

# 长隧道沥青路面无人施工技术研究与应用

王 伟

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

**摘 要:** 为了解决长隧道的特殊工况沥青路面无人摊铺施工难题,研究并实践了一套基于智能化、无人化技术的沥青路面施工解决方案,该方案整合了高精度定位(惯导)、环境感知(环境声音回波)、集群协同控制等技术,开发出适用于无人驾驶摊铺机、压路机的协同作业系统。通过在上海北横通道工程中的实际应用后表明,该无人施工技术能实现施工过程的数字化管理与路面质量的精准控制,为未来类似受限空间下的基础设施建设提供了新的技术范式和应用参考。

**关键词:** 长隧道;无人施工;沥青路面;智能化施工;集群协同

**中图分类号:** U455.4

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2026)06-0420-04

## Research and Application of Unmanned Construction Technology for Asphalt Pavement in Low Clearance Long Tunnels

WANG Wei

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

**Abstract:** To address the challenge of unmanned asphalt pavement paving in low-clearance long tunnels, a set of asphalt pavement construction solutions based on intelligent and unmanned technologies has been researched and practiced. This solution integrates high-precision positioning technology (inertial navigation), environmental perception technology (environmental sound echo), and cluster collaborative control technologies, and develops a collaborative operation system suitable for unmanned pavers and rollers. The practical application in the Shanghai North-South Expressway Project shows that this unmanned construction technology can achieve digital management of the construction process and precise control of pavement quality, providing a new technical paradigm and application reference for future infrastructure construction in similar confined spaces.

**Keywords:** long tunnel; unmanned construction; asphalt pavement; intelligent construction; cluster collaboration

## 0 引 言

随着我国交通基础设施建设的飞速发展,长隧道工程日益增多。传统沥青路面施工方式在此类受限空间内面临施工组织困难、安全隐患突出、环境污染严重、质量控制难度大等挑战<sup>[1-2]</sup>。为应对上述挑战,上海公路桥梁(集团)有限公司与徐工集团工程机械有限公司联合展开研究,通过融合智能传感、高精度定位、集群协同控制等关键技术,研发出沥青路面无人化施工。

## 1 低净空长隧道沥青路面无人施工技术

当前,隧道内沥青路面无人施工技术的核心在

于解决隧道“无GPS”信号环境下的定位、导航、感知与协同问题。

### 1.1 隧道环境声音回波+惯导组合定位

利用声波在隧道或山坳环境中的传播特性,通过测量声波从发射源到接收器的时间差,计算目标物体的位置。在隧道中,声波会经过多次反射和折射,形成复杂的传播路径。由此提出声音回波+惯导定位的解决方案,该方案是以声波通信为基础,辅以惯性导航智能化控制。

根据声波在空气传导过程中的信号衰减、多径等问题,制定通信波形+脉冲压缩识别信号的技术方案,选择的通信波形要具有抗干扰能力强、分辨率高的特点。对移动设备进行声学频响测试,选择适合的声波频段,并将采样声波进行分帧处理,使其在移动终端上展现良好的使用效果<sup>[3-4]</sup>。其次,通过对惯性导航特性的分析,以及压路机动态系统研究,提出

收稿日期: 2025-11-28

作者简介: 王伟(1984—),男,本科,高级工程师,从事道路工程沥青路面施工管理工作。

了基于声波定位信息和惯性比力方程的高精定位组合导航的方法<sup>[5-6]</sup>。在一些长距离或地理位置偏僻隧道,GNSS 信号覆盖不到,采用声波定位和局部地图惯性导航的方法,构建 JDL (joint directors of laboratories model, JDL)模型和 EKF (extended kalman filter, EKF)结合的多传感器融合位姿估计方法<sup>[7]</sup>。再其次,传统定位技术存在时钟不同步,导致位置精度偏差比较大,严重影响压路机的自主运行轨迹,针对这个问题,提出双向感应、自我记录和采样计时策略,提出声波+惯导的室内定位原型,实现压路机在无信号施工环境定位的技术。

压路机通过声波通信定位,是在压路机上安装传感器,施工过程中通过测量压路机接收端与布设基站的距离,综合压路机与三个及以上基站的测距,来计算压路机的相对位置,如图 1 所示。

