

DOI: 10.7652/xjtub201709021

非均匀进汽时迷宫密封汽流激振动力特性的研究

陈尧兴¹, 李志刚¹, 李军^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 100191, 北京)

摘要: 采用基于转子多频椭圆涡动模型和动网格技术的 URANS 方程求解方法, 研究了动、静叶干涉作用以及级间补汽导致的非均匀进汽温度和压力条件下叶顶迷宫密封汽流激振转子动力特性, 计算分析了进汽预旋比为 0.2、0.5、0.7 时叶顶迷宫密封转子动力特性系数, 并与均匀进汽温度和压力条件下迷宫密封转子动力特性系数进行了比较。研究表明: 密封转子稳定性随进汽预旋比的增加而降低; 非均匀和均匀进汽条件下迷宫密封腔室周向旋流强度和腔室压力分布的差异随进汽预旋比的增加而逐渐减小, 2 种进汽条件下密封转子动力特性系数之间的差异随进汽预旋比的增加而减小; 与均匀进汽相比, 进汽预旋比为 0.2 时非均匀进汽下迷宫密封交叉刚度至少降低 82.7%, 交叉阻尼至少增加 30.7%; 进汽预旋比为 0.5 时非均匀进汽下迷宫密封有效阻尼仅在涡动频率为 50~100 Hz 时较均匀进汽低 8.4%~12.4%; 进汽预旋比增加至 0.7 时, 非均匀和均匀进汽条件下迷宫密封转子动力特性系数基本相同。显然, 进汽预旋比较高时进汽均匀性对迷宫密封汽流激振转子动力特性系数的影响可以忽略。

关键词: 迷宫密封; 非均匀进汽; 汽流激振; 转子动力特性

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0145-08

Fluid Excited Rotordynamic Characteristics of Labyrinth Seal During Non-Uniform Inlet Flowing

CHEN Yaoxing¹, LI Zhigang¹, LI Jun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: The effect of non-uniform inlet flow temperature and pressure conditions due to stator/rotor interaction and supplementary steam on fluid excited rotordynamic characteristics of blade tip labyrinth seal was numerically investigated by unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) solution based on the multi-frequency elliptical orbit rotor whirling model and dynamic mesh technique. The rotordynamic coefficients of blade tip labyrinth seal were calculated at three different inlet preswirl ratios of 0.2, 0.5 and 0.7. The rotordynamic characteristics of the blade tip labyrinth seal were comparatively analyzed under the conditions of non-uniform and uniform inlet flow temperature and pressure. The obtained results show that the increasing inlet preswirl ratio weakens rotor stability of labyrinth seal; the discrepancies of the circumferential swirl strength and pressure under non-uniform inlet and uniform inlet conditions are gradually reduced with the increasing inlet swirl ratio, and the differences of rotordynamic characteristics under the

收稿日期: 2017-03-14。 作者简介: 陈尧兴(1992—), 男, 博士生; 李军(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376144)。

网络出版时间: 2017-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170710.1717.004.html>

two conditions are also reduced when inlet preswirl ratio increases. At least a reduction of 82.7% in cross-coupling stiffness K_{xy} , an increase of more than 30.7% in cross-coupling damping C_{xy} of the blade tip labyrinth seal under non-uniform inlet conditions are observed at inlet preswirl ratio of 0.2 compared with uniform inlet conditions. When inlet preswirl ratio increases to 0.5, the effective damping under non-uniform inlet condition is only 8.4%-12.4% lower than that of uniform inlet condition at whirling frequencies from 50 Hz to 100 Hz. The same rotordynamic coefficients of the blade tip labyrinth seal are captured for the non-uniform and uniform inlet conditions at inlet preswirl ratio 0.7, so the effect of the inlet flow condition on the rotordynamic characteristics can be omitted at higher inlet preswirl ratio.

Keywords: labyrinth seal; non-uniform inlet; fluid excitation; rotordynamic characteristics

迷宫密封结构简单、成本低廉,是透平机械中最常用的密封装置。随着透平机械向高压、高温度的发展,迷宫密封在减少流体泄漏的同时还会产生流体激振力,进而引发转子不稳定^[1]。

Picardo 等实验研究指出,迷宫密封在高压下产生的汽流激振易引起密封有效阻尼降低^[2]。Vannini 等的研究表明,袋型阻尼密封在高压下具有更加优良的转子动力特性^[3]。Mehta 等的实验表明,斜齿迷宫密封泄漏量较直齿迷宫密封减少了 10%,但具有相同的转子动力特性^[4]。

王世柱等计算分析了进汽预旋比对迷宫密封转子动力特性系数的影响^[5-6]。孙丹等指出,在密封进口布置防旋板结构可以明显提高迷宫密封的有效阻尼,进而增强转子系统的稳定性^[7]。钟明磊等指出,对于前后凸台的高低齿迷宫密封结构,去掉后凸台能提高转子稳定性^[8]。李志刚等指出,进口防旋板能够降低迷宫密封的进汽预旋比,进而改善迷宫密封转子动力特性,增强转子稳定性能^[9-10]。

