doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.013

叶轮与导叶叶片数匹配对井用潜水泵性能的影响

王洪亮'施卫东'杨阳'周岭'陆伟刚'

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心,镇江 212013; 2. 南通大学机械工程学院,南通 226019)

摘要:叶轮与导叶叶片数对泵的扬程、效率等都具有较大的影响。选取 250QJ140 型井用潜水泵作为研究对象,采 用数值计算与试验相结合的方法,在叶轮与导叶叶片数组合变化下,对井用潜水泵的性能变化规律和内部流场分 布进行了研究。基于不改变其他几何参数的原则,建立 16 组不同叶片数组合的两级井用潜水泵模型。采用 ANSYS ICEM 软件对各组模型分别进行了结构化网格划分,进而在 ANSYS CFX 商用软件中对各组模型进行了多工 况定常数值计算。各组数值计算均选用标准 *k* - ω 湍流模型和标准壁面函数,获得了各组模型在不同工况下的性 能预测值。通过各组方案性能预测值的对比可以发现:在额定流量工况下,当叶轮与导叶叶片数均为 7 时,井用潜 水泵模型的效率最高。在小流量工况和大流量工况下,泵内的介质流动角度发生了变化。在小流量工况下,增加 叶轮与导叶的叶片数可以提高叶片对于液体介质的整流,进而提高井用潜水泵性能;在大流量工况下,较少的叶轮 与导叶叶片数更能减轻叶片对液体介质的排挤作用。将大流量工况下性能较好的方案 6 进行了样机制造和性能 试验,结果表明,模型性能较好,在额定流量工况下,扬程预测值比试验结果低 2.4%,轴功率预测值比试验结果低 1.6%,效率预测值比试验结果高 1.1%,数值预测结果与试验结果随流量的整体变化趋势一致,证实了本文中数值 计算的准确性。

关键词:井用潜水泵;叶轮;导叶;叶片数;数值模拟 中图分类号:TH311 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2018)07-0103-09

Matching Number of Blades between Impeller and Diffuser Blade Effect on Performance of Well Submersible Centrifugal Pump

WANG Hongliang¹ SHI Weidong² YANG Yang¹ ZHOU Ling¹ LU Weigang¹

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
 2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The number of impeller and diffuser blades has a great influence on the head and efficiency of the pump. The 250QJ140 type well submersible centrifugal pump was selected as the research object. By the combination of numerical calculation and experiment, under the variation of blade number of impeller and diffuser, the performance variation and internal flow field distribution of submersible pump were analyzed. Based on the principle of not changing other geometric parameters, 16 submersible pump models with two different combinations of blades were established. ANSYS ICEM software was used to structure each group of models separately, and then the ANSYS CFX commercial software was used to calculate the multi-working constant of each model. For each set of numerical calculation, standard $k - \omega$ turbulence model and standard wall function were selected to obtain the performance prediction values of each model under different operating conditions. Compared the predictions of the performance of each group, it can be found that the efficiency of submersible pump model was the highest when the number of impeller and guide vane was 7 at the rated flow rate. Under the low flow conditions, increasing the number of blades of the impeller and guide vanes can improve blade rectification of the liquid medium, thereby

收稿日期:2018-03-27 修回日期:2018-05-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51609106)、江苏省自然科学基金项目(BK20150508)、江苏高校自然科学研究项目(15KJB570001)、江 苏省博士后科研计划项目(1501069A)和流体及动力机械教育部重点实验室开放基金项目(szjj2015-023)

作者简介:王洪亮(1985—),男,博士生,主要从事多级离心泵设计与流动机理研究,E-mail:pump2010@163.com 通信作者:施卫东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及工程理论研究,E-mail:wdshi@ujs.edu.cn

improving the performance of submersible pumps used in wells. In the case of large flow rates, fewer impellers and guide vane blades were more capable of reducing the effect of the blade on the liquid media crowding. Prototype manufacturing and performance test were carried out under the condition of good performance in large flow conditions. The test results showed that the model performance was better. Under the rated flow conditions, the predicted values of head and shaft power were 2.4% and 1.6% lower than those of the test result, and the predicted efficiency was 1.1% higher than that of the test results. The overall changing trend of numerical prediction results and experimental results with the flow was consistent, which confirmed the numerical accuracy of the research.

