



弯曲分汊河道航电枢纽布置 及通航水流条件试验研究

许锡宾^{1,2}, 曹毅¹, 许光祥¹

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400039)

摘要: 结合湖南澧水青山航电枢纽布置, 采用1:100整体物理模型试验, 研究弯曲分汊河流上航电枢纽的枢纽布置、航道整治和通航水流条件等关键技术。分析左、右汊水流特征, 比较船闸分别布置在左、右汊各方案的通航条件; 提出了比较合理的布置方案和整治方案以及弯曲分汊河道航电枢纽布置的特点, 可为类似的工程提供借鉴。

关键词: 枢纽布置; 通航条件; 口门区; 弯曲分汊河道

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0152-07

Experimental study on navigation-power junction's layout and navigable flow condition of bending braided river

XU Xi-bin^{1,2}, CAO Yi¹, XU Guang-xiang¹

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Vocational College of Architectural Engineering, Chongqing 400039, China)

Abstract: Combining with Lishui Qingshan navigation-power junction's layout in Hunan province, we study the key technology of navigation-power junction's layout, waterway regulation and navigable flow condition by 1:100 physical model test, analyze the characteristics of flow on left braided and right braided, and compare the layout of the left braided lock scheme and right braided lock scheme on navigation condition. Then we put forward reasonable layout scheme and regulation scheme and summarize the characteristics of navigation-power junction's layout on the bending braided river, which may serve as reference for similar projects.

Key words: general layout; navigation condition; entrance area; bending braided river

弯曲分汊河道流态复杂, 对弯曲分汊河道进行河道渠化或对现有的渠化工程进行升级, 以增加通航里程或增加航道的运输量是较为困难的。主要在于如何布置通航建筑物, 并针对已建成的枢纽现有的特征, 采取有效的工程措施或非工程措施才能满足通航水流条件, 且不破坏现有的建筑物, 不影响发电的效率, 维持航道的稳定。曹玉芬等^[1]统计了枢纽中通航建筑物的布置状况, 得出船闸布置在弯道凹岸时有利条件多于凸岸。郝品正等^[2]以湘江株洲航电枢纽通航技术试验研究成

果为基础论述了微弯分汊河段航电枢纽总体布置原则。如何布置通航建筑物的主要研究方法是物理模型试验, 如大顶子山航电枢纽^[3]、乌江银盘航电枢纽^[4]、赣江石虎塘航电枢纽^[5]等工程。不同的枢纽都有各自的特点, 在布置的时候, 首先考虑建筑物的选址优势, 进一步考虑航道与河流之间关系, 再考虑通航对其他建筑物影响, 最后考虑航道通航水流条件^[6-9]; 根据工程所在的河段枢纽具体特点予以研究解决。湖南澧水青山航电枢纽同时受到通航建筑物位置选择、布置形式、通航

收稿日期: 2013-05-15

作者简介: 许锡宾(1955—), 男, 教授, 主要从事结构工程、港口工程研究工作。

水流条件、对已建工程的影响等因素制约,其研究成果对类似工程建设具有一定的借鉴意义。

1 航电枢纽布置

水工建筑物的平面布置是航电枢纽成功与否的关键,坝址段河流形态的不同,挡水、泄水、发电、通航等水工建筑物的平面布置遵循不同的原则。对弯曲河道,一般有集中布置和分散布置两大类^[10];弯曲分汊河道见图1。一般弯曲分汊河道的左、右汊河道的长度不等,此类弯曲分汊河道的特点是:左汊河道长度较右汊长,在分汊口处左汊的直线段长度也较右汊长;左汊在分汊口和汇合口的角度较小,左汊河道的河床比降、水面比降均较右汊小;左汊较长汊道也会带来航道的里程的增加。对于此类河道,船闸枢纽布置在较长汊道上更优于布置在较短汊道。

