

隧道沥青路面无人化智慧施工均质化应用研究

赵勇¹, 康胜清¹, 牟存玉¹, 陈兆南², 王远航²

(1. 重庆高速建设管理有限公司, 重庆市 404100; 2. 中路交科检测技术有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为破解隧道内沥青路面施工普遍存在数字化监控信号弱、施工空间狭小及常规有人施工均质化不足等难题, 开展了隧道无人化智慧施工技术应用研究, 基于数字化监控技术, 采用PWL(允许限值内百分率, Percent Within Limits, PWL)评价方法对沥青混合料拌和运输、摊铺碾压施工进行评价。结果表明, 沥青混合料施工关键参数数字化监控PWL质量评分均达到90以上, 与常规有人施工相比, 无人化智慧施工工后理论压实度和构造深度指标检测变异系数均较小, PWL质量评分为100, 验证了无人化智慧施工有助于均质化控制, 为无人化智慧施工在隧道沥青路面规模化应用提供了理论依据。

关键词: 隧道; 无人化智慧施工; 数字化监控; PWL评价; 均质化

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0321-04

Research on Homogenization Application of Unmanned Intelligent Construction of Tunnel Asphalt Pavement

ZHAO Yong¹, KANG Shengqing¹, MOU Cunyu¹, CHEN Zhaonan², WANG Yuanhang²

(1. Chongqing Expressway Construction Management Co., Ltd., Chongqing 404100, China; 2. Zhonglu Jiaoke Inspection Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to solve the common problems in asphalt pavement construction in tunnels, such as weak digital monitoring signals, small construction spaces, and insufficient homogenization of conventional manned construction, the research on the application of unmanned smart construction technology in tunnels is carried out. Based on digital monitoring technology, the PWL (percent within limits) evaluation method is used to evaluate the asphalt mixture mixing and transportation, paving and rolling construction. The results show that the PWL quality scores of the digital monitoring of key parameters of asphalt mixture construction have reached above 90. Compared with conventional manned construction, the variation coefficients of theoretical compaction and structural depth index detection after unmanned smart construction are smaller, and the PWL quality score is 100, which verifies that unmanned smart construction is helpful for homogenization control and provides a theoretical basis for the large-scale application of unmanned smart construction in tunnel asphalt pavement.

Keywords: tunnel; unmanned smart construction; digital monitoring; PWL evaluation; homogenization

0 引言

2019年, 中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》^[1], 提出推广交通装备及成套技术装备智能化、数字化; 交通运输部印发的《关于做好平安百年品质工程创建示范 推动交通运输基础设施建设高质量发展的指导意见》(交安监发〔2024〕6号)也提出

了探索推动智能化沥青路面摊铺碾压设备群组应用, 提升路面施工质量水平^[2-3]。目前, 国内外隧道无人化施工研究主要为隧道盾构和掌子面无人化驾驶运输等, 而在隧道沥青铺装无人化施工方面研究较少。隧道沥青路面普遍存在施工空间狭小^[4], 隧道内沥青烟大、光线较暗、行车视线较差以及常规有人施工均质化控制难度大等问题^[5], 影响隧道内沥青路面耐久性, 并且隧道内数字化管控信号弱, 施工过程中难以实现数字化实时监控, 制约了无人化智慧施工推广应用。基于此, 本文提出了一种结合SLAM隧道内激光混合导航系统的无人化智慧施工解决方案, 依托某公路工程开展隧道沥青路面无人化智慧施工试点应用, 对比常规有人施工工艺, 基于

收稿日期: 2026-03-20

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BA2023104)

作者简介: 赵勇(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高速公路建设与管理工作。

通信作者: 陈兆南(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事路面材料研究与施工技术咨询工作。电子信箱: 1056311803@qq.com

数字化监控和无人化智慧施工技术,以沥青上面层 SMA-13 为例,建立“数字化监控-无人化智慧施工-工后均质化检测”三维评价体系,采用 PWL(允许限值内百分率,Percent Within Limits, PWL)质量评价方法对沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压工艺关键参数进行评分,并研究无人化智慧施工工后路面实体质量现场理论压实度和铺面构造深度检测指标均质化控制情况。研究结果对解决隧道内沥青路面常规有人施工均质化和耐久性不足问题具有重要的指导意义,为沥青路面数字化监控与无人化智慧施工融合发展提供技术支撑。

