

小南海水电站日调节非恒定流对通航的影响

尚毅梓¹, 郭延祥², 李晓飞³, 冶运涛¹, 赵勇¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 3. 中国建筑科学研究院建研科技股份有限公司, 北京 100013)

摘要:为分析小南海水电站日调节对下游航运的影响,使用 Saint-Venant 偏微分方程组和 Preissmann 隐格式差分方法,建立了一维非恒定流水动力学模型,并以实测水文数据对模型进行了校核和验证。采用该模型模拟了小南海水电站日调节工况时下游水流条件,并与拟定的通航条件进行了对比分析,结果表明,按照电网载荷拟定的日调节工况运行会造成坝下游水流条件恶化,从而降低枯水期库区通航能力;有必要对电站日调节运行方式进行调整,或者对下游河段进行整治。

关键词:日调节水电站;非恒定流;通航能力;水动力学;小南海水电站

中图分类号:TV131.2;TV737 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)04-0065-05

Influence of daily regulation unsteady flow on navigation for Xiaonanhai Hydropower Station//SHANG Yizi¹, GUO Yanxiang², LI Xiaofei³, YE Yuntao¹, ZHAO Yong¹ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Water Transport Planning and Design Co., Ltd., Beijing 100007, China; 3. CABR Technology Co., Ltd., China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to analyze the shipping influence caused by Xiaonanhai Hydropower Station, in the article, the Saint-Venant partial differential equations are used together with Preissmann implicit difference for building a one-dimensional unsteady flow hydrodynamics model and the model was verified with the observed hydrological data. By simulating hydrodynamics for the daily regulation, the capacity of navigation in the lower reach are estimated. The simulating results show that the situation might deteriorate the flow condition in downstream in the case of daily regulation whose operating rules were formulating from the side of load, thereby impair the navigation during the low-flow phase. It is necessary to adjust the operating rules of power station or implement river regulation works for the lower reach after dam.

Key words: hydropower station of daily regulation; unsteady flow; navigation capability; hydrodynamics; Xiaonanhai Hydropower Station

天然河流的流量随季节变化大,在日尺度上变化较小。建立日调节电站后,电站会在一昼夜内对河道径流过程进行重新分配。该调节过程会引起流量和水位以天为周期的循环变化,波动通过水流质点的位移传播,造成下游河道复杂的非恒定流过程^[1]。下游河道陡涨陡落,水面比降增大,都会对船舶的航行安全产生不利的影 响^[2-3]。为兼顾电站发电和下游航运,需要进行电站日调节运行与通航关系研究。庾维德等^[4]建立了葛洲坝水电站模型,通过实验分析了日调节对葛洲坝电站下游水流的影响;万英等^[5]分析了彭水水电站日调节影响,认为彭水水电站能够承担重庆电网的调峰功能;马方凯等^[6]建立了三峡上游某衔接梯级日调节的一维水

动力学模型,划定了通航影响范围。这些研究或针对重要电站进行全方位的物理模型实验分析,或对影响航运的某方面特点进行详尽的数值计算和模拟。基于数学模型来制定水电站日调节规则或评估水流条件改变后对下游通航的影响,是较为经济和方便的研究方法,但在没有模型实验辅助的情况下,如何充分利用已有观测数据得出较为可靠的评估结论,相关研究仍不够充分。

小南海水电站处于长江干线、三峡水库变动回水区的末端,为国务院批准的《长江流域综合利用规划》规划的梯级水电站,是重庆市主城区上游的重要水利枢纽^[7]。重庆市主城区位于电站下游 50 km 河段,沿程码头密布,是重庆市重要的航运通

基金项目:水利部黄河泥沙重点实验室开放基金(2012003);国家自然科学基金(51109112)

作者简介:尚毅梓(1983—),男,河南清丰人,高级工程师,博士,主要从事水力学及水信息学研究。E-mail:shangyz@iwahr.com

通信作者:郭延祥(1974—),男,河北武安人,高级工程师,博士,主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail:gyx2001@sina.com

