排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 3 月 Mar. 2020 | 第 38 卷 第 3 期 Vol.38 No.3

污水搅拌器摆放角度对流场性能影响

张智[1],郑源[1*],蒋洁青[2],李城易[1]
(1. 河海大学能源与电气学院,江苏 南京 210098; 2. 华东宜兴抽水蓄能有限公司,江苏 宜兴 214205)


张智

摘要:针对搅拌器摆放角度不合理、污水处理池内液体能耗过大造成的底部流速较低等问题,基于 Fluent 对搅拌器在不同摆放角度下的流场进行数值模拟,以优化设计、减少污泥沉淀.通过 UG 建立三维实体模型并进行四面体网格划分,利用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型以及 SIMPLEC 算法对处理池进行模拟.在改变搅拌器摆放角度的情况下,对比处理池内的流速分布情况和平均速度大小,得出不同摆放角度对搅拌器推流搅拌效果的影响;同时还对流场中旋涡结构与搅拌能耗的关系进行了研究.结果表明:摆放角度为 50°时,底部截面平均流速最大提高 17.6%,体平均流速可提高 6%,最大降低底部死区率 12%,推流搅拌效果最佳.同时,搅拌效果也受旋涡结构影响,旋涡数量越少,单个旋涡尺度越大,旋涡能耗越低,流态越平稳,推流搅拌效果越好.可以通过改变搅拌器摆放角度,改善内部流态,减少污泥沉淀现象,降低旋涡能耗,达到改善推流搅拌效果的目的.

关键词:污水处理搅拌器;数值模拟;摆放角度;旋涡;灰度关联法
中图分类号:S277.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-8530(2020)03-0271-06
Doi:10.3969/j.issn.1674-8530.18.0143

张智,郑源,蒋洁青,等. 污水搅拌器摆放角度对流场性能影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(3):271-276.

ZHANG Zhi, ZHENG Yuan, JIANG Jieqing, et al. Influence of wastewater mixer setting angle on flow field in sewage treatment pool [J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2020,38(3):271-276.(in Chinese)

Influence of wastewater mixer setting angle on flow field in sewage treatment pool

ZHANG Zhi[1], *ZHENG Yuan*[1*], *JIANG Jieqing*[2], *LI Chengyi*[1]
(1. College of Energy and Electrical, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. East China Yixing Pumped Storage Power Co. Ltd., Yixing, Jiangsu 214205, China)

Abstract: An unreasonable setting angle can result in a wastewater mixer to consume much more power. Bearing this problem in mind, three-dimensional turbulent fluid flows in a sewage water treatment pool with two wastewater mixers at various setting angles were simulated using Fluent software to optimize mixer design and reduce sludge deposition at the pool bottom due to low water velocity. At first, the three-dimensional fluid domain model was established in UG software, then the steady fluid flow field was calculated in unstructured tetrahedron grids based on the N-S equations, standard $k-\varepsilon$ turbulent flow model and SIMPLEC algorithm. The average velocity and velocity distribution within the pool were compared among various setting angles. Consequently, flow mixing effect was assessed by employing grayscale correlation method in terms of low velocity zone occurrence rate at the pool bottom. At the same time, the relationship between vortex structure and mixing energy consumption was studied. The results show that when the angle is 50°, the average fluid velocity at the bottom is increased by

收稿日期:2018-07-13; **修回日期**:2018-10-09; **网络出版时间**:2020-03-04
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20200303.1050.012.html
基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51339005);国家自然科学基金面上资助项目(51579080)
第一作者简介:张智(1994—),男,吉林长春人,硕士研究生(2413338711@qq.com),主要从事流体机械研究.
通信作者简介:郑源(1964—),男,山东日照人,教授,博士生导师(zhengyuan@hhu.edu.cn),主要从事流体机械及水利水电工程研究.

17.6%, the volume-averaged velocity is increased by 6%, and the low velocity zone occurrence rate at the bottom is reduced by 12%, suggesting the best transporting and mixing effect. Additionally, the vortex phenomenon has a significant impact on stirring effect. The smaller the number of vortices and the larger the scale of a single vortex, the lower the energy consumption and the more stable. the fluid flow, the better the mixing effect. Altering the setting angle of a wastewater mixer can improve fluid flow pattern in a sewage water treatment pool, suppress sludge deposition and reduce energy consumption of vortex, eventually to achieve an aim with advanced transporting and mixing effect.

