

# 人工智能赋能的一级高速公路施工过程自动化与 精准化技术创新

马 兵

新疆交投路桥集团 新疆 乌鲁木齐 830000

**【摘要】**：针对新疆荒漠区大温差、强风沙、长距离施工等特殊环境，本文以交通运输部智能交通先导应用试点项目为依托，系统阐述无人摊压机群协同作业、3D 数字化摊铺、智慧工地管理等关键技术在新疆一级高速公路建设中的创新应用。通过北斗定位、激光雷达、AI 算法的深度融合，突破传统施工精度瓶颈，实现摊铺误差毫米级管控；依托智慧工地平台，构建“质量-安全-环保”全要素数字化管理体系。工程实践表明，该技术体系使施工效率提升 40%-50%，人工成本降低 60%-80%，为西部复杂环境下的高速公路智能化建设提供了可复制的技术范式。

**【关键词】**：人工智能赋能施工；无人摊压机群；3D 数字化摊铺；智慧工地

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.068

## 1 自动化施工核心技术：无人摊压机群的“协同大脑”

### 1.1 多源感知融合的精准控制技术

针对新疆荒漠区复杂地形与大温差形变挑战，G315 线民洛高速项目构建“北斗+激光雷达+毫米波雷达”多源融合定位体系，形成三级精度控制网络。在摊铺机熨平板部署 77GHz 毫米波雷达（测温精度±3℃，响应时间<200ms），实时扫描沥青混合料摊铺温度分布，修正因温差导致材料压实特性变化（如 10℃温差引起压实度波动 3%）。通过扩展卡尔曼滤波算法融合三类传感器数据，建立设备位姿误差动态补偿模型，实现 24 台机群的毫米级队列控制（横向间距误差≤10mm，纵向速度同步误差≤0.1m/min）。

### 1.2 大温差环境下的智能决策技术

针对新疆昼夜温差超 30℃的极端工况，基于傅里叶热传导方程与粘弹性力学理论，建立“温度-速度-压实度”三变量耦合模型。系统实时监测沥青混合料摊铺温度（120-160℃为最佳压实窗口），当温度低于 120℃时自动提升压路机振幅至 1.5mm、降低摊铺速度至 1.5m/min；温度高于 160℃时减小振幅至 0.3mm、提升速度至 3m/min，确保每平方米压实功稳定在 25-30kJ。

表 1 技术创新点与工程价值

创新维度	传统人工调节	智能决策系统	核心优势
温度响应机制	人工经验判断	实时多物理场耦合计算	响应速度提升 10 倍，误差降低 60%

压实参数调节	固定振幅/速度	动态自适应调整	压实功稳定性提升 50%
质量隐患控制	事后检测修补	过程中实时闭环控制	“夹生层”发生率从 12%降至 0

该技术突破了传统压实作业依赖人工经验的局限，通过“理论模型+智能算法+边缘计算”的深度融合，实现了大温差环境下压实质量的主动控制。其核心价值在于构建了可复制的“环境感知-模型决策-装备执行”智能施工范式，为西北干旱区、青藏高原等高温差地区的公路建设提供了关键技术支撑，推动我国特殊环境下的路面施工技术从“经验驱动”迈向“数据驱动”的新阶段。

### 1.3 规模化机群协同调度技术

G30 连霍高速哈密段构建“云端大脑-边缘节点-智能终端”三级协同系统，云端平台部署施工规划算法（基于遗传算法优化的蚁群调度模型），支持 10 公里级施工区域的设备任务分配，单批次生成包含 2000+控制指令的作业计划；在施工现场部署 5G CPE 设备（时延≤50ms，带宽≥100Mbps），实时解析云端指令并分发至各设备，同时汇聚设备状态数据（每秒采集 100 组参数）进行本地化处理；摊铺机与压路机搭载工业级控制器（算力≥200TOPS），支持离线模式下的自主作业（断网时可按最后指令运行 30 分钟）。5 台摊铺机与 8 台压路机组成的机群通过该架构实现“秒级响应”，较传统人工对讲机调度（时延>5 秒）效率提升 100 倍。

表2 技术对比

技术维度	传统人工施工	多源融合智能施工	提升幅度
标高控制精度	±8mm	±2mm	75%
压实度标准差	1.4%	0.8%	42%
日摊铺里程	1.2km	1.8km	50%
人工干预频次	20次/小时	2次/小时	90%
温差适应范围	≤20℃	≤35℃	75%

