

文章编号: 1006-4710(2013)03-0290-05

基于 CFD 的贯流式水轮机叶片改型及性能研究

武桦, 冯建军, 吴广宽, 郭鹏程, 罗兴铸

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用改型和 CFD 方法, 对一贯流式水轮机转轮叶片进行改型优化。采用 15 条叶高方向从叶片头部到尾部的 B 样条曲线来对叶片进行参数化, 通过调整 B 样条的控制参数来达到修改叶片几何形状的目的。结果表明, 通过对叶片的改型优化, 尾水管的水力损失明显有所降低, 水轮机在最优工况和额定工况点的效率和空化性能都有所提高。同时也对优化前后的流场进行了详细的分析和比较, 模型试验的结果也验证了改型和数值仿真的正确性。

关键词: 贯流式水轮机; 改型优化; 流动特性; 效率损失

中图分类号: TK733+.8

文献标志码: A

The Blade Geometry Modification and Performance Research for Bulb Turbine Based on CFD

WU Hua, FENG Jianjun, WU Guangkuan, GUO Pengcheng, LUO Xingqi

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The geometry modification and CFD method are adopted to carry out the geometry modification design of a bulb turbine runner blade. The 15 B-Spline curves from the leading edge to the trailing edge in the span direction are used to parameterize the geometry of the runner blade. Therefore, the blade geometry can be modified by changing the control parameters of the B-Spline curves. The results of the study show that: through the geometry modification for the runner blade, the hydraulic loss of the draft tube is reduced obviously, and the efficiency and cavitation performance of the turbine is improved for both the optimal and rated points. Furthermore, the flow fields before and after the optimization are analyzed and compared in detail, and the results have been validated by model tests.

Key words: bulb turbine; geometry modification design; flow characteristic; loss of efficiency

贯流式水轮机流道水平布置, 具有较大的过流能力, 流道内水流沿轴向呈直线流动, 避免了因水流转弯所引发的水流损失, 且具有较高的效率和较好的抗气蚀性能。在运行过程中, 由于转轮叶片和活动导叶能随着运行工况的变化形成最优的协联关系, 提高了水轮机的平均效率, 扩大了运行范围。因此, 贯流式水轮机成为开发低水头、大流量水能资源的一种良好机型。

近年来, 由于水力资源开发已经逐渐转向低水头水力资源, 因此对贯流式水轮机运行性能的研究及优化也成为当今研究热点。随着计算流体力学

的发展, 数值模拟成为贯流式水轮机性能研究的有效手段。文献[1]采用 CFD 对灯泡贯流式水轮机全流道进行流动分析, 总结了各个过流部件内水力损失所占的比重。文献[2]、[3]基于工程实际, 对贯流式水轮机尾水管进行了优化设计。文献[4]~[6]采用 CFX 对含叶片轮缘及轮毂间隙的贯流式水轮机流动特性进行研究, 分析了间隙对水轮机性能的影响。文献[7]、[8]建立了灯泡贯流式水轮机导叶和桨叶全三维反问题联合设计模型, 引入涡量动力学理论进行转轮性能分析和桨叶叶形优化。文献[9]应用数值模拟方法, 采用控制来流进口速度条

收稿日期: 2013-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979091); 陕西省百人计划资助项目(2012)。

作者简介: 武桦, 女, 博士生, 研究方向为流体机械数值仿真。E-mail: w. h@163.com。罗兴铸, 男, 教授, 博导, 研究方向为流体机械流动理论与优化设计、流体机械振动与稳定性研究、水力机组状态监测与故障诊断。

件来求解水轮机导叶水力矩并将计算结果与试验结果进行了比较。文献[10]采用优化算法对一贯流式水轮机转轮叶片进行了优化。

本文主要以某电站灯泡贯流式水轮机的模型机为研究对象,对其转轮叶片进行优化设计,并通过数值仿真的方法对其水力性能进行预估。

1 计算域及网格划分

为对水轮机整体流动特性进行研究,本文选取包括进口段、活动导叶、转轮叶片和尾水管在内的整个模型机为计算域(转轮直径 0.35 m,包括活动导

叶 16 个,转轮叶片 4 个),如图 1 所示。并采用 ANSYS ICEM CFD 对计算域进行高质量的六面体网格划分,图 2 为各个部件的网格,网格数如表 1 所示。

