

透平级轴向间隙对非定常流动干涉影响的研究

石龔, 李少军, 邓清华, 李军, 丰镇平

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对透平级在两个轴向间隙下的非定常流场,应用全三维黏性非定常数值模拟方法分析比较了不同轴向间隙下的流场干涉现象,并引入了损失非定常波动机理.结果表明:透平级轴向间隙增大近 1 倍后,势干涉的变化在静叶和动叶前缘处体现得更为明显,壁面静压波动幅值分别降低了 80%和 60%左右,叶栅间的位势干涉强度较负射流强度下降的快;当负射流迁移至动叶吸力面尾部时,对气流分离会起到抑制作用,为沉寂效应的产生引入了一种新的诱发机制;针对静叶吸力面边界层内气流,通过耗散函数建立了静压与熵值之间的耦合关系,发展了分析非定常流场中损失波动的方法.

关键词: 透平级;轴向间隙;非定常;数值模拟;负射流

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0009-05

Influence of Axial Clearance on Unsteady Flow Interaction in Turbine Stage

SHI Yan, LI Shaojun, DENG Qinghua, LI Jun, FENG Zhenping

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The full three-dimensional viscous numerical simulation is employed to analyze and compare the interaction phenomena of the unsteady flow field at two axial clearances in an axial-flow turbine stage and then the mechanism of the unsteady loss fluctuation is adopted to describe the reason of entropy fluctuation. The results indicate that when the axial clearance is doubled, the potential interaction changes significantly at the entire stator and the leading edge of the rotor, and the fluctuation amplitude of wall static pressure decreases by about 80% and 60%, respectively. The descending of the potential interaction strength is much faster than that of the negative jet. When the negative jet arrives at the trailing edge of the rotor suction side, the repression effect on the flow separation will occur, resulting in a new triggering mechanism of the calming effect. In addition, the coupling relation between static pressure and entropy in the boundary layer flow of the stator suction side is built by a dissipation function, and a method to analyze the loss fluctuation in the unsteady flow field is developed.

Keywords: turbine stage; axial clearance; unsteady; numerical simulation; negative jet

叶轮机械中动静叶栅的相对运动及叶排间的位置匹配导致流场呈现出规律性的非定常现象.定性和定量分析这些结构参数对非定常流场的影响,能够为基于时间精确解的透平设计和优化方法提供指导,实现将非定常效应融合于现代叶轮机械设计中,为解决关键技术问题提供参考.

透平级轴向间隙对相邻叶排间势干涉、尾迹与叶排间干涉和透平级功重比都有着重要影响,从而成为叶轮机械设计中的关键参数,一些学者对此进行了定常和非定常条件下的试验研究^[1-3].由于叶轮机械内部流场相当复杂,完全采用试验手段研究非定常流场是不现实的,需要借助数值方法深入分析

流动的微细结构,研究气动参数的变化规律,获得轴向间隙对非定常流场干涉现象影响的机理与特性,因此有必要对其进行细致的数值模拟研究.

本文结合西安交通大学叶轮机机械研究所承担的国家“973”课题“燃气轮机热端部件冷却机理研究”,利用 CFD 软件对自行研制设计的低压透平级在两种轴向间隙下进行了全三维黏性非定常数值模拟,以叶栅中截面流场为对象,分析比较透平级在不同轴向间隙下的非定常流场,对其干涉现象给出了新的解释,并介绍了在非定常流场中分析气流损失波动的方法,为后续一级半实验透平的试验研究提供参考.

1 数值方法

1.1 计算网格

数值计算采用 NUMECA FINE/Turbo 软件包中的 Domain Scaling 方法,动静叶片数之比为 1 : 1. 网格生成采用其中的 IGG/AutoGrid 模块,为适应叶片通道空间拓扑结构并保证较高的网格质量,计算域采用多块结构化网格技术,叶栅通道内采用 O 型网格,进出口延伸段采用 H 型网格. 图 1 给出了透平级轴向间隙为 7 mm 时计算域的三维网格图. 表 1 给出了计算域各个方向上的网格数. 在透平级轴向间隙为 15 mm 的计算中,使用了相同的网格结构.

透平设计转速为 4 980 r/min,进口总温为 315 K,进口总压为 135 kPa,出口静压为 114. 576 kPa,设计轴向间隙为 15 mm,即 0. 33 倍动叶弦长. 本文按照以上设计参数进行全三维黏性非定常数值模拟.