Key words: well submersible pump; impeller; diffuser; blade number; numerical simulation

0 引言

井用潜水泵是地下水利的关键设备,现已广泛 应用于地下水抽取、地热资源开发、石油开采、抢险 救灾等多个领域^[1-3]。井用潜水泵采用叶轮与导叶 等水力部件逐级叠加的方式来提供高扬程、高压液 体,这种多级结构常导致其轴向长度过大、初期安装 不易等问题^[4-6]。因此,提高井用潜水泵的单级水 力性能,进而缩减其轴向级数,成为井用潜水泵设计 过程中的核心问题^[7-10]。

泵叶轮与导叶的叶片对液体介质具有严格的约 束作用,液体的相对运动流线与叶片形状基本一 致^[11]。因此,叶轮与导叶的叶片数选择对泵的性能 具有极大的影响。LIU等^[12]通过数值计算与试验 研究发现离心泵叶轮叶片数的增加可以增强叶片对 流道内液体的约束作用,进而使得离心泵的扬程不 断增加。张德胜等^[13]对斜流泵在叶轮与导叶叶片 数不同时的运行稳定性进行了研究,发现叶轮叶片 数对泵内的压力脉动影响较大。邴浩等^[14]通过改 变叶轮与导叶叶片数的组合,发现叶轮叶片数与导 叶叶片数的组合变化对混流泵的性能影响较大。季 磊磊等^[15]揭示了不同叶片数混流泵内部非定常特 性的差异性,发现叶轮的叶片数不仅对泵的性能具 有较大影响,还与其运行稳定性相关。

目前,虽然诸多学者对叶轮或导叶的叶片数与 泵性能之间的关系做了大量的研究^[16-19],但是在井 用潜水泵领域,对于叶轮和导叶的叶片数组合变化 对其性能的影响研究尚未见报道。本文围绕叶轮与 空间导叶的叶片数组合变化,对多方案井用潜水泵 模型进行数值计算与试验,以期为提高井用潜水泵 性能提供设计参考。

1 几何模型

以 250QJ140 型三级井用潜水泵作为研究对象, 其基本设计参数如下:额定流量 $Q = 140 \text{ m}^3/\text{h};$ 单级 扬程 $H_s = 18 \text{ m};$ 转速 n = 2850 r/min;比转数 $n_s = 234.74(根据单级扬程计算)。$ 该井用潜水泵叶轮采用了斜切出口边的结构形式,使得液体介质拥有足够的过流空间^[20-23]。同时,其进口处采用精加工的方式保证外圈的粗糙度 *R*_a=3.2 μm,止口配合间隙为0.02 mm,极大地减小 了进口处的容积损失。图1为叶轮三维模型。



图 1 叶轮三维实体模型 Fig. 1 Impeller solid model

相较于其他类型的导叶结构,空间导叶的轴向 长度较长,并采用了三维扭曲叶片,能够提升叶片局 部角度与介质流动角度的契合度。在导叶叶片的进 口处,从叶轮出口流出的液体介质具有较大的圆周 环量,因此叶片进口安放角的确定需要同时考虑来 流介质的圆周速度与轴向速度。而在导叶出口处, 液体介质的圆周速度得到极大的消除,相较于进口 处,其出流介质的部分动能转化为势能,降低了次级 叶轮进口处的介质来流角。在井用潜水泵设计过程 中,根据叶轮的几何参数,即可获得导叶进口处的轴 向速度与圆周速度,进而根据进口液流角选择叶片 的进口安放角 α₃ = 35°。为了在最大程度消除介质 环量的同时,仍能获得下降的特性曲线,选择导叶的 出口安放角 α₄ = 80°。图 2 为导叶三维模型。



图 2 导叶三维实体模型 Fig. 2 Diffuser solid model

在保证各组模型的基本几何参数不变的情况 下,改变各组井用潜水泵模型叶轮与导叶的叶片数, 通过数值计算与试验的方法,分析叶片数组合变化 对井用潜水泵性能和内部流畅的影响。表1为16 组模型方案的叶片数匹配关系。