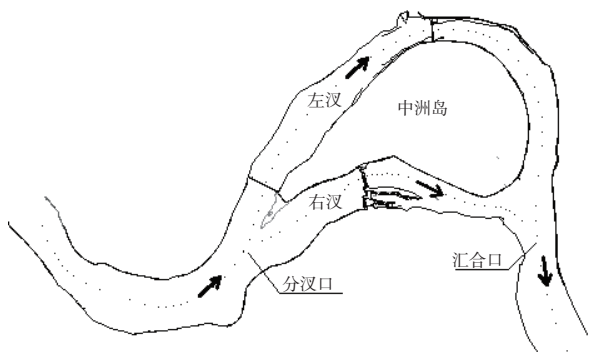


图1 弯曲分汊河道示意图

2 依托工程

澧水青山航电枢纽建于20世纪70年代,青山泵站闸坝工程设计标准为IV等5级;原设计标准为20 a一遇洪水设计,200 a一遇洪水校核。主坝正常蓄水位50.0 m,相应库容0.273亿 m^3 ,水库无调节能力。设计洪水位57.2 m,主坝设计泄流量9 700 m^3/s ;校核洪水位55.2 m,主坝设计泄流量14 600 m^3/s 。青山枢纽工程由主坝水闸、副坝水闸、水轮泵机房及上山管道、电站、船闸等组成,主坝水闸位于澧水干流右汊,坝体为浆砌卵石重力坝,枢纽全长367.9 m,其中闸门段长260 m;副坝水闸建于澧水分支的新安河上,与主坝相距约1 km。坝体为浆砌砂卵石重力坝,全长437m,从左岸到右岸分别设置8 m宽水泵站、120 m的滚水坝、96 m的

泄水闸、90 m的滚水坝、8 m宽水泵站。滚水坝堰顶高程48.2 m,中间泄水闸堰顶高程43 m,并设有8 m×5 m的弧形闸门。水轮泵机房位于主坝右岸,左临电站,下接船闸呈条形布置。全长182.4m,宽18.5 m,为浆砌卵石重力或挡水建筑物,安装35台水轮泵。主坝水闸左右两岸另有河床式电站各一座,装有水轮发电机组8台,总装机8 900 kW,年发电量5 000万 $kW\cdot h$ 。

3 枢纽设计方案及特点

3.1 右汊船闸布置(方案1)

将已建的5级船闸拆除,在同一位置上修建3级船闸,船闸和其它水工建筑物布置在同一河床的同一岸,是典型集中布置,且为同岸布置。右汊方案的特点在于此方案没有改变枢纽的布置形式,船闸位置没有改变,船闸布置在右汊弯道的凸岸侧,船闸上口门区直线段有限,口门区附近有约 35° 的转弯,航槽与水流流向的夹角一般为 $30^\circ\sim 50^\circ$ 。与左汊方案相比,通航里程较短、工程量较小,但是建筑物布置过于紧凑,施工不便利;右汊32孔泵站需迁移重建;新船闸的运行对电站尾水会有一些影响,同时电站的尾水也对引航道口门区水流条件有一定的影响。澧水青山枢纽航电枢纽布置方案见图2。

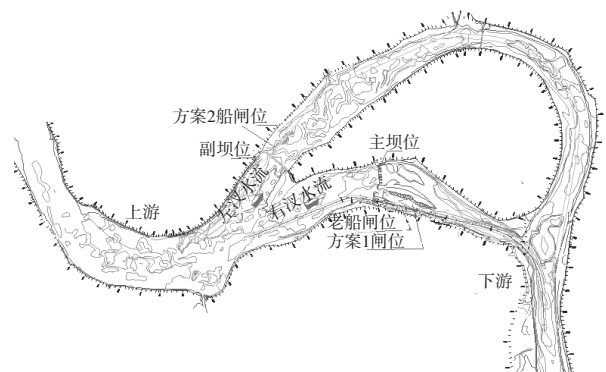


图2 航电枢纽布置

3.2 左汊船闸布置(方案2)

左汊船闸布置方案将左汊的枢纽全部拆除,重建17孔泄洪闸,在泄洪闸的左岸修建III级船闸枢纽;船闸和其它水工建筑物布置在不同河床上。左汊船闸方案航道里程较长、航槽开挖量较大,下口门区附近地形复杂,河床凸凹不平,沙

丘、深槽错落，串沟纵横；但直线段较长，上、下口门区弯道较小，约27°；左汊船闸方案远离右汊枢纽，无论是施工还是运行都不会对右汊枢纽造成较大的影响，避免了电站尾水的影响。

3.3 试验

3.3.1 模型设计

采用平面比尺 $\lambda_L=100$ ，垂直比尺 $\lambda_H=100$ 的正态模型。根据定床河工模型相似性基本准则，模型需满足几何、重力、阻力以及连续相似等相似条件，得到相似比尺。流速比尺 $\lambda_v=\lambda_H^{1/2}=10$ ，水流时间

