

无人驾驶压路机集群作业技术架构设计

金永权¹, 吴荻非^{2*}, 符颖丽¹, 梁文耀²

(1. 中建铁路投资建设集团有限公司, 北京市 102600; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海市 201800)

摘要:为提升道路施工效率和安全性,解决传统道路施工中环境恶劣、施工质量不稳定、人力成本高等问题,该文提出了一种无人驾驶压路机集群作业技术架构。该架构包括底层硬件控制、轨迹规划计算和协同作业调度三个模块,实现压路机集群的无人化压实作业。其中,底层硬件控制模块通过改装现役压路机实现无人化控制、定位和通信;轨迹规划计算模块用于规划无人驾驶压路机的作业轨迹;协同作业调度模块则用于协调压路机集群的作业流程。实际施工现场的测试结果表明:该架构下的单钢轮无人驾驶压路机的平均轨迹误差为6.3 cm,双钢轮无人驾驶压路机的平均轨迹误差为14.3 cm。研究表明:架构能够有效保障无人驾驶压路机的精准循迹作业,并保持协同作业方案的稳定运行,有效提升施工效率,降低人力成本,为智慧道路建设提供有力支撑。

关键词:道路施工;技术架构;无人驾驶;压路机;轨迹规划;协同作业

中图分类号:U415.5

文献标志码:A

Technical Framework Design for Unmanned Roller Cluster Operations

JIN Yongquan¹, WU Difei^{2*}, FU Yingli¹, LIANG Wenyao²

(1. China State Construction Railway Investment & Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102600, China; 2. Experimental Teaching Center of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China)

Abstract: To improve the efficiency and safety of road construction and address problems such as harsh environments, unstable construction quality, and high labor costs in traditional road construction, a technical framework for unmanned roller cluster operations was proposed. The framework consists of three modules: underlying hardware control, trajectory planning calculation, and cooperative operation scheduling, realizing unmanned compaction operations for the roller cluster. Specifically, the underlying hardware control module achieves unmanned control, positioning, and communication by retrofitting active rollers; the trajectory planning calculation module is used to plan the operation trajectories of unmanned rollers; the cooperative operation scheduling module coordinates the operation process of the roller cluster. Field test results indicate that the average trajectory error of the unmanned single-drum roller based on this framework is 6.3 cm, and that of the unmanned double-drum roller is 14.3 cm. The study shows that the framework can effectively ensure the precise path-tracking operations of unmanned rollers, maintain the stable execution of cooperative operation schemes, effectively improve construction efficiency, reduce labor costs, and provide strong support for smart road construction.

Keywords: road construction; technical framework; unmanned driving; roller; trajectory planning; cooperative operation

0 引言

在传统的道路施工行业中,存在一系列挑战和问题,这使得行业迫切需要转型升级。首先,恶劣的

施工环境常常给工人带来很大的困扰,不仅增加了施工难度,也对施工人员的健康和安全构成威胁。同时,由于质量控制效率较低,施工过程中常常出现质量不稳定的情况,影响了道路的耐久性和路用性

收稿日期:2025-01-09 修回日期:2025-02-21

基金项目:上海市科技行动计划项目(编号:20dz1202104);中建三局集团研发项目(编号:CECEC-2022-01)

作者简介:金永权,男,高级工程师. E-mail:403297024@qq.com

*通信作者:吴荻非,男,博士,副教授. E-mail:1994wudifei@tongji.edu.cn

能^[1-3]。就现阶段中国公路工程施工的技术来看,施工质量仍不完善,整体上还处于传统粗放型的管理状态,在道路施工技术的管理上还与新时期施工技术的要求存在一定差距^[4]。再加上有些施工队伍人员素质低,整体技术水平低,导致工程质量低,影响了道路施工的整体进程;另外,人员伤亡事故屡有发生,凸显了人工操作机械施工的潜在危险性,这不仅对工人本身构成威胁,也对整个施工进程产生负面影响。同时,招工难和人力成本的不断攀升,使传统道路施工行业面临着人才资源短缺和经济成本上升的压力^[5]。在近年来的国家全面建设中,道路施工技术有了较大的改进,但是在部分技术问题上仍然存在不足,受各地区地质状况及客观因素的影响,部分道路工程的质量无法得到保障,因此有针对性地进行改进必不可少,这也是现代化建设发展的必然需求^[6]。在这一背景下,国家对智慧道路建设的推动成为必然趋势^[7]。通过引入新型装备技术,如智能化、自动化的机械设备,可以有效应对恶劣的施工环境,提高质量控制的效率,降低人员伤亡的风险。智慧建设通过移动互联、物联网、云计算、大数据等新一代的高科技信息技术,有力支撑建筑行业的信息化、精细化管理,大大提高了安全生产、科学管理水平,并逐步改变传统工地的人员管理难度大、信息更新不及时、安全无保障、环境污染等问题^[8-9]。这不仅有助于解决招工难题,降低人力成本,同时也为行业带来了更大的发展空间。

