

溪洛渡水电站坝下限制性通航河道水流条件监测及成果分析

曹磊, 平妍容, 王渺林*, 包波, 徐洪亮, 杜涛

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 重庆

收稿日期: 2023年8月15日; 录用日期: 2023年9月13日; 发布日期: 2023年10月11日

摘要

溪洛渡下游30 km河道为限制通航区。为分析研究溪洛渡水电站下泄非恒定流对坝下限制性通航区的影响, 对坝下游水流条件进行了原型观测。本文介绍了该河段沿程水位、波浪、流速流态监测技术方案及采用的新技术新方法, 并对沿程水位变幅、波高、流速变化等进行了分析。结果可为研究溪洛渡下游限制性通航条件提供依据。

关键词

水文监测, 非恒定流, 水位变幅, 波浪, 溪洛渡水电站

Hydrological Monitoring and Analysis on Flow Conditions in Restricted Navigation Channel in the Downstream Xiluodu Hydropower Station

Lei Cao, Yanrong Ping, Miaolin Wang*, Bo Bao, Hongliang Xu, Tao Du

Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Upper Changjiang River, Bureau of Hydrology, CWRC, Chongqing

Received: Aug. 15th, 2023; accepted: Sep. 13th, 2023; published: Oct. 11th, 2023

Abstract

The 30 km downstream of Xiluodu Hydropower Station is restricted navigation channel. In order to

作者简介: 曹磊(1983.04-), 男, 高级工程师, 主要从事水文水资源分析和技术管理工作。Email: 154450831@qq.com

*通讯作者 Email: 17831198@qq.com

文章引用: 曹磊, 平妍容, 王渺林, 包波, 徐洪亮, 杜涛. 溪洛渡水电站坝下限制性通航河道水流条件监测及成果分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 494-500. DOI: 10.12677/jwrr.2023.125054

study the effect of unsteady flow on the restricted navigation area, the prototype observation of flow conditions downstream of the dam was carried out. The technical scheme and new methods of water level, wave and flow velocity monitoring were introduced. The amplitude variation of water level, wave height and velocity distribution along the channel was analyzed. The results can provide a basis for the study of restrictive navigation conditions downstream of Xiluodu Hydropower Station.

Keywords

Hydrological Monitoring, Unsteady Flow, Water Level Amplitude, Flood Wave, Xiluodu Hydropower Station

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

溪洛渡水电站是金沙江下游河段四个梯级电站的第三级。该电站 2013 年 5 月开始初期蓄水, 2019 年成功蓄至 600 m 正常蓄水位[1]。目前, 溪洛渡大坝下游 30 km 河道为限制通航区, 已建、在建码头较多, 限制通航区已成实际通航事实, 且在溪洛渡电站调峰运行时, 该区域码头停泊船只通航管理难度极大。根据《金沙江溪洛渡水电站水库运行与电站运行调度规程》(试行)规定[2], 结合溪洛渡和向家坝联合调度规程, 有必要对该区域进行流速、流态、水位等原型观测并分析, 进一步研究改善通航条件的可行性, 同时, 分析限制通航区域码头对溪洛渡电站调峰运行的适应性, 探索电站调峰运行产生的非恒定流对通航条件的影响。为对该区域进行限制性通航进行科学管理、维护通航秩序安全稳定等提供技术支持和制度依据, 开展探索研究溪洛渡下游限制性通航条件是非常有必要的。

随着金沙江梯级水电站投入使用, 改变了天然河道的水流条件和水沙过程, 使原本达到平衡的河床冲淤发生变化[3] [4]。产生的非恒定流可能会使下游河道水位发生陡涨陡落、流态紊乱等问题, 并可能对航运、港口、码头及船舶等产生不利影响。目前研究主要依赖于物理模型与船模试验[5], 且主要针对非恒定流特性和对通航条件的影响[6] [7] [8] [9]。如张绪进等和母德伟等建立向家坝水电站及下游 76 km 河道 1:100 的物理模型, 并进行船模试验, 分析了水面线、流速、日变幅等要素和对下游通航设计水位等因素的影响[6] [7]。杜泽东等采用河道物理模型, 对溪洛渡电站坝下游 15 km 河道的非恒定流特性进行研究[8]。胡亚安等对向家坝升船机下游引航道口门区进行了波浪的监测[9]。

