

# 基于航电一体化的梯级枢纽运行模式优化\*

张 铭, 胡亚安, 范子武, 杨 宇

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,  
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 提出一种基于航电一体化的梯级枢纽运行模式优化研究方法。对整个航道进行断面划分, 并在各枢纽处设置虚化断面, 对航道天然断面和枢纽所在的虚化断面分别采用求解圣维南方程和考虑枢纽调度的水量平衡计算方法, 确定断面水位和流量过程, 实现全航道断面水力要素的同步计算, 满足梯级通航枢纽联合调度对航道水位和口门区流速的高计算精度要求; 并在此基础上构建梯级通航枢纽联合优化调度模型, 渠化航道, 改善口门区和引航道水流条件, 同时优化发电策略, 实现梯级通航和发电综合利用效益最大化。衢江梯级通航枢纽结果表明, 构建模型具有较高的模拟精度, 有效提高了梯级通航保证率和总发电量。

**关键词:** 梯级通航枢纽; 联合优化调度; 水力学计算; 同步计算; 通航保证率

中图分类号: U 621

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0113-08

## Optimization of operation mode of cascade hub based on integration of navigation-power junction

ZHANG Ming, HU Ya-an, FAN Zi-wu, YANG Yu

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** This paper presents a optimization scheduling method on cascade navigation hubs based on waterway hydrodynamic calculation. By dividing the whole channel into some sections and setting virtual sections at the junctions positions, the water level and flow process hydraulic factors of the virtual channel crosses and the natural crosses will be determined by solving Saint Venant equations and water balance calculation considering hub scheduling. Thus, hydraulic factors of all sections of full channel can be computed synchronously and meet the high accuracy requirements of the flow channel level and entrance during the navigation hubs cascade dispatching periods. Joint optimization scheduling model of the navigation hub cascade is built, which can canalize the waterway and improve the entrance area and the navigation flow conditions and optimize the generation strategy, and thus realize the cascade of navigation and power generation comprehensive utilization benefit maximization. Example of Qujiang traffic hub cascade results show that the constructed model is more accuracy and improve the cascade navigable guarantee rate and total generating capacity.

**Keywords:** cascade navigation hubs; joint optimization scheduling; hydraulic calculation; synchronization calculation; navigable guarantee rate

梯级通航枢纽联合调度可以渠化航道、淹没  
险滩, 提高枯水期枢纽泄流量, 改善枢纽上下游

口门区和引航道通航水流条件, 提高通航保证率。  
然而, 基于航运效益最大化的梯级通航枢纽联合

收稿日期: 2016-09-16

\*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51209138, 51139001); 湖北省交通厅 2015 年度科技项目 (2014-721-6-1); 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201501007)

作者简介: 张铭 (1978—), 男, 博士, 高工, 从事水文分析、水动力计算、枢纽优化调控等。

优化调度，尚未得到管理和科研人员的足够重视。究其原因，一方面是在于交通部门更多关注船闸或升船机等通航建筑物的通过能力和对船舶（船队）的调度计划<sup>[1-5]</sup>，尚未形成以整个梯级枢纽为对象研究通航效益的认识和理念，另一方面则是由梯级通航枢纽联合优化调度自身的特点决定的。

与梯级枢纽联合发电或联合防洪调度不同<sup>[6-10]</sup>，枢纽通航对口门区和航道流场水流特性的规范性要求决定了梯级通航枢纽联合优化调度的极端复杂性。通航枢纽泄流过程不仅要满足航道设计通航流量与设计通航水位的要求限制，而且对在上下游口门区、引航道及连接段形成的流场及流速特性要求极为苛刻，流场不能有明显漩涡，横向流速不能超过内河航道通航设计标准，以保障船舶通航安全。

基于严密水动力模型逐时段同步计算包括各级枢纽入库断面在内的全航道断面的流量过程和水位过程，成为解决梯级枢纽联合调度水量平衡计算的必然要求和内在关键。然而基于圣维南方程的水力学计算问题历来又是水动力计算的难点<sup>[11-12]</sup>，尤其是针对地形复杂的山区型航道而言，计算难度更甚。同时，梯级通航枢纽阻断了航道水流条件的连续性，破坏了所在断面的天然水力特性，无法直接基于圣维南方程进行全航道水力模型的统一求解。通过深入研究，笔者认为：枢纽调度提供了枢纽所在断面确定的水位与流量值，此过程恰可作为该断面的水动力要素过程，从而实现全航道断面水动力要素的同步求解。

