

文章编号: 1000-8055(2000) 02-0133-04

利用数值模拟探讨新型轮毂处理的扩稳机理

李 玲¹ 于 清² 陆亚钧²

¹(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

²(北京航空航天大学 407 教研室, 北京 100083)

摘要: 采用三维定常 N-S 方程, 对带有轴向斜槽和圆弧斜槽轮毂处理结构的压气机叶栅通道内湍流流场进行了数值模拟, 计算中首次采用网格分区的方法, 解决了因处理槽结构复杂而带来的网格系统难以建立的问题。通过对两种不同形式的处理槽内复杂的流动以及与叶栅通道端部气流相互作用的流场的分析, 进一步揭示了传统的轴向斜槽处理轮毂和新型的圆弧斜槽处理轮毂的扩稳机理的联系与差别, 为轴流压气机扩稳方法提供理论依据。

关键词: 压气机; 轮毂; 数值模拟

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

1 前 言

轴向斜槽是一种传统的处理槽结构, 已经广泛地应用于许多机种的发动机上。人们对其进行了大量的实验研究, 不断地加深其扩稳机理的认识^[1~3]。圆弧斜槽是一种新型的处理槽结构, 曾在某单级跨音风扇上进行了实验研究, 获得了令人满意的结果, 在扩大风扇稳定工作范围 25% 的同时, 又提高了风扇的峰值效率 1.1%^[4]。本文采用定常 N-S 方程, 基于 RNG 方法的湍流模型, 首次对带有轴向斜槽和圆弧斜槽处理轮毂的压气机叶栅通道内湍流流场进行了数值计算, 通过比较, 深入探讨新型处理轮毂的扩稳特点。

2 计算方法和控制方程

任意曲线坐标系下的通用输运方程:

$$\frac{\partial \rho U \Phi}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho V \Phi}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho W \Phi}{\partial \zeta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\rho \alpha}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\rho \tau}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\rho \gamma}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right] + S^{\Phi} + JS^{\Psi}$$

式中: Φ 分别为变量 $u, v, w, k, \epsilon, \tau, S^{\Psi}$ 分别为各变量对应的有效扩散系数和源项。本文采用了基于 RNG 方法的湍流模型, 该模型能够更好地模拟处

理槽内的分离流。

本文采用了非交错网格系统, 并解决了因采用非交错网格系统带来的压力场振荡问题。

离散方程:

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

其中方程推导过程及各变量的含义详见文献[4]。

在计算中首次采用网格分区的方法, 将计算域分成几个相互独立的“区域”来解决几何边界复杂的问题, 网格生成和流动求解在各区域内彼此独立, 各区域间存在重叠的网格, 通过插值进行着流动参数的传递。

数值求解过程中边界条件的提法: 进口处给定速度, 紊流动能和耗散率可采用经验公式间接估算, 压力按外推方法获得。出口边界给定反压, 其余参数均按导数条件给出。固壁处采用无滑移边界条件, 周期边界及轮毂间隙处按周期性边界条件给定。

轴向斜槽与圆弧斜槽处理轮毂几何参数如图 1 和图 2 所示。本文对两种处理槽形式取 3 种处理槽深, 其中槽深 h 与半叶高 H 之比分别为: 20%, 14%, 10%。处理槽宽度 w 与弦长的轴向投影之比为 15%。处理槽的位置取两种方案: 一种

收稿日期: 1999-03-02; 修订日期: 1999-06-20

作者简介: 李 玲(1970-), 女, 清华大学水利水电工程系博士后

是中间槽,即槽的头部与叶片弦长轴向投影 5%

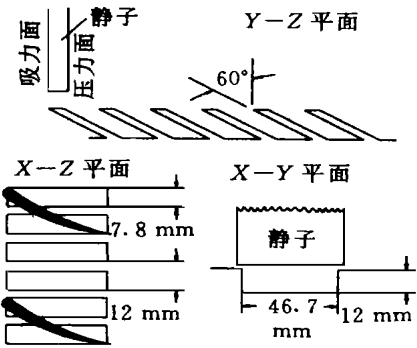


图 1 轴向斜槽处理轮毂示意图

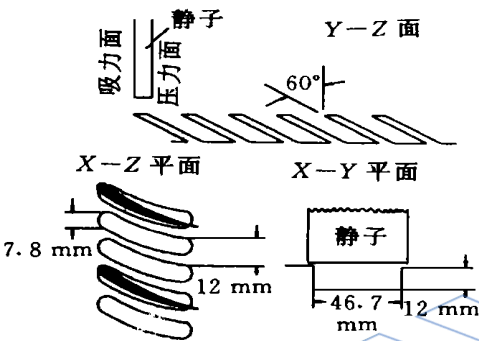


图 2 圆弧斜槽处理轮毂示意图

位置对齐,槽的尾部与叶片弦长轴向投影 95% 位置对齐。另一种是前伸槽,即槽向前移动 5% 弦长的距离。叶型采用 NACA65- 12- A 10- 10,以来流和叶片弦长计算的雷诺数为 400000 等情况一一进行数值计算。