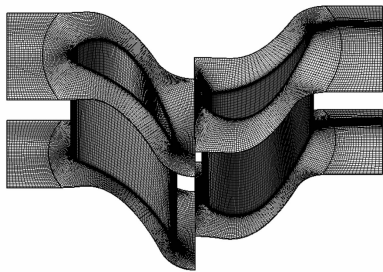


图 1 三维计算网格图
表 1 计算域网格节点数

方向	动(静)叶节点数
周向	65
展向	57
轴向	93
节点数	1 076 844

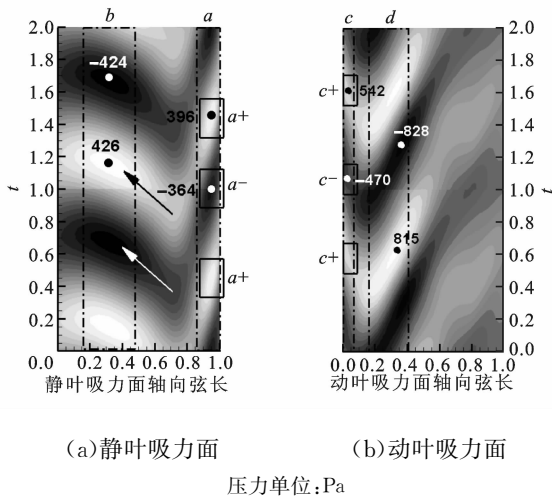
1.2 求解方法

本文借助计算流体动力学软件 FINE/Turbo 求解三维非定常 N-S 方程. 一个计算周期设 30 个物理时间步. 采用 Spalart-Allmaras 一方程湍流模型,空间差分采用中心格式,添加人工黏性项. 时间项的离散采用 Jameson 提出的双时间步隐式时间迭代方法. 为加速收敛,计算采用多重网格,结合变时间步长及隐式残差光顺的方法以达到最快的收敛速度.

2 数值模拟结果及分析

2.1 透平级轴向间隙对叶排间势干涉的影响

图 2 和图 3 给出了不同轴向间隙 δ 下动静叶栅吸力面静压脉动值的时空分布图. 从图 2 可看出,动静叶壁面静压随时间呈周期性波动,在叶栅通道内的不同位置,静压波动幅值变化明显.



(a) 静叶吸力面
(b) 动叶吸力面
压力单位: Pa

图 2 轴向间隙为 7 mm 时动静叶栅的压力脉动时空图

从图 2a 可知,静叶通道内区域 a 和区域 b 中静压波动明显. 区域 a 靠近静叶尾缘,受下游周向掠过的动叶影响,当静叶尾缘处在动叶流道中部时,其周围气流也同时处在动叶通道的主流区,流速较快造成局部静压降低,因此出现 a^- 低压区. 当静叶尾缘与动叶前缘出现最小距离的时候,静叶尾缘附近气流受到动叶的阻挡,速度降低静压升高,产生了 a^+ 局部高压区. 静叶流道压力波动区域 b 是由动叶位势向上游传递产生的. 图中的箭头指向时间轴的正方向和气流轴向运动的反方向,可以看出位势随着时间的发展按照一定速度向上游传播^[4].

从图 2 可以看出,与图 2a 中压力波动区 a 在时间上相对应,图 2b 中出现了压力波动区 c . 由于静

叶尾缘和动叶前缘的干涉作用是相互的,静叶尾缘处静压会与动叶前缘处静压同时升高或降低,出现有时间对应关系的区域 a 和 c 。其中,动叶前缘受到势干涉的同时还受到静叶尾迹的影响,压力波动较静叶尾缘更为明显。

图3中静压波动的定性规律与图2中相似,不再赘述,但定量规律有所差异。当轴向间隙增大至约为原来的1倍后,图3a中静叶壁面压力与图2a相比,波动幅值降低了80%左右。图2b中区域 c 与图3b中区域 e 相比,波动幅值下降了60%左右,其余位置处压力波动幅值下降不超过30%。由此可知,在动静叶栅轴向间隙增大了近1倍后,动静叶栅表面压力波动都有所减弱,其中静叶壁面和动叶前缘处的静压变化尤为明显,下降幅度均超过60%。因此,一定程度上增加透平级的轴向间隙,可以明显降低工作在非定常流场中的静叶和动叶局部区域的表面压力脉动,有效缓解叶栅受力疲劳^[5]。