### 1 航道水动力同步计算方法

全航道断面同步水力要素计算是实现梯级通航枢纽联合优化调度的前提与基础，其实现方法与过程如下：

将整体航道根据地形状况和枢纽建筑物分布情况，划分为多个计算断面  $CS_1, CS_2, \dots, CS_N$ ；断面间距不超过 500 m，梯级自上至下各级枢纽所在河段分别设置为虚化断面  $CS_i, CS_j, CS_k, CS_m$ （以 4 座梯级枢纽为例），各梯级枢纽上游相邻的

第一个断面  $CS_{i-1}, CS_{j-1}, CS_{k-1}, CS_{m-1}$  的位置，选择为所述枢纽坝前水位向上游水平延至的最远处，各枢纽下游第一个断面  $CS_{i+1}, CS_{j+1}, CS_{k+1}, CS_{m+1}$  设置在紧邻该枢纽处。

给出航道最上游断面  $CS_1$  的流量过程和最下游断面  $CS_N$  的水位过程，各天然河道断面  $CS_1, CS_2, \dots, CS_N$ （除虚化断面  $CS_i, CS_j, CS_k, CS_m$ ）的初始流量和水位值，各级枢纽所在处的所述虚化断面  $CS_i, CS_j, CS_k, CS_m$  的初始水位和流量根据所述枢纽运行实际水位和泄流量状况分析确定。

采用特征线法求解圣维南方程确定计算时段末天然航道断面的水位和流量水力要素，对枢纽所在处所述虚拟断面时段末水力要素则根据枢纽调度由水量平衡计算确定，计算方法为：

1) 对所述最上游断面  $CS_1$ ，根据上边界流量过程，通过时间插值获得所述最上游断面  $CS_1$  的时段末流量，并利用特征法求得所述最上游断面  $CS_1$  第一时段末水位。

2) 对紧邻所述最上游断面  $CS_1$  的计算断面  $CS_2$  至所述第一级枢纽前的第一个计算断面  $CS_{i-1}$ ，根据所述第一级枢纽及其上游断面  $CS_{i-1}$  的初始水位和流量值，求解圣维南方程，即可依次获得紧邻所述最上游断面的计算断面  $CS_2$  至所述第一级枢纽前的第一个计算断面  $CS_{i-1}$  第一时段末的水位和流量值。

3) 第一级枢纽虚化断面  $CS_i$  水力要素计算过程为：①在梯级枢纽常规联合调度中：根据所述第一级枢纽前的第一个计算断面  $CS_{i-1}$  时段初流量和所述第一级枢纽的虚化断面  $CS_i$  时段初水位，根据枢纽调度规则，确定第一级枢纽下泄流量，由于计算时段不超过 1.0 s，将该流量值作为所述第一级枢纽的虚化断面  $CS_i$  时段末流量；由所述第一级枢纽前第一个计算断面  $CS_{i+1}$  时段初流量值及计算确定的时段末流量值，以及所述第一级枢纽坝时段初坝前水位值，根据枢纽水位-库容关系曲线进行水量平衡计算，即可确定所述第一级枢纽时段末水位值，亦即所述第一级枢纽虚

化断面 CS<sub>i</sub> 时段末的水位值。由此, 确定了第一级枢纽时段末水位和流量水力要素值; ②在梯级枢纽联合优化调度中: 枢纽时段末水位为优化过程某一设定水位, 枢纽下泄流量则由入库断面流量并结合时段初坝前水位根据水量平衡计算确定, 该水位和流量值将作为第一级虚化断面 CS<sub>i</sub> 时段末的水力要素值。

4) 将所述第一级枢纽下泄流量值作为所述与第一级枢纽紧邻的下游第一个天然计算断面 CS<sub>i+1</sub> 时段末流量, 然后类比所述航道最上游断面 CS<sub>1</sub>, 采用特征法求得该天然断面时段末水位值。

