第41卷 第3期 大连海事大学学报 Vol.41 No.3
2015年8月 Journal of Dalian Maritime University Aug., 2015

文章编号:1006-7736(2015)03-0077-05 doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2015.03.014

叶顶间隙及掠改型对混流喷泵的影响

钟兢军*, 王洪瑞, 韩吉昂
(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:以混流式喷水推进泵作为研究对象,采用三维雷诺平均N-S方程和S-A湍流模型进行CFD模拟,研究不同叶顶间隙下喷泵的性能和流场损失状况,进而做动叶掠改型以期改善对叶顶间隙流动. 结果显示:叶顶间隙的存在有助于沟通压力面与吸力面压差,减少动叶出口回流. 对于所研究的喷水推进混流泵,在0~0.6 mm小叶顶间隙时,效率随间隙增大而升高,而间隙过大会使泄漏损失增加,最优间隙为0.6 mm. 对动叶进行的掠改型发现,前掠会使压力面前缘的损失略有提高,但叶片整体损失下降;从吸力面来看,前掠有助于减小叶顶泄漏损失,+5°掠全工况的效率均有提高,并获得较为平稳的功率曲线.

关键词:喷水推进混流泵;叶顶间隙;倾掠改型
中图分类号:U664.34 **文献标志码**:A

Influence of tip clearance and swept modification on a mixed-flow water-jet pump

ZHONG Jing-jun*, WANG Hong-rui, Han Ji-ang
(*Marine Engineering College*, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: A water jet mixed-flow pump was regarded as an object. CFD simulate was carried out by using three dimensional Reynolds averaged N-S equation and S-A turbulent model. The purpose was to study the influence of different tip clearance on characteristics of pump and flow loss, further more swept modifications were made to reduce gap losses. Results show that the tip clearance could reduce the pressure gap between PS and SS, moreover control backflow at outlet of impeller, for this pump 0.6 mm was the watershed. The appropriate swept modifications could help to reduce the tip clearance losses, +5° swept improve the efficiency with a flat power curve.

