

# 空冷汽轮机低压级组叶片模化设计与开发\*

丁 晨<sup>1,2</sup>, 辛小鹏<sup>1,2</sup>, 隋永枫<sup>1,2,3\*</sup>, 孔建强<sup>1,2</sup>, 叶钟<sup>1,2,3</sup>

- (1. 杭州汽轮机股份有限公司, 浙江 杭州 310022;
2. 浙江省工业汽轮机转子动力学研究重点实验室, 浙江 杭州 310022;
3. 杭州汽轮动力集团 中央研究院博士后科研工作站, 浙江 杭州 310022)

**摘要:** 针对空冷汽轮机低压级组叶片设计困难的问题, 基于叶片模化设计技术, 结合先进的计算流体动力学(CFD)技术, 提出了空冷汽轮机低压级组叶片模化和改型优化设计方法。该方法主要是用于将母型低压级组叶片通过模化设计改进为与设计目标总体性能参数相近的低压级组, 在此基础上, 应用三维气动分析设计优化方法对低压级组进行了改型优化设计, 得到了满足设计要求的空冷低压级组叶片; 同时, 对低压级组进行变工况分析, 以保证低压级组在许用范围内具有较好的变工况性能。该方法将多种先进技术相结合, 缩短了开发周期, 降低了开发成本。研究表明, 采用该方法开发的低压级组能够很好地继承母型低压级组的优良特性, 保证了叶片的安全性和可靠性, 具有良好的气动性能和适用范围。

**关键词:** 空冷汽轮机; 叶片模化设计; 计算流体动力学; 流场分析; 变工况

中图分类号: TK262; TH122 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1143-03

## Mold design and development of low pressure blade stages for steam turbine with air cooled condenser

DING Chen<sup>1,2</sup>, XIN Xiao-peng<sup>1,2</sup>, SUI Yong-feng<sup>1,2,3</sup>, KONG Jian-qiang<sup>1,2</sup>, YE Zhong<sup>1,2,3</sup>

- (1. Hangzhou Steam Turbine Co. Ltd., Hangzhou 310022, China;
2. Zhejiang Industrial Steam Turbine Rotor Dynamics Research Key Laboratory, Hangzhou 310022, China
3. Postdoctor Working Station, Hangzhou Turbine & Power, Hangzhou 310022, China)

**Abstract:** Aiming at the design of low pressure blade stages for steam turbine with air cooled condenser is difficult, based on the technology of simulation design, and combined with advanced computational fluid dynamics (CFD) technique, simulation design and improvement method were established. By simulation design, the original blade stages were simulated in the blade stages which can satisfy with total parameters of the design requirement. Then, full three-dimension analysis method was applied to the improvement of the blade stages which can make the blade stages of low pressure fulfill the requirement of design. Many advanced techniques were applied in simulation and improvement method which shortens the period of the improvement and decreases the cost of the improvement. The results indicate that improved stages inherit the advantageous character of the original blade stages, have good safety and reliability, aerodynamic performance and extensive range for the application.

**Key words:** air cooled condenser; blade mold design; computational fluid dynamics(CFD); fluid analysis; off-design

## 0 引 言

目前, 水资源的短缺已成为世界性的难题, 在我国西部以及印度等地区尤为严重, 因此开发具有节水

特点的空冷机组具有很重要的现实意义<sup>[1]</sup>。与湿冷机组不同, 空冷机组由于设计背压高、变化范围大, 具有典型的变工况特点<sup>[2-3]</sup>, 特别是在印度等地区, 由于温度高、背压高等特点, 有时最高背压可达到 25 kPa 左

收稿日期: 2012-04-19

基金项目: 浙江省科学技术厅优先主题重大工业资助项目(2008C01063)

作者简介: 丁 晨(1955-), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 主要从事汽轮机设计开发和管理等方面的研究. E-mail: dingc@htc.net.cn

