



溪洛渡水电站坝下游河道非恒定流 传播规律研究*

马海涛, 王新, 张首元

(南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要: 受电站下泄非恒定流影响, 溪洛渡下游 30 km 区域通航水流条件复杂, 威胁船舶通航安全。通过原型观测, 对非恒定流传播规律及其主要影响因素进行研究。结果表明, 各码头的水位变化与泄流变化趋势一致, 传播过程中沿程坦化现象明显, 传播速度快, 大河湾—顺河段的平均波速为 11.2 m/s, 汛期大河湾码头水位变幅及变率高达 4.38 m、1.21 m/h。溪洛渡坝下河道非恒定流特性与下泄流量变幅、变化时长及向家坝库水位有关, 其中对流量变幅的响应最大。泄流增加(减少)时, 电站下泄流量变幅越大, 变化时长越短, 向家坝库水位越高(低), 非恒定流传播速度就越快, 码头水位变幅及水位变化率就越大。

关键词: 非恒定流; 水位变幅; 水位变化率; 原型观测; 溪洛渡水电站

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0146-07

Propagation law of unsteady flow in downstream channel of Xiluodu hydropower station

MA Haitao, WANG Xin, ZHANG Shouyuan

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Influenced by the unsteady flow under the power station, the 30 km downstream area of Xiluodu has complicated navigational current conditions, which threatens the safety of ship navigation. Through the prototype observation, the propagation law of unsteady flow and its main influencing factors are investigated. The results show that the change of the water level in each dock is consistent with the trend of the discharge flow, the phenomenon of franking along the propagation is obvious, the propagation speed is fast. The average wave speed of Dahewan to Shunhe section is 11.2 m/s, and the water level variation and change rate at the Dahewan dock during the flood season are as high as 4.38 m and 1.21 m/h. The unsteady flow characteristics of the river channel below Xiluodu dam are related to the variation of the discharged flow rate, the change duration, and the water level of the Xiangjiaba reservoir, with the greatest response to the flow rate variation. When the discharge flow increases (decreases), the larger the variation amplitude of the discharged flow at the power station, the shorter the change duration, the higher (lower) the water level of Xiangjiaba reservoir, the faster the propagation of unsteady flow, and the larger the variation amplitude of the water level and the change rate of the water level of the dock.

Keywords: unsteady flow; water level variability; change rate of water level; prototype observation; Xiluodu hydropower station

溪洛渡和向家坝是金沙江最下游的 2 座大型水电站, 2018 年 5 月, 位于下游的向家坝水电站

升船机通航运行, 千吨级船舶可沿长江直达溪洛渡坝下, 向家坝升船机的投运极大促进了金沙江

收稿日期: 2024-02-04

*基金项目: 南京水利科学研究院研究生学位论文基金 (Yy124015)

作者简介: 马海涛 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为通航水力学。

下游水运的发展与繁荣, 向家坝—溪洛渡两坝间 150 km 的航道货运十分繁忙, 500~1 万吨级多种不同船型的船舶往返于两坝之间。溪洛渡水电站以发电为主, 兼有防洪、拦沙和改善上游航运条件等综合效益, 坝下河道存在一定的变动回水区, 在向家坝低水位时, 溪洛渡电站调峰、泄洪产生的非恒定流导致坝下航道水位波动、流速较大, 坝下 30 km 河道范围内的船舶航行和码头停泊存在一定安全风险, 时有船舶翻沉事故发生, 枢纽运行非恒定流条件下该河段的船舶通航安全问题已引起高度关注。因此, 开展电站非恒定流传播规律研究十分必要, 对金沙江下游梯级航运开发具有重要的参考意义。

