

透平叶栅二次流瞬态特性试验及动力学分析

王顺森, 毛靖儒, 刘观伟, 丰镇平
(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 基于作者提出的片光跟随主流偏移的新测试方法, 成功对后加载环形叶栅的二次流瞬态流场进行了试验研究, 通过实测瞬态矢量场定量展示了二次流的强烈非定常性. 试验结果表明, 随着气流速度的增大, 通道涡更靠近吸力面和端壁, 而其流线结构也更加不稳定, 在同一区域常常存在分叉与不分叉、多次分叉与一次分叉交互出现的非定常现象. 基于对通道涡流线结构的涡动力学及其物理本质的分析, 认为其流线结构取决于局部压力梯度和正、负耗散区的竞争, 在各种抑制二次流措施的基础上, 若能一直保持通道涡为不稳定焦点结构, 将可以进一步减少二次流损失.

关键词: Hopf 分叉; 非定常流; 二次流测试; 透平叶栅

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0010-05

Transient Performance Test and Dynamics Analysis of Secondary Flow in Turbine Vane Cascade

WANG Shunsen, MAO Jingru, LIU Guanwei, FENG Zhenping
(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the authors' new measurement method, the second laser light sheet is modulated to trace the motion of particles and main flow, the secondary flow instantaneous vector field is measured in aft-loaded annular cascade of turbine, and strong unsteady evolution of vortex is found and shown quantitatively. The results indicate that one Hopf bifurcation and unstable limit cycle appear in the vortex core of local channel diffusion area, and the streamline structure of channel vortex belongs to the unstable focus in other areas. The analysis results of vorticity aerodynamics and physical nature of the channel vortex indicate that the streamline structure is determined by the contest between pressure gradient and positive or negative dissipation. Moreover, even though different kinds of method to restrain secondary flow have been taken, the flow loss can be further reduced if the streamline structure of channel vortex is kept the unsteady focus.

Keywords: Hopf bifurcation; unsteady flow; secondary flow measurement; turbine vane cascade

透平叶栅内的二次流主要由通道涡、马蹄涡、角涡、诱导涡和尾迹涡等组成^[1]. 现有文献表明, 马蹄涡的产生位置、强度和涡对数量具有强烈的非定常特性^[2-3], 而叶栅的弯曲通道也具有诱发不稳定 Görtler 涡的条件^[4]. 此外, 尾迹涡在流向和展向上均具有绝对不稳定性^[5]. 对于这些不稳定旋涡与通道涡、角涡、诱导涡等的相互作用是否会引起整个二次流系的非定常演化问题, 还很少有文献报道. 目

前, 国内外许多学者通过持续的研究, 建立了各种各样的叶栅二次流模型. 然而, 因受测试技术条件的限制, 涡系的非定常特性很难直接测量, 所以这些模型都是定常的. 另外, 对二次流涡系演化过程物理本质的认识也并不完善, 急待高水平试验测试和分析方法的发展.

本文首先对叶栅二次流涡系结构演化的物理本质进行了新的探究和诠释, 并基于作者提出的二次

流测试新方法,对叶栅出口附近的次流瞬态流场进行了系统的测量,首次通过实测矢量场定量展示了二次涡的强烈非定常性,随后进一步使用涡动力学方法对试验结果进行分析,提出了一些对二次涡瞬态特性的新观点。

1 通道涡演化的动力学特性探索

通道涡在本质上就是一对旋向相反且轴向速度分量远超过其他速度分量的旋拧涡^[5],而通常我们所讨论的通道涡只是旋拧涡在垂直于主流截面上的投影。

叶栅通道的横向压力梯度是通道涡产生的根源,它首先驱使边界层流体从压力面向吸力面的次流运动,并在吸力面与端壁结合处堆积。此外,在剪切力的作用下,端壁边界层的横向运动也驱使邻近的主流向吸力面运动,并在主流中产生与边界层相反的涡量。该涡量使主流直接卷起形成通道涡,而不是在吸力面上滞止,并且通道涡在吸力面附近的次流速度高于边界层,从而进一步驱使边界层向叶片中部流动。这种通道涡与边界层的相互作用贯穿通道涡的整个发展过程。由此可见,通道涡像一个储能器,它从负耗散区(即边界层中横向运动速度高于通道涡外缘速度的区域)吸收能量,而对正耗散区释放能量,最终驱使更多的边界层低能流体沿吸力面向叶栅中部流动。在紧邻端壁处,横向运动速度沿远离壁面方向增加,而从次流速度最大处到通道涡涡心则刚好相反,这说明从壁面到涡心的速度分布存在拐点。参照相关文献中与此速度剖面类似的旋拧涡的稳定性分析,可以定性地判断该流动对轴对称扰动和螺旋扰动均存在不稳定区^[5],即通道涡具有非定常涡的条件。

