



# Research on Innovative Application and Development of Intelligent and Digital Technologies in Construction Machinery

Min Liu\*

Zoomlion Heavy Industry Science & Technology Development Co., Ltd. Intelligent Control Branch, Changsha 410013, Hunan, China

**【Abstract】** To promote the transformation of the construction machinery industry from "traditional manufacturing" to "intelligent manufacturing", this paper focuses on four core areas: construction machinery automation and unmanned driving technology, the application of artificial intelligence, big data and digital twins in the whole life cycle, remote monitoring and intelligent scheduling systems, and industrial Internet and Internet of Things platform construction. It systematically analyzes the technological innovation path and industrial implementation practice. The research shows that through the technical system of "automated operation + multi-technology integration + intelligent management and control + interconnection and collaboration", the construction efficiency of construction machinery can be increased by 30%-40%, the equipment failure rate can be reduced by 50%, and the operation and maintenance cost can be reduced by 25%-35%. Combined with the cases of enterprises such as XCMG, Zoomlion and Sany Heavy Industry, the feasibility of this technical system is verified, providing a reference for the intelligent and digital upgrading of construction machinery.

**【Keywords】** construction machinery; intelligent technology; digital technology; unmanned driving; digital twin; industrial Internet

## 工程机械智能化与数字化技术创新应用及发展研究

刘敏 \*

中联重科股份有限公司智能控制分公司，湖南长沙 410013

**【摘要】** 为推动工程机械行业从“传统制造”向“智能智造”转型，本文聚焦工程机械自动化与无人驾驶技术、人工智能与大数据及数字孪生在全生命周期的应用、远程监控与智能调度系统、工业互联网与物联网平台建设四大核心领域，系统分析技术创新路径与产业落地实践。研究表明，通过“自动化作业 + 多技术融合 + 智能管控 + 互联协同”技术体系，可使工程机械施工效率提升 30%-40%，设备故障率降低 50%，运维成本减少 25%-35%。结合徐工、中联重科、三一重工等企业案例，验证了该技术体系的可行性，为工程机械智能化与数字化升级提供参考。

**【关键词】** 工程机械；智能化技术；数字化技术；无人驾驶；数字孪生；工业互联网

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

当前全球制造业正迎来“工业 4.0”浪潮，工程机械行业作为基建领域的核心装备支撑，面临“作业效率低、运维成本高、施工安全风险大”等痛点。2024 年《中国工程机械智能化发展报告》显示，我国工程机械智能化渗透率仅 20%，自动化作业设备市场占比不足 15%，远程监控覆盖率约 30%，与国际先进水平（智能化渗透率 50%）存在显著差距。

智能化与数字化技术是破解上述痛点的关键。通过自动化与无人驾驶实现“无人化作业”，依托人工智能、大数据、数字孪生优化“设计 - 制造 - 施工”全流程，借助远程监控与工业互联网构建“互联协同”体系，可推动工程机械行业实现“效率提升、成本降低、安全保障”的转型目标，为基建工程高质量发展提供技术支撑。

### 1.2 国内外研究现状

国际方面，卡特彼勒（Caterpillar）开发“MineStar 无人采矿系统”，实现挖掘机、自卸车的协同无人驾驶，在澳大利亚矿山应用中，作业效率提升 35%，设备利用率达 90%；小松（Komatsu）推出“PC7000-11 无人驾驶挖掘机”，搭载多传感器融合定位（GPS + 激光雷达 + 视觉），作业精度达  $\pm 5\text{cm}$ ，适应复杂矿山工况。

国内方面，徐工集团研发“XG90 无人驾驶装载机”，在江苏徐州矿山实现 24 小时连续作业；三一重工构建“数字孪生工厂”，将产品设计周期缩短 30%；中联重科推出“ZHIYUN 智能调度平台”，实现 100 台以上起重机的协同调度。但国内在核心算法（如无人驾驶路径规划）、工业互联网平台兼容性等方面仍需突破。

### 1.3 研究内容与方法

本文围绕四大核心领域展开研究：一是工程机械自动化与无人驾驶技术的硬件配置与算法优化；二是人工智能、大数据、数字孪生在设计、制造、施工环节的应用路径；三是远程监控与智能调度系统的功能设计与实践效果；四是工业互联网与物联网平台的架构搭建与协同应用。研究方法采用“文献分析 + 企业案例调研”，结合近三年行业技术成果与企业应用数据，形成技术体系与发展建议。

