

金沙江上游叶巴滩水电站智能建设关键技术 探索与应用

夏 勇

(华电金沙江上游水电开发有限公司叶巴滩分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 面对金沙江上游水电工程建设环境复杂、施工条件恶劣、生态环境脆弱等技术与管理挑战, 遵循大型水电工程科学有序开发建设理念, 致力于水电工程数字化、信息化技术与管理体系建设, 以工程结构真实工作性态的安全为目标, 对工程建设中的资源要素、管理程序、结构性态、进度计划进行实时动态分析和耦合仿真预测。笔者以叶巴滩水电站工程智能建设为例, 运用当前最新科技和管理方法进行了探索与实践, 有效解决了设计、施工和管理等难题, 为引领精品工程创建提供参考价值。

关键词: 水电站; 智能建设; 数字化; 信息化

中图分类号: TV741; C931.6

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)01-0111-05

Exploration and Application of Key Technologies for Intelligent Construction of Yebatan Hydropower Station

XIA Yong

(Yebatan Branch, Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: Faced with the technical and management challenges of the complex construction environment, harsh construction conditions, and fragile ecological environment of the hydropower projects in the upstream of the Jinsha River, the concept of scientific and orderly development and construction of large-scale hydropower projects is followed to commit to the construction of digitalization, informatization technology and management systems for hydropower projects. Taking the safety of the actual working behavior of the engineering structure as the goal, real-time dynamic analysis and coupled simulation prediction are conducted on the resource elements, management procedures, structural behavior, and schedule during construction. This article takes the intelligent construction of the Yebatan Hydropower Station project as an example, uses the latest technology and management methods to explore and practice the latest technology and management methods to explore the practice, effectively solving problems in design, construction, and management, and providing reference value for leading the creation of high-quality projects.

Keywords: Hydropower station; Intelligent construction; Digitization; Informatization

1 前言

随着水电工程信息化、网络化、智能化建设的发展, 水电站建设经历了以糯扎渡大坝碾压质量监控为代表的数字化向以溪洛渡智能应用为代表的智能化发展的过程, 正逐步朝着工程智能建设、电站智能运行和流域智能调度的方向发展^[1-2]。水电站的“智能建设”可实现自动、实时采集工程建造过程中的各类数据, 包括设备状态及位置信息, 材料属性信息和质量信息等建造过程信息, 以采用智能化方式, 减少人员的工作量, 实现水电行

业领域建造过程智能化水平显著提升^[3]。智能技术在水电站中的应用是适应时代的产物, 通过对设备的改造升级、仿真分析、实施模拟, 以实现水电站的智能管理和有效监控, 满足水电站智能建设精益化管理的需求。据相关统计分析, 基于精细化管理的“智能建设”与传统建造模式相比, 将能至少能降低 10%~20% 以上的资源投入、成本节约及能耗^[4]。

随着中国水电工程开发的逐步西移, 大型水电工程主要集中在西南高山峡谷地区, 面临着高寒、高海拔、高地震烈度等恶劣自然气候条件与复

收稿日期: 2023-11-06

杂地质条件考验,开发与工程建设管理难度极大,对水电工程建设的多要素协同管控提出了严苛要求。应用“智能建造”新技术、新理念,研发应用先进的信息化、数字化、智能化技术,实现工程安全、高效建设和运行势在必行。笔者以叶巴滩水电站智能建设关键技术研究和应用为出发点,对高海拔寒冷地区特高拱坝智能建设的关键技术进行了深入研究,但是在智能水电站建设过程中也存在一些现实困难,实现水电站智能建设对水电行业而言是长期且艰巨的挑战。

2 工程概况

金沙江上游河段水电开发规划范围上起巴塘河口下至奔子栏全长约 772 km 的干流河段,叶巴滩水电站位于四川与西藏界河金沙江上游河段上,系金沙江上游 13 个梯级水电站的第 7 级,总装机容量 2 240 MW,是中央支持西藏经济社会发展的重大项目、国家“西电东送”接续基地和西南水电基地建设的重大工程。

