DOI: 10.14042/j. cnki. 32.1309.2021.02.013

# 溢流堰与竖缝组合式鱼道紊流结构试验研究

### 董志勇,余俊鹏,黄 洲

(浙江工业大学土木工程学院,浙江杭州 310023)

摘要:利用声学多普勒测速仪(ADV)实测了凹口溢流堰与同侧布置竖缝组合式鱼道的三维瞬时流速,应用射流力 学和紊流统计理论剖析了鱼道水池内的时均流速、紊动强度、雷诺应力、相关函数、紊动尺度等紊流结构。试验 研究结果表明:溢流堰与竖缝组合式鱼道池内水流流态呈现出复杂的三维紊流结构;同竖缝相比,溢流堰对紊动 强度和雷诺应力的变化有着更为显著的影响,尤其是鱼道池内表层区域;堰流区涡旋的相关性比竖缝壁面射流区 好,并且堰流区存在较大尺度的涡旋结构,而竖缝壁面射流区的涡旋尺度则较小。相比单一式鱼道,组合式鱼道 紊流结构更加复杂,研究结果可为优化鱼道设计、修复鱼类生境提供参考。

随着经济社会的快速发展,人们对水资源的需求日益增长,在河流上修筑了许多水闸、大坝等水工建筑物,这些工程在兴利除害的同时对生态环境也带来一些影响<sup>[1]</sup>,例如对鱼类洄游造成阻碍。鱼道作为一种 生态补偿工程,对于保护鱼类资源,恢复河流生物多样性起着重要作用<sup>[2]</sup>。已有研究资料<sup>[3]</sup>表明,在全球 已建成的鱼道中,鱼类能够溯游通过的鱼道尚不足一半。因此,研究鱼道水力特性,尤其是鱼道紊流结构的 特征,对鱼道设计具有重要的指导意义。

鱼道型式可大致分为竖缝式、堰流式、孔口式及其组合式等几种型式。竖缝式鱼道对水位变化的适应性较好,Guiny等<sup>[4]</sup>对竖缝式鱼道的水力特性和生物特性进行过较为系统的试验研究;孙双科等<sup>[5]</sup>对北京市上 庄新闸竖缝式鱼道的水力特性做过模型试验研究;董志勇等在大比尺鱼道模型中试验研究了同侧竖缝式鱼道 的水力特性<sup>[6]</sup>,此外,还试验研究了异侧竖缝式鱼道的水力特性<sup>[7]</sup>。堰流式鱼道适宜于具有跳跃性的鱼类, Rajaratnam 等<sup>[8]</sup>提出了预测堰流式鱼道水流流态从跌落流到滑移流的判别标准;Kim<sup>[9]</sup>试验研究了不同堰型 的水力特性及其对溢流堰鱼道中鱼类溯游的影响。关于紊流结构对鱼类溯游行为影响的研究,Enders等<sup>[10]</sup> 研究了紊动对大西洋鲑鱼游泳能量消耗的影响;Liao等<sup>[11]</sup>阐述了鲑鱼在旋涡之间改变游泳姿态可以减少其 轴向肌肉活动,表明合适的紊流结构有助于鱼类溯游;Liu等<sup>[12]</sup>研究了不同坡度竖缝式鱼道水流的平均动 能、紊动能、紊动强度及雷诺应力;Lacey等<sup>[13]</sup>基于紊流的强度、周期、方向、规模4个特征,研究了鱼类 在紊流中的游泳行为。迄今为止,人们对单一式(竖缝式、堰流式、孔口式)鱼道研究较多,对于组合式鱼 道则仅有些数值模拟研究<sup>[14-16]</sup>,而对于组合式鱼道紊流结构的试验研究,迄今鲜有文献报导。由于沿海、 沿江洄游性鱼类众多,其溯游习性各异,传统的单一式鱼道难以满足不同鱼类的溯游习性。

本文在大比尺鱼道水槽中试验研究了凹口溢流堰与竖缝同侧布置组合式鱼道的紊流结构,以期提高人们 对此种组合式鱼道紊流结构的认识,为优化鱼道设计、修复鱼类生境提供参考。

1 试验设备与量测技术

试验在浙江工业大学水力学实验室大比尺鱼道水槽中进行。鱼道水槽长 20.0 m, 宽 0.6 m, 深 1.0 m,

收稿日期:2020-04-26; 网络出版日期:2020-10-22 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20201022.1021.016.html 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51779225) 作者简介:董志勇(1962—),博士,教授,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: dongzy@zjut.edu.cn 水槽主要由3段组成,即入流段、工作段及出流段。工作段由4个水池组成,其两侧为有机玻璃,水池沿流 动方向呈阶梯式,阶梯高度为5 cm。凹口堰与竖缝组合式隔板在阶梯以上高度均为65 cm,凹口堰宽20 cm, 深25 cm,竖缝宽10 cm。三维流速由 SonTek 公司的 Micro ADV 量测,流量由出流段的矩形堰测读。

