

文章编号: 1000-8055(2006)03-0467-07

将缘线匹配应用于最大化 三维时序效益

季路成¹, 闫朝², 陈江³

(1. 中国科学院工程热物理所, 北京 100080;

2. 中国航天科工集团三十一所, 北京 100074;

3. 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对“二维时序效益大于三维时序”疑惑, 提出将缘线匹配技术应用于最大化三维时序效益的一般方法。在此基础上, 根据先前时序研究积累的经验认识, 进一步给出并着重讨论了最大化三维时序效益的简化方法。以Aachen 1.5级亚声轴流涡轮为例展示了该方法的实际过程和效果。结果表明, 缘线匹配指导下, 可以用较小的计算资源使最大化三维时序效益规程化, 并且改进效果可观。

关键词: 航空、航天推进系统; 缘线匹配; 时序; 叶轮机械; 非定常流动; 气动设计

中图分类号: V 231

文献标识码: A

Maximizing Three-Dimensional Clocking Benefit by Applying Edge-Matching

JILU-cheng¹, YAN Zhao², CHEN Jiang³

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute No. 31,

China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074, China;

3. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering "why the benefit of two-dimensional (2D) clocking is always larger than that of the three-dimensional (3D) clocking", a general way of maximizing 3D clocking benefit by edge matching was put forward. On the basis of experience and knowledge accumulated from investigations on clocking, a further simplified method was presented and emphasized. Aachen 1.5 stage low speed subsonic axial turbine was used as an example of maximizing 3D clocking benefits by applying edge matching. The result shows that 3D clocking benefit can be maximized by routinely using edge matching with only little computation resource requirements, and the benefit is good enough to be paid more attention.

Key words: aerospace propulsion system; edge matching; clocking effect;

收稿日期: 2005-06-21; **修订日期:** 2005-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助(50376062)

作者简介: 季路成(1970-), 男, 山东蓬莱人, 中国科学院工程热物理所副研究员, 博士, 主要从事计算流体、能源、动力和推进装置气动设计及相关理论的研究

turbomachinery; unsteady flow; aerodynamic design

时序效应是相对静止叶排间周向相对位置对叶轮机气动效率产生影响的现象。Walker^[1]最早发现时序能产生声学收益。到 80 年代末,人们开始注意时序的气动效益。90 年代至今,国内外众多学者就该问题进行了大量试验和数值研究,如 Huber^[2]、Dorney^[3]、闫朝等^[4]的工作。时序能产生效率收益已成为业内共识,然而,实际应用时序仍面临两大问题:一是叶片数目差别造成的困难;二是,常常发现三维时序效应效益极微。缘线匹配^[5]为解决上述第二大问题提供了契机。本文对缘线匹配指导三维时序思路进行介绍,并以 Aachen 1.5 级亚声轴流透平为例,用数值方法展示应用缘线匹配最大化三维时序效应效益。

1 缘线匹配和三维时序

迄今,关于时序收益的结论千差万别:Barankiewicz 等^[6]通过静叶时序试验研究发现仅有 0.2% 的效率提升;Gundy 等^[7]在 2.5 级压气机中的静叶时序研究表明效率变化在 0.5%~0.8% 间;Dorney & Shama^[3]对 1.5 级涡轮叶栅进行的二维研究中效率变化达到 2%,...这些结果中,一个明显规律是:二维时序效率收益总比三维情形大。一些学者也注意到这一问题:Huber^[2]实验发现三维时序只能使效率提升 0.3%,而部分叶展(准三维)效率提高可达 1%;Arnold^[8]也发现三维时序提高效率 0.7%,而叶中部效率提升达 1.1%,他们预言,如果能使上游静(转)叶尾迹在各展向位置同时打在下游静(转)叶前缘,三维时序收益将能得到提高。然而,公开文献上仍未见有此方向努力。原因很简单,时序的初衷是:改变叶片安装的周向相对位置而几乎无额外成本地提高叶轮机性能——立足于“展向同步改变叶片周向相对位置”恰在指导思想上妨碍了充分发挥时序效益。缘线匹配解除了这种禁锢,允许在设计阶段通过重新积叠叶身而使展向各截面同时处于最佳时序,从而为三维时序效益最大化提供了理论指导。

