

文章编号:1673-5005(2009)06-0105-06

基于正交设计方法的混输泵叶轮优化设计

张金亚, 朱宏武, 李 艳, 杨 春

(中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249)

摘要:以自主研发并取得外特性试验数据的第三代混输泵叶轮为基础,应用 $L_9(3^4)$ 正交表,以混输泵增压和效率为考查指标,对混输泵叶轮进行 4 因素 3 水平的正交设计,获得 9 组参数组合。采用雷诺平均数值模拟方法,对正交设计中每种组合进行性能预测,分析得到一组最佳的参数组合作为优化后的叶轮参数,然后设计出与优化后叶轮配套的导叶,即得到一套优化后的增压单元设计参数。分别建立优化前后混输泵增压单元的计算流场,并对二者进行数值模拟计算。结果表明:优化后增压单元内流场特性相比优化前得到明显改善,增压提高约 14.97%,效率增加约 8.07%。

关键词:正交设计方法;数值模拟;叶片式混输泵;叶轮;优化设计

中图分类号:TE 974

文献标识码:A

Optimization design of multiphase pump impeller based on orthogonal design method

ZHANG Jin-ya, ZHU Hong-wu, LI Yan, YANG Chun

(Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the impeller parameters of the third generation multiphase pump independently developed, whose external characteristic data were obtained, the $L_9(3^4)$ orthogonal table was implemented to design the impeller of multiphase pump using pressure rise and efficiency as the evaluation targets. And 9 sets of parameters were obtained. Reynolds averaged Navier-Stokes method was adopted to simulate every set of parameters obtained by orthogonal design method. The optimized set of parameters were obtained. The matched guide vane could be generated, and the parameters of compression cell could be obtained. To simulate the characteristics of the inter flow field, both models of original inter flow field and optimized one were established. The results show that the characteristics of optimized inter flow field are obviously improved, pressure rise and efficiency are increased by 14.97% and 8.07%, respectively.

Key words: orthogonal design method; numerical simulation; multiphase pump; impeller; optimization design

随着深海油田和边际油田的开发,气液混输泵由于其显著的经济效益而受到世界各大石油公司的高度重视^[1-3]。叶片式混输泵可以较为有效地防止相态分离的发生^[4]。在国内,李清平等^[4,6]提出了分段不可压的混输泵叶轮设计方法;余志毅等^[7]运用正反问题迭代法进行了叶片式混输泵叶轮的水力设计,并对泵内气液两相流动进行了数值模拟^[8,9];朱宏武等^[10-11]对三套叶片式混输泵原理机进行了对比试验,分析了不同几何参数对混输泵增压单元

性能的影响。然而,影响气液混输泵性能的水力设计参数很多,如果改变众多几何参数,并进行加工试验,以此来研究叶轮参数对混输泵性能的影响,成本高、周期长,对各种参数的排列组合进行加工试验也是不现实的。因此,笔者选用正交设计方法对影响混输泵性能的重要参数进行优化。得到最优的因素水平组合。通过优化前后的数值模拟对比分析及加工后的试验结果验证正交设计方法与数值模拟技术相结合的优化方法的可行性。

收稿日期:2009-04-23

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2007AA09Z316);石油科技中青年创新基金资助项目(07E1039)

作者简介:张金亚(1980-),男(汉族),河南汝南人,博士研究生,主要研究方向为流体机械。

1 正交设计方法及优化参数确定

1.1 正交设计方法

正交设计是多因素的优化试验设计方法,也称为正交试验设计。它是从全部试验的样本点中挑选出部分有代表性的样本点做试验,这些代表点具有正交性。其作用是只用较少的试验次数就可以找出因素水平间的最优搭配或由试验结果通过计算推断出最优搭配,是一种高效、快速、经济的试验设计方法。周先军等^[12]采用有限元分析方法结合正交试验研究了法兰的压力、口径、螺栓预紧载荷等参数对大口径法兰密封性能的影响,研究结果表明影响效果显著。

