

跨音速正弯均匀加载叶片数值与试验研究

康磊¹ 徐巍¹ 张燕¹ 周瑞军²

(1 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078;

2 哈尔滨广瀚新动力有限公司 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 在相同边界条件下对均匀加载、正弯均匀加载、后加载、正弯后加载4种类型静叶片进行数值分析,并对正弯均匀加载叶片的环形叶栅试验件在出口马赫数为0.97的风洞台上做吹风试验。研究表明:正弯叶片有效控制了端部的二次流并使损失在径向均匀化,马赫数等值线与流道中心线正交;同样的边界条件下,无论均匀加载还是后加载叶片,有效的正弯均能使总压恢复系数提高1%以上。

关键词: 正弯叶片; 后加载; 均匀加载; 风洞试验

中图分类号: TK263.3 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.03.009

引言

船用涡轮要求负荷大范围变化并保持较高的效率,末几级较大的子午扩张角要求必须采用扭叶片,在小流量低工况运行时,静叶顶部和动叶根部很容易发生脱流,弯扭叶片可以使得流动在径向更为均匀,较好的提高了根部的反动度并抑制顶部的马赫数;叶片的联合弯扭气动成型概念是60年代初提出的^[1]。叶片沿高度的周向弯曲,增加了叶轮机气动设计的自由度。理论分析和试验研究表明,应用了这一概念而设计出的“正弯”涡轮导叶,可以形成两端高、中部低的沿叶高静压分布,从而将两端端壁低能的边界层流体吸入叶片中部而降低能量损失。这种“正弯”涡轮导叶还可以使叶片两端压力面和吸力面之间的压差减小^[2],从而降低与此有关的二次流损失。利用此原理设计自由度,可以有效控制叶根反动度,从而消除动叶根部分离,改善整个涡轮的流场结构和气动性能。由于这些明显的优越性,弯扭叶片已经被应用到地面、海洋和空中的多种先进涡轮中。

在涡轮机械领域提出了两种先进叶型,即均匀加载和后部加载叶型。如果在吸力面上气流从叶型

的前驻点开始加速,在中部速度保持不变,在后部出现扩压,则把这种叶型称为均匀加载叶型;若在吸力面上气流在喉部以前加速,在喉部以后扩压,则把这种叶型称为后部加载叶型。周凡贞等人将航空发动机的气动设计特点引入到蒸汽轮机叶片设计中^[3],以增大单只叶片的负荷,该叶片属均匀加载叶片;李军等人通过数值方法研究了前加载叶片和后加载叶片气动性能特点^[4];徐大懋在先进控制流透平设计的论述中提到不同的加载叶栅要注意对马赫数 Ma 的适应性^[5],均匀加载叶型随 Ma 的增加($Ma < 0.8$)损失下降,而后加载叶型相反,其原因是尾缘负压梯度随 Ma 增加而加剧,透平高压部分 Ma 较低,用后加载叶型效果明显;宋立明等人在跨音速条件下针对扭叶片做了优化^[6],采用前加载的设计,降低了出口斜激波的强度和激波后边界层的厚度,有效控制流动分离。

本研究通过数值计算方法研究跨音速范围内正弯叶片与常规叶片的气动性能差异,不同加载特点型线与正弯叶片的匹配研究,并选用正弯均匀加载叶片制成叶栅试验件,在跨音速风动平台上测得主流截面和端壁表面静压分布,并与数值计算结果对比,解释此类加载叶栅的气动性能优越性。

1 计算模型和边界条件

以正弯均匀加载扭叶片、常规均匀加载扭叶片、常规后加载扭叶片及正弯后加载扭叶片4种类型作为计算算例,分别标记为模型I、模型II、模型III和模型IV;计算模型如图1所示,叶片型线如图2所示,型线弦长从根部至顶部逐步增大。数值计算边界条件为:工质为空气,进口总压190 000 Pa,进口总温350 K,出口背压101 300 Pa,来流方向为轴向。

