

基于 BladeGen 的混流水轮机转轮叶片优化研究

刘安然¹,施晶²,石祥钟¹,王利英¹

(1. 河北工程大学 水电学院,河北邯郸 056021;2. 中国电能成套设备有限公司,北京 100011)

摘要:基于 CAD - CFD 软件对混流式水轮机转轮叶片优化进行研究,使用 Workbench/BladeGen 进行参数化造型,结合 CFD 实现了对转轮整体性能的优化设计。首先根据二元理论设计出适用水头为 140 m ~ 170 m 的混流式水轮机转轮,根据流场数值分析结果,利用 BladeGen 控制与优化转轮的几何参数,最终改善了流态并提高了效率。BladeGen 可以方便地控制转轮的结构参数,便于探讨水轮机结构与性能的复杂关系,在水力机械设计中具有较好的应用前景。

关键词:混流式水轮机;优化设计;Workbench/BladeGen ; CFD

中图分类号:TK733 + . 1

文献标识码:A

Optimization research for francis hydro turbine blade based on the BladeGen

LIU An - ran¹, SHI Jing², SHI Xiang - zhong¹, WANG Li - ying¹

(1. School of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056021, China
2. China Power Complete Equipment Co., Ltd. Beijing 100011, China)

Abstract: Based on CAD - CFD software Francis hydro turbine runner blade optimization is studied; combined with CFD, the overall performance optimization for runner is realized by using Workbench/BladeGen Parametric modeling. Firstly Francis hydro turbine runner with a suitable water head from 140m to 170m is designed by according to the 2D Design Theory. On the basis of the flow field numerical analysis results, the flow pattern is eventually improved and the efficiency is increased by using the geometric parameters controlled and optimized by BladeGen. The structure parameters of the runner could be easily controlled by BladeGen, and the research of the complex relations between structure and performance of the Francis hydro turbine can be conveniently conducted, which has a good application prospect in the design of hydraulic machinery.

Key words: francis hydro turbine runner; optimization design; Workbench/BladeGen; CFD

混流式水轮机叶片具有较复杂的空间扭曲形状^[1],叶片的形状决定了转轮的性能,设计不合理会造成运行过程中的效率较低、汽蚀和动力性能较差等问题^[2-3]。基于 CAD - CFD 软件对水轮机叶片优化方法进行研究^[4-5],根据二元理论设计出适用水头为 140 m ~ 170 m 的混流式水轮机转轮(设计过程中参考了临近水头推荐的 HL160 水轮机)^[6],使用 Workbench/BladeGen^[7]对水轮机转轮进行参数化造型,再利用 CFX 进行流场分析,基于分析结果评估其性能,研究分析了转轮结构参

数对其性能的影响,通过转轮结构参数进行调整,优化沿翼型压力分布,改善了流态并提高了能量性能。对转轮叶片的适应性进行优化,选择不同的开度^[7],根据计算结果对转轮进行微调,提高了转轮的整体性能。本文使用 BladeGen 对水轮机转轮叶片参数化控制,根据设计目标和 CFD 分析结果不断的调整水轮机转轮的结构参数,有效的实现了转轮整体性能的优化,节约了 CFD 分析的时间,有助于深入探究水轮机转轮结构和性能之间的复杂关系。

1 转轮初步设计及其内部流场计算

1.1 转轮的初步设计

根据二元设计理论,以逐步逼近的试算方式画出轴面流线和等势线,利用轴面流线旋转即可得到流面,对水流质点运动方程进行积分,对流线进行加厚,得到各流面层上翼型的空间数据。将转轮各部分数据整理为 ibl 格式的数据文件读入到 BladeGen 中,将叶片个数等参数设定后即可生成转轮实体,根据叶片表面光滑性,对其进行初步优化,叶片各流面层翼型及其轴面投影如图 1 所示,转轮实体模型如图 2 所示。

