

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2015.06.018

最佳鳃片倾斜角下分离鳃内部流场的数值模拟

陶洪飞, 邱秀云, 马英杰, 赵经华, 洪明, 马亮, 付秋萍

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 采用均匀试验设计理论对鳃片倾斜角 α 与 β 进行数值模拟方案的设计, 通过采用 Fluent 软件中的欧拉模型, 以鳃片 3 上表面的泥沙速度作为考核指标, 对不同鳃片倾斜角下的分离鳃速度流场进行模拟。运用投影寻踪回归分析法 (PPR) 对数值计算结果进行了分析, 得出鳃片 β 倾斜角对分离鳃水沙分离效果影响是最大的, 其次是鳃片 α 倾斜角的影响; 当鳃片倾斜角的组合为 $\alpha=60^\circ$ 与 $\beta=45^\circ$ 时, 分离鳃中的速度流场有利于水沙的快速分离且水沙分离效果最佳。

关键词: 数值模拟; 鳃片倾斜角; 欧拉模型; 均匀试验; 分离鳃; 泥沙速度; 仿真分析

中图分类号: TV14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1105-05

Numerical simulation of internal flow field in gill-piece separation device under optimal gill-piece tilt angle

TAO Hong-fei, QIU Xiu-yun, MA Ying-jie, ZHAO Jing-hua, HONG Ming, MA Liang, FU Qiu-ping

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The scheme design of numerical simulation on tilt angle α and tilt angle β of gill-piece applied the uniform experimental design theory. With the sediment velocity on the upper surface of gill-piece 3 as the evaluation index, velocity flow field was simulated under different tilt angles of gill-piece through the adoption of Eulerian model provided by the Fluent software. The projection pursuit regression (PPR) was used to analyze the numerical simulation results. The results showed that the influence of angle β on the effect of water sediment separation in the gill-piece separation device is the highest, followed by the tilt angle α . The velocity field of gill-piece separation device is beneficial to increase water sediment separation and the effect of water sediment separation is the best under the combination of $\alpha=60^\circ$ and $\beta=45^\circ$.

Key words: numerical simulation; tilt angle of gill-piece; Eulerian model; uniform test; gill-piece separation device; sediment velocity; simulation analysis

我国是世界上河流泥沙问题最严重的国家之一。据观测资料统计,我国西北和华北地区的大部分河流都具有含沙量高且泥沙颗粒细的特点,水沙分离难度大。目前,采用沉沙池与过滤器来处理浑水,但沉沙池水沙分离周期长且投资大,而经过过滤器过滤后的水往往不符合规范的要求^[1-2]。故研究一种新型水沙分离装置势在必行。分离鳃具有结构简单、水沙分离快、工程造价低及运行管理方便等特点,该装置对解决分散居住的农牧民生活用水问题具有积极意义,同时分离鳃作为灌区泥沙前期处理设施,可为灌区滴、喷灌提供优质水源,促进节水灌溉技术在多沙河流域的推广应用^[3]。目前,分离鳃已通过物理模型试验及数值模拟的研究方法得到了以下研究成果:(1)分离鳃中泥沙通道淤堵的临界宽度是 1 mm^[4];(2)分离鳃在处理含有黏性泥沙的浑水

时,能够体现出优势^[5];(3)鳃片间距为 $d=5\text{ cm}$ 时,水沙分离效果最佳^[6];(4)含沙量为 10~80 kg/m 时,分离鳃的水沙分离效果更佳^[7];(5) Fluent 软件中的欧拉模型适合模拟分离鳃中的水沙两相流场^[8]。鳃片倾斜角对分离鳃水沙分离效果的影响不容忽视,而采用数值模拟的方法模拟静水中不同鳃片倾斜角下的分离鳃内部流场是一种非常有效的方法,为减少计算次数,数值模拟方案设计采用均匀试验设计理论,并运用投影寻踪回归(PPR)的方法对数值计算结果进行分析与讨论,来确定最佳鳃片倾斜角。

