

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.019

长短叶片对液力透平性能的影响*

杨孙圣 孔繁余 薛玲 胡俐
(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 为了研究长短叶片对液力透平性能的影响,制作了液力透平样机,搭建了开式液力透平实验台,对有、无长短叶片的叶轮分别进行了数值和实验研究。研究表明,长短叶片的增加可以提高液力透平的效率,增加最高效率点的流量,降低液力透平的扬程。内部流场分析表明,长短叶片的增加,可以改善叶轮内部流场分布,减小叶轮内部漩涡的区域和强度,改善液力透平内部流动规律。对液力透平内部功率损失分布分析表明,液力透平内部的功率损失主要集中在叶轮内部,长短叶片的增加,改善了叶轮内部流动,减小了叶轮内部的功率损失。叶片数的增加加剧了叶轮和蜗壳之间的相互作用,因此蜗壳内部的功率损失有所增加。

关键词: 水泵 长短叶片 液力透平 流场分析
中图分类号: TH322 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0104-04

Effect of Splitter Blade on the Performance of Pump as Turbine

Yang Sunsheng Kong Fanyu Xue Ling Hu Li
(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In order to find out the effects of splitter blades on the performance of pump as turbine, a pump as turbine and an open pump as turbine test rig were built. Research results showed that the addition of splitter blades could improve its efficiency, increase its flow rate at the best efficiency point and decrease its required pressure head. Internal flow field analysis showed that the flow field was improved and the area and intensity of vortex region was decreased with the increase of splitter blades. Power loss distribution analysis within pump as turbine showed that power loss within impeller took up the majority of the total power loss. The power loss within impeller was decreased when splitter blades were added to the impeller. With the increase of blade number, the interaction of impeller and volute was enhanced, so the power loss within volute was increased.

Key words Pump, Splitter blades, Pump as turbine, Flow field analysis

引言

液力透平可将高压液体具有的压力能转化为透平转子的旋转机械能,用于发电或者驱动耗能机械作功,实现对高压液体能量的开发利用。液力透平以其结构简单、体积小、造价低、维修方便、运行可靠等特点,在小型水利水电资源的开发利用、化工处理过程中余压液体能量的回收等节能技术领域有着广

泛应用^[1]。目前对液力透平的研究,主要集中在通过对泵正反工况的研究来选择合适的泵用作液力透平运行^[2~4],较少有对液力透平高效设计方法的研究^[5~7]。泵反转作透平运行以后的效率通常不高于泵工况效率,因此研究液力透平的高效设计方法,是液力透平的研究方向之一。长短叶片技术在泵设计中经常采用^[8],而长短叶片对液力透平性能影响的

收稿日期: 2011-08-25 修回日期: 2011-09-02
* 国家科技人员服务企业行动项目(2009GJC10007)和江苏大学博士创新基金资助项目(CX10B_012X)
作者简介: 杨孙圣,博士生,主要从事能量回收设计理论与技术应用研究,E-mail: yangsunsheng@126.com
通讯作者: 孔繁余,教授,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: kongm@ujs.edu.com

研究则较少。

本文以一单级液力透平为研究对象,在江苏大学流体机械工程技术研究中心建设一个开式液力透平实验台,分别制作有、无长短叶片的叶轮,并对两种叶轮进行数值与实验研究。

1 实验台

目前液力透平的实验台主要是采用液力透平带动泵^[9]或者发电机发电^[3,7]等耗能设备,消耗液力透平产生的机械能和控制液力透平的转速。由于一般泵的功率范围较窄,因此采用透平驱动泵测量的功率范围较窄。采用透平驱动发电机存在发电机产生的电能消耗和发电机转速控制等问题,系统较为复杂。本文提出了一种新的液力透平实验台,具有结构简单、功率范围宽、转速自动控制等优点,较好地解决了使用透平驱动泵和发电机等设备产生的问题。

图 1 为开式液力透平实验台示意图,高压泵排出的高压液体经流量计进入透平,液力透平将液体具有的压力能转化为轴系的旋转机械能,测功机测量、消耗液力透平产生的轴功率并控制液力透平的转速恒定,压力变送器测量透平进、出口位置处的压力。通过测量液力透平进出口压力、扭矩、转速、流量等参数,计算出液力透平的扬程、轴功率和效率等。测功机扭矩测量精度为 $\pm 0.4\text{ N}\cdot\text{m}$,流量计精度等级为 B 级,压力变送器精度准确度为 0.1%。

