

白鹤飞舞 造福民生

白鹤滩水电站大坝 通讯员 谢雷 摄

云南基本建成国家清洁能源基地

实施“西电东送”的国家重大工程——白鹤滩水电站首批机组投产发电，这座装机1600万千瓦的巨型水电站，将与上游乌东德电站、下游溪洛渡电站、向家坝电站一道，在金沙江下游构成世界最大的清洁能源走廊，对改善能源结构、助推“碳达峰、碳中和”目标实现具有重要意义，为云南打造世界一流“绿色能源牌”新优势奠定坚实基础，为全省经济社会实现高质量跨越式发展尤其是金沙江下游地区经济社会快速发展提供强大的绿色经济引擎。随着金沙江、澜沧江干流水电站陆续投产，云南基本建成国家清洁能源基地。

以白鹤滩水电站为首的金沙江下游四座巨型水电站相当于2个“三峡工程”。白鹤滩水电站建成投产后，多年平均发电量624.43亿千瓦时，每年可节约

标煤约1968万吨，减少排放二氧化碳5160万吨、二氧化硫17万吨、氮氧化物约15万吨，节能减排效益显著。三峡集团相关负责人表示，三峡集团坚持生态优先、绿色发展，严格落实工程建设、生态保护和环境修复同步规划、同步建设、同步运行的“三同步”原则，统筹推进美丽白鹤滩、美丽金沙江建设，筑牢长江上游重要生态屏障。

省委、省政府高度重视能源产业发展，深入贯彻“四个革命、一个合作”能源安全新战略，能源基础设施不断完善，能源供给能力大幅跃升；能源结构深刻转型，绿色底色靓丽鲜明；体制机制活力释放，融合发展动力强劲，电力体制改革成为全国标杆。依托金沙江、澜沧江清洁能源基地建设，云南加快风能、太阳能等新能源开发，持续做大做强能源产业，着力

打造世界一流“绿色能源牌”，为全国能源绿色转型、高质量发展作出重要贡献。“十三五”以来，云南以水电为主的绿色能源生产达到世界一流水平，已初步建成清洁低碳、安全高效的现代能源产业体系，能源产业跃升为全省第一大支柱产业，资源优势逐步转化为产业优势、经济优势、生态优势和民生福祉。

截至2020年底，全省电力总装机达到10340万千瓦，居全国第7，其中水电装机7556万千瓦；全省全部发电量达到3674亿千瓦时，全社会用电量2026万千瓦时，西电东送电量1456亿千瓦时。

绿色成为云南能源最鲜明的底色。截至2020年底，云南绿色能源装机占比85%，清洁能源发电量占比约90%，清洁能源交易电量占比97%，非化石能源占一次能源消费比重42%以上，4项指标

全国领先，并达到世界一流水平。西电东送累计送出清洁电量超过1万亿千瓦时，为全国节能减排、污染防治作出巨大贡献。

省能源局局长王正英表示，云南能源将持持续做足电源、做强电网、做优煤炭、做大油气，全力打造世界一流“绿色能源牌”新优势，持续推进深化能源体制改革，推动能源质量变革、效率变革、动力变革，破解当前发展面临的瓶颈制约。全力推动云南能源碳达峰碳中和战略，加快研究出台云南省能源碳达峰碳中和行动计划，积极助力创建全国碳达峰、碳中和示范省。加速绿色能源驱动绿色制造，全力保障绿色制造用能需求，推进绿色能源与装备制造协同发展，推动全省产业结构逐步形成“多轮驱动”格局。

本报记者 李继洪



白鹤滩水电站大坝贝贝航拍 通讯员 谢雷 摄



从石龙坝到白鹤滩—— 云南水电的多个第一

又一个水电行业第一在云岭大地诞生。位于巧家县白鹤滩水电站右岸地下厂房里，备受瞩目的世界单机容量最大的100万千瓦水轮发电机组（14号机组）与左岸的1号机组一道于6月28日如期正式投产发电，这意味着中国水电全面引领世界水电装备的序幕已经拉开。

