

文章编号:1000-8055(2013)10-2284-08

# 径向预旋系统温降与流阻特性的数值研究

张建超, 王锁芳

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 为了探索“预旋降温效应”在航空发动机中应用的新形式,研究径向预旋结构的温降和流阻特性,对径向预旋系统结构的简化模型进行了数值模拟,通过实验验证了数值方法,分析模型内部的流动结构,获得旋转雷诺数和无量纲质量流量对径向预旋系统温降和流阻特性的影响规律.结果表明:数值计算得到的结果与实验值趋势一致,最大相对误差不超过 20%.计算的参数范围内,当流经径向预旋系统的冷气质量流量一定时,气流温降和压降均随旋转雷诺数的增大而降低;当径向预旋系统工作的旋转雷诺数一定时,气流温降和压降均随无量纲质量流量的增大而增加.

**关键词:** 径向预旋; 转静系; 流阻; 温降; 旋流比

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

## Numerical study on characteristics of temperature reduction and flow loss in radial pre-swirl system

ZHANG Jian-chao, WANG Suo-fang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To explore new method of structure design based on ‘preswirl temperature-reduction effect’ in preswirl system of aero-engine, the characteristics of temperature reduction and flow losses in radial pre-swirl system were studied, and numerical investigation was carried out on a simplified radial pre-swirl system. Numerical method was validated by experimental results; flow structure in the radial pre-swirl system was analyzed. Characteristics of temperature reduction and pressure losses were investigated with changes of rotational Reynolds number and non-dimensioned mass flow rate. The computational results show that: the numerical results coincide with the experimental results, and relative error is not more than 20%, proving that the reliability of CFD method; under certain conditions of the study, at the given non-dimensional mass flow rate, the temperature reduction and pressure losses of radial pre-swirl system decrease as the rotating Reynolds number increases; with the given rotational Reynolds number, the temperature reduction and pressure losses increase as the non-dimensional mass flow rate increases.

**Key words:** radial pre-swirl; rotor-stator system; flow loss; temperature reduction; swirl ratio

随着对航空发动机空气系统研究的不断深入,预旋系统作为空气系统组成部分在设计过程

中愈来愈受到重视.冷却热端部件的冷气从压气机引到预旋喷嘴,预旋喷嘴出口的方向与下游涡

收稿日期:2012-09-29

网络出版地址:

作者简介:张建超(1984—),男,河南漯河人,博士生,主要从事发动机内部流动与换热研究.

轮盘的旋转方向一致,在预旋喷嘴内气流经过膨胀加速静温降低,同时相对涡轮盘的相对速度也低,降低了相对总温,从而提高对热端部件的冷却效果。

国内外学者针对轴向预旋系统的结构进行了许多研究,Geis, Dittmann 等<sup>[1-3]</sup>研究了直导式预旋系统的温降特性。Chew 等<sup>[4]</sup>研究了预旋系统的综合性能。Karabay 等<sup>[5]</sup>针对盖板式预旋系统进行了理论分析,通过数值模拟和实验研究获得了相对准确的理论计算式。Lewis 等<sup>[6-7]</sup>分析了直导式预旋系统流动与换热的机理,并就预旋喷嘴径向位置变化对预旋系统性能的影响进行了数值计算。Ciampoli 等<sup>[8]</sup>对直导式预旋系统进行了非稳态数值模拟。国内王锁芳等<sup>[9]</sup>针对直导式预旋盘腔研究了预旋进气径向位置、盘间距等几何因素对换热的影响,并开展了对预旋降温和流阻规律方面的研究,何振威、朱晓华等<sup>[10-11]</sup>研究了简化盖板式预旋系统的温降和流阻特性。罗翔、丁水汀等<sup>[12-14]</sup>针对预旋系统旋转盘腔内部的流动与换热开展了研究,并发展了盘腔内部冷却的评价体系。Radtke<sup>[15]</sup>提出一种有别于传统轴向预旋系统的径向预旋结构,采用径向向低半径位置吹气的方法进行预旋,通过导流盘将气流引入涡轮动叶根部,但没有说明其特性。

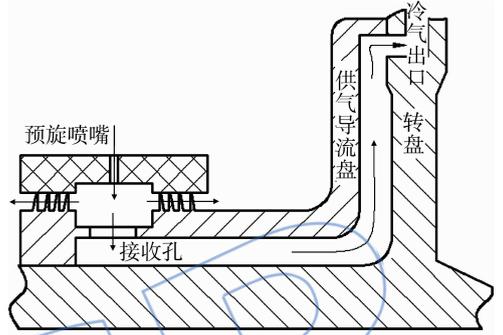
目前这些工作主要是针对轴向预旋结构的进行研究,系统地分析径向预旋系统的公开资料很少。为了探索径向预旋系统的性能,本文针对简化后的径向预旋系统开展了数值模拟,而后通过实验验证了数值模拟的准确性,在不同气动参数条件下获得温降和流阻特性,并对径向预旋系统内的流动结构进行分析。

