

# 基于正交设计法的无过载旋流泵叶轮优化设计

欧鸣雄, 林 鹏, 王秀礼, 苏保稳

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 选择叶轮外径、叶轮出口宽度、叶片出口安放角、叶片数以及无叶腔宽度 5 因素, 每个因素各取 2 水平, 制定了  $L_8(2^7)$  正交试验方案, 探索了几何参数对效率、扬程和轴功率的影响规律。旋流泵基本参数为:  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H = 8 \text{ m}$ 、 $n = 1470 \text{ r/min}$ 。采用流体动力学软件 Fluent 对正交设计中每种组合进行性能预测, 通过分析性能曲线对比图, 找到了对于各个性能的最优方案; 根据极差的大小对结果进行分析与比较, 得到一组最佳参数组合。根据模拟结果设计模型泵并进行试验, 试验结果和数值模拟结果基本吻合, 验证了数值计算方法的有效性和可靠性, 试验结果表明: 模型泵达到设计要求, 实现无过载的同时, 保持了较高的效率与较宽的高效区。本试验结果为进一步研究无过载旋流泵的水力性能和优化设计方法提供了有益的参考。

**关 键 词:** 旋流泵; 无过载; 正交设计; 数值模拟

中图分类号: TH133 文献标识码: A

## 引 言

随着工农业日益迅猛的发展, 产生大量需要输送固液两相的场所, 在输送一些含固量高的介质时, 普通结构的渣浆泵容易堵塞, 而旋流泵的叶轮退缩至泵壳后腔, 不但大大提高了通过性, 而且结构简单和运行稳定性好, 因此被人们日益重视起来<sup>[1~2]</sup>。

众知旋流泵采用的是放射性叶轮, 这种叶轮的旋流泵功率曲线随流量的增加而无限上升, 有可能导致电动机烧毁, 大大限制了其使用范围。以往解决此问题的主要途径是加大功率备用系数, 在旋流泵设计点的轴功率上乘以一个不小于 1.4 的系数作为选配电机的依据, 这一系数显然大于离心泵的对值 1.1~1.2, 造成投资增加和能源浪费<sup>[3]</sup>。

目前, 对旋流泵传统设计方法、设计经验以及排污泵和无过载离心泵的研究<sup>[4~8]</sup>, 都取得了一些有价值的成果, 但把无过载设计方法和旋流泵两者研究成果结合起来, 直接应用于无过载旋流泵的设计研究还未见报道。为此, 在这些研究的基础上, 引入

正交试验法对旋流泵重新进行结构配置, 应用 CFD 技术进行性能预测, 分析各参数对旋流泵性能的影响, 探索无过载旋流泵的设计方法。

## 1 计算模型

### 1.1 旋流泵基本参数

旋流泵基本参数为:  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H = 8 \text{ m}$ 、 $n = 1470 \text{ r/min}$ 。

### 1.2 计算域及网格

采用 Pro/E 软件进行三维造型, 如图 1 所示。用 Gambit 软件划分网格, 由于模型复杂, 将其划分为混合网格, 计算模型共有约 100 万个网格单元, 计算域网格图如图 2 所示。将旋流泵无叶腔和叶轮作为一个整体<sup>[9]</sup>, 选择模型 1 作为说明。

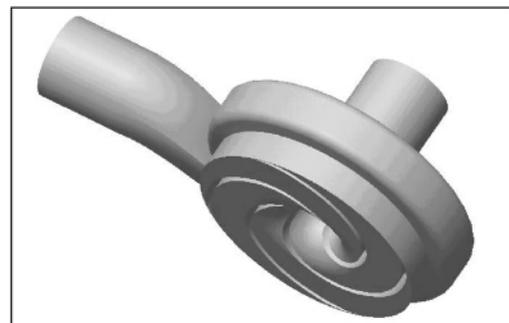


图 1 计算域实体模型

Fig. 1 Computational domain entity model

## 2 正交优化设计

正交设计是多因素的优化试验设计方法, 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、快速和经济的试验设计方法<sup>[10~11]</sup>。

