

湘江长沙综合枢纽水库淹没范围控制研究

普晓刚, 张明, 冯小香

(交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 运用建立的株洲枢纽至长沙枢纽间长河段二维水流数学模型,研究了长沙枢纽库区水面线变化特征,分析了水库调度对库区通航水深条件的影响。依据设计确定长沙枢纽水库淹没范围控制方案,计算出水库淹没曲线控制线,推求了库区控制断面处(湘潭水文站)不增加水库淹没损失的坝前蓄水位与坝址流量关系,合理确定长沙枢纽预泄的动态控制水位调度线,为后续水库优化调度提供边界约束条件。

关键词: 水库; 淹没曲线; 数学模型; 长沙枢纽

中图分类号: TV697.21

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0165-04

Research on control scope of reservoir submerged area of Changsha integrated hydro-junction in Xiangjiang River

PU Xiaogang, ZHANG Ming, FENG Xiaoxiang

(Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering of Ministry of Communication, Tianjin 300456, China)

Abstract: Using the two-dimension mathematical model of long river section between Zhuzhou and Xiangjiang hydro-junctions, the paper studied the variation feature of water surface curves in the area of Changsha hydro-junction and analyzed the influence of reservoir operation on navigation water depth in reservoir area. According to the design scheme, it determined the control scheme of submerged scope in the reservoir area of Changsha hydro-junction, and calculated the reservoir control line of submerged curve, and derived the relation between storage water level and flow of reservoir controlling section (Xiangtan hydrological station) and reasonably determined the pre-discharge water level scheduling line so as to offer the boundary constraint conditions for the subsequent reservoir optimization operation.

Key words: reservoir; submerged curve; mathematical model; Changsha hydro-junction

水库淹没影响范围与水库的运行方式有直接关系^[1],对修建于低山丘陵盆地区及三角洲平原地区的低水头径流式电站或综合枢纽,由于受地形地貌条件限制及库区淹没损失的制约^[2],一般有全年维持正常蓄水位运行、设汛期限制水位运行、考虑洪水预报后动态控制水位运行等3种方式^[3-4]。水库回水线是确定水库淹没范围的主要依据,低水头枢纽回水线有如下特点:在某一蓄水位时,小流量的回水尖灭点离坝址远,大流量的回水尖灭点离坝址近,当闸门全开敞泄时回水尖灭点移到坝前^[5]。长沙综合枢纽为典型低水头枢纽,前期设计过程中为减少库区淹没影响,水库运行方式为全年维持正常蓄水

位,水库淹没范围按开闸预泄回水外包线确定,而作为一座水资源综合利用枢纽工程,为配合开展在不增加水库淹没的情况下,力求通航、发电等综合效益最大化的水库优化调度研究,依据设计确定的长沙枢纽水库淹没范围控制方案,计算出水库淹没曲线控制线,推求了库区控制断面处(湘潭水文站)不增加水库淹没损失的坝前蓄水位与坝址流量关系,合理确定了长沙枢纽预泄的动态控制水位调度线^[6-8]。

1 工程概况

湘江长沙综合枢纽工程是《湘江干流规划》

收稿日期:2014-11-21; 修回日期:2014-12-12

基金项目:湘江长沙综合枢纽公司项目(CSSN-服务-38-09)

作者简介:普晓刚(1979-),男,河南周口人,副研究员,主要从事水利工程及航道工程研究。

(1986 年)9 级梯级开发中最下游一个梯级,坝址位于湘江尾间蔡家洲,控制流域面积 90 520 km²,上距株洲枢纽约 133 km,下距入汇洞庭湖的濠河口约 28 km。工程以保证长株潭城市群生产生活用水、适应滨水景观带建设和进一步改善湘江航运条件为主,兼顾发电、旅游等的水资源综合利用。