旋涡的流线结构是其空间演化的结果,将叶栅二次流截面流线方程在涡心 C 的邻近区域进行泰勒展开,并略去二阶以上各项,然后根据常微分方程的定性分析理论,设

$$\left. \begin{aligned} J &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_c \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_c - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_c \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_c \\ \Delta &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_c + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_c \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

若 $\Delta^2 - 4J < 0$, 则流线方程的解必有 2 个共轭复数根,使得涡的流线为螺旋线^[6]。当 $\Delta < 0$ 时,截面流线在 C 点附近为稳定焦点,即流线由外部指向涡心;当 $\Delta > 0$ 时,截面流线为不稳定焦点,其流向相反。结合 N-S 方程,得到 Δ 的分析式

$$\Delta = \frac{1}{w_c} \left\{ \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right)_c - v(\nabla \cdot (\nabla w))_c \right\} \quad (2)$$

式中: $\partial p / \partial z$ 是沿涡轴方向的压力梯度; $(\nabla \cdot (\nabla w))_c$ 是涡轴附近的速度梯度的散度, $(\nabla \cdot (\nabla w))_c > 0$ 表示速度梯度在向外扩散。基于上面的分析,通道涡的流线结构取决于压力梯度和涡量的耗散。由此可知,端壁边界层对通道涡外缘质点的加速将使 $(\nabla \cdot (\nabla w))_c < 0$, 因此通道涡在形成初期必为不稳定焦点结构,随后其流线结构取决于压力梯度和正、负耗散区的竞争。在叶栅中,加速流体对涡的拉伸、吸力面正耗散区及涡自身的耗散都将使流线向稳定焦点结构演化,而端壁负耗散区为通道涡不断注入的涡量则是其向不稳定焦点结构演化的主要动力。在研究中也经常能看到通道涡出现连续的 Hopf 分叉现象^[7]。

从能量损失的角度考虑,我们认为若通道涡一直保持不稳定焦点结构,能最大程度地减少二次流损失。这是因为在同样的环境下,稳定焦点的涡心压力必然低于不稳定焦点的压力,当然损失也更大。此外,稳定的通道涡因流线指向涡心而易引起吸力面的低能流体与壁面分离,甚至将其卷入涡核造成掺混损失,而不稳定焦点涡则能在壁面附近形成局部的正压梯度,并驱动低能流体向叶高中部延伸。当然,涡的流线结构并非影响二次流的惟一因素,涡的空间大小和强度对能量损失也有重要影响,例如通过叶片正弯曲^[7]或翼刀技术^[8]能够减小通道涡空间的尺寸,而壁面抽吸^[9]和非轴对称端壁技术^[10]也能有效降低通道涡的强度。在此基础上通过叶栅型线的控制,使得通道涡一直保持不稳定焦点结构,将是进一步减少叶栅损失的主要方向。

2 瞬态二次流场测量结果及分析

基于作者提出的片光跟随主流偏移测量二次流的方法^[11],在环形叶栅试验台上对如图 1 所示的后加载叶栅出口斜切区内多个截面的二次流场进行了测量。测量截面 a 、 b 和 c 均垂直于中叶展处的流道中线,且与吸力面的交点分别是 $z = 27.5 \text{ mm}$ 、 $z = 29.5 \text{ mm}$ 和 $z = 31.5 \text{ mm}$ 。在测量中,第二束片光沿主流方向相对第一束片光偏移 1.2 mm 。叶栅展弦比为 1.25 。

图 2~图 4 分别是出口马赫数为 0.3 时截面 A_1 、 A_2 和 A_3 中靠近叶栅上端壁区域的二次流场及流线图,图 5~图 7 是马赫数为 0.4 时的测量结果,对每个工况均给出了 2 个不同瞬态的典型流场。图

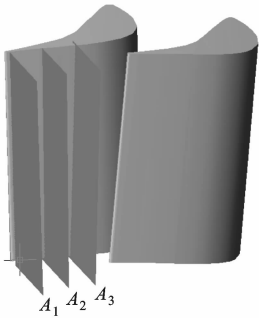
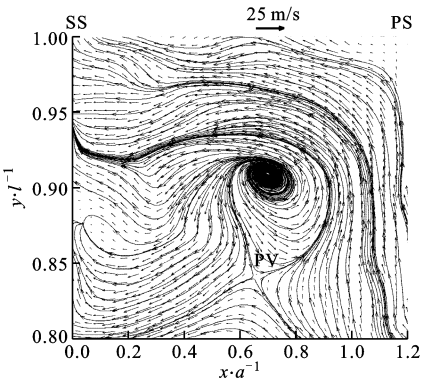


