

文章编号: 1000-8055(2009)08-1799-06

非轴对称导叶尾迹对低速轴流压气机的影响

刘建勇, 李志平, 陆亚钧, 曾 涛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 在轴对称尾流撞击实验的基础上, 进行了多种非轴对称尾流撞击实验研究. 当合理安排进口导叶的数目和周向分布形式时, 进口导叶(IGV)的非轴对称尾迹能对下游转子流场产生有益的非定常耦合激励作用. 与轴对称尾流撞击方案相比, 非轴对称尾流撞击方案在保持了有益的高频激励信号的同时, 引入了合适的低频方波激励信号和其他有益的副频激励信号, 使得导叶尾迹更容易与压气机中的复杂涡系产生耦合激励作用, 例如通道涡、间隙涡和尾迹分离涡等. 实验结果显示, 非轴对称尾流撞击方案 B 能使压气机的最高效率提高 1.2%, 总压升和稳定裕度也略有增加.

关 键 词: 轴流压气机; 尾迹; 非轴对称; 耦合

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Effects of non-axisymmetric IGV wakes on a low speed axial compressor

LIU Jianyong, LI Zhiping, LU Yajun, ZENG Tao

(National Key Laboratory on Aero-Engine, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the axisymmetric wake impact experiment, several non-axisymmetric wake impact experiments were carried out. When the number and circumferential positions of inlet guide vanes (IGV) were logical, the wakes of non-axisymmetric IGVs could make beneficial unsteady excitation on downstream rotor field. In these experiments, some suitable non-axisymmetric wake impact plans worked better than the axisymmetric wake impact plan. As compared to the axisymmetric wake impact plan, the non-axisymmetric wake impact plan could supply multi-frequency exciting signals. In addition to the beneficial high-frequency signal, the non-axisymmetric plan B generated a low-frequency square-wave exciting signal and some beneficial secondary signals. Based on the unsteady cooperative flow theory, the exciting wakes in non-axisymmetric plan were easier to cooperate with complicated vortices in a compressor, such as clearance vortices, passage vortices and separated vortices. The non-axisymmetric wake impact plan B in this paper could make the max efficiency increase by 1.2%, total pressure rise and stall margin rise by a little.

Key words: axial compressor; wakes; non-axisymmetric; cooperate

一直以来, 压气机内真实流动的复杂性给航空发动机的研制带来了很大的困难. 一方面, 压气机的内部流动具有其独特的非定常性. 飞机外部

流动是在很大的空间内单个物体的绕流, 而压气机内部流动则是在很小的空间内多个具有相对运动的物体的绕流. 转/静叶排的相互干扰形成了压

收稿日期: 2008-08-07; 修订日期: 2008-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(50476003); 北京航空航天大学博士生创新基金

作者简介: 刘建勇(1981-), 男, 湖南临湘人, 博士生, 主要从事叶轮机气动热力学研究.

气机内特有的非定常性. 另一方面, 压气机内部流动还存在一定的非轴对称特征. 由于结构和工艺的原因, 压气机的叶尖间隙很难保证全周都是均匀的; 压气机进入失速工况时会产生具有明显非轴对称特征的旋转失速团. 近年来, 已出现一些研究将压气机真实流动的非轴对称特征考虑进来, 包括进行非轴对称的导叶安装角^[1]、叶尖间隙研究^[2]和轮毂端壁造型^[3]等.

近年来, 针对轴流压气机内的非定常流动现象, 一些学者进行了非定常耦合流动理论的相关研究^[4-6]. 该理论认为: 当施加的外部非定常激励频率接近于非定常旋涡流场的某一特征频率时, 可以使外部激励源与压气机内部的某一较强旋涡流动产生耦合作用, 其流动由非定常自然流态转为非定常耦合流态, 流场从无序变为有序, 从而提升压气机的性能.

