

道路压实度自动连续检测及智能压实技术研究

王佳栋

绍兴市交科工程检测有限公司，浙江 绍兴 312000

DOI:10.61369/UAID.2025010038

摘 要： 城市道路建设中，压实作业是确保工程质量的关键步骤，其质量直接影响路基和路面各结构层材料的密实度达标情况。在实际施工过程中，碾压次数不足将导致结构层密实度不达标，引发工程质量缺陷或返工问题，而过度碾压不仅造成资源浪费，更可能产生材料结构破坏导致压实效果衰减。为此，本文围绕道路压实度自动连续检测及智能压实技术进行研究，阐述了道路压实度自动连续检测及智能压实技术要点，旨在建立实时动态监控体系，实现施工过程精准控制，并融合智能压实技术提升作业效率。

关 键 词： 道路压实度；自动连续检测；智能压实技术；自动连续检测

Research on Automatic Continuous Detection of Road Compactness and Intelligent Compaction Technology

Wang Jiadong

Shaoxing Jiaoke Engineering Testing Co., Ltd. Shaoxing, Zhejiang 312000

Abstract： In urban road construction, compaction work is a critical step to ensure the quality of the project, and its quality directly affects the compactness of the subgrade and each structural layer of the road surface. In the actual construction process, insufficient rolling times will lead to the non-compliance of the compactness of the structural layer, causing engineering quality defects or rework problems, while excessive rolling not only causes waste of resources, but also may cause damage to the material structure and lead to the attenuation of the compaction effect. Therefore, this article focuses on the research of automatic continuous detection of road compactness and intelligent compaction technology, expounds the key points of automatic continuous detection of road compactness and intelligent compaction technology, and aims to establish a real-time dynamic monitoring system to achieve precise control of the construction process, and integrate intelligent compaction technology to improve operational efficiency.

Keywords： road compactness; automatic continuous detection; intelligent compaction technology; automatic continuous monitoring

引言

道路检测技术正经历持续革新，过去采用人工巡查方式，检测人员需全程实地勘察路况损伤，不仅耗费大量人力，还存在效率瓶颈，长距离道路检测易引发人员疲劳，直接影响判断精准度。传统检测模式往往需要封闭交通，既影响道路正常通行又产生间接经济损失，现场作业人员的人身安全也难以得到充分保障。当前技术已实现非破坏性检测，在确保路面结构完好的前提下完成全面评估，智能检测设备兼具高效性、精准性及快速响应优势，能在不影响交通流的情况下实时采集数据，配套计算机系统同步接收检测信号，通过集成化分析模块自动生成标准化检测报告，有力推进了道路检测体系与现代化基础设施建设的深度融合。

一、道路压实度自动连续检测及智能压实技术概述

道路压实度是衡量道路工程质量的关键指标，对道路的程度、稳定性及使用寿命有着决定性影响。传统压实度检测方法，如灌砂法、环刀法等，存在操作繁琐、检测效率低、无法实时监

测等弊端，且具有破坏性，只能进行抽样检测，难以全面反映道路整体压实质量。自动连续检测技术借助先进的传感器与数据采集系统，可对压实过程中的关键参数进行实时、不间断监测。智能压实技术则是在自动连续检测的基础上，融合了信息化、智能化技术，实现了对压实过程的智能控制与管理。其核心组成部分

包括高精度定位系统、传感器网络、数据分析与处理系统以及智能控制系统。高精度定位系统可精确确定压路机的位置与行驶轨迹,传感器网络实时采集压实过程中的各种参数,如压实度、温度、碾压速度等。数据分析与处理系统运用先进的算法对采集到的数据进行深度分析,建立压实质量模型,预测压实效果。智能控制系统根据分析结果,自动调整压路机的工作参数,如振动频率、振幅、行驶速度等,确保压实质量达到最佳状态。如在沥青路面施工中,智能压实系统通过温度传感器采集当前压路机位置的温度信息,为高温碾压提供温度分布图,结合压实度数据,实时指导操作手调整碾压参数,有效防止欠压及过压,提升路面压实均匀性和压实质量。

JTG 3450-2019《公路路基路面现场测试规程》为道路压实度检测与控制提供了规范依据。在自动连续检测及智能压实技术应用中,需严格遵循该规程要求。在设备校准与标定方面,应按照规程规定的方法和频率,对传感器等设备进行校准,确保检测数据的准确性与可靠性;在数据采集与处理过程中,要依据规程中关于数据精度、记录格式等要求,进行数据的采集、存储与分析,保证数据质量;在压实质量评定环节,参照规程中的压实度标准及评定方法,对检测结果进行科学评定,判断压实质量是否合格。道路压实度自动连续检测及智能压实技术是道路工程施工技术发展的重要方向。通过实时、连续检测与智能控制,能有效提升道路压实质量,提高施工效率,降低成本。在实际应用中,结合 JTG 3450-2019等相关规范,不断完善技术应用流程与标准,将进一步推动该技术在道路工程中的广泛应用,助力道路建设行业高质量发展。

