

基于无损检测技术的公路路面结构层质量评估方法研究

徐 进

灌云县交通运输综合行政执法大队 江苏 连云港 222200

摘 要：无损检测（Non-Destructive Testing, NDT）技术凭借其高效、快速、无损、可连续检测等优势，已成为公路路面结构层质量评估的核心手段。本文系统梳理了落锤式弯沉仪（FWD）、探地雷达（GPR）、红外热成像（IRT）及超声波（UT）等主流无损检测技术的基本原理与适用范围；深入探讨了多源NDT数据融合的关键技术，包括数据预处理、特征提取与信息融合算法；在此基础上，构建了基于机器学习与物理反演相结合的路面结构层质量综合评估模型框架。最后，文章展望了人工智能、大数据、物联网等新兴技术赋能下，无损检测技术在公路工程领域的发展趋势，旨在为提升我国公路基础设施的智慧化管养水平提供理论支撑与实践参考。

关键词：无损检测；路面结构层；质量评估；数据融合；机器学习；探地雷达；落锤式弯沉仪

引言

公路交通是国民经济发展的命脉，路面质量关乎交通安全与寿命。路面各层（面层、基层等）的完整性、模量等指标，共同决定其整体性能，若某一层出现问题，会迅速引发车辙等病害，影响行车安全与舒适性。长期以来，我国公路工程质量控制与养护依赖钻芯取样等有损检测法。这些方法虽能提供局部精确信息，但“点”状采样空间代表性不足，还会对路面造成不可逆损伤，修复成本高、效率低，无法实现大范围普查。高速公路等高等级公路上，频繁交通管制更限制了其应用。在此背景下，无损检测（NDT）技术迅速发展。它通过发射特定能量并分析响应信号，在不破坏路面前提下反演内部参数和病害信息，实现从“点”到“面”的跨越，为公路决策、养护和管理提供数据基础。但单一NDT技术只能反映路面结构某一侧面信息，如FWD评估承载能力但对材料类型不敏感。因此，融合多种NDT数据，构建全面准确的路面结构层质量评估体系，是当前研究热点与难点。本文旨在研究基于多源无损检测数据融合的评估方法，推动公路管养模式转型升级。

1 主流无损检测技术及其原理

1.1 落锤式弯沉仪（FWD）

落锤式弯沉仪（FWD）是目前评估路面结构整体承载能力和各结构层动态模量最为成熟和广泛应用的无损检测设备。其核心工作原理在于模拟瞬时移动车辆荷载对路面的作用过程。具体而言，FWD通过一个可控质量的重锤从预定高度自由落下，冲击位于路面上的承载板，从而施加一个近似半正弦波形的脉冲荷载，通常标准荷载为50kN。在承载板周围不同径向距离处布置多个高精度位移传感器，同步记录路面在该瞬时荷载作用下

产生的瞬时竖向变形，即形成所谓的“弯沉盆”。弯沉盆的空间分布形态直接反映了路面结构体系在荷载作用下的刚度响应特征^[1]。中心点弯沉值表征了整体结构的柔度，而弯沉随距离衰减的速率则揭示了各结构层的刚度贡献。通过将实测弯沉盆数据输入到基于弹性层状体系理论建立的力学反演模型中，并结合优化算法，可以逐层反算出面层、基层乃至路基顶面的动态回弹模量。这些模量参数是评价路面结构承载能力的核心指标，低模量区域往往对应着材料老化、含水软化或结构性损伤，为后续的养护决策提供了关键依据。

1.2 探地雷达（GPR）

探地雷达（GPR）是一种利用高频电磁波穿透介质并探测其内部结构的地球物理方法，在公路工程中主要用于非破坏性地获取路面结构的几何信息和内部缺陷。GPR系统由发射天线和接收天线组成，工作时向路面发射短脉冲的高频电磁波。当电磁波在传播路径上遇到介电常数发生突变的界面，例如沥青混凝土面层与无机结合料稳定类基层之间的分界面，或者基层与路基土之间的接触面，部分能量会被反射回接收天线。通过精确测量电磁波从发射到接收的双程旅行时间，并结合已知或标定的电磁波在各层材料中的传播速度，即可计算出各结构层的厚度。此外，GPR剖面图能够直观地展示路面内部的反射特征，层间脱空、剥离或含水区域会因介电性质的显著差异而产生异常强反射或信号散射，从而被有效识别。GPR技术以其高分辨率、连续快速检测的能力，为精确刻画路面结构几何形态和定位内部病害提供了不可或缺的技术支持。

