

# 地下厂房智能建造建设与应用综述

何国锋<sup>1</sup>, 张发斌<sup>1</sup>, 孙家波<sup>2</sup>, 徐改卫<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650041;

2. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南 迪庆 674608)

**摘要:** 结合华能集团将 TB 水电工程建设成为“绿色电站、智慧电站”的建设目标, 在 TB 水电工程地下厂房工程建设过程中, 同步进行智能建造项目的建设与应用。运用物联网、射频识别、数据采集、云技术等手段, 完成地下洞室智能通风、地下施工地面化、施工现场可视化、信息化、数字化及智能化, 实现了水电工程智能建造技术的突破, 提升了施工和管理水平, 为将 TB 水电工程建设成为“绿色电站、智慧电站”的建设目标奠定了基础。

**关键词:** 地下厂房; 智能建造; TB 水电工程

**中图分类号:** TV52

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2024)S1-0051-05

**A review of intelligent construction and application of underground plants**//HE Guofeng<sup>1</sup>, ZHANG Fabin<sup>1</sup>, SUN Jiabo<sup>2</sup>, XU Gaiwei<sup>2</sup> (1. Sinohydro Engineering Bureau 14 Co., Ltd., Kunming 650041, China; 2. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China)

**Abstract:** In line with Huaneng Group's vision of building the TB Hydropower Project into a “green and smart power station”, the construction of the underground power plant at the TB Hydropower Project was carried out in conjunction with the construction and application of intelligent construction projects. With the methods of internet of things, radio frequency identification (RFID), data acquisition, and cloud technology, intelligent ventilation of underground caverns, underground construction that operates akin to surface-level projects, as well as the visualization, informatization, digitization, and intelligentization of the construction site were achieved. These achievements have led to breakthroughs in intelligent construction technology for hydropower projects, improving the standards of construction and management. This progress has firmly established the groundwork for the TB Hydropower Project to realize its ambition of becoming a “green and smart power station”.

**Key words:** underground plant; intelligent construction; TB Hydropower Project

互联网时代, 数字化催生着各个行业的变革与创新, 建筑行业也不例外。智能建造是解决建筑行业低效率、高污染、高能耗问题的有效途径之一, 已被广泛应用于工程实践。智能建造主要是将信息化、自动化、智能化与工程建设过程高度融合的建造方式, 通过集成和应用智能化系统, 减少对人的依赖和人工决策的主观性, 提高基础设施建设的可靠性和经济性, 已经成为当前世界各国工程建设的发展重点和热点。

近年来大数据、物联网、人工智能和云计算等智能建造技术逐渐在建筑工程领域得到了广泛应用。与其他行业相比, 我国水电工程智能建造起步较晚, 经过多年的发展, 水电工程的建设先后经历了人工化、机械化、信息化和数字化阶段, 现在已迈入向智能化转型的阶段<sup>[1-3]</sup>。如何加快智能建造的步伐, 是

水电工程目前面临的问题。结合业主方提出的“1+3+N”与“四个一”的智能建造主题, TB 水电工程地下厂房工程建设过程中, 同步开展了 3 个关键技术之一的“地下厂房智能动态管控技术”及 10 个智能建造项目的建设与应用, 同时配合业主方应用了 14 个通用管理系统, 实现了水电工程高效智能建造技术的突破, 提升了 TB 水电工程地下厂房工程施工和管理水平, 为 TB 水电工程建设成为“绿色电站、智慧电站”的建设目标奠定了基础, 为后续水电工程全面推广智能建造的应用打下了坚实的基础。

## 1 自建智能建造系统

地下厂房工程自建了 10 个智能建造系统, 包括智能建造管理平台、智能通风及人员健康在线监测系统、视频监控系统、厂房及主变洞 BIM (building

information modeling) 技术应用系统、门禁管理系统、人员定位系统、车辆定位系统、雷达测速系统、安全隐患排查系统、VR (virtual reality, 即虚拟现实) 安全体验系统。

