DOI:10.15928/j.1674-3075.201902270049

异侧布置竖缝式鱼道紊流结构试验研究

董志勇,江录兵,毛 斌,陈欣宇

(浙江工业大学土木工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要:鱼道是辅助鱼类克服障碍物,实现产卵洄游、索饵洄游和越冬洄游的通道。全球目前已建鱼道中,鱼类能够溯游通过的鱼道尚不足50%,大多数鱼道的水力设计仅考虑平均流速,忽略了鱼道内的紊流结构,探究鱼道的水力特性尤其是紊流结构,对改进其设计具有重要的指导意义。通过在大比尺水槽模型中试验研究异侧布置竖缝式鱼道的紊流结构,利用声学多普勒测速仪(ADV)实测竖缝式水池内每一点的三维瞬时流速,剖析流场的三维时均流速分布、流动特征、旋涡特性、纵向和横向紊动强度分布、不同水平面的雷诺应力分布等,考虑了两种典型流量($Q_1=20.62$ L/s,$Q_2=30.75$ L/s)和3个特征水平面($h/3$,$h/2$和$2h/3$),提出了三维流速分布的半理论半经验公式、流场矢量图及各点的旋度,并与自由壁面射流进行比较。结果表明,异侧布置竖缝式鱼道前半池内纵向流速具有壁面射流的特征,后半池由于受下游隔板的阻挡则偏离壁面射流规律;水池内存在顺时针方向的水平旋涡,其旋度随流量的增大而增强;前半池壁面射流区的紊动强度存在峰值区,后半池的紊动强度峰值区由水槽左侧移至右侧;壁面射流区的雷诺应力变幅较大,而在旋涡区则较小,有利于洄游鱼类在鱼道上溯和歇息。

关键词:竖缝式鱼道;水平旋涡;三维流速分布;紊动强度;雷诺应力

中图分类号:TV131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)01-0129-08

我国江海鱼类资源丰富,洄游性鱼类众多。为了打通鱼类洄游通道和维持生物多样性,通常在挡潮闸、排水闸、分洪闸、大坝等水利枢纽中设置鱼道,以达到水利工程与生态环境的和谐发展。鱼道是一种低水头水工建筑物,可使鱼类克服障碍物,实现产卵洄游、索饵洄游和越冬洄游等。已有研究表明,在全球已建成的鱼道中,鱼类能够溯游通过的鱼道尚不足50%(Clay, 1995)。英国鱼类监测资料显示,在过去30年间,大西洋鲑的洄游率急剧下降,并对鱼道的有效性提出警告(Parrish et al,1998)。因此,进一步研究鱼道的水力特性,尤其是鱼道的紊流结构,对改进其设计具有重要的指导意义。

鱼道可分为水池型、丹尼尔(Denil)型、仿自然旁通型等,几乎所有型式鱼道的设计均基于消能原理,以降低水流速度,使鱼类易于上溯。水池型鱼道的基本原理是由一定数量的隔板(或称隔墙)把鱼道水槽分隔成一系列相互连通的水池,将上下游总水头化整为零,分解为较小水头以降低过鱼孔的流速,造就一个鱼群能在其中溯游的水道,其中隔板用以控制鱼道水池流态,创造鱼类既能上溯又能歇息的栖息环境。通常,按照过鱼口的形状及在隔板上的位置,水池型鱼道可分为竖缝式、堰流式、孔口式及其组合式。竖缝式过鱼口在隔板上从顶部到底部为一条竖缝,水流通过竖缝下泄,可适应水位的变化。Rajaratnam等(1986)对竖缝式鱼道的均匀流和非均匀流特性进行了试验研究,得出无量纲流量与相对水深的关系;Wu等(1999)则认为通过竖缝的流动可看作平面射流;Guiny等(2005)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和数值模拟;孙双科等(2007)对北京市上庄新闸竖缝式鱼道的水力特性进行过模型试验研究;董志勇等(2008a)在大比尺鱼道模型中对同侧竖缝式鱼道的水力特性进行了较为系统的试验研究,指出同侧竖缝式鱼道的不足及其改进措施;此外,还试验研究了异侧竖缝式鱼道的主流轨迹、主流速度的沿程变化规律等(董志勇等,2008b)。迄今为止,大多数鱼道的水力设计只考虑平均流速,忽略了鱼道内的紊流结构。

已有研究表明,鱼类可用内耳、侧线和神经丘来察觉紊动(Northcutt, 1997)。关于紊流对鱼类习性、能量和分布影响的研究表明,在紊流形态中,鱼类可从中受益,Liao等(2003)研究认为成年彩虹鲑在障碍物形成的稳定脱落旋涡中游动时,可从这些旋涡能量中受益,这意味着如果鱼类游动恰当,可减少其在紊流游动中的能量支出。类似的观测结果表

