



射流式离心泵性能及内部流动特性

张人会^{1,2*}, 张四代¹, 田磊¹, 陈学炳¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)



张人会

摘要: 为研究射流式离心泵内流动机理,以 JET750G1 型射流式离心泵为研究对象,搭建试验测试系统,分别对不同安装高度下射流式离心泵的空化及能量特性进行试验研究;基于 $k-\omega$ 湍流模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型,对 0 mm 安装高度下泵各工况点内部流动进行数值模拟。试验结果表明:当流量增大到一定程度之后,扬程-流量、功率-流量、效率-流量曲线均急剧下降;随着安装高度的增大,陡降起始点向小流量工况偏移。数值计算结果表明:扬程、功率、效率的数值模拟结果与试验值基本吻合,数值模拟性能陡降起始流量比试验值大 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$;射流式离心泵由于其面积比值较小,射流剪切层被迅速排挤到喉管壁面,泵内最低压力点出现在喉管内喷嘴稍后处,空化最早发生在该处;随着流量的增大,空化区域急剧向叶轮进口扩展,性能陡降起始点正好是泵内初生空化流量点,射流式离心泵的空化性能取决于其射流器的空化性能;射流器能提升离心泵扬程和自吸性能,但射流器内高速回流及强剪切流动,导致其效率及空化性能大幅下降。

关键词: 射流式离心泵;回流;空化;数值模拟

中图分类号: S277.9; TK730 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2019)09-0763-06

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.17.0239

张人会,张四代,田磊,等.射流式离心泵性能及内部流动特性[J].排灌机械工程学报,2019,37(9):763-768,775.

ZHANG Renhui, ZHANG Sidai, TIAN Lei, et al. Performance and internal flow characteristics of jet centrifugal pump[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2019, 37(9): 763-768, 775.(in Chinese)

Performance and internal flow characteristics of jet centrifugal pump

ZHANG Renhui^{1,2*}, ZHANG Sidai¹, TIAN Lei¹, CHEN Xuebing¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Experiments on suction and hydraulic characteristics were performed at different installation heights in a fluid flow testing system built to investigate self-priming mechanisms in jet centrifugal self-priming pumps in term of the type JET750G1 jet centrifugal pump. Also, a series of numerical simulations of cavitating flows in the pump were carried out based on the $K-\omega$ turbulence model and Zwart-Gerber-Belamri cavitation model at zero installation height. The experimental results show that the head, shaft-power and efficiency curves drop sharply when the flow rate reaches a certain value. As the installation height increases, however, the flow rate at the point for performance starting to drop steeply gets lower. The numerical results exhibit that the predicted head, shaft-power and efficiency are basically consistent with experimental values, and the estimated flow rate for performance starting to drop

收稿日期: 2017-11-03; 修回日期: 2018-01-26; 网络出版时间: 2018-03-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180319.1045.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51469014); 国家重点研发计划项目(2016YFB0200901); 甘肃省陇原创新人才计划项目

第一作者简介: 张人会(1977—),男,江西九江人,教授,博士生导师(通信作者, zhangrh@lut.cn),主要从事水力机械内部流动及性能优化研究。

第二作者简介: 张四代(1990—),男,湖北随州人,硕士研究生(zsdzr@163.com),主要从事水力机械内部流动及性能优化研究。

steeply is $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ larger than the experimental value. Because of a smaller area ratio in the jet nozzle, the primed fluid shear layer is rapidly dragged to the wall of the throat, and the lowest pressure appears just after the throat outlet where cavitation begins to occur. As the flow rate increases, the cavitation extends rapidly to the eye of impeller. The flow rate at the point for performance starting to drop steeply is exactly the flow rate for cavitation inception in the pump. Thus, the suction performance of a jet centrifugal pump depends on the performance of ejector. An ejector can improve the head and self-priming performance of a centrifugal pump, but the high velocity reverse flow and strong shear flow in the ejector will lead to a significant drop in pump efficiency and suction performance.