掌握非恒定流的演进规律及对下游河道的影响, 最直接的技术手段是采用原型监测。原型监测可以获得第一手资料, 以分析原型非恒定流演进特征, 同时可为数学模型计算和实体模型试验提供验证资料。但原型监测需要在较长河段内, 布置多个断面, 进行长时间、不间断、同时刻的沿程水位、典型断面流量、流场流态监测。不仅需要投入大量人力和测验设备, 还会受到现场环境、交通条件、气象条件、测船安全等条件限制, 监测工作非常困难。受上述因素影响, 目前原型监测相对较少, 且监测范围较小、监测项目单一。本文针对溪洛渡下游 30 km 限制通航区, 介绍了该河段沿程水位、波浪、流速流态监测的技术方案及采用的新技术新方法, 并对水位沿程变幅、波浪、流速监测成果等进行了分析。

2. 监测技术方案

2.1. 监测位置及断面布置

监测区域位于溪洛渡坝下游约 30 km 河段长的限制通航区域内, 监测范围为大河湾码头上游 200 m 至糖房

坝码头下游约 300 m, 如图 1 所示。

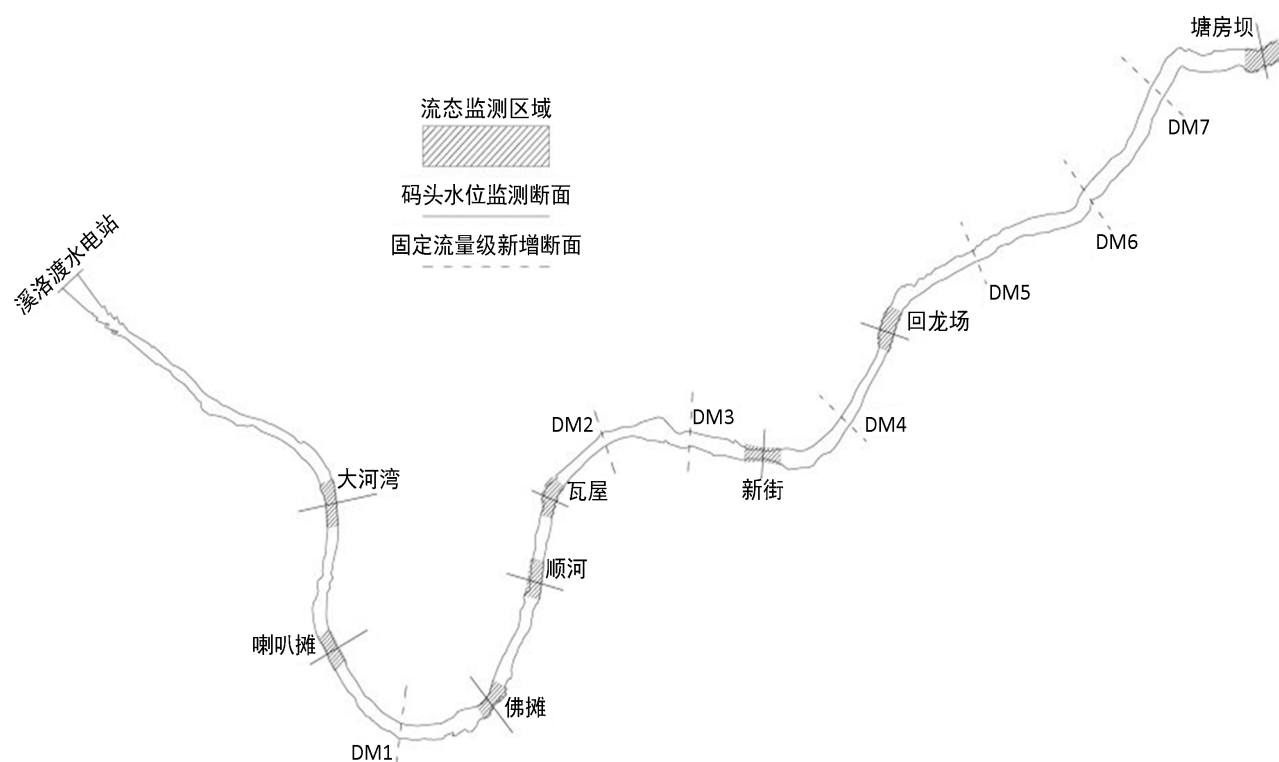


Figure 1. Sketch map of monitoring scope and cross section arrangement

图 1. 监测范围及断面布置示意图

2.2. 监测内容及技术方案

2.2.1. 监测内容

1) 沿程开展溪洛渡出库流量 $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 及 $11,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 等 7 个流量级的水位和流态(流速、流向)等原型观测, 流态观测不少于 3 条顺流向的测线(间距一般不小于 50 m)。

2) $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 及 $11,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 等流量级工况下, 对波浪进行观测。

