

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.018

深井离心泵轴向力数值预测与试验*

周 岭¹ 施卫东¹ 陆伟刚¹ 李振同² 李 伟¹

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 台州佳迪泵业有限公司, 台州 317500)

【摘要】 轴向力的预测和平衡是多级泵设计和优化中的重点和难点。以 150QJ20 型深井离心泵为例,在 Fluent 中采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、SIMPLEC 算法、二阶迎风方程,对包含叶轮、导叶在内的两级深井离心泵进行了全流场数值计算,对不同工况下的泵效率、单级扬程和单级轴向力进行了预测。随后对样机进行了外特性和轴向力的试验测量。将数值模拟结果与试验结果对比,分析了预测值与试验值的差异,结果表明利用数值模拟方法可以较为准确地预测深井离心泵的外特性和轴向力。

关键词: 深井离心泵 轴向力 数值模拟 试验
中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0100-04

Numerical Prediction and Experiment of Axial Force on Deep-well Centrifugal Pump

Zhou Ling¹ Shi Weidong¹ Lu Weigang¹ Li Zhentong² Li Wei¹

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Taizhou Jiadi Pump Industry Co., Ltd., Taizhou 317500, China)

Abstract

The forecast and balance of axial force is the key and difficult aspect in the design of multistage pump. 150QJ20 type deep-well centrifugal pump was chosen as an example; the whole flow field of two-stage deep-well centrifugal pump was simulated in Fluent by the standard $k-\varepsilon$ turbulence model, SIMPLEC algorithm and second-order upwind scheme. The pump efficiency, single-stage head and single-stage axial force at different operating points were obtained by numerical simulations. The external performance and axial force of the prototype pump were tested by the experiments. The difference between numerical results and the experimental result were compared and analyzed. The results indicated that the numerical methods could accurately forecast the pump performance and axial force.

Key words Deep-well centrifugal pump, Axial force, Numerical simulation, Experiment

引言

轴向力是泵设计、运行中必须考虑的重要因素。尤其是节段式多级泵和高扬程深井离心泵运行过程中产生的轴向力较大,直接影响泵的安全、可靠运行。因此,在设计过程中如何准确地预测、计算轴向力的大小,并设法平衡过大的轴向力显得尤为重要。

泵内部轴向力的计算和平衡方法一直是相关学者的研究重点^[1~10]。总的来说,在泵设计和优化的过程中,准确地预测轴向力可以为探索轴向力平衡方法提供有力的参考。

近些年来,随着计算机技术的发展,CFD 的应用越来越广泛。运用 CFD 方法对泵内部流场进行数值模拟,可以在其流动范围内给出流场参数的定

收稿日期: 2011-09-06 修回日期: 2011-10-20
* 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011505)、江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ-0566)、浙江省重大科技专项重大工业项目(2010C01032)和江苏高校优势学科建设工程资助项目
作者简介: 周岭, 博士生, 主要从事多级泵内部非定常流动和优化设计研究, E-mail: zhouling6617@163.com
通讯作者: 施卫东, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

量计算结果,为分析各种流动参数和流场的集合构造对流动规律的影响提供了方便。本文选用一典型的深井离心泵,通过数值模拟和样机试验的方法,对数值模拟预测泵性能、轴向力的可行性和准确度进行对比分析。

1 几何模型与数值模拟

1.1 几何模型

研究对象选用 150QJ20 型深井离心泵,其基本设计参数如下:流量 $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程 $H = 13 \text{ m}$ (共 5 级)、转速 $n = 2\,850 \text{ r/min}$ 、比转数 $n_s = 113$ 。