缘线匹配处理叶轮机相邻叶排中前排叶片后缘与后排叶片前缘空间相对位置关系,它主导并反映叶排间非定常流动相位匹配关系,因而可以用来操作叶轮机固有非定常流动,提高叶轮机性能。三维时序是允许周向相对错动安装的相对静止叶排间的缘线匹配,可看作是中间排叶片给定

且同时包含此叶片的两组缘线匹配组合。图 1 示例了缘线匹配框架下三维时序含义,可以明确:最大化三维时序效益就是找到具有最佳周向相对位置的最佳缘线匹配③,其中最佳缘线匹配意指:存在一组相对静止叶片间的缘线匹配,当这样两排叶片相对错动某一周向距离安装时,沿整个叶展,各截面同时处于最佳时序位置——此时效率最高。

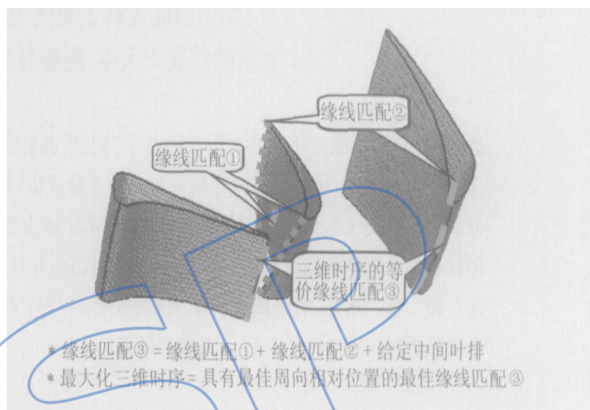


图 1 缘线匹配与时序效应关系示意

Fig 1 Relationship between edge matching and timing

按照缘线匹配理论^[5],如果事关时均性能,只有全优化方法可以胜任。因而针对考虑三维时序的缘线匹配,最大化三维时序效益的正常策略是:

- (1) 确定缘线匹配组合(SM, ST) (中部和尖部缘线无量纲周向距离,见文献[5])变化范围;
- (2) 采用定常方法评价上述变化范围内各种缘线匹配组合,包括确立后续缘线匹配过程的参考基准——第一排叶片缘线走向;
- (3) 对各种缘线匹配组合以及每种组合下不同周向相对位置情形进行全三维非定常计算;
- (4) 根据上述结果确定具有最大三维时序效益的叶排布局。

上述实际操作最大化三维时序效益过程计算量异常巨大,有没有简化方法呢?

2 最大化三维时序的简化方法

文献[5]谈到,利用非定常流动经验认识常可大大降低缘线匹配全优化方法计算量。那么,缘线匹配指导下的最大化三维时序效益努力中,哪些认识可提供帮助呢?

首先,时序效应的二维模型研究结果提供了

二维层面隔排叶片周向相对位置排布基本规律^[2,3]: 如果调整相对静止叶片相对周向位置使得上游叶片尾迹随流输运撞在下游隔排叶片前缘附近, 那么, 由于尾迹低能流体和叶表附面层低能流体汇合时掺混损失小, 所对应时序位置将是最大效率位置; 而如果尾迹打在叶片通道中间, 则会因为尾迹低能流体和主流高能流体掺混剧烈造成较大损失, 此时为最小效率时序位置。上述规律在基元流动层面确定了最大化三维时序效益方向。第二, 调整相对静止叶片缘线匹配使得沿展向各截面能同时达到时序最佳就能最大化三维时序效益, 这是三维时序效益最大化的指导思路。

针对前一认识, 目前正面临质疑, 例如文献[4]发现: 在一个时序周期内, 即便时序的叶片数比为 1 : 1, 效率随时序位置变化可能多次经历峰谷变化。如何确保这一质疑不影响最大化三维时序效益结果? 下述最大化三维时序简化方法具体步骤实际避免了该问题。

- (1) 对应用时序叶排在多个时序位置进行非定常流场时间精确模拟;
- (2) 分析整理一个时序周期内每个时序位置时均效率的展向分布;
- (3) 如图2 示例, 沿展向连接各特征截面最大时序效益点;

