



从空中俯瞰白鹤滩水电站大坝下群像。 谢雷摄

在白鹤滩水电站筑无缝大坝、智慧大坝，造百万千瓦机组 自主创新，中国水电有“创新密码”

本报记者 刘乐艺

没有发现一条温度裂缝

“我在三峡工程工作过，现在又经历了白鹤滩，一辈子能参加两个世界级水电工程，我感到非常自豪。”在壁立千仞的狭深河谷间，热风夹带着水雾缓缓升腾，站在白鹤滩混凝土双曲拱坝上，白鹤滩工程建设部党委书记何伟感慨万千。

中国水电在西南，西南水电在金沙。2012年7月，正值中国长江三峡集团有限公司（以下简称“三峡集团”）全面开发金沙江下游4个梯级水电站，受公司派遣，何伟来到白鹤滩投身工程筹建。

白鹤滩水电站位于四川省凉山州和云南省昭通市境内，作为“老前辈”建设者，9年的现场锤炼，早已令何伟对白鹤滩建设的各类“疑难杂症”烂熟于心。少为人知的是，刚到坝区时，复杂的地质条件曾让他连续几个月都辗转反侧。

河谷地带，两岸空间有限，必须通过开挖地下洞室布置引水发电设备。摆在建设团队面前的首要难题，便是世界水电站建设史中都格外少见的地质现象——玄武岩柱状节理。

“这其实是发育玄武岩中的一种原生张性破裂结构，从形状上看就像薯条一样，开挖后则容易产生松弛、崩落等现象。”中国科学院院士陈祖煜介绍说。

啃下硬骨头，得下硬功夫。为找到最佳解决路径，建设团队彻夜探讨施工方案，组织考察各种隧道工程，大范围搜寻可借鉴的技术，最终决定按照“开挖一层、分析一层、预测一层、验收一层”的工作程序，动态优化施工方案，以保障洞室群整体稳定。

尽管已是倍加小心，但突如其来的岩爆问题还是让建设团队捏了一把汗。2019年5月1日，大坝右岸部分洞段出现岩爆，表面有开裂掉块现象，白鹤滩施工被迫陷入停滞。容不得丝毫犹豫，何伟与同事们立即在洞室内增设了大量监测仪器，迅速组建由国内多名岩石力学专家领衔的科研团队，结合监测数据深入研究岩体变化机理，一场与时间的赛跑就此开启。

“抢险加固涉及很多技术问题，不能蛮干。”何伟告诉记者，初次变形稳定后，团队第一时间现场勘察，科学判断、果断决策，争分夺秒开展应急加固工作，历时半年时间，圆满完成抢险任务。

水电建设业内，大体量混凝土的温控防裂一直是公认的世界级难题。“大坝建设需要浇筑大量混凝土，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。

1910年，中国第一座水电站石龙坝水电站只因几名外国工程师的缺席被迫停工；如今，中国水电总装机容量和年发电量已先后跃居世界第一。百余年来，中国水电为何能够实现从无到有、从弱到强的沧桑巨变？

坚持自主创新是中国交出的答卷。

从三峡水电站到乌东德水电站，中国水电经历了“跟跑”到“并跑”再到“领跑”的转变，在开发利用、运行管理、效益发挥等方面均实现了全方位的跨越。“中国的水电项目在改善民生与保护环境等方面都产生了积极影响，我相信，中国水电也将在创新方面继续引领世界标准。”国际大坝委员会（ICOLD）主席迈克尔·罗杰斯称赞道。

7月28日下午3时，伴随着白鹤滩8号机组转轮顺利通过验收，全球第二大水电工程——白鹤滩水电站的16台机组转轮加工制造正式宣告完成。以此为契机，本报记者对白鹤滩水电站建设团队进行了采访，探秘中国水电的“创新密码”。

如果不采取有效的温度控制措施，任由混凝土热胀冷缩，难免会产生裂缝。”工程建设部教授级高级工程师孙明伦解释。

超级工程，催生了新材料和新工艺。为了从源头上攻克“无坝不裂”难关，白鹤滩水电站首次全坝采用低热水泥混凝土。与常规使用的中热水泥相比，低热水泥水化热量低、后期强度高，具有高抗裂、高耐久性、耐磨性等特点。

事实上，低热水泥的应用绝非是突发奇想，而是经过了长期的工程实践。早在三峡三期工程中，低热水泥混凝土便得到局部应用。但由于其彼时刚研制出来，质量尚不稳定，暂且无法全坝浇筑。

2013年，在三峡集团的安排下，孙明伦开始负责低热水泥混凝土的性能试验工作，为白鹤滩全坝应用低热水泥进行深入研究。编制研究大纲、分析反应机理、总结生产经验……创造性进行多轮低热水泥考核性生产后，水泥各项性能终于达到工程要求。

