



# 嘉陵江水东坝航运枢纽工程坝址方案<sup>\*</sup>

姜兴良<sup>1,2</sup>, 黄道刚<sup>1</sup>, 樊 锐<sup>3</sup>, 刘海民<sup>1</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007;  
3. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510635)

**摘要:** 与常规渠化工程相比, 在已建渠化梯级间增建航运梯级的坝址选择时, 存在梯级间最低通航水位衔接和对已建电站发电影响分析等技术难题, 研究案例较少。以嘉陵江水东坝航运枢纽工程坝址选择为例, 采用对库尾河段水深、河势、地形地质、淹没损失等条件进行利弊分析的方法, 提出坝址初选、枢纽建筑物布置和确定枢纽正常蓄水位的思路, 从水位衔接、库区景观、对上下游已建电站发电影响、施工导流及工程投资等方面进行坝址综合比选。推荐复兴场坝址为水东坝航运枢纽建设坝址。

**关键词:** 航运枢纽; 坎址; 方案; 嘉陵江

中图分类号: U643.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0101-06

## Dam site plan for Shuidongba navigation project of the Jialing River

JIANG Xingliang<sup>1,2</sup>, HUANG Daogang<sup>1</sup>, FAN Rui<sup>3</sup>, LIU Haimin<sup>1</sup>

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;  
2. Research and Development Center on Inland Navigation Construction Technology, CCCC, Beijing 100007, China;  
3. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** Compared with the common canalization project, there are some technical problems of dam site selection, such as the connection of the lowest navigable water level between the hydro-junction and the analysis of the impact on the power generation of the built hydro-power station, when the dam site is added to the existing channelization cascades. The research cases are few. Taking the dam site selection of Shuidongba navigation hydro-junction project in the Jialing River as an example, we analyze advantages and disadvantages of conditions of water depth, river regime, topography and geology, and submergence loss of the section of the reservoir tail, put forward ideas of preliminary selection of dam site, layout of key buildings and determination of normal water level of key project, and carry out the comprehensive dam site selection from the aspects of water level connection, reservoir landscape, influence on power generation of built power stations, construction diversion and project investment, etc. The conclusion is that the dam site of Fuxingchang is recommended as the dam site of Shuidongba navigation hydro-junction.

**Keywords:** hydro-junction; dam site; plan; the Jialing River

航运枢纽坝址选择与自然条件、平面布置、库区淹没、施工组织等因素密切相关, 对工程投资、效益发挥影响显著, 是工程建设的重点问题。交通行业的 JTS 182-1—2009《渠化工程枢纽总体设计规范》<sup>[1]</sup> 规定了坝址选择的条件和原则性要

求; 闵朝斌<sup>[2]</sup>针对渠化工程中坝址选择的问题, 提出了坝址、坝线选择的原则; 刘运化等<sup>[3]</sup>从工程布置、防洪影响、航运条件、淹没浸没影响等方面对钱塘江姚家航运枢纽坝址方案进行比选研究; 左卫华等<sup>[4]</sup>从地质条件、工程布置、施工组

收稿日期: 2023-08-03

\*基金项目: 北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会科技服务品牌机构发展基金项目(20230467193)

作者简介: 姜兴良 (1983—), 男, 正高级工程师, 从事港航工程咨询设计及项目管理。

织等方面对广西右江鱼梁航运枢纽工程坝址方案进行比选；栾约生等<sup>[5]</sup>从地质角度对湖北省某航运枢纽坝址进行比较分析，提出优选坝址和地基处理的建议。交通、水利行业的规范中，关于在已建枢纽间增建航运梯级的坝址选择思路，尚无针对性的要求，相关研究案例也比较有限。

拟建水东坝梯级位于已建上石盘梯级与亭子口梯级之间，其主要开发任务是解决库尾航道水位衔接问题，同步改善昭化古城城市水景观。在确定水东坝梯级坝址位置时，对亭子口库尾河段水深、河势、地形地质、水位衔接、库区景观、对上下游已建电站发电影响、施工导流及工程投资等方面进行坝址综合比选，得出推荐坝址。本文成果可为类似工程提供参考和借鉴。

## 1 工程概况

嘉陵江是长江上游的一级支流，是《全国内河航道与港口布局规划》<sup>[6]</sup>中的高等级航道之一。目前，嘉陵江干流广元以下已建成上石盘、亭子口、苍溪等 15 座梯级，利泽梯级在建，仅水东坝和井口 2 个梯级未建。

