

鱼道紊流特性研究进展

李甜畅, 闫滨

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

**摘要:**鱼道内的紊流特性对于鱼类能否顺利上溯洄游至关重要。为了解鱼道内的紊流状态,综述了丹尼尔式、竖缝式、组合式、涵洞式等鱼道内紊流流速、紊动能、紊流强度、雷诺剪切应力以及漩涡等紊流特性的研究进展,分析不同鱼道内紊流的分布规律及特点,指出鱼道中的紊流强度、紊动能等均会对鱼类对栖息地的选择以及鱼类通行造成较大的影响。此外,目前国内对鱼道内漩涡紊流特性的研究较少,建议对其深入研究,以改善鱼道内水力条件,保证鱼道有效运行。

**关键词:**鱼道;紊流特性;紊流强度;紊动能;漩涡

中图分类号:TV135;X171.4      文献标志码:A      文章编号:1001-5485(2018)02-0062-06

1 研究背景

随着社会经济的快速发展,人类对水资源需求越来越高,因而在江河湖泊上修建了大量的闸坝工程。这些工程在带来巨大的社会效益和经济效益的同时,也会使得鱼类栖息地环境发生变化,导致生物多样性降低,例如分布在山西、陕西、河南、山东4省河段的鳊鲂,由于建坝阻隔其洄游通道而大量减少,黄河下游河南、山东河段的达氏鲟、白鲟也逐步稀少,破坏了原有的区域生态平衡。因而,在修建水利工程的同时,必须充分考虑过鱼设施的建设以维持水生态系统的平衡。

按照全国科学技术名词审定委员会审定公布的定义,鱼道为供鱼类上溯洄游过坝的人工通道;或设在江河上的固定建筑物(如水坝)中使鱼类能逆流或顺流通过的人工水道;或水利设施中供鱼类洄游的人工水道<sup>[1]</sup>。鱼道一般适用于低水头水利枢纽,是一种最常见的过鱼设施。其种类<sup>[2]</sup>包括:丹尼尔式、池堰式、溢流堰式、淹没孔口式、竖缝式、组合式、特殊结构式、仿自然式、涵洞式、新型螺旋式等(见图1)。其中,丹尼尔式的流量较大,可以改善下游吸引鱼类的条件,但是水流的紊动比较剧烈;池堰式具有很好的消能效果,并且可以为鱼类提供休息的区域<sup>[3]</sup>,但是随着流量的增大,其紊流状态就会发生较大改变<sup>[4]</sup>;溢流堰式虽然运行比较平稳,但是消能性较差,对水位变动的适应性较差;淹没孔口式

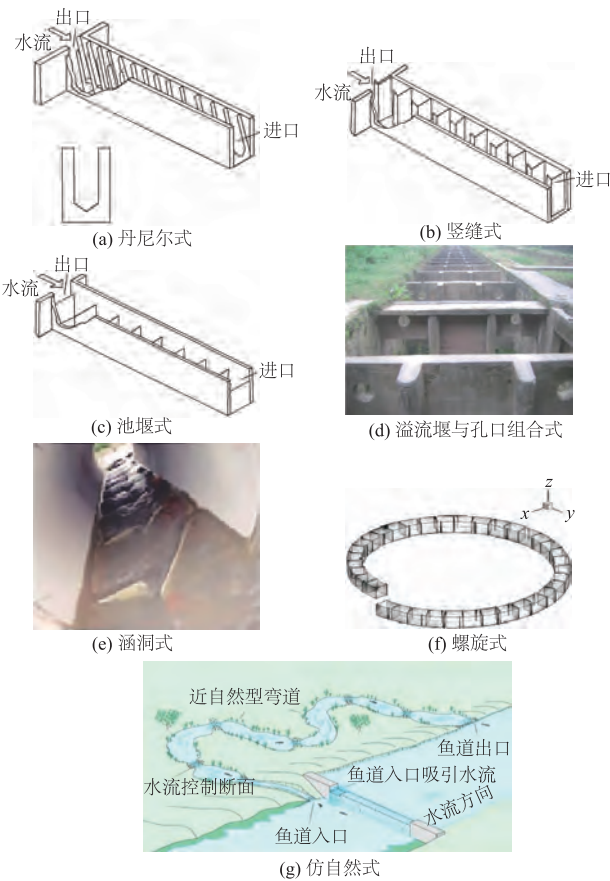


图1 鱼道型式

Fig.1 Several types of fishway

对水位变动的适应性较好,但消能效果较差;竖缝式消能效果和适应性均较好,但容易造成池室内水流的紊动;组合式可以发挥各种孔口优势,水力特性较好,但由于其结构比较复杂,设计有一定难度;特殊

