

文章编号: 1000-8055(2002) 04-0392-07

大间隙涡轮叶栅流场结构的研究

黄洪雁, 杨庆海, 韩万金, 王仲奇
(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 对具有 3.6% 相对叶顶间隙涡轮叶栅的三维流场进行了实验和数值模拟, 分析了大间隙涡轮叶栅流道内的涡系结构。结果表明在叶顶间隙内部和上半叶展出现了复杂的分离涡系, 在上半叶展存在叶顶泄漏涡、上通道涡、吸力侧脱落涡、压力侧叶顶脱落涡和被泄漏流吹向下游的尾缘涡系的相互作用。

关键词: 涡轮叶栅; 间隙; 流场结构

中图分类号: V 231.3 文献标识码: A

Study of Flow Structures within Turbine Cascade with Large Tip Clearance

HUANG Hong-yan YANG Qing-hai, HAN Wan-jin, WANG Zhong-qi
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Flow visualizations on wall surface and numerical simulations within turbine cascade with large tip clearance were carried out. Based on the experiential results and with the aid of numerical simulations, detailed flow structures within a typical turbine cascade were discussed. The detailed information of the flow fields near the wall surface, in the tip clearance, and especially, around the trailing edge was shown in the present study. In the up-half-span region, the flow became very complex due to the existence of the tip clearance. There are interactions among those vortices such as leakage vortex, up passage vortex, shed vortices on the pressure and suction sides, and trailing edge vortices. In the low-half-span, the flow fields near the region formed by the trailing edge and the endwall were also very complex. There are 3 saddle points company with 6 separation lines and 2 nodal points represent the trailing edge vortices on the wall surface near those region. At the end of this paper, vortical structures of the turbine cascade were developed.

Key words: turbine cascade; tip clearance; flow structure

1 引言

在多级轴流式涡轮机械中, 间隙泄漏流动的流动细节和叶栅尾迹的流动结构一直引起叶轮机械设计者的重视。跨过叶片间隙从压力面流向吸力面的泄漏流体卷起形成泄漏涡后, 对叶栅的下游流场产生了很大的影响, 使叶栅出口流场结构发

生明显变化, 有间隙侧的气流掺混损失增大^[1~3]。因此国内外许多学者很早就进行了叶栅间隙流场结构的研究, 这些工作对我们认识叶栅间隙流动的机理起了极大的推动作用。对于尾缘半径相对较大的叶栅, 在尾缘附近存在一对旋向相反的尾缘涡系, 是尾缘附近最显著的流动特征。多级叶轮机械叶栅流动中, 动叶叶栅周期性地扫过流道空

收稿日期: 2001- 08- 06; 修订日期: 2001- 12- 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50106002); 哈尔滨工业大学校基金资助项目(HIT. 2000. 74)

作者简介: 黄洪雁(1968-), 男, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院副教授, 博士。

间的固定位置, 尾迹作为非定常流动的一种主要因素, 使得非定常流动的特征在多级轴流式涡轮机械中全面地表现出来。对于具有间隙的叶栅流动, 由于间隙的存在, 气流绕流叶栅后, 其尾迹发生了怎样的变化, 有间隙叶栅尾迹与无间隙叶栅尾迹的流动结构有何不同, 本文通过数值模拟某涡轮叶栅讨论了上述问题。

2 实验模型与计算方法

对具有 3.6% 相对叶顶间隙的涡轮转子叶栅模型进行了实验和数值模拟。实验叶栅由 6 片高负荷叶片组成, 平行端壁平面内的叶型均采用文献[4]的叶型, 并放大 1.73 倍。叶栅的其它几何参数为: 轴向弦长 $B=120\text{ mm}$; 叶片弦长 $C=121.4$

mm; 节距 $S=90\text{ mm}$; 节弦比 $S/C=0.74$; 展弦比 $h/C=0.905$; 叶片进口边半径 $R_1=6.75\text{ mm}$; 出口边半径 $R_2=3.37\text{ mm}$; 叶栅进口角 $\alpha_1=50^\circ$ (从轴向算起); 出口角 $\alpha=57^\circ$; 进口气流总压 $p_0^*=107804\text{ Pa}$; 出口截面叶展中部马赫数 $Ma=0.3$; 基于弦长的雷诺数 $Re=8.3\times10^5$ 。