因此,国家在道路设施施工领域的智慧建设将为传统行业注入新的动力,推动整个行业向着更为先进、高效、安全的方向转型。这些进步体现在整个道路建设过程中集成先进的传感、通信和定位技术^[10],助力于实现施工状态的智能感知^[11]、主动控制^[12]、智能管理^[13]和其他基本功能。这些技术进步为智能压实和智能建筑工地等新兴技术的发展提供了强力支持^[14]。随着智能压实技术与无人驾驶技术的日益成熟,国内外各大工程机械厂商纷纷展开压路机智能化与无人化研究,推出了一系列应用产品^[15]。然而这些产品价格高昂,不利于施工成本的控制。此外,如何使无人驾驶压路机集群实现协同作业,提高施工效率和施工安全性是一个关键的研究问题。

基于此,本文提出一种用于路面施工的无人驾驶压路机集群作业技术架构,拟对现役的压路机进行无人化的升级改造,并且提出轨迹规划计算算法,

实现无人驾驶压路机的自动压实作业。在此基础上,提出无人驾驶压路机集群的协同作业策略,最大化提升无人驾驶压路机集群的施工效率和安全性。最后,在道路施工现场对该技术架构进行测试验证。

1 技术架构

实现无人驾驶压路机集群作业,首要前提是能够对每台压路机实现无人化控制;其次,需要规划无人驾驶压路机的轨迹;最后,需要制定协同作业策略实现集群作业。这一系列任务需要一套有效的技术架构来支撑和实现。因此,设计一个合理的技术架构,对于保证无人驾驶压路机集群作业的顺利实施至关重要。

技术架构是指一个系统或软件的整体设计和组织结构,用于实现特定功能并满足业务需求。通过模块化的设计,技术架构能拆分为多个相互独立的模块,每个模块负责一个特定的功能。无人驾驶压路机集群作业技术架构包含三个模块:第一个模块是底层硬件控制,对现存的压路机设备进行智能升级改造,加装装备以实现压路机集群的无人化通信、定位和控制;第二个模块是轨迹规划计算,计算分配压路机集群的作业轨迹;第三模块是协同作业调度,用于实现无人驾驶压路机集群的协同作业和控制。无人驾驶压路机集群作业技术架构如图1所示。

1.1 底层硬件控制

目前,器械厂商推出的无人驾驶压路机价格高昂,单台无人驾驶压路机的市场售价约为50万元。此外,这些设备的无人化程序通常不对外开放,后续维护成本高、改装难度大,难以应用于大规模工程建设中;另一方面,现有压路机的存量庞大,大量设备可用于无人化改造。因此,针对现有压路机进行改造,不仅能够根据具体需求灵活配置相关装备,还能有效控制成本。

加装装备对压路机进行改造,包括角度传感器、加速度传感器、工控机、RTK定位模块、LTE通讯模块,以实现对接路机集群的远程控制、定位和通信功能。加装装备介绍如表1所示。通过合理的装备选择,可将无人化改造成本控制在约10万元/台,比直接购入无人驾驶压路机节省80%的费用。

无人驾驶压路机集群作业前准备工作:① RTK定位模块先获取每台无人驾驶压路机的位置;② 在服务器上运行的中央控制系统计算并分配每台无人驾驶压路机的轨迹,轨迹以多个离散点的形式储存



图 1 无人驾驶压路机集群作业技术架构

Figure 1 Technical framework for unmanned roller cluster operations

表 1 无人驾驶压路机加装装备

Table 1 Retrofit equipment for unmanned rollers

装备名称	功能介绍
角度传感器	角度传感器能够实时监测车辆的方向变化,确定车辆朝向。通过方向传感器控制压路机的转向,可以实现精准的转向控制
RTK 定位模块	RTK 定位模块是一种高精度的定位技术,在无人驾驶控制中起到关键作用,通过使用 RTK 基准站的参考数据,能够提供厘米级别的高精度定位信息 ^[16]
工控机	工控机在整个无人施工控制系统中充当集成和优化的核心。工控机负责将来自不同传感器的数据进行融合,进行实时调整行驶路径、速度和转向等参数,确保无人驾驶压路机按照预定的路线安全、平稳地行驶
LTE 通讯模块	LTE 通讯模块使用 LTE(Long-Term Evolution)通信协议,通过无线网络提供广域覆盖,支持高速数据传输,为车辆之间的实时通信提供了可靠基础。为了提高通信的可靠性和覆盖范围,LTE 通讯模块通常采用多天技术,如 MIMO(Multiple Input Multiple Output)。使用 LTE 通讯模块,使得无人驾驶压路机集群能够共享位置、速度等信息,能够有力支撑协同作业调度
服务器	无人驾驶压路机中的服务器是关键的组件,承担数据处理、存储和通信等任务。服务器负责接收并处理来自各类传感器的数据。此外,服务器还能存储历史数据提供分析,并支持远程监控和管理

为轨迹文件;③ 中央控制系统将轨迹文件通过 LTE 通讯模块传输到每台无人驾驶压路机;④ 轨迹文件被工控机解析成无人驾驶压路机循迹作业所需的操作指令;⑤ 无人驾驶压路机中的角度传感器等加装装备按照操作指令执行任务,控制无人驾驶压路机的作业。

