

分汊河段船闸扩建对已有建筑物运行影响 及改善技术研究

李君涛, 冯小香, 王鑫

(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: 航运的发展促使内河航运枢纽中的船闸扩建工程日益增多, 在已建枢纽基础上进行船闸扩建势必会改变现有工程河段的边界条件和水动力特征, 从而对已有建筑物运行产生影响。结合富春江船闸扩建工程, 采用整体物理模型试验, 研究了分汊河段扩建船闸对已有建筑物的影响及相关改善技术。结果表明: 富春江船闸位于峡谷分汊河段, 扩建船闸及导航墙的兴建, 导致汉道分流比发生明显改变, 左汊主河道分流量增加、水位壅高, 对发电、行洪产生不利影响; 为减小扩建船闸的影响, 需在右汊船闸隔流墙与江心洲之间开挖一条行洪渠道, 以尽量维持河道原有分流比, 但行洪渠道紧邻下游口门区, 受渠道内集中水流影响, 口门区通航水流条件不满足要求, 船闸通航条件与发电、行洪相互制约; 提出了在汉道进口设置节制闸控制分流的创新技术, 通过节制闸调节两汊分流比, 能够解决船闸通航与枢纽建筑物运行之间的相互影响问题。

关键词: 船闸扩建; 分汊河段; 改善技术; 节制闸; 枢纽工程

中图分类号: U641.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0129-05

Influence of ship lock extension over branching channel on existing structures and its improvement measures

LI Juntao, FENG Xiaoxiang, WANG Xin

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

Abstract: The development of shipping increases the number of ship lock extension projects in inland navigation hydro-junctions. The extension of ship locks on the basis of existing structures will inevitably change the boundary conditions and hydrodynamic characteristics of the river reach near the existing project, which in turn will impact the operation of the existing structures. Based on the ship lock extension project in Fuchun River, the impact of ship lock extension project on the existing structures and its improvement measures were analyzed through the overall physical model test. Since the ship lock in Fuchun River is located in the branching channel of gorge area, the diversion ratio of branching channels has changed obviously due to the construction of ship lock extension and the guide wall. The water level and flow of the left branch, which is the main channel, increased and affected the power generation and flood discharge adversely. In order to reduce the adverse influence, it is suggested to excavate a flood channel between the partition wall of the right branch and the mid-channel bar to maintain the original diversion ratio of the river to the fullest extent. However, the flood channel is close to the downstream entrance area, and the navigable flow conditions in this area do not meet the requirements under the influence of concentrated flow in the flood channel. Therefore, navigation condition of the ship lock and the function of power generation and flood discharge are incompatible. Finally, the innovative measure of controlling diversion by setting control gate at the entrance of branching channel is put forward. By regulating the diversion ratio of the two branches, the problem of the interaction between ship lock navigation and hydro-

收稿日期: 2019-09-10; 修回日期: 2019-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809130)

作者简介: 李君涛(1983-), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事枢纽通航水力学问题研究。

junction operation can be solved.

Key words: ship lock extension; branching channel; improvement measure; control gate; hydro-junction

