



解码金沙江上“白鹤滩”

本报记者 王永战

6月10日拍摄的白鹤滩水电站。新华社记者 胥冰洁摄

在建规模世界最大

300米级大坝无一毫米级温度裂缝

从1991年开始白鹤滩梯级电站建设的前期研究，到2004年白鹤滩水电站全面启动可行性研究，从2010年正式筹建，再到今年5月31日大坝全线浇筑到顶，经历三十载艰辛磨砺，白鹤滩水电站终于迎来首批机组投产发电。

作为世界上目前在建规模最大的水电工程，白鹤滩水电站是金沙江下游四个水电梯级——乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝中的第二个梯级，在建设过程中创造了多项世界纪录：地下洞室总长217公里，地下洞室群规模世界第一；拦河拱坝高289米，相当于100层楼高，为世界第三；最大泄洪量达到每秒42348立方米，6分钟即可灌满整个西湖，枢纽泄洪功率世界第三。

据三峡集团董事长雷鸣山介绍，白鹤滩水电站核心技术均为自主研发，“2022年7月全部机组投产发电后，白鹤滩水电站将成为仅次于三峡水电站的世界第二大水电站。”

在群山峡谷之中建设水电站，发电厂房建在哪？如何让每台高50米、重量超8000吨的水轮发电机组安卧其中？对此，三峡集团白鹤滩工程建设部主任汪志林介绍，水电站的引水发电系统设备被安置在两侧山体专门开挖的地下洞室中，地下洞室开挖量达2500万立方米，“足够填满2个西湖”。

与此同时，左右岸的引水发电系统共布置了超过160条隧洞，由进口、压力管道、尾水隧洞、尾水出口等建筑物组成，加上各种廊道、管道，从而构成一个庞大的地下洞室群。而左右两岸的地下厂房长达438米，高度近90米，相当于30层楼高，跨度34米，也是世界之最。这里，正是16台百万千瓦机组的“栖息之地”。

施工过程中，工程人员还攻克了300米级特高拱坝温控防裂的世界级难题。

“白鹤滩水电站大坝最大坝高289米，整体计划浇筑低热混凝土803万立方米，规模巨大。”三峡集团白鹤滩工程建设部党委书记何炜说，大体积混凝土的温控防裂一直是工程界的难题。混凝土中的水泥水化反应会产生热量，使得混凝土浇筑后温度上升，之后再缓慢冷却到环境温度。如果不采取有效的温控措施，任由混凝土热胀冷缩，难免会产生裂缝。

而白鹤滩水电站大坝做到了没有一条毫米级的温度裂缝。何炜介绍，这一方面得益于“北斗”系统的助力，另一方面得益于自主研发的低热水泥。为实现“无缝”目标，工程人员利用北斗导航系统实现对浇筑阶段的实时监控、全面感知。而为从源头上解决温度裂缝问题，白鹤滩特高拱坝采用我国自主研发的低热水泥，有效控制混凝土最高温度，防止混凝土温度裂缝。

智能建造系统

破解世界超大“泄洪消能”难题

大量混凝土浇筑条件下，如何实现智能建造，是三峡集团白鹤滩工程建设部工程师刘春风一直关注的重点。得益于长期的水电工程建设经验，在白鹤滩水电站建设过程中，智能建造系统给每一仓混凝土原材料配上“身份证”，实现智能配比和可追溯。

如今，盯着系统，轻点鼠标，大坝施工全过程数据、科研成果等模块便依次展开。刘春风介绍，系统实现了全天候不间断，迅速回应着动态监督、评价预警、终端推送等多方需求，保证最客观、最直接的数据助力现场科学决策。

在安全稳定的地下洞室开挖完成之后，如何保证大体积混凝土浇筑的质量则是工程人员考虑的重点。“地下厂房桥机最大起重量达1300吨，牵引转子转轮吊装时，需要岩壁梁来承担这样巨大的荷载。”汪志林说，如果岩壁梁混凝土浇筑不密实不牢固，后果难以想象。