由于实验用的叶栅转折角和前后缘小圆半径都比较大, 各种涡系结构明显, 有利于流动显示和数值模拟。实验中采用墨迹显示技术, 显示了叶栅上、下端壁壁面流动和叶片表面流动, 同时利用五孔球头探针对叶栅出口流场进行了测量。在利用 TASCFlow 数值模拟具有叶顶间隙的叶栅流动时, 采用不重叠分区算法将计算区域分解为 11 个子区域 (图 1 $\Omega_1\sim\Omega_{11}$)。绕叶型具有一圈 O 型网格, 它实际上由一组 H 型网格 $\Omega_4\sim\Omega_8$ 组成, 在入口段、出口段和流道中部 ($\Omega_5\sim\Omega_8$) 采用的是 H 型网格。对于叶顶间隙区域采用“镶嵌”式网格结构, 由三部分分子区域 $\Omega_9\sim\Omega_{11}$ 组成, $\Omega_9\sim\Omega_{11}$ 在拓扑结构上等同于 H 型网格。

3 具有叶顶间隙叶栅流场结构探讨

3.1 吸力面、压力面与下端壁的壁面流谱

在叶轮机流场中, 由于粘性及复杂边界条件的限制产生了各种各样的二次流动, 它们在宏观上以各种旋涡运动的形式表现出来, 如通道涡、尾涡、泄漏涡、角隅涡和刮削涡等, 上述旋涡运动的存在使得叶轮机流场具有强的三维性与有旋性, 可以说叶栅内的流动是以旋涡运动为主要特征的复杂流动。从涡动力学分离流理论知道, 叶栅流

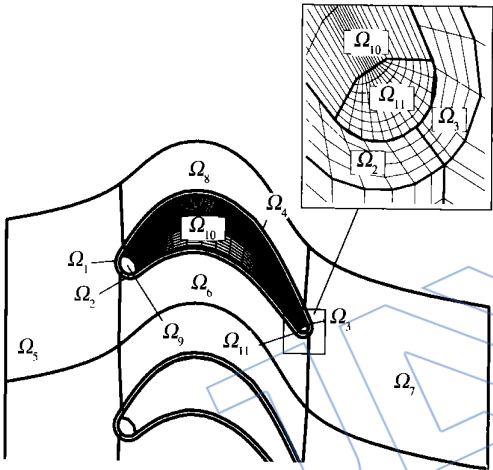
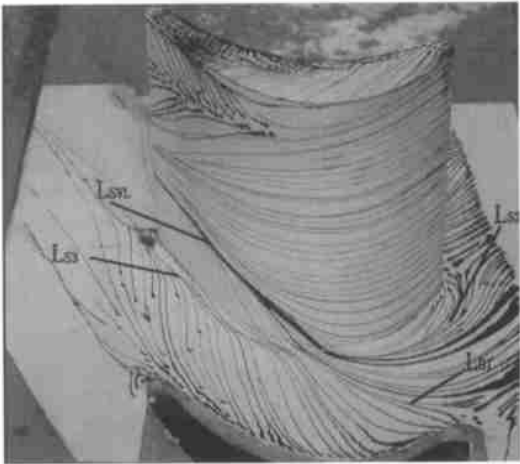
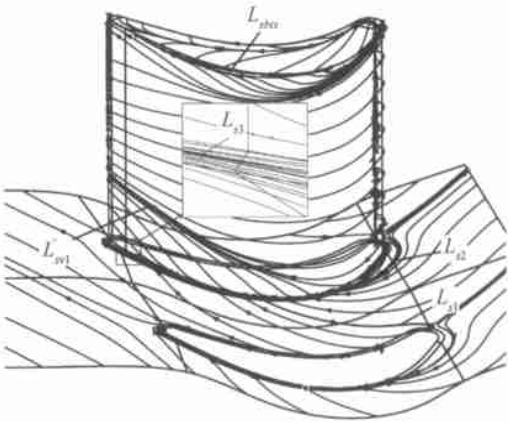


