

高坝鱼道工程设计案例分析

陈静,郎建,何涛,张陆良

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,成都 610072)

摘要:坝高 116 m,最大水头 67.0 m,额定水头 53.5 m。主要过鱼季节为 3–6 月,兼顾过鱼季节为 2 月、7–10 月。综合考虑工程特性和过鱼对象生态习性,设计采用竖缝式池室结构型式鱼道,主要由进口段、槽身段、暗涵段、明渠段、过坝段、出口段、进口补水设施和观测研究室等部分组成,全长 3 566.325 m。共设置 2 个常用进口,2 个备用进口,鱼道过鱼孔设计流速 1.1 m/s。介绍了鱼道设计技术路线及研究方法,提出了休息池、鱼道进口、补水设施和带集鱼池的观测研究室的设计思路。

关键词:高坝;竖缝式鱼道;水位;流速

中图分类号:TV222,S956.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674–3075(2013)04–0019–07

水电作为可再生清洁能源在促进经济快速发展、充分利用水能资源的同时,其工程对水生态环境也会产生不可忽视的影响,主要表现在改变天然河道的水文情势、阻隔鱼类的天然洄游通道和导致河流完整生态系统的生境破碎化。鉴于此,越来越多的学者、设计人员和科研工作者将目光投入到过鱼设施的设计和建设中。

鱼道是在闸坝或天然障碍处为沟通鱼类洄游通道而设置的一种过鱼建筑物(华东水利学院等,1987)。在鱼道中通常设置隔板将上下游水位差分为若干级,利用消能减速和控制水流流量以及缩短鱼道长度等措施创造适合于鱼类上溯的流态(王兴勇和郭军,2005)。鱼道由于其具有技术相对成熟、可连续过鱼、运行费用低、易于管理等特点,目前在国内外运用较为广泛。我国于 1958 年在规划开发富春江七里垄水电站时首次考虑建设鱼道,随后又陆续修建了兴凯湖新开流、鲤鱼港、斗龙港、太平闸、浏河、洋塘、长洲等鱼道。1980 年湖南洋塘鱼道建成,有集鱼、补水系统,进一步推进了鱼道的设计和研究。2007 年建成的长洲鱼道全长 1 423 m,上下游水头差 15 m,为国内设计的第 1 座大型鱼道(农静,2008)。国外鱼道研究起步较早,比较著名的有巴西伊泰普水电站鱼道、美国的邦纳维尔鱼道以及加拿大的鬼门峡鱼道。巴西伊泰普水电站鱼道落差 120 m,全长 10 km,全鱼道流速不超过 3 m/s,水深

不小于 0.8 m,过水断面达到 4 m²,洄游流量为 11.4 m³/s;此鱼道 10 km 的长度中有 6.5 km 是利用自然河流故道,仅 3.5 km 为新开的河道(杨宇等,2006)。

我国已建鱼道主要过鱼对象一般为国内特有的珍稀保护鱼类、鲤科鱼类和虾蟹等幼苗,相对于国外一般以鲑和鳟等具有强洄游性的鱼类,国内过鱼对象一般个体较小、洄游性不强、克流能力较小。因此,国外鱼道设计坡度一般较陡(1:10~1:25),国内鱼道设计坡度一般较缓(1:40~1:115)。在上下游同等水位差的前提下,国内鱼道的长度一般长于国外鱼道。据不完全统计,国外在坝高低于 40 m 的工程上修建鱼道基本能成功运行,而坝高高于 40 m 的工程则通常选择其他过鱼设施。我国目前在建、已建高坝众多,高坝工程鱼道的设计基本没有现成经验可循,且坝高越高,鱼道越长(环境保护部环境评估中心,2012),对国内游泳能力不强的过鱼对象亦是挑战。因此,推动和促进高坝鱼道工程技术进步是我国水电行业水生生态保护工作者面对的重要任务。

1 概况

某高坝水电站工程开发任务以发电为主,兼顾生态环境用水要求,无航运、漂木、防洪、灌溉等综合利用要求。电站坝址控制流域面积 157 668 km²,最大坝高 116 m,引用流量 1 071.3 m³/s,具有日调节性能,装机容量 510 MW,年发电量 25.008 亿 kW·h。电站枢纽布置格局为混凝土重力坝+坝后式厂房。