叶轮的轴面图和实体模型如图 1 所示,为便于出流,叶轮后盖板进行了适当的斜切。导叶为进口边扭曲的三维曲面反导叶,其轴面图和实体模型如图 2 所示。

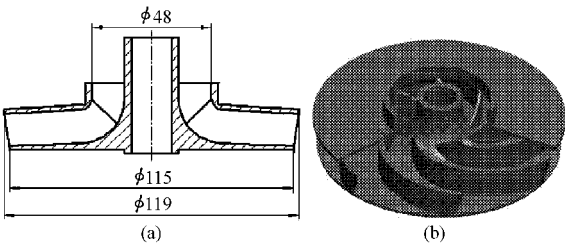


图 1 叶轮
Fig. 1 Impeller
(a) 轴面图 (b) 实体模型

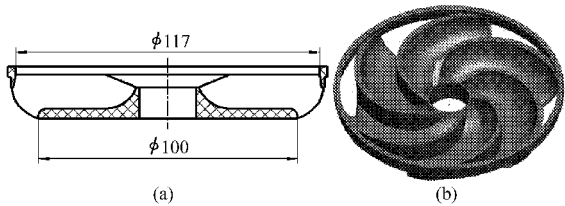


图 2 导叶
Fig. 2 Guide vane
(a) 轴面图 (b) 实体模型

1.2 计算区域

深井离心泵是多级泵的一种,如果计算区域中考虑所有级数,将产生大量的计算网格并耗费较多的计算时间。文献[11~12]对不同级数的深井离心泵进行了数值模拟,结果表明两级深井离心泵的数值模拟可以较为准确地预测整泵的性能。因此选用两级深井离心泵全流场作为计算区域,在 Pro/E 中分别对进口段、密封间隙、叶轮、叶轮腔体、导叶、导叶腔体和出口段等 7 部分进行三维实体造型,并完成装配,其装配关系如图 3 所示。

1.3 数值模拟

计算区域的网格划分是在 Gambit 中完成的,其中进口段、密封间隙、出口段等较为规则的实体采用结构化网格划分,其余部分采用非结构网格,计算区

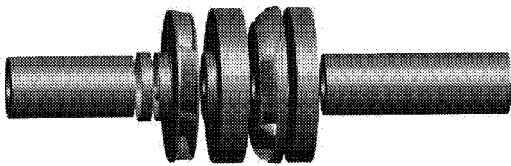


图 3 计算区域
Fig. 3 Calculation domain

域全部网格数量约为 163 万。由于口环间隙长径比较大,因此在对密封间隙划分网格时,先对间隙上的小面进行面网格的划分,然后以此面为网格源,沿轴向进行体网格的结构化网格划分。

边界条件设置如下:首级叶轮进口为无旋流动,设为速度进口,其速度值根据工作流量进行计算;对出口段进行了适当延伸,出口流动假设为充分发展状态,设为出流(outflow)形式;固壁面无滑移,近壁面的湍流流动采用标准壁面函数处理。

选用多重参考坐标系模型(MRF)来进行定常不可压流场的计算,叶轮部分设置为旋转参考坐标系,转速设置为 $2\,850 \text{ r/min}$,其余部分设置为静止。应用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLEC 算法,采用二阶迎风格式离散差分方程,在 Fluent 6.2 中进行数值模拟计算。代数方程迭代计算采取亚松弛,设定收敛精度为 10^{-5} 。

2 轴向力的计算

传统的轴向力公式只计算叶轮外表面的轴向力而不计算叶轮内表面的轴向力,把叶轮内部的轴向力视为内力,并认为内力的合力为零,这在理论上是对的,但在理解、分析上有困难。相比之下,将叶轮内、外表面上全部受力的轴向分量总和作为叶轮受到的轴向力,在理解和分析上更容易一些。因此,在本文的叶轮轴向力数值模拟中,将叶轮的内、外表面划分为以下几部分进行计算分析^[13]:

- (1) 叶轮前盖板外表面所受轴向力 F_1 (不含叶轮进口口环)。
- (2) 叶轮后盖板外表面所受轴向力 F_2 (含叶轮轮毂)。
- (3) 叶轮进口口环外径到内径这一环形区域所受轴向力 F_3 。
- (4) 叶轮流道内,前后盖板表面所受轴向力 F_4 (含叶轮轮毂)。
- (5) 叶轮流道内,叶片表面所受的轴向力 F_5 。
- (6) 叶片出口边斜切部分所受轴向力 F_6 。

叶轮所受的轴向力为上述各项分力的矢量和,即

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \boldsymbol{F}_3 + \boldsymbol{F}_4 + \boldsymbol{F}_5 + \boldsymbol{F}_6 \quad (1)$$

利用 Fluent 的 Force Report 工具,设定力的方

向为沿轴向方向,就可以得出叶轮各部分的轴向力。

图4所示是叶轮轴向力各个分量的示意图, F_1 、 F_3 、 F_2 为传统分类中的盖板力,是轴向力的主要组成部分。 F_3 端面密封作用的

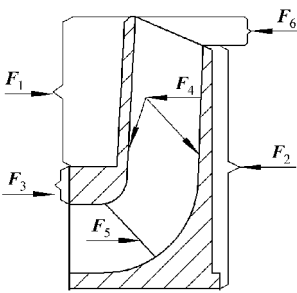


图4 轴向力分量示意图
Fig.4 Axial force components

的进口到出口,液体在叶轮内的流动受到叶片影响,叶轮流道内表面各点的压力是不相等的,即使在叶轮流道内的同一直径上,从前盖板到后盖板静压力也是变化的,这种压力差就产生了轴向力 F_4 。叶片工作面的压力大于背面的压力,它们的压力差的轴向分量又构成了轴向力的一部分(即 F_5),这部分力主要是在扭曲叶片上产生,圆柱形叶片无此分量,但因为叶片的进口边是斜面,所以也能够产生微小轴向力。本文中所研究的叶轮出口边斜切,出口边上的静压力也有轴向分力,因此产生了轴向力 F_6 。

