

横置式甘蔗收获机排杂风机叶轮气动特性分析与参数优化

李伟庆¹ 马少春^{1,2} 李文志¹ 周保成¹ 霍鹏¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学三亚研究院, 三亚 572025)

摘要: 排杂风机是切段式甘蔗收获机的核心部件之一,其性能对甘蔗收获机含杂率起到了至关重要的作用,而叶轮是排杂风机的核心部件,其气动性能与排杂效果密切相关。针对横置式甘蔗收获机排杂风机叶轮性能不足、影响排杂效果的问题,以叶轮为研究对象,研究轮毂类型、叶片安装角 β 、叶片数 N_b 、叶轮无量纲面积 G 、叶片夹角 γ 对风机气动特性的影响及其机理,并以提高风机全压为目标,通过响应面优化法得到了较佳的叶轮结构参数为:叶片安装角 23.34° 、叶轮无量纲面积 0.43 和叶片夹角 14.56° 。在不同风机转速($1\ 050$ 、 $1\ 350$ 、 $1\ 650$ r/min)、不同甘蔗长势(良好、较差和严重倒伏)和不同行驶速度(1 、 2 、 3 km/h)下进行田间试验。结果表明:对于长势良好的甘蔗,当风机转速为 $1\ 050$ r/min时,不同行驶速度下,优化后风机含杂率分别降低 1.06 、 1.99 、 3.28 个百分点;当风机转速为 $1\ 350$ r/min时,优化后风机含杂率最多可降低 2.5 个百分点;当风机转速提升至 $1\ 650$ r/min时,优化前后风机在各行驶速度下含杂率未表现出明显差异;对于长势较差和严重倒伏的甘蔗,优化后风机含杂率最多可分别降低 5.45 、 2.1 个百分点。优化后风机提升了甘蔗收获机在复杂田间环境中的排杂能力,且所得数据为后续风机研究提供了理论支持。

关键词: 甘蔗收获机; 排杂风机; 叶轮; 气动特性; 全压; 参数优化

中图分类号: S225.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0090-10

OSID:



Aerodynamic Characteristics and Parameter Optimization of Sugarcane Chopper Harvester Extractor Impeller on Transverse

LI Weiqing¹ MA Shaochun^{1,2} LI Wenzhi¹ ZHOU Baocheng¹ HUO Peng¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Sanya Institute of China Agricultural University, Sanya 572025, China)

Abstract: The extractor is one of the core components of the sugarcane chopper harvester, and its performance plays a vital role in the impurity rate of the sugarcane harvester, while the impeller is the core component of the extractor, and its aerodynamic characteristics is closely related to the effect of the exhaust. Aiming at the problem of insufficient optimization of the performance of the impeller of the miscellaneous fan of the sugarcane harvester, which affects the miscellaneous effect, taking the impeller of the miscellaneous fan of the transverse sugarcane harvester as the object, and the influences of the type of hub, mounting angle of the impeller β , number of the impeller N_b , dimensionless area of the impeller G , angle of the impeller γ on the aerodynamic characteristics of the fan and its mechanism were researched. With the objective of increasing the full pressure of the fan, the best impeller structure parameters were obtained by the response surface optimization method, which were the blade mounting angle of 23.34° , the impeller dimensionless area of 0.43 and the blade angle of 14.56° . Field experiments were conducted at different fan speeds ($1\ 050$ r/min, $1\ 350$ r/min and $1\ 650$ r/min), different cane growth conditions (good, poor and severe collapse) and different traveling speeds (1 km/h, 2 km/h and 3 km/h). The results showed that for sugarcane with good growth, the optimized turbines reduced the impurity rate by 1.06 , 1.99 and 3.28 percentage points at different driving speeds

收稿日期: 2024-09-25 修回日期: 2024-10-13

基金项目: 海南省自然科学基金创新研究团队项目(322CXTD521)

作者简介: 李伟庆(1997—),男,博士生,主要从事甘蔗机械化收获关键技术研究,E-mail: 15081720542@163.com

通信作者: 马少春(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事甘蔗机械化收获关键技术研究,E-mail: shaochun2004@qq.com

when the turbine rotational speed was 1 050 r/min; when the turbine rotational speed was 1 350 r/min, the optimized turbines reduced the impurity rate by 2.5 percentage points at most; when the turbine rotational speed was increased to 1 650 r/min, the optimized fan did not show obvious differences in the impurity rate at each driving speed; for the sugarcane with poor growth and serious collapse, the optimized fan could reduce the impurity rate by up to 5.45 and 2.1 percentage points, respectively. The optimized fan improved the ability of the sugarcane harvester to remove impurities in complex field environments, and the obtained data can provide theoretical support for subsequent fan research.

Key words: sugarcane harvesters; extractor; impeller; aerodynamic characteristics; full pressure; parameter optimization

0 引言

推广甘蔗机械化收获有利于促进我国制糖业的发展,加强我国食糖产业在国际上的竞争力^[1-2]。但是,目前收获机存在的各种问题使机收难以推广。而在甘蔗机械化收获过程中,排杂是其中的一个关键环节,国内外收获机大多采用轴流式排杂风机去除杂质,其性能对甘蔗的含杂率和损失率均有重要影响,并且直接关系到蔗农和糖厂的利益。因此,对切段式甘蔗收获机排杂风机进行研究至关重要^[3-4]。

排杂风机是切段式甘蔗收获机的核心部件之一,其性能影响甘蔗收获机的含杂率。叶轮是排杂风机的核心部件,其气动性能与排杂效果密切相关^[5-8]。LI 等^[9-10]利用叶片弦向弯掠技术改变叶片结构,来提高叶轮的做功能力,降低泄漏损失。YE 等^[11]将叶片顶部加工成双凹槽结构,改善了叶顶气流泄漏现象,提升叶轮性能。李俊等^[12]针对不同叶片厚度对轴流风机流动特性的影响进行数值模拟和分析,表明薄叶片流量点附近气动性能更好,厚叶片的稳定工作区更大。刘刚等^[13]对叶片顶部进行了气动性能研究,增加了叶尖小翼结构,结果表明,此结构有效提升轴流风机的性能。这些研究主要是针对叶片结构进行了气动特性分析,来提升风机的性能,对甘蔗收获机排杂风机叶轮研究有一定指导意义^[14-15]。

邢浩男等^[16]前期通过数值模拟方法,分析了广西农业机械研究院有限公司生产的 4GZQ-180 型切段式甘蔗收获机风机气动性能缺陷,并进行了结构优化。基于此,提出了一种叶轮横置式排杂风机。该风机结构通过增加叶轮与蔗叶分离区之间的距离,有效降低了甘蔗与叶轮碰撞概率。此外,重新设计的出流室结构避免了出流室内部的形状突变和主轴阻挡气流的现象,从而显著提升了风机气动性能。

XING 等^[17-19]研究表明,叶轮横置式风机相较于传统风机,在转速 1 050、1 350、1 650 r/min 下的流量分别提升 48.01%、42.9%、46.13%;全压效率分别提高 26.76%、25.31%、22.35%,显示出更高的

能量利用率;含杂率最多可分别降低 14.58%、13.91%、20.42%。这些数据表明,叶轮横置式排杂风机在工作性能上显著优于传统风机(4GZQ-180 型切段式甘蔗收获机)。

为进一步提升叶轮横置式排杂风机性能并降低含杂率,需对其进行更深入的优化研究^[20-21]。当前,该风机仍存在若干问题,包括:缺乏叶轮的整体优化方案(如轮毂、叶片安装角、数量、角度、无量纲面积以及叶顶结构、间隙等);对各优化参数的气动特性及相互作用机理研究不足;以空载风速为指标设计的仿真试验与实际应用存在较大误差,应以提升风机全压为目标设计仿真试验;在复杂田间条件下含杂率较高等。