图 1 分区计算网格

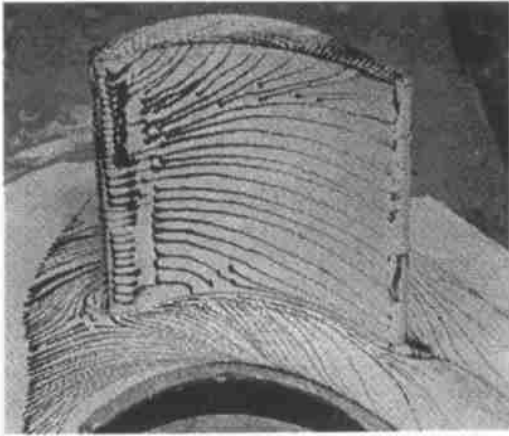


(a) 实验

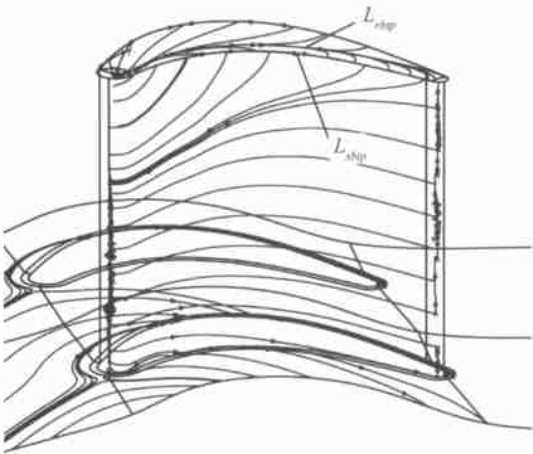


(b) 数值模拟

图 2 下端壁与吸力面上的流动



(a) 实验



(b) 数值模拟

图 3 下端壁与压力面上的流动

道内旋涡系的形成与叶栅壁面附面层的性状密切相关,叶栅流道内形成的每一集中涡系,在壁面上有相应的分离线与之对应。因此壁面流谱分析可以提供叶栅流场的部分信息,将壁面流谱分析与叶栅三维空间流场测量和数值模拟结合起来,能比较全面地揭示出叶栅流道内流场的全貌。

图 2 和图 3 为实验显示和数值模拟得到的叶片表面与下端壁壁面流动图谱,从壁面流线发展的趋势上看,除叶顶吸力面中后部的一个三角形区域外,实验与计算得到的壁面流谱还是比较吻合的。从这四幅图中可以看出,在叶栅的压力面、吸力面和下端壁壁面上,明显地存在着如下几条分离线:前缘马蹄涡分离线的压力侧分支 L_{s1} ;前缘马蹄涡分离线的吸力侧分支 L_{s2} ;下通道涡分离线 L_{s1} ;壁角涡分离线 L_{s3} ;叶顶吸力侧脱落的分离线 L_{s4} ;叶顶压力侧脱落的分离线 L_{s5} 。这些分离线具有的共同特点为分离线两侧的极限流线向其渐进收拢,形成离开壁面的指向流场内部的流动,成为诱发三维空间内集中涡系的主要因素。

3.2 前缘附近和叶顶平面的流动

图 4 为前缘根部附近的流动,图 5 为前缘叶顶间隙内的流动。气流接近叶栅,在静止的圆柱形叶栅前缘的作用下,其速度逐渐降低,在该柱面的某一位置滞止下来,因此前缘根部附近形成了范围非常小的回流区域,体现在下端壁附近的极限流线逆流而上,进入前缘鞍点 S_a 。鞍点 S_a 发出的两条分离线 L_{s1}, L_{s2} 围绕圆柱形前缘向下游运动,流体沿分离线卷起离开壁面,形成前缘马蹄涡系(图 4)。