Key words: water jet propulsion flow pump; tip clearance; swept modification

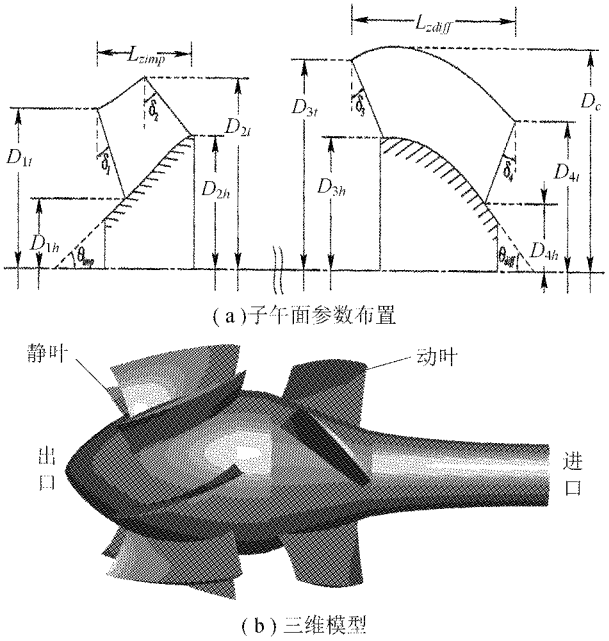
0 引 言

近年来,喷水推进技术被广泛应用于高性能船舶[1],而喷水推进泵是该技术的核心叶轮机械[2],减小喷泵损失对于喷水推进系统效率的提高具有重要意义. 叶顶间隙损失是叶轮机械中常见的损失之一,施卫东[3]、梁开洪[4]、穆岩[5]、赖焕新[6]等做了泵叶顶间隙的研究,得出一些损失规律,而在损失的控制方面,喷泵领域相关研究并不多. 在叶轮机械领域,采用弯掠叶片控制叶顶间隙损失在风机、燃气轮机上已有成功的应用,如Janos Vad[7]将前掠应用于低速轴流风机的控制漩涡设计,结果表明,前掠可以降低损失,并且可以缩短吸力面长度,减小端壁摩擦损失. 相似地,也有一些学者做了泵叶片倾掠改型的研究. Jaberg H[8]为改善轴流泵掠叶片与非掠叶片扬程曲线的不稳定性,通过在机匣开设凹槽等的结构改进,获得成功. Takayama Y等[9]通过改变轮缘轮毂型线、叶片倾掠角度等,完成了混流泵的多目标优化. 刘竹青等[10]研究了弯掠叶片对轴流泵驼峰及空化的影响,研究发现,合理的弯掠可以改善泵驼峰区运行性能和失速工况的空化性能. 尹喜庆等[11]研究了后掠叶片对轴流泵抗气蚀性能影响的数值模拟,结果发现,后掠使泵的气体体积和效率均减少. 本文进行不同叶顶间隙对喷泵流场影响规律的分析,对叶片做了倾掠改型,以期减小间隙损失. 结果表明,适当的掠可以改善叶顶间隙损失.

收稿日期:2014-11-24;**修回日期**:2014-12-09.
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132015207;3132013304);辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2013199).
作者简介:钟兢军*(1963-),男,博士,教授,博士生导师, E-mail:zhongjj@dlmu.edu.cn; 王洪瑞(1990-),男,硕士生,E-mail:wanghongrui2739@163.com.

1 研究对象及数值方法简介

本文研究的喷水推进混流泵为动叶4片,静叶7片,设计流量 $Q=0.600\ m^3/s$,转速 $n=1450\ r/min$,比转速 $n_s=501$. 根据以上参数计算得出叶轮轮缘、轮毂进出口直径 D_{1t}、D_{1h}、D_{2t}、D_{2h},叶轮叶片数 Z_{imp}等; 再选取如叶轮轮毂倾斜角度 θ_{imp},叶片进口边倾斜角 δ_1、δ_2,动叶轴向长度 L_{imp}等轴面参数,以及对应的导叶参数,如图1(a)[12]所示. 根据已有计算参数进行三维建模,参照优秀模型泵[13]选定NACA翼型,动叶4片,静叶7片,叶顶间隙0.5 mm,3D模型如图1(b)所示,以该原型泵为基础研究叶顶间隙和掠改型对混流式喷水推进泵性能和流场的影响.



(a)子午面参数布置

(b)三维模型

图1 混流喷泵的子午面参数布置及三维模型

Fig.1 Parameters in meridional cross-section and 3D model of mixed-flow waterjet pump

采用单流道进行计算,利用Autogrid5进行网格划分,计算域采用全部结构化网格, 如图2所示,网格总数在400万左右,利用Fine/Turbo进行数值计算,采用S-A湍流模型,应用多重网格加速收敛[14].

边界条件:采用流量进口,设计工况进口流量600 kg/s,静压出口101.325 kPa,标准大气压101.325 kPa作为参考压力;叶轮为旋转区域,泵壳为绝对静止壁面条件;叶轮与轮毂为相对静止壁面条件,导叶及出口为静止区域.

网格无关性的验证:为准确反映流道内的流动情况,又不致网格数量太多增加计算时间,本文选用网格数为250万、300万、350万、400万、450万的原型动叶在流量为600 L/s时进行网格验证,结果如图3所示.

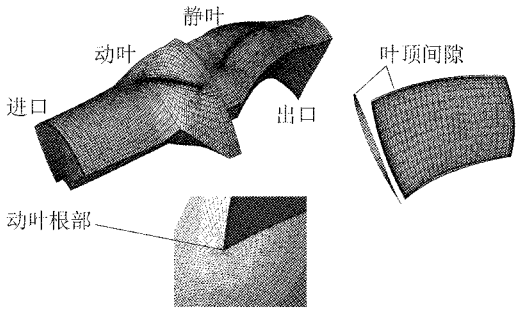
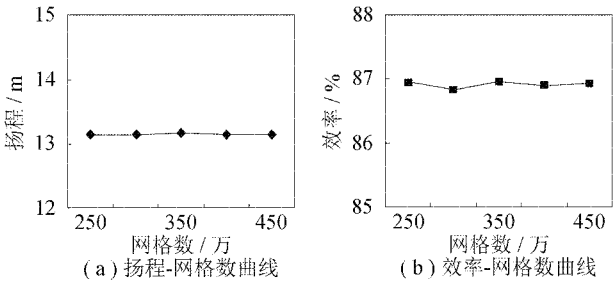