本文研究轮毂形状、叶片安装角、叶片数量、叶轮面积、叶片角度对风机气动特性的作用机理,以提高风机全压为目标,通过响应面优化法得到最佳的叶轮结构参数,并完成叶轮优化工作。以含杂率作为指标对优化前后叶轮进行性能评估,获得气动性能好的叶轮,以期对排杂风机叶轮设计和机理研究提供指导。

1 叶轮结构与主要参数

1.1 排杂风机结构特点

叶轮横置式排杂风机由外壳、叶轮、支撑架、液压马达和整流罩组成,整机结构如图 1 所示。其工作原理是液压马达带动叶轮旋转并产生气流,此时蔗段和杂质同时被抛撒进风机内部,悬浮速度较低的杂质随气流排出,而悬浮速度较高的杂质和蔗段

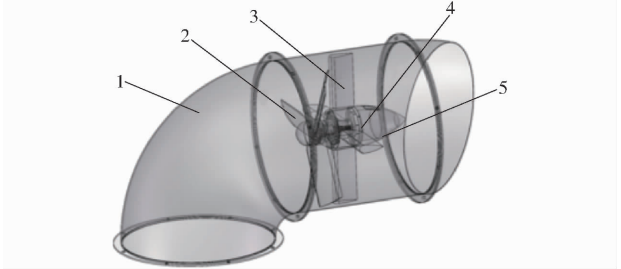


图 1 叶轮横置式排杂风机结构图

Fig. 1 Structure diagram of extractor

1. 外壳 2. 叶轮 3. 支撑架 4. 液压马达 5. 整流罩

受气流影响较小,掉落下方。

1.2 叶轮相关参数

叶轮由叶片、轮毂组成,被优化叶轮的轮毂为圆柱体,其端面处存在尖角特征,易发生流动分离造成能量损失^[22]。如图2所示,其中 c 为叶片弦长, β 为安装角。

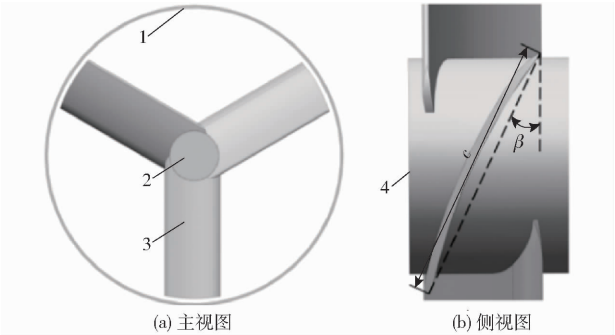


图2 被优化叶轮结构图

Fig.2 Structure diagram of optimized impeller

1. 外壳 2. 轮毂 3. 叶片 4. 轮毂端面

风机风速、风压对清选效果有重要影响,因此分析叶轮参数和风速、风压的关系是确定优化参数的前提。叶片升力主要取决于叶片吸力面和压力面压力差,因此叶片升力能够间接反映风速和风压^[23-24]。图3为叶片截面速度图, r 为截面与轴心的距离,m; V 为截面与空气的相对速度,m/s。其中体积微元升力和轴向风速可表示为

$$F_y = \frac{c_y \rho V^2 \Delta r c}{2} \tag{1}$$

$$v_a = v_\omega \tan(90^\circ - \beta + \alpha) \tag{2}$$

式中 F_y ——升力,N c_y ——升力系数
 ρ ——流体密度,kg/m³
 Δr ——体积微元宽度,m
 v_a ——轴向风速,m/s
 v_ω —— V 在圆周方向上的分量,m/s
 α ——攻角,(°)

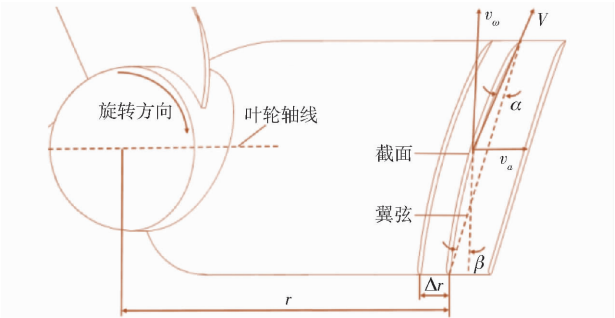


图3 叶片截面速度图

Fig.3 Velocity diagram of blade section

式(1)表明,升力和轴向风速两个物理量与安装角和叶片弦长相关。轴向风速与风机风速成正比,因此在其他因素不变的情况下,安装角和弦长能

够影响风机性能。其中叶片弦长计算公式为

$$L = \frac{2S_F G - 0.5\pi d^2}{N_b(D-d)\cos\beta} \tag{3}$$

其中 $G = \frac{S_l}{S_F} \tag{4}$

式中 L ——叶片弦长,mm
 D ——叶轮直径,mm
 d ——轮毂直径,mm N_b ——叶片数
 G ——叶轮无量纲面积
 S_F ——风机横截面积,mm²
 S_l ——叶轮在风机横截面上投影面积,mm²

排杂风机内部介质中混有大量固体,叶轮面积不应过大以保证有足够大的间隙使杂质通过。在本文中使用无量纲参数定量描述叶轮面积。

式(3)中轮毂直径和叶轮直径受风机结构限制不便改进,所以可选择安装角 β 、叶片数 N_b 和叶轮无量纲面积 G 作为叶轮结构参数,其中被优化叶轮各项参数为:安装角25°、叶片数3、叶轮无量纲面积0.37。

2 叶轮气动性能优化与机理分析

2.1 叶轮轮毂改进

市面上大多数风机轮毂采用半球形端盖形状,针对叶轮横置式排杂风机的端盖形状,提出3种方案进行分析,如图4所示。方案Ⅰ:端面下方基本未发生流动分离,且涡流尺寸较小;端面上方则出现了大尺寸涡流,轮毂被延长后该涡流远离叶片,但是脱落后的涡流依然有可能会对叶片造成影响,此外这种改进方法会增加叶轮的质量,因此不宜采用。方案Ⅱ:在整个轮毂附近均未出现明显的流动分离,因此涡流尺寸较小,这有利于提升叶轮的效能,但是样机安装时该端盖容易滑落,这是锥形端盖不利于抓握造成的,故锥形端盖也不宜采用。方案Ⅲ:具有更好的气动性能且便于安装,因此可以用于轮毂改进。

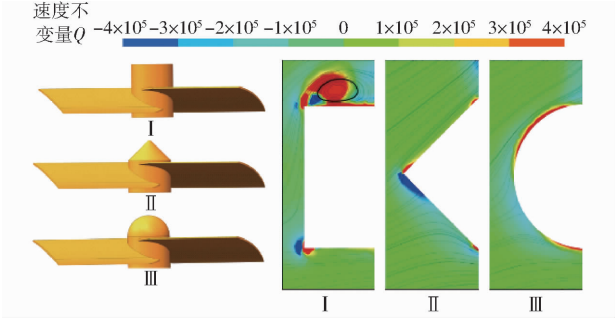


图4 轮毂形状改进方案及其附近流场分布情况

Fig.4 Hub shape improvement scheme and distribution of flow field in its vicinity

2.2 叶片安装角对气动特性的影响

叶片安装角 β 是指翼弦与叶轮回转轴面的夹

角,其取值对叶片攻角有重要影响^[25]。分别计算了 20°~35°范围内 4 个安装角水平下的风机流场,其结果如图 5 所示,当 20°≤β≤30°时空载风速随β增加线性升高,当β>30°时上升趋势减缓。由流量-全压曲线可知,当β=20°时全压始终保持在一个较低的水平,虽然流量在 7~10 m³/s 区间内风机均能正常工作,但是在杂质过多的情况下该风机可能因压力不足而产生风速骤降的现象;当β=25°时风机全压有较大幅度的提高且能保证流量在 10~12 m³/s 区间不发生失速,预计此风机能够应对大部分田间