亭子口枢纽位于苍溪县境内，是嘉陵江干流开发中唯一的控制性工程，以防洪、灌溉及城乡供水、发电为主，兼顾航运和拦沙减淤等综合效益。枢纽正常蓄水位 458 m，死水位 438 m，设计洪水位 461.3 m，校核洪水位 463.07 m<sup>[7]</sup>。

上石盘枢纽—红岩镇河段是亭子口枢纽库尾回水变动段，分布有余浅树滩、油房滩等 21 处滩险。当亭子口枢纽水位从正常蓄水位逐渐消落至死水位时，该河段水深减少至 0.6~2.5 m，滩涂显现，水流散乱，航道断航。拟建水东坝航运枢纽规划坝址在上石盘梯级与亭子口梯级之间，兼具航运、改善城市水景观、发电等功能<sup>[8]</sup>。上石盘—亭子口梯级间河道形势见图 1。

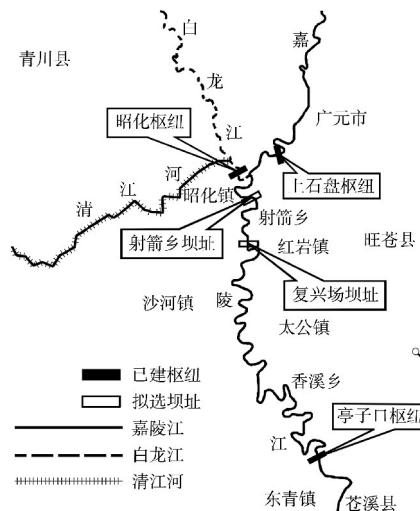


图 1 河道形势

## 2 坎址方案

### 2.1 坎址初选

水东坝枢纽的开发任务主要是解决库尾航道水位衔接问题，同步改善昭化古城城市水景观，建坝河段上游起点选在昭化古城。红岩镇以下河段位于亭子口枢纽常年回水区，施工期受亭子口库区水深影响，枢纽建设施工难度大，水中填筑围堰占用亭子口防洪库容较大，因此建坝河段下游终点选在红岩镇。故水东坝枢纽坝址宜在昭化古城以下、红岩镇以上河段进行选择。

根据河道河势、地形、地质条件，综合考虑通航低水位衔接、发电水头利用和施工条件等方面要求，将河段从上到下划分为 3 段：第 1 段为昭化古城—水井湾，河段长 7.0 km，该河段拥有广元市著名的山水太极自然景观，若在此段选址建坝，将影响自然景观，且不能改善昭化镇以下航道通航条件，不适宜建坝；第 2 段为水井湾—朝阳乡，河段长 7.5 km，在此段选址建坝，须对坝下 6.5 km 航道进行疏挖，实现库尾航道水位衔接；第 3 段为朝阳乡—红岩镇河段，河段长 11.5 km，在此段选址建坝，可解决库尾航道水位衔接问题。

在第 2、3 段分别选择射箭乡坝址、复兴场坝址进行比选。射箭乡坝址上距昭化古城 9.5 km，距上石盘梯级 21.5 km，下距亭子口枢纽 124.5 km。

河流总体流向  $145^{\circ}$ , 河水面宽  $153.5 \sim 188.5$  m, 水深一般为  $3.5 \sim 10.2$  m, 河槽局部有冲刷深槽。嘉陵江左岸为斜坡, 地形坡度  $38^{\circ} \sim 55^{\circ}$ , 右岸近河为一个漫滩, 地形坡度  $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。

复兴场坝址上距射箭乡坝址  $12.5$  km。河段基本顺直, 河流总体流向  $168^{\circ}$ , 河水面宽  $240.0 \sim 254.0$  m, 水深一般为  $4.8 \sim 15.2$  m, 河槽局部有冲刷深槽。嘉陵江左右岸为斜坡, 左岸坡度较陡, 地形坡度  $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ , 右岸坡度相对较缓, 地形坡度  $8^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

## 2.2 水库特征水位

经测算, 抬高水东坝枢纽正常蓄水位后, 水库淹没指标将陡增。正常蓄水位取  $458$  m 时, 库区基本不增加淹没面积; 正常蓄水位取  $460$  m 时, 耕地淹没面积增加  $8.3$  万  $m^2$ , 林地淹没面积增加  $20$  万  $m^2$ 。为控制淹没损失, 水东坝枢纽正常蓄水位取与亭子口枢纽正常蓄水位相同。已建上石盘船闸下闸首门槛高程为  $455.05$  m, 拟建水东坝枢纽正常蓄水位  $458$  m, 上石盘船闸下闸首门槛水深为  $2.95$  m, 满足设计船型通航要求。故水东坝枢纽正常蓄水位取  $458$  m。