3 计算结果与分析

3.1 出口轴向速度

图 3 和图 4 分别为圆弧斜槽式轮毂处理和轴

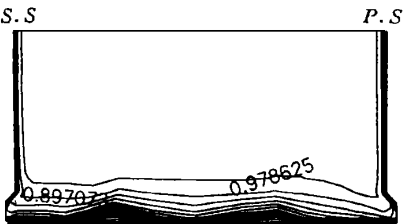


图 3 圆弧斜槽式处理轮毂

向斜槽式轮毂处理两种情况下叶片出口处轴向速度在 Y-Z 平面内的等值线图(用 U_m 无量纲化)。

经过两图的比较可以看出,带有圆弧斜槽式处理轮毂的叶栅通道出口处,轮毂边界层变得更平坦了,这说明圆弧斜槽更有助于消除叶片吸力面附

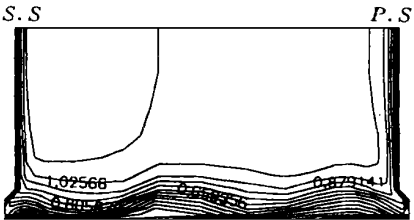
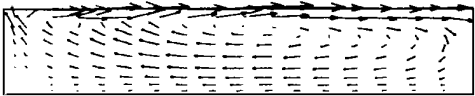


图 4 轴向斜槽式处理轮毂

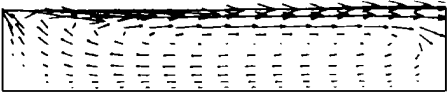
近的低速区,有助于气流的流动,减少了堵塞状况,圆弧斜槽处理轮毂具有更好的掺混效果并可以减少回流的损失。在压力面角区,受到了来自圆弧斜槽中气流的冲刷,圆弧斜槽在扩大压气机/ 风扇稳定工作范围,减少损失方面优于轴向斜槽。

3.2 轴向斜槽内的流动图画

为了便于叙述,将靠近叶片吸力面的槽称为“吸力槽”,靠近叶片压力面的槽称为“压力槽”。以处理槽深 10%, 中间槽和前伸槽为例,计算结果表明了吸力槽和压力槽与端部气流均形成了回流(见图 5 和图 6),气流在处理槽后部进入



(a) 吸力槽

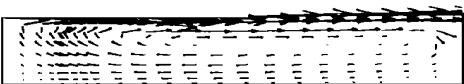


(b) 压力槽

图 5 中间槽内气流速度矢量图($h/H = 10\%$)



(a) 吸力槽



(b) 压力槽

图 6 前伸槽内气流速度矢量图($h/H = 10\%$)

处理槽, 同时在槽内压差的驱使下在处理槽前部喷出, 射向叶片通道。处理槽内形成了回流, 是轴向斜槽扩稳的主要方式。将叶片尾缘低能堵塞团压入处理槽内使叶片通道中后部的堵塞减缓, 同时, 处理槽内气流向外喷射, 有效地吹除了叶背和端部分离的附面层, 使叶片通道前部的堵塞状况得以改善, 这种通过处理槽的气流流动过程实际上是反复加能的过程, 它激励端部区域的低能流, 提高其能量, 使之不易分离或推迟分离。

