

进口导叶载荷分配对小型高压轴流风扇气动性能的影响研究

刘 扬, 赛庆毅, 肖国锋, 张江涛, 严永辉

上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093

摘 要:目的 针对小型高压轴流风扇气动性能的优化设计, 提出对进口导叶与动叶不同载荷分配进行研究, 寻找合适的分配规律以达到气动性能优化的目的。方法 根据进口导叶与动叶分配的不同载荷比, 设计相应的进口导叶预旋角度、动叶安装角, 利用 Pro-e 三维建模软件建立风扇模型, 并通过数值模拟, 采用 ICEM 进行网格划分, 在 Fluent 求解器中选择合适的控制方程与边界条件进行计算, 对不同风扇模型的气动特性、压力分布、速度分布、湍动能分布及内部流场进行研究分析。结果 在小型高压轴流风扇设计中, 进口导叶因负偏转而承担的载荷不同, 对风扇气动性能影响较大。进口导叶气流预旋角在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 区间内变化时, 在设计工况附近, 进口导叶负预旋偏转角越小, 即设计载荷比例越小, 风扇整体压力系数则越高。在设计运行工况点, 5 种风扇模型的压力系数差异可达 9.54%, 全压效率相差 2.49%; 当气流预旋角度大于 30° 时, 即设计载荷比例 ξ 超过 32% 时, 高负荷轴流风扇压力系数从 0.332 逐步下降到 0.303, 全压效率也呈下降趋势。结论 当进口导叶气流预旋角度控制在 30° 以内时, 叶片中后部压力梯度较小, 圆周方向上的速度梯度减小, 叶片尾缘处的附面层分离得到改善, 气体流动平稳, 降低了动叶进口的气流畸变, 有效控制了进口导叶与动叶之间的流动损失。

关键词: 小型轴流风扇; 高压力系数; 载荷分配; 气动性能

中图分类号: TK05; TH432.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0003.002

Influence of Inlet Guide Vane Load Distribution on Aerodynamic Performance of Small High-pressure Axial Flow Fan

LIU Yang, SAI Qingyi, XIAO Guofeng, ZHANG Jiangtao, YAN Yonghui

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

Abstract: Objective In order to optimize the aerodynamic performance of a small high-pressure axial flow fan, we proposed to study the different load distributions of the inlet guide vane and dynamic vane to find the suitable distribution law for aerodynamic performance optimization. **Methods** According to the different load ratios of the inlet guide vane and dynamic vane distribution, the corresponding inlet guide vane prewhirl angle and dynamic vane installation angle were designed, and the fan model was established by using Pro-e 3D modeling software. Through numerical simulation, ICEM was used for grid division, and appropriate governing equations and boundary conditions were selected in Fluent solver for calculation. The aerodynamic characteristics, pressure distribution, velocity distribution, turbulent kinetic energy distribution, and internal flow field of different fan models were studied and analyzed. **Results** In the design of small high-pressure axial flow fans, the inlet guide vane bears different loads due to negative deflection, which has a great impact on the aerodynamic performance of the fan. When the airflow prewhirl angle of the inlet guide vane varied within the range of $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$, near the design condition, the smaller the negative prewhirl deflection angle of the inlet guide

收稿日期: 2023-02-01 **修回日期:** 2023-03-27 **文章编号:** 1672-058X(2024)03-0009-09

基金项目: 国家重点研发计划资助(2021YFF0600605-03)。

作者简介: 刘扬(1998—), 男, 江苏徐州人, 硕士, 从事叶轮机械设计研究。

通讯作者: 赛庆毅(1975—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事叶轮机械设计研究。Email: saiqingyi@163.com。

引用格式: 刘扬, 赛庆毅, 肖国锋, 等. 进口导叶载荷分配对小型高压轴流风扇气动性能的影响研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 9—17.

LIU Yang, SAI Qingyi, XIAO Guofeng, et al. Influence of inlet guide vane load distribution on aerodynamic performance of small high-pressure axial flow fan[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 9—17.

vane, i. e., the smaller the design load ratio, the higher the overall pressure coefficient of the fan. At the design operating point, the difference in pressure coefficients of the five fan models could reach 9.54%, and the difference in full pressure efficiency of the five fan models was 2.49%; when the airflow prewhirl angle was greater than 30° , i. e., the design load ratio ξ exceeded 32%, the pressure coefficient of the high-load axial fan gradually decreased from 0.332 to 0.303, and the full pressure efficiency also showed a decreasing trend. **Conclusion** When the inlet guide vane prewhirl angle is controlled within 30° , the pressure gradient in the middle and rear of the blade is small, the velocity gradient in the circumferential direction is reduced, the boundary layer separation at the trailing edge of the blade is improved, the gas flow is stable, the airflow distortion at the inlet of the rotor vane is reduced, and the flow loss between the inlet guide vane and the rotor vane is effectively controlled.

Keywords: small axial flow fan; high-pressure coefficient; load distribution; aerodynamic performance

1 引言

常用的高压风机均采用离心式设计,但离心风机往往存在尺寸限制、流量不足等缺点。此时小型高压轴流风扇的设计便成为一些特殊领域的研究重点,例如有限空间内通风散热、工业通风除尘等。在过去的研究中,很多研究者针对不同特点的轴流风机提出相应设计方案,分别研究提升压力、增大高效区的措施,为后来的设计提供不同的设计思路,例如李景银等^[1]在进行高压小流量轴流风机设计时,针对短叶片、等弦长直前导叶加动叶的特殊结构,提出了通过积分方法求解径向平衡方程,扩大了方程稳定解的范围,同时应用叶栅理论计算小尺寸的高压轴流风机的损失,为相关风机设计提供了设计思路,具有一定的指导价值。姚武等^[2]基于 MATLAB 轴流风机设计平台,设计了一台压比为 1.15 的高负荷轴流风机,使风机运行工作范围高效、宽广、稳定。李杰灵等^[3]在针对高负荷跨音速风扇级设计时,依据其强逆压梯度、强黏性剪切、可压缩跨音速流动特征,通过控制通道几何曲率分布,完成了高负荷风扇级的优化,减弱了近壁附面层的二次流动和分离,降低了流动损失,扩展了稳定工作范围,证明几何曲率优化具有重要的技术内涵和物理意义,成为风扇先进气动设计技术的补充。王松涛等^[4]详细研究了流量系数、反力度等设计参数的影响规律,分析了叶片负荷调整、叶片弯曲、叶片端弯对叶栅内流动、级匹配、级性能的影响,实现了高通流能力、高流动效率,设计出一台压比为 1.20,载荷系数为 0.83 的轴流风机,给出了高负荷轴流风机三维叶片设计的基本原则,包括参数选取、叶型优化、三维叶片等,并开发了多个叶高处 S_1 流面叶型协同优化方法,作为轴流风机设计的参考。

