doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.012

叶片安放角变化规律对液力透平性能的影响^{*}

王 桃^{1,2} 孔繁余¹ 杨孙圣¹ 陈 凯¹ 许荣军³

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心,镇江 212013; 2. 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室,成都 610039;3. 南京蓝深制泵集团股份有限公司,南京 211500)

摘要:基于 ANSYS Bladegen 软件,针对不同叶片安放角变化规律分别设计 3 种前弯叶片液力透平专用叶轮。通过 与试验结果对比,确定了合理的数值模拟方案,分别完成了 3 台透平全流场数值计算。分析了叶片安放角变化规 律对透平外特性、压力分布和水力损失分布的影响。结果表明:最优工况时,3 个叶轮的效率、压力分布和水力损失 分布均相差不大。在非最优工况,安放角采用线性变化规律设计时,透平性能更好,效率曲线更平坦;叶轮出口处 低压区域范围较其他 2 种方案大。水力损失分布显示在叶片进出口安放角及包角相同的情况下,安放角变化规律 对蜗壳及尾水管内的流动影响不大,仅对叶轮内的流动产生较明显的影响,叶片安放角呈"S"形变化对透平性能的 影响是负面的,线性分布规律相对较好。

关键词:液力透平 安放角变化规律 前弯叶片 数值模拟 性能分析 中图分类号:TH311;TK73 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)10-0075-06

Effects of Blade Angle Distributions on Performance of Pump as Turbine

Wang Tao^{1,2} Kong Fanyu¹ Yang Sunsheng¹ Chen Kai¹ Xu Rongjun³

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039, China

3. Nanjing Lanshen Pump Corp., Ltd., Nanjing 211500, China)

Abstract: A special impeller with forward curved blades can improve the performance of pump as turbine (PAT). From the point of turbine working condition, blade inlet angle at leading edge was determined using shockless inlet flow, while its outlet angle was designed with non-swirling outflow. The distribution rule from inlet angle at leading edge to outlet angle at trailing edge is one of the main factors in impeller design. Therefore, an investigation on the distribution rules of blade angles influencing PAT's performance is useful. In order to investigate the effects of blade angle distributions on the performance of PAT with forward curved blades, three special impellers with different blade angle distributions were designed by using ANSYS Bladegen software. The validity of numerical simulation was first confirmed through the comparison between numerical and experimental results. The impellers with the same blade inlet, outlet angles and different blade angle distributions were numerically investigated. The performance, pressure distributions and hydraulic loss distributions within PATs were analysed. The results showed that under the optimal working condition, the differences of three PATs impeller in terms of efficiency, pressure distributions and hydraulic loss distributions were minor. Under non-optimal working conditions, when the angle distribution was linearly changed, the performance curve was more

收稿日期:2015-02-27 修回日期:2015-03-18

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51379179、51279172)、江苏省青年基金资助项目(BK20130517)、江苏省普通高校研究生科研创新计划资 助项目(CXZZ13-0678)、流体及动力机械四川省科技创新研究团队资助项目(12204505)和流体及动力机械教育部重点实验室开放基 金资助项目(szjj2013-012、szjj2015-029)

作者简介:王桃,博士生,西华大学讲师,主要从事流体机械及工程研究, E-mail: mailtowangtao@163.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. cn

flat and the low pressure area at the outlet of the impeller was larger than those of the other two PATs. Hydraulic loss distribution analysis illustrated that the influence of blade angle distributions on impeller was larger than those of volute and draft. Linear distribution had positive influence while "S" shaped change of angle distribution had negative influence on PATs performance.

