

# 巴拉水电站枢纽总布置格局技术创新实践

邓元亮<sup>1</sup>, 刘兴春<sup>2</sup>, 杨宏昆<sup>2</sup>, 周涛<sup>2</sup>, 梁勇<sup>2</sup>

(1. 四川足木足河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041;

2. 四川省清源工程咨询有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:**过去二十年来,国内水电大规模快速开发利用,各主要河流规划的优良梯级资源基本开发殆尽,余下待开发的梯级大多存在自然条件不好、投资指标较差或受制于环保政策三方面因素的影响,大渡河干流东源自上而下的第 2 级电站—巴拉水电站就是典型的代表,其前期开发准备和立项过程同样因三方面的因素几经周折。在主体工程开工前近 12 年时间里,针对电站枢纽总布置格局持续性地、全方位地从技术经济角度开展了大量的优化研究工作,最后有效克服了内外影响因素带来的困难而核准实施。作为后水电开发时期的经典工程,针对巴拉水电站开发所遇到的内外困难,本文对巴拉电站枢纽布置格局调整过程中的几项核心技术进行梳理和研究,阐明枢纽布置格局技术优化对水电站开发的重要意义,给后水电时期开发有益启发。

**关键词:**巴拉水电站;开发方式;枢纽布置格局;建筑物型式选择

**中图分类号:**[TM622];TV6;[U260.8+1]

**文献标志码:** B

**文章编号:**1001-2184(2023)05-0071-04

## Innovative Practices on Technical Keys of Project General Layout for Bala Hydropower Project

DENG Yuanliang<sup>1</sup>, LIU Xingchun<sup>2</sup>, YANG Hongkun<sup>2</sup>, ZHOU Tao<sup>2</sup>, LIANG Yong<sup>2</sup>

(1. Sichuan Zumuzu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041;

2. Sichuan Qingyuan Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** In the past two decades, domestic hydropower has been developed and utilized rapidly on a large scale and the cascade resources with high quality in major rivers have been basically exhausted. Most of the remaining cascades to be developed are observed with poor natural conditions, poor investment indices or are restricted by environment policies. Bala Hydropower Project, the second cascade of the east origin of Dadu River, is a typical example. Its early preparation process and approval process were though and encountered with all the mentioned 3 difficulties. In the past 12 years before the start of the main project, a large number of researched and optimizations on the general project layout were carried out continuously and comprehensively from a technical and economic perspective. Finally, the difficulties caused by internal and external factors were effectively overcome and the project was approved. As a classic project in the post-hydropower development period, in view of the internal and external difficulties encountered, this article sorts out and studies several key technologies in the process of adjusting the general layout of Bala Hydropower Project, and clarifies the importance of layout optimization on a hydropower project, which could provide useful inspiration for hydropower development in the post-hydropower period.

**Key words:** Bala Hydropower Project; Development mode; General Layout; Selection of structure types

### 1 工程概述

巴拉水电站系大渡河干流水电规划“3 库 28 级”自上而下的第 2 级水电站,位于东源主流脚木足河上。电站于 2007 年启动了勘察设计工作,2016 年 12 月完成可行性研究报告,2018 年 3 月核准批复,2020 年 12 月正式开工建设,预计 2024 年 12 月首台机组正式投产发电,2025 年 4 月前

三台机组全部并网。

电站采用混合式开发,开发任务为水力发电并兼顾减水河段生态用水需要,坝址位于日部乡色江吊桥下游约 2.2 km 处,经右岸引水至日部吊桥上游约 3.9 km 处建地下厂房发电。电站为二等大(II)型工程,由首部枢纽、引水建筑物和厂区等建筑物组成。首部枢纽拦河面板堆石坝大坝高 138.0 m,引水有压隧洞长 6.9 km,地下厂房

