

大渡河双江口水电站过鱼设施的设计及应用效果分析

王玉琦

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：水电工程作为清洁能源开发的重要形式，在满足能源需求的同时，也会改变河流自然流态，阻隔鱼类洄游通道，导致流域鱼类种群结构单一化、资源量下降等生态问题。过鱼设施作为缓解该问题的关键技术手段，其设计需充分匹配工程区的水文条件与鱼类生物学特征，确保设施功能与生态需求的适配性。本文以大渡河双江口水电站为例系统分析过鱼设施的设计要点和关键，并经验证表明设计方案具有较强的系统性和适应性，在过鱼能力与诱鱼效果方面均达到预期目标。

【关键词】：大渡河双江口水电站；过鱼设施；设计方案；应用效果

DOI:10.12417/2811-0528.25.022.074

1 双江口水电站及工程区鱼类资源概况

(1) 水电站项目概况：双江口水电站位于大渡河上游河流脚木足河与绰斯甲河汇合口以下约 2km 处，上距马尔康市约 46km，下距金川县城约 45km。电站采用坝式开发模式，枢纽建筑物由挡水建筑物、引水发电建筑物、泄水建筑物组成，坝址控制流域面积 39330km²，占大渡河全流域面积的 50.8%，多年平均流量约 516m³/s。水库正常蓄水位 2500m，相应库容 27.32 亿 m³，死水位 2420m，调节库容 19.17 亿 m³，具备年调节能力；总装机容量 2000MW，最大坝高 315.0m，多年平均年发电量 80 亿 kW·h，开发主要任务为发电，同时需承担流域生态保护责任，过鱼设施建设是落实该责任的核心举措之一。

(2) 工程区鱼类资源特征：工程区鱼类资源的种类与生活习性直接决定过鱼设施的设计参数与运行策略。根据项目环境影响评价报告，双江口水电站工程河段共分布 12 种鱼类，均属于急流水型鱼类，详细鱼类特征如表 1 所示。在各类鱼类中，流水底层类群与流水洞缝隙类群合计占比 75%，是过鱼设施的主要服务对象，其游泳速度集中在 0.6~0.8m/s，该参数为过鱼设施的流场设计提供了关键依据。

表 1 双江口水电站工程区鱼类资源特征表

类群名称	包含种类	种数	占比 (%)	栖息习性
流水底层类群	齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、厚唇裸重唇鱼、大渡裸裂尻鱼、软刺裸裂尻鱼	5	41.7	栖息于河道底层,依赖急流环境觅食与繁殖
流水洞缝隙类群	玛柯河高原鳅、短尾高原鳅、斯氏高原鳅、细尾高原鳅	4	33.3	偏好栖息于河道岩石缝隙,对水流流速变化敏感

流水吸附类群	青石爬鮡、黄石爬鮡	2	16.7	通过身体结构吸附于岩石表面,适应急流环境
流水中上层类群	川陕哲罗鲑	1	8.3	栖息于水体中上层,为珍稀保护鱼类,需重点关注洄游需求
合计	-	12	100.0	-

2 双江口水电站过鱼设施的方案分析

2.1 上行集鱼系统设计

上行集鱼系统作为鱼类从坝下上溯至库区的核心通道，其布置位置与结构设计需匹配工程区地形特征与鱼类洄游路径。双江口水电站上行集鱼系统布置于大坝下游右岸，下游压重体下方，集鱼槽顺岸坡方向布置于 2245m 高程，分拣观测室与提升系统的启闭机房布置于 2268.00m 高程以上，该高程选择可避免汛期洪水对设施的冲击，同时保障鱼类上溯的高程差需求。系统建筑物按永久次要 3 级建筑物设计，相应建构筑物安全级别为 II 级，主体采用钢筋混凝土结构，以确保设施的耐久性与稳定性。为提升集鱼槽基础的承载能力与抗滑稳定性，对集鱼槽基础采用摩擦桩进行加固处理^[1]；启闭机排架基础位于河床覆盖层，在 2245.00m 高程设置断面面积 2×2m 的钢筋混凝土圈梁，圈梁下部同样采用摩擦桩加固，桩径 1.2m，深度 20m，桩间距 3.75~4.85m，桩身为钢筋混凝土结构，进一步提升基础整体稳定性。

