

# 路面施工机械化与智能化的融合应用探讨

孙 鹏

中国葛洲坝集团路桥工程有限公司 湖北 宜昌 443000

**摘要：**传统机械化施工体系为智能化升级提供了基础，而智能化技术通过传感器、数据采集与传输、人工智能算法等手段，提升了施工效率与质量。融合应用聚焦于施工过程智能化控制、装备协同作业、智能管理与决策支持及绿色施工等方面。面对技术瓶颈与管理挑战，需加强产学研合作、完善标准体系并推动人才培养。未来，全生命周期智能化管理、自动驾驶装备集群化等将是发展趋势。

**关键词：**路面施工；机械化；智能化；融合应用

引言：随着科技的飞速发展，路面施工领域正经历着从传统机械化向智能化转型的深刻变革。机械化施工为路面建设奠定了坚实基础，而智能化技术的融入则为其注入了新的活力与可能。通过智能化手段，施工过程得以更精准地控制，施工效率与质量显著提升。本文旨在深入探讨路面施工机械化与智能化的融合应用，分析其现状、挑战及未来发展趋势。

## 1 路面施工机械化与智能化技术基础

### 1.1 传统机械化施工技术体系

传统路面施工机械化体系以摊铺机、压路机、铣刨机为核心设备，构建了完整的施工流程。摊铺机核心功能是将沥青混合料等物料均匀摊铺并初步压实，其原理是通过螺旋布料器实现物料均分，借助振捣梁和熨平板完成摊铺厚度控制与初步密实；压路机通过自身重量或振动产生的压力，对摊铺层进行最终压实，保障路面密实度和承载力，按工作原理可分为静作用、振动式和冲击式三类；铣刨机主要用于路面病害修复，通过旋转铣刨鼓上的刀具切削破损路面材料，实现路面找平或翻新，为后续施工奠定基础。

### 1.2 智能化技术关键要素

(1) 传感器技术是智能化施工的“感知器官”，激光传感器可精准测量摊铺厚度、平整度，GPS传感器实现设备定位与施工轨迹追踪，视觉识别传感器能实时检测路面裂缝、离析等病害，为施工质量管控提供数据支撑。(2) 数据采集与传输技术构建了智能施工的数据链路，5G技术实现海量施工数据的高速、低延迟传输，物联网技术则将设备、物料、人员等要素互联互通，确保施工全流程数据实时共享。(3) 人工智能算法是智能化施工的“大脑核心”，路径规划算法可优化设备行驶路线，减少冗余作业，质量预测算法基于历史数据和实时参数，提前预判路面压实度、平整度等质量指标，规避

施工隐患。(4) 数字孪生与虚拟仿真技术实现施工全流程可视化管控，通过构建路面施工数字孪生模型，可在虚拟环境中模拟施工过程，优化施工方案，提前规避施工冲突，提升施工规划科学性<sup>[1]</sup>。

### 1.3 机械化与智能化融合的逻辑关系

(1) 机械化是路面施工的基础保障，为智能化升级提供硬件载体，只有具备完善的机械化施工体系，才能实现智能化技术与施工设备、流程的深度融合；智能化是机械化的升级方向，通过技术赋能突破传统机械化施工的效率瓶颈和质量管控局限。(2) 融合目标聚焦提质、增效、降本、安全、环保五大核心维度：提质即通过精准管控提升路面施工质量，延长路面使用寿命；增效即优化施工流程，提升设备作业效率，缩短施工周期；降本即减少物料浪费和人工投入，降低施工成本；安全即通过智能监控规避施工风险，保障作业人员安全；环保即优化施工工艺，减少粉尘、噪音污染，实现绿色施工。

## 2 路面施工机械化与智能化融合应用的核心场景与技术路径

### 2.1 施工过程智能化控制

(1) 无人化摊铺与压实是施工过程智能化的核心应用场景，其技术核心依托北斗/GPS双模定位导航系统，结合惯性导航传感器实现设备高精度定位。通过提前在系统中录入施工路线、摊铺厚度、压实轨迹等参数，摊铺机可自动完成布料、摊铺、初步压实全流程作业，压路机则根据预设压实遍数、压实力度参数，沿规划路径自主行驶并精准完成压实作业。同时，系统具备实时轨迹修正功能，通过定位数据与预设参数的动态比对，自动调整设备行驶速度和作业姿态，规避人工操作带来的摊铺偏差、压实不均等问题，保障施工精度达到厘米级<sup>[2]</sup>。(2) 实时质量监测与反馈构建了施工过程的“动

态质控体系”，核心技术涵盖多传感器融合检测与数据实时反馈机制。针对平整度指标，采用激光平整度仪实时采集路面高程数据，通过算法快速生成平整度数值；针对压实度指标，运用红外热成像仪结合核子密度仪，实现压实度的非接触式实时检测，避免传统检测对路面结构的破坏。检测数据通过5G网络同步传输至控制中心，若出现指标超标，系统立即向施工设备发送调整指令，形成“检测-反馈-调整”的闭环控制，确保施工质量全程可控。

