

反调节枢纽对河道通航水流条件的影响分析

陈益农¹, 胡旭跃², 李彪^{2,3}, 徐灿波²

(1. 湖南省航务管理局, 湖南 长沙 410005; 2. 长沙理工大学 水利学院, 湖南 长沙 410076; 3. 长江航道局设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 利用一维非恒定流数学模型, 计算了建反调节枢纽前后、不同电站运行工况下沅水清水塘枢纽至大沅潭枢纽间河段的水力要素, 并对各工况下航道流速、比降、水位变幅等通航水力指标进行了分析与比较。在此基础上, 探讨了建反调节枢纽前后两坝间非恒定的水流运动及其控制影响因素。结果表明, 建反调节枢纽可明显改善通航水流条件; 但如果反调节枢纽为低水头枢纽, 一些情况下仅通过调整反调节枢纽坝前水位, 上游枢纽近坝段每小时水位变幅仍不能满足航运的要求, 必须同时调节上游电站的出流过程以改善枢纽间航道内的通航条件。

关键词: 非恒定流; 日调节方案; 通航水流条件; 反调节枢纽

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)04-0066-05

Influence of re-regulation hydroproject on navigable flow condition

CHEN Yi-nong¹, HU Xu-yue², LI Biao^{2,3}, XU Can-bo²

(1. Hunan Maritime Safety and Administration, Changsha 410005, China; 2. School of Water Conservancy, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 3. Design Institute of Changjiang River Waterway Bureau, Wuhan 430010, China)

Abstract: By use of a one-dimensional numerical model developed according to the Saint Venant equations, the hydraulic elements of Qingshuitang to Dafutan reach under various operational conditions before and after construction of the re-regulation hydroprojects are calculated and then the hydraulic indexes such as the navigable velocity, hydraulic gradient and fluctuation in water level are analyzed and compared. And on the basis of analyses the unsteady flow and its control factors between two dams before and after construction of the re-regulation hydroprojects are investigated. The research results show that the re-regulation hydroprojects can greatly improve navigable flow conditions, but as to a low-head re-regulation hydroproject, in some cases only regulation of water level in front of the dam, fluctuation in water level per hour near the Qingshuitang power station can not satisfy navigation requirements. And it is necessary to regulate the discharge from the upstream hydropower stations for improvement of navigable conditions between the hydroprojects.

Key words: unsteady flow; daily regulation scheme; navigable flow condition; re-regulation hydroproject

收稿日期: 2008-02-04

作者简介: 陈益农(1963-), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 主要从事内河港口航道管理。E-mail: thomas1963@163.com

为了开发利用水能资源,许多水利枢纽建在通航河流上,而电站在调峰过程中会使下游航道水位急涨急落,流速增加,航道水面比降加大,影响船舶的正常航行.通过优化电站调峰调度方案可缓解发电和通航间的矛盾.方案的优化一是减小电站的工作容量;二是在水库下游修建反调节水库,通过反调节作用来改善电站下游河段的水流条件,减小不稳定流对航运的影响^[1-6].本文拟建立一维非恒定流数学模型,分别计算清水塘电站日调节方案对应下游建反调节枢纽和未建反调节枢纽两种情况下,下游航道的非恒定水流条件及水流特征参数,分析上游枢纽及反调节枢纽联合调度时下游航道的非恒定流特性及控制因素,为电站运行方案的进一步优化提供依据.

1 水库调节一维非恒定流数学模型的建立

1.1 非恒定流控制方程

电站的负荷日调节使电站下游形成非恒定流,该水流运动可用圣维南方程组^[7,8]表述:

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

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

式中: Q, Z 分别为待求的流量和水位; x, t 分别为空间和时间坐标; A, B 分别为断面过水面积和河宽; K 为流量模数, $K = 1/nAR^{2/3}$; R 为断面水力半径; n 为糙率; L_q 为旁侧入流.

