

文章编号: 1000-8055(2001)03-0242-07

进口热斑对涡轮级影响的非定常数值模拟

董素艳, 刘松龄, 朱惠人
(西北工业大学 706教研室, 陕西 西安 100083)

摘要: 通过求解二维 N-S 方程对涡轮级进口有温度畸变时的流场和温度场进行了非定常数值模拟。由于叶排间的相互运动, 使叶片表面压力和叶栅通道内的流场呈周期性地变化; 当涡轮进口有热斑时, 热斑中的气流总温要高于周围气流温度, 在通过涡轮级时, 热斑中的高温气流会向转子压力面上迁移, 导致转子压力面上产生热点。热斑的存在对涡轮级中的压力分布影响很小, 但是严重影响温度场的分布。同时进口热斑相对导叶的位置对叶片表面温度的分布也有很大影响。

关键词: 涡轮; 非定常流动; 热斑; 数值模拟

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

1 引言

高性能, 结构紧凑是当今航空发动机发展的趋势, 随着叶轮机机械叶排间的轴向间隙的减小, 叶排间的干扰也变得更加严重。实验研究表明, 涡轮中的流动具有相当强的非稳态特性, 造成这种情况的原因之一就是由于动静叶排间的干扰, 使流场周期性地发生变化。引起涡轮中非稳态流动的另一个原因是进口参数的不均匀, 特别是沿周向的不均匀, 通常燃烧室出口燃气温度分布是不均匀的, 局部的最高温度可以达最低温度的两倍左右, 这种局部的高温气流被称为“热斑”(Hot Streak)。当燃烧室出口热斑进入涡轮级后, 涡轮流场中的非定常现象愈发严重, 由于动静叶排间的相对运动, 冷热气流在动叶排内产生迁移, 热气流往往堆积在动叶压力面上产生局部过热区, 使其承受着巨大的热负荷。准确地理解这种现象的机理, 深入研究存在热斑时的流场和温度场的特征以及各种参数的影响趋势, 将非常有助于涡轮叶片的热分析, 更合理地确定冷却方案, 改善涡轮叶片的温度分布, 从而提高涡轮的可靠性和寿命。国外从80年代开始对热斑现象进行了一些实验研究^[1,2], Rai^[3], Ni^[4]和 Dorney^[5,6]等人在这方面做了大量的数值模拟工作, 至今这方面的工作还

在继续, 国内在这方面的研究则刚起步, 本文的工作就是通过求解二维非定常 N-S 方程来研究涡轮级中的热斑现象。

2 数值方法

在移动域上二维非定常雷诺平均 N-S 方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} W dV + \oint_{\Omega} [E dS_x + F dS_y] = \int_{\Omega} R dV$$

积分域为 Ω , $\partial\Omega$ 为域的边界。这里:

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \rho u - \rho u_g \\ \rho u^2 + P - \rho uu_g \\ \rho uv - \rho vu_g \\ (\rho e + P)u - \rho eu_g \end{bmatrix}$$
$$F = \begin{bmatrix} \rho v - \rho v_g \\ \rho uv - \rho uv_g \\ \rho v^2 + P - \rho vv_g \\ (\rho e + P)v - \rho ev_g \end{bmatrix}$$

其中 u 和 v 是流体的绝对速度, u_g 和 v_g 是网格移动速度, 对静叶排来说 $u_g = 0$, $v_g = 0$ 。采用绝对坐标系的好处在于对静叶排和动叶排可以在一个统一的坐标系中考虑, 便于动静叶排网格交接面的处理, R 为粘性项。

计算采用显式二阶迎风有限体积时间推进格

收稿日期: 2000-09-18; 修订日期: 2001-01-15

作者简介: 董素艳(1974-), 男, 西北工业大学706教研室博士生

式, 湍流模型采用 RNG (Renormalization Group) $k-\epsilon$ 湍流模型及标准的壁面函数。

2.1 计算网格

本文采用的算例为美国联合技术中心 UTRC 的第一级实验涡轮叶高中截面处的叶型, 对该实验设备的描述详见文献[2], 静、动叶排分别包含22和28个叶片, 精确的数值模拟需计算所有的叶片通道, 但这样做消耗的资源太大, 为节省起见, 对叶片数做了一些简化, 通过放大动叶叶型, 使静、动叶片数比为1:1。计算网格采用非结构三角形网格, 如图1所示, 叶排间距约为15%