1 研究背景

在综合运输体系中,水路运输由于其节能环保、成本低廉等优势,发展潜力巨大。我国有丰富的可持续利用的水运资源,但伴随着内河高等级航道网的实施与推进,众多已建通航枢纽船闸通过能力严重不足或者与规划的航道等级不符,船闸扩能改造逐渐成为内河航运工程建设的重点^[1-2]。而在已建枢纽基础上进行船闸扩建势必会改变现有工程河段的边界条件和水动力特征,从而对已有船闸、电厂、泄洪闸等建筑物运行产生影响。因此,在船闸扩建工程前期阶段,需充分论证工程建设对枢纽建筑物运行的影响程度,并提出相应的改善措施,以保证各建筑物间的相互协调。现有研究成果表明,扩建船闸对已有建筑物运行的影响,与扩建船闸的闸位选择密切相关,当扩建船闸位于已有船闸外侧时,主要是对已有船闸的通航条件产生不利影响,对于船闸上游,由于扩建船闸引航道的开挖,引入扩建船闸上游口门区的水流斜穿已有船闸口门区,导致其通航水流条件恶化;对于船闸下游,扩建船闸引航道的开挖、边界条件的扩大吸流,会造成已有船闸口门区斜流强度增加^[3-5]。其相应的改善技术包括调整扩建船闸轴线间距、在已有船闸口门区兴建导流墩、透空导流堤等^[6-9];当在现有闸位拆除已建船闸扩建高等级船闸或者在原船闸下游新建高等级船闸时,由于新建船闸尺度以及导航墙长度的增加,往往会缩窄河道宽度,从而造成近坝段水位抬升,对电厂发电以及枢纽泄洪产生不利影响,其改善措施包括新建船闸引航道采用折线型、圆弧型隔流堤,或者疏浚河道等^[10-19]。上述研究成果大都是单一河段,而对于支流入汇、分汊等复杂河势条件的船闸扩建工程,对已有建筑物的影响问题则更为复杂,结合富春江船闸扩建工程,采用比尺为1:100的整体水工物理模型,开展了分汊河段扩建船闸对已有建筑物的影响及相关改善技术研究。

2 富春江船闸扩建工程概况

2.1 富春江水电站概况

富春江水电站位于钱塘江中下游、浙江省桐庐县富春江七里泷峡谷处,水电站所处河段属山区性多汊河段,坝址处两岸高山夹峙,河道狭窄,大坝下游附近有一江心洲(唐家洲)将河道分为左右两汊,

左汊为主河道,河宽约300 m,河道较为顺直。右汊为通航汊道,河宽约100 m,河道微弯。

富春江水电站枢纽主要建筑物包括电站厂房、泄洪闸、船闸等,其中电站厂房布置在左岸,共有发电机组6台,总装机容量为357.2 MW,满负荷运行时,每台设计下泄流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。大坝设有17孔泄洪闸,单孔设计泄洪量为 $1\,100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。原有船闸布置在枢纽右岸,为100 t级船闸,有效尺度为 $100 \text{ m} \times 14.4 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ (长×宽×门槛水深),设计水头约20 m。富春江船闸扩建前枢纽布置及下游河势见图1。

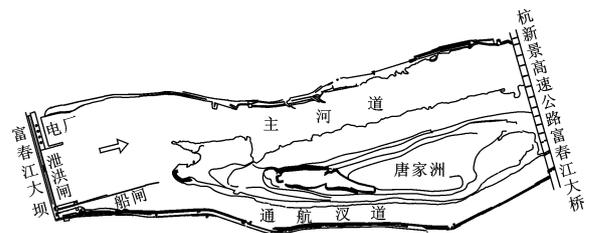


图1 富春江船闸扩建前枢纽布置及下游河势图

2.2 扩建船闸布置难点及工程方案

富春江船闸是富春江水电站枢纽的重要组成部分,原有船闸设计为100 t级,最大年通过能力仅为 $80 \times 10^4 \text{ t}$,已远远不能满足日益增长的水路货运量需求。根据《浙江省内河航运发展规划》,富春江船闸扩建工程按IV级通航标准建设,为适应钱塘江水运远期发展需求,扩建船闸尺度需满足1 000 t级船舶的过闸要求^[20-21]。

由于富春江电站所在河段的河势条件复杂,扩建船闸工程布置存在以下技术难点:(1)两岸高山夹峙、河道狭窄,枢纽建设期没有预留二线通航设施的位置,也不具备布置二线通航设施的陆域条件;(2)已有船闸上闸首与大坝坝体为整体浇注混凝土,老船闸拆除重建施工势必影响大坝安全和电站正常运行,即现有船闸不能拆除重建;(3)坝下河道为分汊河段,扩建船闸在满足通航安全的前提下,不能对电厂发电及河道行洪产生不利影响。

