

文章编号: 1000-8055(2002)01-029-06

多通道涡轮级的流场/温度场非定常数值模拟

董素艳, 刘松龄, 朱惠人

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 通过求解二维 N-S 方程对多通道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。相对于简化成单通道涡轮级的数值模拟得到更精确的结果, 尤其是对温度场的模拟。改变热斑数与导叶通道数比会对动叶时均温度分布产生较大影响, 动叶压力面温度分布所受的影响更大。

关键词: 涡轮; 非定常; 热斑; 流场; 温度场; 数值模拟

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Multipassage Unsteady Simulation of Flow and Temperature Fields in a Turbine Stage

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

(Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A two-dimensional Navier-Stokes equation was solved to predict the unsteady, multipassage flow and temperature fields with hot streak in turbine inlet. Comparing with the results of single-passage's simulation, the present multipassage simulation leads to more precise results, especially for temperature fields. Time averaged temperature distributions on rotor surface will greatly change with the hot streak/airfoil ratio, and the temperature distribution changes more on the pressure surface than that on the suction surface of the rotor.

Key words: turbine; unsteady; hot streak; flow fields; temperature fields; Numerical Simulation

1 引言

在实际的叶轮机中, 为避免各排叶轮间可能出现的周期性破坏, 相邻叶排的叶片数都是不等的并且也是不可约的。在非定常的数值模拟中, 为减少计算工作量, 通常将其数目简化为 1:1 的形式。这样简化有时跟实际叶片数目相差较大, 因此不可避免地带来一些误差。国外一些人的计算与实验^[1~5]结果表明, 对叶片数的简化可能会带来一些流场的失真。当涡轮级进口存在热斑时, 数值模拟采用不同的叶排通道比会改变叶排通道内

的温度分布。本文的工作主要研究不同叶排通道比对涡轮级中流场和温度场非定常效应的影响, 在通道比为 1:2 和 2:3 的情况下, 对不同来流条件下的非定常流场及温度场进行了数值模拟。

2 计算结果与讨论

本文数值模拟求解的是二维非定常雷诺平均 N-S 方程, 采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型及标准的壁面函数。计算采用二阶迎风显式时间推进格式。

叶型采用 UTRC 第一级涡轮叶高中截面处的型面, 叶排间距约为 15% 的叶片弦长, 数值网

收稿日期: 2001-01-15; 修订日期: 2000-04-01

作者简介: 董素艳(1974-), 男, 西北工业大学航空动力与热力工程系博士生

格为三角形非结构网格, 通道比 1:2 时, 非结构网格包括 16824 个三角形单元, 8853 个节点。通道比 2:3 时, 非结构网格包括 25381 个三角形单元, 13276 个节点。

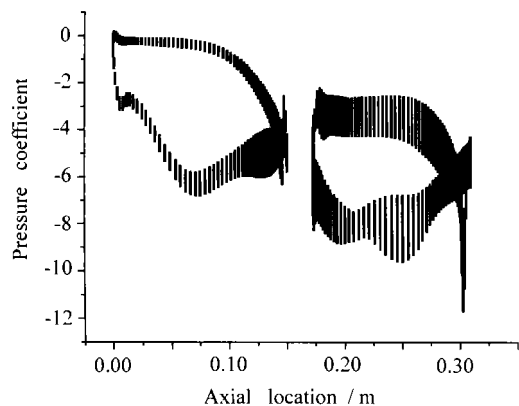


图 1 来流均匀时叶片表面压力系数在 1 个周期内的波动情况

Fig. 1 Unsteady pressure coefficient envelope on the blade (NH, 2:3)

来流速度与动叶转速比 $C_x/U \approx 0.78$, 来流湍流度 0.5%, 分别模拟了来流均匀及有热斑时的不同工况。这里来流热斑温度的分布形状近似为一正弦曲线, 热斑的范围约为导叶栅距的 1/3, 热斑中心最高温度 $T_{hs}/T_\infty = 1.5$, 主流温度为 $T_\infty = 300$ K。

