



龙溪口航电枢纽仿自然鱼道设计

班朝军，金志军，单承康，王园栋

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司，贵州 贵阳 550081)

摘要：为确定岷江航电龙溪口枢纽仿自然鱼道布置的合理性和设计基本参数，对工程河段开展鱼类资源调查和游泳能力测试。通过三维数值模拟计算验证鱼道池室尺寸与池室内流速关系，通过物理模型试验对鱼道内部水流流态、控制断面流速等水力学参数进行研究。提出仿自然鱼道设计方案：1) 鱼道进口布置在发电厂房尾水渠末端，采用发电尾水诱鱼并在进口布设补水设施；2) 鱼道采用藕节形+梯形断面结构，内设横隔，鱼道和横隔均采用天然卵石堆砌；3) 下游河道左岸布设缓流平台，消除鱼类上溯流速屏障。试验结果表明，龙溪口仿自然鱼道池室内部流态多样性，流速满足过鱼要求。

关键词：仿自然鱼道；鱼道设计；缓流平台；龙溪口航电枢纽

中图分类号：U61

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)10-0065-05

Simulated natural fishway design of Longxikou Navigation-power Junction

BAN Chaojun, JIN Zhijun, SHAN Chengkang, WANG Yuandong

(Power China Guiyang Engineering Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: To determine the rationality and basic design parameters of the simulated natural fishway layout at Longxikou Navigation-power Junction in Minjiang River, we carry out fish resource investigation and swimming ability tests for the project river. The relationship between the size of the fishway chamber and the flow velocity inside the chamber is verified by three-dimensional numerical simulation calculations, and the hydraulic parameters such as the flow pattern and control section velocity in the fishway are studied by physical model tests. We propose the design scheme of a simulated natural fishway: 1) The fishway inlet is arranged at the tailrace channel end of the power plant to lure fish by tailwater from power generation and water replenishment facilities are installed at the inlet. 2) The fishway adopts a lotus root type + trapezoidal cross-section structure with transverse diaphragms inside and both the fishway and diaphragms are stacked with natural pebbles. 3) A slow flow platform is set up on the left bank of the downstream river to eliminate the upstream flow velocity barrier of fish. The test results show that the diversity of flow patterns and the flow velocity inside the simulated natural fishway pool at Longxikou meets the fish passage requirements.

Keywords: simulated natural fishway; fishway design; slow flow platform; Longxikou Navigation-power Junction

水电项目的建设改变了河道自然水流条件，形成阻碍鱼类上溯洄游的屏障，需通过修建过鱼设施保障鱼类洄游通道。过鱼设施的发展在国外已有上百年历史。20世纪早期比利时工程师 Daniel (1909—1913年)对鱼道进行了一系列水槽基础试验研究^[1]，国外鱼道专家在20世纪中后期深入研究了丹尼尔鱼道的水力特性，提出阻板和底坎的

不同布置形式^[2]。20世纪，随着我国水利水电资源开发的深入，相继规划建设了一批过鱼设施，如枕头坝一级水电站鱼道、藏木鱼道、安谷仿自然鱼道、马马崖一级水电站集运鱼船、永庆反调节水库仿自然鱼道等，过鱼设施的类型涵盖了竖缝式鱼道、隔板式鱼道、升鱼机、集运鱼船、仿自然鱼道等多种形式。

龙溪口鱼道以曲折蜿蜒、滩潭相间、主急侧缓、有深有浅为设计原则,提出仿自然鱼道的藕节形池室结构,利用天然卵石形成鱼道面层,为鱼类提供更贴近自然的生存空间。并在河道左岸打造有利于鱼类上溯的岸边缓流平台,保障鱼道洄游通道。本文以岷江龙溪口航电枢纽工程仿自然鱼道研究和设计为例,阐述仿自然鱼道的设计和研究方法,总结鱼道设计的关键问题和设计经验,旨在为类似工程设计和研究提供参考。

