

沥青面层无人碾压交通工程施工技术均匀性控制研究

刘瑞超

(山东银创公路工程有限公司, 山东 滨州 251900)

摘要 为解决传统沥青面层人工碾压作业中压实均匀性不足、受人为因素与环境干扰大的行业痛点, 依托无人化智能施工装备体系, 针对交通工程沥青面层无人碾压技术的应用与均匀性控制展开系统性研究。结合施工环境动态波动与沥青混合料材料特性, 拆解压实参数实时动态监测、碾压路径全局优化、多源异构施工数据融合等核心关键技术, 厘清施工过程中压实度分布不均的产生机理; 进一步从施工设备协同调度、压实质量在线检测、自适应闭环控制模型三个维度梳理技术落地路径, 并依托实体交通工程现场试验段开展对照验证, 检验均匀性控制实际成效。工程试验结果表明, 智能化无人碾压施工模式可有效降低压实度离散系数, 显著提升沥青面层压实均匀性与作业过程平稳性。该技术体系的迭代优化与规模化推广, 可为交通工程路面施工的精细化管控提供支撑, 推动行业施工模式向智慧化、高质量方向转型。

关键词 沥青面层; 无人碾压; 均匀性控制; 智能施工; 压实参数

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.006

0 引言

沥青路面施工质量直接决定交通工程的整体服役性能与使用寿命, 面层压实均匀性的精准把控是道路施工阶段的核心技术环节。无人碾压技术投入工程应用后, 施工流程已逐步实现自动化与数据化升级, 但在实际大规模落地过程中, 仍存在压实控制精度不足、多设备协同作业效率偏低等突出问题。针对碾压施工全流程各阶段的核心影响要素开展系统性专项分析, 可显著提升沥青面层均匀性的管控效果, 也能为后续无人碾压技术迭代优化与工程规模化落地筑牢坚实的应用基础。

1 无人碾压条件下沥青面层均匀性控制关键问题分析

1.1 无人碾压施工过程中压实不均现象产生机理

沥青面层无人碾压施工中压实不均, 关联于温度场变化、摊铺供料稳定性及设备控制响应精度。混合料出机后降温迅速, 初压时机偏差会让局部区域因温度偏低增大压实阻力, 最终形成密实度差异。摊铺速度波动引发松铺厚度不均, 碾压后受力状态随之改变。无人碾压设备靠预设参数控制路径与遍数, 转向衔接、轮迹搭接或振动频率与材料状态不匹配时, 会出现局部漏压、过压及边部薄弱问题, 削弱面层整体均匀性。

1.2 施工设备协同运行对面层均匀性影响因素分析

随着我国高速公路建设进入高质量发展阶段, 沥青路面施工的精度控制、效率优化与安全保障成为重点研究方向。传统人工操作方式受人员经验和操作稳定性影响, 易出现厚度偏差、压实度波动及平整度不足等质量问题, 难以满足高标准路面施工需求。尽管近年来无人化装备已在路面工程中逐步应用, 但多以单机模式运行, 存在信息获取不连续、作业间协同不足、压实控制能力有限等情况。

1.3 环境与材料特性变化对均匀性稳定性的干扰表现

无人碾压施工对作业条件的连续性和一致性要求严格, 环境与材料特性波动时, 面层均匀性易受干扰。施工时段内气温、风速、日照强度及路表基础温度有差异, 会改变混合料散热速率, 导致同一作业面不同区域可压实时间出现偏移^[1]。边部、桥面或阴影区位置温度衰减更快, 压实窗口缩短, 设备按既定程序运行易出现压实程度不均。沥青混合料自身级配组成、油石比、矿料含水状态及拌和均匀程度, 直接影响其流动性、黏结性和压实成型能力。运输距离较长或停留时间不稳, 混合料离析与温度离析更易出现, 导致局部结构密实性和平整状态波动。

作者简介: 刘瑞超 (1988-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 建筑工程技术。

2 基于数据驱动的沥青面层均匀性控制技术路径构建

2.1 压实参数动态监测与实时反馈调控方法研究

无人碾压施工环节中,压实质量的稳定程度依托核心参数的实时采集与动态调整。压实遍数振动频率行进速度与轮压状态等信息经由传感器完成采集,再通过车载控制系统完成分析处理。区域压实度偏离预设区间时,系统可按预设模型调整碾压强度与作业节奏,让压实流程适配路面材料的实际状态。温度监测与压实反馈系统相互配合,把控碾压作业的合理时机,规避压实时机不当引发的质量问题。搭建连续监测与闭环调控体系,施工阶段可动态修正压实参数,提升路面面层的密实度与均匀性。