2.1 导叶排与动叶排通道比 2:3

在导叶排与动叶排通道数比为 2:3 时, 研究了来流均匀和有热斑时的非定常流场及温度场。

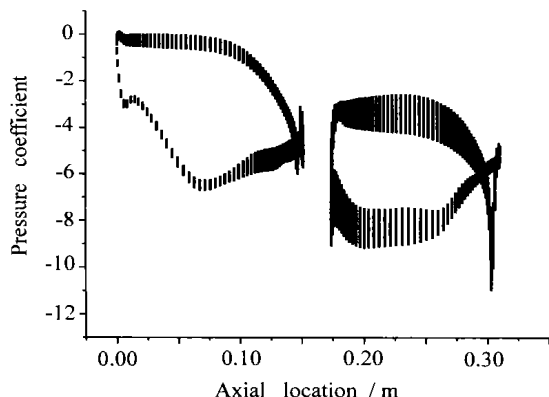


图 2 热斑正对导叶前缘时叶片表面压力系数在 1 个周期内的波动情况

Fig. 2 Unsteady pressure coefficient envelope on the blade (HL, 2:3)

同时针对来流有热斑的情况, 还分别研究了导叶栅 2 个通道均有热斑及只有 1 个通道中有热斑

(热斑通道数比分别为 1:1 和 1:2) 的情况。

首先计算来流均匀的情况, 图 1 是叶片表面压力系数在 1 个周期内的脉动范围(横坐标零点对应于导叶前缘点), 由于叶排间的相互干扰, 导叶接近尾缘的部分压力脉动幅度较大, 而动叶是整个叶片表面都有很大幅度的脉动。与以前计算的叶排通道数比为 1:1 时的结果相比, 则压力波动幅度要大得多, 这是由于相邻排叶片数不等使得瞬时动叶排不同通道中流动变得更加不对称。

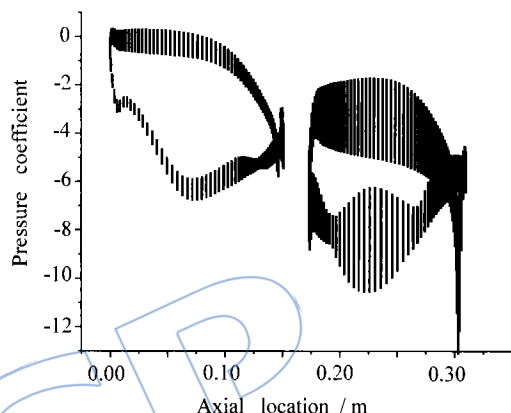


图 3 热斑位于通道中时叶片表面压力系数在 1 个周期内的波动情况

Fig. 3 Unsteady pressure coefficient envelope on the blade (HM, 2:3)

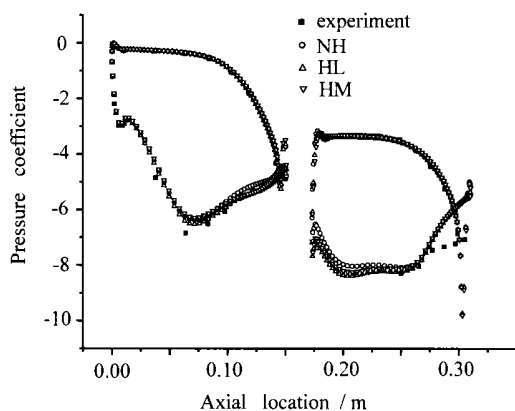


图 4 叶片表面周期平均压力系数

Fig. 4 Time averaged pressure coefficient profile on the blade (2:3)

当加入热斑后, 叶栅通道内的瞬态压力分布会有有一定程度的变化, 图 2 是热斑正对导叶前缘时叶片表面压力系数脉动分布。图 3 是热斑位于通道中时压力系数的脉动分布, 与无热斑情况下的压力脉动分布相比较, 显然热斑的加入在一定

