doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.026

采棉机离心风机叶片优化与试验

冯静安　陈　靖　邵文平　王　磊　刁申港　陈　超　栗宇航
（石河子大学机械电气工程学院，石河子 832000）

摘要：采棉机气力输送系统中离心风机性能会对其工作产生重要影响，因此提高采棉机离心风机的工作效率和性能具有重要意义。本文提取原型离心风机叶片的中弧线，并将具有优良流动特性的 NACA 6410 翼型移植耦合到原型叶片中弧线，设计了一种新型离心风机叶片。结合原型风机在采棉机气力输送系统离心风机试验数据，运用 CFD 数值计算分析风机的性能变化。通过离心风机性能试验对比原型风机与优化风机不同转速下的气动性能，探讨新型风机的改善效果以及转速对优化风机性能影响规律。结果表明，优化叶片具有良好的气动性能，新型叶片结构有效抑制了风机内部存在的气流流动紊乱、射流-尾迹、流动分离等现象，使得风机叶片表面的气流更加稳定，从而提高了风机效率。在额定运行条件下，相比于原型风机效率 54.2%，优化后的离心风机效率达到了 58.4%，这一改进表明风机性能有了明显的优化和增强。相比原型风机，优化风机不同转速各个工况点下的运行效率提升了 3.0～5.3 个百分点，特别是在 4 200 r/min 时，风机气动性能的改善效果最为显著，效率提升幅度最高达 5.3 个百分点。

关键词：采棉机；离心风机；叶片优化；CFD；性能分析；NACA 6410 翼型
中图分类号：S225.91　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)11-0275-10　　**OSID**：

Optimization and Test of Centrifugal Fan Blade of Cotton Picker

FENG Jing'an　CHEN Jing　SHAO Wenping　WANG Lei　DIAO Shen'gang　CHEN Chao　LI Yuhang
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: The performance of the centrifugal fan in the pneumatic conveying system of the cotton picker has an important impact on its work, so it is of great significance to improve the working efficiency and performance of the centrifugal fan of the cotton picker. The mid-arc line of the prototype centrifugal fan blade was extracted, and the NACA 6410 airfoil with excellent flow characteristics was transplanted and coupled to the mid-arc line of the prototype blade to design a type of centrifugal fan blade. Combined with test data of prototype fan in centrifugal fan of pneumatic conveying system of cotton picker, the performance change of the fan was analyzed by CFD numerical calculation. Through the centrifugal fan performance test, the aerodynamic performance of the prototype fan and the optimized fan at different speeds was compared, and the improvement effect of new fan and influence of speed on the performance of optimized fan were discussed. The results showed that the optimized blade had good aerodynamic performance. The blade structure effectively suppressed the airflow disorder, 'jet-wake', flow separation and other phenomena inside the fan, making the airflow on the surface of the fan blade more stable, thereby improving the efficiency of the fan. Under the rated operating conditions, compared with the efficiency of 54.2% of the prototype fan, the efficiency of the optimized centrifugal fan was significantly improved, reaching 58.4%. This improvement showed that the performance of the fan was significantly optimized and enhanced. Compared with the prototype fan, the operating efficiency of the optimized fan at different operating conditions was improved by 3.0～5.3 percentage points. Especially at 4 200 r/min, the improvement of the aerodynamic performance of the fan was the most significant, and the efficiency improvement was up to 5.3 percentage points.

Key words: cotton picker; centrifugal fan; blade optimization; CFD; performance analysis; NACA 6410 airfoil

收稿日期：2024-09-02　修回日期：2024-10-11
基金项目：兵团重点领域创新团队建设计划项目(2019CB006)和石河子大学交叉学科研究计划项目(JCYJ202312)
作者简介：冯静安(1977—)，男，教授，博士，主要从事采棉机关键零部件研究，E-mail：fja_mac@shzu.edu.cn

0 引言

新疆作为棉花主产区,2023 年播种面积占全国近 85%。棉花采摘技术从手工转向机械化,采棉机应用极大提升了采摘效率与机械化程度[1-3]。在采棉机中,气力输送系统是重要组成部分,主要承担输送、清选、集棉等功能[4-6]。近年来,针对采棉机气力输送系统进行了大量研究,冯小川等[7]通过流体仿真优化采棉机分风箱结构,提升气力输送效率。周水清等[8]研究气体粘性力矩对蜗壳壁线分布的影响来改善小型多翼离心风机受气体粘性导致的流动分离加剧现象。张子健等[9]运用正交试验设计方法、CFD(Computational fluid dynamics)技术和试验验证等相结合,分析风机性能改善的内部机理。木合塔尔·克力木等[10]分析风机转速与流量对内部流场的影响,揭示其变化规律。田虎楠等[11]则通过模拟不同射流口高度下的流场,优化采棉机气力输棉系统设计,提升管道性能。

风机性能对采棉机采摘效果至关重要。随着机器学习与优化算法进步,研究者通过构建风机近似模型并结合优化算法进行优化。钟良意等[12]利用 CFD 与遗传算法优化风机叶片设计。肖千豪等[13]采用叶型参数化技术与 CFD 模拟优化叶片形状。ZHANG 等[14]基于最速下降法优化无蜗壳离心风机叶型,提升大流量区效率。LIN 等[15]结合机械加工、神经网络与 CFD 技术,实现轴流风扇叶片最优设计。这些研究通过智能算法优化风机设计,以提升采棉机性能。此外对于风机的优化方法,王加浩等[16-17]通过模仿鲤科鱼 C 型启动姿态下的鱼体中心线形态与轮廓构型,对多翼离心风机的叶片进行了仿生设计,并实施了仿生耦合优化。这种设计减轻了风机运行中尾流与蜗舌、蜗壳结构之间产生的非定常气动干扰。王梦豪等[18]提取了长耳鸮翅膀 40% 展向的翼型截面,将其应用于多翼离心风机叶片的型线中,减弱了叶间流道内旋涡流和叶片与蜗舌的非定常相互作用。上述研究对于改善采棉机离心风机气动性能提供了研究思路。

为了提高采棉机气动性能,通过翼型结构来对离心风机进行优化[19-21],采用数值计算方法研究优化后风机叶轮的气动性能,以及进行不同转速下风机流量的对比。分析翼型结构优化与风机性能之间的关系,为采棉机离心风机优化设计提供技术依据。

1 原型风机与数值计算

1.1 原型风机结构

本文研究的高压离心风机用于大型采棉机气力输送系统,图 1 为摘锭式采棉机气力输送系统结构图。离心风机主要由蜗壳、叶轮和集流器组成,叶轮形式为双进气式叶轮,径向式叶片,中间由中盘间隔,由铝制金属材料制成,叶片数为 46;原型风机在额定工况下运行时转速为 4 330 r/min,原型风机叶轮和蜗壳实物如图 2 所示,表 1 为原型叶轮结构参数。

