

# 涡轮叶栅二次流的热线实验研究

李 军, 苏 明

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030)

**摘 要:** 采用旋转单丝斜热线测量涡轮平面叶栅出口周期性三维流场, 借助于 Matlab 的 Lsqnonlin 最优化函数对热线测量数据进行最小二乘拟合以求解三维速度平均量。搭建了亚音速叶栅试验风洞, 研究在 2 种不同进口流量和 3 种不同的叶片高度下, 热线测得的叶栅出口瞬态速度场, 并分析叶栅出口的二次涡流动情况。通过比较不同的叶栅工况, 发现高速进口较低速进口叶栅尾迹明显, 二次流强度较大; 而较小的叶高下二次流较为剧烈, 导致叶栅出口平面内径向流动速度( $u$ )、垂直于出口平面的轴向速度( $w$ )的迅速增大和出口平面内周向流动速度( $v$ )的显著降低。叶高的减小和气动负荷(速度)的增加都会极大地提高叶栅的二次流损失, 本质上都归咎于叶栅横向压力梯度的增大。

**关 键 词:** 涡轮叶栅; 单斜丝热线; 三维流场测量; 二次流; 叶高; 涡轮

中图分类号: TK402 文献标识码: A

## 引 言

涡轮出口的二次流结构, 在一定程度上可以表征着作用在涡轮叶片上的气动载荷。因此, 叶栅出口二次流的流动分析一直是涡轮空气动力学领域的重要研究工作。目前, 越来越多的研究表明, 了解叶栅二次流的详细流动过程, 对发展相关理论计算方法和提高改进涡轮气动性能等方面都起到重要的作用。

热线测量技术有惯性小、频响宽、灵敏度高和使用方便等优点。用热线风速仪测量三维流场归纳起来有三丝探头和旋转的单丝探头或 X 探头。三丝探头可以测量流动的瞬时值, 测量简便, 时间短, 但三丝探头中 3 根热丝间的交叉作用影响结果的精确度, 加上丝探头所占体积比较大, 对流场的干扰大。在流动相对平稳的条件下, 采用旋转单斜丝测量技术测量三维流场就有优势, 通过探头轴杆与步进电机直联绕自身轴线旋转和移动, 以代替空间分布的 3 根热丝。由于单丝有效空间体积要小得多, 对流

场干扰较小, 而且空间分辨率高, 测量技术简单, 因此适用于观察复杂的三元流场, 在叶轮机械内部流动研究中已经获得了广泛的应用。

本文推导出旋转单丝斜探头测量叶轮机出口周期性三维流场的方法, 借助 Matlab 的 Lsqnonlin 最优化函数实现非线性 L-M 最小二乘法以求解出三维速度平均量, 测量出涡轮叶栅出口三维周期性非定常流场。

## 1 单斜丝热线工作原理

单斜丝技术测量三维速度场是利用了热丝对来流的速度与方向不同所表现出的不同响应性能。当热丝探头顺气流方向放置时, 气流方向包含在丝旋转所形成的锥角内。当热丝绕自身轴线旋转时, 保持热丝的俯仰角不变, 仅气流对探针的偏角随转动而改变得到有效冷却速度与三维速度分量的函数关系式:

$$V_e(\gamma) = f(U, V, W, \gamma_i) \quad (1)$$
$$i = 1, 2, 3 \dots n \quad (n \geq 3)$$

如果热丝旋转  $n$  个角度, 则式(1)就构成了  $n$  个非线性方程组。由于旋转角度为已知, 式(1)只有 3 个未知数  $U, V, W$ , 探针只需旋转至 3 个位置进行测量, 便可求解。因此本文在实验中探针绕自身轴线方向旋转 6 个角度位置, 分别为  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$  和  $300^\circ$ , 计算气流的三维平均速度分量, 增加的 3 个旋转角度用以提高测量的准确性。

