

叶排间轴向间距对时序效应影响的数值研究^{*}

闫 朝¹, 季路成¹, 陈 江²

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080; 2. 北京全三维动力公司, 北京 100080)

摘 要: 时序效应具有改进多级叶轮机械效率的潜力。文中在已有认识基础上, 对叶排间轴向间距对时序效应影响进行深入的二维非定常数值研究。算例采用 1.5 级静/动/静布局的涡轮叶栅。结果发现, 叶排间轴向间距对时序效应自身影响很大, 会使涡轮效率的变化幅度以及效率极值出现的位置发生明显变化。另外, 处于两静叶排正中的动叶位置的前后移动或缩短静叶排间的距离均能带来时序效应影响下效率的整体提升。

关键词: 叶轮; 机械; 时序效应⁺; 非定常流; 数值仿真

中图分类号: V235.111

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 05-0416-05

Numerical investigations for the influence of the axial gap on the use of clocking effect

YAN Zhao¹, JI Lu cheng¹, CHEN Jiang²

(1. Inst. of Engineering Thermophysics, Academia Sinica, Beijing 100080, China;

2. Beijing Full Three Dimension Power Engineering Co. Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: Clocking effect has great potential in improving the efficiency of turbomachinery. Based on knowledge, 2-D unsteady numerical investigations were further performed to understand the influence of axial gap on the use of clocking effect. One 1.5 stage turbine cascade with stator/rotor/stator configuration was adopted as a numerical test case. Results show that different axial gaps do have obvious effects on optimum clocking positions, and the aerodynamic efficiency benefits vary greatly with different axial gaps. Besides, efficiency curves versus clocking positions can be improved globally by changing rotor's position from the middle of two stator rows or by reducing the distance between two stators in axial direction.

Key words: Impeller; Machinery; Clocking effect⁺; Unsteady flow; Numerical simulation

1 引 言

如何提高叶轮机械气动效率一直是人们普遍关心的问题, 对时序效应(Clocking effects)的利用为之提供了一个契机。时序效应就是相对静止隔排叶片之间周向相对位置对叶轮机械气动效率的影响。国外已有众多学者就该问题在压气机和涡轮部件中进行了大量卓有成效的研究, 如 Huber^[1], Dorney^[2], Tiedemann^[3], Arnone^[4]等人的工作, 国内关于这方面的工作开展较晚也较少, 祁明旭^[5], 黄洪雁^[6]等人作出了相应工作。另一方面, 伴随着燃气轮机发展, 为了降低成本, 减轻重量, 设计师倾向于把燃气轮机设计

得更为紧凑, 这样就导致了压气机或涡轮叶排之间距离的缩短。那么, 随着叶排间轴向间距的改变, 时序效应会受到怎样的影响呢? 在这样狭小的空间里, 针对时序效应的影响, 如何安排排与排的相对距离才能获得性能的最大提升呢? 目前未见到关于该问题的公开报道。本文将采用数值模拟的手段, 通过对不同轴向间距下时序效应的大量时间精确解研究, 试图找出部分有关该问题的答案。

2 研究对象

本文中所采用叶型为 Aachen 透平叶型。该透平

^{*} 收稿日期: 2003-11-01; 修订日期: 2004-03-16。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50376062); 中国科学院知识创新工程项目 (KGCX2-301)。

作者简介: 闫 朝 (1975—), 男, 博士生, 研究领域为计算流体力学、叶轮机械非定常流动。E-mail: yzeta@sohu.com

为一实验用轴流式亚声速透平,图 1 为其一级半透平的平面图,它由两列相同的静叶和一系列动叶构成,动叶向上平移速度为 99.8m/s,静、动叶之间轴向间隙为 $L1, L2$ 。表 1 给出了 Aachen 透平静、动叶片的基本几何尺寸。表 2 给出了计算所使用的进出口物理参数。研究中,对于某一确定的 $L1$ 和 $L2$ 值,5 或 5 个以上的时序位置将会被考察,这些都通过改变二级静叶 ($s2$) 的周向位置来完成。时序位置以变量 CLK (周向偏移量等于 CLK 乘以节距) 代表,其基准点(即 $CLK = 0$ 处)定义为二级静叶前缘点比一级静叶前缘点沿周向高 0.41 倍节距的位置,如图 1,然后二级静叶向上平移得到其它时序位置以及相应的 CLK 值。

