

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.004

新型吸水室改善汽蚀性能的 数值模拟与实验研究

牟介刚, 林 玲, 施瀚昱

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要:为了改善离心泵汽蚀性能,结合喷射技术改进吸水室结构。选用 IS100-80-160 单级离心泵为原模型,基于 RNG κ - ε 、均质多相模型和 Rayleigh-Plesset 方程,对改进模型与原模型的流场进行 CFD 数值模拟。数值模拟所得到的汽蚀特性曲线与试验结果吻合较好,验证了计算方法的准确性。研究结果表明:在不同工况下,改进后的泵汽蚀余量 $NPSH_i$ 均低于原模型,最大降低了 0.72 m,离心泵的汽蚀性能提高了 33.49%,改善效果非常可观。相比于原模型,改进后的离心泵的流量与扬程有所下降,但在合理范围之内。

关 键 词:离心泵;吸水室;汽蚀性能;数值模拟;实验研究

中图分类号:TH311 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)01-0013-05

Numerical Simulation and Experimental Research of Cavitation Performance Improvement for New Suction Chamber

MOU Jiegang, LIN Ling, SHI Hanyu

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To improve the cavitation performance of centrifugal pump, the structure of suction chamber was updated through jetting technology. The centrifugal pump IS100-80-160 was selected as original model, on the basis of RNG κ - ε turbulence model, homogeneous multiphase model and Rayleigh-Plesset equation, the flow field of centrifugal pump with different suction chambers were simulated with CFD. The trend of simulated $NPSH$ - Q curves were consistent with the experimental data, in addition, the accuracy of numerical simulation was also verified. The results show that under different conditions, compared with original model, the $NPSH$ of updating model is lower, most drop range is 0.72 m, and cavitation performance of centrifugal pump is improved by 33.49%. But the head and efficiency of updating model decline slightly within reasonable range.

Key words: centrifugal pump; suction chamber; cavitation performance; numerical simulation; experimental research

汽蚀破坏是引起离心泵故障的主要原因之一,提高汽蚀性能对离心泵安全、稳定、高效地运行具有重要意义^[1]。近年来,引射技术应用于各个领域,都已得到较好的成果^[2-4]。吴昱等^[5]等通过理论分析,提出利用引射装置可以改善汽蚀性能,这为改善汽蚀性能提供新思路。通过在吸水室增置引射结构来提高叶轮进口压力,进而改善离心泵汽蚀性能,是一种极有前景的发展方向。文章通过理论分析、CFD 数值模拟以及

试验验证相结合的方法,分析论证在吸水室增置引射结构的可行性,深入研究这种新型吸水室结构对离心泵性能及汽蚀性能的影响,使得从技术上评价吸水室结构设计是否合理成为可能。

1 理论分析

众所周知,要提高离心泵汽蚀性能可以从两方面入手,一方面提高装置汽蚀余量;另一方面降低泵汽蚀余量(压力降)^[6]。前者是使用泵的问题,后者是设计

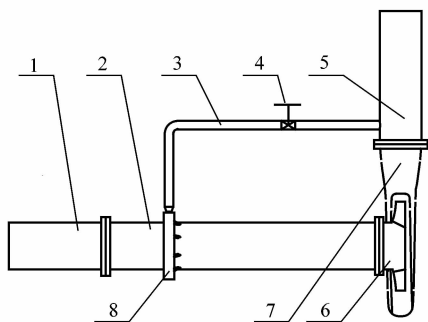
收稿日期:2013-07-29;修回日期:2013-09-20

基金项目:国家科技人员服务企业行动项目(2009GJC20008)

作者简介:牟介刚(1963),男,吉林辉南人,教授,博士生导师,主要从事叶片泵理论研究及其工程设计。E-mail:mjg1963@126.com

泵的问题。根据汽蚀基本方程式,通过叶轮结构优化设计来减小必须汽蚀余量必然可以改善离心泵的汽蚀性能,然而,研究和实践表明通过合理设计叶轮结构来改善汽蚀性能是有限的。