在流道内横向压力梯度的作用下,马蹄涡的

压力侧分支流向相邻叶片的吸力侧,吸力侧分支

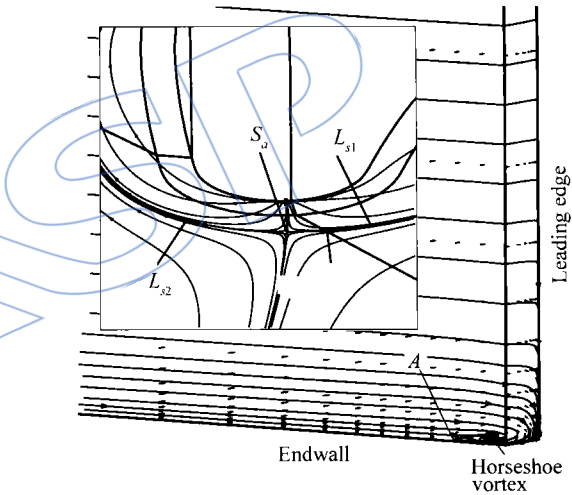


图 4 下端壁前缘附近的流动

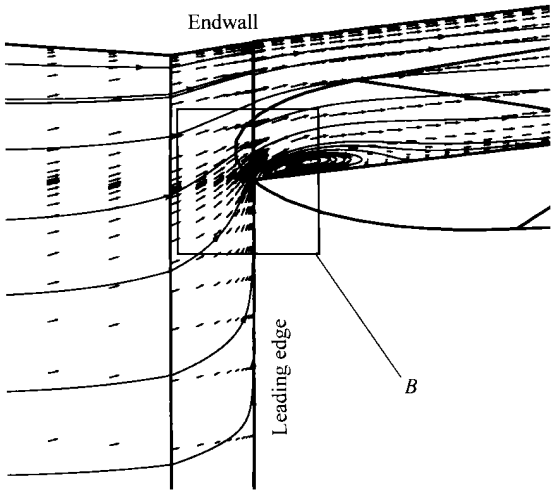


图 5 叶顶与上端壁前缘附近的流动

向下游移动一定距离后迅速转向同一叶片的吸力侧。在有间隙的叶片顶部(图 5), 贴近上端壁的气流直接进入叶顶间隙后流向下游, 离开上端壁一定距离的流体在接近叶栅的柱形前缘时(图 5 中的 B 区域), 形成较强的向上冲的趋势, 因而形成叶顶入口边附近的脱落涡系。

大量事实表明, 在后向台阶绕流中台阶后会形成一个涡, 叶顶入口边附近的脱落涡系的形成机理与其有相似之处。该脱落涡系在前缘点附近较强, 在绕前缘的流动过程中逐渐减弱, 其吸力侧部分绕过叶顶后由于泄漏流流出间隙而消失, 压力侧部分由于有气流流入间隙而一直维持在压力侧(图 6)。图 6 中, 前缘附近和中后部区域的叶顶脱落涡系比较强, 前缘稍后到中部之间的脱落涡系比较弱。

