

营运高速公路路面专项养护无人化施工技术应用研究

胡根生¹ 陈剑锋¹ 王俊喆²

(1. 浙江交投高速公路运营管理有限公司 杭州 310000; 2. 交通运输部科学研究院 北京 100029)

[摘要] 大流量营运高速公路路段路面养护施工存在易拥堵、安全风险大等问题。提高养护设备智能化水平,实现无人化养护施工是未来精细化施工管理的发展方向。文章依托黄衢南高速 2020 年路面养护专项工程,对无人化施工技术在营运高速公路路面专项养护工程中的应用进行了探索研究。研究表明,采用高度智能化和自动化的路面机械施工设备能够实现自动完成摊铺、碾压等作业,有效提升养护施工效率,节省人力资源成本。从检测指标来看,厚度、压实度、渗水系数、构造深度等指标均能满足规范要求,但平整度指标待进一步改进提升,同时应进一步完善降低技术应用成本。

[关键词] 高速公路; 养护装备; 无人化施工; 路面检测

0 引言

2020 年 4 月,浙江省人民政府办公厅发布了《关于公布浙江省交通强国建设试点单位的通知》,其中智慧高速公路建设是浙江省交通强国建设重点任务之一。目前浙江省高速公路运营管理有限公司管养高速桥隧比高,货车比例大,大流量路段养护作业难以开展,极易造成路段拥堵,且存在施工效率较低,作业人员涉路安全风险较大,养护设备智能化水平不高等问题。养护施工依旧较多采用劳动密集型作业方式,依靠信息化技术来实现质量管理的程度不够高,难以满足当前的养护需求。

针对以上问题,浙江省交通投资集团高速公路运营管理有限公司与三一重工股份有限公司、交通运输部科学研究院等单位开展合作研究,通过聚焦于无人化机群协同施工、可视化施工控制等技术研究,对现有路面养护施工设备进行升级改造,进一步提升无人化施工技术水平,以实现路面养护摊铺压实作业的无人化施工。项目组依托于黄衢南高速 2020 年路面专项养护工程,开展了高速公路无人化养护施工摊铺碾压成套技术的应用研究,本文针对技术的应用情况,存在的主要问题和未来的发展趋势进行了探讨,以期路面无人化施工技

术的完善提供技术参考。

1 国内外应用现状

5G 时代已然来临,机械施工的智能化、无人化、标准化成为行业发展趋势,近年来,面对全球新一轮技术和产业升级换代,公路工程建设、养护和运营管理领域均兴起了工程机械融合人工智能、工业互联网的“装备无人化”技术革新。

1.1 国外应用现状

美国联邦公路管理局于 2018 年发布了一系列公路工程领域自动化实现过程的研究成果,系统的阐述了以解决在高速公路建设项目开发中实施自动化技术而所需要开展的技术研究,主要集中在以下五个技术领域:遥感、地面定位、3D 设计、机械控制与自动化和现场检测技术。

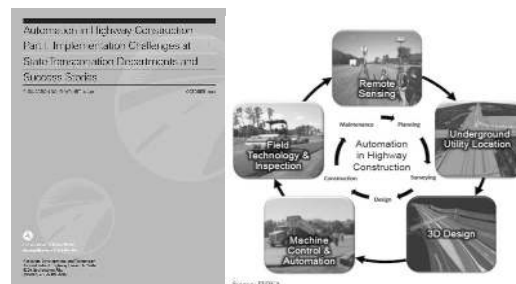


图 1 美国 FHWA 公路自动化施工技术指南

收稿日期: 2021-07-01

作者简介: 胡根生 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事公路、桥梁和隧道方面的专业技术工作和施工管理工作。

美国科技公司 Built Robotics 致力于研发建筑机器人,将自动驾驶技术应用到推土机、挖掘机等工程设备中,代替一些简单枯燥、十分危险或需大量体力劳动的工作。利用自动化机器人以及配套的软件和传感器把现有的挖掘机变成建筑机器人,融合了机器上多个摄像头, GPS, LIDAR 和其他传感器的数据,其最初解决方案适用于较小的翻斗式装载机,并逐步部署至大型挖掘机。美国 CATERPILLAR 卡特彼勒公司,研发的无人化机械及其配套施工技术,实现了在矿山领域的无人化作业。作为卡特彼勒智能采矿技术的重要组成部分,其研发的“矿山之星”系统通过车队、地形、探测、健康和命令五大智能模块,帮助客户管理从物料跟踪到车队、设备健康、无人驾驶等方方面面。通过使用传感器、车载激光雷达和雷达系统等技术,无人驾驶矿用卡车在全球各地矿山实现全天候无人驾驶。

