风扇/增压级带间隙三维粘性流场数值模拟

李晓娟 桂幸民

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 使用三维数值模拟软件NUMECA(Numerical Mechanics Application)对双涵道风扇/增压级带转子叶尖间隙的粘性流场进行了三维定常流动数值模拟,获得了其设计转速下的流场特性.结果显示,随着外涵背压的升高,风扇顶部激波后阻塞区周向和轴向尺寸增大,激波变形加剧,继续提高外涵压比,则外涵效率和进出口流量下降.内涵背压的升高,使内涵各转子叶片顶部的泄漏流动影响范围向上游扩散.内涵背压过高,效率和进出口流量同样会有下降的趋势.同时通过和实验结果的比较表明,数值模拟软件模拟的风扇/增压级的三维定常粘性流场能够较真实的反映出转子叶尖间隙泄漏流场的结构特征,以及间隙对流场参数的影响.

关 键 词: 风扇/增压级;间隙泄漏流动;数值模拟

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2006)01-0004-04

Numerical simulation of three dimension viscous flow of fan/compressor with tip clearance

Li Xiaojuan Gui Xingmin

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

Abstract: A three dimension numerical simulation software named NUMECA(numerical mechanics application) was used to calculate the tip clearance flow of fan/compressor. The flow field performance under design speed condition was obtained. The results show that when back pressure of by-pass duct increases, the intensive blockage area moves upstream and towards the fan pressure surface, and twist of shock become more obvious. The efficiency and the mass flow of the by-pass duct decrease if the back pressure of the by-pass duct increases unceasingly. At core duct, the area influenced by tip clearance leakage flow spreads to upstream with the increase of back pressure. In the same way, the efficiency and the mass flow of the core duct decrease if the back pressure of core duct is too great. The comparison between the results and the experiments shows that the numerical simulation results of three dimension viscous flow of fan compressor with tip clearance could actually reflect the influences of leakage flows on the flow structure and parameters.

Key words: fan/compressor; tip clearance leakage flow; numerical simulation

近年来,有关风扇/增压级多排叶片叶轮机械性能的数值模拟与实验研究一直是国内外有关专家密切关注的热点研究领域[1~3],尤其是在高推重比涡轮风扇发动机中,高负荷跨音风扇转子内部的流动情况极其复杂多变,激波和泄漏涡之间的相互干涉使得整个流场环境对叶尖处流场结构的变化相当敏感,而内涵增压级转子叶尖间隙的泄漏流和二次流也会对整个风扇/增压级流场产生重要影响.所以对带转子叶尖间隙的风扇/增压级多排叶片联算进行深入的研究不仅具有重要的理论意义,而且对延迟风扇/增压级失稳的发生,增加其稳定工作裕度,进而改善工作性能也有着十分重要的工程实用价值[4].

因此,本文使用三维数值模拟软件 NUMECA

收稿日期: 2004-10-15

基金项目: 国家自然基金资助项目(50136010; 50076001)

作者简介: 李晓娟(1980-),女,河南许昌人,博士生, lxj028@sohu.com.

(Numerical Mechanics Applicaation) 对一双涵道风扇/增压级的多排叶片进行了三维定常流动数值模拟, 比较了带间隙算例与不带间隙算例在设计转速下的流场特性, 并且分析了间隙流场的多个工况, 进一步完善了对双涵道风扇/ 增压级的内部流动结构及间隙效应的认识.

1　基本方程与计算方法

1.1　计算网格

本文中所有算例的网格均由软件的 IGG/Autogrid 网格生成器生成, 风扇、内涵增压级叶片采用 HOH 网格, 外涵导叶采用 H 型网格, 并且, 在风扇后, 内、外涵进口前增加一个包含分流环的网格块. 图 1 所示为不带间隙计算网格示意图.

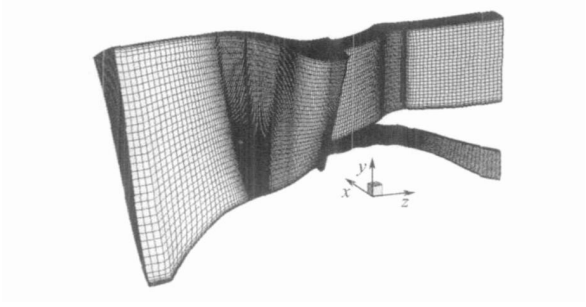


图 1　不带间隙算例计算网格示意图

带间隙算例中, 风扇叶尖间隙为 1.5 mm, 是风扇叶高的 3‰, 内涵转子叶尖间隙均取为 0.5 mm, 是内涵转子平均叶高的 9.09‰, 因此在带间隙网格中, 转子展向网格分布都增加了相应的网格点数, 在叶片间隙处的网格使用了 Autogrid 提供的蝶型间隙网格. 图 2 为带间隙的网格结构中叶尖间隙蝶型网格的示意图.

