



仿生态鱼道施工技术

简 震，蒙富康

(中国水利水电第五工程局有限公司，四川 成都 610066)

摘要：针对犍为航电枢纽仿生态鱼道施工过程中存在的渠道坡面开挖干扰大、密实度难以保证、渠道防渗土工膜连接困难、仿生态鱼道路线无规则变化、边坡开挖测量放线工作繁琐等问题，进行仿生态鱼道施工技术研究。首先通过鱼道模型试验和鱼类生态学试验验证仿生态鱼道设计方案的可行性，再结合仿生态鱼道的特点，研究鱼道渠道体型、鱼道柔性防渗、鱼道坡面碾压等，保证鱼道施工质量和结构的稳定。对鱼道池室流态及过鱼控制断面最大流速进行分析，提出鱼道曲线及隔板透水率等对流速的影响，合理设置休息池，保证目标鱼类顺利通过鱼道；采用当地天然建筑材料，构建出鱼类天然洄游的通道，使之符合生态学原理，满足生态保护要求。

关键词：鱼道；渠道；土工膜；隔板；犍为航电枢纽

中图分类号：U 6

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)12-0073-06

Construction technology of imitating ecological fishway

JIAN Zhen, MENG Fu-kang

(Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu 610066, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in the construction of ecological fishway in Qianwei Navigation-Hydropower Junction, such as great disturbance in channel slope excavation, difficulty in ensuring the compactness, difficulty in connecting the anti-seepage geomembrane of the channel, irregular changes in the route of ecological fishway, and tedious work in slope excavation survey and setting-out, the construction technology of ecological fishway was studied. Firstly, the feasibility of the design scheme of imitating ecological fishway in Qianwei Navigation and Hydropower Junction was verified by fishway model test and fish ecology test. Then, combined with the characteristics of imitating ecological fishway, the fishway channel shape, fishway flexible seepage control and fishway slope rolling were studied to ensure the fishway construction quality and fishway structure stability. This paper analyzes the flow pattern of fishway pond chamber and the maximum flow velocity of fish passing control section, puts forward the influence of fishway curve and diaphragm permeability on flow velocity, and reasonably sets up the rest pond to ensure the target fish to pass through fishway smoothly. Using local natural building materials, the natural migration channel of fish is constructed, which conforms to the ecological principle and meets the requirements of ecological protection.

Keywords: fishway; channel; geomembrane; septum; Qianwei navigation-power junction

水利水电工程枢纽大坝建成后，分割了大坝上、下游的水生生态系统，造成水生生态流无法有效畅通，原河道鱼类通道被切断，严重影响了水生生态系统。为保障枢纽上、下游的生态连通性，须修建适宜的过鱼设施。相对于原有鱼道，生态鱼道不使用化工合成物质，而选择当地的天然材料符合

生态学原理，河道鱼类能更好地融入环境。

本文通过鱼道模型试验和鱼类生态学试验验证犍为航电枢纽仿生态鱼道设计方案，对鱼道渠道进行深度设计，保证目标鱼类能顺利通过。同时研究仿生态鱼道施工工艺，就如何实现鱼道关键设计参数进行研究，如鱼道柔性防渗、鱼道地

基处理防沉降、休息池位置与鱼道曲线、鱼道水流流速控制、防止鱼道水流冲刷导致的鱼道外形改变造成的流速改变等。最后对仿生态鱼道施工关键技术进行论证，对鱼道线路进行调整，保证鱼道关键参数能够满足设计要求。

1 鱼道数据模型分析

仿生态鱼道由于其结构的复杂性，以及断面形式不规则性、渠道体型糙率估算困难等，目前尚无完善的数值模拟及物理模型试验方法^[1]。采用概化模型的方式，针对影响仿生态鱼道水流条件的主要因素逐一分析、归纳、总结与概化，并开展三维紊流数值模拟研究，获得仿生态鱼道的合理参数设计范围，为物理模型试验提供参考。

仿生态鱼道采用加粗消能、降低流速的方式为鱼类提供洄游通道。经分析、归纳与总结得出，影响仿生态鱼道的水流条件的主要因素有：底坡；池室宽度；池室长度；阻水断面透水率及上、下池室主过流断面偏移率。为系统研究竖缝式鱼道尺寸与池室水流条件的关系，建立如图1、2所示的模型。

