

尾水管导流板对离心泵作透平时内部流动的影响

杨军虎 张欣娟 李怀瑞 李 瑶

(兰州理工大学 能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了研究尾水管导流板对离心泵作透平时内部流动的影响,采用 ANSYS-Fluent 软件,对增加尾水管导流板的液力透平内部流动状态进行数值模拟。通过安装尾水管导流板,使得尾水管实现收集叶轮出口液流并修正流动方向的作用,从而消除了叶轮流出液体的旋转运动,即消除尾水管中液体的圆周分速度,进而减少了由旋转造成的液力透平水力损失。对比分析了不同工况下有、无尾水管导流板时液力透平尾水管与叶轮内部的流动状态,揭示了尾水管导流板对液力透平各个过流部件流动状态的影响。研究结果发现:通过对透平尾水管加导流板对离心泵作透平尾水管和叶轮内部流场的流动状态有明显的改善,显著提高了泵作透平的水力效率,拓宽了离心泵作透平的高效运行区。

关键词: 离心泵;液力透平;尾水管导流板;内部流动;影响

中图分类号: TH137; TH312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-0813(2021)04-0056-06

The Influence of Draft Tube Guide Plate on the Inner Flow of Centrifugal Pump as Turbine

YANG Jun-hu, ZHANG Xin-juan, LI Huai-rui, LI Yao

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the influence of draft tube guide plate on the inner flow of Centrifugal pump, the ANSYS-Fluent software was used to simulate the inner flow of Centrifugal pump with draft tube guide plate. By adding the draft tube guide plate, the inlet part of the guide plate has the tendency to collect the flow of the impeller outlet into the axial direction, thus eliminating the rotating movement of the liquid from the impeller, that is, eliminating the circumferential velocity of the liquid in the draft tube, the hydraulic loss of the hydraulic turbine caused by this will be reduced. The internal flow states of the draft tube and the impeller under different operating conditions with and without draft tube guide plates are analyzed and compared. It is found that the flow field in the draft tube and impeller of the centrifugal pump is improved obviously by adding a guide plate to the draft tube of the turbine, and the hydraulic efficiency of the pump as a turbine is improved obviously, the high-efficiency operation zone of Centrifugal pump as turbine is widened.

Key words: centrifugal pump; turbine; draft tube guide plate; inner flow; influence

0 引言

液力透平作为一种能量回收装置,现被广泛应用于实际生产中,以达到能量回收的目的。目前,普遍使用离心泵反转作液力透平,主要是因为泵反转作液力透平(pump as turbine,简称PAT)具有结构简单、维修方便等特点^[1-3]。国内外关于液力透平的研究主要集中于预测选型、力特性研究、优化设计等问题^[4-10]。当选用离心泵反转作透平时,常存在效率低下、高效区较窄、运行不稳定等方面的问题,国内外众多学者针对相关问题进行了泵作透平的结构优化研究:文献[11]通

过对透平叶轮进口边修圆使透平效率有所提高;文献[12]在叶轮内布置长短叶片,发现泵作透平的效率明显提高;文献[13]基于神经网络-遗传算法对液力透平叶片型线进行优化,提高了透平的效率。

将导流板安装在离心泵进口处的设计已有一定研究,文献[14]采用在离心泵进水管内加装肋条的方式明显地改善离心泵进水管的流线分布。文献[15]在带有诱导轮的高速离心泵进水管加装隔板,研究表明加装隔板后进水管中圆周方向的漩涡减少。可见,在离心泵进水管中加导流板可以改善进水管中的流动状态,但当泵作透平时,尾水管作为透平机组中重要的过流部件之一,其内部损失对透平性能有较大影响,一些学者对透平尾水管内部流动分布规律进行研究并优化。文献[16]指出离心泵作透平尾水管存在与叶轮旋向相同的近似轴对称旋涡,同时指出尾水管中由于圆周速度引起的动能损失对液力透平水力效率的影响

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(51569013)

作者简介: 杨军虎(1962-)男,陕西蒲城人,教授,博士,主要从事流体机械内部流场特性研究。

不可忽略,但文献并没有指出如何消除圆周速度从而减小尾水管的动能损失。本文采用 CFD 数值计算方法,通过在透平尾水管内安装导流板,在不同工况下对有无尾水管导流板的液力透平内部流动状态进行数值模拟,分析尾水管导流板对泵作透平正常流动内部流场的影响。

