

公路沥青路面裂缝智能检测技术及病害防控策略研究

彭 真

浙江致欣检测技术有限公司 浙江 嘉兴 314000

摘要: 沥青路面裂缝直接影响道路安全与服役年限, 智能检测与科学防控是路面养护领域的核心课题。本文围绕公路沥青路面裂缝问题, 系统梳理了横向、纵向及网状等常见裂缝类型的成因与演化机理, 深入论述了基于深度学习的图像采集与非接触波动检测技术, 提出覆盖设计、施工、运营全周期的裂缝防控策略, 并分析了检测数据与防控决策的协同衔接机制。从机理认知到技术应用再到策略落地形成完整技术链条, 为路面精细化养护提供理论支撑与实践参考。

关键词: 沥青路面; 裂缝智能检测; 深度学习; 病害防控; 协同应用

引言: 沥青路面在长期服役中不可避免地出现裂缝病害, 传统人工巡检方式耗时费力且判定标准不统一, 难以适应大规模路网的养护管理需求。智能检测技术凭借深度学习与多传感器融合能力, 大幅提升了裂缝识别的精度与效率, 而科学的防控策略则需以精准检测数据为决策基础。将检测与防控深度融合, 构建从病害感知到处置反馈的完整闭环, 已成为路面养护技术发展的重要方向, 对延长路面使用寿命、降低养护成本具有现实意义。

1 公路沥青路面裂缝类型及产生机理

1.1 沥青路面裂缝常见类型

沥青路面在服役期间会呈现多种裂缝形态, 按照走向与成因可划分出横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝、块状裂缝和反射裂缝等典型类型^[1]。横向裂缝多垂直于行车方向, 常出现在路面中部或边缘位置, 形态呈规则或不规则的横向展开。纵向裂缝沿行车方向延伸, 多分布在车道轮迹带附近或路面硬路肩边缘。网状裂缝由多条相互交错的细纹构成, 形似龟背纹, 通常标志着路面结构已进入整体性劣化阶段。块状裂缝表现为路面被分割为若干不规则块体, 块体间出现明显缝隙, 是网裂进一步发展的产物。反射裂缝则源于半刚性基层或旧路面的裂缝向上扩展穿透面层, 在新铺沥青层表面复现原有裂缝轨迹。不同裂缝类型往往并非孤立存在, 一段路面上可能叠加出现多种形态, 反映出路面损伤正处于复合劣化状态。

1.2 裂缝产生的内在机理

裂缝萌生与扩展本质上是路面材料力学性能衰退与应力状态失衡共同作用的过程。沥青混合料在反复荷载作用下逐渐丧失弹性恢复能力, 累积的塑性变形使材料内部微裂纹不断萌生并贯通, 最终形成宏观可见裂缝。

半刚性基层因水泥水化反应和干缩特性产生的体积收缩, 会对面层底部施加持续拉应力, 当面层抗拉强度不足以抵抗该应力时便开裂。路面结构层间粘结不良导致各层不能协同受力, 层间剪切应力集中于薄弱界面处, 诱发层间剥离并加速面层开裂。沥青材料本身的老化使结合料由柔性向脆性转变, 低温抗裂性能显著下降, 温度骤降时路面收缩受阻而产生的热应力极易超过材料极限强度, 热裂由此生成。

1.3 裂缝产生的外在诱因

外部环境与交通荷载是裂缝加速发展的直接推手。重载车辆反复碾压使路面承受远超设计标准的疲劳应力, 轴载每增加一倍对路面的损伤效应呈几何级数增长。气温剧烈波动导致路面表层与内部形成较大温度梯度, 表面收缩受到内部约束后拉应力急剧升高, 冬季寒潮期间尤为突出。雨水通过裂缝渗入结构层内部, 在行车荷载的泵吸作用下不断冲刷基层, 削弱承载能力并加速裂缝扩展。

2 公路沥青路面裂缝智能检测技术

2.1 智能检测技术核心构成

智能检测技术本质上是将传感器感知、数据传输与人工智能分析融合为一体的系统化技术架构。整个体系由感知层、传输层、处理层和应用层四个部分串联而成, 每一层都承担着不可替代的功能^[2]。感知层通过各类传感器采集路面表面形态和内部结构信息, 将物理信号转化为可供计算的数字信号。传输层负责把海量检测数据从移动平台实时回传至云端服务器或本地处理终端, 传输速率需达到100 Mbps以上才能保证后续分析的时效性。处理层是技术体系的大脑, 内置深度学习模型与图像处理算法, 对原始数据执行去噪、增强、分割与识别等一系列运算。应用层将算法输出的裂缝位置和几何

参数转化为养护人员可直接使用的可视化图表和技术报告。四层之间并非简单的线性关系,处理层的反馈会反向调节感知层的采集参数,例如当算法判定当前图像清晰度不足时,系统自动触发补光或降速指令,这种闭环机制大幅提升了检测的适应性和鲁棒性。