1 分离鳃结构及静水沉降工作原理

从分离鳃结构图(图1)可看出该装置由鳃片与鳃管构成,从分离鳃最上端至最下端为鳃片1至鳃片5。静水沉降

收稿日期: 2014-07-19 修回日期: 2015-10-10 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2201.054.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50969009); 高等学校博士学科点专项(20070758003); 新疆水利水电工程重点学科基金资助(xjslgczdk20101202)

作者简介: 陶洪飞(1987-),男,四川南充人,博士,主要从事计算水力学及河流泥沙工程方面研究。E-mail: 304276290@qq.com

通讯作者: 邱秀云(1955-),女,江苏泗阳人,教授,主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: wlmqxy@sina.com

时,分离鳃的上端为开口状,下端呈封闭状;而在动水沉降时,把多个分离鳃布置在沉淀池中,此时分离鳃上下端均为开口状,以便清水的上升和泥沙的排出,并在分离鳃长度方向的壁面上布置小孔,以便分离鳃内外的浑水交换。采用的分离鳃特征尺寸如下:长度 $a=10\text{ cm}$ 、宽度 $b=5\text{ cm}$ 、高度 $c=40\text{ cm}$ 、鳃片间距 $d=5\text{ cm}$ 、清水流上升通道宽度 $e=1\text{ cm}$ 及泥沙流下降通道宽度 $f=1\text{ cm}$,而鳃片与鳃管长度侧壁构成的 α 倾斜角及鳃片与鳃管宽度侧壁构成的 β 倾斜角的数值见表 1。

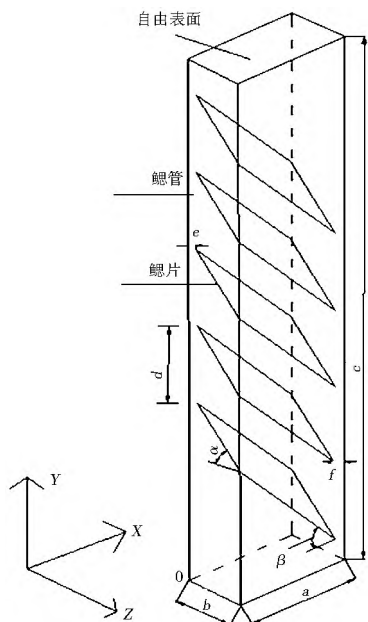


图 1 分离鳃结构

Fig. 1 Structural diagram of gill piece separation device

表 1 因素与水平

Tab. 1 Factors and levels

因素	水平					
	1	2	3	4	5	6
$\alpha(^{\circ})$	15	25	35	45	55	65
$\beta(^{\circ})$	15	25	35	45	55	65

图 2 表示静水条件时分离鳃的工作原理。将浑水注入到分离鳃中,泥沙颗粒在重力作用下先自由沉降,当沉降至鳃片上表面后便汇集成泥沙流,其沿着鳃片上表面的高端流动至低端,而清水流沿着鳃片的下表面由低端流动至高端,从而鳃片上表面的泥沙流运动与鳃片下表面的清水流运动在鳃片间形成一个逆时针方向的横向异重流,见图 2 中带箭头的虚线;当各鳃片低端的泥沙流滑落至泥沙通道时便一起垂直向下运动,而各鳃片高端的清水流运动至清水通道时便一起垂直向上运动,从而形成沿分离鳃边壁的顺时针垂向异重流,见图 2 中带箭头的实线,从而达到水沙分离的目的。

2 数值模拟方案设计

2.1 数值模拟的均匀试验设计

采用 Fluent 软件中的欧拉模型模拟不同倾斜角下的分离鳃中的水沙两相流场,欧拉模型的各方程见文献[9]。分离鳃的边界条件包含 2 个,其设置见文献[8]。初始条件

