



刘志伟,于爽,张玉芬,卜崇兴,丁涛. 导流锥结构对农用轴流风机性能的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(01):193-201.

LIU Zhiwei, YU Shuang, ZHANG Yufen, BU Chongxing, DING Tao. Influence of the guide cone structure on the performance of agricultural axial fans[J].

Journal of China Agricultural University, 2026, 31(01): 193-201.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.01.16

导流锥结构对农用轴流风机性能的影响

刘志伟¹ 于爽² 张玉芬² 卜崇兴³ 丁涛^{2*}

(1. 中国农业大学 基建处,北京 100083;

2. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083;

3. 新疆科创天达农业工程有限公司,新疆 昌吉 831814)

摘要 针对农用轴流风机在高静压、小流量工况下性能偏低的问题,以550圆筒轴流风机为研究对象,采用CFD数值模拟和响应面分析法对其进行结构优化。选取外壳部件的进口段长度和出口段长度,以及进口导流锥长度和出口导流锥长度为试验因素,以风机风量和能效比为评价指标,系统分析外壳部件优化及导流锥增设对风机整体性能的影响。使用Liutex涡识别方法对风机的流场进行涡识别,分析风机内部流场涡结构。结果表明:在对外壳部件进行优化并增设导流锥结构后,电机尾部流场内的涡明显减小。与原型风机相比,优化方案使风量提高7.39%,能效比提高2.6%。增设导流锥结构能够显著提升农用轴流风机性能。

关键词 农用轴流风机; 外壳部件; 导流锥; 数值模拟; 涡识别

中图分类号 S237

文章编号 1007-4333(2026)01-0193-09

文献标志码 A

Influence of the guide cone structure on the performance of agricultural axial fans

LIU Zhiwei¹, YU Shuang², ZHANG Yufen², BU Chongxing³, DING Tao^{2*}

(1. Infrastructure Construction Department, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Xinjiang Kechuang Tianda Agricultural Engineering Co., Ltd., Changji 831814, China)

Abstract To address the problem of low performance of agricultural axial-flow fans under high static pressure and low flow rate conditions, a 550-cylinder axial-flow fan is taken as the research object. The structural optimization is carried out using CFD numerical simulation combined with response surface methodology. In this study, the inlet section length and outlet section length of the casing, together with the inlet guide cone length and outlet guide cone length, are selected as experimental factors. Fan airflow rate and energy efficiency ratio are adopted as evaluation indices to systematically analyze the effects of casing optimization and guide cone installation on the overall performance of the fan. Furthermore, the Liutex vortex identification method is employed to capture and analyze the vortical structures within the flow field. The results indicate that, after optimizing the casing components and adding the guide cone, vortices in the motor wake region are significantly reduced. Compared with the prototype fan, the optimized scheme increases the airflow rate by 7.39% and the energy efficiency ratio by 2.6%. Therefore, the installation of a guide cone can significantly improve the performance of agricultural axial-flow fans.

Keywords agricultural axial fan; casing component; guide cone; numerical simulation; vortex identification

收稿日期: 2025-05-06;接受日期: 2025-10-19

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02005-1);国家奶牛产业技术体系项目(CARS-36)

第一作者: 刘志伟(ORCID:0009-0003-4338-223X),工程师,主要从事农业设施养殖装备研究,E-mail:zhwliu@cau.edu.cn

通讯作者: 丁涛(ORCID:0000-0001-8076-3662),教授,博士生导师,主要从事流体动力学及农业工程环境调控研究,E-mail:dingtiao@cau.edu.cn

轴流风机因其结构简单、风量大、安装便捷,广泛应用于多类温控与通风设备中^[1-2]。其中,农用轴流风机是设施农业与畜禽养殖场中关键的通风设备,需要长期连续运行,其能效水平对农业能源消耗具有重要影响^[3-4]。

关于风机性能提升的研究已从多个方面展开。在叶片几何与安装参数方面,调节叶片安装角度能够有效改善风量与静压输出之间的匹配关系^[5-7],而采用叶尖开槽结构则可削弱叶顶涡强度,从而提升风机效率^[8-11]。在外部装置优化方面,通过在出风端增设导流罩,改善气流出口的均匀性,提高流量并降低噪声^[12-13]。在性能评价方法上,有研究引入能效比作为综合指标,对农用风机在特定运行条件下进行优化分析^[14]。与此同时,随着流场分析技术的发展, Ω 准则与Liutex等涡识别方法被用于揭示叶轮通道内旋涡结构的分布特性,从而为性能优化提供定性参考^[15-16]。在此基础上,Jesús等^[17]提出了一种参数化评估方法,用于整体评价风机气动性能,进一步拓展了风机性能预测的理论路径。

尽管在导流结构和叶片扰动设计方面已有一定进展,但针对导流锥在农用风机中的研究仍相对匮乏。目前多数导流锥设计应用于航空航天等高速流动系统^[18-20],其在低雷诺数和非均匀进气等农业工况下的性能响应机制缺乏研究。现有工作多集中于壳体或叶轮结构优化,对导流锥与轮毂、风筒等部件的协同设计与匹配研究仍然不足。作为一种可与外壳形成渐缩通道的结构,导流锥能够在理论上诱导气流收缩与加速,改善进口速度与压力分布,从而降低流动损失^[21]。这一特性对高静压、小流量等典型农业工况具有潜在优势。

本研究拟采用数值模拟与结构参数敏感性分析相结合的方法,系统探究导流锥结构参数,如长度、锥角等对农用轴流风机气动性能的影响规律,构建高静压、小流量工况下的风机内部流场识别体系,并结合涡结构特征分析风机效率变化机理,以为农用风机在复杂流动工况下的结构优化设计提供理论支撑与工程应用指导。

