

大型双向流道泵装置优化与试验研究

张 鹏¹, 王麦琪², 李彦军², 孟 凡²

(1. 安徽省水利水电勘测设计院, 安徽 合肥 230088)

(2. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 双向进出水流道泵装置可以同时满足引、排水功能, 被广泛应用于沿江滨湖地区。但是由于双向进水流道形状功能的特殊性, 进水喇叭管型线和悬空高度的匹配直接影响到流道出口水流的流态, 严重影响泵装置的效率和运行稳定性。本文共设计了 6 种喇叭管高度, 并通过不同喇叭管高度对水力损失、出口流速均匀度以及出口水流平均偏流角的影响, 选择了最优喇叭管高度。对优化后的泵装置模型进行全流场计算, 验证优化后的进水流道与水泵匹配性。对优化后的泵装置模型进行外特性试验。试验结果表明, 计算结果与试验值吻合较好, 优化后的泵装置在不同工况下均可以稳定运行, 最高装置效率可达 76%, 达到或接近单向立式泵装置的效率水平。

关键词: 双向进出水流道; 轴流泵装置; 定常数值模拟; 模型试验

中图分类号: TV131, TV136 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2017) 07-0028-05

Study on optimization and experiment of large pumping stations with two-way channel

ZHANG Peng¹, WANG Maiqi², LI Yanjun², MENG Fan²

(1. Anhui Surveying and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei 230088, Anhui;

2. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu)

Abstract: Pumping stations with bidirectional inlet and outlet channel were widely used in the area along Yangtze river and lakeshore, which could simultaneously satisfy the function of bidirectional diversion and drainage. However, due to the special shape and function of the two-way inlet channel, the matching between the inlet pipes and hanging height directly affected the flow pattern of the outlet channel, which seriously affected the efficiency and stability of the pump device. Six kinds of horn tube height were designed, and the optimal horn tube height was chosen through the influence on the hydraulic loss, exit velocity uniformity and outlet flow average bias angle by different horn tube height. The external characteristic test results of the optimized pump device model showed that the calculation results agree well with the experimental data, the optimized pump device could run stably in different working conditions, and the highest device efficiency was up to 76%, which could reach or near the efficiency of one-way vertical pump device.

Key words: pumping stations with bidirectional inlet and outlet channel; axial-flow pump device; steady numerical simulation; model test

收稿日期: 2017-04-28

作者简介: 张鹏 (1959-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程水力机械方面的设计与研究。

0 引言

轴流泵装置在农田灌溉、城市给排水以及长距离调水方面均发挥着重要作用,但是,随着大型水利工程的建设,沿江滨湖地区的轴流泵装置需要同时满足引水与排水的两种功能。因此,双向轴流泵装置越来越受到重视。双向进出水流道轴流泵装置作为双向轴流泵装置的一种形式,具有结构简单、安装检修方便与工程投资小等优点,从而被广泛应用。但是双向进出水流道泵装置由于水力设计理论不成熟,导致水力性能普遍较低,运行稳定性普遍较差。因此,对双向进出水流道进行优化设计保证其安全运行具有重要的学术意义与工程价值^[1]。

目前,针对双向进水流道优化的研究还较少。双向进水流道形状特殊,若喇叭口的悬空高度匹配不合理将导致喇叭口下方水流不能均匀进入水泵叶轮,从而危害泵装置的稳定运行^[2-4]。若进水流道喇叭口与导水锥尺寸配合合适,可以有效改善双向进水流道的出口流速分布均匀度。因此,本文设计了6种进水流道喇叭口高度,利用CFD技术对泵装置内部流场进行定常计算,通过研究分析喇叭口高度对水力损失,进水流道出口流速均匀

度以及出口水流平均偏流角的影响选择最优高度。并通过外特性试验,验证了优化设计的可靠性。本研究可以为同类泵装置进水流道的水力设计提供一定的参考。

1 物理模型及计算方法

1.1 双向流道泵站参数

某新建泵站采用箱涵式双向流道闸站结合式。选用5台2900ZLQ-80型立式轴流泵,配5台套TL3400-40/3800型同步电机,额定转速150 r/min,单机功率为3400 kW,总装机功率17000 kW。泵站设计净扬程6.22 m,最高净扬程7.23 m。单台机组设计流量32 m³/s。选用TJ04-ZL-20轴流泵水力模型。