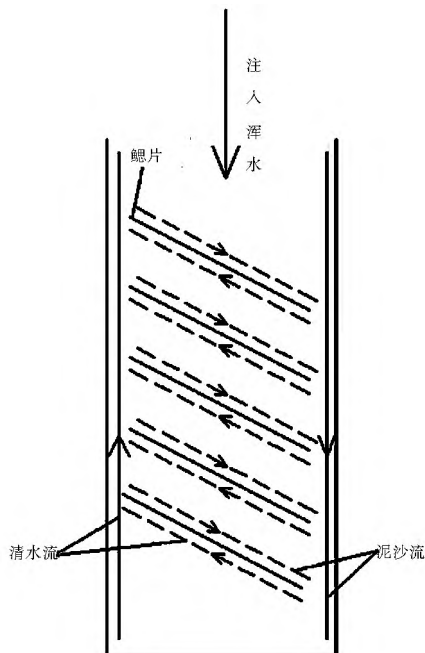


图 2 工作原理概化图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle

如下:将水定义为主相,密度 $\rho_w=998.2\text{ kg/m}^3$;泥沙颗粒定义为第 2 相,假定泥沙颗粒为球形,平均粒径为 0.015 mm (物理模型试验时采用的中值粒径),密度 $\rho_s=2650\text{ kg/m}^3$,考虑重力作用。初始化时,假定分离鳃内水沙混合均匀,含沙量为 $S=60\text{ kg/m}$ 。

均匀设计可以用较少的试验次数,安排多因素、多水平的析因试验,是在均匀性的度量下最好的析因试验设计方法。它可以使试验点在试验范围内充分地均匀分散,不仅可大大减少试验次数,而且仍能得到反映试验体系主要特征的试验结果。均匀设计也是电脑仿真试验设计的重要方法之一,从而可用较少的试验次数获得比较满意的结果^[10]。鳃片倾斜角 α 与鳃片倾斜角 β 对分离鳃的水沙分离效果影响很大,根据这 2 个影响因素的特征,每个因素对应取 6 个水平,详见表 1。

2.2 考核指标

鳃片上表面的泥沙速度大小代表泥沙从浑水中分离出来的快慢,速度越大,说明泥沙从浑水中脱离的越快,水沙分离效果越好,反之,速度越小水沙分离效果就越差。各鳃片上表面的泥沙速度相差不大^[6],可取鳃片 3 上的泥沙速度作为分离鳃水沙分离效果的考核指标。进行数值计算前,在 Fluent 软件中设置监测鳃片 3 上表面的泥沙速度与时间的关系,以获得不同时刻的泥沙速度。

2.3 数值计算结果

因选取的是 2 因素 6 水平,故数值模拟的均匀试验可选用 $U_6^*(6^4)$ 均匀设计表。每个均匀设计表都附有一个使用表,从 $U_6^*(6^4)$ 的使用表(表 2)可知,2 个因素时,应选用 1, 3 两列来安排试验,则均匀度的偏差 $D=0.1875$,该值表示均匀分散性较好。均匀试验的数值计算方案及数值计算结果见表 3,其中 V 表示时间 $t=110\text{ s}$ 时鳃片 3 上表面的泥沙速度值。

表 2 U_6^* (6^4) 的使用表

Tab. 2 Use of U_6^* (6^4)

因素数	列号				D
2	1	3			0.1875
3	1	2	3		0.2656
4	1	2	3	4	0.2990

表 3 均匀试验方案及计算结果

Tab. 3 Uniform test scheme and calculation results

因素	试验号					
	1	2	3	4	5	6
$\alpha(^{\circ})$	$^1(15)$	$^{\circ}(25)$	$^{\gg}(35)$	$^{\frac{1}{4}}(45)$	$^{\frac{1}{2}}(55)$	$^{\frac{3}{4}}(65)$
$\beta(^{\circ})$	$^{\gg}(35)$	$^{\frac{3}{4}}(65)$	$^{\circ}(25)$	$^{\frac{1}{2}}(55)$	$^1(15)$	$^{\frac{1}{4}}(45)$
$V/(cm \cdot s^{-1})$	2.14	7.48	0.07	6.97	0.03	6.04

