

文章编号:1000-8055(2013)10-2302-07

热斑迁移路径分析方法

薛伟鹏, 曾 军, 黄康才

(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院 涡轮技术室, 成都 610500)

摘 要: 首先进行了带进口热斑的涡轮级 S_1 流面非定常计算. 在此基础上, 通过一些假设条件, 提出分段计算和积分计算两种简化的热斑迁移路径分析方法. 与非定常计算结果的对比表明: 这两种方法在预测热斑迁移路径上具有较高的精度, 对热斑通过涡轮级的周向偏移量计算偏差在 1° 以内.

关 键 词: 热斑; 迁移路径; 非定常; 涡轮; 时序效应

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Analysis method of hot streak migration avenue

XUE Wei-peng, ZENG Jun, HUANG Kang-cai

(Turbine Technique Department, China Gas Turbine Establishment,
Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: An unsteady numerical simulation of turbine stage on the S_1 flow surface with hot streak was performed firstly. After analysis of the results, some assumptions for the hot streak migration were made. And then a separate section calculation method and an integral calculation method for the hot streak migration avenue were presented. Comparison with the unsteady calculation, the results show that, these two methods have high precision on the prediction of the hot streak migration avenue, and the differences of migration in circumferential direction are within one degree.

Key words: hot streak; migration avenue; unsteady; turbine; clocking effect

涡轮通道中存在复杂的尾迹、通道涡系、热斑、冷气等非均匀流动, 这些非均匀流动将导致涡轮流场中出现大幅的非定常波动, 严重影响涡轮级的性能、寿命等. 如果能够了解这些与主流存在较大差异的流体团在涡轮通道中的迁移路径, 则可为下游叶片周向位置排布设计提供依据, 通过对准或避开这些流体团, 从而削弱其导致非定常影响, 获得较好的性能.

对这一方面的研究, 国内外的研究工作主要体现在对尾迹时序效应的研究上. 通过在 $3/2$ 级或多级涡轮的数值和试验研究中, 改变两排导叶或动叶的相对位置, 得到了不同的涡轮级性能. 大量的研究都表明, 当上游叶片排尾迹中的高损失

流体输运到第 3 排叶片前缘附近时, 可以获得最好的性能^[1-2], 而对如何确定尾迹路径的研究工作相对较少. Jouini 等^[3]采用一维中径分析方法, 通过几何输入、转速和轴向、切向速度, 对尾迹路径进行跟踪, 但是文中并未给出具体计算方法. 同样的效应也存在于对热斑的研究中. 热斑与导叶相对位置不同, 将对下游转子及静子叶片的热负荷产生很大的影响^[4-5], 相关研究工作的开展大多是通过改变热斑在导叶进口周向位置^[6-8]和径向位置^[9], 对热斑产生的影响进行研究. 在热斑运动路径追踪方面, Casaday 等^[10]在 Fluent 软件的基础上, 发展了一种粒子追踪模型, 研究在热斑影响条件下, 不同直径的燃烧产物粒子在涡轮导叶通道

收稿日期: 2012-10-23

网络出版地址:

作者简介: 薛伟鹏(1984—), 男, 福建漳州人, 工程师, 硕士, 主要从事涡轮设计工作.

中的运动路径以及在导叶表面的沉积,但研究工作仅限于导叶通道. 国内也有众多学者对热斑在性能、叶片热负荷方面的影响以及热斑的影响因素开展深入的研究^[11-14],但对热斑迁移路径和影响区域的确定,都是通过数值计算得到的.

综上所述,目前不管是对热斑或者对尾迹时序效应和影响区域的研究,大多都是通过不同叶片相对位置的试验研究,或者是进行多组非定常计算得到的. 因此,计算量和工作量极大. 本文的主要目的是,通过对非定常条件下,热斑流动结构的运动路径的分析,建立其简化的流动模型,确定其在涡轮通道中的迁移路径和影响区域,以了解其在转子下游所处的周向位置,从而为下游叶片及相关零组件周向位置的排布提供初步的参考,同时避免多组非定常计算导致工作量大幅增加. 与非定常计算结果的对比表明,本文提出的方法具有较高的精度和较好的工程应用价值.