Key words: Pump as turbine Blade angle distribution Forward curved blades Numerical simulation Performance analysis

引言

叶轮直接决定液力透平的能量转换特性、空化 性能和运行稳定性。离心泵反转透平因其简便经济 的特点,广泛应用于能量回收及微型水力发电 中^[1-3]。多年来国内外专家对离心泵反转透平叶轮 优化和性能提高方面做了不少研究,取得了一定成 果^[4-7]。文献[8]从水轮机运行工况,在不改变其 他过流部件的条件下,设计了前弯叶片透平专用叶 轮,通过试验发现可以显著改善离心泵作透平的性 能。前弯叶片进出口安放角是叶片水力设计两个重 要参数,直接决定液体来流与出流状态,进口到出口 安放角的变化规律影响液体在叶片间的流动,对透 平能量转换将产生直接影响。

叶片安放角变化规律对水轮机转轮与水泵叶轮 水力机械性能影响的研究已有文献报道。阮辉 等^[9]研究了叶片安放角呈上凸、下凹和直线3种分 布规律对混流式水轮机转轮性能的影响,蒋云国[10] 研究了叶片型线随安放角变化规律对离心泵叶轮的 性能影响,潘中永等[11]分析了3种不同叶片安放角 变化规律对泵性能的影响。孙庆冲[12]研究了离心 泵叶片型线对泵性能的影响,确定了平面方格网展 开流线的叶片进、出口安放角与包角取值范围的关 系,并给出了采用 Bezier 曲线绘制叶片展开流线的 方法。对于叶片安放角变化规律,已有研究结果表 明:平面展开流线应光滑平顺,保证单向弯曲、不出 现"S"形状^[13]。为了保证上述要求,在叶片绘型 时,若轴面投影图给定,叶片进、出口安放角与叶片 进口边位置确定情况下,通常不同叶片安放角变化 规律将造成包角的差异很大,而叶片包角对水力性 能影响显著[14]。因此,若包角与叶片安放角变化规 律同时改变,无法确定各因素对性能产生的影响如 何,也无法判断在给定包角时,叶片安放角何种变化 规律对性能改善有积极影响。

为了研究在叶片进、出口安放角及包角相同的 条件下,叶片安放角变化规律对液力透平性能的影 响,本文基于 ANSYS Bladegen 软件,考虑 3 种不同 叶片安放角变化规律,分别设计 3 种不同形式的前 弯叶片叶轮。在确定合理的数值模拟方案基础上, 通过全流场数值模拟,分析叶片安放角变化规律对 透平外特性、压力分布和水力损失分布的影响。

1 液力透平叶轮设计

从水轮机运行工况考虑,以比转数为62的泵为 原型,不改变其他过流部件,采用文献[8]思路,确 定了前弯叶片进、出口安放角,设计了前弯型叶片液 力透平专用叶轮。叶轮进口直径为235 mm,出口直 径为102 mm, 叶轮轮毂直径为30 mm, 叶轮叶片数 为11片,叶片进口宽度为16mm,进口安放角为 107°,叶片中间流线处出口安放角为31.3°,叶片中 间流线处叶片包角为 35.93°,进口边厚度为 5 mm, 出口边厚度为2mm。结合 ANSYS Bladegen 软件, 考虑研究以下3种叶片安放角变化规律对透平性能 的影响:① 方案1为进口到出口安放角呈线性变 化,叶片包角自然形成。② 在进、出口安放角和包 角与方案1均相同的情况下,另外采用 ANSYS Bladegen 软件提供的 2 种安放角变化规律设计不同 的叶片。其一为进、出口安放角的大小,叶片包角的 起始、终止这4个值作为边界条件,包角按照三次多 项式变化规律,介于进、出口边之间的叶片安放角随 着包角计算出来,命名该变化规律为方案2。③方 案3在进、出口边附加一个约束条件,假设进、出口 边处安放角的斜率为0,这个附加约束使得安放角 变化规律呈五次多项式变化。3种方案均保证安放 角均匀变化,其角度变化规律曲线如图1所示。