收稿日期: 2011-11-24; 修订日期: 2011-12-20

基金项目: 国家科技型中小企业创新基金资助项目(08C26213200647)

作者简介: 欧鸣雄(1983-), 男, 湖南怀化人, 江苏大学博士研究生。

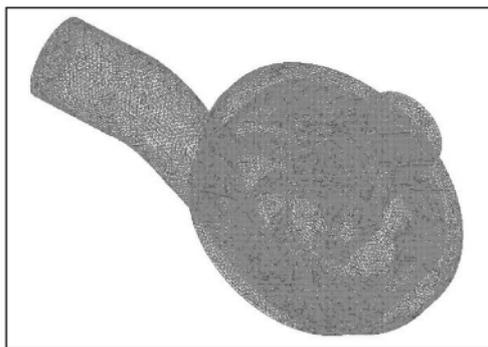


图 2 计算域网格

Fig. 2 Computational domain mesh

2.1 试验目的

(1) 探索旋流泵几何参数对轴功率、效率值及扬程的影响规律,找出其中的主要因素;

(2) 找出模型泵  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H = 8 \text{ m}$ 、 $n = 1470 \text{ r/min}$  的无过载最优设计方案。

2.2 确定试验因素和试验方案

为找出影响最大轴功率值的因素,本研究引入影响旋流泵最大轴功率的 5 个主要因素:叶轮外径  $D_2$ 、叶轮出口宽度  $b_2$ 、叶片出口安放角  $\beta_2$ 、叶片数  $Z$  和无叶腔宽度  $L$ ,每个因素均取 2 个水平,因素水平表如表 1 所示。

根据正交法原则选取不同因素水平进行计算,选用  $L_8(2^7)$  正交表,确定试验方案如表 2 所示。

表 1 水平因素表

Tab. 1 Table of horizontal factors

水平	因素				
	A	B	C	D	E
	$D_2/\text{mm}$	$b_2/\text{mm}$	$\beta_2/(\text{°})$	$Z$	$L/\text{mm}$
1	220	40	14	4	40
2	210	35	18	2	50

表 2 正交设计方案表

Tab. 2 Table of orthogonal design versions

方案	A	B	C	D	E
1	220	40	14	4	40
2	220	40	14	2	50
3	220	35	18	4	40
4	220	35	18	2	50
5	210	40	18	4	50
6	210	40	18	2	40
7	210	35	14	4	50
8	210	35	14	2	40

3 数值模拟计算

3.1 数值计算方法

数值计算采用三维定常雷诺时均  $N-S$  方程和 RNG  $k-\varepsilon$  两方程模型,计算方法为 Segregated 隐式方法;采用 SIMPLEC 算法实现压力与速度耦合;压力项采用二阶中心差分格式,速度项、湍动能项和湍动能粘度系数项采用二阶迎风格式;迭代计算时<sup>[12-13]</sup>,设定各个速度分量及  $k$ 、 $\varepsilon$  的收敛精度为  $10^{-5}$ 。

3.2 边界条件

泵进口采用速度进口条件,计算域出口为自然流出;固壁处采用无滑移边界条件,在近壁处采用标准壁面函数;采用动静双参考系处理叶轮和蜗壳中的水流运动问题,叶轮流道区域采取旋转坐标系,转速为  $1470 \text{ r/min}$ ,蜗壳流道区域为静止坐标系。

4 计算结果及分析

利用 Fluent 数值模拟软件对不同方案进行正交模拟计算,并得出结果。

4.1 极差分析

极差分析法是处理正交试验数据的一种方法,它通过计算质量指标的极差值,找出最优方案。极差值越大,说明该因素的水平变化对质量指标的影响越大,即该因素越重要;极差小,表明这个因素对指标影响小,通常为不重要因素。表 3 为各正交试验方案在最高效率点的数据。

表 3 试验结果

Tab. 3 Test results

方案	最高效率点			
	$Q/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$H/\text{m}$	$\eta/\%$	$P/\text{kW}$
1	51.2	8.41	39.75	2.965
2	38.7	5.53	33.14	1.728
3	39.5	10.05	41.13	2.635
4	41.5	5.23	30.00	1.955
5	51.3	8.62	41.95	2.885
6	42.3	5.52	34.62	1.860
7	37.5	6.95	38.65	1.865
8	36.8	4.82	33.12	1.310