通信联系人: 隋永枫, 男, 高级工程师, 博士后. E-mail: suiyongfeng@hotmail.com

右,且变化范围非常大(如 10 kPa~25 kPa),可能导致末级叶片在阻塞工况或鼓风工况下运行,此时,低压叶片(特别是末级叶片)的工作条件非常恶劣,这对叶片的安全性、可靠性提出了更高的要求。

近些年来,国内各大汽轮机厂对空冷汽轮机低压级组叶片一直在进行深入的研究,如:哈尔滨汽轮机厂的樊庆林等<sup>[4-5]</sup>设计了背压适用于 15 kPa 的空冷低压级组叶片,通过强化叶型和控制反动度等方法,该叶片可以有效保证空冷机组的安全、高效运行。东方汽轮机厂的吴其林,钟刚云等<sup>[6-7]</sup>对空冷汽轮机低压级组叶片进行过详细的三维流场分析,并进行了深入的机理研究等工作。上海汽轮机厂的周英、周代伟等<sup>[8]</sup>从气动和强度振动两方面阐述了空冷汽轮机低压级组末级叶片的设计要点和工作特性,得到了 600 MW 等级空冷汽轮机长叶片,该末级叶片具有良好的振动特性和变工况特性。正是这些卓有成效的研究为研制开发新的空冷汽轮机低压级组长叶片提供了参考。

对于大流量高背压空冷机,其末级叶片高度相对较高,全三维设计的扭叶片是其高效率的关键。合理的叶片高度和排汽面积能够使整个机组具有较高的经济性和安全可靠。这就要求研究者对通流各个参数进行详细的分析和优化。结合 CFX 和 ANSYS 等三维分析软件,研究者可以更准确地掌握通流内部的流动情况,并可应用商用软件进行进一步的三维气动优化,同时可方便地进行强度、振动和流固耦合分析,来评判通流叶片的整体可靠性。

本研究首先按照设计要求选择合适的母型级组,并对该母型级组通过相似理论模化,初步设计出满足总体设计参数要求的低压级组;然后通过全三维气动分析技术,在保证低压级组安全可靠的前提下进行改型设计;最后对低压级组进行变工况分析,以保证低压级组在许用范围内具有较好的变工况特性。

## 1 计算方法简介

本研究中的流体计算部分采用了商业软件 CFX 对汽轮机低压叶片级组进行三维流场分析。它采用了基于有限元的有限体积法,这种方法保证了在有限体积法守恒特性的基础上,吸收了有限元法的数值精确性。本研究采用 24 点插值的六面体网格单元,湍流模型采用常用的两方程  $k-\varepsilon$  模型,流动工质选取 IF97 水蒸汽模型,控制方程为非定常雷诺平均 N-S 方程,空间采用二阶迎风格式<sup>[9-10]</sup>。

## 2 透平中的相似理论

相似理论在传热学等学科已经有了广泛的应用,

以下本研究将简要介绍透平中的模化设计理论,根据相似理论,要想对以气体为工质并作稳定、绝热流动的透平作出一组不受进口条件限制的特性线,或者想通过一台尺寸较小的缩型透平实验来得到尺寸较大的透平特性线,或者作模化设计,都必须满足相似条件,即:几何相似、流场相似和动力相似。以下本研究进行简单介绍,具体推导可见相关书籍<sup>[11]</sup>。

对于透平流动来说,几何相似有两种:一种是同一台透平,但进口条件不同,显然这是满足几何相似条件的;另一种是两台几何尺寸成一定比例关系,即按比例放大和缩小的新设计的透平。这时,两台透平的相似应该包括子午剖面流道的相似和平面叶栅的相似,对应的几何尺寸必须成比例,即各叶片及子午面尺寸均按同一比例放大或缩小。但是,需要说明的是,完全的几何相似是很困难的,这里说的几何相似只需大部分关键尺寸满足几何相似要求即可。