在轴向力计算和读取的过程中,尽可能考虑了作用在叶轮上的全部轴向力。图5为数值模拟得到的前、后盖板外表面上相同轴向位置上的静压分布。前、后盖板上的静压都随着轴向位置的增加而增大,但增大的趋势不同;同时前、后盖板的面积也不同,导致前、后盖板存在较大的压力差,从而构成了轴向力的主要部分。

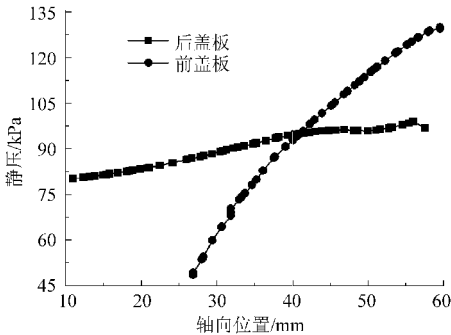


图5 前、后盖板上的静压分布

Fig.5 Pressure distributions on the front shroud and rear shroud

3 样机试验

为了深入分析150QJ20型深井离心泵的外特性和轴向力,对其进行了样机加工和性能试验。叶轮为圆柱形叶片,采用铸造方法加工。导叶的流道为三维曲面,为保证加工精度,采用注塑工艺加工。叶轮与导叶的实物模型如图6所示。

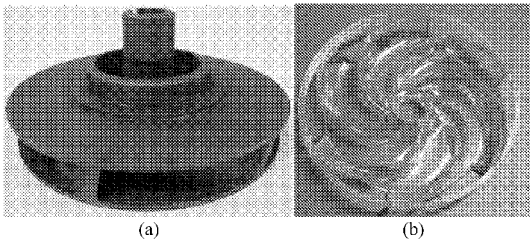


图6 实体模型
Fig.6 Solid model
(a) 叶轮 (b) 导叶

泵性能试验在机械工业排灌机械产品质量监督检测中心(镇江)的试验台上进行。该开式水泵试验台已通过了水利部、机械部的联合鉴定,达到国家1级精度和国际A级精度(草案)的要求。对模型泵进行改装,取下电动机座,将其安装到轴向力测试装置的底座上,电动机下端由传感器支撑,外接TS-5A型智能轴向力测试仪,轴向力试验装置如图7所示。

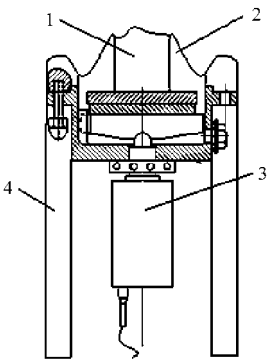


图7 轴向力测试装置
Fig.7 Axial force test device

1. 泵轴 2. 电动机 3. 传感器 4. 支架

试验台装置示意图如

图8所示,泵出口压力由压力传感器采集,流量由涡轮流量计测量,电动机转速、轴向力等参数一并进行了采集。在进行试验时,首先启动泵装置,运行一段时间后调至小流量停止运行,将轴向力测试仪上的数值清零,从而使所有转子的重量都落在电动机轴上,保证所测数值为叶轮旋转时所受轴向力。再次启动泵装置,以零流量为第1个数据记录点,调节阀门的开度至各个流量点,并记录对应的数值。

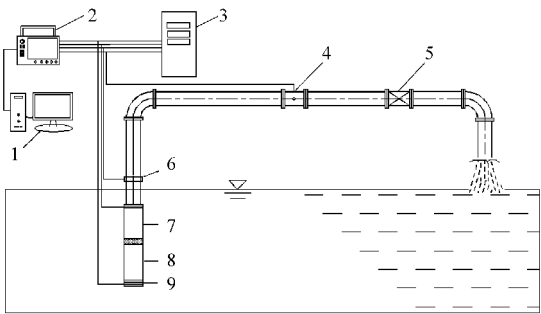


图8 试验装置
Fig.8 Test rig

1. 计算机 2. 数据采集仪 3. 配电柜 4. 涡轮流量计 5. 调节阀 6. 压力传感器 7. 泵体 8. 电动机 9. 轴向力测试装置

4 结果与分析

通过数值模拟,得到了不同流量下的泵效率、单

级扬程、单级轴向力等参数,并与试验结果进行了对比,如图 9 所示。从图中可以看出,数值模拟结果与试验结果的整体变化趋势基本一致,尤其是在工作流量区间(0.8~1.2 倍额定工况),数值模拟预测值与试验值吻合较好。数值模拟预测的泵效率在各个工况下均高于试验值,在大流量时误差较大。单级扬程的预测值在小流量下低于试验值,在其他工况