表 4 为对最高效率点扬程及流量的极差分析表。根据极差大小,可以判断出各因素对最高效率

点流量影响的主次顺序为  $b_2 > Z > \beta_2 > D_2 > L$  根据指标值的大小, 得到对最高效率点流量的最优方案  $A_1B_1C_2D_1E_1$ ; 对最高效率点扬程影响的主次顺序为  $Z > \beta_2 > D_2 > L > b_2$ , 根据指标值的大小, 得到对最高效率点扬程的最优方案为  $A_1B_1C_2D_1E_1$ 。

表 4 最高效率点流量和扬程分析表

Tab. 4 Table showing an analysis of the flow rate and head at the highest efficiency point

指标	A( $D_2$ )	B( $b_2$ )	C( $\beta_2$ )	D( $Z$ )	E( $L$ )
$K_1$	170.9	183.5	164.2	179.5	169.8
$K_2$	167.9	155.3	174.6	159.3	169
$Q$					
$\bar{K}_1$	42.73	45.88	41.05	44.88	42.45
$\bar{K}_2$	41.98	38.83	43.65	39.83	42.25
$R$	3	27.2	10.4	20.2	0.8
$K_1$	29.22	28.08	25.71	34.03	28.8
$K_2$	25.91	27.05	29.42	21.1	26.33
$H$					
$\bar{K}_1$	7.31	7.02	6.43	8.51	7.2
$\bar{K}_2$	6.48	6.76	7.36	5.23	6.58
$R$	3.31	1.03	3.71	12.93	2.47

表 5 为对最高效率点效率及轴功率的极差分析表。根据极差大小, 可以判断出各因素对最高效率点效率影响的主次顺序为  $Z > b_2 > L > D_2 > \beta_2$  根据指标值的大小, 得到对最高效率点扬程的最优方案为  $A_2B_1C_2D_1E_1$ ; 对最高效率点功率影响的主次顺序为  $Z > b_2 > \beta_2 > D_2 > L$  根据指标值的大小, 得到对最高效率点功率的最优方案为  $A_2B_2C_1D_2E_2$ 。

表 5 最高效率点效率和轴功率分析表

Tab. 5 Table showing an analysis of the efficiency and shaft power at the highest efficiency point

Best efficiency point					
指标	A( $D_2$ )	B( $b_2$ )	C( $\beta_2$ )	D( $Z$ )	E( $L$ )
$K_1$	144.0	149.5	144.7	161.5	148.6
$K_2$	148.3	142.9	147.7	130.9	143.7
$\eta$					
$\bar{K}_1$	36.0	37.37	36.17	40.37	37.16
$\bar{K}_2$	37.1	35.73	36.93	32.72	35.94
$R$	4.3	6.6	3.0	30.6	4.9
$K_1$	9.28	9.44	7.87	10.35	8.77
$K_2$	7.92	7.77	9.34	6.85	8.43
$P$					
$\bar{K}_1$	2.32	2.36	1.97	2.59	2.19
$\bar{K}_2$	1.98	1.94	2.33	1.71	2.11
$R$	1.36	1.67	1.47	3.5	0.34

为直观表述, 用因素水平作横坐标, 指标的平均值作纵坐标, 画出因素与指标关系, 如图 3 所示。根据极差的大小, 可以排列出 5 个因素分别对各指标影响顺序表, 如表 6 所示。对各指标的最优条件综合比较、平衡各单项最优条件, 可以找出兼顾各方面最优指标的最优参数组合为  $A_1B_1C_1D_1E_1$ , 即模型 1:  $D_2 = 220 \text{ mm}$ 、 $b_2 = 40 \text{ mm}$ 、 $\beta_2 = 14^\circ$ 、 $Z = 4$ 、 $L = 40 \text{ mm}$ 。

