试验研究

文章编号:1001-2060(2025)06-0126-07

轮缘密封、轴端密封及卸荷孔对转-静盘腔轴向力的影响

杜向宇,贾兴运
(北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

摘 要:为解决某燃气轮机试验过程中频繁出现的转子轴向力调整困难问题,基于转-静盘腔气动轴向力的直接动态测试方法,开展对比试验,系统研究了轮缘密封半径、轴端密封结构及卸荷孔对转-静盘腔气动轴向力的影响规律。试验结果表明:当轴端迷宫密封半径从22 mm增大到42 mm,可使轮盘轴向力降低约74.1%;相比于直梳齿,当轴端迷宫密封齿具有5°的倾角时,轴向力降低约71.1%;当轴端迷宫密封的间隙比从1.14%增加到1.82%时,轴向力降低约87.7%;周向布置卸荷孔同样可使气动轴向力降低约50.3%。研究结果证明:当燃气轮机转子轴向力失衡时,可通过调整迷宫密封半径、倾角、间隙比和增加卸荷孔等方式实现转子轴向力的有效调整。

关 键 词:燃气轮机;转子轴向力失衡;转-静盘腔;迷宫密封;卸荷孔

中图分类号:TK471 **文献标识码**:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.014

[**引用本文格式**]杜向宇,贾兴运.轮缘密封、轴端密封及卸荷孔对转-静盘腔轴向力的影响[J].热能动力工程,2025,40(6):126-132. DU Xiangyu, JIA Xingyun. Influence of rim seal, shaft end seal and unloading hole on the axial force of rotor-stator cavity[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6):126-132.

Influence of Rim Seal, Shaft End Seal and Unloading Hole on the Axial Force of Rotor-Stator Cavity

DU Xiangyu, JIA Xingyun
(College of Electrical and Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China, Post Code: 100029)

Abstract: In order to solve the problem of difficult adjustment of rotor axial force occured frequently in a gas turbine test process, based on a direct dynamic test method for aerodynamic axial force of rotor-stator cavity, the influence law of rim seal radius, shaft end seal structure and unloading hole on the aerodynamic axial force of rotor-stator cavity was studied systematically by comparative experiments. The experimental results show that the axial force of the wheel disc decreases by about 74.1% when the radius of the shaft end labyrinth seal increases from 22 mm to 42 mm. Compared with the straight comb tooth, when the shaft end labyrinth seal tooth has a 5° inclination angle, the axial force is reduced by about 71.1%. When the clearance ratio of the shaft end labyrinth seal increases from 1.14% to 1.82%, the axial force decreases by about 87.7%. In addition, the circumferential arrangement of unloading holes can also reduce the aerodynamic axial force by about 50.3%. The research results demonstrate when the axial force

收稿日期:2024-10-30; **修订日期**:2025-01-09
基金项目:国家自然科学基金(52305176);黑龙江省自然科学基金联合引导项目(JJ2020LH1197);中央高校基本科研经费(JD2423)
Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52305176); Heilongjiang Natural Science Foundation Joint Guidance Project (JJ2020LH1197); Basic Research Funds of Central Universities (JD2423)
作者简介:杜向宇(2002-),女,北京化工大学硕士研究生.
通信作者:贾兴运(1992-),男,北京化工大学副教授.

of the gas turbine rotor is unbalanced, the axial force of the rotor can be adjusted effectively by adjusting the labyrinth seal radius, inclination angle, clearance ratio and increasing the unloading holes.

Key words: gas turbine, rotor axial force imbalance, rotor-stator cavity, labyrinth seal, unloading hole

引　言

燃气轮机是以连续流动的空气为工质,驱动叶轮高速旋转,将燃料的化学能转化为机械能的内燃式动力机械。燃气轮机由压气机、燃烧室和燃气涡轮三大部件组成,是一种旋转叶轮式热力发动机,广泛应用于电力、航空、船舶和重型车辆等领域[1-3]。

转子轴向力是船舶燃气轮机结构设计的重要指标之一。在燃气轮机中,压气机部件所受的轴向力方向朝前,涡轮部件所受的轴向力方向朝后,压气机与涡轮转子形成“拔河”状态。大部分轴向力经压气机和涡轮抵消后,仍存在较大轴向不平衡量。该轴向不平衡量主要通过空气系统卸荷腔结构来抵消,最终残余轴向力由带有止推功能的主轴承进行平衡。为保证在主轴承上的轴向力大小合适且不换向,残余转子轴向力必须保持在一个合适的范围内。轴向力过大会导致轴承保持架发生断裂,轴向力过小则会引起轴承滑蹭和撞击损伤,严重影响整机使用寿命及可靠性[4]。

