

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.020

供气孔角度对径向预旋系统特性影响的数值研究

柴金孟,王锁芳,沈文杰

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:为降低航空发动机径向预旋系统的流阻,增加温降,研究供气孔内的流动特性,建立径向预旋系统三维模型,在不同预旋角和旋转雷诺数条件下,采用数值方法研究不同供气孔角度下预旋系统的特性。结果表明:随着供气孔角度的增加,孔内的旋涡逐渐减小,孔内流通性得到改善;系统温降系数增加,在高旋转雷诺数下增幅较大,最大可提高 19.3%;供气孔的流量系数有显著提高,最大可提高 64.9%,降低了系统的流阻,从而预旋喷嘴出口流量系数及系统无量纲质量流量均有所提高。

关键词:航空发动机;径向预旋;供气孔角度;温降;流阻;流量系数

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0096-05

Numerical Study on Influence of Supply Hole Angle on Radial Pre-swirl System

CHAI Jinmeng, WANG Suofang, SHEN Wenjie

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to reduce the flow resistance and increase the temperature drop of the aero-engine radial pre-swirl system, the flow characteristics inside the supply hole was studied and a three-dimensional model of the radial pre-swirl system was established. The numerical simulation was conducted to study the features of different pre-swirl systems at different pre-swirl nozzle angles and in rotational Reynolds numbers. The results show that as the angle of the supply hole increases, the vortex inside the hole gradually decreases, which improves the flowability of the supply hole. Temperature drop coefficient increases with the supply hole increases, and the increase of temperature drop coefficient is larger in high rotational Reynolds number, up to 19.3%. After the angle of supply hole is increased, the discharge coefficient is significantly improved, up to 64.9%, which reduces the flow resistance of the system, thus the discharge coefficient of the pre-swirl nozzle outlet and the system dimensionless mass flow rate being improved.

Keywords: aero-engine; radial pre-swirl; supply hole angle; temperature drop; flow resistance; discharge coefficient

0 引言

因航空发动机涡轮前温度的上升,给涡轮叶片等热端部件冷却带来了挑战。径向预旋系统是为涡轮叶片提供高品质冷气的系统。结构由预旋喷嘴、转静腔、接受孔、共转腔和供气孔组成。其原理为:冷气通过预旋喷嘴膨胀加速后静温降低并发生偏转,使冷气相对于涡轮盘的速度减小,进而降低了冷气的相对总温,为涡轮叶片提供更高品质的冷气,故提高预旋系统的性能对于涡轮叶片的冷却具有重要意义。

20 世纪欧洲研究人员开始了对预旋系统的研究。MEIERHOFER B 等^[1]首先通过试验证明了预旋系统能显著提高气体的温降,而后国内外学者对预旋系统的各个元件进行了研究。在预旋

喷嘴方面,DITTMANN M 等^[2]通过试验研究发现预旋喷嘴流量系数的变化规律及其影响因素。胡伟学、刘育心等^[3-4]分别研究了直孔型、叶栅型和叶型孔式预旋喷嘴的结构参数对系统性能的影响。

在接受孔方面研究分为直孔型结构改进和设计新孔型两个方向,陈帆、侯伟韬和韦光礼等^[5-7]分别对直孔型结构参数进行研究,找到了温降性能较优的结构。LIU Y X、张凯等^[8-9]各设计了叶栅型和狭缝型接受孔并证明了新结构温降性能的优越性。

在预旋系统旋转域的研究中,张建超和邓丽君等^[10-11]证明添加导流叶片可以提高系统温降。郑笑天^[12]研究了供气孔长度和径向位置的影响,发现长度增大预旋系统性能降低;而径向位置增加,预旋系统的压损减小,温降增加。

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017-III-0011-0037)

第一作者简介:柴金孟(1996—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为热能工程,18020382556@163.com。

