



向家坝水电站切机非恒定流 对下游通航的影响

张 湛¹, 黄成林², 刘亚辉¹, 张绪进¹

(1. 重庆交通大学西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016;

2. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 400016)

摘要: 为分析电站机组突发甩负荷切机运行时, 非恒定流对下游通航的影响, 以向家坝水电站为研究对象, 建立1:100正态物理模型, 模拟向家坝水电站机组切机工况, 分析8台机组不同切机数量下非恒定流引起的下游河段水位、流速的变化特性, 并结合自航船模试验, 研究对船舶安全航行的影响。结果表明: 电站机组分别切机1~8台时, 在采取快速补水情况下, 下游水位最大时变幅0.89 m/h, 未超过电站运行调度规程允许值。非恒定流引起的水位变化主要位于桐梓林以上河段, 流速变化主要位于和尚岩以上河段, 水流条件满足船舶航行要求。研究成果可为电站调度运行、下游航道维护及船舶航行提供技术支持。

关键词: 切机; 非恒定流; 物理模型; 通航条件; 向家坝

中图分类号: TV135.4; U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0093-06

Influence of unsteady flow during unit cut-off at Xiangjiaba Hydropower Station on downstream navigation

ZHANG Zhan¹, HUANG Chenglin², LIU Yahui¹, ZHANG Xujin¹

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering of ChongqingJiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 400016, China)

Abstract: To analyze the impact of unsteady flow on downstream navigation during sudden load shedding and turbine cutting operation of power plant units, this paper takes Xiangjiaba hydropower station as the research object, Establishes a 1: 100 normal physical model, simulates the turbine cutting conditions of Xiangjiaba hydropower station units, analyzes the changes in water level and flow velocity in the downstream reach caused by unsteady flow under different turbine cutting numbers of 8 units. At the same time, combines with self-propelled ship model tests to study the impact on safe navigation of ships. The results show that when the power plant units cut off 1-8 units respectively, under the condition of rapid water replenishment, the maximum hourly variation of downstream water level is 0.89 m/h, which does not exceed the allowable value in the power plant operation and scheduling regulations. The water level changes caused by unsteady flow mainly occur in the river section above Tongzilin, while the flow velocity changes mainly occur in the river section above Heshangyan. The flow conditions meet the requirements of ship navigation. The research results can provide technical support for the dispatch and operation of power plants, downstream channel maintenance, and ship navigation.

Keywords: unit cut-off; unsteady flow; physical model; navigation condition; Xiangjiaba

收稿日期: 2023-11-14

作者简介: 张湛 (1980—) 男, 硕士, 助理研究员, 从事水利、水运工程专业的研究。

随着航电枢纽的不断建设,天然河道得到渠化,具备了通航条件,水运蓬勃发展。同时由于电站调峰、大坝泄洪或机组甩负荷等突发情况,下游河道将产生显著的非恒定流,导致水位、流速短时间内发生剧烈变化,给航运带来不利影响。

对于电站运行过程中非恒定流的传播规律以及对通航的影响问题,许多学者采用物理模型或数值模拟的方法做出大量研究^[1-7]。主要研究对象为三峡工程、向家坝水电站等大型枢纽,重点研究内容为电站日调节运行和枢纽泄洪时下游水力特性。以向家坝水电站为例,张绪进等^[8]、张湛等^[9]通过建立向家坝水电站坝下游长河段物理模型,研究电站日调节非恒定流的特性以及对航运的影响;母德伟等^[10]采用物理模型和数值模拟相结合的方法,研究向家坝水电站枯水时段电站非恒定流的传播规律以及对流速、水位变幅和水面比降等水力要素的影响,结合自航船模试验,提出代表船型的航行要求;王志力等^[11]建立向家坝枢纽下游 145 km 河段一维非恒定流数学模型,模拟向家坝日调节下泄非恒定流的传播过程,根据计算成果对枢纽下游非恒定流的传播规律进行总结;曹民雄等^[12-13],从输沙特性、水面坡降变化等因素考虑,对向家坝水电站下游非恒定流传播规律开展深入研究;蔡新永等^[14]利用小比尺船模测控技术,研究向家坝水电站非恒定流对下游河