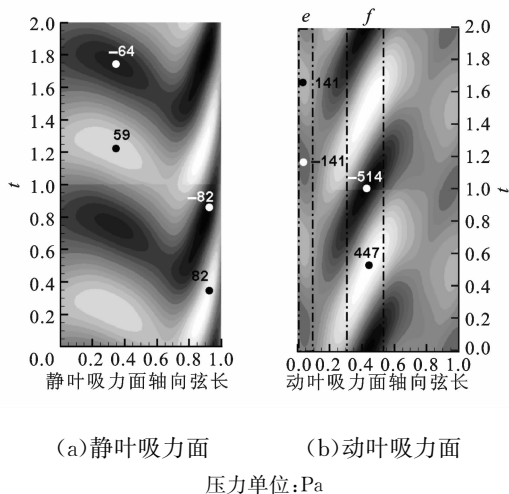


图3 轴向间隙为15 mm时动静叶栅的压力脉动时空图

势干涉属无黏干涉,通过定量分析可为叶栅强度设计提供指导,但对透平气动性能影响较小,因此需对静叶尾迹与动叶栅的黏性干涉进行分析。

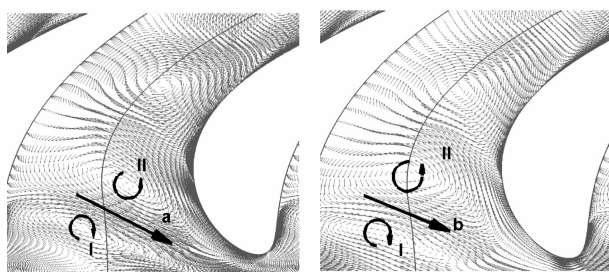
2.2 透平级轴向间隙对尾迹与动叶栅干涉的影响

静叶尾迹由低能流体组成,总压损失较高,表现在速度场上就是一系列带状速度亏损区。因尾迹中的流体速度低于主流,故在相对坐标系下出现欠转折。当静叶尾迹被动叶前缘截断时,其进入动叶通道内就会形成由压力面朝向吸力面的负射流^[6],因此通过分析负射流可以得到透平级轴向间隙对静叶尾迹与动叶栅干涉的影响。

图4给出了透平级在7 mm和15 mm轴向间隙下,动叶前缘处相对速度矢量的脉动值。图4和图

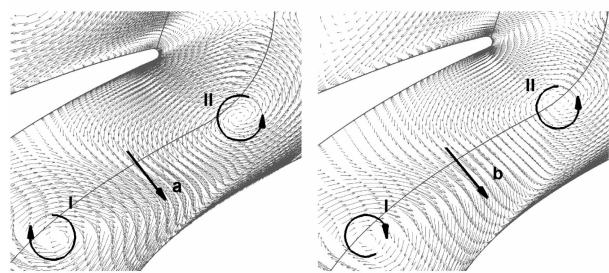
5中箭头的长短代表速度的大小。可以看到,由静叶尾迹产生的负射流出现在动叶吸力面附近,如图中箭头所示。比较这两股负射流和速度场可看出,当轴向间隙较小时,负射流强度和脉动速度矢量场的模都较大。

由于动静叶栅轴向间隙的存在,尾迹自静叶尾缘产生至到达动叶前缘之前,会与周围主流区相互掺混,速度亏损区在扩散作用下,中心亏损值降低,由尾迹中速度亏损引起的负射流强度也会下降。但是,与上述讨论的脉动压力相比,负射流在两个不同轴向间隙下的强度可进行比较,属于同一数量级。此外,动静叶栅轴向间隙增大后,由于气流角较小,气流实际流程增大得更多。因此,尾迹与叶栅间的干涉随着轴向间隙的增加,衰减速度明显小于叶排间的势干涉,可以在更长的流道内保持干涉现象,对下游流场产生持续影响^[7]。



(a) 7 mm 轴向间隙 (b) 15 mm 轴向间隙

图4 动叶前缘处脉动速度分布



(a) 7 mm 轴向间隙 (b) 15 mm 轴向间隙

图5 动叶流道中部脉动速度分布

另外,比较动叶前缘和通道中部的负射流会发现,在进口处负射流方向与动叶吸力面法线成一定夹角,而到了通道中部负射流方向基本垂直于动叶吸力面。在高负荷透平级中,动叶尾缘附近由于扩压区的存在,气流易产生分离。从负射流的方向可推知,当含有负射流的静叶尾迹迁移至动叶分离区附近时,会促使气流向吸力面运动,在一定程度上抑制气流分离,提高了透平气动效率,为沉寂效应^[8]的产

