排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 5 月 May 2014 | 第 32 卷 第 5 期 Vol. 32 No. 5

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.0202


张启华

150QJS20 型精铸不锈钢深井泵的开发

张启华[1]，徐媛晖[1]，徐燕[1]，马栋棋[2]，郑炜[2]，连松锦[2]，陆伟刚[1]
（1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013；2. 福建省机械科学研究院，福建 福州 350005）

摘要：精铸不锈钢井泵成本高，市场定位为中高端用户，在对耐腐蚀、耐磨及使用寿命较高要求的特定场合有着广泛的应用. 为研制高端深井泵产品，在精铸不锈钢工艺的基础上，开发出150QJS20 型多级深井泵. 在研制过程中主要采用了 4 个方面的技术：首先，精铸不锈钢井泵导叶壳体的翻边采用向外翻边的方式，消除了向内翻边时存在的精铸过程清砂困难；其次，泵的导叶采用了圆周弯扭式的径向导叶，比传统的铸造工艺中采用的空间更节约材料，也缩短了轴向长度，提高了运行可靠性；第三，泵体结构采用拉杆连接，级与级之间采用止口连接，由密封圈进行密封，整体外观更加紧凑，运输和检修更为简便；第四，主要配件通用，保证了系列产品零件的互换性，减轻生产加工成本. 通过进行样机试制和试验表明 150QJS20 泵效率接近国标，但单级扬程显著增加，相比传统的空间导叶式多级井泵，其结构更紧凑轻巧. 通过 150QJS20 多级深井泵的研制，对发展中高端井泵产品提供了一定的参考.

关键词：多级深井泵；不锈钢；结构设计；水力设计；试验
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2014)05-0382-06
张启华，徐媛晖，徐燕，等. 150QJS20 型精铸不锈钢深井泵的开发[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(5)：382-387.

Development of 150QJS20 stainless steel casting multistage deep-well pump

Zhang Qihua[1], *Xu Yuanhui*[1], *Xu Yan*[1], *Ma Dongqi*[2], *Zheng Wei*[2], *Lian Songjin*[2], *Lu Weigang*[1]
(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Fujian Academy of Mechanical Sciences, Fuzhou, Fujian 350005, China)

Abstract: Stainless steel casting multistage deep-well pumps have been extensively used in some specific applications where excellent corrosion- and wear-resistance as well as long life-span are highly desirable. Because of stainless steel investment casting multistage deep-well pumps with high cost, they are targeted to mid- or high-end users. By utilizing existing stainless steel casting techniques, a type 150QJS20 multistage deep-well pump was developed. Four kinds of techniques used in the development process are as follows: (1) the guide vane was cast by using outward rather than inward flanging technique to overcome the difficulty in cleaning sand from castings; (2) the inflow diffuser was adopted in this design to reduce manufacturing cost and shorten the axial length of di-ffuser, and eventually to improve the pump operation reliability; (3) tie-bolts are used to assemble the pump, and connection between stages is realized by spigots filled with O-shape seals, causing a more compact pump construction, convenient transportation and easy maintenance; (4) major accessories are interchangeable in the same series to reduce manufacturing cost. A prototype pump was built and its performance was

收稿日期：2013-09-30；**网络出版时间**：2014-05-22
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0202.html
基金项目："十二五"国家科技支撑计划项目(2011BAF14B01)；国家自然科学基金资助项目(51309118)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20130527).
作者简介：张启华(1978—)，男，江苏南通人，助理研究员，博士(qihua05@163.com)，主要从事节能节材深井泵开发研究.
徐媛晖(1990—)，女，江苏南通人，硕士研究生(xuyuanhui1118@163.com)，主要从事深井泵研究.

measured, showing its efficiency being comparable with the international standard level and a greatly improved stage head. Compared with the traditional multistage deep-well pumps, the new type pump has a more compact configuration and lighter weight. Therefore the success in development of 150QJS20 pump can provide useful experience for development of other similar stainless steel casting pumps for mid- and high-end users.