湘江流域地处亚热带湿润气候区,春夏之间降水量集中,秋季多旱,夏热期长,具有大陆性气候特点。流域内降水丰沛,多年平均降水量一般为 1 300 ~ 1 500 mm。年径流量主要由降水形成,年际变化大,年内分布不均。每年 4 ~ 9 月为汛期,10 月至次年 2 月为枯水期。年内水位变幅较大,达 9.5 ~ 13 m。长沙综合枢纽坝址控制流域面积为 9.05 万 km²,坝址 1952 ~ 2008 年多年平均流量为 2 237 m³/s,多年平均径流量为 705 亿 m³。湘江河流所挟带的泥沙,主要来自降水(尤其是暴雨)对表土的侵蚀,来沙绝大部分集中在汛期。坝址多年平均悬移质输沙量为 1 142 万 t,多年平均含沙量 0.164 kg/m³,多年悬移质平均粒径小于 0.037 mm。

长沙综合枢纽工程从左至右主要建筑物依次为左岸改移防洪大堤、左岸副坝及预留三线船闸、二线船闸、一线船闸、26 孔净宽 22 m 的低堰泄水闸、1 孔净宽 7 m 泄洪排污闸、电站厂房、鱼道、蔡家洲副坝、20 孔净宽 14 m 的高堰泄水闸及右岸副坝。长沙综合枢纽工程为低水头径流式电站、开敞式闸坝、槽蓄型水库,不同于高坝大库,枢纽正常蓄水位 29.7 m 时总库容 6.75 亿 m³,上游株洲航电枢纽坝下通航设计低水位 29.70 m(Ⅱ级航道、98% 保证率)已基本衔接。为充分利用水资源,发挥长沙综合枢纽的综合利用功能,枢纽库区需具有一定的调节库容,可考虑蓄水位在 29.7 ~ 29.0 m 之间变动。

长沙综合枢纽设计文件中根据多年来逐日径流水位、流量统计资料,按照入库流量及相应的枢纽建成后的上下游净水头差所占的比例,提出当流量小于 4 000 m³/s 时,坝前基本维持正常蓄水位 29.7 m;当流量大于 4 000 m³/s 时定义为洪水期,进入防汛防淹为主的调度,电站停机,兼顾船闸通航条件,根据水库预泄调度方式逐渐降低坝前水位,直至恢复天然行洪状态。通过分析认为,机组停机流量应结合库区淹没补偿线和上下游水头综合确定,由于本工程水库淹没范围已划定,在确保工程安全的前提下,为充分发挥电站的发电效益,应根据设计的库区淹没补偿线控制上限的情况,选取控制断面,对流量大于 4 000 m³/s 时,降低库区蓄水位后满足淹没

补偿上限的流量情况进行计算研究,并结合上下游水头差合理确定机组停机流量。

2 库区长河段数学模型

2.1 区域转换方程

正交曲线网格的生成方法很多,这里根据有势流的等势线和流线正交的机理生成正交曲线网格。依此生成的网格既能保持正交,又能控制网格的疏密,其转换方程为:

$$C_{\eta}^2 x_{\xi\xi} + C_{\xi}^2 x_{\eta\eta} + J^2 (x_{\xi} p + x_{\eta} Q) = 0 \quad (1)$$

$$C_{\eta}^2 x_{\xi\xi} + C_{\xi}^2 x_{\eta\eta} + J^2 (y_{\xi} p + y_{\eta} Q) = 0 \quad (2)$$