1.2 控制方程的求解

方程(1)、(2)以流量 Q 、水位 Z 为参数,为拟线性双曲型偏微分方程组,求解此方程组的解法有很多,本文采用有限差分法.先用 Preissmann 四点隐式格式对方程(1)和(2)式进行离散,河道断面从上游向下游编号,连续方程和动量方程可化为:

$$A_{1j}\Delta Q_j + B_{1j}\Delta Z_j + c_{1j}\Delta Q_{j+1} + D_{1j}\Delta Z_{j+1} = E_{1j} \quad (3)$$

$$A_{2j}\Delta Q_j + B_{2j}\Delta Z_j + c_{2j}\Delta Q_{j+1} + D_{2j}\Delta Z_{j+1} = E_{2j} \quad (4)$$

由离散后的线性方程式、上下游边界条件和初始条件就构成封闭的数值方程组,用追赶法即可求得各给定断面对应时间的水位和流量.

1.3 模型的验证

选取湖南省沅水清水塘至大沅潭河段进行模型验证.该河道总长为 52.09 km,根据 2003 年 9 月实测断面资料确定 37 个计算断面,划分为 36 个河段,一般断面间距为 1~2 km,最大间距 2.44 km,最小为 0.095 km.计算中时间步长为 1 min,各段的糙率取值为 0.02~0.08.典型计算断面大江口船厂(cs26)的水位、流量变化过程与实测资料的比较见图 1.

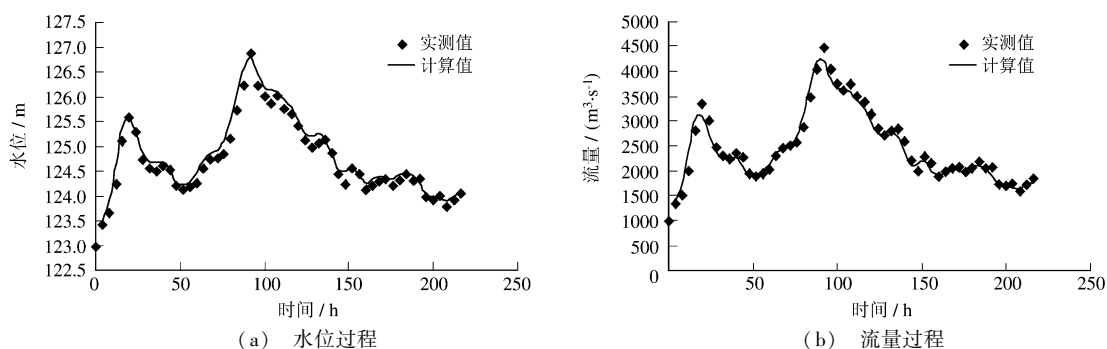


图1 大江口船厂(cs26)的水位及流量过程验证

Fig.1 Discharge and water level process verification in the Dajiangkou Shipyard

从图 1 可见,数值模拟计算得到的水位及流量与实测值基本吻合,水位、流量最大绝对误差不超过 5%,说明该数学模型能够正确反映长河段的非恒定流传播过程,模型及选用的糙率值适用于本河段计算。

2 通航水力指标要求

水库调节非恒定流系重力长波和往复流的复合运动,其运动和演变规律极为复杂,对通航水流条件产生严重影响。因此,从航运的安全性和经济性考虑,需限制局部航道的水面比降、流速及水位的小时变率等,使水库调节过程中枢纽间通航水流条件满足航运要求。

2.1 允许流速、比降限值的确定

航线上允许流速、比降的确定,需从全河段航道条件出发统筹考虑^[9]。若允许流速及比降定得低,则险滩段增多,整治工程量过大;反之,允许值偏大,则船舶航行困难,安全得不到保证。因此,为了满足运输发展的要求,需确定合理的允许流速、比降限值。

