

文章编号: 1000-8055(2010)10-2333-07

轴流透平时序定位方法的探讨

王 俭, 杨 波, 谷传纲

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要: 利用时序效应原理, 对一个 1.5 级轴流透平前后级静叶的周向定位提出简单的方案, 以期能够达到最高效率, 并利用 Numeca 软件对此周向定位方法进行了准三维的数值模拟验证, 结果表明: 该方法在叶轮机构前后级叶片定位的设计中有一定的参考价值。

关 键 词: 轴流透平; 时序效应; 尾迹; 周向定位; 总性能

中图分类号: V231

文献标识码: A

Optimization of axial turbine design by using stator clocking effect

WANG Jian, YANG Bo, GU Chuangang

(School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the effect of clocking in turbo machine, a simple way was suggested to confirm the stator's relative circumferential position. The purpose of this suggestion is to make sure that the axial turbine can reach the best performance. And then, Numeca software was used to make a quasi 3D (three dimensional) numerical simulation for confirmation of this method. Results show that the method has a certain value in the structural design of turbo machine.

Key words: axial turbine; clocking effect; wake; circumferential position; overall performance

现有叶轮机械设计方法大都基于定常假设, 但由于叶轮的旋转, 叶轮机械内部流动呈现非定常性, 即流动状态随时间而改变。即使在来流均匀稳定的前提条件下, 流动仍呈现非定常性, 而气流脉动主要来源于位流干涉、尾迹切割、黏性涡和端壁横向流动等。因此, 为了得到良好的设计效果, 在叶轮机械的气动设计体系中, 从定常向非定常的转变成为主要趋势。

时序效应, 是指多级叶轮机械中, 改变静/静或动/动叶片的相对周向位置, 叶轮机的气动性能将发生相应的改变, 各个不同的相对周向位置对应不同的时序定位, 在定常设计理论中, 叶片周向位置的不同定位不会对叶轮机气动性能产生影响, 这显然与实际情况存在差异。

近年来, 作为一种利用非定常效应以提高叶轮机械效率的方法——时序效应, 在叶轮机械设计中的应用受到人们越来越多的关注。Eulitz 等人^[1] 对一个 1.5 级低压涡轮模型的时序效应进行数值模拟发现不同的时序位置, 第一级静叶尾迹到达第二级静叶前缘线时, 保持冲击在第二级静叶前缘, 此时效率最高, 冲击在通道中部时, 效率最低。Huber 等人^[2] 研究表明, 静子时序效应使得涡轮效率提高的主要因素是改善了第二级静子的性能, 减小第二级叶片表面脉动速度, 对于时序效应为什么会带来效率上的收益, 目前一致的看法是: 由于不同的时序位置, 前排静叶尾迹对后排叶片的附面层及分离层产生不同的影响造成。Dorney D J 和 Sondak D L^[3] 针对时序效应, 利用

收稿日期: 2009 09 01; 修订日期: 2009 11 30

作者简介: 王俭(1982-), 男, 安徽安庆人, 硕士生, 主要从事叶轮机械非定常研究。

一个 1.5 级的静/动/静轴流透平进行三维数值模拟研究. 计算发现第二级静叶处在不同时序位置时, 可导致效率最大相差 1%. Walker 等人^[4]研究了轴流压缩机叶片尾迹在叶排中的运动情况以及尾迹运动对噪声的影响. Saren 等人^[5]改变了一 1.5 级静/动/静轴流压缩机模型的前后级叶排轴向间距, 对时序效应进行研究, 研究表明: 时序效应作用与叶排间距有关, 且不同时序位置引起效率变化的主要原因在于对中间转子叶排的不同影响. 国内, 哈尔滨工业大学^[6,8]对低速压气机时序效应进行了实验研究和数值模拟, 进一步验证了 Huber 提出的时序效应的机理. 北京航空航天大学^[9]的侯安平、周盛^[9]对轴流式叶轮机时序效应的一系列研究工作进行了分析整理, 并给出了一个指导实现最优时序效应结构设计的初步工程简化模型. 闫朝^[10]研究了改善叶片设计以最大化时序效应影响的方法, 利用线缘匹配进行三维定位, 以提高透平效率. 同时李绍斌等人^[11]以两级低速压气机为研究对象, 采用包括湍流模型与转捩模型在内的数值方法, 模拟第二排静叶位于两个典型时序位置上压缩机工作点中径处的非定常流场, 研究表明: 时序位置的改变能减小由非定常波动带来的附面层流动的摩擦损失. 闫朝等人^[12]针对两级轴流透平的数值模拟结果, 提出轴向间距的变化对尾迹的输运时间造成一定的影响, 使得极值效率对应的时序位置沿周向迁移.

