



岷江航电犍为枢纽仿生态鱼道设计

李雪凤，韦瑛

(中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 广西南宁530007)

摘要:为了确定岷江航电犍为枢纽仿生态鱼道设计基本参数和鱼道布置的合理性,在现场对周边河道所捕获的鱼类进行游泳能力测试,通过二维数学模拟模型的水动力计算验证鱼道出入口水流条件,通过物理模型对仿生态鱼道的水力特性进行研究。提出设计方案:1)鱼道设计水位拟采用流量保证率和机组发电水位相结合来确定;2)仿生态鱼道布置在发电厂房左侧的堆碴体上,鱼道及其横隔板全部采用宾格网石笼,鱼道进口段布设补水措施。试验结果表明:犍为鱼道设计流速不大于1.20 m/s、鱼道各池室流速分布多样化,满足过鱼的水力条件。

关键词:仿生态鱼道;鱼道设计参数;鱼道布置;犍为航电枢纽

中图分类号: S 956.3; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0043-04

Natural-like fishway design of Minjiang Qianwei navigation-power junction

LI Xue-feng, WEI Ying

(China Energy Engineering Group Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: In order to determine the basic parameters of the natural-like fishway design of Minjiang Qianwei navigation-power junction and the rationality of the fishway layout, the swimming ability of the fish caught in the surrounding rivers is tested on the spot, the flow conditions in entrance and exit of fishway are verified by the hydrodynamic calculation of the two-dimensional mathematical simulation model, and the hydraulic characteristics of the natural-like fishway are researched by physical model. The design plan is proposed: 1) The fishway design level should be determined by the combination of guarantee rate of flow and the level of power generation. 2) The natural-like fishway is arranged on the stockpile body on the left side of the power plant. The fishway and its transversal partitions are all made of gabions, and water supplement measures are arranged at the entrance of the fishway. The experimental results show that the designed velocity of Qianwei fishway is no more than 1.20 m/s, and the velocity distribution of each chamber in the fishway is diversified, which meets the hydraulic conditions of the fish.

Keywords: natural-like fishway; fishway design parameters; fishway layout; Qianwei navigation-power junction

岷江犍为航电枢纽工程的建设改变了河流的天然状态,隔断了鱼道洄游的路线,须修建鱼道引鱼。尽管国内外的鱼道建设已经有较长历史,但国内的建设起步较晚,而且在20世纪80—90年代完全停滞。前期已经建成的鱼道大部分疏于管理、运行不善^[1],相关设计导则、规范也是在2013、2015年出版。尽管近二、三十年来重新重视,新建枢纽大多设置有鱼道或升鱼机等

过鱼设施,但相关的运行数据和鱼类特性研究还不完善。总的来说,目前国内的鱼道还属于摸索和不断积累经验的阶段。本文结合现行的两个规范SL 609—2013《水利水电鱼道设计导则》和NB 35054—2015《水电工程过鱼设施设计规范》的要求、枢纽的布置及水流情况、模型试验成果等,总结出犍为仿生态鱼道设计中的几个关键问题的设计经验。

1 过坝鱼类生态学参数的确定

鱼道设计首先要确定设计鱼类特征参数。最基础的鱼类生态学参数包括过鱼对象、过鱼季节、过坝鱼类的游泳能力等，其他参数还包括鱼类对声、光等外界因素的感应特性等。鱼类的生态学参数一般可从工程水生态环境影响评价报告中获得。对于鱼的游泳能力，可以进一步进行鱼类游泳能力试验研究。

犍为工程主要过鱼种类包括胭脂鱼、草鱼、鲢鱼、长薄鳅、圆筒吻鮈、长鳍吻鮈、吻鮈、白甲鱼，同时兼顾坝址分布的所有鱼类。犍为过鱼种类繁多，其中草鱼为中下层鱼；鲢鱼为中上层鱼，其他的都是底层鱼类^[2]。犍为鱼道重点过鱼季节为3—9月，此外为保证上下游的遗传交流，应全年均可过鱼。

