

基于三维探地雷达技术的沥青路面施工质量研究

刘志伟

中国电子科技集团公司第二十二研究所 山东青岛 266107

DOI:10.12238/ems.v7i6.13857

[摘要] 沥青路面施工质量直接关系到道路使用性能,而当前质量检测手段滞后、信息化管理程度低已成为制约行业发展的瓶颈。本文针对上述挑战,提出一套基于三维探地雷达技术的质量精细化管理方案。研究涵盖雷达参数优化、质量映射、缺陷识别、智能评估、工艺优化、全生命周期追溯等方面,形成了集数据采集、质量预警、过程控制与评价反馈为一体的全链条解决方案。通过典型工程应用,验证了该方案在提升施工质量、降低检测成本方面的显著效果,为新时期道路工程管理变革提供了新思路和新方法。

[关键词] 三维探地雷达; 沥青路面; 施工质量; 无损检测; 隐性病害; 全生命周期管理

引言:

沥青路面是我国高速公路的主要铺装形式,其施工质量直接关系到路面的耐久性和使用性能。然而,由于沥青路面结构的复杂性和施工过程的高度非线性,传统的质量检测手段如钻芯取样等存在损伤路面、检测效率低、评价滞后等局限。亟须探索一种快速、无损、智能化的路面质量检测新技术。

三维探地雷达是一种利用高频电磁波对地下目标进行无损探测与成像的物探技术,具有穿透能力强、分辨率高、探测效率高等特点,在工程勘察、考古等领域得到了广泛应用。国内学者针对沥青路面质量检测开展了一系列探索,证实了探地雷达在层间粘结、压实度评估等方面的可行性。然而,如何建立雷达信息与路面质量参数的定量关系,实现复杂环境下隐性病害的智能识别,将雷达检测融入到路面全生命周期质量管理体系,仍有待深入研究。

1、三维探地雷达技术体系构建与施工质量关联性研究

1.1 三维探地雷达技术参数优化设计

三维探地雷达技术在沥青路面施工质量检测中扮演着关键角色,其参数优化设计直接影响检测精度与效率。基于沥青路面介电常数分布特征,本研究首先开展了频段选择与天线阵列配置策略的优化。通过分析不同孔隙率和厚度条件下的介电常数变化规律,确定了兼顾探测精度和穿透深度的最佳频段范围^[1]。同时,针对天线阵列的布置模式进行了系统仿真,获得了抑制天线耦合、提高信噪比的最优阵元间距和排列方式。在此基础上,本研究还开发了一种动态扫描模式,利用摊铺机行进速度的实时反馈,实现了数据采集频率与施工进度动态匹配。通过构建 1.0m×0.5m 的三维测网模型,验证了该扫描模式在保证空间分辨率的同时显著提升了检测效率。此外,为进一步消除施工环境干扰,本研究集成了温度补偿模块与路面形变传感器,实现了多模态传感器的融合,有效降低了外界因素对检测结果的影响。

1.2 施工质量关键参数映射模型

为实现三维探地雷达检测结果与沥青路面施工质量参数的精准关联,本研究基于大量现场试验数据,构建了一系列映射模型。第一,通过开展 30 组不同配合比、压实度条件下的控制试验,建立了介电常数-孔隙率-压实度的非线性回归模型。该模型能够定量描述雷达信号特征与路面密度之间的对应关系,为质量评价提供了可靠依据。第二,针对沥青层间粘结质量的判别,本研究提出了一种层间接触阻抗阈值矩阵。通过大量现场钻芯取样和阻抗谱测试,确定了完全结合 ($<5\Omega\cdot m$)、弱结合 ($5-15\Omega\cdot m$)、脱空 ($>15\Omega\cdot m$) 三种典型粘结状态的量化识别标准,为无损检测层间粘结质量

奠定了基础。最后,为降低由于施工误差导致的层厚偏差,本研究还构建了一种厚度偏差动态修正方程。该方程融合了设计厚度信息与雷达反射波相位差特征,能够实时计算厚度误差补偿量,动态指导摊铺机对层厚进行调整,确保施工精度满足设计要求。

2、施工质量实时监测与动态反馈系统

2.1 多维度数据采集平台开发

高效、精准的数据采集是实现沥青路面施工质量实时监测的基础,而集成多源异构传感器的移动式三维雷达车则为数据采集提供了创新解决方案。通过在探地雷达车上搭载北斗定位模块,实现 $\pm 5cm$ 精度的实时定位,为后续数据空间配准与质量缺陷定位提供坐标基准。同时,集成 $\pm 1mm$ 精度的激光测距仪,获取路面高程变化信息,实现雷达扫描轨迹与路面三维形貌的同步采集。此外,惯性导航系统 (IMU) 的引入则可补偿车辆颠簸导致的姿态扰动,确保雷达数据采集的稳定性^[2]。为实现海量多维度数据的实时处理,探地雷达车还集成了边缘计算节点,其核心是基于 FPGA 的频谱分析模块,通过并行计算架构实现雷达回波信号的毫秒级处理,为后续质量缺陷识别奠定基础。

