

文章编号: 1000-8055(2006) 01-0137-07

压气机转子三维流场计算中叶尖 间隙网格的影响

张 辉, 马宏伟, 蒋浩康

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对一带叶尖间隙的低速轴流压气机转子三维流场进行了数值模拟, 通过与实验结果对比, 分析了叶尖网格匹配、网格质量对压气机转子三维流场计算的影响, 发现网格正交性和网格疏密过渡会影响二阶计算精度的收敛, 研究还显示压升特性线不能准确的反映网格数目对计算结果的影响。

关键词: 航空、航天推进系统; 压气机; 转子; 叶尖间隙; 三维流场; 网格
中图分类号: V 231. 3 **文献标识码:** A

Effects of Tip Clearance Grids on the Simulations of Three-Dimensional Flow Fields in a Low Speed Compressor Rotor

ZHANG Hui, MA Hong-wei, JIANG Hao-kang

(National Key Laboratory on Aero Engines,

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

Abstract: The 3-D flow fields of a low-speed axial compressor rotor with a tip clearance were calculated. Compared with experimental results, effects of the tip grid-matching and the grid quality on numerical results were investigated. The result shows the requirement of the grid-matching between the tip clearance and the rotor passage for simulations of flow details in the tip clearance, and the sensitivity of the second-order difference scheme to the grid quality. In addition, it was revealed that the pressure rise characteristics did not exactly reflect the effect of grid numbers on numerical results.

Key words: aerospace propulsion system; compressor; rotor; tip clearance; 3-D flow field; grid

叶尖间隙对转子尖部的流动情况有非常重要的影响^[1], 是压气机损失的主要来源^[2], 与压气机性能和稳定性密切相关, 因此针对叶尖泄漏流的研究一直以来都是压气机气动研究中的热点^[3]。由于叶尖间隙尺寸较小而且又很靠近端壁, 给实

验测量带来很大困难^[4], 数值模拟成为间隙研究的重要手段。早期的数值模拟通常采用简化叶尖结构的办法以利于网格生成和计算求解, 其中主要的简化方法有叶顶削尖和设定间隙吸力面和压力面边为周期性边界两种^[5], 这些简化必然降低

收稿日期: 2004- 12- 20; 修订日期: 2005- 04- 25

基金项目: 国家自然科学基金资助(59806001; 50376002); 航空科学基金资助(04C51030)

作者简介: 张辉(1975-), 男, 辽宁盘锦人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士, 华北电力大学(北京)动力系教师, 主要从事叶轮机械实验和计算的研究。

了数值模拟的准确性。随着计算硬件和计算程序的发展,与实际情况一致的间隙多块网格划分已经普遍被采用了。

间隙网格情况无疑对间隙流动计算结果有影响,但是目前只有少部分学者有针对性的研究了间隙网格对转子三维流场计算结果的影响。文献[5]通过对一带叶尖间隙低速轴流压气机转子的数值计算比较详细的研究了间隙网格划分对计算结果的影响,研究显示使用与实际一致的叶尖网格结构比叶尖简化结构更好的模拟了负荷对泄漏的影响;为了更好的模拟近壁剪切力,机匣和叶顶处都进行网格加密是必要的;近壁网格的 y^+ 值为3显示了较好的结果。

除了文献[5]研究的3个网格因素以外,网格质量、网格块交界处的网格匹配等内容对间隙流动的三维计算也有影响,本文就这些问题做了研究。需要说明的是本文对网格的研究限于结构化网格,网格加密和近壁网格尺寸等内容参考了文献[5]的研究结果。本文流量系数和轴向速度参数的定义为轴向速度与叶尖切向速度 u_t 的比值,总压升定义为出口总压和进口总压的差与 $0.5\rho u_t^2$ 的比值,其中 ρ 为密度,另外图中“PS”代表叶片压力面,“SS”代表叶片吸力面。

1 单转子压气机

本文数值研究的对象为一低速大尺寸单转子轴流压气机,图1是该压气机的剖面图。该压气机由17片C4叶型的转子叶片组成,外径1 m,轮毂比0.6,转速1 200 r/min,叶尖间隙1 mm,叶中弦长0.180 m,文献[6]详细介绍了以该转子为主体的压气机实验台。文献[7,8]提供了该转子比较详细的实验测量结果,本文所引用的转子出口流场数据是采用四孔压力探针和热丝探针获得的。