基于上述技术难点,在工程前期论证阶段提出了3大类布置方案即通航隧洞方案、新建升船机方案和现有船闸扩建改造方案,综合考虑项目建设的难度、投资、安全以及各种外部协调关系,最终确定采用现有船闸扩建改造方案。针对受限于已建船闸不可拆除且无预留二线船闸扩建空间条件的问题,

提出在老船闸下游新建一高等级船闸,同时利用老船闸闸室作为新船闸上游引航道的工程布置方案^[12],具体为:扩建船闸的上闸首与已有船闸的下闸首相连,闸室采用向右侧拓宽的不对称广腹式,上闸首口门宽 12.4 m,闸室有效宽度 23.0 m,下闸首宽 23.0 m。扩建船闸总长 356 m,其中闸室有效长度 300 m、门槛水深 4.5 m。上闸首与上游引航渠道相通,闸墙顶高程为 26.0 m,闸室和下闸首墙顶高程为 26.0 m。下游导航墙总长 375 m,其中导航直线段长 160 m,导航墙顶高程为 15.0 m。扩建船闸工程平面布置见图 2。

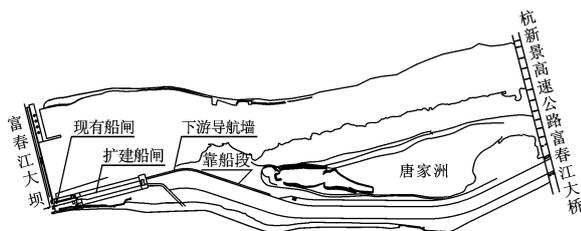


图2 富春江船闸扩建工程平面布置图

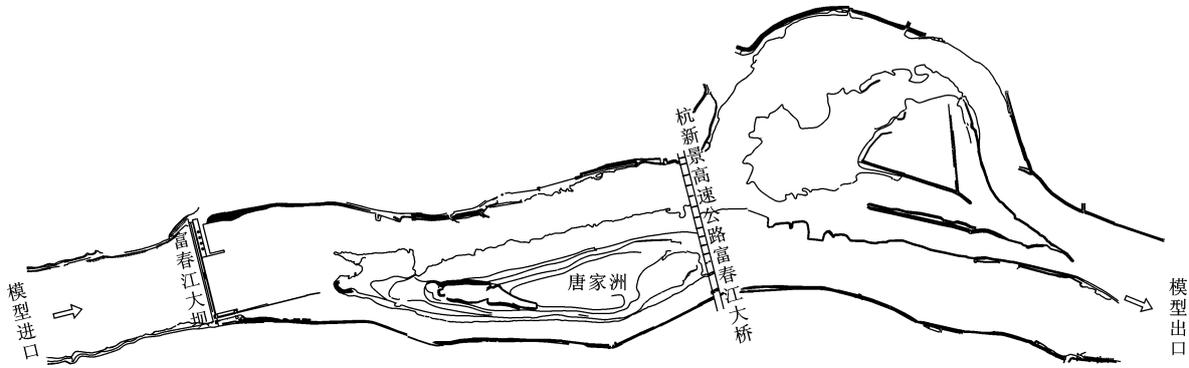


图3 富春江船闸扩建工程整体物理模型范围

3 富春江船闸扩建工程整体物理模型概况

整体物理模型为 1: 100 的正态模型,模拟原型河道长度约 5.2 km,其中富春江大坝上游长约 0.8 km,大坝下游约 4.4 km,宽度为 600 ~ 1 500 m 不等,整体模型范围见图 3。模型按照弗汝德准则设计,模型水流运动满足重力相似、阻力相似、水流连续性相似等相似条件,得出模型的各比尺为:几何比尺 $\lambda_L = \lambda_h = 100$,流量比尺 $\lambda_Q = 100\ 000$,流速比尺 $\lambda_v = 10$,河床糙率比尺 $\lambda_n = 2.154$ 。在以上比尺条件下,模型最小水深 $h_{\min} > 0.03$ m,能够满足避免表面张力影响的要求,模型雷诺数 $Re_m > 1\ 000$,满足模型水流运动为紊流的要求。模型依据原型观测资料进行了沿程水面线和表面流速流向的验证,验证结果表明,模型与原型的差值在规范允许范围内,说明物理模型的阻力以及水流运动达到了与原型相似的要求。

