

文章编号: 1000-8055(2000)03-0251-04

涡轮导向叶栅通道内紊流特性的实验研究*

董志锐 郭 涛 朱惠人 刘松龄

(西北工业大学 706 教研室, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文对一种高压涡轮导向叶栅中的紊流特性进行了实验研究。在雷诺数为 100000 的工况下, 采用二维热线对叶栅通道内垂直于叶高的平面内的平均速度, 脉动速度, 及雷诺切应力相关系数进行测量。并结合以前通过五孔针测量取得的流场进行了分析, 得出了该叶栅中紊流参数的变化规律。实验结果表明: 叶栅端壁区的紊流流动, 基本保持各向同性; 通道涡和马蹄涡内存在高紊流度和雷诺切应力的紊流核心。本实验结果与分析研究叶栅端壁换热特性奠定了基础。

关键词: 叶栅; 紊流; 实验

中图分类号: V 231. 2⁺ 1

文献标识码: A

1 引言

叶栅通道内的流动特性对于通道内换热特性有较大影响。相对于普通通道内的流动而言, 叶栅通道内的流场相当复杂。如文献[1]所示: 气流进入叶栅通道后, 由于周向存在由叶片吸力面到压力面逐渐增大的压力梯度, 叶栅端壁边界层内的气流由压力面侧向流向吸力面, 产生二次流动。端壁边界层以外的气流在此压力梯度作用下产生较强的通道涡。由于通道涡的存在, 在叶栅与端壁的夹角处还可能形成角涡。同时在来流边界层与叶栅前缘相遇处产生马蹄涡, 其压力面分支的旋向与通道涡相同, 并“扫”过叶栅通道端壁向吸力面运动, 最终与马蹄涡的吸力面分支汇合, 在吸力面上形成上攀运动。吸力面马蹄涡分支的旋向与通道涡相反, 始终沿叶片吸力面升高。

二次流对边界层附近的流动有相当大的影响, 通常认为, 气流进入通道后, 最初的边界层被通道涡卷起, 在马蹄涡压力面分支以后形成一个非常薄的新边界层。

文献[2]对低来流紊流度下叶栅中的流场进行了测试, 并采用不同方法对叶栅中的流动进行了流场显示。文献[3, 4]对来流高紊流度下对叶栅

中的流动特性进行了实验研究。为了取得确切的数据, 为涡轮端壁换热研究奠定基础, 本文在文献[2]的基础上对同一叶栅通道内的紊流特性进行了实验研究。

2 实验装置

本次实验是在西北工业大学航空发动机系大尺寸低速开式涡轮叶栅传热风洞进行。为便于观察, 风洞实验段由有机玻璃制成, 实验段内布有 5 个直立叶片, 组成实验叶栅, 测量通道位于第 2、3 叶片之间。叶栅相关参数: 有效出气角为 68° ; 叶片弦长为 205 mm, 轴向弦长为 122.1 mm, 叶高为 300 mm, 栅距为 160 mm。实验段结构见图 1,

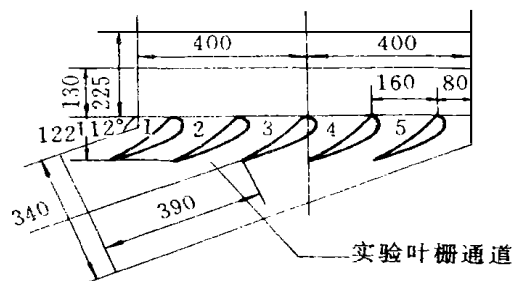


图 1 实验段示意图

收稿日期: 1999- 08- 03

修订日期: 1999- 10- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59476011); 航空基础科学基金资助项目(98C53027)

作者简介: 董志锐(1956-), 男, 博士, 教授, 西安市西北工业大学 706 教研室 710072

其中 X 为来流方向, Y 为叶高方向, Z 为叶栅通道内吸力面指向压力面的方向。探针坐标系中的 U, V, W 方向分别与 X, Y, Z 方向相对应。

本实验的来流雷诺数 $Re = 100\ 000$, 来流主流紊流度为 0.4%。来流雷诺数定义如下: $Re = V_0 C / \nu$ 其中: V_0 为来流速度; C 为叶片弦长; ν 为空气运动粘性系数。

