

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.06.005

## 新型自吸离心泵数值模拟及试验研究

马 栋 棋

(福建省机械科学研究院, 福建 福州 350005)

**摘要:** 应用计算流体动力学软件 Fluent 对带导流器的射流式自吸离心泵内部流场进行了定常数值模拟, 对泵内部流场的速度矢量、静压、总压分布及流动规律进行分析, 预测了泵的效率, 并与试验结果比较。数值模拟结果表明: 带导流器的射流式自吸离心泵的内部流场速度矢量分布趋于平稳, 新型导流器的两个出口压力分布均匀, 各流道内的压力近似对称分布, 泵在设计点数值模拟计算扬程比试验扬程提高 6.9%, 数值模拟计算效率比试验效率提高 0.5%, 数值模拟预测的性能曲线与试验性能曲线趋势一致。试验结果表明: 带导流器的射流式自吸离心泵的性能曲线稳定、平坦, 高效率区范围宽, 各项技术指标满足设计要求, 该泵的效率比国外同类型相同参数泵的效率提高了 16.34%, 同时泵体采用铝合金压铸, 大幅度减轻了泵的重量, 降低了泵的成本, 设计合理, 结构新颖, 体积小, 重量轻, 运行可靠, 操作方便。

**关键词:** 自吸离心泵; 导流器; 流场; 数值模拟; 效率

**中图分类号:** S277.9; TH134 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)06-0483-04

## Numerical simulation and experiment research on new type self-priming centrifugal pump

Ma Dongqi

(Fujian Academy of Mechanical Sciences, Fuzhou, Fujian 350005, China)

**Abstract:** Based on CFD software Fluent, the flow field of a self-priming centrifugal pump with deflector and jet nozzle was simulated numerically. The internal flow field variables such as velocity vector, static and total pressures were analyzed, and the pump efficiency was predicted. The numerical simulation showed that the velocity vector distribution in the pump is smooth, the static pressure distribution at the two outlets of the new type deflector is uniform and the pressure in each channel is close to an axisymmetric distribution. At the design point the pump head and efficiency predicted are higher than observations by 6.9% and 0.5%, respectively. The performance curve predicted is quite similar to that measured. The experimental results showed that the performance curve of the pump is flat and the pump has an expanded high efficiency zone. The entire technical specifications of the pump have met the design requirements; also the efficiency is better by 16.34% than the imported pumps with the same specifications. To reduce weight and cost the pump casing is made of die-casting aluminium alloy, causing the pump is featured with reasonable design, novel structure, small size, light weight, reliable operation and easy for use.

**Key words:** self-priming centrifugal pump; deflector; flow field; numerical simulation; efficiency

收稿日期: 2011-10-02

基金项目: 福建省工商发展资金技术创新项目(闽经贸计财[2010]691号)

作者简介: 马栋棋(1965—),男,福建莆田人,高级工程师(PQSTS@public.fz.fj.cn),主要从事流体机械及测试技术研究。

自吸离心泵是节水灌溉系统的关键设备,广泛应用于各种苗圃、菜园和草坪灌溉,也可用于城市绿化、降温除尘、建筑供水以及渔业捕捞领域。节水灌溉系统中的自吸离心泵性能的优劣、运行的可靠性及适应性对节水灌溉技术的发展有重要意义,也是发展现代农业生产的关键设备<sup>[1-2]</sup>。传统自吸离心泵结构复杂,效率低,泵体大多为铸造工艺,比较笨重<sup>[3-4]</sup>。带导流器的射流式自吸离心泵制造采用铝合金压铸工艺,铸件外观质量有明显提升,大幅度减小了泵的质量,降低了泵的成本,提高了泵的效率,其结构简单,体积小,操作方便。

文中采用计算流体动力学技术,对新型的自吸离心泵内部流场进行定常数值计算,以预测其性能、减少设计工作环节及试制成本,有效缩短新品研发周期,并为新型自吸离心泵的设计提供一定的理论依据。

## 1 计算模型与边界条件

### 1.1 泵的性能参数

50SZB35-4.0Q 新型自吸离心泵采用半开式叶轮及导流器结构,导流器前盖板与半开式叶轮叶片流线间隙为 0.5 mm。泵的性能参数分别为流量  $Q = 18 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H = 35 \text{ m}$ ,额定转速  $n = 3\ 600 \text{ r/min}$ ,比转数  $n_s = 65$ 。

