

评估周向槽机匣处理扩稳效果的新指标

上海交通大学 杜朝辉**
西北工业大学 刘志伟

【摘要】 在分析周向槽机匣处理扩稳装置结构的基础上,采用三维粘性数值分析方法对带周向槽机匣处理的叶栅通道进行了计算,获得一些有益的结果。首次提出用通过处理槽的气流流量评估周向槽机匣处理的扩稳效果和扩稳能力,分析讨论了处理装置的各种结构尺寸参数对扩稳效果的影响,并得到大量实验结果的证实。为工程设计压气机机匣处理装置提供了理论依据。

主题词: 周向槽 机匣处理 轴流式压气机 数值计算

分类号: TK474 81 TH443

1 引言

周向槽式机匣处理能在不降低效率或较小降低效率的情况下扩大压气机的稳定工作范围已得到大量实验研究及实际应用结果的证实^[1,2]。但到目前为止,几乎所有的研究都是利用实验完成的。理论分析通常采用简化的物理模型,在分析设计周向槽机匣处理装置结构时多依靠经验数据,因此在实际应用中不可避免地存在某些盲目性,使得处理装置不便于工程应用。采用粘性数值分析方法研究还没有见过报道,原因是在目前的条件下研究该复杂问题非常困难。为此,必须作某些必要的简化。

在分析对比大量实验研究结果的基础上,采用粘性数值计算的方法分析评估周向槽机匣处理的扩稳效果。根据周向槽机匣处理槽内气流流动的特点^[3](一种三维粘性非定常的复杂流动),作为研究的初步并考虑到目前的研究条件,认为气流粘性及三维性是其影响流场及扩稳效果的主要原因,其它的影响因素在本文的初步研究中暂不考虑。因此采用时均N-S方程,标准k- ϵ 模型,在定常不可压的情况下对引入机匣处理后叶栅通道内气流三元流场变化情况进行数值模拟,从而提出一种新的评估周向槽机匣处理扩稳效果的指标。

经过大量的数值计算,首次提出用通过处理槽的气流流量来评估周向槽机匣处理装置的扩稳效果。分析讨论了处理槽的几何尺寸参数对扩稳效果的影响,并与大量的实验结果作的对比,结论是令人满意的。本文提出的数值计算方法及气流流量评估指标可以用来估计判断周向槽机匣处理装置的扩稳效果和扩稳能力,为工程设计和使用机匣处理装置提供了新方法。

2 数值计算方法

对定常、不可压、时均N-S方程,k- ϵ 双方程紊流模型方程及连续方程,可以写成如下统一形式:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{U} \Phi - \Gamma^{\Phi} \operatorname{grad} \Phi) = S^{\Phi} \quad (1)$$

Φ 为任一输运量, $\vec{U}$ 为速度矢量, Γ^{Φ} 为扩散系数, S^{Φ} 为源项。

计算中采用任意非正交曲线坐标系 $\xi = \xi(x, y, z)$; $\eta = \eta(x, y, z)$; $\zeta = \zeta(x, y, z)$ 。经过变换^[1], 方程(1)可写成:

$$(1/J) \{ \partial(JF^{\xi})/\partial\xi + \partial(JF^{\eta})/\partial\eta + \partial(JF^{\zeta})/\partial\zeta \} = S^{\Phi} \quad (2)$$

式中 J 为雅可比系数。采用有限体积法离散方程, 根据奥氏公式将积分化为面积分

$$\iint (JF^{\xi} d\zeta \eta + JF^{\eta} d\xi \zeta + JF^{\zeta} d\xi d\eta) = \iiint S^{\Phi} d\xi d\eta d\zeta \quad (3)$$

A 为控制体的周边, V 为控制体的体积。经过推导^[1,4], 可得到控制方程的离散化形式如下:

$$A_P \Phi_P = A_U \Phi_U + A_D \Phi_D + A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + A_N \Phi_N + A_S \Phi_S + S_{\text{new}}^{\Phi} \quad (4)$$

其中系数详见文献[1]。方程(4)采用线—线欠松弛方法求解。

压力修正方程的推导及边界条件的处理详见文献[1, 4]。计算中主要涉及开槽深度、开槽宽度、开槽位置等几何参数对扩稳效果的影响。作为初步的研究及利于计算收敛, 计算中处理槽数定为两条。处理槽的几何尺寸及符号说明如图 1 所示。

(1) 处理槽深度 h (与叶高 H 之比): 深槽 $h/H = 16\%$; 浅槽 $h/H = 7\%$ 。(2) 处理槽宽度 w (与叶片弦长 c 之比): 宽槽 $w/c = 20\%$; 窄槽 $w/c = 13\%$ 。(3) 处理槽轴向位置 (处理槽中心线距前缘的间距 l 与弦长 c 之比) 见表 1。

