

流域公司上下游电站“控泄助截”截流模式研究

杨磊¹, 吴云波², 李仲权³, 朱约喜², 吴都督⁴

(1. 武汉大学水资源工程与调度国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南 迪庆 674608;

3. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650051; 4. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 基于初拟截流方案, 对 TB 水电工程进行了截流物理模型试验研究, 对不同工况下载流龙口水力参数进行了对比分析, 指出流量指标是决定截流难度的关键因素。在截流前现场实际条件下, 采用数值模拟方法对截流水力参数进行了分析, 结果表明在相同来流量情况下, 分流条件的恶化将显著提升截流难度。流域开发公司采用“控泄助截”模式, 通过降低上游梯级电站的下泄流量, 有效降低了截流难度, 顺利完成截流。截流现场实测数据与模型试验反演结果均表明, 该模式可为流域梯级开发中类似工程的设计与实施提供实践经验与参考。

关键词: 流域公司; 控泄助截; 模型试验; 数值模拟; TB 水电站工程

中图分类号: TV651.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)S1-0079-04

Study on “controlling discharge to assist river closure” mode for upstream and downstream power stations of river basin company// YANG Lei¹, WU Yunbo², LI Zhongquan³, ZHU Yuexi², WU Dudu⁴ (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China; 3. Yunnan Dianzhong Water Diversion Engineering Co., Ltd., Kunming 650051, China; 4. Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Based on the initially proposed closure scheme, a physical model test study was conducted for the TB Hydropower Project to analyze the hydraulic parameters of the closure gap under different operational conditions, and it was pointed out that the discharge index is the key factor determining the difficulty of river closure. Under the actual field condition before the closure, the numerical simulation method was used to analyze the hydraulic parameters of the river closure. The results shows that under the same inflow rate, a deterioration in the diversion conditions will significantly increase the difficulty of river closure. The river basin development company adopted the mode of controlling discharge to assist river closure, which effectively reduce the difficulty of river closure by decreasing the discharge from the upper cascade power station, thus completing the river closure successfully. Both the measured data in field and the inversion results from model test demonstrate that this mode can provide a successful reference for the design and implementation of similar projects in river basin cascade development.

Key words: river basin company; controlling discharge to assist river closure; model test; numerical simulation; TB Hydropower Project

截流是水利水电工程建设的重要环节, 在施工技术和施工组织上都有一定的难度。为确保截流工程的安全与高效完成, 通常在施工前对截流方案进行模型试验研究, 分析不同方案下载流时龙口处水力参数的变化规律, 以此为截流设计提供参考依据。经过多年的发展, 截流理论与施工技术已逐步完善。肖焕雄^[1]编著的《施工水力学》一书, 为截流理论研

究奠定了坚实的基础。杨文俊等^[2-3]针对三峡大江截流、明渠截流等重大技术难点(如深水堤头坍塌、明渠垫底加糙、双戽堤截流关键技术等)开展了一系列研究, 取得了丰硕的成果, 并构建了科学化、数字化的截流框架体系以及动态决策系统。范锡峨等^[4-5]提出利用非恒定流方法求解双戽堤间恒定流动的水面线, 在对龙口流速以及上下戽堤截流落差

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809052)

作者简介: 杨磊(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水利水电施工技术与管理研究。E-mail: 644256484@qq.com.

通信作者: 李仲权(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事水利水电工程项目投资与建设管理工作。E-mail: 370194669@qq.com

分配进行深入分析的基础上,提出了判断双戗堤截流优越性的方法。戴会超等^[6]运用数学模型对三峡大江截流的龙口水力特性进行了模拟。赵银超等^[7]对澜沧江 TB 水电站开展了截流物理模型试验及数值模拟研究,确定了不同工况下截流时所需的抛投料粒径和抛投强度,并提出了截流推荐方案。吴都督等^[8]为克服分流建筑物分流条件恶化所引发的大落差、高流速挑战,采取了流量控泄、增加“子戗堤”、设置环形施工道路和就近布置料场等措施,在实际截流作业中取得了良好的效果。

