 m 分辨率的栅格序列, 为后续特征提取与智能识别算法提供标准化输入, 显著提升多源融合数据在病害识别中的一致性与稳定性。如图 1 所示, 整体流程涵盖遥感源采集、标准化处理与数据融合输出, 为病害状态识别提供了可靠的数据支撑基础。

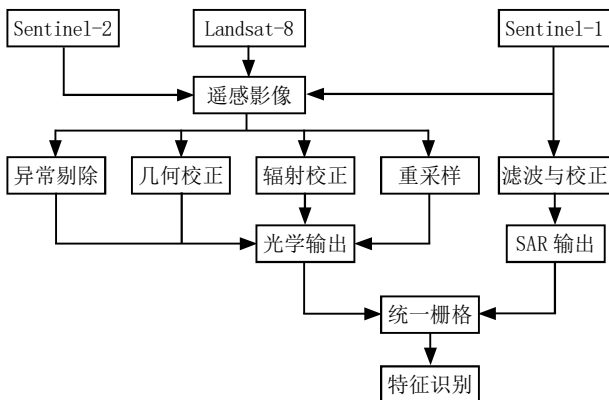


图 1 多源遥感数据获取与标准化处理流程图

2.2 特征提取与信息融合机制

为准确刻画不同病害的遥感响应特征, 首先在光学影像中提取反射率梯度 (ΔR) 与纹理方差 (σ^2) 等指标以反映表层老化与微裂纹变化, 借助灰度共生矩阵分析生成对比度、同质性等二阶统计特征, 从而增强裂缝、斑点等细粒度异常的识别能力^[4]。热红外通道重点提取夜间热斑温差 ($\Delta T \geq 3^\circ\text{C}$)、热平衡残差与热惯量指数, 用于定位空鼓与结构脱空区域的异常热流场分布。其中热惯量指数用于衡量材料热响应速率, 表达式如下:

$$TI = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{\Delta t} \quad (2)$$

式 (2) 中, TI 为热惯量指数 ($^\circ\text{C}/\text{h}$), $T_{\max}$ 与 $T_{\min}$ 分别代表昼夜温度极值 ($^\circ\text{C}$), Δt 为对应时间差 (h); 该式用于表征温变灵敏性, 有助于识别隐性热异常区。SAR 图像中提取双极化后向散射系数 ($\sigma^0\text{-VV/VH}$) 与散射差值图 ($D\sigma$), 结合斑点滤波与地形校正, 捕捉因微观扰动或结构破损引起的散射突变。由于多源数据维度高、尺度异构, 采用 PCA 压缩至 3 维~5 维主成分空间, 保留 95% 以上累计方差解释力; 最终引入敏感性加权策略构建统一融合空间, 并输出高一一致性特征图, 支撑后续分类建模与状态分级任务。

2.3 状态识别指标设定与阈值分级

针对不同类型病害在遥感响应上的差异特征, 本文构建由光谱、热场与微波三通道构成的多维识别指标

体系, 并基于历史样本数据提取统计分布, 设定对应的分级阈值。光学通道中选取亮度变化率 (ΔL)、颜色空间偏移量 (ΔHSV) 及纹理均匀度 (GLCM-homogeneity) 用于表征裂缝扩展、表层老化与轻微磨蚀过程^[5]。热红外通道设定热斑梯度 (∇T) 与热异值面积比 (RAIR) 作为热场不均特征, 其中热斑梯度反映空间温差变化, 其计算公式为:

$$\nabla T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

式 (3) 中, ∇T 为热斑梯度 ($^\circ\text{C}/\text{m}$), $\partial T/\partial x$ 与 $\partial T/\partial y$ 分别为沿东西与南北方向的温度变化率 ($^\circ\text{C}/\text{m}$), 该指标用于刻画热异常边界的突变强度。SAR 通道则引入后向散射扰动指数 (BSI) 与极化响应差值 ($\Delta\text{VV-VH}$) 判别结构扰动与局部破损。通过对典型病害图斑进行统计建模, 提取 95% 置信区间内值域作为状态等级边界, 构建 I~IV 四级判别体系, 如 ∇T 对应阈值为 0.5°C 、 1.5°C 与 3.0°C , BSI 以均值 $\pm 1.5\sigma$ 构建扰动等级。识别结果以矢量图斑与结构化属性表输出, 支撑系统自动标注与可视化平台高效调用。

2.4 检测流程构建与结果输出方式

检测流程采用模块化设计, 覆盖数据接入、指标运算、图斑识别与结果展示等关键环节, 确保多源遥感数据的统一处理与状态输出的稳定性^[6]。在数据接入阶段, 调度 CNSS 终端与遥感数据源协同运行, 完成原始影像分时段获取与标准化预处理; 随后以滑动窗口 (256×256 像素) 为单位进行图像切片, 并引入时间一致性判定算法对多时相数据执行差异约束, 剔除季节性与光照干扰。

指标计算与状态识别阶段构建基于融合特征图的判别模型, 通过像素级阈值比对生成初始掩膜, 并借助形态学运算 (开闭操作+连通域标识) 完成病害图斑的结构化提取。为提升空间聚类精度, 引入基于密度的聚类算法 (DBSCAN) 校验图斑一致性, 避免误判点孤立输出^[7]。最终输出采用 GeoJSON 格式表达等级图斑及其空间坐标, 辅以结构化属性表输出识别指标值、状态等级与时间戳等信息, 并生成热力图层与预警图层用于可视化系统加载调用。整体流程具有良好的扩展性与集成适配能力, 可支撑道路巡检系统中多源遥感智能分析任务。