金属结构设备是上行集鱼系统功能实现的关键组成部分，从诱鱼口至升降室依次布置集鱼通道检修闸门及其启闭机、防逃网、集鱼通道内赶鱼栅及轨道式电容车、集鱼通道内赶鱼栅提升启闭机、升鱼斗及其启闭机等设备。其中防逃网可防止鱼

类进入集鱼通道后逃逸,赶鱼栅与轨道式电容车可辅助鱼类向升鱼斗移动,升鱼斗则负责将鱼类提升至分拣观测室,实现鱼类的集中处理与计数。

2.2 下行集鱼系统设计

下行集鱼系统主要用于保障库区鱼类(尤其是鱼卵、鱼苗)向下游扩散,维持流域鱼类种群的自然交流^[2],其设计重点在于鱼卵、鱼苗的高效采集与安全转运。双江口水电站下行集鱼系统由库区工作船与卵苗采集器组成,两者协同实现鱼卵、鱼苗的采集与处理。

库区工作船作为移动作业平台,搭载卵苗采集器前往工程区潜在产卵场水域开展采集作业。潜在产卵场的选择基于工程区鱼类繁殖习性,主要分布于库区上游支流入口与水流较缓的深潭区域,这些区域水流条件适宜鱼类产卵,鱼卵、鱼苗密度较高。卵苗采集器采用网格状结构,网孔尺寸根据主要保护鱼类的卵径与鱼苗大小设计,确保鱼卵、鱼苗能够被有效捕获且不受机械损伤,同时避免杂质进入采集器影响采集效率^[3]。

采集作业完成后,库区工作船将卵苗采集器运送至岸边处理点,工作人员对采集到的鱼卵、鱼苗进行分类计数,区分目标保护鱼类与非目标鱼类,非目标鱼类及时放回库区,目标鱼类则通过转运系统送至坝下适宜水域放流,确保其能够顺利进入下游栖息地。

2.3 转运系统设计

转运系统是连接上行集鱼系统、下行集鱼系统与放流点的关键环节,需实现鱼类在不同设施间的安全、快速转运,减少转运过程中的鱼类应激反应与死亡率。双江口水电站转运系统主要包括起吊设备、分拣设备、运鱼箱、运鱼车、AGV小车等设备,根据运行阶段的不同采用不同的转运方式。在永久设施运行阶段,上行转运流程为:工作人员在转运平台将集鱼斗箱内的鱼类转移至运鱼箱,运鱼箱放置于AGV小车上,AGV小车沿枢纽区场内专用运输道路(坝后之字路EL.2425m以下)运送至右岸坝肩;随后从坝顶右端头沿永久道路16#路至洞式溢洪道闸室,再经16-1#路行进约0.6km进入28-1#路,继续沿28-1#路向上坝公路方向行进约0.3km进入28#路,最终沿28#公路向可尔因沟大桥方向行进至道路淹没段,与库区工作船汇合,完成鱼类转运,整个转运流程如图1所示。

运鱼箱作为鱼类转运的核心载体,采用不锈钢材质制作,具备良好的密封性与保温性,箱内配备维生系统,包括增氧系统、物理过滤系统、水循环制冷机组,可实时调控箱内水温、溶氧量与水质,确保鱼类在转运过程中处于适宜的生存环境。运鱼车采用专用车辆,车厢内部进行防腐处理,配备固定装置用于固定运鱼箱,避免转运过程中运鱼箱晃动导致鱼类受伤。