## 2.2 施工装备协同作业

(1) 多机种联动控制聚焦摊铺机与压路机的协同调度，技术路径以物联网协同平台为核心，整合设备定位、作业状态、质量检测等多维度数据。平台根据摊铺进度自动规划压路机的跟进路线和作业时序，实现“摊铺-初压-复压-终压”的无缝衔接；同时，通过设备间的实时通信，确保压路机作业范围精准覆盖摊铺区域，避免漏压或重复压实。针对大规模施工场景，平台可支持多台摊铺机与多台压路机的集群调度，通过负载均衡算法优化设备作业分配，提升整体施工效率。(2) 数字孪生驱动的虚拟施工预演构建了“虚拟-现实”联动的施工规划体系，技术核心是构建全要素数字孪生模型与仿真分析引擎。基于施工场地地形、物料特性、设备参数等数据，搭建包含施工环境、设备、工艺的数字孪生模型；通过仿真引擎模拟不同施工方案下的设备运行轨迹、作业效率及质量效果，提前识别施工冲突、设备干涉等潜在问题。根据仿真结果优化施工方案后，将优化参数同步至实体设备，实现虚拟规划与现实施工的精准对接，大幅降低施工风险<sup>[1]</sup>。

## 2.3 智能管理与决策支持

(1) 基于大数据的施工参数优化以海量历史施工数据为基础，通过机器学习算法构建参数优化模型。模型整合不同路面类型、气候条件、物料特性下的施工参数与质量数据，挖掘参数与质量的关联规律；针对新施工项目，输入项目基础信息，模型可自动输出最优摊铺速度、压实力度、温度控制等参数建议，为施工方案制定提供数据支撑。同时，模型具备自我迭代能力，随着新施工数据的持续积累，不断提升参数优化的精准度。

(2) 远程监控与故障预警系统采用“云端-终端”协同架构，技术路径涵盖设备状态实时采集、故障特征提取与预警推送。通过在施工设备上安装振动传感器、温度传感器等，实时采集发动机转速、液压系统压力、设备温度等运行数据；云端平台通过故障诊断算法分析数据，提取故障特征，当检测到异常数据时，立即生成故障预

警信息，通过短信、APP等方式推送至管理人员，并提供故障定位与维修建议，实现设备故障的早发现、早处理，减少设备停机时间<sup>[4]</sup>。

## 2.4 绿色施工与资源优化

(1) 能源管理的核心技术路径是电动化设备升级与能耗动态监测，通过推广电动摊铺机、电动压路机等新能源设备，替代传统燃油设备，从源头减少尾气排放；同时，在设备上安装能耗监测模块，实时采集设备能耗数据，通过能耗分析算法识别高能耗作业环节，优化设备运行参数以降低能耗。此外，构建分布式光伏供电系统，为施工现场设备提供清洁能源，进一步提升能源利用效率，实现绿色供能。(2) 材料精准投放依托智能计量与动态调整技术，实现物料利用效率的最大化。在摊铺环节，通过物料计量传感器实时监测摊铺物料用量，结合摊铺面积和厚度数据，精准控制物料输送速度，避免物料过量投放；在混合料生产环节，基于施工进度预测数据，优化混合料生产批量，减少废料产生。同时，通过材料回收智能分拣系统，对施工废料进行分类回收与再利用，降低原材料消耗，减少碳排放，践行绿色施工理念。

## 3 路面施工机械化与智能化融合发展的挑战与对策建议

### 3.1 技术瓶颈

(1) 复杂环境下的传感器可靠性不足是核心技术短板。路面施工场景常面临高温、粉尘、强振动、极端天气等复杂环境，激光传感器易受粉尘遮挡导致测量偏差，GPS/北斗定位在隧道、山区等遮挡区域易出现信号中断，视觉识别传感器会因强光、阴雨天气降低识别精度。传感器作为智能化系统的“感知终端”，其数据采集的稳定性直接影响后续决策的准确性，复杂环境下的适应性不足制约了智能化技术的规模化应用。(2) 多源异构数据融合难题凸显。智能化施工过程中，传感器、设备终端、管理系统等会产生海量异构数据，包括定位数据、质量检测数据、设备运行数据等，此类数据格式不统一、维度差异大、时序性强。当前数据融合技术难以实现不同来源数据的高效关联与整合，易出现数据冗余、冲突等问题，无法形成完整的施工数据链条，导致数据价值难以充分挖掘，限制了智能化决策的科学性。

### 3.2 管理挑战

(1) 施工人员技能转型压力显著。传统施工人员长期依赖经验操作，缺乏对智能化设备、数据系统的操作能力，难以适应无人化施工、远程监控等新型作业模式。同时，行业内兼具施工经验与数字化技能的复合型

