

某型汽轮机调节级气动特性数值研究

刘子亘¹, 邹积国¹, 韩万金²

(1. 中国船舶重工集团公司第703研究所, 哈尔滨 150001, Liuzigen@sohu.com;

2, 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨, 150001)

摘 要: 对采用寇蒂斯级设计思想、具有局部进气的汽轮机复速级进行了三维整级数值模拟, 分析了设计工况下该复速级的流动特点. 计算结果表明, 气流流出复速级喷嘴后, 每个喷嘴组边界流体的散射作用不强烈, 在边界上基本只影响了附近的一个叶栅流道, 流动的主体方向沿着轴向进行; 当级的压比较大, 流动达到超音速时, 每个喷嘴组出口流动沿周向的不均匀性非常严重, 交替出现尾迹低速区和主流低压区, 使喷嘴区域内处于不同位置的动叶片受力状态发生较大变化; 超音速喷嘴出现的过膨胀低压区, 压力在整个级内是最低的, 会加剧动叶流道的非定常流动效应.

关键词: 汽轮机复速级; 局部进汽; 周向不均匀性; 数值模拟

中图分类号: TK47

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1133-04

Numerical investigation on the characteristics of the guide vane stages in a steam turbine

LIU Zi-gen¹, ZOU Ji-guo¹, HAN Wan-jin²

(1. No. 703 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Harbin 150001, China, Liuzigen@sohu.com;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Three-dimensional numerical simulation on the double-velocity stage of a steam turbine adopting the design idea of the Curtis stage was carried out. The whole circle flow fields of the two stages were computed and the flow features of the Curtis stage under designed operation were analyzed. Results show that the scattering effect of each nozzle group is not intense after the flow flows out of the Curtis stage nozzle, which only affects one blade passage near the boundary. The main direction of the flow is in the axial direction. When the pressure ratio is relatively larger and the flow velocity becomes supersonic, the circumferential non-uniform at the outlet of each nozzle group is very serious, the wake area with low speed and the mainstream area with low pressure appears by turns, so the aerodynamic loads on the rotor blades located at different positions in the nozzle region change greatly. An over-expanded low pressure area occurs in the supersonic nozzle, and the pressure is the lowest in the whole stage, which will strengthen the unsteady effects in the rotor blade passages.

Key words: steam turbine Curtis stage; partial admission; circumferential non-uniform; numerical simulation

由于汽轮机多工况、变转速、变参数的特点, 汽轮机调节级在保持额定工况具有较高效率的前提下, 对变工况起到了调节压力的作用. 随着工质流量的改变, 调节级所承担的压力降和焓降也相

应变化, 提高调节级在各工况下的内效率对汽轮机性能的提高具有较大意义. 近些年, 对于动力涡轮流场及变工况计算已经开展了一些研究^[1-3].

本文对采用寇蒂斯级设计技术的汽轮机复速级进行了研究, 寇蒂斯级的设计思想只有结合其特有结构才能较好地提高级的内效率^[4-5]. 汽轮机通过叶栅做功, 热能和动能转化为机械能, 叶栅流动的效率直接影响汽轮机的效率, 所以提高汽

收稿日期: 2009-12-09.

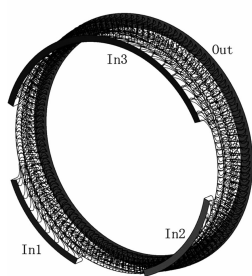
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50706009;50576017).

作者简介: 刘子亘(1971—), 男, 高级工程师;

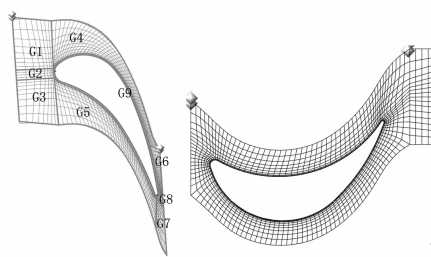
邹积国(1954—), 男, 研究员, 博士生导师;

韩万金(1942—), 男, 教授, 博士生导师.

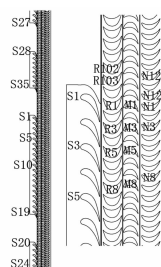
轮机效率的主要途径是降低叶型损失系数^[6-9]. 另一方面,汽轮机调节级的结构形式,关键参数如速比、局部进气率,复速级的反动度分配,复速级的动叶顶部相对间隙尺寸,复速级内非周期、非定常流动特点等均对汽轮机的性能产生影响^[10]. 本文研究的速度级,动叶接近于纯冲动式,转向叶片采用一定的反动度. 采用数值模拟的手段,对某寇蒂斯汽轮机复速级流场进行研究,围绕各列叶栅出口的均匀性和压力分布特点进行了重点讨论,这些是可能引起流动非定常效应的重要因素. 非喷嘴区域的存在严重影响到每个叶片的载荷分布,动叶经过喷嘴区域时各个动叶片的受力状态也发生较大的变化,每个叶片的气动力矩显著变化,这些都是汽轮机调节级在设计时应该着重考虑的因素.