1 风机结构及工作原理

1.1 风机结构

本研究原型风机选用550圆筒轴流风机,其结构主要包括外壳部件、电机、前置导叶和叶轮。基本参

数为:前置导叶数4,叶轮叶片数4,叶轮直径540 mm,外壳部件内径550 mm,外壳部件长度300 mm。进口工作静压为105 Pa的工况下,原型风机的风量为5 401.47 m³/h,能效比9.16 m³/(h·W)。

以电机前端面为界,风机结构可划分为电机区域与叶轮旋转区域,对应地,外壳部件亦划分为进口段与出口段。外壳部件的几何参数以总长度(L_w)表征,由进口段长度(L_{w1})和出口段长度(L_{w2})组成。在原型风机中 $L_w=300$ mm,其中 $L_{w1}=191$ mm, $L_{w2}=109$ mm。

1.2 导流锥结构

为提高导流锥的气动性能,本研究选取冯·卡门(von Kármán)曲线作为导流锥的截面轮廓。该曲线隶属于Haack系列曲线(Haack series),是一类在满足特定几何约束条件(如长度、最大直径或体积)下,可实现最小波阻的流线型轮廓。Haack曲线广泛应用于高速气动结构设计领域,其主要特征是在给定结构长度和横截面尺寸的前提下,通过优化外形轮廓以降低流动分离和压缩波引起的阻力。其中,冯·卡门曲线是Haack曲线中波阻最小的特例,特别适用于低雷诺数、亚声速至跨声速流动环境。基于上述优势,本研究将冯·卡门曲线作为导流锥的截面形状,表达式^[22]如下:

$$\begin{cases} \theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2x}{L_D}\right) \\ y = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\theta - \frac{\sin(2\theta)}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

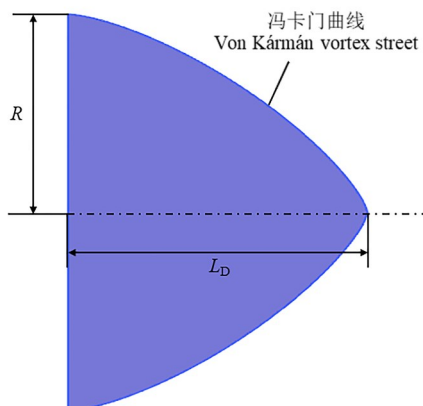
式中: L_D 为导流锥长度,mm; R 为理论曲线的最大半径值,mm; y 为导流锥在轴向位置 x 处的半径,mm; θ 为中间变量。根据冯·卡门曲线确定导流锥截面,导流锥截面示意图见图1。

分别在轴流风机进口、出口布置导流锥结构,建立风机模型(图2)。

2 数值模拟

2.1 计算域模型

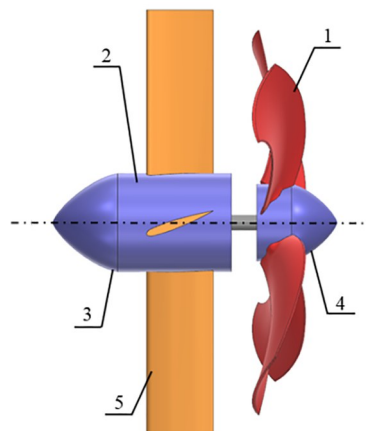
计算域包括进口域、风机部分和出口域3部分,以试验室尺寸为参考,设定进口域为2.74 m×2.74 m×0.85 m的长方体,出口域为5.5 m×5.5 m×5.5 m的立方体,风机部分以风机模型为基础分为电机和叶轮,风机部分计算域与原型风机在试验环境中的试验状态匹配。



L_D 为导流锥长度; R 为曲线的最大半径。
 L_D is the length of the guide cone, and R is the maximum radius of the curve.

图 1 导流锥截面示意图

Fig.1 Section diagram of the guide cone



1. 风机叶片; 2. 轮毂; 3. 进口导流锥; 4. 出口导流锥; 5. 进口导叶
 1. Fan blade; 2. Hub; 3. Inlet guide cone; 4. Outlet guide cone; 5. Inlet guide vane

图 2 风机模型图

Fig. 2 Schematic of the fan model

2.2 数值模型及网格

在对原型风机计算域进行非结构化网格划分时,风

机部分划分为电机区域和叶轮区域,并在叶轮区域内的叶片表面及叶顶间隙处进行局部加密处理(图3)。

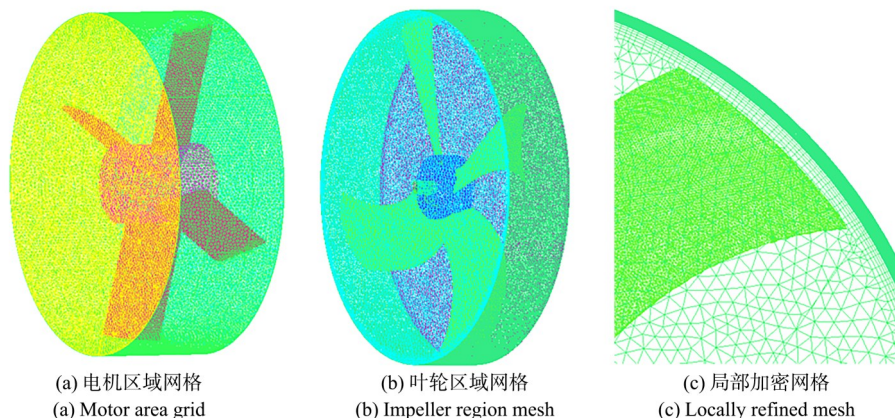


图 3 模型网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model meshing

本研究所涉及的 550 圆筒轴流风机专用于畜禽养殖环境,设计工作静压范围 100~110 Pa。在该工作区间内选取 105 Pa 为额定计算工况。为确保数值模拟的精度和稳定性,采用 5 种不同的网格划分方案进行数值计算,并以风量和能效比作为评价指标开展网格无关性验证(图 4)。当网格总数达到 700 万时,风机性能参数已基本稳定。因此,本研究选用网格数为 700 万的网格方案用于后续模拟计算。