Key words: wastewater mixer; numerical simulation; setting angle; vortex; grayscale correlation

污水处理搅拌器是污水处理中重要的搅拌器械,叶轮通过电动机驱动在高速旋转时,产生螺旋射流,推动处理池内的不同溶质以一定速度混合,既保证了污水处理充分反应,又可防止活性污泥沉降、淤积等问题.生产实践指出:处理池局部流速能确保在0.10 m/s左右即可使悬浮固体物分布均匀,避免产生堆积现象[1].

在利用数值模拟分析搅拌器处理池内部流动特性方面,一些学者已经探索出多个切入点进行研究.从叶片角度,陈斌等[2]研究不同叶轮直径的潜水推流器在不同池型下的水力性能.徐顺等[3]研究了搅拌器叶片间隙对轴功率、出口流量、轴推力、搅拌效果的影响.姜宁等[4]设计一种新型螺旋推流器,使污水形成螺旋流态,从而降低反应器中的水力学死区.从摆放位置角度,陈斌等[5]发现推流器安装位置与中间导流墙的间距对流场流速分布影响重大.从池型角度,施卫东等[6]通过改变水池形状,对搅拌器消耗的功率进行了数值计算与分析,并对其性能进行了预测.从功率角度,田飞等[7]利用搅拌器的轴向有效推进距离与水体截面有效扰动半径,对潜水搅拌器的功率进行研究.另外,从试验角度,通过对叶片进行水力设计并对流体流场分布进行试验研究,揭示了池内流体速度分布规律.NAKAI等[8]利用水模试验研究不同转速和安装位置下液面旋涡深度对脱硫剂分散的影响.

目前,对于改善污水处理池搅拌效果,降低搅拌能耗,尚没有明确的技术标准.现有研究大多针对改变搅拌器位置,增设导流墙,优化叶片以及增设搅拌器数量等方法,而对于搅拌器摆放角度以及处理池内部旋涡对搅拌能耗的影响较少提及.在工程应用中,通过改变搅拌器摆放角度,达到优化设计,降低死区率的方式,较为经济、灵活.

文中基于Fluent软件对某公司一款污水处理用搅拌器进行数值模拟,通过对比不同摆放角度的叶轮推流搅拌能力及速度场流动特性,结合平均值法、灰度关联法对模拟结果的特征参数进行综合评价分析,选取适合处理池最优方案的同时,讨论不同摆放角度下处理池内部旋涡对流场的影响,对工程实践具有一定的指导意义.

1 数值模拟

1.1 模型参数

在数值模拟中,对处理池的全流道进行三维定常湍流计算.文中模拟的处理池长33.4 m,宽9.2 m,高6.0 m,池内进口侧布置两台搅拌器,搅拌器中心距池底2.34 m,处理量为50 000 t/d,介质为常温常压的水.搅拌器叶片直径400 mm,轮毂直径0.13 m、高0.14 m,搅拌器原摆放角度为旋转叶轮中心线与墙在水平截面上的锐角夹角为50°,额定转速730 r/min.处理池结构如图1,2所示.

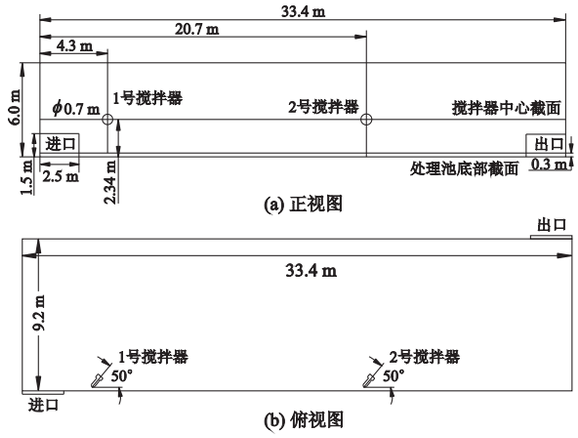


图1 处理器结构图

Fig.1 View of sewage water treatment pool

利用UG软件建立处理池三维物理模型.为搅拌器叶轮创立一个直径410 mm,高度215 mm的圆柱体旋转区域,圆柱体旋转区域底面与轮毂底面重合.结构如图2,3所示.利用旋转区域中旋转的流体能量近似叶片作用液体上的能量,并按照能量方程将能量传递给其余液体.

