排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 3 月 Mar. 2015 | 第 33 卷 第 3 期 Vol. 33 No. 3

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.1061

低比转数变工况离心泵的性能优化

卜学兵，陈晖，李永鹏，王文廷
（西安航天动力研究所，陕西 西安 710100）


卜学兵

摘要：为了提高低比转数变工况离心泵的全局效率，采用单独离心叶轮优化、单独蜗壳优化和叶轮与蜗壳整体优化3种设计方案，基于拉丁超立方抽样试验和模拟退火优化算法，利用数值模拟方法对流量比（最大流量/最小流量）为8的离心泵进行性能优化. 研究结果表明：3种优化方案都能提高变工况离心泵的全局效率，其中蜗壳优化和整体优化获得的泵效率比较接近，而叶片优化方案的效果相对较弱，故开展低比转数变工况离心泵优化时，可以优先考虑对蜗壳结构参数进行优化设计；进行变工况离心泵水力设计时，为了提高离心泵整体效率，应使选取的设计流量稍微小于最大工作流量.

关键词：离心泵；低比转数；变工况；性能优化
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2015)03-0203-06

卜学兵，陈晖，李永鹏，等. 低比转数变工况离心泵的性能优化[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(3)：203-208.

Bu Xuebing，Chen Hui，Li Yongpeng，et al. Performance optimization of low-specific speed centrifugal pump under variable operation conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)，2015，33(3)：203-208.(in Chinese)

Performance optimization of low-specific speed centrifugal pump under variable operation conditions

Bu Xuebing，*Chen Hui*，*Li Yongpeng*，*Wang Wenting*
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute，Xi'an，Shaanxi 710100，China)

Abstract：In order to improve the overall efficiency of a low-specific speed centrifugal pump at multi-operation point，the hydraulic performance of such a pump is optimized numerically across a flow rate ratio of 8 (the maximum flow rate to the minimum one) by making use of a global optimization algorithm based on Latin hypercube sampling and simulated annealing algorithm. Three optimization schemes are exploited，i.e. impeller optimization，volute optimization，and overall (impeller plus volute) optimization. It is shown that the efficiency of the optimized pumps becomes better in all the optimization schemes. The efficiency of the optimized pump in the volute optimization scheme is quit close to that in the overall optimization. However，the improvement of efficiency in the impeller optimization scheme is less than that in the other schemes. Thus，when a centrifugal pump with low-specific speed is optimized at variable operation points，the first priority is to conduct a volute optimization. Moreover，in order to improve the overall efficiency of a centrifugal pump at multi-operation point，the design flow rate should be slightly lower than the maximum operation flow rate.

Key words：centrifugal pump；low-specific speed；multi-operation condition；performance optimization

收稿日期：2013-11-06；**网络出版时间**：2015-03-25
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150325.1019.011.html
基金项目：中国航天科技集团公司科研支撑项目(2011TY09)
作者简介：卜学兵(1987—)，男，河南驻马店人，硕士(buxbing@sina.cn)，主要从事涡轮泵设计及性能优化研究.
陈晖(1970—)，男，浙江宁波人，研究员，博士(chen_51@hotmail.com)，主要从事流体机械和空化理论研究.

随着液体火箭发动机技术的发展,小流量、高扬程的推进剂供应离心泵应用场合愈加广泛,然而低比转数离心泵存在效率低等难点,如何有效提高该类泵的效率一直受到设计人员的关注[1-3]. 同时,根据发动机总体要求,低比转数离心泵必须能够在大流量比的流量范围内可靠工作. 基于上述特点,对低比转数变工况离心泵开展性能优化研究,提高其在工作范围内的水力性能,对于节约运载器推进剂消耗和增加有效载荷,具有非常重要的意义.

离心泵过流部件中,离心叶轮和蜗壳是非常重要的组成部分,两者的相互匹配对离心泵的整体性能有重要影响. 以往离心泵性能优化侧重于分析离心叶轮结构参数的影响规律,针对蜗壳以及叶轮和蜗壳间相互匹配的研究相对较少,而叶轮和蜗壳结构参数选择不当时,离心泵各项指标会出现明显下降,且同时伴随振动、噪声等非稳定现象[4-6]. 当前针对离心泵各过流部件结构参数的优化研究主要集中在如何提高泵设计工况的水力性能[7-9],而对于具有大流量比特征的低比转数变工况离心泵,如何解决离心叶轮和蜗壳间结构参数的匹配问题,提高低比转数变工况离心泵的全局效率的研究鲜见报道.