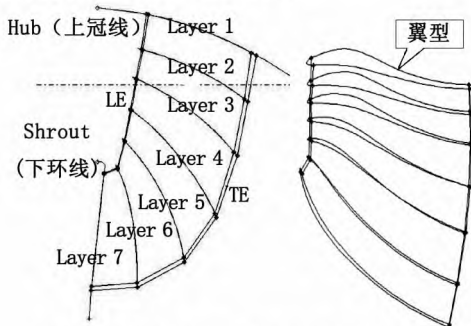


图1 叶片各流面层翼型及其轴面投影图

Fig.1 Stream surface airfoils and its axial projections of blade

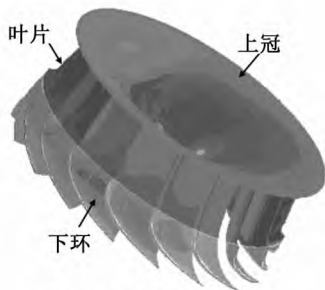


图2 转轮实体模型图

Fig.2 Runner entity model

1.2 水轮机全流道 CFD 计算

根据蜗壳、座环、活动导叶、转轮和尾水管各部分的几个尺寸,绘制出各部分的流动计算域几何模型,水轮机全流道如图 3 所示。

蜗壳与固定导叶计算域使用 ICEM 划分为四面体网格,蜗壳计算域网格单元数为 68 272,座环计算域网格单元数为 36 539,转轮和活动导叶部分的计算域网格用 TurboGrid 划分,转轮计算域网格单元数为 100 926,活动导叶计算域网格单元数

为 17 136,尾水管计算域网格用 ICEM 划分为六面体网格,网格单元数为 112 342。

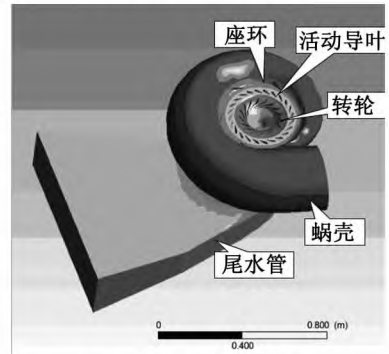


图3 水轮机全流道图

Fig.3 The whole flow passage of Francis turbine

使用 CFX 软件进行 CFD 计算,选用 $k - \epsilon$ 湍流模型,设置蜗壳进口为速度进口,尾水管出口为压力出口。导叶和转轮部分取单流道,将转轮和导叶的单流道计算域设定为绕 Z 轴旋转的周期性计算域,其中导叶数为 24 个,转轮叶片数为 17 个。蜗壳与座环、座环与活动导叶界面都设置为一般连接界面,导叶与转轮、转轮与尾水管交接界面设为冻结转子界面。在可能运行范围内选取的计算工况如表 1。

表 1 计算工况表

Tab.1 Working conditions of calculation

转速 $n / r \cdot \min^{-1}$	流量 $Q / L \cdot s^{-1}$
720	90.00
720	100.00
720	110.00
780	106.87
780	117.00
780	127.00
840	114.00
840	124.69
840	135.00
900	93.00
900	103.00
900	113.00

表 1 考虑了转速为 780 r/min,流量为 117.00 L/s 的设计工况与 11 种非设计工况。

2 转轮的优化改型

2.1 叶片的水力特性优化

利用 BladeGen 对翼型的结构控制参数进行调整,主要是采用改变翼型的包角、厚度和安放角。调整过程中需要综合考虑翼型压力分布曲线、流

场分布等因素,沿着翼型的压力分布决定了叶片的能量与汽蚀性能,基于 CFD 计算结果不断优化叶片,使性能不断提高,通过多次调整、计算、分析,直到达到设计要求。

图4与图5为转轮优化前后,设计工况下翼型压力分布曲线的对比。从图4可知优化前叶片翼型尾部压力分布曲线出现交叉,该问题是由于翼型骨线安放角不合理或是卡门涡列造成的,这对能量转换非常不利并可能造成叶片的振动;叶

展95%处沿翼型压力分布曲线显示出头部基本没有能量转化的作用,尾部压力下降很快,导致汽蚀性能变差,这是由于该处头部翼型安放角较小和翼型加厚规律不良导致的。综上可以预见这样的叶片不会具备良好的性能。图5为优化后沿翼型的压力分布,叶片翼型压力分布较优化前得到了很大改善,虽然靠近下环处背面的压力较低,但可以保持在安全范围内,不容易发生汽蚀,可预见优化后的转轮具有较好的水力性能。

