基于正交设计法的旋流自吸泵泵体结构优化

王春林，刘红光，司艳雷，吴志旺，易同祥
（江苏大学 能源与动力工程学院，江苏 镇江 212013）

摘　要：用正交设计法通过模拟试验对旋流自吸泵泵体结构参数进行了优化设计，设计了一个4因素3水平的正交方案，研究了泵体各几何参数对旋流自吸泵性能的影响．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．并通过对数值计算的数据进行极差分析，获得了各几何参数影响4个性能的主次顺序．通过对数据结果进行综合平衡分析和比较，得出了最优的参数组合．得出的最优参数组合不在原有设计方案中，因此根据分析结果对模型泵进行了再设计．将再设计方案与原有方案的性能作了对比，并判断其为最优方案．本模拟结果对旋流自吸泵性能优化设计有一定的参考价值．

关键词：旋流自吸泵；正交设计法；性能；优化设计；模拟
中图分类号：TH317　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－6254(2009)04－0224－04

Body structural optimization of rotational flow self-priming pump based on orthogonal design

Wang Chunlin, Liu Hongguang, Si Yanlei, Wu Zhiwang, Yi Tongxiang
(School of Energy and Power Engineer, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Using orthogonal design, optimization design of rotational flow self-priming pump body structural parameter was done through simulation. Orthogonal scheme of four factors and three levels was designed, the influence of geometrical parameters on the characteristics was studied, and optimal scheme of the characteristics was found by analyzing the contrast of performance curves. The influence orders of geometrical parameters to the four characteristics were obtained by using range analysis. The optimization parameter combination was obtained by comprehensive balance analysis and comparison to the data result. For the optimization parameter combination is not in the original design schemes, the redesign was made based on the analyzed result. The performances between the additional scheme and original schemes were contrasted, and the optimal scheme was determined. The results are instructive to the optimization design of rotational flow self-priming pump.

Key words: rotational flow self-priming pump; orthogonal design; performance; optimization design; simulation

旋流自吸泵是一种新型自吸泵，不易堵塞，工作可靠性高[1]．国内外学者对旋流自吸泵的设计方法及试验做了一些分析和研究，取得了一定的成就．但是由于其设计理论不成熟及蜗壳结构特殊，所以蜗壳参数的选取主要是通过经验．实际上，现有旋流自吸泵水力模型较少，所以导致一些设计参数的选取

收稿日期：2008－12－01
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50476068)
作者简介：王春林(1962—)，男，江苏盐城人，副教授(wangzha@pub.zj.jsinfo.net)，主要从事流体机械理论、特性及流动模拟的研究．
刘红光(1984—)，男，河南周口人，硕士生(lhg84@sina.com)，主要从事流体机械理论、特性设计及流场模拟的研究．

万方数据

具有一定的盲目性和随机性.

笔者对旋流自吸泵泵体结构进行正交优化设计试验，应用 CFD 技术进行性能预测[2-4]，分析参数对性能的影响，并根据流场分析结果对相关元件做进一步的正交优化设计，探寻其中的主次影响因素.

1　模型的建立

1.1　基本结构及参数

旋流自吸泵的叶轮采用离心式叶轮，泵体结构较为特殊，泵体流道包含有导壁、突台和气－液分离室. 结构见图 1.

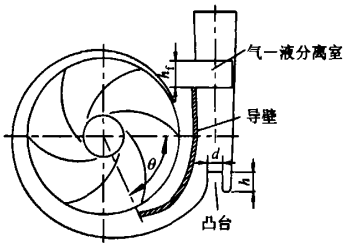


图 1　旋流自吸泵示意图

Fig. 1　Schematic diagram of rotational flow self-priming pump

设计工况点参数：流量 $Q = 25\ m^3/h$，扬程 $H = 30\ m$，转速 $n = 2\ 900\ r/min$，比转速 $n_s = 68.8$.