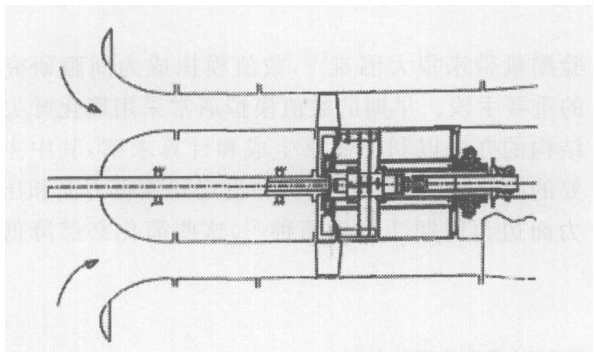


图1 低速压气机实验台
Fig. 1 Low-Speed compressor rig

2 数值模拟方法

本文利用某商用CFD软件进行计算,计算采用非耦合隐式解法求解雷诺平均N-S方程,采用网格中心型有限体积方法,压力修正采用SIMPLE算法,连续方程、动量方程和能量方程的空间离散格式为二阶迎风格式,湍流模型采用S-A模型,基于转子弦长的雷诺数为750 000。

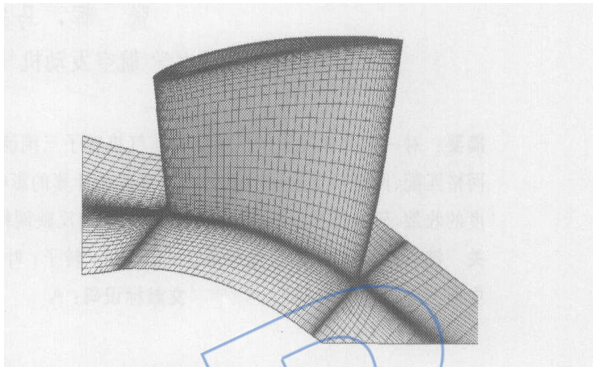


图2 带间隙转子计算域网格
Fig. 2 Domain grid of rotor with tip clearance

计算域为转子单通道,如图2所示,计算域进口位于前缘上游1.5倍弦长位置,给定总压、总温和进气角边界条件;计算域出口位于尾缘下游1.5倍弦长位置,给定轮毂径向位置的静压边界条件,出口静压沿径向分布由简单径向平衡方程算出,通过改变出口边界的背压调整转子的流量状态。轮毂、机匣以及叶片等固壁上给定绝热无滑移边界条件。

3 网格对计算的影响

3.1 网格质量

网格正交性和网格疏密过渡是网格质量的主要内容。图3显示了两种不同网格正交性的转子网格,一个正交性较差,一个正交性较好。图4显示了两种不同网格疏密过渡的转子前缘附近网格,一个网格过渡较平缓,一个网格过渡不平缓。使用不同质量的网格在相同边界条件和计算设置的基础上进行二阶精度数值计算,收敛情况常会出现图5所示的差别,图5显示了计算域出口截面流量系数的收敛情况,可以看出使用质量较差的网格经过一定步数迭代后出口流量系数围绕一定值呈现较大幅度波动,而使用质量较好的网格收敛正常。这显示出二阶计算精度对网格正交性和网格疏密过渡情况的敏感。

