

水利施工机械设备智能化调度与运维管理研究

付嘉¹ 李彰浩²

1. 内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心 内蒙古巴彦淖尔 015400

2. 内蒙古河套灌区水利发展中心解放闸分中心 内蒙古巴彦淖尔 015000

摘要: 水利施工机械设备智能化调度与运维管理是智慧水利建设的重要组成部分,旨在通过现代信息技术提升设备管理效率、降低运维成本并保障施工安全。通过数据分析优化设备选型,减少闲置与过度使用,并基于磨损规律科学制定报废计划。随着技术迭代和政策支持,水利施工机械设备的智能化调度与运维将更趋精细化、高效化,成为水利高质量发展的核心支撑。

关键词: 水利施工; 机械设备; 智能化调度; 运维管理

水利施工机械设备智能化调度技术架构中的云端层是实现全局优化、数据融合与智能决策的核心。水利施工机械设备智能化调度的核心功能与应用场景主要体现在实时监测与智能调度两大方面,通过物联网、大数据、AI等技术实现设备的高效协同与资源优化配置。

一、技术架构与关键技术

1. 终端层

终端层技术架构,感知层,通过部署各类传感器(如位移计、渗压计、振动传感器、GPS定位模块等)实时采集施工机械的运行状态(如位置、速度、能耗)、环境参数(如温湿度、土壤湿度)及工程数据(如碾压密实度、灌浆压力)。例如,大坝填筑中采用北斗高精度定位导航系统实现碾压路径规划与压实度监测。控制层,采用工业级RTU(远程终端单元)或PLC(可编程逻辑控制器)作为核心控制设备,支持多协议接口(如RS485、4-20mA模拟量输入),兼容液压阀、电机启停等执行机构,实现机械设备的远程启停、参数调节及故障保护。边缘计算层,在终端侧部署边缘计算节点,对采集数据进行本地预处理(如数据清洗、异常过滤)、实时分析(如故障诊断、施工质量评估)及决策反馈(如自动调整碾压参数),减少云端负载并提升响应速度。关键技术,多传感器融合技术,集成GPS、IMU(惯性测量单元)、压力传感器等多源数据,通过卡尔曼滤波等算法实现施工机械的高精度定位与姿态控制,确保填筑轨迹的准确性^[1]。低功耗广域通信技术,采用NB-IoT、LoRa等低功耗通信协议,适应野外施工环境,保障数据稳定传输;支持断网续传功能,避

免数据丢失。工业级硬件设计,终端设备需具备宽电压输入(DC 6-30V)、防雷击、抗电磁干扰等特性,确保在复杂工况下可靠运行。智能控制算法,基于实时数据反馈,运用PID控制、模糊逻辑等算法优化机械作业参数(如碾压速度、遍数),提升施工效率与质量。典型应用场景,大坝智能填筑:通过无人驾驶碾压机组协同作业,实现压实度实时监测与路径自动规划。灌浆工程监控:基于压力传感器与流量计数据,动态调整灌浆参数,确保施工质量。终端层作为智能化调度的“神经末梢”,其高可靠性、实时性与边缘计算能力是提升水利施工效率与安全性的核心基础。

2. 管道层

传输层(管道层)技术架构,传输层是连接现场设备与云端平台的“数据管道”,其核心目标是实现稳定、高效、安全的数据传输。主要技术方案包括:通信技术选择:蜂窝网络:4G/5G/NB-IoT等,适用于广覆盖、移动性强的场景,如分散的施工机械。工业总线与以太网:RS485、工业以太网等,用于设备密集、距离较近的固定点位,如泵站内部。低功耗广域网:如LoRa,适用于4G信号盲区的远距离、低功耗数据传输。通信协议:采用MQTT、CoAP等轻量级协议,适应低带宽、高并发的物联网场景。边缘计算节点:在传输层部署边缘计算设备,可对数据进行本地预处理(如过滤、压缩),减少云端负载,并支持断网续传,保障数据完整性。关键技术,多网络融合技术:根据施工环境动态选择最佳通信网络,确保数据传输的连续性和可靠性。数据安全技术:通过APN/VPDN专网、数据加密、访问控制等手段,保障传

输过程的安全。低代码配置技术：通过可视化界面快速配置传输参数（如频率、加密方式），降低部署复杂度。应用场景，在水利施工中，传输层支撑着大坝碾压机械的实时位置与压实数据、灌浆设备的压力与流量信息、以及各类环境监测数据的回传，为智能化调度提供基础。

