

# 智能大坝引领全球水电行业新未来

■本报记者 苏南



大藤峡水利枢纽工程全景图

“中国是大坝建设大国。近年来,中国水利部坚决贯彻落实习近平总书记关于大坝建设运行管理的重要指示批示精神,在大坝智能化领域开展了积极探索实践,建设了一批数字孪生大坝,构建现代化水库运行管理矩阵,推动大坝实现更安全运行、更精准调度、更高效管理,为保障防洪安全、供水安全、粮食安全、生态安全、能源安全提供有力支撑。”水利部副部长李国英在由水利部、四川省人民政府和国际大坝委员会联合主办的国际大坝委员会第28届大会暨第93届年会期间,首次系统阐述了智能大坝的理念。

在全球气候变化和能源转型的双重背景下,传统大坝建设与管理面临着诸多挑战。智能大坝作为一种新型基础设施,正逐渐成为大坝行业发展的新方向。我国在智能大坝领域的探索已取得显著成效,得到了国际水电专家的一致认可。

在业内人士看来,智能大坝的未来发展将更加注重绿色低碳、生态友好和全球合作。一方面,随着技术的不断进步,智能大坝将进一步提升对环境变化的适应能力,推动人与自然和谐共生。另一方面,国际合作将更加紧密,通过制定国际标准和共享经验,推动全球大坝事业的可持续发展,引领水电行业的新

未来。

## ■智能是大坝发展未来

“智能是大坝事业发展的未来。”李国英指出,当前,新一轮科技革命和产业变革深入发展,前沿技术创新进入前所未有的密集活跃期,大坝事业发展面临理念重塑、技术变革、模式再造的新形势新要求新任务。近年来,我们坚持需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力,加快构建智能大坝,深化对水库大坝性态、安全要素和运行管理全过程的数字化映射、智能化模拟,做到历史数据积累分析、实时数据同步交互、未来数据预测预演,实现大坝建设运行管理全生命周期的数字化、网络化、智能化。李国英介绍,智能大坝以物理大坝为基础、时空数据为底座,数学模型为核心、水利知识为驱动,对水库大坝性态全要素和运行管理全过程进行数字化映射、智能化模拟,实现大坝建设运行全生命周期透彻监测感知、智能分析预测、前瞻决策支持,提升大坝安全高效可持续运行水平。智能大坝通过自感知、自诊断、自学习,实现建设运行管理高质量发展和高水平安全良性互动,是对传统大坝运行模式的超越和创新。



大藤峡水利发电厂中控室

量14257亿千瓦时。无论是大坝类型、数量、高坝数量、水力发电装机规模均位居世界第一。

## ■中国已开展智能大坝初步探索

中国在智能大坝领域已取得初步探索成果,为全球水电开发提供了宝贵经验。我国在智能大坝建设方面已构建现代化水库大坝运行管理矩阵,实现了8000余座水库的全覆盖、全要素、全天候、全周期管理。同时,通过提升工程感知能力,建设数字孪生工程,如三峡、小浪底、太浦闸等,大大提高了决策的智能化和精准化水平。

国家能源局副局长万劲松表示,截至2024年底,中国水电总装机已达到4.35亿

会后的考察,走访了中国许多大型大坝工程和水电站工程,我们深切体会到中国在水电开发方面几十年如一日地追求卓越,所取得的巨大成就不仅为中国带来了福祉,也为其他国家和地区的水电开发提供了有益的启发。中国在水电开发领域积累了丰富的经验和成就之后,现在又开始积极向世界其他国家进行投资。中国将自身成熟的技术和工程实践经验推向海外,这无疑是对世界的另一层贡献。中国的水电技术的大坝施工能力走向世界,不仅展示了中国水电开发的实力,也为全球水电、坝工事业的发展贡献了中国智慧和中国力量。

## ■智能大坝助力大坝安全

面对全球气候变化的加速重塑水文环境,水库大坝的安全性、可靠性和可持续性正面临着前所未有的挑战。极端气候事件的频发加剧了大坝安全风险,生态环境压力持续增大,水资源供需矛盾日益尖锐,同时,大坝的老化与运维管理也面临着严峻考验。

在这一背景下,智能大坝以其独特优势,成为应对这些挑战的关键力量。通过实时监测和数据分析,智能大坝能够迅速识别大坝安全隐患,并及时采取预警和应对措施。以三峡、小浪底等数字孪生工程为例,它们的建设实现了对大坝安全状况的实时监控和精准预警,极大地提升了大坝的抗灾能力。

