

三级离心混输泵级间相互作用对首级性能的影响研究

郑小波, 张开辉, 郭鹏程*, 孙帅辉, 汪昭鹏

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安, 710048, Email: guoyicheng@126.com)

摘要: 为了探究气液条件下的混输泵在运行过程中的内部流动特性, 本研究以额定转速为 3500r/min 的新型离心混输泵作为研究对象, 考虑表面张力等因素, 采用 Eulerian-Eulerian 模型作为两相流模型, 液相采用 SST $k-\omega$ 湍流模型, 气相采用分散相零方程模型对不同进口含气率时的单级混输泵和三级混输泵进行数值计算。结果表明: 混输泵三级运行时, 首级泵对比单级泵做功能力有所提高; 三级泵运行过程中第二、三级泵对首级泵做功, 相反首级泵对二、三级泵做负功; 含气率越大做功越大。

关键词: 气液两相流; 含气率; 压力分布; 级间变化

1 引言

泵是输送流体的最常用的动力设备, 离心泵是最常用的泵形式之一, 离心泵也是众多学者的研究对象, 使用数值模拟的方法对离心泵进行内部流场分析和几何部件的改型是主要的研究方向^[1]。随着油气开采的发展, 离心泵在气液两相流的运用日益广泛, 因此通过数值模拟对离心泵在两相流条件下的分析和改型也成为研究的重点。Poullikkas 等^[2]考虑了几何形状、密度变化、气体的可压缩性提出一种改进模型来预测泵在气液两相条件下的性能变化。Barrios 等^[3]对电潜泵进行两相流数值计算, 并与试验结果对比验证, 得出了气泡尺寸的大小和气相阻力系数对电潜泵在两相流条件下流动的影响, 并建立了阻力系数随转速变化的关系式。Kim 等^[4]采用 CFX 软件基于 Eulerian-Eulerian 非均相流模型, 液相分析选择 SST $k-\omega$ 湍流模型, 气相分析选择零方程模型对液、气相进行计算, 对两相流泵几何结构通过试验设计进行了设计, 并提出了更高效率的设计方案。Zhu 等^[5]运用 ANSYS CFX 16.0 使用 Eulerian-Eulerian 方法对电潜泵进行气液两相的数值计算, 并将数值计算结果和试

基金项目: 国家自然科学基金(51839010), 陕西省重点研发计划(2017ZDXM-GY-081), 陕西省教育厅服务地方专项计划(17JF019)

通讯作者: 郭鹏程, E-mail: guoyicheng@126.com.

验结果对比,对气泡分析模型的验证和改进提供了参考依据。

本研究以离心混输泵模型为研究对象,在气液两相流下对三级运行和单级运行时进行数值模拟,分析不同进口含气率下其外特性、内部流动特性、气液两相流的分布和变化。

2 几何模型和网格划分

对泵在三级运行和单级运行时进行数值计算,表 1 为基本设计参数,其中转轮叶片数为 7,扩压器叶片数为 10,转轮出口直径为 131.8mm,进口直径为 62.2mm。混输泵过流部件为进口直管段、叶轮、导流腔、扩压器以及出口直管段 5 个部分(图 1)。

