

变几何涡轮平面叶栅流场数值仿真与试验研究

郑国胜¹,关瑞卿¹,冯小毛¹,刘长青²,葛宁¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016; 2. 中国航发湖南动力机械研究所,湖南 株洲 412002)

摘要:取某两级动力涡轮2级导叶中截面数据,布置为平面叶栅以验证其流场周期性。设计并加工了基于齿轮传动的变几何平面叶栅试验件,并进行变几何与固定几何的PIV试验研究,获得叶栅通道出口区域流场数据,进行对比分析。结果表明:固定几何工况下,从PIV试验得到的速度云图中可清晰地看出叶片尾缘尾迹及扩散过程,与仿真结果吻合良好;变几何工况下的PIV数据可揭示由叶片转动所引起的流场结构变化。

关键词:变几何平面叶栅周期性;固定几何PIV试验;变几何PIV试验

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0141-04

Numerical Simulation and Experimental Research for Plane Cascade of Variable Geometry Turbine

ZHENG Guosheng¹, GUAN Ruiqing¹, FENG Xiaomao¹, LIU Changqing², GE Ning¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: With the middle cross-section data of a certain two-stage power turbine secondary guide vane being assigned as a plane cascade to verify the periodicity of its flow field, a variable geometry plane cascade test piece based on gear transmission was designed and processed. PIV tests and reserch on variable geometry and fixed geometry were carried out to obtain the flow field data of the outlet area of the cascade channel, and on which comparison and analysis were made. The results show that under the fixed geometry condition, the wake and diffusion process of the blade trailing edge can be clearly seen in the velocity nephogram obtained by PIV test, and their results are in good agreement with the simulation results. And the PIV data reveals the change of flow field structure caused by blade rotation under variable geometry conditions.

Keywords: periodicity of variable geometry plane cascade; fixed geometry PIV test; variable geometry PIV test

0 引言

随着现代航空工业技术发展,需要燃气涡轮发动机在不同转速工况下具有正常运行的能力。变几何动力涡轮技术(VGPT)是通过转动动力涡轮静子,调节其喉道面积从而控制涡轮通流量,改变动静叶的匹配情况以适应动力涡轮的不同转速工况^[1-4]。

20世纪60年代美国福特汽车公司率先开展了将变几何动力涡轮应用于涡轴发动机的研究^[5],所研制的Ford 702燃气轮机在Ford TC 800系列重型卡车上获得了成功应用。

理想的全环真实涡轮通道变几何试验比较难以实现,往往存在试验件难以加工、实验风洞尺寸太小、测量数据困难等问题,所以利用平面叶栅试验来代替旋转叶栅是目前广为采取的方法。为了保证其流场情况可以代表旋转叶栅,需要有一个参照来判断是否符合周期性流场的各项标准,本文选取叶片表面压力分布及出口截面线流场分布作为参考标准^[6-8]。本文通过试验与数值仿真相结合的方式,侧重于研究定/变几何涡轮平面叶栅在不同转角工

况下的流场结构变化。

1 试验装置及研究方法

1.1 试验装置

图1为现有的风洞试验台模型示意图,从左到右依次为:喇叭口、圆转方、PIV粒子投放器、收缩段、真空箱^[7]。

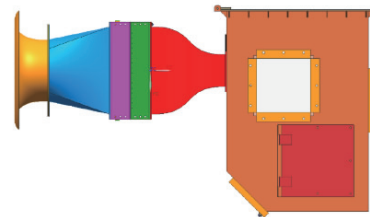


图1 NUAU平面叶栅试验台示意图

图2为变几何平面叶栅UG模型设计示意图,7个叶片可同时由电机驱动,绕其最大厚度处旋转,从而实现叶栅喉道面积可变。

第一作者简介:郑国胜(1995—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为叶轮机气动力学。

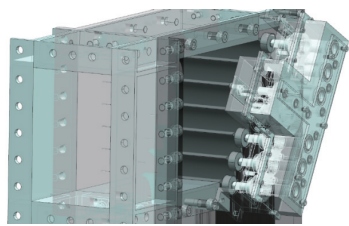


图2 变几何平面叶栅 UG 模型设计示意图

1.2 研究方法

为了保证平面叶栅的叶型参数能够代表三维扭转叶片,取某两级动力涡轮2级导叶叶中截面数据,布置为平面叶栅,考虑到后续工作将要进行的平面叶栅试验加工和数据测量成本(叶片过小不易于探针孔的选取及测量等),以减少叶片数量的方式将其等稠度放大为平面叶栅。

