

# 迷宫密封转子动力学特性的数值模拟

晏 鑫<sup>1</sup>, 蒋玉娥<sup>2</sup>, 李 军<sup>1</sup>, 丰镇平<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 陕西 西安 710049;

2. 河南泰隆科技开发应用有限公司, 河南 郑州 450007)

**摘 要:**采用数值求解三维 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程, 研究了具有 16 个齿的迷宫密封转子动力学特性, 分析了在两种转速条件下进口预旋对迷宫密封转子动力学特性系数的影响, 计算了无进口预旋时, 在两种压比条件下, 迷宫密封系统的交叉刚度和直接阻尼系数随转速的变化关系, 并将计算结果与实验值和两控制容积 BF (Bulk Flow) 方法计算值进行了比较。研究表明: 所采用的数值方法能较好地预测迷宫密封的转子动力特性, 且计算结果优于两控制容积 BF 方法。对于迷宫密封, 交叉刚度与进口预旋近似成正比关系, 且随着转速的增大而增大; 直接阻尼对转速和进口预旋均不敏感, 但随压比的增大而显著增大。过大的进口预旋和转速均会使转子的稳定性降低; 工作在较大转速下的迷宫密封系统可以通过施加合理的进口预旋来增强转子的稳定性。

**关 键 词:**迷宫密封; 转子动力学特性; 进口预旋; BF 方法; 数值模拟

中图分类号: TK263; O242 文献标识码: A

## 引 言

迷宫密封由于其技术成熟、成本低、安装方便而广泛应用于叶轮机械行业中。随着科技的不断进步, 为了满足密封特性的要求, 密封间隙的尺寸不断减小; 另一方面, 转子的柔性不断增大, 均会使得自激振动易于发生<sup>[1]</sup>。研究表明: 压气机中的气流激振力主要来自于其中的迷宫密封; 而对于汽轮发电机组而言, 蒸汽诱发的转子不稳定振动会成为限制机组出力的重要因素。到 2001 年, 国内已有 20 多台 300 MW 等级的机组高压或高中压转子由蒸汽激振引发了不稳定振动<sup>[1]</sup>。根据工程经验, 一旦机组发生流体激振而不能满负荷运行时, 可以通过更换轴瓦、改进设计的密封结构尺寸、动静间隙大小、在迷宫密封部位安装止涡装置、改变阀门开度和顺序等措施来解决。可见, 由迷宫密封所引起的流体激振是汽轮机组不能稳定、满负荷运行的一个重要因

素。而研究密封参数(包括边界条件和几何参数)对密封系统动力特性系数的影响, 对减小激振力、增强转子的稳定性有重要的工程应用价值。

在迷宫密封转子动力特性的预测方面, 传统的理论分析方法主要是采用以整体流动 BF (Bulk Flow) 理论为基础的两控制容积法, 它是由 Scharrer 和 Childs 建立和完善的<sup>[2]</sup>。随后, Childs 等人利用 1 控制体和 2 控制体 BF 模型对进口压力为 7MPa 的 20 齿迷宫密封动力特性进行了预测<sup>[3]</sup>, 并与实验值进行了对比, 由于预测结果不太理想, 他们建议采用 CFD 方法来验证实验结果。两控制容积方法虽然在预测泄漏量上具有较高的精度, 但在预测转子动力特性方面是不太理想的。随着计算机技术和计算流体动力学的发展, CFD 方法在分析迷宫密封动力学特性方面得到了相应的应用。Moore 利用商用软件 SCISEAL 成功计算了具有 8 个静子齿的迷宫密封动特性<sup>[4]</sup>。Toshio 利用商用软件 CFX-TASCflow 计算分析了 5 个静子齿迷宫密封的动特性<sup>[5]</sup>。黄典贵<sup>[6]</sup>对迷宫密封流场进行了三维非定常数值求解, 得到了密封内气流激振力和动特性系数。陆颂元利用 Fluent 商用软件<sup>[7]</sup>, 采用二维轴对称计算网格, 得出了含 3 个静子齿的叶顶围带密封(迷宫式)内气流激振力和动力学特性系数。

本研究利用商用 CFD 软件 CFX, 采用定常方法计算了 16 齿迷宫密封的转子动力特性系数, 研究了进口预旋、压比和转速对迷宫密封转子动力特性的影响规律, 并与实验数据和 BF 方法的计算结果进行了比较。

