

Review of Fishway Inlet Research

Xi Mao

College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an Sichuan
Email: maowhiteknight@163.com

Received: Jun. 29th, 2017; accepted: Jul. 13th, 2017; published: Jul. 17th, 2017

Abstract

The construction of dams, weirs, sluices, and other hydraulic structures in rivers has rapidly increased due to the development of water conservancy and the increasing demands for flood control, irrigation, and the generation of power. Through migrations, fishes meet requirements with regard to the structure of the biotope during their life cycle. These hydraulic structures break down the connectivity of rivers, block the migration of fish, and fragment the fish habitat, which could result in a population decrease for many fish species. Fishway has been an effective way used to restore fish migration passages, and bridge fragmented habitats. The purpose of a fishway is to assist fish in smoothly bypassing an obstacle and alleviate the negative effects of the hydraulic structure. More importantly, fishways prevent the extinction of fishes, by protecting river connectivity and biodiversity. Therefore, well-functioning fishways have important significance. One of the key points in designing fishway is inlet, which was not given full consideration in the past, especially in China. Designers mainly focused their attention on the internal structure and flow conditions. Due to lack of recognition of the fish habits and migration law, researches on the location layout and structure of fishway inlet are seldom reported. In engineering applications, it is difficult or even impossible for fish to enter the fishway. In a word, one of the key factors of fishway design lies in whether fishes can quickly and accurately enter the fishway inlet. On the basis of recent researches on fishway inlet, combining with analysis on swimming capacity of fish and fish school, this paper provides the future direction of fishway inlet research.

Keywords

Fishway, Fishway Inlet, Swimming Capacity of Fish, Fish School, Prototype Observation

鱼道进口研究综述

毛 熹

四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安
Email: maowhiteknight@163.com

收稿日期: 2017年6月29日; 录用日期: 2017年7月13日; 发布日期: 2017年7月17日

摘要

防洪、灌溉、发电等需求的日益增加,使得全球范围内诸多国家在江河上修建了大量的大坝、堰、水闸等水工建筑物。鱼类需要通过洄游来满足不同时期他们对群落生境结构的要求。而这些水工建筑物的修建,破坏了河流纵向的连通性,造成了河流生境的片段化,阻断了鱼类的洄游通道和基因交流,造成了鱼类生境的破碎化,使鱼类无法完成洄游这一自然过程,引起鱼类种群数量减少。鱼道是恢复鱼类洄游通道的有效工程措施,是沟通鱼类破碎化生境的桥梁,设置的主要目的就是让鱼类顺利通过其障碍物。其作用除了减缓工程对鱼类的不良影响外,更使得许多的鱼类免于灭绝,保障了河流的连通性和生物多样性。因此,运行良好的鱼道具有重要的生态意义、经济意义和工程意义。鱼道进口是鱼道设计时必须充分考虑的关键问题,但以往在进行鱼道设计时,却又并没有得到足够重视;尤其在中国,研究人员设计鱼道时主要将他们的注意力集中在鱼道内部的结构水力设计参数的研究及型式选择上,而由于对鱼类生活习性和洄游规律等方面的认识还不完善,对鱼道进口位置布置及结构的研究相对薄弱,导致鱼类进入鱼道困难甚至根本无法进入鱼道,诱鱼效果差。总之,鱼道的进口是否能够吸引过鱼目标,是决定鱼道成败的关键因素之一。本文总结了国内外鱼道进口的研究现状,在此基础上,结合对鱼类游泳能力及集群等习性的分析,提出了未来研究设计鱼道进口的思路。

关键词

鱼道, 鱼道进口, 鱼类游泳能力, 鱼类集群, 原型观测

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大坝、堰、水闸等水工建筑物的修建,阻断了河道原有的连续性,导致水生生物栖息环境出现变化。迫使洄游性鱼类无法完成其生命周期的重要环节——洄游,导致种群数量急剧下降,甚至灭绝;对于非洄游性鱼类,将影响水域群体间的遗传交流,导致种群遗传多样性减少。鱼道作为一种常用的过鱼设施,是恢复鱼类洄游通道的有效工程措施。鱼道主要结构组成包括:进口段,槽身段,出口段和辅助设施等[1]。