表 1 混输泵设计参数

流量 Q (m^3/h)	转速 n (r/min)	单级扬程 (m)	效率 η (%)
26	3500	26	75

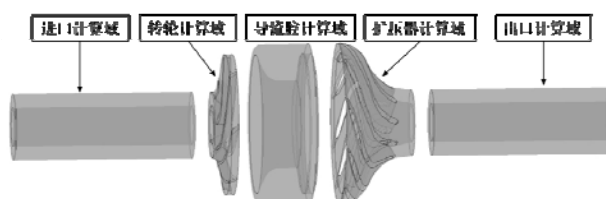


图 1 模型泵计算域三维造型

采用网格划分工具 ICEM 对转轮、扩压器、导流腔等进行结构化网格划分,并对转轮和扩压器网格进行边界层网格加密,图 2 为主要过流部件的网格及局部加密示意图。

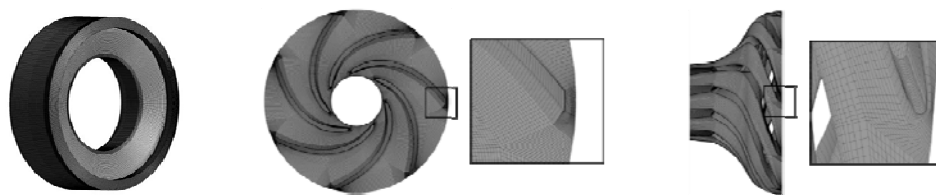


图 2 各过流部件的网格划分示意图

3 边界条件和计算方法

根据计算目的进行边界条件设置。首先,第一相设置为水(water),第二相设置为空气(Air at 25°C)。两相间相互作用选用 Fluid Dependent,壁面滑移条件选用 No Slip Wall,设置计算温度为 25°C ,水的密度为 $997\text{kg}/\text{m}^3$,设定表面张力为 $0.0073\text{N}/\text{m}$,设置总压进口

为 1 atm，沿 Z 轴方向的重力加速度为 9.81m/s^2 。

本次选用欧拉非均相流模型，对液相采用 SST $k-\omega$ 湍流模型，气相则采用分散相零方程模型。进口边界条件为总压条件，并给定含气率，出口边界条件为质量流量，数值计算时采用转轮与其他部件交界面为动静交界面，设置为 Frozen Roter 模式。

4 计算结果分析

4.1 混输泵外特性分析

4.1.1 混输泵在不同含气率下的外特性分析

本节对混输泵的单级运行和三级运行时的不同含气率下的外特性进行分析。图 4 含气率工况下的外特性曲线，从图 4 (a) 中可以看出，扬程和效率都随着含气率的增大而减小，其主要原因时由于气体的存在，流动紊乱、集体聚集阻塞流道导致扬程下降、效率降低。当含气率大于 5% 时，扬程和效率下降呈现急剧下降趋势。图 4 (b) 中扬程和效率随着进口含气率的增大而降低，且当含气率大于 5% 时外特性曲线随着含气率增大下降趋势增大，此现象和单级泵中 5% 到 10% 含气率的外特性变化趋势一致。

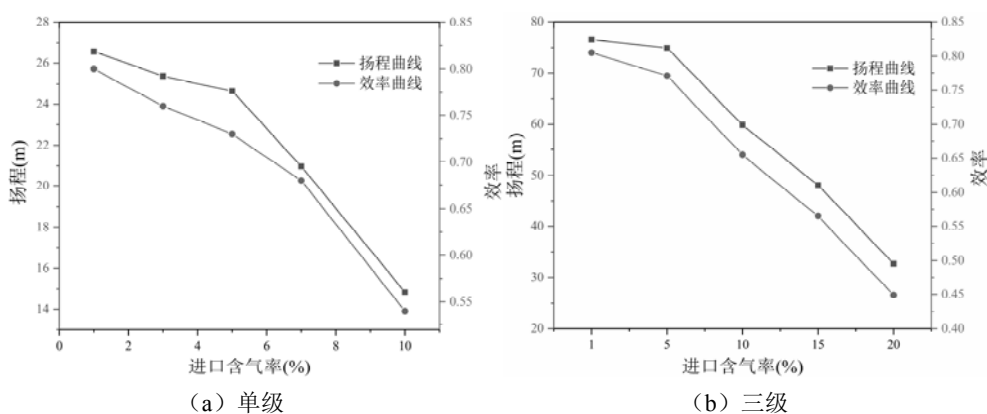


图 4 混输泵在单级运行和三级运行时的外特性曲线

4.1.2 混输泵级间外特性的相互影响分析

本节对同一模型的单级泵和三级泵中的首级进行外特性分析，通过分析第二、三级对第一级的影响来进一步分析级间相互影响。本节对单级泵和三级泵在流量为 $Q=26\text{m}^3/\text{h}$ 时、进口含气率为 1%、5% 和 10% 时的 3 个工况进行分析。

