

# TB 水电工程一体化绿色智能建造系统建设与应用

李 志, 曾 伟, 朱小敏, 孙 颖, 孙正伟

(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:** TB 水电工程基于“建管合一”的管理模式, 建立了覆盖全方位、全流程、全过程、全生命周期的绿色智能建造系统, 通过在建设期实施智建大坝、智建地厂、绿色智慧砂石加工、智能机电安装等智能建造, 以及涉及安全、质量、环水保、进度、物资、设备、合同、数字档案等工程建设各方面的业务管理系统, 解决多阶段、多专业、多履约主体的流程、工艺和绩效管理等问题, 在工程应用中取得了良好的效果, 实现了工程建设管理由传统模式向智能建设管理模式的转变。

**关键词:** TB 水电工程; 绿色智能建造系统; 建设与应用; 建管合一

**中图分类号:** TV52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2024)S1-0019-05

**Construction and application of TB Hydropower Project integrated green intelligent construction system//**LI Zhi, ZENG Wei, ZHU Xiaomin, SUN Ying, SUN Zhengwei (*Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diding 674608, China*)

**Abstract:** Based on the “integrated construction and management” model, the TB Power Station has established a green intelligent construction system that covers all aspects, full flows, full processes, and the entire lifecycle. By implementing intelligent construction during the construction phase, such as smart dam construction, smart powerhouse construction, green and intelligent sand and gravel processing, and intelligent electromechanical installation, as well as business management systems covering various aspects of engineering construction involving safety, quality, environmental and water and soil conservation, progress, materials, equipment, contracts, and digital archives, it has addressed issues related to processes, techniques, and performance management across multiple stages, disciplines, and performance entities. The application of these systems has achieved favorable results in engineering practice, marking a transition from the traditional construction management model to the intelligent construction management model.

**Key words:** TB Hydropower Project; green intelligent construction system; construction and application; integrated construction and management

我国水利水电工程开展信息化、数字化、智能化建设和管理经过数十年研究和应用<sup>[1-3]</sup>, 数字化水平已在逐步提高。早在 2008 年, 华能澜沧江公司在糯扎渡黏土心墙堆石坝建设中率先启用“数字大坝”管理系统, 利用 GPS 技术, 对碾压机和上坝运输车辆进行了定位, 实现从装料、运输、卸料、碾压等各个方面对大坝填筑质量和安全运行进行实时监控, 对保证大坝填筑质量发挥了重要作用, 为水电行业第一个提出“数字大坝”概念并成功运用的工程。后在龙开口、苗尾水电站进一步总结、深入推广运用, 效果较好。黄登水电站碾压混凝土重力坝和小湾水电站混凝土双曲拱坝在数字化建设与运行智慧管理方面开展了研究与探索<sup>[4]</sup>。三峡集团在溪洛渡拱坝建设过程中提出“全面感知、真实分析、实时控制”的智能建造理论, 形成以施工过程数字化精细

管理、关键工艺过程智能控制、大坝全景信息模型 DIM、全坝全过程结构真实工作性态与进度耦合分析为核心的智能化管理平台 iDam1.0, 开展大坝施工全过程信息化管理研究。乌东德和白鹤滩水电工程在溪洛渡拱坝智能化建设的基础上, 进一步融合传感技术、物联网、大数据、云计算及人工智能等最新科学技术成果, 开展水电工程智能建造技术和管理体系的研究与实践, 研发了智能建造管理平台 iDam2.0, 推行大坝工程智能建造信息化管理, 开发大坝混凝土浇筑一条龙和平仓振捣智能控制系统, 实现了大坝施工全过程数字化智能化管理。

杨房沟水电站在建设过程中, 以工程大数据管控为切入口, 通过利用数字化手段和 BIM 技术对大坝工程建设进度、质量、投资、安全信息进行全面管控, 实现工程可视化智慧管理, 提高工程建设与运营