Key words: jet centrifugal pump; reverse flow; cavitation; numerical simulation

射流式离心泵是在离心泵进口增设一个自循环射流器,通过射流喷嘴的高速流体在射流器内形成卷吸效应,在泵进口处形成高真空,实现自吸功能,具有启动前无需向泵体内灌水即可实现快速自吸的特点,应用广泛^[1-2]。目前,对射流式离心泵的相关研究主要集中在 2 个方面:一是射流式离心泵内部流动及外特性研究;二是射流式离心泵自吸过程中泵内复杂的气液两相流流动及自吸性能分析。FAN 等^[3]应用数值模拟对射流泵内流场进行研究,通过数值计算预测性能,验证了数值模拟的可行性。李贵东等^[4-5]对 JETST-100 型射流式离心泵内部非常流动进行多工况数值模拟,认为射流器回流是该类型泵运行效率偏低的原因,并采用动态亚格子应力大涡模拟方法对射流式离心泵射流器内部流动进行细致分析,发现射流器内失稳涡带造成的压力脉动是喉管处易发生空化的原因之一。王洋等^[6]通过正交试验设计及数值计算,分析了射流式离心泵关键结构参数对泵效率影响的主次顺序。刘建瑞等^[7]采用数值模拟和正交试验的方法研究了射流喷嘴几何参数对射流式自吸泵性能的影响,得到射流喷嘴各参数最佳组合方案。周英环等^[8]为提升射流式离心泵自吸性能,对压水室及喷嘴直径进行了优化分析。李红等^[9]运用 VOF 多相流模型结合滑移网格技术,模拟了射流式离心泵启动过程中气液混合及分离现象。

射流式离心泵在大流量工况运行时,易发生空化,导致噪声急剧增大、扬程效率陡降。射流器对泵的扬程、效率及空化性能具有重要的影响,但目前对相关现象的机理及性能的优化方法鲜有报道。文中采用数值模拟与试验相结合的方法,对射流式离心泵空化特性进行研究,分析不同安装高度下泵性能陡降特性、能量特性以及空化特性与射流器内高速循环射流及强剪切流结构间的内在关系,并分析射流器对泵内部流动及泵的扬程、效率及空化性能

的影响机理。

1 研究对象及方法

1.1 几何模型

所研究射流式离心泵的性能及结构参数分别为流量 $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 23 \text{ m}$,转速 $n = 2850 \text{ r}/\text{min}$,叶轮进口直径 40 mm ,叶轮出口宽度 5.3 mm ,叶轮叶片数 6,导叶叶片数 5,喉管直径 14.5 mm ,喷嘴直径 9.0 mm ,面积比 $A = 2.6$ 。定义面积比为射流器喉管面积与喷嘴出口面积之比,在射流式自吸泵中通常采用较小的面积比以提升其自吸性能。

整个计算域包括射流器、叶轮、导叶、泵腔、射流喷嘴,泵进出口作适当延伸,忽略前后泵腔对泵性能的影响,容积损失及摩擦损失通过经验公式估算得到。图 1 为射流式离心泵轴剖面图。

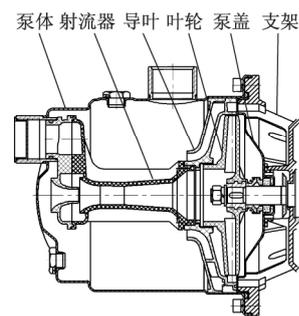


图 1 射流式离心泵轴剖面图

Fig.1 Axial-cross-sectional drawing of jet centrifugal pump

1.2 数值计算方法

采用适应性强的非结构化四面体网格对模型泵进行网格划分。划分网格数由 1 530 000 到 3 940 000 的 5 组网格进行网格无关性分析,当网格数从 2 500 000 增大到 3 300 000 时,泵额定工况扬程模拟值的误差为 0.17%,考虑计算机配置,选取网格数为 2 500 000。喷嘴及射流器内部流动存在较大速度梯度,对其网格进行细化处理。进口段、喷嘴、喉

管局部网格如图 2 所示。

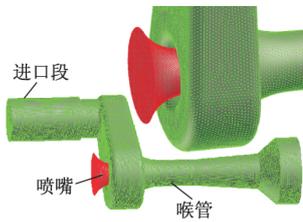


图 2 喷嘴及射流器网格

Fig.2 Mesh in fluid domains of suction nozzle and ejector

采用商用软件 ANSYS CFX 14.5 对整个计算域进行数值求解, 选用 $k-\omega$ 湍流模型、Mixture 多相流模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型进行数值计算. 进口边界条件定义为总压进口, 出口边界定义为速度出口, 速度大小根据泵出口流量确定. 固壁面定义为无滑移边界, 近壁区采用标准壁面函数处理. 射流器与叶轮、叶轮与导叶间的动静交界面, 设置为 Frozen Rotor 模式. 工作介质为 25 °C 清水, 介质饱和蒸汽压为 3 169 Pa.

