

# 智能检测技术在路面病害识别与质量评估中的应用

邓中强

德宏公路局芒市公路分局 云南 德宏 678400

**摘要:**我国公路网规模扩大、交通荷载增长,道路养护管理面临挑战。传统人工巡检效率低、主观性强、危险性高且数据难量化,难满足现代智慧交通与精细化养护需求。近年来,以人工智能等为代表的智能检测技术发展迅猛,为路面病害自动识别与质量评估提供新路径。本文梳理路面病害类型及成因,综述主流智能检测技术体系,包括视觉检测、激光雷达三维扫描等方法;重点剖析深度学习模型在病害分类、定位与量化中的核心作用;探讨智能检测系统在实际工程中的架构设计、数据处理流程及评估指标。最后指出当前技术面临小样本学习、复杂环境干扰等挑战,展望未来发展趋势,旨在为我国道路养护智能化、数字化转型提供理论参考与实践指导。

**关键词:**智能检测;路面病害;深度学习;计算机视觉;质量评估;智慧养护

## 引言

截至2025年底,中国公路总里程突破540万公里,高速公路超18万公里,形成全球规模最大、覆盖最广的公路网。这一庞大体系支撑经济高速发展,却也承受高强度交通荷载与复杂自然环境侵蚀,路面易出现裂缝、坑槽等多种病害,影响行车舒适性与安全性,加速结构劣化,缩短道路寿命,增加养护成本。传统路面病害检测依赖人工目视巡查与简单工具,存在效率低、主观性强、作业环境危险、数据缺乏精确参数等弊端,难以满足需求。在此背景下,利用现代信息技术实现路面病害自动化、智能化、精准化检测与评估,成为国内外道路工程领域研究热点与发展方向。智能检测技术集成先进传感设备、算法模型与数据处理平台,能快速获取路面信息并生成评估报告,为养护决策提供数据支撑,是提升养护管理水平、构建“交通强国”与“智慧城市”的关键。

## 1 路面病害类型与成因分析

准确识别与评估路面病害需明晰其类型与成因。裂缝类病害最为常见,包括由温度应力或基层反射引起的横向裂缝、因路基不均沉降或重载交通导致的纵向裂缝,以及反映结构承载力不足的网状龟裂和块状裂缝。变形类病害主要表现为车辙、拥包与沉陷:车辙源于沥青高温稳定性差或基层强度不足;拥包多因施工不当或材料离析;沉陷则常由路基压实不足或水损害引发。松散类病害体现为材料粘结失效,如坑槽系水损害与荷载共同作用下集料剥落所致,松散因沥青老化或裹覆不良引起,泛油则因沥青用量过多或级配失当造成表面抗滑性能下降。此外,修补不良、接缝损坏及磨光等亦影响使用性能。各类病害具有独特的形态特征与空间分布规

律,其类型与严重程度(如裂缝宽度、车辙深度)是智能识别与路面质量评估(如PCI)的关键依据。

## 2 智能检测技术体系

智能检测技术体系是一个集感知、传输、处理与决策于一体的综合性系统,其核心在于利用多种传感器采集路面信息,并通过智能算法进行分析。

### 2.1 基于图像/视频的视觉检测技术

基于图像或视频的视觉检测技术凭借其直观性、高分辨率和相对较低的成本,已成为当前路面病害智能识别的主流手段。该技术通过在专业检测车辆前端安装高帧率、高分辨率的工业相机阵列,在车辆行进过程中连续拍摄路面高清影像。为了克服自然光照变化带来的干扰,系统通常配备同步触发的LED频闪光源,确保在各种天气和时段下都能获得光照均匀、对比度良好的图像。采集到的原始图像序列需经过一系列预处理步骤,包括镜头畸变校正以消除几何失真、图像去噪以提升信噪比、光照均衡化以统一不同区域的亮度,以及多幅图像的无缝拼接以构建完整的路面全景图。这些预处理环节的质量直接决定了后续病害识别算法的上限。在此基础上,智能算法对处理后的图像进行分析,从复杂的背景纹理中分离并识别出各类病害目标。

### 2.2 激光雷达(LiDAR)三维扫描技术

激光雷达技术通过向路面发射密集的激光束并精确记录其反射回波的时间,能够以毫米级精度重建路面的三维点云模型。这一能力使其在检测和量化路面变形类病害方面具有不可替代的优势。通过对横断面点云数据的分析,可以精确计算出左右轮迹带之间的高程差,从而得到车辙深度这一关键指标。同样,沿道路纵向采集的高程剖面数据可用于计算国际平整度指数(IRI),客观评价行车舒适