计算域整体依次划分为进口区、电机区、旋转区和出口区,各区域之间的接口设定为 Interface,并

通过 GGI(General grid interface)方法进行耦合。在边界条件设置方面,进口处采用静压入口(Static pressure)边界条件,出口处采用开放式出口(Opening: pressure and direction)边界条件,并设定对应的静压值及其作用方向。参考 550 型圆筒风机的典型运行状态,本研究将进口静压设定为 105 Pa,并作为额定工况进行模拟。所有固体壁面均根据试验场地条件设定为壁面(Wall)边界条件。

湍流模型选用剪切应力输运模型(Shear stress transport, SST),流体介质为空气。在计算过程中不考虑重力影响,且由于风机运行过程中

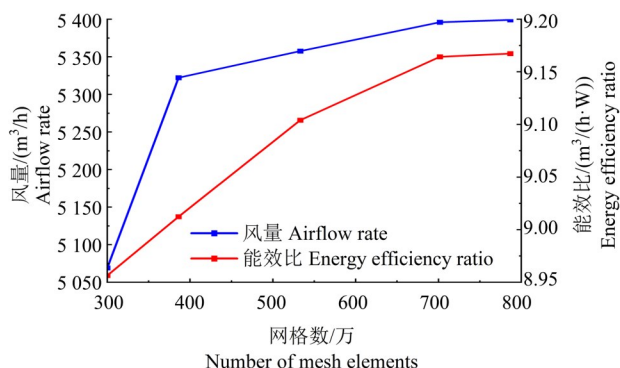


图4 基于风量和能效比的网格无关性验证

Fig.4 Grid independence verification based on airflow rate and energy efficiency ratio

不涉及显著的热量交换,故不求解能量方程。控制方程中动量项与湍动能耗散项的离散格式均采用二阶迎风格式(Second-order upwind)以提高数值精度。完成各项仿真设置后,进行流场初始化,稳态求解器的迭代步数设为2000步,收敛残差判据设定为 1×10^{-5} 。

为验证所构建模型的准确性,将风量-静压关系曲线仿真计算结果与实测数据进行对比(图5),仿真结果与实测数据吻合较好,在整个工作区间内偏差均控制在合理范围内,说明仿真模型和边界条件设置具有较高的可靠性。

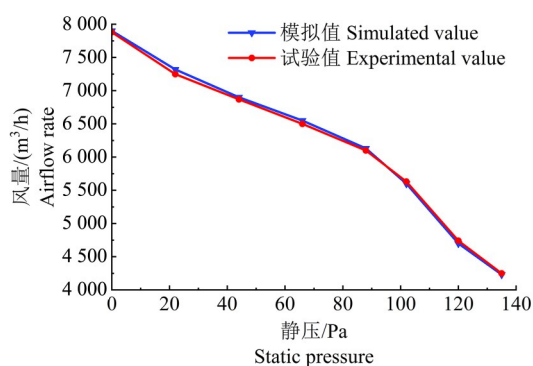


图5 风机性能模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of simulated and experimental results for fan performance

3 外壳及导流锥结构优化

轴流风机的外壳部件长度通常只需覆盖内部

组件。考虑到外壳部件与导流锥的协同作用,本研究首先考察进口段长度、出口段长度、进口导流锥长度和出口导流锥长度对风机性能的影响,并据此开展响应面分析,最终获得最优结构。

3.1 单因素分析

3.1.1 结构优化分析

选取外壳内径为550 mm、进口段长度228 mm、出口段长度112 mm的风机作为原始对照模型,并设定进口导流锥的曲线最大半径 R_1 为62.5 mm,出口导流锥的曲线最大半径 R_2 为49 mm。改变外壳进口段长度(L_{w1})、出口段长度(L_{w2})、进口导流锥长度(L_{D1})和出口导流锥长度(L_{D2}),建立不同风机模型进行单因素数值模拟优化计算,不同结构参数下风机性能的数值模拟结果见图6。

1)为探究进口段长度(L_{w1})对风机性能的影响,根据风机的生产应用情况将 L_{w1} 取值范围设定为228~282 mm,随后对不同 L_{w1} 进行数值模拟并由此展开对比分析,数值模拟结果(图6(a))表明,当 L_{w1} 为242~262 mm时,能效比达到较高水平,并在 $L_{w1}=252$ mm时达到最大值,因此将该区间确定为后续分析中 L_{w1} 的取值范围。

2)为探究出口段长度(L_{w2})对风机性能的影响,根据风机的生产应用情况将 L_{w2} 的取值范围定为112~188 mm,并针对不同 L_{w2} 进行数值模拟与对比分析,数值模拟结果(图6(b))表明,能效比和风量的最优区间为138~158 mm,并在 $L_{w2}=148$ mm时达到最大值,因此将该区间作为后续分析中 L_{w2} 的取值区间。

3)在 L_{w1} 为252 mm、 L_{w2} 为148 mm的条件下,结合风机实际应用,将进口导流锥长度(L_{D1})范围设定为0~95 mm,并针对不同 L_{D1} 进行数值模拟与对比分析,数值模拟结果(图6(c))表明, L_{D1} 为55~75 mm时,风机能效比达到较高水平,同时风量也保持较优;其中,当 $L_{D1}=65$ mm时,风量与能效比的综合性能最佳,因此取该区间作为后续分析中 L_{D1} 的取值区间。

