

文章编号: 1000-8055(2008)07-1168-06

# 预旋进气转-静盘腔中的流动和传热数值研究

曾 军, 张 剑, 黄康才  
(中国燃气涡轮研究院, 成都 610500)

**摘 要:** 采用计算流体动力学(CFD)软件 CFX5.7 对预旋进气旋转盘腔中的流动和传热过程进行了全三维数值模拟. 对 4 种工况进行了计算, 计算结果与试验结果吻合较好, 验证了所采用方法的计算精度, 并分析了旋转雷诺数、无量纲切向速度、预旋比对流场结构、传热的影响.

**关 键 词:** 流动传热; 数值模拟; 旋转盘腔; 预旋

中图分类号: V231.1      文献标识码: A

## Flow and heat transfer investigation in pre-swirl inflow rotor-stator cavity

ZENG Jun, ZHANG Jian, HUANG Kang-cai  
(China Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** In order to investigate the flow and heat transfer in a pre-swirl rotor-stator cavity with two air inflows (central air flow and pre-swirl inflow at stator rim respectively) and two outflows (radial outflow at outer shroud and axial outflow at rotor rim respectively), a numerical study was conducted by using computational fluid dynamics (CFD) software CFX5.7 with shear stress transport (SST) turbulence model. The computational results agree well with the test results. The results show that, rotating Reynolds number, non-dimensional flow velocities and pre-swirl ratio have different effects on the flow structure and heat transfer characteristics in the rotor-stator cavity by computing four different conditions.

**Key words:** flow and heat transfer; numerical simulation; swirl cavity; pre-swirl

符号表:

- $V_t$ : 切向速度
- $\Omega$ : 转速
- $r$ : 半径
- $T$ : 温度
- $T_{in}$ : 进口温度
- $Nu$ : 努塞尔数
- $a$ : 静盘中心进气孔半径
- $b$ : 盘面外半径
- $s$ : 转静盘之间间隙
- $\dot{m}$ : 质量流量
- $\lambda$ : 预旋比
- $Pr$ : 普朗特数

- $Re_\phi$ : 预旋雷诺数
- $C_w$ : 无量纲流动速度
- 下标:
- d: 盘冷流量
- p: 预旋流量

在现代航空燃气涡轮发动机中, 为了有效地冷却高压涡轮盘和转子叶片, 往往采用中心进气和预旋进气提供冷却空气. 从预旋喷嘴喷射出来的冷却空气, 几乎相对静止地进入叶片冷却孔, 相应地降低了相对于叶片的空气温度. 冷却空气进入叶片根部的冷却孔, 通过叶片冷却通道径向甩出. 中心进气进入内转静腔室并径向流过涡轮盘, 通过封严篦齿流出. 其减少了主流高温燃气的入

侵,并降低了盘表面的温度. 涡轮设计人员需要准确计算涡轮盘腔的温度及进入叶片冷却孔的空气温度. 本文针对一种预旋进气旋转盘腔简化模型<sup>[1]</sup>,在 4 种工况下对盘腔中的流动与传热现象进行数值模拟,将计算结果与试验数据进行了对比,验证了方法的计算精度,为涡轮设计人员提供了一种可靠的分析工具.

1 计算模型

图 1 所示为计算的预旋进气旋转盘腔简化模型. 盘面的外半径  $b=215\text{ mm}$ ,转静盘之间的间隙  $s=22.1\text{ mm}$ . 2 个进气口: 静盘中心进气,静盘中心进气孔半径  $a=26.25\text{ mm}$ ,径向外流; 在静盘盘面上半径  $200\text{ mm}$  处周向均匀分布 60 个直径为  $2.9\text{ mm}$  的预旋喷嘴进气孔,与壁面切向的夹角为  $20^\circ$ . 2 个出气口: 转盘盘面对应于预旋喷嘴进气孔同一半径处周向均匀分布 60 个直径为  $7.7\text{ mm}$  的叶片冷却空气进气孔; 外围屏处有 1 个径向出流环面. 旋转盘腔内的静止内隔片和旋转内隔片将盘腔分为内转-静盘腔室和外预旋腔室. 旋转雷诺数为  $Re_\theta=\rho\Omega b^2/\mu$ ; 无量纲流动速度  $C_w=\dot{m}/(\rho b)$ , 其中  $\dot{m}$  为进出口的质量流量,  $C_{w,p}$  表示预旋喷嘴进气的无量纲流动速度,  $C_{w,d}$  表示静盘中心进气的无量纲流动速度; 预旋比  $\lambda=V_{b,p}/\Omega r_p$ , 此处  $r$  为预旋孔的半径,表示离开喷嘴的气体切向速度和旋转盘腔在喷嘴处的切向速度的比值.

