压气机动叶 CLOCKING 效应对叶片气动负荷的影响

姚宏伟，颜培刚，韩万金

（哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院，150001 哈尔滨，Hanwanjin@hit.edu.cn）

摘　要： 为研究某型燃气轮机中间三级轴流压气机第二级动叶片的 CLOCKING 效应及其对静叶片气动负荷的影响，采用基于谐函数（harmonic）的非定常计算方法对三级压气机进行数值模拟，分析流场尾迹输运以及叶片非定常气动负荷. 计算结果表明，动叶片处于不同 CLOCKING 位置时，非定常流场具有截然不同的熵输运特点，因而在不同的气流激振力作用下各列叶片气动负荷差别较大. 在 CLK2 位置上，静叶片气动力始终为正值，且波动幅值明显比其它位置小，气动力方向角波动范围最小，且气动力矩波动幅值和方向改变次数最少，具有最稳定的气动负荷.

关键词： 压气机；叶片；CLOCKING 效应；气流激振力；气动负荷

中图分类号： V231.3　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 0367－6234(2012)01－0111－04

Effect of rotor CLOCKING on blade aerodynamic load in compressor stages

YAO Hong-wei, YAN Pei-gang, HAN Wan-jin

(School of Energy and Science Engineering, Harbin Institute of technology, 150001 Harbin, China, hanwanjin@hit.edu.cn)

Abstract: The field of three stages in axial compressor for a gas turbine was simulated by the unsteady calculation method based on harmonics. The impact of CLOCKING effect of rotor blade in second stage on aerodynamic load of static blade in mid stage was investigated. By analyzing the wake transportation of flow field and the unsteady aerodynamic loads of the blades, the result shows that the different CLOCKING of R2 rotor blade corresponds to different entropy transportation characteristic, so the aerodynamic load discrepancy of each blade row is significantly obvious under different flow induced force. When at the CLK2 position, the aerodynamic force of static blade is always positive. In addition, its amplitude of fluctuation is smaller than that of the other location, the range of direction angle is also small, and the amplitude of fluctuation for aerodynamic torque and the changing number of direction are smaller than those of other locations, therefore the most stable aerodynamic load is obtained.

Key words: compressor; blade; CLOCKING; excitation force; aerodynamic load

燃气轮机内部的非定常流动对其性能参数具有重要的影响，研究非定常流动对燃气轮机性能的影响因素，准确评估燃气轮机的气动性能，具有重要的作用[1－2]. 燃气轮机叶片的损坏绝大多数是由于叶片振动产生的应力过大所致，影响叶片应力的主要因素是叶片振动特性和非稳态气流激振力特性[3－4]. 有效地控制气流激振力，可以降低叶片的事故率，延长机组寿命，因此，保证叶片具有良好的振动特性是降低叶片动应力的主要途径[5－6]. 文献[7－12]对压气机 CLOCKING 效应对各列叶片附面层发展及损失产生的机理做了大量的研究，但研究主要集中在压气机的静叶片 CLOCKING 效应上，在数值模拟过程中通常采用具有小整数比的动、静叶片匹配数目，而对于实际机组中动静叶片数目不便约化的情况，以及动叶片 CLOCKING 效应的数值研究方面，文献还不多见.

本文对某型燃气轮机中间级轴流压气机进行了研究，其中间级静叶片在实际运行时出现根部严重断裂的现象，这一故障可以通过改变其上、下

收稿日期： 2010－12－13.
基金项目： 国家自然科学基金委创新研究群体（51121004）；
中国博士后基金（AUGA4100205011）.
作者简介： 姚宏伟（1965—），男，博士研究生；
韩万金（1942—），男，教授，博士生导师.

游动叶片的周向相对位置得到解决. 本文以动叶片 CLOCKING 效应为出发点,对叶栅流场进行非定常计算,研究叶片非稳态气流激振力的性质. 建立激振力计算模型,探索激振力特性随转子叶片不同相对位置的变化关系,探讨各排叶片在非定常气动负荷条件下的动力响应. 对三级轴流压气机流场进行了非定常数值模拟,研究中间级动叶 CLOCKING 效应对静叶片气动负荷的影响. 在保证三级压气机真实的叶片数目的条件下,采用基于 harmonic 的频域变化方法对全三维 NS 方程进行数值求解,分析流场熵输运特性以及各列叶片非定常气动负荷.

