

转静子间距对斜流压气机流动损失影响研究

戈永旺,陈杰

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:斜流压气机转静子间距对整机性能有重要影响。基于非稳态流场数值模拟,计算分析不同转静子间距下叶轮、无叶段、有叶扩压段三部分流动结构及损失机理,发现随着间距的增大叶轮部分流动损失几乎不变,无叶区部分流动损失增加,有叶扩压段各个控制体的流动损失都减少。研究结果可为斜流压气机转静子匹配设计提供参考。

关键词:斜流压气机;流动损失规律;控制体;转静子匹配;数值模拟

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)04-0024-05

Effect of Rotor-stator Gap on Flow Loss in Mixed-flow Compressor

GE Yongwang, CHEN Jie

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

Abstract: As the gap between impeller and vaned stator of mixed-flow compressor has an important effect on the stage performance, this paper calculates and analyzes flow structure and loss mechanism in impeller, vaneless diffuser, vaned diffuser on the basis of numerical simulation at different gaps with the conclusion that the flow loss, almost unaffected in impeller, increases in vaneless diffuser and decreases in control body of vaned diffuser as rotor-stator gap increases. The research results can provide reference for rotor-stator matching design of mixed-flow compressor.

Keywords: mixed-flow compressor; flow loss; control volume; rotor-stator matching; numerical simulation

0 引言

作为航空发动机中关键部件之一的压气机^[1-2],无论是轴流、离心或者斜流形式,其结构上均是旋转叶片和静止叶片依次排列。转静叶排之间距离受到结构的约束,也影响着转子出流进入本级静子的流动状态以及压气机的性能。

早期的实验研究发现轴向间距改变会明显影响轴流压气机性能^[3]。随着转静间距减少,静子对轴流压气机增稳作用增强,失速流量^[4]和堵塞流量^[5]减少,使得压气机工作裕度变宽;同时压气机整体扩压能力增强,总压比上升,总静压升系数增大^[6]。

对于离心压气机,转静子间隙的增大,对叶轮效率影响较小^[7-9],但会使得扩压器叶片前缘的静压脉动平稳,进口马赫数分布均匀,增强扩压器内部流动稳定性^[10],但扩压器总压恢复系数下降,压气机整机效率下降^[8]。

轴流和离心压气机转静子叶排间距的改变都会影响工作稳定性、静子部分的总压恢复等。静子内流动都会受到上游动叶尾迹的影响,但两者无叶段流动结构不同,离心在转静子间隙中具有强烈的间隙涡^[11]、射流-尾迹结构等三维流动特征,故转静子叶排间距形成的影响也有所不同。

斜流压气机工作特征兼具轴流和离心式的特点,近些

年在先进中小型发动机研制中引起关注,其转静子叶排间距所形成的影响未必能够与后者之一相同,但因发展晚,相关研究较少。本文基于流动的非稳态数值模拟进行转静间距对斜流压气机内部流动损失特征的研究。

1 计算模型及数值仿真方法介绍

1.1 研究对象

本文以一款斜流压气机作为研究对象,设计压比 5.5,叶轮部分采用分流叶片设计,主叶片数 12,大小叶片数 1:1。叶轮进出口直径比 0.74,进口采用导风轮设计,出口采用后弯设计。扩压器部分采用径向段和轴向段一体化构型,扩压器进口叶尖相对于子午面叶片角-71.43°,进口叶根叶片角-70.70°。

1.2 转静子间距的调整方法

本文所研究的斜流压气机转静子间距是指叶轮叶片尾缘至有叶扩压段主叶片前缘的距离,用以下 3 种方式表示:有叶扩压段进口与叶轮出口叶尖处半径的比值 r_3/r_2 、叶轮和有叶扩压段叶尖的轴向长度 H 、叶轮和有叶扩压段叶尖的子午向长度 L ,如图 1 所示。参照离心压气机设计中转静子间距^[9] r_3/r_2 在 1.06~1.16 之间的建议,本文研究的转静子间距范围为 1.076~1.177(表 1)。借鉴轴流压气

基金项目:国家科技重大专项(2017-II-0002-0014)

第一作者简介:戈永旺(1996—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为叶轮机械气体动力学,gyw15895181272@163.com。

机改变转静子间距的方法^[12-13],把有叶扩压段沿着无叶段的子午面 zr 坐标下轮毂机匣拟合直线朝图 1 右上方移动。最终扩压器的叶片安装角、通道面积分布、叶片叶型等参数不发生改变,但由于无叶段加长,使得有叶扩压器通道扩张比发生变化,4 个模型扩张比依次递减,最大值相对最小值减少 1.0%,对于扩压器性能的影响较小。

