

DOI: 10.7652/xjtuxb201309006

透平叶栅非轴对称端壁优化设计

孙皓, 宋立明, 李军

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为减小透平叶栅二次流损失、提高气动效率,建立了结合透平叶栅非轴对称端壁造型双控制型线参数化方法、全局优化自适应差分进化算法和基于 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)方程求解技术的叶栅气动性能评价方法于一体的透平叶栅非轴对称端壁优化设计体系,同时验证了全局优化自适应差分进化算法和透平叶栅气动性能评价方法的可靠性和准确性。以透平叶栅总压恢复系数最大化为优化目标,在出口气流角和质量流量的约束及叶栅非轴对称端壁三维参数化控制点共 20 个设计变量下,完成了透平叶栅非轴对称端壁造型优化设计。研究结果表明,优化后得到的非轴对称端壁造型可有效减少透平叶栅的二次流损失,使叶栅总压恢复系数提高 0.25%,证明所提出的设计体系是有效的,可为透平叶栅非轴对称端壁优化提供设计工具。

关键词: 透平叶栅;非轴对称端壁;自适应差分进化算法;优化设计

中图分类号: TK263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0035-06

Optimization Design of Nonaxisymmetrical End Wall Profiling for Turbine Cascade

SUN Hao, SONG Liming, LI Jun

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

Abstract: Coupled with the two control curves parameterization method of turbine cascade nonaxisymmetrical end wall profiling, the global optimization method adaptive range differential evolution (ARDE) algorithm, and the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equation solver technique for evaluation of turbine cascade aerodynamic performance, an aerodynamic optimization design system for turbine cascade nonaxisymmetrical end wall profiling was developed to reduce its secondary flow loss and increase the aerodynamic efficiency. The feasibility and accuracy of the ARDE method and the RANS evaluation of turbine cascade were verified. The maximization of the total pressure coefficient of turbine cascade was selected as the design objective under the constraint condition of the outflow angle and mass flow rate. The design variables were the nonaxisymmetrical end wall profile parameterization variables of turbine cascade, and 20 design variables in total for optimum nonaxisymmetrical end wall profile was specified in this work. The aerodynamic design of turbine cascade with optimum nonaxisymmetrical end wall profile was conducted. The results show that, with the optimization design, the total pressure coefficient increases by 0.25% and the secondary flow loss is lower. The optimization design system developed for the turbine cascade with nonaxisymmetrical end wall profile was also validated.

收稿日期: 2012-12-12。 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);教育部博士点基金资助项目(20100201120010)。

网络出版时间: 2013-07-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130716.1822.002.html>

Keywords: turbine cascade; nonaxisymmetrical end wall profiling; adaptive rang differential evolution; optimization design

为提高燃气轮机的效率,降低排放,使得燃气透平向高功率、高负荷方向发展,减小透平叶栅中的二次流损失成为现代透平叶栅气动设计中的难点。

近年来,非轴对称端壁造型技术作为减小叶栅二次流损失的有效手段成为透平机械气动领域的研究热点。Rose 设计的非轴对称端壁造型可以有效提高燃机高压透平导叶的气动性能^[1];Harvey 和 Hartland 等采用正向和反向三维优化设计程序设计了燃机透平动叶非轴对称端壁,并进行了平面叶栅实验^[2-3];Nagel 等采用二次序列规划算法进行了非轴对称端壁优化设计,并在一级半透平实验台上对非轴对称端壁造型进行了实验测试^[4];李国君等开展了平面叶栅非轴对称端壁造型方法的研究,并验证了在减小二次流损失方面的有效性^[5];孙皓等在所提双控制型线非轴对称端壁造型方法的基础上完成了高负荷透平叶栅的非轴对称端壁设计,并验证了非轴对称端壁造型可以有效减小小展弦比叶栅二次流损失的结果^[6];高增珣以 iSIGHT 商业软件为平台构建了端壁优化体系^[7];刘波等在 NUMECA 软件优化设计系统下开展了透平叶栅非轴对称端壁优化设计研究^[8]。

关于叶栅非轴对称端壁造型设计,国内均是通过反复调整端壁造型或者基于商用优化软件进行的^[5-7],得到的非轴对称端壁造型很难保证是最优化的型线设计。因此,本文在文献^[6]的双控制型线端壁造型方法的基础上,结合自适应差分进化算法(ARDE)^[9]和叶栅气动性能评价方法,建立了透平叶栅非轴对称端壁造型自动优化设计体系,并通过典型的设计实例验证了本文方法在减小透平叶栅二次流损失和提高气动效率方面的有效性。

