

# 基于北斗高精度定位的水电站大坝施工机械智能调度系统研究

惠红强

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

**[摘要]**为解决西南一大型水电站大坝施工场地地质环境复杂、设备众多及组织协调难等一系列问题,开展了以北斗高精度定位为基础的大坝施工机械设备智能调度系统的研究工作。系统采用北斗 RTK 定位技术、多源信息融合技术和智能调度规划算法等多项先进技术,搭建起感知层、传输层、平台层以及应用层四个层次框架结构,达到对施工现场机械进行实时定位监控、监测其使用状况、优化行驶轨迹以及相互之间协调配合的目的,尤其是围绕北斗卫星导航系统定位数据设计了单车工程费用计算模型和收益评估体系,在此基础上对调度方案改进前后的关键经济参数做出预测比较来说明该系统的经济效益。研究结果表明,该系统能够显著提高机械利用率以及节约燃料消耗及闲置费用,对大型水电工程建设项目的精细化管理具有良好的技术和经济效益支持作用。

**[关键词]**北斗高精度定位; 施工机械调度; 智能建造

DOI: 10.33142/hst.v9i3.19333

中图分类号: TV64

文献标识码: A

## Research on Intelligent Scheduling System for Hydroelectric Dam Construction Machinery Based on Beidou High Precision Positioning

HUI Hongqiang

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

**Abstract:** In order to solve a series of problems such as complex geological environment, numerous equipment, and difficult organization and coordination in the construction site of a large hydropower station dam in Southwest China, research has been carried out on an intelligent scheduling system for dam construction machinery and equipment based on high-precision positioning of Beidou. The system adopts advanced technologies such as Beidou RTK positioning technology, multi-source information fusion technology, and intelligent scheduling planning algorithms, and builds a four level framework structure of perception layer, transmission layer, platform layer, and application layer to achieve real-time positioning and monitoring of construction site machinery, monitor their usage status, optimize their driving trajectory, and coordinate and cooperate with each other. It can significantly improve mechanical utilization and save fuel consumption and idle costs. In particular, a single vehicle engineering cost calculation model and benefit evaluation system have been designed based on Beidou satellite navigation system positioning data. On this basis, key economic parameters before and after the improvement of the scheduling plan are predicted and compared to illustrate the economic benefits of the system. The research results indicate that the system providing good technical and economic support for the refined management of large-scale hydropower construction projects.

**Keywords:** Beidou high-precision positioning; construction machinery scheduling; intelligent construction

### 引言

大型水电站大坝建设施工特点有施工区域狭小,机械种类繁多,交叉作业多,指挥调度难度大等。西南一个大型水电站大坝工程项目坐落于高山峡谷之间,高峰时期各种设备多达 200 余台,在这样复杂的条件下若继续采用传统的通过对讲机进行人工协调指挥的方式,会造成信息传递延迟,死角较多以及反应迟缓,无法满足高强度连

续施工的需要。近年来北斗全球卫星导航系统全面建成投入使用,精准定位技术广泛应用于工程建设行业之中。据相关研究,基于北斗+实现实时差分技术可以达到工程车辆定位的厘米级别精确度,能够给智能指挥调度提供坚实的技术支撑依据。本文以西南某大型水电站大坝工程项目为依托,进行关于基于北斗高精度定位技术下的施工机械智能调度系统的开发,主要针对解决机械的位置获取、工

作状况收集、分配策略制定以及经济收益评估这几个重要点进行相关研究。

## 1 大坝施工机械调度需求与系统总体架构

### 1.1 智能调度系统功能需求分析

针对大坝建设过程中的智能化调度系统需要具备如下几个方面的要求：一是实时定位跟踪管理，能够实现对所有的施工装备的厘米级别的位置识别并绘制出作业轨迹图；二是健康监控以及故障告警，在线收集各台设备燃油消耗量、转速、负荷、温度等工作环境指标参数并对出现的问题及时发出警告提示；三是任务分配及行车路线安排，在施工方案的基础上自动分配设备任务并规划最佳行驶路线；四是群控避免相互干扰现象的发生，避免在同一个区域内的设备因为距离过近而导致彼此之间发生刮擦事故；五是信息汇总与处理，自动完成台班台账、耗油记录、效率评估等工作报表。从研究结果来看，矿山土石方施工应用智能化调度方案后可以使得机械设备使用率平衡提高 30% 以上并且安全生产事故降低了 60% 左右。

