

## 基于 GPS 与 RTK 融合的大坝运输车辆智能调度与能耗监控系统研究

王现明

浙江中水数建科技有限公司, 浙江 杭州 310030

**[摘要]**某抽水蓄能电站上水库大坝填筑工程具有挖填规模巨大、地形条件复杂、运输强度高显著特点,传统运输管理模式面临调度效率低、能耗控制难、安全风险大等多重挑战。文中针对上述问题,设计了一套基于 GPS 与 RTK 融合的大坝运输车辆智能调度与能耗监控系统,从系统总体架构、实时定位与轨迹监测、任务智能分配与能耗采集分析、可视化管理平台四个维度阐述系统设计。在此基础上,从定位精度提升、调度算法优化、智慧工地融合应用、数字化管理体系建设四个方面提出系统优化建议。该系统通过 GPS 与 RTK 融合技术实现厘米级高精度定位,结合智能调度算法和能耗实时监控,可有效提升大坝运输环节的智能化管控水平。

**[关键词]**GPS 与 RTK 融合;抽水蓄能电站;车辆智能调度;能耗监控

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20085

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

## Research on Intelligent Scheduling and Energy Monitoring System for Dam Transport Vehicles Based on GPS and RTK Fusion

WANG Xianming

Zhejiang Zhongshui Shujian Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

**Abstract:** The dam filling project of the upper reservoir of a pumped storage power station has significant characteristics such as huge excavation and filling scale, complex terrain conditions, and high transportation intensity. The traditional transportation management mode faces multiple challenges such as low scheduling efficiency, difficult energy consumption control, and high safety risks. In response to the above issues, a dam transportation vehicle intelligent scheduling and energy consumption monitoring system based on GPS and RTK fusion was designed in the article. The system design was elaborated from four dimensions: overall system architecture, real-time positioning and trajectory monitoring, intelligent task allocation and energy consumption collection and analysis, and visual management platform. On this basis, system optimization suggestions are proposed from four aspects: improving positioning accuracy, optimizing scheduling algorithms, integrating smart construction sites, and building digital management systems. The system achieves centimeter level high-precision positioning through GPS and RTK fusion technology, combined with intelligent scheduling algorithms and real-time energy consumption monitoring, which can effectively improve the intelligent control level of dam transportation.

**Keywords:** GPS and RTK fusion; pumped storage power station; intelligent vehicle scheduling; energy consumption monitoring

### 引言

随着抽水蓄能电站建设的迅速发展,大坝填筑运输组织管理的重要性也越来越大。某抽水蓄能电站位于浙江省天台县,是国家“十四五”重点实施项目,总装机容量为 170 万 kW,额定水头为 724m (世界最高),单机容量为 42.5 万 kW (国内第一)。大坝填筑期间,坝料运输车辆智能调度及能耗监测属于决定工程效率、成本以及安全的重要因素。传统的运输管理存在着车辆位置获取滞后、路径规划依靠经验、油耗手工记录等弊端,在山区复杂的地形中更加明显。实时动态差分 (RTK) 技术利用地面基站

校正卫星信号来达到厘米级高精度定位的目的。将 GPS 和 RTK 结合起来使用,可以给智能调度、能耗精细化管理提供高精度的位置支持。本文以该电站上水库大坝填筑工程为背景,设计出基于 GPS 和 RTK 融合的车辆智能调度与能耗监控系统,并提出相应的建议。

### 1 大坝填筑施工运输组织特点

某抽水蓄能电站上水库大坝填筑工程属于典型的山区施工运输工程。

第一,地形状况十分繁杂,工程区山高坡陡、地势狭窄,施工道路条件差,道路运输危险性大。大坝填筑要严

格按分层压实的原则进行,用进退错距法或者圈转套压法进行机械化碾压,严格控制填料的质量指标。土石料填料集中、上坝强度大、填筑方量大、质量要求高,施工工艺复杂,坝面施工有严密的组织和管理,各工序之间互相衔接,分段流水。

第二,运输强度大,调度压力大。由于场地狭小、弃渣不足、极端天气影响等原因,项目部坚持“试验先行、样板引路”的原则,在大坝填筑高峰期一直保持高强度的施工。施工高峰期运输任务多、时空分布不均,给调度系统提出很高的响应速度和决策能力要求。在大坝填筑碾压现场对大量的运输车辆实施实时全过程的监控,将定位误差控制在厘米级。因此对于高强度运输来说,只能依靠智能化调度系统。

