

## 轴流涡轮基元级动叶稠度对转静干涉的影响

杨 杰, 乔渭阳, 赵 磊, 谭洪川  
(西北工业大学 动力与能源学院 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 针对不同动叶稠度的轴流涡轮基元级的流动情况进行了非定常数值模拟, 探究了动叶稠度对涡轮基元级转子的非定常势干涉、静叶尾迹与动叶的干涉及基元级性能非定常性的影响机制。研究表明, 在一定的动叶稠度范围内, 转子非定常势干涉的强度随着动叶稠度的增加而迅速减小, 而在上游静子中的影响范围与动叶稠度关系不大; 动叶稠度的变化通过引起静叶尾迹强弱和转子通道中流动状态的改变来影响静叶尾迹与动叶干涉的强弱; 而基元级性能的非定常性受尾迹干涉强弱的影响。

**关 键 词:** 轴流涡轮; 动叶稠度; 转静干涉; 势干涉; 非定常流动

中图分类号: TK472 文献标识码: A

### 引 言

叶片稠度是影响叶轮机械气动性能的重要设计参数<sup>[1~7]</sup>, 为了深入理解叶轮机械内部复杂的非定常流动现象, 并在叶轮机械的气动设计中充分利用流场非定常性的效益, 叶轮机械动静叶排流场之间的相互干涉(包括由转子转动产生的非定常势干涉、静叶尾迹与下游动叶的干涉及上游流场中的通道涡、间隙涡等二次流与下游流场的干涉)成为近年来的研究热点<sup>[8~14]</sup>, 而为了在叶轮机械的气动设计中将转静干涉与气动设计参数相关联, 以充分挖掘流动非定常性的效益, 需深入理解叶片稠度对转静干涉的影响机制。

对具有不同动叶稠度的轴流涡轮基元级的流动情况进行了非定常数值模拟, 分析了动叶稠度对涡轮基元级转静干涉包括转子的非定常势干涉、静叶尾迹与动叶的干涉及基元级性能非定常性的影响机制。

### 1 数值计算方法

#### 1.1 研究对象

选用 GE E3 高压涡轮第 1 级 50% 展向处的基元级作为研究对象, 根据区域缩放的原则将静子和转子叶片数分别由原始的 46 和 76 调整为 50 和 75 以减少计算量, 以此作为改变动叶稠度的基准算例, 记为 Case R75。

在 Case R75 的基础上, 分别将动叶叶片数变为 50、60、90、100 作为改变动叶稠度的对比算例, 分别记为 Case R50、Case R60、Case R90、Case R100 5 个算例的动叶稠度大小从小到大分别为 0.835、1.002、1.253、1.504 和 1.671。

#### 1.2 数值模型

流场计算采用商用软件 CFX 求解非定常雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程组。湍流模型采用剪切应力输运模型 (SST 模型), 并采用自动壁面处理。对流项和湍流项均采用高阶格式离散; 时间项采用二阶向后欧拉格式离散。非定常计算的时间步长为静子周期时长(即转子转过一个静叶栅距的时间)的 1/60, 经历 20 个静子周期后, 得到收敛的流场解。

#### 1.3 计算模型

计算网格采用商用软件 TurboGrid 生成。计算域进出口分别选在静叶前缘前 1.5 倍静叶轴向弦长处和动叶尾缘后 3 倍动叶轴向弦长处。沿叶片展向取两层体网格。叶片表面第一层网格  $y^+ \leq 1$ 。图 1 给出了 Case R75 的网格示意图。

边界条件: 计算域给定总温、总压、气流角及来流湍流度; 出口给定平均静压; 计算域展向两侧表面取自由滑移壁面; 计算域周向两侧取旋转周期性边界; 转静交接面在定常计算时取冻结转子交接方式,

收稿日期: 2012-02-15; 修订日期: 2012-03-20

作者简介: 杨 杰(1983-) 男, 湖北汉川人, 西北工业大学博士研究生。

在非定常计算时取暂态转子静子交接方式。

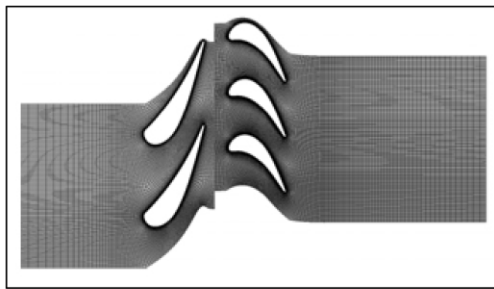


图 1 Case R75 计算网格示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of Case R75 computational mesh

