

冷却塔专用超低比转速水轮机的设计及数值模拟

熊妍, 屈波, 霍志红, 邓力, 时志能

(河海大学 能源与电气学院, 南京 211100)

摘要: 以冷却塔内流量为 5 000 t/h 的超低比转速混流式水轮机为研究对象, 通过结构设计, 开发出了一种小型混流式水轮机, 可直接与风机匹配, 实现富余能量的回收。使用商业 CFD 软件 Fluent, 基于雷诺时均 N-S 方程、RNG k- ϵ 湍流模型和 SIMPLC 算法, 对设计的水轮机模型进行全流道三维定常湍流数值模拟, 分析了水轮机内部流场及各部件的水力损失。结果表明, 在设计工况下, 水轮机的出力为 143.3 kW, 效率为 83.74%, 水头损失较小; 当富余水头在 12~14 m 的范围内变化时, 所给出的小型水轮机整体流态良好, 水力性能稳定, 效率均在 83% 以上, 满足设计要求。

关键词: 水轮机; 结构设计; 数值模拟; 水力损失; 冷却塔

中图分类号: TK 730.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0112-04

Design and Numerical Simulation of Turbine with Super Low Specific Speed Used in Cooling Tower

XIONG Yan, QU Bo, HUO Zhi hong, DENG Li, SHI Zhi neng

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The turbine with super low specific speed and a flow rate of 5000 t/h used in a cooling tower was investigated through structural design in order to develop a new type of small Francis turbine that can match fan directly and recover the surplus energy from cooling tower. On the basis of Reynolds time averaged N-S equation, RNG k- ϵ turbulent model, and SIMPLC algorithm, the three dimensional steady turbulent flow in the designed turbine model was simulated numerically using the commercial CFD software Fluent, and the flow field in the turbine and hydraulic loss of each component were analyzed. The results showed that the output power of turbine is 143.3 kW and the efficiency is 83.74% with a small head loss under the design conditions. When the redundant head was in the range of 12 to 14 m, the turbine had a good flow state and stable hydraulic performance with the efficiency of above 83%, which indicated that the turbine meets the design requirements.

Key words: turbine; structural design; numerical simulation; hydraulic loss; cooling tower

冷却塔是工业领域重要的设备之一, 有着相当广泛的应用。传统的冷却塔通过配置专门的电动机驱动风机旋转送风, 以达到预期的冷却效果。但是, 使用电动机将消耗大量的电能, 而循环冷却水出口仍具有的富余能量却全部浪费了。因此, 用小型水轮机回收冷却塔富余水头, 将余压转换为机械能, 取代电动机作为风机的动力源, 是一种有效的节能措施, 也是当前水轮机发展的一种新趋势^[1]。与用于发电的水轮机不同, 用于冷却塔的水轮机大多具有较低的比转速, 需根据实际情况进行设计。在以往的研究中, 根据富余水头和流量, 学者们已设计出一些不同型式的适合冷却塔使用的小型水轮机^[2-5]。考虑到冷却塔专用水轮机是在串联的有压水流系统工作的, 与反击式水轮机工作原理相悖, 应采

用反击式水轮机^[6]。鉴于, 本文在已有超低比转速混流式水轮机的基础上, 结合某工厂现有的冷却塔, 拟开发出一种结构新颖且能满足驱动风机要求的超低比转速混流式水轮机。

1 水轮机的设计

国内某工厂的冷却塔基本参数见表 1, 本文在此基础上进行超低比转速混流式水轮机的结构设计和数值模拟。

1.1 转轮

由冷却塔的基本参数可知, 若水轮机要与风机实现直连, 则水轮机的比转速 n_s 约为 48。作为水轮机做功的核心部件, 转轮的设计尤为重要。考虑到冷却塔专用水轮机超低比转速的特性, 采用二元理论^[7]设计转轮, 上冠和下环均采用

收稿日期: 2013-12-6 修回日期: 2014-03-21 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.025.html>

作者简介: 熊妍(1990-), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事流体机械数值模拟研究。E-mail: yan_90930@sina.com

通讯作者: 屈波(1966-), 男, 山东济宁人, 副教授, 从事流体机械状态监测与故障诊断研究。E-mail: hhqubo@hotmail.com

表1 冷却塔的基本参数

Table 1 Basic parameters of cooling tower

参数名称	单间额定冷却水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	风机额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	风机额定轴功率/kW	富余水头/m
参数值	5 000	107	120	12~14