收稿日期: 2015-10-15; 修订日期: 2015-11-08

作者简介: 康磊(1984-),男,甘肃会宁人,中国船舶重工第七〇三研究所工程师。



图 1 4 种类型叶片模型
Fig. 1 Models for four types of blade

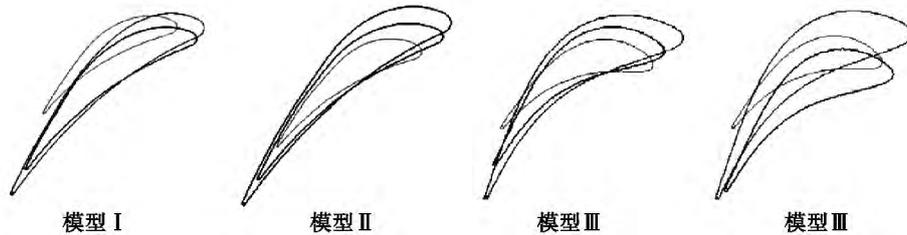


图 2 4 种叶片模型的根、中、顶 3 个截面型线
Fig. 2 Sectional blade profiles of the models for four types of blade at the blade hub ,middle and tip of the blades

2 计算结果分析

2.1 总压恢复系数和压力分布

定义总压恢复系数:

$$C_p = (P_2 - p_2) / (P_1 - p_2) \quad (1)$$

式中: P_2 —出口总压 ,Pa; P_1 —进口总压 ,Pa; p_2 —出口静压 ,Pa。

表 1 给出了 4 种叶片的总压恢复系数值 ,模型 I 是在模型 II 的基础上做了有效的正弯 ,其总压恢复系数提高了 1.22% ,模型 IV 是在模型 III 的基础上正弯的叶片 ,总压恢复系数也有所提高 ,图 3 给出了 4 种叶片在距离出口 5 mm 位置截面上的总压恢复系数等值线分布 ,总压恢复系数沿着叶高呈递减趋势 ,而且在相同叶高位置上 ,正弯均匀加载叶片的总压恢复能力强于常规均匀加载叶片 ,正弯后加载叶片的总压恢复能力也强于常规后加载叶片 ,正弯叶片使压力沿着径向呈“两头大 ,中间小”的分布 ,使端部的附面层流体被吸入主流区域 ,从而抑制了端部附面层的进一步增厚 ;在端部吸力面和压力面的横向压差低于常规叶片 ,端部的横向二次流动被削弱 ,二次流损失降低 ;吸力面的逆压梯度段位置后

移。结合图 4 中模型 I 和模型 II 中压力沿型线的分布图 ,根、中、顶 3 个截面吸力面上压力最低点位置向尾缘靠近有关 ,减小了端部的二次流损失和中部截面的型面损失。对比均匀加载叶片和后加载叶片 ,模型 III 的总压恢复系数略高于模型 II ,且沿着叶高方向分布较为均匀。从图 4 可以看出 ,任何一个截面都能体现出均匀加载叶片的负荷大于后加载叶片 ,在叶片大部分弦长范围内 ,均匀加载叶片吸力面与压力面的压差大于后加载叶片 ,这将加剧横向二次流的发展 ,模型 III、模型 IV 压力在压力面的 70% 弦长之前基本无变化 ,而在 70% 弦长以后剧烈下降 ,吸力面上压力均匀降低至压力最低点 ,加载负荷的区域大部分在流道后部 ,而后加载叶片吸力面压力最低点较均匀加载叶片更为靠后 ,均匀加载叶片压力在吸力面和压力面都均匀降低 ,且在吸力面上压降分布不是很均匀。

表 1 4 种类型叶片的总压恢复系数和出口马赫数

Tab. 1 Total pressure recovery coefficients & mach numbers at the outlet of the four types of blade

叶片类型	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV
总压恢复系数 C_p	0.960 64	0.948 43	0.950 43	0.960 69
出口绝对马赫数 Ma	0.975 40	0.970 71	0.971 35	0.971 47