在测量转子轴向力的过程中,传统测量方法为转子整体轴向力测量,无法将转 – 静盘腔气动轴向力从复杂转子系统轴向力中解耦,每次调整都需分解、复装和重新测量,消耗大量的人力、物力和时间,且没有形成统一有效的调整方法[5]。

影响燃气轮机轴向力的因素有很多,林立[6]针对美国 GE 公司 9F 级燃气轮机高压转子 4 条空气系统气路开展一维流体网络分析,结果表明,转子内部转 – 静盘腔对转子产生推力,而转 – 转盘腔对转子不产生推力;此外,转 – 静盘腔压力分布计算精度将直接影响轴向力计算的准确性。蔡毅等人[7]建立了燃气轮机轴向力仿真平台,基于具有自主知识产权的空气系统计算软件 FLOWNET,开展了不同装机状态轴向载荷研究,结合大量整机试车及轴向力实测数据,提出运行工况、涡轮导向器喉道面积和封严结构等影响轴向力的关键因素。

梁津华等人[8]与郭晓杰[9]采用气热耦合计算方法对空气系统开展研究,取代了传统的二次流动和传热的解耦计算与手工迭代过程,减小了空气系统温度计算误差。张立超等人[10]针对某型号船舶燃气轮机空气系统开展热流耦合计算,得到了空气系统流路各节点的主要参数,并根据整机高压转子轴向力测量数据验证了空气系统中各腔室压力计算的准确性。明玉周等人[5]提出了转 – 静盘腔气动轴向力的直接动态测试方法,该方法既不同于轴向力直接测试方法,也非间接法,基于该方法开展了不同压差与不同转速下转 – 静盘腔轴向力的测试研究。

以上研究主要集中在轮缘密封处高温燃气入侵与盘腔流动传热[11]、轴端迷宫密封泄漏量[12]和迷宫密封气流激振[13]等方面,但对轮缘密封、轴端迷宫密封及卸荷孔与燃气轮机转子轴向力之间的相互关联研究较少,导致无法揭示轮缘密封、轴端迷宫密封及卸荷孔对燃气轮机转子轴向力的影响机理。机理不明是导致燃气轮机转子轴向力调整困难的根本原因。为解决上述问题,本文基于转 – 静盘腔气动轴向力的直接动态测试方法,利用转 – 静盘腔气动轴向力机理试验台开展轮缘密封、轴间密封和卸荷孔对盘腔气动轴向力的影响研究,为形成基于关键密封结构参数调整的燃气轮机转子轴向力平衡技术提供基础理论支撑。

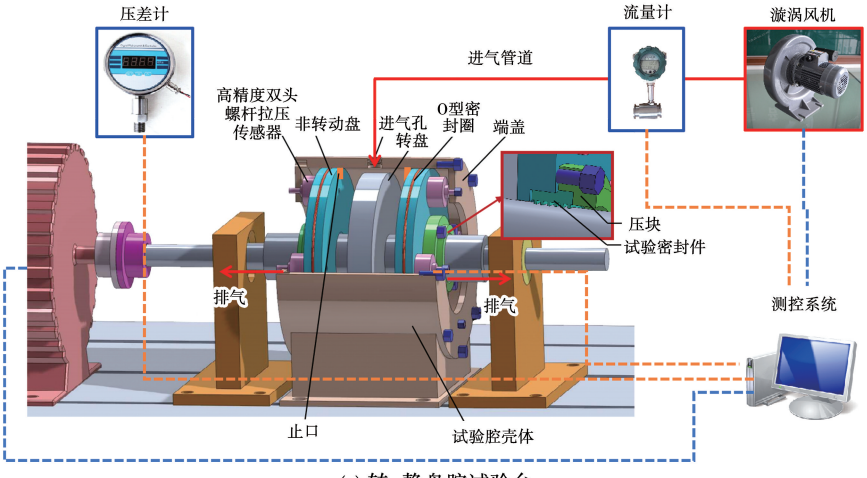
1　转 – 静盘腔气动轴向力的直接动态测试方法

根据燃气轮机结构及运行工况,通过建立高压转子内部空气系统流体网络,确定各腔室流量与压力分布规律,解析旋转盘面流动状态,建立盘腔流动模化理论,实现将转 – 静盘腔气动轴向力从复杂的燃气轮机转子受力中解耦,并搭建转 – 静盘腔气动轴向力机理试验台,用以开展相关机理研究。

