排灌机械工程学报 第28卷 第4期
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering Vol. 28 No. 4

混流泵叶轮流动性能数值模拟和叶型优化设计

谢 蓉，单玉姣，王晓放
（大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘 要：在设计工况下，对一个较高比转速的混流泵叶轮内部流动进行三维湍流数值模拟计算. 通过分析混流泵叶轮内部的流动特点，发现由于局部结构设计不合理，流道内产生了较大范围漩涡区和壁面脱离现象，增加了流动损失. 针对这一问题提出了改进措施，采用一种多参数的优化方法对叶轮叶型进行设计，并分析了叶片型线对叶轮内部流场的作用规律. 结果表明，控制叶型弯曲度可以有效控制叶片进口处的马蹄涡，消除近壁面流动分离和漩涡，减小流动中的通道涡强度和影响范围，改进后叶轮流道内存在的涡团和流动脱离现象基本消失，叶轮水力效率相对提高4.74%，单位功耗的扬程增加11.5%. 叶轮性能参数的计算数据与试验数据吻合较好，验证了所采用的计算方法及模型的准确性和可靠性.

关键词：混流泵；叶轮；数值模拟；叶型优化；性能
中图分类号：S277.9；TH313 **文献标志码**：A **文章编号**：1674-8530(2010)04-0295-05

Numerical simulation on flow performance and blade profile optimal design of mixed-flow pump impeller

Xie Rong, *Shan Yujiao*, *Wang Xiaofang*
(Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: A numerical calculation was carried out to simulate three-dimensional turbulent flow in a high specific-speed mixed-flow pump impeller under design condition. Through the analysis of impeller internal flow, some problems caused by the unsuitable local structure were found, such as vast vortexes aeras and wall flow separations, which added flow losses. Aimed at the problems, a multi-parameter optimal method was adopted to redesign blade profile, and the action rules of blade profile on impeller internal flow were analyzed. The results show that the horse-hoof-shaped vortexes at impeller inlet and passage vortexes and wall flow separations can be removed and the passage vortex intensity and influencing range are reduced by adjusting blade curvature. The hydraulic efficiency of the optimized impeller increases 4.74% relatively, and the head per power dissipation increases 11.5%. The calculated data of impeller performance parameters are in good agreement with the experimental ones, which proves accuracy and reliability of the adopted method and model.

Key words: mixed-flow pump; impeller; numerical simulation; blade profile optimization; performance

收稿日期：2010-03-16
基金项目：国家973计划项目(2009CB724303)
作者简介：谢 蓉(1970—)，女，辽宁大连人，副教授(xieronz@dlut.edu.cn)，主要从事叶轮机械结构设计与数值分析研究.
单玉姣(1984—)，女，辽宁丹东人，硕士研究生(syjtina404@yahoo.com.cn)，主要从事叶轮机械结构设计与数值分析研究.

万方数据

随着社会的发展,高参数、大流量混流泵越来越多地被应用于工业和农业的生产[1-4].但是目前国内关于混流泵水力设计研究的文献仍相对较少,尤其混流式核主泵方面的研究还处于空白.因此,掌握混流泵内部流动规律和完善混流泵的设计方法成为当前需要解决的难题.

混流式叶轮兼有轴流式和离心式叶轮的流动特征,工作流体在粘性作用下,会产生流动分离、漩涡、二次流等现象,对叶轮的流动性能影响较大.目前,国内外在叶轮设计方面广泛应用 CFD 研究方法[5-8].席光等[9]提出以三维粘性分析为参考准则的离心叶轮设计方法和以角动量为控制手段的叶轮变型设计方法;后又将三维粘性流动分析与神经网络相结合,提出了以叶片角的分布为优化变量、叶轮效率为优化目标的混流泵叶片优化设计的方法[10].

文中针对某比转速较高的混流式叶轮进行设计研究,分析叶轮内部的流动特性,研究叶片型线对叶轮内部流动的作用规律,提出叶型设计的优化方法,为后续的核主泵设计提供理论依据.