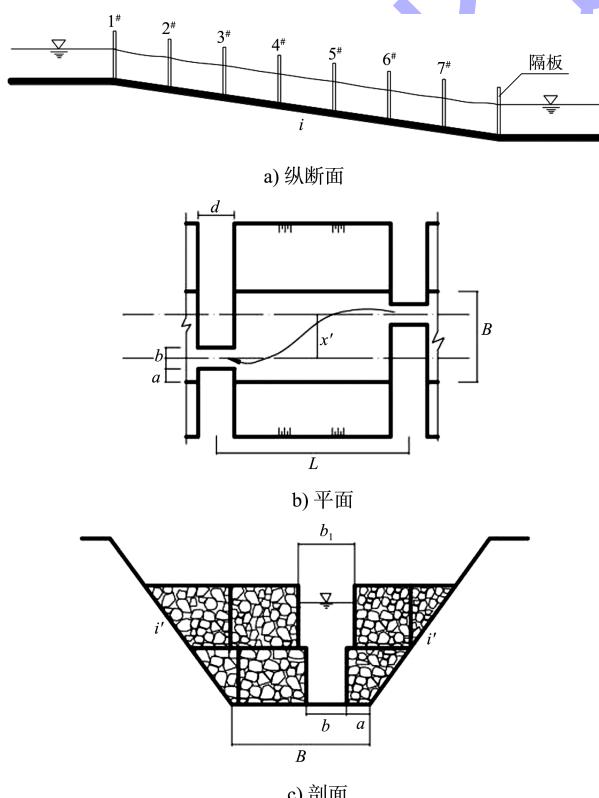


图 1 鱼道概化模型

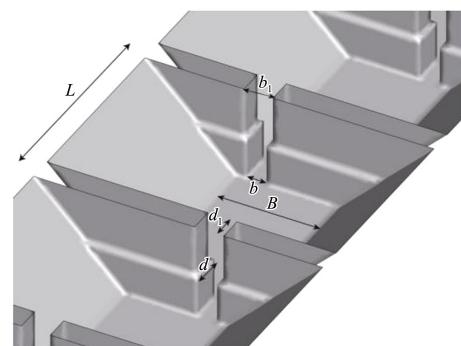


图 2 鱼道三维模型

竖缝式鱼道概化模型共包括 8 块隔板 7 个池室，通过调整竖缝宽度及位置和池室长度等参数研究竖缝式鱼道相关参数与鱼道最大设计流速之间的关系。

通过进行三维紊流数学模型分析，研究透水率、偏移率、池室长度、宽度、池室边坡坡度对池室水流的影响；同时结合鱼道的布置方式和设计流速，研究键为鱼道池室的尺寸形式。结论如下：

1) 当隔板透水率达到 0.25 后，鱼道消能效果随隔板透水率的增大趋于降低，建议隔板透水率小于 0.25；竖缝偏移率小于 0.30 时，消能效果甚微，建议竖缝偏移率大于 0.30；池室长度达到 8 m 后，竖缝流速较大，为避免过大的竖缝流速，鱼道池室长度不宜大于 8 m；隔板竖缝最大流速及其平均值随池室宽度变化影响较小；边坡坡度变化对竖缝最大流速影响较小^[2]。

2) 鱼道的布置方式下，池室长 5 m，透水率小于 0.14，偏移率大于 0.60 时，鱼道过鱼控制断面大部分区域可满足 1.1 m/s 的流速要求，且池室内流态较为平顺；在透水率增大时，适当提高偏移率也可得到满足鱼类上溯的水流条件。

3) 因仿生态鱼道采用透水材料(钢筋石笼)筑成，过水断面难以做到整齐划一，在实际运行过程中，隔墙也有一定的透水作用，因而，过水(鱼)槽内的流速及鱼道流量与数模计算存在一定的差别，须在物理模型中进一步验证和研究。

2 鱼道物理模型试验

键为航电枢纽仿生态鱼道为旁路水道形式，为人工堆石结构。沿鱼道线型砌筑水池用于消减

水头差, 池间落差 53.6 mm, 每级池室留有过鱼口, 整个鱼道内流态复杂。因此, 为尽量减小缩尺的影响, 采用较大几何比尺模型进行研究。通过鱼道数模成果, 初步选定鱼道的池室尺寸及布置形式, 并采用 1:13 的整体物理模型对鱼道各水位组合工况下的水流条件进行研究。