供气孔是径向预旋系统中的重要元件,其结构参数影响冷气的品质,由上文分析可知,在公开的文献中未见对径向预旋系统供气孔角度的研究,而带角度的供气孔可以改变系统内部气体的流动,进而影响系统性能。故本文在不同预旋角和旋转雷诺数的条件下,采用数值方法研究了供气孔周向倾角对径向预旋系统温降及流阻的影响,并进行理论探索与分析,为径向预旋系统未来的结构优化设计打下基础。

1 计算模型及方法

1.1 计算模型

本文研究的径向预旋系统模型如图1所示。模型分为静止域和旋转域,将预旋腔在径向方向的中间截面定义为转静交界面。基于模型具有周期性的特点,为节省计算资源,取模型整体的1/6为实际计算域,该范围内含预旋喷嘴3个,接受孔8个,供气孔8个。

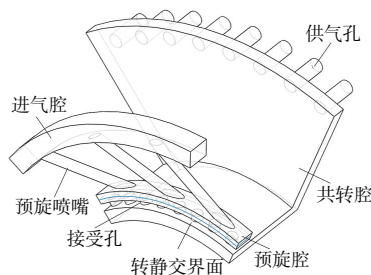


图1 径向预旋系统模型图

图2为供气孔角度与预旋角示意图。供气孔角度 α 为供气孔与转盘面的夹角,本文中其取值为 75° 、 90° 、 100° 、 120° 、 135° 、 150° 。预旋角 θ 为喷嘴出口中心线与静盘切线方向的夹角,其取值为 15° 、 30° 、 45° 。

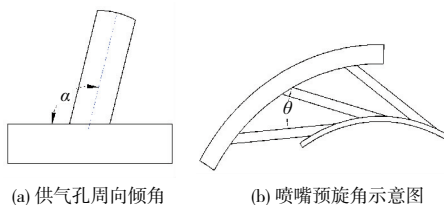


图2 模型细节示意图

图3为该径向预旋系统主要结构尺寸的示意图。图中出口半径位置 R_n 与供气孔中心半径位置 R_s 的比值 $R_n/R_s = 0.63$,与接受孔出口半径位置 R_r 比值 $R_n/R_r = 1.13$,预旋喷嘴直径 D_n 与供气孔直径 D_s 比值 $D_n/D_s = 0.69$,与接受孔直径 D_r 比

值 $D_n/D_r = 0.91$ 。 S_{cr} 为共转盘腔的宽度, L_s 为供气孔的长度, b 为共转盘腔的最大旋转半径。

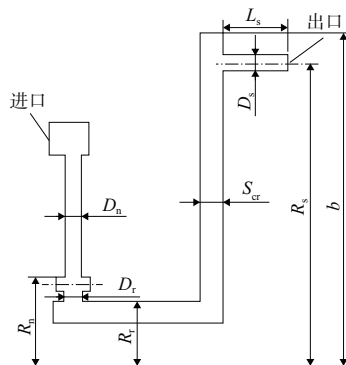


图3 结构参数示意图

1.2 计算方法及验证

采用ANSYS Mesh对模型进行非结构网格划分并添加边界层,第一层边界层高度0.05 mm,网格增长率为1.2,经验证满足计算要求。对网格数为10万~150万的模型进行网格无关性验证,结果表明网格数超过90万后,温降系数的变化率不超过0.2%。为保证精度和节省计算资源,采用网格数量为110万的模型进行计算。

文献[13]中的计算模型与本文同为径向预旋系统,故利用其试验数据进行湍流模型验证。将本文的计算方法对文献中的模型进行计算,所得结果如图4所示。RNG $k-\varepsilon$ 模型所得结果与试验值最为接近,故本文选择此模型进行计算。

