

# 基于 CFD 的轴流泵针对性设计与试验\*

周济人 汤方平 石丽建 谢荣盛 周捍珑

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225100)

**摘要:** 凌城抽水站各运行工况下的扬程范围变化比较大,在对该泵站轴流泵选型分析时发现,南水北调同台测试中的水力模型能够满足其运行的基本要求,但均有其不合理性:高效区扬程满足设计扬程时,最高扬程缺少安全余量;最高扬程满足时,高效区扬程偏离设计扬程,效率偏低。基于 CFD 计算对凌城站水力模型进行针对性设计,通过改变叶栅稠密度和翼型安放角,采用多工况优化设计的方法,使得最终设计方案能够满足凌城站的运行要求。然后对水力模型的最终设计方案进行泵段数值模拟研究,数值模拟结果表明该针对性设计的水力模型效率较高,同时兼顾到凌城站最高扬程的要求。最后对针对性设计的水力模型进行泵段试验,试验结果表明基于 CFD 的轴流泵水力模型的针对性设计是准确的、可靠的,针对凌城站设计的水力模型确实能够更好地满足该泵站的特殊水位要求。同时也说明,对于大型泵站的更新改造,水泵水力模型的针对性设计研究是必要的。

**关键词:** 轴流泵 针对性设计 数值计算 试验

**中图分类号:** TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0042-06

## Specific Design and Experiment of Axial-flow Pump Based on CFD

Zhou Jiren Tang Fangping Shi Lijian Xie Rongsheng Zhou Hanlong

(School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

**Abstract:** The change of head range of the running condition is relatively large in Lingcheng Pump Station. It can be found that the hydraulic model test of South-to-North Water Diversion Project on the same test-bed can meet the basic requirements of running condition when making axial-flow pump selection analysis for the pump station. But it has its irrationality: when the design head is according to high efficiency, the maximum head lacks safety margin; when the maximum head is satisfied, the design head is not within the high efficiency area. Thus, a specific design for Lingcheng hydraulic model based on CFD calculation was done. By changing the cascade dense degree and the airfoil placed angle, the method of multi-operation optimization was adopted to make the final design scheme, which can meet the running requirements of Lingcheng Pump Station. Then numerical simulation study of the final specific-designed hydraulic model was conducted. At its design condition, the head was 5.48 m and the efficiency achieved 86.3% of maximum value. Head increased with the decrease of flow rate, in the calculation of minimum flow rate as 240 L/s, it did not reach the saddle area condition, when head reached 8.46 m, and the efficiency was still in the acceptable range. In a word, the simulation results showed that the specific-designed hydraulic model had higher efficiency and satisfied the highest head requirement of Lingcheng Pump Station. Finally, the experiment results showed that the specific design of axial-flow pump based on CFD was accurate and reliable, and it can meet the special water level requirements of Lingcheng Pump Station. At the same time, specific design research is necessary for the large pump station renewal and reconstruction.

**Key words:** Axial-flow pump Specific design Numerical calculation Experiment

收稿日期: 2015-05-24 修回日期: 2015-06-22

\* 国家自然科学基金资助项目(51376155)、“十二五”农村领域科技计划资助项目(2012BAD08B03-2)、江苏省高校自然科学研究重大项目(11KJA570001)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 周济人,副教授,主要从事水利工程研究, E-mail: zhoujr@yzu.edu.cn

## 引言

我国已建有大型轴流泵站300多座,其中有不少泵站因选型不当<sup>[1]</sup>,导致后期泵站运行时出现了很多问题。南水北调东线工程投资大,影响面广,泵站年运行时间长,运行费用高,并且上下梯级泵站之间相互影响。因此,南水北调大型泵站在建设或改造过程中必须尽量提高供水保证率和泵装置效率。南水北调天津同台测试给出了一批优秀的水力模型,这些水力模型能够满足大型泵站设计的基本要求,但是很多泵站都会根据实际工程概况提出特殊的设计要求,因此,南水北调大型泵站工程的水力模型往往需要进行针对性设计。

