

基于比功率的潜水推流器优化研究

陈 斌¹, 蔡 许¹, 庄于方¹, 杨加林², 金秋景³

(1. 合肥工业大学 化工机械研究所, 安徽 合肥 230009; 2. 蓝深集团股份有限公司, 江苏 南京 211500; 3. 南京合工流体科技有限公司, 江苏 南京 211500)

摘 要: 解读新发布的国家标准《潜水推流式搅拌机》(GB/T 33566—2017), 分别从试验和理论的角度阐述计算比功率的方法, 并论证了它们的优点和局限性。以比功率为评判标准, 基于CFD 商用软件 STAR-CCM+, 研究两叶片潜水推流器在标准检验环形池里比功率随转速和叶轮直径变化的规律。结果表明, 两叶片潜水推流器在标准环形池中运行时, 保持叶轮直径不变, 比功率均随着转速的增大先减后增, 即存在经济转速点; 在恒功率下, 两叶片潜水推流器的比功率随着叶轮直径的增大而减小, 其中在叶轮直径处于 1.1~2.5 m 范围时, 潜水推流器的比功率随着叶轮直径的增大而急剧减小, 而当叶轮直径 > 2.5 m 时, 潜水推流器的比功率随着叶轮直径的增大而缓慢减小。

关键词: 潜水推流器; 比功率; 数值计算; 经济转速; 叶轮直径

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0094-05

Optimization of Submersible Flow Pusher Based on Specific Power

CHEN Bin¹, CAI Xu¹, ZHUANG Yu-fang¹, YANG Jia-lin², JIN Qiu-jing³

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

Abstract: The newly published national standard *Pusher Submersible Agitator* (GB/T 33566 - 2017) was unscrambled, and methods of calculating specific power from experimental and theoretical perspectives were elucidated and their advantages and limitations were demonstrated. The influence of variational rotational speed and impeller diameter on the specific power of a two-blade submersible flow pusher in a standard annular testing tank was investigated through taking specific power as the evaluation standard and using CFD commercial software STAR-CCM+. The results showed that the specific power decreased first and then increased with the increase of rotational speed when the two-blade submersible flow pusher with a constant diameter was operated in the standard annular tank, which indicated that there existed an economic rotational speed point. The results also showed that the specific power of the two-blade submersible flow pusher decreased with the increase of impeller diameter under constant power. When the impeller diameter changed between 1.1 m and 2.5 m, the specific power of the two-blade submersible flow pusher decreased sharply with the increase of impeller diameter, while it decreased slowly with the increase of impeller diameter when the impeller diameter was more than 2.5 m.

Key words: submersible flow pusher; specific power; numerical calculation; economic rotational speed; impeller diameter

国内外对于潜水推流器的研究已经取得了一定的进展。施卫东等^[1]基于 FLUENT 软件,采用4种不同池型进行了数值计算,发现渐进圆管水池和直圆管水池是较为理想的污水搅拌水池;陈斌等^[2]在池型结构不变的情况下,通过改变推流器的布置位置,发现推流器与中间导流墙的距离为环形导流墙半径与偏置距离之和的0.85倍时,整体的流速分布最为均匀;刘启龙等^[3-4]采用声学多普勒测速仪对推流器单独运行时的流场进行分析,发现推流器安装在断面中部比安装在底部的动力利用率高;林燕^[5]定量分析了水池中的系统损失,依据所需推力和潜水搅拌机额定推力这两大主要因素对潜水搅拌机进行精确选型;邓荣森等^[6]对潜水推流器的选型计算方法进行了讨论,在推算推流器输出功率的基础上,根据螺旋桨效率和电机效率的计算方法,计算出了推流器叶片所需的轴向功率。

综上所述,目前国内对于潜水推流器的研究主要集中在工作池型、安装位置、选型这3个方面,而对潜水推流器自身的优化鲜见报道,其主要原因是缺乏对潜水推流器推流效果的评判标准。随着国家标准《潜水推流式搅拌机》(GB/T 33566—2017)的发布,将比功率规定为潜水推流器的能耗指标,为潜水推流器的研究提供了相对完善的判定依据。基于此,笔者将通过解读该标准来论证比功率试验测定的优缺点,并以比功率为评判标准,通过对两叶片潜水推流器进行数值计算,研究转速和叶轮直径对其水力特性的影响,旨在为潜水推流器的优化提供理论依据。