1.3 红外热成像（IRT）

红外热成像（IRT）技术通过非接触方式捕捉物体表

面自然散发的红外辐射,并将其转化为可视化的温度分布图像。在公路路面检测领域,IRT主要采用被动式工作模式,巧妙地利用太阳辐射作为天然热源。在白天日照条件下,路面各部分吸收热量,但由于不同材料或不同内部状态(如含水、脱空)的热物理性质(如比热容、热导率)存在差异,其升温速率不尽相同。进入夜间后,路面开始向环境散热,此时含水区域因其较高的比热容而降温缓慢,表面温度相对较高;而存在脱空的区域由于空气夹层的隔热作用,其热交换效率降低,表面温度变化更为剧烈。这种由内部状态差异导致的表面温度场异常,可以在特定的时间窗口内被高灵敏度的红外热像仪清晰捕捉^[2]。因此,IRT技术作为一种高效的普查工具,能够在短时间内筛查出大面积的潜在病害区域,为后续更有针对性的精查(如FWD或GPR)提供明确的目标指引,极大地提升了检测工作的效率和经济性。

1.4 超声波检测(UT)

超声波检测(UT)技术通过向被测材料发射高频声波(通常频率高于20kHz),并分析其在材料内部传播过程中因遇到缺陷或界面而产生的反射、透射及散射信号来评估材料的内部状况。在公路工程应用中,UT主要用于对水泥混凝土路面或桥梁结构进行局部检测,以识别内部的裂缝、孔洞、蜂窝等缺陷。其基本原理在于,声波在均匀致密的材料中传播速度稳定,而当路径上存在缺陷时,声波的传播时间会延长,振幅会衰减,频谱特征也会发生变化。通过测量这些声学参数的变化,可以推断缺陷的位置、大小和性质。此外,声波的纵波速度与材料的动态弹性模量密切相关,因此UT也可用于估算材料的力学性能。然而,在现场对柔性沥青路面进行大范围检测时,UT技术面临着诸多挑战,例如需要良好的声耦合条件以保证能量有效传入路面,且易受环境噪声和路面表面粗糙度的干扰,导致其在常规公路路面普查中的应用远不如FWD、GPR和IRT广泛,更多地作为一种补充性的局部验证手段。

2 多源无损检测数据融合方法

单一NDT数据的局限性决定了必须进行多源信息融合,才能构建全面的路面“健康画像”。数据融合是一个多层次、多阶段的过程。

2.1 数据预处理

多源无损检测数据的有效融合始于高质量的数据预处理。由于不同设备的工作原理和采集环境各异,原始数据通常包含不同程度的噪声和系统误差。对于探地雷达(GPR)数据,常见的噪声来源包括天线耦合不佳引起的直达波、地面杂波以及系统内部噪声,需采用背景

去除、带通滤波或小波去噪等信号处理技术予以抑制,以凸显真实的地下反射信息。落锤式弯沉仪(FWD)的弯沉盆数据也可能受到车辆振动或传感器漂移的影响,需要进行平滑滤波处理以获得更稳定的变形曲线^[3]。更为关键的是空间配准问题,不同设备(如FWD点测、GPR线测)的采样位置和密度存在差异,必须借助高精度的全球定位系统(GPS)或里程计数据,将所有检测结果统一映射到同一个地理空间坐标系下。在此基础上,针对采样稀疏的数据(如FWD),还需利用克里金(Kriging)插值或反距离加权(IDW)等空间插值算法,将其与高密度采样的数据(如GPR)对齐到统一的网格单元上,为后续的融合分析奠定坚实的数据基础。

2.2 特征提取

特征提取是从原始、冗余的检测数据中提炼出具有明确物理意义和强判别能力的关键信息的过程。对于FWD数据,除了最直观的中心点弯沉值(D_0)外,更能反映结构层间相互作用的弯沉盆形状参数,如距荷载中心300mm处的弯沉值(D_{300})以及由两者计算得到的曲率指数($CI = D_0 - D_{300}$),都是重要的特征。更重要的是,通过反演计算得到的各结构层动态模量,直接量化了材料的承载性能。对于GPR数据,特征不仅包括通过时深转换得到的各层精确厚度,还包括从反射波形中提取的振幅、反射系数以及信号在传播过程中的衰减率,这些参数能够间接反映材料的密实度和含水状况。此外,通过对GPR剖面进行图像处理,可以量化层间反射异常的面积或强度,作为结构完整性的评价指标。对于IRT数据,特征主要围绕温度场的空间分布展开,如特定路段的平均表面温度、温度标准差,以及疑似病害区域与周围健康区域的温差绝对值和梯度。这些经过精心设计的特征向量,共同构成了描述路面结构层综合状态的多维信息空间。