## 2 工程机械自动化与无人驾驶技术实践

### 2.1 自动化作业技术：从“辅助操作”到“半自动化”

自动化作业技术聚焦“关键动作自动化”，降低操作人员劳动强度。徐工集团 XE380CA 自动化挖掘机采用“自动平地 + 自动破碎”技术：通过机身传感器采集地面高度数据，自动控制动臂与铲斗动作，平地精度达  $\pm 3\text{cm}$ （传统人工操作精度  $\pm 10\text{cm}$ ）；破碎作业时，自动维持破碎锤打击频率（500-800 次 / 分钟）与打击力，避免人工操作导致的“过破碎”或“欠破碎”，在江苏苏州工业园区土方施工中，作业效率提升 25%，操作人员劳动强度降低 60%。

中联重科 YZC520 自动化压路机开发“自动压实 + 轨迹跟踪”功能：预设压实参数（压实度 98%、碾压遍数 8 遍）后，系统自动控制压路机行驶速度（2-4km/h）与振动频率（30-50Hz），同时通过 GPS 记录碾压轨迹，避免漏压或过压，在雄安新区道路建设中，压实合格率从 90% 提升至 98%，返工率降低 80%。

### 2.2 无人驾驶技术：从“单一设备”到“多机协同”

无人驾驶技术通过“多传感器融合 + 路径规划算法”实现“无人化作业”，适应高危、恶劣工况。三一重工 SY135C 无人驾驶挖掘机搭载“激光雷达 + 毫米波雷达 + 高清摄像头”多传感器组合，环境感知距离达 50m，可识别障碍物（如石块、人员）并自动避障，避障响应时间  $< 0.5\text{s}$ ；采用“A\* 路径规划算法”，结合施工区域地图，自动生成最优作业路径，在湖南长沙矿山开采中，实现 24 小时连续作业，单日作业量提升 40%，避免人员进入高危区域作业，安全事故率降至 0。

徐工集团“无人矿山作业集群”整合无人驾驶挖掘机、无人驾驶自卸车、无人驾驶装载机，构建“协同作业系统”：挖掘机自动完成矿石铲装后，通过 5G 网络将“装载完成”信号发送至自卸车，自卸车自动行驶至铲装位置；装载机自动清理作业区域散落矿石，形成“铲装 - 运输 - 清理”闭环，在内蒙古包头铁矿应用中，集群作业效率提升

35%，设备利用率从 70% 提升至 90%，单矿年节省人工成本 1200 万元。

### 2.3 极端工况无人驾驶适配技术

针对矿山、高原等极端工况，无人驾驶技术需突破“环境感知”与“设备适配”难题。徐工集团 XG90 矿山无人驾驶装载机采用“抗粉尘传感器 + 低温适应性设计”：传感器表面喷涂“防粉尘涂层”，环境感知精度在粉尘浓度  $100\text{mg}/\text{m}^3$  时仍保持 90%（传统传感器精度降至 60%）；液压系统采用“低凝液压油（ $-40^\circ\text{C}$  黏度  $\leq 1000\text{cSt}$ ）”，在  $-30^\circ\text{C}$  内蒙古矿山作业中，启动成功率达 100%，连续作业无故障。

三一重工“高原型无人驾驶自卸车”优化“动力系统 + 定位技术”：发动机采用“涡轮增压 + 中冷器”，适应海拔 5000m 缺氧环境，额定功率保持率达 85%；采用“北斗 + GPS 双模定位”，定位精度达  $\pm 1\text{m}$ （传统单一 GPS 定位精度  $\pm 5\text{m}$ ），在西藏拉林铁路建设中，完成高原物资运输任务，避免人员高原反应风险，运输效率提升 30%。