为了战胜挑战，工程人员将白鹤滩地下洞室的建筑

系的重要组成部分。在工程施工建设中，工程人员攻克多项世界级难题，创造了多项纪录。与此同时，全球单机容量最大功率百万千瓦的水轮发电机组，实现了我国高端装备制造的重大突破。这标志着我国大型水电工程建设完成从“中国制造”到“中国创造”的历史性跨越。

白鹤滩水电站是国家能源战略布局“西电东送”的骨干电源点，是长江防洪体

物外立面做到了“免装修”水平。汪志林介绍，“免装修”就是外立面光滑细腻，混凝土直接浇筑，后期不用装修就已有陶瓷般的触感。这得益于工程人员在浇筑模板选型、结构布置等方面的精益求精。“比如模板的选择，常规的钢模板可以重复利用，可一旦模板变形，便会导致浇筑出的混凝土坑坑洼洼。”为此，建设者们选用了只可使用两次的模板，以此保证浇筑的平整与光滑。

金沙江流域降水年内分配极不均匀，年降水主要集中在5至10月，可占到年降水量的80%以上。白鹤滩拱坝位于金沙江上的河谷狭窄处，汛期来势凶猛的强降雨汇入金沙江后，洪水向大坝奔涌而来。最大泄洪量每秒42348立方米，下泄落差高达190米，9万兆瓦的能量需要消纳。如此大的“泄洪消能”，在世界上难度也最大。

为解决窄河谷、大泄量条件下泄洪消能等问题，负责设计的华东勘测设计研究院采用坝身孔口和岸边泄洪洞联合泄洪的方式进行泄洪。工程师们对坝身最大泄量的深入研究，合理确定了坝身与岸边泄洪洞之间的泄量分配比例。针对坝身泄洪消能，工程师们在综合分析下游河床承受力、坝身孔口布置方式、坝身开孔对坝体结构影响等因素的基础上，通过大量水工模型试验验证，决定采用“坝身两层孔口”的布置方案，将坝身孔口的最大泄量控制在30000立方米每秒，泄洪建筑物超泄能力强、运行可靠性高，有效解决了超大泄洪规模不对称拱坝坝身泄洪消能的技术难题。

“零配重”百万千瓦机组助力碳达峰碳中和

据了解，白鹤滩水电站装机总容量1600万千瓦，左右两岸分别安装8台100万千瓦水轮发电机组。6月28日，首批2台机组投产发电。

据研制发电机的东方电机有限公司相关负责人介绍，白鹤滩水电站单机容量为百万千瓦，是世界上单机容量最大的水轮发电机组。水轮机最优效率达到96.7%，发电机额定效率超过99%，是世界效率指标最高的水轮发电机组。