(a) 几何模型



(b) 叶栅网格特点



1.05 左右. 气流经过静叶叶栅时, 沿着收敛的流道压力逐渐降低, 马赫数逐渐增加, 在喉部位置马赫数没有达到最大, 而是在斜切三角形区域靠近叶片背弧侧马赫数达到最大, 形成流动局部膨胀较剧烈的现象, 对应位置的压力最低, 经过该膨胀区域后, 流体被压缩, 速度降低, 压力有所提高.

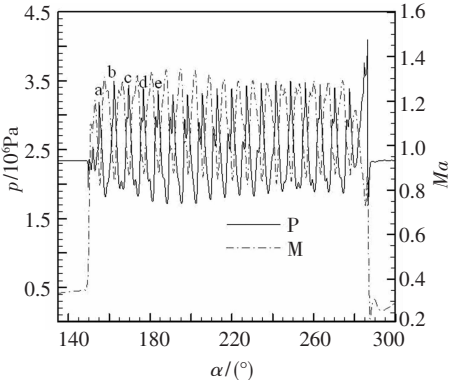


图2 第一级静叶、动叶交界面平均半径处静压、马赫数沿周向的分布(局部放大)

在第一级动叶出口, 气流压力沿周向发生波动的幅度减弱了许多(图3). 一方面, 静叶出口不均匀流动在动静叶之间的空间会有一定的均化作用; 另一方面, 在动叶流道内部, 不均匀的流体将继续掺混而具有进一步均化的趋势. 气流经过第一级动叶流道, 压力面和吸力面边界上新生成的附面层逐渐发展、饱满, 最后在尾缘附近脱落而形成动叶尾迹流动, 导致喷嘴区域第一级动叶出口

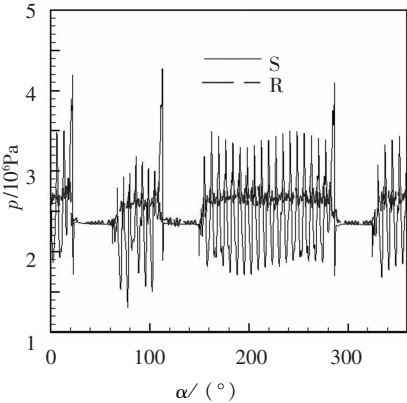


图3 第一级静叶、动叶出口压力沿周向的波动比较

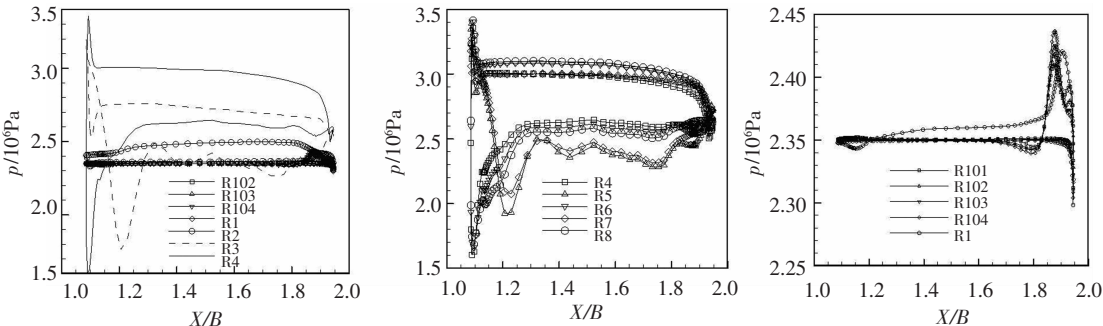


图4 第一列动叶中径压力沿叶型的分布

参数以尾迹为周期的起伏波动现象. 动叶出口相对速度是亚音速的, 不存在局部加速引起的过膨胀现象, 因此, 其低压区是尾迹的压力亏损引起的, 低压区形成的机理与静叶的完全不同.

3 第一列动叶气动负荷分析

比较图4(a)中 R1 ~ R4 这 4 个叶片的压力分布情况可以看出, 在 R1 右侧的喷嘴区域, 动叶片负荷逐渐增大达到正常的工作负荷, 在 R1 左侧的非喷嘴区域, 叶片负荷迅速减小, 叶片吸力侧到压力侧的压差基本为零. 结果表明, 随着转子的转动, 动叶片将逐渐进入喷嘴区域, 受到喷嘴高速喷出的气流的冲击作用, 在接触高速气流后的2 ~ 3 个动叶节距内, 动叶片的气动负荷才基本达到正常工作的负荷状态.