## 1 计算模型及数值方法

### 1.1 迷宫密封动力学模型

当转子在(气体)迷宫密封中心附近作小距离运

收稿日期: 2008-04-14; 修订日期: 2008-12-08

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)基金资助项目(2007CB707705); 新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-07-0669)

作者简介: 晏鑫(1983-)男, 湖北黄冈人, 西安交通大学博士研究生

动时<sup>[3]</sup>, 力与位移的关系可用下式来描述:

$$-\begin{bmatrix} F_{sx} \\ F_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & k \\ -k & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & c \\ -c & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中主对角线项( $K, C$ )分别为直接刚度和直接阻尼系数, 副对角线项( $k, c$ )分别为交叉刚度和交叉阻尼系数, 这 4 个系数就是需要识别的对象。动力特性系数中, 交叉刚度  $k$  是促使转子做非同步低频涡动的激振力的来源, 反映了转子经受气流横向激振力的大小,  $k$  增大时, 转子稳定性下降; 直接阻尼  $C$  反映的是系统阻尼作用的大小, 是低频涡动现象的抑制力。一般地,  $C$  越大则有利于转子系统的稳定。  $k$  和  $C$  这两个系数对系统的稳定性特别重要。直接刚度系数  $K$  反映的是气流对转子系统刚度的增减作用, 交叉阻尼系数  $c$  对系统的稳定性影响较小。另外, 由式 (1) 可知, 迷宫密封内激振力的研究可以归结为动力特性系数的研究, 利用动力特性系数不仅可求出密封系统内的激振力, 还可分析出密封系统对整个转子系统稳定性的影响。

1.2 计算模型及网格

图 1 是 16 齿迷宫密封的计算模型和尺寸<sup>[2]</sup>, 其中转子半径是 75.6 mm, 腔室宽度是 3.175 mm, 齿高是 3.175 mm, 齿顶宽是 0.152 4 mm, 间隙尺寸为 0.33 mm, 密封总长为 50.8 mm。

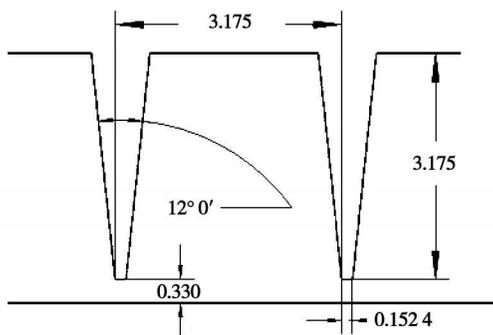


图 1 密封尺寸图(mm)

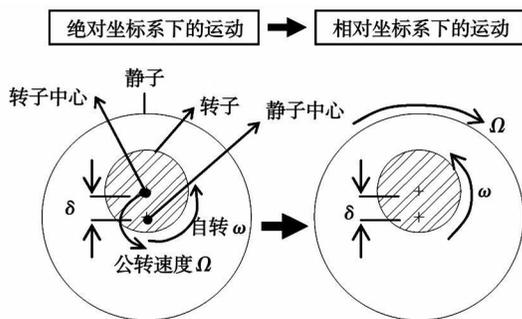


图 2 密封轴向截面及运动的转化

图 2 描述了转子在密封中的运动。密封中转子转速为  $\omega$ , 涡动转速为  $\Omega$ 。假若在绝对坐标系下求解, 由于计算区域随时间改变, 则需要采用动网格进行非定常求解, 如图 2(左图)所示。在相对坐标系下, 计算区域不变, 可以直接进行定常求解, 如图 2(右图)所示。

文献[4]通过数值模拟 8 齿和 18 齿气体迷宫密封的动力特性系数, 取偏心率为密封间隙的 10% 时, 计算结果与实验值吻合良好。故研究也取偏心率为 10% 来模拟密封内的动力特性。

将初始条件:  $Y(0) = \delta, X(0) = 0, \dot{Y}(0) = 0, \dot{X}(0) = -\Omega\delta$  代入式 (1), 可得:

$$\begin{cases} \frac{F_r}{\delta} = -K - \Omega c (\text{径向}) \\ \frac{F_t}{\delta} = k - \Omega C (\text{周向}) \end{cases} \quad (2)$$