1.3 试验方法

试验平台为开式试验系统, 主要包括蓄水池、进出口管路、进出口阀门、试验泵、压力传感器、流量计、电参数测量仪等, 如图 3 所示. 其中: 压力传感器为 CY301 型数字压力传感器, 最小采样间隔 1 ms, 综合精度 0.1%; 流量计为 LWGY-B32L 型涡轮流量计, 精度 0.5 级; 电测仪为 PW9901 型智能电参数测量仪, 用来测量输入功率.

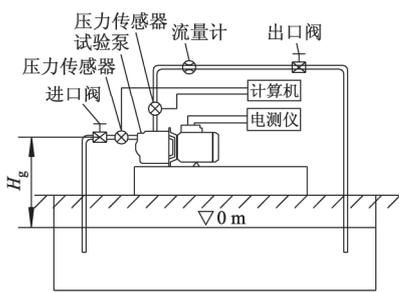


图 3 射流式离心泵试验平台

Fig.3 Testing stand for jet centrifugal pump

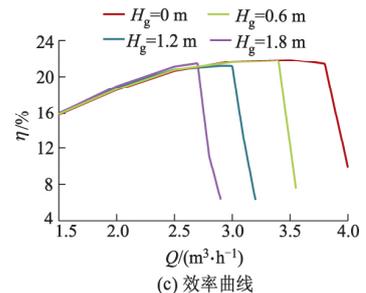
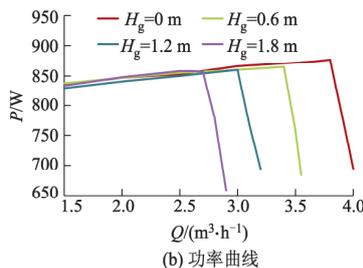
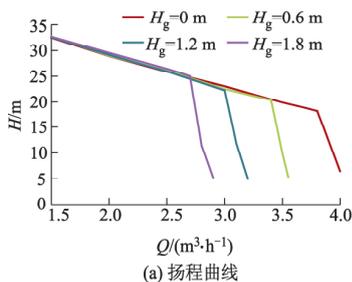


图 5 不同安装高度下泵性能曲线

Fig.5 Pump performance curves at various installation heights

通过调节试验系统进水管路和水池水位, 进行了 4 个安装高度 ($H_g = 0, 0.6, 1.2, 1.8$ m) 的性能试验, 其中 0 m 的安装高度通过调节水箱实现. 数字压力传感器连接到计算机, 运用脉动压力测试系统软件进行动态数据采集, 采样间隔设置为 1 ms, 采集时长为 5 s.

2 试验结果分析

2.1 数值计算与试验结果对比

为分析射流式离心泵能量及空化特性, 在 4 种安装高度下进行试验, 并采用数值计算方法, 对泵内流动进行 CFD 分析. 把 0 m 安装高度下试验测得泵进口总压作为数值模拟进口边界条件, 进行空化计算. 数值计算与试验结果对比如图 4 所示.

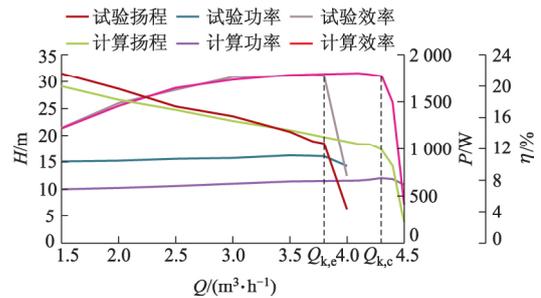


图 4 数值模拟与试验性能曲线对比

Fig.4 Comparison of predicted and experimental performance curves

由图 4 可以看出: 当流量增大到一定程度时, 扬程、功率、效率曲线均急剧下降; 数值计算结果与试验结果基本吻合, 额定工况时扬程 H 和效率 η 的相对误差分别为 2.46% 和 1.12%; 数值计算的陡降流量点 ($Q_{k,c}$) 比试验得到的陡降流量点 ($Q_{k,e}$) 大 0.5 m^3/h , 这里性能曲线的陡降是由空化引起的.

