

智能建造技术在碾压混凝土坝施工中的应用与创新

吴都督¹, 李志², 刘金山², 安辉¹, 向崎伟¹

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南长沙 410004;
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:以 TB 水电工程为例, 介绍了智能建造技术在碾压混凝土坝施工中的应用与创新。基于“GIS+BIM+VR+IoT”搭建了智能建造平台, 利用“区域内网+5G 网”双网融合模式将“智能拌和、智能碾压、智能灌浆、智能温控”四大系统协同统一, 构建了“智能浇筑”和“智能温控”两条核心管理主线, 取得了显著成效: 大坝一年内上升达到 126 m, 并取出长达 26.5 m 的世界最长碾压混凝土芯样。智能建造技术的应用使得项目施工管控更为精准和高效, 确保了施工质量。同时, 通过与国内高校的“产学研”一体化深度融合, 在智慧设备系统、无人碾压、动态温控等领域取得了新的技术成果, 为大型水电工程建设的智能化、高质量发展提供了坚实基础。

关键词:碾压混凝土坝; 智能建造; 无人碾压; 动态温控; TB 水电工程

中图分类号: TV523

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)S1-0066-05

Application and innovation of intelligent construction technology in construction of roller-compacted concrete dams//WU Dudu¹, LI Zhi², LIU Jinshan², AN Hui¹, XIANG Qiwei¹ (1. Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China)

Abstract: Taking the TB Hydropower Project as an example, this paper introduces the application and innovation of intelligent construction technology in the construction of roller-compacted concrete (RCC) dams. Based on the integration of “GIS+BIM+VR+IoT,” an intelligent construction platform was established. Utilizing a dual-network integration model of “intranet + 5G network,” the four systems of “intelligent mixing, intelligent rolling, intelligent grouting, and intelligent temperature control” were coordinated and unified, two core management threads of “intelligent pouring” and “intelligent temperature control” were constructed. Remarkable results were achieved: the dam rose by 126 m within a year, and a 26.5-meter-long core sample, the world’s longest for RCC, was extracted. The application of intelligent construction technology has made project construction management more precise and efficient, ensuring construction quality. Simultaneously, through deep integration with domestic universities in the “industry-academia-research” collaboration, new technological achievements were made in the fields of intelligent equipment systems, unmanned rolling, and dynamic temperature control, providing a solid foundation for the intelligent and high-quality development of large-scale hydropower project.

Key words: roller-compacted concrete dam; intelligent construction; manless crushing; dynamic temperature control; TB Hydropower Project

自 1982 年我国开始碾压混凝土施工筑坝技术研究以来, 这一技术已经历了 40 余年的发展, 我国碾压混凝土坝的坝高从 100 m 跃升至超过 200 m, 碾压混凝土筑坝技术已实现了从“跟跑”到“领跑”的转变^[1]。随着现代计算方法和信息技术手段的不断进步与完善, 基于“数字大坝”理念的安全控制管理模式应运而生^[2], 通过开发相关硬件和软件系统, 全面实现了大坝施工、温度控制和监测等信息的自动化与智能化采集, 推动了“数字大坝”管理与控

制理念向“智能大坝”的转变^[3]。从水布垭面板堆石坝的初步探索, 到糯扎渡水电站的综合信息集成系统应用, 同一时期龙开口、鲁地拉等碾压混凝土大坝上的数字大坝施工实践, 我国数字大坝的建设历程不断丰富。随着黄登、大华桥水电站全面数字化大坝的成功实施, 碾压混凝土筑坝技术已从数字化时代迈入智能化时代^[4]。新一代信息技术革命为大坝建造智能化提供了新的路径, 经过大华桥、黄登、丰满、白鹤滩等大型水电工程的智能化应用实

践,构建了以智能仿真、智能碾压、智能灌浆、智能交通、智能振捣、智能温控和智能管理集成平台等为核心技术的水利水电工程智能建设管理体系^[5-6]。

TB 水电工程智慧大坝系统在黄登系统的基础上再次升级转型,形成从原材料到成品生产,从仓面设计到资源调度,从碾压监控到质量评定等全要素、全方位、全过程、全生命周期的智能建造管理系统,打造了真正意义上的智慧 TB。本文对智能建造技术在碾压混凝土坝施工中的应用与创新进行了介绍,以为混凝土坝施工提供参考。