按照上述3种变化规律,分别建立3种前弯叶 片三维模型,如图2所示。按照上文前弯叶片透平 专用叶轮的主要几何参数与方案1设计的叶轮三维 模型如图3所示。



2 数值模拟

2.1 几何造型

为提高数值模拟准确性,建立了包括蜗壳、叶



轮、前泵腔、后泵腔和尾水管5部分在内的全流道三 维模型,如图4所示。考虑进、出口流态对计算收敛 性和准确性的影响,在蜗壳进水段与尾水管出口段 分别作了一定延伸。



Fig. 4 PAT 3D model
1. 蜗壳 2. 前泵腔 3. 尾水管 4. 叶轮 5. 后泵腔

2.2 网格划分与网格无关性检查

网格划分质量对计算收敛性和计算速度有很重要的影响。本文采用六面体结构化网格对全流道进行网格划分,同时对壁面进行了边界层划分。图 5 为叶轮与计算域网格。



图 5 叶轮及计算域网格 Fig. 5 Mesh of impeller and computational domain (a)叶轮网格 (b)计算域网格

2.3 网格无关性检查

对网格无关性进行了研究,如图 6 所示,当网格 数在 122 万以上时,透平扬程、扭矩和效率偏差均在 0.5%以内,因此本文用于计算的网格在 122 万以上 较合适。

本文用方案1建模的叶轮进行全流场数值计算时,蜗壳、叶轮、前泵腔、后泵腔和尾水管网格数量分别为448110、429088、99720、50400和192726,网格总数为1220044。其余2个方案数值计算时,网格数量相当。

2.4 CFX 求解设置

本文基于 CFX 软件平台,采用 k- e 湍流模型, 参考压力设为零,固壁面采用无滑移边界条件,近壁



区应用标准壁面函数,叶轮旋转速度设为1500 r/min, 动静交接面设置为 Frozen Rotor 模式,过流表面 粗糙度设置为50 μm,收敛残差标准为0.00001。 设置质量流量进口、压力出口边界条件,通过调 节不同的流量,模拟得到透平不同工况运行时的 性能。

3 数值计算试验验证

为了验证数值计算的正确性,搭建了一开式液 力透平试验台^[15],对方案1透平叶轮进行试验。将 试验数据与数值模拟结果进行对比,如图7所示。 透平试验扬程高于数值计算结果,试验轴功率与数 值模拟结果基本一致。对比效率指标,可以看出,在 70~115 m³/h的流量范围,数值计算的效率高于试 验值2.5%~3.7%。虽然与试验值有一定的差异, 但两者的趋势一致,计算与试验效率差值的变动范 围较小,数值计算结果相对稳定。因此本文所采用 的网格方案、数值模拟方案可行,可以较准确地预估 透平的性能。



4 结果分析

4.1 外特性分析

通过对 3 个不同叶轮进行全流场数值模拟,得 到 3 台透平运行的性能参数,如表 1 所示,绘制外特 性曲线,如图 8 所示。

表 1 3 台透平外特性参数 Tab.1 Performance parameters of three PATs

流量	扬程/m			轴功率/kW			效率 η/%		
$/(m^3 \cdot h^{-1})$	方案1	方案 2	方案 3	方案1	方案 2	方案 3	方案1	方案 2	方案3
70	27.26	27.37	27.78	3.38	3.39	3.42	65.14	64.93	64.63
80	30.45	30.66	31.16	4.57	4.58	4.63	68.91	68.65	68.29
90	34.38	34.65	35.11	5.95	5.97	6.04	70.66	70.33	70.20
100	38.97	39.09	39.51	7.54	7.57	7.65	71.04	71.11	71.08
110	44.07	44.31	45.06	9.34	9.39	9.50	70.75	70.75	70.40
120	49.93	50.44	51.31	11.38	11.47	11.62	69.79	69.63	69.31
130	56.35	57.00	57.94	13.67	13.77	13.93	68.55	68.26	67.93





从外特性曲线可以看出,叶片安放角对透平外 特性有较明显的影响。在整个运行工况范围,3种 方案透平外特性变化趋势一致,最优效率差别不大。 方案1扬程均低于其余2种方案,方案1与方案3 的扬程差值在0.52~1.59m之间;3种方案的轴功 率差别不明显。