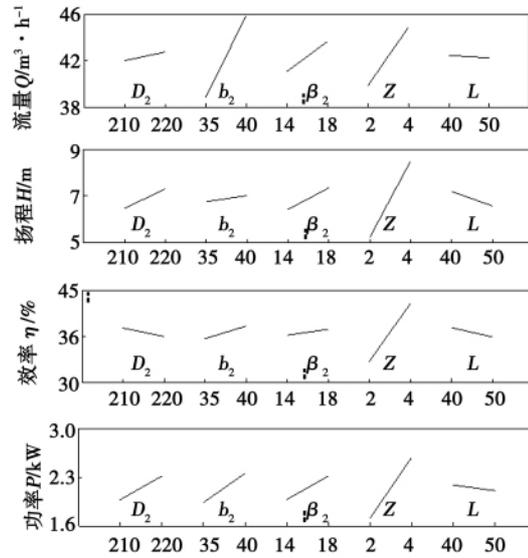


图 3 因素指标关系图

Fig. 3 Chart showing the relationship of various factors and indexes

表 6 因素对性能的影响顺序表

Tab. 6 Sequence table of the influence of various factors on the performance

	主→次				
$Q/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$b_2$	$Z$	$\beta_2$	$D_2$	$L$
$H/\text{m}$	$Z$	$\beta_2$	$D_2$	$L$	$b_2$
$\eta/\%$	$Z$	$b_2$	$L$	$D_2$	$\beta_2$
$P/\text{kW}$	$Z$	$b_2$	$\beta_2$	$D_2$	$L$

#### 4.2 性能曲线图直观分析

模型 1 与模型 5 的效果比较好, 如表 2 和方案 5 所示, 图 4 为模型 1 与模型 5 的外特性对比图。

由图中可以看出: 在小流量时, 模型 1 的扬程高于模型 5, 而在大流量时, 模型 1 的扬程低于模型 5; 两者的效率在整个流量范围内比较接近; 对于功率曲线, 模型 5 的功率随流量上升速度明显比模型 1 快, 在大流量时, 模型 1 逐渐趋于平缓。因此, 综合来看, 模型 1 的效果比模型 5 要好。

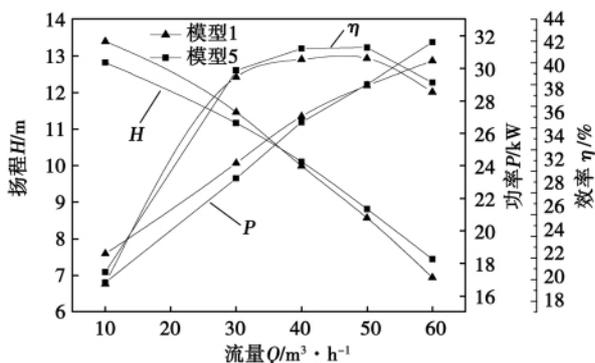


图 4 模型 1 与 5 的性能对比图

Fig. 4 Chart showing a comparison of the performance of Model No. 1 and 5

### 5 试验研究

为验证所提出的无过载旋流泵设计方法的正确性,对选取的最优参数组合进行模型设计和性能预测。

#### 5.1 试验方案

旋流泵性能试验是在具有 B 级精度的江苏某泵厂的水泵开式试验台上进行的,按照《潜水电泵试验方法》进行试验,试验从关死点开始一直测到额定流量的 1.5 倍左右,相关测试数据由计算机自动采集。

#### 5.2 试验结果及分析

图 5 为旋流泵叶轮实体图,图 6 为旋流泵性能曲线图。



图 5 模型泵叶轮实体图

Fig. 5 Entity drawing of the impeller of the model pump

由图 6 中可以看出:在设计流量点,扬程为 8.