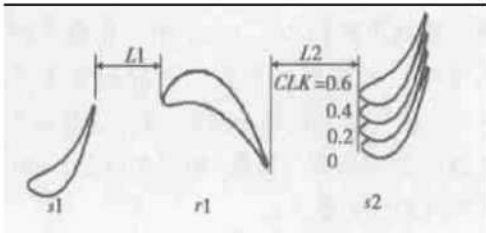


Fig. 1 Sketch map of turbine cascades

Table 1 Parameters of blade geometry

Geometry parameter	Stator	Rotor
Blade count	36	41
Chord/ m	0.062	0.060
Thickness/ m	0.04425	0.054
Pitch (mid-span, m)	0.0476	0.0418

Table 2 Boundary conditions

Inlet stagnation pressure/ Pa	169600.0
Inlet stagnation temperature/ K	305.0
Pitch angle/ (°)	0.0
Yaw angle/ (°)	0.0
Outlet static pressure/ Pa	100860.0

在考虑时序效应的前提下,4 个不同轴向间距的算例将被考察,具体如表 3 所示。这里需要着重说明的是,为了使各个算例结果之间具有可比性,整个计算域的轴向尺寸维持不变。

Table 3 Computational cases

Case	Gap $L1$ / mm	Gap $L2$ / mm
1	15	15
2	8	22
3	22	8
4	10	10

可以看出,算例 1~ 3 并未改变计算域中一级静叶和二级静叶的轴向位置,只是中间动叶的位置沿轴向有所变化。其中,算例 1 为原始工况,动叶“平均分布”于两排静叶正中,算例 2 中动叶位置前移,算例 3 中动叶位置后移。算例 4 和算例 1 一样是“平均分布”,只是改变了总的轴向间距($L1+ L2$)。

计算中,为了减少计算量,叶排间通道比简化为 1: 1: 1。具体实施时保持静叶几何尺寸不变,而将动叶放大 41/36 倍,其稠度维持不变。

3 数值方法

3.1 控制方程

这里所要求解的控制方程是时间精确的二维雷诺平均 Navier-Stokes 方程:

$$U_t + F_x + G_y = R_x + S_y \tag{1}$$

式中的矢量 U 代表主变量 $\rho, \rho u, \rho v, e$ 。矢量 F, G, R, S 分别代表对流项和粘性项。为了封闭该方程组,使用了 Baldwin-Lomax 湍流模型和理想气体状态方程。另外,层流黏性的计算使用了 Sutherland 公式。

3.2 离散格式

对以上方程组的离散^[7]格式以 Ni^[8]方法为基础,结合 TVD 格式^[9]和 Jameson^[10]提出的双时间步法对方程组进行求解,在空间和时间方向均具有二阶精度。

3.3 边界条件

对于整个计算域的进出口使用了普通边界条件求解方法。入口处给定总压、总温和气流角。出口给定静压。固壁边界给定无滑移、绝热壁条件。动静叶排之间的滑移界面通过线性插值来获取邻排的信息。

3.4 计算网格

整个计算域使用代数法生成简单 H 型网格,并在叶栅前后缘和固壁表面适当加密,以提高对流场的分辨率。计算中,离开固壁第一个网格的 $y^+ < 10$,保证了湍流模型在壁面边界的使用精度。在滑移界面,网格采用搭接方式,形成一个网格的重叠,并通过线性插值交换信息,如图 2 所示。

4 结果分析

本文进行了一系列的数值计算用于研究轴向间距对时序效应的影响。计算网格随着轴向间距的改变而略有变化,此处仅以算例 1 为例,其单排 H 型网

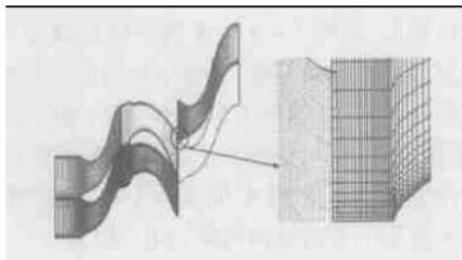


Fig. 2 Computational mesh

格点数为 116×48 , 计算域网格数总和为 16704, 壁面 $y^+ < 10$ 。计算时, 每一周期被分为 100 个物理时间步, 每时刻的内循环步数为 200 步, 其中前 50 步计算湍流黏性, 然后保持恒定, 残差可下降到 10^{-6} 的量级。外循环经过 15 个周期以后, 计算达到收敛。