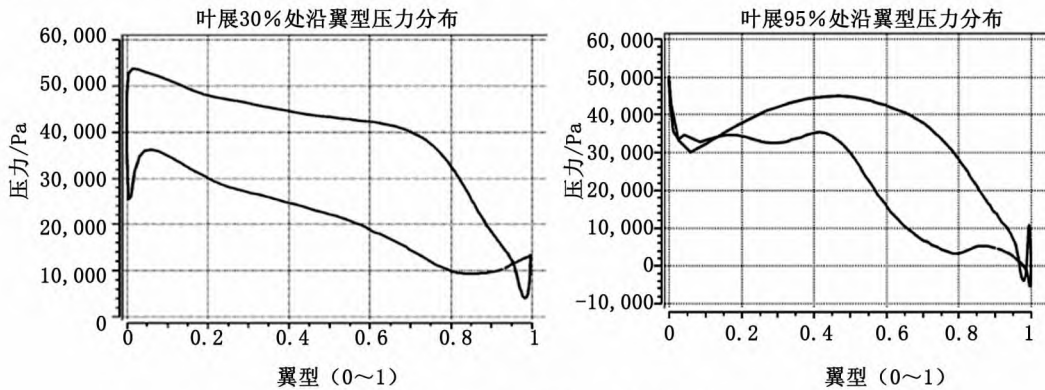


图4 优化前叶片沿翼型压力分布曲线

Fig. 4 Pressure distribution curve along airfoil before blade optimization

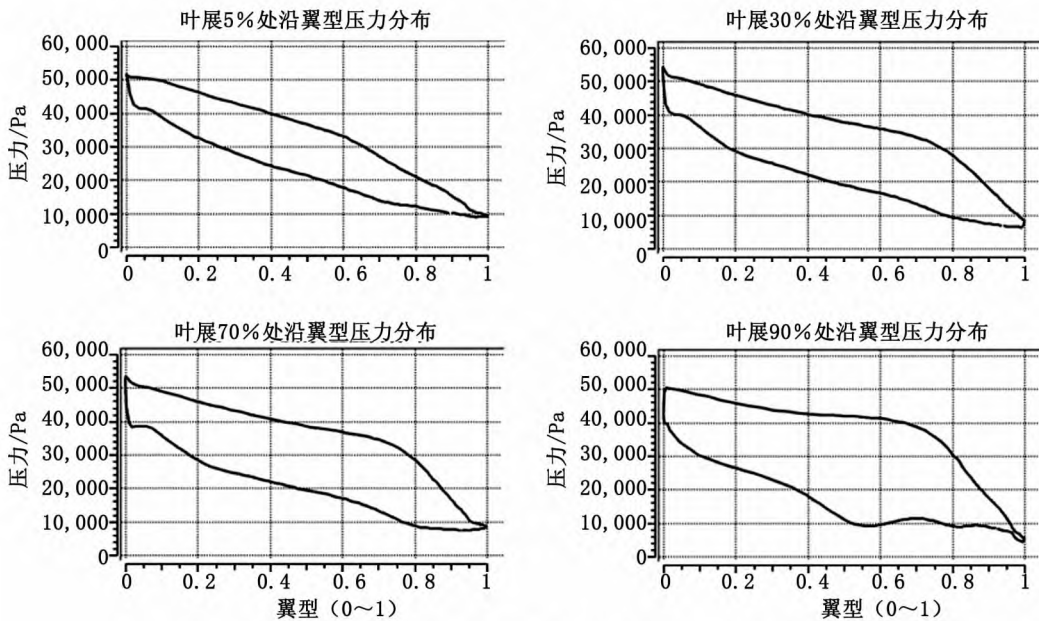


图5 优化后叶片沿翼型压力分布曲线

Fig. 5 Pressure distribution curve along airfoil after blade optimization

2.2 叶片的适应性计算

水轮机不仅在设计工况下具有较好的性能,在非设计工况下也需具有较好的性能,即叶片应具有较好的适应性。特别是在大流量区,由于叶片进口具有负冲角,将引起性能的快速下降,因此

在设计工况下,应使叶片进口水流具有一定的正冲角,并将叶片头部做成圆形,提高对非设计工况的适应性。对不同导叶开度进行 CFD 计算,根据计算结果再对翼型的结构参数进行微调,提高水轮机工作范围内的整体性能。