内河航运建设标准取决于河流的自然条件和客货运量的需求。沅水流域属于典型的山区性河流,河水陡涨陡落,洪峰流量大;根据长远客货运量的需求,清水塘至大沅潭河段按四级航道开发,可通航 500 t 级船舶。调查沅水河道现有的通航情况,并参照国内部分通航河流的实践经验,拟订河道通航水力指标见表 1^[10]。

表 1 沅水 500 t 级船舶允许流速、比降

Tab. 1 Permissible velocity and gradient of 500 t ship in Yuanjiang River

平均流速(m/s)	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0
局部比降(‰)	2.73	2.79	2.85	2.90	2.95	2.98	3.02	3.05

2.2 每小时水位变幅限值

水位变化对船舶安全航行主要有两方面的影响:①对船舶安全稳定性的影响;②可能导致水深不够,船舶搁浅。从船舶安全性角度考虑,水位变幅越小越好,可通过船模试验或实船试验得到每小时水位变幅限值。由于水位变化引起的水深不够,则需要通过计算确定。参考类似山区河流,分析认为本研究河段内每小时的水位变幅不宜超过 1 m。

3 反调节枢纽对枢纽间河道航运的影响

把一维非恒定流数学模型应用于沅水清水塘至大沅潭研究河段,计算水库调节非恒定流,针对计算结果,分析建有反调节枢纽前后清水塘电站日调节非恒定流在下游航道的水力要素变化及对下游航道的影响范围和程度。

3.1 日调节方案

清水塘电站方案的日运行发电流量过程见图 2。方案 1、4、5 为电站连续启闭单台机组情况;方案 2、3 为电站突然启闭多台机组情况。方案中最大发电流量为 3 285 m³/s,最小发电流量为 480 m³/s。

当下游建有反调节枢纽时,坝前水位恒定不变,分别取 128 m、129 m、130 m 和 131 m 四种方案进行计算。

3.2 计算结果及分析

分别计算下游未建反调节枢纽和已建反调节枢纽时,清水塘 5 种日调节方案、大沅潭 4 种日运行水位下

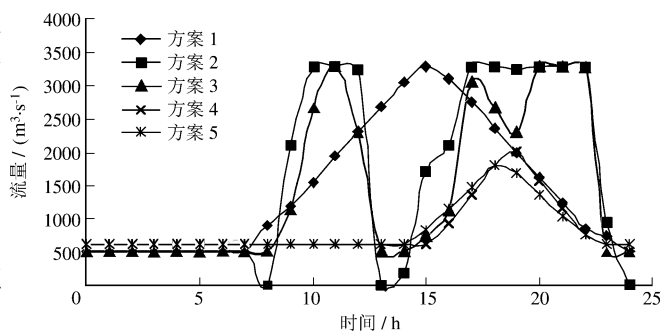


图 2 各方案水电站典型日运行发电流量过程

Fig. 2 Generating flow processes of each scheme of typical daily operation of a hydropower station

两坝间水位、比降、水深和水位变幅情况. 其中,建反调节枢纽前、后大淤潭坝前水位为 129 m 时两坝间各通航水力要素见表 2,调节枢纽前、后大淤潭坝前水位为 129 m 时方案 1 各通航水力要素沿程变化见图 3 和图 4.

表 2 下游建反调节枢纽前后各方案通航水力要素

方 案 名 称		最大水面比降 / ‰	最大平均流速 / (m · s ⁻¹)	最小平均水深 / m	最大水位变率 / (m · h ⁻¹)
方案 1	A	1.6	3.03	0.961	0.965
	B	0.45	1.821	2.405	0.457
	差值	1.15	1.209	1.444	0.508
方案 2	A	1.66	3.20	0.825	3.926
	B	0.51	1.805	2.203	2.211
	差值	1.15	1.395	1.378	1.715
方案 3	A	1.66	3.06	0.961	2.339
	B	0.54	1.843	2.443	1.852
	差值	1.12	1.217	1.482	0.487
方案 4	A	1.59	2.81	0.994	0.926
	B	0.39	1.411	2.394	0.534
	差值	1.2	1.399	1.4	0.392
方案 5	A	1.59	2.80	0.994	0.737
	B	0.40	1.334	2.414	0.402
	差值	1.19	1.466	1.42	0.335

注: 方案 A 代表下游未建反调节枢纽,方案 B 代表下游已建反调节枢纽.