道通航条件的影响,为枢纽调度方案的优化提供科学依据;顾莉等^[15]基于一维水动力数学模型,分析向家坝电站机组切机工况时非恒定流对下游航运的影响。

以上研究成果主要针对电站日调节和泄洪工况非恒定流的特性及其传播规律。对于电站机组突发切机甩负荷时,下游河道非恒定流的传播以及对通航影响的研究成果相对较少。本文以向家坝水电站为例,通过物理模型结合自航船模试验的方法,分析电站机组发生切机时下游非恒定流特性以及对航道的影响,研究成果旨在为电站机组发生极端切机工况时下游船舶航行及航道维护提供技术支持。

1 模型建立

1.1 模型设计与制作

研究利用重庆西南水运工程科学研究所制作的金沙江向家坝水电站整体枢纽及坝下游长河段非恒定流物理模型。该模型采用几何比尺 $\lambda_L = \lambda_h = 100$ 的正态定床模型,模型范围包括向家坝枢纽及以下总长度约 54 km 的河段,见图 1。

模型制作过程严格控制精度,平面误差在 ± 0.5 cm 以内,高程误差在 ± 1.0 mm 以内。表层采用水泥砂浆抹面进行硬化处理,电站、泄洪闸等挡水建筑物采用聚氯乙烯塑料板制作,码头采用有机玻璃制作,见图 2。模型试验的流量、水位变化过程采用计算机实时跟踪模拟。

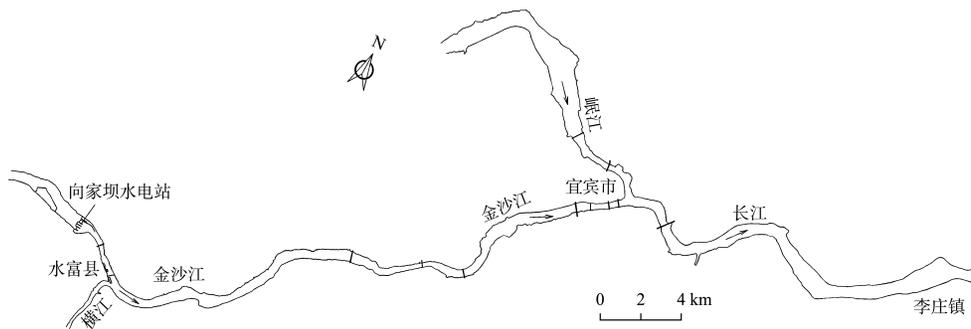


图 1 模型布置



图2 向家坝水电站物理模型

1.2 模型验证

模型采取梅花形加糙方式, 根据不同河段的

糙率情况, 采用不同粒径、间距的卵石。结合实测水面线资料对模型相似性进行分段验证。结果表明: 模型水位与原型水位差值在±0.05 m 以内, 满足阻力相似要求。

采用2013年6月21—24日向家坝水电站枢纽下泄流量过程及坝下游李庄水文站同期水位变化过程资料, 对模型测控系统进行稳定性验证, 见图3。由图可知, 模型流量和水位过程的模拟跟踪与原型吻合良好, 流量误差不超过2%, 水位误差不超过1 mm, 表明模型测控系统精度高, 跟踪效果好。