图 1 所示为单斜丝探头坐标系和实验室固定坐标系的相对关系, 在单斜丝探头坐标系的角度感应遵从 Jorgensen 方程<sup>[1]</sup>:

$$V_e^* = U_N^2 + K_\alpha^2 U_T^2 + k_\beta^2 U_B^2 \quad (2)$$

式中:  $U_T$ —沿热线切向速度分量;  $U_N$ —热线支杆平面内垂直于热线的速度分量;  $U_B$ —垂直于热线支杆平面的速度分量;  $k_\alpha$ —俯仰修正系数;  $k_\beta$ —偏斜修正

系数。

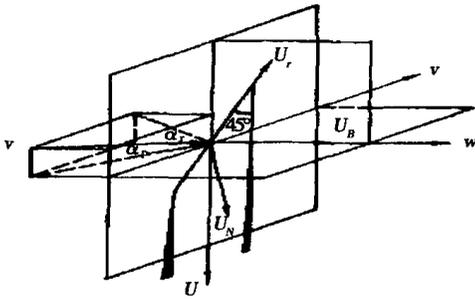


图 1 单斜丝探头及空间速度固定坐标系 (U, V, W)和探头固定坐标系 (UN, VT, WB)

在两个坐标系中速度分量之间的关系如式 (3) 所示,其中所采用的单斜丝倾斜角为 45°, γ 为单斜丝探头从初始位置绕自身轴线方向逆时针旋转过的角度,文中 γ=60°。

$$\left. \begin{aligned} U_N &= U \sin 45^\circ + (V \cos \gamma - W \sin \gamma) \cos 45^\circ \\ U_T &= -U \cos 45^\circ + (V \cos \gamma - W \sin \gamma) \sin 45^\circ \\ U_B &= W \cos \gamma + V \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 可得:  $V_e^2 = A_1 U^2 + A_2 V^2 + A_3 W^2 + A_4 UV + A_5 UW + A_6 VW$ , 对于热线的俯仰系数  $k_\alpha$  和偏斜系数  $k_\beta$ , 文献 [1] 证明可以近似取常数  $k_\alpha = 0.2, k_\beta = 1.2$ 。

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= 0.5 + 0.5 k_\alpha^2 \\ A_2 &= 0.5 \cos^2 \gamma (1 + k_\alpha^2) + k_\beta^2 \sin^2 \gamma \\ A_3 &= 0.5 \sin^2 \gamma (1 + k_\alpha^2) + k_\beta^2 \cos^2 \gamma \\ A_4 &= \cos \gamma (1 - k_\alpha^2) \\ A_5 &= \sin \gamma (k_\alpha^2 - 1) \\ A_6 &= \sin 2 \gamma (-0.5 - 0.5 k_\alpha^2 + k_\beta^2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当热线绕自身轴旋转不同的角度得到不同的电压输出,由式 (1) 得到有效冷却速度  $V_e$ , 采用 Matlab 的  $Lsqnonlin$  最优化函数实现对热线测量数据处理的最小二乘拟合,通过上述的方法可以得到位置