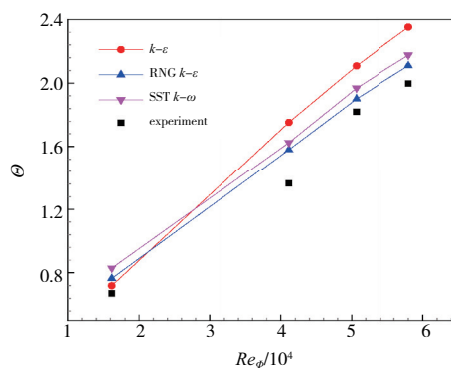


图4 湍流模型验证

采用CFX软件对上述模型进行稳态求解计算,入口给定总压1360 kPa,进口总温750 K;出口给定静压为800 kPa。旋转域的转速范围为7500 r/min ~ 17500 r/min。转静交界面使用Frozen Rotor进行处理,网格连接方式为GGI。壁面均为绝热无滑移壁面,采用Scalable壁面函数。

1.3 参数定义

$$1) \text{ 旋转雷诺数: } Re_{\phi} = \frac{\rho \omega b^2}{\mu} \quad (1)$$

式中: ω 为旋转域的旋转角速度, rad/s; ρ 为空气密度, kg/m³; μ 为空气运动黏度, Pa · s。

$$2) \text{ 旋流比: } S_r = \frac{V_{\phi}}{\omega r} \quad (2)$$

式中: V_{ϕ} 为气流周向速度, m/s; r 为气流当地半径, m。

$$3) \text{ 温降系数: } \Psi = \frac{T_{in}^* - T_{out,rel}^*}{T_{in}^*} \quad (3)$$

式中: T_{in}^* 为进口气流总温, K; $T_{out,rel}^*$ 为出口气流相对总温, K。

$$4) \text{ 无量纲质量流量: } C_w = \frac{\dot{m}}{\mu b} \quad (4)$$

式中 $\dot{m}$ 为出口气流实际质量流量, kg/s。

$$5) \text{ 无量纲总温降}^{[13]}: \Theta = \frac{T_{in}^* - T_{out}^*}{T_{in}^* - T_{in}} \quad (5)$$

式中 T_{in} 与 T_{out}^* 为进口气流静温和出口气流总温, K。

$$6) \text{ 流量系数: } C_D = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_i} \quad (6)$$

式中 $\dot{m}_i$ 为气流的理想流量, kg/s。

2 计算结果分析与讨论

2.1 气流流动特性

图 5 为 $\theta = 15^\circ$ 、 $Re_{\phi} = 8.9 \times 10^6$ 时, 供气孔截面的流线和旋流比云图。可以看出, 进入供气孔前气流旋流比小于 1。当供气孔角度较小时, 气流流进供气孔后沿着下壁面流出, 同时受到上壁面的阻碍, 在上壁面附近形成旋涡, 从而产生耗散使流速降低流动受阻。但随着供气孔角度的增加, 供气孔的导向作用增强, 旋涡的范围逐渐减小, 流阻随之降低, 旋流比分布趋于均匀。当供气孔角度达到 150° 后, 旋涡消失。

图 6 为 $\theta = 15^\circ$ 、 $Re_{\phi} = 1.0 \times 10^7$ 时, 不同供气孔角度下预旋喷嘴截面的流线和马赫数云图。气流经过预旋喷嘴后膨胀加速, 发生偏转使周向速度增加, 降低气流在旋转域的旋流比, 有利于气流在旋转域内的流动。供气孔角度增加后, 气流在预旋喷嘴出口处的马赫数随之增加。由图 6 可知, 供气孔角度增加改善了系统的流通性, 降低了系统流阻, 故在喷嘴出口处气流的马赫数有所增加。

