



蚌埠闸鱼道池室水力特性数值模拟

陈莹颖¹, 祝 龙¹, 乔鑫位², 王晓刚¹

(1. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 通过建立三维紊流数学模型, 对隔板布置形式下的蚌埠闸鱼道池室水力特性进行计算, 研究池室和休息池的水流流态、流速以及竖缝最大流速。特别针对典型池室和休息池上、中、下 3 个水层, 20 个横断面, 920 个测点。并对其中 140 个测点的横向、纵向和垂向流速进行了精细化分析。还研究了池室坡度对池室水力特性的影响。研究结果表明: 1) 鱼道池室和休息池上、中、下 3 个水层的流速、流态基本一致, 水层越偏下主流流速相对越高; 2) 池室水流垂向流速很小, 水流整体呈现二维特征; 3) 休息池主流流速与池室主流流速相当(平均值仅低 3.5%), 但低流速区面积显著增大(54%); 4) 池室坡度由 1:100 变缓至 1:140, 竖缝最大流速降低了 16.9%; 5) 蚌埠闸鱼道池室坡度选为 1:100~1:120 可满足鱼类上溯需求。

关键词: 蚌埠闸鱼道; 垂直竖缝式鱼道; 设计流速; 水力特性; 池室; 休息池

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0078-06

Numerical simulation of hydraulic characteristics of fishway pools in Bengbu Sluice

CHEN Ying-ying¹, ZHU Long¹, QIAO Xin-wei², WANG Xiao-gang¹

(1.Nanjing Hydraulic Research Institute, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, Nanjing 210029, China; 2.Anhui Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: By establishing a three-dimensional turbulence mathematical model, the hydraulic characteristics of the fishway pool of Bengbu sluice with the baffle layout are calculated to study the flow pattern, velocity of the pool and the resting pool, and the maximum vertical slot velocity. In particular, the velocities of 920 measuring points in 20 cross sections of the upper, middle and lower water layers of the typical pool and resting pool are statistically analyzed, and the transverse, longitudinal and vertical velocities of 140 measuring points are finely analyzed. The influence of the slope of the pool on the hydraulic characteristics of the pool is also studied. The results show that: 1) The velocity and flow pattern of the upper, middle and lower water layers in fishway pool and resting pool are basically the same. The lower the water layer is, the higher the main flow velocity is. 2) The vertical velocity of flow in the pool is very small, and the flow presents two-dimensional characteristics. 3) The main flow velocity of the resting pool is equivalent to that of the main flow velocity of the pool (only 3.5% lower on average), but the area of the low-velocity zone is significantly increased (54% higher). 4) The slope of the pool slowed from 1:100 to 1:140, and the maximum velocity of vertical joint decreased by 16.9%. 5) The slope of the fishway pool of Bengbu Sluice is recommended to be 1:100~1:120 to meet the demand of fish upward tracking.

Keywords: fishway in Bengbu Sluice; vertical slot fishway; design velocity; hydraulic characteristics; ordinary pool; resting pool

收稿日期: 2021-09-07

作者简介: 陈莹颖(1989—), 女, 硕士, 工程师, 从事通航水力学研究。

蚌埠闸由新老泄洪闸、复线船闸和电站等组成,上游约 150 km 建有临淮岗枢纽,下游至洪泽湖 180 km 河道没有拦河建筑物。蚌埠闸上下游既有草鱼、鲢、鳙等代表性产漂流性卵鱼类分布,也有小规模产漂流性卵鱼类产卵场分布(蚌埠闸以上淮河干流有凤台产卵场,下游有五河产卵场)。已建蚌埠闸利用闸坝泄流过鱼,未设专门过鱼设施,有必要新建蚌埠闸过鱼设施,恢复淮河干流中游的连通性,促进蚌埠闸上下游间的鱼类资源交流。

竖缝式鱼道因其过鱼效率高、适应水位变化能力强等技术优势在国内外得到了广泛的工程应用^[1]。上层鱼类和下层鱼类都可以适应垂直竖缝式鱼道,更利于上下游各种鱼类的交流^[2]。蚌埠闸鱼道的设计水位变幅相对较大,综合考虑工程特性和过鱼对象的生态习性,蚌埠闸鱼道采用垂直竖缝式鱼道结构形式。

