

冲角对高负荷正弯叶栅壁面静压影响的实验研究

陈绍文¹, 卞兆喜², 刘顺隆¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨哈电电气公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 实验研究了冲角对某高负荷环形正弯扩压叶栅壁面静压的影响, 结果表明, 正冲角时直叶栅吸力面具有趋势明显的反“C”型压力分布这种分布趋势随弯角增大而增强, 并导致低能流体向叶展中部的积聚逐渐增多; 由于吸力面具有较强的流向逆压梯度, 叶展中部气流易分离, 从而致使损失激增; 在高负荷压气机叶栅中, 负冲角和零冲角时采用正弯曲设计对减小分离、降低损失的效果要好于正冲角时, 且弯曲角度不宜太大。

关 键 词: 高负荷叶栅; 正弯曲; 冲角; 静压

中图分类号: TK474. 8 文献标识码: A

引 言

不断增加级负荷, 从而减少压气机的级数是现代航空发动机保持持续发展的关键。对能够获得高压比、高效率, 有适当喘振裕度的紧凑型先进压气机的研究一直是国内外学者工作的重点。叶栅中的气流折转能力的提高可以有效增大级压比或负荷, 而这也引起叶栅中气流三维流动增强, 从而使得端壁附近流体分离加剧^[1], 导致级效率的大幅下降^[2~3]。气流的分离与叶栅壁面附面层的发展密切相关, 而影响附面层发展的主要因素是叶片表面和叶栅端壁上的静压分布^[4]。考虑到大折转角叶栅的特点, 近年有许多提高压气机效率和喘振裕度的方法被研究, 其中叶片弯曲造型技术的研究及应用得到了同行普遍认可, 且其在大折转角压气机叶栅中的研究取得一定的进展^[5~7]。由于外界环境以及工作条件的变化, 压气机在实际运转过程中不可能总是工作在设计工况下, 而变工况条件下压气机叶栅级的特性对级间匹配和总的性能影响较大, 尤其是对具有较大叶型折转角的压气机叶栅来说, 研究其处于正

冲角和部分负荷条件下的特性, 具有较大的实际意义。

前期的研究工作多集中在平面叶栅和较低负荷叶栅, 对具有较高负荷的环形压气机叶栅实验研究还比较少。为了进一步探讨叶片正弯曲对控制高负荷压气机叶栅端壁流动的机理, 完善弯曲叶片气动性能研究, 本文在不同冲角条件下, 对具有 3 种弯曲角度的某高负荷环形扩压叶栅壁面静压随冲角的变化进行了研究, 并分析了壁面静压的改变对栅内附面层发展及其气动性能的影响。

1 实验装置及方案

实验在哈尔滨工业大学推进理论与技术研究所低速扇形叶栅风洞上进行, 进口马赫数为 0.23, 实验栅前表压为 2 500 Pa, 风洞洞内温度为 305 K。轮毂、机匣半径分别为 475 和 575 mm, 叶片高度 100 mm, 弦长 100 mm, 整圈叶片数为 45 个, 实验段实物结构如图 1 所示。实验叶栅的叶型为 NACA65 系列, 叶型折转角达到 60°, 实验叶片由环氧树脂加金属填料浇铸而成, 分别由直叶栅 (STR) 和 15° (PB15)、20° (PB20)、25° (PB25) 3 种正弯叶栅组成, 共计 4 套叶栅。实验采用 U 型水排测量了叶栅的端壁静压和型面静压, 利用 L 型五孔探针测量了叶栅出口截面气动参数, 并对每套叶栅都进行了墨迹流动显示测量, U 型水排的误差主要是读数误差。型面静压测量都在全叶高内进行, 沿叶高布置 7 个不等距测量高度, 每个高度静压测孔数大约为 50 个, 型面静压测点分布如图 2 所示。实验采用 5 个不同的扇形筒来实现变冲角, 如图 3 所示, 冲角范围为 0°、±5°和-10°。图 4 为端壁静压测点分布。

收稿日期: 2007-10-16; 修订日期: 2007-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50236020)

