

花生捡拾收获机秧蔓输送装置设计与试验

王伯凯^{1,2} 张 鹏^{1,2} 曹明珠^{1,2} 顾峰玮^{1,2} 吴 峰^{1,2} 胡志超^{1,2}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 中美花生生产工程技术联合实验室, 南京 210014)

摘要: 针对花生捡拾收获机作业中因缺少高效顺畅残秧输送收集装置造成花生秧浪费的生产实际问题,设计一种秧蔓气力输送装置。阐述秧蔓气力输送装置的工作原理,确定秧蔓气力输送装置方程及关键参数间的关系,分析输送气流及关键结构对残秧速度的影响。通过 Box - Behnken 试验设计和 DEM - CFD 气固耦合仿真,分析左风机转速、主输送管高度、右风机转速对残秧输送效率的影响,仿真试验结果表明:输送效率影响顺序由大到小为左风机转速、右风机转速、主输送管高度。田间试验结果表明,当最优参数为左风机转速 1 550 r/min、右风机转速 1 200 r/min、主输送管高度 2.08 m,秧蔓气力输送装置主输送管内可有效实现残秧与气流的均匀混合和高效输送,对应的青花 6 号和驻花 2 号平均输送效率分别为 1 533.56、1 451.52 kg/h,比优化前分别提高 9.57%、8.61%。

关键词: 花生收获机; 秧蔓输送装置; 风机; 气力输送

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0126-12

OSID:



Design and Experiment of Pneumatic Conveying Device for Seedlings of Peanut Harvester

WANG Bokai^{1,2} ZHANG Peng^{1,2} CAO Mingzhu^{1,2} GU Fengwei^{1,2} WU Feng^{1,2} HU Zhichao^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

2. Sino - US Peanut Production Engineering Technology Union Laboratory, Nanjing 210014, China)

Abstract: Peanut is rich in nutrition, which is a high-quality feed resource and plays an important role in increasing the economic added value of peanut industry. The annual output of peanut seedlings in China is huge. However, there are some problems in the operation of peanut pickers in the main peanut producing areas in China, such as low efficiency and poor reliability in transporting and collecting residual seedlings, which leads to a large number of residual seedlings being left in the fields, which not only wastes resources, but also increases the post-treatment cost. Therefore, it is of great significance to improve the quality and effect of transporting residual seedlings of the pickup harvester for increasing the added value of peanut production. Aiming at the practical problem of peanut seedling waste caused by the lack of efficient and smooth residual seedling conveying and collecting device in peanut picker operation, in order to improve residual seedling conveying efficiency and reduce residual seedling waste, a residual seedling pneumatic conveying device was designed. The working principle of pneumatic conveying device for residual seedlings was expounded, the relationship between equations and key parameters of pneumatic conveying device for residual seedlings was determined, and the influence of conveying airflow and key structure on the speed of residual seedlings was analyzed. Through Box - Behnken experimental design and DEM - CFD gas-solid coupling simulation, the effects of left fan speed, main conveying pipe height and right fan speed on the conveying efficiency of residual seedlings were analyzed. The results showed that the order of influence of conveying efficiency was left fan speed, right fan speed and main conveying pipe height, and the optimal combination was as follows: left fan speed of 1 550 r/min, right

收稿日期: 2021 - 10 - 28 修回日期: 2021 - 12 - 28

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项(Y2021GH08)、江苏省自然科学基金项目(BK2019140)和国家自然科学基金项目(51905282)

作者简介: 王伯凯(1987—),男,助理研究员,主要从事智能农机装备及系统仿真研究,E-mail: wangbokai219@163.com

通信作者: 胡志超(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究,E-mail: nfzhongzi@163.com

fan speed of 1 200 r/min and main conveying pipe height of 2.08 m. Under the optimal parameter combination, in the main conveying pipe of the pneumatic conveying device for residual seedlings, even mixing and efficient conveying of residual seedlings and airflow can be effectively realized, and the corresponding average conveying efficiencies of Qinghua No. 6 and Zhuhua No. 2 were 1 533.56 kg/h and 1 451.52 kg/h, respectively, which were 9.57% and 8.61% higher than those before optimization.

Key words: peanut harvester; pneumatic conveying device for seedlings; fan; pneumatic conveying

0 引言

花生秧营养丰富,是一种优质饲料资源,对增加花生产业经济附加值有重要作用^[1-2]。我国花生秧年产量巨大,据联合国粮农组织(FAO)统计数据,2019 年中国花生种植面积 4.63×10^6 hm²,居世界第 2 位;产量 1.75×10^7 t,居世界第 1 位。但当前我国花生主产区花生捡拾收获机作业过程中存在秧蔓输送效率低、可靠性差等问题,导致大量断枝、断秧被遗留田间,这些残秧既造成资源浪费,又增加后期处理成本^[3-4]。因此,提高捡拾收获机的残秧输送质量和效果,对于提升花生生产附加值有重大意义。

国外学者针对气流输送技术进行研究并取得一定进展。KUANG 等^[5]采用周期性边界条件对水平管道的气力输送系统进行 CFD-DEM 联合仿真,分析不同流型下流场加速和充分发展阶段的特性,建立加速阶段长度、颗粒数量及固体流量的半理论公式。MARCO 等^[6]通过单个大颗粒在小颗粒悬浮流体内的迁移运动试验,验证几种关于固体和流体相互作用力的经验模型,发现基于玻尔兹曼离散仿真获得的曳力和浮力模型相对于其他方法获得的关系式与试验的吻合度较差。近年来,国内学者对气力输送的研究也较为深入,杜俊等^[7]对带有弯管的稀相气力输送系统的流动特性进行耦合模拟,发现弯管管壁部受冲击和磨损更严重,而气流速度对颗粒分散影响很小。张凤奎等^[8]利用 DEM-CFD 对红枣从气力输送装置入口到出口的运动状态、颗粒分布和气流场分布进行仿真分析,通过仿真优化试验探究清选箱箱体的设计。龚智强等^[9]运用 Fluent 软件研究吸种区域气流场中种子的受力情况,确定影响种子受力的因素。但目前针对花生捡拾收获机作业过程中秧蔓气力输送装置结构组配及参数优化的研究较少。

为提高捡拾收获机的残秧输送效率,减少残秧浪费,本文设计一种秧蔓气力输送装置,依据残秧的物理特性和空气流动特性,采用 DEM-CFD 耦合分析气力输送过程中残秧的运动轨迹,并进行参数优化分析,以实现残秧高质顺畅输送。

1 总体结构与气力输送机理

1.1 试验台总体配置方案

针对轴流式花生捡拾收获机的作业原理及结构特点,结合残秧的物理特征及空气力学特性,设计由左风机、右风机、主输送管有序组配的秧蔓气力输送装置,并将其配置于自行研制的自走式捡拾收获试验台上,该试验台总体结构简图如图 1 所示,主要由提升装置、后轮、摘果装置、驱动轮、输送槽、螺旋输送器、驾驶室、残秧收集箱、秧蔓气力输送装置等组成(图 1),试验台可进行残秧气力输送结构参数、作业参数的优化试验。

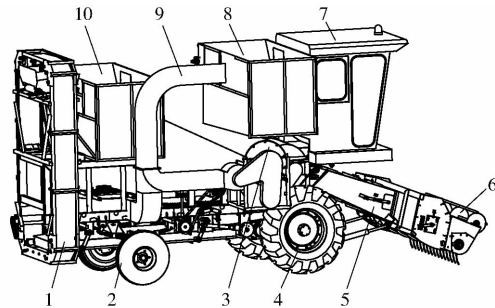


图 1 试验台总体配置方案

Fig. 1 Overall configuration scheme of experiment platform

1. 提升装置 2. 后轮 3. 摘果装置 4. 驱动轮 5. 输送槽 6. 螺旋输送器 7. 驾驶室 8. 残秧收集箱 9. 秧蔓气力输送装置 10. 集果箱

秧蔓气力输送装置如图 2 所示,主要由上筛、左风机、右风机、主输送管、吸秧口、摘果滚筒、进料口及机架等组成。两风机呈前后斜错位布置,左风机在主输送管的左侧(出秧口)产生负压,右风机对主输送管垂直段的残秧输送起辅助作用。