管理信息化水平,改善工程质量。

通过对比分析,上述主要采用数字化、智能化建设管理的工程,目前大多着重于大坝数字化建设和部分工程智能建造管控,主要技术应用包括智能灌浆、智能温控和通水、大坝施工工艺智能监控等方面。TB 水电工程在此基础上进行拓展深化,基于 GIS+BIM+VR+IoT 等新型信息技术,充分依靠海量多类多元大数据分析技术,结合科技创新研发,建立了覆盖全方位、全流程、全过程、全生命周期的 TB 绿色智能建造系统,解决多阶段、多专业、多履约主体的流程、工艺和绩效管理等问题,实现工程建设管理由传统模式向智能建设管理模式的转变。

## 1 系统总体设计

TB 绿色智能建造系统基于水电站“建管合一”管理模式,按照“一个绿色智能建造平台、一套智慧建造管控体系、一个决策中心和一个智慧电厂”进行总体规划建设,建成涵盖工程大坝、地下厂房等主体工程,贯穿工程建设、运行全生命周期的智慧工程管理体系。规划以智能建造管理平台为基础,实现向智慧电厂无缝衔接的智慧协同管理。通过在建设期实施智建大坝、智建地厂、绿色智慧砂石加工、智能机电安装等智能建造,以及涉及安全、质量、环保、进度、物资、设备、合同、数字档案等工程建设各方面的业务管理系统,建立数字孪生平台,无缝衔接运行管理平台。

智能建造系统以技术状态管理等先进的管理理论为主要依据,针对 TB 水电工程建设中的技术和管理特点,通过解决各系统模块之间的逻辑链接问题,将 BIM、物联网、大数据、人工智能等技术,与 TB 水电工程建设安全、质量、进度、投资、环保等业务相融合,建立以工程建设数字化管控为中心,以“全方位、全过程、可追溯、智能化”为特征,实现电站设计、建设管理信息化、网络化,做到信息全记载、全监控、全追溯,在综合平台上进行全方位、全过程立体三维化呈现,实现设备全面感知、系统协同联动、数据驱动决策的智能建造系统,从而达到提高工程建设管理水平、规范管理流程、减轻劳动强度、提高工作效率和降低管理难度和成本的目的。

### 1.1 绿色智能建造平台

通过运用 BIM 技术、GIS 技术、云计算、物联网、移动互联网、大数据等多种信息化技术手段,研发一套符合 TB 水电工程管理现状、满足建设管理需求、既能独立运行又能相互关联的 BIM 和智能建造管理平台。

平台具备工程模型的可视化浏览和查询、数据

汇聚和耦合,通过对工程建设全过程信息进行收集、分析和管理的,从数据、模型、流程的层面实现对工程的进度、质量、安全、工程计量、人员、施工资源、现场监控、现场检测等工作的辅助管控。

平台具备多方协同作业的功能,采用“角色”管理的概念,将工程所有参建方均纳入平台体系,共建、共享 TB 水电工程数字化智能应用体系。

### 1.2 智慧建造管控体系

建立一套智慧建造管控体系,实现工地管理数字化和施工过程智能化。施工过程智能化的目的是“数字化施工”“智能化作业”,是面向水电工程具体的施工专业与工艺过程,通过利用移动采集、设备数字化监控、生产智能化控制等手段,实现施工全工艺流程的精细化管理与关键作业环节的智能化控制,保证工程建设的进度与质量。

工地管理数字化的目的是实现“智慧工地”,充分利用物联网、移动应用、综合定位等技术,从施工现场管控层面实现对作业人员、设备、材料的准入、运行、跟踪管控,实现试验、监测、测量、质量、安全、环境等多专业要素的综合数字化、流程化管控。

### 1.3 决策支持中心

基于大数据、商业智能(BI)技术,对质量、进度、安全、投资、人员、施工资源等各类数据进行分析。采用物联网技术,接入工程所有监控、监测设备,对数据进行钻取和穿透分析,以生动、形象的方式实时展示工程建设重要指标的总体情况;并可根据内置的算法和规则,对工程建设过程中存在的问题、潜在的风险进行预判,以多种方式进行预报、预警。

