

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.009

混流泵叶轮和导叶数量匹配分析

付玲玲¹, 张文鹏², 石丽建², 张允敬³, 黄雪娇⁴

(1. 扬州大学广陵学院 化工与医药系, 江苏 扬州 225128; 2. 扬州大学 水利科学与工程
学院, 江苏 扬州 225009; 3. 蓝深集团股份有限公司, 江苏 南京 211500; 4. 江苏省太湖
地区水利工程管理处, 江苏 苏州 215000)

摘要: 叶轮和导叶数量的合理匹配是保证大型调水工程泵站和泵装置高效、稳定运行的重要因素。为了研究某混流泵叶轮与导叶数量匹配优化问题,采用计算流体力学方法,分别计算叶轮叶片数 Z_1 和导叶叶片数 Z_2 共 12 种匹配方案,每种方案均计算 $0.8Q_0$ 、 Q_0 和 $1.2Q_0$ 这 3 种流量,并通过模型试验验证了数值模拟结果的可靠性。结果表明:改变叶轮叶片数时,不同流量工况下混流泵的水力性能差异较大,适当增加叶轮叶片数,会增加水泵的扬程、改善水泵的汽蚀性能,但是随之摩擦损失增大、效率有所下降,而且流量增大时这种差异越明显;在不同流量工况下,改变导叶叶片数对泵段水力损失的影响较为明显,选择合理的导叶叶片数对改善混流泵段的整体性能是有效的、可行的。

关键词: 混流泵; 叶轮; 导叶; 匹配性

中图分类号: TU312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0051-06

Number Matching Analysis of Impeller and Guide Vane in a Mixed-flow Pump

FU Ling-ling¹, ZHANG Wen-peng², SHI Li-jian², ZHANG Yun-jing³,
HUANG Xue-jiao⁴

(1. Department of Chemical Industry and Medicine, Guangling College of Yangzhou University, Yangzhou 225128, China; 2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Lanshen Group Co. Ltd., Nanjing 211500, China; 4. Taihu District Water Resources Engineering Management Office, Suzhou 215000, China)

Abstract: Reasonable matching of the number of impeller and guide vane is an important factor to ensure the efficient and stable operation of pump station and pump device in large water diversion projects. In order to explore the matching relationship between impeller and guide vane of a mixed-flow pump, a total of 12 matching schemes of impeller blade number Z_1 and guide vane number Z_2 were calculated by computational fluid dynamics. For each scheme, three flow rates of $0.8Q_0$, Q_0 and $1.2Q_0$ were calculated, and the reliability of the numerical simulation results was verified by model test. When the number of impeller blade was changed, the hydraulic performance of the mixed-flow pump varied greatly under different flow conditions. Appropriate increase in the number of impeller blade, the

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20190914); 中国博士后科学基金资助项目(2019M661946); 江苏省高校自然科学研究项目(19KJB570002); 扬州市自然科学基金资助项目(YZ2018103); 江苏省高校优势学科建设项目(PAPD); 扬州大学广陵学院研究项目(ZKYB180012)

通信作者: 石丽建 E-mail: yzdxslj@126.com

impeller head increased, and the impeller cavitation performance was improved. However, it would also increase the friction loss and decrease the efficiency, and the difference was more obvious with the increase of flow rate. Under different working conditions, influence of changing the blade number of guide vane on hydraulic loss of the pump section was obvious, and the selection of a reasonable blade number of guide vane was effective and feasible to improve the overall performance of the mixed-flow pump section.

Key words: mixed-flow pump; impeller; guide vane; matching

混流泵是一种结构和性能介于轴流泵和离心泵之间的泵型,其效率高、运行范围广,广泛应用于农业灌溉排水、市政给水排水、电厂循环冷却水等泵站工程中,近年来在核电、舰船喷水推进方面也得到广泛应用^[1-3]。

叶轮是混流泵装置中的核心部件,叶轮的高效、稳定运行对泵装置的性能至关重要。混流泵后导叶是使泵内动能转化为压能的主要部件。叶轮和导叶的匹配问题一直是泵设计人员十分关心的问题。汤方平等^[4]研究了导叶对叶轮流场的影响,指出导叶对水泵性能的提升起到重要作用。钱忠东等^[5]通过水泵模型试验研究了不同导叶安放角对轴流泵在马鞍区工况运行时的影响以及导叶角度的优化规律。张德胜等^[6]通过试验测试了叶轮及导叶的压力脉动情况。由于叶轮和导叶的动静干涉作用,泵内的流动情况十分复杂。在水泵设计过程中需全面深入地研究叶轮和导叶的匹配关系,而叶轮叶片数与导叶叶片数的匹配问题是其中的一个重要方面。