1.2 国内应用现状

在国内,以三一重工和徐工集团为主的机械设备厂商也开展了针对道路无人化施工技术和设备的研发工作,并在实际道路上开展了相关试验路段的铺筑验证工作:

2019 年 12 月,上海朱建路道路改建项目应用无人驾驶智能沥青道路摊铺压实设备开展施工,施工现场共有 3 台无人驾驶设备。其中,无人驾驶摊铺机“打头阵”,按照预设路线,稳步向前推进,把沥青混合料均匀铺在道路上。两台无人驾驶压路机紧随其后,往复碾压刚刚摊铺完成的路面。施工中采用的无人驾驶摊铺机除了具备自动行走、料斗开合、输分料自动运行等功能外,其三维整平系统更可完成对熨平板的自动找平、振动、振捣等作业功能,并通过红外温度扫描实现对路面温度数据的自动采集。通过大数据的分析,未来还可根据不同条件自动优化施工参数。

四川铁路投资集团、徐工集团、清华大学三方签订战略合作协议,深化产、学、研、用合作,共同开展适用于道路施工场景的无人技术研发。攀大高速沥青路面施工采用无人机群技术,远程监控数据中心根据参数设置规划出最优作业

路径,向机载控制系统输出控制指令,自主操控压路机,实现整个机群的无人作业。无人机群配备了多级安全防范措施,实时监测现场施工情况,可实现自动预警、紧急停车、自动进退场、自动避障等安全防护,为道路施工保驾护航。



图2 上海朱建路道路改建项目无人施工



图3 攀大高速无人机群施工

国内外文献调研显示,在公路施工的智能摊铺、压实和质量监控均开展了大量的研究工作,相关工作显著提高了公路施工的数字化程度,已然成为施工智能化和无人化的基础。国外无人化施工技术应用场景集中于房屋建筑和矿山领域,而在公路工程领域的应用尚不多见。国内在前期智能摊铺压实等技术研究的基础上,通过进一步的技术研发和改进,无人化施工装备已应用于道路新建工程,但公路养护领域的无人化施工装备应用程度不高。

2 无人化施工技术概述

2.1 无人化施工技术原理

无人驾驶技术分为两种:一种是远距遥控,实现施工现场的无人化作业;另外一种是无需遥控,通过对施工现场、无人驾驶机械的参数设置,让机械智能、自主地完成各项施工

任务。无人驾驶路面机械也分为两种：一种是无人单机摊铺机或压路机；一种是无人机群。无人驾驶技术系统一般包括局域地面基站、通讯交互系统、智能避障系统、车载控制系统、施工现场及路径规划系统、施工现场工况采集系统，利用了无线通讯（微波、5G）、高精度定位、智能控制、传感等技术。通过对传统施工机械设备改造，安装车载控制器、雷达、摄像头、高精度卫星定位系统、各种传感器，实现具备自动行走、料斗开合、输分料自动运行等功能，同时充分收集施工过程中所采集的环境温度、路面温度、碾压速度等数据。收集的相关数据通过无线传输系统与地面指挥中心联系，实现可视化实时监控；设备施工过程中，通过高精度定位导航技术实现对车辆的定位和行驶轨迹的控制，在安全控制方面，通过定位技术设置电子安全围栏，结合机群各设备高精度定位，实时规划各设备的无碰撞行驶轨迹。毫米波雷达能及时捕捉机身周围活动轨迹，当有人靠近无人压路机 2m 左右，它会自动感应并减速停车，进一步提升了施工的安全水平。

2.2 关键支撑技术

2.2.1 机群协同施工技术

通过研发自动驾驶摊铺机、自动驾驶钢轮压路机、轮胎压路机。摊铺机根据道路设计数据自动行驶和摊铺作业；双钢轮压路机紧跟摊铺机进行初压作业；轮胎压路机则根据已经完成的初压区域进行复压作业。压路机实时动态规划路径，自动完成所有作业。同时将成套智能设备通过 4G 接入平台，实现设备协同作业。