1 工程概况

岷江龙溪口航电枢纽工程是以航运为主要开发任务,兼顾防洪、供水、环保等综合功能的工程。枢纽区采用“一”字形布置,主体工程从左岸至右岸依次为发电建筑物、泄水建筑物、通航建筑物及连接各建筑物的非溢流坝段,发电厂房布置于左岸河漫滩。坝址断面多年平均流量 $2\,680\text{ m}^3/\text{s}$,水库正常蓄水位317.00 m,死水蓄水位316.00 m。电站装机容量480 MW,共安装9台发电机组。工程平面布置见图1。

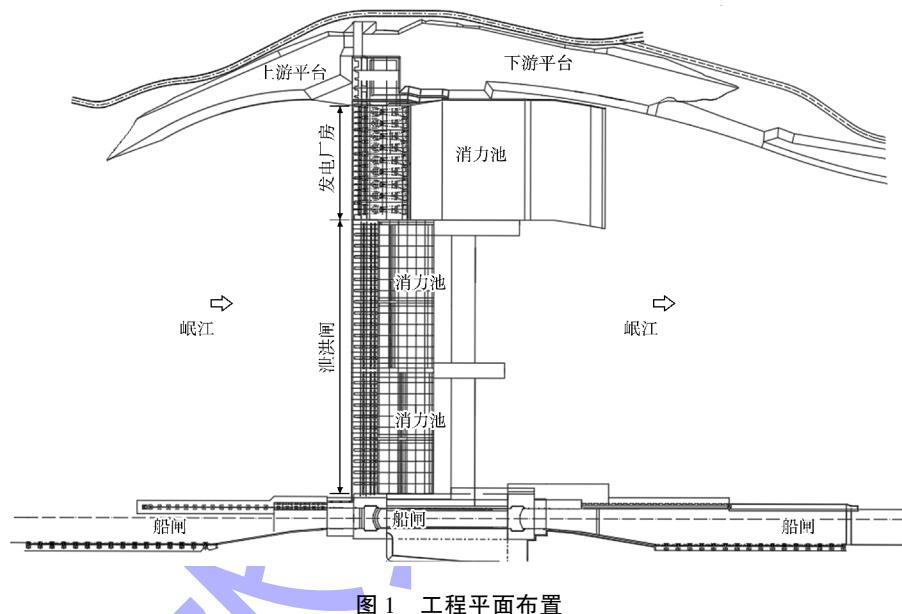


图1 工程平面布置

工程建设和运行将改变工程河段的水文情势,阻隔坝址上下游鱼类基因和种质资源交流。通过修建仿自然鱼道连通上下游水体可为鱼类提供洄游通道,促进鱼类基因交流,将工程对区域水生生态的不利影响减至最低。

2 鱼道设计

2.1 过鱼对象、季节和相关参数

综合考虑鱼类繁殖、栖息习性,并结合过鱼保护价值,确定鱼道主要过鱼对象为长薄鳅、达氏鲟、长鳍吻鮈、胭脂鱼、圆口铜鱼、草鱼、吻鮈链、圆筒吻鮈,同时兼顾岷江下游河段分布的所有鱼类。过鱼对象的主要繁殖期4—9月为主要过鱼季节,此外为保证上下游的遗传交流,全年均可过鱼。

南京水科院开展了相关鱼类游泳能力测试,根

据测试结果提出鱼道设计相关参数:鱼道过鱼孔最大流速为 1.20 m/s ,平均流速取值不大于 0.8 m/s ,鱼道内部水深不小于 1.2 m ,鱼道进口流速为 $0.25\sim0.85\text{ m/s}$ ^[3]。

2.2 鱼道设计运行水位

龙溪口航电工程水库正常蓄水位317.00 m,死水位316.00 m。下游最大通航流量1.50万 m^3/s ,对应水位308.96 m;下游最小通航流量为900 m^3/s ,对应水位301.70 m;机组满发流量4 796.37 m^3/s ,对应水位304.74 m。龙溪口枢纽发电运行时上游库内水位为316.00~317.00 m,变幅差1.00 m,下游水位为301.70~304.74 m,变幅差3.04 m。

