 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i4.10002

Research on Intelligent Detection Cause Analysis and Treatment Strategies for Highway Subgrade and Pavement Diseases

Chunyan Chen

Changzhi Branch, Shanxi Provincial Highway Bureau Changzhi, Shanxi, 046000, China

Abstract

Addressing the challenges of low-efficiency manual inspections, experience-dependent cause analysis, and generalized treatment strategies in traditional highway maintenance, this study establishes an integrated technical framework encompassing "intelligent detection, mechanism analysis, and targeted treatment." By integrating multi-source sensing devices with an improved YOLOv8 algorithm, the research achieves integrated detection of both surface and hidden distresses, with void identification accuracy reaching 93.8%. Through field monitoring and numerical simulation, the evolution patterns of distresses under coupled hydro-thermal-mechanical fields are revealed, with main controlling factors identified using Random Forest and Logistic Regression. A three-dimensional distress classification and grading standard is established, along with targeted treatment technologies addressing four causative mechanisms. Digital twin and life-cycle cost analysis are introduced to optimize maintenance decision-making. The research outcomes provide theoretical support and practical references for scientific, precise, and intelligent highway maintenance.

Keywords

highway subgrade; pavement; intelligent detection; cause analysis; targeted treatment

公路路基路面病害智能检测、成因分析及处治对策研究

陈春艳

山西省公路局长治分局，中国 · 山西 长治 046000

摘　要

针对传统公路养护中人工检测效率低、成因分析依赖经验、处治方案粗放等问题，本文构建了“智能检测—机理分析—靶向处治”全链条技术体系。研究集成多源传感设备与改进YOLOv8算法，实现表观与隐性病害一体化检测，脱空识别精度达93.8%；通过现场监测与数值模拟揭示水-热-力多场耦合作用下病害演化规律，采用随机森林与Logistic回归辨识病害主控因子；建立三维度病害分类分级标准与四类成因的靶向处治技术，引入数字孪生与全生命周期成本分析优化养护决策。研究成果为公路养护科学化、精准化与智能化提供了理论支撑与实践参考。

关键词

公路路基；路面；智能检测；成因分析；靶向处治

1 引言

现在我国的公路网的建设和养护已经是同等重要，传统人工巡查效率低、主观性强，难以发现深层隐性病害，不能及时进行预防病害工作。人工智能等技术发展为构建“智能检测—精准诊断—靶向处治”体系提供了条件，能够提升养护的科学性，但现在的研究仍存在“检 - 诊 - 治”衔接不足、机理不明、精细化程度低等问题。

本文构建多源数据融合检测平台，实现表观与隐性病害一体化检测；揭示多场耦合作用下病害机理；提出基于病害特征的靶向处治对策，并通过实证验证其可行性。研究在体系层面构建“检 - 诊 - 治”闭环框架，在方法层面引入多源融合与多场耦合分析，在应用层面提出基于特征库的靶向处治方法，兼具理论价值与工程意义。

2 基于多源数据融合的路基路面病害智能检测技术研究

2.1 多源传感平台构建

为突破传统检测效率低、难以发现隐性病害的局限，本研究构建了“地 - 空”协同的多源传感检测平台。车载系统集成高分辨率线阵相机、三维激光扫描仪和红外热成像仪，实现路面表观病害的高效采集与三维量化；三维探地雷达阵列可获取路基内部结构数据，识别脱空、含水率异常等

【作者简介】陈春艳（1975—），女，中国河南沁阳人，本科，高级工程师，从事公路勘察设计研究。

隐性病害；无人机搭载可见光 / 热成像吊舱，弥补高边坡、桥梁衔接段等复杂区域的检测盲区。各传感器通过高精度 GPS/INS 组合导航系统实现时空配准，为后续融合分析奠定数据基础。主要传感设备的技术参数与功能定位见表 2-1。

表 2–1 多源传感设备性能对比表

传感器类型	采集数据	主要技术参数	检测对象	功能定位
高分辨率线阵相机	路面高清影像	分辨率 1mm/pixel，采集速度 60km/h	裂缝、坑槽、龟裂	表观病害精细成像
三维激光扫描仪	路面点云	扫描频率 200Hz，测距精度 2mm	车辙、沉陷、平整度	三维形态量化
红外热成像仪	路面温度场	热灵敏度 0.05℃，像素 640×512	基层松散、含水异常	早期隐性病害辅助探测
三维探地雷达	路基雷达剖面	天线频率 200MHz~2GHz，探测深度 3m	脱空、松散、含水率	深层结构探查
无人机吊舱	可见光 / 热成像视频	4K 可见光，热成像分辨率 640×512	高边坡、桥梁衔接段	复杂区域补充巡检

