

深井离心泵的水力设计和二次回归正交试验

王洪亮, 施卫东, 陆伟刚, 周岭, 王川

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 根据研发新型井泵节能节材的要求, 将水力设计与计算流体动力学技术和二次回归正交试验方法相结合, 进行提高井泵效率的试验研究。试验选择深井离心泵的叶轮出口安放角和出口宽度两个几何因素, 按二次回归正交试验方案, 设计了10副叶轮。通过计算流体动力学技术对包含叶轮、导叶在内的两级新型深井离心泵的全流场进行了设计工况下的三维流场数值模拟, 得到了10组设计方案额定点的效率值。通过二次回归正交试验法研究了叶轮出口安放角、出口宽度对效率的影响规律, 根据计算结果对新型深井离心泵效率提出了二次回归约束方程。结果表明, 采用叶轮极大直径设计法对提高新型深井离心泵的水力效率具有一定的参考价值。

关键词: 深井离心泵; 水力设计; 二次回归正交试验; 计算流体动力学; 效率

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)06-0479-05

Hydraulic design and quadratic regression orthogonal experiment of deep well centrifugal pumps

Wang Hongliang, Shi Weidong, Lu Weigang, Zhou Ling, Wang Chuan

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: According to the research and development request of new deep well pump energy-saving and material-saving, test investigation was taken to increase the efficiency of deep well pumps by using hydraulic design of impeller, the modern CFD and the quadratic regression orthogonal test method. The experiment was carried out with two factors of outlet angle and outlet width. Ten impellers were designed through testing schemes of quadratic regression. The whole flow field of the two-stage new-type deep well pumps at design condition was simulated by CFD, and the efficiency of each case was obtained. The effects of both outlet angle and outlet width on efficiency were investigated through quadratic regression orthogonal testing method. According to the calculation results, constrained quadratic regression equation of the efficiency was put forward. The result shows that it would be instructive to increase the hydraulic efficiency of new-type deep well pumps by using the impeller diameter maximum approach.

Key words: deep well centrifugal pump; hydraulic design; quadratic regression orthogonal experiment; computational fluid dynamics; efficiency

深井离心泵广泛应用于地质勘探、地热和油田开发等领域,用于抽取地下液体。泵一般在机井内工作,因外径受井径的限制,单级扬程普遍不高。文献[1-2]提出了一种深井离心泵叶轮极大直径设计

法,数值模拟和试验研究结果表明,该设计方法对提高深井离心泵单级扬程取得了明显的效果,同时其效率较原有设计又不降低。用该方法设计的新型深井离心泵的泵体总长和重量分别减小1/3左右,生

收稿日期: 2010-06-24

基金项目: 国家科技人员服务企业行动项目(2009JC30002); 江苏省高等学校优秀科技创新团队计划项目

作者简介: 王洪亮(1985—),男,河南濮阳人,博士研究生(wnghongliang@163.com),主要从事水泵理论与技术研究。

施卫东(1964—),男,江苏南通人,研究员,博士生导师(wdshi@ujs.edu.cn),主要从事流体机械及工程研究。

产成本降低 1/3 左右,具有明显的节能节材效果。

文中采用叶轮极大直径设计法,对某典型的 150QJ20 型深井离心泵进行水力设计,并进行二次回归正交试验,设计出 10 副叶轮。通过 CFD 对 10 组叶轮配合扭曲反导叶的方案分别对两级全流场进行数值模拟,分析模拟结果,以研究叶轮的几个主要几何参数即出口宽度、出口安放角对深井离心泵效率的影响规律,从而得到该类型深井离心泵效率的回归约束方程。

1 水力设计

1.1 叶轮水力设计

150QJ20 型深井离心泵的基本设计参数为流量 $20 \text{ m}^3/\text{h}$,单级扬程 11 m,转速 2 850 r/min。经计算得比转速 $n_s = 128$ 。首先采用陆伟刚等^[1]提出的叶轮极大直径设计法设计叶轮,其叶轮轴面如图 1 所示。为把井泵的级扬程提高到最大,叶轮前盖板的直径取为 119 mm,略小于泵体内壁直径,且叶轮出口斜切,后盖板直径取为 110 mm。

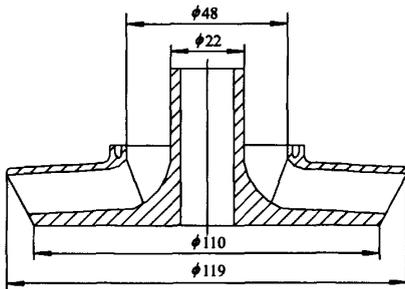


图1 叶轮轴面

Fig. 1 Cross-section of impeller

在确定了叶轮前后盖板直径之后,再设计叶轮的其他结构参数,其中叶轮轴径为 16 mm,轮毂直径为 22 mm,叶轮进口直径为 48 mm,叶轮出口宽度为 9~13 mm(以上均根据叶轮结构和经验选取),叶轮出口安放角为 $10^\circ \sim 25^\circ$ (该值先根据经验初选,然后由基本方程和全扬程公式验算确定),叶片数为 6,进口冲角为 0° ,包角及盖板水力圆角半径根据经验及作图选择。为铸造方便,采用圆柱形叶片。