4)在 L_{w1} 为252 mm、 L_{w2} 为148 mm以及 L_{D1} 为65 mm的条件下,结合风机实际应用,将出口导流锥长度(L_{D2})范围设定为0~60 mm,经数值模拟与对比分析(图6(d))可知,随着 L_{D2} 的增加,风机的风量和能效比均在降低,说明出口导流锥对风机性能无明显改善作用,因此在后续分析中不再讨论该

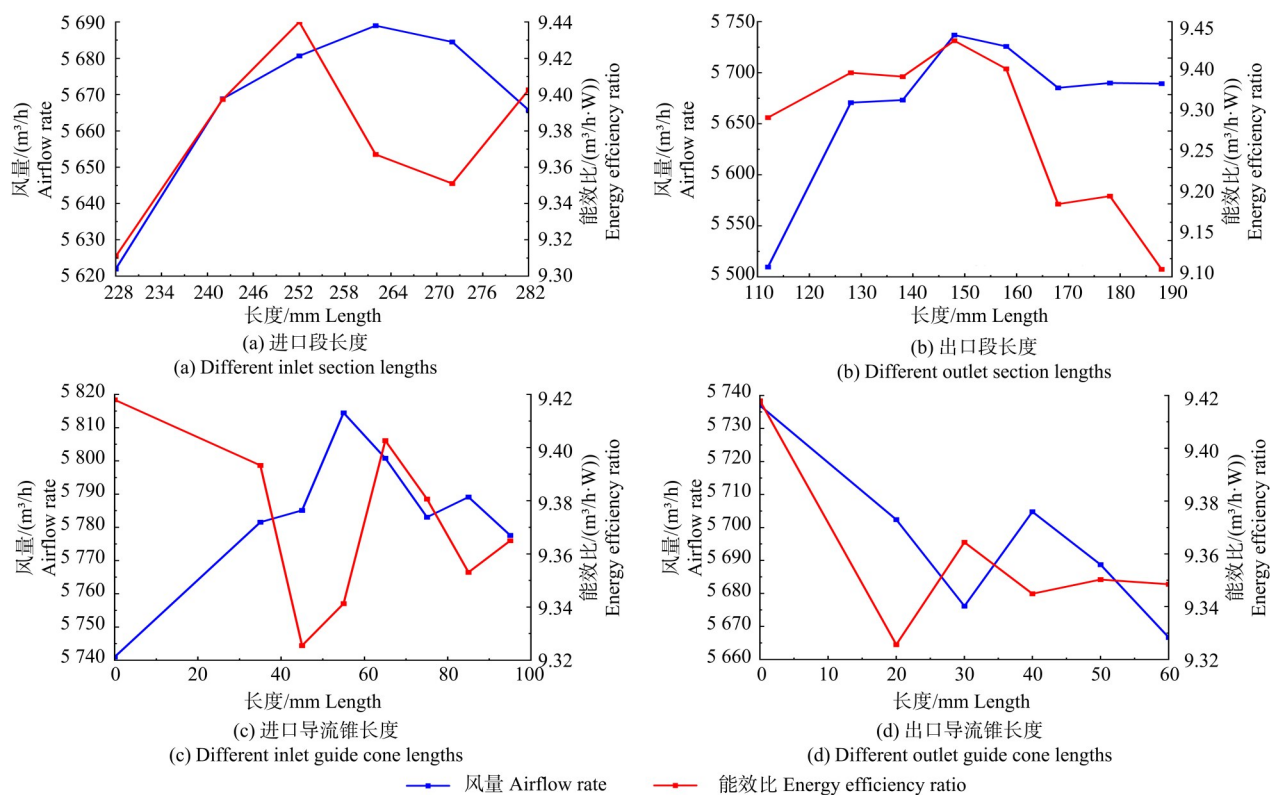


图 6 不同结构参数下风机性能的数值模拟结果

Fig.6 Numerical simulation results of fan performance under different structural parameters

因素。

3.1.2 涡结构分析

外壳部件及导流锥长度的变化会直接影响风机内部速度场的分布,从而改变涡流的形成及其对气流的干扰。为提高涡结构识别的准确性,本研究采用了Liutex方法进行分析。Liutex基于刚性旋转分解理论,能够从速度梯度张量中剔除非旋转分量,有效避免剪切流动导致的伪涡识别。传统方法中, Q 判据(Q -criterion)通过速度梯度张量中旋转强度与应变强度的平衡关系来识别涡区,而 λ_2 判据(λ_2 -criterion)则利用速度梯度张量特征值的符号来判断局部压力极小区域是否存在涡结构。相比之下,Liutex能够更精确地提取真实旋转结构,并具有良好的方向性和物理可解释性,尤其适用于复杂剪切和分离流动的识别。在本研究中,Liutex方法有助于更清晰地揭示风机叶片通道内及叶顶区域的旋涡分布特征。