1.2 三维模型及网格划分

为了降低计算工作量,将原型双向流道泵站换算为模型进行CFD仿真计算。如图1所示,双向进出水流道轴流泵装置模型由双向进水流道、轴流叶轮、导叶、双向出水流道组成。其中,叶轮直径 $D=300$ mm,叶轮叶片数为4,导叶叶片数为7,转速为1450 r/min,设计流量为 $Q_{des}=0.32$ m³/s。图2为泵装置的网格划分情况,为了保证数值模拟计

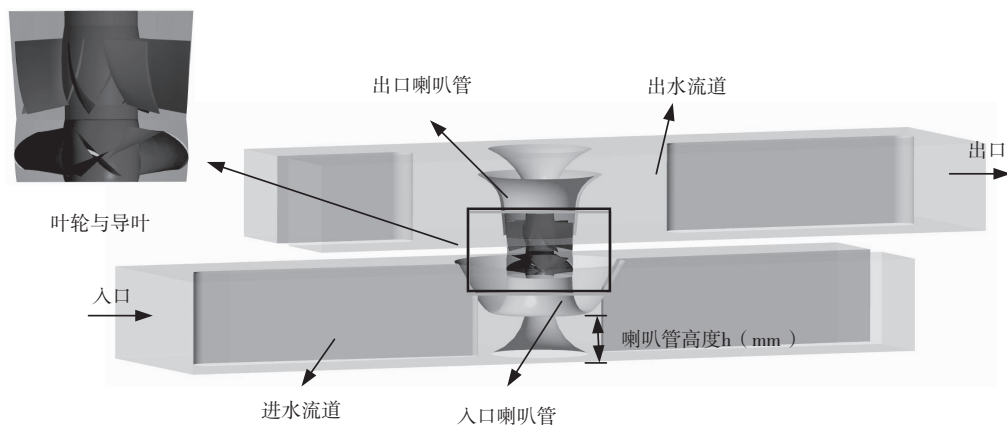


图1 三维物理模型

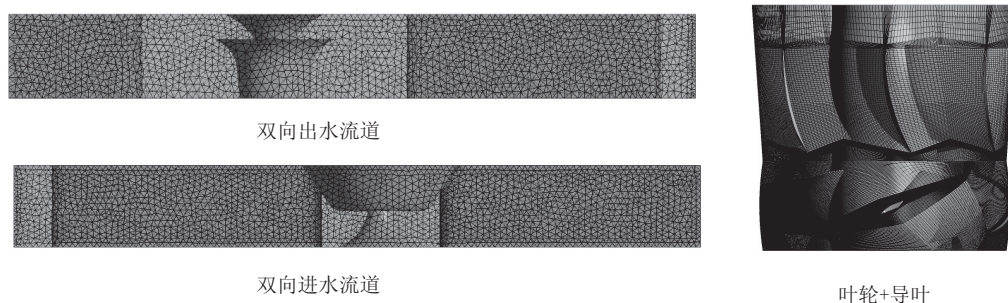


图2 泵装置网格划分

算的精确性,叶轮与导叶采用结构网格划分,双向进出水流道采用非结构网格划分,泵装置网格总数大约为 446 万。

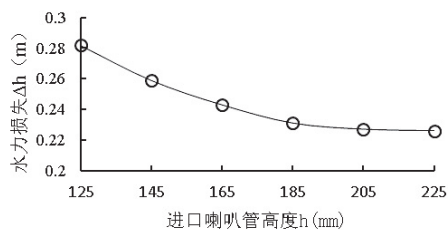
1.3 边界条件设置

本文采用定常计算对双向轴流泵装置内部流场进行数值模拟,进口条件设置为质量流量,出口条件设置为自由出流,计算步数为 1500,叶轮旋转速度为 1450 r/min,静止部件与转动部件交界面设置为 Frozen rotor,静止部件交界面设置为 None,所有壁面设置为光滑壁面,不考虑滑移系数。

