

汽轮机低压排汽缸与末两级耦合流动的三维数值模拟

樊涛, 谢永慧, 张荻, 孙弼

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Combined 3D Numerical Analysis of the Low Pressure Exhaust Hood Coupling With the Last Two Cascades in Steam Turbine

FAN Tao, XIE Yong-hui, ZHANG Di, SUN Bi

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Numerical methods are widely used to study the flow field in large power steam turbines. However, most of the previous numerical simulations studied the exhaust hood separately without taking account of the effect of the inhomogeneous flow from the last stage. In order to obtain more accurate and detailed information of the three dimensional flow in exhaust hood, a combined numerical model, which couples the exhaust hood with the last two stages, was introduced in this paper, meanwhile, the mixing plane approach was used. The Reynolds averaged N-S equations with RNG $k-\epsilon$ turbulence model was adopted to analyze the flow field in the exhaust hood considering the coupling effect between the exhaust hood and the last two stages. It is shown clearly that the presented combined model can give more accurate numerical results than the previous single model. The study provides a more reasonable numerical model for investigating the flow field in the exhaust hood and it may give some significant data for the optimal design of exhaust hood in steam turbine.

KEY WORDS: exhaust hood; numerical analysis; combined simulation; mixing plane

摘要: 数值模拟一直是研究大功率汽轮机低压排汽缸内流场的主要方法之一。但是, 国内外的研究大多只构造单个排汽缸模型进行分析, 并未考虑到末级动叶排出汽流的不均匀性等因素的影响。为了更加透彻地认识排汽缸内三维流动的细节, 文中通过求解由 RNG $k-\epsilon$ 双方程湍流模型封闭的三维时均 N-S 方程对汽轮机低压排汽缸和末两级耦合流动进行了数值分析, 并采用“混合平面”方法处理末两级叶栅及其与

排汽缸之间动静面的参数传递和相互干扰的问题, 获得了排汽缸内部的压力和速度分布。与单独排汽缸数值分析相比, 该方法能够获得更为接近实际的数值结果, 并为汽轮机通流部分及排汽缸的设计研究提供了新思路, 所得到的结果可为排汽缸的优化设计提供参考。

关键词: 排汽缸; 数值分析; 耦合计算; 混合平面

0 引言

排汽缸作为连接汽轮机末级和凝汽器的通道, 是汽轮机组的关键部件, 将通流部分末级流出的汽流很好地组织引导进凝汽器, 并将末级出口的余速动能尽可能地转化为压力能。在凝汽器压力给定的情况下, 降低透平末级出口处的静压, 能够使透平级焓降增加, 从而增加末级出力, 提高汽轮机组效率。研究表明, 汽轮机的排汽损失约占整个汽轮机内损失的 15%^[1], 因此, 从提高排汽缸的气动性能入手, 透彻认识排汽缸内的三维流动细节, 研究其对汽轮机末级和凝汽器性能的影响, 揭示流动损失原因, 对提高汽轮机整机效率具有重要意义。

近年来国内外关于排汽缸气动性能的研究主要以数值方法为主^[2-8], 大部分研究都是对排汽缸单独建模, 并且设定排汽缸进口为轴向进汽。由于没有考虑到排汽缸内部流动受到末级动叶排出汽流参数的影响, 将低压缸末级和排汽缸割裂开来单独计算得到的分析结果与实际状况存在一定的差距。国内外很多学者已经注意到了这一问题, 并提出应该在对排汽缸气动性能的研究中考虑末级对排汽缸的影响^[9-11]。近年来计算机能力及网格生成技术和高效数值分析方法发展迅速, 已在多个领域得到应

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2006AA04Z404)。

The National High Technology Research and Development of China(863 Programme)(2006AA04Z404).