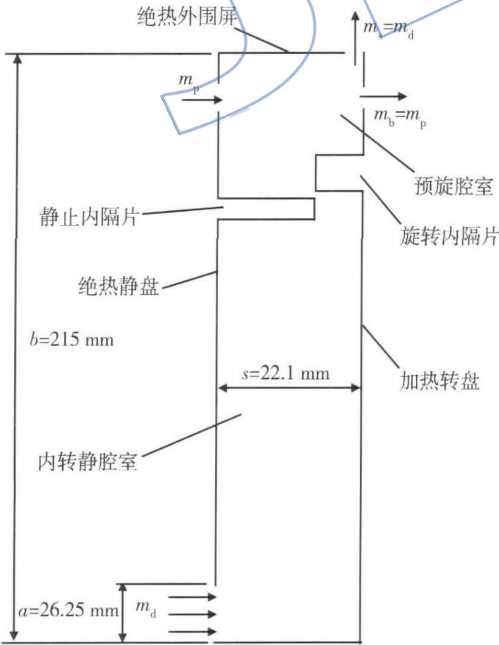


图 1 旋转盘腔结构示意图

Fig 1 Structural sketch map of swirl cavity

- 对文献[1]试验件轴对称模型作如下假设:
- 1) 离散的预旋喷嘴孔和叶片冷却孔用面积相等的环形面代替;
  - 2) 静止内隔片和旋转内隔片处于相同的轴向位置  $X=14.3\text{ mm}$ ,对静止上缘板未作模拟;
  - 3) 外部密封作为旋转围屏,位于半径  $215\text{ mm}$  处,并带有  $1.88\text{ mm}$  的间隙.

2 数值方法

CFX5.7 采用基于有限元的有限体积法,在数值方法上同时利用了有限元与有限体积中的优点,具有高精度的处理格式. 求解器采用全隐式耦合多重网格求解技术,使 CFD 求解稳健而迅速地收敛,并具有先进的网格自适应求解功能. CFX5.7 提供了多达 16 种不同的湍流模型,包括标准的  $k-\varepsilon$  模型、SST 模型、Second moment closure (SMC)、分离流模型 (DES)、大涡模型 (LES) 等. SST 湍流模型综合了标准  $k-\varepsilon$  和  $k-\omega$  模型的优点,适合于计算带有旋转和分离流动的模式<sup>[2]</sup>. 本文计算采用 SST 湍流模型,并使用了自动壁面处理.

3 网格及边界条件

计算采用 CFX-MESH 划分非结构网格. 由于计算模型的轴对称性,仅考虑了整个模型的  $1/30$ . 对于进气孔和出气孔周围采用局部加密;对于近壁面,采用了 inflation<sup>[3]</sup> 技术划分了 7 层附面层网格. 网格膨胀系数不大于 1.2. 网格节点总数为 250 475,网格单元数为 1 018 584. 网格分布见图 2

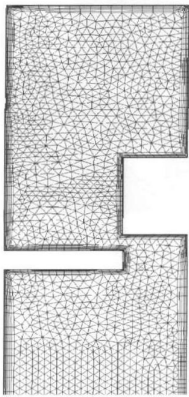


图 2 计算网格局部图

Fig 2 Local map of computational grid

基于试验数据给定计算边界条件. 静盘中心进气和预旋进气给定流量、气流方向和温度. 出口按照非掺混原理,叶片冷却流量和密封流量分别

与预旋进气流量、静盘中心进气流量相等,并假定为常通量<sup>[2]</sup>.静盘和转盘按照试验数据给定表面温度,转盘根据旋转雷诺数给定选择角速度.静止内隔片和外围屏假设为绝热边界.

4 计算结果

采用 CFX5.7 对 4 个工况进行了计算.工况参数详见表 1.