48 m,效率为 38.94%,达到设计要求;而且高效区很宽,在  $30 \sim 65 m^3/h$  范围内,效率高于 35%;随流量的增大,功率曲线逐渐趋于平坦,流量在  $0 \sim 50 m^3/h$  范围内,功率曲线上升逐渐变缓,流量大于  $50 m^3/h$  后,轴功率曲线基本保持不变,基本实现了无过载,这对于旋流泵的安全运行,无疑具有重要意义。

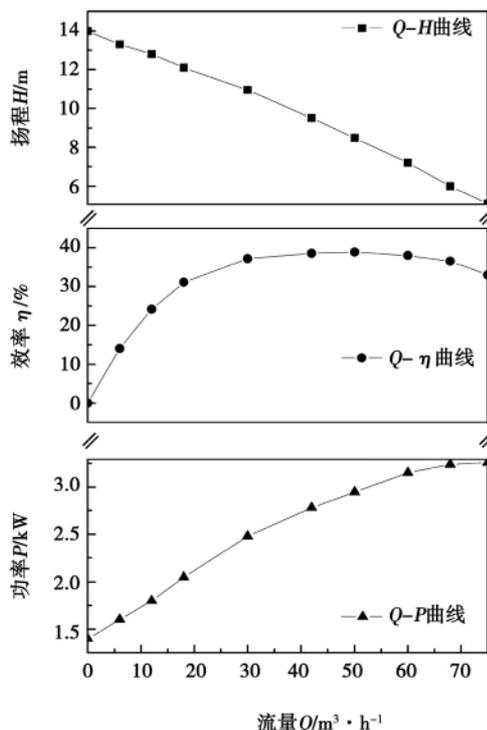


图 6 性能曲线图

Fig. 6 Chart showing the performance curves

### 6 结论

利用正交设计方法,结合数值模拟技术,对旋流泵叶片结构参数进行优化,根据正交设计数据处理与模型试验结果,得到以下结论:

(1) 影响旋流泵功率的主次因素依次为:叶片数  $Z$ 、叶片出口宽度  $b_2$ 、叶片出口安放角  $\beta_2$ 、叶片外径  $D_2$ 、无叶腔宽度  $L$ ;

(2) 通过极差分析得到的最优方案是:  $A_1 B_1 C_1 D_1 E_1$ ,即模型 1:  $D_2 = 220 mm$ 、 $b_2 = 40 mm$ 、 $\beta_2 = 14^\circ$ 、 $Z = 4$ 、 $L = 40 mm$ ;

(3) 按照最优组合制造的叶轮,水力性能满足设计要求,且实现无过载;