1.2 气力输送装置工作机理

秧蔓气力输送装置工作原理如图 3 所示,花生收获过程中,残秧主要来源于 3 处:①花生株系经摘果滚筒时荚果被摘取,荚果掉落下方,长秧秆(长度为 100~150 mm,悬浮速度为 5.9~12.8 m/s)在螺旋输送器作用下向主输送管方向运动,并在出秧口附近受左风机负压气流作用被吸入主输送管。②栅格筛上的中秧秆(长度为 51~99 mm,悬浮速度为 3.2~5.8 m/s)在左风机作用下被吸入吸秧口,经风机由斜支管进入主输送管与长秧秆汇集。③右风机

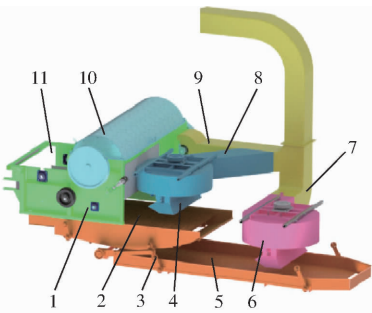


图 2 秧蔓气力输送装置结构图
Fig. 2 Structure diagram of pneumatic conveying device for residual seedlings

1. 机架 2. 上筛 3. 连杆 4. 左风机 5. 下筛 6. 右风机
7. 支管 8. 斜管 9. 主输送管 10. 摘果滚筒 11. 进秧口

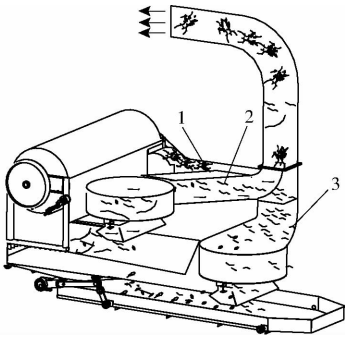


图 3 秧蔓气力输送装置工作原理图
Fig. 3 Schematic circuit of pneumatic conveying device for residual seedlings
1. 长秧秆 2. 中秧秆 3. 短秧秆

从下筛吸附的短秧秆(长度为 20 ~ 50 mm, 悬浮速度为 2.1 ~ 3.8 m/s)在气流作用下被输送至主输送管与长秧秆、中秧秆汇合, 最后一起被输送至集秧箱。

2 气力输送装置设计

2.1 主输送管设计

进秧量决定秧蔓气力输送装置内残秧质量浓度, 主输送管残秧输送量计算式为

$$q = k_1 m_1 v B_1 Q \tag{1}$$

式中 q ——主输送管残秧输送量, kg/s
 k_1 ——蔓果质量比, 取 1
 m_1 ——单株平均质量, kg/株
 v ——前进速度, m/s
 B_1 ——作业幅宽, m
 Q ——花生铺放密度, 株/m²

根据河南花生主产区种植情况, 植株平均长度 400 mm, 收获含水率 20%, 蔓果质量比为 1, 单株平均质量 0.1 kg/株, 作业幅宽为 2.5 m, 收获速度为 0.5 m/s, 花生铺放密度为 12.4 株/m²。通过式(1)计算出主输送管残秧输送量为 1.55 kg/s。

管路配置如图 4 所示, 其中主输送管内残秧由

各管道的残秧汇集而成, 各管道的残秧质量浓度计算式为

$$\begin{cases} w_0 = \frac{q}{A_0 v_0} \\ w_1 = \frac{\lambda_1 q}{A_1 v_1} \\ w_2 = \frac{\lambda_2 q}{A_2 v_2} \\ w_3 = \frac{(1 - \lambda_1 - \lambda_2) q}{A_3 v_3} \end{cases} \tag{2}$$

式中 w_0 ——主输送管内残秧质量浓度, kg/m³
 A_0 ——主输送管竖直段截面面积, m²
 v_0 ——气流速度, m/s
 w_1 ——输送管 $S_1 S_2$ 段内残秧质量浓度, kg/m³
 w_2 ——斜管内残秧质量浓度, kg/m³
 w_3 ——支管内残秧质量浓度, kg/m³
 λ_1 ——输送管 $S_1 S_2$ 段进秧量占主输送管残秧输送量比例
 λ_2 ——斜管进秧量占主输送管残秧输送量比例
 λ_3 ——支管进秧量占主输送管残秧输送量比例
 A_1 ——输送管 $S_1 S_2$ 段截面积, m²
 A_2 ——斜管截面积, m²
 A_3 ——支管截面积, m²
 v_1 ——输送管 $S_1 S_2$ 段气流速度, m/s
 v_2 ——斜管气流速度, m/s
 v_3 ——支管气流速度, m/s

根据式(2)可知, 秧蔓气力输送装置各管道内残秧质量浓度与捡拾收获机的作业速度、作业幅宽、铺放密度成正比, 与输送气流速度、各管道截面积成反比。铺放密度一定时, 残秧质量浓度越大, 越有利于增大秧蔓气力输送装置的输送能力, 但残秧质量

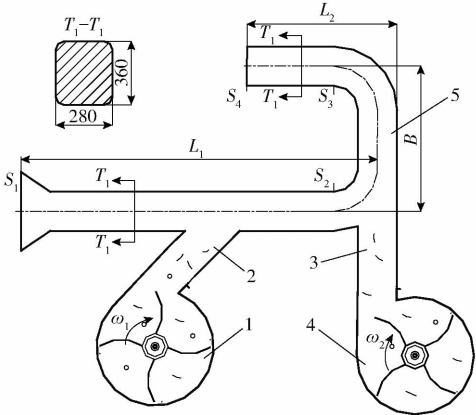


图 4 管路配置简图
Fig. 4 Schematic of pipeline configuration

1. 左风机 2. 斜管 3. 支管 4. 右风机 5. 主输送管

浓度过大,残秧易滞留或堵塞主输送管,降低残秧输送效率,主输送管的结构应满足残秧输送的浓度要求。主输送管截面尺寸对压力和流速有重要影响,是影响残秧质量浓度的关键参数,由式(2)可得主输送管竖直段截面面积计算式为

$$A_0 = \frac{k_1 q}{w_0 v_0} \quad (3)$$

气流输送质量浓度一般小于 10 kg/m^3 ^[10],为避免残秧滞留或堵塞输送管,主输送管内残秧质量浓度 w_0 设计为 2 kg/m^3 ,气流输送速度应大于残秧最大悬浮速度,残秧悬浮速度为 $3.2 \sim 12.8 \text{ m/s}$,为保证顺畅输送,根据气体输送理论,主输送管垂直段气流速度设计为 24 m/s ,花生铺放密度为 12.4 株/m^2 ,代入式(3)计算可得主输送管竖直截面面积 $A_0 = 0.12 \text{ m}^2$ 。综合考虑秧蔓气力输送装置整体结构配置和安装工艺,确定主输送管截面为矩形,尺寸为 $0.28 \text{ m} \times 0.36 \text{ m}$,并以主输送管截面和残秧输送气流速度为依据,确定主输送管所需输送气流流量为

$$Q_0 = 900 \lambda_4 v_0 \pi D^2 \quad (4)$$

式中 Q_0 ——主输送管所需输送气流流量, m^3/h

λ_4 ——输送气流流量系数,取 1.1

D ——管道等流量当量直径, m

根据主输送管尺寸为 $0.28 \text{ m} \times 0.36 \text{ m}$,管道等流量当量直径 $D = 0.32 \text{ m}$,可得 $Q_0 = 7402 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