### 1.4 对数值计算方法的验证

文献 [15] 采用本研究中的数值计算方法对文献 [16] 中的 NGTE (英国国家燃气涡轮研究院) 单级涡轮进行了 CFD 数值模拟, 并与文献 [16] 所给的实验数据进行了对比, 实验数据和数值模拟结果可以很好吻合 [15]。这说明本研究所使用的数值计算方法可以很好地模拟涡轮级流动性能。

## 2 计算结果及分析

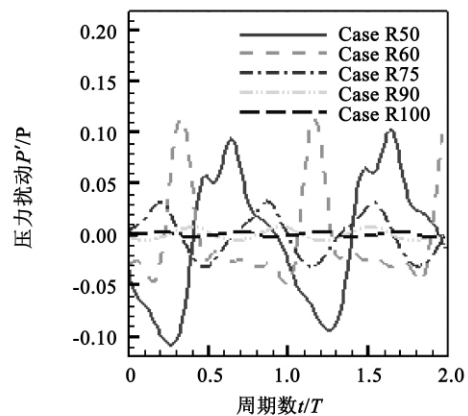
### 2.1 对转子非定常势扰动的影响

图 2 给出了静叶吸力面上 90% 轴向弦长处压力扰动在两个静子周期内随时间的变化和幅值频率谱。压力扰动定义为  $P'/P$ , 其中  $P$  为瞬时压力,  $P'$  为脉动压力, 而  $P'$  定义为  $P - P_{avg}$ ,  $P_{avg}$  为时均压力。图 2 (a) 横坐标轴上的  $t$  为静子周期数, 各算例中静叶表面压力扰动随时间变化的周期为相应的各转子周期 (即转子转过一个动叶栅距的时间); 图 2 (b) 也显示各算例中静叶表面压力扰动的一阶频率为相应各转子的叶片通过频率 (BPF, 为转子周期的倒数)。故静叶表面的压力扰动确由转子转动产生的非定常势扰动引起。

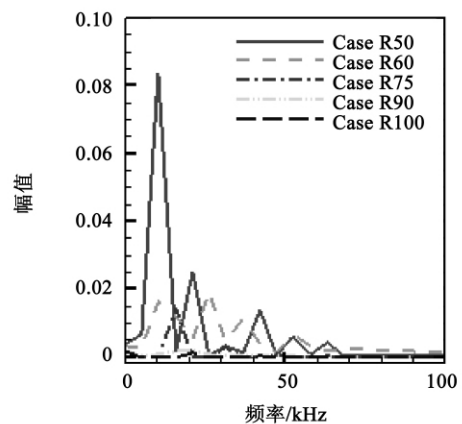
图 3 给出了静叶表面压力扰动分布。压力扰动定义为两个静子周期内的压力标准差与瞬时压力之比。由图可知: (1) 静子叶片表面的压力扰动主要存在于吸力面上的后段, 压力面上几乎没有扰动。这说明静叶压力面对转子非定常势扰动不敏感, 转子非定常势干涉对上游静子的影响主要在吸力面后部。(2) 转子非定常势干涉在静子叶片上的影响范围与动叶稠度的关系不大, 4 个算例的影响范围均是在约 60% 轴向弦长以后的吸力面上。然而转子

非定常势扰动在静子叶片上引起的压力扰动的幅值却随着动叶稠度的增加而快速减小。Case R50 静叶上的压力扰动最强, 峰值达到 6.9%; Case R60 为 5.7%; 到 Case R75 时已经下降到 2.2%; Case R90 下降到 0.5%; 到 Case R100 时, 静叶上的压力扰动峰值只有 0.1%。同时, 静叶吸力面上压力扰动的峰值的位置随着动叶稠度的增加向尾缘方向移动。