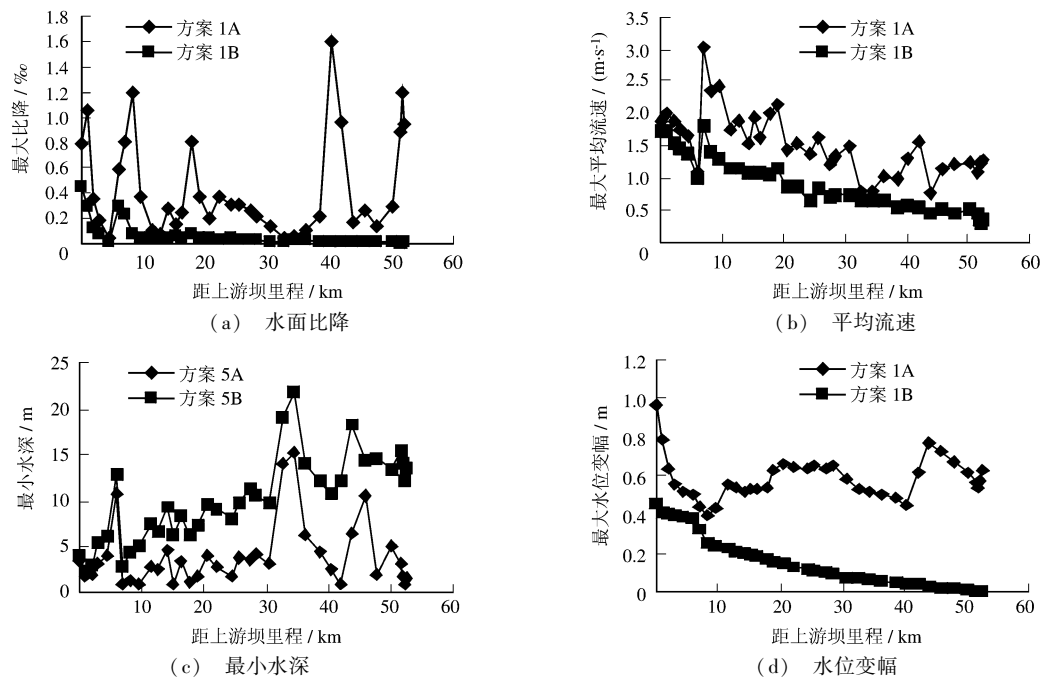


图 3 下游坝前水位 129 m 方案 1 通航水力要素变化

Fig. 3 Variation of navigable hydraulic elements in water level at 129 m in front of the downstream dam of scheme 1

3.2.1 未建反调节枢纽时下游通航水流条件 计算结果表明,未建反调节枢纽时,清水塘电站各日调节方案对应的每小时水位变幅相差较大,其中方案 2 对航运影响程度最大,每小时水位变幅超过 1 m 的河段累计长 47.74 km,占研究河段的 90.88%;其次是方案 3,每小时水位变幅大于 1 m 的河段长达 30.59 km,占研究河段的 58.24%. 方案 1、方案 4、方案 5 在研究河段内每小时水位变幅小于等于 1 m,基本满足 500 t 级船舶通航要求.

5 种方案沿程断面最大水面比降与最大平均流速组合满足 500 t 级船舶上滩要求. 5 种方案下沿程最小平均水深都有小于 1 m 的浅水河段, 部分时段不满足 500 t 级船舶对航运水深的要求, 制约了通航.

