

不同容积流量下汽轮机低压缸末三级 定常流动数值研究

邵帅¹, 邓清华¹, 时和双¹, 丰镇平¹, 程凯², 彭泽瑛²

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 上海电气研发中心, 201612, 上海)

摘要: 借助商用计算流体动力学软件 CFX, 对不同容积流量下某大型核电汽轮机低压缸和排汽缸联合进行了全三维黏性定常流动的数值研究, 详细分析了低压缸末三级的流动特性。结果表明: 在 40% 设计流量下, 末级动叶根部受逆压梯度的作用, 在吸力面近尾缘区域开始发生流动分离, 并随着流量的进一步减小, 逆压区域向径向发展而形成回流; 在 30% 设计流量下, 负攻角导致末级动叶顶部压力面的近前缘区域发生流动分离, 随着流量的进一步减小, 该分离向叶根发展; 在 10% 设计流量下, 末级静叶顶部及根部受负攻角的作用而导致压力面近前缘区域发生流动分离; 末级动叶在靠近叶顶处的绝对出口气流角会随着流量的减小不断增大, 通过绝对出口气流角在叶高方向的转折点可以判断回流区径向扩展的位置。

关键词: 汽轮机; 末三级; 容积流量; 数值研究; 流动特性

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0015-06

Numerical Investigation on Flow Characteristics in Steam Turbine Low Pressure Cylinder and LPEH under Different Volume Flow Rate Conditions

SHAO Shuai¹, DENG Qinghua¹, SHI Heshuang¹, FENG Zhenping¹, CHENG Kai², PENG Zeying²

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Electric Power Generation Technology R&D Center, Shanghai 201612, China)

Abstract: A numerical investigation on full-three-dimensional steady viscous flow fields in the last three stages and low pressure exhaust hood (LPEH) of a steam turbine was conducted using the commercial computational flow dynamics software CFX. The flow fields in the last three stages were analyzed in detail. The results show that a separation caused by the adverse pressure gradient occurs at the hub section near the trailing edge of the last stage rotor at 40% of the design mass flow rate. Moreover, a separation caused by the negative attack angle occurs at the tip section near the leading edge of the last stage rotor at 30% of the design mass flow rate. A separation also caused by the negative attack angle occurs near the leading edge of the last stage stator at 10% of the design mass flow rate. In addition, the absolute outlet flow angle of the last stage rotor at the tip section increases with the decrease in volume flow rate, and the radial location of the reverse flow can be determined by the turning point of the absolute outlet flow angle in the blade radial direction.

Keywords: steam turbine; last three stages; volume flow rate; numerical research; flow characteristics

汽轮机在小容积流量下运行并不鲜见^[1-2],但其流动更为复杂,主要表现为末级流动出现负攻角,在叶片压力面上产生附面层的分离,在叶根处产生扩压流动且形成脱流^[1]。脱流对汽轮机产生的负面影响包括:①引起叶片动应力和动频率变化;②当容积流量减小到一定程度时,末级不但对外不作功,而且还消耗外界功,出现所谓的“鼓风工况”,在此工况下耗功使得排汽温度升高,低压缸末端由于过热而导致超温变形;③低压缸末级气流中水滴含量较大,当发生回流时,液滴冲击动叶出口边,使得动叶受到侵蚀^[2]。

近年来,国内外关于汽轮机低压缸末级和排汽缸的气动性能研究主要采用数值的方法且分别进行了计算,但未考虑末级叶片与排汽缸之间的相互影响^[1-7]。随着计算机硬件水平的提高,杜占波、樊涛等分别展开了汽轮机低压缸末级与排汽缸的联合数值模拟,发现与分别计算相比,联合计算可以更准确地设定计算域的边界条件,获得更接近于实际流动状况的模拟结果^[8-9]。刘建军的数值模拟和实验研究发现,模拟时在排汽缸进口分别设定均匀进口条件和末级出口条件,排汽缸内的流动形态和性能具有很大的差别^[10]。付经伦通过联合数值模拟与实验研究发现,当排汽缸产生的非轴对称压力传播至末级出口时,周向叶片载荷呈现非均匀分布^[11]。可见,上述研究并未涉及到小容积流量工况下的流动特性。

为了揭示汽轮机末级及排汽缸在小容积流量下的流动特性及影响因素,本文采用商用计算流体动力学软件 CFX 对不同容积流量下的某大型核电汽轮机低压缸末三级及排汽缸进行了全三维黏性定常联合数值模拟,主要研究末三级在小容积流量下的气动特性及其随流量的变化规律。