1.2 导叶的水力设计

为降低深井离心泵的生产成本,设计了一种新型反导叶导流壳代替常用的空间导叶式导流壳。由于它的轴向长度最短,且制造比空间导叶容易,所以成本低。但常规的反导叶都是纯粹的圆柱形叶片,其水力

损失比空间导叶大,因此本设计改为进口边扭曲的三维曲面反导叶,这样既降低了反导叶的水力损失,又不影响铸造工艺性,其基本结构如图 2 所示。

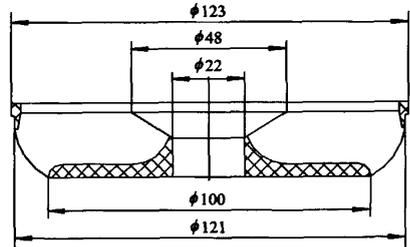


图2 导叶轴面

Fig. 2 Cross-section of guide vane

导叶的主要结构参数为导叶叶片数 6,进口直径 121 mm,出口直径 48 mm。

2 二次回归正交试验

二次回归正交试验设计是一种处理多因素试验的科学方法,它采用数理统计学观点,应用正交性原理,对多个因素同时进行考查,在各个因素都处于变动的情况下,用一套规格化的正交表来合理地安排试验。二次回归正交试验采用组合设计,具有试验次数少,精确度高,试验结果处理简便,并可进行优化分析的特点^[3]。

影响深井离心泵效率、扬程最重要的因素为叶轮出口安放角 β_2 ,出口宽度 b_2 。本研究应用二次回归正交试验分析这两个因素 $\beta_2(10^\circ \sim 25^\circ)$, $b_2(9 \sim 13 \text{ mm})$ 和效率、扬程之间的关系。由于因素数 $m = 2$,如果取零水平试验次数 $m_0 = 2$,根据星号臂长 r 的计算公式^[3]得到 $r = 1.078$ 。

根据因素 $\beta_2(x_1)$ 的上限 x_{11} 为 25° ,下限 x_{12} 为 10° ,所以零水平为 $x_{10} = 17.50$,变化间距 $\Delta_1 = 6.96$,上水平 $x_{12} = 24.46$,下水平 $x_{22} = 10.54$ 。同理,可以计算出因素 $b_2(x_2)$ 的编码,见表 1。

表1 因素与水平
Tab. 1 Factors and levels

规范变量	自然变量	
	x_1	x_2
上星号臂 r	25.00	13.00
上水平 1	24.46	12.86
零水平 1	17.50	11.00
下水平 -1	10.54	9.15
下星号臂 $-r$	10.00	9.00
变化间距 Δ_1	6.96	1.86

由于因素数 $m = 2$, 选用正交表 $L_4(2^3)$ 进行变换, 二水平试验次数 $m_c = 2^2 = 4$, 试验方案见表 2. 其

他几何因素按之前计算所得值设计, 得到 10 组水力模型.

表 2 试验方案
Tab. 2 Experiment program

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z_1	1	1	-1	-1	1.078	-1.078	0	0	0	0
z_2	1	-1	1	-1	0	0	1.078	-1.078	0	0
$\beta_2/(\circ)$	12.86	12.86	9.15	9.15	13.00	9.00	11.00	11.00	11.00	11.00
b_2/mm	24.46	10.54	24.46	10.54	17.54	17.50	25.00	10.00	17.50	17.50

3 数值计算

3.1 控制方程组

深井离心泵的过流部件由进水节、若干级叶轮和导叶体组成. 采用固系于旋转叶轮上的相对坐标系, 转速为 2 850 r/min. 设整个流道内部流场为三维不可压稳态粘性湍流场, 建立相对坐标系下均连续方程、动量方程, 并采用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型来封闭.

3.2 计算模型建立

3.2.1 工作介质属性

在常温常压下介质为清水, 密度为 998.2 kg/m³, 动力粘度为 0.001 003 Pa·s.

3.2.2 计算区域网格划分及计算模型选取

在 Pro/E 中分别对进口段、叶轮、导叶筒体建模, 导入 Gambit 中作进一步处理. 完成两级全流场的计算区域构建后, 进行网格划分, 采用结构化网格和非结构化网格相结合的方法. 比较 1.00×10^6 到 2.50×10^6 网格数之间的 5 组模型, 发现在网格总量达到 1.75×10^6 后, 效率波动稳定在 0.5% 以内, 考虑计算机性能, 选取 1.75×10^6 网格数.