表1 叶轮与导叶叶片数组合方案

Tab. 1 Combination scheme of blade number between impeller and diffuser

		-			
导叶叶片数	叶轮叶片数				
	5	6	7	8	
5	方案1	方案 2	方案 3	方案 4	
6	方案5	方案6	方案7	方案8	
7	方案9	方案 10	方案 11	方案 12	
8	方案 13	方案 14	方案 15	方案 16	

2 数值模拟方法

2.1 三维建模

计算所采用的各计算子域模型均在 UG 10.0 中进行建模并最终装配。由于叶轮进口处的止口间 隙较小,故而忽略此处的介质泄漏。建立由进出口 段、叶轮、泵腔和导叶所组成的两级计算域模型。

2.2 网格划分

相比较于结构化网格,非结构化网格由一系列 的四面体网格组合而成,其组合方式不具有正交性, 这会打破数据结构的规律性,进而影响计算过程中 算法的准确性和可靠性^[24-27]。为了获得组合结构 简单、更有利于数据传输的网格,本文采用 ANSYS – ICEM 对各场域进行结构网格划分,并对靠近叶片 的部位进行了边界层加密。由于网格的质量直接影 响到数值计算的准确性和时长,文中各场域的网格 质量均大于 0.4。图 3 为叶轮和导叶单一流道结构 化网格。



Fig. 3 Structured meshes on calculation domains

选取了方案1中的井用潜水泵模型进行了网格 无关性分析,通过改变各计算子域的全局最大网格 尺寸来控制子域的网格数目,并将最终的控制尺寸 应用到其他各组模型当中,保证各组模型的网格密 度。

针对井用潜水泵模型的4组网格划分方案如表2所示。当全局最大网格尺寸小于1.5 mm时,随着网格数目的增大,其数值计算预测性能变化不大,考虑到计算的周期与准确性,选择方案 c 的全局最大尺寸(1.5 mm)作为各组模型网格划分过程中的标准。

表 2 网格无关性分析

Tab. 2 Analysis of grid independent

方案	全局最大网格尺寸/mm	网格数	效率/%
а	2.5	4. 659 4 × 10^{6}	75.21
b	2.0	5.452 8 $\times 10^{6}$	76.68
с	1.5	7. 257 5 × 10^6	78.71
d	1.0	9. 546 8 × 10^6	78.69

2.3 数值模拟方法

数值计算在 ANSYS - CFX 18.0 中完成,采用质 量出流配合开放式进口(压力进口)的边界条件设 置,参考压力设置为标准大气压。各固壁面粗糙度 依据实际加工精度设为 50 μ m;叶轮场域采用旋转 坐标系,旋转速度 2 850 r/min,其余场域设置为静止 坐标系。选用适应性较好的标准 $k - \omega$ 湍流模型, 设定收敛精度为 10⁻⁴来保证三维定常模拟的计算 精度。壁面采用无滑移边界条件、标准壁面函数,不 同的子域之间通过交界面连接。