1.2 轨迹规划计算

无人驾驶压路机进行无人化作业的前提条件是有充足的施工作业环境信息和基础的施工参数^[17]。因此需要确定无人驾驶压路机轨迹完成的关键施工工艺参数,包括压实区域的范围、无人驾驶压路机的尺寸、横向重叠宽度和每个工区重叠长度,这些参数对于无人驾驶压路机的轨迹生成具有至关重要的影响。

(1) 压实区域的范围。包括压实区域的起点和

终点位置、压实区域的宽度以及压实区域的道路线形。在施工现场中,通过 RTK 定位系统以 20 m 的间隔获取压实区域范围的坐标点,将坐标点连接组成压实区域。

无人驾驶压路机的作业轨迹以工区进行划分,在生成作业轨迹前,压实区域被自动划分成多个连续的工区。划分工区可以将整个压实区域分割成多个独立的区域,有利于对施工任务进行有效的分配和调度。每个工区都可以单独进行施工任务的规划和执行,从而提高了压实施工的组织性和协调性。

(2) 无人驾驶压路机的尺寸。无人驾驶压路机的长度影响作业的机动性和操作空间。较长的压路机在曲线轨迹时的操作受到限制,需要更大的转弯半径,导致轨迹规划时需要考虑合理的曲线轨迹布置。无人驾驶压路机的宽度直接影响压实作业时的

宽度。较宽的无人驾驶压路机能在较短的时间内完成固定宽度的压实区域作业。同时,宽度也影响横向重叠宽度的选择。

(3) 横向重叠宽度。指无人驾驶压路机压实作业时相邻轨迹之间的重叠区域的宽度。适当的横向重叠宽度可以使路面得到充分压实,同时提高施工效率^[18]。设置横向重叠宽度时需要考虑无人驾驶压路机的宽度和转弯半径,还要确保转弯换道轨迹的合理性。

(4) 工区重叠长度。指相邻工区之间的重叠区域的长度。合理的工区重叠长度可以确保相邻工区之间压实施工的连续性,避免无人驾驶压路机的轨迹误差导致路面压实的不连续和不均匀现象。同时,合理的工区重叠长度可以有效提高无人驾驶压路机集群的施工效率。过长的重叠长度会导致资源浪费和施工效率下降,而过短的重叠长度则会影响施工质量和集群协同作业效果。

在无人驾驶压路机轨迹生成前,系统需规划计算出无人驾驶压路机的轨迹数据,生成由离散坐标点组成的轨迹任务文件。直线轨迹由间距为 20 cm 的离散点构成,曲线轨迹则采用间距为 5 cm 的离线点构成,能够保持无人驾驶压路机的循迹精度。轨迹文件的数据示例如表 2 所示。

表 2 轨迹文件数据示例

Table 2 Example of trajectory file data

数据名称	数据介绍	数据示例
work_zone_id	工区编号	1
roller_id	压路机编号	0a01
track_point_num	轨迹点编号	68 992
time	时间(Datetime格式)	2023-06-07 10:50:18
X	经度(wgs84格式)	121.698 82
Y	纬度(wgs84格式)	38.288 12
angle	方位角(°)	30.71
speed	速度(m/s)	4.2
motion	运动状态("1"为停止, "0"为运动)	0
distance	轨迹点间距(m)	0.2

轨迹文件生成后将传输到无人驾驶压路机的服务器。无人驾驶压路机接收到轨迹文件并进行数据解码后即可生成作业轨迹并开始循迹作业。

无人驾驶压路机轨迹可分为开始作业轨迹、直线压实轨迹、曲线换道轨迹、工区切换轨迹和结束作业轨迹。

无人驾驶压路机开始作业时,先判断压实作业第一个工区的起始位置和设备当前的位置,然后自适应生成轨迹,引导无人驾驶压路机行驶至作业的起始位置。无人驾驶压路机进入工区后,沿着直线压实轨迹向前行驶到当前工区终点,然后沿直线压实轨迹向后行驶回当前工区起点,接着通过曲线换道轨迹,切换至单个工区内相邻的下一条直线压实轨迹^[19]。无人驾驶压路机在当前工区内的最后一条直线压实轨迹行驶结束后,通过曲线换道轨迹切换至下一个工区,直至在最后一个工区行驶结束后,退出压实区域,完成压实作业。轨迹如图 2 所示。

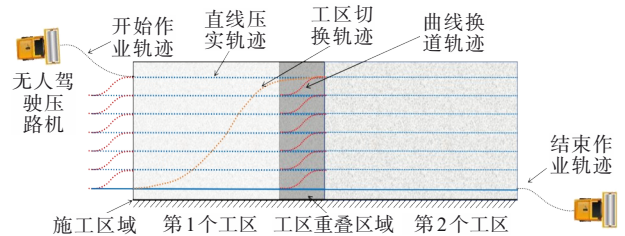


图 2 无人驾驶压路机轨迹

Figure 2 Unmanned roller trajectories

轨迹规划的关键任务是计算单个工区内的直线压实轨迹数量。单个无人驾驶压路机在单个工区内的直线压实轨迹数量计算如式(1)所示:

$$N_i = \left\lceil \frac{W - w_{\text{overlap}}}{w_{\text{roller}} - w_{\text{overlap}}} \right\rceil + 1 \quad (1)$$