3.2.2 建有反调节枢纽时下游通航水流条件 建反调节枢纽后, 两坝间每小时水位变幅大于 1 m 的河段长度大大缩短. 方案 1、方案 4 和方案 5 每小时水位变幅未超过 1 m, 不影响航运. 当下游坝前水位为 129 m, 方案 2 大于 1 m 每小时水位变幅的河段从占研究河段总长的 90.88% 下降至 13.42%; 方案 3 的大于 1 m 每小时水位变幅的河段从占研究河段总长的 58.24% 下降至 8.47%. 同时, 两坝间最小平均水深增大, 沿程最小平均水深均大于 2 m, 各方案下通航水位衔接良好.

建反调节枢纽后, 最大局部水面比降和平均流速得到了明显改善. 各方案沿程断面最大水面比降和最大平均流速组合均满足 500 t 级船舶自航上滩的要求.

3.2.3 下游 4 种运行水位下通航水流条件 清水塘日运行过程相同, 下游坝前水位越高时, 两坝间水位越平坦, 越有利于通航, 但对通航水流条件的改善有限. 以方案 2 为例, 下游坝前水位由 128 m 升至 131 m 时, 最大水位变幅仅降低 0.751 m/h (见图 4). 同样, 最大平均流速和水面比降变化也不大.

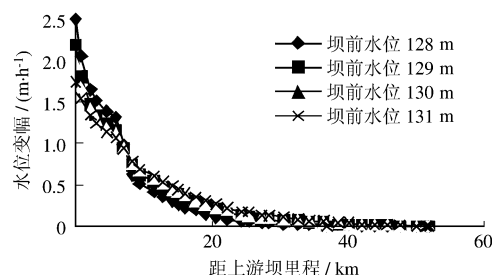


图 4 方案 2 沿程水位变幅

Fig. 4 Fluctuation in water level along the course

4 结 语

(1) 分析清水塘至大淤潭之间河段的非恒定流模拟结果可知, 坝下断面水位变化与泄流过程密切相关, 泄流变幅越大, 水位变幅越大, 距大坝越近, 水位变化受泄流变化的影响也越明显, 而流速、水面比降、水深除与泄流过程有关外, 受地形因素、下游电站坝前水位等影响也很大;

(2) 比较下游电站不同运行方式可见, 建设反调节枢纽可明显改善通航水流条件, 但如果反调节枢纽为水库库容有限的低水头枢纽, 一些情况下仅通过调整反调节枢纽坝前水位, 上游枢纽近坝段每小时水位变幅仍不能满足航运的要求, 必须同时对上游电站的出流过程进行调节来改善枢纽间航道内的通航条件;

(3) 类似沅水这种多目标梯级开发水利工程, 运行时既要保证电站的发电效益, 又要减小对航运的影响; 工程规划设计阶段应研究典型运行方案下坝间的非恒定流特性, 为梯级枢纽的发电航运调度提供依据.

参 考 文 献:

- [1] 傅 湘, 纪昌明. 三峡电站日调节非恒定流对航运的影响分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 23(6): 7-10.
- [2] 孙尔雨, 朱庆福. 三峡电站调峰对两坝间通航的影响和改善措施[J]. 人民长江, 1999, 30(12): 8-12.
- [3] 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.
- [4] 郑守仁, 孙尔雨. 三峡电站调峰与通航问题研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2002, 20(2): 8-11.
- [5] 戈龙仔, 刘红华, 孟祥伟. 三峡汛期日调节对通航影响及改善措施[J]. 武汉水利电力大学学报, 2004, 25(4): 204-208.
- [6] 闵宇翔. 三峡电站日调节对航运的影响[J]. 水运工程, 2002, 340(5): 28-31.
- [7] 周雪漪. 计算水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 9.
- [8] 成都科技大学水力学教研室编. 水力学下册(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 189-198.
- [9] 长江航道局组织编写. 航道工程手册(第一版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 88-91.
- [10] 湖南省航务管理局, 长沙理工大学. 沅水航运技术研究总报告[R]. 长沙: 湖南省航务管理局, 2006.