

梯级电站联合调节非恒定流对枢纽间航运安全的影响

龙启建, 李克锋, 汪青辽

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 针对嘉陵江干流中游亭子口至沙溪航电枢纽间河段建立了非恒定流数学模型, 并采用基于 Preissmann 四点隐格式的有限差分法进行求解. 利用 2001 年亭子口至沙溪河段实测的洪、中、枯下沿程各断面水面线资料率定模型综合糙率值. 用黄河四龙至龙湾段 2002 年实测资料对模型精度进行了验证. 应用该模型分别计算梯级电站联合调节时苍溪反调节枢纽兴建前后亭子口至苍溪段非恒定流水流条件, 并做对比分析. 结果表明梯级电站联合调节时反调节枢纽的兴建能明显改善河段通航水流条件.

关 键 词: 反调节枢纽; 航运安全; 通航水流条件; 非恒定流; 嘉陵江

中图分类号: TV135.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)03-0092-06

电站的日调节泄流和大坝泄洪引起的非恒定流将改变下游河道的天然水流条件, 对大坝下游航道、港口、通航设施的正常使用以及船舶的安全航运造成一定的影响, 特别是电站突然开启或关闭, 大坝开闸泄洪等, 这种高瞬变流对山区河流通航水流条件及船舶通航水深的影响非常明显^[1]. 因此研究电站调节非恒定流对枢纽间河道的通航水流条件产生的影响, 对保障船舶的安全航行很有必要. 针对电站调节非恒定流对通航水流条件的影响, 刘新^[2]建立了汉江石泉枢纽下游非恒定流一维数学模型, 计算满足通航保证率条件下的石泉枢纽调节方式; 郑守仁等^[3]在研究三峡电站调峰产生的非恒定流对三峡至葛洲坝两坝间水流条件影响时, 根据模型试验结果得出在两电站联合运行时能满足万吨级船队航运要求; 吴晓黎等^[4]研究了三峡电站不同调峰流量下河道水流的航运满足情况. 目前研究多数是针对枢纽下游, 以单个电站日调节对下游航道水流的影响为主, 考虑梯级水电站联合运行、调节对通航水流影响的较少.

本文以嘉陵江干流中游段在建的亭子口、苍溪和沙溪航电枢纽为研究对象, 采用数值模拟方法, 研究梯级水电站联合调节非恒定流对枢纽间河道通航水流条件造成的影响, 以及反调节枢纽的兴建对枢纽间河道通航水流的改善程度.

1 通航水力指标要求

电站调节非恒定流的水流条件对船舶航行有着重要的影响, 因此必须对船舶所要求的通航水流条件进行分析. 评价非恒定流对航运影响的指标主要有水位(航深)、涌浪、流速、流态及水面比降、水位日变幅和小时变率. 根据嘉陵江航道规划及《内河航道标准》^[5], 嘉陵江主要通航水力技术指标有: 最小水深为 1.9 m, 最小通航河宽为 50.0 m, 最大平均流速不宜超过 3.0 m/s, 最大水面比降不超过 2.0‰, 最大小时水位变幅不超过 1.0 m.

船舶逆流上行与上滩时推力必须克服水流对船舶所产生的水流阻力和水面比降所产生的比降阻力. 所谓船舶的允许上滩能力, 是指船舶上滩发挥最大马力而获得的对岸航速(0.3~0.5 m/s)时, 此位置的水流表面流速和水面比降亦即船舶上滩时允许的最大流速和水面比降. 当船型、载量和船舶有效推力一定时, 在

收稿日期: 2010-09-08

作者简介: 龙启建(1985-), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 主要从事环境水力学与水污染控制研究.

E-mail: longqijian0728@126.com 通信作者: 李克锋(kefengli@scu.edu.cn)

满足航行阻力小于有效推力条件下,允许流速和比降将会有无数个组合.计算时,首先拟定几个不同的流速值,求出其流速阻力,由已知的船舶推力,反推出相应的允许比降值,多组流速及比降构成的曲线即构成船舶的上滩能力曲线.根据嘉陵江航道规划,得出嘉陵江 2×500 t 级船舶满载时的上滩能力曲线如图 1 所示.

