

基于非定常射流的对转涡轮气动调节性能研究

杨荣菲,祝涛冉

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:在叶片表面布置冷气射流是实现了对转涡轮气动调节的一种有效措施。在对转涡轮的高压级导叶喉道附近的上游布置射流孔,非定常数值仿真研究了射流流量正弦波、方波形式变化时涡轮气动性能的变化情况,并与定常射流调节结果进行对比,发现涡轮进口流量变化量仅与非定常射流的时均流量正相关,与射流频率、波形无关;但涡轮效率同时受时均流量、射流频率影响,时均流量越大,涡轮效率衰减越大;随着射流频率减小,涡轮效率衰减量略微降低。由于定常射流更易实现,故定常射流更具工程应用价值。

关键词:对转涡轮;非定常射流;定常射流;气动调节

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0173-04

Research on Aerodynamic Regulation Performance of Counter-rotating Turbine Based on Unsteady Jet Flow

YANG Rongfei, ZHU Taoran

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

Abstract: It is an effective measure to arrange the cold air jet on the blade surface for realizing the aerodynamic control of the counter-rotating turbine. Jet holes were arranged in the upstream near the throat of the high-pressure stage guide blade of the converse turbine. Unsteady numerical study was carried out on the variation of turbine aerodynamic performance when the form of sinusoidal and square wave of jet flow was changed, and its results were compared with those of steady jet. It is found that turbine inlet flow variation is only positively correlated with the time-average flow of unsteady jet, having nothing to do with jet frequency and waveform. However, the change of turbine efficiency is affected by both hourly flow rate and jet frequency. The greater the hourly flow rate is, the greater the attenuation of turbine efficiency will be. With the decrease of jet frequency, the attenuation of turbine efficiency will decrease slightly. As it is easier to achieve steady jet, the steady jet has more engineering application value.

Keywords: counter-rotating turbine; unsteady jet; steady jet; pneumatic control

0 引言

与常规涡轮相比,对转涡轮具有效率高、质量轻、陀螺力矩小的优点。国内外研究者针对对转涡轮气动设计技术及性能分析方面开展了大量研究工作^[1]。由于对转涡轮高压转子出口流动全展向超音,如何实现高压涡轮变工况流量调节,是其实现工程应用需解决的一个关键技术问题。

除了从气动设计方面寻求解决方案,流动控制也是实现高压涡轮变工况流量调节的有效方案。目前,对转涡轮流量调节方法主要包括可调导叶的机械调节和冷气射流的气动调节两种方式。雒伟伟等^[2]发现对转涡轮的高压导叶角度增加 15° 或 -8° ,涡轮流量变化范围约为25%。但高温环境下可调导叶设计难点在于结构密封及冷却问题,且调节机构和控制系统增加了额外的结构复杂性及质量。在气动调节研究方面,最早始于1971年KLINE J等^[3]对一个带有射流襟翼的涡轮叶片进行的二维平面叶栅试验,发现射流使主流的流动方向发生偏转,从而改变涡轮的进口流量。气动调节是通过在涡轮叶片或端壁加

工类似气膜孔的结构来喷气堵塞流道以实现涡轮流量调节的目的。理论上,该方法较机械式调节方案更有优势,表现在射流方案简单易实现,对发动机质量影响小。自2007年以后,国内开始对对转涡轮气动调节方法开展研究。杨阳^[4]采用理论分析及数值计算的方法验证了气动调节涡轮流量的有效性;付超^[5]分析了定常射流参数影响涡轮性能的规律;史文斌^[6]完成了气动调节的原理性验证;闫晨等^[7]研究了导叶端区定常射流调节涡轮流量的效果。这些研究成果都证明了定常射流气动调节涡轮流量的有效性。

从流动分离控制角度而言,普遍认为非定常射流与定常射流都能有效抑制流动分离,其中非定常射流更节省能量^[8]。张少博等^[9]的数值研究认为脉冲式射流影响下的涡轮效率略微高于定常射流,低频率脉冲射流效果优于高频,但其数值研究中转静交界面采用了定常计算,非定常射流仅采用了脉冲射流,故有必要对文献^[9]得到的结论进一步验证。基于此,本文以某1+1/2对转涡轮高压部件为研究对象,非定常数值计算研究了正弦波、方波射流

基金项目:航空动力基金项目(6141B09050339)