根据水文资料, 经调洪计算, 射箭乡坝址处  $50$  a 一遇设计洪水流量为  $2.45$  万  $m^3/s$ ,  $200$  a 一遇校核洪水流量为  $3.01$  万  $m^3/s$ ; 复兴场坝址处  $50$  a 一遇设计洪水流量为  $2.47$  万  $m^3/s$ ,  $200$  a 一遇校核洪水流量为  $3.20$  万  $m^3/s$ 。

## 2.3 布置方案

### 2.3.1 枢纽建筑物布置思路

枢纽建筑物包括船闸、泄洪冲沙闸、电站厂房和鱼道。当坝址处河面开阔, 河床内能同时布置挡泄水建筑物、通航建筑物和电站等水工建筑物时, 枢纽可采用集中布置的方式。对集中布置的航运枢纽, 为避免泄水建筑物、通航建筑物、电站三者水流互相干扰, 通航建筑物不应布置在泄水建筑物与电站之间, 即通航建筑物与电站宜异岸布置。

为确保泄洪顺畅和安全, 将泄洪冲砂闸布置在河道中部。经枢纽泄流计算与库区回水计算,

采用溢流坝或水闸加溢流坝的坝型, 无法满足行洪、冲沙要求, 因此泄水建筑物采用泄水闸。射箭乡坝址布置  $12$  孔单孔净宽  $14$  m 的泄水闸, 可满足枢纽泄洪冲沙要求。复兴场坝址泄洪冲沙闸奠基于覆盖层, 单宽流量不能太大, 采用  $16$  孔单孔净宽  $12$  m 的泄水闸, 可满足枢纽泄洪冲沙要求。

左岸船闸右岸厂房、右岸船闸左岸厂房两方案的发电指标和库区淹没指标相同, 电站进水渠布置形式同样不受限制。考虑坝址处主航道靠近左岸, 左岸船闸右岸厂房方案具有通航条件好、进厂方便、施工条件相对好等优点, 射箭乡和复兴场坝址均采用左岸船闸右岸厂房方案。

### 2.3.2 射箭乡坝址布置方案

射箭乡坝址坝轴线长  $385.02$  m, 从左到右依次为左岸连接坝段、船闸坝段、泄洪冲沙闸段、电站厂房段、右岸连接坝段。坝址布置方案见图 2。

左、右岸连接坝段采用混凝土重力坝, 坎顶宽  $5$  m。船闸由上游引航道、上闸首、闸室、下闸首及下引航道等组成, 上闸首位于坝轴线上。上、下引航道均采用直进曲出的布置方式, 主导航墙与靠船墩布置在引航道的左侧, 辅导航墙与隔流墙布置于引航道的右侧。鱼道布置于船闸与泄洪冲沙闸之间, 上游出口位于库区, 下游进口位于船闸下引航道外导墙外侧, 采用开敞式的槽式结构。

泄洪冲沙闸采用平底宽顶堰型, 闸室底板中间分缝, 墩厚  $3.5$  m。泄洪冲砂闸的闸室底板顺水流长为  $30$  m, 工作闸门为露顶式平板钢闸门, 由固定式卷扬机启闭, 上游检修门为  $2$  扇露顶式平面滑动钢闸门, 上游检修门由设在坝顶门机配自动抓梁操作。

电站为河床式厂房, 由主机间、安装间和副厂房组成。安装间位于主机间右侧, 主机间长  $44.0$  m, 安装间长  $30.0$  m。副厂房由主机间副厂房和安装间副厂房组成。厂房内装有  $2$  台灯泡贯流式水轮发电机组, 总装机容量  $40$  MW。变电站采用室内布置方式, 布置于安装间下游。