1 数值方法及验证

采用 NUMECA 公司推出的 FINE™/Turbo 软件包的系列模块. 方程的空间离散采用二阶精度中心差分格式,湍流模型采用 SA 模型. 对时均方程组,进口给定总温、总压和气流角,出口给定背压. 交界面采用 2D 无反射边界条件.

叶片约化方法是比较成熟的计算方法. 在上、下游叶片数目得到合理约化的条件下,该方法的计算结果具有较高的可信度. 为了进一步验证 harmonic 非定常计算方法的可靠性,本文以某重型燃气轮机压气机中间三级叶型为研究对象(图 1),对叶片数进行约化(见表 1). 分别采用 harmonic 和 Scaling(叶片约化)两种方法对 2D 流场进行非定常计算,比较分析结果的差异,图 2 为计算网格.

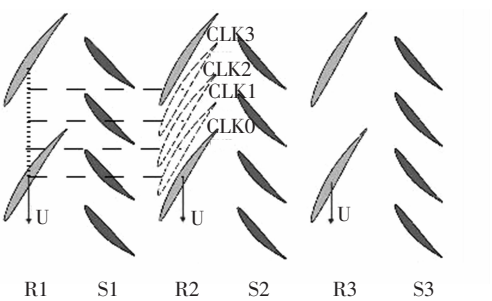


图 1 压气机叶型

表 1 三级压气机约化叶片数

叶片	R1	S1	R2	S2	R3	S3
数目	64	128	64	128	64	128

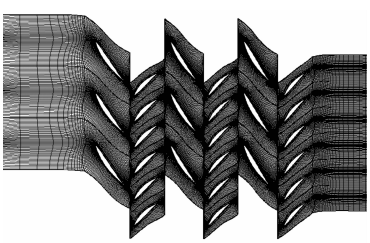


图 2 计算网格

在计算过程中,进口边界条件给定总温 657.18 K、总压 1 252 098 Pa,周向气流角 38.17°,出口边界条件通过考虑径向平衡方程,给定平均静压,静压从 1 200 kPa 提高至 1 750 kPa,其中设计点静压为 1 520 kPa,对应质量流量 625 kg/s. 动叶旋转边界给定转速 3 000 r/min.

两种计算方法得到的叶片型面静压的时均值和非定常波动的幅度见图 3,其中 Max 和 Min 分别表示脉动值的最高值和最低值. 由图 3 可以看到,harmonic 方法计算得到的各列叶片交接面位置的熵分布基本上都是连续的,说明在非定常计算过程中的转/静交接面参数传递方面,harmonic 具有较高的计算精度. 同时,观察 S2 叶片型面静压,与 scaling 方法计算的一个周期内静压非定常波动的最高值和最低值相比,尽管 harmonic 方法计算的非定常波动幅度更大,但是差别并不明显,且两者的静压时均值曲线完全吻合,因此采用 Harmonic 方法计算的叶片气动力和气动力矩的结果是可信的.

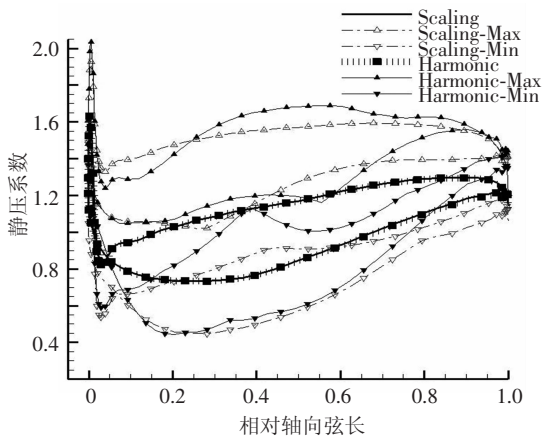


图 3 两种计算方法的叶片型面静压系数时均与脉动值

2 计算模型

本文以燃气轮机中间三级压气机为研究对象,在不改变各列叶片数的前提下,研究中间级动叶片的 CLOCKING 效应对静叶片气动负荷的影响. 各列叶片真实数目见表 2.