Key words: multistage deep-well pump; stainless steel; structural design; hydraulic design; test

目前,在国内水泵中高端市场缺乏有竞争力的产品,但这也为陷于低端竞争旋涡的井泵企业向高端市场突破提供了契机. 文中以新型精铸不锈钢井泵的设计和试制为突破口,围绕150QJS20型精铸不锈钢井泵的结构设计、铸造工艺,以及水力模型的设计等进行研究. 文献[1]介绍了深井泵的发展历史、现状与未来趋势,认为丹麦格兰富公司的不锈钢井泵性能优异,代表了新型井泵的一些发展方向,但仍需在模型设计、结构工艺及轴向力平衡等方面进行深入研究. 文献[2]提出了一种SJB型深井泵,其导流壳采用反导叶式,整体装配采用拉杆连接方式,单级扬程比QJ系列提高约50%. 该泵采用精铸不锈钢作为材质,在结构的紧凑性、节约制造成本及性能方面较传统的空间导叶结构有着明显的优势. 文献[3]为新型SJB泵的系列化参数设计作了初步的规划,但要完成对已有的深井泵系列完整的摸底,以及在此基础上开展并完成系列化革新设计仍然需要相当长的时期. 文献[4]对自主设计开发的新型100SJB8型不锈钢井泵叶轮内部流动进行模拟分析,认为CFD数值模拟在深井泵的研究开发中提供了重要的预测手段. 文献[5]介绍了100SJB8型泵的水力设计方法,并采用Fluent软件对一个完整级进行了数值模拟和性能预测,表明CFD模拟能够为设计提供有效的指导. 文献[6]采用Fluent软件对4SP8型冲压不锈钢井泵进行了优化研究. 文献[7]采用Fluent软件对100XQJ8-43/9型冲压不锈钢井泵的叶片厚度影响进行了研究,指出实际设计仍需根据具体情况选择适当的叶片厚度. 文献[8]采用Fluent软件对QS-40-30-5.5型多级深井泵级间隙影响进行研究,结果显示间隙的增加对性能有所影响,但并不显著. 另外,通过CFD模拟结合正交试验找到优选方案也成为一个研究热点. 文献[9]采用Fluent软件对150QJ20型泵的18组叶轮设计方案进行了正交试验与数值模拟研究,优选的叶轮设计方案通过了试验验证. 文献[10]采用Fluent软件对100QJS10泵的9个叶轮方案进行了正交试验与数值模拟研究后,表明叶轮出口角是影响性能的主要参数. 在原有基础上,文献[11]采用Fluent软件对150QJS20叶轮进口边位置开展了数值模拟和研究. 文献[12]通过试验及CFD模拟分析得出影响泵性能的主次因素. 文献[13]介绍了4种常见导叶的设计方法和软件系统,该软件系统已成功用于深井泵导叶开发中. 文献[14-15]介绍了一种进口弯扭式的导叶设计方法,并通过样机试制和试验验证了设计方法的合理性.

在导叶设计方法上所取得的前期基础为本研究的新型不锈钢井泵研制提供了必要的技术基础,在新型铸造工艺不断进步以及市场需求的驱动下,重新开启新型紧凑式多级精铸不锈钢井泵的研究开发已经具备条件. 过去,多级深井泵基本上采用铸铁工艺,长期使用后部件容易生锈,导致失效. 近年来采用塑料工艺的井泵呈现较快的增速势头,但塑料的耐磨性和结构强度与不锈钢相比仍然相差较大,其使用寿命基本上按磨损率计算. 因此,对于在耐磨、耐蚀和寿命要求较高的使用场合,采用不锈钢材质是一个合理的选择. 国外格兰富公司的精铸不锈钢潜水泵及冲压多级深井泵是该公司技术含量较高的核心产品,但国内在冲压不锈钢泵工艺上仅仅能够达到生产的水平. 在东南沿海等地区,随着汽车工业及模具开发市场的快速发展,精铸模的应用越来越多,技术越来越成熟,因此,本研究采用精铸工艺,研究和开发150QJS20型精铸不锈钢深井泵.

1　泵结构设计

1.1　总体结构设计

深井泵的开发一方面要考虑泵的性能,另一方面要兼顾制造成本以及合理的加工工艺. 从简化制造工艺和装配流程角度,需对总体结构进行综合考虑. 首先,为满足同一系列深井泵零件的通用性要求,在设计中对进水节、出水阀体及阀板、橡胶轴承、密封环以及轴套和联轴器等部件采用通用的设计,为系列化产品开发节约了成本,从而提高了系

列产品零件的互换性. 其次,按照精铸不锈钢的精铸工艺,需对泵的零部件结构提出特殊的设计. 图1为一台三级泵的结构简图.