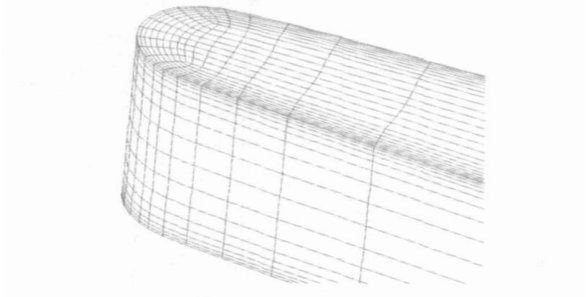


图 2　叶尖间隙蝶型网格的示意图

在不带间隙算例中, 相当于增大转子直径至间隙处, 因此, 转子尖部网格展向分布密度可以减小, 其计算网格总数共 1 900000. 而带间隙算例的计算网格总数达到了 2 200000.

1.2　基本方程和湍流模型

采用三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程. 湍流模型选取 Spalart-Allmaras 方程模型.

1.3　边界条件

边界条件的处理方法为: 进口边界(进口转子) 上, 给定总温、总压、气流的绝对切向和径向气流角的分布; 出口边界(静子出口) 上, 给定某一径向位置处的静压, 出口其它径向位置处的压力利用径向平衡方程确定.

1.4　计算方法

工质假定为理想气体, 空间离散格式为中心差分格式. 计算过程中动静叶采用纵排守恒连接(conservative coupling by pitchwise row) , 并采用多重网格法加速收敛. 具体计算过程为: ①内涵特性: 将外涵背压固定在最高效率线附近, 改变内涵背压进行计算, 得到内涵特性曲线; ②外涵特性: 将内涵背压固定在最高效率线附近, 改变外涵背压进行计算, 得到外涵特性曲线.

1.5　并行计算

使用软件提供的并行计算功能, 在 Windows 操作系统上, 使用一台双 CPU 的网络服务器. 并行通讯协议是 NUMECA 自带的 SMPI(Shared memory MPI, 即 MPICH) 协议.

2　数值结果与讨论

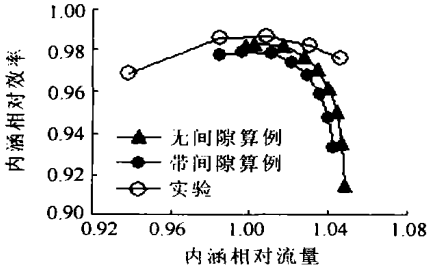
2.1　算例介绍

本文计算的风扇/ 增压级是以地面状态作为其气动设计点, 只针对此风扇/ 增压级设计转速下的流场进行了数值模拟, 2 种网格结构边界条件相同, 进口总温 288.15K, 进口总压 101 325Pa, 风扇入口轴向进气. (计算得到的特性参数值针对其在设计点相应的特性参数值做了无量纲化.)

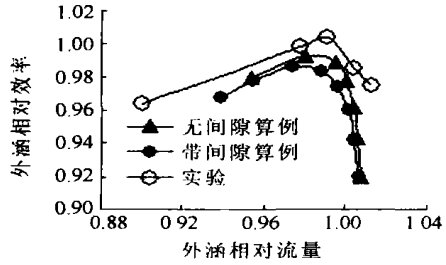
2.2　无间隙与带间隙算例数值模拟的比较与分析

图 3 为无间隙与带间隙算例数值模拟得到的风扇/ 增压级设计转速下特性曲线与实验曲线的对比. 由图 3 中可以看到在对风扇/ 增压级进行数值模拟时转子叶尖间隙的引入使得内、外涵的效率下降, 压比减小, 同时流量的下降使得风扇/ 增压级的特性曲线都向左边有一定程度的偏移. 另外, 图 3 中内涵实验值与计算值相对于外涵来说差别较大, 这主要是因为在进行多级联算时, 误差在内涵级间的传输过程中, 随着叶片排数的增加而不断放大, 从而在一定程度上限制了内涵数值模拟结果的精确程度.

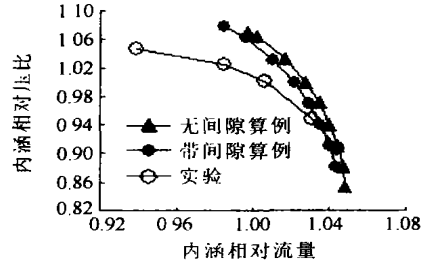
图 4 给出了无间隙算例和带间隙算例模拟风扇/ 增压级流场得到的设计转速下近设计工况点风扇叶片顶部子午面相对 Ma 分布的比较.