用曲线型,转轮叶片进口角 $\beta_1 > 90^\circ$,为法向出口。通过合理选择叶片上的环量分布、叶片厚度分布,设计一种扭曲式叶片,并确定叶片数目。

转轮的进口直径 D_1 可由下式确定:

$$D_1 = \sqrt{P / (9.81 Q_{11} H^{1.5} \eta)} \quad (1)$$

式中: P 为风机额定轴功率; Q_{11} 为水轮机的单位流量,取 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$; H 为额定水头,取 13 m ; η 为水轮机效率,取 0.83 。冷却塔专用超低比转速转轮有较大的进、出口直径比,一般可认为 $D_1/D_2 = 2.0 \sim 2.5$ 。根据式(1)、进出口直径比及相关数值模拟的结果,确定转轮进、出口直径分别为 $1\,380 \text{ mm}$ 、 570 mm 。转轮图如图1所示,叶片模型如图2所示,叶片数为20个。

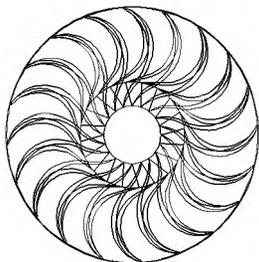


图1 转轮图

Fig. 1 Runner



图2 叶片模型

Fig. 2 Blade model

1.2 导叶

由于冷却塔内流量及富余水头的变化幅度不大,因而冷却塔专用的超低比转速水轮机仅设单列环形固定导叶,不设活动导叶。固定导叶采用负曲度叶型(图3),导叶开度为 54.5 mm ,导叶数目为20个。根据混流式水轮机的导叶相对高度与比转速的近似关系确定导叶高度为 110 mm 。



图3 固定导叶翼型

Fig. 3 Guide model

1.3 蜗壳

按蜗壳断面水流平均速度周向分量 $V_{u,\theta}$ 为常数的规律进行蜗壳设计,采用椭圆断面的金属蜗壳,包角 345° ,椭圆断面的短轴与长轴比例为 0.618 ,如图4所示。

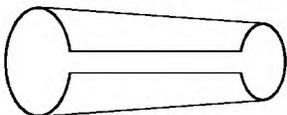


图4 蜗壳图

Fig. 4 Volute

1.4 尾水管

结合冷却塔专用水轮机尺寸小的特点,拟采用结构简单、制造容易、恢复系数 η_w 高的直锥形尾水管。尾水管的母线为直线,锥角 θ 取 10° ,进口断面直径与转轮出口直径相等,为 570 mm ,出口断面直径 804 mm 。

2 CFD 数值模拟

随着计算机技术和计算流体力学的发展,水轮机的数值模拟技术也日趋成熟,已从过去的单个过流部件的计算、单流道耦合计算发展到了全流道耦合流动计算^[9]。选取蜗壳、导叶、转轮和尾水管作为计算域的全流道三维定常湍流数值模拟,考虑了动、静部件间的相互干涉,在指定了进口和出口边界条件后就能更准确地模拟出水轮机的内部流场,进而预测水轮机的性能^[9]。

2.1 建模

按照模型与原型比为 $1:1$ 的尺寸建模,模型包括蜗壳、导叶、转轮和尾水管共4个部分,水轮机的整体几何模型如图5所示。



图5 水轮机整体模型

Fig. 5 Full geometric model of Francis turbine

2.2 划分网格

采用非结构化的混合四面体网格对模型进行划分,其中转轮部分网格较密,其余部分相对稀疏,以便降低网格质量对计算敛散性和计算结果的影响^[10]。为了处理方便,本文在各区域网格交界面上保证点对点搭接^[11]。网格划分情况见表2。

表2 水轮机各部件网格划分情况

Table 2 Mesh generations of each component of Francis turbine

部件	单元数/ 10^4 个	节点数/ 10^4 个
转轮	91	19
导叶	22	5
蜗壳	57	11
尾水管	49	9

2.3 计算方法与边界条件

假设水为不可压缩流体,流动过程中没有热量交换,于是混流式水轮机的内部流动为不可压缩粘性流体湍流,可忽略能量方程,仅将连续性方程和N-S方程^[12]作为流动的控制方程。采用RNG k- ϵ 双方程湍流模型^[13],利用有限体积法和非结构化网格对控制方程进行离散,变量存储在网格单元中心。为确保计算精度,方程压力项采用中心差分格式,其余项采用二阶迎风差分格式,采用SMPLEC算法^[14]实现压力和速度的耦合,收敛精度设为 $0.000\,01$ 。

根据水轮机的设计水头,设置压力进口边界条件为

127 530 Pa; 由于出口的速度和压强未知, 将出口设置为自由出口边界。固壁面采用无滑移边界条件, 假设壁面上流体质点的速度和壁面的速度相等, 并在近壁区采用标准壁面函数。同时, 采用 MRF 模型进行计算, 将旋转区域和静止区域分开, 在动、静部件间定义交界面实现流场信息的传递^[15]。