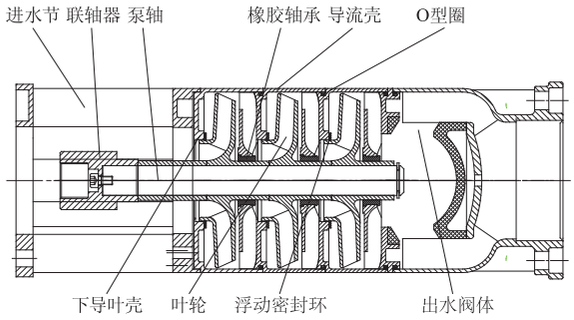


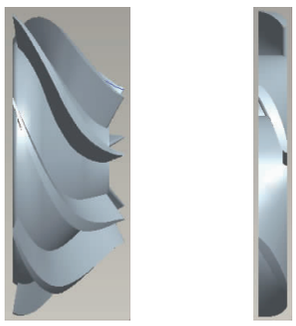
图1 150QJS20型泵总装结构

Fig. 1 Assembly structure of 150QJS20 pump

1.2 导叶壳体设计

由于零部件采用精铸不锈钢浇铸工艺,浇铸的零件有足够的壁厚,因此,在一般结构中采用的外套筒不宜采用. 每一级通过外壁止口连接更为有利,因此本研究考虑采用拉杆结构的总体连接方式,这样不仅外观简洁,安装拆卸也方便.

由于传统的铸造工艺通常采用空间导叶作为衔接和能量回收部件,通常情况下从性能的角度空间导叶是比较适合的结构. 本研究初期也考虑采用空间导叶结构,但通过综合分析后提出了新的导叶设计方案,即径向导叶(见图2),主要考虑有3个方面:① 采用空间导叶轴向长度必然偏大,铸造井泵重量较大,且增加了材料成本;② 对于中低比转数,采用空间导叶与采用径向导叶性能接近;③ 如果不锈钢精铸工艺控制得当,在中低比转数条件下,径向导叶也能取得比较好的性能.



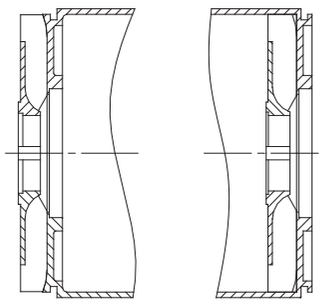
(a) 空间导叶 (b) 径向导叶

图2 空间导叶与径向导叶

Fig. 2 Axial flow and inflow radial guide vane

综上所述,在本研究前期提出的一种进口边沿圆周方向弯扭导叶设计方法的基础上,考虑到150QJS20型泵比转数小于120的条件下,采用圆周弯扭式导叶也是可行的.

由于采用止口连接的方式,导叶铸件清砂会有一定的困难. 翻边形式一般有两种,如图3所示. 通过与模具技术人员分析,图3b所示的结构由于把导叶片放在翻边里面,有可能存在清砂的困难. 因此,本研究采用图3a所示的结构,导叶片部分在翻边的外面,这样清砂相对容易些.



(a) 向外翻边 (b) 向里翻边

图3 深井泵结构

Fig. 3 Structure of deep-well pump

1.3 进口圆周弯扭式导叶设计

目前,对于中低比转数的多级深井泵导叶配置主要有3种方式:① 正反导叶;② 径向导叶;③ 空间导叶. 方式① 由于采用了正导叶,叶轮外径的富裕度有限,方式② 则是去掉了正导叶,但性能也会明显下降,方式③ 是传统的导叶配置,性能较好,但轴向长度太大,从节约材料和使用便利的角度考虑,存在一些缺点. 由此可见,发展和改进径向式导叶更有前景. 而且,本课题组在之前的研究中已提出和研究了一种圆周弯扭式的导叶,从设计原理和模型验证方面均已阐明了采用圆周扭曲式的紧凑型径向式导叶无论在节能节材和性能方面都值得推广和应用. 因此,本研究采用圆周弯扭式导叶.