流场相似即两台透平流场中对应点上的速度方向、大小需成比例,即进、出汽角应对应相等,相应速度应成同一比例。

动力相似是指两台透平内的流场中,对应点上同类力的方向相同,大小成比例。这类力包括静压力、惯性力和粘性力等。

## 3 空冷低压叶片级组设计

为了适应市场需求,针对空冷低压级组叶片工况恶劣的现实情况,杭州汽轮机股份有限公司需要开发能够适应高背压、大流量的空冷低压叶片级组,要求其既具有良好的安全性,同时具有良好的气动性能。

### 3.1 原低压叶片组三维模型介绍

为使所设计的空冷级组满足高背压、大流量的要求,笔者论证了多种方案,基于质量流量、转速以及背压等方面的考虑,最终本研究的母型叶片组选用西门子三系列 HK 叶片级组,该母型低压级组叶片原型为西门子公司设计,最大连续转速高,最大许用流量大,具有良好的变工况气动性能,“杭汽”已应用上百台机组,安全性等性能都得到了实践的检验,是高背压、大流量低压级组设计的良好母型,模型如图 1、图 2 所示,该结构为两极低压级组叶片,具体性能和结构见文献[12],该母型的选取为之后的模化改型设计的成功奠定了基础<sup>[13-14]</sup>。

### 3.2 叶片设计

本研究对母型进行模化设计,同时根据需要在级组前加一级扭叶片级组,构成三级低压叶片级组。同时为保证级组能够在要求的工况下安全、高效运行,笔者采用如下措施<sup>[15-16]</sup>:

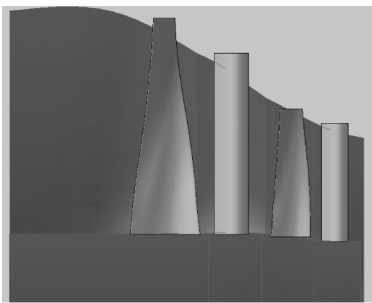


图1 原低压叶片组整体模型1

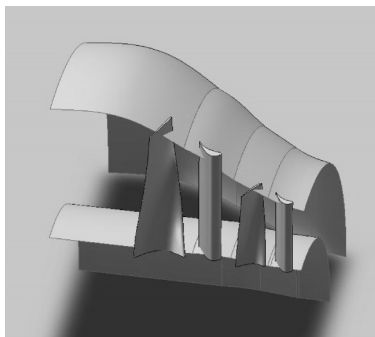


图2 原低压叶片组整体模型2

- (1) 加大叶片的截面面积,增加了叶片截面的抗弯模量;
- (2) 保留原叶片松拉金结构,以增加抵抗叶片应力的能力;
- (3) 对叶片进行调频,避开大部分工作转速,进一步提高安全裕量;
- (4) 改善子午面形状;
- (5) 对静叶适当改型,使静动叶之间更加匹配。

### 3.3 模化改型后低压级组分析

模化改型后低压级组流道模型如图3所示,末级叶片的结构形式可参见专利文献[17],该级组为三级低压级组,动叶片均为扭叶片,第一级静叶为直叶片,后两级叶片为扭叶片。为验证所设计级组的性能,本研究对其进行了详细分析。入口条件为:  $P_0=0.1036\text{ MPa}$ ,  $t=113.13\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $H_0=2702.2\text{ kJ/kg}$ 。由于是空冷机组,其背压变化可能较大,出口条件分为4个工况:工况1:  $P_2=0.0176\text{ MPa}$ ; 工况2:  $P_2=0.011\text{ MPa}$ ; 工况3:  $P_2=0.015\text{ MPa}$ ; 工况4:  $P_2=0.022\text{ MPa}$ 。其中,工况1