4 扩建船闸对已有建筑物运行的影响

富春江水电站是华东地区的大型水电站之一,是华东电网的重要电力来源,同时也对下游城市的防洪安全起到非常重要的作用^[22],为此电站管理部门要求扩建船闸不能对大坝泄洪及电厂发电产生不利影响,即工程建设不能造成电站尾水位和下游河道水位大幅壅高。对此,经整体水工模型试验论证表明,由于扩建船闸采用在已有船闸下游紧接新建高等级船闸的布置方案,且枢纽下游紧邻分汊河段,扩建船闸闸室及下游导航墙的兴建,大幅度改变了坝下分汊河段的分流比,导致左汊主河道分流比明显增加,电站尾水位及泄水闸泄洪时的坝下河段水位壅高明显,不同流量级船闸扩建前后主河道分流比以及河道水位壅高情况见表 1。

表1 船闸扩建后左汊主河道分流比及坝下最大水位壅高

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	主河道分流比/%		坝下最大水 位壅高/m	备注
	现状	船闸扩建		
3070	67.5	98.6	0.60	6 台电站满发
7340	69.5	88.8	0.69	6 台电站发电,同时泄水闸弃水
10580	69.7	87.1	0.72	2 年一遇洪水
12714	69.9	87.0	0.73	3 年一遇洪水
15326	71.4	86.4	0.69	10 年一遇洪水
17584	70.2	85.5	0.57	20 年一遇洪水

由表 1 可见,在机组发电工况(流量 $Q = 3\ 070$ 、 $7\ 340\ \text{m}^3/\text{s}$),左汊主河道分流比增加约 20% ~ 30%,电站尾水位抬高在 0.6 m 以上;在枢纽泄洪工

况下,左汊主河道分流比增加约15%~17%,河道水位抬高在0.57~0.73 m。扩建船闸工程对电厂发电和枢纽泄洪影响较大,须采取必要的工程措施减小其影响。

5 扩建船闸对已有建筑物运行影响的改善技术研究

5.1 江心洲右侧开挖行洪渠道

富春江扩建船闸工程建设造成下游分汉河段的分流比大幅调整,是对已有建筑物运行产生不利影响的关键所在,对此提出的改善措施是将下游江心洲(唐家洲)右侧进行局部开挖,在唐家洲与船闸下游引航道之间形成一条行洪渠道,以增大右汊河道过流量,减小左汊主河道的分流比,开挖行洪渠道宽45 m,底标高为5.0 m,同时为增大左汊主河道的行洪能力,将唐家洲左侧边滩进行切滩,底标高为5.0 m。改善措施布置图见图4。

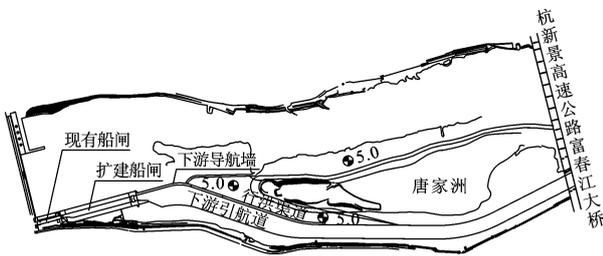


图4 行洪渠道改善措施布置图(单位:m)

经模型试验论证,上述改善措施实施后左汊主河道分流比明显减小,虽然较工程前分流比仍有所增加,但由于边滩的疏浚,行洪能力较改善措施实施前大幅增强,河道水位壅高值大都在0.1 m左右(表2),基本满足电厂发电及防洪安全的要求。