2.2.2 施工实施平台监控技术

通过现场建立监控基站，实现可视化施工监控，施工过程以图像和动画的形式，在远程平台上实时展示。同时施工结果以轨迹、遍数等多维度数据展示，自动生成质量报表，为施工工艺改进和后期维护提供大数据支持。

2.2.3 3D 自动找平技术

国内外沥青混凝土摊铺机目前大部分采用先进的超声波和激光等非接触式自动找平装置，其对环境条件的适应性较强。在本文依托工程路面养护作业中，尝试采用现有 3D 找平施工技

术根据路面测量数据自动施工，减少人为干预带来的摊铺误差，同时采用域激光实现毫米级的平整精度，进一步提升道路的行驶质量。

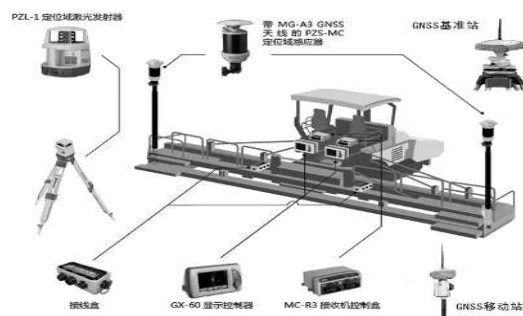


图4 自动摊铺找平技术

2.2.4 高精度融合定位技术

营运高速公路路面养护施工要考虑护栏和中央分隔带等已有构筑物的影响，为实现护栏贴边压实工作，基于道路的原始设计数据，通过高精度的融合定位技术实现，即载波相位差分（Real-time kinematic，实时动态）动态定位技术，RTK 技术的关键在于使用了 GPS 的载波相位观测量，并利用了参考站和移动站之间观测误差的空间相关性，通过差分的方式除去移动站观测数据中的大部分误差，从而实现厘米级的定位。在 RTK 作业模式下，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。流动站不仅通过数据链接来自基准站的数据，还要采集 GPS 观测数据，并在系统内组成差分观测值进行实时处理，同时给出厘米级定位结果。流动站可处于静止状态，也可处于运动状态；可在固定点上先进行初始化后再进入动态作业，也可在动态条件下直接开机，并在动态环境下完成整周模糊度的搜索求解。

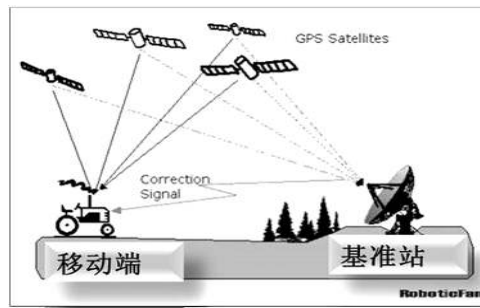


图5 基于高精度定位的贴边压实

3 依托工程情况

3.1 工程概况

黄衢南高速衢南段路基标准宽度 26 米，路面结构从下至上为 32cm 厚水泥稳定碎石底基层，20cm 厚水泥稳定碎石基层，8cm 厚 AC-25C，6cm 厚 sup-20，4cm 厚 AC-13C。经 12 年运营，黄山方向 K1487+412-K1486+838 路面使用性能明显衰减，确定对该路段进行 4.5cm 改性 AC-16 罩面。罩面路段全长 574 米，路面宽度 11.25m，路面横坡 2%，全部为路基段，中间无其他结构物。施工前已对原路面进行病害处理。

3.2 资源配置

用于本工程 AC-16 罩面的沥青混凝土粗集料为玄武岩，0-4mm 材料为石屑，沥青采用常规 SBS 改性沥青。生产配合比设计如下：

表 1 配合比设计

级配	矿料比例 (%)					油石比 (%)
/	10-19mm	6-10mm	4-6mm	0-4mm	矿粉	/
AC-16	36	23	5	33	3	4.70

传统路面养护专项工程根据设备配置传统需 9 名操作人员，无人化初步配置计划 4 名操作人员，比传统的减少 5 人。本次施工配置摊铺机 2 台（一台伸缩，一台拼装），双钢轮压路机 3 台，胶轮压路机 2 台，移动基站一套，由三一重工公司提供，其他铣刨机等设备如表 2 所示。