道。研究小南海水库调度发电与航道通航标准关系,对于向重庆提供清洁、可靠的电能,提高重庆境内长江干流航道标准,进而带动重庆地区经济可持续发展,具有十分重要的意义。本文利用实测历史数据,建立和校核了小南海水电站水动力学模型,并通过控制断面分析,获取了影响通航的特征参数,提出了制定航道评价指标和电站日调节规则的建议。

1 水动力学模型

1.1 数值建模

本文基于描述明渠非恒定流的 Saint-Venant 偏微分方程组,建立一维非恒定流水动力模型。Saint-Venant 方程组包含连续方程和动量方程^[8],其形式如下:

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

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: Z 、 Q 、 A 分别为 t 时刻的水位、流量和断面过水面积; q 为旁侧入流或出流流量; B 为水面宽度; K 为流量模数; g 为重力加速度。

采用 Preissmann 四点隐式差分格式对 Saint-Venant 方程组进行离散,以保证在较高计算精度的基础上提高计算过程的可靠性。数值计算采用传统的追赶法^[9]。用 j 、 n 分别表示计算节点编码和时间步长数,给出对 Saint-Venant 方程组的因变量和导数离散形式表达式:

$$f(x, t) = \frac{\theta}{2}(f_{j+1}^{n+1} + f_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2}(f_{j+1}^n + f_j^n) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_j^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{f_{j+1}^n - f_j^n}{\Delta x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_{j+1}^n + f_j^{n+1} - f_j^n}{\Delta t} \quad (5)$$

式中 θ 为时间加权系数 ($0 \leq \theta \leq 1$)。线性分析结果表明, $\theta \geq 0.5$ 时离散格式无条件稳定^[9]。选取时间步长为 120 s, $\theta = 0.6$ 。采用 Fortran 语言编写模型计算程序^[8],将恒定流计算结果作为水动力学模型的初始条件输入,上游边界条件设定为流量,下游边界根据需要可设定为水位或水位-流量关系。同时,为了精确模拟的需要,根据水位不同将断面糙率分为 3 个等级,分别设置不同的糙率以对应枯水、中水、洪水的水位-流量关系。

1.2 模型验证

为验证建模过程的正确性和获取模型参数以便准确模拟电站实际运行工况,采用电站下游 50 km 河道实测水文数据对建立的一维非恒流水动力学模

型进行验证。所选取的河道为长江干流从小南海坝址到寸滩水文站段,嘉陵江在中段汇入。地形数据取自 2007 年航道实测 1:5000 地形图。模型验证数据为 2007 年实测枯水、中水、洪水水面线数据,2010 年大中和丰收坝专用水尺实测的水位过程数据以及 2010 年羊角滩航行水尺实测的水文过程数据。

小南海坝址到寸滩水文站段每隔 500 m 设置一个断面,沿程共取 98 个断面,断面编号为 1~98。嘉陵江在断面 85(里程 42948 m)处汇入。大中、丰收坝分别对应断面 1 和断面 8。羊角滩处于断面 83 和断面 84 之间,通过断面线性插值以获取其水位、流量值。

a. 模型计算水面线校验。计算时,模型上边界条件采用流量关系,下边界采用寸滩站的水位-流量关系。分别针对枯水、中水和洪水,对模型水面线计算结果进行校验。长江干流在枯水、中水和洪水状态下流量分别为 2947 m³/s、10960 m³/s 和 27300 m³/s,嘉陵江在枯水、中水和洪水状态下流量分别为 633 m³/s、1440 m³/s 和 3600 m³/s。各流量下验证结果如图 1 所示,计算水面线与实测数据吻合良好。

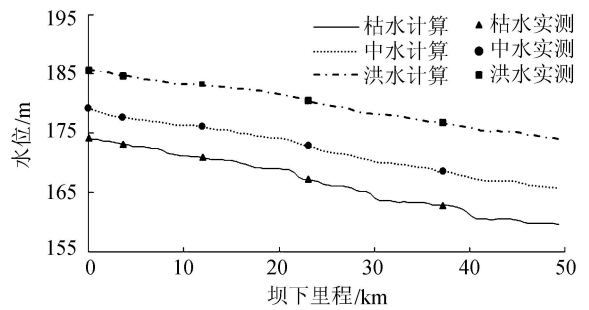


图 1 模型水面线计算校验结果

b. 模型计算水位变化过程校验。用模型计算了 2010 年水位变化过程,与大中、丰收坝和羊角滩的实测数据进行比较,结果如图 2~4 所示,模型计算结果与实测数据吻合较好。