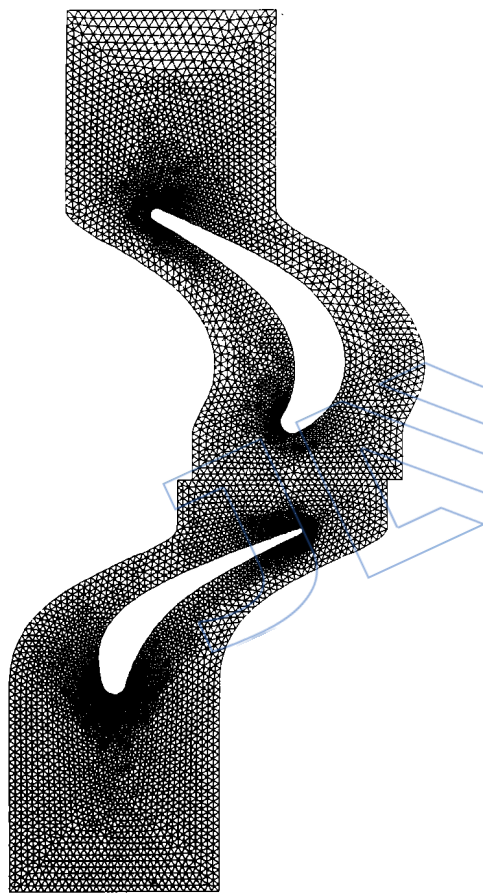


图1 非结构三角形计算网格

Fig. 1 Unstructured computational grid

的叶片轴向弦长, 静、动叶栅中的网格单元数分别为5810, 5082。

2.2 边界条件的处理

2.2.1 进出口边界条件

对亚音速来流, 在上游边界上指定3个量, 即: 来流总压、总温及一个进口流角, 静压由计算域内外插得到。在湍流的情况还需给出 k 和 ϵ 在进口边界上的分布。对来流有热斑的情况, 热斑中的参

数定义为: 静压、总压与周围流体一致, 假设热斑的温度为周围流体的 m 倍, $m = T_{hs}/T_{\infty}$, 则热斑中的参数为: $\rho_{hs} = \rho_{\infty}/m$, $u_{hs} = u_{\infty} \times \sqrt{m}$, $v_{hs} = v_{\infty} \times \sqrt{m}$, $M_{hs} = M_{\infty}$, $a_{hs} = a_{\infty} \times \sqrt{m}$, 上述参数中角标 hs 代表热斑。

对亚音速出口气流, 只需指定一个出口边界上的静压 p , 其它量由计算域内外插得到。

2.2.2 物面边界条件

在不可渗透壁面情况下, 相对法向速度分量应为零, 即没有任何质量流穿过边界, $\vec{V}_{n,r} = 0$, 此外还应满足相对切向速度为零, $\vec{V}_{t,r} = 0$ 。

计算中假设壁面是绝热的, 即 $\partial T / \partial n = 0$

2.2.3 周期性边界条件

对计算所采用的转子与静子叶片个数比, 如静动叶排彼此的组合栅距相同, 仅采用简单的对称技术处理。

2.2.4 非定常叶排相干边界条件的处理

非定常多排计算中, 由于叶排间位置的相对移动, 使每排叶栅的交界面上的参数随时间不断变化, 进而使得流场呈现周期性的变化规律, 如何确保叶排间信息的合理传递, 将直接关系到计算的精度及收敛性。本文对该界面的处理采用插值方法, 即各排的叶栅网格分别深入到对应的另一排网格中, 重叠一个网格单元, 在两排叶片的相互移动的过程中, 由某一时刻叶排位置的相对变化, 得到网格单元间的对应关系, 根据这种网格在空间上的对应关系插值得到边界上的参数。

3 算例和计算结果的讨论

叶型采用 UTRC 实验涡轮的中截面的型面座标, 计算工况为导叶前方来流速度与转子切向速度之比近似为 $C_x/U \approx 0.78$ (C_x 是导叶入口轴向来流速度, U 是动叶切向速度), 来流马赫数约为0.07, 叶排间距约为15%的叶片轴向弦长。分别模拟了来流均匀、热斑正对导叶前缘及热斑位于叶栅通道中时的3种情况。这里来流热斑温度的分布形状近似为一正弦曲线, 范围占导叶栅进口边界的1/3, 热斑的最大温度位于热斑的中心, 温度值是主流温度的1.5倍, 主流温度为300 K。