作者简介: 陈绍文 (1979-), 男, 江西新干人, 哈尔滨工业大学讲师, 哈尔滨工程大学博士后。

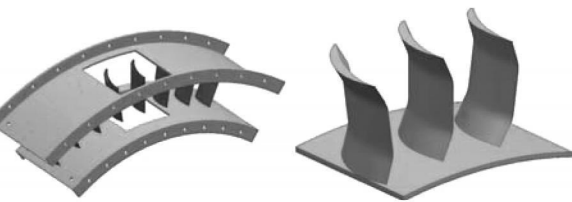


图 1 实验段结构及叶栅模型

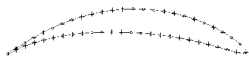


图 2 型面静压测点分布



图 3 变冲角段模型

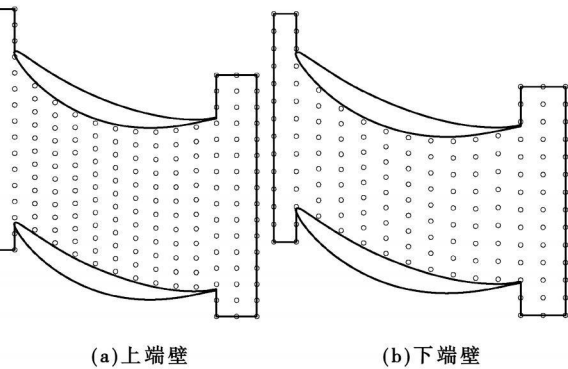


图 4 端壁静压测点分布

2 实验结果与分析

叶栅来流冲角的变化使得叶栅流道内气流折转

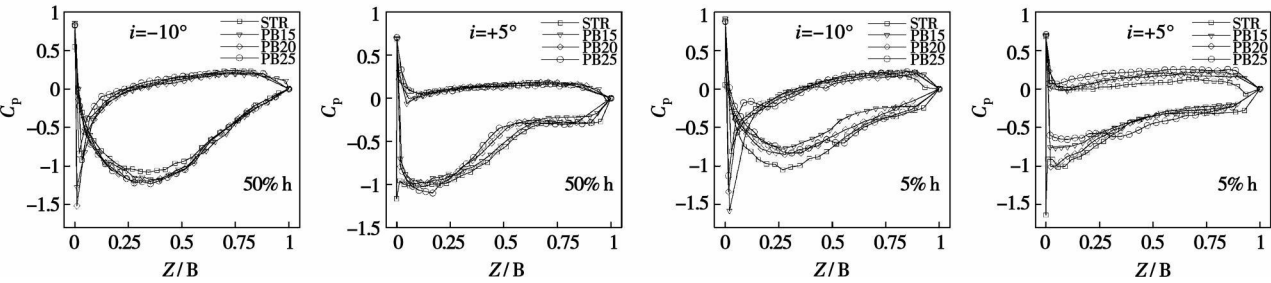


图 5 不同截面静压系数随冲角变化

程度发生改变, 从而引起叶片表面压力梯度的变化, 导致叶片负荷分布发生改变。图 5 给出了各直、弯叶栅在不同冲角时不同叶高处静压系数的分布, 静压系数定义如下:

$$C_p = \frac{P_s - P_{s0}}{P_{v0}} \tag{1}$$

式中: P_s 、 P_{s0} —当地静压和栅前静压; P_{v0} —栅前动压。如图所示, 在最大正冲角时, 叶片吸力面尾部逆压梯度逐渐减小, 部分截面静压系数分布较为平直, 压力梯度较小。静压沿流向分布趋于平直, 压力面和吸力面的静压差减小, 这是由于气流在该处分离使得气流拥塞状况加重, 此时流动发生较大的分离, 使得叶栅负荷减小。