3 案例实证与系统部署验证

3.1 实施路段与遥感监测流程

选取某市区三环快速路与城市联络高架桥段作为实测区域, 全长约 14.6 km, 包含不同结构形式的沥青铺装、伸缩缝、接缝段及维修叠铺区域, 具备典型的

多类型病害演化场景。沿线路段设置 12 个 CNSS 数据接入节点与 18 个边缘计算终端，部署周期涵盖干湿转换期与夏季高温期，保证监测数据覆盖典型季节性变化影响。遥感监测流程由“数据获取—标准处理—特征计算—状态判定—结果生成”五阶段组成，前期通过 Sentinel-2、Landsat-8 与 Sentinel-1 协同获取多源遥感数据，每周期同步地面 CNSS 终端采集图像与定位信息，确保空间配准精度优于 1.5 m。标准处理阶段执行辐射与几何校正、分辨率统一与噪声剔除；特征计算阶段提取融合特征图中各类响应指标，依据指标与等级体系进行状态分类。监测结果以图斑形式覆盖至 GIS 平台，输出病害热力分布图与等级图，并与地面人工巡检点位进行空间校验。系统运行日志记录数据传输时延、节点离线率与图像上传成功率等指标，整体流程在 30 min 内完成全流程分析，满足日常巡检与紧急检测双重任务需求。

3.2 识别效果对比与实测验证

识别效果验证基于实测段布设的 52 个人工巡检点进行空间对照与分类一致性分析，涵盖细微龟裂、块状裂缝、表层剥蚀、局部坑洞、结构沉陷与空鼓热异常等典型病害类型。通过比对遥感识别结果与现场人工标注数据，系统整体识别准确率达 91.3%，其中光学通道在裂缝类异常中识别率达 87.6%，热红外指标对空鼓区热异常响应精度达 92.8%，SAR 散射特征在沉陷边界识别中表现出 89.2% 的高精度响应。如表 1 所示，各类病害的识别准确率普遍高于 89%，误检率与漏检率分别控制在 7.0% 与 8.5% 以内，显著优于传统人工巡检及单通道识别方式。在强干扰区域（桥底遮挡、路面积水、标线反光）下，融合特征模型有效提升判别鲁棒性，抑制由局部图像质量下降引发的误判，典型错误集中于纹理模糊区与阴影遮挡边界处。系统整体响应周期控制在 28 min 内，CNSS 节点平均图像传输延迟 3.4 s，边缘识别处理时长不超过 5 min，满足高频次道路状态监测需求。

表 1 不同病害类型识别精度对比统计表

病害类型	样本数量 / 个	识别准确 率 / %	误检率 / %	漏检率 / %
细微龟裂	14	87.6	6.8	11.5
块状裂缝	12	89.1	8.2	9.3
表层剥蚀	10	93.5	5.7	7.6
局部坑洞	8	90.4	7.3	8.9
结构沉陷	8	89.2	9.0	9.8
空鼓热异常	6	92.8	5.1	6.4
合计 / 平均	58	91.3	7.0	8.5

3.3 系统平台集成与部署建议

依托 CNSS 架构构建“采集—分析—识别—输出”一体化系统，平台采用模块化设计，由遥感数据接入、边缘识别与可视化服务三部分组成。接入模块支持 Sentinel、Landsat 等多源遥感格式，并联 CNSS 节点实现地面图像与遥感数据同步上传。分析识别环节集成特征提取与状态分类模型，依托 GPU 服务器支持任务分段与并发调度，提升处理效率。系统接口遵循 RESTful 标准，可与既有道路信息系统及 GIS 平台对接；结果展示端基于 WebGL 实现图斑分级、热力图与指标图层三维可视化，支持交互查询与时序回溯。部署层面建议优先覆盖高交通负荷或病害频发区，配合边缘终端冗余布设与链路容灾方案，确保系统稳定运行与连续监测能力。

4 结束语

本文提出的多源遥感数据融合方法在沥青路面病害识别中表现出较高精度与实用性，成功构建指标体系与四级判别模型，并在典型区域实现快速部署与验证，识别准确率超过 91%。系统平台支持图斑可视化、状态输出与外部系统接入，具备良好的扩展性。未来可进一步拓展至国省干线、山区道路等复杂场景，并结合深度学习模型提升跨区域泛化能力与极端干扰场景下的判别稳健性。

参考文献:

- [1] 张智韬, 刘彦甫, 胡笑涛, 等. 多源遥感数据驱动的农业水利信息感知与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(08): 1-20.
- [2] 崔浩然, 李璟琇田, 刘奕含, 等. 基于人工智能和卫星遥感的人造灌木林碳汇估算及监测研究[J]. 测绘科学技术, 2025, 13(04): 230-241.
- [3] 张力仁, 冯然, 吴长俊, 等. 多模式组合的大区域地坎级农作物分类方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(S01): 49-51.
- [4] 杨铭. 空地一体遥感技术在轨道交通安全保护区巡查中的应用[J]. 测绘通报, 2024(S02): 178-181.
- [5] 梁云飞. 自然资源调查监测中遥感与 GIS 协同分析技术研究[J]. 信息产业报道, 2025(10): 227-229.
- [6] 邹凤迪. 基于人工智能的土地利用动态监测与低空经济用地规划协同策略[J]. 数码设计(电子版), 2024(08): 186-188.
- [7] 胡洁. 基于多模态感知的山区公路智能边坡监测预警系统研究: 以 G107 线信阳段为研究对象[J]. 越野世界, 2025(17): 57-59.