5) 重复步骤 1~4 即可确定全航道包括各枢纽所在各虚化断面 (CS<sub>i</sub>, CS<sub>j</sub>, CS<sub>k</sub>, CS<sub>m</sub>) 在内的所有计算断面 (CS<sub>1</sub>, CS<sub>2</sub>, …, CS<sub>N</sub>) 的时段末的水位和流量值, 实现全航道所有断面流量和水位水力要素基于同时段的同步计算, 解决枢纽阻隔对航道断面水力要素统一计算带来的难题, 从而为基于航道水动力计算的梯级通航枢纽联合优化调度奠定坚实的基础。

## 2 模型构建

梯级通航枢纽联合, 对航运来说, 是通航保证率 (模拟期适航是段数) 最大; 对发电效益而言, 则是枢纽发电量最大。梯级通航枢纽联合优化调度目标为: 在满足适航时段数最大的前提下, 进一步优化各级枢纽泄流过程, 同时追求发电量最大化。

### 2.1 目标函数

适航时间最长:

$$T^* = \max \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{i=1}^N \Delta t \quad (1)$$

$$(\underline{z}_i \leq z_i \leq \bar{z}_i, \underline{q}_i \leq q_i \leq \bar{q}_i)$$

发电效益最大:

$$E^* = \max \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{i=1}^N p_{it} \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中:  $t$  为时段编号;  $T$  为计算期内时段总数;  $N$  为梯级枢纽个数;  $\Delta t$  为时段长;  $p_{it}$  为  $i$  枢纽  $t$  时段出力;  $\underline{z}_i$ 、 $\underline{q}_i$  分别为第  $i$  级枢纽最低设计通航水位和最小设计通航流量;  $\bar{z}_i$ 、 $\bar{q}_i$  分别为第  $i$  级枢纽

最高设计通航水位和最大设计通航流量。

### 2.2 约束条件

1) 水库水量平衡状态方程:

$$V_t = V_{t-1} + (I_t - Q_t) \cdot \Delta t - \Delta W \quad (3)$$

式中:  $V_{t-1}$ 、 $V_t$  分别为水库  $t$  时段初、末的存水量;  $I_t$  为水库  $t$  时段平均天然入库流量;  $Q_t$  为枢纽  $t$  时段平均引用流量;  $\Delta W$  为水量损失。  $I_t$  的值为梯级枢纽设定的入库断面根据航道一维水动力计算获得的同步流量过程。

2) 物理设备约束。

$$\text{通航设计水位约束: } \underline{z}_t \leq z_t \leq \bar{z}_t \quad (4)$$

$$\text{通航设计流量约束: } \underline{q} \leq Q_t \leq \bar{q} \quad (5)$$

$$\text{枢纽装机容量约束: } \underline{N}_t \leq N_t \leq \bar{N}_t \quad (6)$$

$$\text{枢纽泄流能力约束: } \underline{Q}_t \leq Q_t \leq \bar{Q}_t \quad (7)$$

$$\text{口门区最大横向流速约束: } v \leq v_{\max} \quad (8)$$

式中:  $\underline{z}_t$ 、 $\bar{z}_t$  分别为枢纽  $t$  时段允许的最低、最高水位 (实例研究中, 衢江梯级均为橡胶坝, 正常蓄水位与死水位分别与最高和最低通航设计水位一致);  $Q_{\min}$ 、 $Q_{\max}$  分别为梯级各枢纽最小与最大设计通航流量;  $\underline{N}_t$ 、 $\bar{N}_t$  分别为水电站  $t$  时段允许的最小、最大出力, 允许的最大出力一般为其装机容量乘以系统规定的负荷率;  $\underline{Q}_t$ 、 $\bar{Q}_t$  分别为  $t$  时段允许的最小泄量和最大过流能力;  $v$  表示口门区横向流速。

### 3 模型求解

采用逐次逼近动态规划 (POA) 算法, 以梯级枢纽全航段通航保证率和枢纽总发电量为优化目标, 并以枢纽和航道通航设计水位和通航设计流量为“强制性”约束条件, 对不满足此“强制性”约束条件的调度方案, 采用惩罚函数方法予以目标值惩处, 实现自动淘汰非理想调度方案。同时, 对每一个调度方案的枢纽口门区流场的横向流速进行计算, 对超出通航规范性要求 0.3 m/s 的方案, 也对目标值进行惩处, 具体方法如下:

1) 对整个调度期离散为  $T$  个计算时段, 时段

编号依次为  $0, 1, \dots, T-1, T$ 。对梯级枢纽自上至下编号依次为  $1, 2, \dots, N$ 。以梯级枢纽常规联合调度过程作为 POA 优化过程的初始解, 即初始调度策略。

2) 根据 POA 算法的基本优化原理, 对梯级枢纽在初始调度策略的基础上, 逐时段进行调整与优化:

①维持步骤 1 中梯级枢纽  $0, 2, \dots, T-1, T$  时段的调度策略不变, 即维持  $n$  座梯级枢纽  $0, 2, \dots, T-1, T$  时段的初始水位不变, 而对  $N$  座枢纽第 1 时段末的水位值进行调整和优化。

②维持 2~ $N$  编号枢纽的初始调度策略不变, 首先对第 1 级枢纽第 1 时段末的水位值进行调整和优化。调整与优化过程为: 判断第 1 级枢纽初始调度策略(枢纽泄流量)是否具有优化空间, 对具有优化空间的初始调度策略进行调整与优化。

首先, 判断初始调度策略(泄流量)是否具有优化空间。

假定时段末水位落为最低通航设计水位: 根据水量平衡计算, 若枢纽泄流量小于最小通航设计流量, 说明本时段无法满足最小通航流量要求, 不具优化空间; 当前枢纽当前时段的调度策略将不进行优化, 维持初始给定的泄流量和水位不变; 如果枢纽泄流大于最小通航设计流量, 说明当前时段初始调度策略具有可优化空间。

假定时段末水位升为最高通航设计水位: 根据水量平衡计算, 若枢纽泄流大于最大通航设计流量, 说明本时段无法满足最大通航流量要求, 不具优化空间; 此时, 首先假定时段末水位为最高通航设计水位, 根据水量平衡计算获得枢纽下泄流量, 如果此下泄流量值小于枢纽最大泄流能力, 则枢纽调度策略为: 时段末水位为最高通航设计水位, 泄流量根据水量平衡计算确定; 如果此下泄流量值大于枢纽最大泄流能力, 则枢纽调度策略为: 枢纽按最大泄流能力泄流, 时段末水位根据水量平衡计算确定。如果枢纽时段末水位为最高通航水位情况下泄流小于最大通航设计流

量, 说明当前时段初始调度策略具有可优化空间。

然后对具有调整优化空间的初始调度策略进行调整与优化。

在对具有优化空间的初始调度策略进行调整与优化时, 对满足通航设计水位要求, 同时泄流量具有优化空间的第 1 级枢纽初始调度策略, 以梯级系统第 1 时段和第 2 时段整体发电量之和为优化目标, 采用黄金分割法, 对第 1 级枢纽时段末水位在最低设计通航水位和最高设计通航水位之间进行迭代调整, 并采用惩罚函数的方法, 对不满足设计通航流量要求的过程迭代步策略的目标函数值进行自适应惩罚(即泄流量离设计通航流量越远, 系统发电量自适应惩罚系数越大), 保证迭代优化过程的连续进行, 并自动淘汰不满足通航流量约束的设定策略。每一步的水位调整迭代, 均需进行全航道水动力计算, 以进行枢纽水量平衡计算并确定枢纽调度。通过多次迭代调整, 即可获得第 1 级枢纽第 1 时段末最优水位值及对应泄流量。至此, 完成了对第 1 级枢纽第 1 时段末水位值的优化调整。

③对第 2 级枢纽第 1 时段末的水位值进行调整与优化: 以第 1 级枢纽第 1 时段末调整与优化后的水位值, 替代其初始策略水位值; 按照与②同样的过程, 对第 2 级枢纽第 1 时段末的水位值进行调整与优化, 从而获得第 2 级枢纽第 1 时段末最优水位及对应泄流量。

④完成所有梯级枢纽第 1 时段末的水位值的调整与优化: 采用同样的方法与步骤, 以第 1 和第 2 级枢纽调整优化后的水位值替代相应初始策略水位值, 完成对梯级系统其余枢纽第 1 时段末的水位值的调整与优化。

