

通江河口长槽多隔仓双向鱼道 结构研究与应用

高兴和¹, 陈 浩¹, 王 津²

(1. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128; 2. 江苏省太湖地区水利工程管理处, 江苏 苏州 215128)

摘要:基于新沟河入江口过鱼种类、生物学特征、生态特点及鱼类习性和行为学等渔业资源深入调研,结合江边枢纽工程运行工况与设计,采用“长槽型双侧竖缝多隔仓”结构,将狭长水槽上、下游总水头,分成若干梯级,利用水垫、沿程摩阻、水流对冲、回旋和扩散来消除水头能量,形成各种鱼类喜好的流速动态变化的溯游水流。经数模分析验证与实践证明,设计鱼道体型构造简单,施工简便,运行有效,达到预期效果。

关键词:通江河口; 鱼种; 洄游; 双向鱼道

中图分类号: S956.3

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2020)S2-0054-07

Study and application of two-way fishway structure of multiple compartments with long troughs in Tongjiang estuary

GAO Xinghe¹, CHEN Hao¹, WANG Jin²

(1. Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Suzhou 215128, China;

2. Taihu Lake Region Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suzhou 215128, China)

Abstract: Based on the in-depth investigation of fishery resources such as the species, biological characteristics, ecological characteristics and fish habits and behaviors of the fish passing through the Xingou River estuary, combining with the operating conditions and design of the riverside junction project, a "long trough type with double-sided vertical joints and multiple compartments" structure was adopted to divide the total head of the long and narrow water tank into several steps. The water cushion, friction along the way, water flow hedging, swirling and diffusion were used to eliminate the head energy, forming a retrograde water flow with dynamic changes in the velocity of various fish preferences. Numerical simulation and practice showed that the design of fishway was simple in structure, simple in construction, effective in operation and achieved the desired effect.

Key words: Tongjiang estuary; fish species; migration; two-way fishway

新沟河江边枢纽工程位于新沟河入江口,是太湖联通长江引排调控的龙头口门,由5孔48 m拦河挡潮闸、大(2)型泵站($Q=180\text{ m}^3/\text{s}$)、V级船闸(净宽16 m)和鱼道(宽2~3 m)组成,具有引排改善水环境、挡潮、防洪、排涝、航运及生态等综合功能。其中,鱼道是为方便鱼类洄游而设置的一种人工水

槽和过鱼建筑物,是水生态保护与修复的重要工程措施。为保证新沟河通江水系鱼类与长江的沟通,根据长江侧潮起潮落的水文特点,满足该水域鱼种及其上溯习性^[1]需求,设置了适应长江潮位动态频繁变化、消能充分、并可双向运行的“长槽型双竖缝多隔仓双向鱼道”。

收稿日期:2020-07-06

作者简介:高兴和(1968—),男,高级工程师,主要从事水利工程设计工作。

1 鱼道功能与主要技术要求

1.1 鱼道功能要素

鱼道设计时,首先要确定所在河道过鱼种类,并对其生活习性、游泳能力、体型等相关资料进行研究。通过水生生态调查,明确保护对象,进行鱼类游泳能力测试,主要有两类指标:趋流特性和克流能力。趋流特性反映鱼类洄游路线中出现的最小流速,在这个流速上鱼类会较易找到洄游方向;克流能力分为持续游泳速度、耐久游泳速度和突进速度,其中持续游泳速度在鱼道内出现机率较小,不作为指标;耐久游泳速度是鱼道长度以及休息池设计的参考依据;突进游泳速度主要用于鱼道的一些特殊结构及高流速区^[2]。鱼类依靠自身体游能力克服水流影响,通过鱼道全程,因此,在鱼道设计时,要考虑水流流态、水流紊动能以及水流流速对鱼类洄游的影响。