1 非轴对称端壁造型优化系统

结合双控制型线端壁造型方法、ARDE 优化算法和 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 求解技术的透平叶栅气动性能评价方法,建立了通用透平叶栅非轴对称端壁优化设计体系,具体流程见图 1。该设计体系主要有 3 个模块:ARDE 优化算法模块、透平叶栅非轴对称端壁造型模块和气动性能评价模块,各模块相互独立,可增加设计体系的健壮性和可扩展性。

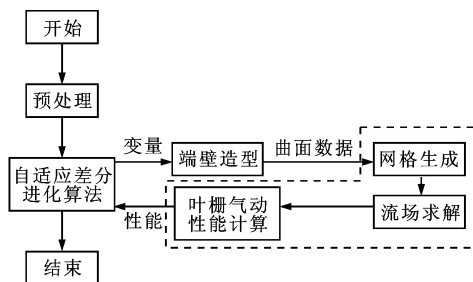


图 1 叶栅非轴对称端壁优化设计流程

1.1 双控制型线端壁造型方法

非轴对称端壁造型的基本原理是在吸力面附近形成凹面,在压力面附近形成凸面,从而改变当地流场的速度和压力分布,达到抑制二次流发展的目的。本文采用双控制型线方法进行透平叶栅非轴对称端壁造型设计,即通过周向 t 和轴向 z 两条控制型线来生成环形叶栅三维端壁曲面,见图 2。在周向,控制型线起点和终点分别位于吸力面和压力面,采用余弦半周期函数在吸力面附近形成端壁凹区,以提高这一区域的压力。在轴向,通过位于压力面和吸力面的两条 B 样条曲线来控制端壁形状,进而影响端壁附近的流线曲率,以达到改变流场压力的目的。B 样条曲线的控制点数和参数范围可进行调整。在本文的优化设计中,轴向控制型线起点和终点位置固定于前缘和尾缘,以保证整个通流部分光滑,并由多个控制点来控制端壁型线及曲率分布,见图 3。一般而言,每条型线采用 4~6 个控制点,控制点仅沿叶高方向调整,因此每个端壁面包含吸力面和压力面附近的 2 条轴向控制型线,共有 8~12 个设计变量。和以往的非轴对称端壁方法相比,设计变量明显减少,这将极大地提高优化设计的效率,缩短叶

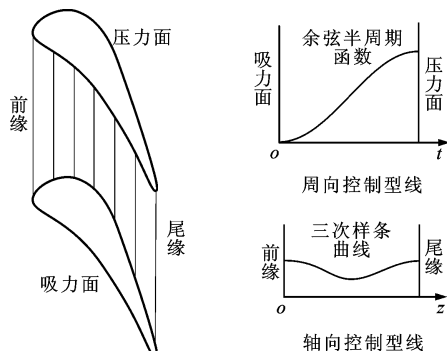


图 2 端壁造型方法

栅非轴对称端壁设计的周期。

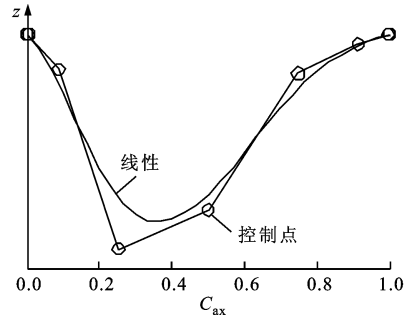


图 3 轴向控制型线与控制点

1.2 数值计算方法

表 1 给出了透平叶栅的基本几何参数。本文的透平叶栅具有展弦比小、相对节距大和负荷高的特点,因而二次流现象较为显著。计算网格采用 HOH 多块结构化网格,网格节点总数为 45 万,同时对壁面进行加密,以保证 $y^+ < 1$ 。数值计算时采用 ANSYS-CFX 软件,对流项空间差分采用高精度混合格式,湍流模型为 SST 模型,边界层求解中增加了转捩模型。进、出口边界条件根据相应的环形叶栅吹风实验的工况进行设定,其中进口采用总温、总压(总压 $P_0 = 109\,400\text{ Pa}$,总温 $T_0 = 320\text{ K}$),出口边界采用平均静压($P = 96\,700\text{ Pa}$),对应的 $Ma = 0.4$ 。