⑤以所有枢纽第 1 时段末调整优化后的水位值, 替代初始策略对应的水位值。然后, 维持所有梯级枢纽  $0, 1, 3, \dots, T-1, T$  时段的水位不变, 采用同样的方法步骤, 完成所有枢纽第 2 时段末水位值的调整和优化。

⑥采用同样的方法与步骤, 完成梯级枢纽第 3 至第  $T-1$  时段末水位值的调整与优化。自此, 完

成了对所有梯级枢纽调度策略第一轮迭代优化。

⑦根据该轮优化调度结果, 利用构建的二维数值模型, 对口门区流场进行计算, 并统计最大横向流速。对不满足横向流速要求的调度方案, 将在效益统计中进行自动“惩罚”。

⑧统计第一轮次计算确定的适航时段和梯级枢纽总发电量。与常规联合调度模式下的适航时段数和梯级总发电量相比, 两变量对应的差值满足给定的精度控制要求, 则停止迭代, 以当前轮次确定的调度策略为最终优化调度策略; 如果不满足精度控制要求, 则以第一轮次确定的梯级枢纽的水位过程为初始过程, 重复①~⑥步过程, 进行新一轮的迭代优化。直至前后两轮次的航道适航时段数和梯级枢纽系统总发电量差值满足给定精度约束, 停止迭代。

#### 4 实例应用

衢江为钱塘江南源的干流, 上溯常山江可达江西境内, 沿江而下经龙游、金华、兰溪、建德、桐庐、富阳抵达杭州, 过三堡船闸进入浙北内河航道网, 可与京杭运河、杭申线等干线航道连通,

到达上海、苏州等地。衢江航道为浙江省内河航道的骨干航道之一。衢江航运开发工程自上而下分 6 个梯级开发建设, 分别为塔底枢纽、安仁铺枢纽、红船豆枢纽、小溪滩枢纽、游埠和姚家枢纽。根据《钱塘江流域综合规划》和《衢江航运规划》, 对衢江自衢州双港口至兰溪长 80 km 航道按内河 IV 级航道标准进行整治, 同步建设塔底、安仁铺、红船豆、小溪滩、游埠和姚家 6 个梯级枢纽, 达到衢江全线通航 500 吨级船舶的目标。

本次以衢江衢州段 4 座梯级枢纽(塔底、安仁铺、红船豆、小溪滩)为对象, 研究梯级航道枢纽通航联合优化调度问题。衢江梯级航道及枢纽分布见图 1。衢江梯级 4 座枢纽特性见表 1, 4 座枢纽通航特征水位见表 2。4 座枢纽水位-库容关系曲线见图 2, 下游断面水位-流量关系见图 3。



图 1 计算区域、水文站和枢纽布置

表 1 衢江梯级枢纽特性

梯级名称	正常蓄水位/m	发电尾水位/m	装机容量/万 kW	设计发电流量/(m <sup>3</sup> /s)	最大通航流量/(m <sup>3</sup> /s)	发电水头/m	年发电量/(亿 kW·h)	年利用时间/h
塔底	59.5	53.5	1.6	370	1 060	5.55	0.63	3 940
安仁铺	53.5	47.0	1.7	451	1 117	6.04	0.70	4 110
红船豆	47.0	40.0	1.9	420	1 215	6.38	0.78	4 100
小溪滩	40.0	34.0	1.8	445	1 383	5.23	0.73	4 060

表 2 衢江梯级枢纽通航设计水位

船闸	上下游	设计最高通航水位/m	设计最低通航水位/m	设计洪水位/m	校核洪水位/m
		塔底船闸	上游 59.5	59.0	62.56
安仁铺船闸	上游	53.5	53.0	57.74	58.68
	下游	50.2	46.5	57.65	58.58
红船豆船闸	上游	47.0	46.5	50.11	51.25
	下游	42.0	39.5	49.91	51.02
小溪滩船闸	上游	40.0	39.5	42.17	42.95
	下游	36.0	33.5	41.77	42.51