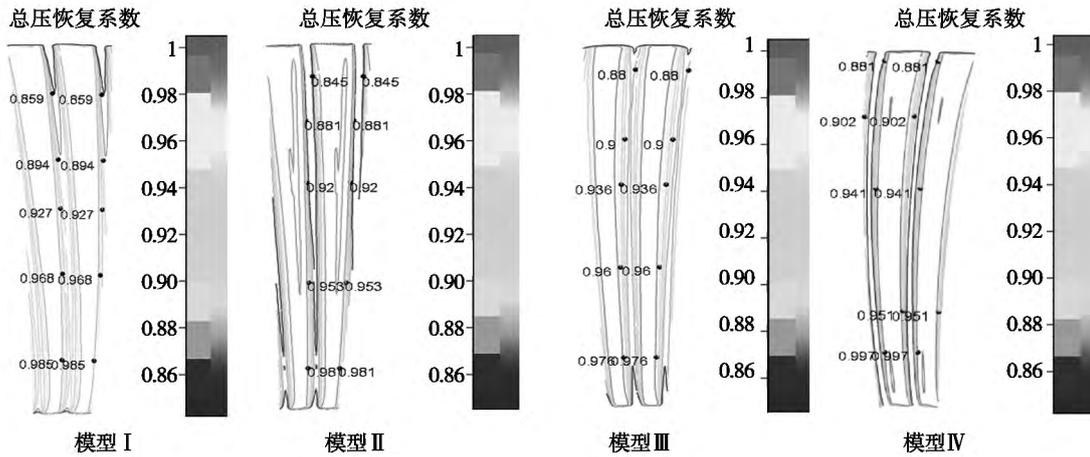


图 3 4 种类型叶片在距离叶片出口 5 mm 位置截面的总压恢复系数等值线图

Fig.3 Chart showing the constant value lines of the total pressure recovery coefficient of the four types of blade at a location 5 mm away from the outlet of the blade

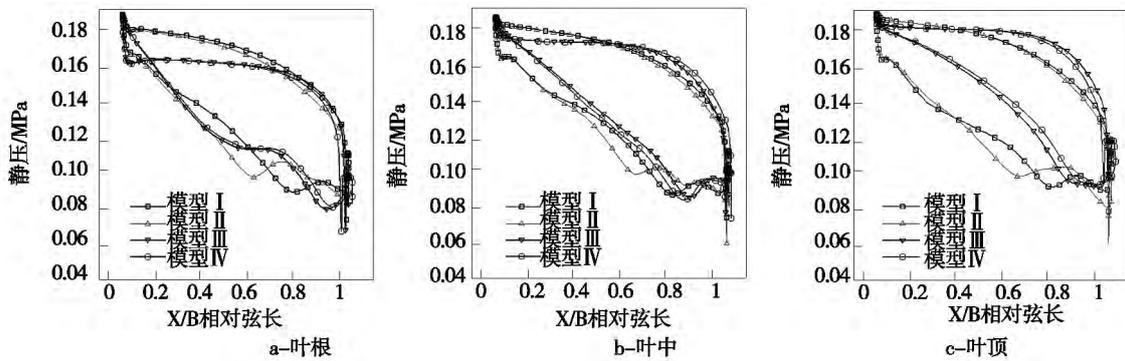


图 4 4 种类型叶片 3 个截面压力沿型线的分布

Fig.4 Static pressure distribution along the blade profile direction in the three cross sections of the four types of blade

2.2 马赫数等值线和速度矢量分布

图 5 - 图 8 给出了 4 种叶片在根、中、顶 3 个截面的马赫数等值线分布,马赫数最大的位置出现在吸力面靠近尾缘的位置 4 种叶片都是顶部马赫数最小,从表 1 可以看出 4 种叶片的出口马赫数均略大于 0.97,模型 I 和模型 II 的最大马赫数位置出现在中部,模型 I 出口马赫数大于模型 II,但马赫数沿叶高的分布更为均匀,在中部截面正弯叶片使出口马赫数增加较为明显,马赫数提高引起流量在中部的增加。模型 III 的最大马赫数出现在靠近根部的位置,沿叶高方向逐渐减小,模型 IV 的马赫数在径向分布较为均匀,不管是均匀加载叶片还是后加载叶片,

较好的正弯都能使马赫数沿着叶高分布更为均匀。由于截面的横向流动是沿马赫数等值线的法向流动,故马赫数等值线与流道中心线的交角能说明截面横向流动的强弱。从图 5、图 7 和图 9 可以看出,在流道内马赫数等值线与流道中心线趋于正交,截面的横向流动相对于图 6 有所减弱,说明叶片的合理的正弯或后加载,有利于减小各截面叶栅的横向流动,从而使叶栅的损失不至于由于横向流动的加强而增加。对比两不同加载特性型线在压力面的曲率变化,在流道前半部分,均匀加载叶片的曲率大于后加载型线叶片,而在后半部分流道正好相反,曲率的变化反映出构成流道的几何面积的扩张程度,曲