叶巴滩水电站枢纽建筑物主要由拦河大坝、泄洪消能设施、引水发电系统等组成,大坝采用混凝土双曲拱坝设计,最大坝高 217 m,坝身布置 5 个表孔和 4 个深孔,坝后水垫塘消能。地下引水发电系统洞室群规模巨大,采用“右岸首部式厂房+长尾水”的布置方案,厂内安装 4 台单机容量 510 MW 的混流式机组和 2 台单机容量 200 MW 互为备用的混流式泄放生态流量机组。两条尾水洞采用圆形断面,断面直径为 14.4 m,长约 3.0 km。工程平均海拔 3 000 m,极高地应力 37.57 MPa,坝址区极端低温 $-23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,全年最大昼夜温差达 $37.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,超 210 m 特高双曲拱坝,480 m 级垂直开挖边坡,综合技术难度大。

3 智能建设关键技术探索

叶巴滩水电站工程规模巨大,面对地形地质条件极其复杂、年温差及日温差极大、气候环境极恶劣、施工质量管控要求高等特点,开展基于正向设计的高寒特高拱坝 BIM 模型高效数智体系研究,创建高寒地区特高拱坝施工多要素智能管控技术体系,构建大型水电工程智能建造管理平台,对工程建设中的资源要素、管理程序、结构性态、进度计划进行实时动态分析和耦合仿真预测,可大幅度降低工程建设过程中人的不确定行为、物的不确定状态、环境的不确定因素及管理缺陷,实

现工程建设的创造价值^[5],有效解决工程建设中的设计、施工和管理难题是必要的。

3.1 建基面地质缺陷处理关键技术

工程坝址位于川西金沙江深切峡谷区,岸坡高陡,岩体浅表风化卸荷强烈、深卸荷发育。深卸荷松弛岩体空间分布复杂,强烈程度变化大,力学性能差,远远超出了以往的理论 and 工程经验,是制约工程安全稳定的特殊重大工程地质问题。针对上述问题,通过精细地质勘探、拱梁分载法、线弹性有限元法、非线性有限元法及地质力学模型试验等方法研究,掌握了深卸荷松弛岩体力学特性和松弛演化规律,实现深卸荷岩体变模、强度综合利用和时效变形控制的技术创新,提出主动保护、精细开挖、快速支护、组合处理、限松弛一控变形的坝基综合处理新方法;开展双保护层分区分级开挖、岩石盖重固结灌浆、深层快速锚固等创新技术研究,形成成套建基面开挖保护处理工法和坝基开挖综合处理措施,保障坝基开挖质量优良。

3.2 拱坝安全优质高效施工关键技术

在高寒高海拔条件下,如何有效提升混凝土运输效率,防止在混凝土运输过程外部气温对混凝土内部温度影响;如何确保混凝土振捣质量满足要求,防止混凝土内部存在缺陷,影响高寒条件下混凝土耐久性,对混凝土浇筑全流程管控提出了更高要求。针对上述问题,基于多维耦合的施工进度仿真实验,研发智能平仓、智能振捣、智能冲毛等混凝土施工智能装备,提升精品混凝土施工技术水平;构建以混凝土拌合、混凝土运输、混凝土平仓、混凝土振捣全流程全环节的智能监控系统,形成系列关键线路和重点部位快速施工成套技术,实现混凝土生产质量偏差、运输单循环时间、混凝土平仓厚度及胚层覆盖时间、混凝土振捣质量全流程智能监控。

3.3 拱坝温控防裂关键技术

工程区域气温日较差较大,易形成反复的冻融过程,汛期雨日持续时间长,呈“长冬无夏短春秋、雪稀风大降水少”气候特点,大体积混凝土温控防裂技术难度极大。针对上述问题,通过“试验研究+数值仿真+试验验证+应用优化”相结合的研究方法,实现全坝应用中热水泥混凝土;通过现场振捣试验、冲毛试验、凝结时间和早期强度等试验,探索形成与之相适应的施工工法及温控策

略,提出“小温差、慢冷却、早保温、长养护”温控理念,实施混凝土预冷、保温自卸汽车运输、吊罐保温保护、仓面智能喷雾降温等一系列温控标准化工艺;配合智能通水系统的全面应用,实现混凝土通水冷却全过程的精准控制,解决大温差气候条件下大体积混凝土温控防裂难题。

