

青田水利枢纽通航水流条件试验研究

姜 楚^{1,2}, 赵建钧¹, 辜晋德¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 青田水利枢纽虽位于瓯江较为顺直的河段,但受支流、潮汐及下游河道收窄的影响,建成后枢纽通航水流条件较为复杂。基于水工整体物理模型试验,对青田水利枢纽建成后的通航水流条件进行了模拟研究。模型试验研究表明,枢纽及主要通航建筑物布置基本合理,但设计方案在运行中容易出现斜流问题,尤其是在中、小流量情况下,从而影响到船舶安全进出引航道,导致通航保证率得不到保障。试验采取调整导航墙及航线等措施,对原方案进行了优化,最终提出了航道及通航建筑物的推荐布置方案,以及最大通航流量。同时对支流入汇、潮汐影响等问题进行了研究,探讨论证了在推荐布置方案及控制流量下的通航安全性。

关键词: 水利枢纽; 通航水流条件; 引航道; 口门区; 物理模型试验

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)02-0074-07

通航河流上修建水利枢纽后,船闸上下游引航道与河流连接的口门区及连接段成为过闸船舶(队)进出引航道的咽喉。船闸口门区及连接段水流条件的好坏,直接关系到船舶(队)能否顺利过坝和安全航行,因此是枢纽布置的关键问题之一^[1-2]。引航道口门区及连接段位于动静水交界区,水流条件复杂,水流一般由斜向水流和回流组成,并常伴随产生其他复杂流态^[3]。该区域水流纵、横向流速及回流强度不应过大,不应有复杂流态,如泡漩、大强度涡流等,不应有较高的波浪,否则船舶(队)不能顺利进出船闸、且威胁其安全^[4]。目前,在通航水流条件改善措施方面已有较多研究成果,但不同工程实情千差万别,所面临的水流问题不尽相同,故设计通航枢纽时,对布置方案进行模拟试验、预测并研究口门区水流条件及形成机理仍然必要。根据青田水利枢纽整体模型试验,对枢纽上下游引航道口门区及连接段通航水流条件、改善措施及其他影响因素进行了分析研究。

1 枢纽概况与模型设计

瓯江是浙江省第二大河,浙南最重要水道。青田水利枢纽位于瓯江干流中下游青田城区段,坝址位于瓯江、四都港汇合口下游约 185 m 处,是瓯江干流梯级开发规划的最末一级电站。枢纽主要建筑物从左至右依次为:左岸混凝土重力坝、单线单级船闸、25 孔泄洪闸(左 13 孔、右 12 孔)、河床发电厂房、及右岸连接建筑物(图 1)。枢纽坝址以上集水面积 13 810 km²,占瓯江流域面积的 76.3%。多年平均年流量 453 m³/s,多年平均入库径流量 143 亿 m³。电站装机容量 42 MW(3 台×14 MW),单机额定流量 306.14 m³/s,为日调节电站。该枢纽工程的主要任务以稳定瓯江青田城区段江道、改善瓯江青田城区水环境和城市景观、提高干流通航能力为主,并结合发电等综合利用^[5]。

瓯江大致由西向东流经坝址,经温州后归水温州湾。从整体上来看,坝址处于顺直微弯河段,坝址区河谷开阔,深(主)槽靠左岸,河谷宽约 680 m。坝址上游 185 m 处右岸有支流四都港入汇,下游约 1.5 km 处束窄段有温溪大桥,自温溪大桥以下为感潮河段,水面相对开阔,河宽逐渐放大,水位受径、潮流共同影响,下游

收稿日期: 2013-09-29

作者简介: 姜 楚(1989-),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要从事水利水电工程方面研究。