表 1 透平叶栅的基本几何参数

叶片数	30	展弦比	0.57
根径/mm	350	相对栅距	0.90
弦长/mm	87.20	安装角/(°)	37.60
叶高/mm	50.00	出口气流角/(°)	18.28

图 4 和图 5 分别对比了数值模拟与实验测量在 50%叶高处的静压分布和叶栅出口 130%轴向弦长比(130% C_{ax})处的总压沿叶高的分布。

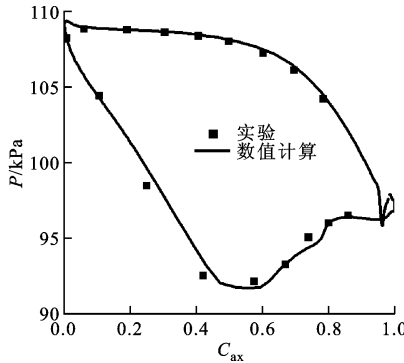


图 4 50%叶高处的静压分布

从图 4 可以看出,数值计算能精确地捕捉到叶栅表面的压力分布。从图 5 可以看出,数值计算得到的上、下端壁附近二次流高损失区域的位置与实验结果吻合良好,特别是数值模拟的型面损失和二次流大小与实验结果吻合良好,说明本文的叶栅气动性能评价方法具有较高的精度。

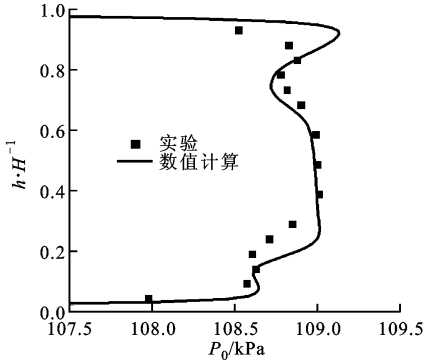


图 5 叶栅出口 130% C_{ax} 处的总压沿叶高的分布

1.3 自适应差分进化算法

优化算法模块控制着优化的进程,控制性能在很大程度上决定着优化设计的成败。本文采用了全局的 ARDE^[9],基本思想是:根据种群熵来表征种群的收敛程度,根据种群熵的变化自适应减小种群搜索范围,并保证算法全局收敛,提高算法的搜索效率。最后,采用典型的优化测试函数(Linear-Quadratic 问题)来验证 ARDE 的寻优能力,该函数是一个典型的多峰值优化函数,表达式为

$$\begin{aligned} \min F_3(\mathbf{u}) &= x_n^2 + \sum_{k=0}^{n-1} (x_k^2 + u_k^2) \\ x_{k+1} &= x_k + u_k \\ x_0 &= 100.00 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $u_k \in [-200.00, 200.00]$, $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$,测试中 $n = 45$ 。图 6 给出了针对 Linear-Quadratic 问题随机进行 100 次测试的结果。从图 6 看出,ARDE 优化算法具有优秀的全局寻优性能。

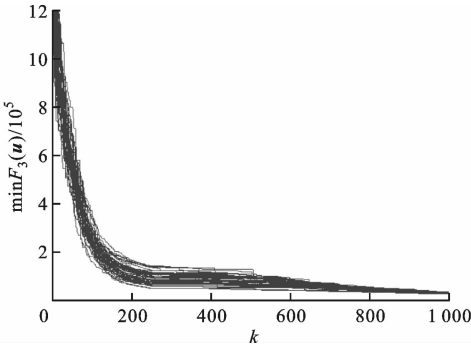


图 6 Linear-Quadratic 问题优化结果

2 优化结果与讨论

2.1 优化变量与目标函数

以环形透平叶栅为优化对象开展了非轴对称端壁造型优化设计。优化设计中采用双控制型线的非轴对称端壁造型进行参数化设计,叶栅上、下端壁共有 20 个设计变量。叶栅的总压恢复系数

$$\xi = (P_{0,\text{local}} - P_{\text{out}})/(P_{0,\text{inlet}} - P_{\text{out}}) \quad (2)$$

