

叶轮直径对潜水推流器水力特性的影响

陈 斌¹, 庄于方¹, 陈孔明², 陈晓军³, 杨加林³

(1. 合肥工业大学 化工机械研究所, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥朱砖井污水处理有限公司, 安徽 合肥 230011; 3. 蓝深集团股份有限公司, 江苏 南京 211500)

摘 要: 针对污水处理池内易产生污泥沉积的现象,研究了叶轮直径对潜水推流器水力特性的影响。选取不同叶轮直径的潜水推流器作为研究对象,基于 STAR-CCM+ 仿真软件,采用多面体网格划分方式,对潜水推流器进行全流场定常数值模拟,同时分析不同叶轮直径的潜水推流器在环形检验池和方形池中运行时池内流体的平均流速。结果表明,在相同功率下,潜水推流器在不同的池子中运行时,叶轮直径对潜水推流器的水力性能有很大影响。在环形检验池中,叶轮直径增大,潜水推流器的推流效果增强;在方形池中,随着叶轮直径的增大,潜水推流器的推流效果则先增强后减弱,当叶轮直径为 3.7 m 时,潜水推流器的推流效果最好。根据动量定理推导出潜水推流器的效率计算公式,并在该公式的基础上分析了潜水推流器在不同池型中推流效果不同的原因。

关键词: 潜水推流器; 水力特性; 叶轮直径; 平均流速; 效率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0057-05

Influence of Impeller Diameter on Hydraulic Characteristics of Submersible Propeller

CHEN Bin¹, ZHUANG Yu-fang¹, CHEN Kong-ming², CHEN Xiao-jun³,
YANG Jia-lin³

(1. Research Institute of Chemical Machinery, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Hefei Zhuzhuanjing Sewage Treatment Co. Ltd., Hefei 230011, China; 3. Lanshen Group Co. Ltd., Nanjing 211500, China)

Abstract: To prevent sludge deposition in sewage treatment pool, the influences of impeller diameter on the hydraulic characteristics of submersible propellers were investigated. Submersible propellers with different impeller diameter were simulated in annular test pool and square pool using STAR-CCM+ simulation software. The simulations used polyhedral mesh and constant parameters. The average flow rates in the two pools were analyzed. The results showed that the impeller diameter had a substantial impact on the hydraulic characteristics of the submersible propellers. In the annular test pool, the larger impeller diameter, the better the pushing flow effect from submersible propellers. In the square pool, with the increase of impeller diameter, the pushing flow effect from the submersible propellers increased initially and then decreased; when the diameter of the impeller was 3.7 m, the pushing flow effect from the submersible propeller was the best. Based on the momentum theorem, the efficiency formula of the submersible propellers was deduced, and the mechanism of the different pushing flow effect in different types

of pools was analyzed.

Key words: submersible propeller; hydraulic characteristics; impeller diameter; average flow rate; efficiency

潜水推流器是重要的污水处理设备,属于机电一体化结构,转速一般在 200 r/min 以下,低速旋转时产生较大体积的流动,使得污水处理池内活性污泥与水的混合液循环流动,起到防止活性污泥沉积的作用,广泛应用于各类水处理工艺中^[1,2]。

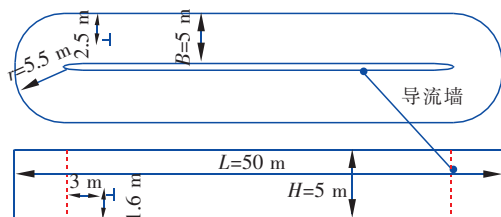
2014 版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)中规定氧化沟内的平均流速应大于 0.25 m/s。从中可以看出平均流速可作为潜水推流器推流效果的一个评判依据。一般认为平均流速越高,潜水推流器的推流效果越好。对于潜水推流器能耗指标的要求,国家标准《潜水推流式搅拌机》(GB/T 33566—2017)规定推流流速不小于 0.3 m/s 时,比功率不得大于 3 W/m³。在该标准的附录 A 中,特别指出比功率测定应在环形检验池中,通过对环形检验池中各点流速的测定得到流场的分布,进而得到计算比功率所需的数据。