E-mail: jiangchu_237@163.com

水位日变幅大。上游坝址附近支流入汇、下游河段受潮汐影响,这正是本枢纽所处河段的特点,也是需研究的潜在难点。

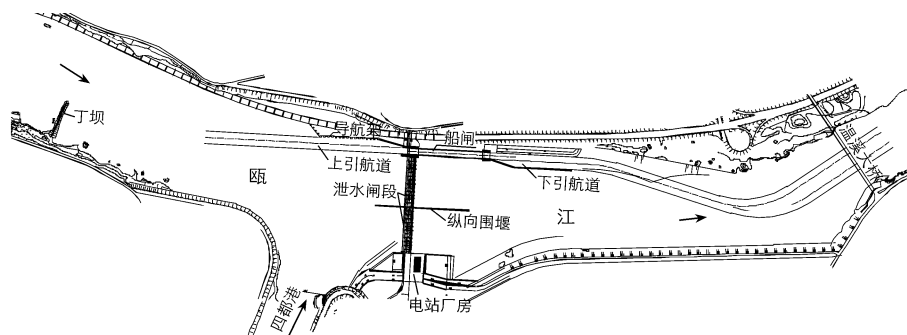


图1 青田水利枢纽整体布置

Fig. 1 General arrangement of the Qingtian hydroproject

工程位于瓯江中上游航道丽水—温溪段,规划为Ⅳ级航道,配套船闸工程通航能力为 500 t 级。该河段为山区性河道,洪水来势凶猛、暴涨暴落,洪水期间不考虑通航。泄洪时船闸不通航,也不参与泄洪。青田枢纽为低水头闸坝型结构,其洪水具有峰高、量大的特点,泄水闸泄流存在大泄量、高淹没度、低弗劳德数下消能效率较低的问题,枢纽泄洪对船闸上下游引航道及口门区通航水流条件可能影响较大。受天然条件及下游温溪大桥限制,青田枢纽引航道口门区与连接段航道中心线与水流交角较大,枢纽泄洪时,上下游通航水流条件较为复杂,需进一步论证和优化通航水流条件并提出改进措施。

根据本项研究的具体目的与内容,模型应在几何相似的条件下,满足水流运动相似和动力相似,采用 Fr 相似准则设计模型^[6];根据青田枢纽河段河势特点,考虑到模型上下游边界对通航试验水流条件的影响,模型模拟枢纽上下游各 2.5 km 河段。在最低通航水位下(上游 6.75 m,下游 -1 m),原型河道水深约 3 m,断面平均流速约 0.60 m/s,考虑模型 Re 要求,模型几何比尺不宜小于 1:100^[7]。综合考虑模型设计几何比尺 $\lambda_L = \lambda_h = 80$ 的正态模型,流速比尺 $\lambda_v = \lambda_t = 8.94$,糙率比尺 $\lambda_n = 2.08$,流量比尺 $\lambda_Q = 57\,243$ 。

针对引航道口门区及连接段水流流速测量,采用 ADV 三维流速测速系统,量程 0.1 ~ 400 cm/s;流量采用标准量水堰测控;模型水位采用可调差动式尾门进行控制。模型上航线宽 62.5 cm,航迹线方向每 50 cm 布置航道测速断面,垂直航迹线方向即每测速断面间隔 10 cm,共布置 7 个测点。

口门区水流条件控制指标^[8]:Ⅳ级航道,纵向流速 $V_y \leq 2.0$ m/s,横向流速 $V_x \leq 0.30$ m/s,回流流速 $V_{\text{回}} \leq 0.4$ m/s;连接段通航水流条件指标的控制,根据相关文献的经验与建议^[9]设定,一般认为连接段通航水流条件标准应介于口门区与内河航道之间,本文连接段沿用口门区水流的控制指标进行评判,同时以“纵向 $V_y \leq 2.5$ m/s,横向流速 $V_x \leq 0.45$ m/s”的标准作为校核。

2 初步试验结果与分析

模型试验表明,枢纽建成后,各级流量下枢纽上下游水流较为平顺,上游来流受枢纽上游右岸丁坝影响,主流偏向左岸,在近坝段向右岸偏转。来流流向与坝轴线基本呈 70° 交角。试验测得洪水流量 $Q = 11\,252$ m³/s 下(3 年一遇洪水)上游最大表面流速为 2.4 m/s,下游最大表面流速出现在温溪大桥附近束窄河段,最大流速 2.6 m/s^[5]。

初步试验不考虑支流四都港来流及下游潮汐影响,考虑到上游引航道为开敞式布置,开左侧泄水闸易致引航道斜流及回流,故尽量避免开启左侧闸。初步试验拟开启右侧闸孔,支流来流量均为 0,电站运行方式均为三机满发,上游水位为 7.0 m,其余各工况详情如下表 1。