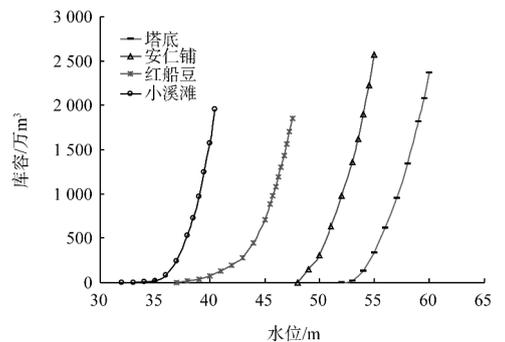


图 2 枢纽水位-库容关系曲线

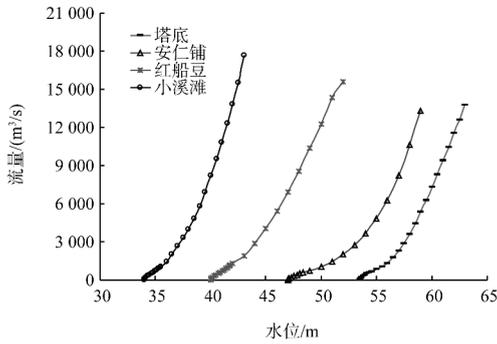


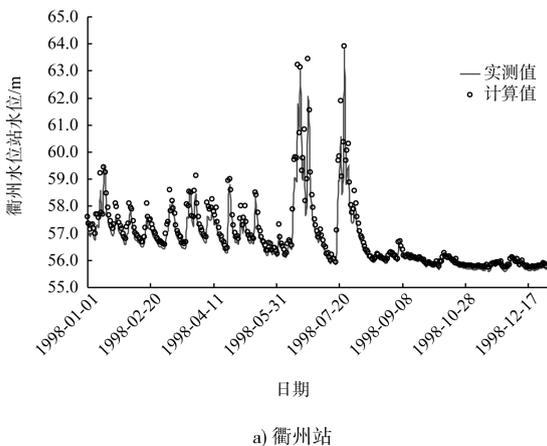
图3 枢纽断面水位-流量关系曲线

表3 衢江各梯级设计洪水水位

洪水概率	塔底		安仁铺		红船豆		小溪滩	
	坝上	坝下	坝上	坝下	坝上	坝下	坝上	坝下
5 a 一遇	60.46	60.22	56.5	56.38	47.65	47.52	40.44	40.21
10 a 一遇	61.11	60.87	57.28	57.13	48.61	48.46	41.07	40.83
20 a 一遇	61.76	61.53	57.94	57.76	49.47	49.31	41.61	41.35
50 a 一遇	62.56	62.35	58.73	58.51	50.50	50.33	42.26	41.96
100 a 一遇	63.39	63.18	59.54	59.28	51.23	50.05	42.89	42.55

在进行模型应用之前，需对模型参数进行率定。率定计算条件：上游采用衢州水文站的流量边界条件，下游采用洋港水文站的水位边界条件。计算水文条件为 2002-01-01—2002-12-31 的日均流量、水位资料。率定依据为衢州站和龙游站的实测水位与计算水位的误差。通过模型调试计算，衢江河床糙率率定值为 0.029~0.035。采用 1998-01-01—1998-12-31 的资料对模型进行验证。

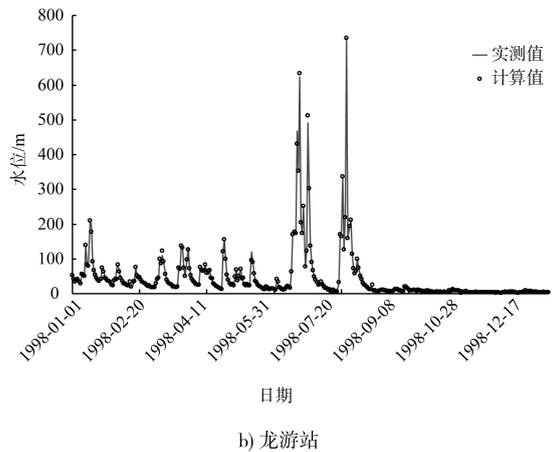
从图 4 可以看出，数学模型的计算值和实测水位吻合较好，表明本模型所选用参数适宜，模拟结果能反映衢江水流状况，可集成应用于衢江梯级枢纽联合优化调度系统中。



