

水轮机式液力透平蜗壳改型数值分析

庞焯, 孙帅辉, 朱景源, 郭鹏程*

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

摘要: 为抑制液力透平在气-液两相工况中工作时蜗壳内气液两相工质的分离现象, 改善透平叶轮内部的流动状况, 提高透平性能, 本文对一水轮机式液力透平的蜗壳结构进行了改型设计, 提出三种改型方案, 并对改型后的透平进行全流道数值模拟, 其中湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型, 多项模型为欧拉-欧拉粒子模型。研究了蜗壳改型后透平在不同含气率和不同流量工况时的外特性及内部流动特征。研究表明, 在蜗壳中增加隔板结构之后能有效的提高透平在两相工况下的效率和输出功率, 蜗壳和叶轮内部的气液相分布得到改善, 叶轮内的叶片吸力面的漩涡变小, 叶片表面压力曲线中做有用功的面积变大。本研究对于提高透平的能量回收效率, 促进工业流程中的节能减排具有重要意义。

关键词: 水轮机式液力透平; 欧拉-欧拉粒子模型; 气液两相; 蜗壳改型; 数值模拟

1 引言

液力透平作为能量回收装置广泛地应用在工业过程中^[1], 在某些工业过程中的工质会含有溶解的或者未溶解的气体。例如在液化天然气(LNG)减压节流的过程及合成氨过程中的液力透平都存在气液相并存的现象^[2-4]。

Suh^[5]利用 CFD 软件建立了一个多相流泵的欧拉-欧拉两相流数值模型, 对影响气泡的各种相间力进行了分析并给出设定参数的推荐值。Kim^[6]在计算中采取欧拉-欧拉粒子模型, 指出预测粒子间阻力的 Grace 模型更精确。Gulich^[7]对一台三级泵在气液两相工况下反转做液力透平进行了实验, 提出了一种等温模型来预测泵在两相流工况下反转做液力透平时的性能; 模型指出当透平进口 GVF 小于 80%, 温度的变化可以忽略不计。杨军虎^[8]利用 Fluent 中的混合多相模型研究了单级和一台五级离心泵做透平时气液两相流工况下的性能, 指出叶轮内部存在气相体积分布不均的现象。史凤霞^[9]对不同含气率条件单级离心式透平进行了数值模拟, 结果发现气相在叶轮出口聚集, 随着含气率的增大聚集现象变得明显。孙帅

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)和陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JM5147)

通讯作者: 郭鹏程, E-mail: guoyicheng@126.com

辉^[10]采用欧拉-欧拉粒子模型对水轮机式液力透平在气液两相工况下的内部流场特性进行了研究,发现在蜗壳内已经发生气液分离现象。

因此,液力透平在气液两相工况下的外特性和稳定性都会变差,但目前关于改善透平在气液两相工况下性能的研究还较少报道。本文为提高液力透平在两相工况下的运行性能,对一水轮机式液力透平蜗壳结构进行了改型设计,提出了三种改型方案,并对其进行了数值模拟分析。

2 几何模型及数值方法

2.1 改型方案及网格划分

针对两相工质在蜗壳内发生气液分离现象的问题,对一水轮机式透平的蜗壳进行了几何改型。图1左边是蜗壳三种改型方案的示意图,三种方案均在蜗壳中增加隔板结构,但隔板的形状和终止位置不同。右边是方案1的网格示意图,蜗壳采取非结构化网格,在隔板和蜗壳出口边进行网格加密,其余部分均采用结构化网格,叶片表面建立8层边界层网格,计算时采用的网格总数约为728万。