白鹤滩水电站14号机组由哈尔滨电气集团电机公司研发，该水轮发电机组水轮机转轮外圆直径8.87米、高3.79米、总重338吨；转子外径16.5米，高近3.9米，总重量超过2000吨，堪称“庞然大物”。“机组运行良好，我们已经将这一大国重器牢牢掌握在自己手中了。”承担了白鹤滩电站8台百万千瓦组研发生产的哈电集团党委副书记、总经理吴伟章说，研发了国内第一台立式水轮发电机组的哈电集团，将继续肩负助力金沙江流域水电工程建设、推动中国水电事业发展的重要责任。

白鹤滩15号机组即将进入并网试验，有望成为右岸地下电站第二台投产发电的百万千瓦水轮发电机组。

云南与水电的情缘，早在100年前就结下了，100多年来，云南水电诞生了多个第一，成为中国水电事业当之无愧的探路者之一。

1910年，全国第一座水电站在滇池出水口的石龙坝开建，1912年装有从德国引进的两台单机240千瓦水轮发电机将昆明的夜空第一次用电点亮，“480千瓦的机组，生产的电力还不够今天100户人家使用，仅仅能够供240台2000瓦的电磁炉运转。”华电云南公司石龙坝电厂党支部书记樊永生介绍，在2012年，整个昆明480千瓦发电负荷都用不完，而这座每小时仅发480度电的水电站，却让云南诞生出了中国的第一挺机枪、第一架军用望远镜和第一条电缆，铸币厂、兵工厂和自来水厂都围着石龙坝电站应运而生，电力在工业化进程中的先决作用可见一斑。

新中国成立后，云南水电事业开始了长足发展，开创性地走出了筹资办电模式，有效破解电力发展瓶颈，开创了中国电力建设的诸多先河：率先引进了世界银行贷款建设鲁布革电站，率先实行部省合资建设漫湾电站，率先吸收跨行企业建设大朝山电站……

100万千瓦的水轮发电机组——到目前为止只有中国才能制造生产的水电装备，背后站着的是不断向上攀登的中国制造体系，体现的是中国综合国力。樊永生透露，由于昆明爆发重九起义，参与建设石龙坝电站的两名德国工程师因躲避战争在越南呆了4个月，三四千名电站建设者因此等了4个月，当时我们的工匠就因为没有水电技术，两个德国工程师就让几千人苦等了4个月。”当时情景，与今天备受国外水电工程师尊敬的白鹤滩水电站先进技术相比，可谓天壤之别。

从百年前的受制于人，到当下引领行业发展，中国水电在云南的变迁向世界证明：现在的中国已不是百年前的中国了。一台100万千瓦水轮发电机组满负荷发电一小时，就能够满足50万台家用电磁炉，而装有16台100万千瓦水轮发电机的白鹤滩电站，一天的发电量可以为一个50万人城市居民提供一年的用电量。

然而，核心技术靠化缘是要不来的，白鹤滩水电站能装上完全国产的世界唯一百万千瓦水轮发电机组，是几代水电人不断努力奋斗的结果。这个奋斗，从三峡电站就开始了，“以前我们国家只能制造30万千瓦以下的水轮发电机组，三峡电站让我们用7年时间完成了30年的跨越。”三峡集团机电总工程师张成平在接受记者专访时透露，三峡电站建设过程中，通过引进、吸收再创新，中国水电机组从设计、研发到生产实现了重大跨越，“三峡电站左岸14台70万千瓦机组进口为主、在国内分包生产不超过25%。”

张成平介绍，而在三峡电站右岸安装的12台70万千瓦机组中，中国企业哈电集团和东电集团就各自生产了4台，另外4台为世界著名的电气企业法国阿尔斯通（现为美国GE公司）生产，“70万千瓦水轮发电机组在三峡电站就实现了国产化。”之后，已国产化的70万千瓦级以上水轮发电机组相距在金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等流域。

2006年，三峡集团联合哈电集团、东电集团研发百万千瓦水轮发电机组，用了十多年时间终于研发成功，“它的核心部件，都已经达到了世界领先水平。”张成平自豪地说，安装于白鹤滩水电站的百万千瓦水轮发电机组研发，让国内水电装备从水轮机的水力设计到发电机的电磁设计、通风设计、机构设计等全面提升，水轮发电机组的加工制造能力和制造装备、生产工艺都得到大幅提升，最重要的是带动了生产材料的国产化，“以前超过70毫米的钢板我们都要进口，现在我们能生产300毫米以上的超厚钢板，很多标准比国外还要高。”张成平说，白鹤滩水电站上百万千瓦机组的研发，在高强钢板、大型锻件、甚至水轮发电机组最核心的砂钢片等方面实现了重大突破，带动国内整个水电产业装备的全面提升，“我们完全掌握了巨型水电装备的主动权。”