2.2 不同安装高度下泵性能分析

根据试验方案, 分别进行了 4 组安装高度 ($H_g = 0, 0.6, 1.2, 1.8$ m) 下泵的性能试验, 结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出:随着流量的增大,扬程曲线、功率曲线、效率曲线均出现陡降点,泵的水力性能急剧下降;随着安装高度逐渐增大,该陡降点(Q_k)逐渐向小流量工况偏移,并且泵装置汽蚀余量减小,泵内流动容易发生空化,因此 Q_{k_p} 逐渐减小。

在 1.2 m 安装高度下,不同流量时试验测得泵出口压力脉动信号的概率密度分布函数(PDF)如图 6 所示。

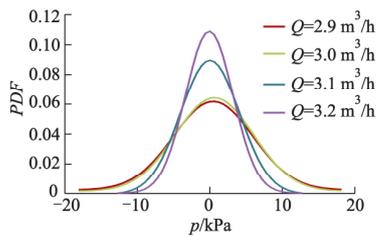


图 6 泵出口压力波动概率密度分布
Fig. 6 Probability density distribution of pressure fluctuation at pump outlet

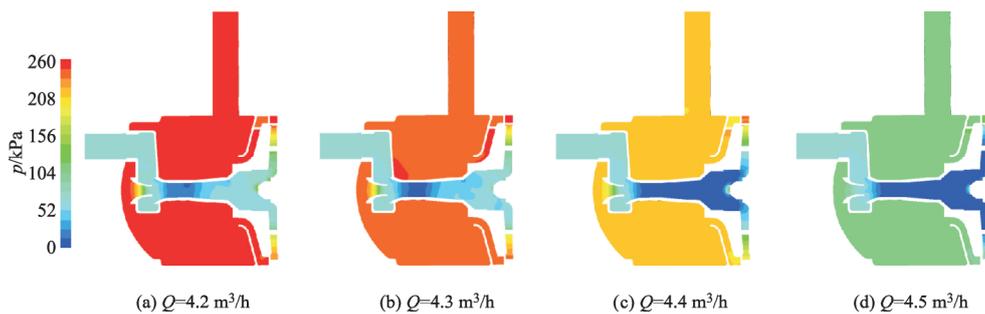


图 7 不同工况下全流场静压分布
Fig. 7 Static pressure contours in pump at different flow rates

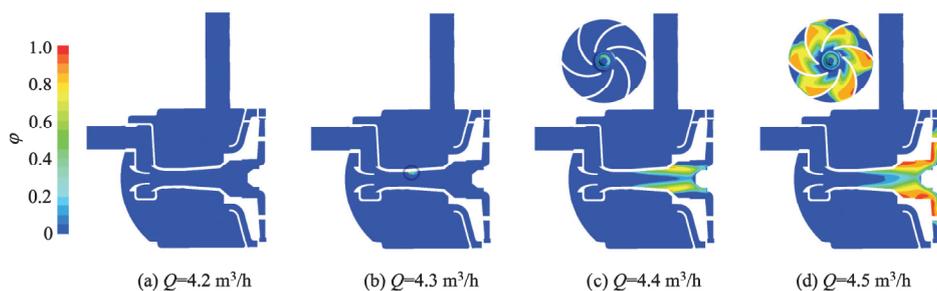


图 8 不同工况下泵内空泡体积分数分布
Fig. 8 Vapor volume fraction contours in pump at different flow rates

由图 7 可以看出,泵内最低压力点出现在喉管进口稍后处,随着流量的增大,低压区迅速向叶轮进口扩展,泵腔内压力也快速下降。

由图 8 可以看出, $Q=4.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,喉管内最先发生空化,该空化区域正好与图 7 最低压力区相同,而且该流量点正好是图 4 中扬程-流量、功率-流量、效率-流量曲线陡降起始流量点。因此,射流式离心泵的性能陡降实质是由泵内流动空化的发展引起的。随着流量的增大,空化区域由喉管急剧向下游

扩展。 $Q=4.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,空化发展到叶轮进口区域,当 $Q=4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,空化已迅速扩展到整个叶轮流道。因此射流式离心泵的空化性能取决于其射流器的空化性能。

3 内部流动数值计算分析

对射流式离心泵在 0 m 安装高度下的空化性能进行分析,首先以清水为介质对各工况进行单相数值模拟,再以此结果作为初始流场,进行非定常空化数值计算。为了便于与试验结果对比,泵进口压力值根据试验值拟合给定。

为分析性能陡降点附近工况泵内部流动特性,选取 4 个流量工况($Q=4.2, 4.3, 4.4, 4.5 \text{ m}^3/\text{h}$) 进行计算,计算结果如图 7、8 所示。

空化的迅速发展主要由 2 个方面的原因:一方面随着流量的增大泵扬程降低,射流器喷嘴出口的液体能量逐渐减小,同时吸入流体的流速增大,喉管下游压力降低;另一方面,随着流量的增大,离心叶轮本身 $NPSHR$ 值急剧增大,空化性能急剧

下降.