式中: (ξ, η) 为变换平面坐标; (x, y) 为物理平面坐标; C_{ξ} 、 C_{η} 为正交曲线坐标系中的拉梅系数。

$$C_{\xi} = \sqrt{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}, C_{\eta} = \sqrt{x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2}, J = C_{\xi} C_{\eta},$$

$$P = -\frac{1}{C_{\xi}^2} \frac{\partial(\ln k)}{\partial \xi}, Q = \frac{1}{C_{\eta}^2} \frac{\partial(\ln k)}{\partial \eta},$$

$$k = \sqrt{C_{\xi}/C_{\eta}}.$$

2.2 曲线坐标系下模型基本方程及相关问题的处理

(1) 模型基本方程。平面二维水流模型基本方程可表示成如下通用微分方程式,即:

$$\frac{\partial(C_{\eta} H u \Phi)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_{\xi} H v \Phi)}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma_{\phi} H \frac{C_{\eta}}{C_{\xi}} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma_{\phi} H \frac{C_{\xi}}{C_{\eta}} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + S_{\phi} \quad (3)$$

式中: u, v 为水流在 x, y 方向上的流速; H 为水深; Γ_{ϕ} 为扩散系数, Φ 是 H, u, v, S 的函数,各方程主要差别体现在源项 S_{ϕ} 上,源项是因变量的函数,需对源项 S_{ϕ} 负坡线性化,即: $S_{\phi} = S_p \Phi + S_e$, Φ, S_p, S_e 为方程替代项。

(2) 初始场的确定。初始水位场可利用计算域上、下游水位和断面间距进行线性插值,在断面上可以不考虑横比降。在计算域较长时,可采用推求水面线的办法给出二维域中某几个断面的水位,然后分段进行线性插值。

对于初始速度场, η 方向上 $v = 0$, ξ 方向上 u 由曼宁公式计算得来,并进行断面总流量校正。由于 ξ, η 正交曲线网格是基于势流理论生成,上述沿 ξ, η 方向给值,在势流区初值已离解较近,在回流区初值与收敛解差别较大,但计算表明,随着迭代计算的进行,上述初值的影响会逐步消失。

(3) 动边界的处理。河道中的边滩和江心洲等随水位波动边界位置也会发生相应的调整。在计算中精确地反映边界位置是比较困难的,因为计算网

格横向间距较大,为了体现不同流量、边界位置的变化常采用“切削”技术,即将露出单元的河床高程降至水面以下,并预留薄水层水深,同时更改其单元的糙率(n 取 10^n 量级),使得露出单元 $u、v$ 计算值自动为0,水位冻结不变这样就将复杂的移动边界问题处理成固定边界问题。

2.3 数学模型建立与验证

自长沙枢纽至株洲枢纽建立了二维平面数学模型,模型进口为株洲枢纽坝轴线,出口为长沙枢纽坝址,河段全长约135 km,共布置了 3018×81 个网格。网格纵向尺度平均为45 m,网格横向宽度一般为10 m。

采用2007年11月株洲枢纽坝下的水文观测资料对模型进行验证,模型计算水位与实测值的差值在 ± 0.06 m以内,断面流速分布与实测流速分布趋势基本一致,模型计算精度能满足规范要求^[9]。

3 库区水面线变化特征

根据长沙综合枢纽坝址河段水文及水库调度特点,综合选取了 $Q = 3\,000、3\,500、4\,000、13\,500、19\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 共5级典型流量(见表1),分别计算枢纽蓄水前后的水面线,研究枢纽建成前后库区河段的回水变化特征。计算采用的天然水位主要根据长沙枢纽初步设计文件及《长沙综合枢纽初步设计阶段整体布置方案模型试验研究》的相关成果,采用线性内插的方式得到;蓄水后水位在非敞泄情况下,采用枢纽正常蓄水位29.7 m,在敞泄情况下,坝前在天然水位的基础上考虑枢纽建成后水位壅高。

由图1可看出,对于计算的3级小流量($Q = 3\,000、3\,500、4\,000\text{ m}^3/\text{s}$),在天然情况下,河段水位、比降自下游向上游虽有缓慢上升,但变化幅度较小,随流量增加水面线近似平行抬升;在枢纽正常蓄水位29.7 m时,库区水面线在下游段平缓,上游段,逐渐增大,呈现翘尾现象。对于计算的两级大流量($Q = 13\,500、19\,700\text{ m}^3/\text{s}$),由于枢纽完全敞泄,枢纽蓄水前后河段的水面线变化不大。表2给出了典型河段区间的比降。