从2017年4月12日开始，至2021年5月31日，1500多个日夜的奋战下，采用低热水泥混凝土浇筑的白鹤滩大坝浇筑到顶，总方量达803万立方米。“目前，我们的白鹤滩大坝已经全部浇筑完成，没有发现一条温度裂缝。”孙明伦骄傲地说。

大坝“耳聪目明”

最大坝高289米、地下洞室总长217公里，白鹤滩水电站可谓名副其实的“大块头”。

然而，“大块头”一样拥有“大智慧”，诸多智能建造技术贯穿于白鹤滩的全生命建设周期，助力其成为世界上“最聪明”的大坝。

正午时分，白鹤滩坝顶坝面闪动着成群橙色身影，工程师们正人手一台笔记本电脑，精细调整传感器角度，验证采集数据，计算设计参数……“你们这群高才生顶着大太阳晒的啥呢，我是一点儿都不懂，就感觉很高级呢。”旁边的工人师傅不断打趣道。

殊不知，工人口中的“高级货”，正是白鹤滩智能建造的“关键一环”——大坝施工进度仿真系统。

从三峡工程开始，到后来的溪洛渡水电站，施工仿真技术在减少安全隐患、实现精准管控等方面都发挥了至关重要的作用。但作为300米级特高拱坝，白鹤滩工程规模巨大、结构复杂，以往的仿真技术已无法满足新的需求。面对工程建设管控的全新挑战，中国电建成都院数字工程团队勇挑重担，努力搜寻“解题”新思路。

为了使超大体量混凝土浇筑进度仿真能够更加真实地反映现场实际情况，身为技术负责人的王飞一头扎进工地现场。无论是方案设计，还是收集一线需求，他都是亲力亲为；无数个深夜里，他一遍又一遍地进行着仿真测试。“研发出能代表当今最先进技术的仿真系统，这是我最大的心愿。”王飞告诉记者。

在他的带领下，数字工程团队集思广益、紧密联动，反复演算优化，最终造就出集“建模—编译—计算—分析—出图”为一体的施工全过程进度仿真系统。“这套系统既可以模

拟出混凝土的浇筑场景，又能及时发现为题，提出合理化建议。”王飞介绍称，这对提高缆机等资源的利用率起到了关键作用，为满足各阶段度汛及蓄水目标奠定了基础。

智能建造，也为白鹤滩水电站添设了一双双“慧眼”，帮助其掌握“身体状态”。

据了解，白鹤滩坝体内埋设有上万个监测传感器，可采集温度、应力状态等数据，实时监控运输车、缆机、振捣机等设备的运转。截至目前，监测传感器已累计采集3470万条温度数据，质量、安全、施工进度等数据突破10亿条，真正实现全过程实时监控和预警。“就好像一个人身体不适，自己就能抽血化验，并开出治病药方。”工程建设部副主任陈文夫形象地比喻道。

在白鹤滩，智能设计无处不在。在白鹤滩技术管理部副主任周孟夏看来，其手机中安装的智能通水成套装备和移动实时诊断控制系统便是他最亲密的“工作伙伴”。

“混凝土比人还要娇贵。”周孟夏告诉记者，由于混凝土往往升温速度过快，这就需要借助冷却通水来控制整个温度变化过程。“以前，大坝通水系统全靠人工操控，按照规范要求至少每4个小时就要对所有仓号进行一次测温，需要投入大量的人员，大坝温度情况掌握也比较滞后。”

如今，智能通水系统通过温度传感器，可实时感知混凝土状态，通过智能调节通水流量、温度和时间，在线个性化进行温度调控，实现对坝体温度的全过程智能化、精准化管理。“有了智能通水系统后，点点手机，所有参数全都一目了然，工程师只需要按时检查系统即可，非常方便。”何伟说。

虽然智能温控并不是一件新生事物，但周孟夏指出，从溪洛渡大坝到白鹤滩大坝，这实现了从自动温控到智能温控的转变，是智能化发展的一大步，也是近年来水电行业加快在5G、大数据、云计算等新兴领域布局的可贵成果。

勇攀“水电珠峰”

在白鹤滩水电站6项位列世界第一的技术指标中，百万机组格外引人注目。作为世界上首批100万千瓦水轮发电机组，不仅实现了单机容量的巨大飞跃，其背后的国产化技术标签还撑起了“中国创造”的底气。