图 1 环形叶栅及测量截面示意图

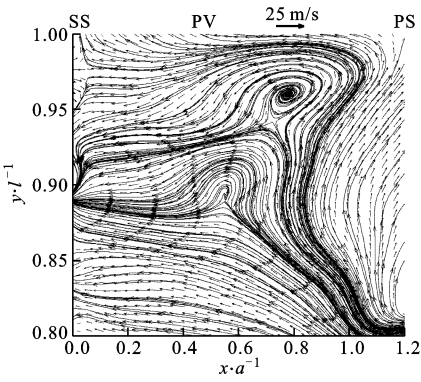
中:PS 为压力面,SS 为吸力面,PV 为通道涡,S 为鞍点,WV 为壁涡或诱导涡,CV 为角涡; x 为到吸力面的距离, a 为叶栅喉部宽度, y 为沿叶高方向到叶根的距离, l 为叶栅总高度. 由各图可以看到:

(1)叶栅出口斜切部分的二次涡结构非常复杂且具有强烈的非定常性,旋涡的流线结构、强度和尺度在不同瞬态均有较大的差异,随着叶栅出口马赫数 Ma 的提高,涡的强度增加很快;

(2)当 $Ma=0.3$ 时,通道涡的中心处于 $x/a=0.6\sim 0.8$ 、 $y/l=0.85\sim 0.95$ 之间,而当 $Ma=0.4$ 时,通道涡的中心处于 $x/a=0.4\sim 0.5$ 、 $y/l=0.90$