1 系统简介

TB 水电工程的绿色智能建造系统基于水电站“建管合一”管理模式,利用“GIS+BIM+VR+IoT”新型信息技术平台,依托海量、多类、多元的大数据分析技术,并结合科技创新研发成果,建成涵盖工程大坝、地下厂房等主体工程,贯穿工程建设与运行全生命周期的智慧工程管理体系。以智能建造管理平台为基础,TB 水电工程旨在实现与智慧电厂无缝衔接的智慧协同管理。在建设期,全面推行智建大坝、智建地厂、绿色智慧砂石加工、智能机电安装等智能建造举措,涉及工程建设的方方面面,包括安全、质量、环保、进度、物资、设备、合同、数字档案等业务管理系统,建立了数字孪生式的无缝衔接运行管理平台。TB 大坝绿色智能建造管理平台(系统架构如图 1 所示),以 BIM+GIS 平台为基础,构建了标准化、轻量化模型,建立了直观的数字沙盘,通过专用系统

和通用系统,形成了以“智能拌和、智能碾压、智能温控、智能灌浆、模板监测”为主线,“质量验评、试验检测、安全环保”等系统为辅线的管理平台,有效促进了大坝高品质、高效率的建设进程。

2 碾压混凝土坝智能建造关键技术

2.1 智能拌和“工厂化”,保障混凝土成品质量

TB 水电工程的大坝混凝土生产系统布置在大坝右岸下游的进厂公路内侧,结合地形共布置了 4 座 HL270-2S4000L 强制式拌和楼。在拌和系统场地内的试验室二楼,设立了专门的智能化生产集控中心,实现了混凝土生产的工厂化管理。智能拌和系统以集控室为中心,覆盖了整个混凝土生产系统的各个功能模块。要料员结合仓面设计混凝土标号,通过 ERP 系统提交要料单。系统根据浇筑仓面、浇筑时段和温控要求,依据配料单生产相应级配的混凝土。配置了车辆识别系统,利用先进的物联网技术和排队论的相关理论,建立了多节点的马尔可夫排队网络模型,实现了车辆的自动识别、排队引导控制,并且能够直接从试验室读取混凝土配比,自动调度拌和楼进行生产。通过远程集控室和现场安装的传感器实时监控和采集料位、骨料预冷、出机口温度等数据,实现了操作人员的工厂化办公和车辆自动识别与排队,不仅节约了指挥人员的人力投入,还减少人为指挥的差错。原材料存量实现了自动监测,骨料含水率、混凝土温度、生产数据等均能实时自动监测、采集和传输。这些数据通过监控终端进行展