结合《岷江龙溪口航电枢纽仿自然鱼道水力学模型试验报告》成果,当枢纽下泄流量超过4 796.37 m^3/s (机组满发)时下游河道流速大于

1.2 m/s, 超过过鱼设计流速。

综合以上结果, 确定龙溪口鱼道运行水位及流量为: 鱼道上游最高水位 317.00 m(正常蓄水位), 最低水位 316.00 m(死水位); 鱼道下游最高水位 304.74 m(机组满发水位), 最低水位 301.70 m(最低通航流量 0.90 万 m^3/s 水位)。

2.3 鱼道位置选择

鱼道位置选择需结合枢纽布置, 综合考虑地

形地质、工程占地等因素。枢纽有船闸时, 鱼道应布置在船闸的对岸, 以免船闸周围环境(过船声响、油污)对过鱼产生不利影响^[4]。枢纽右岸布置通航建筑物, 左岸布置发电厂房。左岸有相对宽阔场地且发电建筑物的发电尾水为连续水流对诱鱼有较大优势。为减少通航船闸对过鱼影响, 本次鱼道布置于左岸岸坡, 通过弯折后穿坝进入上游。鱼道总体布置见图 2。

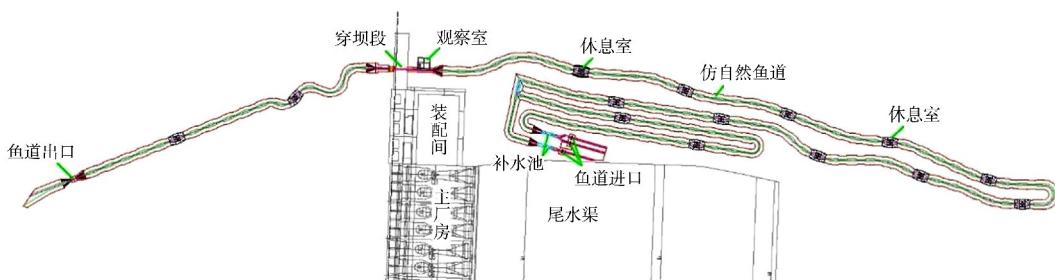


图 2 鱼道整体布置

2.4 鱼道选型

鱼道类型包括技术型鱼道和仿自然型鱼道。其中技术型鱼道按其结构形式可分为池室鱼道、槽式鱼道、隔板鱼道、特殊形态鱼道等类型^[5]。仿自然通道是由一系列深浅交错的深潭构成自然、多功能的旁路通道, 其底质、水流、形态、坡面等均与天然河流极为相似, 鱼道坡度一般控制在 1%~5%。

我国鱼道多为竖缝式鱼道, 仿自然鱼道运用近年逐步增加^[6]。结合龙溪口航电枢纽的水头、场地布置、水位变幅等情况, 并综合考虑过鱼对象特性, 确定采用仿自然竖缝结构形式。

2.5 鱼道进出口位置选择

设计鱼道的关键在于选择鱼道的进口位置, 鱼类能否成功找到进口并进入是过鱼效果的决定性因素。进口处的水流流速应在过鱼的克流能力和感应流速之间, 并在鱼的耐受范围内尽可能提高, 以增加影响水域的范围, 使鱼容易发现并进入^[7]。为确定鱼道进口最佳位置, 开展坝下区域流场模拟, 根据模拟结果, 确定鱼道进口布置在发电尾水下游约 100 m 处, 在运行工况下, 左岸可形成贯穿低流速区供鱼类上溯, 可充分利用发

电尾水诱鱼。

鱼道出口的设置需考虑库区水位变幅情况, 变幅较大可设置多个出口。岷江龙溪口航电枢纽库区水位变幅仅为 1.00 m, 设置 1 个出口即可满足水位变化要求。出口设置在左岸距大坝约 400 m 处岸边。

2.6 鱼道主体结构设计

2.6.1 鱼道池室水力学条件模拟研究

仿自然鱼道结构复杂, 目前尚无完善的数值模拟及物理模型试验方法。为此, 本项目拟采用概化模型的方式, 将影响仿自然鱼道水流条件的主要因素进行归纳与概化, 在底坡、边坡、池室宽度初定的条件下, 利用三维数值模拟研究池室长度与鱼道池室内流速之间的关系, 提出控制断面的设计标准, 优化池室内水流条件。