1 热斑迁移路径的非定常分析

由于热斑是一种进口非均匀流动导致的非定常流动现象,定常分析方法所采用的混合面平均方法将抹平进口的非均匀流动信息,因此需要采用非定常分析方法来确定热斑的迁移路径. 为了简化分析和减少计算量,本文仅开展 S_1 流面的非定常计算.

本文的计算模型为某一跨声速涡轮级的中截面叶型. 导叶和动叶叶片数分别为 32 片和 59 片. 兼顾计算量和叶片缩放的影响,对 6 个导叶通道和 11 个动叶通道进行计算. 计算网格采用软件 CFX-TurboGrid13.0^[15] 进行划分,计算域及计算网格如图 1 所示,网格节点总数为 40 万. 导叶最小网格交角为 70.7° ,动叶最小网格交角为 74° ,网格正交性很好. 采用软件 CFX13.0^[16] 进行流场计算及后处理.

图 1 所示计算域的第 1 个导叶通道中间位置给定一进口热斑,其进口总温比其余位置高 200 K,进口总压和出口静压都为均匀条件. 计算时间步长取为动叶通过 1 个导叶通道时间的 $1/50$,为 2×10^{-6} s. 湍流模型选用 shear stress transport(SST)模型. 计算过程中监测膨胀比、出口流量及动叶出口某一给定点的压力. 图 2 为计算过程中上述参数的监测. 从中可以看出,大约经过 16 个周期的计算后,可以认为计算收敛. 计算耗时 9 h 左右.

图 3 给出了该组非定常计算的结果. 为了清

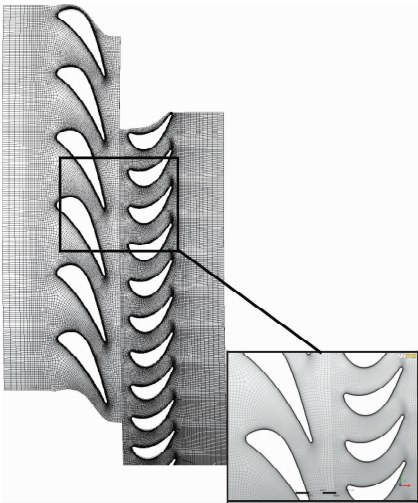
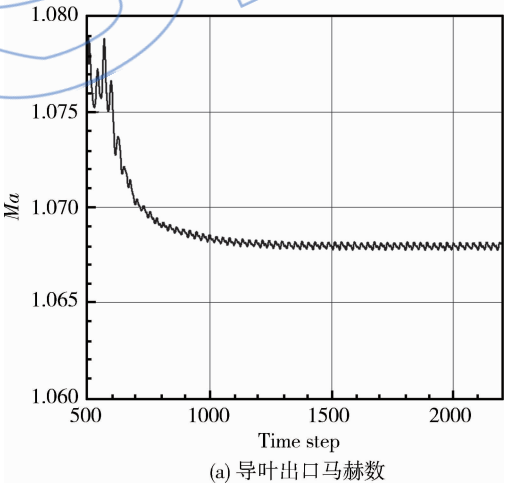