二、道路压实度自动连续检测

某道路改造建设工程主线全长7675.126m,规划道路红线宽度50m,施工内容涵盖路面结构改造、新建排水系统、电力管廊敷设、通信管线预埋、附属设施建设及景观绿化工程。

(一) 试验路段工程特性

(1) 试验段选址依据,根据项目路基施工土工情况,选取1号取土场土样作为路基填筑材料,确定试验段位于桩号 K29+500至 K29+550 区间,为验证压实度自动连续检测系统的测量精度与工程适用性,设置2组对比试验段进行技术验证;(2) 路基土体参数分析,为研究自动检测技术在不同土质条件下的可靠性及检测结果差异性,将首组试验段编号为1号,对应的颗粒级配曲线见图1。

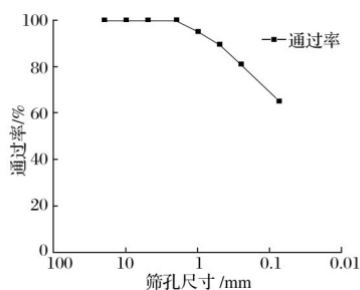


图 11 号试验路段路基土级配曲线

(二) 试验设备

1. 试验仪器

①压路机,选用 Xs223J 型钢轮高频垂直振动压路机,该机型为路基施工常规设备;②加速度传感器,采用压电式传感器,具备体积小、重量轻特点,具有宽频响范围(0.5Hz~18kHz)、高测量精度($\pm 1\%$)及耐高温性能(工作温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 260^{\circ}\text{C}$);③采集仪,配置 DH5902 型坚固式数据采集仪,配备 4 个独立采集通道,带宽范围 0~200kHz,技术指标包含 16Bit 模数转换精度,静态误差控制在 $\pm 0.3\%$ 以内。

2. 加速度传感器安装方式

①胶合螺栓式,适用于需保持被测物完整性的检测,采用环氧树脂将螺栓粘接于测点,安装后传感器谐振频率可达 10kHz;②双面胶带式,适配质量小于 5g 的微型传感器,适用于低频检测($< 5\text{kHz}$),胶层厚度需控制在 0.1mm 以内;③石蜡式黏结,工作温度需低于 40°C ,操作简便且能维持 7kHz 以上谐振频率;④螺栓连接式,通过 M5 螺纹直接固定,可保持传感器原有频率特性(10kHz)和温度范围($-50^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$),安装面需涂抹硅脂增强耦合;⑤磁铁连接式,仅适用于铁磁性材料检测,便捷拆卸但适用频段受限($< 2\text{kHz}$)。

3. 采集仪的参数设置

设备安装完成后,通过 RJ45 网线连接计算机与采集仪,其操作流程:①启动采集仪电源;②运行控制软件并选择 DH8302 设备型号;③修改 IP 地址至目标段(建议 192.168.1.xx);④执行网络搜索直至 IP 标识转为绿色,确认通讯建立;⑤配置采样率(默认 20kHz)、量程($\pm 5\text{V}$)及触发模式(自由采集)。

(三) 检测试验

1. 仪器标定

采用实验室标定方法,直接在实验室内组装检测设备并验证其性能,标定过程分为静态标定与波形显示试验两部分,静态标定用于验证仪器信号采集精度与标定后精度的一致性;波形显示试验用于核对采集信号与计算机显示内容的匹配性,标定仪器包含激振器、传感器、信号发生器、放大器、示波器、万用表及计算机系统,①采用胶带连接方式与磁吸方式固定传感器于震动台,通过数据线依次连接传感器、放大器及示波器,放大器放大系数设为 100 倍,灵敏度调整为传感器 10 倍;②将传感器接入采集器,建立计算机与采集仪的通信连接,启动动态信息采集系统并配置技术参数,执行加速度波形采集;③通过信号发生器切换不同频率与振幅参数,重复采集流程直至获取 10 组有效数据;④完成 10 组数据的误差对比分析,试验中 2 个传感器分别进行 4 次标定,单次标定振动频率稳定在 48Hz,由放大器、发生器及示波器构成的采集系统具备高精度特性,其输出信号作为基准信号使用。

2. 试验方案

选定施工区域开展现场试验,振动压路机按 2.6km/h 速度进行碾压作业,钢轮宽度为 2.3m,每行驶 0.5m 采集一次加速度数据,数据采集仪安装于压路机机架处,传感器信号经采集仪传输至计算机系统实时显示。

