

出口静子安装角对压气机/吊架干涉的影响^{*}

张永新, 陈懋章, 蒋浩康, 张 辉

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对调整出口导流叶片来减小吊架对压气机流场影响的方法, 采用非定常数值模拟和实验方法, 对分离式和一体化式吊架进行了研究。分离式吊架情况下, 对减小扰动的作用不明显; 一体化式吊架情况下, 通过适当调整出口导流叶片安装角可以有效地降低转子后的压力扰动, 改善流场。该优化方法适合于一体化式吊架。

关键词: 航空发动机; 挂架; 导流叶片; 角度调制; 轴流式压缩机; 数值仿真; 非定常空气动力学

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 02-0122-04

Effects of restaggering OGV on a compressor/pylon interaction

ZHANG Yong-xin, CHEN Mao-zhang, JIANG Hao-kang, ZHANG Hui

(School of Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Unsteady numerical simulations and experiments were carried out to investigate the method of restaggering OGV to shield influence of pylons on a low-speed compressor, including separated pylon and separated pylon cases. Results show that restaggering OGV is more effective to reduce disturbance in integrated pylon case but with less effective in separated pylon case. The method of restaggering OGV is more suitable for integrated pylon case.

Key words: Aircraft engine; Pylon; Guide vane; Angular modulation; Axial flow compressor; Numerical simulations; Unsteady aerodynamics

1 引 言

在现代涡扇发动机中, 承力结构以及一些附件系统部件如功率提取轴和滑油系统管路等需要经过发动机气流通道。通常, 将这些部件设计成通过流道中的长弦支板或者发动机吊架; 有时候长弦支板本身就被设计成为承力结构。这些支板和吊架, 其尺寸较大, 会产生较大的扰动势场, 对上游的转子和出口导流叶片排内的流动会带来不利的影响^[1,2]。在现代发动机设计中, 出于减小发动机尺寸和重量的考虑, 往往需要将动静叶之间或者出口导流叶片和发动机吊架之间的轴向距离缩小, 这使得支板和吊架对于流场的影响愈发突出。目前, 优化方案主要包括两种: 重新设计静子叶型^[3,4]和调整静子安装角^[5]。改变叶型弯角的方法的优点是可以使得叶片前缘和后缘的角度都能够与流场相匹配, 能够较好地降低扰动, 但是

其缺点在于需要针对不同的支板或吊架重新设计和制造每个静叶, 这就使得设计/再设计过程以及制造成本大大增加; 而一般认为调整叶片安装角的方法, 虽然从理论上来说其效果可能不如改变叶型弯角的方法理想, 但是其优点在于只需要制造一种叶型, 大大节约了成本^[6], 因而, 调整叶片安装角的方法近 come 为许多研究者所研究。

目前对支板和吊架的计算方法包括求解势流方程的方法^[3]和激盘法^[4], 而较少采用数值模拟方法。本文通过数值模拟方法, 研究了两种不同型式的发动机吊架与压气机流场之间的干涉问题, 及通过调整出口导流叶片安装角来减小发动机吊架对压气机流场的干涉问题。

2 数值模拟

单级轴流低速大尺寸压气机由一级进口导流叶

^{*} 收稿日期: 2003-05-06; 修订日期: 2003-07-31。

基金项目: 重点实验室基金 (51459020101ZS4801 和 00JS48.3.1.HK5402)。

作者简介: 张永新 (1972—), 男, 博士生, 研究领域为叶轮机气动热力学。E-mail: zhangyongxin@sohu.com

片排(IGV)、转子和出口导流叶片排(OGV)组成,其叶片数分别为 36, 16 和 20, 压气机进口轴向马赫数为 0.106, 进口雷诺数为 2.448×10^5 (特征长度为压气机进口导流叶片弦长)。研究的吊架型式有两种, 即分离式吊架和一体化式吊架(如图 1 所示), 其中一体化式吊架在分离式吊架基础上修改前缘形状, 并拆除一片出口导流叶片, 与出口导流叶片排组合在一起。