比尺 $\lambda_t=\lambda_L/\lambda_v=10$ ，流量比尺 $\lambda_Q=\lambda_L\lambda_H\lambda_v=\lambda_L\lambda_H^{3/2}=100\ 000$ ，糙率比尺 $\lambda_n=\lambda_H^{2/3}(\lambda_H/\lambda_L)^{1/2}/\lambda_v=\lambda_H^{2/3}/\lambda_L^{1/2}=2.15$ （采用曼宁糙率公式）。

3.3.2 试验工况

根据青山枢纽电站的组成、枢纽调度、洪水特性等情况，采用副坝主泄洪的调度方式，即以副坝泄洪为主，当副坝泄洪能力不足时才开启主坝泄洪闸。试验工况见表1，左、右汊两个布置方案分别施放表1所示的流量，测试两个方案船闸上、下游口门区水流条件。

表1 试验工况

总流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	尾水位/ m	坝上水位/m	泄水闸、电站调度方式			说明
			副坝泄洪闸	主坝泄洪闸	主坝电站	
182	39.91		闸门全闭	闸门全闭	只右、左岸电站运行	左、右岸电站引用流量
360	40.16		闸门全闭	闸门全闭	只新电站运行	新电站引用流量
542	40.34	坝上保持正常	闸门全闭	闸门全闭	3个电站均运行	3个电站引用流量
1 800	41.86	水位	控泄	闸门全闭	3个电站均运行	中水期常见流量
2 700	42.48		控泄	闸门全闭	3个电站均运行	汛期常见洪水流量
4 000	43.48		敞泄	控泄	电站停止运行	主汛期常见洪水流量
6 000	45.28	48.2~48.4	敞泄	敞泄	电站停止运行	常见洪峰流量
16 113	50.79	52.5~52.6	敞泄	敞泄	电站停止运行	最高通航流量

4 试验成果分析

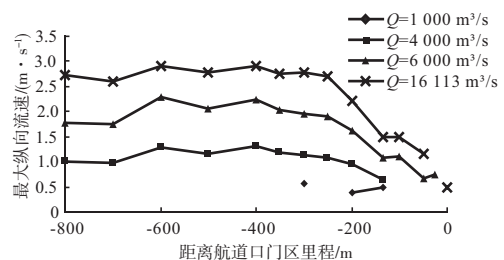
4.1 右汊方案船闸引航道口门区通航水流条件

4.1.1 右汊方案船闸上引航道口门区通航水流条件及优化措施

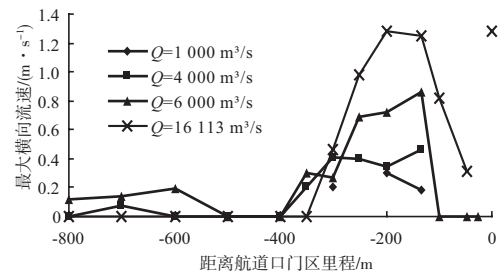
1) 上游口门区及连接段通航水流条件特点。

口门上游100~300 m范围内，航槽与水流夹角较大，达到20°~45°，在口门上游100~300 m范围内（航槽转弯段），水流流向与航槽走向交角很大，最小20°，最大可达45°，越靠近口门越大，且各级流量的流向差异不大。口门上游100~300 m范围内，洪水横向流速可达0.86~1.28 m/s。当 $Q_{总} < 3\ 000\ m^3/s$ 时，主坝不泄洪，右汊仅通过发电流量，虽然流向与航槽轴线夹角较大，其纵向流速和横向均较小，分别不到1.00 m/s和0.3 m/s，满足规范^[1]要求；当 $Q_{总} \geq 3\ 000\ m^3/s$ 后，主坝参加泄洪，流速逐渐增大； $Q_{总}=4\ 000\ m^3/s$ 时，上游口门区和连接段最大纵向流速为1.32 m/s，最大横向流速为0.46 m/s（图3），横向流速稍超规范要求；但当 $Q_{总} \geq 6\ 000\ m^3/s$ 后，口门区和连接段流速迅速