表 1 计算的 4 个工况的无量纲参数

| Table 1 Dimensionless parameter of four computed conditions |                  |           |           |                   |           |
|-------------------------------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| 工况                                                          | $Re_{\phi}/10^6$ | $C_{w,p}$ | $C_{w,d}$ | $C_{w,p}/C_{w,d}$ | $\lambda$ |
| 1                                                           | 1.23             | 9 980     | 4 580     | 2.18              | 0.99      |
| 2                                                           | 1.23             | 20 100    | 4 450     | 4.52              | 1.98      |
| 3                                                           | 1.27             | 9 960     | 2 280     | 4.37              | 0.99      |
| 4                                                           | 1.27             | 20 300    | 2 250     | 9.02              | 1.98      |

图 3~ 图 6 分别为工况 1 下预旋腔室的流场结构、中截面(转静之间)无量纲切向速度沿径向分布、中截面温度沿径向分布和转子表面局部努塞尔数  $Nu$  分布.局部努塞尔数定义为:

$$Nu = h_r \frac{r}{k}, h_r = q_r / (T_{wall} - T_{ref}) \quad (1)$$

式中  $q_r$  为局部热通量;  $T_{ref} = T_{in} + R^2 r^2 / 2c_p$ ;  $R = Pr^{1/3}$ ;  $c_p$  为比定压热容;  $k$  为导热系数;  $h_r$  为传热系数;  $T_{wall}$  为壁面温度.

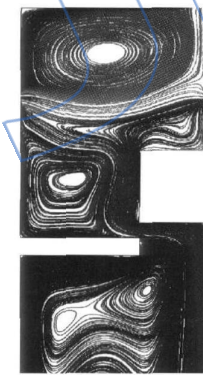


图 3 预旋腔室流场结构(工况 1)  
Fig 3 Flow structure of pre swirl cavity( Condition 1)

从中心孔进入的气流,由于转盘的旋转带动,在内转静腔室形成了复杂的涡系.在静止内隔片附近,形成了两个明显的涡核,均呈逆时针旋转;靠近静盘的涡强度较小.正是由于中心进气冷却气流的旋转流动,有效增强了盘表面与冷却空气的传热效果,降低了盘表面的温度.气流通过静止内隔片和旋转外隔片间的封严缝隙后,分成三股:

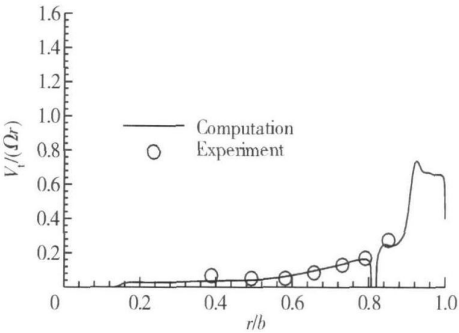


图 4 中截面无量纲切向速度沿径向分布(工况 1)  
Fig. 4 Dimensionless tangential velocity along radial distribution of mid-section(Condition 1)

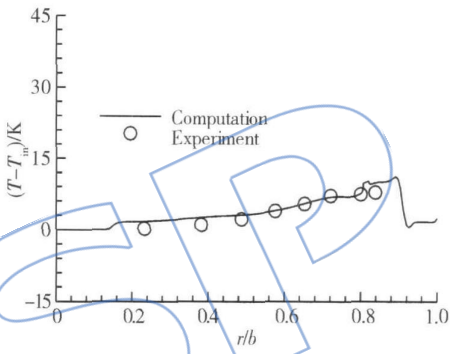


图 5 中截面温度沿径向分布(工况 1)  
Fig. 5 Temperature along radial distribution of mid-section(Condition 1)

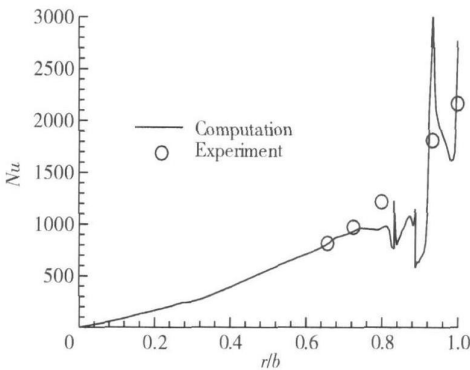


图 6 转子表面数  $Nu$  分布(工况 1)  
Fig. 6 Distribution of  $Nu$  number on rotor surface(Condition 1)

一部分流向静盘,与静盘碰撞后产生逆时针旋转的回流;一部分在流向预旋喷嘴的过程中与预旋喷嘴喷射的冷气碰撞,被预旋喷嘴气流的横向流动所阻隔,形成了一个顺时针方向旋转的涡,并随着预旋喷嘴气流的横向流动进入叶片冷却孔;另一部分则随着转盘的转动直接进入叶片冷却孔.中心进气的气流有效地阻挡了预旋腔室的气流进入转静腔室.从预旋喷嘴进入的冷气,与中心进气

气流和壁面碰撞, 在预旋腔室中心线附近逆时针回转流动. 一部分进入叶片冷却孔, 一部分从外围屏间隙处流出.

