

文章编号: 1000-8055(2004)04-0455-04

## 涡轮级轮缘封严内非定常流场的准三维LDV测量

马宏伟<sup>1</sup>, Dieter E Bohn<sup>2</sup>, Achim Decker<sup>2</sup>, Bernd Rudzinski<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083;

2 Institute of Steam and Gas Turbine, Aachen University)

**摘要:** 研究涡轮级封严内流动和主流的相互作用、相互影响, 进一步认识盘腔内燃气入侵等非定常现象, 急需流场实验数据验证。针对轮缘封严内空间狭窄、光路安排困难等问题, 本文发展了一种用于测量涡轮级轮缘封严内非定常流场的准三维LDV技术, 即测量分两步, 首先在机匣上安置二维测速系统用符合方式测出径向、切向速度及湍流度, 再在轮毂内安置一维探头重复测量, 从两次测量数据中计算出轴向速度; 该技术借助锁相采样等技术能测出不同动静叶相对位置情况下封严及盘腔内的周期性非定常流场细节, 本文给出了部分典型的动态流场测量结果。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 涡轮; 轮缘封严; 非定常流场; 准三维LDV测量

**中图分类号:** V 211.15

**文献标识码:** A

## Quasi-3D LDV Measurements of Unsteady Flow Field in a Rim Sealing of a Turbine Stage

MA Hong-wei<sup>1</sup>, Dieter E Bohn<sup>2</sup>, Achim Decker<sup>2</sup>, Bernd Rudzinski<sup>2</sup>

(1. School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Institute of Steam and Gas Turbine, Aachen University)

**Abstract:** Experimental flow data are urgently necessary to study interaction between the sealing flow and main flow in a turbine stage as well as the unsteady flow phenomena of hot ingestion in a disk cavity. However, there are many difficulties in measurements such as light path arrangements due to the narrow space in a rim sealing. Having worked out a lot of technique problems, this paper reports quasi-3D LDV measurements of unsteady flow field in a rim sealing of a turbine stage. The measurements were taken in two steps. First, radial and tangential velocities as well as turbulence intensities were measured using two-dimensional LDV probes put on the casing, then the measurements were repeated by one LDV probe put in the hub. Axial velocity of the flow was calculated from the two sets of data. With the help of a phase-locked technique, the periodically unsteady flow field in both a rim sealing and a disk cavity can be disclosed at different rotor-stator relative positions. This paper presents some typical results of the unsteady flow field.

**Key words:** aerospace propulsion system; turbine; rim sealing; unsteady flow field; quasi-3D LDV measurements

**收稿日期:** 2003-08-11; **修订日期:** 2003-11-27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50376002)

**作者简介:** 马宏伟(1968-), 男, 山东苍山县人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院副教授, 博士, 主要从事叶轮机内流场实验研究

现代航空燃气涡轮发动机高压涡轮级盘腔内通有冷却空气,用于降低涡轮盘的热负荷,阻止主流的高温燃气进入盘腔。涡轮盘的冷却效率和转子盘寿命强烈地依赖于封严效率。有资料证明,盘腔内燃气入侵增加 1%,足以减少高压涡轮转子寿命 50%。另一方面,减少轮缘封严冷气量 50%,能增加涡轮效率 0.5%。因而优化轮缘封严几何形状,优化涡轮盘腔冷气量对提高航空发动机总体性能是很重要的一个方面。

计算流体力学和计算机技术的飞速发展开展相关研究提供了很好的条件,但由于该流动问题极其复杂,表现为强三维性、非定常性和有旋性,同时存在传热、流固耦合等问题,给准确的计算分析带来很大困难。在工程计算中为便于分析,不得不采用一些简化的模型。这些模型是否适用以及计算结果是否正确,迫切需要反映涡轮盘腔内三维非定常流场的实验数据进行验证。为了通过实验研究涡轮级封严内流动和主流的相互作用、相互影响,进一步认识燃气入侵等非定常现象,本文发展了一种用于测量涡轮级轮缘封严内非定常流场的准三维LDV 技术。