程度上改变了叶栅通道内瞬态的压力分布,但是热斑的加入并不一定会加强压力的脉动,有时可

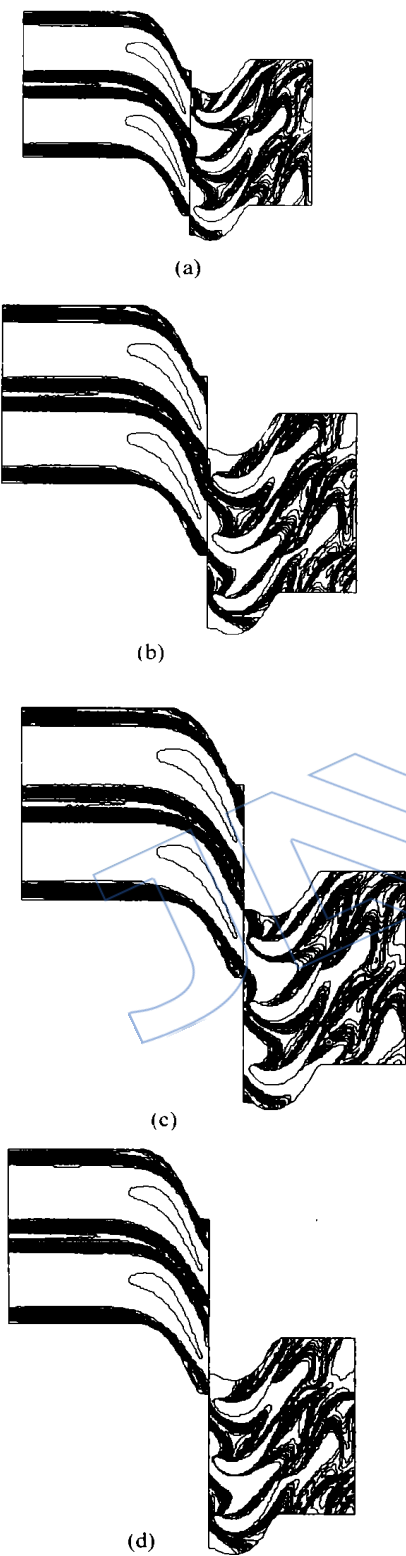


图 5 通道比 2 : 3, 热斑位于通道中时 1 个周期内 4 个时刻时的温度等值线分布

Fig 5 Unsteady temperature contours in a period (HM , 2 : 3)

能消弱压力随时间的波动。图 4 是有热斑和无热斑时 3 种情况下叶片表面的时均压力分布及与实验结果的比较(NH 表示来流均匀, HL 代表热斑中心正对导叶前缘, HM 代表热斑中心位于通道中间), 从图中可知 3 种情况的时均压力分布非常接近, 说明热斑的加入对叶片时均压力分布影响很小。并且计算得到的时均压力分布较叶排通道比 1 : 1 的结果更精确, 这是因为通道比为 2 : 3 时更贴近于实验工况中的叶排通道数比。

热斑的加入极大地改变了叶栅通道内的温度分布。图 5 是热斑位于叶栅通道中时叶栅通道 1 个周期内 4 个时刻(a, b, c, d)的温度等值线分布,

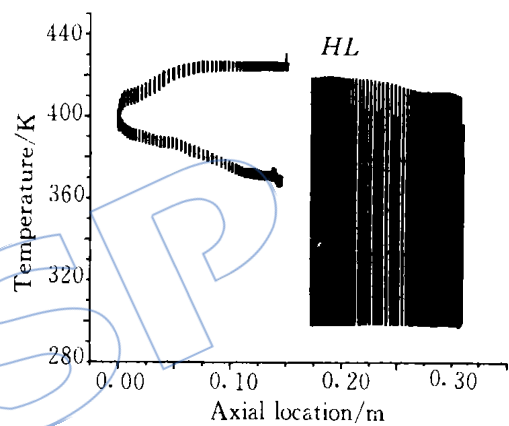


图 6 热斑正对前缘时叶片表面温度在 1 个周期内的波动情况

Fig 6 Unsteady temperature envelope on the blade (HL , 2 : 3)