1.2 主要参数指标

鱼道设计需要获取的主要参数指标包括:(1)鱼种,即过鱼种类的生态习性和游泳能力等基本资料;(2)洄游时间与时机,明确主要过鱼对象通过的时间与时机;(3)特征潮水位与上下游水位差,根据过鱼时段水位变化情况,选定上下游水位;(4)确定流速,主要与鱼类克流能力相关,鱼道过鱼效果主要取决于鱼道的流速与流态,要求流速小于克流能力,且主流明确;(5)鱼道布置与主要尺寸确定,主要包括布置位置、鱼道长度、宽度、高度(水深)及细部结构尺寸等。

2 沿江渔业资源与习性调研

本工程对通江水系专题进行了渔业资源调研,通过收集鱼种相关习性资料,为设计提供依据。

2.1 长江中上游鱼种及体长

四大家鱼体长范围在 150 ~ 1 100 mm 之间^[3],

长江中游段主要鱼类体长范围在 100 ~ 700 mm^[4]。长江中上游及中游主要鱼类体长统计,见表 1 ~ 2。

2.2 长江江阴段优势鱼种及体重

该段不仅是长江水系入海通道,也是许多江、海鱼类洄游通道、产卵场、索饵场。渔获物的优势种类组成结果显示,该段鱼类有 36 种,其鲤形目 20 种占 55.6%,鲶形目 6 种占 16.7%,鲈形目 5 种,占 13.9%,鲱形目、鳊形目、鲮形目、刺鲃目、纯形目各 1 种各占 2.8%。居前十位优势种中,重量百分比以鳊鱼为高,占 40.74%,最小为刀鲚 1.97%。尾数百分比以鳊鱼为高 28.96%,最小为鲤鱼 0.77%。优势种平均体重 60 g 以下鱼类占 80%,最大为鲤鱼,平均体重 352.8 g,最小为蛇鮈,平均体重 9.7 g^[5]。

2.3 附近水域走马塘江边鱼道鱼种及体重

2014 年调查发现该区域鱼种包括鳊鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼、鲤鱼、铜鱼、鲮鱼、吻鮈、黄颡鱼、鲈鱼以及一些小杂鱼等;2015 年 5 月,鱼道内 1 h 内捕获各种鱼类共 9 条,计 1.8 kg,平均体重为 200 g,包括鳊鱼、鲤鱼、鲢鱼、黄颡鱼、鳙鱼等。

2.4 感应与喜好流速及范围

根据鱼道设计导则^[6],可直接采用其整编成果,主要鱼类感应流速为 0.20 m/s,喜好流速范围为 0.3 ~ 1.0 m/s,极限流速范围为 0.6 ~ 1.3 m/s,见表 3。

2.5 洄游时间与时段

鱼类每年的洄游时间为 4—8 月,该时期对应上、下游设计水位详见表 4。

3 鱼道选型与设计

3.1 结构选型

综合国内外已建的鱼道资料,鱼道按结构布置可分为池堰式、潜孔式、垂直竖缝式、仿自然通道及特殊结构型式等;按类型可分为槽式、池式和组合式,槽式包括简单加糙型和丹尼尔型,池式包括溢

表 1 长江中上游四大家鱼体长体重

鱼名	体长/mm		体重/g	
	范围	平均值	范围	平均值
青鱼	170 ~ 1100	577 ± 406	250 ~ 24950	3918 ± 1089
草鱼	210 ~ 980	485 ± 257	150 ~ 16900	3029 ± 490
鲢鱼	140 ~ 630	367 ± 199	141 ~ 10100	1131 ± 340
鳙鱼	150 ~ 780	370 ± 271	135 ~ 8300	1023 ± 413