残秧在主输送管内的流动状态受气流速度、残秧外形尺寸、残秧密度、输送管截面尺寸及输送量等因素影响,残秧在主输送管沿管底滑行或翻滚前进时的启动速度满足^[11]

$$U = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_2 - \rho) g d_m (L_g + f L_f)}{\rho C_D L_D}} \quad (5)$$

式中 U ——残秧在主输送管启动速度, m/s

ρ_2 ——残秧密度,取 302 kg/m^3

ρ ——空气密度,取 1.3 kg/m^3

f ——摩擦因数,取 0.05

d_m ——残秧群的等效粒径,取 0.013 m

L_g ——重力力臂长度,取 0.0065 m

L_f ——摩擦力力臂长度,取 0.006 m

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

C_D ——颗粒曳力系数,取 0.44

L_D ——流体曳力力臂长度,取 0.0065 m

通过式(5)得,最小启动速度 U 为 7.2 m/s 。

输送管 $S_1 S_2$ 段内残秧脱离管底运动的临界气流速度满足条件

$$v_c = C_1 (4 \mu_3 k_2 + 0.01 \rho_2 + b) \sqrt{\frac{1.2}{\rho}} \quad (6)$$

式中 v_c ——残秧脱离管底的临界气流速度, m/s

C_1 ——弯管阻力系数,取 0.5 ^[12]

μ_3 ——混合质量浓度,取 3.29 kg/m^3

k_2 ——输送管 $S_1 S_2$ 段气流速度与残秧速度的比值,取 1.5

b ——输送管 $S_1 S_2$ 段残秧的形状及尺寸系数,取 5

由式(5)、(6)计算可得,残秧在输送管 $S_1 S_2$ 段底部流动的速度为 $7.2 \sim 13.3 \text{ m/s}$,当超过 13.3 m/s 时,残秧脱离输送管 $S_1 S_2$ 段的底部运动。

根据气体输送理论,残秧在主输送管垂直段内稳定输送的气流速度满足条件

$$v_s = \lambda_5 v_x \quad (7)$$

式中 v_s ——主输送管垂直段内稳定输送的气流速度, m/s

λ_5 ——输送气流流量系数,取 1.2

v_x ——残秧的最大悬浮速度,为 12.8 m/s

由式(7)计算得出主输送管垂直段内稳定输送的气流速度为 15.4 m/s 。

2.2 吸秧口设计

吸秧口设计旨在平衡多个特性以实现最佳风机性能,也是保证筛子上长秧秆被充分捕获、吸集的关键点。其对整个系统的气流和压力要求有直接影响,合理的设计,使用较小的抽风量就可以有效提升秧秆输送效率。

吸秧口吸秧原理如图 5 所示,根据吸秧口与筛子之间的位置关系,吸秧口到筛面的高度满足条件

$$h_x = A_s + h_y + h_w \quad (8)$$

式中 h_x ——吸秧口到筛面的高度, mm

A_s ——筛子振幅, mm

h_y ——中秧秆平均平铺高度, mm

h_w ——进气高度, mm

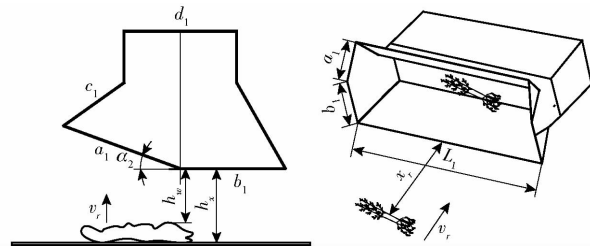


图 5 吸秧口吸秧原理图

Fig. 5 Schematic of seedling suction principle at seedling suction port

长秧秆平铺高度 h_x 为 $100 \sim 180 \text{ mm}$,为保证不堵塞吸秧口,取 $h_x = 180 \text{ mm}$,参照文献[13]上筛振幅设计为 7 mm ,根据设计尺寸,进气高度 h_w 为 $50 \sim 80 \text{ mm}$,则根据式(8),吸秧口到筛面的高度 $h_x = 187 \text{ mm}$ 。

中秧秆从筛子被顺畅吸入吸秧口,根据流体力学理论,进入吸秧口的风量应满足条件^[14-15]

$$Q_x = v_r (10h_x^2 + a_1L_1 + b_1L_1) \tag{9}$$

式中 Q_x ——进入吸秧口空气的流量, m^3/s
 v_r ——上筛筛面上的风速, m/s
 a_1 ——吸秧口斜边长度, m
 b_1 ——吸秧口底边长度, m
 L_1 ——吸秧口宽度, m

根据流体力学原理,吸秧入口处空气速度为

$$\mu_a = \frac{Q_x}{a_1L_1 + b_1L_1} \tag{10}$$

为保证中秧秆从筛子被顺畅吸入吸秧口,上筛筛面上风速 v_r 应大于中秧秆最大悬浮速度 $(5.8 \text{ m}/\text{s})^{[16]}$, 取 $v_r = 6 \text{ m}/\text{s}$, 并根据整体结构配置 a_1 设计为 0.2 m , b_1 设计为 0.19 m , 吸秧口宽度 L_1 设计为 0.9 m , 由式(9)得 $Q_x = 4.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 由式(10)得吸秧口处空气速度 $11.9 \text{ m}/\text{s}$ 。

2.3 风机参数确定

2.3.1 主输送管压损

当残秧在 S_1S_2 段时,混合气流在水平管道内的压力损失为

$$\Delta p_1 = (\lambda_a + \lambda_s \mu_3) \frac{l_1 \rho v_g^2}{2gD} \tag{11}$$

式中 Δp_1 ——混合气流在 S_1S_2 段的压力损失, Pa
 λ_a ——空气摩擦因数,取 $0.12^{[17]}$
 λ_s ——残秧摩擦阻力系数,取 1.8
 l_1 ——输送管 S_1S_2 段长度, m
 v_g ——输送管 S_1S_2 段气体速度, m/s

由式(5)可知,残秧在主输送管沿管底前进时的最小启动速度 $U = 7.2 \text{ m}/\text{s}$, 则 S_1S_2 段气体速度 $v_g \geq 7.2 \text{ m}/\text{s}$, 管道等流量当量直径 D 为 0.32 m , 输送管 S_1S_2 段长度设计为 1.4 m , 则由式(11)得 $\Delta p_1 \geq 104 \text{ Pa}$ 。

左风机吸秧口的压力损失为

$$\Delta p_2 = \zeta \frac{\mu_a^2}{2g} \gamma_a (1 + \mu_4 k_3) \tag{12}$$

式中 Δp_2 ——左风机吸秧口压力损失, Pa
 ζ ——吸秧口阻力系数,取 $1.1^{[18]}$
 μ_4 ——左风机吸秧口输送质量浓度,取 $1.6 \text{ kg}/\text{m}^3$
 γ_a ——吸秧口入口空气重度,取 $12.7 \text{ N}/\text{m}^3$
 k_3 ——物料种类、浓度系数,取 0.92

由式(10)知吸秧口处速度为 $11.9 \text{ m}/\text{s}$, 管道等流量当量直径 D 为 0.32 m , 则由式(12)得 $\Delta p_2 = 58.5 \text{ Pa}$ 。

