

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.007

悬空高对泵装置流道内流特性的影响*

杨帆¹ 刘超^{1,2} 汤方平^{1,2} 梁豪杰² 翟仁洁¹

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225127; 2. 扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室, 扬州 225009)

摘要: 采用单因素比较法对6种不同喇叭管悬空高的立式轴流泵装置进行了全流道的CFD数值计算和喇叭管中心区域的PIV流场测试,分析了不同方案各工况时箱涵式进水流道内附底涡的初生位置变化情况。结果表明:相同工况时附底涡初生位置因喇叭管悬空高的不同而改变;在相同喇叭管悬空高时涡核中心起始位置因工况的不同而改变;喇叭管悬空高度越低,喇叭管底部的速度梯度变化越剧烈。箱涵式进水流道的喇叭管悬空高度建议取 $0.8D$ (D 为叶轮名义直径),宜在该类型的进水流道内设置消涡装置。数值计算和PIV流场测试获得的测试区流场的速度分布及附底涡核线轨迹基本相同。

关键词: 水力机械 泵装置 流道 涡带 数值模拟 粒子图像测速技术

中图分类号: TV131; TH312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)02-0040-06

Effect of Bottom Clearance on Flow Characteristics of Pumping System by CFD and PIV

Yang Fan¹ Liu Chao^{1,2} Tang Fangping^{1,2} Liang Haojie² Zhai Renjie¹

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China

2. Hydrodynamic Engineering Laboratory of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Based on computational fluid dynamic (CFD) and particle image velocimetry (PIV) technology, factor analysis method was used to study the effect of bottom clearance of flare on the flow characteristics of pumping system, and the occurred location change of submerges vortex and the submerged vortex core trajectory were analyzed emphatically. The results show that the occurred location of submerges vortex change along with the change of bottom clearance of flare, and the occurred location of submerges vortex along with the change of operating condition in the same bottom clearance of flare. With the decrease of bottom clearance, the velocity gradient varies greatly in the zone of the flare bottom. The bottom clearance $h = 0.8D$ was strongly suggested and the anti-submerged vortex device should be taken for this kind of box-type inlet passage. The velocity distribution contour of test section by PIV was similar to that by CFD, and the trajectory of submerged vortex by CFD was similar to that by PIV. It was also proved that the measured results showed great agreement with the calculated ones.

Key words: Hydraulic machinery Pumping system Passage Vortex Numerical simulation PIV

引言

箱涵式进水结构主要应用于中小型泵站工程中,箱涵式进水结构水力性能的主要影响因素有喇

叭管悬空高、后壁距等。国内外学者对箱涵式进水结构及其类似进水结构已开展了不少的研究,研究内容主要集中于双向箱涵式进水流道水力性能的物理模型试验及数值计算分析^[1-3]、箱涵式开敞进水

收稿日期: 2014-02-08 修回日期: 2014-03-19

* 国家自然科学基金资助项目(51279173)、江苏省高校自然科学基金研究资助项目(14KJB570003)、扬州大学科技创新培育基金资助项目(2014CXJ030)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 杨帆,讲师,主要从事泵及泵装置水力特性及多目标优化研究,E-mail: sqzyangfan@126.com

池几何影响因素的数值分析^[4-6]、箱涵式进水池消涡措施的试验及数值验证分析^[7-10]、进水池内部流态的数值分析^[11-13]、进水池内流场的测试研究^[14-17]等方面。喇叭管悬空高是吸水喇叭管进口至流道底部的距离,其取值对喇叭管附近流态和土建投资的影响非常显著,箱涵式进水流道的水流是从四周进入喇叭管的,合适的喇叭管悬空高对于形成这样的流动并使水流基本均匀地进入喇叭管至关重要。针对该方面的研究,国内外学者开展的研究工作较少,本文以箱涵式进水流道喇叭管悬空高为研究对象,采用数值模拟技术结合 2D3C-PIV 测试技术分析其对附底涡产生的影响及其对箱涵式进水流道、泵装置水力性能的影响。

