# 深井离心泵数值模拟与试验\*

周 岭 施卫东 陆伟刚 张 丽 王 川 (江苏大学流体机械工程技术研究中心,镇江 212013)

【摘要】 以150QJ20 型深井泵为例,利用 CFD 软件 Fluent 快速准确地预测深井离心泵的性能,分别用不同网格数、不同残差收敛精度、不同湍流模型、不同流场计算方法进行了数值模拟,分析了不同设置方法对数值模拟结果的影响;对不同级数深井离心泵模型的数值模拟结果进行了讨论。在此基础上,选择出适合深井离心泵的数值模拟设置方法。将数值模拟结果与试验结果对比,分析了两者的差异,表明了利用 Fluent 软件预测深井离心泵性能的可行性。

关键词: 深井离心泵 数值模拟 试验 中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0069-05

# Numerical Simulation and Experiment on Deep-well Centrifugal Pump

Zhou Ling Shi Weidong Lu Weigang Zhang Li Wang Chuan (Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

#### Abstract

In order to predict the performance of deep-well centrifugal pump quickly and accurately by the commercial CFD software Fluent, 150QJ20 type deep-well centrifugal pump was taken as an experimental object to research the key set methods on the Fluent simulation. The numerical simulation was carried out at different grid numbers, different residual convergence precisions, different turbulence models, and different flow calculation methods to analyze the impact on simulation results. And different stages of the deep-well centrifugal pump model simulations were analyzed and discussed. The best set methods of numerical simulation for deep-well centrifugal pump were selected. The differences between numerical simulation and experimental results were compared and analyzed. This work is real significance in understanding the accuracy for deep-well centrifugal pump, and it confirmed the feasibility of predict the performance of deep-well centrifugal pump by using Fluent.

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

# 引言

泵是除电动机以外应用最为广泛的通用机械, 所消耗的电量约占全国总发电量的20%<sup>[1-2]</sup>。将 传统的水力设计与 CFD 技术相融合以进一步提高 深井泵性能,已成为日趋重要的研究课题之一<sup>[3]</sup>。

Shukla S<sup>[4]</sup>采用传统商用 CFD 软件对离心泵内 部流动状态进行检验,其设计工况点的效率和扬程 计算结果和试验结果相差在 3% 以内。Rikke K<sup>[5]</sup> 采用大涡模拟对一台六叶片闭式离心机叶轮内部流 动进行了分析,采用 Fine/Turbo 求解器分析了设计 工况点和非设计工况下叶轮内的流动,并用 PIV 测 量结果验证数值模拟的可靠性。Deigosha O C 等<sup>[6]</sup> 利用 NUMECA 软件对汽蚀状态的弯曲叶片离心泵 叶轮进行了试验和数值模拟,数值模拟的结果和试 验非常吻合。钱健等<sup>[7]</sup>利用 CFX 软件基于标准的

收稿日期: 2010-05-17 修回日期: 2010-07-05

<sup>\*</sup> 国家科技人员服务企业行动项目(2009GJC30002)、"十一五"国家科技支撑计划资助项目(2008BAF34B15)和江苏省高等学校优秀 科技创新团队计划项目(苏教科(2009)10号)

作者简介:周岭,博士生,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: zhouling@163.com

通讯作者:施卫东,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: wdshi@ ujs. edu. cn

k- ε湍流模型对离心泵叶轮内部进行了三维数值模 拟。

综上所述,运用 CFD 方法对离心泵进行数值模 拟,可以在其流动范围内给出流场参数的定量计算 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。但是,总体上说数值模 拟的精度在多数工况下还难以达到工程应用的精 度。为此,选择合适的数值模拟设置条件就显得尤 为重要。

本文针对某一典型深井离心泵模型,基于 Fluent 6.2软件,采用标准  $k - \varepsilon$ 模型、SIMPLEC 算 法、二阶迎风格式离散差分方程进行网格无关性分 析。选择合适的网格数,对不同的湍流模型、不同的 流场计算方法下的数值模拟结果进行对比。

# 1 水力模型及计算网格

# 1.1 水力模型

选用 150QJ20 型深井离心泵,其基本设计参数: Q = 20 m<sup>3</sup>/h、单级扬程 H = 11 m(共6级)、转速 n = 2 850 r/min、比转数 n<sub>s</sub> = 128。叶轮设计采用陆伟 刚<sup>[8]</sup>提出的极大扬程设计法。为把深井离心泵的 单级扬程提高到最大,取叶轮前盖板直径略小于泵 体内壁直径,且叶轮出口斜切。导流壳水力设计采 用导叶进口边扭曲的反导叶设计法,工作面分3条 流线计算,最后拟合成光滑的空间曲面。通过 Pro/ E 建模,得到的叶轮和导叶模型分别如图1 和图 2 所示。