本报记者 李继洪

勇闯技术“无人区”

白鹤滩水电站建设科技攻关成果丰硕

工培训，指导施工。”

白鹤滩水电站大坝在世界上首次全坝采用低热水泥混凝土进行浇筑，低热水泥混凝土温控技术没有成熟的经验可以借鉴，建设者们始终保持创新、探索的精神，在大坝开浇前制定了《拱坝混凝土温控施工技术要求》的试验本。三峡集团白鹤滩工程建设部和参建各方开展“智能大坝”技术的研究和运用，浇筑一条龙智能监控、智能通水、智能灌浆等智能技术，为建成无缝大坝及保障大坝长期安全稳定运行提供了创新解决方案。“我们运用智能大坝的相关技术，实现精细化温控管理，有效避免了温度裂缝的产生，保证工程质量。”工程建设部大坝项目部工程师谭亮升告诉记者，大坝中埋设的5774支温度计、75347米的测温光纤、数千支监测仪器，用于感知气温、风速、温度应力、应变等信息，可以实现混凝土生产、运输、浇筑、运行的全生命周期监控，对施工进度、质量进行可视化分析。

多层“蛋糕”里造“心室”

大坝两侧的地下深处，洞室纵横交错，宛若一个巨大的地下迷宫。这里是16台百万千瓦机组的“栖息之地”——白鹤滩水电站地下厂房，其洞室群规模、厂房跨度、调压室直径和数量均居世界水电工程之首。与“世界之首”的美誉相伴而来的，是技术、管理方方面面难题和一个个待攻克的“无人区”。白鹤滩水电站地下厂房的设计、施工与管理，某种程度超越了现有规范和已有工程经验。面对挑战，白鹤滩工程建设者勇攀科技高峰，勇闯“无人区”，通过不断创新，攻克一个个难关，打造出一座恢弘精细的“地下城”。

白鹤滩水电站地下厂房洞室群规模世界第一，结构布置复杂，埋深大，地下洞室开挖量2500万方，开挖总里程约230千米。记者探访的右岸地下厂房位于坝肩上游山体“腹内”，厂房面积有2个足球场大，高约30层楼高，最大水平埋深800米，最大垂直埋深540米。

“白鹤滩水电站地处深V型峡谷，两岸空间有限，需要开挖地下洞室，布置引水发电系统设备。”具体负责白鹤滩右岸地下厂房建设的中国能建葛洲坝三峡建设公司白鹤滩施工局常务副局长王林告诉记者，与地上建房不同，地下厂房开挖从“天花板”开始，一层一层往下开凿。事实上，高边墙围岩变形与稳定，一直是大

型地下洞室开挖中的一项世界性难题。而白鹤滩水电站地下厂房位于横断山脉，处于川滇地震带上，岩石层与层之间柱状节理明显、裂缝极多，更使得围岩变形与稳定困难重重。

“右岸地下厂房不仅开挖断面尺寸大、埋深大，还穿越3条大的不良地质发育带和近50条层间错动带，地应力极高。”王林形容道，开挖右岸地下厂房，就好比在松软多层的“蛋糕”中挖一个又深又大的洞，不仅要根据对围岩岩性的不断认知调整施工方法，还要应对地下洞室挖空率不断变大、应力调整带来的高边墙变形，施工难度可想而知。经过反复研究和摸索，葛洲坝集团白鹤滩施工局现场创新采用“小梯段、短循环、弱爆破、强支护”的施工方法，同时革新了爆破控制技术，有效控制了围岩边墙的深层变形，将变形量控制在0.5毫米的范围内。为了加固围岩，施工人员还像穿针引线纳鞋底般，在整个厂房岩石上施行9460束索，比同规模电站多出一倍。如今，行走在右岸地下厂房，已看不到锚索的痕迹。早在2018年7月，厂房就转入混凝土施工阶段，最高峰时创造了单班3000方混凝土的浇筑纪录。厂房板梁柱墙全部采用免装修混凝土施工新工艺，光滑平整可鉴。

