

叶轮机非定常气动设计的缘线匹配^{*}

(II)数值研究

陈 江¹, 季路成²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083 2 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 缘线匹配通过考虑多叶排叶轮机相邻叶排间前排叶片尾缘线与后排叶片前缘线空间相对位置匹配关系来进一步提升叶轮机性能, 有潜力使叶轮机非定常设计走向工程实际。以一单级跨声轴流压气机和一单级轴流透平为例, 尝试用基元流动展向积分方法和全优化方法改善其性能, 从而示例应用缘线匹配的具体方法及前景。结果表明, 缘线匹配为叶轮机非定常设计提供了可操作的自由度。

关键词: 叶片; 缘线匹配⁺; 非定常流; 流体力学; 气动设计

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2005) 04-0313-06

Edge matching for unsteady design of turbomachinery

(II) Numerical investigations

CHEN Jiang¹, JI Lu-cheng²

(1. Coll. of Energy and Power Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

2. Inst. of Engineering Thermophysics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract Edge Matching (EM) makes it possible to utilize time-accurate simulation of unsteady flow in daily design of multi-blade row turbomachinery. The spatial relation between the trailing edge of one blade and the leading edge of sequent blade is taken into account in improving turbomachinery performance. One single stage transonic axial compressor and one single stage steam turbine are used as examples in using EM in which two implementation methods are involved, i.e. spanwise integration method and full optimization method. Another purpose is to illustrate the potential of EM. Results show that EM does provide unsteady design of turbomachinery an operable degree of freedom.

Key words Blade; Edge matching⁺; Unsteady flow; Fluid mechanics; Aerodynamic design

1 引 言

通过一单级跨声轴流压气机和单级蒸汽透平计算实例, 以数值模拟手段初步演示缘线匹配^[1-3]的两种实施方法, 即基元流动展向积分方法和全优化方法, 目标是展示以缘线匹配进行非定常设计的方法及潜力。

2 原型定常设计

设计一单级轴流压气机和单级轴流透平作为缘

线匹配研究对象, 为减少后续非定常计算量, 设计叶排通道比为 1:1。定常设计阶段未对两原型实施充分的性能优化。单级跨声轴流压气机采用定常手段设计, 其设计参数在推比 8 级航空发动机压气机载荷范围, 属工程实用的压气机级设计。原型叶片见图 1。

选取 50MW 蒸汽轮机低压缸次末级作为单级轴流透平设计对象, 这是工程应用的蒸汽透平级设计, 为了增加尾迹非定常性影响, 人为增大了静叶尾缘厚度。原型三维视图见图 2。

^{*} 收稿日期: 2004-09-16 修订日期: 2005-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (50376062)

作者简介: 陈 江 (1963-), 男, 博士生, 研究领域为叶轮机气动设计及非定常流动。

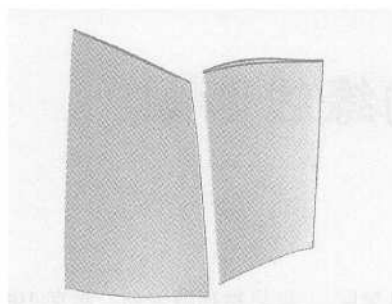


Fig. 1 Baseline design of the compressor

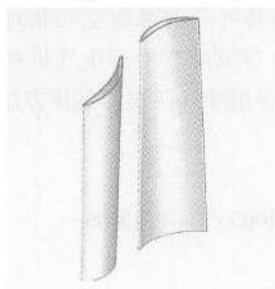


Fig. 2 Baseline design of the steam turbine

3 数值方法

由于难于获得叶轮机非定常试验数据,采用商业 CFD 软件 FNE/TURBO 进行数值模拟,研究结果可靠性由软件出产过程中的校验工作以及使用经验^[4~6]确保。

计算采用流动控制方程为三维定常/非定常 N-S 方程组,取用 B-L 湍流模型。控制方程组空间离散采用中心差分格式^[6],同时为数值稳定添加了二阶、四阶混合人工粘性项。时间导数项由四阶 Runge-Kutta 方法离散。时间精确求解方面,采用双时间步方法^[7],其中虚拟时间步中使用多重网格、变时间步长法及残值光顺方法加速收敛,具有很高的收敛速度。