第三,施工期长,运输任务持续性高。电站主体工程从开工到首台机组并网发电,整个建设周期比较长。运输车辆的运行状态、能耗数据、位置信息等要实时采集、持续监控,对系统数据采集能力及通信稳定性有较高的要求。土石方挖填量大、料源多、路径交叉、管控难度大等特点,使土石方平衡成为工程施工过程中主要的问题,制约着工程进度、质量、投资三大目标的实现。

## 2 大坝运输车辆智能调度与能耗监控系统设计

### 2.1 系统总体架构设计

系统由感知层、传输层、数据处理层和应用层四个层组成,以实现施工现场机械实时定位、监测使用情况、优化行驶轨迹、相互之间协调配合。感知层由每辆运输车上安装的车载智能终端组成,使用 GPS 定位、地磅、RFID 技术对车辆的料源点、卸料点、土料种类、车辆运输路线进行跟踪。车载终端装有 GPS/RTK 双模定位模块、车辆 CAN 总线接口、能耗传感器、无线通信模块,可以对车辆的位置、速度、油耗、发动机工况等进行实时采集<sup>[1]</sup>。传输层用 5G 专网创建出低延迟、高带宽的通信通道。数据处理层主要对数据进行清洗、融合、存储、分析,即 GPS/RTK 融合定位解算、调度算法运算、能耗数据分析等主要功能。应用层给施工管理、调度指挥、能耗监控等应用场景提供车辆调度、轨迹回放、能耗统计、告警管理

等功能。系统各个模块的功能见表 1。

### 2.2 车辆实时定位与运行轨迹监测模块设计

车辆实时定位和轨迹监测模块是系统的主要数据采集单元。该模块使用 GPS 和 RTK 相结合的定位方式,每台运输车辆上装有双模 GNSS 接收机,在施工区域布设参考基站。GPS 提供基本的定位服务,RTK 技术利用地面基站对卫星信号进行校正,消除大气干扰、卫星误差,达到高精度定位的目的。RTK(实时动态差分)和 GNSS(全球卫星导航)技术的融合,实现了室外场景下厘米级高精度定位。GPS/RTK 融合定位系统可以达到厘米级的定位精度,可以得到车辆的高精度的位置、速度、航向角等状态信息。北斗高精度定位系统动态 RTK 定位精度水平可达  $2\text{cm} \pm 1\text{ppm}$ 。大坝填筑施工时,采用高精度 GPS 定位技术,可以对碾压作业数据进行实时监测,为大坝填筑质量提供有力保障。轨迹监测模块把车辆运行轨迹点的记录频率设为 1Hz 到 20Hz,得到完整的运输路径数据。根据车辆的位置、运行轨迹、装料地点、卸料地点等信息来实现对运料全过程的可视化监控和调度。系统根据轨迹数据计算车辆在料场装载区、运输道路、卸料区各环节的行驶时间,实时统计单车运输周期。对于山区道路信号遮挡问题,系统用历史轨迹数据的插值和滤波算法来完成定位盲区的轨迹补全,保证轨迹数据的连续性。

### 2.3 运输任务智能分配及能耗数据采集分析模块设计

运输任务智能分配模块就是在满足大坝填筑进度要求的基础上,对车辆和运输任务进行最优的分配。模块的核心就是智能调度算法引擎,系统使用北斗 RTK 定位技术、多源信息融合技术、智能调度规划算法等多项先进技术,把车辆实时位置、状态(载重/空载)、料场供料能力、坝面填筑需求作为输入,把最小化运输总耗时、均衡车辆工作负荷作为优化目标,动态生成运输任务分配方案。在混凝土坝工程施工进度和成本管理当中,急需对坝料、渣料、骨料水平运输调度优化方案进行统筹考虑。当出现车辆故障、道路拥堵等突发情况的时候,模块可以立即启动重调度计算。能耗数据采集分析模块在每辆运输车上安装能耗传感器,实时检测运输过程中油耗数据,把 GPS 轨