收稿日期:2019-02-27

基金项目:国家自然科学基金(51779225)。

作者简介:董志勇,1962年生,男,教授,博导,主要从事工程水力学和生态水力学教研工作。E-mail: dongzy@zjut.edu.cn

明，成年红大马哈鱼在溯河产卵洄游途中，利用回流区以使其能量支出减到最小（Hinch & Rand，1998）；Herskin & Steffensen（1998）研究认为，鱼类成群溯游时，可从领头鱼产生的旋涡中受益，如黑鲈成群溯游时，在群体后部游动的鱼，其尾鳍拍打频率比在鱼群前部游动时降低9%～14%，能量支出减少9%～23%。若鱼道中水流能形成这种生态友好的流动结构，则大大有利于鱼类溯游。有学者试验研究过竖缝式鱼道的水力特性，但在宽竖缝式（缝宽比0.375）鱼道中用微型旋桨流速仪测得流场的一维时均流速（董志勇等，2008a，2008b）。本文则在窄竖缝式（缝宽比0.167）鱼道中，用先进的声学多普勒测速仪（ADV）量测流场内测点的三维瞬时流速，并对其紊流结构进行剖析。

1 材料与方法

1.1 鱼道结构

试验在浙江工业大学港航实验室的鱼道水槽中进行。水槽主要由3段组成，即入流段、工作段及出流段。水槽长20.0 m，宽0.6 m，深1.0 m，隔板间距为0.9 m，竖缝宽度为0.1 m，工作水池长宽比为1.5，缝宽比0.167。入流段由钢板制成，工作段分为4个水池，其两侧为钢化玻璃，出流段两侧及鱼道隔板为聚乙烯板，如图1和图2所示。

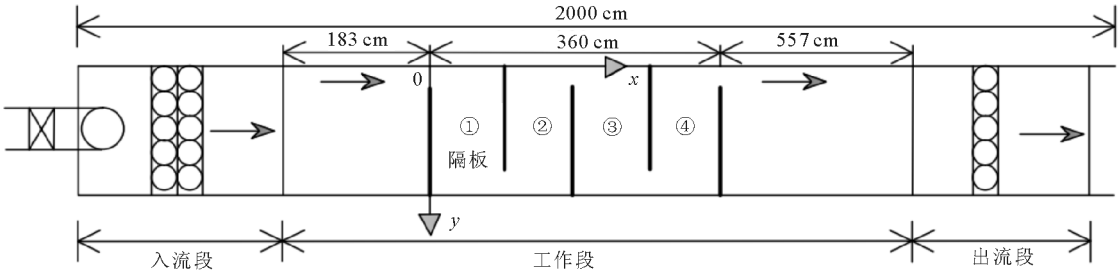

图1 竖缝式鱼道的平面结构

Fig.1 Sketch map of the vertical slot fishway

图2 鱼道水槽试验装置

Fig.2 Fishway flume used in this study

1.2 坐标定义

三维流速由Sontek声学多普勒测速仪（Micro ADV）量测及分析，流量由水槽尾部矩形堰测读，水位由SinfoTek自动水位测量系统读取，测点采用三维地形测车系统定位并且搭载ADV测速仪进行量测。水槽坐标系的定义如图1所示，沿水槽纵向设为x轴，横向为y轴，铅垂方向为z轴，相应的流速分别为u，v，w，原点O位于竖缝左上角。

1.3 试验设计

本次试验组次的安排为实测2种流量，即：$Q_1=20.62$ L/s，$Q_2=30.75$ L/s，每种流量取3个不同水平面（$2h/3$、$h/2$和$h/3$，h为水池水深），在每一水平面上量测17条横线（x =5，10，15，20，25，30，35，40，45，50，55，60，65，70，75，80，85 cm），每条横线上布设23个测点，间距分别为1 cm和5 cm。调节的流量范围为11.0～31.0 L/s，相应的水池水深为48.0～63.0 cm。

2 结果与分析

2.1 三维时均流速

鱼道水流通过竖缝在水池内形成壁面射流。对于平面自由壁面射流，可用Glauert（1956）壁面射流理论计算，但该理论的推求与计算较为复杂，应用不便。为此，本文基于Glauert壁面射流理论的基本原理，提出平面自由壁面射流的流速分布为：

$$\frac{u}{U}=1.5\left(\frac{y}{B}\right)^{1/7}\mathrm{erf}c\left[1.2\left(\frac{y}{B}\right)\right] \quad ①$$