3.4 建基面智能灌浆关键技术

大坝建基面断层发育,断层多组、多方向发育,交切关系复杂,延伸长,性状差,易泥化、软化,受大量断层、节理裂隙的切割,岩体结构异常复杂,坝肩抗滑、边坡稳定、洞室稳定、坝基变形等工程地质问题突出。针对上述问题,通过智能配浆、压力流量联合控制,实现“一键启动、一键结束”全过程无人化控制、全方位灌浆监控;研究全数字化数据中心,实现灌浆作业数据的集成化。

3.5 高边坡开挖支护智能技术

左右岸坝肩处于高山峡谷地区,地形陡峭,高位边坡落石风险对施工期安全和长期运行安全影响较大。针对上述问题,采用 Rocfall 软件对高位落石进行运动特征模拟与分析,研究落石的运动轨迹与无防护情况下落石平动速度、弹跳高度、运动动能、停区域特征,有针对性的对高边坡落石进行安全防护和避让;开展高边坡开挖支护全过程边坡自动化监测,有效监控到高边坡安全稳定的

影响程度及变化规律,为边坡的稳定性评价提供充分可靠的数据成果支撑。

3.6 智能建设信息平台关键技术

面对高标准高质量的建设需求,如何将大数据、物联网为核心的现代信息技术与水电工程建设有机融合,结合全面感知、真实分析、动态调控的智能管理理念,实现工程建设全生命周期全覆盖的智能建造体系是重中之重。针对上述问题,通过研发建设信息管理平台一体化,对施工全环节、全流程进行实时监控、分析、调控,实现智能控制技术、BIM 信息平台及综合监测技术的应用,提高工程建设管理水平。

4 智能建设研究与应用

4.1 基于正向设计拱坝 BIM 模型构建

高寒地区特高拱坝一般处于高山陡坡峡谷地区,外业资料收集极其困难,传统勘察手段难度大,且海量勘察数据量处理分析难度大、复杂地质构造导致传统的人工勘察、设计手段难以实现高效设计。基于 GeoSmart 的勘察体系一体化技术,采取数据驱动、正向建模,自动解释,评价复杂块体稳定,精确施工动态分析等措施,准确还原、三维评价、精准预测、动态分析、指导施工(见图 1),实现叶巴滩水电站 480 m 级左右岸坝肩高陡边坡开挖稳定、大坝建基面一次验收通过。

★ 使用多平台 BIM 数据生产

★ 打通多格式数据转换通道

★ 确保了多终端可自由呈现

★ 适用于多种工程应用场景

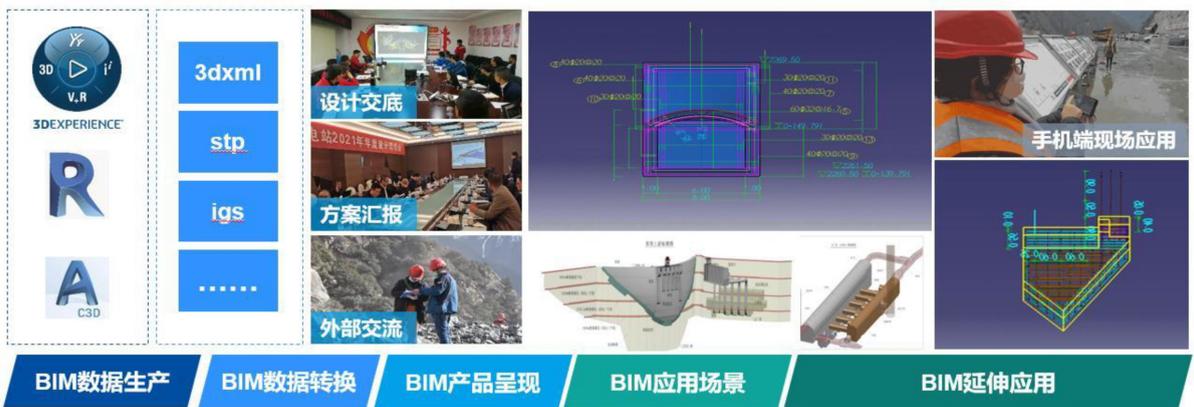


图 1 全专业多平台多格式数据融合协同设计及数字化交付

(1)高海拔地区多源异构数据的工程勘察 BIM 技术。基于无人机、机载三维激光扫描技术,开发了三维实景数字化地质测绘、无人机前端信息快速采集、岩体结构智能识别等技术,实现了全生命周期勘察的数字化勘察管理。采用快速建