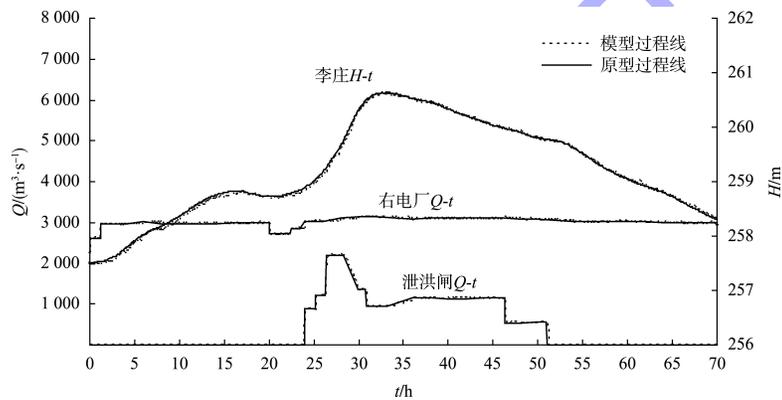


图3 测控系统可靠性验证

2 试验方案

2.1 试验工况

向家坝水电站共8台发电机组, 考虑机组正常运行期可能发生的切机情况, 试验共拟定8个

工况, 分别对应切机1~8台机组, 切机时间均为1 min, 发生切机后采取泄洪闸补水。电站切机工况特征参数见表1。

表1 切机工况特征参数

工况编号	起始流量/(m³·s⁻¹)	减少流量/(m³·s⁻¹)	流量变化/(m³·s⁻¹)	补水起始时间/min	补水时长/min
1	6 573	822	6 573→5 751→6 573	10	2
2		1 643	6 573→4 930→6 573	10	
3		2 465	6 573→4 108→6 573	5	
4		3 287	6 573→3 287→6 573	2	
5		4 108	6 573→2 465→6 573	1	
6		4 930	6 573→1 643→6 573	1	
7		5 751	6 573→822→6 573	1	
8		6 573	6 573→0→6 573	1	

2.2 测点布置

在向家坝水电站下游航行条件复杂的河段以及港口、码头等航运关键部位共设置6个测点,

均布置于枯水期船舶上水航线。各测点断面位置见图4。

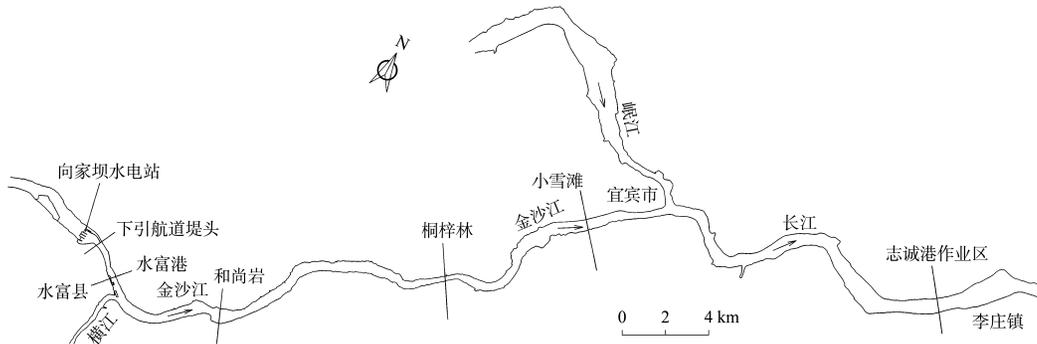


图 4 试验测点及断面位置

2.3 测试设备

试验过程中全程同步观测各测点的水位和流速变化情况，流速采用 HD-4 型电脑流速仪测量，该仪器可根据非恒定流过程中水面的升降，实时自动跟踪水面，以确保始终测取上层流速。水位测量采用 CS-24 型多点超声水位仪，精度 0.1 mm。所有传感器信号经二次仪表转换后，送计算机同步记录、自动处理和输出，并绘制成水力参数过程线。

3 试验成果分析

3.1 坝下游河段的水位变化

向家坝水电站发生切机时，下游河段水位变幅见表 2。根据《金沙江向家坝水电站水库运用与电站运行调度规程(试行)》规定，电站日调峰运行时，控制下游水位最大时变幅不超过 1.0 m/h。工况 1、2 分别切机 1、2 台，发生切机后 10 min 开始补水，补水历时共计 12 min。下游水位最大时变幅分别为 0.36 和 0.49 m/h，影响长度分别为