首先计算了来流均匀的情况, 图2为叶栅通道内静压在1个周期中4个时刻的等值线分布(等值线为等间距分布), 由图可见在叶排的相对运动中, 叶栅通道内的压力是随时变化的, 静叶栅中等

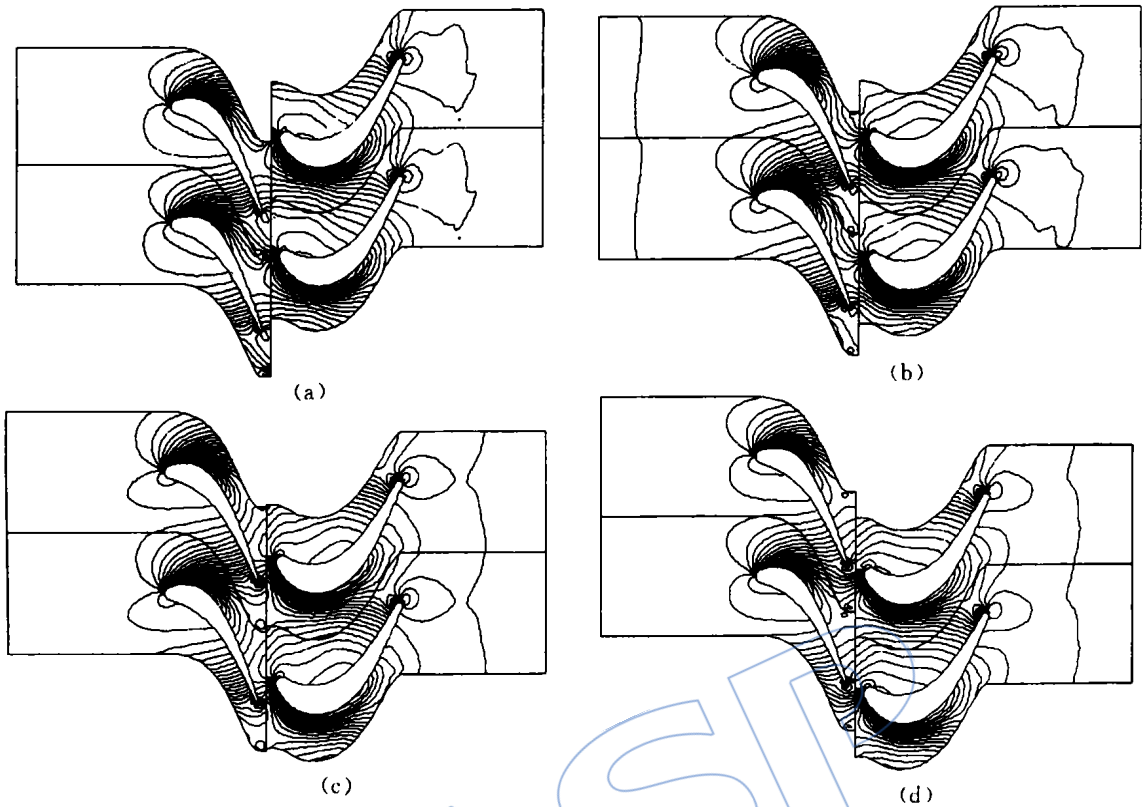


图2 来流均匀时1个周期中的4个时刻压力等值线分布

Fig. 2 Unsteady pressure contours in a period

值线的变化较小,说明叶排的相对运动对静叶的影响较小,但是对动叶栅中的影响要大得多。

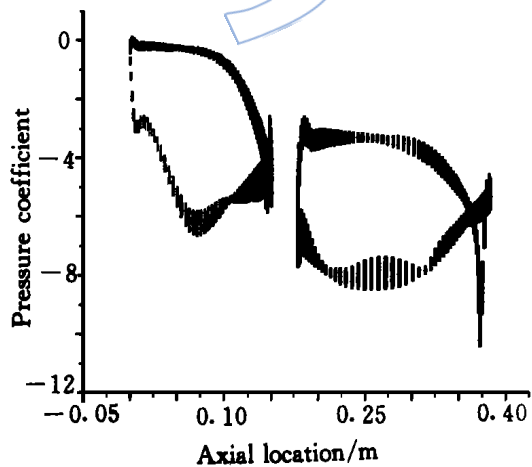


图3 叶片表面压力系数在1个周期内的波动情况

Fig. 3 Unsteady pressure coefficients envelope on the blade

图3是叶片表面压力系数在1个周期内的脉动范围,本文中压力系数定义为: $c_p = (p - p^*) / [(1/2) \rho_{inlet} U^2]$, p 是当地静压, p^* 是来流总压,

