

# 百万核电汽轮机低压排汽缸气动性能数值研究

郑忠伟<sup>1</sup>, 刘云锋<sup>2</sup>

(1 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司, 哈尔滨 150046)

**摘要:**以引进的 AP 1 000 核电汽轮机为例, 建立了低压排汽缸的三维模型, 考虑到进口参数受末级动叶出口流动的影响, 采用了低压末级叶片和排汽缸联合计算的数值模拟方法, 详细分析了排汽缸内部的复杂流动情况, 分析了该排汽缸三维流动情况和总参数, 为核电汽轮机低压排汽缸国产化提供了重要的指导意义。

**关键词:**核电汽轮机; 低压排汽缸; 数值模拟

**分类号:**TK263.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1001-5884(2015)03-0207-03

## Numerical Researches on Aerodynamic Performance of LP Exhaust Hood of 1 000MW Nuclear Steam Turbine

ZHENG Zhong-wei<sup>1</sup>, LIU Yun-feng<sup>2</sup>

(1 China Nuclear Power Engineering Company Limited, Beijing 100840, China;

2 Harbin Turbine Company Limited, Harbin 150046, China)

**Abstract:** With an introduced AP 1 000 nuclear steam turbine as example, a 3D model is established for the LP exhaust hood. In view of the effect of L-0 rotating blade outlet flow on inlet parameters, numerical simulation is conducted for combined calculation of L-0 blade and exhaust hood, and analysis is made for the complex flow in the exhaust hood, specific for the 3D flow behavior and total parameters of the exhaust hood. It is significantly instructive for the localization of LP exhaust hood of nuclear steam turbine.

**Key words:** nuclear steam turbine; LP exhaust hood; numerical simulation

## 0 前言

低压排汽缸是汽轮机的重要组成部分, 其气动性能直接影响着整个机组的热效率和经济性。研究表明, 排汽缸损失系数降低 0.1, 可使汽轮机的整机效率提高大约 0.15%。由此看出, 排汽缸的气动性能的好坏对整个机组的循环效率有较大的影响。而核电机组低压缸出力比重远大于火电机组, 以引进三菱的 AP 1 000 为例, 该机组有 3 个低压缸, 出力占整个机组的 2/3。因此, 排汽缸对整个核电机组的效率影响远大于火电机组。此外, 核电机组低压缸尺寸大于同容量的火电机组, 排汽缸流动效率与结构刚度相互制约, 也使得排汽缸的设计难度加大。所以, 研究排汽缸的气动性能, 尤其核电机组, 对改善机组的经济性具有重要的现实意义。

本文采用三维 CFD 软件对 AP 1 000 百万核电机组的低压排汽缸进行了数值模拟分析, 为核电机组排汽缸设计提供指导。

## 1 排汽缸结构简述

图 1 给出了低压缸部分结构纵剖面, 显示出了低压缸叶栅通流部分与低压排汽缸的相对位置。图 2 和图 3 是排汽

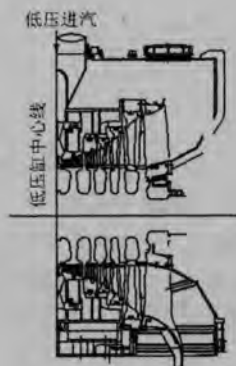


图 1 低压缸部分结构纵剖面图



图 2 排汽缸外形图 (顺流动方向看)

缸三维视图。排汽导流环是非轴对称导流环。为了保证数值模拟的收敛性, 排汽缸出口添加了一段延伸段。

## 2 数值计算结果

排汽缸出口与低压末级相连, 所以进口参数受末级动叶出口流动的影响。低压末级叶片的  $D_m/L$  较小, 蒸汽流动的三维特性强烈, 再加上湿蒸汽流动、子午通道的扩张等因素, 使得末级动叶出口参数很不均匀。因此, 如果单独计算排汽