3 PPR 分析

PPR 是用于处理和分析非正态非线性总体高维数据的一种方法,其不需要对试验数据作任何人为假定、分割或变量处理,是统计学、应用数学及计算机技术三者交叉的前沿领域,已成功运用到众多学科和相关部门,正日益受到人们的重视^[11-14]。该方法具有以下 3 个特点:(1)能有效克服“维数灾难”;(2)客观充分地挖掘数据的各种非正态非线性规

律,用数值函数加以记忆;(3)模型具有稳定性。

设 y 是因变量, x 是 p 维自变量, PPR 模型如式(1)

$$\hat{y} = E(y|x) = \bar{y} + \sum_{i=1}^{MU} \delta_i f_i(\zeta_i^T x) \quad (1)$$

式中: MU 为数值函数最优个数; δ_i 为第 i 个数值函数的相应权重; f_i 为数值函数; ζ_i^T 为 i 方向的投影值,其中 $\|\zeta_i^T\| = 1, i = 1, 2, \dots, MU; \zeta_i^T = (\zeta_{i1}, \zeta_{i2}, \dots, \zeta_{ip})$ 。

运用 PPR 方法将 α 倾斜角与 β 倾斜角这两个影响因素综合在一起考虑,对表 2 中的 6 组数值计算结果进行 PPR 分析,PPR 的算法及操作程序见文献[15]。反映投影灵敏度指标的光滑系数取 0.90,投影数值函数个数初始值 $M = 3$,最终投影数值函数个数取 $MU = 2$ 。模型参数为: N (要求数据大于 9), $P, Q, M, MU = 6 \times 2, 2, 1, 3, 2$ 。PPR 建模结果为: $\delta_1 = 1.0013, \zeta_1^T = (0.2773, 0.9608)$; $\delta_2 = 0.0290, \zeta_2^T = (-0.9742, -0.2254)$ 。不同倾斜角下鳃片 3 上表面的拟合值、计算值以及两者的绝对误差见表 4。由表 4 可知数值模拟的计算值与拟合值两者吻合较好,泥沙速度的绝对误差 $\leq \pm 0.52 \text{ cm/s}$,相对误差在 3% 左右;但鳃片倾斜角 $\alpha = 15^{\circ}, \beta = 35^{\circ}$ 时,相对误差为 24.30%,鳃片倾斜角 $\alpha = 55^{\circ}, \beta = 15^{\circ}$ 时,相对误差为 36.67%,分析原因是网格数量及质量造成的,但一定程度上 PPR 模型可以反映 α 倾斜角与 β 倾斜角对分离鳃水沙分离效果的影响。

表 4 PPR 模型计算结果分析

Tab. 4 Calculation results of PPR model

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
计算值 $V/(cm \cdot s^{-1})$	2.14	7.48	0.07	6.97	0.03	6.04	2.14	7.48	0.07	6.97	0.03	6.04
拟合值 $V_0/(cm \cdot s^{-1})$	1.62	7.72	0.071	6.83	0.019	5.94	1.62	7.72	0.71	6.83	0.01	5.94
绝对误差	-0.52	0.24	0.001	-0.143	-0.011	-0.1	-0.52	0.24	0.001	-0.143	-0.011	-0.1
相对误差(%)	24.30	3.21	1.43	2.00	36.67	1.66	24.30	3.21	1.43	2.00	36.67	1.66