在射流式离心泵中通常采用较小的面积比来提升其自吸性能,该泵的射流器面积比 A 为 2.6,对射流泵而言属于小面积比.图 9 为 $Q=4.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时射流器内速度分布,可以看出,射流边界在喉管入口就已经扩展到壁面.当面积比 A 较大时,空化初生通常位于喷嘴后的射流剪切层内.当面积比 A 较小时,射流剪切层易被迅速排挤到壁面附近.射流器空化初生位于扩散段起始壁面处,类似文丘里管内空化,这与文献 [11] 的研究结果一致.

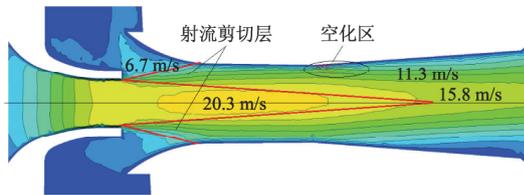


图 9 射流器中间截面速度云图
Fig.9 Velocity contours in meridian plane of ejector

4 射流器对泵性能的影响分析

为分析射流器工作特性,对射流器的喷嘴进行封堵(把喷嘴出口截面设置为壁面边界),其他边界条件不变,对无射流时的泵空化特性进行计算.图 10 为有射流和无射流 2 种情况下,数值计算得到的泵性能曲线对比,可以看出:无射流时,泵的空化流量为 $5.0 \text{ m}^3/\text{h}$,比有射流时空化流量大 $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$,射流器降低了泵的空化性能;空化发生前,有射流时泵的扬程均高于无射流时泵的扬程,射流器提高了泵的扬程;由于喉管高速剪切流、叶轮回流的存在,大大降低了泵的效率,有射流时泵的效率在整个流量范围内均小于无射流时泵的效率.

综合分析,射流器虽然能提高泵自吸性能及扬

程,但也会引起效率及空化性能下降.

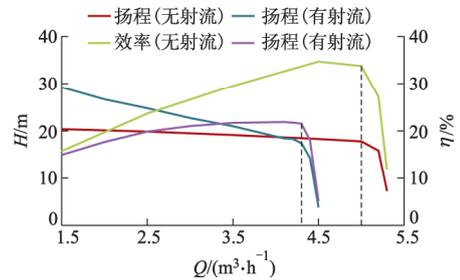


图 10 有无射流时泵性能曲线对比
Fig.10 Comparison of performance curves with and without jet

图 11 为模型泵在 $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 工况下运行,有无射流时泵中间截面涡量分布,可以看出:无射流时,涡量较大的区域主要集中在叶轮内;有射流时,由于高速射流的作用,喷嘴出口及整个喉管内涡量急剧增大,这也是导致泵效率下降的重要原因之一.

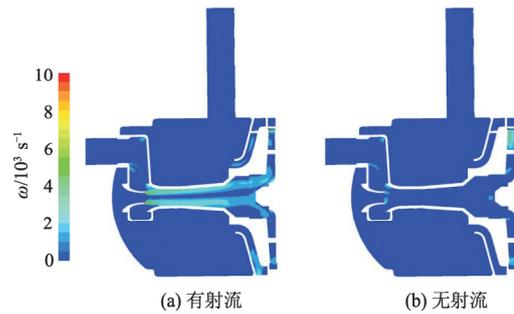


图 11 泵中间截面涡量分布
Fig.11 Vorticity contours in symmetrical plane of pump

图 12 为无射流时泵中间截面空泡分布,可以看出,喉管内没有高速剪切流,随着泵流量的增大,在叶轮进口首先发生空化,并急剧向下游扩展. $Q=5.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,叶轮进口已经空化,空化流量点比有射流时大 $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$.流量大于 $5.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 之后,叶轮内空化迅速发展.