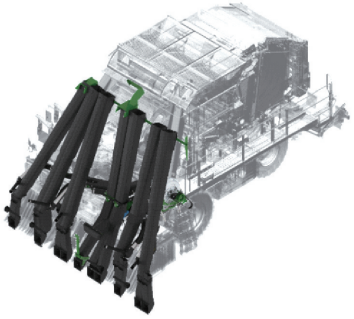
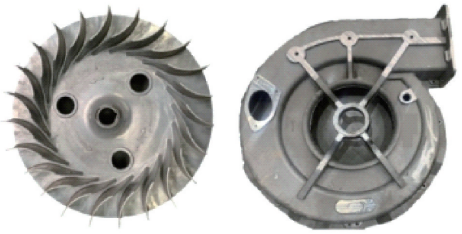


图 1 摘锭式采棉机气力输送系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of pneumatic conveying system of cotton picker



(a) 叶轮 (b) 蜗壳

图 2 原型离心风机实物图

Fig. 2 Prototype centrifugal fan physical diagrams

表 1 原型叶轮结构参数

Tab. 1 Structural parameters of prototype impeller

参数	数值
叶轮内径/mm	300
叶轮外径/mm	482
叶片进口角/(°)	18.5
叶片出口角/(°)	90
叶片包角/(°)	32
叶高/mm	58
叶片数	46

根据双进气式离心风机的特点及输棉通道结构,将流体计算区域划分为进口延伸域、出口延伸域、蜗壳域、叶轮域,延伸段长度均为 3.5 倍集流器直径,蜗壳域和叶轮域之间通过 interface 连接,进口延伸域与叶轮域以及蜗壳域与出口延伸域通过 interior 连接。采用 Solidworks 2021 软件对离心风机进行几何建模,计算域采用 Fluent meshing 中的 Poly-Hexcore 体网格技术进行网格划分,有效降低网格总体数量与求解时间;对蜗舌、叶片区域进行局部网格加密,在蜗壳与叶轮的固体壁面添加边界层,使近壁

面的第 1 层网格的 y^+ 为 20 ~ 50。计算域几何模型及网格如图 3 所示。

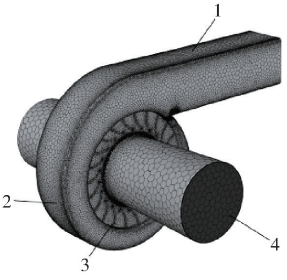


图 3　计算域模型及网格

Fig. 3　Computational domain model and grid

1. 出口延伸域　2. 蜗壳域　3. 叶轮域　4. 进口延伸域

以离心风机全压作为验证目标，对原型风机计算域的网格数进行网格无关性验证，总网格数与风机全压的关系如图 4 所示，在网格数为 1 436 万时，风机全压基本不再随着网格数的增加而变化，满足网格无关性的要求。为了保证计算的准确性并减小计算时间，流体域的总网格数为 1 458 万，蜗壳和叶轮区域的网格数分别为 253 万和 1 205 万。

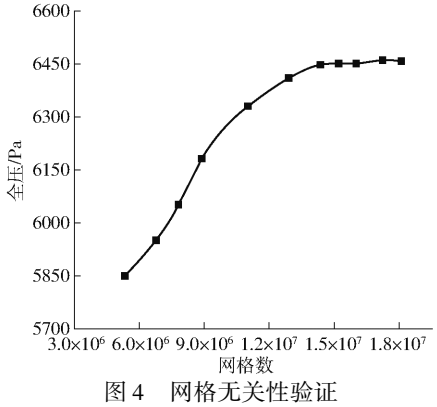


图 4　网格无关性验证

Fig. 4　Grid independence verification

1.2　数值计算方法

采用数值计算软件 ANSYS FLUENT 对离心风机的流场进行数值模拟，由于风机的转速较高，考虑流体的可压缩性，流动控制方程选择 Navier－Stokes 方程，综合考虑模型的计算误差与收敛速度，湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型，近壁面函数选用 Standard Wall Functions，壁面边界条件采用无滑移边界条件，压力和速度耦合采用 Couple 算法；为保证计算精度，控制方程的湍动能、湍流耗散率以及动量均采用 Second Order Upwind 格式，压力项采用 PRESTO! 离散格式。给定压力入口和质量流量出口边界条件，将叶轮区设置为旋转区域，旋转区域采用 MRF 多参考系模型，设定转速为 4 330 r/min，各物理变量收敛残差设置为 10^{-4}。

1.3　误差分析

根据采棉机技术说明，高压离心风机在额定工况运行时，由于风机运行过程中存在各种机械损失以及测量过程中存在误差，数值模拟结果与实际测量值存在一定差异，但指标误差范围均在 5% 以内，符合工程实际应用可接受误差范围。图 5 为原型风机数值模拟与实际工况性能曲线，表明本文数值计算模型及方法的可靠性，能够准确预测离心风机的气动性能和捕捉内部流动特征。

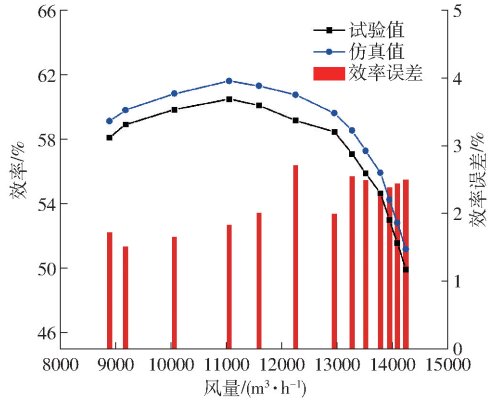


图 5　离心风机性能曲线

Fig. 5　Centrifugal fan performance curves

2　叶片优化设计

2.1　翼型构造

本文优化主要采用翼型结构，NACA 系列翼型具有优良的流动特性及流线型外形特征[22－23]，本文借鉴成熟的 NACA 6410 翼型构造新的叶片，翼型的中弧线和厚度分布是影响翼型外形的最主要因素，NACA 6410 翼型的后缘较薄，给结构设计和制造带来了困难，本文将翼型后缘尖点修改为固定长度，翼型 40% 弦长至后缘点的曲线在翼型设计软件中生成，以翼型的前缘点为原点，获得原翼型和修正后翼型的几何特征点坐标，翼型截面型线如图 6 所示。

