

考虑轴向间距变化的低速压气机 Clocking效应的数值模拟*

孙玺淼, 黄洪雁, 杨海涛, 王仲奇

(哈尔滨工业大学 推进理论及技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 以低速压气机试验为原型, 采用二维非定常数值模拟的方法研究了轴向间距改变对低速压气机气动性能的影响。数值模拟结果显示, 轴向间距减至原型间距的 33% 时, 整机效率的提高超过了 1%。该方案在除第一列静叶之外的三列叶栅中都表现出流动损失的降低, 尤其在第一列动叶中最为明显。轴向间距减小带来的势流干扰增强产生非定常的扑翼现象, 显著改善了第一列动叶的流动状态。适当减小轴向间距可以降低叶栅内下游叶列非定常干扰引起的损失。

关键词: 压气机; 间隔; 非定常流; 尾流; 数值仿真

中图分类号: V231.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2008) 02-0199-05

Numerical study on the clocking effect of a low-speed compressor with different inter-blade-row gaps

SUN Xin-miao, HUANG Hong-yan, YANG Hai-tao, WANG Zhong-qi

(Inst. of Propulsion Theory and Technology, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Based on the experimental results of a low speed compressor, two-dimensional (2D) unsteady numerical simulation has been applied to study the performance variation of low speed compressor with different inter-blade-row gaps. The result of simulation shows that the compressor efficiency is increased by more than 1% when the axial gap is decreased to be 33% of the original gap. Except for the first static row, the flow losses in the rear three blade rows are all reduced obviously in the first rotor row in this case. It is analyzed that the enhancement of potential disturbed flow caused by the axial gap reduction will produce an unsteady flapping wing phenomena which improves the flow significantly in the first rotor row. The conclusion is given that properly decreasing the axial clearance can reduce the loss of downstream blade row caused by unsteady disturbances.

Key words Compressor; Gap; Unsteady flow; Wake; Numerical simulation

1 引 言

近年来航空发动机的发展越来越趋向于更紧凑的级间排列, 轴向间距的缩小也逐渐成为设计者必须考虑的重要因素。李传鹏等实验研究了 6 个轴向间距下压气机的压升特性, 并采取在静子叶片表面埋入微型压力传感器的方法, 对叶片三个截面上的动态压

力进行了测量^[1]。结果表明轴向间距对压气机的失速流量和失速模态有很大的影响, 轴向间距减小时, 压气机稳定性得到加强。闫朝等利用 1.5 级静/动/静布局的涡轮叶栅对叶排间轴向间距对时序效应影响进行了二维非定常数值研究^[2], 发现叶排间轴向间距对时序效应自身影响很大, 会使涡轮效率的变化幅度以及效率极值出现的位置发生明显变化。Beni

* 收稿日期: 2007-01-04 修订日期: 2007-06-11。

基金项目: 国家自然科学基金 (50106002); 国家“九七三”项目基金 (G1999022307)。

作者简介: 孙玺淼 (1977—), 男, 博士生, 研究领域为叶轮机械风扇、压气机气动设计研究。

E-mail: sun_xin_miao@sina.com

ni^[3]指出,级的几何参数,周向 Clocking 位置和叶列轴向间距都是改变级的时均性能的影响因素。

2 方案选取与数值模拟方法

本文在哈尔滨工业大学低速重复级压气机试验^[4]的基础上设计了两种减小间距的方案,一种是将各叶列间的间距同时缩小为原型间距的 67%;另一种则是将各叶列间的间距同时缩小为原型间距的 33%。

本文研究的机型各列叶栅具有相同的叶片数,因此数值模拟可以只计算单个流道,而其它流道用周期性边界条件来代替。选取各叶列中径处的型线,构造多叶列二维平面叶栅流动。计算区域网格划分情况如下:四列叶片贴近叶型表面的区域均被划分为 O 型网格,沿叶型表面共 228 站,垂直叶型表面共 10 站,合计 2 280 个网格点。主流区域,采用了非结构化网格,第一列动叶沿流向 70 站,沿切向 60 站,总的网格数量约在 17 784。第一列静叶沿流向 80 站,沿切向 60 站,总的网格数量约在 22 024。第二列动叶沿流向 80 站,沿切向 60 站,总的网格数量约在 17 707。第二列静叶沿流向 100 站,沿切向 60 站,总的网格数量约在 26 522。

为了准确模拟叶列间干扰,本文使用 Fluent 软件包进行非定常数值模拟,采用滑移网格技术,得到时间精确解。湍流模型采用 5 方程的雷诺应力模型,方程的离散格式采用了二阶迎风格式,并使用多重网格法进行加速计算。

