

公路工程路基压实度实时监测与智能控制技术研究

侯立辉¹ 陈慧颖²

1. 内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗交通运输事务服务中心 内蒙古 通辽 029300

2. 内蒙古自治区通辽市科左中旗地方道路养护中心 内蒙古 通辽 029300

摘要：本文围绕公路工程路基压实质量控制的痛点，系统研究了压实度实时监测与智能控制技术。首先，梳理了压实度的传统检测方法及其局限性；其次，深入分析了基于智能压路机的连续压实控制（CCC）技术原理，包括其核心传感器系统、数据采集机制与评价指标（如CMV、CCV等）；再次，构建了融合多源传感信息与机器学习算法的压实度智能预测模型，并探讨了数字孪生技术在压实过程可视化与闭环控制中的应用；最后，通过工程案例验证了所提技术体系的有效性。研究表明，基于实时监测与智能控制的压实质量管理系统，能够显著提升压实作业效率与均匀性，实现“过程控制”向“结果保障”的转变，为公路工程智能建造提供关键技术支撑。

关键词：路基压实度；实时监测；智能控制；连续压实控制；机器学习；数字孪生

引言

公路是国家重要基础设施，建设质量关乎交通运输效率、区域经济发展与公共安全。路基作为路面结构基础，其压实质量是决定道路结构性能的核心因素，压实度不足或过度压实均会带来不良后果，故科学精准高效控制路基压实度是公路工程质量控制的关键。长期以来，我国公路工程多采用“灌砂法”“环刀法”等传统压实度检测方法，虽精度较高，但存在滞后性，无法及时指导施工；有破坏性，会损伤已完成路基；点状采样代表性有限，难以全面反映压实均匀性；效率低、人力成本高，难以适应大规模快速施工需求。如今，物联网、大数据、人工智能及智能装备技术飞速发展，公路工程加速向数字化、智能化转型。路基压实度实时监测与智能控制技术应运而生，能有效解决传统难题。本文将系统研究该技术，构建压实质量智能管控体系，为提升公路工程建设质量与智能化水平提供理论与实践参考。

1 路基压实度传统检测方法及其局限性

1.1 常用检测方法与技术特征

在现行公路施工规范中，灌砂法被广泛视为压实度检测的“金标准”。该方法通过在压实完成的路基表面开挖标准尺寸的试坑，利用标准砂填充试坑以测定其体积，再结合挖出土样的质量计算现场干密度，最终与室内击实试验获得的最大干密度比较，得出压实度。尽管其精度较高，但整个操作流程繁琐，从开挖、称重到计算，通常需要数小时，且对路基结构造成不可逆的破坏。环刀法则主要适用于细粒土，通过将标准环刀压入土体取样，测定湿密度与含水率后推算干密度。该方法同样具有破坏性，且对粗粒土或含石量较高的填料不适

用。核子密度仪虽可实现无损快速检测，但其依赖放射性同位素，存在辐射安全风险，且测量结果易受土体含水率、密度分布不均等因素干扰，需频繁进行现场标定以保证准确性。此外，落球法或轻型动力触探等间接方法虽操作简便，但其与压实度的相关性较弱，多用于初步判断，难以作为验收依据。

1.2 传统方法的根本性局限

上述检测方法的共同缺陷在于其“事后性”与“离散性”。检测行为发生在压实作业完成之后，无法为当前碾压轮次提供反馈，导致施工人员只能依赖经验判断是否继续碾压，极易造成局部欠压或整体过压。同时，由于检测点数量有限（通常每2000平方米仅设2~4个点），大量区域处于“盲区”状态，即使整体合格率达标，仍可能存在未被发现的薄弱区域，埋下后期沉降或开裂的隐患^[1]。此外，传统方法高度依赖人工操作，从取样到数据处理均存在主观误差风险，且随着劳动力成本上升与工期压缩，高频次检测在经济与时间上均难以为继。这些结构性矛盾表明，传统压实质量控制模式已难以适应现代公路工程高质量、高效率、智能化的发展要求，亟需一种能够将“检测”融入“施工过程”本身的新范式。

2 压实度实时监测技术：连续压实控制（CCC）原理与系统

2.1 连续压实控制的技术内涵

连续压实控制（Continuous Compaction Control, CCC）技术的核心理念在于将压路机从单纯的施工设备转变为集施工与检测于一体的智能终端。在压实作业过程中，压路机振动轮与下方土体构成一个动态耦合系统，土体

