

封面
头条

66

20世纪50年代,一场长江特大洪水过后,一支近300人的勘探队伍挺进川滇交界处的金沙江畔,试图在此筑坝拦江、驯服洪水。然而,受限于当时的技术与经济条件,这个宏大的构想暂时搁浅,但相关勘测研究工作仍在艰难环境下进行着。

2010年,大批建设者扎进四川省凉山州宁南县与云南省昭通市巧家县,以人类科技之力,在金沙江河谷上,筑起289米高的拱形大坝。他们拦住江水,实现发电、防洪等综合功能。

2022年12月,白鹤滩水电站全面投产发电。每年平均624亿千瓦时的清洁电能,通过特高压线路源源不断输送至华东,撑起国家“西电东送”的大动脉。

2026年7月30日,华西都市报、封面新闻记者走进这座藏于深山的大国重器,探寻它荣获2025年度国家科学技术进步奖一等奖背后的智慧密码。



白鹤滩水电站拱形大坝上的泄洪孔。

华西都市报·封面新闻记者 张峥 雷蕴含 摄影报道
实习生 罗薇

金沙江上 驯龙记

白鹤滩水电站如何破解『世界级工程难题』?



俯瞰白鹤滩水电站。

勘测半个世纪,历时12年建成

汪志林,三峡集团重大水电工程科学技术委员会首席专家、原白鹤滩工程建设部主任。当他再次走上大坝,回忆起当年火热的建设场景,往事依然历历在目。

“如果从1954年首次提出构想算起,白鹤滩水电站的历程跨越了70余年。”站在14米宽的坝顶上,汪志林细数着建设的曲折。早在1958年,中国电建集团昆明勘测设计研究院的前身便组织了近300人的地质勘探队进行前期勘探,但因条件不具备,于1961年搁置。直到1990年《长江流域水能开发规划》

获批,1991年中国电建集团华东勘测设计研究院接手前期工作,项目才正式重启。

“当时条件极其艰苦,没有路,很多设备都是靠毛驴驮进深山的。”汪志林回忆说。从2010年底筹建,到2021年首批机组投产发电,再到2022年12月20日全部机组投产发电,整个建设过程历时12年。在这漫长的岁月里,工程建设者一年中有超过300天驻扎在白鹤滩。汪志林只是这个巨大工程接力棒的传递者之一,几代水电人用青春和心血,将宏伟蓝图化作了高峡平湖。



藏于深山中的8台百万千瓦水轮机组。

没有裂缝的“超级大坝”

从正面望去,白鹤滩大坝像一块被切下的弧形鸡蛋壳,牢牢卡在山壁之中,这便是“双曲拱坝”。这座高达289米的世界第三高双曲拱坝,在世界首次全坝使用低热水泥混凝土,在300米级高拱坝中,抗震参数位列世界第一。

最令汪志林自豪的是,如此巨大的大坝,实现了整体无裂缝。从大坝左岸走向右岸,31块长度不一的坝段严丝缝。这得益于技术创新——特高拱坝智能温控与全坝低热水泥应用。

白鹤滩坝址地形地质条件极不对称,两岸山体左缓右陡、岩性各异,

就像举重运动员两臂力量悬殊,却要稳稳举起一座摩天大楼。且坝基广泛分布柱状节理玄武岩,岩体像一把竖着的筷子,开挖后极易松弛。

“大坝浇筑时是24小时连续施工,我们同时浇筑多块坝段。”汪志林介绍说,混凝土在凝固过程中会释放大量热量,若控制不好,热胀冷缩必生裂缝。为此,白鹤滩将大坝内部温度传感器和循环冷却水管相连,实时掌控温度场与应力场。大坝最高温度被严格控制在27℃以内,横缝并缝灌浆前冷却到14℃至16℃,与蓄水后的库区水温基本一致,一举攻克了“无坝不裂”的行业顽疾。

深藏山体的“地下宫殿”

乘坐交通车从坝顶抵达地下厂房约需6分钟。在左右两岸的山体深处,分别藏着两座“超级发电厂”,每座厂房内各装配8台百万千瓦水轮发电机组。

“地下厂房可放下一艘巨大航母。”三峡集团原白鹤滩工程建设部党委书记何炜说。因为河道狭窄,庞大的发电机组无法在地面安置,只能藏于金沙江两岸350米以下的山体中。

在复杂山体里掏洞,犹如在“筷子堆里挖窟窿”。白鹤滩地下洞室群总里程约217公里,开挖总量达

2500万立方米。面对高地应力及复杂地质,建设者采用“先后后墙、分层分块”的精细化开挖方式,像用“钢筋针线”把松散岩体牢牢缝合,让原本容易滑动的岩层重新连成一个整体,最终建成了这座世界规模最大的“地下宫殿”。

作为保障国家能源安全的重要骨干工程,白鹤滩总装机容量1600万千瓦时,这些磅礴的电能都来自“地下宫殿”。自投产以来,累计发电量已突破2500亿千瓦时,多年平均发电水平624亿千瓦时。

“空中对碰” 驯服泄洪巨龙

除了大坝和地下洞室,白鹤滩还破解了另一项世界级难题:不对称条件下的泄洪消能。

白鹤滩水库控制金沙江91%的流域面积,在万年一遇的校核洪水下,需下泄42300立方米/秒的洪水。如此巨大的能量,若不能有效消散,将严重冲刷河床、危及坝基。这些洪水通过坝身孔口和岸边泄洪洞分别下泄。

白鹤滩拱坝坝身布置6个表孔、7个深孔,泄洪能力超过30000立方米/秒。对于白鹤滩这样的不对称拱坝,坝身下泄的洪水想要运用水流对撞消能方法,需要更为精巧的设计。

“我们按照泄洪水流的流态对每个孔口形状个性设计,通过‘分层引流、空中对撞’的方式,让汇聚的巨大水流自行撞击砸碎,消除水体动能。”汪志林介绍说。记者在现场看到,坝身最上层设置了6个表孔,中间设计了7个方向各不相同的深孔。“泄洪时,让水流在上空发生对冲碰撞,在空中先消耗掉一部分能量”,然后落在坝后水垫塘内,由塘内48米深的水体和反拱形水垫塘底板再承受剩余能量,保护坝后河床。

同时,在左岸单侧设计了3条无压泄洪洞,每条泄洪洞最大可下泄4000立方米/秒的洪水,洞内最大流速达到47米/秒。要驯服这条“能量巨龙”,不仅需要巧妙的设计,更需要“无缺陷”的建造。在泄洪洞内高速水流冲刷之下,哪怕只有几毫米的缝隙,都可能引发大面积损毁。为此,建设者革新了施工工艺,将泄洪洞内壁建成光滑如镜的“镜面混凝土”,其平整度仅为规范允许值的1/3,极大减少了水流阻力,牢牢筑起了泄洪安全生命线。

白鹤滩水电站通过攻克多项核心技术难关,创下了百万千瓦水轮发电机组单机容量、地下洞室群规模、圆筒式尾水调压室规模、300米级高拱坝抗震参数、无压泄洪洞群规模,以及世界首次全坝使用低热水泥混凝土等12项世界第一。

如今,长江上已串起一条跨越1800公里的世界最大清洁能源走廊:乌东德水电站、白鹤滩水电站、溪洛渡水电站、向家坝水电站、三峡工程和葛洲坝水电站6座梯级电站,每年总发电量超3000亿千瓦时。

江水奔腾不息,大坝巍峨矗立,白鹤滩用澎湃的绿电点亮了远方的万家灯火,也让库区的绿水青山,真正化作了造福百姓的金山银山。