收稿日期:2023-09-04

装机  $3 \times 240$  MW,尾水有压隧洞长 1.7 km。

电站前期工作开始至正式动工历经 14 年,其过程充满了各种技术性和非技术性问题,技术性包括开发方式规划调整、工程规模扩大、选坝河段范围延展、引水发电系统及泄水系统地下洞室规模庞大等问题。非技术性有“5·12”地震影响复核、川陕哲罗鲑增殖放流、减水河段生态放流、项目经济性评估等问题。每个问题都是过程中的一道高坎,决定着项目生死存亡,但在业主和各相关单位共同努力下,坚持勘察设计优先,应用先进技术,学习和吸取国内外水电工程的经验,攻坚克难、勇于创新,达到电站开发预期。

## 2 河段开发方式规划调整

为开发利用大渡河丰富的水能资源,自 20 世纪 50 年代以来,各有关单位持续进行了大量的勘探、规划和设计工作,编制了一系列有关大渡河的水电开发报告。2003 年 7 月完成《四川省大渡河干流水电规划调整报告》首次将大渡河干流向上游延伸至四川省境内的脚木足河段,确定了 3 库 22 级的开发方案,其中双江口以上的大渡河东源脚木足河按四级开发,梯级自上而下分别为下尔呷、巴拉、达维和卜寺沟。

大渡河干流规划报告对脚木足上游河段提出的是 4 级堤坝式开发,其中巴拉梯级坝高 230 多米,装机 560 MW。通过分析巴拉河段地形、地质和河道比降等自然条件,设计单位提出将巴拉梯级从堤坝式调整为混合式开发,并适当调低达维梯级正常蓄水位减少日部乡淹没、从而增加巴拉梯级水头和装机容量的建议,以充分利用河段中花岗岩地层和千分之十二的河道纵坡。该建议得到业主和原规划编制单位成都院的积极响应,随即委托编制,于 2008 年获得水规总院的批复。由此,电站坝高从 230.0 m 左右坝高降低到 140.0 m 左右,增加 9 km 长引水和尾水隧洞,装机也从 560 MW 增加为 720 MW,工程直接投资减少 6~7 亿元。

## 3 枢纽总布置定局

一个水电站的枢纽总布置的谋篇布局是电站能否建成的关键,巴拉也不例外。

首先,对过工程开发河段进行分析:上游阿坝县茸安乡阿柯河口至马尔康县日部乡日部吊桥止,河段全长 36.82 km,天然落差 242.52 m,河段平均纵坡 6.59%。区内属中高山峡谷河段,河

道纵坡具有“两头缓、中间陡”的特点:色江吊桥以上 23 km 长河道整体较顺直,纵坡在 3~4‰间,水流平缓,河谷相对较狭窄;以下 10.5 km 河段至巴拉峡谷口纵坡在 12‰~13‰间,谷底宽一般 45.0~60.0 m,河谷狭窄,水流湍急;巴拉峡谷口以下 2.1 km,纵坡陡降为 3‰~4‰间,谷底宽一般 50.0~90.0 m,河谷宽缓,水流平缓。

其次,经现场踏勘河段地形地质条件研判:河段为典型高山峡谷地貌,河谷基本呈“V”字型,两岸山体雄厚,阶地、漫滩不发育;与纵坡陡缓分界基本相同,中间河段有侵入燕山期黑云二长斑状花岗岩,而两头为侏倭组变质砂岩,岩质坚硬致密、抗风化能力强;具备建坝的地形地质条件。

再次,为根本上解决达维水库淹没征地所带来的关键问题,原巴拉规划坝址一达维水库库尾间长约 5 km 的河段 50.0 m 水头的水能资源,经开发方式调整后,降低原达维电站规划正常水位 2 730.00 m 至 2 680.00 m,相应 50.0 m 水头转移到巴拉电站,巴拉尾水水位约 2 680.00 m。