在充分认识到压气机真实流动的非定常性和非轴对称特征的前提下, 本文在一台低速轴流压气机上进行非轴对称尾流撞击实验. 以进口非轴对称分布的导叶尾迹作为对下游转子流场的非定常激励源, 本文在合理安排进口导叶(IGV)的数目和周向分布形式时, 上游尾迹会与下游流场的旋涡产生耦合作用, 使原本无序的流动转变为一类有序的非定常耦合流动. 在进行非轴对称尾流撞击实验之前, 本文先在该压气机上进行轴对称尾流撞击实验, 以确定最优的激励频率和轴对称分布的导叶数目.

1 实验设备

实验台由低速轴流压气机、测试系统、动力装置及其控制系统、供电系统 4 大部分组成(结构如图1所示). 该低速压气机的设计转速是 3 000

r/min. 根据压气机性能测试的需要, 本实验台选用了 3 个测量截面. 第一个测量截面为图 2 中的 O-O 流量测量截面, 位于压气机叶排前, 距压气机进口集流器前沿平直段 $0.25D$ 处. 在实验进口集流器风筒上沿周向均布 4 个静压孔, 内径均为 1.5 mm. 第二个测量截面为 I-I 进口总压测量站, 位于压气机进口导叶前缘大约 1 倍进口直径 D 处, 由于此进口截面为均匀流场, 在周向上仅布置了一个总压梳. 第三个测量截面为 II-III 级出口总压测量截面, 周向间隔 90° 左右分布了 4 个总压梳.

由于此低速压气机为无预旋设计, 进口导叶采用如图 2 所示的直叶型. 此直导叶不需要改变经过气流的流向. 因而在本实验中可以按照任意的疏密程度来安装导叶, 而不影响下游转子的进口气流角. 经实验测量, 在改压气机的设计工况下, 进口导叶的尾迹为图 3 所示, 导叶的尾迹亏损可达 110 Pa, 能够对下游转子流场产生足够的非定常激励作用.



图 2 进口导叶的叶型
Fig. 2 Profile of inlet guide vane (IGV)

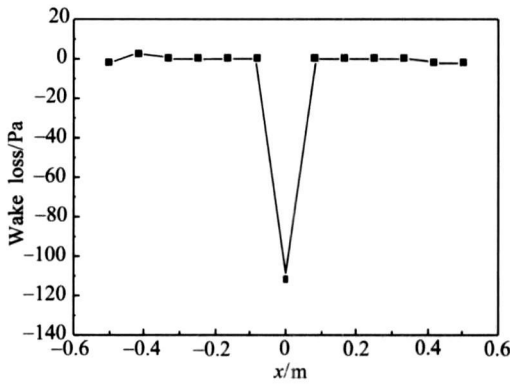
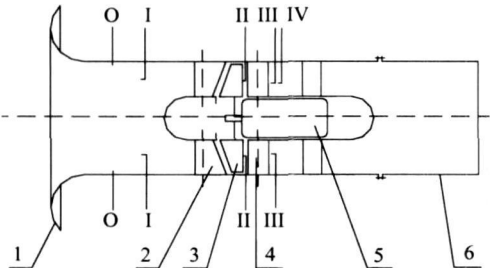


图 3 导叶的尾迹损失
Fig. 3 Wake loss of an IGV in total pressure

在非轴对称的导叶尾迹作用下, 压气机的出口为明显的非轴对称流场, 周向上应该布置多于 4 个的总压梳以更精确地反映出口的总压场. 而又为了不增加测量总压梳对流场的堵塞, 在测量非轴对称方案时, 每个流量点工况的压气机出口分 4 次测量, 并且每次测量只有 4 个总压梳. 在每次测量中, 保证出口总压梳与非轴对称进口导叶之间的周向相对位置与其他 3 次测量时错开一定



1 进口集流器; 2 进口导叶; 3 压气机转子;
4 压气机静子; 5 异步交流电动机; 6 排气管道

图 1 低速轴流压气机实验台结构简图

Fig. 1 Sketch map of the experimental low speed axial compressor facility

角度. 这样使得在相同流量下, 相当于由 16 个总压梳测量出口的非轴对称流场.