3 结果与分析

选取设计工况进行计算, 令水轮机的转速和水头为定值, 得到水轮机的工作参数见表 3。

表 3 设计工况水轮机工作参数

Table 3 Operating parameters of turbine under design conditions

参数名称	水头 / m	流量 / (m ³ · h ⁻¹) / (r · min ⁻¹)	转速 / r · min ⁻¹	出力 / kW	效率 (%)	转轮效率 (%)
参数值	13	4 832.6	107	143.3	83.74	95.3
参数名称	蜗壳水头损失 / m	导叶水头损失 / m	尾水管水头损失 / m			
参数值	0.15	0.64	0.27			

由表 3 的数据可知, 在设计工况下, 水轮机的出力大于风机的额定轴功率, 能够驱动风机旋转; 水轮机各部件的水力损失较小, 转轮效率和整机效率较高。图 6 为设计工况下转轮叶片的静压分布图, 从中可以看出, 叶片的压力由进口向出口不断减小, 叶片正面的压力大于背面的压力, 符合混流式水轮机的原理。

功率 120 kW, 能够驱动风机旋转送风, 达到冷却的目的, 且效率较高, 均在 83% 以上。总之, 该水轮机整体设计合理, 满足设计要求。

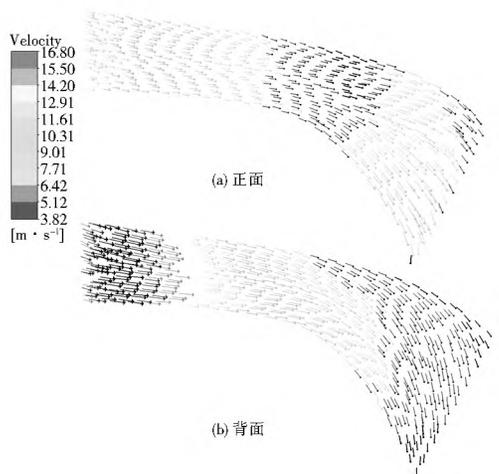


图 7 转轮叶片速度矢量图

Fig. 1 Velocity vector of runner blade

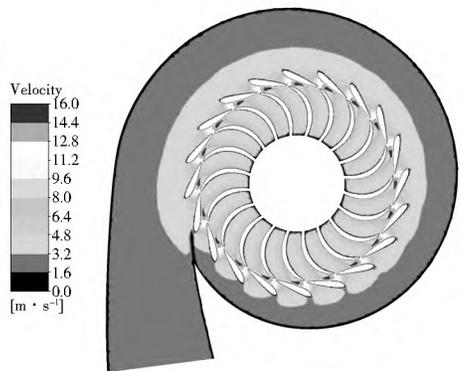


图 8 水轮机流速分布云图

Fig. 8 Velocity distribution of Francis turbine

图 6 转轮叶片静压分布

Fig. 6 Static pressure distribution of runner blade

设计工况下转轮叶片的速度矢量如图 7 所示, 叶片背面速度大于正面的速度, 两个表面的速度分布都比较均匀, 流动顺畅, 没有脱流、回流等现象。设计工况下, 水轮机整体流速分布云图如图 8 所示。图中, 水轮机整体流态较好, 除蜗壳鼻端外, 蜗壳内水流环向流速分布均匀, 与蜗壳断面水流平均速度周向分量 V_{θ} 均为常数的设计方法相一致。

由于冷却塔的富余水头是在 12~ 14 m 的范围内变化的, 在此范围内取不同的水头, 改变进口边界条件的压力值, 重复以上方法对水轮机进行全流道三维定常湍流数值模拟, 得出水头变化对水轮机性能的影响, 见表 4。可以看出, 无论是否达到设计水头, 水轮机的流量变化始终在 4 500~ 5 200 m³/h 的范围内变化, 水轮机的出力总是大于风机的额定轴

表 4 不同水头下水轮机的性能

Table 4 Hydraulic performance of turbine with different heads

水头 / m	流量 / (m ³ · h ⁻¹)	出力 / kW	效率 (%)
12.00	4 522.4	124.5	84.21
12.25	4 603.1	129.4	84.20
12.50	4 685.9	134.2	84.09
12.75	4 759.7	138.8	83.96
13.00	4 832.4	143.3	83.74
13.25	4 912.4	148.4	83.66
13.50	4 985.1	153.1	83.49
13.75	5 060.6	157.9	83.29
14.00	5 132.8	162.7	83.06

4 结语

本文设计了一种超低比转速小型混流式水轮机, 通过数值模拟反映出水轮机流态良好, 性能稳定, 效率较高。将设计的水轮机应用于冷却塔中, 可直接与风机匹配, 更好地回收富余动能, 发挥节能作用。文中的结果可作为今后小型水轮机设计及机械通风冷却塔改造的参考。

