

叶冠齿数和齿顶间隙对涡轮气动性能的影响^{*}

应银生¹, 马石²

(1.江南造船集团责任有限公司, 上海 201913;

2.海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033)

[摘要] 通过数值方法对某 1.5 级带冠涡轮的流场进行研究, 对比分析了不同叶冠齿数和齿顶间隙对涡轮气动性能的影响。研究表明, 泄漏流与主流掺混后形成一个涡流区, 改变了叶栅上半通道的流场结构, 使得顶部流体以负攻角进入下级静叶, 造成攻角损失, 改变了下级静叶的气动性能。同时发现间隙相对于齿数对涡轮气动性能的影响程度更为显著, 间隙相同, 齿数从 1 增加到 4 时, 涡轮效率增加 0.75%; 齿数相同, 间隙从 2mm 减小到 0.5mm 时, 涡轮效率增加 1.82%。

关键词: 叶冠; 齿数; 间隙; 气动性能; 涡轮效率

Effect of the Shroud Seal Number and the Tip Clearance on the Aerodynamic Performance of the Turbine

YING Yinsheng¹, MA Shi²

(1.Jiangnan Shipyard Co., Ltd., Shanghai 201913, China;

2.College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

[ABSTRACT] A 1.5 stage turbine with shroud is studied by using a numerical simulation program. The effects of the shroud seal number and the tip clearance on the turbine aerodynamic performance are analyzed. The simulation results show that mixing between leakage and main flows leads to a turbulence area, alters the flow structure of the upper half channel, the suction side incidence of the re-entering leakage flow in the subsequent stator causes additional losses, and alters the aerodynamic performance of the next stator. In addition, compared with the number of seal, the influence of the tip clearance on the turbine aerodynamic performance is more obvious. In the same tip clearance, with the seal number increases from 1 to 4, the turbine efficiency increased 0.75%. In the same seal number, with the tip clearance decreased from 2mm to 0.5mm, the turbine efficiency increases 1.82%.

Keywords: Blade shroud; Seal number; Tip clearance; Aerodynamic performance; Turbine efficiency

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.128

涡轮叶片带冠结构设计可以减小泄漏流量, 从而减小泄漏流对主流带来的影响。国外, Denton^[1]首先研究了叶片带冠设计对涡轮气动性能的影响, 建立了叶顶间隙泄漏流动损失模型和相关经验公式。Bohn^[2]和Rosic^[3]研究了叶冠上篦齿形状对气动性能的影响。Zimmermann^[4]总结了篦齿封严泄漏流量的计算公式。Nirmalande^[5]经过试验分析了叶顶间隙大小和叶冠形状对涡轮气动损失的影响。国内, 吴丁毅^[6]通过试验得出了篦齿宽度和齿顶间隙比对涡轮流场的影响。鄢景^[7]

应用数值模拟方法分析了某型燃气轮机涡轮无冠和有冠顶部时间隙泄漏流和通道涡流动结构。李钰洁^[8]对比分析了不同叶顶间隙下间隙流的流场, 揭示了间隙流对叶片不同截面压力分布影响的规律。黄晓光^[9]和刘高文^[10]研究了影响叶顶间隙泄漏流的因素有篦齿结构、压比和转速, 得出矩形凹槽宽深比是封严性能的重要参数, 压比和转速对封严性能影响不大。高杰^[11]研究了泄漏流与主流掺混作用对下级静叶气动性能的影响, 表明下级静叶产生攻角损失。贾惟^[12]主要研究了篦齿数、篦齿排列方式、上下级压力以及叶顶间隙对间隙泄漏流及泄漏流与主流混合作用对涡轮气动性能的影响。

文献 [11] 和 [12] 研究了叶冠齿数和齿顶间隙对涡

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学研究基金资助项目(50721005)

轮气动性能的影响,但没有对叶冠齿数和齿顶间隙对涡轮气动性能的影响程度进行对比研究。因此,本文以某1.5级轴流带冠涡轮为研究对象,通过三维数值模拟分析了叶冠齿腔内涡流结构,并主要对比分析了齿顶间隙和叶冠齿数对间隙泄漏流量的影响以及对下级静叶气动性能的影响。