1 优化依据的探讨

1.1 比功率的计算公式

国家标准《潜水推流式搅拌机》(GB/T 33566—2017)将比功率作为推流器推流效果好坏的评判标准,其计算公式如下:

$$E = \frac{P}{V} \quad (1)$$

式中: E 为比功率, W/m^3 ; P 为电机输入功率, W ; V 为当量有效容积, m^3 。

当量有效容积的计算方法为:

$$V = B \times H \times L \quad (2)$$

式中: B 为检验池单侧流道宽度, m ; H 为有效深度, m ; L 为当量有效推流长度,定义为0.3 m/s 的等速线沿推流方向所能达到的最远距离, m 。

1.2 试验测定比功率

1.2.1 标准检验池

试验测定应在《潜水推流式搅拌机》(GB/T 33566—2017)里所提出的标准环形测试水池内进行,水池流道宽度 B 为5 m 、有效水深 H 为5 m 、水池直段长度 L 为50 m 。图1为水池平面及潜水推流器的安放位置示意。

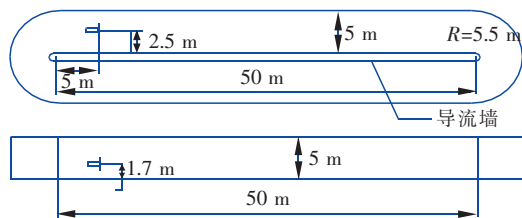


图1 环形测试水池平面及潜水推流器的安放位置

Fig. 1 Planar graph of annular testing tank and location of submersible flow pusher

1.2.2 当量有效推流长度 L 的测量

当量有效推流长度 L 的测量原理是:测量垂直于潜水推流器推流方向一系列的平面上的速度,并将这些平面中 $v = 0.3 \text{ m}/\text{s}$ 的点连起来,形成等流速线,等流速线沿推流方向的长度即为当量有效推流长度,如图2所示。

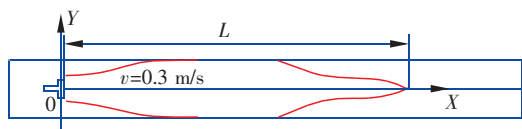


图2 当量有效推流长度

Fig. 2 The equivalent effective pushing length

1.2.3 试验测定比功率方法的局限性

① 环形检验池占地面积大、造价昂贵、建造周期长,并非每个厂家都有这样的水池,因此有很大的局限性。

② 在测定过程中,由于观测者感官鉴别能力有限,所以在仪器的安置、校准、读数等方面都会产生误差;观测者的技术水平和工作态度,也会对观测数据质量有直接影响;仪器本身的精度将导致比功率的测定出现偏差。

③ 当量长度的测量精度较低。如图3所示,保持电机输入功率一致的情况下,由于试验工况环境比较复杂,在当量有效长度一致的情况下,可能出现多种流速分布情况(如图3中a、b、c),这将导致当量有效容积出现较大的测量误差。

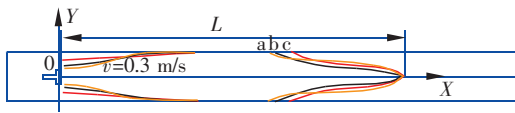


图3 相同当量有效推流长度下出现的多种等流线

Fig. 3 Multiple streamline graphs under constant equivalent effective pushing length

1.3 CFD技术测定比功率

与试验测定比功率相比,CFD技术的优势主要有两点:①当量有效容积的精准测量。标准中当量有效容积测量精度低,而数值计算可精确计算水体体积,即通过对求解收敛后的流场积分求解 $v > 0.3$ m/s 的水体体积。②相比试验测定,CFD技术具有精度高、成本低、周期短等优点。

综合以上讨论,本研究将通过CFD技术来测定比功率,并以比功率为评判标准来进行后续研究。

2 模型的选择和建立

选用某公司生产的QJB3/4-1100/2-52/B型号潜水推流器作为研究对象,叶片数为2,其叶轮直径 $d_0 = 1\ 100$ mm,轮毂直径 $d_h = 360$ mm,额定转速 $n_0 = 52$ r/min。建立的模型如图4所示。

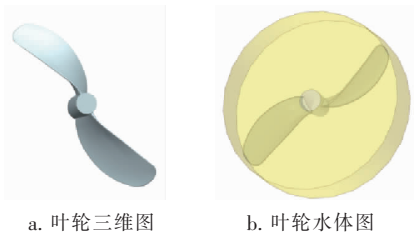


图4 叶轮模型

Fig. 4 Impeller model

3 数值计算

3.1 网格划分

由于潜水推流器叶片的扭曲程度高,本研究将采用多面体网格和边界棱柱层网格的混合网格划分方式,并对叶片附近进行局部加密处理,生成的网格如图5所示。



图5 网格划分

Fig. 5 Grid partition

3.2 网格无关性验证

分别取总网格数为 60×10^4 、 80×10^4 、 140×10^4 、 180×10^4 、 260×10^4 ,以潜水推流器轴功率的变化为指标来衡量网格数量对数值计算结果精度的影响。结果表明,当计算区域的网格数在 180×10^4 以上时,网格数对功率的影响较小。综合考虑计算时间以及计算结果的准确性,选取网格数为 180×10^4 进行数值计算。