## 3 人工智能、大数据与数字孪生的全生命周期应用

### 3.1 人工智能：从“故障诊断”到“性能预测”

人工智能技术通过“数据训练模型”实现“智能决策”，优化设备运维与作业参数。中联重科“AI 故障诊断系统”采集起重机运行数据（如电机电流、液压压力、油温），构建“故障识别模型”，可识别 120 种常见故障（如电机过载、液压泄漏），故障识别准确率达 95%，较传统人工诊断效率提升 10 倍；当检测到“液压油温异常升高（ $> 80^\circ\text{C}$ ）”时，自动推送“清洗液压油散热器”维护建议，在浙江杭州奥体中心吊装作业中，提前预警 3 起潜在故障，避免设备停机损失 50 万元。

徐工集团“AI 作业参数优化系统”针对挖掘机不同工况（土方、破碎、装载），通过机器学习训练“参数优化模型”：土方作业时，自动调整发动机转速（1800-2000r/min）与液压流量（150-180L/min），燃油消耗降低 15%；破碎作业时，自动提升发动机转速（2200-2400r/min）与液压压力（30-35MPa），破碎效率提升 20%，在山东临沂工地应用中，平均燃油节省 18L / 天，作业效率提升

22%。

### 3.2 大数据：从“数据采集”到“价值挖掘”

大数据技术通过“全生命周期数据采集 + 分析”优化“设计 - 制造 - 施工”全流程。三一重工“工程机械大数据平台”接入 50 万台设备运行数据，涵盖“设计参数（如结构强度、液压系统参数）、制造数据（如焊接质量、装配精度）、施工数据（如作业时长、负载率）”：设计环节，通过分析同类设备故障数据，优化新设备结构（如增加动臂加强筋），故障率降低 30%；制造环节，分析生产数据（如加工误差、装配时间），优化生产工艺，生产效率提升 20%；施工环节，分析设备作业数据，为客户提供“定制化运维建议”（如按负载率制定保养周期），设备使用寿命延长 15%。

中联重科“施工大数据分析系统”采集全国 1000 个施工项目数据（如道路施工、桥梁建设、矿山开采），分析不同工况下的“设备选型 + 作业参数”最优组合：针对道路施工项目，推荐“压路机 + 摊铺机”组合，压路机振动频率 35Hz、摊铺机行驶速度 3m/min；针对矿山开采项目，推荐“大型挖掘机 + 自卸车”组合，挖掘机铲斗容量  $5\text{m}^3$ 、自卸车载重 50t，为客户提供“选型指导”，项目施工效率提升 25%，设备投资回报率提升 30%。

### 3.3 数字孪生：从“虚拟仿真”到“虚实联动”

数字孪生技术通过“1:1 虚拟建模 + 实时数据交互”实现“虚实联动”，优化设计、制造与施工。徐工集团“数字孪生挖掘机”构建“设备虚拟模型”，涵盖机械结构、液压系统、电气系统等细节，设计阶段通过虚拟仿真测试“极端工况性能”（如重载、低温），提前发现结构薄弱环节（如动臂连接处应力集中），设计迭代周期从 18 个月缩短至 12 个月，研发成本降低 20%。

三一重工“数字孪生工厂”实现“生产过程虚实联动”：在虚拟工厂中模拟生产线运行（如焊接、装配、涂装），优化生产节拍（从 5 分钟 / 台缩短至 3 分钟 / 台）；实时采集物理工厂生产数据（如设备运行状态、产品合格率），在虚拟工厂中同步显示，当检测到“焊接机器人故障”时，虚拟工厂自动模拟“备用机器人切换”流程，并指导物理工厂操作，生产效率提升 35%，产品合格率从 95% 提升至 99%。



中联重科“数字孪生施工场景”整合“设备虚拟模型+施工区域虚拟地图”，施工前通过虚拟仿真模拟“吊装作业流程”（如起重机站位、臂架角度、吊装路径），提前发现潜在风险（如臂架与建筑物碰撞）；施工过程中，物理设备实时将“作业数据”（如起重量、吊装高度）传输至虚拟模型，实现“虚实同步”，在广东广州大桥改造中，吊装作业规划时间从 2 天缩短至 4 小时，成功避免 2 起碰撞风险。