1 物理模型与数值方法

1.1 物理模型与边界条件

本文的研究对象是某1.5级轴流涡轮,将动叶设计成带冠结构,叶冠齿顶间隙为0.5mm(0.9% h),齿数为 $n=1,2,3,4$ 四种方案,并在齿数为3的情况下,增设齿顶间隙1.0mm(1.8% h),1.5mm(2.7% h)和2.0mm(3.6% h)3种方案,其中 h 表示叶高。图1为该模型的计算网格。边界条件设置为:进口总压170kPa,进口总温1000K,出口静压112.5kPa,动叶转速为3500r/min。

1.2 数值方法与湍流模型

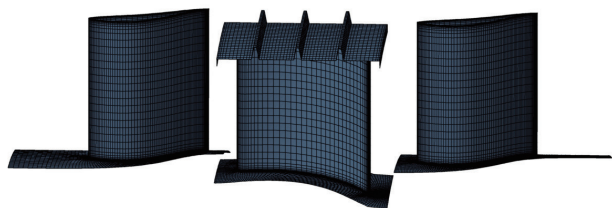


图1 涡轮计算网格

Fig.1 Computational mesh of turbine

本文采用商用CFD软件Numeca的FINE/Turbo模块进行计算,求解三维定常雷诺平均的N-S方程组,采用中心节点有限体积法进行离散,空间差分采用了二阶中心差分格式,时间项采用4阶Runge-Kutta法迭代求解,湍流模型采用Spalart-Allmaras模型。模型的网格采用Numeca软件包的Autogrid5生成,叶栅通道采用O4H型拓扑网格结构,网格数量约为400万,为了准确地模拟出边界层内的流动特性,所有壁面处的 Y^+ 值小于 $2^{[13]}$ 。

2 计算结果及分析

2.1 涡轮的性能结果与分析

表1是涡轮的性能参数及其变化的具体数值,数据为7种不同方案的模拟结果。

从表1可以得出,间隙相同时,随着齿数的增加,叶冠的泄漏量减少,涡轮效率提高,齿数从1增加到2时,泄漏流量减少较多,齿数从2增加到3和从3增加到4时,泄漏量的减少相对较小,齿数从1增加到4时,泄漏流量减少0.0695kg/s,涡轮效率增加0.75%;齿数相同时,随着间隙的增加,泄漏量增加,涡轮效率下降,齿顶

表1 1.5级涡轮性能

方案	齿顶间隙/mm	篦齿数量/个	泄漏量/%	涡轮效率/%
a	0.5	1	1.48	85.01
b	0.5	2	0.92	85.36
c	0.5	3	0.76	85.59
d	0.5	4	0.63	85.76
e	1.0	3	1.62	84.73
f	1.5	3	2.34	84.25
g	2.0	3	2.97	83.77

间隙为2mm时比0.5mm时的泄漏流量增加0.184kg/s,涡轮效率降低1.82%,所以间隙相比齿数对泄漏量和涡轮效率的影响程度更大。

2.2 涡轮动叶顶部间隙流动特性分析

图2是叶冠间隙流动结构图,一部分流体在第一个篦齿前形成一个涡流,另一部分流体则以较快的速度流向下一个齿腔,并紧贴机匣壁面流动至流出叶冠,在每个齿腔中均有形成涡流。流体每次流经篦齿后压力下降,这是由于涡流区的存在引起泄漏流的能力损失造成的。泄漏流与主流掺混后,在叶冠出口形成较小涡流区,改变了主流流动结构。