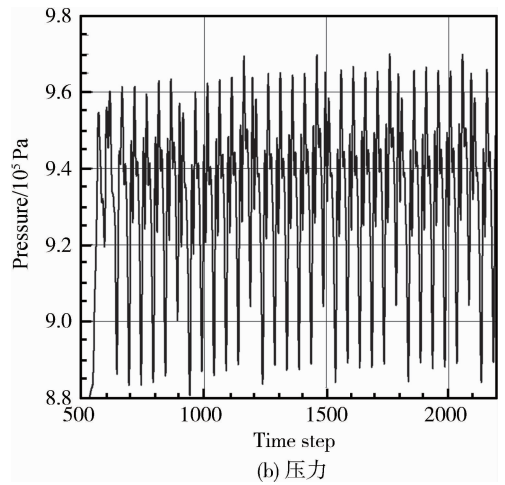
图 1 计算域及计算网格

Fig. 1 Calculation region and calculation grid

晰显示尾迹的运动路径,导叶和动叶通道中的相对总温分布分别以不同的标尺显示. 从计算结果中,可以很明显看出热斑的正射流效应,即向动叶的压力面聚集的现象. 对比不同时刻流场的总温云图,虽然有动叶的周期性扫掠,但是热斑流体还



(a) 导叶出口马赫数



(b) 压力

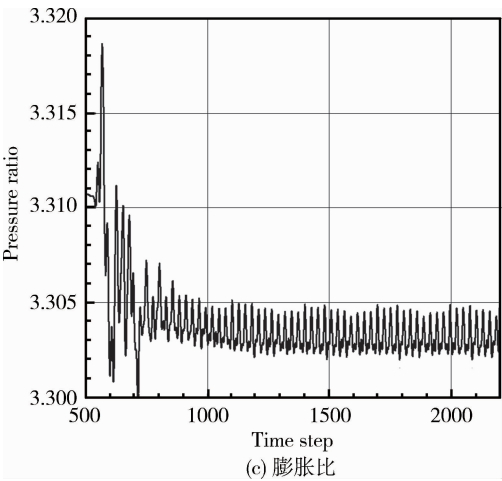


图 2 计算过程中的参数监测

Fig. 2 Parameter monitor of calculation

是存在明显的稳定的运动路径,各个时刻,热斑流体在涡轮通道中的分布位置基本相同,其位于转子出口的周向位置也是较为固定的.图 3(f)中动叶出口不同时刻的相对总温 T_w^* 与涡轮进口总温 T_o^* 的比值随周向角度 θ 的分布证实了上述的分析,即不同时刻热斑在动叶出口的周向位置不变,其值都位于周向 105° 附近位置.此外,总温比分布还存在一些数值基本相当的峰值,其值都约为 0.84,出现峰值的周向位置变化不大,峰值的数量与导叶数一致,可以推断其与导叶尾迹有关.

通过上述的非定常计算分析可以看出,热斑、尾迹等流体团在涡轮级中有较为稳定的迁移路径,这也为建立其运动路径的简化模型提供了可行性.