随着西南及藏区水电开发的热度持续增加,大江大河上的水电梯级开发已进入高峰期,“一江多截”的现象频繁出现。本文针对澜沧江 TB 水电工程截流工程,采用模型试验与数值模拟相结合的方法,对多种截流方案在不同工况下的龙口水力参数进行了对比分析,并结合实际截流前的现场条件,对“控泄助截”这一截流模式进行了研究,确保了截流工程的顺利实施,也为类似截流施工提供了有益参考。

1 工程概况

TB 水电工程位于云南省迪庆藏族自治州境内,其枢纽工程由碾压混凝土重力坝、泄洪设施、引水发电建筑物等组成。TB 水电站选择了全段围堰法隧洞导流方式。在左岸布置 2 条城门洞型导流隧洞,其断面尺寸为 11.5 m×11.68 m(宽×高)。TB 水电工程初步拟定采用单戗单向(从左岸向右岸进占,右岸设有 6 m 裹头)立堵进占的截流方案。截流流量取 2021 年 11 月上旬 10 年一遇旬平均流量,为 751 m³/s。

2 截流模型试验

截流模型试验采用局部动床正态模型,在该模型中,隧洞进口至坝轴线的区域以及下游围堰坡脚至导流洞出口的下游河床设为动床区域。物理模型依据重力相似准则进行设计,其长度比尺确定为 λ_l=60。

截流模型试验考虑了多种截流方案,包括:2021 年 10 月下旬提前截流、2021 年 11 月上旬按照初拟方案截流、2021 年 11 月上旬借助上游电站控泄截流、上游电站停机仅依靠生态流量截流。所有方案中,隧洞进口岩埂高度为 3 m,采用 2 条导流隧洞分流,左岸运用单戗立堵的方式进占,右岸设有 6 m 裹头。截流模型试验工况如表 1 所示。

在各个工况下,截流合龙作业从预进占完成后开始。此时,右岸进占及裹头长度为 6.0 m,左岸预进占戗堤长度为 11.1 m,龙口宽度为 48.9 m。截流作业采用单向上挑脚抛投的方式,抛投强度为 13~

表 1 截流模型试验工况

工况	流量/(m ³ /s)	工况说明
A	964	2021 年 10 月下旬,天然流量
B	751	2021 年 11 月上旬,天然流量
C	475	2021 年 11 月上旬,上游里底电站单机满发流量+区间流量
D	150	上游里底电站停机、下泄生态流量

18 m³/min(原型),平均 400~550 m³/h(原型),相当于 25 t 自卸汽车每分钟抛投 0.4~0.5 车。戗堤的顶部宽度为 30.0 m。各工况下龙口特征水力参数如表 2 所示。

表 2 模型试验不同工况下龙口特征水力参数

工况	最大落差/m	最大平均流速/(m/s)	最大垂线平均流速/(m/s)	最大单宽流量/(m ³ /(s·m))	最大单宽功率/(t·m/(s·m))
A	4.62	4.78	5.19	21.75	319.76
B	3.58	4.45	4.49	19.43	110.45
C	1.32	2.66	3.02	5.88	27.65
D	1.02	1.32	1.63	2.93	12.06

由表 2 可知,在不同的流量条件下,龙口的特征水力参数存在显著差别。例如,当流量从 964 m³/s 降低至 475 m³/s 时,龙口最大落差从 4.78 m 减小到 2.66 m,最大平均流速从 5.19 m/s 降至 3.02 m/s,最大单宽流量从 21.75 m³/(s·m)减小至 5.88 m³/(s·m),最大单宽功率从 319.76 t·m/(s·m)降至 27.65 t·m/(s·m)。这些变化充分表明,流量指标应被视为截流工程实施中首要考虑的因素。