3 数值模拟结果

3.1 泵性能预测

在额定流量工况下,井用潜水泵模型的扬程云 图基于叶轮叶片数出现了较为均匀的分层现象,如 图 4b 所示。相同导叶叶片数下,随着叶轮叶片数的 增加,井用潜水泵模型的扬程均呈现不断提高的趋 势。而在叶轮叶片数相同时,导叶叶片数变化对井 用潜水泵模型扬程的影响较弱。此时井用潜水泵模 型扬程随着导叶叶片数的变化规律与叶轮叶片数相 关,当叶轮叶片数 Z,取 5、8 时,井用潜水泵模型的 扬程随着导叶叶片数的增加而不断提高;而当 Z; = 6时,井用潜水泵模型的扬程随着导叶叶片数的增 加而先减小后增大,其扬程极小值出现在导叶叶片 数 $Z_1 = 6$ 时; 当 $Z_1 = 7$ 时, 随着导叶叶片数的增加, 井用潜水泵模型的扬程出现了先增大后减小的趋 势,其扬程的极大值出现在导叶叶片数 Z_a=7 时。 在额定流量工况下,井用潜水泵模型的轴功率与扬 程云图分布存在较大的相似性,如图 5b 所示。井用 潜水泵轴功率的云图分层现象比扬程云图更为均 匀,且当叶轮叶片数Z;取6、7时,轴功率的极小值 和极大值与相邻点之间的差距较为微小。这是由于 轴功率的组分不仅为水力功率,还包括了圆盘摩擦 损失功率等在内的其他功率组分,其中,水力功率与 泵的扬程正相关。当井用潜水泵模型的叶轮与导叶 的叶片数变化时,其他功率组分基本不变,故而降低 了水力功率变化对泵轴功率变化的影响,使得井用 潜水泵模型轴功率的云图分布更加具有层次。在数 值计算过程中,忽略了机械损失功率对轴功率的影 响,因此,此时的泵效率等于水力功率占轴功率的百 分比。由于井用潜水泵模型的扬程变化规律和轴功 率变化规律具有较为明显的相似性,故而在额定流 量点,井用潜水泵的效率取决干扬程和轴功率的变 化速度,随着叶轮与导叶的叶片数增加,当扬程提高 导致水力功率增加的速率高于轴功率的增加速率 时,井用潜水泵的效率提高,而当扬程提高导致水力 功率增加的速率低于轴功率的增加速率时,井用潜 水泵的效率则会降低。所以井用潜水泵的扬程与轴 功率变化共同决定了其效率的分布。在额定流量 点,当叶轮叶片数与导叶叶片数均为7时,井用潜水 泵的效率云图分布出现了一个高效核心区域,此时 的井用潜水泵水力功率在轴功率中的占比最高。在 小流量工况(0.6Q_{des})下,井用潜水泵模型的扬程云 图出现了对角分布的高扬程区域和低扬程区域,如 图 4a 所示。其中,高扬程区域分布在叶轮与导叶叶 片数较多的右上半区域,而低扬程区域则分布在叶 轮与导叶叶片数较少的左下半区域。这是由于在小 流量工况下,井用潜水泵模型的过流能力大于此时 的实际过流量,而当叶轮与导叶的叶片数增加时,过 流面积减小,提高了井用潜水泵模型讨流能力与实 际过流量的匹配度。随着叶片数的增加,叶轮叶片 对液体介质的作用增强,叶轮流道内的二次流动减 弱,导叶叶片对液体介质的整流能力增加,导叶流道 内的能量损失也有所减弱。这也是在小流量工况下 模型高效区域集中在叶片数较多的右上区域的原 因,如图 6a 所示。在大流量工况(1.4 Q_{des})下,实际 过流量的增加需要更大的过流面积,过多的叶片数 可能会阻塞流道,因此井用潜水泵模型的高扬程区 域偏移向了叶片数较少的左下区域,如图 4c 所示。 与此同时,其效率云图的高效区域也集中在了叶片 数较少的区域,如图 6c 所示。因此,在生产实践过程 中,可根据井用潜水泵的工作需求进行叶片数的选择, 当井用潜水泵常处于小流量高扬程运行工况时,其叶 轮与导叶可选择7叶片,当井用潜水泵常处于大流量 低扬程运行工况时,其叶轮与导叶可选择6叶片。













3.2 内流场分析

在离心泵的设计过程中,常对叶轮与导叶流道 内液体介质的流动进行一系列的假设,用具有不同 规律的流动代替叶轮与导叶流道内复杂的流动状 态^[28-30]。但在泵实际运行过程中,其内部流场的分 布极为复杂,为了进一步探寻不同叶片数下井用潜 水泵的性能与内部流场分布之间的关系,对该井用 潜水泵模型不同叶片数时的内部流场分布进行对比 分析。由于井用潜水泵在实际运行过程中仅有首级 为进口无预旋流动,其后各级进口均为有旋流动,故 而选择各组模型的第2级为研究对象。