枢纽发电调峰引起的非恒定流为常见的现象, 国内众多学者对此展开了广泛研究, 目前已有研究主要集中在数值模拟计算、物理模型试验等方面。王志力等^[1]、廖小琴^[2]、母德伟等^[3]通过数值模拟分析向家坝日调节下泄非恒定流的传播过程, 分析其传播规律及对流速、水位变幅和水面比降等水力要素的影响; 胡真真等^[4]通过物理模型试验, 研究向家坝电站日调节对浅滩河段通航条件的影响; 李少希等^[5]利用二维非恒定数学模型计算分析思林电站日调节非恒定流对山区峡谷下游航道通航影响, 刘臣^[6]采用相同的方法研究电站发电泄流引起的乌江渡河段通航水动力变化过程; 尹崇清等^[7]通过物理试验总结安谷电站非恒定流引起长尾水渠的最大水位变率、最大比降、最大流速以研究船舶航行安全; 刘丽娟^[8]通过非恒定流水面线计算分析黄河大峡电站非恒定流在下游的传播规律、影响范围和程度; 李俊鹏^[9]、杜泽东等^[10]通过正态物理模型试验对溪洛渡水利枢纽调峰、泄洪、调峰泄洪组合工况下产生的非恒定流特性进行分析和讨论。

本文通过对坝下 30 km 河道沿岸多个码头水位的同步监测分析, 结合溪洛渡电站运行调度实际情况, 揭示坝下游非恒定流传播规律及其主要影响因素, 以期为下游河道通航安全分析与应对措施研究奠定基础。

1 梯级水库运行情况

1.1 溪洛渡-向家坝梯级枢纽运行方案

溪洛渡水电站水库正常蓄水位 600 m, 死水位 540 m, 防洪限制水位 560 m, 汛期 7—8 月底按防洪调度方式运行; 9 月上旬开始蓄水, 至 9 月下旬至正常蓄水位 600 m, 此时按来水流量发电。向家坝水库正常蓄水位 380 m, 死水位 370 m, 汛期限制水位 370 m, 6 月中旬—9 月上旬按汛期限制水位 370 m 运行, 9 月中旬开始蓄水, 9 月底至正常蓄水位 380 m; 10—12 月一般维持在正常蓄水位或附近运行; 12 月下旬—6 月上旬为供水期, 至 6 月上旬末水库水位降至 370 m。

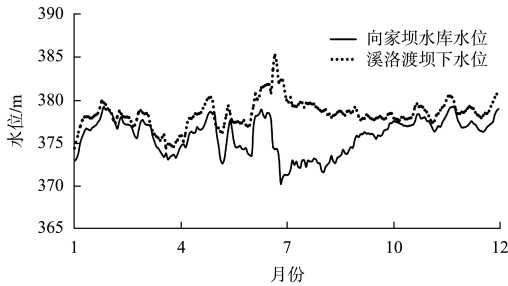
向家坝水电站在正常蓄水位 380 m 运行时, 库区回水至溪洛渡形成近 157 km 的深水航道。溪洛渡水电站尾水最低枯水位 369.25 m, 向家坝 370.00 m 水位即开始与溪洛渡水头重叠。向家坝在水位 370.00~380.00 m 之间运行, 溪洛渡和向家坝梯级水头重叠较多, 溪洛渡坝下游河道水位受向家坝回水影响较大。

1.2 坝下水位流量分析

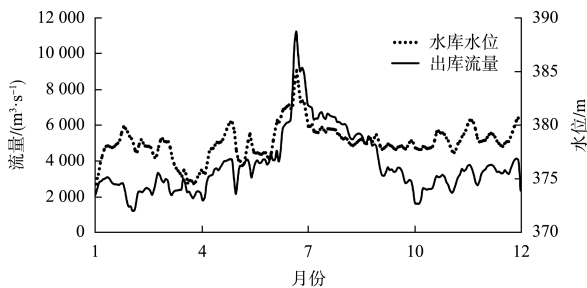
2022 年溪洛渡坝下水位(中心场站)与向家坝库水位(新滩坝站)过程如图 1a) 所示, 枯水期受向家坝蓄水影响, 溪洛渡坝下与向家坝库水位落差在 2 m 以内; 汛期向家坝按控制水位运行, 水位落差明显加大, 最大水位差高达 12 m。汛期 6—9 月, 两站间平均水位落差达 4.92 m, 其中 6 月平均水位落差为 5.89 m, 最大水位落差 12.28 m (6 月 22 日)。由此说明, 枯水期向家坝水库运行水位较高, 回水接近溪洛渡坝下 4 km 处; 汛期向家坝水库按控制水位运行, 库区首尾水位差显著加大, 河道水面存在明显比降。