2 150QJS20型泵水力模型设计

2.1 叶轮设计

本研究通过电子表格编程,将离心泵叶轮的一般设计流程统一由电子表格进行计算. 150QJS20型泵的设计流量为 $Q=20\ \mathrm{m^3/h}$,单级扬程 $H=12.5\ \mathrm{m}$,转速 $n=2\ 850\ \mathrm{r/min}$. 图4为叶轮的轴面投影图. 为便于阐述,略去具体的计算过程,主要的叶片几何参数分别为叶轮叶片数 $Z=7$,叶轮进口直径 $D_1=52.0\ \mathrm{mm}$,叶轮轮毂直径 $D_h=28.0\ \mathrm{mm}$,叶轮前盖板外径 $D_{21}=123.0\ \mathrm{mm}$,叶轮后盖板外径 $D_{20}=114.0\ \mathrm{mm}$,叶轮出口宽度 $b_2=10.0\ \mathrm{mm}$,叶轮叶片进

口角 $\beta_1 = 29.8°$,叶轮叶片出口角 $\beta_2 = 20.0°$,叶轮叶片包角 $\varphi = 85.0°$.

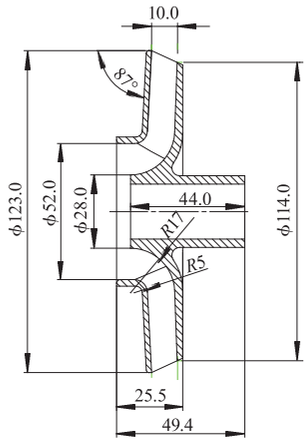


图 4　叶轮轴面尺寸

Fig. 4　Dimensions of impeller

2.2　导叶设计

导叶的设计过程采用绘图法,导叶进口外径为泵体内壁直径,一般已给,这样就可以先确定叶片进口角,可采用式(1)计算:

$$\alpha_3 = \arctan \frac{v_{m3}}{v_{u3}}, \tag{1}$$

式中:v_{m3}和 v_{u3}分别为出口轴面和圆周分速度.

导叶出口直径要与叶轮进口一直吻合,轮毂直径在叶轮轮毂直径的基础上略为放大. 由于泵的比转数不高,导叶出口角一般取 55° ~ 75°,这主要是考虑到叶片角与包角的关联性,以流道的长度和过流面积的变化取合理过渡为宜.

绘图方法采用扭曲三角形绘制叶片曲线,叶片的平面展图上的水平线长度按式(2)计算:

$$L = \frac{\pi D_3}{360}\varphi, \tag{2}$$

式中:φ 为包角;D_3 为导叶进口直径. 进口直径可取 1.1 ~ 1.5 倍叶轮外径.

由于未完全消除旋转速度,对于下一级叶轮的设计需要注意冲角的变化以适应有旋进口条件. 所设计的导叶如图 5 所示. 叶片角、包角等主要的设计参数均可在软件系统中进行调节,直至设计出满意的叶片曲线. 导叶主要几何参数分别为导叶叶片数 $Z = 6$,导叶进口外径 $D_{31} = 125.0$ mm,导叶进口内径 $D_{30} = 105.4$ mm,导叶出口直径 $D_{41} = 52.0$ mm,导叶轮毂直径 $D_{40} = 37.0$ mm,导叶宽度 $b_2 = 10.0$ mm,导叶叶片进口角 $\beta_3 = 23.0°$,导叶叶片出口角 $\beta_4 = 65.0°$,导叶叶片包角 $\varphi = 100.0°$.

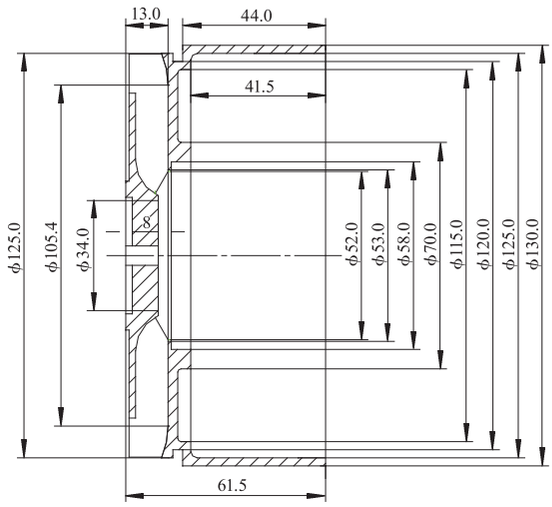


图 5　导叶轴面尺寸图

Fig. 5　Dimensions of inflow radial guide vane

2.3　CFD 模型性能预测

对于多级泵,采用级串结构,除了第一级叶轮外,其他每级叶轮进口都受到前一级导叶出口流动的影响,因此,模拟时建立两级模型,第二级反映一般多级泵中间级的特性. 将建模阶段生成的实体模型构建水体,然后导入 ANSYS Workbench 软件,划分网格后所得两级计算模型如图 6 所示.