图 7~9 为不同流量工况下各组井用潜水泵模





Fig. 6 Cloud maps of efficiency of well submersible pump models

型的次级叶轮在流道中截面处(span 值为 0.5)的叶 栅展开压力分布云图。从图7可以看出,小流量工 况下,各组模型叶轮中截面的静压分布存在一定的 相似性,从叶轮进口至叶轮出口,液体介质的压力不 断增加,从叶轮流道的中段至叶轮流道的后半段,压 力分层现象十分明显。在叶轮流道的后半段,出现 了三角状的高压区域,相较于叶片的背面,叶片工作 面的后半段存在高压区前移的现象。这是由于在叶 轮旋转过程中,由于叶片存在厚度,使得液流更多地 进入流道靠近叶片背面的一侧,这一部分液体因为 绕过了叶片进口边,所以其质点运动距离较大,进而 导致其液流速度较大,流动速度大于靠近叶片背面 处的介质流动速度,而流速的分布不均会导致流道 两侧的静压存在明显差异。在这种静压差的作用 下,叶轮流道后半段极易出现与主流方向不一致的 二次流动。随着叶轮叶片数的增加,叶轮叶片对液 体介质的作用不断增加,故而靠近工作面后半段的 高压区前移现象有所缓解,这有利于改善叶轮流道 内介质的不规律二次流动。在叶轮叶片的前端,各 组模型均出现了数目与叶片数相同的低压区域。当 叶片数 Z_i=6 时,该低压区域的范围最大,且该区域 与周围流场的压力差也最大,当叶片数 Z_i=7 时,该 低压区域的分布范围较小,且该区域与周围流场的 压力差最小,这也是方案 6 的模型在小流量工况下 扬程与效率均低于方案 11 的原因之一。

在额定流量工况(图 8)与大流量工况(图 9) 下,叶轮流道内的压力分布与图 7 存在一定的相似 性,但是随着流量的增加,叶片进口安放角与液流角 的吻合度不断提升,在额定流量工况下,如图 8 所 示,各组井用潜水泵模型叶轮内的流场分布差异性 较小,但叶轮出口处的静压随着叶片数的增加而不 断提升。随着流量的进一步增加,在大流量工况下, 叶轮叶片的进口安放角则明显小于液体的来流角 度,故而在叶片进口工作面处形成了明显的低压区 域。其中,当叶片数 Z_i = 6 时,叶片可以在对液体介 质产生充分作用的同时还具有较小的排挤系数,故 而该组模型低压区域的范围最小,这也是该组模型 效率最高的原因之一。

图 10、11 为次级导叶背面处的静压分布,在大流量工况下,当导叶叶片数 Z_d = 5 时,靠近导叶叶片 背面的后半段出现了明显的低压区域,这表明在导 叶流道的后半段,极易在靠近叶片背面处因液体脱 流而出现低压漩涡区域,从而造成较大的水力损耗。 随着导叶叶片数的增加,当 Z_d = 6 时,靠近导叶叶片 背面处的压力分布较为均匀,不易产生漩涡区域,此 时导叶内的水力损失较小,这也是方案 6 模型效率



















Fig. 11 Static pressure distributions on suction surface of the second stage diffuser under 0. $6Q_{des}$

最高的原因之一。随着导叶叶片数的进一步增加, 叶片占据了较大的导叶流道面积,故而在导叶流道 的中段形成紊流,出现了低压漩涡区域。在小流量 工况下,随着叶片数的增加,导叶的增流能力出现了 先增大后减小的趋势,当导叶叶片数 Z_a = 7 时,导叶的整流能力最强,其流道内的压力分布最为均匀,当 Z_a = 5 时,较少的叶片数无法对来流充分作用,故而 在靠近导叶进口背面处出现了明显的低压区域。

4 泵性能试验与分析

4.1 模型泵加工与试验

为了验证数值计算结果的准确性,本文对模型 泵 250QJ140 型三级井用潜水泵进行了性能试验。 由于合作企业对于井用潜水泵在大流量工况下的性 能要求更为严格,故而选择方案 6 的模型进行样机 制造和性能试验。叶轮与导叶的制作过程均采用消 失模铸造工艺,铸件的表面精度高,尺寸形状较为精 确,图 12 为叶轮与导叶实物模型。性能试验在山西 省天海泵业的井泵试验台上完成。试验装置总体框 架如图 13 所示。试验台采用电动球阀调节系统流 量,采用精度等级为 0.5 级的 DN400 型电磁流量计 采集井用潜水泵的流量信息。