动叶稠度的大小反应了转子区域某种“空间不均匀性”的大小, 转子转动产生的非定常势扰动正是这种空间不均匀性产生的。在一定的稠度范围内, 动叶稠度越大, 这种空间不均匀性越小, 从而转子转动产生的非定常势扰动越弱。由于势扰动以压力波的形式在空间中传播, 它在上游静子中的传播情况与静子叶片的空间排列有关。而在各算例中, 静子的稠度不变, 静子的空间排列形式一样, 势扰动在静子中的传播范围几乎不变。



(a) 压力扰动随时间变化



(b) 压力扰动幅值频率谱

图 2 静子叶片吸力面 90% 轴向弦长处压力扰动  
Fig. 2 Pressure disturbance at 90% axial chord length on the suction surface of a stator blade

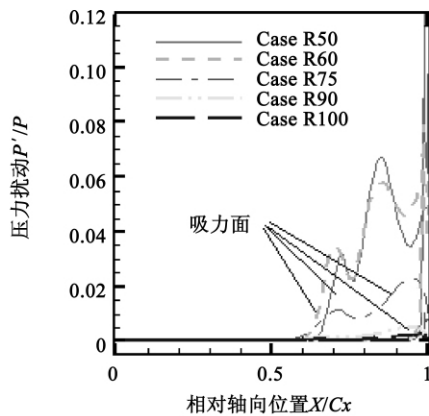
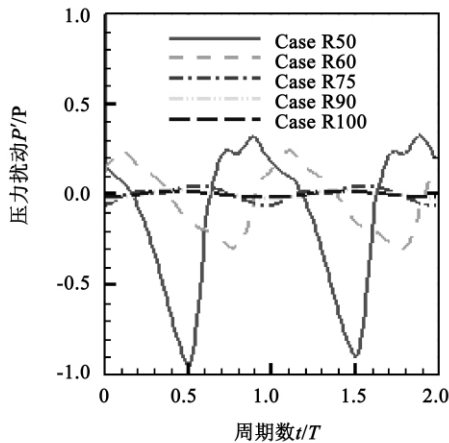


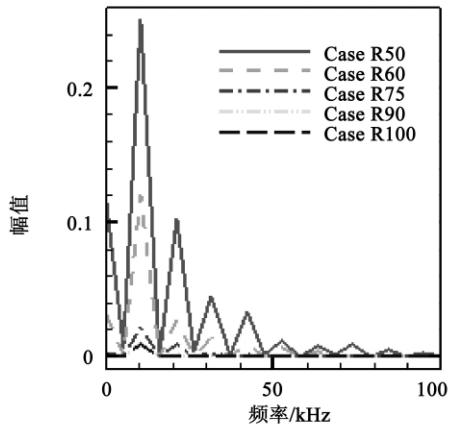
图 3 静叶表面压力扰动  
Fig.3 Pressure disturbance on the surface of a stator blade

2.2 对静叶尾迹与下游动叶干涉的影响

2.2.1 动叶表面压力扰动



(a)压力扰动随时间变化



(b)压力扰动幅值频率谱

图 4 转子叶片吸力面 20% 轴向弦长处压力扰动  
Fig.4 Pressure disturbance at 20% axial chord length on suction surface of a rotor blade

图 4 为动叶吸力面上 20% 轴向弦长处压力扰动在两个静子周期内随时间的变化和幅值频率谱。压力扰动的定义与图 2 中的相同。各算例中动叶表面压力扰动的变化周期均为一个静子周期,扰动频率均为静子叶片通过频率(静子周期的倒数)。动叶表面的压力扰动由静子相对于转子转动时产生的非定常势扰动和静叶尾迹与下游动叶干涉两方面引起。静子势扰动和静叶尾迹干涉扰动的频率均为静叶通过频率,故两因素共同作用在动叶表面引起的压力扰动的频率也为静叶通过频率;由于各算例静叶数相同,动叶表面压力扰动的频率相同。

图 5 为两个静子周期内转子叶片表面压力扰动的分布。静子势扰动在动叶上的影响范围主要在动叶吸力面前段,并且沿叶片弦长衰减。而尾迹干涉的影响存在于整个动叶上,其在动叶上引起的压力扰动的大小由静叶尾迹和动叶通道中的流动状态决定,不存在沿叶片衰减的现象。动叶吸力面前段同时存在静子势干扰引起的压力扰动和静叶尾迹干涉引起的压力扰动,而在吸力面后段只有尾迹干涉引起的压力扰动。这解释了图 5 显示的各算例中动叶吸力面前段的压力扰动幅值很大,并且沿叶片弦长迅速下降,而在动叶吸力面后段压力的扰动的幅值水平变化不大的现象。