研究发现,采用紊流数学模型能较好地模拟鱼道水流结构^[3-4], RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型应用于鱼道水流模拟已较成熟^[5]。本文通过建立蚌埠闸鱼道池室三维 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型,多测点精细化研究分析不同水层池室和休息池的水流流态、流速、竖缝最大流速以及池室坡度对池室水力特性的影响等,为蚌埠闸鱼道的设计和建设提供数据支撑和技术参考。

1 鱼道设计

1.1 鱼道设计流速

蚌埠闸鱼道工程的设计流速指标为 0.6 ~ 1.0 m/s,结合工程实际,在鱼道隔板设计时控制流速指标在 0.7 m/s 左右,既能满足大个体鱼类上溯需求,又能兼顾游泳能力较弱的过鱼对象。

1.2 鱼道池室主要设计尺寸

根据蚌埠闸鱼道的过鱼对象体长、生活习性以及鱼道的设计流速要求,蚌埠闸鱼道选用单侧竖缝式鱼道,鱼道池室尺度为池室宽 2.5 m、池室长 3 m、休息池取 2 倍池长(休息池宜为平底^[6])、

竖缝宽度 0.4 m、设计水深 1.5 m。根据以往工程经验,提出一种隔板布置形式,细部尺寸见图 1。采用该垂直竖缝无翼板式隔板布置形式,蚌埠闸鱼道水流条件容易控制,消能效果较佳;当上下游水位同步变化时,较能适应水位的变幅^[7];结构简单,维护方便。

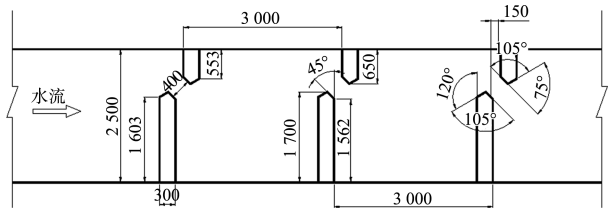


图 1 蚌埠闸鱼道一种隔板布形式平面 (单位: mm)

2 数学模型

鱼道数值计算区域长度取 73 m, 含 16 级池室和 1 个休息池, 共 17 块隔板。建立了池室坡度为 1:100 的鱼道池室数学模型, 研究不同坡度对池室水流影响时还计算了坡度为 1:120 和 1:140 时池室水力特性。休息池为平底, 休息池长度为 6 m。考虑到鱼道水深对池室流速、流态影响不大, 数学模型中池室计算水深取鱼道正常运行水深 1.5 m。

2.1 基本方程

考虑不可压缩水流流动问题, 池室三维紊流数学模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型并耦合 VOF(the volume of fluid) 技术对水流自由表面进行捕捉, 三维水流模型的控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \tag{2}$$

k 方程:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \varepsilon \tag{3}$$

ε 方程:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot G_k - G_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中： k 为紊动能 (m^2/s^2)； ε 为紊动能耗散率； t 为时间 (s)； u_i 为速度分量 (m/s)， x_i 为坐标分量； ν 为运动黏性系数 (m^2/s)； p 为修正压力 (Pa)； τ_{ij}

为应力 (Pa) 张量，定义 $\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)$ ； ρg_i 为重力体积力 (N/m^3)； $\mu_t = \rho \nu_t = \rho c_u k^2 / \varepsilon$ 为紊动动力黏性系数 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)； δ_{ij} 为 Kronecker delta 符号；经验常数 $c_u = 0.09$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.33$ ， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.42$ ； G_k 为平均速度梯度引起的紊动能产生项， $G_k = \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$ 。

对自由表面的捕捉采用 VOF 方法，在空间上定义函数 F ，全含水为 1，不含水为 0，当为自由表面时， $0 < F < 1$ 。函数 F 是空间和时间的函数，即 $F = F(x, y, z, t)$ ，可以理解为固结在流体质点上

并随流体一起运动的没有质量和黏性的染色点的运动，其输运方程为：

$$DF/Dt=0$$

(5)