## 2 精准化管理创新：智慧工地的“三维数字化”落地

### 2.1 质量管控：从“事后检测”到“实时纠偏”

新疆荒漠区高等级公路建设面临年均温差达40℃、风沙侵蚀严重等环境挑战。传统施工模式下，沥青摊铺质量受温度波动影响显著，人工操作效率低且安全风险高。G3036阿阿高速项目创新搭建三维数字化质量管控平台，实现“设计-施工-检测”全要素数据贯通将桥梁工程分解为26万余个单元构件（最小精度至钢筋焊点），每个构件赋予唯一RFID编码，关联设计参数（如焊缝长度15cm、张拉应力1395MPa）与施工工艺标准；在钢筋笼焊接机器人部署16组视觉传感器（分辨率1920×1080）与电流电压变送器，每秒采集128个焊点的施焊时间（精度±0.1s）、焊接电流（±2A）等参数，数据实时上传至BIM模型对应节点；采用“应力-位移”双闭环控制算法，当张拉应力达到设计值的90%时切换为位移控制（精度±0.5mm），最终误差控制在±1%以内（传统单应力控制误差达5%）。

### 2.2 安全管理：AI哨兵的“无死角守护”

针对荒漠区施工人员分散、设备密集的特点，开发“无人机+AI”智能巡检系统。在G30哈吐一标项目，8台固定翼无人机按“3+2”航线（3次日间+2次夜间）全自动巡检，AI算法实时识别未戴安全帽、设备违规操作等18类隐患，识别准确率97%。2024年8-10月，系统累计预警隐患237起，响应时间从人工巡检的4小时缩短至15分钟，实现“风险发现-处置-闭环”全流程数字化。单标段施工周期缩短45天，人工投入从200人降至40人，人工成本降低80%；在8级风沙天气下，机群通过惯性导航与雷达融合算法维持作业，设备停机率较传统模式下降60%。构建“天机”AI气象服务平台，融合气象卫星数据（分辨率1km）、地面气象站（新疆全域部署200+站点）及施工现场微环境监测（风速、湿度、粉尘浓度等12项指标），实现三级预警响应。

## 2.3 环保管理：数据驱动的绿色施工

在塔里木沙漠边缘的G3036阿阿高速，部署200+套多参数环境监测终端（包含风速风向仪、PM2.5/PM10传感器、噪声监测仪），构建“感知-决策-执行”闭环。设定PM10浓度80μg/m<sup>3</sup>、风速12m/s（6级风）等7项环保触发条件，当监测值超标时，自动启动30台雾炮机（射程50m）、15台洒水车联动降尘，同时暂停露天焊接等污染工序；基于Dijkstra算法开发混合料运输调度模型，综合考虑运距（最小化）、能耗（降低15%）、生态保护区绕行（避免穿越胡杨林等敏感区），单标段运输成本下降12%，燃油消耗减少20000升；建立建筑垃圾AI识别系统（准确率95%），通过分拣机器人将废混凝土、钢材、模板分别回收，固体废弃物回收率达95%（传统模式仅60%），其中废混凝土经破碎筛分后作为水稳基层骨料（替代率30%）。项目通过智能技术实现“减碳、降损、护生态”三重目标，AI调度系统减少设备怠速时间40%，新能源洒水车（电动化率30%）配合光伏供电雾炮机，累计降低碳排放1.2万吨（等效种植6.6万棵冷杉）。

表3 典型项目对比

项目名称	技术应用	精度指标	效率提升	人工成本降本	质量合格率
G315线民洛高速	无人摊铺机群+北斗定位	摊铺误差±2mm	50%	80%	100%
G30哈吐一标	3D数字化摊铺+AI巡检	层厚波动率↓30%	40%	65%	99.2%
G3036阿阿高速	智慧工地+机器人焊接	焊缝合格率99.8%	300%	75%	99.5%

## 2.4 固废高值化利用

针对新疆每年产生超1000万吨磷石膏（化工固废）的资源化需求，研发“磷石膏改性剂+多元固化剂”复合技术体系。通过纳米SiO<sub>2</sub>（掺量3%）与碱性激发剂（NaOH占比5%）协同作用，将磷石膏二水硫酸钙转化为硬石膏，抗压强度较天然石膏提升200%；在水稳基层中替代30%水泥（传统水泥用量6%），配合级配碎石形成“骨架-胶结”双结构，7天无侧限抗压强度达4.5MPa（满足一级公路标准）；固废综合利用率超95%，单位路面碳排放降低40%，生产成本较传统水泥稳