南京水利科学研究院进行犍为枢纽鱼类游泳能力研究，在现场进行犍为河段内所捕获的鱼类（包括长鳍吻鮈、长薄鳅、草鱼、鲢鱼、岩原鲤、中华倒刺鲃、瓦氏黄颡、南方大口鲶和铜鱼）的游泳能力（包括感应流速、临界游速、持续游泳时间以及突进游速）测试。提出相关设计参数^[3]：鱼道过鱼孔最大流速建议为1.20 m/s；本鱼道上部竖缝宽度≥0.6 m，下部竖缝宽度≥0.5 m；鱼道平均流速宜选择0.5 m/s，建议至少750 m内设置1个休息池，供鱼类恢复体力；全部过鱼对象半数以上可感知到大于0.12 m/s的流速，建议鱼道进口流速范围为0.25~0.85 m/s。

2 鱼道设计运行水位的确定

由于出入库的流量是变化的，且枢纽在满足各功能要求下需要流量的调整，故水库上、下游水位存在变幅。鱼道设计运行水位应根据坝（闸）上、下游可能出现的水位变动情况合理选择。

SL 609—2013《水利水电鱼道设计导则》规定，鱼道上、下游运用水位较为稳定时，鱼道上游设计水位可采用主要过鱼季节相应的闸、坝正常运行水位；下游设计水位取主要过鱼季节的多年平均低水位。当上、下游运行水位变化较大时，鱼道上游最高水位取正常蓄水位或者主要过鱼季节

的工程限制运行水位，最低设计水位不宜低于工程死水位；下游最高设计水位可选主要过鱼季节闸、坝下游常见平均高水位，最低设计水位取主要过鱼季节的常见平均低水位^[4]。

NB 35054—2015《水电工程过鱼设施设计规范》规定，当上游运行水位变动较小时，上游设计水位范围可选择在过鱼季节电站的正常运行水位和死水位之间；当上游运行水位变化较大时，上游设计水位范围可选择在过鱼季节电站的运行控制水位和死水位之间，下游设计水位可选择在单台机组发电和全部机组发电的下游水位之间^[5]。

综上，这两个规范对于鱼道设计水位的确定是有所区别的，特别是对于水位变幅比较大的情况。按照目前流行的以概率论为基础的设计理念，可以采用“过鱼保证率”的概念，即在主要过鱼季节中，在一定保证率下的鱼道水位。水利版规范提出的是常见平均的原则，但未指明常见的；能源版规范提出的是机组发电水位的具体数值，未提及保证率的数值。按照国外的设计习惯，全部机组发电流量（水位）基本上对应75%~80%的保证率；但中国的习惯是多采用机组利用时间（h）来控制全部机组发电流量（水位），而单台机组发电的最小发电流量是根据机组的性能确定，和保证率不直接挂钩。

由于犍为枢纽为日调节水库，上游水位比较稳定、下游水位变幅比较大，鱼道上游设计水位取334.00~335.00 m，即正常蓄水位和死水位。

鱼道下游设计水位的确定根据水文的推算，过鱼季节（3—9月）中河道10%保证率的流量为6 398 m³/s，对应水位为317.97 m；90%保证率的流量为1 101 m³/s，对应水位为322.87 m。而单台机组发电的最低水位为317.14 m，对应的流量544 m³/s；全部机组（9台）满发水位为321.66 m，对应的流量为4 430 m³/s。

由于水位变幅大，综合考虑两个规范的要求，下游过鱼水位取317.97~321.66 m。317.97 m的水位为主要过鱼季节的90%保证率的水位（544 m³/s对应的保证率为98%），故最低过鱼水

位不再往下取单台机组发电水位。而最高水位取全部机组发电的下游水位。

3 鱼道位置选择

鱼道位置选择最关键的因素是枢纽布置、地形条件和诱鱼水流条件, 也考虑地质、施工布置等因素。鱼道可布置为绕岸式、格式、多层次盘折式或塔式等形式。枢纽中有船闸时, 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。犍为枢纽右岸为一线船闸, 并预留二线船闸, 中间为平底泄水闸, 左岸为贯流式厂房。根据枢纽的布置情况, 右岸无相应地形布置鱼道, 故犍为鱼道可以布置为左岸绕岸式鱼道, 也可以布置在厂房和泄水闸之间, 布置成多层次盘折或者塔式。由于岸坡边流速分布多样, 鱼道更适合靠岸布置。贯流式厂房尾水为连续水流, 流速不大, 也适合布置鱼道进口。故犍为鱼道布置在左岸岸坡, 左岸岸坡地形陡峭, 绕岸布置比较困难, 结合弃碴的要求, 最终选择在左岸堆碴体上布置仿生态鱼道。