1 几何模型与数值方法

本文的低压缸末级动叶高度为 1.71 m,排汽缸整体尺寸为 14.00 m×5.25 m×11.43 m,排汽缸进口直径为 6.42 m。由于排汽缸进口气流存在周向分速度,这样对称结构下的排汽缸内流动不具有对称性,因此需要对整个排汽缸进行数值模拟。

为了获得更为真实的流动,排汽缸内部结构不作任何简化,计算时采用非结构四面体网格;为了保证计算的收敛性,排汽缸出口需延伸,延伸段采用六面体网格。叶片通道为轴对称,计算时仅取单个通道即可,这样网格总体数量下降,计算效率提高。

图 1 为末三级叶片单通道网格,图 2 为排汽缸主体网格。末三级叶片网格由 NUMECA-AutoGrid 生成,网格数共约 118 万;排汽缸及延伸段网格由 ICEM 生成,网格数约 490 万。所以,网格总数约 608 万。

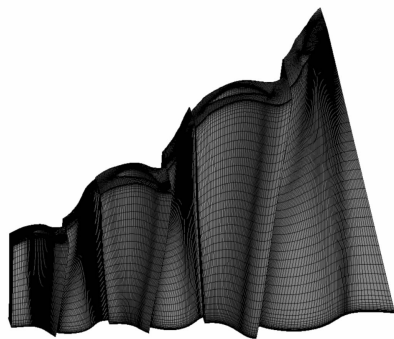


图 1 末三级叶片通道网格

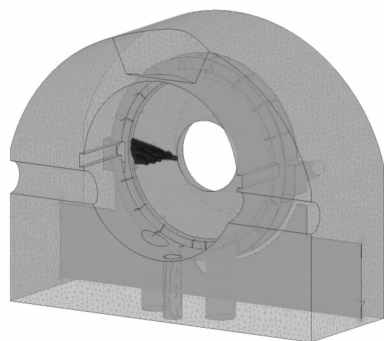


图 2 排汽缸主体网格

采用商用软件 CFX 求解 $k-\epsilon$ 模型的雷诺时均 N-S 方程组,工质为平衡态湿蒸汽。在计算域出口给定平均静压 5 160 Pa,进口给定总焓和流量,各工况下进口总焓为固定值 2 518.4 kJ/kg。改变进口流量使其从设计流量 267.3 kg/s 按 10% 递减,最终为设计流量的 10%。

2 结果与分析

表 1 为不同流量下末三级的等熵焓降及反动度。从表 1 可以看出:末三级的焓降与反动度基本上随流量的减小而减小,次末级的反动度在 10% 设计流量下很小;末级等熵焓降及反动度随流量的减小而减小的趋势最为明显,在 30% 设计流量下,末级反动度很小,对外输出功很少,在 20% 设计流量下,末级的反动度为负值,说明此时末级进入鼓风工况,对外的输出功为 0,同时还要耗功使得蒸汽温度升高,该结果对末级动叶不利。

表 1 不同流量下末三级的焓降及反动度

相对 流量 /%	次次末级		次末级		末级	
	等熵焓降/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	反动度	等熵焓降/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	反动度	等熵焓降/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	反动度
10	64.074	0.377	30.276	0.163	6.070	-1.341
20	85.279	0.428	81.217	0.369	16.702	-0.321
30	88.015	0.440	101.427	0.435	44.572	0.023
50	90.128	0.441	106.945	0.447	98.638	0.184
70	91.462	0.442	108.520	0.448	141.519	0.334
90	90.473	0.452	109.651	0.448	173.692	0.449

图 3 和图 4 分别为汽轮机末三级功率 P 和扭矩 T 随相对流量的变化。从图 3、图 4 可以看出:在 10%设计流量下,功率、扭矩为负值;在 20%设计流量以下,扭矩均为负值,说明末级动叶此时进入鼓风工况,由做功转变为耗功;末三级动叶的扭矩和功率与流量近似成线性关系。