图2 计算域及网格

Fig.2 Grid of computational domain



(a)扬程-网格数曲线 (b)效率-网格数曲线

图3 水力性能随网格数变化曲线

Fig.3 Curve of performance change with the grid number

由图3可以看出,网格数大于400万时,网格每增加50万,扬程波动小于0.06%,效率波动小于0.34%. 从以上结果可以看出,效率、扬程均对网格数目不敏感,而网格数过大会使计算时间过长. 本文选用400万网格数进行计算和研究.

2 叶顶间隙计算结果及分析

表1为600 L/s流量时不同叶顶间隙喷泵性能参数. 在相同流量下,间隙为0时效率最低,随着叶顶间隙的增加,效率升高;在0.6 mm叶顶间隙时达到最大值;继续增大间隙则效率减小.

表1 600 L/s流量时不同叶顶间隙的喷泵性能参数

Tab.1 Performance with different tip clearance at 600 L/s

间隙/mm	扬程/m	效率	功率/kW
0.0	9.8428	0.77572	99.49
0.3	12.841	0.85314	112.93
0.6	13.306	0.86801	115.03
0.9	13.214	0.85409	115.28
1.2	12.992	0.85083	114.1
1.5	12.689	0.84119	113.13

间隙在0.6 mm以上, 随间隙增加,泵效率开始下降,这是由于泄漏量加大,泄漏涡损失增大,

效率下降，叶轮做功的一部分被容积损失消耗；若继续加大叶顶间隙，则会使主流的干扰流体增多，内部流动恶化，扬程和效率明显下降[3-5].

值得注意的是，间隙为0.3 mm时的效率低于间隙为0.6 mm. 图4为600 L/s工况下0.3 mm和0.6 mm间隙叶片吸力面流线图. 两种间隙情况下，动叶前缘上端均存在回流，且0.3 mm间隙下回流更为严重，而分析吸力面的基本相同. 图5为动叶压力面的静压云图，相比0.6 mm间隙，0.3 mm间隙下动叶前缘上端的局部高压区要严重，因而压力面与吸力面压差更大，当高压溢流到吸力面时，导致吸力面对应位置回流0.3 mm间隙更严重.

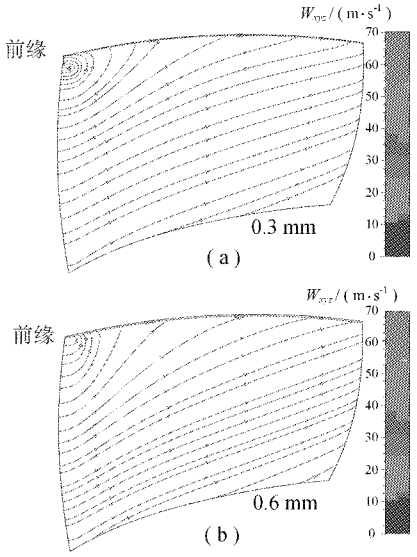


图4　不同间隙下吸力面流线图

Fig. 4　Streamline with different tip clearance at SS

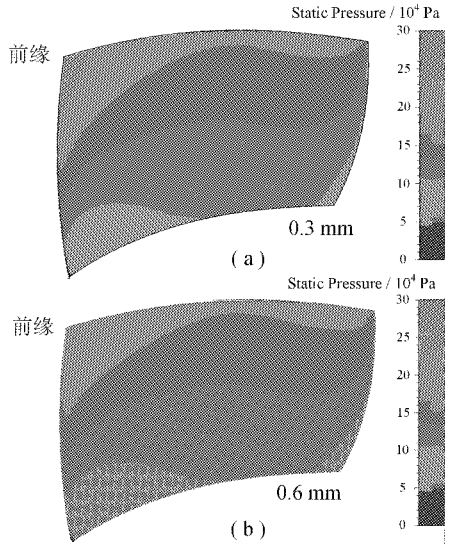


图5　不同间隙下压力面静压图

Fig. 5　Static pressure with different tip clearance at PS

3　倾掠改型计算结果分析

为减小叶顶泄漏损失，对0.6 mm叶顶间隙的叶片采取轴向掠改型，即在其他几何参数不变条件下，积跌线绕轮毂一点旋转，定义积叠线与轮毂流道垂直为0°，则上述叶顶间隙所研究的模型为-5°，另外增加+5°以研究叶片掠所产生的影响. 三种模型如图6所示.