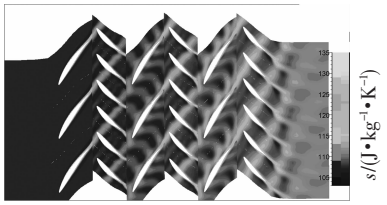
表 2 三级压气机真实叶片数

叶片	R1	S1	R2	S2	R3	S3
数目	64	132	64	130	64	132

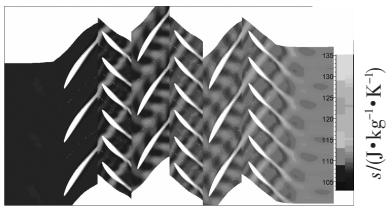
2.1 熵输运分析

图 4 给出了 R2 在 CLK0 和 CLK2 位置上熵的输运过程,取某一瞬时流场进行比较、分析. 由图 4 可以看到,当 R2 在 CLK0 位置上时,R1 的尾迹和势流输运到 S1 流道,S1 叶片吸力面附近气流的加速过程使得尾迹被拉伸,静叶边界层的作

用使得尾迹被扭曲，但是在流向逆压梯度下并没有发生耗散. R2 在 CLK0 位置出现一个最重要的现象，就是 R1 的尾迹和 S1 的部分尾迹在 S1 尾缘发生掺混后恰好输运至 R2 的前缘，在一个周期内始终被 R2 前缘切割，因此 R1 的尾迹主要在 R2 的边界层中耗散. 在 R2 吸力面一侧，R1 部分尾迹与 S1 尾迹掺混，形成 R2 的尾迹，并向下游继续输运，因此 S2 中熵的输运主要表现为单个较强尾迹不断被切割，并向下游积聚、耗散的过程.



(a) CLK0 ($t = T/2$)



(b) CLK2 ($t = T/2$)

图 4　两个 CLOCKING 位置的熵输运云图

当 R2 在 CLK2 位置时，R1 的部分尾迹和 S1 的尾迹掺混后进入 R2 的流道中部，并输运至 R2 的出口，R2 的前缘交替切割 S1 的尾迹和势流. 由于 R2 的出口既有 R1 和 S1 的尾迹，又有 R2 的尾迹，因此 S2 中熵的输运反映了多个尾迹的输运过程. 与 CLK0 位置相比，被 S2 叶片切割并向下游积聚和耗散的多个尾迹强度明显减小，尾迹输运过程中的扭曲和变形都有所减弱，因此 R2 的尾迹在经过 S2 后，直接进入 R3 流道的中部.

从以上分析可以看出，R2 处于不同的 CLOCKING 位置对应着截然不同的尾迹输运特点，导致势流、尾迹和叶片边界层发生相互作用的特点也明显互不相同，因此由尾迹和势流引起的压力波动必然会清晰地反映在叶片气动负荷的非定常波动上. 结合尾迹和势流输运过程中的瞬态流场，深入分析作用在叶片上的非定常气动力和力矩，有助于清楚地了解该三级压气机叶片气流激振力的作用机制.

2.2　叶片非定常气动力时域分析

为进一步研究三级压气机中动叶 CLOCKING 效应对叶片气动负荷的影响，对各列叶片非定常气动力和气动力矩进行时域分析，比较转子叶片在不同 CLOCKING 位置时各列叶片气动力系数、气动力矩系数以及气动力的作用角度非定常波动幅度及变化次数. 以压气机的轴向和动叶旋转的反方向为参考坐标系的正方向，对叶片进行受力分析，如图 5 所示.

