

公路工程检测技术在公路工程质量控制中的应用分析

李文芳, 王留山

黄河交通学院, 河南 焦作 454950

DOI:10.61369/ME.2025010027

摘要：公路工程质量控制是保障工程结构安全性、耐久性和功能性的核心环节，检测技术作为量化评价工程质量的重要手段，贯穿于材料性能验证、施工过程监控及服役状态评估的全生命周期。本文基于现行技术规范，系统分析了落锤式弯沉仪、探地雷达、红外热成像、无核密度仪及激光平整度仪等检测技术的原理与应用要点，探讨其在路基承载性能评价、层间缺陷识别、摊铺温度场监控、压实度实时控制及路面平整度检测中的具体应用，以期工程全寿命周期管理提供科学依据。

关键词：公路工程；检测技术；质量控制；应用分析

Application Analysis of Highway Engineering Inspection Technology in Highway Engineering Quality Control

Li Wenfang, Wang Liushan

HuangheJiaotongUniversity, Jiaozuo, Henan 454950

Abstract： Highway engineering quality control is the core link to ensure the safety, durability and functionality of engineering structures. Testing technology, as an important means of quantitative evaluation of engineering quality, runs through the whole life cycle of material performance verification, construction process monitoring and service status assessment. Based on the current technical specifications, this paper systematically analyzes the principle and application points of drop weight bending meter, ground penetrating radar, infrared thermal imaging, non-core density meter and laser flatness meter and other detection technologies, and discusses their specific applications in subgrade bearing performance evaluation, interlayer defect identification, paving temperature field monitoring, real-time compaction control and pavement flatness detection. In order to provide scientific basis for engineering life cycle management.

Keywords： highway engineering; detection technology; quality control; application analysis

引言

公路工程作为现代交通基础设施的重要组成部分，其质量直接关系到行车安全、运营效率及社会经济效益。随着交通荷载的日益增加与自然环境复杂性的加剧，传统质量控制手段已难以满足高精度、高效率的工程需求。检测技术作为工程质量控制的核心支撑，通过实时监测与数据分析，能够有效识别施工过程中的潜在缺陷，优化工艺参数，确保工程结构性能的长期稳定性。因此，深入探讨检测技术在公路工程质量控制中的应用，对于提升工程建设水平、降低全寿命周期成本具有重要意义。

一、公路工程质量控制需求

公路工程质量控制是保障工程结构安全性、耐久性和功能性的核心环节，其需求源于工程全生命周期中各环节的严格技术标准与规范。根据《公路工程质量检验评定标准（JTG F80/1-2017）》，公路工程需满足结构稳定性、强度、水温稳定性三大核心指标。结构稳定性要求路基在行车荷载及冻融循环、降水

冲刷等自然因素作用下不发生整体失稳或变形，尤其需关注高填方、陡坡路段及软土地基的加固处理，确保压实度达到100%合格率，并通过弯沉值检测验证整体承载能力。强度控制则要求路基与路面材料具备足够的抗压、抗剪能力，例如路基填料需满足加州承载比（CBR）试验要求，二级及以上公路CBR值 $\geq 5\%$ ，路面基层材料无侧限抗压强度需符合《公路路面基层施工技术细则（JTG/T F20-2015）》规定，比如水泥稳定碎石基层7d抗压强度

课题项目：黄河交通学院2022年度校级课程资源库——道路试验检测技术（课题编号 HHJTXY—2022kczyk075）。

作者信息：李文芳（1988.01—），女，汉族，河南灵宝人，硕士，讲师，研究方向：道路线形设计、道路交通安全。

≥ 3.5MPa。水温稳定性方面，需通过渗透系数试验和冻融循环试验，以确保材料在极端气候下的性能稳定性^[1]。

施工过程中，质量控制需覆盖原材料、工艺参数及成品检测三大维度。原材料进场前需按《公路工程集料试验规程（JTG E42-2005）》进行筛分，按照压碎值≤ 26%、含泥量≤ 3%等指标检测，杜绝不合格材料使用。半刚性基层混合料需通过击实试验确定最大干密度≥ 2.30g/cm³，最佳含水率控制在± 2%范围内，并依据《公路路基施工技术规范（JTG/T 3610-2019）》进行分层压实，确保压实度≥ 96%。成品验收阶段，需采用激光平整度仪检测路面平整度IRI≤ 2.5m/km，横向力系数车测试抗滑性能SFC≥ 54，以及落锤式弯沉仪验证整体刚度。此外，质量控制体系需融入全过程动态管理，例如通过实时监测摊铺温度，沥青混合料≥ 145℃，碾压遍数≥ 6遍等工艺参数，避免因施工偏差导致层间粘结失效或早期病害^[2]。