在风洞试验台收缩段出口高度确定的情况下,将叶栅斜置,从而使其总栅距增大,叶型放大倍数有进一步上升空间。进口来流方向为设计进气角(攻角为 0°),符合三维叶型2级导叶的进口工况。

如图3所示,PIV测量主要是通过间隔一定时间的两束脉冲激光照亮布撒一定浓度示踪粒子的被测流场,相机曝光得到的两帧图像,经过互相关计算及一系列后处理操作即可得到示踪粒子的速度场,从而间接获得被测流场的速度场^[9-10]。

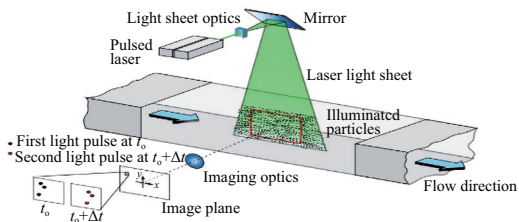


图3 PIV 原理示意图

2 平面叶栅试验件周期性验证计算与分析

2.1 计算模型

对不同旋转角度下的平面叶栅流场模型进行数值计算。叶栅流场周期性验证中采用叶片表面压力、出口截面流场参数作为研究对象,分布参考。叶型几何参数为:栅距 $t = 11.39 \text{ mm}$, 弦长 $b = 17.00 \text{ mm}$, 进口气流角 $\beta_1 = 28.71^\circ$, 出口气流角 $\beta_2 = 54.7^\circ$ 。

图4所示为试验装置二维简图,7个平面叶栅被安装在高度为150mm的收缩段出口截面处,1号叶片尾缘处装有可绕顶部旋转调节角度的开孔尾流板,以改善其周期性。

如图5所示,本计算模型采用Gambit划分二维混合网格,ANSYS Fluent软件求解流场,流动控制方程基于N-S方程,湍流模型采用一方程SA模型,壁面条件为无滑移边界条件。本次试验是在NUAA吸气暂冲式跨声速平面叶栅风洞试验台上完成的。此风洞采用大气进气与真空抽

吸的供气方式。故本计算模型进口总压恒定为101 325 Pa。

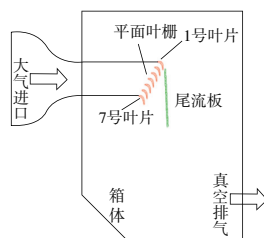


图4 流场示意图

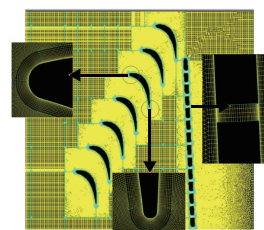


图5 网格划分示意图

2.2 流场周期性分析

叶栅通道及出口流场的周期性是判断平面叶栅风洞是否可以模拟全环叶栅的重要依据。图6和图7为变几何平面叶栅关闭 10° 下的流场马赫数云图与叶片表面压力分布(pp3代表3号叶片压力面,ss3代表3号叶片吸力面),观察其云图分布及压力分布重合度,判断其周期性良好(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。其中处于流道中心的3、4、5号叶片周期性最好。气流经由收缩段整流,降压加速均匀进入叶栅通道,叶栅关闭,喉道面积减小,攻角增大,气流在叶片前缘压力面处形成高压低速区,随后在叶栅通道内持续加速,并在喉道处达到峰值,在流出叶栅通道后,各叶片尾迹开始掺混,气流减速。