对于气体密封, 在小偏心率条件下转子的周向力和径向力与涡动速度成一次关系, 文献[3]利用实验验证了该结论。文献[5]通过数值模拟 5 齿迷宫密封、偏心率为 10% 时的径向力和周向力, 也得出了相同的结论。

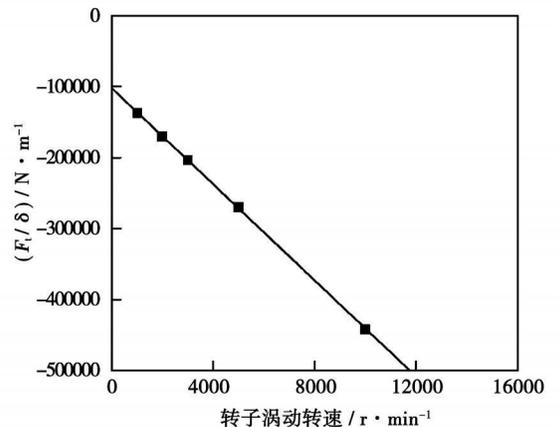
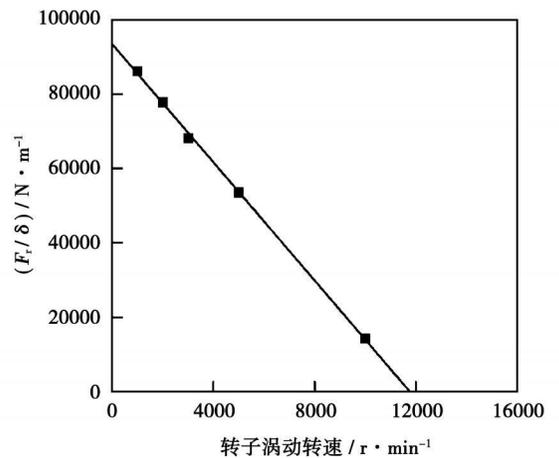


图 3 径向力(上)、周向力(下)与涡动转速的关系

为了验证该结论,本研究选取进口压力为 0.802 MPa、无进口预旋、转子转速由 1 000 r/min 增大到 10 000 r/min,计算了力与涡动速度间的关系,如图 3 所示。可以看出力与涡动速度间存在着良好的线性关系,从而验证了文献[3, 5]的结论,也证明了取 10% 偏心率是可靠的。因此,本研究将采用一次线性关系来求迷宫密封的动力特性系数。

本研究采用商用软件 ICEM 生成结构化网格,图 4(a)给出了计算网格的示意图,图 4(b)是密封子午切面上的网格图。节点总数为 106.2 万;网格最小角度为 75°。采用商用 CFD 软件 CFX 求解三维 RANS 方程,求解方法为时间推进方法,离散格式为高精度格式;工质为理想空气;进口给定总温总压和速度方向;出口给定静压 0.1 MPa。收敛准则是:动量方程、能量方程及湍流方程均方根残差下降到  $10^{-6}$  数量级,进出口流量相差小于 0.1%,转子受到的径向力、轴向力、周向力波动小于 0.5%。

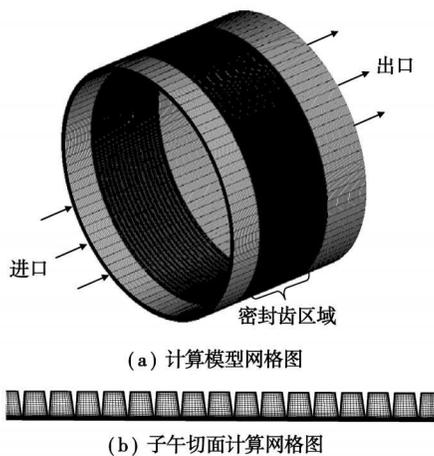


图 4 计算网格图

## 2 结果与分析

计算了不同进口预旋、不同压比、不同转速下迷宫密封转子的动力学特性系数,与文献[2]的实验结果进行了比较,同时与 BF(Bulk Flow)计算结果<sup>[8]</sup>进行了对比。

### 2.1 进口预旋和压比对密封动力学特性的影响

进口预旋对转子稳定性的影响可以归结于密封内周向速度的差别<sup>[6]</sup>,至于进口施加多大的预旋才合适,这必须结合工程实际来确定。因此,在密封转子动力系统设计过程中,一方面需要确定密封的封严性能;另一方面须准确地对转子动力特性进行预测,得出各种因素对转子稳定性的影响。一般地,判断密封转子动力系统的稳定性可以从交叉刚度  $k$