模型几何比尺确定为 $L_r = 1:13$; 流速比尺 $v_r = 1:3.606$; 流量比尺 $Q_r = 1:609.338$; 鱼道共设 315 个池室。

因鱼道穿坝为平底工程段, 无需消能, 且流态较为均匀, 模型中空坝段仅模拟了较短的距离。沿鱼道中心线自上而下布置 20 个水位测点, 用来测量鱼道沿程各池室的水位落差及水面线, 在与水位测点附近的 22 个典型池室缩窄断面布置了流速测点, 如图 3 所示。由于仿生态鱼道缩窄断面在垂线方向宽窄不同, 断面测流垂线至少布设 2 个测点, 水深较大的工况垂向测点数约 3 个, 以校验各池室流速是否满足鱼类克流能力, 验证鱼道底坡、隔墙形式等是否满足消能要求, 不至于产生明显的能量累积现象。



图 3 鱼道物理模型

鱼道物理模型试验结果表明:

1) 在初始方案下, 隔墙高度为 1.70 m, 略小于上游高水位 1.75 m, 且隔墙为透水结构, 因而过水流量较大, 在透水性较差或较窄的过鱼控制断面最大流速大于 1.1 m/s。

2) 在初始方案的基础上, 将深潭 5 上游侧 10 个隔墙的堆石高度增加为 1.90 m, 并在堆石内增加砂浆, 减小其透水性。各水位组合工况下的研究成果表明: 池室内流速均不超过 1.1 m/s 的设计流速, 但在下游水位较高时, 进鱼口附近结构段及部分池室内流速小于 0.2 m/s, 该区域内鱼类不易感应到流速并上溯, 需采取一定的补水措施。

进鱼口 1 过鱼时, 在深潭 1 处补水; 进鱼口 2 过鱼时, 在深潭 2 处补水。

上游 0.75 m、下游 1.65 m 时, 建议补水 0.2 m³/s; 上游 0.75 m、下游 3.46 m 时, 建议补水 0.8 m³/s。

3) 通过鱼道数字模型及物理模型试验最终确定鱼道渠道的布置形式见图 4。为引诱鱼类进入生态鱼道, 在鱼道进口闸处增加补水流量, 推荐在 2 个进口处分别设置补水措施, 补水流量 2 m³/s^[3]。同时, 将鱼道进口轴线布置为与主流方向交角 30°~45°, 使进口处流速与主流有一定交角, 以利于鱼类能察觉鱼道。在进口处布置喷淋系统, 利用水声、水流诱鱼; 尾水流道为截断区域, 为防止鱼类误入, 在鱼道进口闸上游侧布置合适的拦鱼导鱼系统, 增强鱼道过鱼效果。

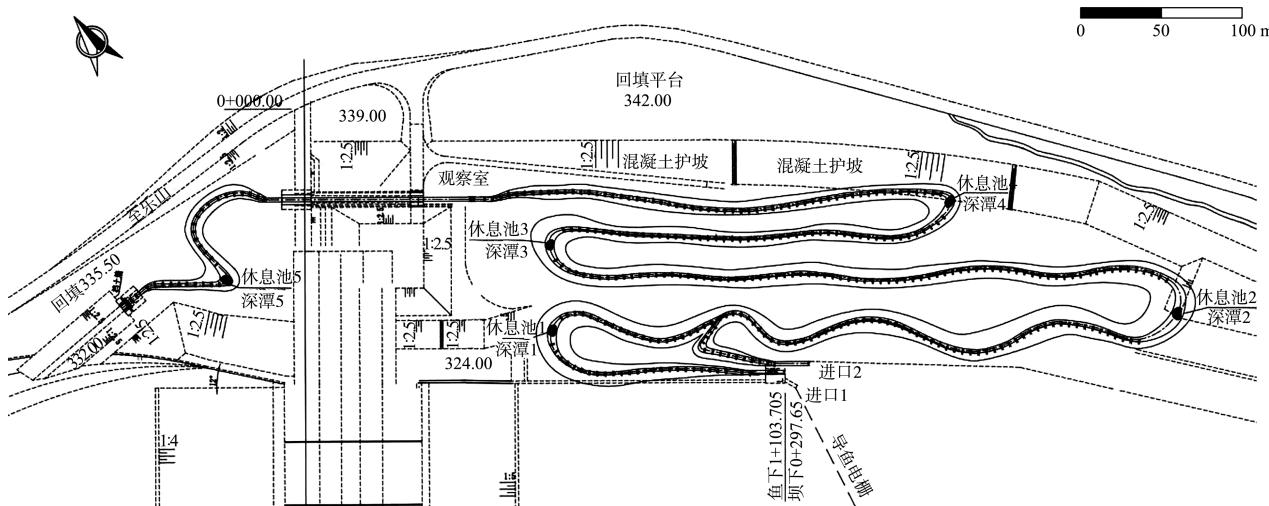


图 4 鱼道布置 (高程: m)