增大，最大纵向流速为2.29~2.90 m/s，最大横向流速为0.86~1.28 m/s，超过规范较多。



a) 纵向



b) 横向

图3 右汊方案上口门区最大流速

2) 对上口门区方案优化。

原方案隔水墙延长330 m至弯段位置（图4）。

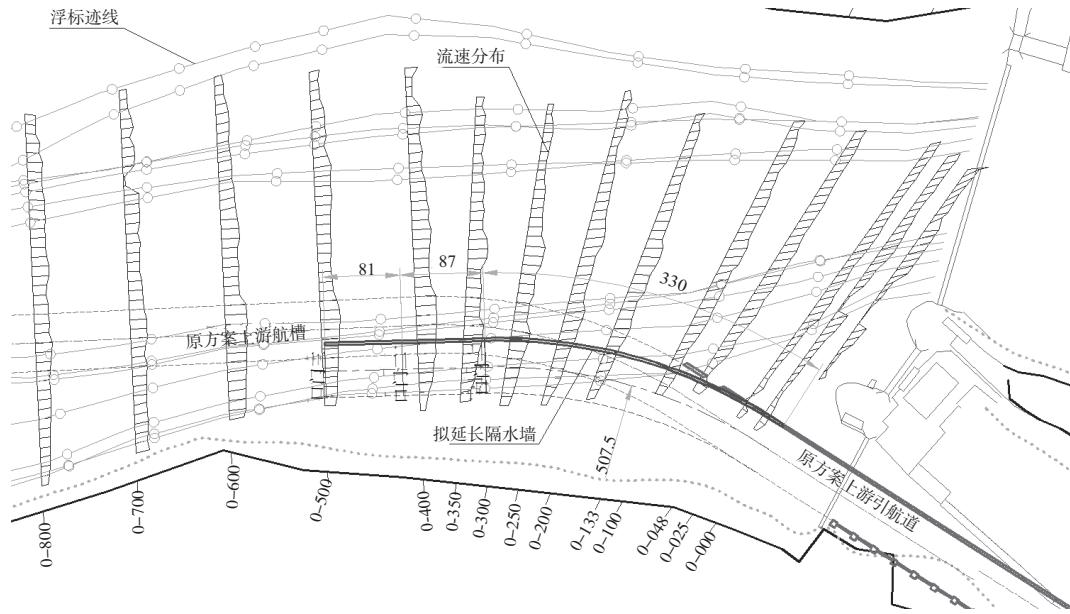
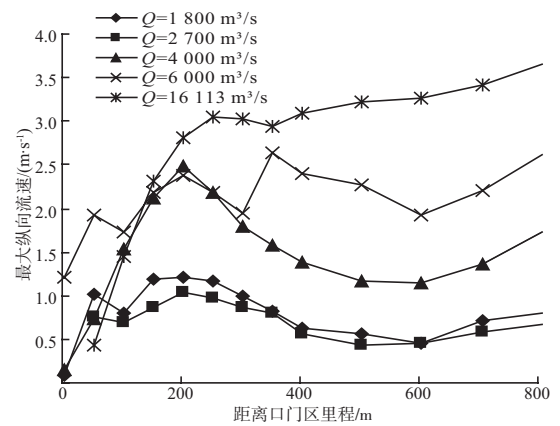


图4 右汊上口门区优化方案

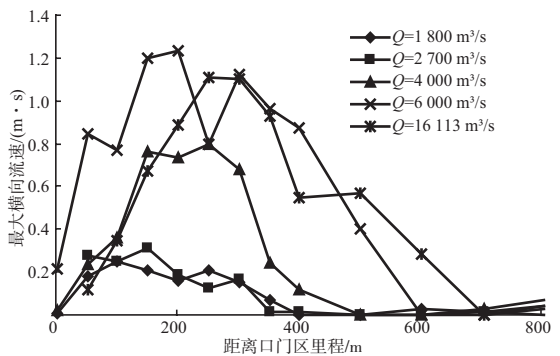
试验结果表明: 隔水墙延长和调向后纵向流速有明显改善, 在 $Q_{总}=4\ 000\ m^3/s$ 时, 最大纵向流速减小了 $0.01\ m/s$, $Q_{总}=6\ 000\ m^3/s$ 时减小了 $0.21\ m/s$, 当 $Q_{总}=16\ 113\ m^3/s$ 时减小幅度最大, 为 $0.40\ m/s$; $Q_{总}=4\ 000\sim 6\ 000\ m^3/s$ 基本降到了规范要求的 $2.0\ m/s$ 以下, $Q_{总}=16\ 113\ m^3/s$ 也基本降到了 $2.5\ m/s$, 稍超规范要求。优化后横向流速最大不超过 $0.8\ m/s$, 优化方案在 $Q_{总}\leq 4\ 000\ m^3/s$ 时纵、横向流速基本满足规范要求, 大洪水流量时仍超出规范要求一定范围。优化方案口门附近存在一定回流, 但强度均不超过 $0.3\ m/s$ 。与原方案相比, 只是纵、横流速有较大幅度减小, 通航条件有较大改善, 但仍不满足规范要求。