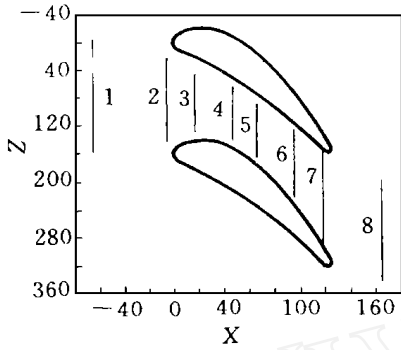


图 2 测量截面位置

实验的主要测量设备为 DANTEC 三维热线风速仪, 采用一个 X 型二维探头 (55P54) 分别在 8 个测量截面 (图 2) 的测点上上进行测量, 最低测点距端壁 3 mm。对于每一个测点, 其 XOZ 平面上的流场信息被采入计算机中, 经过数据还原, 相对于 X 方向和 Z 方向的平均速度分量 $\bar{U}$ 和 $\bar{W}$, 脉动量 $U_{ms} = \sqrt{\overline{U'^2}}$, $W_{ms} = \sqrt{\overline{W'^2}}$ 和雷诺切应力相关系数 $\overline{U'W'}$ 都可自动生成。为了减小因气流与探头夹角过大而产生的角度误差, 在 4~8 截面保持探头与 X 轴夹角为 68° , 即与叶栅的有效出气角相一致, 在数据还原过程中多做一步探头坐标系向实验坐标系转化以得到 X 和 Z 方向的分量。

3 实验结果及分析

测试结果中紊流参量用紊流强度和雷诺切应力相关系数来表示, X, Z 方向的紊流强度分别定义为: U_{ms}/V_0 和 W_{ms}/V_0 ; 雷诺切应力相关系数定义为: $\overline{U'W'}/V_0^2$, $-\rho \overline{U'W'}$ 是作用于 XOZ 平面内的雷诺切应力, 雷诺切应力相关系数能够反映其特性。

为了便于比较分析, 图 3 ($Re = 100000$) 给出了用五孔针测量获得的叶栅通道内三个截面的二次流图形。由图 3 可以看出: 在叶栅入口截面 ($X = 0.0\text{ mm}$) 通道涡已经开始形成, 并可观察到马蹄涡吸力面分支形成的小的涡流。比较 $X = 61\text{ mm}$ 和 $X = 122\text{ mm}$ 两个截面的二次流矢量图, 可以看

出: 通道涡的中心沿流动方向逐步向吸力面靠近。

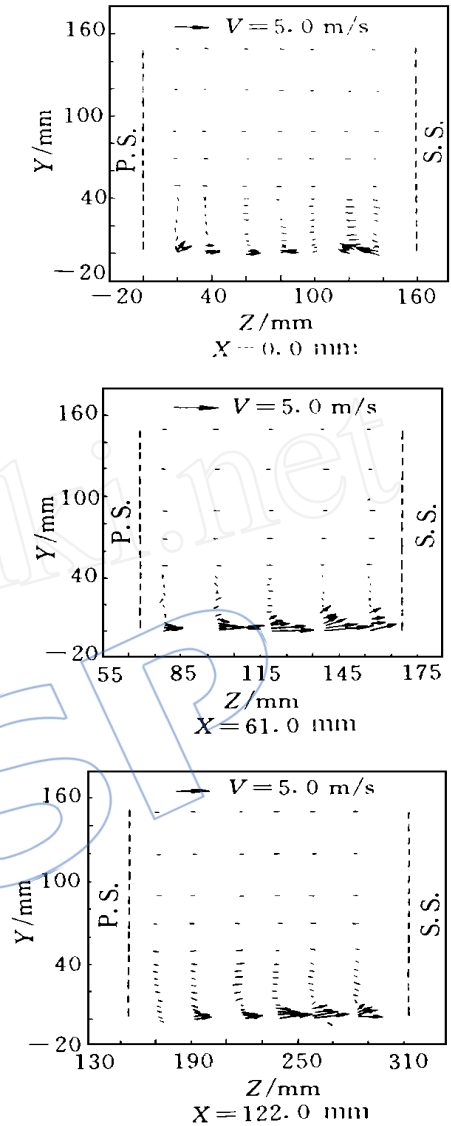


图 3 叶栅通道中二次流矢量图

第二截面位于栅前 9.1 mm 处, 在该截面马蹄涡已经开始形成。由图 4 可以看出 ((a), (b) intervals 0.02; (c) intervals 0.05): 马蹄涡的压力面分支和吸力面分支处紊流强度明显高于其他部位, $\overline{U'W'}$ 也相对较大。测量结果同时反映出: 第二截面仍保持来流边界层的基本形态。边界层厚度变化不大。边界层内紊流强度大于主流, 主流紊流强度不足 2%。图 4(c) 显示出靠近端壁 $\overline{U'W'}$ 变化比较大, 由于气流进入叶栅之前, 边界层内气流偏转较大, 加上马蹄涡的形成, 在近端壁区形成 3 个高 $\overline{U'W'}$ 核心。中间的一个高 $\overline{U'W'}$ 核心因气流流向压力面, 故数值为正, 且靠近压力面。相应的雷诺切应力 $-\rho \overline{U'W'}$ 为负。在该核心的上方一定范围内 $\overline{U'W'}$ 出现了小的局部负值区, 表明该处雷诺