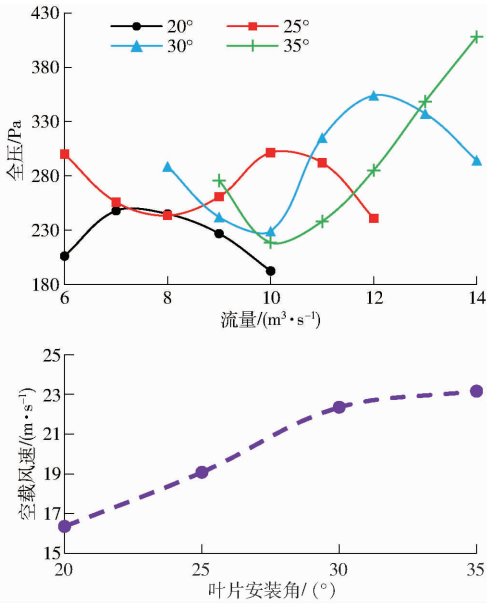
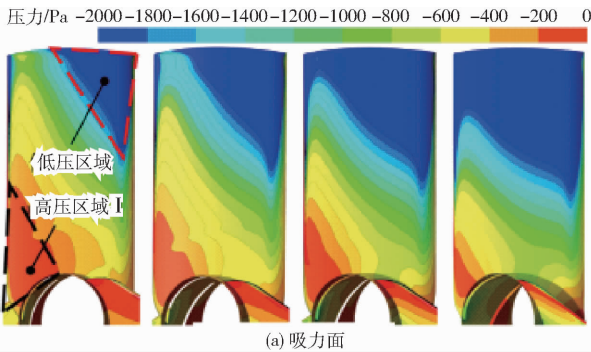
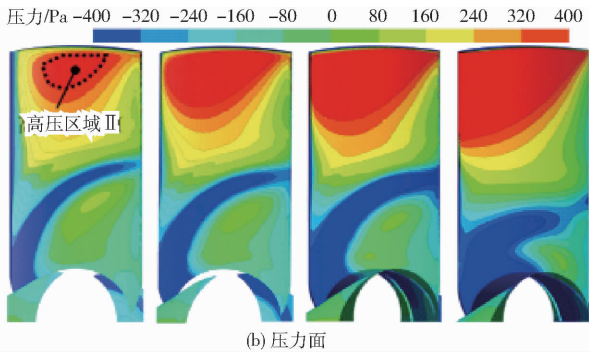


图 5 安装角对空载风速和流量-全压曲线的影响

Fig. 5 Influence of installation angle on no-load wind speed and flow - full pressure curve



(a) 吸力面



(b) 压力面

图 6 空载工况下叶片表面压力分布随安装角变化规律

Fig. 6 Pressure distributions of blade surface varied with installation angle under no-load condition

吸力面上的低压区域和高压区域 I 产生的位置及其形状由以下两点决定:①如图 7 所示,由于叶片截面为弧形,叶片前缘位置与来流的夹角(图中 α_1)较小,而靠近叶片尾缘位置处的夹角更大($\alpha_2 > \alpha_1$),故叶片吸力面的低压区域更易集中在尾缘附近。②安装角是沿叶轮径向不变的,叶高更大处的叶片截面具有更高的线速度和更大的攻角,因此低压区易在更大叶高处出现。综上所述,沿图 6 吸力

情况;当β=30°时,全压曲线随流量变化发生大幅度波动,此时流量小于 8 m³/s 的数据因叶片发生严重喘振而无法获得,该风机能够在 12~14 m³/s 流量区间内工作,此流量对应的风速可达 18.87~22.02 m/s,可能会造成较大损失,但较高的风速有利于快速分离混合在蔗段中的杂质,因此对于生长环境差、杂草较多的蔗田有一定的使用价值;当β=35°时,即使流量达到 14 m³/s 风机依然为失速状态,因此很难被应用于实际场合。

图 6 为空载工况下不同安装角时叶片表面的压力分布图,其中叶片旋转方向均为逆时针,安装角由左到右依次为 20°、25°、30°、35°,下同。β=20°时,仅在 0.7~1 倍叶高附近存在小面积的低压区域(-2 000 Pa 以下),该区域靠近叶片尾缘,呈三角形分布,而在靠近前缘位置处则存在一个三角形高压区域(高压区域 I),该区域自叶根位置延伸至 0.5 倍叶高处,对气动性能有不利影响。随着β的增加,吸力面的低压区域逐渐增大并扩展到叶片前缘,高压区域 I 则逐渐缩小。β=20°时,压力面中部存在高压区域 II(400 Pa 以上),此区域位于 0.9~1 倍叶高处,其上部边缘水平,底部边缘呈抛物线分布。随着安装角增大,高压区域 II 逐渐扩大并向叶片前缘扩展。当β=35°时高压区域 II 已扩展至 0.4~1 倍叶高处并且其形状转变为三角形。安装角的升高增大了吸力面和压力面的压差,使空载工况下风速升高,但这可能造成叶片失速,所以当β上升至 30°以后,空载风速的上升趋势减缓。

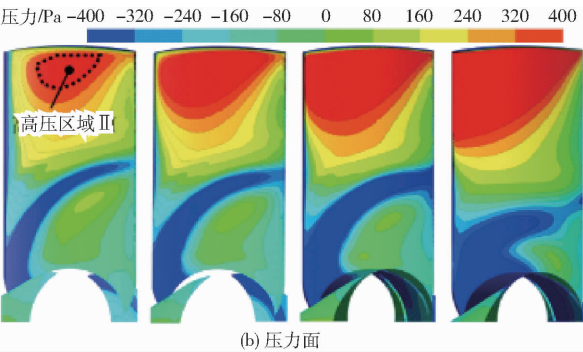


图 7 叶片截面与来流夹角变化规律

Fig. 7 Variation of angle between cross-section of blade and incoming flow

面左下至右上方向,叶片与来流的夹角逐渐增大,因此当β=20°时,低压区为较小的“倒置三角形”,而

高压区域Ⅰ为较大的“正置三角形”。随着安装角增大,叶片攻角整体增加,所以当 $\beta = 35^\circ$ 时低压区域扩展至0.5倍叶高处,并且形状发生了变化。

甘蔗混合物进入风机后会导致风机流量下降,当流量降低后叶轮流场将会产生较大变化。图8为流量为 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 时叶片表面压力分布情况。压力面分布未发生明显改变,因此风机全压的变化主要取决于吸力面的压力变化。当 $\beta = 20^\circ$ 时风机全压较低, $10\text{ m}^3/\text{s}$ 已接近其最大流量($10.4\text{ m}^3/\text{s}$),因此压力分布情况与空载时基本相同。在此流量下, $\beta = 25^\circ$ 的叶轮所对应风机全压为4种叶轮中的最高值,此时吸力面的低压区域明显扩大,压力面的压力也有所升高,这是因为相对于空载工况,流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 使风速由 19.07 m/s 减小到 15.73 m/s ,此