3) 出库流量在 6 个小时内(一般为 5:00~10:00)分别增加 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 等 4 种调峰工况条件下, 监测沿程水位和 8 个码头江段(单段不小于 500 m, 需覆盖码头上下游范围)流速流向。

4) 出库流量在 6 个小时内(一般为 20:00~次日 2:00)分别减小 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 等 4 种调峰工况条件下, 监测沿程水位和 8 个码头江段流速流向。

2.2.2. 监测方案

1) 水位观测

在测区每个观测点(包括码头观测断面及固定流量级新增观测断面共计 15 处), 安装 LH25-RBRsolo D 微型潮位仪。此设备已经在向家坝电站下游使用, 在观测中设备运行良好, 数据收集齐全, 精度较高。

2) 波浪观测

波浪观测方法按仪器布设的空间位置也可分成水下、水面、水上和太空(如卫星遥感)四种观测技术; 波浪观测仪器按其工作原理可分为视距测式、测波杆式、压力式、声学式、重力式和遥感测波仪等类型[10]。最简单的

水下测量仪器使用高分辨率传感器测量表面波引起的压力波动[11],也就是压力式测波仪。通过调研,考虑经济适用性和操作简便,本次在测区 8 个固定码头断面及 DM1、DM6 断面位置共 10 处,安装 RBRsolo3 D|wave16 波潮仪,获取长周期波浪脉冲采样。该波潮仪为高精度自容式小型水下波潮仪(长 210 mm,直径 5.4 mm),能方便地安装于各种物体上,常用于海洋、湖泊和港口及地下水测量。

3) 流速、流态观测

采用电子浮标系统(Smart Gaging GPS 智能测流系统)进行流速、流态观测,系统采用高强度材料制作的浮球随水漂流,实时采集显示浮球漂流的轨迹,时间、位置、流速、流向等数据。

3. 监测成果初步分析

根据溪洛渡水电站提供的出库下泄流量过程(示意如图 2 所示),下泄流量波动变化,流量变幅为 2000~5000 m^3/s ;一般为每日 6:00 下泄流量增加,11:00 左右达到当日最大值并持续至 20:00;20:00 至 22:00 开始下泄流量减小直至次日凌晨 2:00。