目前, 利用时序效应对轴流叶轮机械叶片相对周向进行定位, 尚无工程上的准则, 更多的是利用数值模拟来确定最高效率点位置. 实际中, 透平往往多达十几级, 若针对每对相邻叶片的周向定位进行数值模拟确定, 工作量巨大, 因此, 希望有定位准则, 在保证一定准确性的前提下, 快速简单的实现利用时序效应使得效率最大化. 本文中, 试图利用静叶时序效应, 对相邻叶片的相对周向定位方法给出简化的公式, 并针对某一 1.5 级透平算例, 利用 Numeca 软件的数值模拟结果对该方法进行验证.

1 最佳时序定位的理论探讨

图 1 为一个 1.5 级透平模型中径截面示意图, 同时给出动叶进出口速度三角形. 据此, 对第一级静叶尾迹在级中的运动进行分析.

第一级静叶尾迹产生后, 在进入动叶通道前, 沿着与主流速度相同的方向运动, 在进入动叶前, 其周向偏移为 $D_1 \cdot \cot \alpha_1$, 进入动叶流道后, 被

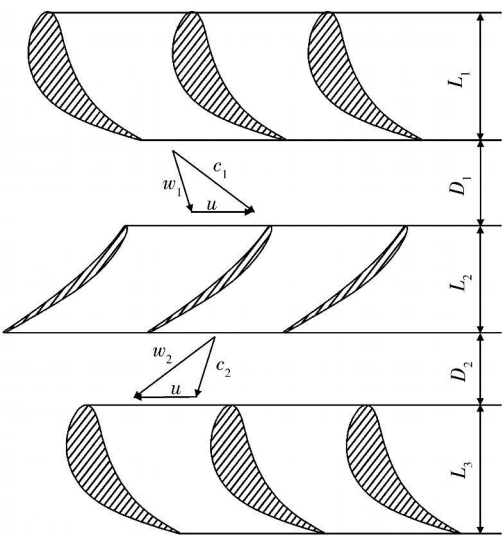


图 1 1.5 级透平速度三角形示意图
Fig. 1 1.5 stage turbine's velocity triangle sketch

叶切割, 分成上下两部分, 最后和动叶尾迹掺混流出. 在假设动叶不运动时, 尾迹沿动叶流道流过动叶, 在动叶流道中的运动, 我们确定周向偏转即为动叶前后缘的周向距离 $-\Delta l$. 从动叶流出后, 与主流速度方向基本上保持一致, 在到达第二级前缘之前, 周向运动距离近似可用 $-D_2 \cdot \cot \alpha_2$ 表示. 其实, 在动叶流道中, 尾迹运动状况相当复杂, 此处的简化, 假设在动叶不运动情况下尾迹产生了 $-\Delta l$ 的周向偏距, 同时, 它随着动叶的转动, 偏移距离即是线速度 $v = \omega \cdot R$ 乘以时间 $t = L_2 / (c_1 \cdot \sin \alpha_1)$. 由此, 根据几何关系可知, 总的周向偏移为

$$s = D_1 \cdot \cot \alpha_1 + \frac{L_2}{c_1 \cdot \sin \alpha_1} \cdot \omega \cdot R - \Delta l - D_2 \cdot \cot \alpha_2 \tag{1}$$

式中 s —流体从第一级静叶尾缘点流出到达相对应的第二级静叶前缘点时的周向总偏距; D_1 —第一级静叶与动叶的轴向间距; α_1 —第一级静叶出口气流角; L_2 —动叶在流面上的投影弦长; ω —动叶旋转角速度; R —圆柱半径; c_1 —动叶进口绝对速度; Δl —动叶前后缘的周向距离; D_2 —动叶与第二级静叶轴向间距; α_2 —动叶出口气流角.

当然, 这样进行几何关系的简化和实际尾迹的复杂运动有一定出入. 实际上, 尾迹在传输过程中, 由于干涉作用, 其运动的情况远远不是如此简单. 脱落的旋涡随流体运动, 同时由于黏性和湍流作用而扩散, 但从叶片后的涡量连续分布这一性质可以得出, 对流影响是主要的, 流动方向的速度

梯度和侧向速度梯度相比较小. 尾迹在传播过程中, 其平均速度 v_0 与主流速度 V_0 方向相同, 但存在速度差, 使得进入转子叶排的尾迹具有指向动叶吸力面的滑移速度, 从而, 尾迹传播过程中有向动叶吸力面传输的趋势. 因此, 在工程上用 $-\Delta l$ 对以上扩散运动进行一定的简化具有合理性, 从后面的数值模拟的结果中可直观看到具体运动情况.