透平机械叶顶密封是由动、静叶之间相互作用以及级间补汽等的作用,导致了迷宫密封进口的温度和压力具有非均匀性,而目前针对迷宫密封非定常汽流激振转子动力特性系数的研究都认为进口的温度和压力是均匀的。因此,本文针对典型透平级动叶叶顶迷宫密封结构,考虑动、静相互作用和级间补汽引起的非均匀进口温度和压力,基于转子多频椭圆涡动模型以及动网格技术^[6],研究了 3 种预旋比条件下非定常汽流激振转子动力特性系数的变化,并与均匀进口温度、压力条件下的计算结果进行了比较,为更好地掌握迷宫密封非定常汽流激振转子动力特性系数的影响机制提供参考。

1 计算模型和数值方法

图 1 给出了某透平级子午流道图和动叶叶顶迷

宫密封的计算网格。为了获得动叶叶顶迷宫密封在周向的非均匀特性,采用透平级整圈计算模型,同时采用了多块结构化计算网格,其中静叶网格节点数为 386.8 万,动叶网格节点数为 312 万,叶顶迷宫密封网格节点数为 544 万。表 1 给出了整圈透平级计算的数值方法和边界条件。表 2 给出了叶顶迷宫密封的几何参数。

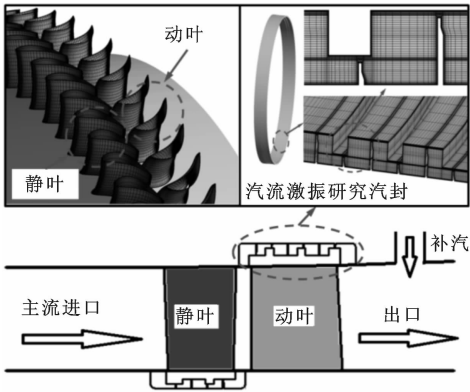


图 1 透平级子午流道图和动叶叶顶迷宫密封计算网格

表 1 透平级计算的数值方法和边界条件

项目及参数	属性及数值
求解器	ANSYS CFX
湍流模型	标准 $k-\epsilon$, 改进壁面函数法
工质	水蒸气
动、静叶交界面连接方式	静态转子
进口总温/K	803.95
进口总压/MPa	17.632
出口平均静压/MPa	16.27

表 2 动叶叶顶密封几何参数 mm

密封间隙	齿间隙	静子直径	转子直径
0.8	9.0	1 057.0	1 042.0

动、静叶间相互作用和级间补汽会引起动叶叶顶迷宫密封进汽温度和压力沿周向非均匀分布。采用透平级计算获得动叶叶顶迷宫密封进口在 50% 腔室高度处总压及总温沿周向的分布,且通过将高次多项式拟合得到的进汽温度和压力作为叶顶迷宫密封非均匀进汽条件,以此开展不同进汽预旋比下迷宫密封流体激振转子动力特性研究。图 2 和图 3 分别给出了进口总压和总温的计算数据以及相应周向拟合曲线。

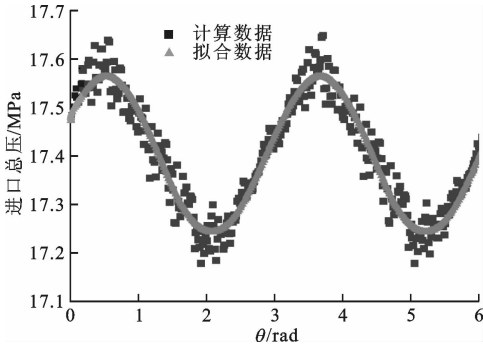


图 2 叶顶迷宫密封进口总压沿周向的分布

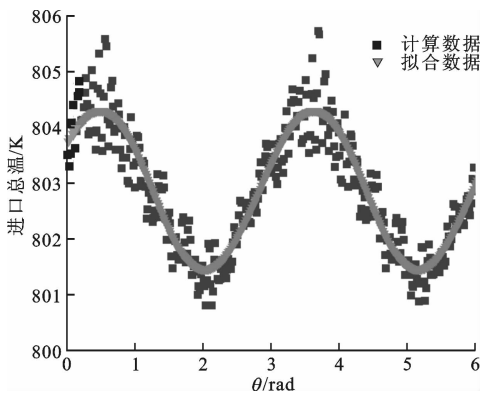


图 3 叶顶迷宫密封进口总温沿周向的分布

动叶叶顶迷宫密封出口平均静压为 16.27 MPa,转子转速为 3 000 r/min,进汽预旋比分别为 0.2、0.5、0.7。均匀进汽条件下进口的总温、总压为相应非均匀进汽条件下进口的总温、总压平均值,进汽预旋比为 0.2 时总温、总压分别为 803.2 K、17.38 MPa;进汽预旋比为 0.5 时总温、总压分别为 803.1 K、17.37 MPa;进汽预旋比为 0.7 时总温、总压分别为 803.0 K、17.36 MPa。进汽预旋比定义为