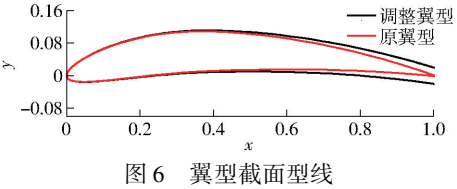


图 6　翼型截面型线

Fig. 6　Airfoil cross-section profile

2.2　叶片重构

本文研究的离心风机叶片为铝制金属叶片，在实际工作时，采棉机气力输送系统会存在异物进入离心风机内部的情况，且叶轮转速较高，离心风机叶片工作时会与空气产生大量的摩擦热，因此现有离心风机叶轮存在易损坏、使用寿命短的问题，具体表现为叶片在根部发生折断。因此在叶片优化过程中需要考虑叶片加厚和叶片表面形状的改善。叶片中弧线的弯曲特性直接影响到离心风机的气动性

能[24],本文前期研究的叶片中弧线在整体气动性能上优于同类风机叶片的中弧线。因此,本文在原有叶片弧线的基础上进行了优化,将翼型骨架线进行坐标变换,变换后的骨架线与原型叶片中弧线重合。

首先,采用多项式拟合对原型叶片中弧线进行拟合修正,所形成的拟合曲线如图 7 所示,叶片中心线拟合方程的 R^2 均在 0.999 以上,根据方程形成的曲线与原型叶片中弧线形状较一致,保证了拟合曲线具有与原型叶片相近的气动特性。拟合曲线对应的方程为

$$y = 3.08068x - 0.01534x^2 - 1.12648\times10^{-4}x^3 + 1.00053\times10^{-6}x^4 - 1.90319\times10^{-9}x^5 \quad (80\ \text{mm}\leqslant x\leqslant 220\ \text{mm}) \tag{1}$$

R^2 表示决定系数,用来度量回归线对观测值拟合优度的统计量,$R^2=0.999$。R^2 值越接近 1,说明拟合曲线对观测值的拟合程度越好。R^2 在 0.999 以上,保证了拟合曲线具有与原型叶片中弧线相近的性能特性。优化后的叶片如图 8b 所示,与原型叶片相比,新的叶片在叶片前缘附近(气流入口处)厚度得到加强,叶片面积增大,加强了叶轮做功能力。

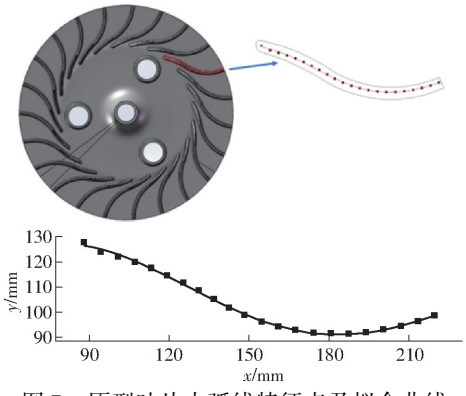


图 7 原型叶片中弧线特征点及拟合曲线

Fig. 7 Arc feature points and fitting curve of prototype blade

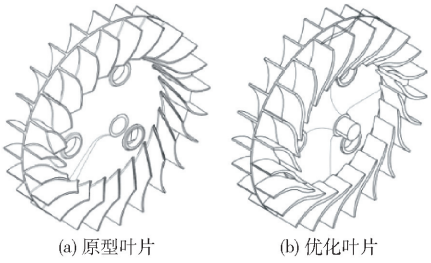


图 8 原型叶片和优化叶片比较图

Fig. 8 Comparison of prototype blade and optimized blade

3 试验

为了对采棉机气力输送系统离心风机的性能进行测试,搭建了离心风机性能测试试验台,如图 9 所示,试验平台按照 GB/T 1236—2017《工业通风机用标准化风道性能试验》标准进行,风量测量范围为 3 000 ~ 30 000 m^3/h。



图 9 风机性能测试试验台

Fig. 9 Fan performance test bench

图 10 所示为风室多喷嘴风机气动性能测试试验装置结构示意图,符合国家标准中规定的 B 型试验装置要求。在试验过程中,电动机驱动离心风机旋转,风机所产生的气流通过静压采集,随后通过稳流网。稳流网的作用是使得风室内的气流更加均匀。接着,气流通过控制喷嘴进入风室,采集喷嘴两端的压差,通过风压和风道参数的计算得到风量。最后,气流通过风量控制阀,由辅助风机抽出风室。

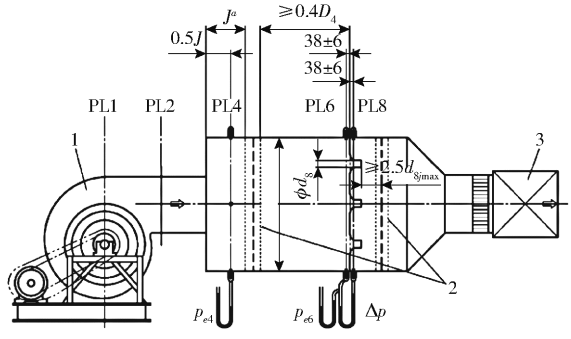


图 10 风机气动性能测试试验装置结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of fan aerodynamic performance test device

1. 试验风机 2. 稳流装置 3. 辅助风机

3.1 风机内部速度场分析

通过分析两种叶片在额定工况运行点下内部流动状况,揭示叶轮内部流动的改善效果。图 11 为叶片截面高度及平面展开角度示意图,图 12、13、14 分别表示 20%、40%、80% 叶高截面关于速度分布的平面展开图。在原型叶片的 20% 叶高截面,由于叶片的前段主要负责引导气流,因此 20% 叶高截面流体流速较低,速度分布不均匀。特别是在展开角 100° ~ 150°范围内,由于该区域靠近涡舌,速度梯度较大,导致流道内速度分布较为紊乱。优化后,叶间流道内的整体速度得到提升,速度分布更加均匀,蜗舌对入口气流的影响作用减弱,附近叶间流道内的气流分布更加平稳。同时,流道内存在的局部低速区减小,叶间流道内气流与两侧蜗壳壁之间的相互作用也减小,从而降低了能量损失。