文中结合前人的研究基础,将射流泵中的射流技术^[7]引入离心泵的吸水室中,如图 1 所示。由于泵出口的流体是高能流体,加上喷射管的喷射作用,大大提高了这部分流体的压力能。如图 2 所示,能量较低的吸入流体与能量较高的高压流体在吸水室中的混合区通过质点间的相互碰撞来传递能量,在流动过程中流体的速度渐渐均衡,这期间常常伴随着流体压力的升高,最后从吸水室出口流出混合后的高压流体,从而提高离心泵的汽蚀性能。



1—进水管;2—吸水室;3—回流管;4—调节阀;5—出水管;6—叶轮;7—蜗壳;8—均匀分布器及喷射装置

图 1 吸水室增置引射装置示意图

Figure 1 Structure of suction chamber come by jetting technology

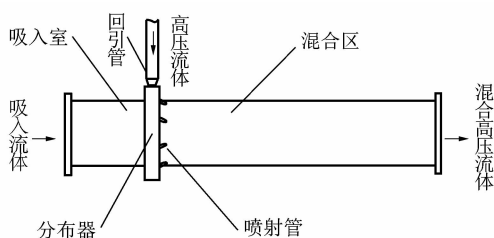


图 2 新型吸水室工作原理

Figure 2 New suction chamber working diagram

2 数值分析

2.1 数值计算方法

文中选取 IS100-80-160 单级单吸清水离心泵以及增置新型吸水室的离心泵为模型,应用 Pro/E 软件对蜗壳、叶轮和吸水室等部分的流道分别进行造型,如图 3 所示。利用 Gambit 软件对泵的全流场区域进行分块划分网格,对离心泵流体域采用分块网格划分,叶轮流体域、蜗壳流体域、喷射管分布器的流道比较复杂,

扭曲程度较高,因此,采用适应性较强的非结构化网格对叶轮流体域和蜗壳流体域进行网格划分。由于蜗壳隔舌对离心泵流场影响比较大,因此需要对隔舌进行局部加密处理。而对于进水管、吸水室、回流管、出水管均为规则结构,采用结构化网格以节省计算资源。

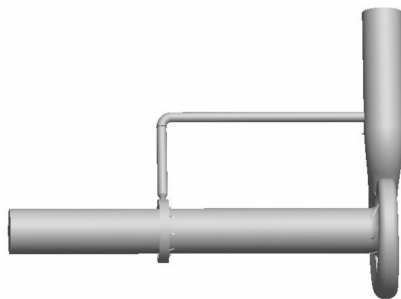


图 3 新型吸水室离心泵的流体域

Figure 3 Fluid domain model of centrifugal pump with new suction chamber

计算流体为 25 ℃ 的清水和 25 ℃ 的空气,介质在该温度下的汽化压力 $P_v = 3\ 574\ \text{Pa}$;湍流模型选用适应性较强的湍流模型 RNG $\kappa\text{-}\varepsilon$ 模型来考虑湍流的影响;选用基于均质多相模型的汽蚀模型^[8]与 Rayleigh-Plesset 方程来模拟气泡的产生与溃灭;气泡的平均直径为 $2 \times 10^{-6}\ \text{m}$;模拟计算流场的参考压力设为 0 Pa。进口边界条件采用总压进口 (Total Pressure-inlet),水的体积分数设为 1,空气的体积分数设为 0,通过不断降低进口压力来使离心泵发生汽蚀;出口边界条件采用质量流量出口 (Bulk Mass Flow Rate) 来保证泵运行时流量保持不变^[9]。

