

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.005

工业汽轮机调节级部分进汽瞬态数值研究*

周立明¹, 施培丽², 初 鹏¹, 李宏福¹, 隋永枫^{1,3}

(1. 杭州汽轮机股份有限公司 工业透平研究院, 浙江 杭州 310022;

2. 浙江大学 航空航天学院, 浙江 杭州 310058; 3. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对采用喷嘴调节的汽轮机调节级效率和安全性问题, 基于时均的N-S方程, 采用六面体结构化网格和有限容积法, 对某机组调节级内部流动进行了数值计算。给出了不同工况下调节级内部压力和速度分布图, 分析了4阀开和3阀开工况下调节级内部流动。给出了动叶旋转一周扭矩的变化, 并将非定常扭矩进行了傅里叶变换, 得到了频谱图。研究表明, 部分进汽使调节级内部流动不均匀, 4阀开, 动叶所承受最大瞬时扭矩是进汽弧段平均扭矩的2.2倍, 3阀开, 动叶所承受最大瞬时扭矩是进汽弧段平均扭矩的1.8倍, 这可以为调节级动叶安全性校核提供参考; 频谱图显示, 动叶受到与转速相关的低频激振力; 3阀开工况下调节级的效率比4阀开工况下降低7%。

关键词: 汽轮机; 调节级; 数值模拟; 周向不均匀; 安全性

中图分类号: TK26; TH122 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)10-1258-05

Numerical simulation of unsteady flow in the control stage of an industry steam turbine under partial admission condition

ZHOU Li-ming¹, SHI Pei-li², CHU Peng¹, LI Hong-fu¹, SUI Yong-feng^{1,3}

(1. Industrial Turbine Academy Turbomechanical Institute, Hangzhou Steam Turbine Co., Ltd., Hangzhou 310022,

China; 2. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of the efficiency and safety of the control stage in a steam turbine. Based on RANS with the application of structural hexahedron mesh and finite volume method, the flow field of the control stage in a steam turbine was calculated. Pressure contour and velocity contour were performed to analysis the flow field of the control stage under different conditions. Torque of the blade rotating one circle were performed. Amplitude-frequency map of the torque was obtained according to the FFT analysis. The results indicate that the flow field is nonuniform under partial admission condition. The maximum torque of the blade is 2.2 times larger than that in the flow area under four valves open condition, while under three valves open condition the maximum torque of the blade in the blocked area is 1.8 times larger. It can help to check the safety of the blade. Spectrum analysis indicates that the typical low frequency of the exciting force is caused by the rotating speed of the blade. The efficiency of the control stage under three valves open condition is 7% lower than that under four valves open.

Key words: steam turbine; control stage; numerical simulation; nonuniform; safety

0 引 言

工业汽轮机通常采用调节级来控制汽轮机组的负荷, 调节级的气动性能直接影响着机组的效率和运

行安全。部分进汽量越大, 内部流动越复杂, 流场和气动参数的周向分布也越不均匀。在汽轮机运行过程中有调节级叶片断裂事故发生。叶片事故的发生显然与调节级部分进汽口附近流动的不均匀性有直

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 浙江省科学技术厅优先主题重大工业资助项目(2008C01063)

作者简介: 周立明(1970-), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 主要从事汽轮机设计、开发和管理等方面的研究。E-mail:zhoulm@htc.cn