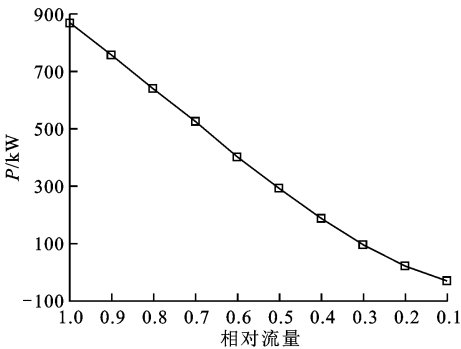


图 3 功率随流量的变化

图 5~图 7 分别为末级静叶、动叶在不同位置、不同流量下的流面流线。从图 5 可以看出:在 10%

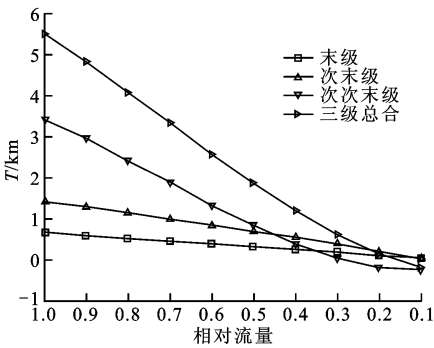
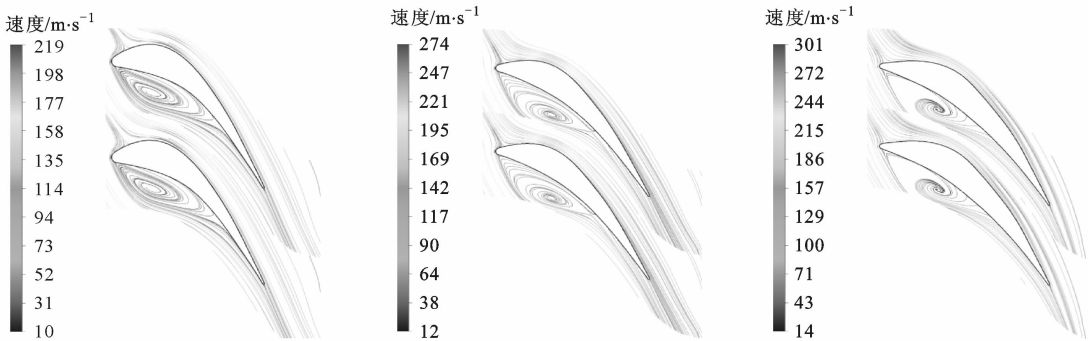


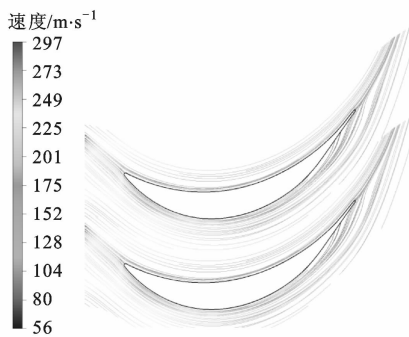
图 4 扭矩随流量的变化

设计流量下,末级静叶压力面侧由于较大的负攻角使得流动发生了分离。从图 6 可以看出:在 40%设计流量下,末级动叶根部出现了逆压梯度,尾缘吸力面处最先发生流动分离;在 20%设计流量下,流动呈现负攻角,压力面前缘附近出现了流动分离;在 10%设计流量下,流动分离扩展至整个动叶通道。从图 7 可以看出,在 30%设计流量下,末级动叶顶部的压力面侧由于负攻角使得流动发生分离。