14.0 和 30.3 km。

工况 3 切机 3 台，发生切机后 5 min 开始补水，补水历时共计 7 min。下游水位最大时变幅 0.55 m/h，影响长度 30.3 km。工况 4 切机 4 台，发生切机后 2 min 开始补水，补水历时共计 4 min，下游水位最大时变幅 0.52 m/h，影响长度 22.4 km。与工况 3 相比，虽然工况 4 切机流量较大，但由于补水历时短，有效遏制了下游水位降幅，因此工况 4 的水位时变幅和影响长度均小于工况 3。

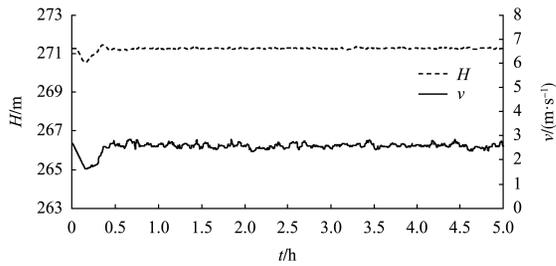
工况 5~8 分别切机 5~8 台，发生切机后 1 min 开始补水，补水历时共计 3 min。虽然补水时间最短，但由于切机流量变化大，下游水位影响长度相应较远，如工况 5 和 8 下游水位最大时变幅分别为 0.69 和 0.86 m/h，影响长度分别为 27.6 和 32.1 km。可以看出，电站发生切机时，下游水位时变幅和影响长度除与切机流量有关，还与补水时长有关。切机流量越大，补水用时越长，下游水位变幅和影响范围越大，水位变幅影响主要位于桐梓林以上河段。

表 2 切机工况下游河段水位最大时变幅

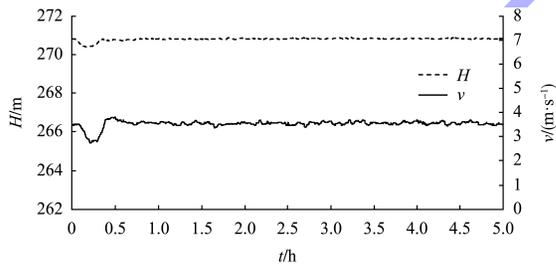
测点	距坝里程/ km	水位最大时变幅/(m·h ⁻¹)							
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
下引航道堤头	1.05	0.36	0.49	0.55	0.52	0.55	0.59	0.69	0.86
水富港	3.50	0.23	0.28	0.34	0.32	0.34	0.36	0.47	0.50
和尚岩	9.07	0.13	0.22	0.26	0.26	0.28	0.30	0.33	0.33
桐梓林	20.50	0.08	0.11	0.12	0.13	0.13	0.15	0.16	0.17
小雪滩	30.30	0.10	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10
志诚港	48.40	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09

3.2 坝下游河段的流速变化

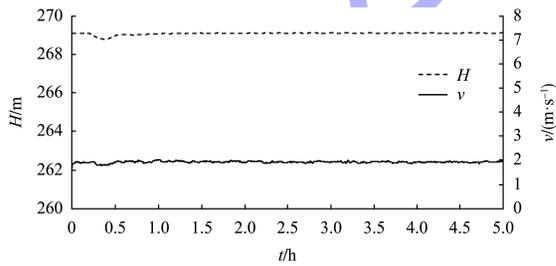
电站切机时, 坝下游流速变化与水位变化过程相似, 即水位降低, 流速相应减小。电站及时补水后, 流速又逐渐增加至恒定流状态。以工况 8 切机过程下游河道流速变化为例, 见图 5。切机过程下引航道堤头流速变幅最大, 最小流速 1.62 m/s, 较恒定流速减小 34%; 和尚岩最小流速 1.69 m/s, 流速减小 12%; 桐梓林最小流速 3.19 m/s, 流速减小 6%。流速变化影响主要位于和尚岩以上河段, 下游流速基本无变化。