人才稀缺, 现有人员培训体系滞后, 技能转型速度无法匹配技术升级节奏, 影响智能化技术的落地效果。(2) 标准规范与安全监管滞后。路面施工机械化与智能化融合属于新兴领域, 当前缺乏统一的技术标准、施工规范和质量评估体系, 不同企业的设备接口、数据格式不兼容, 存在“信息孤岛”现象。此外, 针对无人化施工、设备协同作业的安全监管机制不完善, 缺乏明确的安全责任界定标准, 给施工安全带来潜在风险。

### 3.3 对策建议

(1) 加强产学研合作突破关键技术。推动施工企业、科研院所、设备厂商组建协同创新平台, 聚焦复杂环境传感器研发, 通过材料升级、多传感器冗余设计提升设备适应性; 针对数据融合难题, 联合攻关异构数据标准化处理、智能融合算法等核心技术, 构建统一的数据融合框架, 打通数据流通壁垒。(2) 完善智能化施工标准体系。由行业主管部门牵头, 联合企业、协会制定涵盖设备技术、施工流程、质量检测、数据安全的全链条标准规范, 统一设备接口与数据格式。同步建立动态更新机制, 结合技术发展前沿持续优化标准内容, 为行业规范化发展提供支撑<sup>[5]</sup>。(3) 推动行业人才数字化能力培训。构建“校企合作+在岗培训”双轨培训体系, 高校增设智能化施工相关专业课程, 定向培养复合型人才; 企业开展针对性在岗培训, 通过实操演练、线上课程等方式提升现有人员的数字化操作与管理能力。同时, 建立人才激励机制, 吸引数字化人才投身行业, 缓解人才短缺压力。

## 4 路面施工机械化与智能化融合发展趋势展望

### 4.1 全生命周期智能化管理

未来路面工程将打破设计、施工、养护的分段割裂格局, 构建全生命周期智能化管理体系。依托数字孪生技术搭建工程全要素模型, 设计阶段可精准预判施工难点; 施工阶段实时同步数据至模型, 实现设计与施工的动态适配; 养护阶段通过传感器实时监测路面状态, 结合模型分析病害演化趋势, 制定精准养护方案。一体化管理将实现各环节数据无缝衔接, 大幅提升工程整体效益与使用寿命。

### 4.2 自动驾驶施工装备集群化作业

自动驾驶技术将向集群化升级, 形成多类型、多套施工装备的协同作业集群。通过5G+边缘计算实现集群

内设备的低延迟通信与精准调度, 摊铺机、压路机、运输车辆等按预设方案自主协同, 完成从物料运输到摊铺压实的全流程无人化作业。集群化作业将显著提升施工效率, 降低人工依赖, 适配大规模、高标准的路面工程需求。

### 4.3 基于元宇宙的沉浸式施工模拟与培训

元宇宙技术将深度赋能路面施工领域, 打造沉浸式模拟与培训场景。利用VR/AR设备构建高保真虚拟施工环境, 可模拟复杂工况下的施工流程, 优化施工方案; 培训场景中, 学员通过沉浸式操作虚拟设备, 快速掌握智能化装备操作技能与应急处置流程。该技术将突破传统培训的时空限制, 提升培训效率与实操适配度。

### 4.4 碳中和目标下的绿色智能施工路径

围绕碳中和目标, 绿色智能施工将成为核心发展方向。一方面推广电动化、氢能等新能源施工装备, 结合智能能耗管理系统降低能源消耗; 另一方面通过精准配料、废料再生智能管控等技术减少碳排放。同时, 构建绿色施工评价体系, 结合智能化监测实现碳排放实时追踪与调控, 推动路面施工行业向低碳化转型。

## 结束语

路面施工机械化与智能化的融合应用, 是行业发展的必然趋势, 它不仅显著提升了施工效率与质量, 还促进了资源的优化配置与绿色施工的实现。尽管在融合过程中面临技术瓶颈与管理挑战, 但通过加强产学研合作、完善标准体系及推动人才培养等措施, 我们能够克服这些难题。展望未来, 随着技术的不断进步, 融合应用将迈向更高水平, 引领路面施工行业迈向新篇章。

## 参考文献

- [1]曹琪山.公路工程施工中沥青砼施工技术应用研究[J].大陆桥视野,2024,(10):130-132.
- [2]潘娟峰.公路养护中的沥青路面预防性养护技术应用[J].运输经理世界,2024,(12)146-147.
- [3]李皓然.公路养护机械化与智能化发展趋势探讨[J].建筑技术科学,2024,(07):92-94.
- [4]张伟斌.公路养护机械化与智能化发展趋势分析[J].建筑技术科学,2025,(06):66-67.
- [5]张飞.高速公路养护机械化与智能化发展趋势研究[J].建筑理论,2024,(08):101-103.