(4) 正交设计方法与数值模拟技术相结合的叶

轮优设计方法,在研制无过载旋流泵上是可行的。

#### 参考文献:

- [1] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 234-238.  
GUAN Xin-fan. Modern pump technical handbook [M]. Beijing: Yuhang Press, 1995: 234-238.
- [2] 汪永志, 施卫东, 董颖, 等. 旋流泵的研究现状与发展展望[J]. 排灌机械, 2004, 22(2): 8-11.  
WANG Yong-zhi, SHI Wei-dong, DONG Ying, et al. Status quo of the study of vortex pumps and its prospect [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004, 22(2): 8-11.
- [3] 严敬, 张勇, 杨小林, 等. 旋流泵特性分析[J]. 水泵技术, 2005, 1: 18-19.  
YAN Jing, ZHANG Yong, YANG Xiao-ling, et al. Analysis of the characteristics of a vortex pump [J]. Water Pump Technology, 2005, 1: 18-19.
- [4] 郑铭, 袁寿其, 陈驰. 旋流泵结构参数对泵性能的影响[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 46-49.  
ZHENG Ming, YUAN Shou-qi, CHEN Chi. Influence of the structural parameters of a vortex pump on its performance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 46-49.
- [5] 沙毅, 王劲松, 杨敏官, 等. 旋流泵内部流动及吸入性能试验研究[J]. 水泵技术, 2003, 4: 9-12.  
SHA Yi, WANG Jin-song, YANG Min-guan, et al. Experimental study of the internal flow and the suction performance of a vortex pump [J]. Water Pump Technology, 2003, 4: 9-12.
- [6] 王家禄. 旋流泵性能试验研究[J]. 排灌机械, 1987, 7(3): 8-15.  
WANG Jia-lu. Experimental study of the performance of a vortex pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1987, 7(3): 8-15.
- [7] 沙毅, 杨敏官, 康灿, 等. 旋流泵的特性分析与设计方法探讨[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 124-127.  
SHA Yi, YANG Min-guan, KANG Can, et al. Analysis of the characteristics of a vortex pump and exploratory study of the design methods [J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 124-127.
- [8] 郑铭, 袁寿其, 陈驰. 旋流泵结构参数对泵性能的影响[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 46-49.  
ZHENG Ming, YUAN Shou-qi, CHEN Chi. Influence of the structural parameters of a vortex pump on its performance [J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 31(2): 46-49.
- [9] 施卫东, 汪永志, 孔繁余, 等. 旋流泵无叶腔内部流场数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 72-75.  
SHI Wei-dong, WANG Yong-zhi, KONG Fan-yu, et al. Numerical simulation of the flow field inside the volute of a vortex pump [J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9): 72-75.
- [10] 王春林, 刘红光, 司艳雷, 等. 基于正交设计法的旋流自吸泵泵体结构优化[J]. 排灌机械, 2009, 27(4): 224-227.  
WANG Chun-lin, LIU Hong-guang, SI Yan-le, et al. Pump body structural optimization of a vortex self-priming pump based on the orthogonal design method [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(4): 224-227.
- [11] 丛小青, 袁寿其, 袁丹青. 无过载排污泵正交试验研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 66-69.  
CONG Xiao-qing, YUAN Shou-qi, YUAN Dan-qing. Research of the orthogonal tests of a sewage water pump having no overloads [J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 66-69.
- [12] Jorge L. Parrondo-Gayo. The Effect of the Operating Point on the Pressure Fluctuations at the Blade Passage Frequency in the Volute of a Centrifugal Pump [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(9): 784-790.
- [13] 郭鹏程, 罗兴铸, 刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 1-5.  
GUO Peng-cheng, LUO Xing-zhi, LIU Sheng-zhu. 3D turbulent flow numerical simulation of the coupled flow between the impeller and volute of a centrifugal pump [J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 1-5.
- ( 辉 编辑)
- 
- (上接第581页)
- [4] 吴潮之. 干式除渣技术在1000 MW发电机组中的应用[J]. 广东电力, 2010, 23(8): 66-68.  
WU Chao-zhi. Application of the dry type slag removal technology in a 1000MW power generator unit [J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(8): 66-68.
- [5] 桑斌修. 火电厂干式排渣系统的技术经济性浅析[J]. 电力技术经济, 2008, 20(3): 44-47.  
SANG Bin-xiu. Exploratory study of the cost-effectiveness of the dry type deslagging system in a power plant [J]. Electric Power Cost-effectiveness, 2008, 20(3): 44-47.
- [6] 李秀国. 火电厂大型机组除渣系统选择研究[J]. 锅炉制造, 2011, 1(1): 5-10.  
LI Xiu-guo. Research of the choice of the deslagging system for a large-sized unit in a thermal power plant [J]. Boiler Manufacturing, 2011, 1(1): 5-10.
- ( 陈 滨 编辑)

pH 对换热表面黄铜碳酸钙结垢特性的影响 = **Influence of the pH Value on the Calcium Carbonate Fouling Characteristics of the Brass-made Heat Exchange Surfaces** [刊 汉]/SHI Xue-fei ZHANG Hua SHENG Jian , ZHAO Ping ( College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology , Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 5) . - 586 ~ 590

Besides the factors such as the heat flux density ,fluid temperature ,heat exchange surface temperature and flow speed which influence the fouling characteristics of the main constituent of the foul on the heat exchange surface ,the pH value of the solution also plays an important role. In the 0.5 mmol/l  $\text{CaCO}_3$  solution at 35 °C ,studied were the growth characteristics of  $\text{CaCO}_3$  on the brass-made surfaces through adopting the static reaction method. Through adopting the weighing method ,the foul weights at various times were acquired and the microscopic morphology of the foul at various times was obtained by using a scanning electronic microscope with the influence of the pH value on the  $\text{CaCO}_3$  foul being also obtained: In water quality ,the higher the pH value ,the quicker the foul growth and the shorter the fouling induction period. The surface foul coverage rate of brass when pH value is 11 will be greater than that of brass when pH value is 10. In the crystal morphology ,the proportion of aragonite will lower by a great margin when pH value is 11 and the calcite will dominate ,however ,when pH value is 10 ,the aragonite will dominate. **Key words:** calcium carbonate foul ,pH value ,coupon test ,foul weight ,microscopic morphology of foul