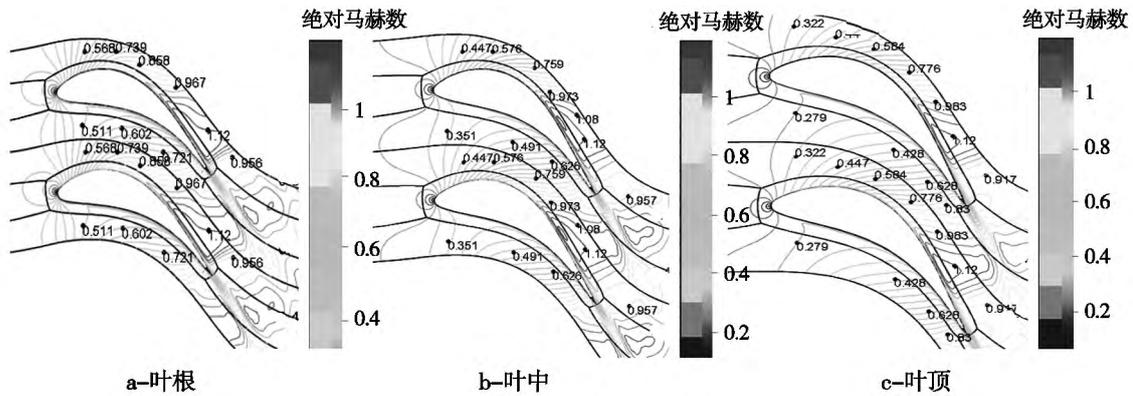


图 8 模型Ⅳ马赫数等值线

Fig. 8 Chart showing the constant value lines of the Mach numbers in Model IV

3 正弯均匀加载叶片气动特性试验研究

风洞试验台如图 9 所示,试验台出口风源均匀,压力波动小;选取正弯均匀加载叶片按 2:1 缩比制成环形叶栅试验件如图 10 所示,试验条件与前述的数值计算条件相同,试验条件出口马赫数为 0.97,入口气流零冲角进入;取叶栅相对高度为 0.15、0.5 和 0.85 位置的 3 个截面布置测点,在吸力面和压力面上均布置 11 个探针测点孔,如图 11 所示,出口截面马赫数的测量位置距叶片出口 3.5 mm,探针从近根部至近顶部径向测量总 15 站。

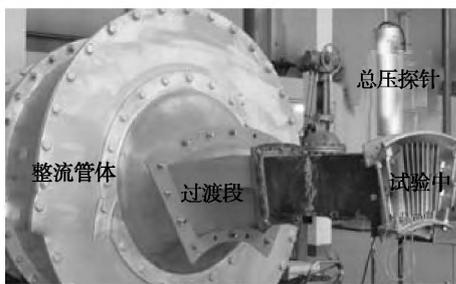


图 9 叶栅风洞试验台

Fig. 9 Wind tunnel test rig for cascades

3.1 总压恢复系数、总压损失系数、出口截面马赫数分布

定义总压损失系数:

$$C_{pt} = (P_1 - P_2) / (P_2 - p_2) \quad (2)$$

式中: P_1 —进口总压, Pa; P_2 —当地测试截面总压, Pa; p_2 —出口静压, Pa。

图 12 给出了压力损失系数和压力恢复系数沿

叶高的变化,叶片中部以下损失明显小于中部以上,与图 3 的总压恢复系数等值线的趋势一致,根部截面受到一定程度的边界层厚度的影响,但在正径向压力梯度的作用下使部分流体离开根部,弱化了边界层的堆积效应,叶片通道在径向通道的扩张使叶片在径向有正压力梯度,叶片的正弯抑制这种扩张的发展,最终形成中部以上截面受负径向压力的作用,图 14 中静压沿叶高 C 型分布,抑制了端部二次流的发展。相比中截面,顶部焓降的分配是最大的,由此带来横向压差的增加对二次流是不利的,顶部通道涡与端部横向流交汇,在吸力面会形成二次漩涡并逐渐扩大至出口,以上这些因素构成了上端壁的损失;型面损失在各个截面上都是存在的,3 个截面的雷诺数 Re 均大于 7×10^5 ,且沿叶高逐渐增大,叶片表面的附面层厚度不会引起马蹄涡通道涡损失的增加。