2008 年 9 月,该高坝水电站环境影响报告书通

收稿日期:2013–04–16

基金项目:重大水利水电工程生态保护技术及标准规范研究(2012BAC06B01)。

作者简介:陈静,女,1983 年生,工程师,主要从事环保工程设计。E-mail:Chenjing0129@gmail.com

过环境保护部环境工程评估中心组织的技术评审。根据批复意见要求,需要修建过鱼设施等以保护水生生态系统。

结合项目特点,鱼道进口结合左、右岸冲砂底孔坝段布置。鱼道工程的技术挑战主要为以下几个方面:(1)坝高 116 m,最大水头 67.0 m,额定水头 53.5 m,而国内外成功运行鱼道的坝高一般在 40 m 以下,工程缺乏可借鉴的设计和运行管理经验;(2)鱼道进口水位变幅较大(进口水位变幅 5 m),不同水位条件下局部断面流速和进口处流速难以控制;(3)工程河段鱼类生态学习性和鱼类游泳能力等基础研究较为薄弱。

2 设计路线及研究方法

按照基础资料调研、鱼道方案拟定、鱼道工程细部设计等阶段开展了鱼道工程的科研和设计工作。项目技术路线见图 1。

针对本高坝鱼道工程的特点和设计的难点,设计单位先后完成了《鱼道主要过鱼对象生态习性及游泳能力测试研究》、《鱼道水工模型试验》以及《鱼道可通过性试验》3 个专题的科研工作,具体内容见表 1。

表 1 某高坝鱼道科研工作

Tab.1 Scientific researches of a high dam fishway

科研专题	时间	研究地点	研究内容	技术方法
过鱼对象生态习性及游泳能力测试研究	2004-2007 年, 2010 年	工程影响河段	①提出鱼道设计的目标过鱼对象	资料调研、渔民走访及跟踪调查
			②池室尺寸:调查过鱼对象的体长、体宽等生物学特性	现场捕捞、测量记录
	2010 年 11-12 月, 2011 年 6 月	现场工程所在地临江边	③过鱼时间:调研过鱼对象的迁徙习性、迁徙时间以及所处的生命阶段	资料调研、渔民走访及跟踪调查
			④设计流速:现场进行鱼类游泳能力试验,确定过鱼对象的感应流速、临界游速、突进游速和持续游泳时间等相关参数	递增流速法、固定流速法
水工模型试验	2011 年 2-12 月	科研院所试验室	①I: 5 局部模型试验:插板型式比选试验、底板坡度对比试验、鱼道引用流量试验、池室段试验研究	物理模型试验、选用 FLUENT 软件采用 VOF 法进行数值模拟
			②I: 60 整体模型试验:鱼道进口布置研究、鱼道池室段试验研究、鱼道出口试验研究	物理模型试验、选用 FLUENT 软件采用刚盖假定法进行数值模拟
可通过性试验	2011 年 10 月	科研院所试验室	①可通过性试验:观察池室中鱼类行为,统计过鱼效率,分析鱼道池室及进出口设计的合理性	观测记录、分析统计
			②隔板选择试验:比较鱼类竖缝式隔板和竖缝+底孔式隔板型式的选择性	观测记录、分析统计
			③鱼类聚集试验:观察不同坝下水位工况下鱼类集群区域	观测记录、分析统计