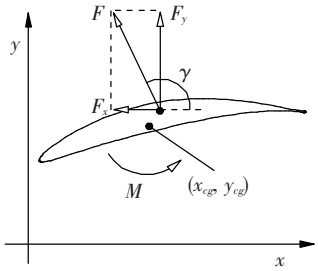


图 5　叶片受力分析

$$\vec{F}(t) = \vec{F}_x(t) + \vec{F}_y(t),$$

$$\vec{F}_x(t) = -\Delta h \oint_L p(t)\,\mathrm{d}\vec{y},$$

$$\vec{F}_y(t) = \Delta h \oint_L p(t)\,\mathrm{d}\vec{x},$$

$$\vec{M}(t) = \Delta h \oint_L p(t)\left[(x - x_{cg})\,\mathrm{d}\vec{x} + (y - y_{cg})\,\mathrm{d}\vec{y}\right],$$

$$\gamma = \arctan(\vec{F}_y / \vec{F}_x),$$

$$Cp = (p - p_0)/(p_0^* - p_0).$$

其中，$\vec{F}$ 为气动力，$\vec{M}$ 为气动力矩，p 为当地静压，p_0 为叶栅进口的平均静压，p_0^* 为叶栅进口的平均总压.

图 6 给出了静叶 S2 的气动负荷随时间的变化. $F(t)/\bar{F}$ 和 $M(t)/\bar{M}$ 分别表示气动力系数和力矩系数. 从图 6 可以看出，在 CLK0 位置上，$0 \sim 0.3T$ 时间内，气动力的两个分量为负值，表示与规定的正方向相反，此时气动力方向角也处于第四象限. 这表明在该时间段内，叶片吸力面的压力高于压力面的压力，叶片的受力与常规的压力面指向吸力面的方向相反. 类似的现象同样发生在 CLK1 和 CLK3 两个位置上.

在 CLK2 位置上，静叶 S2 的气动力始终为正值，且波动幅值明显的比其他 3 个位置的小，气动力方向角的波动范围也较小，表明在 CLK2 位置上，静叶 S2 具有更稳定气动的气动负荷，其气动负荷受尾迹和势流非定常干扰的影响较小，这有利于延长 S2 的疲劳寿命.

在非定常条件下，叶片排之间存在显著的非定常干扰，上游叶片尾迹和势流不仅会对相邻下游叶片造成影响，甚至对更远的下游叶片造成干扰，因此第三列转子叶片 R3 与前两列转子叶片之间也会存在 Clocking 效应. 本文仅仅针对实际工程中出现问题的 S2 叶片进行计算，没有考虑其他各列.