3 截流现场数值模拟研究

3.1 现场截流前数值模拟

在 TB 水电工程施工过程中,由于疫情影响,项目团队决定将截流时间提前至 2021 年 10 月下旬,此时的流量为 10 年一遇的旬平均流量,即 964 m³/s。2021 年 10 月 19 日,导流洞进出口岩坎经过爆破作业后,实测发现进口岩坎的残留高度达到 10 m,导致初始分流比仅为 36%,隧洞的分流条件急剧恶化。为了评估在 2021 年 10 月下旬流量达到 964 m³/s,隧洞进口残留岩埂高度为 10 m 情况下的截流风险,本文采用数值模拟方法对截流时水力参数进行了研究。

在运用 Flow-3D 软件进行数值模拟计算时,采用 RNG *k-ε* 紊流模型,利用 TruVOF 法追踪自由液面变化,采用有限差分法进行数值离散。模型网格划分采用结构化网格。模型进水口(以水流流向作为 *x* 轴方向)选择流量边界,设定流进流量及水位条件;下游水位控制点选择压力边界并设定相应的下游水位。模型计算区域的两侧边及底部均设为固体边界;模型上表面选取压力边界,并设定压强为 0、

体积分数为 0。

不同龙口宽度下龙口局部流态及流速分布云图如图 1 所示。

模拟结果表明,截流过程中的最大落差为 4.72 m,龙口处的最大平均流速为 7.23 m/s,龙口的最大单宽功率为 1011.25 t·m/(s·m)。与模型试验中相同流量条件下,导流隧洞前 3 m 岩埂所对应的工况 A 相比,10 m 岩埂对导流洞的分流能力产生了显著影响,导致截流时龙口的水位差、平均流速等水力参数均大幅增加,进而显著提高了截流难度。在该工况下,截流最困难区段出现在龙口宽度为 28 m 附近位置,该区段的龙口流速和龙口单宽功率等指标均相对较高,相应的截流难度也更大,对实际截流将构成极大的挑战。

3.2 实际截流方案数值模拟

为降低截流难度,考虑到澜沧江上从漫湾水电站至乌弄龙水电站均由同一家公司开发,且 TB 水电工程上游的乌弄龙和里底电站均已投产发电,具备实施上游控泄的条件。在导流隧洞前岩埂较高、分流差的现场实际情况下,若能合理调控上级电站泄流,以减小来流量,将是降低截流难度的有效措施。然而,上级电站需要保证最低日发电效益,无法完全停机不泄流。因此,最终决定在截流预进占期间,上游里底电站的 2 台机组满负荷发电下泄,考虑区间流量,实际预进占总来流量为 1000 m³/s。在进占合龙期间,电站调整为单机满负荷发电下泄,考虑截流合龙前的区间流量,实际总来流量为 550 m³/s。

针对龙口合龙阶段来流量为 550 m³/s 的工况进行了数值模拟分析。此时导流隧洞前的岩埂高度

为 10 m。龙口水力特征参数如表 3 所示。

表 3 实际截流方案合龙阶段龙口水力参数
(流量 550 m³/s,岩埂高度 10 m)

龙口宽/m	戽堤落差/m	隧洞分流比/%	龙口平均流速/(m/s)	龙口平均单宽功率/(t·m/(s·m))
35.0	1.03	35.39	3.72	226.31
32.2	1.52	47.03	4.12	357.18
28.8	2.25	65.15	4.41	406.39
23.0	3.28	77.18	5.26	530.84
18.0	3.47	85.36	4.25	426.47

模型试验及数值模拟对应流量下各工况截流困难区段的最大落差、最大平均流速、最大单宽功率及相应的所需最大抛投粒径见表 4。

表 4 不同工况龙口水力参数对比

流量/ (m³/s)	岩埂高 度/m	最大落 差/m	最大平均 流速/ (m/s)	最大单宽 功率/ (t·m/(s·m))	最大抛投 粒径/m
964	3	3.84	5.19	332.21	0.75
964	10	4.72	7.23	1011.25	1.45
550	3	2.12	3.12	223.88	0.27
550	10	3.47	5.26	530.84	0.77