下面将对各工况的总效率进行比较。首先, 将计算域进口和出口处的平均总压 ($\bar{P}_{in}, \bar{P}_{ou}$)、总温 ($\bar{T}_{in}, \bar{T}_{ou}$) 按下式求出:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^{300} (\dot{m} Q)_i / \sum_{i=1}^{300} \dot{m}_i \quad (2)$$

Q 代表计算域进口、出口的总压、总温, $\dot{m}$ 为质量流量, 下标 i 代表第 i 个物理时刻。通过把最后三个周期的结果按时间平均得到 $\bar{Q}$ (分别为 $\bar{P}_{in}, \bar{P}_{ou}, \bar{T}_{in}, \bar{T}_{ou}$)。然后, 利用已经求出的 $\bar{P}_{in}, \bar{P}_{ou}, \bar{T}_{in}, \bar{T}_{ou}$, 求出此 1.5 级涡轮的多变效率:

$$\eta = \frac{\bar{T}_{in} - \bar{T}_{ou}}{\bar{T}_{in} | 1 - (\bar{P}_{ou} / \bar{P}_{in})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} |} \quad (3)$$

在本文二维亚声叶栅中, 气动损失主要来自于两个方面: 尾迹的掺混损失和叶型损失。在算例 1~4 中, 通过对计算结果的分析与比较, 发现轴向间距的改变没有造成各叶栅流动工况明显的变化, 对叶型损失的影响可以忽略不计, 而剩下的对性能产生影响的只能是掺混损失, 因此, 掺混损失是本文分析轴向间距对时序效应影响的唯一考虑因素。

4.1 只改变动叶的位置

比较算例 1~3, 两排静叶的位置(总间距)并未改变, 只是动叶的位置有所变化。算例 1 中动叶处于两排静叶的正中, 算例 2 中动叶前移, 而在算例 3 中则向后移动。下图给出了计算得出的它们的效率曲线。图中的 CLK 表示第二排静叶在一个节距内沿周向变动所处的时序位置, EFF 表示多变效率 η 。

可以看到, 动叶后移 (Case3) 的总体效率最高, 动叶前移 (Case2) 次之。当动叶居中时 (Case1), 总体效率最低, 比最高的算例 1 低了大约 2.5%。参阅图 7

可以得到解释。图 4 是对压气机的研究结果^[11], 可以看到, 当气体流过转静间隙, 尾迹和势流掺混所带来的损失在刚离开上游叶片尾缘时增长很快, 即掺混非常剧烈, 但随着距离的延长, 尾迹和势流趋于均匀, 使得损失增长趋于平缓。对于不同的叶栅, 表示这种变化的 x 轴, 即轴向间距, 实际上是以这个叶栅的宽度或喉道宽度为特征尺度变化的。在本节中, 算例 2, 3 的两个轴向间距 $L1, L2$ 均是一个被延长, 一个被缩短, 这样会带来损失的增加和减小, 从计算结果看, 两者相抵所带来的总体效益呈增加的趋势 (大于算例 1)。又因为动叶的喉道宽度 ($b_{rl} = 22.88\text{mm}$) 大于静叶 ($b_{sl} = 16.25\text{mm}$), 对于相同的 $L1, L2$, 动叶后叶排间的无量纲距离 ($L2/b_{rl}$) 小于第一排静叶后的 ($L1/b_{sl}$), 动叶后的掺混处于较一级静叶更为剧烈的状态。所以改变相同的轴向间距, 动叶后效率的变化比一级静叶更为显著。因此, 如图 3 所示, 动叶后移对效率提高的作用更大。