3 研究结果

3.1 基础资料

3.1.1 过鱼对象 原则上,工程河段可能分布的鱼类,工程河段为重要生境、洄游、迁徙路线的鱼类均

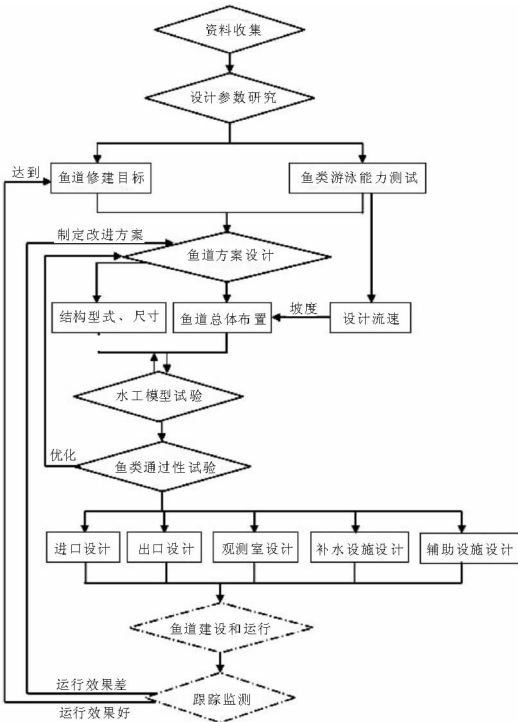


图 1 某高坝鱼道工程设计技术路线

Fig.1 Technical route for engineering design of a high dam fishway

应作为过鱼对象进行选择。但过鱼设施的结构和布置很难做到同时对所有鱼类都有很好的过鱼效果,因此在设计过鱼设施时,可按资源量、迁徙需求、洄游动机、保护级别依次优先选择过鱼对象。该工程影响河段过鱼对象选择结果见表 2。

表 2 过鱼对象选择
Tab.2 Choice of fish pass object

过鱼对象	鱼类	资源量	迁移需求	洄游动机	保护级别
主要过鱼对象	A	+++	+++	生殖洄游、基因交流	
	B	+++	+++	生殖洄游、基因交流	
	C	++	+++	生殖洄游、基因交流	
兼顾过鱼对象	D	+	+	基因交流	省级保护
	E	++	+	基因交流	
	F	+++	+	基因交流	
	G	+	+	基因交流	
	H	+	+	基因交流	
其它鱼类 <1%					

注:+++——多见/大;++——常见/一般;+——少见/小。

3.1.2 过鱼季节 具有生殖洄游习性的鱼类在性成熟之后,在春季水温上升时,一般上溯至具有产卵条件的产卵场繁殖,所以对于生殖洄游的鱼类,其过鱼季节和繁殖时间息息相关,可以根据鱼类性成熟即 GSI 指数来判断主要过鱼季节。通过对主要过鱼对象及兼顾过鱼对象的繁殖习性研究,综合确定了本鱼道的主要过鱼季节为 3-6 月,兼顾过鱼季节为 2 月、7-10 月。

3.1.3 运行水位 鱼道进口布置在厂房下游,鱼道进口水位受发电泄水和天然来流情况下通过溢流坝下泄洪水影响。鱼道出口布置于库区,出口水位受水库运行方式影响。该高坝工程水库特征水位及尾水位见表 3。

表 3 水库特征水位及尾水位
Tab.3 Characteristic water level and tail water level in reservoir

位置	水位	数值/ m
坝址	校核洪水位 (P=0.2%, Q=13 600 m³/s)	3 262.47
	设计洪水位 (P=0.5%, Q=12 400 m³/s)	3 261.43
下游	正常尾水位 (Q=1 071.3 m³/s)	3 248.05
	最低尾水位 (Q=Q _r)	3 243.53
	正常蓄水位	3 310.00
	汛期排沙运用水位	3 305.00
上游	死水位	3 305.00
库区	正常蓄水位以下库容 0.866 亿 m³,	
	调节库容 0.131 亿 m³,日调节	

该高坝水电站坝下水位变化情况为:11 月-翌年 5 月,下游来水主要受发电泄水影响,变幅为 4.52 m;汛期 6-10 月,坝下水位因溢流坝下泄洪水变动。在不泄洪时,鱼道进口水位主要受电站发电泄水影响,水位变化范围为 3 243.53~3 248.05 m,变幅为 4.52 m。

电站的水库运行方式为:汛期(6-10 月)水库维持汛期排沙运用水位,其他时间水库带基荷按日调节方式运行,水位在正常蓄水位与死水位之间变

动。在过鱼季节的鱼道出口水位,2-5 月在正常蓄水位 3 310 m 与死水位 3 305 m 之间变动,变幅为 5 m;6-10 月维持水位 3 305 m 运行。

3.2 基本设计参数

3.2.1 结构型式 综合对比了丹尼尔式、溢流堰式、竖缝式和底(潜)孔式共 4 种池室结构型式。由于本工程上下游水位均存在较大变幅(下游水位变幅 4.52 m,上游变幅 5 m),而竖缝式鱼道适应水位的变幅能力最强,且竖缝式鱼道对表层和底层鱼类均适用。因此,综合考虑工程特性和过鱼对象生态习性,推荐采用竖缝式池室结构型式。为使水流平顺进入过鱼缝,缝上游采用圆弧导流,见图 2。