当残秧在垂直上升的 S_2S_3 段时,混合气流局部压损计算式为

$$\Delta p_3 = \frac{\lambda_a B_2 \gamma_a v_6^2}{4gD} (l + K_s \mu_5) + v_6 B_2 (1 + 1.7 \mu_5) \tag{13}$$

式中 Δp_3 ——混合气流在直立管段内的局部压损, Pa
 B_2 —— S_3S_4 段长度, m
 v_6 —— S_3S_4 段气流速度, m/s
 K_s ——混合气流在 S_2S_3 段的综合阻力系数, 取 1.2
 μ_5 —— S_2S_3 段混合质量浓度,取 $1.6 \text{ kg}/\text{m}^3$

根据整机结构空间配置,管道垂直段的长度 B_2 在 $1.8 \sim 2.4 \text{ m}$ 之间,设计初始值 $B_2 = 2.0 \text{ m}$, 由式(13)得 $\Delta p_3 \geq 398.4 \text{ Pa}$ 。

当残秧在上水平管道 S_3S_4 段时,混合气流内的压力损失为

$$\Delta p_4 = (\lambda_a + \lambda_s \mu_5) \frac{l_2 \rho v_g^2}{2gD} \tag{14}$$

式中 Δp_4 —— S_3S_4 段压力损失, Pa
 l_2 —— S_3S_4 段长度, m
 v_g —— S_3S_4 段气体速度, m/s

由式(14)得 $\Delta p_4 = 131.1 \text{ Pa}$ 。

根据流体力学理论,左风机输送总压力损失为

$$\Delta p_5 = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 \tag{15}$$

式中 Δp_5 ——左风机输送总压力损失, Pa

由式(11)~(15)得 $\Delta p_5 \geq 692 \text{ Pa}$ 。

2.3.2 左风机转速

左风机结构如图6所示,主要由吸秧口、蜗壳、带轮、风机叶片等组成。主要参数包括风压全压 h_f 、风机转速 n_1 。由于左、右风机的结构和工作原理相似,仅对左风机参数进行设计。其作用是在吸秧口处产生足够负压风压和风量,将筛面抛送的中秧秆从吸秧口吸入,从出口排出到斜管,经由斜管送至主输送管。

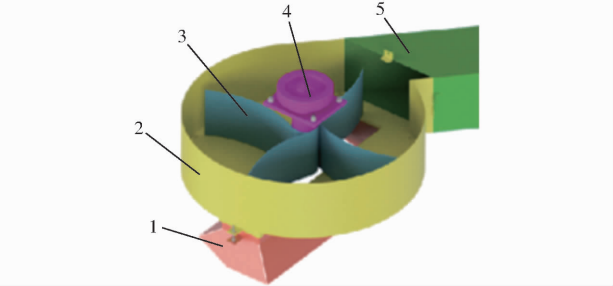


图6 左风机结构简图

Fig. 6 Schematic of left fan structure

1. 吸秧口 2. 蜗壳 3. 风机叶片 4. 带轮 5. 出口

为保证中秧秆能够由下吸秧口吸入,同时提高输送效率,根据流体力学理论,应满足条件

$$h_f = \lambda_6 \Delta p_4 \tag{16}$$

式中 λ_6 ——安全系数,取 1.2

由式 (16) 计算得出,左风机风压全压 $h_f \geq 760.2 \text{ Pa}$ 。根据式 (15)、(16) 计算结果,通过查询风机性能曲线和风机性能表,选择 4-79 型离心风机,根据前期试验,确定左风机工作转速 n_1 为 1 400 ~ 1 600 r/min,对应的流量为 15 120 ~ 17 000 m^3/h 。由于左、右风机两者结构和作业原理基本相同,通过同样的分析过程确定右风机转速为 1 000 ~ 1 200 r/min,对应的流量为 8 650 ~ 10 800 m^3/h 。同时,由式 (11) ~ (16) 可知,主输送管高度对各型颗粒运动状态有重要影响,结合前期测试试验确定主输送管高度为 1.8 ~ 2.4 m。

3 气力输送装置性能优化试验

3.1 气力输送装置仿真模型

使用 Autodesk Inventor 2019 对秧蔓气力输送装置进行三维建模,保存成 step 格式导入到 ICEM 18.0 中进行混合网格的划分^[19-20],结果如图 7 所示。

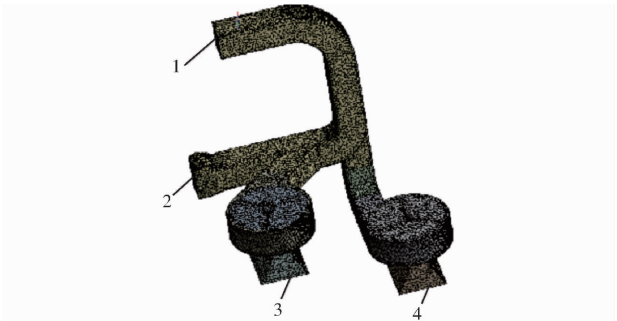


图 7 流场网格划分

Fig. 7 Grid generation of flow field

1. 上出风口 2. 上进风口 3. 左进风口 4. 右进风口

采用 EDEM 2018 和 ANSYS Fluent 17.0 软件开展 DEM-CFD 气固耦合仿真,在 Fluent 17.0 中设置 3 个进风口均为压力进风,上出风口设为压力出风,湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行瞬态计算,管道壁面为无滑移壁面,采用基于压力的 SIMPLE 算法对速度场和压力场进行耦合求解,动量项采用二阶迎风格式,湍流动能和湍流耗散率采用一阶迎风格式,残差精度为 10^{-3} s。定义最大运算步数为 1 000,时间步长设为 4×10^{-4} s。利用 EDEM 2018 设置相关参数,对长秧秆、中秧秆、短秧秆进行颗粒造型(图 8),设置输送气流为空气,密度和粘性系数分别为 1.29 kg/m^3 和 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,重力加速度为 9.81 m/s^2 ,时间步长设为 2×10^{-4} s,颗粒间的接触采用 Hertz-Mindlin (no slip) 接触理论,建立的残秧气力输送仿真模型如图 9 所示,其中长秧秆、中秧秆、短秧秆分别为红色、绿色、蓝色。

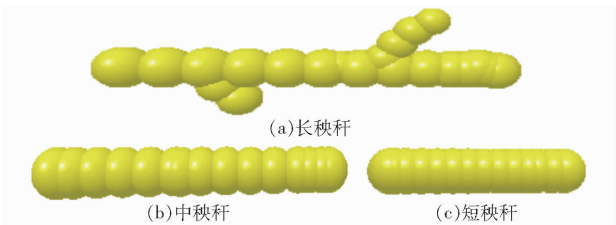


图 8 3 种颗粒造型

Fig. 8 Three kinds of particle modeling

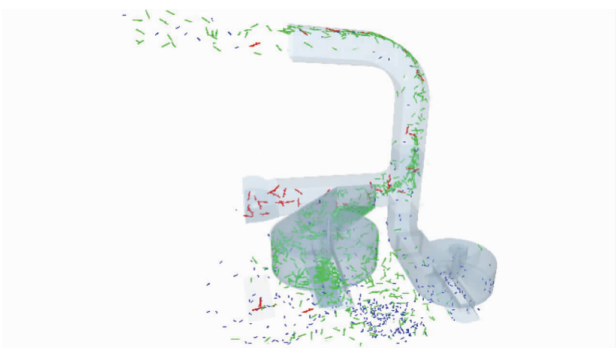


图 9 气力输送仿真模型

Fig. 9 Simulation model of pneumatic conveying of residual seedlings

3.2 仿真试验方法

由于 3 种颗粒形状、尺寸、质量多样,为提高运算效率,将 3 种颗粒视为由大小不同刚性体小球组合而成。各颗粒基本结构参数如表 1 所示,EDEM 模拟参数如表 2 所示,其中钢的泊松比为 0.25,剪切模量为 $2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$,密度为 $7 800 \text{ kg/m}^3$ 。颗粒数量无限制,生成位置及方向为随机。并根据前期试验测定,各型颗粒间的摩擦因数设置如表 3 所示^[21-22],由于青花 6 号、驻花 2 号两种品种的残秧物理特性不同,其在受残秧输送装置系统、击打及接搓过程后的空间姿态也不相同,也影响输送效率,因此需对两种品种残秧的基本特性进行研究。