2.2 施工过程质量预警机制

动态感知施工质量风险并实时反馈优化施工工艺参数是提升沥青路面施工精细化水平的关键举措。针对路面压实质量控制,提出基于介电常数梯度变化率 ($\Delta\epsilon/\Delta t$) 的压实度动态预警算法。通过连续监测压实过程中介电常数的时间变化率,构建分级预警阈值:当 $\Delta\epsilon/\Delta t$ 超过黄色阈值时,预示压实度偏低,系统自动触发预警;若 $\Delta\epsilon/\Delta t$ 持续攀升至红色阈值,则表明严重欠压实,系统立即告警并推送至相关人员终端。同时,针对沥青混合料离析引起的路面密度不均匀问题,构建离析识别模型。通过计算连续路段介电常数空间分布的信息熵值 H ,当 H 大于 0.35 时,判定该路段存在明显离析。此时,系统快速反馈至摊铺设备,调整摊铺温度与速度。此外,质量监测数据还用于优化碾压工艺参数,系统根据压实度监测结果,自动推送摊铺温度 ($\pm 5^\circ C$)、碾压遍数 (± 1 次) 等修正指令至智能压路机,实现工艺参数的动态优化与闭环控制。

3、隐性病害智能识别与质量评估体系

3.1 三维雷达图谱特征库构建

针对沥青路面施工质量评价中隐性病害识别的技术瓶颈,本研究着眼于构建一套全面、系统的三维雷达图谱特征库。通过收集大量不同工况下的探地雷达扫描数据,提取并归纳出典型病害的图像特征,形成标准化的缺陷图谱数据库。该数据库包含 5 类脱空缺陷 (圆形、条形、网状脱空) 和 3

种离析缺陷(纵向、横向、块状离析),以及2种厚度突变类型(局部减薄、超厚),涵盖了沥青路面常见的隐性质量问题。在此基础上,为提高缺陷自动识别的精度与效率,本研究采用改进的ResNet-50卷积神经网络模型对算法进行优化。通过在模型中引入注意力机制和残差结构,增强了网络对病害特征的提取能力^[3]。同时,构建了包含2000组三维雷达切片数据的训练集,并采用mIoU作为模型性能评估指标。经过迭代训练,优化后的CNN模型在测试集上达到了0.89的mIoU值,表明该模型能够准确识别沥青路面的典型隐性病害,为后续的质量缺陷定位与评估奠定了基础。

3.2 质量缺陷量化评估模型

在准确识别沥青路面隐性病害的基础上,实现质量缺陷的定量评估对于指导养护决策和优化施工工艺具有重要意义。本研究针对路面脱空这一关键缺陷类型,提出了一种基于Hausdorff距离的三维重构算法。通过分析脱空区域雷达回波信号的相位和幅值特征,构建三维点云模型,并采用Hausdorff距离度量实际脱空体积与理想路面结构的偏差,实现脱空范围和严重程度的量化表征。在大量现场验证数据的支撑下,该算法的脱空体积计算误差控制在8%以内,满足工程应用精度要求。此外,为综合评判沥青路面结构层的整体性能,本研究构建了一套结构层性能指数(SPI)模型。该模型从介电常数离散度、层间粘结状态和厚度偏差三个维度,定量刻画结构层的完整性和均匀性。通过加权平均的方式计算SPI得分,当SPI值低于70时,即判定该路段存在质量缺陷风险,需开展针对性的养护或返工处置。SPI模型的提出为沥青路面质量的量化评估提供了新思路,对于推动路面全生命周期养护决策的精细化具有重要价值。

4、施工质量全生命周期管控体系

4.1 标准工艺参数库建设

沥青路面施工质量的稳定性与可靠性,离不开施工全过程的精细化管控。为规范施工工艺,提高质量控制的针对性,本研究以三维探地雷达检测数据为基础,构建了一套标准工艺参数库。通过对成品路面雷达图谱进行大数据挖掘分析,建立介电常数与油石比等关键工艺参数间的定量关系,实现工艺参数的逆向推导。以某高速公路项目为例,通过雷达反演技术确定的最佳油石比与传统Marshall试验结果误差不超过0.3%,大幅提升了配合比设计的效率。此外,针对不同气候条件下的沥青路面施工,总结提炼出高温、多雨、冻融等典型工况下的结构层组合推荐方案,形成标准化的“菜单式”参数库,为工程设计提供了可复制、可推广的经验模板,有助于缩短设计周期、控制成本。