为讨论叶片数对混流泵水力性能的影响,选用某混流泵设计工况流量 $Q_0 = 360 \text{ L/s}$,泵段扬程为 14 m ,转速为 1450 r/min ,初始叶轮叶片数为 5 片,导叶叶片数为 11 片。根据文献^[7]叶轮叶片数与导叶叶片数尽量互质的原则,分别选取叶轮叶片数 $Z_1 = 4, 5, 6$,导叶叶片数 $Z_2 = 7, 9, 11, 13$,共计 12 种组合。通过 CFD 数值模拟,每种组合均计算 3 种流量(分别为 $0.8Q_0$ 、 Q_0 和 $1.2Q_0$)下的水力特性,并对不同流量工况下叶轮和导叶叶片数的匹配结果进行分析,深入研究叶轮叶片数和导叶叶片数对混流泵水力性能的影响。

1 计算模型及方法

为了能够真实地反映混流泵内部复杂的流动情况,对混流泵段的流体域进行了全流场数值模拟,将计算域分为进水直管段、叶轮室、导叶体、后导水锥和出水弯管段共 5 个部分。混流泵段的计算模型如

图 1 所示。

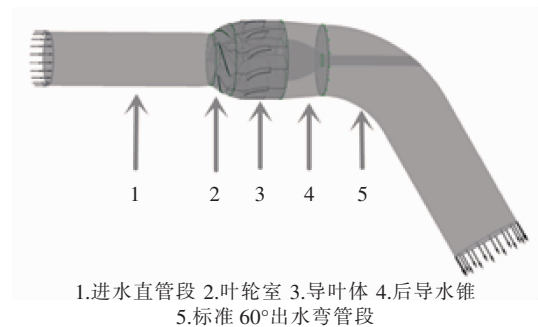


图 1 混流泵段的计算模型

Fig. 1 Calculation model of mixed-flow pump section

进水直管段、后导水锥和标准 60° 出水弯管段 3 个计算域均采用 ICEM 软件进行结构化网格划分,网格质量达到 0.4 以上,符合计算要求。混流泵叶轮和导叶体在 Turbo-Grid 中进行结构化网格划分。基于 CFX 数值模拟软件,采用三维不可压缩 $N-S$ 方程描述混流泵内部流动,选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭方程组。采用 SIMPLEC 算法求解不可压缩 $N-S$ 方程,利用有限体积法对控制方程进行离散。壁面采用无滑移边界条件,近壁区域采用标准壁面函数处理,进口采用压力进口边界条件,出口采用质量出流条件。

2 叶轮叶片数对叶轮性能的影响

改变叶轮叶片数来探究叶轮叶片数变化对混流泵性能的影响。分别取 $Z_1 = 4, 5$ 和 6 ,计算得出不同叶轮叶片数下叶轮的外特性曲线,如图 2 所示。可知,当 $Q = 0.8Q_0$ 时,叶轮的扬程随叶轮叶片数的增加而变大,叶片数越多,扬程越高,而效率变化不明显; $Q = Q_0$ 时,扬程随叶轮叶片数的增加而增加,而叶轮叶片增加到 6 片时效率下降较为明显; $Q = 1.2Q_0$ 时,扬程增加并不明显,而效率下降显著,叶轮叶片数为 6 时的效率比叶轮叶片数为 4 时下降了约 5% 。在小流量工况下不同叶片数对效率影响不明显;在大流量工况下由于扬程降低,摩擦损失占比