下均高于试验值。轴向力的预测值在小流量时较试验值偏小,在大流量时较试验值偏大,但是在额定流量附近预测较为准确,这表明数值模拟可以在泵设计和优化的过程中提供较为可靠的轴向力参考值。具体而言,在额定流量,泵效率的预测值约高于试验值 5.2%,单级扬程的预测值高于试验值 4.6%,单级轴向力的预测值约高于试验值 6.7%。

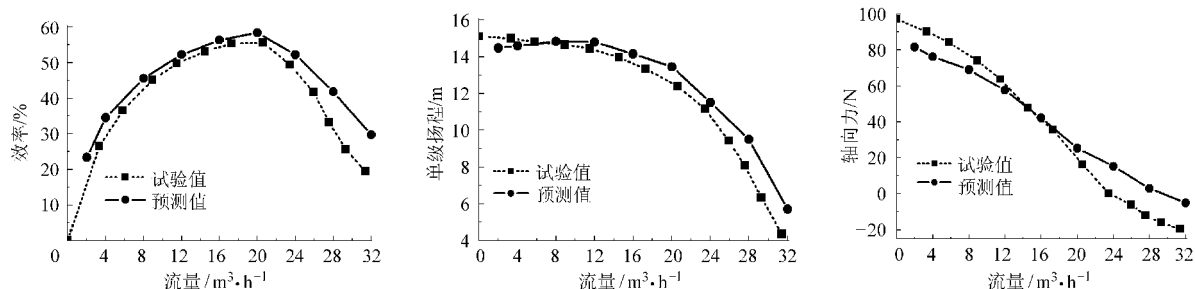


图 9 数值模拟结果与试验结果的对比

Fig. 9 Comparison of numerical results and test results

如图 9 所示,轴向力随着流量的增大而减小。由性能曲线可知,在小流量时扬程较大,前、后盖板上和叶轮内部的静压较大,作用在前、后盖板上的轴向力也会随之增大。在轴向力的组成中,前、后盖板上的压力差占很大部分,因此,在小流量时轴向力较大。在大流量时,流道流速加大,虽然此时动反力会加大,但是由动反力所引起的轴向力只是总的轴向力中的一小部分,对总的轴向力没有太大影响。因此,在工程应用中,应尽量避免深井离心泵在小流量下长时间运行。

5 结论

(1) 数值模拟可以较为准确地预测深井离心泵

的性能及轴向力,在工作流量区间可以提供较为可靠的参考数据,但数值模拟预测值在偏离泵的工作流量区间时误差相对较大。

(2) 在进行轴向力测量时,应在试运行一段时间后再将数值归零,从而使所有转子的重量都落在电动机轴上,保证所测数值为叶轮旋转时所受轴向力的大小。

(3) 前、后盖板上的轴向力分量是叶轮轴向力的主要组成部分,减小后盖板直径可以有效地平衡部分轴向力。

(4) 深井离心泵的轴向力随流量的增加逐渐减小,在实际应用中应尽量避免泵长时间在小流量下运行。

参 考 文 献

- George S, Eric O. Experimental evaluation of axial thrust in pumps [J]. World Pumps, 1999, 393:34~37.
- Kazakov Y A, Pelinskii A A. Experimental investigation of the axial force in a submersible electric well pump [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1970, 6(3): 262~263.
- Gantar M, Florjancic D, Sirok B. Hydraulic axial thrust in multistage pumps-origins and solutions [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 336~341.
- 孔繁余, 刘建瑞, 施卫东, 等. 高速磁力泵轴向力平衡计算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 69~72.
Kong Fanyu, Liu Jianrui, Shi Weidong, et al. Calculation of axial force balance for high-speed magnetic drive pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7): 69~72. (in Chinese)
- 孔繁余, 高翠兰, 张旭峰, 等. PBN65-40-25 型屏蔽泵轴向力平衡计算及其试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 68~72.
Kong Fanyu, Gao Cuilan, Zhang Xufeng, et al. Computation and experiment for axial force balance of canned motor pump PBN65-40-25[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 68~72. (in Chinese)
- 陆伟刚, 张金凤, 袁寿其. 离心泵叶轮轴向力自动平衡新方法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(17): 2 037~2 040.
Lu Weigang, Zhang Jinfeng, Yuan Shouqi. A new method to axial thrust self-balance for centrifugal pump impeller [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(17): 2 037~2 040. (in Chinese)