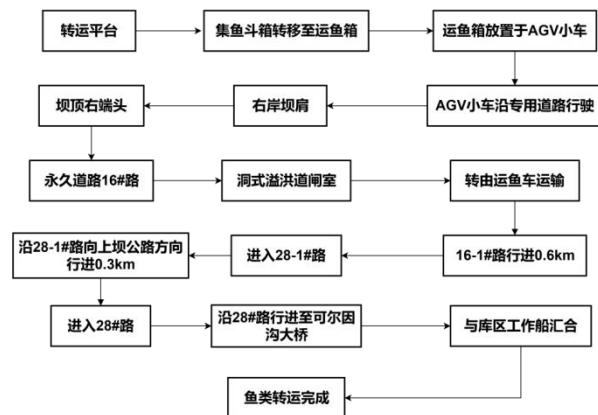


图1 上行转运流程

2.4 附属设施设计

附属设施为过鱼设施的正常运行提供支撑,包括综合楼、交通桥、监测设备与通信设施,各设施功能互补,形成完整的运行保障体系。(1)综合楼作为集鱼系统、分拣系统的配套附属设施,承担鱼类分拣、暂养、观测与工作人员办公的功能,其建设内容包括地基与基础工程、主体结构工程、装饰装修工程、屋面工程、建筑给排水工程、建筑电气工程、建筑节能工程。综合楼的位置选择在集鱼系统附近,便于工作人员快速处理集鱼系统捕获的鱼类,减少鱼类在转运过程中的停留时间。

(2)交通桥连接大坝下游6#道路与过鱼工程综合楼,为工作人员与设备的运输提供通道,设计安全等级为二级,设计使用年限50年,总跨约40m,分三跨设置,单跨最长约14m,桥面宽度9m,包含8m车行道与1m人行道。上部结构采用整体式桥面板,下部结构采用桥台或桥墩,桥墩设置于圈梁承台上,圈梁承台下采用摩擦桩加固,桩径1.2m,深度18m,每个承台下设置2根桩,桩身为钢筋混凝土结构,确保交通桥的承载能力与稳定性。(3)监测设备主要用于评估过鱼设施效果,其包括水下摄像系统、水质监测设备、流速水位监测设备、PIT监测设备、水声学观测设备^[4],上述各类设施通过通信设施实现其与控制中心的连接,确保过鱼设施运行状态能够得到实时监控与调整。

3 过鱼设施应用效果分析

3.1 分析方法

鱼道过鱼设施的应用效果分析需要按照标记放流、信号监测和数据统计的步骤进行分析^[5]。第一,标记放流。在鱼道进口外及鱼道内共投放标记鱼类644尾,涵盖花斑裸鲤、黄河裸裂尻鱼、骨唇黄河鱼等8种工程区土著鱼类,标记方式未明确提及,但文件明确标记鱼可被信号监测设备识别;第二,信号监测。设置5个信号站位覆盖鱼道全程,实时检测标记鱼的通行轨迹,记录“检测到信号”与“未检测到信号”两类情况,统计

分析时将“未检测到信号”默认为未通过鱼道；三是数据统计，针对通过最后一个信号站位（站位5）的鱼类，统计其成功上溯至库区的数量，计算整体及不同种类的通过率、折返率（过鱼能力分析指标），同时通过坝下进鱼口诱鱼效果试验，统计进入鱼道的鱼类数量，计算诱鱼效果（诱鱼能力分析指标）。

3.2 应用效果分析

（1）过鱼能力：过鱼能力通过标记鱼整体通过率、折返率及不同种类通过率衡量，水电站监测结果显示，5个信号站位共检测到标记鱼273尾，其中114尾成功通过鱼道出口上溯至库区，标记鱼整体通过率为74.8%，折返率为25.2%，整体过鱼能力较强。不同种类鱼类因对水流环境适应性差异，通过率存在明显分化，具体数据见表2。由表可知，花斑裸鲤通过率最高（97.0%），对鱼道内流速波动耐受性最强；黄河高原鳅次之（88.9%），底栖习性与鱼道缓流区设计匹配度高；厚唇裸重唇鱼（75.0%）、骨唇黄河鱼（71.9%）通过率处于中等水平，适应竖缝池室的行进环境；黄河裸裂尻鱼（68.4%）、硬刺高原鳅（46.7%）对流速敏感，部分个体因局部流场变化折返；刺鲃通过率最低（33.3%），偏好天然浅滩急流，与鱼道水深环境存在差异；极边扁咽齿鱼仅放流1尾且通过率100%，样本量限制下暂不具备代表性。