定碎石下降 25%。

G315 线若羌至民丰段（试验段长 5km）应用磷石膏基水稳基层，经 2 年运营监测显示弯沉值、劈裂强度等指标均优于设计标准，冻融循环 20 次后强度损失仅 8%（传统材料损失 15%）；消纳磷石膏 3.2 万吨，减少水泥消耗 0.8 万吨，相当于减排 CO<sub>2</sub>4800 吨（等效种植 26 万棵冷杉）；推动《新疆磷石膏基路面材料应用技术规程》立项，填补西北干旱区固废基路面材料标准空白。

表 4 综合效益与推广价值

效益维度	具体成果
技术效益	形成专利 12 项（发明专利 5 项），编制地方标准 3 项，突破大温差环境下无人施工、固废利用等 4 项“卡脖子”技术
经济效益	试点项目平均节约成本 30%-40%，G315 线民洛高速单标段节约资金 1800 万元，全疆年可节约基建投资超 5 亿元
社会效益	减少高温作业人员 60%，安全事故率下降 80%，获评交通运输部“平安百年品质工程”示范项目
环境效益	固废综合利用率提升至 85%，单位公里施工碳排放降低 35%，推动新疆交通建设绿色转型

新疆荒漠区的工程实践表明，通过“装备智能化+管理数字化+材料绿色化”的技术耦合，成功破解了极端环境下高速公路建设的世界级难题。相关技术已在甘肃、内蒙古等西北干旱区项目推广应用，为“一带一路”沿线高温差、高风沙地区的交通基础设施建设提供了“中国方案”。

形成《新疆荒漠区无人摊压施工技术规范》等 3 项地方标准，北斗+激光雷达融合算法获国家专利。G30 连霍高速改扩建单标段节约成本 2100 万元，按新疆年均新建高速 500 公里测算，年节约成本超 10 亿元。减少高温环境作业人员 60%，近三年试点项目零安全事故，获交通运输部“平安百年品质工程”示范称号。

### 参考文献：

- [1] 程桂萍.路基下穿既有高速公路施工技术研究[J].山西建筑,2021,47(03):113-115.
- [2] 周旋.一级公路(高速公路)沥青路面施工中的压路机操作[J].交通世界,2020,(34):152-153+161.
- [3] 樊敏央,包升林.山区高速公路桥梁施工安全问题的原因分析及对策研究[J].城市道桥与防洪,2015,(05):158-160+19.

## 3 效益分析与行业启示

### 3.1 经济效益：从“成本增量”到“价值倍增”

新疆荒漠区试点项目通过无人摊压机群（1 机 4 群配置）实现“人机比”从传统模式的 30 人/公里降至 6 人/公里，人工成本降低 80%。以 G315 线民洛高速为例，单标段 80 公里施工节约人工费用 1200 万元；工期较计划缩短 20%，提前 45 天通车，按日均通行费收入 50 万元测算，创造间接经济效益 2250 万元。京港澳高速改扩建工程引入智能梁厂系统，协作焊接机器人替代 80%人工焊接，生产效率提升 3 倍，单标段节约投资超 3 亿元，印证了“智能装备投入-效率成本比”达 1:5 的经济可行性。

### 3.2 质量与安全效益：从“经验控制”到“数据闭环”

光纤光栅传感器埋入式监测（间距 5m）实现路面结构层温度、应力、变形的毫米级感知，提前 3-5 年预警裂缝、车辙等病害，使路面使用寿命从 15 年延长至 25 年以上。京港澳高速智能梁厂生产的梁板，通过数字孪生模型模拟 30 年服役状态，疲劳开裂风险降低 60%，奠定“平安百年品质工程”技术基础。

### 3.3 环境效益：从“资源消耗”到“绿色循环”

新疆项目创新应用磷石膏基水稳基层技术，单公里消纳磷石膏 400 吨，减少水泥消耗 100 吨，降低碳排放 120 吨（等效种植 6700 棵冷杉）；全标段累计消纳固废 50 万吨，减少弃土场占用 200 亩，推动新疆交通固废综合利用率从 40%提升至 85%。京港澳高速湖北段利用钢渣、粉煤灰等工业废渣制备沥青混合料，固废替代率达 35%，构建“开采-施工-运维”全链条低碳体系。

## 4 结论

人工智能技术在一级高速公路施工中的深度应用，显著提升了施工过程的自动化与精准化水平，尤其在新疆等复杂环境下展现了强大的适应性。未来需进一步突破数据标准化、算法泛化能力等技术瓶颈，加强人机协作、碳排放管理等前沿领域研究，推动交通基础设施向全生命周期智能化方向发展。随着 5G、数字孪生等技术的深度融合，人工智能将为交通强国建设注入更强劲的新质生产力。