表2 行洪渠道实施后左汊主河道分流比及坝下最大水位壅高

流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	主河道分流比/%			坝下最大水位壅高/m	备注
	现状	船闸扩建	行洪渠道		
3070	67.5	98.6	84.9	0.06	6台电站满发
7340	69.5	88.8	83.0	0.11	6台电站发电,同时泄水闸弃水
10580	69.7	87.1	81.8	0.12	2年一遇洪水
12714	69.9	87.0	81.4	0.13	3年一遇洪水
15326	71.4	86.4	78.9	0.09	10年一遇洪水
17584	70.2	85.5	80.0	0.06	20年一遇洪水

该改善措施虽然能有效解决扩建船闸对电厂发电及防洪安全造成的不利影响问题,但由于河道右汊分流完全集中在相对狭窄的行洪渠道内,渠道内流速较大,且行洪渠道出口即为船闸下游口门区,受渠道大流速出流影响,口门区斜流强度较大(图5),各流量级下口门区内横、纵向流速均大幅超出规范要求(表3),通航水流条件较为恶劣,船舶进出船闸下游引航道口门区极为困难。由此可见,开挖行洪渠道对改善行洪条件与船闸本身的通航条件相互影响,需进一步寻求与两者相适应的改善技术措施。

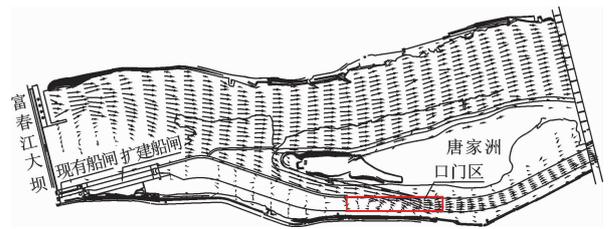


图5 行洪渠道及口门区流场图

表3 行洪渠道实施后船闸下游口门区水流流速

流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	最大横向流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大纵向流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	备注
3070	0.80	2.22	《船闸总体设计规范》(JTJ305-2001)要求口门区横向流速不大于0.3 m/s、
7340	0.99	3.83	
12714	1.00	4.40	纵向流速不大于2.0 m/s。

5.2 分流口设置分水节制闸

通过上节的试验成果可以看出,分汊河段扩建船闸通航条件与已有建筑物发电、行洪相互制约,如何在不影响发电、行洪的前提下,有效解决船闸下游口门区通航水流条件成为制约工程建设的一项技术难题。对此,模型进行了多组次的改善措施试验,如在开挖行洪渠道的前提下,下游口门区左侧(行洪渠道出口)设置导流墩、透空堤等导流建筑物以及扩大行洪渠道断面面积等。试验表明,由于口门区斜流强度大,单纯设置导流建筑物难以达到有效改善通航水流条件的目的。扩大行洪渠道断面,理论上可以减小渠道流速,但因该渠道为一分流明渠,断面面积扩大的同时也使得渠道内的分流量增加,因此也未能起到有效降低渠道流速、改善口门区水流条件的作用。在上述试验成果的基础上,通过进一步研究分析,提出了在行洪渠道进口设置一座对分

流量可控的节制闸,通过调节节制闸的闸门开度,控制行洪渠道的分流量^[23],在保证左汊主河道水位基本不壅高的前提下,再通过扩大行洪渠道断面面积并辅以导流墩的综合优化工程措施,达到降低渠道水流流速,改善口门区通航水流条件的目的。具体改善措施如下:

(1)在行洪渠道进口处设置 3 孔分水节制闸,单个闸孔净宽 12 m;

(2)调整行洪渠道出口方向与右汊内航道走向基本一致,同时将底标高降低为 3.0 m;

(3)将唐家洲左侧边滩切滩底标高降低为 4.0 m;