1 几何模型

1.1 数值计算模型

选取比转速为 55.7 的离心泵作透平为研究对象,该离心泵的设计流量 $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 $H = 93.6 \text{ m}$ 、转速 $n = 2900 \text{ r/min}$,其主要几何参数如表 1 所示。依据以上数据,对离心泵作透平在透平尾水管沿轴向布置导流板,对导流板进行修圆处理以降低导流板对流动的阻碍,所设计导流板结构如图 1 所示。导流板的主要设计参数包括:导流板的轴向长度 $A = 60 \text{ mm}$,导流板高度 $B = 20 \text{ mm}$,导流板厚度 $d = 2 \text{ mm}$,导流板距进口叶轮交界面 $D = 35 \text{ mm}$ 以及导流板角度 $\theta = 135^\circ$ 。在液力透平尾水管内增加共计 4 个导流板。

表 1 研究对象主要几何参数

名称	参数	数值
叶轮	叶轮进口直径 D_1/mm	98
	叶轮出口直径 D_2/mm	272
	叶轮口环间隙 D_h/mm	0.2
	叶片进口安放角 $\beta_{b1}/(^\circ)$	17
	叶片出口安放角 $\beta_{b2}/(^\circ)$	26
	叶片数 Z	6
蜗壳	蜗壳基圆直径 D_3/mm	280
	蜗壳出口直径 b_0/mm	80
	蜗壳断面形状	圆形
	蜗壳进口圆断面半径 ρ_0/mm	13

2 数值计算

2.1 三维建模及网格生成

对比转速为 55.7 单级单吸式离心泵作透平进行全场数值模拟,应用 Creo 三维造型软件进行三维水体建模,图 2 为原模型泵水体模型与网格划分示意图。图 3 为增加尾水管导流板的液力透平叶轮三维水体图。采用 ICEM 软件生成自适应性较强的四面体非结

构化网格图 2,各区域的网格质量均在 0.3 以上,并对所研究模型进行网格数无关性检查,经网格无关性验证,得到比转速为 55.7 的离心泵网格数约在 230 万时,泵作透平的水力效率基本没有变化,同时考虑到计算资源的有限性,选取该网格数进行数值计算。对于添加尾水管导流板的模型使用与原模型相同的网格数(其他各部件不重新进行网格划分,只对尾水管的网格重新进行划分)。

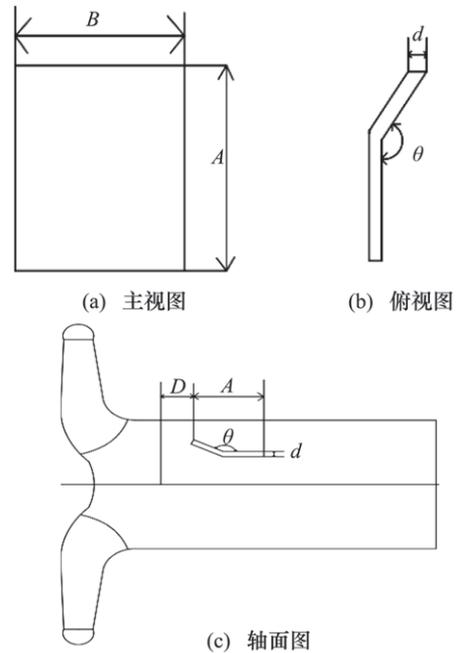


图 1 尾水管导流板几何结构示意图

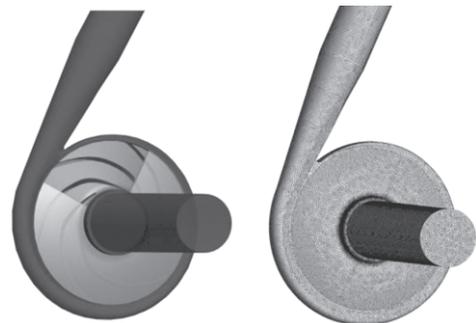


图 2 原模型泵水体模型与网格划分示意图

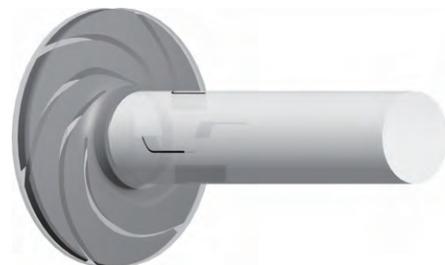


图 3 加导流板叶轮三维水体图

2.2 边界条件设置

采用 ANSYS - Fluent 软件进行数值模拟,设置进口边界条件为速度进口,进口速度由泵的流量与进口面积计算;出口为压力出口,出口压力根据工艺要求设为 0.5 MPa。选用 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型,压力和速度耦合采用 SIMPLEC 算法,动静耦合面采用采用 Moving Reference Frame 边界条件,设置残差精度为 1.0×10^{-5} 壁面为无滑移条件。