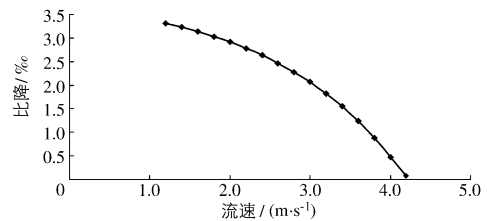


图 1 2×500 t 级船舶满载时的上滩能力曲线

Fig. 1 Curve of 2×500 t ship ascending rapids with full load

2 非恒定流数学模型及其验证

与船舶航行有关的电站调节非恒定流的水力学特征参数,如断面平均流速、水深等,可采用非恒定流一维偏微分方程组进行求解.非恒定流一维偏微分方程组由连续方程和动量方程组成.

$$\text{连续方程:} \quad \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = L_q / B \quad (1)$$

$$\text{动量方程:} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) + L_q \frac{Q}{A} = 0 \quad (2)$$

式中: Z 为水位(m); Q 为流量(m^3/s); A 为过水断面面积(m^2); L_q 为单位河长的旁侧入流量(m^2/s); x 为沿水流方向的水平距离(m); t 为时间(s); g 为重力加速度(m/s^2); B 为断面河宽(m); α 为流速分布不均匀系数; S_f 为摩阻坡度. S_f 一般根据曼宁公式可写为:

$$S_f = \frac{(nV)^2}{R^{4/3}} = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} = \frac{Q^2}{K^2} \quad (3)$$

式中: K 为流量模数(m^3/s); n 为糙率; V 为断面平均流速(m/s); R 为水力半径; Q 为流量(m^3/s).

现行求解上述偏微分方程组最常用的方法是数值解法.本文采用 Preissmann 隐格式差分法求解上述方程组.该方法具有计算速度快、稳定性强、收敛性好的特点,特别适用于流动变化不太剧烈的长距离、长时段的洪水演进计算,在非恒定流数值计算中被广泛使用.

本文的计算范围为嘉陵江干流在建的 3 个连续开发的亭子口、苍溪、沙溪航电枢纽所在河段,其中亭子口枢纽位于河段起点,沙溪枢纽位于末端,均按低水头水电连续开发建设.且 3 座航电枢纽建成后,沙溪电站水库回水影响至苍溪电站、苍溪电站水库回水影响至亭子口电站.三枢纽间河道全长 39.10 km,沿程共布置 53 个计算断面,最大间距为 1 418 m,最小为 445 m,其中上游亭子口坝址为 1#断面,苍溪坝址为 13#断面,沙溪坝址为 53#断面.嘉陵江干流亭子口至沙溪枢纽间河段的综合糙率值,采用 2001 年洪、中、枯 3 级典型流量下亭子口至沙溪河段沿程各断面的水面线观测资料反算求得.

为验证非恒定流数学模型及其求解方法的精确性,将该数学模型应用于甘肃境内黄河四龙到龙湾段进行模型验证.该河段全长 110 km,共 125 个计算断面将四龙至龙湾划分为 124 个河段,最大间距为 2 343 m,最小为 235 m.以四龙断面 2002 年 7 月 22 日 0 时至 2002 年 7 月 26 日 0 时实测流量过程作为上边界条件,下游给定龙湾断面同时段实测的水位过程为下边界条件.计算结果与四龙至龙湾段中三滩断面实测的水位过程比较见图 2.从图 2 可见,数值模拟计算得到的水位与实测值水位过程基本吻合,两者的最大相对水深误差都基本控制在 5% 以内,说明该数学模型能较精确地模拟该河段非恒定流的传播规律和过程.