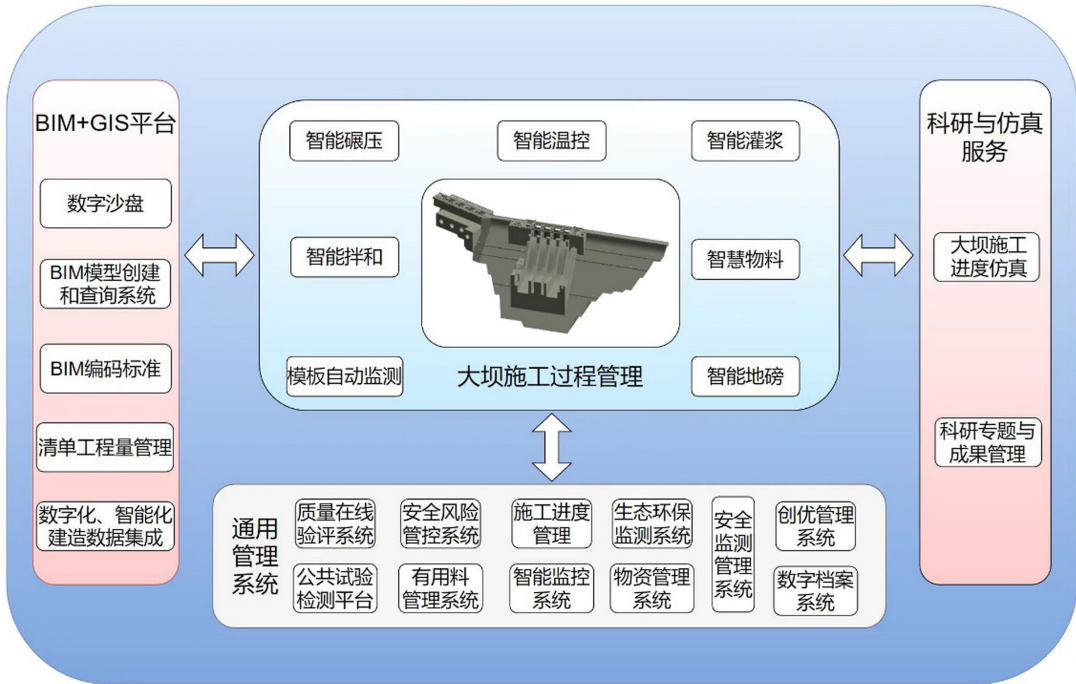


图 1 TB 大坝绿色智能建造系统架构

示,试验人员根据相关数据进行必要的人工检测和校正,从而提高了工作效率并确保了混凝土的品质。

2.2 开仓、浇筑信息化,实现“小白式”操作

混凝土施工管理系统将传统的纸质流程和签字环节从“线下”迁移至“线上”,并结合智能设备系统,对设备轨迹、油耗等数据进行统计分析,以辅助施工管理。开展从仓面设计、要料、配料到拌合生产的数字化调度,通过跟踪浇筑流程、设备轨迹和资源协调等过程,形成“信息化”管理流程。操作人员只需要按照系统流程进行仓面设计录入,系统将自动提醒进入下一个流程,同时进行逐级审核。每当一个流程完成后,系统会及时提示下一流程的责任人员进行审批,上一流程的人员也可追踪并督促下一流程人员尽快完成相关工作,实现了工作的相互监督。这样的无纸化办公不仅减少了沟通成本,加快了准备工作的进度,同时也节约了工程投资。该系统的应用降低了对管理人员工作经验的要求,即使是一个刚毕业的新人也能在系统的引导下完成施工作业,让年轻人能够利用“玩手机”的时间完成工作,提升了浇筑效率和配料的时效性。此外,该系统还能够根据大坝混凝土的浇筑分层和分区进行仓面设计资源的反向分析,结合智能平仓监控的层间覆盖时间和自卸汽车运输实时监控的运输强度,系统可以反向校核仓面设计中的设备数量是否满足标准,在发现异常时提醒管理人员,从而为仓面设计优化或现场管理加强提供依据。

2.3 平仓、碾压智能化,提升一次合格率

TB 水电工程联合国内高校,在传统数字平仓、碾压技术基础上,结合大数据、虚拟现实(VR)等新技术,再次进行智能化升级。在每台平仓机上安装了全球导航卫星(GNSS)系统,平仓机自动计算摊铺时间和厚度,对摊铺作业过程进行精细化管控,实现摊铺厚度和平整度的智能控制。实时动态监测碾压混凝土坝施工机械的运行轨迹、速度、振动状态、碾压遍数以及施工层信息等数据,一旦数据值未达到预设参数标准,系统将立即发出警报提示和调整指令。现场结合碾压混凝土工艺性试验,以碾压过程中所采集的监控参数为基础,结合碾压机的振动特性,构建了碾压混凝土压实度智能预测模型,并建立了可以直接表征碾压混凝土压实质量的指标体系,实现了仓面压实质量的智能预测,这为基于大数据模型推动未来碾压混凝土压实度质量检测方法的革新奠定了基础。利用增强现实(AR)技术,通过坝面碾压质量智能导引系统,将碾压数据以图像的形式直观展现在碾压司机驾驶室,引导碾压司机进行自主作业。全过程值班人员协同管控,与智能导引系

统紧密配合,实现精准定位,全面提升了施工过程的反馈效率,提高了仓面碾压作业的一次达标合格率。每层碾压施工结束后,监控系统能输出图形分析报告,包括碾压轨迹图、碾压遍数图形报告以及压实度预测值报告等图件,为保障高质量碾压混凝土坝施工提供基础支撑。平仓、碾压智能化技术的应用,实现了层间覆盖时间控制精度达到分钟级,碾压遍数、轨迹、厚度等定位精度达到厘米级。TB 大坝共监控碾压混凝土 59 仓,共计 1502 层,碾压遍数覆盖率达 98% 以上,压实度合格率达到 100%。