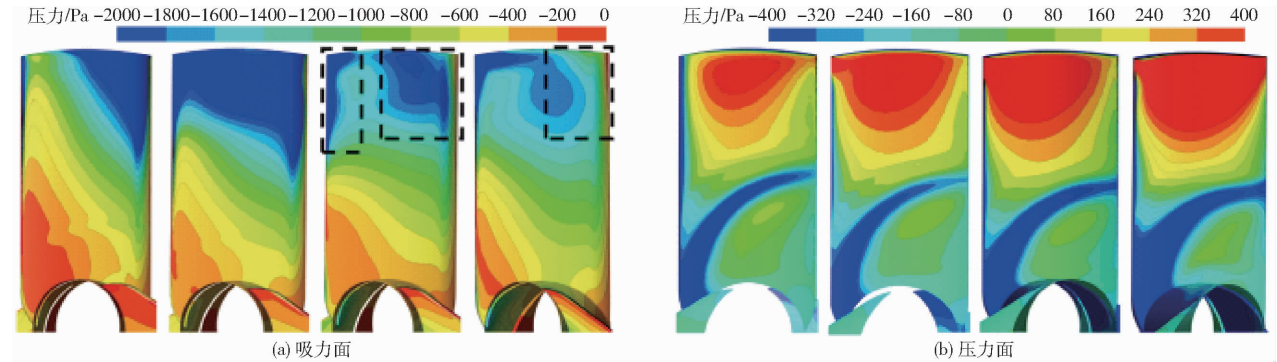


图8 流量为 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 时叶片表面压力分布随安装角变化规律

Fig. 8 When flow rate was $10\text{ m}^3/\text{s}$, pressure distribution on blade surface varied with installation angle

综上所述可知叶片安装角为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 时,风机气动性能较好。

2.3 叶片数对气动特性的影响

如图9所示,随着叶片数 N_b 的增加空载风速减小,并且随着叶片数的增加下降趋势加快,但总体来看叶片数对空载风速的影响较小(最高和最低风速相差 1.13 m/s)。当 N_b 为2和3时,全压曲线差别很小,两种叶轮均能使风机在流量 $10 \sim 12\text{ m}^3/\text{s}$ 区间内正常工作;当 $N_b = 4$ 时,风机全压在各流量时均有大幅度降低,并且正常工作的流量范围减小至 $11 \sim 12\text{ m}^3/\text{s}$,因此该风机排杂性能对工况的变化会更加敏感,可能在物料量增大时发生失速;当 $N_b = 5$ 时,全压再次大幅度降低并且更易发生失速,故该风机性能最差。

图10为不同叶片数的叶轮在空载工况下叶片表面的压力分布图,叶片数从左至右依次为2、3、4、5。叶片数较少时,低压区域能够延伸至更小的叶高处,这有利于增大吸力面和压力面的压力差,但是总体来看所有叶片吸力面的压力分布具有相似的规律。叶片压力面的差异则较明显,当 $N_b = 2$ 时,高压区域Ⅱ能够占据压力面总面积的 $1/3$ 左右,但是不

时叶片攻角增大且尚未达到失速的临界值,因此会使叶片的做功能力得到加强; $\beta = 30^\circ$ 的叶轮在此流量已经失速,风机全压随时间发生波动(图8显示了压力为中间值时的叶片表面压力分布图),此时叶片尾缘和叶尖交界处(图8中叶片右上方)最先发生失速,导致该位置压力分布规律发生较大变化,同时叶片前缘的低压区域有一定程度的扩大,这是因为叶片靠近前缘部分与来流的夹角较小尚未引起该位置的流动分离,这一情况仅出现在叶片前缘附近的小面积区域,但整个吸力面的低压区域则因失速而大幅度缩减,故此时风机全压较低。 $\beta = 35^\circ$ 的叶轮在此流量下失速更加严重,吸力面在 $0.5 \sim 1$ 倍弦长之内的低压区域完全消失,因此风机全压较低。

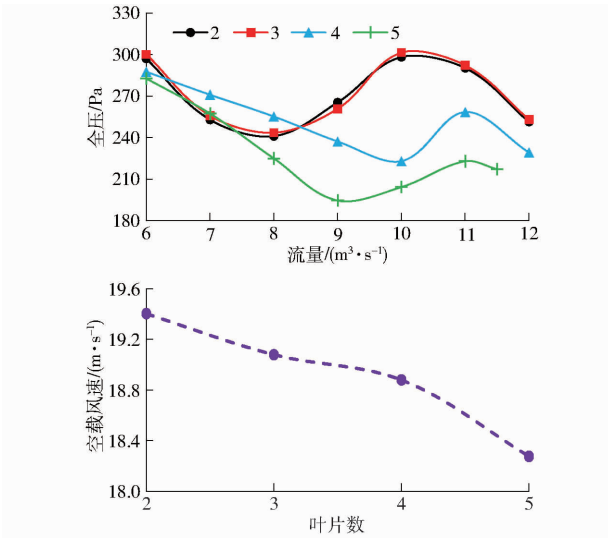


图9 叶片数对空载风速和流量-全压曲线的影响
Fig. 9 Effect of number of blades on no-load wind speed and flow - total pressure curves

能延伸至叶片前缘,同时可以观察到因叶根涡流造成的负压延伸长度可达0.5倍叶高以上,并将高压区域Ⅱ分裂为两部分。当 $N_b = 3$ 时,高压区域Ⅱ占据压力面的比例有小幅降低,但是叶根涡流造成的负压最远仅延伸至0.5倍叶高附近。当 $N_b = 4$

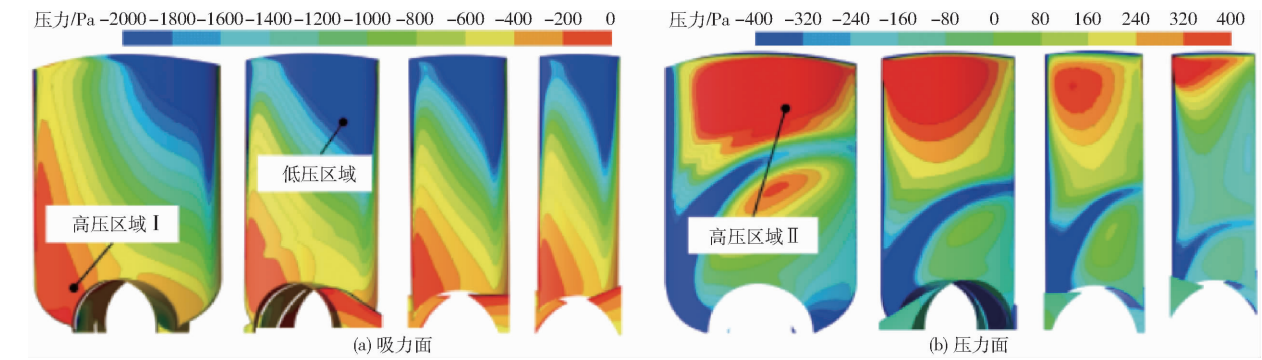


图 10 空载工况下叶片表面压力分布随叶片数变化规律

Fig. 10 Pressure distributions of blade surface varied with number of blades under no-load condition

时,高压区域Ⅱ明显缩小。叶片数达到 5 时,压力面的高压区域Ⅱ仅集中于 0.8 ~ 1 倍叶高附近。因此随着叶片数的增加,空载风速降低,但因为叶片吸力面的压力分布受叶片数影响较小,所以降低的幅度不大。

虽然叶片数对空载风速的影响较小,但是对风机的流量-全压曲线影响较大,这主要是叶片弦长变化引起的。图 11 为不同弦长叶片升力系数曲线,升力系数和失速临界攻角均随弦长的增加而提升。