较大,因此不同叶片数对效率影响较大。总体来看,不同流量下叶轮的外特性随叶轮叶片数的增加变化趋势是不一致的,扬程在小流量下变化幅度大,效率在大流量下变化幅度大。

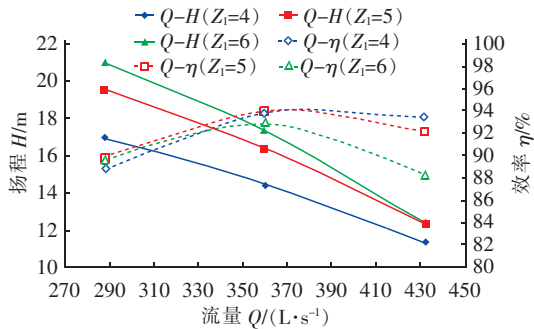


图2 不同叶轮叶片数下叶轮的外特性曲线

Fig. 2 External characteristic curve of impeller with different blade numbers

为了更好地了解叶轮不同叶片数下的内部流动状况,取设计工况叶轮轮毂到轮缘 $\text{span} = 0.6$ 处的压力分布云图,如图3所示。可知, $Z_1 = 4$ 时,叶片吸力面存在较大的低压区,在压力面靠近尾缘的位置存在较小范围的高压区; $Z_1 = 5$ 时,叶片吸力面位置的低压区面积减小,叶轮出口位置高压区面积扩大十分明显,说明叶片做功能力明显增强; $Z_1 = 6$ 时,叶轮压力面出口位置高压区面积增大,但增大量也不明显,说明叶片进一步提高做功能力有限。这也验证了外特性的变化趋势。

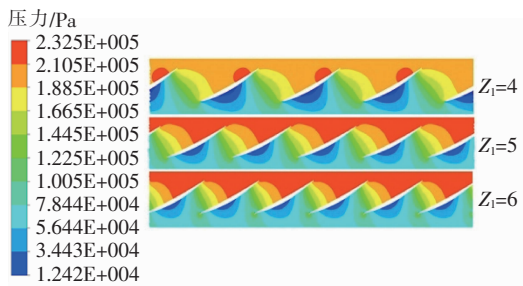


图3 不同叶轮叶片数 $\text{span} = 0.6$ 处压力分布云图

Fig. 3 Cloud chart of pressure distribution at span of 0.6 with different number of impeller blades

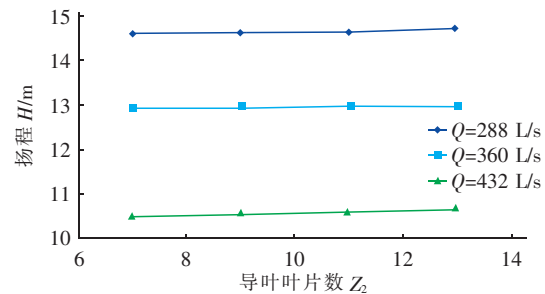
结合图2、3来看,叶轮叶片数增加可以提高叶片做功能力,提高扬程;减小叶片吸力面的低压区面积,可以改善叶轮的汽蚀性能,但是也会致使叶轮的效率降低。并且,增加叶轮叶片数,叶轮的扬程并不是线性增加,汽蚀性能的改善也会随着叶片增多而减弱。另外,当叶轮叶片数增加时,会造成水流与叶

片之间的摩擦损失相应增加,从而导致效率降低,这种现象在大流量工况下尤为明显。

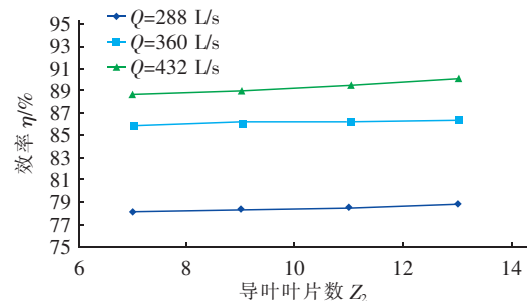
叶轮叶片数的增加,会增加叶栅稠密度值,提高水泵的做功能力,进而提高扬程,但当叶片数选择过大时,叶栅排挤系数明显增大,叶片的摩擦损失增加较多,效率指标下降明显。根据研究发现,叶片数的增加对不同工况下水泵水力性能的影响不是线性的。从设计和工程应用角度而言,比转速一定的混流泵,在设计扬程满足要求的前提下叶轮宜选用叶片数为4或者5,根据实际工程运行水位,如泵站运行时间集中在大流量区域可选择4片,反之可选5片叶轮。

3 导叶叶片数对泵段性能的影响

在保证其他过水部件和设计条件不变的情况下,改变导叶叶片数来探究导叶叶片数变化对泵段性能的影响。当 $Z_1 = 4$ 时,分别取 $Z_2 = 7, 9, 11$ 和 13,计算出不同导叶叶片数在不同流量时的混流泵段外特性曲线,如图4所示。



a. 扬程随导叶叶片数的变化



b. 效率随导叶叶片数的变化

图4 不同导叶叶片数泵段的外特性曲线

Fig. 4 External characteristic curve of pump section with different number of guide vanes