## 1 计算模型与数值方法

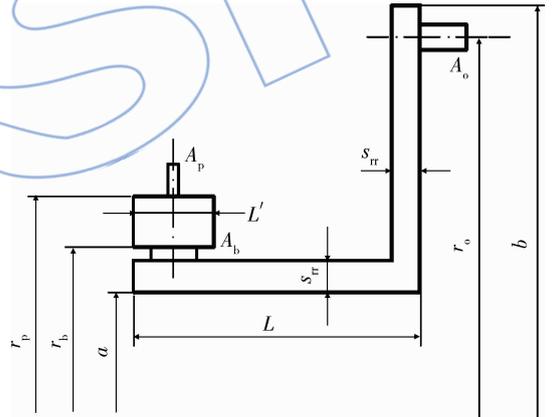
### 1.1 计算模型

本文研究的径向预旋系统如图 1 所示。图 1 (a)为径向预旋系统结构示意图,上游引自压气机的冷气在预旋喷嘴内膨胀加速后进入预旋腔,供气导流盘上开接收孔,安装在旋转盘轴上与旋转盘轴一起旋转,气流穿过接收孔进入导流流道,最终从冷气出口进入涡轮叶片。图 1(b)为本文数值模拟与模型实验采用的简化模型,图 1(c)为简化模型的轴向视图。径向预旋系统的几何参数如图所示,其内外半径分别为  $a=40\text{ mm}$ ,  $b=80\text{ mm}$ , 预旋进口位置安装有 24 个预旋喷嘴,径向位置

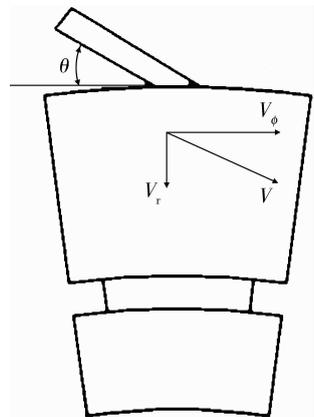
$R_p = r_p/b = 0.65$ , 预旋角  $\theta = 20^\circ$ , 如图 1(c)所示; 预旋腔宽度与外半径之比  $L'/b = 0.175$ 。进气导流盘安装在旋转部件上,与轴和转盘之间构成共转同心轴和共转盘腔,在于预旋喷嘴正对的位置有 24 个接收孔,其进口径向位置  $R_b = r_b/b = 0.575$ ;同心轴段长  $L/b = 0.5$ ;冷气出口径向位置  $R_o = r_o/b = 0.9375$ ;共转同心轴和共转盘腔的间距均为  $G = s_{rr}/b = 0.0625$ ;预旋喷嘴、接收孔及冷却出口的面积比  $A_p : A_b : A_o = 1 : 28.4 : 7.1$ 。



(a) 径向预旋系统结构示意图



(b) 径向预旋系统简化计算模型



(c) 径向预旋系统简化计算模型轴向视图

图 1 径向预旋系统图

Fig. 1 Sketches of radial pre-swirl system

## 1.2 数值方法

本文研究的模型结构具有轴对称性,为减小计算量,选取模型 1/24 的流体域做为计算域,建立三维计算模型.采用四面体网格进行网格划分,壁面和进出口位置用三棱柱网格进行局部加密(如图 2).经过网格独立性实验,选定 22 万左右的网格进行计算.采用 Fluent 软件对研究对象进行稳态模拟,选用 RNG(re-normalization group)  $k-\epsilon$  双方程湍流模型加标准壁面函数,壁面  $y^+$  在 40~70 之间;密度、动量、湍动能、湍动能耗散率以及能量的离散格式均为 1 阶迎风;压力-速度耦合采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法;解收敛的标准是连续性方程残差精度小于  $10^{-4}$ ,能量方程残差精度小于  $10^{-6}$ ,其他各方程残差均小于  $10^{-3}$ ,重要物理量的残差变化趋于平直.

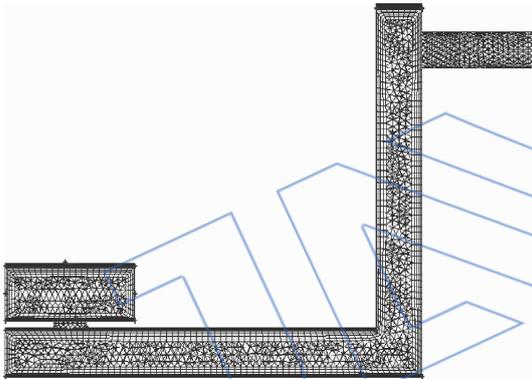


图 2 网格示意图

Fig. 2 Sketch of grid distribution

## 1.3 边界条件

旋转雷诺数  $Re_\omega = \rho\omega b^2/\mu = 8.74 \times 10^5 \sim 3.93 \times 10^6$ ,式中  $\mu$  为流体的动力黏度,无量纲质量流量  $C_w = \dot{m}/\mu b = (1.35 \sim 3.15) \times 10^4$ ,所有壁面均为绝热无滑移壁面.旋转设置采用 MRF(moving reference frame)方法,预旋腔上半部不旋转,预旋腔下半部、转盘和供气导流盘设置为旋转.计算模型的周期性对称面采用周期性边界条件.计算过程考虑流体的压缩性,流体黏度根据不同工况按 Sutherland 公式计算.