生引入一种新的诱发机制。

由图 4a 可知,负射流两侧出现对转涡 I 和 II,两者强度不同.从图 5 中可知,当对转涡 I 和 II 流经动叶通道中部时,强度下降,影响范围增大.根据涡通量守恒定律,维持静叶表面的速度环量 $\pm\Gamma$,需要从尾缘不断脱落具有一 Γ 速度环量的气流.按照静叶表面速度环量的方向可知对转涡 I 强度较大,有利于在流动中保持漩涡形态.若动叶下游还有静叶排,对转涡 I 对下游流场的时序效应会起到主导作用^[9],通过分析对转涡 I 的时空分布能够以最高效率为目标,确定动叶上下游两静叶排间的最佳时序位置,优化透平级间气动布局.

2.3 透平级轴向间隙对非定常流场损失的影响

熵值是衡量气流耗损的参数^[10],气流向下游迁移过程中发生多种耗损,熵值逐渐增大.为研究气流在透平级非定常流场环境中的损失机理,需要对随时变化的熵值进行分析.

在对透平内流的研究中,压力是否随时间变化是区分稳态计算和非定常计算的主要标准^[11],因此寻找气流熵值和压力之间的非定常耦合关系是揭示气流损失非定常波动机理的关键.在常规透平叶栅中,吸力面边界层内流体产生的损失较大,为简化计算,这里对静叶吸力面边界层内气流进行研究.采用求和约定,下式给出衡量气流损失的耗损函数

$$\phi = \lambda \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (1)$$

气流通过静叶喉部进入尾部扩压区,速度降低.扩压区中逆压梯度的高低决定了静叶吸力面边界层内气流 $\partial u_j / \partial x_j$ 和 $\partial u_j / \partial x_i$ 的大小.当静叶尾缘背压升高并引发尾部扩压区内静压上升时,静叶尾部的速度梯度增加,式(1)右侧第 1 项增大.与此同时,静叶吸力面边界层增厚,使得式(1)右侧第 2 项增大.在这两方面的作用下,耗损函数 ϕ 在静叶尾部静压升高时出现较大值.反之,耗损函数 ϕ 在静叶尾部静压降低时出现较小值.

图 6 给出了透平级轴向间隙为 7 mm 时静叶吸力面第 2 层网格上 ds/dt 和 dp/dt 的时空分布图,其中 s 为熵值, p 为静压.从图 6a 可知,在静叶吸力面轴向弦长 85%~100%之间 dp/dt 占据主导地位,在时间轴上顺次交替出现最大值和最小值(见图 6 中+、-号).与此对应,图 6b 中在静叶吸力面轴向弦长 85%~100%之间 ds/dt 也随时间发展交替出现正负极大值(见图 6 中+、-号).当 dp/dt 出现最大值时, ds/dt 出现最大值;当 dp/dt 出现最小值时,

ds/dt 出现最小值.由此可知,静叶吸力面尾部静压随时间变化会引发边界层内气流熵值变化,静压和熵值随时间变化的趋势正相关.

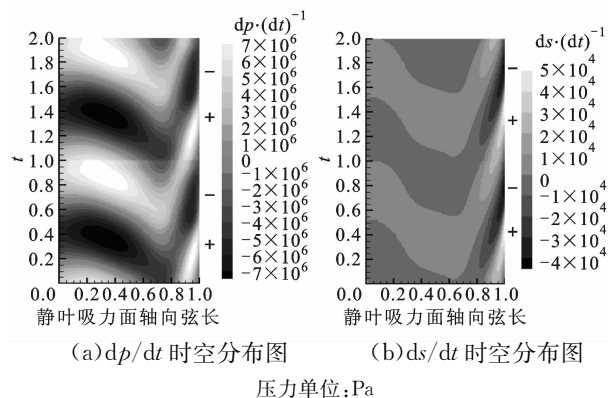


图 6 静叶吸力面边界层内 dp/dt 和 ds/dt 的时空分布图

从图 7 和图 8 可以看出,气流的静压波动幅值和熵值波动幅值正相关.当动静叶栅间隙较小时,上下游叶栅间的位势干涉较强,静叶壁面附近气流的静压波动较为剧烈,引发气流中熵值波动较强.在动静叶栅轴向间隙较大时,动叶叶栅位势干涉强度下降较快,相应的熵值波动削弱明显.