结构式虽然经济、易于设计,但其是采用竹笼固定在混凝土上,所以需要经常更新;仿自然式可以给鱼类在池室中创造良好的休息条件,不过需要有符合要求的合适地形;涵洞式鱼道具有流速大、输水快的特点,但是其进出口处流速过大,且水流的紊动过大<sup>[5]</sup>;新型螺旋式是在现有竖缝式鱼道顺河布置的基础上进行结构改进而得到的一种新型鱼道,它具有占用平面面积小、提升高度大、流速分布均匀、水深大等特点,适合不同鱼类洄游<sup>[6]</sup>。

上述各类鱼道虽然都具有一定优点,但是普遍存在着紊流剧烈的缺点,而鱼道内流速、漩涡的分布、紊动能、紊流强度等紊流特性是鱼类顺利通过鱼道及实现自然洄游的关键因素,因此,研究鱼道内紊流要素的变化规律,合理设计鱼道形式,对于提高鱼道过鱼效果、维持区域生态平衡具有重要意义。

## 2 紊流特性

鱼道的紊流特性包括流速、紊流强度、紊动能、雷诺切应力等。紊流的瞬时流速包括时均值和脉动值2个部分。对于 $x$ 方向,有

$$u_x = \bar{u}_x + u'_x \quad (1)$$

式中: $u_x$ 为 $x$ 方向紊流的瞬时流速; $\bar{u}_x$ 为 $x$ 方向紊流的时均值; $u'_x$ 为 $x$ 方向紊流的脉动值。

对于脉动值,常用它的均方根值作为它的统计特征值。若为各向同性紊流,则有

$$\overline{u'^2_x} = \overline{u'^2_y} = \overline{u'^2_z} \quad (2)$$

式中: $u'_y$ 为 $y$ 方向紊流的脉动值; $u'_z$ 为 $z$ 方向紊流的脉动值。

用单位质量流体的紊动平均动能 $e$ 来表示紊动能的大小,即

$$e = \frac{1}{2}(\overline{u'^2_x} + \overline{u'^2_y} + \overline{u'^2_z}) \quad (3)$$

常用紊流强度 $N$ 来表示紊流的程度,即

$$N = \frac{1}{\bar{u}_x} \sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2_x} + \overline{u'^2_y} + \overline{u'^2_z})} \quad (4)$$

对N-S方程进行时间平均后,得到紊流时均运动的运动方程即雷诺方程,雷诺方程中的 $\rho \overline{u'_x u'_x}$ ,  $\rho \overline{u'_y u'_y}$ ,  $\rho \overline{u'_z u'_z}$ 这3项为附加法向应力; $\rho \overline{u'_x u'_y}$ ,  $\rho \overline{u'_y u'_x}$ ,  $\rho \overline{u'_x u'_z}$ ,  $\rho \overline{u'_z u'_x}$ 这4项为附加切应力,统称为雷诺应力<sup>[7]</sup>。

学者们通过研究表明,鱼道中的紊流特性和鱼类的行为有着密切的关联。Lacey等<sup>[8]</sup>(2012)研究发现:鱼道中鱼类的洄游能力主要取决于紊流的强度(紊动能、雷诺切应力和漩涡)、周期性、方向、长

度(漩涡及漩涡的规模)等。Crowder等<sup>[9]</sup>(2002)指出,漩涡和紊动能是紊流特性中对鱼类影响较大的因素,漩涡是表示一个流体绕其轴线旋转的速度向量;紊动能是衡量由于紊流速度波动而导致动能增加的量度。Guiny等<sup>[10]</sup>(2005)研究得出,池堰式鱼道中的最大紊动能在 $0.4 \sim 1.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 之间,而Silva等<sup>[11]</sup>(2010)在同种鱼道中得到最大紊动能值仅为 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ;Liu等<sup>[12]</sup>(2006)发现,竖缝式鱼道中最大紊动能为 $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ;Morrison等<sup>[13]</sup>(2009)在涵洞式鱼道中测得最大紊动能为 $0.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