用^[12-16]，其发展为开展汽轮机末级与排汽系统的耦合数值分析奠定了基础。本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，壁面函数法，用控制容积法求解雷诺时均三维 N-S 方程及“混合平面”方法^[17]分析了 600MW 汽轮机排汽缸和末两级叶栅的耦合流动，并与单独排汽缸模型分析结果进行了比较。分析指出对排汽缸进行耦合数值模拟能够更准确地预测排汽缸的气动性能，从而为其合理优化奠定基础。

1 数值方法

1.1 物理模型和控制方程

汽轮机低压排汽缸内部结构和流动非常复杂，而末级动叶出口的参数沿叶高的变化也比较大，导致排汽缸入口的参数沿径向分布呈现强烈的三维特性。排汽缸主要任务是将通流部分末级排汽组织好、引导到凝汽器。本文所研究的排汽缸整体尺寸为 $7.5\text{m}\times 6.2\text{m}\times 2.7\text{m}$ ，排汽缸导流环进口直径为 3.06m ，图 1 为排汽缸结构简图。汽轮机末级动叶出口汽流具有一定的周向和径向偏转，蒸汽进入排汽缸后，上半部分排汽沿扩压管由轴向到径向经过 90° 翻转后，沿扩压管导流环内弧分流进入排汽缸下半部分，再流入凝汽器；下半部分排汽沿扩压管 90° 翻转后直接沿导流环背弧进入凝汽器。

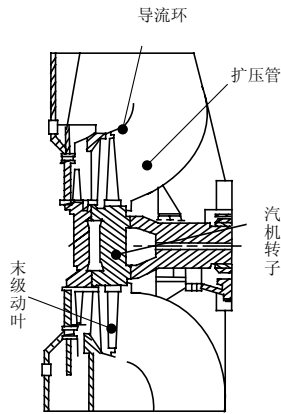


图 1 排汽缸结构简图

Fig. 1 Schematic structure of exhaust hood

柱坐标系下三维湍流流动和传热的控制方程为^[18]

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + S \quad (1)$$

式中： Γ 和 S 是通用变量 $\phi(u, v, w, T, k, \varepsilon)$ 的广义扩散系数和源项； u, v 和 w 是坐标方向的速度分量。研究表明，流动中如果存在旋转，将影响湍流动能从

大尺度脉动过程向小尺度脉动过程的能量转移，从而降低了耗散率 ε 。Yakho 及 Orzag^[19]提出了“renormalization group”（重整化群）RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型理论，将非稳态 N-S 方程对一个平衡态作 Gauss 统计展开，通过频谱分析消去其中的小尺度涡并将其影响归并到涡粘性中，从而改善了对耗散率 ε 的模拟。RNG $k-\varepsilon$ 模型与标准 $k-\varepsilon$ 模型的不同之处主要是在 ε 方程源项中加入了一个非线性的附加项 R_ε ，该非线性对于提高大应变率流动计算精度非常重要：

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (2)$$

式中： $\eta = Sk / \varepsilon$ ； $\eta_0 = 4.377$ ； $\beta = 0.012$ 。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型仍属于高雷诺数湍流模型，因而在近壁处要采用壁面函数来处理。

对于方程(1)采用压力修正法求解。计算时为减少结点变量的存储量，将压力和速度存放在同一套计算网格上，如图 2 所示。同时，采用 Rhie^[20]和 Chow 提出的动量插值(MIM)方法来解决非交错网格引起的非物理性质的压力波动问题。在网格单元上对控制方程离散，使得相邻两点的压差出现在计算方程中，从而避免了不合理压力锯齿波的出现。相关物理参数的离散方程为

$$a_p u_p = \sum_k a_k u_k + b + A_p (p_w - p_e) \quad (3)$$

式中： p_w, p_e 为界面压力；系数 a_k 反映对流扩散影响，其具体表达与数值离散方法有关；参数 k 为中心节点 P 的 4 个相邻节点 E, W, N, S ； b 为不包含压力梯度的源项。方程中的扩散项和源项的离散采用二阶中心差分，对流项的离散采用混合差分。系统离散方程使用 Raw 开发的耦合代数多网格方法进行求解。这种方法数值计算量与网格节点成线性变化。通过时间步长迭代直到达到规定的收敛要求。

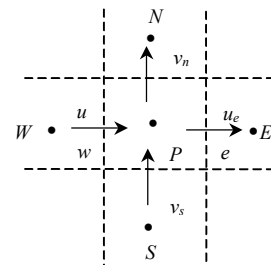


图 2 非交错网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of non-staggered grid