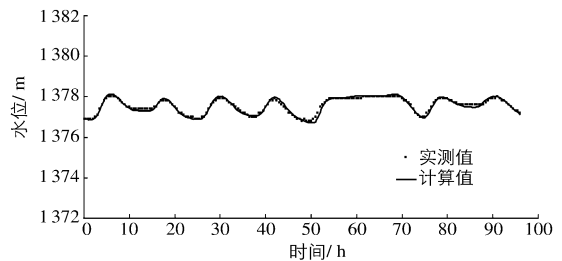


图 2 三滩计算与实测水位过程比较

Fig. 2 Comparison between the measured and calculated water-level

3 航电枢纽联合运行非恒定流的数值模拟

为充分研究梯级水电站联合调节时反调节枢纽建设对上、下游河道航运水流条件的改善程度,针对以下 2 种情形进行计算并作比较分析:(1)亭子口与沙溪枢纽建成,中间苍溪枢纽未建成,沙溪库区起反调节作用;(2)3 个梯级均建成,苍溪库区对亭子口起反调节作用,沙溪库区对苍溪枢纽起反调节作用.通过对这 2 种情况下非恒定流水力要素变化规律的计算、分析和比较,从而确定梯级航电枢纽联合调节非恒定流对枢纽间河道通航水流条件影响的规律,以及反调节枢纽在梯级航电枢纽调度中对通航水流条件的改善作用.

根据亭子口水利枢纽的设计运行方式,亭子口电站在系统中需要承担调峰任务,因此在苍溪反调节枢纽兴建之前,非恒定流计算以亭子口电站的日调峰流量下泄过程作为上边界条件,以沙溪电站坝址水位过程作为下边界条件.苍溪反调节枢纽兴建之后非恒定流计算中,亭子口至苍溪段以亭子口日调峰流量下泄过程为上边界条件,以苍溪电站坝址水位过程为下边界条件,苍溪至沙溪段以联合调节时苍溪电站流量下泄过程为上边界条件,沙溪坝址水位过程为下边界条件.根据上游来水情况及亭子口电站日调节方式,亭子口下泄流量按以下 3 种情况加以考虑:

(1)当上游日均来流量小于电站满发时的最大引用流量 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$,来流全部用于发电,此时主要研究亭子口电站日调节非恒定流对下游枢纽间河道航运安全的影响;为方便比较梯级水电站联合调节非恒定流对枢纽间河道通航水流条件的影响,以及反调节枢纽的兴建对枢纽间河道通航水流的改善程度,在苍溪电站兴建前后亭子口都采用同样的日调节下泄流量过程.根据梯级电站优化调度原则拟定亭子口 5 种日调节方案,及同时段苍溪电站坝址水位流量过程.亭子口下泄流量过程线如图 3,方案 1~3 为电站连续启闭单台机组情况;方案 4 和 5 为电站突然启闭多台机组情况.根据亭子口日调节的下泄流量过程和苍溪坝前的水位流量关系曲线计算得同时段苍溪电站在联合日调节过程中下泄流量过程见图 4.

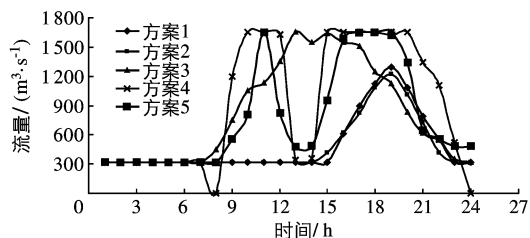


图 3 亭子口电站的典型日调节下泄流量过程
Fig. 3 Discharge hydrographs of each scheme of typical daily regulation of Tingzikou

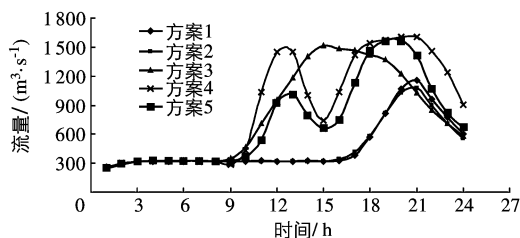


图 4 亭子口影响下的苍溪电站典型日调节下泄流量过程
Fig. 4 Discharge hydrographs of each scheme of typical daily regulation of Cangxi under the influence of Tingzikou

