

带叶片涡轮盘腔气流增压温降特性数值模拟研究

郝鑫,连文磊,尚登阅

(南京航空航天大学,能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:通过在涡轮盘腔内部增加叶片的方式改变盘腔内部流动结构,从而降低旋转系下的相对总温。针对不同叶片结构对涡轮盘腔内部流动的影响开展数值模拟研究。结果表明:叶片叶型结构设计对内部流场的影响较大,旋流比为影响的主要因素,旋流比接近于1时,增压温降效果最好;导流叶片叶型的差异对总温降增压效果的影响明显;叶片进出口半径对预旋系统整体性能有一定影响。

关键词:航空发动机;涡轮盘腔;内部叶片;增压;温降;数值模拟

中图分类号:V232 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0042-03

Numerical Simulation Study of Pressure and Temperature Drop Characteristics of Turbine Disk Cavity with Internal Blades

HAO Xin, LIAN Wenlei, SHANG Dengyue

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

Abstract: The internal flow structure of turbine disk cavity is changed by adding blades in the disk cavity to reduce the relative total temperature under the rotating system, and the numerical simulation study on the effect of different blade structures over the internal flow in turbine disk cavity is conducted. The results show that the design of blade profile has a great influence on the internal flow field, and the swirl ratio is the main factor. When the swirl ratio is close to 1, the effect of pressurization temperature drop is the best. The difference of guide vane profile has obvious influence on the total temperature drop and pressurization effect. The radius of blade inlet and outlet have certain influence on the overall performance of the pre-swirl system.

Keywords: aircraft engine; turbine disk cavity; internal blade; pressurization; temperature drop; numerical simulation

0 引言

预旋系统作为航空发动机气流冷却系统的重要组成部分,极大地影响了涡轮叶片冷却气流的冷却效果。如何优化预旋系统的结构设计,进一步对冷却气流进行优化利用,更加有效地满足涡轮叶片的冷却要求是涡轮叶片冷却技术后续发展的一个重要研究方向。

KILIC M^[1]利用 Navier-Stokes 方程对盘腔内结构下的流动和传热特性进行了数值模拟。SNOWSILL G D^[2]分析了转静交界界面的处理方式对数值计算结果的影响,证明 Frozen Rotor 处理方法耗时更少,并可以取得很好的结果。肖竞雄等^[3]研究了径向进气装置进气孔数量、尺寸的变化,总压恢复系数与畸变指数的变化规律。王锁芳等针对随着盘腔进气径向位置^[4]、预旋喷嘴的径向角度^[5]对气流旋流比、径向预旋系统温降系数及总压损失系数变化影响规律进行了研究。

以上及其他相关研究大多集中在盘腔传热的基础研究上,对涡轮盘腔内部结构对流动的影响涉及得较少。本文将针对涡轮盘腔内部对冷却气流温降增压效果的影响展开研究,并分析影响温降增压效果的主要因素、相应的

评价标准以及各影响因素的影响规律。

1 数值模型

1.1 几何模型

本文根据实际航空发动机涡轮盘腔的实际设计尺寸,进行了涡轮盘腔的几何模型构建如图1所示,并根据涡轮引气系统实际内部流场,对模型进行了适当的简化,构建了如图2所示的涡轮盘腔内部的流体域计算模型。由于该模型具有周期性,选取了模型的1/7作为计算域。