式中: N_i 为直线压实轨迹的数量; W 为压实宽度; w_{overlap} 为横向重叠宽度; w_{roller} 为无人驾驶压路机的宽度。

无人驾驶压路机在当前直线压实轨迹行驶完成后,通过曲线换道轨迹,切换至单个工区内相邻的下一条直线压实轨迹。本文采用贝塞尔曲线生成曲线轨迹。

贝塞尔曲线是由法国工程师皮埃尔·贝济埃(Pierre Bézier)提出^[20]。它是由一组控制点向量所确定,定义的控制点依次连接形成多边形,贝塞尔曲线无限逼近这个多边形,可通过改变控制点来改变曲线形状。贝塞尔曲线由其控制点决定其形状, n 个控制点对应 $n-1$ 阶的贝塞尔曲线,并且通过递归的方式来绘制曲线。贝塞尔曲线被广泛用于运动规划,其中以 3 次、5 次和 7 次曲线应用居多。

本研究中的曲线换道轨迹 $B(t)$ 由 3 次贝塞尔曲线构建,计算公式如式(2)所示:

$$B(t) = (1-t)^3 P_0 + 3(1-t)^2 t P_1 + 3(1-t)t^2 P_2 + t^3 P_3, t \in [0, 1] \quad (2)$$

式中: t 为位置参数,是二项式系数; P_0 为初始点; P_3 为目标点; P_1 和 P_2 根据初始方位角和目标方位角计算得出。

无人驾驶压路机在根据轨迹文件执行压实作业任务的过程中,自身的运行状态以心跳包的形式实时发送到服务器。通过这些数据,可以计算每个压路机的移动方向($d_1 \sim d_n$)、当前轨迹的执行率($e_{t1} \sim e_{tn}$)和当前工区执行率($e_{wz1} \sim e_{wzn}$),计算公式如式(3)、(4)所示:

$$e_t = \frac{N_{\text{executed_trajectory}}}{N_{\text{trajectory}}} \quad (3)$$

$$e_{wz} = \frac{N_{\text{executed_zone}}}{N_{\text{zone}}} \quad (4)$$

式中: $N_{\text{executed_trajectory}}$ 为当前轨迹中已执行的轨迹点个数; $N_{\text{executed_zone}}$ 为工区中已执行的轨迹点个数; $N_{\text{trajectory}}$ 为当前轨迹中轨迹点的数量; N_{zone} 为当前工区中轨迹点的数量。

当前工区执行率是决定下一个工区的轨迹文件下发时机的关键参数,当前轨迹执行率是协同作业调度的关键参数。

1.3 协同作业调度

无人驾驶压路机集群实现协同作业的前提,是有一套完整的集群协同作业调度方案,保证无人驾驶压路机集群通过合理调度,减少施工过程中的等待时间,提高施工效率^[21]。无人驾驶压路机集群的协同作业调度方案可分为队列式协同作业方案和排队式协同作业方案。

队列式协同作业方案:把无人驾驶压路机集群分成多个队伍,同步进行压实作业。同一队伍的无人驾驶压路机并排进入压实区域的工区中同步进行压实作业,队伍完成当前工区的作业后,同步进入下一个工区进行压实作业。这种方案的优点是施工顺序清晰明确,易于管理和控制。同时,压路机集群之间能够避免冲突和干扰,保证施工的连续性和稳定性。队列式协同作业方案如图3所示。

排队式协同作业方案:无人驾驶压路机集群按照先后顺序,以相同的轨迹进行压实作业。在该方案下,相邻2台无人驾驶压路机的横向距离需大于3 m,保证相邻的2台无人驾驶压路机不会发生碰撞。若当前存在无人驾驶压路机需要切换工区时,其余无人驾驶压路机停止行驶,优先让当前无人驾驶压