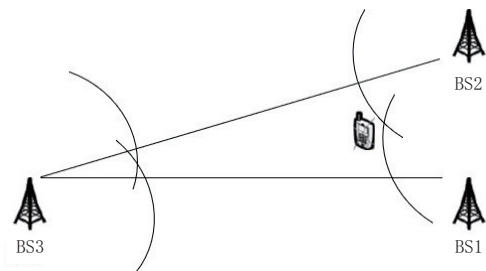


图 1 信号传输接受示意图

1.2 路径规划

采用改进算法与动态窗口法结合,规避动态障碍物(如施工人员),支持多机协同作业路径优化<sup>[8-9]</sup>。通过测量压路机到基站入射角,获得压路机空间定位,通过计算达到时间差,在时间维度按照压路机与基站(3个及以上)声波通信获得移动后定位信息,融合射入角度、声波通信曲线,精准定位压路机位置。

1.3 隧道环境适应性设计

(1)施工设备硬件改造

考虑到隧道净空较低施工环境,采用可伸缩式与自动升降熨平板,一体化找平系统适应隧道低净空要求,同时保持低重心,提高设备在复杂地形下的稳定性,防止侧翻。

(2)无人驾驶控制系统

高精度轨迹跟踪:基于模型预测控制设计横向控制器,预判隧道弯道曲率(最小半径 50 m),转向响应延迟<100 ms。

纵向控制采用PID-模糊复合算法,摊铺速度稳 1.5~3.0 m/min(误差±0.1 m/min)。基于自适应路径跟

踪速度控制技术,以常规比例积分微分控制算法为基础,通过强化学习对调成参数进行自适应整定,从而提高控制精度。时域差值学习算法无需依赖系统模型,能直接利用原始经验数据,通过预测长期结果来给先前的动作进行奖惩修正,从而确定道路机械学习路径。在强化学习过程中,道路机械方向控制系统通过不断与环境交互,以获取控制经验并以此改善控制行为<sup>[10-11]</sup>。使用强化学习算法对其参数进行自适应整定,设计了基于强化学习的自适应路径跟踪速度控制系统,控制系统以横向位置偏差、航向角偏差、曲率偏差为输入,转向角控制量为输出。无人操控压路机在接入具有强化学习的自适应路径跟踪速度控制算法后,能够有效地减小轨迹偏差,提高控制精度。

(3)多机协同调度

压路机与摊铺机通过“跟随式压实”策略:压路机依据摊铺机 GPS 轨迹与时间戳,自动保持 20~30 m 安全距离<sup>[12-13]</sup>。

(4)施工质量闭环控制

智能压实决策-边缘计算模块运行压实遍数优化算法,动态调整碾压路线。

2 工程案例

2.1 工程概况

北横通道是上海市内环内“三横三纵”、“井”字形通道的一部分,全长 19.1 km。北横通道是上海市中心城区东西向小客车专用通道,服务重点地区的交通,有效提高城市交通运输效率,是三横的补充和扩容。

2024 年 4 月 26 日,在北横通道东段主线上层隧道 ZXK17+420~ZXK17+660,进行无人智能沥青混合料摊铺试验段的施工。本次试验段施工要素,施工宽度 9.5 m,长度 240 m,施工面积 2 280 m<sup>2</sup>,施工材料 SMA-13(净味阻燃改性),沥青上面层施工厚度 4 cm。考虑到隧道内净空限制,本次混合料运输采用小料车短驳方式。

2.2 施工组织

本次无人智能摊铺采用 4000 型沥青混合料拌合站,生产北横通道东段隧道主线沥青混合料。现场设备主要由 2 台沥青摊铺机和 5 台双钢轮压路机组成无人化集群设备,进行长隧道沥青路面无人施工。具体无人化集群设备如表 1 所示,碾压方案如表 2 所示。

表1 无人化集群设备

| 序号 | 设备类型 | 型号      | 数量 | 工作内容  | 备注 |
|----|------|---------|----|-------|----|
| 1  | 摊铺机  | RP805   | 1  | 摊铺    | 徐工 |
| 2  | 摊铺机  | RP1005T | 1  | 摊铺    | 徐工 |
| 3  | 双钢轮  | XD135T  | 4  | 压实+收面 | 徐工 |
| 4  | 双钢轮  | XD135T  | 1  | 备用+收面 | 徐工 |