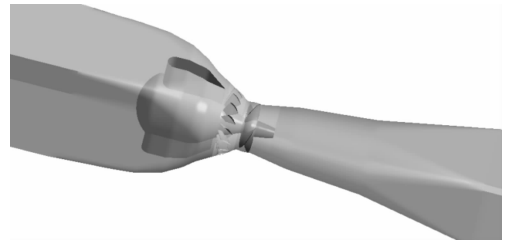
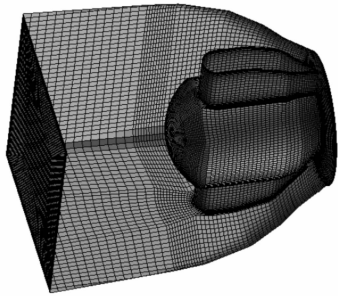
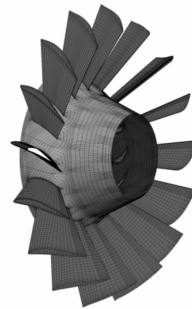


图 1 整体计算域

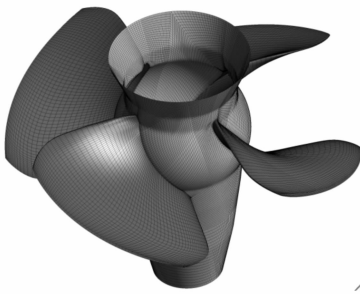
Fig. 1 The whole computational domain



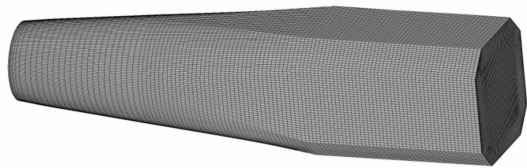
(a) 进口段



(b) 活动导叶



(c) 转轮



(d) 尾水管

图 2 计算域网格

Fig. 2 Computational grid

表 1 各个过流部件网格数量

Tab. 1 Mesh information

几何部件	网格节点数	网格单元数
尾水管	505 590	489 968
活动导叶	498 800	461 888
进口段	422 450	406 063
转轮	1 426 480	1 362 440

2 数值计算方法及边界条件给定

连续性方程、动量守恒方程以及能量守恒方程是描述流体流动规律的基本方程,自然界的任何复

杂的流动过程均遵守这三个物理规律,水轮机内部的流动状态也不例外。由于一般认为水流是不可压缩流体,热交换量很小,可以不考虑能量守恒方程,所以对于水轮机内复杂的三维粘性不可压缩湍流的模拟,基本控制方程可以描述为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j) = 0$$

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{u_j}$$

式中, S_{u_j} 为附加源项。

动量守恒方程:

$$\tau_{ij} = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{u}\right)\delta_{ij} +$$

$$\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\delta_{i,j}$$

本文采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对计算域进行求解,边界条件给定如下。

进口:机组进口段进口给定质量流量,并假定流动方向与进口截面垂直。

出口:尾水管出口给定质量流量。

固壁面:对固壁面采用无滑移边界条件。

3 水轮机叶片改型及结果分析

由于早期的水轮机设计经验不足,并且缺少对水轮机内部流动特性的准确认识,因此使得许多老电站水轮机在运行过程中出现出力不足、效率水平低、空化严重等问题。因此本文主要针对水轮机效率水平较低、空化严重等问题,对贯流式水轮机转轮叶片进行改型优化,并对优化前后最优点及额定点的运行性能进行对比分析,以提高水轮机的效率并改善空化性能。

在转轮叶片改型过程中,在叶高方向采用15条从叶片头部到尾部的B样条曲线来对叶片进行参数化,通过调整B样条的控制参数来达到修改叶片几何形状的目的。对调整所得的叶片几何,首先进行三维造型和网格划分,然后进行CFD流场仿真进行性能预估。