2.2 网格无关性分析

理论上,数值模拟结果的准确性受到网格数量的制约,网格数越多,模拟计算结果准确性越高。但是随着网格数量的增加,数值计算对计算机性能的要求也随之提高。因此,为保证计算结果尽量不受网格数量的影响,同时兼顾计算机的性能配置,对模型泵 IS100-80-160 进行网格无关性分析。通过逐渐加密流体域的网格,直到获得计算结果受网格影响较小的结果,文中选择了 5 组不同的网格数量实验组进行数值模拟,其结果如图 4 所示。

由图 4 可知,在网格数大于 117 万以后,数值模拟预测的扬程和效率受网格数变化的影响较小,基本趋于稳定。因此,文中模型泵的计算网格数取 1 170 823 来进行研究。

2.3 吸水室改进前后的对比分析

在原吸水室的基础上,通过增置引射结构改进吸

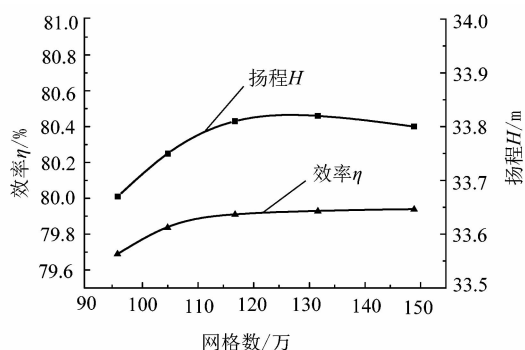


图4 扬程、效率与网格数的关系

Figure 4 Relation between grid and head, efficiency

水室。其中引射结构参数为环形均匀分布 8 个喷射管;喷射管出口直径为 3 mm;喷射角度为 30° ;引回管直径为 20 mm。将增加上述改进模型与原模型在多工况条件下进行 CFD 模拟,对两者汽蚀性能和内部流场进行比较分析。

1) 外特性对比

图 5 为离心泵改进前后的汽蚀特性曲线对比图。其中 Q 为流量, Q_d 为设计流量。由图可知,不同工况时,改进后的泵汽蚀余量 $NPSH_r$ 均低于原模型,最大降低了 0.72 m,离心泵的汽蚀性能提高了 33.49%,改善效果是非常可观的。由图还可知,在小流量工况下,离心泵的汽蚀性能改善效果明显;随着流量的增大,离心泵的汽蚀性能改善效果减弱。究其原因推断为:大流量工况下,泵入口液流流动状态已有所恶化,流量—扬程曲线已经明显开始下降,再引回一部分流量会进一步加剧入口流动恶化程度,故没有达到改善泵汽蚀性能的效果。

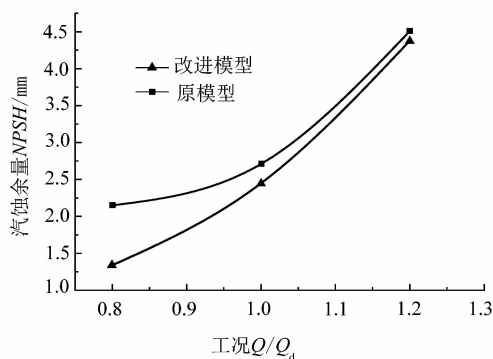


图5 改进前后的汽蚀特性曲线对比

Figure 5 Comparison of cavitation characteristics curves of different models

图 6 为离心泵改进前后的性能曲线对比图。由图可知,相比于原模型,改进模型的流量与扬程在不同工

况均有所下降,因此改善离心泵的汽蚀性能是以牺牲扬程和效率为代价的。小流量工况时,效率和扬程下降幅度较小,效率、扬程下降幅度分别为 2.15% 和 0.07 m;大流量工况时,流量扬程下降幅度较大,效率、扬程下降幅度分别为 3.09% 和 0.99 m。因此可以推断,在小流量和设计流量工况下运行时,在吸水室增加引射装置可以有效地改善离心泵的汽蚀性能,并且效率和扬程下降幅度不大,在合理范围之内。