### 1.1 智能建造管理平台

为了实现智建地厂系统中各专业子系统统一管理、数据集成、同步与共享,实现智建地厂智能建造管理平台与业主的智慧 TB 管理平台系统对接,发挥智能建造项目为工程建设服务的作用,提升工程施工和管理水平,利用 BIM 及物联网技术<sup>[4]</sup>,建立了智建地厂系统智能建造管理平台(图 1)。智能建造管理平台主要由智能建造控制中心机房、LED 显示大屏及其他配套的辅助设备设施组成,包括软件系统、基础硬件系统、基础网络系统、大数据控制系统、显示系统等。



图 1 智能建造管理平台

### 1.2 智能通风及人员健康在线监测系统

为解决密集洞室群平行施工环境差的难题,基于理论需风量和地下空间的粉尘、O<sub>2</sub>、CO、氮氧化合物等气体状况实时监测结果,建立了通风系统模型与控制参数迭代优化与智能反馈控制方法,研发了移动便携式智能通风系统管理平台(图 2),实现了通风系统的移动终端控制及施工环境中通风量、氧气输送量、除尘量的最优组合;融合网络信息、数据传感(物联网)、射频识别、数据采集、数据库和可视



图 2 便携式管理平台

化等关键技术,研发了洞室群环境气体在线监测与预警系统(图 3),实现了环境气体实时、连续、自动化、可视化和高精度在线监测,基于点网联动智能通风优化,使得爆破后空气达标时间缩短 20%,能耗降低 40%。



图 3 洞室群环境在线监测与预警系统

### 1.3 视频监控系统

视频监控系统主要包括高清网络摄像机、光纤、网络硬盘录像机、智能分析服务器、网络交换机、光纤收发器、电源线、网线、存储硬盘及安装辅材等。在工区公共区域及施工工作面安装高清摄像机,采用光纤将各个高清摄像机连接到智能建造管理控制中心集成视频监控系统,360°无死角全角落查看,24h 不间断录像,可实时查看监控图像,可随意浏览任何保存的录像。可实时视频播放及录像、云台控制、录像回放、违法行为判断、统计分析应用、数据存储等功能(图 4)。实现对视频监控范围内的人员、车辆、设备、物资和材料的状态进行识别与判断,实现人员行为分析与车辆、设备、物资和材料位置的实时监控管理,最大限度地防止设备、物资和材料被盗与流失,提高安全管理水平,实现了地下施工可视化。

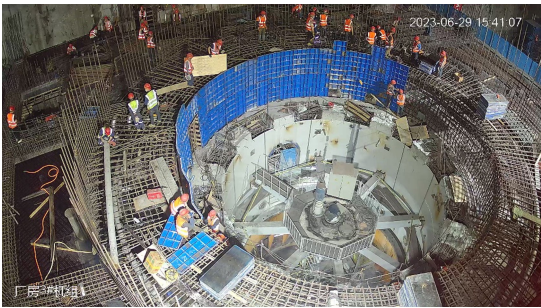


图 4 视频监控画面

### 1.4 厂房及主变洞 BIM 技术运用系统

厂房及主变洞 BIM 技术运用系统以主副厂房及主变洞开挖支护、一期混凝土浇筑为管理对象,创建与工程实际匹配的单元及进度 BIM 模型(图 5 和图 6)。模型经轻量化处理,在 BIM 引擎平台上关联工程属性、人力、机械及设备投入、施工工期等相关信息。通过模型交互查询,工程量、资源投入及进度统计分析等功能,为工程提供高效的决策支撑手段。

