

文章编号: 1000-8055(2003)01-0070-06

轴流式叶轮机时序效应的机理探讨

侯安平, 周 盛

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 对近年来关于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。国外的实验表明: 在涡轮中比在压气机中所获性能收益更为显著; 对于压气机, 在高速情况下比在低速情况下所获性能收益更为显著。本文对这种现象作了解释, 并指出, 时序效应产生的机理可以用非定常流动的相互干扰来解释, 尤其重要的是, 时序效应机理为我们利用非定常流动提供了一个切入点, 促使人们在叶轮机气动设计体系中考虑流动的非定常性。另外在现有认识基础上, 文中给出了一个利用时序效应的初步工程模型。

关键词: 航空、航天推进系统; 时序效应; 固有非定常; 轴流式叶轮机

中图分类号: V 231. 3; O 357. 1

文献标识码: A

Probe into the Mechanism of Clocking Effect in Turbomachinery

HOU Anping, ZHOU Sheng

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

Abstract: A review of the research on clocking effect in turbomachinery in recent years is presented in the paper. As the experiments showed, the benefit acquired by clocking effect in turbine is prominent, and the benefit increases with the flow velocity in compressor. It is believed and interpreted in this paper that the difference of efficiency induced by clocking effect results in the unsteady interaction. The introduction of clocking effect is meaningful that this phenomenon gives the way which leads us to use the unsteadiness of flow and urges people to consider function of the flow unsteadiness in the design of turbomachine. An engineering model to make use of clocking effect based on the present understanding of this phenomenon also has been given.

Key words: aerospace propulsion; clocking effect; inherent unsteady; axial turbomachinery

1 引言

在叶轮机气动设计体系中, 人们采用的一直是针对定常流动的设计理论。然而, 由于流体的粘性和存在相对旋转的叶片排, 即使是在设计工况下, 叶轮机内的流动也是高度非定常的。这样, 现有气动设计体系就与此种非定常流动形成了巨大的反差——流动是高度非定常的, 而针对非定常流动过程所建立的现有气动设计工程体系反而是

以定常流动基本假设为前提的。因此, 国内外叶轮机界专家学者普遍认为, 叶轮机气动设计体系从定常向非定常转变是主要发展趋势, 非定常蕴含着很大的潜力^[1]。

转/静叶排轴向间距的变化引起叶轮机气动性能改变是人们比较早碰到的, 要全面解释必须考虑流动非定常性的一种现象。直到现在, 转/静间距影响叶轮机性能的物理机制尚未弄清楚, 在设计中人们只是凭经验确定合适的间距。流动诱

收稿日期: 2001- 12- 24; 修订日期: 2002- 04- 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10072008); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2000000615)

作者简介: 侯安平(1975-), 男, 湖南常德人, 北京航空航天大学动力系博士生, 主要从事叶轮机气动力学研究

发振动也是一种由于叶轮机叶片固有频率与流体的非定常激励频率相互耦合而导致共振的非定常现象。此外“热痕”(Hot streak)和叶排的相互作用也是一种非定常现象,它是指在涡轮叶排进口气流中有局部的高温气团,由于叶排的旋转,温度空间分布的不均匀就导致了温度场在时间上的非定常性。但本文不拟在这些方面展开讨论。

当审视现有多级叶轮机的实物和图纸时,我们会发现,各转子叶排之间、各静子叶排之间在几何上并不存在周向定位。变动转/转或静/静叶片的相对周向位置时,却发现叶轮机的气动性能也产生了变化。这种现象称为时序效应(Clocking Effect)。按照定常设计体系理论,这种周向位置的不同定位不会对叶轮机气动性能产生影响的。那么时序效应产生的物理机理是什么呢?时序效应是否与叶轮机非定常气动设计体系有关联呢?