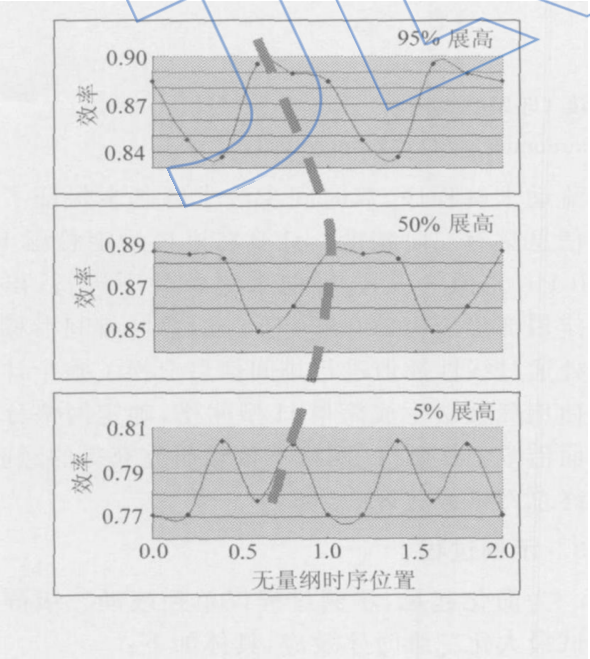


图2 最大时序效益示意

Fig 2 Sketch plot of optimum clocking

- (4) 根据(3) 确立目标缘线匹配组合 $[S(r_{hub}), S(r_{mid}), S(r_{tip})]$, 以达到图3 所示效率展向

分布, 其中隐含了各叶片基元发生周向相对位错时非定常流动只发生相位变化的假设;

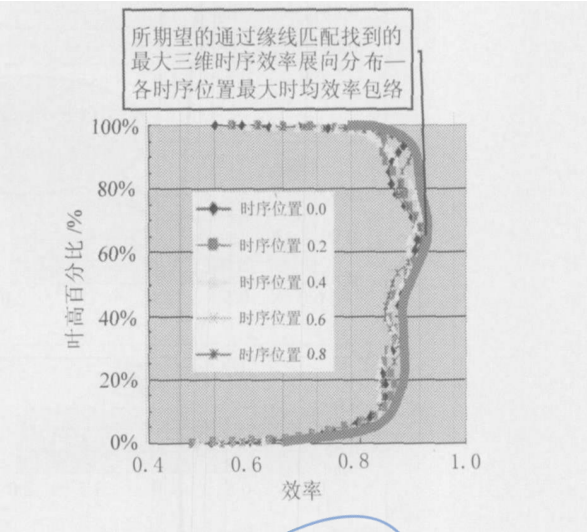


图3 最大化三维时序效率目标

Fig 3 Goal to maximize 3D clocking benefit

- (5) 考虑到近端壁区流动可能严重偏离(4)中假设, 故以上述目标缘线匹配组合 $[S(r_{hub}), S(r_{mid}), S(r_{tip})]$ 为中心, 展开一定 SH (根部缘线无量纲周向距离)、 ST 变化范围内缘线匹配优化, 如图4(b)所示, 由此寻求三维时序效益最大化。

4 个要点值得说明:

- (1) 出于叶片几何光滑性及结构强度考虑, 工程实际中并不能实现图2、图3 反映的理想缘线匹配, 因此才有图4(a)中虚线和实线连接的折衷选择;
- (2) 注意到 $S(r)$ (半径 r 处缘线无量纲周向距离) 的相对性质, 在实际应用缘线匹配最大化时序效应时, 可单独改变前排或后排相对静止叶片积叠, 也可同时改变;
- (3) 步骤(5) 中以目标 $[S(r_{hub}), S(r_{mid}), S(r_{tip})]$ 为中心变化缘线匹配组合 (SH, ST) 时, 将叶中部固定在最佳时序位置附近将节省搜索最优的计算量;
- (4) 采用三维定常计算以快速排除不良缘线匹配(本文将不演示此步骤)。

3 数值示例

3 1 研究对象

数值示范研究对象采用德国A achen 学院1.5 级亚声低速轴流透平, 如图5 所示, 该涡轮由两列相同静叶和一系列动叶构成, 其中静叶采用Traupel 叶型, 动叶采用改型后的VKI 叶型, 转速