2.2 图像采集类智能检测技术

图像采集是目前裂缝检测中应用最为成熟的技术路线,核心设备包括线阵工业相机、面阵高分辨相机和全景拼接相机。线阵相机通过逐行扫描方式获取路面条带图像,分辨率可达亚毫米级别,配合车载惯性导航系统能够精确标注每条裂缝的空间坐标。面阵相机则以快照方式捕捉路面局部区域,适合手持设备对重点病害点位进行近距离拍摄。全景相机通过多镜头拼接获取宽幅路面图像,虽然单像素精度有所下降,但覆盖效率极高,常用于路网级快速普查。近红外相机利用裂缝与正常沥青在近红外波段反射率的差异,能够识别出可见光条件下难以分辨的早期微裂缝。高光谱成像技术进一步将光谱分辨率提升至纳米级别,通过分析不同波段的反射特征曲线区分裂缝类型和老化程度,为病害分级提供了丰富的光谱维度信息。

2.3 非接触式波动类智能检测技术

波动类检测技术突破了光学方法仅能感知表面信息的局限,借助电磁波或声波穿透路面表层探测内部缺陷。探地雷达向路面发射纳秒级脉冲信号,当电磁波在传播路径上遇到介电常数突变的界面,例如裂缝填充空气或松散区域时,部分能量被反射回接收天线,通过对反射信号的时频分析可重建路面内部的剖面图像。激光多普勒测振仪利用激光束照射路面并接收散射光的频率偏移来测量路面各点的振动响应,裂缝处因刚度降低而表现出与完好区域截然不同的振动特征,据此可精确定位损伤位置。红外热成像技术则从能量角度切入,利用路面裂缝处热传导路径中断导致的表面温度异常来间接判断裂缝分布。

2.4 智能检测技术操作流程

一套完整的智能检测操作从前期准备、数据采集、数据处理到结果输出四个阶段依次推进。前期准备阶段需要对检测设备进行标定和参数设置,根据路面等级和检测精度要求选择合适的传感器组合与采集速度。数据采集阶段设备按照预设路线沿路面行进,传感器持续记录路面信息并同步采集GPS坐标和里程数据,确保每一帧图像或每一组波形都带有准确的位置标签。采集结束后进入数据处理阶段,原始数据先经过去噪和拼接等预处理操作消除系统误差,随后送入已训练好的检测模型执

行裂缝识别和参数提取。模型输出的结果还需经过人工复核环节,技术人员对比原始图像修正误检和漏检,最终生成包含裂缝分布图、几何参数表和养护建议的正式检测报告。

2.5 智能检测技术关键技术要点

检测性能的优劣取决于若干关键技术环节的突破程度。训练样本的多样性直接决定模型泛化能力,样本库需涵盖不同裂缝宽度、不同路面材质和不同光照条件下的图像,缺失任何一类典型场景都可能导致模型在实际应用中出现盲区。模型轻量化是车载实时检测的瓶颈所在,庞大的网络参数量虽然能提升识别精度,却会导致推理速度无法匹配行车速度要求,因此需在精度与速度之间寻找平衡点。多源数据融合技术将图像的平面纹理信息与雷达的深度结构信息进行配准叠加,弥补了单一传感器的感知盲区^[3]。环境适应性处理同样关键,雨天路面反光和夜间低照度条件会严重干扰光学采集质量,自适应曝光控制和图像增强算法是应对这类问题的有效手段。

3 公路沥青路面裂缝病害防控策略

3.1 设计阶段裂缝防控

设计阶段是裂缝防控的源头环节,结构方案与材料选型在很大程度上决定了路面抗裂性能的先天条件。沥青层厚度与基层类型的组合需充分考虑区域气候特征与交通荷载等级,半刚性基层虽然刚度大、承载力强,但收缩特性明显,应通过设置应力吸收层或采用柔性基层来缓解反射裂缝向上扩展的风险。路面结构组合设计中,各层材料的模量匹配至关重要,上下层刚度相差过大会导致层间应力集中,加速裂缝萌生。沥青混合料级配设计应兼顾高温稳定性与低温抗裂性,间断级配虽能提升抗车辙能力,但对低温收缩极为敏感,连续级配在抗裂方面更具优势。排水结构设计不可忽略,路面内部积水会显著削弱结构强度,横向排水坡度与纵向盲沟的合理布设能有效降低水损害引发的裂缝风险。

3.2 施工阶段裂缝防控

施工质量直接关系到路面结构的完整性与耐久性,诸多裂缝隐患在这一阶段便已埋下。混合料拌合温度与级配控制是基础环节,温度过高会加速沥青老化,过低则导致压实不足,级配偏差使路面空隙率失控,水分由此侵入并在冻融循环中诱发开裂。摊铺作业应保持连续均匀,避免中途停顿形成冷接缝,接缝处若处理不当极易成为裂缝起始点。碾压工艺需严格遵循初压、复压、终压的顺序与遍数要求,压实度不足的区域在后期荷载作用下会率先出现疲劳裂缝。层间粘结质量同样关键,洒布粘层油的均匀程度与用量直接影响上下层协同受力效果,