- Feng Lihui, Liu Boping, Zhang Guowen, et al. Near infrared spectroscopic determination of sesame oil adulterated with rapeseed oil [J]. Food Science, 2009,30(18):296~299. (in Chinese)
- 7 邹小波,赵杰文,夏蓉,等. 果糖度近红外光谱小波去噪和 iPLS 建模[J]. 农业机械学报,2006,37(6):79~82.
Zou Xiaobo, Zhao Jiewen, Xia Rong, et al. Near infrared determination of sugar content in apples based in multi-resolution decomposition and interval partial least square (iPLS) method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(6):79~82. (in Chinese)
- 8 张淑娟,张海红,赵艳茹,等. 鲜枣可溶性固形物可见/近红外光谱检测建模方法比较[J]. 农业机械学报,2012,43(3):108~112.
Zhang Shujuan, Zhang Haihong, Zhao Yanru, et al. Comparison of modeling methods of fresh jujube soluble solids measurement by NIR spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(3):108~112. (in Chinese)
- 9 吴静珠,徐云. 基于 CARS-PLS 的食用油脂脂肪酸近红外定量分析模型优化[J]. 农业机械学报,2011,42(10):162~166.
Wu Jingzhu, Xu Yun. NIR quantitative model optimization of fatty acid in edible oil based on CARS-PLS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):162~166. (in Chinese)
- 10 吴瑞梅,岳鹏翔,赵杰文,等. 特征变量筛选在近红外光谱测定绿茶汤中茶多酚的应用[J]. 农业机械学报,2011,42(12):154~157,163.
Wu Ruimei, Yue Pengxiang, Zhao Jiewen, et al. Application of characteristic variables selection in determination of polyphenols content in green tea infusion by near infrared spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):154~157,163. (in Chinese)
- 11 于修烛,杜双奎,李志西,等. 基于傅里叶红外光谱重组技术的食用油检测改进研究[J]. 农业机械学报,2009,40(10):129~134.
Yu Xiuzhu, Du Shuangui, Li Zhixi, et al. Improved application of FTIR spectral reconstitution technique in edible oils analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):129~134. (in Chinese)

(上接第 103 页)

- 7 施卫东,李启峰,陆伟刚,等. 基于 CFD 的离心泵轴向力计算与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):60~63.
Shi Weidong, Li Qifeng, Lu Weigang, et al. Estimation and experiment of axial thrust in centrifugal pump based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):60~63. (in Chinese)
- 8 马旭丹,吴大转,王乐勤. 多级离心泵轴向力平衡装置的设计与分析[J]. 农业工程学报,2010,26(8):108~112.
Ma Xudan, Wu Dazhuan, Wang Leqin. Design and analysis of an axial thrust balancing device for multistage centrifugal pumps [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(8):108~112. (in Chinese)
- 9 牟介刚,李思,郑水华,等. 多级离心泵叶轮级间泄漏对轴向力的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(7):40~44.
Mou Jiegang, Li Si, Zheng Shuihua, et al. Influence of interstage leakage on the axial force of the multistage centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):40~44. (in Chinese)
- 10 张启华,施卫东,陆伟刚,等. 新型深井离心泵轴向力的数值计算及平衡分析[J]. 排灌机械,2007,25(6):7~10.
Zhang Qihua, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical calculation of axial force and balancing on new type deep well pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007,25(6):7~10. (in Chinese)
- 11 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(3):69~73.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):69~73. (in Chinese)
- 12 Lu Weigang, Zhou Ling, Zhang Desheng, et al. Unsteady flow numerical analysis of new-type deep well pump under multi-conditions [C] // Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting (FEDSM2010), 2010, 1: 647~652.
- 13 袁寿其,李红,施卫东,等. 新型喷灌装备设计理论与技术[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- 14 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 井用潜水泵导叶的正交试验与优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):312~315.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Orthogonal test and optimization design of submersible pump guide vanes [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(4):312~315. (in Chinese)
- 15 王洪亮,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵的水力设计和二次回归正交试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(6):479~483.
Wang Hongliang, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Hydraulic design and quadratic regression orthogonal experiment of deep well centrifugal pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(6):479~483. (in Chinese)