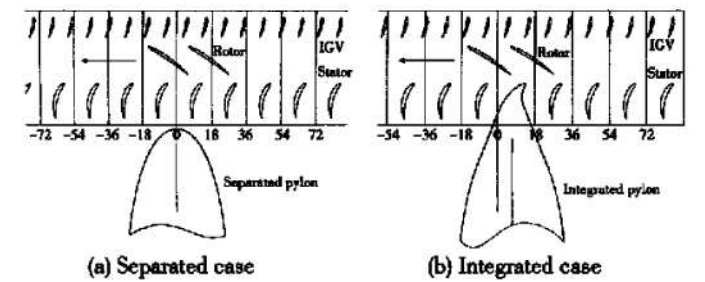


Fig. 1 Two types of pylon configurations

在本文的研究中通过调整出口导流叶片排中紧靠吊架的 6 个叶片安装角来获得不同的调整方案。表 1 中叶片所处的周向位置如图 1 所示, 安装角角度方向按逆时针方向转动为正。本文研究针对各种方案进行了数值模拟, 并且对分离式吊架情况的 S-1 和一体化式吊架情况的 I-1 方案分别进行了实验。

Table 1 Schemes of restaggering angles of OGV blades

(a) Separated case						
Circumferential position of OGV blades	- 45	- 27	- 9	+ 9	+ 27	+ 45
S-1	- 3.5	- 7.5	- 15	+ 7.5	+ 3.75	+ 2.0
S-2	- 1.5	- 3.5	- 7.0	+ 3.5	+ 1.5	0
S-3	- 1.5	- 3.5	- 7.0	- 3.5	- 1.5	0

(b) Integrated case						
Circumferential position of OGV blades	- 45	- 27	- 9	+ 27	+ 45	+ 63
I-1	- 4.5	- 9.0	- 18.0	+ 12.0	+ 6.0	+ 3.0
I-2	- 2.0	- 4.5	- 9.0	+ 6.0	+ 3.0	+ 1.5
I-3	- 1.5	- 3.0	- 6.0	+ 4.0	+ 2.0	+ 1.0

O' Brien 等的研究表明, 产生的扰动在周向的周期性增加时, 扰动会降低^[1], 意味着数值计算中必须在周向将整个流动考虑进来。Parry 的研究表明, 转子具有后效应(Back effect), 可减轻静子对扰动的放大, 且有助于减少静子的叶型损失^[2]。这表明在考虑下游吊架引起的扰动传播过程时, 必须综合考虑整个压缩系统的影响。本文计算中将进口导流叶片排、转子和出口静子的所有叶片, 以及吊架包括进来。

数值模拟计算了二维流场, 模拟的流面为压气机 50% 叶高的流面, 本文压气机算例为等内外径通道, 取该截面三维流动对二维计算结果不会带来本质的影响。数值模拟所采用的软件为 Fluent 5。网格用 Gambit 生成, 网格在形式上采用了分块结构网格, 在叶片和吊架壁面采用了 O 型网格(如图 2 所示), 计算网格节点数为 31 万。计算网格分布经过了多次调整, 在保证定常计算结果不受网格变化影响的前提下, 使网格数目满足软件对计算资源耗费要求; 计算结果与实验的对比, 表明计算网格可以满足工程计算的要求。计算方法采用了基于 SIMPLE 的非耦合隐式算法, 二阶空间差分, 湍流模型为 S-A 模型, 进口给定总压和总温, 出口给定压力边界条件。由于吊架的影响达到整个周向尺度, 转静子网格之间数据传递不能采用掺混面模型, 而是采用了基于悬挂节点方法(Hanging node)的移动网格模型。本文采用非定常方法求解, 非定常计算的初场采用定常计算收敛解得到, 定常计算收敛准则为流量的相对残差低于 1.0×10^{-4} , 并且要求进出口流量达到稳定平衡。非定常计算采用二阶时间差分, 取 1000 个时间步为一个计算周期(即转子扫过整个周向长度的), 通过监测进口流量以及流场内给定点压力变化的周期性, 当第五个计算周期的监测点压力和进口流量变化周期性(包括变化幅度和相位)与第四个计算周期的差别小于 1% 时, 判断非定常解达到收敛, 计算结果采用一个计算周期内的参数进行时间平均的方法处理。