基于低比转数变工况离心泵的工作特点,文中对一比转数 $n_s=58$、流量比(最大流量/最小流量)为8的离心泵,选取离心叶轮和蜗壳的结构参数作为设计变量,以离心泵单点设计得到的初始模型为基础,选择叶轮优化、蜗壳优化和叶轮与蜗壳整体优化3种方案,采用拉丁超立方抽样和模拟退火算法,通过数值计算对离心泵结构参数进行设计,进而提高低比转数变工况离心泵的全局效率,并对各方案得到的结果进行分析.

1 离心泵性能预测与验证

1.1 数值计算方法

低比转数变工况离心泵初始模型水力设计时,选取最大工作流量点作为设计流量,得到如图1所示的离心泵初始三维模型.

根据离心泵的结构特点,计算域网格采用适应性较好的非结构四面体网格[10-11]. 为确保离心泵数值计算结果不受网格数影响,逐步增加离心泵计算域网格数量,选取不同的网格数对计算模型进行网格无关性检查,综合考虑计算效率与数值精度,确定网格数为1 510 000.

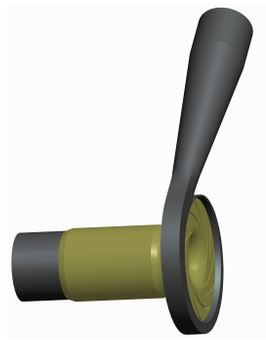


图1 初始离心泵三维模型

Fig. 1 3D model of original centrifugal pump

利用ANSYS CFX软件对离心泵初始模型进行数值模拟,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型[12]. 在旋转坐标系下,标准 $k-\varepsilon$ 模型控制方程包括湍流脉动动能方程(k 方程)和湍流耗散方程(ε 方程),分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k\bar{u}_k)}{\partial x_k}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_k}\right]+\mu_t\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k}+\frac{\partial\bar{u}_k}{\partial x_i}\right)\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k}-\rho c_D\frac{k^{\frac{3}{2}}}{l},\tag{1}$$

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial(\varepsilon\bar{u}_j)}{\partial x_j}=\frac{1}{\rho}C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left[\mu_t\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k}+\frac{\partial\bar{u}_k}{\partial x_i}\right)\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k}\right]+\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]-C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k},\tag{2}$$

式中:$C_{1\varepsilon}$,$C_{2\varepsilon}$ 为经验常数,$C_{1\varepsilon}=1.44$,$C_{2\varepsilon}=1.92$;c_D 为拖曳系数,$c_D=0.09$;σ_k 为与湍动能 k 对应的Prandtl数,$\sigma_k=1.0$;σ_ε 为与耗散率 ε 对应的Prandtl数,$\sigma_\varepsilon=1.3$;μ_t 为湍流涡团黏性系数,$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$,其中 $C_\mu=0.09$.

入口边界条件设定为总压进口,方向垂直进口段截面,出口为质量流量出口. 离心泵壁面设定为无滑移壁面条件,忽略壁面表面粗糙度的影响,在近壁区采用Scalable壁面函数. 离心泵静止域与旋转域交界面选用冻结转子模型.

1.2 外特性预测

在流量范围内选取变工况离心泵部分流量点,定常计算初始模型泵的扬程和效率,获得离心泵的扬程和效特性曲线,并对比分析数值模拟结果与水试试验数据,得到的离心泵外特性曲线如图2所示. 可以看出:数值模拟得到的离心泵外特性曲线与水试试验变化趋势基本一致,由于对离心泵模型进行了简化处理,两者之间具有一定的差别;数值计算和水试试验得到的扬程曲线在设计工况附近吻合良好,小流量工况下模拟值比试验值略高;效率曲

线中模拟值在设计工况附近与试验值比较一致，偏离设计工况时，根据经验公式修正的模拟效率值略低于试验值.

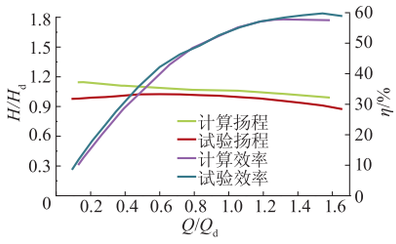


图 2　离心泵性能曲线对比

Fig. 2　Comparison of computed and tested pump performance

总体而言，选用的计算模型能够较准确地预测离心泵外特性，表明所选用的数值模拟方法是可信的.