在高压轴流风扇中,通常利用进口导叶使气流产生偏转,在动叶入口形成负预旋的效果,进一步提升轴流风扇的压力,因此进口导叶特性研究是提高高压轴流风扇性能的重要方向之一。袁小平^[5]研究了单级轴流式通风机的结构,对风机气动性能进行了实验研究,提出了进口导叶、后导叶安装角变化对风机气动性能的影响,发现在进口导叶与叶轮匹配、叶轮与后导叶匹

配的条件下,进口导叶叶片安装角变化改变风量,后导叶叶片安装角变化则改变风压。叶学民等^[6]以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,发现了长短复合式导叶增压增效的作用以及短叶片位置、长度对气动性能的影响,提供了风机导叶结构的优化配置。李一明等^[7]分析了某动静叶可调子午加速轴流风机在不同叶轮叶片安装角和进口导叶安装角下的气动性能,结果提供了动静叶可调轴流风机全压、流量与叶轮安装角及进口导叶安装角的变化关系,从而通过动、静叶调节方法来使风机保持在高效率区稳定运行。雷鹏等^[8]研究了前后可调变弯度导叶结合变前缘和变尾缘调节对风机性能的影响,通过减小导叶实际弯角,推迟了气流的分离,扩大了导叶低损失角度调节范围,风机设计中这种变前缘和变尾缘调节方法,应用在高负荷风扇上具有非常积极的作用。吴凯旋等^[9]研究加装 KSE 装置前后及 KSE 叶片的影响,发现加装 KSE 装置,能够提高 UA 新型静叶可调轴流风机的失速性能,且对风机效率的影响较小,给出了 KSE 叶片的最佳设计位置,提供了优化失速的最佳方案。

在以上针对高压轴流风扇进口导叶的研究,以变安装角、结构形式改变为主。而针对动叶的研究,牛东霞等^[10]研究了可调动叶安装角度与结构参数的匹配, Song^[11]等研究了动叶可调轴流风机模型特性曲面的拟合方法, Zhu 等^[12]研究了不同动叶安装角度对叶片背压与涡流的影响。本文则基于提供的轴流风扇气动设计要求,以单级 P+R+S 结构为基础,在保证叶轮直径、轮毂直径、轴向宽度的尺寸要求时,以设计压力为定量,匹配进口导叶与动叶,研究进口导叶与动叶不同载荷分配如何影响小型高压轴流风扇的性能。

2 数值模拟计算

2.1 模型设计

以某单级高压轴流风扇为研究对象,风扇原模型如图 1 所示,基本组成结构包括进口导叶、动叶、后导叶,速度三角形如图 2 所示。叶片叶型采用机翼型,基

本设计参数如表 1 所示。本文在控制基本设计参数及轴向尺寸不变的条件下,仅改变进口导叶与动叶设计载荷的分配比例,定义进口导叶承担载荷与总载荷之比为 ξ ,动叶气流折转角 $\Delta\beta=\beta_2-\beta_1$,分别列于表 2 中。其中, P_3 为原模型,另外 4 种模型为分别调整进口导叶预旋角加减各 5° 、 10° ,即调整了进口导叶提供的周向速度改变量的比例。

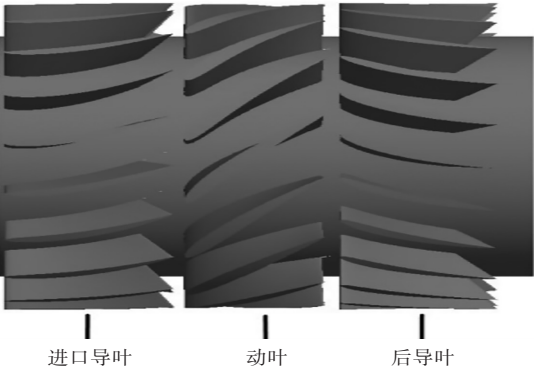


图 1 原型风扇模型
Fig. 1 Model of original fan

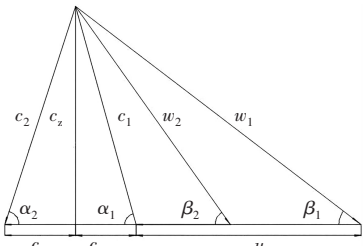


图 2 速度三角形示意图
Fig. 2 Schematic diagram of velocity triangle

表 1 原始叶轮参数

参 数	数 值
叶轮直径 D_i/mm	120
轮毂直径 D_h/mm	94.8
叶顶间隙 δ/mm	0.5
设计转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	5 800
设计流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	230
设计压力 P_0/Pa	600
设计轴向宽度 d_0/mm	94

表 2 5 种风扇模型设计参数

模型名称	导叶载荷比 $\xi/\%$	预旋角	$\Delta\beta$
P_1	32	30°	23.4°
P_2	39	35°	21.0°
P_3	46.7	40°	18.8°
P_4	55.7	45°	16.6°
P_5	66.6	50°	14.5°

2.2 网格划分及可靠性验证

采用 ICEM CFD 软件对计算域流场进行网格划

分,在数值模拟计算中,为保证计算的可靠性,延长了风扇流体域的进口区和出口区。计算域分为 5 个部分: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。流体域整体网格划分采用非结构化网格划分。由于风扇内部流动的复杂性,对叶片部分位置加密处理。网格划分结果示意图如图 3 所示。

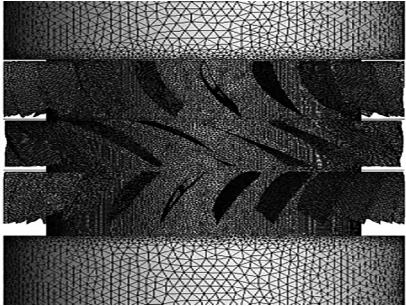


图 3 网格划分结果
Fig. 3 Meshing result

为验证风扇网格数对计算结果的无关性,确保有限元计算结果变化趋势和总体结果的分布正确,在设计流量下,对网格数分别为 332 万、494 万、635 万、747 万、926 万的模型 P_1 进行了数值模拟,结果列于表 3,当网格数达到 635 万时,风扇全压与效率的模拟结果波动相应变小,方案的计算量也较小,因此最终选取 635 万的网格数目进行计算。