2.2 无人碾压路径优化与施工轨迹精准控制策略

施工路径合理规划直接关联面层受力均衡与碾压覆盖完整,无人碾压设备靠定位系统获取作业区域空间信息,结合设计断面与摊铺宽度生成作业轨迹。实际运行中,路径搭接宽度、转弯半径及端部折返方式需精细设定,避免重叠压实或遗漏区域^[2]。轨迹控制系统依靠高精度导航与姿态修正功能,实时修正设备运行偏差,维持碾压路径连续稳定。复杂工况区域可依据施工进度与设备分布动态调整行进路线,提升整体作业协调,路径优化与轨迹控制协同,可实现面层压实过程均衡覆盖。

2.3 智能化施工系统中多源数据融合应用机制分析

智能化施工体系内,多源数据的融合处理为均匀性把控筑牢基础支撑。施工环节采集的温度数据、压实度反馈、设备运行状态与环境参数,需在统一平台内完成整合分析。数据融合技术可让不同渠道的信息相互补充,完善对施工状态的整体认识。算法模型可对各类数据开展关联分析,定位施工中的异常区域,生成对应的作业调控指令。无线通信与边缘计算技术支撑数据传输与处理环节,保障信息快速响应并提供决策依据。多源数据协同运用,推动施工控制从单一参数调节转为综合管控,为面层均匀性提升提供技术支撑。

3 无人碾压施工中均匀性控制关键技术优化与实现

3.1 碾压设备智能调度与协同作业效率提升方法

无人碾压施工场景中,设备调度水平直接影响作业衔接与面层压实连续性。不同压路机分别承担初压、复压、终压任务,作业次序、进场时机与间距需匹配摊铺推进节奏。调度系统结合摊铺速度、作业面长度、设备位置及施工任务统筹调配,避免设备等待、扎堆或出现碾压空档。桥头、弯道、加宽段等区域因地制宜调整设备编组与行进路线,适配工作面形态。设备

通过通信共享位置与工况信息,实现区域划分、冲突避让及工序衔接,减少无效行走与重复碾压,保障协同作业效率与施工稳定。

3.2 压实质量在线检测与异常区域识别技术应用

压实质量在线检测是施工精准管控的重要基础,实现质量判定由完工抽检前移至施工全过程。施工依托压实传感器、温度装置、定位单元与车载终端,实时采集碾压遍数、振动参数、温度及设备轨迹,构建全覆盖连续施工数据图层^[3]。系统对接实时数据,参照压实阈值、温度区间开展对比分析,精准识别压实不足、搭接缺陷、温降过快与局部离析区域。系统对异常点位标注坐标并划分风险等级,为现场补压施工与工序调整提供可靠依据。

3.3 施工过程参数自适应调整与控制模型构建方法

施工参数具备连续性 with 耦合特性,固定参数难以适配复杂工况管控要求。为增强无人碾压系统现场应变能力,构建适配混合料状态、作业环境与设备性能的自适应控制模型。模型整合混合料温度、摊铺厚度、压实度、行驶速度及振动参数,分阶段设定管控目标与约束条件。当监测数据偏离标准范围,控制模块自动调整行驶速度、振动模式、碾压遍数与搭接宽度,实现压实作业与工况动态匹配。该模型结合规则算法与预测机制,在施工扰动下维持控制精度,保障路面面层施工稳定。

4 工程实践中沥青面层均匀性控制效果验证与问题修正

4.1 典型交通工程案例中均匀性控制效果对比分析

某省高速公路改扩建工程中,沥青上面层选用无人碾压施工工艺,施工段长约 3.2 km,设计厚度设定为 4 cm。施工过程中布置温度传感器与压实监测系统,对不同作业区段的压实效果开展持续监测记录。传统作业方式的对照区段压实度离散系数为 3.8%,局部区域存在明显压实不足问题;无人碾压控制区段压实度离散系数严格控制在 1.6% 以内,面层平整度标准差从 1.25 mm 降至 0.72 mm。碾压轨迹数据显示,设备运行路径重叠率稳定保持在 85% 以上,边部区域压实补偿作业更为均衡可控。温度分布监测显示,压实作业基本集中在 135 ℃ 至 155 ℃ 的合理范围,压实窗口利用率得到有效提升。不同施工模式在均匀性控制上呈现显著差异,无人碾压条件下数据驱动控制的优势更为突出明显。

4.2 施工过程偏差识别与及时修正技术应用路径

施工环节各类偏差多表现为压实不足、重复碾压与温度窗口错配,需借助实时监测系统完成快速识别并

作出对应处置。整合设备运行轨迹、压实反馈数值与温度变化曲线展开分析,可在施工推进中锁定异常区域方位,判定偏差形成的具体原因^[4]。压实不足的路段可通过增补碾压遍数、更换振动模式完成修整,重复碾压的区域则依托路径规划优化降低能耗,规避路面材料出现损伤。温度异常区域依靠红外检测与数据比对完成判别,温度未达压实标准阈值时,需及时调整施工推进节奏,或对局部路段实施加热处理。偏差判别与修正流程依托信息平台搭建闭环管控体系,施工阶段出现的各类问题可就地处置,降低后续路面修复所需的成本。