二、公路工程检测技术要点

公路工程检测技术是量化评价工程质量的核心手段，其要点涵盖材料性能验证、施工过程监控及服役状态评估三大层级。材料性能检测方面，依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程（JTG E20-2011）》，需对沥青针入度、软化点及延度进行实验室测定。集料则需通过洛杉矶磨耗试验和黏附性试验确保耐久性。针对水泥混凝土，需按《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程（JTG E30-2005）》进行抗压强度试验及坍落度控制，以保障结构物承载能力。施工过程检测技术以实时性与精准性为核心。路基压实度检测采用灌砂法，标准击实法比对，允许偏差± 1.5%，路面厚度通过钻芯取样结合雷达探地技术双控。弯沉检测作为评价路基路面整体刚度的重要指标，需使用贝克曼梁法（静态）或落锤式弯沉仪（动态），依据《公路路基路面现场测试规程（JTG 3450-2019）》要求，单点弯沉值需≤ 设计容许值，且代表值通过数理统计判定合格^[3]。对于沥青路面施工，红外热成像技术可实时监控摊铺均匀性，而无核密度仪（PQI）可实现压实度快速无损检测，与理论密度比值≥ 93%^[4]。

服役状态评估则依托定期检测与病害诊断技术。路面损坏状况指数（PCI）通过自动化检测车采集裂缝率、坑槽面积等数据计算。结构强度则通过弯沉盆反演模量评价，并结合探地雷达（GPR）检测基层隐性脱空。桥梁检测需依据《公路桥梁荷载试验规程（JTG/T J21-01-2015）》，通过静载试验和动载试验验证承载能力，并利用超声回弹法检测混凝土强度推定值。此类技术的综合应用，为公路工程全寿命周期质量管理提供了数据支撑与决策依据^[5]。

三、公路工程检测技术在公路工程质量控制中的应用

（一）落锤式弯沉仪动态模量评价路基承载性能

落锤式弯沉仪（Falling Weight Deflectometer, FWD）动态检测技术通过模拟行车荷载的瞬态冲击效应，量化评价路基及路面结构层的动态响应特性，是公路工程质量控制中验证结构承载能力的关键手段。其核心技术在于利用液压驱动落锤从设定高度（通常0.5-1.2m）自由下落，产生50-700kN的脉冲荷载，持续时间25-40ms，精准复现车辆轴载对路面的动态作用。荷载通过直

径300mm的承载板传递至路基表面，同步触发分布于弯沉盆半径0-1.5m范围内的9个高精度位移传感器，实时采集冲击荷载下的动态弯沉曲线。依据《公路路基路面现场测试规程（JTG 3450-2019）》，检测前需采用全站仪对测点进行精确定位，横向偏差≤ 50mm，并通过激光水准仪校准传感器基准面，平整度误差≤ 0.3mm/m。典型检测方案要求每检测断面沿路基宽度方向布置3个测点，行车道、超车道及路肩，纵向间隔20m连续布设，冲击荷载等级需根据设计轴载选定^[6]。

数据反演分析采用弹性层状体系理论，通过MODULUS、ELMOD等专业软件拟合实测弯沉盆，计算路基动态回弹模量及各结构层模量梯度。当路基模量低于阈值时，需结合地质雷达（GPR）扫描判定软弱层深度，针对性采取补压或换填措施。施工质量控制要点涵盖：冲击荷载垂直度控制，偏角≤ 2°，温度修正，沥青路面检测时表面温度需在20± 5℃范围内，每偏差1℃需对模量值进行0.8%线性修正，及数据有效性筛选，剔除因地表杂物或传感器异常导致的离群值，变异系数CV≤ 15%。此外，针对高填方路基，需在96区顶面检测时同步进行CBR试验，贯入量2.5mm对应压强≥ 5MPa，综合验证填料强度与模量指标的匹配性。

（二）探地雷达层间缺陷无损识别技术

探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）基于电磁波在介质中的传播特性，通过发射高频脉冲电磁波并接收反射信号，实现对道路结构层内部缺陷的精准识别与空间定位。其技术核心在于利用不同介电常数的材料界面反射波时差及振幅变化，解析层间粘结状态、脱空区域及含水异常分布。检测系统由控制主机、天线单元及数据采集软件构成，施工前需依据《公路工程地质雷达检测技术规程（JTG/T F81-01-2020）》完成系统校准，包括天线中心频率验证、时窗参数设定及介电常数标定，采用已知厚度的结构层钻孔样本反算ε值，误差≤ 0.5。在路面结构层施工后的隐蔽工程验收阶段，采用1.5GHz高频天线，分辨率≤ 3cm沿车道纵向以5-10km/h匀速连续扫描，横向覆盖全幅路面（含路肩），确保扫描轨迹重叠率≥ 30%。数据采集时需实时监测信号信噪比，并通过时变增益（TVG）补偿电磁波衰减，确保深层缺陷可辨识^[7]。