点的三维速度分量,图 2 示出了单斜丝热线的数据处理过程。

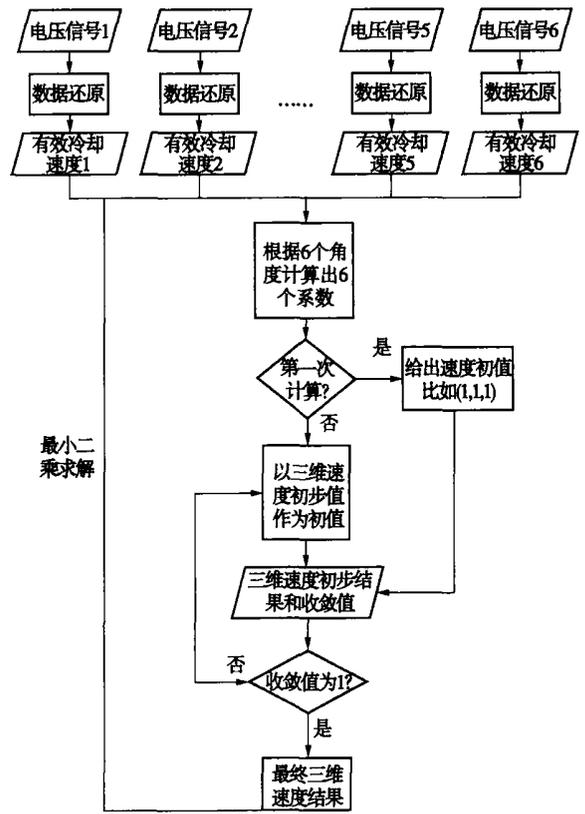


图 2 单斜丝热线的数据处理过程

### 2 实验风洞与叶栅装置

图 3 示出了实验风洞装置示意图和叶栅实物图。实验是在上海交通大学涡轮机实验室风机实验台上进行的,采用吹式低速风洞,风洞前方安装整流金属网和整流栅,以减少来流的紊流度。利用 Danfoss VLT5000 全数字变频调速仪调节鼓风机的转速,以达到连续调节风力机前方空气流速的目的,变频仪的变频范围为 0~50 Hz。

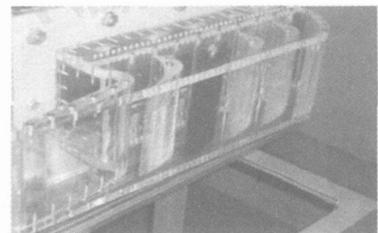
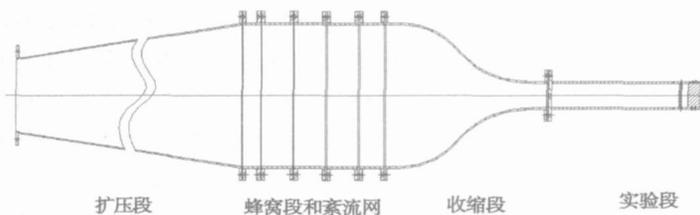


图 3 实验风洞装置示意图和叶栅实物图

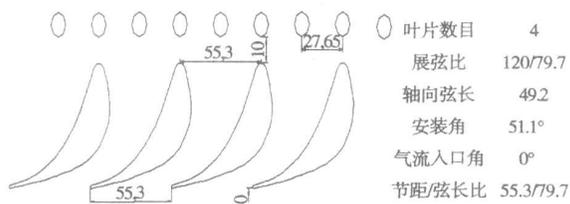


图 4 叶型段几何参数(mm)

图 4 示出了叶型段的基本几何参数, 如节距、轴向距离、圆柱列间隔等。空气涡轮叶型采用静叶叶型 25NSP, 设计的 4 个叶片构成 3 个叶栅流道, 增加

的两个辅助流道有助于提高中心流道模拟结果的可信度。前置圆柱列产生的尾迹用于模拟上游动叶产生的尾迹。

据文献[ 2~3] 报导, 影响端部二次流损失最主要的因素是叶片高度。因此实验相应采用了更改叶片高度的方法, 通过上下两块平面套板的遮挡, 形成不同叶高的实验件。需要说明的是, 平面套板厚仅为 3 mm, 并采用 45°斜角的结构, 尽可能减少套板对来流的干扰, 确保叶片中间段的可信度。图 5 示出了二次流板和叶栅组合图。在叶栅前 10 mm 处调整叶高, 距叶栅出口测量截面距离为 90 mm。实验中套板间距分别为 30、60 和 90 mm 3 种工况。

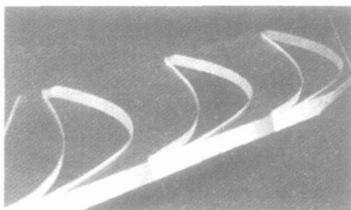
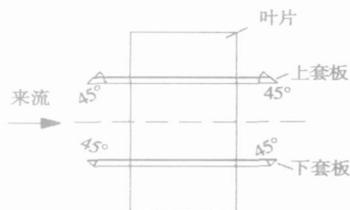