图6为活动导叶开度为 12.41 mm 时,叶片优

化前后叶道流场形态的对比。图6(a₁)、(b₁)分别为优化前的中间流面叶道流速分布与三维流线图,从图中可知优化前叶片进口水流有负冲角,三维流线显示出叶栅中存在明显的涡流,这可能会导致叶片的振动和汽蚀,说明优化前转轮对于大开度工况适应性不好,水力特性较差。图6(a₂)、(b₂)显示出优化后的转轮在大开度工况下流场形态良好,流速分布和三维流线显示出较好的水力特性,说明优化后转轮有较好的适应性。

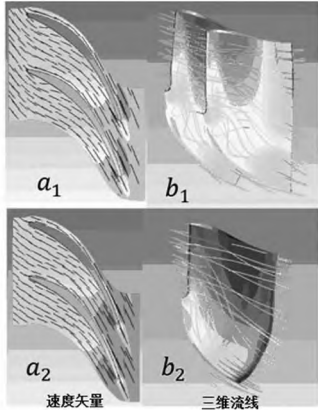


图6 优化前后叶道流速分布与三维流线图
Fig.6 Velocity distribution and streamlines before and after the optimization

3 水轮机的性能计算

3.1 能量性能计算

采用优化后的转轮,取不同开度计算了水轮机12种工况下的能量特性参数,选取具有代表性的4个工况的计算结果列于表2。

由表2可知,设计工况下转轮的能量性能最好,并且在设计工况附近转轮具有较高的适应能力,但当开度达到14.5 mm时,效率呈现明显降低,这是由于水流开始具有负冲角引起的,因此转轮需要在出力限制线以内工作。

3.2 转轮叶片的模态计算

这里对优化后的叶片进行了模态计算分析^[8],如图7所示,将前6阶固有频率列于表3。

由于过流部件的水力不平衡力与其它激振力会导致叶片振动,如果与叶片的固有频率相同即可导致共振,将会造成破坏,在运行过程中应该避开共振频率。综上可知,优化后的转轮能量特性较好,流场与叶片表面压力分布合理,对不同开度的适应性较好,转轮的整体性能达到了设计要求。

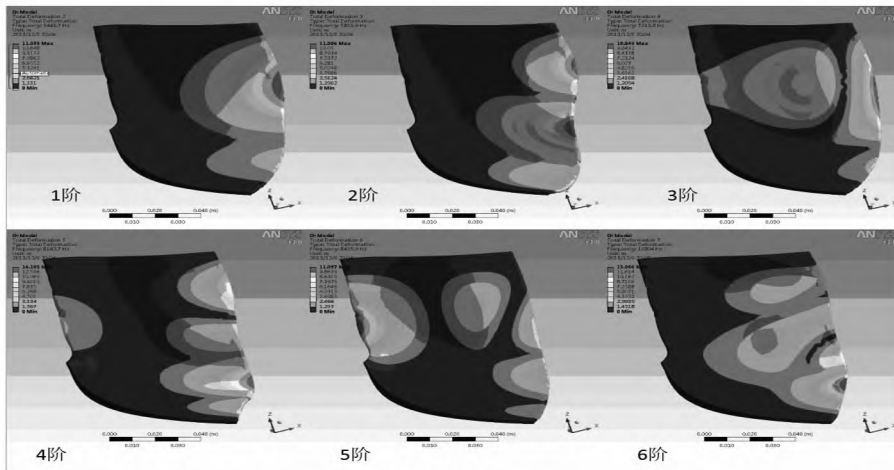


图7 叶片前6阶模态示意图
Fig.7 The first six modes of blade

表2 不同开度下水轮机的出力与效率

Tab.2 The output and efficiency of the turbine under different opening

名称	数值			
开度 a /mm	10.30	11.36	12.41	14.15
转速 n/r. min ⁻¹	780	780	840	840
流量 Q/L. s ⁻¹	106.87	117.00	124.69	135.00
单个叶片的扭矩 T/·	7.18	6.507	7.381	8.150
出力 P/kW	7.936	9.031	11.032	12.181
效率/%	90.615	90.987	90.164	86.337

表3 叶片前6阶模态表
Tib.3 The first six modes of bade

阶次	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	3 443.7	5 801.9	7 019.8	8 142.7	8 405.9	10 080.4