透平效率计算公式为

$$\eta = \frac{M\omega}{\gamma QH} \times 100\%$$

式中 M——透平叶轮输出扭矩,N·m

ω——叶轮旋转角速度, rad/s

γ----介质重度,N/m³

Q---计算流量,m³/s

H----扬程,m

分别计算各个工况点的效率,可以看出在小流 量 70 m³/h 工况,方案 1 与方案 3 最大效率差值为 0.51%,在大流量 130 m³/h 工况,最大效率差值为 0.62%。从效率指标看,方案 1 最优,方案 2 次之, 方案 3 最差。表明叶片安放角呈"S"形变化对透平 性能影响是负面的。

4.2 内部压力分布

图 9 为 3 种透平叶轮在 0.8 Q_{BEP}(Q_{BEP}表示透平 最优工况点流量)、Q_{BEP}、1.2 Q_{BEP}时叶轮与蜗壳内部 静压分布。可以看出:液体压力从蜗壳至叶轮进口 到叶轮出口沿流线方向逐渐降低,呈层状分布;随着 流量的加大,液体进入蜗壳及叶轮的压力逐渐增大。 在最优工况 Q_{BEP}时,3 种方案透平叶轮内部的压力 分布差异不大。在非最优工况,叶轮进口区域压力 分布差异不大,但在叶轮出口处有所差异。方案 3 中图 9c 与图 9i 分别对比方案 1 中图 9a 与图 9g,发 现叶轮出口处低压区范围有所减小,表明方案 3 较 方案1在叶轮出口处具有更高的压能,由此可判断 在进行能量转换时,方案1能量转换较方案3更为 充分。

79



图 9 不同工况蜗壳与透平叶轮内部静压分布

Fig. 9 Pressure distributions in impeller and volute at different operating ranges

(a) 方案 1,0.8 Q_{BEP} (b) 方案 2,0.8 Q_{BEP} (c) 方案 3,0.8 Q_{BEP} (d) 方案 1, Q_{BEP} (e) 方案 2, Q_{BEP}

(f)方案 3, Q_{BEP} (g)方案 1, 1.2 Q_{BEP} (h)方案 2, 1.2 Q_{BEP} (i)方案 3, 1.2 Q_{BEP}

4.3 水力损失分布

为了分析不同叶片安放角变化规律对水力损失 的影响,分别计算了3个透平叶轮在不同工况下,蜗 壳、叶轮(包含叶轮与蜗壳间的间隙)及尾水管的水 力损失^[14],表 2 列出了 3 台透平各过流部件水力损 失值,各水力损失分布如图 10 所示。

可以看出叶轮内的水力损失占总水力损失的比 重最大,随流量增大,蜗壳与叶轮内的水力损失增

Tab. 2Hydraulic loss distributions within PATs											
流量	蜗壳						尾水管				
$/(m^{3} \cdot h^{-1})$	方案1	方案 2	方案 3	方案1	方案 2	方案 3	方案1	方案 2	方案 3		
70	1.37	1.37	1.38	7.01	7.10	7.34	1.11	1.12	1.10		
80	1.73	1.73	1.73	6.75	6.89	7.15	0.98	0.99	1.00		
90	2.07	2.11	2.11	7.12	7.26	7.46	0.89	0.91	0.89		
100	2.30	2.37	2.35	8.13	8.10	8.24	0.85	0.82	0.83		
110	2.91	2.91	2.96	9.17	9.26	9.57	0.81	0.79	0.81		
120	3.55	3.55	3.57	10.74	10.98	11.33	0.79	0.78	0.84		
130	4.26	4.28	4.30	12.67	13.02	13.38	0.79	0.79	0.90		