2.4 复杂工况下无人碾压机组作业试验,助力实现大坝“智能化无人”

相较于土石坝,碾压混凝土坝的结构更加复杂,涉及众多廊道、竖井、电梯井等结构和埋件。随着大坝高度的增加,仓面逐渐缩小,结构复杂性也随之提升。这些复杂工况制约着无人碾压技术的推广。TB 水电站联合国内高校,开发了复杂施工条件下的碾压混凝土坝无人驾驶技术,率先在仓外水垫塘开展了无人碾压试验,并在 9~12 号大平层仓面和 15~21 号复杂结构仓面实施了施工应用。利用激光雷达、短波雷达、卫星定位等关键技术,研发了一种不改变施工机械油路、电路等控制系统以及机械结构的无人驾驶改造技术,能够实现自主施工环境感知、自主施工行为决策以及自主施工动作执行的目的。结合建立的碾压混凝土坝施工过程实时智能化监控系统,实现了大坝碾压施工全过程的智能化,有效保证了施工质量,显著提高了施工过程的管理水平。碾压机实现自动驾驶主要基于高精度定位、碾压机底层自动驾驶控制系统、自动避障系统以及轨迹跟踪控制系统。三大系统介绍如下:

a. 碾压机底层自动驾驶控制系统。该系统负责接收上层智能控制系统的指令,精确调控车辆的转向与速度等运动特性。作为所有运动动作的最终落实环节,底层自动驾驶控制系统不仅是碾压机实现感知、规划、推理以及决策等智能能力的基础,更是碾压机核心系统之一,其执行效果关乎碾压机能否准确且实时地完成上层智能控制系统的控制指令。

b. 智能避障系统。该系统专门针对大坝碾压场的障碍物进行分析与识别。在大坝碾压作业区域,主要障碍物分为动态和静态两大类,其中动态障碍物主要包括其他碾压机、平仓车、运料车、洒水车以及工作人员等;静态障碍物主要包括不同大小的石块、钢筋、模板等。凭借无人碾压机配备的各类感知设备及强大的感知算法,无人碾压机已经可以实现对作业场景中可能阻碍其正常作业的各类动静态对象的精准感知。一旦无人碾压机感知到这些障碍

物,智能避障决策系统将实时、精确地发出避障指令,指导无人碾压机执行各类避障操作。

c. 轨迹跟踪控制系统。采用速度表示法与坐标变换法相结合的方式,建立碾压机运动学模型。综合考虑整车的俯仰角、前后车体的侧倾角、横摆角等因素,分析各刚体质心连体坐标系及其相互关系,建立一个能够描述不平地形下铰接车体空间运动状态的运动学模型。无人驾驶碾压机的运动控制由横向控制与纵向控制两部分组成。横向控制决定了轨迹跟踪的精确度,纵向控制决定了碾压速度。在碾压机的压实作业中,为了保证施工质量,需要根据实际需求调整振动频率和振动幅度,也就是在高频低振和低频高振这两种状态间合理切换。而碾轮偏心轮的振动会引起车身抖动,作为车辆的扰动,同样会影响碾压机的横向控制精度。因此,可将振动轮振动频率和振幅的变化视为外部扰动,并基于扰动自适应的自抗扰控制这一新方法,从碾压机的方向盘或控制手柄的输入信息以及航向角、运动速度的输出数据中,设计状态观测器,计算出扰动量,进而提前对扰动进行补偿。通过现场试验与理论仿真的方法,验证了算法对强弱振动的适应能力,提升了智能无人碾压机的循迹精度。

TB 水电工程的无人碾压技术实施过程遵循了严谨的步骤,从对接调试、仓外试验、仓内生产性试验到生产应用,均按照先单机后机群的路线,逐步将无人碾压技术应用于大坝工程建设中。首先,进行对接调试;随后,通过多次仓外试验,对远程通信、路径规划、避障、边界判断、紧急制动等功能进行测试;在此基础上,在仓内结合实际生产条件,包括材料、工艺、环境等因素,开展试验,试验流程涵盖指令设置与启动、前进及后退、转向及错距、前后避障、循迹以及紧急制动等环节;最终,经过严格的试验评估,确认各项指标合格后,无人碾压技术得以在碾压机群中投入生产应用。