(2)当上游来流量大于电站最大发电流量而小于 10 年一遇流量 $11\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 时,电站满发,泄洪闸泄流调峰,船闸仍继续通航,按对航运影响最不利情况进行考虑,取亭子口水电站上游来流量为最大通航流量 $11\,800\text{ m}^3/\text{s}$,泄洪闸起始下泄流量为电站满发流量 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$,此时主要研究闸门开启历时分别拟定为 5, 10, 15, 20 和 30 min 共 5 种方案下亭子口下泄流量按线性变化过程时非恒定流对通航水流条件的影响;根据亭子口泄洪调节的下泄流量过程和苍溪坝前水位流量关系曲线计算出同时段苍溪电站在电站联合日调节时泄洪流量过程见图 5.

(3)当上游来流量大于 10 年一遇流量 $11\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 时,机组停发,船闸停航,闸门全开泄洪,此时水利枢纽接近天然行洪状态.本文对此情况未作研究.

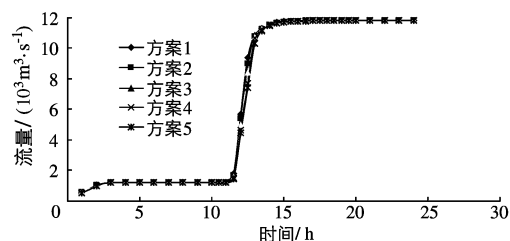


图 5 亭子口影响下苍溪水电站典型日调节泄洪流量过程
Fig. 5 Flood hydrographs of each scheme of typical daily regulation of Cangxi under the influence of Tingzikou

3.1 电站联合发电调节非恒定流对航运的影响

当亭子口上游日均来流量小于电站满发最大引用流量 1 200 m³/s 时,苍溪电站兴建前后亭子口至苍溪电站枢纽间河道,各断面最大的平均流速和水面比降组合对船舶上滩能力影响见图 6;各发电方案下通航水力学指标值的比较见表 1.

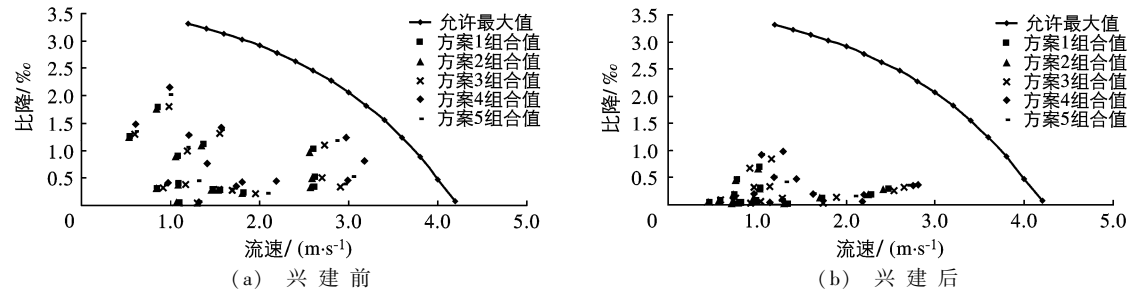


图 6 苍溪电站兴建前后最大平均流速和最大水面比降组合

Fig. 6 The maximum mean velocity and water surface slope before and after construction of Cangxi hydropower station

表 1 苍溪电站兴建前后通航水力指标比较

Tab. 1 Navigable hydraulic indexes before and after construction of Cangxi hydropower station