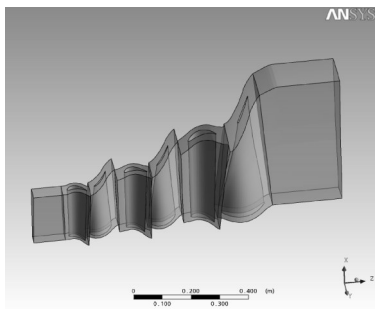


图3 三级级组流道模型

是设计工况。

50%叶高处的速度和压力图如图4、图5所示,可以看到,中径截面流线顺畅,压力分布合理,达到了初始设计时的预期目标。

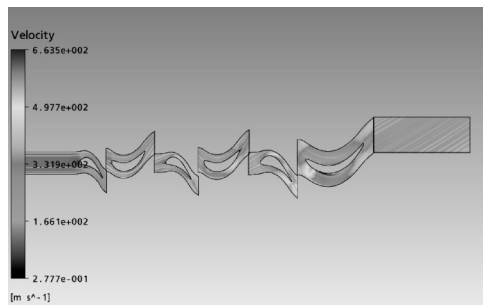


图4 50%叶高速度图

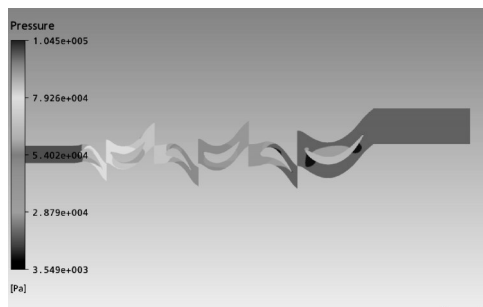


图5 50%叶高压力图

经进一步计算得到该低压级组在正常工况以及各背压变工况情况下的总体特性,如表1所示。从表1可以看到,在设计背压和流量下,级组实际效率为78.1%,达到了不少于75%的设计要求,在设计流量下,背压在0.015 MPa以上均能够维持75%以上的较高效率,且随着背压的提高,级组效率越高。

表1 低压级组背压变工况性能

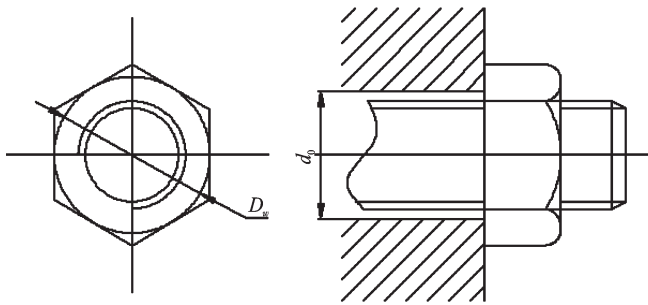
背压/ MPa	流量 /( $\text{kg s}^{-1}$ )	总功 /kW	轮周功 /kW	轮周 效率 /(%)	内功率 /kW	内效率 /(%)	实际 效率 /(%)
0.0176	51	14 047	11 737	83.6	11 324	80.6	78.1
0.011	51	17 372	12 636	72.7	12 135	69.9	67.5
0.015	51	15 185	12 230	80.5	11 774	77.5	75.0
0.022	51	12 430	10 778	86.7	10 439	84.0	81.5

## 4 结束语

本研究以西门子三系列HK90低压级组叶片为母型,通过模化改型设计出具有更大通流面积、适用性更广的空冷汽轮机低压叶片级组。该级组满足了在3 000 r/min~3 600 r/min转速范围安全运行的要求,且在设计流量下具有较高的气动性能,该级组能够在最大背压0.025 MPa下安全运行,且具有很好的变工况性能,达到了预定的设计目标。

(下转第1170页)



图3 参数 $D_w$ 与 $d_w$ 的取值示意图

内圈端面用内圈加载头施加与螺母拧紧相当的锁紧力,然后对外圈端面用加载头施加卸载力,当所施加的力刚好使得拨模在一定的扭矩下能拨动内侧钢球,记录下此时卸载力,即为装车件的卸载力,接下来可以通过程序设计计算出轮毂轴承游隙和预紧力。对于非驱动轮轮毂轴承,由于存在事先的预紧,游隙检测时,小内圈处不施加载荷。

## 5 结束语

本研究在当前检测条件下,研究获取了轮毂轴承卸载力与预紧力之间存在的线性关系,探索了一种通用性的三代轮毂轴承单元游隙间接检测方法。该计算和检测方法也能应用于一、二代轮毂轴承装车状态下负游隙的分析、计算和检测,能够对游隙的设计给