$$\lambda = 60V_{\theta}/(2\pi Rn) \tag{1}$$

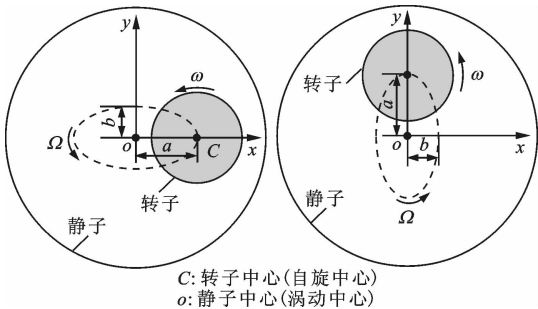
式中: V_{θ} 为密封进口气流绝对周向速度。

计算时采用动网格技术、多频椭圆涡动模型和 URANS (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程,计算了 3 种进汽预旋比在非均匀进汽温度和压力条件下叶顶迷宫密封转子动力特性系

数、旋流强度和非均匀流场,对比分析了在均匀进汽的温度、压力条件下叶顶迷宫密封的转子动力特性系数。表 3 给出了数值方法和涡动模型参数。图 4 给出了转子椭圆涡动轨迹模型示意图。

表 3 转子动力特性系数数值方法和模型参数

求解器	ANSYS CFX
离散格式	高精度格式
求解方法	非定常数值方法,动网格技术
湍流模型	标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,改进壁面函数法
工质	过热蒸汽
涡动模型	多频椭圆涡动模型
涡动基准频率/Hz	10
涡动频率数	10
涡动幅值/mm	$a=0.01S;b=0.005S;S=0.8$
计算时间步长/s	0.000 2



(a) x 方向激励 (b) y 方向激励

图 4 转子多频椭圆涡动轨迹模型示意图

根据小位移涡动理论可知

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{D}_x \\ \dot{D}_y \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: F_x 、 F_y 是密封内流体激振力; D_x 、 D_y 是转子涡动位移; $\dot{D}_x$ 、 $\dot{D}_y$ 是转子涡动速度。

x 方向激励下激振力与涡动位移的关系方程为

$$\begin{bmatrix} F_{xx} \\ F_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{xx} \\ D_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{D}_{xx} \\ \dot{D}_{xy} \end{bmatrix} \tag{3}$$

y 方向激励下激振力与涡动位移的关系方程为

$$\begin{bmatrix} F_{yx} \\ F_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{yx} \\ D_{yy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{D}_{yx} \\ \dot{D}_{yy} \end{bmatrix} \tag{4}$$

将式(3)和式(4)进行快速傅里叶变换并进行同时求解,可得式(2)的频率解

$$H_{xx} = \frac{(-F_{xx})D_{yy} - (-F_{yx})D_{xy}}{D_{xx}D_{yy} - D_{yx}D_{xy}} \tag{5}$$

$$H_{xy} = \frac{(-F_{xx})D_{yx} - (-F_{yx})D_{xx}}{D_{xy}D_{yx} - D_{yy}D_{xx}} \quad (6)$$

$$H_{yy} = \frac{(-F_{yy})D_{xx} - (-F_{xy})D_{yx}}{D_{yy}D_{xx} - D_{yx}D_{xy}} \quad (7)$$

$$H_{yx} = \frac{(-F_{yy})D_{xy} - (-F_{xy})D_{yy}}{D_{xy}D_{yx} - D_{yy}D_{xx}} \quad (8)$$

式中: $H_{ij} = K_{ij} + i\Omega C_{ij}$ 是密封阻抗系数; i 表示流体激励力方向, 取 x 和 y ; j 表示转子位移方向, 取 x 和 y 。

图5给出了2种疏密网格下密封转子面的流体激励力时域图(x 方向激励, 进汽预旋比为0.7, 均匀进汽边界), 其中疏网格(coarse mesh)节点数为544万, 密网格(fine mesh)节点数为734万。从图中可以发现, 当网格节点数达到544万时, 疏密网格下流体激励力完全重合。因此, 本文迷宫密封的网格节点数为544万。