鱼类能否较快地发现和准确进入鱼道进口,是鱼道能否成功运行的关键因素之一[1]。目前,研究人员在设计鱼道时大多侧重于分析和改善其内部结构和水流条件等方面,例如:优化鱼道内部结构的基础,保证鱼道内部水流流速等水力学要素满足鱼类洄游的要求[2][3]。但是,由于对鱼类生活习性和洄游规律等方面的认识还不完善,现阶段关于鱼道进口位置布置及结构的相关研究较薄弱,因此在很多工程中,鱼类进入鱼道困难甚至根本无法进入鱼道,导致鱼道诱鱼效果差[4]。因此,如何设计进口,使鱼类能够快速进入鱼道,具有重要的意义。

作者在现有鱼道进口研究现状的基础上,分析了目前存在的问题。并针对存在的问题,提出了未来鱼道进口的研究思路,为鱼道工程的进口设计提供参考。

2. 鱼道进口研究现状及存在问题分析

Videler 等人的研究,给出了鱼道进口流速的参考值——1.5 m/s 至 2.0 m/s,同时,他们认为在允许范

围内, 鱼道进口的流速流量越高越好[5]; Alvarez-Vázquez 等人的研究表明, 鱼道进口处的最低流速, 大约为 1.0 m/s, 相对应的, 鱼道进口处的水位落差应该控制在 0.2 m 至 0.3 m 之间[6]; Larinier 通过分析德国莱茵河畔某鱼道工程的进口设计方案, 认为鱼道的吸引力与其相对障碍物的位置, 尤其是与其进口的的位置及进口附近的水力状况有关, 进口处必须不受涡轮机或溢洪道的水流影响, 也不得在环流区或静水区[7]。Abad 等人对加拿大北支河下鱼道进口与下游河道的相关关系进行了研究, 并利用 FLOW-3D 软件, 采用 k- ϵ 模型和 VOF 模型进行了相关模拟, 对该鱼道进口的选择和鱼道结构的改进提出了建议[8]。有研究者采用 k- ϵ 模型和 VOF 模型对美国某低水头坝的鱼道整体进行了模拟, 建议控制进口流速在 2.0 m/s 左右, 并认为要适当引进补水措施, 来适宜不同时期河道的流量变化[9]。Caisley 采用 k- ϵ 模型和 VOF 模型, 对美国某主要通过鲑科鱼类的鱼道进口流态进行了模拟, 认为鱼道进口的水位差不超过 0.30 m, 相对最大流速不超过 2.4 m/s [10]。史斌等人用模型实验的方法对楠溪江水闸鱼道的进行研究, 并在缩放的模型上进行了放鱼实验, 对鱼道进口水力学指标进行了相应验证[11]。黎贤访等人采用 k- ϵ 模型和 VOF 模型研究了鱼道进口轴线与河岸成不同角度的情况下, 鱼道进口的流场分布[12]。

以上相关研究, 表明了: 1) 现阶段研究鱼道进口的办法主要是依托某些特定工程, 研究手段除了大量的资料分析和实地考察之外, 主要应用 k- ϵ 模型和 VOF 模型等数学模型对相关工程进行模拟分析, 通过分析这些特定工程案例, 找出该案例中鱼道进口布置的成功或不足之处, 重点分析鱼道进口处的流速、水位等相关水力学指标, 但是这些水力学指标主要是针对过鱼对象的个体游泳能力进行分析, 而个体鱼类游泳能力的测试结果与实际情况相比是有一定差距的。因此, 鱼类游泳能力与鱼道进口处的水力学指标之间的联系并没有得到充分的考虑。2) 大部分研究缺乏放鱼实验来验证鱼道进口的水力学条件, 就算适应了放鱼实验的少数研究, 也是在缩小了比例的模型上进行实验, 并且是利用人工饲养的实验用鱼进行放鱼实验, 但即使鱼道进口、河道等可以按比例缩小从而获取水力学要素, 但是鱼类活体是不能进行缩小的, 且人工饲养实验用鱼和野生原鱼相比, 其游泳能力又有显著差异。因此, 目前这方面的研究较为缺乏。3) 相对于宽阔的河道而言, 鱼道通常是比较小的结构, 宽度通常在 5 m 之内, 因此具有“针眼”的特点, 对于大江大河尤其明显。因此, 找准鱼道进口的位置, 让鱼类轻松找到进口并进入鱼道, 具有至关重要的意义, 虽然相关文献表明, 大多数鱼道进口设计利用水下音响、光屏、气泡装置等附加措施来进行诱鱼导鱼, 能取得一些成果[13]; 但关于鱼道进口的最适合位置及体型, 只是提到了鱼道进口的位置应该在岸边, 与江河的主要流向平行, 并尽量接近发电尾水[1]。归根结底, 鱼道的位置选择并没有一个详细可行的指导原则, 因此, 更多情况下, 由于缺乏对鱼类生态学及行为学等方面的认识, 鱼道进口的设计不能很好适应鱼类生活习性及洄游规律, 导致鱼类始终无法顺利找到鱼道进口。