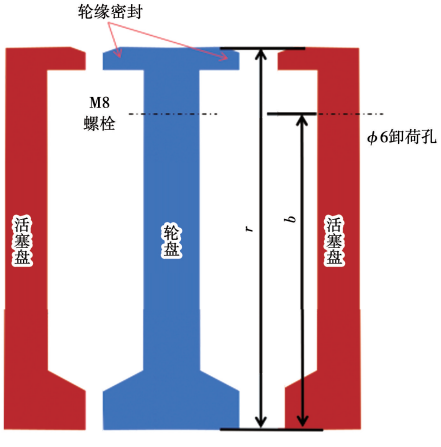
图 1 为转 – 静盘腔气动轴向力机理试验台,试验台主要由动力系统、气源系统、试验段、测量与测控系统 4 部分组成。如图 1(a)所示,该转盘与非转动盘组成的转 – 静盘腔几何结构与实际船舶燃气轮机盘腔结构相似。基于旋转雷诺数、封严流量和盘面湍流流动参数等多个无量纲参数的模化准则,构

建船舶燃气轮机变工况条件下盘腔内部多种盘腔流态结构,以模拟不同工况下真实船舶燃气轮机盘腔内部流动特性。两个转 – 静盘腔对称布置,可以避免高速转子受力并发生轴位移,有助于提高转速与流量等相关设计参数值。考虑边界夹带层流量[14],根据一维分析方法[15]估计转 – 静盘腔的旋流系数。在转 – 静盘腔试验系统中,流体处于湍流流动状态,旋转雷诺数大于 4.4×10^6,压缩空气从进气口进入试验腔,经过轴端迷宫密封节流后向外排出,迷宫密封的出口压力为大气压。活塞盘在内外压力差的作用下形成气动轴向力,转 – 静盘腔的气动轴向力由均布在两个活塞盘上的 8 个高精度轴向力传感器直接测量。这种直接测试方法可以直接得到转 – 盘腔的轴向力,而非转子受力,因此,不同密封结构或参数对转 – 静盘腔气动轴向力的影响可以直接通过测试得到。

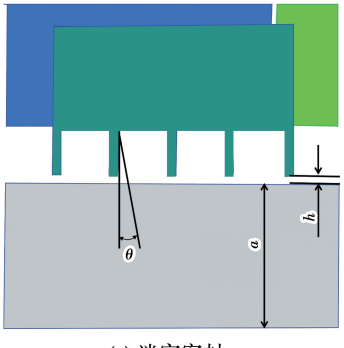
转 – 静盘腔内轮缘密封和卸荷孔的分布如图 1(b)所示,其中 r 表示轮缘密封的半径,b 表示直径为 6 mm 的卸荷孔与直径为 8 mm 的螺栓距轴心的距离。迷宫密封处结构参数如图 1(c)所示,其中 θ 表示迷宫密封梳齿的倾角,a 表示轴的半径,h 表示迷宫密封齿顶与轴的间隙。



(a) 转–静盘腔试验台



(b) 轮缘密封与卸荷孔



(c) 迷宫密封

图 1　转 – 静盘腔气动轴向力机理试验台示意图

Fig. 1 Illustrations of aerodynamic axial force test bench of rotor-stator cavity

间隙是影响燃气轮机腔压和轴向力的关键因素,本文迷宫密封的间隙比定义为迷宫密封与轴之间的间隙 h 和轴径 $2a$ 的比值,记作 β,本试验中间隙比的取值为 0.40% ~1.82%。为确保安装间隙的精准性,首先需要保证轴的准确定位,导轨式的安装设计可保证转子轴的中心、轴承位置和轴承间距是固定准确的,且每次试验均保持不变的;其次,设计非转动盘时,设置了一个止口,止口位于实验腔壳