2.3 模拟结果准确性验证

为了验证泵作透平数值模拟方法的准确性,在图 4 所示的实验台上对比转速为 55.7 的离心泵在清水介质下反转作透平进行试验,试验在 0.8 ~ 2.0 倍的泵设计流量点(20 L/s、25 L/s、30 L/s、35 L/s、40 L/s、45 L/s、50 L/s)进行。

透平的输出扭矩和转速通过透平输出轴上的扭矩、转速传感器测出,透平的进出口压头差可以通过安装于透平进出口管路上的压差传感器读出,流量通过透平进口管路上的流量计读出,这样可以计算:

$$P_{out} = \frac{Mn}{9550};$$

$$P_{in} = \rho gQH;$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%。$$

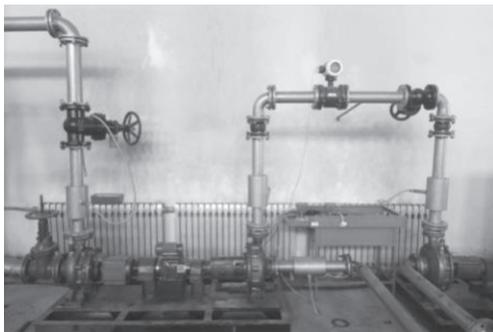


图4 液力透平实验台

比转速为 55.7 的离心泵在清水介质下反转作透平时不同流量工况下的压头 H 流量 Q 效率 η 输出功率 P_{out} 在不同流量下的试验值和模拟值结果绘于图 5。从图中可以看出:数值模拟得到的结果和试验结果吻合较好,说明数值模拟的方法、策略、方格网数是合适的。另外还可以看出,比转速为 55.7 的泵在清水介质下作透平时,透平最优工况的流量为 40 L/s,压头为 149.2 m,透平输出功率为 31.5 kW,效率为 68.25%。

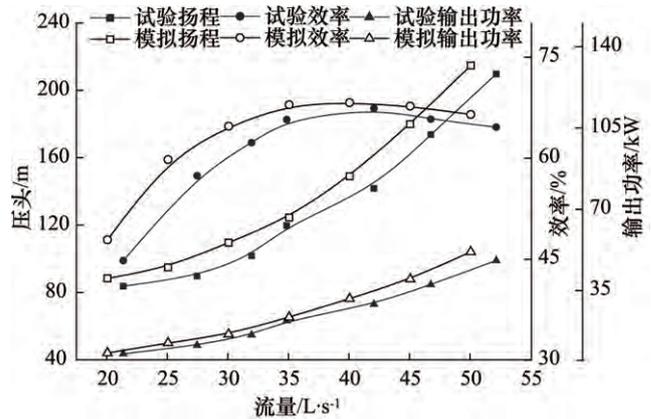


图5 模拟与实验的外特性曲线对比

3 数值模拟结果及分析

3.1 外特性结果对比

通过对有、无尾水管导流板的离心泵作透平进行定常数值模拟,得到有、无尾水管导流板的离心泵作液力透平的外特性对比如图 6 所示。明显可以看出:安装尾水管导流板后,离心泵作液力透平的压头有所下降,输出功率略有上升,这导致加尾水管导流板的离心泵作液力透平整体的水力效率提高。最优工况点(1.6Q)液力透平的水力效率提高了 3.027%。