式中：u为纵向流速；U为竖缝断面平均流速；y为沿水池横向坐标；B为水槽宽度。

图 3 绘出两种不同流量下鱼道水池各条横线的无量纲时均流速分布。由图 3 可见，各条横线上试验点据的规律性均较好，所有点据基本上聚集在同一条曲线上。

图中靠近下游隔板处的试验点据偏离自由壁面射流分布规律，这是因为竖缝式鱼道壁面射流是在受限空间内扩散，受下游隔板的阻挡，迫使壁面射流转向下游异侧竖缝的缘故。

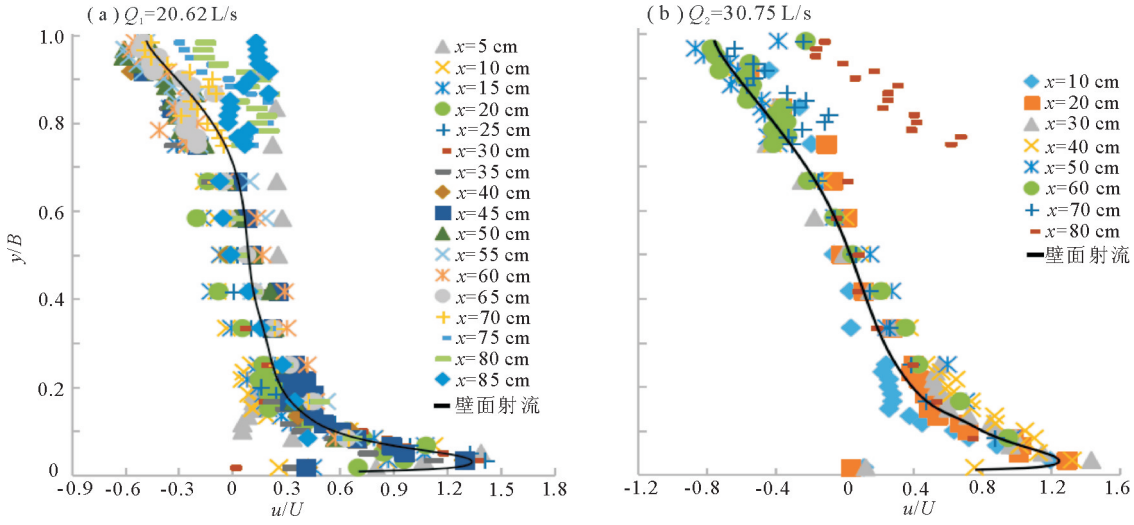

图 3　纵向流速沿横向分布

Fig.3　Transverse distribution of longitudinal velocity

不同水平面（$h/3$，$h/2$，$2h/3$）、不同流量（20.62 L/s，30.75L/s）的垂向流速 w 沿垂向的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出，在壁面射流区存在一定的相似性，故可将竖缝水流视为平面二维流动；垂向流速沿纵向的变化主要位于 $w/U=-0.3\sim0.1$ 区间内，如图 5 所示。垂向流速沿横向分布如图 6 所示，垂向流速呈马鞍形分布，除了靠近边壁和竖缝外，大部分区域的垂向流速可用下式拟合：

$$\frac{w}{U}=\frac{1}{20}\sin\left[\frac{5}{4}\pi\left(\frac{y}{B}-1\right)\right] \quad ②$$

式中：w 为垂向流速；U 为竖缝断面平均流速；y 为沿水池横向坐标；B 为水槽宽度。

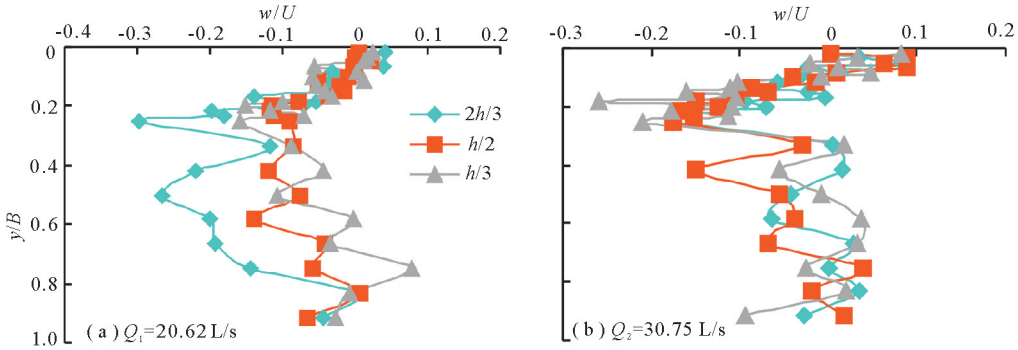

图 4　垂向流速沿水深分布

Fig.4　Vertical velocity distribution along flow depth

异侧布置竖缝式鱼道水池内壁面射流受下游隔板的阻挡而转向，横向流速 v 沿程变化如图 7 所示，并可近似拟合为：

$$\frac{v}{U}=\left(\frac{x}{L}\right)^{2.7}+0.2 \quad ③$$

式中：v 为横向流速；U 为竖缝断面平均流速；x 为沿水池纵向坐标；L 为水槽长度。

2.2　流动特征与旋涡特性

竖缝式水池内实测流速矢量图如图 8 所示。可见在水槽内形成顺时针方向旋转的水平旋涡。水流从竖缝进入水池后形成壁面射流，卷吸周围水体，使其横断面不断扩展，由于水槽内上、下游竖缝交错布置，再往下游由于受到隔板的阻挡而转向，偏离壁面射流区，在下游隔板竖缝处形成射流冲击区和两侧壁面射流区，从试验过程中可以观测到，一部分水流通过隔板竖缝流入下游水池，另一部分水流则在水池内循环形成水平旋涡，该旋涡的存在有利于鱼道内溯游鱼类歇息。