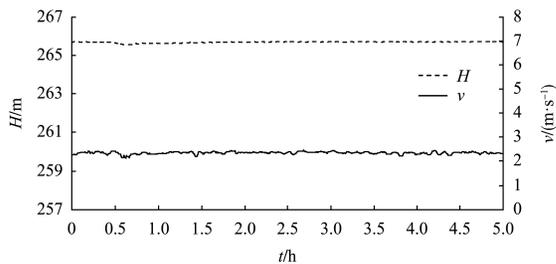
a) 下引航道堤头



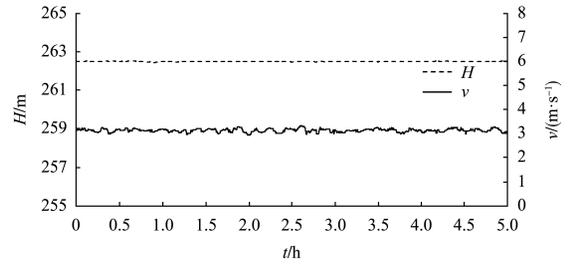
b) 水富港



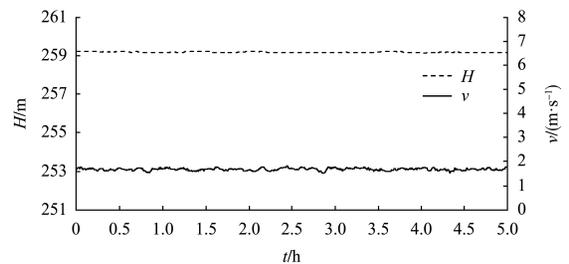
c) 和尚岩



d) 桐梓林



e) 小雪滩



f) 志诚港

图 5 切机工况 8 下游河道典型断面水位、流速变化过程

3.3 对下游河段通航的影响

电站切机对通航条件的影响程度主要与切机流量、补水间隔时间等因素有关。以切机工况 8 为例, 流量在短时间内由 6 573 m³/s 降至 0, 在 8 个工况中降幅最大。虽补水较快, 坝下水位降幅得到一定遏制, 但因流量变幅太大, 该工况影响范围已达宜宾河段。此时, 下引航道内水位日最大降幅 0.91 m, 最低水位 270.56 m, 相应水深 10.56 m, 远大于设计船舶吃水; 小雪滩最大降幅 0.11 m, 最低水位 262.45 m, 滩段水深满足设计航深要求。其他各工况在下引航道及以下河段的最低水位均高于相应河段的设计低水位, 航道水深均满足船舶航行要求。

3.4 船模试验成果

选择切机工况 8 进行自航船模试验, 船型采用 1 000 吨级货船, 尺寸为 85.0 m×10.5 m×2.0 m (长×宽×吃水深度)。船模比尺与物理模型比尺一致。试验航段为: 1) 下引航道口门区及连接段, 长约 1.4 km; 2) 水富港河段, 长约 1.0 km; 3) 和尚岩滩段, 长约 1.3 km。试验成果见表 3。