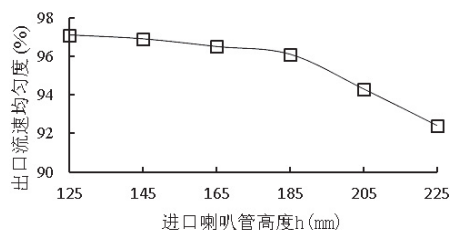
2 数值计算结果分析

为了使双向进水流道内喇叭管附近的水流均匀进入水泵叶轮,本文共设计了 6 种进口喇叭管高度对双向进水流道进行局部优化匹配,喇叭管高度分别为 $h_1=125$ mm, $h_2=145$ mm, $h_3=165$ mm, $h_4=185$ mm, $h_5=205$ mm, $h_6=225$ mm。为了节省计算时间与计算资源,先采用 CFX14.5 只对进水流道流场进行定常计算,通过水力损失、出口流速均匀度以及出口水流平均偏流角来确定最优喇叭管高度。然后再对采用最优喇叭管高度方案下的整个泵装置流场进行定常计算,并研究分析其内部流场状态能否达到稳定运行的要求。

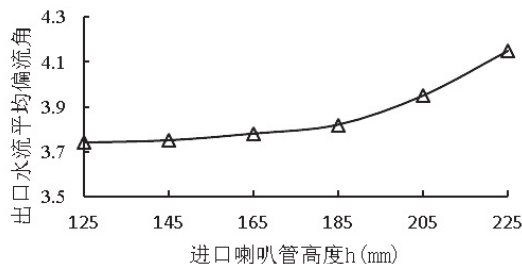
根据 CFD 仿真计算所得结果,如图(3a)所示,水力损失随着喇叭管高度的上升而逐渐下降,当喇叭管高度增加到 $h=185$ mm 后,水力损失不再随喇叭管高度的变化而发生明显改变。如图(3b)所示,出口流速均匀度一开始不随喇叭口高度增加而发生明显改变,但是当喇叭管高度增加到 $h=185$ mm 后,出口流速均匀度随喇叭管高度增加而发生突降现象。如图(3c)所示,出口水流平均偏流角一开始随着喇叭管高度的增加而缓慢增大,但是当喇叭管高度增加到 $h=185$ mm 后,出口水流平均偏流角随喇叭管高度增加而出现突升现象。综上所述,喇叭管高度为 185 mm 时,双向进水流道



(a) 水力损失变化曲线



(b) 出口流速均匀度变化曲线



(c) 出口水流平均偏流角变化曲线

图 3 双向进水流道各参数随喇叭管高度的变化曲线
水力性能最优。

图 4 所示为泵装置内部流线分布,由于双向进出水流道左侧为盲流区,所以存在漩涡。但是,进水流道内部流线平稳,且进水流道喇叭管附近,并未出现明显漩涡,流速分布均匀,证明了所选进口喇叭口高度的合理性。图 5 为不同工况下进水流道竖直截面内的压力与流线示意图。如图 5 所示,进水流道左侧与右侧压力较大,在进水流道出口处存在低压区,且随着流量逐渐增大,整个泵装置内部的压力呈上升趋势。此外,双向进水流道截面左侧流线平稳,但右侧为盲流区,所以存在漩涡,但对流道出口的流速分布几乎没有影响,流道

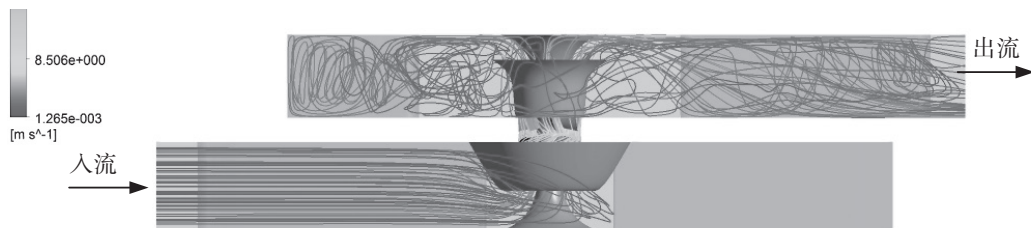
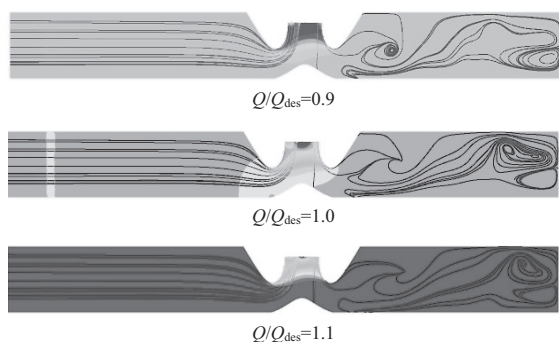
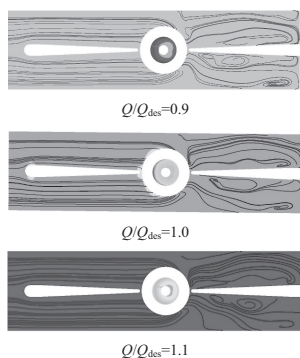


