

汽轮机末级动叶栅对排汽缸气动性能的影响研究

李殿玺 李春清 刘子亘

(哈尔滨船舶锅炉轮机研究所)

摘要: 汽轮机排汽缸的气动性能受末级出口气流的影响, 由于末级气流极其复杂, 排汽缸的设计难以准确确定进口气流状态, 导致排汽缸在实际运行中气动性能下降。为研究末级对排汽缸气动性能的影响, 通过末级与排汽缸的耦合数值分析, 揭示了末级出口气流条件下排汽缸内的流动状态及流动规律, 发现了末级出口较大的顶部及径向速度导致的扩压器内环的旋涡分离现象, 一定程度上揭示了实际汽轮机排汽缸性能下降的原因。

关键词: 汽轮机、排汽缸、数值分析、旋转机械、STAR-CD

1 前言

汽轮机排汽缸是连接其末级出口至冷凝器的通道, 主要作用是利用汽轮机末级出口的余速动能, 把已经做功的末级出口的乏汽导入冷凝器。排汽缸的研究分数值分析及模型试验两大类。随着计算机的发展, 数值分析已成为排汽缸研究的主要方法, 对数值分析的要求也逐步提高, 寻求更准确反映排汽缸运行实际数值方法, 一直是人们追求的目标。

排汽缸的数值分析, 起初采用均匀进气条件, 后来发现进气条件对排汽缸气动性能的影响较大, 采用非均匀进气条件, 在进口边界给定气流参数的二维分布^[1-3]。由于实测数据的测点位置有限, 排汽缸实际进口气流参数的分布很难获得, 只能将局部测量数据应用于整个进口环面, 很大程度上忽略了进口气流参数的周向变化, 鉴于气动性能对进气条件的敏感性, 这会导致计算结果与实际有较大差距。文献[4][5]进行了汽轮机末级与排汽缸的计算, 将动静叶栅简化为零厚度盘, 流动参数在盘面上发生跳跃, 更准确地模拟了排汽缸的进口条件, 但忽略了叶栅内的流动过程及叶栅流的周期性脉动特征, 计算结果仍与实际的排汽缸进口气流有差距。本文进行了某汽轮机末级与排汽缸的耦合数值分析, 研究了末级动叶栅出口气流对排汽缸流场的影响, 为进一步研究旋转末级对排汽缸气动性能的影响奠定了基础。

2 排气缸几何模型的建立

作者对某船用汽轮机排汽缸进行了流场分析。低压缸为具有倒车汽轮机的双流中间下排汽结构(图1), 左右对称, 选择排汽缸左侧部分进行分析。排汽缸具有末级静叶栅、动叶栅、倒车汽轮机、进汽管、加强筋柱等结构, 与实际结构基本相同, 为便于边界的给定, 进、排汽口进行了延伸(图2)。