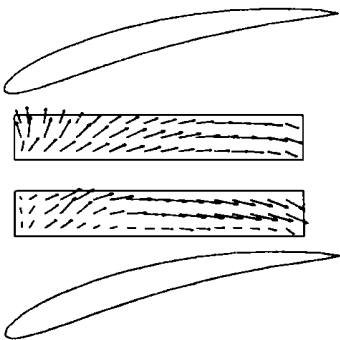


图 7 中间槽内气流在 $x-z$ 平面速度矢量图

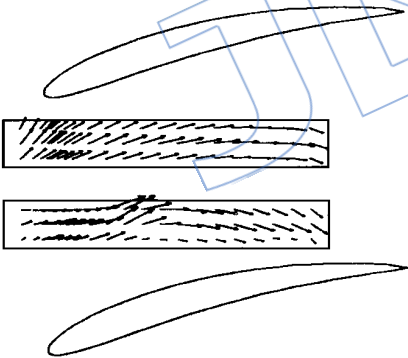


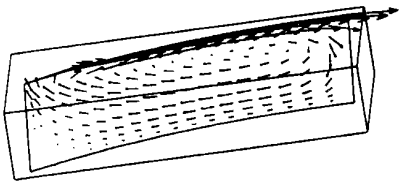
图 8 前伸槽内气流在 $x-z$ 平面速度矢量图

从图 7 和图 8 可以看出气流在处理槽的尾部进入处理槽, 在处理槽的前部向外喷射, 前伸槽情况下, 处理槽内气流在向外喷出的同时, 有效地吹除叶栅前的环壁附面层, 提高来流的均匀度, 改善叶片前的进气条件。

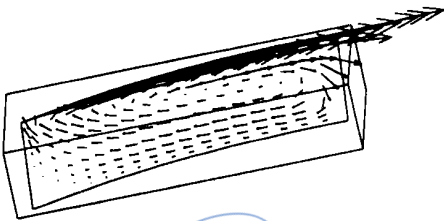
3.3 圆弧斜槽内的流动图画

从图 9 和图 10 可以看到处理槽内均形成了回流, 但与轴向斜槽相比, 由于处理槽本身形状特点, 使得处理槽内的流动已不是在平面内的流动, 而是在曲面上的流动。从进气位置处以切向速度

为主的流动逐渐折转到喷流位置上以轴向速度分量为主的流动, 这样能够提高处理槽内回流吹除端部附面层的效果, 有利于提高压气机的稳定工作范围。

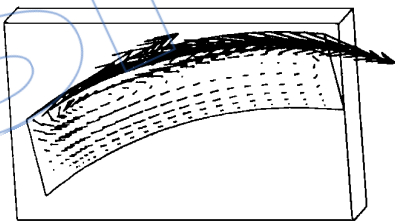


(a) 吸力槽

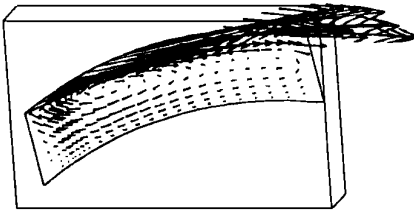


(b) 压力槽

图 9 中间槽内气流速度矢量图($h/H = 10\%$)



(a) 吸力槽



(b) 压力槽

图 10 前伸槽内气流速度矢量图($h/H = 10\%$)

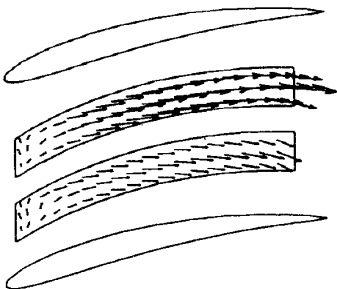


图 11 中间槽内气流在 $x-z$ 平面速度矢量图

从图 11 和图 12 可以看出气流明显地进出处理槽, 但与轴向斜槽相比, 入槽气流的比重较大, 这说明了圆弧斜槽的主要扩稳方式是将叶片尾缘

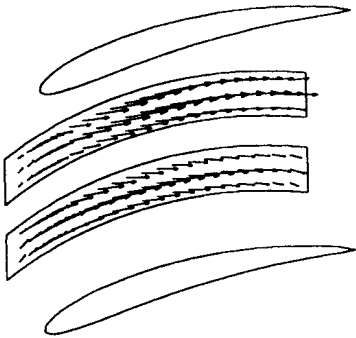


图 12 前伸槽内气流在 $x - z$ 平面速度矢量图

低能附面层压入处理槽内, 减少后部堵塞情况的发生。

3.4 处理槽几何参数对扩稳效果的影响

为衡量处理槽几何参数对扩稳效果的影响, 本文选择了处理槽内的流率作为指标, 槽内的流动可看成是从前到后的时间平均的压力差驱使气流流动。

从表 1 中数据可以看出, 处理槽的几何参数与通过处理槽内流率有很大关系, 位于叶弦中部、深槽内的流率较大, 对提高压气机失速裕度有很大帮助, 同时, 由于存在大的回流, 增加流动损失, 与轴向斜槽相比, 圆弧斜槽内流率要小, 对流动损失影响不大, 因而对效率影响不大。