表 1 各颗粒基本结构参数

Tab. 1 Basic structural parameters of three kinds of particles

类型	品种	颗粒比例	长径比	悬浮速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	球形度
长秧秆	青花 6 号	0.12	50.42	5.9 ~ 11.2	0.02
	驻花 2 号	0.10	45.65	6.3 ~ 12.8	0.03
中秧秆	青花 6 号	0.36	30.65	3.2 ~ 5.3	0.09
	驻花 2 号	0.37	25.67	3.7 ~ 5.8	0.11
短秧秆	青花 6 号	0.52	16.24	2.1 ~ 3.4	0.11
	驻花 2 号	0.53	13.45	2.3 ~ 3.8	0.12

通过对秧蔓气力输送装置的设计与参数分析,并结合式 (8) ~ (16) 可知,左风机影响残秧与输送气流的混合效果及高压区范围;主输送管高度影响输送装置主体内长秧秆和短秧秆管壁冲击和摩擦阻

表 2 EDEM 模拟参数

Tab.2 Simulation parameters in EDEM				
参数	品种	长秧秆	中秧秆	短秧秆
泊松比	青花 6 号	0.31	0.30	0.30
	驻花 2 号	0.30	0.30	0.29
剪切模量/Pa	青花 6 号	1.26×10^8	1.20×10^8	1.12×10^8
	驻花 2 号	1.22×10^8	1.19×10^8	1.08×10^8
密度/(kg·m ⁻³)	青花 6 号	1 200	1 500	1 500
	驻花 2 号	1 221	1 510	1 510
颗粒生成速率/ (个·s ⁻¹)	青花 6 号	90	210	210
	驻花 2 号	90	210	210
颗粒直径/mm	青花 6 号	6~10	4~7	2~5
	驻花 2 号	6~12	6~9	3~6

表 3 各型颗粒间的摩擦因数

Tab.3 Friction coefficient between three types of particles				
类型	参数	长秧秆	中秧秆	短秧秆
长秧秆	动摩擦因数	0.09		
	静摩擦因数	0.18		
中秧秆	动摩擦因数	0.08	0.09	
	静摩擦因数	0.18	0.18	
短秧秆	动摩擦因数	0.08	0.09	0.09
	静摩擦因数	0.18	0.18	0.18

力系数、速度及运动轨迹;右风机对主输送管内的垂直段气流场分布、残秧及输送气流有重要影响,影响秧蔓气力输送装置的残秧输送效率。以左风机转速、主输送管高度、右风机转速为影响残秧输送效率的主要因素。采用响应曲面法开展 Box-Behnken 试验,每组试验重复 5 次,确定输送装置最佳参数组合^[23]。

基于秧蔓气力输送装置气流输送机理,上进风口、左进风口、右下进风口均为压力进口,输送过程中,残秧在主输送管先为水平输送,后经下弯管后垂直输送,最后经上弯管后水平输出。

残秧输送效率计算公式为

$$Y_i = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m}$$

(17)

式中 Y_i ——残秧输送效率,kg/h
 m ——试验次数,取 5
 x_i ——第 i 次试验值,kg/h

3.3 性能试验

3.3.1 性能试验设计与方法

选取对收获质量影响较大的左风机转速、主输送管高度、右风机转速为作为试验因素。试验中前进速度 0.8 m/s,试验以青花 6 号残秧输送效率 Y_1 、驻花 2 号残秧输送效率 Y_2 作为指标,开展三因素三水平正交试验,试验因素与编码见表 4^[24]。

表 4 试验因素与编码

Tab.4 Factors and codes of experiment			
编码	因素		
	左风机转速 $A/(r \cdot min^{-1})$	主输送管高度 B/m	右风机转速 $C/(r \cdot min^{-1})$
-1	1 400	1.8	1 000
0	1 500	2.1	1 100
1	1 600	2.4	1 200

3.3.2 数据分析与处理

试验数据采用 Design-Expert 12.0 软件进行二次多项式回归分析^[25],并利用响应面分析法对各因素相关性和交互效应的影响规律进行分析研究。

3.4 试验结果回归分析

试验设计方案及结果如表 5 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。对试验数据进行多元回归拟合,可得各因素对残秧输送效率的回归模型为^[26-27]

$$Y_1 = 1\,358 + 91.6X_1 + 19.6X_2 + 59X_3 + 1.2X_1X_2 - 30.5X_1X_3 - 7.1X_2X_3 - 113.5X_1^2 - 180.9X_2^2 + 36.6X_3^2$$

(18)

$$Y_2 = 1\,332.4 + 106.3X_1 + 26.9X_2 + 71X_3 - 3.6X_1X_2 - 34.2X_1X_3 - 10.3X_2X_3 - 134.7X_1^2 - 211.5X_2^2 + 42.3X_3^2$$

(19)

表 5 试验设计方案及响应值结果

Tab.5 Experiment design and response values					
序号	因素			青花 6 号残秧输送效率 $Y_1/(kg \cdot h^{-1})$	驻花 2 号残秧输送效率 $Y_2/(kg \cdot h^{-1})$
	X_1	X_2	X_3		
1	1	0	1	1 406.3	1 392.6
2	1	1	0	1 158.2	1 094.8
3	0	1	1	1 297.7	1 262.2
4	1	-1	0	1 126.3	1 056.6
5	0	-1	-1	1 115.4	1 043.5
6	0	-1	1	1 262.9	1 220.5
7	0	0	0	1 353.4	1 329.1
8	-1	-1	0	971.2	870.4
9	-1	1	0	998.4	923.1
10	-1	0	-1	1 094.9	1 018.9
11	0	1	-1	1 178.6	1 126.3
12	0	0	1	1 348.6	1 323.3
13	0	0	0	1 358.9	1 347.7
14	-1	0	1	1 258.3	1 215.0
15	0	0	0	1 376.3	1 351.6
16	0	0	0	1 352.7	1 310.2
17	1	0	-1	1 364.7	1 333.4

回归方程的方差分析如表 6 所示。由表 6 可知,青花 6 号残秧输送效率 Y_1 、驻花 2 号残秧输送效率 Y_2 的 P 值均小于 0.001,表明 2 个模型极显著。其决定系数 R^2 分别为 0.992 0、0.990 6,表明 99% 以上的响应值均可以由这 2 个模型解释,因此,该模型

表 6 回归方程方差分析

Tab. 6 Variance analysis of regression equation

方差来源	青花 6 号残秧输送效率 Y_1				驻花 2 号残秧输送效率 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	3.054×10^5	9	96.55	<0.000 1	4.220×10^5	9	82.14	<0.000 1
A	67 106.16	1	190.93	<0.000 1	90 308.25	1	158.22	<0.000 1
B	3 085.05	1	8.78	0.021 0	5 799.65	1	10.16	0.015 3
C	27 800.82	1	79.10	<0.000 1	40 359.25	1	70.71	<0.000 1
AB	5.52	1	0.0157	0.903 8	52.56	1	0.0921	0.770 4
AC	3 708.81	1	10.55	0.014 1	4 684.03	1	8.21	0.024 2
BC	201.64	1	0.5737	0.473 5	422.30	1	0.7399	0.418 2
A^2	54 267.34	1	154.40	<0.000 1	76 345.13	1	133.76	<0.000 1
B^2	1.378×10^5	1	392.15	<0.000 1	1.883×10^5	1	329.99	<0.000 1
C^2	5 639.48	1	16.05	0.005 2	7 514.27	1	13.17	0.008 4
残差	2 460.33	7			3 995.35	7		
失拟	1 987.02	3	5.6	0.064 8	2 806.09	3	3.15	0.148 6
误差	473.31	4			1 189.27	4		
总和	3.079×10^5	16			4.259×10^5	16		