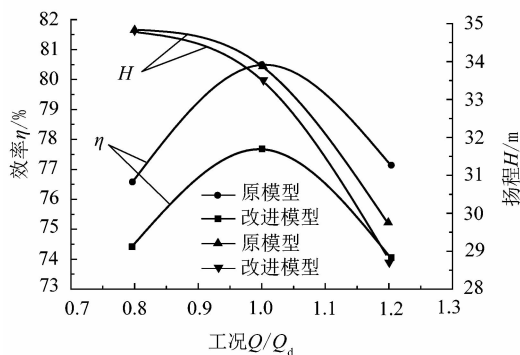


图6 改进前后的性能曲线对比

Figure 6 Comparison of performance curves of different pumps

2) 内特性对比

为了分析对比改进前后离心泵的内特性,截取了在不同工况时前盖板的压力云图和气泡体积分数分布云图。图 7 为 2 种模型在 3 种工况下的前盖板压力云图。其中(a)为原模型,(b)为改进模型。由图可知,2 种模型的前盖板压力分布随流量变化时的变化趋势一致,随着流量的增大,前盖板同一半径处的压力增大,低压区域由叶轮进口处向叶轮出口处不断扩大。从而验证了汽蚀特性曲线变化趋势的正确性。对比改进前后模型的前盖板压力云图可知,不同工况下,改进后的前盖板同一半径处的压力均高于原模型,并且低压区域也相对较小。

图 8 为 2 种模型在 3 种工况下的前盖板气泡体积分数分布云图。由图可知,2 种模型的前盖板气泡体积分数分布随流量变化时的变化趋势一致,随着流量的增大,前盖板同一半径处的体积分数增大,气泡区域由叶轮进口处向叶轮出口处不断扩大。因此,离心泵的汽蚀性能随着流量增大而变差,也验证了汽蚀特性曲线变化趋势的正确性。对比改进前后模型的前盖板气泡体积分数分布云图可知,不同工况下,改进后的前盖板气泡体积分数均低于原模型,并且气泡区域也相对较小。由此,验证了在吸水室增置引射装置可以有