由表 4 可知,岩埂高度对截流难度影响很大。在来流量为 964 m³/s 的情况下,当隧洞进口处的岩埂高度从 3 m 增加到 10 m 时,龙口最大平均流速相差 2.04 m/s,龙口最大单宽功率相差 679.04 t·m/(s·m),相应的进占所需的最大抛投料粒径相差 0.70 m;在来流量为 550 m³/s 的情况下,当隧洞进口岩埂高度从 3 m 增加到 10 m 时,龙口最大平均流速相差 2.14 m/s,龙口最大单宽功率相差 306.96 t·m/(s·m),相应的进占所需的最大抛投料粒径相差 0.50 m。通过对比隧洞进口前 3 m 岩埂

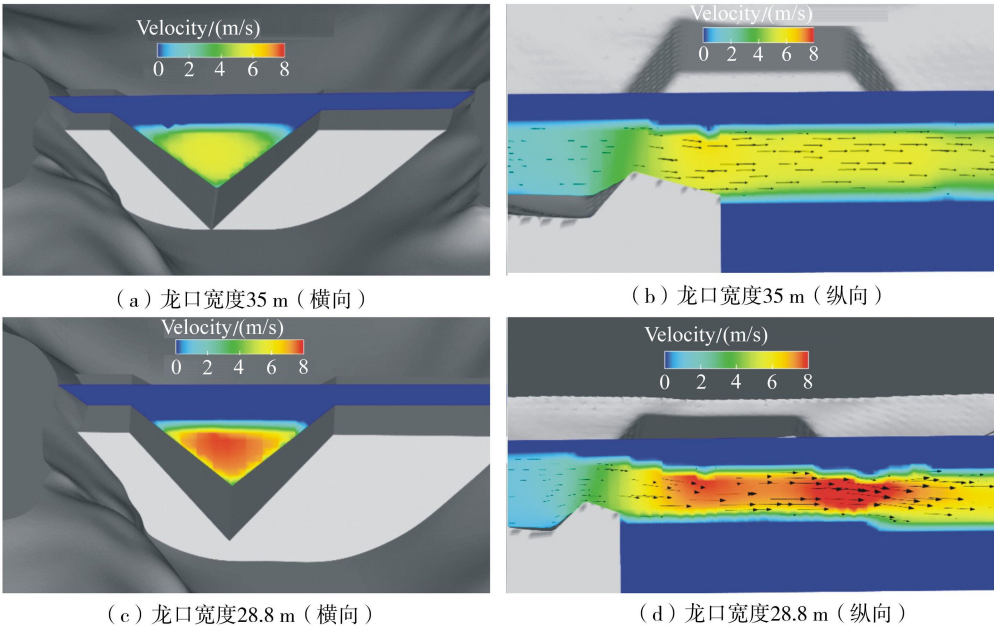


图 1 不同龙口宽度下龙口流态及流速分布云图(流量 964 m³/s,岩埂高度 10 m)

和 10 m 岩梗两种情形下的龙口水力参数,可以看出隧洞进口 10 m 高的岩梗对隧洞的分流量产生了显著影响,大幅提高了龙口的特征水力参数,进而导致截流所需的最大抛投料粒径也大幅增加。因此,导流隧洞前 10 m 岩梗极大地提高了截流难度。

流量大小作为截流工程实施需要考虑的首要因素,其对截流难度的影响是不言而喻的。通过对比截流流量分别为 $964\text{ m}^3/\text{s}$ 与 $550\text{ m}^3/\text{s}$,且隧洞前 10 m 岩梗情形下的龙口水力参数,可以发现,在进占阶段,两种工况的截流最大落差相差 1.44 m,最大龙口平均流速相差 1.97 m/s ,龙口最大单宽功率相差 $480.41\text{ t}\cdot\text{m}/(\text{s}\cdot\text{m})$,相应的所需最大抛投料粒径相差 0.68 m。这表明,在导流隧洞前存在较高岩梗的条件下,流量对截流难度的影响显著。