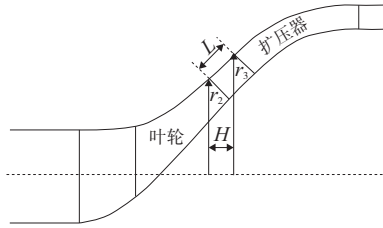


图 1 转静间隙示意图

表 1 4 组转静子间隙

参数	Case1	Case2	Case3	Case4
r_3/r_2	1.076	1.109	1.143	1.177
H/mm	13.00	18.74	24.48	30.22
L/mm	17.36	24.97	32.73	40.42

1.3 数值计算方法

本文采用 NUMECA 商业软件进行三维非定常计算,选用 S-A 湍流模型。进口给定总压 101 325 Pa、总温 288.15 K,出口给定不同的平均静压调节压气机的工作状态,壁面采用无滑移条件。叶轮与扩压器的通道比为 1:1,采用区域缩放法,由叶轮各一个主叶片、分流叶片的周期性通道与扩压器中 1 个叶片的周期性通道形成计算域。

采用结构网格,叶轮和扩压器前后缘都进行网格加密,叶片表面网格如图 2 所示。叶轮和扩压器部分分别以约 1.5 倍的网格量增长率调整网格,对网格量进行无关性验证。

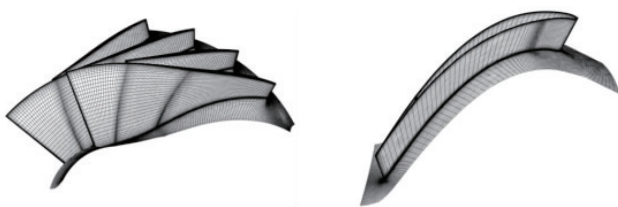


图 2 斜流压气机整级网格图

图 3 为采用 5 种网格定常计算所得整级特性曲线(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者),网格量 0.7×10^6 和 1.6×10^6 效率及压比都很低,当网格量增到 2.6×10^6 及以上时,效率和压比都没有太大变化,可以认为在压气机整级的特性上,选择 2.6×10^6 网格可以作为仿真模拟的网格量。图 4 为采用 5 种网格计算所得转静交界面上的马赫数云图,可以发现总量 $2.6 \times 10^6 \sim 4.9 \times 10^6$ 的网格计算结果基本一致,因此本文研究采用总量 2.6×10^6 的网格。

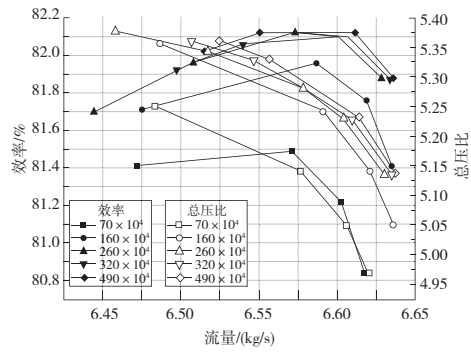


图 3 5 种网格量下压气机特性曲线

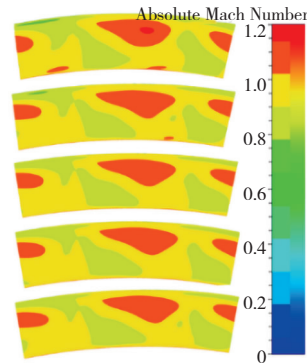


图 4 5 种网格量下转静交界处马赫数云图

2 结果比较与分析

2.1 斜流压气机性能与流动损失对比

图 5 为斜流压气机性能曲线与流动损失柱状图。随着转静子间隙的增加,整级流动损失先减后增,整级效率曲线先增后减,说明流动损失越小,整级效率越高;无叶段流动损失递增,总压恢复系数递减,有叶扩压段流动损失递减,总压恢复系数递增,无叶段总压恢复系数曲线最高点从 0.964 降至 0.956,差值 0.008,有叶扩压段总压恢复系数曲线最高点从 0.941 升高至 0.966,差值 0.025,说明转静子间距变化,对有叶扩压段影响更大,如图 5 所示。

