

智能压实技术在公路路基施工中的应用研究

马晓鹏

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：随着我国交通基础设施建设向高质量、高效率、智能化方向发展，传统路基压实工艺在质量控制精度、过程管理效率及数据可追溯性等方面已难以满足现代公路工程的需求。智能压实技术（Intelligent Compaction, IC）作为融合传感技术、自动控制、地理信息系统（GIS）与大数据分析的先进施工方法，为路基压实作业提供了全过程、可视化、可量化的质量控制手段。本文系统阐述了智能压实技术的基本原理、核心组成及关键技术，深入分析其在公路路基施工中的具体应用场景与实施流程，并结合工程案例对其压实均匀性、施工效率提升及质量保障能力进行验证。同时，文章探讨了当前智能压实技术推广过程中面临的技术标准缺失、设备兼容性不足、数据管理复杂等挑战，并提出相应的对策建议。研究表明，智能压实技术能够显著提升路基压实质量的均匀性与可靠性，降低返工率，延长道路使用寿命，是推动公路工程智能化建造的重要支撑技术。

关键词：智能压实；公路路基；压实度；连续压实控制；物联网；施工质量控制

引言

公路路基作为道路结构的基础承载层，其压实质量直接关系到路面结构的稳定性、耐久性及行车舒适性。长期以来，我国公路路基压实质量控制主要依赖于“试坑法”或“灌砂法”等离散点检测手段。这类方法不仅检测频率低、代表性差，而且存在明显的滞后性，往往在施工完成后才能发现问题，导致返工成本高昂，甚至埋下长期性能隐患。尤其在高等级公路或对沉降控制要求严苛的路段，局部压实不足极易引发不均匀沉降、裂缝乃至结构性破坏。近年来，随着物联网、全球导航卫星系统（GNSS）、惯性测量单元（IMU）以及边缘计算等信息技术的迅猛发展，智能压实技术应运而生。该技术通过将压路机转变为移动感知平台，在碾压过程中实时采集土体对激振力的动态响应，并结合高精度空间定位信息，实现对整个压实区域的连续、全覆盖监测。这种从“结果验收”向“过程控制”的转变，不仅契合了“品质工程”和“智慧工地”的现代建设理念，也为实现公路工程全生命周期质量管理提供了数据基础。因此，系统研究智能压实技术在公路路基施工中的应用路径、实施效果及发展瓶颈，具有重要的理论价值与实践意义。

1 智能压实技术概述

1.1 基本原理

智能压实技术的核心在于利用压路机自身作为“移动传感器平台”，在碾压过程中实时感知土体对激振力的响应特性。其基本物理原理基于土体动力学：当压路机滚筒对土体施加周期性激振力时，土体产生相应的加

速度或位移响应。随着压实度的提高，土体刚度增大，其对相同激振力的响应幅度逐渐减小。通过监测这一响应变化，即可间接评估土体的压实状态。常见的智能压实指标包括：（1）压实计值（CMV）：由滚筒垂直加速度信号经傅里叶变换后计算得出，反映土体刚度。（2）模量值（CCM）：基于振动模型反演得到的土体动态模量，更具物理意义。（3）压实遍数：记录每个位置被碾压的次数，确保达到设计要求。（4）碾压速度：影响能量输入效率，需控制在合理范围。

1.2 系统组成

一套完整的智能压实系统通常包含以下模块：（1）传感采集模块：包括加速度传感器（安装于振动轮）、GNSS接收机（RTK/PPK级精度）、IMU（惯性测量单元）、温度传感器、速度编码器等，用于实时采集压实过程中的多源数据^[1]。（2）数据处理与显示模块：车载计算机或工业平板，运行专用软件，对原始数据进行滤波、融合、计算，并生成实时彩色压实地图（Color-coded Pass Map）。（3）通信与存储模块：通过4G/5G或Wi-Fi将数据上传至云端服务器，实现远程监控与历史追溯。（4）反馈控制模块（可选）：部分高级系统具备自动调节激振频率、振幅或行驶速度的功能，实现闭环控制。