决策支持中心支持大屏、Web、移动端、微信端、VR 等应用,同时,开展工程大数据分析,实现工程进度、质量、安全、成本等多维度监控与绩效分析。决策支持中心既是远程监视和控制平台,也是本部管理机构决策会商的环境与场所。

## 2 系统功能建设

TB 绿色智能建造系统(系统架构如图 1 所示)对 TB 水电工程设计、建设过程中涉及的工程进度和施工质量等信息进行动态采集与数字化处理,构建 TB 水电工程综合数字信息平台和三维虚拟模型,以实现各种工程信息整合和数据共享,并在工程建设的整个生命周期里,实现综合信息的动态更新与维护,为工程建设决策与管理提供信息应用和支撑平台。

### 2.1 绿色智能建造平台

绿色智能建造管理平台包括 GIS 平台、BIM 平台、VR 平台和 IoT 平台。

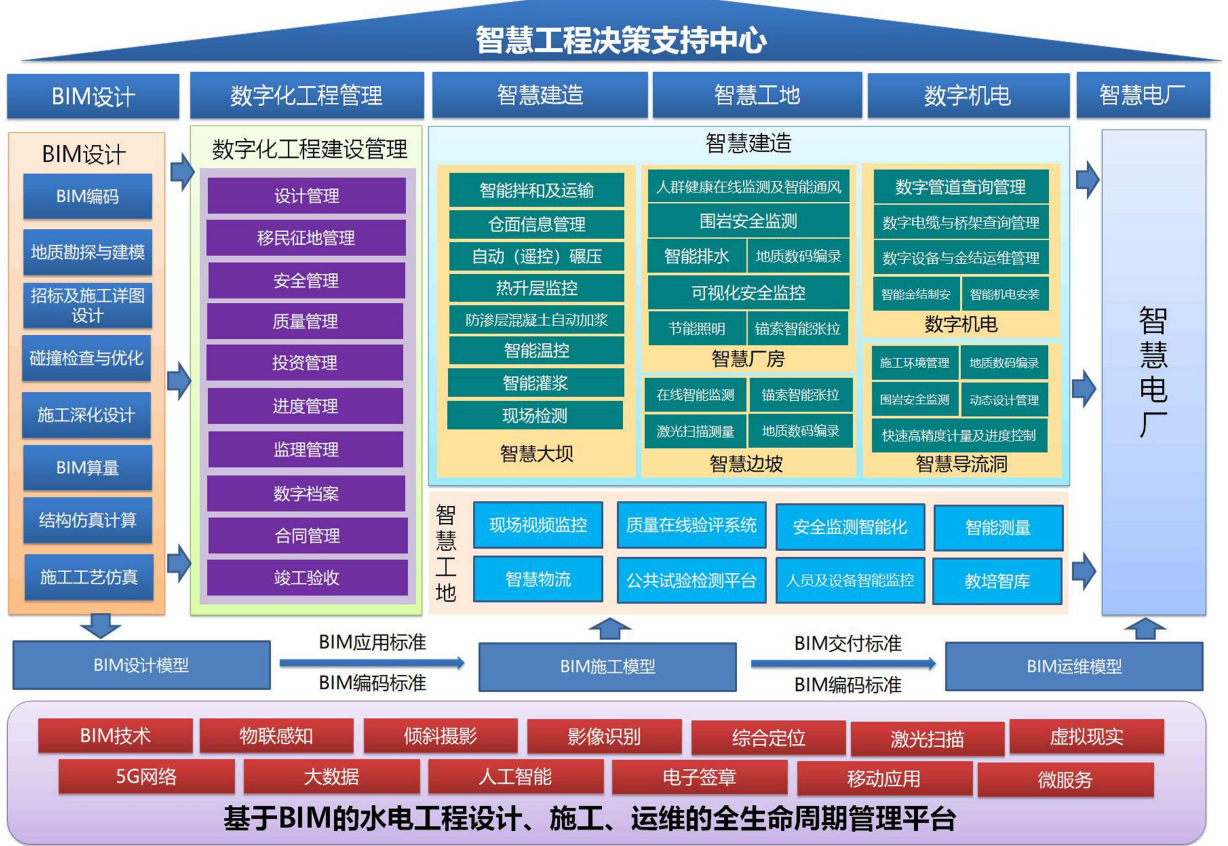


图 1 TB 绿色智能建造系统架构

2.1.1 GIS 平台

GIS 平台是一个多版本、多尺度、高精度的三维地质模型的分布式存储和管理方案,支持海量结构模型和属性模型一体化关联存储,提供高可用、高并发、高性能的三维模型服务。GIS 平台将设计院提供的精修和单体化后的倾斜摄影数据导入,通过 Web 组件的方式为业务系统和决策分析应用提供基础 GIS 可视化展示服务。

GIS 平台支持电脑、平板、手机等多种终端,支持 IE、Chrome、Firefox 和 Safari 等多种浏览器,支持 Windows、Linux、MacOS、iOS、Android 等多种操作系统,是一个基于 WebGL 的实现跨平台、跨浏览器、无插件的三维 GIS 平台。GIS 平台具备丰富的地上地下一体化的三维分析、多种实用的交互工具以及 GIS 专业分析与处理能力,如地质分析(透明地表、地面开挖、动态剖切、淹没分析、可视域分析)、交互测量(面积测量、距离测量、三角测量、两点坡度测量)以及交互绘制(交互绘制点、线、面)等,为 GIS 数据应用提供高效支持。

2.1.2 BIM 平台

BIM 平台支持主流建模软件数据成果及 IFC、OBJ、测量、倾斜摄影等数据的识别、轻量化处理,提供通用的 BIM 模型轻量化服务,支持 BIM 模型的管理、查询与展示。BIM 平台由 BIM 数据中心、BIM