图 5 二次流板和叶栅组合图

### 3 热线实验测量及结果

采用丹麦 Dantec 公司的恒温式热线风速仪 Streamline CTA (Constant Temperature Anemometry), 热线探头采用 55P12 单斜丝倾斜式热丝探头, 经 Streamline 热线单元, 由 Light weigh 位移旋转单元、UEI2WIN 30/DSA/D 板及 PC 机组成高速数据采集系统。图 6 示出了热线系统框图。同时, 为了测量不

出了热线实验系统实物图。根据单斜丝热线旋转测量三维速度的基本原理, 借助于 Matlab 的程序实现非线性  $L-M$  最小二乘法求解三维速度平均量, 测量得到叶轮机出口三维周期性非定常流场。

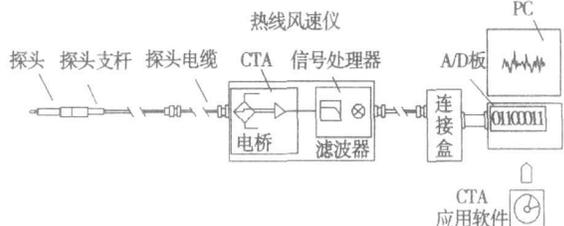


图 6 热线测量系统框图

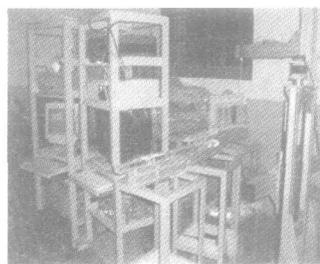


图 7 热线实验系统实物图

同角度的有效冷却速度, 由 Streamline 的 Transverse 模块控制支杆上安装的步进电机带动探针沿着其轴线旋转。另一方面, 热线依靠三维坐标架可沿不同的方向运动, 方便调整探针到合适的位置。图 7 给

热线使用前需进行标定, 以获得热线输出电压与有效冷却速度的关系曲线。本文采用速度校准方法, 在 Dantec 热线所配校准风洞上完成单斜丝探头的校正, 标准风洞给定标定风速为 0.5~45 m/s, 湍流度小于 5%, 如图 8 所示。采用四次幂函数拟合上述曲线后可得热线输出电压  $E$  与有效冷却速度  $V$  的函数关系:  $V = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3 + C_4 E^4$ 。式中  $C_0 = 177.8092$ ;  $C_1 = -324.80306$ ;  $C_2 = 225$ 。

038 14;  $C_3 = -71.426 84$ ;  $C_4 = 9.042 8$ .

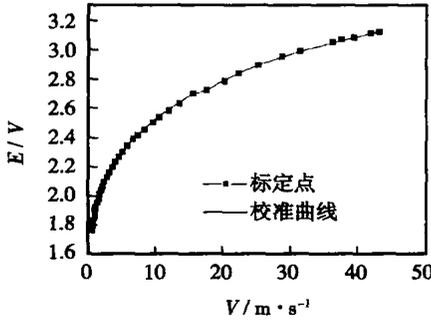


图 8 单斜丝热线速度校准曲线

首先,测试了在两种不同的进口流量(进口变频仪分别为低速 10 Hz 和高速 25 Hz)和 3 种不同的叶高(30、60、90 mm)条件下,叶栅出口平面内的周向和径向流动速度值。由于叶栅中间截面的数值具有代表性,因此图 9 和图 10 分别截取了叶栅中间截面的