定常计算初场根据通流计算值给出,转/静之间引入掺混界面方法;非定常计算初场则给定为定常收敛解,转/静间采用滑移界面传递参数。

边界条件根据通流设计给出,进口给定总压、总温、气流角度,出口给出通流中径处的背压。计算给定的进、出口边界条件与时间无关,非定常影响只源于转/静叶排的相对运动。

4 数值模拟

4.1 计算网格

计算网格由 Autogrid 生成,为保证网格质量采用了多块网格策略。由于透平叶排弯角较大,且压气机、透平叶排间间距较小,故安排前排叶片采用 H-O,后排叶片采用 O-H 型多块结构化网格,网格细节见

表 1。出于计算量及更清晰展示缘线匹配考虑,计算未考虑叶尖间隙。借鉴先前网格依赖性考察,近壁网格间距取 $y^+ < 30$ 。

Table 1 Mesh distribution information

Mesh info		Compressor stage		Steam turbine	
		Rotor	Stator	Stator	Rotor
H	Pitchwise	65	97	49	49
	Streamwise	33	17	33	33
O	Normal	33	33	25	25
	Parallel	257	289	181	197
Spanwise		33	33	33	33
Total nodes		35065	36913	20268	21588
Near wall y^+		< 15	< 15	< 5	< 5

4.2 计算结果

采用 FNE/TURBO 对原型进行三维定常校核,其结果与通流设计值比较示于表 2。可见,设计满足指标要求。

Table 2 Comparisons between S2 and 3D steady calculations

Parameters	Compressor		Steam Turbine	
	S2	3D	S2	3D
Mass flow (kg/s)	20.0	19.61	41.152	40.5065
Total pressure ratio	1.48	1.485	0.5335	0.5283
Isentropic efficiency	≥ 0.85	0.8648	≥ 0.85	0.8735

时间精确模拟将一个物理周期分为 40 个物理时层,每一个物理时层内则进行 50 个虚拟时间步数迭代。收敛判断建立在对流量、效率、压比等总性能参数监测基础上,一般 15~20 个物理周期后,上述总性能参数会显现明显周期性。在 PV 2 4G 计算机上,轴流压气机非定常计算需 140~190 CPU 小时,轴流透平需 70~100 CPU 小时。

图 3 为轴流压气机级叶中截面熵等值线在一个

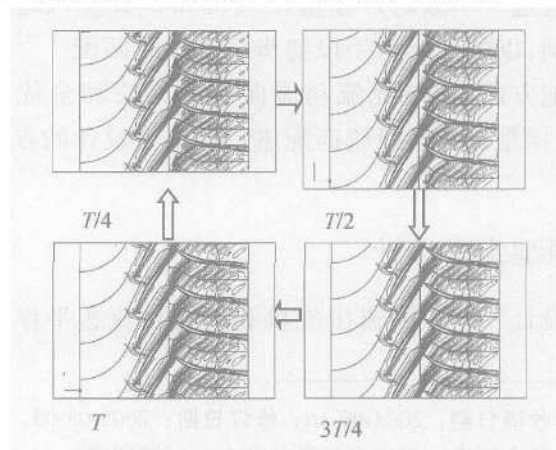


Fig. 3 Instantaneous contour plot of entropy at mid span of the single-stage compressor

周期内变化历程。从图中可以清晰看到上游叶排尾迹受下游叶排切割、扭转、扩散等的全部历程。就算例而言,在排间界面处未出现明显的尾迹间断或弥散现象,进出口流量的时均值也有较高的符合精度,因此认为非定常计算结果是较为合理的。

5 缘线匹配应用于轴流压气机

5.1 缘线匹配改进目标及实施过程

对单级轴流压气机实施缘线匹配展向积分方法以改进设计,其目标如下:

- (1) 减少压气机级出口流量脉动幅值;
- (2) 减少压气机等熵级效率脉动幅值;
- (3) 在流量脉动、效率脉动较小的情况下,减少静叶扭矩脉动幅值。

上述改进目标均为性能脉动,故尝试用缘线匹配的基元流动展向积分方法进行改进方案筛选,其具体过程如下:

- (1) 对原型实施时间精确模拟,获取原型非定常流场信息;
- (2) 选取叶排根、中、尖三个特征截面,对各截面基元实施周向位移;
- (3) 确定两叶排缘线相对位置关系参数,此时把叶排缘线根截面周向角差归零,则定义中、尖截面周向角差为 SM , ST , 参见图 4

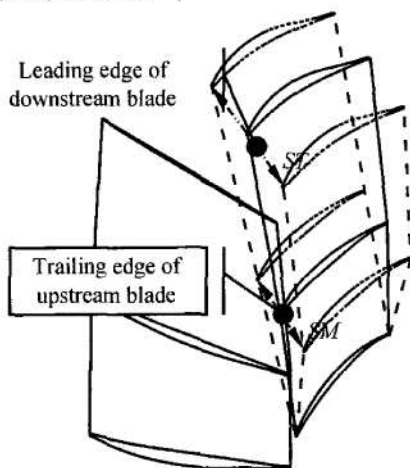


Fig. 4 3D view about definitions of SM and ST

- (4) 由原型抽取 SM , ST 及相应 $S(r)$;
- (5) 由非定常流场模拟结果抽取各流管非定常脉动性能,并与原型 $S(r)$ 建立对应关系;
- (6) 给出缘线匹配组合 (SM , ST) 范围,对应每组 (SM , ST),由原型 $S(r)$ 与流管脉动性能关系经过位错 (相位移),获得新缘线匹配组合下脉动性能,由

此获得 (SM , ST) 性能脉动张网图谱;

(7) 根据改进目标在 (SM , ST) 性能脉动张网图上选择合适的缘线匹配组合 (SM , ST), 即目标叶片;

(8) 以定常解验证新缘线组合是否满足基元流动展向积分方法前提假设,如果愿意并有条件,可以对改型通过时间精确模拟进行确认。

针对压气机原型,允许 SM , ST 在区间 $[-0.5, 0.5]$ 内变化。按照上述步骤 (1) ~ (6) 整理出 SM - ST 等值线图,见图 5~7。

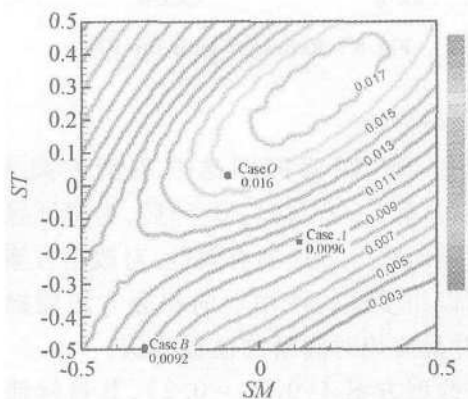


Fig. 5 SM - ST contour plots about mass flow oscillation at the exit

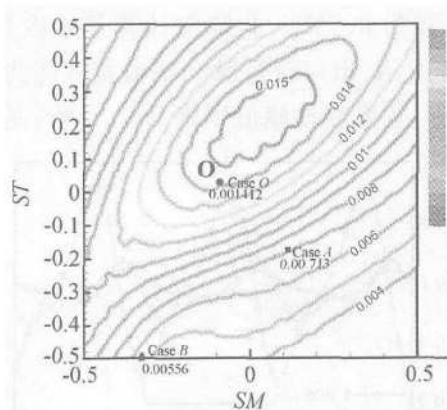


Fig. 6 SM - ST contour plots about the isentropic efficiency oscillation

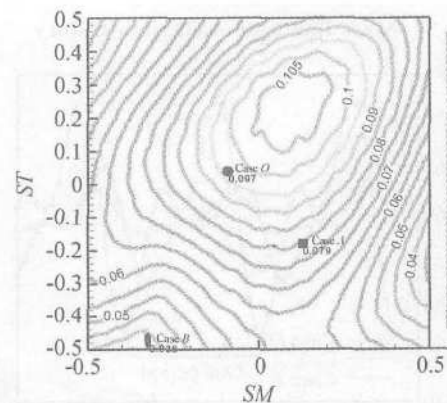


Fig. 7 SM - ST contour plots about the torque oscillation on stator

图 5~图 7 中, 原型缘线匹配 (SM, ST) 落在 O ($-0.116, 0.021$) 点, 根据改型目标, 最终选取缘线匹配 A ($0.1, -0.2$), B ($-0.32, -0.5$) 两点, 图 8 给出了改型设计的三维视图。