早期的研究结果表明, 叶片正弯使得叶栅端壁负荷小于直叶栅, 而叶展中部负荷大于直叶栅, 在大折转角叶栅中叶片正弯曲对负荷的影响随冲角不同而不同。如图 5 所示, -10° 冲角时直、弯叶栅不同截面负荷变化与早期结果类似, 而正冲角时则有所不同, 正弯叶栅中部和端部的负荷均有所减小, 说明在正冲角时叶片正弯对流动的控制能力减弱。采用正弯叶片使得叶展中部截面的最低压力点位置向尾缘移动, 增加了前缘附近顺压梯度的范围, 减小了尾缘附近逆压梯度的范围, 这对流动是有益的, 但同时叶片正弯也导致最低压力峰值增大, 从而加大了尾缘附近的逆压梯度, 特别是在正冲角时流道内逆压梯度强度增加明显, 以至引起流动的恶化和损失的发展影响较大。图 6 给出了叶栅吸力面流场显示结果, 由图可见, 随着冲角的增大, 叶片吸力面的分离程度随着增大, 且在正冲角时达到最大, 负冲角时正弯叶栅两端分离减小, 中部流动也没有恶化趋势, 而正冲角时正弯叶栅中部流动恶化明显, 这是损失增长的主要原因。

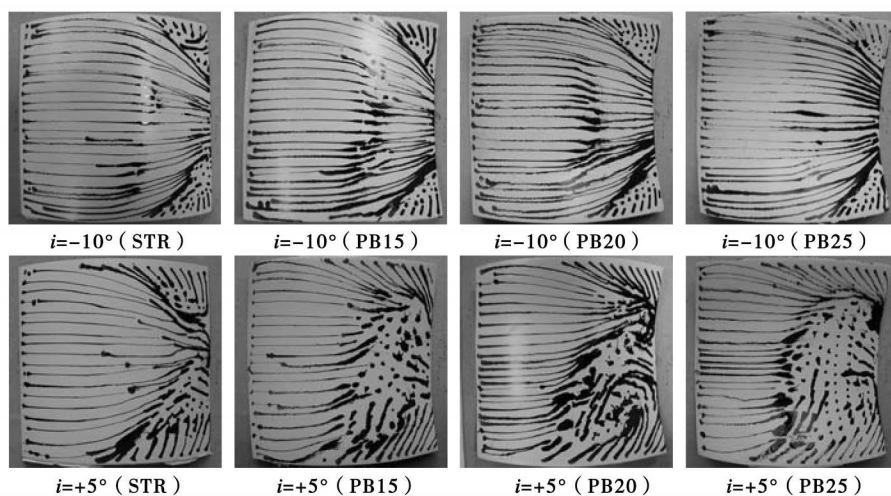


图 6 叶片吸力面表面流场显示

图 7 给出了不同冲角时直、弯叶栅端壁静压系数等值线分布。冲角的变化改变了叶栅端壁吸力面侧最低负压点和压力面侧最高正压力点的压力峰值,并且影响到叶栅端壁近吸力面侧最低负压点的位置及其后部逆压梯度的大小。当冲角由负向正变化时,各直、弯叶栅靠近吸力面侧的最低压力区均有

不同程度的前移,最大正冲角时叶栅的最低压力区接近前缘。从图中还可以发现,任意冲角时,对比直叶栅而言,正弯叶栅流道内端壁的横向压力都有明显减小,这说明此时叶片正弯可以有效控制端部的横向二次流动。

