

涡轮高压导叶流场结构及损失分析*

吴 猛, 王松涛, 王仲奇, 冯国泰

(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: 采用具有 TVD 性质的三阶精度 Godunov 格式, 数值模拟了某型涡轮高压导叶流场, 并对流场损失及涡系结构进行分析, 结果表明由于强烈的径向窜流, 使低能流体大量地迁移到下端壁, 使得下端部的损失显著增大, 从而引起了总损失的增加。因此在高压导叶设计中, 当采用低展弦比叶片时, 应注意削弱叶片出口附近流场的严重径向窜流。

关键词: 涡轮导向叶片; 三维流; 径向窜流; 数值仿真; 粘性流

中图分类号: V235.113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2001) 03-0229-04

Analysis of flow field structure and loss of high pressure guide vane

WU Meng, WANG Song-tao, WANG Zhong-qi, FENG Guo-tai

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The viscous flow field in a high pressure gas turbine guide vane was simulated by three order accuracy GODUNOV scheme with TVD property. The results indicate that a lot of low energy flow accumulated in the hub region since the radial movement of the secondary flow. Those above result in the increase of energy loss near the hub and even increase the total energy loss. Therefore when using low aspect ratio blade during the design of high pressure guide vane, attention should be made in order to obstruct the radial movement of the secondary flow.

Key words: Turborotor; Three dimension flow; Radial movement; Numerical simulation; viscous flow

1 引 言

随着计算机水平的飞速发展和人们对叶栅流场中流动机理认识的不断提高, 利用全三维计算方法和采用全三维设计手段来进行叶轮机械气动设计的思想逐渐成熟和完善, 并被国内外许多设计者所采用^[1~3]。由于冷却问题及气动损失较高使得高压涡轮导叶设计非常棘手, 事实上第一级导叶的特征通常是低展弦比, 并且由于冷却要求节弦比通常很高, 所有这些特征都将使二次流的强度提高, 因此在高压涡轮中二次流损失占了很大的比重。通过对于某型涡轮高压导叶进行数值模拟及流场分析表明, 该导叶出口附近存在强烈的径向窜流, 使得下端部的损失显著增大, 从而引起了总损失的增加。因此在设计中, 当采用低展弦比叶片时, 应注意削弱叶片出口附近流场

的严重径向窜流, 比如采用端壁成型及弯曲叶片等措施以减少二次流损失^[4~6]。

2 计算方法

控制方程为任意曲线坐标系下用柱坐标速度分量表示的全三维 N-S 方程^[7]

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + \frac{\partial G}{\partial \zeta} =$$
$$\frac{f_1}{r} + \frac{1}{Re} \left[\frac{f_2}{r} + \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \frac{\partial R}{\partial \eta} + \frac{\partial S}{\partial \zeta} \right]$$

式中无粘、粘性通量及源项的详细表达式参见文献[8]。方程无粘项采用具有 TVD 性质的 Godunov 格式进行离散, 粘性项采用中心差分格式进行离散, 湍流模型为 B-L 模型。

* 收稿日期: 2000-09-11; 修订日期: 2000-11-20。基金项目: 国家自然科学基金 (59636180)、科技部 973 资助项目。

作者简介: 吴 猛 (1973—), 女, 博士后, 研究领域为计算流体力学。

计算进口给定总温为 1 261.32 K, 总压为 1.418 3 MPa。周向及径向气流角均为 0° 。出口给定中径处背压为 0.775 8 MPa。栅前区及栅后区满足周期性边界条件。整个计算域的网格点数为 $97 \times 53 \times 53$, 图 1 为计算网格示意图。

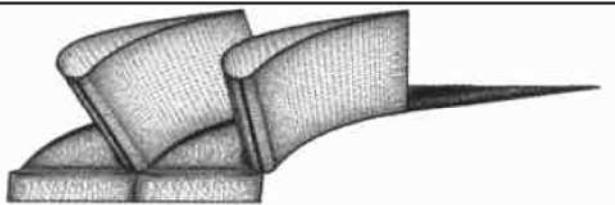


Fig. 1 Computation grid

3 结果及分析

3.1 叶片表面压力分布

图 2 给出了根、中、顶三个截面上的叶片表面压力分布, 从图中可以看出该叶型基本属于后部加载叶型, 在三个典型截面上的最低压力点位置分别是: 根部位于 83% 轴向弦长位置处; 中部位于 85% 轴向弦长位置处; 顶部位于 85% 轴向弦长位置处。