1 数学模型及边界条件

立式轴流泵装置包括箱涵式进水流道、叶轮、导叶体及出水流道,泵装置三维模型如图 1 所示。

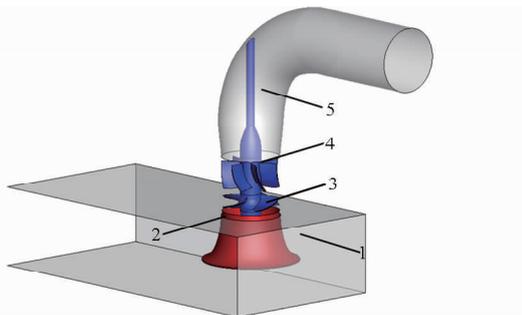


图 1 立式轴流泵装置三维模型

Fig. 1 3D-model of axial-flow pumping system

1. 箱涵式进水流道 2. 喇叭管 3. 叶轮 4. 导叶体 5. 圆管式出水流道

叶轮名义直径 $D = 120 \text{ mm}$,叶轮的叶片数为 4,转速 $n = 2400 \text{ r/min}$,叶片安放角为 0° ,导叶体叶片数为 7。

叶轮和导叶体采用六面体网格,箱涵式进水流道采用混合网格,圆管式出水流道采用六面体网格,网格剖分采用 ANSYS Turbo-Grid 和 ICEM CFD 软件。针对箱涵式进水流道的底部及后壁区域易产生涡带,对其近壁区的网格进行了加密处理。依据文献[18]对湍流模型在泵站进水池漩涡模拟中适用性研究所得的结论,同时 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型考虑了分离流动和涡旋效应,该湍流模型能更好地模拟高应变率及流线弯曲程度较大的流动,结合该湍流模型在泵装置数值模拟中的较好应用^[4,19-20],故选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。本文采用 ANSYS CFX 的 CFD 应用程序对立式轴流泵装置进行全流道的数值计算。

计算域流场的进口采用流量进口条件;流场出

口采用静压出口;箱涵式进水流道、叶轮、导叶体及圆管式出水流道的流固接触面均设置为固体壁面,近壁区采用可伸缩壁面函数(Scalable wall functions)处理;叶轮与导叶体、箱涵式进水流道的数据传递采用动静交界面的方法进行处理。

2 悬空高对泵装置水力性能的数值分析

2.1 计算方案

箱涵式进水流道的主要控制尺寸包括:叶轮名义直径 D 、流道进口高度 H_{in} 、喇叭管悬空高 h 、流道宽度 B 、流道长度 L 、后壁距(叶轮中心线至进水流道后壁的距离) X 。以叶轮名义直径 D 为基数,对其他各参数进行无量纲换算,则 $H_{in} = 1.40D$, $h = 0.60D$, $B = 3.0D$, $L = 5.93D$, $X = 1.31D$ 。喇叭管型线为 1/4 的椭圆型线。流道的控制尺寸如图 2 所示。

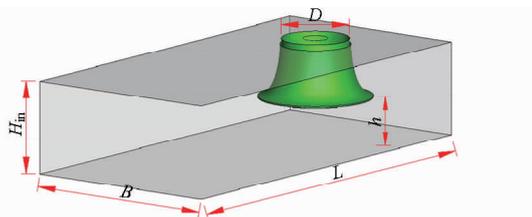


图 2 箱涵式进水流道尺寸示意图

Fig. 2 Size diagram of box-type inlet passage

为了确保喇叭管在进水流道内部的几何形状不改变,通过调整进水流道的进口高度达到设置不同喇叭管悬空高的目的,共选取了 6 种不同喇叭管悬空高度进行分析,各方案喇叭管悬空高和流道进口高度如表 1 所示。

表 1 不同方案的喇叭管悬空高和流道进口高度

Tab. 1 Bottom clearance of different flares

参数	类别	相对值	参数	类别	相对值
喇叭管悬空高	方案 1	0.20D	流道进口高度	方案 1	1.00D
	方案 2	0.40D		方案 2	1.20D
	方案 3	0.60D		方案 3	1.40D
	方案 4	0.80D		方案 4	1.60D
	方案 5	1.00D		方案 5	1.80D
	方案 6	1.20D		方案 6	2.00D