公式 (1) 中, 尾迹在进入动叶前的速度定为与主流速度相同的 c_1 , 主要是依据大量文献实验数据. 尾迹中心线速度恢复比较快, 一般在下游半个弦长距离可恢复到主流速度的 70%, 据此做了近似处理.

公式 (1) 的推导并不是基于定常流动假设, 只是忽略了尾迹运动过程的具体细节, 而具体运动过程将在数值模拟验证部分做进一步的观察与分析.

另外在工程应用中, 利用时序效应, 对相邻叶片进行周向定位不仅仅针对某两级叶栅, 一般的大型叶轮机械往往多达十几级, 仅依靠数值模拟对每级进行定位, 工作量巨大, 为了达到快速简便定位的目的, 提出合理的简化公式是必要的.

2 数值模拟验证

利用一个模化的 1.5 级透平算例来验证以上方法的准确度, 先后用两个算例来进行验证. 算例 1 的参数设定见 2.1 节, 算例 2 仅在算例 1 的基础上改变前后级叶片的轴向间距, 其他条件不变, 进行计算.

2.1 模型参数

算例 1 的透平为静/转/静结构, 动静叶片均为 29, 设计转速为 7 500 r/min, 截取中径截面做准三维数值模拟.

算例 1 的各参数设定为: $D_1 = 12.1085\text{ mm}$, $\alpha_1 = 10.5^\circ$, $\omega = 250\pi/\text{s}$, $c_1 = 195\text{ m/s}$, $L_2 = 38.4439\text{ mm}$, $R = 164.484\text{ mm}$, $\Delta l = 31.6205\text{ mm}$, $D_2 = 20.7343\text{ mm}$, $\alpha = 49^\circ$.

2.2 计算设定

取中径截面做准三维数值模拟, 按照一个栅

距八等分, 依次转动第二级静叶, 得到 8 个 (第 1 位置和第 9 位置相同) 不同的时序位置, 分别标记为 Clock 1, 2, 3, ..., 7, 8. 其中第 1 位置 (基准点) 定义为相对应的第二级静叶前缘点比第一级前缘点沿周向高出 $s' = 32.669\text{ mm}$. 采用 Numeca 软件, 对这 8 个位置进行非定常计算.

计算控制方程是三维雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程, 由于零方程模型相对简单, 可以比较好地模拟附着边界层湍流, 因此选用 Baldwin-Lomax (B-L) 湍流模型, 计算采用 HO 网格, 计算网格如图 2 所示, 各网格块的网格点分布如表 1 所示. 径向设置为一层网格, 厚度为 0.78 mm, 加密靠近叶片壁面网格节点, y^+ 满足湍流模型的要求, 该 1.5 级透平总网格数为 156 218, 动静交界面的数据传递采用 Domain scaling 方法. 为加速收敛, 计算采用多重网格法及双时间步长法, 以获得较快的收敛速度.

给定边界条件: 进口总压 $p_{in} = 260\,000\text{ Pa}$; 进口温度 $T_{in} = 413\text{ K}$; 出口静压 $p_{out} = 160\,000\text{ Pa}$.

初场为对应的定常计算结果, 一个栅距通道内设定 26 个物理时间步, 迭代 20 个周期后, 所有参数均出现周期性变化, 从而确定收敛结果.

2.3 计算结果分析

将每个时间点得到的进出口压力和温度代入以下公式:

$$\eta = \left[1 - \frac{T_{12}}{T_{11}} \right] \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{p_{12}}{p_{11}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}$$

其中 T_{11} , T_{12} 分别表示进口和出口总温, p_{11} , p_{12} 分别表示进口和出口压力. 再对每个时刻点的效率进行时间平均, 得到各时序位置的时均等熵效率如图 3 所示.