2.2 基于改进 YOLOv8 的路面病害识别算法

针对路面病害尺度差异大、细小特征难提取等问题，本研究以 YOLOv8 为基线进行改进。首先对采集图像进行光照均衡、去噪等预处理，并整合公开数据集与自采数据构建包含裂缝、坑槽等典型病害的高质量数据集。改进点包括：在骨干网络中引入 CBAM 注意力机制，增强细小病害的特征表达；采用基于 PANet 的多尺度自适应特征融合网络，替换原有颈部结构，提升不同尺度病害的融合效率；引入 Focal Loss 缓解正负样本不平衡问题。改进后的算法结构如图 2-1 所示。在 RDD2020 和 UAPD 数据集上的测试表明，平均精度（mAP）提升 3.2~5.8 个百分点，参数量降低 7%，实现了精度与效率的平衡。

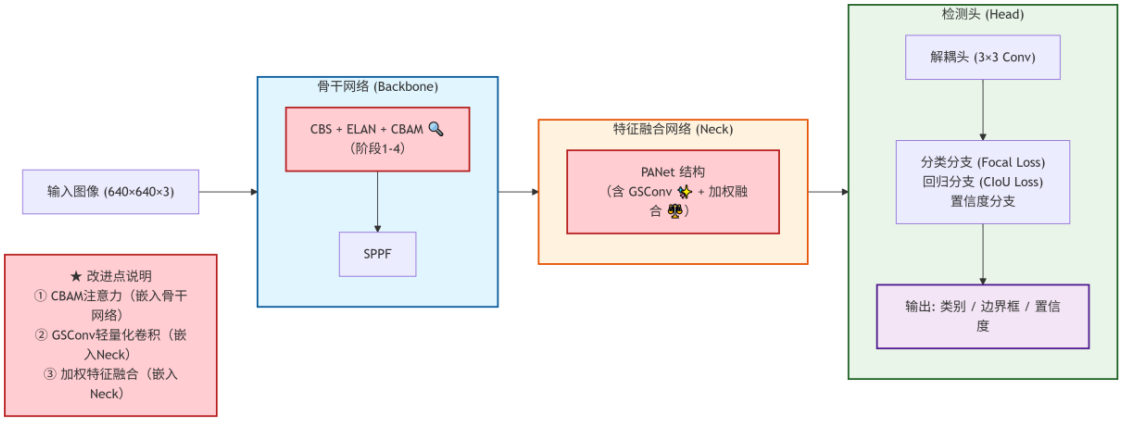


图 2–1 改进 YOLOv8 算法结构图

2.3 探地雷达智能解译与多源数据融合

针对脱空、松散等典型隐性病害构建基于 MobileViT 的双视图融合模型，利用 B-scan（垂直剖面）和 C-scan（水平切片）信息，通过特征交错加权融合突出关键特征，进行深度学习实现自动识别三维探地雷达图谱中典型隐形病害。试验表明脱空识别精度达 93.8%，体积误差率低于 4.3%，多视图融合准确率达 90.5%。

通过空间配准将病害位置与 GPR 异常区域关联，构建路基路面一体化病害分布图谱，将表观与深层数据进行融合。裂缝位置若对应深层脱空则判别为结构性反射裂缝，车辙若与基层含水率异常对应则归为水损害型，实现从表观现象追溯深层病因的关联诊断。这个融合分析框架为后续成因机理研究与靶向处治提供了数据支撑。

3 典型病害成因机理与多因素耦合分析

3.1 现场监测与病害演化规律

为对比不同条件下路基路面病害的演化规律，选取季冻区、黄土地区、盐渍土地区典型路段开展长期原位监测，布设温湿度、含水率、土压力等传感器，结合北斗与 InSAR 技术获取路基变形数据。监测路段特征对比见表 3-1。

3.2 水 – 热 – 力多场耦合机理

基于 COMSOL Multiphysics 建立水 - 热 - 力三场耦合模型，控制方程包括热量传输方程（考虑相变潜热）、水分迁移方程（Richards 方程）和冰 - 水相变方程，开展室内物理模型试验与数值模拟。数值模拟结果：冻结过程中水分向冻结锋面迁移，最大迁移量达初始含水率的 20%；冻融循环导致路基累积变形。典型病害形成机理总结见表 3-2。

3.3 基于机器学习的病害主控因子辨识

本文从数据层、模型层、因子效应层和知识层让机器进行学习，进行成因分析，系统性的识别不同病害类型的参数。如图 3-1 所示，对所有监测到的数据进行量化处理后进行多模型融合评估，再用 Logistic 回归模型分析每个因子的效应，最终建立病害成因的数据库。