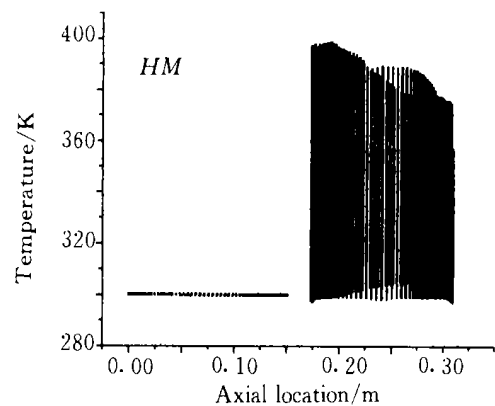


图 7 热斑位于通道中时叶片表面温度在 1 个周期内的波动情况

Fig 7 Unsteady temperature envelope on the blade (HM , 2 : 3)

等值线为等间距分布, 温度范围从 300~ 450 K。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。对这种迁移现象的机理,前面已有文章解释,这里不再重复。图6,图7分别是热斑正对导叶前缘及位于叶栅通道中间时叶片表面温度随时间的脉动分布。由于在动叶的转动过程中,高温气流与动叶表面不同位置的接触使动叶整个表面的温度脉动都非常大。在热斑正对导叶前缘的情况,动叶表面脉动的最高温度要大于热斑位于叶栅通道中的情况,并且两者的分布图形也有一定差别。热斑正对前缘时动叶尾缘部分的温度能达到与前缘相近的高温,但是当热斑位于叶栅通道中时,动叶尾缘部分的最高温度要低于前缘所能达到的温度。

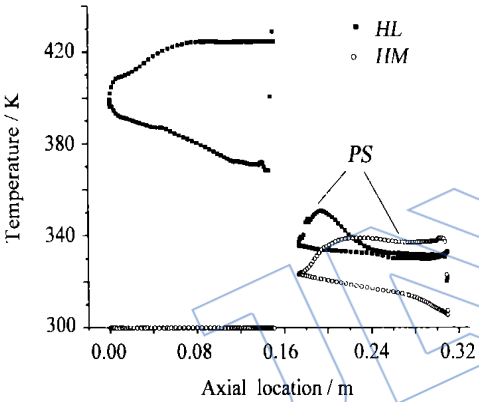


图8 热斑通道比 1 : 1, 叶片表面时间平均温度分布
Fig 8 Time averaged temperature profile on the blade (1 : 1)

图8是热斑在入口不同位置时,叶片表面时均温度分布图,图中 PS 代表叶片压力面。针对本文的计算工况发现,在热斑正对导叶前缘时,由于热气流贴附导叶表面,因此导叶表面温度很高,叶片环量的作用使热气流的大部分从导叶吸力面侧流过,吸力面的温度要高于压力面,并且在吸力面侧的加速流动过程中热斑的高温核心更贴近叶片表面,从而使叶片吸力面的温度分布沿流向不断升高,而压力面侧由于沿流向热气流的扩散,叶片表面温度不断降低。对于动叶发现,压力面侧的温度要高于吸力面,尤其在前缘附近,在叶片后半部分压力面侧与吸力面侧的温度分布很接近,整个动叶的吸力面温度分布非常平缓。当热斑位于叶栅通道中时,叶片表面温度分布呈现出非常明显的差别。对导叶来说,由于热斑位于叶栅通道中间,热气流与导叶并不接触,所以导叶的温度不受热斑的影响,和无热斑时的温度分布一致。但是动叶的压力面温度要远高于吸力面的温度,热斑在动叶中的迁移现象在这里得到非常明显的证实。