表2 碾压方案

| SMA-13 碾压组合方式       |             |      |    |                                                             |  |
|---------------------|-------------|------|----|-------------------------------------------------------------|--|
| 方案<br>编号            | 种类          | 吨位/t | 数量 | 压实方式                                                        |  |
| 碾压方<br>案(2+<br>2+1) | 钢轮振动<br>压路机 | 13.2 | 2台 | 初压:2台XD135T压路机前静后振<br>各碾压2遍,碾压速度4.5 km/h。<br>搭接处两台压路机错轮1/2轮 |  |
|                     | 钢轮振动<br>压路机 | 13.2 | 2台 | 复压:2台XD135T压路机,前振后<br>振各碾压2遍,碾压速4.5 km/h。<br>搭接处两台压路机错轮1/2轮 |  |
|                     | 钢轮振动<br>压路机 | 13.2 | 1台 | 终压:1台徐工XD135T双钢轮压路<br>机全幅静压2遍                               |  |

压实采用梯形推进,压路机紧跟摊铺机,双钢轮压路机同进退,保证前后两个梯队及时消除停车轮迹,最大限度保证平整度<sup>[14-15]</sup>。

2.3 工后检测

2.3.1 渗水系数检测

根据设计图纸:隧道内上面层渗水系数≤60 mL/min。  
根据实测数据,无人摊铺路段渗水系数满足设计方案要求,与有人摊铺路段渗水系数相比,虽然无

人摊铺渗水系数偏大,但是变异性较小,质量稳定可控。渗水系数检测情况如表3所示。

表3 渗水系数检测情况

| 无人摊铺渗水系数检测 |           |            |          |                                  |          |
|------------|-----------|------------|----------|----------------------------------|----------|
| 序号         | 检测桩号      | 检测位置/<br>m | 样品<br>规格 | 渗水系数/<br>(mL·min <sup>-1</sup> ) | 结果<br>判定 |
| 1          | ZXK17+460 | 距边 5.7     | SMA-13   | 25                               | 合格       |
| 2          | ZXK17+510 | 距边 3.1     |          | 23                               | 合格       |
| 3          | ZXK17+560 | 距边 4.5     |          | 27                               | 合格       |
| 4          | ZXK17+610 | 距边 6.5     |          | 26                               | 合格       |
| 有人摊铺渗水系数检测 |           |            |          |                                  |          |
| 5          | ZXK17+660 | 距边 4.0     | SMA-13   | 20                               | 合格       |
| 6          | ZXK17+710 | 距边 4.5     |          | 36                               | 合格       |
| 7          | ZXK17+760 | 距边 3.8     |          | 25                               | 合格       |
| 8          | ZXK17+810 | 距边 5.5     |          | 16                               | 合格       |

2.3.2 平整度检测

根据设计图纸,隧道内上面层平整度采用3 m直尺进行平整度控制。

根据实测数据,无人智能化摊铺平整度满足设计图纸要求。无人摊铺平整度标准差0.09,有人摊铺平整度标准差0.19,经数据分析对比,无人摊铺的平整度明显优于传统的有人摊铺。道路无人化集群施工控制技术与传统人工施工工艺相比,道路无人化集群施工控制技术指标优于常规施工水平。平整度检测情况如表4所示。

表4 平整度检测情况

单位:mm

| 无人摊铺平整度检测 |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 点位 1      | 点位 2 | 点位 3 | 点位 4 | 点位 5 | 点位 6 | 点位 7 | 点位 8 | 点位 9 | 点位 10 |
| 1.2       | 1.2  | 1.0  | 1.1  | 1.0  | 1.2  | 1.2  | 0.9  | 1.0  | 0.9   |
| 1.1       | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.2  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.2  | 1.0   |
| 1.0       | 1.1  | 1.2  | 1.0  | 1.0  | 1.2  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.1   |
| 平均值       |      |      | 1.1  |      |      | 标准差  |      | 0.09 |       |
| 有人摊铺平整度检测 |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
| 点位 1      | 点位 2 | 点位 3 | 点位 4 | 点位 5 | 点位 6 | 点位 7 | 点位 8 | 点位 9 | 点位 10 |
| 2.0       | 1.4  | 1.4  | 1.6  | 1.8  | 1.8  | 1.4  | 1.6  | 1.7  | 1.8   |
| 1.8       | 1.6  | 1.8  | 1.6  | 1.6  | 1.4  | 1.9  | 1.9  | 1.6  | 1.4   |
| 1.7       | 1.8  | 1.4  | 1.6  | 1.4  | 1.3  | 1.8  | 1.4  | 1.4  | 1.8   |
| 平均值       |      |      | 1.6  |      |      | 标准差  |      | 0.19 |       |