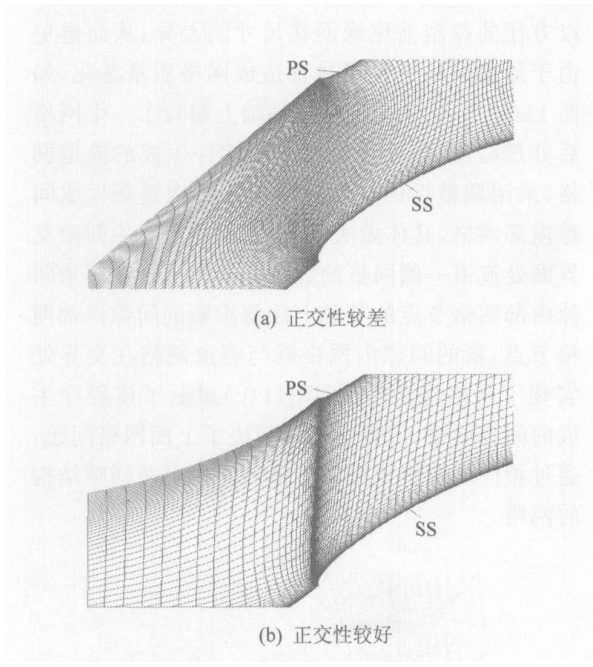


图3 两种不同正交性网格
Fig. 3 Grids with different orthogonality

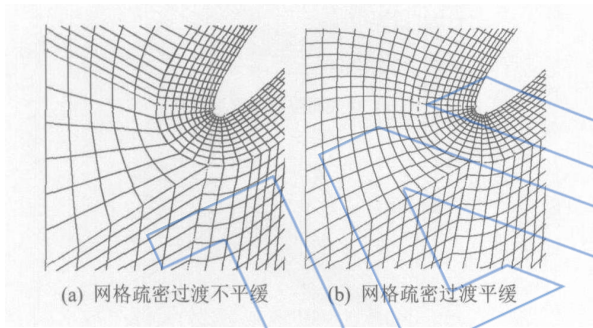


图4 不同网格疏密过渡情况
Fig. 4 Grids with different transition

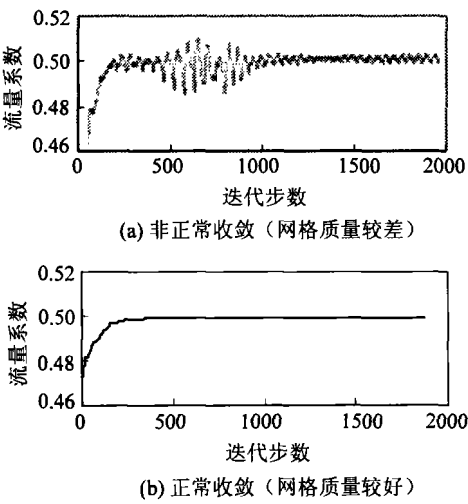


图5 计算域出口流量系数收敛情况
Fig. 5 Different convergence to different grid quality

3.2 网格匹配

由于叶尖间隙和转子通道分别属于不同的网格块, 交界处网格有匹配和不匹配两种情况, 图6显示了尾缘附近间隙和流道网格沿流向不匹配情况, 有些网格生成方法还可能造成径向网格不匹配, 这些网格不匹配会给计算结果带来影响。

图7显示了间隙与流道不同网格匹配情况对转子总压升计算的影响, 可以看出径向和流向网格都不匹配对计算结果影响最大, 仅流向网格不匹配对计算结果影响较小, 网格完全匹配的情况获得了与实验值较接近的结果。