3.2 尾水管内部流场对比

1) 尾水管流线对比

液力透平外特性的变化是内部流场的外在表现,

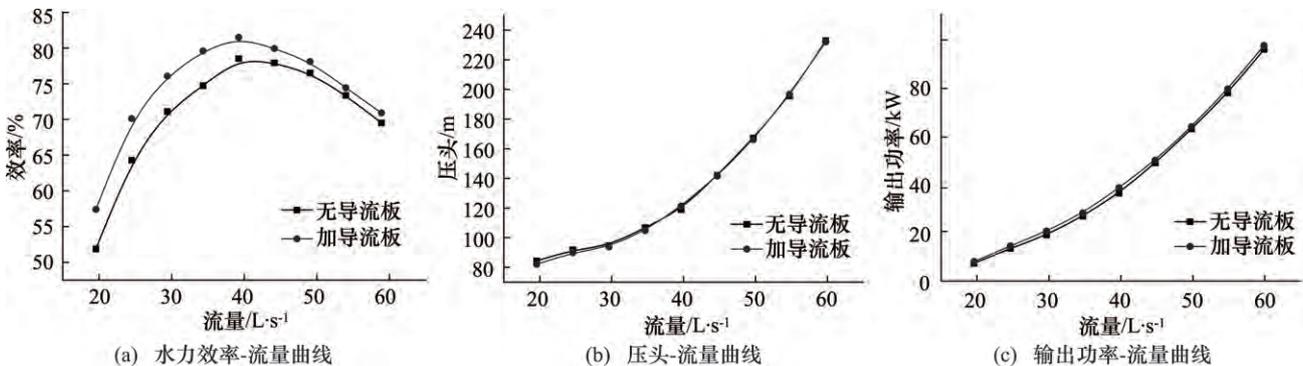


图6 有、无尾水管导流板离心泵作液力透平外特性曲线对比

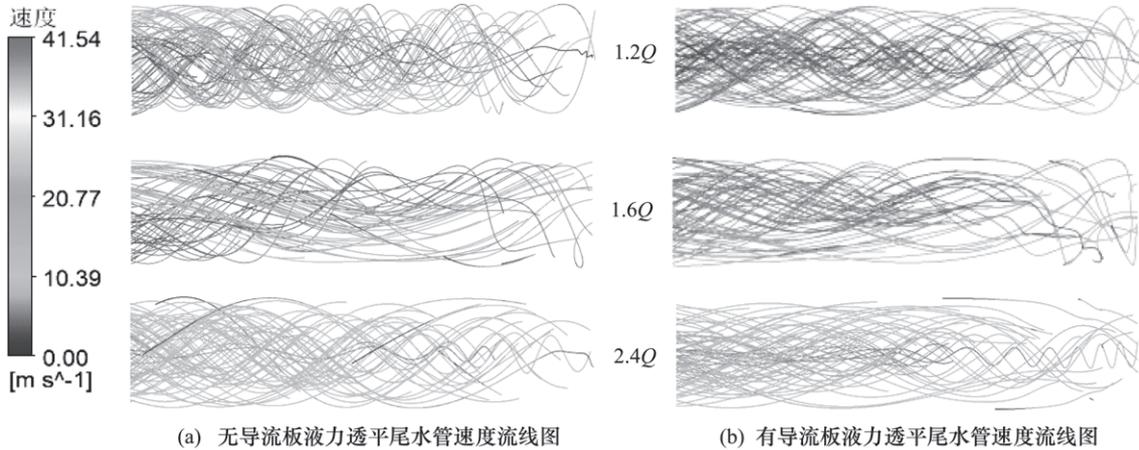


图7 不同流量下有、无尾水管导流板的液力透平尾水管速度流线图

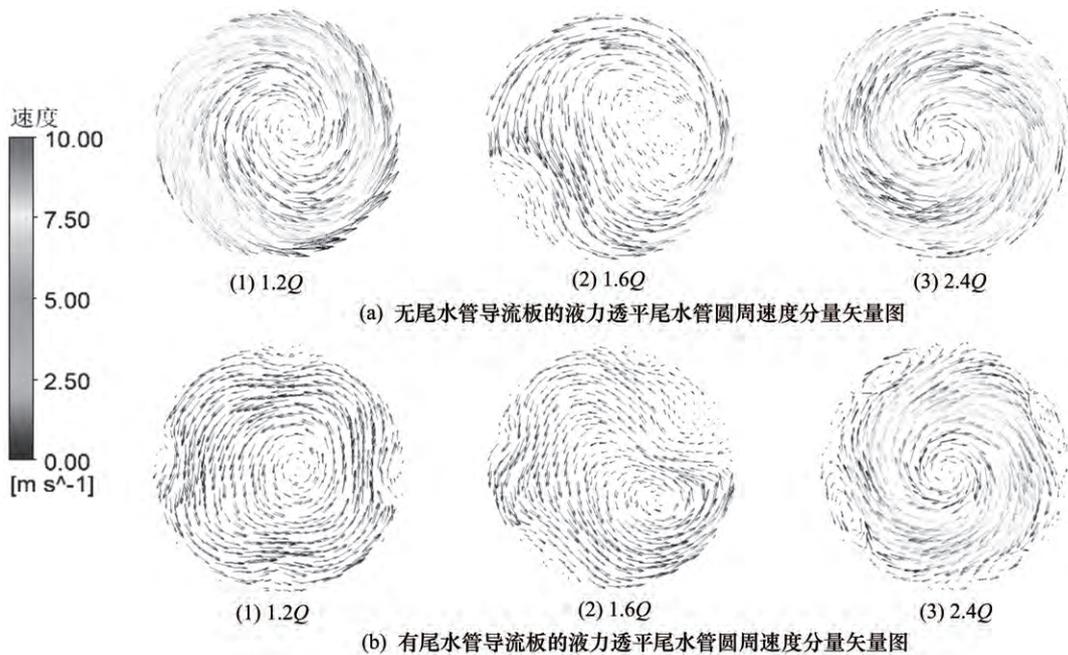


图8 不同流量下有、无尾水管导流板的液力透平尾水管截面的圆周速度分量矢量图对比

为了更加清楚的理解上述液力透平性能参数变化的本质原因,下图7为小流量点(1.2Q)、最优工况点(1.6Q)、大流量点(2.4Q)时,有、无尾水管导流板的液力透平尾水管速度流线图。从图可以看出在无导流板的离心泵作透平时尾水管中出现一系列的尾水涡,在最优工况点(1.6Q)处尾水管的流线较其他两个工况顺畅并未出现很强烈的速度扰动,使得流动的不规则造成尾水管流体流动的能量损失,这也就解释了最优工况下尾水管水力损失最小的原因。在加入尾水管导流板之后明显可以看到不同工况下的液力透平的尾水管流线均变得顺畅,尤其对于近壁面区域流线明显变顺畅,这就证明导流板的存在改变了尾水管的流动状态,这样大大降低了尾水管中的水力损失使得水力效率明显提高。

2) 尾水管圆周速度分量对比

如图8为有、无尾水管导流板的离心泵作透平的尾水管距离叶轮进口交界面110mm处截面(图9示意图)的圆周速度分量矢量图对比,从图可以看出无尾水管导流板的离心泵作透平的尾水管中在小流量区近壁面处圆周速度较高,在最优工况点处透平尾水管的圆周速度相对比较低,而随着流量的增加液力透平尾水管的圆周速度分量的较高区从尾水管外侧向尾水管内部转移。添加尾水管导流板之后液力透平的尾水管圆周速度分量无论是在小流量区和最优工况点、大流量点处均明显降低,这就导致了尾水管中因为圆周速度引起的动能损失有所下降,从而提高了液力透平的水力效率。