4 单因子分析

利用鳃片 3 上表面泥沙速度的 PPR 模型可以进行各种类型仿真。把各因子按其变幅分成 11 级水平,每次考虑变动一个因子,其它因子保持在中水平,即将 α 倾斜角与 β 倾斜角都分成如下的 11 级水平: $15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}, 50^{\circ}, 55^{\circ}, 60^{\circ}, 65^{\circ}$,每次变动 α 倾斜角(或 β 倾斜角),而 $\beta = 40^{\circ}$ (或 $\alpha = 40^{\circ}$),可知单因子 α 倾斜角(或 β 倾斜角)对鳃片上表面泥沙速度的影响,用 PPR 仿真后的数据绘制各因子对泥沙最大速度的影响,见图 3。从图 3 中可直观地看出两个因子对泥沙速度影响大小的排序: β 倾斜角大于 α 倾斜角(因 β 倾斜角的曲线斜率大于 α 倾斜角的斜率),这同 PPR 分析的因子贡献权重是一致的,即 β 倾斜角的贡献权重为 1.000 00, α 倾斜角的贡献权重为 0.260 43。从图 3 中还可看出 α 倾斜角为 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时, α 倾斜角对泥沙速度影响最大,且在 $\alpha = 60^{\circ}$ 时泥沙速度达到峰值,即该倾斜角下分离鳃的水沙分离效果最好。 β 倾斜角为 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 时,泥沙最大速度随 β 倾斜角的增大而增幅很少, $V < 1 \text{ cm/s}$; β 倾斜角为 $25^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,随着 β 倾斜角的增大泥沙速度快速地增大;而 β 角在 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 时可发现泥沙速度相差不大。 β 倾斜角对分离鳃的水沙分离效果影响包括两个方面。一方面,倾斜角过小,则泥沙的下滑力不能克服水流的阻力与摩擦力,不利于泥沙的下滑,且泥沙

速度较小;另一方面,当倾斜角过大,虽然可以缩短泥沙颗粒在鳃片上的聚结时间,加快泥沙沉降,但同时随着 β 倾斜角增大,鳃片的长度也会增加,则泥沙颗粒与清水滑动的路程相应地也增加,此时有效鳃片数也会减少,相应的沉淀面积也会减少,对水沙分离过程起着负面作用,因此,存在一个合理的 β 倾斜角。所以,单因子分析也为进一步进行的因子全局优化仿真提供了参考信息。

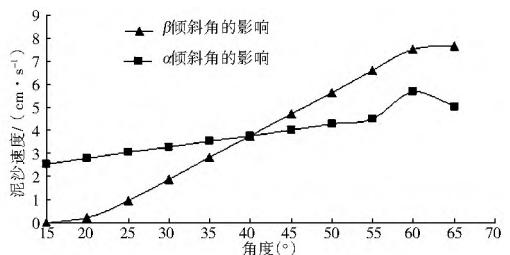


图 3 各因子效应

Fig. 3 Effect of each factor

5 多因子优化仿真

综合考虑 α 倾斜角与 β 倾斜角同泥沙速度的关系,将 PPR 仿真的数据,利用 Surfer8.0 软件绘制出泥沙速度等值线图。由图 4 可知当 β 在 $45^{\circ} \sim 65^{\circ}, \alpha$ 在 $30^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 取值时,泥沙速度在 4.22 cm/s 以上,据文献[6]可知,鳃片间距对分离

鳃的水沙分离效果影响最大,故为了能在分离鳃中多布置鳃片,减少鳃片间距,以加大沉淀面积,最佳倾斜角的组合为 $\alpha = 60^\circ, \beta = 45^\circ$, 该倾斜角下对应的泥沙速度为 5.69 cm/s 。

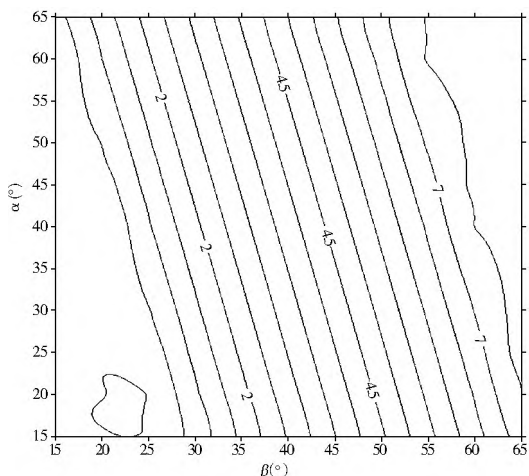


图 4 鳃片 3 上表面的泥沙最大速度等直线
Fig. 4 Contour of maximum sediment velocity on the upper surface of gill piece 3