图 10 叶栅试验件

Fig. 10 Cascade test piece

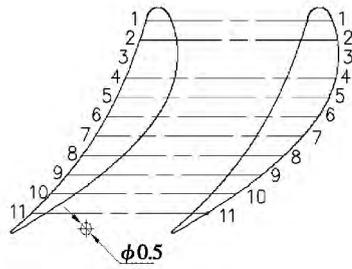


图 11 叶栅试验件截面测点布置

Fig. 11 Arrangement of measuring points in a cross section of the cascade test piece

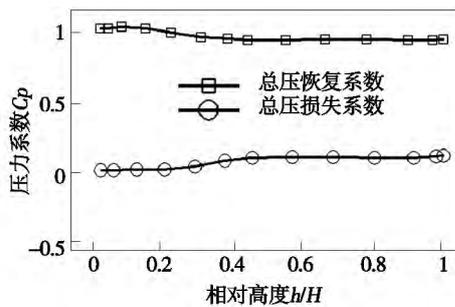


图 12 总压恢复系数、总压损失沿叶高的分布

Fig. 12 Distribution of the total pressure recovery coefficient and total pressure loss coefficient along the blade height direction

图 13 给出了出口马赫数在径向的分布, 试验数据和数值计算结果吻合很好, 两端的流体向中间聚集导致中部流量的增加引起中部马赫数高于两端部, 而常规均匀加载叶片马赫数沿叶高逐渐降低, 合理的正弯可以减小叶片端部的二次流损失, 只是将损失在整个叶高方向上均化。

3.2 叶片表面静压分布

图 15 为 15%、50%、85% 相对叶高截面上数值

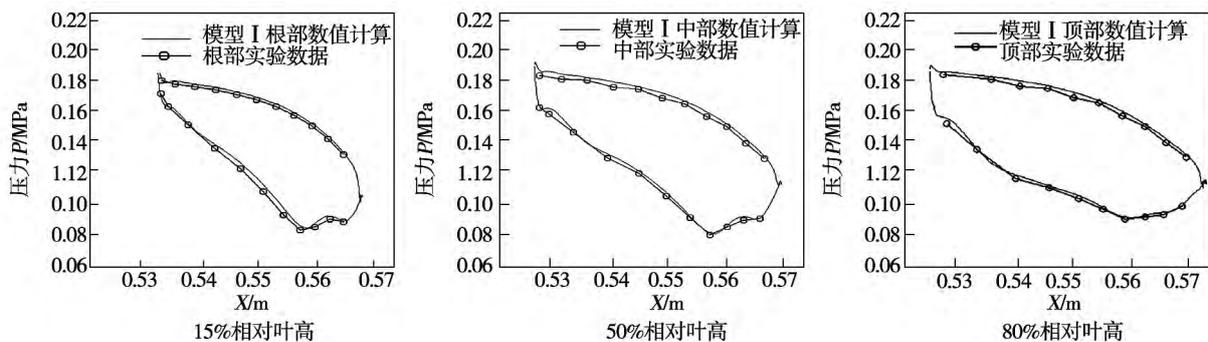


图 15 叶片 3 个截面静压沿叶型分布

Fig. 15 Distribution of the static pressure along the blade profile direction in three cross sections of the blade

计算和试验数据的叶片表面静压沿叶型线的分布。在压力面上试验数值略低于计算值, 但总体上和数值计算数值吻合得很好, 气流在入口无冲角进入, 在压力面加速膨胀至尾缘, 吸力面上加速至接近出口处缓慢减速至出口, 在根部截面吸力面有两段微小逆压梯度, 试验数据也捕捉到了这段微小的转折区, 越往通道后部(至喉部) 横向压差越大; 沿叶高方向越接近顶部均匀加载的特征越明显, 负荷也就越大。