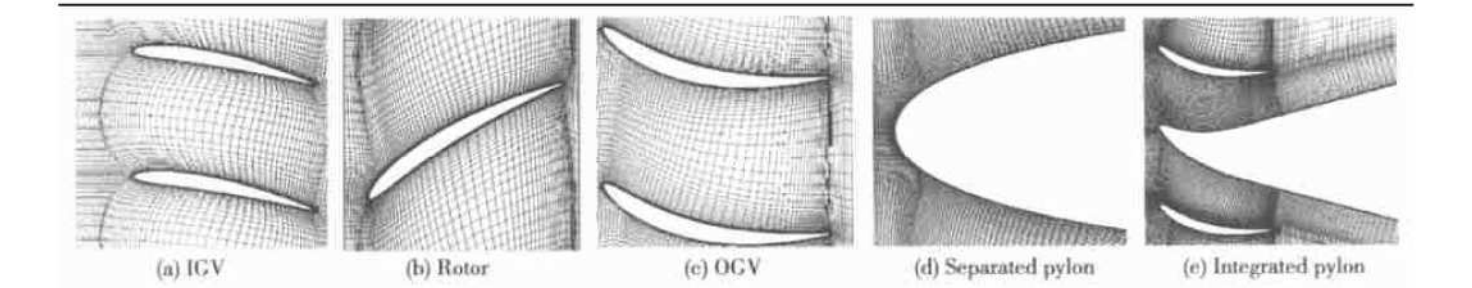


Fig. 2 Computational mesh

3 数值计算结果和讨论

3.1 分离式吊架

图3为转子出口压力系数 $\bar{p}_s = (p_s - p_0)/(1/2) \rho u_t^2$ 和总压系数 $\bar{p}_t = (p_t - p_0)/(1/2) \rho u_t^2$ 分布(u_t 为转子叶尖切线速度, p_s , p_t 和 p_0 分别为静压、总压和进口总压), 图中 N.S. 表示数值模拟(Numerical simulation)结果, Uniform 表示没有调整安装角的方案。S-1 方案数值模拟与实验结果吻合, 表明非定常模拟可以较好反映吊架产生的扰动。由图可见, 吊架引起较大的压力和总压扰动, 通过调整 OGV 叶片安装角, 可以不同程度地减少总压和静压扰动程度, 其中 S-1 方案效果相对较好, 总压扰动降低约 26.7%, 而 S-2 和 S-3 方案总压扰动降低约 14.6%。

图4为转子出口和 OGV 出口轴向速度系数 $\bar{C}_a = C_a/u_t$ 分布(其中 C_a 为轴向速度)。在转子出口 S-1 方案数值模拟与实验结果吻合较好。图中显示, 吊架引起低速流动; 通过调整 OGV 叶片安装角, 在转子出口速度扰动略有降低; OGV 出口轴向速度的分布显示, 调整 OGV 叶片安装角使得在靠近吊架的几个 OGV 叶片通道堵塞状况减轻的同时, 有一个叶片通道的堵塞状况却加重, 在 S-1 方案中甚至出现了反流。

3.2 一体化式吊架

图5为转子出口压力系数 $\bar{p}_s$ 和总压系数 $\bar{p}_t$ 分

布。F1 方案数值模拟与实验结果反映的压力和总压分布趋势基本一致。由图可见, 一体化吊架同样引起较大的压力和总压扰动, 比较图5和图3, 一体化吊架引起的扰动要比分离式吊架的大; 通过调整 OGV 叶片安装角, 可以不同程度地减少总压和静压扰动程度, 方案 F1 的效果较明显, 总压扰动降低约 49.8%, S-2 和 S-3 方案总压扰动降低约 26.4%。

图6为转子出口和 OGV 出口轴向速度系数 $\bar{C}_a$ 分布。在转子出口 F1 方案数值模拟与实验结果反映的轴向速度沿周向分布较为一致。图中显示一体化式吊架同样引起较大的低速流动区域; 通过调整 OGV 叶片安装角, 在转子出口尤其是方案 F1 中的速度扰动有较大幅度降低; OGV 出口轴向速度的分布显示调整 OGV 叶片安装角使得 OGV 叶片通道堵塞状况得到改善, 这与分离式吊架情况是不同的(图4)。