1.2 级间处理

计算域动、静叶列间以及排汽缸的气动参数传

递是耦合计算的重要环节。本文计算中末级和次末级静叶出口与动叶进口、动叶出口与排汽缸进口交接面上的信息传递均采用混合平面法^[21]，即假设在叶片排间隙中存在一个混合平面，对上(下)游的信息周向平均后向下(上)游传递，平均参数在每一时间步都有变化，直至收敛。这种平均模型可以保证流量在混合前后保持守恒。图 3 为混合平面法示意图，静叶和动叶栅分别生成各自的网格，其中 J 列为静叶网格系统的最后一条网格线， I 列为动叶网格系统的第一条网格线。由于气动参数存储在网格的中心节点上，上游的最后一个控制体和下游的第一个控制体具有相同的坐标。根据上游出口参数的平均值，可以得到下游进口需要的总温、总压和汽流角，从下游进口的平均值，可以得到上游出口需要的背压边界。

对于上游出口($j-1$)点:

$$p_{j-1} = p_{j-2} \int_{\theta_p}^{\theta_s} p_i d\theta / \int_{\theta_p}^{\theta_s} p_{j-2} d\theta \quad (4)$$

对于下游入口 i 点:

$$p_i = p_{i+1} \int_{\theta_p}^{\theta_s} p_{j-1} d\theta / \int_{\theta_p}^{\theta_s} p_{i+1} d\theta \quad (5)$$

$$T_i = T_{i+1} \int_{\theta_p}^{\theta_s} T_{j-1} d\theta / \int_{\theta_p}^{\theta_s} T_{i+1} d\theta \quad (6)$$

$$\beta_i = \beta_{i+1} \int_{\theta_p}^{\theta_s} \beta_{j-1} d\theta / \int_{\theta_p}^{\theta_s} \beta_{i+1} d\theta \quad (7)$$

由于汽轮机中动、静叶间的间隙较小，进出口边界与叶片的前后缘相靠很近，在边界上存在着很强的周向不均匀将引起附加误差。本文采用 Denton^[15]的外推边界的无反射边界条件，即先计算级间交接面上、下游的参数(静压、总压、总温及气流角)的周向平均值 \bar{x}_A 和 \bar{x}_B ，然后在参数传递过程中，考虑到上游掺混面参数原有的周向分布，引入一个修正量 Δ 对掺混面上的参数分布进行修正，从而得到下游面上参数的新值 x'_B ，完成参数传递:

$$x'_B = \bar{x}_B + \Delta \quad (8)$$

式中 $x = x(\rho, \rho v_x, \rho v_r, \rho v_\theta, p)$ 。

在混合平面上要保证其周向的平均值等于上(下)游传递来的周向平均值，从而使单列叶栅的周向不均匀性在进出口边界条件上得到体现。计算忽略了叶栅和排汽缸间流动的非定常性，认为末级叶栅和排汽缸内部流动是相对定常的，在同一个时间层被看作是相对独立的系统，并且采用各自独立的

网格系统。

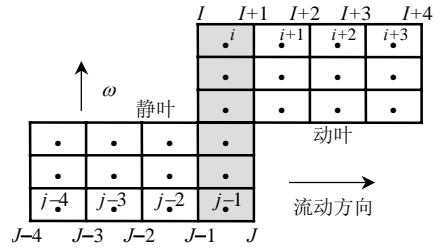


图 3 混合平面法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mixing plane approach

1.3 计算网格

末级及次末级叶栅具有轴对称性，故计算时仅取一个通道，这样可以减少计算的网格数，从而减少计算时间，提高计算效率。计算域采用多块结构网格进行剖分，以适应叶片复杂外形及流道空间拓扑结构的要求。叶片的近壁区采用 O 型网格，以提高叶片前缘，尾缘的网格质量；而远壁区采用 H 型网格，以提高流道中的网格质量。图 4 和图 5 分别为静叶前缘和动叶尾缘的网格，图 6 为末两级叶栅的计算网格。在排汽缸模型的选取中，对低压排汽缸部分次要的几何结构如撑管、筋板、挡板等进行了简化，以分析影响流动的主要因素和提高计算的效率。如图 7 所示，排汽缸的计算域也被分成多个子域，在每个子域中生成单块结构化网格。考虑到排汽缸出口附近可能会有较大的分离区存在，导致计算收敛困难。因此在排汽缸出口增加一段延伸段。虽然排汽缸的结构具有对称性，但是实际进入排汽缸的汽流带有周向的分速度，从而使排汽缸内部的流动呈非对称性，因此采用整缸模型对排汽缸进行