方 案	苍溪电站兴建前					苍溪电站兴建后				
	最大水面	最大平均	最小平均	最小平均	最大小时	最大水面	最大平均	最小平均	最小平均	最大小时
	比降/ ‰	流速/ (m·s ⁻¹)	水深/ m	水面宽度/ m	水位变幅/ m	比降/ ‰	流速/ (m·s ⁻¹)	水深/ m	水面宽度/ m	水位变幅/ m
方案 1	1.78	2.63	1.8	62.21	0.79	0.69	2.48	3.20	82.26	0.52
方案 2	1.76	2.59	1.8	62.19	0.80	0.66	2.42	3.20	82.12	0.55
方案 3	1.8	2.93	1.8	62.21	0.84	0.84	2.65	3.20	82.28	0.58
方案 4	2.15	3.18	1.22	59.45	1.25	0.98	2.81	2.61	80.34	0.94
方案 5	2.02	3.15	1.81	62.25	1.08	0.95	2.77	3.20	82.41	0.79
断面位置	5#~6#	4#	7#或 1#	6#	1#	3#~4#	4#	1#	4#	1#

3.2 电站联合泄洪调节非恒定流对航运的影响

当上游来流量大于电站最大发电流量而小于 10 年一遇流量 11 800 m³/s 时,在亭子口各方案闸门启闭时间的影响下,苍溪电站兴建前后亭子口至苍溪电站枢纽间河道,各断面最大的平均流速和水面比降组合对船舶上滩能力影响见图 7,亭子口至苍溪段各泄洪方案的通航水力学指标值的对比统计见表 2. 由于此时启门历时均未超过 1 h,因此产生的下泄非恒定流量发生变化的时间较短,为了准确分析和统计非恒定流引起的水力指标变化情况,故采用 1 min 作为统计时段.

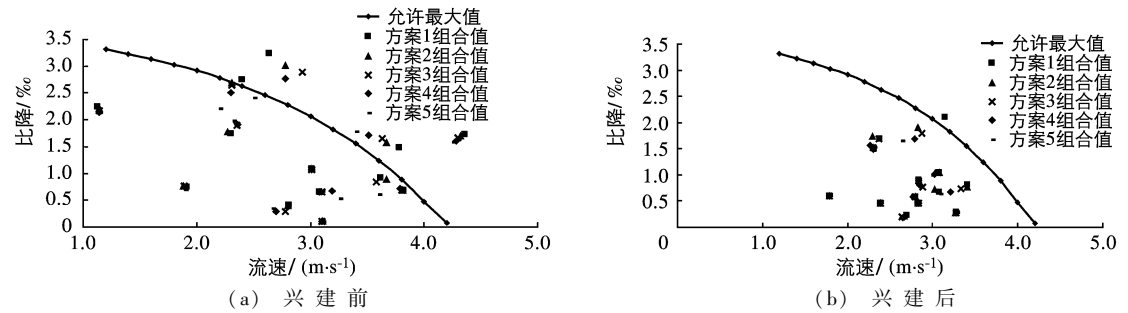


图 7 苍溪电站兴建前后最大平均流速和最大水面比降组合

Fig. 7 The maximum mean velocity and water surface slope before and after construction of Cangxi hydropower station

表 2 苍溪电站兴建前后通航水力指标比较

Tab. 2 Navigable hydraulic indexes before and after construction of Cangxi hydropower station

方 案	闸门启闭 历时/ min	建 站 前					建 站 后				
		最大水面 比降/ ‰	最大平均 流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最小平均 水深/ m	最小平均 水面宽度/ m	最大分钟 水位变幅/ m	最大水面 比降/ ‰	最大平均 流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最小平均 水深/ m	最小平均 水面宽度/ m	最大分钟 水位变幅/ m
方案 1	5	3.24	4.35	3.45	85.86	1.06	2.03	3.43	3.83	94.35	0.98
方案 2	10	3.03	4.32	3.45	85.85	0.64	1.91	3.41	3.83	94.28	0.63
方案 3	15	2.91	4.30	3.45	85.86	0.46	1.80	3.33	3.83	94.21	0.45
方案 4	20	2.79	4.25	3.45	85.83	0.36	1.69	3.21	3.83	94.16	0.36
方案 5	30	2.62	4.22	3.45	85.86	0.27	1.64	3.14	3.83	94.07	0.23
断面位置	-	1#~2#	6#	7#	6#	1#	1#~2#	4#	1#	4#	1#