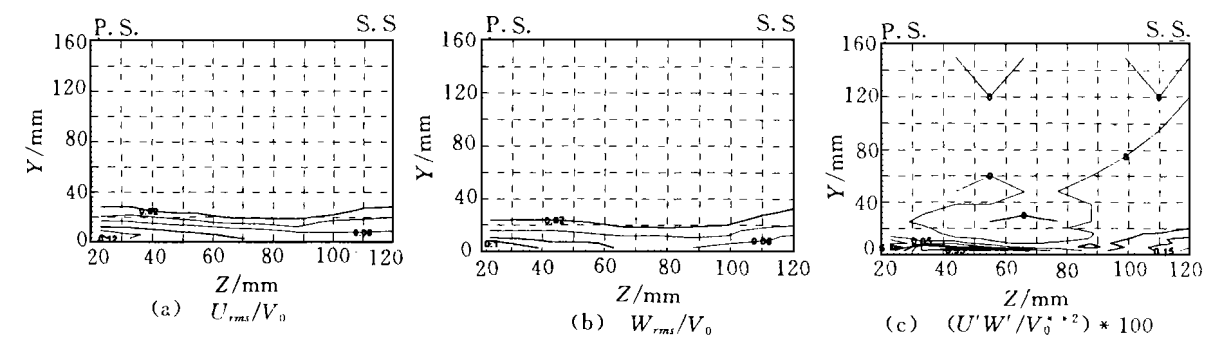


图 4 第二截面($X = -9.1 \text{ mm}$)紊流参数等值线图

切应力为正。主流区的雷诺切应力很小。靠近端壁处 $U W$ 的分布与边界层和涡附近气流的平均速度的速度梯度分布相关。

Y 方向影响范围较大。文献[2]中流场演示表明: 该位置在马蹄涡压力面分支与通道涡融合并在吸力面上形成分离线的起始位置附近, 紊流参数测量的结果与此一致。 $U W$ 在整个三维流动区内为负值, 即 $-\rho U W > 0$, 这一点可由吸力面至压力面逐渐减小的速度分布来解释。

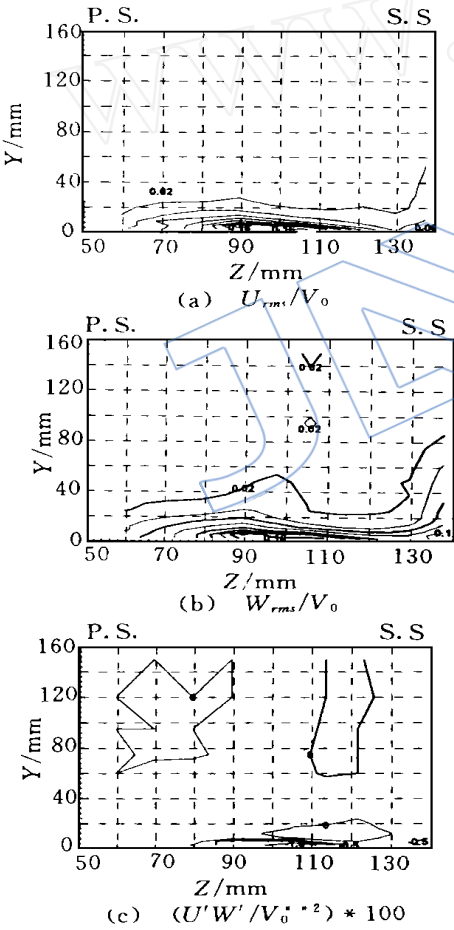


图 5 第四截面($X = 46.6 \text{ mm}$)紊流参数等值线图

在第四截面(图 5(a), (b) intervals 0.02; (c) intervals 0.5), 通道涡核心处存在紊流强度核心, 该核心由压力面向吸力面运动, 并略有上升。这与在压差作用下, 通道涡向吸力面运动的趋势相吻合。吸力面与端壁夹角处也存在一个紊流核心, 在