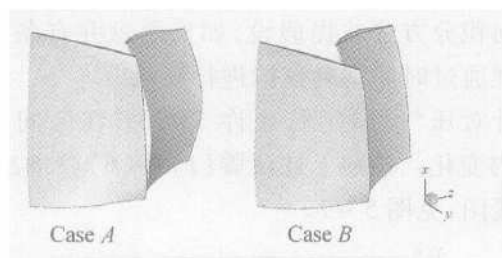


Fig. 8 Redesign with the EM

5.2 结果与分析

在通过 $SM-ST$ 张网图选取改型方案 A ($0.1, -0.2$) 和方案 B ($-0.32, -0.5$) 后, 为验证缘线匹配基元流动展向积分方法的有效性, 对改型方案进行了定常计算以初步检验使用展向积分方法前提假设得以保障, 并最终用时间精确模拟确认。

对于改型方案 A ($0.1, -0.2$), 其目标使压气机出口流量脉动和效率脉动均减小, 即流量脉动幅值应由原型 1.6% 降为 0.96% 的时均流量, 效率脉动幅值则由 1.4% 降为 0.7% 。非定常计算显示改型结果, 如图 9~10 所示, 出口流量脉动幅值实际降为时均流量的 0.53% , 效率脉动幅值则降为 0.75% , 基本实现

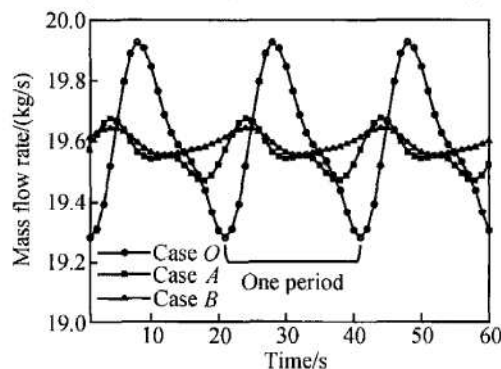


Fig. 9 Mass flow rate oscillation history

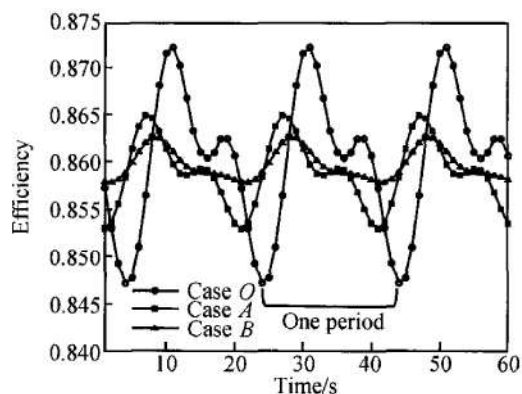


Fig. 10 Efficiency oscillation history

目标要求, 由此初步验证了缘线匹配基元流动展向积分方法的有效性。

改型方案 B ($-0.32, -0.5$) 的预期目标是: 出口流量及效率脉动幅值不变大情况下, 静叶扭矩由原型 O 方案的 9.7% 和第一次改型 A 方案的 7.9% 降为时均值的 3.8% 。而最终非定常计算结果, 如图 9~11 所示, 静叶扭矩脉动降为时均扭矩的 3.2% , 其流量脉动幅值仅为时均值的 0.26% , 效率脉动降为 0.58% , 完全实现了目标要求, 再次验证了缘线匹配基元流动展向积分方法的有效性。