路机完成工区切换。这种方案的优点在于灵活性强,可以根据不同的施工情况和需求动态调整作业顺序,更加适应复杂多变的施工现场。排队式协同作业方案如图4所示。

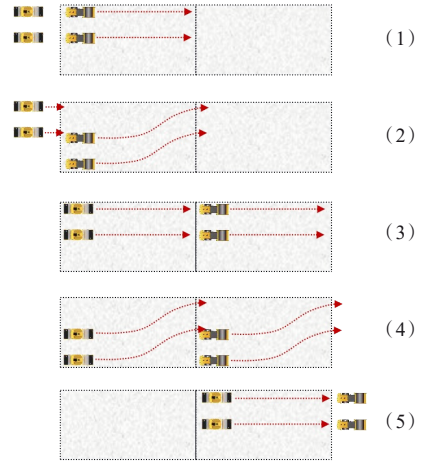


图3 队列式协同作业方案

Figure 3 Platoon-type cooperative operation scheme

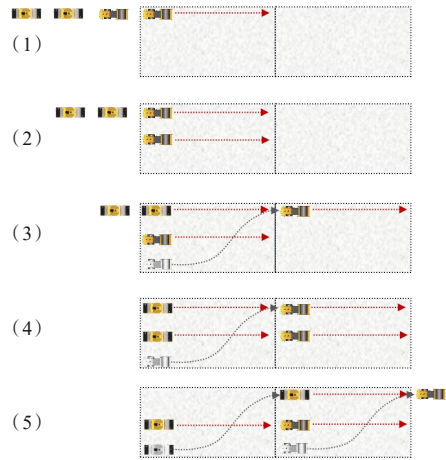


图4 排队式协同作业方案

Figure 4 Queuing-type cooperative operation scheme

无人驾驶压路机配备了安全保障系统能够实时监测无人驾驶压路机的各项运行状态,当系统检测到压路机的运行状态存在异常,如压路机行驶路线与生成轨迹之间的误差过大、加装装备的运行状态异常、通信中断等情况,系统将使无人驾驶压路机集群停止作业,直至异常的情况解决后才再次启动集群协同作业,保障施工的安全^[22]。

此外,安全保障系统能够实时检测和识别施工现场的障碍物和危险^[23]。系统把所有无人驾驶压路机根据尺寸构建压路机的矩形边界($A_1 \sim A_n$),当无人驾驶压路机矩形边界内存在障碍物时,系统能够使

无人驾驶压路机及时停止行驶,避免发生碰撞,保障施工现场的安全性。

同时,安全保障系统能够保证压路机集群在协同作业中的安全和高效,令无人驾驶压路机集群保持同进退的作业模式。首先,安全保障系统计算每台压路机的移动方向($d_1 \sim d_n$)和当前轨迹的执行率($e_{t1} \sim e_{tn}$),并将多数的无人驾驶压路机的行驶方向定义为主要行驶方向 D 。然后,通过不同的 D 和 e_t ,无人驾驶压路机集群被划分成不同的组合,如表3所示。

表3 无人驾驶压路机协同作业组合

Table 3 Cooperative operation combinations of unmanned rollers

组合名称	组合介绍
RS_1	在 D 上行驶的无人驾驶压路机组合。 RS_1 中的无人驾驶压路机的轨迹执行率 $e_t < 100\%$ 时运动状态保持为“0”(运动),当 $e_t = 100\%$ 时运动状态改为“1”(停止)
RS_2	与 D 反向行驶的无人驾驶压路机组合。 RS_2 中的无人驾驶压路机的运动状态保持设置为“0”,直至行驶方向切换到 D 时,离开 RS_2 并进入 RS_1 中
R_{sc}	一组容易发生潜在危险的无人驾驶压路机组合(最初为空集)。若在协同作业时 RS_1 和 RS_2 中存在潜在碰撞风险的压路机组合($A_{1k} \cap A_{2k}$),记为 R_{1k} 和 R_{2k} ,并将 R_{1k} 和 R_{2k} 从 RS_1 和 RS_2 放入 R_{sc} 中

对于冲突组合 R_{1k} 和 R_{2k} ,根据其矩形边界重叠区域的前5 m(安全距离),计算相应的轨迹执行率 e_{t01} 和 e_{t02} 。冲突组合如图5所示。

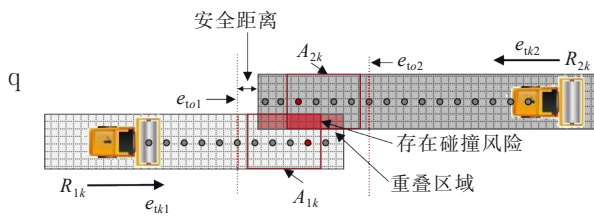


图5 无人驾驶压路机冲突组合

Figure 5 Conflict combination of unmanned rollers

分析 e_{t01} 和 e_{t02} 在冲突组合中的无人驾驶压路机的运行状态,可以避免发生碰撞。

当 $e_{tk2} \leq e_{t02}$ 时, R_{2k} 未进入边界重叠区域,此时若轨迹执行率达到 e_{t02} , R_{2k} 运行状态设置为“1”。当 e_{tk1} 达到100%时, R_{1k} 运行状态设置为“1”。然后, R_{1k} 和 R_{2k} 移出 R_{sc} ,并根据主要行驶方向被放入 RS_1 和 RS_2 中。

当 $e_{tk2} > e_{t02}$ 且 $e_{tk1} \leq e_{t01}$ 时, R_{2k} 已进入边界重叠区域,此时若 e_{tk1} 到达 e_{t01} , R_{1k} 运行状态设置为“1”,直至 R_{2k} 恢复正常轨迹运行并切换到主要行驶方向。然

后, R_{1k} 和 R_{2k} 移出 R_{sc} ,并根据主要行驶方向被放入 RS_1 和 RS_2 中。

当 $e_{tk2} > e_{t02}$ 且 $e_{tk1} > e_{t01}$ 时, R_{1k} 和 R_{2k} 都已进入边界重叠区域,此时冲突无法避免,需要人工进行干预。