2 实验结果与分析

2.1 轴对称尾流撞击对压气机性能的影响

如前所述, 本实验先进行轴对称尾流撞击实验, 以在该轴流压气机上验证非定常耦合流动理论. 因为至少需要安装 4 片导叶作为进口整流罩的支撑板, 本实验选择 4 片 IGV 时的压气机性能作为基准, 近似为没有尾流撞击时的方案. 在轴对称尾流撞击实验中, 共进行了导叶数分别为 9, 15, 20, 24, 30, 36, 40, 48, 60, 72, 80 和 96 等共 12 种方案. 图 4 显示了在 12 种轴对称尾流撞击方案中, 此压气机的最大总压升随激励频率的变化关系. 由图可知, 当激励频率在 750, 2000 Hz 和 4000 Hz 时, 压气机的性能出现 3 个峰值. 尤其是在进口导叶为 40 片, 即尾流激励频率为 2000 Hz 时, 压气机的性能取得最优值. 本文将 40 片导叶轴对称分布的方案称为尾流撞击方案 A.

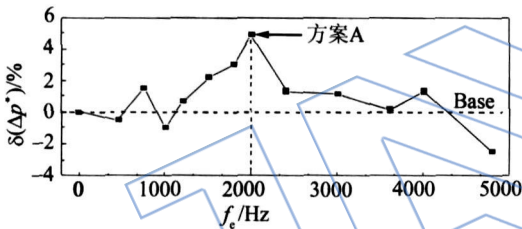


图 4 轴对称尾流撞击频率对压气机总压升的影响
Fig. 4 Effect of axisymmetric wake exciting frequency on the max total pressure rise

根据非定常耦合流动理论可以认为, 当安装有 40 片进口导叶时, 上游的尾迹会与下游转子流场中特征频率接近 2000 Hz 的较强旋涡产生耦合作用, 使得下游流场更为有序, 分离减小, 从而提高压气机的性能. 对于该低速轴流压气机来说, 可以认为 2000 Hz 是最优的非定常激励频率. 因此, 在设计接下来的非轴对称尾流撞击方案时, 应保留有益的 2000 Hz 非定常激励频率.

2.2 非轴对称尾流撞击方案的分区数对压气机性能的影响

为了优化进口导叶的周向分布形式, 本实验在 40 片导叶轴对称分布的基础上分区去掉部分导叶, 以考察分区数对非轴对称尾流撞击效果的影响. 实验中, 共设计了分区数分别为 1, 2, 3, 4 和 6 的五种非轴对称分布方案. 它们的导叶总数均为 20 片, 且各个分区具有相同的大小. 其中, 4 个

分区的非轴对称方案在本文中被称为尾流撞击方案 B. 图 5 给出了 40 片导叶轴对称分布的方案 A 和 20 片导叶 4 个分区非轴对称分布的方案 B 的示意图.

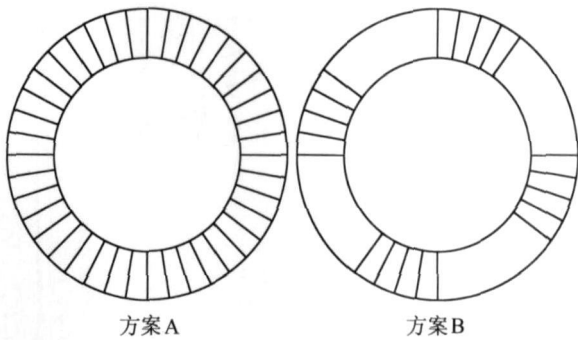


图 5 尾流撞击方案 A 和 B 的导叶分布形式
Fig. 5 IGV distribution in wake impact plan A and B

实验结果显示, 这几种非轴对称尾流撞击方案的压气机性能相对于基准方案和轴对称方案 A 的压气机性能有不同程度的提升. 在各项性能参数中, 以效率的增加最明显. 图 6 给出了不同分区数的非轴对称尾流撞击时压气机的峰值效率. 单分区的非轴对称尾流撞击效果最差. 当分区数增加到 4 时, 压气机的效率达到峰值. 而当分区数继续增加时, 压气机的性能开始下降.