1.2　控制方程和湍流模型

采用连续性方程和雷诺时均 N－S 方程来描述泵内的三维定常不可压缩流动，选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型闭合方程组.

湍流的基本控制方程[5]

$$\mathrm{div}(\rho u\varphi) = \mathrm{div}(\Gamma \mathrm{grad}\phi) + S \qquad (1)$$

式中 ϕ 为求解通量，代表 u,v,w,T 等求解变量；Γ 为扩散项；S 为源项；ρ 为示流体密度；u 为速度矢量.

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的控制方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{\mathrm{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - \rho\varepsilon \qquad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{\mathrm{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (3)$$

式中 $\mu_{\mathrm{eff}} = \mu + \mu_t, \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$；$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta\left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta\eta^3}$；$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon}$；$E_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$.

式中 μ_t 为湍动粘度；G_k 为湍动能的产生项；$C_{1\varepsilon} = 1.42$；$C_{2\varepsilon} = 1.68$；$C_\mu = 0.084\ 5$，$\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$；$\eta_0 = 4.377$；$\beta = 0.012$.

1.3　计算域网格划分

计算区域包括叶轮流道和蜗壳流道两部分，二者之间通过 Interface 面实现耦合. 由于间隙较小和夹角较小都有可能使网格划分不成功，所以采用适用范围更广的非结构的四面体混合网格. 网格间距 2.0，划分蜗壳流道的网格数 426 868，叶轮流道的网格数 243 635. 计算网格见图 2.



图 2　计算网格系统

Fig. 2　Calculation grid system

2　正交优化设计

2.1　确定设计质量指标、因素和水平

采用的正交模拟试验是通过软件仿真模拟来代替试验，根据数值计算预测旋流自吸泵的性能，达到优化参数的目的[6].

对于自吸泵，应考虑其自吸性能. 评价自吸泵自吸性能的指标，主要指自吸时间和自吸高度[6,7]. 根据旋流自吸泵的自吸原理和结构，影响因素取分离室高度 h_f(mm)，采用 A 表示；导壁包角 θ(°)，采用 B 表示；突台高度 h(mm)，采用 C 表示；突台直径 d(mm)，采用 D 表示. 见图 1. 每个因素均取 3 个水平数，水平数按等差数列选取. 所用的正交设计因素、水平表见表 1.

表 1　正交设计因素和水平表

Tab. 1　Factors and levels of orthogonal design

水平	因素			
	A	B	C	D
1	20	75	15	10
2	30	65	23	18
3	40	55	30	26

万方数据

2.2 按正交设计法确定方案

根据前面的分析,选择的是4因素3水平,方案数为9. 正交设计方案见表2.

表2 正交设计方案表

Tab.2 Scheme of orthogonal design

方案	A	B	C	D
1	20	75	15	10
2	20	65	23	18
3	20	55	30	26
4	30	75	23	26
5	30	65	30	10
6	30	55	15	18
7	40	75	30	18
8	40	65	15	26
9	40	55	23	10

3 结果分析

通过FLUENT计算后,绘制出扬程与流量($H-Q$)的扬程曲线及效率与流量($\eta-Q$)的效率曲线.

3.1 性能曲线图直观分析

图3为扬程曲线对比图. 在低流量区,方案3扬程最大,但是在大流量区,其扬程最小. 而方案5在小流量区扬程较大,但与另外几个方案无明显差别,在大流量区,其扬程均大于其他方案. 所以在以扬程为考察指标时,方案5为最优方案.