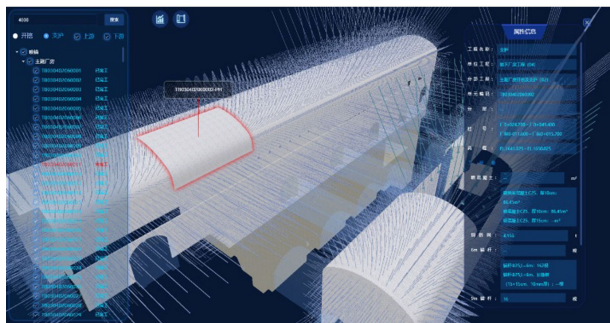


图5 开挖支护 BIM 模型

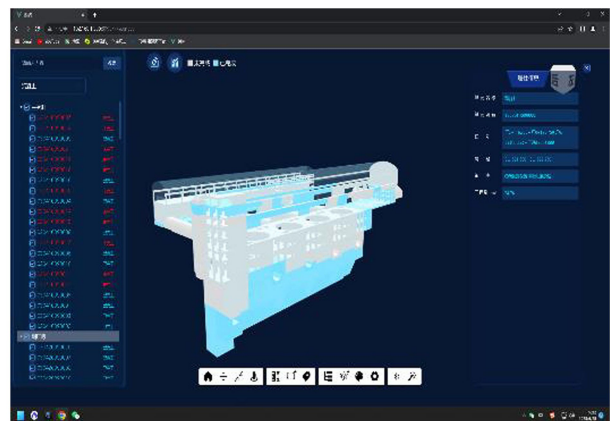


图 6 混凝土 BIM 模型

### 1.5 门禁管理系统

门禁管理系统(图7)包括人脸识别系统(图8)和车牌自动识别系统(图9)。



图 7 门禁管理系统

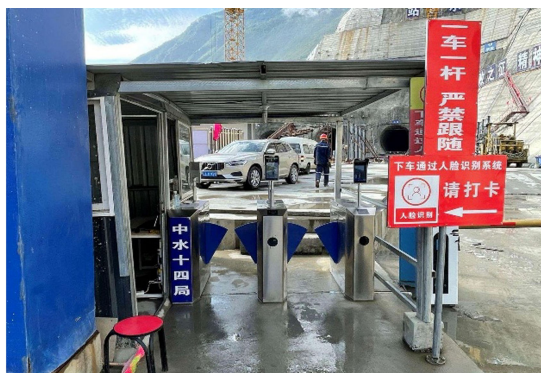


图 8 人脸识别系统

### 1.5.1 人脸识别系统

人脸识别系统主要由人脸识别闸机、LED 显示屏、值班岗亭及配套办公设备,实现对人员的动态管



图9 车牌自动识别系统

理及实名制管理。具体是在人员进、出的地方安装人脸识别闸机,通过人脸识别方式,实现对人员的动态管理及实名制管理。同时,在进洞口安装 LED 大屏(图 10),动态显示参建各方在场、出场人数,提升项目建设全过程信息化、安全管理水平和效率。

| 在場人數(人) 205 |     |   |   |   |    |     |
|-------------|-----|---|---|---|----|-----|
| 總出席在場人數     | 395 | 0 | 0 | 0 | 31 | 164 |
| 2022/09/17  | 295 | 0 | 0 | 0 | 0  | 47  |
| 2022/09/18  | 279 | 0 | 0 | 0 | 8  | 0   |
| 2022/09/19  | 365 | 0 | 0 | 0 | 5  | 0   |
| 2022/09/20  | 332 | 0 | 0 | 0 | 5  | 0   |
| 2022/09/21  | 391 | 0 | 0 | 0 | 2  | 0   |
| 2022/09/22  | 367 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/09/23  | 312 | 0 | 0 | 0 | 2  | 0   |
| 2022/09/24  | 312 | 0 | 0 | 0 | 1  | 2   |
| 2022/09/25  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/09/26  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/09/27  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/09/28  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/09/29  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/09/30  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/01  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/02  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/03  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/04  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/05  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/06  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/07  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/08  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/09  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/10  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/11  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/12  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/13  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/14  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/15  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/16  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/17  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/18  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/19  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/20  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/21  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/22  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/23  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/24  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/25  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/26  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/27  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/28  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/29  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/30  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/10/31  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/01  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/02  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/03  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/04  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/05  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/06  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/07  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/08  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/09  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/10  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/11  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/12  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/13  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/14  | 312 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0   |
| 2022/11/15  | 312 | 0 |   |   |    |     |

图 10 洞口 LED 显示屏显示参建单位在场人员信息

### 1.5.2 车牌自动识别系统

车牌自动识别系统主要由 AI 智能服务器、高清车牌识别一体机和 79G 防砸雷达、车辆智能闸机等四大部分组成。系统配置 AI 人工智能服务器,内部装有 AI 识别算法及无人化停车场管理系统,通过对海量的图片进行反复的训练和深度学习,实现了对车牌、车型、车标、车身颜色等特征的识别,准确率无限接近于 100%。具体的方案是在车辆进、出的地方安装车牌识别一体机和车辆闸道,通过车牌自动识别方式实现对车辆信息的录取和车辆通行的监管,实现对车辆实名制动态管理,提升安全管理水平,避免非法车辆进入施工区,提高了施工区的施工安全性。