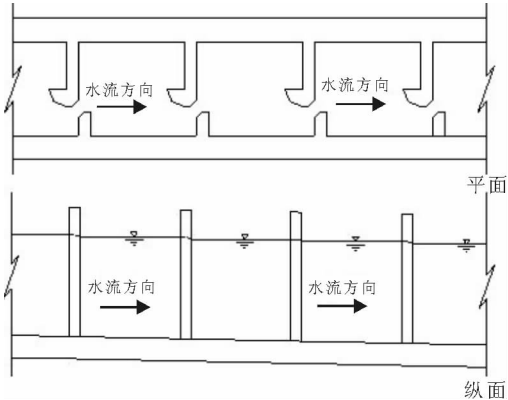


图 2 鱼道池室结构型式

Fig.2 Pool room structure of fishway

3.2.2 设计流速 鱼类的游泳能力直接影响鱼道的设计流速,并间接影响鱼道坡度和投资。鱼类的游泳行为是鱼道设计中必须考虑的重要因素,缺乏对鱼类行为学研究的鱼道设计往往是失败的(Quirós R,1989)。以往工程设计中通常采用 Videler 通过试验提出的鱼类游泳速度的经验公式,当鱼类体长 <0.5 m,鱼的最大游泳速度(m/s)和体长 L(m) 之间的关系: $V_{max} = 0.4 + 7.4L$, 鱼的最大巡游速度(m/s) 以及体长 L(m) 之间的关系: $V_{cr} = 0.15 + 2.4L$ 或 $V_{cr} = 2.3L + 0.8$ (Larinier M et al,2002)。但此公式因忽略了鱼的种类、生长阶段、生活环境、水温等影响,难以反映相同体长的不同鱼类在游泳能力上的差异。

2010 年 11 月和 2011 年 6 月 2 次现场开展的过鱼对象游泳能力测试结果见表 4。

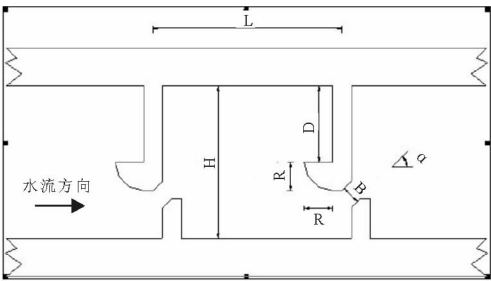
主要过鱼对象临界游速基本在 0.90 m/s 以上,突进游速基本大于 1.20 m/s。鱼道过鱼孔流速的取值不仅需要参考鱼类的游泳能力,而且与上下游水头差、鱼道结构类型以及鱼道建设条件和投资有密切关系。结合工程水头高(坝高 116 m)以及两岸

为峡谷地形等特性,为取得鱼类通过能力和工程建设的平衡,鱼道过鱼孔设计流速取值为 1.1 m/s。

表 4 过鱼对象游泳能力测试结果

主要过鱼对象	测试指标/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			测试时间
	感应流速	临界流速	突进流速	
A	0.10	0.98	1.27	2010 年 11 月
	0.07	0.95	1.53	2011 年 6 月
B	0.08	0.96	1.21	2010 年 11 月
	0.04	0.83	1.22	2011 年 6 月
C	0.12	0.95	1.17	2010 年 11 月
	0.08	0.91	1.37	2011 年 6 月

3.2.3 池室尺寸 该高坝鱼道竖缝式鱼道主要结构尺寸如图 3。



$\alpha = 45^\circ, B = 0.3 \text{ m}, D = 1.2 \text{ m}, R = 0.45 \text{ m}, H = 2.4 \text{ m}, L = 3 \text{ m}$