如图 4 所示，不同含气率下三级泵首级扬程高于单级泵扬程，且含气率越大扬程差越大，进口含气率为 10% 时，扬程差 $\Delta H_1=0.97\text{m}$ 。不同含气率时三级泵首级效率均高于单级泵效率，且含气率越大效率差越大，当含气率为 10% 时效率差 $\Delta \eta_1=1.94\%$ 。

产生上述现象的原因：三级泵中首级所做的功除了本级转轮做功，还受到二、三级对它做功，做功越多转化的势能越大。

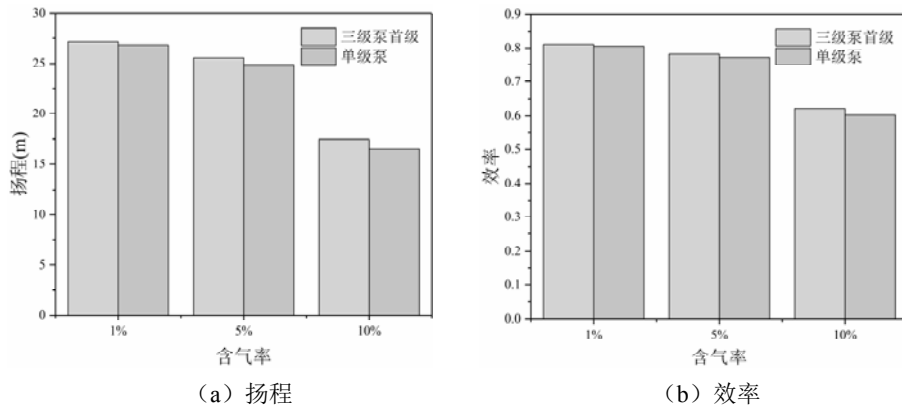


图5 三级泵首级和单级泵外特性对比图

4.2 混输泵转轮中的气相分布

4.2.1 混输泵级间相互作用对转轮气相分布的影响

本节对三级泵首级转轮和单级泵转轮在设计流量下，进口含气率为 1%、5%和 10%三个工况进行分析。图 6 中，三级泵首级和单级泵的气相分布不同，当含气率低时转轮气相分布差别很小，随着含气率的增大，差别也越大。以 10%工况为例，三级泵首级气相聚集程度和流道阻塞现象高于单级泵，原因是三级泵中二三级泵对首级做功使径向流速高于单级泵，导致转轮中气液分离加剧、气相聚集增加。



图6 三级泵首级和单级泵转轮气相分布对比图

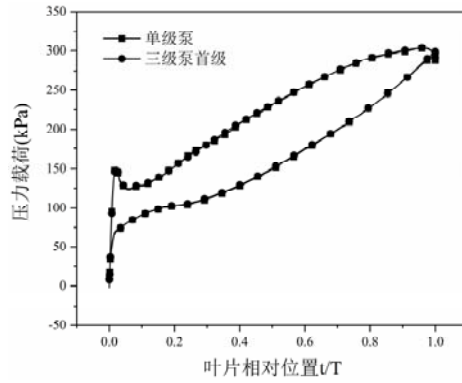
4.3 混输泵级间相互作用对转轮叶片载荷的影响

本节对相同边界条件下的三级泵和单级泵首级进行叶片载荷分析。流量为 $Q=26\text{m}^3/\text{h}$ 时，对进口含气率为 1%、5%和 10%三个工况进行分析。

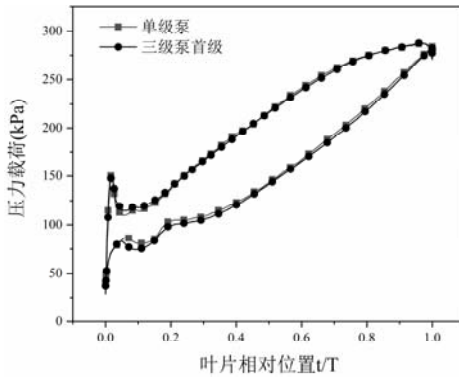
如图 7 中所示，1%和 5%时，三级泵首级和单级泵转轮叶片载荷基本相同，进口含气率为 10%时三级泵首级转轮叶片载荷低于单级泵转轮叶片载荷，即三级泵首级转轮的静压低于单级泵转轮静压，即含气率越大第二、三级对首级转轮叶片载荷影响越大。