2 时序效应研究工作的回顾

Walker^[2]发现如果适当调整一个一级半的轴流压气机静子的相对周向位置,测量出的噪声有显著减少(5~6 dB)。Walker(1974年)的工作还表明,尾迹的周期性扰动会在轴流叶轮机械的叶片表面产生周期性的非定常转捩现象。Capece(1987年)是最早指出变动压气机静/静、动/动叶片的相对周向位置可获得潜在的性能效益的研究者之一。对于这些早期的研究,由于计算和测试手段的限制,人们很难取得大的进展,也就不易揭示其内在的物理机制。到了最近十年,计算技术和测试技术都取得了长足的发展,人们在非定常方面的了解逐渐深入,对时序效应也作了很多研究,并得到了一些有意义的结果。

2.1 时序效应对涡轮性能的影响

Engel(1995年)使用计算的方法研究了静子时序效应对一个静子/转子/静子结构涡轮的影响。对于两种时序效应结构:第一种是第二级静子与第一级静子对齐,第二种是把第一种情况中第二级静子偏移半个静子栅距,得出结论:在第二级静子的出口处,总压损失系数会有2~4%的差别,而且认为这种差别绝大部分是由非定常造成的。

Dorney和Shama(1996年)等也研究过时序效应对于涡轮性能的影响。这些研究表明当静叶相对周向位置变化时,效率有0.5%的变化,并且当第一级静叶的尾迹打在第二级静叶前缘上时出现最高效率,而最低效率出现在第一级静叶的

尾迹在第二级静叶通道中央流过时。

Huber^[3], Griffin(1995年)也对一个各级叶片数修改至相等的2.5级涡轮进行了研究。结果表明,不论在设计工况下还是在非设计工况下,静子的时序效应都使效率产生了0.3%的变化。在设计工况时,对不同径向位置进行了测量,最高的效率变化达到1%。叶中测得的效率变化在设计转速时达0.8%,转速更高时可达1%。文中指出,如果第一级叶片的尾迹能够从叶尖到叶根都调整到与第二级叶片前缘对准,则涡轮性能提高0.8%是可能的。基于CFD研究的结果,可以得出前级叶片尾迹打在后级叶片前缘上时出现最高效率,而最低效率发生在前级叶片的尾迹在后级叶片通道中央流过时。N-S模拟可以说明,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转子的性能,减小第二级叶片表面脉动速度和减少大尺度的非定常流动是可以提高其性能的。

从已发表的文献来看,对涡轮进行的时序效应研究,不论在高速下还是在比较低的速度下,一般都能较明显地测到效率的变化,这说明时序效应对涡轮的性能有一定的影响。

2.2 时序效应对压气机性能的影响

在最近几年,时序效应对压气机性能的影响也受到了关注。

Saren^[4]曾利用理论的、计算的和试验的技术得出结论:时序效应能够用来提高性能和减少叶片的非定常气动负荷;而在另一个试验研究中, Walker(1997年)研究了进口导流叶片时序效应对边界层性质的影响和对下游叶片排损失的影响;Hsu和Wo^[5]的研究发现,前面转子对后面静子的非定常影响以尾迹的影响为主,势流的影响不大;而后面转子对前面静子的影响以势流影响为主。当前排转子的尾迹正好打在后面静子的前缘上时,静子前缘的非定常性最大;当后排转子的前缘和前排静子的尾缘最近时,前排尾缘的非定常性达到最大,过一个微小的时间延迟后,其非定常性达到最小。因此,如果适当布置转子-转子的相对周向位置,使静子前缘的非定常力达到最大时,尾缘的非定常力达到最小,则可以大幅度减少静子上的非定常负荷,延长静子叶片的使用寿命。Dorney^[6]验证了一个1.5级的高速压气机在设计工况下,通过静子的时序效应,效率变化了0.6~0.7%。Walker^[7](1998年)对一个1.5级的压气机所作的试验显示,时序效应强烈地影响着下游

叶片上的周期性转捩现象。

为了更准确地建立压气机分析模型, Dorney^[8] (1999 年) 采用 34 个 IGV, 35 个转子叶片, 34 个静子叶片来实现全周向模拟, 并与把叶片数简化至相等的模拟进行了比较。结果显示, 按实际叶片数建立模拟, 对准确地预测与时序效应相关的趋势很有必要。全周向模拟的压力变化比简化模拟中的压力变化更接近试验数据。