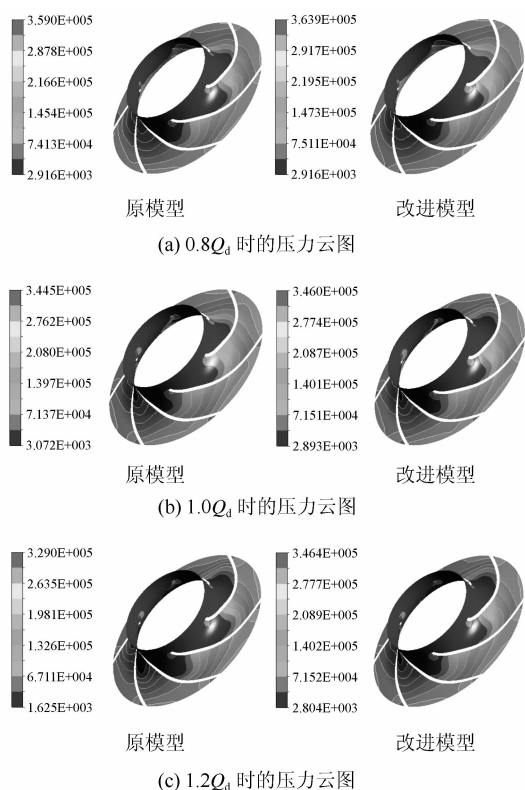


图7 前盖板压力云图

Figure 7 Pressure nephogram of former coverplate

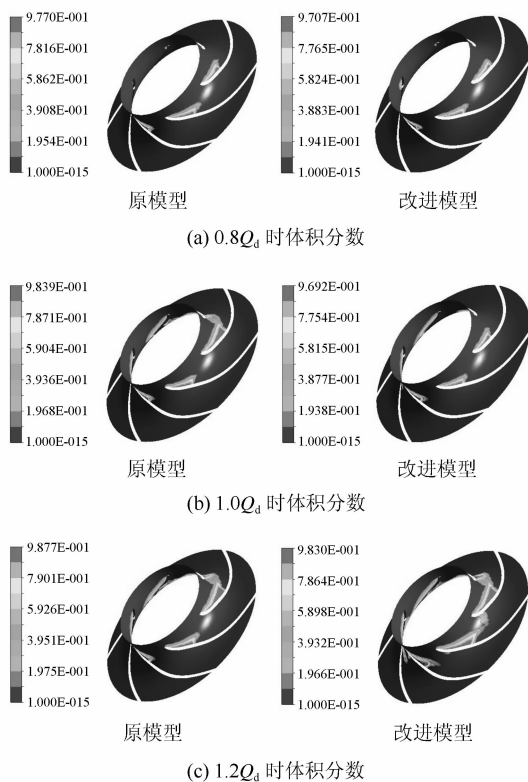


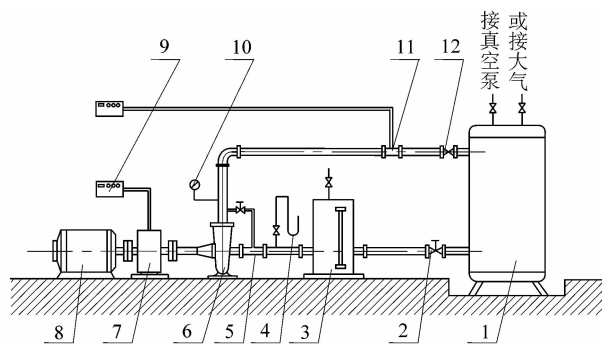
图8 前盖板气泡体积分数分布

Figure 8 Vapour distribution on former coverplate

效地改善离心泵汽蚀性能。

3 实验分析

实验在某水泵总厂的闭式试验台进行性能试验和汽蚀试验,该试验台的设计符合国家标准 GB/T3216^[10],试验装置的测试精度为1级。试验装置采用闭式回路,见图9,在密闭容器内抽真空的方法逐渐降低装置汽蚀余量,使泵发生空化。直至恒定流量下的扬程下降达到3%,此时的汽蚀余量 $NPSH_r$ 为临界汽蚀余量,离心泵汽蚀余量 $NPSH_r$ 近似等于临界汽蚀余量。



1—汽蚀罐;2—水封式阀闸;3—稳压器;4—真空计;5—引射装置;6—试验泵;7—扭转传感器;8—电动机;9—扭转转速测量仪;10—压力表;11—流量计;12—流量调节阀

图9 闭式回路试验装置示意图

Figure 9 Experimental equipment

图10为数值模拟的汽蚀特性曲线与试验曲线对比图。由图可知,数值预测性曲线与试验曲线变化趋势相同,各流量工况点泵汽蚀余量 $NPSH_r$ 相差 $-0.12 \sim 0.42$ m,误差范围在 $-7.10\% \sim 8.57\%$ 之间,最大偏差不超过9%,验证了CFD数值模拟计算的可靠性。小流量工况下,两者偏差较小;大流量工况下,两者偏

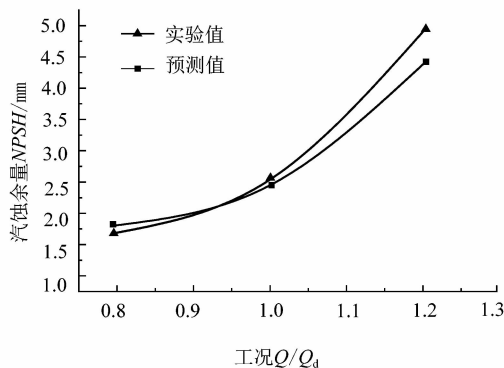


图10 数值预测的汽蚀特性曲线与试验曲线对比
Figure 10 Comparison of the cavitation characteristics curves of simulation and experimental

(下转第21页)