和直接阻尼  $C$  这两个系数来分析: $k$  绝对值越小、 $C$  系数越大,系统越稳定。系数越大,表明周向流动越强烈,越不利于系统的稳定。

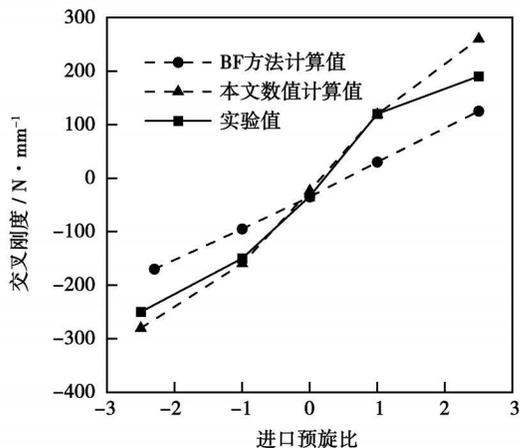


图 5 3 000 r/min 时交叉刚度与进口预旋的关系

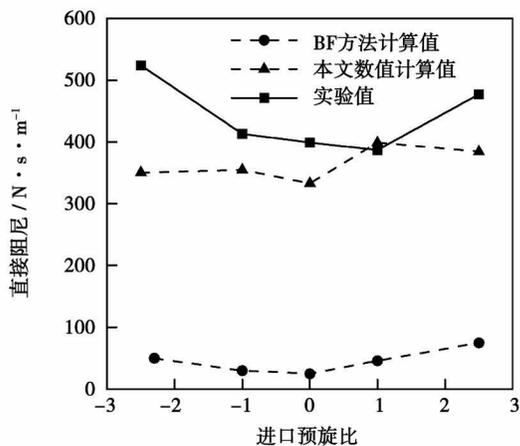


图 6 3 000 r/min 时直接阻尼与进口预旋的关系

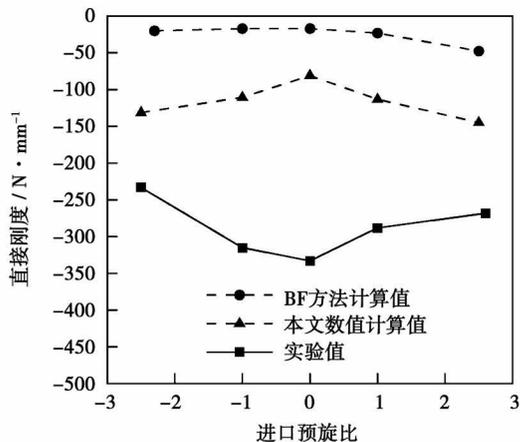


图 7 3 000 r/min 时直接刚度与进口预旋的关系

图 5~图 7 分别给出了进口压力为 0.825 MPa、

转子转速为 3 000 r/min 时迷宫密封交叉刚度  $k$ 、直接阻尼  $C$ 、直接刚度  $K$  随进口预旋的变化关系曲线。从图中可知, CFD 计算的结果与实验值吻合良好, 明显优于两控制体 BF 模型计算的结果。这可能是因为 CFD 方法求解的是全三维 RANS 方程, 而 BF 模型将壁面剪切应力用简化模型替代, 且人为地将密封区域分为两个区域, 界面处的速度场用射流模型关联。这些假设虽然简化了计算, 但与实际流动是有差距的。

交叉刚度  $k$  与进口预旋近似成正比关系, 随着预旋比的增大而增大, 对进口预旋敏感。这说明对于迷宫密封而言, 较大的正、负预旋均使得气流周向流动增强, 不利于转子系统的稳定。而直接阻尼  $C$  随进口预旋变化缓慢, 对进口预旋不敏感。计算得到的主刚度与实验值相差较大。从图 5 和 6 还可以看出: 在低转速条件下, 进口不施加预旋或施加较小的正预旋时密封系统的稳定性较好。