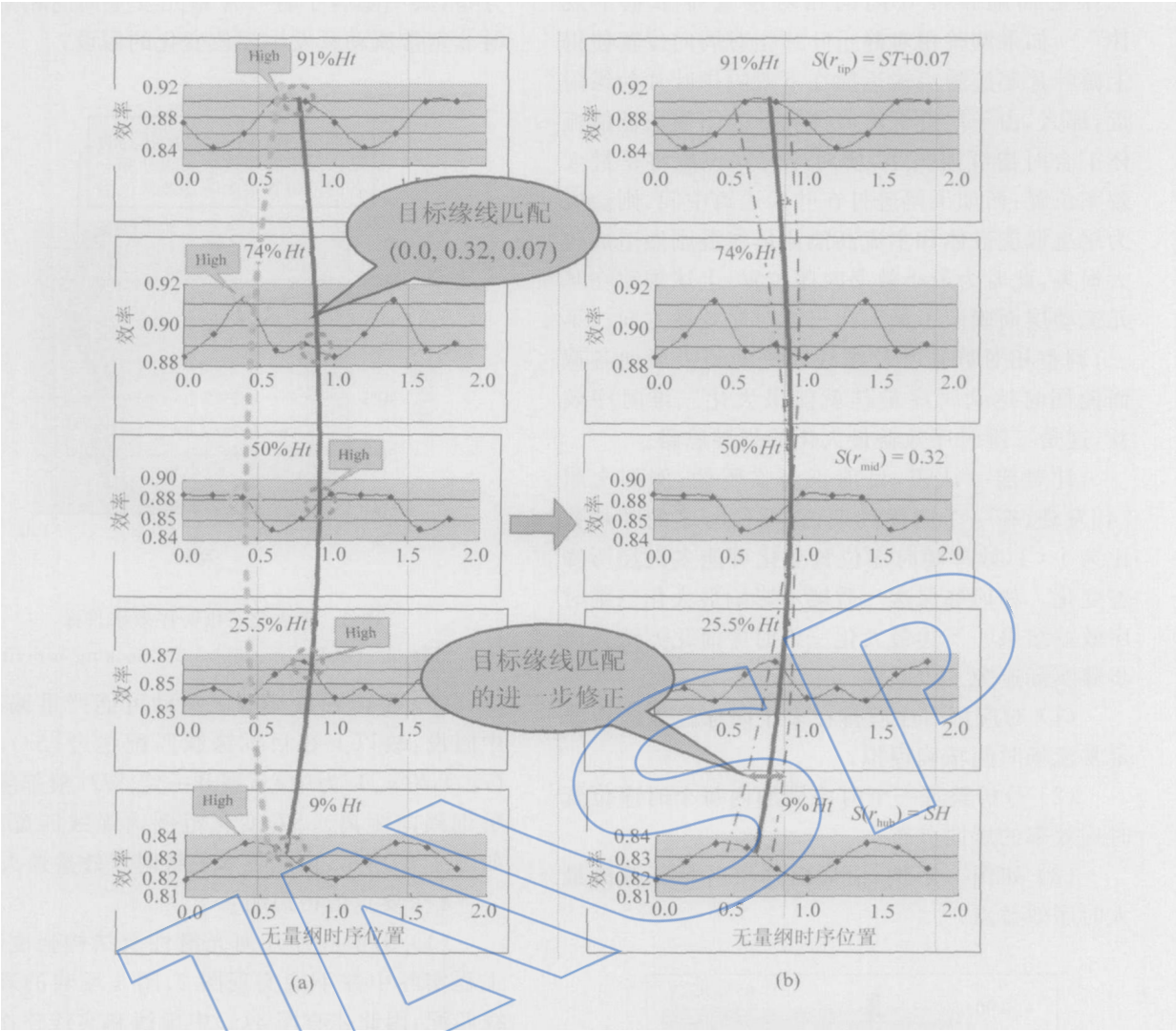


图4 最大时序效益点展向连接 (即积叠线选取)

Fig 4 Selection of restacking line for maximizing 3D clocking effects

为3 500 r/min, 静/转/静叶片数比为36 : 41 : 36, 为降低数值示例该技术过程中的计算量, 对转叶进行模化, 最终使叶片数比简化为1 : 1 : 1。