2　变工况离心泵匹配优化

2.1　优化目标函数

进行低比转数变工况离心泵水力性能优化设计时，选取离心泵的 3 个流量点 $0.15Q_d$，$0.40Q_d$ 和 $1.25Q_d$ 作为计算工况.

由于离心泵需要工作在不同的工况点，因此通过确定各工况点的权重系数建立离心泵的多工况优化目标函数. 离心泵各工况点的工作时间不相同，并且该泵通过涡轮驱动，文中以离心泵各工况的涡轮燃气消耗量占总消耗量的比值计算相应工况的权重系数. 基于上述考虑，建立变工况离心泵目标函数为

$$\eta_w = \frac{1}{0.359\,6\left(1-\dfrac{\eta_{0.15Q_d}}{\eta_{1.25Q_d}}\right)+0.21\left(1-\dfrac{\eta_{0.40Q_d}}{\eta_{1.25Q_d}}\right)}, \tag{3}$$

式中：η_w 为优化目标；$\eta_{0.15Q_d}$，$\eta_{0.40Q_d}$ 和 $\eta_{1.25Q_d}$ 分别为选取的计算工况所对应的效率. 该函数综合考虑了变工况离心泵的全局效率，能够在整体上体现变工况离心泵的水力性能.

进行优化设计时，在满足扬程等约束条件下，优化目标 η_w 取值越大，表明该方案的变工况离心泵性能越好.

2.2　优化方案

为了分析各过流部件在变工况离心泵匹配优化设计中的影响大小，提高低比转数变工况离心泵的全局效率，缩短设计周期，采用 3 种优化方案对离心泵进行性能优化，分别为单独叶轮优化、单独蜗壳优化和叶轮与蜗壳整体优化.

由于性能优化设计的目的是提高离心泵的全局效率，主要途径是通过改变离心泵过流部件结构参数，提高泵水力效率，故根据离心泵水力损失表达式，选择影响离心泵效率的几何参数作为各优化方案的设计变量，得到各方案选取的设计变量[13].

2.2.1　离心叶轮优化

单独进行叶片优化时，选取的设计变量分别为叶轮出口直径 D_2、长叶片进口角 β_1、长叶片出口角 β_2、短叶片进口直径 D_i、短叶片进口角 α_1、短叶片出口角 α_2 和叶轮出口宽度 b_2.

2.2.2　蜗壳优化

单独进行蜗壳优化时，选取的设计变量分别为蜗壳基圆直径 D_3、喉部宽度 h_{tw}、喉部高度 h_{th}、扩散角 γ 和扩散段长度 L.

2.2.3　叶轮与蜗壳整体优化

整体优化时，选取的设计变量为离心叶轮优化和蜗壳优化所选择的全部结构参数. 根据文献[14]的研究结论，首先进行叶轮优化，然后以优化后得到的离心叶轮为基础，对蜗壳进行优化设计，完成离心泵的整体优化匹配. 文中以单独叶轮优化方案得到的离心叶轮作为优化后的叶轮模型，在此基础上对蜗壳进行优化设计.

2.3　优化算法及优化平台

对各方案进行性能优化时，首先采用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling，LHS)对选取的设计变量进行试验方案设计，然后对各方案通过数值计算得到的试验结果使用 Kriging 插值建立响应面模型，最后基于响应面模型，使用模拟退火算法优化选择各方案设计变量，进而完成低比转数变工况离心泵的性能优化.

LHS 是一种分层抽样方法，简单的随机抽样需要占用大量的计算资源，而 LHS 采用每层样本点随机取值的全因子设计方法，确保抽样空间的数值都能得到体现，在设计变量数目一定时能够有效减小抽样样本点的规模[15].

Kriging 方法是对空间数据进行加权插值的权值设计方法，通过引进以距离为自变量的变差函数计算权值. 由于变差函数既可以反映变量的空间结构特性，又可以反映变量的随机分布特性，所以使用 Kriging 方法进行空间数据插值可以取得理想的

效果. 此外,Kriging 方法很容易实现局部加权插值,这使其在解决非线性程度较高的问题时容易取得较理想的拟合效果.

SA 优化算法的出发点是基于物理学中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性. 在某一初温下,伴随温度参数的不断下降,在解空间中,结合概率以突跳方式寻找目标函数的全局最优解.

基于 OPTIMUS 优化平台,建立的低比转数变工况离心泵优化流程如图 3 所示.