体上,保证密封环径向定位;此外,每次安装静止密封环与旋转轴后,需要通过塞尺测量轴与迷宫密封齿顶之间的间隙即齿顶间隙,以保证试验的准确性。

为减少试验误差,保证试验台安装精度和测量精度,安装时以水平导轨为基准,将电机、轴承和试验腔壳体均固定在同一高精度水平导轨上以减小安装误差;采用高精度双螺杆压力测试系统和自编程高速采集软件动态捕捉转 – 静盘腔的气动轴向力;采用 MAGRFHELIC 微压差计测量转静盘腔内部压力水平;采用 Darhor 有机玻璃流量计与智能涡街流量计测量流量,保证测量数据的精确性和稳定性,减小测量误差。测量时对同一试验进行多次重复测量,取数据的平均值作为测量结果,以减少偶然误差。

2　转 – 静盘腔轴向力测试结果的精度验证

为确保直接测试轴向力试验结果的可靠性与准确性,在一定气压下进行试验,记录流量、压力和轴向力结果,经数据处理后将其与 CFD 数值计算结果进行对比,轴向力测试结果如图 2 所示。

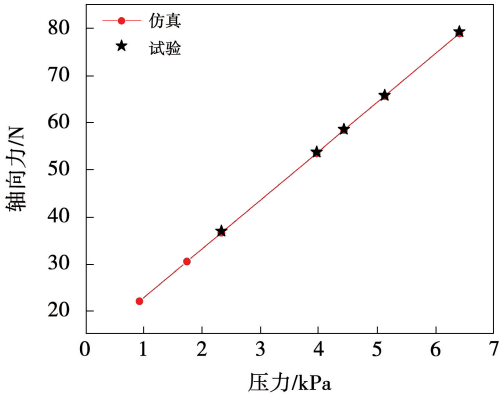


图 2　轴向力测试结果精度验证

Fig. 2 Accuracy verification of axial force test results

由图 2 可知,轴向力实测结果与数值计算结果高度吻合,误差不大于 0.64%。转 – 静盘腔轴向力测试试验结果表明,测试方法能够准确测量转 – 静盘腔内的气动轴向力,即非转动盘在内外压差作用下产生轴向力,气动轴向力随转 – 静盘腔压力增大而增大。

通过试验结果与仿真结果的对比可知,转 – 静盘腔气动轴向力的直接动态测试是准确的。因此,基于此方法,本文开展了不同轮缘密封及轴端迷宫密封参数对转 – 静盘腔气动轴向力影响的测试研究。

3　密封结构参数变化

转子支撑结构、主流与空气系统热力学参数都是影响转子轴向力的主要因素[5]。燃气轮机轴向力计算涉及的子系统与部件范围广,各部件或子系统之间耦合程度高,导致燃气轮机转子轴向力计算结果精度较低,轴向力设计水平不高,尤其是面向三转子发动机,轴向力更加难以设计与匹配。由于缺少各因素对转子轴向力影响的机理研究,传统轴向力测试方很难将高压转子轴向力的最大值和最小值同时调整到规定范围内,且每次调整都需要将燃气发生器分解至零部件状态,没法形成统一有效的调整方法。

根据调整试车的经验及前人对燃气轮机轴向力的研究,本文重点开展轮缘密封结构、带螺栓轮缘密封结构及轴端迷宫密封结构单独作用在不同压力下转 – 静系气动轴向载荷测试,转 – 静盘腔内外压差为 1 ~ 8 kPa,转子转速为 4 000 r/min。不同密封结构参数变化如表 1 所示。试验过程中,通过阀门调节转 – 静盘腔内外压差,采集并存储不同转 – 静盘腔压力下的体积流量及非转动盘受力数据。