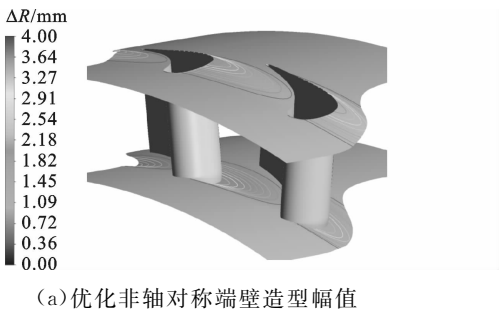
式中: $P_{0,\text{local}}$ 为当地总压; P_{out} 为出口截面静压; $P_{0,\text{inlet}}$ 为进口总压。

优化设计目标是叶栅总压恢复系数最大,并以流量偏差超过轴对称端壁叶栅流量的 3% 和出口气流角的变化不超过 0.5° 为约束条件,即

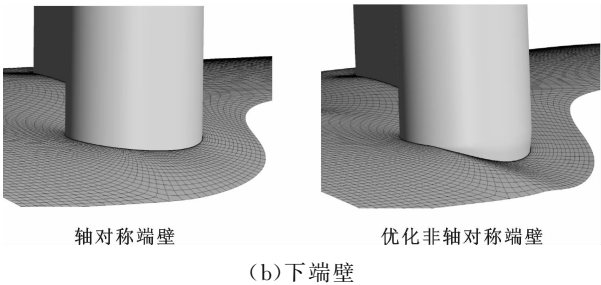
$$\begin{aligned} \max F_{\text{obj}}(\gamma) &= \xi(\gamma) \\ \text{s. t. } 0.97m_{\text{ref}} &\leq m \leq 1.03m_{\text{ref}} \\ \alpha_{1,\text{ref}} - 0.5^\circ &\leq \alpha_1 \leq \alpha_{1,\text{ref}} + 0.5^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 优化结果与讨论

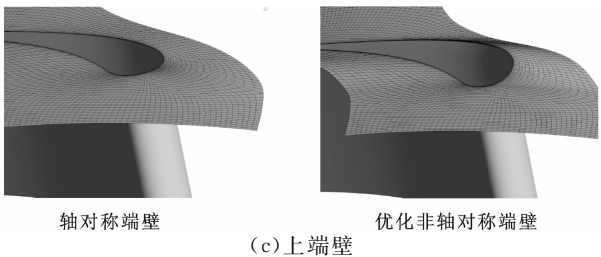
透平叶栅的非轴对称端壁造型优化的种群规模(设计变量数)设定为 60,最大代数 80。图 7 分别给出了优化设计得到的非轴对称端壁造型幅值 ΔR



(a) 优化非轴对称端壁造型幅值



(b) 下端壁



(c) 上端壁

图 7 优化非轴对称端壁造型幅值、叶栅端壁形状及计算网格

以及轴对称和非轴对称端壁的叶栅端壁形状及计算网格的对比。端壁造型幅值反映了非轴对称端壁在形成了凸、凹区域后,相对于轴对称端壁的径向变化幅度。非轴对称端壁叶栅在下端壁吸力面附近形成了下凹区,在上端壁吸力面附近形成了上凸区,最大端壁造型幅度约 4 mm 左右,相当于 8% 的相对叶高。

与原始轴对称端壁相比,非轴对称端壁造型在 2 个区域的流线会发生弯曲,吸力面压力提高,叶栅通道中周向压力梯度减小,二次流发展得到了抑制。Takeishi 在二次流流动模型研究中指出:端壁面周向压力梯度增加会促进端壁上的低能流体进入通道涡,使得通道涡增强^[10]。图 8 和图 9 分别对比了叶根(1%叶高)和叶顶(99%叶高)处叶栅负荷(静压)的变化。从图 8、图 9 看出:在 20%~60% 轴向弦长比范围内,非轴对称端壁能有效提高吸力面的压力,降低周向压力梯度,优化的非轴对称端壁造型使得扩压区的逆压梯度得到了控制,这有利于减小边界层的损失。

