

沥青路面无损检测技术应用与优化研究

刘志平

广东路宏达检测技术有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i11.5015

[摘要] 沥青路面是我国公路网络的主体结构,其健康状况直接影响行车安全和使用寿命。传统破坏性检测方法因需钻芯取样,会对路面造成二次损伤,难以满足大规模路网的常态化检测需求。无损检测技术以其快速、连续、非介入的技术特征,在路面状态评估中发挥着日益重要的作用。本文系统梳理了探地雷达、落锤式弯沉仪及激光路面检测车三类主流无损检测技术的工作原理、现场操作要点与数据处理流程,深入分析各技术在结构层厚度核查、承载力评估及表面病害识别中的适用范围与局限性,并探讨了多技术融合与检测参数优化的改进方向。研究表明,通过规范数据采集流程、引入数字化分析平台并合理配置检测手段组合,可有效提升路面检测结果的准确性与工程应用价值,为路面养护决策提供可靠支撑。

[关键词] 沥青路面; 无损检测; 探地雷达; 落锤式弯沉仪

中图分类号: TV442+.1 **文献标识码:** A

Application and Optimization Research of Non destructive Testing Technology for Asphalt Pavement

Zhiping Liu

Guangdong Road Hongda Testing Technology Co., Ltd

[Abstract] Asphalt pavement is the main structure of China's highway network, and its health directly affects driving safety and service life. Traditional destructive detection methods require core sampling, which can cause secondary damage to the road surface and cannot meet the normalized detection needs of large-scale road networks. Non destructive testing technology plays an increasingly important role in road condition assessment due to its fast, continuous, and non-invasive technical characteristics. This article systematically summarizes the working principles, on-site operation points, and data processing procedures of three mainstream non-destructive testing technologies: ground penetrating radar, hammer deflectometer, and laser road surface inspection vehicle. It deeply analyzes the applicability and limitations of each technology in structural layer thickness verification, bearing capacity evaluation, and surface disease identification, and explores the improvement direction of multi technology integration and detection parameter optimization. Research has shown that by standardizing data collection processes, introducing digital analysis platforms, and reasonably configuring detection methods, the accuracy and engineering application value of road surface detection results can be effectively improved, providing reliable support for road maintenance decisions.

[Key words] Asphalt pavement; Non destructive testing; Ground penetrating radar; Falling hammer deflectometer

随着我国公路基础设施大规模建成并进入养护关键期,路面健康状态的科学评估变得尤为重要。相关规范明确提出建立以预防性养护为导向、以科学检测为基础的路网管理体系。在此背景下,无损检测技术以其无需中断交通、效率高等优势,成为路网健康状况评估的重要手段。然而,在实际应用中,受设备精度差异、环境干扰及数据解译标准化不足等因素影响,检测结

果的可靠性和一致性仍面临挑战。本文基于工程实践,系统分析沥青路面主要病害特征与检测需求,重点阐述探地雷达、落锤式弯沉仪和激光路面检测车的技术原理与现场操作方法,并围绕数据质量控制、多源信息融合与评价体系优化展开探讨,旨在提升无损检测技术的工程应用水平,推动路面养护管理的科学化与精细化。

1 沥青路面病害特征与检测需求分析

1.1 主要病害类型与成因

沥青路面在长期荷载与气候环境综合作用下,会产生多种结构性与功能性损伤。依据《公路技术状况评定标准》,路面病害可分为裂缝类、变形类、松散类等类型。裂缝类病害包括横向、纵向裂缝及网裂等,主要由温度应力循环、疲劳开裂或基层反射裂缝导致;变形类病害以车辙、沉陷为代表,源于混合料高温稳定性不足或基层承载力衰退;松散类病害如坑槽、骨料脱落,多因水损害或施工缺陷引发。广东地区高温多雨,水损害问题突出,车辙与网裂最为常见。当车辙深度超过15mm或路面损坏指数低于70时需启动养护。准确识别病害分布、深度及成因,是制定合理养护方案的基础,也对检测技术提出了针对性要求。

1.2 无损检测技术选型原则

技术选型需从检测目标、路段特征与工程条件三个层面综合考虑。检测目标方面,厚度核查宜用探地雷达,承载能力评估适用落锤式弯沉仪,表面病害调查可依托激光检测车。路段特征方面,城市快速路及高速公路交通量大、施工窗口短,应优先选用不中断交通的设备,减少占道影响。工程约束方面,需权衡检测精度、设备成本及数据交付周期。单一手段难以全面反映路面状况,多技术组合已成为精细化检测的通行做法。典型项目中,探地雷达核查厚度与层间状况,弯沉仪评估结构承载力,激光车采集表面病害数据,三者结合能为维修设计提供翔实依据,显著提升检测成果的工程价值。

