

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.6015

导叶进出口角对能量回收水力透平性能的影响

史凤霞, 杨军虎, 王晓晖

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)



史凤霞

摘要: 根据不同的导叶进、出口角,设计4组带导叶的基于单级离心泵反转的能量回收水力透平模型,应用计算流体动力学软件 Fluent 6.3 对其进行数值模拟. 结果表明: 同一流量,随着导叶进口角的增大,透平的效率和水头均显著下降,在最优工况点,模型 A 比模型 D 水力效率高出 7%. 进口角一定,出口角大于进口角时,导叶出口速度环量减小,透平效率降低;反之,出口角小于进口角时,导叶出口速度环量增加,透平效率提高. 随着进、出口角的增大,最优工况点向大流量区域偏移,转轮内部压力分布均匀性变差. 因此导叶进口角对能量回收水力透平的性能有决定性作用,进口角大于出口角有利于效率的提高. 对于其他基本尺寸确定的能量回收水力透平,存在最佳的导叶进、出口角,且导叶进、出口角对透平的外特性和内流场均有很大的影响. 结果为能量回收水力透平的进一步研究提供了一定的理论基础.

关键词: 能量回收水力透平;进出口角;外特性;内流场;数值模拟

中图分类号: S277.9; TK73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2014)05-0378-04

史凤霞,杨军虎,王晓晖. 导叶进出口角对能量回收水力透平性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(5): 378-381,398.

Effect of guide vane inlet and outlet angles on performance of energy recovery turbines

Shi Fengxia, Yang Junhu, Wang Xiaohui

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Four energy recovery hydraulic turbine models were designed according to different combinations of guide vane inlet and outlet angles based on an existing single-stage centrifugal volute pump, and the fluid flows in them were simulated numerically by using software Fluent 6.3. It was shown that at the same flow rate all the turbine efficiency and head were declined markedly with increasing inlet angle; at the best efficiency point (BEP), however, the hydraulic efficiency of model A was 7% higher than that of model D. For the same inlet angle, once the outlet angle was greater than the inlet angle, the circulation at the guide vane outlet was decreased and the efficiency of turbine was reduced; otherwise, the efficiency was raised. With increasing inlet and outlet angles, BEP was moved to a higher flow rate, and the pressure distribution in the impeller was distributed more non-uniformly. Therefore, the inlet angle plays a crucial role in determining turbine performance and a guide vane with an inlet angle larger than the outlet angle is beneficial to turbine efficiency. Especially, for a turbine in which the basic geometrical parameters of all the hydraulic components except the guide vane were fixed, there is an optimum combination between inlet and outlet angles of the guide vane. This result can provide some theoretical basis for further study on energy recovery hydraulic turbines.

收稿日期: 2013-02-12; 网络出版时间: 2014-05-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.13.6015.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAA08B05); 国家自然科学基金资助项目(51169010); 甘肃省 B 类基金资助项目(1112RJZA027)

作者简介: 史凤霞(1977—),女,内蒙古赤峰人,博士研究生(shifengxia_168@126.com),主要从事流体机械力学特性及设计理论研究. 杨军虎(1962—),男,陕西蒲城人,教授(lzyangjh@lut.cn),主要从事流体机械力学特性及设计理论研究.

Key words: hydraulic energy recovery turbines; inlet angle and outlet angle; outer performance; flow field; numerical simulation

随着液体能量回收水力透平在石油开采、煤化工、石油加工等行业的应用,近年来国内外对离心泵反转作为液体能量回收透平的研究也越来越多^[1-3], Shahram Derakhshan 等^[4]、Punit Singh 等^[5]和杨军虎等^[6]都对泵及泵作透平的外特性参数关系进行了大量的研究,但由于研究方式不同,结果差异较大. 杨孙圣等^[7]对液力透平的内流场和外特性进行了数值模拟与试验,指出离心泵反转可用作液力透平运行,并具有较高的效率,在透平叶片背面和工作面存在漩涡区域. 而如何提高透平转轮进口前环量的均匀性、转速的可控性以及透平效率,仍然是能量回收水力透平研究的热门课题^[8-10]. Shahram Derakhshan 等^[11]提出通过修圆透平转轮进口边和转轮前后盖板来提高透平的效率. Ventrone 等^[12]通过对5台泵做试验发现泵反转后增大固定导叶引流比蜗壳引流水力性能要好,可提高透平的效率. Fernandez 等^[13]提出泵反转作为液力透平使用时应在液力透平转轮进口增加导叶,增加导叶后水力透平的压头系数随流量系数的变化较小,效率随流量系数的变化较大,但最高效率点的效率提高.