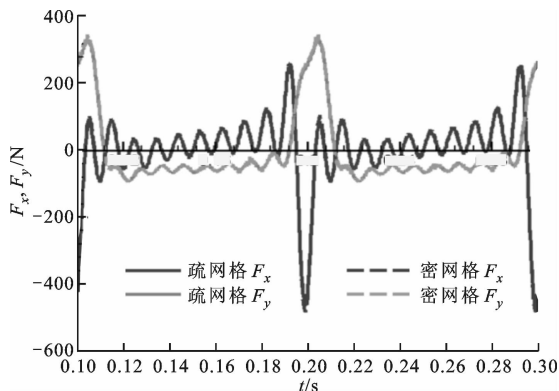


图5 不同网格数下迷宫密封转子激励力时域图

2 结果分析与讨论

2.1 非均匀进汽下迷宫密封转子动力特性系数

图6给出了3种进汽预旋比在非均匀进汽条件下迷宫密封直接刚度 K_{xx} 随转子涡动频率 f 的变化, 并与均匀进汽条件下计算结果进行了对比。

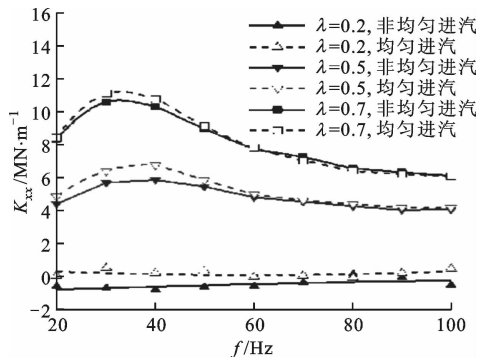


图6 直接刚度随涡动频率的变化

从图6看出, 随着进汽预旋比的增加, 密封直接刚度显著增大, 表明转子系统的临界转速随进汽预

旋比的增加而增大。 $\lambda=0.2$ 时, 非均匀进汽条件下密封直接刚度随涡动频率的增加而略微增加, 但比均匀进汽条件下直接刚度的低, 其中最大偏差为 -1.2 MN/m 。 $\lambda=0.5$ 时, 随着涡动频率的增加, 非均匀进汽条件下密封直接刚度先略微增加而后缓慢降低, 且与均匀进汽条件下直接刚度的偏差减小, 仅当涡动频率为 $20 \sim 50 \text{ Hz}$ 时较均匀进汽低 $7.2\% \sim 13.5\%$ 。 $\lambda=0.7$ 时, 随着涡动频率的增加, 非均匀进汽条件下密封直接刚度先急剧增加而后逐渐降低, 且仅当涡动频率为 $20 \sim 50 \text{ Hz}$ 时较均匀进汽低 $1.3\% \sim 4.7\%$, 表明非均匀进汽条件下转子系统的临界转速低于均匀进汽下转子系统, 且2种进汽条件下转子系统临界转速的差异随预旋比的增加而减小。

图7给出了3种进汽预旋比在非均匀进汽条件下迷宫密封交叉刚度 K_{xy} 随转子涡动频率的变化, 并与均匀进汽条件下计算结果进行了对比。

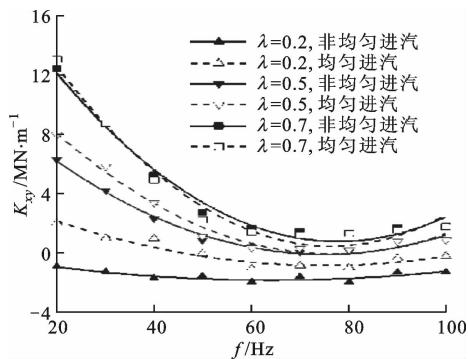


图7 交叉刚度随涡动频率的变化

从图7中看出, 随着进汽预旋比的增加, 密封交叉刚度增大, 激励汽流更易诱发转子失稳, 使得密封转子稳定性降低。 $\lambda=0.2$ 时, 非均匀进汽条件下密封交叉刚度在 $K_{xy} = -1.5 \text{ MN/m}$ 附近小范围波动, 与均匀进汽相比, 非均匀进汽条件下密封交叉刚度至少低 82.7% , 表明低预旋比下非均匀进汽不易诱发转子失稳。 $\lambda=0.5$ 时, 随着涡动频率的增加, 非均匀进汽条件下密封交叉刚度先急剧降低而后逐渐增大, 交叉刚度受进汽均匀程度的影响减弱, 仅当涡动频率为 $20 \sim 50 \text{ Hz}$ 时, 非均匀进汽条件下密封交叉刚度较均匀进汽低 $21.1\% \sim 32.1\%$ 。 $\lambda=0.7$ 时, 非均匀进汽条件下密封交叉刚度随涡动频率的变化趋势保持不变, 与进汽均匀程度基本无关, 表明高进汽预旋比下2种进汽条件对诱发转子失稳的能力不再存在差异。

图8给出了3种进汽预旋比在非均匀进汽条件下迷宫密封直接阻尼 C_{xx} 随转子涡动频率的变化,

并与均匀进汽条件下计算结果进行了对比。从图8中看出,随着进汽预旋比的增加,当涡动频率大于40 Hz时,密封直接阻尼明显降低,激振气流抑制转子失稳的能力减弱,密封转子的稳定性降低。3种进汽预旋比时,非均匀进汽条件下密封直接阻尼与均匀进汽下计算结果大致相当。当 $\lambda=0.2$ 时,非均匀进汽条件下密封直接阻尼在涡动频率为80~100 Hz时较均匀进汽略低。当 $\lambda=0.5$ 时,非均匀进汽条件下密封直接阻尼在涡动频率为20~40 Hz时较均匀进汽低10.2%~11.7%。当 $\lambda=0.7$ 时,非均匀进汽条件下密封直接阻尼在涡动频率为40~70 Hz时较均匀进汽高5.2%~30.1%。