在中截面( $x/s=0.5$ ), 计算的无量纲切向速度与试验值吻合良好(图 4). 在相对高度  $r/b=0.807\sim 0.821$  处为静止内隔片, 切向速度为零.

在中截面温度径向分布图中(图 5), 其温度计算值和试验测量值基本吻合.

转子表面  $Nu$  数分布与试验数据接近(图 6).

图 7~ 图 10 分别为工况 2 下预旋腔室的流场结构、中截面无量纲切向速度沿径向分布、中截面温度径向分布和转子表面  $Nu$  数分布. 计算的中截面无量纲切向速度、中截面温度和转子表面  $Nu$  数与试验数据吻合较好.

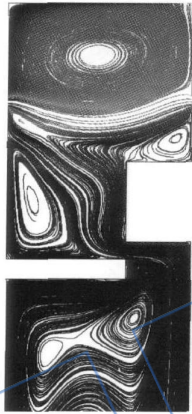


图 7 预旋腔室流场结构(工况 2)

Fig. 7 Flow structure of pre-swirl cavity(Condition 2)

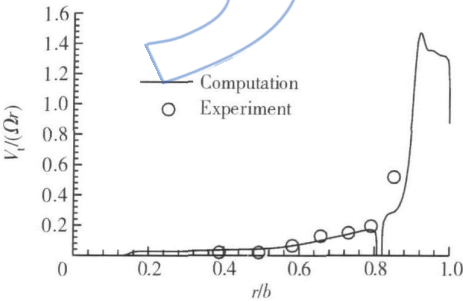


图 8 中截面无量纲切向速度沿径向分布(工况 2)

Fig. 8 Dimensionless tangential velocity along radial distribution of mid-section(Condition 2)

比较工况 1 和工况 2: 由于旋转雷诺数  $Re_\phi$  和  $C_{w,d}$  相同, 可以看到内转静腔室的流场结构基本相同. 中截面无量纲切向速度在内转静腔室保持不变. 工况 2 下  $C_{w,p}$  增大 1 倍后, 预旋腔室内的预旋流动增强, 进一步压缩了中心进气在预旋腔室内的流动(见图 3 与图 7). 但由于预旋比增大了 1 倍, 中截面无量纲切向速度在预旋腔室也几

乎增大了 1 倍, 即中截面无量纲切向速度与预旋比成正比关系(见图 4 和图 8). 在预旋腔室叶片冷却孔中心线以下, 由于气流与壁面的碰撞, 产生了一个顺时针旋转的回流.

图 11~ 图 14 分别为工况 3 下预旋腔室的流动结构、中截面无量纲切向速度沿径向分布、中截面温度径向分布和转子表面  $Nu$  数分布.

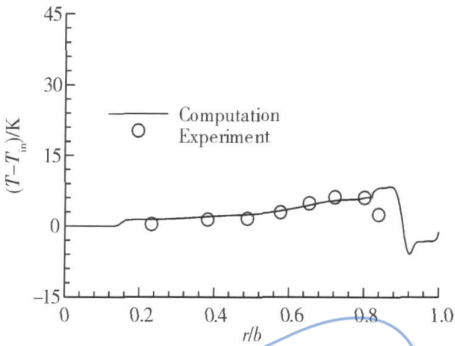


图 9 中截面温度沿径向分布(工况 2)

Fig. 9 Temperature along radial distribution of mid-section(Condition 2)