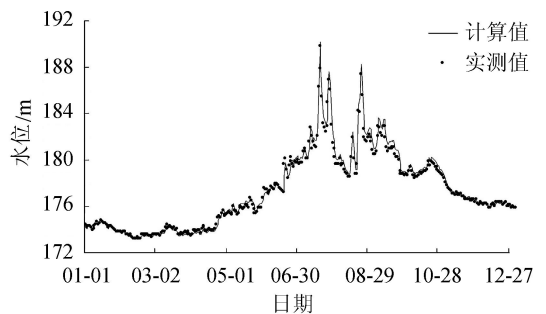


图 2 大中水位变化过程校验结果

模型计算结果与实测数据吻合良好,表明本文建立的一维非恒定流水动力学模型能够较为精确地描述所选取河段的非恒定流过程,可用于分析小南海水电站的日调节与通航关系。

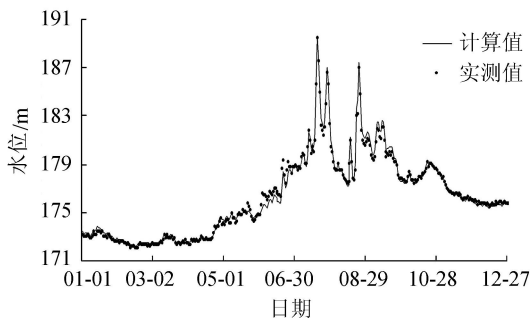


图3 丰收坝水位变化过程校验结果

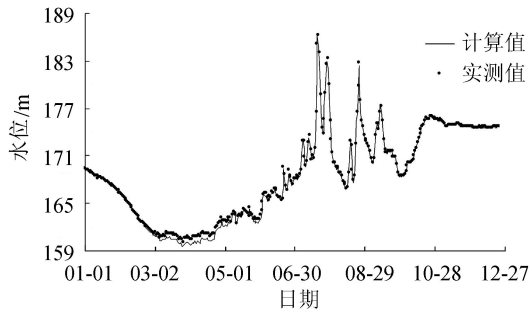


图4 羊角滩水位变化过程校验结果

2 电站日调节影响计算分析

2.1 设定工况

a. 适航水流条件。对于给定航道,影响船舶运行安全的因素主要取决于水流流速和水面比降,尤其是船舶吃水深度范围内的流速。采用表面最大流速和水面比降指标能够较为科学地评价电站日调节下的航道水流适航程度^[3-4]。参照三峡库区的通航要求^[10],并根据小南海水电站所在河段航道等级^[11],制定出河道比降为0.05%、0.10%、0.20%和0.30%时的河段船队通航水流条件要求为表面最大流速分别为4.25 m/s、4.00 m/s、3.50 m/s和3.00 m/s。

b. 电站日调节运行。小南海水电站在丰水期(6月下旬至8月上旬)承担电网的基荷,机组全部投入运行,对径流过程无调节;在枯水期(年内其他时间)电站承担电网的调峰任务,根据电网负荷变化调度投入运行的机组。由于机组发电与不发电时的下泄流量变化很大,在枯水期河道下游将产生复杂非恒定流过程。水电站日调节计划制定需要综合考虑电网负荷、河道径流等关键要素。选取1月和6月中旬为日调节典型月,综合考虑枯水年月流量的多年平均值和区域电网的实际调峰需求,制定出两种发电计划,给出对应工况下的电站日调节下泄流量过程曲线如图5所示。

2.2 水流条件

2.2.1 恒定流条件下的流速与流量关系

首先分析恒定流情况。该河道具有3种典型的断面形态。选取断面45、72、80作为分析的典型断

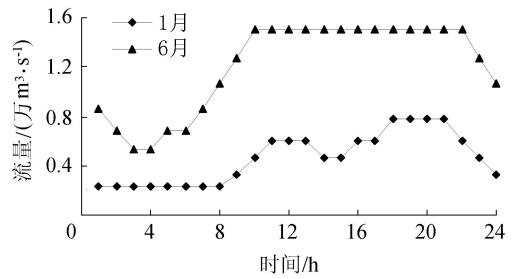


图5 小南海水电站典型月日调节下泄流量过程

面,绘制出断面表面最大流速和流量关系曲线如图6所示。可以看出,随着流量增加和水位抬升,这些断面的最大流速呈现不同的变化趋势。如要通过校核关键断面的水力学要素以达到河道通航能力评估的目的,还须获取全河段最大表面流速及该流速所处的断面位置信息。