管理器、BIM 浏览器组成。

BIM 数据中心建立模型转换服务,内置转换引擎及解析引擎组件,实现模型的轻量化转换及模型的解析与分析,支持分布式的模型文件存储;同时建立 BIM 管理服务,实现对工程结构分解、参数化的属性及模型进行管理,弱化对构件的定义及构件属性的强对象处理,此外支持多项目管理,并将孤立的 BIM 模型通过工程结构有机连接在一起。

BIM 管理器采用 B/S 架构,基于 VUE 框架建立,支持定义与管理工程信息、PBS 结构信息、模型上传与转换、属性的配置与维护、模型版本及权限管理等功能。

BIM 浏览器基于 WebGL 技术建立,通过在此基础上进行组件化封装及插件功能扩展,提供独立模型的浏览器及浏览插件,满足 BIM 模型浏览及与各个业务系统集成分析的需求。

2.1.3 VR 平台

VR 平台围绕 Unity3d 高性能渲染引擎进行二次开发,基于 Unity3d 引擎的跨平台优势,在主流的 PC 端、Web 端及移动端( Android 和 IOS)都能进行快速的版本发布。平台开发语言涉及 C、C++, C#, JavaScripts 等,数据接口沿用轻量化的 WebVR Api,数据通信以 JSON 格式为标准,美术资源来源 PS, 3DMax, Maya, ShadeFoge 等。平台对整体工程场景

概览、基于 BIM 结构的水工结构物展示、施工数据可视化、视频监控等业务提供技术服务,具备高效的业务开发能力。

### 2.1.4 IoT 平台

IoT 平台是专门为物联网应用设计的一体化管理平台。性能强大的 IoT Hub 方便设备和云端稳定地进行双向通信;多节点的部署让多区域设备都可以低延时与云端通信;多重的防护能力保障设备云端安全;功能丰富的设备管理能力帮助用户方便进行远程维护设备;稳定可靠的数据存储能力方便海量设备数据存储和实时访问。物联网平台还提供丰富的 API 以及规则引擎,通过规则引擎,只需在 web 上配置规则即可实现数据采集,数据计算,数据存储等全栈服务,灵活快速地构建物联网应用。