归纳起来, 根据鱼道进口研究的分析, 总体来看, 鱼道进口方面的研究缺乏统一的分析方法和手段, 不同的工程由于受河流流量, 地形, 运行方式的影响, 对应的结果差异大, 得到的结果无法进行有效推广。同时, 单一的以鱼类个体游泳能力作为指标是不完备的, 实际上自然界中的鱼类洄游多是采用集群洄游的方式, 相关研究给出了佐证: Weihs 应用流体力学和节能的原理, 研究出群体中的每一尾鱼在交错排列的行列中游泳, 可利用周围鱼群产生的漩涡而使本身游泳的摩擦力或阻力降低, 并利用群体产生的与游动方向同向的力来推动自身向前, 因此, 相比于单个鱼类个体, 鱼类集群能适应更大的流速, 有利于鱼类的洄游[14]; Partidge 的观察记录表明, 绿线鳕采用集群的方式, 在洄游时将自身所能承受的最大流速提升到了 35% 以上[15]。另外, 针对鱼类活体不能缩放这一事实, 比例缩小后的模型实验及在此模型上进行的放鱼实验得出的实验结果, 并不能有效推广[16]。

实际上, 鱼类游泳能力被认为是决定许多种鱼类和水生生物生存的主要特征, 表征鱼类游泳能力的指标主要有三类: 感应流速, 临界游泳速度, 突进游泳速度。感应流速指鱼类开始产生反应的流速值, 这种产生反应的标准通常是鱼类改变游动的方向; 临界游泳速度是鱼类在一段特定时间内保持的最大速

度,也是鱼类稳定式游动和“冲刺—滑行式”游动的边界速度;突进游泳速度则是鱼类能够达到的最大速度,此状态只能维持较短的时间(通常持续时间小于20秒)[17][18]。

再者,通过对前期研究的调研发现——鱼类集群行为是个体对外部环境的刺激作出的反应和个体间相互刺激所产生的自动反应的结果,是大部分洄游鱼类的天性;针对不同种鱼类早期发育时出现的集群现象与相关水力学参数的响应机制,国内外大量研究都表明了鱼类集群行为在很多鱼类发育早期就已具备:Fukuda等人研究发现了金枪鱼幼体在发育阶段集群行为的形成,变化,以及与流速的响应关系[19];Torisawa等人通过研究,发现了蓝鳍金枪鱼幼体在发育阶段的集群行为与水体弗雷德数的关系[20]。Gallego等人认为幼鱼发育过程中,集群行为的出现和发展与鱼类的全长雷诺数相关[21];Zhuang等人对比分析了黑龙江中3种代表性鱼类在发育阶段的集群行为,认为流速和紊动能是相当重要的水力学影响指标[22];Clark等人认为当幼鱼鱼体的全长雷诺数小于200时,适合间歇高速游泳方式,难以维持与其他鱼的相对位置,不易集体行动,而持续游泳方式有利于集群行为的发生[23]。石小涛等人对胭脂鱼早期发育过程中集群行为的形成,认为在紧凑型鱼类集群行为中,流速具有稳定值[24]。以上研究表明,鱼类集群是表示具有同步游泳行为的鱼类集合体。而这在现有的鱼道进口相关研究资料中,还并没有被列入研究重点。