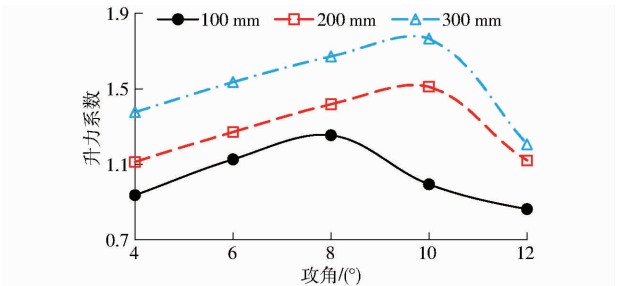


图 11 叶片弦长对升力系数曲线的影响

Fig. 11 Effect of blade chord length on lift curves

若其余因素水平不变,则叶片数更少的叶轮具有更大的叶片弦长,这使得气动性能增强的同时也提高了叶片抵抗失速的能力。叶片数由 2 增加至 3 时风机气动性能并未因弦长减小而降低,这是因为叶片较少的叶轮受叶根涡流影响较大(图 12),其原因是:由于叶片截面为圆弧形,弦长更大的叶片其前缘附近与来流夹角更小,在叶根附近该夹角甚至缩小为负值,这将引起叶根涡流强度和延伸距离的增加;弦长过大的叶片需要对叶根进行切割才能安装在轮毂上,这破坏了叶片前缘的圆弧形,进一步

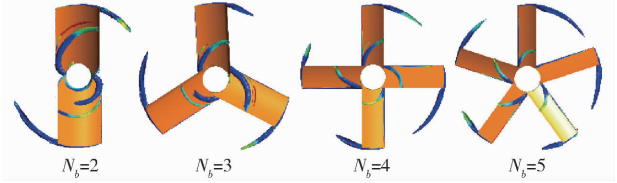


图 12 叶片数对叶根处湍流相干结构的影响($Q = 4 \times 10^5$)

Fig. 12 Effect of blade number on turbulent coherence structure at leaf root ($Q = 4 \times 10^5$)

增加了叶根涡流尺寸。

综上所述,减少叶片数在增加叶片弦长提高升力系数的同时,还会使叶根涡流向主要做功区域延伸,因此当叶片数为 2 和 3 时风机气动性能相近,当叶片数大于 3 时气动性能下降。

2.4 叶轮面积对气动特性的影响

如图 13 所示,随着叶轮无量纲面积 G 的增加空载风速线性升高,最高值与最低值相差 2.64 m/s,说明该参数对风速影响较大。当 G 为 0.3 时,各流量下全压均较低,风机正常工作流量范围很小(10 ~ 11 m³/s);当 G 为 0.35 时,全压有较大幅度的提升,正常工作流量范围扩大到 10 ~ 11.5 m³/s;当 G 为 0.4 时,风机具有最大流量区间(10 ~ 12 m³/s),此时全压也有进一步提高,因此该风机实用性比较强。当 G 为 0.45 时风机全压提高,但是失速流量由 10 m³/s 上升至 11 m³/s,并且在发生失速后全压明显降低。 $G = 0.45$ 的风机具有风速和风压较高的优点,但是该风机同时具有高负载下易失速且失速后

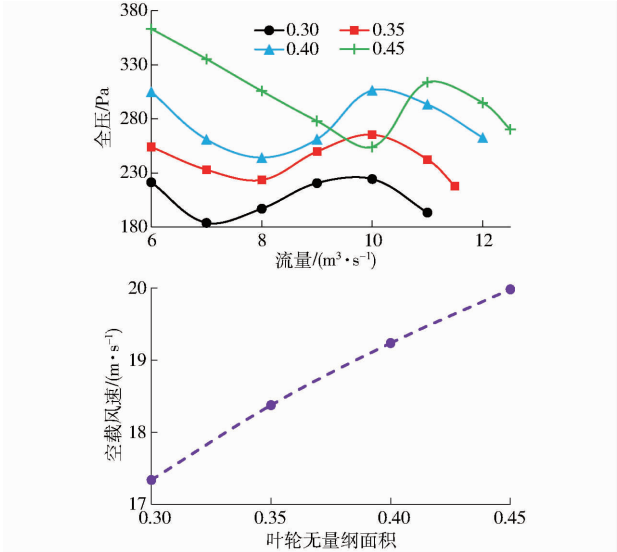


图 13 叶轮无量纲面积对空载风速和流量-全压曲线的影响

Fig. 13 Effect of dimensionless area of impeller on no-load wind speed and flow - total pressure curves

全压降低幅度过多的缺点,这导致其相对于 $G = 0.4$ 的风机没有明显优势。

提高叶轮无量纲面积可增加叶片弦长,有利于提升叶片的升力系数和失速攻角^[26],因此可提高风机的空载风速和全压,并且可以扩大风机正常工作的流量区间,但是叶轮面积提高也会增加叶根附近的弦长,这会导致叶根涡流尺寸扩大进而造成叶轮附近流场的恶化。此外叶根处线速度和攻角较低,所以该区域几乎无做功能力, G 的提高必然会增大该区域面积,从而加重叶根处气流堵塞,因此当 G 达到0.45时,全压的增长趋势有所减缓。综上可知当叶轮无量纲面积为0.35~0.45时,风机气动性能较好。

3 叶轮结构参数优化

3.1 优化参数选取

叶片安装角 β 、叶片数 N_b 以及叶轮无量纲面积 G 对风机气动特性均有影响,但在优化过程中 N_b 被舍弃,其原因有两点:① β 可以控制叶片攻角,计算结果表明该参数对风机气动特性有明显的影 响。② N_b 和 G 均可控制叶片弦长从而影响风机特性,但是 N_b 只能为整数且过多的叶片数会导致杂质通过的空隙被分散,这使得该参数在优化方面存在局限性。

图14为0~0.9倍叶高处叶片截面压力分布情况。在0~0.3倍叶高处,叶片压力面和吸力面的压差很小,说明该位置做功能力较弱,随着叶高增加,压差逐渐增大,因此风机风能主要来源于叶片2/3~1倍叶高位置。基于以上结论,扩大主工作区弦长并缩小叶根位置弦长有利于提高叶轮气动性能,因此使用叶片夹角(前缘和尾缘之间夹角 γ)来调节主工作区在整个叶片中所占的比重,并将此作为优化参数之一。

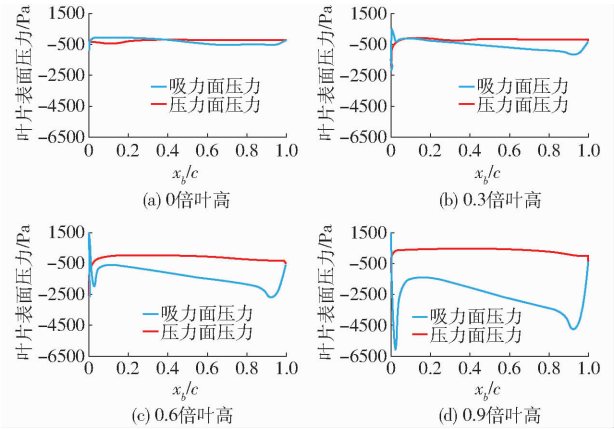


图14 叶片表面压力分布

Fig. 14 Description of pressure distribution on surface of blade

当安装角为 35° 时,空载工况下风机已经进入失速状态,因此将 β 取值限定为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。将 N_b 设定为3,其原因是: N_b 为2和3时风机具有类似的全压曲线;叶片数过少会导致流线混乱;叶片数应与支撑架数(2个)不同以防二者产生相同的倍频发生共振。 G 为0.3时风机全压和空载风速均较低,因此将 G 取值限定为0.35~0.45。为保证叶片与轮毂连接点的强度,叶片夹角 γ 限定在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围之内。

3.2 响应曲面试验结果

采用Box- Behnken Design进行试验设计,试验结果由仿真计算得到,因素编码如表1所示。风机内部风速应小于蔗段和大体积甘蔗碎片的悬浮速度以防损失率升高,经验表明蔗段悬浮速度普遍为20 m/s以上,大部分甘蔗碎片悬浮速度为17 m/s以上,有部分小体积碎片悬浮速度低于17 m/s,但高负载工况下进入收获机甘蔗较多,蔗段不易受压劈裂为碎片,因此本文将17 m/s作为甘蔗损失率升高的临界风速,在该风速下风机流量约为 $11 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为了提高风机在高负载工况下清选能力,将流量为 $11 \text{ m}^3/\text{s}$ 时风机全压作为评价指标进行响应面试验。