1 试验台和准三维LDV 测量方案

为开展涡轮级轮缘封严技术的实验研究,Aachen 大学专门建有一座 1.5 级的涡轮试验台,设计转速 900 r/min。图 1 是实验段的子午剖面。

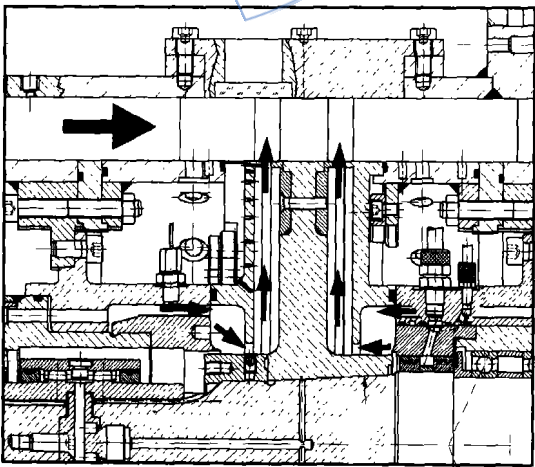


图 1 实验段子午剖面  
Fig 1 Cross section of test rig

一个可提供 6 kg/s 流量的压气机组提供热气体,通过静子后吹动涡轮转子,其轴输出功由一个涡流测功器吸收。另外一个独立的压气机提供冷却空气,引入涡轮盘腔内。两个流量都由单独的流量

计测量。涡轮进出口静压、总压和总温由压力探针和热电偶测定。各种参数测量都通过计算机综合数据采集系统完成,并实时显示,通过涡轮试验台控制台,调整涡轮的试验状态。

试验涡轮两排静子都有 16 个叶片,转子有 32 个叶片。第一级静子和转子与 M T 1 级的叶型相对应,图 2 给出了叶型及一种封严的几何形状。涡轮盘前、后腔及封严型式都易于更换,便于各种封严型式的实验测量。

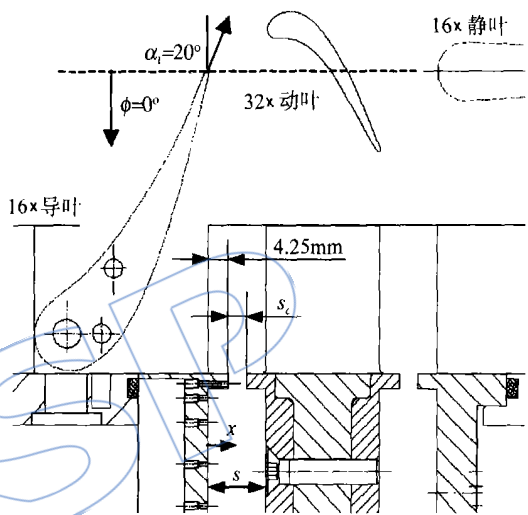


图 2 叶型及试验封严的几何形状  
Fig 2 Blading and seal geometry

测量研究涡轮级轮缘封严及盘腔内的三维非定常流场是非常困难的,主要原因之一是空间狭窄,图 2 所示的封严轴向间隙仅有 4 mm,接触式测量技术,如热丝、压力探针技术几乎无能为力,因为插入式测量不可避免地破坏原来的流场,测量结果不能反映真实情况。即使采用非接触测量技术,如 PIV、LDV 等光学手段,也存在光路安排、失踪粒子播放和测量盲区等具体问题。而转子叶片及轮盘的高速旋转更增加了测量安排的困难。采用三维 LDV 技术无法直接测到盘腔内较深的区域。在这种情况下,本文提出了用准三维 LDV 技术测量涡轮轮缘封严内非定常流场的实验方案,即测量分两部分完成,首先测量切向速度和径向速度,再相应地测量出轴向速度。