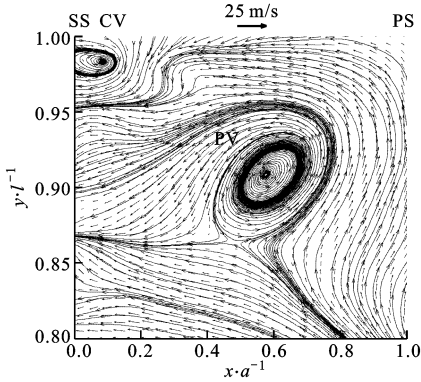


(a)瞬态 1

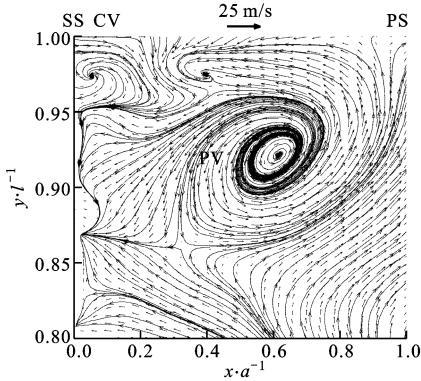


(b)瞬态 2

图 2 $Ma=0.3$ 时截面 A_1 的二次流场和流线分布图

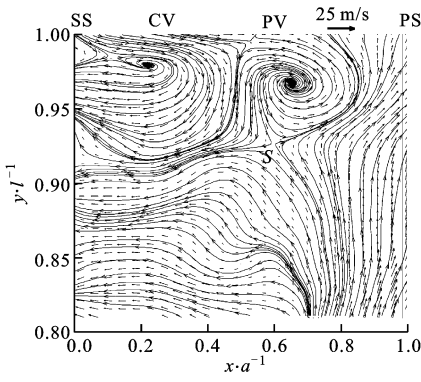


(a)瞬态 1

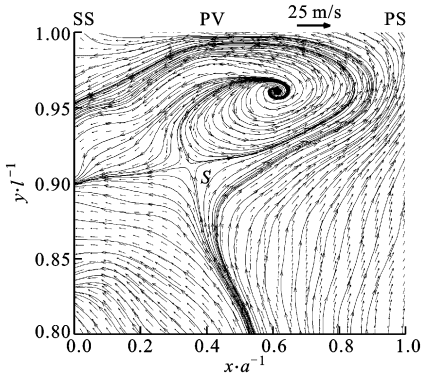


(b)瞬态 2

图 3 $Ma=0.3$ 时截面 A_2 的二次流场和流线分布图

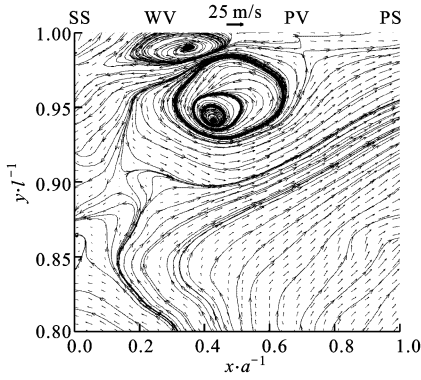


(a)瞬态 1

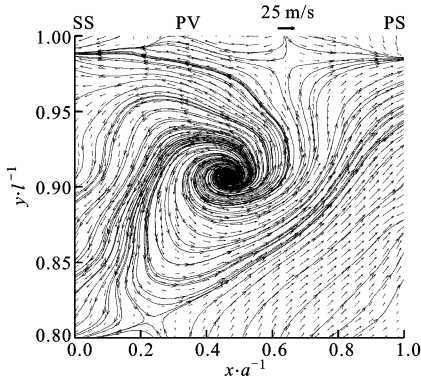


(b)瞬态 2

图 4 $Ma=0.3$ 时截面 A_3 的二次流场和流线分布图

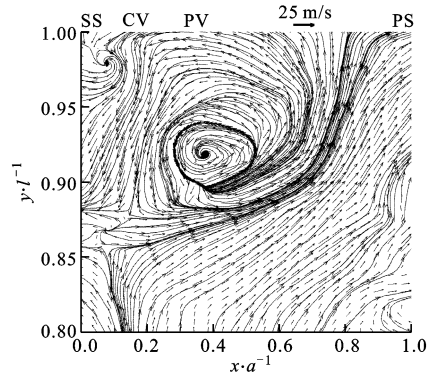


(a)瞬态 1

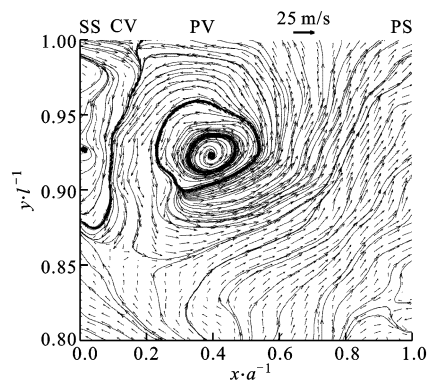


(b)瞬态 2

图 5 $Ma=0.4$ 时截面 A_1 的二次流场和流线分布图

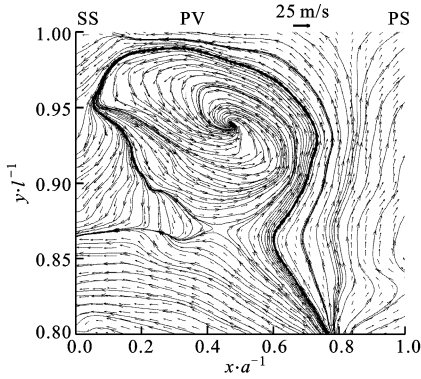


(a)瞬态 1

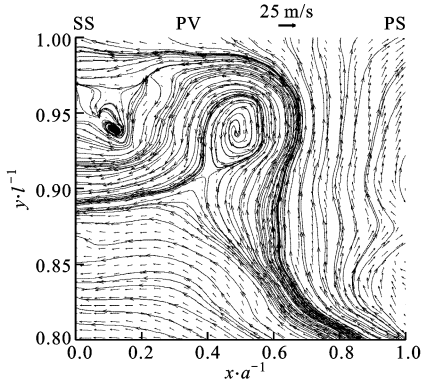


(b)瞬态 2

图 7 $Ma=0.4$ 时截面 A_3 的二次流场和流线分布图



(a)瞬态 1



(b)瞬态 2

图 6 $Ma=0.4$ 时截面 A_2 的二次流场和流线分布图

~0.95 之间,说明随着叶栅出口马赫数的提高,通道涡更靠近端壁和吸力面;

(3)当 $Ma=0.3$ 时,截面 A_2 处的通道涡几乎在所有瞬态均出现了 Hopf 分叉,并产生了不稳定极限环,其直径大多在 0.5~1.5 mm 之间,而当 $Ma=0.4$ 时,在 3 个截面上均有 Hopf 分叉出现,有时甚至出现多次分叉,如图 5a 和图 7b 所示,且极限环的尺度也更大,各截面上出现分叉和不出现分叉的概率几乎相同,这说明 $Ma=0.4$ 时流动的非定常性更强;