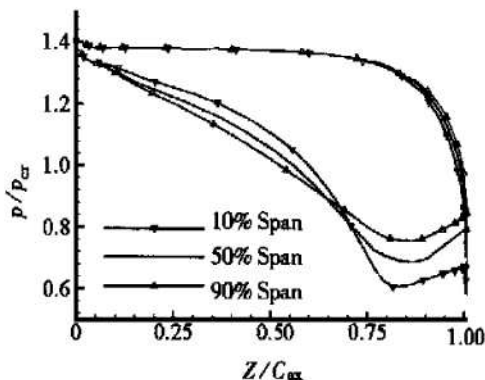


Fig. 2 Pressure distribution along blade profile

3.2 损失分布

图 3 给出几个典型轴向位置处节距平均能量损失系数沿叶高分布(轴向位置以前缘为基准)。

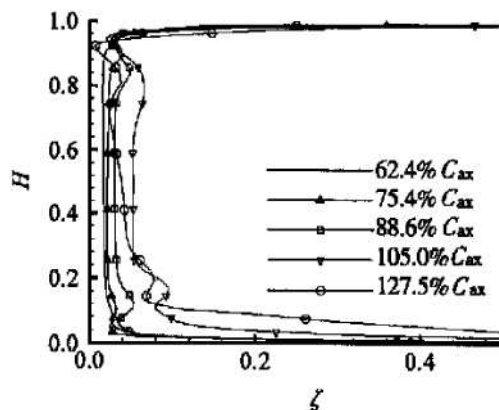


Fig. 3 Distribution of energy loss coefficient along span

在 62.4% ~ 75.4% 轴向弦长位置处, 二次流损失逐渐发展起来, 但此时上下端壁处的损失在大小上没有显著的差别; 在 88.6% 轴向弦长位置处, 上下端壁处的二次流损失呈现出均匀发展的趋势。这一方面是由于环形叶栅内压力沿叶高不均匀及二次流径向发展不均匀所致, 另一个主要的原因则是由于该导叶展弦比过小引起的径向窜流较为严重, 导致了损失在以后的发展过程中表现出根部二次流损失显著高于顶部, 这一现象可以清晰地从 105% 轴向弦长位置处损失沿叶高的分布看出来。在 127.5% 轴向弦长位置处下端壁损失明显增大, 我们将在 S_3 截面损失等值线分析中给出其原因。

为了能够清晰地展现径向窜流对损失的影响, 图 4 给出了与图 3 相应的几个 S_3 截面上损失等值线(各图中左侧为吸力面, 右侧为压力面)。

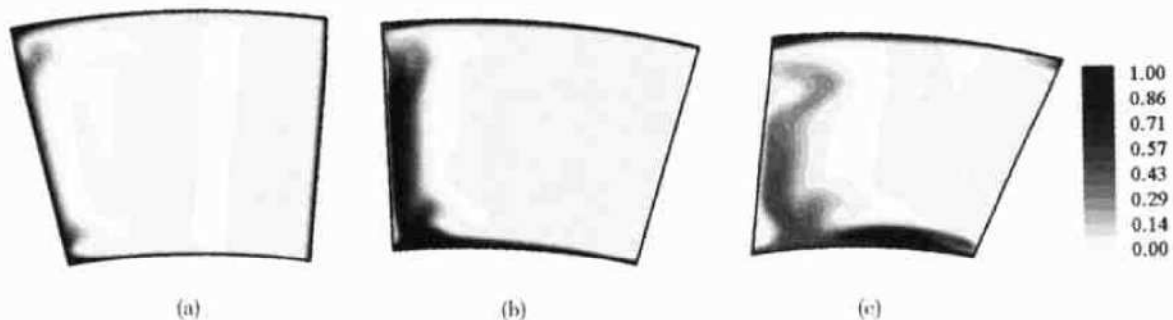


Fig. 4 Contour of energy loss coefficient on S_3

(a) 88.6% C_{ax} ; (b) 105.0% C_{ax} ; (c) 127.5% C_{ax}

从图中可以看出在 88.6% 轴向弦长处, 上下端壁的二次流损失的影响范围大体相当, 但在 105.0% 轴向弦长处由于尾缘附近存在严重的径向窜流, 造成了附面层内的低能流体大量向下端壁迁移引起根部损失显著增大, 这表现为如下两个方面: 一是节距平均的能量损失系数显著地增大; 另一个现象则是下端壁二次流损失影响的范围明显要大于上端壁的。如前所述, 在 127.5% 轴向弦长位置处, 下端壁损失明显增加, 这主要是由于在此位置处存在一较明显的扩压流动, 同时由于径向窜流使该处堆积了大量的低能流体, 这部分流体不具备很强的抵抗逆压梯度的能力, 在此处会呈现出分离的趋势, 因此造成了损失的急剧增加。另外, 对比上端壁附近的损失情况也可以看出径向窜流使低能流体向根部迁移, 一方面减少上端壁的损失, 另一方面使得上端壁出口处的流体与下端壁相比具有较强的抵抗逆压梯度的能力, 因此尽管在该位置处上端壁也存在扩压流动但不至于分离而使损失急剧增大。因此在涡轮设计中要充分考虑到合理地消除径向窜流, 减小由于该现象的出现而引起导叶出口扩压段内损失的急剧增加。