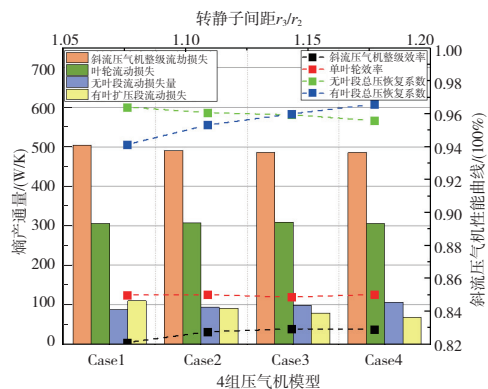


图 5 斜流压气机性能曲线及流动损失柱状图

2.2 叶轮部分流动损失分析

图6为不同转速下90%叶高相对马赫数云图,100%转速时无叶段存在超音速,下游对上游叶轮的干扰减弱,65%转速时无叶段不存在超音速,但转静子间距的变化,下游对叶轮的扰动仍然较小,说明本文研究的转静子间距范围内,下游对叶轮流动影响较小。

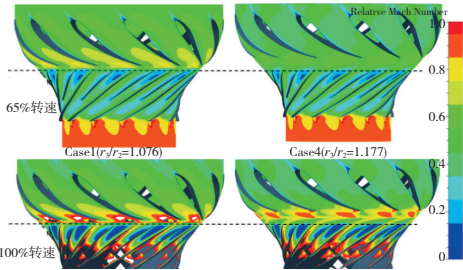


图6 整级90%叶高相对马赫数云图

叶轮出流的尾迹结构^[14]是叶轮下游部件工作的重要流动特征,主要由以下3个部分组成:叶尖泄漏流、叶片近壁面二次流、通道涡,都具有高熵值、高流动损失的特性,因此尾迹具有相同特性。

对比图7整级回转面上熵分布与绝对马赫数分布,可以看出组成叶轮尾迹高熵值区域同时具有高绝对马赫数特征。叶尖泄漏流从分流叶片压力面跨过叶顶横向流向主叶片压力面,在分流叶片吸力面-主叶片压力面通道中部转向叶轮出口。通过图8可以得出该流线上位置2与上游位置1点处速度三角形的对比,旋转速度 U 相同,相对流动发生偏转,子午速度 $V_{m2} < V_{m1}$,导致 $W_1 > W_2$ 、 $|V_2| > |V_1|$,因此在叶轮通道内,位置点2附近的泄漏流裹挟二次流形成的通道涡区域相对于其他部分流体绝对马赫数更大。

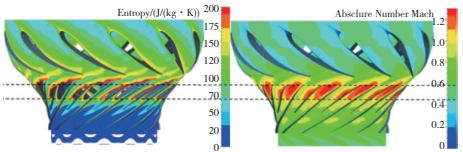


图7 整级90%叶高回转面上熵云图与绝对马赫数云图对比

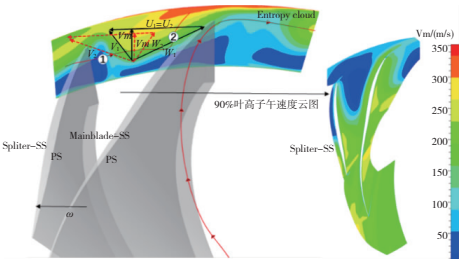


图8 叶轮叶尖泄漏流三维流线

2.3 无叶扩压段流动损失分析

相对于叶轮和有叶扩压段部分,无叶段理想流动模型相对简单,从图9中归一化无叶段熵产通量^[15]曲线可以

发现流动损失与转静子间距接近正比关系。

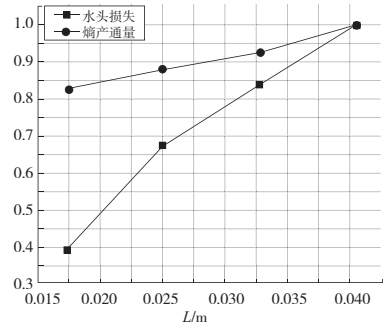


图9 无叶段归一化损失和熵产通量对比曲线

无叶段的流动损失主要在50%叶高以上,主要包括上游叶轮出口的尾迹在无叶段内掺混形成的损失和摩擦损失,如图10所示。随着转静子间距的增加,无叶段的流动结构熵分布在空间上增长,但没有出现新的流动熵分布结构,可以使用管流水头损失计算模型无叶段内损失与转静子间距的关系。