为完成第一部分测量任务,光路安排如图 3 所示。两个激光探头安装在坐标架上,而坐标架固定在机匣上,参见图 4。探头能沿切向、径向和轴向改变测量位置。试验台机匣开有 2 个激光测量窗口,涡轮机匣可部分转动,便于改变周向测量位

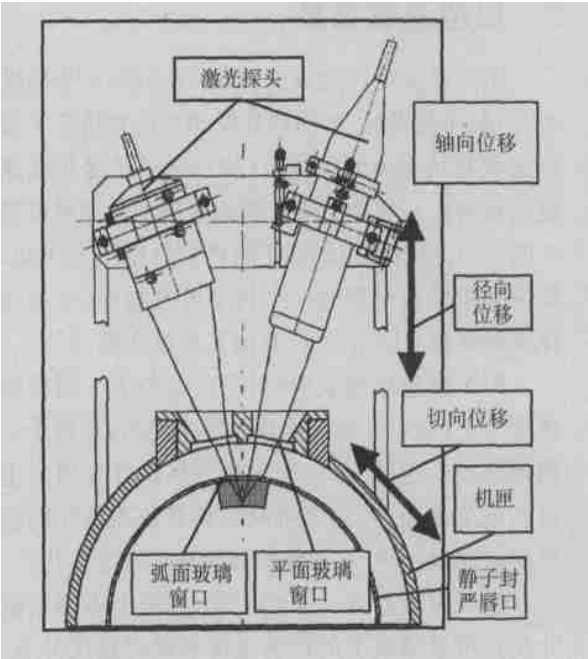


图 3 同时测量切向和径向速度的实验方案

Fig 3 Scheme to measure tangential and radial velocities

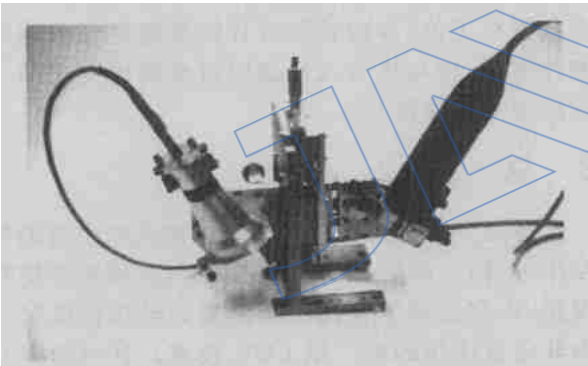


图 4 固定在机匣上的位移机构及激光探头

Fig 4 Traverse mechnism and LDV probes fixed on the casing

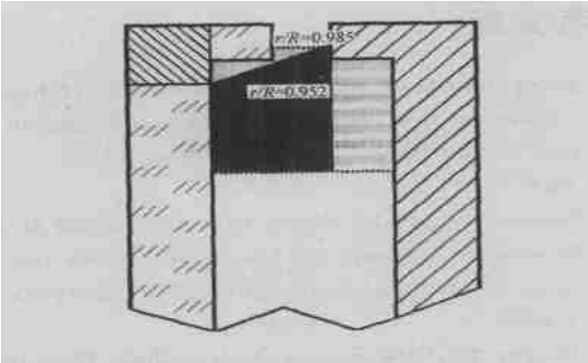


图 5 测量窗口及测量区域

Fig 5 Measuring window and measured area

置。封严在静子一侧的唇缘部分地用玻璃制成,以

扩大测量区域,参见图 5。

第二部分测量难度较大,因为激光探头不得不安置于轮毂和轴承室之间的拥挤空间里,如图 6 所示,探头安装在一个专门设计的位移机构上,通过控制步进电机改变探头的轴向或切向测点位置。由于空间限制没有设计安装径向位移电动系统,在实验中无法改变径向测量位置,只能在开车前打开机器调整径向测量站。静子轮盘上开有激光测量窗口,用光学玻璃制成,参见图 5 及图 6。