凌城抽水站位于睢宁县凌城镇境内,徐洪河支流新龙河,属于睢宁县梯级河网规划中的凌城枢纽工程。该工程包括凌城抽水站和附属工程凌城闸,通过抽取徐洪河水送入新龙河。新龙河为凌城灌区的骨干河道,可以通过凌城闸调节水位。凌城抽水站灌溉面积为24 667 hm<sup>2</sup>,泵站设计流量为25 m<sup>3</sup>/s,设计扬程为5.2 m,最高扬程为7.4 m,最低扬程为2.8 m。本文以凌城泵站为例,对该泵站水力模型进行针对性设计研究。

## 1 主水泵选型分析

原型泵装置为肘型进水流道、平直管出水流道立式泵装置,叶轮直径1 150 mm,转速370 r/min,单机流量5 m<sup>3</sup>/s。换算到模型泵装置参数如表1所示。其中模型泵叶轮直径300 mm。

表1 模型泵装置参数

Tab.1 Model pump device parameters

转速 /(r·min <sup>-1</sup> )	设计流量 /(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最大 扬程 /m	设计 扬程 /m	最小 扬程 /m	平均 扬程 /m	<i>nD</i> 值
1 418	0.340	7.4	5.2	2.8	5.2	426
1 450	0.347	7.734	5.435	2.927	5.435	435

水泵的*nD*值是指叶轮的轮缘速度,由装置特性和泵特性共同作用。目前工程上一般认为轴流泵的*nD*值应小于或等于435。根据模型泵装置设计点参数和南水北调工程水泵模型天津同台测试泵段综合特性曲线,选择TJ04-ZL-06、TJ05-ZL-02、TJ04-ZL-12、TJ04-ZL-20型水泵水力模型<sup>[2-5]</sup>。TJ04-ZL-06在淮安市楚州茱陵一站进行过模型泵装置试验,TJ04-ZL-12和TJ04-ZL-20型两种水泵水力模型在南水北调山东万年闸泵站进行过模型泵装置试验,而茱陵泵站和万年闸泵站与凌城抽水站类似都采用肘形弯管进水流道、平直管出水流

道。因此,将模型泵装置性能曲线应用于凌城站进行比选分析。通过模型泵装置性能曲线可以看出(图1),选择TJ04-ZL-06模型时,凌城抽水站的设计工况点落在高效区,效率在75%左右,最高扬程为6.2 m,换算到1 450 r/min时为7.91 m,能够满足最高扬程7.73 m的要求,但是余量很小;临界汽蚀余量8 m多,汽蚀性能一般。TJ05-ZL-02水泵水力模型扬程略高,但满足最高扬程7.73 m的要求也比较紧张。要兼顾最高扬程,可选择设计扬程6 m左右的TJ04-ZL-12和TJ04-ZL-20这两种水泵水力模型。根据南水北调万年闸泵站模型泵装置试验曲线可知(图2),凌城站在在使用这两种水力模型时,最高扬程均能满足要求,临界汽蚀余量小于6.0 m,汽蚀性能较好,但设计点效率只在71%左右,处于非高效区。