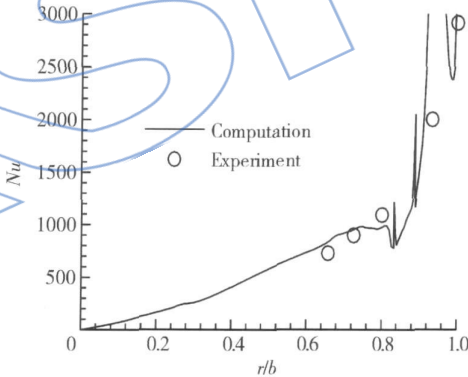


图 10 转子表面  $Nu$  数分布(工况 2)

Fig. 10 Distribution of  $Nu$  number on rotor surface(Condition 2)

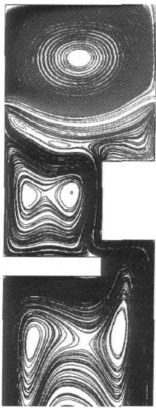
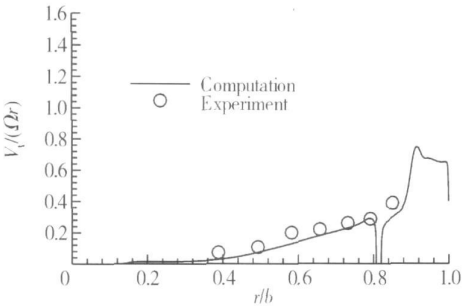


图 11 预旋腔室流场结构(工况 3)

Fig. 11 Flow structure of pre-swirl cavity(Condition 3)



> 0.4 中截面无量纲切向速度工况 1 为工况 3 的 1/2. 由此说明内转静腔室的无量纲切向速度与  $Re_\phi$  和  $C_{w,d}$  有关.

图 15~ 图 18 分别为工况 4 下预旋腔室的流动结构、中截面无量纲切向速度沿径向分布、中截面温度径向分布和转子表面  $Nu$  数分布.

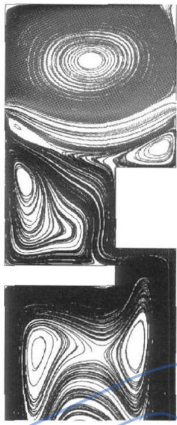


图 15 预旋腔室流动结构(工况 4)  
Fig. 15 Flow structure of pre-swirl cavity(Condition 4)

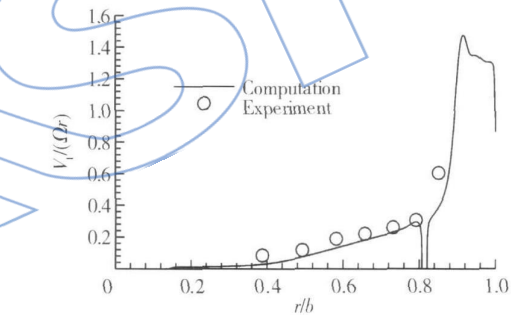
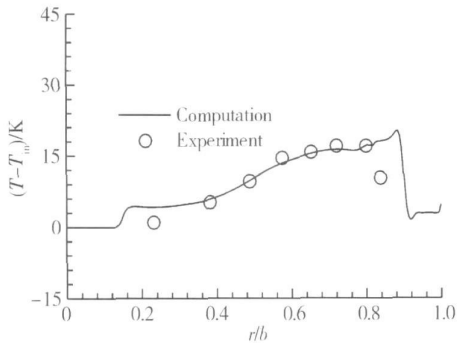


图 16 中截面无量纲切向速度沿径向分布(工况 4)  
Fig. 16 Dimensionless tangential velocity along radial distribution of mid-section(Condition 4)

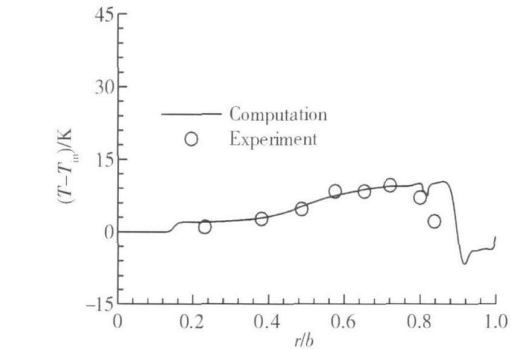
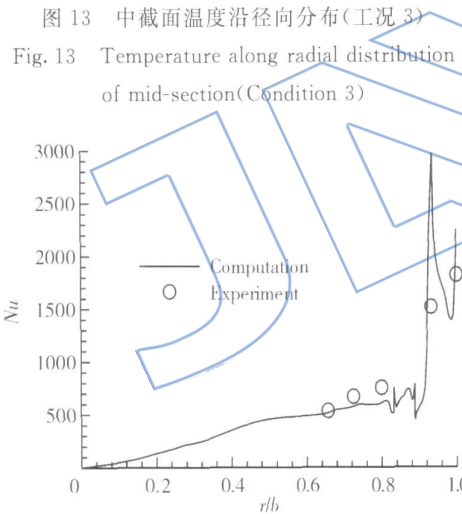