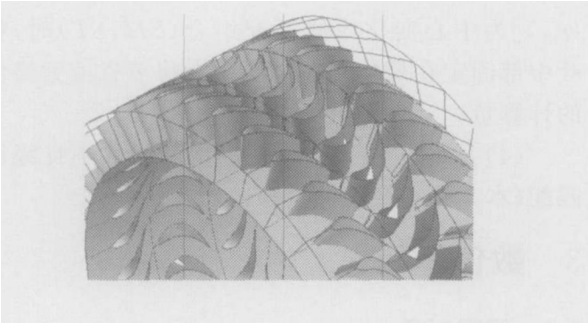


图5 Aachen 1.5 级涡轮三维实体

Fig 5 3D Plot of Aachen 1.5 stage turbine

3 2 数值方法

数值计算采用文献[9]开发的三维粘性非定

常流动求解程序, 双时间步法求解基本保证了时间信息具有二阶精度。计算在进口给定总压169 600 Pa、总温305 K、轴向来流条件下进行, 出口给定根部静压为100 860 Pa。动/静叶排间滑移界面处通过线性插值进行排间信息交换。整个计算域使用代数法生成简单H 型网格, 确定网格分布方面借鉴了文献[9]网格不依赖研究获得的经验, 最终总网格数达883 568。

3 3 示例过程

为简化起见, 示例过程仅单独改动二级静叶尝试最大化三维时序效应, 具体如下:

(1) 对A achen 1.5 级涡轮原型(叶片数比为1 : 1 : 1)在0, 0.2, 0.4, 0.6 和0.8 (以栅距无量纲化值) 5 个时序位置分别进行非定常流场时间精确求解, 由结果整理出沿展向9%, 25.5%, 50%、74.5% 和91% 5 个典型截面随时序位置变化的效

率分布,图4所示;

(2) 在图4上选取一条连线尽可能使得连线上各点均处于最高效率。考虑几何光滑性因素,本次示例选定对应缘线匹配组合 $[S(r_{hub}), S(r_{mid}), S(r_{tip})]$,图4(a)实线;

(3) 考虑到近端壁区流动可能严重偏离流动束缚于基元流面内假设,故仍需允许上述目标缘线匹配 $(0.0, 0.32, 0.07)$ 在尖区和根区有一定范围变化,以遍历所有提高效率可能,这是一轮以叶根 SH 、叶尖 ST 变化为主的缘线匹配, SH 和 ST 按图4(b)定义。本文允许 SH 和 ST 在 $[-0.2, 0.1]$ 间改变,如图6,其中缘线匹配 $(0.0, 0.32, 0.07)$ 即为改进原型O点;

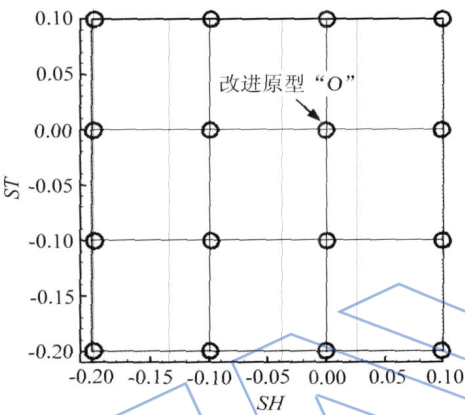


图6 示例时序效益最大化的 (SH, ST) 域
Fig 6 (SH, ST) Plot for maximizing clocking effects

(4) 根据 (SH, ST) 变化域内每一点坐标重新积叠生成二级静叶并进行全三维非定常流场数值模拟,据此寻求 (SH, ST) 变化域内时均效率最高点;

(5) 为节省由时序带来的附加计算量,考虑到二静在时序位置1.0时中部接近效率最高以及流动束缚于基元流面内假设,对所有图6中所示缘线匹配均认为其最大时序发生在中部50%截面固定在时序位置1.0(见图4,等价于0.0)时。

4 结果及讨论

Aachen 1.5 级涡轮原型对应缘线匹配组合参数为 $(0.0, 0.0, 0.0)$ 。对其在5个时序位置的非定常流场时间精确求解表明,“刚”性地周向移动二级静叶情况下,即“传统”三维时序时,最低和最高效率分别发生在0.4和0.8时序位置处(如图7),效率值分别为86.25%和86.58%,效率最大提