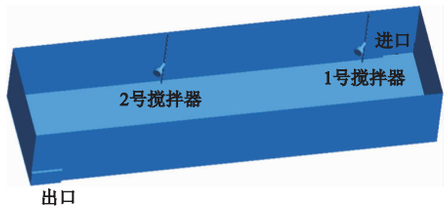


图 2　处理池模型
Fig.2　Model of treatment pool

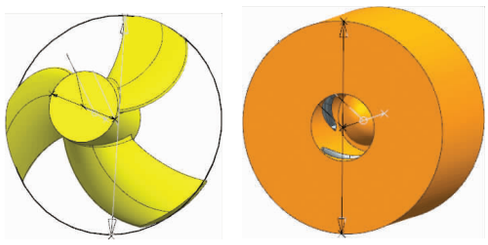


图 3　转轮模型与圆柱体旋转区域
Fig.3　Impeller model and rotating cylindrical region

1.2　网格及边界条件

采用 ICEM 软件对处理池流道和转轮体进行网格划分，并对支撑、叶片以及轮毂这些较为复杂的过流部件表面进行加密，以减少数值模拟计算的误差.考虑到该搅拌器形状的复杂性，采用了自适应性较强的非结构化四面体网格以及边界层网格，并对近壁面等关键部位进行了局部加密.对计算域进行网格无关性研究，在摆放角度为 50°时，网格数为 1.30×10^6，体平均流速为 0.944 5 m/s，网格数为 1.50×10^6，体平均流速为 0.102 9 m/s，网格数为 1.70×10^6，体平均流速为 0.107 7 m/s，网格数为 1.90×10^6，体平均流速为 0.108 3 m/s.当网格数达到 1.70×10^6 后，网格数对体平均流速的影响较小，综合考虑计算资源与计算结果的准确性，选取网格数为 1.70×10^6 的网格进行计算.

计算区域的边界由固体边壁、进水池进口和出水池出口断面组成.进口采用 578 kg/s 的流量进口条件，出口采用自由出流条件，水池表面采用对称边界条件，固体壁面及池底采用无滑移壁面边界条件，不考虑粗糙度对流场的影响.搅拌器旋转区域采用 MRF 旋转坐标系法，固定区域与旋转区域之间的交界面设置为 interface 类型.

1.3　控制方程和求解算法

为准确描述处理池内搅拌器的推流效果及流道内的旋涡现象，选用的控制方程：质量守恒方程、动量方程以及三维标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型方程.

利用 Fluent 软件，采用有限体积法进行方程离散.选择 SIMPLEC 算法进行速度与压力耦合求解，梯度项采用最小二乘法，压力项采用二阶中心差分格式，动量项采用二阶逆风差分格式，湍流动能项采用一阶逆风差分格式，湍流耗散项采用一阶逆风差分格式.计算收敛判断依据为各变量残差绝对值小于 10^{-5}.

2　数值模拟结果与分析

2.1　确定摆放角度

将搅拌器在原摆放角度基础上逆时针旋转，分析 4 种摆放角度 35°，50°，65°，80°的流场情况.

2.1.1　底部速度分布与平均速度值分析

当处理池内流体流速过低时，易在处理池底部形成活性污泥沉降、淤积等现象.故通过观察靠近图 4 底部截面的速度云图，推断处理池底部流态.截面与沟底间距离应适宜，于是选择距离处理池底部 0.3 m 的水平截面.