根据不同工况下的特征流速统计值, 得出控制断面最大流速随隔板间距的增加而增加, 在底坡 1:1.25 的条件下, 隔板间距不超过 6.5 m, 可满足最大设计流速 1.1 m/s 的要求。

2.6.2 鱼道物理模型试验研究

鱼类进入鱼道后, 能否通过长距离鱼道游至出口进入上游河道和鱼道池室内的水流流速及流

态有直接关系。池室内控制断面水流流速需小于鱼类的克流能力，池内水流允许有回流但需有明确的主流。总体模型试验对不同水力要素作用下的鱼道流速和流态进行了总结。

1) 控制断面面积的影响：物理模型试验进行了不同控制断面面积条件下的流速测试，测得控制断面平均流速与过流宽度成反比。根据控制断面过流宽度与平均流速的变化趋势得出，鱼道控制断面宽度不得小于 0.75 m。

2) 控制断面透水率的影响：模型试验在尽量保证上、下游各控制断面流速一致条件下分析控制断面透水率对流速的影响。控制断面采用透水形式时，相当于增加了控制断面过水面积，流速相应有所减小。

3) 边坡形式的影响：模型试验对鱼道两侧边

坡在不同坡比条件下进行模拟研究，分析边坡形式对流速和流态的影响。试验表明，鱼道两侧边坡的坡比和结构对鱼道内流速分布影响较小。

2.6.3 鱼道池室结构设计

本工程过鱼种类较多，对流速和流态的要求多样，鱼道设计需尽可能模拟天然河流条件，根据蜿蜒曲折、滩潭相间的自然原则将鱼道设计成藕节形结构，沿线每隔 100 m 设置 1 个深潭，供鱼类休息调整。仿自然通道池室底部宽度 3.0 m，藕节处底部宽度 1.5 m，鱼道断面两侧坡比 1:1.25，蛮石(横向隔板)高度 1.8 m，蛮石间隔宽度 0.8 m，池室设计水深 1.2~2.5 m，鱼道大坝下游底坡纵坡坡比 1:180，大坝上游底坡纵坡坡比 1:120。鱼道断面至上而下依次采用浆砌卵石面层和混凝土防渗底层结构。鱼道池室结构见图 3。