## 2.2 智慧建造管控体系

智慧建造管控体系包括通用管理系统、智建大坝系统、智建地厂系统、智能机电安装系统和绿色智慧砂石加工系统。

a. 通用管理系统:主要包含施工进度管理系统、人员信息管理系统、车辆信息管理系统、有用料管理系统、物资信息化系统、质量在线验评系统、试验检测管理系统、经济问题处理系统、计量管理系统、安全监测管理系统、生态环保监测系统、数字档案管理系统等,实现施工全方位通用业务的智能监控和管理。

b. 智建大坝系统:主要开展混凝土原材料及配料监控、混凝土智能拌和及运输智能调度、智能碾压工艺监控、热升层监控、变态混凝土振捣监控、智能温控(智能通水、智能喷雾、智能保温)、智能灌浆等项目。

c. 智建地厂系统:主要开展地下工程混凝土一条龙智能监控系统、人群健康在线监测、智能通风、地质与工程结构信息的四维全息映射系统、地下工程安全智能动态管控技术、智能预应力锚索张拉等项目。

d. 智能机电安装系统:主要包括设备全生命周期管理、数字管道、电缆及桥架查询与管理系统、主机设备虚拟动态安装、设备综合信息管理、设备安装动画演示等智能管理系统。

e. 绿色智慧砂石加工系统:开展砂石加工系统自动化控制技术和环保技术信息化和智能化研究,一方面直接引入其他类似行业先进技术和装置,建立智能降噪除尘、智慧废水处理、智能巡检机器人、骨料在线监测等系统,另一方面在已有先进技术和装置基础上开展实用化设计研究,从而构建一套包括现场信息采集和指令执行单元、数据综合处理与

智能调度单元、多方案介入协调管理单元、可视化智能监控单元组成的绿色智能化监控系统,以满足智能化生产运行和业务管理需求,实现砂石系统自动化控制、信息化管理和智能化决策,实现砂石生产效率的提高和节能降碳目标。

## 2.3 决策支持中心

决策支持中心包括 5 个部分:综合查询分析、移动查询、大屏监控、数字沙盘和大数据分析。

a. 综合查询分析:综合查询分析是决策支持中心的主要应用,功能包括:三维综合查询(三维可视化查询、三维计划查询、三维进度查询、工程结构模型等)、二维综合查询(二维可视化查询、二维计划查询)、业务专题分析(混凝土施工、基岩灌浆、质量验评、试验检测、安全监测、生态环保监测),主要实现对工程施工过程实时的监控,实现数据统计查询分析和工程建设可视化分析。

b. 移动查询:移动查询使管理人员能够利用随身携带的手机、Pad 等移动终端设备,随时随地掌握现场施工进度、质量情况,同时进行预报警和重要消息推送。鉴于移动终端设备屏幕大小和交互模式的限制,移动端查询以界面简洁、数据直观为原则,包括各个业务的综合实时监控、业务查询分析、施工报告推送、消息通知提醒等。

c. 大屏监控:智能建造大屏监控综合展示系统为整个智能建造提供直观可视化展现,同时可灵活接入其他系统,在大屏上进行有选择的集中展现,为管理人员提供有效、实用的统一场景监控。

d. 数字沙盘:数字沙盘利用 GIS、VR 等技术,以地理环境和建筑三维模型为基础,建立三维虚拟仿真环境。数字沙盘在支持三维动态交互式浏览的基础上,通过结合各业务系统数据,实现数据可视化监控、可视化查询分析与仿真模拟。

e. 大数据分析:大数据分析以大数据平台为技术基础,针对大数据平台中存储的各类结构化、非结构化数据,结合智能建造的实际业务特点,深入挖掘大数据分析应用场景,探索智能建造大数据的有效应用方法和范围,找出影响施工进度、施工质量的相关性因素及相关强度。

## 3 技术架构设计

TB 绿色智能建造系统平台采用 STDPA 平台系统架构体系<sup>[5]</sup>,遵循“全面感知、真实分析、实时控制”的闭环智能控制原理<sup>[6]</sup>,由信息感知层、网络传输层、数据管理层、技术平台层、应用决策层以及系统集成接口组成。各层之间协同一致,互相促进。智能建造系统平台技术架构如图 2 所示。