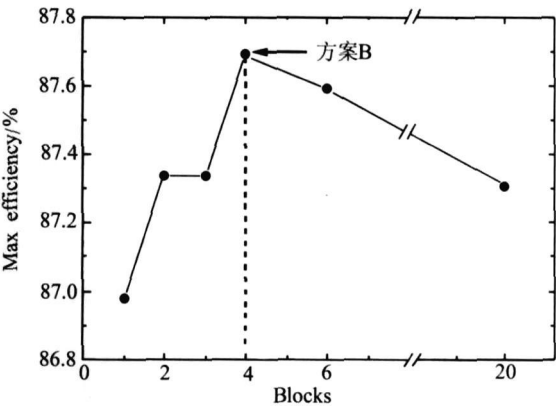


图 6 分区数对非轴对称尾流撞击效果的影响
Fig. 6 Effect of exciting block number on max efficiency of the compressor

图 7 和图 8 分别给出了在基准、尾流撞击 A 和 B 三种方案时压气机的效率和总压升特性. 与基准相比, 40 片 IGV 轴对称分布的尾流撞击方案 A 的激励效果不明显, 最高效率仅能比基准高 0.2%. 但是方案 A 中 40 片导叶自身的尾迹损失并没有使压气机的总体性能下降, 这说明了下游

转子流场确实受到尾流激励的作用而变得更加高效了. 由图可知, 非轴对称尾流撞击方案 B 的激励效果明显好于方案 A, 压气机的最高效率比基准提高了 1.2%, 同时总压升和稳定裕度也有一定增加.

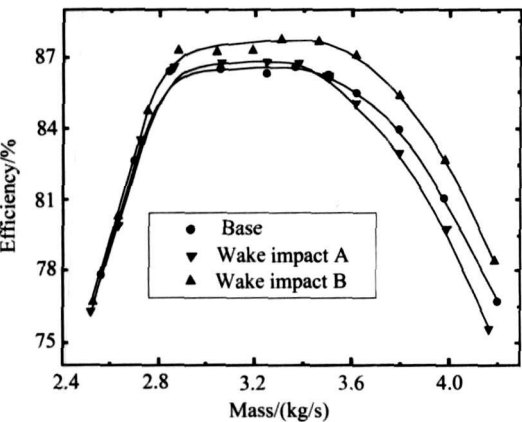


图 7 尾流撞击方案 A 和 B 对压气机效率特性的影响
Fig. 7 Efficiency characteristics of the compressor influenced by wake impact plan A and B

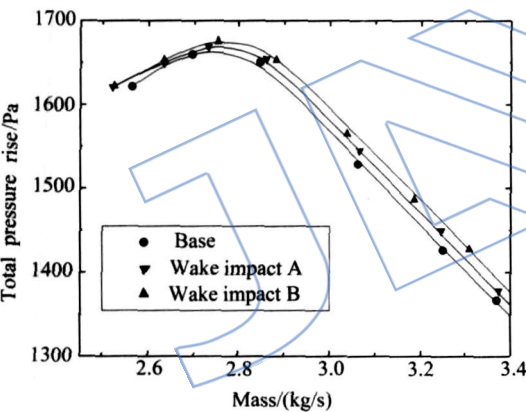


图 8 尾流撞击方案 A 和 B 对压气机总压升特性的影响
Fig. 8 Total pressure rise characteristics of the compressor influenced by wake impact plan A and B

尾流撞击方案 A 和 B 有着很不同的导叶分布. 因此有必要深入分析两种方案对压气机的流动机理有何不同影响. 进口导叶的这两种分布形式导致下游转子流场的激励信号存在着较大不同. 由于每个导叶尾迹都会带来如图 3 所示的总压亏损, 在 40 片导叶轴对称分布的方案 A 中, 转子旋转一周会感受到 40 个连续分布的尾迹亏损, 如图 9(a) 所示. 它的激励频谱为图 9(b) 所示的单一激励频率 2000 Hz. 而在方案 B 中分 4 个区去掉一半导叶后, 下游转子流场会感受到如图 10(a) 所示间断分布的尾迹亏损. 方案 B 会给下游