1 隧道无人化智慧施工方案

无人化智慧施工主要基于北斗高精度定位技术,实现施工碾压轨迹精准控制,有效避免有人施工过程中常出现的漏压、过压、欠压、超速等问题,可实现摊铺速度与碾压速度最优匹配^[6-9],大幅度提升沥青路面施工碾压均匀性,更有利于施工安全管控。目前,该技术已在我国大部分地区高等级公路新建、改扩建工程以及养护大中修工程的路基和桥梁段沥青路面施工中得到成功应用。但是,该技术在隧道段沥青路面施工中应用较少,主要由于隧道内施工环境复杂,存在通信传输和导航精确定位难题,经常出现遥控信号传输延时,无法实现摊铺机和压路机等机械设备远程精准遥控,容易造成安全事故。本文主要采用“卫星导航+SLAM激光雷达”融合定位解决方案:激光雷达线束为16线,波长为905 nm,激光等级为class1,在隧道外架设基站,隧道内架设信号接收杆,架设间距为20 m,有效解决隧道内无人施工期间摊铺机和压路机通信正常传输和接收的问题。摊铺机在作业中通过GPS或者雷达识别道路工作宽度,通过摊铺机中的工控机规划压路机工作轨迹,并通过网络分发给压路机。摊铺机中的工控机在压路机前方提前建图,并通过网络分发建图结果。分发的地图为新增压缩后的地图数据,可实现在小带宽的网络中传输^[10](见图1、图2)。压路机毫米波雷达工作频率为30~300 GHz,定位精度小于1 m。

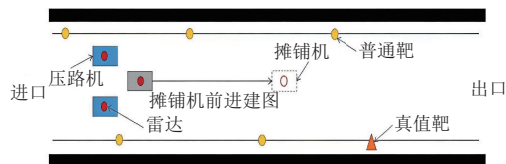


图1 隧道无人化智慧施工体系示意图



图2 隧道无人化智慧施工现场照片

2 混合料数字化监控质量评价

采用在无人化智慧施工机械设备上安装数字化监控系统数据采集硬件设备的方案进行硬件融合,包括红外温度传感器、GNSS接收机定位终端及方盘天线等^[11],实时采集沥青混合料拌和油石比、级配、运输温度、摊铺温度、摊铺速度、碾压温度和碾压速度等关键参数数据^[12],逐步实现沥青路面施工数字化监控系统与无人化智慧施工技术的自动化→集群化→智慧化发展。本文采用PWL评价方法对沥青混合料均匀性以及施工工艺控制关键参数稳定性进行评价^[13]。PWL定义为“满足规范百分比”,相比合格率评价指标,PWL考虑了评价指标数据的变异性,对沥青路面施工稳定性敏感。通常,PWL由数字化监控数据的平均值和标准差计算得到^[14],能够有效结合样本规范上下限、均值、标准差三大指标,更科学地评价工程质量。PWL质量评分计算公式为:

$$P_{WL} = P_U + P_L - 100 \quad (1)$$

式中: P_{WL} 为允许限值内百分率; P_U 为满足上限要求的样本的百分率; P_L 为满足下限要求的样本的百分率。

2.1 拌和运输质量评价

沥青拌和数字化监控硬件设备主要有数据采集发送器和采集软件,在沥青拌和楼控制电脑安装采集软件,直接获取底层数据并扫描新数据,实时监控每盘沥青混合料的级配、油石比等关键参数波动情况。沥青混合料运输数字化监控硬件设备主要有RFID识别器和电子标签卡,在每辆运输车驾驶室侧厢和料斗尾厢安装RFID电子标牌,对运输车车牌号码进行记录,实时监控每辆运输车混合料运输温度关键参数波动情况。沥青混合料拌和运输工艺关键参数质量评价结果见表1。

从表1可以看出,隧道沥青上面层SMA-13改性沥青混合料拌和数字化监控油石比和关键筛孔通过

表 1 混合料拌和运输质量评价结果

项目类型	油石比/%	关键筛孔尺寸/mm 和关键筛孔通过率/%				运输温度/℃
		13.2	4.75	2.36	0.075	
平均值	6.02	92.25	25.90	20.72	9.95	179
标准差	0.044	0.148	0.435	0.335	0.091	1.594
设计值	6.0	92.2	25.7	20.8	9.6	180
PWL 评分	99	100	100	100	100	99

率两个参数的 PWL 质量评分均达到 99 及以上,说明沥青拌和楼混合料生产称量系统控制稳定性较好,沥青混合料拌和均匀。沥青混合料运输车采用车厢顶部定制化“油布 + 棉被 + 油布”以及侧面加装保温板等六面保温措施,混合料运输温度关键参数 PWL 质量评分为 99,保证了沥青混合料温度的均匀性。沥青混合料拌和运输工艺关键参数质量稳定性是确保前场摊铺碾压均质化的基础,施工过程中应重视沥青拌和楼生产的稳定性以及运输车的保温措施。

