

叶片安装角槽式轮毂处理的三维数值模拟

北京航空航天大学 李 玲** 陆亚钧

【摘要】 采用三维定常不可压 N-S 方程对叶片安装角槽式的轮毂处理的叶栅通道进行了数值模拟, 分析了叶片安装角槽式的轮毂处理的扩稳机理, 在计算中采用了非交错网格的 SIMPLE 算法, 并解决了因使用非交错网格离散方程而带来的压力场振荡的抑制问题, 紊流模型采用 $k-\epsilon$ 两方程模型。

主题词: 压气机 轮毂 非定常流动 数值模拟

分类号: V211.15 O242.1

1 前 言

叶片安装角槽处理具有结构形式相对简单而且有发展前途的特点, 与其他形式的槽相比, 在各个转速下都能使失速裕度有很大的提高, 而且最大效率与实壁机匣相同^[1,2]。基于这一特点, 国内外不少学者对其进行了大量的实验研究, 试图通过一系列实验测试结果来解释叶片安装角槽处理的理论工作原理, 但迄今为止, 叶片安装角槽处理对抑制叶栅流道中出现的不稳定现象的基本原理还没有系统地建立起来。原因之一是一些流体动力学中简化的方法在此处无帮助。本文采用定常不可压时均三维 N-S 方程, 标准 $k-\epsilon$ 两方程紊流模型, 对引入叶片安装角槽轮毂处理后叶栅通道流场进行了数值计算。从理论计算的角度出发, 解释扩稳机理。同时为验证计算方法和计算程序的可靠性, 本文首先对二维凸缘通道和三维叶栅通道进行计算, 并用实验数据或他人的计算结果加以检验。

2 计算方法和控制方程

笛卡尔坐标下无量纲化的连续方程, 动量方程, $k-\epsilon$ 方程的统一形式可写成:

$$(\partial \alpha_i)(\rho u_i \Phi) = (1/Re)(\partial \alpha_i)[\tau^p(\partial \Phi \partial \alpha_i)] + S^p$$

利用张量、矢量理论, 推导出任意曲线坐标系下的通用输运方程:

$$\frac{\partial \rho U \Phi}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho V \Phi}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho W \Phi}{\partial \zeta} = \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right) \right] + JS^\Phi + JS^\beta$$

将方程进行离散, 对通用输运方程在微元控制体上积分整理得:

$$A_P \Phi_P = A_E \Phi_E + A_S \Phi_S + A_W \Phi_W + A_N \Phi_N + A_D \Phi_D + A_T \Phi_T + \int_V S^\Phi d\xi d\eta d\zeta + \int_V S^\beta d\xi d\eta d\zeta$$

其中方程推导过程及各变量的含义详见文献[3]。

离散形式的压力修正方程为:

1997 年 2 月收稿, 1997 年 4 月收到修改稿。

** 女 26 岁 博士生 北京航空航天大学 407 教研室 100083

$$A_P P_P' = A_E P_E' + A_W P_W' + A_N P_N' + A_S P_S' + A_D P_D' + A_T P_T' + m_p$$

在非交错网格上, 用上面的压力修正方程求解压力的修正量将会导致压力场的振荡, 因此需对其加以修正和改造, 具体过程详见文献[3]。

数值求解过程中边界条件的提法: 进口处给定进口边界上的流动参数分布, 紊流动能和紊流耗散率可采用经验公式间接估算。固壁处采用无滑移边界条件, 靠近壁面处应用壁面函数加以处理, 出口边界处所有参数均按导数条件给出, 即沿流向的参数梯度为零。周期边界处采用周期性边界条件。

3 计算结果与分析

为了验证计算方法和程序的可靠性和准确性, 首先, 对二维带凸缘的通道紊流流动加以计算, 最初的流动条件是均匀的静压力场加上一维的速度场。在通道下壁面上带有一个 10% 厚的圆弧凸缘, 两端壁之间的距离为凸缘的一个弦长, 整个计算域划分成 31×21 网格, 靠近端壁区的网格线加密。图 1 表示流场的静压等值线, 曲线的对称性表明了本文计算方法和计算程序的准确性, 这个二维通道流动的计算证实了本文计算方法和计算程序用于计算不可压流的可行性。



图 1 静压力等值线图

其次, 本文计算了 Flot 和 Papailiou 的直静叶叶栅通道三维紊流流动。叶栅由 NACA 65-12-A10-10 叶片组成, 安装角 15° , 展弦比为 2.1, 流动雷诺数为 389000。叶中截面 C_p 值分布见图 2, 并与其他人的结果相对比, 结果比较吻合。图 3 表示了 S_1 流面上在 44% 弦长的位置处距离叶背 20%、40%、60%、80% 各点处的速度值, 并与其他人的计算结果相对比, 结果十分符合。