边界条件:预旋进口为压力进口边界,给定总压,在柱坐标系里给定气流方向的径向和切向分量,使气流沿预旋喷嘴的轴线方向进入转静腔,冷气出口为压力出口边界,在冷气出口处控制质量流量大小.

## 1.4 数值模拟方法的验证

定义无量纲温降、无量纲压降分别为

$$\Delta T_t^* = \frac{2c_p(T_{in}^* - T_{out}^*)}{(\omega r_b)^2} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{p_{in}^* - p_{out}^*}{\frac{1}{2}\rho\omega^2 r_p^2} \quad (2)$$

式中  $c_p$  为空气的比定压热容; $T_{in}^*$  为预旋孔进口处空气的总温; $T_{out}^*$  为出流孔进口处空气的相对总温; $p_{in}^*$  为进口处气流的总压; $p_{out}^*$  为出口处气流的相对总压; $r_b$  为接收孔进口径向位置; $r_p$  为预旋孔出口径向位置; $\rho$  为气流的密度; $\omega$  为转盘旋转角速度.

为验证计算方法设计模型实验,对  $C_w = 1.76 \times 10^4$ ,  $Re_\omega = 5.05 \times 10^4 \sim 2.23 \times 10^5$  范围内的温降特性进行研究,获得实验数据.实验段如图 3 所示,进口设计了一定容积的稳压腔,在腔内使用压力传感器测量总压,精度为 0.15%,使用温度巡检仪测量温度,精度为  $\pm 0.1$  K,作为进口边界;在旋转盘的冷气出口外侧周向均布的固定 3 对热电偶,随转盘一起旋转,热电偶引线穿过空心轴,通过刷环引电器引到温度巡检仪测量相对总温.出口是环境大气.综合考虑设备仪器人员工况等方面的因素,实验结果的不确定度不大于 5.72%.

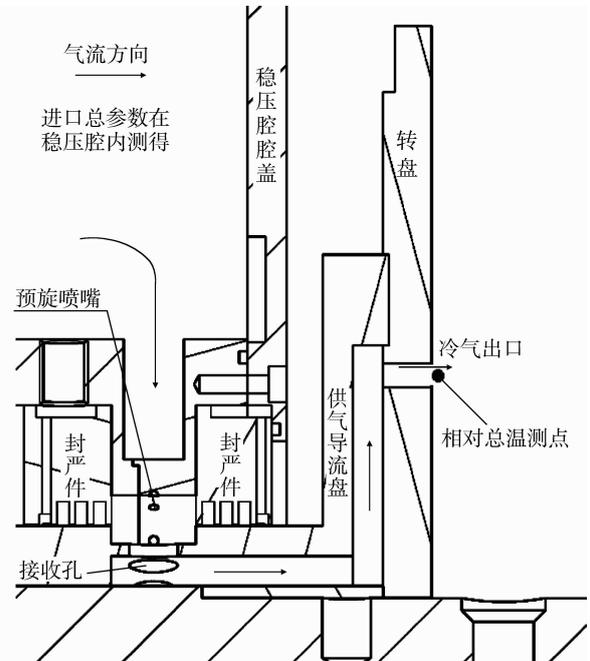


图 3 实验段与测点布置

Fig. 3 Sketch of test section and measurement points position

图 4 所示为径向预旋系统结构的无量纲温降随旋转雷诺数变化的计算值和相同尺寸模型实验值的对比,结果表明两者在趋势一致且数值上最大相对误差不超过 20%,计算方法可行. 本文的数值模拟均采用上述方法.

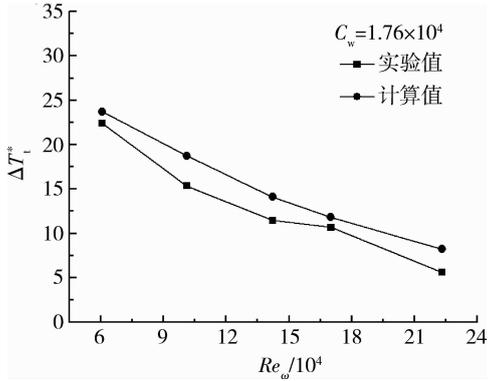


图 4 径向预旋系统温降计算值与实验值的对比  
Fig. 4 Comparison between computational and experimental  $\Delta T_i^*$  of the radial pre-swirl system

## 2 计算结果与分析

在径向预旋系统中,冷却气流在预旋喷嘴膨胀加速,速度方向与下游旋转部件的旋转方向一致,且周向分量较大,径向分量较小,当流至冷气出口时仍具有较高的周向速度,从而降低了冷气出口处冷气与旋转元件的相对速度,实现降低冷气的相对总温,减小流动损失的目的.