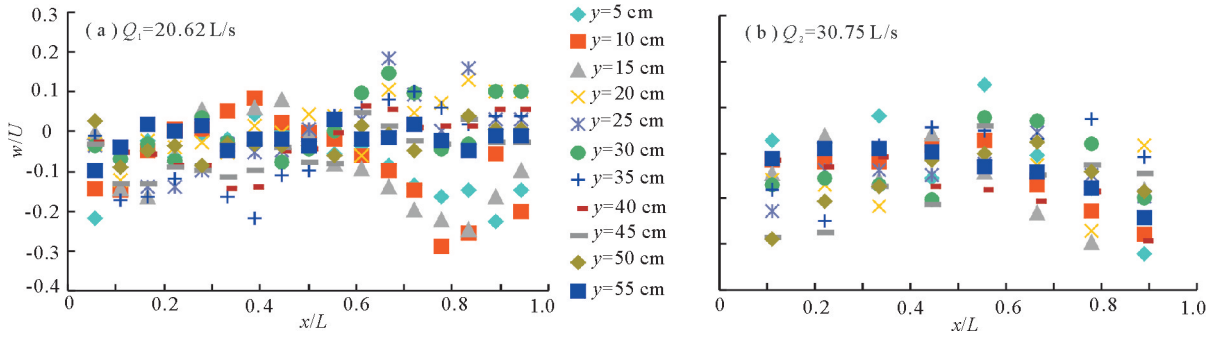

图5 垂向流速沿纵向分布

Fig.5 Vertical velocity distribution along flow direction

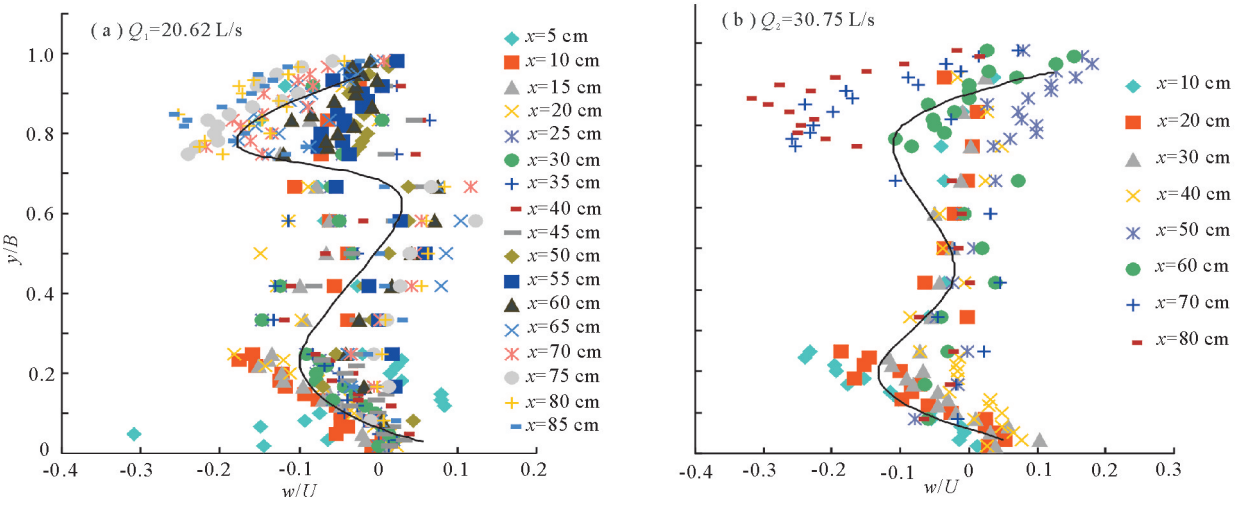

图6 垂向流速沿横向分布

Fig.6 Transverse distribution of the vertical velocity

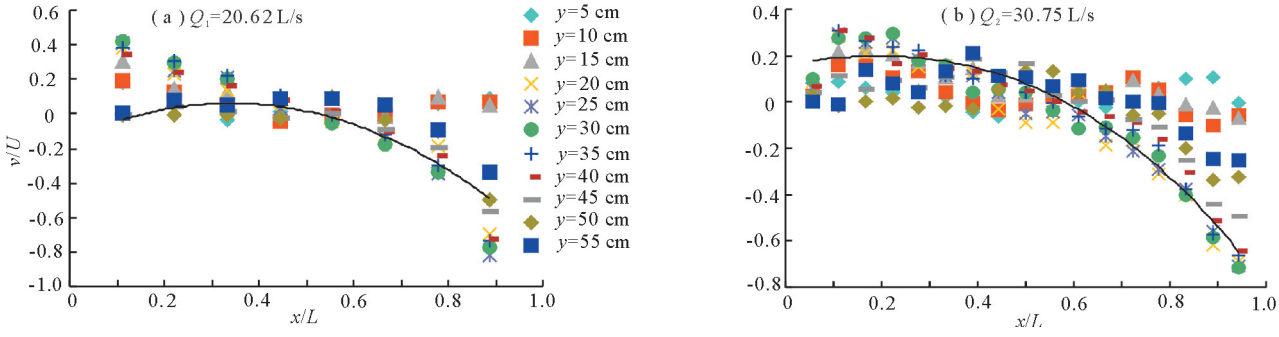

图7 横向流速沿沿程变化

Fig.7 Variation of transverse velocity along flow direction

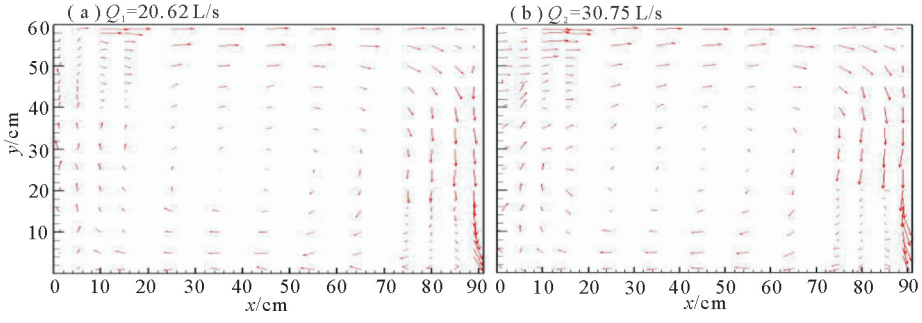

图8 水池 $h/2$ 水平面上流速矢量

Fig.8 Velocity vectors on $h/2$ horizontal plane in the pool

水池内水平旋涡的旋度（S）可定义为横向流速（v）与纵向流速（u）之比，即 $S=\frac{v}{u}$　④

两种流量下水平旋涡的旋度分别列于表 1 和表 2 中。不难看出，位于水池两侧的旋度接近于零，中心部分则较大，并随流量的增大而增强。这是因为鱼道水池两侧水流主要为纵向流动，旋转作用小，中心部分则相反。

表 1　流量 20.62 L/s 时 $h/2$ 水平面上旋涡各点旋度值

Tab.1　Rotation value at each point in vortex zone on $h/2$ horizontal plane for $Q_1=20.62$ L/s

x/cm	y/cm										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
10	−0.25	−0.53	−1.08	−1.85	25.45	64.51	−4.51	17.74	0.95	0.03	0.28
20	−0.08	−0.27	−1.03	12.19	−1.48	2.65	−4.80	3.41	0.05	0.45	0.17
30	0.08	−0.02	−0.64	0.76	0.34	2.20	1.45	4.83	0.47	−2.03	0.23
40	0.20	0.18	−0.50	0.72	−0.23	1.05	0.51	0.38	0.03	0.03	0.07
50	0.04	0.04	−0.45	−3.60	0.07	−0.98	−0.13	0.04	0.24	0.43	0.15
60	0.04	−0.02	−0.20	1.88	−2.52	−2.13	−0.63	−0.38	0.02	−0.05	−0.02