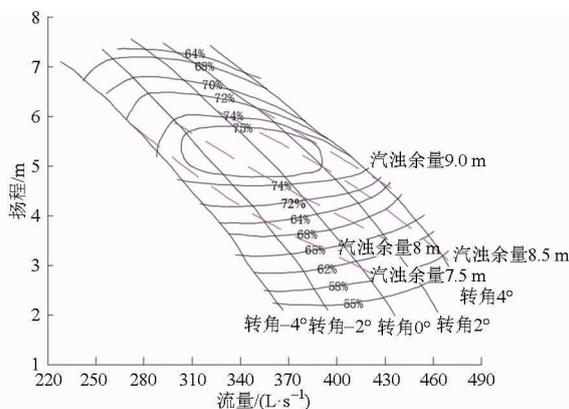


图1 TJ04-ZL-06型泵装置性能曲线

Fig. 1 Pump device performance curves of TJ04-ZL-06

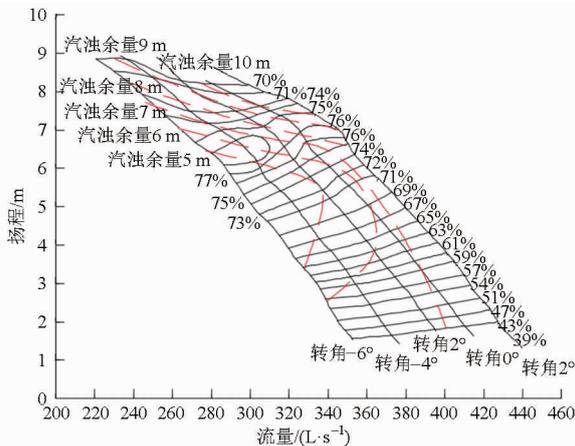


图2 TJ04-ZL-20泵装置性能曲线

Fig. 2 Pump device performance curves of TJ04-ZL-20

凌城站扬程范围大,水泵选型难度大,现有水泵水力模型很难满足要求。为了确保凌城站泵装置高效、稳定运行,应进行水泵水力模型的针对性开发,新型水泵水力模型性能应介于TJ04-ZL-12和TJ05-ZL-02之间。新型水泵水力模型既要能够满足凌城站的扬程范围要求,又要使得设计点效率

较高。

## 2 凌城站水力模型的针对性设计

针对凌城站5台套1300ZLB型立式轴流泵机组选型方案和泵站泵装置设计参数,参照文献[6],确定针对性设计的轴流泵的设计参数为:叶轮直径300 mm,转速1450 r/min,设计流量360 L/s,设计扬程5.50 m。

在针对性设计研究时对轴流泵叶片采用数值计算的分析方法。利用数值计算软件CFX对不同设计参数下的轴流泵叶轮内部流场进行多工况全三维的紊流数值模拟。对数值模拟结果进行分析和比较,兼顾最高运行扬程和设计扬程,得到最终针对凌城站的设计方案。

### 2.1 设计参数

#### 2.1.1 叶栅稠密度

叶栅稠密度( $l/t$ )是轴流泵叶轮的重要几何参数<sup>[7-9]</sup>,它直接影响泵的效率,也是决定水泵汽蚀性能的重要参数。叶栅稠密度是根据在叶栅中能量损失最小以及具有较好汽蚀性能的条件确定的。叶栅稠密度减小,水泵叶片总面积减小,叶片工作面和背面的压差增加,汽蚀性能变差。但是叶片总面积减小,相应地减小了水力摩擦损失,叶片效率可以提高。

在针对性设计时,保持叶根叶栅稠密度倍数不变,在叶尖叶栅稠密度的可变范围内,适当降低叶尖叶栅稠密度,以减小内外翼型的长度差,均衡叶片出口扬程,扩大高效区范围,提高效率,提升运行稳定性。

#### 2.1.2 翼型安放角

叶片的翼型安放角( $\beta$ )对轴流泵的性能同样具有重要的影响。通常轴流泵叶轮叶片的外缘翼型很薄,几乎平直,并且叶片的冲角很小,可见做功能力不强。反之,轮毂侧的翼型较厚,拱度较大,且冲角较大,导致叶片扭曲严重。因此,在针对性设计时应适当减小轮毂处翼型安放角,降低轮毂侧的轴面速度与圆周分速度,同时适当增大外缘翼型的安放角,增大外缘叶片的冲角,提高叶片的做功能力。这样不仅可以减小叶片扭曲,改善翼型工作条件,增加过流量,而且可以提高效率、扩大高效区和提高叶片的抗汽蚀性能。