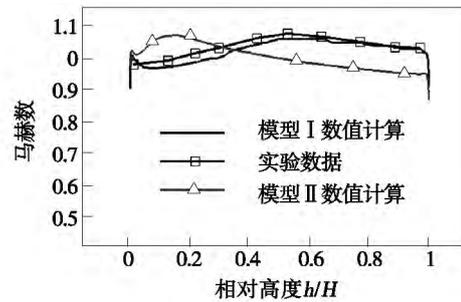


图 13 出口马赫数沿叶高的分布

Fig. 13 Distribution of the Mach number at the outlet along the blade height direction

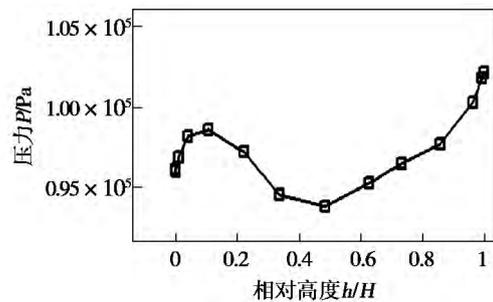


图 14 静压沿叶高的 C 型分布

Fig. 14 "C-shaped" distribution of the static pressure along the blade height direction

4 结 论

在相同边界条件下对均匀加载、正弯均匀加载、后加载、正弯后加载 4 种类型静叶片进行数值分析，并对正弯均匀加载叶片的环形叶栅试验件在出口马赫数为 0.97 的风洞台上做吹风试验。研究表明：

(1) 均匀加载叶片相对后加载叶片承载能力较大，横向压差在流道内前半部分大于后者，在后半部分小于后者，横向二次流发展的较早，吸力面压力最低点相对靠前；正弯均匀加载叶片使叶片中部压力低于叶片两端，使端部流体向中部主流区域靠拢，削弱了端部二次流损失。后加载叶片在吸力面的逆压梯度段且仅出现一次，位置最靠近尾缘。

(2) 正弯均匀加载叶片及后加载叶片的马赫数等值线与流道的中心线基本正交，减小了截面的横向流动，而均匀加载叶片的交角较小，对控制二次流的发展不利，在出口接近音速条件下，均未出现明显激波，尾迹损失较小。

(3) 试验数据与计算数据吻合，总压恢复系数沿叶高逐渐减小，总压损失系数沿叶高逐渐增大，叶片的正弯改变压力沿叶高的分布，同时也改变了焓降分配，总体上正弯叶片减弱了端部二次流损失，并使所有损失在叶高方向均匀化。

参考文献：

[1] 王仲奇,郑 严. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势

[J]. 中国工程科学 2000 2(6) : 40 - 47.

WANG Zhong-qi ,ZHENG Yan. Status quo and development tendency of the bowed and twisted blades for turbo-machinery [J]. China Engineering Science 2000 2(6) : 40 - 47.

[2] 黄洪雁 ,韩万金 ,王仲奇. 叶片正弯曲对间隙流动损失的影响 [J]. 航空动力学报 ,1997 ,12(3) : 263 - 267.

HUANG Hong-yan ,HAN Wan-jin ,WANG Zhong-qi. Influence of the positive bending of blades on the losses arisen from the flow in gaps [J]. Journal of Aerospace Power ,1997 ,12(3) : 263 - 267.

[3] 周凡贞 ,蒋洪德 ,冯国泰. 汽轮机采用高载荷叶片和大焓降级的初步探讨 [J]. 汽轮机技术 ,2002 44(1) : 16 - 19.

ZHOU Fan-zhen ,JIANG Hong-de ,FENG Guo-tai. Preliminary exploratory investigation of a steam turbine adopting highly-loaded blades and large enthalpy drop stages [J]. Steam Turbine Technology. 2002 44(1) : 16 - 19.

[4] 李 军 ,孙 奇 ,晏 鑫 等. 前加载和后加载叶片气动性能的数值研究 [J]. 动力工程 2007 27(6) : 835 - 839.

LI Jun ,SUN Qi ,YAN Xin ,et al. Numerical study of the aerodynamic performance of fore-loaded and rear-loaded blades [J]. Power Engineering 2007 27(6) : 835 - 839.