升为0.33%。对其展向各截面时均效率分布图4分析指明,即便处于最高时序效率,仍有9%,50%和74.5%3个区域代表截面处于低效率,这意味着我们有机会通过周向平移这3个区域的叶片基元而使得时序效益更大。为此,将二级静叶按图4(a)实线所针对的缘线匹配 $(0.0, 0.32, 0.07)$ 重新积叠,并将其周向位置固定使得叶中截面对应时序位置1.0,此时再次时间精确模拟表明时均效率达到86.65%,仅有微弱改进。值得一提,由于考虑实际叶片必须光滑因素,图4(a)实线所针对的缘线匹配并非在所有截面保证实现最佳时序,74.5%展高处就仍处于低时序效益区,这是缘线匹配指导下最大化时序效益的不得已选择。实际上,最大化时序效益过程中,可以选择的展向连线有多种,如图4(a)粗虚线可能就比粗实线所针对的缘线匹配要好,因为二者相反,粗虚线注重大流量区(74.5%展高)高效率,而粗实线注重小流量区(25.5%)高效率。本文选择粗实线仅为示例。

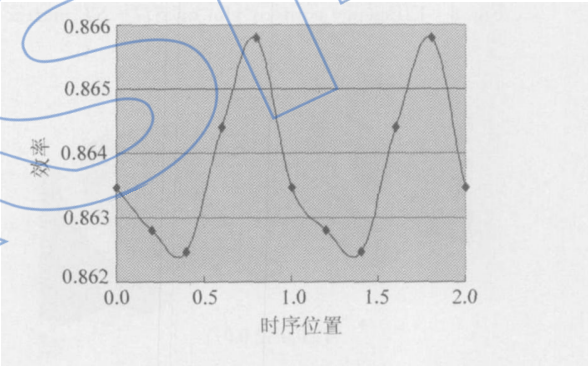


图7 1.5级涡轮原型三维时序效率变化
Fig 7 Efficiency variation vs clocking position (Baseline 1.5 stage turbine)

上述过程未必能实现最大时序效益,因为还不知道该算例多大程度上违反了“周向移动叶片基元时非定常流动保持束缚于原流片内”这一假设。事实是,尤其端壁区流动性状改变明显,会严重偏离该假设。为此,保持改进叶片中间截面不变而变化端壁区叶片积叠,继续寻求更好时序。以缘线匹配描述,就是考察 $(SH, 0.32, ST + 0.07)$,其中 $SH, ST \in [-0.2, 0.1]$ 。对此匹配域内任一点,重新积叠二级静叶并时间精确模拟,获得每种缘线匹配的时均效率。为节省计算以快速找到最佳三维时序,可以先粗粒度筛选,然后逐步细化精确找出最佳位置。本文仅做一次粗粒度筛选,在 $[-0.2, 0.1]$ 内按0.1间隔进行,共16种二级静叶,经过16次时间精确模拟,获得时均效率整理于 SH

- ST 张网图8上, 最终清晰看出, 当 $SH = -0.2$, $ST = 0.1$, 即缘线匹配组合 $(-0.2, 0.32, 0.17)$ 时, 获得时序效益最大, 此时时均效率达86.90%, 这是综合考虑定常流场改变后的最佳三维时序。

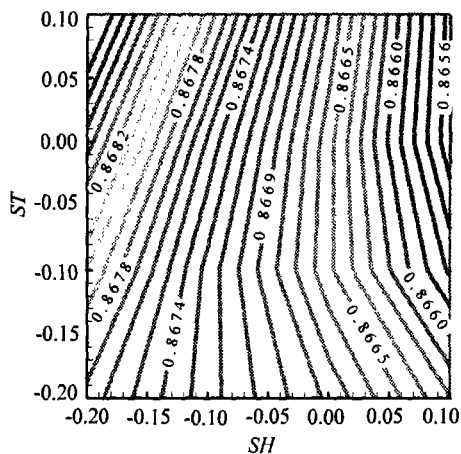


图8 $SH - ST$ 张网上的时序效率等值线

Fig. 8 Efficiency contour plot on $SH - ST$ matrix

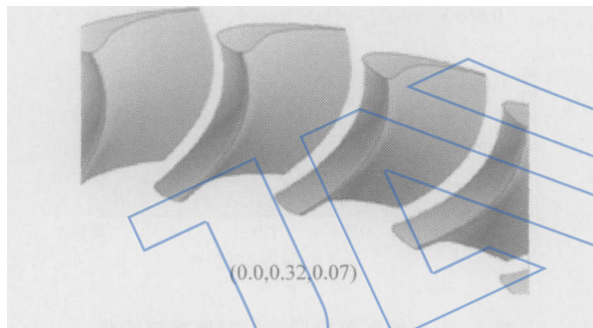


图9 原目标缘线匹配的二级静叶实体图

Fig. 9 3D Plot of 2nd stator

(restacked for original EM destination)