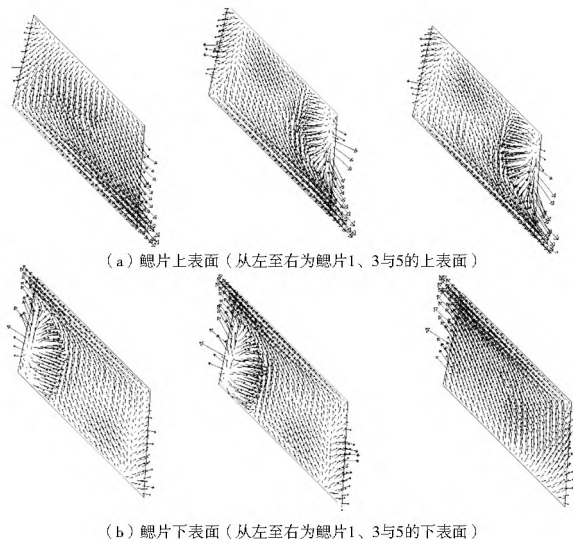


图 5 倾斜角 $\alpha = 60^\circ, \beta = 45^\circ$ 下的鳃片上、下表面速度矢量分布

Fig. 5 Distribution of velocity vectors in the gill pieces under gill piece tilt angle of $\alpha = 60^\circ$ and $\beta = 45^\circ$

6 最佳鳃片倾斜角下的速度场

6.1 鳃片上、下表面的速度场

图 5 表示计算时间为 110 s 时, 倾斜角 $\alpha = 60^\circ, \beta = 45^\circ$ 下的鳃片 1、3 及 5 的上、下表面速度矢量分布图。从图 5(a) 可知, 鳃片 1、2 及 3 上表面的流动主要为泥沙流运动, 泥沙流先沿鳃片斜面的最大倾斜角 63.43° 向下滑动, 当滑至鳃片长边时同其它泥沙流一起以 $\beta = 45^\circ$ 向下运动, 但鳃片 2 与 3 上表面的泥沙流不仅受到 α 与 β 倾斜角的影响, 还受到来自泥沙通道中下沉的泥沙流影响, 使得这两个鳃片上表面右上角的速度呈向内放射状, 而鳃片 1 靠近分离鳃上端, 其上表面的泥沙流仅受 α 与 β 倾斜角的影响, 则无此特征, 故鳃片 1 上表面的速度分布规律与其它两个鳃片上表面不同。从图 5(b) 可知, 鳃片 1、2 及 3 下表面的流动主要为清水流运动, 清水先沿鳃片斜面的最大倾斜角 63.43° 向上滑动, 当流至鳃片长边时同其它清水流以 $\beta = 45^\circ$ 向上流动, 但鳃片 1 与 2 下表面的清水流不仅受到 α 与 β 倾斜角的影响, 还受到来自清水通道中上升的清水流影响, 使得鳃片 1 与 2 下表面左下角的速度呈向内放射状, 而鳃片 3 靠近分离鳃下端, 其仅受 α 与 β 倾斜角的影响, 则无此特征, 故鳃片 3 下表面的速度分布规律与其它两个鳃片下表面不同。

6.2 宽方向的速度场

图 6 表示计算时间为 110 s 时, 倾斜角 $\alpha = 60^\circ, \beta = 45^\circ$ 下的宽方向(Z 断面) 的速度矢量分布图。从图 6(a) 中可知, 5 个鳃片下表面的水流从鳃片的低端以 $\beta = 45^\circ$ 沿着鳃片长边滑至鳃片高端, 后汇入清水通道向上运动。从图 6(c) 可知, 5 个鳃片上表面的水流从鳃片的高端以 $\beta = 45^\circ$ 沿着鳃片长边滑至鳃片低端, 后汇入泥沙通道向下运动。图 6(a) 与图 6(c) 的速度分布规律在图 6(b) 中得到了体现, 且从图 6(b) 中还可看出鳃片上表面的水流、鳃片下表面的水流、泥沙通道中的水流及清水通道中的水流相互干扰较少, 各自按着相应的运动轨迹流动; 鳃片间的局部涡流对水流和泥沙具有卷吸作用, 加速了泥沙的沉降和清水的上升, 从而达到水沙分离的目的。