### 1.2 计算区域及计算方法

图 1 为采用 Pro/E 三维造型软件对泵的全流场计算区域进行的分块建模。在建模过程中考虑到叶轮高速旋转时对泵入口速度分布有干扰作用,会导致后续数值模拟过程中过早的数值扩散,故将泵的入口段适当延伸。为保证出口处的流场状态符合预设出口条件的要求,将泵出口段进行适当延伸<sup>[5-6]</sup>。

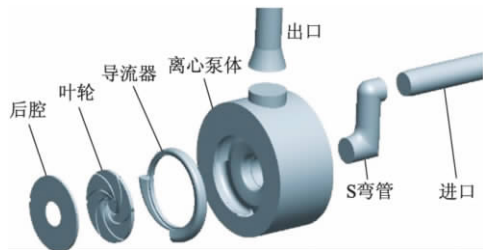


图 1 新型自吸离心泵结构全流场模型

Fig. 1 Whole flow field model of new type self-priming centrifugal pump

为了提高数值模拟的准确性,同时考虑对计算机软硬件的要求,采用非结构化网格划分模型。进口、

S 弯管、叶轮、后腔、导流器、离心泵体、出口等各过流部件网格尺寸分别采用 5.0, 2.5, 1.2, 1.8, 2.5, 4.2, 5.0 mm, 相应的网格数分别为 119 000, 138 000, 652 000, 41 000, 238 000, 332 000, 134 000, 网格总数为 1 654 000。

计算采用多重坐标系模型进行计算,使用 SIMPLE 算法实现压力和速度的耦合求解。湍流模型选取标准  $k-\varepsilon$  模型,计算精度为  $10^{-4}$ 。

采用速度进口边界条件,即在进水嘴进口处根据流量给定速度值;入口湍流取值按水力直径大小及湍流强度给定。出口边界条件设为自由出流形式。对近壁面区域非充分发展的湍流流场采用标准壁面函数进行处理,壁面采用无滑移边界条件。

### 1.3 泵外特性预测原理

在 Fluent 软件中,流场中某一点的总压定义为

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho v^2, \quad (1)$$

式中:  $p_s$ 、 $v$  分别为流场中某一点的静压和速度。

使用 Fluent 软件中面积积分的功能,求出离心泵进、出口的总压。根据伯努利方程计算出离心泵的扬程,即

$$H = \frac{p_{\text{out}}}{\rho g} - \frac{p_{\text{in}}}{\rho g} + \Delta z, \quad (2)$$

式中:  $p_{\text{in}}$  和  $p_{\text{out}}$  分别为叶轮进口、出口的总压;  $\Delta z$  为叶轮出口与叶轮进口在垂直方向上的距离。

使用 Fluent 软件中力矩报告功能,求出叶轮对旋转轴的力矩  $M'$ ,则数值计算中的叶轮输入功率为

$$P = M'\omega, \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为叶轮的角速度。

水力效率为

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H}{M'\omega}. \quad (4)$$

## 2 计算结果分析

### 2.1 泵内部流场分析

选取叶轮体前端面(相当于导流器前盖板的内壁面)为参照面,沿叶轮进口方向做水平移场,移场距离用  $Z$  表示,计算得到不同  $Z$  值时曲面上的速度矢量分布,如图 2 所示。可以看出:在  $Z = 0 \text{ mm}$  变化到  $Z = 0.5 \text{ mm}$  的过程中,叶轮体内的速度矢量分布有明显的变化,由水体壁面环形的速度分布趋于均匀的星形分布,曲面外缘的高速区明显地变小;  $Z = 0.5 \text{ mm}$  时高速区分布在叶轮出口处的局部区域。在

靠近导流器出口的区域,出现明显的低速区;在导流器前盖板与半开式叶轮叶片流线之间的速度矢量分布变化较大,而在叶轮内速度分布趋于平稳;在  $Z =$

$1.0\text{ mm}$  变化到  $Z = 6.0\text{ mm}$  的过程中,速度矢量的分布更加均匀并且趋于平稳,叶轮出口处的高速区以及导流器出口附近的低速区变化很小。