2 主要无损检测技术原理与现场操作

2.1 探地雷达检测技术

探地雷达(GPR, Ground Penetrating Radar)是目前沥青路面结构层检测中应用最为成熟的无损手段之一。其工作原理是利用高频电磁波向路面以下发射脉冲,电磁波在不同介质界面处因介电常数差异产生反射,通过记录反射波的双程走时及振幅变化,反演出各结构层厚度与层间界面状态。现场检测通常采用车载拖曳式或接触式天线,检测车速一般控制在30~60km/h。天线中心频率的选择与探测深度直接相关:400MHz天线探测深度可达1.5m,适用于含基层的全结构剖面扫描;900MHz及以上频率天线纵向分辨率更高,适合面层厚度及层间脱空的精细化检测。常规检测每条车道宜布置不少于1道测线,车辙严重路段或结构异常区域可加密至3道测线,以提高结果可信度。数据处理阶段需对原始雷达剖面进行零点校正、增益调整、背景去除及滤波处理,再结合钻芯标定数据建立路段专用介电常数模型,换算得到各层厚度值。在路面含水率较低、结构层界面清晰的条件下,GPR厚度检测误差通常可控制在±5mm以内;当路面存在积水、油污或含高导电性材料时,信号衰减加剧,解释精度会有所下降,此时需适当增加钻芯验证点的布置密度,以保证最终结果的可靠性。

2.2 落锤式弯沉仪检测技术

落锤式弯沉仪(FWD)通过模拟行车动荷载,对路面施加瞬态冲击力,同步采集不同径向距离处的弯沉响应,用于评估路面整

体结构承载力及分层回弹模量。其核心参数包括可调的落锤重量(通常为50~150kN)、300mm标准承载板直径,以及200~300mm的地传感器布设间距。依据《公路路基路面现场测试规程》(JTG3450-2019),检测应在路面温度稳定且无降雨的条件下进行,测点纵向间距一般为20~50m,需覆盖车行道中心线和轮迹带。检测时,落锤自由下落产生约25~30ms的冲击荷载,弯沉盆数据实时传入采集系统。该数据经反算程序处理后,结合路面分层信息可反算各结构层回弹模量。评价时将反算模量与设计或规范值对比,路基顶面回弹模量低于设计要求的70%时,通常判定为结构承载力不足,需纳入大修计划。FWD可量化结构薄弱区域分布,为加铺设计提供直接参数,但检测效率有限,完成10km路段约需1个工作日,适合路段级精细化评估,不宜用于路网级快速普查。

2.3 激光路面综合检测技术

激光路面检测系统通过集成在综合路况检测车上的线激光传感器与CCD摄像头协同工作,能够在行驶中连续采集路面三维形貌数据,从而同步获取车辙深度、纵断面不平度、路面裂缝及纹理深度等多项功能性指标。该系统通常以60~100km/h的速度工作,采样频率不低于1000Hz,可覆盖全车道宽度。检测前需对激光传感器进行标定,确保高程测量精度,行驶中需保持匀速以避免数据干扰。在裂缝识别方面,基于图像特征的自动识别算法可有效识别宽度超过1mm的裂缝,但对更细微或对比度低的裂缝仍需人工复核^[1]。所获数据经配准后可接入GIS平台,生成病害分布图与评价报告。相比于FWD,该技术具有高效率优势,适合大范围快速普查,但其仅能评估表面状态,对结构内部缺陷的探测能力有限,需结合探地雷达或落锤式弯沉仪以完成全面路面健康评估。

3 检测数据处理与质量控制

3.1 数据采集规范化管理

数据采集的规范化是确保无损检测结果准确性的基础。设备标定是首要环节:GPR天线应在每次出工前完成空气耦合标定,记录天线零位和背景噪声;FWD传感器需定期送至专业机构进行力值溯源标定,确保荷载测量误差不超过±2%;激光检测车的惯性测量单元则应在检测起点完成初始对准。现场作业时,应严格按照检测方案设定的测线布置和测点间距执行,并同步记录桩号里程与检测数据。遇到路面标志线、减速带、桥梁伸缩缝等特殊构造物时,需在数据中标注对应里程,以便后续处理时进行识别或剔除,避免其对正常路段的评价造成干扰^[2]。对于多技术组合检测项目,各系统的时间同步与里程同步至关重要,建议统一采用GPS时钟授时,确保时间戳误差控制在100ms以内,并使用同一里程编码基准,防止数据错位。所有采集数据应在现场作业结束后立即进行本地与云端双重备份,以防设备故障导致数据丢失,保障后续分析工作的连续性。