### 2.1 温降和流阻随旋转雷诺数的变化

图 5 和图 6 分别是不同质量流量下,气流流经径向预旋系统的无量纲温降和无量纲压降随旋

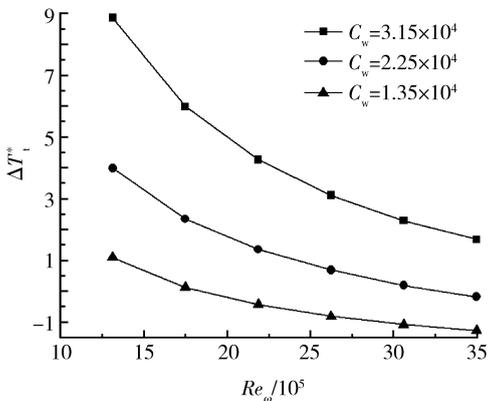


图 5 不同无量纲质量流量下温降随旋转雷诺数的变化关系

Fig. 5  $\Delta T_i^*$  versus  $Re_\omega$  with different  $C_w$

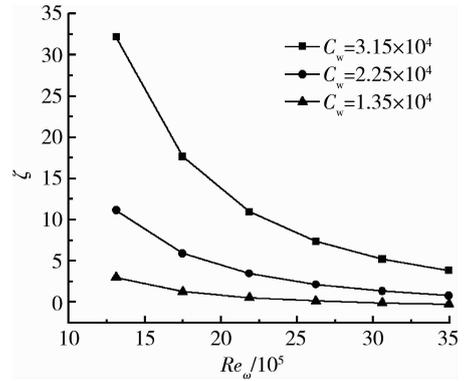
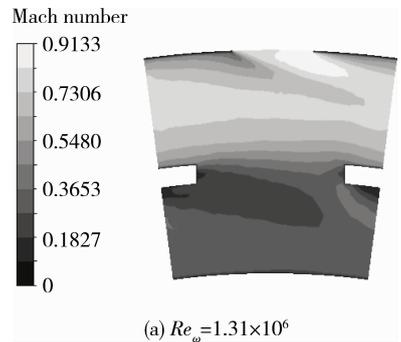


图 6 不同无量纲质量流量下压降随旋转雷诺数的变化关系

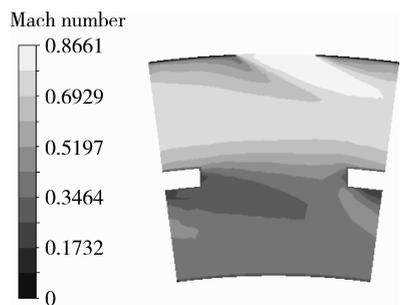
Fig. 6  $\zeta$  versus  $Re_\omega$  with different  $C_w$

转雷诺数变化的关系曲线. 从图中可以看出,不同质量流量条件下,无量纲温降、无量纲压降均随着旋转雷诺数的增大而减小.

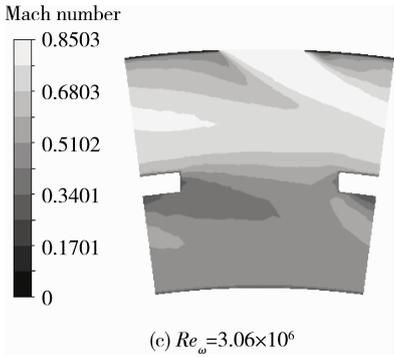
图 7 是经过预旋喷嘴和接收孔中心截面的马赫数云图,图 8 是  $C_w = 3.15 \times 10^4$  时,径向预旋系统子午面和共转腔内流线图. 可以看出:不同旋转雷诺数下预旋系统内部的流动结构相似. 整个径向预旋系统可以分为 3 个区域:预旋腔(转静腔)、同心轴和共转盘腔. 冷气以较大的周向速度进入预旋腔,一部分直接通过接收孔进入下游共转系,其余流体在预旋腔内形成旋流,在预旋气流作用下反向旋转,旋转雷诺数越高,下游旋转壁面通过黏性将旋转的影响传递到上游,预旋入流向旋转方向的偏转越明显;为了改善流通能力,接收孔的