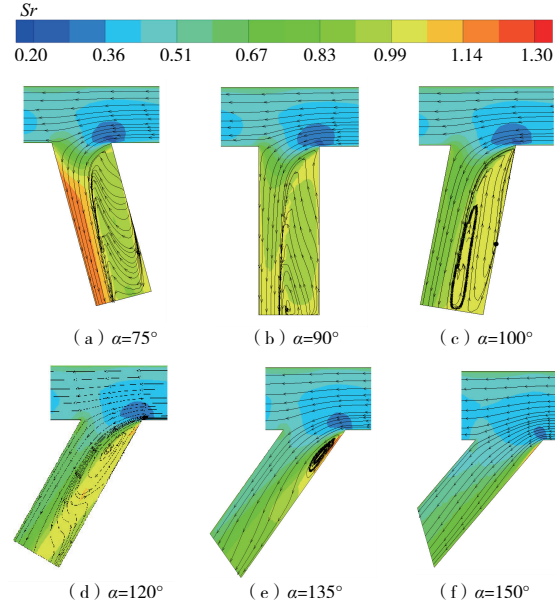


图 5 供气孔截面流线与旋流比云图

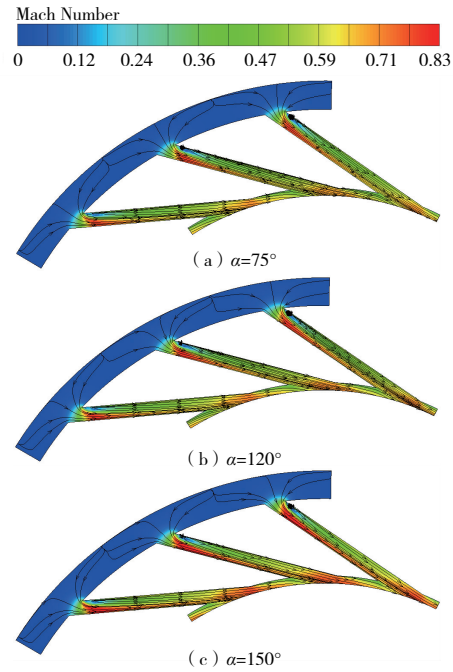


图 6 预旋喷嘴截面流线与马赫数云图

2.2 温降特性

图 7 所示为 $\theta = 15^\circ$ 、 $Re_{\phi} = 1.0 \times 10^7$ 时供气孔截面的相对总温云图。由图可知随着供气孔角度增加, 孔内气流的相对总温逐渐降低。这是由于供气孔角度的增加使得孔内旋涡范围减小, 流通性增强, 流动过程中产生的耗散减弱。在供气孔内部气流的相对总温变化幅度不大, 从其孔型来看, 由于供气孔为圆形直通型孔, 由对称性可知孔