接关系。然而在汽轮机设计中往往只是根据经验估算,并未详细计算和评估部分进汽所引起的流动不均匀性对机组性能的影响,以及随之而产生的叶片安全性问题。

国内蔡颐年^[1]对调节级部分进汽进行研究;隋永枫等^[2]通过对某已出厂并安全运行的机组的可调侧向进汽口后半段和下游的静动叶栅进行整圈的全三维数值模拟,发现侧向进汽会导致下游级组扭矩和流量沿周向分布不均匀,通流能力下降,级组效率降低。徐星仲等^[3]对部分进汽状态时的10个动叶的三维流动进行了数值模拟,发现作用在同一叶片上的扭矩经历了周期性的变化,且幅值变化剧烈,在某些时刻甚至出现负扭矩的情况。屈焕成等^[4]对300 MW汽轮机调节级在不同工况下的运行进行了数值模拟研究,发现进汽段下游动叶通道静压分布合理,内部流动顺畅,而非进汽段动叶通道内部流动紊乱,熵增明显,部分进汽带来的损失较大。晏鑫等人^[5-6]开展了大功率汽轮机调节级段的三维数值分析,给出了部分进汽工况下的调节级内弧段损失和调节级段损失发展和演化的机理。

Bohn等人^[7]通过实验研究了调节级的周向非均匀特性和衰减特性。Lampart^[8]采用二维数值计算模型对调节级进行了整周气动分析,采用傅里叶变换得到动叶所受的力。瑞典皇家学院的Jense F等^[9]对调节级部分进汽相关工作机理进行了理论和数值研究,发现动叶在部分进汽状态下,承受比全周进汽时大2.5倍的非定常力。

为了更好地了解汽轮机调节级在不同运行工况下的三维流动状况并分析其气动特性,本研究采用RANS方法和结构化网格,对某汽轮机组的调节级进行三维流动瞬态分析,通过对速度场、压力场以及动叶片扭矩的考察,研究部分进汽对机组气动特性及叶片载荷的影响,从而为汽轮机通流设计提供一定的参考和指导。

1 物理模型及边界条件

所需研究的调节级组叶栅模型如图1所示,该模型由4个喷嘴组和动叶栅组成,包含58片静叶和65片动叶,上、下喷嘴组之间有5个静叶通道堵塞,每个喷嘴组有两个进口堵塞。

本研究采用商业软件CFX进行计算,湍流模型为标准 $\kappa-\varepsilon$ 两方程模型,采用二阶精度离散格式和时间推进的求解方法,工质为IF97水蒸汽模型。瞬态计算时间步长为 1×10^{-5} s。

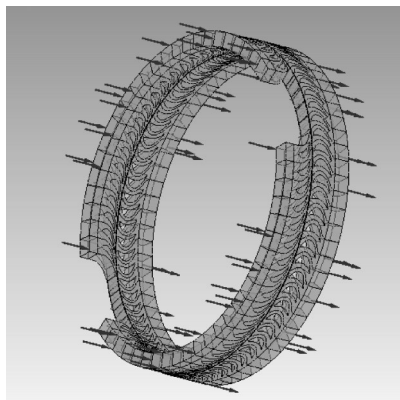


图1 调节级组叶栅几何模型

为了直观地分析不同工况下部分进汽度对调节级性能的影响,本研究分别模拟了4阀进汽和3阀进汽两种工况。进、出口边界条件如表1所示。

表1 计算工况边界条件

工况	入口 总压 /bar	入口 总温 /K	出口 静压 /bar	转速 /(r·min ⁻¹)
4阀进汽(设计工况)	94.88	728.15	59.87	10 872
3阀进汽(部分负荷况)	101	713.15	49.95	103 54

2 网格无关性验证

本研究采用Turbogrid模块对调节级模型划分结构化网格,叶片附近的网格划分情况如图2所示。由于本研究计算规模过大,在进行瞬态计算之前,笔者针对4阀进汽稳态工况进行了网格无关性的验证计算,采用粗细两套网格进行稳态计算。粗网格单元数量约为 5.6×10^5 ,节点数量约为 7.2×10^5 ;细网格单元数量约为 1.08×10^6 ,节点数量约为 1.34×10^6 。粗细两套网格的计算结果如表2所示。结果表明吻合得很好:流量和出口温度的差别在0.5%以内,满足工程的要求。因此,在之后的瞬态数值模拟中笔者均采用较粗的网格,以节省计算时间。