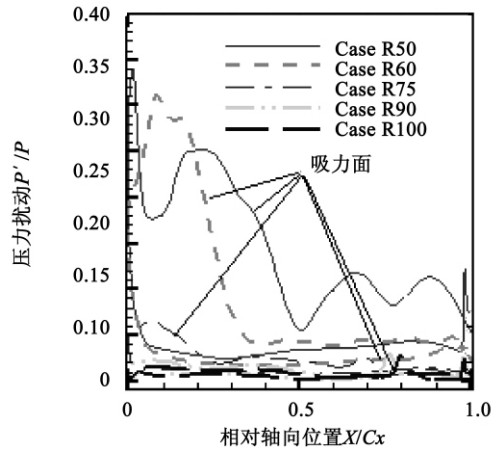


图 5 动叶表面压力扰动  
Fig.5 Pressure disturbance on the surface of a rotor blade

静叶尾迹与下游动叶干涉作用的强弱取决于尾迹的强弱、尾迹干涉的频率和转子通道中的流动状态。尾迹干涉的频率取决于静叶通过频率,由于各算例中的静子叶片数相同,静叶通过频率相同,尾迹干涉的频率相同。因此,本研究中静叶尾迹的强弱和转子通道中的流动状态决定了静叶尾迹与下游动

叶干涉作用的强弱,也在很大程度上决定了图 5 中动叶表面压力扰动的强弱。

2.2.2 静叶尾迹与下游动叶干涉

图 6 给出了各算例静叶尾迹中时均湍动能的分布。从湍动能大小的对比中可以发现静叶尾迹的强弱与动叶稠度有关,动叶稠度越大,静叶尾迹越弱。Case R50 的静叶尾迹最强,其次依次是 Case R60、Case R75、Case R90 和 Case R100 的尾迹最弱。

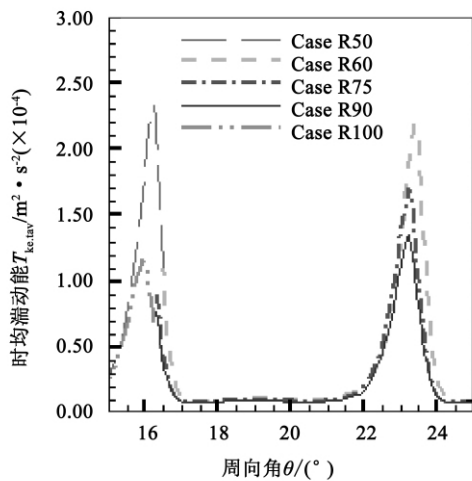


图 6 静子尾缘后 5% 轴向弦长处时均湍动能分布  
Fig. 6 Time-averaged turbulent flow kinetic energy distribution at 5% axial chord length after the trailing edge of a stator blade

图 7 给出了各算例中转子进口时均气流攻角的对比。可以看出,转子进口的气流攻角随动叶稠度的增加而减小。Case R50 转子进口的攻角最大,达到 6°; Case R60 其次,达到 5°; Case R90 和 Case R100 都是大的负攻角。由于 Case R50 和 Case R60 进口攻角大,因而尾迹对叶片吸力面前缘冲击强,而且从图 8(动叶表面的时均压力分布图)可以看出,Case R50 和 Case R60 由于转子进口极大的正攻角的存在,动叶吸力面前缘(10% 轴向弦长前)出现极大的逆压梯度。在此逆压梯度区,尾迹与叶片干涉会产生极大的压力扰动。这正是图 5 中显示的 Case R50 和 Case R60 中动叶吸力面 10% 轴向弦长前压力扰动幅值极大的原因。10% 轴向弦长后是顺压梯度,从而压力扰动幅值下降。而 Case R90 和 Case R100 中转子进口是大的负攻角,尾迹对动叶吸力面的冲击较弱,并且尾迹的强度本身较弱,故动叶吸力面前缘的压力扰动较弱。