表 1 系统各模块功能说明表

| 模块名称       | 所属层级  | 核心功能                    | 技术支撑            |
|------------|-------|-------------------------|-----------------|
| 车载定位感知模块   | 感知层   | GPS/RTK 定位数据采集、车辆工况数据采集 | 双模定位模块、CAN 总线接口 |
| 能耗监测模块     | 感知层   | 实时油耗/电耗监测、能耗数据上传        | 能耗传感器、车辆控制器     |
| 5G/物联网通信模块 | 传输层   | 数据传输、通信链路保障             | 5G 专网、MEC 边缘计算  |
| 融合定位解算模块   | 数据处理层 | GPS/RTK 数据融合处理、厘米级位置解算  | RTK 差分算法、滤波算法   |
| 调度优化引擎模块   | 数据处理层 | 运输任务分配、路径规划、车辆调度决策      | 智能调度算法          |
| 可视化管理平台    | 应用层   | 地图监控、任务派发、能耗分析、告警管理     | WebGIS、数据可视化    |

迹数据与油耗数据相结合来计算单位里程油耗、单车往返油耗、单位运输量能耗等指标。利用智能传感器、物联网技术可以及时了解车辆的位置、运行状况、能耗情况等信息,进而准确安排运输路线、作业任务,实现设备的智能调度和协作工作,从而提高施工效率<sup>[2]</sup>。系统会自动对高能耗时段、高能耗路段进行分析,找出异常的能耗波动并发出告警。智能维护系统可以提前预知设备出现的故障情况,从而节省由于设备故障而造成的停机维修时间。该模块负责土石方调配方案的落地执行,对调度指令进行优化,为通过方量精确核算控制施工成本提供数据支撑。运输任务智能分配与能耗数据采集分析模块结构图如下所示。

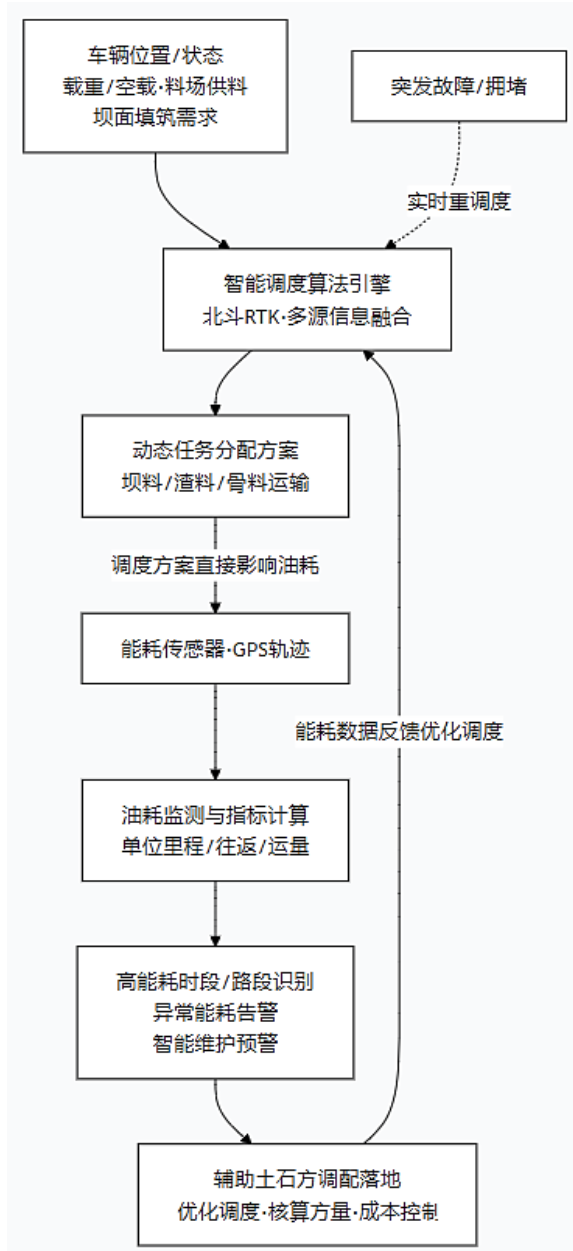


图1 运输任务智能分配及能耗数据采集分析模块架构

## 2.4 可视化管理平台设计

可视化管理平台属于系统的用户界面,给调度员、管理人员赋予可视化的监控及操作手段。平台采用 WebGIS 技术,用电子地图的形式把所有的运输车辆实时位置、运行状况、运输路线都呈现出来。管理人员点开车辆图标就会看到车辆的当前任务、速度、油量、行驶里程、所属驾驶员这些信息。调度员可以手动下达运输任务,系统会自动将任务推送到对应的车辆车载终端上,也可以使用智能调度模式,由调度引擎自动生成任务并发布到平台上,然后由平台进行派发确认。平台具备历史轨迹回放的功能,能够选择某一时间段回放某一车辆的行驶路线,并且可以同时展示这段时间内的能耗数据,从而方便对运输过程进行复盘以及驾驶员的操作分析。能耗管理模块用仪表盘的形式来显示车队整体的油耗趋势,单个车辆的油耗排名以及运输效率分析表。平台还具有告警管理功能,当车辆行驶路线出现偏离时,就会产生线路偏离报警,并且会将报警信息发送给管理人员。