1 数值模拟可靠性验证

1.1 数值计算方法

利用 CFD 软件—— NUMECA 中的 Fine/Turbo 建立了基于真实几何模型的某混流泵内部的三维湍流流场数值模拟的计算平台,计算工质为水,运动方程为湍流 N-S 方程,对流项采用基于 TVD 量差分分裂方法的高精致迎风格式,耗散项采用 Jameson 人工粘性显中心格式,方程求解采用多阶 Runge-Kutta 法,并应用多重网格与隐式残差光顺法等加速收敛技术,湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型.

1.2 建模、网格划分及边界条件的设定

研究对象是一个比转速为 380 的单级闭式混流叶轮,图 1 为根据其结构几何参数和叶片木模图利用几何造型软件 Pro/E 生成的叶轮三维实体.

计算网格在 Auto Grid5 中进行划分.叶片附近采用 O 型网格,主流区采用 I 型网格,在叶轮曲面扭曲曲率较高处,进行反复修正以提高网格质量.划分单元的总数约为 280 000 时,数值模拟收敛状况良好.加大网格密度(增加了叶片表面附近的网格数)到 380 000 时,对比两个结果发现流动参数并没有明显变化,说明网格密度已经达到了无关性要求.考虑到随后优化时网格的变动,最终选定本次数值模拟网格总数为 310 000.

叶轮结构网格示意图如图 2 所示.



图 1 叶轮 Pro/E 造型
Fig. 1 Pro/E modeling of impeller

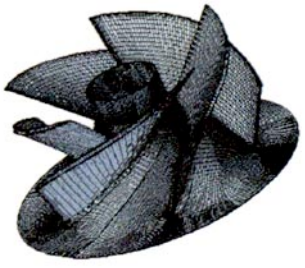


图 2 叶轮三维网格
Fig. 2 3D mesh of impeller

边界条件:进口限定流量,工质流入方向,静温;出口限定平均压力;固壁限定转动区域和转速的范围.

1.3 数值计算结果的可靠性分析

表 1 为在设计工况时混流泵叶轮总体性能的数值模拟数据与试验数据的对比结果.由表 1 可以看出,扬程和总效率都相差很小,均在工程允许的误差 5% 范围内,验证了文中采用的数值模拟计算方法和模型的准确性与可靠性.

表 1 数值模拟结果与试验数据对比
Tab. 1 Comparisons between numerical simulation results and experimental data

	流量/(m^3/h)	扬程/m	总效率/%
试验数据	4 440	15.5	86.0
模拟结果	4 441	15.9	86.8
误差/%	0.02	2.60	0.90

1.4 叶轮内部的静压分析

工质在泵内受到叶轮的作用,在出口处,压力明显得到提升.图 3 为叶片子午面和回转面静压分布图.由图 3 可以看出,该泵在设计工况下,进出口压力变化比较均匀,但观察图 3b 发现叶片两侧的压力不平衡,可能会引起横向的二次流动,加剧流道内近壁面处的流动损失.此外,叶轮进口处存在小范围低压

万方数据

分布区,有可能会形成局部的漩涡,但进口的低压值仍高于该处水的饱和压力值,因此不会产生汽蚀现象.

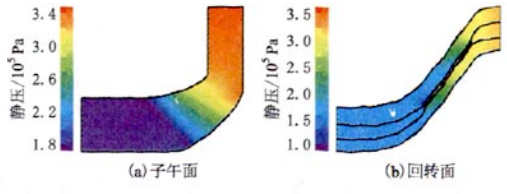


图3 叶片单通道静压分布

Fig. 3 Static pressure distribution of single blade channel

1.5 叶轮内部的流动分析

文中研究的混流式叶轮属于强后弯并且扭曲严重型叶轮,叶根附近流动状况复杂、混乱.叶片压力面和吸力面附近的根部都存在流动分离,且吸力面附近尤其严重,叶根进口处产生了明显的漩涡,近壁面处的流动分离已经严重影响到叶片流道主流区的流动,导致损失增大,效率下降(见图4a和4c);进口流场不均匀,叶根处尤为严重.叶根入口处存在明显的冲击和马蹄涡,并且马蹄涡吸力面上的分支绕过头部,在近壁面形成了漩涡,压力面分支进入流道之后出现了壁面脱离现象(见图4e).可见冲击和马蹄涡的存在严重影响了流道的近壁面流动,叶根头部结构设计存在严重的不合理.