表 2 水力损失分布



Fig. 10 Hydraulic loss distribution within PATs

大。在相同工况下,蜗壳内的水力损失几乎无差异, 尾水管内的水力损失差异较小,而叶轮的水力损失 差异明显。在叶片进、出口安放角及包角相同情况 下,不同的叶片安放角变化规律对蜗壳及尾水管内 的流动影响不大,仅对叶轮内的流动产生较明显的 影响,方案1水力损失最小,方案3水力损失最大。

5 结论

(1) 在透平叶片进、出口安放角及叶片包角相同的情况下,叶片安放角变化规律对最优工况能量特性的影响不大,但对非最优工况的扬程、效率影响较大。3 种方案中,安放角呈线性变化规律的透平性能最好,叶片安放角呈"S"形变化对透平性能影响是负面的。

(2) 在最优工况时,叶轮与蜗壳内部压力分布 相似;在非最优工况时,安放角呈线性变化规律的方 案较其他2种分布规律的方案其叶轮出口处低压区 域范围大。

(3)水力损失分布表明,在叶片进、出口安放角 及包角相同情况下,叶片安放角变化规律对蜗壳及 尾水管内的流动影响不大,仅对叶轮内的流动产生 较明显的影响,方案1安放角呈线性分布规律的透 平叶轮内水力损失小于其他2种方案。

参考文献

- 1 Sanjay V Jain, Rajesh N Patel. Investigations on pump running in turbine mode: a review of the state-of-the-art[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,30:841-868.
- 2 杨孙圣. 离心泵作透平的理论分析数值计算与实验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2012.
- 3 王桃,孔繁余,何玉洋,等. 离心泵作透平的研究现状[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(8): 674-680. Wang Tao, Kong Fanyu, He Yuyang, et al. Researching status of centrifugal pump as turbine [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(8): 674-680. (in Chinese)
- 4 Yang Sunsheng, Derakhshan S, Kong Fanyu. Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performace [J]. Renewable Energy, 2012, 48: 507 - 513.
- 5 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.
- 6 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): 2022 2029.
- 7 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].排灌机械工程学报,2014,32(2):113-118. Yang Junhu,Gong Chaohui,Xia Shuqiang,et al. Numerical analysis on influence of guide vanes on performance of centrifugal pump acting as hydraulic turbine [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(2): 113-118. (in Chinese)
- 8 王桃,孔繁余,袁寿其,等. 前弯叶片液力透平专用叶轮设计与实验[J]. 农业机械学报,2014,45(12):75-79. Wang Tao, Kong Fanyu, Yuan Shouqi, et al. Design and experiment on pump as turbine with forward curved blades [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(12):75-79. (in Chinese)
- 9 阮辉,廖伟丽,赵亚萍,等.叶片安放角分布规律对冷却塔用混流式水轮机转轮性能的影响研究[J].水力发电学报,2014, 33(3):274-278,285.
 - Ruan Hui, Liao Weili, Zhao Yaping, et al. Effects of blade angle distributions on Francis turbine performance used in cooling tower [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(3):274-278,285. (in Chinese)
- 10 蒋云国. 离心泵叶片参数化设计及其试验研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- 11 潘中永,谢蓉,曹英杰,等.叶片安放角变化规律对离心泵性能影响分析[J].排灌机械,2009,27(5):319-322. Pan Zhongyong,Xie Rong,Cao Yingjie,et al. Analysis effects of blade angle on centrifugal pump performance[J]. Drainage and Irrigation Machinery,2009,27(5): 319-322. (in Chinese)
- 12 孙庆冲. 离心泵叶片型线对泵性能影响的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- 13 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.
- 14 Yang Sunsheng, Kong Fanyu, Chen Hao, et al. Effects of blade wrap angle influencing a pump as turbine [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(6):1021-1028.
- 15 Wang Tao, Kong Fanyu, Yang Sunsheng, et al. Numerical study on hydraulic performances of pump as turbine with forwardcurved blades [C] // Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2014: FEDSM 2014 - 21347.