2.2 摊铺碾压质量评价

沥青混合料摊铺碾压数字化监控硬件设备主要有 GNSS 接收机、MC100 主机、温度传感器和 LED 显示屏等。在摊铺机上安装高精度 GNSS 定位板卡,获得摊铺位置及摊铺速度信息;在摊铺机熨平板处安装多个温度传感器,实时采集同一摊铺断面不同位置的温度信息情况。在压路机上安装流动站,现场基准站通过数据链将其观测值和测站坐标信息一起传送给流动站^[15-16],获取压实轨迹信息;在压路机上加装红外传感器,实时监控碾压温度;在压路机驾驶室内安装碾压互联平板电脑,便于操作手实时查看是否有漏压、超压、欠压的情况,确保碾压均匀性。沥青混合料摊铺碾压工艺关键参数质量评价结果见表 2。

表 2 混合料摊铺碾压质量评价结果

项目类型	混合料摊铺		混合料碾压	
	温度/℃	速度/(m·min ⁻¹)	温度/℃	速度/(m·min ⁻¹)
平均值	180.74	2.53	155.12	3.09
标准差	2.99	0.17	2.93	0.129
设计上限	185	3	170	4
设计下限	170	2	150	2
PWL 评分	92	100	95.5	100

从表 2 可以看出,隧道沥青上面层 SMA-13 改性沥青混合料摊铺碾压 PWL 质量评分均达到 90 以上,其中摊铺速度和碾压速度 PWL 质量评分为 100,能够做到缓慢、匀速和连续摊铺碾压作业。无人化智慧施工主要通过算法保障无人化路面机械彼此之间快速高效地进行协调配合,沥青面层压实采用梯形

推进策略,初压车辆紧跟摊铺机,钢轮与胶轮间存在重叠区域,可保证前后两个梯队及时消除对方停车轮迹,实现领航-跟随法压实机群同进同退。这说明无人化智慧施工对沥青路面施工均匀性质量控制具有重要的作用。

3 工后路面均质化检测评价

为进一步验证无人化智慧施工路面均质化质量,采用现场理论压实度和构造深度两项评价指标,选取某项目隧道内沥青上面层 SMA-13,采用无人化施工路段与常规有人施工路段的检测结果进行比对。必须确保无人化施工路段和常规有人施工路段在原材料、配合比、施工设备、施工条件等方面均保持一致,理论压实度与构造深度检测点位均选择 5 个不同的断面,理论压实度选择竖向均匀分布的 5 个点,构造深度为理论压实度相对应的位置(见图 3)。

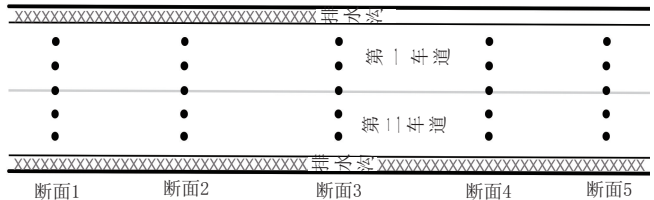


图 3 路面均质化检测点示意图

3.1 理论压实度指标

理论压实度指标采用无核密度仪快速检测方法,利用电磁波来检测沥青路面的压实度,即先由发射器发射电磁波,电磁波在沥青混凝土传播后被接收器接收,再利用电子元件将介电常数转化为密度^[17],将混合料理论最大相对密度输入无核密度仪,即可将检测密度自动计算成理论压实度。理论压实度检测结果如图 4、图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知,无人化智慧施工和常规有人施工的理论压实度平均值均为 95.2%,但无人化智慧施工理论压实度变异系数为 0.40%,常规有人施工理论压实度的变异系数为 0.72%,无人化智慧施工路段理论压实度变异系数偏小,且无人施工理论压实度 PWL 质量评分为 100,有人常规施工理论压实度