第一作者简介:杨荣菲(1982—),女,湖北武汉人,硕士生导师,硕士,研究方向为叶轮机气体动力学。

频率、幅值以及方波射流占空比对涡轮气动性能的影响情况,并分析了非定常射流影响涡轮气动性能的流动机理。

1 数值计算方法

1.1 研究方案

以某对转涡轮高压部件为研究对象,此涡轮的设计参数见文献[10]。根据定常数值计算获得的最佳射流参数方案,本文在导叶60%轴向弦长处均匀布置17个射流孔,射流孔直径1mm,射流角度为120°。以无射流的涡轮设计工况为基准,射流孔产生的非定常射流流量相较于基准工况涡轮进口流量按照正弦、方波形式非定常变化见式(1)-式(2)。

$$m_{i,s} = A |\sin(\pi ft)| \quad (1)$$

$$m_{i,D} = \begin{cases} A, 0 < t - \text{int}(t) < D/f \\ 0, D/f \leq t - \text{int}(t) < 1/f \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 是射流幅值; t 是射流时间; f 是射流频率; D 是射流占空比。

1.2 数值计算方法

由于高压涡轮静-转叶片数约化之后叶片数通道数之比为21:40,为减少计算量,改变导叶叶片数,使其与转子叶片数之比约化为1:2,见图1(a)。涡轮叶片流道采用Autogrid5自动生成HOH型拓扑网格,忽略叶尖间隙,加密近壁区的网格以保证 $y^+ < 1$ 。射流孔采用蝶形网格,为提高射流孔与叶片通道交界面处的插值精度,加密叶片主流道中射流孔附近的流向网格,见图1(b)。最终导叶、转子以及射流孔计算域的网格节点分别为 206×10^4 、 311.9×10^4 、 314.5×10^4 。

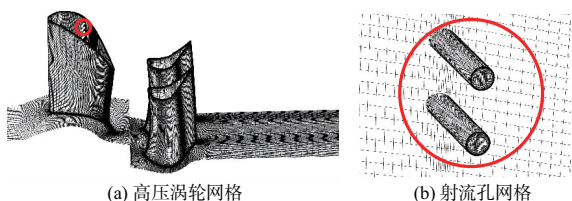


图1 气动调节计算模型示意图

数值模拟采用商业软件CFX18.1,对流空间离散采用二阶迎风格式,时间离散采用二阶后差欧拉格式、SST湍流

模型。涡轮进口给定总温1800K、总压3351520Pa;出口给定背压,固壁采用无滑移边界,周向边界采用周期性边界条件,非定常计算时转静交界面采用滑移平面,非定常时间步长为 1.66811×10^{-6} s,相当于转过一个转子叶片通道需30个时间步;射流孔进口给定总温、流量,其中总温为涡轮进口总温的0.44倍,流量按照式(1)-式(2)的形式给定。

1.3 气动性能评价参数

为了评估冷气射流对涡轮气动调节效果的影响,以无射流涡轮的性能参数为基准,定义涡轮进口相对流量 R_e 、相对效率变化量 D_e 、相对膨胀比 R_p 如下:

$$\begin{cases} R_e = \frac{m_{0R} - m_{0j}}{m_{0R}} \times 100 \\ D_e = (\eta_R - \eta_j) \times 100 \\ R_p = \frac{P_R - P_j}{P_R} \times 100 \end{cases} \quad (3)$$

式中: m_0 表示涡轮进口流量; P 和 η 表示涡轮的膨胀比和效率,下标“R”、“j”分别为基准工况和冷气射流工况。

式(3)中考虑冷气射流的涡轮效率定义式^[11]如下:

$$\eta_c = \frac{N_T}{(m_0 + m_j) h_{1i} \left(1 - \frac{h'_{2i}}{h_{1i}} \right)} \quad (4)$$

式中: N_T 表示涡轮输出轴功率; h_{1i} 表示级间总焓; h'_{2i} 表示达到涡轮总膨胀比的涡轮出口理想总焓。

2 计算结果分析

2.1 涡轮气动性能分析

1) 正弦射流

为了获得正弦射流参数调节涡轮气动性能的规律,首先研究射流频率的影响。选取射流幅值 $A = 3.15\%$,数值计算得到4种射流频率下的涡轮气动性能变化情况见图2。由图2可以看出,涡轮进口流量及膨胀比的变化量随射流频率的变化可忽略不计;随射流频率增加,涡轮效率衰减量小幅增加,其中射流频率0.5kHz较射流频率20kHz影响下的涡轮效率提升了0.06个百分点,效率变化量虽不大,但从下文的方波射流中也可得出低频射流下涡轮性能收益最佳相同结论。