对比各算例动叶吸力面后部的压力扰动大小,

如图 5 所示,Case R50 最大,这是由于 Case R50 中动叶吸力面存在流动分离(流动分离是由于转子进口极大的正攻角引起的),而且尾迹也最强,故尾迹干涉作用最强,产生的压力扰动最大。Case R60 动叶吸力面后段的压力扰动比 Case R75、Case R90、Case R100 大,这是由于 Case R60 静叶尾迹更强,从而尾迹干涉产生的压力扰动更强。

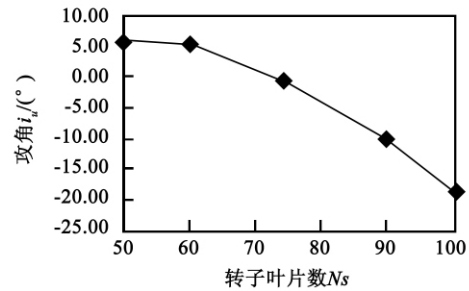


图 7 动叶时均气流攻角随动叶叶片数变化  
Fig. 7 Change of time-averaged flow incidence angles with the number of rotor blades

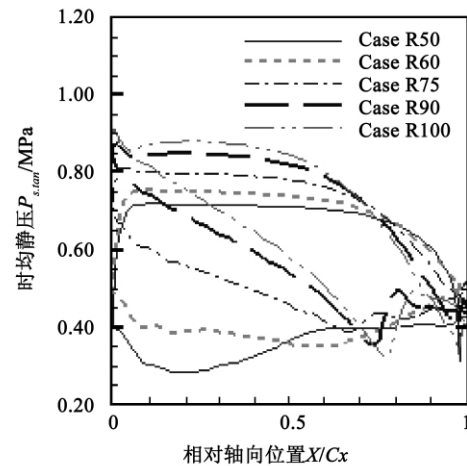


图 8 动叶表面时均静压分布  
Fig. 8 Time-averaged static pressure distribution on the surface of a rotor blade

图 8 为某时刻 Case R50 动叶表面轴向摩擦力的分布。从图 9 可以看出 Case R50 动叶吸力面后段存在两个大的负轴向摩擦力区,此即为两个分离流动中心。这与图 5 显示的 Case R50 动叶吸力面后段的两个压力扰动峰值对应。这两个压力扰动峰值正是静叶尾迹与两个分离流动中心干涉形成的。

从图 5 可以看出 Case R75、Case R90、Case R100 动叶吸力面后段压力扰动均有一个小的峰值,这与动叶吸力面上的分离泡的位置对应(分离泡对

应于图 8 中动叶吸力面后段的大压力梯度区)。而图 5 显示 Case R60 动叶吸力面后段上压力扰动不存在峰值,事实上,其动叶吸力面上不存在分离区或分离泡(图 8 中 Case R60 动叶吸力面后段没有大的压力梯度区)。这说明动叶吸力面后段上压力扰动的峰值是尾迹与分离泡干涉引起的。即尾迹与分离区或分离泡的干涉作用相对于未分离区会加强。

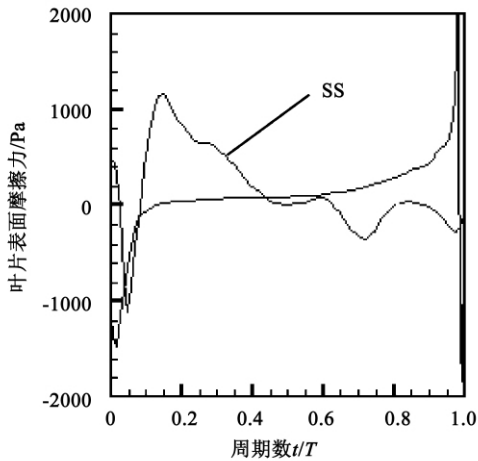


图 9 某时刻 Case R50 动叶表面轴向摩擦力分布  
Fig. 9 Axial friction force distribution on the surface of a rotor blade at a time in Case R50