表 1 初步试验工况

Tab. 1 Tentative test conditions

干流流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	泄流闸开启方式	下游水位/ m	干流流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	泄流闸开启方式	下游水位/ m
918.4	全关	2.85/0.25	3 500	均匀开右岸 1#~12#孔	4.51
4 500	均匀开右岸 1#~12#孔	5.00	3 000	均匀开右岸 1#~12#孔	4.22
4 000	均匀开右岸 1#~12#孔	4.79			

注：闸门开启方式相同,但不同流量开启度不同;918.4 m³/s 流量下,下游水位设置了高、低两种水位。

2.1 上游引航道通航水流条件试验结果及分析

以上各工况下,上游引航道口门区及连接段流速分布测量结果见表 2。在电站满发($Q=918.4 \text{ m}^3/\text{s}$)工况下,由于枢纽泄量较小,枢纽上游来流流速较小,上引航道口门区最大流速 0.24 m/s,纵、横向流速均可满足要求。

表 2 上游引航道口门及连接段流速测量结果

Tab. 2 Test results of upper approach

流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大纵向流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最大横向流速及描述	最大回流流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
918.4	0.25	$V_{x\max}=0.14 \text{ m/s}$	0.12
4 500	1.28	$V_{x\max}=0.53 \text{ m/s}$;口门上游 0~500 m 范围内几乎所有测点超出限值	0.22
4 000	1.08	$V_{x\max}=0.46 \text{ m/s}$;口门上游 100~500 m 范围几乎所有测点超出限值	0.21
3 500	0.95	$V_{x\max}=0.40 \text{ m/s}$;口门上游 200~500 m 范围几乎所有测点超出限值	0.20
3 000	0.76	$V_{x\max}=0.36 \text{ m/s}$;口门上游 400 m 处局部断面测点超过限值	0.20

从上引航道口门区及连接段流速分布来看,流量超过 4 000 m³/s 后,口门区和连接段横向流速均超过了 0.3 m/s,难以满足船舶安全进出闸要求;在 $Q=3\,500$ 和 $3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,引航道口门区内流速可以满足要求,但口门区上游连接段横向流速较大,主要原因是其靠近河道主流,且枢纽运行方式为开启与船闸异岸右侧闸孔,使主流偏向右侧导致与航道中心线交角过大。

2.2 下游引航道通航水流条件试验结果及分析

在电站满发工况下,由于枢纽泄量较小,电站下游低水位(0.25 m)时,下引航道口门区除个别测点横向流速略大(0.32 m/s)外,纵横向流速基本满足要求;在电站下游高水位(2.85 m)时,下引航道纵、横向流速均可满足要求。其他各工况试验结果见表 3。

表 3 下游引航道口门及连接段流速测量结果

Tab. 3 Test results of lower approach

流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大纵向流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最大横向流速及描述	最大回流流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
4 500	1.74	$V_{x\max}=0.63 \text{ m/s}$;口门下游 100~600 m 范围内所有测点均超出限值	0.25
4 000	1.66	$V_{x\max}=0.56 \text{ m/s}$;口门下游 200~600 m 范围几乎所有测点均超出限值	0.20
3 500	1.56	$V_{x\max}=0.44 \text{ m/s}$;口门下游 400~560 m 连接段范围内测点超过限值	0.21
3 000	1.53	$V_{x\max}=0.36 \text{ m/s}$;口门下游 400~560 m 连接段范围内测点超过限值	0.20

从表 3 可见,各级流量下下游引航道纵向及回流流速均满足规范要求。而在枢纽下泄流量大于 4 000 m³/s 时,斜流问题突出,下引航道口门区及连接段大范围内水流横向流速超过限值 0.3 m/s;下泄流量 3 500 m³/s 及 3 000 m³/s 时,下游口门区流速基本满足要求,但连接段局部范围内水流条件不理想。这主要是由于下游口门以下河段河道渐收窄,电站尾水下泄后受同岸外凸岸线挑流后偏往左岸;同时航线出引航道后逐渐由靠岸转向近主流区,偏右侧下泄的主流与航道中心线交角偏大。

3 上、下游引航道优化布置

3.1 上、下游引航道通航水流条件优化措施与探讨

根据初步试验结果及分析可知,上、下游引航道口门及连接段水流存在的问题均是横向流速偏大:一方面由于上下游航线在靠近主流区的航线段与主流向交角偏大;另一方面,各工况水流仅经右侧泄孔泄流,恰好在上下游均形成一定的斜冲。基于此,初步采取以下措施改善上、下游引航道水流条件。