ρ_{inlet} 是来流密度, U 是动叶排移动速度。轴向的坐标零点对应于导叶前缘点的横坐标,周向的坐标零点对应于导叶尾缘点的纵坐标。这里需说明是对来流有热斑的情况,来流密度取的是无热斑时的来流密度。由图可以看出,导叶前缘及动叶尾缘

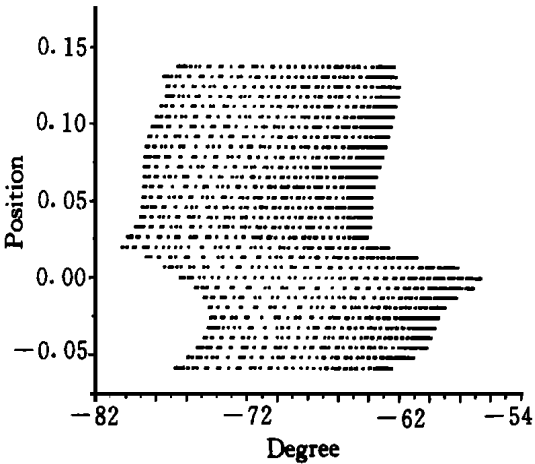


图4 静叶出口边界气流角在1个周期内的变化情况

Fig. 4 Unsteady flow angle envelope at the outlet of stator

表面的压力波动相对较弱, 而导叶尾缘及动叶前缘处的压力脉动比较强烈, 这是由于叶排间距较短, 导叶尾缘和动叶前缘相互干扰较为剧烈。图4是静叶排出口边界各个周向位置上的气流角在1个周期中的脉动情况, 本文中的气流角定义为速

度矢量与轴向的夹角, 逆时针为正。图中说明在叶排相对运动的过程中气流角变化的非常剧烈, 达到20°左右, 这样的情况使动叶的攻角不断变化, 从而引起叶片表面压力的大幅脉动。

图5是3种计算工况得到的叶片表面周期平均压力系数的分布, 以及由实验得到的型面压力系数分布^[1]。由图可见, 3种计算工况下得到的压力分布都非常接近, 说明在热斑中的总压和静压与周围气体相同时, 热斑的存在不会对压力分布造成重大的影响。图中导叶和动叶的大部分表面的压力系数的时间平均值都与实验符合良好, 只是在动叶吸力面尾缘附近, 计算值与实验值有些偏差。

图6, 图7分别是热斑正对导叶前缘和位于叶栅通道中时, 叶栅通道一个周期中4个时刻(a, b, c, d)的静温分布。在这两个图中, 由于进口热斑的加入, 使整个涡轮级中的温度分布发生很大变化, 静叶栅中的温度分布相对简单, 但动叶栅中温度分布变得非常复杂, 可观察到热气流在动叶栅中有向压力面迁移的现象, 并形成V形的等值线分布。上述结果与 Rai^[3]所得的结果是一致的。对这个现象的解释是, 当加入热斑后, 几乎对导叶排