表 2 长江中游主要经济鱼类体长、体重值

鱼名	荆州段		岳阳段		湖口段	
	平均体长/mm	平均体重/g	平均体长/mm	平均体重/g	平均体长/mm	平均体重/g
青鱼	384 ± 113	1306 ± 893	379 ± 196	2058 ± 2337	468 ± 90	1553 ± 569
草鱼	500 ± 114	2400 ± 1590	391 ± 126	1647 ± 1243	468 ± 67	1738 ± 933
鲢鱼	379 ± 104	1168 ± 877	320 ± 126	1207 ± 1887	344 ± 83	800 ± 320
鳙鱼	432 ± 101	1816 ± 1360	405 ± 282	2175 ± 2722	467 ± 135	1800 ± 1095
鲤鱼	297 ± 74	878 ± 626	269 ± 151	559 ± 819	288 ± 63	588 ± 348
铜鱼	194 ± 37	111 ± 82	202 ± 62	142 ± 99	218 ± 40	159 ± 100
长吻鮠	267 ± 123	473 ± 784	364 ± 15	497 ± 22	/	/
南方鲇	364 ± 135	875 ± 363	364 ± 15	743 ± 741	250 ± 105	134 ± 78
黄颡	171 ± 30	72 ± 45	159 ± 46	60 ± 41	159 ± 46	60 ± 41

表 3 鱼类的感应流速、喜好流速和极限流速

种类	体长/m	感应流速/(m · s ⁻¹)	喜好流速/(m · s ⁻¹)	极限流速/(m · s ⁻¹)
草鱼	0.15 ~ 0.18	0.2	0.3 ~ 0.5	0.70
	0.18 ~ 0.20	0.2	0.3 ~ 0.6	0.80
	0.24 ~ 0.50	—	1.02 ~ 1.27	—
	0.30 ~ 0.40	—	—	>1.20
鲢鱼	0.10 ~ 0.15	0.2	0.3 ~ 0.5	0.70
	0.23 ~ 0.25	0.2	0.3 ~ 0.6	0.90
	0.40 ~ 0.50	—	0.90 ~ 1.0	—
	0.30 ~ 0.40	—	—	1.20 ~ 1.90
	0.70 ~ 0.80	—	—	1.20 ~ 1.90
鳙鱼	0.40 ~ 0.50	—	<0.80	—
	0.80 ~ 0.90	—	—	1.20 ~ 1.90
鲤鱼	0.37 ~ 0.41	—	1.16	—
	0.40 ~ 0.59	—	1.11	—
鲂鱼	0.10 ~ 0.17	0.2	0.3 ~ 0.5	0.60
鮠鱼	0.20 ~ 0.25	0.2	0.3 ~ 0.7	0.90

表 4 鱼道上下游设计水位

单位:m

运行方向	上游水位	下游水位	备注
正向	3.20 ~ 3.60	3.20 ~ 2.53	3.20 为正常水位,3.60 为警戒水位;2.53 为多年平均低潮位
反向	2.50 ~ 3.20	4.15 ~ 3.34	2.50 为控制低水位;4.15 为多年平均高潮位;3.34 为多年平均潮位

流堰式、竖缝式、底(潜)孔式,组合式包括堰孔、堰缝组合式^[7]。对各种鱼道的型式进行比较筛选,长槽型竖缝式鱼道一般由槽身边墙、竖直平面隔板、休息室及进出口建筑物组成,其结构简单,消能充分;且水流平稳,适应上下游水位变动能力强,不会因内外河水位的急剧变化而影响鱼道内的水流流态,从而影响鱼类的洄游,且水深范围大,水流流速从水底至水面呈逐层增加的分布态势,可满足多种鱼类洄游时对不同流速、不同水深的喜好。

结合新沟河江边枢纽运行工况和节制闸结构设计,在竖缝式鱼道基础上进行适当优化,将鱼道依附于节制闸及其上下游翼墙布置,采用“长槽型双竖缝多隔仓”结构型式,通过多个竖缝和隔仓,将上下游总水位差分成若干个小梯级,消能效果好,能适应较大水位的动态变化,能同时适应栖息于表层和底层的鱼类洄游习性的需求。同时鱼道采用开放式运行方式,有利于过鱼时间的延长,增加过鱼数量;有利于适应不同鱼类的洄游条件,运行过程中,上下游水头差、流速、流量等水力条件动态变化,有利于不同洄游习性鱼类找到适合自己洄游所需的条件和路径。