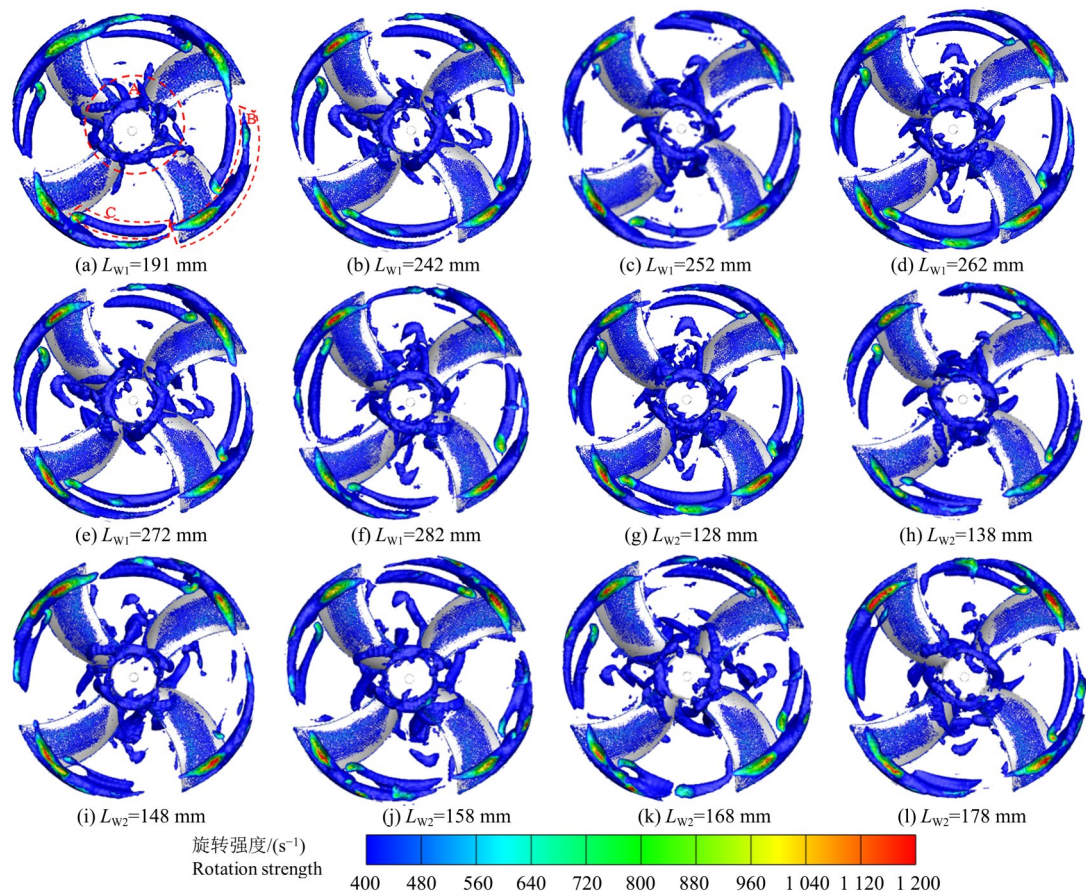
1)外壳部件涡结构分析。基于外壳部件进出口长度单因素分析的数值模拟结果,采用Liutex方

法对风机内部涡结构进行识别。识别结果中,将叶根围绕轮毂的涡流定义为A区域,从叶片前缘产生的涡流定义为B区域,而在叶片尾缘处分支的涡流定义为C区域。

不同外壳部件长度风机叶轮部分的涡结构见图7。随着外壳部件长度(L_{W1} 、 L_{W2})的增大,A区域的涡系始终呈现范围增大并向两侧扩展的趋势,B区域涡系整体表现为尺寸减小,表明中部流场趋于稳定;而C区域涡系变化较为复杂,部分条件下出现减小,部分则变化不明显。综合涡结构分析,当进口段长度为252 mm、出口段长度为148 mm时,流场特性表现最佳。

2)导流锥涡结构分析。基于不同进口导流锥长度的单因素数值模拟结果,对比各风机模型,并采用Liutex方法识别其内部涡结构,分析进口导流锥长度对流场涡结构的影响。不同进口导流锥长度下电机部分涡结构见图8。

随着进口导流锥长度(L_{D1})的逐渐增大,导流锥区域的涡系逐渐减少,当 L_{D1} 增大到65 mm时,导流锥区域的涡系消失,此时风机风量、能效比较优;若



A 为叶根围绕轮毂的涡;B 为叶片前缘产生的涡;C 为叶片尾缘分支的涡。

A is the vortex around the hub at the blade root, B is the vortex generated at the blade leading edge, C is the vortex shed from the blade trailing edge.

图 7 不同外壳进口段长度 (L_{w1}) 和出口段长度 (L_{w2}) 条件下的叶轮部分 Liutex 涡结构分布

Fig. 7 Liutex vortex structures in the impeller region under different inlet (L_{w1}) and outlet (L_{w2}) casing lengths