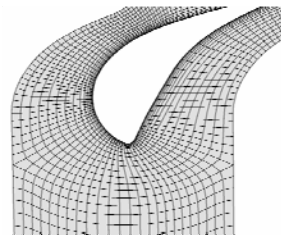


图 4 静叶前缘网格
Fig. 4 Grid of the stator leading edge

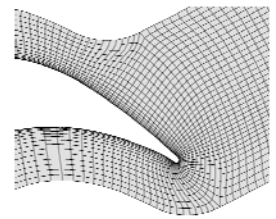


图 5 动叶尾缘网格
Fig. 5 Grid of the rotor trailing edge

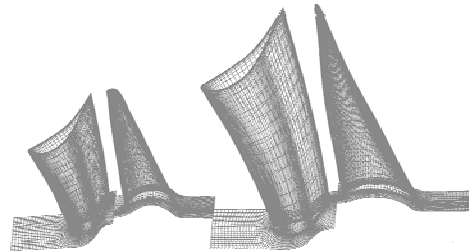


图 6 末两级叶栅的计算网格
Fig. 6 Computational grid of the last two stage

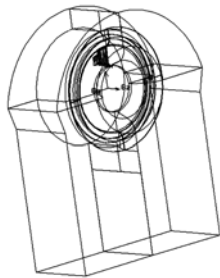


图 7 排汽缸的计算域

Fig. 7 Calculating region of the exhaust hood

计算。本文计算中单列叶栅的网格约为 30 万，整个耦合计算域的网格约为 170 万。

2 结果及分析

2.1 耦合计算对排汽缸气动性能的影响

通常，排汽缸的气动性能主要用静压恢复系数 C_p 来描述，静压恢复系数越高，说明排汽缸回收动能的能力越强，性能越好，其定义为^[4]

$$C_p = \frac{p_{out} - p_{in}}{p_{t,in} - p_{in}} \quad (9)$$

式中： p_{in} 、 $p_{t,in}$ 和 p_{out} 分别为排汽缸进口的平均静压、总压和出口的平均静压。

排汽缸单独计算和耦合计算的结果见表 1，可以看出单独计算和耦合计算的结果相差很大，耦合计算的排汽缸进口静压为 15986.2Pa，低于排汽缸出口的压力 17203.4Pa。而同样的出口压力下，在单独计算排汽缸时，进口压力却高于此值。两种计算结果的不同说明末级叶栅对排汽缸内流动的影响非常大，虽然本文中单独计算的部分进口参数取自于耦合计算的结果，但是由于排汽缸单独计算中没有考虑末级排汽的不均匀性，更没有考虑末级叶栅通道和排汽缸中流动的交互作用，使得单独计算和耦合计算的结果产生了较大的差异。

表 1 排汽缸单独计算和耦合计算的典型结果

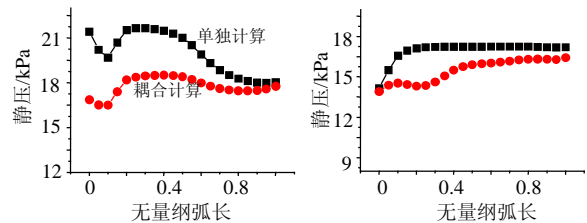
Tab. 1 Typical results of single and combined analysis of exhaust hood

类别	位置	p_i /Pa	ρ /(kg/m ³)	p_o /Pa	C_p
末两级和排汽缸耦合计算	末级进口	52819.9	0.52987	50238.7	0.251
	排汽缸进口	20820.0	0.22327	15986.2	
	排汽缸出口	18306.4	0.22470	17203.4	
	延伸段出口	18060.2	0.22089	17329.5	
排汽缸单独计算	排汽缸进口	23873.6	0.20661	18480.1	-0.217
	排汽缸出口	19067.0	0.18545	17308.2	
	延伸段出口	18172.9	0.18270	17329.5	