本文中采用正交设计方法,选用 4 因素 3 水平的正交表,只需要 9 种组合方式就可以获得较好的优化结果。

1.2 叶片式混输泵叶轮关键参数

叶片式混输泵增压单元由叶轮(转子)和导叶(静子,又称整流器)组成,如图 1 所示。叶轮具有特殊结构,可避免或减少气液混合介质发生相态分离,并通过叶轮的转动增加流体的能量;导叶疏导叶轮中流出的流体,并将气液混合不均的流体重新均匀混合。叶轮的几何结构决定了混输泵的增压、效率等特性,导叶为流体进入下一级转子做准备。导叶的结构由叶轮的结构决定,因此叶片式混输泵增压单元主要的优化目标是叶轮。

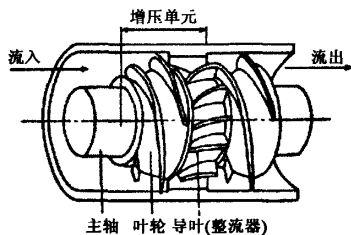


图 1 叶片式混输泵增压单元示意图

Fig.1 Diagram of multiphase pump boosting cell

影响叶轮几何结构的主要参数有:轮缘直径 D_1 、叶轮轴向长度 H 、轮缘进口安放角 β_1 、轮缘出口安放角 β_2 、轮毂半锥角 γ 、进口轮毂比 h_{ir} 、叶片数 Z 等。叶轮结构参数选取是否合理,对气液混合介质的流动性能具有决定性作用。合理的结构设计可以有效地防止气液两相分离,也是保证两相稳定输送的必要条件。混输泵叶轮参数的选择范围^[13]如下:扬程系数 ψ_1 、流量系数 φ_L 、进口轮毂比 h_{ir} 、轮毂半锥角 γ 、叶片进口安放角 β_1 、叶片角 β 分别为 0.17 ~

0.26, 0.01 ~ 0.20, 0.65 ~ 0.95, $5^\circ \sim 12^\circ$, $3^\circ \sim 12^\circ$, $6^\circ \sim 13^\circ$ 。

1.3 参数选取及其水平确定

在综合衡量影响多相泵性能的诸多因素的基础上,考虑到轮毂轴向长度、轮缘直径不易改变的实际情况,本文中研究 4 个重要因素,即:轮缘进口安放角 β_1 、轮缘出口安放角 β_2 、进口轮毂比 h_{ir} 、轮毂半锥角 γ 。

根据已经加工试验的第一至第三代混输泵数据,同时考虑所要顾及的试验范围,确定每个因素取 3 水平,如表 1 所示。通过四因素三水平正交设计方法,找出最优的设计方案。

表 1 因素及其水平取值表

Table 1 Values of factors and levels

因素	水平		
轮缘进口安放角 β_1	6	7	8
轮缘出口安放角 β_2	13	14	15
进口轮毂比 h_{ir}	0.65	0.7	0.75
轮毂半锥角 γ	5.5	6	6.5

2 叶轮的优化

2.1 数据无量纲化

为了进行相关数据的比较,避免参量单位改变引起实际权重的变化,利用归一化方法将各参数经过变换化为无量纲参数。

主要考查指标为混输泵的增压和效率,分别将其变换为

$$p'_i = \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{orig}}, \eta'_i = \frac{\eta_i}{\eta_{orig}}$$

式中, Δp_i 为第 i 组样本点的增压值, MPa; η_i 为第 i 组样本点的效率; Δp_{orig} 为优化前叶片式混输泵模拟工况下的增压, 取为 0.975 MPa; η_{orig} 为效率, 取为 33.43%。

2.2 考查指标的确定

混输泵的设计原则是保证在一定的含气率工况下满足需要的增压,并具有较宽的高效区范围。按照这个原则,正交设计的考查指标确定为混输泵的增压 Δp 和效率 η 。利用加权方法,将多目标规划方法转化为单目标规划方法来求解。赋予增压和效率不同的权重 λ_1 和 λ_2 ,且满足评价函数:

$$F_i = \lambda_1 p'_i + \lambda_2 \eta'_i$$

本文中重点考查混输泵的增压性能,因此确定各权重的取值为 $\lambda_1 = 0.7, \lambda_2 = 0.3$ 。

2.3 指标考查方法的确定

本文中采用数值模拟的方法来评价每个试验号

的考查指标。数值模拟采用 CFD 软件 FLUENT 来实现。首先,根据每个试验号对应的叶轮参数,计算出与之对应的导叶几何参数;之后建立每个试验号对应的增压单元物理模型,利用混合网格划分计算区域;最后,采用雷诺平均数值模拟方法进行计算。