（四）施工后检测试验

在道路施工完成后，运用自动连续检测设备对已压实路段进行全面检测。采用与施工过程中相同类型的加速度传感器，沿道路纵向每隔一定距离（如5m）布置一个检测点，横向在路面全幅范围内均匀设置检测点，确保检测覆盖整个路面。通过数据采集仪实时采集各检测点的加速度数据，并传输至计算机系统。同时，使用核子密度仪作为辅助检测手段，对部分检测点进行压实度的直接测量，以验证自动连续检测数据的准确性。核子密度仪依据 γ 射线与中子源的原理，快速测定路面材料的密度和含水量，进而计算出压实度。将核子密度仪测量的压实度数据与自动连续检测系统基于加速度数据推算出的压实度数据进行对比分析。

（五）试验结果分析

从施工后检测数据来看，自动连续检测系统推算出的压实度数据与核子密度仪测量数据具有较高的相关性。在大部分检测点上，两者的压实度偏差在可接受范围内（如 $\pm 3\%$ ）。对于少数偏差较大的点，经现场勘查发现，多与施工过程中的局部材料不均匀、压路机碾压不到位等因素有关。通过对施工后检测数据的详细分析，能够精准定位道路压实质量存在问题的区域，为后续的修复和完善提供有力依据。同时，也验证了自动连续检测技术在施工后检测中的有效性和可靠性，能够为道路工程的质量验收提供全面、准确的数据支持^[1]。

三、道路压实度的智能压实技术

（一）定位与导航技术

在无人化碾压作业中，GPS技术常与惯性导航系统（INS）配合使用以保障定位连续性，当GPS信号出现波动或中断时，INS通过实时监测设备的加速度与角速度变化，结合初始位置持续推算运动轨迹。工程实践表明，两种导航技术的融合能显著提升施工机械在复杂环境（如高层建筑密集区或峡谷地形）中的定位稳定性。道路施工领域内，该组合导航技术已成功应用于土方开挖、路基整平、沥青摊铺及压实等多个工序环节，针对碾压作业的特殊需求，INS可辅助设备维持直线行驶精度，有效避免重复碾压或漏压现象，现场测试数据显示，引入惯性导航后，压路机的轨迹偏差率降低约40%，显著节约了沥青混合料用量并缩短施工周期。值得注意的是，在路基高程控制、接缝处理等精度敏感环

节，INS提供的实时姿态数据对施工质量具有关键作用，随着传感器精度的持续提升和算法优化，该技术体系正推动道路工程向智能化方向加速发展，为现代化施工管理提供了重要的技术支撑。

（二）遥感与数据处理

遥感技术在道路施工领域的应用持续拓展，通过采集地理空间信息和环境参数，有效支持工程规划、过程监控与施工方案优化。在项目规划环节，遥感技术可完成地形三维建模与用地类型识别，为确定合理路线和施工区域提供依据，卫星影像与航空摄影作为主要数据来源，其提供的精细地理信息有助于完善施工组织设计，同时具备动态追踪工程进度的功能，通过周期性获取的卫星及航拍影像，可直观对比工程实际进展与预期目标。当前数据采集多采用卫星遥感与无人机航测协同作业模式，配置高清摄像设备的无人机实施低空航测，捕获的厘米级影像可精确监测施工细节，如沥青摊铺层的密实度与平整度指标。相关研究证实，无人机群在路基智能压实作业中展现出良好应用价值，多源遥感数据融合方面，整合卫星观测、无人机航拍及物联网传感设备数据的技术方法，能够显著提升施工监控数据的完整性与可靠性，构建多维立体的工程现场感知体系，这些技术突破为道路施工自动化提供了重要支撑^[2]。

（三）智能评价压实技术

当前施工压实质量控制多采用现场钻芯等单点检测手段，存在处理难度大、成本高的问题，且可能影响路面使用性能，造成沥青路面早期病害。针对这一现状，主流智能压实技术普遍采用加速度动力反馈方法，通过分析压实机械振动加速度的频谱特征，可建立动力响应值与实际压实量之间的关联关系，由此确定压实计值、劲力模数、能量指标等常用压实参数。此外，部分技术通过传感器方法对压实效果进行评估，智能颗粒可应用于研究散体材料在荷载作用下的微观运动及力学行为，满足材料受力、变形与稳定性等监测需求，该传感器系统集成数据模块、通讯模块与电源模块，具备实时采集检测数据并完成传输的功能^[3]。

四、结语

综上所述，路基智能压实施工技术在我国属于相对前沿的创新工艺，目前整体处于技术探索期，在理论与实践层面仍有诸多领域亟待探索，该技术在施工参数动态调控、质量数据实时追溯方面表现突出，同时具备提升作业效能和优化工程成本的双重优势。

参考文献

- [1]王浩.公路路基工程中常用的试验检测方法[J].黑龙江交通科技,2024,47(11):16-19.
- [2]何兆益,张宇,宋刚,等.基于探地雷达的沥青路面压实度检测研究综述及展望[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(11):1-10.
- [3]王世伟,杨松.固化铁尾矿砂基层材料的工程应用可行性研究[J].公路,2024,69(10):69-74.