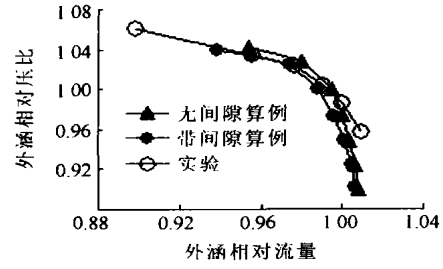
a 内涵效率特征



b 外涵效率特征

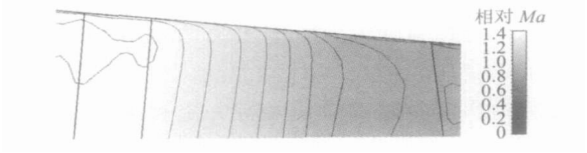


c 内涵压比特征

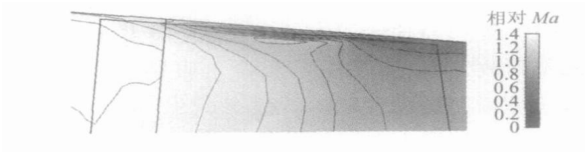


d 外涵压比特征

图3 风扇/增压级特性曲线比较



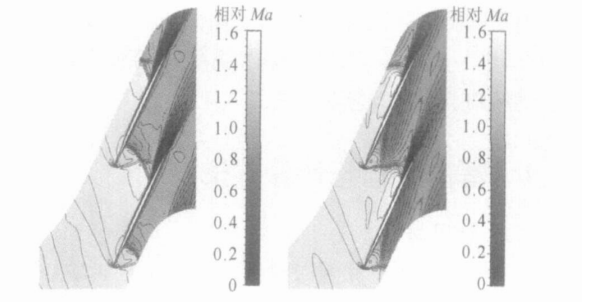
a 无间隙算例



b 带间隙算例

图4 近设计点风扇叶片顶部子午面相对 *Ma* 分布比较

图5则是2个算例模拟风扇/增压级流场得到的近设计工况点风扇98.5%叶高截面相对 *Ma* 分布的对比.

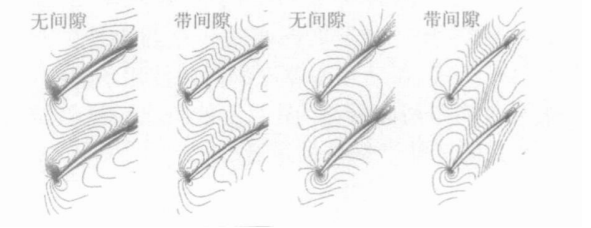


a 无间隙算例 b 无间隙算例

图5 风扇98.5%叶高截面相对 *Ma* 分布比较

由图4和图5可以看出,在风扇转子带有间隙的算例模拟的流场中,由于激波和泄漏涡的相互作用,风扇叶片顶部出现了一个阻塞区,由尾缘到前缘波及了绝大部分间隙区域,阻塞区内存在着强烈的逆向流动,这使得流场在叶尖附近沿径向的变化非常剧烈,膨胀波和激波的形状受其影响产生了变形.

图6所示为无间隙、带间隙算例模拟风扇/增压级流场得到的近设计工况点内涵第一级、第三级转子98.5%叶高截面等 *Ma* 线分布,图6中可以看到内涵转子叶尖间隙的存在在转子叶栅通道的下游引起了泄漏流动,并且,越是处在下游的转子泄漏流动在通道内的影响范围就越广.



a 内涵第一级转子 b 内涵第三级转子

图6 无间隙、带间隙算例内涵转子98.5%叶高截面等 *Ma* 线

2.3 多工况间隙流场分析

本节主要分析和比较了近设计、近失速工况点风扇/增压级带转子叶尖间隙流场的数值模拟结果.

图7为风扇/增压级外涵近失速工况点风扇

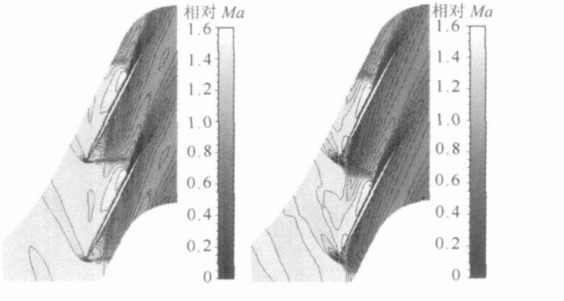


图7 外涵近失速工况点风扇叶片顶部子午面相对 *Ma* 分布

转子叶片顶部子午面相对 *Ma* 分布.