表1 计算条件

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	天然水 位/m	蓄水后坝 址水位/m	流量特征
3000	25.03	29.7	正常蓄水,电站与泄水闸联合调度
3500	25.43	29.7	同上
4000	25.83	29.7	大于该流量,开闸预泄
13500	32.57	32.63	2年一遇洪水,电站关闭、泄水闸敞泄
19700	34.51	34.59	20年一遇洪水,电站关闭、泄水闸敞泄

表2 枢纽蓄水前后典型河段区间的比降变化对比表

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	长沙枢纽 - 湘潭 水文站/‰		湘潭水文站 - 株洲枢纽/‰	
	天然	蓄水后	天然	蓄水后
3000	0.045	0.009	0.070	0.041
3500	0.046	0.011	0.070	0.047
4000	0.046	0.014	0.071	0.051
13500	0.040	0.041	0.074	0.075
19700	0.049	0.049	0.082	0.083

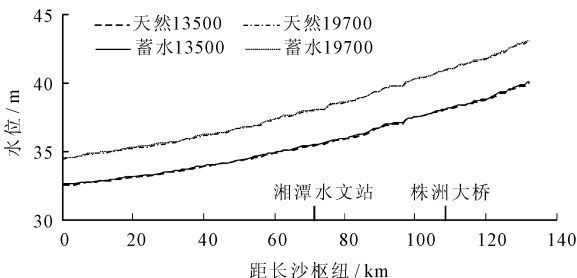
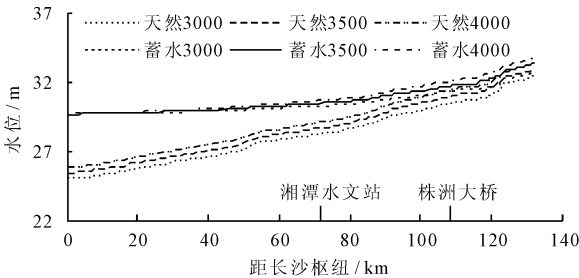


图1 枢纽蓄水前后典型流量下的水面线沿程变化图

4 水库调度对库区通航水深的影响

长沙枢纽水库调度,将会引起库区水面线的变化,进而对上游航道水深条件造成影响,由于结合长沙枢纽工程进行的湘江2 000 t级航道工程建设后,影响库区航道水深变化的节点在株洲枢纽船闸,因此,在长沙枢纽水库调度时,对上游航道通航水深的

影响仅考虑对株洲枢纽船闸下游引航道的影响即可。

株洲枢纽下游设计最低通航水位为29.7 m,对应的最小通航流量 $330\text{ m}^3/\text{s}$ 。然而,在株洲枢纽运行后,由于湘潭段河道的大量采砂,造成向上游溯源冲刷,坝下河道同流量下的枯水水位已发生明显下降。经多次试算,确定当株洲枢纽最小通航流量 $330\text{ m}^3/\text{s}$ 时,为保证株洲枢纽下游引航道水位为

29.7 m 时,长沙枢纽坝前最低水位为 29.5 m。若长沙枢纽坝前蓄水位进一步降低,为保证株洲枢纽下游引航道水位为 29.7 m,株洲枢纽必须加大下泄流量,经计算,当长沙枢纽坝前水位降低至 29.0 m 时,最低下泄流量至少为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

5 枢纽库区淹没控制研究

湘潭水文站为湘江下游的控制性水文站,位于长沙与株洲之间,下距长沙枢纽约 69 km,上距株洲枢纽约 66 km。为研究长沙枢纽水库正常调度时对于上游淹没的影响,以湘潭水文站作为控制性淹没点,研究在不增加湘潭水文站河段淹没损失的情况下,不同枢纽蓄水位下对应的来流量。