a) 衢州站

#### 4.1 全航道一维水力模型参数率定与验证

衢江衢州段计算河段长约 63 km，共计划分 125 个断面，断面间距约为 500 m。模型计算上游边界取为衢州水文站以上 10 km 处，下游边界取在洋港水文站，计算区域、各水文站点和枢纽布置见图 1。本次共搜集和整理了上游衢州水文站自 1997-01-01—2006-01-01 共计 10 a 的日径流资料过程及下游洋港站的水位过程。



b) 龙游站

图4 水位验证

#### 4.2 衢江梯级通航联合优化调度模拟成果分析

为进行衢江梯级联合优化调度，需首先进行梯级常规联合调度，为联合优化调度提供初始调度线。考虑下游枢纽的水力顶托作用，以梯级枢纽特性为约束条件，按照各级枢纽常规调度规则，对衢州水文站自 1997-01-01—2006-01-01 共计 3 650 d 的日径流资料过程进行基于航道水流演进的调节计算。计算时间步长为 10 s。通过常规联合调度，获得衢江梯级各级枢纽初始调度线，包括各级枢纽水位过程、泄流过程以及出力过程。

获得了基于常规联合调度的枢纽初始调度过程, 以其作为初始调度线, 即可依据构建的衢江

梯级联合优化调度模型, 进行衢江梯级联合优化调度。两种模式下调度成果统计见表 4。

表 4 衢江梯级模拟期可通航时段数统计

统计要素	衢江梯级枢纽	常规联合调度模式下相关时段统计/h	常规联合调度通航保证率/%	联合优化调度模式下时段统计/h	联合优化调度通航保证率/%	通航保证率提高百分点
超过最大通航流量	塔底	4 620	94.65	4 596	94.68	0.03
	安仁铺	4 027	95.34	1 218	98.59	3.25
	红船豆	3 690	95.73	2 225	97.42	1.69
	小溪滩	3 143	96.36	1 733	97.99	1.63
高于最高通航水位	塔底	172	99.80	231	99.73	-0.07
	安仁铺	293	99.66	0	100.00	0.34
	红船豆	23	99.97	0	100.00	0.03
	小溪滩	6	99.99	0	100.00	0.01
低于最低通航水位	塔底	0	100.00	0	100.00	0
	安仁铺	0	100.00	0	100.00	0
	红船豆	0	100.00	0	100.00	0
	小溪滩	0	100.00	0	100.00	0
满足通航流量和水位条件	塔底	82 980	96.04	83 004	96.07	0.03
	安仁铺	83 573	96.73	86 382	99.98	3.25
	红船豆	83 910	97.12	85 375	98.81	1.69
	小溪滩	84 457	97.75	85 867	99.38	1.63

由表 4 可以看出: 梯级枢纽的联合调节作用, 可有效改善和保障航道通航水流条件要求。无论是单项通航水流条件指标还是综合水流条件要求, 通航保证率均维持在约 95% 及其以上水平; 尤其是梯级枢纽的径流调节和水位衔接作用, 使得整体航道在模拟期内全部满足最低通航水位要求; 通过梯级枢纽群的联合优化调度, 不仅增大了梯级系统的发电量和综合利用效益, 还提高了梯级枢纽的通航保证率, 使得梯级枢纽群平均通航保证率由 97% 提高到 98%。

由于梯级枢纽的径流调节作用, 显著改善了航道的通航水流条件, 使得航道常年维持在适航水位, 而且改善了下游枢纽的发电条件。常规联合调度模式下, 4 座枢纽多年平均发电量分别为 0.63 亿、0.78 亿、1.08 亿、1.09 亿 kW·h, 总计发电量为 3.58 亿 kW·h, 较设计值的 2.84 亿 kW·h 提高约 26.1%; 联合优化调度模式下, 4 座枢纽多年平均发电量分别为 0.81 亿、0.86 亿、1.08 亿、0.91 亿 kW·h, 总计发电量为 3.67 亿 kW·h, 较常规联合调度总发电量提高约 0.08 亿 kW·h, 提

高约 2.2%。

表 5 4 座枢纽发电量 亿 kW·h

衢江梯级枢纽	设计年均发电量	常规联合调度发电量	优化联合调度发电量
塔底	0.63	0.63	0.81
安仁铺	0.70	0.78	0.86
红船豆	0.78	1.08	1.08
小溪滩	0.73	1.09	0.91
总计	2.84	3.58	3.67