模技术在云端精确还原复杂的地质体,基于模型进行多源异构、多模态、多时态、复合性的地质数据分析,全过程正向设计。基于构造模型、单因素属性模型、多因素综合属性模型、几何—参数耦合模型为叶巴滩水电站大坝建基岩体质量评价问题

提供充分依据,解决了建基面选择、建基岩体利用、地质缺陷处理等工程问题。

(2)全专业多平台多格式数据融合协同方法。开展多种专业设计平台的对比研究,形成以各辅助平台开展设计、总体协调平台协同。在通用三维设计平台基础上,自研专业性设计软件,创新协同设计及模型迭代方案,实现模型的阶段更新和同步,确保模型的准确性和实用性,实现与“叶电云”平台数据互通。

(3)全专业多场景 BIM 数字化交互方案实践。在提供全套设计蓝图的同时,也尝试交付集成部分设计数据的三维模型,用三维模型承载设计意图和设计数据,形成设计 BIM 产品,参建各方基于数字交互产品开展协同工作、实时互动,最大限度的避免设计产品“出厂地”与项目地因空间物理距离导致的信息失真。

4.2 寒冷地区拱坝施工多要素智能管控体系

以高寒特高拱坝面临的复杂恶劣施工环境为基础,构建高寒特高拱坝混凝土施工全流程智能管控技术,实现了“混凝土生产—运输—平仓—振捣”全流程智能监控(见图2)。提出低温环境混凝土温度与强度特性耦合模型,开发大温差地区智能温控系统,实现了拱坝冬季不间断高强度施工。研究高寒区特高拱坝智能灌浆关键技术,通过智能化集成、全自动化配浆、压力流量联合控制等,实现了高寒区特高拱坝基础处理质量全方位受控。研究高山峡谷地区高寒区特高拱坝开挖—浇筑全流程智能监测体系,实现工程建设安全全方位分析。大坝经历了低温冬季、高温夏季高强度施工,截至目前未发现温度裂缝,为工程安全高质快速建设保驾护航。

(1)混凝土浇筑施工全流程管控系统。构建



图2 寒冷地区特高拱坝施工多要素智能管控体系

了混凝土生产、运输、平仓振捣全过程智能监控系统,实现混凝土生产质量偏差、运输单循环时间、混凝土平仓厚度及胚层覆盖时间、混凝土振捣质量全流程智能监控。

(2)混凝土全环节智能温控。建立了全环节的智能调控模型,包括温控效果评价和预警模型、开裂风险预警模型、拌和监控模型、温度和流量预测预报模型、智能通水时空温度梯度调控模型、个

性理想温度控制曲线模型、智能小气候模型、保温监控模型等(见图3)。

(3)复杂地形条件下智能灌浆。高寒地区特高拱坝智能灌浆主要通过智能配浆、压力流量联合控制,实现配浆—灌浆“一键启动、一键结束”的无人化控制,实现了灌浆过程流量、密度、压力、注灰量等指标的实时监控与智能反馈控制,有效提升了灌浆过程控制水平。