性<sup>[1]</sup>。对于坑槽这类兼具平面和深度特征病害，LiDAR 不仅能定位其位置，还能通过点云的凹陷体积估算其严重程度，为养护决策提供更全面的量化依据。此外，LiDAR 数据不受光照条件影响，可在夜间或恶劣天气下稳定工作，有效弥补了纯视觉系统的不足。

### 2.3 红外热成像技术

红外热成像技术提供了一种非接触式的内部病害探测视角。其原理在于，路面不同区域由于材料成分、含水率、密实度或是否存在脱空等差异，其热物理性质（如热容、热导率）各不相同，导致在经历相同的日照加热和夜间冷却过程后，表面温度场呈现出特定的分布模式。例如，水分积聚区域（如潜在的坑槽下方或基层脱空区）因其热容较大，在日落后降温速度明显慢于周围干燥区域，在红外热像图上会清晰地显示为相对“温暖”的异常斑块。通过分析这些热异常区域，可以在病害尚未在路面表面显现之前就进行早期预警，实现预防性养护，从而大幅延长道路使用寿命并降低后期维修成本。

### 2.4 探地雷达（GPR）技术

探地雷达（GPR）是一种利用高频电磁波穿透路面结构的地球物理探测方法。它通过向路面下方发射短脉冲电磁波，并接收来自不同结构层界面（如沥青层与基层、基层与路基）的反射信号。通过对反射波的双程旅行时间和波形特征进行分析，不仅可以精确测定各结构层的厚度，还能有效识别层间脱空、基层破碎、路基含水饱和等隐蔽性病害。这些内部结构信息对于判断路面的整体承载能力和剩余寿命至关重要，是仅依靠表面视觉检测无法获取的关键数据。将GPR揭示的“内在健康状况”与视觉、LiDAR反映的“外在症状”相结合，能够对路面进行全面、立体的健康诊断。

## 3 深度学习在病害识别中的核心作用

### 3.1 主流深度学习模型

一类是以Faster R-CNN、YOLO系列和SSD为代表的目标检测模型，它们能够在单次前向传播中同时完成病害的定位（用边界框表示）和分类。其中，YOLO系列模型因其卓越的速度-精度平衡，特别适合部署在需要实时处理的车载边缘计算平台上。另一类则是以U-Net、DeepLab系列为代表的语义分割模型，这类模型追求像素级的精细识别，为图像中的每一个像素分配一个病害类别标签，从而能够精确勾勒出病害的轮廓和范围。这对于需要精确计算病害面积、长度等几何参数的应用场景（如计算路面状况指数PCI）至关重要。U-Net凭借其独特的编码器-解码器结构和跳跃连接机制，能够有效融合高层语义信息与低层空间细节，在医学图像分割领

域取得成功，也被迅速引入并广泛应用于路面病害的精细分割任务中<sup>[2]</sup>。近年来，基于自注意力机制的Vision Transformer（ViT）等新兴模型也开始被探索，它们在捕捉图像中长距离依赖关系方面展现出潜力，有望在处理复杂、交织的病害场景时取得更好的效果，推动路面病害检测技术升级，助力智慧养护体系构建与交通设施可持续发展。

### 3.2 数据处理与模型训练

构建一个高质量的路面病害数据集是一项耗时耗力的基础性工作，需要对海量图像进行精确的手动标注，包括绘制边界框或像素级掩码。目前，尽管已有Crack500、CFD等公开数据集可供研究使用，但针对中国特有的复杂路况、多样化的病害形态以及不同气候区域的专用数据集仍然匮乏。为了解决训练样本不平衡（例如，严重的坑槽样本远少于常见的细小裂缝）以及提升模型在未见场景下的泛化能力，数据增强技术被广泛应用，通过对原始图像进行旋转、翻转、调整亮度/对比度、添加模拟噪声等操作，可以有效扩充训练集的多样性。此外，迁移学习策略极大地降低了模型训练的门槛，通过利用在ImageNet等大型通用图像数据集上预训练好的模型权重作为初始化参数，再在特定的路面病害数据集上进行微调，不仅显著减少了所需的训练数据量和计算资源，还能有效提升最终模型的收敛速度和识别精度。

### 3.3 评估指标

为了客观、定量地衡量不同智能检测算法的性能优劣，学界和工业界采用了一系列标准化的评估指标。在目标检测任务中，平均精度（mAP）是最核心的综合评价指标，它综合考虑了不同类别病害的检测精度和召回率。交并比（IoU）则用于衡量预测的病害区域与真实标注区域之间的重合程度，是判断定位准确性的关键阈值。而在分类和分割任务中，精确率（Precision）、召回率（Recall）以及它们的调和平均数F1-Score被广泛使用，分别反映了模型预测结果的准确性、查全能力以及二者的综合平衡。这些指标共同构成了评价智能检测系统可靠性的量化标尺，助力智慧交通养护体系实现精准化与智能化升级。