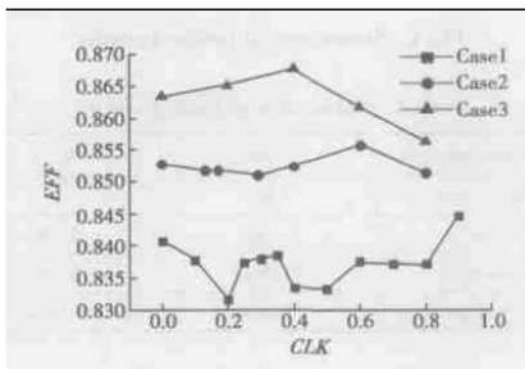


Fig. 3 Efficiency compared between the cases with rotor's axial position varied only

从图 3 可以看到, 当轴向间距变化时, 时序效应影响下的最小和最大效率的位置都发生了改变, 而且, 效率变化幅值也有所不同, 分别为 1.3% (Case1)、0.5% (Case2) 和 1.1% (Case3)。图 5 可以解释这一现

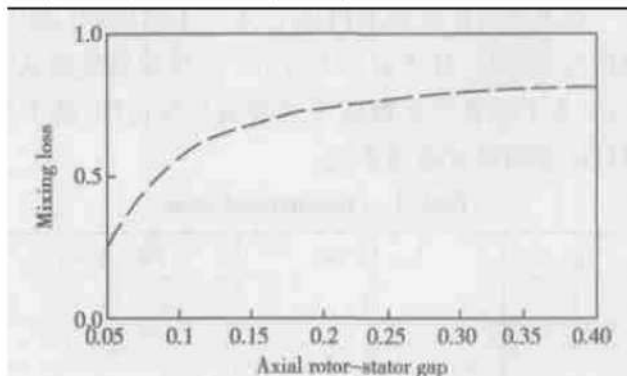


Fig. 4 Effect of axial gap on mixing loss

象,图中纵轴为无量纲时间 $\bar{dt} (= dt/T)$, dt 表示流体从一级静叶尾缘到二级静叶前缘所需的时间, T 为周期 ($= 4.76 \times 10^{-4}$ s), 横轴为所对应的时序位置。图 5 对算例 1~3 进行了比较,可以看出,动叶轴向位置的变化对上游尾迹的输运过程有显著影响,使得输运一级静叶尾迹的轴向速度发生了变化,随着动叶位置的改变,该尾迹到达二级静叶前缘的时间发生了变化,造成其周向位置的不同,所以时序效应影响下效率极值出现的位置有所迁移。图 6 可以补充说明这一点。注意二级静叶前缘的熵值分布,较大熵值出现的位置代表一级静叶尾迹的到达位置,可以发现,其位置在周向是不同的。另一方面,当时序位置变化时,输运一级静叶尾迹的轴向速度也会发生变化,使得尾迹到达二级静叶前缘的时间相应改变。但是,关于在时序效应影响下,涡轮效率的变化幅值在不同算例中不等的原因目前尚不清楚。

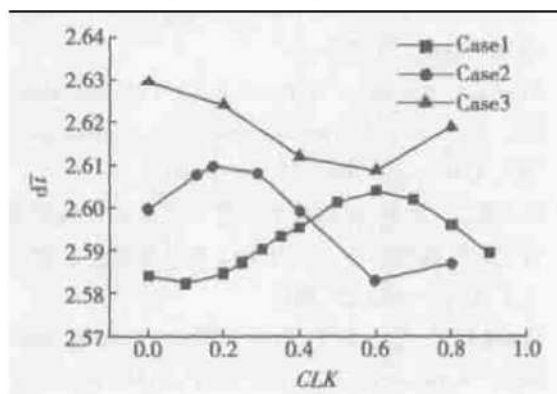


Fig. 5 Time length of the wake convecting from trailing edge of s_1 to leading edge of s_2