可以预测秧蔓气力输送装置的工作参数。

根据两模型各因素回归系数,可得到各因素对青花 6 号残秧、驻花 2 号残秧输送效率的影响由大到小均为左风机转速、右风机转速、主输送管高度。

3.5 参数优化与分析

基于理论分析与试验结果可知,左风机转速、主输送管高度、右风机转速对残秧输送效率均有显著影响,其中左风机转速影响最显著。以驻花 2 号残秧输送效率最高为评价指标,通过 Design-Expert 12.0 求解,左风机转速为 1 551.45 r/min、主输送管高度为 2.084 m、右风机转速为 1 200 r/min,驻花 2 号残秧最大输送效率为 1 468.36 kg/h,综合考虑秧蔓气力输送装置实际精度,以主输送管高度为 2.08 m、右风机转速为 1 200 r/min,应用 DEM-CFD 耦合仿真对比分析左风机转速分别为 1 400 r/min(试验水平最小值)、1 500 r/min(试验水平中间值)、1 551 r/min(回归模型最优解)、1 600 r/min(试验水平最大值)对残秧和输送气流的影响。

秧蔓气力输送装置主输送管内残秧流线如图 10 所示。图 10a 中,绿色流线为残秧由吸秧口进入左风机内的残秧运动轨迹,蓝色流线为残秧由左风机进入主输送管内的运动轨迹。根据式(17)计算左风机转速分别为 1 400、1 500、1 551、1 600 r/min 时,残秧输送效率分别为 1 178.64、1 340.52、1 468.36、1 416.37 kg/h,均可实现残秧与输送气流的顺畅混合;左风机转速为 1 551 r/min 时,残秧的输送效率优于左风机转速为 1 400、1 500、1 600 r/min 时。图 10a、10b 中,残秧流线少且出口流线短,表明残秧

的输送速度和效率较低;图 10c、10d 中,残秧流线多且出口流线长,表明残秧的输送速度和效率较高;主输送管内输送气流速度分布如图 11 所示。图 11 中主输送管竖直段输送气流速度高于下水平段输送气流速度,残秧及输送气流经主输送管上水平段排出,图 11a、11b、11c 中,输送管竖直段输送气流速度随左风机转速增加而升高,残秧输送效率也不断增加,图 11c 主输送管上水平段气流“高速区”较图 11d 均匀稳定,气流波动少,且残秧与气流的混合效果也更好,更有利于提高残秧输送。

3.6 气流场试验验证

为保证模拟得到的气流速度分布规律具有参考价值,使用 DP3000 型管道风速测量仪(分辨率为 0.01 m/s)对主输送管上水平段出口附近的测量面进行气流速度测定。将实测气流速度数据与模拟流场气流速度数据进行对比,以验证仿真结果的可靠性。

采用布点法^[28],以主输送管竖直段中心线与上水平段管道中心线交点为原点,选取上水平段管道宽度方向为 x 轴,主输送管上水平段管道中心线为 y 轴,水平段管道高度方向为 z 轴。如图 12 所示,沿 y 轴方向的 3 个测量面分别为前测量面($y=0$ mm)、中间测量面($y=200$ mm)和后测量面($y=400$ mm),其中每个测量面上均匀分布由 x 、 z 轴坐标交错构成的 27 个测点,通过整理测点气流速度,可以分析各测量面气流的分布规律,3 个测量面共计 81 个测点。 x 轴方向测量点为 -130、-95、-65、0、35、65、130 mm; y 轴方向测量点为 0、200、400 mm; z 轴方向测量点为 0、170、340 mm。

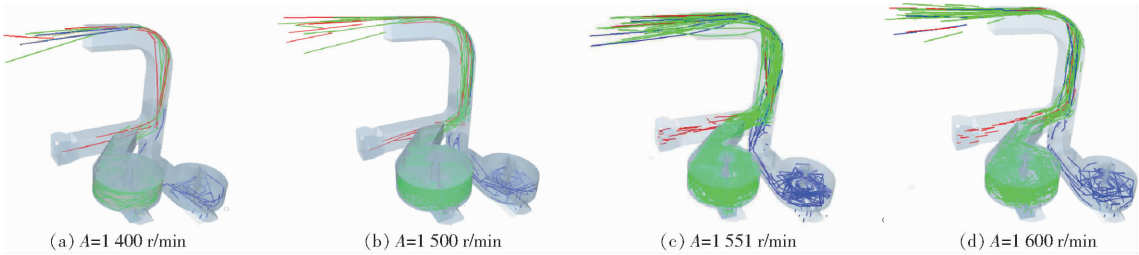


图 10 主输送管内残秧流线图

Fig. 10 Streamline diagrams of residual seedlings in main conveying pipe

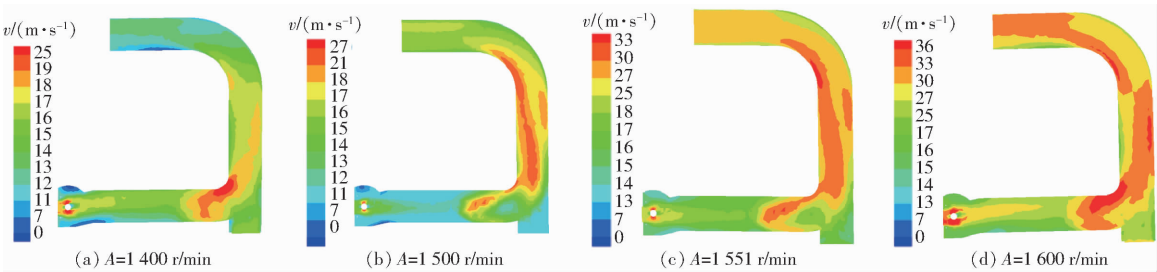


图 11 主输送管内输送气流速度分布图

Fig. 11 Velocity distribution diagrams of conveying air flow in main conveying pipe