3.2 主要结构尺寸拟定原则

鱼道结构尺寸主要包括:池室长度、宽度,竖缝宽度与水深高度等。

池室宽度:按鱼种和体长综合分析确定,一般取 2 ~ 3 m,且不小于最大过鱼体长的 2 倍。

池室长度:一般应大于池宽,同时,不小于最大过鱼体长的 2.5 倍,池长与水流消能及鱼类的休息密切相关。池室长,则水流条件好,休息水域大,对过鱼有利,池室短则与之相反。

竖缝宽度:与鱼体大小和水位梯级与流速有关,竖缝宽度一般不小于通过鱼类胸鳍水平展开最大距离,考虑多数鱼类通过需求,鱼道竖缝宽度一般不小于多数过鱼对象体长的一半;同时,考虑上下游水位梯级与流速要求,缝宽宜小不宜大。

池室水深:按鱼类洄游习性而定,一般取 1.5 ~ 2.5 m,不宜大于 3 m,同时,不应小于最大过鱼目标体高的 5 倍或体长的 2.5 倍。

3.3 结构布置与设计

根据渔业资源及习性调研成果,结合工程建设的实际情况,本工程鱼道进出口布置在水流平稳,且有一定水深的岸边,采用“长槽型双竖缝多隔仓式双向洄游鱼道”,依附于江边枢纽工程的节制闸西岸,结合节制闸及其上下游翼墙布置,将经过狭长水槽的上下游总水位差,通过多个竖缝^[8]和隔仓,分成若干个小梯级,利用水垫、沿程摩阻、水流对冲、回旋和扩散来消除水头能量,并形成各种鱼类喜好的溯游水流。鱼道由进口、槽身和出口 3 部分组成,总长 55 m。鱼道槽身横断面为矩形,底高程 0.6 m,净宽 2 ~ 3 m,双侧竖缝由两侧边柱与中隔板错位形成,中隔板下部生根于底板之上,边柱固支于侧壁,边柱与中隔板上部以顶层梁衔接固定,底板、侧壁及边柱、中隔板、顶撑梁形成槽型双侧竖缝和隔仓单元体,相邻单元体形成一个隔仓,隔仓长 2 ~ 3 m,多个隔仓组成长槽型鱼道,共布设 20 ~ 25 个隔仓,槽身居中部位的一个隔仓设胸墙和闸门控制,并在相应隔仓位置的临土侧设置观察井,用于对鱼道洄游情况人工观察。鱼道主体局部结构布置见图 1 ~ 2。

3.4 鱼道特点

本工程所采用长槽型双侧竖缝多隔仓双向洄游鱼道结构,具有如下特点。

(1)本工程鱼道位于入江口,在调研渔业资源及洄游习性的基础上,结合通江口门条件,满足多数鱼类喜好,合理选择鱼道布置和结构型式,长槽型鱼道依附节制闸及其上下游翼墙,不仅更适合上下游水位动态多变条件,而且节省鱼道工程投资。

(2)鱼道隔仓设置,需根据上下游水位差和鱼类溯游能力进行分级,形成合适的梯级水流,本工程控制每级水头 5 ~ 10 cm,竖缝与隔仓梯级之间流态平稳,流速适当,便于鱼类洄游。