Fig. 13 Schematic of test rig

 1. 计算机 2. 数据采集仪 3. 配电柜 4. 电磁流量计 5. 电动 球阀 6. 压力传感器 7. 泵体 8. 电动机

4.2 泵性能试验结果分析

通过泵性能试验,得到了 250QJ140 型井用潜水 泵在不同流量下的扬程、功率和泵效率,如表 3 所 示。为了便于对比,本文先将数值计算中的 2 级井 用潜水泵模型换算至 3 级,进而将其与试验结果进 行了对比。图 14 为井用潜水泵模型数值预测性能 与试验性能的对比结果。

在 0.6~1.4 倍额定流量工况范围内,井用潜水

泵性能的数值计算预测值与试验结果具有一致的变 化规律,数值计算结果具有一定的准确性。在额定 流量工况点,扬程预测值比试验结果低 2.4%,轴功 率预测值比试验结果低 1.6%,效率预测值比试验 结果高 1.1%。分析两者之间存在误差的原因,在 试验过程中,各工况点下泵的运行状态都不是绝对 的稳态运行,其扬程、功率、效率均处在一个不断波 动的状态,且这种波动幅度会随着泵运行工况点偏 离额定流量点而不断加剧。因此,在试验过程中,各 点的取值仅代表该点的瞬时取值,并不是准确的时 域性平均取值,而在稳态数值计算过程中,是基于完 全稳态进行的性能预测,故而两者之间存在一定的 差异性。

表 3 泵性能试验结果 Tab. 3 Pump performance test results

流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	扬程/m	功率/kW	效率/%
0	69.65	17.70	0
31.61	67.57	19.67	29.57
56.01	66.24	21.24	47.56
76.91	63.27	21.89	60.53
97.37	60.48	22.72	70.60
125.96	56.56	23.92	81.09
132.62	54.72	24.27	81.41
136.74	53.58	24.49	81.49
144.11	52.18	24.66	83.05
158.93	49.25	24.68	86.38
171.67	44.31	24.81	83.47
177.51	41.82	24.80	81.54
191.75	35.60	24. 23	76.72
204. 28	30.10	23.74	70.55
215.37	24.57	22.85	63.05





5 结论

(1) 叶轮叶片数与导叶叶片数对井用潜水泵的 性能影响总是二维组合变化的,在不同的导叶叶片 数前提下,即使叶轮叶片数改变方式相同,其对于井 用潜水泵的性能影响的规律也是不同的。

(2)在额定流量点,可以通过增加叶轮的叶片 数来提高叶轮的单级扬程,同时,增加导叶的叶片数 可以提高 250QJ140 型井用潜水泵对液体介质的整 流能力,达到减小导叶内介质的水力损失,进而稍微 提高模型整体的单级扬程,但其效率的极大值出现 在叶轮与导叶的叶片数均为7时。按照传统的设计 与工程经验,当叶轮与导叶的叶片数相同时,泵内不 稳定流动会比较剧烈,但是在多级井用潜水泵中,可 以通过调整各级叶轮或导叶的圆周安装位置来削弱 这种不稳定流动的影响^[31-32]。

(3)可针对实际使用情况的不同,选择不同的 叶片数组合方案:当井用潜水泵常处于小流量、高扬 程运行工况时,其叶轮与导叶可选择7叶片;当井用 潜水泵常处于大流量、低扬程运行工况时,其叶轮与 导叶可选择6叶片。