2 智能压实技术在公路路基施工中的应用

2.1 应用场景

智能压实（IC）技术通过集成高精度传感器、实时数据处理系统和地理信息系统（GIS），实现了对压实过程的动态监控与闭环反馈控制。该技术广泛适用于各类

公路路基填筑工程，尤其在以下典型场景中展现出显著优势：（1）高等级公路（如高速公路、一级公路）：此类道路对路基均匀性、承载力及长期稳定性要求极高，传统抽检方式难以全面反映整体压实质量，而智能压实可实现“全覆盖、无盲区”的质量控制。（2）软基处理段与桥头过渡段：这些区域因土体性质突变或结构刚度差异，易产生不均匀沉降。智能压实可精准识别薄弱区域，避免“跳车”等病害。（3）大体积填方路段：如山区高填方或互通立交区，传统检测点密度不足，难以保证整体压实一致性；IC系统可连续监测每平方米的压实状态，提升质量可控性。（4）对沉降控制要求严苛的特殊工程：如机场跑道、港口集疏运通道、重载货运专线等，其服役期内承受反复高荷载作用，需确保路基模量高度均匀。智能压实通过控制压实模量（如CMV、CCM等指标），有效保障长期性能。

2.2 实施流程

智能压实在路基施工中的标准化实施流程可分为三个阶段，形成“规划—执行—验证”的闭环管理：

2.2.1 前期准备阶段

一是目标设定：依据设计文件明确路基压实控制指标，如压实度 $\geq 96\%$ 或动态模量 $Evd \geq 45\text{ MPa}$ ；二是系统标定：在代表性试验段开展对比测试，采集智能压实指标（如压实计量值CMV、压实控制模量CCM）与传统检测方法（如灌砂法、核子密度仪）的数据，建立回归模型（如 $K = a \cdot CMV + b$ ），相关系数 R^2 通常要求 ≥ 0.85 ；三是工艺参数设定：结合填料类型、含水率、层厚等因素，确定碾压遍数（如6~8遍）、行进速度（ $\leq 3\text{ km/h}$ ）、振动频率、振幅及相邻碾压带搭接宽度（一般 $\geq 20\text{ cm}$ ）；四是施工分段与路径规划：利用BIM或GIS平台划分作业单元，预设压路机最优行走轨迹，避免漏压或重复碾压^[2]。

2.2.2 过程实施阶段

压路机搭载GNSS定位、加速度传感器、位移传感器等设备，在碾压过程中实时采集振动响应、行驶轨迹、碾压遍数等数据；车载终端同步生成彩色压实热力图：绿色表示达到目标压实标准，黄色为临界区，红色为未达标区域；操作人员根据实时反馈，对红色区域进行靶向补压，直至全区域达标；所有数据自动上传至云端平台，支持远程监控与多终端协同。

2.2.3 数据管理与验收阶段

施工完成后，系统自动生成结构化压实报告，包括：碾压遍数分布图；CMV/CCM空间分布云图；统计报表（平均值、标准差、达标率等）；异常区域坐标及处

理记录^[3]。监理单位可通过云端平台调取原始数据，进行独立复核，减少人为干预；该数字化成果作为交工验收的核心依据之一，并纳入工程数字档案，为后期养护决策提供数据支撑。

2.3 工程案例分析

2.3.1 案例背景

某高速公路改扩建项目K50+000~K52+000段，全长2公里，地处软土分布区，路基填料主要为粉质黏土（最优含水率14.2%，最大干密度 1.86 g/cm^3 ），设计压实度要求 $\geq 96\%$ （重型击实标准）。该路段包含两处桥头过渡段及一段约8米高的填方边坡，沉降控制要求极为严格。

2.3.2 实施方案

选用配备TrimbleCCS900智能压实系统的22吨双钢轮振动压路机，集成高精度RTK-GNSS（定位精度 $\pm 2\text{ cm}$ ）；在K50+500处设置 $50\text{ m} \times 30\text{ m}$ 试验段，布设40个灌砂法检测点，同步采集CMV数据，经线性回归分析，建立如下关系式：

$$K = 0.82 \times CMV + 12.5 \quad (R^2 = 0.91)$$

据此反推目标CMV值为100（对应压实度96%）；设定施工参数：碾压遍数 ≥ 6 遍，行进速度 $\leq 3\text{ km/h}$ ，振动频率 30 Hz ，振幅 0.8 mm ，搭接宽度 30 cm ；划分4个施工单元，每单元配置独立压实路径，避免交叉干扰。

2.3.3 实施效果

（1）质量提升：传统检测（按规范每 2000 m^2 抽检8点）显示合格率为92%；而智能压实系统覆盖全部碾压面（约 40 万 m^2 ），数据显示整体达标区域占比达98.5%，显著优于抽检结果；（2）缺陷识别与处置：系统自动标记出3处局部低值区（ $CMV < 90$ ，对应压实度约86%），位置分别位于桥台后 15 m 、边坡中部及填挖交界处。经针对性补压 $2\sim 3$ 遍后，CMV均提升至102以上，复检合格；（3）效率与经济性：因避免大面积返工和减少人工检测频次，施工周期缩短约15%（节省工期7天），直接节约返工与检测成本约18万元；（4）长期性能验证：通车运营一年后，采用自动化弯沉车与无人机激光扫描对该段进行跟踪监测，结果显示最大沉降量仅 8 mm ，远低于规范限值（ 30 mm ），且平整度 IRI 值为 1.2 m/km ，明显优于相邻采用传统压实工艺的路段（ $IRI = 1.8\text{ m/km}$ ）。