以进水流道喇叭管悬空高和流道高度 2 个相互关联的几何参数作为一个指标,基于三维定常数值计算分析了不同喇叭管悬空高对泵装置水动力性能的影响。相同流量时,各方案的箱涵式进水流道进口断面相对面积比和流道进口的相对入流速度比定义如下:

相对面积比 m_s 为

$$m_s = \frac{4A_{in}}{\pi D^2} = \frac{4BH_{in}}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中 A_{in} ——箱涵式进水流道的进口面积

相对入流速度比 m_v 为

$$m_v = \frac{1}{m_s} \quad (2)$$

各方案时箱涵式进水流道进口断面相对面积比与相对入流速度比如图3所示,各方案的进口相对面积呈线性变化,相同流量时进水流道进口断面的平均速度呈二次曲线。

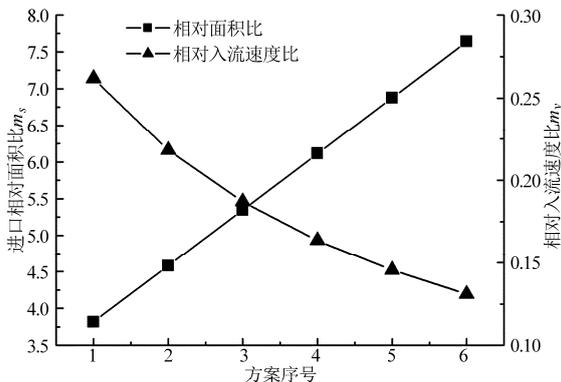


图3 各方案进口相对面积与相对入流速度曲线

Fig.3 Relationship between relative area and relative inflow velocity

2.2 数值计算结果分析

选择3个不同流量系数 K_Q 的特征工况(小流量工况 $K_Q = 0.318$ 、高效工况 $K_Q = 0.499$ 和大流量工况 $K_Q = 0.608$)对各方案分别进行三维定常数值计算分析,获得了各方案泵装置水动力性能,流量系数 $K_Q = 0.608$ 时各方案箱涵式进水流道内部流线如图4所示。

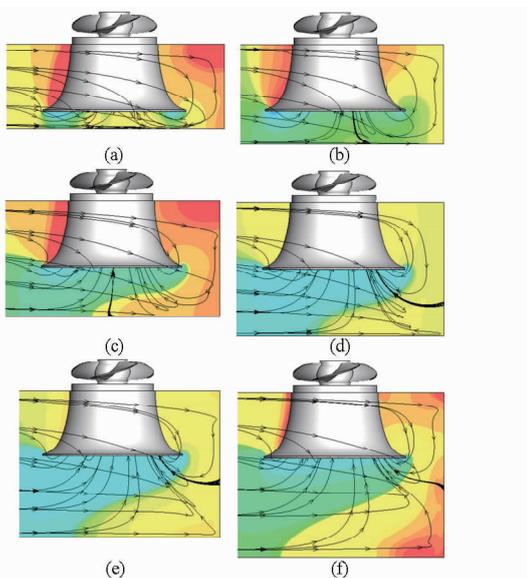


图4 流道内特征断面的流线图

Fig.4 Streamline diagram of feature section

(a)方案1 (b)方案2 (c)方案3

(d)方案4 (e)方案5 (f)方案6

况时箱涵式进水流道底部均出现了附底涡,定义平面 XOY , X 方向为垂直水流方向, Y 方向为顺水流方向,坐标原点即为喇叭管口圆心投影在流道底部的点。以 XOY 平面为基准,对方案2和方案3在各工况时涡核的 Y 方向起始位置进行统计,如表2所示。

表2 不同喇叭管悬空高时涡核中心位置

Tab.2 Center position of vortex core

名称	流量系数 K_Q	涡核在 Y 方向位置/mm
方案2	0.318	-14.12
	0.499	46.88
	0.608	-16.60
方案3	0.318	-4.74
	0.499	2.36
	0.608	1.65