对多级轴流压气机时序效应的研究最先出现在对压气机噪声的研究上。Walker^[2] 发现, 如果适当调整一个一级半的轴流压气机静子的相对周向位置, 测量出噪声显著减少 (5~6 dB)。他们由此得出结论, 在相邻两级叶片之间的尾流的干扰可以用来减少这些尾流中的速度亏损, 并以次来减少噪声的大小。静子时序效应对声压级的影响同样得到了 Schmidt 和 Okiishi (1977 年) 的证实。他们还进一步指出, 在最高和最低噪声状态下, 无法测出总压损失和效率的改变。Barankiewicz 和 Hathaway^[9] 在 NASA Lewis 中心对一个 4 级的低速压气机的时序效应进行了试验研究。在最高效率和最大压力这两种情况下, 静叶时序效应均使压气机的性能产生了 0.2% 的变化, 使第 3 级静子的总压损失系数分别产生了 5% 和 10% 的变化。作者认为, 时序效应对压气机性能的影响是很小的, 与测试用压气机制造和装配过程中产生的误差处于同一个量级。但是, 当叶片负荷加大时, 这种影响就会增加到明显的程度。Gundy-Burlet 和 Dorney (1997 年) 在一个 2.5 级的压气机中也对静叶时序效应作了数值研究, 结果显示效率变化的量级在 0.5~0.8%。

上述压气机的时序效应研究也得到了性能有变化的结论, 但只有很少几篇文献显示了在高速压气机中, 时序效应导致了效率多于 0.5 个百分点的变化, 大部分文献显示效率变化量级与测量误差、装配误差量级相当。这说明时序效应对压气机, 尤其是低速压气机影响并不显著。

3 时序效应对气动性能影响的某些讨论

综合上述文献, 从传统的时序效应大致可以得到下面一些结论:

(1) 静子叶片的尾迹打在下排静子叶片的前缘上时, 效率达到最大值; 静子叶片的尾迹在下游静子通道的中间通过时, 效率最低。

(2) 高速情况下时序效应导致的效率变化比低速时明显。

(3) 全周向数值模拟对时序效应的反映更真实, 与试验数据更接近。

(4) 当连续两级静子 (转子) 具有相同数目的叶片时, 我们就可以以某种方式安排静叶排, 使上排每一个尾迹都冲击到下一排叶片的前缘上。但若两级叶片数不相等, 可以推知时序效应提高性能的潜力要降低。

(5) 对于提高超跨音涡轮气动性能, 时序效应是有影响的; 叶尖切线速度 300 m/s 量级的 1.5 级压气机实验表明, 会导致级效率约 0.5~1.0 个百分点的变化, 对近端壁区则约导致 7.0~8.0 个百分点的变化; 对于叶尖切线速度为几十米每秒量级的低速压气机, 未捕获到时序效应的正结果; 对于跨声速压气机, 未查找到有关实验结果。

传统的时序效应都是指间隔一排叶片的静/静或动/动叶片之间相对周向位置的变化对整体性能的影响。按照这个观点, 时序效应在涡轮中对效率影响比较明显, 但在压气机中的影响则不显著。这已为上文很多文献所证实。通过分析, 我们认为造成这种现象的主要原因是: 涡轮叶片内流动处于顺压梯度, 且尾迹边界速度高, 尾迹区亏损大, 经过下一排叶片的切割及扩散后, 尾迹仍有一定的强度, 故尾迹所在位置对下游第二排叶片的气动性能还有影响, 这体现在了涡轮效率的变化上。但在压气机中, 由于所作实验中叶片尾缘出口速度相对较低, 流动处于逆压梯度, 尾迹亏损小, 故尾迹经过下游叶片排的切割及扩散后, 强度大大降低, 主要影响后排叶片的周期性脉动 (Smith 等, 1998 年), 尾迹所在位置对下游第二排叶片的气动性能没有明显影响。在速度更低的轴流压缩系统中, 前排尾迹甚至还没有到达下一排叶片的前缘就掺混得比较均匀了。