3.3 边界条件的设定

以清水为介质,进行单相流动模拟。试验水池无进、出水情况,故水池流态为封闭式分离流流动;叶轮部分为旋转区域,转速根据需求设定,其余部分均为静止区域;控制方程选用 Reynolds - Averaged N - S方程;选用标准 $k - \varepsilon$ 湍流模型;收敛评判依据是所有残差均小于 10^{-4} 。

4 结果与分析

4.1 恒直径下转速变化对推流效果的影响

保持叶轮直径恒定,通过改变电机转速 n ,对两叶片潜水推流器进行不同转速工况下的三维定常数值模拟,依据计算结果绘制比功率随转速变化的曲线,如图6所示。可知,在环形池内,该水力模型的比功率随着转速的提高先减后增,存在经济转速点,在额定转速下比功率最小。按照比功率的定义,从理论上讲,转速小于额定转速时,转速越高,比功率越小,越节能。但在实际工程当中,由于转速和电机配套功率是呈正相关的,比功率降低的同时,所需的配套功率反而增加,过度地提高转速来降低比功率反而并不节能,因此还需对恒功率下潜水推流器的水力特性展开讨论。

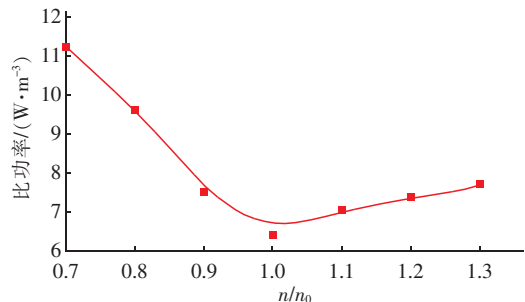


图6 两叶片潜水推流器比功率随转速的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of specific power with rotational speed of the two-blade submersible flow pusher

4.2 恒功率下叶轮直径对推流效果的影响

以给定的两叶片潜水推流器为原型,通过比例

缩放得到叶轮直径分别为 1.1、1.5、1.9、2.5、3.1、3.7 和 4.2 m 的潜水推流器水力模型。根据相似换算定律^[7]通过调整转速来使得潜水推流器保持恒功率。计算结果如表 1 所示。

表 1 恒功率下环形检验池中两叶片潜水推流器的数值计算结果

Tab. 1 Numerical calculation results of two-blade submersible flow pusher under constant power in annular testing tank

叶轮直径/m	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	转矩/ ($N \cdot m$)	电机功率/ kW	比功率/ ($W \cdot m^{-3}$)
1.1	135.00	178.15	2.517	6.45
1.5	78.50	306.34	2.517	5.23
1.9	52.00	463.04	2.520	4.32
2.5	32.20	746.20	2.515	3.20
3.1	22.28	1 079.36	2.517	2.70
3.7	17.38	1 381.40	2.513	2.14
4.2	14.15	1 697.00	2.514	0.31

绘制恒功率下比功率随潜水推流器叶轮直径变化的曲线,如图 7 所示。

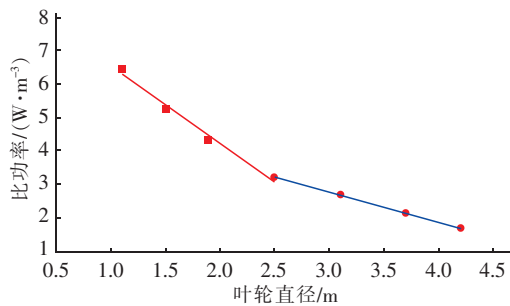


图 7 恒功率下环形检验池中两叶片潜水推流器比功率随叶轮直径的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of specific power with diameter of the two-blade submersible flow pusher under constant power in annular testing tank