对于实际的燃气涡轮进口,1个燃油喷嘴后对应1个局部燃气高温区,但是并不是1个导叶通道对应着1个高温区,而是几个叶栅通道对应1个局部高温区。为了研究热斑数与导叶通道数比的关系,这里只在其中的1个导叶通道中布置了热斑,热斑通道数比为1 : 2,重复上面的数值模拟。数值模拟结果表明涡轮级的压力分布所受热斑的影响与上面的工况类似,对时均压力场的分布几乎没有大的影响。但是对于温度场分布有很大的影响,图9是热斑正对导叶前缘时1个周期内4个时刻的温度等值线分布。由于热斑不对

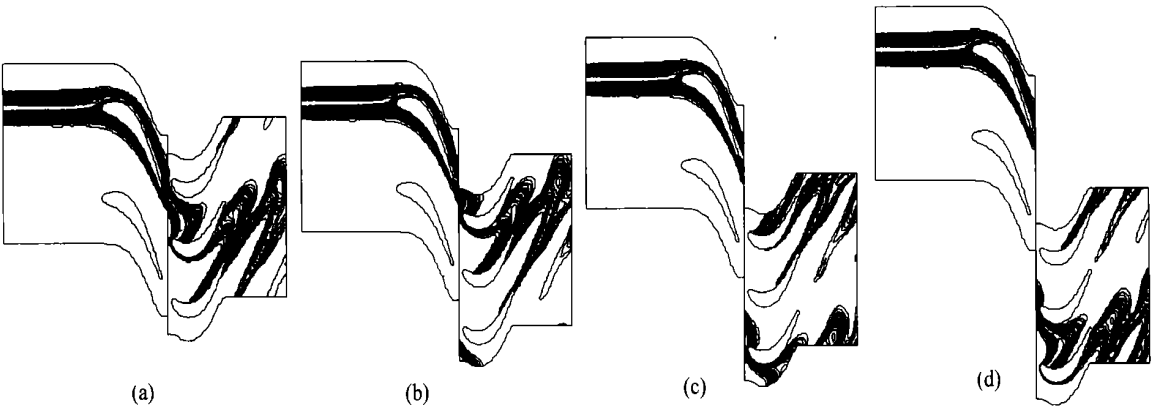


图9 通道比 2 : 3, 热斑正对导叶前缘时 1 个周期内 4 个时刻时的温度等值线分布
Fig 9 Unsteady temperature contours in a period (HL, 2 : 3)

称的加入,使温度的等值线分布与 2 个通道内均加热斑的情况有很大不同,当动叶某一通道运动到与导叶包含热斑的通道相对时有较多的热流体进入该通道。图 10 是叶片表面时均温度分布(HL_1hot 代表热斑正对导叶前缘, HM_1hot 代表

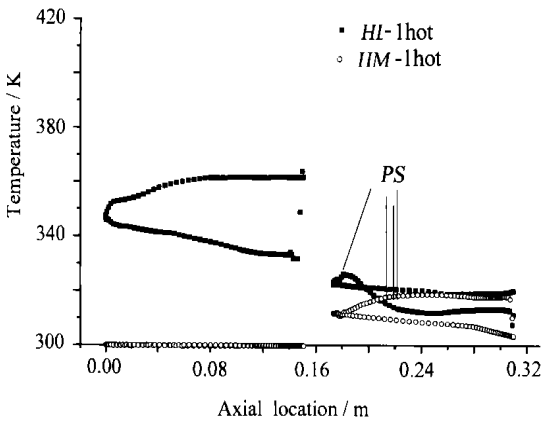


图 10 热斑通道比 1 : 2, 叶片表面时间平均温度分布
Fig. 10 Time averaged temperature profile on the blade (2 : 3)