为提高混凝土施工效率，白鹤滩工程建设部在施工设备创新上也下足了功夫，为减少钢模台车的拆装次数，加快施工进度，规避人工拆装台车的安全风险等问题，研发出一种可横向移动的伸缩式钢模台车，能够平行至相邻隧洞，大大节约台车安拆工期。在白鹤滩右岸地下厂房的施工现场，记者见识这一施工“神器”，据与制造企业联手开发这种“伸缩台车”的葛洲坝集团白鹤滩施工局总工程师邓富扬介绍，该项设备的研发使用，进一步减少了人工投入，提高了功效，保证了施工质量，实现了以科技创新手段促进经济效益提升的目的。

世界性难题成为过去时

在大坝左岸的地下洞室里，藏着三条名为泄洪洞的水利工程建筑物。作为世界级水电工程，白鹤滩水电站泄洪洞具有大泄量（每秒12250立方米）、大断面（15米×18米）、大坡度（最大23°）、高流速（最大每秒47米）、高水头（189米）、高强度（混凝土强度），每一项都是世界级难题。白鹤滩建设者坚持创新引领，用“体型精准、平整光滑、耐磨防裂、零缺陷”的精品混凝土质量回应挑战，施工采用智能温控解码关键点，攻克大断面衬砌混凝土“无衬不裂”世界性难题，实现衬砌零温度裂缝；首次实现高流速浇筑全过程过流面浇筑低坍落度混凝土，填补国内外的技术空白；创建水工隧洞镜面混凝土施工成套工法及管理体系，彻底解决衬砌混凝土质量顽疾。

全面精品工程是白鹤滩水电站的建设目标，泄洪洞施工团队在项目初期就提出“体型精准、平整光滑、耐磨防裂、零缺陷”的目标，但是所有人都明白，这不是轻而易举就能实现的。

“泄洪洞流程较长，在高速水流作用下，对其抗冲磨、防空蚀性能要求极高。”白鹤滩水电站泄洪洞项目负责人王孝海告诉记者，混凝土缺陷修补费用高，施工缝面缺陷修补后，在高流速水流下基本全部破坏，只有确保混凝土无缺陷才是保证运行期安全的基础。在泄洪洞混凝土施工过程中，施工团队科学定量地布置光纤测温仪器，精密的仪器就好比混凝土的神经末梢，能准确感知温度，为优化调整温控提供依据。有了神经末梢，当然还要赋予混凝土一颗聪明的“大脑”。找到了症结，就能对症下药，泄洪洞施工团队很快便锁定了温控的这一剂“良药”——智能温控。

在智能温控的帮助下，白鹤滩水电站泄洪洞实现了施工期零温度裂缝，智能方案的成功运用也让大断面衬砌混凝土“无衬不裂”这一世界性难题从此成为过去时。

高流速泄洪洞全过流面浇筑常态混凝土一直是国内水电行业从业人员的梦想。“就是因为常态混凝土有这么多的优点，国内有很多类似的工程在这方面进行了探索，但受限于洞室空间相对封闭、结构体形复杂、常规设备难以利用等问题，相关探索一直止步不前，没能真正实现。”王孝海介绍，泄洪洞龙尾段高边墙施工复杂、坡度大，想要实现常态混凝土可谓难上加难，“但为了实现精品工程的高标准，常态混凝土无疑是最好的选择。”王孝海说，在攻坚克难的关键时候，洞室施工团队中的党员率先站了出来，对大坡度环境下常态混凝土运输展开专题研究，自主设计研发了大坡度重载自动化运料系统。“有了这套系统，我们只需要按下下一个按钮就能将带有常态混凝土的料斗小车从下料平台运往钢模台车。”作业人员对记者说，“这套系统实现了一键启动、全程自动控制，并配备四套安全控制装置，保证了常态混凝土运输效率和质量，也确保了运输过程的安全。”

2018年11月底，龙尾段高边墙浇筑正式启动，距离全过流面浇筑常态混凝土只剩最后一块硬骨头——龙尾段底板浇筑，标志着水电行业一直以来未能在高流速泄洪洞全过流面浇筑常态混凝土的遗憾不复存在，填补了世界水电建设的技术空白。应用情况表明，白鹤滩水电站泄洪洞项目自行研制的成套常态混凝土施工装备安全、高效，较常规施工效率提高约20%。

本报记者 李继洪



右岸厂房施工