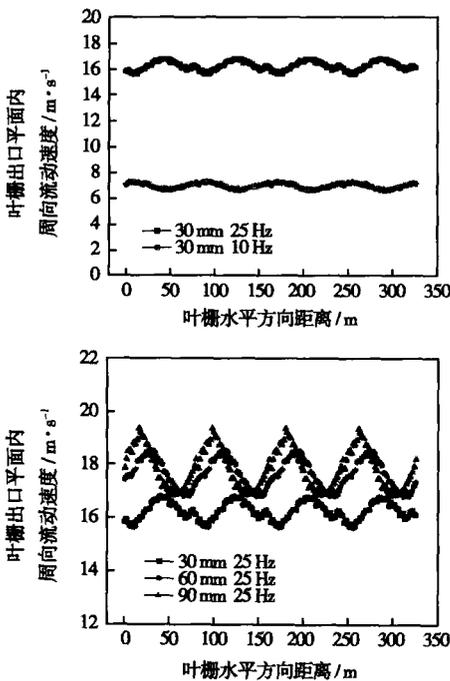


图 9 叶栅出口平面内周向流动速度( $v$ )

数据。由图可见,高速情况下(25 Hz)尾迹区较为陡峭,尾迹明显;而低速情况下(10 Hz)尾迹区较为平坦。这是因为流动速度(即气动负荷)大小是影响横向压力梯度(最终决定端部损失)的主要因素之一。其次,在较小的叶高下(30 mm),叶栅出口平面内周向流动速度较小,随着叶高的逐渐增加,周向流动速度相应增大。这是因为当叶高很小时,上下端部的

二次流汇合成一个较大的漩涡区,二次流损失的明显剧烈增加破坏了原有的流场结构,导致主流补偿运动的急剧增加以满足连续流条件,而它的方向与主流相反,因此明显降低了中间截面周向的流动速度。

图 10 示出了垂直叶栅出口平面的轴向速度图,同样可以得到高速情况下尾迹区较为陡峭,尾迹强度较大;而低速情况下尾迹区较为平坦。而在进口条件不变情况下,较低的二次流板间距(30 mm)具有较高的叶栅出口平面速度,这是因为在较小的叶高下二次流流动剧烈,叶栅损失迅速增加而破坏了顺序的流场结构,导致气流流动方向发生改变,引起垂直叶栅出口平面的速度增大的缘故。

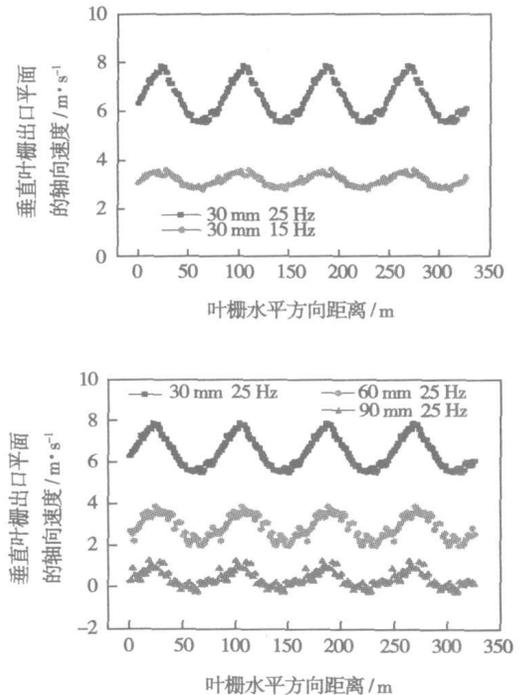


图 10 垂直叶栅出口平面的轴向速度( $w$ )

由于在中间截面上无法测得径向流动速度,因此每一个实验工况均选取中间截面上方 5 mm 处的径向流动速度值加以研究,如图 11 所示。图 11 说明较高进口流量和较小叶高条件下,叶栅出口平面内叶顶和轮毂的径向速度较大,对上述结论作辅助说明。

从上述实验结果得出的结论概括地说,叶高的减小和气动负荷(气流速度)的增加都会极大增加叶栅的二次流速度,其本质上都是叶栅横向压力梯度加剧所引起,反之则减小。这些情况下所增加的叶