2.3.1 几何模型

混输泵的单个增压单元流场作为计算流场。图 2 为混输泵单个增压单元轮毂及叶片的网格图。由图 2 可以看出,模型由入口延伸区域、叶轮、导叶和出口延伸区域组成。正交设计方法所得的所有试验号均采用与此类似的几何模型进行建模和计算。

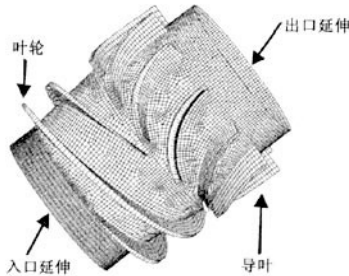


图 2 单个增压单元网格图

Fig.2 Grid of single boosting cell

2.3.2 湍流模型、边界条件及正交表确定

采用有限体积法对控制方程进行离散,将标量值压力等变量存储在以节点为中心的控制容积中,将矢量值速度按其方向存储在与主控制容积相差半个网格步长的错位的控制容积中。选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。在差分格式中,压力项采用二阶中心格式,速度项与湍动能和湍动能耗散率项均采用二阶迎风格式。

所采用的边界条件如下:

①进、出口边界条件。叶轮计算域的进口为轴向速度进口,根据不同的流量给定轴向速度值;出口采用第二类边界条件。导叶计算域的进口速度由叶轮出口的计算结果做轴向平均得到;导叶出口边界条件采用第二类边界条件。

②固壁边界条件。在固壁面采用无滑移边界条件;在临近固壁的区域采用标准壁面函数。如果边界转动,边界上的速度为给定的周向速度。

③坐标系。叶轮内流场按照旋转坐标系计算,导叶内流场按照固定坐标系计算。

按照因素水平,选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交设计。对正交表中的 9 个试验号进行研究,确定每个试验号的考查指标。

对每个试验号所对应的增压单元进行数值模

拟,得到每个试验号的考查指标数值,并完成因素水平表,如表 2 所示。

表 2 因素水平表
Table 2 Level of factors

试验号	因素				性能指标		
	β_1	β_2	h_{te}	γ	增压	效率	指标
1	1(6)	1(13)	1(0.65)	1(5.5)	0.966	32.102	0.981
2	1	2(14)	2(0.7)	2(6)	1.002	36.054	1.043
3	1	3(15)	3(0.75)	3(6.5)	1.114	35.539	1.119
4	2(7)	1	2	3	0.955	35.347	1.003
5	2	2	3	1	1.095	36.239	1.111
6	2	3	1	2	0.952	32.381	0.974
7	3(8)	1	3	2	0.973	33.402	0.998
8	3	2	1	3	0.949	31.649	0.965
9	3	3	2	1	1.088	33.213	1.079
k1	3.143	2.983	2.921	3.172			
k2	3.089	3.119	3.125	3.015			
k3	3.043	3.172	3.228	3.087			
k1'	1.048	0.994	0.974	1.057			
k2'	1.030	1.040	1.042	1.005			
k3'	1.014	1.057	1.076	1.029			
R	0.033	0.063	0.103	0.052			

2.4 正交设计结果分析

把每个因素同一水平的所有方案的试验结果相加,分别用 k_1, k_2, k_3 表示,如 β_1 因素 1 水平方案试验结果即是 β_1 因素 k_1 ,记在因素 β_1 下方。为了直观,再分别计算各自的算术平均值;各自的 k 值均为 3 个值的和,分别记为 k_1', k_2', k_3' 。 R 表示各因素的极差,即各因素 k' 最大值减去最小值。将计算结果填入表 2 中。为了直观起见,以因素的水平变化为横坐标,指标的平均值为纵坐标,画出水平与指标关系图,见图 3。