鱼道水槽坐标系定义如图1所示,坐标原点位于水池上游组合式隔板右下角,沿水槽纵向设为 x 轴,横向为 y 轴,垂向为 z 轴。竖缝采取同侧布置方式,沿垂向(z

向)取不同深度水平面(10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、44 cm、48 cm),每一水平面沿纵向(x 向)取多条横线(5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、30 cm、50 cm、70 cm、90 cm、110 cm、130 cm、150 cm、160 cm、165 cm、170 cm、175 cm),在每条横线(y 向)上布设多个测点(5 cm、7.5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、24 cm、28 cm、32 cm、36 cm、40 cm、45 cm、50 cm、52.5 cm、55 cm、57.5 cm)。试验流量Q=49.7 L/s,相应的水池断面平均流速U=15.9 cm/s。以3 号水池作为试验水池,水池长L=180 cm,水池宽B=60 cm,池内水深H=52 cm。定义z=0~20 cm为水池底层,z=20~40 cm为水池中层,z=40~52 cm为水池表层。工作段水池水位采用自动水位测量系统实时量测。





### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 三维时均流速

#### 2.1.1 纵向流速

水池前部纵向流速沿横向分布如图 2(a) 所示,从图中可以看出,表层 z = 48 cm 由于受到凹口堰跌落射流的影响,凹口堰附近纵向流速较大,其他深度的纵向流速沿横向分布具有壁面射流流速分布的特征。平面壁面射流分布规律如图中实线所示,可表示为

$$\frac{u}{U} = 11 \left( 1 - \frac{y}{B} \right)^{1/7} \operatorname{erfc} \left[ 2.8 \left( 1 - \frac{y}{B} \right) \right]$$
(1)

式中: u 为纵向流速, cm/s。





图 2(b) 为水池后部纵向流速沿横向分布,由图可见,相对于水池前部,凹口堰对表层水流的影响明显

小于水池前部,图中实线为壁面射流,可表示为

$$\frac{u}{U} = 6\left(1 - \frac{y}{B}\right)^{1/7} \operatorname{erfc}\left[2\left(1 - \frac{y}{B}\right)\right]$$
(2)

2.1.2 横向流速与垂向流速

图 3 为水池横向流速沿横向分布,除表层外,其他深度的试验点可拟合为

$$\frac{v}{U} = -11.82\left(\frac{y}{B}\right)^4 + 10.64\left(\frac{y}{B}\right)^3 + 8.1\left(\frac{y}{B}\right)^2 - 7.53\left(\frac{y}{B}\right) + 0.11$$
(3)

式中:v为横向流速, cm/s。

从图中可以看出,除堰流区表层外,水池后部横向流速基本为负值,表明水流受隔板阻挡形成冲击射流,往远离竖缝的方向流动,从而形成回流。水池垂向流速沿横向分布如图4所示,垂向流速可拟合为

$$\frac{w}{U} = 2.51 \left(\frac{y}{B}\right)^2 - 2.54 \left(\frac{y}{B}\right) + 0.15$$
(4)

式中: w 为垂向流速, cm/s。



图 3 横向流速沿横向分布(x = 175 cm) Fig. 3 Transverse distribution of transverse velocity



Fig. 4 Transverse distribution of vertical velocity

#### 2.1.3 最大纵向流速衰减规律

三维紊动射流按其最大速度衰减率可分为3个明显不同流动区域,即势流核心区、特征衰减区和径向型 衰减区,可表示成幂函数形式:

$$\frac{u_{\rm m}}{U} \propto \left(\frac{x}{R}\right)^{-n} \tag{5}$$

式中: $u_m$ 为任意 x 处的最大流速, cm/s; R 为出流孔水力半径, cm; n 为衰减指数。

不同深度最大流速沿程衰减如图 5 所示,依照式
(5), *x*/*R* 在 0~10 内可拟合为一条直线, *x*/*R*>10 可拟
合为

$$\frac{u_{\rm m}}{U} = 23 \left(\frac{x}{R}\right)^{-0.616} \tag{6}$$

与平面自由壁面射流对比,组合式鱼道的壁面射流 区存在势流核心区和特征衰减区,但未出现径向型衰减 区,且特征衰减区的表层流速衰减相对缓慢,主要是由 壁面射流卷吸所致。