不仅如此,智能大坝在优化水库调度策略、提高水资源利用效率方面也发挥着重要作用。借助智能化的调度系统,智能大坝可以根据实时水情和气象条件,自动调整蓄水和放水策略,实现防洪、供水、灌溉、发电等多目标的精准决策调控。这不仅确保了大坝的安全运行,也为缓解水资源供需矛盾、支撑经济社会可持续发展提供了坚强保障。

米歇尔·利诺指出,从大坝全生命周期的角度来看,人工智能技术的应用潜力无限。无论是设计阶段利用AI赋能的建模软件,还是在流域尺度上进行梯级水电站的智慧化调度,或是防洪调度和洪水预测,人工智能技术都扮演着关键角色。他进一步解释道, AI技术的应用不仅显著提升了洪水预测的准确性,还能在短时间内处理大量数据,为我们提供最精准的信息。这些信息对于优化水库大坝的调度和全生命周期管理至关重要,极大地提高了我们的管理效率和决策水平。展望未来,人工智能技术在大坝全生命周期管理中的应用前景广阔,其作用将愈发凸显。

上接1版

# 水风光协同开发进入全面实施阶段

中国工程院院士许唯临也表示,雅砻江流域水风光蓄资源富集,且建成了两河口、锦屏、二滩三大控制性水库,也是四川省内最大的三座水库,雅砻江全流域具备年调节能力,可显著改善四川电网“丰余枯缺”的结构性矛盾,还可带动周边新能源大规模开发。雅砻江流域水风光一体化基地建成后,每年可贡献清洁电量2000亿千瓦时,满足1.1亿个家庭的年用电量,相当于每年减少标准煤消耗约6000万吨。

“我国水能资源十分丰富,居世界第一位。以雅砻江流域先行先试带动周边风风光能规模化发展,实现多能互补,提升资源利用与保供及新能源替代水平,是实现能源绿色低碳转型的重要力量和实践路径。”水电水利规划设计总院副院长赵增海认为,同时,通过在一体化资源配置、开发建设、联合调度等方面的探索,可为优化能源行业体制机制提供思路,是在新型电力系统下保障国家能源安全的重要举措。此外,还可以利用不同电源互补特性,打造水风光一体化项目群,将不稳定的风光电转化为优质电能,提高可再生能源利用效率,助力“双碳”目标,为世界绿色低碳转型提供示范。

## 构建“5+1”模式是核心

水风光蓄一体化基地开发建设运行是一项复杂的系统性工程,涉及资源配置、网源协同、跨省跨区送电等诸多事项。风、光的不稳定性决定了其大规模开发必须依靠水电优异的调节能力,这就需要在风风光资源的统一配置、规划布局、开发建设、联合调度和市场消纳等方面进行一体化管理。然而,目前在这些方面还存在一些体制机制上的障碍,需要进一步完善和优化。

“如技术系统难题,水风光系统的联合调度、智能运维、安全稳定运行的技术尚未完全突破,需加快构建网型光蓄发电机、秒级气象预测等前沿技术的研发与应用。”汪小刚表示,又比如生态与经济屏障问题,大型基地建设需兼顾生态保护与经济效益,就像沙戈荒区光蓄资产模式,虽然已探索出生态修复与能源开发的系统路径,但如何量化生态效益,完善补偿机制仍需研究。还有市场机制的创新问题,电力外送通道应用、跨区电力交易规则等市场化配套政策继续完善,以提升经济整体竞争力。

在汪小刚看来,构建“5+1”模式是加快水风光一体化开发与运营的核心。“5”是指“五个一体化”,包括一体化资源配置、一体化规划布局、一体化开发建设、一体化联合调度、一体化市场消纳。一体化资源配置方面,要将水风光资源统一配置

给水电开发主体统筹开发,实现内部补偿平衡与优化运行;一体化规划布局方面,依托水电抽蓄等支撑调节电源,在经济合理范围内规划具体风光站址,并同步规划建设电网,实现网源协同和高效开发;一体化开发建设方面,强化“一体化、扁平化、集约化”管理方式,以水电为核心,统筹各个项目的设计、资金、采购、施工等,提升整体开发效益;一体化联合调度体制机制,政企联动、网源协调,不断优化基地调度策略和电站运行方式,实现资源最大化利用;一体化市场消纳方面,将项目群作为一组电源统一参与市场,构建统一电价、结算和消纳机制,实现基地电力资源在全国范围内的消纳和优化配置。

汪小刚表示,“1”是指国家政策支持,国家层面应出台基地开发主体的确认文件、基地一体化开发方面规程规范、基地内电源电量电价机制等政策措施,为基地开发提供良好的政策环境。