从图 3 可以看出, 最高效率和最低效率相差 0.4% 左右, 差别不大的原因主要在于: 流量不大, 削弱了时序效应的影响. 但差别还是存在的, 对定性分析没有影响. 容易看出 Clocking 1 位置效率最高, 为 91.348%, Clocking 4 位置效率最低, 为 90.969%. 产生效率差别的原因在于: 第一级静叶尾迹打在第二级静叶前缘, 来自上游低能流体和

表 1 各网格块网格点分布
Table 1 Distribution of the mesh

第一级静叶		动叶	第二级静叶	
H 型 inlet	O 型 blade	O 型 blade	O 型 blade	H 型 out let
85×2×33	61×2×365	61×2×465	61×2×365	73×2×33

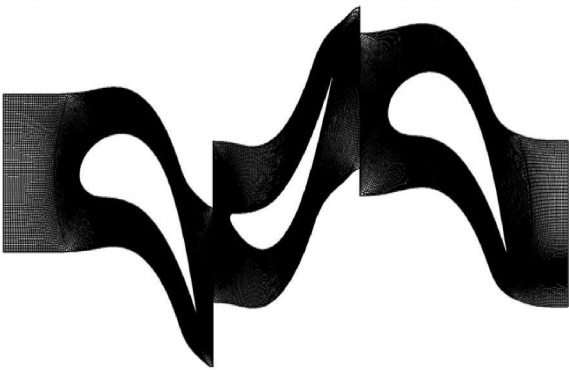


图 2 计算网格
Fig. 2 Mesh to compute

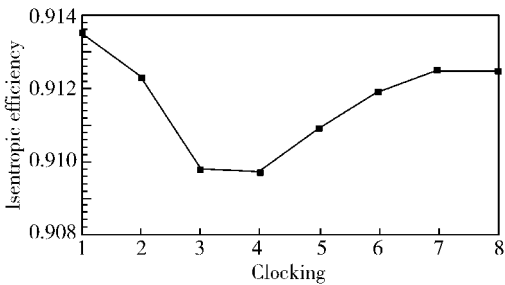


图 3 算例 1 时均等熵效率随静叶时序位置的变化
Fig. 3 Example 1's isentropic efficiency versus the stator's clocking position

当前排的低能流体相汇合, 损失最小, 效率最高; 从第二级静叶流道中间流过, 来自上游的低能流体与当前排的高能势流汇合, 损失较大, 效率较低. 针对最高效率和最低效率的时序位置, 给出一个周期内 4 个时间点的熵变化如图 4、图 5 所示. 图 4 中四幅图分别为最高效率点 Clocking 1 位置一个周期内 4 个不同时间点的熵图, 从图中可以清楚看到第一级静叶尾迹产生以及向下游传输的全过程, 图中颜色较浅的区域在一个周期内, 基本保持冲击到第二级静叶的前缘. 图 5 中四幅图分别为最低效率点 Clocking 4 位置一个周期内 4 个不同时间点的熵图, 颜色较浅的区域, 到达第二级静叶前缘线时, 基本位于流道中间位置, 由此说明了前言提到的结论的真实性.

同时, 图 6 给出了第二级静叶最高以及最低效率点对应时序位置的吸力面摩擦力在一个周期内 $(1/13)T$, $(3/13)T$, $(5/13)T$, $(7/13)T$, $(9/13)T$, $(11/13)T$ 以及 T , 这 7 个时间点的分布情况. 横坐标为沿轴向 Z 的各点坐标, 此处只列出了吸力面摩擦力, 并给出压力面摩擦力, 主要原因在于吸力面的摩擦力相对于压力面要大, 且压力面的摩擦力在一个周期内的变化不明显. 从图中总趋