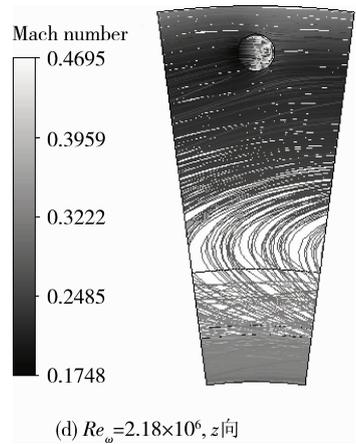
(a)  $Re_\omega = 1.31 \times 10^6$



(b)  $Re_\omega = 2.18 \times 10^6$



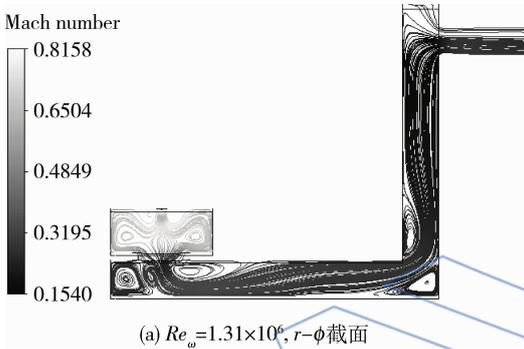
(c)  $Re_\omega = 3.06 \times 10^6$



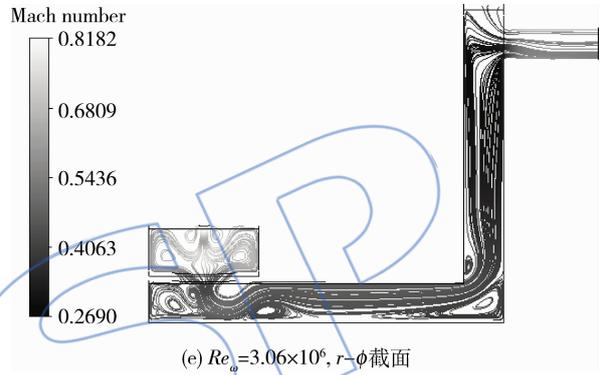
(d)  $Re_\omega = 2.18 \times 10^6, z$ 向

图 7 不同旋转雷诺数下预旋喷嘴-接收孔中心截面的马赫数云图

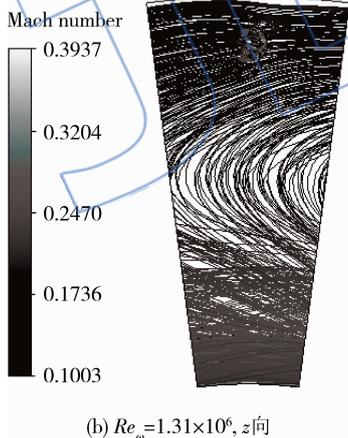
Fig. 7 Mach number contours on preswirl nozzle-receiver hole mid-plane at different  $Re_\omega$



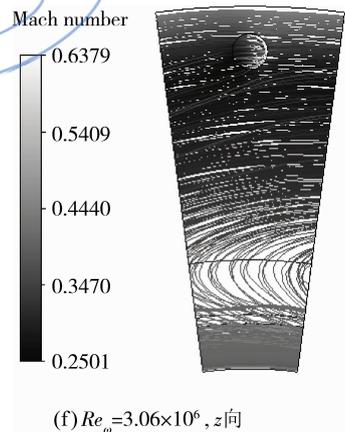
(a)  $Re_\omega = 1.31 \times 10^6, r-\phi$ 截面



(e)  $Re_\omega = 3.06 \times 10^6, r-\phi$ 截面



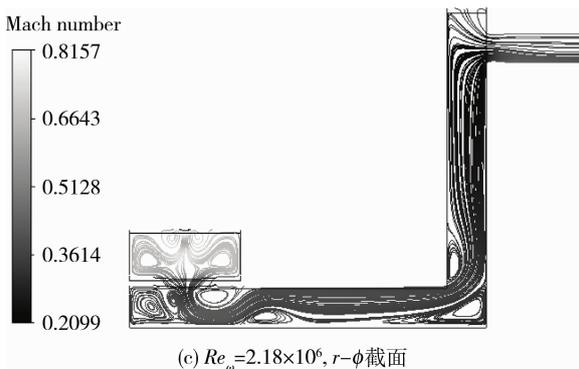
(b)  $Re_\omega = 1.31 \times 10^6, z$ 向



(f)  $Re_\omega = 3.06 \times 10^6, z$ 向

图 8 预旋系统内三维流线图 ( $C_w = 3.15 \times 10^4$ )

Fig. 8 Streamlines in the pre-swirl systems ( $C_w = 3.15 \times 10^4$ )



(c)  $Re_\omega = 2.18 \times 10^6, r-\phi$ 截面

直径较大,通过接收孔的流体进入共转的同心轴后冲击内层壁面,气流仍保持了较大的周向速度向下游流动,并在左侧盲端和接收孔附近形成小范围涡流,随着旋转雷诺数的增大,同心轴出口处的角涡范围逐渐扩展;流体从同心轴流出折转进入盘腔。

定义径向位置为  $r$  处的当地旋流比  $S_r = v_\phi / \omega r$ , 表示处于该径向位置的流体与相同径向位置的壁面周向线速度的相对大小。

气流进入旋转盘腔前,气流速度高于旋转壁

面速度, 旋转雷诺数高时两者相对速度小, 摩擦损失较小, 因此高旋转雷诺数工况下气流进入旋转盘腔的速度略高. 气流进入旋转盘腔后向高半径位置流动, 在理想条件下气流动量对旋转轴的矩是守恒的, 周向速度随半径增大而降低, 低半径处气流速度大于当地旋转盘线速度, 从低半径向高半径流动过程中, 旋转盘线速度逐渐增大, 存在一个半径, 使气流周向速度等于当地旋转盘线速度, 即此时当地的旋流比等于 1, 之后气流速度落后于旋转盘. 图 8 盘腔内流线采用相对速度绘制, 可以看出, 随着旋转雷诺数的增加, 旋流比等于 1 的位置的半径越小. 在冷气出口, 旋转雷诺数越高, 气流与当地相对速度越大, 动温越高, 而静温相差不大, 相应的相对总温就越高, 导致温降越小.