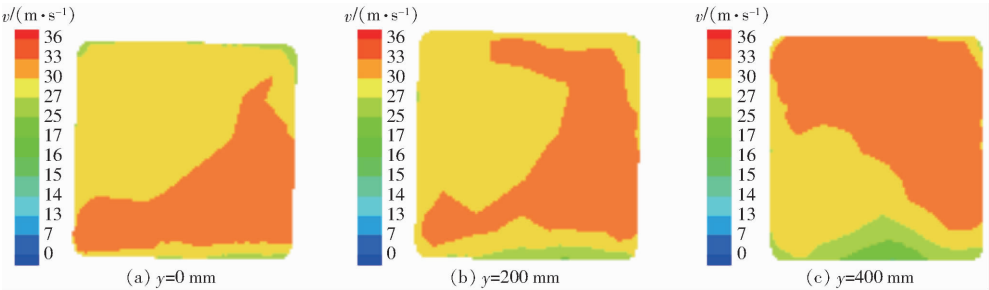


图 12 气流场测量面

Fig. 12 Layouts of air flow measurement points

通过分析数值模拟结果,主输送管上水平段出口附近的各测量面气流速度分布差异较为明显,气流速度测量空间和测量点分布如图 13 所示。

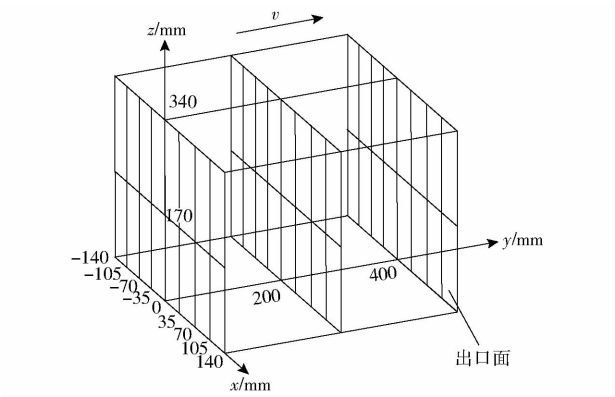


图 13 气流场测量点布置图

Fig. 13 Layout of air flow measurement points

3 个测量面与不同测量点处风速如图 14 ~ 16 所示,3 个测量面的实测值和模拟值的最大相对误差分别为 4.2%、2.3%、2.7%,均小于 5%,可以判断数值模拟准确、有效,同工作参数下 3 个测量面气流速度分布规律一致,但气流速度略有差异,产生差

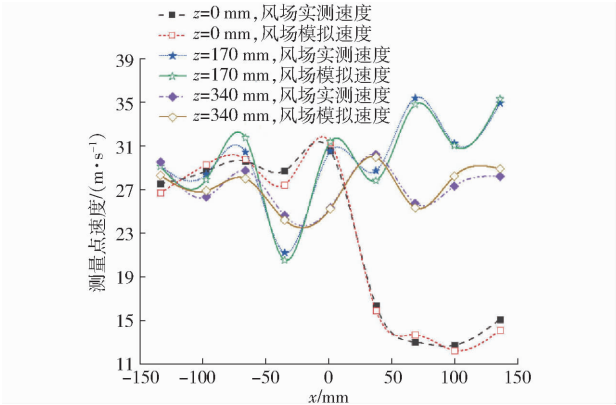


图 14 前测量面不同测量点处风速比较

Fig. 14 Comparison of wind speed at different measuring points on front measuring surface

异的原因在于风速仪对气流场的干扰、数值模拟参数中边界条件、流动参数等因素造成结果的微小偏差^[23]。

3.7 试验验证

由前文的气力输送装置气流场的数值模拟试验,确定气力输送装置参数优化值,为验证模型预测的准确性,采用上述参数在河南省周口市花生种植

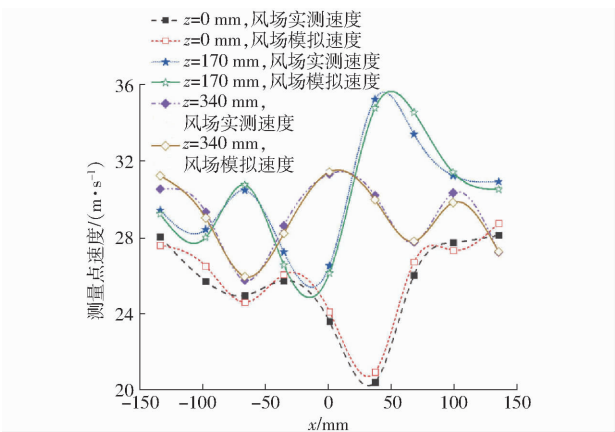


图 15 中间测量面不同测量点处风速比较
Fig. 15 Comparison of wind speed at different measuring points in middle measuring plane

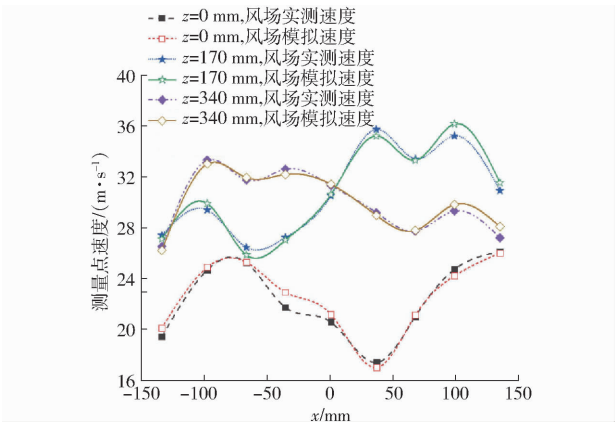


图 16 后测量面不同测量点处风速比较
Fig. 16 Comparison of wind speed at different measuring points on back measuring surface

基地进行 3 次重复试验(图 17)。考虑试验的可行性,将左风机转速设置为 1 550 r/min、主输送管高度调节为 2.08 m、右风机转速设置为 1 200 r/min,前进速度为 0.8 m/s,试验结果见表 7。



图 17 田间试验现场
Fig. 17 Field test site

由表 7 可知,各响应值试验值与理论优化值均比较吻合,试验值与优化值相对误差均小于 5%,因此,参数优化模型可靠。在残秧输送作业时,采用该优化参数组合,即左风机转速为 1 550 r/min、右风机

表 7 优化条件下各评价指标

Tab.7 Each evaluation index under optimized conditions		
项目	青花 6 号残秧输送	驻花 2 号残秧输送
	效率/(kg·h ⁻¹)	效率/(kg·h ⁻¹)
试验平均值	1 523.49	1 437.68
优化值	1 589.28	1 468.36
相对误差/%	4.14	2.10

转速为 1 200 r/min、主输送管高度为 2.08 m,此时两种残秧输送效率分别为 1 523.49、1 437.68 kg/h。

3.8 对比试验

在同一地块进行优化前后对比试验,花生铺放密度为 12.4 株/m²,收获含水率 20.5%,优化前后两种秧蔓气力输送装置均以前进速度为 0.7、0.8、0.9 m/s 开展残秧输送对比试验,优化后青花 6 号和驻花 2 号平均输送效率为 1 533.56、1 451.52 kg/h,比优化前分别提高 9.57%、8.61%,试验结果如表 8 所示。

表 8 优化前后对比试验结果

Tab.8 Contrast experiment result before and after optimization			
项目	前进速度/ (m·s ⁻¹)	青花 6 号残秧 输送效率/ (kg·h ⁻¹)	驻花 2 号残秧 输送效率/ (kg·h ⁻¹)
优化前	0.7	1 225.68	1 175.04
	0.8	1 423.25	1 398.51
	0.9	1 549.71	1 435.79
优化后	0.7	1 343.82	1 256.71
	0.8	1 535.23	1 480.30
	0.9	1 721.64	1 617.54
输送效率 提高率/%		9.57	8.61

4 结论

- (1)设计一种适用于轴流式花生全喂入收获机的秧蔓气力输送装置,较现有花生捡拾收获机的输送装置,能有效提升青花 6 号残秧输送效率和驻花 2 号残秧输送效率。
- (2)在分析试验台工作原理的基础上,进行秧蔓气力输送装置关键部件的结构设计及参数确定,并根据花生残秧的物理特性和空气动力学特点,对残秧在管道中的运动状态进行分析,确定左风机转速、右风机转速、主输送管高度作为影响花生残秧输送效率的主要因素。
- (3)基于 Box – Behnken 试验设计理论,以左风机转速、主输送管高度、右风机转速作为影响因子,开展仿真试验研究。结果表明,输送效率影响顺序

由大到小为左风机转速、右风机转速、主输送管高度,最优参数组合为:左风机转速 1 550 r/min、右风机转速 1 200 r/min、主输送管高度 2.08 m。

(4)田间残秧输送对比试验表明,优化后青花 6 号和驻花 2 号平均输送效率分别为 1 533.56、1 451.52 kg/h,比优化前分别提高 9.57%、8.61%。