表 3 网格无关性验证

网格数/万	全压 P_t/Pa	风扇效率 η
332	522.8	0.578 7
494	525.1	0.579 1
635	528.5	0.580 9
747	528.8	0.581 2
926	529.0	0.580 8

2.3 控制方程及边界条件

在 Fluent 中,对三维定常雷诺时均方程和连续性方程进行数值计算,湍流模型选用 Standard $k-\varepsilon$ 模型,针对本模型的三维粘性流场,壁面附面层上流动较复杂,用湍动能 k 和湍流耗散率 ε 两个输运变量求解湍流黏度,该湍流模型计算精度较高的同时收敛速度较快。采用 Simple 算法进行压力-速度耦合,其在 $k-\varepsilon$ 方程数值求解和流场模拟中应用广泛,基于交错网格对流体微元进行微分方程求解;采用二阶迎风格式进行动量方程、能量方程、湍流耗散方程的离散,该差分格式为一阶导数具有二阶精度截断误差,克服了中心差分的不稳定性和迎风格式的精度不够。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,对于大多数时均流动,尤其是如风机这种动网格区域与静网格区域相互作用较微弱的计算模型,可以采用多重参考系 MRF 进行旋转域和静止域的耦合,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 交界面进行数据传递。入口边界条件设置为速度入口,即给定了流量,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 风扇气动性能对比

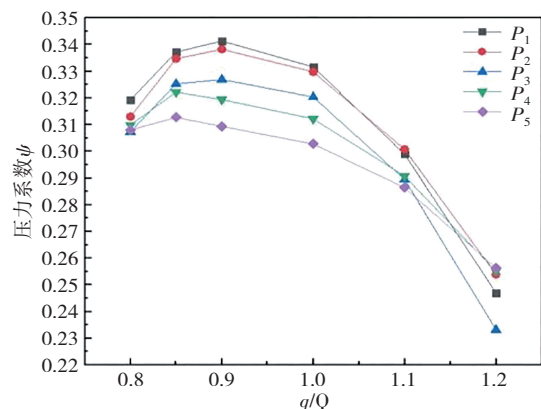
通过对 5 种不同模型进行数值模拟,利用 Fluent 软件,读取不同流量下轴流风扇进出口静压、全压以及动叶的力矩,根据与流量对应的全压升 P_t 、转矩 M 计算,得到不同模型的流量-压力系数、流量-全压效率曲线图,如图 4 所示,其中

$$\text{压力系数: } \Psi = P_t / (\rho u^2) \quad (1)$$

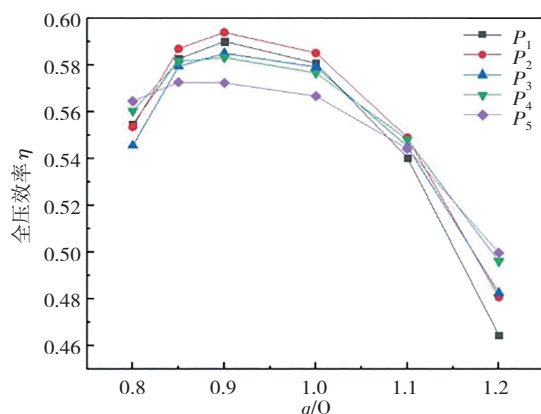
$$u = \pi (D_t / 1000) n / 60 \quad (2)$$

$$\text{全压效率: } \eta = P_t q / (M n \pi / 30) \quad (3)$$

式(1)中, P_t 为风扇全压 (Pa); ρ 为空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); u 为圆周速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); 式(2)中, D_t 为叶轮外径 (mm); u 为圆周速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); n 为动叶额定转速 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); 式(3)中, P_t 为风扇全压 (Pa); q 为风扇流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); M 为风扇转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); n 为动叶额定转速 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。



(a) 不同流量下压力系数分布



(b) 不同流量下全压效率分布

图 4 风扇性能曲线对比

Fig. 4 Comparison of fan performance curves

在 $0.8 \sim 1.2 Q$ 流量范围之内,随着进口导叶设计载荷比例 ξ 的变化,即进口导叶气流偏转角在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之间变化时,其中模型 P_1 相比于 P_5 静压最大提高 10.67%, P_2 相比于 P_5 静压效率最多提高 4.04%。在 $0.85 \sim 1.1 Q$ 流量范围之内,进口导叶设计载荷比例 ξ 越小,轴流风扇静压则越大。当进口导叶承担载荷较大时,如 P_4 、 P_5 模型,其风扇运行最佳高效点位于设计工况左侧,流量为 $0.85 Q$ 处。进口导叶承担载荷比例降低时,如 P_3 、 P_4 、 P_5 模型,风扇运行的最佳高效点向右偏移,表明在静压提高的同时,风扇高效运行工况调节范围变小。在远离高效区间的 $0.8 Q$ 、 $1.2 Q$ 流量时,5 种模型的静压并无明显规律,且数值相差不超过 4%,在此不做过多考虑。在设计运行工况附近, P_1 模型相比于 P_2 ,全压效率略低约 0.4%,综上所述,该轴流风扇进口导叶设计载荷比例 ξ 为 32%,即气流转角为 30° 时,风扇的压力系数达到最高,且运行工况附近效率未出现明显降低,达到优化目的。

3.2 压力分布分析

图 5 是 5 个风扇模型的进口导叶吸力面的压力云图,通过对比可以发现,当进口导叶承担载荷较小时,该风扇吸力面的压力分布较为均匀,整体压力较高,而随着进口导叶承担负荷的提高,进口导叶叶片弯角、出口气流角也增大,因此绝对速度增大,气流得到了更多的动能,整体静压值减小。如 P_3 、 P_4 、 P_5 模型所示,部分叶片吸力面也出现更加明显的负压区。

图 6、图 7 分别是 5 个风扇模型的动叶吸力面、压力面的压力云图,根据上述分析,由于该风扇结构的紧凑性,进口导叶出口气流冲击在动叶吸力面,中间气流被卷入分离区中,造成如图 6 所示, P_5 模型中动叶吸力面的前 1/4 叶片出现较大的流动损失,这种情况随着预旋角度的减小得到了一定缓解。对于动叶压力面的压力梯度分析,其压力分布符合风扇动叶压升的规律,5 种模型之间也不存在较大差异。