在长沙枢纽正常蓄水位 29.7 m,流量为 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,湘潭水文站水位 30.68 m。以不增加湘潭水文站河段淹没损失作为约束条件,经过多次试算,计算了长沙枢纽不同蓄水位情况下对应的最大来流量,见图 2。可以看出,随来流量增加,长沙枢纽坝前蓄水位需逐渐降低。当来流量为 $4\,950 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,长沙枢纽坝前蓄水位应为 29.0 m;当来流量为 $5\,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,长沙枢纽坝前蓄水位应为 28.5 m。

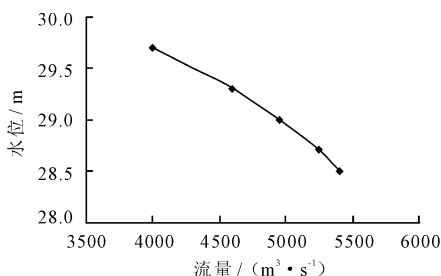


图2 以湘潭水文站水位作为约束的长沙枢纽坝前水位流量关系曲线图

6 结 语

运用建立的株洲枢纽至长沙枢纽间长河段二维

水流数学模型,对库区水面线变化特征进行了研究,结果表明:

(1)枢纽蓄水(蓄水位 29.7 m)后非敞泄的各级典型流量下,水面线在库区下游段比降平缓,上游段,比降逐渐增大,呈现翘尾现象;敞泄流量下,枢纽蓄水前后河段的比降变化不大。

(2)经多次试算,当长沙枢纽坝前水位降低至 29.0 m,株洲枢纽下游引航道水位为 29.7 m 时,株洲枢纽最低下泄流量至少为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3)依据设计的长沙枢纽水库淹没方案,计算出水库淹没曲线控制线,推求了库区控制断面处(湘潭水文站)不增加水库淹没损失的坝前蓄水位与坝址流量关系,合理确定了长沙枢纽预泄的动态控制水位调度线,为水库优化调度提供边界约束条件。

参考文献:

- [1] 陈慈洲,黄洪,吴洋. 峡山水库淹没影响范围分析[J]. 江西水利科技, 2013, 39(4):322-325.
- [2] 李宁新. 南方低水头径流式电站的水库浸没问题[J]. 人民珠江, 2008, 29(2):30-33.
- [3] 卜继勤,罗纯军,曹志辉. 长泥坪水库运行方式及回水研究[J]. 小水电, 2006(6):38-40.
- [4] 郭大军,王东辉. 桃源水电站水库运行方式及回水研究[J]. 水力发电, 2014, 40(6):42-44.
- [5] 卜继勤,李玲,罗纯军. 低水头电站水库回水分析研究[J]. 广东水利水电, 2003(6):22-23.
- [6] 谢海林,王丰赞. 岩滩水电站汛期动态控制水位调度运行线的设计[J]. 红水河, 2005, 24(1):71-73.
- [7] 朱永英,袁晶瑄,王国利,等. 实时预蓄预泄法汛限水位动态控制与应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(4):606-609.
- [8] 邱瑞田,王本德,周惠成. 水库汛期限制水位控制理论与观念的更新探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1):68-72.
- [9] 中华人民共和国交通部. TJT/T232-98 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程[S]. 北京:人民交通出版社, 1998.

(上接第 164 页)

- [4] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.
- [5] 胡岚平,刘华,覃文文,等. 基于 Matlab 的明渠恒定非均匀渐变流水面线的数值计算[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2011, 37(5):827-831.
- [6] 霍倩,李广品. 龙格-库塔法计算明渠恒定渐变流水面线[J]. 水文, 2011, 31(1):22-25.
- [7] 吴持恭. 水力学(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.

- [8] 郭生练. 水库调度综合自动化系统[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [9] 李炜. 水力计算手册(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析(第5版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.