溪洛渡 2022 年水位流量过程如图 1b) 所示, 出库流量最大 11 400 m³/s, 对应最高坝下水位 385 m, 出库流量与坝下水位变化过程基本对应。枯水期时坝下水位与出库流量的相关性并不明显, 存在出库流量减少时坝下水位却增加的情况, 说明向家坝蓄水的影响范围达到了溪洛渡坝下 4 km 处;

汛期时向家坝按汛限制水位运行，对溪洛渡近坝河段回水影响小，出库流量与坝下水位变化趋势保持一致。



a) 溪洛渡-向家坝水位变化



b) 溪洛渡水位流量过程

图 1 2022 年溪洛渡水位、流量情况

2 水位监测分析

2.1 水位监测

在溪洛渡坝下 30 km 范围内的 7 座主要码头布置水位计，实现对沿岸 7 座码头水位的同步在线监测，监测周期为 2023 全年，数据精度达到厘米级，现场监测区域及码头位置见图 2。水位监测系统网络如图 3 所示，主要由前端感知(水位计)、通用分组无线业务 (general packet radio service, GPRS) 移动网络传输、监控中心 3 部分组成。

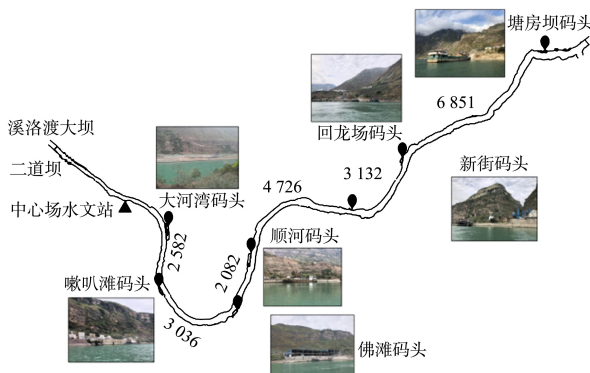


图 2 现场监测区域及码头位置 (单位: m)

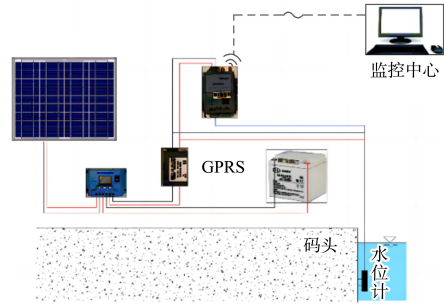


图 3 水位监测系统网络

2.2 水位波动分析

结合电站实际运行调度情况，根据不同泄流条件选取 24 种典型流量变化过程分析非恒定流水位波动传播规律及其主要影响因素。典型流量变化过程见表 1。

表 1 典型流量变化过程

工况	典型流量变化过程	初始出库流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	流量 变幅/m	变化 时长/h	向家坝库 水位/m
不同流量 变幅 及变化 时长	1	5 600	3 000	3	378.22
	2	5 800	2 000	2	378.22
	3	6 400	3 000	2	378.38
	4	7 300	4 500	5	373.77
	5	6 800	4 000	4	373.95
	6	7 000	4 500	4	374.19
出库 流量 减少	7	2 000	3 000	4	377.89
	8	1 900	2 000	3	377.58
	9	2 000	3 000	3	378.06
	10	2 800	4 500	4	373.48
	11	4 500	2 000	3	373.52
	12	2 400	4 500	3	373.79
不同向 家坝库 水位	13	7 100	2 000	2	373.49
	14	5 800	2 000	2	378.22
	15	7 200	3 000	2	373.96
	16	6 500	3 000	2	378.39
	17	4 800	3 000	3	373.74
	18	5 500	3 000	3	378.22
出库 流量 增加	19	4 400	2 000	3	373.52
	20	1 900	2 000	3	377.58
	21	3 800	2 000	2	373.59
	22	3 400	2 000	2	377.61
	23	4 200	3 000	4	373.43
	24	2 000	3 000	4	377.87