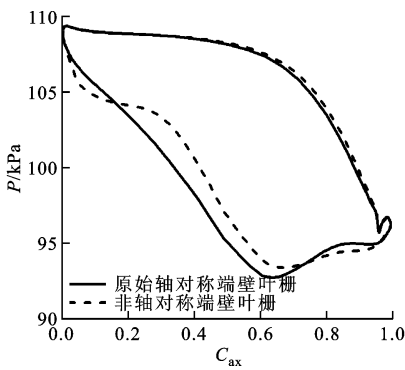


图 8 1%叶高处静压分布

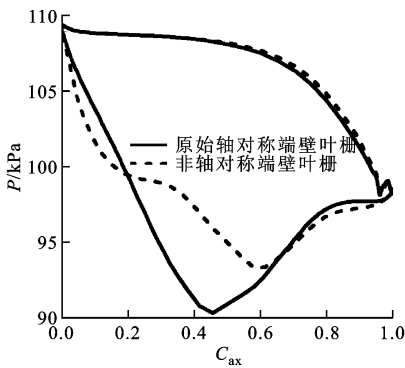
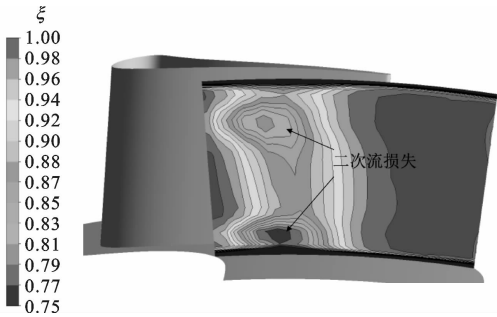


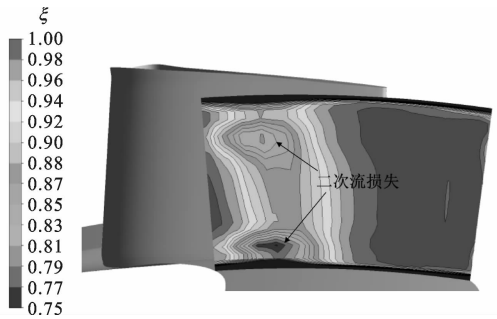
图 9 99%叶高处静压分布

图 10 给出了原始轴对称和优化非轴对称端壁叶栅在出口截面(130% C_{ax})处总压恢复系数 ξ 的分布。从图 10 看出:对于原始轴对称端壁叶栅,由于相对栅距大,叶片载荷高,所以上、下端壁附近的二

次流高损失区十分明显;对于优化非轴对称端壁叶栅,二次流损失明显减弱,说明通过优化得到的非轴对称端壁能有效抑制二次流的强度,减小二次流的损失。



(a)原始轴对称端壁叶栅



(b)优化非轴对称端壁叶栅

图 10 叶栅在出口截面处总压恢复系数的分布

图 11 对比了叶栅出口(130% C_{ax})处端壁优化前后整个叶高范围内总压恢复系数的变化。从图 11 看出,二次流损失区比图 10 结果明显减小,叶栅中部的型面损失减小。型面损失减小是因为采用非轴对称端壁增大了喉部面积,在进、出口压比不变的情况下,叶栅整体载荷降低,从而导致中叶展型面损失有所减小。所以,对于所设计的叶栅,非轴对称端壁对整个流场产生了显著的影响,并不仅局限于端壁附近。

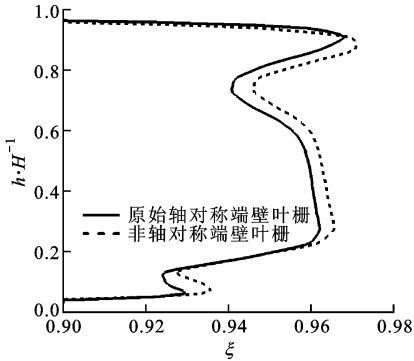


图 11 叶栅出口处总压恢复系数沿叶高的分布

气流角的过偏转和欠偏转在一定程度上反映出二次流的强弱,图 12 给出了端壁优化前后的出口气流角沿叶高的分布。出口气流角

$$\alpha = \arctan(V_z/V_t) \tag{4}$$

式中: V_z 、 V_t 分别为轴向和周向速度分量。

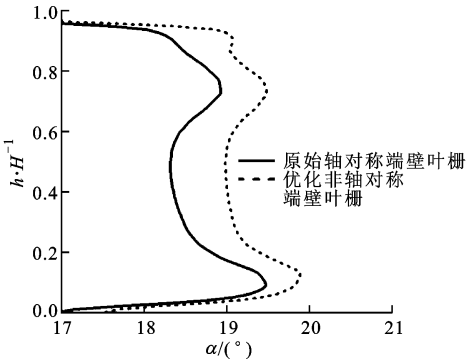


图 12 叶栅出口气流角沿叶高的分布

优化非轴对称端壁中,由于叶栅载荷减小,出口气流角整体增大,所以二次流区的气流角过偏转和欠偏转现象得到了明显抑制。以上部区域为例,原始轴对称端壁叶栅在 75%叶高处与 50%叶高处气流角的差值约为 0.6° ,优化非轴对称端壁叶栅对应的气流角差值为 0.4° ,体现出欠偏转程度有所减弱,叶栅流场中的二次流得到了抑制。