系统采用了随机森林、XGBoost 和 LightGBM 三种集成学习算法对量化后的影响因素进行重要程度评估。

表 3–1 典型监测路段特征对比

路段类型	气候区	路基填料	主要病害类型	监测参数	监测周期
季冻区	寒冷湿润	粉质粘土	冻胀、翻浆	温度、含水率、冻深	3 年
黄土地区	半干旱	黄土	湿陷、沉陷	含水率、土压力、沉降	2 年
盐渍土地区	干旱	盐渍土	盐胀、溶陷	含盐量、温度、变形	2 年

表 3–2 典型病害形成机理总结

病害类型	主导因素	作用机理	典型特征
水损坏型	降雨、积水	水分入渗导致基质吸力降低、有效应力减小	路基软化、差异沉降
冻融型	温度梯度	水分迁移冻结产生冻胀，融化时强度降低	季节性起伏、翻浆
结构疲劳型	重载交通	基层底部疲劳开裂，反射至面层	龟裂、车辙
特殊土质型	盐分、含水率	盐胀（硫酸盐）或溶陷（氯盐）	隆起、沉陷

随机森林通过基尼指数计算特征重要性：

$$Importance(X_j)=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\sum_{m\in t}\Delta Gini(m,X_j)$$

其中，N 为决策树数量，ΔGini(m,Xj) 为节点 m 使用特征 Xj 分裂时基尼指数的下降量。

XGBoost 和 LightGBM 的特征重要性计算方式类似，均可基于增益（Gain）来衡量特征的重要性。增益表示使用该特征进行分裂时带来的损失函数减少量的总和，其计算公式可统一表示为：

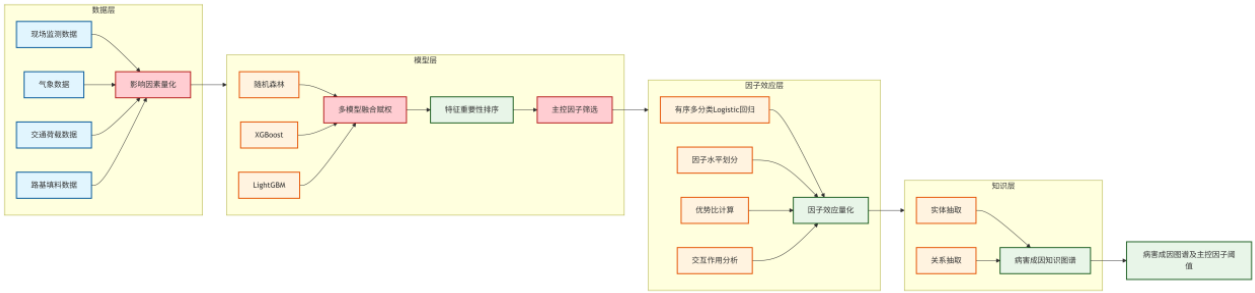


图 3–1 机器学习成因分析流程图

$$Importance(X_j)=\sum_{t\in T}\sum_{s\in S_j^{(t)}}Gain(s)$$

其中，T 为所有决策树的集合，Sj(t) 为第 t 棵树中使用特征 Xj 进行分裂的节点集合，Gain(s) 为节点 s 分裂时带来的增益值。在模型输出中，增益通常归一化为相对百分比，数值越高表示特征越重要。

为避免单一模型的偏差，采用 MACBETH 方法对三个模型赋予权重，得到融合后的特征重要性排序。根据累积贡献率原则（≥ 85%）筛选出各类病害的主控因子，为后续深入分析奠定基础。

筛选出主控因子后，进一步采用有序多分类 Logistic 回归分析各因子对病害等级的影响程度。有序多分类 Logistic 回归模型基于累积概率建模，其表达式为：

其中，Y 为病害严重等级（Ⅰ级 =1，Ⅱ级 =2，Ⅲ级 =3），X 为影响因子向量，β 为回归系数向量，αj 为第 j 个累积概率对应的截距参数（满足 α1 < α2）。

通过计算各因子的优势比（OR=eβ），可量化因子变化一个单位对病害等级提升的影响倍数。同时，引入因子间的交互项（如含水率 × 冻融次数），分析多因素协同作用对病害发展的影响。例如，季冻区路基的冻胀变形分析显示，“高含水率（> 20%）+ 强降温（日降幅 > 10℃）”的交互作用可使冻胀概率提升约 3.2 倍，远高于单因子作用。

4 基于病害特征的靶向处治对策与工程验证

4.1 病害分类分级与处治目标

为克服传统处治“一刀切”的局限，建立基于多源检测结果的精细化病害分类体系。分类涵盖三个维度：①表观特征（裂缝类、变形类、松散类）；②深层病因（水损害、冻融、疲劳、特殊土质）；③发展态势（稳定型、发展型、快速恶化型）。在此基础上，制定多指标综合的严重程度分级标准（Ⅰ ~ Ⅲ级），见表 4-1。