4 梯级电站联合调节时反调节枢纽对河道航运的影响

通过对梯级电站联合调节时反调节枢纽兴建前后在亭子口发电、泄洪产生的各方案非恒定流影响下的枢纽间河道水力要素的比较分析,主要有以下结论:

(1) 建苍溪反调节枢纽后,在亭子口发电、泄洪各方案非恒定流的影响下,河道沿程的最大平均流速和最大水面比降均出现不同程度的减小;在电站发电调峰时,最大平均流速由建坝前方案 4 的 3.18 m/s 减小至 2.81 m/s ,最大水面比降由方案 4 的 2.15‰ 减小至 0.98‰ ;在电站泄洪调节时,最大平均流速由方案 1 的 4.35 m/s 减小至 3.43 m/s ,最大水面比降由方案 1 的 3.24‰ 减小至 2.03‰ 。由此可见,建坝后河道沿程的最大平均流速和水面比降均出现了一定程度的改善。

(2) 建反调节枢纽后,在亭子口发电、泄洪各方案非恒定流的影响下,靠近船舶上滩能力曲线的组合点数量减少明显,说明亭子口各方案的下泄非恒定流经过苍溪水库的反调节作用后,其流量有所削弱,通航水流变得更平缓,更加有利于船舶通航。建坝前,在亭子口泄洪产生的非恒定流影响下,各方案均有断面不满足 $2 \times 500 \text{ t}$ 级船舶的上滩要求,而建坝后除启门历时为 5 min 的方案 1 存在 1 个断面不满足要求外,其他方案在各断面均能满足要求,因而反调节枢纽兴建后泄洪期亭子口电站的闸门启闭时间不得小于 5 min 。

(3) 建反调节枢纽前后,河道沿程的最小水深值变化较为显著。在亭子口各方案发电产生的非恒定流影响下,建反调节枢纽前沿程最小平均水深均不满足最小通航水深 1.9 m 的要求,建反调节枢纽后各方案在全河段均能满足要求;在亭子口各方案泄洪非恒定流影响下,沿程最小平均水深由 3.45 m 增至 3.83 m 。

(4) 建反调节枢纽前后,在亭子口各方案发电非恒定流影响下,方案 4 和 5 的沿程最大小时水位变幅,分别由 1.25 m 和 1.08 m 相应减小至 0.94 m 和 0.79 m ,建坝后,两方案在全河段均满足水位变幅要求;在亭子口各方案泄洪非恒定流影响下,沿程最大分钟水位变幅由方案 1 的 1.06 m 减至 0.98 m 。

(5) 在亭子口发电各方案非恒定流影响下,方案 1~3 中电站连续启闭单台机组相比方案 4 和 5 中电站突然启闭多台机组最大水面比降、最大平均流速、最大分钟水位变幅都相对更小;在亭子口泄洪各方案非恒定流影响下,各方案中随着闸门启闭时间的增大最大水面比降、最大平均流速、最大分钟水位变幅都随之减小,且方案 1~3 中不满足 $2 \times 500 \text{ t}$ 级船舶的上滩要求的断面明显比方案 4 和 5 少。

5 结 语

(1) 梯级电站联合日调节过程闸门突然启闭及泄洪期间闸门启闭历时越短,下泄流量变化率就越大,下游河道受影响的程度和范围就越大,导致各断面的最大水面比降和分钟水位变幅也最大,更不利于船舶上滩。

(2) 比较梯级电站联合调节时反调节枢纽的兴建前后发电调节及泄洪调节期间水流条件,可知反调节枢纽的兴建对河道通航水流条件有改善作用,更有利于 $2 \times 500 \text{ t}$ 级船舶的安全通航。