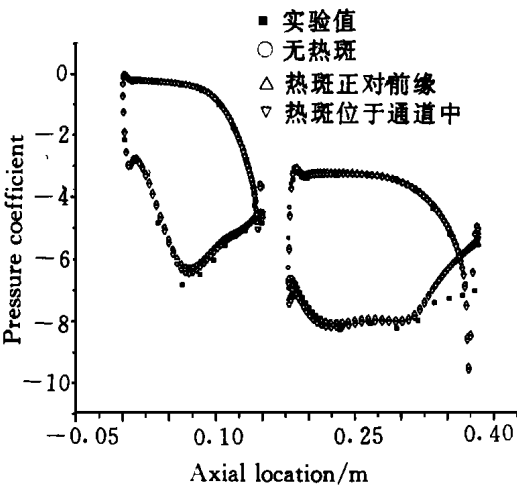


图5 叶片表面周期平均压力系数

Fig 5 Time averaged pressure coefficient profile on the blade

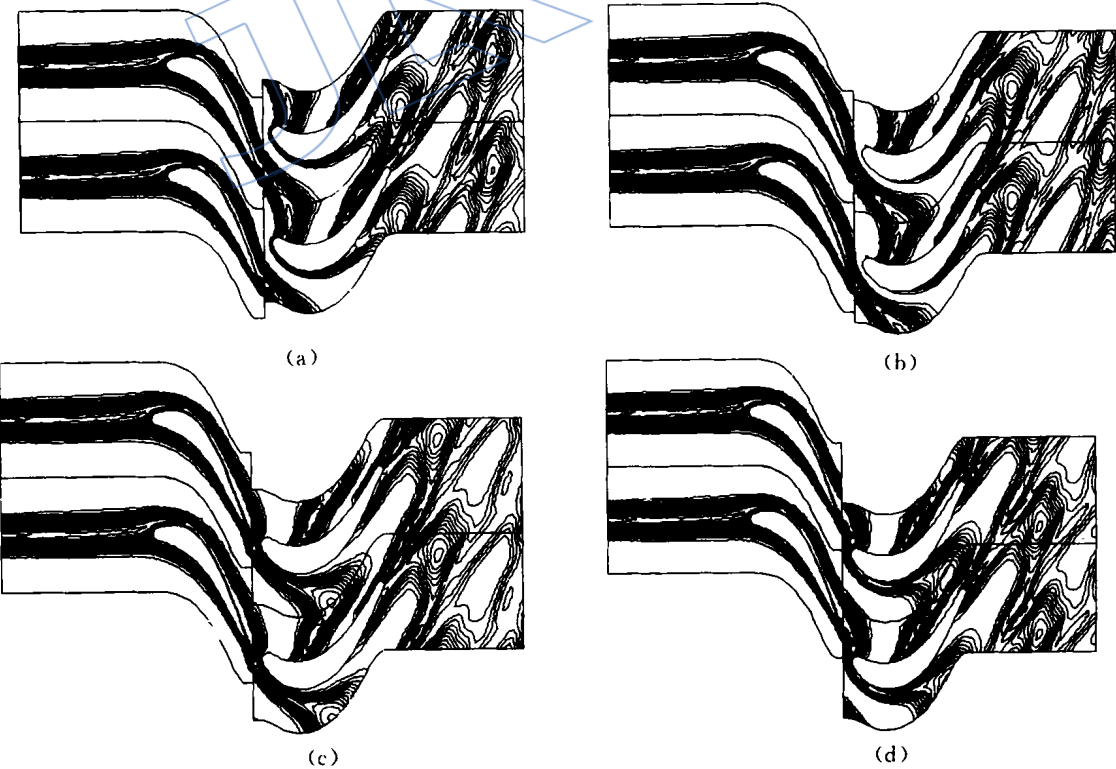


图6 热斑正对导叶前缘时1个周期中4个时刻的温度分布

Fig 6 Unsteady temperature contours in a period, hot streak impinging on vanes

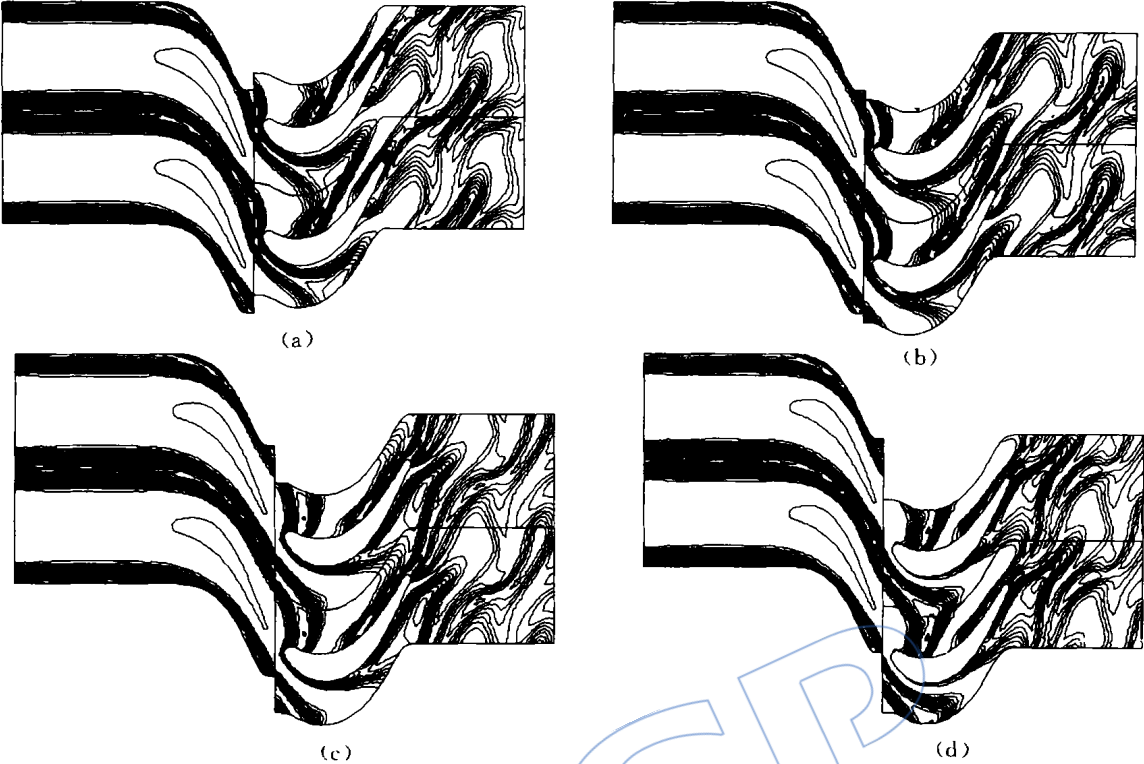


图7 热斑位于叶栅通道中时1个周期中4个时刻的温度分布

Fig 7 Unsteady temperature contours in a period, hot streak introduced between vanes

的流场没有影响,在导叶出口处,热斑中的总压、静压与没有热斑时的情况是一致的;但由于热斑的总温高,造成了热斑中的气流绝对速度比周围流体的速度更大,相对于动叶来说,热斑中的气流对动叶具有更大的攻角,更高的相对速度,因而驱使热气流向动叶压力面迁移,表现在动叶通道内等值线上有一个转折。为了证实这一点,图8给出