表 1　结构参数变化

Tab. 1 Structural parameters change

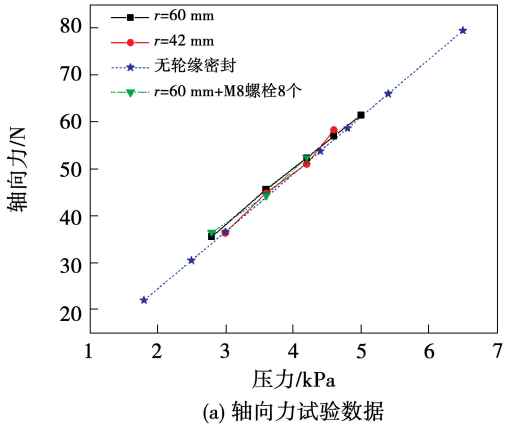
试验序号	结构变化
1	无轮缘密封
2	高半径布置轮缘密封 $r = 60$ mm
3	中半径布置轮缘密封 $r = 42$ mm
4	高半径轮缘密封 + M8 螺栓 $r = 60$ mm,M8 螺栓数量为 8 个
5	$a = 22$ mm　$h = 0.5$ mm　$\beta = 1.14\%$　$\theta = 0°$
6	$a = 42$ mm　$h = 0.5$ mm　$\beta = 0.60\%$　$\theta = 0°$
7	$a = 62$ mm　$h = 0.5$ mm　$\beta = 0.40\%$　$\theta = 0°$
8	$a = 22$ mm　$h = 0.8$ mm　$\beta = 1.82\%$　$\theta = 0°$
9	$a = 22$ mm　$h = 0.5$ mm　$\beta = 1.14\%$　$\theta = 5°$
10	在 $b/r = 0.6$ 半径上均布布置 4 个 $\phi 6$ mm 卸荷孔

4　转 – 静盘腔轴向力试验结果与分析

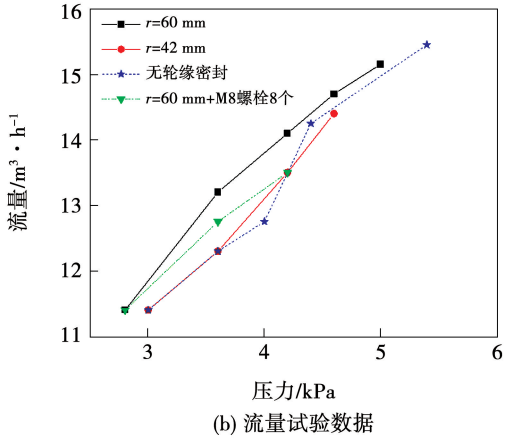
4.1　轮缘密封结构对气动轴向力的影响

搭建带有轮缘密封结构的转 – 静盘腔气动轴向力机理试验台，进行轴向力与流量测试，重点对比有/无轮缘密封结构、不同轮缘密封半径、整周带有 8 个 M8 螺栓的轮缘密封结构对转 – 静盘腔气动轴向力及流量的影响。

图 3 展示了轮缘密封结构对转 – 静盘腔气动轴向力与流量的影响规律。由图 3 可知，随着腔室内压力增大，非转动盘内外压差增大，转 – 静盘腔产生的轴向力逐渐增大。在确定轴端迷宫密封的前提下，转盘有/无轮缘密封、不同轮缘密封半径以及轮盘面是否布置螺栓对转 – 静盘腔的气动轴向力及流量几乎无影响。



(a) 轴向力试验数据



(b) 流量试验数据

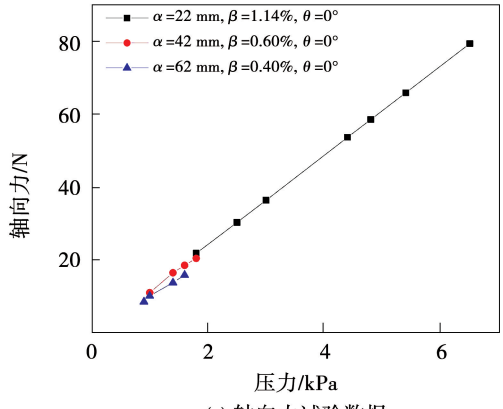
图 3　轮缘密封结构对转 – 静盘腔轴向力及流量的影响

Fig. 3 Influences of rim seal structure on axial force and flow rate of rotor-stator cavity

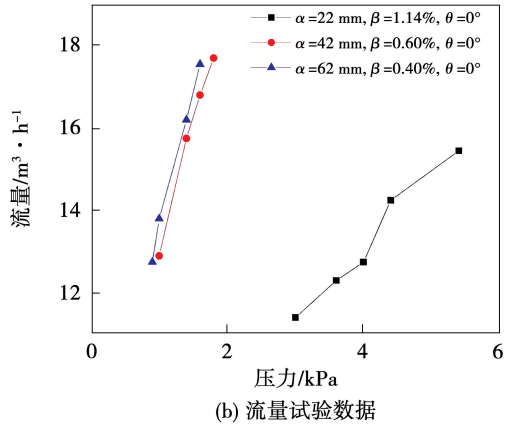
4.2　轴端迷宫密封结构对气动轴向力的影响

根据前人研究可知，燃气轮机转子轴向力对卸荷腔迷宫密封结构参数的敏感性较高，也常通过调整迷宫密封半径与齿顶间隙进行轴向力调整，因此，开展不同迷宫密封半径、迷宫密封齿顶间隙以及不同密封齿倾角对转 – 静盘腔气动轴向力的影响研究。