图 4 泵装置内部流线分布图

出口流速分布较均匀。



(a) 进水流道竖直面



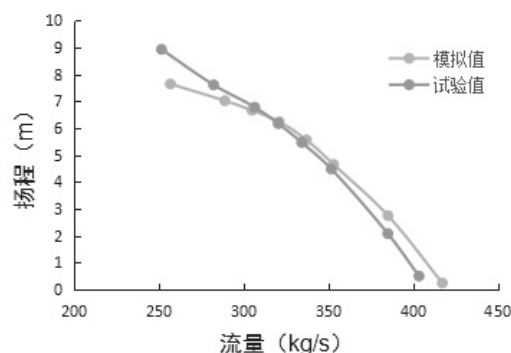
(b) 进水流道水平截面

图5 进水流道截面压力、流线分布图

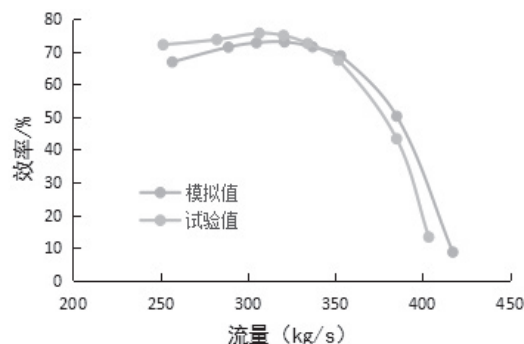
3 试验验证

为了验证数值计算的准确性以及优化后的泵装置能否在不同扬程工况下稳定可靠运行,需要进行泵装置模型试验。该模型试验在江苏大学国家水泵工程技术研究中心水泵闭式试验台进行,泵装置模型试验台综合不确定度优于 $\pm 0.32\%$ 。图6为叶轮安放角度为 0° 时的试验值与计算值对比图。如图所示,在设计流量 ($0.32 \text{ m}^3/\text{s}$) 附近,数值模拟扬程曲线与试验扬程曲线吻合良好,在小流量工况下,数值模拟扬程略低于试验扬程,而大流量时,数值模拟扬程值略高;类似的,数值模拟效率曲线与试验效率曲线在设计流量处较为吻合,小流量工况时,数值模拟效率略低于试验效率,大流量时数值模拟效率值略高于试验值。数值模拟结果与试验值变化趋势相同,误差较小,这说明数值模拟的结果是可靠的。