4 鱼道形式的选定

鱼道的形式就其材料划分为仿生态鱼道和工程鱼道等。仿生态鱼道又称仿自然鱼道, 主要利用部分支流、古河道等形成鱼道; 也可就地取材, 采用河床天然漂石、卵石等天然材料形成的坡比不一、宽度不等的鱼道。而工程鱼道采用混凝土结构、木结构、钢结构等人工材料形成鱼道。根据过鱼通道的形式, 分为隔板式(也叫池式)鱼道、槽式鱼道和特殊结构形式的鱼道。其中隔板式鱼道按照隔板的形式可分为溢流堰式、淹没孔口式、竖缝式和组合式, 我国用得较多的是竖缝式和组合式的工程鱼道。竖缝式有斗龙港闸鱼道、瓜州闸鱼道、利民河闸大鱼道、浙江富春江鱼道、安徽裕溪闸鱼道、广西右江鱼梁鱼道、广西大藤峡鱼道等; 组合式包括江苏辽河鱼道(孔口和竖缝)、湖南洋塘鱼道(孔口和堰)、广西浔江长洲鱼道(孔口和竖缝)、江西赣江石虎塘鱼道、吉林省珲春河

老龙口鱼道等。最近几年, 仿生态鱼道兴起, 包括江西新干三湖鱼道、藏木鱼道等。

一般根据过鱼对象来选择过鱼孔口的形式, 如喜跳跃的鱼可采用溢流堰式、底层鱼可采用淹没孔口式。但目前对鱼道的要求是兼顾所有过坝鱼类, 也将过鱼的多样性作为评价鱼道成功与否的标志, 基于这样的理念, 新建设的鱼道也趋向于竖缝或者竖缝组合式。

根据主要过鱼对象以及我国鱼道的设计实践经验, 犍为鱼道采用仿生态竖缝的结构形式。

5 鱼道进出口的确定

鱼道进口设计是鱼道设计很关键的一环, 进鱼效果的好坏直接影响鱼道的过鱼效果, 国内外对进口的研究比较多, 主要包括进口位置和朝向、进口的数量、进口处的水流条件和鱼道的拦导鱼措施等。根据相关文献研究, 王岑等^[6]对不同位置和朝向的诱鱼效果研究发现: 同一位置不同朝向进口时, 垂直进口的诱鱼效果一般好于顺直进口的诱鱼效果; 不同位置的与电站相对位置不同的进口时, 其诱鱼效果受环境流速和进口位置的影响较为显著, 流速与过鱼对象的喜好流速相对应。其他相关研究也得出了类似结论^[7-8]。从研究成果来看, 厂房尾水诱鱼的效果比较好, 而且出口与主流有一定夹角效果比较明显。

犍为鱼道根据水工整体模型试验的结果, 进口布置在坝下约 285 m 处, 主要利用厂房的尾水诱鱼, 流速能满足鱼类上溯要求^[9]。根据数学模型计算, 流量 $\leq 4\ 430 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下, 鱼道进口及下游靠岸侧可形成贯通性流速小于 1.1 m/s 的低流速区^[10], 满足鱼类上溯的要求。

由于下游水深变幅大, 鱼道下游设计水位变幅达 3.69 m, 故布置了两个进鱼口。同时在汇流处设置了分流闸。多年平均流量以下以进鱼口 1 为主, 多年平均流量以上多采用进鱼口 2。两个进口位置相邻, 朝向与下游水流的夹角均为 30°, 最小进鱼水深为 1.6 m。进口底部均以 1:10 坡比与河床顺接。同时还布置有喷洒系统利用水声诱鱼,