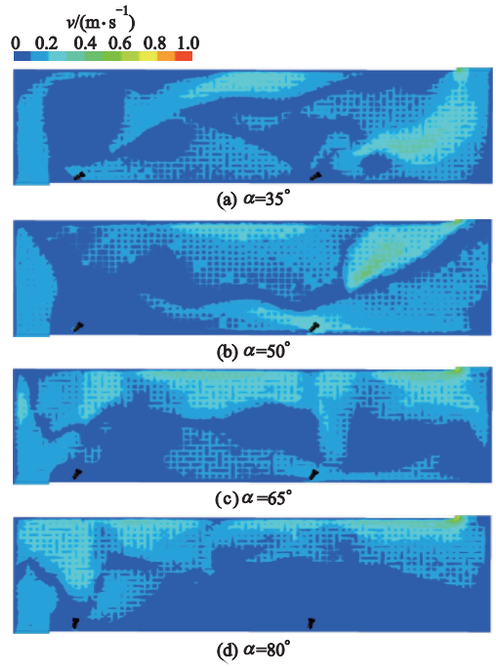


图 4　处理池底部速度云图
Fig.4　Velocity contour in cross-section above pool bottom

分析各方案下底部截面的速度 $v_{底}$ 分布与面上各处速度的平均值变化，如图 5 所示.可知摆放角度 α 为 35°时的底部速度高的区域主要集中于经过搅拌器加速的液体冲击墙体区域与出口区域，这是由于经过 1 号搅拌器加速的液体会以冲击墙面的位置为中心向四周扩散，底部亦收到波动；经过 2 号搅拌

器加速的液体冲击墙体的位置距离出口很近但略高于出口，于是在出口区域形成自上而下的旋涡，扰动处理池底部液体流速.摆放角度为50°时的高流速区面积较大，分布较均匀，平均速度最高，搅拌效果最好.摆放角度为65°时，液体的推流距离较近，被加速的液体与墙体冲击较剧烈，能量耗散较大.摆放角度为80°时，液体与墙体发生激烈冲击，入口区域与被水流冲击的墙体区域流速较高，能量耗散较大，底部低流速区面积大，平均速度较低，推流效果差.

综上所述，以底部速度云图和流场平均速度图为评判依据时，摆放角度为50°时搅拌效果最好.

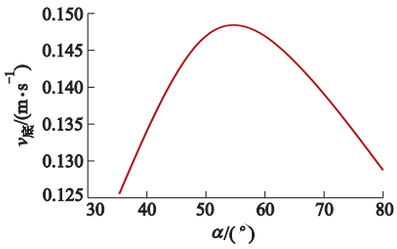


图5 处理池底部平均速度随摆放角度的变化

Fig.5 Mean velocity versus setting angle curve in cross-section above pool bottom

2.1.2 底部流线图分析

图6为处理池底部截面流线图.

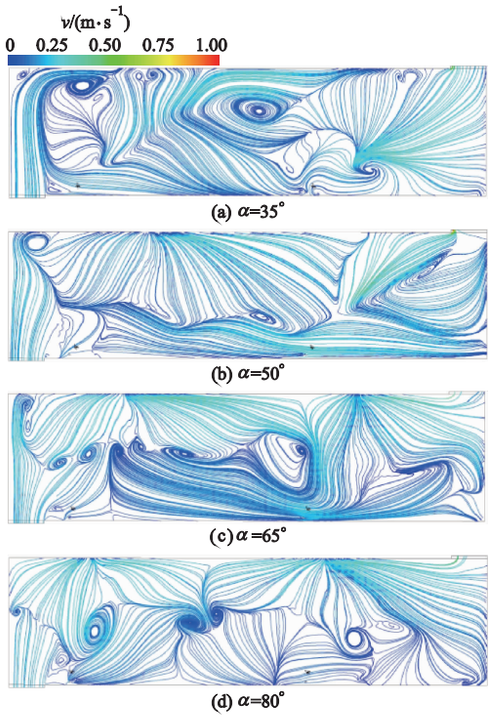


图6 处理池底部截面流线图

Fig.6 Streamline in cross-section above pool bottom

通过对比可知，4种摆放角度的处理池底部都存在旋涡，50°与35°整体流态较平稳.其中50°内的旋涡数量最少，只有3个，第一个旋涡是由于进口来流的挤压，在弯道处产生旋涡；第二个是由于一部分经过1号搅拌器加速的液体在扫掠处理池底部的同时，恰好进入2个搅拌器加速区域之间，产生回流现象；第三个旋涡则是因为2号搅拌器的推流方向略高于出口区域，在压力作用下，形成自上而下的旋涡.虽然摆放角度为35°内的旋涡数量也较少，但由于35°时推流方向靠近出口，液体经过1号和2号搅拌器加速后，一部分液体直接流出处理池，造成搅拌不充分，这也是35°底部截面平均速度低的重要原因.