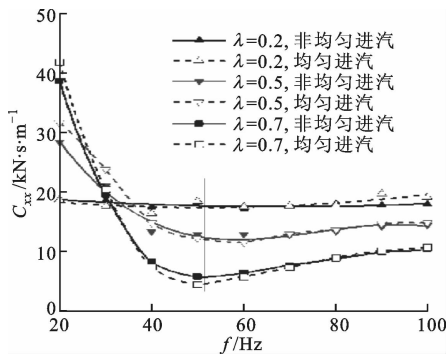


图8 直接阻尼随涡动频率的变化

图9给出了3种进汽预旋比在非均匀进汽条件下迷宫密封交叉阻尼 C_{xy} 随转子涡动频率的变化,并与均匀进汽条件下计算结果进行了对比。从图9中看出,3种进汽预旋比时,非均匀进汽条件下密封交叉阻尼均随涡动频率的增加而增大。 $\lambda=0.2$ 时,非均匀进汽条件下密封交叉阻尼较均匀进汽至少高30.7%,但这种偏差随涡动频率增加而逐渐降低。 $\lambda=0.5$ 时,非均匀进汽条件下密封交叉阻尼与均匀进汽的差异减小,仅当涡动频率为20~70 Hz时高19.2%~28.2%。 $\lambda=0.7$ 时,受到进汽均匀程度影响明显的转子涡动频率范围减小,仅当涡动频率为

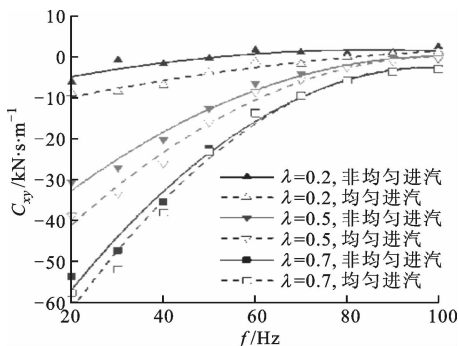


图9 交叉阻尼随涡动频率的变化

20~40 Hz时非均匀进汽条件下密封交叉阻尼较均匀进汽高6.7%~8.9%。

图10给出了3种进汽预旋比在非均匀进汽条件下迷宫密封有效阻尼随转子涡动频率的变化,并与均匀进汽条件下计算结果进行了对比。有效阻尼定义为

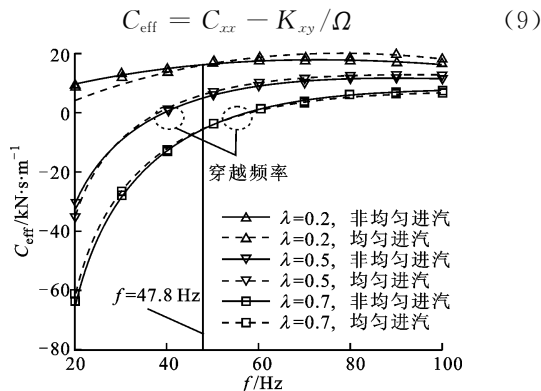


图10 有效阻尼随涡动频率的变化

综合考虑直接阻尼、交叉刚度对密封转子稳定性的影响可以发现,密封有效阻尼随进汽预旋比的增加而明显减小,从而转子稳定性降低,同时密封有效阻尼项中穿越频率的增大使得转子安全稳定运行的频率范围减小。当 $\lambda=0.2$ 时,随着涡动频率的增加,非均匀进汽条件下密封有效阻尼先逐渐增加而后略微降低,且当涡动频率小于47.8 Hz时,非均匀进汽条件下密封有效阻尼大于均匀进汽,表明低涡动频率下非均匀进汽条件更利于转子稳定,当涡动频率大于47.8 Hz时,非均匀进汽条件下密封有效阻尼小于均匀进汽,表明高涡动频率下均匀进汽条件更利于转子稳定。当 $\lambda=0.5$ 时,非均匀进汽条件下密封有效阻尼随涡动频率的增加而增大,且与均匀进汽条件下密封有效阻尼的差值减小,仅在涡动频率为50~100 Hz时较均匀进汽低8.4%~12.4%。当 $\lambda=0.7$ 时,非均匀进汽条件下密封有效阻尼随涡动频率的变化趋势保持不变,且与均匀进汽基本相同,表明高进汽预旋比下密封转子稳定性基本不受进汽均匀程度的影响。

2.2 非均匀进汽时迷宫密封流场分析

图11给出了迷宫密封腔室标示图。图12分别给出了3种进汽预旋比在非均匀进汽条件下不同腔室内周向旋流强度的分布,并与均匀进汽条件下计算结果进行了对比。周向旋流强度 β 定义为