70	−0.40	−0.64	−2.00	3.39	2.97	3.49	−1.59	−0.46	−0.41	0.03	0.06
80	0.59	−0.74	−0.22	14.40	10.56	−52.08	−8.78	−2.62	−1.50	−0.58	−0.32

表 2　流量 30.75 L/s 时 $h/2$ 水平面上旋涡各点旋度值

Tab.2　Rotation value at each point in vortex zone on $h/2$ horizontal plane for $Q_2=30.75$ L/s

x/cm	y/cm										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
10	−0.67	−0.74	−1.90	−8.83	−4.71	−5.69	−7.77	−28.56	0.16	−0.13	0.01
20	−0.14	−0.35	−1.11	−3.60	−3.17	−3.75	6.26	0.86	0.14	−0.04	0.12
30	0.11	−0.28	−0.28	−0.40	−1.04	−18.78	1.44	0.15	−0.14	0.01	0.07
40	0.04	0.16	−0.15	−0.42	2.93	0.93	0.44	0.06	−0.01	0.03	0.05
50	0.20	−0.16	−0.35	0.44	0.08	−0.29	0.00	0.33	−0.01	0.16	0.22
60	0.01	−0.10	0.17	0.53	−4.07	−6.23	−0.49	−0.29	−0.23	0.05	0.02
70	0.06	−0.16	−0.39	−1.26	5.14	−4.48	−2.20	−1.01	−0.38	−0.19	−0.11
80	0.53	0.38	0.08	−53.12	5.32	−24.17	−11.63	−5.83	−1.58	−0.85	−0.36

2.3　紊动强度

纵向和横向紊动强度可分别表示为：

$$T_u=\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U}\quad ⑤$$

$$T_v=\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U}\quad ⑥$$

式中：T_u 为纵向相对紊动强度；T_v 为横向相对紊动强度；u' 和 v' 分别为纵向和横向脉动流速。

以前半水池特征断面 $x=20$ cm 和后半水池特征断面 $x=70$ cm 为例，分析两种流量的紊动强度分布，如图 9 和图 10 所示。前半水池壁面射流区的紊动强度存在峰值区，而在壁面射流区以外的紊动