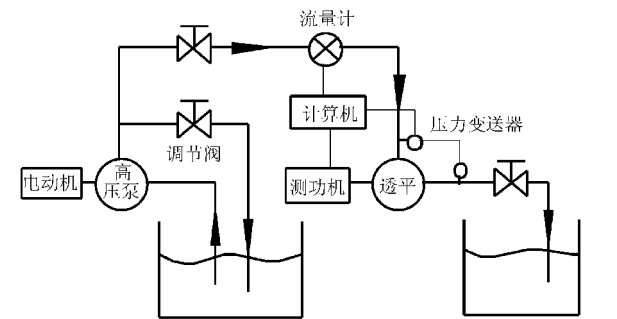


图 1 开式液力透平实验台示意图
Fig. 1 Open pump as turbine test rig

2 液力透平的主要参数

本文研究对象为一单级液力透平,其设计参数为:流量 $80\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 32 m ,转速 $1\,500\text{ r/min}$,比转数 63,叶轮旋转方向顺时针。表 1 列出了液力透平的主要几何参数。图 2 为有、无长短叶片叶轮。

3 数值计算

3.1 网格生成

当液力透平运行时,由于叶轮进口对透平性能影响较大,数值计算如果不考虑前、后腔内部的流

体,计算结果与实验结果相差较大^[10~12],因此对液力透平进行了全流场数值计算。由于前、后腔存在较小的间隙,非结构网格很难对这些细小间隙进行较好的处理,因此本文采用了结构化网格技术,对过流部件进行六面体结构网格划分,边界层 $y^+ \geq 40$ 。图 3 为有、无长短叶片叶轮网格和全流场网格装配图。

表 1 液力透平的主要几何参数
Tab. 1 Main geometric parameters of designed pump as turbine

部件	参数	数值
叶轮	叶轮进口直径 D_1/mm	102
	叶轮口环长度 L/mm	15
	叶轮口环间隙/ mm	0.25
	进口安放角 $\beta_2/(\text{^\circ})$	20
	出口安放角 $\beta_1/(\text{^\circ})$	19.5
	叶片数 z	5, 5 + 5
	叶轮出口直径 D_2/mm	255
	长短叶片与主叶片长度比	0.8
	长短叶片轴向偏置度	0.6
	叶轮轮毂直径 D_h/mm	30
蜗壳	叶轮出口宽度 b_2/mm	14.38
	蜗壳基圆直径 D_4/mm	266
	蜗壳进口宽度 b_3/mm	26
	蜗壳出口直径 D_5/mm	65
	蜗壳断面形状	圆形

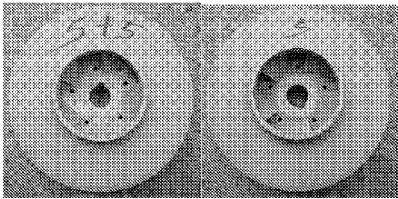


图 2 有、无长短叶片叶轮照片
Fig. 2 Impellers with and without splitter blades

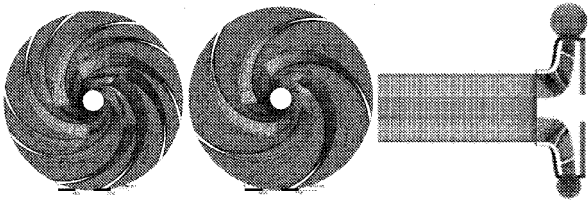


图 3 叶轮网格和网格装配
Fig. 3 Mesh of impellers and mesh assembly

对该模型的网格无关性进行了研究,当网格数量在 95 万以上时,效率的变动范围小于 0.5%,因此网格数量在接近 100 万时较为合适。本文用于数值计算的蜗壳、无长短叶片叶轮、前腔、后腔、出水管的网格数量分别为 479 710、378 222、134 956、

129 700、174 720,网格总数 1 297 308。有、无长短叶片的叶轮网格数量相差不大。

3.2 参数设置

ANSYS – CFX 软件采用基于有限元的有限体积法和全隐式算法进行求解,具有收敛速度快、收敛精度高的优点。本文采用 ANSYS – CFX 流场分析软件对液力透平内部流动进行求解分析。