## 不断推进技术创新与应用

为了加快水风光一体化开发与运营,更好地促进能源绿色低碳转型发展,需要各方通力合作、协同发力,采取多方面的措施。

业内认为,大力推进“数字化、智能化”,加快前沿技术与水风光一体化清洁能源开发的创新融合。在规划设计阶段,要融合设计知识和工程经验,实现机理、数据和知识多源驱动的智能设计,从源头上优化电站总体布置和功能结构;在工程建设阶段,推广应用智能仿真、智能监控、智能灌浆、智能温控等先进技术和智能化、无人化施工装备,实现工程建设进度、质量、成本、安全、环保等多目标协同控制;在生产运维阶段,通过引入智能化设备和系统,建立“空-天-地”智能感知体系,提高发电可靠性和安全性,优化发电策略,降低运营成本和管理难度。通过智能化技术的应用,系统性解决流域水风光一体化开发难题,实现流域资源高效利用与效益提升。

针对水风光一体化开发过程中的关键技术难题,企业需要继续致力于更多能源发展关键核心技术的研发。高校、科研机构和企业应加强合作,共同开展相关科研项目,为保障国家能源安全提供技术支撑。例如,四川大学与雅砻江公司正在承担雅砻江联合基金“水风光一体化柔性互补及智能调度关键技术”集成项目研究,这种合作模式值得推广。

## 绿色物流助力低碳

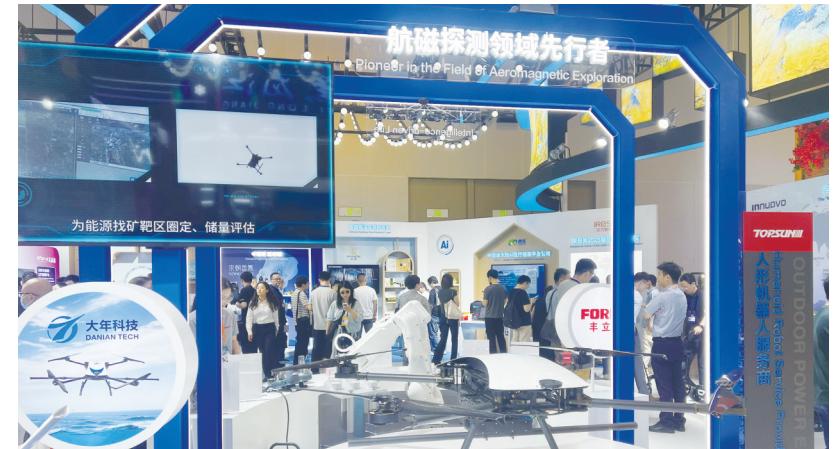
“绿色物流”也是本届中国—中东欧博览会的一大看点。当载满竹制品的集装箱抵达北仑港,电动龙门吊无声地搬运着集装箱,这些“钢铁巨臂”全部采用绿色驱动,单台年减碳量相当于300亩森林的固碳能力。“现如今,我们的竹篮从宁波竹林到欧洲客厅,全程都是‘零碳旅行’。”宁波士林工艺品有限公司外贸部负责人举着刚签下的中东欧订单表示。

士林是集开发、设计、生产、销售于一体竹制品加工企业,在本届中国—中东欧博览会搭建了展位,展出深受海内外顾客喜欢的20多种竹制艺术品。士林展位工作人员透露:“去年,我们购买了3141兆瓦绿证,为我们的竹制品注入了‘绿色血液’。”

另据士林外贸部负责人透露,本届博览会期间,士林已经与沙特等国贸易公司签订外贸订单,计划年底在宁波港出海。“实际上,我们的厂区早就配备了零噪音、零排放的电动集卡,承担从工厂到港口的运输任务。”士林物流负责人给记者算了一笔账,“每辆电动集卡单趟运输可减少约80公斤碳排放,相当于种植4棵树一年的减排效果。虽然初期投入高30%,但每公里运营成本比柴油车低40%,两年就能回本。”

当前,宁波已建成覆盖主要工业园区的充换电网络,电动集卡1小时快充可续航200公里,完全满足“工厂—港口”短驳需求。去年8月,北仑港绿电码头投运,作为浙江首个“绿电码头”,依托风光储技术,通过智能能源管理系统,实现清洁能源在港口高效利用和优化配置,为货轮、集卡、龙门吊等提供绿色能源。这些绿色物流模式的不同尝试,已然成为宁波外贸的“秘密武器”。

国网宁波供电公司相关负责人对记者表示,在全球碳中和浪潮下,绿色低碳已成为国际贸易“新门槛”。外贸企业使用绿电和购买绿证,不仅是环保责任,更是突破国际市场绿色壁垒的关键策略。



大年科技带着无人机航磁探测技术亮相。王林/摄

数智  
绿能  
汇甬城  
低碳  
科技促合作