### 1.2 系统总体架构设计（感知层-传输层-平台层-应用层）

系统采取四层结构设计。感知层包括装在设备上的北斗高精度定位装置、车载传感器、摄像机等对位置、姿态、工况、环境等进行数据采集，其中北斗装置具有 RTK 差分的功能，平面误差小于 2cm，高程误差小于 5cm；传输层基于现场建设的 5g 基站以及自组网装置来实现大量数据的快速传送并进行边缘计算的预处理；平台层为整个系统的运算核心部分，部署在云端服务器上，完成数据融合、位置计算、调度算法运行以及数据库维护；应用层面对调度管理人员，给出电子大屏、调度指令下达、报表导出以及报警提醒。经研究发现，大型施工机械设备无人化的前提是厘米级定位技术的应用，在北斗/GNSS 卫星定位系统结合 UWB 技术之下，机械设备可以在复杂的环境中保持良好的导航性能。

## 2 基于北斗定位的施工机械感知与数据采集系统

### 2.1 施工机械北斗终端布设方案

根据西南某大型水电工程水电站大坝建设机械种类及工作环境不同而采取不同的部署策略：挖掘机、推土机等大型机械设备安装北斗双天线装置，结合惯导单元完成全方位监测；自卸卡车等运输车辆安装单天线设备，获取位置信息以及行驶速度与距离；混凝土泵车等固定式设备通过基准站+流动站结构部署。所有的设备均内置了 4G、5G 通讯模组，峡谷间信号弱区增设 UWB 基站进行辅助

增强。研究发现，在运输设备内嵌入定位芯片后可以实时获取其行驶速率以及轨迹还有负载量大小等信息，建成三维立体监测体系。

### 2.2 作业状态实时感知与数据采集方法

作业状态监测分为机器作业状态与作业过程状态两大类。作业状态监测是基于车载 CAN 总线采集发动机转速、油耗、油门踏板位置、液压泵排量等信息以及通过北斗定位获取的位置信息来确定设备是行驶、作业还是怠速或者停机的状态。作业过程状态通过对设备所在位置的变化轨迹及传感器信号进行分析来确定：挖掘机的挖斗动作由铲斗角度传感器和液压压力确定为装料-旋转-卸料-退回的动作；振动碾碾压次数由其移动轨迹同施工区域电子围栏重叠计算得出；自卸车的装载点则由进入和离开电子围栏的时间点记录下来等信息。数据采样率随设备种类变化而改变，高速移动车辆使用 5Hz、慢速作业碾压装置使用 1Hz，从而降低数据冗余及通讯开销，实验证明北斗卫星系统联合地面基站可以给机器进行厘米级精确度定位，同时整合多种传感器信息，做到对周围环境全方位的监测。

## 3 大坝施工机械智能调度模型与算法设计

### 3.1 调度目标函数构建（效率、成本、能耗）

智能化调度要在施工效率、运营成本以及能源消耗这三个方面之间进行取舍。效率的目标是使最大完工时间最短；成本的目标是使机械设备操作总费用最少；能耗的目标是单位产品综合能耗最少。用线性加权的方法把多个目标合并成一个目标。权重要根据项目实际情况来定：效率 0.4，成本 0.4，能耗 0.2。约束条件有工序顺序的限制，设备数量限制，工作面容量限制，安全间距限制等。通过实验证明了，调度问题是需要建立一个以最小化最大完工时间，以及最小化总的能耗总量与总机器负载量为目标函数的目标规划模型。

### 3.2 施工机械作业路径优化模型

任务路线优化主要是针对自卸车、洒水车等有行驶特点的机器而言。大坝工程项目施工场地道路较窄且坡度较大，会车机会较少，路途的选择既要考虑路程最短、时间最省，还要兼顾节油环保、避堵等因素。把施工道路网络简化成有向图模型，结点为交叉路口，装料站点以及卸载站点，弧线表示各个路段之间的连接关系，权值设置为通过该路段所需要的时间，大小跟当前车辆数量有关。运用改进型 A\* 算法来进行静态路径搜索，在此基础上融入实时交通信息来实施动态再调整方案，在多个卡车同时提请

路径的情况下，系统设置时间窗口限制避免路径冲突，具体做法是在一维坐标轴上给每台车分配一个路段的时间间隔，若超出了规定的时间长度还没有结束，则会发出警告并重新执行。研究表明，基于深度强化学习的调度策略在增加产量的情况下大大减少了机械相互干涉的概率。