## 3 鱼道紊流特性研究进展

### 3.1 丹尼尔式鱼道

丹尼尔式鱼道是最早出现的鱼道形式,早期有学者对其流量、水深及流速分布进行了研究<sup>[14]</sup>。其后,佟雪丰等<sup>[15]</sup>(2016)利用ADV进行流速测量,通过物理模型试验(模型总长 $L=18.57 \text{ m}$ ,宽度 $B=1 \text{ m}$ ,高 $H=1 \text{ m}$ ,坡比为 $1:12$ ),分析丹尼尔式鱼道在不同工况下的紊动特性。结果表明:池室中的流场具有明显的主流区和回流区;主流区域内 $w$ 方向紊动强度值明显高于 $u, v$ 2个方向,回流区 $u, v, w$ 方向的紊动强度值则大致相同;在 $xy$ 平面上,雷诺应力值随着与边墙距离增大而减小;水流经过隔板处紊动能达到最大值,随后沿程减小。

丹尼尔式鱼道底板附近处流速较小,可供游泳能力弱的鱼类洄游,游泳能力强的鱼类可以在接近表面处洄游。但由于鱼道内的流速会随水深增加而增大,因此限制了鱼道的高度<sup>[14]</sup>。

### 3.2 池堰式鱼道

池堰式鱼道历史比较久远,自20世纪80年代起,广大学者陆续通过试验,对池堰式鱼道内水流流态、流量与水深的关系进行了研究<sup>[16-19]</sup>。为了进一步了解该鱼道的紊流特性,Yagci<sup>[20]</sup>(2010)通过试验对长 $L=0.7 \text{ m}$ ,宽度 $B=0.975 \text{ m}$ ,坡度为7%的池堰式鱼道内的紊流特性进行分析,结果表明:池室中各层流动模式不同,形成了2个流动区域,分别是主流区和循环区。其中,循环区在速度值较低处提供一个相对静止的休息区域。基于试验数据,得到6层的紊流模式。最大的紊流出现在第3层,位于2个主要流层“堰流”层和“孔口流”层之间,这可能是因为相对密集的动量转移到这2个主要流动层之间。试验结果也表明,鱼道中紊流具有各向异性。

### 3.3 淹没孔口式鱼道

淹没孔口式鱼道属于隔板型鱼道,其过鱼孔是

淹没在水下的孔洞,孔口流态为淹没流。汪红波等<sup>[21]</sup>(2012)采用数值模拟方法对淹没孔口式横隔板鱼道的流态以及紊动能等进行了系统的分析。分析表明:池室内的漩涡主要分布在大孔主流的两侧,在同一隔板中,与大孔同侧的小孔处水流具有分流现象,而与大孔异侧的小孔处比同侧的小孔处流速大;紊动能主要分布在隔板的边界处以及鱼道的底部,相同隔板条件下,大孔同侧小孔处的紊动能要比异侧的小,且挡板边界处的要比边墙边界处的大。

3.4 竖缝式鱼道

早期对于竖缝式鱼道的研究主要集中在紊流流速规律方面。董志勇等<sup>[22-23]</sup>(2008)对  $L=15\text{ m}$ ,  $B=0.8\text{ m}$ ,  $H=1\text{ m}$ , 隔板间距为  $120\text{ cm}$ , 竖缝宽度为  $30\text{ cm}$  的同侧、异侧竖缝式鱼道的一维流速进行研究,研究表明:同侧竖缝式鱼道中,如果流速较大,则鱼类在穿过竖缝后就转向漩涡区域,若流速较适宜,则鱼类在穿过竖缝后可以继续上溯;异侧竖缝式鱼道内主流速的变化分为前半池和后半池 2 部分,其中前半池主流速度逐渐减小,后半池则逐渐增加。并且在半池长附近存在一个低速区,流速  $<0.2\text{ m/s}$ 。郭维东等<sup>[24]</sup>(2012)对  $L=11\text{ m}$ ,  $B=0.4\text{ m}$ ,  $H=0.5\text{ m}$  的同侧竖缝式鱼道的流速特性进行了试验研究,结果表明:当水流进入到池室后,主流速度先逐渐增大,在达到最大值后,主流速度开始减小,在接近下一池室竖缝处流速达到极值区。随后,郭维东等<sup>[25]</sup>(2013)在其前期试验的基础上,对同侧竖缝式鱼道进行了二维的数值分析,并且与物理模型的结果进行了对比,发现数值模拟的结果与物理模型的结果基本一致,并且,其在前期的基础上,从紊动能的角度分析了适合目标鱼类洄游的池室规格,得出:长宽比为  $10:8$ 、底坡为  $1\%$  的条件对目标鱼种的洄游更为有利。