## 1.6 人员定位系统

根据人员定位智能硬件,建设工程室内及室外一体化定位网络系统,实现人员实时定位,人员状态监测,人员应急救援,实时语音播报,工作考勤记录,危险区域预警等(图 11)。通过在人员的安全帽上安装定位器,利用 GPS 定位、电子安全围栏和智建平台电子地图,实时显示人员所在位置和活动轨迹,实现了对人员行为的动态管理,同时具备一键求救、远程指挥等功能,极大提高了安全管理水平和效率(图 12)。

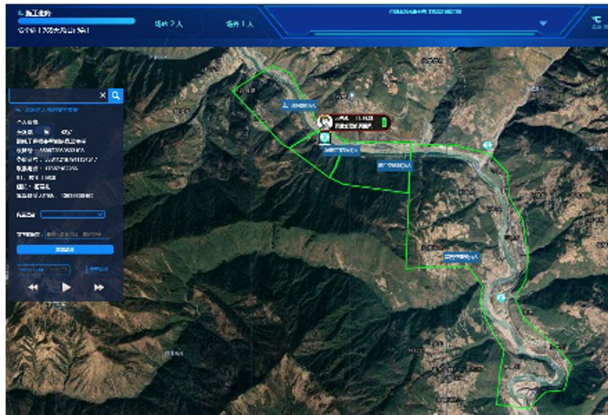


图 11 人员定位系统



图 12 人员定位设备

### 1.7 车辆定位系统

车辆定位系统(图 13)主要通过运输车辆上安装 GPS 和行车记录仪,通过 GPS 和行车记录仪实时采集车辆位置信息、运行轨迹,实时将数据、信息上传到平安云南车联网开放平台,然后将平安云南车联网开放平台与工地智能建造管理平台对接,通过控制中心及管理平台,实现对车辆的实时定位、轨迹跟踪、视频监控、发布调度指令、运输线路监管等动态管理,对施工区运输车辆和重要物资进行实时动态监控,及时掌握车辆状态,显著提高了安全管理的精准度与效率。



图 13 车辆定位系统

### 1.8 雷达测速系统

由于施工现场道路崎岖狭窄,车流量大,人车混行,存在较大的交通安全隐患,为保证道路车辆的规范行驶、降低道路交通安全风险,建设了雷达测速系统(图 14)。系统主要由测速雷达、高清摄像机、补



图 14 雷达测速系统

光灯、终端服务器、交换机、辅助照明设备和声光报警器等组成(图 15)。利用雷达测速功能,对经过雷达测速区的所有车辆进行测速,同时自动抓拍超速车辆的图像并保存在硬盘,并记录该车辆违章的时间、地点、超速值和限速值等,实现对过往车辆行驶速度的监控,预防和减少道路交通事故的发生,确保道路交通安全。



图 15 雷达测速设备

### 1.9 安全隐患排查系统

安全隐患排查系统(图 16)是一款基于微信平台的安全隐患管理系统,利用“互联网+”云技术,实现安全隐患从排查到治理全流程可视化管理,同时利用大数据对隐患种类、整改时间等不同维度的分析,具有隐患信息传递效率高、隐患整改闭环可实时跟踪、隐患分析统计针对性强等特点。该平台通过建立公开透明的责任落实和追查机制,大大降低了



图 16 安全隐患排查系统

施工建设过程中事故发生的可能性,保证施工顺利进行,提高安全生产管理水平。该系统流程主要分为3块:发现上报、隐患整改、隐患闭合。通过安全隐患排查系统的使用,大大降低施工中安全事故发生的可能性,保证施工顺利进行,提高了安全生产管理水平。

### 1.10 VR 安全体验系统

VR 就是利用计算机技术,模拟出逼真的三维虚拟世界,并通过视觉、听觉等让使用者体验施工现场危险行为的发生过程和后果,感受事故发生瞬间的惊险,从而提高施工人员安全意识,增强自我保护意识,避免事故的发生(图 17)。虚拟现实技术的特性包括沉浸性、交互性和构想性等,同时还具有强大的网络功能、多媒体功能,可创建三维立体造型场景,具有动态交互、人工智能、智能感知等。本项目将 32 种 VR 虚拟现实技术应用到安全教育,开创了全新的沉浸式安全教育新模式。