由图4可知,在计算流量范围内,各流量下的扬程均随导叶叶片数的增加而提高,但提高并不明显,特别是流量 $Q = 360 \text{ L/s}$ 时,扬程基本保持不变。泵段的效率随导叶叶片数的增加也逐渐变大,不同流

量下增大幅度不同,在流量 $Q = 432 \text{ L/s}$ 时,效率随导叶叶片数的增加幅度最大。

增加导叶叶片数,在不同流量下对外特性的影响不同。分别取导叶体及后导水锥和出水弯管段内的水力损失,计算出不同流量下水力损失随导叶叶片数的变化如图5所示。

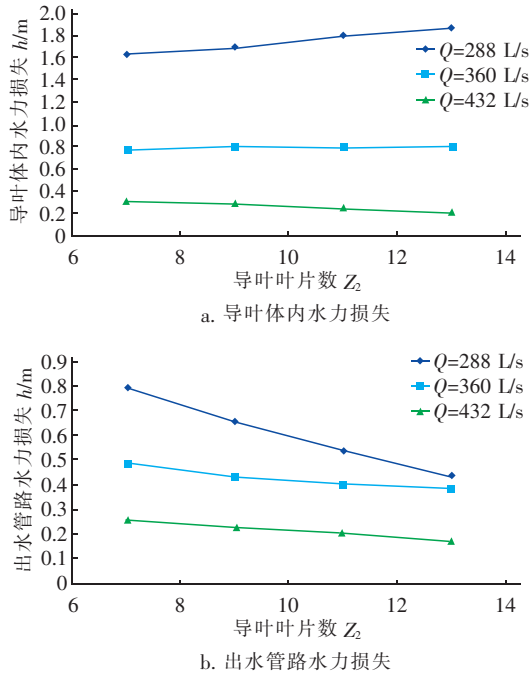


图5 不同工况下水力损失随导叶叶片数的变化

Fig.5 Change of hydraulic loss with number of guide vanes under different working conditions

由图5可知,导叶叶片数的增加对不同流量的水力损失造成的影响不同。当 $Q = 288 \text{ L/s}$ 和 $Q = 360 \text{ L/s}$ 时,导叶体内的水力损失均随导叶叶片数的增加而变大;而 $Q = 432 \text{ L/s}$ 时,导叶体内的水力损失随导叶叶片数的增加而减小。3种流量下的后导水锥和出水弯管段内水力损失基本随着导叶叶片数的增加而减小。从流量变化来看,流量越小,不同位置的水力损失均越大。这是由于小流量下,导叶体内的水流十分紊乱,内部的水力损失分为两部分,一部分为流体紊乱造成的损失,另一部分为水流与叶片之间的冲击损失。当增加导叶叶片后,水流与导叶的冲击作用加强,导致水力损失增加,但是,经过导叶整流作用后,从导叶内流出的水流就比较均匀,因此在出水弯管段内的水力损失会随导叶叶片数的增加而减少。当流量增加时,导叶内部水流比较平稳,增加导叶叶片数,会促进水流的平稳流动,因此,

导叶内和出水弯管段的水力损失均减小。需要说明的是,可能受到导叶体内其他设计参数的影响,使导叶更适合于流量 $Q = 432 \text{ L/s}$,这还需要进一步的探究验证。

4 叶轮和导叶叶片数量匹配分析

为进一步探究不同叶轮叶片数随导叶叶片数的变化情况,在流量 $Q = 432 \text{ L/s}$ 时,取不同叶轮叶片数与导叶叶片数的外特性曲线,如图6所示。可知,在计算范围内,各叶轮叶片数对应的扬程均随着导叶叶片数的增加而增大,对应的效率也是升高的。但不同叶轮叶片数对应的效率曲线的斜率是不一样的,叶轮叶片数越少,效率随导叶叶片数的变化斜率越大,效率增加越明显,叶轮叶片数分别为4、5和6时,对应的泵段效率最大增幅分别为1.5%、0.9%和0.86%。