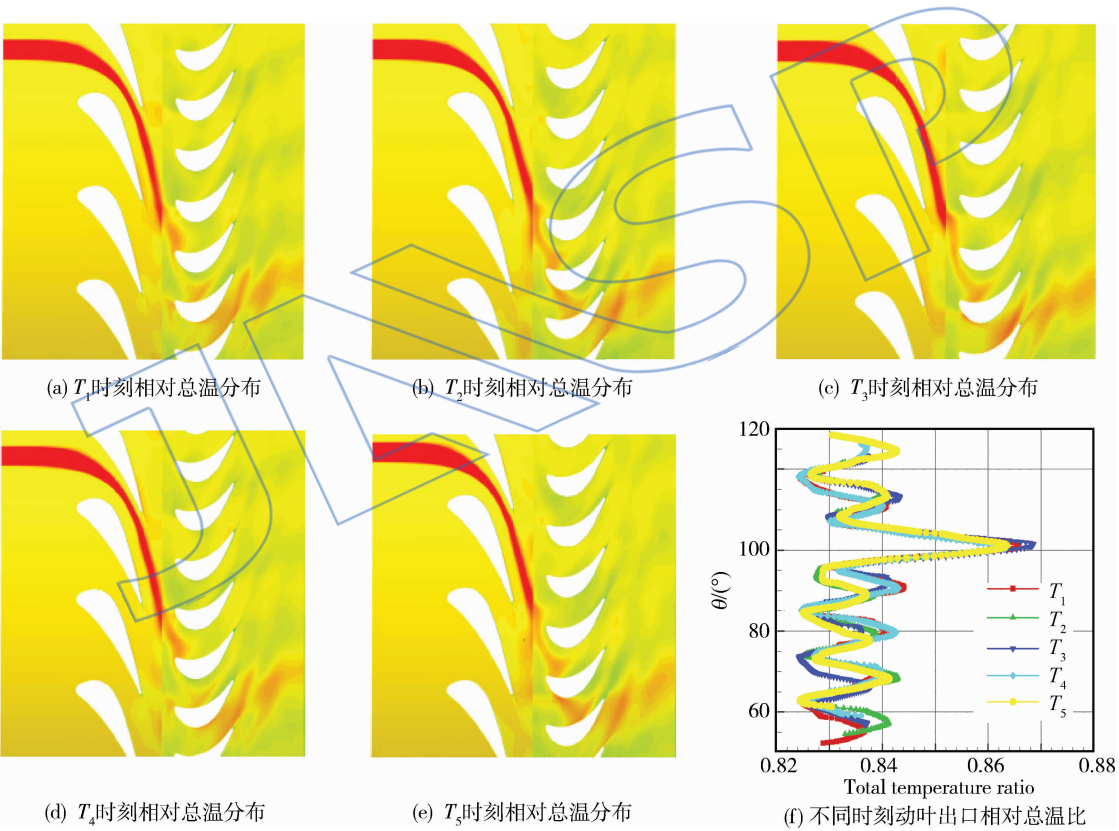


图 3 非定常计算结果

Fig. 3 Unsteady calculation result

2 热斑迁移路径的简化分析方法：
分段计算

这里不考虑热斑在涡轮通道中所具有的特殊的迁移特性,认为其随主流流动.流体质点进入涡轮级中,认为可以分为 4 个阶段:①导叶通道中的气流折转;②转、静子轴向间隙中的流动;③在动叶通道中的相对运动及随转子的随流运动;④动

叶出口的无约束运动.对以上 4 个阶段,分别做如下假设:①导叶通道中流动的偏转只取决于该处与导叶吸力面和相邻叶片压力面的相对距离,即从导叶通道入口中间流入的流体,也将从导叶通道出口中间流出;②在转、静子轴向间隙中的流动只取决于导叶出口气流角;③动叶通道中相对运动的流动假设与假设①相同;④动叶通道出口的流动仅取决于动叶出口绝对气流角.