2.1.3 底部死区率分析

死区率是流场特性分析中衡量污泥沉积的标准，为精确得出搅拌器最佳摆放角度，通过灰色关联法分析处理池底部各速度段的表面积占比，得出最优方案.

对于因摆放角度不同而带来的流动工况不同的灰色评价问题，将每种间隔下速度面积百分比分布值构成一个比较序列，则共有4个序列，每个序列记为

$$X_i(j)=[X_i(1),X_i(2),X_i(3),\cdots,X_i(m)],$$

其中，$i=1,2,\cdots,4$ 为方案个数；$j=1,2,\cdots,5$ 为每个方案中的指标数，具体见表1.

表1 处理池底部各速度段的表面积占比

Tab.1 Ratio of area of five velocity regions to total bottom area in cross-section above pool bottom

v/(m·s^{-1})	35° X_1/%	50° X_2/%	65° X_3/%	80° X_4/%
0~0.10	52.6	50.2	49.1	57.0
0.10~0.15	28.2	30.0	23.5	20.9
0.15~0.20	10.5	12.0	15.8	12.5
0.20~0.30	8.0	6.6	10.1	8.6
>0.30	0.7	1.2	1.5	1.0

为避免处理池内部发生淤泥沉积现象，应使局部地方确保在0.10 m/s左右即可使悬浮固体物分布均匀，不易产生堆积现象.因此在选取理想序列时，将表1中各比较序列的0.10~0.15，0.15~0.20 m/s的最大值，其余速度段的最小值，构成最理想序列，则最理想序列为

$$X_0=\{49.1,30.0,15.8,6.6,0.7\}.$$

灰色关联度的计算步骤如下：

$$\gamma(x_0(k),x_i(k))=\frac{\min\limits_i\min\limits_k|x_0(k)-x_i(k)|+\varepsilon\max\limits_i\max\limits_k|x_0(k)-x_i(k)|}{|x_0(k)-x_i(k)|+\varepsilon\max\limits_i\max\limits_k|x_0(k)-x_i(k)|},\tag{1}$$

$$\gamma(X_0,X_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\gamma[x_0(k),x_i(k)]. \quad (2)$$

则 $\gamma(X_0,X_i)$ 称为 X_0 与 X_i 的灰色关联度，其中 ε 为分辨系数，通常取 0.5.

不同摆放角度的特征序列与理想序列的关联度计算结果如图 7，图中 c 为综合指标值.

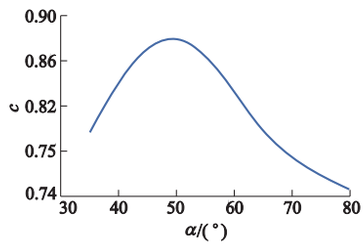


图 7　不同摆放角度下的综合指标值

Fig.7　Comprehensive index versus setting angle curve

由图 7 可见：当摆放角度为 50°时总体关联度最高，为 0.880；65°时，为 0.798；35°时，为 0.797；80°时，为 0.746.则通过灰色关联分析法评价搅拌器摆放角度为 50°时，处理池的运行工况最接近理想情况，为 4 个方案中的最优方案.

2.2　流场特性分析与讨论

2.2.1　流场分析

根据上述结论，并结合处理池不同位置平均速度（见表 2），摆放角度为 50°时，可以最大提高底部平均流速 17.6%，体平均流速 6%，最大降低死区率 12%，是最优方案.对 50°时的速度流场进行分析.