图 8 是 P_1 、 P_3 、 P_5 三种模型分别在 0.15 、 0.5 、 0.85 倍叶高处的叶片负载图,由图可知,随着进口导叶设计载荷的增加,叶片压力面与吸力面的压差增大,产生的升力增大,这验证了模型设计的正确性与合理性,进口导叶确实承担了较大的气流偏转作用,与此同时,观察叶片载荷,可以发现在进口导叶中后部分处,承担载荷越大,如 P_5 模型,吸力面和压力面的压力变化更明显,即压力梯度较大,吸力面更容易出现流动分离,在尾缘出口处还会出现吸力面压力大于压力面的情况,此时气流由吸力面向压力面扩散,这也意味着尾缘的分离更加严重,在气流流动时,会产生非常大的流动阻力和流动损失,这样严重的分离还会延伸到动叶的进口处。

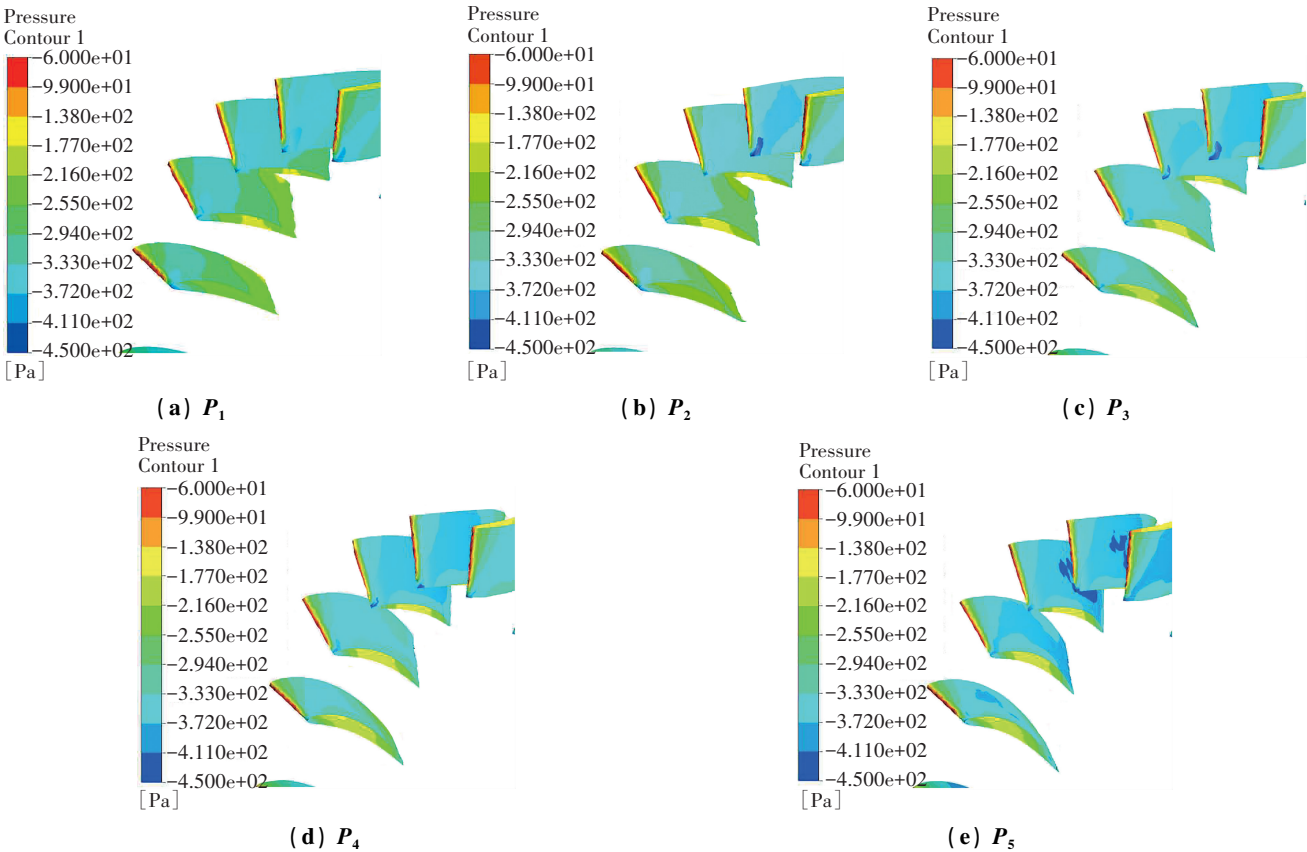