另一方面,鱼类生态行为对鱼道进口的设计也有着至关重要的影响,但是也并未得到足够的重视[16]。鱼类生态行为,是指鱼类在受到外界或内在环境变化或刺激下的行为反应,包括鱼类的运动、洄游、觅食、逃避等[25]。鱼类在历经长期的适应复杂环境的过程中,其生态行为模式千变万化:不同的鱼类之间,行为不会相同,甚至还会存在很大的差异性,比如鲑鱼会成群地不停游动,鲨鱼也会成群一起活动,但是密度远远低于鲑鱼群,因此每种鱼类的行为都各具特点;同时,即使是同一种鱼类的同一类型行为,也会有许多不同的行为形式,比如齐口裂腹鱼的游泳行为,其既可以是保持鱼体挺直,鱼鳍张开,缓慢摆尾低速游动,也可以高频率摆动尾鳍,其背鳍、胸鳍等都紧贴鱼体,身体弯曲呈波浪形进行冲刺游泳[18]。

本文就鱼道进口研究现状的分析及展望,着重考虑了鱼道使用者——鱼类的集群习性及其游泳能力,这将会是鱼道进口研究在生态学方面的重要补充。

3. 鱼道进口研究思路展望

针对上述研究现状及存在问题,未来对鱼道进口进行研究的思路可从以下方向入手:1)充分考虑鱼类游泳能力与鱼道进口处的水力学指标之间的联系,即建立鱼道进口生态水力学指标;2)充分考虑鱼类集群与鱼道进口设计的联系;3)放鱼实验应进行原型观测,同时,不采用人工饲养鱼,而是将野生原鱼作为实验用鱼。

3.1. 鱼道进口生态水力学指标的建立

在考虑鱼类游泳能力与鱼道进口处的水力学指标之间的联系时,可通过建立一系列生态水力学指标,将鱼类的游泳能力还原至水力学指标,通过工程措施来更好满足鱼类洄游需求。具体如下:

首先,鱼类能通过鱼道洄游的前提条件是一——鱼类能够顺利找到鱼道进口进入鱼道。因此,建议将鱼道进口附近流速塑造为“诱鱼流速”,即鱼道进口处的流速能让鱼类感知,从而被吸引过来,并让它们继续往鱼道洄游。最小的“诱鱼流速”是感应流速,临界游泳速度则是最佳的“诱鱼流速”。

鱼道进口也即水流出口,当鱼类被“诱鱼流速”吸引到鱼道进口时,鱼类会持续往上洄游,故建议“鱼道进口流速”应该在临界游泳速度和突进游泳速度之间。其中,临界游泳速度为鱼道进口最低流速,突进游泳速度为鱼道进口最大流速。

3.2. 充分考虑鱼类集群与鱼道进口设计的联系

正如前文所述：鱼类集群的习性对于鱼道设计有着非常大的影响。鱼类集群表示具有同步游泳行为的鱼类集合体。这种同步性表现在鱼群中的个体具有相近的泳速，相同的方向，并保持着相对稳定的空间距离，这是鱼类对外部环境变化做出的集体响应。可见鱼类集群能准确的反映鱼类对河流水力学环境的适宜情况。因此，建议在设计鱼道进口时，充分考虑鱼类集群的影响，研究鱼类集群时对水流流速、紊动能、雷诺数、弗雷德数等水力学指标的响应情况。

3.3. 放鱼实验验证鱼道进口处水力学条件

鱼类是鱼道的主要使用者，鱼类本身对鱼道进口设计的重要性毋庸置疑，为了将此重要因素考虑周全，建议在鱼道进口设计时要进行放鱼实验，研究鱼类的生态行为与鱼道进口处流速、紊动能等水力学要素之间的联系，这对鱼道进口的设计与优化具有重要的参考意义。另外，在进行放鱼实验时必须考虑到，对于人工饲养的实验用鱼，其游泳能力与天然河流中的野生原鱼相比，肯定会有差异；同时，即使鱼道进口、河道等可以按比例缩小从而获取相关的水力学要素，但是鱼类活体是不能进行缩小的。因此，建议使用野生原鱼在原型上进行放鱼实验，做原型观测；如果无法在原型上进行，至少将模型做成与原型 1:1 的比例。

基金项目

四川省教育厅自然科学基金项目(035Z1994)；四川农业大学(03571673、04070066)。

参考文献 (References)