相较于 20% 叶高截面,40% 叶高截面内的流道流体流速增加,这是由于叶轮对流体持续做功。在

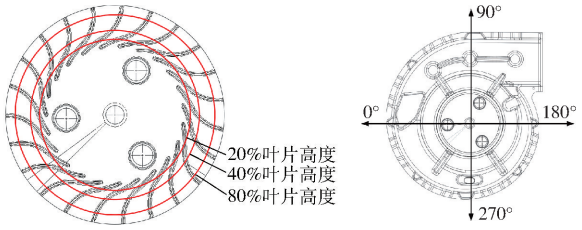
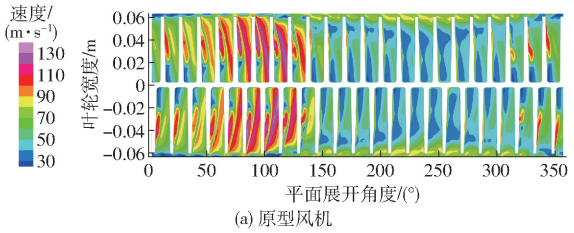
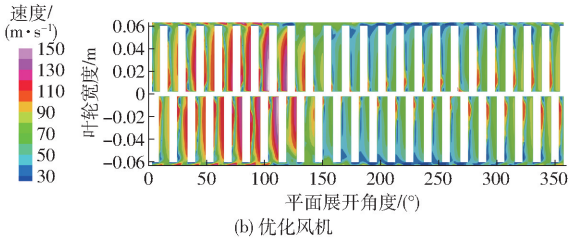


图 11　叶片截面高度及平面展开角度示意图

Fig. 11　Blade section height and plane expansion angle diagram



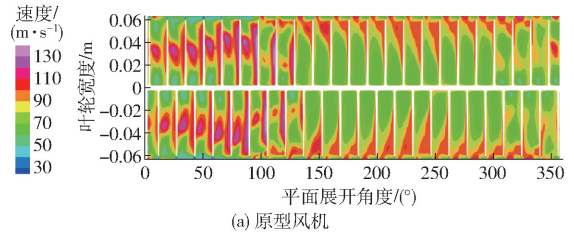
(a) 原型风机



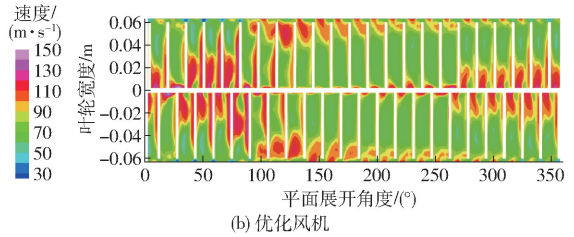
(b) 优化风机

图 12　叶轮区域 20% 叶高截面展开云图

Fig. 12　Contour of 20% blade height section unfolded in impeller region



(a) 原型风机



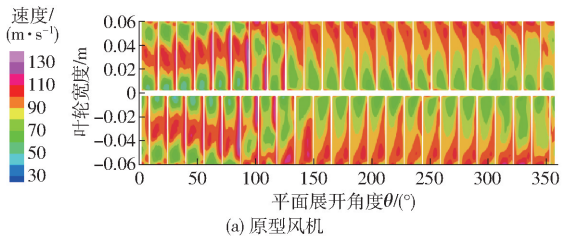
(b) 优化风机

图 13　叶轮区域 40% 叶高截面展开云图

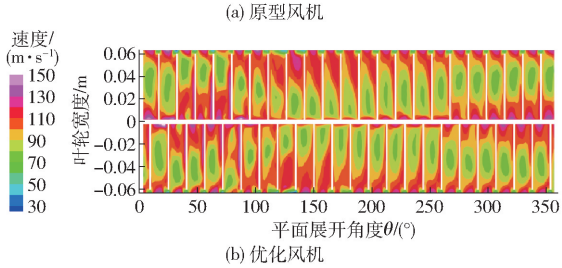
Fig. 13　Contour of 40% blade height section unfolded in impeller region

原型风机中，叶片吸力面靠近蜗壳壁处形成高速区，这是由于轴向涡旋运动导致叶片的吸力面上两种速度叠加，相对速度增加。

80% 叶高截面叶间流道内流体的流动状态已经接近叶轮出口的状态，从图 14 中可以清晰地观察到原型叶轮整体的趋势：靠近叶轮中盘的位置，流体速度较低；而远离叶轮中盘的位置，速度逐渐增加。优化后的叶轮速度中间部分速度较低，而叶片两侧速度较高，形成了低速区域的涡旋。新型叶片结构的



(a) 原型风机



(b) 优化风机

图 14　叶轮区域 80% 叶高截面展开云图

Fig. 14　Contour of 80% blade height section unfolded in impeller region

应用有效减少了叶间流道内的低速区域，改善了速度分布，并减弱了叶间流道内的气流与两侧蜗壳壁的相互作用，从而降低了能量损失。

图 15 为原型风机和优化风机叶轮区域截面的湍动能分布图。从图中可以看出，在原型风机中，0°～160°区域叶间流道内均存在较高强度的湍动能，叶轮正上方流道内湍流强度最高，这是因为从 0°开始，蜗壳内部的气流流量逐步增加，气流与蜗舌区域存在撞击并产生回流，影响了叶间流道内气流的稳定性，导致了湍动能的增加。经过优化，原型风机叶间流道内存在的强湍动能得到了抑制，有效地引导入口气流，并减小了入口气流的冲击角。叶片流线型的外形使得气流在流道内更加顺畅地流动，从而降低了叶间流道内的能量损失。优化结构对叶片进行了加厚处理且采用了翼型结构设计，使叶间流道更加稳定，减弱了叶片与气流间的相互作用力，改善了叶片在根部易折断的现象。

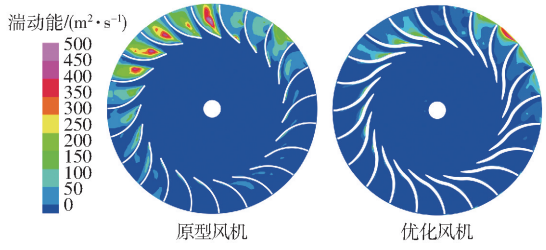


图 15　风机截面湍动能云图

Fig. 15　Contour of turbulent kinetic energy at section

图 16 为原型风机和优化风机出口速度分布云图。为了对离心风机出口气流的状态进行评价，本文采用均匀性指数表示指定场变量在一个表面上的变化程度，捕捉通量在面上的变化，其中值为 1 表示最高的均匀性。

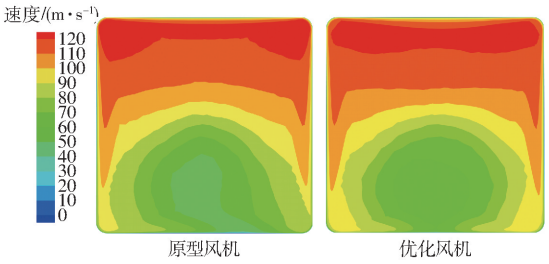


图 16 风机出口速度分布云图

Fig. 16 Wind turbine outlet velocity distribution cloud

$$\gamma_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\left|\phi_i - \overline{\phi}_m\right|\right)\left(\left|\rho_i v_i A_i\right|\right)\right]}{2\left|\overline{\phi}_m\right|\sum_{i=1}^{n}\left[\left|\rho_i v_i A_i\right|\right]} \tag{2}$$