不过, 本文仅通过数值模拟和理论分析对水轮机性能进

行了预测,缺少模型试验对比验证,因此今后需要在模型试验的基础上进一步优化,使蜗壳、导叶和尾水管能更好地匹配转轮,提高水轮机效率。

参考文献(References):

- [1] 陈应新. 大型机械通风冷却塔电动风机的节能改造[J]. 工业水处理, 2009, 29(1): 77-79. (CHEN Yingxin. Energy Saving Renovation for The Electric Fans of the Big Mechanical Ventilating Cooling Tower[J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(1): 77-79. (in Chinese))
- [2] 郭润睿, 张国强, 史金华, 等. 轴流式微型水轮机在节能型冷却塔中的应用[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(4): 66-70. (GUORunrui, ZHANG Guoqiang, SHI Jinhua, et al. Study of Mini Axial Flow Turbine in Energy-Saving Cooling Towers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(4): 66-70. (in Chinese))
- [3] 陈满华. 代替冷却塔中风扇电动机的新型节能水轮机开发研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (CHEN Manhua. Instead of Cooling Tower Fan Motor in the New Energy-saving Water Turbine Development Research[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [4] 张丽敏. 用于水动冷却塔的超低比转速混流式水轮机开发研究[D]. 南京: 河海大学, 2010. (ZHANG Limin. Study on Francis Turbine with Super Low Specific Speed Applied in Cooling Towers[D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese))
- [5] 黄敏, 屈波, 皮雪松, 等. 双极贯流式水轮机导叶和转轮的水力设计[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 45-48, 85. (HUANG Min, QU Bo, PI Xuesong, et al. Hydraulic Design Principles of Vanes and Runners For The Double Stage Tubular Turbine[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(2): 45-48, 85. (in Chinese))
- [6] 李延频, 南海鹏, 陈德新. 冷却塔专用水轮机的工作特性与选型[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 175-179. (LI Yanpin, NAN Hai peng, CHEN Dexin. Performance and Type Selection of Special Hydraulic Turbine in Cooling Tower[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 175-179. (in Chinese))
- [7] 郑源, 鞠小明, 程云山. 水轮机[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (ZHENG Yuan, JU Xiaoming, CHENG Yunshan. The Hydroturbine[M]. Beijing: China National Water Resources and Hydropower Press, 2007. (in Chinese))
- [8] 黄剑峰, 张立翔, 王文全, 等. 混流式水轮机全流道三维非定常流场数值模拟[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 155-157. (HUANG Jianfeng, ZHANG Lixiang, WANG Wenquan, et al. 3D Unsteady Flow Field Numerical Simulation of Whole Flow Passage in Francis Turbine[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(1): 155-157. (in Chinese))
- [9] 张海库, 刘小兵, 曾永忠, 等. 基于全流道的混流式水轮机内部流动的三维数值模拟[J]. 水力发电, 2009, 35(3): 51-53. (ZHANG Haiku, LIU Xiaobing, ZENG Yongzhong, et al. 3D Numerical Simulation of Inside Flow for Mixed Flow Turbine Based on Whole Passage[J]. Water Power, 2009, 35(3): 51-53. (in Chinese))
- [10] 朱飞, 郑源, 范小娟, 等. 冷却塔内小型混流式水轮机的设计及数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 165-168. (ZHU Fei, ZHENG Yuan, FAN Xiaojuan, et al. Design and Numerical Simulation of Small Francis Turbine Used in Cooling Tower[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 165-168. (in Chinese))
- [11] 刘胜柱, 郭鹏程, 罗兴琦. 混流式水轮机导叶与转轮的匹配关系[J]. 西安理工大学学报, 2004, 20(1): 1-4. (LIU Shengzhu, GUO Pengcheng, LUO Xingqi. Matching Relationship Between Runner and Guide Vanes in Francis Turbine[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2004, 20(1): 1-4. (in Chinese))
- [12] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. (TAO Wenquan. Numerical Heat Transfer (The Second Edition)[M]. Xian: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese))
- [13] 张凯, 王瑞金, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (ZHANG Kai, WANG Ruijin, WANG Gang. Basic Technology and Application Examples of Fluent (The second edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese))
- [14] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Fujun. The Analysis of Computational Fluid Dynamics the Principle and Application of CFD Software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [15] 吴玉林, 刘树红, 钱忠东. 水力机械计算流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (WU Yulin, LIU Shuhong, QIAN Zhongdong. Hydraulic Machinery Computational Fluid Dynamics[M]. Beijing: China National Water Resources and Hydropower Press, 2007. (in Chinese))