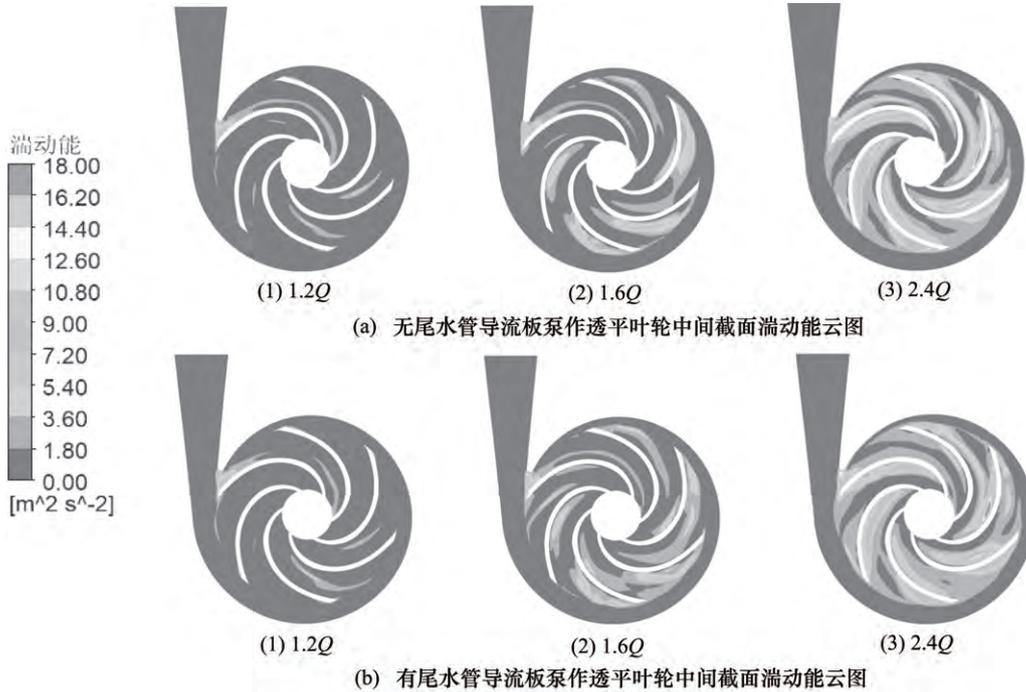


图 10 不同流量下有、无尾水管导流板的液力透平叶轮中间截面湍动能云图对比

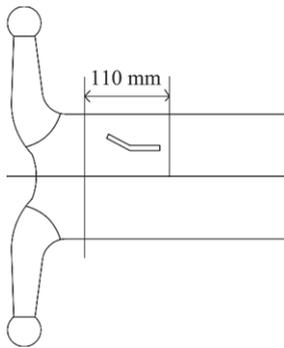


图 9 尾水管截面示意图

3.3 叶轮中间截面湍动能对比

有、无尾水管导流板的离心泵作透平叶轮中间截面湍动能云图如图 10 所示。从无尾水管导流板的离心泵作透平叶轮中间截面湍动能云图发现：小流量区透平叶轮中间流道及靠近蜗壳喉部区域内成为泵作透平叶轮中的湍动能主要集中区。随着流量的增加叶轮内的湍流强度也随之增大，同时叶轮中的湍动能从叶轮进口处逐渐向整个叶轮流道内扩散。加有尾水管导流板的液力透平叶轮中间截面上的湍动能明显要小于无尾水管导流板的，可见尾水管导流板的添加不仅影响透平尾水管的内部流场，同样也改变透平叶轮内部流场。使其叶轮内的损失较小这也就是在液力透平不同流量下，加尾水管导流板的液力透平水力效率较高的原因。

4 结论

本文通过对不同工况下有、无尾水管导流板的离心泵作透平进行数值模拟，分析了尾水管导流板对泵作透平内部流场的影响，研究发现：

通过对有、无尾水管导流板的离心泵反转作透平外特性分析，加装尾水管导流板的透平整体输出功率明显高于无尾水管导流板的离心泵作透平，加装尾水管导流板的离心泵作透平整体水力效率有所提高，其最优工况点（1.6Q）处透平水力效率提高了 3.027%。

通过对有、无尾水管导流板的离心泵作透平的尾水管内流线云图和圆周速度矢量云图的分析，发现尾水管导流板的添加使得尾水管内流线变得平坦，圆周速度有所降低，由圆周速度所引起的能动损失继而减低，尾水管导流板的添加起到了引流的作用。

从有、无尾水管导流板的离心泵作透平叶轮中间截面湍动能分布云图来看，尾水管导流板的添加减少了叶轮内部的湍动能，改善了透平叶轮内部流体流动状态，减少了因湍能损耗造成的透平能量损失。

参考文献

[1] Pradeep Bansal, Nick Marshall. Feasibility of Hydraulic Power Recovery from Waste Energy in Bio-gas Scrubbing Processes [J]. Applied Energy 2010, 87(3): 1048-1053.

(下转第 63 页)

等边三角形,可减小 F_3 的大小以达到减小二次效应的预压力的影响的效果。

将水平夹角调整为 35° ,将水平直角边延长至4.1 mm。O形圈压缩量为三角形内接圆面积与O形圈截面积之比即:

$$z = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \quad (2)$$

式中 z —— 压缩量;

d_1 —— O形圈截面直径;

d_2 —— 三角形沟槽内接圆。

计算得压缩量 $z = 25.7\%$ 相对原有结构压缩量增大了3% ,同时介质力在 Y 轴方向的分量由 $\sin 45^\circ \times F_1$ 变为 $\sin 35^\circ \times F_1$,减小18.9%。