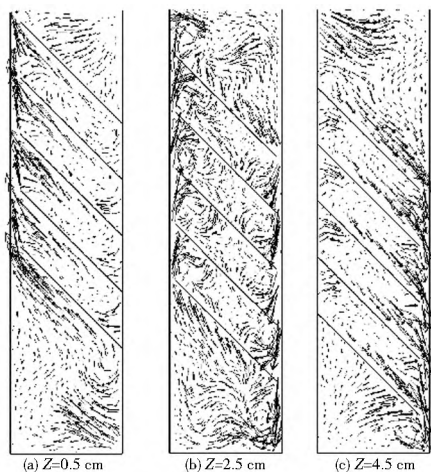


图 6 倾斜角 $\alpha = 60^\circ, \beta = 45^\circ$ 下的 Z 断面的速度矢量分布
Fig. 6 Distribution of the velocity vectors in the Z section under gill piece tilt angle of $\alpha = 60^\circ$ and $\beta = 45^\circ$

7 结论

- (1) PPR 模型能够较好地反映鳃片的 α 与 β 倾斜角对分离鳃水沙分离效果的影响。
- (2) 影响分离鳃水沙分离效果的各因素主次排列为鳃片的 β 倾斜角, 鳃片的 α 倾斜角。
- (3) 当 $\alpha = 60^\circ, \beta = 45^\circ$ 时, 分离鳃的水沙分离效果最佳。
- (4) 鳃片倾斜角为 $\alpha = 60^\circ, \beta = 45^\circ$ 时的速度流场有利于分离鳃中的水沙快速分离。

参考文献(References):

[1] 韩丙芳, 田军仓. 微灌用高含沙水处理技术研究综述[J]. 宁夏农学院学报, 2001, 22(2): 63-69. (HAN Bing-fang, TIAN Jurcang. General introduction on the technology of purifying water for micro irrigation with high silt content water[J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2001, 22(2): 63-69. (in Chinese))

[2] 李琳, 邱秀云, 聂境, 等. 基于滴灌浑水水力分离装置的水沙分离试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 37-40. (LI