表 2 项目主要设备投入表

序号	名称	数量	型号
1	沥青混凝土拌和楼	1 套	SG4000
2	铣刨机	1 台	维特根 W2000
3	摊铺机	2 台	SAP120 伸缩机 SAP90 拼装机
4	双钢轮振动压路机	3 台	STR130（自重 13t）
5	轮胎压路机	2 台	STR300（自重 30t）
6	沥青洒布车	1 辆	FD5040GLQ
7	空压机	1 台	VF7/7

3.3 路径规划

采用 2+2+2+1 组合模式，共 7 台设备分区域进行施工；监控后台获取各机器实时状态，依

据“无碰撞”“均匀碾压”等原则进行路径规划与调度。压路机实时动态规划路径，自动完成所有作业。采用毫米波雷达和视觉识别系统对障碍物进行识别，保障设备安全，避免压路机与道路边侧波形梁护栏发生碰撞。

摊铺速度，压路机的碾压速度、振动或静压、碾压遍数，搭接距离可在程序设定中进行调节。初压压路机采用跟随摊铺机的方式，复压压路机采用区域作业的方式，纵向停车位位置有错位机制。

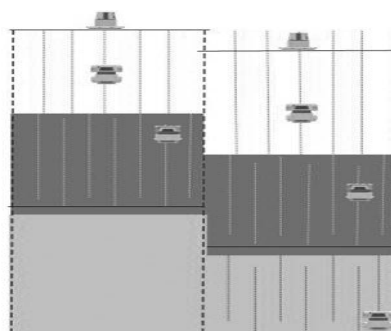


图 6 摊铺路径规划

3.4 摊铺碾压

1. 摊铺机根据道路设计数据自动行驶和摊铺作业；本工程采用 1 台伸缩摊铺机和 1 台拼装摊铺机组成梯队、联合摊铺，相邻两幅的摊铺有 20cm 左右宽度的搭接。相邻两台摊铺机相距不得超过 15m，且不得造成前面摊铺的混合料冷却。靠中分带侧摊铺机在前，采用 3D 找平技术进行厚度、高程、横坡、平整度的控制，后一台摊铺机在摊铺好的面上走滑撬，纵向接缝采用热接缝。

2. 本项目施工时摊铺机速度控制在 3m/min，保证缓慢、均匀、连续不间断的摊铺，摊铺中不得随意变换速度或中途停顿；根据摊铺机的性能，并且与拌和、运输能力相适应，满足规范要求。

3. 碾压作业程序分为初压、复压、终压三个阶段，碾压方案：初压钢轮碾压 1 遍（静压）→复压钢轮 2 遍（振动）→轮胎碾压 5 遍→终压钢轮静压 1 遍。双钢轮压路机紧跟摊铺机进行初压作业；轮胎压路机则根据已经完成的初

压区域进行复压作业。

4. 碾压速度、遍数、温度控制等内容参照《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40-2004中 AC-16 混合料相关内容执行。



图7 现场无人化摊铺碾压

3.5 工后检测

3.5.1 厚度、压实度检测

共对 11 处点位进行现场取芯试验，芯样厚度全部合格，平均厚度 4.6cm；检测压实度 11 处，压实度平均值 98.8%，满足规范要求。

表3 芯样厚度及压实度检测结果

桩号	车道	厚度 (cm)	压实度 (按照 标准密度%)	备注
K1487+346	行	4.6	99.3	
K1487+380	行	4.7	98.6	
K1487+280	超	4.4	99.2	
K1487+230	超	4.5	98.1	
K1487+190	行	4.9	98.7	罩面为
K1487+160	超	4.3	98.3	4.5cmAC-16,
K1487+048	行	4.5	99.6	压实度
K1486+998	行	4.6	99.4	要求 $\geq 98\%$
K1486+935	行	4.7	98.9	
K1486+882	行	4.9	98.6	
K1486+850	超	4.2	98.4	
平均值		4.6	98.8	

3.5.2 渗水系数、构造深度检测

对试验路段进行现场取芯试验，共对 9 处点位进行渗水系数及构造深度试验，11 处点位全部合格，渗水系数平均值 112ml/min；构造深度试验 9 处，构造深度 0.69mm，满足规范要求。