紊流特性不仅包括紊流流速,还包括紊流强度、紊动能以及雷诺切应力等。Liu 等<sup>[12]</sup>(2006)利用 ADV 进行流速测量,分别对坡度为  $5.06\%$  和  $10.12\%$  的 2 种竖缝式鱼道内紊流特性进行了研究,结果表明:2 种坡度对应着 2 种不同的水流形态,而 2 种坡度鱼道内主要紊流特征与平面射流的差别较大;随着射流沿池室向下,纵向和横向紊流强度随之降低,但在回流区紊流强度基本保持不变。Sanagiotto 等<sup>[26]</sup>(2006)分析了竖缝式鱼道池室内流速、紊动能、紊流强度以及雷诺剪切力等紊流特性,发现水流可分为主流区和休息区,其中主流区的流速、紊动能和雷诺剪切力均较大,但紊动强度较小,而休息区的紊流特性与之相反。Bermúdez 等<sup>[27]</sup>(2010)利用

物理模型和数值模拟相结合的方法对  $5\%$  和  $10\%$  这 2 种坡度的 16 种不同规格的竖缝式鱼道(见表 1)内紊流特性进行了分析。分析结果表明:紊动能最大值通常是在池室的入口处,紊流强度以及消能率在池室的上部较低。

表 1 16 种规格鱼道的尺寸  
Table 1 Dimensions of 16 fishways

| 水槽<br>宽度<br>$b/\text{m}$ | 鱼道<br>宽度<br>$B/\text{m}$ | 鱼道<br>长度<br>$L/\text{m}$ | 池室<br>数量<br>$N$ | 水槽<br>宽度<br>$b/\text{m}$ | 鱼道<br>宽度<br>$B/\text{m}$ | 鱼道<br>长度<br>$L/\text{m}$ | 池室<br>数量<br>$N$ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 0.150                    | 0.300                    | 0.375                    | 10              | 0.075                    | 0.300                    | 0.188                    | 10              |
| 0.150                    | 0.300                    | 0.750                    | 9               | 0.075                    | 0.300                    | 0.375                    | 10              |
| 0.150                    | 0.300                    | 1.500                    | 4               | 0.075                    | 0.300                    | 0.750                    | 9               |
| 0.150                    | 0.300                    | 2.250                    | 3               | 0.075                    | 0.300                    | 1.125                    | 6               |
| 0.113                    | 0.302                    | 0.283                    | 10              | 0.038                    | 0.304                    | 0.095                    | 10              |
| 0.113                    | 0.302                    | 0.565                    | 10              | 0.038                    | 0.304                    | 0.190                    | 10              |
| 0.113                    | 0.302                    | 1.130                    | 6               | 0.038                    | 0.304                    | 0.380                    | 10              |
| 0.113                    | 0.302                    | 1.695                    | 4               | 0.038                    | 0.304                    | 0.570                    | 10              |

为进一步了解鱼道内的紊流特征,曹庆磊等<sup>[28]</sup>(2010)采用三维数值模拟方法对长  $L=7.25\text{ m}$ , 宽度  $B=0.6\text{ m}$ , 高  $H=0.6\text{ m}$  的同侧竖缝式鱼道内的流场、雷诺剪切应力等紊流特性进行研究,并且通过试验验证了标准  $k-\varepsilon$  和雷诺切应力方程 2 种紊流模型的结果。研究表明:池室内形成了由 1 个主流区和 2 个大小不同的回流区组成的 3 个区域;紊动能和雷诺切应力对竖缝处和小回流区的鱼类上溯影响较大,对大回流区处的上溯能力影响不大。在上述研究基础上,曹庆磊等<sup>[29]</sup>又利用 ADV 量测流速,对异侧竖缝式鱼道进行试验研究,研究表明:池室中的流速、紊动能以及雷诺剪切应力在竖缝出口处较大,在回流区较小,鱼类洄游时在上层受到流速的影响要稍大于下层,而所受紊动能与雷诺切应力的影响则与之相反。高东红等<sup>[30]</sup>(2015)以生态流体力学为基础,用 3D 模型分析了竖缝式鱼道内的流场。分析表明:鱼道内部流场呈现明显的三维特性,并伴随有漩涡、上升流、下降流以及流动分离等现象,沿着长隔板附近的流速较低,且在鱼池两端形成上升流,流态发生了明显的变化,并且有涡流产生;在通过竖缝处,形成了射流形式,在竖缝上游形成下降流而在下游附近形成上升流;在鱼池中部流向短隔板处形成下降流;位于短隔板边的漩涡靠近下游,位于自由表面附近的漩涡相对较弱,并且靠近上游隔板。综上,国内外对竖缝式鱼道紊流特性的研究方法主要为物理模型试验和数值模拟方法。研究内容主要为紊流流速、紊流强度及紊动能的分布规律。结果表明:异侧竖缝式鱼道内主流速先减小后增大,而同侧竖缝式鱼道则与之相反;位于竖缝处和出口处的紊