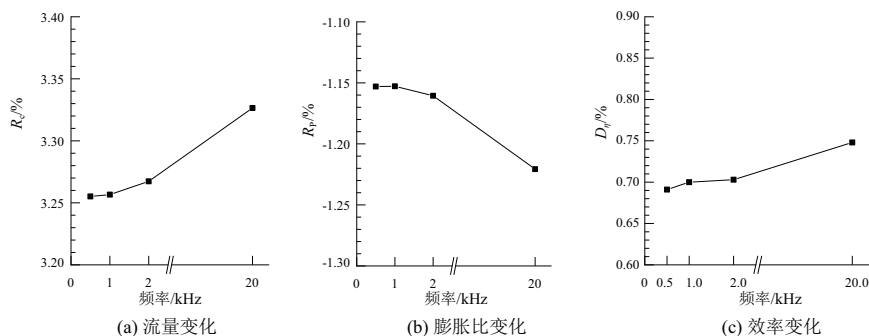


图2 正弦射流频率引起涡轮性能改变量

然后研究射流幅值的影响。选取正弦射流频率 2 kHz,数值计算射流幅值分别为 3.15%、7%和 8.82%时涡轮气动性能变化情况见图 3 中的线 1,可见射流幅值对涡轮气动性能影响显著,随着射流幅值增加,涡轮的流量调节范围、效率以及膨胀比线性改变。为了分析射流非常性影响涡轮气动性能的程度,图 3 中线 2 对比了幅值

为 2.01%、3.15%、4.42% 定常射流折合为幅值 3.15%、4.95%、6.89%。从正弦射流下的涡轮气动性能计算结果中可以看出时均流量相同的正弦射流与定常射流的涡轮性能变化曲线重合,这意味着正弦射流对涡轮气动性能的影响主要体现在与射流幅值相关的时均射流流量大小,非定常性的影响可以忽略不计。

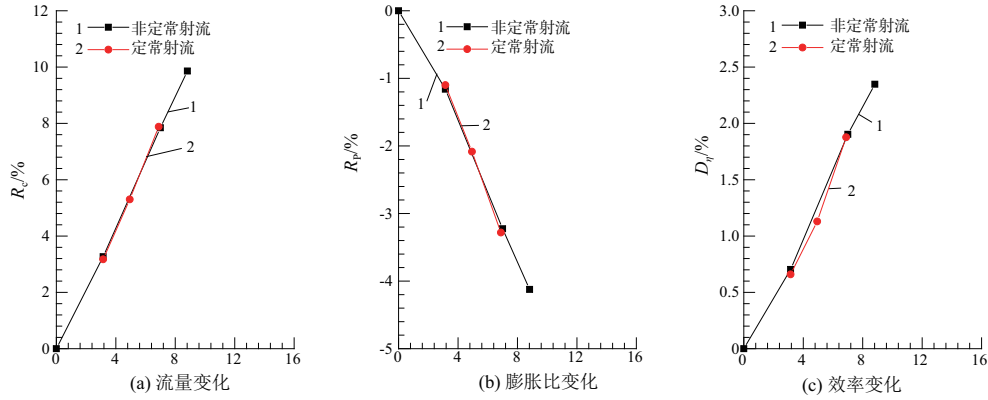


图 3 正弦射流幅值引起涡轮性能改变量

2) 方波射流

为了研究方波射流参数对涡轮气动性能的影响规律,分别选取射流幅值 $A = 3.15\%$ 、 8.82% ,频率 $f = 0.5\text{ kHz}$ 、 2 kHz 、 20 kHz ,占空比 $D = 0.1$ 、 0.3 、 0.5 。非定常计算获得涡轮气动性能较基准工况变化量随方波参数的变化情况见图 4。由图 4 可以看出,涡轮流量、膨胀比变化量与射流

频率无关,随着射流幅值增加、占空比增加,涡轮流量、膨胀比变化量线性增加。由于方波射流时均流量仅与射流幅值、占空比成正比,故认为涡轮流量、膨胀比调节量仅与非定常射流的时均流量相关,与正弦波射流的结论相一致,这从图 5 中也可以看出。图 5 为正弦/方波非定常射流、定常射流控制下涡轮性能随时均射流流量变化情况。