式中 γ_m——表面面积加权平均值

ρ——流体密度 v——出口气流速度

A——表面面积

i——具有多个面的曲面的面索引

而 $\overline{\phi}_m$ 表示场变量通过曲面的平均通量

$$\overline{\phi}_m = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\phi_i\left(\left|\rho_i v_i A_i\right|\right)\right]}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left|\rho_i V_i A_i\right|\right]} \tag{3}$$

原型风机和优化风机在出口截面速度分布呈现出相似的规律。具体而言,原型风机的出口平均速度为 94.12 m/s,优化风机的出口平均速度为 94.67 m/s。通过比较两者的均匀性指数来观察出流的稳定性,原型风机的均匀性指数为 0.886 9,而优化后的风机则提高至 0.903 6,表明具有更高的出流稳定性。而在效率方面,原型离心风机的效率为 54.2%(仿真值),而优化后的风机效率则提升至 58.4%。

3.2 转速变化对风机流场的影响

为了深入了解离心风机性能受转速影响的情况,对不同转速下离心风机的性能曲线进行研究。通过实地调研发现,所研究的离心风机在实际田间作业时,其转速通常在 4 300 ~ 4 350 r/min 之间波动。因此,分别对 4 330 r/min(额定转速)和 4 350 r/min 下的性能曲线进行绘制;同时,为了探究低转速下离心风机的性能,对 4 100、4 200 r/min 转速下的性能曲线进行测定。

3.2.1 转速为 4 350 r/min 时风机性能曲线分析

图 17 为原型风机和优化风机转速 4 350 r/min 时的全压-风量曲线和效率-风量曲线。随着风量的增加,原型风机和优化风机全压均呈现近似线性下降的趋势,并且曲线斜率较高。优化风机所有工况点下的总压均大于原型风机,优化风机完成了对原型风机全压-风量曲线的覆盖。静压为 0 Pa 时,与原型风机相比,优化风机最大风量增加了 196 m^3/h。经过优化,风机的气动性能有了显著提升。

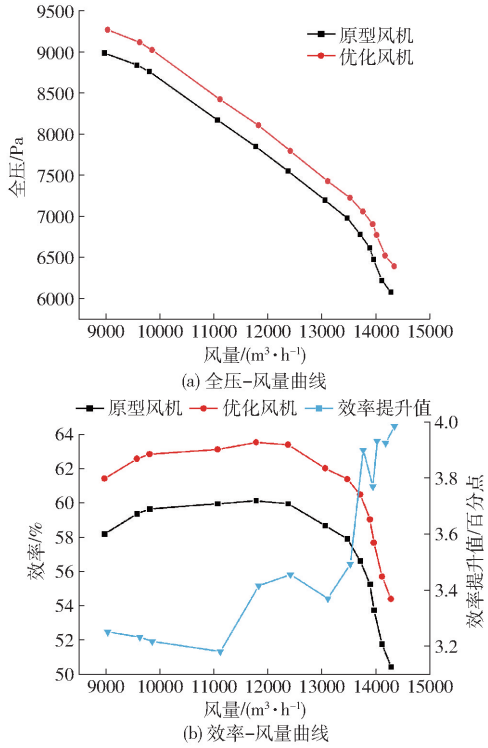


图 17 4 350 r/min 时离心风机性能曲线

Fig. 17 Performance curves for centrifugal fan at 4 350 r/min

观察风机的效率-风量曲线,原型风机和优化风机均呈现出“先增大后减小”的趋势。此时,离心风机效率-风量曲线在最高效率点附近变化较平缓,风机表现出稳定的性能,不会因风量的轻微变化而出现剧烈的效率波动。相比原型风机,优化风机的运行效率提升了 3.0 ~ 3.9 个百分点。

3.2.2 转速为 4 330 r/min 时风机性能曲线分析

图 18 为原型风机和优化风机转速 4 330 r/min 时的全压-风量曲线和效率-风量曲线。随着风量的增加,原型风机和优化风机全压-风量曲线与转速为 4 350 r/min 时曲线的变化趋势相同。优化风机所有工况点下的全压均大于原型风机,优化风机完成了对原型风机全压-风量曲线的覆盖。静压为 0 Pa 时,与原型风机相比,优化风机的最大风量增加 202 m^3/h,经过优化,风机转速为 4 330 r/min 时气动性能也有了显著提升。

根据风机效率-风量曲线,原型风机和优化风机的效率均呈现“先增大后减小”的趋势,与转速为 4 350 r/min 时的性能曲线相似。不同之处在于,4 350 r/min 时风机具有更宽的高效工作区。相比原型风机,此时优化风机的运行效率提升了 3.0 ~ 4.2 个百分点。

3.2.3 转速为 4 200 r/min 时风机性能曲线分析

图 19 为原型风机和优化风机在转速为

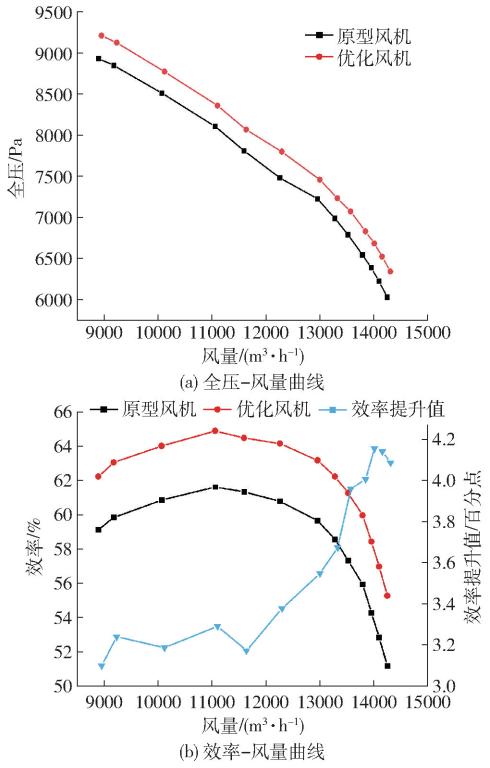


图 18　4 330 r/min 时离心风机性能曲线

Fig. 18　Performance curves for centrifugal fan at 4 330 r/min

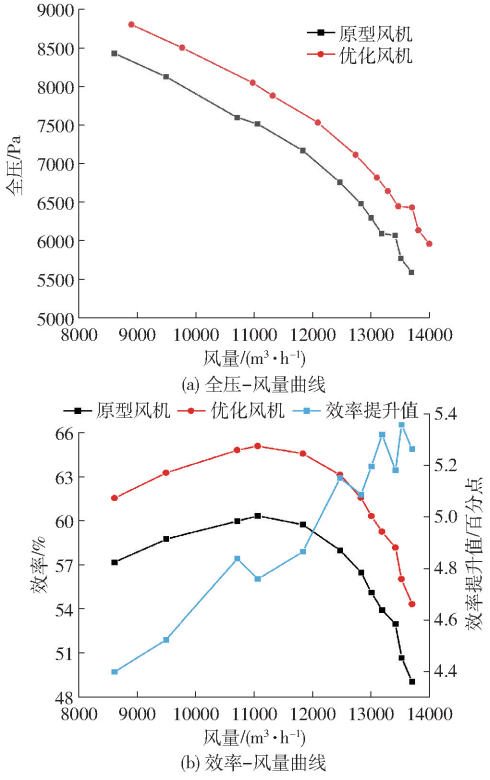


图 19　4 200 r/min 时离心风机性能曲线

Fig. 19　Performance curves for centrifugal fan at 4 200 r/min

4 200 r/min 时的全压-风量曲线和效率-风量曲线。随着风量的增加，原型风机和优化风机的全压-风量曲线呈现出与转速为 4 350、4 330 r/min 时曲线相似的变化趋势。在所有工况点下，优化风机的全压均高于原型风机。同时，在相同工况点下，4 200 r/min 时优化风机的输出全压提升值高于转速为 4 350、4 330 r/min 时的提升值；当静压为 0 Pa 时，相比于原型风机，优化风机的最大风量增加了 286 m^3/h。经过优化，风机的气动性能提升效果最为显著。

根据风机效率-风量曲线观察可得，原型风机和优化风机的效率均表现出“先增大后减小”的趋势。然而，与原型风机相比，此时优化风机的运行效率提升了 4.0 ~ 5.3 百分点。显然，随着风量的增加，效率的提升越为显著。鉴于本文研究的离心风机在采棉机气力输送系统中运行时转速较高，对轴承的损坏较为严重，仿真结果显示，优化风机在转速为 4 200 r/min 时的性能接近于原型风机在 4 330 r/min 时的性能水平。因此，下面对优化风机进行实际试验验证，并将其应用到实际系统中。

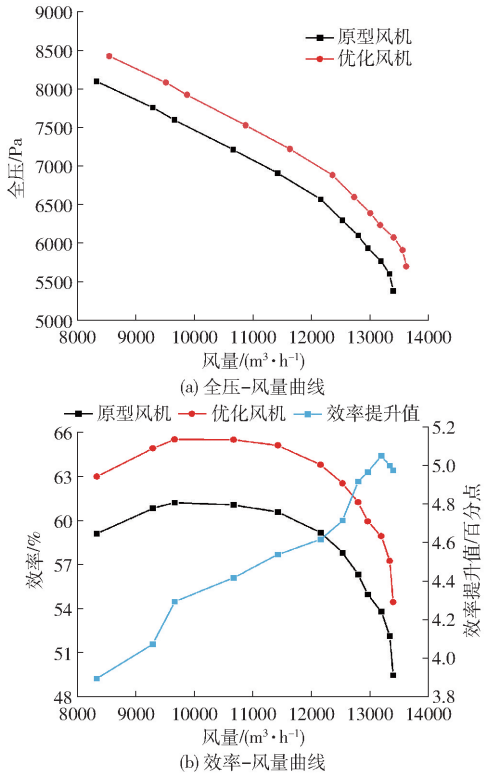


图 20　4 100 r/min 时离心风机性能曲线

Fig. 20　Performance curves for centrifugal fan at 4 100 r/min

3.2.4　转速为 4 100 r/min 时风机性能曲线分析

图 20 为原型风机和优化风机在转速为 4 100 r/min 时的全压-风量曲线和效率-风量曲线。由图可知转速为 4 350、4 330、4 200、4 100 r/min 时曲线的变化趋势相同，均呈现出随着风量的增加，风机全压近似线性下降的趋势，不同转速下原型风机和优化风机全压-风量曲线相似。优化风机完成了对原型风机全压-风量曲线的覆盖，与原型风机相比，优化风机不同风量工况点下的风机静压、全压均有所增加。经过优化，风机的气动性能都有了显著提升。

根据风机的效率-风量曲线可知,4 350、4 330、4 200、4 100 r/min 的效率-风量曲线相似,随着风量的增加,风机效率先上升后下降,并在最佳流量点附近达到最大值,呈现出“先增大后减小”的趋势。与原型风机相比,优化风机的运行效率提升了 3 ~ 5 个百分点,其中 4 200 r/min 时风机气动性能的改善效果最为显著。

3.3 优化风机不同转速下的内部流场分析

图 21 为不同转速下的截面速度云图。随着转速的降低,截面的速度呈现逐步下降趋势。原型风机在额定转速下的运行效率为 54.2%。在该流量工况点下,优化风机的效率提高了约 4.2 个百分点。

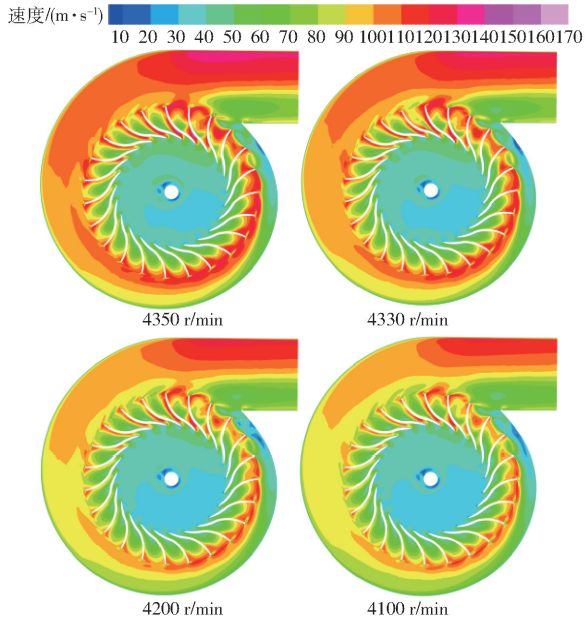


图 21 优化风机截面速度云图

Fig. 21 Optimization of fan section velocity cloud diagram

图 22、23 为不同转速下截面的静压云图。原型风机随着转速的降低,叶间流道内的低压区域扩大,逐步扩散至蜗壳区域以及气流入口,涡流在叶片之间的流动速度减慢,流场扩散趋势增强。这意味着气流倾向于朝着压力较低的区域扩散,同时导致压力梯度增加,从而使叶间流道内的压力降低。这种低压区域的扩大会逐渐影响到蜗壳区域和气流入口。对于优化风机这种现象基本消失,新型叶片改善了叶片表面和叶间气流流动的稳定性,从而减少涡流和压力梯度的变化,阻止了低压区域的扩大。