$$\beta = 60U_{\text{gas}} / (2\pi Rn) \quad (10)$$

式中: U_{gas} 是气流绝对周向速度。

从图12中看出:非均匀进汽条件下不同腔室内

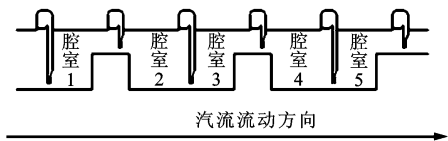
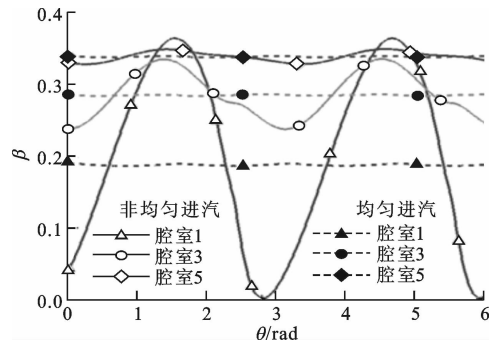
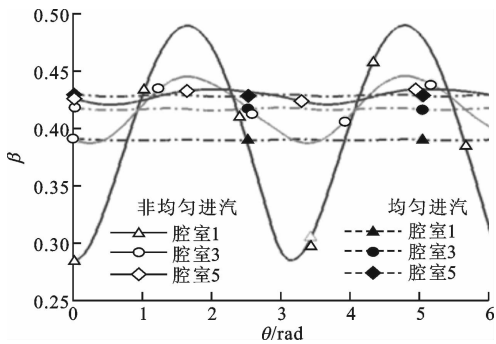


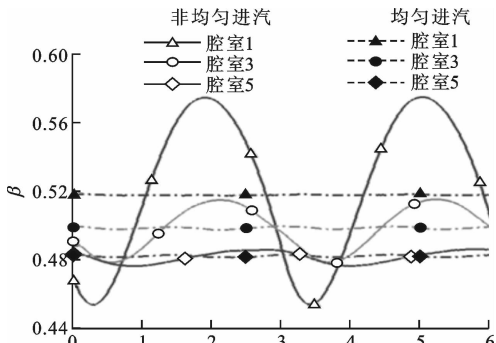
图 11 迷宫密封腔室标示图



(a) $\lambda=0.2$



(b) $\lambda=0.5$



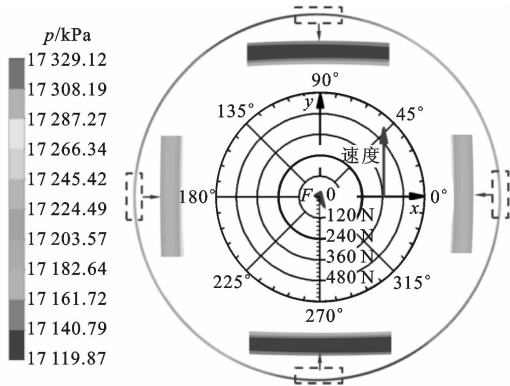
(c) $\lambda=0.7$

图 12 3 种进汽预旋比下迷宫密封腔室内周向旋流强度

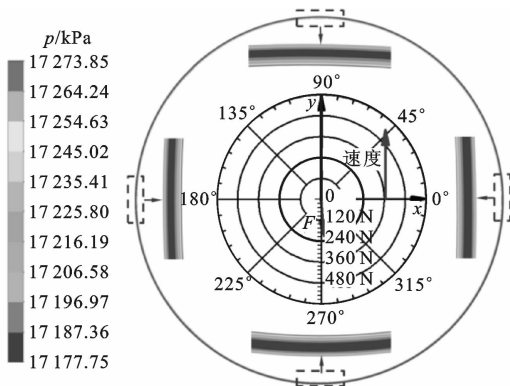
周向旋流强度均存在周期为 π 的波动,且这种波动沿汽流流动方向逐渐减弱;均匀进汽条件下不同腔室内周向旋流强度均为定值,且与相应非均匀进汽条件下周向旋流强度的平均值相同。 $\lambda=0.2$ 时,非均匀进汽条件下密封上游腔室周向旋流强度与均匀进汽时差异巨大。 $\lambda=0.5$ 时,非均匀进汽条件下密

封腔室周向旋流强度与均匀进汽时差异减小,最大差值为均匀进汽条件下上游腔室周向旋流强度的 25.6%。 $\lambda=0.7$ 时,非均匀进汽条件下密封腔室周向旋流强度与均匀进汽的差异进一步减小,最大差值仅为均匀进汽条件下上游腔室周向旋流强度的 11%。值得注意的是,当 $\lambda=0.7$ 时,非均匀进汽条件下腔室周向旋流强度平均值开始沿汽流流动方向略微降低,这主要是高进汽预旋比下密封静子面强烈的黏性作用引起周向速度沿流动方向降低。

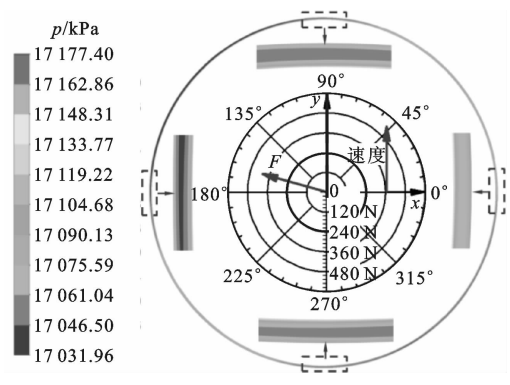
图 13 给出了非定常计算在 $t=0.2\text{ s}$ 时 3 种进汽预旋比在非均匀进汽条件下迷宫密封腔室内的压