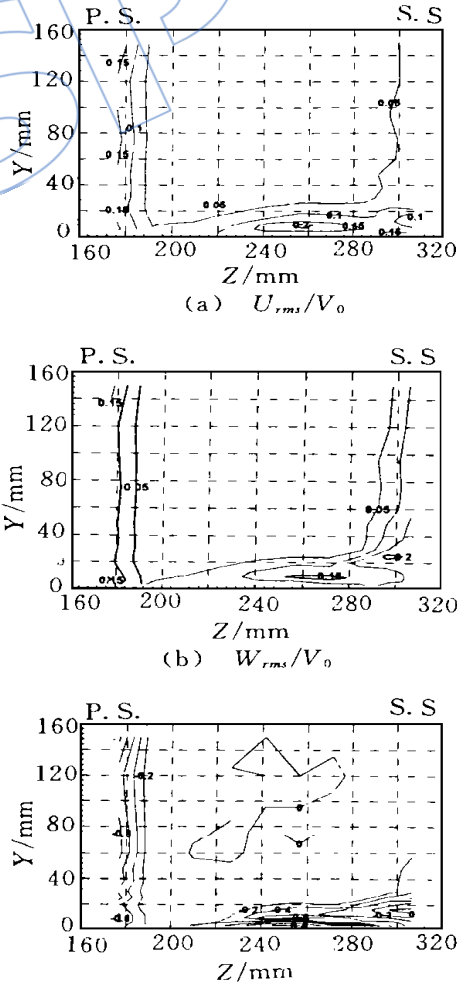


图 6 第七截面($X = 118.2 \text{ mm}$)紊流参数等值线图
第七截面(图 6(a), (b) intervals 0.5; (b)

0.05; (c) 0.2) 位于叶栅出口之前 3.4 mm 处, 通道涡紊流核心继续向吸力面移动, 并脱离端壁向上运动, 在距吸力面 15~30 mm 范围内有一紊流核心, 该核心为马蹄涡的吸力面分支与压力面分支融合后沿吸力面的发展, 其位置有显著的升高, 这一涡的上升运动在吸力面根部形成一个三角区域. 在该截面, 叶片的压力面与吸力面均出现了比较厚的紊流边界层, 边界层厚度均匀, 压力面上的紊流强度达到 15%。 $U'W'$ 在大部分区域内较小且为负值, 但在端壁附近有一个核心, 其值为正, 在它的上方有一个数值为负的核心, 这个核心是通道涡的紊流核心。

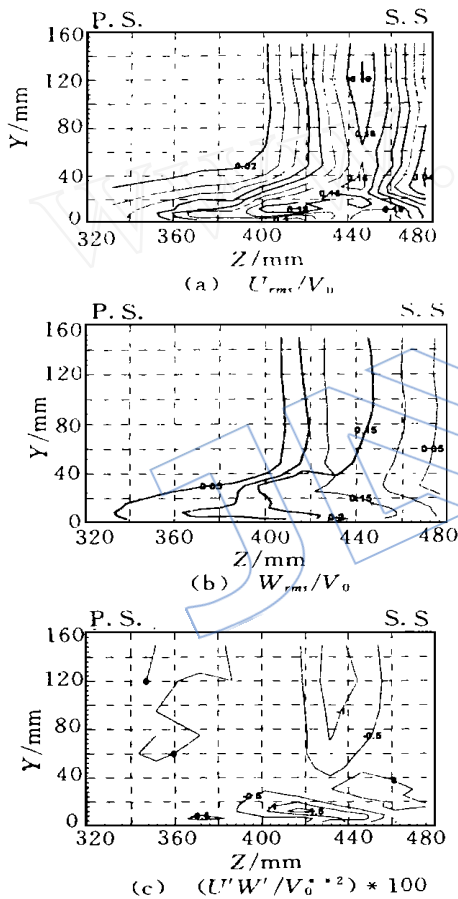


图 7 第八截面($X = 166.6 \text{ mm}$)紊流参数等值线图

第八截面(图 7(a), (b) intervals 0.02; (b) 0.05; (c) 0.5) 位于叶栅下游, 尾迹对于紊流强度及雷诺切应力相关量的影响相当大, 由于吸力面气流与压力面气流的剧烈掺混, 在通道涡的紊流核心上方存在一个紊流强度很大的区域, 在叶高方向涉及整个测量范围. 切应力相关系数也呈现此规律, 但相应区域内为负值. 同时也可看出通道涡在惯性作用下一直运动到叶栅的下游。

4 结 论

(1) 现有实验结果表明: 叶栅端壁区的紊流流动基本保持各向同性的性质。

(2) 通道内主流紊流强度很小, 接近来流紊流强度, 但在通道涡及马蹄涡的核心处, 其紊流强度及雷诺切应力明显高于其他区域, 这些区域是造成叶栅内部流动损失的主要区域, 并增大了紊流动能. 其位置随涡的位置的改变而改变。