壁对气流的作用在圆周方向上相同且使气流会随孔旋转,这就使得孔内气流的相对总温变化幅度较小。

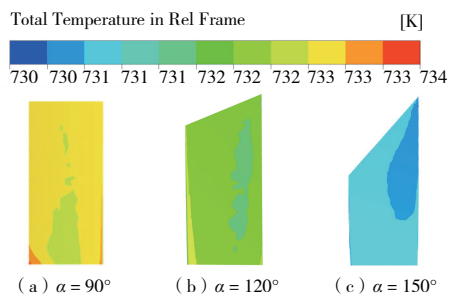


图7 供气孔内相对总温

在不同旋转雷诺数和预旋角下,温降系数随

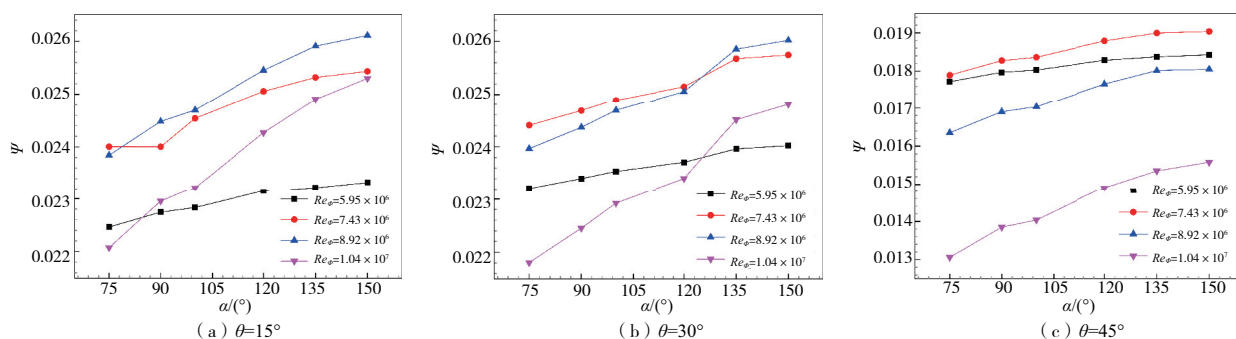


图8 不同供气孔角度下温降系数变化关系

在相同的旋转雷诺数下,随着预旋角的增加,温降系数均有所降低。这是由于预旋角增加使得喷嘴出口气流的速度降低,使气流周向速度与转盘转速之间差距增加,转盘对气流做功增加,从而降低了系统温降系数。

2.3 流阻特性

图9所示为 $\theta = 15^\circ$ 时供气孔角度对其流量系数的影响。在不同的旋转雷诺数下,供气孔的流量系数均随着供气孔角度的增加而增加。从图中可知供气孔角度增加,供气孔内旋涡逐渐消失,改善了其流通性,从而提高了有效流通面积;而供气孔流量系数随着旋转雷诺数的增加而降低,这是由于在低旋转雷诺时,供气孔截面的气流旋流比更接近于1,供气孔具有较优的流通性。在4种旋转雷诺数下,供气孔的流量系数相较于 90° 时最大增加了59.1%、64.9%、57.6%、49.8%。

$\theta = 15^\circ$ 时径向预旋系统无量纲质量流量随供气孔角度变化关系如图10所示。随着供气孔角度增加,系统无量纲质量流量增加。这是由于供气孔角度增加提高了其有效流通面积,系统流阻降低,从而使系统无量纲质量流量均提高。在不同的旋转雷诺数下,无量纲质量流量分别提高了

供气孔角度变化关系如图8所示。在不同的旋转雷诺数下,供气孔角度增加,温降系数都随之增加。由文献[5]可知,此工况下系统进出口温差取决于喷嘴出口气流旋流比。供气孔角度的增加,降低了系统流阻,使喷嘴出口气流流速升高,旋流比随之增加,从而提高了系统的温降系数。旋转雷诺数为 1.04×10^7 时,不同预旋角下温降系数增幅分别为14.6%、15.1%和19.3%。旋转雷诺数增加,温降系数先增加后降低。这是由于旋转雷诺数增加后,气流离心温升较低。而在高旋转雷诺数的情况下,旋流比小于1,转盘壁面对气流所做的功明显增加,导致气流升温,温降系数明显降低。

1.3%、1.6%、1.9%、2.1%。旋转雷诺数增加,无量纲质量流量随之增加。这是由于旋转雷诺数增加后,盘腔壁面对气流的泵送作用增加,使系统的无量纲质量流量增加。

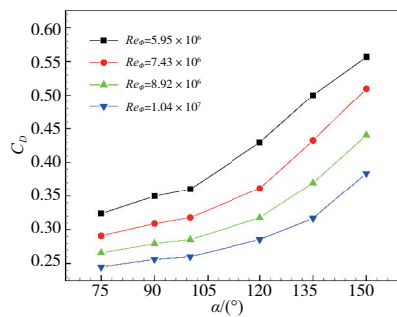


图9 供气孔流量系数($\theta = 15^\circ$)

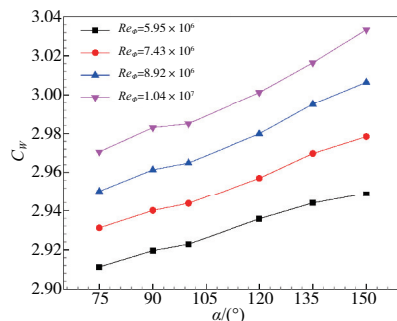


图10 径向预旋系统的无量纲质量流量变化关系

3 结语

1) 随着供气孔角度的增加,供气孔对气流的导向作用逐渐增强,孔内的旋涡逐渐减小,旋流比分布逐渐均匀,供气孔流通性增强,从而降低系统的流动阻力,使预旋喷嘴出口马赫数随之增加。