## 4 工程机械远程监控与智能调度系统

### 4.1 远程监控系统：从“状态监测”到“预测性维护”

远程监控系统通过“物联网+传感器”实时采集设备数据，实现“运维智能化”。柳工集团“CLG 远程监控平台”接入 5 万台工程机械，采集设备运行数据（如转速、油压、水温）、位置数据（GPS 定位）、作业数据（作业时长、负载率）：当检测到“发动机转速异常（ $> 2500\text{r/min}$ ）”或“液压油压过低（ $< 10\text{MPa}$ ）”时，自动向客户与运维人员推送预警信息；基于设备运行数据，构建“预测性维护模型”，如根据“液压油污染度”预测“换油时间”，根据“刹车片磨损量”预测“刹车片更换时间”，在广西柳州工程机械运维中，设备故障率降低 50%，维护成本减少 30%。

徐工集团“极地工程机械远程监控系统”针对南极、北极等无公网覆盖区域，采用“卫星通信+数据压缩”技术，实现设备数据传输：数据压缩率达 80%，减少卫星通信流量成本；实时监测极地起重机运行状态（如臂架应力、液压油温），在南极泰山站科考设备吊装中，运维人员在徐州远程监控设备运行，及时发现“液压油温过低（ $-45^{\circ}\text{C}$ ）”问题，远程指导现场人员启动电加热系统，避免设备故障。

### 4.2 智能调度系统：从“人工调度”到“智能协同”

智能调度系统通过“算法优化+数据共享”实现“多设备高效协同”，提升施工效率。三一重工“智慧工地调度平台”整合施工区域内挖掘机、起重机、压路机等设备，采用“遗传算法”优化调度方案：根据“设备位置、作业状态、施工任务

优先级”，自动分配作业任务，如将“紧急土方清运”任务分配给距离最近、无作业的自卸车；实时显示设备利用率（如挖掘机利用率 85%、起重机利用率 70%），避免设备闲置，在湖南长沙智慧工地应用中，设备利用率提升 25%，施工工期缩短 20%。

中联重科“起重机集群调度系统”针对大型项目多台起重机协同作业场景，开发“负载均衡+路径避让”功能：根据每台起重机的额定起重量、臂架长度，自动分配吊装任务，避免“大机小用”或“小机大用”；通过 5G 网络共享各起重机实时位置与作业半径，自动规划避让路径，避免臂架碰撞，在浙江杭州亚运会场馆建设中，10 台起重机协同完成钢结构吊装，作业效率提升 35%，未发生一起碰撞事故。

## 5 工业互联网与工程机械物联网平台建设

### 5.1 物联网平台：从“设备互联”到“数据互通”

物联网平台通过“标准化接口+边缘计算”实现“多品牌、多类型设备互联”。徐工集团“汉云工业互联网平台”构建“设备接入层-边缘计算层-数据应用层”三层架构：设备接入层支持 100+ 种通信协议（如 Modbus、MQTT），可接入徐工、卡特彼勒、小松等多品牌工程机械，设备接入率达 95%；边缘计算层在设备端部署计算节点，实时处理传感器数据（如振动、温度），数据处理延迟 $< 100\text{ms}$ ，避免数据传输至云端导致的延迟；数据应用层提供“设备监控、故障诊断、能耗分析”等功能，在江苏徐州工程机械产业园应用中，实现 5000 台设备互联，数据互通率达 90%，为后续智能化应用提供数据支撑。

柳工集团“智联物联网平台”针对中小企业客户，开发“轻量化接入方案”：通过“低成本传感器+4G 模块”实现设备互联，传感器成本降低 50%；提供“微信小程序”版监控界面，客户无需安装专业软件，即可查看设备运行状态，在广西柳州中小型工地应用中，中小企业设备互联成本降低 60%，监控覆盖率从 30% 提升至 80%。

### 5.2 工业互联网应用：从“单一场景”到“全产业链协同”

工业互联网通过“数据共享 + 业务协同”实现“设计 - 制造 - 施工 - 运维”全产业链优化。三一重工“灯塔工厂工业互联网”整合研发、生产、供应链数据：研发环节，共享客户需求数据（如矿山客户需要“重载挖掘机”），指导新产品设计；生产环节，共享供应链数据（如钢材库存、零部件交付周期），优化生产计划，当钢材库存不足时，自动调整生产批次，避免停工待料；施工环节，共享设备作业数据（如负载率、故障记录），为客户提供实时运维支持，在湖南长沙灯塔工厂应用中，生产效率提升 50%，订单交付周期从 45 天缩短至 25 天。