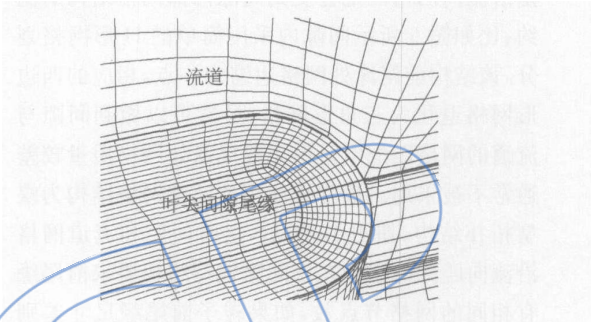


图6 尾缘附近沿流向网格不匹配情况
Fig. 6 Non-matching grids near tailing edge

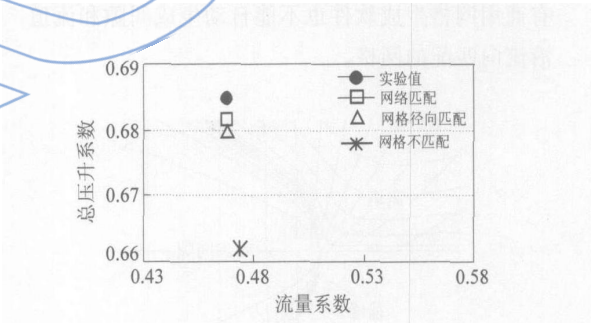


图7 不同网格匹配情况对总压升计算的影响
Fig. 7 Effect of non-matching grid on pressure ratio

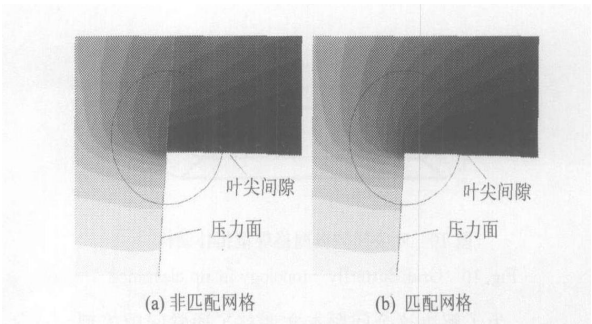


图8 转子某轴向截面间隙内静压分布
Fig. 8 Contour of static pressure in tip clearance

图 8 显示了转子某轴向截面使用流向匹配和不匹配网格计算出的间隙内静压分布,可以看出沿流向不匹配的网格在交界处不但导致流场不连续而且间隙内部流动细节也发生很大变化。造成差异的主要原因是交界面保证流场参数通量平衡的前提下引入的插值误差,在流动情况比较复杂的区域差异更大,这说明间隙内部流动细节的准确模拟要求间隙与流道网格的完全匹配。目前大部分涉及到叶尖间隙或处理机匣的数值计算没有考虑到叶片尖部网格匹配的问题。

间隙和流道网格沿径向匹配很容易做到,但是沿流向网格匹配会受到间隙内部网格结构的制约,比如图 9 所示间隙内采用简单的 H 形网格划分,该结构前尾缘处网格边缩为一点,相应的四边形网格退化为三角形网格,虽然可以做到间隙与流道的网格匹配但是由于前尾缘处网格质量较差通常不被采用。最常被使用的间隙网格结构为蝶型拓扑结构,如图 10 所示,这时间隙和流道网格沿流向匹配的困难在于间隙蝶型结构要求前尾缘有相同的网格节点数,如果转子前尾缘尺寸差别较大,会出现前缘网格过稀或尾缘网格过密的情况,局部过稀或过密的网格难以保证网格质量。现有商用网格生成软件也不能自动生成间隙和流道沿流向匹配的网格。

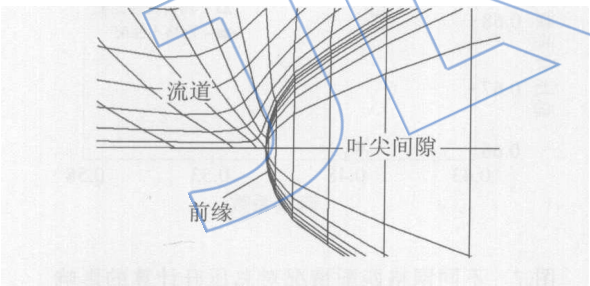


图 9 叶尖间隙内 H 形网格

Fig. 9 Grid H-topology in tip clearance

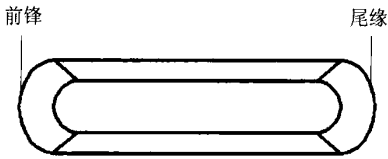


图 10 叶尖间隙内网格蝶型拓扑结构

Fig. 10 Grid Butterfly- topology in tip clearance

为了解决这个问题本文调整了通常间隙蝶型拓扑结构,在前缘增加了 3 个网格块,如图 11(a) 所示,通过调整这 3 个网格块的网格节点数目,可

以方便的控制前尾缘网格尺寸的差异,从而避免由于局部网格过密或过稀造成网格质量恶化,如图 11(a) 和(b) 所示。在此基础上编写了一个网格后处理程序,该程序利用商用软件生成的流道网格,采用调整后的间隙蝶型拓扑结构重新生成间隙内部网格,具体做法是:按照流道与叶尖间隙交界面处流道一侧网格的数目和坐标位置在原来间隙内部网格节点的基础上插值出新的间隙内部网格节点,新的间隙内网格就与流道网格在交界处实现了网格完全匹配,图 11(c) 显示了该程序生成的间隙网格。该程序不但解决了上面网格问题,通过相应的调整还可以方便的生成复杂间隙结构的网格。