2) 供气孔内气流温度随供气孔角度增加而降低,温降系数随着供气孔角度的增加而增加。旋转雷诺数为 1.04×10^7 时,温降系数最大增加了19.3%。

3) 供气孔流量系数和系统无量纲质量流量随供气孔角度增加而增加。预旋角为 15° 时供气孔流量系数最大可提高64.9%,无量纲质量流量最大可提高2.1%。

参考文献:

- [1] MEIERHOFER B, FRANKLIN C J. An investigation of a preswirlled cooling airflow to a turbine disc by measuring the air temperature in the rotating channels[C]. [S.I.]: Asme, 1981.
- [2] DITTMANN M, GEIS T, SCHRAMM V, et al. Discharge coefficients of a preswirl system in secondary air systems[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(1): 119-124.
- [3] 胡伟学, 王锁芳, 毛莎莎. 预旋喷嘴径向角度对预旋特性影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 84-91.
- [4] 刘育心, 刘高文, 吴衡, 等. 叶型孔式预旋喷嘴流动特性数值研究[J]. 推进技术, 2016, 37(2): 332-338.

- [5] 陈帆, 王锁芳, 张光宇, 等. 接受孔角度对预旋系统流动特性影响的数值研究[J]. 推进技术, 2018, 39(7): 1549-1555.
- [6] 侯伟韬, 王新军, 李炎栋. 接收孔周向倾角对预旋静盘腔流动特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(11): 27-33.
- [7] 韦光礼, 王锁芳, 陆海, 等. 带进气角度接受孔径向预旋流动特性数值研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 16-20.
- [8] LIU Y X, LIU G W, KONG X Z, et al. Design and numerical analysis of a vane shaped receiver hole in a cover-plate preswirl system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(4): 041001.
- [9] 张凯, 王锁芳, 侯晓亭, 等. 狭缝型接受孔对径向预旋系统的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(5): 983-991.
- [10] 张建超, 王锁芳. 带导流片的径向预旋系统流动结构数值研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014, 28(1): 43-48.
- [11] 邓丽君, 朱宇. 带内部叶轮结构的涡轮盘腔流动与温降特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(4): 562-569.
- [12] 郑笑天. 流路结构对预旋盘腔气流流动影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [13] 余建军. 径向预旋流动特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

收稿日期: 2022-10-11

(上接第82页)

2) 对机构进行了正逆向运动学分析, 得到了机构的正运动学数学模型以及反解表达式。

3) 对机构进行误差建模与可靠性分析, 通过仿真运算得到机构末端位姿误差范围, 利用蒙特卡洛法对机构进行可靠性分析, 得到影响机构末端位姿误差的主要误差源为关节4和关节6的 $\Delta\alpha$ 值, 为提高对接机构的位姿精度提供了依据。

参考文献:

- [1] 王丙戌. 导弹总装对接平台的设计与研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [2] 张志雄, 江志新, 杨拥民, 等. 关节对中误差对机械臂末端定位精度影响[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 185-190.

- [3] 宋晨, 杨洋, 张雷雨, 等. 一种六自由度调姿机构的运动学与误差分析[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(4): 16-21.
- [4] 陈博, 杨健, 闫恒, 等. IRS-300 六轴机器人运动学建模与参数仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(5): 88-90, 112.
- [5] 阎华, 刘桂雄, 郑时雄. 机器人位姿误差建模方法综述[J]. 机床与液压, 2000, 28(1): 3-5.
- [6] 徐立中, 丁晓峰, 王鑫, 等. 基于信赖域的序贯拟蒙特卡洛滤波算法[J]. 电子学报, 2011, 39(3A): 24-30.
- [7] 谢里阳, 王正, 周金宇. 机械可靠性基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

收稿日期: 2022-09-09