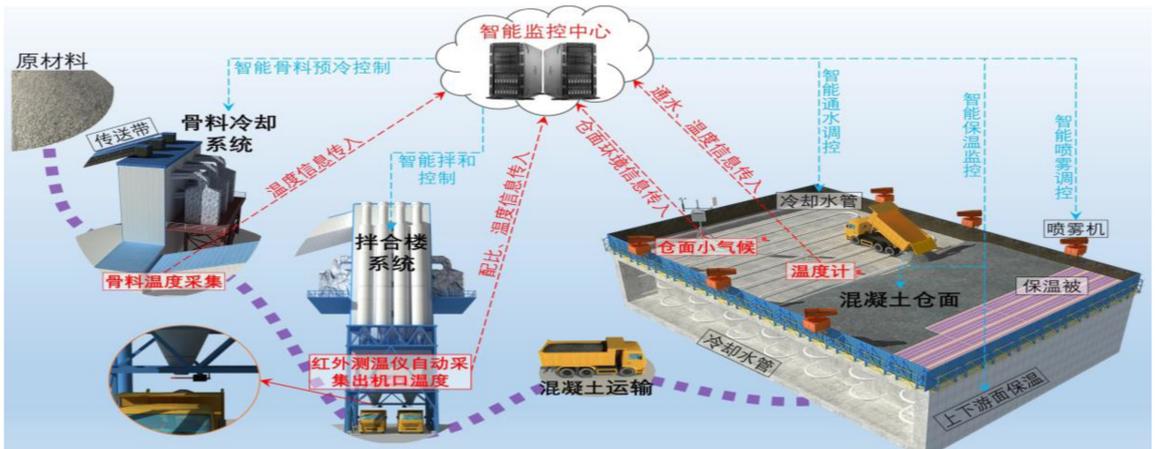


图 3 寒冷地区混凝土全环节智能温控综合监控

(4) 高边坡高地应力边坡智能监测与防护。

集成管理施工期围岩监测与稳定分析动态反馈分析成果数据,包括开挖洞段的局部和整体稳定性评价结果、开挖支护参数的优化结果、围岩稳定安全控制措施等,并将这些数据和信息展示在基于 BIM 技术的三维模型中,有效分析现场施工过程及环境条件等因素对工程边坡安全稳定的影响程度及变化规律,为边坡的稳定性评价提供了充分可靠的数据成果支撑,以指导工程施工和管理决策。

4.3 智能建设信息管理平台

以 BIM 技术、物联网技术、人工智能与大数据等新一代计算机技术为依托,研发了勘察技术管理、智慧大坝、智慧地厂、智慧机电、综合管理、合同投资管理、数字防汛等为一体的智能建设平台,集成应用智能浇筑、智能温控、智能灌浆系统、智能喷雾机、缆机及平仓振捣设备智能监控等一系列智能建造技术,有效地解决了高海拔寒冷地区特高拱坝施工过程高效管控与科学决策管理难题,管理实现了预警决策指挥。通过预警决策指挥模块,工程管理决策者可快速掌握工程建设过程中的工程形象面貌、质量数据、安全状况、水文气象、视频监控及预警信息,提升信息协同效率。此外,以现场问题、施工需求为导向,开展了多维、多场、多要素的工程全生命周期安全与工作性态评价,通过大坝施工期工作性态的动态跟踪仿真分析、风险预警及措施优化,动态反馈指导现场施工。智能建设大量运用监测(监控)感知、BIM、智能识别、云计算、物联网、移动互联等技术,根据水电工程建设特点,实现了工程建设管理的信息化、

数字化、智能化^[6]。

4 结论

智能建设是电力技术进步的必然结果,通过采用先进的通信技术、控制技术和计算机技术,能够帮助大型项目实现施工过程智能管控,尤其是根据以人为本的理念,在高海拔、高寒地区可降低工人劳动强度,节约工程投资,促进工程目标的实现。水电站智能化建设过程应积极探索,稳步推进,综合考虑技术和管理等因素,进行充分的风险和效益评估,通过技术创新不断提升水电站的智能化水平并最终实现智能水电站建设的目标,该思路在现阶段应为实现水电站智能化的现实可行方案。金沙江上游叶巴滩水电站智能建设关键技术探索与应用中的主要工作包括:

(1) 叶巴滩水电站针对工程建设过程中所面临的设计难题、施工难题、管理难题,开展基于正向设计 BIM 模型高效数智体系研究,创建高寒地区特高拱坝施工多要素智能管控技术体系,构建大型水电工程智能建设信息管理平台,有效解决工程地形地质条件复杂、年温差及日温差极大、气候环境极恶劣、施工质量管控要求高等问题,实现了信息技术和工程管理技术的深度融合,为建成技术先进、管理高效的精品工程奠定基础。

(2) 叶巴滩水电站智能建设关键技术探索与应用,契合行业工程数字化、智能化的发展方向,对工程的安全质量保证、改善作业人员工作条件、提高工作效率、节约资源和降低成本具有重要作用。

(3) 叶巴滩水电站作为在建同纬度海拔最高

(下转第 122 页)

坏, 围护结构安全;

(3) 将地下连续墙顶部水平位移与监测位移对比, 计算结果与实测位移在趋势上较为吻合, 计算位移略小于实测位移; 地下连续墙顶部的最大水平位移量值约为 3.0~4.5 mm, 量值较小, 说明地下连续墙在施工过程中的稳定性较好。

参考文献:

[1] 袁赞, 谢剑波, 林伟明. 复杂地质条件下超深渗水竖井施工技术浅析[J]. 四川水力发电, 2018, 37(5): 26-28+153.