2.2 模型验证

利用某鱼道大比尺物理模型(模型比尺 1:2.5)实测池室流速数据对本文数学模型进行验证。鱼道池室流速见图 2。采用本文数学模型模拟鱼道水流条件，获得的鱼道池室流速见图 3。验证发现，两者流态基本一致，主流明确，主流两侧各有一弱回流区，主流最大流速在 1.0 m/s 左右。另外，对鱼道最重要的竖缝流速(流速控制断面)进行验证，数学模拟竖缝总平均流速为 0.97 m/s，最大流速为 1.01 m/s；物理模型竖缝总平均流速为 0.95 m/s，最大流速为 1.05 m/s。两个重要参数分别仅差 2% 和 4%，说明本文数学模型参数取值合理。

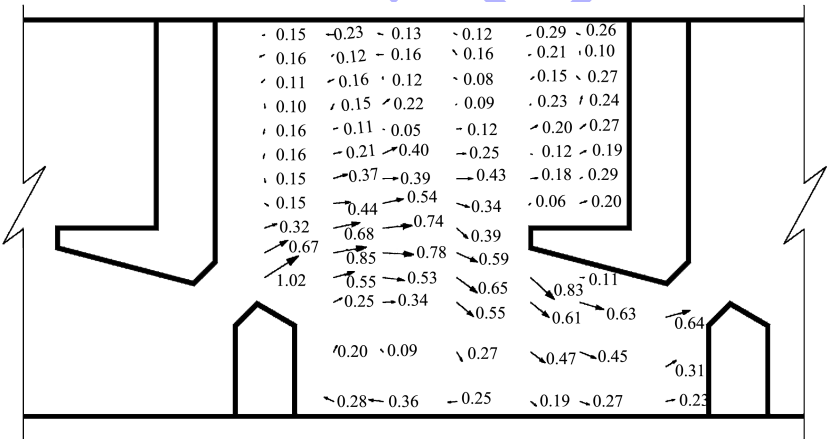


图 2 某鱼道池室物理模型流速 (单位: m/s)

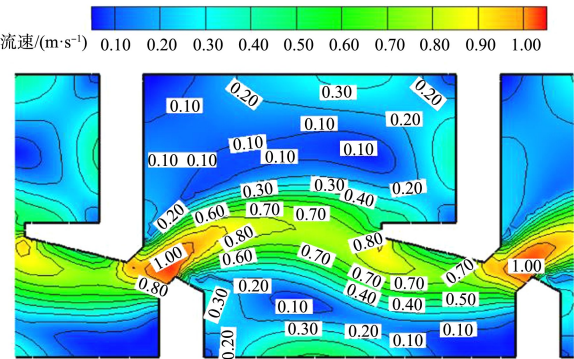


图 3 某鱼道池室数学模型流速

3 水力特性

3.1 池室水力特性

池室上层(距底 1.3 m)、中层(距底 0.8 m)和下层(距底 0.3 m)水流流速见图 4，池室主流流线见图 5。池室内主流呈现 S 形弯曲，主流宽度与竖缝宽度接近，约 0.4 m；主流流向明确、平顺，池室左、右侧各形成了一个漩涡，池室右侧漩涡范围较大，但两侧漩涡强度都很弱，流速大小在 0.1~0.2 m/s，适合鱼类休息。