图7为不同叶片安放角度下的泵装置扬程和效率特性曲线以及空化特性曲线。图8为换算为原型后双向流道泵装置综合特性曲线。在设计

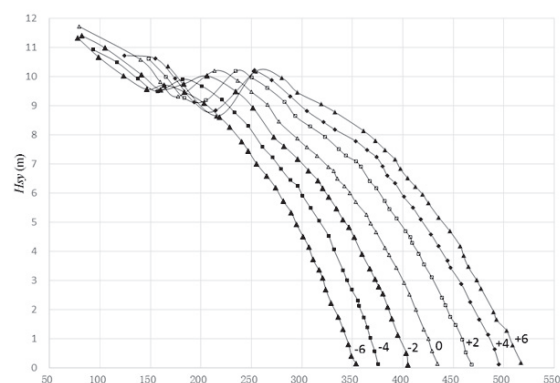


(a) 扬程对比

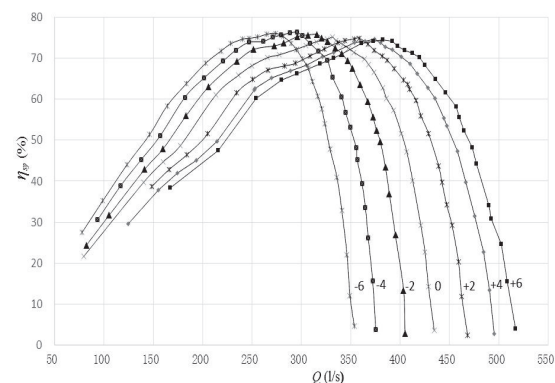


(b) 效率对比

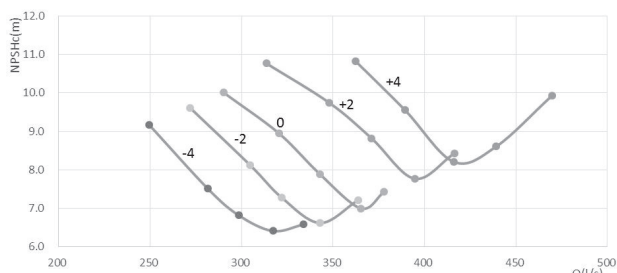
图6 模拟值与试验值对比



(a) 扬程特性曲线



(b) 效率特性曲线



(c) 空化特性曲线

图7 不同叶片安放角度下模型试验外特性曲线

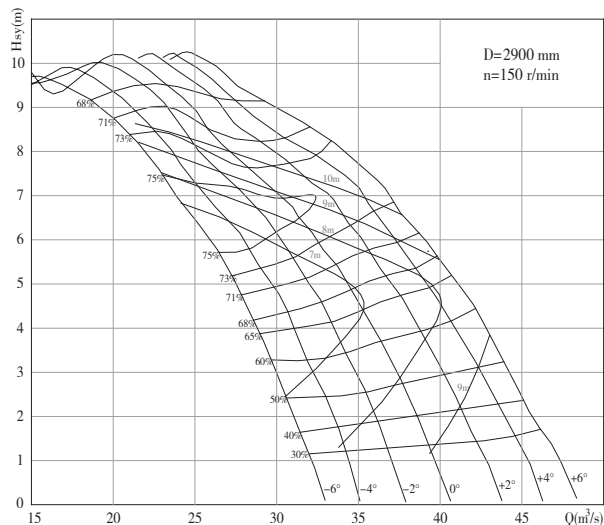


图8 双向流道泵装置原型综合特性曲线

净扬程 $H_{sy}=6.22$ m 工况下: 叶片角 0° , 单机流量 $Q=32.02$ m^3/s , 装置效率 $\eta_{sy}=73.24\%$, 轴功率 $P=2668$ kW; 叶片角 -4° , 单机流量 $Q=27.67$ m^3/s , 装置效率 $\eta_{sy}=76.25\%$, 轴功率 $P=2214$ kW。由此可知, 泵装置性能指标满足泵站设计要求, 而且性能优良。

4 结论

本文首先采用 CFD 计算软件 CFX 对不同进口喇叭管高度的双向进水流道模型单独进行定常计算来确定最优喇叭管高度。然后对不同流量工况下的整个泵装置流场进行定常计算验证确定的喇叭管高度与整个泵装置匹配性。最后对优化后泵装置模型进行外特性试验, 可得如下结论:

(1) 通过进水流道流场定常计算流道的水力损失、出口流速均匀度以及出口水流平均偏流角, 确定了最优进水流道喇叭管悬空高度, 该方法具有一定合理性和科学性。

(2) 将优化后的进水流道匹配优选的水泵模型, 组配成高效泵装置, 在高精度水泵模型试验台进行装置模型试验, 得到双向流道泵装置综合特性曲线, 不仅验证了数值模拟的准确性, 更验证了优化后的泵装置能够高效稳定运行。

(3) 在设计净扬程工况, 泵装置最高效率可达 76.25%, 已达到或接近单向立式轴流泵装置的效率水平, 为双向流道立式轴流泵装置的进一步推广和应用提供了基础和参考。

参考文献:

- [1] 杨帆, 刘超, 汤方平. 基于 CFX 的双向立式轴流泵装置水力性能分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20 (3): 403-412.
- [2] 丁辉. 低扬程双向立式轴流泵装置水力优化研究 [J]. 江苏水利, 2017 (1): 17-21.
- [3] 王丽, 张跃飞, 单陆丹. 双向开敞式立式轴流泵装置数值模拟 [J]. 治淮, 2014 (10): 18-19.
- [4] 黄良勇, 吴忠, 张啸, 等. 大型双向流道泵装置优化匹配与试验研究 [J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34 (7): 602-607.

(责任编辑: 王宏伟)