表1 试验因素编码
Tab.1 Test factor codings

编码	因素		
	安装角/($^\circ$)	叶轮无量纲面积	叶片夹角/($^\circ$)
-1	20	0.35	0
0	25	0.40	15
1	30	0.45	30

根据响应曲面法的要求,在优化过程中进行了13次试验(表2, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值)。为了研究各参数对评价指标的作用机理还进行了若干组补充试验(表3)。表4表明, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 以及 X_1X_3 对评价指标有显著性影响,其组合可以反映指标变化趋势。

表2 响应曲面试验结果
Tab.2 Response surface test results

试验序号	因素			风机 全压/Pa
	X_1	X_2	X_3	
1	1	1	0	367.42
2	1	0	1	352.36
3	1	0	-1	252.55
4	-1	0	-1	137.98
5	0	-1	-1	152.36
6	0	0	0	394.76
7	0	1	1	357.12
8	1	-1	0	312.05
9	-1	1	0	367.24
10	-1	-1	0	252.75
11	-1	0	1	336.89
12	0	-1	1	331.78
13	0	1	-1	230.77

表 3 补充试验结果
Tab.3 Supplements test results

试验序号	因素			风机
	X_1	X_2	X_3	全压/Pa
1	-1	0	0	323.08
2	1	0	0	391.87
3	0	-1	0	236.39
4	0	1	0	366.91
5	0	0	-1	335.04
6	0	0	1	380.81

表 4 方差分析结果
Tab.4 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	F	P
模型	1.124×10^5	9	74.42	$<0.0001^{**}$
X_1	4489.73	1	26.75	0.0013^{**}
X_2	9357.8	1	55.75	0.0001^{**}
X_3	45676.02	1	272.14	$<0.0001^{**}$
X_1X_2	873.79	1	5.21	0.0565
X_1X_3	2455.2	1	14.63	0.0065^{**}
X_2X_3	704.11	1	4.2	0.0797
X_1^2	4861.29	1	28.96	0.001^{**}
X_2^2	5431.48	1	32.36	0.0007^{**}
X_3^2	34742	1	207	$<0.0001^{**}$

注：**表示影响极显著($P<0.01$)。

评价指标与各显著因素编码值回归方程为
$$Y = 394.76 + 23.69X_1 + 34.2X_2 + 75.56X_3 - 33.98X_1^2 - 35.92X_2^2 - 90.84X_3^2 - 24.77X_1X_3$$
(5)

3.3 交互作用机理

如图 15 所示,由于 β 和 γ 之间的相互作用对评价指标有显著影响,当 $\gamma \leq 15^\circ$ 时,3 条曲线均呈上升趋势,当 $\gamma \geq 15^\circ$ 时,3 条曲线表现出不同的趋势,其中 $\beta = 20^\circ$ 的曲线维持上升趋势,而其余 2 条曲线则开始下降。

为了研究其相互作用机制,分析不同 β 和 γ 组合时叶片表面的压力分布规律。如图 16 所示,当 $\beta = 20^\circ$ 时,吸力面低压区域随着 γ 的增加而增大,但当 $\beta = 30^\circ$ 时这一趋势相反。低压区域面积变化主要与叶片尾缘和来流夹角的变化有关。

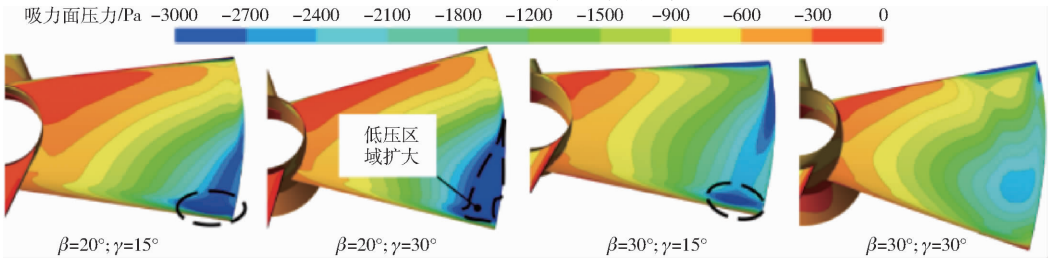


图 16 叶片表面压力分布随安装角和叶片夹角的变化规律

Fig. 16 Pressure distribution on surface of blade varied with installation angle and blade angle

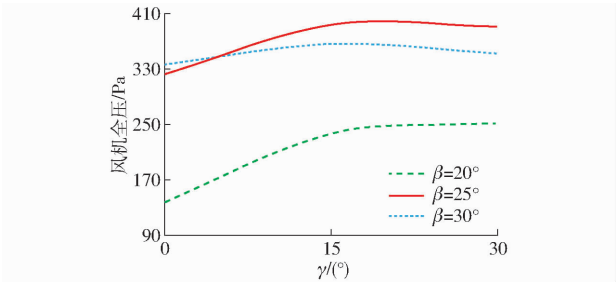


图 15 β 与 γ 交互作用对风机全压的影响

Fig. 15 Effect of β interaction with γ on fan full pressure

图 17 为叶片尾缘附近的速度矢量(图中点 I 位于 $\gamma = 15^\circ$ 叶片的尾缘,点 II 位于 $\gamma = 30^\circ$ 叶片的尾缘)。因为叶片截面为弧形,所以远离叶片中心的位置与来流的夹角更大(图中 $\alpha_2 > \alpha_1, \alpha_4 > \alpha_3$)。当 $\beta = 20^\circ$ 时,由于攻角较低,叶片的性能随着攻角的增加而提高,相比之下使用 $\gamma = 30^\circ$ 的叶片可以在尾缘形成更大的低压区域。当 $\beta = 30^\circ$ 时,因为叶片尾缘与来流夹角已超过最佳值,所以导致气动性能下降,而这一现象在点 II 会更为明显,故此时低压区域随 γ 值的增加而缩小。

3.4 优化结果与风机气动性能

为了获得叶轮最佳参数,将提高流量 $11 \text{ m}^3/\text{s}$ 下的风机全压作为优化目标,其结构参数约束条件为: $\beta \in [20^\circ, 30^\circ], \gamma \in [0^\circ, 30^\circ], G \in [0.35, 0.45]$ 。此外,全压提升之后,风机在低负载工况下,其流量可能大于 $11 \text{ m}^3/\text{s}$,这会导致损失率升高,因此还应附加一个约束条件以限定风机流量的最大值。考虑到叶轮优化前风机在低负载工况下未造成较高的损失,故设定附加约束条件为:叶轮优化前后,风机空载风速差异不超过 5%。

优化后得到叶轮参数为: $\beta = 23.34^\circ, G = 0.43, \gamma = 14.56^\circ$ 。优化前后,风机空载风速最大差异为 4.67%,符合附加约束条件。为了对比叶轮优化前后风机气动性能,图 18a 给出了叶轮优化前后以及原型风机的流量-全压曲线。除流量为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近的小范围区域外,叶轮优化后,风机全压均有大幅度提升,尤其当流量大于 $11 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,优化后叶轮具有更大优势。如图 18b 所示,叶轮优化前后,其最高效率变化不明显,但最高效率点流量由 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 提升至 $11 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

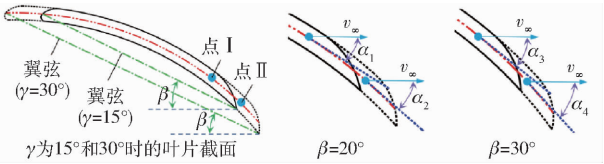


图 17 安装角和叶片夹角交互作用机理分析
Fig. 17 Analysis of interaction mechanism between mounting angle and blade angle