表 2　处理池不同位置平均速度

Tab.2　Average velocity at different locations in water treatment pool

α/(°)	v_{in}/(m·s^{-1})	v_{out}/(m·s^{-1})	v_{avg}/(m·s^{-1})
35	0.154 598	0.210 368	0.101 637
50	0.154 598	0.204 412	0.107 693
65	0.154 598	0.194 438	0.105 670
80	0.154 598	0.182 367	0.101 926

观察图 8 搅拌器中心截面流线图，整个流场存在 4 个主要旋涡，分别分布在区域 1 拐角处、区域 1 入口处、区域 2 两股加速水流之间、区域 3 出口处 4 个区域.

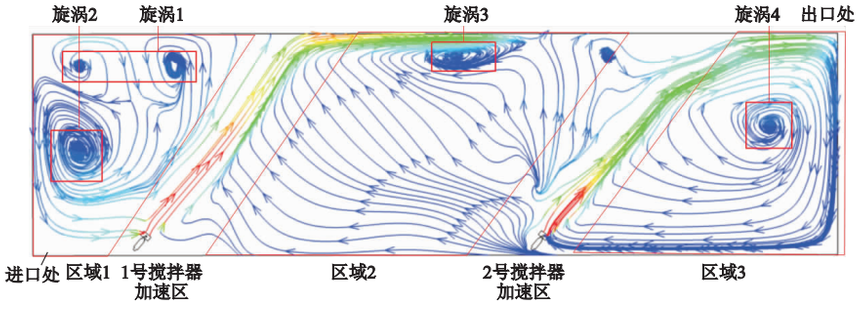


图 8　搅拌器中心截面流线图

Fig.8　Streamline in horizontal plane through mixer-axis

水流在刚进入处理池时，由于自身流速，在第一次冲击墙面时在区域 1 拐角处形成旋涡 1，旋涡 1 向上扩散并向右偏折流动，流入 1 号搅拌器加速区.由于旋涡 1 的存在，逐渐影响入口来流，在入口处形成旋涡 2.经搅拌器加速，液体变成螺旋射流，在纵向流动同时还有周向扩散流动.当加速液体碰墙后，产生附壁现象，一部分液体扫掠流场上下墙壁进入 2 号搅拌器加速区与区域 3；另一部分液体在作平行于边界方向的平移时受到横向压力作用，产生环形流动的二次流即旋涡 3，旋涡 3 在区域 2 逐渐均布.经 2 号搅拌器加速的液体，冲击墙面的位置略高于出口，在自由出口的条件下，在区域 3 形成下翻流动的旋涡 4，最终流出流场.

2.2.2　旋涡对流场的影响

如图 9 所示，取距上表面 0.3 m 的上部截面、推流器中心处的中部截面、距处理池底部 0.3 m 的下部截面，3 个截面的流线图刻画整个流场流动特性，对比不同摆放角度的流线图，讨论流场内旋涡对流场的影响.

观察表 2，4 种不同摆放角度的入口流速 v_{in} 相同，经过相同功率的搅拌器作用，流体获得的能量是相同的.这些能量主要支撑处理池内液体流动、处理池内液体流动损耗与出口处液体运动.体平均流速 v_{avg} 代表维持液体运动的能量，出口流速 v_{out} 代表液体在出口处的能量，利用处理池内平均流速与出口流速即可得到处理池内部能量消耗情况.

处理池内的流体经过对流和涡流分裂的作用，靠掺混作用达到均匀混合的效果.在湍流流场内，存在不同大小的涡旋，流体的能量都储存在这些涡旋里.大尺度涡旋边界上会形成剪切力把大尺度涡旋分裂

成多个小尺度涡旋,同时大尺度涡旋的能量也传递给了小涡旋,在能量传递的过程中同时存在能量损失.

由图9和表2可知,65°与80°流场内部旋涡数量较多,流体流态紊乱,且出口流速与体平均流速与50°相比较小,能量损耗较大.35°的旋涡数量与分布规律跟0°相似,但35°的旋涡尺度明显小于50°,单个旋涡空间占比较低,且35°由于推流方向靠近出口,一小部分液体没有经过充分融合搅拌就流出处理池,所以出口流速较高,体平均流速最低,故搅拌效果依然逊于50°.