进口总温为 293.6 K,总压为 99.997 kPa,进口绝对气流角为 0°;出口背压为 102.498 kPa,叶型表面使用无滑移边界条件,并保证绝热和压力梯度为 0。

3 数值模拟与试验测量总参数比较

为了验证数值模拟方法的有效性,将部分模拟结果与原型实验数据进行了比较。实验测量是在哈尔滨工业大学的两级低速压气机动态实验台上进行的。压气机本体由入口内、外整流罩,动、静叶压缩系统,出口可调外环等组成。在第二级静叶下游离其尾缘中部 0.32 轴向弦长处设置头部直径为 2.1 mm 的五孔测针进行气动参数测量,探针可沿径向移动和沿自身轴向转动。实验级的轮毂比 0.666 7,顶部半径 300 mm,静叶中部稠度为 1.018,原型轴向间距为 30 mm。其它详细实验条件见文献[4]。图 1 给出了实

验测量和数值模拟参数分别计算所得的滞止等熵效率随静子叶列转位变化曲线,试验曲线表明最大效率发生在两排静子叶列 0.5 相对转位位置(图 1 中 4/8 位置),最小效率则对应两排静叶 0/8 的转位位置。在本实验条件下,当静子叶列转位时,可使效率变化约 1.1%,说明静叶 Clocking 对压气机效率有很大影响,非定常流动特性是一个不可忽略的因素。

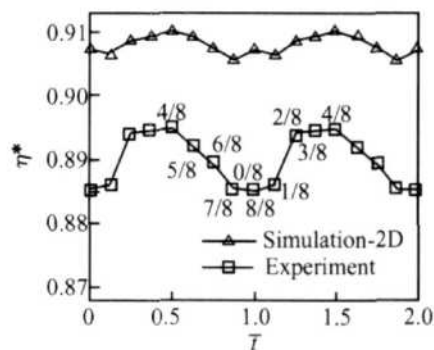


Fig. 1 Efficiency versus stator clocking positions

从图 1 中可以看到二维数值计算较好地模拟了 Clocking 效应的走势:效率随静叶 Clocking 位置的变化曲线趋势与实验曲线很好地吻合,数值模拟对最高效率点的位置也有成功的预测。二维的数值模拟对叶型损失和尾迹损失的描述较准确,而对端壁损失和二次流损失的描述较少,因而数值模拟得到的效率会比试验得到的效率高一些。同时静叶相对位置的改变将会改变端部损失在下游静叶和动叶流道中的分布,从而对下游叶栅的气动性能产生一定的影响,这在二维计算是无法模拟出来的,再考虑到数值计算本身存在的不可避免的误差。故实验和二维计算得到的效率波动必然有幅度上的差别。

4 计算结果与讨论

本文在每一种轴向间距方案的数值模拟中,均选择了 8 组不同的静叶周向相对位置。具体的静叶周向相对位置关系请参考文献[4]。

图 2 给出了不同轴向间距时压气机效率随静叶相对位置的变化。100% 原型间距下,效率平均值为 0.907 9, 67% 原型间距下,效率平均值为 0.908 5, 33% 原型间距下,效率平均值为 0.918 0。相比原型方案而言,轴向间距最小的方案的平均效率提高了 1%。

本文使用的效率计算公式如下

$$\eta^* = \frac{((p_{out}^*/p_{in}^*)^{(k-1)/k} - 1) * T_{in}^*}{T_{out}^* - T_{in}^*}$$

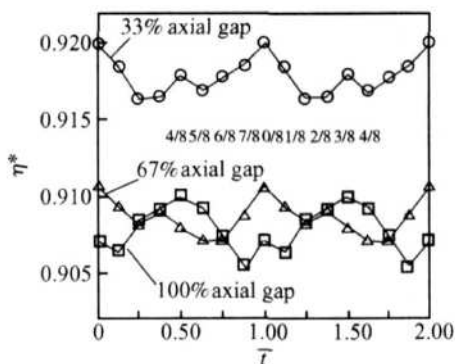


Fig. 2 Efficiency versus stator clocking position at different axial clearances

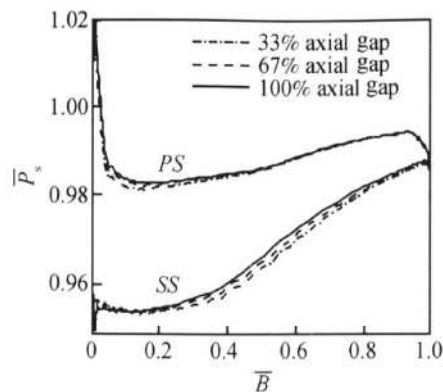


Fig. 3 Time-averaged static coefficient distribution on the first row of rotor surface