3 非恒定流水位波动特性与传播规律

3.1 水位波动特性

选取枯水期、汛期下泄流量减少和增加的代

表性工况, 对比各码头的水位变化值, 分析非恒定流水位波动特性。各典型工况下沿程码头水位变化见图 4。

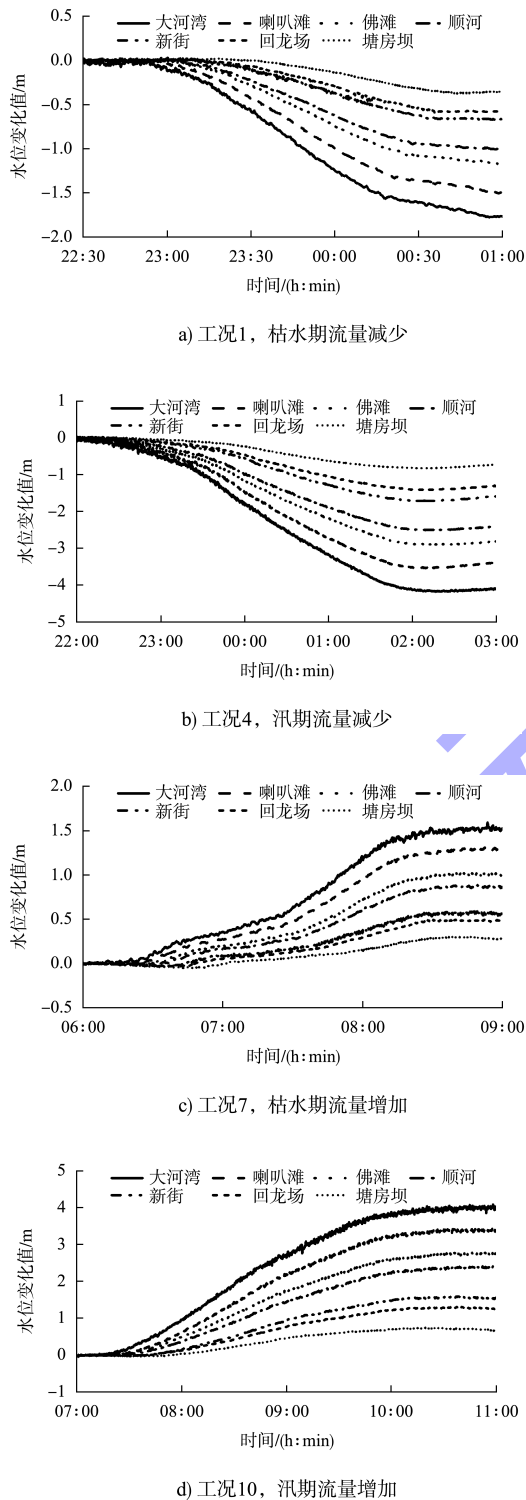


图 4 各典型工况下码头水位变化

工况 4 下泄流量从 $7\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 减少至 $2\,800\text{ m}^3/\text{s}$, 流量变幅高达 $4\,500\text{ m}^3/\text{s}$, 变化时长 5 h, 形成的落

水波先后传递至沿岸 7 座码头, 其中大河湾、顺河、塘房坝码头水位变幅依次为 4.38、2.58、0.84 m, 水位变化率依次为 0.96、0.61、0.22 m/h。工况 10 出库流量从 $2\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $7\,300\text{ m}^3/\text{s}$, 变化时长 4 h, 形成的涨水波沿程传递, 引起的大河湾、顺河、塘房坝码头的水位变幅分别为 4.13、2.38、0.63 m, 水位变化率分别为 1.21、0.71、0.22 m/h。