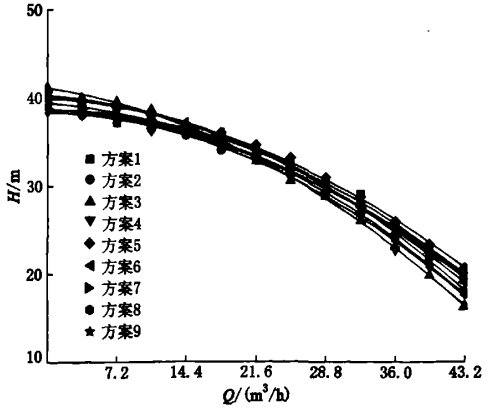


图3 扬程曲线对比

Fig.3 Contrast of head curves

图4为9个方案的效率曲线对比图. 在小流量区,各方案对效率影响很小,而在大流量区影响却很大. 在大流量区,方案2的效率明显优于其他方案. 可以认为,仅以效率为考察指标时,方案2为最优方案.

综合以上分析,方案2,5较优. 但还是不能断定最佳方案,另外也没有分析出各个因素对于性能的影响程度. 针对4个质量指标分别进行极差分析,确定最佳方案,并判断影响因素的主次顺序.

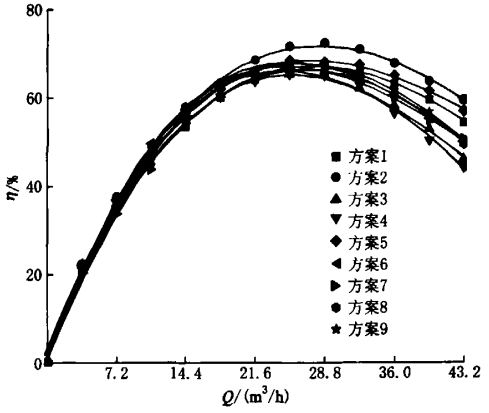


图4 效率曲线对比

Fig.4 Contrast of efficiency curves

3.2 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.

表3为对于设计工况点扬程和效率的极差分析表. 根据极差的大小,可以判断出各因素对设计工况点扬程的影响的主次顺序为 $D>A>B>C$,. 根据指标平均值的大小,得到对设计工况点扬程的最优方案为 $A_2B_3C_2D_1$. 对设计工况点效率的影响的主次顺序为 $B>D>C>A$. 根据指标平均值的大小,得到对设计工况点效率的最优方案为 $A_1B_2C_2D_2$.

表3 设计工况点扬程和效率极差分析表

Tab.3 Range analysis of head and efficiency at design point

指标		A	B	C	D
H/m	$\bar{K}_{1j}$	33.47	33.60	33.68	34.42
	$\bar{K}_{2j}$	33.96	33.77	33.77	33.81
	$\bar{K}_{3j}$	33.78	33.84	33.76	32.98
	R	0.49	0.24	0.09	1.44
η/%	$\bar{K}_{1j}$	65.91	64.08	65.36	65.29
	$\bar{K}_{2j}$	65.22	66.63	66.18	66.43
	$\bar{K}_{3j}$	65.32	65.74	64.91	64.73
	R	0.69	2.54	1.27	1.70

表4为对于最高效率点的扬程、效率极差分析表. 根据极差的大小,可以判断出各因素对最高效率点扬程的影响的主次顺序为 $D>B>A>C$. 根据指标平均值的大小,得到对设计工况点扬程的最优方案为 $A_2B_2C_3D_1$. 对最高效率点效率影响的主次顺序为 $D>B>C>A$. 根据指标平均值的大小,得到对设

万方数据

计工况点效率的最优方案为 $A_1B_2C_2D_2$.

表 4　最高效率点扬程和效率极差分析表

Tab. 4　Range analysis of head and efficiency at best efficiency point

指标		A	B	C	D
H/m	$\bar{K}_{1j}$	30.51	30.59	30.67	31.53
	$\bar{K}_{2j}$	31.47	31.58	30.72	30.13
	$\bar{K}_{3j}$	30.67	30.48	31.25	30.99
	R	0.96	1.10	0.58	1.41
η_{max}/%	$\bar{K}_{1j}$	68.35	66.42	67.24	67.92
	$\bar{K}_{2j}$	67.25	69.24	68.54	68.97
	$\bar{K}_{3j}$	67.07	67.00	66.89	65.77
	R	1.28	2.82	1.65	3.20

根据极差大小，可以排列出 4 个因素分别对各指标影响顺序表，见表 5. 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 $A_2B_2C_2D_2$，即 h_t = 30 mm，θ = 65°，h = 23 mm，d = 18 mm. 但是由表 2 可知，不存在该方案，这就需要进行再设计.