流强度较大,位于入口处的紊动能较大,这都会对鱼类的通过产生较大的影响,因此,合理改善该处的设计尺寸和形式,会使过鱼效果得到一定的提高。

### 3.5 组合式鱼道

组合式鱼道是溢流堰式、淹没孔口式及竖缝式3种形式的组合。对于竖缝和潜孔组合式鱼道,黄明海等<sup>[31]</sup>(2009)对其进口处的紊动水流进行了三维数值模拟,鱼道隔板导墙厚度为0.3 m,布置一个0.8 m宽的竖缝,导墙另一侧靠近底部设置5个0.46 m×0.46 m(长×宽)的正方形潜孔,相邻导墙竖缝及潜孔采用交替方式布置。分析结果显示:组合式鱼道竖缝和潜孔处流速较大,底部流速>水面流速。竖缝和潜孔的进口转角处及两侧边壁的涡量较大,最大涡量可达 $15\text{ s}^{-1}$ ;竖缝、潜孔断面中部和其下游局部区域的紊动能较大,最大值可达到 $0.27\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

对于竖缝与堰的组合式鱼道,王琲等<sup>[32]</sup>(2013)利用RNG  $k-\varepsilon$ 紊流模型对 $L=4\text{ m}$ , $B=3.5\text{ m}$ , $H=3\text{ m}$ ,竖缝宽 $b_1$ 及堰宽 $b_2$ 均为0.5 m,堰顶距池室底部1.8 m的鱼道进行数值模拟,分析了池室内的流场及紊动能。分析表明:堰上和池室内的流速随水深增加而加大;池室内、竖缝处和堰上的紊动能均随着水深增加而加大。龚丽等<sup>[33]</sup>(2015)利用数值模拟方法分析了老龙口水利枢纽处长 $L=532.5\text{ m}$ ,坡度 $i=6.25\%$ ,过鱼池净宽 $B=2.5\text{ m}$ ,竖缝宽度为0.32 m,溢流堰宽1.1 m的竖缝与堰组合式鱼道池室内的主流、流速和紊动能。结果表明:沿主流轨迹线方向,主流流速沿程衰减,衰减率最高可达44%左右,证明该种鱼道池室消能效果良好;池室内紊动能基本在 $0.01\sim 0.12\text{ m}^2/\text{s}^2$ 之间,对鱼类的洄游影响较小。

由于组合式鱼道将不同形式的鱼道有机组合,取长补短,充分发挥各种形式鱼道的优势,因而适合多种鱼类同时通过,极大提高过鱼效率。

### 3.6 仿自然式鱼道

仿自然式鱼道可以为生活在水中的生物体提供合适的通道,在经济和生态方面,仿自然式鱼道可以替代传统的鱼道,因而引起了广大学者的研究兴趣<sup>[34]</sup>。Breton等<sup>[35]</sup>(2013)分析了 $L=8.89\text{ m}$ , $B=0.91\text{ m}$ , $H=0.61\text{ m}$ ,坡度为5%的仿自然式鱼道的紊流特性。其结果表明:鱼道中漩涡的规模为1~30 cm;紊动能值的范围较大,为 $0.005\sim 0.25\text{ m}^2/\text{s}^2$ ;最强烈的剪切应力发生在靠近喷射区的巨石上,而不是扩散到整个断面上。这种情况,鱼类可以选择在巨石之间洄游通过鱼道,从而避开射流区域。在巨石尾部,其速度、峰度、旋涡均较低,可以作为鱼类

的休息区。Baki等<sup>[36]</sup>(2015)进一步研究了 $L=8.89\text{ m}$ , $B=0.92\text{ m}$ ,坡度分别为1.5%和3%的仿自然式鱼道内的紊流特性,研究表明,巨石群和孤立的巨石之间的紊流和紊流衰减率存在一定的差异。巨石群的紊动能和雷诺切应力的最大值明显小于孤立巨石中的数值,其主要原因是由于尾流干扰流紊动能的分散度要高于其他条件。