### 2.3 对基元级性能非正常性的影响

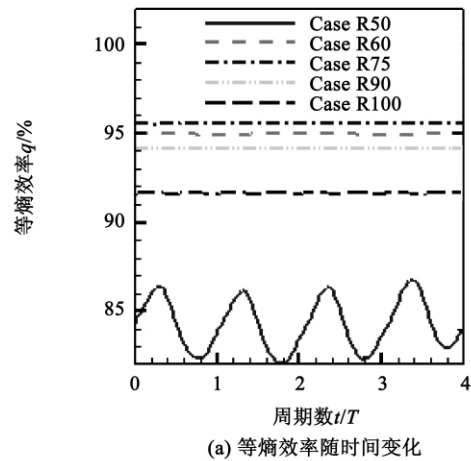
图 10 给出了各算例 4 个静子周期内基元级等熵效率及效率扰动随时间的变化。其中效率扰动的定义与图 2 中压力扰动的定义类似。从图 10 可以看出,随着动叶稠度的不同,基元级性能呈现出不同的非正常性。Case R50 级效率的扰动最大,并呈现明显的周期性,最高效率与最低效率相差 4 个百分点。其它 4 个算例效率扰动的幅值均较小,均不超过 0.03%。在这 4 个算例中,Case R60 的效率扰动最大; Case R100 其次,并且呈现良好的周期性; Case R90 的效率扰动最小。

基元级性能的非正常性主要由尾迹干涉带来的损失的非正常性引起。尾迹干涉越强,级效率的扰动会越大。如 Case R60、Case R75、Case R90 的尾迹干涉依次减弱,相应的效率扰动也依次减弱。

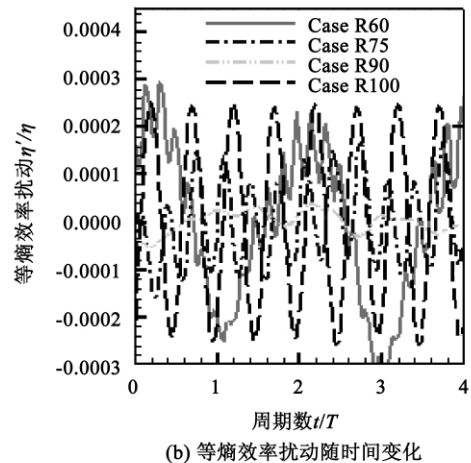
Case R100 的效率扰动也较强,并呈现明显的周期性,变化周期正好是半个静子周期,也就是一个转子周期。这是由于静子叶片数和转子叶片数之比为正好是 1:2,转子在转动过程中,每相隔的两个叶片承受尾迹干涉的状态相同,于是在一个转子周期中,在同一某时刻承受尾迹冲击的叶片数最多,而在

另一某时刻不承受尾迹冲击的叶片数也会达到最多,会产生较大的效率扰动,并且出现良好的周期性。

由于 Case R50 的尾迹干涉最强,并且动、静叶片数之比为 1:1,其效率扰动最大,并且呈现良好的周期性。



(a) 等熵效率随时间变化



(b) 等熵效率扰动随时间变化

图 10 基元级等熵效率及效率扰动随时间变化  
Fig. 10 Change of the isentropic efficiencies and their disturbances of the element stage with time

### 3 结论

(1) 转子的非定常势扰动在上游静子中的影响范围与动叶稠度关系不大,而与静叶稠度有关。在一定的动叶稠度范围内,转子非定常势干涉的强度随动叶稠度的增加而迅速减小。

(2) 动叶稠度的变化通过引起静叶尾迹强弱和转子通道中流动状态的改变来影响静叶尾迹与动叶干涉的强弱。动叶稠度减小时,静叶尾迹增强,而且

转子进口气流攻角增大 相应的尾迹干涉增强。

(3) 动叶稠度的改变通过引起静叶尾迹与动叶干涉强弱的变化来对基元级性能的非定常性产生影响。当动叶稠度的变化使得尾迹干涉增强时,基元级性能的非定常性增强。当动叶稠度变化使得动叶和静叶叶片数成倍数关系时,基元级性能的非定常性也会增强,并且效率变化呈现良好的周期性。

参考文献:

[1] 廖红桃, 赛庆毅, 杨爱玲, 等. 扩压器稠度对离心压缩机性能影响的数值分析[J]. 风机技术, 2010(3): 3-6.  
LIAO Hong-tao, SAI Qing-yi, YANG Ai-ling, et al. Numerical analysis of the influence of the solidity of the diffuser on the performance of a centrifugal compressor [J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2010(3): 3-6.