坐标定义如图 4,以图示中某一导叶前缘点为原点 O ,以下标 a 表示轴向,以下标 c 表示周向,向转动方向为周向的正方向,以 X 表示位移。

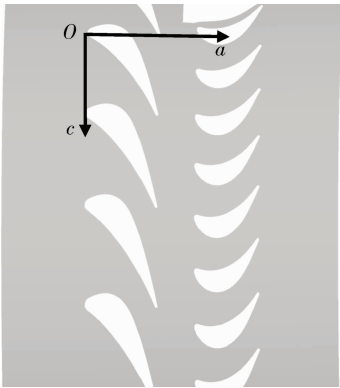


图 4 坐标定义

Fig. 4 Definement of coordinate

1) 第 1 阶段运动的周向位移 X_{c1}
在导叶通道的约束下发生的周向位移为

$$X_{c1} = \frac{B_1}{\tan \gamma_1} \tag{1}$$

式中为 B_1 导叶轴向弦长, γ_1 为导叶安装角。

2) 第 2 阶段运动的周向位移 X_{c2}

$$X_{c2} = \frac{d_1}{\tan \partial_1} \tag{2}$$

式中 d_1 为导叶尾缘到动叶前缘距离, ∂_1 为导叶出口气流角。

3) 第 3 阶段的运动分为相对运动和随流运动,相对运动的周向位移 X'_{c3} 为

$$X'_{c3} = \frac{B_2}{\tan \gamma_2} \tag{3}$$

式中 B_2 为动叶轴向弦长, γ_2 为动叶安装角。

第 3 阶段随流运动的周向位移 X''_{c3} 为

$$X''_{c3} = u \times t \tag{4}$$

式中 u 为叶片的切向速度, t 为流体从动叶进口到动叶出口的运动时间。

$$t = \frac{B_2}{V_a} \tag{5}$$

式中 V_a 为流体在动叶通道中的轴向速度,因此第 3 阶段的周向位移 X_{c3} 为

$$X_{c3} = X'_{c3} + X''_{c3} \tag{6}$$

4) 第 4 阶段周向位移 X_{c4}

$$X_{c4} = \frac{d_2}{\tan \partial_2} \tag{7}$$

式中 d_2 为动叶尾缘到出口的距离, ∂_2 为动叶出

口气流角。

按照此方法,根据定常流场计算结果和叶栅设计参数(见表 1),对上述热斑迁移路径进行计算。

为确定动叶通道中发生的随流运动周向位移,需了解流体在动叶通道中的运动时间,图 5 中给出的虚线为该算例定常计算得到的动叶通道中质量平均轴向速度沿轴向位置的分布,这里简化为黑色折线进行计算。表 2 给出折线转折点 $a_1 \sim a_5$ 上的轴向位置和轴向速度,由此计算出主流流体质点通过折线分出的每个轴向段所需的时间。

表 1 分段计算的叶栅设计参数

Table 1 Designed cascade parameters of separate section calculation

导叶		动叶	
参数	数值	参数	数值
B_1/mm	37.00	B_2/mm	33.00
$\gamma_1/(\text{^\circ})$	34.00	$\gamma_2/(\text{^\circ})$	63.40
X_{c1}/mm	54.85	X'_{c3}/mm	16.53
d_1/mm	18.30	d_2/mm	40.00
$\partial_1/(\text{^\circ})$	14.58	$\partial_2/(\text{^\circ})$	59.50
X_{c2}/mm	70.35	X_{c4}/mm	24.51

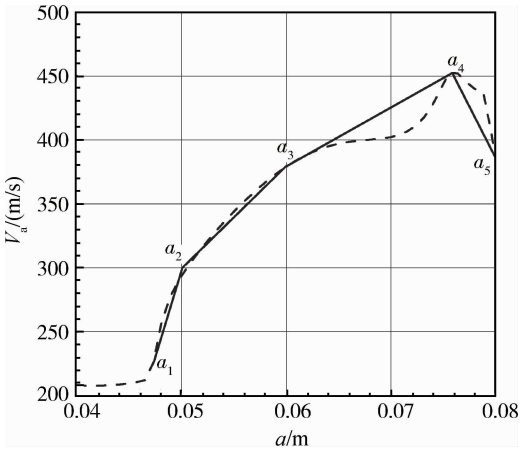


图 5 轴向速度沿轴向位置的分布

Fig. 5 Distribution of axial velocity along axial position

该算例中,叶片的切向速度 u 为 524 m/s,则动叶通道中流体质点随流运动的周向位移 X''_{c3} 为

$$X''_{c3} = u \times t = 46.19 \text{ mm} \tag{8}$$

由此,可计算得各段的周向位移,如表 3 所示。

表 2 流体在动叶通道中的运动时间计算

Table 2 Calculation for moving time of fluid in rotor passage

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
轴向位置 a/m	0.0472	0.0500	0.0600	0.0756	0.0800
轴向速度 $V_a/(\text{m/s})$	225.60	300.00	380.00	452.00	380.00
时间 $t/10^{-5}\text{ s}$	1.1	2.9	3.8	1.1	

表 3 分段计算的各段周向位移

Table 3 Circumferential displacement of each section of separate section calculation