表 5　4 个因素对性能的影响顺序表

Tab. 5　Influence order of four factors to performance

	主→次			
H/m	D	A	B	C
η/%	B	D	C	A
H_{max}/m	D	B	A	C
η_{max}/%	D	B	C	A

3.3　再设计及分析

对选取的最优参数组合 $A_2B_2C_2D_2$，进行模型设计和性能预测，得到性能曲线.

图 5 为其扬程和效率性能曲线图. 结合前面的性能曲线对比图，其设计点扬程超过了原有最好方案的 33 m，且在其他工况点扬程值都较高；其在设计工况点的效率超过了原有最好方案的 71.7% 达到了 73.5%，且其高效区很宽. 综合分析得到，参数组合 $A_2B_2C_2D_2$ 是最优的设计方案.

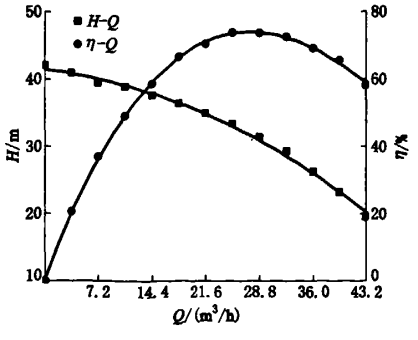


图 5　扬程和效率性能曲线图

Fig. 5　Performance curves of head and efficiency

4　结　论

1）通过极差分析法，确定了各因素对于旋流自吸泵各个性能指标影响的主次顺序.

2）对数据结果进行了综合比较和平衡，得出模型的最优参数组合方案.

3）对最优参数组合方案进行再设计，并进行性能预测. 本模拟结果对旋流自吸泵性能优化设计有一定的参考价值.

参考文献(References)

[1] 王春林，司艳雷，郑海霞，等. 旋流自吸泵内部流场的数值模拟[J]. 排灌机械，2008，36(2)：31－35.
Wang Chunlin, Si Yanlei, Zheng Haixia, et al. Numerical simulation of rotational interior flow in self-priming pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 36(2): 31－35. (in Chinese)

[2] 王秀勇，王灿星. 基于数值模拟的离心泵性能预测[J]. 流体机械，2007，35(10)：9－13.
Wang Xiuyong, Wang Canxing. Performance prediction of centrifugal pump based on the method of numerical simulation [J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35(10): 9－13. (in Chinese)

[3] 叶晓琰，杨孙圣，许建强，等. 基于 CFD 技术的高压泵液力端优化设计[J]. 排灌机械，2008，26(6)：31－35.
Ye Xiaoyan, Yang Sunsheng, Xu Jianqiang, et al. Optimization design for hydraulic end of high-pressure pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(6): 31－35. (in Chinese)

[4] Hornsby C. CFD－Driving pump design forward [J]. *World Pumps*, 2002, 431: 18－22.

[5] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京：清华大学出版社，2004：7－11.

[6] 吕智君，兰才有，王福军. 自吸泵研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械，2005，23(3)：1－5.
Lü Zhijun, Lan Caiyou, Wang Fujun. The present status and development of self-priming pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(3): 1－5. (in Chinese)

[7] 郭晓梅，杨敏官，王春林. 自吸泵现状分析[J]. 水泵技术，2002(1)：27－29.
Guo Xiaomei, Yang Minguan, Wang Chunlin. Self-priming pump status analysis [J]. *Pump Technology*, 2002(1): 27－29. (in Chinese)

(责任编辑　贾国方)

万方数据