图 5 进口导叶吸力面压力分布

Fig. 5 Pressure distribution on suction surface of inlet guide vanes

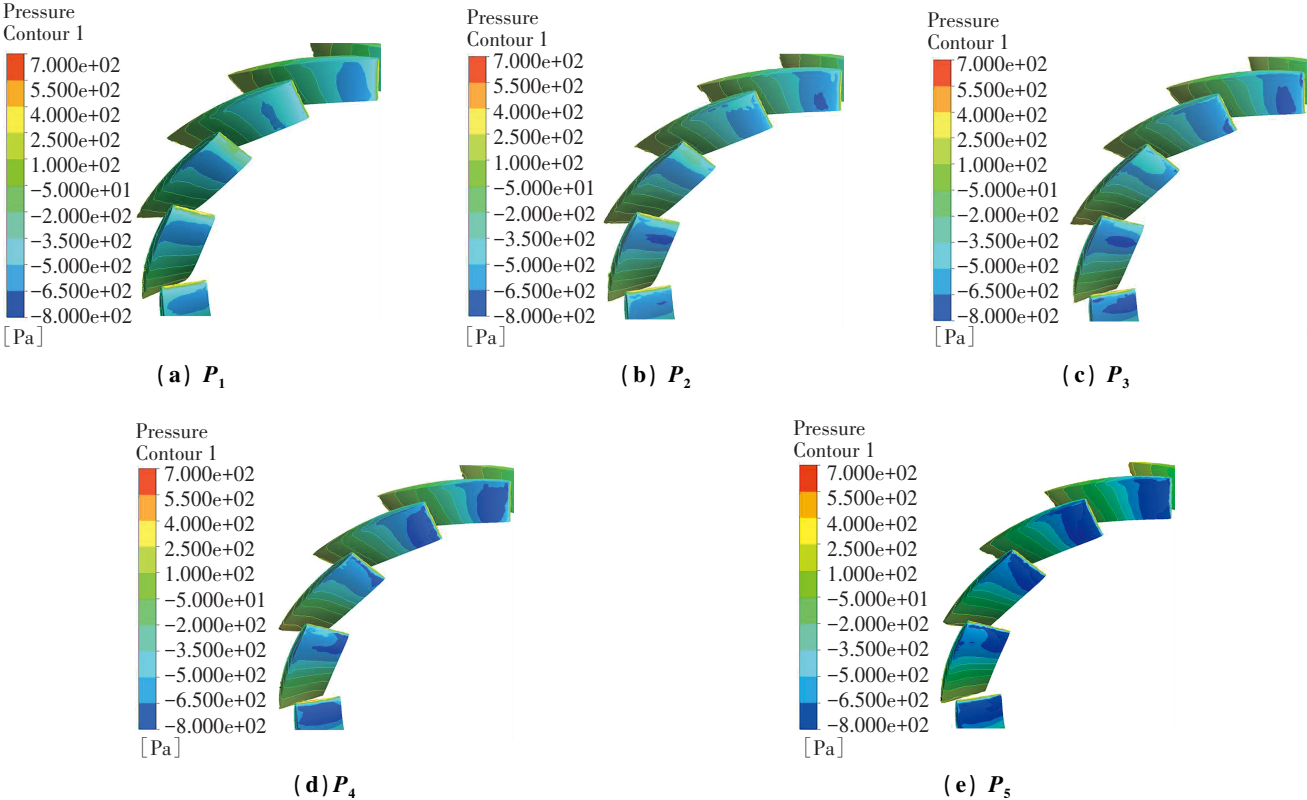


图 6 动叶吸力面压力分布

Fig. 6 Pressure distribution on suction surface of rotor blades

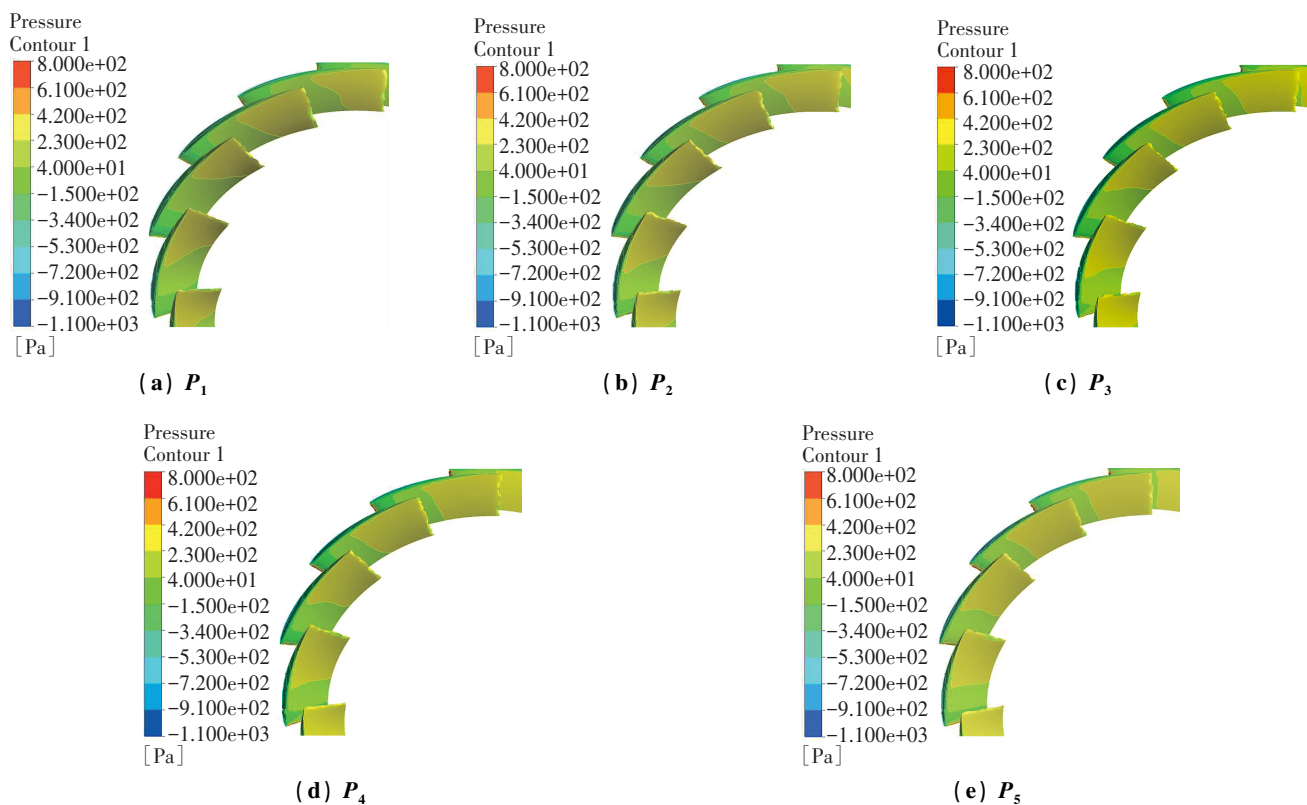
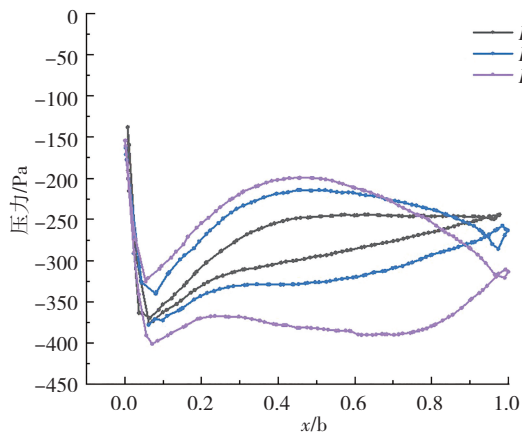
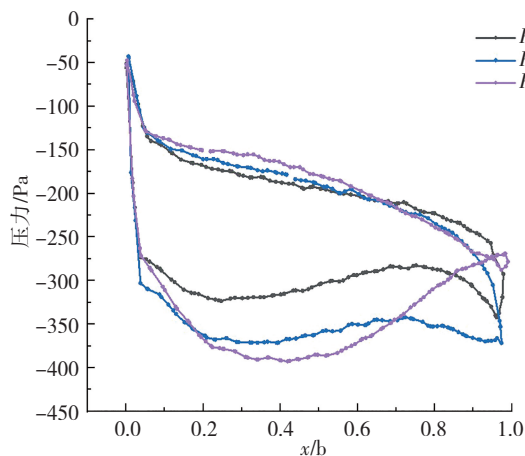