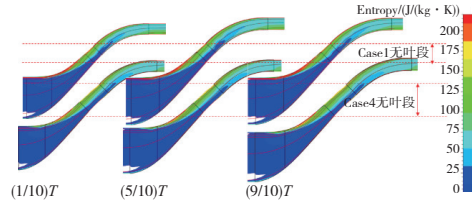


图10 子午流道熵分布

由于流路中不存在流动面积突变的地方,因此忽略局部损失,则流动损失公式为

$$H_w = H_f = \lambda \frac{LV^2}{2dg} \quad (1)$$

式中: V 为无叶段进口平均速度; g 为重力加速度; d 为叶轮出口截面的当量直径; ν 为运动黏度; μ 动力黏度,设置为 1.716×10^5 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$),4组 $R_e = 2.92 \times 10^6$ 、 9.04×10^5 、 8.99×10^5 、 8.99×10^5 都在 $(10^5, 3 \times 10^6)$ 范围内,满足尼古拉兹沿程损失系数计算公式使用条件,求出 λ 。

求得4组损失 H_w ,绘制图9无叶段水头损失归一化曲线。损失和熵产通量都与无叶段长度接近线性,说明无叶段的流动损失与转静子间距成线性关系。

2.4 有叶扩压段流动特征分析

来流气体以负攻角绕过扩压器叶片前缘进入扩张通道,由于流道气动截面积增加,导致减速增压,压力面叶根产生分离涡,相同原因在压力面叶尖产生分离涡,如图11①处和②处三维流线所示。①处流体在径向压差和离心力的作用下向着轮毂发展,流经轮毂处又被横向压差推动下向吸力面发展;②处流体在横向压差作用下向下游吸力面发展;①处和②处的低速流体都会流经扩压器的转弯段的③处,在③处因转弯段大曲率和减速增压作用下发生流动分离。同时,叶片近壁面的二次流会从叶尖往叶根移动,汇聚到转弯段的叶根附近,流体最终在扩压器出口聚集成尾缘分离涡,是④处尾缘分离涡形成的重要原因

之一。

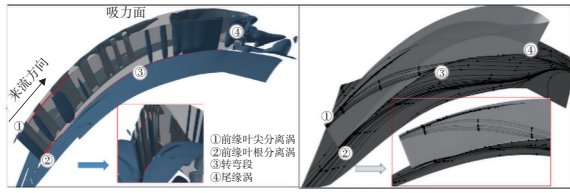


图 11 有叶扩压段内部流动结构

参照图 11 有叶扩压段流动结构,沿 50%叶高将有叶扩压段划分成上控制体和下控制体,图 12 为斜流压气机不同叶高回转面熵云图,可以明显看出流动损失集中在 55%叶高以上,因此有叶扩压段的进口段上控制体相对于下控制体受到更多的叶轮尾迹的影响,进口段上控制体的马赫数比下控制体的更大,如图 13 所示。

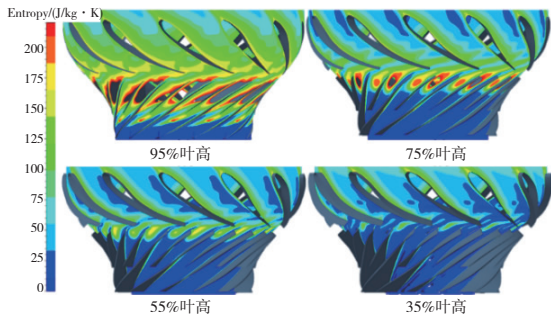


图 12 不同叶高下熵云图

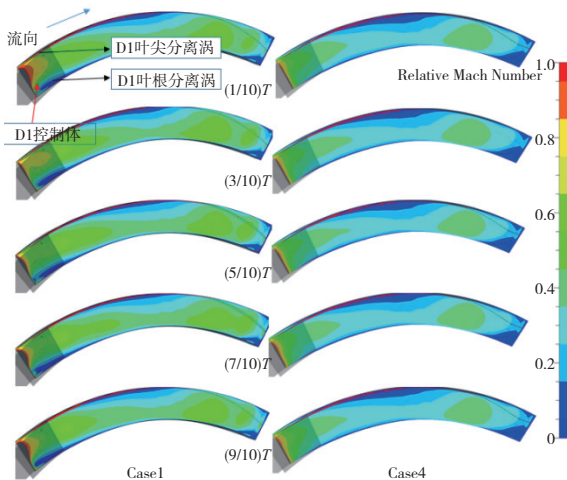


图 13 Case 1、Case 4 的近壁面马赫数云图

图 13 为最小、最大转静子间距下扩压器叶片压力近壁面马赫数分布对比(图中 T 表示 1 个周期),叶轮出流尾迹在无叶段掺混和摩擦使得流进有叶扩压器的流体流速降低,随着转静子间距的增加,有叶扩压段进口来流马赫数明显降低,分布也变得更为均匀。

