

DOI: 10.7652/xjtuxb201307006

非轴对称端壁透平级气动性能的数值研究

孙皓, 宋立明, 李军, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 采用双控制型线方法对高负荷低展弦比透平级完成了非轴对称端壁造型设计;采用 RANS 方程和考虑转捩模型的 SST 紊流模型对轴对称端壁透平级和非轴对称端壁透平级进行了气动性能的分析 and 对比。结果表明:非轴对称端壁造型设计方法通过降低周向压力梯度减小了透平级的二次流损失,提高了透平级效率达 0.16%;静叶流场的变化引起了动叶进口条件的改变,从而导致动叶进口压力和反动度增大。

关键词: 透平级;二次流损失;非轴对称端壁造型;气动性能;数值模拟

中图分类号: TK263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)07-0029-07

Numerical Investigations on the Aerodynamic Performance of Turbine Stage with Nonaxisymmetric End Wall Profiling

SUN Hao, SONG Liming, LI Jun, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Nonaxisymmetric end wall profiling of a high loaded and low aspect ratio turbine stage was designed by the two control curves method. The characteristics of the initial axisymmetric end wall profiling turbine stage and the nonaxisymmetric end wall profiling turbine stage with high load and low aspect ratio were numerically investigated using the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) and the SST turbulent model with transition effects. The numerical results for the axisymmetric turbine stage and the nonaxisymmetric turbine stage were compared and analyzed. The results show that the nonaxisymmetric end wall reduces the circumferential pressure gradient and the secondary loss, and the efficiency of the end wall profiling stage increases by 0.16%, compared with that of the axisymmetric end wall stage. In addition, the inlet condition of the rotor changes due to the change in the stator flow field, resulting in the increase in the rotor inlet pressure and the reaction degree.

Keywords: turbine stage; secondary flow loss; nonaxisymmetric end wall profiling; aerodynamic performance; numerical simulation

二次流损失是透平级中气动损失的主要来源之一,减小二次流损失对于提高透平级的气动性能有着重要的意义和工程应用价值。20 世纪 90 年代初,Rose 提出在透平级中使用非轴对称端壁的概念,用于减小燃机中冷却气流的“侵入”^[1]。英国杜

伦大学的研究者将非轴对称端壁用于减小平面叶栅的二次流损失^[2],并进行了实验测量和详细的流场分析^[3],在此基础上对 Trent 500 航空透平高压和低压级进行了非轴对称端壁造型设计和整级实验^[4],结果证明非轴对称端壁设计可以减小透平级

收稿日期: 2012-10-29。 作者简介: 孙皓(1982—),男,博士生;李军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106123);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2013-04-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130423.1659.009.html>

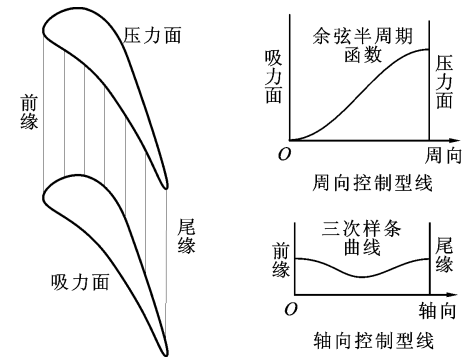
二次流损失,提高透平级气动效率。Germain 等在一级半透平实验台上证明了非轴对称端壁在减小二次流损失方面的有效性^[5],研究了其对透平级非定常特性的影响。

李国君等开展了非轴对称端壁造型平面叶栅设计方法和相应气动性能的数值研究^[6]。高增珣等在级环境下对静叶端壁进行了优化设计,使得级效率提高了 0.12%^[7]。刘波等详细分析了端壁造型对通道涡发展过程的影响,指出采用非轴对称端壁可减小通道涡的发展机会,抑制二次流的增强^[8]。彭绍辉等研究了涡轮非轴对称端壁造型对气动性能的影响^[9]。