图 7 动叶压力面压力分布

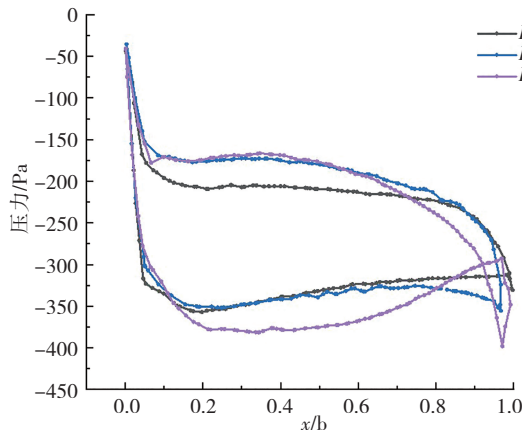
Fig. 7 Pressure distribution on pressure surface of rotor blades



(a) 0.15 倍叶高



(c) 0.85 倍叶高



(b) 0.5 倍叶高

图 8 进口导叶不同叶高处叶片负载

Fig. 8 Blade load at different blade heights of inlet guide vanes

3.3 内部流动规律分析

图 9 是 5 个风扇模型进口导叶和动叶之间,在 0.5 倍叶高处的速度矢量图,通过对比可以发现,随着进口导叶承载载荷增加,进口导叶尾缘处气流紊乱越严重,也验证了前一节所述,气体的不均匀流动,会在进口导叶与动叶之间引起了较大的流动损失,对下游气流扰动较大,破坏了动叶进口处气流的平稳流动,这种进口畸变流会增加风扇运行的不稳定性,导致风扇的性能下降。

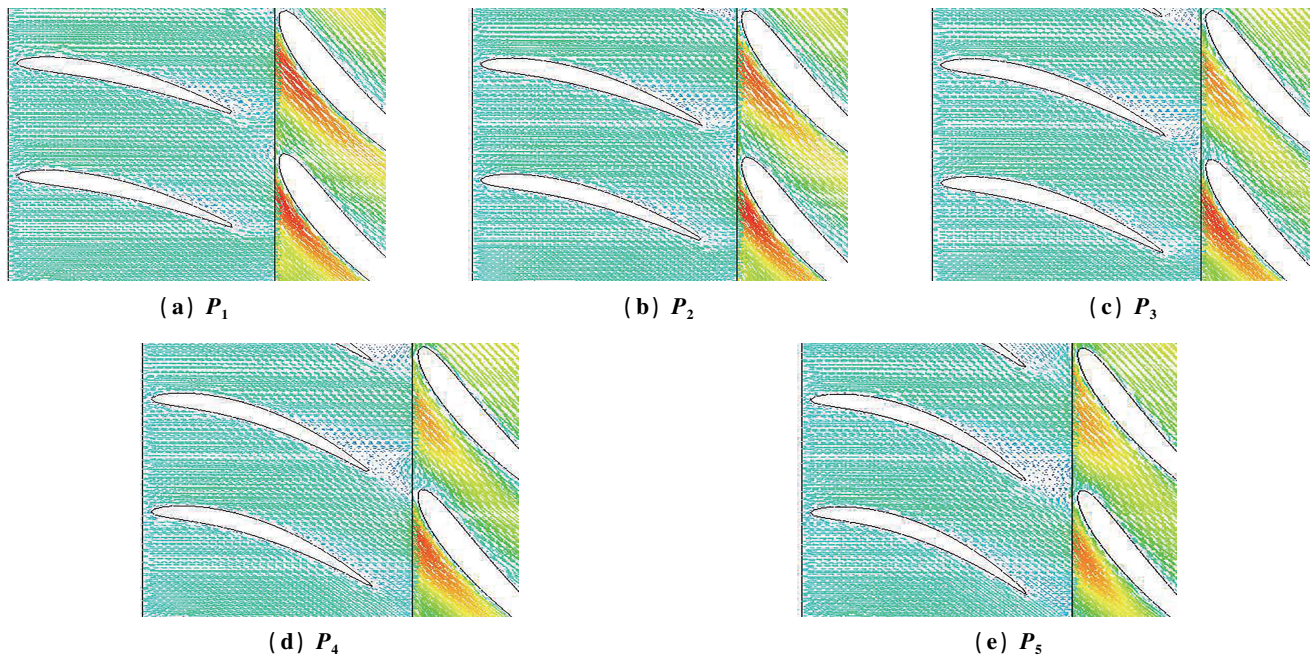


图9 进口导叶 0.5 倍叶高速度矢量图

Fig. 9 Velocity vector diagram of the inlet guide vane 0.5 times of blade height

流道内速度分布可以反映流道内流量分布和流动分离的特征,图 10、图 11 及图 12 分别为进口导叶在 0.15 倍叶高、0.5 倍叶高、0.85 倍叶高截面处的速度分布图。由图 10 可知,前置叶片 15% 叶高处的气体流动,从气流入口开始,主要存在轴向的速度梯度,且随着承担载荷的增加,这种速度梯度也越大,叶片尾缘出口处则更为明显,气流在导叶尾缘局部膨胀,造成流道局部堵塞,通流能力较弱,无法平稳流畅进入动叶。再由图 11、图 12 的速度分布可知,进口导叶的叶中至叶

顶处的气流速度相比于叶根有了明显增大,同时叶片流道的速度分布也更均匀,50% 叶高处相比于叶根的速度梯度也大大减小,85% 叶高处相比于叶根,更主要体现在圆周方向上的速度梯度,并且从 P_1 到 P_5 模型,速度梯度越来越大,尤其是在叶片尾缘到动叶进口之间的速度梯度,这时尾缘处的气流向流道中部扩散,被卷入分离区的气流也越多,干扰到下游气流的流动,使得动叶入口处的流场紊乱,流体微团之间碰撞,流动损失增加,风扇压力、效率下降。