质量流量较小时, 预旋温降随着旋转雷诺数的增大出现负值, 即该工况下预旋系统出口相对总温高于进口总温, 没有得到期望的降温效果, 这是由于小质量流量工况的冷气流动速度较低, 当旋转雷诺数较高时冷气出口处气流与出口相对速度较大, 动温高, 相对总温较大, 同时由于旋转作用对气流做功, 将流体从低半径位置泵送到高半径, 补充了流动过程中的损失, 也提高了流体温度, 总的效果使温降降低, 压降减小. 因此会出现小质量流量时温降和压降小于 0 的情况.

### 2.2 温降和流阻随无量纲质量流量的变化

图 9 和图 10 是不同旋转雷诺数下, 径向预旋系统的温降和流阻随无量纲质量流量变化关系. 由图可见, 不同旋转雷诺数下, 温降和流阻均随无量纲质量流量的增大而增加. 图 11 和图 12 是  $Re_\omega = 1.31 \times 10^6$  时, 不同无量纲质量流量下预旋系统内部流动结构.

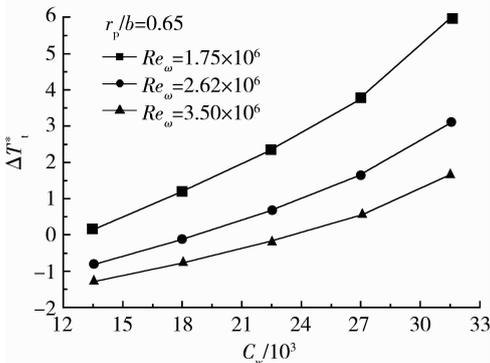


图 9 不同旋转雷诺数下温降随无量纲质量流量的变化关系

Fig. 9  $\Delta T^*$  versus  $C_w$  with different  $Re_\omega$

由于这里所模拟工况的旋转雷诺数较高, 气出口处的冷气速度总是落后于旋转盘的当地线速

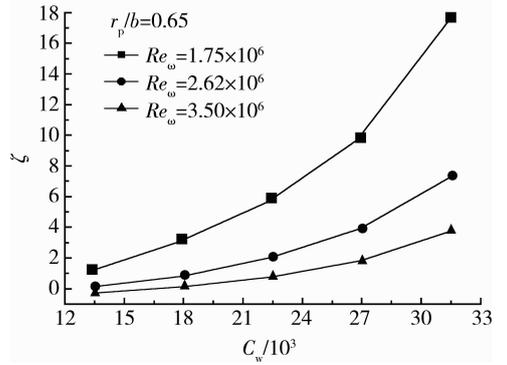


图 10 不同旋转雷诺数下压降随无量纲质量流量的变化关系

Fig. 10  $\zeta$  versus  $C_w$  with different  $Re_\omega$