相同工况时,附底涡发生的起始位置因喇叭管悬空高的不同而改变;在相同喇叭管悬空高时,涡核中心起始位置因工况的不同而改变;在方案3($h = 0.6D$)时,涡核中心在 Y 方向的位置变化范围在 $0.0138D \sim 0.0395D$ 间,在方案2($h = 0.4D$)时,涡核中心在 Y 方向的位置变化范围在 $0.118D \sim 0.391D$ 间,表明随着喇叭管悬空高度的降低,喇叭管底部的速度梯度变化越剧烈。

涡带形成的最基本条件是流道底部形成涡带的水流需具备一定的圆周分速度。在喇叭管悬空高 $h = 0.2D$ 时,喇叭管底部未见涡带的形成,主要因喇叭管悬空高较小,速度梯度变化剧烈,水流的圆周分速度未达到一定数值,或部分水体的圆周分速度达到该值后即被四周进入喇叭管的水流扰乱,导致附底涡带未能形成。在喇叭管悬空高 $h = 0.4D \sim 0.6D$ 时,箱涵式进水流道底部均出现了附底涡带,在喇叭管悬空高 $0.8D \sim 1.2D$ 之间,箱涵式进水流道未见附底涡带的形成,但流道后壁均出现了附壁涡。

在上述流道内部流动分析的基础上,对各方案的箱涵式进水流道的水力性能进行分析比较,水力损失计算结果如图5所示。箱涵式进水流道的水力损失呈现出随喇叭管悬空高的增加而减少的整体变化趋势。在方案1($h = 0.2D$)时,各工况下箱涵式进水流道的平均水力损失是方案2($h = 0.4D$)时流道水力损失的2.38倍;方案2($h = 0.4D$)时各工况下箱涵式进水流道的平均水力损失是方案3($h = 0.6D$)时流道水力损失的1.53倍;随喇叭管悬空高的进一步增大,箱涵式进水流道的水力损失差异性变小,在各方案下,喇叭管悬空高 $h = 0.8D$ 、 $h = 1.0D$ 和 $h = 1.2D$ 时,箱涵式进水流道的水力损失差值均在 $0.1 \sim 0.2$ mm 范围内。

在喇叭管悬空高 $h = 0.4D$ 和 $h = 0.6D$ 时,各工

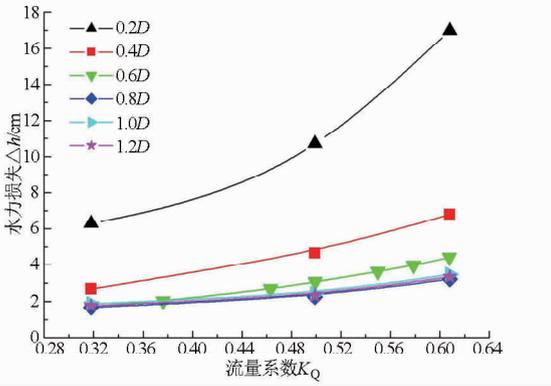


图 5 流道的水力损失

Fig. 5 Hydraulic loss of inlet passage

对流量系数 $K_Q = 0.499$ 和 $K_Q = 0.608$ 时,各方案箱涵式进水流道出口断面的水力性能进行计算,轴向速度分布均匀度和速度加权平均角的结果如图 6、图 7 所示。