3 面临的挑战与对策

3.1 技术标准体系不完善

目前我国尚未出台统一的智能压实技术标准，各地方、企业标准不一，导致设备选型、数据格式、验收方法缺乏规范。例如，CMV值受土质、含水率、压路机型号等多因素影响，不同工况下难以直接比较。对策建

议：加快制定国家或行业标准，明确智能压实系统的性能要求、标定方法、数据接口及验收准则；推动建立“智能压实指标—传统压实度”转换数据库，按土类、含水率区间分类建模；鼓励开展第三方认证，提升技术公信力。

3.2 设备成本与兼容性问题

高端智能压实系统价格昂贵（单台改装费用约20~50万元），且不同厂商设备数据格式不兼容，难以实现多机协同作业^[4]。对策建议：推广模块化、轻量化传感器套件，降低改造门槛；推动开放数据协议（如ISO22381），实现跨品牌数据互通；探索“设备租赁+服务”模式，降低中小施工单位使用成本。

3.3 数据管理与安全风险

海量压实数据的存储、处理、分析对施工单位信息化能力提出挑战；同时，数据泄露或篡改可能影响工程质量责任认定。对策建议：构建基于云平台的智能压实数据中心，集成数据清洗、可视化、预警功能；采用区块链技术对关键数据进行加密存证，确保不可篡改；加强操作人员培训，提升数据解读与应用能力。

3.4 人员观念与技能转型

部分施工管理人员仍习惯于传统经验做法，对新技术接受度不高；操作员需掌握基本的数据判读与设备维护技能。对策建议：将智能压实纳入“智慧工地”示范工程，加强宣传引导；开展专项技能培训，培养“懂技术、会操作、能分析”的复合型人才；将智能压实应用成效纳入企业信用评价体系，形成正向激励。

4 未来发展趋势

展望未来，智能压实技术将深度融入公路工程数字化转型浪潮，呈现四大发展趋势。其一，与BIM/CIM技术深度融合。智能压实数据将作为关键属性嵌入公路BIM模型，实现从设计意图到施工实况的精准映射，为运维阶段的预防性养护提供靶向依据。其二，人工智能赋能决策优化。通过机器学习对历史压实数据进行训练，系统可预测不同工况下的最优碾压参数组合，实现“自适

应压实”；同时，AI算法还能自动识别传感器异常或操作失误，提升系统鲁棒性。其三，向无人化压实作业演进。结合高精度定位与自动驾驶技术，智能压路机可在预设路径下自主完成碾压任务，并根据实时反馈动态调整策略，实现“无人值守”施工，进一步提升安全性与一致性。其四，迈向多源数据融合分析。将智能压实数据与无人机航测地形、地质雷达探测、土壤含水率监测等多维信息融合，构建路基施工“数字孪生体”，实现对地基承载力、材料均匀性及沉降趋势的综合智能评估。

5 结语

智能压实技术作为公路路基施工智能化转型的关键抓手，通过实时、连续、全覆盖的质量监控，有效破解了传统压实工艺在代表性、时效性与可追溯性方面的固有局限。研究表明，该技术不仅显著提升了路基压实的均匀性与结构可靠性，还在缩短工期、降低返工成本、积累数字资产等方面带来多重效益。尽管当前在标准体系、设备成本、数据治理及人才储备等方面仍存在挑战，但随着技术迭代与政策完善，这些问题将逐步得到解决。未来，智能压实将朝着标准化、集成化、智能化与无人化方向持续演进，成为“交通强国”和“新基建”战略下公路工程高质量发展的核心技术支撑。建议相关部门加快标准制定步伐，鼓励产学研协同创新，推动智能压实技术在更大范围、更高层次上落地应用，为建设“百年品质工程”奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 龚绵涛.公路工程建设中路基智能压实施工技术研究[J].新城建科技,2024,33(05):115-117.
- [2] 单奇伟.智能压实技术在高速公路施工质量控制中的应用与效果[J].中国公路,2025,(04):117-119.
- [3] 王辅宋,高速公路路基智能压实与健康监测关键技术开发及应用示范.江西省,江西飞尚科技有限公司,2024-09-25.
- [4] 陶然.公路工程建设中的路基智能压实施工技术[J].智能建筑与智慧城市,2021,(06):150-151.