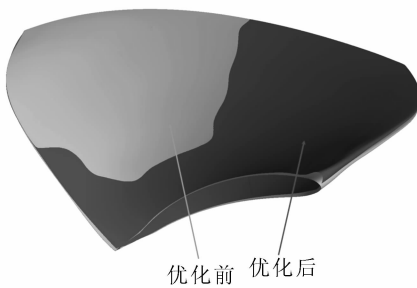
如果叶片性能没有达到要求,则根据流场分析结果,进一步修改叶片几何形状,之后再对新叶片进行CFD流场仿真。如此重复,直到所得叶片的性能满足要求。

表2为进行性能评价时所选取的工况点。优化前后转轮叶片几何如图3(a)所示,相对于原叶片,优化后的叶片的进口安放角及出口靠轮毂处安放角有所增加,而减小了叶片出口靠轮缘处的安放角。

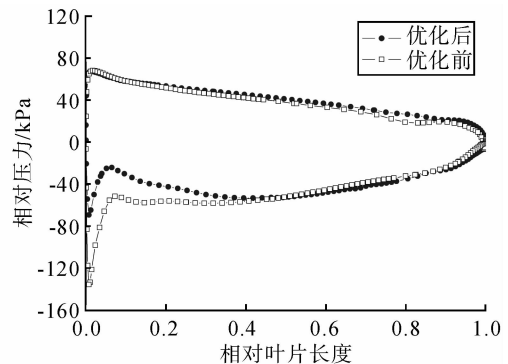
表2 计算工况点

Tab. 2 Calculation operation conditions

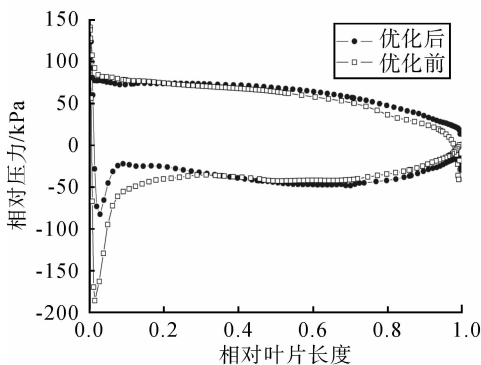
计算 工况点	导叶 开度/(°)	桨叶 转角/(°)	单位流量 $Q_{11}/(L/s)$	单位转速 $n_{11}/(r/min)$
最优 点	55	20	1700	152
额定 点	69	31	2780	176



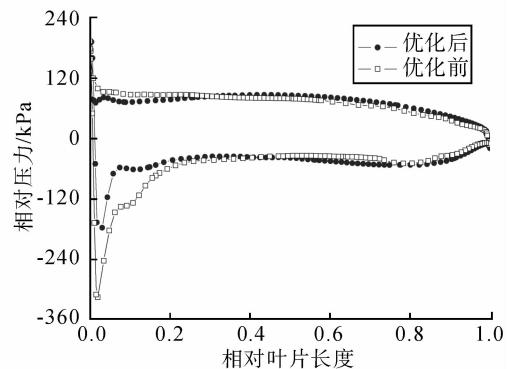
(a) 优化前后叶片几何比较



(b) 靠轮毂处(Span=0.1)



(c) 叶片中间位置(Span=0.5)



(d) 靠近轮缘(Span=0.9)

图3 最优点叶片表面压力分布对比

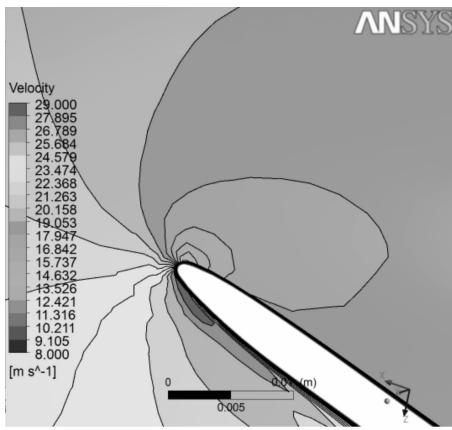
Fig. 3 Pressure distribution comparison on the runner blade surface for the optimal point

水流在绕流叶片表面时,在低压区会出现空化现象,进而影响水轮机的安全稳定运行。因此在设计水轮机时,不仅要考虑效率,还应该考虑空化性能。就水轮机的设计而言,沿绕流翼型表面的压力分布对空化特性有决定性的影响。图3给出了优化前后叶片表面压力分布曲线。