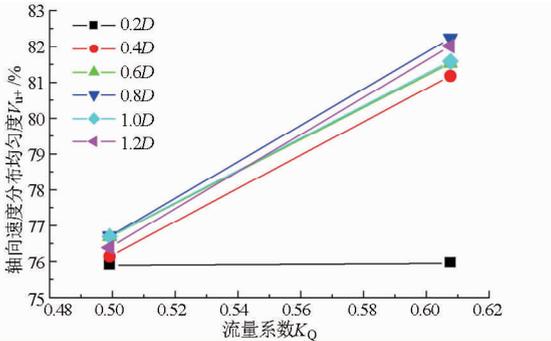


图 6 各方案的轴向速度分布均匀度

Fig. 6 Axial velocity distribution uniformity of different schemes

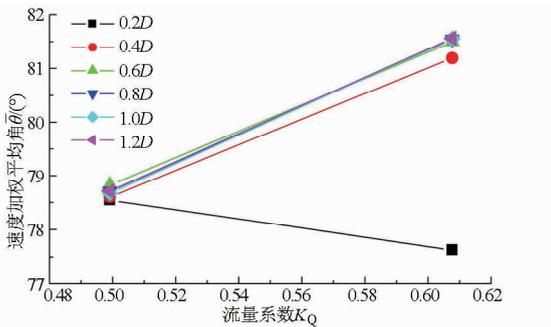


图 7 各方案的速度加权平均角

Fig. 7 Velocity-weighted average swirl angle of different schemes

在喇叭管悬空高 $h = 0.2D$ 时,箱涵式进水流道出口断面的轴向速度分布均匀度和速度加权平均角在各方案中均最小,尤其在大流量工况 ($K_Q = 0.608$) 时,速度加权平均角比方案 2 低了 3.57° ,轴向速度分布均匀度低了 5.22% 。随着喇叭管悬空高的减小,轴向速度分布均匀度开始逐渐降低且下降幅度逐渐增大,在喇叭管悬空高 $0.6D \sim 1.2D$ 时,速度加权平均角差值较小,但喇叭管悬空高从 $h =$

$0.4D$ 继续减小时,速度加权平均角大幅度降低,表明了随喇叭管悬空高的减小,进入喇叭管的水流流态越差,流速分布越不均,由图 4 可知,流入喇叭管的水流流线弯曲幅度更大,也进一步导致了流道水力损失的增大。

对于此研究对象,无论悬空高取值多少,该箱涵式进水流道均存在附底涡或附壁涡,对该类型的进水流道,宜在流道内部设置消涡措施,避免涡带的产生。基于上述分析,对于箱涵式进水流道的喇叭管悬空高度建议取 $h = 0.8D$ 。

3 数值模拟结果与试验对比

3.1 试验装置

2D3C-PIV 测试系统为丹麦 Dantec 公司生产,包括一个双腔 Nd:Yag 激光器,激光器最大输出能量为 600 mJ,波长为 532 nm,最大频率为 100 Hz,脉动持续时间为 6 ns;2 台 SpeedSense 9050 相机,相机分辨率为 4.3 M 像素数,采集速度为 480 帧/s,相机自带 12 GB 内存;依据文献[20]对激光测量中示踪粒子的选择分析,采用聚苯乙烯作为示踪粒子,整套测试系统如图 8 所示,测试区域如图 9 所示。



图 8 2D3C-PIV 激光测试试验系统

Fig. 8 Test system of 2D3C-PIV laser measurement

1. 受测泵装置 2. 激光器 3. 相机

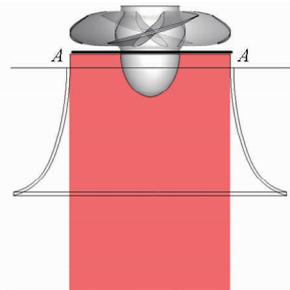


图 9 测试区域

Fig. 9 Test area

3.2 PIV 试验结果与数模结果比较

对流量系数 $K_Q = 0.499$ 和 $K_Q = 0.608$ 时箱涵式进水流道中心纵断面测试区域进行 2D3C-PIV 测试和 CFD 数值计算结果进行比较,结果如图 10