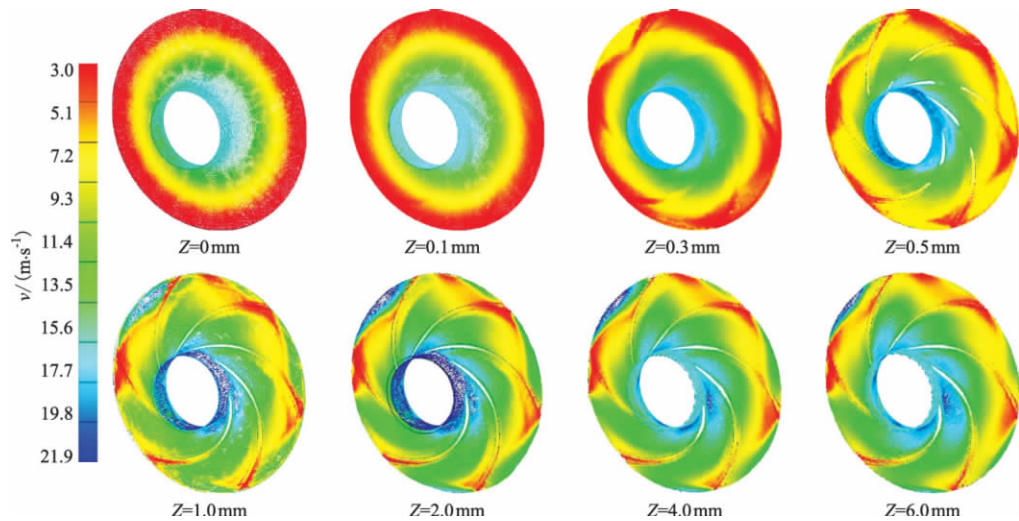


图 2 速度矢量分布

Fig. 2 Velocity vector distribution

图 3 为泵内静压分布云图,可以看出:叶轮中静压沿半径方向增大,导流器出口附近区域为高压区;导流器两个出口的结构使叶轮内的压力分布更趋于均匀,各流道内的压力近似对称分布。

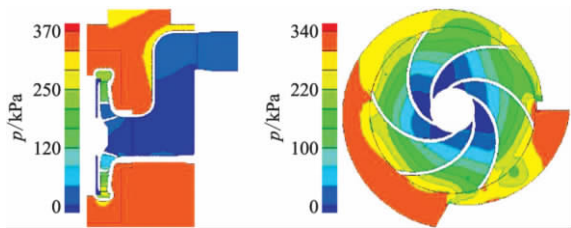


图 3 静压分布

Fig. 3 Static pressure distribution

图 4 为泵内总压分布云图。

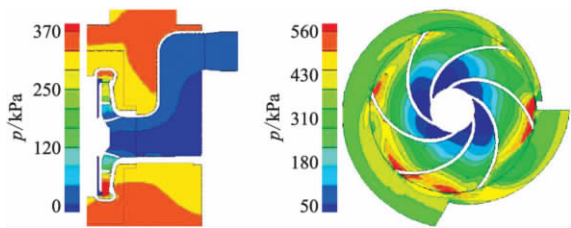


图 4 总压分布

Fig. 4 Total pressure distribution

由图 4 可以看出:在导流器及半开式叶轮中,总压从进口向出口逐渐增大,叶轮外缘在靠近导流器出口附近,总压有较大的极值区,同时总压的变化梯度也较大;流体由叶轮进口流至叶轮出口过程中总

压不断增大,在叶轮出口其总压达到极大值;在流体流入导流器过程中,动能不断转换为压力能,其中伴随着能量损失,总压出现较大的变化梯度。

2.2 泵水力模型的试验研究

新型自吸离心泵的试验按国家标准 GB/T 3216—2005《回转动力泵 水力性能验收试验 1 级和 2 级》及机械行业标准 JB/T 6664.3—93《自吸泵自吸性能试验方法》进行。

将定常计算得到的泵扬程、效率曲线与试验性能曲线进行对比,如图 5 所示。

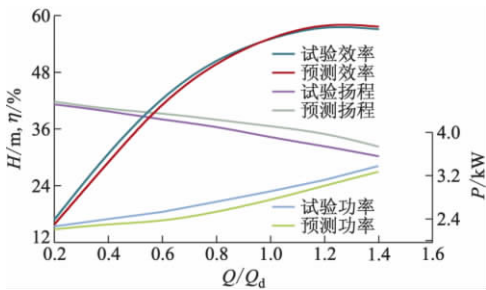


图 5 泵外特性预测与试验的对比

Fig. 5 Comparisons between prediction and experiment for pump external characteristics

由图 5 可以看出:扬程随着流量的增大而减小,效率随着流量的增大先增后减,这一规律与试验结果吻合;泵在设计工况点预测扬程为  $36.57\text{ m}$ ,试验扬程为  $34.21\text{ m}$ ,预测扬程比试验扬程高  $6.9\%$ ;预测效率为  $55.56\%$ ,试验效率为  $55.29\%$ ,预测效率