(3)适应双向水头运行工况,结构尺寸由水系鱼类大小而定,确保鱼类的正常洄游线路不受阻。

(4)满足鱼类向阳、喜氧习性,鱼道顶部开敞或开放,既能采光又能与大气沟通,可满足鱼类逐光^[9]和供氧需求,也可采用透气、透光材质覆盖,防

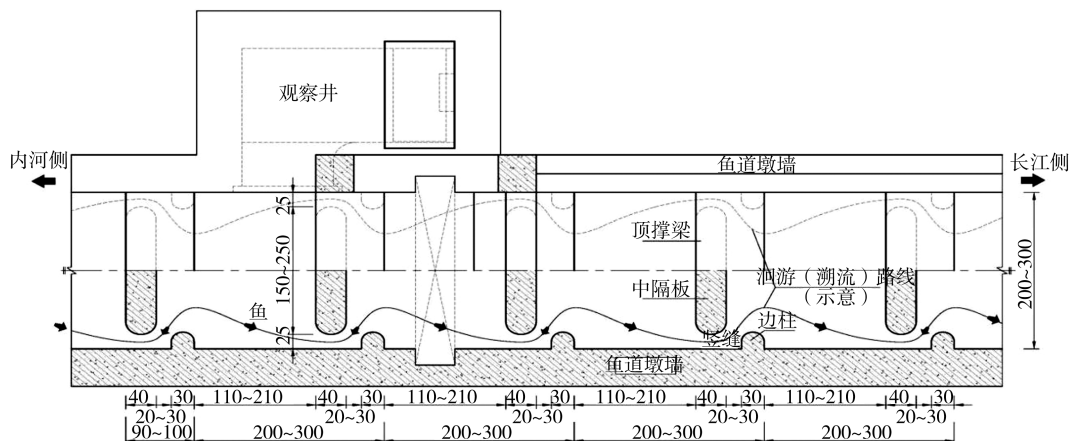


图1 鱼道平/剖面图(局部)

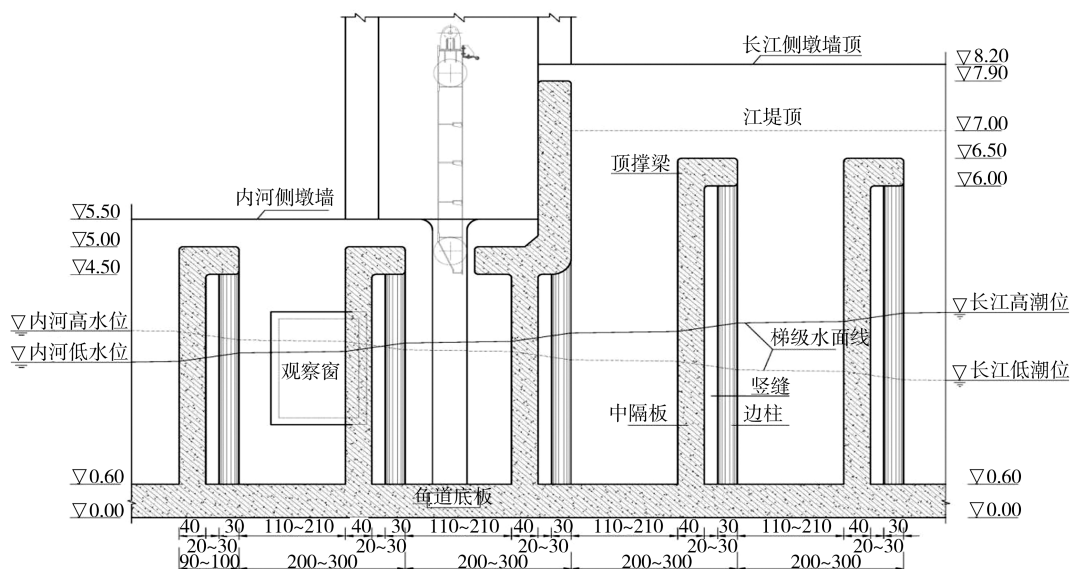


图2 鱼道纵向剖视图(局部)

止杂物进入鱼道影响鱼道流态与洄游效果。

(5) 鱼道设有观察窗,可实时实地观察记录鱼类洄游情况,以便验证并指导类似工程设计。

(6) 鱼道进口一般设在经常有水流下泄、鱼类洄游路线及经常集群处,并尽可能靠近鱼类上溯能到达的最前沿;鱼道出口应确保有一定的水深,附近不应有妨碍鱼类继续上溯的不利环境^[9]。

(7) 竖缝结构边角应倒圆,使水流平顺,改善流态,且避免锐缘触伤鱼类,便于鱼类通过。

(8) 有条件可增加导鱼、诱鱼设施,完善监测手段,便于全面掌握鱼道洄游生物特性,为制定更合理的运行方案提供依据,确保鱼道持续有效工作,减缓工程建设对鱼类洄游的阻隔影响。