图 3 某高坝鱼道池室尺寸示意

Fig.3 Sketch map of pool room size of a high dam fishway

3.2.4 池室间落差及纵坡 池间落差决定了过

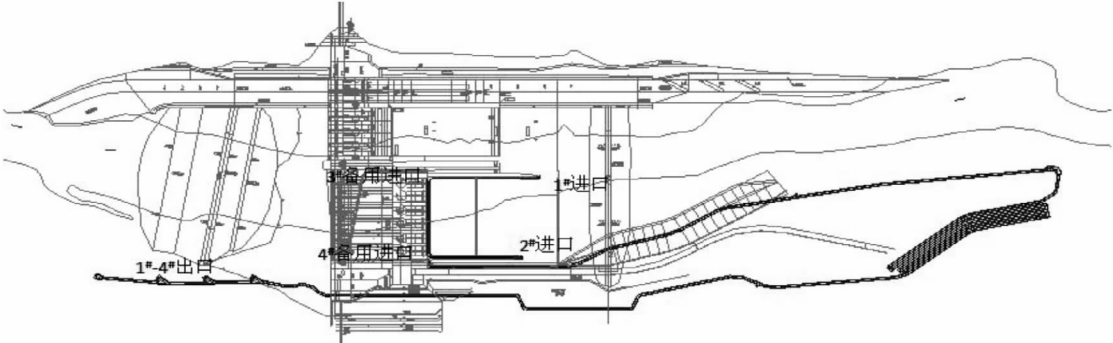


图 4 鱼道平面布置

Fig.4 Fishway plane layout

表 5 工程设计难点及解决方案

Tab.5 Design difficulties and solution for the project

工程特点	鱼道设计难点	解决方案	预期效果
坝高 116 m, 最大水头高 67 m	按照一般每 10 个池室设置休息池, 休息池底坡为 0, 将增加鱼道长度, 且鱼类通常并未在休息池得到充分的休息	横向扩宽鱼道池室作为休息池	底坡同一般池室底坡, 且不增加鱼道总长
	鱼道提升高度国内最高, 鱼道总长度将很长, 鱼类可能无法到达出口	带集鱼池的观测研究室	为后期集鱼、标记、休息区域, 且可作为后期鱼道过鱼效果不好改建的集鱼池
坝下水位变幅 5 m	坝下水位与鱼道进口水位有关, 坝下水位变幅大, 影响鱼道进口诱鱼	鱼道进口布置及补水设施设计	不同机组运行时启用不同鱼道进口, 分段补水, 流量调节阀为后期优化留有余地

鱼竖缝处的流速以及池室内部流态, 按以下公式确定: 池间落差 $\Delta h \frac{V^2}{2g} = 0.062 \text{ m}$;

鱼道纵坡为 $i = \frac{\Delta h}{l} = \frac{0.062}{3} = 0.02$ m, 其中 l 为

池室长度。

底坡的选择通过水工模型试验验证, 当坡度调整为 2% 时, 竖缝中垂线流速值减小到 1.04 ~ 1.17 m/s, 平均流速为 1.05 ~ 1.10 m/s, 满足鱼道的设计流速要求。

3.3 鱼道总体布置

本高坝鱼道工程主要由进口段、槽身段、暗涵段、明渠段、过坝段、出口段、进口补水设施和鱼道观测研究室等部分组成, 全长 3 566.325 m。共设置 2 个常用进口, 2 个备用进口, 进口底坡为 0。鱼道槽身段和暗涵段与尾水渠底板、尾水左、右导墙、厂房防洪墙结合布置。鱼道明渠段逐步爬升至 19#坝段处穿越大坝, 该过坝段鱼道采用底坡为 0, 可兼起休息池作用。鱼道设置 4 个出口, 底坡为 0。鱼道总体布置见图 4。

4 高坝鱼道设计重点

结合本高坝工程特点, 设计中対休息池、鱼道进口段、进口段补水设施、带集鱼池的观测研究室进行了优化设计和特殊考虑。见表 5。

4.1 休息池优化设计

休息池可供鱼类上溯过程中暂时休息,恢复体力,有利于鱼类的继续上溯。但根据本工程鱼道水工模型试验及可通过性试验结果,鱼类并未在通常考虑的休息池(长度为一般池室 2 倍,底坡为 0)中休息。本工程考虑鱼道每升高 9.00 m 布置 1 个休息池,休息池侧向扩宽鱼道池室宽度,扩宽部分留有充分的回流区供鱼类休息,采用与鱼道池室相同底坡 $i=0.02$,休息池示意图 5。本高坝鱼道工程休息池的设计相对于一般意义上设计的休息池可不增加鱼道总长度,特别适用于鱼道可能很长的工程。