图 24、25 为原型风机和优化风机不同转速下截面湍动能云图。不同转速下原型风机截面湍动能值均高于优化风机截面湍动能值。原型风机中,随着风机转速降低,截面湍动能强度也逐步降低;优化风机转速对截面湍动能没有显著影响。

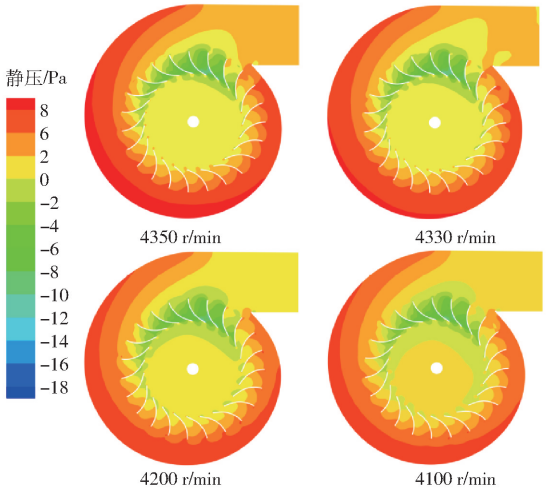


图 22 原型风机截面静压云图

Fig. 22 Cross-section static pressure cloud diagram of prototype fan

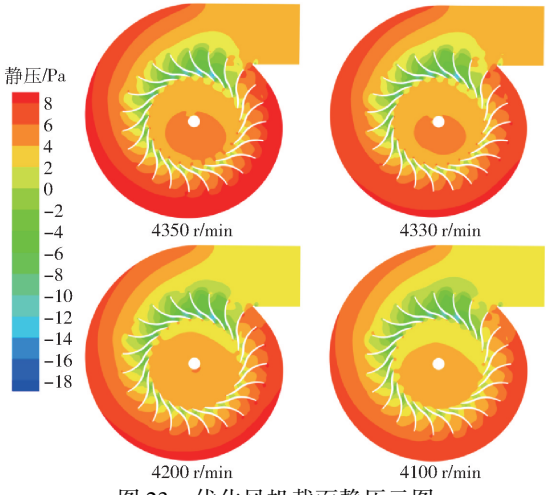


图 23 优化风机截面静压云图

Fig. 23 Cross-section static pressure cloud diagram of optimized fan

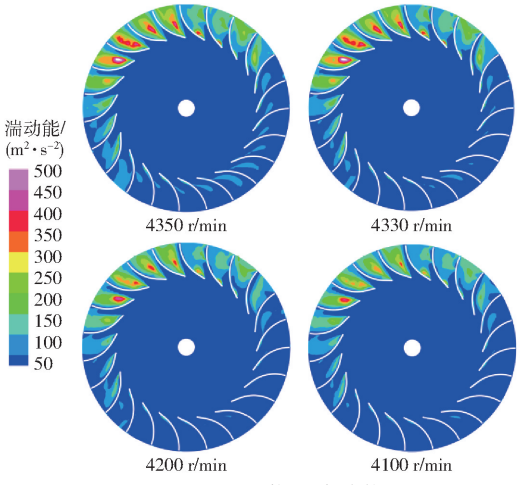


图 24 原型风机截面湍动能云图

Fig. 24 Turbulent kinetic energy cloud diagram of prototype fan section

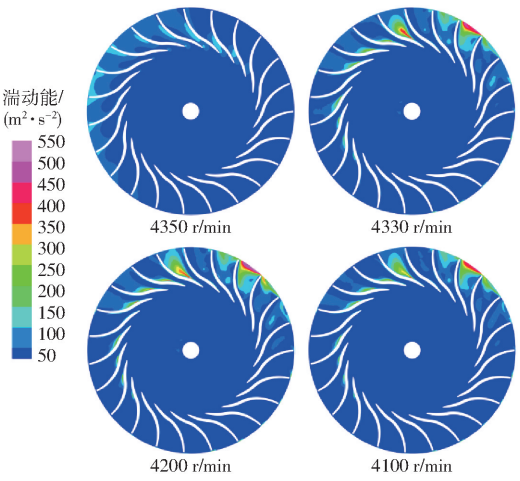


图 25　优化风机截面湍动能云图

Fig. 25　Turbulent kinetic energy cloud diagram of optimized fan section

4　结论

(1)新型叶片结构能够有效减小入口处的气流冲击角,从而降低了叶间流道内的冲击损失,改善了叶片根部易折断的现象。同时,该结构改善了叶间流道内气流的紊乱程度,并减弱了出口处的“射流-尾迹”现象,进一步减少了流动分离的发生,从而降低了能量损失。

(2)原型风机和优化后风机的流场分布规律相似,经过优化,风机出口的出流速度和稳定性得到了提升,不仅能够更有效地输出风力,而且运行效率也得到了提升,风机的效率由 54.2% 提升为 58.4%,提升了 4.2 个百分点。

(3)随着风机风量增加,不同转速下的风机全压近似线性下降,风机效率则呈现先增大后减小的趋势。在转速较高时,效率-风量曲线的最高效率点附近变化较为平缓,风机具有更宽的高效工作区。然而,当风量超过一定值时,风机效率会迅速下降。

(4)现有离心风机应用于气力输送系统时,通常无法运行在最佳工况点,其内部流场存在流动分离、跨叶轮流动、气流堆积以及入口流动角与叶片入口安装角不匹配等问题,导致运行效率偏低。

(5)原型风机和优化风机的性能曲线变化趋势一致,流场分布也相似。相比原型风机,优化风机不同转速各个工况点下的运行效率提升了3.0 ~ 5.3 个百分点,特别是在 4 200 r/min 时,风机气动性能的改善效果最为显著。此外,由于优化风机采用了融入翼型的叶片设计,随着风机风量的增加,新型叶片对风机气动性能的改善效果愈加显著。

参　考　文　献

[1] 陈传强,蒋帆,张晓洁,等. 我国棉花生产全程机械化生产发展现状、问题与对策[J]. 中国棉花,2017,44(12):1 - 4.
CHEN Chuanqiang, JIANG Fan, ZHANG Xiaojie, et al. The present situation, problems and countermeasures of mechanized production of cotton in China[J]. China Cotton, 2017, 44(12):1 - 4. (in Chinese)

[2] 国家统计局关于 2022 年棉花产量的公告 [N]. 中国信息报,2022 - 12 - 27(001).

[3] 国家统计局关于 2023 年棉花产量的公告 [N]. 中国信息报,2023 - 12 - 26(001).