[2] Abdelwahab A. An airfoil diffuser with variable stagger and solidity for centrifugal compressor applications [R]. ASME Paper GT2007-27920, 2007.

[3] 陈 浮, 宋彦萍, 赵桂杰, 等. 附面层吸除对压气机叶栅稠度特性影响[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 211-215.  
CHEN Fu, SOU Yan-ping, ZHAO Gui-jie, et al. Effect of the boundary layer suction on the solidity characteristics of a compressor cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(2): 211-215.

[4] 赵养正, 刘前智. 轴流压缩机动静叶不同稠度组合对性能的影响[J]. 风机技术, 2007(6): 3-7.  
ZHAO Yang-zheng, LIU Qian-zhi. Effect of various solidity combinations of rotor-stator cascades on the performance of an axial-flow compressor [J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2007(6): 3-7.

[5] 张永军, 冯国泰. 跨音速压气机叶栅中稠度对弯掠叶栅流场影响的数值分析[J]. 热能动力工程, 2007, 22(3): 237-240.  
ZHANG Yong-jun, FENG Guo-tai. Numerical analysis of the impact of solidity on bowed and swept cascade flow fields in a transonic compressor cascade [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2007, 22(3): 237-240.

[6] Duquette M M, Visser K D. Numerical implications of solidity and blade number on rotor performance of horizontal-axis wind turbines [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(11): 425-432.

[7] Simpson A, Spence S, Watterson J. Numerical and experimental study of the performance effects of varying vaneless space and vane solidity in radial inflow turbine stators [R]. ASME Paper GT2008-

50261, 2008.

[8] Ernst M, Michel A, Jeschke P. Analysis of rotor-stator-interaction and blade-to-blade measurements in a two stage axial flow compressor [R]. AMSE Paper GT2009-59371, 2009.

[9] Fakhari K, Hofbauer T, Weber A. Numerical investigation of unsteady blade row interactions with leakage flow in steam turbines [R]. AMSE Paper GT2009-59613, 2009.

[10] Paradiso B, Persico G, Gaetani P, et al. Blade row interaction in a one and a half stage transonic turbine focusing on three dimensional effects - part I: stator-rotor interaction [R]. AMSE Paper GT2008-50291, 2008.

[11] Mailach R, Vogeler K. Rotor-stator interactions in a four-stage low-speed axial compressor—part I: unsteady profile pressures and the effect of clocking [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(10): 507-518.

[12] 党 政, 席 光, 王尚锦. 叶片安装角对动/静叶排内部非定常流动的影响[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 319-322.  
DANG Zheng, XI Guang, WANG Shang-jin. Influence of the installation angle of blades on the unsteady flow inside a rotor/stator cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(3): 319-322.

[13] 王正明, 王嘉炜. 动静叶相互干扰非定常流动特性的数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(1): 12-16.  
WANG Zheng-ming, WANG Jia-wei. Numerical investigation of the rotor and stator blade interaction-caused unsteady flow characteristics [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(1): 12-16.

[14] 王英锋, 胡 骏, 罗标能, 等. 上游叶片尾迹对转子叶片非定常表面压力频谱特性影响的研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 693-699.  
WANG Ying-feng, HU Jun, LUO Biao-neng, et al. Study of the influence of the wake of an upstream blade on the pressure spectrum characteristics of a rotor blade unsteady flow surface [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 693-699.

[15] 孙大伟. 高压涡轮二次流机理、损失模型及控制技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2009.  
SUN Da-wei. Research of the mechanism governing the HP turbine secondary flow loss models and control technologies [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 2009.

[16] Smith D J L, Johnston I H. Investigations on an experimental single-stage turbine of conservative design [R]. Reports and Memoranda, No. 3541, 1967.