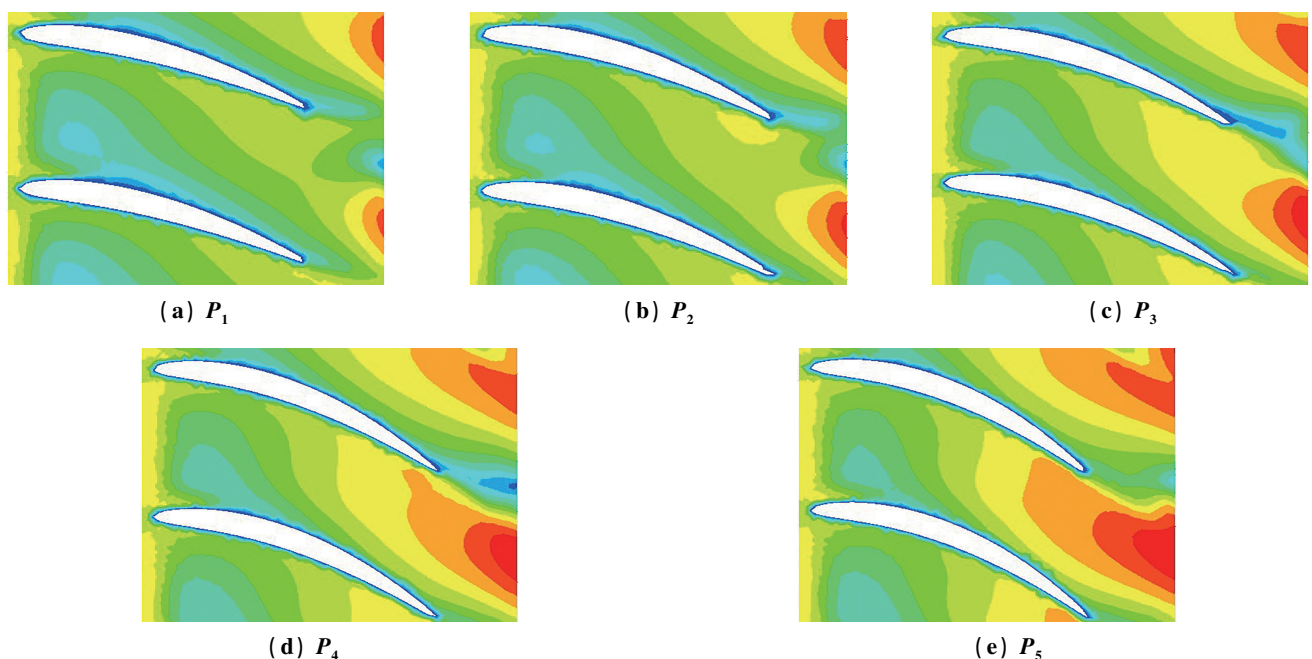


图10 进口导叶 0.15 倍叶高速度分布

Fig. 10 Velocity distribution of the inlet guide vane 0.15 times of blade height

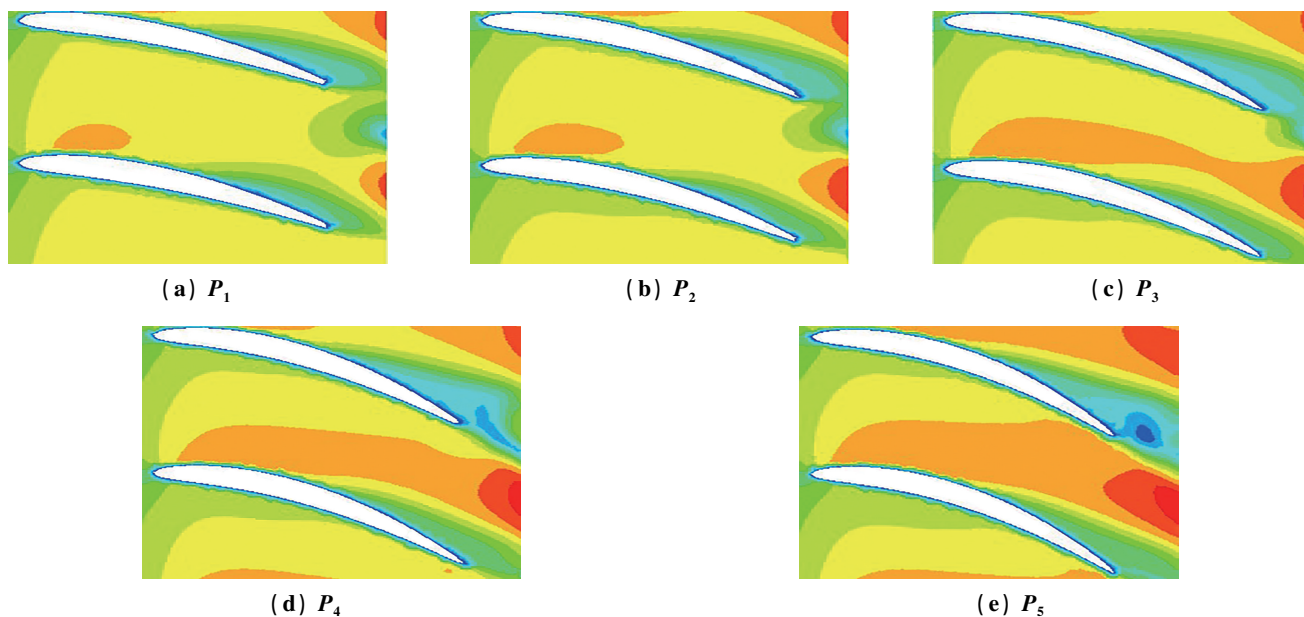


图 11 进口导叶 0.5 倍叶高速度分布

Fig. 11 Velocity distribution of the inlet guide vane 0.5 times of blade height

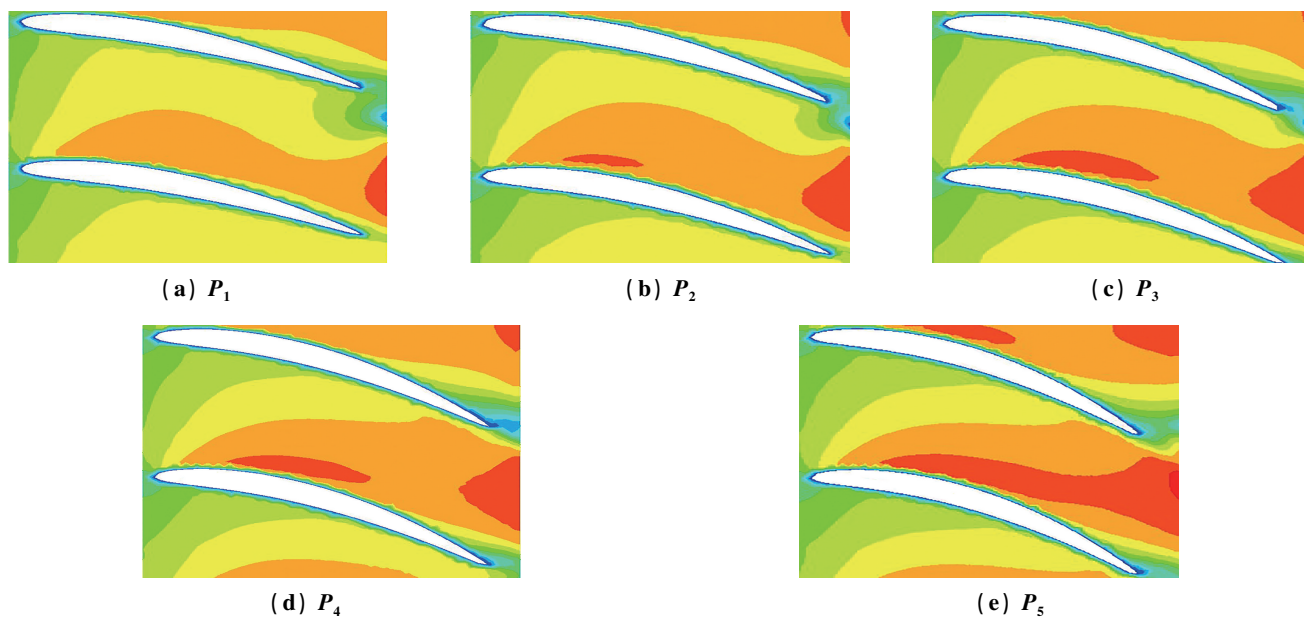


图 12 进口导叶 0.85 倍叶高速度分布

Fig. 12 Velocity distribution of the inlet guide vane 0.85 times of blade height

湍流动能分布表征了流体湍流脉动的程度,代表了流体中微团相互碰撞与动量交换的程度。图 13 为 5 种模型进口导叶出口截面湍动能分布图,可以看出高湍动能主要集中在叶片的 0.5 倍叶高附近区域,正如图 11(a)与图 12(a)对比,图 11(b)与图 12(b)对比,即使 0.85 倍叶高的速度高于 0.5 倍叶高,但是尾缘处的速度梯度则是 0.5 倍叶

高时更大,速度梯度对应着此处的高湍动能区。因此伴随着进口导叶承担负荷增大,叶片尾缘出口处湍动能及高湍动能区域增大,证明了进口导叶出口的速度梯度造成的气流扩散分离,使得流体微团之间碰撞激烈,尾缘涡流强度较大,并且该尾缘涡流和气流分离影响了动叶的进口气流,也引起了风扇整机的压力下降。

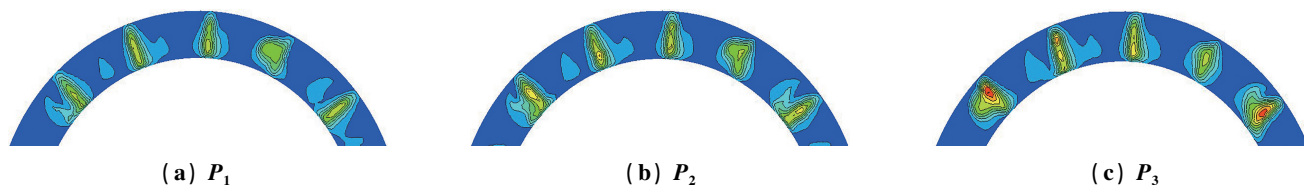




图13 进口导叶出口湍流动能分布

Fig. 13 Turbulent kinetic energy distribution of the inlet guide vane

4 结 论

在小型高压轴流风扇设计中,进口导叶因负偏转而承担的载荷不同,对风扇气动性能影响较大。在设计工况附近,进口导叶负预旋偏转角越小,即设计载荷比例越小,风扇整体压力系数则越高。在设计运行工况点,当预旋角度大于 30° 时,即设计载荷比例 ξ 超过32%时,高负荷轴流风扇压力系数从0.332逐步下降到0.303,全压效率呈下降趋势,故进口导叶气流预旋角度不宜超过 30° 。

数值模拟结果表明:进口导叶气流预旋角度不超过 30° 时,叶片中后部压力梯度较小,圆周方向上的速度梯度减小,叶片尾缘处的附面层分离得到改善,气体流动平稳,降低了动叶进口的气流畸变,有效控制了进口导叶与动叶之间的流动损失。

参考文献(References):

- [1] 李景银,张义云,祁大同. 小型高压小流量轴流风机设计理论[J]. 流体机械, 1997(11): 21—24.
LI Jing-yin, ZHANG Yi-yun, QI Da-tong. Design theory of small axial fan of high pressure small flow[J]. Fluid Machinery, 1997(11): 21—24.
- [2] 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.
- [3] 李杰灵,陈焕龙,刘洋,等. 可控曲率技术在某高负荷轴流风扇气动优化设计中的应用[J]. 动力工程学报, 2019, 39(7): 554—561.
LI Jie-ling, CHEN Huan-long, LIU Yang, et al. Aerodynamic design optimization of a high loaded axial-flow fan based on curvature control technique[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(7): 554—561.
- [4] 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.