基于上述三方面分析认识,总枢纽布置格局原则在 2007 年 12 月首次现场综合踏勘后就基本确定,即:充分利用陡纵坡河段引水,坝址尽量上移至上游河段陡缓分界范围内,地下厂房洞室避开不利地层而置于花岗岩体下游边界内,同时设 1.7 km 尾水洞退水至厂房衔接下游梯级库水位。该枢纽布置格局的重要意义是针对巴拉梯级流域内不利自然地形地质条件,充分利用河段特点和区内地质地层特性,大胆地谋定“厂房中部开花、长引水加长尾水的双调压井”混合引水枢纽布置格局,不仅从本质上为电站宏观技术可行和投资可控定下调子,亦为整个电站后续勘察设计、申请立项和开工建设奠定了基础。

## 4 坝址坝型精细化选择

为精细化决策,结合巴拉水电站与上、下游梯级衔接关系,在达尔仓沟至下游峡谷出口长约 12 km 河段,选择了上、中、下三个坝址进行坝址坝型及布置格局综合比选,三个坝址均具备修建坝高 120.0~230.0 m 级当地材料坝和混凝土坝的地形地质条件,通过比选先排除地质条件较差的下坝址,重点对上、中坝址进行综合比选。设计通过对混凝土面板堆石坝、粘土心(斜)墙堆石坝、沥青混凝土心墙堆石坝、混凝土重力坝及混凝土拱

坝的初步分析比较,以混凝土面板堆石坝作为当地材料坝的代表坝型和碾压混凝土拱坝作为混凝土坝的代表坝型<sup>[1]</sup>。

从两坝址面板堆石坝方案和混凝土拱坝方案枢纽布置及建筑物设计方面比较,上、中坝址各有优缺点,技术难度均在已有成熟经验范围内,社会和环境影响因素不制约。上坝址大坝规模略小但引水线路长 2.4 km,上、中坝址面板堆石坝方案和混凝土拱坝方案静态投资分别约为 67.64、67.70、67.22 和 68.97 亿元。

综合分析各项因素,考虑中坝址的长期电量效益优势,最终选定中坝址、混凝土面板堆石坝为推荐坝型,期间对近坝库岸稳定性开展了专题研究,确保了方案落实。

## 5 泄洪系统布置优化

巴拉电站设计洪水 2 900 m<sup>3</sup>/s、校核洪水 3 900 m<sup>3</sup>/s,总泄洪功率超过 4 000 MW。为使枢纽布置方案合理可靠且经济,在坝址坝型选择成果基础上,可研阶段根据泄水建筑物设置原则,考虑溢洪道、溢洪洞、放空洞及导流洞等建筑物在左岸和右岸的布置相互协调,分配不同的泄流能力进行组合,放空洞与导流洞的结合形式,拟定了 3 类共 7 个布置格局方案进行综合比较,重点研究左右岸泄洪通道布置重心、单侧开敞溢洪道方案、高低泄水通道泄量分配及功能、导流洞利用等<sup>[2]</sup>。各方案技术上均在工程经验范围内,均为技术可行方案。

通过分析河道左岸具有裁弯取直天然地形,确定泄洪通道重心布置于左岸。

开敞式溢洪道与洞式溢洪道相比,由于两岸河谷狭窄、陡峻,溢洪道进口转弯及出河条件较差,靠山侧边坡开挖工程量巨大,最大坡高近 210 m,致使边坡支护工程量巨大和“高边坡”问题突出;相反,高陡峡谷多采用的洞室式溢洪道方案具有较好的地形适应性,进出口边坡高约 80 m,施工及运行风险相对较小,投资比溢洪道高低约 3 600 万元左右,因此,推荐采用洞式溢洪道方案。

在确定左岸高高程洞室溢洪道为主泄水通道和低高程放空洞的前提下,进行了泄量分配和导流洞利用的比较,综合考虑推荐采用技术难度最低,可靠性最高的“三通道”泄水的组合方案,作为推荐坝址面板坝泄水建筑物方案,即左岸布置溢洪洞和泄洪放空洞,溢洪洞可单独宣泄 100 a 一