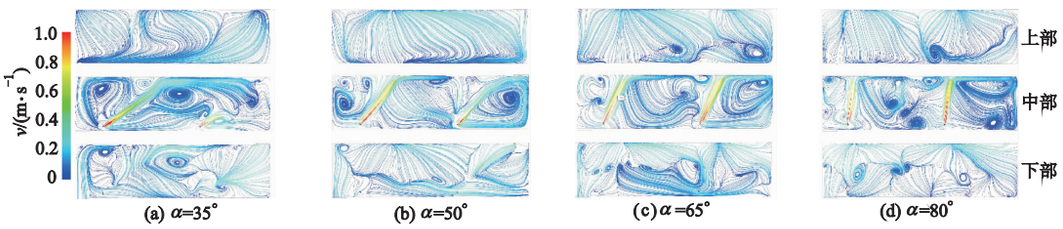


图9 不同摆放角度流线图

Fig.9 Streamline at different setting angles

3 结 论

1)调整搅拌器摆放角度可以改善处理池内部流态,提高平均流速,降低底部死区率,进而提高处理池推流搅拌效果.

2)旋涡现象对推流搅拌效果影响明显,旋涡数量越少,单个旋涡尺度越大,流态越平稳,旋涡能耗越低,推流搅拌效果越好.可以通过改变搅拌器摆放角度减少旋涡能耗.

3)对于该处理池搅拌器摆放角度为50°时,可以最大提高底部平均流速17.6%,提高体平均流速6%,最大降低底部死区率12%.流场的整体流速分布最为均匀,推流搅拌效果最好.

4)在分析对比各方案死区率时,平均速度法难以体现各速度段占比,利用灰度关联法择优更准确.

参考文献(References)

[1] 邓荣森.氧化沟污水处理理论与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.

[2] 陈斌,庄于方,陈孔明,等. 叶轮直径对潜水推流器水力特性的影响[J]. 中国给水排水,2018,34(5):57-60.
CHEN Bin, ZHUANG Yufang, CHEN Kongming, et al. Influence of impeller diameter on hydraulic characteristics of submersible propeller[J]. China water & wastewater, 2018,34(5):57-60. (in Chinese)

[3] 徐顺,汤方平,汪文生,等. 叶片间隙对潜水搅拌器流场特性的影响[J]. 中国给水排水,2017,33(1):106-109.
XU Shun, TANG Fangping, WANG Wensheng, et al. Influence of different blade gaps on flow field of submersible mixer[J]. China water & wastewater, 2017,33(1):106-109. (in Chinese)

[4] 姜宁,徐璇,吉芳英,等. 污水螺旋推流器的设计及试验效果研究[J]. 中国给水排水, 2014,30(9):85-87.
JIANG Ning, XU Xuan, JI Fangying, et al. Design and experimental research of spiral flow propeller for wastewater[J]. China water & wastewater,2014,30(9):85-87. (in Chinese)

[5] 陈斌,王炳祺,张华,等. 推流器布置对氧化沟流场特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(3):227-231.
CHEN Bin, WANG Bingqi, ZHANG Hua, et al. Effects of propeller layout position on flow characteristics in oxidation ditch[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016,34(3):227-231. (in Chinese)

[6] 施卫东,田飞,曹卫东,等. 不同池形中推流搅拌器功率消耗的数值模拟[J]. 排灌机械, 2009, 27(3):140-144.
SHI Weidong, TIAN Fei, CAO Weidong, et al. Numerical simulation of mixer power consumptions in different ponds[J]. Drainage and irrigation machinery, 2009, 27(3):140-144. (in Chinese)

[7] 田飞,施卫东,卢熙宁,等. 三叶片潜水搅拌器的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1):11-14.
TIAN Fei, SHI Weidong, LU Xining, et al. Numerical simulation of submersible mixer with three blades[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2012, 30(1):11-14. (in Chinese)

[8] NAKAI Y, SUMI I, MATSUNO H, et al. Effect of flux dispersion behavior on desulfurization of hot metal[J]. ISIJ international,2010,50(3): 403-410.

(责任编辑 谈国鹏)