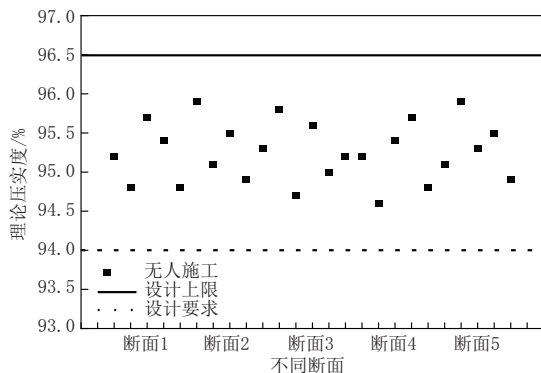


图4 无人化智慧施工路段理论压实度检测结果图

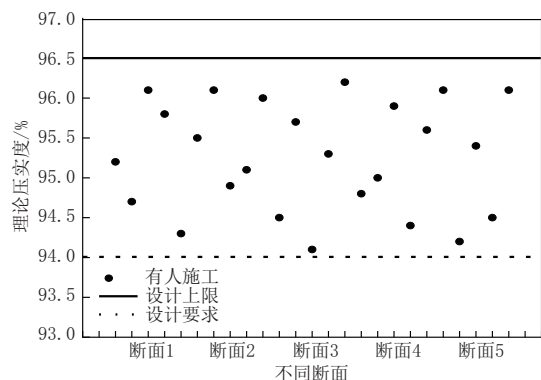


图5 常规有人施工路段理论压实度检测结果图

PWL质量评分为94,故无人施工碾压均匀性总体上优于常规有人施工路段。

3.2 构造深度指标

构造深度指标采用激光构造深度仪快速检测方法,该方法具有检测速度快、准确性高等特点。构造深度检测结果如图6所示。

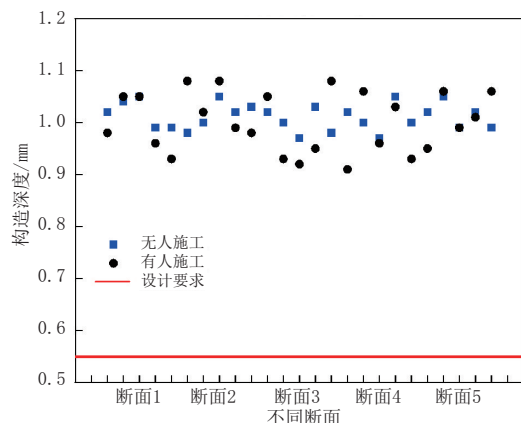


图6 无人化智慧施工与常规有人施工路段构造深度指标统计分布图

从图6构造深度指标统计分布图来看,无人化智慧施工路段相比常规有人施工路段构造深度指标检测数据更聚集,主要分布在0.90~1.10 mm之间,且无人化智慧施工路段构造深度指标检测平均值为1.01 mm,变异系数2.53%,常规有人施工路段构造深度指标检测平均值为1.00 mm,变异系数5.67%。从

构造深度指标PWL质量评分结果来看,无人化智慧施工PWL质量评分为100,常规有人施工PWL质量评分为98,故无人化智慧施工相较于常规有人施工均质化控制方面优势更明显,可显著提升沥青路面施工均匀性。

4 结 语

为解决当前隧道内信号弱难以实现无人化智慧施工以及沥青路面常规有人施工均质化不足的问题,本文搭建了新一代隧道无人化智慧施工融合定位解决方案,基于沥青路面施工数字化监控,采用PWL质量评价方法对隧道沥青路面施工均质化进行综合检测评价。主要结论如下:

(1)采用SLAM激光混合导航与多机协同控制技术,破解了隧道无信号、空间受限的施工瓶颈。通过栅格化离散不规则施工区域、优化梯形推进等多机协同策略,结合摊压进度同步模型动态匹配设备速度,实现无人集群施工的精准协同与连续推进,解决了人工施工难以动态适配的问题。

(2)基于沥青路面施工数值化监控系统,采用PWL质量评价方法对沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压施工工艺关键参数进行质量评分。混合料拌和油石比和级配、运输温度关键参数PWL质量评分均达到99及以上,沥青路面摊铺温度和速度、碾压温度和速度关键参数PWL质量评分均达到90及以上,说明沥青混合料拌和运输生产质量稳定性控制较好,可保障施工现场摊铺碾压质量控制,同时无人化智慧施工摊铺、碾压工艺均匀性控制方面更优异。

(3)无人化智慧施工工后路面理论压实度指标检测变异系数0.40%,构造深度指标检测指标变异系数2.53%,PWL质量评分均为100;常规有人施工工后路面理论压实度指标检测变异系数0.72%,PWL质量评分为94,构造深度指标检测指标变异系数5.67%,PWL质量评分为98。这验证了无人化智慧施工对沥青路面均质化控制具有重要实践意义,实现了隧道沥青路面从“人工操控”向“智能管控”的转型。全过程施工均质化技术方案具有较强的适用性和推广价值,可为交通基础设施智能化施工提供参考,助力实现平安百年品质工程高质量发展。

参考文献:

- [1] 陈显福.关于西香高速打造平安百年品质工程的认识与思考[J].低碳世界,2024,14(8):136-138.
- [2] 交通运输部.关于做好平安百年品质工程创建示范推动交通运输基础设施建设高质量发展的指导意见[Z].北京:交通运输部,

(下转第351页)