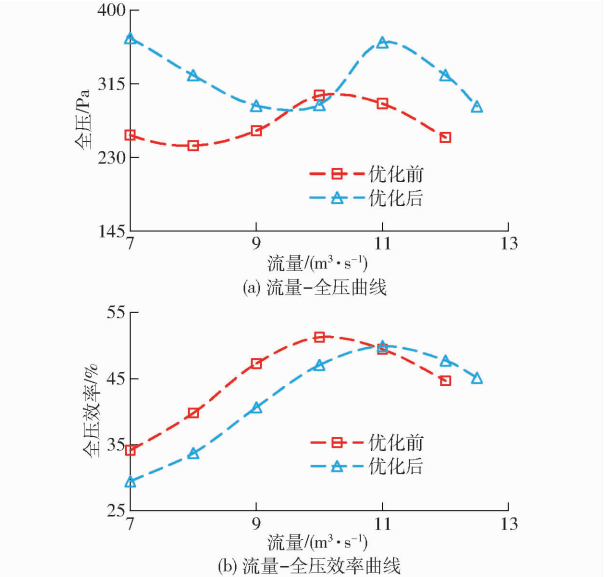


图 18 叶轮优化前后风机特性曲线
Fig. 18 Fan characteristic curves before and after impeller optimization

4 叶轮优化后的排杂试验

为了研究叶轮优化对风机性能的影响,进行了不同风机转速(1 050、1 350、1 650 r/min)、不同甘蔗地长势情况(良好、较差和严重倒伏)以及不同收获机行驶速度(1、2、3 km/h)下风机优化前后含杂率试验。试验场地在武鸣区锣圩镇,甘蔗品种桂糖 55。

如图 19a 所示,当风机转速为 1 050 r/min、行驶速度为 1 km/h 时,含杂率降低 1.06 个百分点,随着行驶速度升高,优化后风机优势逐渐变大,当行驶速度为 2 km/h 和 3 km/h 时,含杂率分别降低 1.99、

3.28 个百分点,并且即使收获机以最高速度行驶,优化后风机依然能够在最低转速下达到较低含杂率(6.77%),因此在收获长势良好的甘蔗时,建议适当降低转速以减少能耗和甘蔗损失。当风机转速为 1 350 r/min 时,优化后风机仅在行驶速度为 3 km/h 的情况下有较大优势(含杂率下降 2.5 个百分点)。当风机转速提升至 1 650 r/min 时,物料中已基本无游离的蔗叶,因此两种风机在各行驶速度下的含杂率未表现出明显差异。

如图 19b 所示,收获长势较差的甘蔗时,两种风机排杂性能表现出了较大差异。当转速为 1 050、1 350、1 650 r/min 时,含杂率最大降低量分别为 4.07、5.2、5.45 个百分点,可见优化后的风机在所有因素水平下均具有明显优势,这是因为该试验场地甘蔗植株矮小且杂草较多,优化后风机可产生更高风速,能够将缠绕在蔗段上的杂质快速分散。此外,通过与糖厂工作人员沟通得知,含杂率小于 10% 的甘蔗方可达到收购标准,而在该场地收获时,只有当行驶速度低于 3 km/h 且风机转速达到最高的情况下才能达到此标准。因此,建议收获长势较差且田间杂草较多的甘蔗时,适当降低行驶速度、提高风机转速以获得含杂率合格的蔗段。

如图 19c 所示,收获倒伏甘蔗时,当转速为 1 050、1 350、1 650 r/min 时,含杂率最大降低量分别为 1.99、2.1、1.7 个百分点。优化后风机能够获得更低含杂率的原因是:倒伏甘蔗进入收获机时易带入泥土、绿色蔗叶等不易被排出的高悬浮速度杂质,优化后的风机可产生更高的风速从而将此类杂质清除;倒伏甘蔗聚集较紧密,贴合在一起的甘蔗进入收获机后会使得风机负载骤然升高,导致风速下降,优化后风机具有更高的风压,可以减小负载对风速的影响。

5 结论

(1) 半球形的轮毂端盖形状具有更好的气动性

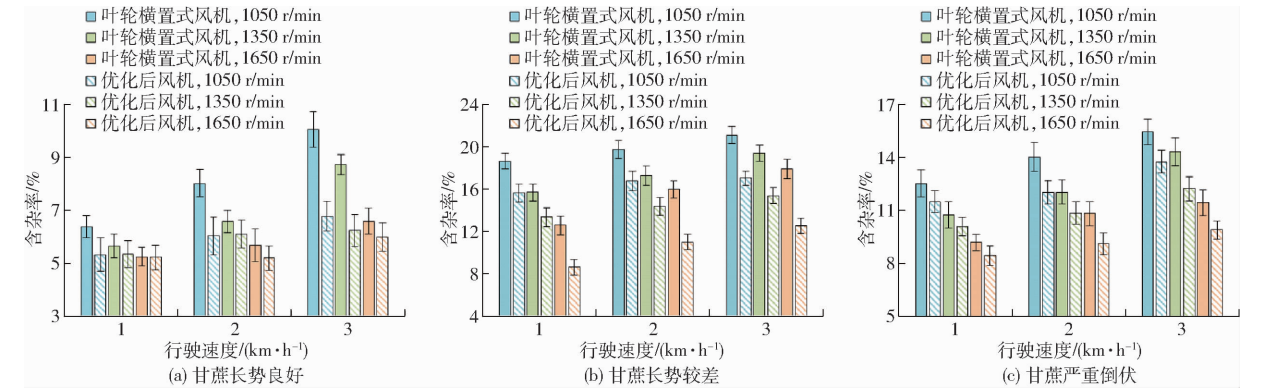


图 19 叶轮优化后含杂率试验结果
Fig. 19 Impurity test of impeller after optimization

能;叶轮的叶片安装角、叶片数、叶片夹角、叶轮无量纲面积在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、 $3.0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、 $0.35 \sim 0.45$ 时气动性能更好。

(2)以流量 $11 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的风机全压为评价指标,以叶片夹角、叶轮无量纲面积以及安装角为因素进行响应面试验,结果表明, γ 、 G 、 β 、 γ^2 、 G^2 、 β^2 以及 $\gamma\beta$ 对评价指标有显著性影响。优化后叶轮参数为: $\beta=23.34^{\circ}$ 、 $G=0.43$ 、 $\gamma=14.56^{\circ}$ 。

(3)含杂率试验结果表明,对于长势良好的甘

蔗,当风机转速为 $1\,050 \text{ r/min}$ 时,随着行驶速度升高,含杂率降低 $1.06 \sim 3.28$ 个百分点;当风机转速为 $1\,350 \text{ r/min}$ 时,在行驶速度为 3 km/h 的情况下含杂率降低 2.5 个百分点;当风机转速提升至 $1\,650 \text{ r/min}$ 时,两种风机在各行驶速度下含杂率未表现出显著差异。对于长势较差和严重倒伏的甘蔗,在所有因素水平下含杂率降低 $1.99 \sim 5.45$ 个百分点。优化后风机提升了甘蔗收获机在复杂田间环境中的排杂能力,为后续风机研究提供了理论支持。

参 考 文 献

[1] 区颖刚. 我国甘蔗生产全程机械化现状与对策[J]. 现代农业装备, 2019, 40(2): 3-8, 42.
OU Yinggang. Present situation and countermeasure of whole-process mechanization of sugarcane production in China [J]. Modern Agricultural Equipment, 2019, 40(2): 3-8, 42. (in Chinese)

[2] 徐超华, 邓玉龙, 刘新龙, 等. 美国蔗糖产业特点及对我国蔗糖业的借鉴[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(6): 80-86.