(4)在洪渠道出口设置 4 个导流墩,单个导流墩长 20 m,宽 2 m,导流墩间距 30 m。分水节制闸方案平面布置见图 6。

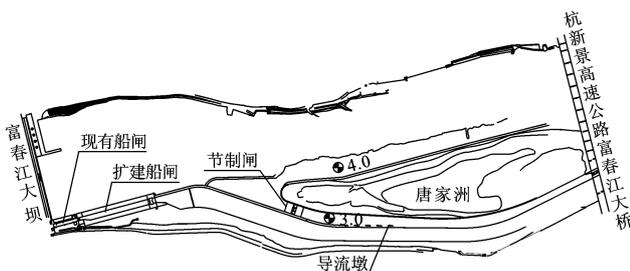


图 6 分水节制闸措施工程平面布置图(单位:m)

分水节制闸改善措施实施后,在扩建船闸最大设计通航流量(12 714 m³/s)以下,通过调节节制闸的开度控制左、右两汊分流比,保证左汊主河道水位壅高在 0.1 m 以内,试验提出了各典型流量下的闸门开度,见表 4。在河道流量超过 12 714 m³/s 后,节制闸完全敞泄泄流,此时各级洪水流量左汊主河道的水位壅高也均在 0.1 m 以内,满足行洪要求。此外,在分水节制闸的调控以及其他综合措施的作用下,船闸下游口门区水流条件较单一的行洪渠道方案也有明显改善,各级通航流量下口门区横、纵向流速均满足规范要求,见表 5。

表 4 分水节制闸实施后左汊主河道分流比及坝下最大水位壅高

流量/ (m ³ · s ⁻¹)	主河道分流比/%			坝下最大 水位壅高/ m	节制闸 开度/ m
	船闸 扩建	行洪 渠道	分水 节制闸		
3070	98.6	84.9	87.3	0.04	2.1
7340	88.8	83.0	83.4	0.06	4.9
10580	87.1	81.8	81.7	0.07	5.8
12714	87.0	81.4	81.5	0.08	6.8
15326	86.4	78.9	79.0	0.10	全开
17584	85.5	80.0	82.6	0.07	全开

表 5 分水节制闸实施后船闸下游口门区水流流速

流量/ (m ³ · s ⁻¹)	最大横 向流速/ (m · s ⁻¹)	最大纵 向流速/ (m · s ⁻¹)	备注
3070	0.14	0.64	《船闸总体设计规范》 JTJ305 - 2001 要求口
7340	0.27	1.51	门区横向流速不大于 0.3 m/s、纵向流速不
12714	0.32	1.95	大于 2.0 m/s。

6 结 论

(1)汊道型河流节制闸控制分流新技术是结合富春江船闸扩建工程中遇到的船闸通航条件与电厂发电、河道行洪相互制约问题,提出的创新设计理念与创新技术。

(2)通过分水节制闸调节左右两汊分流比,从而达到对电站尾水、船闸通航水流条件和河道行洪多控的目的,有效协调了船闸通航与电厂发电、河道行洪的关系。

(3)分流节制闸的应用,为改善分汊河段船闸口门区通航水流条件提供了新的解决思路,尤其是对于解决空间受限的扩建船闸工程布置及其对已建枢纽建筑物的运行影响问题具有一定的技术优势,可供类型工程借鉴。

参考文献:

[1] 金国强,张公略,李浙江,等.富春江船闸扩建改造工程创新设计与实践[J].水运工程 2018(2):98-104.

[2] 李云,胡亚安,宣国祥,等.国家高等级航道通航枢纽及船闸水力学创新与实践[J].水运工程,2016(12):1-9.

[3] 李君涛,郝媛媛.湘江株洲航电枢纽二线船闸建设对一线船闸通航条件影响研究[J].水运工程,2013(6):103-107.

[4] 余丹亚,王广禄,王常红.韩江东山枢纽二线船闸通航条件试验研究[J].水道港口,2018,39(4):465-469.

[5] 刘中峰,刘达,黄本胜,等.孟洲坝枢纽二线船闸上引航道通航水流条件试验研究[J].水运工程,2019(1):119-125.

[6] 李君涛,郑旺,李桦.内河航电枢纽扩建二线船闸轴线选择研究[J].水道港口,2014,35(1):62-65.