调整上游引航道,主要考虑以下几个方面:(1)调整引航道连接段,在口门上游320 m(坝上0+720 m)处以转弯半径450 m、转角22°转向主航道,以减小航线与河道主流的交角;(2)结合下游水流条件调整枢纽运行方式,适当开启左侧闸孔,将主流适当引向左岸,减小上游主流与航线交角;(3)试验观察发现,由于上游引航道为开敞式布置,开启左侧闸孔,在水流剪切作用下,容易导致引航道调顺段形成较强的斜流及回流,需调整上游引航道隔流堤长度,因此分析比较了120、180和300 m几种隔流堤长度布置方案。

隔流堤长度较长(300 m)时,可以较好地改善待闸船舶靠船段停泊条件及进闸调顺段水流条件,但隔流堤长度过长又导致引航道外侧导墙与内侧隔流堤间连线与航道交角过大,在口门附近形成较大的斜向封门水流;隔流堤长度不足120 m时,在泄水闸一侧水流的带动下,会在引航道内形成回流。试验研究发现,隔流堤长度在180 m左右可以起到较好的效果。调整后的上游航道布置见图2,流速测量试验结果见表4。

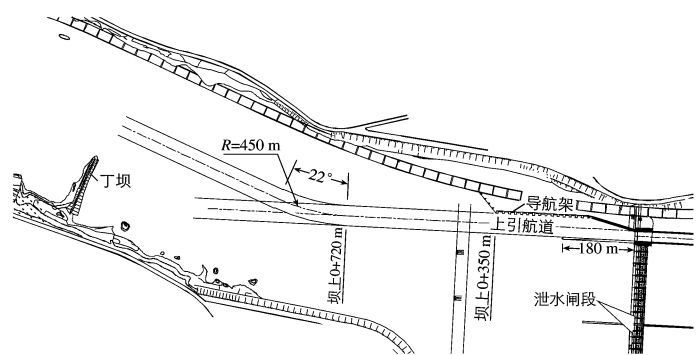


图2 上游引航道优化(方案I)(单位:m)

Fig. 2 Layout optimization of upper approach (scheme I) (unit: m)

对于下游引航道,口门区及连接段处于下游河道束窄段,在口门区采用太复杂工程措施必然会影响到河道行洪,因此改善水流条件,只能从枢纽运行调度及航线调整方面进行考虑。考虑到受右岸下泄水流斜冲,拟先调整运行调度方式(个别开启左侧闸孔),调整后流速试验结果见表4。

表4 方案I上、下游引航道口门及连接段流速测量结果

Tab. 4 Test results of upper and lower approaches of scheme I

位 置	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	枢纽运行方式	最大纵向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速及描述	最大回流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
上游	3 500	右岸2#~12#孔+ 左岸15#孔	0.97	$V_{x\text{max}}=0.38 \text{ m/s}$;口门上游400~500 m 范围连接段,航道局部测点超限值	0.20
	3 000	右岸2#~12#孔+ 左岸15#孔	0.79	$V_{x\text{max}}=0.33 \text{ m/s}$;口门上游400 m范围连接处, 个别测点超限值	0.17
下游	3 500	右岸2#~12#孔+ 左岸15#孔	1.32	$V_{x\text{max}}=0.42 \text{ m/s}$;口门下游440~560 m范围连接段局部 测点超限值,主要分布在航道中心线右侧(靠主流侧)	0.23
	3 000	右岸2#~12#孔+ 左岸15#孔	1.24	$V_{x\text{max}}=0.39 \text{ m/s}$;口门下游440~560 m范围连接段局部测 点超限值,主要分布在航道中心线右侧(靠主流侧)	0.16

从以上结果可知,上游航线调整后,相应工况下的口门区及连接段水流条件有明显改善,基本可满足安全通航要求;通过适当减少开启右侧泄孔、增开左侧泄孔,下游连接段流速超限强度及范围均有所减小。从初步试验可得出如下结论:

(1)流量在 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,枢纽上下游引航道口门区及连接段,均有大范围的超标横向流速,基本可认为干流通航流量不宜超过此值。