周向位移	数值
X_{c1}/mm	54.85
X_{c2}/mm	70.36
X_{c3}/mm	29.66
X_{c4}/mm	-23.56
周向位移/mm	131.31
周向角度/ $^\circ$	28.18

$$\Delta t = \frac{\Delta a}{\bar{V}_a} \tag{9}$$

每段 Δt 时间内发生的周向位移 ΔX_c 为

$$\Delta X_c = \bar{V}_a \times \Delta t \tag{10}$$

总的周向位移为 X_c 为

$$X_c = \int V_c dt \tag{11}$$

其中 V_c 为周向速度. 通过计算可得, 周向位移为 127.24 mm. 与分段计算进行对比, 如下表 4. 从中可知, 两种方法得到的结果偏差较小.

表 4 分段计算与积分计算结果的对比

Table 4 Comparison of separate section calculation and integral calculation

周向位移	分段计算	积分计算	偏差
X_{c1}/mm	54.85	53.08	1.77
X_{c2}/mm	70.36	70.55	-0.19
X_{c3}/mm	29.66	28.74	0.92
X_{c4}/mm	-23.56	-25.13	1.57
周向位移/mm	131.31	127.24	4.07
周向角度/ $^\circ$	28.18	27.30	0.87

3 热斑迁移路径的简化分析方法:

积分计算

同样假设热斑随主流流动. 通过定常三维计算获得轴向速度和周向速度随轴向位置的变化. 通过轴向位移和轴向速度可以获得流体流过涡轮级的时间, 再在该时间段内对周向速度进行积分, 即可获得周向位移.

将图 6 曲线分段进行计算, 流体通过每一小段轴向位置所用的时间 Δt 为

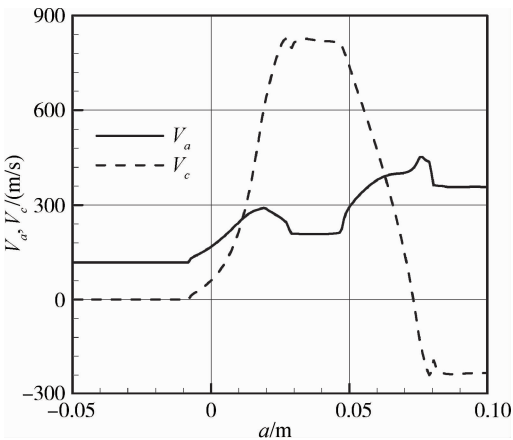


图 6 轴向和周向速度沿轴向位置的分布

Fig. 6 Distribution of axial and circumferential velocities along axial position

图 7(a)和图 7(b)给出了积分计算确定的进口热斑处于通道中间和正对导叶前缘的两种情况下热斑迁移路径与非定常计算结果对比. 绿线为积分计算的结果. 红色虚线为上述非定常计算结果提取出的高温等值面, 可以表征热斑的核心区域. 从中可以看出: 在大部分区域, 通过积分计算确定的热斑迁移路径与非定常计算结果很吻合. 这也表明该方法在评估热斑迁移路径上有较高的精度. 积分计算与非定常计算结果的主要差距出现在进口热斑处于通道中间时, 在导叶通道进口, 真实热斑流体整体上略微偏向导叶压力面, 积分计算结果更靠近压力面. 但是在导叶出口, 两组计算结果确定的周向位置又几乎重合, 因此不影响最终的计算结果. 在动叶前缘附近, 相同轴向位置下, 热斑流体高温核心更靠近下游, 这是由于热斑

的正射流效应,其与主流相比,具有更高的绝对速度所致. 动叶通道中及动叶通道出口,计算的热斑路径与非定常计算结果基本吻合. 图 7(c)和图 7(d)给出两种不同进口热斑位置下,非定常计算和积分计算的进出口温度峰值位置对比,其中洋红竖线为积分计算结果,热斑相对进口位置偏移了 27.3° ,而非定常计算的进出口温度峰值偏移了 27.1° ,两者偏差很小. 两种不同热斑周向位置的计算结果也说明,导叶尾迹、叶片表面附面层等因素对热斑迁移路径影响很小.