收稿日期: 2014-12-26

作者简介: 郑忠伟(1975-), 男, 工程师。主要从事核电设备采购管理等方面的工作。



图3 排汽缸模型3D透视图

缸,进口参数无法准确给定。所以,低压末级叶片和排汽缸联合计算,这样可以避免直接给定排汽缸进口参数,最大限度的模拟了排汽缸中蒸汽的真实流动。但是限于计算机硬件不能承受太大的网格量,末级叶片采用周期对称的方法计算单通道的流动。

### 2.1 排汽缸气动性能参数

描述排汽缸性能的主要参数有静压恢复系数、总压损失系数以及出口速度不均匀度,具体如下:

静压恢复系数:

$$c_{ps} = \frac{\bar{p}_{t,out} - \bar{p}_{t,in}}{\bar{p}_{t,in} - \bar{p}_{in}}$$

总压损失系数:

$$c_{pt} = \frac{\bar{p}_{t,in} - \bar{p}_{t,out}}{\bar{p}_{t,in} - \bar{p}_{in}}$$

出口速度不均匀系数:

$$x_v = \frac{c_m}{c_a}$$

式中, $\bar{p}_{out}$ 和 $\bar{p}_{in}$ 分别表示出口和进口处的质量流量平均静压; $\bar{p}_{t,out}$ 和 $\bar{p}_{t,in}$ 分别表示出口和进口处的质量流量平均总压; $c_m$ 表示排汽缸出口截面上的质量流量平均速度; $c_a$ 表示相同流量下,假设排汽缸出口截面为均匀流场时的速度值即面积平均值。

当 $c_{ps} = 0$ 时,表示末级动叶的余速动能刚好用于汽流流过排汽缸的损失和排汽缸出口的余速损失。此时 $p_{in} = p_{out}$ ;当 $c_{ps} > 0$ 时,表示只有一部分末级动叶的余速动能用于使汽流流过排汽缸,即损失掉了,还有一部分被回收,转变为排汽缸出口处汽流的压力能。这时 $p_m < p_{out}$ ,即进入排汽缸的蒸汽焓小于离开排汽缸的蒸汽焓,多出的这部分能量则变为末级的可用焓降,使末级做功增加,从而提高机组的效率;当 $c_{ps} < 0$ 时,表示不只是末级动叶的余速动能,而且还有一部分压力能,皆用于使汽流流过排汽缸,这时 $p_m > p_{out}$ ,即进入排汽缸的蒸汽焓大于离开排汽缸的蒸汽焓,显然末级不能完成预先分配给它的焓降,末级做功减少,机组效率降低。

总压损失系数主要反映排汽缸的流动损失,并且总压损失系数大,静压恢复系数就小。而出口速度不均匀系数主要

表征排汽缸出口参数的均匀性,速度不均匀系数大,表明排汽缸流入凝汽器的参数不均匀性大,影响凝汽器的工作效率。

### 2.2 气动结果分析

表1是计算得到的AP1000低压排汽缸的3个性能参数。该排汽缸设计比较合理,静压略有恢复,但恢复系数不大,总压损失系数适中,出口速度不均匀系数也不大。

表1

静压恢复系数	总压损失系数	出口速度不均匀系数
0.036	0.599	1.23

图4是计算结果三维流线分布图,图5是子午面速度矢量图,图6是子午面静压恢复云图,图7是排汽缸出口流线分布图。由图4可以看出,汽流在排汽缸两侧形成两个大的漩涡,随流动该漩涡一直延伸到排汽缸出口。由于排汽缸轴向进汽、径向排汽,导流锥和导流环配合,实现了汽流的转向和扩压,同时导流锥后由于面积增大,出现了漩涡,这就是排汽缸两侧漩涡的起源。导流环设计成非轴对称结构,避免了导流环出口流体脱流形成分离涡,导流环下半缸宽度较长,使得流体得到了充分扩压。

结合图5和图6,排汽缸上部支撑少,导流锥短,静压恢复系数大,性能较好,下部由于靠近出口、支撑较多,导流锥背部形成了大的分离流动,气动性能较差。同时可以看出,漩涡是造成排汽缸气动性能下降的主要因素,漩涡出现的区域静压恢复系数降低,所以排汽缸设计时要尽量减弱漩涡,