(2)通过采取多种改善措施, $Q=3\,500$ 和 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 情况下,水流条件改善效果明显:上游口门区水流条件基本能够满足要求,连接段流速小范围偏大;下游口门区纵、横向水流条件能够满足要求,在口门下游 400 m 以下连接段,航道中心线右侧局部范围横向流速大于 0.30 m/s ,但小于 0.45 m/s ;考虑下游进出闸船舶的操控条件及其安全性,也基本可以接受。同时可见,枢纽运行方式对上下游水流条件均有一定影响,只开右岸泄水闸时,上下游均易产生不利流态,而适当开启左岸泄水闸,则能使之均有一定改善。

(3)对于上游,库内水深大,河面开阔、流速相对较小,通航水流条件优化余地较大。而下游则相对复杂,一方面受泄流斜冲影响,连接段尤其是河心侧受影响明显;另一方面下游河道收窄,通航水流条件的优化不宜考虑过大的工程措施,只能进一步调整航线。

3.2 上、下游引航道通航水流条件的进一步优化

根据前述试验结果,拟对上下游航道布置作进一步优化。结合调整枢纽运行调度方式,对上游航线向左岸偏移,以减小上游引航道连接段转弯区处河道主流区转弯段斜向流速较大的影响,进一步改善上游水流条件;下游引航道口门区航线与河道主流流向夹角偏大(达 25°),枢纽下泄水流在航道上形成较强的斜向水流。据此,进一步优化了航道布置,形成修改方案Ⅱ,具体修改如下:转弯段下移,上引航道在坝上 $0+600\text{ m}$ 处开始转弯,转弯半径 500 m 、圆心角 24° ,如图3(a);温溪大桥通航孔左移一孔,以减小航线与主流的夹角。调整后口门区航线与船闸轴线夹角由原来的 15° 减小为 8° ,如图3(b)。

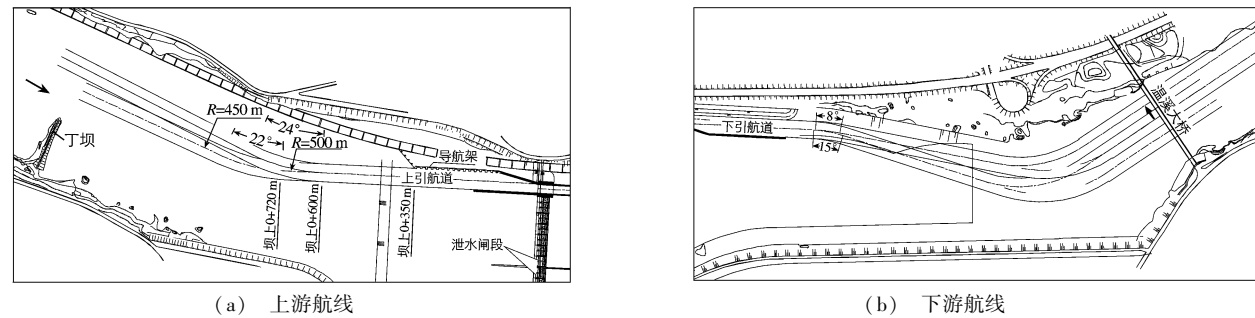


图3 上、下游航线布置优化(方案Ⅱ)

Fig.3 Layout optimization of upper and lower approaches (scheme Ⅱ)

修改后,分别进行了 $Q=3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、全开1#~25#闸孔和 $Q=2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、单开左侧闸孔两组工况试验,试验结果见表5。另外,还进行了 $Q=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、全开所有闸孔工况的试验。该工况下下游引航道口门区最大横向流速 0.26 m/s ,最大纵向流速约 1.2 m/s ;连接段最大纵向流速 1.40 m/s ,局部范围横向流速超限值,最大横向流速 0.38 m/s ,但小于 0.45 m/s 。说明枢纽下泄流量 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 已接近下游引航道安全行船的最大允许流量。

从以上试验结果可知,同工况下修改方案Ⅱ,枢纽上、下游引航道口门区及连接段通航水流条件得到了明显改善,可以保证在 $Q=3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 流量范围内,基本满足相关规范的安全通航要求。综合考虑以上试验结果,认为枢纽干流(不考虑四都港)来流最大通航流量不超过 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 为宜。