所示,图 10 中标注为相对速度,即各点速度与测试断面中最大速度的比值 v_i/v_{\max} 。

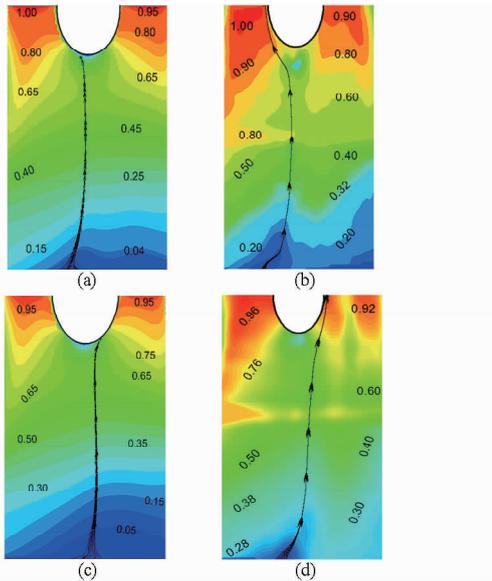


图 10 CFD 和 2D3C-PIV 型测试的速度云图比较

Fig. 10 Velocity contours of test section for numerical simulation and test

- (a) $K_Q = 0.499$, CFD (b) $K_Q = 0.499$, 2D3C-PIV
(c) $K_Q = 0.608$, CFD (d) $K_Q = 0.608$, 2D3C-PIV

在流量系数 $K_Q = 0.499$ 和 $K_Q = 0.608$ 时,CFD 计算结果与 2D3C-PIV 测试获得的相对速度分布的整体趋势及其变化趋势基本相同,2D3C-PIV 测试和 CFD 数值计算获得的涡核线的运动轨迹也基本相同。

截取截面出口侧的一根测线 A-A,如图 9 所示,将相对速度进行比较,如图 11(图中 $l^* = (l - l_i)/l$,其中, l 为测线总长, l_i 为各点与测线左端点的距离)所示,在流量系数 $K_Q = 0.499$ 时,CFD 数值计算结果与 2D3C-PIV 测试所得相对速度分布趋势整体上相同;在流量系数 $K_Q = 0.608$ 时,CFD 数值计算与 2D3C-PIV 测试结果在轮毂逆水侧的速度分布差异性稍大,从速度的整体分布分析,CFD 数值计算与 2D3C-PIV 测试结果基本相同。2D3C-

PIV 的测试分析也验证了 CFD 数值计算结果的有效性和可靠性。

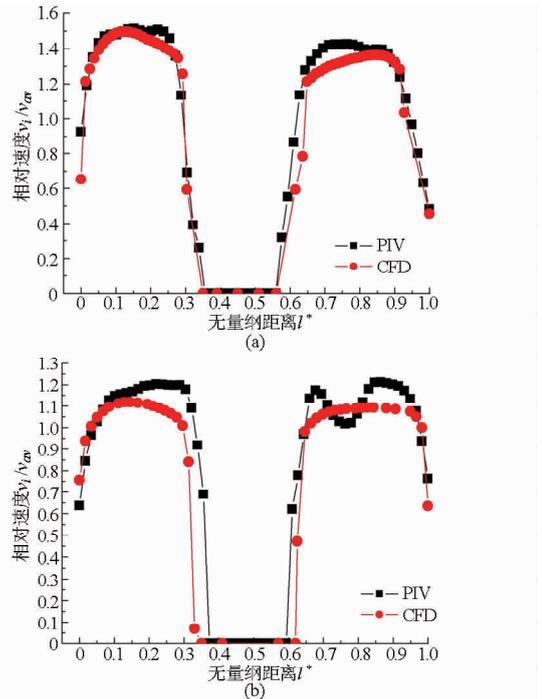


图 11 2D3C-PIV 测试值与 CFD 计算值的对比

Fig. 11 Comparison of calculated and tested data

- (a) $K_Q = 0.499$ (b) $K_Q = 0.608$

4 结论

(1) 相同工况时,附底涡初生位置因喇叭管悬空高的不同而改变;在相同喇叭管悬空高时,涡核中心起始位置因工况的不同而改变;随着喇叭管悬空高度的降低,喇叭管底部的速度梯度变化越剧烈。

(2) 对该类型的泵装置进水结构,宜在进水结构内部设置消涡装置,避免涡带的产生。对于箱涵式进水流道的喇叭管悬空高宜取 $h = 0.8D$ 。

(3) 采用 2D3C-PIV 测试技术对喇叭管中心区域进行了流场测试,数值计算和流场测试获得的附底涡核线轨迹基本相同,流场基本相同,验证了数值计算结果的可靠性。

参考文献

- Zhu Jinmu, Zeng Fanchun. Experimental study on two-way flow passages in pumping system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(10): 1966-1970.
- Liu Chao, Jin Yan, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation and experimental study of a two-floor structure pumping system[C]// Proceedings of ASME 2010 Power Conference, 2010:777-784.
- 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.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping. Analysis on hydraulic performance of reversible vertical pumping system based on CFX[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(3): 403-412. (in Chinese)
- 周佩剑,王福军,张志民. 导流锥型式对低扬程泵站水力性能的影响[J]. 排灌机械学报, 2013, 31(9): 768-773.
Zhou Peijian, Wang Fujun, Zhang Zhimin. Effects of guide cone configuration on hydraulic performance of low-head pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(9): 768-773. (in Chinese)