2.5 智能温控云仿真,确保大坝安全施工

TB 水电工程在混凝土浇筑过程中,构建了“一条龙全时空”的温度控制体系,涵盖了从骨料预冷、混凝土拌制(出机口)、入仓浇筑温度到智能通水、智能喷雾的动态化管控流程。在大坝建设中,冷却水管和水工数字温度计的所有管线布置均利用 BIM 技术提前进行设计,为现场施工提供了精确的指导。在仓内冷却水管铺设完成后,确保在 6 h 内启动通水,实时在线监测混凝土的进出口温度和流量等。系统同步收集拌和楼的骨料温度、出机口温度、现场入仓温度和浇筑温度等数据。通过云端大数据展开深度学习,以此实现实时在线监测和协同仿真分析。

考虑每一仓混凝土的实际边界条件和初始条件,为每个浇筑块量身定制最优的控温策略,精准抉择通水调控的最佳时机、合理的流量和适宜的开度等,进而能够预测混凝土温度应力梯度值,并给出最优的通水策略。水科院研发的智能通水控温集成系统通过调节通水量或水温对混凝土温度进行控制,自动将通水指令发送到每个测控装置,及时自动调整每组水管的通水流量和流向,整个过程准确无误、高效及时、无人工干预,实现了对大坝每一仓混凝土通水冷却的自动化精准管控。在传统人工喷雾技术的基础上,TB 水电工程开展了智能喷雾技术研究,根据仓面内小型气象站自动感知的太阳辐射、仓面温度、湿度等参数,按照设计要求自动开启或关闭喷雾设备,营造适宜的“仓面小气候”,从而提升碾压混凝土施工质量。

在 TB 水电工程的建设进程中,针对大坝浇筑关键节点,进行温控防裂仿真分析。通过构建基于智能温控系统的数据和云计算平台,接合 TSTM 实验手段,根据实测资料和现场需要,及时进行温度应力的跟踪反馈仿真分析。这一举措能够实时、精确掌握大坝混凝土的实际热力学参数及温度应力状态,不仅能够评价当前状态,还能预测未来趋势,确保及时发现潜在问题并提出解决方案。通过实时跟踪和优化温控标准与措施,并及时反馈到智能温控系统以及现场温控施工,形成了一种新的智能温控跟踪反馈优化方法。结合大坝实测温度数据和混凝土材料参数,TB 水电工程云计算模块反演得到了典型坝段上、下游面和中面的温度、应力及和位移云图,同时给出了典型部位的温度、应力及安全系数过程曲线,实现了对大坝施工期安全性的直观且实时评估,有力地保障了大坝施工及运行的安全。截至目前,大坝已浇筑混凝土 224 仓,埋设温度计 879 支,铺设冷却水管 3 592 套。全程运用智能温控系统实施精细化温控管理,大坝的整体温度满足温控要求。

3 结 语

TB 大坝的建设全程依托于华能澜沧江公司独立自主研发的“GIS+BIM +VR+IoT”绿色智能建造系统平台,该平台将项目各参与方紧密联结,实现了高效流畅的运转与精准实时的管控,显著提升了项目的智能化管理水平。在大坝混凝土施工方面,建立了一整套“一条龙”式的全流程智能浇筑管理体系,涵盖仓面设计、要料、配料、拌合生产数字化调度,以及全程跟踪浇筑流程、设备轨迹、资源协调、平仓、碾压、质量评定等环节。在大坝混凝土温控方面,打造了从原材料至拌合楼、混凝土运输、智能喷

雾、智能通水、智能养护等“一条龙”式的全方位智能化温控系统。在智能导引、压实度预测、智能喷雾、无人碾压等方面,TB 大坝取得了创新性突破,实现了全时空的智能化应用。这不仅显著提升了工作效率,还有效解决了因人口老龄化所引发的平仓碾压等技能工种短缺的问题,从而确保了混凝土的高质量。得益于智能建造技术的强大助力,TB 大坝在 2023 年创造了令人瞩目的施工纪录:全年上升 128 m,且在一次性连续上升 18 m 时大坝内部最高温度依旧可控,成功取出长达 26.5 m 的世界上最长碾压混凝土芯样。这些成就充分展示了 TB 大坝在智能建造领域的先进性和卓越成效。

参考文献:

[1] 矫勇. 中国大坝 70 年[M]. 北京:中国三峡出版社, 2021.