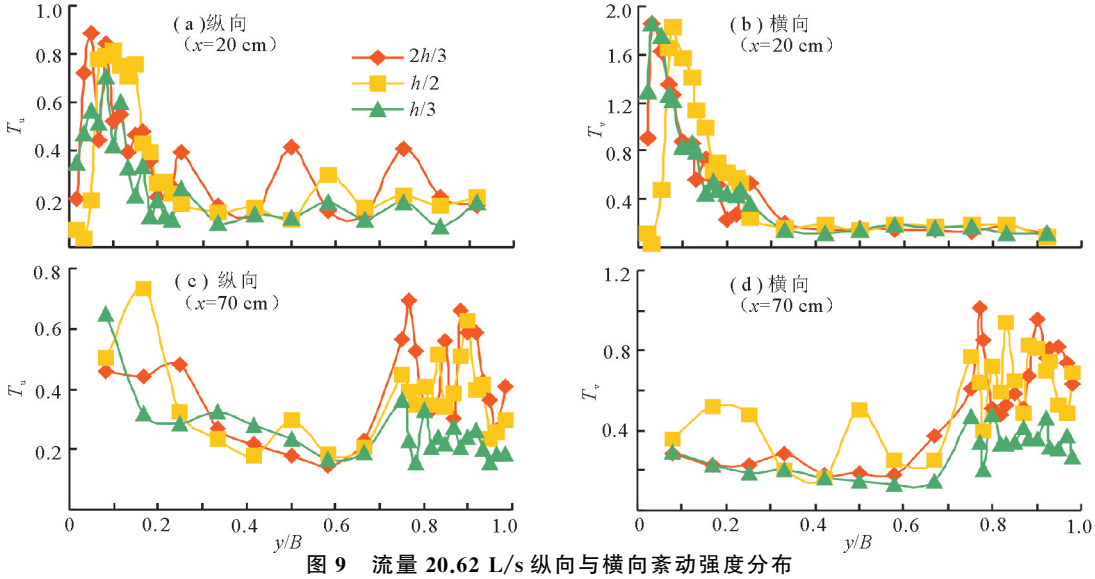

图 9　流量 20.62 L/s 纵向与横向紊动强度分布

Fig.9　Longitudinal and transverse distributions of turbulent intensity for $Q_1=20.62$ L/s

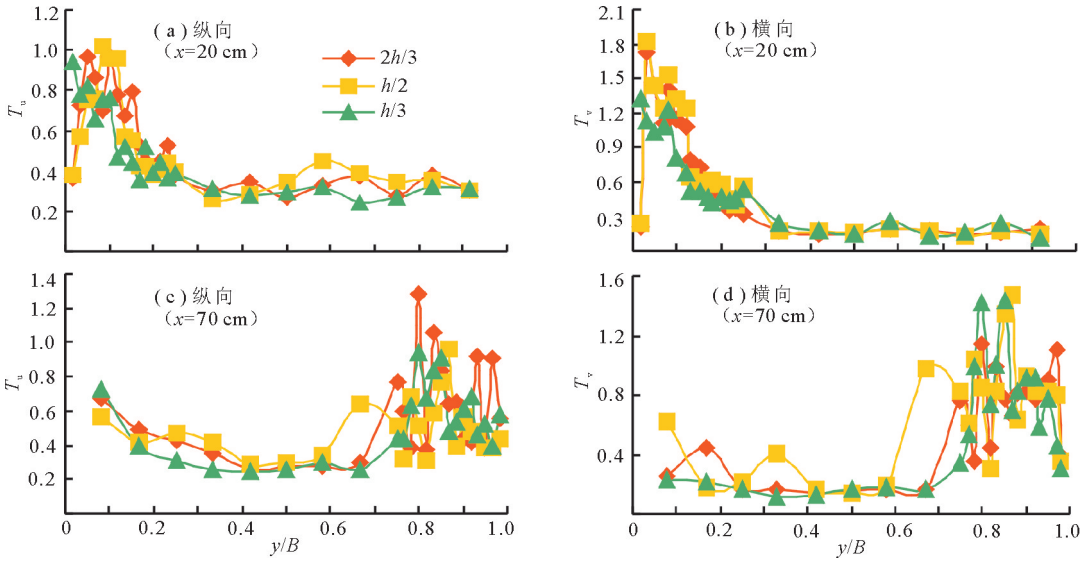

图10　流量30.75 L/s纵向与横向紊动强度分布

Fig.10　Longitudinal and transverse distributions of turbulent intensity for Q_2=30.75 L/s

强度则比较小并趋于平缓；后半水池紊动强度峰值区则由水池左侧移至右侧，这意味着在下游竖缝处的射流冲击区和壁面射流区的紊动强度仍存在峰值区。对于不同流量下的同一断面，紊动强度分布基本相似，当流量增大时，紊动强度也随之变大。不同水平面上的紊动强度分布存在相似性。纵向与横向紊动强度的变化规律基本一致，但在相同工况下壁面射流区横向紊动强度更大一些。