了静叶排出口边界上气流角的周期平均值的分布,纵座标为沿周向的位置,图中的3条曲线非常接近,说明无论是否包含热斑,对静叶排出口气流角的影响很小。图9是静叶排出口边界上流速的

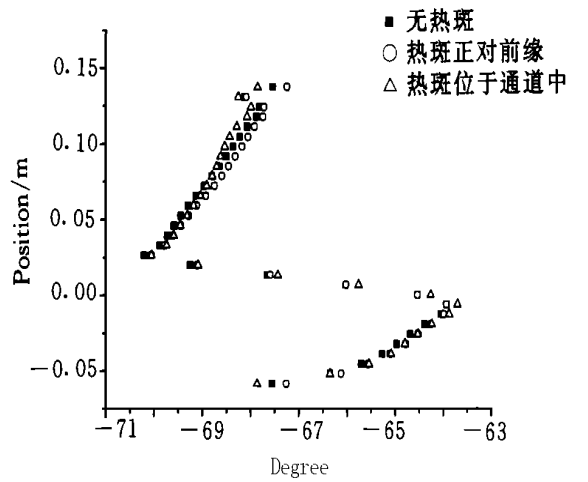


图8 导叶出口边界出口气流角的周期平均值

Fig 8 Time averaged flow angle at the outlet of stator

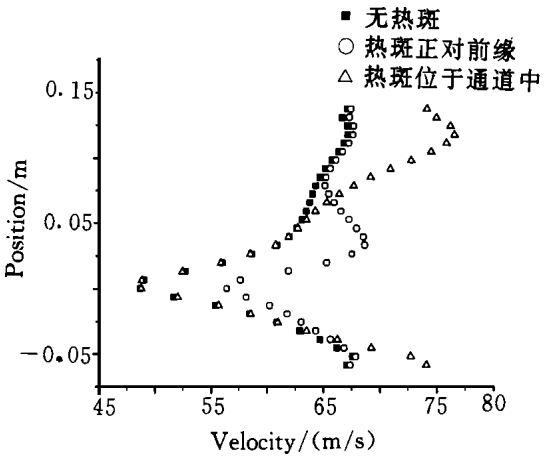


图9 导叶出口边界出口气流流速的周期平均值

Fig 9 Time averaged flow velocity at the outlet of stator

周期平均值,当热斑位于叶栅通道中间时,静叶排出口处叶栅通道中间部分热气流的流速显著增大,而当热斑正对导叶前缘时,高温气流位于静叶

尾缘下游的尾迹区, 尾迹中的掺混过程会削弱静叶出口处热气流的流速, 使热气流的出口流速较热斑位于通道中间位置时有所降低。尽管如此, 热气流的温度仍较周围流速大, 上述高温气流都会有向动叶压力面迁移的趋势。