A damczyk^[10] 也认为: 时序效应对涡轮有一定的影响, 但对压气机影响不大。

在文献[4]中提到的动叶时序效应, 已不同于传统意义上的时序效应, 而是从结构完整性出发, 因为这里不是考虑两排动叶的相互影响, 而是考虑两排动叶对其中间静叶的影响。得出的一些结论是, 当静子前的动叶尾迹打在其前缘上, 同时静子后的动叶前缘刚刚通过与其后缘最近的位置时, 静子叶片上的非定常压力脉动幅度最小, 这样的叶片布置对叶片的疲劳强度是很有好处的。

4 轴流式叶轮机时序效应的机理探讨

4.1 初步的物理模型

对于时序效应为什么能带来效率上的收益, 文献都没能在机理上给出明确的解释。目前比较一致的看法是: 前排尾迹在间隔一排叶片后的第二排叶片槽道中位置的不同导致了效率的差别。Hodson^[11]研究了尾迹与边界层作用的问题, 发现周期性的尾迹能使边界层提前转捩, 减小分离泡尺度, 使分离再附提前以及产生“平静区”(calm-ing region)等。

然而, 很少有人将上述两方面的研究结合起来, 其实这两种现象在机理上是相互联系的。当静/静(动/动)叶片相对周向位置变化时, 前排叶片尾迹进入后排叶片的位置也会发生变化。这就会对后排叶片上的附面层及分离层产生不同的影响, 导致后排叶片附面层上转捩点、分离点、分离尺度、分离区内流动等发生变化, 从而影响到整级的效率。因此我们认为时序效应对性能的影响可能是叶片周向位置不同导致的不同尾迹分布对下游叶片边界层的不同影响造成的。

借鉴和学习外流的一些研究成果, 对时序效应的机理可以理解得更深入一点。

外流在发展第三代流型“非定常脱体涡流型”方面进行了很多研究, 得到了不少有意义的结果。其中值得一提的是, 吴介之教授等人在对一个 NACA 0012 翼型所作数值模拟后指出, 因为前缘剪切层不稳定流动有着非常宽广的响应频率, 前缘处的非定常扰动能引起前缘剪切层小涡的卷起和联合, 形成一个较大的涡, 通过这个涡与尾流涡街的相互作用, 使流场变得更加有序, 从而使翼型的气动性能提高^[12]。

然而, 在飞行器空气动力学领域, 尽管对于第三代流型的机理研究已取得很大进展, 但各类当代战斗机均使用第二代定常脱体涡流型, 尚无应用第三代流型之先例。究其原因, 主要是受限于工程上实现的途径, 而不是机理上是否正确。即使对于体积、重量最小的飞机, 要想对于机翼绕流实施非定常激励, 在工程上也不是轻而易举之事。然而, 在轴流压气机流场中组织非定常激励, 在工程上则反而是比较现实的事。

轴流压气机流路中转子叶排与静子叶排交错排列, 决定了在设计工况运行时流场也是非定常

的。此类固有非定常流场存在着数值很大的逆压梯度, 在此逆压梯度作用下, 比机翼更易于产生非定常分离流和相应的涡脱落。因此, 从波涡共振发作条件审视, 轴流压气机内即不缺乏非定常激励源, 也不担心是否存在着减少大尺寸分离区的需求和机遇。因此从波涡共振的角度考虑, 时序效应的产生可能是两种非定常流动, 尾迹和边界层, 发生了有利或不利的干扰, 从而在性能上产生了相应的变化。

从时序效应现象就可以看出, 叶轮机内固有非定常流动的不同方式会对气动性能产生影响。因此可以说, 时序效应为我们利用叶轮机的固有非定常提供了一个切入口。进一步分析会发现, 产生时序效应现象的原因是因为我们没有对各叶排进行周向定位的气动准则, 而在现有的定常设计体系中是不可能对各叶排进行周向定位的。因此, 发展考虑固有非定常性的叶轮机气动设计体系就是不可避免的了。