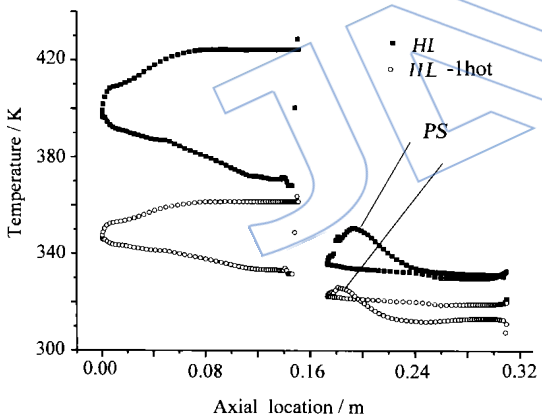


图 11 热斑正对导叶前缘时,不同热斑通道比,叶片表面的温度分布
Fig. 11 Time averaged temperature profile on the blade ($HL, 2:3$)

热斑位于通道中间。在热斑正对导叶前缘的情况下,正对热斑的导叶温度分布与以前的一样,但是由于另一导叶没有热斑正对,所以温度分布与无热斑情况下相同,而计算导叶平均温度时是计算两个导叶总的平均温度,所以得到的总平均温度较低)。当热斑正对导叶前缘时,动叶压力面侧的温度分布形状变化较大,前缘部分的温度要高于吸力面侧的温度,但是在叶片后半部分压力面侧的温度要低于吸力面。热斑位于叶栅通道中时,动

叶表面的温度分布规律不变,仍是压力面的温度要比吸力面的温度大很多。为了比较热斑数与导叶通道数比的变化对叶片温度分布的影响,将不同热斑通道数比时的叶片时均温度分布绘制在一起,图 11、图 12 分别是热斑正对导叶前缘及位于通道中时不同热斑通道数比对应的叶片表面时均温度分布。从图中很明显地看出热斑通道数比的减少从整体上降低了动叶表面温度。这一点可以解释为:从直观的角度来看,由于只在 1 个叶栅通道内布置了热斑,加入整个计算域的热流相当于减少了一半,从而使动叶的温度随之降低。并且热斑通道数比的改变对动叶压力面的温度影响更大。本文计算结果表明减少热斑通道数比使动叶压力面的温度下降得更多。这是因为热斑在动叶

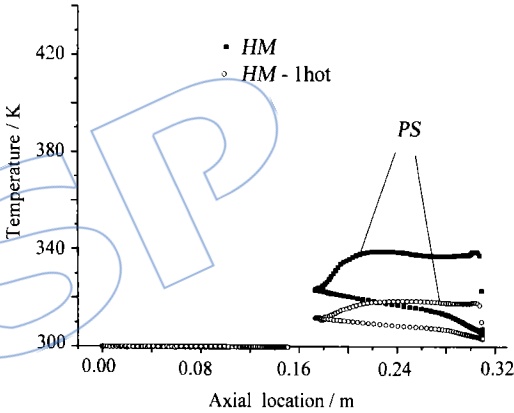


图 12 热斑位于通道中时,不同热斑通道比,叶片表面的温度分布
Fig. 12 Time averaged temperature profile on the blade ($HM, 2:3$)

栅中是朝动叶压力面迁移,对动叶压力面的温度影响更大,所以减少加入的热斑很显然会对动叶压力面产生更大的影响。

2 2 导叶排与动叶排通道比 1 : 2

为了对上面的结论做进一步论证,又对通道数比为 1:2 的情况做了数值模拟。导叶入口边界加入热斑的参数与通道比 2:3 的热斑参数一致。因为通道比定时均压力场分布影响较小,这里不再讨论对流场的非定常影响,只给出有来流热斑时的温度分布。图 13、图 14 分别是热斑正对导叶前缘及位于通道中间时的 1 个周期内某个时刻时的温度分布等值线。从图可见,相对动叶栅通道而言,由于动叶的稠度更大,使得温度等值线的分布更密,说明高温流体的影响范围要更大些。