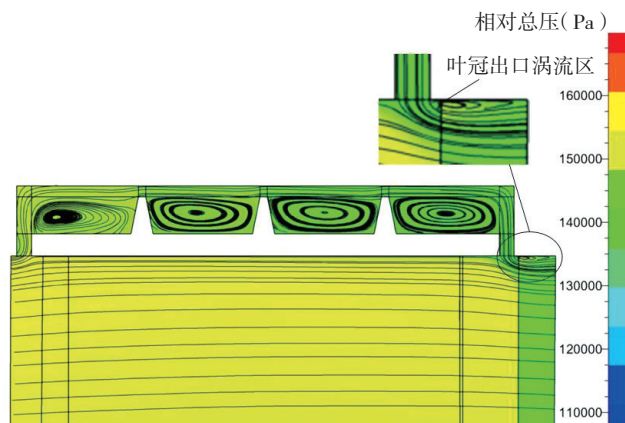


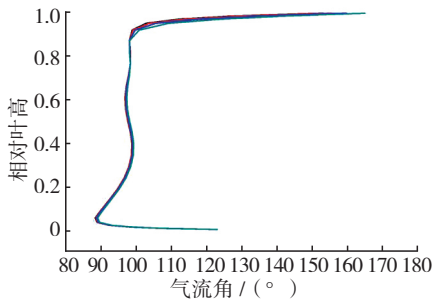
图2 叶冠间隙流动结构

Fig.2 Flow structure of the shroud

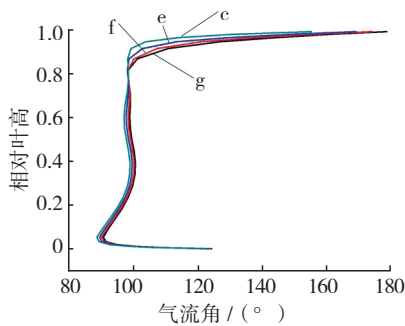
2.3 篦齿数和齿顶间隙对主流气动性能的影响

在叶冠篦齿数不同的情况下,静叶入口气流角沿叶高分布如图3(a)所示,气流角从85%相对叶高处开始变大,气流角在95%相对叶高处发生突变,因为泄漏流与主流掺混后形成一个较小的涡流区,从而改变了静叶入口气流角的分布,齿数越少,影响的范围越大,因为齿数少时泄漏量较大。图3(b)是间隙不同的情况下静叶入口气流角沿叶高分布图,气流角的变化趋势与齿数不同时的变化趋势相同,但间隙对入口气流的影响程度大于齿数对入口气流角的影响。

图4(a)是不同齿数时静叶入口相对马赫数沿叶高的分布图,马赫数从80%相对叶高开始变化,并从95%相对叶高突然增大,齿数越少,马赫数的影响范围越大,齿数由1增加到4,马赫数最大值增加0.075,因



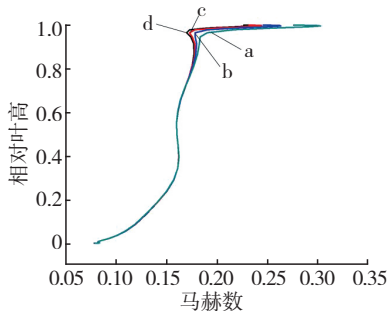
(a) 齿数不同时



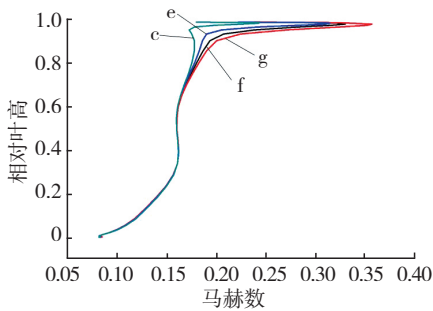
(b) 间隙不同时

图3 第二级静叶入口相对气流角沿叶高分布

Fig.3 Relative gas flow angle at the inlet of next stator along the span direction



(a) 齿数不同时



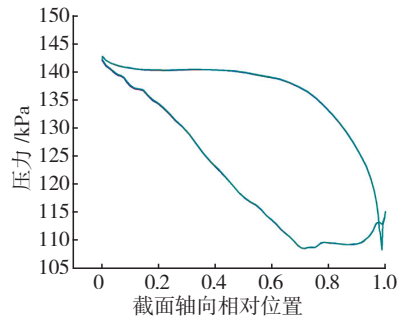
(b) 间隙不同时

图4 静叶入口相对马赫数沿叶高分布

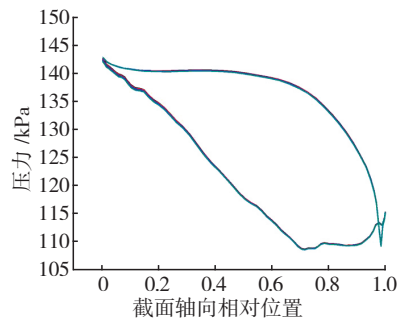
Fig.4 The relative Mach number at the inlet of stator along the span direction