## 1.2 计算区域

深井离心泵相对单级泵而言结构较复杂,若按照150QJ20型深井离心泵6级模型来进行数值模拟,会花费较多的时间和精力。本文探索以两级全流场数值模拟为研究手段,计算区域由进口段、两级叶轮、两级导叶及出口段组成,其装配关系的三维模型如图3所示。



Fig. 1 Impeller

# 1.3 计算网格

网格是 CFD 模型的几何表达形式,也是模拟和 分析的载体。本文的网格生成在前处理软件 GAMBIT 2.2 中完成,GAMBIT 被认为是最优秀的商





1. 进口段 2. 叶轮 3. 导叶 4. 出口段

用 CFD 软件前置处理器之一<sup>[9]</sup>。在全流域内采用 非结构化四面体网格划分,这种网格虽然生成过程 比较复杂,但却有着极好的适应性,尤其对具有复杂 边界的流场计算问题特别有效。利用分区域网格生 成方法,区域间采用交界面技术进行连接。其计算 区域的网格如图 4 所示。



图 4 计算网格模型 Fig. 4 Calculation mesh

# 2 数值模拟方法

## 2.1 网格无关性分析

在对指定问题进行湍流计算之前,首先要将计 算区域离散化,即在空间坐标和时间坐标上将连续 的计算区域剖分成许多个网格单元。理论上讲,随 着模型的网格数的增加,由网格引起的求解误差会 逐渐缩小,直至消失。但考虑到计算机的配置及计 算时间,网格数也不能过多。针对上述的水力模型, 本文选择了5种不同的网格数量进行了数值模拟, 其结果如表1所示。

从表1可以看出,在网格尺寸小于1.6、即网格数大于120万以后,随着网格数的增加,数值模拟的结果显示的扬程和效率波动非常小,呈现较为稳定的状态,计算结果对网格的相关性很小,因此综合计

算机的配置,选用网格尺寸 1.6 来进行网格划分并 进行后续相关研究。

表 1 网格无关性分析 Tab. 1 Grid independence analysis

<i>会 料</i>	网格尺寸						
参奴	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0		
网格数	264 882 5	174 650 4	121 952 7	913 611	676 528		
效率 η/%	67.3269	67. 326 4	67.3123	66. 257 2	66. 272 7		
单级扬程 H/m	11.996	11.989	11.941	11.939	11.721		

#### 2.2 收敛精度的选择

对于稳态问题的解,往往要通过多次迭代才能 得到。解的收敛性可能会受到大量的计算单元、过 于保守的亚松弛因子和复杂的流动物理性质等很多 因素影响。因此,在迭代过程中,要对解的收敛性随 时进行监视,并在系统达到指定精度后,结束迭代过 程。

针对 150QJ20 型深井离心泵,分别选择了 3 个 递增的收敛精度 10<sup>-3</sup>、10<sup>-4</sup>、10<sup>-5</sup>,进行了数值模拟, 其结果如表 2 所示。随着求解残差收敛精度的提 高,迭代的次数递增,但在收敛精度为 10<sup>-4</sup>、迭代次 数 1 600 步之后,数值模拟得到的效率、扬程趋于稳 定,且残差收敛趋势缓慢。考虑到收敛精度和计算 时间的平衡,本文选取残差收敛精度为 10<sup>-4</sup>。

## 2.3 湍流模型的选择

湍流流动是一种高度非线性的复杂流动,但人

表 2 不同求解收敛精度下的数值模拟结果 Tab.2 Numerical simulation results at different

residual convergence precisions

4) M/r	收敛精度				
<i>参</i> 奴	10 - 3	10 -4	10 - 5		
迭代次数	874	1 631	2 907		
效率 η/%	66.73	67.31	67.19		
单级扬程 H/m	11.92	11.94	11.94		

们已经能够选择不同湍流模型对不同的湍流进行模拟,取得与实际比较吻合的结果。Fluent 提供了许 多湍流模型,但没有一个湍流模型对于所有的问题 是通用的。对于不同的问题,选择模型时主要考虑 以下几点:流体是否可压、建立特殊的可行的问题、 精度的要求、计算机的能力、时间的限制等。针对 150QJ20型深井离心泵,分别采用标准  $k - \varepsilon$ 、RNG  $k - \varepsilon$ 和 Realizable  $k - \varepsilon$ 模型、标准  $k - \omega$ 和 SST  $k - \omega$ 模型进行数值模拟对比分析。除去湍流模型不同以 外,在其他设置均相同的情况下,将得到的结果与试 验结果进行了对比。