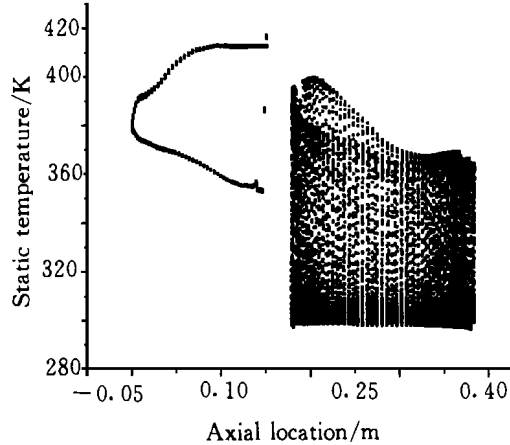


图10 热斑正对前缘时叶片表面静温在1个周期中的波动情况

Fig 10 Unsteady temperature envelope on the blade, hot streak impinging on vanes

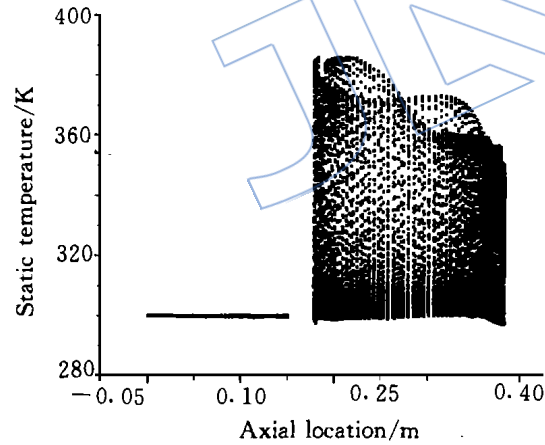


图11 热斑在通道中时叶片表面静温在1个周期中的波动情况

Fig 11 Unsteady temperature envelope on the blade, hot streak introduced between vanes

图10, 图11分别是热斑正对导叶前缘和位于通道中间时叶片表面静温在一个周期内的脉动分布。由图可见, 在静叶排内温度的波动相对很小, 动叶表面的温度则有剧烈的变化, 在不同瞬时, 由于热气流在动叶排中的迁移会撞击到动叶表面的不同位置, 在撞击区产生局部高温区, 整个叶片呈

现非常不均匀的温度分布, 并随时间剧烈变化。

图12是热斑位于通道中间时叶片表面时间平均温度分布, 图中 PS , SS 分别代表叶片压力面和吸力面。由图可见叶片表面的周期平均温度分布相对较平缓。当热斑位于叶栅通道中时, 导叶表面的温度不受热斑的影响, 热斑局限在导叶通道中间, 压力面与吸力面的时间平均温度与无热斑情况时相同。动叶表面温度受到热斑的强烈影响, 整个动叶表面温度都明显高于导叶, 压力面的温升更大。

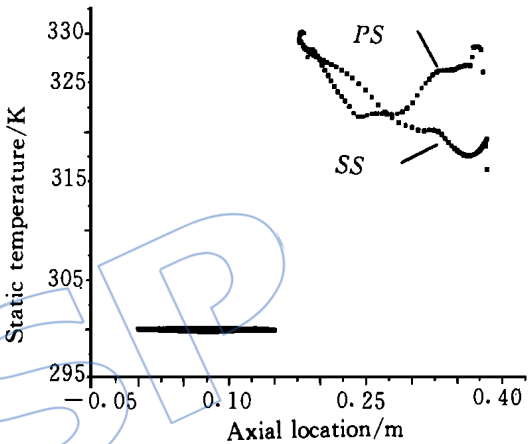


图12 热斑位于通道中时叶片表面的时间平均温度

Fig 12 Time averaged temperature on the blade, hot streak introduced between vanes