的刚度变化会直接反映在其对振动激励的响应特性上。CCC系统正是通过高精度传感器实时捕捉这一动力学响应，并将其转化为可量化的压实评价指标，从而实现对整个碾压面的连续、无损、全覆盖监测。这种“边压边测”的模式彻底打破了传统检测的时间与空间限制，使质量控制真正嵌入施工流程之中。

2.2 CCC系统的构成与工作机理

一套完整的CCC系统以智能压路机为载体，集成了多类高精度传感器与数据处理单元。加速度传感器通常安装于振动轮内部，用于采集垂直与水平方向的振动加速度信号；位移传感器（如线性可变差动变压器LVDT）则测量振动轮与机架之间的相对位移，反映土体对振动的阻尼特性。同时，高精度RTK-GPS模块为每一组传感数据赋予精确的地理坐标，确保压实状态可与空间位置一一对应。所有原始数据由车载数据采集单元（DAU）进行实时滤波、同步与初步处理，并通过无线通信模块上传至云端管理平台。在此基础上，系统依据预设算法计算出如压实计量值（CMV）或连续压实控制值（CCV）等核心指标。其中，CMV通过分析振动加速度信号中基频与二次谐波的幅值比，并结合压路机行进速度进行修正，其数值大小与土体刚度呈正相关；而CCV则更侧重于土体非线性响应的频谱特征，对不同土质的适应性更强。这些指标虽为无量纲量，但通过现场标定可建立其与传统压实度之间的统计关系，从而为施工提供直观的质量参考。

3 压实度智能预测与控制模型

3.1 多源信息融合与特征提取

尽管CMV、CCV等指标能有效反映土体刚度变化，但其与真实压实度之间的映射关系受多种因素影响，包括土体类型、含水率、压路机工作参数及环境条件等。因此，单一指标难以满足高精度预测需求。现代智能压实系统趋向于构建多源信息融合框架，将压路机自身的运行参数（如激振频率、振幅、行进速度）、环境传感器数据（温湿度）、以及前期地质勘探信息（如通过近地表地球物理方法预判的土层分布）纳入统一分析体系^[2]。通过对原始传感信号进行时域、频域及时频域变换（如傅里叶变换、小波分析），可提取出更能表征压实状态的高维特征向量，为后续建模奠定数据基础。

3.2 基于机器学习的压实度预测建模

在获得高质量特征数据后，可利用机器学习算法建立从多源传感特征到真实压实度的非线性映射模型。实践中，首先需在施工现场选取若干代表性区域，同步采集CCC系统数据与传统灌砂法检测结果，形成训练样本

集。随后，可采用支持向量回归（SVR）处理小样本非线性问题，或利用随机森林（RF）模型挖掘特征间的复杂交互关系并评估各输入变量的重要性。对于具有明显时序依赖性的压实过程，长短期记忆网络（LSTM）等深度学习模型能更好地捕捉碾压遍数累积对压实度的动态影响。经训练与验证后，该模型可部署于车载或云端平台，在施工过程中实时预测每一空间位置的压实度，并以彩色热力图形式在管理界面上动态呈现，使施工管理人员能够直观掌握全场压实质量分布。

3.3 智能压实控制策略的实施

基于高精度的压实度预测结果，系统可进一步实现从“监测”到“控制”的跃升。当识别出局部区域压实度未达设计要求时，系统可自动生成补压指令，通过车载终端或增强现实（AR）设备引导操作手精准覆盖薄弱区域，避免传统“全覆盖多遍碾压”造成的能源浪费与过度压实风险。更进一步，系统可根据土体实时响应动态调整压路机的工作参数——例如，在软弱区域自动提高激振频率以增强压实效果，在已接近密实区域则降低振幅以保护土体结构^[3]。此外，结合路径规划算法，系统还能优化压路机的行驶轨迹，确保补压作业高效、无遗漏。这种以数据驱动的自适应控制机制，显著提升了压实作业的精准性与智能化水平。

4 数字孪生驱动的压实过程闭环管控

4.1 压实数字孪生体的构建逻辑

数字孪生技术为压实过程的精细化管理提供了全新范式。所谓压实数字孪生体，是指在虚拟空间中构建一个与物理施工现场完全同步的数字化映射体，它不仅包含路基的几何模型与设计参数，还实时集成了地质信息、施工进度、设备状态及多源传感数据流。该孪生体通过内置的物理模型（如土体本构模型、压路机动力学模型）与数据驱动模型（如压实度预测AI模型），能够对物理世界的压实行为进行高保真模拟与预测。