在设计体系中考虑非定常, 包括综合考虑叶片数、叶片形状、各叶排的相对周向位置、各叶排间距等。因此, 仅仅对现有的叶轮机机械的转/转、静/静叶排相对周向位置作一下改变, 影响不会很显著, 因为这样没有优化各个因素在固有非定常流动中的影响。这也解释了现在时序效应研究的现状: 对叶轮机的性能有影响, 但影响并不太显著。因此, 今后的研究应是以此为切入点, 更多地挖掘非定常的潜力。

4.2 在结构设计中利用时序效应的一个简单工程模型

现在对叶轮机静/静时序效应比较一致的看法是: 当前排静子(或 IGV)的尾迹打在后一排静子叶片前缘上时, 效率最高; 当前排静子(或 IGV)的尾迹打在后排静子叶片通道中央时, 效率最低。在上文的物理模型中, 这实际上是一种感受性的问题, 既扰动源以合适的位置进入受扰动流才能产生共振效果。但是, 一个关键的问题是: 怎样在设计时就考虑到前排静子的尾迹打在后排静子叶片前缘上? 这在工程上是头等大事, 但尚无公开的文献讨论这个问题。下面介绍解决这一问题的初步想法。

图 1 为一个 1.5 级叶轮机的示意简图。设转速为 n , 导—转—静在 S_2 流面的投影弦长分别为 L_1, L_2, L_3 , 叶片数分别为 A_1, A_2, A_3 , 且 $A_1 = A_3$, 导转、转静间距分别为 d_1 和 d_2 , 导叶的出口气流角

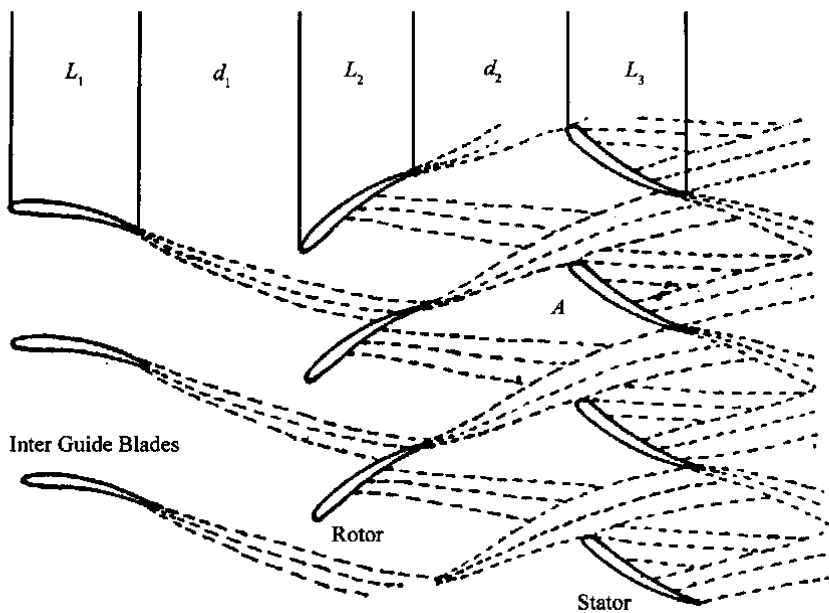


图 1 叶片尾迹的瞬时位置

Fig 1 Instantaneous position of blade wakes

为 θ , 动叶中气流转角为 θ 。先假设没有动叶, 并且当第一级动叶的尾迹向下运动到第二级静叶额线时与第二级静叶前缘的周向距离为 ∇L 。此时迹周向偏离为:

$$C_1 = (d_1 + L_2) \times \operatorname{tg} \theta$$

也就是尾迹轴向前进 $(d_1 + L_2)$, 周向再偏 $((d_1 + L_2) \times \operatorname{tg} \theta + \nabla L)$ 。加入动叶后, 这时第一级静子因为动叶在周向转动了:

$$\left[\frac{d_2 + L_2}{V_z} \times \omega \times R \right] + d_2 \times (\theta_1 + \theta_2)$$

ω 为旋转角速度, R 为此处半径, 于是第一级静子尾迹总的周向偏移为:

$$C_2 = (d_1 + L_2) \times \operatorname{tg} \theta_1 + \left[\frac{d_2 + L_2}{V_z} \times \omega \times R \right] + d_2 \times (\theta_1 + \theta_2)$$