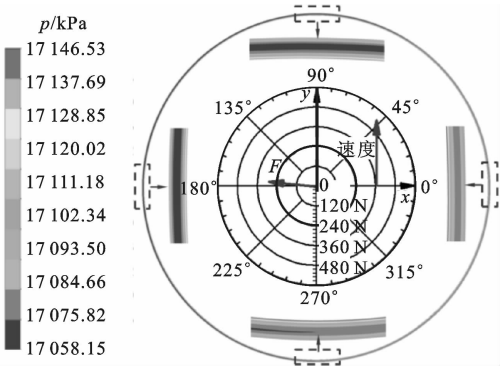
(a) $\lambda=0.2$, 非均匀进汽



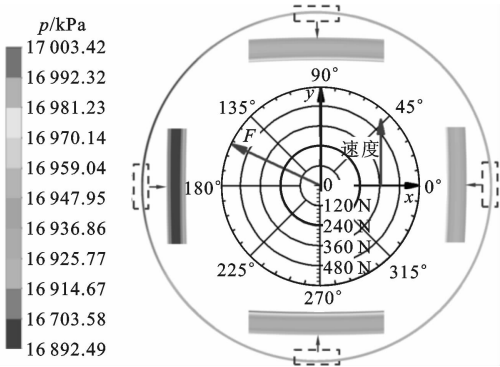
(b) $\lambda=0.2$, 均匀进汽



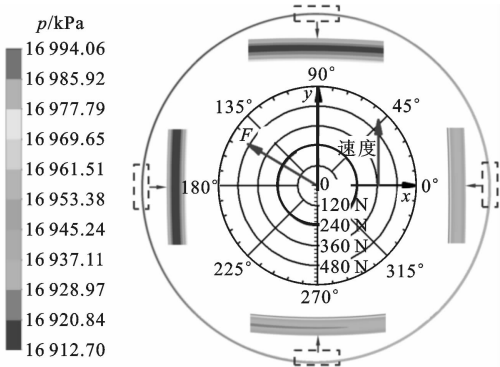
(c) $\lambda=0.5$, 非均匀进汽



(d) $\lambda=0.5$, 均匀进汽



(e) $\lambda=0.7$, 非均匀进汽



(f) $\lambda=0.7$, 均匀进汽

图 13 3 种进汽预旋比下迷宫密封腔室内静压云图和转子表面流体激振力矢量

力 p 分布云图和转子表面流体激振力矢量(x 方向激励, 转速为 3 000 r/min), 并与均匀进汽条件下计算结果进行了对比。

从图 13 中看出, 在偏心涡动情况下, 密封腔室压力沿周向分布不均匀, 这种不均匀程度随进汽预旋比的增加而逐渐增强。当 $\lambda=0.2$ 时, 由密封偏心涡动引起的周向压力非均匀性不明显, 密封腔室压力分布主要受进汽均匀程度的影响, 因此非均匀进汽与均匀进汽条件下密封腔室压力存在明显差异。

当 $\lambda=0.5$ 时, 由偏心涡动引起的周向压力非均匀程度增强, 从而使得与均匀进汽条件下密封腔室压力差异减小。当 $\lambda=0.7$ 时, 由偏心涡动引起的周向压力非均匀程度进一步增强且占主导地位, 因此非均匀进汽条件下密封腔室压力与均匀进汽条件下基本相似, 均为右下方压力高于左上方压力。

$\lambda=0.2$ 时, 非均匀和均匀进汽条件下迷宫密封转子表面流体激振力切向分量分别为 -71.1 N 、 -219.3 N , 均与此时转子涡动方向相反, 表明在整个涡动频率范围内, 非均匀进汽条件下平均有效阻尼较均匀进汽低, 2 种进汽条件下平均有效阻尼均为正值。 $\lambda=0.5$ 时, 非均匀和均匀进汽条件下迷宫密封转子表面流体激振力切向分量分别为 107.4 N 、 25.4 N , 均与此时转子涡动方向相同, 表明在整个涡动频率范围内, 非均匀进汽条件下平均有效阻尼较均匀进汽低, 且均为负值。 $\lambda=0.7$ 时, 非均匀和均匀进汽条件下迷宫密封转子表面流体激振力切向分量分别为 250.2 N 、 251.9 N , 是进汽预旋比为 0.5 时的 1.33 倍、8.92 倍, 表明在整个涡动频率范围内, 2 种进汽条件下平均有效阻尼基本相当, 且随进汽预旋比的增加有所降低。

3 结 论

本文开展了 3 种进汽预旋比在非均匀进汽条件下叶顶迷宫密封流体激振转子动力特性和流场的研究, 并与均匀进汽下计算结果进行了对比, 得出结论如下。

(1) 随着进汽预旋比的增加, 密封交叉刚度增大, 有效阻尼降低, 从而转子稳定性降低。

(2) $\lambda=0.2$ 时, 受进汽均匀程度的强烈影响, 非均匀进汽条件下密封腔室压力分布、周向旋流强度与均匀进汽具有明显差异, 当涡动频率小于 47.8 Hz 时, 有效阻尼偏高, 表明非均匀进汽条件利于转子稳定, 而当涡动频率大于 47.8 Hz 时, 有效阻尼偏低, 表明均匀进汽条件利于转子稳定。