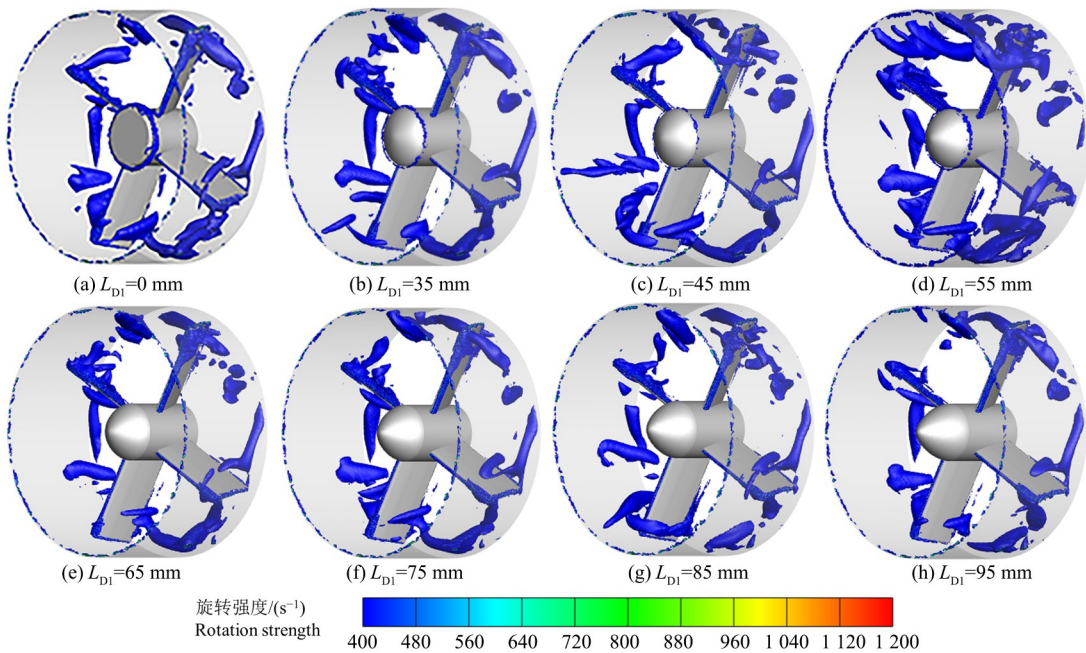


图 8 不同进口导流锥长度 (L_{d1}) 条件下的电机部分 Liutex 涡结构分布

Fig. 8 Liutex vortex structures in the motor region under different inlet guide cone lengths (L_{d1})

继续增大 L_{D1} , 涡系结构仍然消失, 但是此时的风量、能效比呈下降趋势。因此合理适当地增加进口导流锥结构长度能减小气流在风机轮毂处的扰动, 从而达到为轴流风机提供优良的进气条件的目标。

3.2 响应面分析

3.2.1 响应面优化试验

响应面分析法是一种基于试验设计获取数据, 并利用多元二次回归方程拟合各因素与响应值函数关系的统计方法。本研究采用 Box - Behnken Design(BBD)试验设计, 研究多因素交互作用对响应值的影响, 从而获得风机的最优结构参数以实现性能提升。

基于单因素分析结果, 选取外壳进口段长度 (L_{w1})、出口段长度 (L_{w2}) 和进口导流锥长度 (L_{D1}) 为变量, 以风机风量 (Q) 和能效比 (N) 为响应值建立响应面。结合单因素分析结果确定取值区间: $L_{w1}=242\sim 262$ mm, $L_{w2}=138\sim 158$ mm, $L_{D1}=55\sim 75$ mm, 依据

BBD 设计 17 组试验模型, 经数值模拟获得对应的 Q 和 N , 并对其进行方差分析和显著性检验, 建立响应面回归方程如下:

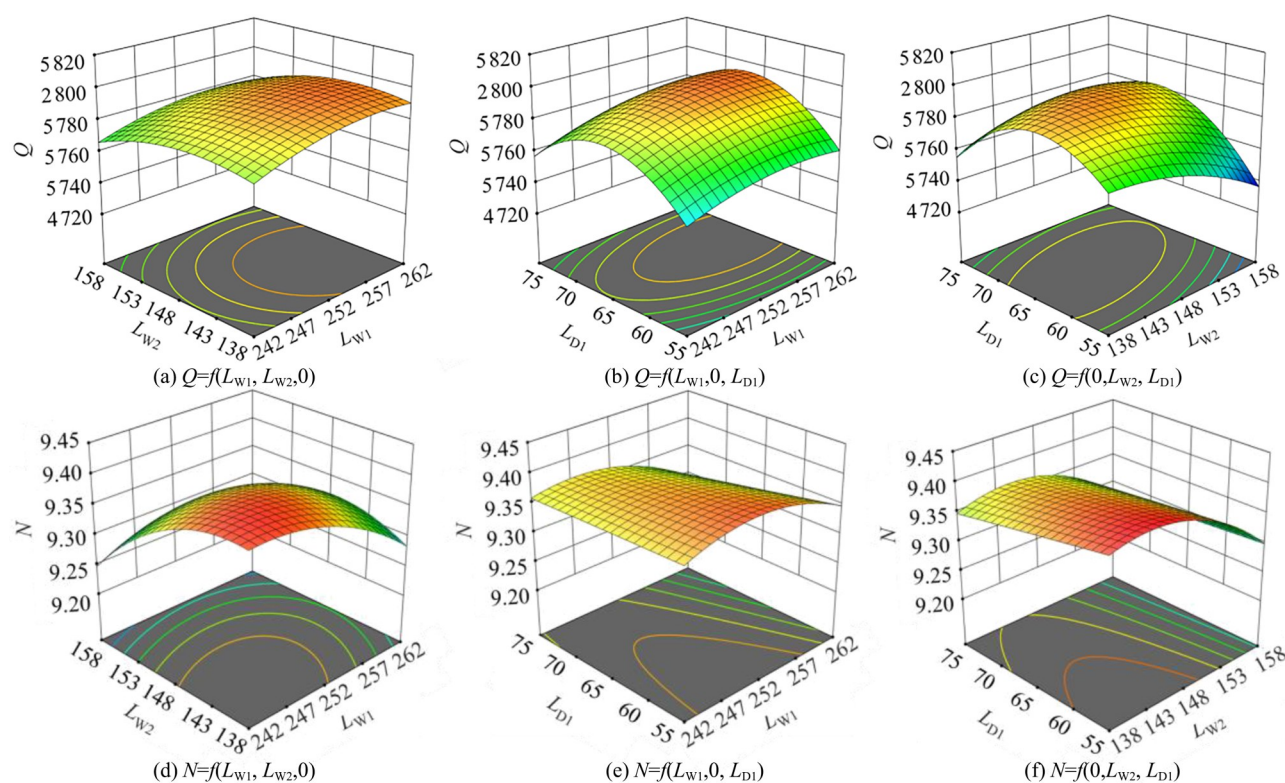
$$Q = 5793.17 + 6.87L_{w1} - 4.41L_{w2} + 5.27L_{D1} - 0.7818L_{w1}L_{w2} + 2.27L_{w1}L_{D1} + 12.13L_{w2}L_{D1} - 6.3L_{w1}^2 - 8.4L_{w2}^2 - 25.93L_{D1}^2$$

$$N = 9.38 - 0.0222L_{w1} - 0.0421L_{w2} - 0.0162L_{D1} + 0.0323L_{w1}L_{w2} - 0.0111L_{w1}L_{D1} + 0.0077L_{w2}L_{D1} - 0.0339L_{w1}^2 - 0.0456L_{w2}^2 - 0.0004L_{D1}^2$$