4 调整出口导流叶片安装角对压气机的影响

图7给出了实验得到的分离式吊架情况的特性线(其中基准情况为没有吊架的情况)。图中显示吊架的存在, 使得压缩系统的特征线向左下方移动, 而通过调整出口导流叶片只能很小部分地抵消吊架的影响。在一些情况下, 通过调整出口导流叶片安装角可以使得整个流动有较大改善, 但这通常意味着出口导流叶片排与吊架之间的轴向距离并未达到最小, 还

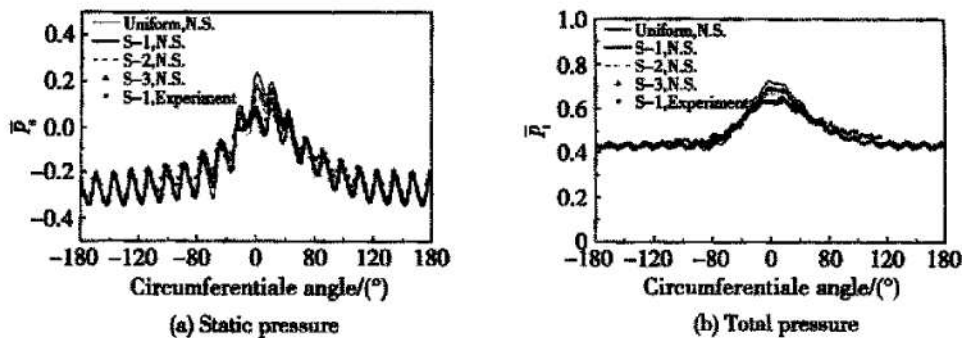


Fig. 3 Circumferential distributions of static pressure and total pressure at exit of rotor (separated case)

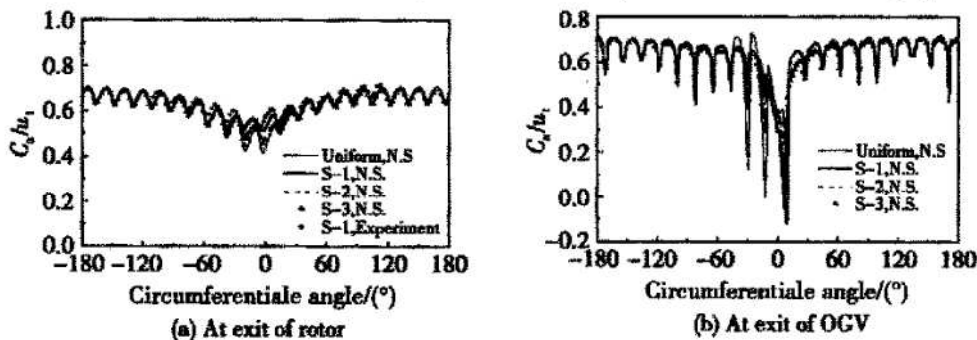


Fig. 4 Circumferential distributions of axial velocity (separated case)