4.1.2 右汊方案船闸下引航道口门区通航水流条件

右汊方案船闸下口门区各种工况下纵向流速最大为 $1.6\sim 3.6\ m/s$, 横向流速最大为 $0.6\sim 1.9\ m/s$, 纵、横向流速都远超过规范要求。最大纵向流速和横向流速沿程变化见图5, 从试验成果看, 当 $Q_{总}=1\ 000\sim 3\ 000\ m^3/s$ 时, 航槽最大纵向流速小于 $2\ m/s$, 满足规范要求, 但其横流达到 $0.73\ m/s$, 超出规范一定范围; $Q_{总}>3\ 000\ m^3/s$ 时, 最大纵向流速普遍超过 $2\ m/s$, 连接段最大可达 $3.7\ m/s$; 口门区最大横向流速普遍超过 $0.8\ m/s$, 最大可达 $1.9\ m/s$, 远超过规范要求。



a) 纵向



b) 横向

图5 右汊方案下口门区最大流速

较大的横流主要出现在口门下游 $400\ m$ 范围内, 即口门区内, 这主要是因为横穿口门区的斜流形成的; 典型流量的浮标迹线见图6。在口门下游 $400\ m$ 范围内, 水流从航槽左侧斜穿至右侧, 且

流向与航槽走向交角较大, 最大超过 30° , 当出现最高通航流量时, 斜流范围还延伸至口门下游700 m左右, 通航水流条件十分不利; 受河流直线段长度的影响, 船闸轴线可调整幅度不大, 且河道处于收缩段, 基本没有可优化的空间。

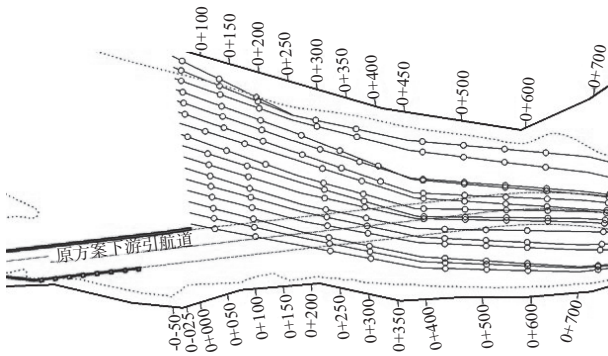


图6 右汉方案下口门区典型浮标迹线 ($Q_{总}=6\ 000\ m^3/s$)

4.2 右汉方案船闸枢纽布置对电站尾水的影响

新建船闸占据了部分右岸电站尾水渠, 缩窄了中州岛与原船闸之间的过流通道(中州岛右侧坡脚最突出处原枯水河段约66 m, 建船闸后缩窄为约40 m), 右汉船闸方案前、后右岸电站和新电站尾水水位见图7。从图7可看出, 拟建船闸对右岸电站和老电站的尾水影响是明显的, 流量越小, 影响越明显。右岸电站和新电站, 尾水最小抬高0.23 m和0.18 m, 最大抬高0.76 m和0.71 m, 电站尾水的抬高对发电效益有较大的影响。

