

倾对某单排叶片进口流场的影响机理

许 涵¹, 朱 芳², 金东海¹, 桂幸民¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 上海电气电站技术研究与发展中心 燃气轮机技术研究所, 上海 201612)

摘 要: 采用降维的方法考察了倾对某单排叶片进口流场的影响,利用进口流场的变化解释了倾改善端壁流动的机理.通过推导周向平均的 Navier-Stokes(N-S)方程得到了周向不均匀源项的表达形式.在均匀来流条件下,周向不均匀源项的径向和周向分量在叶片通道前已经存在,表征了进口流场周向不均匀性的强弱.通过对不同倾叶栅模型的三维数值计算和周向平均后处理发现,倾会改变叶片通道进口周向不均匀源项的大小和分布,引进口气流的径向迁移,其中正倾使进口气流有从叶根到叶尖的迁移趋势,从而可以改善端壁的流动,负倾的作用与之相反.来流马赫数、叶片稠度和安装角等气动设计参数也会对倾叶片进口周向不均匀源项产生影响,过高的来流马赫数和过大的安装角均不利于体现倾对进口流场的作用效果.

关 键 词: 倾; 进口流场; 周向不均匀; 降维; 数值模拟

中图分类号: V232.4 **文献标志码:** A

Mechanism for the effect of lean on the inlet flow
of a single blade row

XU Han¹, ZHU Fang², JIN Dong-hai¹, GUI Xing-min¹

(1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Gas Turbine Technology Institute,
Shanghai Electric Power Generation Research and Development Center, Shanghai 201612, China)

Abstract: The effect of lean on the inlet flow of a single blade row was studied with the dimensionality reduction method, and the mechanism for lean improving endwall condition was explained by the inlet flow change. The circumferential fluctuation (CF) source items were obtained through the derivation of the circumferentially averaged Navier-Stokes (N-S) equations. The radial and circumferential components of the CF sources existed yet before the blade passage with a uniform incoming flow, representing the magnitude of the inlet CF. Different leaned cascade models were numerically calculated and circumferentially averaged. The results indicate that lean could change the magnitude and distribution of the CF source items before the blade passage, leading to the radial migration of the inlet flow. The positive lean diverts the inlet flow from hub to tip and improves the endwall condition, while the negative lean has a contrary effect. The inlet CF sources are also affected by the aerodynamic parameters such as the inlet Mach number, blade solidity and stagger angle. Neither an over-high inlet Mach number nor an over-wide stagger angle is good for the effect of blade lean on the inlet flow.

Key words: lean; inlet flow; circumferential fluctuation;
dimensionality reduction; numerical simulation

英文符号

x	轴向坐标
r	径向坐标
m	流向坐标
w	相对速度
v	绝对速度

希腊字母

ρ	密度
τ_{ij}	黏性应力张量
φ	周向角度

上下标

x	轴向
r	径向
u	周向
m	流向

p	静压
e	单位质量的能量
i	单位质量的焓
q	热流
N	叶片数

ω	角速度
σ	流线角度

p	压力面
s	吸力面
"	周向脉动

倾作为航空发动机叶片的一种三维造型形式,在控制载荷分布和端壁损失方面具有明显的效果. Harrison^[1]在 1992 年通过实验发现正方向的倾(叶片吸力面与端壁夹角为钝角)可以减小端壁区的损失. Sasaki 等^[2]在 1998 年对比了掠和倾对压气机叶栅特性的影响,得到了相同的实验结果. 在工程实际中,反角(垂直于弦向的倾)作为倾的一种形式已经得到了广泛的研究和应用^[3-6].

然而,对于倾的作用机理目前还没有明确的结论. Vavra^[7]和 Smith 等^[8-9]研究了叶片倾角对流动径向平衡的影响,发现径向压力梯度与叶片倾角之间存在比例关系. Gummer 等^[10]进一步指出倾的主要作用机制是在流动的径向平衡中引入了一个径向的叶片力,从而改变了流管和静压的分布轮廓,但没有考虑进口流场变化带来的影响. D'Ippolito 等^[11]通过数值模拟发现了倾叶栅进口流场的不均匀性和由此引发的气流迁移,但没有给出诱发这一现象的机理,并且没有注意到由此带来的进口迎角的变化.

事实上,通过对压气机无黏动量方程的降维分析可知,通道内压力场的周向不均匀以无黏叶片力的形式作用于流体,这种无黏叶片力的作用会向上游延伸,从而造成进口流场的周向不均匀^[12],这也是本文所探讨的均匀来流条件下单排叶片进口流场周向不均匀的来源. 倾的引入改变了叶片进口的周向不均匀性,流动在新的周向不均匀性下建立起新的平衡,使得来流的迎角在前缘前发生改变,从而直接影响到叶片特性. 朱芳^[13]通过周向平均降维的方法研究了掠对进口流场的影响. 本文在此基础上继续利用降维的思

想探究了倾叶片进口流场周向不均匀性的产生及其对流动的作用机理.

1 研究对象及研究方法

1.1 倾的定义及叶栅模型

本文利用的倾的定义是:叶片基元沿周向移动形成倾,倾角定义为叶片前缘线与通过叶根截面前缘点的径向线之间的夹角. 当吸力面与端壁夹角为钝角时称为正倾(positive lean,简写为 PL)反之称为负倾(negative lean,简写为 NL). 本文所采用的叶栅模型以叶根处倾的性质进行命名.

叶栅模型的基元叶型采用圆弧中弧线,厚度分布规律与 MAN GHH 1-S1 可控扩散叶型相同^[14],叶栅的基本参数见表 1. 选择展弦比为 6 是为减小端壁区边界层的影响范围,使叶栅中部近似可视为无黏流动. 选取不同的安装角、稠度和来流 Ma 旨在考察不同气动设计参数对倾叶片进口流场的影响.

表 1 叶栅基本参数
Table 1 Basic parameters of cascade

参数	数值
弦长/mm	100
展弦比	6
叶型弯角/(°)	0,30
安装角/(°)	37,42,47
进口 Ma	0.15,0.35,0.62
稠度	1.18,1.47,1.60
最大相对厚度(百分比弦长)/%	10.64

1.2 数值模拟与周向平均后处理

三维数值模拟利用商用 CFD 软件 NUMECA 完成^[15], 采用全叶高计算, 计算网格如图 1 (a)所示. 网格拓扑结构采用 HOH 型, 如图 2 所示, 网格数为1376 595, 对于不同的计算模型保持网格密度一致. 进口边界条件给定总温(293 K), 总压(101 325 Pa)和来流速度方向, 出口给定流量, 以保证来流 Ma . 采用 Spalart-Allmaras 湍流模型, 计算中保证固壁表面第一层网格的 $1 < y^+ < 10$.

在三维数值模拟计算结果的基础上, 利用双线性差值法得到周向平均网格点上的流场参数, 并通过数值计算得到周向平均动量方程中各项的值. 周向平均网格如图 1 (b)所示, 共6381个网格点.

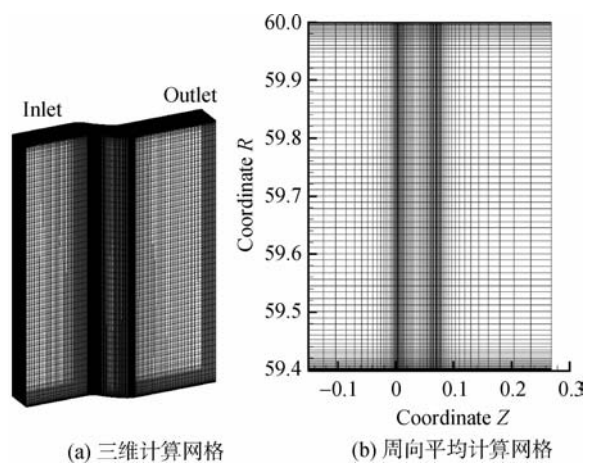


图 1 计算网格
Fig. 1 Computational grids

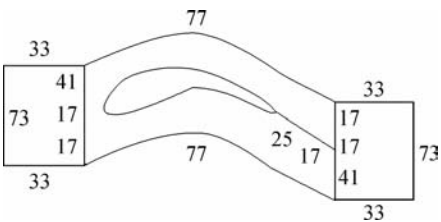


图 2 网格拓扑结构
Fig. 2 Topology of the grids

2 进口流场周向不均匀性的产生

导致叶片进口流场周向不均匀的因素有很多, 包括来流不均匀, 上游叶片尾迹的影响和下游传递的位势干扰等. 然而在单排叶片、均匀来流的情况下, 进口流场的周向不均匀性主要来源于叶

片通道内部的周向不均匀性向上游的延伸, 是几何非对称流场的固有特性.

沿周向对 Navier-Stokes(N-S)方程进行通道平均和密度平均得到相对坐标系下的周向平均控制方程^[16]

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{1}{br} \cdot \frac{\partial}{\partial x} [br(\mathbf{F} - \mathbf{F}_v)] + \frac{1}{br} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [br(\mathbf{G} - \mathbf{G}_v)] = \mathbf{S} + \mathbf{F}_{ib} + \mathbf{F}_{vb} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho w_x \\ \rho w_r \\ \rho w_u \\ \rho e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho w_x \\ \rho w_x w_x + p + \rho w''_x w''_x \\ \rho w_r w_x + \rho w''_r w''_x \\ \rho w_x w_u + \rho w''_x w''_u \\ \rho i w_x + \rho i'' w''_x \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho w_r \\ \rho w_x w_r + \rho w''_x w''_r \\ \rho w_r w_r + p + \rho w''_r w''_r \\ \rho w_u w_r + \rho w''_u w''_r \\ \rho i w_r + \rho i'' w''_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xr} \\ \tau_{xu} \\ \tau_{xx} w_x + \tau_{xr} w_r + \tau_{xu} w_u - q_x \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xr} \\ \tau_{rr} \\ \tau_{ru} \\ \tau_{xr} w_x + \tau_{rr} w_r + \tau_{ru} w_u - q_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\rho(w_u + \omega r)^2 + p + \rho w''_u w''_u - \tau_{uu}}{r} \\ \frac{-\rho w_r(w_u + 2\omega r) - \rho w''_r w''_u + \tau_{ru}}{r} \\ \rho w_r \omega^2 r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{ib} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho f_{ib,x} \\ \rho f_{ib,r} \\ \rho f_{ib,u} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{vb} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho f_{vb,x} \\ \rho f_{vb,r} \\ \rho f_{vb,u} \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中省略了通道平均量及密度平均量的上标, 其

中 U 为守恒项, F 和 G 为对流项, F_v 和 G_v 是黏性项, S 是与离心力和空间脉动有关的源项, F_{ib} 是无黏叶片力, F_{vb} 是黏性叶片力, b 是与周向叶片厚度有关的阻塞系数, 其定义如下:

$$b = \frac{\varphi_s - \varphi_p}{2\pi/N} \quad (2)$$

其中 $\varphi_s - \varphi_p$ 代表周向的叶片厚度, N 是叶片数. 阻塞系数在叶片内部小于 1, 在叶片外部等于 1.

对于无黏流来说, 利用叶片中弧面的概念可以得到周向平均流面的轴向、径向及周向平衡方程组

$$\begin{cases} \frac{1}{b\rho} \cdot \frac{\partial(b\rho)}{\partial x} = -\frac{w_m^2}{r_m} \sin\sigma - w_m \cos\sigma \frac{Dw_m}{Dm} + P_x + f_{ib,x} \\ \frac{1}{b\rho} \cdot \frac{\partial(b\rho)}{\partial r} = \frac{v_u^2}{r} + \frac{w_m^2}{r_m} \cos\sigma - w_m \sin\sigma \frac{Dw_m}{Dm} + P_r + f_{vb,r} \\ \frac{w_m}{r} \cdot \frac{D(V_u r)}{Dm} = P_u + f_{ib,u} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $f_{ib,x}$, $f_{vb,r}$, $f_{ib,u}$ 为无黏叶片力源项

$$\begin{cases} f_{ib,x} = \frac{N}{2\pi b\rho} \left(p_s \frac{\partial\varphi_s}{\partial x} - p_p \frac{\partial\varphi_p}{\partial x} \right) \\ f_{ib,r} = \frac{N}{2\pi b\rho} \left(p_s \frac{\partial\varphi_s}{\partial r} - p_p \frac{\partial\varphi_p}{\partial r} \right) \\ f_{ib,u} = \frac{N}{2\pi r b\rho} (p_p - p_s) \end{cases} \quad (4)$$

式中 P_x , P_r , P_u 为周向不均匀源项在轴向、径向和周向的 3 个分量

$$\begin{cases} P_x = -\frac{1}{rb\rho} \left[\frac{\partial}{\partial r} (rb\rho w_r'' w_x'') + \frac{\partial}{\partial x} (rb\rho w_x'' w_r'') \right] \\ P_r = -\frac{1}{rb\rho} \left[\frac{\partial}{\partial r} (rb\rho w_r'' w_r'') + \frac{\partial}{\partial x} (rb\rho w_r'' w_x'') - b\rho w_u'' w_u'' \right] \\ P_u = -\frac{1}{rb\rho} \left[\frac{\partial}{\partial r} (rb\rho w_r'' w_u'') + \frac{\partial}{\partial x} (rb\rho w_u'' w_r'') + b\rho w_r'' w_u'' \right] \end{cases} \quad (5)$$

大部分研究只局限于叶片力而忽视了进口不均匀源项的影响^[17-18]. 朱芳^[13]发现, 当某个方向的无黏叶片力为零时, 进口周向不均匀源项在该方向的分量也为零, 而周向不均匀源项的大小也与无黏叶片力有关. 从而可以认为是在叶片内部无黏叶片力的影响下产生了进口周向不均匀源项, 从而使进口流场具有周向不均匀性.

3 倾叶片进口流场的周向不均匀性及其对流动的影响

3.1 无气动负荷叶栅

首先考虑没有气动负荷的叶片, 取叶型弯角为 0° , 分别对进口气流角为 0° , 57° 的直叶栅正倾 20° , 给定来流迎角为 0° 和进口 Ma 为 0.15 流场进行三维数值计算, 并将计算结果进行周向平均处理. 为考察叶片通道进口的流场特征, 取前缘前 1% 弦长轴向位置处的周向平均流场参数进行对比分析. 算例以“叶型弯角-进口气流角-倾角”的方式命名, 如“0-57-PL20”即代表叶型弯角为 0° , 进口气流角为 57° , 正倾 20° 的叶栅算例.

如图 3 所示, 图 3(a)、图 3(b) 进口气流角分别为 0° 和 57° 无倾直叶栅 50% 展高处的静压分布等值线图. 可以明显地看到, 图 3(a) 中叶片通道内的流场是完全对称的, 吸压力面没有压力差; 图 3(b) 中由于通道几何的非对称性, 其流场也是非对称的, 吸压力面存在压力差. 这种差异将直接导致其进口流场周向不均匀性的不同.

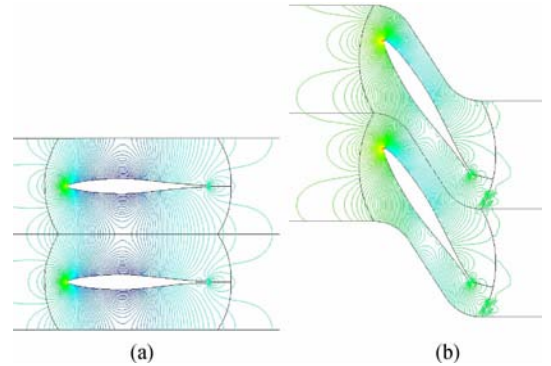


图 3 静压分布等值线图

Fig. 3 Pressure distribution at mid-span

图 4~图 7 分别给出了 4 种叶片前缘前 1% 弦长轴向位置处周向不均匀源项的径向和周向分量 P_r , P_u 以及进口气流的径向速度 V_r 和迎角 i_{in} 沿展向的分布规律.

先讨论 P_r 带来的影响. 对于倾角为零的直叶栅 0-0-ST 和 0-57-ST (其中 ST 代表倾角为零的直叶栅), 在吸压力面有

$$\frac{\partial\varphi_{p,s}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial\varphi_s}{\partial x} = \tan\beta_s, \quad \frac{\partial\varphi_p}{\partial x} = \tan\beta_p \quad (6)$$

由式(4)可知此时不存在径向无黏叶片力, 从而进口 P_r 为零. 当引入本文所定义的倾角时, 由于

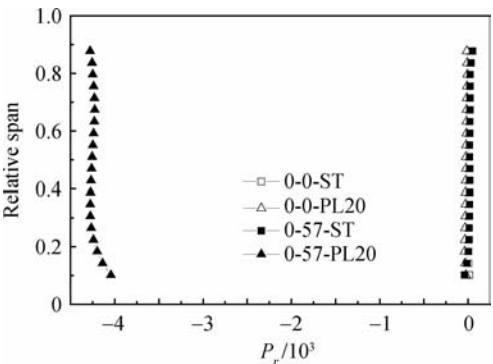


图 4 无气动负荷下进口 P_r 的展向分布
Fig. 4 Spanwise distributions of inlet P_r without aerodynamic load

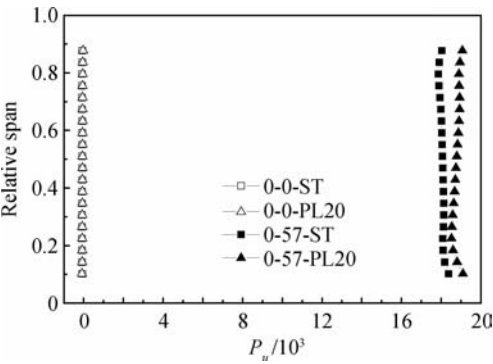


图 5 无气动负荷下进口 P_u 的展向分布
Fig. 5 Spanwise distributions of inlet P_u without aerodynamic load

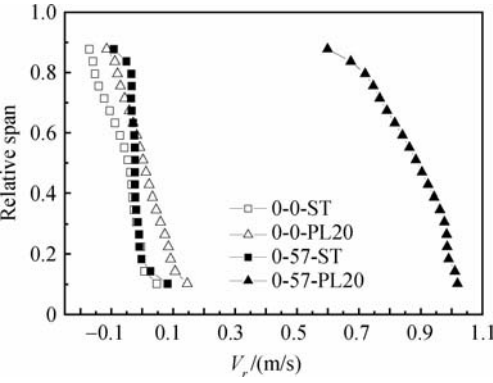


图 6 无气动负荷下进口 V_r 的展向分布
Fig. 6 Spanwise distributions of inlet V_r without aerodynamic load

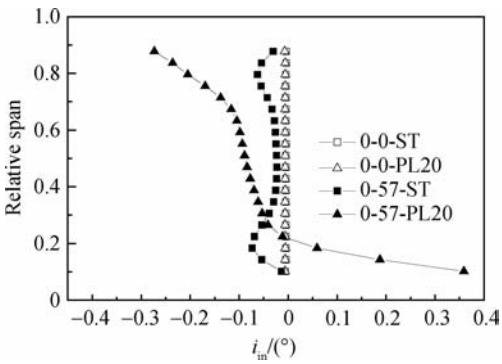


图 7 无气动负荷下进口迎角的展向分布
Fig. 7 Spanwise distributions of incidence angle without aerodynamic load

压力面不存在压力差,由式(4)可知其径向无黏叶片力依然为零,进口 P_r 也为零。而 0-57-PL20 吸压力面存在压力差,从而在通道内部存在径向的无黏叶片力,作用于进口产生负的 P_r 。 P_r 为负表明进口径向压力梯度为负,于是气流在前缘前有从根到尖的迁移趋势($V_r > 0$),导致迎角从根到尖逐渐减小。

P_u 的分析相对简单:对于几何对称的 0-0-ST 和 0-0-PL20,吸压力面不存在压力差,由式(4)可知其周向无黏叶片力为零,进口 P_u 也为零。而对于几何非对称的 0-57-ST 和 0-57-PL20,吸压力面的压力差使得其周向无黏叶片力不为零,从而在进口产生正的 P_u 。而 P_u 与迎角的关系是: P_u 越正,迎角越负^[13]。从而与 0-0-ST 相比,0-57-ST 的迎角在全展高范围都有变负的趋势,而倾的引入会增加这种趋势。

通过以上分析可知,叶片进口的流动通常都会存在显著的周向不均匀性(几何完全对称的情况除外),在无黏叶片力的作用下产生的进口周向不均匀源项 P_r 和 P_u 是诱发进口气流的径向迁移,改变迎角特性的关键因素。

3.2 有气动负荷叶栅

给定叶型弯角为 30° ,进口气流角为 57° ,来流 Ma 为 0.15,名义迎角为 0° ,对不同叶片倾角($0^\circ, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ$)的叶栅模型进行三维数值模拟并对计算结果进行周向平均处理。图 8 所示为直叶片在 50%展高处基元流动的静压分布等值线图,可以看到同没有气动负荷的叶栅相比有气动负荷的叶栅进口流场周向不均匀性更加明显。

图 9~图 13 给出了不同倾叶栅前缘前 1%弦长轴向位置处周向不均匀源项的径向分量 P_r 及

吸压力面的周向坐标沿径向的变化趋势一致,从而有

$$\frac{\partial \varphi_p}{\partial r} = \frac{\partial \varphi_s}{\partial r} \neq 0 \quad (7)$$

对于 0-0-PL20,虽然有了倾角,但由于其吸

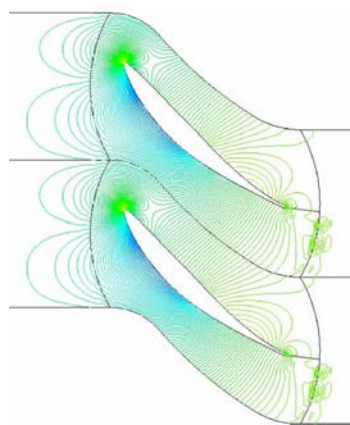


图 8 静压分布等值线图

Fig.8 Pressure distribution at mid-span

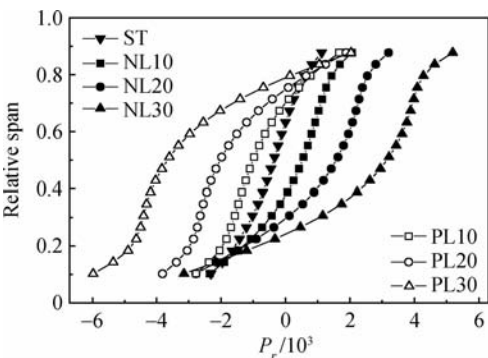


图 9 有气动负荷下进口 P_r 的展向分布

Fig.9 Spanwise distributions of inlet P_r with aerodynamic load

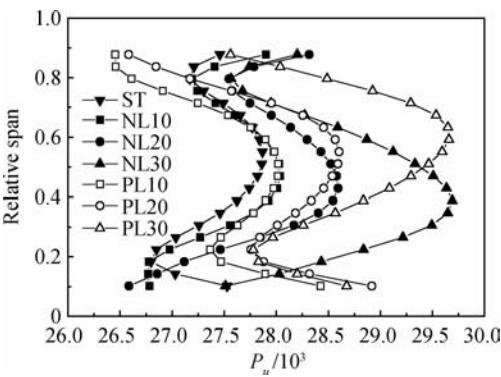


图 10 有气动负荷下进口 P_u 的展向分布

Fig.10 Spanwise distributions of inlet P_u with aerodynamic load

周向分量 P_u , 进口气流径向速度 V_r 及轴向速度 V_x , 以及迎角 i_{in} 的展向分布规律。

为避免边界层的影响, 考察 50% 展高处 P_r 的值: 直叶栅由于不存在径向的无黏叶片力, 从而进口 P_r 为零; 当叶片正倾时, 通道内部存在正的

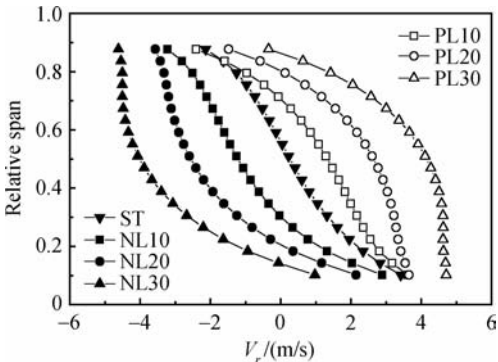


图 11 有气动负荷下进口 V_r 的展向分布

Fig.11 Spanwise distributions of inlet V_r with aerodynamic load

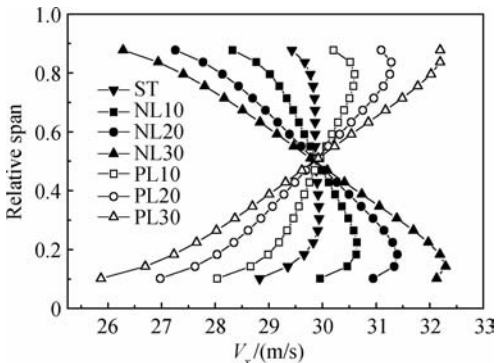


图 12 有气动负荷下进口 V_x 的展向分布

Fig.12 Spanwise distributions of inlet V_x with aerodynamic load

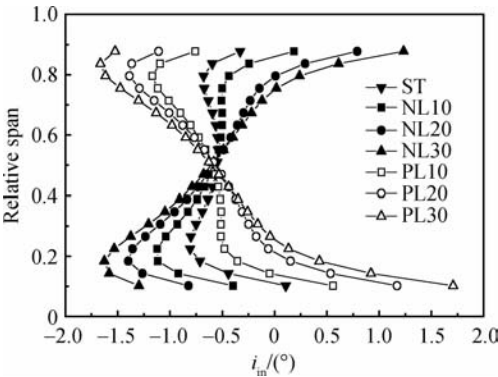


图 13 有气动负荷下进口迎角的展向分布

Fig.13 Spanwise distributions of incidence angle with aerodynamic load

无黏叶片力, 在进口产生负的 P_r , 径向压力梯度从叶根指向叶尖, 诱发气流从根到尖的迁移。随着倾角的增大进口气流速度的径向分量逐渐增大, 当倾角增大到一定程度时, 整个展高的气流都向尖部流动。进口气流从根到尖的迁移使得根部轴向速度减小, 尖部轴向速度增大, 从而产生了进口

迎角从根到尖逐渐减小的分布规律. 负倾的作用与正倾相反.

由于吸压力面压力差的存在, P_u 在直叶栅进口不为零. 随着倾角的增大, P_u 的值逐渐增加, 意味着吸压力面压力差变大, 从而使得倾叶片 50% 展高处的迎角较直叶片偏负.

通过以上分析可以看出, 在倾的作用下, 进口周向不均匀源项的分布发生变化, 诱发气流在进口的径向迁移, 进口迎角随之发生改变, 这很好的解释了前文提到的倾对改变叶片负荷分布和抑制端壁损失的作用.

4 气动设计参数的影响

4.1 来流 Ma 的影响

给定叶型弯角为 30° , 进口气流角为 57° , 名义迎角为 0° , 叶片倾角为 $\pm 20^\circ$, 通过改变出口流量得到不同来流 $Ma(0.15, 0.35, 0.62)$ 的叶栅模型, 取其前缘前 1% 弦长轴向位置处的周向平均的流场参数进行对比. 图 14~图 17 分别给出了不同来流 Ma 下倾叶栅进口周向不均匀源项 P_r , P_u , 进口气流的径向速度 V_r 以及迎角 i_m 沿展向的分布规律. 算例以“倾的形式- Ma ”的方式命名, 其中“15”代表来流 Ma 为 0.15, 以此类推.

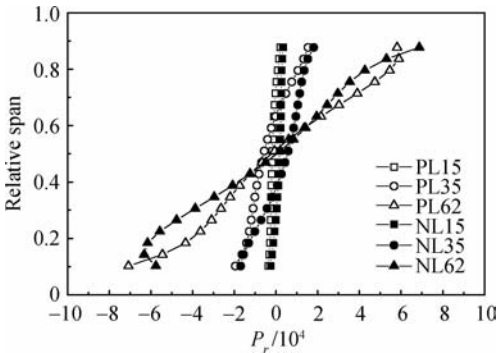


图 14 不同来流马赫数下进口 P_r 的展向分布
Fig. 14 Spanwise distributions of inlet P_r with different inlet Mach numbers

可以看出, 随着来流 Ma 的增大, 端壁边界层的影响增强, 进口流场沿展向变得更加不均匀. 在 Ma 从 0.15 变大到 0.35 的过程中, 进口 P_r 的绝对值变大, 气流在进口的径向迁移增强. 但当 Ma 继续增大到 0.62 时, 边界层的影响起到了主导的作用, 进口 P_r 在 50% 展高以下为负, 50% 展高以上为正, 根部和尖部的进口气流在边界层的排挤下都向叶中区域流动, 倾对进口流场的影响已经

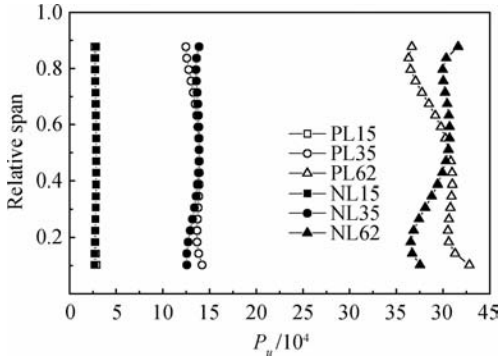


图 15 不同来流马赫数下进口 P_u 的展向分布
Fig. 15 Spanwise distributions of inlet P_u with different inlet Mach numbers

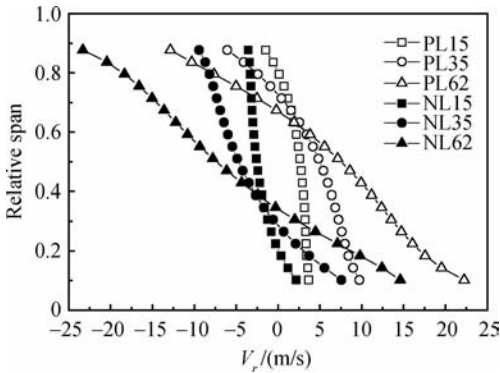


图 16 不同来流马赫数下进口 V_r 的展向分布
Fig. 16 Spanwise distributions of inlet V_r with different inlet Mach numbers

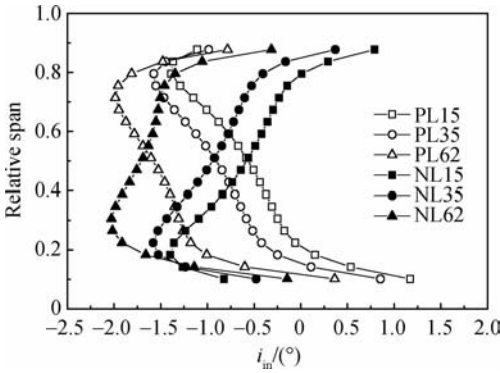


图 17 不同来流马赫数下进口迎角的展向分布
Fig. 17 Spanwise distributions of incidence angle with different inlet Mach numbers

无法体现. 然而进口 P_u 始终随 Ma 增大而增大, 从而导致进口迎角在高来流 Ma 下变负.

通过以上分析可知, 在一定的来流 Ma 范围内, 倾的作用效果随 Ma 的增大而增强, 但 Ma 过高时, 边界层的影响会起到主导作用. 从而在设计中引入倾时要配合适当的来流 Ma , 否则将达不

到预期的设计效果.

4.2 叶片稠度的影响

给定叶型弯角为 30° , 进口气流角为 57° , 来流 Ma 为 0.15, 名义迎角为 0° , 叶片倾角为 $\pm 20^\circ$, 通过改变叶片数得到 3 个不同稠度 (1.18, 1.47, 1.6) 的叶栅模型, 取其前缘前 1% 弦长轴向位置处周向平均的流场参数进行对比. 图 18~图 21 分别给出了不同稠度的倾叶栅进口周向不均匀源项 P_r, P_u , 进口气流的径向速度 V_r 以及迎角 i_m 的沿展向分布规律. 算例以“倾的形式-稠度”的方式命名.