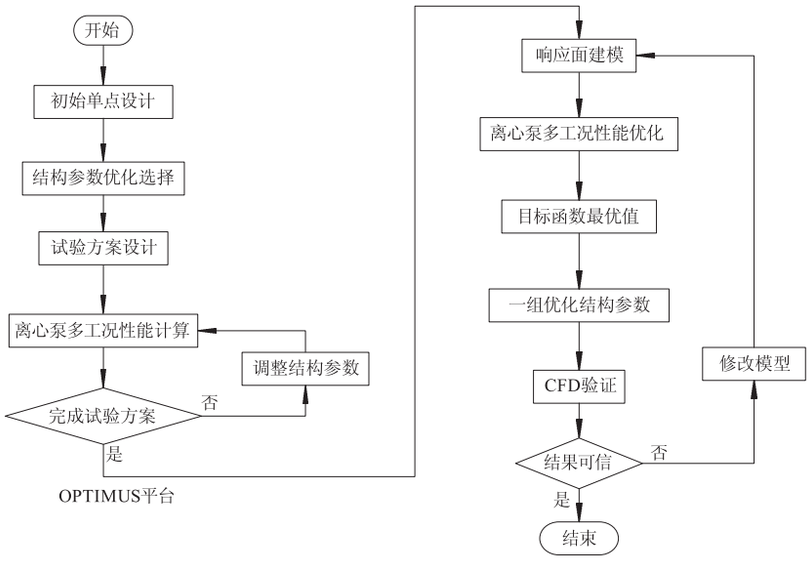


图 3 变工况离心泵优化设计流程

Fig. 3 Flow chart of optimization design of centrifugal pump under variable operation conditions

3 优化结果分析

根据上述各优化方案所选取的离心泵结构参数,基于低比转数变工况离心泵优化设计流程,以建立的目标函数作为优化目标,对变工况离心泵进行性能优化. 采用 3 种方案对离心泵多工况点性能进行优化设计后,获得的离心泵结构参数数值变化情况如表 1 所示.

表 1 离心泵各优化方案结构参数

Tab. 1 Geometrical parameters of original and optimized pumps

设计变量	初始模型	叶轮优化	蜗壳优化	整体优化
D_1/mm	53.8	52.6	—	52.6
β_1/(°)	16.6	16.4	—	16.4
β_2/(°)	42.7	36.2	—	36.2
D_i/mm	38.5	35.8	—	35.8
α_1/(°)	27.6	25.5	—	25.5
α_2/(°)	26.1	31.7	—	31.7
b_2/mm	5.6	6.1	—	6.1
D_3/mm	56.0	—	58.4	57.7
h_{tw}/mm	10.0	—	8.9	9.8
h_{th}/mm	7.0	—	6.6	6.3
γ/(°)	9.6	—	8.4	7.9
L/mm	100	—	113	107

3 种方案优化后得到相应的离心泵模型,选取的各计算工况效率变化如表 2 所示.

表 2 各优化方案计算工况效率值

Tab. 2 Efficiency of pumps optimized with various optimization schemes %

计算工况	初始模型	叶轮优化	蜗壳优化	整体优化
$0.15Q_d$	12.38	13.64	14.81	15.20
$0.40Q_d$	27.76	29.08	32.46	32.88
$1.25Q_d$	57.71	59.35	58.65	58.76

采用上述计算方法对各优化方案所得离心泵进行数值模拟,得到图 4 所示的泵外特性曲线.