## 4 智能检测系统架构与工程应用

### 4.1 系统架构

现代智能路面检测系统遵循“端-边-云”协同的架构设计理念。在前端感知层，多传感器套件被集成安装于专业检测车辆或经过改装的普通巡检车上，负责在车辆行进过程中同步采集路面的视觉、三维、内部结构等多

维原始数据。在边缘计算层,车载嵌入式计算单元(如NVIDIA Jetson AGX Orin)上部署了经过优化的轻量化深度学习模型,能够对采集到的数据流进行初步的实时处理,完成病害的初步筛查与标记,从而大大减少需要上传至云端的数据量,并实现对关键病害的即时告警<sup>[3]</sup>。在云端处理层,强大的服务器集群接收来自各检测终端的数据,利用更复杂的融合算法和更大的历史数据库,进行高精度的复核、多源数据深度融合、与历史检测记录的纵向比对分析,并最终生成标准化的、包含详细病害清单、位置地图和量化指标的综合评估报告。最后,在应用服务层,养护管理人员可以通过Web门户或移动应用程序,直观地查看辖区内路网的健康状况“一张图”,进行数据钻取、统计分析和养护方案模拟,真正实现数据驱动的科学决策。

#### 4.2 路面质量评估

智能检测的终极价值在于将海量的原始感知数据转化为可指导行动的养护知识。系统通过对识别出的各类病害进行类型、数量、面积、严重程度等维度的量化统计,依据国家或行业标准(如《公路技术状况评定标准》JTG 5210-2018),自动计算出一系列关键的路面服务质量指标。其中,路面状况指数(PCI)是最为核心的一项,它通过一套加权公式,将不同病害对路面使用性能的影响程度进行综合考量,最终得出一个0到100的数值,直观反映路段的整体技术状况。与此同时,由LiDAR或加速度计数据计算出的国际平整度指数(IRI)则专门用于评价行车舒适性,而部分高级系统甚至能通过分析路面微观纹理特征来间接评估抗滑性能指数(SRI)。这些标准化的量化指标不仅是衡量养护成效的标尺,更是路面管理系统(PMS)进行养护需求预测、优先级排序和预算分配的核心输入。

### 5 挑战与未来展望

#### 5.1 当前面临的挑战

尽管智能检测技术发展迅速,其规模化应用仍面临多重挑战。高质量标注数据获取成本高,且罕见病害样本稀缺,制约模型泛化能力;雨、雪、雾、强光等复杂环境易干扰视觉系统,影响鲁棒性;在车载边缘设备上部署高精度模型以实现实时检测,对算法轻量化提出严

峻要求;行业尚缺乏统一的设备性能标准、数据格式规范及识别精度认证体系,阻碍技术互认与推广;此外,深度学习“黑箱”特性导致决策过程缺乏可解释性,影响工程人员的信任度,助力道路养护实现全周期数字化管理,为交通基础设施高质量发展注入新动能。

#### 5.2 未来发展趋势

面向未来,智能检测将向多模态深度融合方向发展,通过融合视觉、激光雷达、探地雷达等多源信息,构建“表里如一”的路面健康画像。小样本学习与自监督学习等技术将缓解数据依赖,提升模型适应性。更长远看,检测数据将与BIM、GIS及力学模型结合,构建道路数字孪生体,实现从“被动修复”到“预测—预防”养护模式的转变。车路协同与众包感知有望形成低成本、广覆盖的动态监测网络。同时,可解释人工智能(XAI)的发展将增强模型透明度,弥合人机信任鸿沟,推动智能技术在关键养护决策中的深度应用。

### 6 结语

智能检测技术正以前所未有的深度和广度重塑路面病害识别与质量评估的传统模式。以深度学习为核心的视觉检测方法,结合LiDAR、GPR等多源传感技术,已展现出在检测效率、精度和客观性方面的巨大优势。它不仅极大地解放了生产力,降低了养护成本和安全风险,更重要的是,为实现基于数据驱动的科学化、精细化、预防性养护奠定了坚实基础。然而,要真正释放其全部潜能,仍需产学研各界通力合作,共同攻克数据、算法、硬件、标准等方面的瓶颈。未来,随着人工智能、物联网、5G/6G通信等新一代信息技术的持续演进,智能检测技术将朝着更高精度、更强鲁棒性、更广覆盖范围和更深决策支持能力的方向发展。

#### 参考文献

- [1]汪伟.人工智能技术在路面病害检测中的应用[J].四川建材,2025,51(03):61-63+68.
- [2]何丽娜.基于物联网技术的公路路面病害智能检测方法[J].物联网技术,2024,14(06):18-20.
- [3]李宏伟.公路路面病害智能检测关键技术研究及应用.浙江省,浙江杉工智能科技有限公司,2022-12-30.