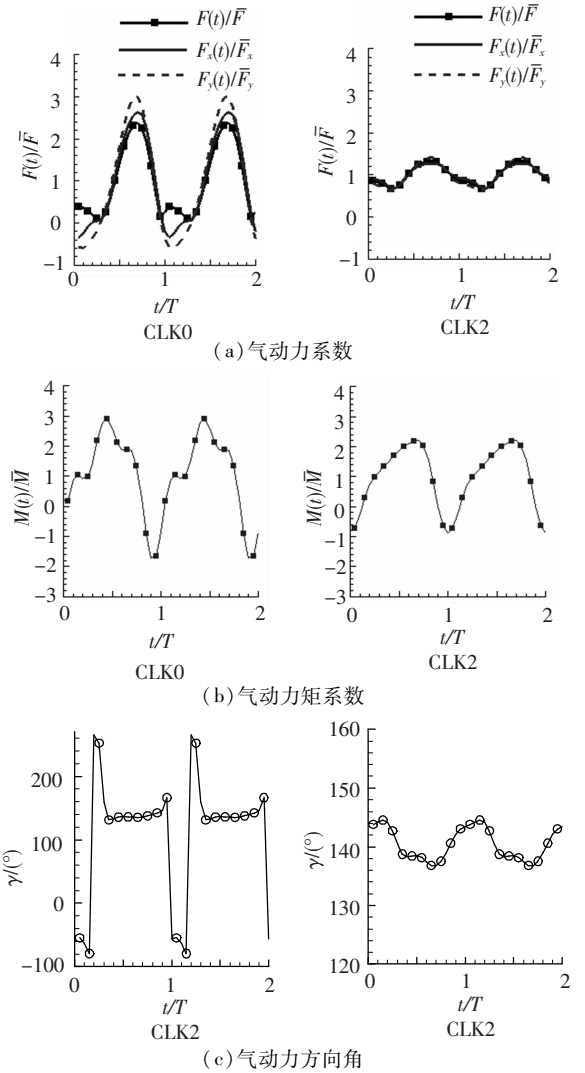


图 6 中间级静叶片 S2 非定常气动负荷

3 结 论

1)转子叶片不同 CLOCKING 位置对应截然不同的熵输运特点. 在 CLK0 位置,R1 的尾迹和 S1 的部分尾迹掺混后恰好输运至 R2 的前缘, S2 中熵的输运主要表现为单个较强的 R2 尾迹的输运过程. 在 CLK2 位置,R1 的尾迹和 S1 的部分尾迹掺混后进入 R2 的流道中部并输运至 R2 的出口,R2 的前缘交替切割 S1 的尾迹和势流,S2 静叶片中熵的输运反映了多个尾迹的输运过程,从而对应不同的气流激振力.

2)动叶片 R2 处于不同的 CLOCKING 位置时,会引起 R2 下游 S2 静叶片气流激振力显著的变化. 其中在 CLK2 位置上,静叶 S2 的气动力始终为正值,与其他位置相比波动幅值明显减小,气动力方向角的波动范围也较小,因此具有最稳定的气动负荷,这有利于减少对叶片 S2 的不利因素.

参考文献:

[1] MÜLLER L, MAILACH R, VOGELER K, *et al.* Unsteady blade coading with clocking in multistage axial compressors, part 2[J] Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(1): 36 – 45.

[2] NICOLE L K, PATRICK B L, SANFORD F. An experimental study of vane clocking effects on embedded compressor stage performance [J]. J Turbomach, 2010, 132(1): 1 – 10.

[3] JIA Huixia, VOGELER K. Effect of clocking on the unsteady rotor blade loading in a 1.5 stage low-speed axial compressor[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo. Montreal, Que, Canada: ASME, 2007: ASME Paper GT2007 – 27237.

[4] SANDERS A J, FLEETER S. Multi-blade row interactions in a transonic axial compressor, part II: rotor wake forcing function & stator unsteady aerodynamic response[C]//[S.l.]: ASME,2001: ASME Paper 2001-GT-0269.

[5] LEE Y T, FENG J Z. Potential and viscous interactions for a multi-blade-row compressor[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003. Oil and Gas Applications; Structures and Dynamics; Scholar Lecture. Atlanta, GA, United states: ASME, 2003: ASME Paper GT2003 – 38560.

[6] YANG Haitao, HUANG Hongyan, FENG Guotai. Numerical simulation of rotor clocking effect in a low speed compressor[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(3): 129 – 137.

[7] MAILACH R, LEHMANN I, VOGELER K. Periodical unsteady flow within a rotor blade row of an axial compressor-part II: wake-tip clearance vortex interaction [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air. Montreal, Que, Canada: ASME, 2007: ASME Paper GT2007-27211.

[8] 周晓勃, 周盛. 尾流撞击效应对轴流压气机下游叶排涡面的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 608 – 614.

[9] 刘焱, 陆亚钧. 尾流撞击效应的一些探讨[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 182 – 185.

[10] 李绍斌, 苏杰先, 冯国泰, 等. 动静叶干扰下跨声压气机级性能与叶片型面静压研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1153 – 1160.

[11] SORANNA F, CHOW Y C, UZOL O, *et al.* The effects of IGV wake impingement on the boundary layer and the near-wake of a rotor blade[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo. Berlin, Germany: ASME, 2008: ASME Paper GT2008-50598.

[12] HE L, CHEN T, WELLS R G. Analysis of rotor-rotor and stator-stator interferences in multi-stage turbomachines[C]//ASME Int Gas Turbine Inst Publ IGTI. Amsterdam, Netherlands: ASME, 2002: ASMEPaper 2002-GT-30355.

(编辑 杨 波)