如果 R_{sc} 为空集,则迭代搜索所有的无人驾驶压路机,如果有运行状态为“0”的无人驾驶压路机且处于停止状态,则发出批量启动命令。如果所有无人驾驶压路机的运行状态为“1”,则发出同时启动命令,并将所有压路机的控制状态设置为“0”。

无人驾驶压路机冲突组合的状态判断步骤每秒执行一次,并根据当前的状况下发相应的控制指令,使所有无人驾驶压路机在作业时一起前后移动,确保能够实时保障作业的安全性。若当前存在任意无人驾驶压路机 R_i 即将执行工区切换轨迹时,其余的无人驾驶压路机 $R_j(j \neq i)$,则在完成其当前轨迹后停止,直至 R_i 完成工区切换,以避免 R_i 在工区切换时与 R_j 碰撞。

2 应用案例

试验在河北省一条新建的高速公路上进行,如图6所示。压路机集群由4台无人驾驶压路机组成,包括2台单钢轮压路机和2台双钢轮压路机,经过无人化升级改造后进行应用。为了确保试验过程中道路施工质量不受影响,试验在水泥稳定碎石基层上进行。此外,测试区域的路面宽度为12 m,主要由直线段组成。在现场测试过程中,仅需要一位工程师通过控制决策平台操控无人驾驶压路机集群即可实现无人化作业,有效减少人力成本。

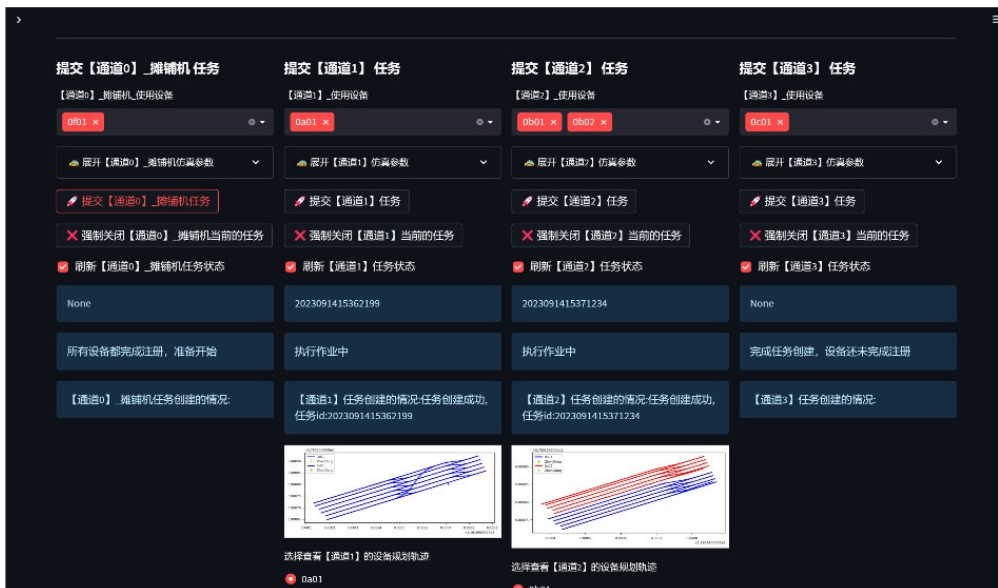


图6 无人驾驶压路机集群作业现场测试

Figure 6 Field test of unmanned roller cluster operations

本研究开发了一个控制决策平台,用于管理和实时控制多台无人驾驶压路机在施工现场的作业,如图 7 所示。该控制决策平台集成了无人驾驶压路机集群作业技术架构中的多项功能。轨迹规划生成页面能够设置施工工艺参数,计算每台无人驾驶压路机的作业轨迹。集群控制检测页面给集群下发协同作业调度方案,监控集群的运行状态,以及控制集群的运行状态,方便施工员在现场调控无人驾驶压路机的作业。控制决策平台仅需一位施工员操作,相较于传统的人工操控压路机施工方式,可节省 4 名压路机操作手的人力成本。

在该现场试验中,采用了队列式协同作业方案。第一个队伍由 1 台双钢轮压路机进行初压作业,第二个队伍由 2 台单钢轮压路机进行复压作业,第三个队伍由 1 台双钢轮压路机进行终压作业。4 台无人驾驶压路机的速度限制在 1.2 m/s 内。在测试中,无人驾驶压路机收到轨迹文件后就开始按照规划的轨迹进行作业。当第一台双钢轮无人驾驶压路机(0a01)的工区执行率 e_{wz} 达到 95% 时,决策操控平台就下发下一个工区的轨迹文件,同时后排的 2 台单钢轮无人驾驶压路机(0b01、0b02)也收到第一个工区的轨迹文件开始作业。当压实区域内有超过 2 台压路机在作