图2 智能建造系统平台技术架构

## 4 工程应用

TB 绿色智能建造系统采用分批上线运行的方式,依次上线了通用管理系统、智建地厂系统、智建大坝系统、智慧砂石加工系统、智能机电安装系统。从施工管控层面对作业人员、设备、材料的准入、运行、跟踪管控,实现施工进度、试验、质量、经营、环境等多专业要素的综合数字化、流程化管控。基于 IoT 及 AI 技术,实现了现场人员、机械、物流、环境、场区安全等管理要素的集成、全面、实时的控制与管理;规范了混凝土施工过程线上管理,实现了从混凝土开仓、设计、要料、配料、拌和、碾压和温控信息集成的全过程收集与展示,对移动端程序进行了重构,更好地支持与满足 TB 水电工程混凝土浇筑管理需要。

TB 绿色智能建造平台在工程资源管理、工程场内物流管理、全面精细化的工程质量控制体系建设、虚实结合的工程建设可视化管理、平台特色 LOGO 及外观设计等方面都取得了创新与较好应用效果。首次采用三维 GIS+物联网集成与识别+可视化等技术,对有用料全过程进行管控,提高收集率,减少有用料流失和弃料造成的污染,符合绿色 TB 建设理念;首次采用三维地理信息+BIM+VR 虚拟现实等先进技术融合,实现工程形象的三维虚拟现实的直观展示。

全面引入数字签章及数字签名认证,实现整体工程全面的质量管理数字化转型,建立工程管理文件的电子文件档案,并基于此扩展形成了工程全面的电子签章及自动归档的管理业务。

基于大数据技术实现了海量数据的采集、统计、分析、推送工作,有效地规范了业务流程,提高了管理效率,使现场信息及时、准确、真实、完整地传递到各级管理层,为科学管理、施工指导、辅助决策奠定了基础。

在智能砂石、智能拌和、智能通水、智能碾压、智能灌浆、智能机电等业务方面继承了行业前期的发展成果,并形成了进一步的应用创新。实现了资源投入、工艺过程、业务流程、结构形态、工程进度和实物成本的精准、实时、扁平化管理和调控,解决了复杂多变的现场环境与人员设备流动变化导致的资源流动性管理难题。

TB 绿色智能建造平台统一用户信息,构建全新的工程信息综合展现门户(Portal),所有业务系统支持在门户直接打开,支持 TB 建管局及澜沧江公司的门户集成,实现了数据接口的统一规范。各系统之间实现数据共享、互为支撑,实现数据实时、动态更新和反馈,一定程度上可以自动决策,为工程决策和管理提供了有效的支撑,极大地提升了工程建设管理水平,为项目实现数字化转型奠定了基础。

## 5 结 语

TB 绿色智能建造系统是结合 TB 水电工程现状、满足工程建设管理需求的综合管理平台。系统平台具备多方协同工作的能力,将工程所有参建方均纳入平台体系,共建、共享 TB 水电工程的智能化应用体系。最终形成工程建设全过程规范化、标准化、专业化、精细化管理,有力地促进了工程建设。

(下转第 73 页)