表3 典型河段切机工况8船模试验成果

位置	航行时段	航向	最大舵角/(°)		最大漂角/(°)		车档/(m·s ⁻¹)		航速/(m·s ⁻¹)		平均航速/(m·s ⁻¹)
			右	左	右	左	最大	最小	最大	最小	
下引航道 口门区及 连接段	00:03:30—00:13:05	上行	23.56	20.03	13.57	20.30	5.00	5.00	3.59	1.80	2.33
	00:46:10—00:57:55	上行	23.08	21.35	7.68	21.78	5.00	5.00	2.97	1.33	2.03
	00:30:50—00:36:05	下行	24.00	24.99	16.00	4.56	4.00	4.00	5.55	2.57	4.34
	01:04:20—01:09:05	下行	24.00	24.27	20.55	19.59	4.00	4.00	5.84	3.05	4.83
水富港 河段	00:10:00—00:17:10	上行	9.56	16.03	5.88	14.25	5.00	5.00	2.59	1.72	2.32
	03:11:50—03:18:45	上行	5.92	18.19	9.54	16.35	5.00	5.00	2.69	1.57	2.25
	00:24:10—00:26:45	下行	3.28	9.07	2.84	9.67	4.00	4.00	6.43	4.37	6.17
	03:24:50—03:27:25	下行	8.12	12.35	2.51	7.30	4.00	4.00	6.34	4.52	6.15
和尚岩 滩段	00:51:50—01:00:25	上行	24.76	24.09	10.75	49.53	5.00	5.00	3.42	1.39	2.36
	02:23:40—02:33:20	上行	19.52	23.31	10.46	38.23	5.00	5.00	3.16	1.01	2.14
	01:07:40—01:12:15	下行	22.44	23.62	21.38	37.94	4.00	4.00	5.89	3.03	4.75
	02:39:40—02:44:05	下行	23.00	22.78	20.60	43.44	4.00	4.00	5.55	3.58	4.65

注：所有数据均已换算为原型值。

由试验成果可知，1 000 吨级机动货船在通过上述 3 个试验河段时，船模最小航速分别为 1.33、1.57 和 1.01 m/s，均优于船模试验最低航速安全限值 0.40 m/s。最大舵角分别为 24.99°、18.19° 和 24.76°，虽未超过船模试验舵角安全限值 25.00°，但部分河段船模舵角已十分接近该安全限值。船舶在通过该河段时需谨慎驾驶，注意用舵，克服不良流态对船舶航行的影响，以确保船舶航行安全。

4 结论

1) 向家坝水电站切机 8 台机组时，下游水位最大时变幅 0.86 m/h，未超过电站调峰运行水位变幅规定值。水位变幅影响主要位于桐梓林以上河段，流速变化影响主要位于和尚岩以上河段，机组切机对下游通航影响总体较小。

2) 切机 1~2 台时，下游水位时变幅小于 0.5 m/h，无需补水；切机 2 台以上时，应及时补水并缩短补水时间；切机 8 台时，船闸下引航道口门区及连接段、和尚岩河段船舶航行用舵已接近安全限值，需谨慎驾驶。

3) 电站发生切机时，应尽可能控制切机数量，并迅速补水，以减小对下游水位的影响。

参考文献：

- [1] 付俊, 张涛涛, 刘佳明, 等. 非恒定来流过程对复式河道水动力的影响试验研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 41-45, 53.
- [2] 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.
- [3] 毕明亮, 潘增, 邢龙, 等. 白鹤滩蓄水期向家坝控泄对下游航道影响分析[J]. 水运工程, 2022(4): 81-87.
- [4] 秦镛宁, 胡江, 薛飞龙. 长江上游日调节非恒定流对拴疆碛浅滩航道要素的影响[J]. 水运工程, 2021(11): 81-86, 104.
- [5] 张有林, 李文杰, 张溢, 等. 向家坝枢纽非恒定泄流对落锅滩河段航道通航条件的影响[J]. 水运工程, 2018(11): 91-96.
- [6] 薛飞龙, 胡江, 杜思材, 等. 叙泸段河道非恒定流作用下水力参数的变化[J]. 水运工程, 2017(10): 142-148.
- [7] 杜思材, 胡江, 薛飞龙, 等. 金沙江宜宾段非恒定流过程及传播特性[J]. 水运工程, 2017(10): 166-170.
- [8] 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, 36(5): 414-418.
- [9] 张湛, 刘亚辉, 何冷慧, 等. 向家坝日调节对中嘴码头运行的影响[J]. 水运工程, 2023(9): 145-150.

(下转第 104 页)