实际上，生产制造100万千瓦机组，绝非一蹴而就，而是一个长期论证、自我革新

与不断实践的过程。

1996年，因三峡电站左岸建设需要，中国通过国际招标的形式首次引进了14台70万千瓦水轮发电机组，中国企业东方电机和哈尔滨电机分别与中标公司合作完成了机组的设计制造。虽然国内企业承担了不少的供货任务，但由于精加工能力有欠缺，更多的还是在给外企“打工”。“5000元一吨的高强钢，人家卖我们7000元，也只能咬着牙买下来。”何伟回忆称。

技术落后，就要受制于人。为了破解发展困局，中国水电开始了一条重大装备国产化的赶超之路。

东方电机白鹤滩项目现场总代表王笑君表示，企业通过参与三峡水电站70万千瓦水轮发电机组研制，短短几年间就缩小了与国外先进技术30多年的差距；之后参与溪洛渡水电站77万千瓦发电机组研制，生产技术也取得质的提高。如今，白鹤滩水电站百万千瓦发电机组顺利投运，意味着中国已经带领世界水电装备制造进入“无人区”，并向着“水电珠峰”发起冲击。

然而，攀登“水电珠峰”，怎会是一片坦途？“国之重器”的核心技术，实则是海量的设计图纸、试验结果与计算报告共同积累而成的。

“在白鹤滩之前，国内已建机组的最大单机容量是85万千瓦，制造100万千瓦机组，研制难度并不是简单的加减法，而是成倍的差距。”工程建设部工程师陈浩说，机身上每一个孔的布置、每一个叶片的角度都大有讲究，任何一个看似寻常的部件背后都蕴含着惊人的计算量。

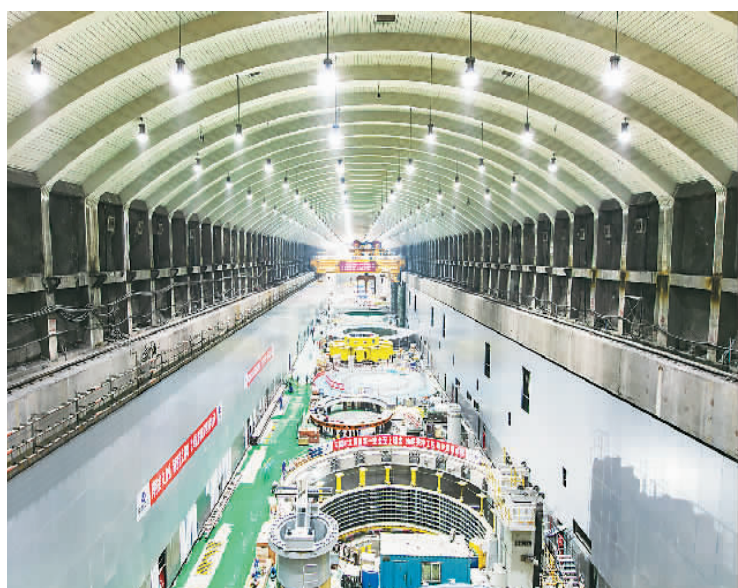
转子是水轮发电机组发电部分的“心脏”，也是机组中制造难度最多的部件，直接影响机组运行效率与稳定性。“转子高4.1米，组完能有1955吨，转动起来需要承受相当于30万辆小轿车同时加速产生的力。”陈浩说道，“我们的额定转速是111转，但在极限试验中，即使达到额定转速的151%，转子也可保证完好无损。”

在降低损耗、控制污染的同时，如何有效控制机组轴承性能、冷却效果，也是巨型机组制造的难题之一。对此，白鹤滩专门采用了低损耗轴承技术，降低推力总损耗25%以上，全部满足高可靠性、高效、清洁环保等各项要求。

研发难，安装制造也并非易事。以转轮焊接为例，所需的马氏体不锈钢材料需预加热，工人因此要穿着厚重的防护服，趴在异常狭小的空间里进行操作。“普通人站在旁边可能就受不了，而我们的工人师傅在里面作业，手能像机械臂一样稳，保证整条焊缝没有任何缺陷。”陈浩说。

创新精神与大国工匠精神的紧密结合，造就了史无前例的精品百万机组。高度超过50米的发电机组，一台的重量约等于一艘驱逐舰，但转动起来的整体摆幅却不超一根头发丝，即便在机组的机架盖板上立硬币也不会倒。

“白鹤滩百万千瓦国产化机组的应用，将进一步稳固中国水电技术的世界领先地位，推动中国水电更好更快‘走出去’，为国家发展战略提供更加稳固的支撑。”何伟告诉记者。



白鹤滩水电站右岸主厂房。

张勇摄



白鹤滩水电站大坝坝面。

谢雷摄



白鹤滩水电站左岸技术设备厂房内景。

张禾摄