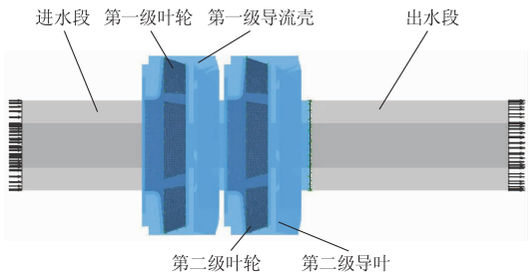


图 6　两级计算模型

Fig. 6　Computational model of two stage pump

由计算模型可知,动静部件之间共产生 5 对交界面,对稳态计算分别设置 MRF 和 Frozen rotor 模型,对湍流模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,其控制方程为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \frac{\mu_{\text{eff}}}{\rho}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \frac{\mu_{\text{eff}}}{\rho}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon}^*\frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{4}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

其中,$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \dfrac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$,

$$\eta=(2S_{ij}S_{ij})^{1/2}\frac{k}{\varepsilon},S_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right),$$

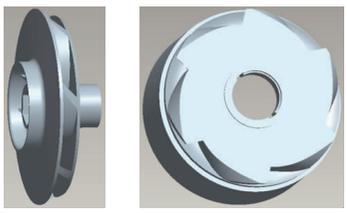
式中:k 为湍动能;ε 为湍动能的耗散率;μ 为动力黏度;μ_t 为湍动黏度;ρ 为流体密度;u 为速度;i,j 为下标,依次取1,2和3;$C_\mu=0.0845$,$\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.393$,$C_{1\varepsilon}=1.42$,$C_{2\varepsilon}=1.68$,$\eta_0=4.38$,$\beta=0.012$.

方程组的求解采用SIMPLEC算法. 主要的边界条件分别为均匀进口速度、自由出流出口,对于所有固壁面采用标准壁面函数处理.

模拟预测的泵单级扬程为13.7 m,泵效率为69.1%.

3 泵性能测试

叶轮和导叶模型设计完成后,利用三维软件Pro/E Wildfire 5.0生成三维模型,如图7所示. 精铸师根据三维模型完成开模和浇铸,这样较好地保证了模型的一致性. 若保证工艺得当,精铸模型的表面粗糙度也更好,有利于提高水力性能. 同时,本研究的150QJS20型泵单级长度比空间导叶式泵将大幅缩短,质量大幅下降.



(a) 叶轮 (b) 导叶

图7 叶轮和导叶三维模型

Fig. 7 3D model of impeller and guide vane

对泵进行测试,其性能曲线如图8所示,可以看出,在额定工况点,该泵的单级扬程接近12.0 m,效率超过62%,与模拟预测值存在10%上下的偏差. 尽管如此,本次设计的150QJS20型泵在基本满足国家标准前提下,扬程明显提高. 因此,对于中端用户而言,在需要高扬程的场合,将能够节省级数,也更有吸引力.

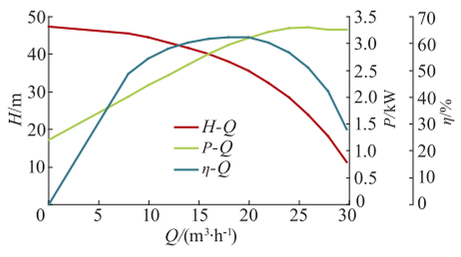


图8 150QJS20型泵试验性能曲线

Fig. 8 Experimental performance curves of 150QJS20 pump

4 结论与展望

在深井泵领域,不同的铸造工艺大体上代表着一定的用户市场. 早期的深井泵采用空间导叶或正反导叶,配合铸造工艺,其产品价廉物美,在农业灌溉、边远地区提取地下水等领域获得了广泛应用. 近年来,随着汽车、航空、模具等领域在塑料工艺上的快速发展,塑料材质深井泵也逐步在一些厂家中得到重视和发展,产品大多面向欧美、中东以及东南亚地区,成为家庭供水、园艺、喷灌等领域的重要设备. 此外,丹麦格兰富公司的冲压深井泵性能优越,一直占据着深井泵高端市场,在市政、喷泉、楼宇供水等领域深受欢迎,而国内的冲压深井泵工艺上仍然存在一定的差距. 根据市场的分析,可以看到,精铸不锈钢工艺已经具备一定的水平,将其引入深井泵开发中,将能够有效地保证产品的质量,在耐磨、耐蚀和强度等多方面具备了高端品质. 因此,以150QJS20型泵的开发作为前奏,可以预计在不远的将来,中高端市场上国产的高性能水泵也将占有一定的份额.