不同冲角条件下,叶片正弯使得端壁吸力面处

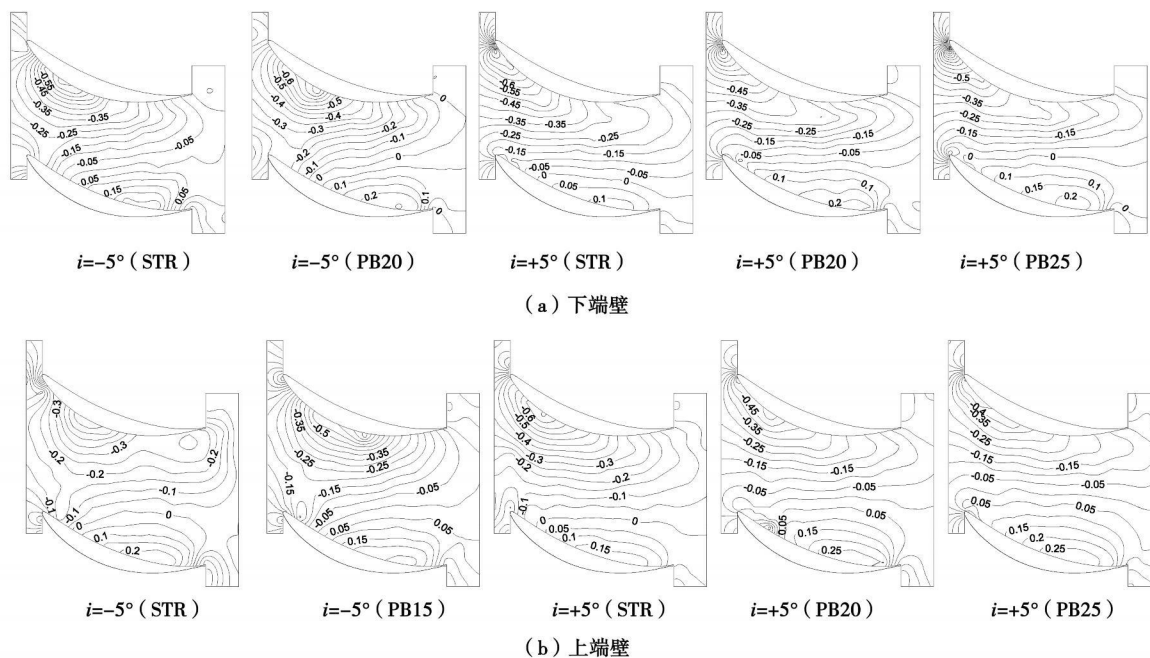


图 7 叶栅端壁静压系数分布

的静压系数等值线扭曲程度加重,且扭曲区域向吸力面方向缩小。正冲角时,直叶栅端壁吸力面后半部分的静压系数等值线呈“U”型分布,叶片正弯引起该区域静压分布向“V”型发展,这使得叶栅的尾

缘区容易发生分离和回流;而负冲角时,这种转变趋势明显减弱,流动也不易发生分离。叶栅端壁的静压梯度随冲角绝对值的增大而减小,横向压力梯度和逆压梯度随之降低,这使得流道内气流的横向二

次流动减弱, 且大大降低了流动分离发生的可能性; 而正冲角时, 由于直叶栅端壁静压梯度较小, 这也使得叶片正弯对减小端壁横向压力梯度的作用随之减弱, 且叶片正弯对控制叶栅端壁流动的作用也随之减弱。

叶栅来流冲角发生变化必将使得气流在绕流叶片表面时的流动状况发生改变, 引起叶片表面及端壁表面静压的变化, 从而影响叶片表面附面层的发展和叶片正弯时端壁低能流体向叶展中部的迁移。图 8(a) 所示为不同冲角时叶片压力面静压系数等值线分布, 从图中可以发现, 任意冲角时压力面的静压系数等值线较压力面要稀疏, 正冲角时压力面静压系数等值线较负冲角时要稀疏, 扩压能力也相对要低, 下端壁的压力梯度要明显大于上端壁, 低能流体向叶展中部的迁移能力更强。-10° 冲角时叶栅压力面静压系数等值线扭曲程度小, 分布也较均匀, 直叶栅中部等值线向前缘凸起, 略有“C”型静压分布的特点, 正弯叶栅中部等值线向尾缘凸起, 形成了典型的压力面“C”型静压分布, 随着冲角增大等值线扭曲程度随之加大, 直叶栅压力面逐渐呈倾斜分

布, 正弯叶栅压力面“C”型静压分布趋势增强, 这表明沿径向的压力梯度增加, 把流体向叶展中部方向运输的作用增强。

吸力面与端壁所围成的角区是气流分离和堵塞的主要区域, 对于环形压气机叶栅来说更重要的是下端壁吸力面角区的流动状况, 该区域气流严重的分离和堵塞将引起通道涡的失稳破裂, 损失容易出现激增。图 8(b) 给出了不同冲角时叶片吸力面静压系数等值线分布图, 在任意冲角条件下, 叶片正弯使得吸力面低压区向上端壁方向移动, 多个低压区被合并成一个低压区。在-10° 冲角时吸力面低压区距离前缘最远, 3 种折转角叶栅最大距离都能达到大概 35% 轴向弦长, 随着冲角的增大, 吸力面低压区逐渐向前缘移动, 最大正冲角时直叶栅中最低压力区距离前缘缩减到 10% ~ 15% 轴向弦长内, 正弯叶栅中低压区向前缘移动的距离和直叶栅差不多, 只有大弯角时距离前缘距离比直叶栅远, +5° 冲角时直叶栅中大概 10% 轴向弦长, 其中 25° 弯角正弯叶栅中距离前缘大概 15% 轴向弦长。叶片吸力面静压等值线区域被划分成两个部分, 第一区域为