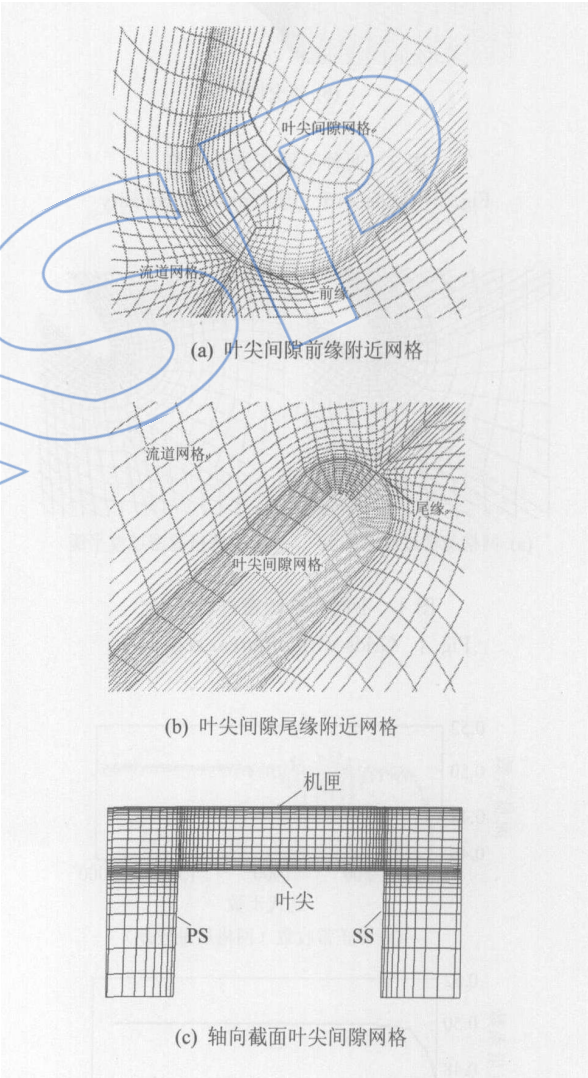


图 11 网格后处理程序生成的带间隙转子网格

Fig. 11 Grids of rotor with tip clearance generated by using grid post-processing code

3.3 计算精度的使用

对于转子三维流场数值计算来说,为避免一

阶计算精度较大的数值耗散,采用二阶计算精度是必要的。但是对于带间隙转子的计算来说,初始迭代就采用二阶精度有时会造成一定的问题,图 12 显示了使用二阶精度进行初始迭代的连续方程残差收敛情况,可以看出收敛出现异常,呈现“不收敛不发散”的状态。这显示了二阶精度对流场初始值的敏感,而且与网格情况有很大关系。较大的数值耗散会降低对流场初始值的敏感,在迭代初始使用一阶计算精度然后过渡到二阶计算精度可以解决上面的问题,图 13 显示了连续方程的收敛情况。

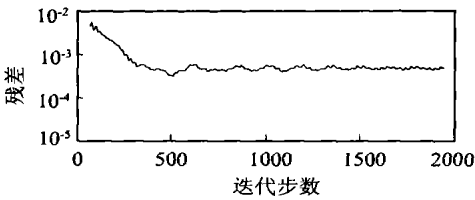


图 12 使用二阶计算精度初始迭代的收敛情况
Fig. 12 Initial iteration of second order accuracy

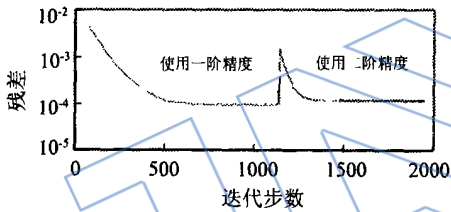


图 13 使用一阶计算精度初始迭代然后转到二阶
计算精度的收敛情况
Fig. 13 Initial iteration of first order accuracy then
second order accuracy

对于大多数不是很复杂的流场来说使用二阶计算精度进行初始迭代是可以的,但是网格质量、流场几何形状和初始值等会给二阶计算精度的使用带来影响,将计算精度的使用与网格情况联系在一起也是降低网格影响一个值得注意的内容。

3.4 网格数目

逐渐增加网格数目是减少网格对计算结果影响的重要步骤,本文对带间隙转子三维流场计算采用 3 种不同疏密程度的网格,具体情况列在表 1 中。图 14 显示了在相同边界条件下使用不同网格对总压升和流量系数的计算结果,可以看出随着网格数目的增加,计算结果的差异变得越来越小了。

表 1 本文使用的计算网格
Table 1 Three grids with different node number

	A	B	C
总数	194 976	393 406	654 565
流向	93	125	137
径向	53	65	73
周向	37	45	61
间隙径向	9	13	17
间隙流向	25	35	37
y^+	3~8	1~6	1~5
计算时间 (单流量点) P4, 1 G 内存	≈ 8 小时	≈ 12 小时	≈ 20 小时