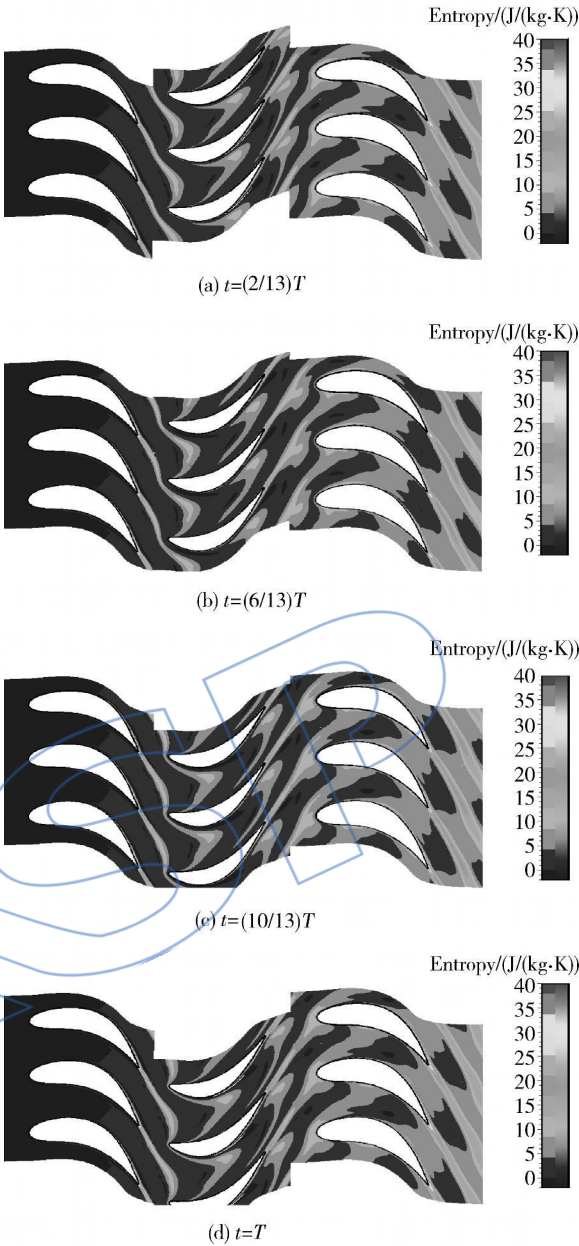


图 4 最高效率点熵图
Fig. 4 Largest efficiency position's entropy

势可以看出, 最高效率点对应的时序位置, 吸力面摩擦力较最低效率点要小, 且一个周期内, 吸力面摩擦力波动幅度比最低效率点对应的时序位置要小的多, 这说明前者的摩擦损失较小, 且由非定常干扰引起的附面层流动的参数波动较小, 流动趋于平稳, 时序位置的改变减小了由非定常波动带来的流体摩擦损失. 这也是时序效应能够提高轴流透平性能的主要原因.

不同时序位置, 气体在到达第二级静叶前的运动轨迹的时均图基本是一致的. 结合图 7 Clocking 1 位置的涡量值云图, 观察尾迹的运动情况, 以考察公式 (1) 的合理性. 第一列静叶尾迹

存在涡量方向相反的两部分, 被下游动叶前缘截断, 并与该处边界层掺混, 在动叶中, 由于速度梯度、压力梯度以及通道涡的存在, 尾迹形态发生变化, 主要分为弯曲、剪切和拉伸。

静叶尾迹进入动叶通道, 靠近壁面的流体在黏性作用下流动速度较小, 靠近通道中部的流体速度较大, 使得尾迹两侧速度相对较小, 如图 4、图 5 中从 $(2/13)T$ 时刻到 T 时刻, 尾迹明显弯成拱形。同时, 动叶吸力面侧的速度较大, 对于尾迹的输运也比压力面一侧提前, 从而产生明显的剪切效果。