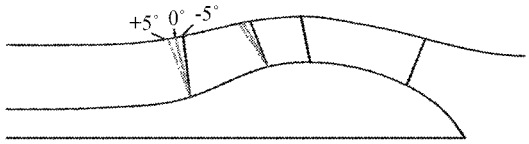


图6　几种积迭线的变化规律

Fig. 6　Meridional view with different swept angle

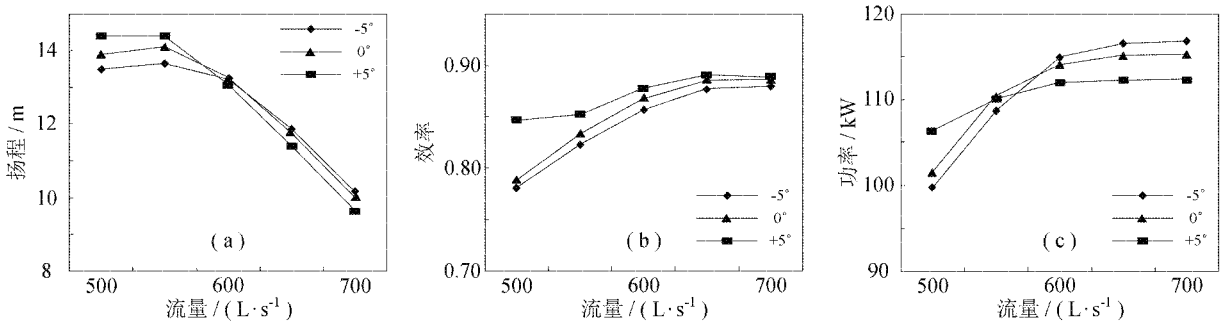


图7　泵全工况外特性曲线

Fig. 7　Performance with different swept angle

对不同模型进行全工况数值模拟，其外特性如图7所示. 扬程曲线在设计流量及以后趋势基本一致，在小流量时-5°和0°模型表现出离心泵的性质，即扬程随流量的增加而增加；由效率曲线可以看出+5°模型的明显优势，其效率曲线平缓且高于其他模型；从功率曲线来看，+5°模型功率曲线更为平稳.

对设计流量均为600 L/s的三个模型进行计

算,对应的外特性参数变化如表2所示.从表2可以看出,随前倾角度加大,+5°时效率最高,耗功少,而扬程下降微弱.

表2 600 L/s流量下,不同倾掠角度对应的外特性参数

Tab.2 Performance with different swept angle at 600 L/s

角度	扬程/m	效率	功率/kW
-5°	13.224	0.85753	114.88
0°	13.261	0.86801	114.07
+5°	13.074	0.87781	111.95

图8为动叶压力面熵云图.从图8可以看出,+5°模型虽然在前缘(LE)上部损失大于其他两个模型,但在叶片后部的损失要比其他两个模型小得多,即降低了压力面的总体损失.图9为动叶吸力面极限流线.由图9可知,前缘顶部均有回流,分析该处由前缘泄漏涡形成.对比看来,+5°前掠模型回流较弱.

为进一步了解动叶吸力面流动和损失状况,给出叶片表面附近截面的熵和流线(图10)。由图10可知,在吸力面前缘顶端处附近都有损失,+5°掠改型对前缘泄漏损失起到较好的抑制作用,对应的熵分布和流线情况都可以显示前缘泄漏引起的漩涡减弱.