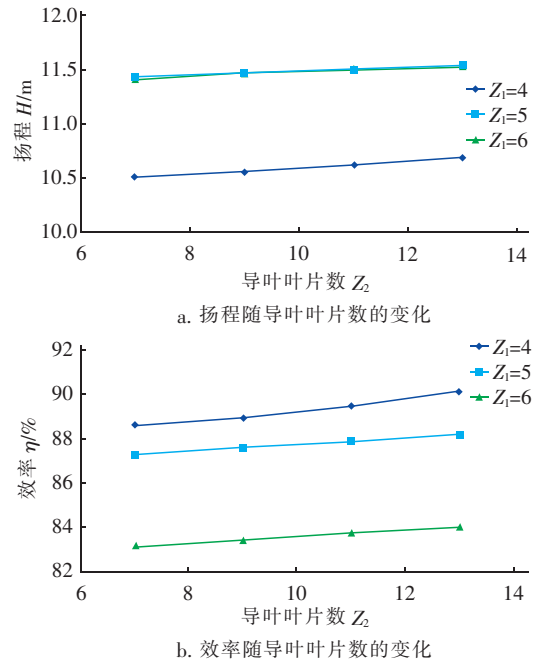
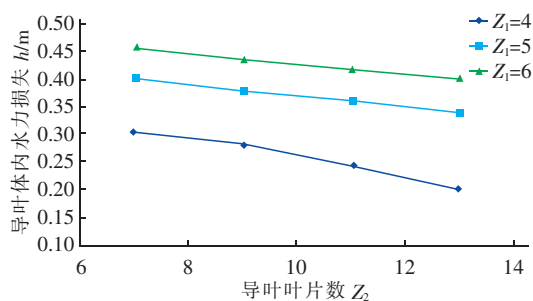


图6 不同叶轮叶片数与不同导叶叶片数下泵段的外特性曲线

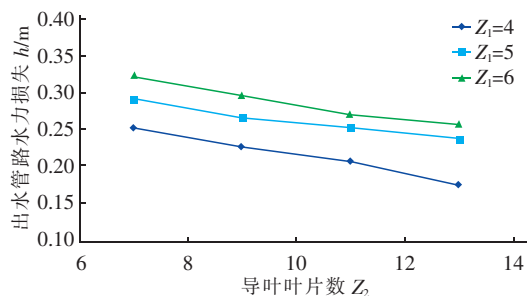
Fig.6 External characteristic curve of pump section with different number of impeller blades and guide vanes

分别取导叶体内和出水弯管段内的水力损失,不同叶轮叶片数的水力损失随着导叶叶片数的变化如图7所示。可以看出,在计算范围内,相同流量时:随着导叶叶片数的增加,导叶体内的水力损失均下降明显,叶轮叶片数越少,导叶体内的水力损失就越小,并且随导叶叶片数增加而减小的趋势越明显;在出水弯管段内,水力损失的变化趋势与导叶体内

的变化趋势基本一致,只是出水弯管段内的变化幅度较小。



a. 导叶体内水力损失



b. 出水管路水力损失

图7 不同叶轮叶片数与不同导叶叶片数的水力损失曲线

Fig.7 Hydraulic loss curves of different number of impeller blades and guide vanes

综合图6、7来看,当叶轮叶片数由4增加到5时,导叶体内水力损失增加的幅度比扬程整体提高的幅度要大很多,叶轮叶片数从5增加到6时,虽然导叶体内水力损失增加量比叶轮叶片数由4增加到5时少,但叶轮叶片数从5增加到6时的扬程基本没有变化,因此,叶轮叶片数从5增加到6时的效率下降十分明显。大流量时,当叶轮叶片数增加,泵段整体的水力损失也是增加的。

5 模型试验验证

为了验证数值模拟结果的可靠性,在高精度水力机械试验台上进行了混流泵外特性试验。选用与数值模拟相一致的混流泵段装置,测试了 $Z_1=5$ 和 $Z_2=11$ 组合下的水力性能,试验转速设置为1450 r/min。混流泵段数值模拟和试验结果的外特性曲线对比如图8所示。可知,混流泵段数值模拟和试验结果的外特性曲线存在较小的误差,这可能是由于模型试验角度调节误差造成的。总体来说,数值模拟和模型试验结果的整体趋势基本一致,效率误差也在2%以内,能够满足工程的应用要求,这也说明了数值模拟结果是可靠的。

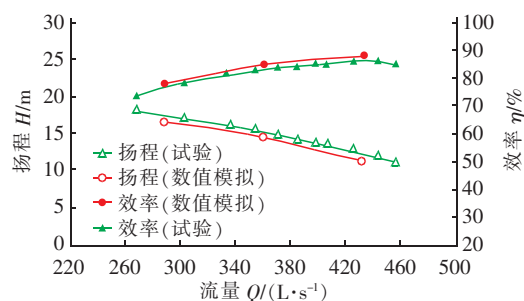


图8 数值模拟和试验结果的外特性曲线对比

Fig.8 Comparison of external characteristic curves between numerical simulation and test results