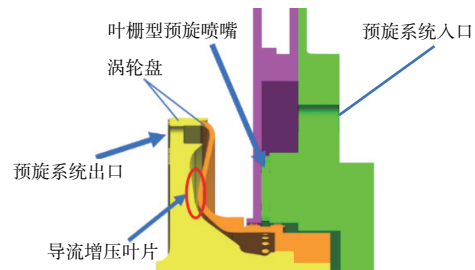


图1 涡轮盘腔的几何模型

第一作者简介:郝鑫(1995—),男,吉林四平人,硕士研究生,研究方向为航空发动机热管理。



图2 涡轮盘腔内部流体域

1.2 数值计算方法

本文研究的内容是稳态流动,各物理量可以取稳态下的时均值。计算模型的边界条件由实际航空发动机的实际工况来确定,预旋喷嘴的进口设置为压力进口边界,给定进口总压、总温和出口压力,出口设置为流量出口。转静交界面采用 Frozen Rotor 法处理,采用 RNG 湍流模型作为计算模型,并选用 CFX 软件进行计算。壁面的 y plus 在 30~300 之间;入口处的湍流强度为 5%,涡流黏度比为 10,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 算法。收敛标准为各项残差均 $<10^{-4}$,出口相对总温的残差变化趋于稳定。在相关文献中也利用试验结果对该模型进行了验证^[6],证明了计算方法的可行性(图3)^[7]。

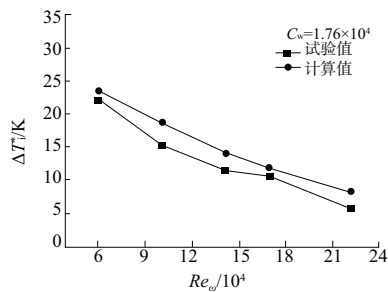


图3 温降计算值与试验值的对比

1.3 参数定义

由于涡轮叶片冷却气流主要服务于高速旋转的涡轮叶片的冷却工作,旋转系下的相对总温对其实际工作效果更具有参考意义^[8],故选定无量纲温降 θ 为温降效果的参考量,同时气流压比也影响着冷却气流的冷却效果。上述性能参数的定义如下:

1) 无量纲温降

无量纲温降 θ 是有关进口总温和旋转坐标系下出口相对总温的无量纲参量,定义如下:

$$\theta = \frac{2C_p(T_{in,rel}^* - T_{out,rel}^*)}{(\omega r_b)^2} \quad (1)$$

其中: $T_{in,rel}^*$ 为涡轮盘腔的进口总温,K; ω 为涡轮盘腔转速,rad/s; r_b 为涡轮盘腔的最大半径,m; C_p 为比热容,J/(kg·K); $T_{out,rel}^*$ 为涡轮盘腔出口以旋转坐标系所计算出的相对总温,K,其定义^[9]如下:

$$T_{rel}^* = T + \frac{1}{2C_p} [V_{axial}^2 + V_{radius}^2 + (V_\varphi - \omega r)^2] \quad (2)$$

2) 压比

在绝热的旋转盘腔中,静压增加,相对总压保持不变,总压变化等于动压变化和静压的变化。

$$\pi = P_{out}/P_{nozzle} \quad (3)$$

3) 旋流比

为研究关键性能参数的影响变化规律,现选取旋流比为设计过程中的无量纲设计参量,旋流比的定义如下:

$$\beta = \frac{V_\varphi}{\omega r_b} \quad (4)$$

式中: V_φ 为周向速度,m/s; ω 为轴向角速度,rad/s。将上式代入相对总温的定义式(2),则有

$$T_{rel}^* = T + \frac{1}{2C_p} [V_{axial}^2 + V_{radius}^2 + (\beta - 1)^2 (\omega r)^2] \quad (5)$$

对预旋系统来说其静温是固定不变的,所以当旋流比 β 接近于1的时候,相对总温最低。

2 研究结果

针对涡轮盘腔内叶片设计参数对冷却气流的影响规律,本节针对叶型设计、叶片长度以及叶片构型等主要参数展开分析,同时选择旋流比为设计过程中的主要无量纲参考量。

2.1 叶型设计对温降增压效果的影响

根据叶片的流动规律和实际加工制造的可行性,初步选定叶片进口位置为距涡轮盘腔中心半径 100 mm 处,出口安装位置为半径 130 mm 处。并基于直叶片、弯曲叶片和弯扭叶片设计了 3 种基本叶型,各叶型下的盘腔内部气流流场如图 4、图 5 所示。