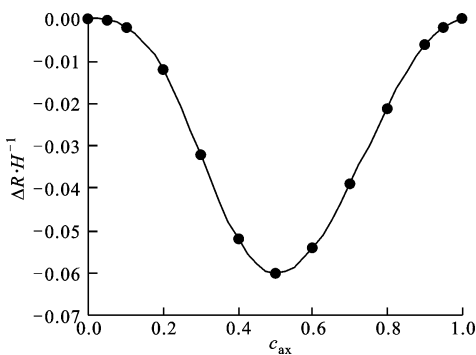
目前,国内的研究者在透平级整级非轴对称端壁造型的研究结果还不多,就此本文采用双控制型线端壁造型方法,对一高负荷低展弦比透平级进行了非轴对称端壁造型设计和数值计算,并与轴对称端壁透平级的气动性能进行了对比,对透平级端壁造型的设计规律进行了研究和讨论。

1 非轴对称端壁造型的设计方法

图 1 为双控制型线的非轴对称端壁造型的设计方法。如图 1a 所示,端壁上周向控制型线的起点位于吸力面,终点位于压力面,起、终点采用余弦半



(a)控制型线位置



(b)轴向控制型线控制点

图 1 双控制型线的非轴对称端壁造型的设计方法示意

周期函数联结,这样可在吸力面附近形成端壁凹区,从而提高吸力面附近流场的压力。在轴向,根据一系列轴向位置固定的控制点生成一个三次样条曲线,以保证曲率 K 连续,见图 1b,图 1b 中横坐标为相对轴向弦长 c_{ax} ($0\sim1$),纵坐标为造型幅度与叶高的比值 $\Delta R/H$,起点和终点坐标位置保持不变,以便与叶栅进出口端壁衔接。相对轴向弦长

$$c_{ax} = (Z_{local} - Z_{Le}) / (Z_{Te} - Z_{Le}) \tag{1}$$

式中: Z_{local} 为坐标点的轴向位置; Z_{Le} 和 Z_{Te} 分别为前缘和尾缘的轴向位置。

采用双控制型线方法进行非轴对称端壁造型设计的基本思路是:以静叶下端壁为例,当曲率为正时,端壁面下凹,流线随之发生弯曲,气流流速降低,流场局部压力升高;反之,当曲率为负时,端壁面凸起,气流速度增大,流场压力下降。根据流线曲率法的基本原理可知,在速度一定的前提下,压力变化的幅度正比于曲率的大小。因此,进行端壁造型设计时可以通过改变轴向控制型线上控制点的坐标,来调整轴向控制型线的曲率分布。

2 研究对象和数值方法

表 1 为高负荷低展弦比透平级的相关参数。针对此透平级,根据双控制型线法对静叶上下端壁和动叶下端壁进行了非轴对称端壁造型设计。图 2 为轴对称和非轴对称端壁透平级叶栅通道各端壁的网格。非轴对称端壁壁面及其与叶片的结合处要保证优良的网格质量。叶栅网格采用 HOH 网格,壁面网格进行加密处理,以保证 $y^+ < 2$,透平级网格总数为 112 万。

表 1 透平级参数

参数	静叶	动叶
叶片数	30	45
进口气流角/(°)	90	55.8
出口气流角/(°)	18.28	26.7
相对栅距	0.9	0.80
展弦比	0.57	0.76
间隙/mm		0.5
Zweifel 系数	0.83	1.02
相对出口马赫数	0.55	0.42
级反动度	0.32	
级载荷系数	1.25	
流量系数	0.42	
转速/ $r \cdot \min^{-1}$	3 600	

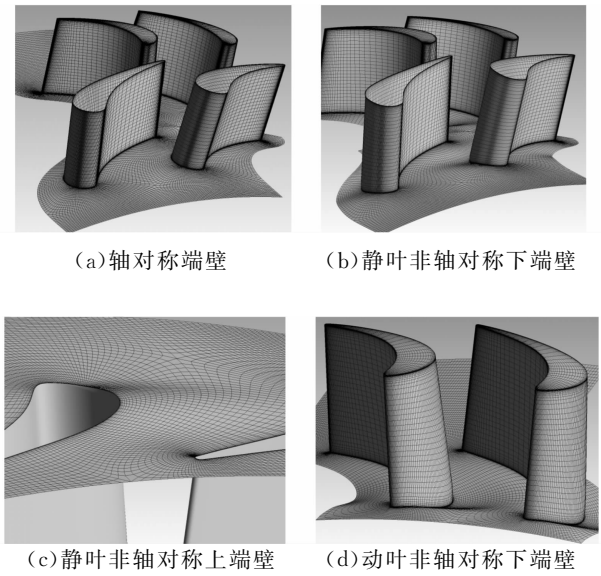


图 2 端壁网格

数值计算采用 ANSYS-CFX 12.1 软件进行,工质采用理想空气,进口边界采用总温、总压条件(总压 $P_0=141\ 855\text{ Pa}$,总温 $T_0=320\text{ K}$),出口边界采用平均静压条件($P=101\ 325\text{ Pa}$)。对流项空间差分采用高精度混合格式,湍流模型为 SST($k-\omega$ Shear Stress Transport)模型,边界层的求解中增加了转捩模型。