本研究以深井离心泵的两级泵壳内流道为计算区域, 采用全流道方式, 同时将整个计算区域分为泵的进口段与叶轮室的旋转部分和包括反导叶区的静

止部分, 两个子区域之间联结的平面作为分界面. 对于旋转部分和静止部分之间的耦合, 通过计算比较, 采用多参考坐标系模型的定常计算结果进行泵的数值模拟.

3.2.3 边界条件

设叶轮进口为无旋流动^[4], 进口面中心处为压力参考点, 其相对压力为 0; 出口流动设为充分发展状态, 即出流 (outflow) 形式^[5-6]; 固壁面无滑移, 即壁面上各向速度均为 0, 对近壁面的湍流流动按标准壁面函数法处理^[7].

3.2.4 数值算法及求解控制参数

应用 SIMPLEC 算法, 采用二阶迎风格式离散差分方程^[8-10]. 代数方程迭代计算采取亚松弛, 各项系数分别为压力亚松弛系数 0.3, 动量亚松弛系数 0.7, 湍动能亚松弛系数 0.8, 湍动能耗散率 0.8. 设定收敛精度为 10^{-5} .

4 二次回归正交试验结果分析

4.1 二元二次回归正交组合设计

运用数值模拟得到 10 组方案在额定工况下深井离心泵的效率值, 二元二次回归正交组合设计表及试验结果见表 3. 根据二元二次回归正交组合设计的要求, 将二次项 z_1^2, z_2^2 分别进行中心化, 得到 z_1' 和 z_2' , 二次项中心化结果见表 4.

表 3 二元二次回归正交组合设计表及试验结果
Tab. 3 Binary quadratic regression combination design and test results

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z_1	1	1	-1	-1	1.078	-1.078	0	0	0	0
z_2	1	-1	1	-1	0	0	1.078	-1.078	0	0
$z_1 z_2$	1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0
z_1	1	1	1	1	1.162	1.162	0	0	0	0
z_2	1	1	1	1	0	0	1.612	1.612	0	0
z_1	0.368	0.368	0.368	0.368	0.530	0.530	-0.632	-0.632	-0.632	-0.632
z_2	0.368	0.368	0.368	0.368	-0.632	-0.632	0.531	0.531	-0.632	-0.632
y	64.46	66.74	66.54	67.44	63.31	67.34	65.29	67.25	66.46	66.46

表4 二元二次回归正交组合设计计算表
Tab.4 Binary quadratic regression combination design calculations

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
z_1	1	1	-1	-1	1.078	-1.078	0	0	0	0	
z_2	1	-1	1	-1	0	0	1.078	-1.078	0	0	
$z_1 z_2$	1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	
z_1'	0.368	0.368	0.368	0.368	0.530	0.530	-0.632	-0.632	-0.632	-0.632	
z_2'	0.368	0.368	0.368	0.368	-0.630	-0.632	0.530	0.530	-0.632	-0.632	
y	64.46	66.74	66.54	67.44	63.31	67.34	65.29	67.25	66.46	66.46	661.29
y^2	4 155.092	4 454.228	4 427.572	4 548.154	4 008.156	4 534.676	4 262.784	4 522.563	4 416.932	4 416.932	43 747.09
$z_1 y$	64.46	66.74	-66.54	-67.44	68.25	-72.60	0	0	0	-7.12	
$z_2 y$	64.46	-66.74	66.54	-67.44	0	0	70.38	-72.50	0	0	
$(z_1 z_2) y$	64.46	-66.74	-66.54	67.44	0	0	0	0	0	0	
$z_1' y$	23.721	24.560	24.486	24.817	33.554	35.690	-41.263	-42.502	-42.003	-42.003	-0.939
$z_2' y$	23.721	24.560	24.486	24.817	-40.011	-42.558	34.603	35.642	-42.002	-42.002	1.256
$(z_1 z_2)^2$	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	4
$z_1'^2$	0.135	0.135	0.135	0.135	0.281	0.281	0.399	0.399	0.399	0.399	2.701
$z_2'^2$	0.135	0.135	0.135	0.135	0.399	0.399	0.281	0.281	0.399	0.399	2.701
z_1^2	1	1	1	1	1.162	1.162	0	0	0	0	6.324
z_2^2	1	1	1	1	0	0	1.162	1.162	0	0	6.324

根据表4可知各个回归系数分别为

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 66.129,$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i z_{1i}}{\sum_{i=1}^n z_{1i}^2} = -1.127,$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i z_{2i}}{\sum_{i=1}^n z_{2i}^2} = -0.837,$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i (z_1 z_2)_i}{\sum_{i=1}^n (z_1 z_2)_i^2} = -0.345,$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i (z_1')_i}{\sum_{i=1}^n (z_1')_i^2} = -0.348,$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i (z_2')_i}{\sum_{i=1}^n (z_2')_i^2} = 0.465.$$