- 5 成立,刘超,周济人,等. 泵站开敞式进水池几何参数的数值模拟[J]. 农业机械学报,2009,40(1):50-55.
Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation on geometrical parameters for open pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 50-55. (in Chinese)
- 6 王本成,詹杰民,余凌晖,等. 泵站矩形及蜗形进水池的水力性能数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2012,27(4):464-470.
Wang Bencheng, Zhan Jiemin, Yu Linghui, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics in the pumping station's rectangle intake sump and volute intake sump[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(4): 464-470. (in Chinese)
- 7 Tang Xuelin, Wang Fujun, Li Yanjun, et al. Numerical investigation of vortex flows and vortex suppression schemes in a large pumping-station sump[J]. Proc. IMech E, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(6):1459-1480.
- 8 刘超,杨帆,赵军. 基于高速摄影技术的泵进水流道消涡试验分析[J]. 农业机械学报,2014,45(3):61-65.
Liu Chao, Yang Fan, Zhao Jun. Analysis on the vortex-elimination device of pump suction passage using high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 61-65. (in Chinese)
- 9 Kawakita K, Matsui J, Isoda H. Experimental study on the similarity of flow in pump sump models[C]//26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and System, Beijing, China, 2012.
- 10 Shazy A Shabayek. Improving approach flow hydraulics at pump intakes[J]. International Journal of Civil & Environmental Engineering, 2010, 10(6): 23-31.
- 11 刘厚林,周孝华,王凯,等. 泵站装置蜗形进水池流态与水力性能分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(11):12-16.
Liu Houlin, Zhou Xiaohua, Wang Kai, et al. Analyzing flow patterns and hydraulic performance of volute intake sump for pump station[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(11): 12-16. (in Chinese)
- 12 刘树红,耿福明,吴玉林,等. 大型泵站水泵进水池中流动稳定性研究[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(1):138-142.
Liu Shuhong, Geng Fuming, Wu Yulin, et al. Flow stability research in the pump sump of large-scale pump station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 138-142. (in Chinese)
- 13 马涛,樊红刚,袁义发,等. 基于VOF模型的泵站进水池流场计算研究[J]. 水力发电学报,2013,32(6):244-249,255.
Ma Tao, Fan Honggang, Yuan Yifa, et al. Study on flow in inlet sump of pumping station based on VOF model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 244-249, 255. (in Chinese)
- 14 陈铁军,刘树红,吴玉林. 水泵吸水池后台阶内部流场试验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(12):2025-2027.
Chen Tiejun, Liu Shuhong, Wu Yulin. An experimental study of an open pump sump with backward-facing step flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(12): 2025-2027. (in Chinese)
- 15 Liu Chao, Zhou Jiren, Li Daliang, et al. An application of 3D-PIV to the flow measurements in pump sump[C]//2007 Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, 2007, 2:69-72.
- 16 Rajendran V P, Patel V C. Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(5): 322-334.
- 17 Takahide Nagahara, Toshiyuki Sato, Tomoyoshi Okamura, et al. Measurement of the flow around the submerged vortex cavitation in a pump intake by means of PIV[C]//5th International Symposium on Cavitation, Cav03-OS-6-011, 2003.
- 18 丛国辉,王福军. 湍流模型在泵站进水池漩涡模拟中的适用性研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):31-35.
Cong Guohui, Wang Fujun. Applicability of turbulence models in numerical simulation of vortex flow in pump sump[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 31-35. (in Chinese)
- 19 杨帆,刘超,汤方平,等. 大型立式轴流泵装置流道内部流动特性分析[J]. 农业机械学报,2011,42(5):39-43,55.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Characteristics of flow in large vertical axial-flow pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 39-43, 55. (in Chinese)
- 20 金燕. 贯流泵内部流动的数值模拟与三维LDV测量研究[D]. 扬州:扬州大学,2010.
Jin Yan. Study on the numerical simulation and 3D-LDV measurement of tubular pump[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese)