

加速型IGV对高负荷轴流风扇性能影响研究

肖国锋, 赛庆毅, 刘扬

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093

摘要:目的 为了进一步提升小型高负荷轴流风扇在微小空间的高通流及高负荷能力, 提出一种加速型进口导叶(IGV)结构设计方案。方法 采用三维设计软件Pro/E设计不同加速型IGV, 通过数值模拟方法研究其对风扇不同流量系数下的压力系数、全压效率以及流道损失的影响。结果 采用加速型IGV使得风扇流道内通流能力增强, 叶片尾缘气流延缓分离, 下游流动更加均匀; 随着进口气流加速程度的提高, 设计工况点全压效率基本呈单调递增的趋势; 相比无加速IGV风扇, 当IGV加速程度为1.1、1.2时, 在设计工况点, 风扇压力系数提升百分比为1.61%、1.24%, 效率分别提升了3.49%、5.05%; IGV的加速程度从1.0增至1.5时, 风扇效率提高6.69%。结论 在小型高负荷轴流风扇中, 加速型IGV与无加速IGV相比, 加速型IGV对风扇压力系数以及效率的提升具有更优的效果, 并且IGV加速程度也并非越大越好, 当加速程度为1.1、1.2时风性能表现最优, 为小型高负荷轴流风扇的研究提供相关设计参考。

关键词:轴流风扇; 进口导叶; 加速型; 压力系数; 全压效率

中图分类号:TK83; TK05 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0002.006

Research on the Effect of Accelerated Inlet Guide Vane on the Performance of High-load Axial Fans

XIAO Guofeng, SAI Qingyi, LIU Yang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Objective In order to further improve the high-pass flow and high-load capacity of small high-load axial flow fans in small space, an accelerated inlet guide vane (IGV) structure design scheme was proposed. **Methods** The 3D design software Pro/E was used to design different accelerated IGVs, and their effects on the pressure coefficient, full pressure efficiency, and runner losses at different flow coefficients of the fan were investigated by numerical simulation methods. **Results** The use of accelerated IGV increased the flow capacity in the flow channel, delayed the separation of the airflow at the trailing edge of the blade, and made the downstream flow more uniform. With the increase in the acceleration degree of the inlet airflow, the total pressure efficiency at the design point basically showed a monotonous increasing trend. Compared with non-accelerated IGV fan, when the IGV acceleration degree was 1.1 and 1.2, at the design operating point, the fan pressure coefficient was increased by 1.61% and 1.24%, and the efficiency was increased by 3.49% and 5.05%, respectively. When the acceleration degree of IGV increased from 1.0 to 1.5, the fan efficiency was increased by 6.69%. **Conclusion** In small high-load axial flow fans, accelerated IGV has better effects on fan pressure coefficient and efficiency than non-accelerated IGV, and the greater the acceleration degree of IGV is not the better. When the acceleration degree is 1.1 and 1.2, the wind performance is the best, which provides relevant design references for small high-load axial flow fans.

Keywords: axial flow fan; inlet guide vane; accelerated type; pressure coefficient; total pressure efficiency

收稿日期:2022-12-28 修回日期:2023-02-07 文章编号:1672-058X(2024)02-0042-08

基金项目:国家重点研发计划(2021YFF0600605-3).

作者简介:肖国锋(1997—),男,江西赣州人,硕士研究生,从事叶轮机械设计优化研究。

通讯作者:赛庆毅(1975—),男,山东威海人,副教授,博士,从事叶轮机械设计及流体测控技术研究. Email:saiqingyi@163.com.

引用格式:肖国锋,赛庆毅,刘扬.加速型IGV对高负荷轴流风扇性能影响研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(2):42—49.

XIAO Guofeng, SAI Qingyi, LIU Yang. Research on the effect of accelerated inlet guide vane on the performance of high-load axial fans[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(2): 42—49.

1 引言

小型高压高负荷轴流风机在许多特殊的场合有着十分广泛的应用,例如微小空间排气换热,空调通风、工业除尘等。相对于小型离心风机,小型高压高负荷轴流风机具有尺寸小及轻便的特点,在一些安装空间受限的场合发挥重要的作用。姚武等^[1]基于 MATLAB 轴流风机设计平台,设计了一台压比为 1.5 的高负荷轴流风机,实现了风机内部流体高效率运行且有较宽的稳定工作范围。王松涛等^[2]设计了一种高负荷高通流能力的轴流风机,相比离心式风机,其迎风面积更小且流动效率更高。金东海等^[3]对高负荷低速风扇 TA36A 转子叶型进行了数值优化设计,一定程度上拓宽了其失速裕度,使其具有高稳定工作裕度 17.97% 和高效率 89.42% 的显著特点,但均未对进口导叶结构设计进行进一步研究与分析。

在高负荷轴流风机中进口导叶对气流产生预旋作用,因此设计合理的进口导叶对高负荷风机内流特征的改善、整机效率的提升具有重要的现实意义。滕礼志等^[4]通过给定的出口气流参数设计 3 种进口导叶方案,研究表明:导叶出口流场能够为压气机整机提供真实气流参数,且有较小导叶流动损失。国内外很多学者对风扇进口导叶可调设计进行了广泛的研究^[5-10],研究表明,进口导叶安装角的调节拓宽了风扇喘振裕度,提高了非设计点效率以及风扇稳定工作范围,在设计工况的气动性能的提升上未有较多的研究。李景银等^[11]提出一种提高可逆风机正反风效率的新方法,在完全可逆风机动叶上下游设置安装角度为 90° 的完全对称翼型的前后导叶,结果表明前导叶对进口气流方向无影响,但后导叶可以大幅降低出口周向旋绕速度,带前后导叶风机气动性能相比于无导叶风机有明显提高。叶学民等^[12]以 BMCR 工况及安装角为 3° 的两级动叶可调轴流风机为研究对象,设计了不同的轴向、周向位置和叶片长度的长短复合式导叶,同时对风机整机和局部进行数值模拟,以实现风机导叶结构的最优配置。

目前,对于小型高负荷轴流风扇进口导叶的研究,主要通过改变进口导叶的安装角变化来拓宽非设计工况的失速裕度和工作范围,改善风扇整机运行性能;其次,IGV 对气流产生的负预旋导致进口导叶流动损失较大,且对于风机加速比的研究多集中在子午加速轴流风机动叶以及多级轴流风机转子部分^[13-14],而对带加速型 IGV 的小型高负荷轴流风扇的研究尚少,本文基于某小型高负荷单级 P+R+S 轴流风扇,针对带不同加速型 IGV 的风扇展开数值模拟,深入分析其对小型高负荷轴流风扇性能的影响。

2 数值计算方法

2.1 计算模型

以某单级高负荷轴流风扇为研究对象,原模型如图 1 所示,风扇基本结构包含集流器、进口导叶、动叶、静叶以及扩压筒,叶片叶型均采用机翼型,关键设计参数列于表 1 中。本文在不改变原模型 IGV 叶片设计关键参数及 IGV 轮毂轴向长度的基础上,仅改变导叶进口轮毂半径得到不同加速型 IGV,各 IGV 模型的轮毂结构参数列于表 2 中。其中 IGV 的加速程度用 N 表示,N 越大,加速程度越高。图 2 为加速型 IGV 结构简图。

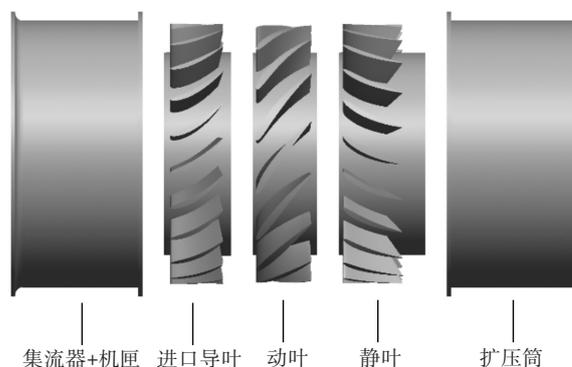


图 1 原型风扇模型

Fig. 1 Model of the original fan

表 1 风扇关键设计参数

Table 1 Key design parameters of fans

设计参数	数值
设计流量($Q/m^3 \cdot h^{-1}$)	230
设计压力(P_0/Pa)	600
额定转速($n/r \cdot min^{-1}$)	5 800
叶轮直径(D_r/mm)	120
叶尖间隙(h/mm)	0.5
进口导叶轮毂直径(D_2/mm)	94.8
动叶轮毂比(v)	0.79
进口导叶片数	22
动叶片数	15
静叶片数	22

表 2 六种风扇模型 IGV 轮毂结构参数

Table 2 Structure parameters of IGV hub for six fan models

模型名称	轮毂轴长 (d_0/mm)	进口轮毂 半径(d_1/mm)	出口轮毂 半径(d_2/mm)	加速程度 ($N=d_1/d_2$)
P_0	31.0	47.40	47.40	1.0
P_1	31.0	43.09	47.40	1.1
P_2	31.0	39.50	47.40	1.2
P_3	31.0	36.46	47.40	1.3
P_4	31.0	33.86	47.40	1.4
P_5	31.0	31.60	47.40	1.5

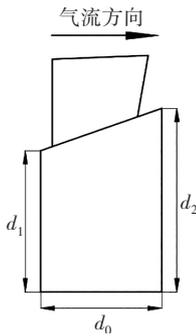


图 2 加速型 IGV 结构简图

Fig. 2 Structure diagram of accelerated IGV

2.2 网格划分及可靠性验证

采用 ICEM 软件对风扇流体域进行网格划分,延长了风扇流体域的进口和出口。流体域分为进口和出口的扩展区、进口导叶区、动叶旋转区及静叶扩压区五部分^[16]。此整体网格划分采用混合网格,扩展区采用六面体单元生成结构化网格,其余区域采用四面体单元生成非结构化网格。由于风扇内部流动的复杂性,对各叶片叶尖、轮毂加密处理。为验证风扇网格数对计算结果的无关性,在设计流量下,对网格数分别为 321 万、489 万、614 万、768 万、988 万的模型 P_1 进行了数值模拟,结果列于表 3,风扇全压与效率随网格数的增加逐步提高,当网格数达到 614 万时,风扇全压与效率不发生显著变化,最终选用整机网格数为 614 万的方案进行计算。

表 3 网格无关性验证

Table 3 Validation of grid independence

网格数/万	全压 (P_t/Pa)	风扇效率 (η)
321	610.5	0.572 7
489	613.9	0.573 2
614	617.0	0.574 9
768	617.1	0.575 0
988	617.3	0.575 3

为验证模拟的可靠性,对原模型风扇各部件进行加工,依据国标 GB/T1236-2000《工业通风机用标准化风道进行性能试验》^[15] 的标准,试验装置采用出口侧试验风洞,对原型 P_0 风扇的气动性能进行试验测量。图 3 为风机性能实验装置图。

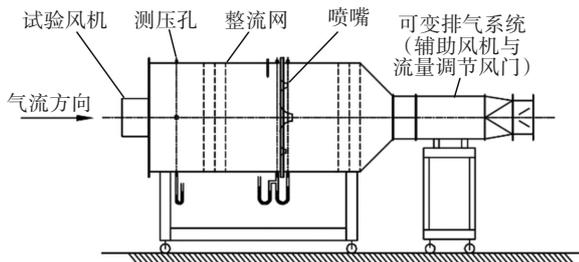


图 3 出口侧试验风洞装置图

Fig. 3 Installation diagram of outlet side test wind tunnel

图 4 为原型 P_0 风扇模拟与实验结果曲线对比。对原型 P_0 风扇压力系数随流量系数变化的模拟结果与实验结果进行比较,其中

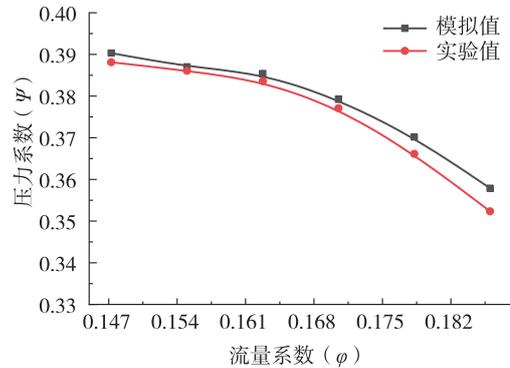
$$\varphi = Q_V / (3\ 600\ Au) \quad (1)$$

$$\Psi = P_t / (\rho u^2) \quad (2)$$

$$A = \pi (D_t / 1\ 000)^2 / 4 \quad (3)$$

$$u = \pi (D_t / 1\ 000) n / 60 \quad (4)$$

式(1)~式(4)中, φ 为流量系数; Ψ 为压力系数; Q_V 为体积流量($m^3 \cdot h^{-1}$); A 为动叶特征面积(m^2); P_t 为风扇全压(Pa); ρ 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$); D_t 为叶轮外径(mm); u 为圆周速度($m \cdot s^{-1}$); n 为动叶转速($r \cdot min^{-1}$)。由图 4 可知,模拟值与实验值的曲线整体趋势大致相似,其最大误差在 2%,在可接受范围内,验证了数值模拟结果的可靠性。

图 4 原型 P_0 风扇模拟与实验结果对比Fig. 4 Comparison between simulation and experimental results of prototype P_0 fan

2.3 控制方程及边界条件

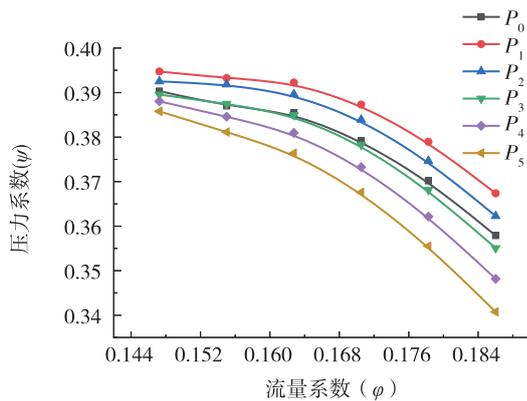
采用 FLUENT 软件对流体域进行数值计算,湍流模型选取 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[16],压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法;动量方程、能量方程和湍流耗散方程均采用二阶迎风格式^[16]。动叶区设置为旋转区域,其余四部分计算域设定为静止区域,旋转区域和静止区域采用多重参考系 MRF 进行耦合,壁面选用无滑移边界条件,近壁面区采用标准壁面函数,动静区域采用 Interface 界面,入口边界条件设置为速度入口,出口为自由出流。当各参数的残差小于 10^{-4} ,且进、出口截面的总压均不随迭代时间而改变时,则认为计算已经收敛。

3 结果与分析

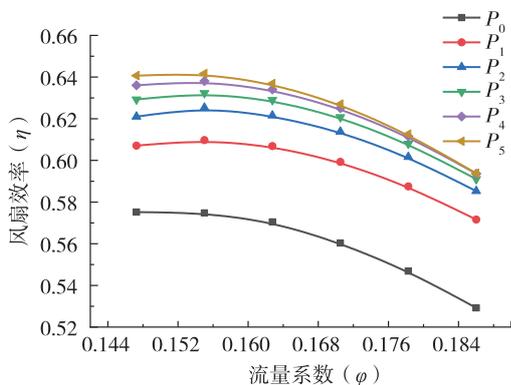
3.1 风扇性能

图 5 为不同 IGV 风扇模型的压力系数及风扇效率曲线对比,设计工况点对应压力系数为 0.376,流量系数为 0.155。从图 5(a) 可以看出,当流量系数 φ 为 0.147~0.19 时, P_1 与 P_2 的压力系数相比原型 P_0 均有

提升,而 P_4 与 P_5 压力系数均小于原型 P_0 ,其中 P_5 下降最多;当流量系数为 0.147~0.155 时, P_3 与 P_0 压力系数基本一致,当流量系数为 0.155~0.19 时, P_3 压力系数逐渐低于 P_0 。由图 5(b)可知,当流量系数为 0.147~0.19 时,风扇效率曲线从 P_1 到 P_5 呈递增趋势。当 N 由 1.0 增至 1.5 时, P_1 — P_5 风扇的设计工况点效率较原型 P_0 分别提升 3.49%、5.05%、5.75%、6.33%、6.69%。由此可见, N 为 1.1 与 1.2 时,相比无加速 IGV 风扇,风扇压力系数和效率提升效果明显。



(a) 不同流量系数下的压力系数分布



(b) 不同流量系数下的风扇效率分布

图 5 风扇性能曲线

Fig. 5 Fan performance curves

3.2 内流特征及损失分析

3.2.1 IGV 流道速度分布

IGV 出口气流速度大小分布和角度对动叶进口气流参数尤为重要。图 6 为风扇叶栅基元级速度三角形,图 7 为 IGV 出口速度沿叶片展向分布曲线,其中 c_1 为 IGV 出口速度。由图 7 可知,由于端壁效应,在 0.1 倍相对叶高以下及 0.9 倍相对叶高以上端壁附近气流速度梯度较大,随着加速程度的增大,IGV 出口速度呈现减小的趋势。在 0.05~0.95 倍相对叶高内,原型 P_0 实际的 c_1 稍高于其几何设计下的 c_1 ,其在叶片尾缘叶根至叶顶呈现“凹形”分布,0.5 倍相对叶高处 c_1 稍小,原型 P_0 的 IGV 尾缘气流速度均匀性较差,从而使得气

流进入后级动叶入口损失较大,导致整机效率较低。随着加速程度 N 的增大,“凹形”分布趋势逐渐减小并消失,IGV 尾缘流场得到较好改善,进入后级动叶流场较为稳定,从而随着加速程度的提高,风扇效率均有不同程度的提升。

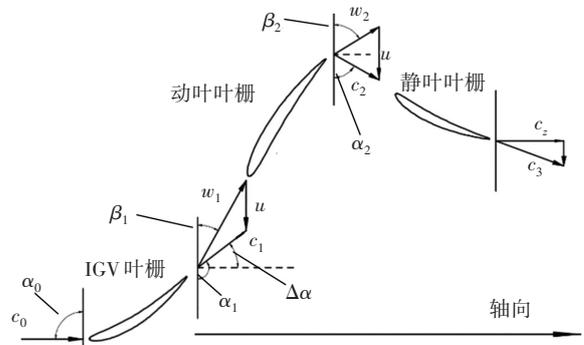


图 6 风扇叶栅基元级速度三角形

Fig. 6 Velocity triangle of fan cascade primitive level

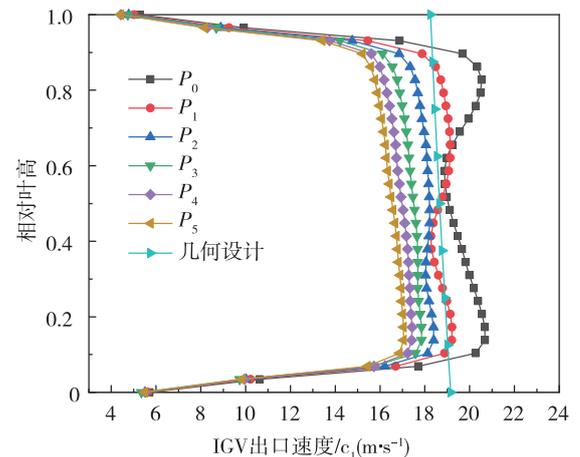


图 7 IGV 出口速度沿叶高分布

Fig. 7 Distribution of IGV outlet velocity along blade height

流道内速度分布反映了流道内的流量分布和流动分离特征,图 8、图 9 及图 10 为 IGV 不同叶高截面的速度分布图。由图 8(a)可知,15%叶高处 P_0 导叶压力面叶根 70%弦长至尾缘下游气流速度梯度较大,造成局部气流分离严重。由图 9(a)50%叶高及图 10(a)85%叶高的速度分布可知,原型 P_0 的 IGV 吸力面叶中至叶顶的高速区分布相对叶根增大,且气流沿圆周方向速度变化较大,导致尾缘吸力面气流分离,IGV 出口尾迹扰动使得后级动叶入口流场紊乱,流动损失增加,导致风扇效率下降。由图 8、图 9 及图 10 可知,IGV 不同的加速程度对流道全叶高范围内的气流流动均有影响;当 N 值由 1.0 增至 1.5 时,IGV 流道内速度梯度逐渐减小,气流在叶片表面分离减少,IGV 通流能力增强,尾缘流场畸变得得到改善,后级动叶入口流动分布更优,这也是风扇整机效率上升的重要原因之一。

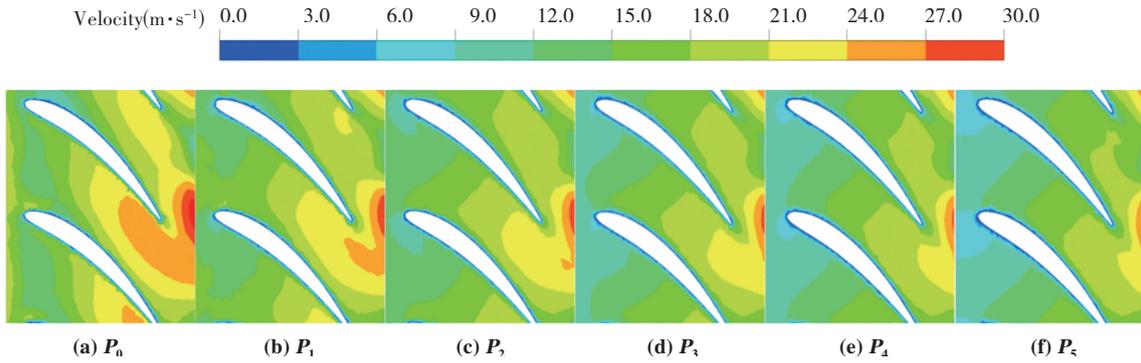


图 8 IGV 0.15 倍叶高速度分布

Fig. 8 Velocity distribution of inlet guide vane 0.15 times of blade height

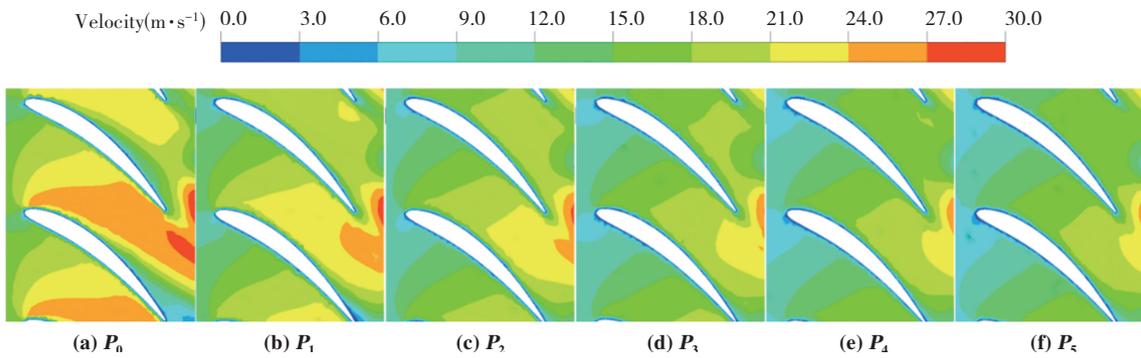


图 9 IGV 0.5 倍叶高速度分布

Fig. 9 Velocity distribution of inlet guide vane 0.5 times of blade height

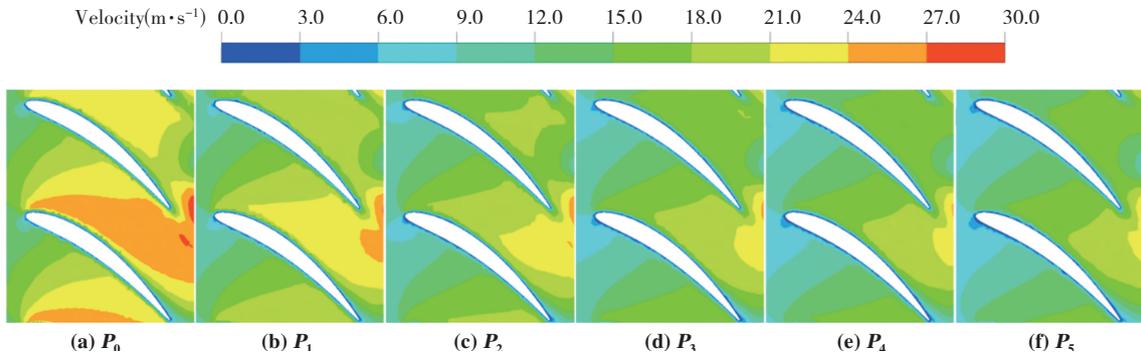


图 10 IGV 0.85 倍叶高速度分布

Fig. 10 Velocity distribution of IGV 0.85 times of blade height

3.2.2 IGV 流道涡结构及湍动能分布

Q 准则是一种判别流场内旋涡区域的方法,可以直观地识别涡核结构和位置, Q 的定义^[17]为

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ij} - e_{ij} e_{ij}) \quad (5)$$

式(5)中, e_{ij} 为应变速率张量; Ω_{ij} 为涡量张量。图 11 为 $Q = 1.14 \times 10^6 \text{ s}^{-2}$ 时六种模型 IGV 吸力面及轮毂区域涡量识别图, $Q > 0$ 表示流体微团旋转运动占据主导。由于导叶无叶顶间隙,叶片涡分布主要为通道马蹄涡与叶片脱落尾涡。由图 10(a)可知,原型 P_0 IGV 中旋涡从前缘开始扩散,高强度涡集中在导叶吸力面,吸力面流动分离严重;在通道内横向速度梯度及主流气流牵引作用下,马蹄涡分支在通道吸力面由前缘叶根向尾缘叶中倾斜发

展,并与压力面尾涡混合出现在叶片尾缘,导致尾迹涡强度增大,从而损失较大。当 N 为 1.1 与 1.2 时,IGV 吸力面马蹄涡分支尺度明显减小,其与导叶尾涡干涉作用减弱,降低了尾迹涡流强度,导叶出口气流流动均匀性得到较大改善,使得动叶入口流场紊乱程度减小, P_1 与 P_2 动叶作功能力增强,风扇效率提升,这与速度沿叶高分布分析结果一致。比较图 11(d)、11(e)及 11(f)可知, P_3 、 P_4 及 P_5 吸力面马蹄涡分支几乎消失。

湍流动能分布表征了流体湍流脉动的程度,反应流体微团之间发生碰撞和动量交换的程度。图 12 为部分模型 IGV 出口截面湍动能分布图,图 13 为部分模型动叶出口截面湍动能分布图。由于动叶叶顶间隙的存在,间隙附近湍动能分布较高,原型 P_0 的 IGV 出口以

及动叶出口高湍动能区域较大,表明导叶与动叶尾缘涡流强度较大,叶片尾缘附面层分离明显。当 N 由 1.0 增至 1.5 时,动叶区气流湍流脉动减弱,出口附近湍动能降低幅度较大,这也从另一方面体现了 IGV 加速程度的增大,对于提升后级动叶区整体气流流动的均匀性,增强流道通流能力,提升风扇效率具有一定的意义。

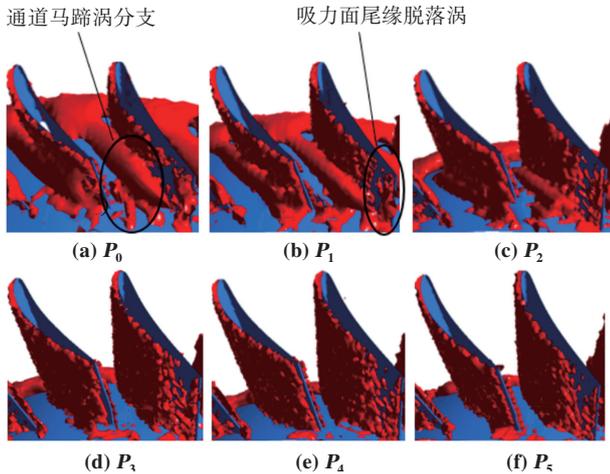


图 11 IGV 流道 Q 准则涡量识别图

Fig. 11 The vorticity identification diagram of the Q criterion of the IGV flow

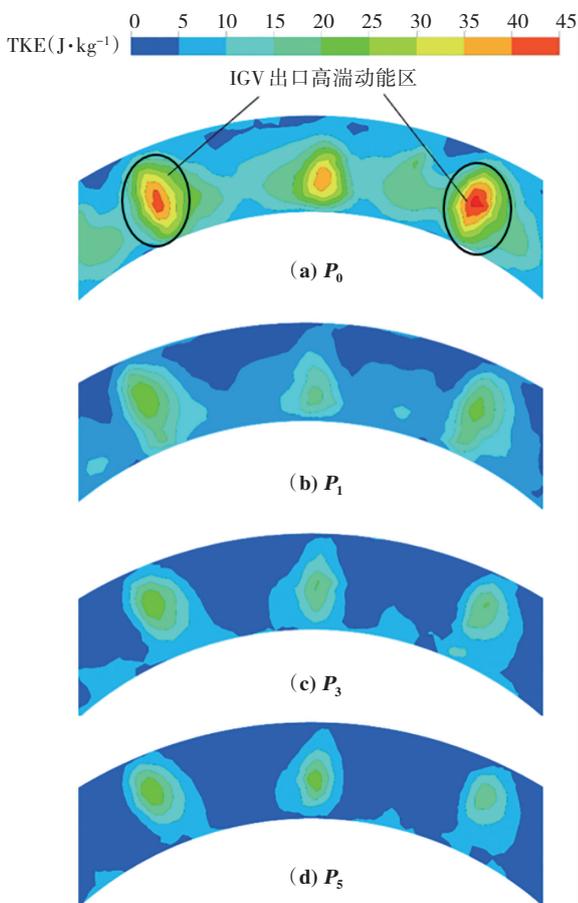


图 12 IGV 出口截面湍动能分布

Fig. 12 Turbulent kinetic energy distribution of IGV outlet section

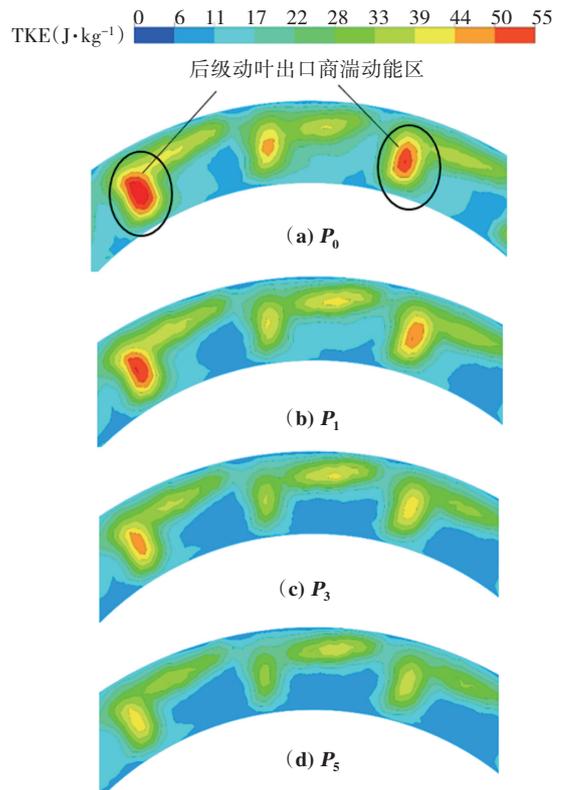


图 13 动叶出口截面湍动能分布

Fig. 13 Turbulent kinetic energy distribution of rotating blade outlet section

3.2.3 IGV 气流折转角

气流折转角 $\Delta\alpha$ 是 IGV 对气流旋绕能力的重要参数。图 14 为 IGV 气流折转角 $\Delta\alpha$ 沿叶高的分布曲线。由于端壁效应,IGV 通道端壁附近气流流动紊乱,气流转折角较其余叶高部分小。随着 IGV 加速程度的提高,叶片对气流的折转能力有所减小,且加速程度越高, $\Delta\alpha$ 越小。在 0.05~0.95 倍相对叶高内,原型 P_0 实际的 $\Delta\alpha$ 高于其几何设计下的 $\Delta\alpha$ 。原型 P_0 实际的 $\Delta\alpha$ 过大,导致后级动叶入口攻角过正,导致动叶出口落后角更快地增大,使得相对速度气动弯角不能继续增大,使得其做功能力低于 P_1 及 P_2 ; 而 P_3 、 P_4 及 P_5 由于 IGV 的 $\Delta\alpha$ 远低于原型 P_0 几何设计下的 $\Delta\alpha$,做功能力依次低于原型 P_0 。由图 6、图 7 及图 14 可知,随着 IGV 加速程度的提高,风扇整机对气流的做功能力先增大后减小。

3.2.4 导叶总压损失系数

图 15 为 IGV 出口总压损失系数沿径向分布曲线,定义导叶总压损失系数 ω 为

$$\omega = \frac{P_{\text{tin}} - P_{\text{tr}}}{\frac{1}{2} \rho u_{\text{in}}^2} \quad (6)$$

式(6)中, P_{in} 为进口平面平均总压 (Pa); P_r 为计算点总压 (Pa); u_{in} 为进口 0.5 倍叶展处平均速度 ($m \cdot s^{-1}$)。从图 15 可以看出, 叶根与叶顶处总压损失系数较其余叶高部分明显增大, 而加速型 IGV 在 0.1 倍相对叶高以下以及 0.8 倍相对叶高以上两部分总压损失较大。 P_1 在全叶高范围内导叶总压损失系数均小于原型 P_0 , 最多减小 9%, 全叶高平均总压损失系数减小约 42.4%。综合分析图 7—图 10 及图 15 可知, N 越大, 流动分离越少, IGV 总压损失系数较原型 P_0 减小越多, 风扇效率提高越明显。

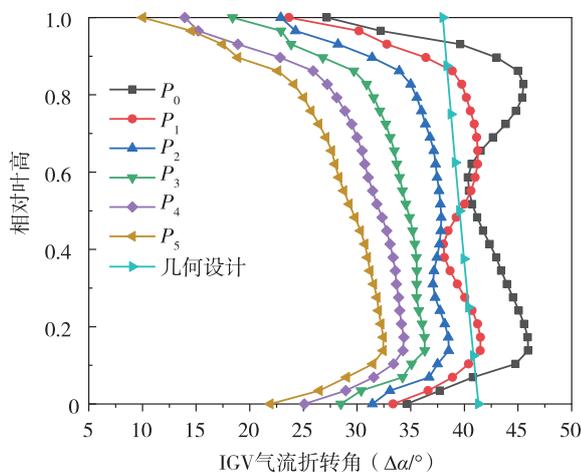


图 14 导叶气流折转角 $\Delta\alpha$ 沿叶高分布

Fig. 14 Distribution of guide vane air flow angle $\Delta\alpha$ along leaf height

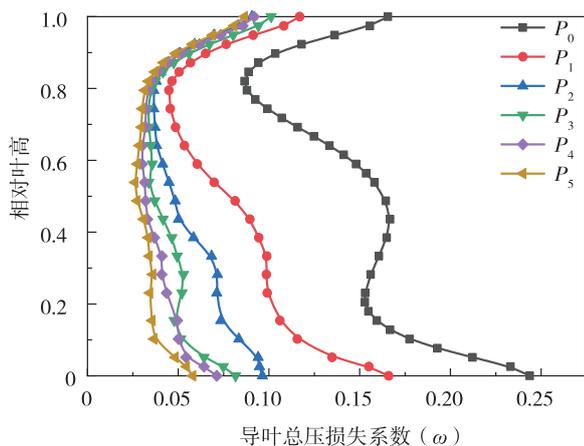


图 15 IGV 出口总压损失系数沿叶高分布

Fig. 15 Total pressure loss coefficient of IGV outlet distributed along blade height

4 结 论

IGV 加速程度越大, 流道内气流流动分离减少, 流通能力增强, 导叶总压损失系数越小, 风机效率呈单调

递增趋势, 当加速程度为 1.1~1.5 时, 风机设计工况点效率较无加速时分别提高了 3.49%、5.05%、5.75%、6.33%、6.69%。

IGV 对气流的折转能力会影响后级动叶作功能力, 从而影响整机性能, 随着 IGV 加速程度的提高, 风扇整机对气流的作功能力先增大后减小。表明在高负荷轴流风扇中 IGV 加速程度并非越大越好。综合 5 种加速型 IGV 的高负荷轴流风扇的压力系数与效率, 当 IGV 加速程度为 1.2 时风扇性能最优。

参考文献 (References):

- [1] 姚武, 徐惠坚, 孙强胜. 轴流高负荷风机气动设计[J]. 电站系统工程, 2018, 34(1): 54—55.
YAO Wu, XU Hui-jian, SUN Qiang-sheng. Aerodynamic design of a high load axial fan[J]. Power System Engineering, 2018, 34(1): 54—55.
- [2] 王松涛, 丁骏, 朱伟, 等. 高效高负荷高通流能力轴流风机气动设计参数选择与三维叶片技术[J]. 风机技术, 2018, 60(2): 25-33, 65.
WANG Song-tao, DING Jun, ZHU Wei, et al. On the aerodynamic design parameter selection and three dimensional blading techniques of highly efficient, highly loaded and large flow capacity axial fan[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2018, 60(2): 25-33, 65.
- [3] 金东海, 李泯江, 桂幸民. 高负荷低速轴流风扇数值优化设计与实验研究[J]. 推进技术, 2009, 30(6): 696—702.
JIN Dong-hai, LI Min-jiang, GUI Xing-min. Numerical design optimization of a high-loaded low speed axial-flow fan and experimental research[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(6): 696—702.
- [4] 滕礼志, 孙鹏, 徐佳汇, 等. 扇形叶栅实验进口导叶设计及数值分析[J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(3): 95—101.
TENG Li-zhi, SUN Peng, XU Jia-hui, et al. Inlet guide vane design and numerical simulation of the sectorial cascade test[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(3): 95—101.
- [5] SHI H T, LIU B J, YU X J. Criteria for designing low-loss and wide operation range variable inlet guide vanes [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 80(1): 177—191.
- [6] RODGERS C. Centrifugal compressor inlet guide vanes for increased surge margin[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(4): 696—702.

- [7] 张申,吴孟龙,范俊岩,等.可调进口导叶在两级同轴离心压气机上的应用[J].汽车零部件,2020,1(10):1—4.
ZHANG Shen, WU Meng-long, FAN Jun-yan, et al. Application of the VIGV in a double stage centrifugal compressor[J]. Automobile Parts, 2020, 1(10): 1—4.
- [8] 雷鹏,金东海,桂幸民.高负荷风扇前后可调变弯度导叶的数值研究[J].西北工业大学学报,2017,35(1):55—62.
LEI Peng, JIN Dong-hai, GUI Xing-min. Numerical investigation of a variable inlet guide vane with two rotating segments in a highly loaded two stage fan [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(1): 55—62.
- [9] 陈节贵,彭铖,杨金广,等.带可调进口导叶的多级轴流压气机非设计点性能计算[J].热科学与技术,2018,17(1):73—79.
CHEN Jie-gui, PENG Cheng, YANG Jin-guang, et al. off design performance calculation of multistage axial compressor with variable inlet guide vanes[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2018, 17(1): 73—79.
- [10] 王萌,王明金,王忠义,等.低工况下轴流压气机可转导叶调节规律研究[J].热能动力工程,2021,36(9):33—41.
WANG Meng, WANG Min-jin, WANG Zhong-yi, et al. Research on the adjustment law of variable inlet guide vane of axial compressor at off-design condition[J]. Journal of Engineering For Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 33—41.
- [11] 李景银,陈巍巍,吕峰.带有前后导叶的新型可逆轴流风机数值研究[J].机械工程学报,2010,46(2):139—144.
LI Jing-yin, CHEN Wei-wei, LU Feng. Numerical investigation on a new type of fully reversible axial fan with two blade rows on both sides of the rotor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 139—144.
- [12] 叶学民,李新颖,李春曦.第一级导叶改进对两级动叶可调轴流风机性能的影响[J].动力工程学报,2014,34(3):228-235,252.
YE Xue-min, LI Xi-ying, LI Chun-xi. Effects of first-stage guide vane improvement on performance of two-stage variable vane axial flow fan [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(3): 228-235, 252.
- [13] 李一明,王雷,李宝宽.动静叶可调子午加速轴流通风风机气动性能研究[J].热力发电,2014,43(8):64—70.
LI Yi-ming, WANG Lei, LI Bao-kuan. Aerodynamic performance of stator/rotor adjustable axial-flow fan with meridian acceleration [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(8): 64—70.
- [14] 李斌,赛庆毅,张波,等.加速比对子午加速轴流风机气动性能影响的研究[J].建模与仿真,2020,9(3):332—344.
LI Bin, SAI Qing-yi, ZHANG Bo, et al. Study on influence of acceleration ratio on aerodynamic performance of meridional accelerated axial fan [J]. Modeling and Simulation, 2020, 9(3): 332—344.
- [15] 工业通风机用标准化风道性能试验:GB/T 1236-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
Industrial fan—Performance testing using standardized airways: GB/T 1236-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [16] 叶学民,李鹏敏,李春曦.双凹槽叶顶结构下的轴流风机性能及叶片振动特性研究[J].机械工程学报,2015,51(4):167—174.
YE Xue-min, LI Peng-min, LI Chun-xi. Study on performance and vibration characteristics of axial fan with double groove tip structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 167—174.
- [17] 李春曦,张超,张锐星,等.Gurney襟翼对动叶可调轴流风机性能的影响[J].动力工程学报,2020,40(5):404—411.
LI Chun-xi, ZHANG Chao, ZHANG Rui-xing, et al. Effect of Gurney flap on performance and aeroacoustics of variable pitch axial fans[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(5): 404—411.

责任编辑:陈芳