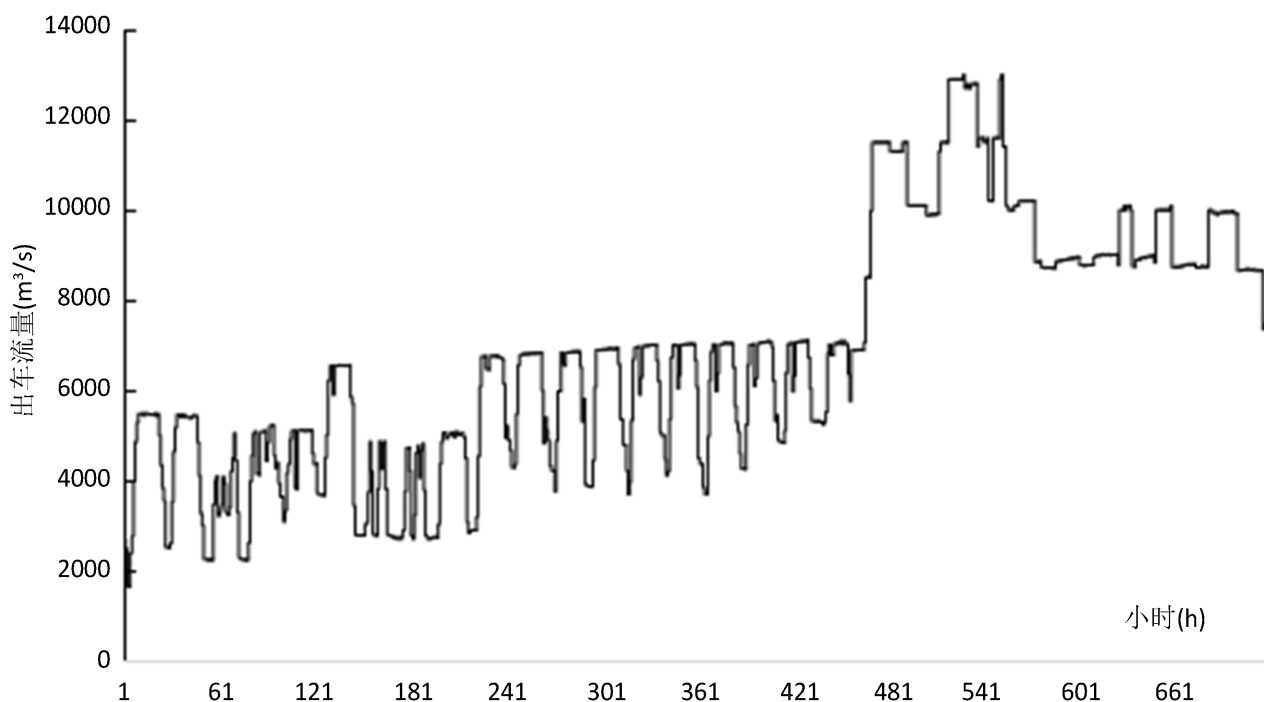


Figure 2. Discharge process of Xiluodu hydropower station in June 2022

图 2. 2022 年 6 月溪洛渡电站出库流量过程

3.1. 水位变幅分析

目前在监测范围内开展了 6 次不连续水位沿程监测,监测工况见表 1。工况 6 最大流量为 12,900 m^3/s ,工况 2 最大流量变幅 3260 m^3/s 。

Table 1. Monitoring conditions and flow amplitude

表 1. 监测工况及流量变幅统计

工况	监测时间	初始流量(m^3/s)	最小流量(m^3/s)	最大流量(m^3/s)	流量变幅(m^3/s)	变化时长(h)
工况 1	2023 年 5 月 18~19 日	4660	1730	4660	-2930	6

Continued

工况 2	2022 年 6 月 14 日	3690	3690	6950	3260	5
工况 3	2023 年 3 月 25 日	3850	2010	3850	-1840	6
工况 4	2023 年 3 月 28 日	1660	1660	3880	2220	6
工况 5	2022 年 6 月 24 日	10,200	8840	10,200	-1360	3
工况 6	2022 年 6 月 23 日	11,600	11,600	12,900	1300	2

统计各断面水位变幅,见表 2。可以看出,各断面的水位变幅沿程递减。工况 4 下(由 1660 m³/s 增加至 3880 m³/s)大河湾码头至佛滩码头之间水位变幅最大,初步分析与该段河道横断面形态和水位流量关系有关,需要进一步研究。其余河段工况 2 水位变幅最大。

Table 2. Water level amplitude along the section under each condition (Unit: m)

表 2. 各工况沿程断面水位变幅统计(单位: m)

断面	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
大河湾码头(1#)	-1.64	1.75	-1.90	2.00	-1.12	1.28
喇叭滩码头(2#)	-0.82	1.26	-1.58	1.63	-0.75	0.82
佛滩码头(3#)	-0.58	1.19	-1.16	1.23	-0.71	0.75
顺河码头(4#)	-0.51	1.11	-0.92	1.02	-0.67	0.73
瓦屋码头(5#)	-0.46	1.03	-0.91	0.97	-0.58	0.72
新街码头(6#)	-0.42	0.86	-0.61	0.73	-0.45	0.47
回龙场码头(7#)	-0.58	0.68	-0.31	0.63	-0.33	0.41
塘房坝码头(8#)	-0.29	0.39	-0.20	0.36	-0.24	0.26

3.2. 波浪分析

依据中华人民共和国海事局《内河船舶法定检验技术规则》的相关要求[12],本江段为 C 级航区 J1 级航段,有效波高 H_s 应满足 H_s ≤ 0.5 m。经统计,各监测工况下,波高最大的为大河湾码头,有效波高为 0.273 m,最大波高 0.667 m。越靠近下游,波高越小,如塘房坝码头,有效波高为 0.048 m,最大波高 0.08 m。影响波动特性的因素需通过后续观测进一步研究。

Table 3. The wave monitoring results

表 3. 波浪监测结果

监测位置	流量(m ³ /s)	有效波高(m)	最大波高(m)	流量(m ³ /s)	有效波高(m)	最大波高(m)
大河湾码头(1#)	12,900	0.273	0.667	10,200	0.166	0.411
喇叭滩码头(2#)	11,500	0.115	0.205	10,200	0.079	0.145
新街码头(6#)	12,900	0.127	0.306	10,200	0.050	0.133
塘房坝码头(8#)	11,600	0.073	0.137	10,200	0.048	0.080

3.3. 沿程流速

目前对影响船舶航运安全的表面流速具体数值以及对应的船舶航速要求没有明确界定,通过以往研究以及结合《内河通航标准》分析,当航道表面流速大于 3 m/s 时,一般船舶无法克服水流阻力,对航运安全产生影响[1]。根据监测成果,流量 8500 m³/s 时坝下至顺河码头流速超过 3 m/s;流量 10,000 m³/s 时坝下至回龙场码头流速超过 3 m/s;流量 11,000 m³/s 时监测范围大部分流速超过 3 m/s。综上,当流量超过 8500 m³/s 时较长河段流速超过 3 m/s,对下游河道航运安全产生威胁,无法满足航运安全的条件。