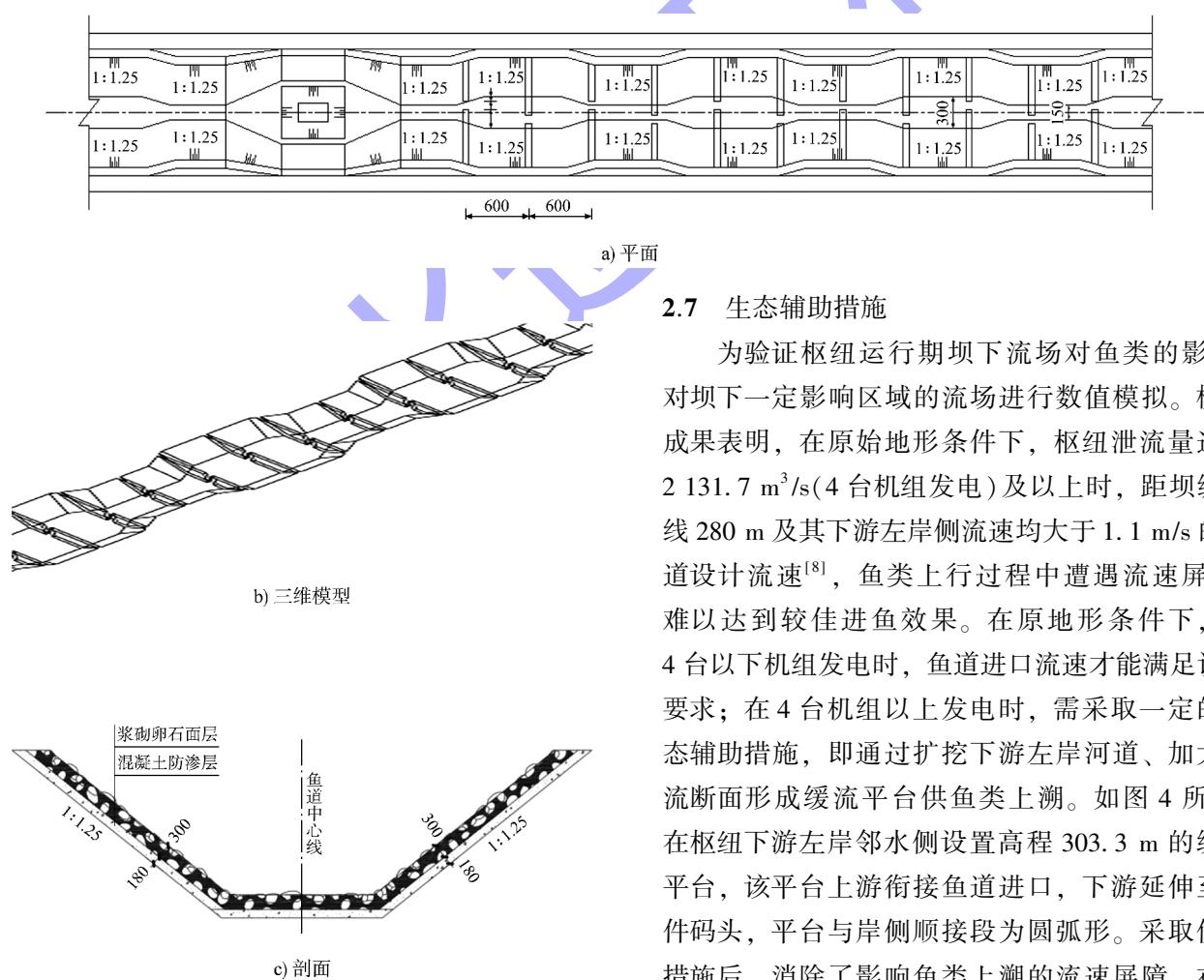


图 3 鱼道池室结构 (单位: mm)

2.7 生态辅助措施

为验证枢纽运行期坝下流场对鱼类的影响，对坝下一定影响区域的流场进行数值模拟。模拟成果表明，在原始地形条件下，枢纽泄流量达到 2 131.7 m³/s(4 台机组发电)及以上时，距坝纵轴线 280 m 及其下游左岸侧流速均大于 1.1 m/s 的鱼道设计流速^[8]，鱼类上行过程中遭遇流速屏障，难以达到较佳进鱼效果。在原地形条件下，在 4 台以下机组发电时，鱼道进口流速才能满足设计要求；在 4 台机组以上发电时，需采取一定的生态辅助措施，即通过扩挖下游左岸河道、加大过流断面形成缓流平台供鱼类上溯。如图 4 所示，在枢纽下游左岸邻水侧设置高程 303.3 m 的缓流平台，该平台上游衔接鱼道进口，下游延伸至大件码头，平台与岸侧顺接段为圆弧形。采取优化措施后，消除了影响鱼类上溯的流速屏障，在鱼道运行工况下下游流场满足鱼类上溯需求。

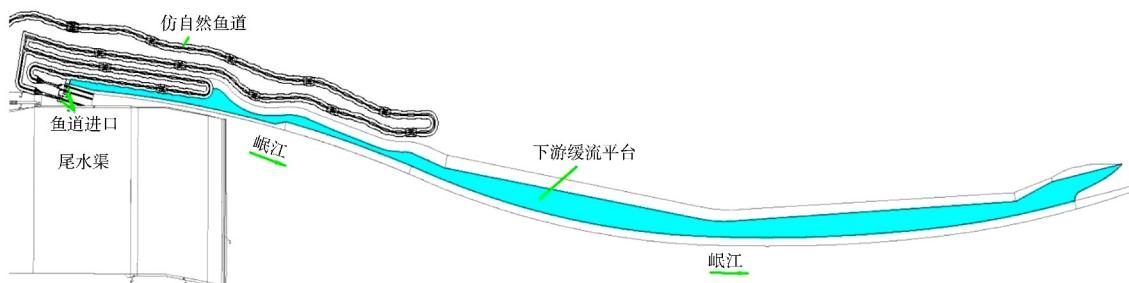


图 4 缓流平台平面

2.8 其他辅助设施

1) 补水措施。鱼道整体模型试验研究表明, 高进口运行时, 一般需采取补水措施; 低进口运行、上游水位为 316.00 m(低水位)时, 需进行补水诱鱼^[7]。在进口处补水, 补水量为 1.1 m³/s。