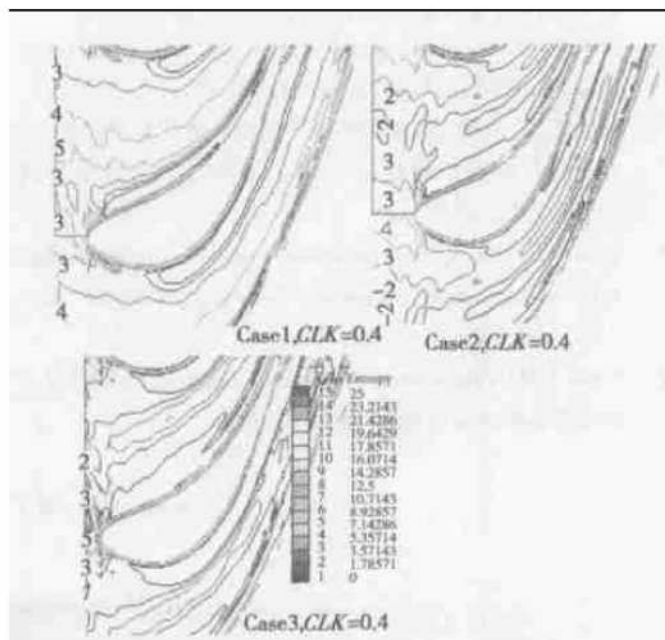


Fig. 6 Time-averaged entropy contour in s_2 passage (CLK= 0.4)

比较图 3 和图 5 还会发现一个有趣的问题,就是同一算例的效率变化曲线和时间变化曲线之间存在一个相位差,且这个差值对于三个算例基本相同。具体地,以各算例效率最大值对应的时序位置为例,算例 1 的效率峰值比时间峰值落后 0.3,算例 2 落后 0.4,算例 3 落后 0.4,考虑到各算例所计算的时序位置不够精细的影响,可以说,这三个算例的相位差是一致的。但效率和尾迹输运时间之间是否有这样一种必然联系,目前还很难确定,原因也不清楚。

4.2 改变 $L1+L2$ 的总和

4.1 节的比较中保持两排静叶的位置不变,只改变动叶位置。本节所比较的算例 1,4 则维持动叶始终处于两排静叶的正中,改变两排静叶之间的距离,算例 4 的总间距比算例 1 有所缩短,图 7 展示了它们的效率变化。

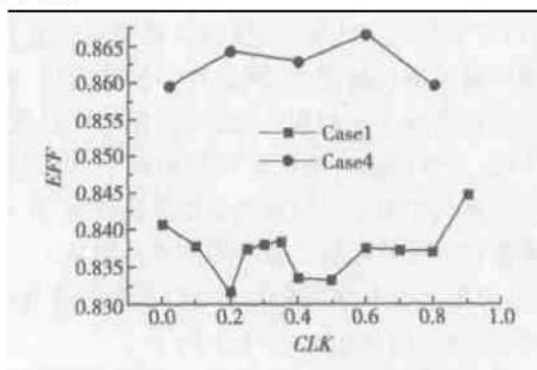


Fig. 7 Efficiency comparison between cases with two stators' axial positions varied

正如 4.1 节分析的那样,如图 7 所示,间距较短的算例 4 的整体效率大于算例 1 大约 3%,说明整体轴向间距的缩短对涡轮效率有相当的提升。和 4.1 的情况一样,轴向间距的改变会对尾迹的输运时间造成一定影响,如图 8,使得效率极值点所对应的时序

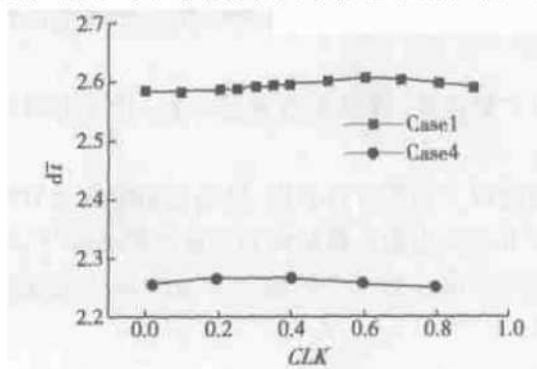


Fig. 8 Time length of the wake convecting from trailing edge of s_1 to leading edge of s_2

位置沿周向发生迁移,且使时序效应所带来的效率的变动程度也有所不同。相对于时序效应带来的效率提升,轴向间距的作用显得更为突出。比较图 7 和图 8 也能发现和 4.1 节相同的现象,就是效率变化曲线和时间变化曲线存在一个相位差,这里的这个差值也是 0.3 左右。