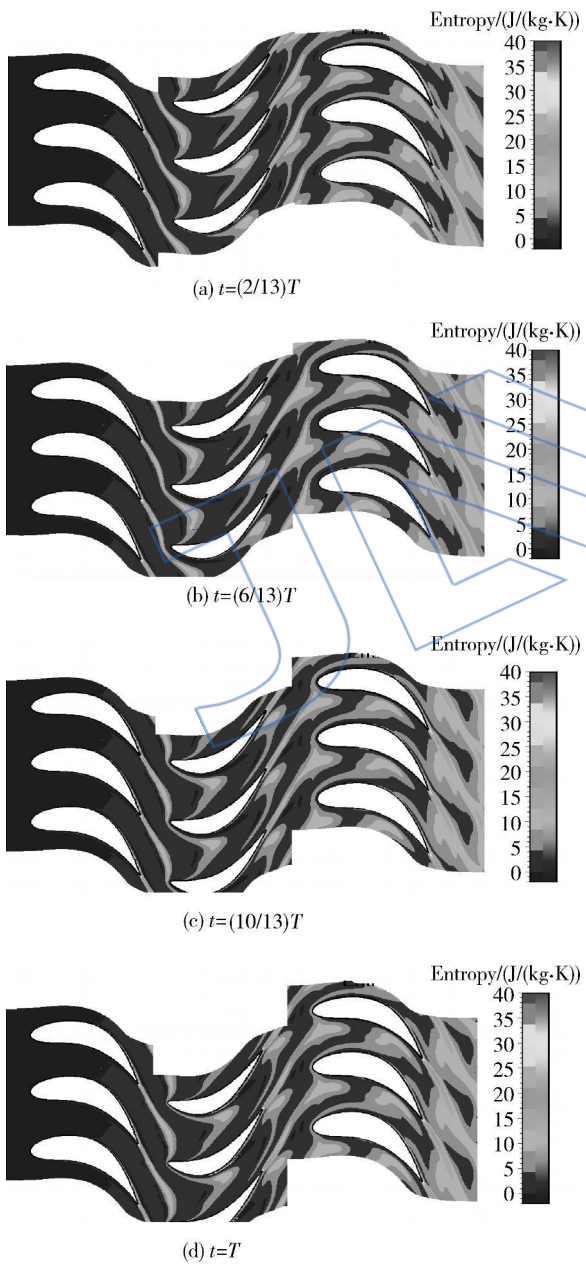


图 5 最低效率点熵图

Fig. 5 Least efficiency position's entropy
拉伸作用主要是因为轴向速度沿流道逐渐增

大, 尾迹在动叶排下游处于运动速度较快的区域, 被强行拉伸, 从图 4、图 5 中浅色区域也可以明显观察到。

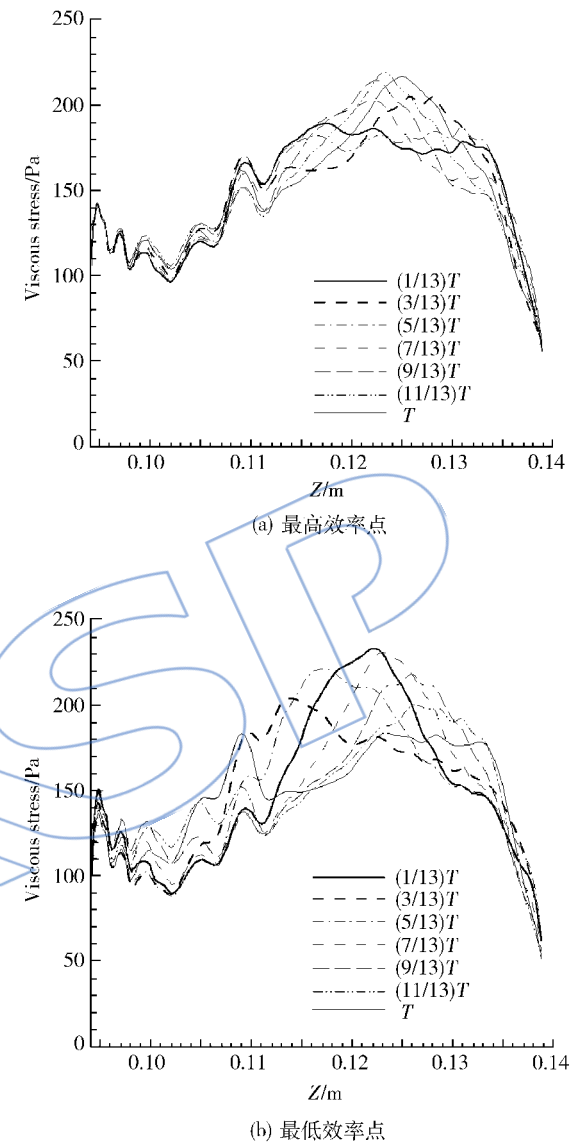


图 6 第二级静叶最高及最低效率点对应时序位置的吸力面摩擦力分布
Fig. 6 Largest and the least efficiency position's friction force distribution in S_2 's suction surface

从图 7 中可以清楚看出, 静叶尾迹通过动叶时, 相对于主流而言, 向着动叶的吸力面传输, 动叶的存在将切断尾迹的传输, 结果静叶尾迹都被动叶的吸力面收集起来, 静叶尾迹又将在动叶尾迹中出现。这就是我们设想用线速度 $v = \omega \times R$ 乘以时间 $t = L_2 / (c_1 \times \sin \alpha_1)$ 之积与 $-\Delta l$ (动叶前后缘的周向距离) 之和, 表示第一级静叶近似在动叶中周向偏移的依据。图中, 第一级静叶尾迹被

流动,随着流动到动叶尾缘,其周向偏转为 $-\Delta l$;与势流掺混的部分尾迹的偏转比较复杂,根据前面的分析,由于剪切、拉伸等多种情况的存在,它并不是简单的沿着与势流相同的方向前进,这里做出了近似假设,也用 $-\Delta l$ 表示其周向偏转.这是本方法的主要误差来源,但由于轴向的速度以及动叶的线速度相当大,且图中可以看出尾迹沿流道近似以 $-\Delta l$ 偏转,所以进行如此简化也具有合理性.