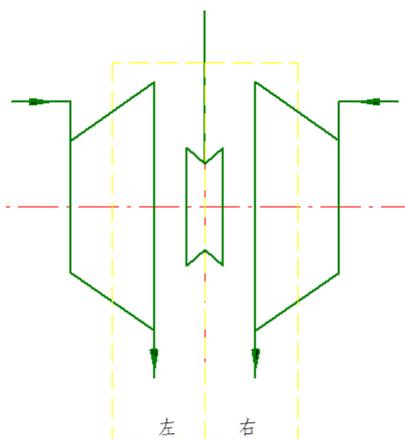


图 1 低压缸型式简图

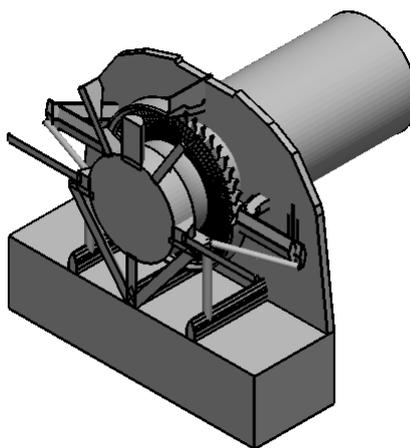


图 2 排汽缸模型图（去外壳）

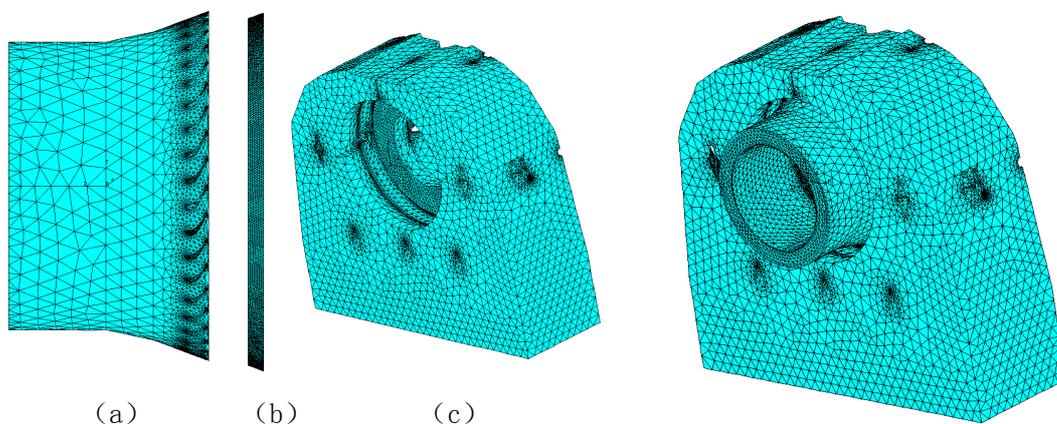
3 计算网格的生成

包含末级的排汽缸结构复杂，采用网格耦合技术进行排汽缸及末级网格组装。网格生成的步骤如下：

1) 几何造型。在同一坐标系中，末级静叶栅及进汽部分、末级动叶栅、排汽缸及出口延长三部分（图 3）分别进行造型，且特意在三部分间留有间隙。

2) 单体网格划分。分别对三部分进行网格划分。每部分结构仍很复杂，为降低网格数，提高计算精度，采用了混合网格技术，即壁面区采用贴体网格，中心区采用六面体结构网格，壁面区与中心区之间采用四面体非结构网格过渡。

3) 网格组合。启动前处理程序，调入中间部分的动叶栅网格，将叶栅的进出口面网格分别按照预留的间隙进行拉伸，生成新的网格层。依次以添加模式调入其它两部分网格，并与相对应的新网格层耦合，形成叶栅与排汽缸的组合网格（图 4）。



a、静叶栅及进汽部分 b、动叶栅 c、排汽缸

图 3 静叶栅及进汽部分网格及延长部分

图 4 叶栅及排汽缸组合网格

4 计算模型及边界条件

4.1 计算模型

排汽缸的整个计算域包括排汽缸、末级动叶栅、静叶栅、进汽延长段、排汽缸出口延长段，形成广义概念上的排汽缸。网格是按照上节的方法，多块拼接、耦合形成。网格总数约 190 万，图 4 为排汽缸的计算网格。计算以空气为工质，而实际汽轮机排汽缸内为湿蒸汽两相流，应用中可通过试验公式^[6]进行转化；采用可压缩、粘性流数学模型， $k-\epsilon$ 高雷诺数湍流模型。

4.2 边界条件

排汽缸与末级耦合计算的边界条件见图 5。排汽缸计算域包含排汽缸、末级叶栅、进汽及出口延长部分，实际排汽缸居于中间，实际进出口参数由计算自动得到满足。计算模型进口采用进口边界条件，给定进口速度 144m/s、密度 1.13kg/m³，以确定流量，进口湍动能 $k=66\text{J}$ ，耗散率 $\epsilon=4435$ ；出口采用出口边界条件；动叶顶部间隙外壁采用运动边界条件，以与动叶相反的速度旋转，以确保间隙外壁事实上处于静止状态；其它为绝热、无滑移壁面边界条件。