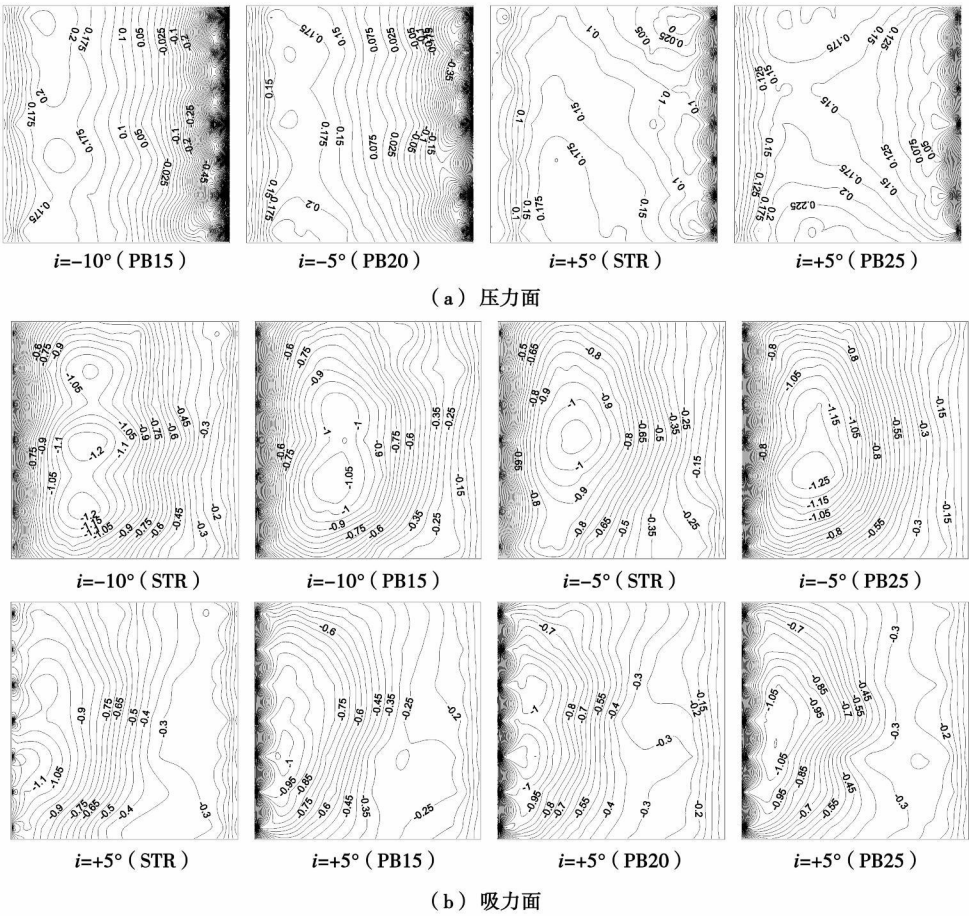


图 8 叶片表面静压系数分布

前缘至低压区内, 第二区域为低压区至尾缘区域。正弯叶片吸力面低压区向尾缘移动, 这使得第一区域长度增加, 第二区域长度减小, 即使得前缘顺压梯度段增加, 气流在这一区域的加速更充分, 另外还使得叶片中部逆压梯度段的减小, 气流在这一区域的动能减少程度降低, 分离可以得到控制, 负冲角下正弯叶栅内的分离得到了较好的改善, 而正冲角下正弯叶栅的效果不佳, 由图可见, 在正冲角正弯叶栅吸力面上都存在一个新的高压区, 3 种弯角时位置基本一致, 距离下端壁 35% 叶高、距离尾缘 20% ~ 30% 轴向弦长处, 弯角越大此区域越接近尾缘, 此区域的存在, 是引起气流动能的急速降低、发生较大堵塞、使得损失发生激增的主要原因。