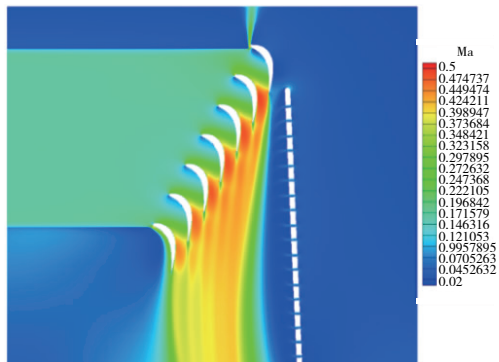


图6 叶栅关闭 10° 下的流场马赫数云图

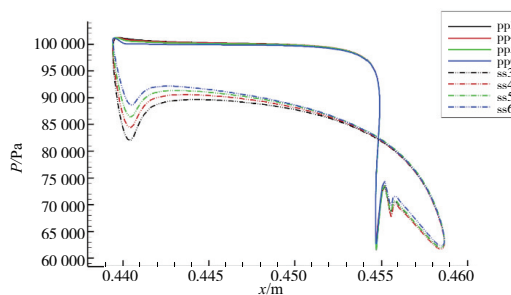


图7 叶栅关闭 10° 下的叶片表面压力分布

对于 0° 工况下,连接1、7号叶片尾缘点,做出口截面线,分析该截面线上的流场分布。如图8所示(横坐标从左到右依次为7到1),叶栅出口流场总体上周期性良好,其中1、7号通道出口流场稍显不足,其原因是1、7叶片进口前缘分别受收缩段上下附面层的影响,1号叶片尾缘最靠近尾流板,7号叶片尾缘左侧直接真空箱,扰动较大。

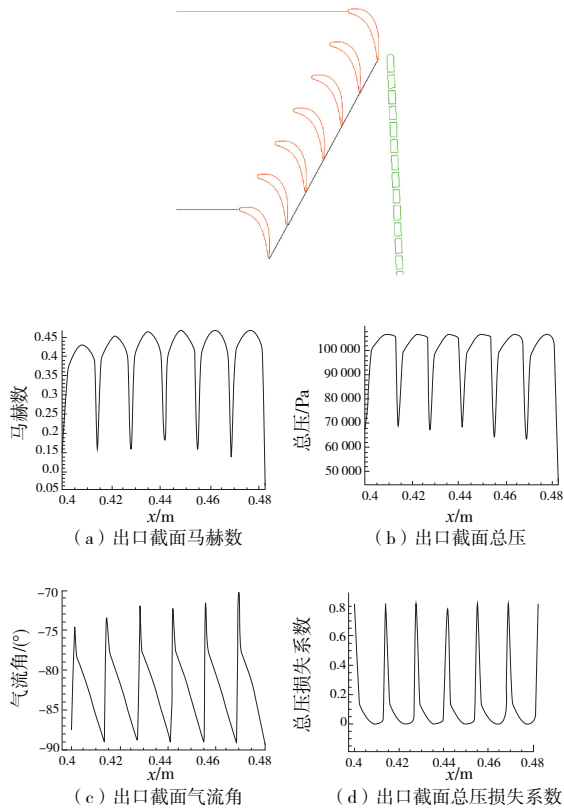


图 8 0°工况出口截面线流场周期性分布

3 试验结果及分析

如表 1 所示,固定几何工况下,共进行了 6 组试验。其中 R_10°代表叶栅通道关闭 10°,L_10°代表打开 10°,0°代表叶栅 0°攻角进气状态,即设计状态。

表 1 固定几何试验工况

背压/kPa	0°	L_10°	R_10°
85	A1	A2	A3
90	B1	B2	B3

图 9 为叶栅在背压 95 kPa 旋转过程中的 1 帧原始粒子图像。从图中可以看出,尾迹区与主流区的分界面清晰可见,同时尾迹区含有大量脱落涡。



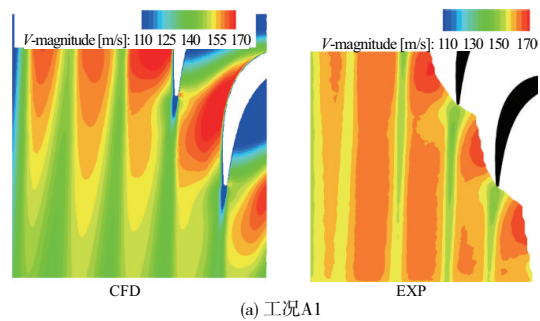
图 9 试验所捕捉到的 1 帧原始粒子图像

采用 MATLAB 对粒子图像进行处理,获得叶栅通道处流场数据。如图 10 所示,工况 A1、B1 为涡轮叶栅设计

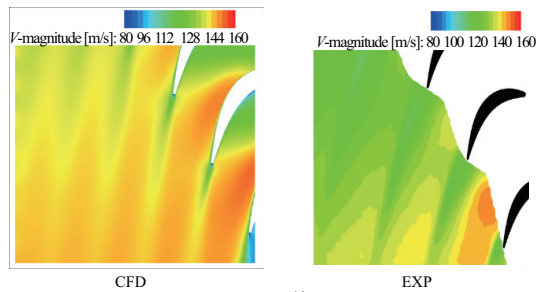
角度,未经旋转,其喉道面积与原始叶型一致。随着背压的降低,涡轮叶栅中气流膨胀加速程度变大,气流沿叶背加速,在喉道部位出现局部速度最高区域。