为了验证数值计算方法的有效性,在西安交通大学叶轮机械研究所的环形叶栅风洞实验台上开展了透平级静叶叶栅气动性能的测量,叶栅出口马赫数约 0.4。实验条件为:进口总压 $P_{0,\text{inlet}}=109\ 400\text{ Pa}$,进口总温 $T_{0,\text{inlet}}=320\text{ K}$,出口静压 $P_{\text{out}}=101\ 325\text{ Pa}$ 。图 3 为 50%叶高处静压分布的数值计算和实验结果对比,可见数值计算精确地捕捉到了叶栅表面的压力值。图 4 为静叶出口(130%轴向弦长位置)处总压 P_0 沿叶高的分布, $h \cdot H^{-1}$ 为叶栅相对高度。从图中看出,数值计算反映出的型面损失和二次流的大小与实验结果吻合良好,说明本文数值计算方法的可信度较高。

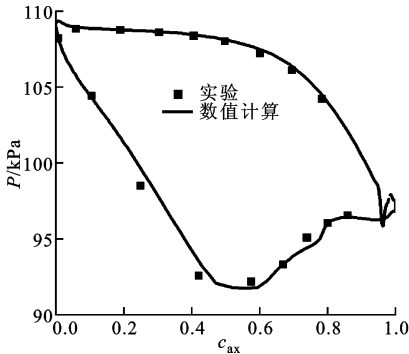


图 3 50%叶高处静压分布对比

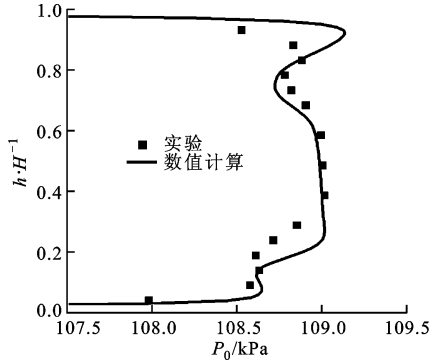


图 4 静叶出口处总压沿叶高的分布

3 结果分析与讨论

3.1 静叶流场变化

采用非轴对称端壁减小二次流损失的基本原理是,通过改变端壁附近的压力场来抑制通道涡的发展。图 5 和图 6 分别为静叶下端壁面对应的轴向控制型线曲率分布和 1%叶高处叶栅表面的压力分布。对比两图可以发现:在约 30%~70%轴向弦长范围内,控制型线曲率 K 为正,对应着下端壁凹面,而在同一区域内,相对于轴对称端壁叶栅,非轴对称端壁叶栅的吸力面压力增大;在其他轴向弦长范围内,曲率为负,吸力面压力降低。就压力变化幅度来说,40%~50%轴向弦长范围内正曲率接近峰值,因此压力变化幅度也相对较大。