通过与图 4b 比较可以发现, 随着外涵背压的升高, 阻塞区域的位置向上游有明显地移动, 覆盖了整个叶尖间隙区域. 同时, 阻塞区域在径向上有增大的趋势,

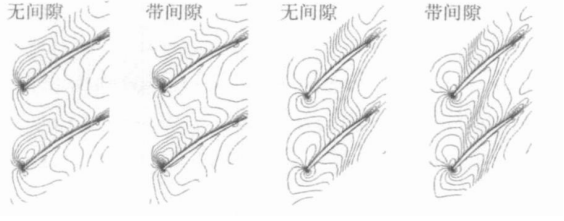
图 8 给出了风扇/增压级近设计工况点和外涵近失速工况点风扇 98. 5% 叶高截面相对 *Ma* 分布比较. 随着外涵背压的升高, 图中阻塞区域轴向及周向范围有所扩大, 由激波和泄漏涡相互作用造成的激波扭曲更加剧烈.



a　外涵近设计工况点　　b　外涵失速工况点

图 8　风扇 98. 5% 叶高截面相对 *Ma* 分布

图 9 则是风扇/增压级近设计工况点、内涵近失速工况点下内涵某三级转子 98. 5% 叶高截面等 *Ma* 线分布的比较, 图 9 中显示, 随着内涵压比的升高, 流场中的泄漏流动影响范围由于压力的作用向上游略有移动, 而越是处在下游的转子压力对其影响就越明显, 但是, 流体仍能较顺利地流过所有叶高槽道.

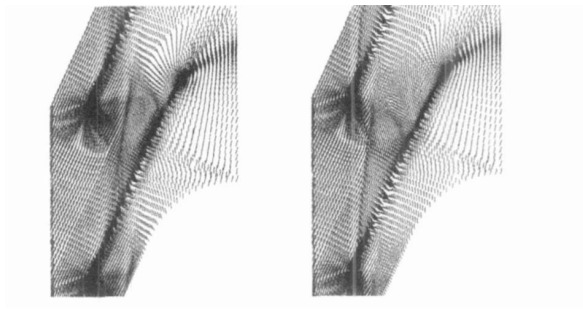


a　内涵第一级转子　　b　内涵第三级转子

图 9　近设计点、内涵近失速点内涵转子 98. 5% 叶高截面等 *Ma* 线

图 10 所示为近设计工况点和外涵近失速工况点风扇顶部间隙内拟 S1(叶片到叶片) 流面上相对速度矢量分布的计算结果.

近设计工况点, 泄漏流动和主流相互作用形成一条直线型泄漏涡, 而在外涵近失速工况下, 泄漏涡呈曲线型并向上游及压力面有所偏移, 这说明泄漏流和主流之间的相互作用有进一步的加强. 但是, 在本文中的计算结果并没有文献[3] 中的结果趋势明显, 这主要是因为双涵道风扇/增压



a　外涵近设计工况点　　b　外涵失速工况点

图 10　风扇顶部间隙内拟 S1 流面上速度矢量分布

级的失速并不完全是由于外涵背压过高引起的, 内、外涵流场的不匹配也可能使风扇/增压级在外涵背压较低的情况下进入失速状态, 所以, 此时泄漏流与主流之间的相互作用并没有单流道风扇中那么强烈, 另外, Spalart-Allmaras 一方程湍流模型对分离流动的模拟不如两方程模型的效果好, 这也可能对计算结果造成一定影响.

3　结 束 语

研究结果表明, 随着外涵背压的升高, 风扇叶片顶部的泄漏流动同主流的掺混轨迹向压力面和上游移动, 机匣附近的阻塞区的径向和轴向尺寸增大, 激波的弯曲变形加剧, 外涵压比继续上升, 效率和进出口流量总体上都下降. 而随着内涵背压的升高, 内涵各转子叶片顶部的泄漏流动影响范围由于压力的作用向上游略有移动, 同样内涵压比继续上升, 效率和进出口流量总体上都表现出了下降的趋势.

参考文献 (**References**)

[1] 桂幸民, 王同庆, 于　清, 等. 跨音压气机转子叶尖流场试验与分析[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(5): 553~558
Gui Xingmin, Wang Tongqing, Yu Qing, *et al*. Investigation on the tip clearance flow field in a transonic compressor rotor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(5): 553~558(in Chinese)

[2] 桂幸民, 聂超群, 王同庆, 等. 跨音压气机转子叶尖间隙复杂流动观测[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(5): 570~572
Gui Xingmin, Nie Chaoqun, Wang Tongqing, *et al*. Tip clearance flow in a transonic compressor rotor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(5): 570~572(in Chinese)

[3] Copenhaver W W, Mayhew E R, Hah C. The effect of tip clearance on a swept transonic compressor rotor[R], ASME-94-GT-363, 1994

[4] 敬荣强, 李泯江, 桂幸民. 高负荷跨音压气机叶尖间隙流动的数值分析与比较[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 827~831
Jing Rongqiang, Li Minjiang, Gui Xingmin. A numerical analysis and comparison of the tip-clearance flow of a high-loading transonic compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 827~831(in Chinese)