为齿越少,泄漏流与主流掺混产生的涡流区强度越大,所以对马赫数的影响越大。图4(b)是不同间隙时静叶入口马赫数沿叶高的分布图,4种情况下的马赫数从70%相对叶高开始不同,间隙越大,马赫数的变化程度越大,与不同齿数情况相比,马赫数的影响范围更大,并在齿数相同情况下,2mm间隙时的最大马赫数是0.5mm间隙时的1.5倍,这是因为间隙大时涡流区的强度更大。

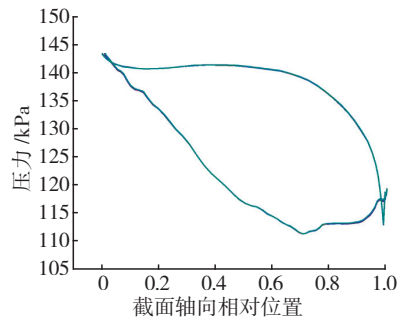
泄漏流与主流掺混后对下级静叶表面静压的影响如图5所示。间隙相同情况下,10%和50%相对叶高截面上的压力基本没有变化,90%相对叶高截面上的压力略有变化,齿数越少,叶片前缘到30%弦长左右的前半部分的压力越高。间隙相比齿数对下级静叶表面压力的影响更为明显,尤其在90%相对叶高截面,2mm间隙比0.5mm间隙情况下的压力高出很多,导致叶片表面压力这样分布的原因是90%相对叶高处进口气流存在较大的负攻角,间隙越大,负攻角越大,从而导致静叶



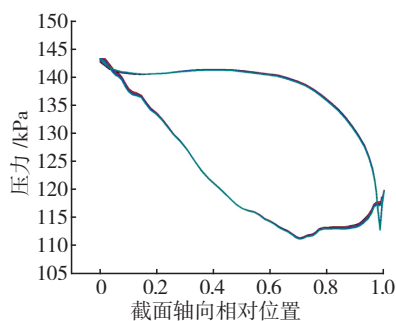
(a) 齿数不同,10%相对叶高



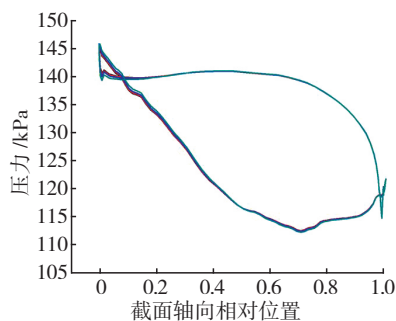
(b) 间隙不同,10%相对叶高



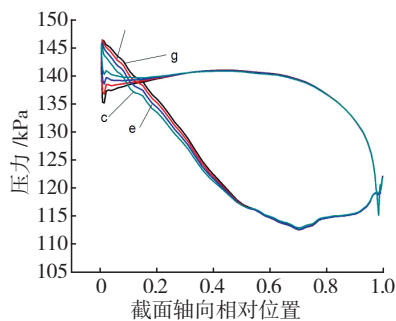
(c) 齿数不同,50%相对叶高



(d) 间隙不同, 50% 相对叶高



(e) 齿数不同, 90% 相对叶高



(f) 间隙不同, 90% 相对叶高

图5 第二级静叶表面压力分布

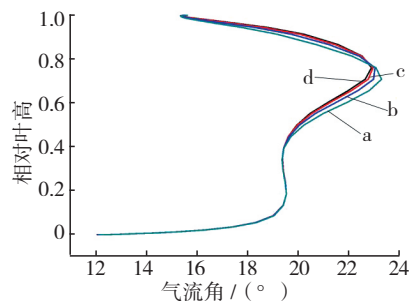
Fig.5 Static pressure distribution along the blade surface at the 2nd stator