(3) $\lambda=0.5$ 时, 密封腔室压力、周向旋流强度受进汽均匀程度的影响减弱, 使得 2 种进汽条件下密封转子动力特性系数的差异减小, 其中有效阻尼仅在涡动频率为 50~100 Hz 时较均匀进汽低 8.4%~12.4%。

(4) $\lambda=0.7$ 时, 密封腔室压力、周向旋流强度几乎不受进汽均匀程度的影响, 非均匀进汽条件下迷宫密封转子动力特性的变化规律与均匀进汽基本相当, 即转子稳定性不受进汽均匀程度的影响。

参考文献:

- [1] VANCE J M. Machinery vibration and rotordynamics [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2010: 271-278.
- [2] PICARDO A, CHILDS D W. Rotordynamic coefficients for a tooth-on-stator labyrinth seal at 70 bar supply pressures: measurements versus theory and comparisons to a hole-pattern stator seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2004, 127(4): 843-855.
- [3] VANNINI G, CIONCOLINI S, del VESCOVO G, et al. Labyrinth seal and pocket damper seal high pressure rotordynamic test data [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136: 022501-1-9.
- [4] MEHTA N J, CHILDS D W. Measured comparison of leakage and rotordynamic characteristics for a slanted-tooth and a straight-tooth labyrinth seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136: 012501-1-11.
- [5] 王世柱, 李志刚, 李军, 等. 补汽对透平级汽动性能和静叶汽封转子动力特性影响的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 56-61.
WANG Shizhu, LI Zhigang, LI Jun, et al. Numerical investigations for effect of supplementary steam on aerodynamic performance of turbine stage and rotordynamics of stator seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 56-61.
- [6] LI Z, LI J, YAN X. Multiple frequencies elliptical whirling orbit model and transient RANS solution approach to rotordynamic coefficients of annular gas seals prediction [J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2013, 135: 031005-1-14.
- [7] 孙丹, 王双, 艾延廷, 等. 阻旋栅对密封静力和动力特性影响的数值分析与实验研究 [J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3002-3010.
SUN Dan, WANG Shuang, AI Yanting, et al. Numerical and experimental research on performance of swirl brakes for the static and dynamic characteristics of seals [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3002-3010.
- [8] 钟明磊, 李雪松, 张俊杰, 等. 高低式迷宫密封转子动特性的数值模拟及优化 [J]. 工程热物理学报, 2015(7): 1447-1450.
ZHONG Minglei, LI Xuesong, ZHANG Junjie, et al. Numerical investigation and optimization for the rotordynamic characteristics of a staggered labyrinth seal [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015(7): 1447-1450.
- [9] 李志刚, 李军, 丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 16-21.
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Effect of swirl brakes on unsteady flow excitation characteristics of hole-pattern seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 16-21.
- [10] CHILDS D W, MCLEAN J E, ZHANG M, et al. Rotordynamic performance of a negative-swirl brake for a tooth-on-stator labyrinth seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138: 062505-1-8.

[本刊相关文献链接]

- 李志刚, 陈尧兴, 李军. 高偏心率下旋转密封泄漏特性和静态动力特性研究. 2017, 51(7): 1-7. [doi:10.7652/xjtuxb201707001]
- 高庆, 廖高良, 张永海, 等. 透平级气动及运行参数对轮缘密封封严性能影响的数值研究. 2017, 51(7): 62-72. [doi:10.7652/xjtuxb201707010]
- 王晟旻, 琚亚平, 张楚华. 离心压缩机级通流与盘盖侧泄漏流的耦合分析. 2017, 51(7): 73-77. [doi:10.7652/xjtuxb201707011]
- 李法敬, 高建民, 史晓军, 等. 电主轴轴心冷却用环路热虹吸管的传热特性. 2017, 51(7): 90-97. [doi:10.7652/xjtuxb201707014]
- 张西宁, 张海星, 吴婷婷. 一种转动容器中磁流体液表面形貌测量方法. 2017, 51(1): 103-108. [doi:10.7652/xjtuxb201701016]
- 陈秀秀, 晏鑫, 李军. 蜂窝叶顶密封对透平级气动性能的影响研究. 2016, 50(4): 14-20. [doi:10.7652/xjtuxb201604003]
- 张峰, 王新军, 李军. 冷却孔布置对透平转静腔室性能影响的数值研究. 2016, 50(3): 55-61. [doi:10.7652/xjtuxb201603009]
- 李志刚, 李军, 丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响. 2016, 50(1): 16-21. [doi:10.7652/xjtuxb201601003]
- 高云凯, 杨肇通, 冯海星, 等. 车门实际关闭工况的密封条隔声性能仿真. 2015, 49(11): 142-148. [doi:10.7652/xjtuxb201511023]
- 康乐, 胡欲立, 张克涵. 水下磁谐振式无线电能传输系统的分析与设计. 2015, 49(10): 41-47. [doi:10.7652/xjtuxb201510007]
- 高庆, 李军. 间隙结构对轮缘密封封严性能及透平级气动性能影响的数值研究. 2015, 49(3): 25-31. [doi:10.7652/xjtuxb201503005]

(编辑 苗凌)