(a) 轨迹规划生成

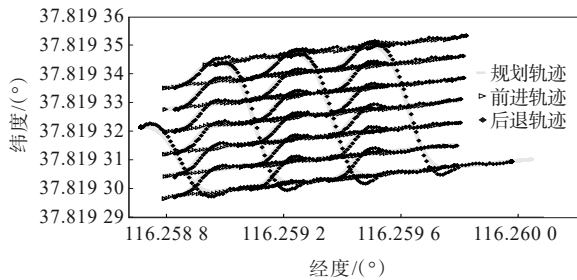


(b) 集群控制监测

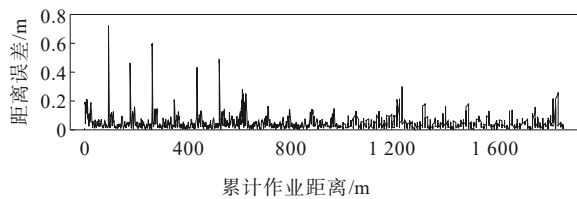
图 7 操控决策平台

Figure 7 Control and decision-making platform

业时,安全保障系统就开始实时判断并下发相应的控制指令。实际的轨迹数据和运行状态通过RTK定位模块采集。通过规划轨迹和实际轨迹的对比,可以得知双钢轮无人驾驶压路机0a01和单钢轮无人驾驶压路机0b01的循迹精度。单个工区内的实际轨迹如图8、9所示。



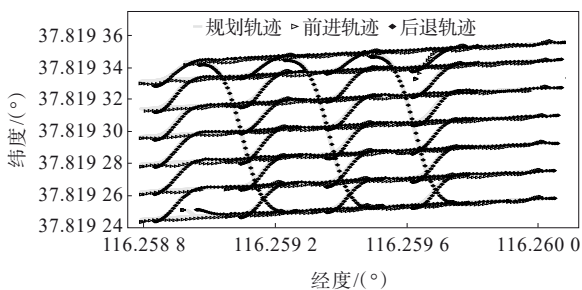
(a) 单钢轮无人驾驶压路机轨迹



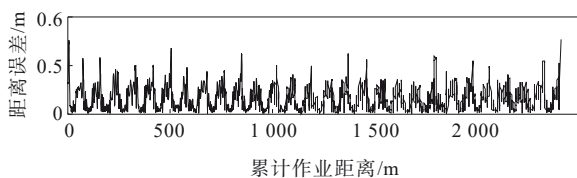
(b) 单钢轮无人驾驶压路机轨迹误差

图8 单钢轮无人驾驶压路机实际轨迹

Figure 8 Actual trajectory of unmanned single-drum roller



(a) 双钢轮无人驾驶压路机轨迹



(b) 双钢轮无人驾驶压路机轨迹误差

图9 双钢轮无人驾驶压路机实际轨迹

Figure 9 Actual trajectory of unmanned double-drum roller

由图8、9可知:无人驾驶压路机的轨迹误差较小,能够保持稳定精准的循迹作业。单钢轮无人驾驶压路机的平均误差为6.3 cm,双钢轮无人驾驶压路机的平均误差为14.3 cm。在工区切换的过程中较容

易出现轨迹误差较大的情况,影响作业的稳定性和精度。单钢轮无人驾驶压路机的最大误差为70 cm,双钢轮无人驾驶压路机的最大误差达40 cm。

最终,4台无人驾驶压路机顺利完成协同作业任务,沿着结束作业轨迹退出压实区域,验证了无人驾驶压路机集群作业技术架构的可行性。

3 结语

在智慧道路建设的背景下,本文聚焦道路路面压实施工作业,为实现先进、高效、安全的道路路面压实作业目标,提出了一种无人驾驶压路机集群作业技术架构。

该技术架构由3个模块组成:底层硬件控制模块、轨迹规划计算模块和协同作业调度模块。

无人驾驶压路机集群作业技术架构在道路施工现场测试结果表明:无人驾驶压路机能保持稳定、精准的循迹作业,有效提高施工效率。此外,采用该架构可有效节省80%的无人压路机设备成本与4位压路机操作手的人力成本,具有良好的经济效益。

然而,该架构仍存在一定的局限性。架构运行测试仅在直线段进行,在大转弯半径的弯道中仍能保持良好的运行效果,但在高速公路的变宽段、匝道交会段以及城市道路中的交叉路口等复杂路段中的应用仍存在一定的挑战。后续研究将通过优化轨迹规划算法,增加协同作业调度方案,提高在这些复杂路段中的适应性,并优化安全保障系统,以提高集群运行稳定性与安全性。

参考文献:

References:

- [1] 章汉拱. 道路路基路面工程施工及质量控制研究[J]. 散装水泥, 2023(5): 77-79.
ZHANG Hangong. Study on construction and quality control of road subgrade and pavement engineering[J]. Bulk Cement, 2023(5): 77-79.
- [2] 刘朝晖, 黄优, 余时清, 等. 刚柔复合式路面结构与材料发展趋势[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 27-53.
LIU Zhaohui, HUANG You, YU Shiqing, et al. Structure and material of rigid-flexible composite pavements and development[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2): 27-53.
- [3] 李雪莲, 陈鹏, 查旭东. 沥青稳定+无机结合料稳定组合式基层沥青路面设计综述[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 1-8.
LI Xuelian, CHEN Peng, ZHA Xudong. Review of design for combined base asphalt pavements with asphalt treated