4 数值模拟分析与研究

利用 Flow-3D 软件工具进行模拟分析,验证了鱼道布置及体型设计的合理性。

4.1 鱼道水流流态

双向水流主流位于两侧,流态总体上对称,底、中、表层的水流流态基本一致,见图 3。

4.2 鱼道沿程水面线分析

经数模计算获得的正反向运行的沿程水面线如图 4 所示。每个梯级落差大致相同,数模结果与设计成果比较吻合。

4.3 流速分布与分析

鱼道过鱼效果主要取决于隔板间流速及相邻隔仓水流流态。要求流速小于过鱼的克流能力,水池间主流明确,需要一定回流,但回流又不能过于剧烈,范围不能过大,防止鱼类迷失方向,延误上溯时间。根据数值模拟分析成果,正反向运行典型断面平均流速如表 5 所示。

数模成果显示,鱼道内流速分布相对均匀,沿程无明显增大或减小现象。鱼道内流速分布总体上对称,两级隔板间休息室存在大小及强度随时间

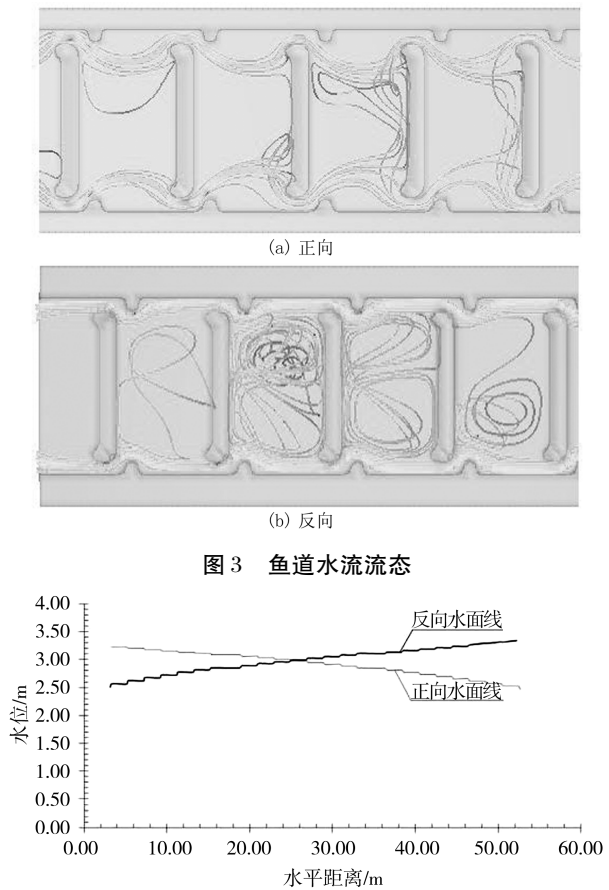


图 3 鱼道水流流态

图 4 正反向运行鱼道沿程水面线变化、流速较小的回流, 见图 5。

表 5 正、反向运行典型断面平均流速

典型断面 (隔板号)	1	2	3	4	5	6
正向断面平均 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.66	0.69	0.69	0.72	0.74	0.85
反向断面平均 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.93	0.78	0.81	0.72	0.72	0.66

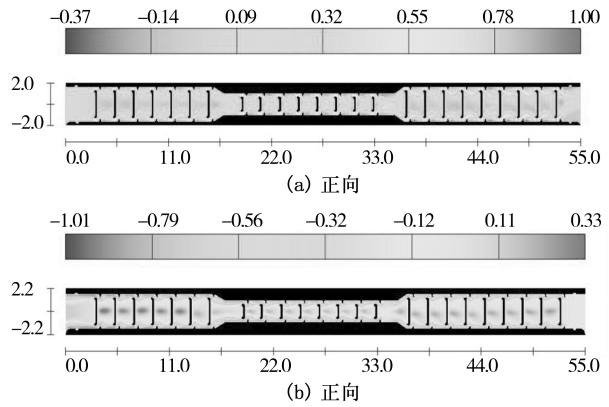


图 5 流速分布图

4.4 竖缝流速影响分析

本工程鱼道外河连接长江, 为感潮河道, 潮位动态变化中, 为了解水位差变化对鱼道过鱼的影响, 对不同水位差与竖缝最大断面流速进行计算分析, 成果见表 6 和图 6。