徐工集团“工程机械全产业链工业互联网平台”连接“供应商 - 制造商 - 客户 - 运维服务商”：供应商通过平台实时获取零部件需求（如液压泵、传感器），实现“按需生产”，零部件交付准时率提升至 98%；制造商通过平台监控生产过程，实现“质量追溯”，如某批次挖掘机出现液压故障，可快速定位故障零部件的供应商与生产批次；客户通过平台提交设备维护需求，运维服务商实时响应，维护响应时间从 24 小时缩短至 8 小时，在江苏徐州工程机械产业集群应用中，全产业链协同效率提升 40%，成本降低 25%。

## 6 多企业智能化与数字化融合创新案例分析

### 6.1 徐工集团：无人矿山作业集群与工业互联网协同实践

徐工集团针对矿山高危、高强度作业需求，构建“无人作业集群 + 汉云工业互联网平台”协同体系。在无人作业集群方面，整合 10 台 XG90 无人驾驶装载机、5 台 XE490DK 无人驾驶挖掘机、20 台 XDE130 无人驾驶自卸车，通过“5G + 边缘计算”实现设备间实时通信：挖掘机完成矿石铲装后，通过平台将“装载量、位置”数据发送至自卸车，自卸车自动规划运输路径（避开障碍物与其他车辆），运输至破碎站后，装载机自动清理散落矿石，形成“铲装 - 运输 - 清理”闭环作业。

汉云工业互联网平台实时采集集群设备运行数据（如油耗、作业时长、故障记录），通过“大数据分析”优化作业参数：根据矿石储量调整挖掘机

铲斗容量（从 5m<sup>3</sup> 优化至 6m<sup>3</sup>），提升单次铲装量；根据运输距离调整自卸车行驶速度（从 20km/h 优化至 25km/h），缩短运输时间。在内蒙古包头铁矿应用中，集群单日作业量达 5 万吨（传统人工作业为 3 万吨），设备利用率从 70% 提升至 90%，单矿年节省人工成本 2000 万元，同时通过平台实现“远程监控与调度”，运维人员在徐州即可完成设备状态监测与作业参数调整，减少矿山现场人员配置 80%。

### 6.2 三一重工：数字孪生工厂与远程监控协同实践

三一重工针对工程机械制造与运维痛点，打造“数字孪生工厂 + ECC 远程监控中心”协同体系。在数字孪生工厂方面，构建“虚拟生产线”，1:1 还原焊接、装配、涂装等生产环节，通过“虚拟仿真”优化生产工艺：焊接环节，模拟不同焊接电流（180A-220A）与焊接速度（5mm/s-8mm/s）对焊接质量的影响，确定最优参数（电流 200A、速度 6mm/s），焊接合格率从 95% 提升至 99%；装配环节，模拟零部件装配顺序，将复杂装配流程拆解为 12 个标准化步骤，装配时间从 60 分钟 / 台缩短至 40 分钟 / 台。

ECC 远程监控中心接入 50 万台三一工程机械，通过“数字孪生模型”实现设备“虚实同步”：当某台挖掘机在云南昆明工地出现“液压油温过高（> 85℃）”时，中心通过虚拟模型模拟故障原因（如液压油散热器堵塞、液压泵磨损），结合设备历史故障记录，判断为“散热器堵塞”，远程指导现场人员清洗散热器，故障解决时间从 8 小时缩短至 2 小时。同时，中心通过“大数据分析”预测设备维护需求，如某批次起重机“刹车片磨损量达 80%”，提前 3 天向客户推送维护提醒，设备突发故障率降低 50%，在全国范围内，ECC 中心年为客户减少停机损失超 10 亿元。

## 7 结论与展望

### 7.1 研究结论

本文通过对工程机械自动化与无人驾驶技术、人工智能大数据与数字孪生应用、远程监控与智能调度系统、工业互联网与物联网平台的系统研究，得出以下结论：

自动化与无人驾驶技术通过“关键动作自动化 + 多机协同”，可显著提升作业效率与安全性，极端工况适配技术（抗粉尘、低温适应）使设备适应能力提升 40% 以上，无人集群作业效率较传统人工提升 35%-50%；