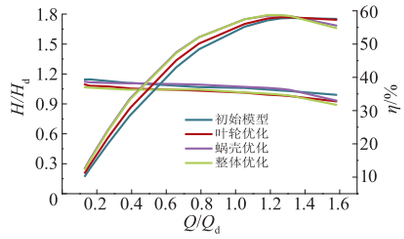


图 4 离心泵外特性曲线

Fig. 4 Performance curves of original and optimized centrifugal pumps

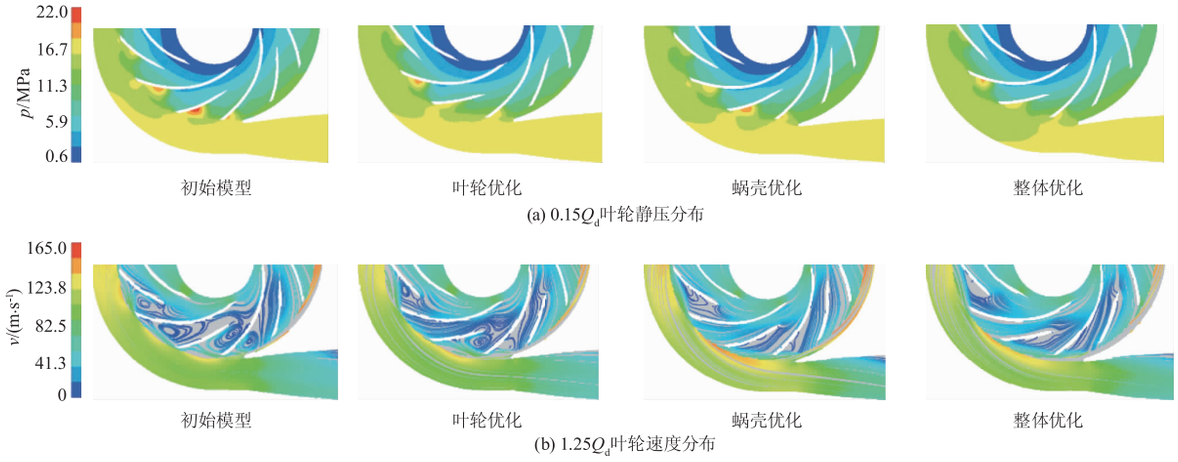
由图 4 可以看出:在扬程特性曲线上,各方案总体变化趋势一致,离心泵出口压力符合发动机总体的要求;叶轮优化方案和整体优化方案的扬程值基本相同,但两者都比初始模型的扬程有所降低;蜗壳优化后离心泵的扬程并没有发生明显变化,在工作范围内与离心泵初始模型的扬程基本相同;在效

率特性曲线上，在泵工作流量范围内，各优化方案得到的离心泵全局效率都有不同程度的提高，其中小流量工况效率提高幅值与大流量工况相比较明显；根据文献[4]中离心泵流量最佳匹配点计算公式，优化后离心泵的最佳匹配点与初始设计流量值相比，全部向小流量工况偏移；随着流量的增大，优化后的离心泵效率在大流量工况略有下降，该现象与文献[15]所阐述的采用延迟失速设计来提高离心泵非设计工况效率所获得的外特性曲线基本相吻合.

3 种优化方案中，叶轮优化方案对于提高离心泵全局效率的效果相对而言较不明显，蜗壳优化和整体优化得到的泵效率曲线非常接近. 由于离心泵的最佳性能的工况点决定于离心叶轮和蜗壳的相互匹配，而且在低比转数离心泵中，蜗壳结构参数的轻微改变就会引起泵最佳匹配点的明显改变.

对于低比转数变工况离心泵，增大蜗壳基圆直径会使泵的最佳匹配点向小流量工况偏移，提高离心泵小流量工况的效率. 根据面积比理论，叶轮出口过流面积与蜗壳喉部面积之比是离心泵扬程、流量和轴功率等特性的主要决定因素. 减小蜗壳喉部面积，在流量减小时，水力损失较小，使离心泵的效率最高点偏向小流量工况.

为了观测优化前后离心叶轮与蜗壳在多工况点的匹配特性，在变工况离心泵的各计算工况，选取离心叶轮和蜗壳中间截面静压云图和速度流线图，比较离心泵初始模型和优化后得到的泵内流场，如图 5 所示.



(a) 0.15Q_d叶轮静压分布

(b) 1.25Q_d叶轮速度分布

图 5　离心泵不同流量工况下各优化方案内流场分布

Fig. 5　Pressure and velocity contours in mid-span plane of original and optimized pumps at two flow rates

由图 5 可以看出：3 种优化方案与初始方案相比，离心叶轮的内流场分布都得到了不同程度的改善，叶轮优化方案得到的离心泵内流场分布更加均匀，整体优化与蜗壳优化方案所得结果相差不大，获得的离心泵内流场分布相对其他方案而言较好；在 0.15Q_d 工况时，3 种优化方案得到的叶轮静压分布与初始离心叶轮相比，喉部附近叶片压力面的高压区范围都有所减小，静压分布更加均匀；在 1.25Q_d 工况时，由于叶轮出口液流角与蜗壳隔舌匹配性能提高，隔舌干涉对蜗壳喉部附近区域内相对速度分布的作用减小，喉部附近叶轮流道内的回流区域减小，使得该区域的速度场分布更加均匀.

3 种优化方案中，优化后的离心叶轮速度场分布比初始叶轮速度场变得更加均匀，蜗壳优化和整体优化得到的内流场基本一致. 从离心泵内流场分析可知，蜗壳优化对于离心泵的性能提高具有非常重要的作用.