如表 3 所示,利用 Fluent 软件提供的 5 种湍流 模型进行数值模拟得到的效率和单级扬程均高于试 验结果,标准  $k - \varepsilon$ 模型得到的结果与试验结果最为 接近,而标准  $k - \omega$ 和 SST  $k - \omega$ 模型与试验结果偏 差较大,这两种模型较适用于强旋流或带有弯曲壁面 的流动。为此,选用标准  $k - \varepsilon$ 湍流模型进行研究。

表 3 不同湍流模型下的数值模拟结果 Tab.3 Numerical simulation results at different turbulence models

<del>会 数</del>		计办社用				
参数	标准 k - ε	RNG $k - \varepsilon$	Realizable $k - \varepsilon$	标准 $k - \omega$	SST $k - \omega$	国
效率 η/%	67. 312 3	69. 503 3	68. 335 9	68.6511	69.4324	66. 59
单级扬程 H/m	11.941	12.298	12.109	12.170	12.331	10.90

#### 2.4 流场计算方法的选择

流场计算的基本过程是在空间上将计算区域离 散成多个小的体积单元,在每个体积单元上对离散 后的控制方程组进行求解。目前工程上应用最为广 泛的流场计算方法是 SIMPLE 算法,它属于压力修 正算法的一种。Fluent 提供了多种流场计算方法, 本文分别采用 SIMPLE、SIMPLEC 和 PISO 算法,比 较 150QJ20 型深井离心泵模型在额定流量下的效率 和单级扬程,结果如表 4 所示。

由表4可知,采用SIMPLE、SIMPLEC和PISO 算法所求得泵效率、扬程基本相同。其中采用 SIMPLEC容易收敛,计算时间较短。采用PISO算 法进行数值模拟时迭代速度较慢,耗时较长。这也 印证了 Fluent 用户手册<sup>[10]</sup>中指出的,对于稳态问题,选用 SIMPLE 或 SIMPLEC 更为合适,PISO 算法 较适用于对瞬态问题进行求解。因此,本文采用 SIMPLEC 算法进行数值模拟。

表 4	不同流场计算方法下的数值模拟结果
Tab. 4	Numerical simulation results and different

flow calculation methods

	算法					
<i>参</i> 奴	SIMPLE	SIMPLEC	PISO			
效率 η/%	67.19	67.31	67.43			
单级扬程 H/m	11.95	11.94	11.96			

### 2.5 数值模拟级数的选择

深井离心泵系多级潜水电动离心泵,与单级离

m

心泵相比,形式较为复杂,其流动特点也与单级离心 泵有所不同。多级泵的首级叶轮进口为无旋流动, 但其后的各级叶轮进口均为有旋流动。为此,多级 泵的数值模拟中,选择合适的级数就显得尤为重要。 对于 150QJ20 型深井离心泵 6 级模型,选择不同的 级数进行了数值模拟,其各级的效率和扬程分别如 表 5 、表 6 所示。

表 5 不同级数数值模拟的效率对比 Tab. 5 Efficiency comparison of the different stages

					%
/at #4			级数 n		
级数 11	1	2	3	4	5
1	69.89	69.46	69.39	69.39	69.41
2		67.38	67.41	67.41	67.42
3			67.31	67.18	67.19
4				67.44	67.31
5					67.46
总效率	67.87	67.31	67.39	67.67	67.78

从表 5、表 6 中可以看出,不同级数模型的首 级效率、扬程相差不大。当级数 n≥2 后,随着级 数的增加,模型的效率、单级扬程波动较小,第二 级的效率、扬程与其后各级的效率、扬程基本一 致。这也与多级泵的首级叶轮进口为无旋流动, 但其后的各级叶轮进口均为有旋流动的事实相吻 合。考虑到级数增加带来的网格总数递增,综合 计算机性能及计算时长,选取两级全流场模型来 进行研究。

表 6 不同级数数值模拟的扬程对比 Tab.6 Head comparison of the different stages

471 ×hr			级数n		
奴奴 11	1	2	3	4	5
1	13.16	12.91	12.92	12.92	12.92
2		11.37	11.29	11.29	11.29
3			11.27	11.24	11.24
4				11.31	11.27
5					11.30
平均单级扬程	12.44	11.94	11.71	11.64	11.60