针对不同等级，设定三层级处治目标：①功能性修复（Ⅰ级病害，恢复平整度、抗滑等）；②结构性补强（Ⅱ级病害，提升承载能力、阻断裂缝）；③耐久性提升（Ⅲ级病害及特殊土质病害，增强抗水损、抗冻融、抗盐胀性能）。

4.2 面向不同成因的靶向处治技术

水损害主导型：优化排水系统，设置防渗阻水层，或采用透水性基层。

冻融与盐胀主导型：采用盐渍土自降盐排导技术或易溶盐吸附处理技术。

结构性疲劳主导型：基层加铺土工格栅或玻纤格栅，设置应力吸收层。

表观功能衰减型：采用微表处、稀浆封层、含砂雾封层等预防性养护技术或超薄磨耗层恢复路面功能。

表 4–1 病害三维分类与分级标准

维度	具体指标	Ⅰ级（轻微）	Ⅱ级（中等）	Ⅲ级（严重）
表观特征	裂缝宽度	＜ 3 mm	3~6 mm	＞ 6 mm
	坑槽深度	＜ 2 cm	2~5 cm	＞ 5 cm
	车辙深度	＜ 10 mm	10~25 mm	＞ 25 mm
深层病因	基层状态	基本完好	局部松散	脱空或松散严重
	路基含水率	正常范围	异常升高	饱和或积水
发展态势	发展速率	低于阈值	阈值范围内	高于阈值

4.3 基于数字孪生的养护决策优化

构建养护对策知识图谱，引入全生命周期成本分析（LCCA），将未来不同时点的成本统一折现，现值计算公式为：

$$PVC=\sum_{t=0}^{T}\frac{C_t}{(1+r)^t}$$

其中 Ct 为第 t 年的机构成本、用户成本与环境成本之和，r 为折现率，T 为分析期。通过数字孪生模型对备选方案进行虚拟实施与性能预测，结合多目标优化生成 Pareto 最优方案集。

4.4 与现行行业标准的衔接

本文病害分级与《公路技术状况评定标准》（JTG 5210）中的路面损坏状况指数（PCI）存在明确对应关系，分级在 PCI 基础上增加了深层病因与发展态势维度，弥补了宏观指标无法反映病害成因与演化趋势的局限，养护对策与《公路沥青路面养护设计规范》（JTG 5421）形成衔接，对应关系如下表。

5 结语

本文围绕“智能检测—机理分析—靶向处治”全链条技术体系开展系统研究，主要结论如下：

（1）智能检测方面：构建了集成多源传感设备的“地 - 空”协同检测平台，提出基于改进 YOLOv8 的病害识别算法，检测精度提升 3.2~5.8 个百分点；建立探地雷达智能解译方法，脱空识别精度达 93.8%，实现了表观与隐性病害一体化检测。

（2）成因机理方面：通过现场监测与数值模拟揭示了水 - 热 - 力多场耦合作用下病害演化规律，冻胀量达 51 mm、融沉量 13 mm；采用随机森林与 Logistic 回归辨识了各类病害的主控因子，构建了病害成因知识图谱。

（3）靶向处治方面：建立三维度病害分类与三级分级标准，提出四类成因的差异化处治技术；构建基于数字孪生与 LCCA 的养护决策优化方法，实现方案智能生成与比选。

表 4–2 本文处治目标与行业养护对策对应关系

本文处治目标	对应行业养护对策	适用 PCI 范围	核心任务	代表性技术
功能性修复	预防性养护 / 功能性修复养护	PCI ⩾ 80（预防性） PCI70~85（功能性）	恢复平整度、抗滑、防水等使用功能	微表处、稀浆封层、超薄磨耗层
结构性补强	结构性修复养护	PCI ＜ 70	提升承载能力，阻断深层病害发展	基层加筋、应力吸收层、铣刨重铺
耐久性提升	——	特殊土质 / 气候区	增强抗水损、抗冻融、抗盐胀性能	盐渍土自降盐排导、防冻层、抗冻融改良

参考文献

[1] 《中国公路学报》编辑部. 路基工程科技发展与趋势展望[J]. 中国公路学报, 2025, 38(12).

[2] 杨东宽, 高光磊, 尹诗雨, 等. 基于DFES-YOLOv5s的道路脱空病害智能检测优化算法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(4): 499-507. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2025.04.011.

[3] 基于改进YOLOv8的探地雷达道路隐性病害检测方法[J]. 现代雷达, 2025. DOI: 8d388966-1120-422f-8617-15c3400ac97a.

[4] 陈登峰, 孟屯良, 何拓航, 等. 路基病害雷达图像多视图融合识别方法[J]. 测绘通报, 2025(6): 97-102. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2025.0617.