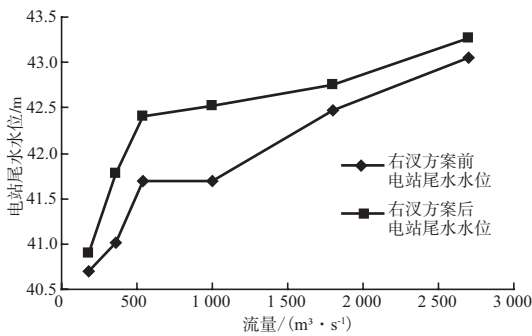


图7 右汉方案前、后右岸电站和新电站尾水水位变化

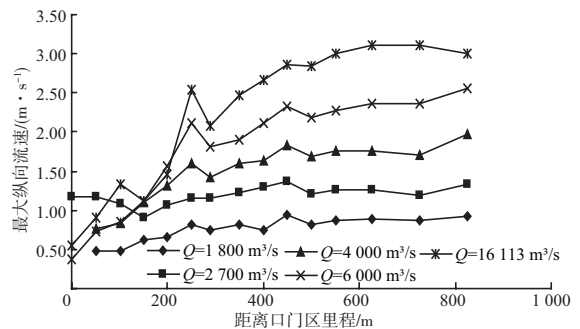
4.3 左汉方案船闸引航道口门区通航水流条件

4.3.1 上引航道口门区通航水流条件

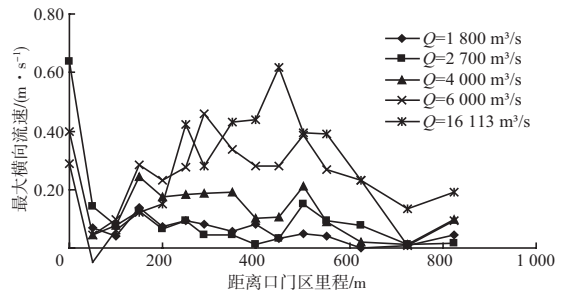
左汉方案上口门区最大横向流速、最大纵向流速沿程变化见图8, 流速随流量增加而增大, 总流量 $Q_{总} \leq 4\ 000\ m^3/s$ 时, 上游口门区和连接段的最

大纵向流速 $v_{y_{max}} < 2.0\ m/s$, 最大横向流速 $v_{x_{max}}$ 除零星几处外均小于 $0.3\ m/s$, 没有回流出现, 基本满足规范要求。总流量 $Q_{总} \geq 6\ 000\ m^3/s$ 后, 除口门200 m范围内, $v_{y_{max}}$ 均超过了 $2.0\ m/s$, 最大通航流量时可达 $3.2\ m/s$; $v_{x_{max}}$ 也超过了 $0.3\ m/s$, 最大接近 $1.0\ m/s$, 超过了规范要求的一定范围; 但是点数不多, 出现的机会也较少, 对通航的影响不大。

从试验观察和流场测试显示, 上游引航道口门区及连接段没有回流、泡漩等不良流态, 也没有明显与航线交角较大的横流, 水流流线基本平顺, 这对船舶顺利进出船闸十分有利。



a) 纵向



b) 横向

图8 左汉方案上口门区最大流速

4.3.2 下引航道口门区通航水流条件

左汉船闸原方案纵向、横向和回流速度均超规范, 特别是当 $2\ 700\ m^3/s \leq Q_{总} \leq 6\ 000\ m^3/s$ 时, 最大纵向流速可达 $3.5\ m/s$, 连接段最大横向流速可达到 $2.5\ m/s$, 最大回流达到 $1.2\ m/s$, 超规范较多。船模试验也表明, $Q \leq 4\ 000\ m^3/s$ 时, 船舶通航困难, 特别在 $Q=2\ 700\ m^3/s$ 时, 不能满足 $1\ 000\ t$ 自航驳的通航条件。主要原因是: 由于人工挖采砂石、局部冲刷等原因, 下游河床凹凸不平, 沙丘、深槽错落, 形成多条串沟, 水流集中于串沟与航槽成较大交角冲入航槽。左汉船闸下口门区

复杂地形见图9, 副坝下泄水流集中于串沟内, 呈股流形式与航槽成40°以上交角冲入航槽, 形成较大的横流和回流。

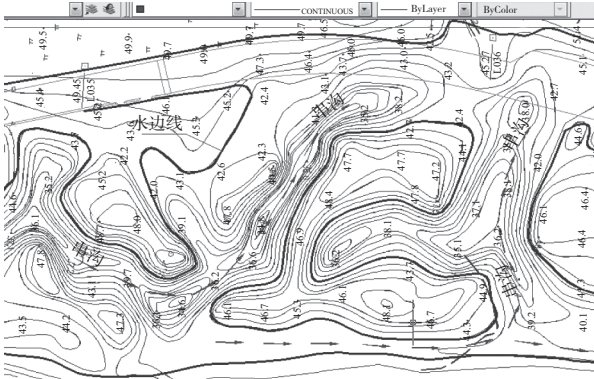


图9 左汊下口门区附近复杂地形 (等高线单位: m)