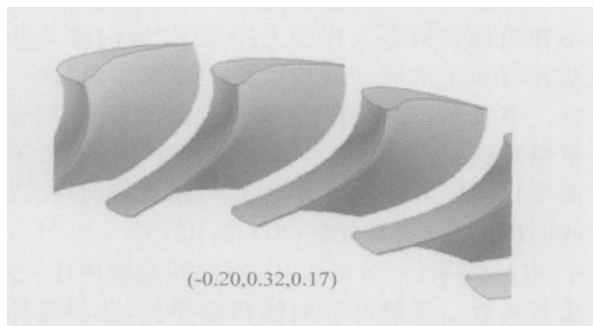


图10 最佳三维时序缘线匹配的二级静叶实体图

Fig. 10 3D Plot of 2nd stator

(Final restacked for optimum clocking effects)

图9、图10 分别展示了原目标缘线匹配 $(0.0, 0.32, 0.07)$ 和最终最佳三维时序缘线匹配 $(-0.2, 0.32, 0.17)$ 的二级静叶实体图。值得说明, 看

到实体图, 人们或许会将本文工作简单理解为“弯”叶片技术——这是一种错误, 因为“弯”叶片技术没提供最大化时序效益的方向性指导, 更重要的, “弯”只针对单排叶片, 而在缘线匹配指导下, 相对地调整两排叶片均可最大化时序效益。本文只不过是出于计算量考虑而仅改动二级静叶。

回顾整个改进过程, 针对原始1.5级涡轮, “传统”时序将使最高、最低效率有0.33%的差别, 而经过缘线匹配指导改进二静静叶, 最高效率进一步提高0.32%。虽然效率改进的绝对数值并不大, 但同“传统”时序带来效率变化幅度相比, 这个提升还是比较可观的, 据此有理由期盼, 在高负荷、高速、短轴向间隙情形, 缘线匹配指导下的最大化时序效益将有更大收获, 足见缘线匹配之于三维时序应用的重要意义。

5 结束语

鉴于存在“二维时序效益大于三维时序”的疑惑, 首次叙述了在缘线匹配指导下最大化三维时序效益的技术, 并以Aachen 1.5级涡轮进行了示范。其间获得认识如下:

(1) “二维时序效益大于三维时序”疑惑源于未能使沿展向各截面同时达到时序最佳;

(2) 缘线匹配指导下能够最大化三维时序效益, 具体实现过程现实可行;

(3) 缘线匹配指导最大化三维时序效益的意义在于, 对待利用时序效应, 能够做的将不再仅仅是安装中直接“刚性”旋转叶片, 而是在设计中就考虑到时序因素。

参考文献

- [1] 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[J]. *Transactions of ASME Journal of Engineering for Power*, Paper No. 72-GT-15, 1975.
- [2] Huber F W, Johnson P D, Shama O P, et al. Performance Improvement Through Indexing of Turbine Airfoils: Part I—Experimental Investigation[R]. *ASME Paper 95-GT-27*, 1995.
- [3] Dorney D J, Shama O P. A Study of Turbine Performance Increases Through Airfoil Clocking[R]. *AIAA Paper 96-2816*, 1996.
- [4] 闫朝, 季路成, 陈江, 徐建中. 轴向间距对时序效应影响的研究[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(2): 220~222.
Yan Zhao, Ji Lucheng, Chen Jiang, Xu Jianzhong. Investigation About the Effects of Axial Gaps on Clocking

Effects[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25 (2): 220~ 222

[5] 季路成, 陈江. 叶轮机设计的缘线匹配理论及方法[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(1): 39~ 42

Ji Lucheng, Chen Jiang. Edge Matching Theory and Methods for the Unsteady Design of Turbomachinery[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26 (1): 39~ 42

[6] Barankiewicz W S, Hathaway M D. Effects of Stator Indexing on Performance in a Low Speed Multistage Axial Compressor[R]. *ASME Paper No 97- GT- 496*

[7] Gundy Burlet K L, Dorney D J. Physics of Airfoil Clocking in Axial Compressors[R]. *ASME Paper 97- GT- 44, Orlando, FL, June*

[8] Arnone A, Marconcini M, Scotti Del Greco A, et al. Numerical Investigation of Three- dimensional Clocking Effects in a Low Pressure Turbine[R]. *ASME Paper GT- 2003- 38414*, 2003

[9] 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