参考 文献

- 施卫东,袁寿其,李世英,等. 泵行业存在的主要问题及急需解决的关键技术[J]. 排灌机械, 2001, 19(6):7-9.
 SHI Weidong, YUAN Shouqi, LI Shiying, et al. Main existing problem and key technology to be solved of pump industry in China
 [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(6):7-9. (in Chinese)
- 2 施卫东,王洪亮,余学军,等. 深井泵的研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械, 2009, 27(1):64-68. SHI Weidong, WANG Hongliang, YU Xuejun, et al. Development and prospect of deep well pump in China[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(1): 64-68. (in Chinese)
- 3 陆伟刚,裴冰. 新型井用潜水泵技术介绍[J]. 江苏农机化, 2011(4):26-27. LU Weigang, PEI Bing. Technical introduction of new well submersible pump[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2011(4): 26-27. (in Chinese)
- 4 施卫东,杨阳,周岭,等.潜水泵缩比模型的相似性验证与内部流场分析[J].农业工程学报,2017,33(3):50-57. SHI Weidong,YANG Yang,ZHOU Ling, et al. Verification of comparability and analysis of inner flow fields on scaling models of submersible well pump[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(3):50-57. (in Chinese)
- 5 周岭,杨阳,施卫东,等.导叶出口边位置对深井离心泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016,34(12):1028-1034. ZHOU Ling, YANG Yang, SHI Weidong, et al. Influence of outlet edge position of diffuser vane on performance of deep-well centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(12): 1028-1034. (in Chinese)
- 6 ZHOU Ling, SHI Weidong, LI Wei, et al. Numerical and experimental study of axial force and hydraulic performance in a deepwell centrifugal pump with different impeller rear shroud radius[J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(10):749-760.
- 7 陆伟刚,李启锋,施卫东,等.减小叶轮后盖板直径的轴向力试验[J].排灌机械,2008,26(1):1-5. LU Weigang, LI Qifeng, SHI Weidong, et al. Experiment for axial thrust of shortened impeller back shroud[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(1):1-5. (in Chinese)
- 8 ZHOU Ling, SHI Weidong, BAI Ling, et al. Numerical calculation and experimental study of axial force in a deep-well centrifugal pump[J]. Latin American Applied Research, 2014, 44(1):105-110.
- 9 刘在伦,许立中,贾晓,等.离心泵浮动叶轮轴向间隙的液体流动分析及轴向力计算[J].农业工程学报,2013,29(12):79-85. LIU Zailun, XU Lizhong, JIA Xiao, et al. Analysis of liquid flow and axial force calculation in axial clearance for floating impeller of centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(12):79-85. (in Chinese)
- 10 李伟,施卫东,蒋小平,等.多级离心泵轴向力的数值计算与试验研究[J].农业工程学报,2012,28(23):52-59. LI Wei, SHI Weidong, JIANG Xiaoping, et al. Numerical calculation and experimental study of axial force on multistage centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(23):52-59. (in Chinese)
- 11 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:宇航出版社,1998.
- 12 LIU H, WANG Y, YUAN S, et al. Effects of blade number on characteristics of centrifugal pumps [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(6):742-747.
- 13 张德胜,施卫东,王川,等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 167-170. ZHANG Desheng, SHI Weidong, WANG Chuan, et al. Influence of impeller and guide vane blade number on pressure fluctuation in mixed flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 167-170. (in Chinese)
- 14 邴浩,谭磊,曹树良.叶片数及叶片厚度对混流泵性能的影响[J].水力发电学报,2013,32(6):250-255.
 BING Hao, TAN Lei, CAO Shuliang. Effects of blade number and thickness on performance of mixed-flow pumps[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6):250-255. (in Chinese)
- 15 季磊磊,李伟,施卫东,等.叶片数对混流泵内部非定常压力脉动特性的影响[J].排灌机械工程学报,2017,35(8):666-673. JI Leilei, LI Wei, SHI Weidong, et al. Influence of different blade numbers on unsteady pressure pulsations of internal flow field in mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(8): 666-673. (in Chinese)
- 16 杨从新,齐亚楠,黎义斌,等.核主泵叶轮与导叶叶片数匹配规律的数值优化[J].机械工程学报,2015,51(15):53-60. YANG Congxin, QI Ya'nan, LI Yibin, et al. Numerical optimization on blade number matching law of impeller and guide vane in reactor coolant pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(15): 53-60. (in Chinese)
- 17 袁寿其,吴登昊,任芸,等.不同叶片数下管道泵内部流动及振动特性的数值与试验研究[J].机械工程学报,2013,

49(20): 115 - 122.