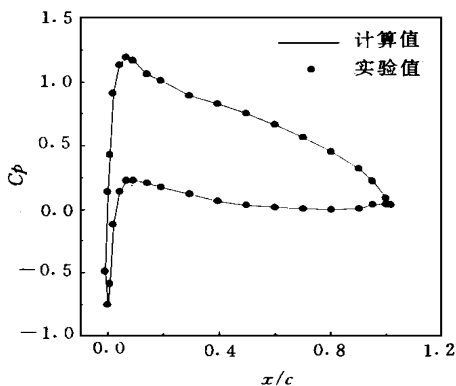


图 2 压力系数分布

最后, 在上面的叶栅通道中进行轮毂处理。计算中主要涉及开槽深度, 开槽宽度, 开槽的位置等几何参数对扩稳效果的影响。本文以处理槽深度 h 与叶高 H 之比为 15%, 处理槽宽度 w 与弦长 C 之比为 20%, 处理槽的轴向位置位于距叶片前缘 10% 的弦长, 末端距叶片尾缘 30% 的弦长为例, 在一个栅距内安装了两个叶片安装角槽, 来说明轮毂处理的工作原理。

图 4 绘出了叶片安装角槽示意图。图 5 为一个典型处理槽及其叶栅通道在 $X-Z$ 平面内的气流速度矢量图。从图中可以看到在槽内气流形成了回流, 强烈地影响着端壁区附面层的分布。首先, 端壁区的气流借助于栅后的高压及叶片到叶片的压力梯度, 在槽的中、后部进入处理槽。在叶片通道中, 后部压力最高的叶盆附近, 这种流动更为强烈, 将端壁的低能附面层及端壁区的高损失流带入处理槽中, 有效地改善了叶栅通道中后的阻塞。同时, 槽内气流在叶片通道前部的低压区向主气流喷射, 这种喷射在压力最低的叶背附近最强, 有效地吹出叶背和端壁区的附面

层,抑制了二次流,使叶片通道前部叶背处阻塞状况有所改善。另外,通过处理槽的回流提高了端壁区附面层的能量,使之不易分离或推迟分离,从而推迟了压气机不稳定工况的发生。气流反复进出处理槽,增加了气流的相对动压升,消除了阻滞流,改善了压气机的性能。

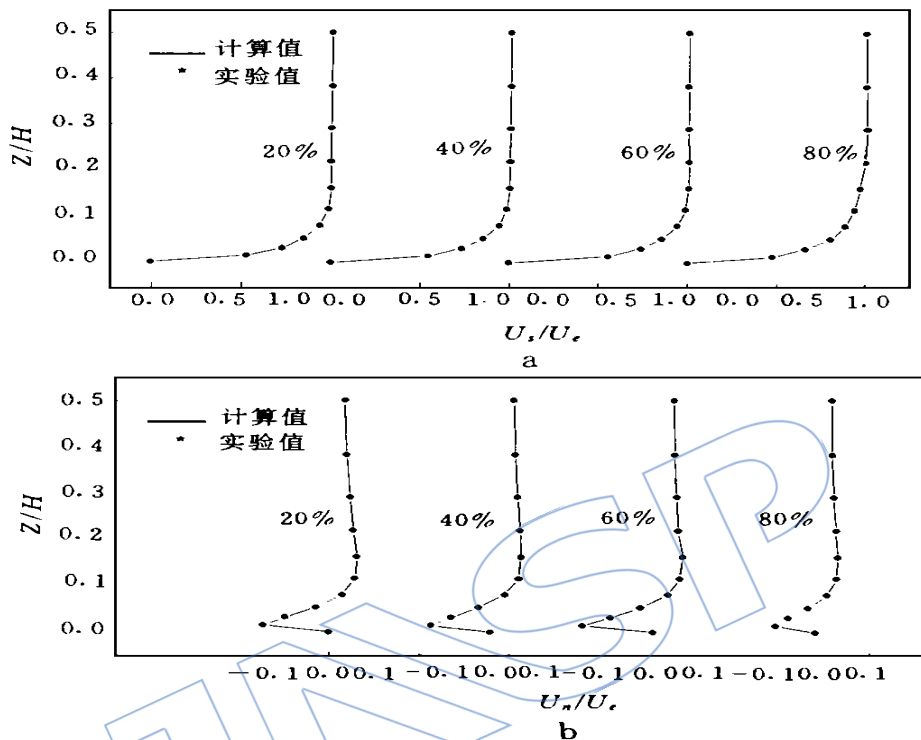


图3 在44%弦长处轴向(a)周向(b)速度曲线图

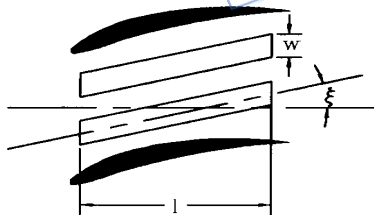


图4 叶片安装角槽示意图

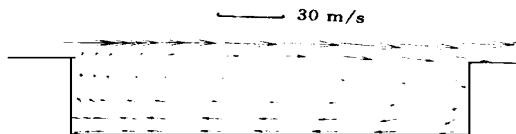


图5 $X-Z$ 平面槽内气流速度矢量

图6是无处理槽的原通道和带叶片安装角槽的叶栅通道在距叶根截面2%叶高处的 S_1 流面气流速度矢量图。同无处理槽相比,带处理槽的通道中气流在处理槽末端位置的吸力面附近速度明显降低,说明了有气流进入处理槽,改变了吸力面附近气流的分布,使气流不易在此处聚集,而压力面及大部分区域流场基本不变。