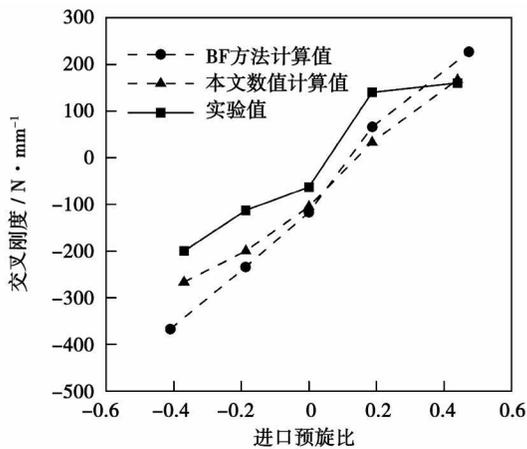


图 8 16 000 r/min 时交叉刚度与进口预旋的关系

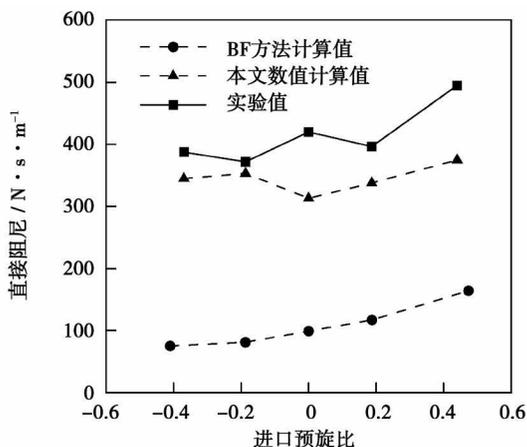


图 9 16 000 r/min 时直接阻尼与进口预旋的关系

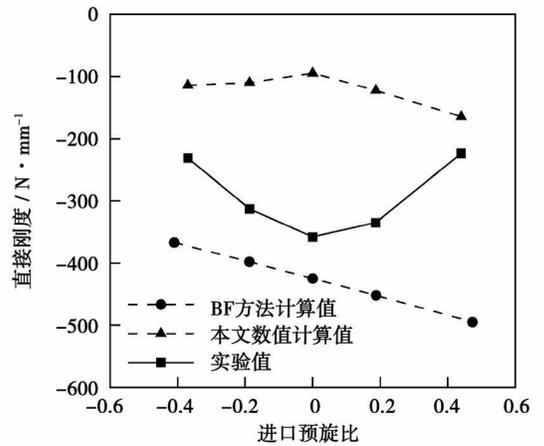


图 10 16 000 r/min 时直接刚度与进口预旋的关系

图 8 ~ 图 10 分别给出了进口压力为 0.825 MPa, 转子转速为 16 000 r/min 时迷宫密封交叉刚度  $k$ 、直接阻尼  $C$ 、直接刚度  $K$  随进口预旋的变化关系曲线。与 BF 模型计算结果相比, 在高转速下, CFD 结果仍然比较准确。与低转速工况类似, 交叉刚度对进口预旋敏感, 计算得到的交叉刚度与进口预旋近似成正比, 直接阻尼随进口预旋变化缓慢, 计算得到的直接刚度值与实验值仍然相差较大。由图 8 和 9 可知, 进口预旋比取 0.1 左右时, 系统稳定性较好。

### 2.2 转速对迷宫密封动力特性的影响

图 11 给出了进口总压为 0.308 和 0.825 MPa、无预旋时交叉刚度  $k$  随转子转速的变化关系。可以发现: 交叉刚度  $k$  的绝对值随转速的提高而逐渐增大, 说明在高转速条件下转子稳定性降低, 这时候可以采取相关的措施, 比如在进口施加合适的正预旋来降低系统的交叉刚度。当压比由 0.308 增大到 0.825 时, 交叉刚度增大 2 ~ 3 倍。