图 17 中截面温度沿径向分布(工况 4)  
Fig. 17 Temperature along radial distribution of mid-section(Condition 4)

比较工况 3 和工况 1: 在  $C_{w,p}$  和  $\lambda$  基本一致的情况下, 由于工况 3 增大了  $C_{w,p}/C_{w,d}$  的比值, 即减小中心进气的情况下, 预旋进气在预旋腔室得到了充分发展, 进一步压缩了中心进气的流动空间, 有效阻止了中心进气在预旋腔室内的流动(见图 11 和图 3). 还可以发现, 在  $\lambda$  一致的情况下, 中截面无量纲切向速度在预旋腔室保持不变; 在内转静腔室, 工况 1 的  $C_{w,d}$  为工况 3 的 2 倍,  $r/b < 0.4$  时中截面无量纲切向速度工况 1 为工况 3 的 2 倍;  $r/b$

比较工况 2 和工况 4 发现: 预旋比  $\lambda$  均为 1.98, 中截面无量纲切向速度在预旋腔室相同, 反

映在流场结构上即为预旋腔室的流场结构一致 (图 7 和图 15). 比较工况 3 和工况 4 发现, 工况 3 中预旋比  $\lambda$  为 0.98, 中截面无量纲切向速度在预旋腔室的大小为工况 4 的 1/2. 因此, 预旋腔室内 的中截面无量纲切向速度大小与  $\lambda$  成正比, 与  $Re_\phi$  无关.

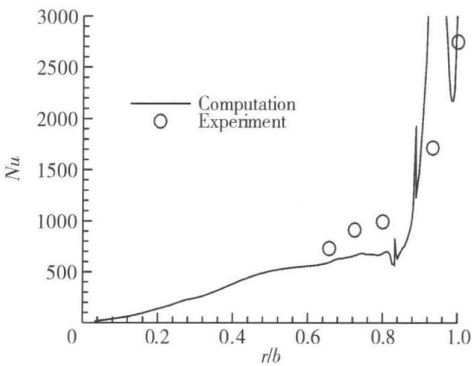


图 18 转子表面  $Nu$  数分布( 工况 4)  
Fig 18 Distribution of  $Nu$  number on  
rotor surface( Condition 4)

5 结 论

利用全三维 CFD 软件 CFX5.7 对预旋进气

转静盘腔中的流动和传热进行了数值模拟, 通过 4 种工况的计算表明:

- 1) CFX5.7 计算结果与试验结果吻合较好, SST 湍流模型较适合转静盘腔的数值模拟.
- 2) 在  $C_{w,p}$  和  $\lambda$  不变的情况下,  $Re_\phi$  和  $C_{w,d}$  对内转静盘腔无量纲切向速度有一定的影响; 对预旋腔室内无量纲切向速度没有影响.
- 3)  $Re_\phi$ ,  $C_{w,d}$  不变的情况下,  $\lambda$  对内转静盘腔内无量纲切向速度几乎没有影响, 但对预旋盘腔内无量纲切向速度的影响较大, 随  $\lambda$  的增大无量纲切向速度增大.

参考文献:

[ 1 ] Wilson M, Pilbrow R, Owen J M. Flow and heat transfer in a pre swirl rotor-stator system [ J]. Transactions of ASME, 1997, 364( 119) : 364-373.

[ 2 ] Morse A P, ONG C L. Computation of heat transfer in rotating cavities using a two-equation model of turbulence [ R]. Transactions of ASME, 90-GT-135.

[ 3 ] 冶萍. 有预旋进气转静盘腔中的流动和换热特性数值研究 [ J]. 航空动力学报, 2004, 19( 3) : 370-374.

YE Ping. Numerical investigation of flow and heat transfer performances in pre swirl rotor-stator cavity[ J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19( 3) : 370-374. ( in Chinese)