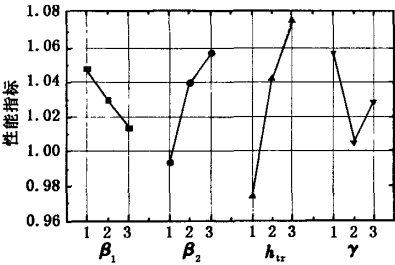


图 3 水平与指标关系图

Fig.3 Relation of level and index

从图 3 可以明显看出,轮缘进口安放角与进口轮毂比对混输泵性能指标的影响较大,并且图中显示最佳方案为 1-3-3-1 的水平组合,而 9 个正交方案中的最佳方案为 1-3-3-3 的水平组合,即试验号 3。其中并没有 1-3-3-1 的水平组合,其是否为最佳组合,需要与试验号 3 进行比较。采用正交设计中考

查指标相同的预测方法对 1-3-3-1 的水平组合进行考查,其相同工况下的性能指标为 1.129 (增压 1.121 MPa,效率 36.13%),高于试验号 3 的组合 (1.119)。这说明 1-3-3-1 的水平组合确实为最佳方案,即优化后的最佳参数为

$$\beta_1 = 6, \beta_2 = 15, h_{tr} = 0.75, \gamma = 5.5.$$

3 优化结果

采用与正交设计方法优化中相同的模拟方法及设置,分别对混输泵优化前后单个增压单元进行数值模拟,并结合优化前混输泵的试验结果进行对比评价。模拟工况为转速 $n = 4500 \text{ r/min}$,流量 $Q = 50 \sim 80 \text{ m}^3/\text{h}$,含气率 $G_{vf} = 30\%$ 。根据计算结果,对比分析了混输泵增压单元优化前后在不同流量下的增压情况,以及在流量 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ 时内流场的分布特征。

3.1 增压特性对比

图 4 为混输泵优化前后增压对比曲线图。分析曲线图,可以看出:

(1) 优化前混输泵的试验增压、效率与数值模拟增压、效率的数据吻合较好,数值模拟的增压数据相比试验数据稍大、效率稍高,这是因为试验中有损失和泄露,而数值模拟中没有考虑这些因素。

(2) 优化前试验与数值模拟的曲线吻合情况说明了数值模拟方法可行、可信。这也提高了正交设计结果的可信度,并为数值模拟的验证提供了可靠依据。

(3) 优化后混输泵增压提高了约 14.97%,最高效率提高了约 8.07%,并且最高效率区增宽,这证明优化后混输泵增压单元相比优化前在外特性方面得到了改善。

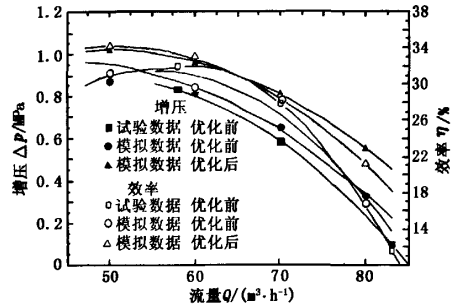


图 4 优化前后混输泵增压对比

Fig. 4 Comparison of original and optimized multiphase pump

3.2 含气率对比

图 5 为数值模拟所得优化前后叶轮叶片压力面和吸力面的含气率分布云图,图 6 为优化前后叶片及轮毂处的含气率分布云图。由图 5 可以看出:

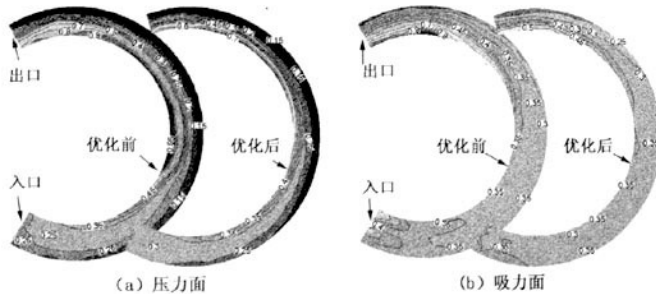


图 5 优化前后叶片压力面及吸力面的含气率分布对比

Fig. 5 Comparison of GVF distributions of impeller pressure surface and suction surface before and after optimization

(1) 优化前叶片压力面靠近轮毂处,从中部到出口含气率分布在 80% ~ 95%,几乎形成了全部由气体充斥的区域,并且区域较宽,说明这里气液分离现象严重。优化后此区域含气率分布在 60% ~ 70%,并且高含气率区域明显变窄,说明叶轮参数优化后气液分离现象得到了有效控制。