3 仿生态鱼道施工工艺

3.1 鱼道渠道结构

鱼道的渠道结构自下而上为回填土石结构基础、1层0.3 mm厚的复合土工膜、200 mm厚细砂、1层0.5 mm厚的复合土工膜、200 mm厚的砂料级配碎石过渡层、800 mm厚的宾格网石笼，如图5所示。

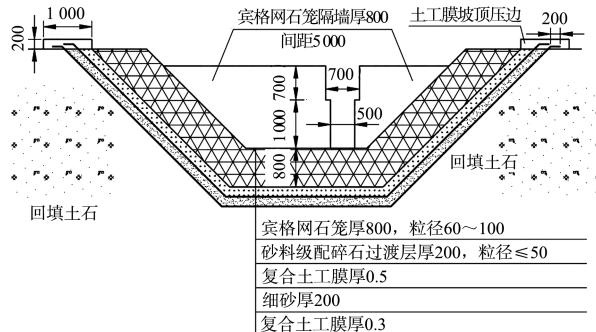


图5 鱼道典型断面(单位: mm)

施工内容主要包括: 渠道开挖、级配碎石施工、土工膜施工、宾格石笼砌筑、细砂铺筑。

进行地基开挖回填压实工序时对鱼道渠道进行开挖补填，并采用反铲对渠道进行修整，取出大块尖锐石块。进行下一工序时渠道修整平整。渠道第1层铺设1层0.3 mm厚复合土工膜，第2层为200 mm厚细砂保护下层与上层土工膜，第3层铺设0.5 mm厚复合土工膜，第4层为过渡层，材料为砂料级配碎石，厚200 mm，粒径≤50 mm，渠道最上层为800 mm厚宾格网石笼，粒径60~100 mm。

3.2 鱼道渠道施工

在水利水电工程鱼道施工过程中，渠道填筑、碾压成本高，工期长，且渠道斜坡面碾压难度较大，压实度难以达到设计要求，施工质量难以保证。且回填之后的鱼道经机械开挖，容易造成渠道坡面的扰动^[4]。

通过研究鱼道渠道施工存在的技术难点，研制了一种小型渠道碾压设备，用于进行仿生态鱼道渠道的土石方填筑。该碾压设备包括卷扬机、支撑架及振动钢轮。根据鱼道渠道体型制作支撑架，于支撑架中部固定卷扬机，卷扬机牵动钢丝

绳带动振动钢轮实现碾压工作。根据要求，鱼道渠道不进行刚性衬砌，为保证鱼道渠道的稳定，采用该小型渠道碾压设备进行鱼道渠道斜坡的碾压，确保鱼道斜坡施工质量，保证鱼道渠道施工进度。

3.3 土工膜工艺

3.3.1 土工膜布置

土工膜布置原则是保证土工膜的整体性，减少土工膜的焊缝。鱼道根据仿生态进行设计，鱼道渠道复杂多变，弯曲较多，因此鱼道采用如下方式布置：每卷土工膜的宽度为渠道断面总长的一半，保证两幅土工膜能够覆盖底板。

土工膜沿鱼道轴线铺设，仅有1条沿轴线方向的纵向焊缝，仅在土工膜的端头有1道横向焊缝。

加工土工膜时，在四周预留10 cm宽的范围，仅有中部的膜而不粘接土工布，以保证热熔焊接的质量。

3.3.2 土工膜焊接

鱼道渠道工作面倾角较大，自爬式土工膜焊机在该工作面上行走难度较大，且容易造成焊机行走偏离轨道，施工质量难以保证，因此工人必须随焊机行走，实时修正焊机行走路线，施工效率较低，且行走踩踏容易造成土工膜破损，影响土工膜整体性。为此对土工膜焊接工艺进行创新，设计焊接轨道，辅助焊机行走，根据焊机轮距及填筑分层高度专门设计焊机行走轨道保证了焊接质量及土工膜焊接的施工效率(图6、7)。