本研究采用精铸不锈钢工艺、向外翻边的导流壳,以及圆周弯扭式的导叶设计,泵体采用拉杆连接,主要零件进行统一化,保证了150QJS20型泵结构紧凑,美观轻巧. 这些开发技术将为精铸不锈钢深井泵的进一步系列化和推广提供经验.

同时也看到,样机性能略低于预计的性能,通过拆机检查表明,机械磨损比较明显,浮动密封也不够紧致. 塞规检查表明零件同轴度存在偏差,机械加工精度不够理想,由此造成的性能损失仍然值得后续研究和改进.

参考文献(References)

[1] 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)

[2] 陆伟刚,庞杰文,施卫东,等. 拉杆结构深井泵的设计[J]. 农业机械学报,2006,37(7):201-203.
Lu Weigang, Pang Jiewen, Shi Weidong, et al. Development of a rod-connected deep well pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(7):201-203. (in Chinese)

[3] 陆伟刚,施卫东,王准. 井泵新系列研究与探讨[J]. 中国农村水利水电,2006(3):49-51.
Lu Weigang, Shi Weidong, Wang Zhun. Study on a new series of well pump[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(3):49-51. (in Chinese)

[4] 施卫东,张启华,陆伟刚,等. 新型深井离心泵叶轮内部流动的研究[J]. 流体机械,2008,36(5):21-24.
Shi Weidong, Zhang Qihua, Lu Weigang, et al. Research on the internal flow of impeller on new-type deep well pump[J]. Fluid Machinery, 2008,36(5):21-24. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 王川,陆伟刚,施卫东,等. 不锈钢冲压潜水井泵的数值计算与试验验证[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2012, 33(2): 176-180.
Wang Chuan, Lu Weigang, Shi Weidong, et al. Numerical calculation and experimental verification of stainless steel stamping submersible well pump[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(2): 176-180. (in Chinese)

[7] 王川,施卫东,陆伟刚,等. 不同叶片厚度的不锈钢冲压井泵性能模拟与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(7):94-99.
Wang Chuan, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Effect and experiment of different blade thickness on stainless steel stamping well pump performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7):94-99. (in Chinese)

[8] 施卫东,王川,司乔瑞,等. 级间间隙对新型井泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(6):627-631.
Shi Weidong, Wang Chuan, Si Qiaorui, et al. Influence of inter-stage seal clearance on performance of new-type well pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(6):627-631. (in Chinese)

[9] 王洪亮,施卫东,陆伟刚,等. 基于正交试验的深井泵优化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(5):56-63.
Wang Hongliang, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Optimization design of deep well pump based on latin square test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 56-63. (in Chinese)

[10] 施卫东,周岭,陆伟刚,等. 高扬程深井离心泵的正交试验与优化设计[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2011, 32(4): 400-404.
Shi Weidong, Zhou Ling, Lu Weigang, et al. Orthogonal test and optimization design of high-head deep-well centrifugal pump[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition, 2011, 32(4): 400-404. (in Chinese)

[11] 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 叶轮进口边位置对深井离心泵水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(3):78-82.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Hydraulic performance effect of impeller inlet edge position on deep-well centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 78-82. (in Chinese)

[12] 施卫东,王川,陆伟刚,等. 深井离心泵的回归分析与数值模拟[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(6):11-15.
Shi Weidong, Wang Chuan, Lu Weigang, et al. Regression analysis and numerical simulation of deep-well centrifugal pumps[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(6): 11-15. (in Chinese)

[13] Zhang Qihua, Xu Yan, Shi Weidong, et al. Research and development on the hydraulic design system of the guide vanes of multistage centrifugal pumps[J]. Applied Mechanics and Materials,2012,197:24-30.

[14] 张启华,徐燕,施卫东,等. 多级离心泵圆周弯扭式导叶设计及性能试验[J]. 农业工程学报,2013,29(5):37-43.
Zhang Qihua, Xu Yan, Shi Weidong, et al. Design and performance test of circumferential crankle guide vane of multistage centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(5):37-43. (in Chinese)

[15] Zhang Qihua, Shi Weidong, Xu Yan, et al. A new proposed return guide vane for compact multistage centrifugal pumps[J]. International Journal of Rotating Machinery,2013:683713.

(责任编辑　陈建华)