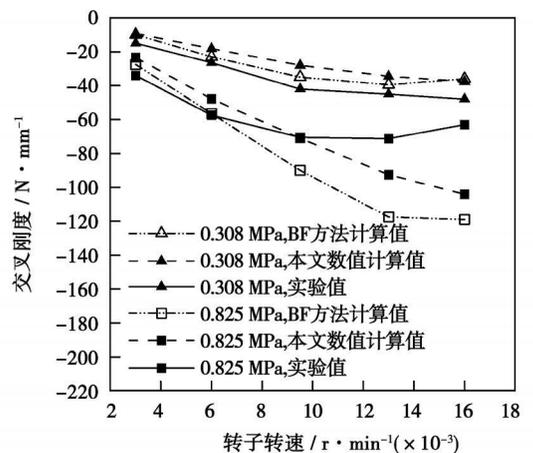


图 11 进口无预旋时交叉刚度随转速变化

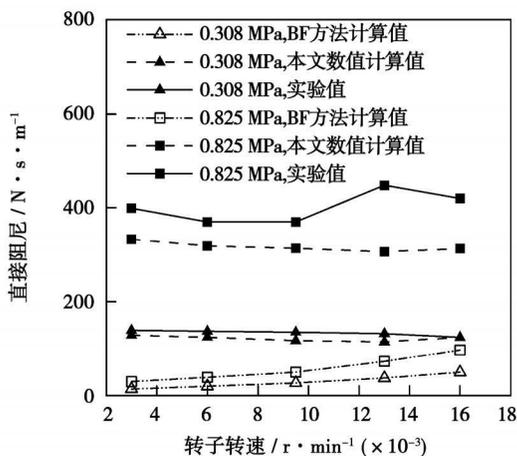


图 12 进口无预旋时直接阻尼随转速变化

图 12 给出了进口总压分别为 0.308 和 0.825 MPa 时,无预旋情况下直接阻尼随转子转速的关系。直接阻尼随转子转速的变化不敏感,在较大转速范围内值基本不变化;进口压力对直接阻尼影响较大,直接阻尼随压力的增大而增大。

在该工况下,从模拟精度来看,CFD 方法对交叉刚度的预测精度与 BF 模型差不多。但在直接阻尼的预测上,CFD 结果与实验结果十分接近,而 BF 模型计算结果与实验值相差较远。

### 3 结 论

采用 CFD 方法计算了两种转速条件下 16 齿迷宫密封转子动力特性与进口预旋的变化关系;计算了无进口预旋时两种压比条件下转子动力特性系数随转速的变化关系。通过与实验结果和两控制容积 BF 模型计算结果进行的比较,得出:

(1) CFD 方法能较好地预测迷宫密封转子动力特性,在很大程度上优于两控制容积 BF 模型,BF 模型在预测转子动力特性方面存在较大误差。

(2) 数值结果显示:交叉刚度近似与进口预旋成正比关系;交叉刚度绝对值随转速的增大而增大;当压比由 0.308 增大到 0.825 时,交叉刚度增大 2~3 倍。主阻尼对进口预旋和转子转速不敏感;但对进口压力十分敏感,当压比由 0.308 增大到 0.825,主阻尼增大 3 倍。

(3) 过大的进口预旋会降低密封系统的稳定性,在工程应用中应选择合适的进口预旋;转子转速

的增大也会使得密封稳定性降低,但可以通过调整进口预旋值来增强系统的稳定性。

### 参考文献:

- [1] 张学延,王延博,张卫军.超临界压力汽轮机蒸汽激振问题分析及对策[J].中国电力,2002,35(12):1-6.
- [2] SCHARERER J K. A comparison of experimental and theoretical results for labyrinth gas seals[D].Texas: Texas A & M University, 1987.
- [3] PICARDO A, CHILDS D W. Rotordynamic coefficients for a tooth-on-stator labyrinth gas 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 and Power, 2005, 127(10): 843-855.
- [4] MOORE J J. Three-dimensional CFD rotor dynamic analysis of gas labyrinth seals[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125(4): 427-433.
- [5] TOSHIO H, GUO Z L, KIRK R G. Application of computational fluid dynamics analysis for rotating machinery- Part II: Labyrinth seal analysis[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(4): 820-826.
- [6] 李雪松,黄典贵,李久华,等.迷宫密封三维非定常流场及转子动特性数值仿真[J].机械工程学报,2003,39(4): 136-140.
- [7] 刘晓锋,陆颂元.汽轮机转子涡动汽流激振力分析与 CFD 数值模拟[J].热能动力工程,2007,22(3): 245-249.
- [8] 朱杰.透平机械迷宫密封动特性研究[D].西安:西安交通大学 2007.