无论枯水期还是汛期, 各典型工况下码头水位均随着下泄流量的增加而上涨(或减少而下降), 与下泄流量的变化趋势保持一致。当电站为了满足调峰需求而增加下泄流量时, 上游码头响应最快, 水位最先上涨, 随着波峰在河道中的传递, 沿程各码头水位依次抬升, 当下泄流量增加到最大值时, 各码头的水位也相继接近最高水位。同时可以看出, 上游码头水位变幅和水位变化率明显大于下游码头, 非恒定流传播过程中沿程坦化现象明显。

3.2 传播规律

3.2.1 水位变幅

工况 1~12 沿程各码头每千下泄流量水位变幅如图 5 所示, 各码头的水位变幅均随着距坝里程的增加而减小, 中上游河道的水位变幅降低明显, 靠近下游河道的水位变幅变化呈缓慢下降趋势, 且各工况下塘房坝码头水位变幅相差不大。工况 1~3、7~9 为枯水期, 工况 4~6、10~12 为汛期, 向家坝水电站按控制水位运行, 因此汛期河道水位变幅大于枯水期, 同时发现落水波引起的水位变幅较大于涨水波, 原因可能是库区消落比库区涨蓄受回水影响更小。

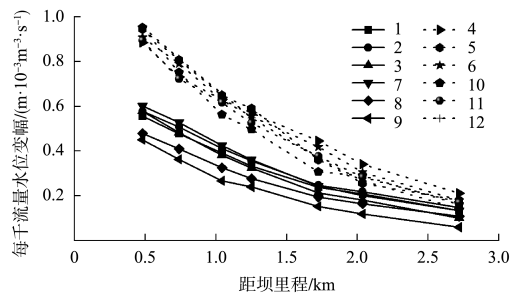


图 5 各典型工况沿程码头的水位变幅

3.2.2 传播速度

非恒定流传播速度用两码头之间沿河道中心

线的距离除以各自波峰到达的时间，经统计计算得到各工况下大河湾—顺河段、顺河—塘房坝段非恒定流的传播速度见图6。

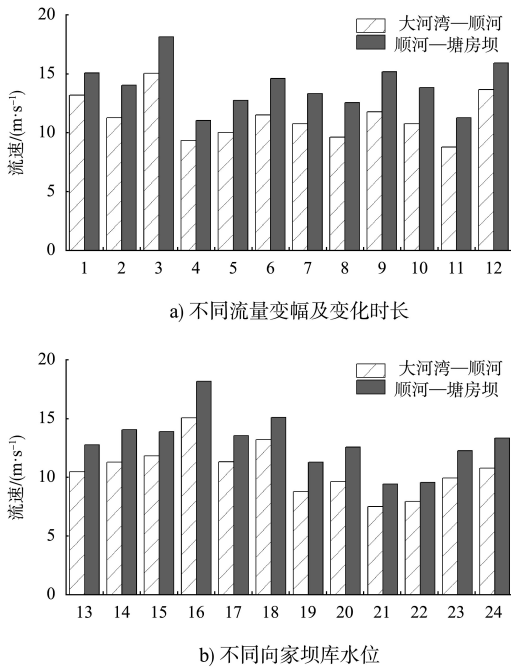


图6 典型工况下非恒定流传播速度

调减流量 4 500 m³/s 条件下，跌水波传播过程中大河湾—顺河段平均波速 9.3 m/s，顺河—塘房坝段平均波速 11.1 m/s；调增流量 4 500 m³/s 条件下，涨水波传播过程中大河湾—顺河段平均波速 10.7 m/s，顺河—塘房坝段平均波速 13.8 m/s。大河湾—顺河段为 U 形弯道，顺河—塘房坝段多为顺直河道，因此传播速度更快。