3. 云端层

云端层技术架构，数据融合中心，整合来自感知层（如传感器、GPS定位）的施工机械运行数据（位置、油耗、工况）、环境数据（气象、地质）及工程进度数据，通过ETL工具清洗异常值，构建统一时空数据库。示例：大坝填筑机械的碾压轨迹、压实度数据与设计模型实时比对，生成偏差预警。智能决策引擎，资源优化算法：基于遗传算法或强化学习，动态分配机械任务（如土方开挖、混凝土浇筑），减少空载率。风险预测模型：结合历史故障数据与实时工况，预测设备维护周期（如发动机磨损预警）。仿真推演：数字孪生技术模拟施工进度，优化调度方案（如洪水期机械撤离路径规划）。可视化与协同平台，三维GIS看板：展示机械分布、任务进度及能耗热力图，支持多终端（PC/移动端）访问。协同工作流：设计、施工、监理方通过云端共享数据，实现任务派发-执行-验收闭环管理。关键技术，大数据处理技术，采用Spark/Flink流处理框架，实时分析TB级机械运行数据，支撑秒级响应调度指令。云原生架构，基于Kubernetes容器化部署微服务，弹性扩展计算资源（如汛期临时增加仿真节点）。安全与标准化，数据加密传输（TLS 1.3）与访问控制（RBAC模型）。遵循《水利工程建设信息管理架构标准》，统一数据接口与编码体系。应用案例，三峡大坝施工：通过云端调度200+台无人驾驶碾压机械，实现填筑效率提升30%。南水北调工程：数字孪生平台模拟全线机械调度，缩短工期15%。该架构通过“数据-模型-应用”三层协同，推动水利施工从经验驱动向数据驱动转型。

二、核心功能与应用场景

1. 实时监测与智能调度

核心功能，实时监测与数据采集，通过部署传感器、GPS等设备，实时采集机械设备的运行状态（如位置、油耗、故障代码）、施工环境（如地质条件、气象数据）及工程进度（如土方量、混凝土浇筑量）。数据通过4G/5G或LoRa传输至云端平台，支持远程监控与异常预警。智能调度与协同作业，基于算法分析设备状态、任务优先级及资源分布，自动生成最优调度方案。例如：

动态分配土方机械与运输车辆，减少空载率；根据施工进度调整混凝土泵车作业顺序，避免工序冲突。系统支持多设备联动控制，如挖掘机与推土机协同作业时自动匹配工作路径。故障诊断与维护预测，通过AI分析设备运行数据，提前预警潜在故障（如发动机过热、液压系统泄漏），并推送维修建议，降低停机风险。应用场景，大型水利工程：在跨区域调水、水库建设中，智能调度系统可协调数百台设备（如盾构机、起重机）的作业时序，确保工期与安全。应急抢险：洪水或塌方场景下，系统快速调配挖掘机、装载机等设备，结合实时水文数据优化抢险路径。精细化施工：通过数字孪生技术模拟施工流程，验证调度方案可行性，如大坝浇筑中的混凝土运输车调度。技术支撑，数字孪生平台：构建施工机械的虚拟映射，支持动态仿真与策略优化。边缘计算节点：在本地处理高频数据，降低云端传输延迟，提升响应速度^[2]。通过智能化调度，水利施工可提升设备利用率20%以上，缩短工期15%-30%，同时降低能耗与安全风险。

2. 故障预警与远程维护

水利施工机械设备智能化调度的核心功能与应用场景，特别是故障预警与远程维护方面，主要依托物联网、大数据和AI技术实现设备全生命周期管理。核心功能，实时状态监测与数据采集，通过部署温度、压力、振动等传感器，实时采集设备运行参数（如电流、转速、能耗），并传输至云端平台，实现设备状态透明化。例如，泵站可监测电机电流、管道压力等数据，支持远程查看。故障预警与主动防御，系统内置智能分析模块，对比实时数据与安全阈值，检测异常（如过载、干转）后触发多级报警（声光、短信推送）。部分系统可自动执行保护动作（如紧急停机），防止设备损坏。例如，水闸泵站平台能定位故障设备并推送维修建议。远程维护与诊断，支持远程参数调节、启停控制及故障诊断。运维人员可通过平台查看设备历史数据、生成维修工单，并跟踪处理进度，形成“预警-派单-维修-验收”闭环。低代码平台还可快速搭建维护管理系统，减少现场巡检需求。应用场景，水利工程施工现场：大坝填筑机械通过北斗定位和物联网技术实现无人驾驶碾压，系统实时监控压实度并预警故障。泵站与水闸管理：远程控制闸门启闭、调节泵站流量，结合健康分析模型预测设备寿命，优化备件库存。跨区域联合调度：多泵站协同运行时，系统根据需水量自动分配流量，降低能耗。技术支撑，数据