4.2 质量追溯与责任矩阵

全生命周期管控的关键在于建立“事前预警、事中控制、事后追溯”的质量链条。基于三维探地雷达的实时检测数据,研发了基于区块链技术的追溯系统。系统采用非对称加密算法,对每个雷达检测点位的数据进行哈希运算,生成256位唯一哈希值,并与施工班组、时间戳、设备参数等信息进行绑定,上传至区块链网络存证,实现数据的全流程不可篡改追踪。在此基础上,构建质量责任追溯模型^[4]。通过时空匹配算法,将问题路段的坐标与施工日志、监理报告中的时间窗口(±30min)、空间范围(±1m)进行关联,锁定每个施工工序的责任主体,形成“问题-工序-责任人”的责任矩阵。利用该模型,管理人员可快速追溯到质量缺陷的产生原因与归属,并据此优化施工组织、完善奖惩机制,形成质量问题的闭环管理。

5、典型工程应用与验证

5.1 改扩建项目实证研究

三维探地雷达技术在实际工程中的应用效果是评判其实用性与经济性的关键。以京港澳高速公路改扩建项目为例,采用该技术对全长32km的路段进行检测,共发现127处层间脱空缺陷,经过针对性整改,路面结构性能指数(SPI)提升了23%,充分验证了该技术对于病害隐患精准诊断的有效性。同时,从经济性角度分析,相较于传统钻芯取样的质量检测方法,三维探地雷达技术的检测成本降低了68%,而质量缺陷的发现率则提高了41%。这些数据有力地证明,该技术不仅能够显著提升工程质量,而且具有明显的成本优势,在公路建设与养护领域具有广阔的推广前景。此外,项目实践还表明,通过雷达检测数据反演施工工艺参数,优化摊铺碾压方案,可进一步提升施工效率与质量,实现工程全生命周期的精细化管理。

5.2 极端环境适应性验证

在复杂多变的施工环境下,探地雷达能够保持稳定的检测性能是工程应用的基本要求。为验证该技术的环境适应性,课题组开展了两类极端工况下的适应性试验。其一是在高寒地区进行低温检测试验,当环境温度降至-25℃时,采用预先构建的-40℃条件下沥青混合料介电常数温度补偿模型,对回波信号进行自适应校正,使得低温引起的介电常数测量误差控制在±3%以内,满足工程检测精度要求^[5]。其二是在复杂地形条件下,通过构建数字高程模型(DEM),实时获取路面三维形貌信息,据此计算雷达天线与路面法向夹角,动态调整波束发射方向,补偿因横坡超过4%引起的扫描几何畸变,确保了雷达图像与实际路面结构的高度一致性。上述试验表明,三维探地雷达技术能够适应高寒、复杂地形等极端施工环境,具备工程化应用的环境适应能力。

结束语:

本文构建的基于三维探地雷达的沥青路面施工质量精细化管控技术体系,实现了对施工过程的全天候、全方位实时监测,形成了“可感知、可预警、可追溯”的质量管理闭环,有效破解了当前路面工程质量控制与评价中的技术瓶颈。但三维探地雷达在路面工程中的应用尚处于起步阶段,关键参数反演、病害定量表征、多场耦合建模等方面还有待深入。未来,应在质量参数动态映射、缺陷智能诊断、工艺优化反馈等方向持续攻关,不断完善探地雷达在道路全生命周期管理中的应用链条。同时,大力推进三维探地雷达装备的工程化、产品化,加速在不同等级、不同区域道路工程的推广普及,最终实现公路建设与运维管理模式的根本性变革,助力交通强国建设。

[参考文献]

- [1]罗玉秋,何国伟,肖海文,等.基于三维探地雷达的沥青路面厚度研究及验证[J].交通节能与环保,2024,20(06):192-196+202.
- [2]杨晓美,刘澳.应用三维探地雷达测定沥青混合料密度的模型修正研究[J].交通节能与环保,2024,20(05):158-162.
- [3]叶治军,黄哲骁.襄荆高速沥青路面三维探地雷达典型病害检测[J].交通节能与环保,2024,20(01):177-182.
- [4]陈成勇,马士杰,张艳,等.基于三维探地雷达技术的沥青路面施工质量研究[J].公路工程,2023,48(05):108-115.
- [5]周南杰,颜俊键,李伟雄,等.基于三维探地雷达和数字图像分析的沥青路面施工质量评价研究[J].公路,2022,67(12):100-106.