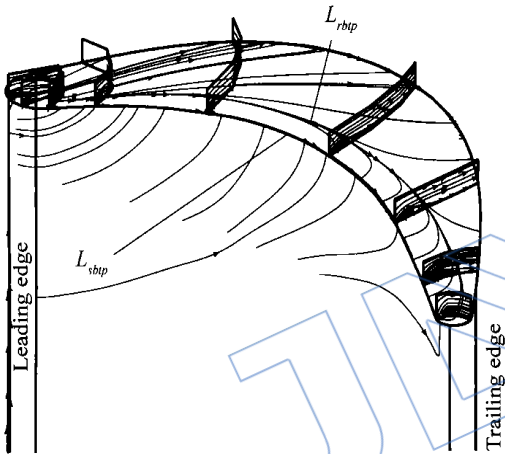


图 6 叶顶压力侧脱落涡

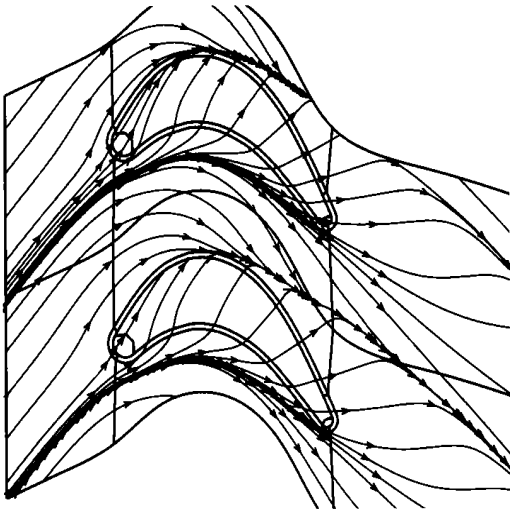


图 7 间隙内的流动

在叶顶脱落涡系较强的区域, 是流体与叶片

相互作用比较强的地方, 这可从图 7 中流线与叶型轮廓线的正交性看出。在叶顶平面上, 由于间隙内压力侧脱落涡系的影响, 拓扑地出现了一条分离线 L_{sbtp} 和一条再附线 L_{rbtp} 。

3.3 尾缘附近的流动

在尾缘根部附近的壁面上, 出现了三个鞍点 S_{tes} , S_{tep} , S_{te} , 由它们发出了 6 条分离线, 这 6 条分离线使尾缘涡系稳定地卷绕在尾缘附近(图 8)。

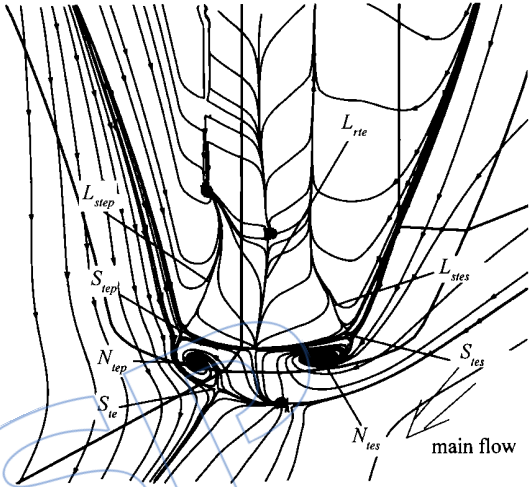


图 8 尾缘根部的壁面流谱

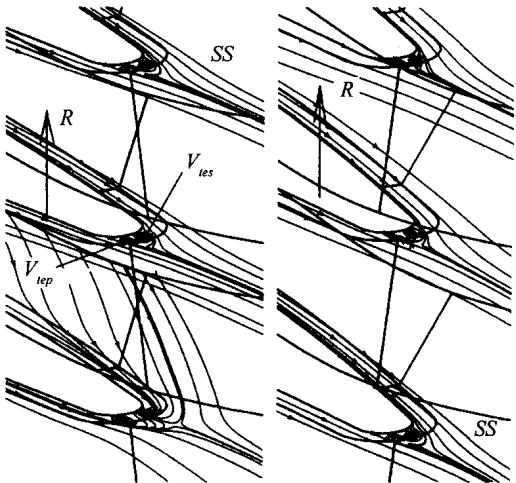


图 9 下半叶展尾缘附近的流动

下端壁附近是横向流动比较强的区域, 靠近下端壁的平面上, 尾缘涡系吸力侧分支的流线来自流道中部和吸力侧上游, 使得图 9 中下端壁附近的尾缘吸力侧涡系显得比较松散。在离下端壁壁面较远的 $S1$ 网格平面上, 尾缘涡系吸力侧分支的流线主要来自吸力侧上游。在压力侧, V_{tep} 的流线主要来自压力侧, 因此沿叶高, V_{tep} 紧密地贴在尾

缘的压力侧。在尾缘根部附近的压力侧和吸力侧形成的这一对旋向相反的尾缘涡系, 构成了尾缘附近气流流动的主要特征(图 9, 图中 R 所指的方向为半径增大的方向, SS 所标记的平面为同一平面)。