(3) 通道涡和马蹄涡紊流核心的紊流强度峰值沿流动方向逐步增强, 从 10%~20% 左右。

(4) 雷诺切应力相关系数在通道涡的核心处始终小于 0, 即雷诺切应力为正, 这使得通道涡核心处的气流不断从时均运动中获取能量, 并转化为紊流动能。

(5) 叶栅尾缘之后, 气流剧烈掺混, 造成一个沿叶高方向的高紊流区, 在 $Re = 100\ 000$ 时, 最大紊流强度可达 18%。

(6) 叶片表面的流动在进入紊流状态后, 紊流强度迅速提高, 直至叶栅出口, 其紊流强度接近端壁表面紊流强度。

参 考 文 献

- 1 Chen P H, Goldstein R J. Convective Transport Phenomena on the Suction Surface of a Turbine Blade Including the Influence of Secondary Flows Near the Endwall[R]. ASME Paper 91-GT-35, June 1991
- 2 董志锐, 刘松龄, 张玉金, 许都纯. 涡轮叶栅端壁区流动的实验研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 197-202
- 3 Gregory-Smith D G, Cleak J G E. Secondary Flow Measurement in a Turbine Cascade with High Inlet Turbulence[J]. Trans ASME, Journal of Turbomachinery, 1992, 114: 173-183
- 4 Moore H, Gregory-Smith D G. Loss Mechanism and Unsteady Flows in Turbomachines[R]. AGARD-CP-571, January 1996

(责任编辑 杨再荣)

(英文摘要转第 259 页)

通的潜力,则随着齿数的增加,密封能力几乎可以按倍数相应增加(单个齿平均密封能力有很小的下降)。否则,齿数的增加并不能带来密封能力的相应增加。因此,在其它结构参数确定后,存在一个完全发挥密封装置能力的最小齿数;

(8)密封装置参数间匹配关系非常密切,需对其参数间匹配关系进行研究,这对整个装置结构参数总体优化十分重要。

同时,也表明了不考虑永磁体和磁极靴的合理匹配而认为永磁体越大、极靴齿数越多密封能

力越强是对磁流体密封的误解。

参 考 文 献

1 孙雨施,王素菊,曲民兴,沈世尧 直流磁系统的计算与分析 [M] 北京:国防工业出版社,1987
2 池长青,王之珊,赵丕智 铁磁流体力学[M] 北京:北京航空航天大学出版社,1993
3 赵国伟,池长青,王之珊 矩形齿磁流体密封装置的磁场计算 [J] 北京:北京航空航天大学学报,2000:

(责任编辑 王震华)

The Effects of Structural Parameters
on Sealing Performance of Magnetic Fluid Seal

Zhao Guowei, Chi Changqing, Wang Zhishan, Wang Guangzhen

(College of Mechanical Engineering and Automation

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The effects of structural parameters on the performance of magnetic fluid seal are researched on the basis of magnetic field analysis. The parameters include seal gap, structural parameters of pole tooth, structural parameters of permanent magnet and the number of teeth on the pole. In the process of magnetic field analysis, magnetic field method and unequally spaced net finite difference method are used to obtain accurate data. A qualitative explanation to the data is given by magnetic circuit analysis. In order to testify the theoretical research, an optimized magnetic fluid seal has been designed and tested. The experiment results show that the weight and size of the optimized seal are reduced by more than 50 percent.

Key words: magnetic fluid; structural parameter; sealing

(The Chinese text of the following abstract is printed in PP251- 254)

Experimental Investigation
of Turbulence Characteristics in a Turbine Vane Cascade

Dong Zhirui, Guo Tao, Zhu Huiren, Liu Songling

(7th Dept Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The characteristics of turbulent flow in a high pressure turbine cascade were investigated experimentally. The mean velocity, fluctuating velocity and the correlation factor of Reynolds shear stress were measured by means of two-dimensional hot wire, within the several pitch/streamwise planes. The test Reynolds number based on the incoming flow and the blade chord was 100000. The measured results were analyzed in conjunction with the flow fields mapped by using five-hole probe. In result, the distribution of turbulence parameters in the passage of cascade was found. The experimental results show that the turbulent flow near the end wall of the turbine cascade is to be fairly isotropic. There are turbulence cores within the passage vortex and horseshoe vortex, in which the turbulence intensity and Reynolds shear stress are quite high.

Key words: cascades; turbulence; experiments