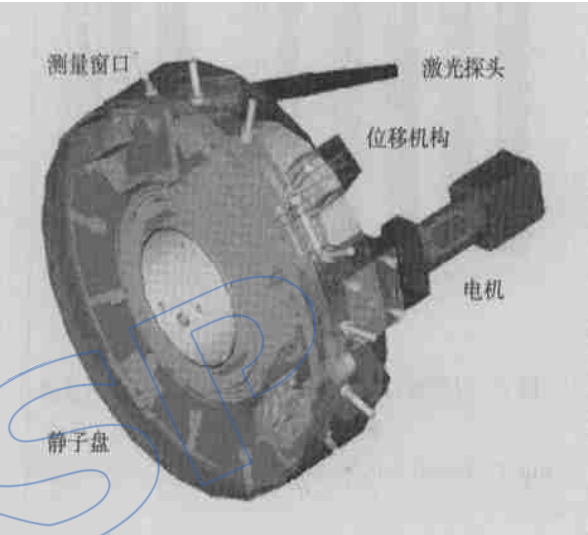


图 6 安置于轮毂内的位移机构及激光探头

Fig 6 Traverse mechanism and LDV probl settled in the hub

为保证两次测量测点的空间位置相同,专门设计了激光焦点检测工具。在此基础上,可利用数学工具获得准三维的速度场。

主要的激光测量系统采用 Dantec 公司的产品, Dantec BSA 信号处理器, Dantec Fibre Flow 光学系统单元, 60 mm 和 12 mm 激光探头。信号处理器内的测量数据在 BSA 系统软件的控制下通过 GPB 接口由数据采集器采样进入计算机。利用美国 TSI 公司提供的雾化器对 Shell Ondina 油进行雾化,产生的烟雾作为示踪粒子,加到涡轮盘冷却气体的入口,对被测流场几乎没有影响。

受动静叶相互干扰的影响,涡轮级轮缘封严内流场存在固有的非定常性和周期性。认清此类流动现象应采用锁相采样技术。本文借助轴编码器和数据采集控制系统,将转子一周的周向位置平均划分为 384 区,并根据设定的初始相对位置予以标号,采集到的非定常激光多普勒信号分别对应着相应的周向位置。在动静叶相对位置的一个周期内,平均划分了 12 个时间步,用来分析动