2) 鱼道观测。为评估鱼道是否达到设计过鱼效果, 需对进入鱼道和成功上溯的过鱼数量、主要种类及个体大小进行科学有效的统计。通过过鱼数量、种类、大小与设计目标对比作为过鱼效果评估的判别依据, 并为后续过鱼设施的改进、运行提供科学依据。龙溪口过鱼设施在鱼道上布设观测室 1 处, 室内设有玻璃观测窗和监测仪器, 对上溯鱼类进行监测统计。

3 结语

1) 鱼道设计是一个综合复杂的过程, 需尽可能收集工程流域鱼类生态习性及鱼类生态学特征参数, 为鱼道设计提供准确资料。

2) 应根据不同的设计工况, 采用多种方式(数值模拟、三维模型)研究鱼道池室及鱼道内部的总体流场分布, 确定鱼道池室的最佳结构尺寸。

3) 除了鱼道内部的水流条件, 也需分析坝下流场分布, 以便确定在运行工况下坝下是否存在鱼类上溯洄游流速屏障, 确保存在连续的可供鱼类洄游的通道。

4) 仿自然鱼道底坡要求较缓, 一般控制在 1%~5%, 而缓坡导致鱼道长度较长^[9]。为保障鱼类上溯, 考虑鱼类生态习性及持续游泳能力等综合因素, 鱼道上需间隔一定间距布设休息室以供上溯鱼类休息。休息室内可布设卵石等营造鱼类生境。

5) 岷江航电龙溪口枢纽仿自然鱼道采用藕节形布置方案, 鱼道内流场分布满足过鱼要求, 并通过坝下游的缓流平台形成连续的鱼类洄游通道, 减缓下游鱼类上溯洄游屏障。

6) 经过水力学模拟及物理模型试验研究, 岷江航电龙溪口枢纽仿自然鱼道水流条件满足过鱼要求, 但工程过鱼种类多, 过鱼复杂, 过鱼效果存在一定的不确定性, 需加强工程运行期监测评估, 提出优化改进方式, 以达到最佳过鱼效果。

参考文献:

- [1] 陈国柱, 王猛, 王海胜, 等. 枕头坝一级水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探[J]. 水力发电, 2018, 44(7): 4-8, 58.
- [2] 朱澄浩, 李卫明, 郭泽云, 等. 丹尼尔式鱼道隔板形式变化对水力特性的影响研究[J]. 水力发电, 2019, 45(7): 61-65.
- [3] 南京水利科学研究院. 岷江犍为航电枢纽工程鱼类游泳能力试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [4] 水利部水利水电规划设计总院. 水利水电鱼道设计导则: SL 609—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [5] 王猛, 马卫忠, 单承康, 等. 马岭水利枢纽集运鱼系统设计研究[J]. 水力发电, 2021, 47(1): 7-11.
- [6] 李雪凤, 韦瑛. 岷江航电犍为枢纽仿生态鱼道设计[J]. 水运工程, 2021(12): 43-46, 64.
- [7] 王岑, 王继保, 吴欢, 等. 不同位置和朝向的鱼道进口诱鱼效果[J]. 水产学报, 2020, 44(4): 681-689.
- [8] 南京水利科学研究院. 岷江龙溪口航电枢纽工程鱼类仿自然通道水力学模型试验研究: 龙溪口鱼道进口水流条件二维数值模拟研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.
- [9] 冯三杰. 加糙坡道型仿自然鱼道水力特性的数值模拟及优化研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2018.

(本文编辑 王传瑜)