4　结　论

通过 3 种优化方案，对某一低比转数变工况离心泵进行全局效率匹配优化研究，得到以下结论：

1）变工况离心泵水力设计时，选取离心泵最大工作流量或者加大流量作为设计工况并不能获得最佳的泵水力性能. 为了提高泵全局效率，应使选取的设计流量点从最大流量稍微向小流量工况偏移.

2）与原模型相比，各优化方案得到的离心泵整体性能都有不同程度的改善，其中叶轮优化得到的离心泵水力性能与其他 2 种优化方案相比，优化结果尚有待提高，蜗壳优化与整体优化的效果基本一致. 故开展低比转数变工况离心泵性能优化时，可

以优先考虑对蜗壳结构参数进行优化设计,在缩短设计周期的同时能够获得比较满意的结果.

参考文献(References)

[1] 朱祖超. 低比转速高速离心泵的理论及设计应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[2] 齐学义, 刘永明. 胡家旺,等. 提高超低比转速离心泵效率的方法[J]. 水电能源科学, 2011,29(2):118-120.
Qi Xueyi,Liu Yongming,Hu Jiawang, et al. Method of improving efficiency of low specific speed centrifugal pump[J]. Water Resources and Power, 2011,29(2): 118-120. (in Chinese)

[3] Hideshi Kagawa, Akira Okayasu, Toyohiko Ota. Improvement on the low n_s high-pressure pump[J]. AIAA Journal, 2009:49-57.

[4] Junichi Kurokawa, Takeshi Yamada, Hiroshi Hiraga. Performance of low specific speed pumps[C]//Proceedings of the 11th Australasian Fluid Mechanics Conference. Hobart,Australia:University of Tasmania, 1992.

[5] 邓文剑, 楚武利. 叶轮和蜗壳匹配关系对离心泵性能影响的研究[J]. 石油机械,2008, 36(3): 9-12.
Deng Wenjian, Chu Wuli. The effect of matching between impeller and volute to performance of centrifugal pump[J]. China Petroleum Machinery, 2008,36(3):9-12. (in Chinese)

[6] 袁寿其, 胡博, 陆伟刚, 等. 中比转数离心泵多工况设计[J]. 排灌机械工程学报, 2012,30(5):497-502.
Yuan Shouqi, Hu Bo, Lu Weigang, et al. Multi-operating-condition design of centrifugal pump with medium specific speed[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(5):497-502. (in Chinese)

[7] Joseph P V. Centrifugal and Axial Pump Design and Off-design Performance Prediction[R]. Washington D. C., USA:NASA Technical Memorandum,106745.

[8] Massinissa Djerroud, Guyh Ngoma, Walid Ghie. Numerical identification of key design parameters enhancing the centrifugal pump performance: Impeller, impeller-volute, and impeller-diffuser[C]// Proceedings of the ISRN Mechanical Engineering,2011: 794341.

[9] 袁寿其, 付强, 朱荣生. 核电站离心式上充泵多工况水力设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010,28(3):185-189.
Yuan Shouqi, Fu Qiang, Zhu Rongsheng. Multi-operating-condition hydraulic design of centrifugal pump for nuclear power plant[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(3):185-189. (in Chinese)

[10] 胡苑, 赖喜德, 符杰,等. 基于数值模拟和性能预测方法的主油泵改型优化[J]. 流体机械, 2009,37(4): 38-42.
Hu Yuan, Lai Xide,Fu Jie,et al. Retrofit and optimization design of main oil pump by numerical simulation and performance estimation [J]. Fluid Machinery, 2009,37(4):38-42. (in Chinese)

[11] 张伟. 叶片泵非设计工况叶轮内部流动分析和预测[D]. 上海:上海大学上海市应用数学和力学研究所,2010.

[12] 张伟, 余运超, 陈红勋. 离心泵叶轮非设计工况下内部湍流流场的模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(1): 38-42.
Zhang Wei, Yu Yunchao, Chen Hongxun. Numerical simulation of flow in centrifugal pump impeller at off-design conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(1): 38-42. (in Chinese)

[13] 谈明高. 离心泵能量性能预测的研究[D]. 镇江:江苏大学流体机械工程技术研究中心,2008.

[14] Shusaku Kagawa, Junichi Kurokawa, Jun Matsui,et al. Performance of very low specific speed centrifugal pumps with circular casing[J]. Journal of Fluid Science and Technology, 2007, 2(1): 130-138.

[15] 李世煌. 叶片泵的非设计工况及其优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社,2006.

(责任编辑 陈建华)