图 14 给出了扩压器轮毂处马赫数分布以及近前缘流线,随着转静子间距的增加,负攻角减少,叶根前缘分离涡区减小,流入轮毂转弯段的低能流体减少,③处转弯段的低速区面积减少。

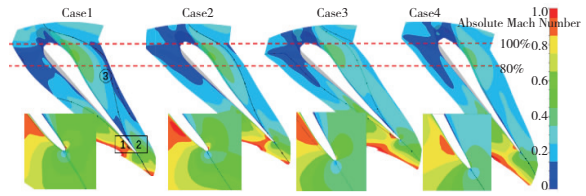


图 14 扩压器轮毂处马赫数云图

2.5 有叶扩压段流动损失分析

根据流动特征分析,有叶扩压段流动损失主要分布在前缘、转弯段、尾缘,因此对有叶扩压段从进口到出口划分 9 个控制体,计算得到各控制体熵产通量,如图 15 所示。随转静叶排间距的增加,有叶扩压段的流动损失整体减少,与图 5 总压恢复系数逐渐增加相一致;D1 和 D9 控制体流动损失相对其他控制体更高,并且 D1 和 D9 控制体的流动损失随着转静子间距的增加,流动损失减少程度最大,说明随着转静子间距的增加,有叶扩压段流动损失越多的控制体流动损失减少量越大。

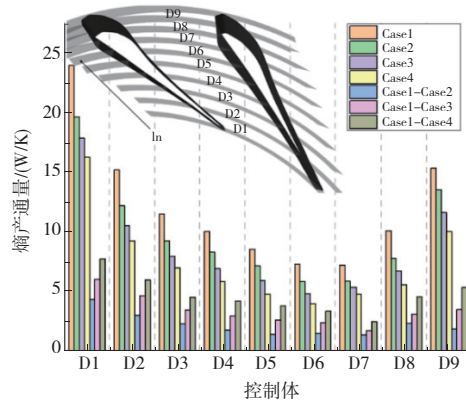


图 15 不同转静子间距的控制体流动损失以及相互差值

对 D1 控制体按照 2.4 节中有叶扩压段进口流动特征划分成上、下控制体。D1 上控制体流动损失一方面来源于叶轮尾迹结构在控制体内发展所形成的摩擦损失、掺混损失;另一方面是叶尖分离涡损失。由于叶轮尾迹高熵区流体大部分流入 D1 上控制体,并结合图 12 中 75%、95%展向位置回转面转静交接段的熵分布变化特征,可认为前者是上控制体主要损失源。随着转静子间距增加,2.4 节分析了流入上控制体的流速、马赫数分布更均匀,使得摩擦损失、掺混损失下降。

D1 下控制体流动损失变化来源两个方面,一方面负攻角越小时,叶根负攻角导致的分离涡会减小,下控制体的流动损失降低,反之流动损失上升;另一方面来流流速降低,使得在下控制体中的掺混损失以及摩擦损失降低。

D9 控制体流动损失来源主要为①②③处的低速流体汇聚到弦长 80%~100%形成的低能分离涡团,如图 14 所示。随着转静子间距的增加,D9 控制体轮毂处的低速区面积减少,流动损失降低。

D1 下控制体的分离涡相对于上控制体更大(图 13),同时轮毂处有大面积分离涡以及摩擦损失,都使得下控制

体的流动损失比上控制体的流动损失大;叶轮和扩压器叶片相对位置的改变会影响叶轮尾迹流入扩压器通道的位置,使得上控制体的进口马赫数随时刻波动幅度明显强于下控制体(图13),上控制体内摩擦损失、掺混损失波动幅度更大,因此上控制体内的流动损失随时刻变化曲线更加剧烈。图16为D1上、下控制体流动损失随时间的变化曲线。