- [1] Fao and DVWK (2002) Fish Passes: Design, Dimensions, and Monitoring. Food and Agriculture Organization of the United Nations and DVWK, Rome.
- [2] 毛熹, 李嘉, 易文敏, 等. 鱼道结构优化研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(S1): 57-62.
- [3] 毛熹, 脱友才, 安瑞冬, 等. 结构变化对鱼道水力学特性的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(3): 13-19.
- [4] 陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 182-188.
- [5] Videler, J.J. and Wardle, C.S. (1991) Fish Swimming Stride by Stride: Speed Limits and Endurance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **1**, 23-40. <https://doi.org/10.1007/BF00042660>
- [6] Alvarez-Vázquez, L.J., Martínez, A., Vázquez-Méndez, M.E., et al. (2008) An Optimal Shape Problem Related to the Realistic Design of River Fishways. *Ecological Engineering*, **32**, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.10.008>
- [7] Larinier, M., Travade, F. and Porcher, J.P. (2002) Fishways: Biological Basis, Design Criteria and Monitoring. Food and Agriculture Organization of the United Nations, DVWK, Rome.
- [8] Abad, J.D., Waratuke, A., Barnas, C., et al. (2009) Hydraulic Model Study of Canoe Chute and Fish Passage for the Chicago River North Branch Dam. *World Environmental and Water Resources Congress*, Kansas City, Missouri, 17-21 May 2009, 1-11.
- [9] Cea, L., Pena, L., Puertas, J., et al. (2007) Application of Several Depth-Averaged Turbulence Models to Simulate Flow in Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**, 160-172. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(160))
- [10] Caisley, M.E. (2002) Numerical Modeling of Flows in Vertical Single Slot Fishways. *The 13rd IAHR-APD Congress*, Singapore, 6-8 August 2002.
- [11] 史斌, 王斌, 徐岗, 等. 浙江楠溪江拦河闸鱼道进口布置优化研究[J]. 人民长江, 2011, 42(1): 69-71.
- [12] 黎贤访, 朱世洪, 邓润兴, 等. 鱼道进口水力特性数值模拟研究[J]. 人民长江, 2015, 46(8): 7-9.
- [13] 水利部南京水利科学研究所. 鱼道[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [14] Weihs, D. (1973) Hydromechanics of Fish Schooling. *Nature*, **241**, 290-291. <https://doi.org/10.1038/241290a0>

- [15] Partridge, B.L. (1981) Internal Dynamics and the Interrelations of Fish in Schools. *Journal of Comparative Physiology A*, **144**, 313-325. <https://doi.org/10.1007/BF00612563>
- [16] 毛熹. 中国西南山区河流鱼类友好型鱼道水力学研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 四川大学, 2015.
- [17] 李明德. 鱼类形态与生物学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011.
- [18] 周应祺. 应用鱼类行为学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [19] Fukuda, H., Torisawa, S., Sawada, Y., *et al.* (2010) Ontogenetic Changes in Schooling Behaviour during Larval and Early Juvenile Stages of Pacific Bluefin Tuna *Thunnus orientalis*. *Journal of Fish Biology*, **76**, 1841-1847. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02598.x>
- [20] Torisawa, S., Takagi, T., Fukuda, H., *et al.* (2007) Schooling Behaviour and Retinomotor Response of Juvenile Pacific Bluefin Tuna, *Thunnus orientalis* under Different Light Intensities. *Journal of Fish Biology*, **71**, 411-420. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2007.01498.x>
- [21] Gallego, A. and Heath, M.R. (2005) The Development of Schooling Behaviour in Atlantic Herring *Clupea harengus*. *Journal of Fish Biology*, **45**, 569-588. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1994.tb00925.x>
- [22] Zhuang, P., Kynard, B., Zhang, L., *et al.* (2003) Comparative Ontogenetic Behavior and Migration of Kaluga, *Huso dauricus*, and Amur Sturgeon, *Acipenser schrenckii*, from the Amur River. *Environmental Biology of Fishes*, **66**, 37-48. <https://doi.org/10.1023/A:1023224501116>
- [23] Clark, P.J. and Evans, F.C. (1954) Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations. *Ecology*, **35**, 445-453. <https://doi.org/10.2307/1931034>
- [24] 石小涛, 王博, 王雪, 等. 胭脂鱼早期发育过程中集群行为的形成[J]. 水产学报, 2013, 37(5): 705-710.
- [25] 殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org