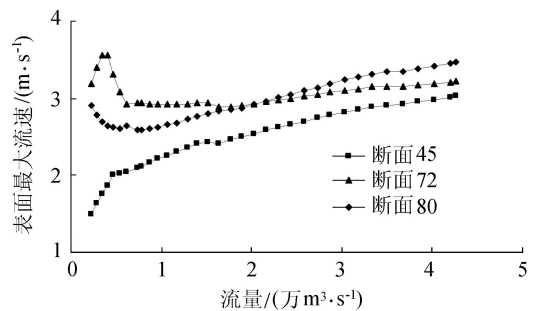


图6 典型断面表面最大流速与流量关系

由于一维非恒定流模型仅能给出断面平均流速 \bar{v}_m ,为获取航道的表面最大流速 v_{max} 和断面平均流速 \bar{v}_m 关系,对上述3个典型断面的表面最大流速和断面平均流速进行了测算,将实测数据和计算数据进行拟合得到了近似关系式 $v_{max} = (1.2 \sim 1.4)\bar{v}_m$,并在航道其他控制断面进行了测速验证,结果表明该拟合公式满足工程应用要求。应用该拟合公式计算出河段最大表面流速,绘制出与河段最大表面流速对应的流量关系曲线如图7所示。

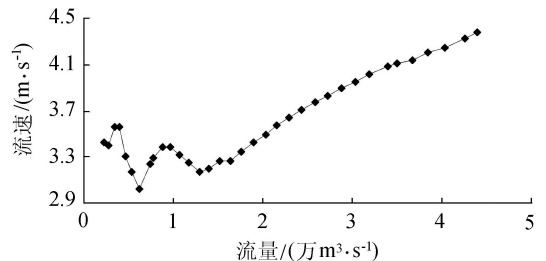


图7 全河段最大表面流速与流量关系

由图7可见,随着河道水流流量的增加,河道表面最大流速呈现不同的变化趋势,整个河段最大表面流速出现多个极值。在流量 $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4010 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $9680 \text{ m}^3/\text{s}$ 时流速取得极大值,但随着流量的进一步增大河段表面最大流速和流量逐步呈现正相关关系。这不难理解,因为在流量较小时中泓流速更容

易受到断面影响。虽然出现的流速极值所对应的流量均较小,但正因为枯水期流量小,河道水位低,水面比降大,所以枯水期航运条件最差。

2.2.2 非恒定流产生的附加流速与附加比降

电站下泄流量变化会导致坝下产生复杂的非恒定流。下泄流量增加,河道出现涨水,近电站的河段先涨,使水面坡度变陡,水力比降增大,产生附加流速,此时附加比降为正,流速和流量都比恒定流态时大;下泄流量减少时则相反,附加比降为负,流量比恒定流时要小^[12]。附加流速和附加比降的存在,导致非恒定流计算、分析较恒定流更为复杂。

以电站日调节工况1月9—10时流量下泄过程(涨水)为例,计算出日调节表面最大流速和水面比降,并与对应流量下的恒定流工况相比较,以获取其附加流速与附加比降,结果如图8和图9所示。