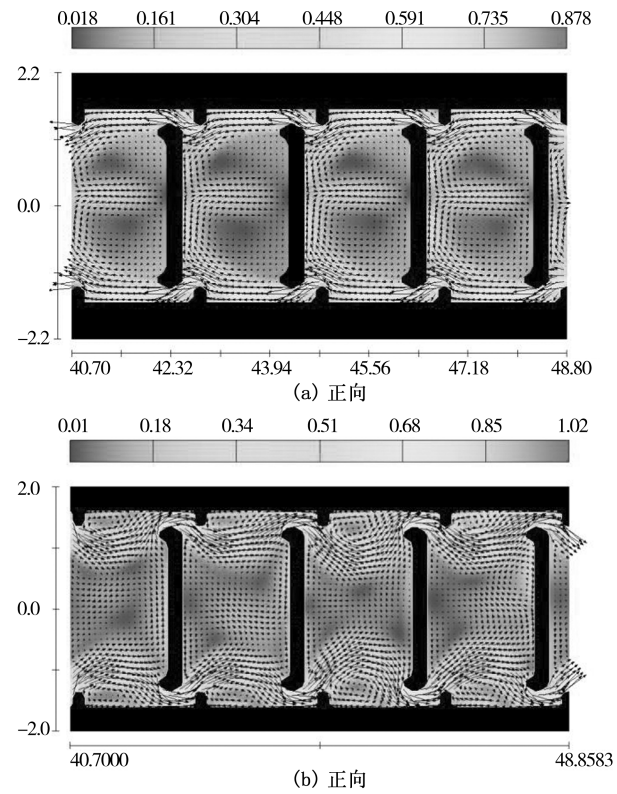


图 6 竖缝流速分布图

数模成果显示, 双向运行竖缝最大断面平均流速与水位差均具有很好的线性关系, 正向水位差在 0.05 ~ 1.20 m 之间变化时, 竖缝最大断面平均流速变化范围为 0.28 ~ 1.30 m/s, 反向水位差在 0.03 ~ 1.30 m 之间变化时, 竖缝最大断面平均流速变化范围为 0.18 ~ 1.33 m/s。

4.5 紊流与紊动能分布

紊流会产生紊动能, 令鱼类不适, 紊动变强, 甚至会伤害鱼鳞、鱼鳃, 损害鱼眼。紊动能等值线成果显示 (图 7), 鱼道紊动能最大值 0.0172 ~ 0.0209 m^2/s^2 ; 深度方向呈底部小、上部大的分布规律; 相对而言, 主流区紊动能比回流区小。总体而言, 鱼道内紊流对鱼类影响较小。

4.6 数模验证主要结论

基于鱼类调研及数模计算成果, 新沟河通江鱼道采用长槽型双竖缝多隔仓式双向结构, 可形成双向梯级水流, 鱼道总体布置和体型设计优良, 能适应长江口双向过鱼的水文特性, 鱼道过流参数满足

表 6 正向运行水位差与竖缝最大断面平均流速计算结果

序号	内河水位/m		外河水位/m		水位差/m		竖缝最大断面平均流速/(m·s ⁻¹)	
	正向	反向	正向	反向	正向	反向	正向	反向
1	3.20	2.50	2.00	3.80	1.20	1.30	1.30	1.33
2	3.20	2.50	2.20	3.60	1.00	1.10	1.12	1.15
3	3.20	2.50	2.36	3.34	0.84	0.84	0.98	0.93
4	3.20	2.50	2.70	3.07	0.50	0.57	0.69	0.68
5	3.20	2.50	3.04	2.65	0.16	0.15	0.39	0.30
6	3.20	2.50	3.15	2.53	0.05	0.03	0.28	0.18