通过以上积分计算确定的热斑迁移路径与非定常计算结果的对比可以看出,该方法具有较高的分析精度,可以不通过非定常计算,利用该方法即可确定出热斑迁移路径,为下游零组件周向位置排布提供了很好的依据. 由此也可以说明,上述两种简化方法所做的“热斑随主流运动”的假设是成立的,也即热斑虽然存在其特殊的迁移特性,但在整体上其流动方式与主流是一致的.

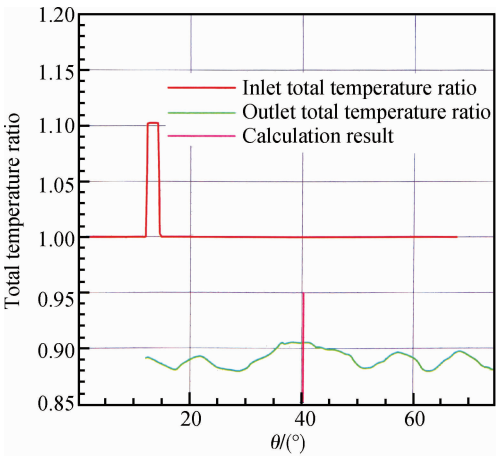
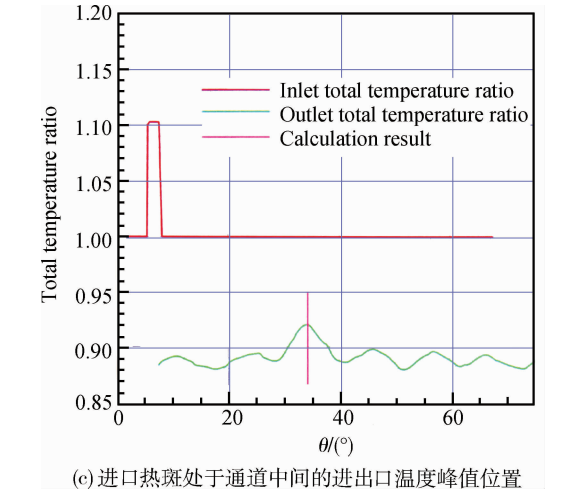
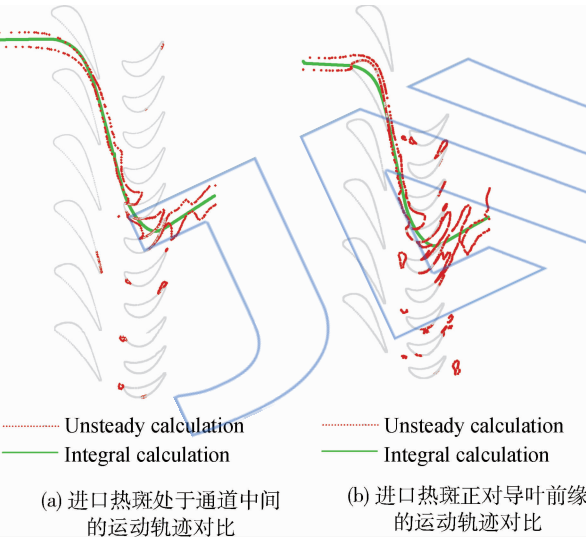


图 7 积分计算确定的热斑迁移路径与非定常计算结果对比

Fig. 7 Comparison of integral calculation with unsteady calculation for hot streak migration avenue

4 结 论

首先进行了带进口热斑的 S_1 流面非定常计算,通过对计算结果的分析,了解热斑迁移路径的发展趋势及其特性. 在此基础上,对流动做出假设,提出两种简化的热斑迁移路径的确定方法,并与非定常计算结果进行对比. 本文的分析结果表明:

- 1) 热斑及导叶尾迹在涡轮通道中具有较为稳定的运动路径.
- 2) 热斑的正射流效应对其整体的迁移路径影响不大.
- 3) 本文提出的两种简化的热斑迁移路径分析方法具有较高的预测精度,与非定常计算结果相比,对热斑通过涡轮级的周向偏移量计算偏差在 1° 以内,可供工程人员在设计中参考使用.