2.4　雷诺应力

雷诺应力(η)也是分析水流紊动对鱼类溯游行为影响的一个重要指标，可表示成：

$$\eta=-\frac{\overline{u'v'}}{U^2} \quad ⑦$$

取前半水池特征断面 x=20 cm 和后半水池特征断面 x=70 cm，从特征断面的雷诺应力分布可以看出(图11)，在水池前半段壁面射流区的雷诺应力变化幅度较大，但在壁面射流区以外的旋涡区，其雷诺应力在不同水平面上均趋于零；而在后半水池壁面射流区的雷诺应力变化幅度则逐渐增大。相同流量下，不同水平面上雷诺应力分布趋势存在相似性；在不同流量下，随着流量的增大，雷诺应力也随之增大；后半水池雷诺应力方向与前半水池正好相反，并且后半水池的雷诺应力变动更为剧烈，这主要是因为水池后半段因隔板阻隔、竖缝出流、水平旋涡等因素造成了紊动微团在流层中的交换更加剧烈，从而导致后半水池雷诺切应力变化更为复杂。

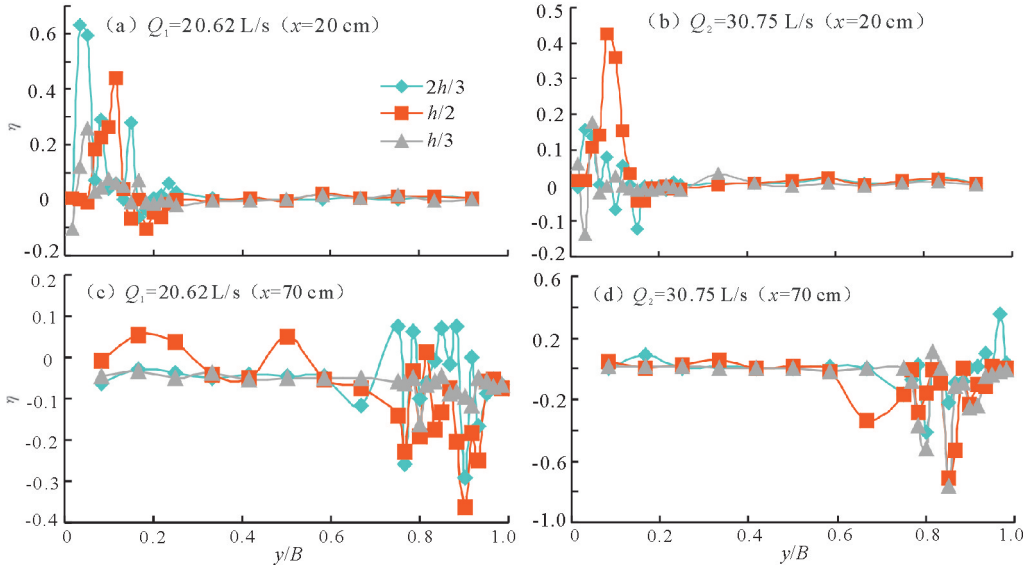

图11　雷诺应力分布

Fig.11　Reynolds stress distribution for the two velocity set

3　讨论与小结

不同流量时，不同水平面上垂向流速存在一定的相似性，因此竖缝式鱼道内水流可近似看作平面二维流动，即沿垂向的变化可以忽略，主要变化在纵向和横向。异侧布置竖缝式鱼道内水流为交错出流，壁面射流区的旋度较小，中心部分则较大。壁面射流区的紊动强度存在峰值区，有利于溯游鱼类在鱼道内感应主流上溯。

雷诺应力方程可用下式描述：

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{V_i'V_j'}\right)}_{\text{变化率}}+\underbrace{\overline{V_l}\frac{\partial\overline{V_i'V_j'}}{\partial x_l}}_{\text{对流}}=\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_l}\left[-\overline{V_i'V_j'V_l'}-\overline{\frac{p'}{\rho}\left(\delta_{jl}V_i'+\delta_{il}V_j'\right)}+\nu\frac{\partial\overline{V_i'V_j'}}{\partial x_l}\right]}_{\text{扩散}}$$
$$\underbrace{-\left(\overline{V_i'V_l'}\frac{\partial V_j}{\partial x_l}+\overline{V_j'V_l'}\frac{\partial V_i}{\partial x_l}\right)}_{\text{产生}}\underbrace{-2\nu\overline{\frac{\partial V_i'}{\partial x_l}\frac{\partial V_j'}{\partial x_l}}}_{\text{耗散}}+\underbrace{\overline{\frac{p'}{\rho}\left(\frac{\partial V_i'}{\partial x_j}+\frac{\partial V_j'}{\partial x_i}\right)}}_{\text{应力-应变}}\qquad⑧$$

由式⑧知，雷诺应力的变化主要取决于紊流的扩散、产生、耗散及应力应变的综合效应。显然，壁面射流区的雷诺应力变化幅度较大；而在旋涡区则较小，有利于鱼类在鱼道内上溯和歇息。