透平进口条件设为静压进口,出口设为质量出口,通过调节出口的质量流量获得透平的外特性曲线。计算收敛标准设为 10^{-6} ,壁面粗糙度设为 $50\text{ }\mu\text{m}$,输送介质选用 25°C 的水,湍流模型选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,过流部件动静结合部位用 rotor-stator interface 连接,静止过流部件之间用 general grid interface 连接。

4 结果分析

4.1 实验与数值计算结果

图 4 为有、无长短叶片叶轮数值与实验结果。表 2 列出了最高效率点的流量、扬程、轴功率等。

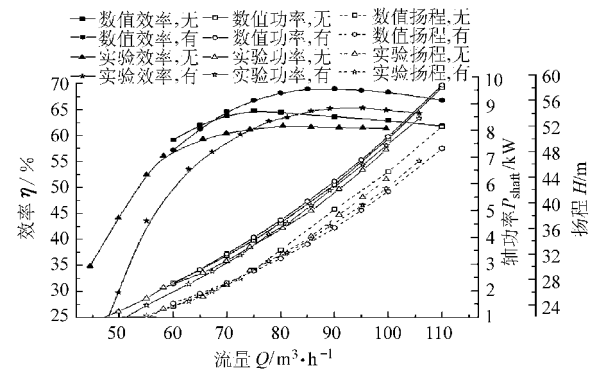


图 4 实验与数值计算结果

Fig. 4 Experimental and CFD results

表 2 实验与数值计算最高效率点性能参数

Tab. 2 Performance comparison at BEP between experiment and calculation

项目	长短叶片	Q $/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	H $/\text{m}$	P_{shaft} $/\text{kW}$	$\eta/\%$
数值计算	无	75.00	29.45	3.89	64.71
	有	90.00	36.04	6.09	68.98
实验	无	80.39	31.98	4.33	61.84
	有	89.13	36.34	5.75	65.16

由实验结果可以看出:增加长短叶片后液力透平的效率有明显增加,其中最高效率点的效率增加 3.32%;长短叶片的增加使液力透平的最高效率点向大流量偏移了 10.87%;增加长短叶片后液力透平的扬程有明显下降,轴功率变化较小。

由实验与数值计算结果的比较可以看出,数值

计算结果与实验结果都反映了长短叶片对液力透平性能影响的规律。数值计算结果与实验结果差别较小,采用 CFD 技术可以较准确地预测液力透平的外特性曲线和进行优化设计。

4.2 速度场分布

液力透平外特性的变化是内部流场变化的表现形式。图 5 是最优工况下,有、无长短叶片叶轮内部速度场的分布情况。从图 5 可以看出,无长短叶片时叶轮内部速度场分布较为不均匀,在叶轮背面和叶轮工作面形成 2 个与叶轮旋转方向相反的漩涡区域。增加长短叶片以后,叶轮内部速度场分布变得较为均匀,漩涡区域和强度明显减小。因此长短叶片的增加,可以改善叶轮内部流场分布,提高透平的效率。

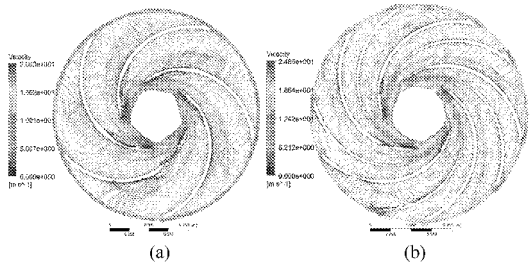


图 5 有、无长短叶片叶轮内部速度场分布

Fig. 5 Velocity field distribution of impeller with and without splitter blades

(a) 无长短叶片 (b) 有长短叶片

4.3 功率损失分布

图 6 为各液力透平蜗壳、叶轮、尾水管等水力部件的功率损失分布曲线。叶轮内部的功率损失分布由总功率损失减去蜗壳和尾水管的功率损失得到。因此叶轮内的功率损失包括叶轮前、后泵腔内部的功率损失以及由于口环泄漏而引起的功率损失。