遇洪水,泄洪放空洞可参与宣泄设计和校核洪水,也可单独宣泄常年洪水,右岸导流洞只承担施工期导流任务,蓄水发电前进行封堵。

为确保方案的合理可靠,在上述基础上开展了枢纽整体水工模型试验和洞式溢洪道单体水工模型试验,细化确认了可研方案。施工阶段再次对泄洪放空洞及其出口挑流消能开展了单体水工模型试验,优化了细部结构型式。

## 6 引水发电系统技术难题的解决和优化

引水发电系统采用地下厂房居中、高低隧洞输水、双调压室的特有布置模式,即:“上平引水隧洞+上调压井+地下厂房+下调压室+下平尾水隧洞”。虽电站整体规模中等,但其引水系统结构规模和技术难度高于绝大多数大中型电站。其主要技术难点集中在隧洞、调压室、高压管道混凝土衬砌及系统水力过渡四个方面。

引水和尾水隧洞设计引用流量 383.1 m<sup>3</sup>/s,输水经济洞径 11.0 m,最大开挖洞径 14.2 m,规模在川内排前 3 名,国内外也名居前列。上平引水隧洞围岩比较好,Ⅱ、Ⅲ类居多,难点主要是断层和密集带。尾水隧洞基本上都是Ⅳ、Ⅴ类围岩,炭质板岩岩性较差。电站项目在核准前开展大量研究工作,过程充分融合和借鉴了各种先进理念和成果。勘探方面各阶段按规范并针对隧洞的特点完成了引水线路跨沟段的 4 个钻孔和沿线 13 个平洞勘探的地质勘查实物工作,基本查明引水隧洞所穿越区的地质条件和围岩情况,沿线未有大断裂和断层,仅一条次级 1.0~2.0 m 断层破碎带,隧洞常遇的岩爆、断层、地下水等地质难题对巴拉电站在常规经验预期范围。依托勘探成果,大胆运用现代隧洞设计理念,即“以围岩自身为主要承载结构,辅之以喷锚支护、二次支护以及固结灌浆等加固围岩措施,最终目的使喷锚支护、围岩灌浆加固、围岩结构组成复合体联合承载”,采用Ⅱ、Ⅲ围岩喷锚不衬砌,Ⅳ、Ⅴ类围岩全断面钢筋混凝土薄衬砌(厚 0.8~1.0 m)为隧洞结构设计,大大节省了工期和造价,为项目最终可研审查和项目投资评审通过奠定了良好的基础<sup>[3]</sup>。

上、下调压室均为地下埋藏圆筒式,单室阻抗式,上调压室开挖直径 34.9 m、穹顶 36.5 m、井深 90.5 m,下调压室开挖直径 40.8 m、穹顶 44.0 m、井深 45.97 m。相比目前已完建的一些大型水电

工程(糯扎渡、小湾、锦屏一级水电站调压室,以及近期建成白鹤滩水电站尾水调压室)<sup>[4]</sup>,其结构规模较为近似,设计和施工技术难度均具挑战性。尤其是上调压室,预可研阶段上调压室采用长廊阻抗式,跨度仅15.0 m,但可研阶段审查后推荐地下埋藏圆筒阻抗式,跨度规模突增。由于前期选址勘探通道极端困难,没有平洞勘探条件,仅在可研审查前完成了一个穹顶钻孔,因此,这个方案选择客观上存在一定风险,或要求继续等待具备勘探条件后补勘,或随工程施工过程进行位置的动态和精准选址。为继续等待时机而拖延整体项目进程,最终选择了后一种跟进措施,目前已经有效精准实施。

压力管道最初设计为全部钢板衬护,最大内水压力0.8~3.1 MPa,在可研审查过程中,考虑地下厂房平洞围岩较好、压力中等,审查专家提出仅厂前100.0 m段钢板衬护、其余均采用混凝土衬砌的方案,后经专题论证研究最终可研方案予以采用,直接节省投资约2 000万元。