随着计算流体力学(CFD)和计算机硬件技术的发展,以及对潜水推流器研究方面的细化,笔者着眼于潜水推流器转速与叶轮外径,研究叶轮外径与转速之间的映射关系,探索环形检验池与方形池中,叶轮外径与转速的最佳匹配值,以填补国内外相关研究的空白。

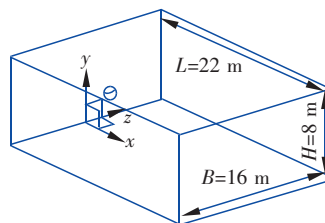
1 数值计算

1.1 计算模型基本参数

根据《潜水推流式搅拌机》(GB/T 33566—2017)的规定,对标准环形检验池进行建模,水池流动宽度 B 为 5 m,弯道半径 r 为 5.5 m,有效水深 H 为 5 m,水池直段长度 L 为 50 m,设备安装高度距离池底 1.6 m。为了对比不同池型对潜水推流器选型的影响,同时设定一个常见的方形池与环形池作对比,见图 1。



a. 环形检验池及推流器安放示意



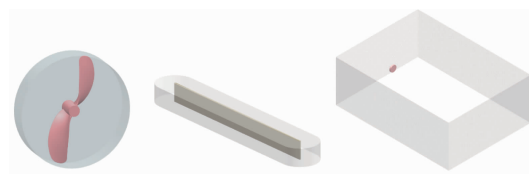
b. 方形池及推流器安放示意

图1 环形检验池和方形池的平面布置

Fig. 1 Plane layout of annular test pool and square pool

方形池长 $L = 22$ m, 宽 $B = 16$ m, 深 $H = 8$ m, 安装高度距池底 3.6 m。

计算原型采用的是蓝深集团 QJB4/4-1100/2 潜水推流器叶轮,其直径 $D_2 = 1.1$ m, 轮毂高为 0.2 m, 轮毂半径 $r_b = 0.14$ m, 转速 $n = 135$ r/min。对潜水推流器叶轮和两个池子进行三维建模,如图 2 所示。



a. 潜水推流器模型 b. 环形检验池模型 c. 方形池子中的计算区域

图2 三维建模

Fig. 2 3D model

1.2 网格划分和网格无关性检验

将潜水推流器水体模型和环形检验池水体及方形池水体模型导入到 STAR-CCM+ 软件中。采用多面体网格技术对计算区域进行网格划分,生成多面体网格。

计算区域的网格合理划分和高质量是计算流体力学(CFD)计算的前提条件,多面体网格对网格数量依赖性比四面体网格小,同时其收敛速度、趋势更优于四面体网格^[3]。

计算区域包括静止部分和旋转部分,叶轮是旋转部分。旋转部分与静止部分通过交界面连接。边界采用棱柱层网格,棱柱层厚度为 0.002 m,层数为 5 层,增长率为 1.2。为了保证计算精度,对检验池

导流墙转弯处以及潜水推流器叶片进行局部加密,如图 3 所示。

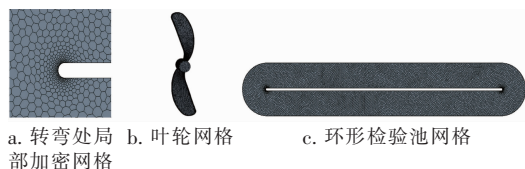


图 3 计算区域的多面体网格

Fig. 3 Polyhedral mesh in computing region

进行数值计算时,在其他条件不变的情况下,网格数增加,由网格引起的计算误差就会减小,但是网格数增加意味着计算量变大,所以选择合适的网格数对于数值计算的准确性至关重要。对计算区域进行网格无关性检验,结果表明,随着网格数的增加,潜水推流器的功率减小。当网格数为 204×10^4 、功率达到 2.517 kW 后,网格数对功率的影响较小,综合考虑计算时间与计算结果的准确性,选取网格数为 204×10^4 的网格进行数值计算。