静叶非定常干扰对燃气入侵的影响

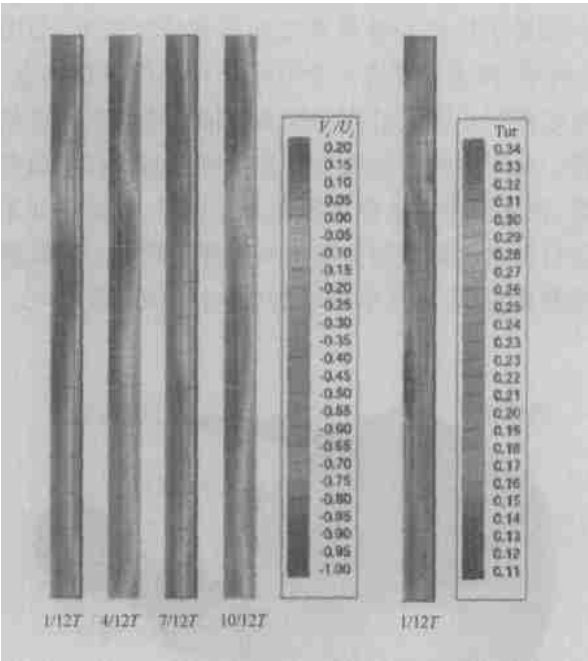


图 7 封严唇口内  $r/R = 0.985$  截面上的径向速度  
和径向湍流度分布

Fig 7 Radial velocity and turbulence in  $r/R = 0.985$

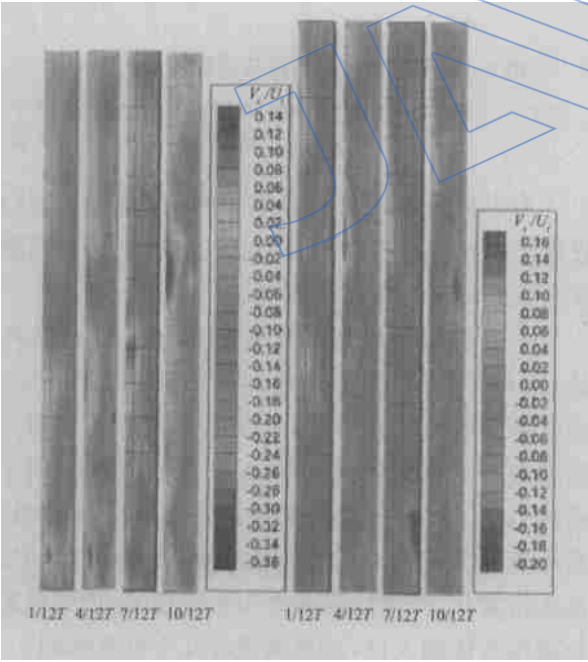


图 8 盘腔内  $r/R = 0.952$  截面上的径向速度  
和轴向速度分布

Fig 8 Radial and axial velocities in  $r/R = 0.952$

测量径向和切向速度时采用符合方式, 确保测量结果的真二维性。由于原有的数据处理软件不能满足本项目研究分析的需要, 在认识其原始数据结构的基础上重新编制了数据处理软件。

2 典型测量结果

图 7 是在封严唇口内  $r/R = 0.985$  ( $R$  为轮缘半径) 截面测得的, 不同动静叶相对位置情况下径向速度和径向湍流度分布(均用转子轮缘切线速度无量纲化), 测量面最左侧距离静子封严唇口壁  $0.65\text{ mm}$ , 最右侧距离转子封严唇口壁  $0.15\text{ mm}$ , 周向测量截面则跨越 2 个转子叶片栅距, 冷却气体流量系数  $C_w = 20000$ , 其定义参见文献[2]。

图 7 测量结果表明, 封严口近静子一侧径向速度为正, 说明冷却气体从盘腔中流出, 近转子一侧局部径向速度为负, 证实热气体从叶片通道主流入侵至盘腔内, 该区域同时具有较高的径向湍流度, 并随转子叶片的旋转而周期性发生变化。

图 8 为盘腔内  $r/R = 0.952$  截面上不同动静叶相对位置情况下的径向速度和轴向速度分布, 轴向和周向测量站安排与图 7 相同, 但距离转、静子盘较远, 参见图 5 所示的测量区域。与图 7 的测量结果表明, 径向速度值明显减小, 动静叶片的周期性影响仍然可见, 但明显减弱。轴向速度局部出现负值和正值, 并随转子叶片的旋转呈现弱的周期性变化, 这与热气入侵盘腔及盘腔内存在的二次流动等现象有关。

3 总 结

通过实验研究涡轮级封严内流动和主流的相互作用、相互影响, 进一步认识燃气入侵等非定常现象, 本文发展了一种用于测量涡轮级轮缘封严内非定常流场的准三维 LDV 技术。针对研究对象、实验台和测试条件等情况, 制定测量方案, 解决了相关的技术难题。试验结果表明, 该技术方案是可行, 对类似课题的研究具有参考价值。

参考文献

[1] Smout P D, Chew J W, Childs P R N. ICA S-GT: A European Collaborative Research Program on Internal Cooling Air Systems for Gas Turbines[R]. ASME Paper No. GT- 2002- 30479.

[2] Bohn D, Decker A, Ma H, et al. Influence of Sealing Air Mass Flow on the Unsteady Hot Gas Ingestion in the Upstream Cavity of a 1.5-Stage Turbine[R]. ASME Paper 2003- GT - 38459.

[3] Hongwei Ma, Haokang Jiang, Qingguo Zhang. Three-Dimensional Unsteady Flow Field Due to Rotor-Stator Interaction in the Tip Region of an Axial Compressor Stator Passage[R]. ASME Paper 2001- GT- 597.