另外,在算例 1,4 中,出现了“双波峰”现象,即在一个时序周期内效率曲线上同时存在两个波峰和波谷。这在以往的时序效应研究中虽然也曾出现过,但具体是什么原因造成的还有待深入研究。

5 结 论

本文通过数值模拟的手段研究了轴向间距对时序效应的影响,在流动工况无明显恶化的情况下,即叶型损失可以忽略不计的前提下,结果发现:

(1) 对于孤立排叶栅,掺混损失随测量位置到叶栅尾缘距离的增长而增长,所以在多排叶栅中,轴向间距的缩短可减少这种损失,提高涡轮的气动效率;另一方面,在整体轴向间距不变的前提下,中间动叶的不等距布局相对于等距布局也能提高效率,且对于喉道宽度较大的叶栅后的效率提高更为明显;

(2) 时序效应本身具有改变气动效率的潜力。在本文中,波动范围为 0.5% ~ 1.3%;

(3) 轴向间距的变化对尾迹的输运时间造成一定的影响,使得时序效应影响下的最高和最低效率对应的时序位置沿周向发生迁移;

(4) 在轴向间距的影响下,时序效应带来的效率波动的幅度会发生一定变化,但原因不明:

除了以上结论以外,还有一些原因未明但又值得继续深入研究的问题:

(a) 当轴向间距改变时,时序效应影响下的气动效率和尾迹输运时间之间是否存在一个确定的相位关系?

(b) “双波峰”现象是否普遍存在,其发生原因是什么?

通过以上分析可以看出,轴向间距的变化对时序效应具有很大影响。在轴向间距改变的条件下,时序效应所带来的效率提升的幅度和效率极值出现的位

置都会发生变化。另外还发现,轴向间距还能带来涡轮叶栅整体效率的提高,其程度甚至超过了时序效应本身的作用。所以,综合考虑轴向间距和时序效应这两个方面的因素会带来更大的效益。受条件所限,这项研究还存在一定的局限,算例也不够丰富,以上结果仅能从定性的角度对该问题进行说明。但总体来看,轴向间距对时序效应影响很大,能够带来的效益也很大,值得深入研究。

参考文献:

- [1] Huber F W, Johnson P D. Performance improvement through indexing of turbine airfoils, Part 1-Experimental investigation [R]. *ASME paper* 95-GT-27, 1995.
- [2] Dorney D J, Shama O P. A study of turbine performance increase through airfoil clocking [R]. *AIAA* 96-2816.
- [3] Tiedemann M, Kost F. Some aspects of wake-wake interactions regarding turbine stator clocking [J]. *Transactions of ASME*, 2001, 123: 526~ 533.
- [4] Arnone A, Marconcini M, Pacciani R, et al. Numerical investigation of airfoil clocking in a three-stage low pressure turbine [R]. *ASME paper* 2001-GT-0303, 2001.
- [5] 祁明旭, 丰镇平. 轴流透平动静干涉的非定常效应及其对气动性能的影响 [A]. 中国工程热物理学会学术会议论文 [C]. No. 022029, 2002.
- [6] Huang H Y, Yang H T, Feng G T, et al. Fully clocking effect in a two-stage compressor [R]. *ASME paper* GT2003-38867, 2003.
- [7] 于海力, 闫朝, 季路成, 等. 探讨一种叶轮机非定常流数值模拟的方法 [J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(1).
- [8] Ni R H. A multiple-grid scheme for solving the euler equations [R]. *AIAA paper* 81-1025R, 1981.
- [9] 刘建军, 蒋洪德. 用多重网格 TVD-LW 格式数值求解 NS 方程 [A]. 中国工程热物理学会热机气动热力学会议 [C]. 932012, 1993.
- [10] Jameson, Antony. Time dependent calculations using multigrid, with application to unsteady flows past airfoil and wings [R]. *AIAA paper* 91-1596, 1991.
- [11] Smith L H. Wake dissipation in turbomachine [J]. *ASME J of Basic Engineering*, 1966, 88D: 688~ 690.

(编辑: 梅 瑛)