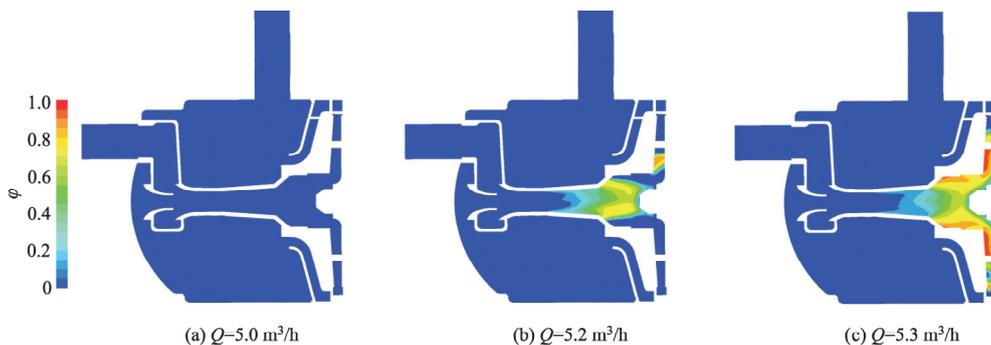


图 12 无射流时泵中间截面空泡分布
Fig.12 Vapor volume fraction contours in symmetrical plane of pump without jet

图 13 为射流式离心泵喷嘴和叶轮流量随泵流量变化曲线,可以看出:在泵流量达到空化流量之

前,由于叶轮出口压力随泵流量增大而逐渐降低,喷嘴流量随之减小;空化发生之后,喷嘴流量急剧减小,通过叶轮的流量是泵进口流量及喷嘴流量之和,喷嘴流量的急剧下降导致叶轮流量也急剧下降。额定工况点喷嘴回流流量与泵进口流量之比为 1.9,泵内回流强度大。回流是射流式离心泵效率偏低的主要原因。

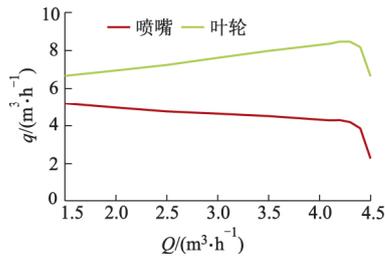


图 13 喷嘴、叶轮流量变化曲线

Fig.13 Flow rate curves of nozzle and impeller

图 14 为射流式离心泵有无射流时扬程及效率随叶轮流量的变化曲线,可以看出,由于发生空化,射流式离心泵叶轮的流量随着泵进口流量的增大先增大后急剧下降,射流式离心泵的扬程及效率随着叶轮流量变化的曲线均呈“反 C”型。

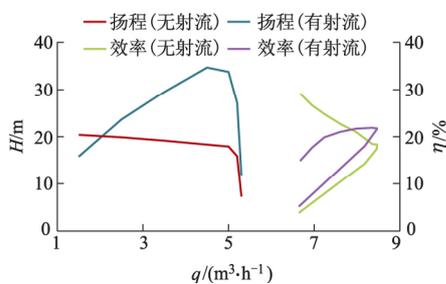


图 14 泵扬程、效率随叶轮流量变化曲线

Fig.14 Head and efficiency curves against impeller flow rate with and without jet

射流器大大提升了叶轮进口液体的能量,叶轮实际的空化流量由 $5.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大到 $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。此时泵的空化流量为 $4.3 \text{ m}^3/\text{h}$,近一半流量为回流。射流器提升了泵的自吸性能及扬程,但同时降低了泵的效率及空化性能。

5 结 论

1) 射流式离心泵内最低压力点位于喉管进口稍后处,空化最早发生在该处。随着流量的增大,空化区域急剧向叶轮进口扩展。射流式离心泵的空化性能取决于其射流器的空化性能。

2) 射流式离心泵由于其射流器面积比值较小,

射流剪切层被迅速排挤到喉管壁面,空化初生发生在扩散段起始壁面处。

3) 射流器内高速射流提升了叶轮进口液体能量,增大了泵的扬程和自吸性能,但泵内的高强度回流降低了泵的效率,喉管内高速强剪切流动降低了泵的空化性能。

参考文献(References)