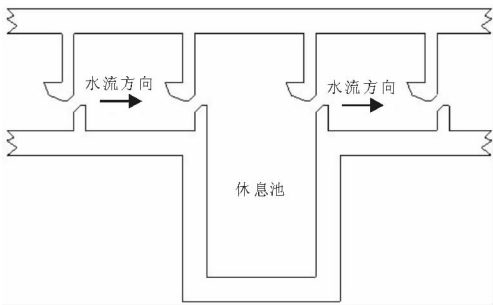


图 5 休息池示意
Fig. 5 Sketch map of rest pool

工程在鱼道转弯位置处(转弯角 90° 、 180°)也设置休息池,休息池底坡 $i=0$ 。工程共设 9 个休息池。

4.2 鱼道进口设计

鱼道进口设计是鱼道设计的关键,鱼道进口设计的成功与否直接决定后期鱼道是否能发挥效用。进口布置通常考虑:经常有水流下泄的地方,且紧靠在主流的两侧;位于坝下游鱼类能上溯到的最上游处(流速屏障或上行界限)及其两侧;水流平稳顺直,水质鲜肥的区域;坝下游两侧岸坡处;能适应下游水位的涨落。

电站左侧河道为泄洪系统,右侧布置厂房发电系统,泄洪时段为 6 月中旬 - 10 月中旬,泄洪时流速较大,水流紊乱,对鱼类形成阻隔,左侧河道不适合鱼道进口布置。每年过鱼期主要集中在 3 - 6 月,此时厂房尾水为主要过水通道,左侧河道处于回流状态,不同电站机组运行时,下泄水流可以起到一定的诱鱼作用,水工模型试验实测最大流速 1.58 m/s (出现在 6 台机组运行工况),尾水渠水力学条件适合布置鱼道进口。

通过水工模型试验和鱼类集群试验,本电站鱼道布置了 1#进口、2#进口 2 个常用进口,分别位于尾水渠左、右两侧的导墙末端。考虑到电站发电尾水可能将鱼类吸引到尾水出口处,故本鱼道在尾水渠左、右两侧的导墙始端布置了 3#、4#2 个备用进口,进口布置见图 6。