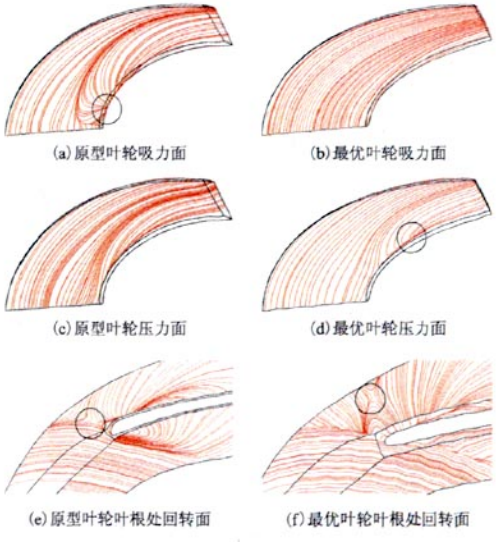


图4 叶轮速度极限流线图

Fig. 4 Velocity limiting streamlines of impeller

分析原因,可能是由于叶片的进口冲角和叶型弯曲度不符合流动规律,因而导致流体冲击叶片进口边,马蹄涡在叶片入口之前提前形成,影响了入口流场,致使马蹄涡后的分支在叶片两侧产生了漩涡和分离流动.此外主流区形成了通道涡(见图5a),通道涡是影响流动的主要因素之一,是弯曲流动不可避免的现象,只能尽量减小其发展.

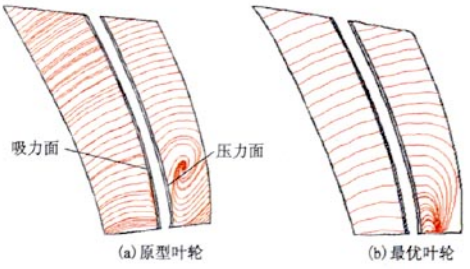


图5 距叶轮进口1/5处横截面速度极限流线

Fig. 5 Velocity limiting streamlines at 1/5 inlet of impeller

实际上,马蹄涡的强度本身并不大,损失可以忽略,但其在压力面上导致的流动分离可能会加大通道涡的强度,吸力面分支又融合入口冲击形成了漩涡.因此,马蹄涡的控制应予以重视.针对上述流动问题,文中对叶轮提出叶型修正的方案——优化叶片头部及骨线形状,以期能够消除或者减少不必要的流动损失,提高叶轮的水力性能.

2 叶型优化

2.1 优化模型的建立

2.1.1 几何参数化拟合

根据提出的修正方案,只针对叶片的骨线形状进行优化,其他结构均不改变.

具体控制条件设定:前后盖板设置5点控制的B-Spline样条曲线;流面设置从后盖板到前盖板的默认迭代;积叠线位置设置在进口边,线型为可以空间倾斜的直线;叶片进口设定圆头;叶片出口设定钝头;骨线设置2点控制的B-Spline曲线;轮廓线设置5点控制的Bezier曲线.

2.1.2 数据库生成

生成数据库时,变量及其数值的选择十分重要,在一定程度上依赖于设计者的经验,选择的好坏直接影响到优化的效果及数据库生成的时间和质量.根据经验,设置叶根和叶顶两个截面中弧线的4个控制点作为可变参数,相当于改变叶片的进口角、出口角和流道形状,数据库样本选择为50.数值模拟采用和原型泵相同的模型.

2.1.3 优化方法和过程

对数据库样本进行优化时,选择叶轮水力效率作

万方数据

为目标函数,数据库寻优步数设为10,寻优样本按水力效率从小到大排列如表2所示.可以看出,叶型弯曲度和效率之间的关系并不是简单的正比例或者反比例关系(叶型控制参数越大,叶型弯曲度越高),叶型弯曲度存在最优值.