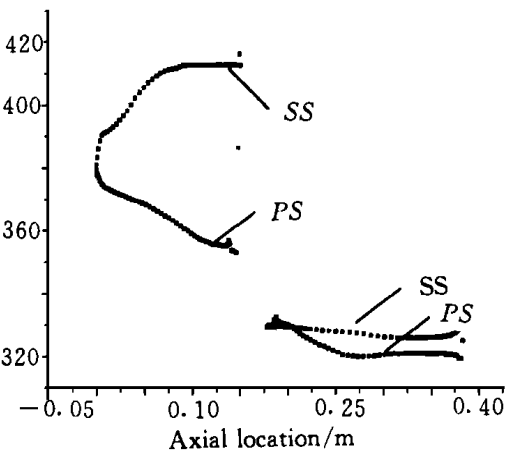


图13 热斑正对前缘时叶片表面的时间平均温度

Fig 13 Time averaged temperature on the blade, hot streak impinging on vanes

图13是热斑正对导叶前缘时叶片表面的时间平均温度分布, 此时热斑中的高温气流紧贴叶片表面, 使导叶温度明显上升, 接近热斑的高温水

平。另外由于静叶环量的作用,热气流在接近导叶时会向吸力面偏转(见图6),在导叶通道内气流加速过程中高温气流的核心区会更接近壁面,造成吸力面的温度沿流向逐渐上升,并且导叶的吸力面的温度要比压力面高得多。在导叶尾缘出口处,由于导叶尾迹的掺混作用,热气流的温度会下降,温度也会有所降低,由图8还可看到在尾迹中气流角相对于通道中间要更小些,使热气流相对于动叶的攻角变小,从而使高温气流向动叶压力面迁移的趋势减弱并强化了对动叶吸力面的影响。图13中的计算结果表明,此时动叶吸力面上的静温要高于压力面的静温。从以上分析可以看出,热斑位置对动叶表面温度分布影响的大体规律是:当热斑的位置从叶栅通道中移到正对导叶前缘时,对动叶的吸力面会产生更不利的影响。检查动叶上瞬时温度的分布,局部最高温度一般发生在压力面或前缘,这是由于热气流向压力面迁移的结果;吸力面温度的分布则相对较均匀,但热气流覆盖的范围相对较长些,从而吸力面可能得到较高的平均温度。

4 结 论

(1) 在叶排相对运动中,叶片表面的压力周期性地脉动,在一排导叶和一排动叶的情况下,导叶前缘和动叶尾缘的压力脉动幅度较小,而在导叶尾缘附近及动叶前缘压力脉动较大。

(2) 热斑的引入对整个叶栅的时均压力场影响很小,热斑的位置对时均压力的影响也很小。

(3) 进口热斑在不同位置几乎不改变静叶出口的气流角,但热斑位置对导叶出口气流的速度

有较大影响。

(4) 当热斑中静压、总压与周围流体一致时,由于绝对速度增大,高温气流将以正冲角流向动叶,造成热流体向动叶压力面迁移,冷流体向吸力面迁移。

(5) 热斑的位置严重影响叶片表面温度分布。当热斑位于叶栅通道中时,对导叶的温度没有影响,但会使动叶压力面的温度升高。当热斑正对导叶前缘时,会极大升高导叶吸力面的温度,并使动叶的吸力面热负荷增大的趋势。

参考文献

- [1] Dring R P, Joslyn H D, Hardin L W, et al Turbine Rotor-Stator interaction [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1982, 104: 729- 742
- [2] Butler T L, Shama O P, Joslyn H D, et al Redistribution of an Inlet Temperature Distortion in an Axial Flow Turbine Stage[J]. AIAA Journal of Propulsion and Power, 1989, 5: 64- 71
- [3] Rai M M, Dring R P. Navier-Stokes Analysis of The Redistribution of Inlet Temperature Distortions in a Turbine [R]. AIAA 87- 2146
- [4] Takahashi R K, Ni R H. Unsteady Euler Analysis of the Redistribution of an Inlet Temperature Distortion in a Turbine[R]. AIAA 90- 2262
- [5] Dorney D J, Gundy-Burlet K L, Sondak D L. A Survey of Hot Streak Experiments and Simulations [J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1999: 16, 1- 15
- [6] Dorney D, Davis R, Edwards D. Unsteady Analysis of Hot Streak Migration in a Turbine Stage[R]. AIAA 90- 2354

(责任编辑 杨再荣)

Unsteady Numerical Simulation on the Effects of Hot Streak Phenomena on Turbine Stage

DONG Su-yan, LU Song-ling, ZHU Hui-ren

(7th Dept., Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The unsteady numerical simulation is completed by means of two-dimensional, Navier-Stokes analysis to predict unsteady flow and temperature fields with inlet temperature distortions in a turbine stage. Because of relative movement of blade rows, the pressure distributions on the blade and the flow field in the cascade vary periodically. When the distribution of inlet flow temperature becomes non-uniform, the inlet hotter gas in the hot streak will migrate to the pressure surface of the rotor blade and causes the hot spot on it. The location of the hot streak has a significant effect on the surface temperature distribution. However the presence of hot streak has little effect on the pressure distribution on the blade surface.

Key words: turbine; unsteady flow; hot streak; numerical simulation