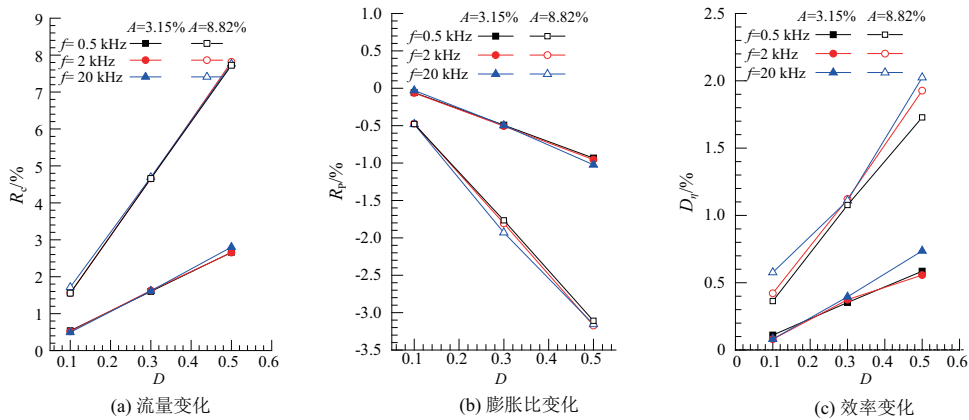


图 4 方波射流频率、幅值及占空比引起对转涡轮性能改变量

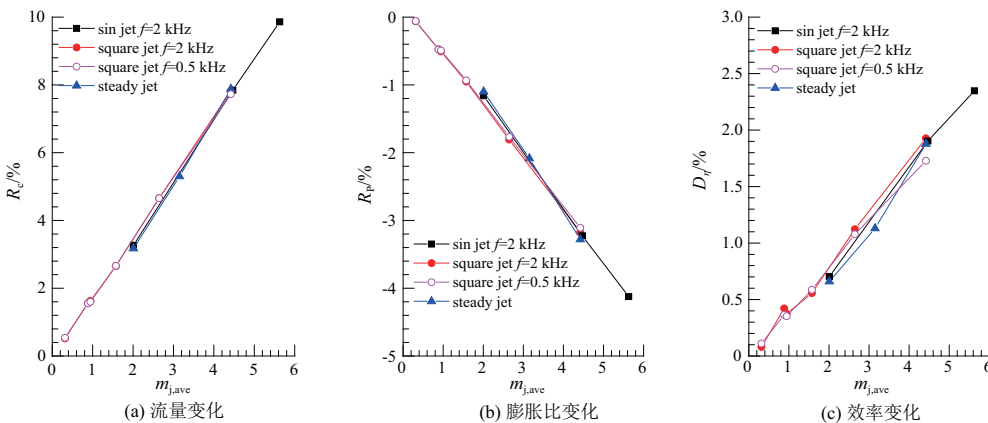


图 5 涡轮性能改变量随定常、非定常射流时均流量的变化情况

相较而言,涡轮效率的变化量与方波射流频率、幅值、占空比都相关,见图4。随着射流幅值、占空比增加,对应时均射流流量增加,引起涡轮效率衰减加剧,这与定常射流、正弦射流获得的结论相一致,见图5。但是随着射流频率减小,相同时均射流流量下涡轮效率衰减量减小,在占空比0.5、幅值8.82%的射流工况中,射流频率0.5 kHz较射流频率20 kHz控制下的涡轮效率增加了0.3个百分点。因此,方波射流时采用低频射流有利于利用较低的涡轮效率损失获得相同的涡轮流量调节范围,与正弦射流频率的影响相一致。进一步分析图5可以看出,正弦射流引起的涡轮效率衰减量略低于方波射流结果,意味着非正常射流类型对涡轮效率的影响不大,同时两种非正常射流引起的涡轮效率衰减量与定常射流结果相差不大,从射流控制的工程实用而言,定常射流较非正常射流更加简单。因此,在对转涡轮气动调节中,建议采用定常射流方案。