布置导鱼电栅防止鱼类进入厂房尾水渠。

鱼道的出口一般布置在水库的岸侧，总的来说一般避开不良水流即可，如漩涡、较差水质、过大流速的泄水水流等。关于出口的研究比较少。也有很多枢纽根据上游运行水深的情况，设计多个出口。如大藤峡水利枢纽设置了 4 个出口。犍为鱼道出口布置在坝上游约 113.7 m 处，不会受到厂房进水口流速的干扰。上游水深变幅小(仅 1 m)，故仅布置 1 个出口。出口与边坡相连，便于鱼类沿岸边继续洄游至合适的产卵场。

6 鱼道主体段结构设计

鱼道主体段设计充分体现仿生态特征。除进口、出口须严格按照设计位置以满足相应的进水口流态要求外，犍为仿生态鱼道的主体段设计遵循以下原则：1) 鱼道总长不少于 1.85 km，平均纵坡不陡于 1:93。2) 转弯段(休息池)底部为平段，底宽 2.5 m。3) 鱼道底部宽 1.8~2.5 m；坡比 1:1~1:1.5，可随地形调整；竖缝平均宽度 0.6 m，同时最小宽度应大于 0.5 m。总体布置见图 1。鱼道的布置轴线、断面宽度、坡度都是可变化的，放宽施工精度的要求，施工出来的鱼道也更加接近天然河道的不规则形状，营造更好的流速分区。经过整体水工模型试验验证，鱼道内的流速流态满足设计要求^[11]。

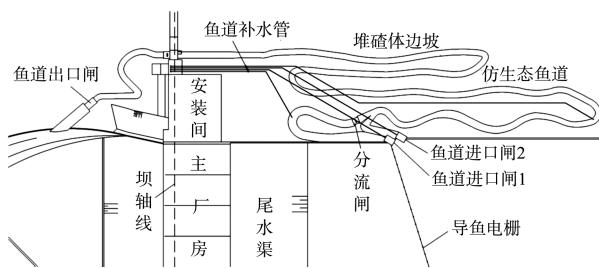


图 1 鱼道总体布置

鱼道的断面设计也尽量仿自然，采用梯形断面；鱼道建造材料均采用河卵石。结合断面稳定和防渗的要求，鱼道断面采用宾格网石笼，采用双层土工膜防渗。断面结构从上至下采用宾格网石笼或浆砌石、级配碎石过渡层、土工膜、细砂

和土工膜，见图 2。

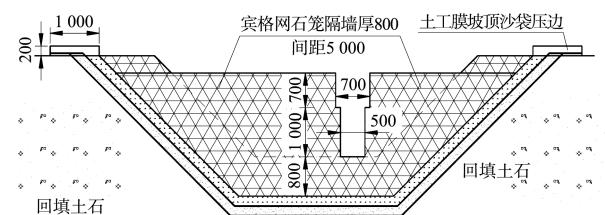


图 2 鱼道断面 (单位: mm)

7 辅助设施

7.1 补水设施

鱼道整体物理模型试验研究表明，在下游水位较高时，鱼道内下游段(即进口段区域)流速小于 0.2 m/s 的鱼类感应流速，故需采取补水措施对流速进行调节。补水调节的措施如下：1) 进口 1 过鱼时在休息池 1 补水，进口 2 过鱼时在休息池 2 补水，补水流量为 0.2~0.8 m³/s。2) 在进口闸 1 和进口闸 2 处补水，最大补水流量为 2 m³/s。补水管末端均布置有消能措施。

7.2 鱼道进口诱导鱼设施

在每个进口处都布置了喷淋系统，利用水流和水声诱鱼。在进口和厂坝导墙之间设置了拦导鱼电栅，引导鱼进入鱼道进口，限制鱼类进入厂房尾水。

7.3 鱼道观测

为检验过鱼效果、掌握过鱼规律和水流规律、进而总结鱼道建设经验，在鱼道上段布置了观察室，可直接通过玻璃橱窗观察鱼类上溯；同时在鱼道沿程布置自动监测系统，能自动捕捉鱼道人口和鱼道内鱼群图像，智能识别鱼类和数量；鱼道自动控制系统可对导鱼、诱鱼设备进行有效控制，根据鱼情控制补水阀、调节补水流量、调整鱼道内的流速，满足过鱼水流的要求。

8 结语

1) 尽可能收集鱼道生态学特征参数资料，有条件时可进行工程河段鱼类游泳能力测试及声、光、色等环境因素的感应测试。

(下转第 64 页)