## 3 系统优化建议

### 3.1 提高复杂地形区域定位精度

虽然 GPS 和 RTK 融合的方案可以达到厘米级的定位,在开阔的区域可以做到,但是抽水蓄能电站施工区域的沟谷纵深、山体遮挡严重,造成部分路段的 RTK 差分信号接收不稳定。格网化网络 RTK 可以消除地形对定位精度的影响,用平原、过渡区、山区三个区域的不同密度划分的格网 RTK 定位实验来分析确定不同地形的格网划分密度标准。不同的定位技术在复杂地形中适用性不一样,见表 2。

表 2 不同定位技术的精度与复杂地形适用性对比

| 定位技术              | 定位精度           | 优点                  | 局限性                      | 适用场景                  |
|-------------------|----------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
| 单独 GPS            | 米级<br>(5~10m)  | 覆盖范围<br>广,设备成<br>本低 | 精度低,受多路<br>径效应影响大        | 开阔区域、<br>非关键任务        |
| RTK               | 厘米级<br>(1~3cm) | 精度最高,<br>实时性强       | 差分信号易受<br>山体遮挡,需基<br>站覆盖 | 基站信号覆<br>盖良好的区<br>域   |
| GPS+RTK+IMU<br>融合 | 厘米级            | 抗遮挡能力<br>强,连续性<br>好 | 系统复杂度高,<br>成本较高          | 抽水蓄能电<br>站复杂地形<br>全路段 |

建议在 GPS/RTK 接收机上加装低成本 IMU 惯性测量单元,当 RTK 差分信号中断时利用 IMU 做短时航位推算,保证定位的连续性。依靠连续运行基准站(CORS)网络,采用内插数学方法处理大气延迟误差,可在复杂地形下达到厘米级的高精度实时定位。同时对施工区域参考基站的选址布局进行优化,适当增大基站密度来减小信号盲区。



### 3.2 优化车辆调度算法

目前系统所用的智能调度算法大部分可以满足运输任务分配的要求,但随着大坝填筑施工的推进,道路网络以及料场供料条件会不断发生变化,传统的静态调度方法已经不能适应当前路径规划和任务分配中严格的逻辑关系使常规算法不能很好地解决高约束遗传算子问题。建议使用基于深度强化学习的动态调度方法,算法模型将实时交通状况和施工需求作为输入,不断改善调度方案。就

230 万  $\text{m}^3$  填方跨区域调配问题而言,将 BIM 模型与现场地形数据相结合,准确计算出挖填量,并借助仿真算法优化运输线路,可以明显减少二次搬运次数,提高调配速度。采用高约束单亲遗传算法等方法来解决大坝运输调度任务中严格的约束问题。土石方调运分期路网模型将工期离散成若干个时段,对每个时段建立路网模型,以体现调运网络的时变特性,从而提高挖填料直接利用率。优化车辆调度算法的改进方案结构图如图 2 所示。