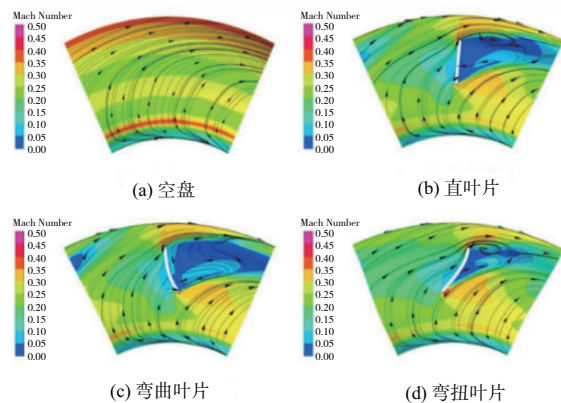
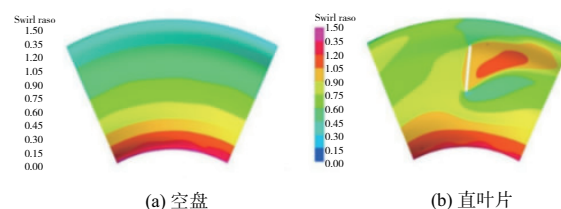


图4 不同叶型下的盘腔内部的流场(旋转系下)



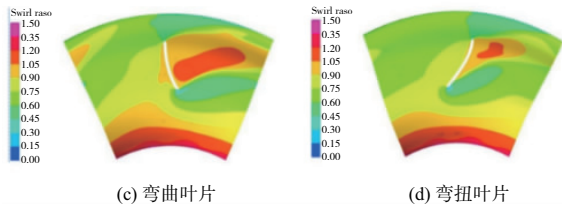


图5 不同叶型典型工况下旋流比分布图

由流场图可以看出,相对于空盘,添加叶片的各盘腔出口处的周向相对速度均显著降低。这是由于导流叶片使得盘腔内部气流的周向速度上升,与旋转盘腔的相对速度差逐步减小,从而实现了相对速度的降低,进一步使相对总温下降。其中弯扭叶片的流动分离区域最小,所造成的压力损失相对较小,结合叶片所带来的增压效果较好。

对比不同叶型的旋流比分布图可以发现,布置导流增压叶片对整个盘腔内部旋流比分布均会产生影响。空盘内部旋流比分布呈层状分布,受半径位置旋流比逐步下降的影响。叶片的存在改变了旋流比变化规律,明显提升了高半径出口位置的旋流比,并使盘腔内部大部分区域的旋流比接近于1,从而提升静压和总温降,提升了导流系统总体性能。

图6、图7为典型工况下3种基础叶型的涡轮盘腔与空盘的无量纲温降及压比变化曲线图。3种基础叶型的无量纲温降、压比相差不大,但均远好于空盘,弯扭叶型的温降效果最为优秀,计算结果与流场及旋流比分析的预估结果一致。

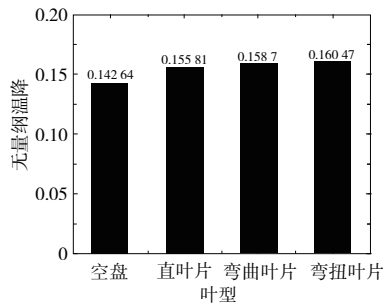


图6 典型工况下各叶型无量纲温降

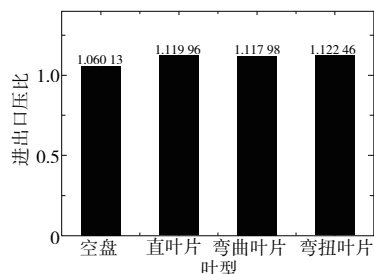


图7 典型工况下各叶型压比

2.2 叶片长度对温降增压效果的影响

为避免因长度变化带来的叶片叶型变化所造成的影响,对比不同叶片数时均选取直叶片进行数值计算,选择

典型工况作为计算工况,盘腔内叶片数均选为7片,选择叶片的出口半径为130mm,叶片的进口半径分别取为80mm、90mm、100mm、110mm。图8、图9为不同叶片长度与不同叶片旋流比对流场及分布的影响。