[2] 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控[J]. 水利水电技术, 2008,39(2):15-18. (ZHU Bofang. Numerical monitoring of concrete dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008,39(2):15-18. (in Chinese))

[3] 张国新,刘有志,刘毅. “数字大坝”朝“智能大坝”的转变-高坝温控防裂研究进展[C]//水库大坝建设与管理中的技术进展:中国大坝协会 2012 学术年会论文

集. 郑州:黄河水利出版社,2022:74-84.

[4] 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(10):1-13. (ZHONG Denghua, WANG Fei, WU Binping, et al. From digital dam toward smart dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015(10):1-13. (in Chinese))

[5] 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):38-61. (ZHONG Denghua, SHI Mengnan, CUI Bo, et al. Research progress of the intelligent construction of dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(1):38-61. (in Chinese))

[6] 李庆斌,马睿,胡昱,等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(8):1252-1269. (LI Qingbin, MA Rui, HU Yu, et al. A review of intelligent dam construction techniques [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022,62(8):1252-1269. (in Chinese))

[7] 郭万里,杨琦,郭燕. 数字监控系统在黄登水电站建设中的应用[C]//国际碾压混凝土坝技术新进展与水库大坝高质量建设管理论文集:中国大坝工程学会 2019 学术年会论文集. 北京:中国三峡出版社,2019:540-551.

(收稿日期:2024-09-18 编辑:雷燕)

(上接第 65 页)

- f. 通过框式水平仪测量接力器基础板两侧垂直度,控制在 0.25 mm/m 以内(只允许接力器基础板法兰面相对于机组中心后仰)。
- g. 接力器基础板调整合格后,将其加固牢靠后再与机坑里衬点焊固定。
- h. 采用分段、对称焊接的方法将接力器基础板焊在机坑里衬上。焊接过程中应严密监视接力器基础板的变形,根据接力器基础板的变形情况对焊接顺序进行必要的调整以保证接力器基础板焊后的变形最小或朝有利的方向变形。
- i. 检查接力器基础板支撑加固是否牢靠。

2.4.2 混凝土浇筑过程控制

机坑里衬混凝土按照常规混凝土浇筑工艺浇筑,在浇筑过程中需对接力器基础板加强监测,若浇筑过程中基础板相关参数(主要是垂直度)出现显著变化时应及时调整浇筑顺序。另外,由于接力器基础板下面为阴角,面积较大,混凝土浇筑时不可能一次性浇筑密实,因此应在混凝土凝固后对阴角水平坑衬部位进行检查,在脱空部位开孔灌浆,灌浆时也应对接力器基础板垂直度等进行监测,以保证接力器基础板及下部的阴角部位浇筑密实,确保后续接力器的安全稳定运行。

3 结 语

水轮机埋件安装虽没有后期机组安装那么高的精度,但若是对关键位置把控不到位,很容易造成重大质量缺陷,如肘管管口跑偏、座环浇筑变形、蜗壳定位跑偏、接力器基础板严重变形等都在其他电站施工过程中出现过。因此为提高水轮发电机组安装质量,减少不必要的质量缺陷,提高水轮机埋件安装效率,对本文提及的关键点进行重点把控,将会起到事半功倍的效果。

参考文献:

[1] 电力行业水电施工标准化技术委员会. 水电水利工程施工测量规范: DL/T 5173—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.

[2] 中国电力企业联合会标准化中心. 水轮发电机组安装技术规范:GB/T 8564—2023[S]. 北京:中国标准出版社,2023.

[3] 中国电力企业联合会标准化中心. 水电水利基本建设工程单元工程质量等级评定标准第 3 部分:水轮发电机组安装工程:DL/T5113. 3—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.

(收稿日期:2024-09-15 编辑:熊水斌)