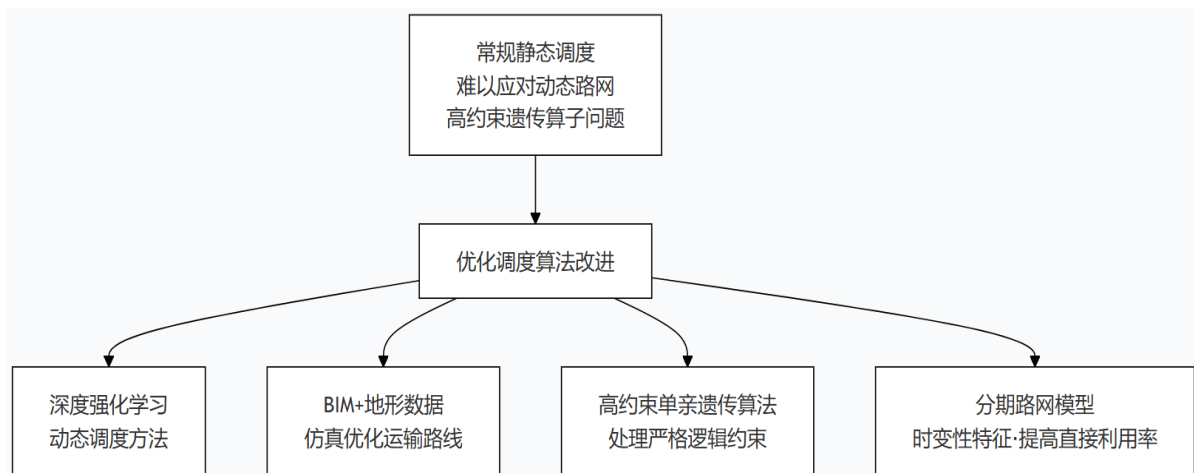


图 2 优化车辆调度算法改进方案架构

### 3.3 深化智慧工地平台融合应用

系统运行效果很大程度上取决于与其他施工管理平台数据融合的程度。目前车辆调度以及能耗监控的数据没有与进度管理系统、质量监控系统等形成信息闭环。以 BIM 模型为数据基础,把车辆运输数据同 BIM 中的进度计划联系起来。通过将无人机航拍得到的高精度现场实际地形数据同 BIM 模型深度整合,准确计算出各个区域的土石方量,利用仿真算法对各个作业区的工程量和运输路线进行智能调配<sup>[3]</sup>。利用 GIS、BIM、AIOT 技术建立的数字大坝施工闭环管理系统,对坝料运输、碾压等各个施工环节进行全方位的监控和智能化管理。综合使用 BIM、GIS、RFID 和无人机倾斜摄影等数字化技术来创建智能土石方动态管控系统,从而达到工程建设全过程料源动态管控的目的。建议创建包含环境监测、安全监控、质量验收评价等内容的综合管理系统,利用 AI 视觉识别、智能监控等方式实现智能化管理。

### 3.4 推进数字化施工管理体系建设

系统的优化不仅是技术上的更新,更深层次上要从施工管理理念、制度体系等各方面进行系统改善。建立大坝

运输全过程的数字化管理标准,对车辆调度、能耗监控、数据统计分析、考核评价等各方面作出统一规定。建议把能耗数据加入施工成本核算体系当中,以单位运输量能耗作为车队考核的量化指标。就项目部管理人员而言,深入推进信息化建设及培训应用工作,推动施工方案数智化改良。围绕北斗卫星导航系统定位数据来设计单车工程费用计算模型和收益评价体系,可以对调度方案改进前后关键的经济参数进行预测比较<sup>[4]</sup>。根据车辆的运行情况每天、每周、每月自动生成工作报表,达到坝料运输信息化管理的目的。机械指挥官管理系统对设备运行全过程进行管控。

## 4 结语

基于 GPS 和 RTK 融合的大坝运输车辆智能调度及能耗监控系统,是为了解决抽水蓄能电站大坝填筑运输管理问题而提出的一种系统性的解决办法。本文根据施工运输组织的特点,完成了系统总体架构、实时定位与轨迹监测、任务智能分配与能耗采集分析、可视化管理平台四个主要模块的设计,从定位精度提高、调度算法优化、智慧工地平台融合、数字化管理体系建设四个方面提出改进意见。之后可以对调度算法进行改进,提高多源定位的融合度,

考虑无人机巡检系统在大坝运输方面的联动,朝着更高级别的智能化方向前进。

[参考文献]

[1]赵建.基于 GPS-RTK 技术的桥梁监控应用研究[J].运输经理世界,2021(3):89-90.

[2]吕伟明.GPS-RTK 技术在水利工程施工测量中的精度控制研究[J].中国高新科技,2025(21):149-151.

[3]刘伟强.水库大坝变形观测过程 GPS—RTK 技术的有效运用[J].河南水利与南水北调,2016(12):66-67.

[4]潘建恩.水利水电工程测量中 GPS RTK 技术的有效运用研究[J].江西建材,2016(16):142-148.

作者简介:王现明(1991—),男,工程师,浙江大学工商管理学硕士,现担任浙江中水数建科技有限公司总经理,主要从事工程数字化及智能建造管理工作。