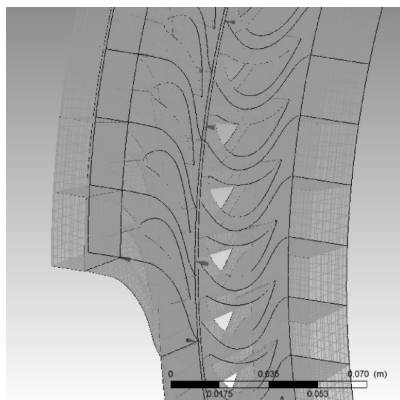


图2 叶片附近的网格划分

表2 不同密度网格计算结果的比较

	流量/(kg·s ⁻¹)	出口温度/K
粗网格	77.76	661.86
细网格	78.03	660.68
相对误差/(%)	0.35	0.18

3 计算结果

本节对汽轮机调节级部分进汽进行了全三维的瞬态数值模拟,对不同工况下的流速、压力、动叶所受扭矩以及机组气动性能进行了分析。

3.1 流速分布

不同工况下的流场速度云图和流线分布分别如图3、图4所示。可见,4阀进汽时,调节级下游动叶栅通道内的流场较为理想,流速分布比较均匀;而在3阀进汽时,动叶栅通道内部的流速分布存在明显的空间不均匀性,在闭合阀下游的动叶通道内流线很少,存在大尺度湍流涡,增加了流动损失。此外,对于单个动叶而言,处于开、闭阀交界处的叶片两侧流速变化最大。由此推测,该处叶片受到流场不均匀性的影响也最大。

3.2 压力分布

为了更清楚直观地描述流场空间不均匀性对下游动叶的影响,本小节对压力场进行考察。不同工况下的压力分布云图如图5所示。由图5可见,与4阀进汽工况相比,3阀进汽对应的压力分布周向不均匀性更为显著,主要表现在以下两个方面:①3阀进汽时,闭

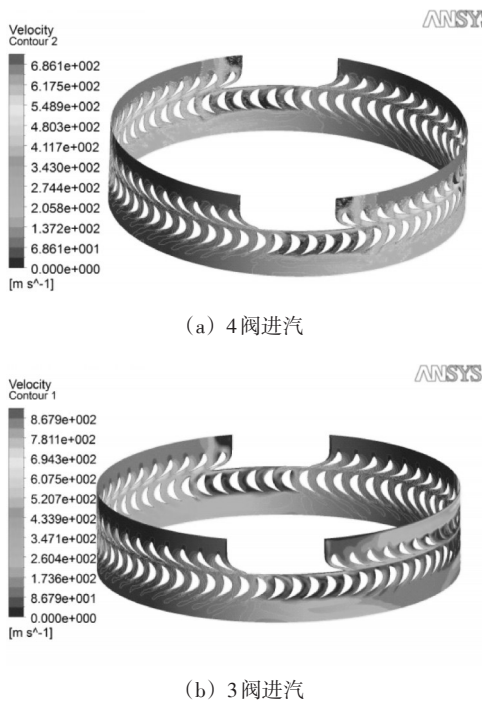
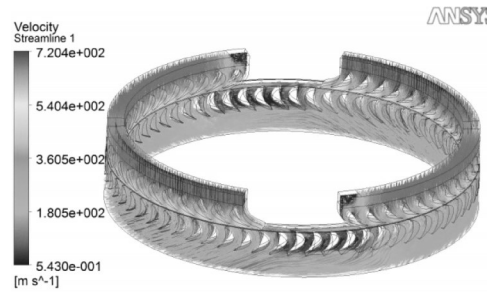
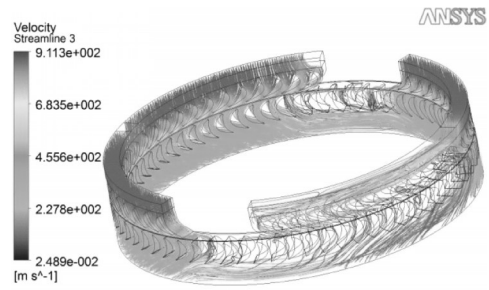