表 2 为原始轴对称端壁叶栅和优化非轴对称端壁叶栅的总体性能参数。可以看出,优化后叶栅总压恢复系数提高了 0.25%,同时由于端壁造型在一定程度上扩大了喉部通流面积,使得流量有所增加,气流角有所增大。

表 2 叶栅总体气动性能

叶栅	$\xi/\%$	流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$\alpha/(\text{^\circ})$
原始轴对称端壁	93.68	5.77	18.50
优化非轴对称端壁		5.91	18.98

3 结 论

本文结合双控制型线非轴对称端壁造型参数化方法、ARDE 和三维叶栅气动性能评价方法,发展了透平叶栅非轴对称端壁优化设计体系。以负荷透平叶栅为优化设计的对象,叶栅总压恢复系数最大化为优化的目标,并在质量流量和出口气流角的约束下完成了叶栅的非轴对称端壁造型优化设计。结果表明,优化非轴对称端壁透平叶栅通过减小周向压力梯度,抑制了二次流的强度。叶栅出口的气动损失减小,总压恢复系数提高了 0.25%,出口气流

角更加均匀,叶栅整体气动性能得到明显提高,表明本文的透平叶栅非轴对称端壁造型优化设计是有效的。

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 1994 Power for Land, Sea & Air. New York, USA: ASME, 1994: 249.
- [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] 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): 1008-1018.
- [5] 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.
- [6] 孙皓, 宋立明, 李军, 等. 小展弦比叶栅非轴对称端壁造型机及气动性能的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11): 6-11.
SUN Hao, SONG Liming, LI Jun, et al. Numerical investigation on nonaxisymmetrical end wall profiling and aerodynamic performance of a low aspect ratio cascade [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(11): 6-11.
- [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] NA Zhenzhe, LIU Bo. Application and optimization of

non-axisymmetric end wall in a high pressure turbine [C]//2012 Proceedings of 4th International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering. Xi'an, China: Northwest Polytechnical University Press, 2012: A0135.

- [9] SONG Liming, LUO Chang, LI Jun, et al. Aerodynamic optimization of axial turbomachinery blades using parallel adaptive range differential evolution and Reynolds-averaged Navier-Stokes solutions [J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2011, 27(3): 283-303.
- [10] TAKEISHI K, MATSUURA M, AOKI S, et al. An experimental study of heat transfer and film cooling on low aspect ratio turbine nozzles [J] ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(2): 488-496.

[本刊相关文献链接]

- 孙皓, 宋立明, 李军, 等. 非轴对称端壁透平级气动性能的数值研究. 2013, 47(7): 29-35. [doi:10.7652/xjtuxb201307006]
- 孙皖, 马斌, 牛璐, 等. 低温透平膨胀机内平衡凝结两相流动的数值模拟. 2013, 47(7): 36-39. [doi:10.7652/xjtuxb201307007]
- 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. [doi:10.7652/xjtuxb201305003]
- 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. [doi:10.7652/xjtuxb201303011]
- 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. [doi:10.7652/xjtuxb201301008]
- 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. [doi:10.7652/xjtuxb201009005]
- 孙皓, 薛志恒, 李军, 等. 低雷诺数对透平叶片间隙泄漏流动影响的研究. 2010, 44(3): 11-15. [doi:10.7652/xjtuxb201003003]
- 王顺森, 毛靖儒, 刘观伟, 等. 透平叶栅二次流瞬态特性试验及动力学分析. 2009, 43(1): 10-14. [doi:10.7652/xjtuxb200901003]
- 王顺森, 毛靖儒, 刘观伟, 等. 透平叶栅二次流瞬态特性的新测试方法. 2008, 42(11): 1361-1366. [doi:10.7652/xjtuxb200811010]
- 吴晓明, 李国君, 丰镇平, 等. SST $k-\omega-k_p$ 两相湍流模型及其在湿蒸汽凝结流动数值模拟中的应用. 2007, 41(5): 526-529. [doi:10.7652/xjtuxb200705005]

(编辑 苗凌)