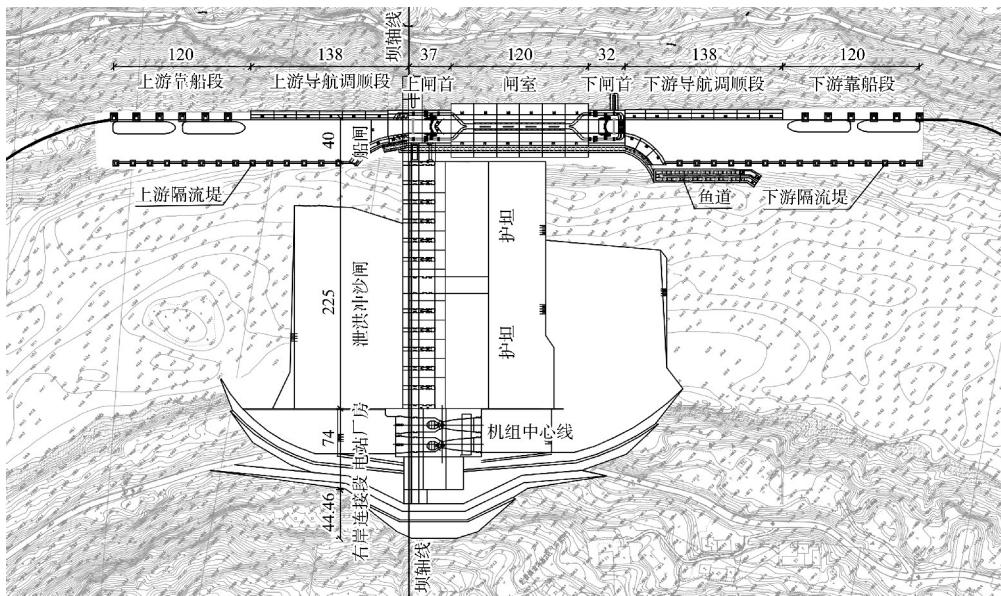


图 2 射箭乡坝址布置方案 (单位: m)

坝顶设置 5.0 m 宽交通桥, 其中在左右连接坝段利用坝顶平台, 在主厂房、泄洪冲沙闸段及跨越船闸段采用 T 梁形成桥面, 桥长 382.60 m。左岸在连接段设回车场, 右岸与上坝公路相接, 上坝公路利用厂房右侧开挖的马道与右岸的昭化—红

岩公路连接, 道路坡度按 5% 控制, 道路净宽 7.0 m。

### 2.3.3 复兴场坝址布置方案

复兴场坝址坝轴线长 427.87 m, 从左到右依次为左岸连接、船闸坝段、泄洪冲沙闸段、电站厂房段、右岸连接坝段。坝址布置方案见图 3。

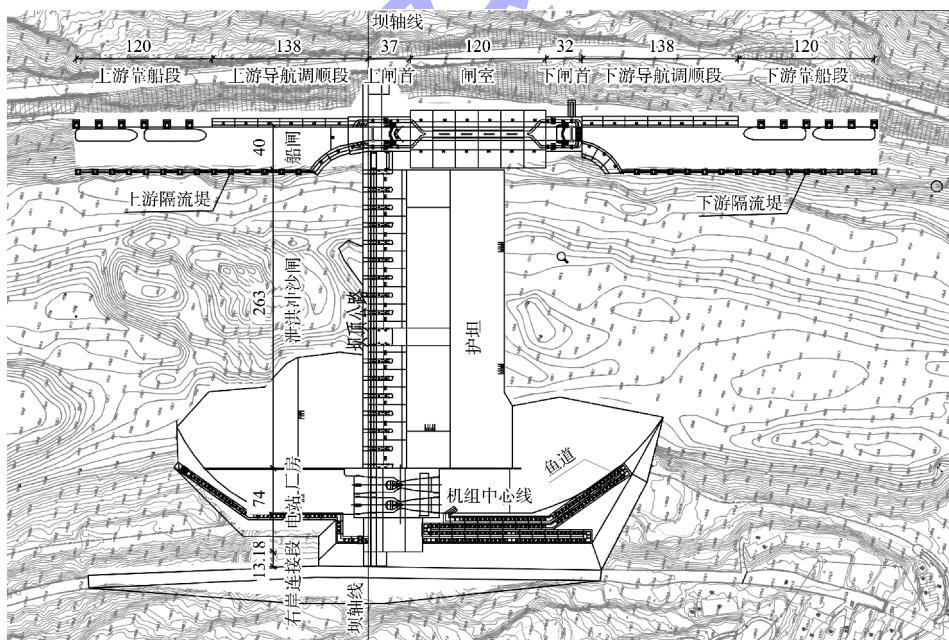


图 3 复兴场坝址布置方案 (单位: m)

左、右岸连接坝段采用混凝土重力坝, 坝顶宽 5 m。根据坝址处地形条件及下游在建嘉陵江特大桥预留通航孔的布置, 船闸布置于左岸。上、下引航道均采用曲进直出的布置方式, 其