图 17 VR 安全体验系统

## 2 配合应用的通用管理系统

地下厂房工程土建施工中总共配合业主应用了 15 个智能建造系统,主要包括:人员信息管理系统、设备信息管理系统、质量在线验评系统、进度计划管理系统、周报报管理系统、有用料管控系统、试验检测系统、经济问题管理系统、计量签证管理系统、智慧物资管理系统、设计管理系统、混凝土施工管理系统、项目 OA 系统、智能灌浆系统、安全管理信息化平台。

通过通用管理系统(图 18)的全面应用,实现工程现场施工资源(人员、设备、有用料)的实时监控与管理,实现覆盖质量验评、试验检测在内的工程质量管理全过程的数字化应用,实现了工程进度、文档

等技术管理的信息化应用,混凝土生产过程、施工过程、灌浆过程数字化监控与管理,工程资料的数字化归档,以及企业级物资供应链管理,提升了 TB 水电工程地下厂房工程管理水平。



图 18 配合业主应用的通用管理系统

## 3 结 论

TB 水电工程建设中,运用物联网、数据采集、云技术、射频识别、GPS、VR、BIM 等技术手段,建设了智能建造管理平台、智能通风及人员健康在线监测系统、视频监控系统、厂房及主变洞 BIM 技术运用系统、人脸识别系统、人员定位系统、车辆定位系统、车牌自动识别系统、安全隐患排查系统、VR 安全体验系统、质量在线验评系统、试验检测系统、混凝土施工管理系统和智能灌浆系统等,通过对系统的应用,实现了地下洞室智能通风、地下施工可视化、信息化、数字化及智能化,实现工程质量管理全过程的数字化、混凝土及灌浆施工全过程数字化监控与管理,解决了水电工程智能建造“从无到有”的问题,实现了水电工程智能建造技术的突破,提升了 TB 水电工程施工和管理水平,为 TB 水电工程建设成为“绿色电站、智慧电站”的建设目标奠定了基础,也为后续澜沧江上游水电站工程开展智能建造建设提供了经验与参考。

本工程智能建造虽然取得了一些成绩,但也存在不足,后续还需进一步改进:

a. 懂技术熟业务的复合型人才匮乏。智能建造项目在水电工程地下厂房施工行业处于起步阶段,既懂技术又熟悉业务的复合型人才不多,大多数人都是在实践中摸索,导致智能建造工作开展比较困难。

b. 智能建造系统存在缺陷。智能建造系统设计人员具有非常专业的知识,但缺乏现场施工管理经验,导致部分系统技术与业务之间存在“两张皮”的现象,建议系统设计时加强与应用单位的沟通,尽量做到设计与应用场景高度统一、融合。

(下转第 59 页)

型托辊带式输送机最大倾角不超过 16°。

参考文献：

[ 1 ] 侯友夫. 带式输送机动态特性及控制策略研究[ D ]. 北京:中国矿业大学,2001.

[ 2 ] 郭敏. 大倾角胶带输送机延深改造设计与应用[ J ]. 当代化工研究,2019(5):190-191. ( GUO Min. Design and application of extension transformation for large inclination belt conveyor [ J ]. Contemporary Chemical Research, 2019(5): 190-191. (in Chinese) )

[ 3 ] 蔡肃川,任荣. 浅析立轴冲击式破碎机与棒磨机联合制砂工艺[ J ]. 水力发电,2007(1):48-50. ( CAI Suchuan, REN Rong. Analysis of the joint sand-making process of vertical shaft impact crusher and rod mill [ J ]. Hydropower Generation, 2007(1): 48-50. (in Chinese) )

[ 4 ] 王海舰. 布袋除尘器脉冲清灰工艺的优化研究[ J ]. 科技视界,2020(2):32-33. ( WANG Haijian. Optimization study on pulse cleaning process of baghouse dust collector [ J ]. Science and Technology Horizons, 2020(2): 32-33. (in Chinese) )

[ 5 ] 汪琳琪,梁柱俊,何艳珠. 板框式压滤机固液分离环境污染治理[ J ]. 铜业工程,2021(2):73-75. ( WANG Linqi, LIANG Zhujun, HE Yanzhu. Environmental pollution control in solid-liquid separation by plate and frame press[ J ]. Copper Industry Engineering, 2021(2):

73-75. (in Chinese) )

[ 6 ] 刘忠富,袁木林. 辉长岩骨料在托巴水电站工程中应用研究[ C ]//中国水利学会. 2022 中国水利学术大会论文集第六分册. 郑州:黄河水利出版社,2022:577-580.