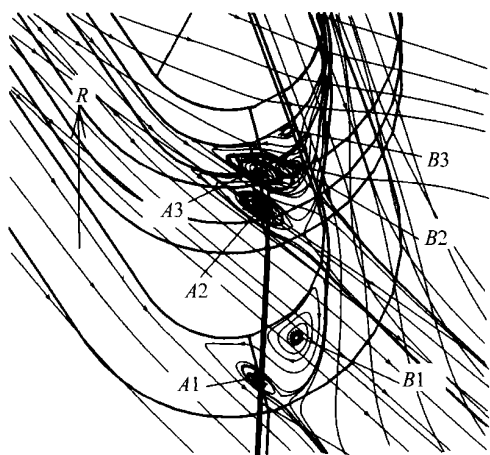


图 10 间隙侧尾缘附近的流动

交汇在这儿, 它们之间的相互作用以及向下游的流动过程中与主气流之间的相互作用将形成较大的下游掺混损失。图 11 为尾缘附近的壁面流动显示, 图中仅给出了一些粗线条的结果。

3.4 出口横截面流动讨论

图 12 给出了按常规二次流方式定义的出口

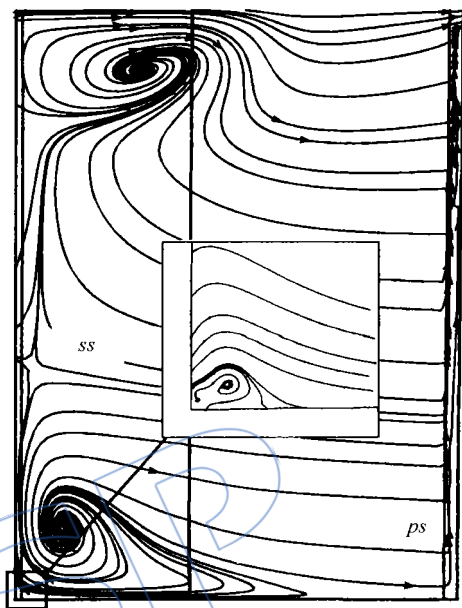


图 12 出口截面内的二次流流线



吸力面

压力面

图 11 尾缘附近的壁面流动(实验)

图 10 给出了上端壁附近尾缘涡系的空间结构, 图中 $(A1, B1)$, $(A2, B2)$, $(A3, B3)$ 分别为同一 $S1$ 网格平面上的流动, $(A3, B3)$ 所在的平面非常接近叶顶平面, 最上面的一个面为叶顶间隙中分面。从中部向上, 在到达叶顶平面之前, 尾缘涡系的压力侧分支变化不是很明显, 吸力侧分支在接近叶顶平面之时迅速减小(图 10 中的 $B2 \rightarrow B3$)。在尾缘附近的间隙中分面上, 流体直接跨过叶顶, 尾缘涡系被泄漏流体吹向下游, 不再存在。在顶部尾迹区, 是流体相互作用比较强烈的区域, 来自于压力侧、吸力侧和叶顶间隙的三部分流体