粘结不良处层间滑移会产生剪切应力并催生裂缝。

3.3 运营阶段裂缝防控

路面投入使用后,裂缝防控转向以预防性养护为主的动态管理模式。定期检测是养护决策的前提,通过智能检测手段获取裂缝分布与发展态势,据此制定针对性养护计划。裂缝封缝宜在宽度较小时尽早实施,防止雨水渗入导致基层损坏,封缝材料需具备良好的弹性恢复能力以适应路面温度变形。薄层罩面与微表处等预防性技术能有效延缓路面老化进程,封闭表面微裂缝并恢复路面功能。超限车辆管控不可放松,重载交通是加速裂缝扩展的主要外力因素,设置称重检测点并限制轴载能显著降低路面疲劳损伤速率。

3.4 裂缝应急处置技术

当裂缝发展到影响行车安全与结构稳定的程度时,应急处置必须迅速到位。坑槽修补采用冷补或热补工艺,关键在于确保修补材料与原路面的粘结强度及压实质量。严重网状裂缝区域可采用铣刨重铺方案,彻底清除已劣化的面层后重新铺筑。注浆填缝技术适用于深层裂缝的修复,将高渗透性材料注入裂缝内部以恢复结构整体性^[4]。应急处置还需关注周边路段的连带损伤,裂缝扩展往往具有区域性特征,局部修复应与相邻区域的养护统筹安排,避免短期内重复开槽。

3.5 防控技术应用流程

全周期裂缝防控遵循检测诊断、方案制定、实施修复、效果跟踪的闭环流程。检测阶段运用智能识别技术获取裂缝类型、宽度、长度及分布密度等量化参数,依据病害等级划分养护优先级。方案制定需综合考虑交通量、气候条件、材料供应及资金约束,选择经济性与技术合理性兼顾的处置措施。施工过程中严格执行质量控制标准,每道工序完成后进行验收方可进入下一环节。修复完成后持续监测裂缝复发情况,将数据反馈至下一轮检测中,不断修正养护策略,形成螺旋式上升的管理循环。

4 智能检测与病害防控的协同应用

4.1 检测数据与防控策略的衔接机制

智能检测生成的裂缝参数是制定防控策略的直接依据,二者的衔接质量决定着养护资源能否精准投放。检测系统输出的裂缝宽度、深度、长度及空间分布数据经标准化处理后汇入路面管理数据库,数据库依据预设的病害分级阈值自动匹配对应的处置方案。宽度处于三毫

米以内的细裂缝触发封缝养护指令,宽度超过五毫米的结构性裂缝则转入修补或铣刨重铺流程。这种数据驱动的衔接方式消除了传统养护中凭经验判断的模糊性,使每一处裂缝都能获得与损伤程度相匹配的技术响应。衔接机制还包含反馈通道,修复完成后的复检数据会回传至数据库,用于评估处置效果并更新病害演化模型,为后续养护决策积累经验参数。

4.2 协同应用的技术要点

协同应用的核心在于打通检测端与养护端的信息壁垒,实现数据从采集到处置的全链路贯通。裂缝三维重构数据与修复材料的力学参数需建立映射关系,确保所选封缝胶或修补料的弹性模量与裂缝周围路面材料相兼容。多期检测数据的叠加分析能够揭示裂缝扩展速率与方向,养护方案据此动态调整修复时机和工艺组合^[5]。车载检测平台与养护调度系统的数据接口须统一标准,避免因格式不兼容导致信息传递中断。算法模型的持续迭代同样关键,将实际修复后的路面表现作为新样本喂入检测网络,可逐步提升模型对不同病害场景的识别与预判能力,使检测与防控形成相互促进的良性循环。

结束语

沥青路面裂缝的智能检测与病害防控贯穿路面全寿命周期,从成因认知到技术突破再到策略落地,各环节紧密关联、缺一不可。深度学习驱动的检测手段为病害诊断提供了高精度数据基础,全周期防控策略则将检测成果转化为实际养护行动,二者在协同应用中相互促进、持续迭代。这一技术体系的不断完善,将推动公路养护从经验驱动向数据驱动转型,为道路基础设施的长期安全运行筑牢技术根基。

参考文献

- [1]鲁怡彤.公路沥青路面现场病害智能识别与分级检测研究[J].时代汽车,2026(8):144-146.
- [2]黄洁.基于智能检测技术的沥青路面裂缝快速识别与养护策略研究[J].车时代,2026(1):88-90.
- [3]周伟红.高速公路沥青路面养护中裂缝病害的评价[J].科技资讯,2023,21(15):117-121.
- [4]任启东.公路养护中沥青路面病害智能诊断与寿命预测研究[J].工程技术研究,2025,7(17):212-214.
- [5]叶倡斌,周新宇.沥青路面裂缝自动检测系统的开发与应用[J].建筑与施工,2025,4(2):193-194.