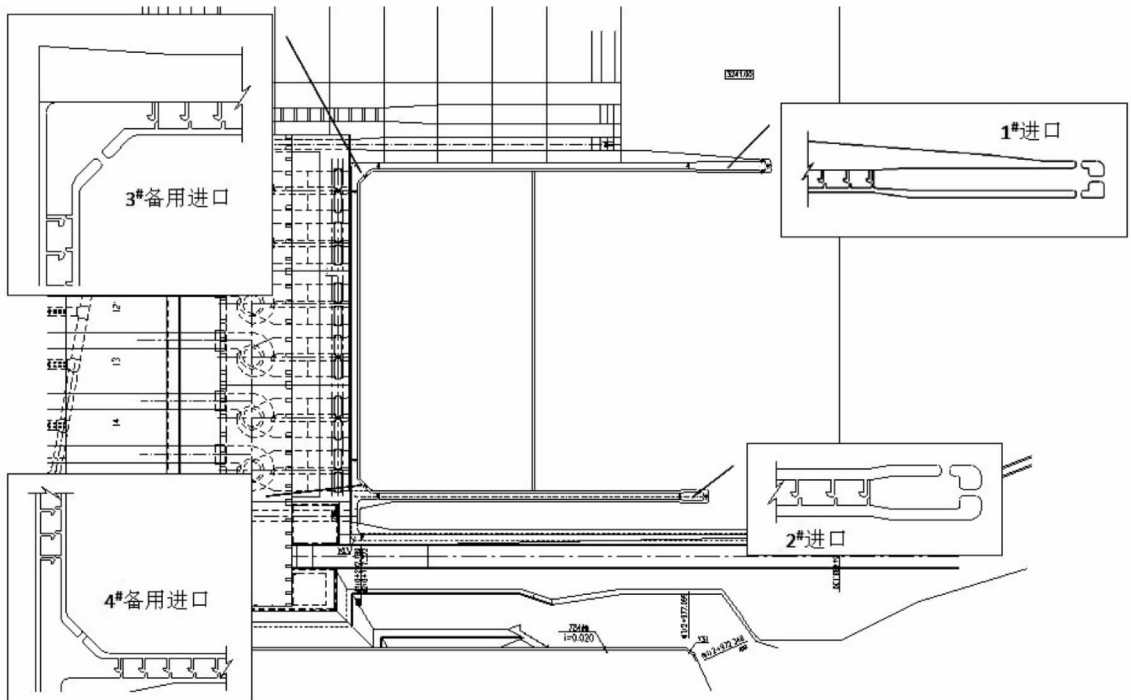


图 6 鱼道进口布置
Fig. 6 Layout of fishway inlets

4.3 鱼道进口补水设施

4.3.1 补水流量 电站鱼道流量较小,为 0.27 ~ 0.74 m³/s。为达到更好的诱鱼效果,需对鱼道进行补水。根据不同机组台数发电运行工况对鱼道进口流速的要求,计算鱼道需要的补水流量见表 6。

表 6 补水流量计算

Tab. 6 Calculation of the flow of replenishing water

工况	进口	进口 水位/ m	进口 水深/ m	补水 流量/ m ³ · s ⁻¹	进口 流速/ m · s ⁻¹
1 台发电	1#进口	3 243.34	2.34	1.40	1.11
2 台发电 (高程 3241.00 m)		3 244.60	3.60	2.20	1.04
3 台发电	2#进口	3 245.56	2.56	1.40	1.01
4 台发电	(高程	3 246.64	3.64	2.20	1.02
5 台发电	3 243.00 m)	3 247.30	4.30	3.00	1.13
6 台发电		3 247.60	4.60	3.00	1.06

4.3.2 补水方式 为满足在不同下游尾水流量工况(对应不同机组发电台数)下鱼道内的过缝流速保持在 0.90 ~ 1.20 m/s,电站鱼道采用分散补水方式,即在鱼道的不同部位及进鱼口设置多个补水点,根据不同的机组发电台数工况相应调整各补水点的补水量,以满足鱼道的诱鱼流速要求。在左、右侧鱼道沿程设置多根补水支管,补水支管上装有流量调节阀,可根据实际情况调整各补水点的补水量,以达到鱼道内最佳诱鱼流速要求。鱼道进口补水系统见图 7。

4.4 带集鱼池的观测研究室

鱼道观测研究室承担统计进鱼数量、观察研究

和参观游览的功能,观测研究室旁预留旁通池塘,具有休息、集鱼和标记功能。

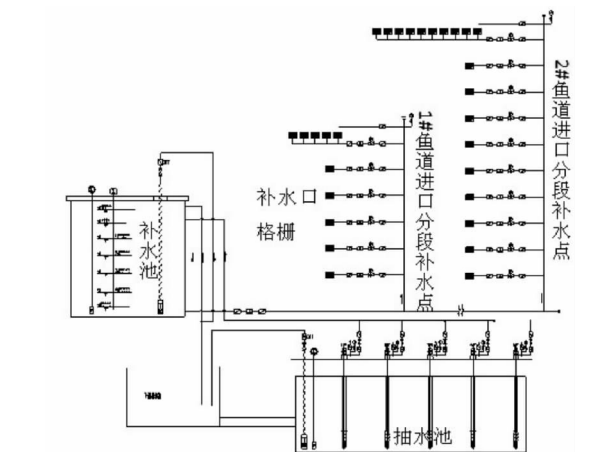


图 7 鱼道进口补水系统

Fig.7 Water replenishing system for fishway inlet

鱼道观测研究室主要由游客参观陈列室、鱼道观测室、科研办公室和卫生间等房间组成。为满足观察研究的需要,鱼道观测室观测窗对应池室结构需做局部调整,观测室鱼道段池室设置观测板和导鱼板,将鱼类导向观测窗附近。鱼道段池室配备日光灯、水下摄像机、声纳回声探测仪等设备。进口观测研究室平面图见图 8。