### 3.3 多机械协同调度模型

大坝建设的主要协作模式有挖装运协作、摊铺碾压协作、混凝土供给协作三种。挖装运协作主要以挖掘机与装载机的比例为中心，系统根据挖掘机装车耗时以及装载机的运输周期及时调整出最佳卡车数量，防止出现装载机空闲或者等待的现象；摊铺碾压协作主要是根据摊铺机的速度及碾压遍数的要求来确定所需的振动碾的数量以及行走速率的问题，在摊铺完之后要尽快用振动碾实施碾压；混凝土供给协作中，拌和楼、搅拌车、泵车串联在一起组成一条生产线，若其中任何一个工序的节拍不符合都会影响整个系统的运行效率，系统会实时检测各工序的工作率，以此调控搅拌车发车间隔以及行走路径。机械施工智能化的主要目的就是依托大数据来改善施工工艺并且减少对人工需求的程度，常见的技术架构包括感知层、控制层、执行层、协作层四个层次。

## 4 基于调度数据的施工机械经营分析与成本控制

### 4.1 基于北斗数据的单机作业成本核算模型

传统成本计算是以每个月或者一个季度为时间周期来汇总总量信息，不能细化到每一台设备、每次班次及每次行程的信息；基于北斗位置数据可以构建起单台设备作业的微成本测算模型。模型公式如下：

$$C_{\text{总}} = \sum (C_{\text{燃油}} \times T_{\text{作业}} \times r_{\text{油价}} + C_{\text{人工}} \times T_{\text{台班}} + C_{\text{维保}} \times N_{\text{台班}} + C_{\text{闲置}} \times T_{\text{闲置}} + C_{\text{折旧}}) \quad (1)$$

其中： $C_{\text{总}}$ 是单车核算周期总成本， $C_{\text{燃油}}$ 是单车单位时间油耗成本，通过 CAN 采集到的实时油耗积分求得； $T_{\text{作业}}$ 是根据北斗轨迹判定的有效作业时间，不同于简单地通电时间和行驶时间； $r_{\text{油价}}$ 是柴油单价， $C_{\text{人工}}$ 是台班人工费，包含了操作手工工资及各种社会保险； $T_{\text{台班}}$ 是实际出勤台班数，在定位数据中开机时间段选取； $C_{\text{维保}}$ 是单台班维保费用，包含滤芯更换、加注润滑油、损坏零件更换费用等； $N_{\text{台班}}$ 是累计作业台班数； $C_{\text{闲置}}$ 是单位空闲期成本，包括折旧费、借款利息以及保险费用等； $T_{\text{闲置}}$ 为空闲期，定位信息里怠速并且没有作业的行为时间段； $C_{\text{折旧}}$ 为折旧金额，采取的是按使用量分摊的方式或者按年份分摊的方法，这个模型可以输出单车每小时作业成本，为企业经

营管理提供准确的数据参考。从研究得知，设备购置方式中，在高原地区的折旧系数乘以 1.3，低温地区乘以 1.2，设备每年的折旧率应该按照 18% 计算而不是常规认为的 10%。

### 4.2 机群综合运行效率与能耗经济性分析

机群联合工作能力体现的是多台机器在一起工作的整体情况，其计算方法如下所示：

$$E_{\text{机群}} = Q_{\text{产量}} / \sum (T_{\text{作业},i} \times P_i) \quad (2)$$

式中： $E_{\text{机群}}$ 为机群联合工作能力； $Q_{\text{产量}}$ 为统计周期内合格产量数； $T_{\text{作业},i}$ 为第  $i$  台设备的有效工作时间； $P_i$ 为第  $i$  台设备的额定功率。这个数据可以用来比较不同的调度方案中机群工作的优劣情况<sup>[1]</sup>。能量经济性的考量就是看每生产一吨粮食需要多少燃油。计算方式如上所示：

$$U_{\text{能耗}} = \sum F_{\text{消耗},i} / Q_{\text{产量}} \quad (3)$$

式中： $U_{\text{能耗}}$ 为每生产一吨粮食所需的燃油量， $F_{\text{消耗},i}$ 为第  $i$  台设备消耗的燃料总量， $Q_{\text{产量}}$ 为统计周期内所生产的合格产品数量，在此基础上还可以进行分解能耗结构：行驶燃油比例、作业燃油比例以及怠速燃油比例等，找出节省能量的突破口。西南一大型水电站大坝应用案例显示，智能调度使车辆减少了无用行程以及怠速时间，整个车队工作效率提高了 22% 左右，而每吨产品的油耗也节约了大约 15%。无人驾驶卡车车队通过车-路-云三位一体系统可以做到全天候不停运转，单车年运输量增长到 35%，油耗减少 16%。