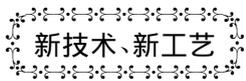
[5] 徐大懋. 先进控制流透平设计的展望 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版) 2006 3(3) : 20 - 26.

XU Da-mao. Prospect of the design of an advanced control flow turbine [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science Edition) 2006 3(3) : 20 - 26.

[6] 宋立明 ,李 军 ,丰镇平. 跨音速透平扭叶片的气动优化设计研究 [J]. 西安交通大学学报 2005 39(11) : 1277 - 1281.

SONG Li-ming ,LI Jun ,FENG Zhen-ping. Study of the aerodynamically optimized design of twisted bladed for transonic turbines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University 2005 39(11) : 1277 - 1281.

(刘 瑶 编辑)



Black & Veatch 建造 H 级燃气轮机联合循环电站

据《Gas Turbine World》2014 年 9 ~ 10 月刊报道 ,Black & Veatch 已被选择为在俄亥俄州俄勒冈市的 869 MW OCEC(俄勒冈清洁能源中心) 的工程、采购、建造(施工) 和启动的主要承包商。

OCEC 将利用 2 台高效率 Siemens 的 SGT6 - 8000H(274 MW 功率和 40.0% 效率) 、由 NEM 供给的 2 台余热锅炉和 1 台 Siemens 的 SST6 - 5000 汽轮机。H 级燃气轮机正在被装入 2 × 1 联合循环结构内。

为了增加输出功率 ,2 台余热锅炉都装备有补燃 ,并且 2 台燃气轮机都装备有蒸发冷却器。OCEC 的湿冷却系统针对电站具体的位置被最优化。

Siemens 将制定并提供热力循环设计和动力岛结构配置并依据长期的服务和维护协议完成电站正在运行的服务。

预期该电站将在 2017 年 7 月开始商业运行。

(吉桂明 摘译)

radiation ,compressor fouling ,time series model

跨音速正弯均匀加载叶片的数值与试验研究 = **Numerical and Experimental Study on Positive-curving & Evenly-loading Blade in Transonic Condition** [刊 汉] KANG Lei ,XU Wei ,ZHANG Yan (No. 703 Research Institute of CSIC ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) ,ZHOU Rui-jun (Grand New Power Co. Ltd. Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(3) . -56 -62

The numerical analysis on four kinds of stator blade including evenly-loading blade ,positive-curving & evenly-loading blade ,aft-loading blade and positive-curving aft-loading blade was made under the same boundary conditions , and the air test of the annular cascade test pieces of the positive-curving & evenly-loading blade was carried out on the wind tunnel test bench with outlet Mach number of 0.97. The study results showed that positive-curving blade can control effectively the secondary flow of tip section ,realize the homogenization of the loss at the radial direction and make the Mach number contour orthogonal to the central line of the flow channel. Under the same boundary conditions ,for both the evenly-loading blade and aft-loading blade ,effective positive-curving can make the total pressure recovery coefficient increased by more than 1%. **Key words:** positive-curving blade ,aft-loading ,evenly-loading ,wind tunnel test

基于混料设计的优化配煤方案的研究 = **Research on Optimization of Coal Distribution Based on Mixture Design** [刊 汉] GUAN Hai-ying ,ZHANG Hai-ying (Key Laboratory on Complex System Control and Intelligent Information Processing ,Xi'an University of Technology ,Xi'an ,Shanxi Province ,China ,Post Code: 710048) ,LIU Yu-ming (Baqiao Thermal Power plant of Datang Shanxi Power Generation Co. Ltd. Xi'an ,Shanxi Province ,China ,Post Code: 710048) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(3) . -63 -69

Under the preconditions of ensuring the normal operation of coal-fired boiler unit and meeting the needs of the unit load ,in order to improve the composite indicators such as coal distribution cost ,calorific value ,sulfur content ,ash content ,volatiles and so on ,on the principle of mixture test design ,with consideration of three factors including high-calorie & low-sulfur coal ,medium-calorie & medium-sulfur coal and low-calorie & high-sulfur coal ,the extreme vertex method was adopted for coal distribution design. In combination with the enterprise coal distribution status and environmental protection requirements ,the optimal proportion of three factors was obtained by using the multi-index response optimization model which established by analyzing and processing the test data. The results in-