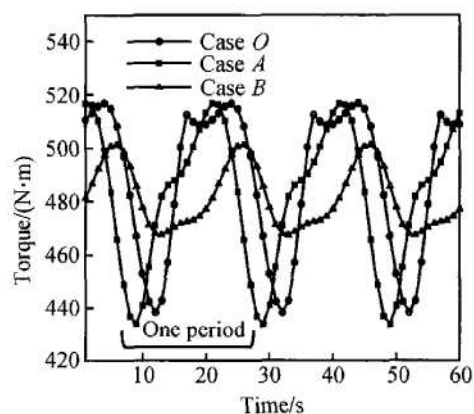


Fig. 11 Stator torque oscillation history

针对上述例子, 缘线匹配基元流动展向积分方法很有效。实际上, 在对方案 A, B 进行非定常计算之前, 已经进行了定常计算以确保在符合前提假设条件下应用基元流动展向积分方法。表 3 汇集了各方案三维定常计算获得的性能结果, 可以看出, 各方案流量相差无几, 从而确认可以应用基元流动展向积分方法。表 4 给出相应的非定常模拟结果的时均性能, 比较发现: 原型与改型设计的非定常时均流量也几乎相等, 再次说明在符合前提假设条件下, 缘线匹配基元

Table 3 Performance comparisons between the baseline design and the two redesigns (Steady computation)

	O	A	B
Inlet mass flow / (kg/s)	19.607	19.573	19.580
Outlet mass flow / (kg/s)	19.605	19.572	19.577
Total pressure ratio	1.4848	1.4845	1.4852
Isentropic efficiency	0.8648	0.8609	0.8611

Table 4 Performance comparisons between the baseline design and the two redesigns (Unsteady computation)

Time-averaged quantity	O	A	B
Inlet mass flow / (kg/s)	19.630	19.590	19.620
Outlet mass flow / (kg/s)	19.630	19.600	19.630
Total pressure ratio	1.4840	1.4850	1.4860
Isentropic efficiency	0.8680	0.8675	0.8690

流动展向积分方法可以最小的计算代价对叶轮机性能非定常脉动实施优化。

继续比较表 3-4 发现, 尽管非定常计算所得时均性能中, 流量、压比与三维定常计算结果差别很小, 但绝热效率却均有不同程度提高, 最大提高竟达 0.79%, 这是非定常与定常计算间的差别, 因此, 仅就提高设计可靠性而言, 大量应用非定常分析的设计过程也值得提倡。

6 缘线匹配应用于轴流透平

对单级蒸汽透平用展向积分方法和全优化方法尝试实施非定常设计优化。

6.1 缘线匹配实施过程

首先对轴流透平原型采用实施缘线匹配, 改进目标是减小透平动叶扭矩脉动。对原型透平级时间精确模拟后抽取动叶扭矩脉动幅值的 $ST-SM$ 张网谱图, 见图 12。由于透平级的大展长/栅距比特征, 选取 SM, ST 取值范围为 $[-1, 1]$, 原型对应缘线匹配 $O(0.248, 0.535)$, 其动叶扭矩脉动幅值是时均值的 3.9%, 这种高幅扭矩脉动意味着功率脉动、叶片轴向力脉动等等一系列问题, 其危害显而易见, 但目前为止很少被关注。

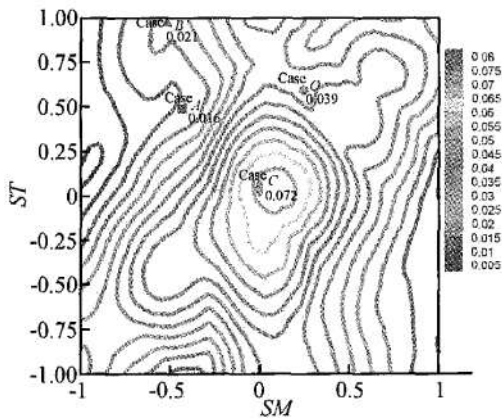


Fig. 12 $SM-ST$ contour plots about the torque oscillation on rotor

针对改型目标, 从图 12 中选取 $A(-0.488, 0.48)$, $B(-0.5, 0.97)$ 两个改型方案, 对应动叶扭矩脉动幅值为时均值的 1.6% 和 2.1%, 但造型后的非定常计算表明, 扭矩脉动并未按预期变小, 而是有所变大。由原型及两改型定常和非定常计算时均流量对比分析认为, 两改型违背了应用基元流动展向积分方法的前提条件, 即两改型时均流量已与原型流量相差较大。鉴于此, 第三次改型首先注意保证时均流量