融合与可视化：通过数字孪生平台展示设备三维模型，关联运行数据与历史记录。智能算法：利用知识图谱分析故障根源，结合图像识别技术辅助诊断。

3. 全生命周期管理

水利施工机械设备智能化调度与全生命周期管理是智慧水利建设的重要组成部分，核心功能，设备状态监测与远程控制，通过物联网技术实时采集机械设备的运行参数（如油耗、工作时长、故障代码），并支持远程启停、参数调整等操作，确保设备在最佳状态下运行。例如，水泵、闸门等设备可通过智能管理系统实现精准控制。智能调度与资源优化，基于数字孪生技术构建施工场景的虚拟模型，结合BIM+GIS技术模拟设备调度路径，优化“人、机、料、法、环”资源配置，减少空转和等待时间。例如，在淮河入海水道工程中，通过4D模型预演施工流程，提前识别调度堵点。故障预警与维护决策，利用大数据分析设备历史运行数据，预测关键部件（如发动机、液压系统）的剩余寿命，触发预防性维护工单，降低突发故障风险。全生命周期数据追溯，从设备采购、使用到报废的全过程数据上链存证，包括维修记录、能耗统计、折旧计算等，为资产管理提供透明化依据。应用场景，施工期智能调度，在大型水利工程（如水库、堤坝建设）中，通过数字孪生平台动态调整挖掘机、混凝土泵车等设备的作业区域和时序，避免交叉作业冲突。运维期设备管理，对已投入运行的闸门启闭机、发电机组等设备进行远程监控，结合AI算法分析振动、温度等数据，实现异常工况自动报警。通过上述功能与场景的结合，水利施工机械的智能化调度可提升设备利用率20%以上，同时延长全生命周期管理效能。

三、实施路径与挑战

水利施工机械设备的智能化管理是提升工程效率、保障安全的关键环节。结合行业实践与技术趋势，其实施路径与挑战可归纳如下：

1. 实施路径

设备智能化升级，通过加装传感器、GPS等物联网设备，实时采集设备位置、运行状态、油耗等数据，构建数字化管理基础。例如，利用机械指挥官等系统实现

设备选型优化与动态调度，减少闲置与过度使用。管理平台构建，建立集成化运维管理平台，整合设备监控、维护记录、故障预警等功能，实现全生命周期管理。部分大型项目已引入BIM技术进行施工模拟与实时监测，提升管理精度。智能调度与决策支持，结合大数据与AI算法，分析施工需求与设备能力，生成最优调度方案。例如，通过历史数据预测设备故障，提前安排维护，减少停机时间。人员培训与制度完善，加强操作人员与管理的技术培训，制定标准化运维流程，避免因操作不当导致的设备损耗。

2. 主要挑战

技术应用瓶颈，部分水利工程（如中小型水库、堤防）监测设施覆盖率低，智能化技术普及受限。设备老旧、技术更新快也增加了升级难度。管理机制不足，传统人工管理效率低，信息化程度不足导致数据孤岛现象突出。同时，跨部门协作与标准化流程仍需完善。自然与成本压力，水利工程常面临复杂地质、气候条件，影响设备稳定性。此外，智能化改造需大量资金投入，对中小企业构成压力。

3. 未来方向

国家水网工程已明确“网络化、数字化、智能化”目标，未来将依托数字孪生、5G等技术提升设备互联与调度能力。例如，构建“一网、三中心、N结点”的智慧化体系，实现设备全流程精准管控。水利施工机械智能化管理需技术、制度、资金多维度协同推进，同时需应对自然条件与成本约束等挑战。

总之，随着数字孪生、无人驾驶等技术的成熟，水利施工机械将向全自动化、自适应调度方向发展，进一步降低人工依赖并提升工程精度。例如，灌浆工程实时智能化监控系统已实现关键工序的精细化管理。

参考文献

- [1] 李忠浩. 水利施工机械设备智能化调度与运维管理探讨[J]. 中国新技术新产品. 2009, (23). 121-123.
- [2] 张晓丽. 浅谈水利施工机械设备智能化调度与运维管理研究[J]. 科技资讯. 2006, (19). 34-35.