(丛 敏 编辑)

欢 迎 投 稿                      欢 迎 订 阅

增强型地热系统的开发—以法国苏尔土地热田为例 = **Development of Enhanced Geothermal Systems (EGS)—With Soultz Geothermal Farm in France Serving as an Example** [刊, 汉] / WANG Xiao-xing, WU Neng-you, SU Zheng, ZENG Yu-chao (Key Laboratory on Renewable Energy and Natural Gas Hydrate, Guangzhou Energy Source Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(6). - 631 ~ 636

Enhanced geothermal systems denote the artificial thermal energy systems economically exploiting the geothermal energy at a depth of 3 to 10 meters under the ground surface from low penetration rocks and mainly used for power generation. As the currently important development direction in the geothermal energy domain, their investigation gains a wide attention in the developed countries but in China basically remains virginal ground. Soultz geothermal farm, which is located in the northeast part of France, is regarded as an important representative of the EGS currently still in operation in Europe and conducting on-site tests. During its operation in more than 20 years, it has produced a great quantity of achievements in scientific research. By looking back the main understandings of the geothermal farm obtained during its development process, the authors have summarized the main conclusions concerning the geological prospecting, artificially-made storage layer and circulation testing etc., thus offering reference for scientific research and project implementation of the EGS in China. **Key words:** enhanced geothermal system (EGS), Soultz, artificial heat storage, circulation testing

轴流涡轮基元级动叶稠度对转静干涉的影响 = **Influence of the Rotating Blade Solidity of the Elementary Stage of an Axial Flow Turbine on the Interference Between Its Rotor and Stator** [刊, 汉] / YANG Jie, QIAO Wei-yang, ZHAO Lei, TAN Hong-chuan (College of Power and Energy Source, Northwest China Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(6). - 637 ~ 642

An unsteady numerical simulation was made of the flow conditions in the elementary stage of an axial flow turbine at various rotating blade solidities and investigated was the mechanism governing the influence of the rotating blade solidity on the unsteady potential interference on the rotor of the turbine, interference on the stator blade wake and rotating blades as well as the unsteady characteristics of the elementary stage. The research results show that in a certain range of the rotating blade solidity, the intensity of the unsteady potential interference on the rotor will rapidly diminish with an increase of the rotating blade solidity. However, in the upstream stator, such influencing range has no obvious relationship with the rotating blade solidity. Any change of the rotating blade solidity will affect the inten-

sity of the interference between the stator blade wake and rotating blades by the consequent intensity of the stator blade wake and change of the flow conditions in the passages of the rotor. In the meantime, the unsteady characteristics of the elementary stage performance are influenced by the intensity of the stator blade wake interference. **Key words:** axial flow turbine, rotating blade solidity, interference between the rotor and stator of a turbine, potential interference, unsteady flow

某 MW 级燃机变几何动力涡轮动/静叶栅与排气道的流动分析 = **Analysis of the Flow Inside the Variable Geometrical Power Turbine Stator/rotor Cascade and Exhaust Gas Duct of a MW Class Gas Turbine** [刊, 汉] / HOU Jian-fei, GU Chun-wei, LIU Hong (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(6). - 643 ~ 648

The flow field of the variable geometrical power turbine stator/rotor cascade at the end of a MW class gas turbine may interact with that of the unsymmetrical exhaust gas duct. By using the commercial CFD software CFX, the authors have studied the coupled flow field between them at various installation angles of the stator blades. An analysis of the flow field at the installation angle of the stator blades under the design operating condition shows that the circumferential asymmetry of the exhaust gas duct will mainly affect the flow field of the rotating blades of the power turbine, leading to a difference of the load between any two rotating blades in the circumferential direction. In the meantime, the distribution of the gas flow angle at the outlet of the rotating blades may also assume an intense non-uniformity along the circumferential direction. After the stator blades have been rotated by 7 degrees, an increase of the positive attack angle at the inlet of the stator blades may result in a separation in a large area of the suction surface of the stator blades. Therefore, the rotating blades have a negative attack angle at the inlet, increasing the separation area of the pressure surface. At the same time, the vorticity of the vortices in the exhaust gas duct will be intensified, leading to a marked drop of the efficiency and power output of the power turbine after the installation angle of the stator blades has been changed. **Key words:** variable geometrical turbine, unsymmetrical exhaust gas duct, numerical simulation

低转速离心叶轮自循环机匣处理扩稳机理研究 = **Study of the Mechanism Governing the Stability Expansion of the Self-circulating Casing Treatment of a Centrifugal Impeller at a Low Rotating Speed** [刊, 汉] / CHU Wu-li, BU Yuan-yuan, ZHANG Hao-guang (College of Power and Energy Source, Northwest China Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27