(4)尽管存在局部区域的各种分叉,但在 2 种出口马赫数下,通道涡的主体大多还是以非稳定焦点结构为主,基于上节的动力学分析可知,这也是后加载叶栅效率较高的主要原因之一;

(5)在 $Ma=0.4$ 时,截面 A_2 上的通道涡偶尔会呈现稳定焦点结构,如图 7a 所示,从中可以清晰地看到吸力面低能流体被卷起形成壁面涡的情形,这也进一步验证了我们对不稳定焦点结构可减少叶栅损失的正确判断;

(6)通道涡附近常常存在一个鞍点 S,当涡中心移动时鞍点周围的流线将向鞍点弯曲,同时通道涡

核心区域也迅速缩小,如图 2b、图 5b 所示,该演化模式在所测区域非常常见。

通过上面的试验结果可以看到二次流涡系结构的复杂性和不确定性,这并非经典二次流模型所描绘的简单模式。尽管目前还很难通过对这些长时间间隔(0.2 s)瞬态矢量场的重构获得非定常涡系的连续演化细节,但作为对该专题的探索性研究,我们在测试方法和试验方面取得的成果将为后续研究奠定基础。目前我们正在实施 2 组 CCD 与 4 束沿主流方向依次偏移的激光片光的组合方案,以求有效解决二次流涡系非定常演化的测量问题。

3 结 论

(1)基于作者提出的片光跟随主流偏移的 PIV 测试方法,实现了对叶栅二次流瞬态流场的精确测量,首次通过矢量场方式展示了二次流的强烈非定常性。

(2)试验结果表明,随着气流速度的增大,通道涡更靠近吸力面和端壁,而其流线结构也更加不稳定。在出口马赫数为 0.3 时,所研究的后加载叶栅出口斜切部分只有局部区域出现了 1 次 Hopf 分叉,当出口马赫数达到 0.4 时,通道涡在几乎整个出口三角区均存在分叉与不分叉、多次分叉与 1 次分叉交互出现的非定常现象。

(3)通过对通道涡流线结构的涡动力学和物理本质的分析,认为其流线结构取决于压力梯度和正、负耗散区的竞争,在各种抑制二次流措施的基础上,若能一直保持通道涡为不稳定焦点结构,将能最大限度地减少叶栅损失。

参考文献:

- [1] 王仲奇,冯国泰,王松涛,等. 透平叶片中的二次流旋涡结构的研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 553-556.
WANG Zhongqi, FENG Guotai, WANG Songtao, et al. Study on secondary flow vortex structures in turbine blades [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5): 553-556.
- [2] LIN Chang, CHIU Penghao, SHIEH S J. Characteristics of horseshoe vortex system near a vertical plate-

base plate juncture [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 27(1): 25-46.

- [3] WANG Haiping, OLSN S J, GOLDSTEIN R J, et al. Flow visualization in a linear turbine cascade of high performance turbine blade [J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(1): 1-8.
- [4] 吴介之. 涡动力学引论[M]. 北京:高等教育出版社, 1993: 489-494.
- [5] 尹协远,孙德军. 旋涡流动的稳定性[M]. 北京:国防工业出版社, 2003: 78-88, 115-138.
- [6] 张涵信. 旋涡沿轴线的非线性分叉[J]. 空气动力学学报, 1994, 12(3): 243-251.
ZHANG Hanxin. Bifurcation of vortex motion along its axis [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1994, 12(3): 243-251.
- [7] 王松涛,吴猛,王仲奇,等. 通道涡稳定性及其对损失的影响[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(4): 425-429.
WANG Songtao, WU Meng, WANG Zhongqi, et al. The effect of passage vortex stability on energy loss [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(4): 425-429.
- [8] MOON Y J, KOH S R. Counter-rotating streamwise vortex formation in the turbine cascade with endwall fence [J]. Computers & Fluids, 2001, 30(4): 473-490.
- [9] HARVEY N W, ROSE M G, TAYLOR M D, et al. Nonaxisymmetric turbine end wall design: part I, three dimensional linear design system [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(2): 278-285.
- [10] SONG Yanping, CHEN Fu, YANG Jun, et al. A numerical investigation of boundary layer suction in compound lean compressor cascades [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(2): 357-366.
- [11] 王顺森,毛靖儒,刘观伟,等. 透平叶栅二次流瞬态特性的新测试方法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1361-1366.
WANG Shunsen, MAO Jingru, LIU Guanwei, et al. New measurement method for transient performance of secondary flow in turbine vane cascade [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1361-1366.

(编辑 葛赵青 王焕雪)