- Lin, QIU Xir yun, NIE Jin, et al. Experiment on the water sediment separation by turbid water hydraulic separation device Based on drip irrigation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(6): 37-40. (in Chinese)
- [3] 邱秀云, 龚守远, 严跃成, 等. 一种新型水沙分离装置的研究[J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(1): 68-70. (QIU Xir yun, GONG Shou yuan, YAN Yao cheng, et al. The research on a new separator device for water sediment[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2007, 30(1): 68-70. (in Chinese))
- [4] 严跃成, 邱秀云, 张翔, 等. 两相流分离鳃泥沙下沉通道宽度对水沙分离影响的试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(6): 526-528. (YAN Yao cheng, QIU Xir yun, ZHANG Xiang, et al. Experimental study on influence of sediment settling access width in two phase flow separation device on water sediment separation. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2011, 34(6): 526-528. (in Chinese))
- [5] 朱超, 邱秀云. 垂向异重流式分离鳃适用泥沙的试验研究[J]. 人民长江, 2009, 40(5): 60-61. (ZHU Chao, QIU Xir yun. Experimental study of sediment on vertical density flow gill piece separation device[J]. Yangtze River, 2009, 40(5): 60-61. (in Chinese))
- [6] 陶洪飞, 邱秀云, 李巧, 等. 不同鳃片间距下的分离鳃内部流场三维数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 183-189. (TAO Hong fei, QIU Xir yun, LI Qiao, et al. 3-D numerical simulation of internal flow field in gill piece separation device under different gill piece spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014(6): 183-189. (in Chinese))
- [7] 陶洪飞, 邱秀云, 何照青, 等. 含沙量对分离鳃的水沙分离影响试验[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 93-95. (TAO Hong fei, QIU Xir yun, HE Zhao qing, et al. Sediment concentration on water sediment separation effect test of separation device[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 93-95. (in Chinese))
- [8] 陶洪飞, 邱秀云, 赵丽娜, 等. 水沙分离鳃内部流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 38-46. (TAO Hong fei, QIU Xir yun, ZHAO Li na, et al. Numerical simulation and PIV display of internal flow field in gill piece separation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 38-46. (in Chinese))
- [9] 江帆, 黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (JIANG Fan, HUANG Peng. FLUENT Advanced Applications and Case Analysis[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2010. (in Chinese))
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 193-207. (REN Lu quan. Optimum design and analysis of experiments[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 2003: 193-207 (in Chinese))
- [11] 侯杰, 赵涛, 牧振伟, 等. 悬栅消能率的 PPR 因子贡献率分析及优化仿真[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 38-40. (HOU Jie, ZHAO Tao, MU Zhen wei, et al. Analysis and optimization simulation of PPR factors contribution ratio of suspension girder dumping ratio[J]. Water Power, 2005, 31(2): 38-40. (in Chinese))
- [12] 冯勇, 何建新, 刘亮, 等. 冻融循环作用下细粒土抗剪强度特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 1013-1017. (FENG Yong, HE Jian xin, LIU Liang, et al. Experimental Study of the Shear Strength Characteristics of Fine Grained Soil under Freezing and Thawing Cycles[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2008, 30(6): 1013-1017. (in Chinese))
- [13] 何建新, 郭鹏飞, 刘录录, 等. 阳离子乳化沥青混凝土配合比设计的优选方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 96-98. (HE Jian xin, GUO Peng fei, LIU Lu lu, et al. Study on Optimal Method for Mix Design of Cation Emulsified Asphalt Concrete[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(3): 96-98. (in Chinese))
- [14] 吴素芬, 韩萍, 李燕, 等. 塔里木河源流水资源变化趋势预测[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 708-711. (WU Shu fen, HAN Ping, LI Yan, et al. Predicted Variation Tendency of the Water Resources in the Headwaters of the Tarim River[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2003, 25(6): 708-711. (in Chinese))
- [15] 周新民, 李嘉, 赵文谦, 等. 确定固液两相流扩散系数的投影追踪模型[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2001, 16(2): 175-180. (ZHOU Xin min, LI Jia, ZHAO Wen qian, et al. Project pursuit regression model for diffusion coefficient of suspended particles in liquid solid two phase flow[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser A, 2001, 16(2): 175-180. (in Chinese))

(上接第 1100 页)

- [14] 董智. 基于层次分析法的城市电网电缆化改造的研究[D]. 天津: 天津大学. 2005. (DONG Zhi. Power network and cable transformation of city based on AHP[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))
- [15] 朱茵, 孟志勇. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学报, 1999, 23(5): 119-122. (ZHU Yin, MENG Zhi yong. Determination of weight value by AHP[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(5): 119-122. (in Chinese))
- [16] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061. (ZHANG Xian qi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1061. (in Chinese))
- [17] 陈昊, 杨俊安, 庄镇泉. 变精度粗糙集的属性核和最小属性约简算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(5): 1011-1017. (CHEN Hao, YANG Jun an, ZHUANG Zhen quan. The core of attributes and minimal attributes reduction in variable precision rough set[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(5): 1011-1017. (in Chinese))
- [18] 徐袭, 祝力, 范学鑫. 基于粗糙集与 K-均值聚类的故障知识挖掘[J]. 微计算机信息, 2007, 23(5-3): 141-143. (XU Xi, ZHU Li, FAN Xue xin. Fault Knowledge mining based on rough set and k-means clustering[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(5-3): 141-143. (in Chinese))