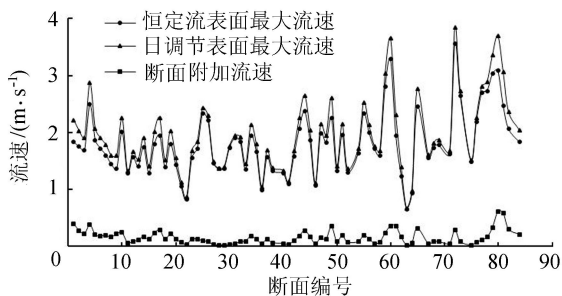


图8 非恒定流产生的断面附加流速

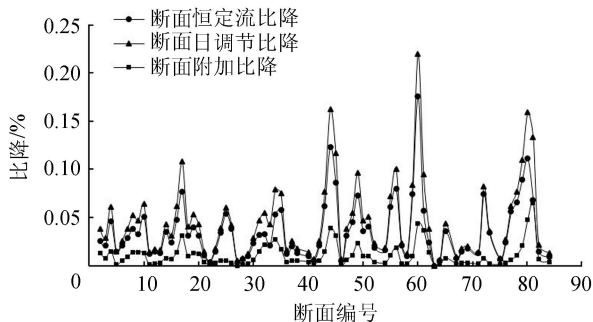


图9 非恒定流产生的断面附加比降

由图8和图9可以看出,在大坝下泄流量增加到 $4010\text{ m}^3/\text{s}$ 的过程中,出现最大附加流速 0.61 m/s ,最大附加比降 0.065% ,均出现在断面80和81处,即猪儿碛险滩。受下泄流量增加的影响,各断面的流量和比降都较恒定流大,而且流速和比降大的断面,附加流速和附加比降也较大。恒定流下流态较

差的断面,其非恒定流态也较差,这些断面更容易受电站日调节的影响,更容易发生碍航现象。

2.3 日调节对航运的影响

6月的航道较1月而言,流量较大,且流速均匀,断面比降均较小。计算结果显示,电站在执行以6月为典型月的日发电计划时,全河段最大流速为 3.66 m/s ,最大比降为 0.103% ,在适航范围内。以下重点分析电站执行1月日调节过程时对通航可能产生的影响。针对恒定流流态差的断面,给出其日调节水力特征值,如表1所示。

模型计算结果显示,最大流速、最大比降出现的断面位置与恒定流一致,猪儿碛、九龙滩等恒定流水流条件差的几个断面非恒定流时仍然最差。全河段表面最大流速为 3.85 m/s ,出现在13:00时铜元局(断面72),断面瞬时流量为 $3946\text{ m}^3/\text{s}$,比降为 0.082% ;全河段最大比降为 0.224% ,出现在12:40时九龙滩(断面60),断面瞬时流量为 $4306\text{ m}^3/\text{s}$,表面最大流速为 3.76 m/s ,都超过了通航水流标准。不过铜元局和九龙滩这两个水流条件超标的断面小时水位变幅均未超标,而在小时水位变幅超过控制条件的45号胡家滩断面,水流条件未超标。这说明按照通航标准制定水位变幅条件限制,并不能完全适应实际水流条件,需要进一步补充其他限制指标。在模型计算过程中,还发现全河段小时水位变幅超过 1 m/h 的断面有20个,但超限并不大,全河段最大小时水位变幅为 1.38 m/h ,出现在胡家滩河段,对应表面最大流速 2.19 m/s ,比降 0.098% 。因此,在通航条件校核时应选取铜元局、九龙滩、猪儿碛、胡家滩为主要控制断面。

由上述分析结果得出结论:按照电网负荷拟定的日调节工况,在枯水期会使坝下游水流条件恶化,对航运造成一定的影响。因此有必要采取措施,对日调节制定细则进行修正,或者对九龙滩和猪儿碛河段进行整治。

3 结论

a. 利用实测水文数据建立了一维水动力学模型,通过河道典型断面选取,系统分析了断面恒定流和非恒定流工况的通航条件,表明非恒定流工况下

表1 小南海水电站1月日调节特征值

河段名	断面编号	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	比降/%	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	附加流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	附加 比降/%	小时水位变幅/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	断面水力特征
铜元局	72	3.85	0.082	3946			0.73	最大流速,超标
九龙滩	60	3.76	0.224	4306			0.81	最大比降,超标
猪儿碛	80	3.70	0.159	4010	0.61		0.58	附加流速最大,超标
猪儿碛	81	3.06	0.133	4010		0.065	0.60	附加比降最大
胡家滩	45	2.19	0.098	4936			1.38	最大水位变幅