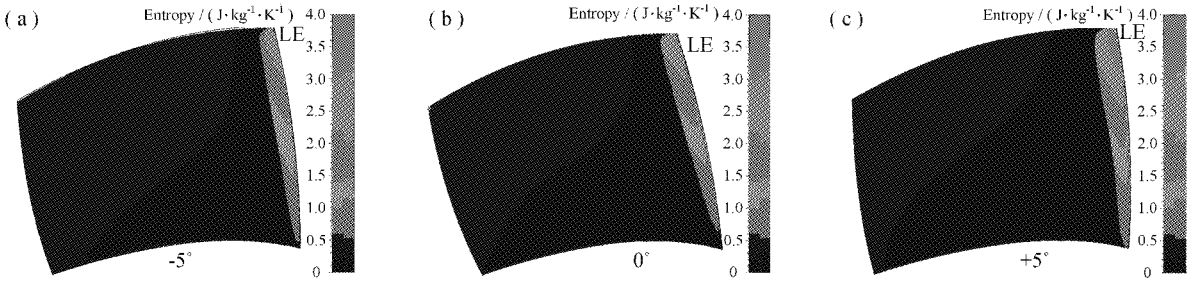


图8 动叶压力面熵云图

Fig.8 Entropy distribution at PS

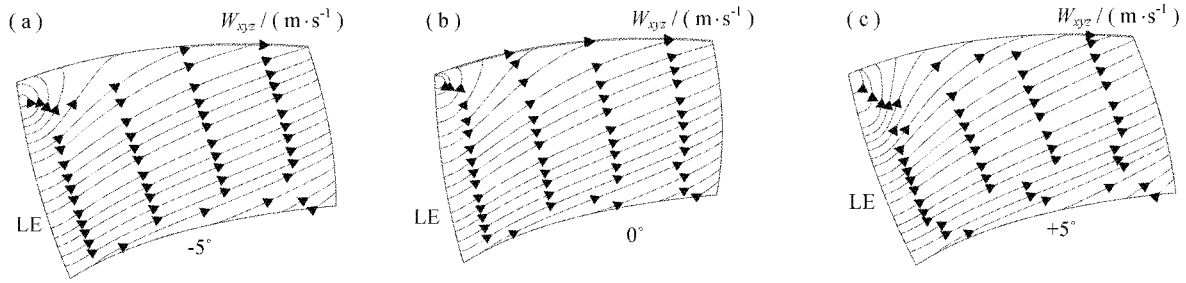


图9 动叶吸力面相对速度流线图

Fig.9 Streamline of relative velocity at SS

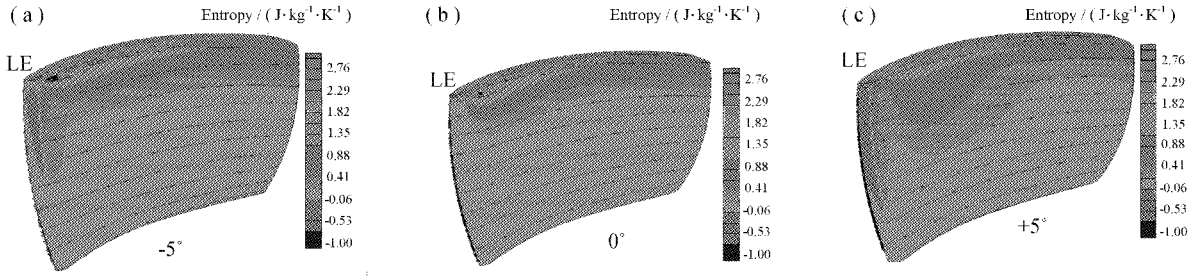


图10 叶表一定距离截面吸力面的熵和流线

Fig.10 Entropy distribution and streamline relative velocity at SS

4 结语

对于喷水推进混流泵,叶顶间隙的存在有助于沟通压力面与吸力面压差,减少动叶出口回流,因此在0~0.6 mm小叶顶间隙时,效率随间隙增大而升高,但间隙过大会使泄漏损失增加.对于本泵,最优间隙为0.6 mm.