4. 结语与展望

本文介绍了溪洛渡坝下游 30 km 限制通航区河道沿程水位变幅、波浪监测、流速监测技术方案及针对监测难点采用的新技术新方法,并对水位变幅、波浪、流速等要素的沿程变化进行了分析。今后可在此基础上继续开展监测,并同时开展数学模型、物理模型计算和船模试验,进一步分析电站下游航运条件的影响因素。

基金项目

溪洛渡水电站坝下限制性通航区水流条件观测及分析项目;长江水利委员会水文局科技创新基金项目(SWJ-CJX23Z10);长江水科学研究联合基金(U2240201)。

参考文献

- [1] 李俊鹏. 水电站下游非恒定流特性及其对航运影响[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
LI Junpeng. Characteristics of unsteady flow downstream of hydropower station and its impact on shipping. Master's Thesis, Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese)
- [2] 王学敏. 面向生态和航运的梯级水电站多目标发电优化调度研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
WANG Xuemin. Research on ecology and shipping based multi-objective generation scheduling of cascaded hydropower stations. Doctoral Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] 陈绪坚. 金沙江梯级水库下游水沙过程非恒定变化及其对通航条件的影响[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 218-224.
CHEN Xujian. Unsteady change of water and sediment processes downstream of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and its influence on navigation conditions. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 218-224. (in Chinese)
- [4] 杨阳, 曹叔尤, 杨奉广. 山区阶梯河道中洪水波运动特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(1): 31-36.
YANG Yang, CAO Shuyou and YANG Fengguang. Experimental study of flash flood wave down a stepped channel. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1): 31-36. (in Chinese)
- [5] 胡旭跃, 李彪, 徐立君. 水利枢纽通航水流条件研究综述[J]. 水运工程, 2005, 382(11): 59-64.
HU Xuyue, LI Biao, XU Lijun. A review of research on navigation flow condition of hydro-junction. Port & Waterway Engineering, 2005, 382(11): 59-64. (in Chinese)
- [6] 张绪进, 胡真真, 刘亚辉, 等. 向家坝水电站日调节非恒定流的传播特征研究[J]. 水道港口, 2015(5): 414-418.
ZHANG Xujin, HU Zhenzhen, LIU Yahui, et al. Research on propagation characteristics of unsteady flow caused by daily regulation of Xiangjiaba hydro-power station. Journal of Waterway and Harbor, 2015(5): 414-418. (in Chinese)
- [7] 母德伟, 王永强, 李学明, 等. 向家坝日调节非恒定流对下游航运条件影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(6): 71-77.
MU Dewei, WANG Yongqiang, LI Xueming, et al. Study on the effect of downstream navigation by unsteady flow caused by Xiangjiaba daily regulation. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(6): 71-77. (in Chinese)
- [8] 杜泽东, 董先勇, 秦蕾蕾, 等. 溪洛渡水电站坝下游河道非恒定流特性研究[J]. 人民长江, 2023, 54(1): 200-205.
DU Zedong, DONG Xianyong, QIN Leilei, et al. Study on unsteady flow characteristics in downstream channel of Xiluodu hydropower station. Yangtze River, 2023, 54(1): 200-205. (in Chinese)
- [9] 胡亚安, 安建峰, 赵建钧, 等. 向家坝升船机下游引航道口门区水力波动特性原型观测[J]. 水运工程, 2020(12): 22-26.
HU Ya'an, AN Jianfeng, ZHAO Jianjun, et al. Prototype observation of hydraulic fluctuation characteristics at entrance of approach channel downstream of Xiangjiaba ship lift. Port & Waterway Engineering, 2020(12): 22-26. (in Chinese)
- [10] 杜跃, 郭磊. 海洋波浪测量技术及实测分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(35): 170-173.
DU Yue, GUO Lei. Ocean wave measuring technologies and case analysis. Technology Innovation and Application, 2022,

12(35): 170-173. (in Chinese)

- [11] 左其华. 现场波浪观测技术发展和应用[J]. 海洋工程, 2008, 26(2): 124-139.
ZUO Qihua. Advances and applications of ocean wave measurement technology. The Ocean Engineering, 2008, 26(2): 124-139. (in Chinese)
- [12] 吴斌. 江西石虎塘航电枢纽库区航区划分建议[J]. 中国水运, 2015(4): 30-31.
WU Bin. Suggestion for the division of navigation areas of Jiangxi Shihutang navigation power junction. China Water Transport, 2015(4): 30-31. (in Chinese)