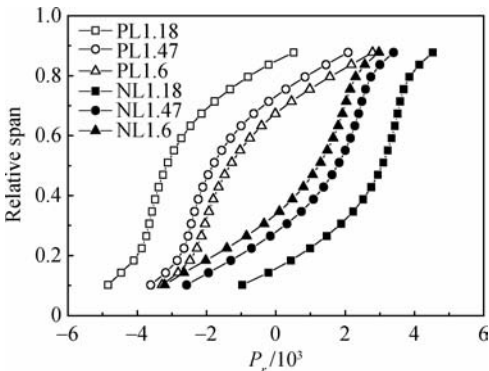


图 18 不同稠度下进口 P_r 的展向分布
Fig. 18 Spanwise distributions of inlet P_r with different solidities

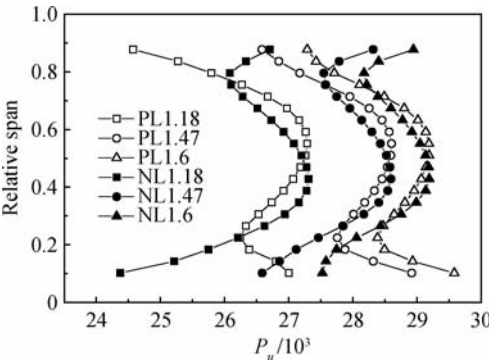


图 19 不同稠度下进口 P_u 的展向分布
Fig. 19 Spanwise distributions of inlet P_u with different solidities

可以看到, 随着稠度的增大, 进口 P_r 的绝对值减小, 气流在进口的径向迁移减弱. P_u 随稠度增大而增大但变化幅度较小, 从而进口迎角的分布变化不明显. 这说明倾叶片进口流场对稠度的变化并不敏感.

4.3 叶片安装角的影响

给定叶型弯角为 30° , 来流 Ma 为 0.15, 名义

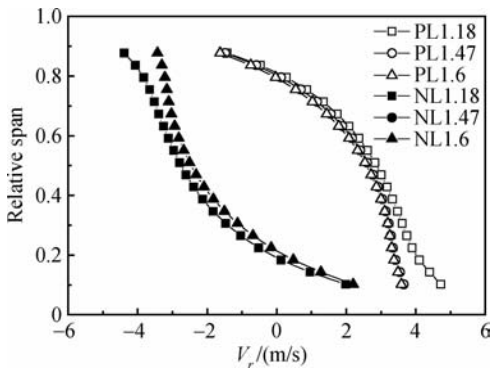


图 20 不同稠度下进口 V_r 的展向分布
Fig. 20 Spanwise distributions of inlet V_r with different solidities

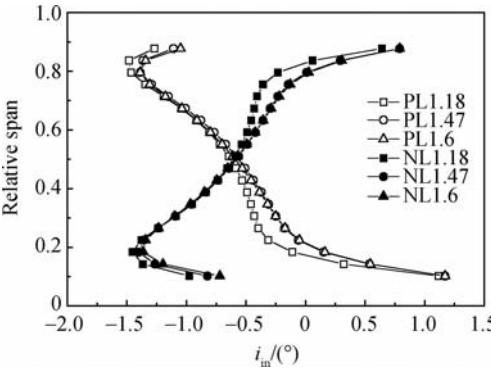


图 21 不同稠度下进口迎角的展向分布
Fig. 21 Spanwise distributions of incidence angle with different solidities

迎角为 0° , 叶片倾角为 $\pm 20^\circ$, 通过改变叶片安装角 ($37^\circ, 42^\circ, 47^\circ$) 得到 3 个叶栅模型, 进口气流角分别对应 $52^\circ, 57^\circ, 62^\circ$. 取其前缘前 1% 弦长轴向位置处周向平均的流场参数进行对比.

图 22~图 25 分别给出了不同安装角的倾叶栅进口周向不均匀源项 P_r, P_u , 进口气流的径向

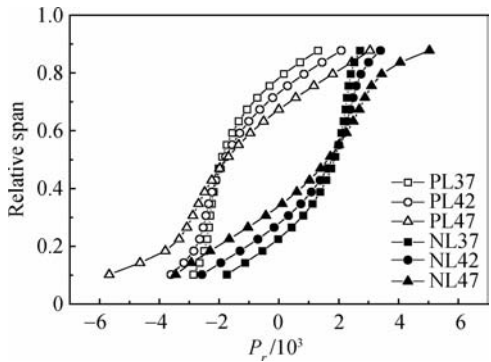


图 22 不同安装角下进口 P_r 的展向分布
Fig. 22 Spanwise distributions of inlet P_r with different stagger angles

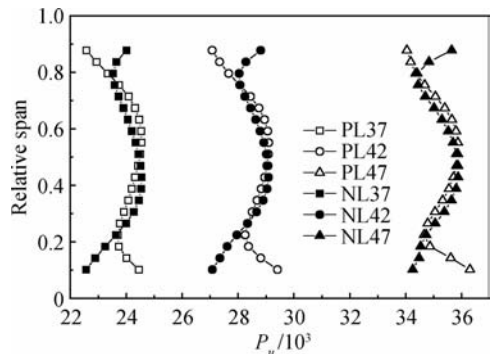


图 23 不同安装角下进口 P_u 的展向分布
Fig. 23 Spanwise distributions of inlet P_u with different stagger angles

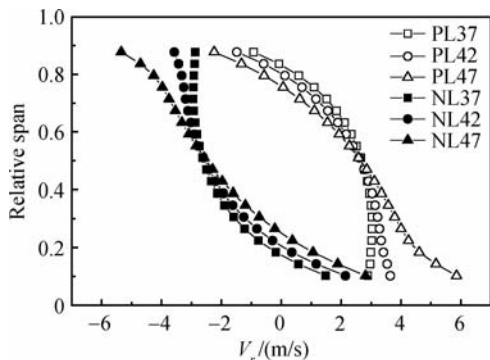


图 24 不同安装角下进口 V_r 的展向分布
Fig. 24 Spanwise distributions of inlet V_r with different stagger angles

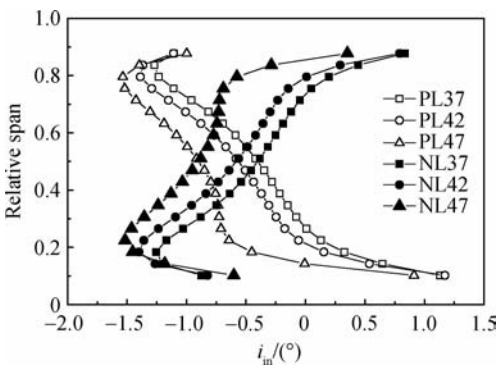


图 25 不同安装角下进口迎角的展向分布
Fig. 25 Spanwise distributions of incidence angle with different stagger angles

速度 V_r 以及迎角 i_{in} 沿展向的分布规律. 算例以“倾的形式-安装角”的方式命名.