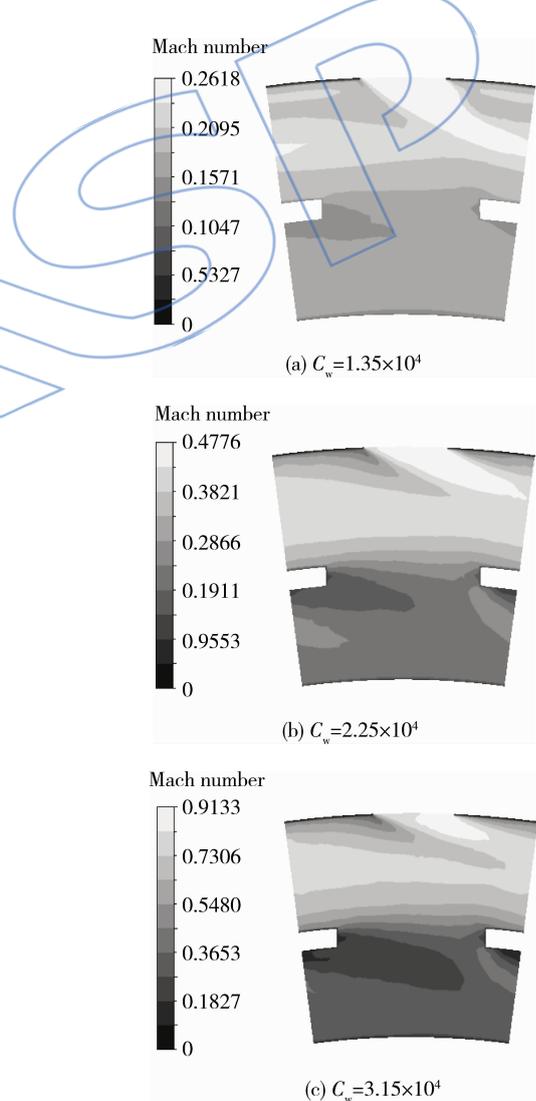
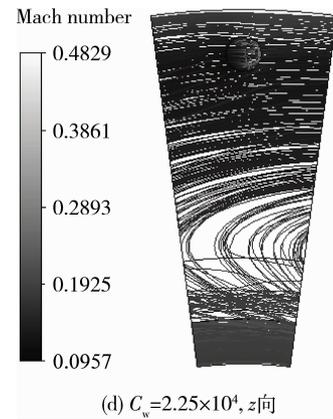
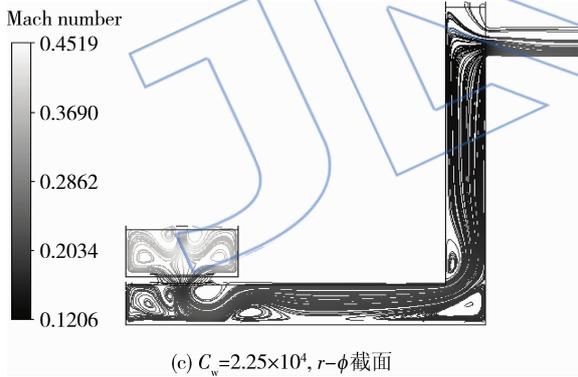
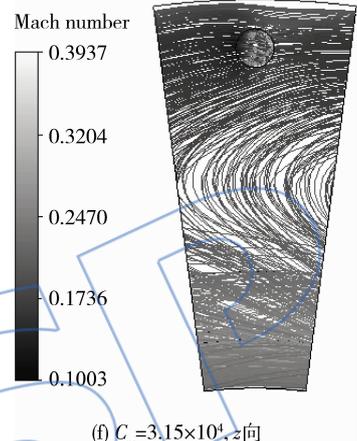
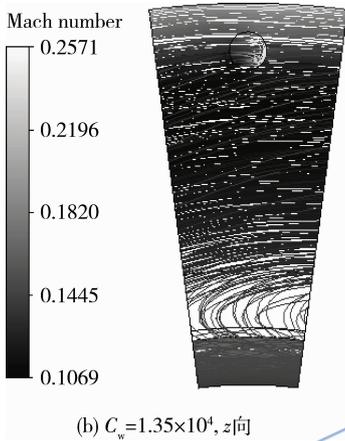
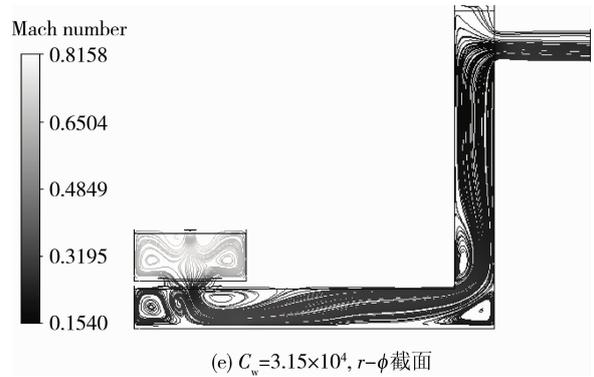
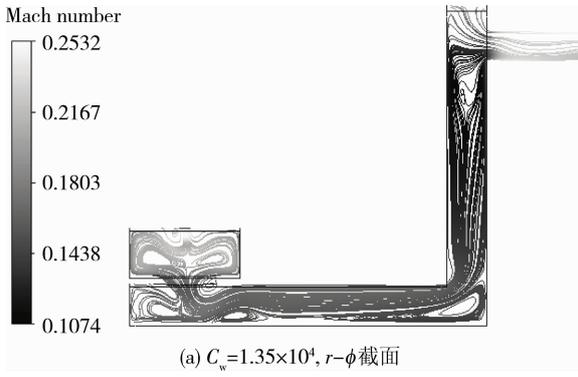


图 11 不同无量纲质量流量下预旋喷嘴-接收孔中截面的马赫数云图

Fig. 11 Mach number contour on preswirl nozzle-receiver hole mid-plane at different  $C_w$

图12 预旋系统内流线图( $Re_w=1.31 \times 10^6$ )Fig. 12 Streamlines in the pre-swirl systems ( $Re_w=1.31 \times 10^6$ )

度. 由图12的 $z$ 向视图可以看出, 无量纲质量流量越大, 相应的冷气速度越大,  $S_r = v_\phi / \omega r = 1$ 的位置向高半径处偏移, 冷气出口处的冷气速度落后于旋转盘的当地线速度的程度越小, 且两者之间的相对速度减小, 则动温越小, 温降变大.