轴端迷宫密封半径对泄漏量、腔室压差及轴向力有较大影响。图 4 展示了迷宫密封半径对轴向力与流量的影响规律。由图 4(a)可知，当轴端迷宫密封的半径从 22 mm 增大到 42 mm 时，转 – 静盘腔内的最高压力从 6.5 kPa 下降到 1.8 kPa，降低约 72.3%，产生的最大轴向力由 79.5N 减少到 20.6 N，减少约 74.1%；继续增加轴端迷宫密封半径到 62 mm，转 – 静盘腔内的最高压力下降到 1.6 kPa，产生的最大轴向力减少到 16.0 N。



(a) 轴向力试验数据



(b) 流量试验数据

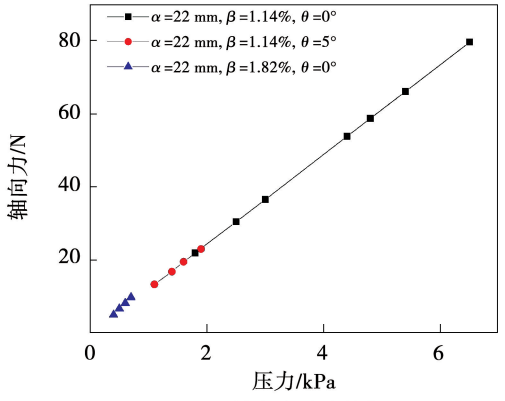
图 4　迷宫密封半径对转 – 静盘腔轴向力及流量的影响

Fig. 4 Influences of labyrinth seal radius on axial force and flow rate of rotor-stator cavity

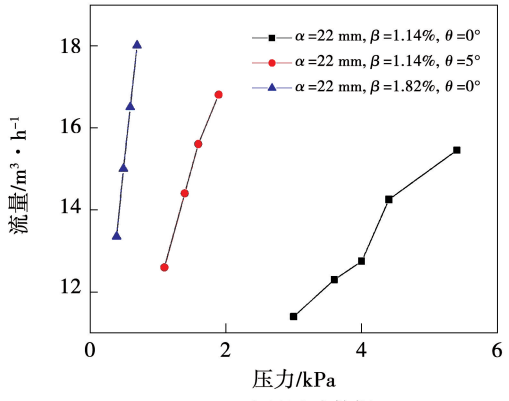
由图 4(b)可知，轴端迷宫密封半径为 42 和 62 mm 的试验组在转 – 静盘腔内压力较低的情况下就会达到与轴端迷宫密封半径为 22 mm 的试验组相同的流量。试验说明，在其他条件不变的情况下，增大轴端迷宫密封半径会显著增加气体的流通面积，

从而导致流量增大。试验中转 – 静盘腔内外无法建立较大的压差,因此气动轴向力较小。

图 5 展示了齿顶间隙与梳齿倾角对轴向力与流量的影响规律。



(a) 轴向力试验数据



(b) 流量试验数据

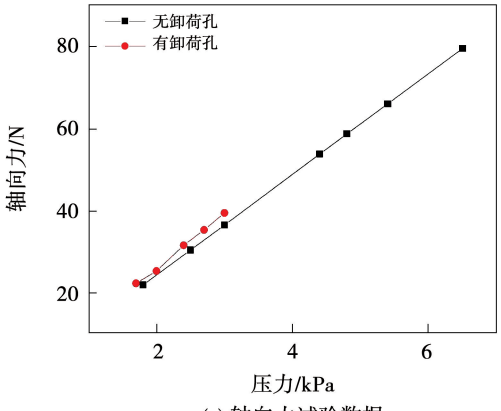
图 5　齿顶间隙及梳齿倾角对转 – 静盘腔轴向力及流量的影响

Fig. 5 Influences of tip clearance and comb tooth inclination angle on axial force and flow rate of rotor-stator cavity