表2 优化数据库

Tab.2 Optimizing database

	叶顶控制参数	叶根控制参数	等熵效率/%
1	0.800	1.966	91.63
2	1.010	1.700	92.51
3	1.010	1.821	92.71
4	1.014	1.822	92.71
5	1.014	1.822	92.71
6	1.014	1.822	92.71
7	1.013	1.815	92.72
8	0.900	1.753	92.84
9	0.980	1.789	92.86
10	0.990	1.799	92.89

2.2 叶轮优化结果

2.2.1 优化前后叶轮总体性能对比

图6为叶根和叶顶两截面上的叶片优化前后的叶型图.

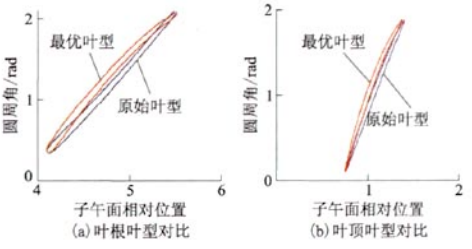


图6 优化前后叶型的对比

Fig.6 Comparisons of blade profile before and after optimization

由图6可以看出,叶根和叶顶的叶型进口和出口角发生了很大改变,叶型弯曲度加大.

表3为优化前后原型叶轮与最优叶轮总体性能参数的对比.可以看出,同样的流量下,叶型优化设计后叶轮的水力效率相对提高4.74%,单位耗功扬程提高了11.5%,表明最优叶轮的水力性能要大大好于原型叶轮.

表3 原型叶轮与最优叶轮数值模拟总体性能参数对比

Tab.3 Numerical simulation results comparison between original impeller and best impeller

	原型叶轮	最优叶轮	相对变化/%
流量/(kg/m^3)	4 441	4 441	0
单位耗功扬程/(m/kW)	0.067 4	0.075 1	11.50
水力效率/%	88.7	92.9	4.74

2.2.2 优化前后叶轮流动性能的对比

图4a-d为原型叶轮和最优叶轮的叶片近壁面极限流线图.前文已经分析了原型泵流动情况,对比可以发现,改进叶型后,原型叶片在吸力面根部形成的流动分离和漩涡基本上消失了,但压力面附近的流动分离略微加剧,且在叶片中后部形成了小范围的漩涡,但强度不大.放大后的叶根处回转面叶片进口流场如图4e,4f所示.

从图4中可以看出,改进叶型后进口处冲击有所减弱,吸力面附近的漩涡消失.分析其原因可能是叶型弯曲度的加大,改变了叶型进口角,在来流方向不变的条件下,进口冲角减小,从而使得叶片进口冲击减弱和马蹄涡位置后移、减弱、影响范围减小,因而进口压力场和速度场趋于均匀,叶片进口吸力面附近漩涡消失;叶型弯曲度的增大,也同时使得流体流动到叶片后半段时,速度降得更低,压力升得更高,因而在叶片压力面的后部,形成了流动的边界层分离,流体在更大的逆压力梯度作用下产生回流,形成小范围的漩涡.

逆压力梯度的存在迫使叶片之间所堆积的低能流体从压力面流向吸力面,从而形成了通道涡,通道涡所引起的损失是总损失的重要组成部分.对比原型叶轮和最优叶轮的流道横截面,可以更清楚地看到原型叶轮在压力面上距叶轮进口1/5之前就已经形成了的通道涡,该通道涡随着流动逐渐向吸力面横向移动并扩大,如图5所示.修改叶型后,同样位置截图可以看出新叶型抑制了该通道涡的形成,不稳定的通道涡被紧压在叶根底部,使涡结构变得较为紧凑,影响范围减小,限制了其与周围高能流体相互掺混的范围与质量,有助于减少通道涡附近的高能流体因掺混而产生的损失,从而降低了二次流损失.

综上所述,改进叶型后,原叶轮叶片在吸力面根部形成的流动分离和漩涡基本消失,流道中的通道涡和进口冲击受到抑制,叶根进口处的相对速度矢量分布趋于合理,近壁区域流动趋于良好,叶轮的水力效率得到很大提升,说明改型措施正确有效.文中的优化设计证明了控制叶型弯曲度可以有效控制叶片进口处的马蹄涡,消除近壁面流动分离和漩涡,减小流动中的通道涡强度和影响范围.