2.2 排汽缸导流环内、外壁面的压力分布

图 8(a)给出了两种计算模型下排汽缸导流环内壁面上沿流向的静压分布，其横轴为排汽缸子午面

沿导流环轴向从进口到出口的无量纲曲线坐标。从导流环内壁面上的静压分布图上可以看出单独计算结果显示压力沿轴向先下降然后上升，最后缓慢下降的趋势。出口静压值低于入口静压值，说明导流环未起到扩压作用。而耦合计算结果显示压力沿轴向先下降然后上升趋势，出口静压值高于入口静压值，说明导流环起到扩压作用。图 8(b)为导流环外壁面上的静压分布比较图，结果显示不论是单独计算还是耦合计算，二者总体上都显示沿轴向呈压力上升趋势。耦合计算结果显示了在 25%弧长处存在低压槽，这是由于末级叶栅出口形成的旋流在导流环外壁面此处折转汽流分离所造成的。在单独计算中也存在此处压力突变，但因为流动较为平稳，未造成静压的变化。



(a) 导流环内壁面上的静压分布 (b) 导流环外壁面上静压分布

图 8 导流环内外壁面上的静压分布

Fig. 8 Distribution of static pressure on the intra- and extra-plane of flow guide

2.3 排汽缸内流场的压力和速度分布

耦合计算和单独计算得到的排汽缸入口面、子午面以及出口面的静压分布如图 9 所示。图 9(b)的压力分布明显不同，在单独计算时排汽缸导流环内壁面一侧有一个压力较高的区域，而在耦合计算中，导流环内壁面的前段则没有明显的高压区。在图 9(c)中，由于末级叶栅的影响，耦合计算的结果显示出出口截面上的压力分布是不对称的。图 10 所示为两种计算模型下这三个典型截面的速度分布，图 10(b)为子午面上半的速度分布，在耦合计算中排汽缸进口汽流在轴向和周向都有分速度，而在单独计算中没有考虑末级旋流等因素，轴向速度占主导地位，当高速汽流进入扩压管折转后，由于汽流角的存在会使汽流与导流环脱离并在导流环附近形成一个空穴区。在粘性运输的作用下，空穴里的汽体会不断地被下游汽流带走，这种抽吸行为会使空穴内压力下降，形成低压区，因而没有起到扩压的效果。图 10(c)给出了出口截面的速度矢量，由图上可以清楚地看出耦合结果的二次涡不对称性。

虽然在耦合计算中的末两级仅取了一个通道，并且在末两级叶栅和排汽缸进口之间采用的混合平

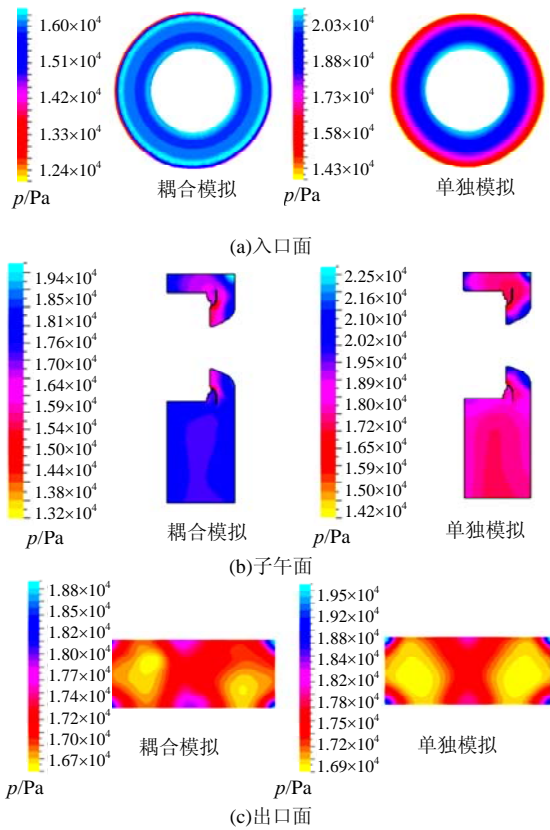


图9 排汽缸入口面、子午面以及出口面的压力云图
Fig. 9 Pressure contours of inlet, meridian and outlet planes in exhaust hood from the combined and single analysis