流场带来一个特殊的低频方波激励信号. 在有导叶区, 下游流场能感受到连续的尾迹亏损, 而在无导叶区, 下游流场则不能感受到尾迹亏损. 尾迹信号的这种从有到无, 再从无到有的转变过程, 就是一个典型的低频方波激励信号, 这也是轴对称尾流撞击方案所不能提供的. 此外, 在有导叶区, 转子流场还会感受到多个尾迹连续经过时产生的高频率的尾流激励信号. 而这个高频激励信号就是已经被证明能对下游流场产生耦合激励作用的 2000 Hz. 方案 B 的激励信号频谱如图 10(b) 所示. 在它的频谱中出现了比较明显的 200 Hz 的低频激励信号, 同时在 2000 Hz 的高频激励信号附近出现了 1800 Hz 和 2200 Hz 的副频成分. 副频成分使得图 9(a) 中单一的 2000 Hz 激励信号变成了图 10(b) 中围绕 2000 Hz 的激励频带. 由以上分析可知, 导叶轴对称分布的方案 A 与非轴对称分布的方案 B 对下游转子流场的激励信号存在较大不同. 由非定常耦合流动理论可知, 非定常激励信号的这种差别应该就是改变压气机性能的内

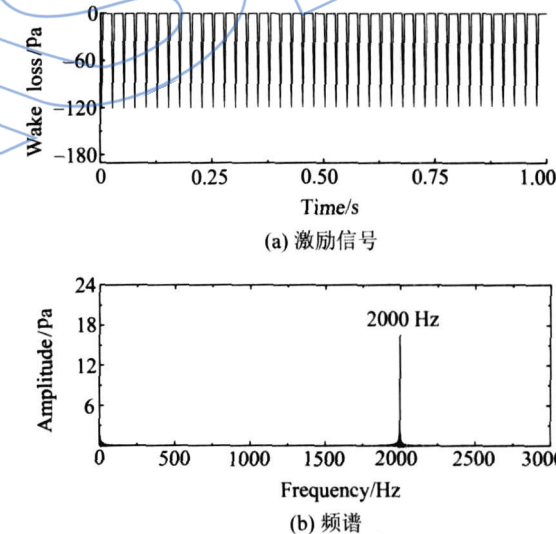


图 9 轴对称尾流撞击方案 A 的激励信号及其频谱

Fig. 9 Exciting signal and its frequency spectrum of axisymmetric wake impact plan A

如前所述, 轴对称尾流撞击方案 A 产生的 2000 Hz 的激励频率接近于该压气机内的某一个较强旋涡的特征频率, 因而能对它产生耦合激励作用, 从而改善下游流场. 但是, 非轴对称的方案 B 产生的尾流激励效果却比方案 A 更好, 可以从以下两方面来分析其原因:

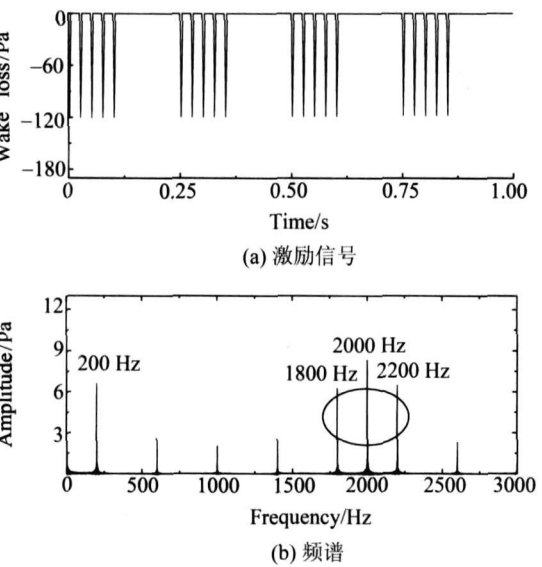


图 10 非轴对称尾流撞击方案 B 的激励信号及其频谱

Fig. 10 Exciting signal and its frequency spectrum of axisymmetric wake impact plan B