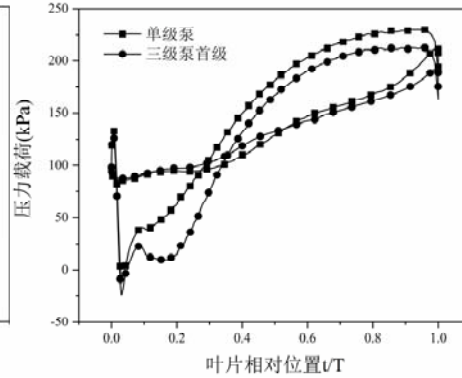
(a) 分析叶片在转轮中的位置



(b) 进口含气率为 1% 时叶片载荷



(c) 进口含气率为 5% 时叶片载荷



(d) 进口含气率为 10% 时叶片载荷

图 7 单级泵和三级泵首级转轮叶片载荷曲线对比

5 结论

本研究对三级泵和单级泵进行定常数值计算, 分析三级泵首级和单级泵外特性、内部含气率和叶片载荷对比分析, 得出混输泵级间相互作用对泵的影响。

(1) 不同含气率下三级泵首级的扬程和效率高于单级泵的扬程和效率, 含气率越大差距越大, 即三级泵运行时第二、三级对首级做功, 使得首级扬程和效率高于单级泵运行时的扬程和效率。

(2) 三级泵首级转轮气相聚集高于单级泵转轮。这是由于三级泵运行时首级泵受二、三级做功, 使得流速增加, 使得湍流强度更明显, 流道中气液分离更明显。

(3) 含气率逐渐增大时, 三级泵首级转轮叶片载荷和单级泵转轮叶片载荷差值越大。

参 考 文 献

- 1 郭鹏程, 罗兴铨. 不同断面型式蜗壳对离心泵性能影响的数值模拟[J].排灌机械工程学报, 2010, 28 (4): 300-304.
- 2 A. Poulikkas. Compressibility and condensation effects when pumping gas-liquid mixtures[J]. Fluid Dynamics Research, 1999, 25: 57-62.
- 3 Lissett Barrios, Mauricio Gargaglione Prado. CFD modeling inside an electrical submersible pump in two-phase flow condition[J]. Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009: 1-13.
- 4 Kim J H, Lee H C, Kim J H, et al. Improvement of hydrodynamic performance of a multiphase pump using design of experiment techniques[J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137 (8): 01-15.
- 5 Jianjun Zhu, Hongquan Zhang. Numerical study on electrical-submersible-pump two-phase performance and bubble-size modeling[J]. Society of Petroleum Engineers, 2017: 1-12.

Numerical study on gas-liquid two-phase flow in centrifugal mixing pump

ZHENG Xiao-bo, ZHANG Kai-hui, GUO Peng-cheng*, SUN Shuai-hui, WANG Zhao-peng

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, E-mail: guoyicheng@126.com)

Abstract: In order to explore the internal flow characteristics of the mixed pump under gas-liquid conditions during operation, a new centrifugal mixing pump with a rated speed of 3500r/min was used as the research object. Considering the surface tension and other factors, the Eulerian-Eulerian model was used as two. In the phase flow model, the liquid phase adopts the SST k- ω turbulence model, and the gas phase uses the dispersive phase zero equation model to numerically calculate the single-stage mixed pump and the three-stage mixed pump at different inlet gas contents. The results show that the performance of the first-stage pump is improved compared with the single-stage pump when the mixed-stage pump is operated in three stages. The second- and third-stage pumps work on the first-stage pump during the operation of the third-stage pump, and the first-stage pump is opposite. The tertiary pump performs negative work; the greater the gas content, the greater the work.

Key words: Gas-liquid two-phase flow; Gas content; Pressure distribution; Interstage change.