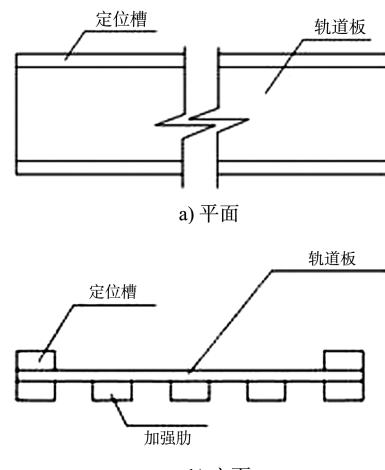


图6 焊机轨道制作

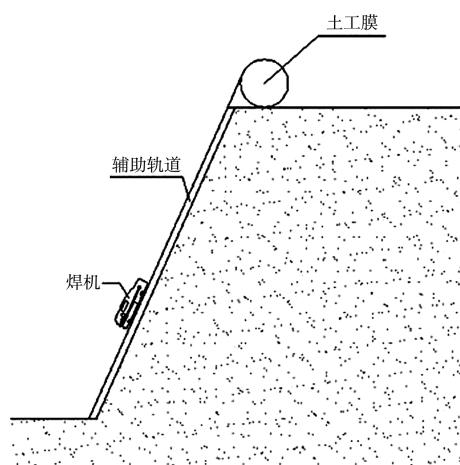


图 7 土工膜焊接工艺

3.3.3 施工工序

1) 轨道板下部用绳索牵引, 由上至下放入土工膜接缝处;

2) 由 2 名工人将土工膜由上至下铺设, 并调整接缝位置和焊机轨道位置, 使定位槽和接缝位置一致;

3) 由 1 名工人在土工膜下部将焊机安装在土工膜上, 经预热后推动焊机至定位槽内, 焊机沿着定位槽行走至土工膜顶端;

4) 将轨道板拉出进行下一块土工膜焊接。

3.4 细砂铺筑

细砂铺设于底层土工膜上, 起反滤作用以及保护土工膜的作用。细砂铺设采用后退法进行施工, 自卸汽车卸料, 1.0 m^3 反铲摊铺, 人工整平。为了便于流水作业, 可从渠道两边往中部倒料^[5]。

3.5 砂料级配碎石铺设

1) 测量放样。每间隔 20 m 采用钢筋桩标识摊铺高程。

2) 摊铺精平施工。运至现场的级配碎石混合料, 沿渠道轴线方向卸料于渠道顶部两侧, 首先用反铲进行级配碎石混合料摊铺, 再由人工按照提前布置的标桩进行精平, 精平完成后由现场负责人进行校验, 再进行下一道工序。

3.6 格宾石笼砌筑

1) 鱼道池室。池室长度为 5 m, 透水率小于 0.14, 偏移率大于 0.60, 鱼道过鱼控制断面大部分区域的流速可满足 1.1 m/s 的流速要求, 且池室

内流态较为平顺; 在透水率增大时, 适当提高偏移率也可得到满足鱼类上溯的水流条件。

2) 鱼道隔板。鱼道隔墙采用钢筋石笼堆挡水, 上游侧前 3 个隔墙高 1.9 m, 且宾格石笼内填充砂浆减小其透水性(图 8); 其余池室均用高 1.7 m 的钢筋石笼挡水。在下游水位较大时, 采取一定的补水措施。

3) 鱼道底坡加糙。采用适当的漂石布置方式结合宾格石笼, 构建接近于天然河流鱼类所需的水流流域。



图 8 宾格石笼

3.7 鱼道护坡施工

护坡工程包括现浇混凝土与三维植被网护坡。现浇混凝土坡面和三维植被网护坡铺设反滤土布宜自下而上进行, 在顶部和底部固定, 防止草皮护坡的土壤流失, 将土工网垫铺于土的表面后再种植草皮。