4.2 闭环控制机制的实现路径

在压实数字孪生平台上，质量控制形成了完整的“感知—分析—决策—执行”闭环。施工过程中，压路机上的传感器持续将振动、位移、位置等数据上传至孪生体，实现物理状态的实时映射；孪生体内的AI模型随即对数据进行分析，预测全场压实度分布并识别异常区域；基于预设的质量目标与优化算法，系统自动生成最优控制策略，如调整碾压遍数、修改激振参数或规划补压路径；最终，这些决策指令通过通信网络下发至压路机的控制系统或操作人员终端，驱动物理世界执行相应动作^[4]。执行结果又作为新的感知数据反馈回孪生体，形

成持续迭代优化的闭环。这种机制将质量控制从被动的事后检验转变为主动的事中干预，从根本上保障了压实质量的均匀性与可靠性。

5 工程应用案例分析

5.1 项目实施与技术部署

在某高速公路改扩建工程K15+200至K16+500段的路基填筑施工中，项目团队部署了一套完整的压实度实时监测与智能控制系统。该段填料为粉质黏土，设计压实度要求不低于96%。施工方配备了两台搭载CCC系统的智能压路机，并在现场搭建了专用无线局域网，确保传感数据可实时回传至基于Web开发的压实质量管理平台。为建立可靠的预测模型，项目初期选取了50个具有代表性的点位，同步进行灌砂法检测与CCC数据采集，利用随机森林算法训练了CMV等特征与实测压实度之间的映射关系。

5.2 应用成效与价值体现

系统投入使用后，显著提升了施工质量与效率。管理平台上的压实度热力图实现了对整个作业面的100%覆盖监测，成功识别出三处传统抽检极易遗漏的局部薄弱区域，并及时引导压路机进行了精准补压。由于避免了盲目、重复的碾压作业，整体压实施工时间缩短约15%，燃油消耗相应降低。最终验收结果显示，该段路基压实度合格率由以往项目的92%提升至99.5%，且变异系数显著减小，表明压实均匀性大幅改善。同时，灌砂法检测点数量减少了70%，既节约了检测成本，又缩短了工期。

6 挑战与展望

尽管压实度实时监测与智能控制技术展现出巨大潜力，其推广应用仍面临若干挑战。首先，现有预测模型对特定工况（如特定土质、含水率范围）依赖较强，跨项目泛化能力有限，需频繁重新标定，增加了应用复杂度。其次，现行《公路路基施工技术规范》尚未将CCC指标纳入正式验收体系，导致施工单位在采用新技术时存在合规性顾虑。此外，不同厂商的智能压路机与软件平台之间缺乏统一的数据接口标准，系统集成难度较大。最后，智能压路机及配套系统的初期投入成本较高，对中小型施工企业构成一定门槛。

面向未来，该领域的发展应聚焦于几个关键方向：一是研发具备小样本学习与迁移学习能力的AI模型，提升其在不同地质与施工条件下的适应性；二是加快行业标准体系建设，明确CCC技术的应用条件、标定流程与验收准则，为其大规模推广扫清制度障碍；三是深化5G与北斗高精度定位技术的融合应用，实现更低延迟、更高精度的数据传输与设备协同；四是探索多台压实机器人集群协同作业模式，结合群体智能算法，实现超大规模路基填筑的无人化、自主化智能压实。这些方向的突破将有力推动公路工程向更高水平的智能制造迈进。

7 结语

本文系统研究了公路工程路基压实度实时监测与智能控制技术。研究表明，传统压实度检测方法因其滞后性、破坏性与点状采样特性，已难以满足现代公路工程高质量、高效率的建设需求。基于智能压路机的连续压实控制（CCC）技术通过实时采集振动轮-土体系统的动力学响应，可实现对压实过程的全覆盖、无损监测。进一步融合多源传感信息与机器学习算法，能够构建高精度的压实度智能预测模型，将CCC指标有效转化为工程可理解的质量指标。在此基础上，借助数字孪生技术构建“感知—分析—决策—执行”闭环，可实现压实作业的自适应优化与精准控制。综上所述，路基压实度实时监测与智能控制技术代表了公路工程质量控制的发展方向，随着相关技术的成熟与标准的完善，其必将在我国交通强国建设中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 姜方林.公路工程路基压实质量控制要点与检测方法[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第三届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.杭州兴瑞路桥工程有限公司;,2025:338-340.
- [2] 张来源,姜丛建.公路工程中路基路面压实度智能化检测技术研究[J].交通科技与管理,2025,6(20):67-69.
- [3] 李云.公路工程路基填方施工技术要点及压实度控制研究[J].建筑机械,2025,(10):270-273.
- [4] 苟红军.公路路基施工过程的压实度控制方法[J].大众标准化,2025,(13):96-98.