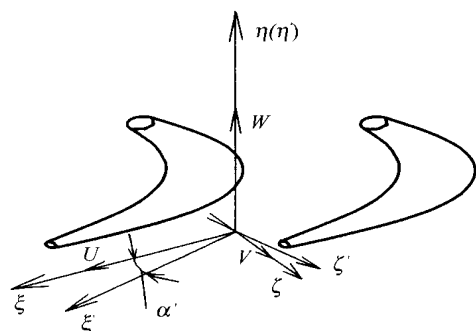


图 13 二次流定义

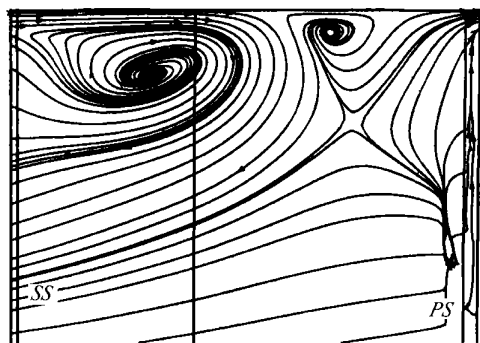


图 14 (ξ', ζ', η) 坐标系的观察结果

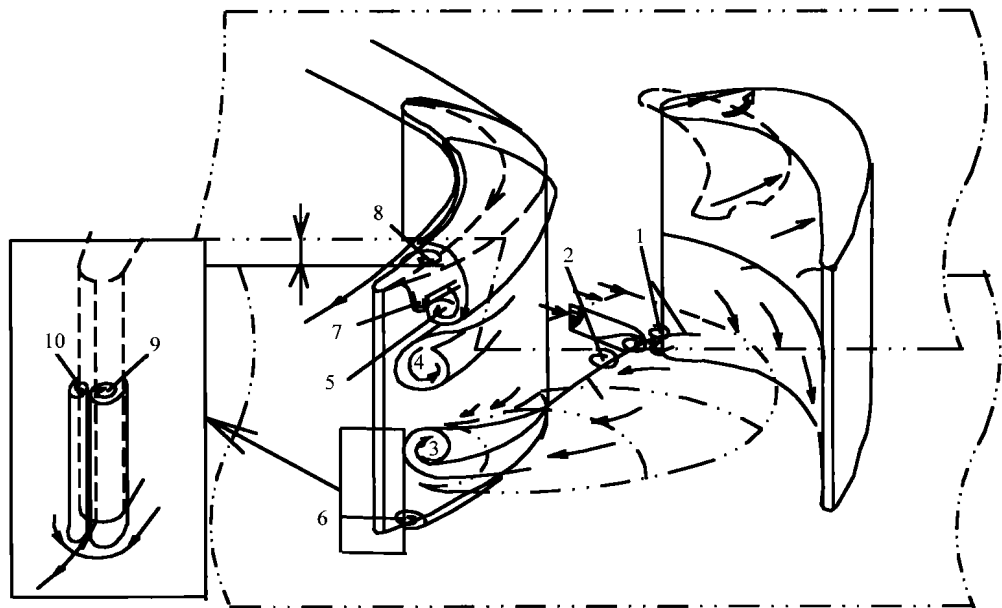


图 15 大间隙涡轮叶栅涡系结构

截面内的二次流流线,如图 13, ξ 轴为叶栅几何中心线所在的曲线, η 轴指向径向, ζ 垂直于 ξ 与 η , 三维速度矢量在 ζ 轴和 η 轴上的投影即认为是二次流矢量。在出口截面的二次流流线上(图 12), 可以观察到叶顶泄漏涡、下通道涡和吸力面壁角的壁角涡系, 上通道涡在二次流流线上没有显示出来。在上端壁的流动显示和计算得到的壁面极限流线中, 可以观察到横向流动的存在, 众所周知, 上通道涡的形成与横向流动密切相关, 但在图 12 中却观察不到上通道涡的存在, 有可能是观察的角度不好造成的。一般而言, 垂直于涡轴的平面才是一个理想的涡系观察平面, 因此, 又将空间速度矢量沿 (ξ', ζ', η') 坐标系进行了投影, 其中 ξ 与 ξ' 轴的夹角为 $\alpha \approx 10^\circ$ (图 13)。图 14 为 (ξ', ζ', η') 坐标系的观察结果, 在该图中可以观察到上通道涡的存在, 由于泄漏流动的影响, 上通道涡远离了吸力面, 尺度也明显小于下通道涡。

3.5 计算中相关问题讨论

泄漏涡作为间隙泄漏流体与端壁横向流动强烈相互作用的结果, 在计算中总是能观察到, 下通道涡也比较容易出现。泄漏涡和通道涡在叶栅流道中属于大尺度流动结构, 对于网格特性的依赖性几乎不存在, 可以比较容易地模拟出来。在叶栅流道内还存在另一类小尺度流动结构, 如前缘马蹄涡系, 叶栅尾缘附近的旋涡涡系、叶顶压力边出现的叶顶脱落涡系和根部吸力面壁角出现的壁角涡系等属于小尺度结构, 这种小尺度结构在数值