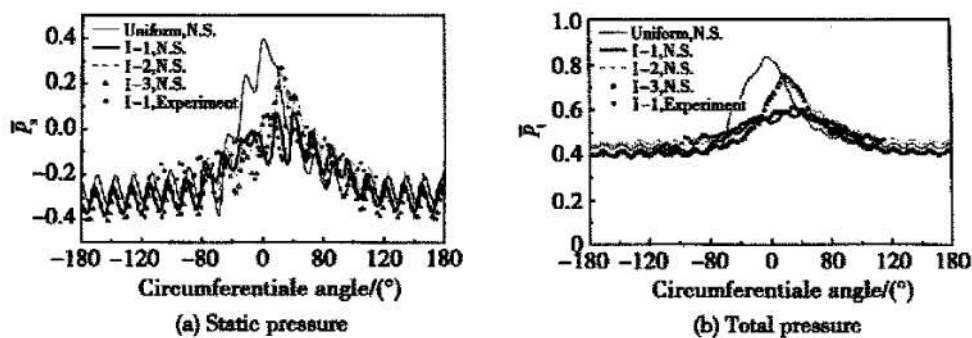


Fig. 5 Circumferential distributions of static pressure and total pressure

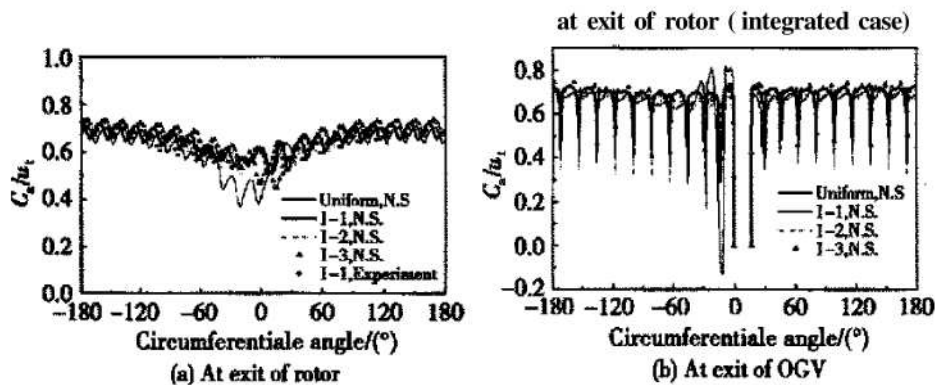


Fig. 6 Circumferential distributions of axial velocity (integrated case)

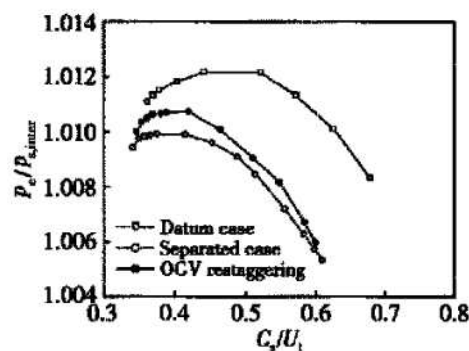


Fig. 7 Experimental characteristics of separated case

有进一步减小的余量,而随着距离减小,这种方法的局限性就会体现出来;由图中可见,在分离式吊架情况下,相比较而言,在流量相对较低的情况下,调整出口导流叶片方法的作用相对较明显。

5 结 论

(1) 在通过调整安装角方法来对压气机/吊架干涉问题进行优化设计中,引入了非定常数值模拟方法。数值模拟结果和实验的对比,表明非定常数值模拟可以定性地并且在较大程度上定量地反映出吊架对压气机流场的影响。

(2) 对于分离式吊架,调整出口导流叶片方法所起的作用很有限。对于一体化式吊架,调整出口导流叶片安装角可以较大程度地减小吊架对转子的扰动,并且改善出口导流叶片通道内的流动。调整出口导流叶片安装角的方法适合于一体化式吊架情况。

(3) 本文一体化式吊架情况下,最佳的出口静子安装角调整方案为:紧靠吊架的叶片,按照未调整安装角情况下其各自前缘攻角的角度调整,其余相邻的叶片,调整角度按照依次减半的规律来调整。

(4) 目前在吊架的优化设计中引入非定常数值模拟方法,存在计算资源耗费大,计算时间长的问题,还

有待计算机技术的进一步发展。

参考文献:

- [1] O'Brien W, Richardson S, Ng W. Calculation of unsteady fan rotor response caused by downstream flow distortions [R]. AIAA 84-2282.
- [2] Parry A. Optimisation of bypass outlet guide vanes [R]. ASME 96-GT-433.
- [3] Rubbert P, Bector M, Cowan S, et al. Concept and design of stators tailored to shield a fan from pressure disturbances arising in the downstream fan duct [R]. AIAA 72-84.
- [4] Parry A. Ideal vane stagger patterns for a coupled fan stage with circumferentially nonuniform flow [C]. Third Rolls-Royce/AVIC International Symposium, 2000.
- [5] Chiang H, Turner M. Compressor blade forced response due to downstream vane-strut potential interaction [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118.
- [6] Parry A. The use of cyclic variations in strut stagger to reduce coupled blade vane-strut-pylon interaction and system losses [R]. ASME 97-GT-470.

(编辑:王居信)