1.3 边界条件及参数设置

设定环形检验池和方形池内流体为定常分离流,密度恒定。考虑重力影响,重力加速度取 9.81 m/s^2 。基于雷诺平均 N-S 方程及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对全流场进行定常模拟。两个池子均不考虑进出水情况。

近壁面区域采用壁面函数处理,应用两层所有 $y+$ 壁面处理。

2 方案设计与结果分析

2.1 方案设计

分别在环形检验池和方形池中,以直径 $D_2 = 1.1 \text{ m}$ 、转速 $n = 135 \text{ r/min}$ 的潜水推流器模型为原型,对原型进行相似换算,以一定的比例放大,得到不同的叶轮直径,并相应地调整叶轮转速,使得这些不同叶轮直径的潜水推流器输出功率相等,对比在相同的输出功率、不同的池子中叶轮直径对潜水推流器水力特性的影响。

潜水推流器功率 P 的计算公式:

$$P = \frac{M \cdot n}{9\,553} \quad (1)$$

式中, M 为输出力矩; n 为转速。

不同直径的叶轮,计算可得对应的力矩 M 。其中 M 随叶轮直径的增大而变大,通过调整转速 n ,使得输出功率 P 相同。

表 1、2 分别是潜水推流器在环形检验池和方形池中运行时,不同叶轮直径潜水推流器所对应的转速和功率。通过对转速的调试,尽可能地使不同叶轮直径的潜水推流器功率一致,比较相同功率下不同叶轮直径的潜水推流器在环形检验池和方形池中的平均流速。

表 1 环形检验池中不同叶轮直径潜水推流器的功率

Tab. 1 Power of submersible propeller with different impeller diameters in annular test pool

d/m	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$M/(\text{N} \cdot \text{m})$	P/kW
1.1	135	178.15	2.517
1.5	78.5	306.34	2.517
1.9	52	463.04	2.520
2.3	37.23	645.60	2.516
2.7	28	857.51	2.513
3.1	22.28	1 079.36	2.517
3.7	17.38	1 381.4	2.513

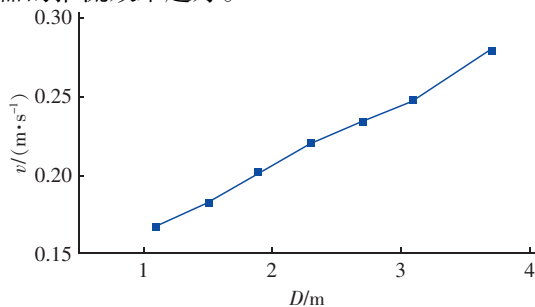
表 2 方形池中不同叶轮直径潜水推流器的功率

Tab. 2 Power of submersible propeller with different impeller diameters in square pool

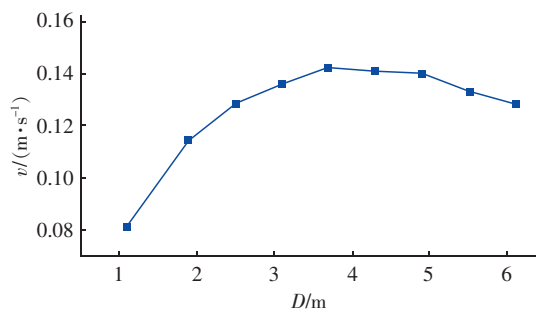
d/m	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$M/(\text{N} \cdot \text{m})$	P/kW
1.1	135	172.76	2.441
1.9	53.2	438.53	2.442
2.5	33.2	700.4	2.434
3.1	23	1 011.41	2.435
3.7	17.11	1 365.46	2.446
4.3	13.19	1 764.22	2.436
4.9	10.6	2 207.9	2.45
5.5	8.7	2 676.49	2.438
6.1	7.32	3 190.9	2.445

2.2 平均流速的分析

统计不同叶轮直径下两种池子内流体的平均流速,结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,在环形检验池中运行时,池内流体平均流速随着潜水推流器叶轮直径的增大而提高,即在环形检验池中运行时,相同功率下,叶轮直径越大则转速越低,潜水推流器的推流效果越好。



a. 环形检验池内流体的平均流速



b. 方形池内流体的平均流速

图4 不同叶轮直径下两种池子内流体的平均流速

Fig. 4 Average flow velocity in two kinds of pools with different impeller diameters