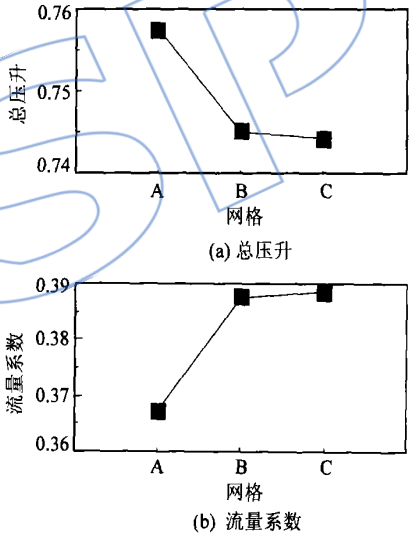


图 14 总压升和流量系数计算结果比较
Fig. 14 Calculation results of total pressure ratio
and mass flow rate

图 15 显示了使用 3 种网格计算的总压升特性,3 种网格间的差别非常小而且与实验结果比较吻合,与图 14 相对照可以分析出压升特性线上某个相同流量点对于这 3 个网格来说是在不同的出口背压条件下计算得到的,这说明压升特性线不能准确的反映网格数目对计算结果的影响,而这一内容经常被忽视。

根据上面的分析可以得出当网格加密到 C 网格水平时网格数目对计算结果的影响已经很小了,可认为计算基本可靠,最后将 C 网格用于带间隙转子三维流场计算研究。下面给出使用该网格计算的部分流场结果以及和实验结果的比较。

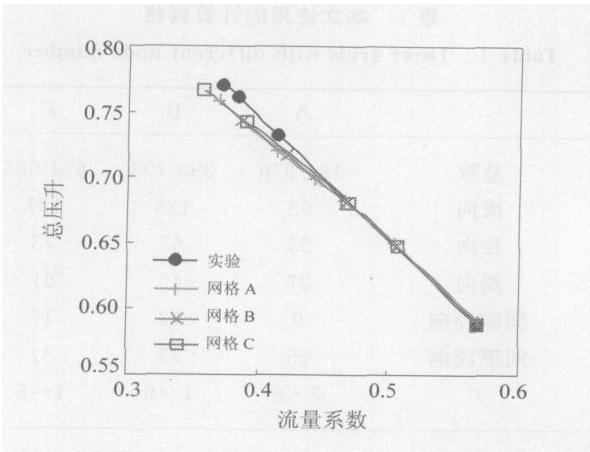


图 15 总压升特性

Fig. 15 Characteristics of total pressure ratio

3.5 计算结果

图 16 显示了转子出口截面周向平均的轴向速度和总压升沿径向分布, 图中纵坐标 $span$ 代表叶片展向位置, 其中 0.0 对应于轮毂径向位置, 1.0 对应于机匣径向位置, 可以看出无论设计状态还是近失速状态中间径向位置的计算和实验结果吻合较好, 在叶尖靠近端壁区计算和实验结果在趋势上是一致的, 但与叶片径向中部相比差别较大, 而且在近失速状态的差别更大, 这一方面体现了端区流动的复杂, 不但有二次流、端壁附面层而且它们之间存在较强的相互作用, 目前的计算手段还不能准确的模拟端区的流动细节, 另一方面实验数据是采用压力探针等接触式测量手段获得的, 在叶尖近壁区测量结果误差较大。对于根部