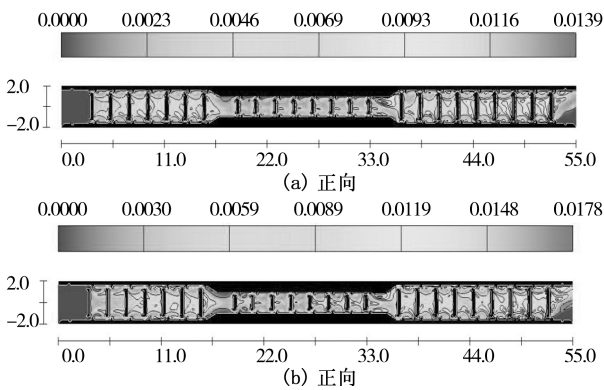


图 7 紊动能等值线分布图

江边各类洄游鱼类洄游习性,满足该区段绝大部分洄游鱼类的需要。双向运行时,内部水流流态相近,进流平顺,隔仓休息室内为回流区,主流对称位于两侧,且不同深度的水流流态基本一致;各级竖缝水位差范围 1.74 ~ 6.46 cm;竖缝间流速明显增大,竖缝内流速 0 ~ 1.0 m/s 之间动态变化,最大平均流速 0.85 ~ 0.93 m/s,隔仓内流速较小,回流流速 0.1 ~ 0.35 m/s,适合主要鱼类洄游与休息;双向运行紊动能最大值 0.0172 ~ 0.0209 m²/s²,影响较小;鱼道最大断面平均流速与水位差基本成线性关系,总水位差达到 1.3 ~ 1.5 m 时,最大断面平均流速达到 1.33 m/s。

5 结 语

本文基于新沟河入江口过鱼种类、生物学特征、生态特点及鱼类习性和行为学等渔业资源深入调研,结合江边枢纽工程功能与运行工况,设计采用“长槽型双侧竖缝多隔仓”结构,将狭长水槽上、下游总水头,分成若干梯级,利用水垫、沿程摩阻、水流对冲、回旋和扩散来消除水头能量,形成各种鱼类喜好的流速动态变化的溯游水流。经数模分

析验证,“鱼道总体布置和体型设计优良,符合长江口双向过鱼水文特性,过流参数符合各类洄游鱼种习性,满足入江口鱼类洄游需要”。工程建成后,通过观察并不定期观察,特别是洄游季节,各鱼种通过鱼道往复溯游频繁,鱼道设置科学合理,达到预期效果。理论与实践证明,该鱼道体型构造简单,施工简便,运行有效。查新成果^[10]显示,该结构属于首创,尺寸可变,具有通用性,江苏沿江鱼道可推广应用。

参考文献:

[1] 王珩,杨文俊,陈辉.生态水工建筑物——鱼道的建设及研究进展[J].人民长江,2013(9):88-91.

[2] 候璐,王海胜,王棋.枕头坝一级水电站鱼道设计及施工关键技术[J].四川水力发电,2015(6):107-110.

[3] 刘绍平,陈大庆,段辛斌,等.长江中上游四大家鱼资源监测与渔业管理[J].长江流域资源与环境,2004(2):183-186.

[4] 刘绍平,段辛斌,陈大庆,等.长江中游渔业资源现状研究[J].水生生物学报,2005(6):708-711.

[5] 查晓宗,张彤晴,方建清,等.长江江阴段监测点渔业资源[J].水产养殖,2012(9):14-18.

[6] SL609—2013,水利水电工程鱼道设计导则[S].

[7] 周小波,陈静,张连明.浅论鱼道设计方法与过程——以藏木水电站鱼道为例[J].水电站设计,2017(3):29-32.

[8] 张湘隆.竖缝式鱼道设计与研究[J].水电站设计,2014(1):97-99.

[9] 俞鹏,李寅伟.Y江ZM水电站鱼道灯光诱鱼照明系统设计初探[J].水电站设计,2017(1):59-60.

[10] 江苏省科学技术情报查新咨询中心.科技查新报告——长槽依附型双侧竖缝多隔仓双向洄游鱼道结构[R].南京:江苏省科学技术情报查新咨询中心,2019.