4 试验成果

1) 降低水流对渠道冲刷造成的影响, 在鱼道转弯处增加格宾网石笼的厚度, 防止转弯处因长期冲刷导致结构破坏。

2) 消除鱼道线路中出现的急弯(图 9)。根据对隔板间距的变化对水流流速和流态影响的研究, 通过设计流速确定合适的鱼道曲线及隔板间距, 保证鱼道满足过鱼要求。

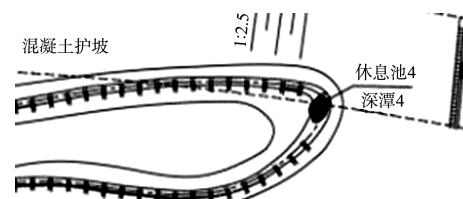


图 9 消除鱼道急弯处

3) 鱼道通过提高土工膜焊接质量达到防渗作用。鱼道中的仿生态布置曲线变化复杂, 土工膜焊接施工较为复杂。为此, 设置土工膜焊机轨道板辅助焊机行走代替人工辅助焊机行走, 以保证土工膜焊接质量, 防止因踩踏及硬物碰撞导致土工膜破坏。经试验, 效果良好。

4) 鱼道边坡采用三维植被网护坡进行防护, 根据鱼道布置曲线合理对边坡进行分割, 保证鱼道边坡坡比及面积满足要求, 结合生态公园理念, 合理选用回填材料及植被, 在满足保持水土要求的基础上建设绿色生态航电项目。

4 结论

1) 影响仿生态鱼道水流条件的主要因素有: 底坡、池室宽度、池室长度、阻水断面透水率及上下池室主过流断面偏移率。

2) 鱼道渠道不进行刚性衬砌, 利用发明的一种小型渠道碾压设备进行鱼道渠道斜坡的碾压, 确保鱼道斜坡施工质量, 保证鱼道渠道施工进度。

3) 创新土工膜焊接工艺, 设计焊接轨道, 辅

(上接第 72 页)

5 结语

1) 实践证明, 键为航电枢纽船闸施工期间墙挡水度汛方案是成功的。

2) 山区河流大型船闸施工期间墙挡水度汛在国内类似工程中属于首次应用, 对类似工程建设具有借鉴意义。

3) 今后应进一步尝试从闸墙结构设计角度思考, 采取设计措施使挡水闸墙自身独立具备挡水能力, 可简化施工、节约成本、缩短工期、提高结构挡水安全可靠度。

4) 键为船闸左侧闸墙施工期间, 混凝土浇筑施工强度极高, 最大强度达 $15 \text{ 万 m}^3/\text{月}$, 设备投入和安全管理压力巨大。未来在类似工程建设中, 宜早决策、早施工规划及早组织实施, 科学投入混凝土入仓设备等主导资源, 化解安全管控风险, 实现安全、快速、高质量施工。

助焊机行走, 保证了焊接质量及土工膜焊接的施工效率。

4) 降低水流对渠道冲刷造成的影响, 在鱼道转弯处增加格宾网石笼的厚度, 防止转弯处因长期冲刷导致结构破坏。

5) 消除鱼道线路中出现的急弯, 根据对隔板间距的变化对水流流速和流态进行研究, 通过设计流速确定合适的鱼道曲线及隔板间距, 保证鱼道满足过鱼要求。

参考文献:

- [1] 徐进超, 王晓刚, 宣国祥, 等. 仿自然鱼道整体物理模型试验研究简[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 879-887.
- [2] 郭生根. 赣江新干航电枢纽仿生态鱼道整体设计[J]. 水运工程, 2018(12): 155-159.
- [3] 薛正梅, 孟志鑫, 刘博雅, 等. 大源渡枢纽扩建鱼道工程总体布置[J]. 水运工程, 2019(3): 56-61.
- [4] 李永山, 陈猛, 梁勇, 等. 一种小型渠道斜坡碾压设备: 中国, CN208830277U[P]. 2019-05-07.
- [5] 石朗琴. 浅析混凝土面板堆石坝坝体填筑施工工艺[J]. 大陆桥视野, 2011(4): 128-128. (本文编辑 郭雪珍)

参考文献:

- [1] 中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司. 岷江键为航电枢纽工程初步设计[R]. 广西: 中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 2015.
- [2] 重庆西南水运工程科学研究所. 四川省岷江键为航电枢纽工程施工导截流与通航模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2012.
- [3] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. 水利水电工程施工组织设计规范: SL 303—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [4] 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院. 岷江键为航电枢纽船闸工程左侧水工建筑物施工期挡水结构复核报告[R]. 四川: 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 2019.
- [5] 中交水运规划设计院. 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

(本文编辑 王璁)