### 3.7 涵洞式鱼道

涵洞式鱼道紊流特性的研究主要集中在紊流流速、紊流强度及紊动能方面。Abbs等<sup>[37]</sup>(2007)研究发现,环形波纹钢管涵洞的紊流强度在边界附近较高,而在中心区较低。最大紊流强度出现在涵洞进口处上角偏下游处。Richmond等<sup>[38]</sup>(2007)利用ADV在螺旋波纹涵洞式鱼道内测量流速,从而对鱼道内流速及紊流状态进行分析。

结果表明:在主流区的中心会产生较高的流速及紊流强度;平稳的流速和较高的紊流强度出现在主流区的左侧;主流区的右上角则会产生相对较低的流速和紊流强度(向上游看),鱼类在涵洞的右侧通过。Morrison等<sup>[13]</sup>(2008)利用物理模型对 $L=12.2\text{ m}$ , $D=1.83\text{ m}$ ,坡度为1.14%的涵洞式鱼道的紊流特性进行分析,利用M-ADV仪器分别在设有斜坡堰式挡板和槽堰式挡板的涵洞内测量流速。研究表明:在槽堰式挡板的边缘会产生较大的横向紊流强度;在斜坡式挡板的左侧(向下游看)会产生较高的紊动能。Hunt等<sup>[39]</sup>(2010)分析了 $L=21\text{ m}$ , $D=0.8\text{ m}$ ,坡度为0%和1.5%的环形波纹钢管涵洞内紊流分布情况,结果表明,紊流最大的位置和下游低流速区域位置密切相关,涵洞进口附近的紊流明显大于流场充分发展区域的紊流。

除了对紊流流速、紊流强度及紊动能的研究外,有学者对涵洞式鱼道内的漩涡结构进行了分析和探讨。Yan等<sup>[40]</sup>(2011)对 $L=8\text{ m}$ , $D=0.5\text{ m}$ ,坡度为0.4%的波纹钢管涵洞内水流的紊流结构进行了研究,指出随着水流沿涵洞长度方向推进,紊流强度及漩涡尺寸不断增大,最大的漩涡尺寸范围为26~59 cm;较大的漩涡在涵洞进口处分散在过水断面的左上角和右上角区域,到流场充分发展区域(涵洞中部),漩涡逐渐集中于断面中心偏低区域。刘桐渤等<sup>[41]</sup>(2015)在前期研究基础上,通过数值模拟分析了环形波纹钢管涵洞式鱼道内不同流量、埋深(0D, 0.1D, 0.2D)工况下,流速沿程分布以及紊流强度在进出口及洞身的变化趋势。

研究结果表明:该种鱼道的过水断面中心区域处的流速较高,紊流强度较低;水面中心区域附近紊

流强度较高,水流流速较低。涵洞底部边壁处,流速较小,紊流强度也较低。

涵洞式鱼道进出口处流速过大,且水流的紊动过度,这将不利于鱼类的通过,但波纹钢管涵洞过水断面的大部分区域水流流速低于平均流速,所以比较适合鱼类上溯洄游<sup>[42]</sup>。特别地,波纹钢管中波纹的粗糙度可以在边界附近产生足够低的流速,即使涵洞内的平均流速超出了鱼种的游泳能力,鱼类仍然可以由此游向上游<sup>[43]</sup>,过鱼效果良好。因而,波纹钢管涵洞式鱼道可针对部分合适的过鱼对象进行推广应用。

3.8 各种鱼道紊流特性分析

通过对丹尼尔式、池堰式、淹没孔口式、竖缝式、组合式、仿自然式、涵洞式鱼道紊流特性的对比分析,归纳各种鱼道的主要紊流特性见表 2。

表 2 各种鱼道紊流特性

Table 2 Turbulent characteristics of different types of fishway

| 鱼道形式  | 紊流特性                   |
|-------|------------------------|
| 丹尼尔式  | 隔板处紊动能达到最大             |
| 池堰式   | 紊流具有各向异性               |
| 淹没孔口式 | 紊动能分布在隔板处及鱼道底部         |
| 竖缝式   | 竖缝处和出口处紊流强度较大,入口处紊动能较大 |
| 组合式   | 紊动能随水深增加而增大            |
| 仿自然式  | 紊流主要位于巨石附近             |
| 涵洞式   | 进口处紊流强度较大,较大旋涡分布在进口处   |