4 结论

1) 优化后的转轮比使用二元理论设计出的转轮整体性能有明显提高,对型谱中适用于该水头段的水轮机起到了补充作用。

2) 基于 BladeGen 参数化的设计方法具有非常重要的应用价值,利用叶片各部分参数化控制曲线可方便地对转轮的几何结构进行控制,快速实现叶片改型。BladeGen 与 TurboGrid 的结合能快速划分较高质量的六面体网格,大大缩短了整个转轮设计分析周期,提高了工作效率。

参考文献:

- [1] 廉玲军. 混流式水轮机转轮设计方法的研究[D]. 成都: 西华大学,2009.
- [2] 赵亚萍, 廖伟丽, 李志华, 等. 轴流式水轮机叶片进水边形状对其性能的影响[J]. 农业工程学报, 2012,

28(13): 94 - 99.

- [3] 姬晋廷. 轴流式水轮机转轮改造中的关键问题研究[D]. 西安:西安理工大学, 2009.
- [4] 刘胜柱, 郭鹏程, 季兴英, 等. 混流式水轮机叶片进水边外延的方法[J]. 中国农村水利水电, 2004, 12: 114 - 118.
- [5] SCHILLING R, THUM S, MULLER N. Design optimization of hydraulic bladings by multilevel CFD - technique [C]. Proceeding of 21nd IAHR, 2002.
- [6] 季盛林, 刘国柱. 水轮机(第二版)[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [7] 詹巧月, 周晨阳, 韩凤琴. 基于转轮入口流动的最优导叶开度预测[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(5): 862 - 865
- [8] 王少波. 混流式水轮机转轮动力特性分析及综合优化设计[D], 郑州: 机械科学研究院, 2003.

(责任编辑 刘存英)

(上接第88页)(1)系统对库房环境参数检测时效性良好,温度的绝对误差小于 0.5°C ,湿度的绝对误差小于3%;(2)系统具有较强的库房火灾监控性能,火焰传感器在烟头距离为4 m时报警;而烟雾传感器在香烟距离2 m时开始报警;系统的报警延时为6秒;(3)系统表现出自动环境调控性能,在实验中当温湿度超过阈值时系统给空调和加湿器发出信号,空调和加湿器均能启动和停止。由于实验的房间较大,空调的功率较小并且加湿器只有一台,因此系统调控能力有限。考虑到我们主要是测试系统的调试功能,因此这已经足够了;(4)数据缓冲区的容量影响收发数据的质量。另外,由于库房内没有灭火系统,因此系统的自动灭火性能没有测试。

5 结论

本文基于物联网技术开发了一套智能仓库环境监控系统。该系统把物联网技术与电信网技术、自动控制技术相结合,充分利用网络资源,可以直接、准确、高效、可靠的对仓库内的温、湿度进行智能监控,在发生火灾能及时灭火和报警。实验测试结果表明:系统运行稳定、可靠,控制灵活、准确,有较强的通用性。

参考文献:

- [1] SALTZER J, REED D, CLARK D. End - to - end arguments in system design[J]. ACM Trans Comput Syst., 1984(2): 277 - 288.
- [2] ROUSSOS G, KOSTAKOS V. RFID in pervasive computing: state - of - the art and outlook [J]. Pervasive Mob Comput, 2009(5): 110 - 131.
- [3] AKYLIDIZ I, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor network: a survey [J]. Comput Netw, 2002, 38(4): 393 - 422.
- [4] AKYLIDIZ I F, KASIMOGLU I H. Wireless sensor and actor networks: research challenges [J]. Ad Hoc Netw J, 2004(2): 351 - 367.
- [5] MA X, LIU T. The application of Wi - Fi RTLS in automatic warehouse management system[C]// Proceeding of the IEEE, 2011(11): 64 - 69.
- [6] ZHANG Y, JIANG X, LIN Z, et al. Pre - handover context transfer mechanism based on warehouse station communication pattern [J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2012, 6(19): 206 - 214.
- [7] WEI Y. Logistic unified information system warehousing module design based on internet of things [C]// Proceeding of the IEEE, 2011(11): 263 - 266.
- [8] GAO J, TANG Y. Intelligent distribution system based on IOT technology [J]. ICTE, 2011(1): 2211 - 2215.

(责任编辑 王利君)