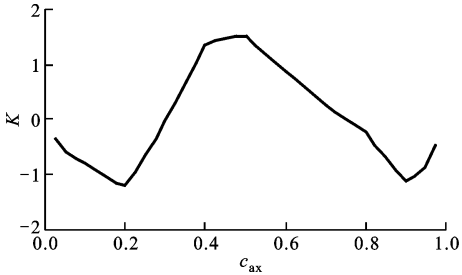


图 5 静叶下端壁轴向控制型线曲率分布

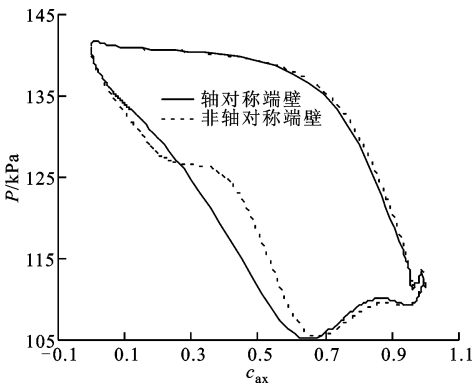


图 6 1%叶高处叶栅表面的压力分布

图7为99%叶高处静叶叶栅表面的压力分布。从图中看出,静叶上端壁面附近,非轴对称端壁在20%~60%轴向弦长范围内,吸力面压力提高,周向压力梯度减小。

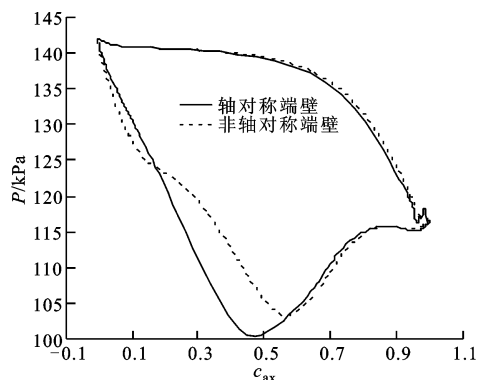
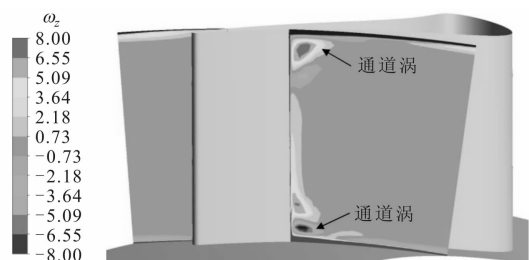


图7 99%叶高处静叶叶栅表面的压力分布

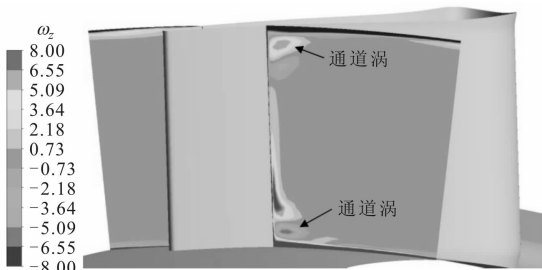
就流动机理来说,叶栅通道中周向压力梯度对通道涡的发展有着重要的影响。在周向压力梯度的作用下,端壁边界层附近的低能流体不断地通过从压力面流向吸力面而进入通道涡,促使通道涡增强。因此,周向压力梯度的减小有利于减少进入通道涡的低能流体,抑制通道涡的发展^[2,3,5]。图8为静叶95%轴向弦长处涡量的等值线云图,可见在静叶出口附近,上下通道涡的强度明显得到了抑制。轴向涡量经无量纲化处理后得

$$\omega_z = \omega_z c / W_{out} \quad (2)$$

式中: ω_z 为轴向涡量; c 为动叶弦长; W_{out} 为相对出口速度。



(a)轴对称端壁



(b)非轴对称端壁

图8 95%轴向弦长处静叶涡量的等值线云图

图9为轴对称和非轴对称端壁静叶出口(130% c_{ax})处经流量加权、周向平均后的总压损失系数 C_{pt} 沿叶高的分布。定义

$$C_{pt} = (P_{0,inlet} - P_{0,local}) / (0.5\rho V_{out}^2) \quad (3)$$

式中: $P_{0,local}$ 为当地总压; $0.5\rho V_{out}^2$ 为出口截面动压头。

与轴对称端壁静叶相比,在10%和80%叶高处对应的高损失区,非轴对称端壁静叶总压损失明显减小,说明在非轴对称端壁的作用下,叶栅二次流损失减小。在中部叶高区域,型面损失也明显减小,这也成为非轴对称端壁静叶气动损失减小的另一个原因。