经过试验验证 ,更改后的结构能可靠的实现密封1.25 MPa 气压。

4 结论

三角形密封槽在设计时应特别注意介质力 ,不合理的密封槽设计可能使O形圈的压缩量减小导致泄漏^[9]。

改变三角形两锐角角度 ,可有效调整二次效应对O形圈压缩量的影响。

参考文献

[1] 张聪超,张振炎. 阀门密封中O形圈防吹出结构设计

(上接第60页)

- [2] 王晓晖,杨军虎,史凤霞. 能量回收液力透平的研究现状及展望[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(9): 742-747.
- [3] Mao S, Yang J, Shi F, et al. Research on Energy Conversion Characteristic of Pump as Turbine [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(4): 1-10.
- [4] 杨孙圣,孔繁余,宿向辉,等. 泵及泵用作透平时的数值模拟与外特性实验[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(3): 37-41.
- [5] 杨军虎,罗凯凯,夏书强,等. 基于离心泵反转液力透平的轴向力的数值计算[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(1): 41-45.
- [6] 袁亚飞. 基于离心泵的水力透平的流场分析及性能预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [7] Li Wenguang. Effects of Viscosity on Turbine Mode Performance and Flow of a Low Specific Speed Centrifugal Pump [J]. Applied Mathematical Modelling 2016, 40(2): 904-926.
- [8] Li Wenguang. Optimising Prediction Model of Centrifugal Pump as Turbinewith Viscosity Effects [J]. Applied Mathematical Modelling 2017, 41: 375-398.
- [9] 杨军虎,雷蕾,张书玮,等. 介质黏度对泵作透平性能换算

[J]. 液压气动与密封 2018 (01): 51-52.

- [2] 李东,万昌文,李杰. 液压阀内部O形圈正确选用计算[J]. 液压与气动 2019 (5): 138-141.
- [3] 魏列江,韩小霞,熊庆辉,吕凌亘,段静. O形圈密封沟槽倒角半径对密封性能的影响[J]. 液压气动与密封, 2016, (03): 72-75.
- [4] 杜晓琼,陈国海,闫晓亮,赵永亮. 考虑安装过程的O形密封圈有限元分析模型[J]. 液压与气动, 2017, (10): 27-35.
- [5] 黄迷梅. 液压气动密封与泄漏防治[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 浦广益. Ansys workbench 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [8] 熊力,张志彬,刘银水,付磊. 基于有限元的电液舵机O形圈密封多参数耦合优化[J]. 液压气动与密封, 2020, (01): 84-87.
- [9] 杨友胜,王杰. 水液压O形圈锥面密封特性分析[J]. 液压与气动 2020 (2): 30-35.
- [10] 樊智敏,李龙,王启林. 深海高压环境下O形密封圈密封性能分析[J]. 机电工程 2019, 36(2): 131-135.
- [11] 熊力,等. 基于有限元的电液舵机O形圈密封多参数耦合优化[J]. 液压气动与密封 2020 (1).
- [12] 李凤成,等. 高压海水泵密封故障分析及解决方案研究[J]. 液压气动与密封 2020 (5).
- 的影响[J]. 排灌机械工程学报 2017, 35(7): 553-557.
- [10] 杨军虎,龚朝晖,夏书强,等. 导叶对液力透平性能影响的数值分析[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 32(2): 113-118.
- [11] 新滨仁,蔡千华. 逆运转的水泵作为水轮机运行的研究[J]. 国外大电机 2000 (2).
- [12] 杨孙圣,孔繁余,薛玲,等. 长短叶片对液力透平性能的影响[J]. 农业机械学报 2012, 43(7): 104-107.
- [13] 苗森春,杨军虎,王晓晖,等. 基于神经网络-遗传算法的液力透平叶片型线优化[J]. 航空动力学报, 2015, 30(8): 1918-1925.
- [14] 林培锋,徐文斌. 进口肋条对离心泵定常流动影响的数值研究[J]. 浙江理工大学学报, 2019, 41(4): 379-383.
- [15] 宋文武,魏立超,石建伟,等. 孔板对带诱导轮高速离心泵进口段流动特性的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2014, 7(2): 190-195.
- [16] 王晓晖,杨军虎,史凤霞,等. 液力透平轴对称旋拧尾水涡的计算与分析[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 64-68.
- [17] 沈姗姗,左强. 叶片仿鲨鱼鳍的导叶式离心泵数值仿真研究[J]. 机电工程 2020, 37(3): 221-226.
- [18] 姚宝运,等. 平衡鼓结构对多级离心泵性能影响的研究[J]. 液压气动与密封 2020 (1).