由图 7 可以发现,在保持相同的配套功率下,两叶片潜水推流器的比功率随着叶轮直径的增大而减小。叶轮直径处于 1.1~2.5 m 范围时,潜水推流器的比功率随着叶轮直径的增大而急剧减小,因此在这个范围内,通过改变叶轮直径来减小比功率以达到节能的效果是比较明显的,同时也很好地解释了国内潜水推流器行业中其叶轮直径均小于 2.5 m 这一现象。而在叶轮直径处于 2.5~4.2 m 范围时,比功率随着叶轮直径的变化较为平缓,在这个范围内通过增大叶轮直径来降低比功率的节能效果不明显。考虑到叶轮直径越大,造价也更高,并且当转速较高时,其强度也会存在问题,增加潜在的维修成

本,因此保持恒功率下叶轮直径为 2.5 m 是较为经济的。

5 结论

① 解读了国家标准《潜水推流式搅拌机》(GB/T 33566—2017),介绍了从试验和 CFD 角度测定比功率的方法,发现利用 CFD 方法来进行比功率的测定更为经济和准确。

② 在环形检验池中,以比功率为评判标准,在保持叶轮直径恒定的情况下,发现两叶片潜水推流器比功率随着转速的增大先减后增,存在经济转速;该水力模型于额定转速下比功率最低,推流效果最佳,设计是合理的。

③ 在恒功率工况下,该水力模型的比功率随着叶轮直径的增大而减小;叶轮直径处于 1.1~2.5 m 范围时,比功率随着叶轮直径的增大而急剧减小;叶轮直径在 2.5 m 以上时,比功率随着叶轮直径的增大而缓慢减小。综合考虑经济和强度问题,应在 1.1~2.5 m 范围内通过减小叶轮直径来减小比功率以达到节能的目的,并且选用叶轮直径为 2.5 m 是较为经济的。

参考文献:

- [1] 施卫东,田飞,曹卫东,等. 不同池形中推流搅拌机功率消耗的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,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).
- [2] 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]. Drainage and Irrigation Machinery, 2016, 34(3): 227-231 (in Chinese).
- [3] 刘启龙,何建京. 水下推动器对氧化沟流场特性影响的实验研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(11):93-98.
Liu Qilong, He Jianjing. Submerged propeller's influence on oxidation ditch flow characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(11): 93-98 (in Chinese).
- [4] 唐瑜谦,何建京,刘启龙. 水下推动器作用下氧化沟流

场的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(3): 317-323.

Tang Yuqian, He Jianjing, Liu Qilong. Numerical simulation of flow fields in an oxidation ditch of taking a submerged propeller as the power [J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(3): 317-323 (in Chinese).

- [5] 林燕. 利用推力和 F/P_1 值对潜水搅拌机进行精确选型[J]. 中国给水排水, 2008, 24(16): 48-50.

Lin Yan. Application of thrust and F/P_1 ratio in accurate selection of submersible mixer [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(16): 48-50 (in Chinese).

- [6] 邓荣森, 张会朋, 王涛. 水下推动器选型计算探讨[J]. 中国给水排水, 2006, 22(20): 49-52.

Deng Rongsen, Zhang Huipeng, Wang Tao. Discussion on calculation for choosing types of submersible propellers [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(20): 49-52 (in Chinese).

- [7] 关醒凡. 现代泵设计与理论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.

Guan Xingfan. Modern Pumps Theory and Design [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2011 (in Chinese).



作者简介: 陈斌(1971-), 男, 江苏靖江人, 博士, 研究员, 主要从事环保设备和流体机械研究。

E-mail: chenbin21cn@21.com

收稿日期: 2018-12-25

(上接第93页)

- [9] Baudez J C, Gupta R K, Eshtiaghi N, et al. The viscoelastic behavior of raw and anaerobic digested sludge: Strong similarities with soft-glassy materials [J]. Water Res, 2013, 47(1): 173-180.

- [10] Li T, Wang Y L, Dong Y J. Effect of solid contents on the controlled shear stress rheological properties of different types of sludge [J]. J Environ Sci, 2012, 24(11): 1917-1922.

- [11] Eshtiaghi N, Markis F, Yap S D, et al. Rheological characterisation of municipal sludge: A review [J]. Water Res, 2013, 47(15): 5493-5510.

- [12] Stroot P G, McMahon K D, Mackie R I, et al. Anaerobic co-digestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. Digestion performance [J]. Water Res, 2001, 35(7): 1804-1816.

- [13] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南, 等. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.

Chen Minheng, Cong Dezi, Fang Tunan, et al. Principle

of Chemical Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015 (in Chinese).



作者简介: 王磊(1989-), 男, 湖北十堰人, 硕士, 高工, 研究方向为污泥处理处置与土壤修复。

E-mail: wanglei5@smedi.com

收稿日期: 2019-03-12