3.3 流场结构分析

图 5 给出了吸力面、压力面极限流线及中间 S_2 流面流线图。从吸力面极限流线可以清晰地看到, 在前缘附近在上下端壁附近马蹄涡的存在。在向流道内部的发展过程中, 随着通道涡的生成, 端壁附近极限流线被卷起而向流道中部偏折。在出口附近由于强烈径向窜流的存在使得低能流体在尾缘附近向根部迁移, 并堆积在下端壁出口处, 同时使得下端壁通道涡的分离线也向下偏转, 在下端壁出口以后可以看出这部分堆积的低能流体在其后的扩压流动中呈现出了分离的趋势, 这是造成出口以后损失剧增的主要原因。

径向窜流的产生主要是由于高压导叶为低展弦比叶片, 并且由图 2 的压力分布曲线可知吸力面扩压部分的实际弧长为 13 mm 左右, 这样叶片表面附面层内的低能流体要经历相当长的减速过程。附面层内流体的压力与其周围势流具有相同的值, 因此附面层内的流体也同样承受着径向压力梯度的作用, 同时由于附面层内上述扩压减速过程的存在, 使得其沿流向的动能不足以克服径向压力的作用, 因此附面层内流体就产生了由上至下径向迁移运动。

从压力面的极限流线上同样可以观察到上下

端壁附近马蹄涡分支的存在。在整个槽道内部, 由于通道涡旋转作用的存在使得压力面的极限流线向端壁处偏转。在叶栅出口位置以后下端壁扩压段处同样可以看到一微弱分离区的存在。

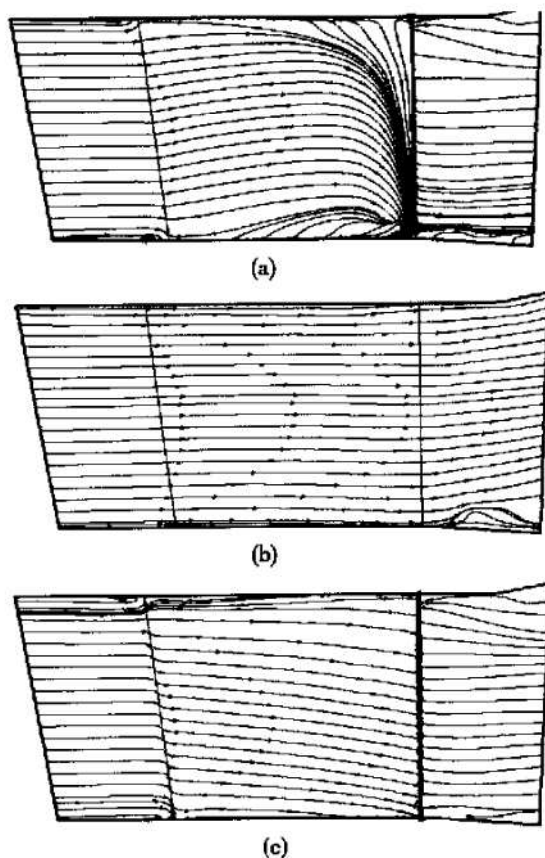


Fig. 5 Streamline on S_2 surface

(a) Suction surface; (b) Mid S_2 ; (c) Pressure surface

众所周知, 对壁面附近流动的研究, 有助于了解该区域内的流场特点, 但要从物面的极限流线图像去推断整个复杂流场状况几乎是不可能的。研究表明, 壁面上的流谱与空间旋涡场并不唯一地相对应。为了研究通道涡的发展过程及分离形态的演变, 在流场中取拟 S_3 截面, 并分析该截面内的流动图像。为此, 计算时先将该面上速度矢量在曲线坐标系下进行分解, 并舍弃拟流向的速度分量, 而只考虑截面内的两个速度分量。当然这种速度分解方法主要是针对分析二次流及通道涡。通常, 二次流被定义为与主流方向不一致的流动。在本文中由于在网格生成的过程中保证了 ξ 族网格线与叶道中心线大致平行, 从而在每个计算点上将 ξ 方向的速度分量舍去, 剩下的速度便构成了二次流场。