[3] 温翔, 杨佳敏. 我国甘蔗收获机械除杂装置现状及问题分析[J]. 农机使用与维修, 2019(2): 80.

[4] 陆喜梅. 甘蔗机械化收割技术与收割机械推广策略[J]. 世界热带农业信息, 2022(3): 65-66.

[5] SULTANIAN B. Turbomachinery history, classifications, and applications[J]. Logan's Turbomachinery: Flowpath Design and Performance Fundamentals, 2019(3): 1-12.

[6] 温翔, 杨望, 郭无极, 等. 切段式甘蔗收割机排杂离散元仿真参数标定及验证[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 12-18.
WEN Xiang, YANG Wang, GUO Wuji, et al. Calibration and verification of simulation parameters of sectional sugarcane harvester discrete element discharge[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 12-18. (in Chinese)

[7] 王海波, 李尚平, 麻芳兰, 等. 小型甘蔗收获机除杂风机的气动设计[J]. 农机化研究, 2015, 37(10): 103-107.
WANG Haibo, LI Shangping, MA Fanglan, et al. Pneumatic design of de-impurity fan of small sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10): 103-107. (in Chinese)

[8] 韦巧, 杨宝玲, 高振江. 我国甘蔗产业化现状浅析[J]. 农机化研究, 2015, 37(4): 247-254.
WEI Qiao, YANG Baoling, GAO Zhenjiang. Analysis of current situation of sugar cane industry[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4): 247-254. (in Chinese)

[9] LI Chunxi, FAN Fuwei, LIU Hongkai, et al. Simulation on aerodynamic performance of a variable-pitch axial flow fan with chordwise swept blades[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14): 151-159.

[10] LI C, LIN Q, DING X, et al. Performance, aeroacoustics and feature extraction of an axial flow fan with abnormal blade angle [J]. Energy, 2016, 103: 322-339.

[11] YE Xuemin, LI Pengmin, LI Chunxi. Investigation of double grooved blade tip structure on aerodynamic performance and vibration characteristic of an axial flow fan[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 167-174.

[12] 李俊, 徐洪海, 余培铨, 等. 不同叶片厚度对轴流风机流动特性影响的数值模拟[J]. 风机技术, 2017, 59(5): 20-25, 31.

[13] 刘刚, 王雷, 刘小民. 叶尖小翼对轴流风机气动性能及噪声特性影响的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(7): 104-112.
LIU Gang, WANG Lei, LIU Xiaomin. Numerical investigation on effects of blade tip winglet on aerodynamic and aeroacoustic performances of axial flow fan[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(7): 104-112. (in Chinese)

[14] 李春曦, 张丹, 叶学民. 动叶可调轴流风机叶片磨损的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1762-1771.
LI Chunxi, ZHANG Dan, YE Xuemin. Simulation of blade erosion of variable-pitch axial flow fan [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1762-1771. (in Chinese)

[15] 张睿, 谭舒翊, 丁旭洁, 等. 基于熵产理论的竖井贯流泵流动损失特性[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 6-12.

[16] 邢浩男, 马少春, 王凤磊, 等. 切段式甘蔗收割机排杂风机结构优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 67-75.
XING Haonan, MA Shaochun, WANG Fenglei, et al. Structure optimization and experiment of sugarcane chopper harvester extractor[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 67-75. (in Chinese)

[17] XING Haonan, MA Shaochun, WANG Fenglei, et al. Aerodynamic performance evaluation of sugarcane harvester extractor based on CFD[J]. Sugar Tech., 2021, 23(3): 627-633.

[18] XING Haonan, MA Shaochun, LI Weiqing, et al. Improving the performance of a sugarcane harvester extractor using design changes validated by computational fluid dynamic modelling and experiment[J]. Biosystems Engineering, 2022, 218: 124-138.

[19] 邢浩男, 马少春, 莫建霖, 等. 甘蔗收割机排杂风机叶轮结构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 12-19.
XING Haonan, MA Shaochun, MO Jianlin, et al. Optimization and experiment of parameters for the impeller structure of extractor in a sugarcane chopper harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 12-19. (in Chinese)

[22] 蒋俞,孙泽宇,汪若尘,等. 丘陵山区履带式作业机全向调平系统设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2023,39(18): 64-73.
JIANG Yu, SUN Zeyu, WANG Ruochen, et al. Design and performance test of the omnidirectional leveling system for crawler work machine in hilly areas[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 64-73. (in Chinese)

[23] 韩振浩,朱立成,苑严伟,等. 基于重心自适应调控的山地果园运输车设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):430-442.
HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Design and test of transport vehicle for hillside orchards based on center of gravity regulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):430-442. (in Chinese)

[24] 韩振浩,朱立成,苑严伟,等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. 农业机械学报,2022,53(5):413-421,448.
HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Analysis of slope trafficability and optimized design of crawler chassis in hillside orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):413-421,448. (in Chinese)

[25] 齐文超,李彦明,张锦辉,等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J]. 农业机械学报,2019,50(10): 17-23,34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy pid control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):17-23,34. (in Chinese)

[26] 齐文超,李彦明,陶建峰,等. 丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):381-388.
QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):381-388. (in Chinese)

[27] 彭贺,马文星,王忠山,等. 丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(1): 157-165.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2019,49(1):157-165. (in Chinese)

[28] 孙泽宇,夏长高,蒋俞,等. 基于 QBP-PID 的履带式作业机全向调平控制研究[J]. 农业机械学报,2023,54(12):397-406.
SUN Zeyu, XIA Changgao, JIANG Yu, et al. Omnidirectional leveling control of crawler machine based on QBP-PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(12):397-406. (in Chinese)

[29] 汪若尘,苏兆睿,丁仁凯,等. 基于滑模同步控制的履带式作业机全向调平系统研究[J]. 农业机械学报,2024,55(4): 394-401.
WANG Ruochen, SU Zhaorui, DING Renkai, et al. Omnidirectional leveling system of crawler machine based on sliding mode synchronous position control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):394-401. (in Chinese)

(上接第 99 页)

[20] ZHOU Baocheng, MA Shaochun, LI Wenzhi, et al. Study on sugarcane chopping and damage mechanism during harvesting of sugarcane chopper harvester[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243: 1-12.

[21] ZHOU Baocheng, MA Shaochun, LI Weiqing, et al. Study on the influence mechanism of energy consumption of sugarcane harvester extractor by fluid simulation and experiment[J]. Agriculture, 2023, 13(9): 1726.

[22] 刘鹏,何进,章志强,等. 基于 CFD-DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1):244-253.
LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD-DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):244-253. (in Chinese)

[23] 刘超群. Liutex——涡定义和第三代涡识别方法[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3):413-431, 478.
LIU Chaoqun. Liutex—third-generation of vortex definition and identification methods[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3):413-431, 478. (in Chinese)

[24] 王博,吴艳辉. 扩压叶栅叶尖非定常流动的涡动力学机理[J]. 航空学报, 2020, 41(11):246-262.
WANG Bo, WU Yanhui. Vortex dynamics mechanism of unsteady flow at the tip of the diffused blade grid[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(11):246-262. (in Chinese)

[25] 党政,席光,王尚锦. 叶片安装角对动/静叶排内部非定常流动的影响[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 319-322.
DANG Zheng, XI Guang, WANG Shangjin. Influence of blade mounting angle on the non-stationary flow inside a moving/static blade row[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(3): 319-322. (in Chinese)

[26] 刘家成,陈二云,杨爱玲,等. 非光滑表面叶片气动及降噪特性的研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(12): 31-39.
LIU Jiacheng, CHEN Eryun, YANG Ailing, et al. Study on noise reduction characteristics of blade with non-smooth surface [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(12): 31-39. (in Chinese)