# 3 试验研究

为了进一步分析数值模拟的准确性,将 150QJ20型深离心井泵6级模型采用精密铸造加工 制造,试验结果如表7所示。同时也采用上文经过 分析讨论后选择的网格尺寸1.6、网格数122万,标 准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,SIMPLEC算法对两级深井泵全 流场模型进行了0.4~1.6倍额定工况下的数值模 拟,得到的结果如表8所示。

表7 试验结果 Tab.7 Test results

	流量 <i>Q</i> /m <sup>3</sup> ⋅ h <sup>-1</sup>						
参奴	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00	28.00	32.00
效率 η/%	47.33	58.21	64.74	66. 59	63.98	49.92	30.11
单级扬程 H/m	14.06	13.27	12.48	10. 90	8.79	5.75	2.94

表 8 数值模拟结果 Tab.8 Numerical simulation results

	流量 Q/m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>						
参数	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00	28.00	32.00
效率 η/%	50. 23	59.76	65.23	67.31	64.23	54.07	34.03
单级扬程 H/m	14.26	13.97	13.20	11.94	9.80	7.13	3.84

图 5、图 6 分别显示了试验得到的泵效率及单 级扬程与数值模拟结果的比较,从图中可以看到,数 值模拟结果得到的单级扬程高于试验值 5% 左右, 效率高于试验值 3% 左右。究其原因,可能是本文 的数值模拟中假定叶轮进口密封端面轴向间隙完全 密封,没有考虑端面密封环处的泄漏带来的容积损 失。但两种方法得到的结果随流量变化的趋势基本 吻合,尤其是在泵工作流量区间内(0.8~1.2 倍额 定流量),数值模拟得到的效率与试验值的偏差为 1%左右。这也表明了利用数值模拟的方法来预测 深井泵性能的可行性。

## 4 结束语

针对 150QJ20 型深井离心泵模型,基于 Fluent 6.2 软件,对深井离心泵数值模拟中的参数设定、湍 流模型及算法选择进行了分析和研究。在网格尺寸





小于 1.6、即网格数大于 120 万以后,数值模拟结果 呈现对于网格数增加的无关性;在收敛精度为  $10^{-4}$ 、迭代次数 1 600 步之后,数值模拟得到的效 率、扬程趋于稳定;采用标准  $k - \varepsilon$ 模型、SIMPLEC 算法,具有较快的收敛速度,且数值模拟结果与试验 值最为接近;数值模拟得到的额定流量下效率、扬程 的预测值在两级全流场模拟下已经趋于稳定,自两 级后的效率、扬程变化极小。综合多方面因素,最终 确定深井离心泵的数值模拟方法为:网格尺寸 1.6、 网格数 120 万左右;设置残差收敛精度为 10<sup>-4</sup>;采 用标准  $k - \varepsilon$ 模型、SIMPLEC 算法;两级全流场模 型。将样机试验结果与多工况下的最终数值模拟结 果对比发现,数值模拟得到的效率、扬程随流量变化 的趋势基本上与样机试验结果相吻合。

参考文献

- 施卫东,袁寿其,李世英,等. 泵行业存在的主要问题及急需解决的关键技术[J]. 排灌机械,2001,19(6):7~9.
  Shi Weidong, Yuan Shouqi, Li Shiying, et al. Main existing problem and key technology to be solved of pump industry in China [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(6):7~9. (in Chinese)
- 2 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)
- 3 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2001.
- 4 Shukla S, Kshirsagar J. Numerical experiments on a centrifugal pump [C] // ASME Conference Proceedings, FEDSM2002, 2002: 709 ~ 720.
- 5 Rikke K, Christian P B, Nieholas. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions-part II: large eddy simulations [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1):73 ~ 83.
- 6 Deigosha O C, Patella R E, Reboud J L, et al. Experimental and numerical studies in a centrifugal pump with twodimensional curved blades in cavitating condition [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(6): 970 ~ 978.
- 7 钱健,刘超,汤方平,等.离心泵叶轮内部三维紊流数值模拟与验证[J].农业机械学报,2005,36(1):32~34. Qi Jian, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Numerical simulation and verification of the 3D turbulent flow in centrifugal pump impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 32~34. (in Chinese)
- 8 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 for deep well pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24 (5):1~7. (in Chinese)
- 9 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- 10 Fluent Inc. . Fluent user's guide [M]. Fluent Inc. , 2003.
- 11 王洪亮,施卫东,陆伟刚,等. 基于正交试验的深井泵优化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(5):56~63.
  Wang Hongliang, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Optimization design of deep well pump based on Latin square test[J].
  Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):56~63. (in Chinese)