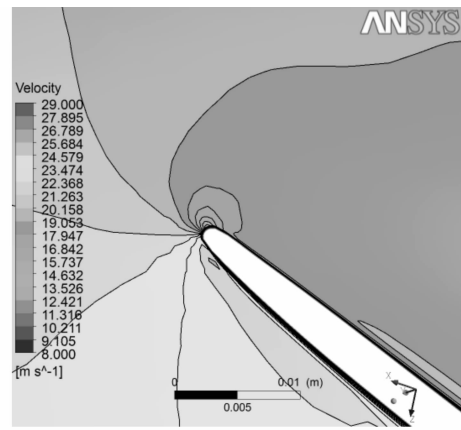
从图3可以看出,转轮叶片的低压区主要集中在叶片背面靠头部位置(叶片正面位于上方,叶片背面位于下方)。因此在运行过程中,该区域最容易发生空化。而优化后的转轮叶片在头部背面靠头

部位置的低压值有很大的提高,因此水轮机的空化性能也会有所改善。同时相对于优化前,优化后叶片正背面压差有所增加,尤其是叶片靠出水边部分,相应地增加了水轮机的出力。

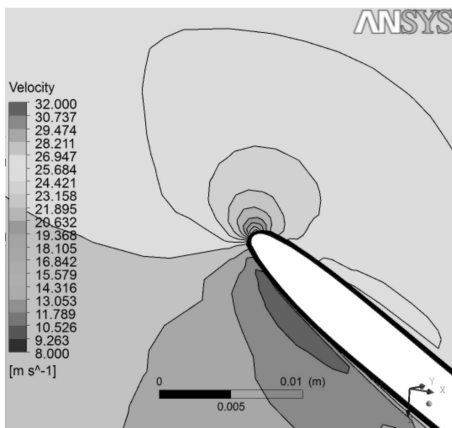
从理论上讲,满足进口水流无撞击和法向出流的情况是具有最高效率的工况。但是实际情况下需要水轮机在偏离最优工况的大流量区域有良好的水力性能。因此在设计时,最优点采用一定的正冲角。图4给出了叶片头部附近的相对速度云图,以反映水流绕流翼型头部时水流流动特性。



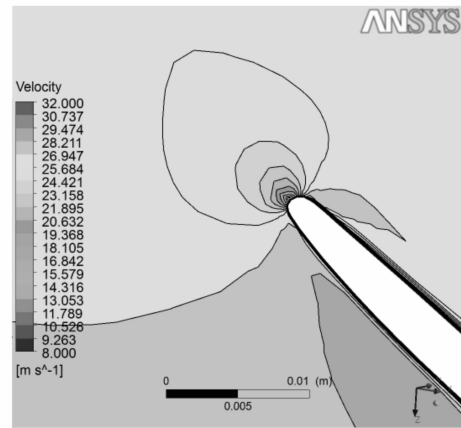
(a) 优化前最优点



(b) 优化后最优点



(c) 优化前额定点



(d) 优化后额定点

图4 叶片头部附近速度云图

Fig. 4 Velocity contours near the runner blade leading edge

从图4可以看出,原始叶片最优翼型绕流时水流驻点位于叶片正面,叶片头部冲角也相对较大,形成较大的撞击损失,在叶片背面相应区域也容易出现脱流和漩涡,因此使得水轮机效率降低,并且脱流区域内易发生空化空蚀现象。因此对叶片进行改型优化时,在最优点使叶片头部保持一定正冲角,在额定点接近无撞击进口,因此水轮机的效率及空化性

能均有所改善。

表3给出了叶片优化前后水轮机的效率及各个过流部件的效率损失。

对叶片的改型优化能够很好地改善尾水管内的流动特性,使得尾水管内的水力损失明显减小,水轮机最优点和额定点的效率相对于叶片优化前分别提高1.35%和1.1%。

表3 水轮机优化前后性能比较

Tab.3 Performance comparison

工况点	方案	水轮机效率/%	进口段水力损失/%	活动导叶内水力损失/%	尾水管内水力损失/%
最优点	优化前	91.47	0.194	1.094	2.805
	优化后	92.82	0.194	1.097	1.833
额定点	优化前	89.43	0.495	1.362	3.334
	优化后	90.53	0.495	1.368	2.144