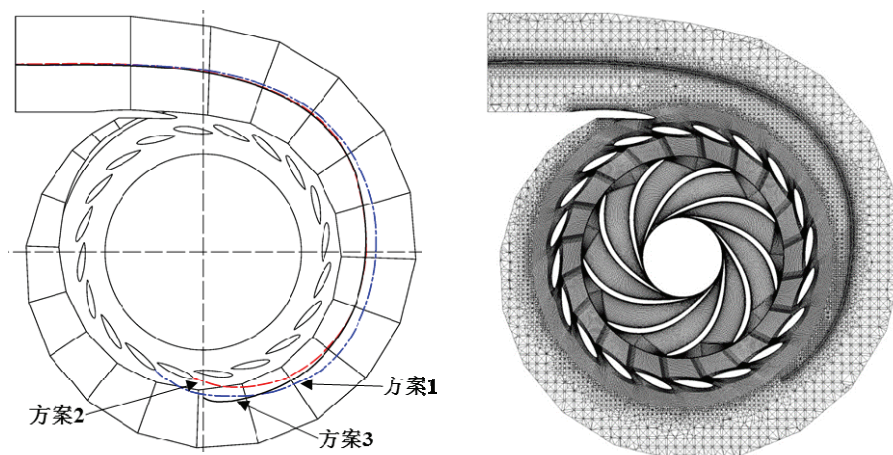


图1 蜗壳改型方案及方案1的网格示意图

2.2 边界条件设置及湍流模型

模型入口采用质量流量入口,出口为静压出口。叶轮采用旋转坐标系,导叶蜗壳采用静止坐标系^[11]。壁面采用光滑无滑移边界条件。两相流模型采取欧拉-欧拉粒子模型,给定阻力系数和气泡的直径,湍流模型使用更合适气液两相计算的SST $k-\omega$ 模型。

3 蜗壳改型性能及流场分析

3.1 外特性能分析

液力透平在进口工质气相体积分数较大时,透平的效率和输出功率会有大幅度的下降。因此,对蜗壳改型前后液力透平在三种流量工况下,进口气相体积分数为 20%时性能和流场进行了模拟。模拟的工况点如见表 1。

表 1 改型模型模拟工况点

名称	工况 1	工况 2	工况 3
单位流量 (L/s)	413	349	272
含气率 (%)	20	20	20

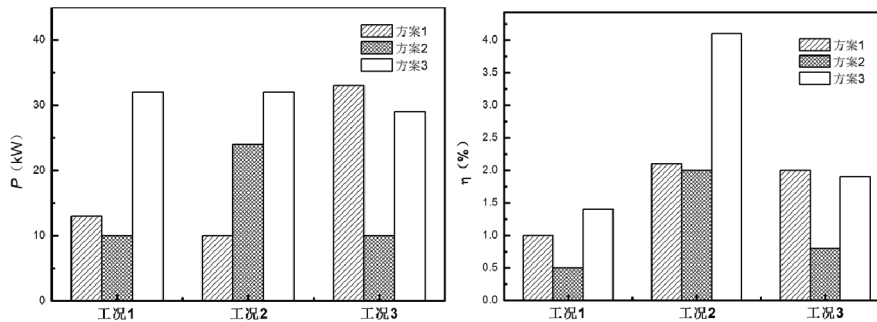


图 2 改型前后输出功率和效率增量

图 2 是改型蜗壳的 3 个方案对透平功率和输出功率的增量柱状图,左边是输出功率的增量图,右边是透平效率的增量图。由图看出,方案 1 和方案 3 对透平的输出功率和效率的改善明显好于方案 2。在工况 2 处含气率为 20%时,方案 3 使透平效率提高 4.1%,输出功率增加 30kW。

3.2 气相分布

图 3 是蜗壳改型前后,透平在工况 3 条件下,含气率为 20%时的气相体积分布图,图 4 时蜗壳截面上的气体体积分布图。从图中可以看出,工质在蜗壳内发生了气液分离现象,这是由于气相工质的密度远小于液相工质的密度,液相工质沿隔板的内表面和蜗壳壁面运动,气相工质进入叶轮或者沿隔板的外侧运动。隔板尾部含气率较高的工质继续向前运动,导致蜗壳后四分之一管段的蜗壳内相对原始模型含气率分布更为均匀,如图 4 中当 N 为 10 和 13 的截面。在未改型的蜗壳中可以看到叶轮出口边出现气相工质聚集现象,在蜗壳中增加隔板结构之后,气相聚集现象得到改善,如图 3(b)与图 3(c)中圈内所示。