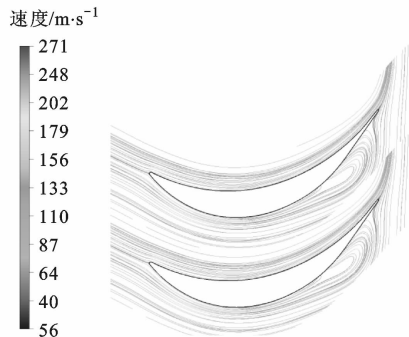


(a)10%相对叶高处 (b)50%相对叶高处 (c)90%相对叶高处

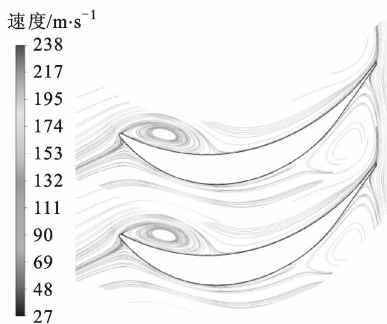
图 5 不同位置的末级静叶在 10%设计流量下的流面流线



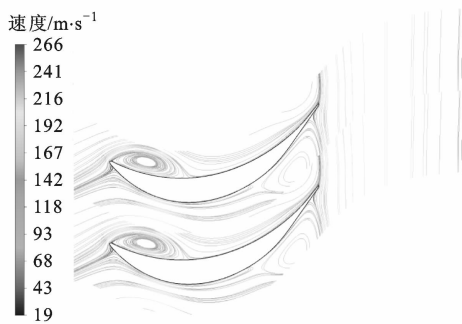
(a) 40%设计流量



(b) 30%设计流量

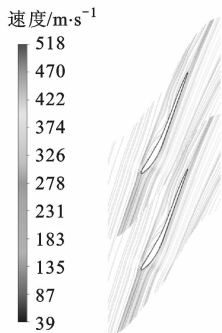


(c) 20%设计流量

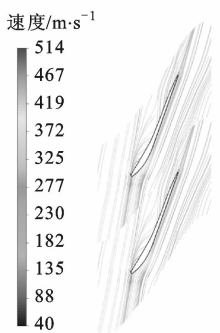


(d) 10%设计流量

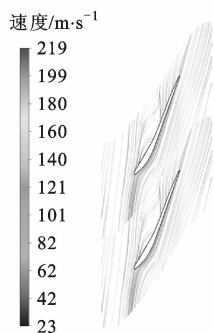
图 6 不同流量下末级动叶在 10%叶高处的流面流线



(a) 30%设计流量



(b) 20%设计流量



(c) 10%设计流量

图 7 不同流量下末级动叶在 90%叶高处的流面流线

图 8 和图 9 分别为 10%设计流量下末级静叶和动叶通道内的三维流线及叶片表面极限流线。从图 8、图 9 可以看出:在末级静叶压力面侧,负攻角导致的分离流动在三维空间内表现为,沿着叶片前缘由叶顶向叶根发展的旋涡;从极限流线图中的再附线上可以看到,这个旋涡从叶顶贯穿到叶根。末级动叶在 60%叶高以下、50%弦长之后的区域为回流区,受回流区中逆压梯度的影响,叶根吸力面在 50%弦长处形成了向中叶展发展的旋涡,受气流负攻角的影响,叶片压力面形成了由叶根向叶顶发展

的旋涡。

图 10 为不同流量下末级动叶出口处绝对出口气流角沿叶高的变化。从图 10 可以看出:在 40%设计流量下,绝对出口气流角在径向存在一个明显的转折点,该点对应 20%叶高处,可见随着流量的减小,回流区从叶根不断向上发展,最终到达 60%叶高处;转折点以上的绝对出口气流角随着流量的减小不断增大,使得该区域气流的周向速度分量增大;转折点前后绝对气流角差值随着流量的减小而不断增大。