6 结论

① 从设计角度而言,增加叶轮叶片数,叶栅稠密度增加,水泵做功能力增加,扬程会有所增加,但各工况点增加幅度不一样。同时,增加叶轮叶片数可以改善叶轮的汽蚀性能,但叶片数过大时,摩擦损失增加,效率下降明显。实际工程中,应根据实际运行情况确定叶轮叶片数。

② 叶轮叶片数保持不变时,增加导叶叶片数,加大了导叶回收水流速度环量的能力,进而减小出水水力损失,提高泵段的扬程和效率。实际工程中,在导叶水力损失增加不多的情况下,可适当增加导叶叶片数量,尽可能回收水流速度环量,达到减小出水水力损失、提高效率的目的。

参考文献:

- [1] 关醒凡. 轴流泵和斜流泵水力模型设计试验及工程应用[M]. 北京:中国宇航出版社,2008.
Guan Xingfan. Axial Flow Pump and Diagonal Flow Pump: Hydraulic Model Design Test and Engineering Application[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House,2008(in Chinese).
- [2] 张鑫太,张阳,高国红,等. 混流泵径向正导叶的水力设计[J]. 水泵技术,2012(3):16-20.
Zhang Xintai, Zhang Yang, Gao Guohong, et al. Hydraulic design of radial positive guide vane of mixed flow pump[J]. Pump Technology,2012(3):16-20(in Chinese).
- [3] 何希杰,李艳辉,高瑛,等. 混流泵的现状与发展趋势[J]. 通用机械,2003(9):21-24.
He Xijie, Li Yanhui, Gao Ying, et al. Present situation and development trend of blending pump[J]. General Machinery,2003(9):21-24(in Chinese).
- [4] 汤方平,周济人,鄢碧朋. 轴流泵后导叶回收能量分析

- [J]. 水泵技术, 1995(3): 19-22.
- Tang Fangping, Zhou Jiren, Yan Bipeng. Energy recovery analysis of the back guide vane of the axial flow pump [J]. Pump Technology, 1995(3): 19-22 (in Chinese).
- [5] 钱忠东, 王凡, 王志远, 等. 可调导叶式轴流泵马鞍区水力特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 461-465.
- Qian Zhongdong, Wang Fan, Wang Zhiyuan, *et al.* Experimental study on hydraulic performance of saddle zone in axial flow pump with adjustable guide vane [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6): 461-465 (in Chinese).
- [6] 张德胜, 耿琳琳, 施卫东, 等. 轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 66-72.
- Zhang Desheng, Geng Linlin, Shi Weidong, *et al.* Experimental investigation on pressure fluctuation and vibration in axial-flow pump model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 66-72 (in Chinese).
- [7] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.

版社, 2010.

Guan Xingfan. Morden Pumps Theory and Design [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010 (in Chinese).



作者简介: 付玲玲 (1989 -), 女, 江苏高淳人, 硕士, 助教, 研究方向为水污染治理。

E-mail: 766009692@qq.com

收稿日期: 2019-11-12

(上接第 50 页)

- [10] 李爽, 张晓健. 给水管壁生物膜的生长发育及其影响因素[J]. 中国给水排水, 2003, 19(13): 49-52.
- Li Shuang, Zhang Xiaojian. Growth and development of biofilm on water supply pipe wall and its influencing factors [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(13): 49-52 (in Chinese).
- [11] 赵明. 输配水系统水力与水质安全研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- Zhao Ming. Study on Hydraulic Safety and Water Quality Safety for Transmission and Distribution System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese).
- [12] 刘书明, 李振瑜, 陈晋端, 等. 基于覆盖水量的监测点优化选址法的缺陷与改进[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 88-92.
- Liu Shuming, Li Zhenyu, Chen Jinduan, *et al.* Flaw of demand coverage based method for optimal locations of monitoring stations and modification [J]. Environmental Science, 2010, 31(1): 88-92 (in Chinese).
- [13] 李炜煜. 铸铁供水管的初腐蚀与微生物特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

Li Weiyu. Research on Initial Corrosion of Cast Iron Pipe and Microbial Characteristic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).



作者简介: 黄善钦 (1995 -), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事城市给水管网水质监测点优化布置研究。

E-mail: 452599541@qq.com

收稿日期: 2019-12-26