Q 和 N 响应面函数模型的显著性水平 P 分别为 0.000 3 和 0.000 1, 均远小于 0.1, 表明所建立的模型通过显著性检验, 具有良好的拟合可靠性。

3.2.2 响应面结果分析

以风量 Q 和能效比 N 为响应值, 进口段长度 (L_{w1})、出口段长度 (L_{w2}) 和进口导流锥长度 (L_{D1}) 三因素交互作用对 Q 和 N 的影响见图 9。



L_{w1} , L_{w2} , L_{D1} 分别为进口段长度、出口段长度和进口导流锥长度; Q 为风量; N 为能效比。
 L_{w1} , L_{w2} , L_{D1} were the inlet section length, outlet section length, and inlet guide cone length. Q was the airflow rate.
 N was the energy efficiency ratio.

图 9 部分交互因素对风量和能效比的影响

Fig. 9 The effects of partial interaction factors on airflow rate and energy efficiency ratio

当 $L_{w1}=252$ mm、 $L_{w2}=148$ mm、 $L_{D1}=65$ mm 时, 风机的性能达到最优。在进口静压为 105 Pa 的

工况下, 该优化风机的风量为 5 800.8 m³/h, 能效比为 9.4 m³/(h·W)。与原型风机相比, 风量提升了

7.39%,能效比提升了2.6%。

4 结 论

本研究以550圆筒轴流风机为研究对象,采用CFD数值模拟结合响应面分析法对其结构进行优化。以风机风量和能效比为性能评价指标,系统研究了优化外壳部件并增设导流锥结构对风机性能的影响,并利用Liutex涡识别方法对风机内部流场的涡结构进行分析,得出以下结论:

1)基于单因素分析,外壳部件进口段长度(L_{W1})、出口段长度(L_{W2})和进口导流锥长度(L_{D1})三因素的较优范围分别为:242 mm $<L_{W1}<262$ mm、138 mm $<L_{W2}<158$ mm、55 mm $<L_{D1}<75$ mm。

2)根据响应面分析结果,当 $L_{W1}=252$ mm、 $L_{W2}=148$ mm、 $L_{D1}=65$ mm时,风机性能达到最优。在进口静压为105 Pa的工况下,与原型风机相比,风量提高了7.39%,能效比提升了2.6%。

3)对风机内部流场的涡结构分析表明,合理的外壳部件长度能够有效优化风机叶轮区域的涡结构,而增设进口导流锥结构则能显著改善风机电机尾部的涡结构。

参考文献 References

- [1] 李倩倩,汤德利,娄笑,陆怡,别锋锋,朱晓渠. 叶片背面改型对轴流风机性能和压力脉动特性的影响[J]. 机电工程技术, 2024, 53(1): 5-9
Li Q Q, Tang D L, Lou X, Lu Y, Bie F F, Zhu X Q. Effects of blade back modification on the performance and pressure fluctuation characteristics of axial flow fans[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2024, 53(1): 5-9 (in Chinese)
- [2] 王素慧. 轴流风机叶片的模态与动力学响应分析[J]. 煤矿机械, 2024, 45(2): 83-85
Wang S H. Modal and dynamic response analysis of axial fan blade[J]. *Coal Mine Machinery*, 2024, 45(2): 83-85 (in Chinese)
- [3] 邓广滕,夏永刚,李汉宏,姚亚东,郭谊,赖新华,冯硕,刘义漳. 大直径筒仓控温减损技术应用研究[J]. 粮食储藏, 2023, 52(5): 17-20
Deng G D, Xia Y G, Li H H, Yao Y D, Guo Y, Lai X H, Feng S, Liu Y Z. Application research on temperature control and loss reduction technology for large diameter silos[J]. *Grain Storage*, 2023, 52(5): 17-20 (in Chinese)
- [4] 张立祥,戴玉芹,郑娃. 喷雾降尘对旋流轴流风机结构参数设计优化[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版, 2024, 42(2): 51-54
Zhang L X, Dai Y Q, Zheng W. Design optimization of structural parameters of dust spraying counter-rotating axial flow fan[J]. *Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition*, 2024, 42(2): 51-54 (in Chinese)
- [5] Tang J D, Lu Y P, Sun X M, Zhang W Q. CFD simulation of installation angle for axial flow fan of a motor[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 274: 212-215
- [6] 刘小民,汤虎,樊涛,高德康. 多翼离心风机叶片出口安装角对吸油烟性