3.5.3 平整度检测

试验路段完成摊铺碾压施工后，采用车载式激光平整度仪对路段左侧和右侧的平整度指标进行了检测，试验数据如表 5 所示。结果显示，施工路段总体国际平整度指数 IRI 均值为 1.94m/km，RQI 为 91.52，根据《公路技术状况评定标准》中的相关规定，平整度指标为优等水平。根据经理数据，采用人员摊铺碾压进行罩面时 IRI 均值控制在 1.6m/km 左右。

对比左右侧平整度数据显示，两者之间存在一定的差别，各百米路段右侧平整度明显优于左侧，右侧 RQI 指标均值为 92.7，而左侧 RQI 均值 90.1。在桩号 K1486+912-K1486+812 处两侧平整度差距最大，RQI 差值为 3.6，此路段按照右侧数据评定为优等，而按照左侧数据评定为良等。数据表明当前自动化设备在平整度控制较人工操作仍存在一定差距，下一步可对机械设置、路径规划等方面作进一步优化。

表4 渗水系数及构造深度检测

桩号	车道	渗水系数 (ml/min)	指标 要求	构造深度 (mm)	指标 要求
K1487+341	行	140		0.72	
K1487+313	行	160		0.69	
K1487+280	超	80		0.69	
K1487+230	超	90		0.66	
K1487+185	行	60	$\leq 300\text{ml/min}$	0.66	$\geq 0.55\text{mm}$
K1487+155	超	140		0.72	
K1487+048	行	130		0.71	
K1486+993	行	80		0.66	
K1486+935	行	130		0.73	
平均值		112		0.69	

表5 平整度检测结果

桩号	左 IRI (m/km)	右 IRI (m/km)	IRI 平均值 (m/km)	RQI (左)	RQI (右)	RQI 均值
K1487+412--K1487+312	2.23	1.508	1.869	90.03	93.52	91.94
K1487+312--K1487+212	2.052	1.62	1.836	91.02	93.06	92.10
K1487+212--K1487+112	1.575	1.637	1.606	93.25	92.99	93.12
K1487+112--K1487+012	2.306	1.717	2.0115	89.57	92.65	91.23
K1487+012--K1486+912	2.435	1.791	2.113	88.76	92.31	90.69
K1486+912--K1486+812	2.538	1.924	2.231	88.08	91.68	90.02
检测路段总体均值	2.19	1.70	1.94	90.12	92.70	91.52

4 结论

本文依托黄衢南高速 2020 年路面专项养护工程,针对营运高速公路开展了无人化养护施工摊铺碾压成套技术的应用研究,并通过相应的试验检测对无人化施工路段的质量进行了综合评价。通过本次示范路段的养护施工与传统施工方式的对比分析显示,基于道路数据形成的路径规划来引导施工,能够实现预设工况下设备无人智能作业,施工轨迹可精确控制在 2 至 3cm,可实时跟踪机群碾压轨迹和压路机碾压数据、实时监测摊铺碾压厚度,有利于解决营运高速路面养护工程中的质量、安全问题,检测数据显示压实后的路面厚度、压实度、渗水系数、构造深度均能满足规范指标。

技术应用存在以下方面问题待进一步研究完善:一是高精度定位技术精度易受 GPS 信号等因素的影响,在隧道等特殊路段应用需进一步验证;二是采用的技术装备针对直线路段适用性较好,针对线性复杂路段的数据建模和精度控制要求更加严格,前期技术准备工作较多,

技术应用成本较高;三是施工路段摊铺找平技术待进一步完善,从而实现平整度指标提升,提升高速公路行车舒适性。

参考文献

- [1] FHWA. Automation in Highway Construction Part I: Implementation Challenges at State Transportation Departments and Success Stories. Report NO. FHWA-HRT-16-030, USA.
- [2] 冯坤鹏. 摊铺机找平技术及施工方法浅析 [C]. 中国公路学会筑路机械分会, 2010.
- [3] 姚鑫. 沥青路面摊铺的数字化机械过程控制施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2019 (20), 42-44.
- [4] 余小龙, 胡学奎. GPS RTK 技术的优缺点及发展前景 [J]. 测绘通报, 2007, 000 (010): 39-41, 44.
- [5] 中华人民共和国行业标准. 《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40-2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] 中华人民共和国行业标准. 《公路技术状况评定标准》JTG 5210-2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [7] 中华人民共和国行业标准. 《公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG 5220—2020) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.