为水力透平增加导叶可以使转轮进口环量均匀,透平效率提高,但是上述文献中均没有给出增加导叶的具体形式以及导叶的叶片数、进出口角等对水力透平性能的影响. 文中选取保证透平转轮基本几何参数相同的情况下,根据不同的导叶进、出口角,设计4组带导叶的基于单级离心泵反转的能量回收水力透平模型,应用计算流体动力学软件 Fluent 6.3 对其进行数值模拟.

1 研究方案

为了研究导叶进出口角对能量回收水力透平的影响,文中以一台比转数 $n_s = 51$ 的单级单吸离心泵反转作水力透平. 泵工况设计参数分别为转速 $n = 2\ 950\ \text{r/min}$, 流量 $Q = 63\ \text{m}^3/\text{h}$, 扬程 $H = 81\ \text{m}$. 当作透平使用时,泵的进口作为透平的出口,泵的出口作为透平的进口. 根据导叶进出口角的不同,设计4组水力透平模型 A, B, C, D. 选取导叶叶片厚度与转轮叶片进口厚度均为 $S = 4\ \text{mm}$, 导叶叶片数 $Z = 6$. 导叶太短,不能约束流体;导叶太长,则使蜗壳外形尺寸过度增大以及流动损失增大. 故根据转

轮和蜗壳的尺寸,选取导叶长度 l 分别为 30, 40 mm. 为使导叶与蜗壳能够很好地连接,蜗壳断面采用圆形断面. 为了防止脱流和减小冲击损失,导叶进口采用无冲击进口,导叶进口角等于蜗壳螺旋角,由此计算得到导叶进口角度 α_1 分别为 $13^\circ, 18^\circ$.

文献[14]指出增减速度环量不取决于导叶形状,而取决于导叶的进口角 α_1 和出口角 α_2 ,故选取导叶的出口角时根据增大和减小速度环量2种情况进行,由此得到的导叶几何参数如表1所示.

表1 模型导叶几何参数

参数	模型			
	A	B	C	D
l/mm	30	30	40	40
$\alpha_1/(\text{^\circ})$	13	13	18	18
$\alpha_2/(\text{^\circ})$	9	18	15	22

模型 A 和模型 B、模型 C 和模型 D 的进口角相同,模型 A 和模型 C 的导叶出口速度环量增大,模型 B 和模型 D 的导叶出口速度环量减小.

2 数值模拟及方法

采用 Pro/E 软件对蜗壳、导叶、转轮进行建模,以模型 A 为例,其实体计算模型如图1所示.



图1 计算模型

Fig. 1 Computational model

利用 Gambit 软件对4种模型进行网格划分,应用 Fluent 6.3 软件进行数值模拟. 控制方程包括连续性方程和 Reynolds 时均 Navier - Stokes 方程. 采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLC 算法,实现速度场和压力场的耦合求解. 边界条件采用速度进口,具体数值根据流量和进口面积的比值确定,设置压力

出口边界条件,固体壁面处采用无滑移边界条件.计算区域为蜗壳进口到转轮出口,一次完成计算.

3 模拟结果及分析

3.1 导叶进出口角对透平外特性的影响

图2为4种模型的水头和效率性能曲线,可以看出:随着流量的增大,水头迅速增大;在大流量区域,模型A和模型B的水头基本相同,模型C的水头高于模型D;效率随流量的增大先增大后减小,同一流量下,小流量工况时模型A效率最高;在最优工况点,模型A,B的效率相同,明显高于模型C,D的效率.其中模型D的效率最低,模型A比模型D效率高7%.且模型C,D的效率曲线不流畅,这说明同一流量下,随着进口角的增大透平的效率显著下降,水头降低,进口角增大后最优工况点逐渐向大流量区域偏移.