他与射箭乡坝址相同。泄洪冲沙闸采用平底宽顶堰型, 含 16 孔, 单孔净宽 12 m, 其他与射箭乡坝址相同。电站厂房布置与射箭乡坝址基本相同。

鱼道布置在电站厂房右侧, 进口布置在厂房尾水渠处, 沿尾水渠右岸边坡往复盘旋, 向上游穿过安装间下部, 鱼道出口布置在电站进水渠右岸岸坡。鱼道总长 1 050 m, 底坡 1%。坝顶设置 5.0 m 宽交通桥, 其中在左右连接坝段利用坝顶平台, 在主厂房、泄洪冲沙闸段及跨越船闸段采用 T 梁形成桥面。左岸在上闸首内侧设回车场, 右岸与上坝公路相接, 上坝公路利用厂房右侧开挖的马道与右岸的昭化—红岩公路连接, 道路坡度

按 5% 控制, 道路净宽 7.0 m。

### 3 坝址比选

射箭乡坝址和复兴场坝址船闸、厂房均以基岩为持力层, 泄洪冲沙闸以粉砂质泥岩、砂岩夹泥质粉砂岩为持力层, 均具备修筑低水头闸坝的工程地质条件。从河谷地形条件判断, 复兴场坝址优于射箭乡坝址; 从基岩埋深条件判断, 射箭乡优于复兴场坝址, 见表 1。

表 1 坝址地形地质条件比选

坝址	库区地质	地形地貌	河床覆盖层性质	基岩顶埋深/m	软弱破碎带分布范围及埋深/m	坝基岩石透水层(透水率 $q > 5 \text{ Lu}$ )	
						厚度/m	防渗帷幕面积/ $\text{m}^2$
射箭乡	不存在邻谷渗漏和大的浸没, 库区存在有影响的滑坡 3 个, 对坝址区存在影响的滑坡有 2 个	坝址为河流转弯处, 两岸为陡坡, 河床中有漫滩, 为“V”形河谷	卵砾石夹砂, 局部有砂土分布, 砂土存在液化可能	2.86~16.45 (平均埋深 10.62)	揭露 4 条岩块岩屑型(X)及 5 条岩屑夹泥型(C)等软弱破碎带, 不具贯通性, 延伸较短、埋藏较浅, 对坝基有一定影响	12.0~16.5	6 475
复兴场	不存在邻谷渗漏和大的浸没, 库区存在有影响的滑坡 4 个, 近坝库段无滑坡分布	坝址为顺直河段, 两岸为陡坡, 河床中有漫滩, 为“V”形河谷	卵砾石夹砂, 部分胶结较好, 似砾岩	8.5~16.8 (平均埋深 13.55)	揭露 4 条岩块岩屑型(X)及 10 条岩屑夹泥型(C)等软弱破碎带, 不具贯通性, 延伸较短、埋藏较浅, 对坝基有一定影响	6.5~10.0	5 652
评价	复兴场坝址略优	复兴场坝址优	复兴场坝址优	射箭乡坝址优	基本相同	基本相同	基本相同

注: Lu 为透水率单位。

从枢纽布置、通航条件、库区景观、年发电量、对上下游梯级发影响、施工导流、库区淹没及工程投资等方面进行坝址综合比选, 见表 2。射箭乡坝址在水库淹没及占地、工程投资指标方面占优, 复兴场坝址在枢纽布置、水位衔接、库

区景观、发电量、施工导流指标方面占优。两坝址工程投资差约 2%, 考虑拟选坝址位于亭子口枢纽库区, 施工导流难度极大, 复兴场坝址地形宽阔, 易于实施, 且对上游昭化电站、上石盘电站发影响小, 作为推荐坝址。

表 2 坝址综合比选

坝址	枢纽布置	水位衔接	库区景观	年发电量/(亿 kW·h)	对上下游梯级发电影响	对外交通	施工导流	水库淹没及占地/ $\text{万 m}^2$		静态总投资/亿元
								新增淹没旱地	坝址永久占地	
射箭乡	泄洪闸总净宽较小, 船闸上下游导航墙影响过流, 泄流不畅。右岸公路改线长约 400 m	最低通航水位不能充分衔接, 坎下 6.5 km 航道需要疏挖整治	库区壅水长度较小, 景观改善条件略差	1.08	对上游昭化、上石盘发电影响略大	坝址两岸已有公路和外界连接, 交通便利	覆盖层厚度较大, 坎址河宽度有限, 施工导流布置困难	0.76 (涉及沙场 1 处)	15.33	26.44
复兴场	泄洪闸总净宽较大, 泄流顺畅。右岸公路改线长约 640 m	与下游梯级最低通航水位充分衔接, 无需航道整治	壅水长度较长, 射箭乡坝址景观改善条件较好	1.29	对上游昭化、上石盘发电影响很小	坝址两岸已有公路和外界连接, 交通便利	覆盖层和射箭乡坝址相当, 坎址河床较宽阔, 施工导流布置较射箭乡坝址容易	0.73 (涉及搬迁 2 户)	18.67	26.96
评价	复兴场坝址占优	复兴场坝址占优	复兴场坝址占优	复兴场坝址占优	复兴场坝址相当	复兴场坝址占优	复兴场坝址相当	射箭乡坝址占优	射箭乡坝址占优	