非恒定流传播速度的影响因素除了河道断面、底坡等自然因素之外，电站泄流情况决定着非恒定流的传播速度，工况 1~12 为不同流量变幅及变化时长的对比工况，选择同一河段分析电站

下泄流量变幅及变化时长对传播速度的影响。从图 6a) 可知，无论是在顺直河段还是弯曲河段，电站下泄流量变幅越大、变化时长越短，非恒定流在河道传播的速度就越快。

通过工况 13~24 两两对比可知，向家坝库水位均相差 4 m 以上，分析向家坝库水位对非恒定流传播速度的影响。从图 6b) 可知，同一河段的相同泄流条件下，向家坝库水位越高，河道水深越大，非恒定流传播速度就越快。

4 非恒定流特性影响因素分析

电站下泄流量的变化是产生非恒定流的根本原因，非恒定流特性主要与下泄流量变化情况有关。除此之外，向家坝库水位的影响也不容忽视，选取流量变幅、变化时长及向家坝库水位不同的工况，对比大河湾、顺河、塘房坝 3 座码头的水位变幅和水位变化率，分析非恒定流特性的影响因素。

4.1 流量变幅

工况 2 和 3、5 和 6、8 和 9、11 和 12 两两变化时长和向家坝库水位一致，流量变幅不同，典型码头水位变幅及水位变化率见表 2。工况 9 比 8 的下泄流量变幅大 1 000 m³/s，大河湾码头水位变幅增加 0.84 m，水位变化率增加 0.33 m/h，河道水位变幅及水位变化率与下泄流量变幅有直接关系。对比其他工况发现，无论在枯水期还是汛期、下泄流量减少还是增加，流量变幅较大工况对应的典型码头水位变幅和水位变化率都比流量变幅较小工况的要大。当变化时长和向家坝库水位保持一致时，下泄流量变幅越大，坝下游河道中各码头水位变化幅度越大，水位变化率越大。

表 2 不同流量变幅条件下典型码头水位变幅及水位变化率

工况	初始流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	流量变幅/ (m ³ ·s ⁻¹)	变化 时长/h	水位变幅/m			水位变化率/(m·h ⁻¹)			向家坝库 水位/m
				大河湾	顺河	塘房坝	大河湾	顺河	塘房坝	
2	5 800	2 000	2	1.459	0.864	0.327	0.762	0.485	0.192	378.22
3	6 400	3 000	2	2.161	1.367	0.566	1.035	0.658	0.304	378.38
5	6 800	4 000	4	3.725	2.199	0.610	0.940	0.638	0.200	373.95
6	7 000	4 500	4	4.204	2.480	0.843	1.038	0.616	0.235	374.19
8	1 900	2 000	3	1.003	0.504	0.149	0.356	0.196	0.113	377.58
9	2 000	3 000	3	1.842	0.988	0.449	0.680	0.390	0.155	378.06
11	4 500	2 000	3	1.940	1.171	0.437	0.692	0.423	0.190	373.52
12	2 400	4 500	3	4.235	2.438	0.718	1.290	0.755	0.261	373.79

4.2 变化时长

工况 1 和 3、4 和 6、7 和 9、10 和 12 两两流量变幅和向家坝库水位一致, 变化时长不同, 典型码头水位变幅及水位变化率见表 3。工况 7 和 9 变化时长分别为 4、3 h, 工况 9 大河湾码头水位变幅较工况 7 增加 0.1 m, 水位变化率增加 0.26 m/h, 变化时长对码头水位变幅及变率的影响较小。