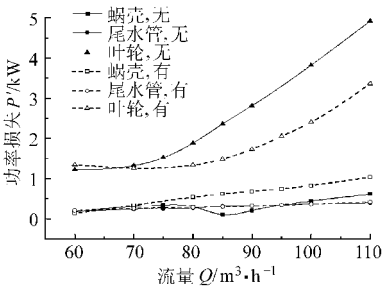


图 6 有、无长短叶片时功率损失分布曲线

Fig. 6 Power loss distribution with and without splitter blades

从图 6 可以看出,叶轮内部的功率损失是液力透平内的主要功率损失,因此液力透平的优化设计应该集中在叶轮的优化设计。有长短叶片时叶轮内部的功率损失迅速减小,蜗壳内部的功率损失有所增加,尾水管内部的功率损失变化可以忽略。由于有、无长短叶片时叶轮的口环间隙、前后泵腔等几何

参数都不变,因此叶轮内部的功率损失的减小,主要是由于叶轮内部水力损失减小造成的。由于叶轮和蜗壳之间存在旋转部件与静止部件之间的相互作用,叶片数的增加加剧了叶轮与蜗壳之间的相互作用,因此蜗壳内的功率损失有所增加。

5 结论

(1) 对有、无长短叶片叶轮的液力透平进行实验。结果表明:长短叶片的增加可以使液力透平最高效率点的效率提高 3.32%,流量增加 10.87%,并使液力透平的流量扬程曲线下降。

(2) 采用全流场和结构化网格技术,对有、无长

短叶片叶轮进行了数值模拟,数值计算与实验结果都反映了长短叶片对液力透平性能影响的规律,数值计算结果与实验结果差别较小,因此采用 CFD 技术可以较准确地预测液力透平的外特性曲线和进行优化设计。

(3) 对液力透平内部流场分析表明,长短叶片的增加,可以改善叶轮内部流场分布,减小叶轮内部漩涡的区域和强度,提高液力透平的效率。

(4) 对液力透平内部功率损失分布分析表明,液力透平内部的功率损失主要集中在叶轮内部,长短叶片的增加,可以减小叶轮内部的功率损失,增加蜗壳内部的功率损失。

参 考 文 献

- 1 Williams A A. Pumps as turbines used with induction generations of stand-alone micro-hydroelectric power plants [D]. Nottingham; Nottingham Polytechnic, 1992.
- 2 Amelio M, Barbarelli S. A one-dimensional numerical model for calculating the efficiency of pumps as turbines for implication in micro-hydro power plants [C] // Proceedings of ESDA:7th Biennial ASME Conference Engineering Systems Design and Analysis. Manchester, UK; 1~8.
- 3 Derakhshan S, Nourbakhsh A. 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.
- 4 Williams A A. The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods [J]. Proc. I. Mech. E., Part A: Journal of Power and Energy, 1994, 208(1): 59~66.
- 5 Derakhshan S, Mohammadi B. The comparison of incomplete sensitivities and genetic algorithms applications in 3D radial turbo machinery blade optimization [J]. Computers & Fluids, 2010, 39(10): 2 022~2 029.
- 6 Derakhshan S, Mohammadi B, Nourbakhsh A. Efficiency improvement of centrifugal reverse pumps [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(2):021103.
- 7 Singh P, Nestmann F. Internal hydraulic analysis of impeller rounding in centrifugal pumps as turbines [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(1): 121~134.
- 8 袁寿其. 低比转速离心泵理论与设计 [M]. 1 版. 北京:机械工业出版社,1997:123~138.
- 9 杨孙圣,孔繁余,邵飞,等. 液力透平的数值计算与试验 [J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012,33(2):165~169.
Yang Sunsheng, Kong Fanyu, Shao Fei, et al. Numerical calculation and experiment of hydraulic turbine [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012,33(2):165~169. (in Chinese)
- 10 Yang Sunsheng, Kong Fanyu, Shao Fei, et al. Numerical simulation and comparison of pump and pump as turbine [C] // FEDSM ICNMM 2010-30186, Montreal, Canada, 2010: 1~10.
- 11 Derakhshan S, Nourbakhsh A. Theoretical, numerical and experimental Investigation of centrifugal pumps in reverse operation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1 620~1 627.
- 12 Singh P. Optimization of the internal hydraulics and of system design for pumps as turbines with field implementation and evaluation [D]. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2005.
- 13 杨军虎,王晓晖. 叶片形状对能量回收水力透平性能的影响 [J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):287~291.
Yang Junhu, Wang Xiaohui. Effect of vane profile on hydraulic energy recovery turbines performance [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(4):287~291. (in Chinese)