表5 方案Ⅱ上、下游引航道口门及连接段流速测量结果

Tab.5 Test results of upper and lower approaches of scheme Ⅱ

位 置	工况流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	枢纽运行方式	最大纵向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向流速及描述	最大回流流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
上游	3 500	1#~25#孔全开	0.83	$V_{x\max}=0.32\text{ m/s}$;口门上游240 m处, 航道局部测点超限值	0.12
	2 000	左13#~25#孔	0.51	$V_{x\max}=0.25\text{ m/s}$	0.10
下游	3 500	1#~25#孔全开	1.26	$V_{x\max}=0.31\text{ m/s}$;连接段个别测点流速超限值	0.16
	2 000	左13#~25#孔	1.18	$V_{x\max}=0.31\text{ m/s}$;连接段个别测点流速超限	0.14

4 支流(四都港)来流影响

四都港汇流口位于电站一侧,根据分区设计洪水结果,坝址洪水主要以瓯江干流为主,四都港来流所占比例较小, $P=20\%$ 洪峰流量为 $1\,950\text{ m}^3/\text{s}$ 。模型试验进行了上游(干流)来流 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$,四都港(支流)来流 $1\,000$ 和 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 两组试验。结果表明,四都港来流主要通过枢纽右侧泄水闸下泄,对上游引航道口门区及连接段水流条件无明显不利影响。

但是,结合以上试验研究,当流量 $Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,下游引航道口门区及连接段水流条件难以满足行船安全流速限值要求;修改方案后 $Q=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$,全开所有闸孔工况下,下游引航道口门及连接段水流条件基本满足要求。因此,上游支流对下游通航水流条件影响明显,需要重视。建议下游安全通航流量(枢纽安全通航最大下泄流量)不要大于 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

5 下游水位变幅影响

由于坝址位于感潮河段,考虑到同流量下下游水位降低对通航不利,应关注潮位下降对通航水流条件的影响。根据规范^[10]要求,潮汐影响应根据潮位频率资料进行分析研究,但枢纽河段潮汐影响段潮位资料暂缺,只有短期设置的临时水文站观测资料,限于此,试验仅主要针对下游对退潮(水位下降)的敏感性进行简化研究。

根据青田县水文站2009-01-01在坝址临时水文站的观测结果可得,无明显洪水过境情况下,坝址处水位呈现明显的“一日两高两低”规则潮型,日最大变幅达 $2.5\sim 3.0\text{ m}$;根据坝址水位流量综合平均线计算, $Q=3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,坝址综合平均水位为 4.51 m 。 $Q=3\,500\text{ m}^3/\text{s}$,1~25#孔全开,下游水位降低 1.0 m 时, $V_{x\max}=0.40\text{ m/s}$,下行航线(外侧)连接段少数点超限;1#~25#孔全开,下游水位降低 2.0 m 时, $V_{x\max}=0.43\text{ m/s}$,下行航线(外侧)连接段局部区域超限;电站满发流量下($918.4\text{ m}^3/\text{s}$),1#~25#孔全关,下游水位按最低通航水位 -1.96 m 考虑, $V_{x\max}=0.33\text{ m/s}$;下行航线(外侧)连接段个别点超限。试验结果表明,相同工况下,下游水位降低,口门区及连接段通航水流条件恶化;水位降低幅度愈大,恶化范围和程度愈大。由此可见,潮汐对下游河道通航水流条件影响明显,表现在低潮位下通航水流条件变差。根据原设计,最低通航水位为 -1.96 m 基本满足安全通航的通航水流条件流速要求。

6 结 语

青田水利枢纽,受多种因素制约,船闸引航道水流条件较复杂。通过1:80枢纽水工整体物理模型试验对枢纽通航水力学问题进行了研究。综合分析试验成果,可得出如下结论:

(1)枢纽及主要通航建筑物布置基本合理,上引航道采用敞开式布置时,口门区及引航道内流态对泄水闸运行方式敏感;下游口门区及连接段对泄水闸及电站运行较敏感,船闸异岸侧的电站及泄水闸运行时,下泄水流易对冲下游口门导致超标斜流产生,宜适当两岸对称开启泄水孔。

(2)口门区及连接段的布置主要考虑避开主流或减小航线与主流交角。上引航道位于库区内,水深大且变化较小,航道布置较易,支流入汇对上游影响小;下引航道位于河道束窄段,调整航道布置要考虑对行洪的影响;本工程中,上游支流的影响主要表现在与干流流量叠加后枢纽下泄量增加对下游的影响。下游通航水流条件对潮位变化较敏感,低潮位下通航水流条件变差,故对此需进一步分析研究。