栅端部损失应该引起重视。

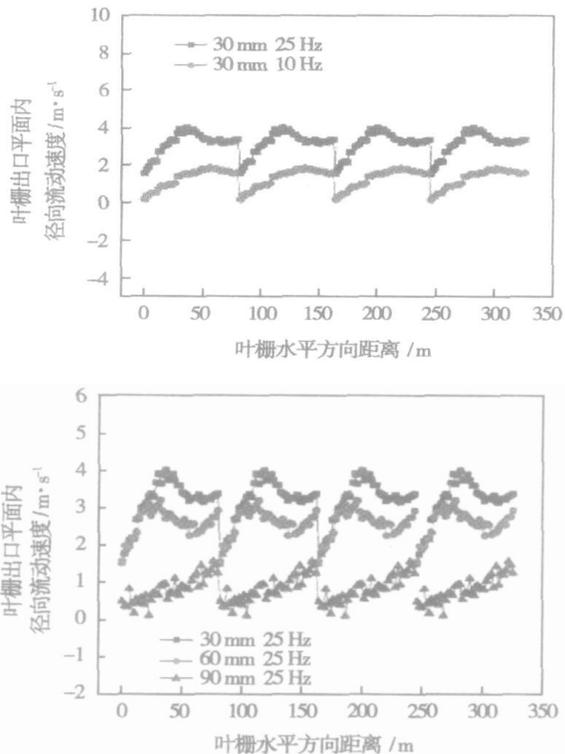


图 11 叶栅出口平面内径向流动速度图(u)

### 4 结 论

单斜丝测量技术在对于复杂的三元流场测量中

有着巨大的优势, 本文采用旋转单斜丝测量涡轮叶栅出口周期性三维流场, 在 2 种不同的进口流量和 3 种不同的叶高情况下, 得出叶片出口速度的散点分布, 研究发现:

(1) 较高进口速度下叶栅尾迹区陡峭, 尾迹明显, 二次流强度较大;

(2) 较小的叶高下二次流剧烈, 此时叶栅损失的迅速增加破坏了顺序的流场结构, 导致垂直出口平面的轴向速度(w)和叶栅出口平面内径向流动速度(u)的增大, 而主流补偿运动的急剧增加, 引起周向流动速度(v)的显著降低;

(3) 叶高的减小和气动负荷(气流速度)的增加都会极大提高叶栅的二次流损失, 本质上都是叶栅横向压力梯度的增大所引起。

### 参考文献:

- [ 1 ] JORGENSEN F E. How to measure turbulence with hotwire anemometers-a practical guide[M]. London: Academic, 2002.
- [ 2 ] SCHULTE V, HODSON H P. Unsteady wake induced boundary layer transition in high lift LP turbine[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 28-35.
- [ 3 ] 翁史烈. 燃气轮机[M]. 上海: 机械工业出版社, 1989.
- [ 4 ] 胡丹梅. 水平轴风机尾迹气动特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [ 5 ] 田 杰. 旋转单斜丝热线测量叶轮机出口流场[J]. 流体机械, 2003, 31(7): 25-28.

(编辑 何静芳)

## 新 能 源

# 大功率风力发电机

风力发电机组是风电系统的关键设备, 很多国家就风轮机的材料、结构、发电机控制技术、功率容量以及可靠性等展开研究, 其技术也取得了长足的进步。

主要技术表现在:(1) 单机功率逐步增大。20 世纪 80 年代中期, 商品化机组的单机功率只有 55 kW, 目前, 单机功率已达兆瓦级, 1 MW 以下的并网风力发电机组单机技术已经成熟;(2) 由于控制技术的改进、设计水平的提高以及新型材料的运用, 机组功率曲线改善, 运行可靠性不断提高, 故障率显著下降;(3) 运用先进的计算机控制技术, 能实现对机组的远程集中监控和通信, 从而可做到无人值守运行。美国格伦曼公司开发了一种带有扩散体的增强型风轮机。据测算, 当转轮直径达到 20 m 时, 发电电价可小于 3.1 美分/(kWh), 具有很强的竞争力。这种风轮机已在新西兰投入运行。目前, 单机容量 500 kW 的三翼刚性构造风力机组及集合型风力机组群有关技术是开发热点之一。