式中 $\overline{p_{out}^*}$ 为时均级出口总压; $\overline{p_{in}^*}$ 为时均级进口总压; $\overline{T_{out}^*}$ 为时均级出口总温; $\overline{T_{in}^*}$ 为时均级进口总温; k 为比热比, 这里 $k = 1.4$ 。

4.1 时均参数分析

选择图 2 中的 0/8 所表征的静叶相对位置, 比较不同轴向间距给各列叶栅气动性能带来的影响。表 1 给出了各列叶栅出口总压损失时均值相对于原型间距方案的变化。显然 33% 轴向间距方案在除第一列静叶之外的三列叶栅中都表现出流动损失的降低, 尤其在第一列动叶中最为明显, 其总压损失的相对降低幅度可达 20%。下面重点分析轴向间距减小对第一列动叶气动性能的影响。

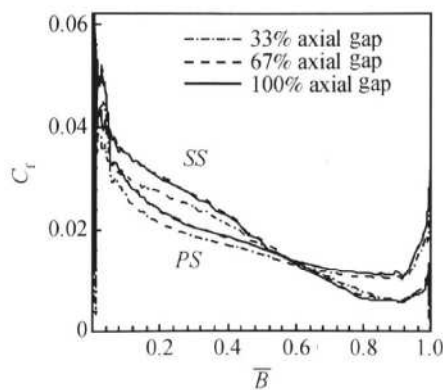


Fig. 4 Time-averaged friction coefficient distribution on the first row of rotor surface

Table 1 Changes of total pressure loss at each blade cascade outlet under different axial clearances			
Axial gap /%	100	66	33
Rotor 1	0.00	- 5.72	- 20.39
Stator 1	0.00	8.65	10.69
Rotor 2	0.00	- 10.22	- 12.82
Stator 2	0.00	7.82	- 13.04

图 3 和图 4 分别给出了时均静压系数和摩擦力系数在第一列动叶叶型表面的分布。图 3 显示, 第一列动叶吸力面 (SS) 绝大部分表面的时均静压分布都随着轴向间距越小而显著降低, 压力面 (PS) 也有类似趋势, 但集中在前 50% 轴向弦长范围内, 且降低程度不大。叶型表面静压降低, 通常对应着表面等熵马赫数提高, 这时叶型损失应该增加。但是表 1 却表现出了相反的趋势, 轴向间距最小的时候, 无论是吸力面还是压力面 (除吸力面尾缘附近), 第一列动叶表面的摩擦力系数分布都显著降低, 尤其是在前 50% 轴向弦长的范围里。

图 5 给出了第一列动叶的一些时均气动参数随

轴向间距的变化。图中显示, 100% 原型间距时, 各项时均参数指标都是最大, 而 33% 原型间距时, 各参数均为最小。扩压因子和气流转折角代表了叶栅的负荷程度, 其值越大, 叶栅的负荷越高, 相应的叶栅损失也增加。就冲角而言, 一般叶栅的最佳冲角都保持在 $-1^\circ \sim -2^\circ$, 冲角离开此范围越远的话, 栅内损失增加的越厉害。在给定叶栅进口气流冲角和叶片几何角的情况下, 叶栅出口的落后角越大, 实际气流的转折角越小, 扩压能力下降。综合分析以上第一列动叶气动参数的时均值, 我们知道轴向间距减小的时候, 叶栅负荷下降, 气流折转程度也下降, 冲角更趋近于最佳冲角, 这些都将引起栅内损失的降低。

对于第一列动叶来说, 不论轴向间距如何变化, 其进口条件总是恒定的。栅内流动状态发生如此剧烈的变化, 唯一可以确定的就是, 来自下游的非定常干扰改变其内部流场的结构。而且这种非定常干扰在小轴向间距条件下表现得更加明显了。