通航条件差的河道断面恒定流工况下通常也会差,因此可以通过恒定流计算结果选取控制断面,然后再利用非恒定计算模型进行工况校核。

b. 水位变幅较大的断面,可能流速和比降并不大,从而对通航影响较小;而水流条件较差的断面,不适合通航,但水位变幅并不一定就大,因此在使用水位变幅作为计算模型下游边界的控制变量时,需要慎重选择控制断面。也可以根据小南海水电站特点,从下泄流量过程和河道断面形态入手,补充其他通航限制条件。

c. 恒定流时水流条件较差的断面非恒定流时仍然较差,且影响也较大,这加剧了险滩段的通航难度,因此需要重视险滩治理工作。

d. 小南海水电站1月日调节流量过程超出了适航水流条件。日调节的非恒定流影响主要集中在枯水期,且集中在涨水阶段的 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量之间,建议放缓从 $3\,350 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $4\,610 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量增加速率。

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,2000,33(6):6-10. (FU Xiang, JI Changming. Influence analysis of Three Gorges Power Station's daily regulating unsteady flow on navigation [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2000, 33(6): 6-10. (in Chinese))
- [2] 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 Shouren, SUN Eryu, YANG Wenjun. Study on the navigation and power station for hump modulation of Three Gorges and Gezhouba Project [J]. Water Resources and Power, 2002, 20(2): 7-12. (in Chinese))
- [3] 杨文俊,孙尔雨,饶冠生,等. 三峡水利枢纽工程非恒定流通航影响研究II:三峡、葛洲坝两枢纽区间[J]. 水力发电学报,2006,25(1):50-55. (YANG Wenjun, SUN Eryu, RAO Guansheng, et al. Research on the influence of unsteady flow produced by operation of TGP on navigation II: Reach between TGP and Gezhouba Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 50-55. (in Chinese))
- [4] 庾维德,赵小霞. 葛洲坝水电站近期日调节对下游航运影响的初步研究[J]. 水利水电技术,1988(10):7-13. (YU Weide, ZHAO Xiaoxia. Preliminary study of influence of daily regulating unsteady flow on navigation for Gezhouba Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1988(10): 7-13. (in Chinese))

- [5] 万英,邹幼汉,管益平. 彭水水电站调峰对下游航运影响研究[J]. 人民长江,1998,29(7):20-22. (WAN Ying, ZOU Youhan, GUAN Yiping. Influence analysis of hump modulation of Pengshui Hydropower Station on navigation [J]. Yangtze River, 1998, 29(7): 20-22. (in Chinese))
- [6] 马方凯,盛佳,饶光辉,等. 三峡上游衔接梯级日调节非恒定流对航运影响范围研究[J]. 中国水运,2013,13(12):20-21. (MA Fangkai, SHENG Jia, RAO Guanghui, et al. Study on unsteady flow for transport of hydropower station in upstream of Three Gorges Dam [J]. China Water Transport, 2013, 13(12): 20-21. (in Chinese))
- [7] 陈甜,董增川,贾本有,等. 考虑上游梯级水库群调度的小南海水电站坝址设计洪水分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2014,42(6):476-480. (CHEN Tian, DONG Zengchuan, JIA Benyou, et al. Analysis of design flood of dam site of Xiaonanhai Hydropower Station considering flood control operation of upstream cascade reservoir group [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(6): 476-480. (in Chinese))
- [8] SHANG Yizi, LIU Ronghua, LI Tiejian, et al. Transient flow control for an artificial open channel based on finite difference method [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4): 781-792.
- [9] 方神光,尚毅梓,李玉荣,等. 大型输水渠道退水口的退水能力研究[J]. 水利水电科技进展,2008,28(1):58-61. (FANG Shengguang, SHANG Yizi, LI Yurong, et al. Recession capacity of discharge outlet of large water transfer channels [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(1): 58-61. (in Chinese))
- [10] 重庆长江小南海水电站可行性研究报告[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究院有限公司,2012.
- [11] GB 50139—2004 内河通航标准[S]
- [12] 尚毅梓,吴保生,崔兴华,等. 长距离输水渠道节制闸调节系统控制特性研究[J]. 水力发电学报,2009,28(1):95-101. (SHANG Yizi, WU Baosheng, CUI Xinghua, et al. Study on control characteristics of sluice regulation systems for long distance canal [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 95-101. (in Chinese))

(收稿日期:2014-05-29 编辑:熊水斌)