图3 不同工况下的动静叶栅速度分布云图

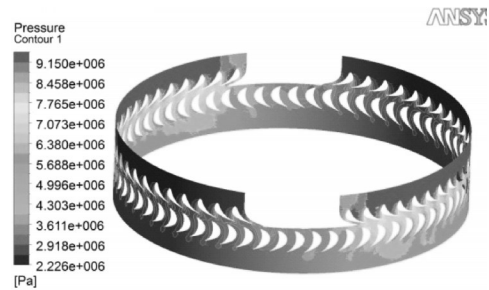


(a) 4阀进汽

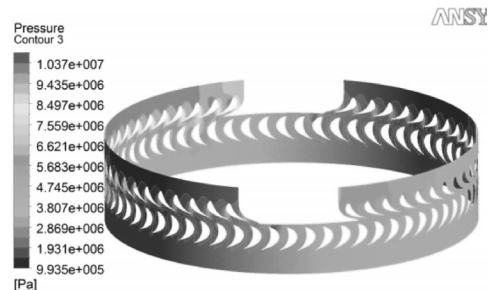


(b) 3阀进汽

图4 不同工况下的动静叶栅流线分布



(a) 4阀进汽



(b) 3阀进汽

图5 不同工况下的动静叶栅压力分布云图

阀下游的大面积区域均为低压区,即与4阀进汽相比3阀进汽的低压区更大;②3阀进汽时,处于开闭阀交界处的叶片压力面和吸力面的压差比4阀进汽时更大。所以,3阀进汽工况对动叶结构强度的要求更高。

3.3 动叶扭矩

4阀进汽和3阀进汽工况下,某只动叶片在旋转一周内扭矩的时程曲线分别如图6、图7所示。笔者对于这两种工况进行研究,动叶在进入非进汽段时出现扭矩

跳跃,对于4阀开工况最大扭矩达到308 N·m,最小扭矩-180 N·m,对于3阀开工况最大扭矩达到410 N·m,最小扭矩-203 N·m。动叶进入非进汽弧段的扭矩振荡比较剧烈,叶片承受较大的交变应力。

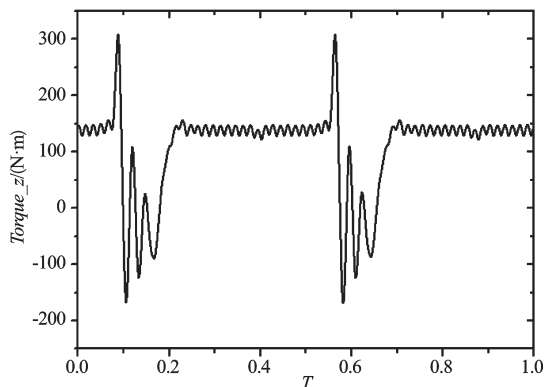


图6 4阀进汽工况下一个时间周期内动叶扭矩

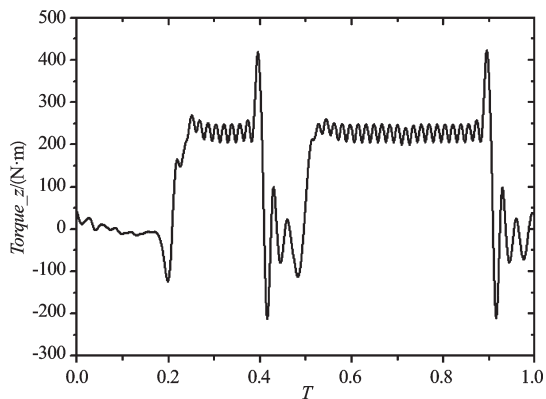


图7 3阀进汽工况下一个时间周期内动叶扭矩

4阀开,动叶所承受最大瞬时扭矩是进汽弧段平均扭矩的2.2倍,这表明,动叶所承受最大瞬时应力是进汽弧段的2.2倍;3阀开,动叶所承受最大瞬时扭矩是进汽弧段平均扭矩的1.8倍,这表明,动叶所承受最大瞬时应力是无部分进汽时的1.8倍。这可以为笔者进一步研究由于部分进汽引起的调节级应力以及强度问题提供参考。