2.2 流动机理分析

由于方波射流与正弦射流获得的涡轮特性线性变化特征相近,两者影响涡轮气动性能的机理相同,故这里仅

针对正弦射流控制涡轮气动性能的流动机理进行详细解释。以幅值3.15%、频率2 kHz的正弦射流为例,分析 $t=0T$ 、 $0.5T$ 时刻涡轮叶中截面 Ma 云图,见图6。图6还给出了无射流、幅值3.15%定常射流时均结果,以进行对比,并用加粗线标出了导叶喉道位置。可以看出无射流与正弦射流 $t=0T$ 时刻、定常射流与正弦射流 $t=0.5T$ 时刻的流场结构、喉道面积近似完全一致,这意味着非正常射流流量形成的堵塞与涡轮导叶喉道面积调节同步,非正常射流对涡轮流量的调节相当于不同幅值定常射流的线性叠加,两者之间不存在非线性作用。图7的结果也证实了这个结论,不同频率、相同幅值3.15%的正弦射流时均射流流量都为2.01%。图7(b)中正弦射流影响下涡轮叶中截面的时均 Ma 云图及喉道面积与图7(a)中幅值2.01%定常射流影响下的流场结构一致。图7还给出了射流频率2 kHz下正弦射流幅值8.82%的 Ma 云图。可以看出,在相同频率下,随着射流幅值增加、射流流量增加,气动堵塞引起涡轮导叶的喉道面积减小,这也是引起图3中涡轮流量大幅减小的原因。

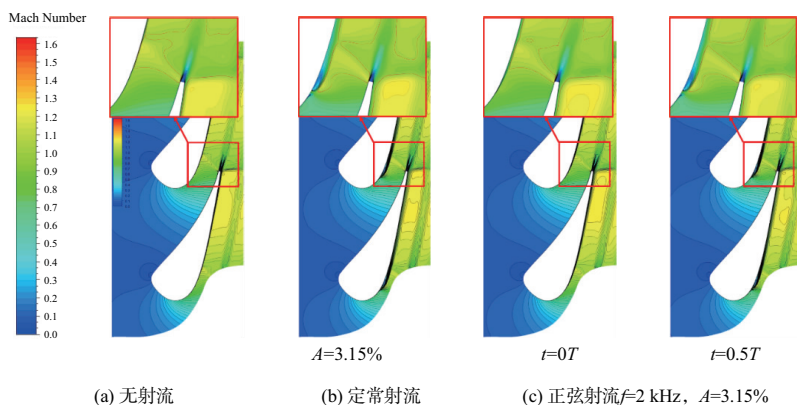


图6 无射流、定常射流时均马赫数及正弦射流瞬时马赫数云图

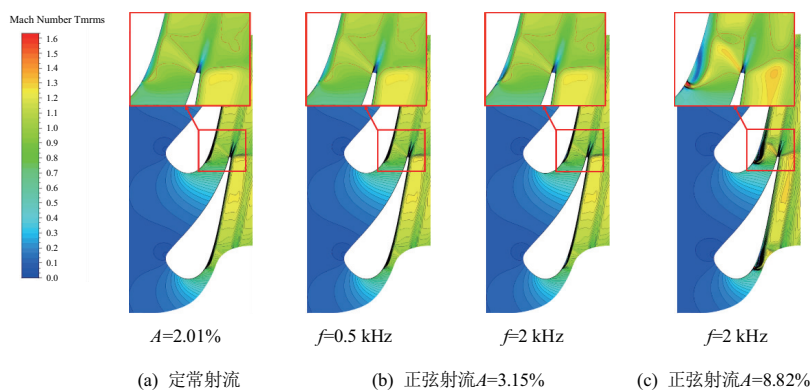


图7 定常射流及正弦射流时均马赫数云图

图7中叶栅流动损失主要包括激波损失、尾迹损失以及射流低速区与主流的掺混损失。由于图7(a)、图7(b)中相同时均流量下射流引起的流动堵塞面积相同,则理论上叶栅主流激波损失、尾迹损失相同,而射流频率2 kHz较射流频率0.5 kHz的射流低速区速度更低,对应的射流

低速区涡量更大,则射流低速区与主流的掺混损失更大,这也是低频非正常射流的效率略高于高频射流的原因。图7(c)中激波强度增加、射流低速区增加是大幅值射流引起涡轮效率大幅降低的主要原因。

(下转第197页)

制、满载的准确检测及垃圾的正确回收,同时实现了人机交互界面的实时显示,控制性能优异;

3)文中通过对 MobileNet V1 模型的训练以及两个超参数的调整,展现了识别系统的优异性能,实现了可回收、其他、厨余和有害这 4 类垃圾的准确识别与分类,避免了人工分类过程中主观因素的影响。

由装置的应用测试表明,其具备了生活垃圾的自动识别、分类回收、满载检测和界面显示等功能,且性能优异,对于减少环境污染和提高资源利用具有积极的应用价值;但在生活实际应用场景中,生活垃圾种类更为繁杂。因此,后续仍将会对本装置的识别模型进行进一步的训练,不断扩大样本数据,从而满足日常生活垃圾分类需求。