优化措施: 整平副坝下游2 300 m的河床; 局部扩宽航槽, 将口门下游280 m的航槽右扩30 m, 然后向下游顺延240 m与原航槽边直线连接, 扩宽部分底部高程同原方案, 即36.51 m, 边坡1:3。该措施的思路是允许出现强横流, 但不出现在规划的60 m航宽内, 而仅出现在扩宽的范围, 从而不影响船舶通航; 同时航槽扩宽后, 过水断面增大, 使流速得到相应减小。方案优化见图10。

在该方案下对1 800, 2 700, 4 000 m³/s共3级流量进行测试, 测试结果见图11。航槽内最大纵向流速在口门区及连接段的900 m航段内均小于2.0 m/s, 已满足规范要求, 对船舶航行十分有利。

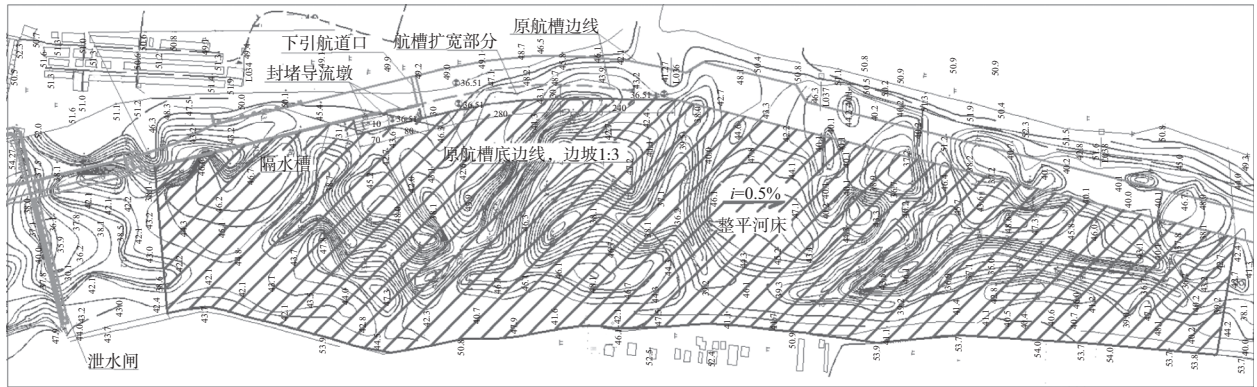
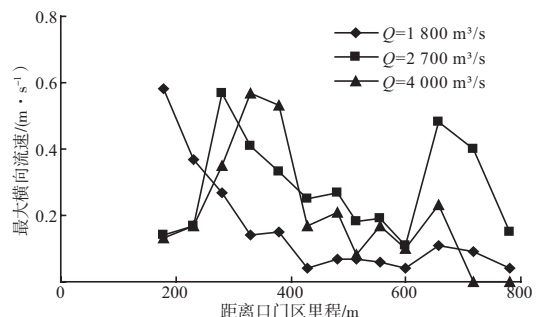
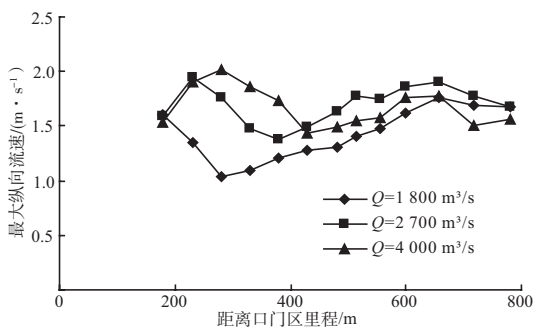


图10 左汊下口门区优化方案 (等高线单位: m)