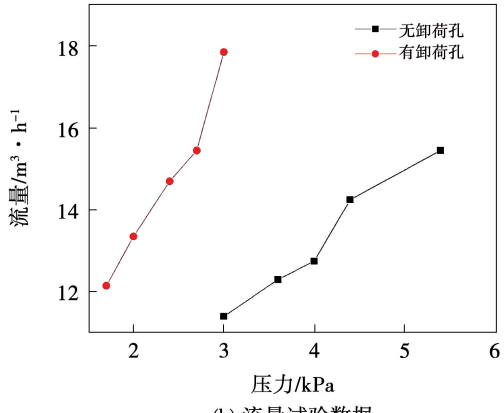
由图 5(a)可知,当 $\beta = 1.14\%$、轴端迷宫密封的梳齿倾角从 0°增加到 5°时,转 – 静盘腔内的最高压力从 6.5 kPa 下降到 1.9 kPa,降低约 70.8%,产生的最大轴向力由 79.5 N 减少到 23.0 N,减少约 71.1%;将轴端迷宫密封的齿顶间隙从 0.5 mm 增加到 0.8 mm 时,即 β 由 1.14% 增加到 1.82% 时,转 – 静盘腔内的最高压力从 6.5 kPa 下降到 0.7 kPa,降低约 70.8%,产生的最大轴向力由 79.5 N 减少到 9.8 N,减少约 87.7%。由图 5(b)可知,与齿顶间隙为 0.5 mm($\beta = 1.14\%$)、梳齿倾角为 0°的轴端迷宫密封试验组相比,将轴端迷宫密封的倾角增大到 5°或将轴端迷宫密封的齿顶间隙增大到 0.8 mm($\beta =$ 1.82%),均使得转 – 静盘腔试验台在较低压力下就产生较大流量。试验表明,增大轴端迷宫密封的齿顶间隙会显著增加流量,而在较大齿顶间隙下通过增加轴端迷宫密封的梳齿倾角难以实现小泄漏量,此时腔体内外压差只能维持较低水平,产生的轴向力也较小。因此,调整轴端迷宫密封间隙或梳齿倾角能够迅速改变腔室压差,从而实现轴向力的高效调整。

4.3　非转动盘卸荷孔对气动轴向力的影响

图 6 为有/无卸荷孔对转 – 静盘腔轴向力及流量的影响。



(a) 轴向力试验数据



(b) 流量试验数据

图 6　轮盘卸荷孔对转 – 静盘腔轴向力及流量的影响

Fig. 6 Influences of wheel disc unloading hole on axial force and flow rate of rotor-stator cavity

由图 6(a)可知,随着非转动盘内外压差的增大,转 – 静盘腔产生的轴向力逐渐增大,当未设置卸荷孔时,非转动盘两侧的腔室压差较大,气动轴向力最大约 79.5 N;当设置卸荷孔时,非转动盘两侧的腔室压差较小,气动轴向力最大约 39.5 N,降低约 50.3%,证明了周向布置卸荷孔可以显著降低盘腔的气动轴向力。由图 6(b)可知,在非转动盘上设置卸

荷孔以后,盘腔内气体流量显著增加,这是腔体内压力无法维持在一个较高水平的根本原因。

5 结 论

(1) 本文提出了转 – 静盘腔气动轴向力直接测试的新方法,搭建了转-静盘腔气动轴向力动态测试试验装置,根据腔室压差、轴向力及流量测试结果与 CFD 计算结果的相互验证,证明该测试方法准确,可以真实反映转 – 静盘腔气动轴向力水平,可以支撑不同密封结构对轴向力影响的试验研究。

(2) 转 – 静盘腔的腔室压差、气动轴向力及流量对轴端迷宫密封半径、迷宫密封齿顶间隙最敏感,增大轴端迷宫密封半径及密封齿顶间隙可以显著扩大泄漏面积,降低非转动盘内外压差,从而显著降低转 – 静盘腔的气动轴向力;轮缘密封结构主要影响转 – 静盘腔高半径流态,对轴向力的影响非常小;而周向布置卸荷孔可以显著降低盘腔的气动轴向力,降低幅度约 50.3%。

参考文献:

[1] 黄启昆,张羡旸,蔡 亮. 燃气轮机进气过滤系统的技术现状与展望[J]. 价值工程,2024,43(25):165 – 168.
HUANG Qikun, ZHANG Xianyang, CAI Liang. Technical status and prospect of gas turbine intake filtration system[J]. Value Engineering,2024,43(25):165 – 168.