缺陷判读依据反射波形特征：层间脱空表现为同相轴局部中断或出现多次反射波，振幅突增，较正常区域提高50%-80%。含水异常区域则因介电常数升高导致反射波走时延长，且波形频率降低。数据处理时需采用背景去除滤波消除地表杂波，并利用希尔伯特变换提取瞬时振幅参数，量化脱空范围。针对水泥稳定碎石基层与沥青面层界面检测，脱空厚度≥ 3mm或连续面积> 0.5m²的区域需标记为缺陷区，采用非水反应高聚物注浆，注浆压力0.5-1.0MPa，进行填充修复。施工质量控制要点包括：检测前需清除路面杂物并用砂纸打磨测区，确保天线与路面耦合良好。多车道检测时需采用多通道天线阵列同步采集，避免漏检。数据解译需结合层位标定，并利用三维成像技术重构缺陷立体形态。此外，对于复合结构层，需采用双频联合探测模式（高频1.5GHz与低频900MHz组合），分别优化浅层界面与深层基层的检测精度。该技术可实现单日10-15km车道的高效检测，缺陷识别准确率≥ 85%，显著降低层间剥离引发的反射裂缝与车辙风险^[8]。

（三）沥青摊铺温度场监控

红外热成像技术依托非制冷型焦平面探测器，通过接收沥青

混合料表面发射的长波红外辐射,实时构建摊铺全断面温度场分布模型,是沥青面层施工过程中控制温度离析的关键技术手段。检测系统由红外热像仪、云台稳定装置及温度分析软件组成,施工前需采用黑体辐射源进行辐射校准,确保测温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。检测时,热像仪安装于摊铺机后方3-5m处支架上,镜头轴线与路面呈 45° 倾角,扫描覆盖宽度 $\geq 4.5\text{m}$,空间分辨率 $\leq 10\text{mm/pixel}$,帧率 $\geq 30\text{Hz}$ 以匹配摊铺速度 $(2-4\text{m/min})^{[9]}$ 。温度数据通过无线传输模块实时反馈至控制终端,软件自动生成温度直方图及等温线分布图,识别低温区 $(< 145^{\circ}\text{C})$ 、高温区 $(> 165^{\circ}\text{C})$ 及温度梯度异常带(相邻像素温差 $\geq 8^{\circ}\text{C}/10\text{cm}$)。

施工过程中,温度场监控需与摊铺机参数联动调控:当检测到横向温度标准差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 时,系统触发预警并指导调整螺旋分料器转速,通常控制在 $60-90\text{r/min}$,或夯锤振幅 $4-6\text{mm}$,以改善混合料横向分布均匀性。针对纵向温度波动,通过调整摊铺机行进速度,与运料车衔接节奏,确保温度连续性。对于局部低温区域,需立即采用小型保温料斗补充热料,补料温度 $\geq 170^{\circ}\text{C}$,并在碾压前用红外加热板(功率密度 2kW/m^2)进行二次升温。环境干扰抑制方面,需在热像仪镜头加装窄带滤光片以屏蔽太阳短波辐射干扰,同时采用主动风冷系统防止镜面结雾。数据后处理阶段,需将温度场数据与探地雷达介电常数分布图叠加分析,验证温度离析是否引发压实度差异,要求同断面压实度极差 $\leq 2\%$ 。施工质量控制要点包括:每日开工前需用接触式热电偶对热像仪进行交叉验证;检测过程中需监控环境温湿度,建议空气温度 $> 5^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $< 80\%$;数据存储需同步记录GPS位置信息以便质量追溯。对于改性沥青施工,需特别设定温度补偿系数,较普通沥青混合料检测阈值上浮 5°C ,避免因材料辐射率差异导致测温偏差。

(四) 沥青面层压实度实时控制

无核密度仪(Pavement Quality Indicator, PQI)基于电磁感应原理,通过测量沥青混合料介电特性与密度的线性关系,实现压实度的快速无损检测。其核心技术在于发射频率为 $1\text{MHz}-1\text{GHz}$ 的电磁波,利用混合料中集料、沥青及空隙的介电常数差异,通过接收线圈捕获衰减信号并换算为密度值,检测精度可达 $\pm 0.5\%$ 。该技术贯穿初压、复压及终压全过程,检测时需根据《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40-2004)》要求,在初压后立即进行首轮检测,后续每碾压段 50m 布置3个测点,测点间距横向均匀分布于轮迹带及车道中心线。探头与路面接触压力需稳定在 $10-15\text{N}$,保持静止 3s 以上以确保电磁场充分穿透面层^[10]。