### 2.2 针对性设计结果

针对性设计时采用Turbo-Grid对设计的轴流泵叶轮进行建模并划分网格,运用ANSYS-CFX对叶轮内部三维不可压缩紊流流场进行数值模拟,计算流场外特性参数,对不同设计参数能否满足泵站设

计要求进行验证比较,最终确定叶片设计参数。

参照TJ04-ZL-12和TJ05-ZL-02的主要几何参数,选定水泵模型轮毂比为0.4,叶片数为4片。不断修改各断面的叶栅稠密度和翼型安放角,并通过CFD计算分析比较是否能够满足最高运行扬程要求和设计扬程下效率较高,最后根据不同方案的计算结果优选出最终满足泵站设计要求的最终设计方案。其主要设计参数为:叶尖叶栅稠密度0.82,叶根叶栅稠密度1.4,叶尖翼型安放角15.32°。图3为叶轮的三维造型图。

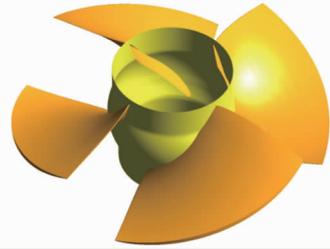


图3 叶轮三维造型图

Fig. 3 3-dimensional model of impeller

轴流泵导叶的作用是回收一部分叶轮出口水流的动能,导叶的设计要求合理确定设计工况。改变导叶设计工况,可使泵段的高效区扬程产生明显的移动,以适应不同泵站实际运行工况要求。通过CFD分析确定最终导叶的设计方案,如图4所示,导叶轮毂直径为110 mm,叶片数为7,叶片外缘叶栅稠密度为1.05。



图4 导叶三维造型图

Fig. 4 3-dimensional model of guide vane

## 3 轴流泵段数值模拟

### 3.1 泵段数值模拟

#### 3.1.1 三维建模

水泵水力模型泵段进出口直径350 mm,带60°标准弯管。其中进水直管段,导水锥和60°出水弯管通过Pro/E进行三维建模。叶轮和导叶通过Turbo-Grid进行三维建模。将各部件进行装配,得到水泵水力模型泵段示意图,如图5所示。

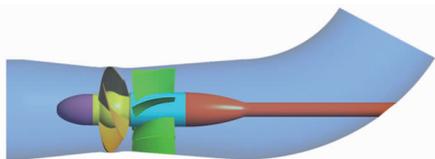


图 5 泵段水力模型示意图

Fig. 5 Pump device hydraulic model

### 3.1.2 网格划分

对进水直管段、导水锥和标准出水弯管 3 个计算域采用 ICFM 软件进行结构化网格划分, 网格质量都在 0.4 以上, 质量较好, 符合计算要求。叶轮和导叶直接在 Turbo-Grid 中进行结构网格划分, 对边界层进行网格加密, 经检验, 叶轮和导叶在 Turbo-Grid 中画出的网格质量较好, 同时满足正交性要求。参照文献[10], 满足网格无关性要求时, 该泵段叶轮网格数为 447 504, 导叶网格数为 442 491, 整个计算域网格数为 1 233 007。

### 3.1.3 边界条件设置

整个泵段计算域进口为进水直管段的进口, 进口边界条件设置为总压进口, 指定进口总压为一个标准大气压。泵段计算域的出口为 60°出水弯管的出口, 出口边界设置为质量流量出口, 设计流量为 360 L/s, 转速为 1 450 r/min。壁面边界条件设置, 包括叶片表面、轮毂表面、轮缘和管道内表面等。表面固壁上满足粘性流体的无滑移条件, 因此在近壁区域采用标准壁面函数边界条件。

泵段各部件交界面的设置分为动静交界面设置和静静交界面设置, 导水锥出口与叶轮进口、叶轮出口与导叶进口的动静交界面采用 Stage 模型, 其余各部分交界面均采用 None 交界面类型。