工况 A2、B2 为叶栅打开 10°,与设计角度对比,其喉道面积增大,叶栅通道内流场速度云图局部速度最高区域明显降低。工况 A3、B3 为叶栅关闭 10°,与设计角度对比,其喉道面积减小,叶栅通道内流场速度云图局部速度最高区域明显增大。通过云图分析可得,以 0°攻角工况为参考,叶栅通道关闭 10°,通道出口峰值速度增加约 3%。

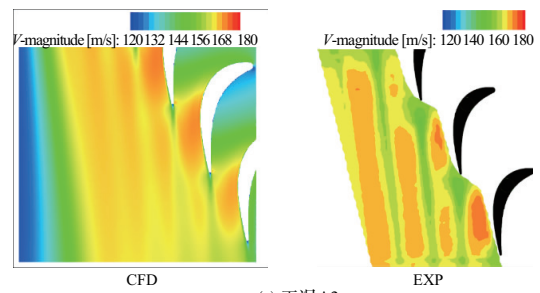
涡轮中的流动是膨胀加速的,当背压较高时,叶栅前后压差较小,叶栅中降压膨胀加速的能力并不强,加之栅前流速很低,因此全流场都是亚音速流动。整个流场流动平稳,由于尾缘的气流流速不大,尾迹区影响较小且很快与主流区掺混。



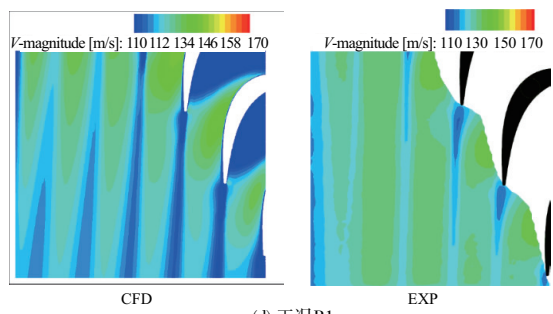
(a) 工况 A1



(b) 工况 A2



(c) 工况 A3



(d) 工况 B1

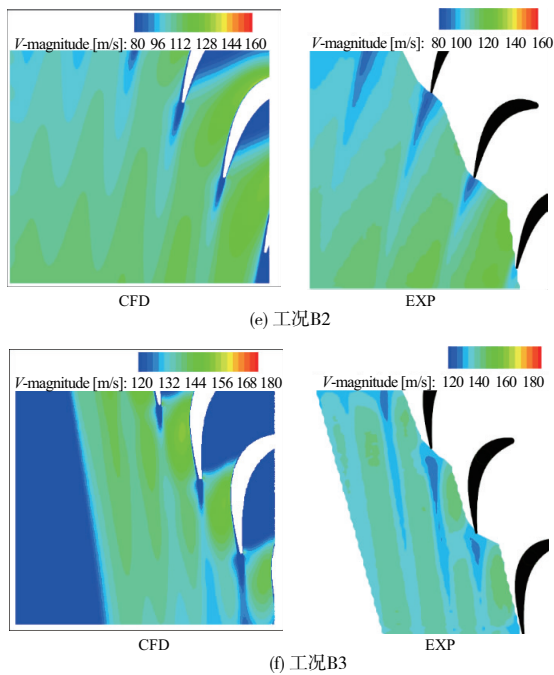
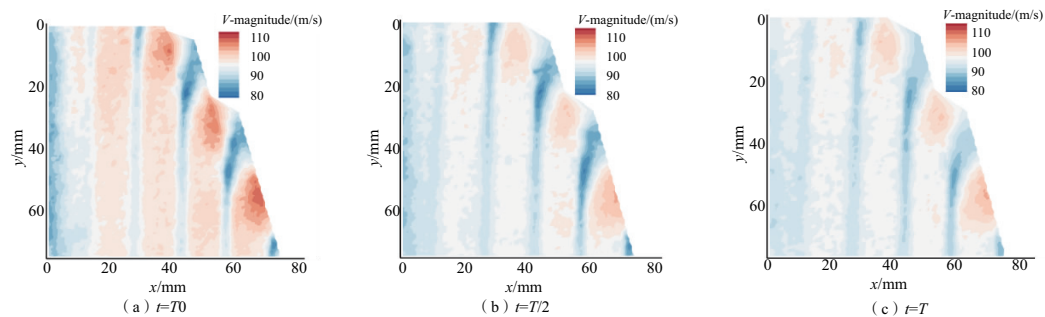