当旋转雷诺数相同时, 增加质量流量后冷气流速增大, 与壁面的摩擦损失增加; 与此同时, 气流进入旋转盘腔后与旋转盘的相对速度降低, 旋转盘腔对冷气流的泵送效应受到削弱, 补偿到冷气的机械能减少, 总的作用使冷气总压降低, 无量纲压降增加.

### 3 结论

为探索径向预旋系统的温降和流阻特性, 建立了径向预旋系统结构的简化模型进行数值模拟, 研究了旋转雷诺数和无量纲质量流量对温降和流阻特性的影响. 将计算结果与实验值对比, 证明了计算结果具有一定精度, 并对径向预旋系统内的流动进行了分析. 通过本文的研究, 得到以下结论:

1) 采用本文的计算方法得到的结果与实验值趋势一致,数值上相差不大,最大相对误差不超过 20%。

2) 本文参数范围内,当流经径向预旋系统的冷气质量流量一定时,气流温降随旋转雷诺数的增大而减小,气流压降随旋转雷诺数的增大而降低。

3) 当径向预旋系统工作的旋转雷诺数一定时,气流温降随无量纲质量流量的增大而增大,气流压降随无量纲质量流量的增大而增加。

## 参考文献:

- [1] Geis T, Dittmann M, Dullenkopf K. Cooling air temperature reduction in a direct transfer preswirl system[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004, 126(4): 809-815.
- [2] Dittmann M, Geis T, Schramm V, et al. Discharge coefficients of a pre-swirl system in secondary air systems [EB/OL]. [2012-09-15]. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=13502734>.
- [3] Dittmann M, Dullenkopf K, Wittig S. Direct-transfer pre-swirl system: a one-dimensional modular characterization of the flow[EB/OL]. [2012-09-15]. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16846559>.
- [4] Chew J W, Hills N J, Ciampoli F, et al. Pre-swirled cooling air delivery system performance [C] // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*. Reno-Tahoe, NV, United States: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 1129-1137.
- [5] Karabay H, Chen J X, Pilbrow R, et al. Flow in a 'cover-plate' preswirl rotor-stator system[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(1): 160-166.
- [6] Lewis P, Wilson M, Lock G, et al. Physical interpretation of flow and heat transfer in preswirl systems[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(3): 769-777.
- [7] Lewis P, Wilson M, Lock G D, et al. Effect of radial location of nozzles on performance of preswirl systems: a computational and theoretical study[J]. *Journal of Power and Energy*, 2009, 223(2): 179-190.
- [8] Ciampoli F, Hills N J, Chew J W, et al. Unsteady numerical simulation of the flow in a direct transfer pre-swirl system [C] // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*. Berlin, Germany: ASME, 2008: 1647-1655.
- [9] 王锁芳, 朱强华, 张羽, 等. 预旋进气位置对转静盘腔换热影响的数值研究[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(8): 1227-1232.  
WANG Suofang, ZHU Qianghua, ZHANG Yu, et al. Numerical studies of heat transfer in a rotor-stator cavity with different radial positions of pre-swirl inlet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(8): 1227-1232. (in Chinese)
- [10] 何振威, 冯青, 刘松龄, 等. 带盖板预旋进气系统的温降实验误差分析[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(26): 6439-6444.  
HE Zhenwei, FENG Qing, LIU Songling, et al. The error analysis of an experiment about drop in temperature in a pre-swirl system with a cover-plate[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(26): 6439-6444. (in Chinese)
- [11] 朱晓华, 刘高文, 刘松龄, 等. 带盖板的预旋系统温降和压力损失数值研究[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(11): 2498-2506.  
ZHU Xiaohua, LIU Gaowen, LIU Songling, et al. Numerical studies of temperature drop and pressure loss in a cover-plate preswirl system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(11): 2498-2506. (in Chinese)
- [12] 罗翔, 徐国强, 陶智, 等. 进气角度对旋转盘冷却效果的影响[J]. *推进技术*, 2007, 53(3): 240-243.  
LUO Xiang, XU Guoqiang, TAO Zhi, et al. Cooling effectiveness in a rotor-stator system with different pre-swirl angles[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(3): 240-243. (in Chinese)
- [13] 丁水汀, 陶智, 徐国强, 等. 旋转盘腔冷却问题的工程评价[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(1): 84-87.  
DING Shuiting, TAO Zhi, XU Guoqiang, et al. An engineering evaluation system of turbine disk cooling configuration[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(1): 84-87. (in Chinese)
- [14] 丁水汀, 陶智, 徐国强, 等. 带进气预旋的旋转空腔平均换热特性研究[J]. *航空动力学报*, 1998, 13(3): 277-280.  
DING Shuiting, TAO Zhi, XU Guoqiang, et al. A study on averaged heat transfer characteristics of a rotating cavity with preswirl inflow[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1998, 13(3): 277-280. (in Chinese)
- [15] Radtke L J. Radial inflow blade cooling system: US, 3990812[P]. 1976-09-11.