### · 书 讯 ·

## 《电工与电气控制基础》

本书共 6 章,内容包括直流电路、正弦交流电路、变压器与电动机、工作机械的基本电气控制、可编程控制器、输配电及安全用电。通过对本教材的学习,可以了解电路的基本分析方法,电路中各物理量之间的关系,各种电气控制元件的图形符号、动作过程,工作时发生触电能及时救护和如何安全用电,不断增强安全用电意识,了解可编程控制器的组成及用基本指令进行简单的编程方法,掌握变压器及交直流、伺服电动机的工作原理,掌握机床电气自动控制的典型环节及工作原理,掌握电气原理图的识读方法。读者对象:中等职业学校和技校机械类、机械类专业师生。

2009 年 7 月出版。

tiveness, and obtained was the flow field distribution around the air-film holes. The hole shapes chosen were cylindrical, forward flared, slot-shaped forward flared and new type converging-diverging slotted holes. It has been found that the cooling efficiency of cylindrical holes is reduced significantly with an increase of the air blowing ratio, the cooling efficiency of slot-shaped forward flared holes is superior to that of cylindrical and forward flared holes and the cooling efficiency of converging-diverging slotted holes at different air blowing ratios is invariably higher than that of the other three kinds of hole shapes. The converging-diverging slotted holes and slot-shaped forward flared holes can restrain the production of reverse vortex pairs to a certain extent and strengthen the wall-adhesion property of jet flows, thus enhancing the cooling effectiveness to wall surfaces. **Key words:** turbine blade, converging-diverging slot-shaped hole, slot-shaped forward flared hole, air-film cooling efficiency, turbulent flow model, numerical simulation

**迷宫密封转子动力学特性的数值模拟 = Numerical Simulation of the Kinetic Characteristics of a Labyrinth Gland Rotor** [刊, 汉] / YAN Xin, LI Jun, FENG Zhen-ping (Turbomachinery Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), JIANG Yu-e (Henan Tailong Science and Technology Development and Application Co. Ltd., Zhengzhou, China, Post Code: 450007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 566 ~ 570

By way of seeking numerical solutions to a three-dimensional RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) equation, studied were the kinetic characteristics of a 16-tooth labyrinth gland rotor and analyzed was the influence of the inlet pre-swirling on the kinetic characteristic coefficient of the rotor in question at two rotating speeds. In addition, in the absence of the inlet pre-swirling and at two pressure ratios, the variation relationship of the cross rigidity and direct damping coefficient of the labyrinth gland system with the rotating speed was calculated and the calculation results were compared with the test ones and the values calculated by using two volume controlled BF (bulk flow) methods. The research results show that the numerical method adopted can predict relatively well the kinetic characteristics of the labyrinth gland rotor and the calculated results are better than those obtained by using dual volume controlled BF methods. As regards labyrinth glands, the cross rigidity is approximately in direct proportion with the inlet pre-swirling and increases with an increase of the rotating speed. The direct damping is not sensitive to both the rotating speed and inlet pre-swirling, but increases remarkably with an increase of the pressure ratio. An excessively large inlet pre-swirling and rotating speed can invariably reduce the stability of the rotor. The labyrinth gland system operating at a bigger rotating speed can enhance its rotor stability by applying a rational inlet pre-swirling. **Key words:** labyrinth gland, rotor kinetic characteristics, inlet pre-swirling, BF (bulk flow) method, numerical simulation

**畸变进气条件下风扇三维非定常流动数值模拟 = Numerical Simulation Study of a Three-dimensional Unsteady Flow in a Fan Under Distorted Air Admission Conditions** [刊, 汉] / XU Kai-fu, QIAO Wei-yang, LUO Hua-ling (College of Power and Energy Source, Northwest Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 571 ~ 576

Analyzed was a three-dimensional compressible model for calculating three-dimensional flow fields and performance of an axial-flow fan/compressor, in which a streamline curvature method was adopted to obtain a source term of a turbine doing work to air flows by blades. Subsequently, by seeking solutions to a three-dimensional unsteady Euler equation involving the source term, a simulation was performed of an inner three-dimensional flow field and performance of a fan/compressor. By using the model, the three-dimensional flow field and performance of a transonic fan rotor were numerically simulated and analyzed, especially, the three-dimensional inner flow fields and aerodynamic performance in the absence and presence of an abnormal inlet distortion were analyzed and compared. The research results show that the three-dimensional-theory-based prediction model can effectively analyze the influence of an inlet air distortion on the performance and stability of an axial-flow fan. **Key words:** streamline curvature method, source term, semi-actuator disk, inlet distortion