WANG Song-tao, DING Jun, ZHU Wei, et al. Aerodynamic design parameters of high-efficiency high-load high-pass capacity axial fan[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2018, 60(2): 25—33.
- [5] 袁小平. 单级轴流式通风机导叶片安装角对气动性能的影响[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(4): 70—72.
YUAN Xiao-ping. Influence of guide vane installation angle on aerodynamic performance of single-stage axial flow fan [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(4): 70—72.
- [6] 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.
YEXue-min, LI Xin-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.
- [7] 李一明,王雷,李宝宽. 动静叶可调子午加速轴流通风机气动性能研究[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.
- [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(S1): 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(S1): 55—62.
- [9] 吴凯旋,邓辉. KSE装置对轴流风机气动性能影响的数值分析[J]. 风机技术, 2020, 62(S1): 11—15.
WU Kai-xuan, DENG Hui. Numerical analysis of KSE device on the aerodynamic performance of axial fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(S1): 11—15.
- [10] 牛东霞. 带后导叶动叶可调轴流风机的优化设计[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
NIU Dong-xia. Optimization of adjustable blade axial flow fan with rear guide vane [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013.
- [11] DONG H S, LIU P H, SHAO H L. Performance model development for the adjustable blades axial flow fan based on multivariate polynomial fitting [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3546(672-674): 1584—1587.
- [12] AI H Z. Simulation analysis of adjustable movable blade axial flow fan[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3227(945-949): 236—241.
- [13] 李庆宜. 通风机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
LI Qing-yi. Fan[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981.