由表 2 可见,各类鱼道中影响紊流特性的因素各不相同,在实际应用中,可将其作为参考,加以改善,使鱼道的过鱼效果得到提高。

4 结 语

综上,目前关于鱼道内紊流特性的研究主要集中在流速、紊动能以及雷诺剪切应力等方面,且已经取得了较大的进展,但是对于漩涡的研究还比较少见。鱼道内漩涡的存在也会在很大程度上干扰鱼类的洄游,因此,了解漩涡的大小、分布等特点十分必要,这将成为今后紊流特性研究热点之一。

目前国内对于波纹钢管(CSP)涵洞式鱼道内漩涡结构的研究仍属空白,由于 CSP 的结构有利于鱼类的上溯,若能进一步研究其紊流特性,充分发挥其特点并提出改善措施,将 CSP 更广泛地应用到鱼道建设中,将会对维持区域生态平衡发挥重要作用。此外,数值模拟作为物理模型试验的辅助手段,由于其可以调节各种边界条件,进行多工况数值模拟,便于方案优选,且与物理模型试验相比,其具有限制条

件少,灵活性强的优点,因而该方法可以广泛地应用于鱼道紊流特性研究中。

参考文献:

[1] 王 然.鱼道规划设计研究进展[J].水利建设与管理, 2012,(5):11-13,47.

[2] 南京水利科学研究院.鱼道[M].北京:电力工业出版社,1982.

[3] LARINIER M, MARMULLA G. Fish Passes; Types, Principles and Geographical Distribution an Overview[ C ] // Food and Agriculture Organization of the United Nations. Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries, Phnom Penh, Kingdom of Cambodia, February 11-14,2003:183-206.

[4] BATES K.Fish Way Guidelines for Washington State[R]. Washington: Washington Department of Fish and Wildlife, 2000.

[5] 许晓蓉,刘德富,汪红波,等. 涵洞式鱼道设计现状与展望[J]. 长江科学院院报,2012,29(4):44-48,63.

[6] 王新雷,张根广,高 猛,等. 新型螺旋式鱼道水力特性的数值模拟[J]. 人民黄河,2014,36(12):118-121.

[7] 吴福生,姜树海. 柔性植物与刚性植物紊流特性研究[J].水动力学研究与进展 A 辑,2008,23(2):158-165.

[8] LACEY R W, NEARY V S, LIAO J C, *et al.* The IPOS Framework: Linking Fish Swimming Performance in Altered Flows from Laboratory Experiments to Rivers[ J]. River Research & Applications, 2012,28(4):429-443.

[9] CROWDER D W, DIPLAS P. Vorticity and Circulation: Spatial Metrics for Evaluating Flow Complexity in Stream Habitats[J]. Journal Canadien des Sciences Halieutiques et Aquatiques,2002,59(4):633-645.

[10] GUINY E, ERVINE D A, ARMSTRONG J D. Hydraulic and Biological Aspects of Fish Passes for Atlantic Salmon [ J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(7): 542-553.

[11] SILVA A, SANTOS J, FERREIRA M, *et al.* Effects of Water Velocity and Turbulence on the Behaviour of Iberian Barbel(Luciobarbus Bocagei, Steindachner, 1864) in an Experimental Pool-type Fishway[ J]. River Research and Applications,2011,27(3): 360-373.

[12] LIU M, ZHU D, RAJARATNAM N. Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways[ J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,132(8):756-777.

[13] MORRISON R, HOTCHKISS R, STONE M, *et al.* Turbulence Characteristics of Flow in a Spiral Corrugated Culvert Fitted with Baffles and Implications for Fish Passage[ J]. Ecological Engineering,2009,35(3):381-392.

[14] KATOPODIS C, WILLIAMS J G. The Development of Fish Passage Research in a Historical Context[ J]. Ecological Engineering,2012,48(11):8-18.