[2] 王天明. 复杂环境下特殊地层异型深竖井关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(6): 77-82.

[3] 姚亚辉, 张玉洁, 万龙, 等. 竖井开挖过程的 FLAC3D 数值模拟[J]. 金属矿山, 2014(5): 60-63.

[4] 孙强. 复杂地质条件下竖井开挖稳定性及参数优化[J]. 水电能源科学, 2018, 36(4): 123-125.

[5] 李孟, 郑月昱, 杨小平, 等. 深厚砂层深挖圆形竖井施工数值模拟及实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1 355-1 362.

[6] 濮奇浩, 骆晓锋, 徐磊, 等. 复杂支护结构软弱地层深竖井施工过程仿真分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(3): 144-148+159.

[7] 孔科, 易文明, 汤雷, 等. 软岩中竖井开挖的支护体系研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(2): 131-134.

[8] 曾祥茜, 何文社, 王开喜. 渗流-应力耦合作用下的临库竖井开挖数值分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(4): 139-143.

[9] 毛盘, 张旭东, 叶斌, 等. 特深圆形竖井土压力分布模式及影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 257-267.

[10] 代鑫, 徐伟, 邹丽, 等. 竖井开挖过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 154-157.

[11] 熊仲明, 覃泽宏, 蔡虹, 等. 富水砂层盾构始发 MJS 工法桩的应用及分析[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(3): 8-12+64.

[12] 魏福贵, 朱牧原, 李鳌, 等. 考虑松动圈的深大竖井稳定性及受荷特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 2): 662-669+702.

[13] 马永锋, 倪锦初, 李衡, 等. 邛山高边坡对穿黄竖井变形影响三维数值分析[J]. 人民长江, 2010, 41(21): 59-61+95.

作者简介:

周巾森(1999-), 男, 重庆合川人, 硕士研究生, 研究方向为地下工程的数值模拟;

肖明砾(1981-), 男, 四川成都人, 博士, 副教授, 研究方向为地下工程(地下厂房、隧洞)、岩土基础与结构稳定性的数值模拟;

谢红强(1976-), 男, 四川成都人, 教授, 博士, 主要从事地下工程(水工隧洞、地下厂房、盾构隧道)、高边(滑)坡地质灾害、大坝基础与结构稳定性的试验测试、理论分析、数值模拟, 以及岩石流变力学和多场耦合相互作用等领域的研究;

何江达(1961-), 男, 四川达州人, 教授, 博士, 主要研究领域包括: 岩体地应力、岩体变形与强度、裂隙岩体/非饱和土渗流、岩土体多场耦合分析、岩土边坡优化设计及稳定性分析、高坝坝基(肩)、坝体结构稳定性、大型地下洞室稳定性分析从事岩体地应力、岩体参数以及高坝坝基(肩)、坝体结构、岩质高边坡、大型地下洞室稳定性研究;

裴建良(1976-), 男, 江苏常州人, 讲师, 博士, 主要从事岩石力学机理、土力学与地基基础、工程边坡稳定性等方面的教学与研究工作。

(编辑: 廖益斌)

(上接第 115 页)

拱坝, 对中国正在或者即将进行的藏区、高寒区高拱坝智能建设具有重要指导和引领意义, 推动能源数字化和智能化发展, 加快提升能源产业链智能化水平, 为类似工程提供参考。

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.

[2] 李庆斌, 林鹏. 论智能大坝[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 139-146.

[3] 钟登华, 时梦楠, 崔博, 等. 大坝智能建设研究进展[J]. 水利

学报, 2019, 50(1): 38-52, 61.

[4] 樊启祥, 张超然, 陈文斌, 等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 22-35.

[5] 王继敏, 程晓攀. 雅砻江流域水电工程智能建设探索与创新[J]. 四川水力发电, 2020, 39(6): 1-7.

[6] 李善平, 肖培伟, 唐茂颖, 等. 基于智慧工程理念的双江口水电站智能地下工程系统建设探索[C]. 北京: 中国电力出版社出版, 2017.

作者简介:

夏勇(1984-), 男, 四川泸州人, 高级工程师, 硕士, 从事水利水电工程建设管理工作。

(编辑: 廖益斌)