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, 28(3): 12-15. (WANG Zhi-li, LU Yong-jun. Numerical simulation of unsteady flow in Xiangjiaba hydropower project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 12-15. (in Chinese))
- [2] 刘新. 汉江石泉枢纽下游非恒定流数学模型研究[J]. 水道港口, 2005, 28(6): 425-429. (LIU Xin. Investigation of downstream unsteady flows of Shiquan hydraulic power station with mathematical model[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2005, 28(6): 425-429. (in Chinese))
- [3] 郑守仁, 孙尔雨, 杨文俊. 三峡电站调峰与通航问题研究[J]. 水电能源科学, 2002, 20(2): 7-12. (ZHENG Shou-ren, SUN Er-yu, YANG Wen-jun. Study on the navigation and power station for hump modulation of Three Gorges and Gezhouba project[J]. International Journal of Hydroelectric Energy, 2002, 20(2): 7-12. (in Chinese))
- [4] 吴晓黎, 李承军, 张勇传, 等. 三峡电站调峰流量对航运的影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(6): 7-9. (WU Xiao-li, LI Cheng-jun, ZHANG Yong-chuan, et al. Effects of peak regulation at Three Gorges Power Station on navigation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(6): 7-9. (in Chinese))
- [5] GB 50139-2004, 内河通航标准[S]. (GB 50139-2004, Navigation standard of inland waterway[S]. (in Chinese))
- [6] 曹民雄, 姜继红, 唐存本, 等. 船舶上滩阻力计算方法对比与分析[J]. 水利水运工程学报, 2005(2): 41-45. (CAO Min-xiong, JIANG Ji-hong, TANG Cun-ben, et al. Comparison and analyses of calculation methods for resistance of ships ascending rapids[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(2): 41-45. (in Chinese))
- [7] 赵克玉. 天然河道一维非恒定流数学模型[J]. 水资源与工程学报, 2004, 15(1): 38-41. (ZHAO Ke-yu. Numerical model of unsteady flow in natural river[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2004, 15(1): 38-41. (in Chinese))
- [8] 张防修, 王艳平, 韩龙喜, 等. 复式河道一维洪水演进数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 6-9. (ZHANG Fang-xiu, WANG Yan-ping, HAN Long-xi, et al. Numerical simulation of one-dimensional flood routing for a compound channel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 6-9. (in Chinese))
- [9] 吴持恭. 水力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003. (WU Chi-gong. Hydraulics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese))
- [10] 金生, 王志力, 耿艳芳. 安康枢纽下游非恒定流数学模型研究[J]. 水道港口, 2005(增刊1): 15-19. (JIN Shen, WANG Zhi-li, GENG Yan-fang. Investigation of downstream unsteady flows of Ankang hydraulic power station with mathematical model[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2005, 26(Suppl): 15-19. (in Chinese))

Effect of unsteady flow caused by joint regulation of cascade hydropower stations on safety navigation between dams

LONG Qi-jian, LI Ke-feng, WANG Qing-liao

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: An unsteady flow model is established for numerical simulation of flow between Tingzikou and Shaxi Dam in the middle reach of the Jialingjiang River. Finite difference method based on Preissmann 4-point implicit scheme is employed in the study. Roughness coefficients are rated by using the measured water surface data of the river reach during flood, and the medium and low stages in the year of 2001. The model with corresponding numerical methods are verified by the field water surface profile data of Silong to Longwan reach of the Yellow River in the year of 2002. The unsteady flow conditions caused by joint regulation of the cascade hydropower stations in the river reach of Tingzikou, Cangxi and Shaxi dam before and after the Cangxi re-regulation dam construction are studied with the model respectively. Comparison of the numerical results shows that the re-regulation dam can greatly improve navigable flow conditions under the joint regulation of the cascade hydropower stations.

Key words: re-regulation hydroproject; safety navigation; flow condition; unsteady flow; the Jialingjiang River