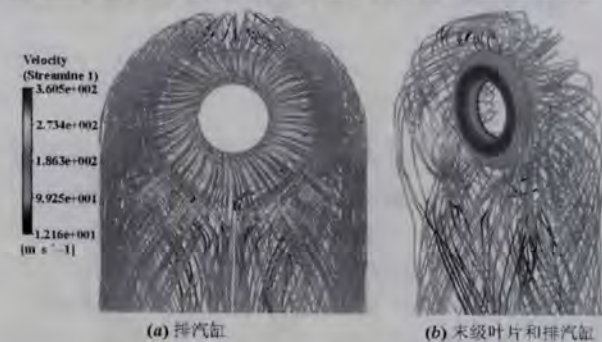


图4 整个排汽缸三维流线图

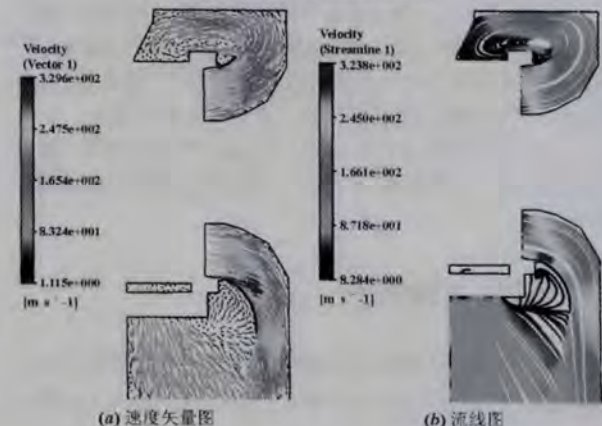


图5 排汽缸扩压通道xz平面(y=0)

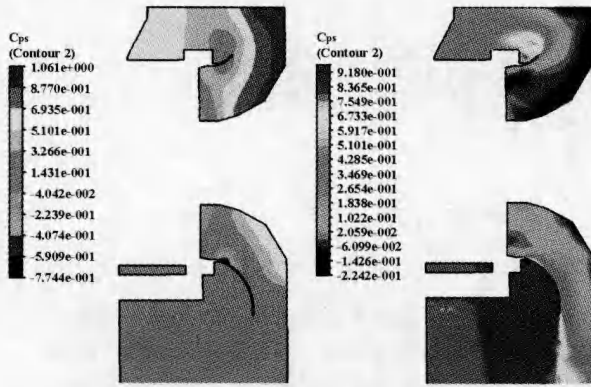


图6 扩压通道子午面静压恢复系数分布云图

减小小漩涡区。

结合图7、图8、图9,排汽缸两侧的漩涡一直延伸到出口,并且逐渐扩大,最终形成了两个旋转方向相反、充满整个出口的漩涡,并且漩涡中心的总压损失系数最大,静压恢复系数最小,成为气动性能最差的区域。由于排汽缸上部汽流向下游流动,造成出口位置两侧速度明显高于中间位置。