鉴于上游电站与 TB 电站均由同一公司运营,通过协调上游电站进行下泄流量的控制,将截流流量从 $964\text{ m}^3/\text{s}$ 减小至 $550\text{ m}^3/\text{s}$,这一措施极大地降低了实际截流的难度。该工程在 2021 年 10 月 25 日进行了截流预进占(流量 $1000\text{ m}^3/\text{s}$),在 26 日顺利完成了截流施工(截流流量 $550\text{ m}^3/\text{s}$)。在截流施工条件差、隧洞分流受限的情况下,采用“控泄助截”模式进行截流,有效地降低了截流难度。该模式将为今后大江大河流域公司运营的电站截流提供新的思路。

4 结 论

a. 运用模型试验与数值模拟相结合的手段对不同工况下的截流方案进行了研究与分析,重点分析了流量指标、分流能力指标等影响截流难度的关键因素。澜沧江 TB 水电工程枢纽截流工程于 2021 年 10 月 26 日顺利实现大江截流。研究结果表明模型试验与数值模拟相结合的分析方法能够为截流工程的实施提供科学的决策依据。

b. 由于上游电站与 TB 电站属于同一流域公司运营,通过协调上游电站进行了下泄流量的控泄,极大地降低了实际截流难度。在截流施工条件差、隧洞分流受限的情况下,采用“控泄助截”模式进行截流,为流域公司运营的类似电站进行截流设计与施工提供了成功的实例参考。

参考文献:

[1] 肖焕雄. 施工水力学[M]. 北京:水利电力出版社, 1992 年.
[2] 杨文俊, 郑守仁. 三峡工程明渠提前截流关键技术及

措施研究[J]. 人民长江, 2005, 36(7): 4. (YANG Wenjun, ZHENG Shouren. Study on key technologies and measures of early closure of open channel in Three Gorges Project [J]. Yangtze River, 2005, 36 (7): 4. (in Chinese))

[3] 周厚贵, 刘光廷, 王光谦. 三峡深水截流堤头坍塌计算及预报[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002 (4): 535-538. (ZHOU Hougui, LIU Guangting, WANG Guangqian. Calculation and prediction of the dyke end slump for deep water closure of the Three Gorges Project [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002(4): 535-538. (in Chinese))
[4] 范锡峨, 胡志根, 刘全. 双戽堤截流条件下戽间水位变化分析及模型试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2006(3): 11-14. (FAN Xi'e, HU Zhigen, LIU Quan. Research and analysis on water level variational regularity during river closure end-tipped with double embankments and its physical model test[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2006(3): 11-14. (in Chinese))
[5] LU He, HU Zhigen, LIU Quan, et al. The hydraulic characteristics of end-dump closure with the assistance of backwater-sill in diversion channel [J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(5): 886-896.
[6] 戴会超, 王玲玲, 朱红兵. 三峡工程导截流数值实验室的建立及数值模拟(II) [J]. 长江科学院院报, 2004(6): 7-10. (DAI Huichao, WANG Lingling, ZHU Hongbing. Development of hydraulics numerical laboratory and its application in river closure and diversion engineering of Three Gorges Project and numerical simulation (II) [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004(6): 7-10. (in Chinese))
[7] 赵银超, 米热扎提, 杨磊, 等. TB 水电站截流方案与现场截流分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2022 (12): 201-205. (ZHAO Yinchao, MI Rezati, YANG Lei, et al. An analysis of the closure scheme and on-site closure analysis of TB Hydropower Station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(12): 201-205. (in Chinese))
[8] 吴都督, 魏东风, 米热扎提, 等. 梯级开发条件下分流异常时截流技术研究[J]. 水利建设与管理, 2023 (7): 13-18. (WU Dudu, WEI Dongfeng, MI Rezati, et al. Research on diversion cutoff technology under abnormal conditions in cascade development [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2023 (7): 13-18. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 03 编辑: 雷燕)