### 4.3 机械闲置与空驶浪费的量化评估

机械停置是指机械设备可以正常运行但没有进行工作的时段，空载行驶指的是车辆完成卸货之后的空程。根据北斗定位信息可以准确判断出停置时间段以及空驶距离。是 4.1 单台设备费用计算中的  $C_{\text{闲置}}$  的基础数据来源，也是 4.2 能耗分析确定燃油浪费主要环节的位置依据。西南某大型水电工程大坝项目中，在引入系统之前通过人为经验估计的机械设备闲置率为 25%，空驶率为 20%；引入系统之后用北斗系统的实际监测数据显示出来闲置率为 28.5%，空驶率为 22.6%，都远超出了之前的预估值<sup>[2]</sup>。具体的数值测算的意义就在于发现管理漏洞，给调度改进提供了客观的基础。赣江尾间项目实行动态调整，使设备使用率达到 85% 以上，每月节省租金支出 3 万元。

### 4.4 调度优化前后的经营效益对比预测

在北斗智能调度系统的基础上，对调度优化前后的几个重要的经营指标做出预测如下表所示：

表1 调度优化前后经营效益对比预测

经营指标	优化前（传统调度）	优化后（传统调度）	改善幅度	年度效益估算（万元）
单机日均有效台班	6.2h	8.5h	+37.1%	等效增加产能
月度平均油耗	2850 升/台	2310 升/台	-18.9%	节约燃油费约 95
机械闲置率	28.5%	12.3%	-56.8%	减少闲置损失约 120
空驶里程占比	22.6%	9.4%	-58.4%	节约燃油与磨损约 65
单方施工机械成本	4.85 元/m <sup>3</sup>	3.62 元/m <sup>3</sup>	-25.4%	按年产量 500 万 m <sup>3</sup> 节约 615
设备故障停机时间	年均 168h	年均 95h	-43.5%	减少误工损失约 80

注：年经济效益根据西南一个大型水电站大坝建设高峰时期 100 套主要设备，每年工作时间为 300d，柴油平均价格 8 元/L 进行估算。表格中的数字是通过模拟以及类似的工程项目进行测算出来的预估数值。无人化智能化摊铺碾压机组群施工可以做到全天候连续性施工，提高工作效率 25% 以上，每公里节约柴油 122.5L，大大降低二氧化碳排放量。

#### 4.5 机械全生命周期成本控制策略

机械设备全寿命周期成本包含购买成本、运行成本、维护保养成本以及处置成本四个方面。根据北斗调度数据开展生产经营分析能够为上述各方面的节支措施提供支持。首先是对采购环节进行改进，在单台机成本计算模型下找到高价设备，在更换购买之时挑选性价比更高的种类；其次是对使用年限进行延长，对工况数据进行研究得出机械承载能力的特点从而制定不同的检修制度，防止出现过度损耗或者提前淘汰的情况发生；再就是加大残值变现力度，拥有完整的工作履历以及维修记录，使二次售卖时信息更加公开公正从而增强谈判优势；最后是引入租赁代替机制，针对一些季节性的或者是突发性的需求机械经过比较之后采用租赁的方式代替采购行为<sup>[3]</sup>。经过分析研究得出租赁、采购选择需要贯通“三维成本链”， $租赁总成本 = 月租 \times 租期 + 燃油费 \times 时长$ ， $采购总成本 = 购置价 + (维修费 + 保险费 + 折旧费) \times 使用年限 + 残值折价$ 。

#### 5 结语

本文依托西南某大型水电站大坝工程项目，探讨北斗高精度定位下的施工机械智能调度系统，搭建起感知层-

传输层-平台层-应用层层叠结构，实现施工机械厘米级定位、状态实时监控、智能调度管理以及经营分析。着重对北斗定位单个机械的成本核算模型的建设以及调度优化前后经营收益对比预测机制做了探究。北斗高精度定位技术一方面克服了传统调度方式信息时滞以及盲区不足的问题，另一方面也给施工机械设备精确化成本管理提供数据支撑。伴随北斗系统的逐渐完善，这个智能化调度系统可以推广应用于更多的水电项目当中，为大型工程建设数字化升级和提质增效发挥助力作用。

#### 【参考文献】

- [1] 敖哲鑫. 基于北斗多频观测数据的单历元高精度定位方法[J]. 北京测绘, 2026, 40(3): 289-295.
- [2] 樊启祥, 林鹏, 谢亮, 等. 水电工程复杂场景施工资源定位管理技术研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(2): 113-124.
- [3] 刘沛. 基于北斗高精度定位的智能调度系统研究[J]. 信息记录材料, 2020, 21(8): 2.

作者简介：惠红强（1982.03—），男，毕业院校：武汉科技大学/浙江大学，所学专业：工程造价管理/工商企业管理，当前工作单位：中国水利水电第十二工程局有限公司，职务：公司二级专家，职称级别：高级经济师。