在任意冲角下, 各直、弯叶栅的吸力面静压等值线都呈反“C”型的分布区域, 且在正冲角时比负冲角时此分布的趋势更明显, 在正弯叶栅中此分布的趋势也要强于直叶栅中, 使得沿径向的压力梯度也随之增大, 但是增大的区域和程度各种叶栅之间有不同之处。负冲角下, 正弯叶栅较直叶栅反“C”型压力分布强度和作用范围的增大主要是由于低压区合并引起的, 而正冲角下这种情况逐渐减弱, 此时静压梯度的作用区域向叶展中部移动明显, 在 +5° 冲角时直叶栅本身具有较大强度的反“C”型压力分布, 正弯叶栅相对直叶栅在近端壁区的变化也相对要小, 而正弯叶片吸力面的反“C”型静压分布较直叶片变化较大, 作用强度和范围都变大, 低能流体向叶展中部的积聚逐渐增多, 由于此时叶栅流道中气流折转过大, 引起叶展中部发生大面积的分离, 从而导致损失的激增。图 9 为叶栅出口总损失随冲角的变化情况, 正冲角时正弯叶栅较直叶栅的损失增长相对其它冲角时明显要大, -5° 冲角时各弯曲角度的弯叶片都能使得损失减小, 0° 冲角时 15° 弯角正弯叶片减小损失程度最大。

3 结 论

(1) 当冲角接近或者大于 +5° 冲角时, 高负荷叶栅吸力面表面逆压梯度较大, 此时应用叶片正弯曲设计容易引起中部流动恶化, 甚至反过来影响端壁区域的流动;

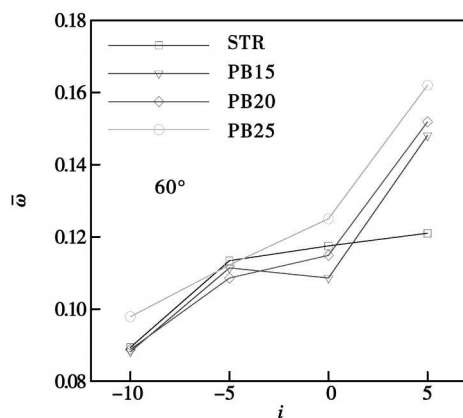


图 9 出口质量平均总损失随冲角变化

(2) 当冲角接近或者大于 +5° 冲角时, 直叶栅吸力面具有趋势明显的反“C”型压力分布, 叶片正弯引起吸力面反“C”型静压分布趋势增强, 低能流体向叶展中部的积聚逐渐增多, 在较强逆压梯度的作用下, 易引起叶展中部气流的分离, 致使损失激增;

(3) 在高负荷压气机叶栅中, 实验负冲角范围内和零冲角时采用正弯曲设计对减小分离、降低损失的效果要好于正冲角时, 且弯曲角度不宜太大, 在本实验条件下当弯角小于 20° 时总损失是减小的。

参考文献:

- [1] 钟兢军, 苏杰先, 王仲奇. 压气机叶栅壁面拓扑和二次流结构分析[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(1): 40-44.
- [2] EMMERSON P R. Three-Dimensional flow calculations of the stator in a highly loaded transonic fan[R]. ASME Paper 96-GT-546, Birmingham, 1996.
- [3] CALVERT W J, EMMERSON P R, MOORE J M. Design test and analysis of a high pressure ratio transonic fan[R]. ASME Paper, GT-2003-38302, Atlanta, 2003.
- [4] 钟兢军, 苏杰先, 王仲奇, 等. 叶片倾斜和弯曲对扩压叶栅出口流场的影响[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(1): 29-34.
- [5] SHANG E B, WANG Z Q, SU J X. The experimental investigations on the compressor cascades with leaned and curved blade[R]. ASME Paper, 93-GT-50, 1993.
- [6] WANG ZHONGQI, SU JIEXIAN, ZHONG JINGJUN. The effect of the pressure distribution in a three-dimensional flow field of a cascade on the type of curved blade[R]. ASME Paper, 94-GT-189, 1995.
- [7] SASAKI T, BREUGELMANS F A E. Comparison of Sweep and dihedral effects on compressor cascade performance[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 454-464.