- base and cement stabilized subbase[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(5): 1-8.
- [4] 蒋乐. 对公路施工安全管理对策的研究综述[J]. *上海公路*, 2023(4): 192-194, 214.
JIANG Le. Research on safety management measures for highway construction[J]. *Shanghai Highways*, 2023(4): 192-194, 214.
- [5] 李培. 高速公路企业人力资源管理面临的问题与优化[J]. *人才资源开发*, 2021(24): 83-84.
LI Pei. Problems and optimization of human resource management in expressway enterprises[J]. *Human Resources Development*, 2021(24): 83-84.
- [6] 王云鹏. 推动道路交通工程技术发展推动道路交通工程技术发展, 助力交通运输现代化建设[J]. *前瞻科技*, 2023, 2(3): 21-23.
WANG Yunpeng. Promoting the development of road traffic engineering technology and accelerating transportation modernization[J]. *Science and Technology Foresight*, 2023, 2(3): 21-23.
- [7] 杜豫川, 刘成龙, 吴荻非, 等. 新一代智慧高速公路系统架构设计[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 203-214.
DU Yuchuan, LIU Chenglong, WU Difei, et al. Framework of the new generation of smart highway[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 203-214.
- [8] 曾庆斌. 城市道路建设全流程信息化探析[J]. *中国建设信息化*, 2024(3): 52-55.
ZENG Qingbin. Analysis on informatization of the whole process of urban road construction[J]. *Informatization of China Construction*, 2024(3): 52-55.
- [9] 程晶晶. 智慧工地在公路工程项目中的应用[J]. *四川建材*, 2024, 50(3): 24-25, 34.
CHENG Jingjing. Application of smart construction site in highway engineering project[J]. *Sichuan Building Materials*, 2024, 50(3): 24-25, 34.
- [10] 朱慧芳, 王亮. 沥青路面智能压实及其关键影响因素研究[J]. *中外公路*, 2024, 44(4): 47-55.
ZHU Huifang, WANG Liang. Intelligent compaction of asphalt pavement and its key influencing factors[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(4): 47-55.
- [11] 吴春颖, 张丽丽, 张鹏. 利用智能碾压系统评价沥青路面碾压均匀性方法研究[J]. *中外公路*, 2017, 37(4): 42-45.
WU Chunying, ZHANG Lili, ZHANG Peng. Study on evaluation method of asphalt pavement rolling uniformity by intelligent rolling system[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017, 37(4): 42-45.
- [12] 周春风, 王彤. 平地机数字化自动控制系统在路基施工中的应用[J]. *机械管理开发*, 2021, 36(2): 117-118.
ZHOU Chunfeng, WANG Tong. Application of digital automatic control system of grader in the subgrade construction[J]. *Mechanical Management and Development*, 2021, 36(2): 117-118.
- [13] 江宇清, 肖鑫. 桥梁工程施工质量智能化管理的数据标准制定[J]. *中外公路*, 2019, 39(5): 102-106.
JIANG Yuqing, XIAO Xin. Establishment of data standard for intelligent quality management for bridge construction[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(5): 102-106.
- [14] LIN Y C, DONG C Y, WU D F, et al. Study of pavement macro- and micro-texture evolution law during compaction using 3D laser scanning technology[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5736.
- [15] 王杰. 无人驾驶双钢轮振动压路机机群运动规划及控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
WANG Jie. Research on motion planning and control method of unmanned double-drum vibratory roller group [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [16] TEUNISSEN P J G, KHODABANDEH A. Review and principles of PPP-RTK methods[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 217-240.
- [17] 刘可欣, 徐旻, 李旭, 等. BIM技术在沥青路面施工模拟中的应用研究[J]. *中外公路*, 2022, 42(3): 43-47.
LIU Kexin, XU Min, LI Xu, et al. Application research on BIM technology in construction simulation of asphalt pavement[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(3): 43-47.
- [18] 李尉敏. 沥青路面摊铺-碾压组合模型及应用[J]. *中外公路*, 2015, 35(1): 54-57.
LI Weimin. Asphalt pavement paving-rolling combination model and its application[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2015, 35(1): 54-57.
- [19] 赵方熠, 高博, 赵睿英, 等. 基于贝塞尔曲线的双钢轮振动压路机轨迹规划研究[J]. *现代机械*, 2022(1): 61-65.
ZHAO Fangyi, GAO Bo, ZHAO Ruiying, et al. Path planning of double drum vibratory roller based on Bezier curve[J]. *Modern Machinery*, 2022(1): 61-65.
- [20] CHOI J W, CURRY R, ELKAIM G. Path planning based on Bézier curve for autonomous ground vehicles[C]//San Francisco: *Advances in Electrical and Electronics Engineering-IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008*, 2008.
- [21] SHI M N, WANG J J, LI Q H, et al. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2022, 148(7): 4022046 (1-17).
- [22] ZHANG W X, GAO Y X. Self-collision avoidance and cooperative avoidance control for multiple road-roller vehicles[C]//Kunming: 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC), 2024.
- [23] 张军城. 基于障碍物位置预测的无人驾驶压路机智能避障算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
ZHANG Juncheng. Research on intelligent obstacle avoidance algorithm of driverless roller based on obstacle position prediction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.