对于同一码头, 工况 3 典型码头的水位变幅和水位变化率均大于工况 1, 工况 9 水位变幅和变化率均大于工况 7, 在枯水期, 无论下泄流量

增加还是减少, 变化时长越短形成的非恒定流在下游河道传播时波峰越大、波速越快, 导致下游河道各码头水位变幅和水位变化率越大。但这一规律在汛期却不完全适用, 汛期下泄流量增加时, 工况 10 和 12 对比仍满足上述规律, 然而对于汛期下泄流量减少的情况, 同一码头工况 4 大河湾码头水位变幅比工况 6 的大 0.18 m, 但水位变化率却比工况 6 的小 0.08 m/h, 在汛期流量减少幅度较大的情况下, 变化时长越短, 下游河道各码头水位变化越快, 但水位绝对变幅会越小。

表 3 不同变化时长条件下典型码头水位变幅及水位变化率

工况	初始流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量变幅/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	变化 时长/h	水位变幅/m			水位变化率/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)			向家坝库 水位/m
				大河湾	顺河	塘房坝	大河湾	顺河	塘房坝	
1	5 600	3 000	3	1.819	1.067	0.322	0.620	0.380	0.118	378.22
3	6 400	3 000	2	2.161	1.367	0.566	1.035	0.658	0.304	378.38
4	7 300	4 500	5	4.386	2.585	0.843	0.959	0.604	0.224	373.77
6	7 000	4 500	4	4.204	2.480	0.806	1.038	0.616	0.235	374.19
7	2 000	3 000	4	1.740	0.936	0.406	0.417	0.225	0.097	377.89
9	2 000	3 000	3	1.842	0.988	0.449	0.680	0.390	0.155	378.06
10	2 800	4 500	4	4.132	2.383	0.628	1.212	0.704	0.220	373.48
12	2 400	4 500	3	4.235	2.438	0.718	1.290	0.755	0.261	373.79

4.3 向家坝库水位

工况 13~24 两两流量变幅和变化时长一致, 向家坝库水位不同, 典型码头水位变幅及水位变化率见表 4。相同泄流条件下, 当下泄流量减少、下游河道落水时, 向家坝库水位越低, 河道水位变幅和水位变化率就越小, 但是数值相差不大, 下泄流量变幅在 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 373 和 378 m 向家坝运行水位对应典型码头水位变幅差值最大不超

过 15 cm, 水位变化率相差不超过 10 cm/h; 当下泄流量增加、下游河道涨水时, 向家坝库水位越低, 河道水位变幅和水位变化率越大, 并且相差较大, 下泄流量变幅在 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 373 和 378 m 向家坝运行水位典型码头水位变幅差值最小达到了 50 cm, 最大接近 1 m, 水位变化率相差最小为 10 cm/h, 最大相差 25 cm/h。

表 4 不同向家坝库水位条件下典型码头水位变幅及水位变化率

工况	初始流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量变幅/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	变化 时长/h	水位变幅/m			水位变化率/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)			向家坝库 水位/m
				大河湾	顺河	塘房坝	大河湾	顺河	塘房坝	
13	7 100	2 000	2	1.408	0.835	0.318	0.723	0.438	0.182	373.49
14	5 800	2 000	2	1.459	0.864	0.327	0.762	0.485	0.192	378.22
15	7 200	3 000	2	2.053	1.246	0.521	0.939	0.603	0.274	373.96
16	6 400	3 000	2	2.161	1.367	0.566	1.035	0.658	0.304	378.39
17	4 800	3 000	3	1.748	0.986	0.286	0.536	0.321	0.104	373.74
18	5 600	3 000	3	1.819	1.067	0.322	0.620	0.380	0.118	378.22
19	4 500	2 000	3	1.940	1.171	0.437	0.692	0.423	0.190	373.52
20	1 900	2 000	3	1.003	0.504	0.149	0.356	0.196	0.113	377.58
21	3 800	2 000	2	1.711	1.059	0.272	0.666	0.434	0.164	373.59
22	3 400	2 000	2	1.235	0.778	0.264	0.553	0.336	0.144	377.61
23	4 200	3 000	4	2.477	1.638	0.651	0.682	0.398	0.165	373.43
24	2 000	3 000	4	1.740	0.936	0.406	0.417	0.225	0.097	377.87