前半水池内纵向流速具有壁面射流的特征，可用本文提出的半理论半经验公式计算，但在后半水池，由于受下游隔板的阻挡偏离壁面射流规律；不同流量时不同水平面上垂向流速在壁面射流区存在一定的相似性，故可将竖缝水流视为平面二维流动；横向流速沿程逐渐增大，乃异侧布置竖缝式鱼道的主要特征之一。水池内存在以顺时针方向旋转的水平旋涡，该旋涡的存在有利于鱼道内溯游鱼类歇息。水平旋涡的旋度随流量的增大而增强，位于水池两侧的旋度接近于零，而中心部分则较大。前半水池位于壁面射流区的紊动强度存在峰值区，而在壁面射流区以外的紊动强度则比较小并趋于平缓；后半水池的紊动强度峰值区由水池左侧移至右侧。纵向与横向紊动强度变化规律基本一致，但壁面射流区横向紊动强度更大些。在前半水池壁面射流区的雷诺应力变化幅度较大，但在壁面射流区以外的旋涡区，其雷诺应力在趋于零，而在后半水池壁面射流区的雷诺应力变化幅度则逐渐增大。

参考文献

董志勇，冯玉平，Ervine A，2008a. 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，27(6)：121－125.

董志勇，冯玉平，Ervine A，2008b. 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，27(6)：126－130.

孙双科，邓明玉，李英勇，2007. 北京市上庄新闸竖缝式鱼道的水力设计研究[C]//2007 水力学与水利信息学进展. 南京：河海大学出版社：348－353.

Clay C H，1995. Design of fishways and other fish facilities [M]. 2nd Edition，Boca Raton：CRC Press：256.

Glauert M B，1956. The wall jet[J]. Journal of fluid mechanics，1 (1)：625－643.

Guiny E，Ervine A，Armstrong J D，2005. Hydraulic and biological aspects of fish passes for Atlantic salmon[J]. Journal of Hydraulic Engineering，ASCE，131(7)：542－553.

Herskin J，Steffensen J F，1998. Energy savings in sea bass swimming in a school-measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds[J]. Journal of Fish Biology，53 (2)：366－376.

Hinch S G，Rand P S，1998. Swim speeds and energy use of upriver-migrating sockeye salmon，role of local environment and fish characteristics[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences，55 (8)：1821－1831.

Liao J C，Beal D N，Lauder G V，et al，2003. Fish exploiting vortices decrease muscle activity[J]. Science，32：1566－1569.

Northcutt R G，1997. Evolution of gnathostome lateral line ontogenies[J]. Brain behavior and evolution，50 (1)：25－37.

Parrish D L，Behke R J，Gephard S R，et al，1998. Why aren't there more Atlantic salmon? [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences，55 (Sup.)：281－287.

Rajaratnam N，Van der Vinne G，Katopodis C，1986. Hydraulics of vertical slot fishways[J]. Journal of Hydraulic Engineering，ASCE，112(10)：909－927.

Wu S，Rajaratnam N，Katopodis C，1999. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering，ASCE，125(4)：351－359.

（责任编辑　万月华）

An Experimental Study of Turbulent Flow Structures in a Vertical Slot Fishway with Staggered Slots

DONG Zhi-yong, JIANG Lu-bing, MAO Bin, CHEN Xin-yu

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

Abstract: Fishways are constructed to help fish overcome obstacles as they migrate to spawn, feed or overwinter. However, data indicates that fishways in which most fish successful pass make up no more than half of the world's fishways. Up to now, the hydraulic design of fishways has tended to focus on mean velocity and neglected the turbulent flow generated in fishways. Research has shown that fish can detect turbulence by the inner ear, lateral line and nerve hillock. Thus, when research is conducted to improve fishway design, the turbulent structures produced in the fishway must be considered. In this study, the turbulent structures produced in a staggered vertical slot were studied in a large-scale model of a fishway flume. Three-dimensional instantaneous velocities at each point were measured using Acoustic Doppler Velocimetry (ADV). The three-dimensional time-averaged velocity distribution, flow characteristics, vortex behavior, the intensity distribution of longitudinal and transverse turbulence, and the Reynolds stress distribution on three horizontal planes ($h/3$, $h/2$ and $2h/3$) were analyzed at two typical flow rates ($Q_1=20.62$ L/s and $Q_2=30.75$ L/s). Semi-theoretical and semi-empirical formulas of the three-dimensional velocity distribution, a velocity vector chart and the rotation index at each point in the flow field were developed, and a comparison was made with a free wall jet. The experimental results show that the longitudinal velocity was influenced primarily by the wall jet in the first semi-pool of the staggered vertical slot fishway, but deviates from the wall jet pattern as a result of obstruction by the lower baffle of the second semi-pool. A clock-wise horizontal vortex is produced, and its rotation index increases with flow rate. Turbulence intensity peaked in the first semi-pool and the peak turbulence moved from left to right in the second semi-pool. The Reynolds stress amplitude is larger in the wall jet zone and smaller in the vortex zone, thus assisting migratory fish as they swim upstream and providing rest within the fishway.

Key words: vertical slot fishway; horizontal vortex; three-dimensional velocity distribution; turbulence intensity; Reynolds stress