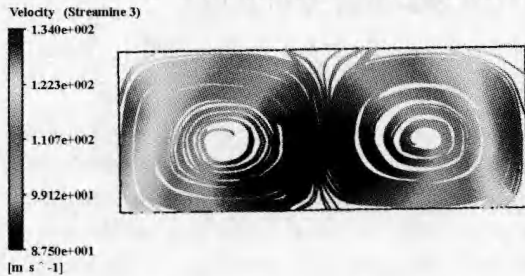


图7 排汽缸出口流线分布图

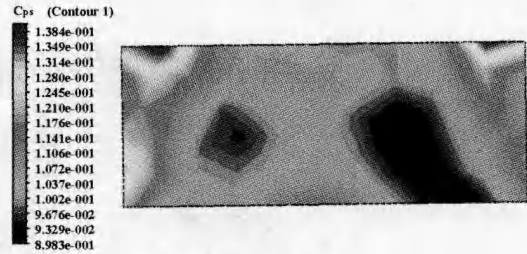


图8 排汽缸出口静压恢复系数分布云图

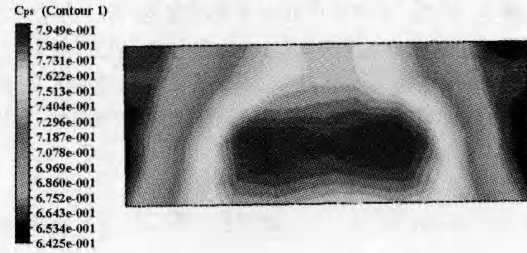


图9 排汽缸出口总压损失系数分布云图

### 3 结论

- (1) AP1000的排汽缸性能较好,静压恢复系数、总压损失系数、出口速度不均匀系数均适中。
- (2) 由于排汽引起排汽周向不均匀性较大,排汽导流环设计成周向不对称结构,较好地适应了当地流动情况。
- (3) 由于外缸采用的是折线型而非光滑流线型,导致局部有微小分离流动,仍有改进空间。但流线型加工难度比折线型大,精度可能略差,需综合考虑。

(上接第206页)

#### 参考文献

[1] 韩绪鹏,张宇浩,高 晓. 发电机汽门的分数阶PID控制策略研究[J]. 电力科学与工程,2010,26(12):64-68.

[2] 蒋铁铮,陈 陈,艾 芊. 汽轮发电机汽门开度的分散非线性预测控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(20):22-26.

[3] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control [J]. IEEE Transaction on System Man Cybern, 1985, 15:116-132.

[4] 贾培艳,杨一平,柴秀丽,等. 基于T-S模糊模型的离散混沌系统的模糊控制[J]. 河南大学学报(自然科学版),2013,43(2):191-195.

[5] 刘素华,唐驾时. 四维Qi系统零平衡点的Hopf分岔反控制[J]. 物理学报,2008,57(10):6162-6168.

[6] 李德权,许仙珍,费树岷. 基于LMI的不确定混沌系统的模糊输出反馈控制[J]. 系统仿真学报,2005,17(2):453-456.

[7] Abdelkader Senouci, Abdelkrim Boukabou. Predictive Control and Synchronization of Chaotic and Hyperchaoticsystems Based on a T-S Fuzzy model [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2014, 105:62-78.

[8] Yibei Nian, Yongai Zheng. Controlling Discrete Time T-S Fuzzy Chaotic Systems via Adaptive Adjustment [J]. Physics Procedia, 2012, 24:1915-1921.

[9] Li Yi-Min, Sun Yuan-Yuan. Type-2 T-S Fuzzy Impulsive

Control of Nonlinear Systems [J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36:2710-2723.

[10] Jun Yoneyama. Nonlinear Control Design Based on Generalized Takagi-Sugeno Fuzzy Systems [J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351:3524-3535.

[11] Yang Liu, Shouwei Zhao. T-S Fuzzy Model-based Impulsive Control for Chaotic Systems and its Application [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2011, 81:2507-2516.

[12] Cheng Hu, Haijun Jiang, Zhidong Teng. General Impulsive Control of Chaotic Systems Based on a TS Fuzzy Model [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2011, 174:66-82.

[13] 凌代俭,沈祖谔. 水轮机调节系统的非线性模型、PID控制及其Hopf分岔[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):97-102.

[14] M Chadli, I Zelinka, T Youssef. Unknown Inputs Observer Design for Fuzzy Systems with Application to Chaotic System Reconstruction [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2013, 66:147-154.

[15] Junqi Yang, Fanglai Zhu. Synchronization for Chaotic systems and Chaos-based Secure Communications Via Both Reduced-order and Step-by-step Sliding Mode Observers [J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, 2013, 18:926-937.

[16] Choon Ki Ahn. Takagi-Sugeno Fuzzy Receding Horizon H Chaotic Synchronization and its Application to the Lorenz System [J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2013, 9:1-8.