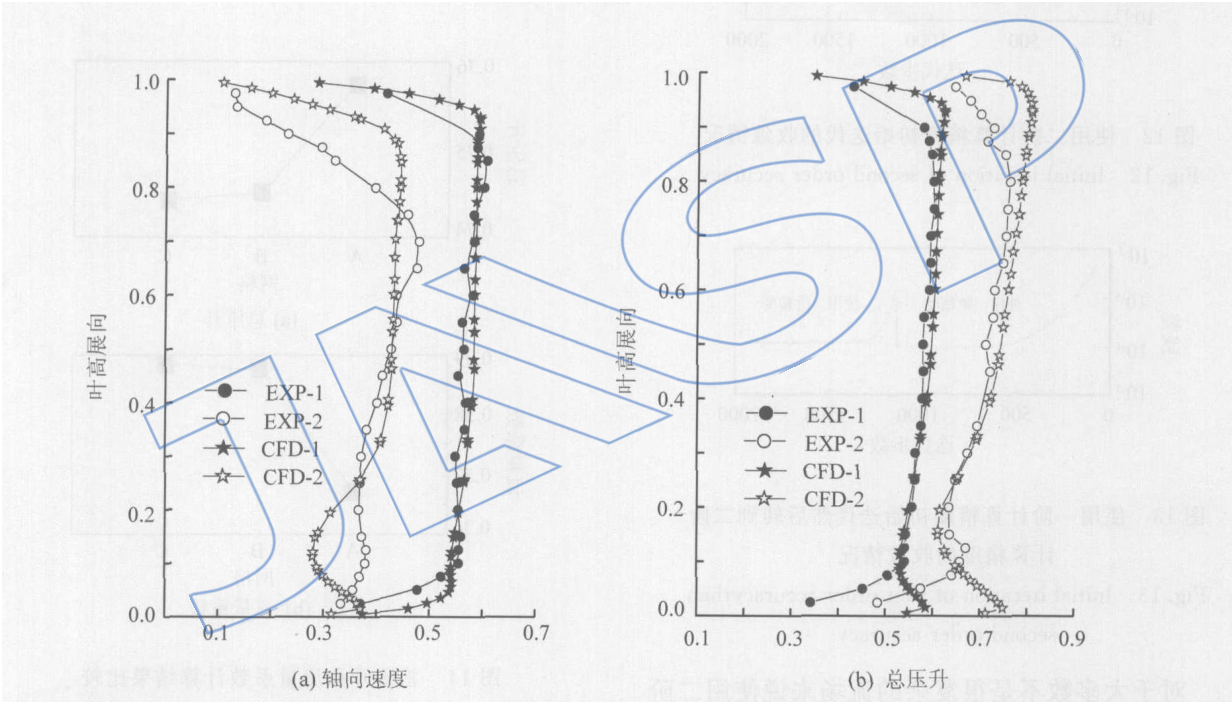


图 16 转子出口截面周向平均流场参数沿径向分布 (图中: 1. 代表设计状态; 2. 代表近失速状态)

Fig. 16 Radial distribution of total pressure ratio and axial velocity (1: design condition, 2: near stall condition)