[2] 王 斌,邵方琴,沈秀利,等. 燃气轮机双燃料喷嘴燃油内流场特性仿真分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(27):11125 – 11130.
WANG Bin, SHAO Fangqin, SHEN Xiuli, et al. Inner flow field characteristics simulation of the dual fuel nozzle of gas turbine[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(27):11125 – 11130.

[3] 白玉金,康英伟,黄 伟,等. 基于局部敏感哈希 – 双层随机森林的燃气轮机剩余使用寿命预测[J]. 科学技术与工程,2021,21(15):6297 – 6304.
BAI Yujin, KANG Yingwei, HUANG Wei, et al. Gas turbine remaining useful life prognosis based on local sensitive hash-double-layer random forest[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(15):6297 – 6304.

[4] 焦 腾. 燃气发生器与燃气轮机轴向力计算分析[D]. 西安:西北工业大学,2014.
JIAO Teng. Calculation and analysis of axial force of gas generator and gas turbine[D]. Xi′an: Northwest Polytechnic University, 2014.

[5] 明玉周,侯启炀,贾兴运. 空气系统转静腔室轴向力计算与试验研究[J]. 科学技术与工程,2023,23(23):9933 – 9938.
MING Yuzhou, HOU Qiyang, JIA Xingyun. Calculation and test of axial force of air system to static chamber[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(23):9933 – 9938.

[6] 林 立. 燃气轮机转静系盘腔内流动与传热机理研究[D]. 北京:清华大学,2013.
LIN Li. Research on the mechanism of flow and heat transfer in rotor-stator cavities in gas turbine[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

[7] 蔡 毅,朱惠人,张 丽,等. 影响某型燃机转子轴向力关键因素分析[J]. 航空工程进展,2013,4(1):66 – 70.
CAI Yi, ZHU Huiren, ZHANG Li, et al. Key factors investigation on the rotors axial thrust of a gas turbine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering,2013,4(1):66 – 70.

[8] 梁津华,赵维维,徐连强,等. 航空发动机空气系统和热分析的耦合计算与试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究,2019,32(3):24 – 28.
LIANG Jinhua, ZHAO Weiwei, XU Lianqiang, et al. The coupling calculation and experiment research of the secondary air system and thermal analysis in aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2019,32(3):24 – 28.

[9] 郭晓杰. 航空发动机空气系统与热分析耦合方法研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
GUO Xiaojie. Research on the coupling method of aero-engine air system and thermal analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2014.

[10] 张立超,何建元,彭 涛,等. 燃气轮机空气系统计算方法研究及验证[J]. 舰船科学技术,2011,33(11):71 – 75.
ZHANG Lichao, HE Jianyuan, PENG Tao, et al. Gas turbine air system calculations research and verification[J]. Ship Science and Technology,2011,33(11):71 – 75.

[11] 贾兴运. 涡轮转静盘腔燃气入侵及封严机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
JIA Xingyun. Research on gas intrusion and sealing mechanism of turbine rotor-stator cavity[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2019.

[12] 贾兴运. 转子振动对 T 型交错式迷宫密封性能影响[J]. 推进技术,2017,38(6):1370 – 1378.
JIA Xingyun. Effect of rotor vibration on T type labyrinth seal performance[J]. Propulsion technology,2017,38(6):1370 – 1378.

[13] 贾兴运,王嘉宁,张 海,等. 转子振动对直通式迷宫密封性能的影响[J]. 推进技术,2016,37(8):1461 – 1468.
JIA Xingyun, WANG Jianing, ZHANG Hai, et al. Effects of rotor vibration on straight-through labyrinth seal performance[J]. Journal of Propulsion Technology,2016,37(8):1461 – 1468.

[14] 林 立,谭勤学,吴 康,等. 中心进气转静盘腔一维流动模型的改进[J]. 航空动力学报,2015,30(11):2584 – 2591.
LIN Li, TAN Qinxue, WU Kang, et al. Improvement on one-dimensional flow model of rotor-stator cavity with central inlet[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(11):2584 – 2591.

[15] 林 立. 燃气轮机转静系盘腔内流动与传热机理研究[D]. 北京:清华大学,2013.
LIN Li. Research on the mechanism of flow and heat transfer in rotor-stator cavities in gas turbine[D]. Beijing: Tsinghua University,2013.

(王治红 编辑)