出合理的评价,进而优化轮毂轴承的设计,具有较大的实际意义和应用价值。

### 参考文献(References):

- [1] 刘泽九. 滚动轴承应用手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [2] STRIBECK R. Ball bearing for various loads[J]. *Transactions of the ASME*, 1907(29):420-463.
- [3] 刘 佳. 轿车二代轮毂轴承游隙与预紧力分析[J]. 上海汽车, 2010(3):44-47.
- [4] SUZUKI Y, TAKAGI S. Hub Bearings. CAT. NO. 4601/E [EB/OL]. [2006-08-03]. <http://www.ntn.co.jp/english/products/pdf/hub/pdf/HubBearing.pdf>.
- [5] 殷 杰. 第3代轮毂轴承单元轴向游隙影响因素的正交试验[J]. 轴承, 2011(7):23-24.
- [6] HARRIS T A, KOTZALAS M N. 滚动轴承分析:第1卷[M]. 罗继伟,译. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [7] 冈本纯三. 球轴承的设计计算[M]. 黄志强,译. 北京:机械工业出版社, 2003:44-45.
- [8] 吕同富,康兆敏. 数值计算方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [9] 张德丰. MATLAB数值分析与计算[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [10] 吕 伟. 摩擦系数与螺栓拧紧力矩系数关系的探讨[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1998, 15(4):29-33.

[编辑:张 翔]

(上接第1145页)

### 参考文献(References):

- [1] 赵俊明,邹建伟,李宇峰,等. 空冷汽轮机末级680mm叶片的开发[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(5):5-10.
- [2] 李维特,黄保海. 汽轮机变工况热力计算[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [3] 蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社, 2006.
- [4] 樊庆林. 空冷汽轮机低压排汽面积选择和变工况特性分析[J]. 热力透平, 2007, 36(1):49-52, 70.
- [5] 李宇峰,黄 钢,赵俊明. 空冷汽轮机低压末级系列长叶片的研制[J]. 热力透平, 2007, 36(1):45-48.
- [6] 吴其林,钟刚云. 空冷汽轮机末级叶片的三维流场分析[J]. 东方电气评论, 2005, 19(2):75-79.
- [7] 吴其林,潘 成. 空冷汽轮机末级长叶片设计特点[J]. 热力透平, 2007, 36(2):89-91, 100.
- [8] 周 英,周代伟. 600 MW等级二缸空冷汽轮机长叶片开发[J]. 热力透平, 2007, 36(1):41-44.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [10] KAECHEL E T, HAUFF C, ASCHENBRENNER T. Discussion of Several Numerical Approaches for the Stator-Rotor Interaction [C]//Proceedings of the 20th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery System. Charlotte, North Carolina, U S A: [s.n.], 2000.
- [11] 王乃宁,张志刚. 汽轮机热力设计[M]. 北京:水利电力出版社, 1987.
- [12] 隋永枫. 高转速大容量工业汽轮机叶片流固耦合分析及叶片开发平台建设[R]. 西安交通大学博士后出站报告, 2010.
- [13] 蒙春林,丁星华,沈卫军. 模块化非标准工业汽轮机热力设计软件开发[J]. 机电工程, 2008, 25(6):71-74.
- [14] 毛汉忠,周一飞. 中小型热电联产汽轮机的优化设计[J]. 机电工程, 2006, 23(11):8-13.
- [15] 隋永枫,孙义冈. 不调频叶片设计改型研究[J]. 热力透平, 2010, 39(1):19-21, 50.
- [16] 丁 晨,隋永枫,辛小鹏,等. 高背压大流量空冷汽轮机低压级组叶片设计及优化[J]. 热力透平, 2012, 41(1):31-34.
- [17] 隋永枫,丁旭东,陈金铨,等. 变转速工业汽轮机的低压末级叶片:中国, CN201934148U[P]. 2011-01-10.

[编辑:张 翔]