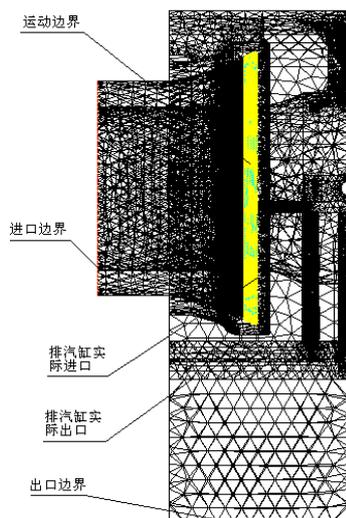


图 5 排汽缸与末级耦合计算边界条件

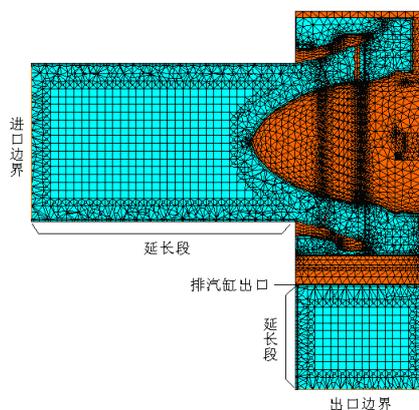


图 6 排汽缸非耦合计算模型

5 计算结果及分析

图 6 为排汽缸与末级的非耦合计算模型，仅以静叶栅模拟末级出口的流动。针对同一排汽缸，本文提供耦合与非耦合模型的计算结果对比。

5.1 流场分析

图 7a 为排汽缸与末级耦合计算纵剖面流场。排汽缸的进口气流具有很强的不均匀性，由于离心力的作用，气流积聚在叶栅顶部，顶部气流具有较高的速度及径向速度，甚至在叶栅后的扩压器中

还在加速，气流直接冲击到顶部汽缸壁。在扩压器内环及倒车汽轮机外壁处，出现了强烈的分离旋涡，以前排汽缸的研究着重于防止扩压器外环的旋涡分离，如图 7b 显示在内环不发生分离，今后排汽缸的设计要注意防止末级出口的径向流动造成的内环分离。

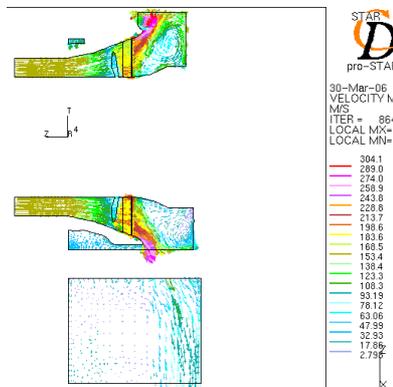


图 7a 耦合计算模型纵剖面流场

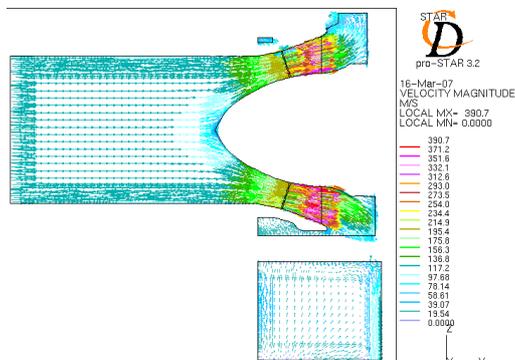


图 7b 非耦合计算模型纵剖面流场

图 8a 为排汽缸与末级耦合计算的中分面流场。流动加速过程与图 7a 类似，动叶顶部出口气流以较高的速度进入中分面两侧空间，由于径向速度大，在扩压器内环及倒车汽轮机外壁存在涡流区，在左右两侧也存在有旋涡，而图 8b 非耦合计算则显示只有中分面两侧存在旋涡，且流场更加均匀、对称，末级叶栅的旋转使中分面处的流动严重恶化。

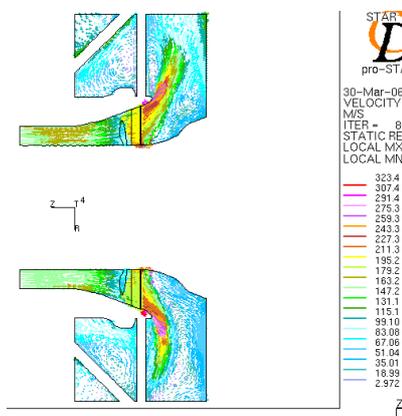


图 8a 耦合计算模型中分面流场

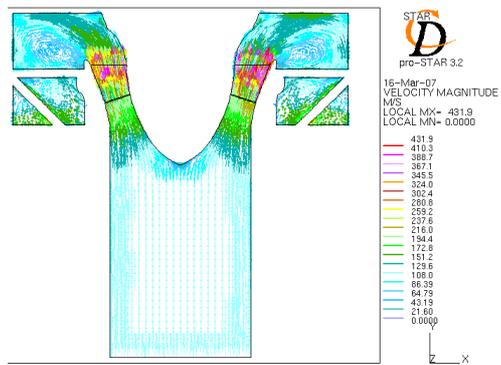


图 8b 非耦合计算模型中分面流场

图 9a 为排汽缸与末级耦合计算的轴向 x 截面处流场，左右两侧呈现出明显的不对称性。在右侧支撑法兰之上的一小的区域内，气流几乎滞止，向上气流速度逐步提高，且都流向上、向左流动，左侧气流呈现较规则的向下流动，在支撑柱及中分面上部分气流被加速；在中间倒车汽轮机的下部，存在低速气流，且自此往下气流加速，在轴向连接筋处形成了高速区，在右侧汽轮机支撑法兰之下，存在高速区，气流直冲壁面，而后向下流动。而图 9b 排汽缸左右两侧的流动基本对称，显然末级叶栅使排汽缸两侧的流动具有严重的不对称性。