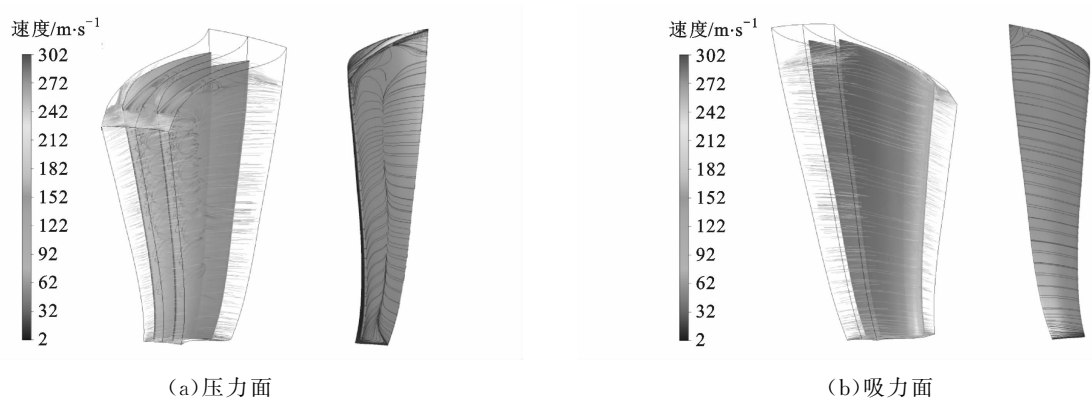


图 8 10%设计流量下末级静叶通道内三维流线及叶片表面极限流线

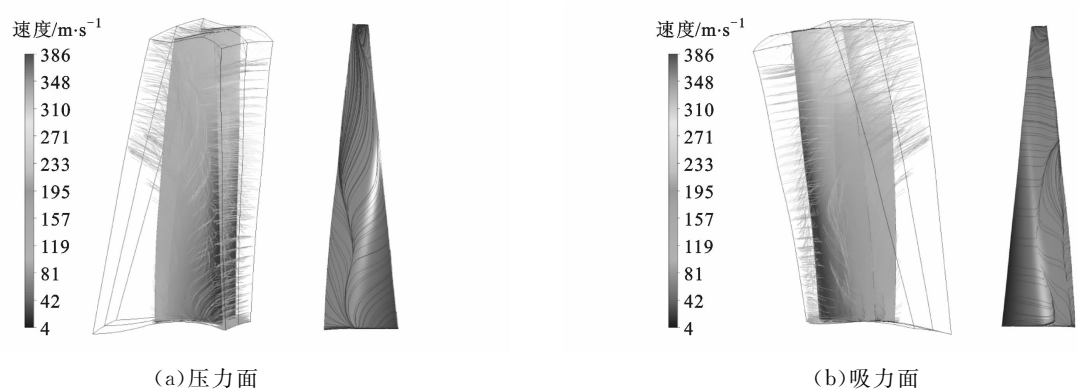


图 9 10%设计流量下末级动叶通道内三维流线及叶片表面极限流线

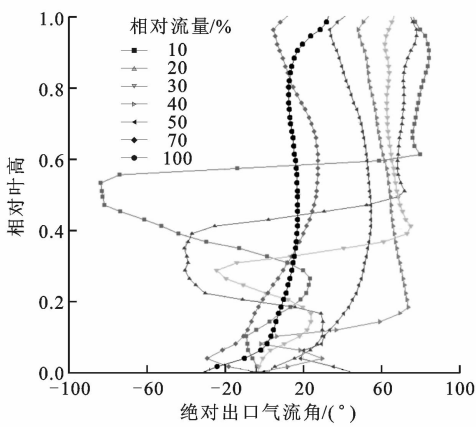


图 10 不同流量下末级动叶出口处绝对出口气流角沿叶高的变化

图 11 为不同流量下叶片通流部分的子午流线。从图 11 可以看出:在 40%设计流量下,末级动叶根部尾缘处的流线开始向展向突起;在 30%设计流量下,末级动叶根部的流线沿展向突起;在 10%设计流量下,回流区扩展至末级动叶 50%弦长处,整个末级动叶内的流动十分混乱;在 60%叶高以下回流异常明显,回流带动气流内的液滴冲击动叶叶根尾缘,造成动叶根部尾缘出现水蚀,严重影响了汽轮机的效率和可靠性。

3 结 论

本文重点进行了汽轮机低压缸末三级单通道和排汽缸的定常数值研究,揭示了汽轮机低压缸末级叶栅通道内的流动特性及其随流量的变化规律。通过分析比较获得如下结论。

(1)末三级动叶的扭矩和功率与流量呈线性变化关系,10%设计流量下,末三级的功率为负值,20%设计流量以下,末级动叶扭矩均为负值,叶片由作功转变为耗功。

(2)次次末级、次末级及末级的等熵焓降、反动度均随流量的减小而减小,末级动叶焓降在 20%设计流量下出现负值,说明末级动叶进入了鼓风工况。

(3)末级静叶、动叶通道内的静压和马赫数均随流量的降低而减小,在 10%设计流量下,末级静叶顶部和根部的压力面侧发生了流动分离。在 30%设计流量下,末级动叶顶部的压力面侧出现流动分离;在 40%设计流量下,动叶根部吸力面侧尾缘处最先发生流动分离;在 20%设计流量下,压力面前缘附近出现流动分离;在 10%设计流量下,流动分离扩展至整个动叶通道。