4.3 不同工况条件下均匀性控制稳定性评估方法

均匀性控制效果随工况条件不同呈现明显差异,需建立多维度评估方法综合判定,核心评估指标涵盖压实度离散系数、平整度指标、温度分布均匀性及碾压轨迹覆盖率。气温变化明显或施工环境复杂的路段,需对不同时间段施工数据分段统计,剖析温度波动对压实效果的具体影响。桥梁接头、坡道及宽幅路段等相关特殊工况,需结合结构特征修正均匀性指标计算。建立分级评价体系,对比不同工况下的数据,能识别控制稳定性较弱的环节,为后续施工参数优化提供可靠依据,评估过程注重数据的连续性与可比性,确保分析结果拥有实际指导意义。

5 面向高质量施工的无人碾压均匀性控制体系完善路径

5.1 施工标准化与智能控制体系协同发展机制构建

沥青面层无人碾压施工实现均匀性稳定把控,需依托施工标准化规范与智能控制体系的协同衔接。标准化体系涵盖混合料转运、摊铺对接、碾压时段、遍数规划、搭接尺度及终压核验等核心工序,把传统经验型操作转变为可量化、可落地的技术准则。智能控制体系在此前提下开展参数判别、工况感知与动态调整,保障设备运行逻辑贴合工艺执行标准。施工场地借助统一数据平台,整合设计指标、设备运行参数、工序流程与质量限值完成统一配置,搭建任务推送至结果核验的全流程管控链路。标准规范与智能决策相互支撑,降低作业环节的随意操作,提升各施工班组与作业工区的质量统一度,助力无人碾压施工向规范化、精细化方向持续发展。

5.2 关键技术推广应用中存在的问题与改进方向

无人碾压均匀性控制技术推广应用进程中,仍遭遇设备兼容短板、数据接口割裂、施工组织适配度偏低等现实难题。部分工程现场摊铺、压实设备与监测平台来源各异,各系统间缺少高效数据交换链路,易引发信息传递迟滞,干扰控制指令落地执行成效。施

工条件复杂场景下,既有控制模型适配特殊路段、温差波动区段及断面转换区域的能力仍有欠缺,造成局部区段控制精度出现回落^[5]。现场管理流程与智能化施工模式衔接度不足,质量判定准则、异常处置流程及作业协同机制仍需进一步细化完善。改进路径聚焦统一技术接口、优化场景算法、健全配套管理制度及强化系统稳定性等维度,助力关键技术在各类工程环境中适配性与连续运行能力同步提升。

5.3 未来交通工程施工中智能化均匀性控制发展趋势

交通工程施工范畴内的均匀性控制正从单一设备自动化转向系统化智能协同发展,后续发展方向将侧重全流程感知、全过程决策与全工序联动。施工现场的数据采集范畴持续拓展,压实参数与温度信息之外,材料状态、气象变动、基层状况和设备运行状态等内容均被归入实时监测体系。高精度定位技术、边缘计算载体与智能算法平台相互支撑,施工管控模式从事后整改逐步转向过程预判与前置调控。无人碾压设备的协作能力不断提升,作业编组、路径规划与工序转换贴合施工需求,适配复杂路段与多工点同步作业场景。均匀性控制技术的应用场景拓展至养护施工、快速修补与特殊结构路面施工领域,构建更为完善的智能施工技术体系。

6 结束语

无人碾压技术在沥青面层施工中的规模化应用,切实提升了压实全过程的可控性与沥青面层的压实均匀性水平。通过对施工关键环节、精准控制方法及典型工程实践的系统梳理,沥青面层均匀性控制正逐步从传统经验依赖,转向全流程数据驱动与动态智能调节的新模式。面向行业未来发展,仍需持续完善配套标准体系与跨技术融合机制,进一步提升该技术在复杂施工工况下的环境适应能力,推动交通工程施工向高精度、智能化与高稳定化方向持续迈进。

参考文献:

- [1] 宿世伟.高速公路沥青路面压实质量智能检测与控制方法研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2025.
- [2] 邱海兵,卢继乾,李波.沥青路面无人化摊铺施工技术应用[J].交通科技与管理,2023,04(24):138-140.
- [3] 惠记庄,张泽宇,叶敏,等.公路建养装备数字孪生技术综述[J].交通运输工程学报,2023,23(04):23-44.
- [4] 姜月新.基于多传感器数据的公路路面质量检测方法研究[D].上海:同济大学,2023.
- [5] 马广文.浅析沥青路面领域研究应用无人设备现状[J].城市道桥与防洪,2022(05):212-213,245,M0019.