溪洛渡坝下河道水位变幅及水位变化率受向家坝库水位影响,相同泄流条件下,向家坝库水位越高,表明河道水深也越高,因此当下泄流量减少时,下游河道的水位消落幅度及其变化率就越大,水位变化越快。同样,向家坝库水位越低,表明河道水深越低,当下泄流量增加时,下游河道的水位增长幅度及其变化率越大,并且向家坝库水位对坝下河道水位变幅及其变化率的影响程度在下泄流量增加时比下泄流量减少时要大得多。

5 非恒定流通航影响及应对措施

电站大容量调峰会致下游航道中水位急涨急落,流速增加,航道水面坡降加大,影响船舶的正常航行。溪洛渡水电站调增流量达到 $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,大河湾码头水位变幅高达 $4.38\ \text{m}$,水位变率 $0.96\ \text{m/h}$,一般情况水位变幅不超过 $4\ \text{m/d}$ 、变率不超过 $1\ \text{m/h}$ 为宜。电站负荷调节变化使下游航道中的水位变幅、变率超过设计要求,使停泊中的船舶无法起锚开航,航行中的船舶因流速突然增大而上行困难,或者掉头过程中失控翻船,码头作业的船舶触底搁浅、系缆力增大而缆绳崩断,威胁船舶通航安全。为此,须采取应对措施,如水库运行调度信息及时发布,及时掌握水情变化,提前做好应对;开展相关非恒定流条件下船舶通航安全专题研究,科学制定坝下限制性航区通航安全管理办法,加强该航段通航安全管理。

6 结论

1) 溪洛渡坝下河道非恒定流传播过程中,各码头的水位变化与泄流变化趋势一致,沿程坦化现象明显,传播速度快,大河湾—顺河段平均波速 $11.2\ \text{m/s}$,顺河—塘房坝段平均波速 $13.8\ \text{m/s}$ 。汛期泄流增加 $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$,大河湾码头水位变幅 $4.38\ \text{m}$,水位变化率 $0.96\ \text{m/h}$;泄流减少 $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$,大河湾水位变幅 $4.13\ \text{m}$,水位变化率 $1.21\ \text{m/h}$ 。

2) 溪洛渡坝下河道非恒定流特性与下泄流量变幅、变化时长以及向家坝库水位有关,其中对流量变幅的响应最大。泄流增加(减少)时,电站下泄流量变幅越大,变化时长越短,向家坝库水位越高(低),非恒定流传播速度就越快,码头水位变幅及水位变化率就越大。

3) 溪洛渡水电站负荷调节、泄洪产生非恒定流使得坝下河道水位变幅、变率超过设计要求,威胁船舶通航安全,亟需开展相关非恒定流条件下船舶通航安全专题研究,科学制定坝下限制性航区通航安全管理办法。

参考文献:

- [1] 王志力,陆永军. 向家坝水利枢纽下泄非恒定流的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2008(3): 12-15.
- [2] 廖小琴. 电站调度运行产生的非恒定流对下游航道通航条件的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [3] 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.
- [4] 胡真真,张绪进. 向家坝电站日调节对大雪滩通航水流条件的影响分析[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(2): 16-18, 44.
- [5] 李少希,吕彪,邢岩. 枢纽下泄非恒定流对下游航道通航条件的影响研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(3): 85-86.
- [6] 刘臣. 乌江渡电站泄流对乌江渡码头航行影响[J]. 水运工程, 2017(4): 151-155, 165.
- [7] 尹崇清,周勤. 电站非恒定流对长尾水渠通航的影响[J]. 中国农村水利水电, 2009(3): 125-127, 130.
- [8] 刘丽娟. 电站非恒定流对下游航道影响的研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [9] 李俊鹏. 水电站下游非恒定流特性及其对航运影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- [10] 杜泽东,董先勇,秦蕾蕾,等. 溪洛渡水电站坝下河道非恒定流特性研究[J]. 人民长江, 2023, 54(1): 200-205.

(本文编辑 王传瑜)