图 15 是时间平均叶片表面温度分布,动叶压

力面温度要高于吸力面,与通道数比 2:3 得到非常相似的时均温度分布。与以前计算的导叶与动

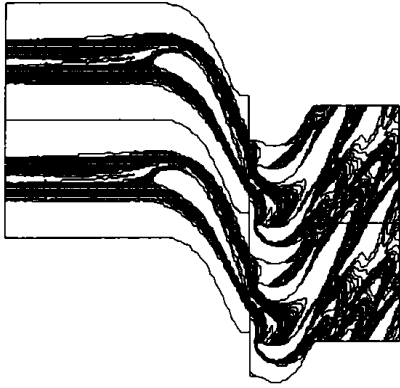


图 13 通道比 1:2, 热斑正对导叶前缘时 1 个时刻时的温度等值线分布

Fig 13 Unsteady temperature contours (HL, 1:2)

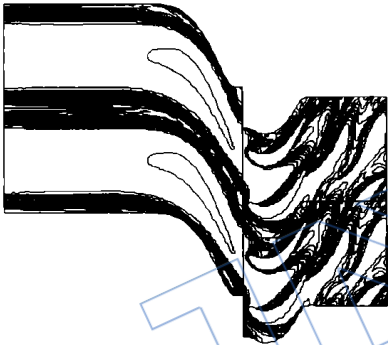


图 14 通道比 1:2, 热斑位于叶栅通道中时 1 个时刻时的温度等值线分布

Fig 14 Unsteady temperature contours (HM, 1:2)

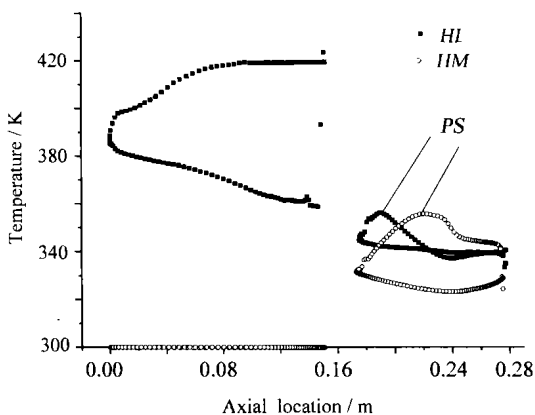


图 15 通道比 1:2, 热斑位于进口的不同位置时叶片表面时间平均温度分布

Fig 15 Time averaged temperature profile on the blade (1:2)

叶通道数比为 1:1 的情况相比较可知,叶排通道数比对时均压力分布影响很小,但是对时均温度分布却有较大影响。

3 结 论

本文对多通道涡轮级的流场/温度场进行了非定常数值模拟,与以前叶栅通道比 1:1 时的数值模拟结果相比较,可知单通道数值模拟得到的结论对多通道情况依然适用。但是多通道的结果与单通道的结果也存在一定差别,主要表现在:

(1) 多通道模拟得到的叶片表面压力分布更接近实验值,这是因为多通道模拟时叶排的几何形状更接近真实的涡轮级的几何形状。对不同叶排通道比,数值模拟都证实了热斑的加入对叶片表面时均压力分布影响很小,但是对叶排通道内压力场的瞬态分布有影响。

(2) 改变叶排通道比对温度场的影响要大得多。当增大动叶的稠度时,动叶压力面的温度得到很显著的提升。

(3) 无论热斑在进口的哪一位置,改变热斑与导叶通道数的比对动叶表面温度影响很大,尤其是对动叶压力面上温度分布。当减小热斑通道比会使动叶压力面温度下降更多。

参考文献

- [1] Dring R P, Joslyn H D, Hardin L W, Wagner J H. Turbine Rotor-Stator Interaction[J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1982, 104: 729- 742
- [2] 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
- [3] Butler T L, Shama O P, 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
- [4] Dorney D J. Investigation of Hot Streak Temperature Ratio Scaling Effects[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1997, 114: 217- 227.
- [5] Madavan N K, Rai M M, Gavali S M Multipassage Three-Dimensional Navier-Stokes Simulation of Turbine Rotor-Stator Interaction[J]. Presented in Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(3): 389- 396

(责任编辑 杨再荣)