[4] WANG C Y, WANG X N, CHEN F, et al. Flow field analysis of conducting trunk of comb-type cotton picker[J]. Advanced Materials Research, 2012, 468:1749 - 1752.

[5] 肖霄,孙奎,谢方平,等. 水平摘锭式采棉机采摘系统研究现状与展望[J]. 农机化研究,2023,45(10):1 - 9.
XIAO Xiao, SUN Kui, XIE Fangping, et al. Horizontal spindle type cotton picker picking system research status and prospects [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10):1 - 9. (in Chinese)

[6] 石茂林,高小雅,张卫东,等. 采棉机关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(5):167 - 183.
SHI Maolin, GAO Xiaoya, ZHANG Weidong, et al. Development status and prospect of research on key technologies of cotton pickers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):167 - 183. (in Chinese)

[7] 冯小川,韩树杰,郝付平,等. 基于 ANSYS 的采棉机分风箱应用研究[J]. 农业工程,2024,14(5):89 - 93.
FENG Xiaochuan,HAN Shujie,HAO Fuping,et al. Application research on air distribution box of cotton picker based on ANSYS [J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(5):89 - 93. (in Chinese)

[8] 周水清,王曼,李哲宇,等. 多翼离心风机蜗壳改型设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):180 - 186, 249.
ZHOU Shuiqing, WANG Man, LI Zheyu, et al. Influence of volute retrofit design on performance of multi-blade centrifugal fan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):180 - 186, 249. (in Chinese)

[9] 张子健,余晴阳,邓业林,等. 考虑叶轮与蜗壳间隙的风机多因素正交优化设计[J]. 流体机械, 2023, 51(6):26 - 32.
ZHANG Zijian, YU Qingyang, DENG Yelin, et al. Multi-factor orthogonal experimental optimization design of an industrial fan considering the clearance between impeller and casing[J]. Fluid Machinery, 2023, 51(6):26 - 32. (in Chinese)

[10] 木合塔尔·克力木,王晨,孙海霞,等. 采棉机风机内部流场数值研究[J]. 液压与气动, 2018,42(2):9 - 13.
MUHETAER·KELIMU, WANG Chen, SUN Haixia, et al. Numerical study on internal flow field of cotton picker fan[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018,42(2): 9 - 13. (in Chinese)

[11] 田虎楠,王春耀,王学农,等. 基于 FLUENT 的采棉机输棉系统内部流场的模拟研究[J]. 机械设计与制造, 2012(3):125 - 127.

TIAN Hunan, WANG Chunyao, WANG Xuenong, et al. Simulation for internal flow field of conveying system of cotton-picking machine based on FLUENT[J]. Journal of Mechanical Design and Manufacturing, 2012(3):125 - 127. (in Chinese)

[12] 钟良意,张增磊,宗超勇,等. 采棉机风机叶片优化与流场分析[J]. 液压与气动, 2024,48(5):77 - 85.
ZHONG Liangyi, ZHANG Zenglei, ZONG Chaoyong, et al. Fan blade optimization and flow field analysis for cotton picker [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2024, 48(5):77 - 85. (in Chinese)

[13] 肖千豪,王军,蒋博彦,等. 多翼离心风机叶片参数化及多目标优化研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(12):2977 - 2981.
XIAO Qianhao, WANG Jun, JIANG Boyan, et al. Parametric and multi-objective optimization of the squirrel cage fan[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(12):2977 - 2981. (in Chinese)

[14] ZHANG H, WANG Z, YANG H, et al. Blade shape optimization and internal-flow characteristics of the backward non-volute centrifugal fan[J]. Journal of Power and Energy, 2022, 236(4): 673 - 688.

[15] LIN B J, HUNG C I, TANG E J. An optimal design of axial-flow fan blades by the machining method and an artificial neural network[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2002, 216(3):367 - 376.

[16] 王加浩,龚东巧,刘小民,等. 采用仿鲤科鱼 C 型启动构型叶片的多翼离心风机气动性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(9):57 - 68.
WANG Jiahao, GONG Dongqiao, LIU Xiaomin, et al. Aerodynamic performance of multi-blade centrifugal fan with bionic blades inspired by C-type start of cyprinidae[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9):57 - 68. (in Chinese)

[17] 王加浩,乔洋,田晨晔,等. 仿鲤科鱼 C 型启动多翼离心风机叶片性能研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(9):2363 - 2373.
WANG Jiahao, QIAO Yang, TIAN Chenye, et al. A study on aerodynamic performance of multi-blade centrifugal fan by using the bionic blade inspired by the cyprinidae C-start[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(9):2363 - 2373. (in Chinese)

[18] 王梦豪,吴立明,刘小民,等. 采用仿鸮翼叶片降低空调用离心风机气动噪声的研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6):55 - 61.
WANG Menghao, WU Liming, LIU Xiaomin, et al. A study on noise reduction of centrifugal fan in air conditioner by using the bionic blade inspired by the owl wing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2018,52(6):55 - 61. (in Chinese)

[19] 韩非非,席德科. 多翼离心风机数值计算及改进设计研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8):992 - 996.
HAN Feifei,XI Deke. Numerical calculation and improvement design of a multi-blade centrifugal fan[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(8):992 - 996. (in Chinese)

[20] 韩忠华,高正红,宋文萍,等. 翼型研究的历史、现状与未来发展[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(6):1 - 36.
HAN Zhonghua, GAO Zhenghong, SONG Wenping, et al. On airfoil research and development: history, current status, and future directions[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(6):1 - 36. (in Chinese)

[21] ZHAO X, GUAN J, WANG T, et al. Optimization of impeller structure parameters of a centrifugal fan in a powered air-purifying respirator power system[J]. Processes, 2024, 12(2):353.

[22] 王星,朱阳历,李文,等. NACA 翼型叶顶对低展弦比向心涡轮影响特性[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18):172 - 179.
WANG Xing, ZHU Yangli, LI Wen, et al. Effects of blade tip profile based on NACA airfoil on aerodynamic performance of low aspect ratio radial-inflow turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18):172 - 179. (in Chinese)

[23] 倪少松. 基于翼型叶片前向多翼离心通风机内部流动特性及噪声分析[D]. 杭州:浙江理工大学, 2020.
NI Shaosong. Internal flow characteristics and noise analysis of forward multi-blade centrifugal fan[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020. (in Chinese)

[24] 王加浩, 刘小民, 田晨晔, 等. 多翼离心风机双圆弧叶片的参数优化设计及气动性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3):94 - 104.
WANG Jiahao, LIU Xiaomin, TIAN Chenye, et al. Parametric optimization design of double-circular arc blade used in multi-blade centrifugal fan and its aerodynamic analysis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3):94 - 104. (in Chinese)