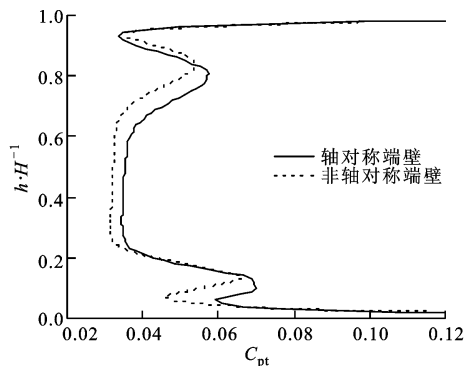


图9 静叶出口处经流量加权、周向平均后的总压损失系数沿叶高的分布

图10为轴对称和非轴对称端壁静叶出口气流角 α_1 沿叶高的分布。非轴对称端壁在减小静叶气动损失的同时,也影响了静叶出口气流角 α_1 。定义

$$\alpha_1 = \arctan(V_z/V_t) \quad (4)$$

式中: V_z 、 V_t 分别为轴向和周向速度分量。

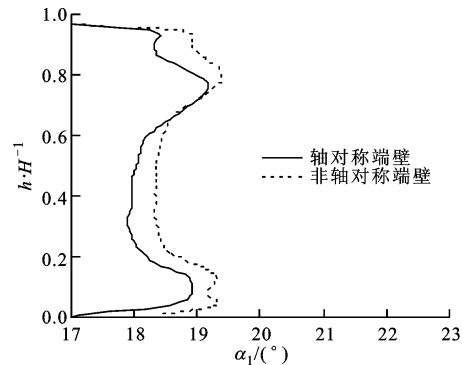


图10 静叶出口气流角沿叶高的分布

综上:非轴对称端壁静叶使得整个叶高范围内的叶栅负荷降低,特别是上下端壁喉部附近的压力变化(见图6、图7)导致出口气流角在整个叶高范围内有增大的趋势,平均增幅在 0.4° 左右,与文献[4]中结果类似;在10%和80%叶高附近,气流角的变

化体现出了端壁造型设计对静叶通道涡位置的影响。

3.2 动叶流场变化

图 11~图 13 分别为轴对称和非轴对称端壁动叶在 1%、50%和 90%叶高处的压力分布。从图中看出:在动叶根部,非轴对称端壁使得吸力面在 10%~64%轴向弦长范围内压力升高,周向压力梯度大幅减小(见图 11),由于该范围内展弦比较小,所以压力影响扩展到中叶展,从而导致这一区域的叶栅负荷有所减小(见图 12);在动叶叶顶附近,动叶叶栅负荷基本不变,但压力面和吸力面压力整体上升,其由动叶进口压力增大所引起(见图 13)。

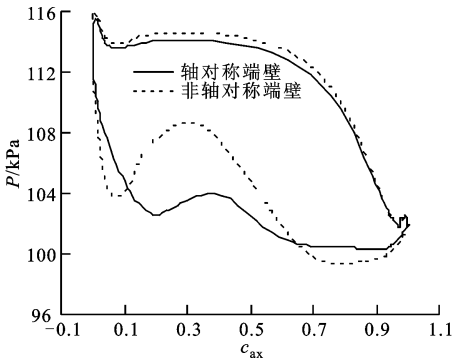


图 11 1%叶高处动叶的压力分布

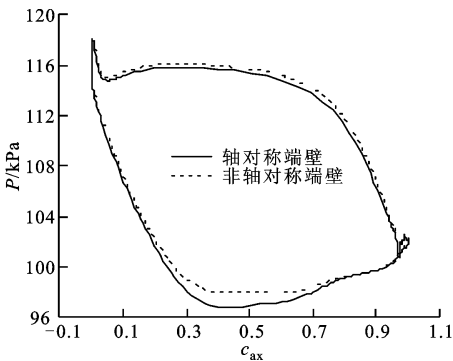


图 12 50%叶高处动叶的压力分布

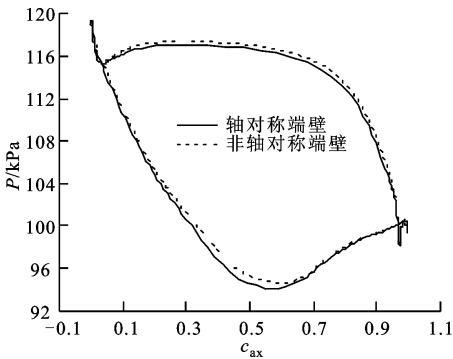


图 13 90%叶高处动叶的压力分布

可知,动叶叶栅通道中存在着间隙泄漏涡、上下通道涡及尾迹脱落涡等复杂涡系,所以非轴对称端壁对动叶的影响主要体现在下部通道涡强度的变化上。在下端壁叶栅通道周向压力梯度减小的影响下,动叶出口处下部通道涡的强度明显减弱,同时受中叶展叶栅负荷降低的影响,扩压区逆压梯度的降低导致尾迹脱落涡强度也有所降低。