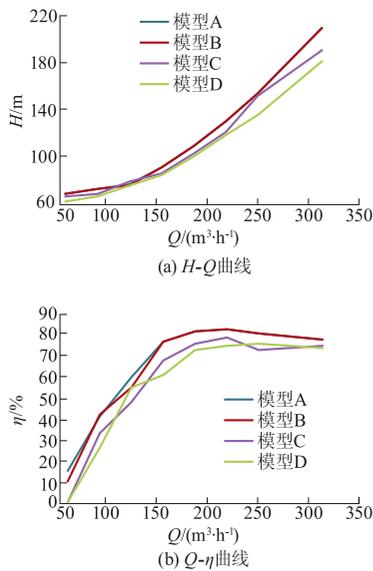


图2 4种模型性能曲线

Fig. 2 Performance curves of four models

图3为模型A和模型B、模型C和模型D在进口角相同而出口角不同时的特性曲线对比.可以看出:出口角不同,导叶出口速度环量也不同;对比模型A和模型B,两者的水头和效率曲线都比较流畅,在最优工况点之前,模型A的效率稍高于模型B,在最优工况点之后,模型A,B的性能曲线几乎没有差异,而在最高效率点时,模型A,B的流量相等,两者的水头也基本相等;对比模型C和模型D,两者的效率和效率和水头曲线都不够流畅,且模型D的最优工况点向右偏移,其最高效率比模型C的小.

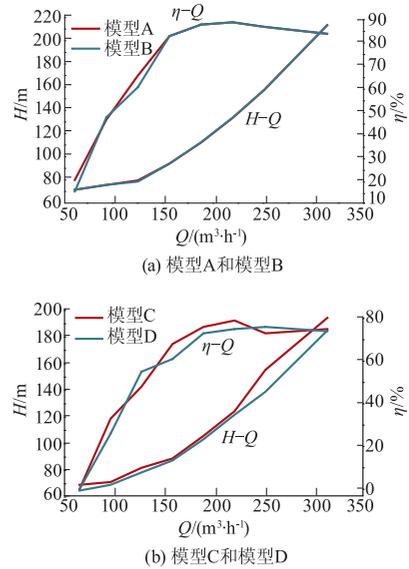


图3 4种模型性能曲线对比

Fig. 3 Comparison of performance curve of four models

综上所述,模型A的特性曲线好于模型B,模型C的特性曲线好于模型D,其根本原因在于模型A和C的导叶进口角大于出口角,出口速度环量是增大的,模型B和D的导叶进口角小于出口角,出口速度环量是减小的,说明导叶出口速度环量增大有利于提高透平的性能.此外,通过分析比较,模型A的进出口角最合适,说明当透平其他基本几何尺寸固定不变时,导叶存在最佳的进出口角.

3.2 导叶进出口角对透平内部流场的影响

图4为4种模型在设计工况时转轮和导叶的静压分布.

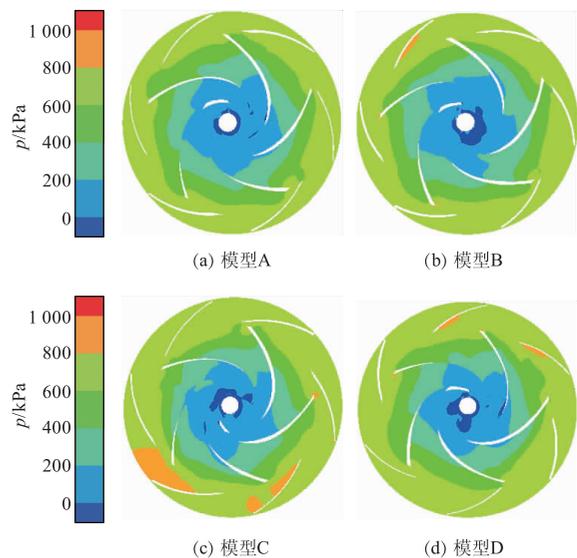


图4 转轮-导叶静压力分布

Fig. 4 Static pressure distribution in guide vane and runner

可以看出:从导叶进口到转轮出口,压力逐渐减小,这是转轮对液体做功的结果;模型A的导叶和转轮静压分布比较均匀,模型B稍差于模型A;模型B,C,D的导叶内部都存在高压区,其中模型C最严重;模型D在转轮叶片出口存在低压区,这说明在同一工况下,导叶进出口角变化引起转轮内部流场压力分布随之发生变化;进口角增大,透平内部流场静压力分布的均匀性变差。