参考文献:

- [1] 王佳佳,赵娜娜,李金惠. 中国海洋微塑料污染现状与防治建议[J]. 中国环境科学,2019,39(7):3056-3063.
- [2] 魏子瑄,刘小刚,陈真贵,等. 基于语音识别技术的智能分类垃圾桶[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2020,20(1):79-82.
- [3] SU S X, MA X H, LI C, et al. Research and design of intelligent garbage classification system based on Internet of Things [J]. International Journal of Higher Education Teaching Theory, 2021, 2(1):156-159.
- [4] 王玥,刘苇,崔昊. 基于 STC89C52 单片机的智能分类垃圾桶的设计[J]. 科技经济导刊,2019,27(16):66.

- [5] 张方超,董振,张栋,等. 基于图像视觉的垃圾分类机器人识别控制系统算法设计[J]. 电子测量技术,2019,42(20):63-67.
- [6] 叶志祥. 智能分类垃圾箱设计研究[J]. 中国资源综合利用,2019,37(4):191-193.
- [7] 金琦淳,任俊,袁明新,等. 复杂竞赛任务中的自动分拣搬运机器人系统设计[J]. 轻工机械,2019,37(2):17-23,28.
- [8] HOWARD A G, ZHU M L, CHEN B, et al. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications [EB/OL]. 2017:arXiv:1704.04861[cs.CV]. (2017-04-17) [2021-05-20]
<https://arxiv.org/abs/1704.04861>.
- [9] 易强,李成娟,李宝清,等. 基于改进 MobileNet V1 网络的野外车辆识别[J]. 工业控制计算机,2020,33(7):104-107.
- [10] 谢堂,吴居豪,温泉河. 基于机器学习的智能垃圾分类箱[J]. 现代计算机,2020(12):139-143.
- [11] 康庄,杨杰,郭濠奇. 基于机器视觉的垃圾自动分类系统设计[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(7):1272-1280,1307.
- [12] 吴碧程,邓祥恩,张子懂,等. 基于卷积神经网络的智能垃圾分类系统[J]. 物理实验,2019,39(11):44-49.

收稿日期:2021-08-23

(上接第 176 页)

3 结语

本文数值研究了正弦及方波形式非定常冷气射流影响对转涡轮高压级气动性能的规律及流动机理,得到结论如下。

1)射流影响下涡轮进口流量、膨胀比变化量仅与时均射流流量相关,与射流非定常性无关,时均射流流量越大,涡轮流量及膨胀比改变量越大;低速射流堵塞流道引起涡轮喉道面积减小,是造成涡轮流量降低的原因。

2)涡轮效率衰减量与时均射流流量、射流频率相关,时均射流流量越大,涡轮效率衰减越大,射流频率越低,涡轮效率衰减量略微减少。

3)非定常射流较定常射流并不能显著提升涡轮气动性能,而定常射流实现更加简单,故建议对转涡轮气动调节方案采用定常射流。

参考文献:

- [1] 周琨,邹正平,刘火星,等. 航空发动机对转涡轮气动设计技术研究进展[J]. 科技导报,2012,30(15):61-74.
- [2] 雒伟伟,张磊,王会社,等. 可调高压导叶对 1+1/2 对转涡轮性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2011,26(12):

2741-2748.

- [3] KLINE J, NOSEK S. Two-dimensional cascade test of a jet-flap turbine rotor blade[R]. ANSA TM X-2183, 1971.
- [4] 杨咏. 气动方式调节涡轮流量[D]. 北京:北京航空航天大学,2009.
- [5] 付超. 先进涡轮气动设计技术若干问题研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2010.
- [6] 史文斌. 叶轮机械叶栅流动数值与试验研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2011.
- [7] 闫晨,叶建,付超. 利用端区射流调节涡轮流量的数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2011,24(2):9-12,4.
- [8] SARACOGLU B H, PANIAGUA G, SALVADORI S. Energy analysis of pulsating coolant ejection[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany:[s.n.], 2014.
- [9] 张少博,史伟,刘火星. 脉冲式喷气调节涡轮流量的数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2015,28(6):26-30.
- [10] 杨荣非,李云朋,仲冬冬,等. 采用冷气射流调节对转涡轮高压部件流量的数值研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):29-32.
- [11] HB 7081—2012 航空燃气涡轮发动机轴流涡轮气动性能试验方法[S].

收稿日期:2021-07-26