图 10 固定几何下仿真与试验流场对比

图 11 $R_{10^\circ} \sim 0^\circ$ 动态调节过程

4 结语

1) 静、动态试验中原始粒子图像非常清晰,粒子平均直径为 2~3 个像素,粒子分布均匀且密度适中,查询区内粒子数目满足互相关计算要求,PIV 测量试验方案设计合理;且准确地复现变几何动力涡轮的流动状态下典型流场结构。

2) PIV 试验得到的速度云图中可清晰地看出叶片尾迹及扩散过程,试验结果与计算结果吻合良好。喉道关闭,速度峰值增大;喉道打开,速度峰值减小。

3) 通过云图分析可得,以 0° 攻角工况为参考叶栅通道关闭 10° ,通道出口峰值速度增加约 3%。

参考文献:

- [1] 付少林. 变转速动力涡轮数值分析及优化设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [2] 蒋海明,徐亮,张宜奎,等. 组合动力装置用变几何涡轮转速与安装角匹配研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(3):49-53.
- [3] 陈升,邱超,宋华芬. 涡轮平面叶栅变几何试验研究[J]. 热能动力工程,2011,26(1):7-12,118.

为了充分掌握导叶转动对动力涡轮平面叶栅流动的影响,进一步分析喉道关闭与打开对动力涡轮整体性能的影响,对平面叶栅的动态转动过程进行 PIV 试验,将湍流理论中的可变区间时间平均算法准则(VITA)简化^[11],应用于求解其动态调节过程中叶栅通道出口流场区域的速度场。表 2 为变几何试验工况。

表 2 变几何试验工况

背压	变化范围	马赫数	落压比
85 kPa	$R_{10^\circ} \sim 0^\circ$	0.300 6	1.064 7

图 11 为平面叶栅由 $R_{10^\circ} \sim 0^\circ$ 的转动过程中速度流场随时间变化图,随着叶栅通道的逐渐打开,通道出口速度呈单调递减趋势,这之前固定几何的试验结果对比分析一致。尾迹区域流速放缓,在叶片尾缘处有加宽的迹象,这可能与调节过程中电机振动带来的扰动有关。

综上所述,整个实验结果与 CFD 计算结果吻合良好,证明了本次 PIV 测量结果能够较为准确地揭示变几何动力涡轮平面叶栅流动状态下典型的流场结构,也说明对流场的 CFD 计算结果准确可靠。

- [4] 马超,臧述升,黄名海. 变几何涡轮动叶栅流场的 PIV 实验研究[J]. 动力工程学报,2014,34(6):458-462,481.
- [5] RAHNKE C. J. The variable - geometry power turbine [J]. Transaction of the Society of Automotive Engineers,1969,78(1):213-223
- [6] 陈宇. 跨声速平面叶栅风洞设计与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [7] 巩昊,徐惊雷,陈宇. 开槽尾流板对跨声速涡轮平面叶栅流场影响的实验[J]. 航空动力学报,2018,33(12):3048-3056.
- [8] 陈升. 变几何平面叶栅试验研究及数值模拟[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- [9] ELAVARASAN R, VENKATAKRISHNAN L, KROTHAPALLI A, et al. A PIV study of a supersonic impinging jet[J]. Journal of Visualization,2000,2(3/4):213-221.
- [10] SCHRIJER F F J, SCARANO F, OUDHEUSDEN B W. Application of PIV in a mach 7 double - ramp flow [J]. Experiments in Fluids,2006,41(2):353-363.
- [11] 陈矛章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2002.

收稿日期:2021-10-12