- 能影响的实验研究[J]. 风机技术, 2014, 56(6): 22-25
Liu X M, Tang H, Fan T, Gao D K. Experimental study on effect of the impeller outlet angle of multi-blade centrifugal fan on the performance of range hood[J]. *Compressor, Blower & Fan Technology*, 2014, 56(6): 22-25 (in Chinese)
- [7] 姜晨龙,朱兴业. 轴流风机结构优化设计及内部流动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 707-713
Jiang C L, Zhu X Y. Structural optimization design and internal flow characteristics analysis of axial flow fan[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(7): 707-713 (in Chinese)
 - [8] Kharati-Koopae M, Moallemi H. Effect of blade tip grooving on the performance of an axial fan at different tip clearances in the absence and presence of inlet guide vanes[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2020, 234(1): 72-84
 - [9] 杨天康,叶学民,刘洋,李春曦. 叶顶开槽-小翼结构对轴流风机性能和噪声影响的数值研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(9): 1123-1131
Yang T K, Ye X M, Liu Y, Li C X. Numerical study on the influence of blade tip slot and winglet on the performance and noise of axial fans[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 43(9): 1123-1131 (in Chinese)
 - [10] 崔建光,叶学民,李春曦. 斜沟槽机匣处理对轴流风机性能影响的数值研究[J]. 流体机械, 2017, 45(1): 30-37
Cui J G, Ye X M, Li C X. Simulation of the effect of sloped trench casing treatment on the performance of an axial flow fan[J]. *Fluid Machinery*, 2017, 45(1): 30-37 (in Chinese)
 - [11] 叶学民,李鹏敏,李春曦. 叶顶开槽对轴流风机性能影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 652-659
Ye X M, Li P M, Li C X. Numerical investigation of grooved blade tips effect on the performance of an axial flow fan[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 652-659 (in Chinese)
 - [12] Neal D R, Foss J F. The application of an aerodynamic shroud for axial ventilation fans[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2007, 129(6): 764-772
 - [13] 丁涛,邱锦靖,刘志伟,李妥,施正香. 前置导叶对畜禽舍轴流风机性能的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 80-88
Ding T, Qiu M J, Liu Z W, Li T, Shi Z X. Influence of inlet guide vane on the performance of axial fan for livestock and poultry farming[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 80-88 (in Chinese)
 - [14] 李玮哲,刘仁鑫,杨卫平,夏根水,袁志强,周诚科. 轴流风机导流罩及拢风筒的优化[J]. 流体机械, 2022, 50(3): 96-104
Li W Z, Liu R X, Yang W P, Xia G S, Yuan Z Q, Zhou C K. Optimization of fairing and wind tube of axial fan[J]. *Fluid Machinery*, 2022, 50(3): 96-104 (in Chinese)
 - [15] 陈少华,张弘强,谢军龙. 旋涡风机内部流场特性及涡分布特征研究[J]. 压缩机技术, 2023(4): 28-33
Chen S H, Zhang H T, Xie J L. Research on characteristics of internal flow field and vortex distribution in regenerative fan[J]. *Compressor Technology*, 2023(4): 28-33 (in Chinese)
 - [16] 李妥,刘志伟,孔维双,施正香,丁涛. 基于周向涡量的农用通风机叶片表面凹槽分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 51-60
Li T, Liu Z W, Kong W S, Shi Z X, Ding T. Analysis of surface grooves of agricultural fan blades based on circumferential vorticity[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(5): 51-60 (in Chinese)
 - [17] Jesús M F, Andrés M F, Bruno P G. Turbulence transport in rotor-stator and stator-rotor stages of axial flow fans[J]. *Intech Open*, 2017(5): 123-142
 - [18] 南博华,黄诚,何腾锋,徐耀钟. 冯·卡门外形夹层结构整流罩成型工艺研究

- [J]. 上海航天, 2016, 33(S1): 164-168
- Nan B H, Huang C, He T F, Xu Y Z. Processing technology of von karman fairing fabricated by sandwich structure [J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2016, 33(S1): 164-168 (in Chinese)
- [19] 陈阳, 蒋博彦, 王军, 付观井. 后置导流锥对轴流风机性能影响的研究[J]. 风机技术, 2016, 58(5): 31-35
- Chen Y, Jiang B Y, Wang J, Fu G J. Analysis of the effect of the rear guide cone on the performance of an axial fan [J]. *Compressor, Blower & Fan Technology*, 2016, 58(5): 31-35 (in Chinese)
- [20] 赵瑞, 荣吉利, 李跃军, 李海波. 整流罩母线形状对脉动压力环境的影响研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(5): 1020-1026
- Zhao R, Rong J L, Li Y J, Li H B. An investigation of fluctuating pressure environment around rocket fairing with different curvetypes [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(5): 1020-1026 (in Chinese)
- [21] Chen J F, Fan X Q, Xiong B, Meng Z W, Wang Y. Parameterization and optimization for the axisymmetric forebody of hypersonic vehicle [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 167: 239-244
- [22] 鞠琳. 高超声速冯卡门光学整流罩特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022
- Ju L. Study on characteristics of hypersonic von Karman optical fairing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 刘志伟, 工程师。主要从事农业设施养殖装备研究, 负责完成重大工程项目施工建设改造 10 余项, 受企业委托主持横向课题农用轴流风机性能优化项目, 参与国家自然科学基金项目、国家重点研发项目及省部级重点研发项目 6 项, 参与发表 SCI/EI 收录论文 10 余篇, 授权发明专利/实用新型 10 余项。指导本科生参加“美丽乡村设计大赛”(省部级) 获得一等奖及优秀指导教师称号。



通讯作者简介: 丁涛, 教授, 博士生导师。主要从事流体动力学及农业工程环境调控研究。2012 年在美国 University of Illinois at Urbana-Champaign 从事博士后研究工作。2015 年起担任国家级水利与土木工程虚拟仿真实验教学中心副主任, 北京市实验教学示范中心副主任、实验教学中心主任。主持参与国家自然科学基金项目、国家重点研发项目及省部级重点研发项目 7 项, 发表 SCI/EI 收录论文 40 余篇, 授权发明专利/实用新型 30 余项, 参与制定国家标准/行业标准/团体标准 6 项。