## 5 结论

1) 针对梯级枢纽通航效益最大化问题, 提出一种基于航道精确水动力计算的梯级枢纽联合优化调度模型, 满足航道通航对水流精确模拟的要求, 解决梯级枢纽联合调度中的水流“滞时”问题, 最大化航道整体通航保证率和通过能力。

2) 基于航道水动力计算的梯级通航枢纽联合优化调度方法, 不仅是确定全航段通航水位大小和口门区流速分布、评估航道适航水平的必要条件, 更在客观上解决了梯级枢纽联合调度中常见的水流“滞时”技术难题。

3) 通过航道一维水动力计算, 获得航道沿程

断面水深和流量过程,通过口门区二维水力学计算,获得口门区流场特性和流速大小,为航道是否满足通航水位和流量要求以及口门区船舶航行流速规范要求提供数据支持。

4) 衢江梯级通航枢纽联合优化调度成果表明:由于梯级枢纽的径流调节作用,显著改善了航道的通航水流条件,使得航道常年维持在适航水位,而且改善了下游枢纽的发电条件,通航保证率由设计的 96% 提高到 98%;联合优化调度模式下 4 座枢纽多年平均发电量分别为 0.81 亿、0.86 亿、1.08 亿、0.91 亿 kW·h,总计发电量为 3.67 亿 kW·h,较梯级枢纽设计总发电量提高约 28%,经济效益显著。

**参考文献:**

[1] Hu Ya-an, Zhang Rui-kai, Li Yun, et al. Prototype debugging on four-step operation mode of TGP lock under impounded level 156 m during compleion stage [C]// Proceedings of 16 th IAHR-APD & 3rd IAHR-ISHS: Advances in Water Recourses and Hydraulic Engineering, German: Spinger, 2009: 1 924-1 933.

[2] Hu Ya-an, Zhang Rui-kai, Li Yun, et al. Research on improving the traffic capacity of Three Gorges ship lock by optimizing the conveyance Mode [J]. Pianc on course magazine, 2008, 131(4) : 19-29.

[3] 刘云峰,齐欢.DFS 算法在三峡永久船闸优化编排中的应用[J].计算机工程,2002,28(8):224-226.

[4] 傅希德,张晓盼,袁晓辉,等.基于气象预报的三峡工程两坝联合通航调度方法[J].水电能源科学,2011,29(2):28-31.

[5] 张晓盼,齐欢,袁晓辉.三峡葛洲坝联合通航调度的混合整数规划[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2007,31(1):1-4.

[6] 袁晓辉,王乘,张勇传,等.水电系统短期经济运行的新方法[J].水力发电学报,2006,25(4):1-5.

[7] 邓先礼.时滞对梯级水电站经济运行的影响[J].重庆大学学报:自然科学版,1982(2):91-102.

[8] 张铭,李承军,张勇传.水电站发电收益最小风险控制模型[J].华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(9):25-28.

[9] 张铭,丁毅,袁晓辉,等.梯级水电站水库群联合发电优化调度[J].华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(6):90-92.

[10] 张铭,李承军,袁晓辉,等.大规模混联水电系统长期发电优化调度模型及求解[J].武汉大学学报:工学版,2007,40(3):45-49.

[11] 沙海飞,周辉,吴时强,等.坝身泄洪水气两相流二维数值模拟[J].水动力学研究与进展,2007,22(3):311-316.

[12] 宋利祥,周建中,王光谦,等.溃坝水流数值计算的非结构有限体积模型[J].水科学进展,2011,22(3):373-377.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

**上海南汇东滩促淤二期工程开工**

11 月 25 日,三航局承建的上海南汇东滩促淤工程促淤二期第 2 标段项目开工。

该工程主要针对大治河以南外侧区域促淤,区域面积约 4 400 万 m<sup>2</sup>,主要包括新建 2 507 m 的东顺堤 1 座、3 811 m 的隔堤 1 座,以及纳潮口和警示标志等。项目的建成将对上海市进一步缓解土地资源紧缺,确保土地总量动态平衡提供帮助。

[http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201611/t20161128\\_86717.html](http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201611/t20161128_86717.html)(2016-11-28)