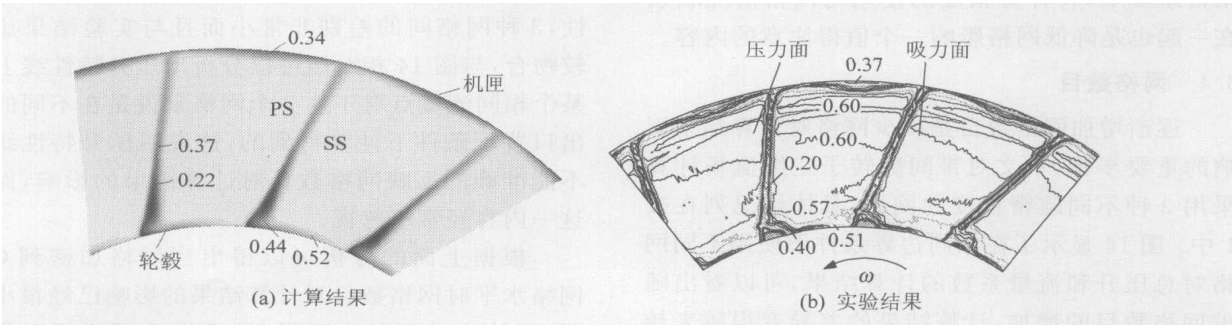


图 17 转子出口设计状态轴向速度分布

Fig. 17 Distribution of axial velocity at exit of rotor in design condition

近端壁区计算和实验结果的差别除了上面两个原因以外, 计算没有考虑到实际压气机转子叶片与轮毂之间的缝隙也是一个重要原因。

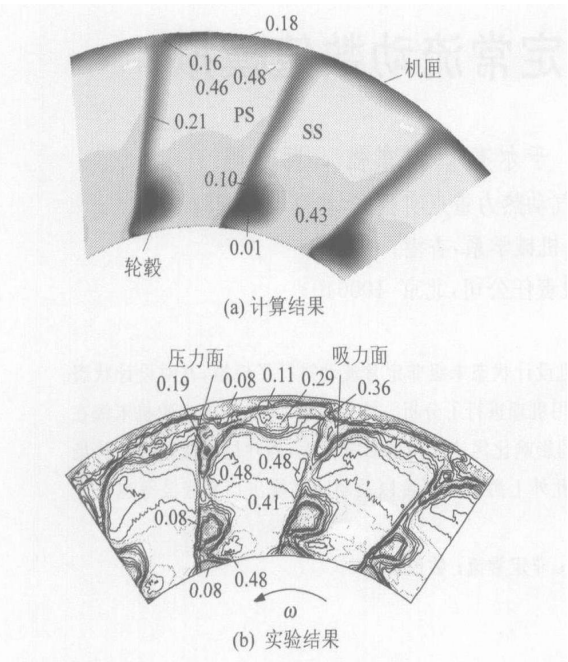


图 18 转子出口近失速状态轴向速度分布
Fig. 18 Distribution of axial velocity at exit of rotor in near stall condition

图 17 和图 18 分别显示了设计和近失速状态转子出口截面轴向速度分布, 可以看出计算与实验结果是一致的, 特别是近失速状态尖部和根部角区分离与实验吻合较好。从设计状态计算结果可以明显的看到叶尖泄漏涡的影响以及叶根尾迹区, 从近失速状态计算结果可以明显看到叶尖吸力面高阻滞角区以及叶根吸力面角区分离, 这些与文献[6]的论述是比较一致的, 也显示出该计算结果可用于本文带间隙转子三维流场分析。

4 结 论

本文重点研究了网格质量、网格匹配等网格因素对带间隙转子数值计算的影响, 编写了一个网格后处理程序, 通过调整叶尖间隙网格拓扑结构以及重新生成叶尖间隙内部网格解决了间隙与流道网格匹配的问题, 并对网格数目和计算精度的使用等问题做了说明, 获得如下结论:

(1) 网格质量影响数值计算的一个重要方面是二阶计算精度(基于分离隐式算法)对于网格正交性和网格疏密过渡的敏感, 通常体现为收敛情

况异常。

(2) 网格匹配情况对计算结果有不同程度的影响, 间隙内部流动细节的计算需要间隙与流道网格完全匹配。

(3) 基于本文的单转子压气机, 带间隙转子数值模拟的初始迭代应该采用一阶计算精度然后改为二阶计算精度。另外, 压升特性线不能准确的反映网格数目对计算结果的影响。

(4) 本文所使用的 C 网格基本可用于带间隙低速压气机转子的三维流场计算研究。

参考文献:

[1] Cumpsty N A. Compressor Aerodynamics[M]. Harlow, Essex, England: Longman Scientific & Technical, 1989.

[2] Denton J D. Loss Mechanisms in Turbomachines[R]. ASME 93- GT- 435.

[3] 邓向阳, 张宏武, 陈乃兴, 等. 叶顶间隙大小和壁面相对运动对低速轴流压气机孤立转子性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2004, 125(5): 773~775.

Deng Xiangyang, Zhang Hongwu, Chen Naixing et al. The Effect of Tip Clearance Gap Size and Wall Rotation on the Performance of a Low-Speed Axial Compressor Rotor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 125(5): 773~775.

[4] 蒋浩康, 马宏伟. 压气机转子三维紊流流场[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(3): 287~292.

Jiang Haokang, Ma Hongwei. Three-Dimensional Turbulent Flow Field of Axial Compressor Rotor Passage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(3): 287~292.

[5] Gupta A, Khalid S A, McNulty G S, et al. Prediction of Low Speed Compressor Rotor Flowfields with Large Tip Clearance[R]. ASME GT2003- 38637.

[6] 蒋浩康, 李雨春, 张洪, 等. 研究转子内流动的大尺寸轴流压气机实验装置和动态测量技术[J]. 航空动力学报, 1992, 7(1): 1~8.

Jiang Haokang, Li Yuchun, Zhang Hong, et al. A Large-Scale Axial Flow Compressor Facility and Dynamic Measurement Techniques for Rotor Flow Study[J]. Journal of Aerospace Power, 1992, 7(1): 1~8.

[7] 马宏伟. 压气机转子内三维流场实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1996.

[8] 马宏伟, 蒋浩康. 单转子压气机设计和近失速状态出口三维紊流流场[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(2): 153~158.

Ma Hongwei, Jiang Haokang. Three-Dimensional Turbulent Flow Field at the Exit of an Axial Compressor Rotor Passage in both Design and Near Stall Conditions[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(2): 153~158.