#### 2.2 紊动强度



图 5 最大流速沿程衰减

#### Fig. 5 Decay of the maximum velocity along flow direction

紊动强度是表征流速脉动强弱的一个特征量,可表示为

$$T_i = \frac{\sqrt{u_i'^2}}{U} \tag{7}$$

式中: T<sub>i</sub>为 i 方向的量纲一紊动强度; u'<sub>i</sub>为 i 方向的脉动流速; "—"表示时均值。

图 6(a)为纵向紊动强度沿横向分布,由图可见,纵向紊动强度在堰流区较大,其他区域则较平缓。由于凹口堰跌落射流流速较大,卷吸周围流体和剧烈掺混,致使堰流区表层的紊动强度较大。横向紊动强度沿横向分布如图 6(b)所示,从图中可以看出,水池中部横向紊动强度为中间大两边小,呈上凸型分布。



图 6 紊动强度变化

Fig. 6 Variation in turbulence intensity

#### 2.3 雷诺应力

雷诺应力的变化取决于紊流的扩散、产生、耗散及应力应变的综合效应。相对雷诺应力可表示为

$$\eta_{ij} = -\frac{\overline{u'_i u'_j}}{U^2} \tag{8}$$

式中: $\eta_{ii}$ 为 ioj 面上的相对雷诺应力; $u'_{i}$ 为 j 方向的脉动流速。

水平面(z = 48 cm)上雷诺应力( $\eta_{xy}$ )沿横向分布与纵剖面(y = 32 cm)上雷诺应力( $\eta_{xz}$ )沿程变化如图 7 所示,由图可见,水池前部堰流区和竖缝壁面射流区表层的雷诺应力较大,且堰流区左右两侧雷诺应力方向相反,中部和后部的雷诺应力相对较小。堰流区表层前部的雷诺应力明显比中、后部大,中、底层则基本沿程不变,表明凹口堰跌落射流对表层雷诺应力影响较大,主要是由跌落射流剧烈紊动掺混所致。



图 7 雷诺应力变化

Fig. 7 Variation in Reynolds stress

#### 2.4 自相关系数

流场中某一特征点不同时段 $\tau$ 的相关系数,称为该点的自相关系数 $R_L$ ,可表示为

)

$$R_{L}(\tau) = \frac{\overline{u'(t)u'(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{u'^{2}(t)}} \sqrt{\overline{u'^{2}(t+\tau)}}}$$
(9)

式中:u'(t)为特征点t时刻的纵向脉动流速; $u'(t + \tau)$ 为特征点 $t + \tau$ 时刻的纵向脉动流速。

水池中部水流特性对鱼类的溯游有着重要影响,因此,分析水池中部表层不同区域的自相关系数变化具 有重要意义。水池中部表层不同区域自相关系数如图8所示。从图中可以看出,竖缝壁面射流区的自相关系 数相对于堰流区略小,但周期更短,表明竖缝壁面射流区的涡旋变化较快,涡旋之间的相关性比堰流区差。



图 8 自相关系数

Fig. 8 Auto-correlation coefficient

#### 2.5 紊动尺度

对自相关系数进行时间积分可以得到相应的积分时间尺度  $\Lambda_L$ , 以衡量紊流场中不同涡旋的平均尺度, 可表示为

$$\Lambda_{L}(\tau) = \int_{0}^{\tau} R_{L}(\tau) \,\mathrm{d}\tau \tag{10}$$

图 9 为不同区域积分尺度变化情况,从图中可以看出,堰流区的积分尺度远大于竖缝壁面射流区,且随时间呈不断增大的趋势,表明在堰流区存在较大尺度的涡旋结构。



Fig. 9 Variation in integral scale

将自相关系数对时间求二次导数可以得到相应的微分时间尺度 $\lambda_L$ ,表征引起脉动流速当地变化的微小 涡旋平均大小的一种度量,可表示为

$$\lambda_L(\tau) = \frac{1}{\tau_L^2} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 R_L}{\partial \tau^2}$$
(11)

图 10 为不同区域微分尺度变化情况,从图中可以看出,竖缝壁面射流区的微分尺度明显比堰流区微分 尺度大,意味着竖缝壁面射流区的微小涡旋比堰流区多。竖缝壁面射流区大部分都是一些微小的涡旋,而堰 流区的涡旋尺度则明显比竖缝壁面射流区大。



Fig. 10 Variation in micro-scale

### 3 结 论

通过声学多普勒测速仪实测溢流堰与竖缝组合式鱼道的三维瞬时流速,得到以下主要结论:

(1) 鱼道水池内有两股水流相互作用影响,纵向流速起主导作用。

(2) 堰流区的跌落射流对紊动强度和雷诺应力都有较大的影响,紊动强度和雷诺应力均在此处出现峰值,这种紊流结构有助于吸引具有跳跃习性的鱼类过堰。

(3) 堰流区易于产生大尺度涡旋,竖缝壁面射流区则生成许多小尺度涡旋。

(4)相比于单一式鱼道,溢流堰与竖缝组合式鱼道水流流态受凹口堰跌落射流和竖缝壁面射流共同作用,呈现出复杂的三维紊流结构。

#### 参考文献:

- [1] 陈求稳,张建云,莫康乐,等.水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J].水科学进展,2020,31(5):793-810.
   (CHEN Q W, ZHANG J Y, MO K L, et al. Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5):793-810. (in Chinese))
- [2] 曹庆磊,杨文俊,周良景. 国内外过鱼设施研究综述[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 39-43. (CAO Q L, YANG W J, ZHOU L J. Review on study of fishery facilities at home and abroad[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(5): 39-43. (in Chinese))
- [3] BATES K. Fishway guidelines for Washington State[R]. Washington: Department of Fish and Wildlife, 2000.
- [4] 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.
- [5] 孙双科,邓明玉,李英勇.北京市上庄新闸竖缝式鱼道的水力设计研究[C]//第三届全国水力学与水利信息学大会论文集.南京:河海大学,2007:357-362.(SUN S K, DENG M Y, LI Y Y. Hydraulic research on the layout of vertical slot fishway in Shangzhuang Gate[C]// Proceedings of the 3rd National Conference on Hydraulics and Hydraulic Informatics. Nanjing: Hohai University, 2007: 357-362. (in Chinese))
- [6] 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. (DONG Z Y, FENG Y P, ERVINE A. An experimental study of hydraulic characteristics and fish test in vertical slot fishway to one side[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 121-125. (in Chinese))
- [7] 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.
   (DONG Z Y, FENG Y P, ERVINE A. An experimental study of hydraulic characteristics and fish test in vertical slot fishway from side to side[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 126-130. (in Chinese))
- [8] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, MAINALI A. Plunging and streaming flows in pool and weir fishways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(8): 939-944.

- [9] KIM J H. Hydraulic characteristics by weir type in a pool-weir fishway[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(3): 425-433.
- [10] ENDERS E C, BOISCLAIR D, ROY A G. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (Salmo salar) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, 60(9): 1149-1160.
- [11] LIAO J C, BEAL D N, LAUDER G V, et al. Fish exploiting vortices decrease muscle activity [J]. Science, 2003, 302 (5650): 1566-1569.
- [12] LIU M N, RAJARATNAM N, ZHU D Z. Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(8): 765-777.
- [13] LACEY R W J, 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 and Applications, 2012, 28(4): 429-443.
- [14] 王琲,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.(WANG B, YANG W J, CHEN H. Study on numerical simulation of hydraulic characteristics of combined fish way consisted of weir and vertical slot[J]. Yangtze River, 2013, 44(11):81-84. (in Chinese))
- [15] 刘鹄,程文,任杰辉,等. 竖缝与孔口组合式鱼道流动特性模拟研究[J]. 水力发电学报,2017,36(6):38-46. (LIU H, CHENG W, REN J H, et al. Simulation of flows in fishways combined with a vertical slot and orifice plates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(6):38-46. (in Chinese))
- [16] MASAYUKI F, MAI A, MATTASHI I. 3-D Flow simulation of an ice-harbor fishway [C] // Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Nanjing: Hohai University, 2008: 2241-2246.

## An experimental study of turbulent structures in combined fishway of overflow weir and vertical slot\*

DONG Zhiyong, YU Junpeng, HUANG Zhou

(College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract**: Three-dimensional instantaneous flow velocity was measured by an Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) in a combined fishway with an overflow notched weir, and a vertical slot with an identical layout. Turbelent structures, such as time-averaged velocity, turbulence intensity, Reynolds stress, correlation function, and turbulence scales in the fishway pool were analyzed based on the jet mechanics and statistical theory of turbulence. The experimental results showed that flow patterns in the combined fishway pool of the overflow weir and the vertical slot, exhibited complex three-dimensional turbulent structures. The effects of the overflow weir on turbulence intensity and Reynolds stress were more considerable, relative to the vertical slot, especially in the pool surface layer. But correlation of the eddy structures in the weir flow region was better than that in the wall jet region, due to vertical slot. Also there were larger eddy structures in the weir flow region, whereas the eddy size in the wall jet region was smaller. Compared with the single fishway, turbulent structures in the combined fishway were more complicated. These studied results can provide an important guide for optimizing fishway design and rehabilitating fish habitat.

Key words: turbulent structures; overflow weir; vertical slot; combined fishway

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51779225).