表 1 处理槽轴向位置

	前部处理	中部处理	后部处理
第 1 条处理槽	26%	46%	67%
第 2 条处理槽	52%	73%	93%

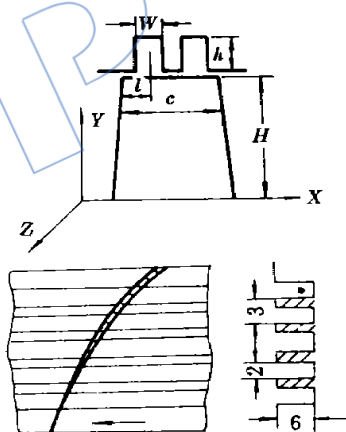


图 1 处理装置结构简图

计算中的叶型是西北工业大学叶轮机实验室单级轴流压气机静子叶片型面, 计算网格为 $45 \times 21 \times 15$ 。以来流和叶片弦长计算的 $Re = 4 \times 10^5$ 。

3 计算结果及讨论

3.1 处理槽几何参数对扩稳能力的影响

作为度量周向槽机匣处理扩稳效果的统一标准, 本文首次提出用通过处理槽的气流流量来定量说明处理装置的扩稳效果, 即流通量

$$m = \int W dA$$

式中 A 是沟通处理槽的叶片压力面与吸力面之间的面积, W 是 A 上的法向速度。 m 与 A 之比 m/A (本文称之为流通比) 的大小可以有效地说明其诱导气流^[3]的强弱, 即扩稳效果的优劣。表 2 是不同几何尺寸及处理位置的处理槽在相同工况下数值计算的结果。

表 2 各种处理槽的流通能力

处理槽	前宽浅	前宽深	中宽浅	中宽深	后宽浅	后宽深	前窄浅	前窄深	中窄浅	中窄深	后窄浅	后窄深
流通量	85	162	96	274	90	272	30	126	64	206	26	111
面 积	32	85	32	85	32	85	38	86	38	86	38	86
流通比	2.66	2.75	3.0	3.22	2.8	3.2	0.79	1.47	1.68	2.39	0.68	1.29

注: 宽表示宽槽, 窄表示窄槽; 浅表示浅槽; 深表示深槽; 前、中、后分别表示处理槽位于叶片弦长的前部、中部、后部。

经过分析比较可以有这样的认识: (1) 对宽处理槽系列, 3 种情况都是深槽的流通能力大于浅槽(2.75→2.66; 3.22→3.00; 3.2→2.8), 但效果并不显著。而在相同的处理位置及处理槽深, 宽槽的作用明显优于窄槽(2.66→0.79; 3.00→1.68; 2.8→0.68) 这说明处理槽宽度对处理效果的影响要强于深度对扩稳效果的影响。但必须指出的是宽处理槽会引起较大的回流损失^[5]。(2) 对窄处理槽系列, 同样是深槽的流通强度大于浅槽(1.47→0.79; 2.39→1.68; 1.29→0.68), 作用非常明显, 即在一定槽宽时, 处理槽深度的作用占主导地位。对实用效果而言, 为了减少损失, 一般处理槽都较窄。本算例中的窄处理槽更接近于实际, 所以应充分注意处理槽深度的作用。(3) 对相同的处理深度, 宽槽的作用强于窄槽, 对浅处理槽更为明显。(4) 对各种处理型式, 轴向位置的影响效果是一致的。即中部处理效果最佳, 前后部次之。为了得到好的处理效果, 一般在设计周向槽处理机匣结构时, 处理槽应足够多, 并应在包括叶片中部区域在内的全部弦长都处理。

3.2 与实验结果对比

为验证理论计算结果的正确性, 本文与大量的实验测量结果做了对比。这里给出两个例子来说明。需要指出的是, 这里的实验结果并没有得到本文的计算验证, 仅仅是定性的对比。以相似的结论说明本文计算方法及指出的扩稳指标的正确性。

文献[6]的实验中, 周向处理槽宽度为 0.318cm, 处理全部弦长需开 9 条处理槽。实验中采用打开某几个处理槽来确定开槽数, 开槽位置, 开槽深度等对失速点流量的影响, 结果如表 3 所示。

表 3 随开槽轴向位置及槽深改变失速点流量的减少 100%

开槽位置	2~9	2~9	2~9	1~2	1~5	2~5	2~6	3~7	2~6
槽 深	0.381	1.143	2.896	1.143	1.143	1.143	1.143	1.143	0.381
70% 转速	1.5	3.6	5.7	- 0.6	2.8	4.2	5.8	5.5	3.9
100% 转速	3.5	1.6	7.2	0	2.4	3.9	4.4	4.1	2.2

可以看到, 对于 2~9 槽处理, 随深度从 3.18mm 增加到 28.96mm, 其失速点流量从 3.5% 减少到 7.2%, 效果很好。对 2~6 槽处理结果也是如此(深度 3.81mm~ 11.43mm, 失速点流量 2.2%~ 4.4%)。这说明深槽的扩稳效果比浅槽好。对于相同的槽深 11.43mm, 中部 2~6、3~7 槽处理效果最好(4.1%、4.4%), 而前部的 1~2 槽处理基本没有效果。在表中的各种情况下, 最深的 28.96mm, 2~9 槽处理效果最佳达 7.2%。所以为了获得最大量的稳定裕度提