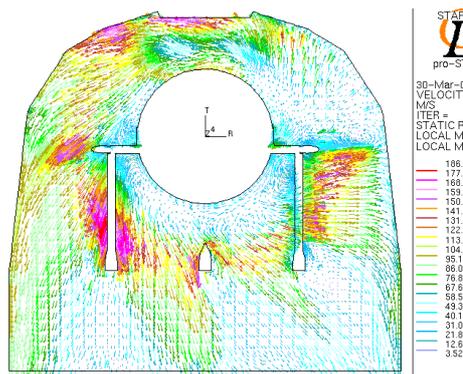


图 9a 耦合计算模型轴向 X 截面处流场

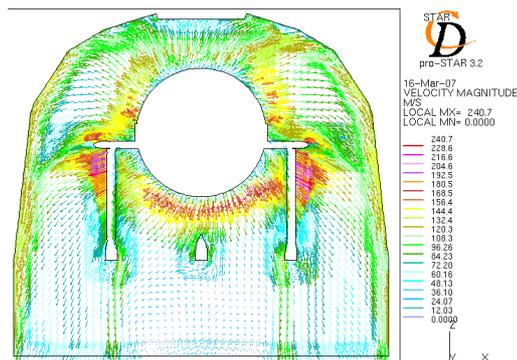


图 9b 非耦合计算模型轴向 X 截面处流场

5.2 计算模型

对排汽缸与末级耦合与非耦合计算结果进行处理, 获得了同一排汽缸两种计算方法下的能量总损失系数 ζ_n , 计算结果表明, 末级动叶栅可使排汽缸能量损失系数提高 30%, 气动性能显著下降。

6 结论

通过本文的研究, 可以获得如下结论:

1) 由于末级动叶栅的影响, 排汽缸的进口气流具有很强的不均匀性, 顶部速度远大于底部, 导致在扩压器内环出现了强烈的旋涡脱流; 由于以前扩压器的研究均集中于外环脱流的防止, 尚未发现这一现象, 为排汽缸扩压器的深入研究提供了新的认识;

2) 由于末级动叶栅的影响, 加剧了排汽缸内流动的非对称性, 严重恶化了排汽缸内的流动;

3) 由于末级动叶栅的影响, 可使排汽缸的气动性能降低 30%。排汽缸传统的数值分析及试验方法没有充分考虑实际进口条件, 不够准确, 其结果的应用应至少考虑 30% 的偏差。

4) 末级与排汽缸的耦合数值分析, 在更接近排汽缸实际进口条件下进行排汽缸内的流动分析, 获得了与实际排汽缸内的流动状态更加接近的分析结果, 发现了新的流动现象, 深化了对实际排汽缸内的流动理解及认识。

7 参考文献

[1] Jiri Linhart, Michal Hoznedl. Properties and Improvements of Flow in Steam Turbine Exhaust Hood[J]. Proceedings of International conference on Energy and the environment, Dec. 11-13, 2003, shanghai, China.

[2] Tindell R.H., Sarro C.A.. Computational fluid dynamics analysis of a steam power plant low pressure turbine downward exhaust hood[J]. Design, Repair, and of Steam Refurbishment Turbine, ASME 1991, Vol.13, pp43-49

[3] 刘建军, 蒋洪德. 汽轮机低压排汽系统气动性能分析[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 426-428.

- [4] Jianjun LIU. Numerical Simulation of Asymmetric Exhaust Flows Using an Actuator Disc Blade Row Model[J]. PVP-Vol. 448-2, Computational Technologies for Fluid/Thermal/Structural /Chemical Systems With Industrial Applications-2002, Volume II, ASME 2002, pp207-213.
- [5] J. J. Liu, T. P. Hynes. The Investigation of Turbine and Exhaust Interactions in Asymmetric Flows—Blade-Row Models Applied[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125: 121-127.
- [6] V. F. Kasilov and A. V. Sharkov. Evaluating the Effect of Steam Wetness on the Efficiency of the Exhaust Hoods of the Low-Pressure Cylinders of Steam Turbines[J]. Thermal Engineering Engineering, 2004, 51 (5): 378-383.