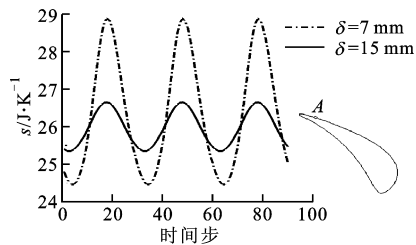


图 7 不同轴向间隙下静叶吸力面上 A 点熵值波动图

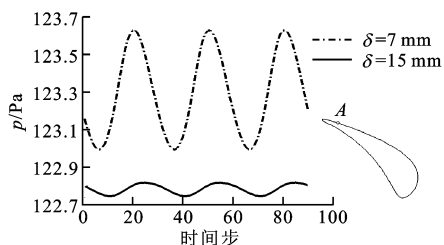


图 8 不同轴向间隙下静叶吸力面上 A 点静压波动图

综上所述,周期性掠过的动叶使得静叶出口处的压力势场呈周期性变化,引发静叶边界层内流体熵值非定常波动,其变化方向和变化幅值都是正相关的.随着透平级轴向间隙的增大,静叶吸力面尾部静压波动降低,边界层内流体熵值波动减弱.另外,

在静叶轴向弦长 85%~100% 边界层内的流体中静压和熵值的耦合关系体现的较为明显,在静叶前缘到 80% 弦长间的流体中耦合现象较弱。

3 结 论

通过对不同轴向间隙下的透平级进行全三维非定常数值模拟研究,获得结论如下。

(1)透平级轴向间隙增大近 1 倍后,势干涉的变化在静叶和动叶前缘处体现得更为明显,壁面静压波动幅值分别降低了 80% 和 60% 左右,叶栅间的位势干涉降低较快。

(2)随着透平级轴向间隙增加,静叶尾迹产生的负射流强度下降较慢。当负射流迁移至动叶吸力面尾部时,对气流分离会起到抑制作用,为沉寂效应的产生引入了一种新的诱发机制。

(3)针对静叶吸力面边界层内的气流,利用耗散函数,建立了静压与熵值间的耦合关系,两者的变化方向和变化幅值都是正相关的。随着透平级轴向间隙的增大,静叶吸力面尾部静压波动降低,边界层内流体熵值波动明显减弱。

参考文献:

- [1] GAETANI P, PERSICO G, OSNAGHI C, et al. Investigation of the flow field in a high-pressure turbine stage for two stator-rotor axial gaps, part I: three-dimensional time-averaged flow field [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2007, 129(3): 572-579.
- [2] KEN-ICHI F, KAZUTOYO Y, MAMORU K, et al. Experimental studies on aerodynamic performance and unsteady flow behaviors of a single turbine stage with variable rotor-stator axial gap: comparisons with time-accurate numerical simulation [C/CD]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007. New York, USA: ASME, 2007: GT2007-27670.
- [3] SCHENNACH O, WOISETSCHIAGER J, FUCHS A, et al. Experimental investigations of clocking in a one-and-a-half-stage transonic turbine using laser Doppler velocimetry and a fast response aerodynamic

pressure probe [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2007, 129(2): 372-381.

- [4] URBASSIK R M, WOLFF J M. Unsteady aerodynamics and interactions between a high pressure turbine vane and rotor [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 35-42.
- [5] YAMADA K, FUNAZAKI K, HIROMA K, et al. Effect of wake passing on unsteady aerodynamic performance in a turbine stage [C/CD]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2006. New York, USA: ASME, 2006: GT2006-90783.
- [6] HODSON H, DAWES W N. On the interpretation of measured profile losses in unsteady wake-turbine blade interaction studies [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 276-284.
- [7] 陈海生. 叶轮机械内部流动研究进展[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 2-12.
CHEN Haisheng. Review of investigation into internal flow of turbomachinery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 2-12.
- [8] UZOL O, ZHANG X F. Investigation of unsteady wake-separated boundary layer interaction using particle-image-velocimetry [C/CD]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2007. New York, USA: ASME, 2007: GT2007-28099.
- [9] ARNONE A, MARCONCINI M, GRECO A S D. Numerical investigation of three-dimensional clocking effects in a low pressure turbine [C/CD]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. New York, USA: ASME, 2003: GT2003-38414.
- [10] DENTON J D. Loss mechanisms in turbomachines [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(4): 621-656.
- [11] YAO J X, CARSON S. Hpt/lpt interaction and flow management in the inter-turbine space of a modern axial flow turbine [C/CD]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2006. New York, USA: ASME, 2006: GT2006-90636.

(编辑 王焕雪)