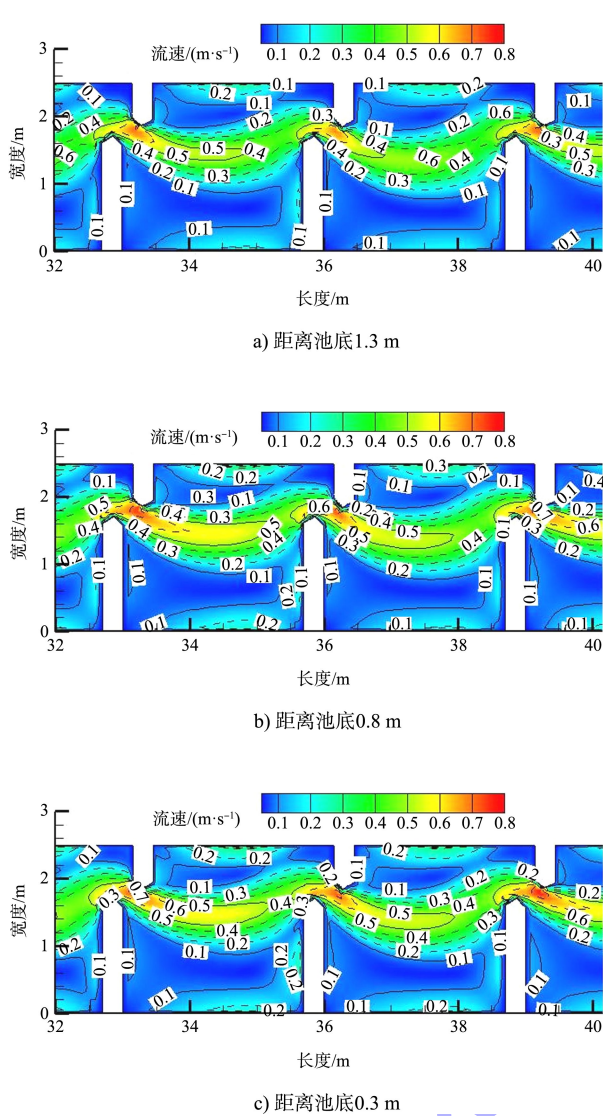


图 4 坡度 1:100 时池室流速

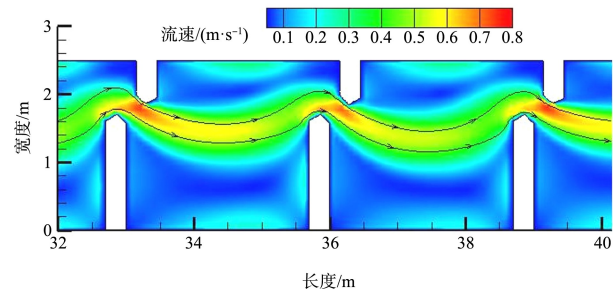


图 5 坡度 1:100 时池室主流流线

为了定量了解鱼道池室内水流流速大小,在池室内布设 7 个测流断面(断面间距 0.5 m),见图 6。每个测流断面的每个水层均匀布设 13 个测点,上、中、下水层共设置 273 个测点,其中中层各测点流速见表 1。根据各测点流速数据,池室上、中、下水层主流最大流速分别为 0.64、0.68、0.69 m/s(纵向流速、横向流速、垂向流速的合速度),水层越低主流流速值越高;计算得池室内主流最大流速平均值为 0.67 m/s;273 个测点中,流速大于 0.6 m/s 的测点仅 7 个,占总数的 2.6%,且均在竖缝附近;流速不大于 0.2 m/s 的测点有 188 个,池室内存在大范围小流速区。

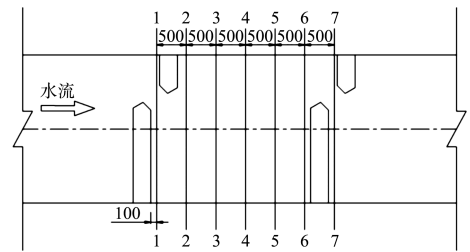


图 6 池室布设 7 个测流断面(单位: mm)

表 1 坡度 1:100 时池室中层流速 v

| 距离/m | 流速 $v/(m \cdot s^{-1})$ | | | | | | | 最大值 |
|------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 断面 1 | 断面 2 | 断面 3 | 断面 4 | 断面 5 | 断面 6 | 断面 7 | |
| 2.45 | 0.02 | 0.09 | 0.23 | 0.31 | 0.28 | 0.12 | 0.01 | 0.31 |
| 2.25 | 0.03 | 0.10 | 0.12 | 0.17 | 0.14 | 0.08 | 0.02 | 0.17 |
| 2.05 | 0.21 | 0.12 | 0.05 | 0.03 | 0.12 | 0.28 | 0.13 | 0.28 |
| 1.85 | 0.68 | 0.19 | 0.13 | 0.17 | 0.31 | 0.49 | 0.65 | 0.68 |
| 1.65 | 0.48 | 0.61 | 0.46 | 0.44 | 0.49 | 0.52 | 0.51 | 0.61 |
| 1.45 | 0.13 | 0.55 | 0.59 | 0.58 | 0.50 | 0.22 | 0.17 | 0.59 |
| 1.25 | 0.10 | 0.30 | 0.46 | 0.46 | 0.36 | 0.12 | 0.09 | 0.46 |
| 1.05 | 0.10 | 0.08 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | 0.17 | 0.10 | 0.25 |
| 0.85 | 0.11 | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.07 | 0.20 | 0.10 | 0.20 |
| 0.65 | 0.10 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.21 | 0.10 | 0.21 |
| 0.45 | 0.09 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.18 | 0.09 | 0.18 |
| 0.25 | 0.07 | 0.09 | 0.13 | 0.16 | 0.16 | 0.13 | 0.06 | 0.16 |
| 0.05 | 0.04 | 0.14 | 0.20 | 0.23 | 0.22 | 0.08 | 0.03 | 0.23 |
| 最大值 | 0.68 | 0.61 | 0.59 | 0.58 | 0.50 | 0.52 | 0.65 | 0.68 |