4.2 非定常静压波动分析

Domey^[5~8] 在研究叶栅 C locking 效应的时候发现: 效率最高的 C locking 位置总是伴随着叶型表面更

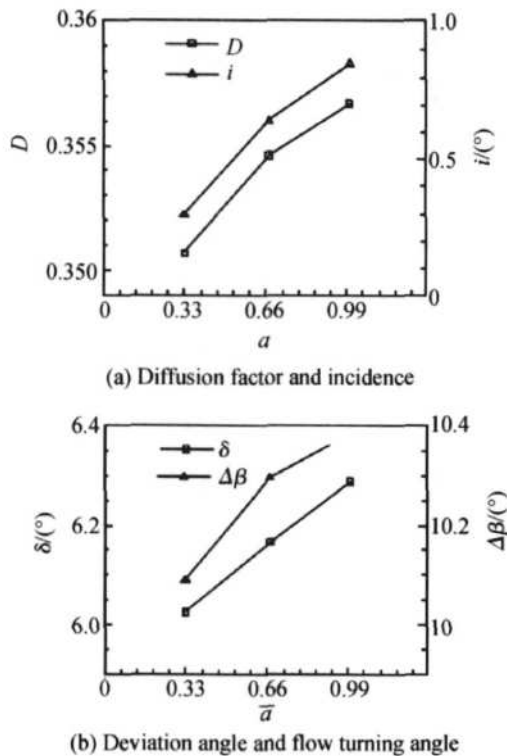


Fig. 5 Time-averaged parameters of the first rotor row at different axial clearances

多的非定常干扰。他推测是一种类似非定常“扑翼”的现象改善了叶栅的气动性能。1999年, Cizmas^[6]

的研究发现, 进口导叶与下游静叶的周向位置达到最佳配置时, 进口导叶的尾迹增强了下游静叶的非定常表面静压响应, 进而增强了动/静叶之间的势流干扰并导致动叶表面静压波幅增加。

复杂的非定常扰动经过傅立叶变换, 就被分解为许多不同频率的正弦分量, 而各正弦分量的振幅与相位分别按频率高低次序排列成频谱。在叶列间周期性非定常干扰的研究中, 人们通常关注以叶片通过频率为基准的一系列频率所对应非定常运动。对本文研究的机型来说, 叶片通过频率等于叶片转速 ($3 \text{ kr/m in} = 50 \text{ Hz}$) 与叶片数 (20片) 的乘积, 为 1 kHz 。二倍频就是 2 kHz , 三倍频则是 3 kHz ……。

第一列动叶叶型表面各点的静压波动通过下式计算得到

$$\overline{p_{un}} = (\overline{p_{s \max}} - \overline{p_{s \min}}) / p_a$$

式中 $\overline{p_{s \max}}$ 为静压在一个叶片通过周期内的最高值; $\overline{p_{s \min}}$ 为静压在一个叶片通过周期内的最低值; p_a 为标准大气压。

然后对叶型表面各点的静压系数进行傅立叶变换, 可以得到各个倍频范围内静压波动的幅值, 并使用 p_{mag} 来表示。

图 6 给出第一列动叶表面静压波动的倍频 (BPF)