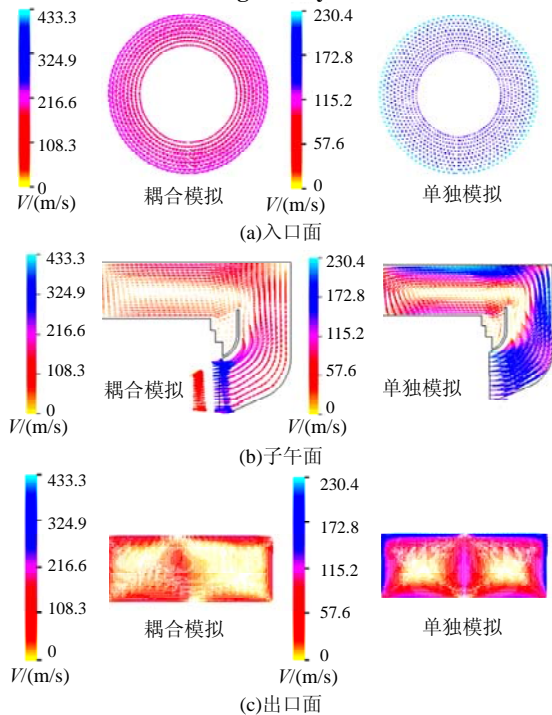


图10 排汽缸入口面、子午面以及出口面的速度矢量
Fig. 10 Velocity vectors of inlet, meridian and outlet planes in exhaust hood from the combined and single analysis

面模型, 会给计算引入一定的误差, 但是耦合计算考虑到了末两级叶栅流动对排汽缸气动性能的影响, 与单独计算相比更接近于排汽缸工作的实际情况, 其结果的准确程度也有所提高。在排汽缸相关的分析中, 应考虑末级叶栅对其影响, 反过来在末级及次末级的叶栅设计中也应考虑排汽缸对流场的影响。

3 结论

(1) 本文采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对汽轮机低压缸末两级叶栅和排汽缸内部流场进行了耦合数值分析。其中在动、静叶列以及排汽缸各交界面上运用外推法无反射边界条件完成了计算域上下游气动参数的传递。结果表明采用的网格生成方法是合适的, 计算方法能够较好地分析排汽通道内的流场, 获得了低压排汽缸三维可压缩湍流流场的详细信息。

(2) 本文对排汽缸分别进行了单独和耦合计算。两种不同的数值模型计算得到的压力分布、速度分布及压力恢复系数差异较大。排汽缸虽然为对称结构, 但由于末级排汽的影响, 模拟计算中必须考虑排汽缸内流动的非对称性。

(3) 耦合计算结果显示在 25% 弧长处存在低压槽。这是由于末级叶栅出口形成的旋流在导流环外壁面处折转, 引起汽流分离所造成的。

(4) 分析表明考虑末级排汽的不均匀性对排汽缸流场的影响在排汽缸的性能研究中十分重要。本文利用耦合模型进行计算, 尽可能使排汽缸进口参数分布与实际情况接近, 提高了排汽缸性能预测结果的可靠性。

(5) 采用数值方法进行排汽缸结构及性能优化设计, 应该考虑到末级流动对排汽缸流场的影响, 以保证优化的可靠性。同时, 在进行汽轮机低压末几级设计时, 也应该考虑排汽缸的影响, 从而使整个汽轮机低压缸叶片的设计更为合理。

参考文献

[1] 蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
 [2] 杜占波, 张荻, 孙弼. 透平低压排汽缸流场的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(3): 36-39.
 Du Zhanbo, Zhang Di, Sun Bi. Numerical simulation of flow field in low-pressure turbine exhaust hood[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(3): 36-39(in Chinese).
 [3] 刘建军. 用多块多网格方法数值模拟三维粘性流动[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 46-48.
 Liu Jianjun. Numerical simulation of 3d viscous flow using a multiblock multigrid method[J]. Journal of Engineering