施工中需针对不同混合料类型进行介电参数标定:通过实验

室击实试验建立理论密度与介电值的对应关系,并将标定数据预载入仪器数据库。检测数据通过蓝牙实时传输至压路机驾驶室终端,动态生成压实度云图,当局部区域压实度低于 93% 或相邻测点差异 $> 2\%$ 时,系统自动触发声光报警并标记位置,指导操作手增加 $2-3$ 遍定向碾压。对于桥头搭接、井盖周边等特殊部位,需采用 25kg 激振力 $8-10\text{kN}$ 的小型振动压路机进行补压,同时将检测频率提升至每 20m 5个测点。技术难点在于混合料级配波动会导致介电特性漂移,需每 2000m^2 采用钻芯法进行现场校准,并通过回归分析修正介电模型参数。

(五) 路面纵向均匀性检测

激光平整度仪基于多普勒频移原理,采用波长 635nm 的半导体激光器配合高速CMOS线阵传感器,实现路面纵断面高程的毫米级精度连续测量。检测系统由激光发射模块、惯性基准单元、距离测量轮及数据处理终端构成,依据《公路技术状况评定标准(JTG 5210-2018)》要求,检测车辆需配备液压减震底盘并以 80km/h 匀速行驶,激光束以 30° 入射角投射至路面,光斑直径 $\leq 2\text{mm}$,纵向采样间隔 10cm ,横向覆盖车道全宽。原始高程数据经卡尔曼滤波消除车体振动噪声后,通过四次移动平均法平滑处理,计算国际平整度指数IRI,同时生成断面曲率半径及波长谱分析图,识别施工接缝、碾压波浪等局部不平整特征。

施工过程控制阶段,车载式激光系统集成于摊铺机后方 $2-3\text{m}$ 处,实时采集新铺层表面高程,通过CAN总线将数据反馈至摊铺机控制系统。当检测到 3m 波长范围内高程偏差 $> 3\text{mm}$ 时,自动调节熨平板仰角液压缸或振动频率,补偿混合料流动性与压实度差异导致的平整度偏移。检测前需使用标准三角规对激光传感器进行静态标定,并利用全站仪测量 100m 基准路段进行动态验证。环境适应性方面,需在强日照条件下启用光学滤光片,并在雨雾天气切换至近红外激光模式。数据后处理阶段,需将高程数据与无核密度仪(PQI)的压实度分布图空间配准,分析平整度异常区与压实不足的耦合关系,要求同点位压实度差异 $\leq 2\%$ 。

结束语:综上,公路工程检测技术的应用为工程质量控制提供了科学化、精细化的技术手段,显著提升了施工过程的实时监控能力与缺陷识别精度。通过落锤式弯沉仪、探地雷达、红外热成像等技术的综合应用,工程结构的安全性、耐久性及功能性将得以全面保障。检测技术的持续创新与规范化应用,将进一步推动公路工程质量控制体系的完善,为交通基础设施的高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1]丁振.公路工程检测技术应用于工程质量控制的探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(19):120-122.
- [2]亚庆媛,赵新华.公路工程水泥稳定碎石基层质量控制试验检测技术研究[J].运输经理世界,2024,(36):28-30.
- [3]李培荣,徐宁,温宏平.工程试验检测在公路工程质量标准化管理中的应用[J].江苏建材,2024,(05):155-156.
- [4]付水良.高速公路工程试验检测与质量控制技术研究[J].汽车周刊,2024,(11):255-257.
- [5]肖林丰.工程检测技术在公路工程质量控制中的应用分析[J].交通科技与管理,2024,5(15):86-88.
- [6]秦虎.公路工程检测技术在公路工程质量控制中的应用研究[J].运输经理世界,2024,(22):62-64.
- [7]刘嘉琦.公路工程混凝土结构现场检测技术研究[J].运输经理世界,2024,(34):37-39.
- [8]罗媛.公路工程沥青混凝土路面质量检测技术研究[J].中华建设,2024,(12):172-174.
- [9]王臣.公路工程沥青路面老化试验检测技术[J].汽车画刊,2024,(10):101-103.
- [10]李峰.公路工程沥青路面施工现场试验检测技术[J].运输经理世界,2024,(25):34-36.