随时间变化的动叶扭矩经过傅里叶变换得到的频谱图如图8、图9所示。4阀开得到362.4 Hz、724.8 Hz、1 087.2 Hz等低频振动。4阀开时动叶转速为10 872 r/min,频率应为181.2 Hz,由于调节级两个弧段完全对称,叶片在旋转一周内受到2次激振,最小的激振频率是转速的2倍即362.4 Hz。叶片还受到倍频激振,如724.8 Hz、1 087.2 Hz即为转速的4倍频和6倍频激振。3阀开得到172.5 Hz、345 Hz、517.5 Hz等

振动,3阀开时转速为10 354 r/min,频率为172.5 Hz。这说明动叶旋转一周激振一次,最低激振频率等于转速频率,同样叶片还受到转速的倍频激振,如345 Hz、517.5 Hz即为转速的2倍频和3倍频激振等振动。

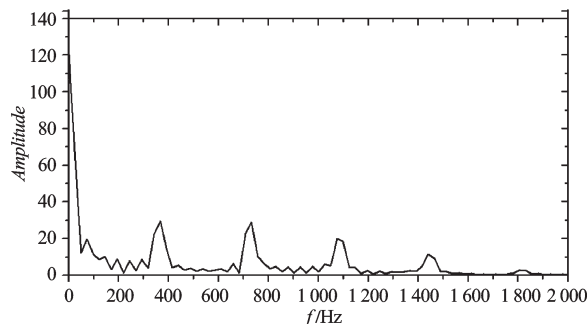


图8 4阀开启动叶扭矩频谱图

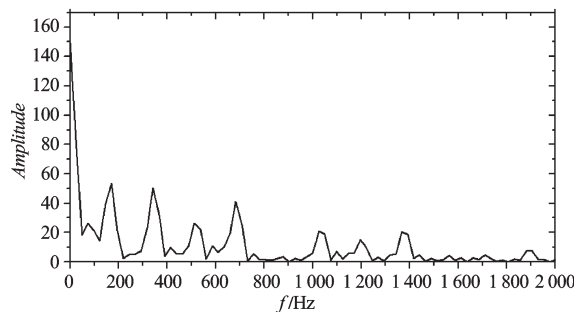


图9 3阀开启动叶扭矩频谱图

3.4 气动性能

4阀开和3阀开工况下的调节级的出功和效率情况如表3所示,可以看出:在流量相差不大的情况下,3阀开情况的效率比4阀全开降低了7%左右。这表明,由于部分进汽、汽流不均匀引起的气动损失比较大。

表3 不同工况下的气动性能

	流量 /(kg·s ⁻¹)	等熵焓降 /(kJ·kg ⁻¹)	输出功率 /kW	总静效率 /(%)
4阀进汽	76.82	132.65	10190.2	77.2
3阀进汽	69.81	189.83	13252.0	70.5

4 结束语

本研究采用κ-ε两方程模型以及结构化网格,对汽轮机调节级在多工况下的三维流场进行了瞬态计算与分析,得到主要结论如下:

- (1) 与4阀进汽工况相比,3阀进汽的流场沿周向

(下转第1273页)

本文引用格式:

周立明,施培丽,初鹏,等. 工业汽轮机调节级部分进汽瞬态数值研究[J]. 机电工程,2014,31(10):1258-1261,1273.

ZHOU Li-ming, SHI Pei-li, CHU Peng, et al. Numerical simulation of unsteady flow in the control stage of an industry steam turbine under partial admission condition[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(10): 1258-1261, 1273. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>