3 结 论

(1)文中采用Spalart-Allmaras湍流模型,应用NUMECA软件中Fine/Turbo模块对某混流泵内部流

万方数据

动进行了三维数值模拟.叶轮数值模拟的计算结果与其试验数据符合较好,证明了文中针对该型叶轮所选用的数值模拟方法和计算模型的准确性和可靠性.

(2)根据模拟结果,分析了流动中存在的问题,探讨了叶型结构的不合理之处,提出了改进方法.利用 Design3D 对叶片叶型进行优化设计,优化效果十分明显,在水力效率相对提高 4.74% 的同时,单位功耗的扬程也大大增加,原型叶轮中存在的漩涡和壁面脱离现象基本消失,叶根进口冲击和流道涡团影响范围减弱,叶轮的水力性能显著提高.

(3)研究表明,漩涡和流动分离是高比转速、高扭曲混流式叶轮损失的主要原因,叶根的部位尤其严重.优化时,对该型叶轮通过控制叶型的中弧线形状和进口角,从而控制流道内各个涡团的形成和结构,减小或消除流道内不必要的流动损失,提高叶轮的水力性能.

参考文献(References)

[1] Anagnostopoulos J S. A fast numerical method for flow analysis and blade design in centrifugal pump impellers [J]. *Computers and Fluids*, 2009, 38(2): 284 - 289.

[2] Dakshinamoorthy D, Khopkar A R, Louvar J F, et al. CFD simulation of shortstopping runaway reactions in vessels agitated with impellers and jets[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(6): 570 - 581.

[3] Zangeneh M, Goto A, Takemura T. Suppression of secondary flows in a mixed-flow pump impeller by application of three-dimensional inverse design method—Part 1: Design and numerical validation [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118(3): 536 - 543.

[4] Muggli F A, Holbein P, Dupont P. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoffto maximum flow[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(3): 798 - 802.

[5] Yu S C M, Ng B T H, Chan W K, et al. The flow patterns within the impeller passages of a centrifugal blood pump model[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2000, 22(6): 381 - 393.

[6] 杨敏官,刘 栋,贾卫东,等. 离心泵叶轮内部三维湍流流动的分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006, 27(6): 524 - 527.
Yang Minguan, Liu Dong, Jia Weidong, et al. Analysis on turbulent flow in impeller of centrifugal pump [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2006, 27(6): 524 - 527. (in Chinese)

[7] 龙志军,裴 毅,杨晓珍,等. 离心泵叶轮内部湍流流场的数值模拟[J]. 排灌机械,2005,23(2):8 - 10.
Long Zhijun, Pei Yi, Yang Xiaozhen, et al. Numerical simulation of turbulent flow inside impeller of centrifugal pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(2): 8 - 10. (in Chinese)

[8] 谈明高,刘厚林,王 勇,等. 叶轮外径对离心泵内流影响的 CFD 分析[J]. 排灌机械,2009,27(5):314 - 318.
Tan Minggao, Liu Houlin, Wang Yong, et al. CFD analysis on effects of impeller outlet diameter on flow field in centrifugal pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(5): 314 - 318. (in Chinese)

[9] 席 光,王晓锋,蒋三红,等.基于三维粘性流动分析的离心压缩机叶轮设计方法[J]. 工程热物理学报,2002,23(S1):54 - 57.
Xi Guang, Wang Xiaofeng, Jiang Sanhong, et al. Design method of centrifugal compressor impellers based on 3D viscous flow analysis[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23 (S1): 54 - 57. (in Chinese)

[10] 席 光,卢金铃,祁大同. 混流泵三元叶片优化设计方法研究[J]. 工程热物理学报,2004,25(6):952 - 955.
Xi Guang, Lu Jinling, Qi Datong. Research on the optimization method of 3D blade in mixed-flow pump [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25 (6): 952 - 955. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)

万方数据