(2) 优化前叶片吸力面出口靠近轮毂处,有一个含气率为 70% ~ 90% 的高含气率区域,气液分离现象严重,优化后此区域最高含气率为 50%,这进

一步说明了叶轮参数优化后气液分离现象得到了有效控制。

通过图 6 可以进一步分析得出:优化前,混输泵叶轮轮毂处从中部到出口气液分离现象严重,而优化后这个区域只在叶片压力面靠近轮毂附近存在一个较小的高含气率区域,这也进一步说明了优化后的混输泵叶轮内特性良好。

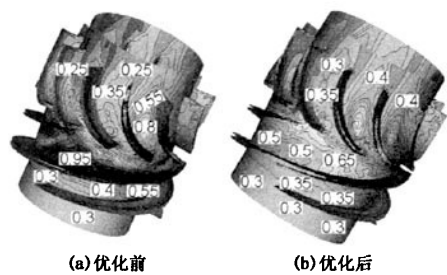


图 6 叶片及轮毂处含气率分布对比
Fig. 6 Comparison of GVF distributions of blade and hub

4 优化前后试验对比

4.1 优化后叶轮及导叶的加工

根据优化后叶轮及导叶的几何参数,绘制优化后增压单元的木模图,并进行加工,如图 7 所示。



图 7 优化后的增压单元实物图
Fig. 7 Photograph of optimized boosting cell

4.2 试验方法

试验主要测量液相管路压力、气相管路压力、混输泵入口压力、混输泵出口压力、液体流量、气体流量以及多相泵的输入扭矩和转速等数据,根据这些数据计算得到原理机外特性曲线,并以此为依据评价优化后混输泵的性能。

根据试验要求,试验台架主要包括气体和液体循环管路,试验介质为空气和水。试验台布局示意图见图 8。为了降低试验误差,保证试验数据的实时性与准确性,试验过程采用数据自动采集与阀门、

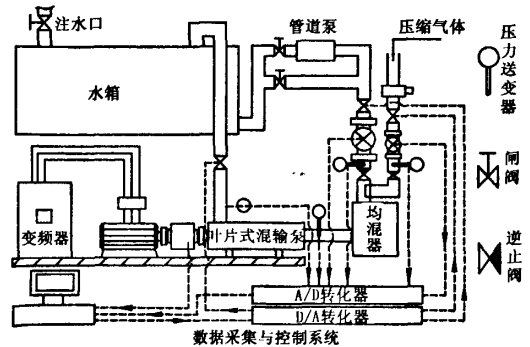


图 8 多相泵试验台架布局示意图
Fig. 8 Layout of multiphase pump experiment table

流量自动控制系统。试验台中安装了压力变送器与流量控制调节阀。数据采集与流量控制通过具有 A/D 与 D/A 转换功能的采集卡实现,并通过自动采集与控制程序完成数据采集与阀门控制。

4.3 试验结果分析

为了测试优化后混输泵的性能,依次在 3 000, 3 600, 3 900, 4 200, 4 500 r/min 不同转速下,进行了各种流量、含气率的试验。这里只给出转速 $n = 4\,200\text{ r/min}$ 情况下,优化前后混输泵性能随着流量或含气率变化的对比曲线(图 9, 10)。

由图 9, 10 可以看出,在相同流量或含气率工况下,优化后混输泵的增压和效率均有了明显提高。并且,随着流量的增加,混输泵增压的衰减相比优化前趋于缓慢。

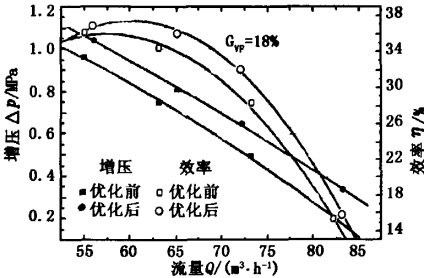


图 9 优化前后流量-增压、流量-效率曲线
Fig. 9 Comparison curves of $Q-\Delta p$ and $Q-\eta$ before and after optimization