图5为非设计工况时转轮叶片的压力面和吸力面沿径向 R 的压力分布,可以看出:从转轮叶片进口到出口,压力逐渐减小;叶片吸力面压力分布均匀,在转轮进口存在吸力面压力大于压力面的区域,模型C,D的压力面波动比较大,在转轮叶片进口处,模型B吸力面波动比模型A的大,模型D吸力面波动比模型C的大;在转轮叶片出口,流体经过转轮做功后,吸力面和压力面的压力基本趋于相等。综上所述,模型A的叶片区压力分布较合适。

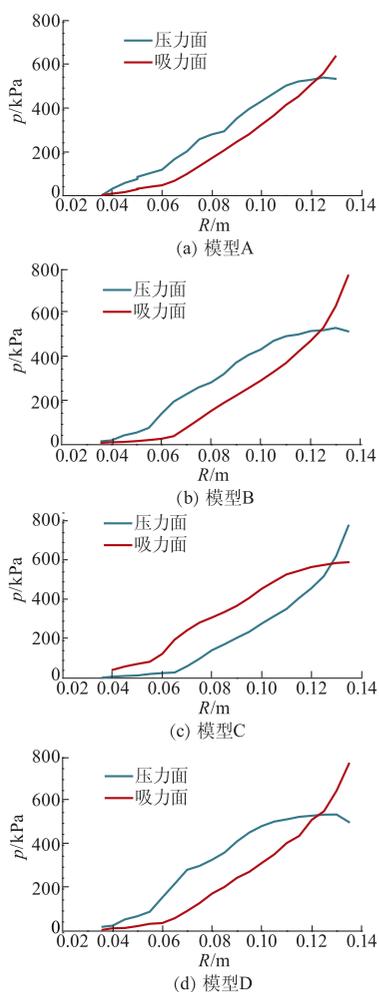


图5 转轮叶片沿径向压力分布

Fig. 5 Pressure distribution in radial direction on impeller blade of four models

4 结论

1) 导叶进口角对能量回收水力透平的水力性能有决定性作用. 对于能量回收水力透平,存在最佳的导叶进、出口角组合. 随着进口角的增大,透平效率和头都显著下降,最优工况点逐渐向大流量区域偏移,进口角过大不利于透平性能的提高。

2) 导叶出口角小于进口角,导叶出口速度环量增大,可以提高能量回收水力透平的效率,且使能量回收水力透平导叶和转轮内部流场压力分布均匀,对透平性能有利。

参考文献 (References)

- [1] 龚时宏. 水泵作为水轮机运行时的选型[J]. 小水电, 1989(5):25-27.
Gong Shihong. Type selection for pump operating as hydroturbine[J]. Small Hydropower, 1989(5):25-27. (in Chinese)
- [2] Ramos H, Borga A. Pumps as turbines: An unconventional solution to energy production[J]. Urban Water, 1999,1(3), 261-263.
- [3] 杨军虎,张雪宁,王晓晖,等. 能量回收液力透平研究综述[J]. 流体机械,2011,39(6):29-33.
Yang Junhu, Zhang Xuening, Wang Xiaohui, et al. Overview of research on energy recovery hydraulic turbine [J]. Fluid Machinery, 2011,39(6):29-33. (in Chinese)
- [4] Shahram Derakhshan, Ahmad Nourbakhsh. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008,32(3):800-807.
- [5] Punit Singh, Franz Nestmann. Internal hydraulic analysis of impeller rounding in centrifugal pumps as turbines [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(1):121-134.
- [6] 杨军虎,袁亚飞,蒋云国,等. 离心泵反转作为能量回收透平的性能预测[J]. 兰州理工大学学报, 2010,36(1):54-56.
Yang Junhu, Yuan Yafei, Jiang Yunguo, et al. Performance predictions of reversed centrifugal pumps working as energy recovery turbines[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010,36(1), 54-56. (in Chinese)