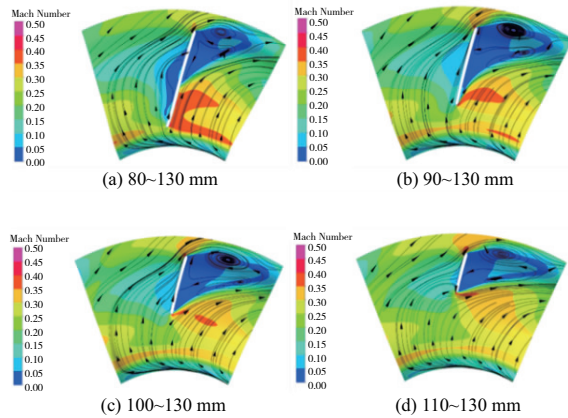


图8 不同叶片长度下的盘腔内部流场(旋转系下)

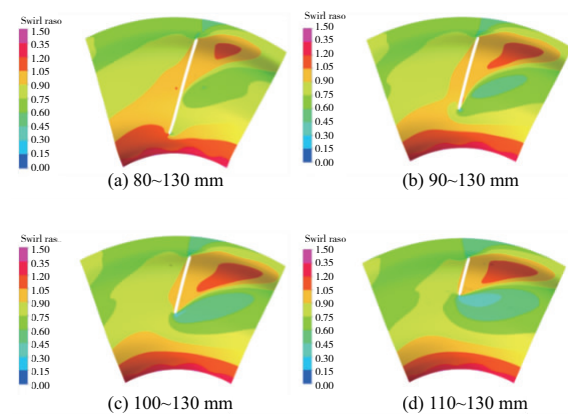


图9 不同叶片长度的旋流比分布图

图8中叶片长度越短,出口处的流动分离区影响范围越大。增加叶片长度主要影响了低半径处的气流流动方向,使得气流提前偏转,强化了对气流的增压效果,同时随着叶片长度缩短,流动分离尾迹区逐步增大,造成出口位置的流动不均匀,会产生较大的压力损失。

从图9中可以看出随着叶片的长度的增加,高旋流比分离区逐步减小,盘腔内部大部分区域旋流比均更为接近于1。总体来看,盘腔内部旋流比变化较大的区域主要集中在叶片附近,其他区域旋流比变化不大,加长叶片主要对低半径处叶片附近区域的旋流比产生了影响。

图10、图11中的数值计算结果与流场及旋流比分析结果一致。虽然不同叶片长度长度间的无量纲温降相差较小,但是随着叶片长度增加,无量纲总温降依旧有着升高的趋势。因此,可以认为叶片在低半径处可以提高系统的温降效果,但是总体来说提升力有限,可以认为加长叶片长度能够在一定范围内提升温降增压效果。

(下转第69页)

具反装技术完成了高精度阶梯轴零件的加工,且该零件各尺寸、形位公差及表面粗糙度要求均满足图样要求。

4 结语

本文对一种高精度阶梯轴零件的加工难点进行了分析,并利用刀具反装技术及高精度数控车床对其加工工艺进行了改进,省略了传统的磨削工序,有效提高了加工效率。同时,对刀具反装技术的基本原理进行了详细的阐述,并根据该原理针对如图1所示的零件图设计出了详细的车削加工工序,编制了刀具反装工步的数控加工程序,完成了该类阶梯轴零件的精加工,可为该类阶梯轴零件的加工工艺改进提供参考。

参考文献:

[1] 冯小东,王新明,康凯,等. 反装刀具车削工艺在镗孔技术中的应用[J]. 产业与科技论坛,2017,16(7):71-72.