另在距池底 0.8 m 水层上,在该池室 7 个测流断面,每个断面均匀布设 20 个测点,共计 140 个测点。该池室不同断面最大流速见图 7,典型断面上各测点在 X、Y 方向上的流速见图 8。由图 7 可知,Z 向流速最大值仅为 0.02 m/s,说明在池室内可忽略垂向水流影响,水流呈现二维特征;在 X、Y 向流速分布来看,池室主流在竖缝区前后 X 或 Y 向流速均较大,且 Y 方向发生了变化,说明主流流经竖缝时发生一定转向;主流在池室内流速超过 0.6 m/s 的区域主要位于隔板竖缝附近区域,池室内大部分区域主流流速在 0.4~0.6 m/s;池室主流右侧大部分区域流速较低,为 0.1~0.2 m/s,适合鱼类上溯过程短暂休息;池室主流左侧区域有流速小于 0.3 m/s 的回流区,范围较小且位于池室左侧边壁,不会对鱼类上溯产生较不利的影响。

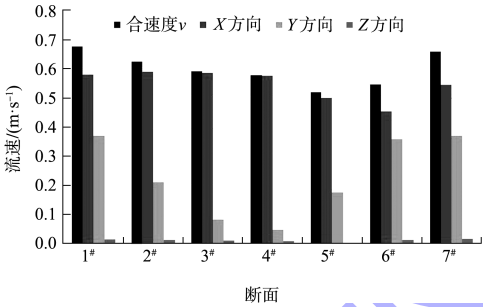


图 7 坡度 1:100 时池室中层不同断面最大流速分布

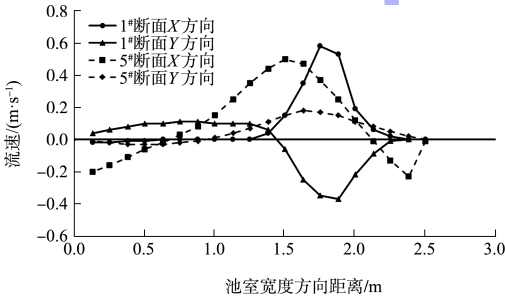


图 8 坡度 1:100 时池室典型断面流速分布

3.2 休息池水力特性

休息池上、中、下水层水流流速见图 9,休息池主流流线见图 10。休息池内主流也略呈 S 形弯曲,主流宽度与竖缝宽度接近,约 0.4 m;主流流向明确、平顺,受休息池右侧边壁影响,主流贴右侧壁流动;由于休息池长度较长,主流由上一级池室流入休息池后,在左侧形成了一个较大范