同时，机组定子绕组温升不超过63K，转子绕组温升不超过58K，为水电行业最严格的温升控制水平；额定电压24千伏，为水电行业最高电压等级。

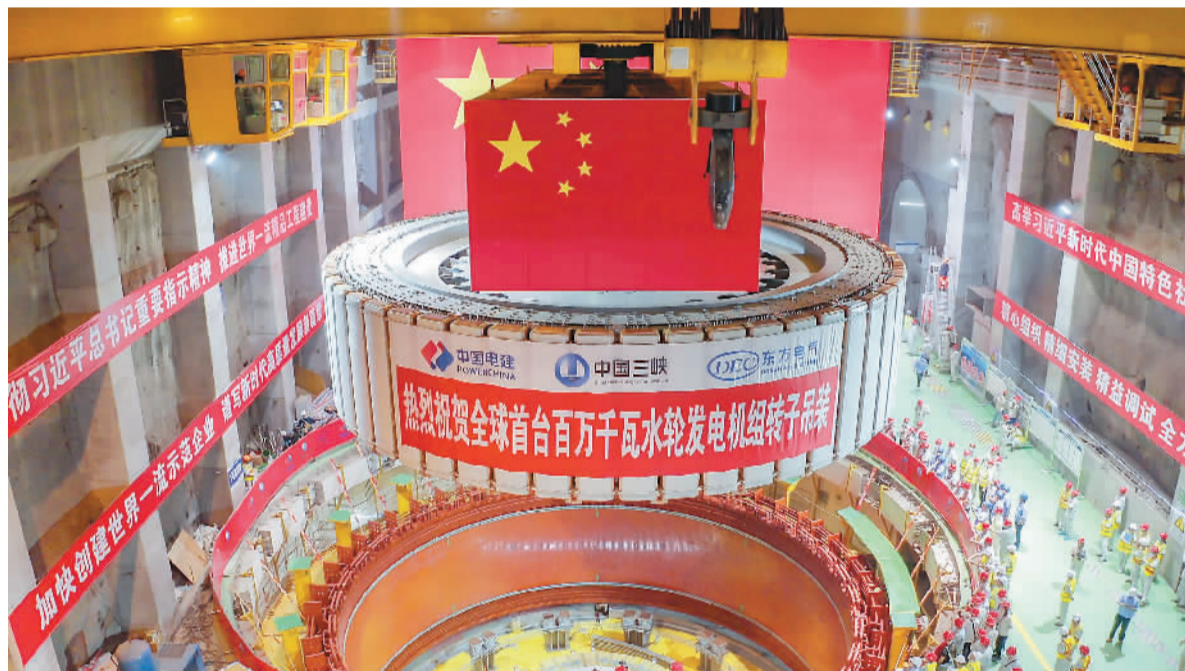
发电机组核心部件实现了智能制造。东方电机有限公司工艺部相关负责人邹应冬介绍，白鹤滩发电机核心部件定子线棒、转子线圈、定子冲片的生产制造，采用了数字化车间生产，生产效率大幅提高，运营成本大幅降低，产品研制周期大幅缩短，产品不良品率和能耗大幅降低。

与以往不同，此次运行机组转动部件由上万个零部件构成，重达2600吨，但在总装后却实现了“零配重”，成为全球首个巨型水轮发电机组不需试运行配重即满足精品指标的案例，也是水电史上首个“零配重”机组。

东方电机白鹤滩项目现场负责人冷建华介绍，百万千瓦机组由转轮、转子、主轴等组成，上万个零部件组装。“这些零部件如果不是一个机床生产的，可能都会出现细微的重量差别，那么转起来就会出现力矩不平衡偏差，需要‘配重’之后才能进入下一个环节。”冷建华说，但白鹤滩百万千瓦机组实现了“零配重”，几乎没有力矩不平衡，说明在研发设计、制造加工、安装偏差控制上均做到了极致。

值得注意的是，水电站的水轮发电机组零部件已全部实现国产化。据介绍，东方电机充分总结以往经验，形成了包括机组总体设计、转轮研发、核心部件制造、磁极绕组空内冷技术、低损耗轴承技术、24千伏绝缘系统、平衡受力新型转子支架开发等一系列自主知识产权和核心技术。

“水电站完全建成后，年均发电量约624亿千瓦时，每年可节约标准煤1968万吨，减排二氧化碳5160万吨。”汪志林说，这对于我国按期实现2030年碳达峰、2060年碳中和目标将发挥重要作用。



2020年8月18日，白鹤滩首台机组转子吊装。

东方电气供图



哈电电机值班人员在14号机组控制柜前。
刘洋摄
(人民视觉)



6月8日，在白鹤滩水电站左岸机房，工作人员在观察1号机组运转情况。
新华社记者 胥冰洁摄

白鹤滩水电站建设时间轴

2004 2017.8.3 2018.8.4 2019.1.2 2019.4.1 2020.8.18 2021.3-4 2021.5.31 2021.6

白鹤滩水电站全面启动可行性研究

主体工程开工建设

大坝浇筑突破100米

全球首台百万千瓦水轮发电机组转轮出厂

大坝混凝土取芯

全球首台百万千瓦水轮发电机组转子吊装

库区云南侧及四川侧移民安置省级专项验收通过

大坝全线浇筑到顶

首批机组投产发电