#### 4 结论

1) 已建渠化梯级间增建航运枢纽的坝址选择,应围绕枢纽主要建设任务,在分析河段自然条件和对上下游梯级影响的基础上开展坝址初选工作,从枢纽布置、通航条件、库区景观、发电量、施工导流、库区淹没及工程投资等方面进行坝址综合比选,推荐复兴场坝址为水东坝航运枢纽建设坝址是合适的。

2) 枢纽采用集中布置方案时,船闸与电站应异岸布置,船闸宜布置在主航道岸侧,根据泄流能力和库区回水计算确定泄水建筑物型式和规模尺度,以满足通航和泄洪的安全要求。

3) 确定正常蓄水位时应考虑淹没航道主要滩险,利于库区航道整治,同时应控制淹没、浸没、征地、拆迁等工程量和投资。

#### 参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 渠化工程枢纽总体设

(上接第 92 页)

2) 中间渠道断面形式几乎不影响船闸输水时的流量变化趋势与输水时间。虽然不同断面形式的中间渠道船闸作用水头不同,但矩形断面与梯形断面的中间渠道具有相似的流量变化趋势与输水时间。

3) 中间渠道的断面形式直接影响其通航水流条件,梯形断面的中间渠道拥有更好的通航水流条件。与矩形断面的中间渠道相比,梯形断面的中间渠道可以有效地减小上游船闸泄水过程中的水位变幅、振荡波波高、最大水面坡降和最大纵流速。

#### 参考文献:

- [1] 吴澎. 中国内河航运发展的机遇与挑战[J]. 水运工程, 2010(2): 11-15.

计规范: JTS 182-1—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

- [2] 闵朝斌. 论渠化工程中的坝址选择[J]. 水运工程, 1999(2): 23-27.
- [3] 刘运化, 王峰. 钱塘江中上游姚家航运枢纽坝址方案选择研究[J]. 人民珠江, 2010, 31(5): 36-38, 54.
- [4] 左卫华, 吴信. 广西右江鱼梁航运枢纽工程坝址方案比选[J]. 西部交通科技, 2012(8): 116-119.
- [5] 朱约生, 潘霄, 肖丽. 汉江湖北段某航运枢纽坝址工程地质问题与坝址选择[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(3): 407-409.
- [6] 交通部. 全国内河航道与港口布局规划[A]. 北京: 交通部, 2007.
- [7] 生晓高. 嘉陵江亭子口水利枢纽坝址及坝型研究[J]. 人民长江, 1997(7): 16-18.
- [8] 中交水运规划设计院有限公司, 中水珠江规划勘测设计有限公司. 嘉陵江水东坝航电综合枢纽工程坝址优化专题报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.

(本文编辑 王璁)

- [2] 孟祥玮. 船闸灌泄水引航道非恒定流研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [3] 吴时强, 丁道扬. 中间渠道内非恒定流数值模拟[J]. 水利水运科学研究, 1997(3): 219-227.
- [4] 曹玉芬, 戈龙仔, 孟祥玮, 等. 带中间渠道船闸运转方式的试验研究[J]. 水道港口, 2007, 28(2): 126-132.
- [5] 戈龙仔, 曹玉芬, 孟祥玮, 等. 船闸中间渠道非恒定流特性与调节池改善措施探讨[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 378-383.
- [6] 李广一, 范宝山, 金贤, 等. 大藤峡水利枢纽船闸中间渠道非恒定流三维数值模拟研究[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(10): 58-65.
- [7] 祝龙, 刘本芹, 宣国祥, 等. 分散梯级船闸中间渠道水力特性及关键参数影响研究[J]. 水运工程, 2020(12): 15-21.
- [8] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水力水电出版社, 1992.

(本文编辑 赵娟)