围的漩涡,但漩涡强度很弱,流速值大小基本在 0.1~0.2 m/s,适合鱼类在此充分休息。

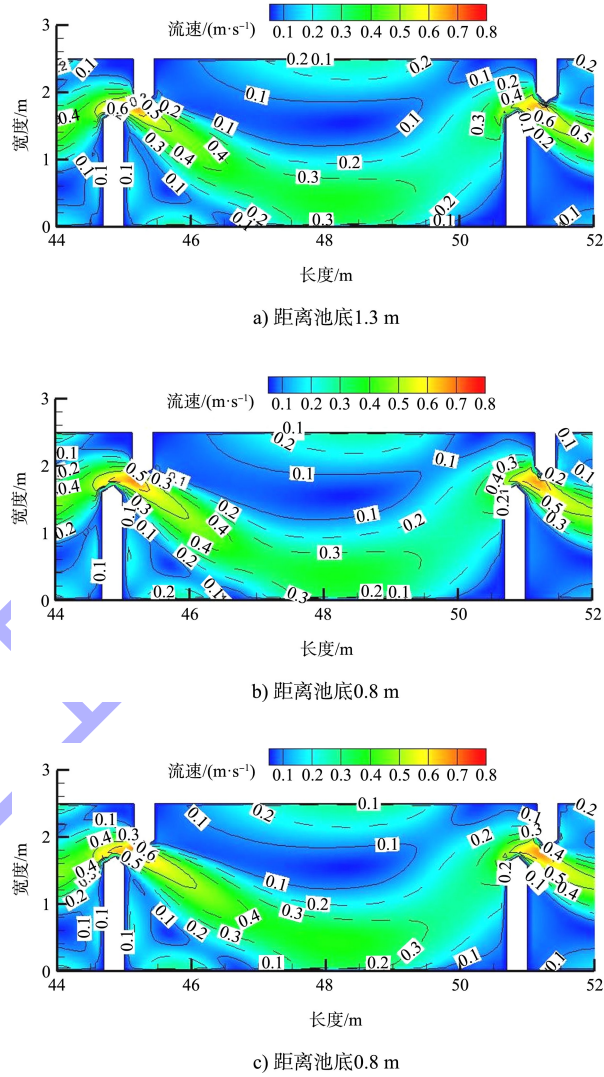


图 9 坡度 1:100 时休息池流速

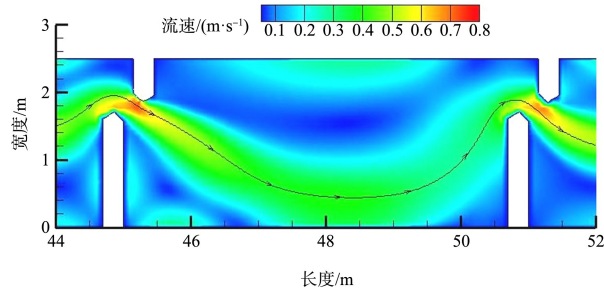


图 10 坡度 1:100 时休息池主流流线

为了定量了解鱼道休息池内水流流速大小,在典型休息池内布设 13 个测流断面(断面间距 0.5 m),见图 11。每个测流断面每个水层均匀布设 13 个测点,上、中、下水层共设置 507 个测

点。根据各测点流速数据, 休息池上、中、下水层主流最大流速值分别为 0.63、0.65、0.66 m/s, 同样是水层越低主流流速值越高; 计算得休息池内主流最大流速平均值为 0.65 m/s, 与池室主流最大流速平均值 0.67 m/s 相当(仅低 3.5%); 507 个测点中, 流速大于 0.6 m/s 的测点仅 12 个, 占总数的 2.4%, 且均在竖缝附近; 流速不大于 0.2 m/s 的测点有 289 个, 休息池内存在大范围低流速回流区, 流速值在 0.1~0.2 m/s, 适合鱼类上溯休息; 对比可知, 休息池低流速区面积相比池室显著增大, 面积增大约 54%, 鱼类由此得到足够休息和轻松上溯的空间。

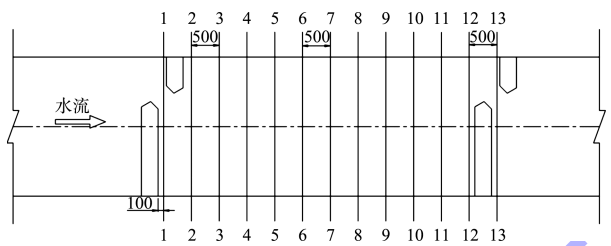


图 11 休息池布设 13 个测流断面 (单位: mm)