于是只要下列式子满足:

$$C_2 - C_1 - \nabla L = \frac{k \times 2\pi \times R}{A_3} \quad (k \text{ 为整数})$$

即:

$$\left[\frac{d_2 + L_2}{V_z \times \omega \times R} \right] + d_2 \times (\theta_1 + \theta_2) - \nabla L = \frac{k \times 2\pi \times R}{A_3} \quad (1)$$

就能保证前级静子的尾迹打到后级静子的前缘上。在式(1)中, 若只有后级静子可以轴向、周向变化, 也就是 d_2 与 ∇L 调, 则总可以使上式成立, 这

基本上对应着转—静间距对叶轮机性能的影响和时序效应对叶轮机性能的影响。从这一个小公式中, 可以看到各个参数相互依赖的关系, 进一步完善后有望对叶轮机各个参数的优化起一定的作用。

5 结 论

(1) 据国外轴流式叶轮机机械时序效应实验结果, 关于时序效应对时均气动性能的影响, 在涡轮中比在压气机中所获性能收益更为显著; 对于压气机, 在高速情况下比在低速情况下所获性能收益更为显著。

(2) 序效应引起叶轮机气动性能的变化, 可能是在流动中尾迹与后面排叶片的边界层产生了非定常的相互干扰。

(3) 时序效应引起了人们对于非定常影响性能的直接关注, 促使人们在叶轮机的气动设计体系中开始考虑流动的固有非定常性。

(4) 根据对于时序效应现象的现有解释, 本文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。

参考文献

- [1] Fransson T H. Preface in Proc. of 8th International Symp. Of Unsteady Aerodynamics & Aeroelasticity of Turbomachinery[R]. Stockholm, Sept. 1997.

- [2] 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
- [3] Huber F W, Johnson P D, Shama O P, Staubach J B, Gaddis S W. Performance Improvement Through Indexing of Turbine Airfoils: Part I - Experimental Investigation[R]. ASME Paper No. 95- GT- 27, 1995
- [4] Saren V E, Savin N M, Dorney D J, Zacharias R M. Experimental and Numerical Investigation of Unsteady Rotor-Stator Interaction on Axial Compressor stage (With IGV) performance[R]. Stockholm, Sweden: 8th International Symposium on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines, September 14- 18, 1997.
- [5] Hsu S T, Wo A M. Reduction of Unsteady Blade Loading by Beneficial Use of Vortical and Potential Disturbances in an Axial Compressor with Rotor Clocking[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 13(2): 10- 16
- [6] Dorney, D. J., Shama, O. P., Gundy-Burlet K. L. Physics of Airfoil Clocking in a High-Speed Axial Compressor[R]. ASME Paper No. 98- GT- 82
- [7] Walker G J, Hughes J D. Solomon Periodic Transition on an Axial Compressor Stator-Incidence and Clocking Effects Part I -Experimental Data[R]. ASME Paper No. 98- GT- 363, 1998
- [8] Dorney D J, Sondak D J. Full-Annulus Simulations of Airfoil Clocking in a 1- 1/2 Stage Axial Compressor [R]. ASME Paper No. 99- GT- 23, 1999
- [9] Barankiewicz W S, Hathaway M D. Effects of Stator Indexing on Performance in a Low Speed Multistage Axial Compressor[R]. Orlando, FL: ASME Paper No. 97- GT- 496, June, 1997.
- [10] Adamczyk J J. Aerodynamic Analysis of Multislage Turbomachinery Flows in Support of Aerodynamic Design [R]. ASME Paper No. 99- GT- 80, 1999
- [11] Hodson H P. Boundary Layer and Loss Measurements on the Rotor of an Axial-Flow Turbine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106: 391- 399
- [12] Jie-zhi W u, Xi-yun L u, Andrew G Denny, Meng Fan, Jain-ming w u. Post-Stall Flow Control on an Airfoil by Local Unsteady Forcing[J]. Journal of Fluid Mechanical, 1998, 371: 21- 58