- [2] 谭建华. 轴类零件数控车削加工工艺研究[J]. 现代制造技术与装备,2017(1):148,151.
- [3] 黄兴焯,韩佳颖,王延广. 超声磨削加工机理与装置的研究进展[J]. 机械设计,2019,36(增刊1):81-83.
- [4] 王洋,孟庆国,杨喆,等. 提高轴类零件表面粗糙度的方法探讨[J]. 内燃机与配件,2020(8):116-117.
- [5] 邹军. 空心车轴加工工艺研究[J]. 机车车辆工艺,2020(2):19-20.
- [6] 窦武阳,赵则祥,曹秀成,等. 基于径向圆跳动检测的转子弹性管组件同轴度误差分析[J]. 机械设计与研究,2020,36(2):199-203.
- [7] 尉渊,丁大伟,赵正彩,等. 阶梯轴类零件激光在机测量误差补偿研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):23-25,51.
- [8] 姚明钊. 数控车圆弧螺纹车削加工方法研究[J]. 机械研究与应用,2019,32(4):178-180.

收稿日期:2020-07-10

(上接第44页)

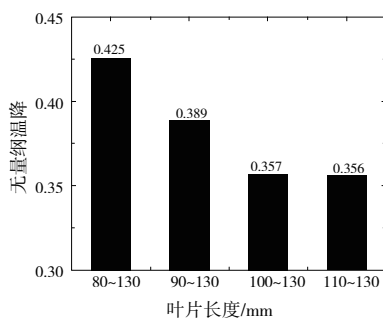


图10 不同叶片长度无量纲温降变化

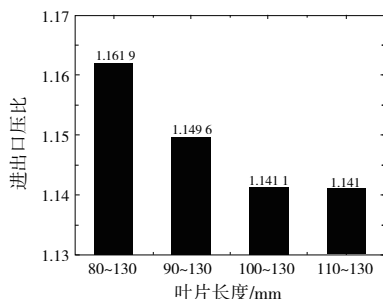


图11 不同叶片长度压比变化

3 结语

本文通过对空气预旋系统涡轮盘腔进行数值模拟,对其内部结构采用添加叶片的方式进行优化设计,并进一步研究了叶型设计、叶片长度、叶片数对冷却气流的温降增压效果的影响,得出了以下结论:

1) 涡轮盘腔的作用机理是通过导流叶片的导流增压效果使得盘腔内部气流的周向速度升高,从而使得盘腔旋转系下气流的相对速度下降,达到降低相对总温的效果,同时可提高气流的压比。优化效果的主要影响因素是气流旋

流比,全局流场旋流比均接近1时,优化效果最为明显。

2) 叶型设计对涡轮盘腔优化效果有着显著影响。在不同工况下,布置叶片均能对温降增压效果产生收益,其中弯扭叶型带来的收益最高。

3) 叶片长度对温降增压效果影响较大,加长叶片长度能有效增强对冷气流的导流增压效果,但随叶片加长而带来的收益会逐渐降低。

参考文献:

- [1] KILIÇ M. Computation of flow and heat transfer in rotating cavities with peripheral flow of cooling air[J]. Annals of the New York Academy of Sciences,2001,934:513-520.
- [2] SNOWSILL G D, YOUNG C. The application of CFD to underpin the design of gas turbine pre-swirl systems[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, Barcelona, Spain; 2008:1393-1401.
- [3] 肖英雄,张品. 径向进气装置内孔板流动规律研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):57-60,77.
- [4] 张凯,王锁芳,侯晓亭,等. 盘腔进气位置对径向预旋系统的影响[J]. 航空动力学报,2020,35(3):502-509.
- [5] 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.
- [6] 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),2014,28(1):43-48.
- [7] EL - OUN Z B, OWEN J M. Pre - swirl blade - cooling effectiveness in an adiabatic rotor - stator system [C]// Proceedings of ASME 1988 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Amsterdam, The Netherlands. 2015.
- [8] 吴衡,刘高文,冯青,等. 叶轮对预旋系统影响的数值研究[J]. 推进技术,2016,37(1):57-64.
- [9] 张建超. 冷气预旋结构的温降与流阻特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.

收稿日期:2020-11-05