比试验效率提高 0.5% ,而在大流量工况下误差较大<sup>[7]</sup>。由于计算的造型误差、网格质量以及计算模型等因素都对结果有一定的影响,因而误差是无法避免的<sup>[8]</sup>。从整体上看,数值模拟预测的扬程、效率曲线与试验的扬程、效率曲线变化趋势基本一致,因而新型自吸离心泵的数值模拟结果是可靠的<sup>[9]</sup>。由于 50SZB35-4.0Q 新型自吸离心泵采用半开式叶轮及导流器结构,同时泵体采用铝合金压制,大幅度减轻了泵的重量,降低了泵的成本。对比同类型相同参数的泵(见表 1),50SZB35-4.0Q 新型自吸离心泵比本田泵 50QBZ35-4.9 型自吸离心泵(本田泵)额定效率提高了 16.34%。泵的试验结果表明:泵的性能曲线稳定、平坦,高效率区范围宽,使用工况佳。研制成功的新型自吸离心泵是普通自吸离心泵的更新换代产品。

表 1 同类型相同参数泵的性能比较

Tab.1 Performance comparisons of pumps with the same design parameters

	模型泵			本田泵		
	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	$H/m$	$\eta/\%$	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	$H/m$	$\eta/\%$
标准值	18	35	54	18	35	36
实测值	17.59	34.21	55.29	18.08	35.16	38.95

### 3 结 论

1) 在导流器前盖板与半开式叶轮叶片流线之间的速度矢量分布变化较大,而在叶轮内速度分布趋于平稳。导流器两个出口的结构使叶轮内的压力分布更加均匀。泵在设计点数值模拟计算扬程比试验扬程提高 6.9%,数值模拟计算效率比试验效率提高 0.5%,数值模拟预测的扬程、效率曲线与试验的扬程、效率曲线变化趋势一致。

2) 新型自吸离心泵采用铝合金压铸,大幅度减轻了泵的质量,降低了成本;其设计合理,结构新颖,体积小,运行可靠,操作方便,是普通自吸离心泵的更新换代产品,并且拥有自主知识产权。

3) 新型自吸离心泵性能曲线稳定、平坦,高效率区范围宽,各项技术指标满足设计要求。50SZB35-4.0Q 新型自吸离心泵的效率比 50QBZ35-4.9 型自吸离心泵(本田泵)效率提高了 16.34%。该泵的研制成功为自吸离心泵提供了技术支持,而且作为一种高效节水灌溉设备,具有广阔的市场,将大幅提升我国自吸离心泵产品在国际市场上的竞争力。

### 参考文献(References)

- [1] 吕智军,兰才有,王福军. 自吸离心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)
- [2] 郭晓梅,杨敏官,王春林. 自吸离心泵现状分析[J]. 水泵技术 2002(1):27-29.  
Guo Xiaomei, Yang Minguan, Wang Chunlin. Analysis of the present status of self-priming pump[J]. *Pump Technology* 2002(1):27-29. (in Chinese)
- [3] 王春林,司艳雷,郑海霞,等. 旋流自吸离心泵内部流场的数值模拟[J]. 排灌机械 2008 26(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 26(2):31-35. (in Chinese)
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社 2004:215-216.
- [5] 沈艳宁,袁寿其,陆伟刚,等. 复合叶轮离心泵数值模拟正交试验设计方法[J]. 农业机械学报,2010 41(9):22-26.  
Shen Yanning, Yuan Shouqi, Lu Weigang, et al. Orthogonal test design method based on numerical simulation for non-overload centrifugal pump with complex impeller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 2010 41(9):22-26. (in Chinese)
- [6] 苏起钦. 射流式自吸离心泵性能数值模拟暨气液两相流分析[D]. 江苏大学流体机械工程技术研究中心 2009.
- [7] 黄思,吴玉林. 叶片式离心泵内气液两相泡状流的三维数值计算[J]. 水利学报 2001(6):57-61.  
Huang Si, Wu Yulin. 3D calculation of gas-oil flow in roto-dynamic pump based on a bubbly flow model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 2001(6):57-61. (in Chinese)
- [8] Kang Can, Yang Minguan, Wu Xiaolian, et al. Characteristics of gas-liquid transport flow through an axial flow impeller[C]// *Proceedings of the 2009 Asia-Pacific Conference on Power and Energy Engineering* 2009:1-4.
- [9] Zhu Zuchao, Xie Peng, Ou Guofu, et al. Design and experimental analyses of small-flow high-head centrifugal-vortex pump for gas-liquid two-phase mixture[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 2008 16(4):528-534.

(责任编辑 陈建华)