2.3 信息融合策略

信息融合是将来自不同来源的特征信息进行有机整合,以获得超越单一信息源的、更全面、更可靠的认知。在路面结构层质量评估中,融合策略主要体现在两个层面。其一是物理模型驱动的融合,这是一种自上而下的方法。例如,将GPR提供的高精度层厚和层位信息作为硬性约束条件,嵌入到FWD的力学反演模型中。这种做法能够有效克服传统反演中因层厚假设不准而导致的模量计算偏差,显著提升反演结果的物理真实性和可靠性。其二是数据驱动的融合,这是一种自下而上的方法,主要依托于机器学习技术^[4]。在此框架下,将前述步骤中提取的所有多源特征(如各层模量、厚度、温度

异常指数等)组合成一个高维输入向量,利用历史积累的钻芯、挖验等“真值”数据作为监督信号,训练一个强大的预测模型。诸如随机森林(RF)、梯度提升树(XGBoost)等集成学习算法,能够自动学习并捕捉不同特征之间复杂的非线性交互关系,最终输出对路面结构层质量的综合评分或具体的病害类型诊断。对于GPR这类图像数据,还可以引入卷积神经网络(CNN)等深度学习模型,直接从原始图像中端到端地学习病害特征,进一步提升自动化和智能化水平。

3 路面结构层质量综合评估模型构建

基于上述融合策略,本文提出一个“物理-数据”双驱动的综合评估模型框架。

3.1 步骤一:数据采集与预处理

使用集成化的多功能检测车,同步或准同步采集FWD、GPR、IRT数据,并完成预处理和空间对齐。

3.2 步骤二:物理反演与特征生成

利用GPR数据精确划分路面结构层,并计算各层厚度。将GPR层厚作为先验知识,代入FWD反演程序,计算各结构层的动态模量。从IRT数据中提取温度异常特征,标记潜在含水或脱空区域。

3.3 步骤三:构建评估指标体系

定义一套能全面反映路面结构层质量的指标集,例如:①结构承载能力指数(SCI):由FWD反算的路基顶面模量(E0)和基层模量(E1)加权计算得出。②结构完整性指数(SII):基于GPR识别的层间脱空面积占比、厚度变异系数等计算。③水损害风险指数(WRI):综合IRT温差异常区域和GPR信号衰减特征计算。

3.4 步骤四:机器学习模型训练与预测

将步骤二和三生成的多维特征(SCI, SII, WRI, 各层厚度,模量等)作为输入,以路段的综合路况指数

(如PQI)或专家评定的养护等级作为输出标签,训练一个集成学习模型(如XGBoost)。该模型能够学习到不同指标间的复杂非线性关系,最终输出对每个路段的结构层质量综合评分和主要病害类型诊断。

4 结语

本文聚焦基于无损检测(NDT)技术的公路路面结构层质量评估方法研究。通过融合多源数据(FWD、GPR、IRT)并结合物理反演与机器学习,构建了全面、精准、智能的评估体系,有效替代传统有损检测,为预防性养护和科学决策提供技术支撑。研究指出,未来该领域将呈现四大趋势:深度学习(如Transformer、图神经网络)推动复杂数据(GPR图像、时序数据)的自动识别与量化;边缘计算与5G技术实现检测数据“实时在线”处理;无损检测数据与BIM模型、施工数据等融合,构建公路数字孪生体,实现全生命周期健康监测与智能运维;新型感知技术(LiDAR、DFOS)扩展“空-天-地”多维感知网络。该方法不仅是当前公路工程的关键技术,更是智慧交通和基础设施韧性管理的必由之路,对保障国家交通动脉安全高效运行具有重大战略意义。

参考文献

- [1]柳欣.路面结构内部裂缝无损检测技术实路验证[C]//中国公路学会养护与管理分会.中国公路学会养护与管理分会第十四届学术年会论文集.江苏高速公路工程养护技术有限公司,2025:18-22.
- [2]苏斌,江勇.基于无损检测技术的沥青路面施工质量研究[J].建筑机械,2025,(07):339-344.
- [3]李明珊.高速公路路面病害无损检测与养护技术探析[J].交通世界,2024,(Z2):73-75+79.
- [4]赵宏彦.基于声波无损检测技术的公路路面缺陷评估[J].电声技术,2025,49(06):184-186.