表 1 处理槽内的流量占总流量百分率

处理槽形式	前 伸 槽			中 间 槽		
	$h/H = 10\%$	$h/H = 14\%$	$h/H = 20\%$	$h/H = 10\%$	$h/H = 14\%$	$h/H = 20\%$
圆弧斜槽内流率/(%)	4.0110%	4.201%	5.225%	4.2760%	4.3240%	5.665%
轴向斜槽内流率/(%)	4.1159%	4.255%	5.478%	4.3296%	4.4691%	5.803%

4 结 论

(1) 本文通过对两种不同形式的轮毂处理结构的对比分析, 表明了圆弧斜槽结构不但兼有轴向斜槽结构的扩稳方式, 同时又有其自身特点, 气流在槽内的流动从进气位置处以切向速度分量为主的流动逐渐折转到喷流位置上以轴向速度分量为主的流动, 提高处理槽内回流吹除叶片进口环壁附面层的效率, 更好地改善叶根处的流动环境。

(2) 处理槽内的回流是两种处理槽结构实现扩稳的原因所在, 与轴向斜槽结构相比, 圆弧斜槽内的回流量有所减少, 但圆弧斜槽结构特点使处理槽内的回流与叶栅通道内端壁区的气流相互作用更强烈, 这样不但大幅度地扩大失速裕度, 而且减少回流造成的能量损失, 对压气机效率影响不大。

(3) 本文对两种形式的处理轮毂结构及其各种方案的计算结果进行了分析, 可定性说明各种

处理形式及各种方案扩大压气机稳定工况能力的大小。计算的结果对建立扩稳机理, 各种形式的处理轮毂的优劣分析以及用数值实验筛选方案, 避免大量的真实实验以减少大量的人力、物力均能起到积极和有益的作用。

参 考 文 献

1 Takata H, Tsukuda Y. Study of the Mechanism of Stall Margin Improvement of Casing Treatment[R]. ASME 75- GT- 13

2 Johnson M C, Greitzer E M. Effects of Slotted Hub and Casing Treatments on Compressor Endwall Flow Fields[R]. ASME 86- GT- 247

3 Pandya I, Lakshminarayana B. Influnce of Casing Treatment On the Operating Range of Axial Compressors[R]. ASME 82- GT- 103

4 李玲. 轴流压气机机匣处理的数值模拟与实验研究[D]: [博士学位论文]. 北京航空航天大学, 1998

(责任编辑 杨再荣)

(英文摘要转第 141 页)

Experimental Investigation on Influence of Incidence on Performance of Turbine Stator Cascade

Gu Zhonghua, Han Wanjin, Zhou Xun, Lu Wencai, Wang Zhongqi

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An experimental investigation was carried out to examine the influence of incidence angle on the performance of an annular turbine stator cascade with controlled-outlet-angle guide vanes. The tests were made at seven incidence angles from $+25^\circ$ to -28° . The five-hole probe measurements were performed at two planes, one was located at the stator cascade exit and another at the guide vane exit. The static pressure distribution on the stator blade surface was also measured. The distributions of local energy loss coefficients with local static pressure coefficients, as well as the secondary flow velocity vector plots show in detail, how much the losses and the secondary flow are influenced by incidence angles. At positive incidence, the losses rise mainly due to the development of passage vortex. At negative incidence, the losses rise due to the separation of pressure surface boundary layer.

Key words: incidence angle; cascade; aerodynamic characteristics; experiments

(The chinese text of the following abstract is printed in PP133- 136)

Numerical Simulation Research on Mechanism of Stability Enhancement by a Dovel Hub Treatment

Li Ling¹, Yu Qing², Lu Yajun²

¹(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The three-dimensional viscous turbulent Reynolds averaged equations of motion and turbulent models based on RNG method are used to simulate the flow field in a blade row with axial skewed slot hub treatment and a blade row with curve skewed slot hub treatment. The difficulty in grid system establishment due to the complex structure in treatment slots is surmounted by using zonal-grids technology. By analyzing the mutual interaction between flows in the hub treatment slots and the endwall flows in blade row, the mechanism of the compressor stability enhancement is revealed both for traditional axial skewed slot hub treatment and novel curve skewed slot hub treatment.

Key words: compressor; wheel hub; numerical simulation