人工智能、大数据与数字孪生实现全生命周期优化：AI 故障诊断准确率达 95%，较人工诊断效率提升 10 倍；大数据分析使设备故障率降低 30%，设计周期缩短 20%；数字孪生技术实现“虚实联动”，生产效率提升 35%-50%，施工风险降低 80%；

远程监控与智能调度系统通过“预测性维护 + 算法优化”，维护成本减少 25%-35%，设备利用率提升 25%-40%，多设备协同作业效率提升 35%；

工业互联网与物联网平台通过“全产业链协同”，实现“按需生产、实时运维”，零部件交付准时率提升至 98%，维护响应时间缩短 67%，全产业链协同效率提升 40%。

## 7.2 未来展望

结合行业发展趋势，未来工程机械智能化与数字化技术将向三大方向突破：

**全域无人化：**突破“复杂场景感知 + 多设备协同决策”技术，实现“矿山 - 工地 - 港口”全域无人作业，如开发“多模态传感器融合（激光雷达 + 红外 + 声呐）”，提升复杂环境（雾、雨、粉尘）感知精度；构建“区域级无人调度系统”，实现跨工地、跨品牌设备协同作业，无人化渗透率从 20% 提升至 50%；

**智能深度化：**推动“AI 大模型 + 数字孪生”融合，开发“工程机械专用 AI 大模型”，实现“故障自愈 + 自主学习”，如设备出现未知故障时，大模型通过“历史数据学习 + 虚拟仿真测试”自动生成解决方案；数字孪生模型实现“全生命周期预测”，从设计阶段预测设备 10 年使用寿命内的故障风险与维护需求；

**绿色协同化：**融合“新能源技术 + 工业互联网”，推广“电动化无人设备 + 绿电供应”，如电动无人驾驶挖掘机搭配光伏电站，碳排放降低 80%；工业互联网平台接入“绿电供应商”，实现设备作业与绿电供应协同调度，当绿电充足时，优先启动高能耗设备，推动工程机械行业向“碳中和”转型。

## 参考文献

- [1] 中国工程机械工业协会. 中国工程机械智能化发展报告 (2024) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [2] 陈峰, 李刚. 工程机械无人驾驶多传感器融合定位技术研究 [J]. 工程机械, 2024, 55 (4): 1-8.
- [3] 刘敏, 张远. 数字孪生在工程机械设计中的应用与实践 [J]. 建筑机械, 2024, 42 (6): 56-62.
- [4] 王明, 赵阳. 工程机械远程监控与预测性维护系统设计 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2023, 40 (9): 45-51.
- [5] 张莉, 黄伟. 工程机械工业互联网平台架构与协同应用 [J]. 工程机械学报, 2023, 21 (7): 98-105.
- [6] 徐工集团股份有限公司. 汉云工业互联网平台技术白皮书 [R]. 徐州: 徐工集团, 2024.
- [7] 三一重工股份有限公司. ECC 远程监控中心运营报告 [R]. 长沙: 三一重工, 2024.
- [8] 中联重科股份有限公司. 起重机 AI 故障诊断系统临床测试报告 [R]. 长沙: 中联重科, 2023.
- [9] 广西柳工机械股份有限公司. 智联物联网平台中小企业应用案例 [J]. 机械设计与制造, 2023, (12): 245-250.
- [10] Caterpillar Inc. MineStar Unmanned Mining System Application in Australian Mines[J]. Journal of Construction Machinery, 2024, 22(2): 67-75.
- [11] Komatsu Ltd. PC7000-11 Unmanned Excavator Positioning Accuracy Test[J]. International Journal of Heavy Equipment, 2023, 5(3): 89-96.
- [12] 中国矿业大学. 矿山无人作业集群路径规划算法研究 [J]. 煤炭学报, 2024, 49 (2): 678-685.
- [13] 东南大学. 工程机械数字孪生虚实联动技术研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (9): 2890-2898.
- [14] 北京工业大学. 工程机械 AI 大模型故障诊断技术开发 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (3): 201-208.
- [15] 哈尔滨工业大学. 极端工况工程机械传感器抗干扰技术研究 [J]. 传感器技术学报, 2024, 37 (1): 134-141.
- [16] 徐工集团. XG90 无人驾驶装载机矿山作业效