(4)从末级动叶绝对出口气流角随流量的变化趋势中看到,回流区沿展向发展,回流区最终在轴向

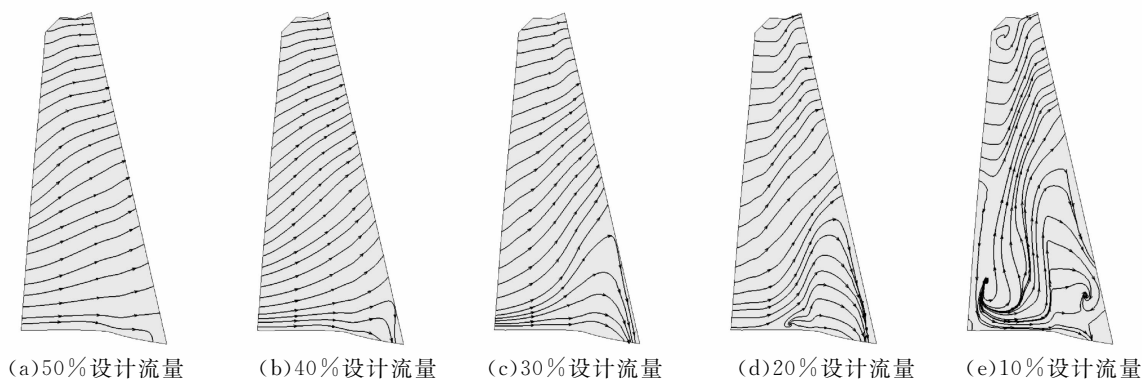


图 11 不同流量下通流部分的子午流线

扩展至末级动叶 50% 弦长处, 在径向扩展至 60% 叶高处。

参考文献:

- [1] 邓向阳, 阳虹, 张宏武, 等. 小流量工况下汽轮机低压缸末两级三维粘性流场数值分析 [C]// 中国工程热物理学会 2004 年热机气动热力学学术会议论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 2004: 263-268.
- [2] 曾晓强, 朱斌, 蔡虎, 等. 两种汽轮机低压缸末级在小容积流量工况下的三维粘性数值模拟及其性能比较 [C]// 中国工程热物理学会 2001 年热机气动热力学学术会议论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 2001: 157-163.
- [3] 竺晓程, 王红涛, 周代伟, 等. 汽轮机低压缸变工况特性的数值研究 [J]. 热力透平, 2008, 37(1): 51-53. ZHU Xiaocheng, WANG Hongtao, ZHOU Daiwei, et al. Numerical study of off-design on lp casing of steam turbine [J]. Thermal Turbine, 2008, 37(1): 51-53.
- [4] 金建国, 李勇, 曹丽华. 小容积流量下汽轮机末级流场的计算研究 [J]. 汽轮机技术, 2004, 46(6): 411-414. JIN Jianguo, LI Yong, CAO Lihua. Calculated research on the last stage flow field of steam turbine under the low volume flow condition [J]. Turbine Technology, 2004, 46(6): 411-414.
- [5] 戴丽萍, 蔡虎, 康顺. 150 MW 汽轮机低压缸末两级三维流动的数值模拟 [J]. 汽轮机技术, 2010, 52(2): 87-90. DAI Liping, CAI Hu, KANG Shun. Numerical simulation of last two stage 3D flow field of 150 MW steam turbine [J]. Turbine Technology, 2010, 52(2): 87-90.
- [6] 程云生, 全晓军, 章任蕾. 汽轮机低压排汽缸气动性能的数值研究 [J]. 汽轮机技术, 2010, 52(5): 359-361. CHEN Yunsheng, QUAN Xiaojun, ZHANG Renlei. The numerical investigation of steam turbine low-pres-

sure exhaust hood aerodynamic performance [J]. Turbine Technology, 2010, 52(5): 359-361.

- [7] 王红涛, 竺晓程, 阳虹, 等. 基于 iSIGHT 平台的汽轮机低压排汽缸气动优化设计 [J]. 动力工程, 2009, 29(7): 650-655. WANG Hongtao, ZHU Xiaocheng, YANG Hong, et al. The aerodynamic optimization design of low pressure exhaust hood for steam turbine based on iSIGHT platform [J]. Power Engineering, 2009, 29(7): 650-655.
- [8] 杜占波. 汽轮机低压排汽缸和末几级流场的联合数值模拟 [J]. 动力工程, 2005, 25(S0): 353-357. DU Zhanbo. Combined numerical simulation of fluid flow at last two stages and low-pressure exhaust hood of steam turbine [J]. Power Engineering, 2005, 25(S0): 353-357.
- [9] 樊涛, 谢永慧, 张荻, 等. 汽轮机低压排汽缸与末两级耦合流动的三维数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 90-95. FAN Tao, XIE Yonghui, ZHANG Di, et al. Combined 3D numerical analysis of the low pressure exhaust hood coupling with the last two cascade in steam turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 90-95.
- [10] LIU Jianjun, CUI Yongqiang, JIANG Hongde. Investigation of flow in a steam turbine exhaust hood with/without turbine exit conditions simulated [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(1): 292-298.
- [11] FU Jinglun, ZHOU Sijing, LIU Jianjun. Experimental and numerical investigation of interactions between axial turbine and non-axisymmetric exhaust hood [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2008. New York, USA: ASME, 2008: 50766.

(编辑 苗凌)