图 6 给出了与图 4 相对应的 S_3 截面上涡结构 (以下图示中左侧为吸力面, 右侧为压力面)。

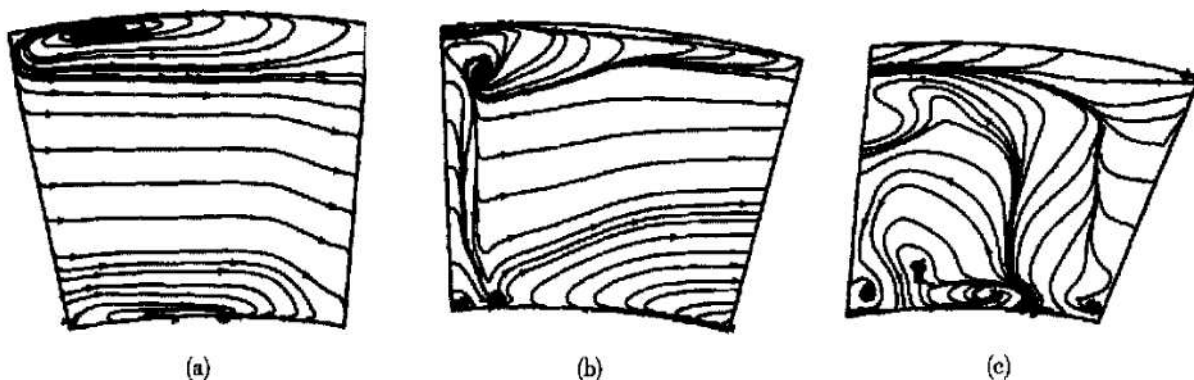


Fig. 6 Vortex structure on S_3

(a) 88.6% C_{ax} ; (b) 105.0% C_{ax} ; (c) 127.5% C_{ax}

在 88.6% 轴向弦长位置处, 上下端壁的通道涡均已形成, 从图中可以明显地看到上端壁的通道涡尺度大于下端壁, 同时下端壁通道涡涡核更为靠近壁面, 这是由于叶片的前掠作用使得上端壁通道涡提早产生因而发展得较为充分, 另外一个不可忽视因素是在此位置上径向压力梯度的作用, 以及由此而诱发产生的径向窜流也抑制了下端壁通道涡的发展。在叶栅的出口截面位置附近即 105.0% 轴向弦长位置处, 上端壁通道涡得到了进一步的发展, 但此时由于径向窜流与下通道涡在吸力面附近所诱导的流体速度方向相反, 因此径向窜流将削弱下端壁通道涡, 此外由于径向窜流在下端壁发生滞止, 因此在该位置附近产生了一个与通道涡旋转方向相反的小涡。在以后发展过程中, 径向窜流诱发产生的旋涡得到了进一步的发展并向流道中间位置处抬起, 并且下端壁通道涡趋于消失。由于出口延伸段上有一扩压段的存在, 它使得下端壁的流体又一次发生了分离, 并且该分离区在 S_3 面上表现为与通道涡旋转方向相反的旋涡。在 127.5% 轴向弦长位置处, 通道涡、径向窜流诱导的旋涡在沿流向运动过程中逐渐耗散掉, 只有下端壁分离区内的旋涡仍在进一步发展。

4 结 论

对某型涡轮高压导叶流场的数值模拟表明出口附近存在着强烈的径向窜流, 该径向窜流的存在造成了低能流体在根部的大量堆积, 导致该区域的损失增加。由于高压导叶出口处存在扩压段, 因径向窜流而堆积在下端壁的低能流体在此扩压段处会产生一定程度的分离, 从而使出口后下端壁损失存在有一急剧

增加的现象。此外, 静叶出口流场的恶化不但会增加静叶出口的损失, 而且直接影响到下一列动叶的进口流场, 从而恶化动叶流场造成级效率下降。因此在设计中, 当采用低展弦比叶片时, 应注意削弱叶片出口附近流场的严重径向窜流, 比如采用端壁成型及弯曲叶片等方法以减少二次流损失。

参考文献:

- [1] Denton J D. Turbomachinery blade design systems [C]. VKI Lecture Series, 1999-02.
- [2] 袁 宁, 张振家, 王松涛, 等. 某型两级涡轮变比热容三维定常流场的数值模拟[J]. 推进技术, 1999, 20(1).
- [3] 袁 宁, 王松涛, 张振家, 等. 涡轮级三维粘性流场的数值模拟[J]. 航空动力学报, 1999, 20(1).
- [4] Duden A, Ravb I, Fottner L. Controlling the secondary flow in a turbine cascade by three-dimensional airfoil design and end-wall contouring[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(2).
- [5] Dossena V. The influence of endwall contouring on the performance of a turbine nozzle guide vane[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(2).
- [6] 王仲奇, 韩万今, 徐文远, 等. 在低展弦比透平静叶栅中叶片的弯曲作用[J]. 工程热物理学报, 1990, 11(3).
- [7] 袁 宁, 张振家, 王松涛, 等. 三维粘性流数值计算在多级透平中的应用[J]. 推进技术, 1999, 20(5).
- [8] 王松涛, 袁 宁, 王仲奇, 等. 具有 TVD 性质的三阶精度 GODUNOV 格式在粘性流场计算中的应用[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(3).

(编辑: 盛汉泉)