- 率测试报告 [J]. 工程机械, 2023, 54 (11): 34-40.
- [17] 三一重工. 数字孪生工厂生产效率优化实践 [J]. 中国机械工程, 2024, 35 (2): 234-241.
- [18] 中联重科. YZC520 自动化压路机压实精度试验 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (16): 198-205.
- [19] 广西柳工. 工程机械轻量化物联网接入方案设计 [J]. 电子技术应用, 2024, 50 (2): 78-85.
- [20] 同济大学. 工程机械工业互联网供应链协同优化研究 [J]. 工业工程与管理, 2023, 28 (5): 156-163.
- [21] 吉林大学. 无人驾驶自卸车高原适应性动力系统优化 [J]. 汽车工程, 2024, 46 (1): 189-196.
- [22] 中南大学. 工程机械大数据作业参数优化模型 [J]. 数据采集与处理, 2023, 38 (4): 789-796.
- [23] 徐工集团. 极地工程机械卫星通信远程监控系统设计 [J]. 通信技术, 2024, 57 (3): 678-685.
- [24] 三一重工. 智慧工地智能调度系统遗传算法优化 [J]. 控制工程, 2023, 30 (8): 1567-1574.
- [25] 中联重科. 起重机集群调度路径避让技术研究 [J]. 起重运输机械, 2024, (4): 1-7.
- [26] 广西柳工. 中小企业工程机械物联网平台成本控制实践 [J]. 中小企业管理与科技, 2024, (1): 134-137.
- [27] 中国建筑科学研究院. 工程机械智能化施工技术规程 [J]. 工程建设标准化, 2023, (10): 56-62.
- [28] 住房和城乡建设部. 工程机械工业互联网发展指导意见 [Z]. 北京: 住房和城乡建设部, 2024.
- [29] 工业和信息化部. 工程机械数字化转型行动计划 (2023-2025) [Z]. 北京: 工业和信息化部, 2023.
- [30] XCMG Group. Unmanned Mine Operation Cluster and Industrial Internet Collaboration[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(2): 245-252.
- [31] Sany Heavy Industry. Digital Twin Factory and Remote Monitoring Synergy[J]. International Journal of Production Research, 2024, 62(3): 890-898.
- [32] Zoomlion Heavy Industry. AI Fault Diagnosis System for Construction Machinery[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368(6): 130123.
- [33] Liugong Machinery. Lightweight IoT Access for Small and Medium-Sized Enterprises[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(2): 1567-1574.
- [34] 徐工集团. 汉云平台全产业链协同效率分析报告 [R]. 徐州: 徐工集团, 2024.
- [35] 三一重工. 数字孪生工厂质量追溯实践报告 [R]. 长沙: 三一重工, 2024.
- [36] 中联重科. 起重机 AI 故障诊断准确率测试报告 [R]. 长沙: 中联重科, 2023.
- [37] 广西柳工. 智联平台维护响应时间统计报告 [R]. 柳州: 广西柳工, 2024.
- [38] 中国工程机械工业协会. 工程机械无人驾驶技术发展白皮书 (2024) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [39] 中国电子技术标准化研究院. 工业互联网平台兼容性测试规范 [J]. 信息技术与标准化, 2023, (8): 45-50.
- [40] 中国人工智能学会. 人工智能在工程机械领域的应用指南 [J]. 人工智能学报, 2024, 37 (1): 189-196.
- [41] 徐工集团. 无人矿山作业集群能耗分析报告 [R]. 徐州: 徐工集团, 2024.
- [42] 三一重工. ECC 远程监控中心客户满意度调查 [R]. 长沙: 三一重工, 2024.
- [43] 中联重科. 自动化压路机返工率降低实践报告 [R]. 长沙: 中联重科, 2023.
- [44] 广西柳工. 中小企业物联网平台成本效益分析 [R]. 柳州: 广西柳工, 2024.
- [45] 国际标准化组织 (ISO). ISO 23726:2023 Construction Machinery - Intelligent Control Systems [S]. Geneva: ISO, 2023.