为了验证数值模拟结果和优化设计结果,进一步考察模型转轮的水力性能,对优化得到的转轮进行了模型试验。根据模型试验结果,模型水轮机的最优效率达到 92.78%,额定点达到 90.65%,数值计算结果和模型试验比较吻合,同时显示所开发的转轮具有较好的水力性能。

4 结论

本文采用数值计算的方法对贯流式水轮机流动特性进行研究,分析了水轮机内部的流动缺陷,根据流动分析结果对水轮机转轮叶片进行改型优化。通过优化,明显提高了叶片表面的低压值,改善了叶片头部的水流撞击,减小了尾水管的水力损失,使得水轮机最优点和额定点的效率分别提高 1.35% 和 1.1%,同时水轮机的空化性能也有所改善。研究表明,通过 CFD 分析水轮机内部流动缺陷,进而进行有目的的几何改型是可行的。

参考文献:

- [1] 王正伟,周凌九,陈炎光,等. 灯泡贯流式水轮机水力损失分析[J]. 大电机技术,2004,(5):40-43.
Wang Zhengwei, Zhou Lingjiu, Cheng Yanguang, et al. Hydraulic loss analysis in bulb turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004,(5):40-43.
- [2] 陈新方,季盛林,张进. 贯流式水轮机尾水管设计与试验研究[J]. 河海大学学报,1995,23(2):32-38.
Chen Xinfang, Ji Shenglin, Zhang Jin. Design and study of draft tubes of tubular turbines[J]. Journal of Hohai University, 1995, 23(2):32-38.
- [3] 宋文武,陈次昌,杜同,等. 贯流混流式水轮机的设计[J]. 农业机械学报,2012,33(6):44-47.
Song Wenwu, Chen Cichang, Du Tong, et al. Research and design of the straflo-francis turbine[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 33(6):44-47.
- [4] 韩秀丽,刘万江,魏显著. 贯流式水轮机间隙流动的数值分析[J]. 大电机技术,2009,(4):52-54.

Han Xiuli, Liu Wanjiang, Wei Xianzhu. Numerical analysis of clearance flow of tubular turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2009,(4):52-54.

- [5] 黎辉,许建新,刘万江. 贯流式水轮机间隙流动模拟技术浅析[J]. 大电机技术,2011,(2):31-36.
Li Hui, Xu Jianxin, Liu Wanjiang. The analysis of gap simulation technology on tubular turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2011,(2):31-36.
- [6] 赵道利,马薇,梁武科,等. 有无轮缘间隙的贯流式水轮机三维流动数值模拟[J]. 大电机技术,2007,(3):31-35.
Zhao Daoli, Ma Wei, Liang Wuke, et al. On 3d flow numerical simulation of bulb tubular turbine considering and not flange clearance[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2007,(3):31-35.
- [7] 李凤超,樊红刚,王正伟,等. 贯流式机组桨叶与导叶全三维匹配设计方法[J]. 水力发电学报,2010,29(4):213-217.
Li Fengchao, Fan Honggang, Wang Zhengwei, et al. Three-dimensional matching design method for runner blades and guide vanes of tubular turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4):213-217.
- [8] 李凤超,樊红刚,王正伟,等. 贯流式机组桨叶与导叶全三维联合设计[J]. 水力发电学报,2012,31(2):206-209.
Li Fengchao, Fan Honggang, Wang Zhengwei, et al. Three-dimensional matching design method for runner blades and guide vanes of tubular turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2):206-209.
- [9] 纪兴英,赖旭,陈玲,等. 贯流式水轮机导叶水力矩计算[J]. 水利学报,2011,42(7):869-875.
Ji Xingying, Lai Xu, Chen Ling, et al. Numerical analysis of hydraulic torque of guide vanes in bubble turbines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7):869-875.
- [10] Yang Wei, Wu Yulin, Liu Shuhong. An optimization method on runner blades in bulb turbine based on CFD analysis[J]. Sci China Tech Sci, 2011, 54(2):338-344.

(责任编辑 王卫勋)