参 考 文 献

- [1] 赵小伟,卜登攀,张佩华,等.青贮花生秧在饲料中的应用[J].中国饲料,2019(9):30-32.
- [2] 刘纪成,张敏,刘佳,等.花生秸秆在畜禽生产中的利用现状及其生物发酵技术[J].中国饲料,2017(20):36-38.
- [3] 王凤婕,杨然兵,陈明东,等.花生秧蔓打捆装置设计与试验[J].农机化研究,2021,43(3):164-168.
WANG Fengjie, YANG Ranbing, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment of peanut seedling bundling device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 164-168. (in Chinese)
- [4] 高连兴,陈中玉,CHEN Charles,等.美国花生收获机械化技术衍变历程及对中国的启示[J].农业工程学报,2017,33(12):1-9.
GAO Lianxing, CHEN Zhongyu, CHEN Charles, et al. Development course of peanut harvest mechanization technology of the United States and enlightenment to China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 1-9. (in Chinese)
- [5] KUANG S B, LI K, ZOU R P, et al. Application of periodic boundary conditions to CFD-DEM simulation of gas-solid flow in pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 93: 214-228.
- [6] MARCO R, FELICE D, PAOLD P. Validation of fluid-particle interaction force relationships in binary-solid suspensions[J]. Particuology, 2015, 23: 40-48.
- [7] 杜俊,胡国明,方自强,等.弯管稀相气力输送 CFD-DEM 法数值模拟[J].国防科技大学学报,2014,36(4):134-139.
DU Jun, HU Guoming, FANG Ziqiang, et al. Simulation of dilute pneumatic conveying with bends by CFD-DEM[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(4): 134-139. (in Chinese)
- [8] 张凤奎,于福锋,李忠杰,等.气吸式落地红枣捡拾机的设计与试验[J].果树学报,2020,37(2):278-285.
ZHANG Fengkui, YU Fufeng, LI Zhongjie, et al. Design and field testing of the air-suction machine for picking up Chinese jujube fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(2): 278-285. (in Chinese)
- [9] 龚智强,陈进,李耀明,等.吸盘式精密排种装置吸种过程气流场中种子受力研究[J].农业机械学报,2014,45(6):92-97,117.
GONG Zhiqiang, CHEN Jin, LI Yaoming, et al. Seed force in airflow field of vacuum tray precision seeder device during suction process of seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 92-97, 117. (in Chinese)
- [10] 王磊,廖宜涛,万星宇,等.油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(4):43-53.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on distributor device of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43-53. (in Chinese)
- [11] 张勉照.气力输送系统水平管内混合颗粒起动速度的试验研究[D].南京:东南大学,2016.
ZHANG Mianzhao. Investigation of pickup velocity of particles mixtures in horizontal pneumatic transport[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [12] 赵国华,陈良勇,段钰锋.弯管内水煤浆流动阻力的数值实验研究[J].华东电力,2007(10):6-9.
- [13] 于昭洋,胡志超,曹明珠,等.切流式花生全喂入联合收获机清选机构设计[J].农业工程学报,2019,35(9):29-35.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of cleaning device of tangential flow and whole-feed peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 29-35. (in Chinese)
- [14] 郝元.轻型扫路车反吹式吸秧口流动特性及吸尘效率优化研究[D].长春:吉林大学,2016.
XI Yuan. Research on the flow characteristics and overall removal efficiency optimization of reverse blowing pickup mouth for a light sweeper[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [15] 高连兴,李献奇,关萌,等.双吸风口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(3):110-117.
GAO Lianxing, LI Xianqi, GUAN Meng, et al. Design and test on cleaning device of peanut pods with double air-suction inlets with vibration screen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 110-117. (in Chinese)
- [16] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [17] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等.气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(4):75-86,139.
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75-86, 139. (in Chinese)
- [18] 刘正怀,郑一平,王志明,等.微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J].农业机械学报,2015,46(7):102-108.
LIU Zhenghuai, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102-108. (in Chinese)
- [19] 高连兴,杜鑫,张文,等.双滚筒气力循环式花生脱壳机设计[J].农业机械学报,2011,42(10):68-73.
GAO Lianxing, DU Xin, ZHANG Wen, et al. Double-roller peanut sheller with pneumatic circulating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 68-73. (in Chinese)
- [20] 李洪昌,李耀明,唐忠,等.风筛式风选系统振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J].农业机械学报,2012,43(2):

- 79 – 84.
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD – DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79 – 84. (in Chinese)
- [21] 廖庆喜, 杨波, 李旭, 等. 内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 51 – 54.
- LIAO Qingxi, YANG Bo, LI Xu, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 51 – 54. (in Chinese)
- [22] 陆永光, 胡志超, 林德志, 等. 基于 CFD – DEM 花生荚果管道输送过程数值模拟[J]. 中国农机化报, 2016, 37(6): 104 – 109.
- LU Yongguang, HU Zhichao, LIN Dezhi, et al. Numerical simulation of peanuts particles conveying in pipeline using CFD – DEM coupled approach[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 104 – 109. (in Chinese)
- [23] 陈洋. 花生荚果清选装置设计与仿真分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- CHEN Yang. Design and simulation analysis of peanut pod cleaning device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [24] 丁宁, 李海涛, 闫安, 等. 秸秆多级连续冷辊压成型参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 196 – 202, 290.
- DING Ning, LI Haitao, YAN An, et al. Optimization and experiment on straw multi-stage continuous cold roll forming for molding parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 196 – 202, 290. (in Chinese)
- [25] 陈海涛, 王洪飞, 王业成, 等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 75 – 85.
- CHEN Haitao, WANG Hongfei, WANG Yecheng, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace seeds features for soybean plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 75 – 85. (in Chinese)
- [26] 王金峰, 尚文虎, 翁武雄, 等. 圆盘顶出式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 62 – 72.
- WANG Jinfeng, SHANG Wenhui, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of disc ejection type paddy field side deep fertilization device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 62 – 72. (in Chinese)
- [27] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117 – 125, 247.
- DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117 – 125, 247. (in Chinese)
- [28] 王晗昊, 李耀明, 徐立章, 等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 84 – 92.
- WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 84 – 92. (in Chinese)

(上接第 26 页)

- [28] 李必军, 方志祥, 任娟. 从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(1): 65 – 70.
- LI Bijun, FANG Zhixiang, REN Juan. Extraction of buliding's feature from laser scanning data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(1): 65 – 70. (in Chinese)
- [29] REISER D, VÁZQUEZ-ARELLANO M, PARAFOROS D S, et al. Iterative individual plant clustering in maize with assembled 2D LiDAR data[J]. Computers in Industry, 2018, 99: 42 – 52.
- [30] 黎锁平, 刘坤会. 平滑系数自适应的二次指数平滑模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(2): 94 – 99.
- LI Suoping, LIU Kunhui. Quadric exponential smoothing model with adapted parameter and its applications[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(2): 94 – 99. (in Chinese)
- [31] ANIL K J. Data clustering: 50 years beyond K-means[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(8): 651 – 666.
- [32] 王谷, 过秀成. 包含异常数据的居民出行稳健回归分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(3): 509 – 511.
- WANG Gu, GUO Xiucheng. Robust regression analysis of trip generation including abnormal data[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(3): 509 – 511. (in Chinese)
- [33] NOGUCHI N, REID J F, BENSON E, et al. Vehicle automation system based on multi-sensor integration[C] // American Society of Agricultural Engineers Meeting, 1998.
- [34] 罗尤春. 自动驾驶理论及在农机中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020: 47 – 53.
- [35] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 – 19.
- WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 – 19. (in Chinese)