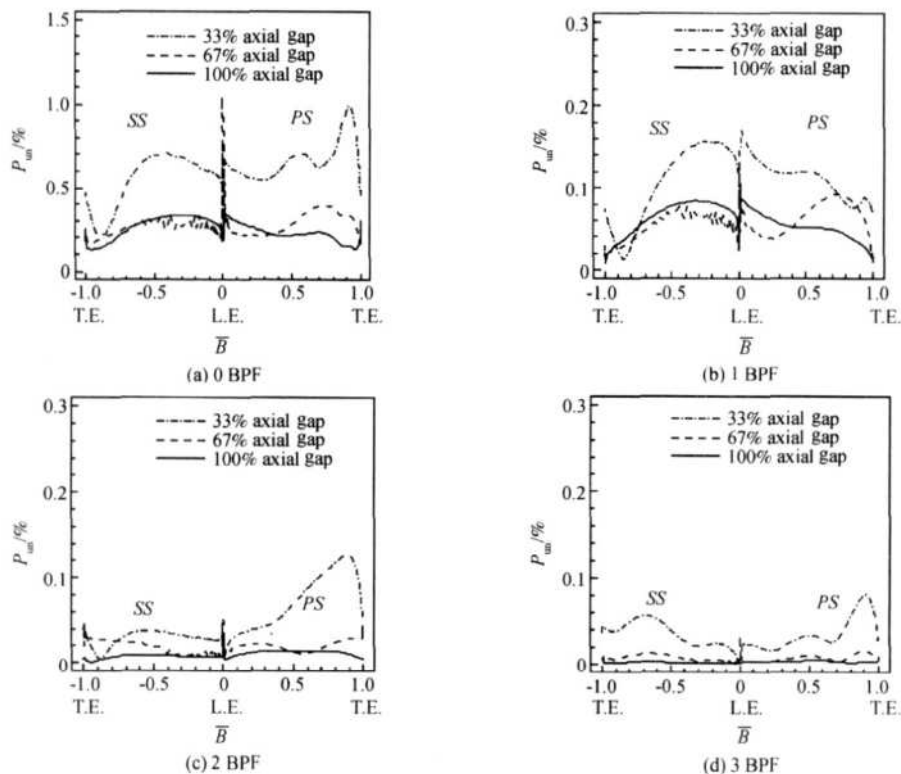


Fig. 6 Distribution of unsteady static pressure coefficient fluctuation amplitude on the first row of rotor surface

幅值分析结果。轴向间距最小时, 第一列动叶表面静压的波幅最大, 而且远远超过了另外两种轴向间距时的波幅(可以达到 2~4 倍)。无论是原始波动, 还是傅立叶变换后得到的各个倍频时的波动, 33% 原型间距的方案都显示出绝对的优势。对第一列动叶而言, 不存在上游的尾迹干扰, 引起它表面静压波动的因素只可能是来自下游各叶列的势流干扰。1 倍频曲线反映了来自下游第一列静叶的势流干扰, 而更高频段的曲线则表征了来自第二级各叶列的势流干扰。这充分说明: 轴向间距减小时, 势流干扰将发挥重要作用, 它给相邻叶列带来强烈的非定常压力波动。图中叶片表面非定常静压系数的波动显示轴向间距减小带来的势流干扰增强在动叶中产生了非定常的扑翼现象。Cimás^[6]认为势流干扰增强叶型表面压力波动的时候, 必然会增加当地附面层内低能流体的活力, 有降低附面层分离和改善流动状态的趋势。这也是轴向间距减小时, 流动非定常性的增加给叶栅内流动损失带来降低的一个可能因素。

本文方案受到计算条件和实验条件的限制, 无法继续减小轴向间距, 国内外也未见压气机 Clocking 效应下最佳间距方面工作的研究报告, 但是考虑到转子有轴向弹性应变, 结构上不允许无限减小轴向间距。所以在结构允许的条件下, 继续探寻最佳轴向间距将是下一步要进行的主要工作。

5 结 论

(1) 100% 原型间距下, 平均效率为 0.9079, 67% 原型间距方案对应的平均效率为 0.9085, 33% 原型间距方案对应的平均效率为 0.9180。相比原型方案而言, 轴向间距最小的方案, 整机效率的提高超过了一个百分点。

(2) 轴向间距的改变带来了各列叶栅气动性能的显著变化。轴向间距最小的方案在除第一列静叶之外的三列叶栅中都表现出流动损失的降低, 尤其在

第一列动叶中最为明显。轴向间距减小带来的势流干扰增强在动叶中产生了非定常的扑翼现象, 并显著改善第一列动叶的流动状态。

参考文献:

- [1] 李传鹏, 胡 骏, 张燎原, 等. 轴向间距变化对轴流压气机全流量特性的影响 [J]. 推进技术, 2004, 25(6). (LI Chuan-peng HU Jun ZHANG Liao-yuan, et al. Effects of axial spacing on compressor performance in all flow range [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(6).)
- [2] 闫 朝, 季路成, 陈 江. 叶排间轴向间距对时序效应影响的数值研究 [J]. 推进技术, 2004, 25(5). (YAN Zhao JI Lu-cheng CHEN Jiang Numerical investigations for the influence of the axial gap on the use of clocking effect [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(5).)
- [3] Benini E, Toffolo A. Towards a reduction of compressor blade dynamic loading by means of rotor-stator interaction optimization [R]. ASME 2002-GT-30396
- [4] 杨海涛, 黄洪雁, 冯国泰, 等. 平面扩压叶栅静叶相对位置改变对流动的影响 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(6).
- [5] Domey D J, Shama O P. A study of turbine performance increases through airfoil clocking [R]. AIAA 96-2816
- [6] Cimás P G, Domey D J. The influence of clocking on unsteady forces of compressor and turbine blades [R]. IS-ABE 99-7231
- [7] Gundy-Burlet K L, Domey D J. Physics of airfoil clocking in axial compressors [R]. ASME 97-GT-44
- [8] Gundy-Burlet K L, Domey D J. Investigation of airfoil clocking and inter-blade-row gaps in axial compressors [R]. AIAA 97-3008

(编辑: 郭振伶)