2.3.3 压实度检测

根据设计图纸,试验室标准密度的压实度≥98%,最大理论密度的压实度为94%~97%。

根据实测数据:无人智能化摊铺压实度满足设计图纸要求。数据分析对比,无人摊铺的压实度数据值相对稳定,其变异性更小,与传统的有人摊铺差异值小,反映无人智能摊铺施工质量更稳定可控。压实度检测情况如表5。

3 结 论

(1)研发了声音回波+惯导组合隧道定位应用系统,提供了一种可行、稳定且可靠的高精度定位解决方案,填补了隧道高精度定位空白,解决了隧道场景无人驾驶施工难题。

(2)通过硬件设备改造、高精度轨迹跟踪、多机协同调度等技术,实现隧道内沥青路面无人施工。

表 5 压实度检测情况

| 无人摊铺检测情况 |           |        |        |       |            |              |      |
|----------|-----------|--------|--------|-------|------------|--------------|------|
| 序号       | 桩号        | 横距/m   | 样品规格   | 厚度/cm | 标准密度的压实度/% | 最大理论密度的压实度/% | 结果判定 |
| 1        | ZXK17+440 | 距边 7.7 | SMA-13 | 4.0   | 99.0       | 95.0         | 合格   |
| 2        | ZXK17+500 | 距边 2.5 |        | 4.0   | 98.8       | 94.8         | 合格   |
| 3        | ZXK17+560 | 距边 5.8 |        | 4.1   | 99.2       | 95.2         | 合格   |
| 4        | ZXK17+620 | 距边 6.8 |        | 3.9   | 98.9       | 94.9         | 合格   |
| 有人摊铺检测情况 |           |        |        |       |            |              |      |
| 序号       | 桩号        | 横距/m   | 样品规格   | 厚度/cm | 标准密度的压实度/% | 最大理论密度的压实度/% | 结果判定 |
| 5        | ZXK17+730 | 距边 2.5 | SMA-13 | 3.9   | 99.2       | 95.2         | 合格   |
| 6        | ZXK17+830 | 距边 4.3 |        | 4.2   | 98.2       | 94.2         | 合格   |
| 7        | ZXK17+890 | 距边 5.3 |        | 4.1   | 99.5       | 95.6         | 合格   |
| 8        | ZXK17+940 | 距边 8.1 |        | 4.0   | 98.6       | 94.6         | 合格   |

(3)基于上海北横通道东段新建工程——全国首次长隧道沥青路面无人施工的应用分析,证实隧道内沥青路面无人施工技术可以有效解决隧道“无GPS”信号环境下的定位、导航、感知与协同问题。根据工后检测数据分析,隧道内无人摊铺路段,沥青路面的渗水、平整度和压实度均满足设计要求。

参考文献:

[1] 曹艳芳. 公路工程沥青路面施工技术及质量控制策略[J]. 汽车画刊, 2024(10): 125-127.

[2] 陈剑, 王栋. 沥青路面施工产生的环境问题和防治策略[J]. 建材世界, 2014, 35(4): 97-99; 103.

[3] 雷旭东. 一种基于声波通信的室内定位技术[D]. 太原: 中北大学, 2016.

[4] 刘阳曦. 基于声传播的室内定位方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[5] 张百强. 中短程捷联惯导/GNSS导航系统关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.

[6] 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, 4(24): 138-140.

[7] 雷京颢. 基于旋转二维激光的三维地图构建[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[8] 原荔. 智能无人化集群施工技术在公路改扩建中的应用[J]. 交通世界, 2024(30): 59-61.

[9] 周健楠, 高立波, 李旭, 等. 沥青路面无人化施工技术在辽宁现役高速公路维修中的应用研究[J]. 北方交通, 2024(8): 29-33.

[10] 孙魁, 吴成东. 强化学习模型及其在避障中的应用[J]. 山东工业技术, 2016(1): 261-263.

[11] 张小明. 环境侦察无人车自主避障系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.

[12] 金永权, 田博远, 吴荻非. 面向沥青路面无人压实的压路机改装和控制技术[J]. 交通科技, 2025(2): 7-11; 49.

[13] 王成华, 王功强, 徐雅蒙, 等. 工程施工机械自动化与无人化技术研究——以某高速路段沥青路面养护工程为例[J]. 工程技术研究, 2023, 8(5): 37-39.

[14] 王伟伟, 蔡莉莉, 吴春颖, 等. 沥青路面无人化施工技术研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(4): 109-111.

[15] 卞宇翔. 高速公路沥青路面无人驾驶智能碾压施工技术应用研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(2): 60-62.