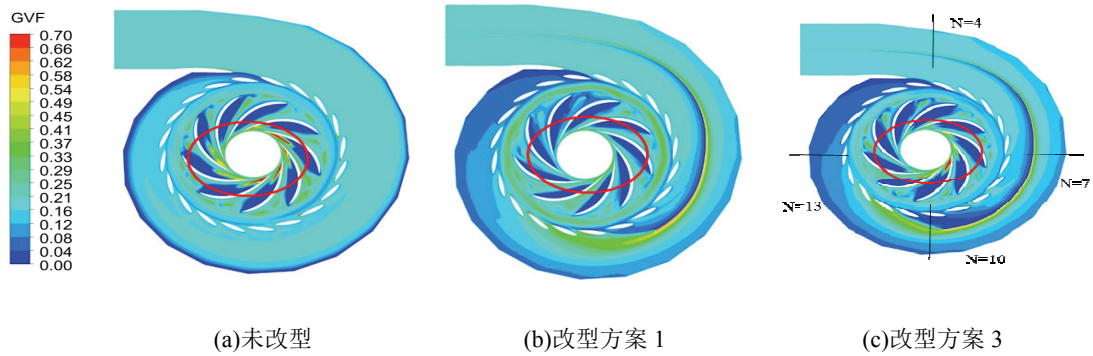


图3 改型前后气相分布

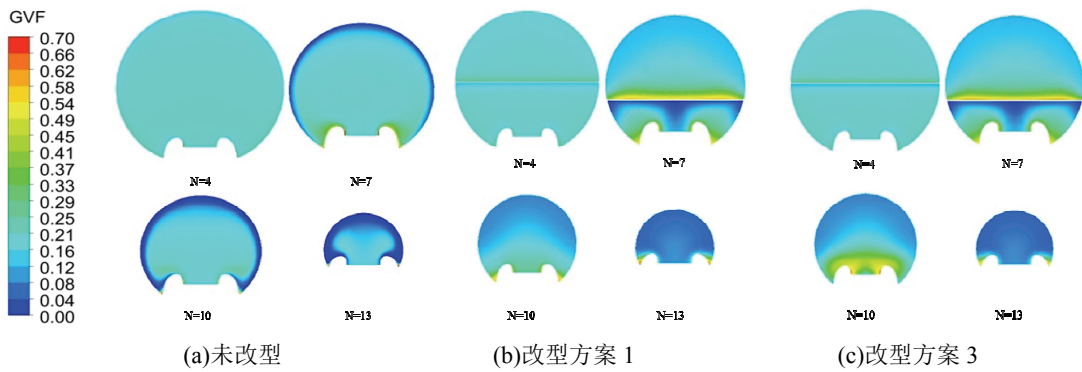


图4 改型蜗壳截面气相分布

3.3 流线分布

图5是工况3条件下，蜗壳改型前后叶轮内部的流线图，从图中可以看出每个叶片的吸力面存在着漩涡，漩涡占据了流道内的空间，混合工质流经漩涡时速度会变大。如图5(b)红色圈中所示，在叶轮的进口边出现回流现象，是由沿着叶片吸力面向外运动的工质会在流道入口处和准备进入流道的工质发生碰撞形成。在蜗壳中增加隔板结构后，叶片吸力面的漩涡变小，方案1的漩涡小于方案3，这也是该工况下方案1的改型效果好于方案3的原因。

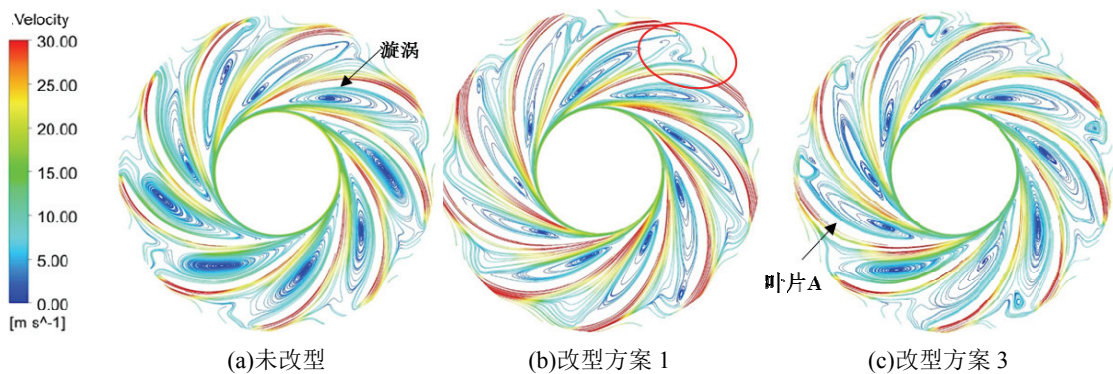


图5 改型前后叶轮内部流线

3.4 静压力曲线

图 6 给出工况 3 条件下蜗壳改型前后叶片 A 表面的静压力曲线图, 改型前叶片相对位置 0.2 以前和 0.5-1 表面的吸力面压力大于工作面压力, 这个区域做负功。在蜗壳中增加隔板之后, 叶片吸力面和压力面的最大压力均有提高, 做负功的面积减小, 做正功的面积增加, 因此改型之后透平输出功率增加。在该工况下, 方案 1 增加的叶片有用功的面积大于方案 3。