从图4(b)可以看出,在方形池中运行时,池内流体平均流速随着潜水推流器叶轮直径的增大而提高,但叶轮直径增大到3.7 m时,方形池内的平均流速开始下降,可见叶轮直径并不是越大越好。即在方形池中运行时,在相同功率下,潜水推流器推流效果随叶轮直径的增大先增后减,叶轮直径为3.7 m时,推流效果最好。

2.3 流场特性的分析

假设水是不可压缩流体,在流场中,做一个包含叶轮在内的流管,如图5所示。

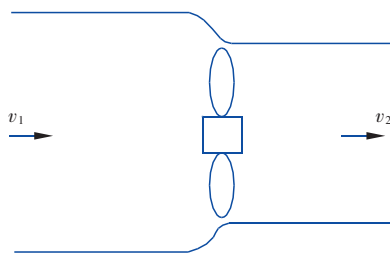


图5 潜水推流器的工作原理

Fig. 5 Working principle of submersible propeller

由于流经叶轮后流速有变化,根据连续性原理,叶轮前后流管的面积是不同的。在叶轮的远前方,设流速为 v_1 ,叶轮后方流速为 v_2 。对于环形池, v_1 可视为平均流速。根据动量定理,叶轮作用于水体的推力为:

$$T = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (2)$$

而用于维持水池内稳定流动所需要的功率则为 $T \times v_1$ 。

将水流速度从 v_1 提高到 v_2 ,叶轮的输出功率(水功率)为:

$$P = \frac{1}{2} \rho Q (v_2^2 - v_1^2) \quad (3)$$

维持池内平均速度为 v_1 的稳定流动所需要的功率与叶轮的输出功率之比称为推流效率 η ,即:

$$\eta = \frac{T v_1}{P} = \frac{2 v_1}{v_1 + v_2} \quad (4)$$

从式(4)可见,为提高推流效率,只有减小 v_2 与 v_1 的差值(若 $v_2 - v_1 = 0$,则 $\eta = 1$)。但为保持推力不变,则必须同时增加流量。仅仅降低转速只可降低 v_2 ,但要保持推力和增加流量,就需加大直径。因此,环形池中,推流器叶轮直径越大则效率越高。

对于方形池,取过潜水推流器旋转中心的横截面进行分析。图6为方形池内流场的速度矢量图,可以看到潜水推流器在方形池中运行时有两个方向的流动,一个是主流方向(向前),潜水推流器直接推动受控流体向前流动,在潜水推流器叶轮前方区域;二是受控流体碰撞到壁面后产生回流,流动方向与主流方向相反。此外,对于方形池,叶轮直径的变化对池内速度分布有明显影响,所以流动阻力不仅仅与流速有关,还与叶轮直径有关,即 v_1 不能简单地视为平均流速,因此,上述公式的分析并不适合方形池。

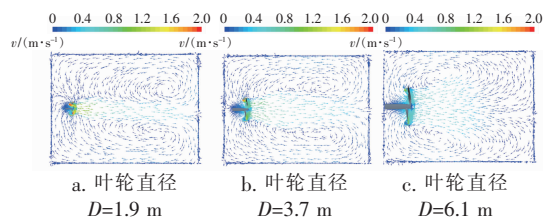


图6 方形池的横截面速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector graph of cross section of square pool

方形池中,总的流动阻力应是两个方向的阻力和。对比图6(b)、(c),当叶轮直径过大时,主流横截面很大,回流的通道面积就小了,总的阻力也就增大了,潜水推流器的效率就会下降,因此在方形池中潜水推流器的效率随着叶轮直径的增大而提高,但当叶轮直径过大时效率反而下降。因为消耗的功率相同,故潜水推流器在方形池中运行时,随着叶轮直径的增大推流效果先增后减。因此,对于方形池中潜水推流器的选型应进行更加详细的分析。

3 结论

- ① 池型对潜水推流器的推流效果有直接影

(下转第65页)