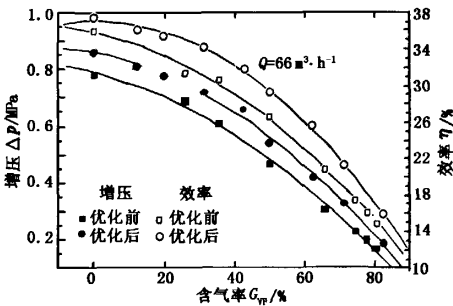


图 10 优化前后含气率-增压、含气率-效率曲线
Fig. 10 Comparison curves of $G_{VF}-\Delta p$ and $G_{VF}-\eta$ before and after optimization

5 结 论

(1) 优化后叶轮内气液分离现象得到了很好的抑制。在外特性方面,转速 $n = 4\,500\text{ r/min}$ 工况下,优化后混输泵增压提高了约 14. 97%,效率增加约 8. 07%。

(2)正交设计方法与数值模拟技术相结合的叶片式混输泵叶轮优化设计方法,在提高混输泵性能方面是可行的。

参考文献:

- [1] J De Salis, CH De Marolles, FALCIMAIGNE J. Multiphase pumping-operation & control [R]. SPE 36591, 1996.
- [2] FALCIMAIGNE J, BRAC J, CHARRON Y. Multiphase pumping: achievements and perspectives [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2002, 57(1): 99-107.
- [3] YVES Charron. Two-phase helico axial turbines [R]. SPE 84062, 2003.
- [4] 李清平, 薛敦松, 卢文强. 多相泵设计方法初探[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(1): 61-64.
LI Qing-ping, XUE Dun-song, LU Wen-qiang. Some discussions about the design of rotodynamic multiphase pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(1): 61-64
- [5] 李清平, 薛敦松, 李忠芳. 螺旋轴流式多相泵的实验研究与优化设计[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 962-964.
LI Qing-ping, XUE Dun-song, LI Zhong-fang. Optimize of the helico-axial multiphase pump prototype and its experimental studies on performances [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(6): 962-964.
- [6] 李清平, 薛敦松, 朱宏武. 螺旋轴流式多相泵的设计与实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 84-87.
LI Qing-ping, XUE Dun-song, ZHU Hong-wu. Research on hydraulic design concept of an helico-axial multiphase pump and its experimental studies on performances [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(1): 84-87.
- [7] 余志毅, 曹树良, 彭国义. 运用正反问题迭代法进行叶片式气液混输泵叶轮的水力设计[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 135-141.
YU Zhi-yi, CAO Shu-liang, PENG Guo-yi. Hydraulic design of a multiphase rotodynamic pump impeller and test verification [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(4): 135-141.
- [8] CAO Shu-liang, PENG Guo-yi, YU Zhi-yi. Hydrodynamic design of rotodynamic pump impeller for multiphase pumping by combined approach of inverse design and CFD analysis [J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2005, 127(2): 330-338.
- [9] 余志毅, 曹树良, 王国玉. 叶片式混输泵内气液两相流的数值计算[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 46-48.
YU Zhi-yi, CAO Shu-liang, WANG Guo-yu. CFD analysis of the air-water bubbly flow in a multiphase rotodynamic pump impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 46-48.
- [10] 朱宏武, 李忠芳. 螺旋轴流式多相泵对比实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 606-608.
ZHU Hong-wu, LI Zhong-fang. Compare with the experimental studies of the helico-axial multiphase pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(4): 606-608.
- [11] 朱宏武, 李忠芳, 李清平. 螺旋轴流式多相泵流动参数设计值探讨[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6): 954-956.
ZHU Hong-wu, LI Zhong-fang, LI Qing-ping. Discussion on design scale of flow parameters of helico-axial multiphase pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(6): 954-956.
- [12] 周先军, 陈国明, 仇性启, 等. 大口径法兰瞬态工况正交试验[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 109-111.
ZHOU Xian-jun, CHEN Guo-ming, QIU Xing-qi, et al. Orthogonal test of large diameter flange at transient condition [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2): 109-111.
- [13] 朱宏武, 李清平, 薛敦松. 叶片式油气水多相增压泵: 中国, ZL 02159274. 3 [P]. 2006-11-22.

(编辑 沈玉英)