表面压力越大。

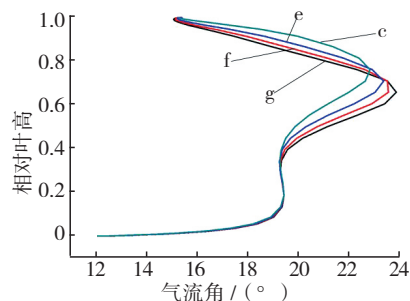
图6是下级静叶出口气流角沿叶高的分布, 泄漏流对静叶出口气流角的分布影响从50%左右叶高开始, 并在75%叶高以上气流偏转不足, 造成攻角损失。齿数减小或者间隙变大时, 泄漏流强度变大, 对下级静叶的影响程度增大。对比图6(a)和图6(b)可得, 相对于齿数, 间隙对静叶出口气流角的影响更加显著。

3 结论

本文应用数值模拟方法, 分析了某型燃气轮机涡轮叶冠顶部间隙内的流动结构, 得出叶顶间隙泄漏流在齿腔内形成较大涡流区, 使得泄漏流的能量减小, 并在经过篦齿后压力下降, 泄漏流与主流掺混后在叶冠出口紧贴壁面处形成一个较小的涡流区, 从而改变了下级静



(a) 齿数不同时



(b) 间隙不同时

图6 静叶出口相对气流角沿叶高分布

Fig.6 Relative gas flow angle at the outlet of stator along the span direction

叶的气动性能。对比齿数和间隙对涡轮气动性能的影响得到以下结论: 齿数和间隙对主流的气动性能影响较大, 尤其对90%相对叶高以上区域的影响较为明显。对比分析了间隙和齿数对主流气动性能的具体影响程度, 当间隙相同时, 齿数越多, 泄漏量越少, 涡轮效率越高; 齿数相同时, 间隙越小, 泄漏量越少, 涡轮效率越高。同时发现间隙对涡轮效率的影响大于齿数对涡轮效率的影响。

参考文献

- [1] DENTON J D. Loss mechanism in turbomachines[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(4):621-656.
- [2] BOHN D E, KREWINKEL R, TUMMERS C, et al. Influence of the radial and axial gap of the shroud cavities on the flow field in a 2-stage turbine[R]. ASME, 2006.
- [3] ROSIC B, DENTON J D. Control of shroud leakage loss by reducing circumferential mixing[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2008, 130:1-7.
- [4] ZIMMERMANN H. Air system correlations part(1):labyrinth seal[R]. ASME, 1998.
- [5] NIRMALAN N V, BAILEY J C. Experimental investigation of aerodynamic losses of different shapes of a shrouded blade tip section[R]. ASME, 2005.
- [6] 吴丁毅. 两类常用篦齿密封和临界特性的分析与比较[J]. 航空动力学报, 1997, 12(4):397-400.

(下转第135页)

大,该影响跟流量的变化关系不大,并随着压力的增加而减少。压力对制冷剂流量的测量影响相对较小,该影响随着温度的增大而增大。上述研究结果对机载液冷系统的设计计算提供一定的技术参考。