## 3.2 结果分析

针对凌城站设计的水泵水力模型模型泵泵段进行了数值计算<sup>[11-15]</sup>, 采用标准  $k-\varepsilon$  模型, 叶片安放角为 0°时, 计算流量范围 240~420 L/s, 分别计算了 240、260、280、300、320、340、360、380、400、420 L/s 共 10 个流量点, 最优工况点流量 360 L/s 左右。计算结果如表 2 所示。

表 2 为基于 CFD 的凌城站水力模型针对性设计比选最终方案的泵段数值模拟结果。在设计工况下, 扬程为 5.48 m, 效率达到最大值 86.3%, 说明本文基于 CFD 的凌城站的针对性设计是准确的、可靠的; 随着流量的减小, 扬程增加, 在计算的最小流量 240 L/s 时, 并没有到达马鞍区工况, 而此时扬程已达 8.46 m, 效率还处于可接受范围, 而前述的 TJ04-ZL-06 和 TJ05-ZL-02 水力模型最高扬程不到 8 m, 相比最高扬程有所提高。根据泵段数值模拟计算结果可知, 此针对性设计的水泵水力模型能够更

好地满足凌城站运行要求, 且效率较高。

表 2 泵段数值模拟计算结果

Tab. 2 Pump device numerical simulation results

流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	扬程 $H/m$	效率 $\eta/\%$	轴功率 $P/W$
240	8.46	69.2	28 822.8
260	7.97	72.6	28 016.4
280	7.47	75.7	27 149.0
300	6.92	78.3	26 052.0
320	6.31	79.6	24 897.2
340	5.79	82.8	23 527.6
360	5.48	86.3	22 443.0
380	4.69	85.4	20 503.0
400	3.70	79.4	18 300.3
420	2.69	70.1	15 849.1

## 4 模型试验验证

### 4.1 泵段试验系统

根据泵段数值模拟结果, 将该针对性设计最终方案的叶轮、导叶和进水管加工制作并进行泵段试验研究。泵段试验在扬州大学测试中心的高精度水力机械试验台上进行。试验台为立式封闭循环系统。在该试验台上对本文针对性设计出的水泵水力模型进行了泵段能量性能试验和汽蚀性能试验。模型泵名义叶轮直径  $D = 300$  mm, 实际叶轮直径  $D = 299.65$  mm。叶轮如图 6a 所示, 用黄铜材料经数控加工成型。导叶如图 6b 所示, 叶片数为 7, 用钢质材料焊接成型。模型泵段进出口直径 350 mm, 带 60°标准弯管, 叶轮室开有观察窗, 便于观测叶片处的水流形态。模型泵段经安装检查, 导叶体与叶轮室定位面轴向跳动 0.10 mm, 叶轮轮毂外表面径向跳动 0.08 mm, 叶顶间隙控制在 0.20 mm 以内。

### 4.2 测试方法

泵段模型试验测试内容包括: 6 个叶片安放角下泵段性能试验; 各叶片安放角下 5 个特征扬程点的汽蚀性能试验。

试验参照 GB/T 18149—2000《离心泵、混流泵和轴流泵水力性能试验规范(精密级)》和 SL140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》, 每个叶片安放角的性能试验点不少于 18 个, 临界汽蚀余量按流量保持常数, 效率下降 1% 来确定。

### 4.3 模型泵段试验结果及分析

模型泵段试验测试了 6 个叶片安放角度 ( $-4^\circ$ 、 $-2^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ ) 的能量性能和各叶片角度下不同流量点的汽蚀性能。将  $0^\circ$  角的数据结果取出与数值模拟结果进行对比, 如图 7 所示。并根据试验结果画出针对凌城站的水力模型综合特性曲线如图 8 所示。