高, 应该用深槽处理包括叶片中部在内的大部分弦长区域。

图 2 是稳定裕度改进量与槽深的实验曲线, 图 3 是最小损失系数 $(P_{\text{进}}^* - P_{\text{出}}^*) / (0.5 \rho U_{\text{进}}^2)$ 与转速的关系。实验是在西工大单级轴流压气机上完成的, 见文献[3]。图中(A)槽深 6mm; (B)槽深 6mm; (C)槽深 9mm; A、B、C 槽宽均为 2mm; (D)槽深 6mm, 槽宽 3mm。

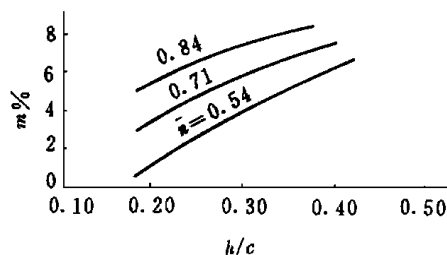


图 2 稳定裕度随处理槽深的变化

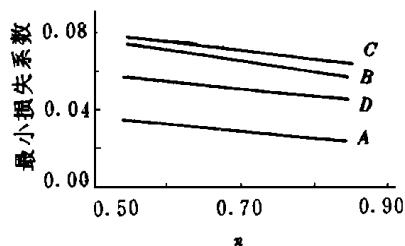


图 3 最小损失系数随槽深、槽宽的变化

在一定的相对转速下, 随槽深的加大稳定裕度的改进量也随之增大, 这种趋势在低转速下表现得尤为明显。在一定槽深情况下, 稳定裕度改进量随相对转速的提高而增大, 这一变化趋势与其它大量实验结果是一致的。对于损失变化, 当槽宽一定时, 随着槽深的加大, 最小损失系数也加大, 与其相应的峰值效率减小。若槽深一样, 宽度增加, 则损失加大。

综上所述, 理论计算的结果与实验研究的结论是一致的。因此, 本文指出的方法及评估扩稳效果指标可以用来指导工程设计周向槽机匣处理装置。

参 考 文 献

- 1 杜朝辉 轴流压气机槽式机匣处理的理论和实验研究 [博士学位] 西北工业大学, 1992
- 2 Prince D C, W isler D C Jr, Hilvers D E. Study of Casing Treatment Stall Margin Improvement Phenomena. NASA - CR-134552, 1974
- 3 刘志伟 关于周向槽机匣处理的若干观测 西北工业大学学报, 1985, 3(1)
- 4 帕坦卡, 张政译 传热与流体流动的数值计算 科学出版社, 1984
- 5 Rhie C M, Chow W L. Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separating Flow. Jour., 1983, 21(11)
- 6 Bailey E E. Effects of Grooved Casing Treatment on the Flow Range Capability of a Single Stage Axial Flow Compressor. NASA TM X- 2459, 1972
- 7 杜朝辉, 刘志伟 周向槽机匣处理的三维理论分析 航空动力学报, 1993, 8(4)

(责任编辑 魏星禄)

from it, and the rebound angle is less than the impact angle. (3) The velocities of the particles on the pressure side is lower, while those on the suction side is higher relatively.

Key words Fans High-speed photography Gas-solid flow Experiment

AN EXPERIMENT ON AEROELASTIC STABILITY OF A HINGELESS ROTOR MODEL IN HOVER

Xia Ping and Xu Guiqi

(1st Dept., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT A 2 m diameter, soft-inplane or stiff-inplane, isolated hingeless rotor model in hover has been tested to investigate its aeroelastic stability. The hingeless rotor blade is constructed with flap-lag-torsion coupling. The investigation aims at effects of structural and dynamic parameters, such as the collective pitch, precone, sweep, blade lag frequency and rotor rotational speed on the aeroelastic stability. A new and simple technique is applied to the tests so that the excitation of cyclic pitch is accomplished at the blade lag regressing frequency in vertical direction. The experiment shows that the aeroelastic stability of the hingeless rotor blade in hover is slightly influenced by the rotor rotational speed and the blade sweep, but strongly influenced by the collective pitch, precone and blade lag frequency.

Key words Hovering Rotor wings Rigid rotors Stability tests Elastic stability

A NEW INDEX FOR EVALUATING EFFECTS OF CIRCUMFERENTIAL GROOVED CASING TREATMENT ON EXTENDING STABILITY

Du Zhaohui

(2nd Dept., Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Liu Zhiwei

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

ABSTRACT Based on the analysis of structural features of the circumferential grooved casing treatment, 3-D incompressible, steady, time-averaged N-S equation, continuity and $k-\epsilon$ two equation turbulence model equations are successfully applied to the flow field calculation in the cascade with the circumferential grooved casing treatment. The flux of the gas through the treatment groove is proposed as a new index which can quantitatively evaluate the effectiveness and the capability of extending stability by circumferential grooved casing treatment. The effects of structural parameters and treatment positions on the effectiveness of extending stability are analysed and discussed. The conclusions are proved by a great deal of testing results. The method and technique can be applied to analysis and design of the casing treatments in a compressor.

Key words Slots Cases Axial flow compressors Numerical computation