接近, 但在 $SM-ST$ 张网内找到即符合假设且可减少脉动的改型的尝试遭遇失败。反之, 如果能找到一个符合假设且可增加脉动改型, 那么也可以说明基元流动展向积分方式缘线匹配的有效性。为此, 我们选取方案 $C(0.027, 0.001)$, 其目标是改型后脉动幅值应达到时均值的 7.2%, 最终非定常计算表明脉动幅值实际达到时均值的 10%, 绝对量虽稍有差别, 但确实实现了脉动倍增的目标。表 5-6 分别列出了各方案三维定常和非定常数值模拟时均性能结果, 比较表明, 符合前提假设是应用展向积分方法的必要条件, 图 13 给出了三种改型方案的叶片三维实体视图。

Table 5 Performance comparisons between the baseline design and the three redesigns (Steady computation)

	<i>O</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Inlet mass flow / (kg/s)	40.42	41.51	42.42	40.21
Outlet mass flow / (kg/s)	40.51	41.43	42.527	40.29
Total pressure ratio	0.5288	0.5295	0.5312	0.528
Isentropic efficiency	0.8748	0.9039	0.8851	0.920

Table 6 Performance comparisons between the baseline design and the three redesigns (Unsteady computation)

	<i>O</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Inlet mass flow / (kg/s)	40.43	41.48	42.51	40.18
Outlet mass flow / (kg/s)	40.75	42.15	42.017	40.30
Total pressure ratio	0.5298	0.5305	0.5302	0.529
Isentropic efficiency	0.8748	0.9119	0.8871	0.924

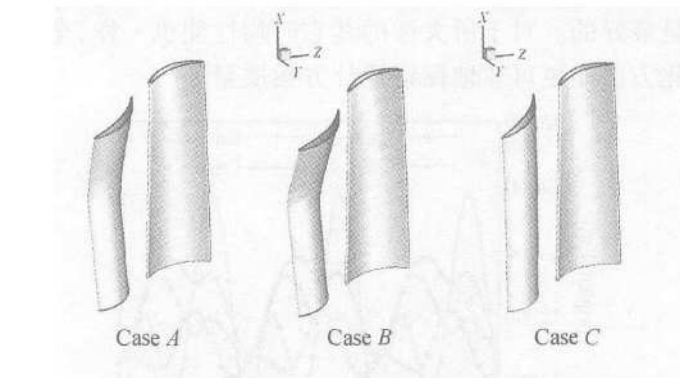


Fig. 13 Redesigns of steam turbine with the EM

缘线匹配全优化方式依赖大量全三维非定常数值模拟及合适的优化算法对各种缘线匹配组合进行时均和脉动性能的多目标、全方位折衷选优。为了说明这种方法的实施, 同时又不得不面对计算条件限制, 在此将再次利用上述四种方案, 但此时权当优选域仅包含 4 个 $SM-ST$ 组合, 即 $O(0.248, 0.535)$, $A(-0.488, 0.48)$, $B(-0.5, 0.97)$, $C(0.027, 0.001)$ 。

实际上,在全优化方法中,方案选择应该以最快而又有满意分辨精度的方式遍历 (SM , ST)网内的每一种设计方案。

6.2 结果与分析

在原型 O 非定常数值模拟基础上,针对减小动叶扭矩脉动幅值目标选取方案 A , B 改型设计,非定常计算表明并未实现预期目标,其原因是改型未遵守基元流动展向积分方法前提假设。以增大脉动幅值为目标的方案 C 却很成功,注意到方案 C 与原型 O 流量接近,这是方案 A , B 失败而方案 C 成功的根本原因。