因此,规范变量与试验指标 y 之间的回归关系式(回归方程)为

$$y = 66.129 - 1.127z_1 - 0.837z_2 - 0.345z_1 z_2 - 0.348z_1' + 0.465z_2'. \quad (1)$$

4.2 二次回归约束方程

由二次项中心化公式,可得

$$z_1' = z_1^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{1i}^2 = z_1^2 - 0.632,$$

$$z_2' = z_2^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{2i}^2 = z_2^2 - 0.632,$$

代入回归方程,则有

$$y = 66.129 - 1.127z_1 - 0.837z_2 - 0.345z_1 z_2 - 0.348(z_1^2 - 0.632) + 0.465(z_2^2 - 0.632), \quad (2)$$

$$\text{又根据编码公式 } z_1 = \frac{x_1 - 11.0}{3.71}, z_2 = \frac{x_2 - 17.5}{13.91},$$

代入式(2),整理后可得新型深井离心泵效率的二次回归约束方程(回归公式)为

$$y = 66.835 + 0.373x_1 - 0.067x_2 - 0.007x_1 x_2 - 0.025x_1^2 + 0.002x_2^2,$$

$$\text{即 } y = 66.835 + 0.373\beta_2 - 0.07b_2 - 0.007\beta_2 b_2 - 0.025\beta_2^2 + 0.002b_2^2. \quad (3)$$

5 结论

在二次回归正交试验设计、数值计算的基础上,采用数值计算和样机试验验证相结合的方法,对新型深井离心泵的水力模型进行两级全流场数值模拟,得到叶轮出口安放角、出口宽度对深井离心泵性能的影响规律,结论如下:

(1)采用极大直径设计法设计的深井离心泵单级扬程高,效率也不降低,采用数值模拟与二次回归正交试验相结合,能够指导深井离心泵的设计,找到符合设计要求的优选方案。

(2)针对多级深井离心泵,采用两级全流场作数值模拟能够较为准确地指导设计。

(3)通过二次回归正交试验设计出10组设计方案,得出了叶轮两个主要设计参数出口安放角和出口宽度对深井离心泵效率的影响规律,并优选出回归方程,从而为实现对新型深井离心泵的优化设计目标提供了设计依据。

参考文献 (References)

- [1] 陆伟刚,张启华,施卫东. 深井离心泵叶轮极大直径

- 设计法[J]. 排灌机械, 2006, 24(5): 1-7.
- Lu Weigang, Zhang Qihua, Shi Weidong. Impeller diameter maximum approach on deep well pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(5): 1-7. (in Chinese)
- [2] 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. Flow calculation of new-type deep well pump [J]. *Fluid Machinery*, 2008, 36(5): 21-24. (in Chinese)
- [3] 施卫东, 王洪亮, 余学军. 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. Development and prospect of deep well pump in China [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(1): 64-68. (in Chinese)
- [4] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [5] 何有世, 袁寿其, 郭晓梅, 等. 分流叶片离心泵叶轮内变工况三维数值分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(3): 193-197. He Youshi, Yuan Shouqi, Guo Xiaomei, et al. Numerical simulation for inner flow of impeller with splitting vanes of centrifugal pump under different operating condition [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2005, 26(3): 193-197. (in Chinese)
- [6] 李龙, 王泽, 徐峰, 等. 离心泵叶轮内变工况三维湍流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 72-73. Li Long, Wang Ze, Xu Feng, et al. Simulation of 3-D turbulent flow inside centrifugal pump impellers at varying conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(6): 72-73. (in Chinese)
- [7] Zhou Weidong, Zhao Zhimei, Lee T S, et al. Investigation of flow through centrifugal pump impellers using computational fluid dynamics [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2003, 9(1): 49-61.
- [8] 龙志军, 裴毅, 杨晓珍, 等. 离心泵叶轮内部湍流流场的数值模拟[J]. 排灌机械, 2005, 23(2): 8-10. Long Zhijun, Pei Yi, Yang Xiaozhen, et al. Numerical simulation of turbulent flow inside impeller of centrifugal pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(2): 8-10. (in Chinese)
- [9] Shi Weidong, Lu Weigang, Wang Hongliang, et al. Research on the theory and design methods of the new type submersible pump for deep well [C] // *Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Vail, Colorado: ASME Press, 2009.
- [10] 杨敏官, 李辉, 高波, 等. 离心泵内流场计算及空间导叶内流动分析[J]. 流体机械, 2008, 36(7): 16-19. Yang Minguan, Li Hui, Gao Bo, et al. Numerical calculation of turbulent flow in a centrifugal pump and flow field analysis to vaned diffuser [J]. *Fluid Machinery*, 2008, 36(7): 16-19. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)