- [1] 刘建瑞,周贵平.射流式自吸喷灌泵的研究进展与展望[J].农业机械学报,2007,38(8):177-180.
LIU Jianrui,ZHOU Guiping. Research and prospects for the self-priming irrigation pumps[J]. Transactions of the CSAM,2007,38(8):177-180. (in Chinese)
- [2] 王海艳,刘纪新,于晓,等.新型孔式环形射流泵的结构设计及仿真分析[J].煤炭技术,2019,38(1):160-163.
WANG Haiyan,LIU Jixin,YU Xiao,et al. Structure design and simulation analysis of new-type perforated annular jet pump[J]. Coal technology,2019,38(1):160-163. (in Chinese)
- [3] FAN J,EVES J,THOMPSON H M,et al. Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps[J]. Computers & fluids,2011(46):212-217.
- [4] 李贵东,王洋,杨学明,等.基于大涡模拟的射流式离心泵射流器内部的流动特性[J].排灌机械工程学报,2017,35(5):369-374.
LI Guidong,WANG Yang,YANG Xueming,et al. Features of internal flow in jet nozzle of self-priming centrifugal pump based on large eddy simulation[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2017,35(5):369-374. (in Chinese)
- [5] 李贵东,王洋,曹璞钰,等.射流式离心泵非设计工况下内部流动研究[J].农业机械学报,2015,46(8):48-53.
LI Guidong,WANG Yang,CAO Puyu,et al. Internal flow of flow-ejection centrifugal pump under off-design conditions[J]. Transactions of the CSAM,2015,46(8):48-53. (in Chinese)
- [6] 王洋,韩亚文,朱新新,等.基于CFD的射流自吸泵性能优化与试验[J].农业工程学报,2016,32(S2):16-21.
WANG Yang,HAN Yawen,ZHU Xinxin,et al. Optimization and experiment on performance of flow-ejecting self-priming pump based on CFD[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(S2):16-21. (in Chinese)

(下转第 775 页)

- trifugal pump with several vane diffusers [J]. Journal of turbomachinery ,1990(1) : 98-108.
- [8] ARNDT N ,ACOSTA A J ,BRENEN C E ,et al. Rotor-stator interaction in a diffuser pump [J]. Journal of turbomachinery ,1989 ,111(3) : 213-221.
- [9] ZHANG Desheng , WANG Haiyu , SHI Weidong , et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump [J]. Transactions of the CSAM , 2014 ,45(11) : 139 - 144. (in Chinese)
- [10] WANG Fujun , ZHANG Ling , ZHANG Haimin , et al. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in axial-flow pump [J]. Journal of hydraulic engineering , 2007 , 38(8) : 1003-1009.(in Chinese)
- [11] YAO Jie ,SHI Weidong ,WU Suqing ,et al. Numerical calculation and experiment on pressure fluctuation in axial-flow pump [J]. Transactions of the CSAM ,2013 , 44(S1) : 119-124.(in Chinese)

(责任编辑 陈建华)

—————
 (上接第 768 页)

- [7] 刘建瑞,文海罡,高振军,等. 射流喷嘴几何参数对喷灌泵自吸性能的影响 [J]. 农业工程学报, 2012 , 28(24) : 47-54.
 LIU Jianrui , WEN Haigang , GAO Zhenjun , et al. Effects of geometric parameters for jet nozzle on self-priming performance of spray pump [J]. Transactions of the CSAE , 2012 , 28(24) : 47-54. (in Chinese)
- [8] 周英环,袁寿其,刘建瑞,等. 新型射流式喷灌自吸泵的水力设计与对比试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2009(4) : 62-68.
 ZHOU Yinghuan ,YUAN Shouqi ,LIU Jianrui , et al. Hydraulic design and experimental reserch on the new self-priming sprinkler irrigation jet pump [J]. China rural water and hydropower , 2009(4) : 62-68. (in Chinese)
- [9] 李红,徐德怀,涂琴,等. 自吸泵启动过程气液两相流动的数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2013 , 29(3) : 77-83.
 LI Hong ,XU Dehuai ,TU Qin , et al. Numerical simulation on gas-liquid two-phase of self-priming pump during starting period [J]. Transactions of the CSAE , 2013 , 29(3) : 77-83. (in Chinese)
- [10] 李晓俊. 离心泵叶片前缘空化非定常流动机理及动力学特性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- [11] ABDULAZIZ A M. Performance and image analysis of a cavitating process in a small type Venturi [J]. Experimental thermal and fluid science , 2014(53) : 40-48.

(责任编辑 陈建华)