- Thermophysics, 2002, 23(4): 46-48(in Chinese).
- [4] 徐旭, 康顺, 蒋洪德. 低压蒸汽透平排汽缸内能量损失的数值研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(6): 652-655.
Xu Xu, Kang Shun, Jiang Hongde. Numerical simulation of 3d viscous flow in exhaust casing of a low-pressure steam turbine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(6): 652-655(in Chinese).
- [5] 李欣, 徐星仲, 严明, 等. 汽轮机排汽缸模型的数值模拟与结果分析[J]. 汽轮机技术, 2003, 45(6): 361-363.
Li Xin, Xu Xingzhong, Yan Ming, et al. Numerical simulation on steam turbine exhaust hood model and its result analysis[J]. Turbine Technology, 2003, 45(6): 361-363(in Chinese).
- [6] 杨科, 李宇峰, 康顺. 30 万千瓦空冷汽轮机组低压排汽缸数值模拟[J]. 热力透平, 2005, 35(2): 69-72.
Yang Ke, Li Yufeng, Kang Shun. Numerical simulation of the low pressure exhaust hood in a 300mw air-cooled steam turbine[J]. Thermal Turbine, 2005, 35(2): 69-72(in Chinese).
- [7] Tindell R H, Alston T M, Sarro C A, et al. Computational fluid dynamics analysis of a steam power plant low pressure turbine downward exhaust hood[J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1996, 118(1): 214-224.
- [8] Liu J J, Cui Y Q, Jiang H D. Investigation of flow in a steam turbine exhaust hood with/without turbine exit conditions simulated[J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2003, 125(1): 292-299.
- [9] Solodov V G, Gnesin V I. Three-dimensional simulation of nonstationary flow phenomena in "last stag-exhaust hood" compartment[J]. Journal of Thermal Science, 1997, 6(4): 231-236.
- [10] Dejean F, Marty C, Hartmann O. Three-dimensional coupled flow calculations in a low-pressure steam turbine last stage and exhaust hood for nominal and partial load conditions: comparisons with experimental results[C]. The 3rd European Conference on Turbomachinery, London, 1999.
- [11] Liu J J, Hynes T P. The investigation of turbine and exhaust interactions in asymmetric flows-blade-row models applied[J]. Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1): 121-127.
- [12] 曹丽华, 郭婷婷, 李勇. 300MW 汽轮机凝汽器喉部出口流场的三维数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 56-59.
Cao Lihua, Guo Tingting, Li Yong. Three-dimensional numerical simulation of the outlet flow field of the 300MW steam turbine's condenser throat[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 56-59(in Chinese).
- [13] 李少华, 宋东辉, 刘建红, 等. 不同孔型平板气膜冷却的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 112-116.
Li Shaohua, Song Donghui, Liu Jianhong, et al. Numerical simulations of flat plate film cooling using respectively different shaped jet holes[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 112-116(in Chinese).
- [14] 李军, 邓清华, 丰镇平. 蜂窝汽封和迷宫式汽封流动性能比较的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 108-111.
Li Jun, Deng Qinghua, Feng Zhenping. Comparison of the flow characteristics for the honeycomb and labyrinth seal using numerical simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 108-111(in Chinese).
- [15] 郭婷婷, 李少华, 徐忠. 横向紊动射流流场结构的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 181-188.
Guo Tingting, Li Shaohua, Xu Zhong. A numerical simulation of three-dimensional turbulent jets in crossflow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 181-188(in Chinese).
- [16] 张泽, 吴少华, 秦裕琨, 等. 炉内流场中复杂结构喷嘴射流的近流线数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 108-113.
Zhang Ze, Wu Shaohua, Qin Yukun, et al. Closed to streamline numerical simulation on complicated structural nozzle jets in furnace flow field[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 108-113(in Chinese).
- [17] Denton J D. The calculation of three dimensional viscous flows through multistage turbomachines[J]. Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, 1992, 114(1): 18-26.
- [18] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [19] Yakhot V, Orzag S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-11.
- [20] Rhie C M, Chow W L. A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation[J]. Journal of AIAA, 1983, 21(11): 1525-1532.
- [21] 席光, 高丽敏, 王尚锦. 离心压缩机级内三维粘性流动数值分析[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1): 49-51.
Xi Guang, Gao LiMin, Wang ShangJin. Numerical simulation of 3-d viscous flow field in a centrifugal compressor stage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(1): 49-51(in Chinese).

收稿日期: 2007-02-01.

作者简介:

樊涛(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事叶轮机械复杂通道的气动热力学研究, fantao@mail.xjtu.edu.cn;

谢永慧(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事叶轮机械气动热力学与强度振动分析, yhxie@mail.xjtu.edu.cn;

张荻(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事叶轮机械复杂通道内湿蒸汽两相流及叶片水蚀特性的研究;

孙弼(1943—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事叶轮机械气动热力学及湿蒸汽两相流研究。

(编辑 王庆霞)