[15] 佟雪丰,李卫明,刘德富,等. 丹尼尔式鱼道内水流紊

- 动特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2): 94-97, 128.
- [16] RAJARATAM N, KATOPODIS C, MAINAL A. Plunging and Streaming Flows in Pool and Weir Fishway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(8): 939-944.
- [17] KIM J H. Hydraulic Characteristics by Weir Type in a Pool-weir Fishway [J]. Ecological Engineering, 2001, 16(3): 425-433.
- [18] EADS A, KATOPODIS C, SIKORA G J, *et al.* Flow Regimes and Structure in Pool and Weir Fishways [J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, 3(5): 379-390.
- [19] CLAY C H. Design of Fishways and Other Fish Facilities [M]. Ottawa: Department of Fisheries of Canada, 1995.
- [20] YAGCI O. Hydraulic Aspects of Pool-weir Fishways as Ecologically Friendly Water Structure [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(1): 36-46.
- [21] 汪红波, 王从锋, 刘德富, 等. 横隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 65-68, 141.
- [22] 董志勇, 冯玉平, ERVINE A. 同侧竖缝式鱼道水力特性及放鱼试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 121-125.
- [23] 董志勇, 冯玉平, ERVINE A. 异侧竖缝式鱼道水力特性及放鱼试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 126-130.
- [24] 郭维东, 孙磊, 高宇, 等. 同侧竖缝式鱼道水力特性研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 81-83.
- [25] 郭维东, 赖倩, 王丽, 等. 同侧竖缝式鱼道水力特性数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 77-80, 144.
- [26] SANAGIOTTO D G, COLETTI J Z, MARQUES M G. Velocity and Hydraulic Turbulence on a Vertical Fishway [C] // HYDROCHINA. Proceedings of Hydropower 2006 International Conference. Kunming, China, October 23-25, 2006: 105-106.
- [27] BERMÚDEZ M, PUERTAS J, CEA L, *et al.* Influence of Pool Geometry on the Biological Efficiency of Vertical Slot Fishways [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1355-1364.
- [28] 曹庆磊, 杨文俊, 陈辉. 同侧竖缝式鱼道水力特性的数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(7): 26-30.
- [29] 曹庆磊, 杨文俊, 陈辉. 异侧竖缝式鱼道水力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 698-703.
- [30] 高东红, 刘亚坤, 高梦露, 等. 三维鱼道水力特性及鱼体行进能力数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, (2): 103-109.
- [31] 黄明海, 周赤, 张亚利, 等. 竖缝-潜孔组合式鱼道进鱼口渠段三维紊流数值模拟研究[C] // 周孝德. 水力学与水利信息学进展. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 212-218.
- [32] 王珮, 杨文俊, 陈辉. 竖缝与堰组合式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 人民长江, 2013, 44(11): 81-84.
- [33] 龚丽, 白音包力皋, 穆祥鹏, 等. 老龙口水利枢纽鱼道水力特性研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5): 73-76, 96.
- [34] KATOPODIS C, KELLS J A, ACHARYA M. Nature-like and Conventional Fishways: Alternative Concepts? [J]. Canadian Water Resources Journal, 2001, 26(2): 211-232.
- [35] BRETON F, BAKI A B M, LINK O, *et al.* Flow in Nature-like Fishway and Its Relation to Fish Behaviour [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(6): 567-573.
- [36] BAKI A B M, ZHU D Z, RAJARATNAM N. Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp Type Fish Pass [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(2): 156-168.
- [37] ABBS T J, KELLS J A, KATOPODIS C. A Model Study of the Hydraulics Related to Fish Passage Through Backwatered Culverts [C] // Canadian Society for Civil Engineering. Proceedings of the 18th Canadian Hydrotechnical Conference. Winnipeg, Manitoba, August 22-24, 2007: 1-12.
- [38] RICHMOND M C, DENG Z, GUENSCH G R, *et al.* Mean Flow and Turbulence Characteristics of a Full-scale Spiral Corrugated Culvert with Implications for Fish Passage [J]. Ecological Engineering, 2007, 30(4): 333-340.
- [39] HUNT M, CLARK S, KEHLER N. A Model Study of the Hydraulics Related to Fish Passage in a CSP Culvert with a Vertical Headwall [C] // International Association for Hydro-environment Engineering and Research. Proceedings of the 8th International Symposium on Ecohydraulics. Seoul, Korea, September 12-16, 2010: 1-8.
- [40] YAN B, KELLS J A, SPARLING B F, *et al.* Turbulence Characteristics of the Flow in a Corrugated Steel Pipe Culvert in the Context of Fish Passage [C] // Canadian Society for Civil Engineering. Proceedings of the 20th Canadian Hydrotechnical Conference. Ottawa, Canada, June 14-17, 2011: 3066-3075.
- [41] 刘桐渤, 闫滨, 王铁良. 环形波纹钢管涵洞式鱼道水力特性数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(11): 25-29, 39.
- [42] BARBER M E, DOWNS R C. Investigation of Culvert Hydraulics Related to Juvenile Fish Passage [R]. USA: Washington State Department of Transportation, 1996.
- [43] EAD S A, RAJARATNAM N, KATOPODIS C, *et al.* Turbulent Open-channel Flow in Circular Corrugated Culverts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(10): 750-757.