图6 叶轮和导叶实物图

Fig. 6 Model of impeller and guide vane

(a) 叶轮 (b) 导叶

根据图7可知,针对凌城站的数值模拟结果与试验结果误差较小,说明针对凌城站水力模型的泵段数值模拟结果是可靠的。数值模拟结果与试验结果得到了相互验证。同时也说明了针对凌城站水泵模型的针对性设计是准确的、可靠的。根据图8水力模型的综合特性曲线可知,该针对性设计的水泵水力模型最高效率出现在叶片安放角 $4^\circ$ 、流量 $382\text{ L/s}$ 、扬程 $6.487\text{ m}$ ,为 $86.05\%$ ,此时临界汽蚀余量 $7\text{ m}$ 、比转数 $805$ 、汽蚀比转数 $1170$ 。水泵水力模型的特点是能量和汽蚀性能比较均衡,效率高、临界汽蚀余量小,叶片安放角 $0^\circ$ 时最大扬程和最高效率点扬程的比值达到 $8.79/5.56=1.58$ ,高于平均 $1.3$ 的水平,适用于凌城站这样扬程变化幅度较大的泵站。

## 5 结论

(1) CFD 计算能预测水泵及泵段的水力性能,精度满足工程要求,能有效指导水泵和导叶的设计工作。基于CFD的轴流泵水力模型的针对性设计是可靠的、成功的。

(2) 针对凌城站运行扬程变化范围大,兼顾效率要求,针对性设计轴流泵水力模型,通过数值模拟和试验对比分析,说明此次针对性设计能够更好地满足凌城站的运行要求。

(3) 对于大型泵站的更新改造,针对泵站运行的特殊要求对泵站水力模型进行针对性设计是必要的。

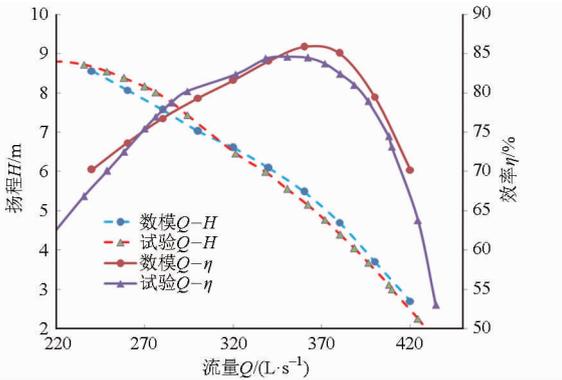


图7 试验结果与数模结果对比

Fig. 7 Comparison of simulation results and experiment results

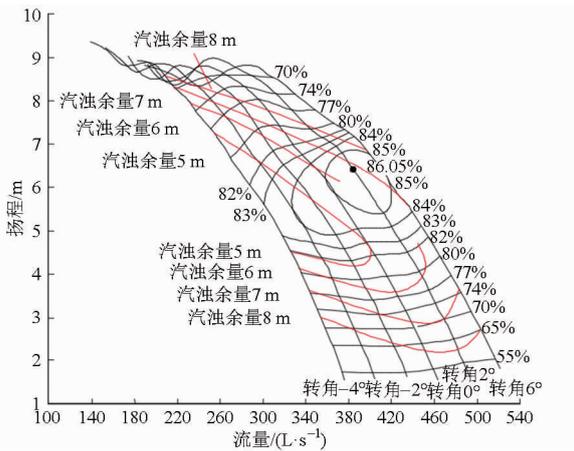


图8 水泵水力模型综合特性曲线

Fig. 8 Hydraulic model synthetic characteristic curves

## 参 考 文 献

- 1 关醒凡, 黄道见, 刘厚林, 等. 南水北调工程大型轴流泵选型中值得注意的几个问题[J]. 水泵技术, 2002(2): 13-16.
- 2 甄峰. 乌江泵站水力模型选择及泵装置模型试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.  
Zhen Feng. Hydraulic model selection and model experimental study on pump sets of Wujiang Pumping Station[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese)
- 3 刘剑, 杜亮, 蒋雯. 南水北调东线工程睢宁二站主泵参数优化设计研究及选型[J]. 水泵技术, 2014(5): 31-35.
- 4 兰才有, 仪修堂, 段桂芳, 等. 南水北调东线工程水泵机组选型方法探讨[J]. 排灌机械, 2004, 22(1): 1-7, 12.  
Lan Caiyou, Yi Xiutang, Duan Guifang, et al. Study on selection of water pump-unit on the east route of South-North Water Diversion Project[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004, 22(1): 1-7, 12. (in Chinese)
- 5 汤方平, 王国强, 刘超, 等. 高比转数轴流泵水力模型设计与紊流数值分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 119-123.  
Tang Fangping, Wang Guoqiang, Liu Chao, et al. Design and numerical analysis on an axial-flow model pump with high specific

- speed[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 119-123. (in Chinese)
- 6 汤方平,刘超,成立,等.低扬程水泵选型新方法[J].水力水电科技进展,2001,21(4):41-43,70.  
Tang Fangping, Liu Chao, Cheng Li, et al. A new method for low-lift water pump selection[J]. Advances in Science and Technology Water Resources, 2001, 21(4):41-43,70. (in Chinese)
- 7 雷翠翠.水泵叶片的多学科设计优化理论与方法研究[D].扬州:扬州大学,2009.  