一方面, 由于旋涡运动的复杂性, 对于某个较强的旋涡来说, 压气机处于不同的工况时其特征频率也会有所变化. 从图 10 中的激励频谱可以看到, 非轴对称方案 B 产生的激励信号是一个围绕 2000 Hz 的激励频带, 而不是图 9 所示的单一激励频率. 当压气机中某一个旋涡的特征频率在 2000 Hz 附近变动时, 方案 B 的激励频率带比方案 A 的单个激励频率更容易捕捉到其特征频率, 从而产生更好的耦合激励效果.

另一方面, 压气机内存在着极为复杂的二次流动, 包含了各种涡系, 有间隙涡、通道涡、分离涡等. 而不同涡系的特征频率不尽相同. 除了特征频率在 2000 Hz 附近的涡系之外, 方案 B 产生的低频方波激励信号能够对另一较强涡系产生耦合激励. 提供了丰富频率的激励信号的非轴对称方案 B 能够同时对压气机内的两种或更多涡系产生耦合激励, 这显然优于只能提供单一频率的激励信号的轴对称方案 A. 改变导叶分布的分区数则会改变该低频激励信号的频率, 根据图 6 所显示的导叶分区数的影响可知, 此低频激励信号的最优频率是 4 个分区产生的 200 Hz.

从以上两方面的分析可知, 能同时产生低频激励信号和高频带激励信号的非轴对称方案 B 对压气机的激励效果比轴对称方案 A 更好.

2.3 激励频带中副频激励信号的作用

为了验证非轴对称尾流撞击产生的激励频带

中副频成分的作用, 本实验比较了具有不同导叶分布形式的两种非轴对称尾流撞击方案 C 和 D. 这两种方案的导叶总数均为 20 片, 且都是 2 个分区. 但是, C 方案的两个导叶区同样大小, 而 D 方案的两个导叶区大小不一样. 图 11 分别给出了方案 C 和 D 的导叶分布示意图.

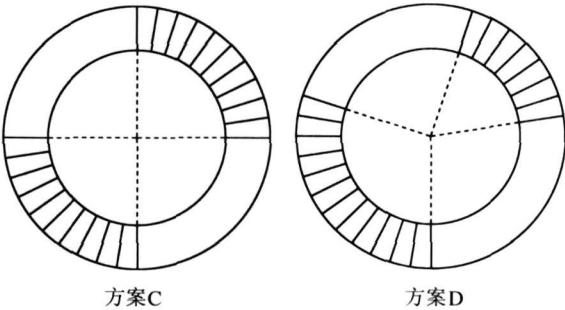


图 11 尾流撞击方案 C 和 D 的导叶分布示意图

Fig. 11 IGV distribution of wake impact plan C and D

改变导叶的周向分布形式必然引起尾流激励信号的不同. 图 12 和图 13 分别描述了方案 C 和 D 的尾流激励信号频谱. 比较它们的频谱可以发现: 虽然此两种方案都能产生 100 Hz 的低频激励信号和 2000 Hz 的高频激励信号, 但是方案 D 所