3.2 数据解译与综合评价方法优化

在GPR数据解译方面,可推广基于连续小波变换的半自动波形拾取算法,以替代传统人工拾取方法,从而大幅提升处理效率

与结果一致性,将单道数据处理时间缩短至秒级。厚度反算时,应结合不少于5个有效钻芯标定点,建立路段专用的介电常数模型,避免直接套用行业经验值产生系统误差。对于FWD弯沉盆反算,工程中宜固定使用同一反算软件以保证数据的纵向可比性,减少因平台差异导致的结果偏差^[3]。温度修正是影响FWD评价可靠性的关键,需在检测中同步记录路面温度(精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$),并按规范进行修正;当温度超出标准区间时,应在评价结论中注明其影响。在多源数据综合评价阶段,建议建立统一的数据库管理平台,将GPR厚度、FWD模量及激光检测指标按里程对齐存储,实现病害分布的可视化查询与分析。综合评价可参照JTG5210-2018中MQI的计算框架,将结构性能指标(如弯沉比率、模量比率)与功能性指标(如PCI、IRI、RD)加权合成,形成兼顾结构状态与使用性能的综合评价,为分段制定差异化养护策略提供量化依据^[4]。

4 工程应用实践与技术优化建议

4.1 典型工程应用案例

广东路宏达检测技术有限公司于2023年承接广东省内某一级公路共计58km路段的路面综合检测项目,检测内容涵盖GPR结构层扫描、FWD承载能力评估及激光路面综合检测三个模块。GPR采用900MHz空气耦合天线,按双轮迹线布置,检测速度为45km/h;FWD测点纵向间距设定为40m,每测点采用65kN、90kN、115kN三级荷载连续落锤,取中间荷载级弯沉盆作为评价依据;激光检测车以80km/h匀速完成全路段扫描。检测结果表明,该路段约23%的里程存在结构层厚度不足情况,GPR测量面层总厚度较设计值偏薄超过10mm的路段主要集中于K12+000至K19+500区间;FWD反算显示,该区段路基顶面回弹模量均值约为42MPa,低于路面结构设计要求的60MPa,结构性能衰退较为明显;激光检测车采集的裂缝数据显示,同一路段PCI均值为64.3,属次差等级,与结构检测结论相互印证,客观反映了该路段结构层与面层状态同步劣化的实际情况。综合三类数据,项目组将K12+000至K19+500路段列为优先修复对象,建议采用铣刨加铺方案,铣刨深度结合GPR厚度数据确定为60mm,加铺AC-20中粒式沥青混凝土厚度60mm,该方案已在后续大修工程中付诸实施,工后检测结果显示路段结构性能与功能性指标均恢复至设计要求水平。

4.2 技术优化路径与管理建议

在设备配置方面,建议探地雷达系统配备多频天线阵列,实现400MHz与900MHz数据的同步采集,低频段用于全深度结构扫描,高频段用于面层精细化解译,尤其在层间界面复杂的旧路改

造路段可有效提升检测精度。FWD设备宜集成温度自动监测与修正模块,在采集阶段完成温度修正,降低后处理阶段因数据不完整导致的结果偏差风险^[5]。数据处理方面,可引入基于机器学习的GPR自动解译模块,利用历史钻芯标定数据训练模型,提高层间界面识别的自动化水平与结果稳定性;针对激光裂缝识别在复杂场景下的局限性,应建立不低于10%的抽样人工复核机制,并将修正数据反馈至算法优化过程,形成持续改进闭环。管理机制上,检测单位应建立涵盖设备标定、数据采集、处理与成果审核的全过程质量控制体系,实施分级质检;检测报告需包含完整的标定记录、原始数据说明、处理参数及评价依据,确保结论可追溯、可复核。随着数字交通建设推进,应将无损检测数据全面接入路网管理信息系统,实现检测成果的动态更新与历史趋势分析,为路面预防性养护提供数据支撑,从而提升养护管理的精细化与科学化水平。

5 结束语

沥青路面无损检测技术在路网健康评估与养护决策中发挥着重要作用。探地雷达、落锤式弯沉仪与激光检测车三类技术优势互补,共同构成覆盖结构层状态、承载能力与表观病害的综合检测体系。通过规范检测流程、优化数据处理方法并合理组合多技术手段,可显著提升检测结果的准确性和工程应用价值。随着传感器技术和数字化平台的持续发展,无损检测的自动化水平和解译精度将进一步提高。检测机构应加强技术跟踪与方法创新,推动检测成果深度融入养护管理全过程,为公路基础设施的长期安全运营提供有力技术支撑。

[参考文献]

- [1]何禹,高新民,杨永强,等.沥青路面压实度无损检测技术与应用研究[J].建筑机械,2021,(04):39-44+6.
- [2]陈绍伦.无损检测技术在沥青路面检测中的应用[J].交通世界,2019,(18):40-41.
- [3]吴泳钿.无损检测技术在高速公路沥青路面施工质量控制中的应用[J].广东公路交通,2018,44(03):10-14.
- [4]罗传熙.基于三维探地雷达的道路无损检测技术应用研究[D].华南理工大学,2018.
- [5]黎邦涛.无损检测技术在沥青路面中的应用[J].中国高新区,2018,(05):36.

作者简介:

刘志平(1993--),男,汉族,湖南省邵阳县人,本科,研究方向:沥青路面。