图 7 Clocking 1 位置流动时均涡量值云图
Fig. 7 Time average count of vorticity in Clocking 1 position

另外,在尾迹进入动叶之前和离开动叶流道之后,其运动方式随主流方向运动,以对流运动为主,从图 7 中可以比较清楚看出,尾迹进入动叶之前和离开动叶流道之后,其周向偏离距离分别以 $D_1 \times \cot \alpha_1$, $-D_2 \times \cot \alpha_2$ 表示是合理的.

这样,根据公式(1),预测最佳效率点位置对应的 s

$$s = D_1 \cdot \cot \alpha_1 + \frac{L_2}{c_1 \cdot \sin \alpha_1} \cdot \omega \cdot R -$$

$$\Delta l - D_2 \cdot \cot \alpha_2 = 138.1373 \text{ mm}$$

第二级静叶栅距为

$$\Delta t = 35.4431 \text{ mm}$$

实际在 Clocking 1 位置对应的 $s' = 32.6690$ mm,可以得到

$$s \approx 3 \cdot \Delta t + s'$$

误差

$$\theta = \frac{s - (3 \cdot \Delta t + s')}{s} = 0.62\%$$

可知在 Clocking 1 位置,第二级任一静叶可以接收到对应的第一级静叶向前逆动叶转向的第三个静叶片的尾迹,保证达到第二级静叶前缘.

为了进一步证实公式(1)的可信性,改变此 1.5 级透平的轴向间距进行验证.

此时 $D_1 = 15.0000 \text{ mm}$, $D_2 = 15.0000 \text{ mm}$,其他参数不做改变,计算设定以及计算方法与算例 1 相同,作为算例 2.先根据公式(1),将各数据带入进行预测

$$s = D_1 \cdot \cot \alpha_1 + \frac{L_2}{c_1 \cdot \sin \alpha_1} \cdot \omega \cdot R -$$

$$\Delta l - D_2 \cdot \cot \alpha_2 = 158.7084 \text{ mm}$$

此时

$$s \approx 4 \cdot \Delta t + 16.9360$$

对应的

$$s' = 16.9360 \text{ mm}$$

在设定的 8 个 Clocking 位置,与 s' 最接近的应为 Clocking 5 位置,对应的 $s' = 14.9474 \text{ mm}$.

根据数值模拟的结果,得到各位位的时均等熵效率如图 8 所示.

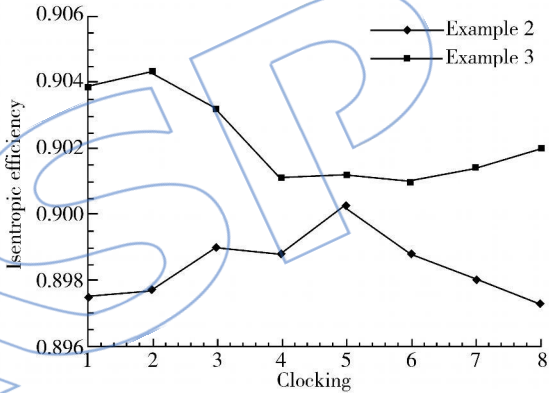


图 8 算例 2,3 时均等熵效率随静叶时序位置的变化
Fig. 8 Example 2 and 3's isentropic efficiency versus the stator's clocking position

由图 8 可知,在 Clocking 5 位置,效率达到最大值(90.027%),证明了公式(1)的相对可靠性.

同时可以发现,算例 2 中,增大 D_1 、减小 D_2 ,等熵效率有所下降.实际上,动静叶间轴向距离在一定范围内的缩短能减少掺混带来的损失,提高高级的等熵效率,增大 D_1 、减小 D_2 ,带来损失的增加和减少.针对算例 2,带来的总体效率呈减小趋势.

为了进一步证明公式(1)的实用性,再次改变轴向间距: $D_1 = 18.0000 \text{ mm}$, $D_2 = 14.0000 \text{ mm}$ 其他参数不做改变,计算设定以及计算方法依然相同,作为算例 3.计算出的时均等熵效率随静叶时序位置的变化如图 8 中所示,用公式(1)预测的最高效率点为

$$s = D_1 \cdot \cot \alpha_1 + \frac{L_2}{c_1 \cdot \sin \alpha_1} \cdot \omega \cdot R -$$

$$\Delta l - D_2 \cdot \cot \alpha_2 = 175.7699 \text{ mm}$$

此时

$$s \approx 4 \cdot \Delta t + 31.2234$$

对应的 $s' = 31.2234 \text{ mm}$, 最高效率点与之对应, 位置应该在 Clocking 1 点附近, 由图 8 可知, Clocking 2 位置为最高效率点, 结果与计算相差不大, 由此进一步证明了公式 (1) 的有效性。