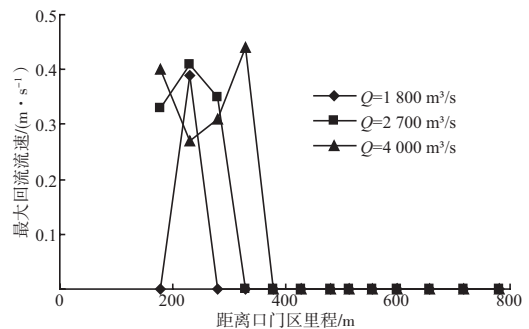
航槽内最大横向流速大多航段小于0.3 m/s, 即使存在部分航段的横流超过0.3 m/s, 其最大值为0.58 m/s, 没有超过0.6 m/s。另外, 最大横流出现的位置有随流量增大而逐渐下移的趋势。航槽内出现回流的航段很少, 仅在口门下游150~350 m范围内, 且最大回流强度不超过0.45 m/s, 基本满足规范要求。



b) 最大横向流速



a) 最大纵向流速



c) 最大回流流速

图11 左汊下口门区优化后最大流速

对比左、右汊两个方案,右汊船闸方案上游口门区回流条件不能够满足规范要求,即使通过优化方案,纵向流速、横向流速都得到较大改善,也难以满足规范要求;右汊船闸方案下游口门区水流条件恶劣,纵向流速、横向流速均超出规范要求较多;且右汊船闸方案的建设对右岸电站和新电站尾水有较大抬升,最大可达到0.76 m;右汊船闸方案基本不可行。虽然左汊船闸原方案下口门区的水流条件不能满足通航规范要求,通过工程措施将下游口门区附近2 300 m范围内的河床整平,将航槽局部扩宽,使水流提前进入扩宽的航槽内消能,可以有效改善航槽内的水流条件,使其达到规范要求;左汊船闸方案基本可行。

此河道左汊处在弯曲分汊河道较长的一汊,右汊属于较短的一汊,较长一汊在分汊口段直线段长,口门区主河槽与航道的交角也小,水流平顺,更有利于船闸的布置。

5 结论

1) 通过对澧水青山船闸设计方案建立1:100物理模型试验,船闸布置在右汊口门区水流条件难以满足通航规范要求;通航建筑物将抬高已建电站的尾水,影响发电效益。

2) 船闸等通航建筑物布置在左汊方案,对左汊下口门区2 km范围复杂地形进行整平,局部扩宽航槽,口门区水流条件基本满足规范要求。有效地解决宽浅河道河床凹凸不平,沙丘、深槽错落,串沟纵横,股流乱窜的复杂地形和流水问题。方案在通航水流条件方面优势明显,建筑物间相互不影响,建议作为推荐方案。设计最高通

航流量 $Q_{\text{总}}=16\ 113\ \text{m}^3/\text{s}$,基本满通航条件。

3) 通过对澧水青山航电枢纽布置和通航水流条件试验研究;认为弯曲分汊河道分汊口处较长汊道上直线段长度更长、水流平缓、水面比降更小、碍航因素少、通航水流条件更优;在较长汊道上更适宜布置通航建筑物。

参考文献:

- [1] 曹玉芬,周华兴. 船闸布置在弯道凹凸岸附近时通航条件分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 77-81.
- [2] 郝品正,李军,徐国兵. 微弯分汊河段航电枢纽总体布置与通航条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2004(11): 66-69.
- [3] 张艳萍,王谊,马志强,等. 大顶子山航电枢纽总体布置[J]. 东北水利水电, 2006(7): 9-10.
- [4] 赵志舟,王多垠,徐红,等. 乌江峡谷型弯曲河道通航建筑物口门区通航条件试验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008(5): 812-815.
- [5] 周家俞,尹崇清,王召兵,等. 赣江石虎塘航电枢纽船闸引航道口门区通航水流条件试验研究[J]. 红水河, 2010(6): 57-61.
- [6] 吴澎,张珊,罗少桢,等. 航电枢纽工程选址与布置[J]. 水运工程, 2011(9): 185-188.
- [7] 李焱,郑宝友,卢文蕾,等. 引航道与河流主航道的夹角对通航条件影响试验[J]. 水道港口, 2009(1): 42-48.
- [8] 吴锡荣,周严伟,肖诗汉,等. 葛洲坝水利枢纽大江下游航道水流条件分析[J]. 水运工程, 2008(4): 87-91.
- [9] 韩昌海,杨宇. 安仁铺枢纽整体模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [10] JTS 182-1—2009 渠化工程枢纽总体布置设计规范[S].
- [11] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)