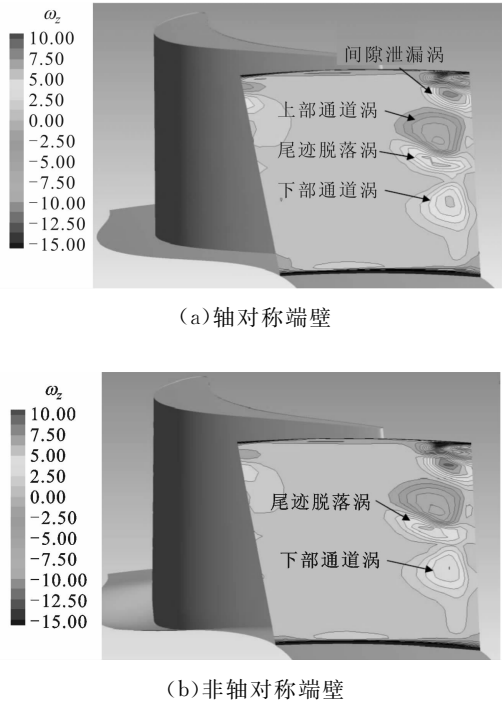


图 14 动叶出口处轴向涡量的分布

3.3 透平级性能变化

非轴对称端壁下透平级设计必须考虑静叶和动叶间的相互影响。本文在定常条件下完成了透平级流场的数值模拟,级环境下主要考虑了静叶流场变化对下游动叶流场的影响。

图 15 为动叶进口压力 P_1 沿叶高的分布。在非轴对称端壁静叶流场中,整个叶高范围内喉部压力上升,静叶出口处速度减小,总压损失减小,从而导致静叶出口压力升高。动叶进口压力增大,特别是在叶顶附近,间隙前后压差的增大是间隙泄漏流增强的原因。受非轴对称端壁静叶出口气流角度增大的影响,大部分叶高范围内动叶进口气流角 β_1 明显增大,如图 16 所示。在 50%叶高以下,相比于轴对称端壁,非轴对称端壁动叶进口气流角增大幅度在 1° 左右,在 80%~95%叶高范围内增幅在 2° 左右。