Lei Cuicui. Multidisciplinary design optimization theory and method study of water pump blades[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese)
- 8 汤方平,周济人.低扬程泵装置性能的决定因素[J].排灌机械,1997,15(1):12-13,27.  
Tang Fangping, Zhou Jiren. Determination of the pumping installation characteristic[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1997, 15(1):12-13,27. (in Chinese)
- 9 汤方平,石丽建,雷翠翠,等.轴流泵叶片多学科设计优化[J].农业机械学报,2014,45(9):96-100.  
Tang Fangping, Shi Lijian, Lei Cuicui, et al. Multidisciplinary design optimization of axial-flow pump blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):96-100. (in Chinese)
- 10 杨帆.低扬程泵装置水力特性及多目标优化关键技术研究[D].扬州:扬州大学,2013.  
Yang Fan. Research on hydraulic performance and multi-objective optimization design of low-lift pump system[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese)
- 11 施卫东,李通通,张德胜,等.轴流泵叶轮区域空化特性数值模拟[J].农业工程学报,2012,28(13):88-93.  
Shi Weidong, Li Tongtong, Zhang Desheng, et al. Numerical simulation on cavitating characteristic in impeller of axial-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13):88-93. (in Chinese)
- 12 Ye Liang, Liu Zhongmin. Design of implantable axial-flow blood pump and numerical studies on its performance[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(4):445-452.
- 13 杨敬江.轴流泵水力模型设计方法与数值模拟研究[D].镇江:江苏大学,2008.  
Yang Jingjiang. Studies on hydraulic design method and numerical simulation of axial flow pump model[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 14 Li Zengliang, Zhi Ruiping, Zhao Chuanwei, et al. The 3D modeling of blades of multiphase flow helico-axial pump's rotor based on solidworks[J]. CADDM,2011,21(2):1-6.
- 15 徐磊.斜式轴伸泵装置水力特性及优化设计研究[D].扬州:扬州大学,2009.  
Xu Lei. Study on hydraulic characteristic and optimum design of pump system with slanting and extensive shaft[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese)
- 16 武桦,冯建军,吴广宽,等.基于CFD的贯流式水轮机叶片改型及性能研究[J].西安理工大学学报,2013,29(3):290-294.  
Wu Hua, Feng Jianjun, Wu Guangkuan, et al. The blade geometry modification and performance research for bulb turbin based on CFD[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(3):290-294. (in Chinese)
- 17 刘超.轴流泵系统技术创新与发展分析[J].农业机械学报,2015,46(6):49-59.  
Liu Chao. Researches and developments of axial-flow pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):49-59. (in Chinese)