3.3 竖缝最大流速

为了确定鱼道在竖缝处最大流速值, 在沿程 13 个隔板竖缝间布设了多个测点, 分别取上、中、下水层上的最大流速, 不同隔板竖缝最大流速见表 2。

表 2 坡度 1:100 时竖缝最大流速值 m/s

| 隔板编号 | 测点距池底距离 | | | 平均值 | 最大值 |
|-----------------|---------|-------|-------|------|------|
| | 0.3 m | 0.8 m | 1.3 m | | |
| 3 [#] | 0.68 | 0.68 | 0.69 | 0.68 | 0.69 |
| 4 [#] | 0.70 | 0.69 | 0.70 | 0.70 | 0.70 |
| 5 [#] | 0.68 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.68 |
| 6 [#] | 0.72 | 0.69 | 0.68 | 0.70 | 0.72 |
| 7 [#] | 0.70 | 0.69 | 0.67 | 0.69 | 0.70 |
| 8 [#] | 0.76 | 0.75 | 0.71 | 0.74 | 0.76 |
| 9 [#] | 0.73 | 0.72 | 0.69 | 0.71 | 0.73 |
| 10 [#] | 0.74 | 0.74 | 0.71 | 0.73 | 0.74 |
| 11 [#] | 0.73 | 0.73 | 0.69 | 0.72 | 0.73 |
| 12 [#] | 0.79 | 0.77 | 0.71 | 0.76 | 0.79 |
| 13 [#] | 0.73 | 0.72 | 0.68 | 0.71 | 0.73 |
| 14 [#] | 0.74 | 0.72 | 0.67 | 0.71 | 0.74 |
| 15 [#] | 0.73 | 0.72 | 0.67 | 0.71 | 0.73 |
| 平均值 | 0.73 | 0.72 | 0.69 | 0.71 | — |
| 最大值 | 0.79 | 0.77 | 0.71 | — | 0.79 |

竖缝处最大流速为 0.79 m/s, 从竖缝最大流速沿水深分布看, 竖缝沿水深最大流速平均值沿程为 0.67~0.76 m/s, 竖缝平均最大流速分布较为均匀, 沿程无明显增大或减小现象。从竖缝垂向最大流速变化看, 竖缝内最大流速值沿水深变化较小, 竖缝垂向最大流速变化仅为 0.08 m/s, 且与池室和休息池不同水层主流最大流速一致, 也基本是水层越低竖缝最大流速值越高。鱼道竖缝最大流速平均值为 0.71 m/s, 可满足鱼道设计流速指标要求。

4 不同坡度对池室水力特性影响

为更全面了解该隔板形式鱼道池室的水力特性, 还针对池室坡度为 1:120 和 1:140 的情况建立三维数学模型, 计算分析池室坡度对池室水力特性的影响。数值模拟结果分析中所取的 3 个水层、断面、测点等位置和分布均与第 3 节一致。

池室坡度为 1:120 和 1:140 时, 整体水流流态均与池室坡度 1:100 时差别不大, 主流总体平顺、流线呈 S 形弯曲, 池室内主流两侧形成两个弱回流区, 休息池内主流左侧形成一个较大范围的弱回流区, 但鱼道内流速整体偏小。不同池室坡度的鱼道竖缝平均最大流速值与降低比例见表 3。随着池室坡度由 1:100 变缓至 1:140, 竖缝平均最大流速呈递减趋势、降低了 16.9%; 池室坡度为 1:100 和 1:120 时, 鱼道竖缝平均最大流速分别为 0.71 m/s 和 0.65 m/s, 满足鱼道设计流速要求; 池室坡度为 1:140 时底坡较缓, 鱼道竖缝平均最大流速为 0.59 m/s, 小于鱼道设计流速指标。

根据数模计算结果, 综合考虑鱼道池室内部水流条件和工程量, 建议蚌埠闸鱼道的池室坡度选为 1:100~1:120, 建设条件许可情况下可取相对较缓底坡, 即 1:120 坡度, 以营造良好的上溯水力条件。

表 3 鱼道竖缝平均最大流速特征值与降低比例

| 池室坡度 | 竖缝平均最大流速/ (m·s ⁻¹) | 降低比例 (与 1:100 坡度相比)/% |
|-------|-----------------------------------|--------------------------|
| | | |
| 1:100 | 0.71 | — |
| 1:120 | 0.65 | 8.5 |
| 1:140 | 0.59 | 16.9 |