(编辑 刘 伟)

lytical results can provide some guidance for evaluating the operation of the unit. **Key words:** elevation, rotor, transfer matrix, turbo-generator unit

三维全息谱在诊断负荷诱发的转子热弯曲与标高故障中的运用 = **Application of Three-dimensional Holographic Spectrums in the Diagnosis of a Load-induced Rotor Thermal Bending and Elevation Fault** [刊, 汉] / WANG Xiu-feng, QU Liang-sheng, LIAO Yu-he (Intelligent Instrument and Monitoring/Diagnosis Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 462 ~ 467

It is extremely common for a large-sized rotary machine to undergo a vibration change of its shafting resulting from a load variation during its operation. An abnormal vibration is often triggered by a change of such operating conditions as the transfer torque and thermal state, etc. of a bearing-rotor system experiencing load variations. The authors have combined the load-induced vibration mechanism with three-dimensional holographic spectrum technology and fully utilized the shafting vibration information indicated by a three-dimensional holographic spectrum to identify the three-dimensional holographic spectrum characteristics of different faults, thus providing a new approach for discriminating load-induced vibration faults. The mechanism and three-dimensional holographic spectrum characteristics of a thermal bending and elevation fault have been analyzed. The verification results obtained from on-site data show that the spectrum characteristics in question resulting from a mechanism analysis enjoy a good ability to identify load-induced vibration faults.

Key words: holographic spectrum, vibration, thermal bending, elevation, load

冲角对高负荷正弯叶栅壁面静压影响的实验研究 = **Experimental Study of the Effect of an Incidence on the Wall-surface Static Pressure of a High-load Positively-bent Cascade** [刊, 汉] / CHEN Shao-wen, LIU Shun-long (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), BIAN Zhao-xi (Harbin Ha-dian Electrical Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 468 ~ 472

An experimental study has been conducted of the effect of an incidence on the wall surface static pressure of a high-load annular positively-bent diffusion cascade. The results of the study show that when the incidence is positive, the suction surface of a straight-blade cascade exhibits an evident tendency of reverse "C" shaped pressure distribution, which will be intensified with an increase of the bending angle and result in a gradual accumulation of low-energy fluid in the middle of the blade span. Due to a relatively strong reverse pressure gradient streamwise on the suction surface, the air flow in the middle blade span is prone to be separated, thus causing a sharp increase of losses. In a high-load compressor cascade, when the incidence is negative and zero, the adoption of a positively-bent blade design will lead to a better effectiveness in reducing separation and losses than in the case when the incidence is positive. In addition, an excessively large bending angle should be avoided. **Key words:** experimental study, high-load cascade, positive bending, incidence, static pressure

跨音速轴流压气机间隙泄漏流流动特性研究 = **A Study of the Clearance Leakage Flow Characteristics of a Transonic Axial-flow Compressor** [刊, 汉] / ZHANG Yan-feng, CHU Wu-li, WU Yan-hui (College of Power and Energy Source, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 473 ~ 477

Clearance leakage flow exercises a major influence on the formation of rotating stall of an axial flow compressor. The authors have conducted a single-passage and multi-passage non-steady numerical simulation by utilizing the transonic axial-flow compressor of NASA rotor 37. The single-passage non-steady calculation results reveal that at an operating condition approximating to compressor stalling speed, there exists a clearance leakage-flow self non-steady behavior at the blade tip. In addition, the non-steady simulation results under two different back-pressure conditions have been compared. When the back pressure at the outlet is comparatively high, the unsteady behavior of the clearance leakage flow is extremely unstable. When the back pressure at the outlet is relatively low, the above-mentioned unsteady behavior is stable. The multi-passage non-steady numerical simulation results indicate that at an operating condition approximating to the stalling speed, when the outlet back pressure is comparatively high, the clearance leakage flow will oscillate.