前期和施工阶段均委托四川大学水电学院进行引水发电系统水力过渡过程计算,成果表明电站调节保证计算值满足规范要求,压力钢管全线正压,电站机组间水力干扰不大,调压室面积满足引水系统小波动稳定性要求。

## 7 建设过程中的枢纽布置持续优化和深化

巴拉电站前期至主体工程开工建设历时较长,期间经历了规程规范的更新迭代、建设理念和工程技术的更新。在建设过程中,按审定的枢纽布置格局和主建筑物型式不变的基本原则,持续开展优化调整工作,使各建筑物使用功能和施工方案符合现行规程规范要求,在保证安全和质量的前提下,力求技术先进,尽可能节约工程投资、便于施工并缩短工期<sup>[5]</sup>。不完全统计采取的优化调整和深化工作有:

(1)边坡开挖支护动态设计,支护措施精准施用,有效的使水电站永久边坡降低至80.0 m以内,并经历了马尔康“6·10”地震考验;

(2)进水口位置优化调整,在降低边坡的同时缩短引水线路,节省工程投资;

(3)出线场布置格局调整,减小永久边坡高度,提高出线场施工和运行安全;

(4)大型溢洪洞室浅埋段专项研究和泄洪放

空洞水力条件优化,为工程实施和未来安全运行打下基础;

(5)上游调压室型式及位置的专题研究,通过施工期补充勘探、专题研究和专家咨询,复核了结构型式和选定了最终的调整位置。

## 8 结语

巴拉水电站大渡河干流源头双江口以上最后一批规划开发的梯级电站之一,与下游已建和在建梯级相比,地理环境条件较差,自然区内地质条件不好,加之前期规划勘察工作深度不足,因而梯级投资指标不好且存在项目可行与否的风险。巴拉梯级作为最后一批四个梯级电站中指标最好的一级电站(单位千瓦静态投资9 500元、单位电度投资2.6元)能核准开工建设,主因是对电站总枢纽布置格局重要性的高度认知和创新实践,既充分结合梯级区内的自然边界条件(河道特性、地质情况等),又不断借鉴先进工程经验和技術,并针对涉及枢纽布置的关键技术有的放矢地开展了多项专题研究,达到预期效果。文中所列若干巴拉电站技术核心的思路和方法对于后水电时期的梯级开发具有一定的借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 刘兴春,杨宏昆,周涛,等.四川省脚木足河巴拉水电站可行性研究阶段坝址及坝型选择专题报告[R].四川成都.四川省清源工程咨询有限公司,2010.
- [2] 刘兴春,杨宏昆,周涛,等.四川省脚木足河巴拉水电站可行性研究报告[R].四川成都.四川省清源工程咨询有限公司,2017.
- [3] 邓元亮,刘兴春,杨宏昆,等.四川省脚木足河巴拉水电站项目申请报告[R].四川成都.四川脚木足河流域水电开发有限公司,四川省清源工程咨询有限公司,2017.
- [4] 张宗亮,刘兴宁,冯业林,等.糯扎渡水电站枢纽工程主要技术创新与实践[J].水力发电,2012,38(09):22-26+34.
- [5] 杨泽艳,文亚豪,吴基昌,等.洪家渡水电站枢纽布置的优化调整[J].贵州水力发电,2001,(04):22-25+66.

## 作者简介:

邓元亮(1969-),男,四川阆中,正高级工程师,学士,从事水电工程建设技术与管理工

作;刘兴春(1964-),男,四川达州,高级工程师,硕士,从事水利水电工程设计、咨询和管理工

作;杨宏昆(1969-),男,云南大理,高级工程师,硕士,从事水利水电工程设计、咨询和管理工

作;周涛(1982-),男,四川简阳,正高级工程师,学士,从事水利水电工程设计、咨询和管理工

作;梁勇(1987-),男,江西吉安,高级工程师,学士,从事水利水电工程地质勘察工

(责任编辑:卓政昌)