对于尺度较大的喷嘴组, 其叶片数折算到整圈后是 50, 而动叶片数为 104, 静叶片数和动叶片数的比例接近 1:2, 意味着该喷嘴组的一个静叶流道对应着 2 个动叶流道. 对于第一列动叶, 当一个叶片运动至静叶的尾缘附近时, 相邻的另一个动叶则运动到静叶流道中部附近. 实际计算采用定常方式, 叶片 R4、R6 所对应的空间位置较好地切分了静叶流道的势流区, 如图4(b)所示. 这两个叶片前缘附近的压力侧, 相对滞止后的气体速度变化不明显, 气体在向下游流动过程中压力迅速降低到接近压力面正常工作压力并在很大范围内基本维持不变, 其前缘附近的吸力侧, 气流相对速度较高, 基本上是整个动叶流道速度最高的位置, 因此动叶前缘附近的吸力侧压力较低. 对于 R3 和 R5 这两个叶片, 其前缘处于速度相对较低的位置, 而主流所具有的高速低压区扫过了吸力侧前部稍后的位置, 使压力偏低. 图4(c)给出了非喷嘴区动叶的压力分布情况, 在动叶出口的吸力侧, 叶型压力先是略有降低, 然后迅速增加, 叶型吸力侧受到的合力大于叶型压力侧受到的合力, 表明非喷嘴区域, 大部分动叶片消耗功.

4 结 论

1) 对于低反动度速度级, 由于后续各列叶栅几何通道的束缚作用, 从每个喷嘴组流出的流体散射作用不强烈, 在边界上基本只影响了附近的一个叶栅流道. 后续叶栅特有的几何形状使流体发生多次折转, 高速区域基本局限在各喷嘴出口以后的轴向空间, 流动的主体方向是沿着轴向进行的.

2) 动叶由非喷嘴区域进到喷嘴区域后受到高速流动冲击, 超音速气流流经调节级喷嘴流道后交替出现了尾迹低速区、主流过膨胀低压区等, 是引起下游动叶受力状态发生较大变化的重要因素.

3) 动叶片逐渐进入喷嘴区域, 在喷嘴高速喷出气流的冲击下, 要经过大约两个静叶喷嘴后, 气动负荷才能达到正常工作状态. 非喷嘴区域, 大部分动叶片消耗功.

参考文献:

- [1] LIEUTENART O L. Curtis turbine design[J]. Journal of the American Society for Naval Engineers, 2009, 23(2): 31-458.
- [2] 刘顺隆, 冯永明. 一个典型舰船动力涡轮三维粘性流动的数值分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(6): 617-621.
- [3] ENSIGN P E. Description and Test of 27-inch Curtis Turbine for 50-Foot U. S. Navy cutter[J]. Journal of the American Society for Naval Engineers, 2009, 19(5):

927-932.

- [4] 刘子亘, 刘建成, 梅雪艳, 等. 船用汽轮机变工况超临界与超流问题的研究[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(6): 447-450.
- [5] 冯永明, 刘顺隆. 舰船燃气轮机变几何动力涡轮三维粘性流场的数值分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(5): 580-585.
- [6] BURD S W, SIMON T W. Flow measurements in a nozzle guide vane passage with a low aspect ratio and end-wall contouring[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(4): 659-670.
- [7] SORANNA F, CHOW Y C, KATZ J. The effect of inlet guide vanes wake impingement on the flow structure and turbulence around a rotor blade[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 82-96.
- [8] KAPTEIJN C, AMECKE J. Aerodynamic performance of a transonic turbine guide vane with trailing edge coolant ejection: Part I—Experimental approach[J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(3): 519-529.
- [9] CHOW Y C, UZOL O, KATZ J. On the Flow and Turbulence Within the Wake and Boundary Layer of a Rotor Blade Located Downstream of an IGV[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo. Atlanta: [s. n.], 2003: 2003-GT38599.
- [10] 刘顺隆, 冯永明, 刘 敏, 等. 船用燃气轮机动力涡轮可调导叶级的流场结构[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 120-124.

(编辑 杨 波)

(上接第 1099 页)

- [30] JOHNSON A C, HAYES S A, JONES F R. An improved model including plasticity for the prediction of the stress in fibres with an interface/interphase region[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(2): 263-271.
- [31] NATHA R B, FENNERA D N, GALIOTIS C. The progressive approach to interfacial failure in carbon reinforced composites: Elasto-plastic finite element modeling of interface cracks[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(9): 929-943.
- [32] ZHONG Wen, PAN Ning. A computer simulation of single fiber pull out process in a composite[J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37(21): 1951-1965.
- [33] HAYES S A, LANE R, JONES F R. Fibre/matrix stress transfer through a discrete interphase. Part 1: Single-fibre model composites[J]. Composites Part A:

Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(3/4): 379-389.

- [34] KIRITSI C C, ANIFANTIS N K. Load carrying characteristics of short fiber composites containing a heterogeneous interphase region[J]. Computational Materials Science, 2001, 20(1): 86-97.
- [35] ASH J T, CROSS W M, SVALSTAD D, *et al.* Finite element evaluation of the microbond test: Meniscus effect, interphase region, and vise angle[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(5): 641-651.
- [36] SUN W, LIN F. Computer modeling and FEA simulation for composite single fiber pull-out[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2001, 14(4): 327-343.

(编辑 张 红)