从 Harrison^[1] 的实验结果可以看到, 倾会改变叶片展向的载荷分布, 当叶片正倾时, 根部吸压力面压力差大于尖部吸压力面压力差, 从而进口 P_r 的绝对值有从根到尖逐渐减小的趋势. 当叶片安装角增大时, 这种展向的载荷差异被放大, 从而

P_r 沿展向的分布更加不均匀, 其结果是尖部气流径向迁移减弱, 根部气流径向迁移增强, 负倾的效果与之相反. 同时, P_u 的值随安装角的增大而增大, 进口迎角随之变负. 可以看到, 过大的安装角同样不利于体现倾对进口流场的作用.

5 结 论

1) 在均匀来流条件下单排叶片进口流场也具有周向不均匀性, 这可以看作是叶片通道内的周向不均匀流场向上游延伸的结果. 通过降维得到的周向不均匀源项 P_r 和 P_u 在叶片通道前已经存在, 是影响进口流动和叶片特性的关键因素.

2) 对于无气动负荷和有气动负荷的叶片, 倾都会导致进口 P_r 和 P_u 的重新分布, 从而影响叶片特性. 正倾叶片进口 $P_r < 0$, 气流有从根到尖的迁移趋势, 从而改善端壁区的流动. 倾角越大, 迁移作用越强. 负倾的效果与之相反.

3) 来流 Ma 、叶片稠度、叶片安装角等气动设计参数都会对倾叶片进口周向不均匀源项的大小和分布产生影响, 从而影响到倾对进口流场的作用: 在一定的来流 Ma 范围内, 倾的作用随 Ma 的增大而增强, 但 Ma 过高时, 边界层的影响会起到主导作用; 叶片稠度增大, 进口 P_r 的绝对值减小, P_u 增大, 但流场的变化并不明显; 安装角的变化对 P_u 的影响比较明显, 增大安装角, 进口 P_u 的值随之增大, 进口迎角明显变负. 过高的来流 Ma 和过大的安装角均不利于体现倾对进口流场的作用效果.

参考文献:

[1] Harrison S. The influence of blade lean on turbine losses [J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114(1): 184-190.
[2] Sasaki T, Breugelmans F. Comparison of sweep and dihedral effects on compressor cascade performance [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(3): 454-463.
[3] Breugelmans F, Carels Y, Demuth M. Influence of dihedral on the secondary flow in a two-dimensional compressor cascade [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(3): 578-584.
[4] Gallimore S, Bolger J, Cumpsty N, et al. The use of sweep and dihedral in multistage axial flow compressor blading: Part I university research and methods development [J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(4): 521-532.
[5] Gallimore S, Bolger J, Cumpsty N, et al. The use of sweep and dihedral in multistage axial flow compressor blading: Part II low and high speed designs and test verification [J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(4): 533-541.
[6] Debruge L. The aerodynamic significance of fillet geometry

in turbocompressor blade rows[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1980, 102(4): 984-993.

[7] Vavra M. Aero-thermodynamics and flows in tubomachines[M]. New York: Wiley & Sons Inc. , 1960.

[8] Smith L, Yeh H. Sweep and dihedral effects in axial-flow turbomachinery[J]. Journal of Fluids Engineering, 1963, 85(3): 401-414.

[9] Smith L. The radial-equilibrium equation of turbomachinery[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1966, 88(1): 1-12.

[10] Gummer V, Wenger U, Kau H. Using sweep and dihedral to control three-dimensional flow in transonic stators of axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 40-48.

[11] D'Ippolito G, Dossena V, Mora A. The influence of blade lean on straight and annular turbine cascade flow field[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1): 011013. 1-011013. 9.

[12] GUI Xingmin, ZHU Fang, WAN Ke, et al. Effects of inlet circumferential fluctuation on the sweep aerodynamic performance of axial fans/compressors[J]. Journal of Thermal Science, 2013, 22(5): 383-394.

[13] 朱芳. 民用航空发动机高流通高效率风扇/增压级设计技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.

ZHU Fang. Study on design techniques of high through flow and high efficiency fan/booster of civil aeroengine [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

[14] Steinert W, Eisenberg B, Starken H. Design and testing of a controlled diffusion airfoil cascade for industrial axial flow compressor application[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(4): 583-590.

[15] NUMECA Int. Numeca's flow integrated environment for turbomachinery and internal flows; user manual[M]. Brussels, Belgium: NUMECA International, 2000.

[16] WAN Ke, JIN Hailiang, JIN Donghai, et al. Influence of non-axisymmetric terms on circumferentially averaged method in fan/compressor[J]. Journal of Thermal Science, 2013, 22(1): 13-22.

[17] Simon J. Contribution to throughflow modelling for axial flow turbomachines [D]. Liege, Belgium: University of Liege, 2007.

[18] 金海良. 周向平均方法在多级轴流风扇/压气机设计与分析中的应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.

JIN Hailiang. Application of circumferential average method in multistage axial fan/compressor design and analysis[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)