渐开线行星齿轮传动技术的发展 = **Latest Advances in Involute Planetary Gear Transmission Technology** [刊, 汉] / ZHU Zhen-rong, JIANG Li-dong, CHANG Shan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 351 ~ 356

The classification and specific features of planetary gears and the latest research findings concerning their transmission efficiency, uniform loading, vibration and noise abatement are described with the current research results of some scholars both at home and abroad being summarized. As to the calculation of their transmission efficiency, the method most widely used is based on transmission ratios. For some special structures, the use of certain specific methods may greatly simplify the calculation process. Regarding the research of uniform loading, outlined are several kinds of typical uniform-load mechanisms and research achievements of some Chinese and foreign academics. As for the research in vibration abatement and noise reduction of planetary gear transmission devices, mainly presented are the dynamic models and methods for solving dynamic responses. Finally, it is noted that major problems due for further research include: planetary gear transmission dynamics, low vibration and noise planetary-gear transmission units and the design of the above units in the high capacity category. **Key words:** involute, planetary gear, efficiency, uniform load, vibration, noise

单级轴流压气机周向槽与梯状间隙结构的对比 = **A Comparison of Circumferential Slot With Stepped Clearance Structure in a Single-stage Axial-flow Compressor** [刊, 汉] / LU Jia-ling, CHU Wu-li, LU Xin-gen (College of Power and Energy Source under the Northwest Institute of Technology, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 357 ~ 361

After the reliability of a calculation model has been verified, a numerical simulation for a single-stage subsonic axial-flow compressor was conducted of the working characteristics of a real wall casing, circumferential slot one and stepped clearance structure under the condition of 71% design speed. The simulation results show that both the circumferential slot casing and stepped clearance structure can enlarge the compressor stable operating range to a certain extent. However, the circumferential slot plays a more explicit role in controlling the blade tip leakage vortexes in the blade leading edge, thus making it more suitable to be designed at the front half portion of a blade flow passage. The stepped clearance structure can fulfil its due function of diffusion stabilization when located in both the front and rear half portion of the blade flow passage. When the above structure is allocated in the leading edge of a blade, the compressor will suffer a relatively large drop in efficiency. In case the clearance structure is located in the blade trailing edge, it can contribute to a reduction of the area of the separation zone in the blade wake, thus playing a beneficial role in enhancing compressor efficiency. **Key words:** axial-flow compressor, circumferential slot, stepped clearance structure, blade tip leakage vortex, wake

涡轮叶栅二次流的热线实验研究 = **Hotwire-based Experimental Study of Secondary Flows in Turbine Cascades** [刊, 汉] / LI Jun, SU Ming (Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 362 ~ 366

The periodical three-dimensional flow field at the outlet of a turbine plane cascade was measured by using rotary single-wire slanting hotwires and a mathematical solution to the three-dimensional speed average value was accomplished by using a least square fit of the hot-wire measured data with the help of the LSQNONLIN most optimized function of Matlab. A sub-sonic cascade test wind tunnel was set up to study the transient speed fields measured by hotwires at three different blade heights and two different inlet flow rates and analyze the secondary vortex flow conditions at the cascade outlet. By comparing different operating conditions of the cascade, it has been found that the cascade with a high inlet flow speed has a more conspicuous wake zone and more intensive secondary flows than those with a low inlet flow speed. The cascade with a relatively small blade height, however, has more drastic secondary flows, resulting in a quick increase of both radial flow speed ( $u$ ) in the outlet plane of the cascade and axial flow speed ( $w$ ) perpendicular to the outlet plane and a dramatic decrease of circumferential flow speed ( $v$ ) in the outlet plane. Both the decrease of blade height and the increase of aerodynamic load (speed) will greatly increase the secondary flow losses of the cascade, which can be substantially ascribed to an enhancement of transversal pressure gradient of the cascade. **Key words:** cascade, single-wire slanting hotwire, three-dimensional flow field measurement, secondary flow, blade height, turbine