实际的叶轮机件的时序定位是个三维问题, 三维时序效应实际就是多个准三维时序效应沿叶高的叠加, 但实际叶片沿叶高是扭曲的, 无法保证各准三维时序效应同时达到最佳。所以三维的定位准则只可能取各准三维的最优化组合。

3 结 论

1) 透平静叶时序效应的机理体现在: 前级叶片的尾迹干扰减小了第二级静叶附面层的摩擦损失以及非定常波动幅度。

2) 提出利用透平静叶时序效应对叶片进行周向定位, 以使第一级静叶尾迹能大部分冲击到第二级静叶前缘, 通过 1.5 级透平数值模拟, 结果显示, 提出的方法与实际最高效率点差别不大。对比第一级静叶尾迹在叶排中的流动涡量值云图发现, 主要在动叶流道中, 尾迹的运动比较复杂, 但简化后, 反映在公式 (1) 中, 对比数值模拟的结果, 简化还是合理的。该简化准则, 解除了数值模拟定位的复杂性, 公式 (1) 可用于透平各相邻静叶的周向定位, 达到利用时序效应提高透平效率的目的。

3) 一定范围内合理的改变相邻动静叶的轴向间距, 能使级效率得到提高, 同时, 对应的最高效率点的时序位置也会发生相应的变化。

4) 工程中平板叶片的定位可以用本文的方法实现, 但往往叶片沿叶高是扭曲的, 实际三维定位是个复杂的问题, 要考虑到沿叶高各准三维位置的优化组合, 通过优化确定最优效率点位置, 有待进一步的研究。

参考文献:

[1] Eulitz F, Engel K, Gebing H. Numerical investigation of the clocking effects in a multistage turbine[R]. ASME Paper 96 GT-26, 1996.

[2] Huber F W, Johnson P D, Sharma O P, et al. Performance improvement through indexing of turbine airfoils: Part 1—Experimental investigation [R]. ASME Paper 95 GT-27, 1995.

[3] Dorney D J, Son dak D L. Three dimensional simulations of airfoil clocking in a 1.5 stage turbine[R]. AIAA 2000

3359, 2000.

[4] Walker G J, Oliver A R. The effect of interaction between wakes from blade rows in an axial flow compressor on the noise generated by blade interaction[R]. ASME Paper No. 72-GT-15, 1972.

[5] Saren V E, Sauin N M, Dorney D J, et al. Experimental and numerical investigation of airfoil clocking and inter blade row gap effects on axial compressor performance[R]. AIAA-98 3418, 1998.

[6] 杨海涛. 低速压气机中 Clocking 效应的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.

YANG Haitao. Numerical simulation of clocking effects in a low speed compressor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004. (in Chinese)

[7] 陈浮, 顾忠华, 谢海逸, 等. 弯曲静叶时序效应对压气机性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 37-40.

CHEN Fu, GU Zhonghua, XIE Haiyi, et al. Effect of stator clocking on performance in a low speed axial compressor with compound lean stators[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 37-40. (in Chinese)

[8] 蔡蕾, 邹正平, 陈浮, 等. 低速压气机静叶非定常 Clocking 效应数值模拟[J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 914-922.

QI Lei, ZOU Zhengping, CHEN Fu, et al. Numerical simulation of stator clocking effect in a low speed compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 914-922. (in Chinese)

[9] 侯安平, 周盛. 轴流式叶轮机时序效应的机理探讨[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 70-75.

HOU Anping, ZHOU Sheng. Probe into the mechanism of clocking effect in turbo machinery[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 70-75. (in Chinese)

[10] 闫朝. 关于应用缘线匹配最大化时序效应潜能的初探[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2004.

YAN Chao. Preliminary investigation on further exploration of clocking effect by edge matching theory[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)

[11] 李绍斌, 陈浮, 颜培刚, 等. 静叶时序效应对压气机叶片附面层流动影响的数值研究[J]. 航空学报, 2007, 28(增刊): 62-69.

LI Shaobing, CHEN Fu, YAN Peigang, et al. Numerical investigation of the effect of stator clocking on blade boundary layer flow in compressor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(Suppl.): 62-69. (in Chinese)

[12] 闫朝, 季路成, 陈江, 等. 轴向间距对时序效应影响的研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(3): 220-222.

YAN Chao, JI Lucheng, CHEN Jiang, et al. Investigation about the effects of axial gaps on clocking effects[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(3): 220-222. (in Chinese)