[ 7 ] 钟毅,程国林. 大倾角下运胶带输送机的研究与应用[ J ]. 企业技术开发,2014(24):35-36. ( ZHONG Yi, CHENG Guolin. Research and application of large angle inclined belt conveyor [ J ]. Enterprise Technology Development, 2014(24): 35-36. (in Chinese) )

[ 8 ] 张建荣. 大倾角下运带式输送机防飞车治理实践[ J ]. 山东煤炭科技,2023(1):129-131. ( ZHANG Jianrong. Practice of preventing flywheel in downward belt conveyor at large inclination [ J ]. Shandong Coal Science and Technology, 2023(1): 129-131. (in Chinese) )

[ 9 ] 王军,葛令芝. 矿用下运大倾角光面胶带输送机的应用研究[ J ]. 煤矿现代化,2011(6):63-66. ( WANG Jun, GE Lingzhi. Application research on mine downward large inclination smooth surface conveyor belt [ J ]. Modernization of Mines, 2011(6): 63-66. (in Chinese) )

[ 10 ] 王军. 下运带式输送机制动装置的选用分析[ J ]. 煤矿现代化,2006(5):71-72. ( WANG Jun. Analysis on the selection of braking devices for downward belt conveyors [ J ]. Modernization of Coal Mines, 2006(5): 71-72. (in Chinese) )

( 收稿日期:2024 - 09 - 23 编辑:刘晓艳)

( 上接第 55 页 )

- c. 智能建造网络建设不完善。在项目建设初期,系统依赖于互联网运行,然而在国家重要会议及护网期间,系统需暂时停运,这导致系统的连续运行受到了中断,呈现间歇性运作状态,同时存在网络覆盖不全的问题,导致智能建造系统间歇性运行。
- d. 管理人员认知不足,管理不到位。大部分管理人员受传统的管理模式和手段影响,对新兴的智能建造的重要意义认识不到位、不深刻,由于目前智能建造系统应用过程中还需大量的人员配合运行、维护,减人效果不明显。
- e. 费用处理比较困难。智能建造项目的建设需要投入大量经费,但存在费用处理比较困难的情况,影响了相关方的积极性,建议以后在招标中进一步明确智能建造费用的出处,在实施过程中提高费用处理的力度和及时性。

参考文献：

[ 1 ] 樊启祥,陆佑楣,周绍武,等. 金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[ J ]. 水利学报,2019,50(3):294-304. ( FAN Qixiang, LU Youmei, ZHOU Shaowu, et al. Research and practice on intelligent construction technology system of Jinsha River hydropower projects

[ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 50(3): 294-304. (in Chinese) )

[ 2 ] 谭尧升,樊启祥,汪志林,等. 白鹤滩特高拱坝智能建造技术与应用实践[ J ]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(7):694-704. ( TAN Yaosheng, FAN Qixiang, WANG Zhilin, et al. Intelligent construction methods for the Baihetan super high arch dam [ J ]. Journal of Tsinghua University ( Science and Technology ), 2021, 61(7): 694-704. (in Chinese) )

[ 3 ] 刘耀儒,侯少康,程立,等. 水利工程智能建造进展及关键技术[ J ]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10):1-20. ( LIU Yaoru, HOU Shaokang, CHENG Li, et al. Advances and key technologies of intelligent construction of hydraulic engineering [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10): 1-20. (in Chinese) )

[ 4 ] 孔兰,蔡一坚,王东阳,等. GIS+BIM 的水利工程两层级架构智能建造系统研究[ J ]. 水利信息化, 2021(6):73-76. ( KONG Lan, CAI Yijian, WANG Dongyang, et al. Research on GIS + BIM based two-level framework intelligent construction system of water conservancy engineering[ J ]. Water Resources Informatization, 2021(6): 73-76. (in Chinese) )

( 收稿日期:2024 - 09 - 23 编辑:王培)