进口观测研究室旁预留旁通池塘,兼具鱼道休息池功能,同时可作为后续鱼类标记、统计鱼道过鱼效率的集鱼系统,也可以作为后续捕捞过坝的集鱼池。

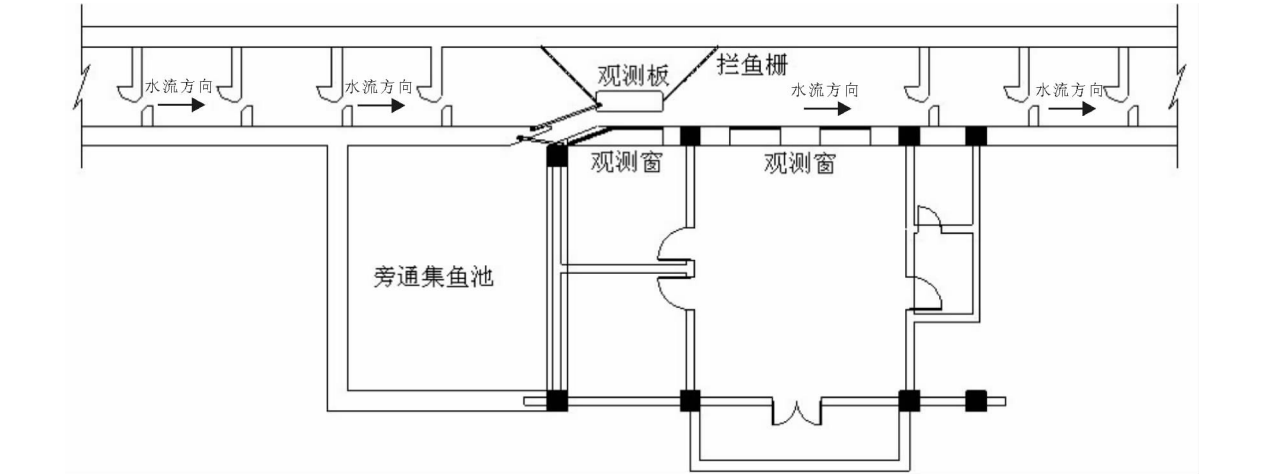


图 8 进口观测研究室平面

Fig.8 Plane graph of the inlet in observation laboratory

5 结语

本鱼道工程具有上下游水头差大(最大可达 67 m),上下游水位变幅大(下游变幅 4.52 m,上游

变幅 5 m),工程河段分布鱼类生态学和游泳能力的基础研究薄弱等技术难点。虽目前无现成高坝鱼道设计经验可循,但工程设计中提出了诸多具有探索意义的设计思路,工程建成后将成为国内最高、最长

的鱼道。工程的实施对促进我国水电行业高坝鱼道工程勘测设计工作的技术进步具有深远的意义。

参考文献

华东水利学院,等. 1987. 水工设计手册:6:泄水过坝建筑物[M]. 北京:水利电力出版社.

环境保护部环境工程评估中心. 2012. 建设项目环境影响评价鱼类保护(鱼道专题)技术研究与实践[M]. 北京:中国环境科学出版社.

农静. 2008. 长洲水利枢纽工程鱼道设计[J]. 红水河, 27(5):50-54.

王兴勇,郭军. 2005. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 3(3):222-228.

杨宇,严忠民,陈金生. 2006. 鱼道的生态廊道功能研究[J]. 水利渔业, 26(3):65-67.

郑金秀,韩德举,胡望斌,等. 2010. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究[J]. 水生态学杂志,3(5):104-110.

Larinier M, Travade F, Porcher J P. 2002. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring[J]. Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture, 364: 208.

(责任编辑 张俊友)

Analysis on Engineering Design of Fishway in High dam

CHEN Jing, LANG Jian, HE Tao, ZHANG Lu-liang

(Hydro China Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, P. R. Chian)

Abstract: The dam is 116 m in height, 67 m in maximum water head, and 53.5 m in rated water head. The main fish pass season is from March to June and the secondary is February and from July to October. Considering the engineering characteristics and the ecological habit of fish pass object, the fishway, which was composed of inlet section, slot sections, culvert section, open channel section, cross dam section, outlet section, imported water facilities and observation laboratory, was designed using vertical slot and pool room structure with total length is 3566.325 m. It sets up two frequently used inlets and two spare inlets. And the designing flow velocity of the fish pass hole is 1.1 m/s. This paper introduced the technical route and research method of fishway design, and also put forward the design thoughts of rest pool, fishway inlets, water replenishing facilities and observation laboratory with fish-gathering pool.

Key words: high dam; vertical-slot fishway; water level; flow velocity