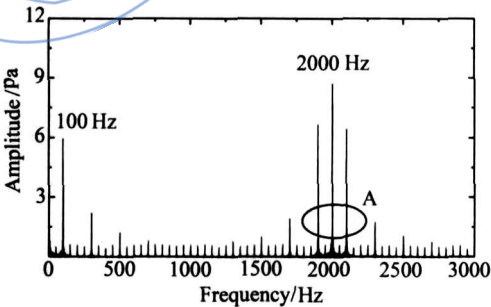


图 12 方案 C 的尾流激励信号的频谱

Fig. 12 Exciting frequency spectrum of wake impact plan C

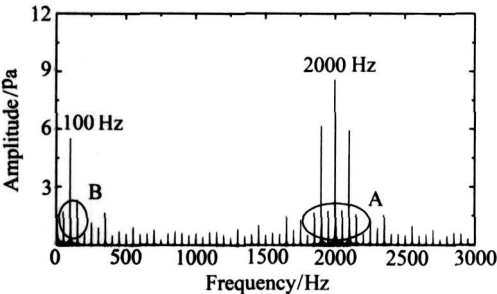


图 13 方案 D 的尾流激励信号的频谱

Fig. 13 Exciting frequency spectrum of wake impact plan D

产生的两个激励频带 A 和 B 包含了比方案 C 更丰富的副频成分. 按照此前的分析, 在占优的激励频率处于合适值时, 激励频带内的副频成分越丰富越容易捕捉到压气机中不断变化的旋涡运动特征频率. 因此, 尾流撞击方案 D 对压气机的耦合激励效果应该比方案 C 好. 而实验结果证实了这个推断: 在副频激励信号更丰富的方案 D 作用下, 压气机的效率和稳定裕度都能比方案 C 作用下更好(参见表 1).

表 1 5 种尾流撞击方案的压气机性能
Table 1 Compressor performance with five wake impact plans

方案	轴对称	最高效率/ %	设计点总压升/ Pa	稳定裕度/ %
基准	是	86.53	1 630	11.63
方案 A	是	86.77	1 645	12.46
方案 B	否	87.69	1 656	11.89
方案 C	否	87.34	1 653	11.33
方案 D	否	87.54	1 663	12.21

3 结 论

在轴对称尾流撞击实验的基础上, 本实验研究了多种非轴对称尾流撞击对压气机性能的影响, 可以得出如下结论:

- 1) 对于本文所述的低速轴流压气机而言, 轴对称尾流撞击存在最佳激励频率 2 000 Hz, 也就是 40 片导叶轴对称分布的方案 A. 方案 A 提供的 2 000 Hz 的尾流激励信号能够与压气机中的某一较强旋涡产生耦合作用, 从而改善压气机的转子流场.
- 2) 非轴对称尾流撞击方案的分区数对压气机性能有较大影响. 对于该低速轴流压气机而言, 非轴对称尾流撞击方案的最佳分区数为 4, 称为方案 B. 此方案能够使压气机的最高效率增加

- 1. 2%, 同时使得总压升和稳定裕度也略有增加.
- 3) 与轴对称尾流撞击方案 A 相比, 非轴对称尾流撞击方案 B 能够提供 200 Hz 的低频方波激励信号, 同时使得 2 000 Hz 的单一激励频率变成一个激励频率带. 由非定常耦合流动理论可知, 非轴对称方案 B 能够对压气机中特征频率不断变化的两种旋涡同时产生耦合激励效果, 因而取得比轴对称方案 A 更好的效果.
- 4) 激励频率带所包含的副频激励信号越丰富, 导叶尾迹越容易与特征频率不断变化的旋涡产生耦合作用. 因此, 包含更丰富的副频激励信号的非轴对称方案 D 比方案 C 的尾流激励效果更好.

参考文献:

[1] Horlock J H. The use of circumferentially varying stagger guide vanes in an axial flow pump or compressor [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112: 294-297.

[2] Graf M B, Woag T S, Greitzer E M. Effects of non axisymmetric tip clearance on axial compressor performance and stability [J]. Transactions of the ASME, 1998, 120 (4): 648-661.

[3] Rose M G, Harvey N W, Seaman P, et al. Improving the efficiency of the Trent 500 HP turbine using non axisymmetric end walls: Part II —Experimental validation [R]. ASME Paper 2001- GT- 0505.

[4] ZHOU Sheng, ZHENG Xinqian, HOU Anping, et al. Interaction of unsteady separated flow over multibodies moving relatively in the same flow-field [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 288: 981-1009.

[5] ZHENG Xinqian, ZHOU Xiaobo, ZHOU Sheng. Investigation on a type of flow control to weaken unsteady separated flows by unsteady excitation in axial flow compressors [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127 (3): 489-496.

[6] ZHENG Xinqian, ZHOU Sheng, HOU Anping, et al. Unsteady cooperative flow type in axial compressor [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(10): 930-936.