基于正交设计法的无过载旋流泵叶轮优化设计 = **Optimized Design of the Impeller of a Non-overload Vortex Pump Based on the Orthogonal Design Method** [刊 汉]/OU Ming-xiong ,LIN Peng ,WANG Xiu-li SU Bao-wen( Research Center for Fluid Machinery Engineering Technology ,Jiangsu University ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 212013) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 5) . - 591 ~ 595

By choosing five factors ,namely ,impeller outer diameter ,impeller outlet width ,blade outlet installation angle ,number of blades and bladeless cavity width ,and 2 levels for each factor ,formulated was a  $L_8( 2^7)$  orthogonal test scheme and explored was the law of the geometrical parameters influencing the efficiency ,head and shaft power. The basic parameters of the vortex pump were as follows:  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$  , $H = 8 \text{ m}$  and  $n = 1470 \text{ r/min}$ . For each combination in the orthogonal design ,the performance was predicted by using the fluid dynamics software Fluent. The optimum schemes for each performance were identified by analyzing the chart for contrasting the performance curves. According to the ranges ,the results were analyzed and compared with a group of the combinations of optimum parameters being obtained. In the light of the simulation results ,the model pump was designed and a test was performed. The test results are basically in agreement with the numerical simulation results ,verifying that the numerical

calculation method in question is effective and reliable. The test results show that the model pump can meet the design requirements keeping a relatively high efficiency and a relatively wide high efficiency zone at the same time of realizing an operation without any overload. The test results can offer useful reference for further studying the hydrodynamic performance of a non-overload vortex pump and optimizing the design methods. **Key words:** vortex pump, non-overload, orthogonal design, numerical simulation

**烧结矿显热分级回收实验研究 = Experimental Study of the Apparent Heat Staged Recovery of a Sinter Mine** [刊, 汉] / ZHAO Bin, WEN Zhi-hai, ZHONG Xiao-hui, HAN Xi-qiang ( Hebei Provincial Key Laboratory on Modern Metallurgical Technology, Hebei United University, Tangshan, China, Post Code: 063009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(5). - 596 ~ 599

Based on the waste heat energy stepped utilization theory, set up was a test stand for recovering in stages the apparent heat of a sinter mine. Under the condition that the initial temperature of a sinter mine is identical, the exergy and heat recovery rates of the nine groups of orthogonal test operating conditions were compared. The test results show that under the operating condition of which the particle diameter is 10 - 16 mm, the material layer thickness is 1 200 mm, the cooling air quantity is 748 m<sup>3</sup>/h and the air temperature at the inlet is 70 °C, both exergy and heat recovery rate are relatively high, reaching 49.0% and 88.1% respectively. The average heat recovery rate of a power and absorption type heat pump-based staged recovery system hits 84.6% and the average exergy recovery rate reaches 47.6%, averagely 10.7 percentage points higher than the heat recovery rate of a single stage power recovery system and averagely 2.3 percentage points higher than the exergy recovery rate of the single stage power recovery system. **Key words:** sintering and cooling machine, medium and low temperature waste heat, absorption type heat pump, staged recovery, orthogonal test

**基于叶尖损失的风力机叶片气动性能数值模拟 = Numerical Simulation of the Aerodynamic Performance of the Blades of a Wind Turbine Based on the Blade-tip Losses** [刊, 汉] / WANG Xu-dong, WANG Li-cun, CHEN Bin ( Education Ministry Engineering Research Centre for Waste Oil Resource Technology and Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing, China, Post Code: 400067), JIANG Ren-ke ( Guangxi Liugong Machinery Co. Ltd., Liuzhou, China, Post Code: 545007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(5). - 600 ~ 603

In the light of the influence of the blade tip losses on the load and output power of a wind turbine, contrasted and