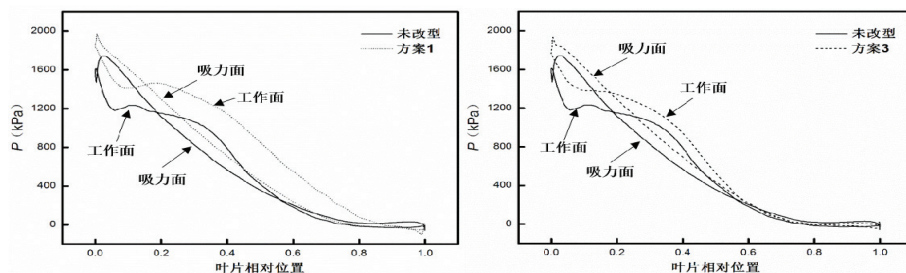


图 6 改型前后叶片 A 的静压力曲线图

4 结论

本文对一水轮机式液力透平的蜗壳进行了改型, 并对其在两相下的性能和流场进行了数值计算, 对改型效果进行了比较, 并对工况 3 下, 不同改型透平内的流场进行了分析, 得到以下结论。

(1) 蜗壳改型可以有效提高透平的输出功率和效率, 最高可提高透平的效率 4.1%, 输出功率可提高 30kW。

(2) 在蜗壳中增加隔板结构之后, 工质在蜗壳内分成两个部分发生气液分离现象, 蜗壳内部的气相分布情况得到改善, 和未改型的蜗壳相比, 蜗壳后 1/4 管段中混合工质的气相分布更为均匀, 叶轮出口边的气相聚集现象得到抑制。

(3) 蜗壳改型后, 每个叶轮流道中叶片吸力面的漩涡变小, 漩涡耗散的能量也会减少, 同时叶轮表面做有用功面积变大, 透平效率和输出功率提高。

参考文献

- 1 陈铁军,郭鹏程,骆翼,等.基于反转双吸泵的液力透平全特性的数值预测[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(03): 195-199.
- 2 万学丽,刘少伟,陈琪,等.LNG液化厂用低温潜液液力透平国产化应用分析[J]. 通用机械, 2015(02): 32-34.
- 3 柳奉谦.液力透平在合成氨工艺中的应用[J]. 天然气化工(C1化学与化工), 2017, 42(04): 66-68.

- 4 Stefanizzi M, Torresi M, and Fomarelli F. Performance prediction model of multistage centrifugal Pumps used as Turbines with Two-Phase Flow. 2018, 73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Italy.
- 5 Suh, WJ, Kim, JW and Choi, SY. Development of numerical Eulerian-Eulerian models for simulating multiphase pumps [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 62: 588-601.
- 6 Kim JH, Jung UH and Kim S, Uncertainty analysis of flow rate measurement for multiphase flow using CFD [J]. Acta Mechanica Sinica, 2015, 31(5): 698-707.
- 7 Gulich, JF., 2008, "Centrifugal Pumps" 2nd ed, New York.
- 8 杨军虎, 许亭. 气液两相介质的多级液力透平特性[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(02): 45-50.
- 9 史凤霞, 杨军虎, 王晓晖. 变工况下气液两相液力透平的性能分析[J]. 流体机械, 2018, 46(01): 40-45.
- 10 Sun SH, Pang Y, Guo PC, et al. Numerical simulation of two-phase flow in an energy recovery micro-hydraulic turbine based on Francis hydraulic model [C]. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 240 (2019) 042006 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/240/4/042006.
- 11 郭鹏程, 罗兴铸, 周鹏, 等. 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(04): 300-304.

Numerical analysis of the volute modification in a hydraulic turbine

PANG Ye, SUN Shuai-hui, ZHU Jing-yuan, GUO Peng-cheng*

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

Abstract: In order to reduce the gas-liquid separation in the volute and improve the performance of the hydraulic turbine when it works in the gas-liquid two-phase condition, the volute structure of a micro-hydraulic turbine is modified and three modification schemes are proposed in this paper. The SST $k-\omega$ turbulence model and Eulerian-Eulerian particle model were used to simulate the flow field in the modified turbine. The performance and internal flow characteristics of the turbine under different gas volume fractions and flow rate conditions are studied. The results show that the efficiency and output power of the turbine can be effectively improved by adding baffle structure in the volute. The gas phase distribution inside the volute and impeller is improved, the vortex on the blade suction surface inside the impeller becomes smaller, and the area of useful work in the blade surface pressure curve becomes larger. This study is beneficial to improving energy recovery efficiency of turbines and reducing emission in industrial processes.

Key words: Micro-hydraulic turbine; Eulerian-Eulerian particle model; Two-phase flow; Volute modification; Numerical simulation