参考文献

- [1] 张静. 差压式流量测量的新途径[J]. 石油化工自动化, 2004(5): 87-89.
- ZHANG Jing. A new way of the flow meter of pressure difference[J]. Automation In Petro-Chemical Industry, 2004(5):87-89.
- [2] 李郁侠, 武周虎. 利用弯管测量管道流量的理论分析与实验研究[J]. 灌溉排水, 1995, 14(1):6-11.
- LI Yuxia, WU Zhouhu. Theoretical analysis of and experimental investigation on DIS charge measurement by angle PIPE[J]. Irrigation and Drainage, 1995, 14(1):6-11.
- [3] 孙志强, 周子民, 张宏建. 弯管流量测量特性的数值模拟与试验研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6):1413-1415.
- SUN Zhiqiang, ZHOU Jiemin, ZHANG Hongjian. Numerical simulation and experimental research on measurement characteristics of elbow meter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(6):1413-1415.
- [4] 李郁侠, 廖伟丽, 田嘉宁. 弯管流量与压差的回归分析及流量系数计算[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4):373-376.
- LI Yuxia, LIAO Weili, TIAN Jianing. Regression analysis concerning discharge and pressure difference of elbow and calculation of discharge coefficient [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1998, 14(4):373-376.
- [5] SILVA F S, VELAZQUEZ M T, HERNANDEZ J R. Experimental study for the use of elbows as flowmeters[C]. Proceedings of American Society of Mechanical Engineers of Fluids Engineering Division on Fluid Flow Metering, 1997:1-10.
- [6] 郑建光, 梁国伟. 弯管流量计的特性试验研究[J]. 中国计量学院学报, 1999, 19(1):39-44.
- ZHENG Jianguang, LIANG Guowei. The experiment study for characteristics of the elbow flowmeters[J]. Journal of China Institute of Metrology, 1999, 19(1):39-44.
- [7] 田野, 王岳, 郭士欢, 等. 常见流量计的应用[J]. 当代化工, 2011, 40(12):1294-1296.
- TIAN Ye, WANG Yue, GUO Shihuan, et al. Application of common flowmeters [J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(12):1294-1296.
- [8] 王茜. 流量计的应用现状及发展趋势[J]. 科教前沿, 2008(3):32.
- WANG Qian. The application and the development of flowmeters[J]. Science & Technology Information, 2008(3):32.
- [9] 郭新勇, 尤希凤, 李永远, 等. 新型变径孔板流量计[J]. 河南职业技术学院学报, 1994, 22(4):13-15.
- GUO Xinyong, YOU Xifeng, LI Yongyuan, et al. A new orifice flowmeter with different diameter[J]. Journal of Henan Vocation Technical Teachers College, 1994, 22(4):13-15.
- [10] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- WU Chigong. Hydraulics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1982.
- [11] 川田裕郎, 小宫勤一, 山崎弘郎. 流量测量手册[M]. 北京:

中国计量出版社, 1982.

CHUANTIAN Yulang, XIAOGONG Qinyi, SHANQI Honglang. The flow measurement manual [M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1982.

[12] 梁国伟, 蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

LIANG Guowei, CAI Wuchang. The flow measurement technology and instruments [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

(责编 宇宇)

(上接第 131 页)

WU D Y. Comparison between two kinds of conventional labyrinth[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(4):397-400.

[7] 鄢景, 杨自春. 动力涡轮有冠及无冠叶栅顶部二次流的数值分析[J]. 燃气轮机技术, 2011, 24(2):30-34.

YAN J, YANG Z C. Numerical analysis of tip secondary flow in rotor cascades with or without shroud in power turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2011, 24(2):30-34.

[8] 李钰洁, 刘永葆, 高杰. 间隙流动对涡轮叶片温度场分布影响的数值研究[J]. 海军工程大学学报, 2013, 6(25):24-29.

LI Y J, LIU Y B, GAO J. Numerical analysis of effect of clearance flow on distribution of temperature field in turbine blade[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 6(25):24-29.

[9] 黄晓光, 吴丁毅. 封严齿腔内流动及旋涡分布和顶板换热特性的实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(4):20-25.

HUANG X G, WU D Y. The investigation of flow field and heat transfer in cavity of labyrinth seal[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(4):20-25.

[10] 刘高文, 蒋兆午, 务为涛, 等. 基于数值模拟的矩形凹槽对直通型齿封严特性影响研究[J]. 推进技术, 2013, 34(2):181-186.

LIU G W, JIANG Z W, WU W T, et al. Investigation on effects of rectangular groove on leakage of straight-trough labyrinth seal based on numerical simulation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(2):181-186.

[11] 高杰, 郑群, 李义进. 动叶顶部蜂窝面迷宫密封对涡轮级气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1):160-168.

GAO J, ZHENG Q, LI Y J. Effect of labyrinth-honeycomb seal of shrouded rotor blades on the aerodynamic performance of the turbine stage[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1):160-168.

[12] 贾惟, 刘火星. 涡轮叶栅叶冠泄漏流动数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(3):316-325.

JIA W, LIU H X. Numerical investigation on shroud leakage flow in turbine cascade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(3):316-325.

[13] 马石, 刘永葆, 缪四春, 等. 叶冠齿顶间隙对涡轮气动性能的影响研究[J]. 机械工程与自动化, 2015 (2):29-31.

MA S, LIU Y B, MIU S C, et al. Effect of tip clearance on aerodynamic performance of turbine[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(2):29-31.

(责编 李丹)