利用本文数值计算的方法可以定量地分析各种影响处理槽结构扩稳能力的主要几何参数:处理面积开放度、槽长、槽深及处理槽的相对位置。其结论是:处理面积开放度为65%~

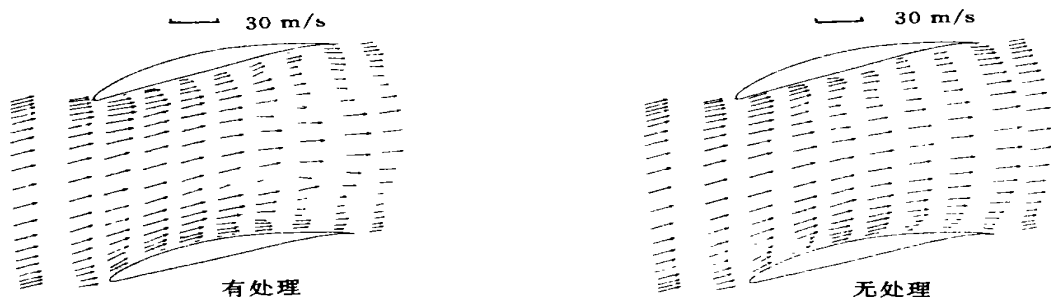


图 6 S_1 流面气流速度矢量

67% 效果好, 若处理面积开放度过大, 不但扩稳能力不会有明显增加, 反而会增加损失, 处理槽的轴向长度必须限制在一个叶片弦长的轴向投影之内, 短槽比长槽的效果好, 浅槽的作用优于深槽, 槽的位置基本上应处于与叶栅前缘并齐的地方, 适当地前移应会有很好的效果。

4 结 论

(1) 应用粘性紊流的三维数值计算方法对带叶片安装角槽式轮毂处理的叶栅通道进行了数值模拟, 得到了很有价值的结论, 为进一步分析轮毂处理的扩稳机理提供了新方法。并为处理机匣几何参数优化奠定了数值试验基础。

(2) 从计算结果可以清楚地解释轮毂处理的作用机理, 从而分析轮毂处理对抑制压气机不稳定工况发生, 扩大压气机的稳定工作裕度的机理。

(3) 提出的数值分析方法可以定量地确定各种因素对扩稳效果的影响大小, 因而可以在工程设计中得到广泛应用。

参 考 文 献

- 1 陆亚钧. 叶轮机非定常流动理论. 北京航空航天大学出版社, 1988
- 2 D. C. Prince, "A Study of Casing Treatment Stall Margin Improvement Phenomena," ASME-75-GT-60
- 3 李玲. 有粘条件下进气畸变沿压气机通道的传递: [学位论文]. 南京航空航天大学, 1995
- 4 Kirtley K R, Warfield M, et al. A Comparison of Computational Methods For Three-Dimensional, Turbulent Turbomachinery Flows. AIAA-86-1599
- 5 帕坦卡 SV, 张政译. 传热与流体流动的数值计算. 科学出版社, 1984

(责任编辑 魏星禄)

influence the distribution and magnitudes of bird impact loads, the coupling of the bird impact with blade deformation has a remarkable influence on the transient responses of the blade. A simple and effective method is provided to analyze the responses of blades with consideration of this coupling. Taking a model blade as an example, its influence extent is also sized up.

Key Words Blade Bird impact Coupling Response analysis

A DOUBLE- CHAMBER VAPORIZING COMBUSTOR WITH HIGH TEMPERATURE RISE AND UNIFORM EXIT TEMPERATURE FIELD

Chen Binglu, Tang Ming, Wu Erping

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT A new type of combustor, a double- chamber vaporizing combustor has been developed for heating apparatus of heating calibration tunnel. Its average exit temperature can reach 1850°C, the highest temperature rise from inlet to exit can reach 1600°C. In addition, this combustor has many other excellent characteristics, such as constant exit temperature field. Some experiences and keys to its development are described herein.

Key Words Combustion chambers Flame tubes Temperature field

3- D NUMERICAL SIMULATION OF BLADE- ANGLE SLOTTED HUB TREATMENT

Li Ling and Lu Yajun

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT Three- dimensional incompressible steady time- averaged N- S equation, continuity equation and $k- \epsilon$ turbulence model equations are applied to calculation of the flowfield in the cascade passage with blade- angle slotted hub treatment. The mechanism of extending stability by blade- angle slotted hub treatment is elaborated by means of a three- dimensional viscous numerical simulation. It is revealed that a pressure difference between suction and pressure sides induces a strong flow which enters in the rear of the slot and pours out from the front of the slot. This flow blows off the low energy boundary layer and retards stall emergence. The SIMPLE algorithm with non- stagger grid is employed to solve the problem of the pressure oscillation.

Key Words Compressor Wheel hub Treatment Nonsteady flow
Numerical simulation