(3)采取调整引航道导墙及进出闸航线布置等措施对改善上下游引航道口门及连接段通航水流条件效果明显,推荐采用修改方案Ⅱ。上游干流最大通航流量为 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$,支流四都港入汇 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量时,对上游通航无明显不利影响;下游最大通航流量不宜超过 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$,由于各级流量下连接段靠近主流侧局部范围水流条件稍差,建议上行进闸船舶靠岸侧行驶,下行出闸船舶靠河心一侧行驶。

参 考 文 献:

- [1] 普晓刚,李俊,郝媛媛,等.湘江土谷塘航电枢纽船闸通航水流条件优化试验研究[J].水道港口,2011(5):346-350.

- (PU Xiao-gang, LI Jun, HAO Yuan-yuan, et al. Navigation flow condition optimization of Tugutang navigation-power junction of Xiangjiang River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2011(5): 346-350. (in Chinese))
- [2] 叶海桃. 船闸引航道口门区流态的模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (YE Hai-tao. Model test research for flow conditions of approach channel of the shiplock[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [3] 周淑芹. 引航道口门区通航水流条件的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008. (ZHOU Shu-qin. Research of navigation flow conditions of the approach channel of the shiplock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [4] 黄碧珊, 张绪进, 舒荣龙, 等. 新政电航枢纽船闸引航道口门区通航条件研究[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(3): 120-124. (HUANG Bi-shan, ZHANG Xu-jin, SHU Rong-long, et al. Study on the flow conditions at the entrance area of shiplock approach channel in Xinzheng hydro-power station[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, 22(3): 120-124. (in Chinese))
- [5] 胡亚安, 宣国祥, 赵建钧. 青田枢纽水工整体模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013. (HU Ya-an, XUAN Guo-xiang, ZHAO Jian-jun, et al. Hydraulic model test study on Qingtian hydroproject[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2013. (in Chinese))
- [6] 水利水电科学研究院, 南京水利科学研究院. 水工模型试验[M]. 2 版. 北京: 水利电力出版社, 1985. (Institute of Water Resources and Hydropower Research, Nanjing Hydraulic Research Institute. Hydraulic model test[M]. 2th ed. Beijing: China WaterPower Press, 1985. (in Chinese))
- [7] JTJ 235-2003, 通航建筑物水力学模拟技术规程[S]. (JTJ 235-2003, Technical regulation of modeling for hydraulics of navigation structures[S]. (in Chinese))
- [8] JTJ 305-2001, 船闸总体设计规范[S]. (JTJ 305-2001, Code for master design of shiplocks[S]. (in Chinese))
- [9] 周华兴. 船闸口门外连接段通航水流条件标准的初探[J]. 水运工程, 2004(4): 62-67. (ZHOU Hua-xing. An approach to the standard of navigation flow condition at the connection reach outside the lock entrance[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(4): 62-67. (in Chinese))
- [10] GB 50139-2004, 内河通航标准[S]. (GB 50139-2004, Navigation standard of inland waterway[S]. (in Chinese))

Experimental studies on flow condition for navigation of Qingtian hydroproject located at Oujiang River

JIANG Chu^{1,2}, ZHAO Jian-jun¹, GU Jin-de¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Although located at a straight reach of Oujiang River, the Qingtian hydroproject is faced with complex flow conditions for navigation, for there is a few unfavorable factors such as tributary upstream of the hydroproject, tide and narrowing waterway downstream of the hydroproject. Based on an integrated physical model test studies, the navigable flow conditions at the approach channel entrance area and the connection section of the shiplock of the original layout have been simulated and analyzed. The model test results show that the original layout of the hydroproject and the navigable structures are basically reasonable, however the cross current is easy to appear at the entrance area of the approach channel especially under circumstances of the median and low flow discharge, and it must result in unsafe navigation of vessel passing through the approach channel and also will affects the waterway throughput capacity of the hydroproject. Regulating the guide walls and waterway regulation line and optimizing the original layout schemes of the navigation structures, finally a series of the proposed schemes are presented to optimize the layouts of the waterways and navigation structures as well as the maximum design navigable discharge. In addition, some influences of the tributary and tide upon the navigable flow conditions are discussed, and navigation safety concerned to the proposed layout schemes and controlled discharge is demonstrated in the study.

Key words: hydroproject; navigable flow conditions; approach channel; entrance area; physical model tests