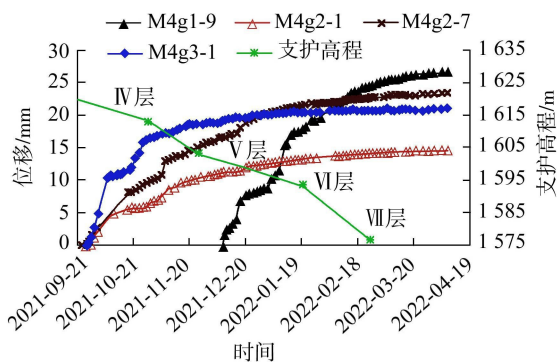


图2 典型测点孔口位移-支护高程关系曲线

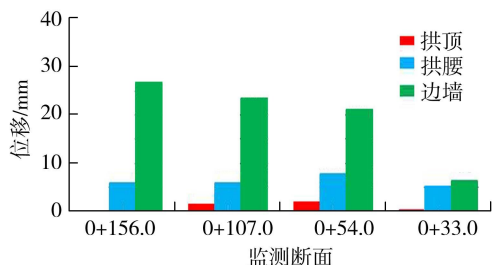


图3 主厂房多点位移计孔口位移分布

置,共布置有148根锚索)。

**b.** 拱顶、拱腰位置最大位移量仅7.6 mm,位移量总体较小。

**c.** 边墙上下游1627 m高程、1609 m高程当前位移最大测点M4g1-9(G1断面,厂0+156桩号下游边墙1609 m高程)当前孔口位移量为26.7 mm,其次最大位移量分别为23.5 mm(G2断面,厂0+107桩号下游边墙1627 m高程)、21.0 mm(G3断面,厂0+54桩号上游边墙1627 m高程),其他测点孔口位移量介于3.1~14.7 mm,当前位移变化趋势总体趋于平稳。

**d.** 位移主要集中于围岩2 m深度范围内,同类似工程基本一致。支护结束后,个别测点存在一定蠕变—趋于平稳情况,当前(支护结束约40 d)各测点位移速率接近为零,围岩应力调整基本结束,同类似工程相比应力调整时间较短。

## 5 结 语

本文对大型地下洞室开挖期进行智能化监测的必要性、可行性、难点及对应措施进行了系统介绍,并对所取得的成果进行分析,可为其他水电工程开挖期自动化监测提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 国家能源局:混凝土坝安全监测技术规范:DL/T5178—2016[S].北京:中国电力出版社.
- [2] 国家能源局.大坝安全监测自动化技术规范:DL/T5211—2019[S].北京:中国电力出版社.
- [3] 杨宁,卢正超,乔雨,等.乌东德水电站施工期大坝安全监测自动化[J].水利发电,2021,47(11):113-117. (YANG Ning, LU Zhengchao, QIAO Yu, et al. Automation of dam safety monitoring during the construction period of Wudongde Hydropower Station [J]. Hydropower, 2021, 47(11): 113-117. (in Chinese))
- [4] 胡旭阳,陈昌华,段杭,等.白鹤滩水电站施工期安全监测自动化技术的应用[J].中国水利,2019(1):99-102. (HU Xuyang, CHEN Changhua, DUAN Hang, et al. Application of safety monitoring automation technology during the construction period of Baihetan Hydropower Station [J]. China Water Resources, 2019 (1): 99-102. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-23 编辑:彭桃英)

(上接第23页)

## 参考文献:

- [1] 钟登华,王飞,吴斌平,等.从数字大坝到智慧大坝[J].水力发电学报,2015,34(10):1-13. (ZHONG Denghua, WANG Fei, WU Binping, et al. From digital dam toward smart dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(10): 1-13. (in Chinese))
- [2] 李庆斌,林鹏.论智能大坝[J].水力发电学报,2014,33(1):139-146. (LI Qingbin, LIN Peng. Demonstration on intelligent dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 139-146. (in Chinese))
- [3] 樊启祥,张超然,等.特高拱坝智能化建设技术创新和实践—300 m级溪洛渡拱坝智能化建设[M].北京:清华大学出版社,2018.
- [4] 马洪琪,卢吉,陈豪.澜沧江流域水电站大坝智慧管理实践与展望[J].中国水利,2018(20):7-11. (MA

Hongqi, LU Ji, CHEN Hao. Practice and prospect of intelligent management for hydropower dams in Lancang River Basin [J]. China Water Resources, 2018(20): 7-11. (in Chinese))

- [5] 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))
- [6] 樊启祥,强茂山,金和平,等.大型工程建设项目智能化管理[J].水力发电学报,2017,36(2):112-120. (FAN Qixiang, QIANG Maoshan, JIN Heping, et al. Intelligent management of large-scale construction projects [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(2): 112-120. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-23 编辑:王培)