表2 双江口水电站不同种类标记鱼过鱼能力统计

种类	放流数量(尾)	检测到信号数量(尾)	通过数量(尾)	通过率(%)
花斑裸鲤	111	56	32	97.0
黄河高原鳅	49	26	18	88.9
厚唇裸重唇鱼	24	6	3	75.0
骨唇黄河鱼	104	52	23	71.9
黄河裸裂尻鱼	132	72	26	68.4
硬刺高原鳅	139	46	9	46.7

刺鲃	83	14	2	33.3
极边扁咽齿鱼	1	1	1	100.0
合计	644	273	114	74.8

（2）诱鱼能力：诱鱼能力通过坝下进鱼口诱鱼效果试验评估，核心指标为“进入鱼道的鱼类数量占标记数量的比例”，水电站共标记297尾鱼类开展诱鱼效果试验，最终34尾成功进入鱼道，整体诱鱼效果为11.4%，表明进鱼口具备基础诱鱼功能，但未达理想水平。按鱼类类群划分，诱鱼效果存在明显差异：过鱼对象（含花斑裸鲤、黄河裸裂尻鱼、骨唇黄河鱼、厚唇裸重唇鱼、刺鲃）共计193尾，进入鱼道的有14尾，整体诱鱼效果为7.3%；高原鳅类（含黄河高原鳅、硬刺高原鳅）共计104尾，进入鱼道的有20尾，整体诱鱼效果为19.2%，高原鳅类诱鱼效果显著优于过鱼对象，主要因该类群对水流信号感知更敏锐。进一步分析诱鱼效果制约因素，流场模拟与现场实测显示，水电站鱼道进口（1#、2#）实际诱鱼流速范围为0.162~0.572m/s，显著低于0.8~1.1m/s的设计流速，弱水流信号难以有效吸引过鱼对象靠近进鱼口，这是导致整体诱鱼效果偏低的核心原因。双江口水电站在过渡期及永久运行阶段，需通过补水泵等设备调控进鱼口流速，确保实际流速达到设计值，同时可参考水电站类群差异，针对过鱼对象（流水底层类群为主）优化诱鱼信号设计，提升其进入鱼道的概率。

4 结语

大渡河双江口水电站过鱼设施的设计充分考虑工程区的水文特征与鱼类生物学行为，通过构建上行、下行集鱼系统及转运系统为核心的综合过鱼体系，并经运行监测表明过鱼能力表现良好，能够有效支持多数鱼类的上行洄游需求，整体诱鱼效果仍有待提升，对流水底层类群的吸引力较弱，需进一步优化进口流速与信号设计。在后续应持续做好数据的监测分析，并围绕鱼类的行为响应机制，对进鱼口流场进行动态调控，逐步完善诱鱼策略，以提升过鱼设施对不同生态类群鱼类的适应性。

参考文献：

- [1] 王改会,沈坤民,黎贤访.西藏扎拉水电站鱼道工程布置与设计研究[J].水利水电快报,2024,45(06):62-68.
- [2] 陈浩,杨涛,贺翠玲,等.高坝过鱼设施集诱鱼口位置及设计参数体系研究[J].水力发电,2023,49(07):45-49.
- [3] 兰志良.某水电站过鱼设施的水力特性优化研究[D].西安理工大学,2022.
- [4] 杨俊锋,张菡.金沙水电站过鱼方案比选研究[J].水利水电快报,2022,43(03):86-90.
- [5] 吴俊东,王翔,翁永红,等.乌东德水电站集运鱼系统方案设计[J].人民长江,2022,53(02):88-94.