[7] 刘俊涛,庞雪松,潘荣友.长洲枢纽三线四线船闸平面布置研究[J].水道港口,2013,34(1):66-72.

[8] 李君涛,普晓刚,张明.导流墩对狭窄连续弯道枢纽船闸引航道口门区水流条件改善规律研究[J].水运工程,2011(6):100-105. (下转第 141 页)

- [9] 李志威,王兆印,贾艳红,等. 三峡水库蓄水前后长江中下游江心洲的演变及其机理分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 65-73.
- [10] 高超. 基于 MSS/TM/ETM 图像的长江马芜铜段江心洲演化研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 135-141.
- [11] DEFINA A. Numerical experiments on bar growth[J]. Water Resources Research, 2003, 39(4): 285-285.
- [12] WANG Bo, XU Y J. Dynamics of 30 large channel bars in the Lower Mississippi River in response to river engineering from 1985 to 2015[J]. Geomorphology, 2018, 300(1): 31-44.
- [13] LUCHI R, HOOKE J M, ZOLEZZI G, et al. Width variations and mid-channel bar inception in meanders: River Bollin (UK)[J]. Geomorphology, 2010, 119(1): 1-8.
- [14] WINTENBERGER C L, RODRIGUES S, CLAUDE N, et al. Dynamics of nonmigrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France)[J]. Geomorphology, 2015, 248: 185-204.
- [15] 李晓鹏. 湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.
- [16] 刘海, 殷杰, 陈晶, 等. 基于遥感影像的丹江口水库水域面积动态变化与原因研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11): 1759-1766.
- [17] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [18] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [19] 刘培亮, 毛德华, 周慧, 等. 1990-2013年资水流域汛期径流量变化规律分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(Z1): 6-13.

(上接第133页)

- [9] 张兰芳, 陆峰, 雷兴. 西津水利枢纽一、二线船闸轴线间距研究[J]. 西部交通科技, 2018(4): 191-195.
- [10] 叶玉康, 刘晓平, 张宇, 等. 弯曲河段船闸口门区通航水流条件探讨[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 72-75+87.
- [11] 孙保虎, 李君涛. 汉江雅口航运枢纽船闸通航条件试验研究[J]. 水运工程, 2017(1): 94-97+120.
- [12] 李君涛, 闫涛, 王艳华. 汉江雅口航运枢纽泄流能力试验研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 38-41.
- [13] 徐进超, 李云, 宣国祥, 等. 船闸泄水作用下引航道中动水冲沙规律[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 186-195.
- [14] 胡旭跃, 许晓琳, 沈小雄. 江心洲型船闸通航安全问题及改善措施研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 94-97.
- [15] 李君涛. 汉江雅口航运枢纽平面布置特点分析及优化布置研究[J]. 水道港口, 2017, 38(3): 258-262.
- [16] 伍志元, 蒋昌波, 陈杰. 泄水闸开启方式对通航水流条件的影响[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 73-77+82.
- [17] 彭伟, 冯小香, 普晓刚. 船闸下游引航道口门区急流碍航改善措施比选[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(10): 47-52.
- [18] 符蔚, 王能, 李志威, 等. 分汊河段船闸引航道整治试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 17-22.
- [19] 郝媛媛, 普晓刚, 李君涛, 等. 长沙枢纽船闸下游口门区出口支流入汇段通航条件研究[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 399-403.
- [20] 曹一中, 张公略, 金国强, 等. 富春江船闸扩建改造工程总体布置方案[J]. 水运工程, 2009(9): 136-141.
- [21] 杨娟, 黄靖, 程开宇. 富春江船闸扩建改造工程影响分析[J]. 浙江水利科技, 2012(4): 8-12+20.
- [22] 董志俊, 李君涛, 郝媛媛. 富春江船闸扩建改造工程平面布置优化研究[J]. 水道港口, 2009, 30(5): 357-360.
- [23] 王毓莹. 基于泄洪移民区域分汊河道泄流相互影响的模型试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 139-145.