对动叶进行的掠改型发现,前掠会使压力面

前缘损失略有提高,但叶片整体损失下降;从吸力面来看,前掠有助于减小叶顶泄漏损失.设计工况下,+5°较0°效率提高1%,+5°掠全工况的效率均有提高,并获得较为平稳的功率曲线.

参考文献(References):

[1]李晓晖,朱玉泉,聂松林.喷水推进器的发展研究综述[J].液压与气动,2007(7):1-4.
LI Xiao-hui, ZHU Yu-quan, NIE Song-lin. The overview of development and research for waterjet propulsion[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2007(7):1-4. (in Chinese)

[2]吴梵,陈昕.喷水推进装置及其在舰艇上的应用[J].海军工程大学学报,2003,15(6):44-48.
WU Fan, CHEN Xin. Waterjet propulsion equipment and its application on warships[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2003, 15(6):44-48. (in Chinese)

[3]施卫东,张华,陈斌,等.不同叶顶间隙下的轴流泵内部流场数值计算[J].排灌机械工程学报,2010,28(5):374-378.
SHI Wei-dong, ZHANG Hua, CHEN Bin, et al. Numerical simulation of internal flow field in axial-flow pump with different blade tip clearance sizes[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5):374-378. (in Chinese)

[4]梁开洪,张克危,许丽.轴流泵叶顶间隙流动的计算流体动力分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2004,32(9):36-38.
LIANG Kai-hong, ZHANG Ke-wei, XU Li. Analysis of the flow through the blade tip clearances of axial pumps by CFD[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(9):36-38. (in Chinese)

[5]穆岩,俞健,李绍旭,等.叶顶间隙对轴流泵性能的影响[J].水泵技术,2013(5):33-35.
MU Yan, YU Jian, LI Shao-xu, et al. Influence of tip clearance on axial flow pump performance[J]. Pump Technology, 2013(5):33-35. (in Chinese)

[6]赖焕新,康顺,谭春青,等.有无叶顶间隙条件下斜流风机叶轮内部三维流动的数值研究[J].航空动力学报,2000,15(1):17-21.
LAI Huan-xin, KANG Shun, TAN Chun-qing, et al. Numerical study of 3-D flow in a diagonal fan impeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1):17-21. (in Chinese)

[7]VAD J, KWEDIKHA A R A, HORVATH C, et al. Aerodynamic effects of forward blade skew in axial flow rotors of controlled vortex design[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2007, 221(7): 1011-1023.

[8]JABERG H. Modifying unstable headcurves of swept and unswept pump bladings by means of casing treatment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, 226(4):479-488.

[9]TAKAYAMA Y, WATANABE H. Multi-objective design optimization of a mixed-flow pump[C]// ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. American Society of Mechanical Engineers. Vail: ASME, 2009: 371-379.

[10]刘竹青,肖若富,吕腾飞,等.弯掠叶片对轴流泵驼峰及空化性能的影响[J].排灌机械工程学报,2012,30(3):270-273.
LIU Zhu-qing, XIAO Ruo-fu, LV Teng-fei, et al. Effect of swept blade on hump and cavitation characteristics of axial flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3):270-273. (in Chinese)

[11]尹喜庆,刘仲祥,穆勇.后掠叶片对轴流泵抗汽蚀性能的影响[J].应用科技,2005,32(5):52-54.
YIN Xi-qing, LIU Zhong-xiang, MU Yong. Effect of backward-swept blade on axial flow pump performance of anti-cavitation[J]. Appllied Science and Technology, 2005, 32(5): 52-54. (in Chinese)

[12]常书平,王永生,丁江明,等.混流式喷水推进泵水力设计和性能预报[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(6):708-713.
CHANG Shu-ping, WANG Yong-sheng, DING Jiang-ming, et al. Hydraulic design and performance predictions of a waterjet mixed-flow pump[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(6):708-713. (in Chinese)

[13]OH H W, YOON E S, KIM K S, et al. A practical approach to the hydraulic design and performance analysis of a mixed-flow pump for marine waterjet propulsion[J]. Journal of Power and Energy, 2003, 217(A6): 659-664.

[14]郭然,贾力平,樊小莉,等.NUMECA 系列教程[M].北京:机械工业出版社,2013.