参考文献:

[1] Paradiso B, Persico G, Gaetani P, et al. Blade row interaction in a one and a half stage transonic turbine focusing on three dimensional effects: Part I stator-rotor interaction [R]. ASME Paper GT2008-50291, 2008.

[2] Behr T, Porreca L, Mokulys T, et al. Multistage aspects and unsteady effects of stator and rotor clocking in an axial turbine with low aspect ratio blading[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 11-22.

[3] Jouini D, Little D, Bancalari E, et al. Experimental investigation of airfoil wake clocking impacts on aerodynamic

- performance in a two stage turbine test rig[R]. ASME Paper GT2003-38872, 2003.
- [4] Sondak D L, Gupta V, Orkwis P D, et al. Effects of blade count on hot streak clocking simulations using linearized and nonlinear methods[R]. AIAA 2001-3476, 2001.
- [5] Gundy-Burlet K L, Dorney D J. Three-dimensional simulations of hot streak clocking in a 1-1/2 stage turbine[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1997, 14(3): 133-144.
- [6] AN Baitao, LIU Jianjun, Jiang H. Numerical investigation on unsteady effects of hot streak on flow and heat transfer in a turbine stage[J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(3): 031015. 1-031015. 15.
- [7] ZHAO Qingjun, WANG Huishe, ZHAO Xiaolu, et al. Numerical investigation on the influence of hot streak temperature ratio in a high-pressure stage of vaneless counter-rotating turbine[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2007, Article ID 56097, 1-14.
- [8] Aksoy H, Liu J, Couey P, et al. Three-dimensional analysis of hot streak attenuation in a high pressure turbine stage[R]. AIAA 2002-3646, 2002.
- [9] Povey T, Chana K, Jones T, et al. The effect of hot-streaks on HP vane surface and endwall heat transfer; an experimental and numerical study[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(1): 32-43.
- [10] Casaday B, Ameri A, Bons J. Effect of hot streaks on ash deposition in an uncooled turbine vane passage[R]. AIAA 2012-0474, 2012.
- [11] 季路成, 杨吉, 徐建中. 关于 1+1 对转涡轮中热痕现象的研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 683-686.
- JI Lucheng, YANG Ji, XU Jianzhong. Investigations about the hot streak in the counter-rotationing turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(6): 683-686. (in Chinese)
- [12] 董素艳, 刘松龄. 涡轮级进口温度分布不均匀时流场和温度场的非定常数值模拟[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(3): 345-348.
- DONG Suyan, LIU Songling. Unsteady numerical simulation of the effects of hot streak phenomena on turbine stage[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2001, 19(3): 345-348. (in Chinese)
- [13] 刘高文, 刘松龄. 热斑在 1-1/2 级涡轮内的非定常迁移数值模拟[J]. 航空动力学报, 2004, 19(6): 855-859.
- LIU Gaowen, LIU Songling. Numerical simulation of unsteady hot streak migration in a 1-1/2 stage turbine[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(6): 855-859. (in Chinese)
- [14] 王宝臣, 季路成. 缘线匹配指导下热痕迁移现象的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 29(5): 751-754.
- WANG Baochen, JI Lucheng. Numerical investigation on hot streak migration under the guidance of edge-matching technology[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(5): 751-753. (in Chinese)
- [15] ANSYS Inc. Guide to the CFX documentation[R]. Pittsburgh, US: ANSYS Inc., 2010.
- [16] ANSYS Inc. Guide to the turbogrid documentation[R]. Pittsburgh, US: ANSYS Inc., 2010.