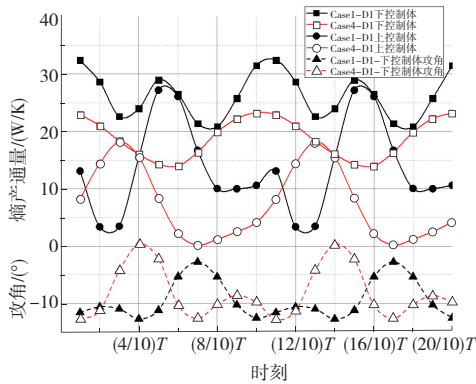


图16 D1上、下控制体流动损失及来流攻角

从图16中可以看出,随着转静子间距增加,进口马赫数降低、分布更均匀,使得叶轮尾迹引起的摩擦损失、掺混损失减少,时均态流动损失降低;上控制体马赫数随时间的波动减弱,上控制体损失随时间的波动幅度更小;下控制体的来流负攻角减少、来流速度降低,使得流动损失减小,因此D1控制体总流动损失下降。

由于转静子间距的增加,尾迹在无叶段流动掺混更久,扩压器进口来流马赫数稳定,扩压器流动损失波动减弱,使得叶轮与扩压器匹配后整机性能更平稳,如图17所示。

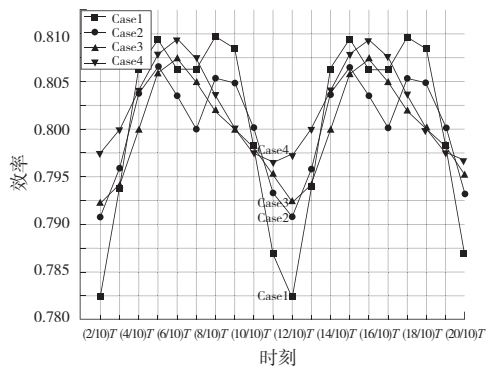


图17 不同间距非稳态整机效率曲线

3 结语

本文对转静子间距不同的斜流压气机内部流场的数值模拟与分析,研究了叶轮、无叶段、有叶扩压段三部分的流动结构和损失及其流动损失规律,得到主要结论如下:

1)在所研究的斜流压气机转静子间距变化范围内,叶轮65%设计转速以上工作时,其流动结构、损失以及性能所受影响较小;

2)无叶段的流动损失与转静子间距近似成线性关系,掺混损失和摩擦损失是重要的损失源;

3)有叶扩压段损失首要来源是进口段和出口段;转静子间距的增加使得有叶扩压器流动损失减小,其首要收益亦是来源这两处。

参考文献:

- [1] 世界中小型航空发动机手册编委会. 世界中小型航空发动机手册[M]. 北京:航空工业出版社,2006.
- [2] 彭泽琰,刘刚,桂幸民. 航空燃气轮机原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] ZHU J Q, WU Y H, CHU W L. Axial location of casing treatment in multistage axial flow compressors[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air, Reno, Nevada, USA; 2008:365-371.
- [4] 张环,胡骏,李传鹏,王英锋. 轴向间距对压气机气动稳定性的影响[J]. 航空动力学报,2005,20(1):120-124.
- [5] GORRELL S E, OKIISHI T H, COPEHAVER W W. Stator-rotor interactions in a transonic compressor: part I—effect of blade-row spacing on performance[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air, Amsterdam, Netherlands; 2009:889-899.
- [6] 陆华伟,车聪斌,钟兢军,等. 采用正弯静叶的压气机在不同轴向间隙下时序效应的实验[J]. 航空动力学报,2011,26(2):241-248.
- [7] ZIEGLER K U, GALLUS H E, NIEHUIS R. A study on impeller-diffuser interaction—part I: influence on the performance[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1):173-182.
- [8] CHEN J, YUE Y, HUANG G P. Effect of vaned diffuser on a small centrifugal impeller performance[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany; 2014.
- [9] 岳洋. 微型离心压气机转静子间隙对级性能影响研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [10] ARNDT N, ACOSTA A J, BRENNEN C E, et al. Rotor-stator interaction in a diffuser pump[J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 111(3):213-221.
- [11] 赵正. 转静间隙涡对离心压气机气动特性的影响研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [12] 汪松柏,张少平,李春松,等. 转静轴向间距对压气机静子叶片气流激励的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究,2020,33(6):9-15,31.
- [13] 刘东健,李军,蒋爱武,等. 轴向间距对压气机通道堵塞及总性能的影响[J]. 航空学报,2015,36(11):3522-3533.
- [14] 赖焕新,康顺,吴克启. 离心式叶轮内部湍流及出口“射流尾迹”结构的成因分析[J]. 推进技术,2000,21(1):45-48.
- [15] 敖天翔. 斜流压气机保形通道扩压器局部流动损失量化研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.

收稿日期:2022-03-01