虽然非轴对称端壁的动叶下端壁在通道中部,周向压力梯度减小,但是在通道后部,特别是在喉部

图 14 为动叶出口处轴向涡量的分布。从图中

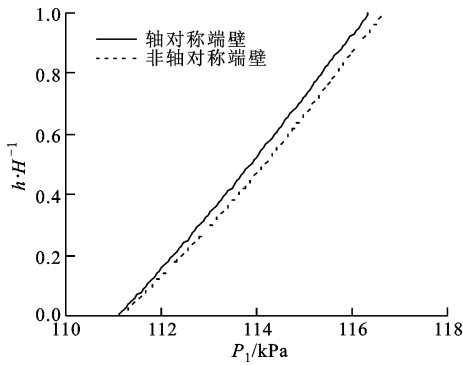


图 15 动叶进口压力沿叶高的分布

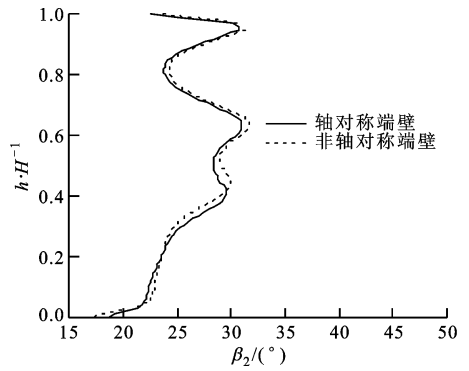


图 17 动叶出口气流角沿叶高的分布

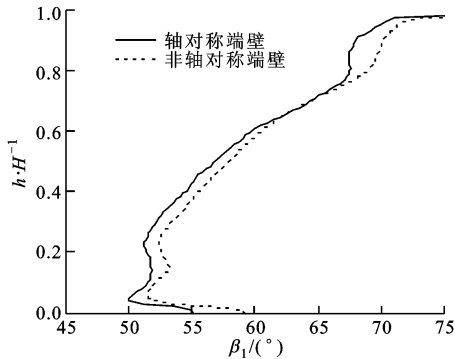


图 16 动叶进口气流角沿叶高的分布

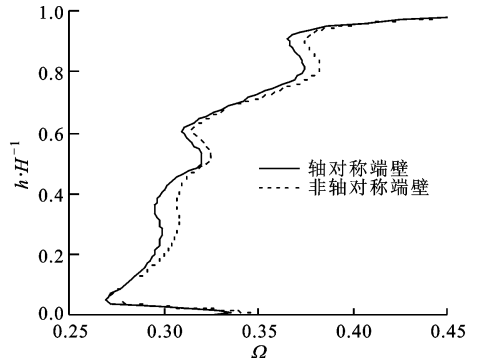


图 18 级反动度沿叶高的分布

位置(70% c_{ax}),周向压力梯度的增大在一定程度上抵消了增大出口气流角的效果。图 17 为轴对称和非轴对称端壁动叶出口气流角 β_2 沿叶高的分布。与静叶不同的是,动叶出口气流角的变化主要是由涡系位置和强度变化引起的,且变化幅度较小。因此,在非轴对称端壁动叶中,进口气流角增大,而出口气流角基本不变,动叶通道中气流转折程度减小,这意味着单位流量的工质做功能力下降,同时透平级的反动度也随之发生明显变化。图 18 为大部分叶高范围内级反动度沿叶高的分布,可见整体上反动度有增大的趋势。反动度

$$\Omega = (T_1 - T_2) / (T_{0,\text{inlet}} - T_2) \quad (5)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为动叶进、出口温度。

表 2 为轴对称和非轴对称端壁透平级的气动性能参数。透平级总-总等熵效率

$$\eta = (1 - T_{02} / T_{0,\text{inlet}}) / (1 - (P_{02} / P_{0,\text{inlet}})^{(k-1)/k}) \quad (6)$$

式中: P_{02} 和 T_{02} 分别为透平级出口总压和总温。

表 2 透平级气动性能参数

端壁	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	效率/%	功率/MW	反动度
轴对称	9.576	93.640	0.240	0.322
非轴对称	9.731	93.800	0.242	0.328

表 2 结果表明:由于非轴对称端壁增加了静叶和动叶的喉部面积,因此整级流量有所上升。非轴对称端壁透平级叶栅通道中的通道涡得到了抑制,二次流损失减小,透平级总-总等熵效率提高了 0.16%。虽然动叶进口气流角的减小导致单位工质做功能力下降,但由于流量的上升,透平级的输出功率基本不变。受动叶进口气流角增大的影响,级反动度有所提高。

4 结 论

本文采用双控制型线方法完成了一高负荷低展弦比透平级静叶上下端壁和动叶下端壁的非轴对称端壁造型设计,同时数值研究了轴对称和非轴对称端壁透平级的气动性能。

采用双控制型线方法设计的非轴对称端壁有效抑制了静叶和动叶叶栅通道中通道涡的发展,减小了二次流损失,提高了透平级的气动效率,由此证明本文的非轴对称端壁造型设计方法对减小透平级二次流损失的有效性。

静叶非轴对称端壁在减少总压损失的同时,也改变了动叶进口条件。由于非轴对称端壁静叶出口总压损失减小,以及叶片负荷降低所引起的出口速度减小,动叶进口压力增大,间隙泄漏流增多。相比

于轴对称,非轴对称端壁静叶出口角的增大也将引起了动叶进口角的增大,导致透平级反动度增大和动叶气流转折角减小。

参考文献:

- [1] ROSE M G. Non-axisymmetric endwall profiling in the HP NGVs of an axial flow gas turbine [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo Power for Land, Sea & Air, 94-GT-249 [R]. New York, USA: ASME, 1994.
- [2] HARVEY N, ROSE M, SEAMAN P, et al. Nonaxisymmetric turbine end wall design: part I Three-dimensional linear design system [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122(2): 278-285.
- [3] HARTLAND J C, SMITH D G, HARVEY N, et al. Nonaxisymmetric turbine end wall design: part II Experimental validation [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122(2): 286-293.
- [4] BRENNAN G, HARVEY N W, ROSE M G, et al. Improving the efficiency of the trent 500 HP Turbine using non-axisymmetric end walls: part I Turbo design [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125(3): 497-504.
- [5] GERMAIN T, NAGEL M G. Improving efficiency of a high work turbine using nonaxisymmetric endwalls: part I Endwall design and performance [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132(2): 8-18.
- [6] 李国君, 马晓永, 李军. 非轴对称端壁造型及其对叶栅损失影响的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(11): 1169-1172.
LI Guojun, MA Xiaoyong, LI Jun. Non-axisymmetric turbine end wall profiling and numerical investigation of its effect on the turbine cascade loss [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(11): 1169-1172.
- [7] 高增珣, 高学林, 袁新. 透平叶栅非轴对称端壁的气动最优化设计 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 589-591.
GAO Zengxun, GAO Xuelin, YUAN Xin. Aerodynamic optimal design of non-axisymmetric endwall for a turbine cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4): 589-591.
- [8] 刘波, 管继伟, 陈云永, 等. 用端壁造型减少涡轮叶栅二次流损失的数值研究 [J]. 推进技术, 2008, 29(3): 355-359.
LIU Bo, GUAN Jiwei, CHEN Yunyong, et al. Numerical investigation for effect of non-axisymmetric endwall profiling on secondary flow in turbine cascade [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(3):

355-359.

- [9] 彭绍辉, 任丽芸, 李维. 高压级涡轮非轴对称端壁造型数值研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(1): 38-42.

PENG Shaohui, REN Liyun, LI Wei. Numerical investigation with non-axisymmetric endwall profiling in high pressure turbine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(1): 38-42.

[本刊相关文献链接]

高庆, 陶加银, 宋立明, 等. 涡轮轮缘密封封严效率的数值研究. 2013, 47(5): 12-17.

蔡君伟, 孙皖, 李斌, 等. -150℃逆布雷顿空气制冷机动态温降特性研究. 2013, 47(3): 60-63.

卢娟, 张朝磊, 丰镇平. 离散伴随气动优化设计方法的紊流扩展. 2013, 47(1): 37-42.

白光辉, 高铁瑜, 李国君. 交叉潮汐透平阵列能量输出的数值研究. 2012, 46(11): 35-39.

周权, 侯予, 陈汝刚. 应用于高速透平膨胀机的箔片动压气体止推轴承的试验研究. 2012, 46(11): 49-52.

李瑜, 李亮, 钟刚云, 等. 水平轴末级透平对低压缸气动和凝结特性的影响. 2012, 46(7): 16-20.

白光辉, 樊鹏飞, 郭涛, 等. 潮汐透平场的数值研究. 2012, 46(7): 98-102.

徐亮, 税琳棋, 高建民, 等. 透平叶片双工质冷却流量和流向的优化配置. 2012, 46(5): 7-12.

吴君, 张荻, 马丹丹, 等. 利用三维接触有限元法的透平叶片枞树型叶根轮缘优化. 2012, 46(5): 25-31.

杨孙圣, 孔繁余, 宿向辉, 等. 泵及泵用作透平时的数值模拟与外特性实验. 2012, 46(3): 36-41.

霍文浩, 祁明旭, 李军, 等. 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011, 45(7): 9-14.

文乐, 高林, 戴义平. 透平压缩机组的模糊PID控制与特性研究. 2011, 45(7): 76-81.

付雷, 丰镇平. 毫米级微型燃气轮机系统设计原则与可实现性循环分析. 2011, 45(5): 42-46.

叶冬挺, 张荻, 蓝吉兵, 等. 合成射流控制下低压高负荷透平叶片边界层分离大涡模拟. 2011, 45(3): 58-64.

刘小民, 周海洋, 王星, 等. 低压透平叶片表面合成射流非定常流动控制机理研究. 2011, 45(3): 95-101.

刘钊, 丰镇平, 宋立明. 实际叶片前缘冲击冷却流动和换热的数值研究. 2011, 45(1): 5-9.

周贤, 王波, 张士杰, 等. 联合循环电站改造为整体煤气化联合循环的粗煤气冷却. 2010, 44(11): 71-76.

刘小民, 周海洋. 低压透平叶片流动分离主动控制的数值研究. 2010, 44(9): 21-26.

(编辑 苗凌)