关于时均性能的改进只能依靠全优化方法。对于四种缘线匹配方案,其定常和非定常时均性能对比可在表 5 和表 6 间进行。可见,四种组合的某些性能差别极小,如流量、压比,但关于效率却出现很难预测的变化:非定常和定常计算获得的时均效率差别最高达 0.8%,而有些匹配组合则惊人地符合,好在两种计算所获得的效率随匹配组合变化趋势是一致的,然而必须注意,这未必具有一般性,所以,以缘线匹配为自由度的非定常优化至少在可靠性方面更有保障。

全优化缘线匹配下,设计者可根据目标,在全部匹配组合下选取满足目标的解域,在真正的多目标折衷设计过程中,不同目标解域的交集向设计者展示了满足所有要求的设计方案。对算例而言,假如设计者以降低扭矩脉动为目标,那么由所有非定常计算获得的扭矩脉动绘于图 14 可以明显看出各方案各自扭矩脉动幅值,仅以减小此脉动为目标看, O 方案无疑是最好的。对于所关注的其它时均性能也一样,全优化方法能更可靠地保证设计方案质量。

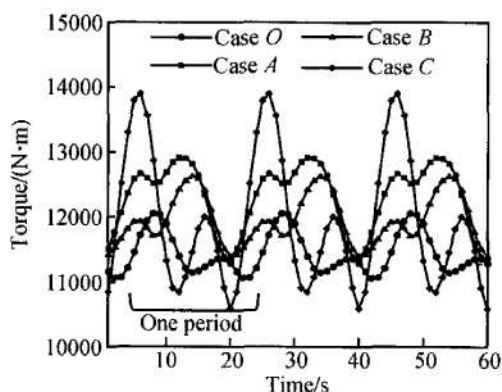


Fig. 14 Rotor torque oscillation history

7 结 论

(1) 缘线匹配为叶轮机非定常气动设计提供了新的设计自由度,可能促使叶轮机非定常气动设计走

向工程实用;

(2) 缘线匹配基元流动展向积分方法进行非定常设计,当满足其假设条件时,只需一次非定常数值模拟即可获知满足目标的缘线匹配信息,再次非定常计算只是确认改进效果,最大可能地减小了非定常设计计算量。但缘线匹配基元流动展向积分方法的局限性也是明显的,其前提假设体现为适用该方法的改型应具有基本相同的时均流量。其另外限制是只能对性能脉动实施优化,对时均性能就无能为力了;

(3) 缘线匹配全优化方法不存在任何限制,具有同时进行时均和脉动性能多目标折衷、优化能力,此时缘线匹配的意义仅是非定常设计的一个实际可操作的自由度。该方法明显缺陷是计算及后处理工作量巨大;

(4) 非定常分析相对于定常分析所具有的高可靠性为设计中尽可能大量应用非定常计算的策略提供了支持。而仅从提高可靠性而言,缘线匹配也是主导非定常设计优化的重要途径。

参考文献:

- [1] Ji L C, Chen J, Xu J Z. Numerical investigations about the aerodynamic performance of the cascade in unsteady environment [R]. ASME GT 2003-38288
- [2] Ji L C, Ke H Y, Li W. A new freedom for turbomachinery design-edge matching technique [R]. 2003 ISABE Na 1100
- [3] 季路成, 陈江. 叶轮机非定常气动设计的缘线匹配 (I) 理论与实施方法 [J]. 推进技术, 2005, 26(4). (JI Lu-cheng, CHEN Jiang. Edge matching for unsteady design of turbomachinery (I) Theory and implementation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(4).)
- [4] Kang S, Hirsch Ch. Numerical simulation of three-dimensional viscous flow in a linear compressor cascade with tip clearance [J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118: 493
- [5] Qi M X, Feng Z P. Numerical validation on an annular turbine cascade with different turbulence models [C]. Proceedings of the 4th International Conference on Pumps and fans, 2002
- [6] Hirsch Ch. Numerical computation of internal and external flows [M]. Wiley, ISBN: 0471924520, 1990
- [7] Jameson A. Time dependent calculations using multigrid with applications to unsteady flows past airfoils and wings [R]. AIAA 91-1596

(编辑: 朱立影)