模拟中只要网格分布合理就可以模拟出来。小尺度流动结构对网格的依赖性非常强, 网格特性不好, 在计算结果中便观察不到。从分离流体力学理论知道, 分离线的出现意味着在流体内部形成相应的旋涡涡系。在叶顶吸力边附近, 由于叶顶平面流线和吸力面上流线共同作用的结果, 形成一条时而附着于叶顶吸力边, 时而进入吸力面的分离线 L_{slas} (图 2), 该分离线对应的涡系结构在横截面的流动中却观察不到, 表明其尺度是非常小的, 属于一种微尺度结构, 这种结构在横截面内的流谱中观察不到的, 但壁面流谱分析却揭示了它的存在。

3.6 具有叶顶间隙涡轮叶栅的涡系结构

根据有间隙涡轮叶栅壁面流谱显示、壁面极限流线数值模拟和三维空间流场的数值模拟结果, 在图 15 中给出了所实验叶栅的三维空间涡系结构: 来流附面层在柱形前缘作用下形成马蹄涡的两分支 1, 2; 流道内下端壁附面层在横向压力梯度的作用下卷起形成下通道涡 3; 同理形成上通道涡 4; 跨过叶顶间隙的泄漏流体与上端壁横向流动相互作用形成泄漏涡 5; 下通道涡诱导而生成的壁角涡 6; 在间隙侧出现了吸力边脱落涡 7 和压力边脱落涡 8; 尾缘涡对的吸力侧分支 9 和压力侧分支 10。作为流体运动的“肌腱”, 涡轮叶栅中高强度的旋涡涡系影响了附面层的发展和低能流体的再分布, 只有充分地认识涡轮叶栅中各种涡系的形成机理, 才能实现“以涡制涡”的目的。

4 结 论

(1) 在有间隙的上半叶展和叶顶平面上, 与下半叶展相比较而言, 出现了两条分离线 L_{slap} , L_{sls} , 一条再附线 L_{rbtp} , 同时 L_{dts} 时而附着于叶顶吸力边, 时而进入上半叶展吸力面, 表明这一区域内的流动是相当复杂的。在上端壁附近很小的区域内存在叶顶泄漏涡、上通道涡、吸力侧脱落涡、压力侧脱落涡和被泄漏流吹向下游的尾缘涡系的相互作用。

(2) 在尾缘附近, 由于叶顶间隙的影响, 上半叶展尾缘附近的涡系结构与无间隙侧的涡系结构明显不同, 有间隙侧的尾缘涡直接被泄漏流体吹向下游, 在间隙中分面上已不再存在, 而下半叶展尾缘涡系的终结点却在下端壁壁上。

(3) 在气流绕流叶栅的流动过程中, 出现了大尺度、小尺度和微尺度等不同尺度的流动结构。大尺度结构几乎对计算网格没有依赖性, 能比较容易地模拟出来; 小尺度结构对网格的依赖性较

强, 网格性能不好在计算中便观察不到; 微尺度结构在目前所能使用的网格尺度中观察不到, 但壁面流谱却可以揭示它的存在。

参考文献:

- [1] Bindon J P. The Measurement and Formation of Tip Clearance Loss[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1989, 111(2): 257– 263.
- [2] Moore J, Tilton T S. Tip Leakage Flow in a Linear Turbine Cascade[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1988, 110: 18– 26.
- [3] 黄洪雁, 韩万金, 王仲奇. 叶片正弯曲对间隙流动损失的影响[J]. 航空动力学报, 1997, 12(3): 263– 267.
- [4] Yamamoto A. Interaction Mechanisms Between Tip-Leakage Flow and the Passage Vortex in a Linear Turbine Rotor Cascade[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1988, 110: 329– 339.

(责任编辑 杨再荣)