YUAN Shouqi, WU Denghao, REN Yun, et al. Numerical and experimental study on flow and vibration characteristics of in-line circulator pumps with different blades numbers [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (20): 115 - 122. (in Chinese)

18 施卫东,吴苏青,张德胜,等.叶片数对高比转数轴流泵空化特性的影响[J/OL].农业机械学报,2013,44(11):72-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131113&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.013.

SHI Weidong, WU Suqing, ZHANG Desheng, et al. Effects of number of blades on cavitation of high specific speed axial flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):72-77. (in Chinese)

19 周岭, 白玲, 杨阳, 等. 导叶叶片数对井用潜水泵性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10):78-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161011&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298.2016.10.011.

ZHOU Ling, BAI Ling, YANG Yang, et al. Influence of diffuser vane number on submersible well pump performance [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):78 - 84. (in Chinese)

- 20 施卫东,张启华,陆伟刚.新型井泵水力设计及内部流动的数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(6):528-531. SHI Weidong, ZHANG Qihua, LU Weigang. Hydraulic design of new-type deep well pump and its flow calculation[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(6):528-531. (in Chinese)
- 21 陆伟刚,张启华,施卫东. 深井离心泵叶轮极大直径设计法[J]. 排灌机械, 2006, 24(5):1-7. LU Weigang, ZHANG Qihua, SHI Weidong. Impeller diameter maxmium approach for deep well pumps[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(5):1-7. (in Chinese)
- 22 LU W, ZHOU L, ZHANG D, et al. Unsteady flow numerical analysis of new-type deep well pump under multi-conditions [C] // ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting collocated with 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. American Society of Mechanical Engineers, 2010:647-652.
- 23 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3):69-73.
 ZHOU Ling, SHI Weidong, LU Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump[J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):69-73. (in Chinese)
- 24 WANG Chuan, SHI Weidong, WANG Xikun, et al. Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics [J]. Applied Energy, 2017, 187:10 26.
- 25 LEE I J, BASNET B, CHUN H J, et al. Development of a sensorless deep well pump multi-function controller using current detection method[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2017, 66(7):1149-1154.
- 26 ZHOU Ling, SHI Weidong, GAO Weidong, et al. CFD investigation and PIV validation of flow field in a compact return diffuser under strong part-load conditions[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(3):405-414.
- 27 MORTAZAVI F, RIASI A, NOURBAKHSH S A. Numerical investigation of back vane design and its impact on pump performance [J]. Journal of Fluids Engineering, 2017,139(12): 121104 121104 9.
- 28 施卫东,程成,张德胜,等.后掠式双叶片污水泵优化设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(18):85-92. SHI Weidong, CHENG Cheng, ZHANG Desheng, et al. Optimal design and experiment of back swept double blades sewage pump[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(18):85-92. (in Chinese)
- 29 张永学,陈龙,周鑫,等. 高效率离心泵水力设计及 BVF 诊断[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 479-483. ZHANG Yongxue, CHEN Long, ZHOU Xin, et al. Hydraulic design and BVF diagnosis of high efficiency centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6): 479-483. (in Chinese)
- 30 司乔瑞,林刚,袁寿其,等. 高效低噪无过载离心泵多目标水力优化设计[J]. 农业工程学报,2016,32(4):69-77. SI Qiaorui, LIN Gang, YUAN Shouqi, et al. Multi-objective optimization on hydraulic design of non-overload centrifugal pumps with high efficiency and low noise[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(4):69-77. (in Chinese)
- 31 谈明高,戴菡葳,刘厚林,等. 多级离心泵叶轮时序对振动性能影响的数值研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(24):117-122. TAN Minggao, DAI Hanwei, LIU Houlin, et al. Numerical research on the effect of impeller clocking position on vibration of multistage centrifugal pumps[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(24): 117-122. (in Chinese)
- 32 刘梅清,李秋玮,白耀华,等.采用交错布置叶轮的双吸离心泵压力脉动分析[J].工程热物理学报,2010,31(增刊):61-64. LIU Meiqing, LI Qiuwei, BAI Yaohua, et al. Pressure pulsation analysis of a double suction centrifugal pump with staggered arrangement impeller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010,31(Supp.):61-64. (in Chinese)