doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.011

基于套种模式的气力集排式小麦播种机设计与试验

王　龙[1,2]　谷泊萱[1,2]　胡　灿[1,2]　石　露[1,2]　段爱国[3]　王旭峰[1,2]

(1.塔里木大学机械电气化工程学院,阿拉尔 843300;2.南疆特色农林产物利用与装备兵团重点实验室,阿拉尔 843300;
3.第一师农业发展服务中心,阿拉尔 843300)

摘要:针对机械式小麦播种机播种效率低无法适应高速精量播种,以及套种模式农艺标准与机械化适配不足等问题,设计了一种适用于“冬小麦 +”套种模式的气力集排式小麦播种机,阐述了整机结构与工作原理,分析了小麦悬浮速度、气力输送速度及管道直径等影响播种质量的关键参数。结合文丘里混种装置实现气固两相流均匀输送,采用波纹式增压管优化气流分布,并搭建台架试验装置,开展了三因素三水平 Box - Behnken 试验,分析外槽轮转速、风速和增压管波纹数量对排种均匀性的影响。台架试验结果表明,风速对各行排量一致性变异系数影响最显著,最佳参数组合为:外槽轮转速 35 r/min、风速 27 m/s 和增压管波纹数量 9。田间试验结果表明,当作业速度为 8.5 km/h 时,气力集排式小麦播种机各行排量一致性变异系数为 3.15%,断条率为 1.83%,播种均匀性良好,满足套种农艺要求。

关键词:小麦;套种模式;气力集排式;增压管

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0129-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Winter Wheat Pneumatic Collection and Discharge Seeder Based on Intercropping Mode

WANG Long[1,2]　GU Boxuan[1,2]　HU Can[1,2]　SHI Lu[1,2]　DUAN Aiguo[3]　WANG Xufeng[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar* 843300, *China*
2. *Xinjiang Production and Construction Corps(XPCC), Key Laboratory of Utilization and Equipment of Special Agricultural and Forestry Products in Southern Xinjiang, Alar* 843300, *China*
3. *Alar Agricultural Development Service Center, Alar* 843300, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of low seeding efficiency of mechanical wheat seeders that cannot adapt to high-speed continuous seeding and precision seeding, as well as the insufficient adaptation between the agronomic standards of intercropping patterns and mechanization, a pneumatic centralized wheat seeder based on the “winter wheat +” intercropping pattern was designed. The overall structure and working principle of the seeder were expounded, key components such as the pneumatic centralized system and centralized quantitative seeding system were analyzed, and key parameters affecting seeding quality, including the suspension velocity of wheat, pneumatic conveying velocity, and pipeline diameter, were theoretically analyzed. A corrugated booster pipe was adopted to optimize airflow distribution, and a Venturi mixing device was integrated to achieve uniform transportation of gas-solid two-phase flow. A bench test device was built, and a three-factor three-level Box - Behnken test (a response surface methodology) was conducted to analyze the effects of outer groove wheel speed, wind speed, and the number of corrugations in the booster pipe on seeding uniformity, followed by the establishment of a second-order regression model. The results showed that wind speed had the most significant effect on the coefficient of variation, with the optimal parameter combination being an outer groove wheel speed of 35 r/min, a wind speed of 27 m/s, and nine corrugations in the booster pipe. Finally, field tests verified that the consistency coefficient of variation of row displacement of the

收稿日期:2025 - 07 - 02　修回日期:2025 - 07 - 17

基金项目:兵团指导性科技计划项目(20232D094)、第一师阿拉尔市科技计划项目(2025ZB03)和塔里木大学校长基金项目(TDZKYS202302)

作者简介:王龙(1988—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail:77323127@qq.com

通信作者:王旭峰(1974—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail:wxfwyq@126.com

pneumatic centralized seeder at an operating speed of 8.5 km/h was 3.15%, the broken strip rate was 1.83%, and the seeding uniformity met the requirements of intercropping agronomy.

Key words: wheat; interplanting mode; pneumatic collection and exhaust system; boosting tube

0 引言

“冬小麦 +”间作套种模式可以提高土地资源利用率和生产效率,克服传统小麦与其他作物分季种植的弊端。该种植模式通过在同一地块不同区域依序种植 2 种作物,可提升单位面积综合产量与经济效益[1-2]。

间作套种已有大量应用示范与技术研究,如河南、山东等地多采用“小麦 + 朝天椒”套种的栽培模式,该模式在实践过程中获得了良好的种植效果[3]。周新国等[4]研究了麦棉套种模式下预留行宽度对小麦产量的影响,结果表明预留行宽度对小麦的单产影响不显著。套种植模式可较好地解决粮经争地问题,实现粮食与经济作物双收益。目前套种模式主要使用机械式小麦播种机,该模式下小麦实际播种面积减少,为确保产量不减少,需增加小麦种植区域播量,而机械式播种机在较大播量下容易出现断条和漏播现象。为避免“缺苗断垄”和“种子扎堆”问题,实现小麦单株生长空间均衡,符合套种农艺要求,可选用气力集排式播种机。

播种是农业生产中的关键环节,播种机播种性能直接影响农作物生长与产量[5]。随着精准农业技术推广和精量播种技术发展,精量播种已经成为现代农业技术体系的主要组成部分[6-7]。气力集排式播种机以种子适应性强、通用性好、不伤种子等优势显著提高了排种频率和效率[8]。气力集排式播种机是以气流为载体,利用气流分配系统完成分行排种的播种系统[9-10],近年来在播种和施肥装置中得到广泛应用[11-13]。YATSKUL 等[14]对气力播种机输送系统进行了理论分析,为优化现有气力播种机械提供了理论基础。陈凤艳等[15]设计的小麦气吸精量播种机采用缝隙式排种器,提高了小麦精量播种机播种性能。张晓辉等[16]设计了一种气力集排式小麦排种分配系统,研究了排种分配机理,分析了排种分配系统稳定性和均匀性,试验结果与仿真分析基本一致。

针对“冬小麦 +”套种模式下的农艺需求,本文设计气力集排式小麦播种机,以集中定量供种系统和气力集排系统为核心,采用文丘里混种装置与波纹式增压管优化气固两相流输送均匀性,并通过田间试验验证播种机在套种模式下的作业性能,以期为小麦套种机械化提供装备支撑与技术参考。

1 整机结构与工作原理

冬小麦于前一年 10 月中下旬播种,来年成熟前 30 d 左右在麦垄预留行间播种其他作物(辣椒、玉米、棉花等),气力集排式小麦播种机适用的套种模式如图 1 所示。其中,小麦种植行宽度为 52 cm,播种行数为 6 行,滴灌带铺设于行距为 11 cm 小麦空行中,其余小麦行距为 10 cm;预留行宽度为 56 cm。小麦播种深度控制在 3 ~ 4 cm 范围内,作业幅宽为 160 cm。

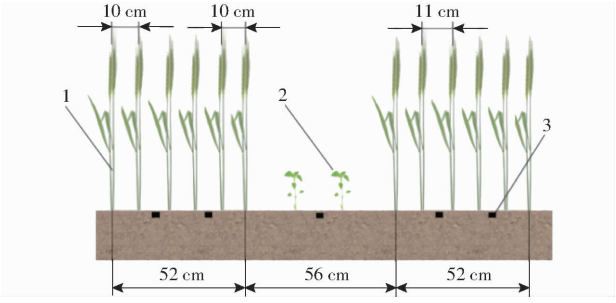


图 1 套种模式小麦种植农艺示意图

Fig. 1 Schematic of wheat planting under intercropping mode

1. 小麦植株 2. 套种作物 3. 滴灌带

基于套种模式设计气力集排式小麦播种机整机结构如图 2 所示,该播种机主要由机架、种箱、螺旋平土器、开沟器、气力集排系统、覆土轮、滴灌带铺设机构等组成。

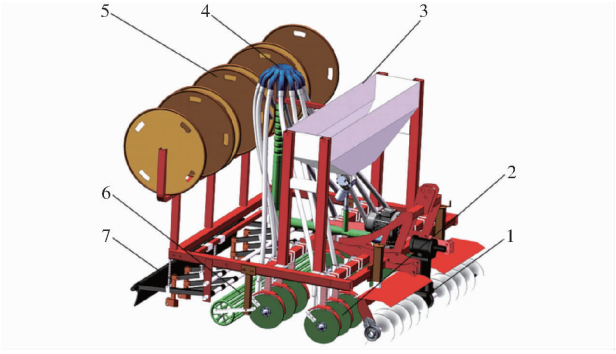


图 2 气力集排式小麦播种机整机结构

Fig. 2 Structure diagram of pneumatic centralized seeding machine for wheat

1. 螺旋平土器 2. 双圆盘开沟器 3. 种箱 4. 气力集排系统 5. 滴灌带支架 6. 覆土轮 7. 滴灌带铺设机构

该小麦播种机先使用螺旋平土器将土地平整,然后双圆盘开沟器进行开沟作业,小麦种子通过气力集排系统均匀地输送至各行种沟中,最后覆土轮和滴灌带铺设机构完成覆土和铺设滴灌带,从而实

现小麦播种作业。

2　关键部件设计

2.1　气力集排系统设计

气力集排系统如图 3 所示，主要由调速风机、集中定量供种装置、混种装置、输种管、增压管、分配器、导种管等组成。集中定量供种装置将种子从种箱中定量均匀提供给混种装置，种子与气流在混种装置中形成气固两相流进入输种管，在波纹型增压管进一步混合后由分配器输送至各排种口。

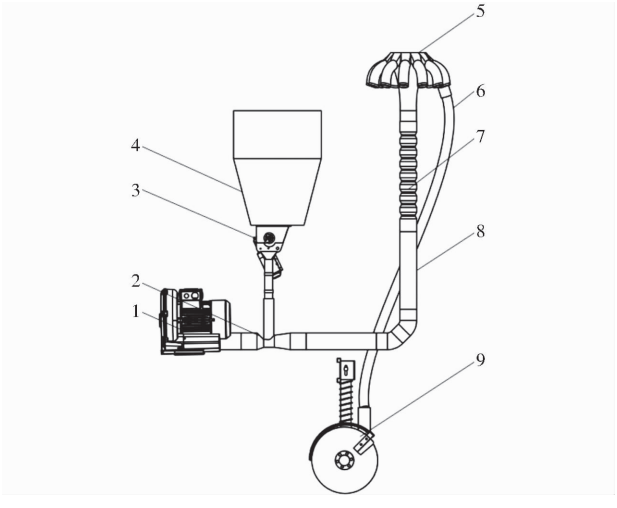


图 3　气力集排系统

Fig. 3　Pneumatic collection and discharge system

1. 调速风机　2. 混种装置　3. 集中定量供种装置　4. 种箱　5. 分配器　6. 导种管　7. 增压管　8. 输种管　9. 双圆盘开沟器

2.1.1　气力输送速度计算

为确保小麦种子颗粒能够被有效输送，需要计算小麦悬浮速度 v_0 和气力输送速度 v_1。为了使小麦种子颗粒在气流作用下达到悬浮状态，须满足空气阻力与物料在空气中的浮重相等。在空气中理想球形颗粒自由悬浮速度表示为

$$v_0 = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{d_p(\rho_p - \rho_f)g}{C_d\rho_f}} \tag{1}$$

式中　d_p——小麦种子颗粒等效直径，取 4.02×10^{-3} m

ρ_p——小麦种子颗粒密度，取 1 330 kg/m^3

ρ_f——空气密度，取 1.205 kg/m^3

g——重力加速度，取 9.81 m/s^2

C_d——阻力系数，取 0.44

不规则形状颗粒空气悬浮速度 v_0' 可通过等效球体悬浮速度 v_0 进行校正即

$$v_0' = \frac{v_0}{\sqrt{K_s}} \tag{2}$$

式中　K_s——单个颗粒悬浮速度不规则形状修正系数，取 1.2

由此计算得到小麦种子颗粒自由悬浮速度 v_0' 为 10.06 m/s，为确保小麦种子颗粒在管道中稳定输送，气力输送速度通常需大于悬浮速度。一般通过悬浮速度乘以经验系数 k 来确定。该系数一般为 1.5 ~ 3.0，根据实际需求与经验，确保气力集排系统具有良好的输送性能，选取经验系数 k 为 1.8 ~ 2.8，即 $v_1 = kv_0' = 18.108 \sim 28.168$ m/s，取整可得 v_1 为 18 ~ 28 m/s。

2.1.2　文丘里混种装置设计

基于文丘里结构设计混种装置如图 4 所示，主要由进气管、进料管、混合室、气固两相流出口管组成，进气口直径 D 为 55 mm、喉部直径 d_a 为 22 mm、小麦种子入口直径 d 为 32 mm、加速区长度 l_1 为 25 mm、扩散区长度 l_2 为 60 mm。

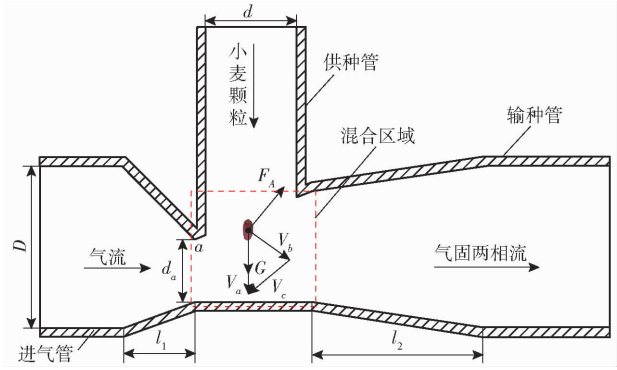


图 4　混种装置示意图

Fig. 4　Schematic of seed supply device

图中：G 为重力，N；F_A 为曳力，N；V_a 为气流速度，m/s；V_b 为小麦种子颗粒速度，m/s；V_c 为小麦种子颗粒速度与气流速度的相对速度，$\boldsymbol{V}_c = \boldsymbol{V}_a - \boldsymbol{V}_b$。

LEI 等[17]采用离散元法（DEM）和计算流体动力学（CFD）耦合方法对混种装置中种子运动进行仿真，为混种装置的设计提供理论依据。廖宜涛等[18]设计了一种油麦兼用突扩型文丘里高通量混种装置，试验结果表明，小麦和油菜种子各行一致性变异系数均满足要求。

作业时，由风机提供气流，气流通过进气管进入混合室内。根据伯努利原理，当气流到达 a 处时，截面积变小，气流速度增大，在混合室内形成负压，将供种管内小麦种子快速吸入混合室内，并在气流的作用下形成气固两相流，随后进入输种管。

在文丘里型混种装置混合过程中，小麦种子运动受压差力和曳力共同主导，实现高效吸入和稳定输送。曳力是气流与种子相对运动时产生的流体阻力，方向与种子相对于气流的运动方向相反，根据牛顿阻力定律，曳力计算式为

$$F_A = \frac{1}{2}\rho_f v_2^2 C_d A_1 \tag{3}$$

式中　v_2——喉部气流速度，m/s

A_1——种子在气流方向上的投影面积,m^2

根据连续性方程,入口与喉部的流量守恒,喉部气流速度计算式为

$$v_2 = v_1 \left(\frac{D}{d_a} \right)^2 \tag{4}$$

压差力由文丘里效应引发的气流压力梯度产生,是种子吸入过程的核心驱动力。根据伯努利方程与连续性方程,喉部流速 v_2 与压强差 ΔP 关系式为

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho_f (v_2^2 - v_1^2) \tag{5}$$

压差力计算式为

$$F_{\Delta P} = \Delta P A_1 \tag{6}$$

在文丘里型混种装置中,小麦种子运动状态受曳力的影响显著。气流输送风速为 18 ~ 28 m/s,由式(3)计算得曳力为 0.042 ~ 0.102 N。压差力作为文丘里装置中种子吸入的核心驱动力,根据式(6)计算可得压差力为 0.093 ~ 0.225 N,压差力与曳力的协同作用确保了种子高效吸入与稳定输送。

2.1.3 气力集排系统输送管设计

料气输送比是衡量气力集排系统输送性能的关键参数,表示单位时间内输送物料质量与输送气体质量的比值,对系统的输送效率和稳定性有重要影响,计算式为

$$\mu = \frac{m_s}{m_a} \tag{7}$$

式中 μ——小麦质量与气流质量混合比,取 2.2

m_a——单位时间内空气质量,kg

m_s——小麦种子排种质量,取 0.12 kg/s

小麦种子颗粒在输送管道中,单位时间所需空气体积 Q 为

$$Q = \frac{m_a}{\rho_f} = v_1 A_2 \tag{8}$$

其中

$$A_2 = \frac{\pi d^2}{4} \tag{9}$$

式中 A_2——管道横截面积,m^2

管道直径 d 计算式为

$$d = \sqrt{\frac{4m_a}{\pi \rho_f v_1}} \tag{10}$$

计算可得气力集排系统管道直径 d 为 55 mm,单位时间所需空气体积 Q 为 0.054 6 m^3/s。

2.1.4 增压管设计

增压管是气力集排系统中连接输种管和分配器的核心部件,能够将气种两相流在进入分配器之前进行扰流,起到打散种子和促进气种两相流均匀分布的作用,对气力集排式播种机播种质量有重要影响[19]。高筱钧等[20]通过对不同形式增压管进行数值模拟,结果表明 V 形增压管对种子流具有较好的扰动分散作用,因此选用 V 形波纹管。李衍军[21]采用 Fluent 与 EDEM 进行气固两相流耦合仿真,结果表明在波纹深度为 6 mm、波纹宽度为 40 mm、波纹数量为 10 时各行排量变异系数最小。但考虑到排种系统压力损失问题,增压管波纹数量越多,排种系统压力损失越大,造成能量浪费,波纹深度增大在增加压力损失的同时还会提高种子破损率,影响播种效果。

采用 V 形波纹式增压管,如图 5 所示,其主要几何参数包括增压管直径为 55 mm、增压管波纹深度为 5.5 mm、波纹宽度为 25 mm、波纹夹角为 124°、波纹数量选用 6 ~ 10。

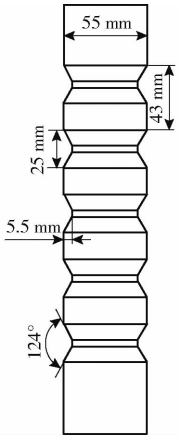


图 5 增压管结构图

Fig. 5 Structural diagram of booster tube

种子颗粒在增压管内的运动过程属于典型的气固两相流运动行为,包括颗粒输送、混合与分离等动力学过程。相关学者对气力集排系统增压管内种子流运动特性也有相关研究[22-24]。种子颗粒在增压管内的运动过程中,不仅与管壁发生频繁的碰撞接触,颗粒间也存在复杂的相互作用。由于增压管内存在空气流动、颗粒流动且增压管结构比较复杂,内部气流和颗粒动态信息难以测量,需要对种子颗粒在增压管内气力输送理论进行研究,种子颗粒在增压管内的运动主要分为无碰撞和有碰撞,有碰撞包括种子与增压管之间和种子与种子之间的碰撞。

(1)种子无碰撞情况

种子颗粒在增压管内的气流输送过程可简化为二维流场进行分析,根据气固两相流体力学理论可知,种子颗粒在气流场中受到的力包括种子颗粒自身重力、气流对种子颗粒产生的浮力、种子颗粒运动过程中产生的气流阻力、种子颗粒运动过程中因自身旋转产生的升力等(图 6)。

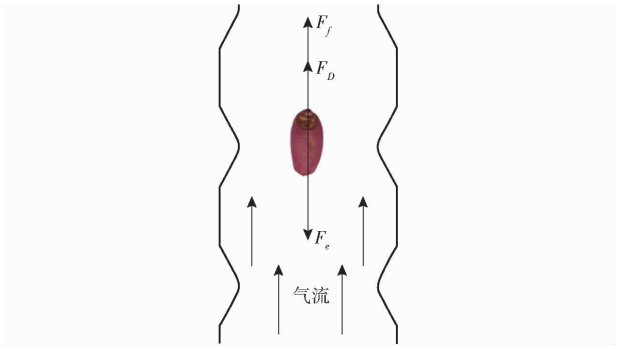


图 6　种子颗粒受力简图

Fig. 6　Schematic of force on seed particles

在种子颗粒无碰撞情况下，种子颗粒重力、浮力和阻力 3 种力对种子颗粒运动的影响较大，因此对种子颗粒进行受力分析时可忽略其他的力，仅考虑种子颗粒重力、浮力和阻力。

小麦种子颗粒的重力 F_e、浮力 F_f 和阻力 F_D 计算式为

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_p A_3 (v_1 - v_p)^2 \tag{11}$$

$$F_e = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g \tag{12}$$

$$F_f = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g \tag{13}$$

其中

$$A_3 = \frac{\pi d_p^2}{4} \tag{14}$$

式中　v_p——小麦种子颗粒速度，m/s

A_3——小麦种子颗粒迎风面积，m^2

（2）种子有碰撞情况

种子颗粒在输送过程中与增压管之间的碰撞是影响种子颗粒运动的重要因素，种子颗粒与增压管碰撞过程如图 7 所示。

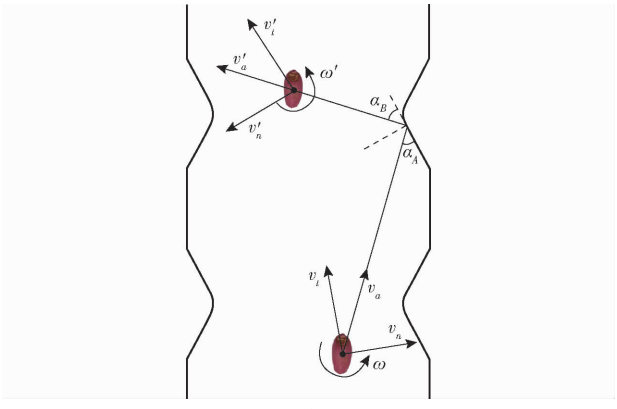


图 7　种子碰撞情况下受力分析

Fig. 7　Force analysis under seed collision

小麦种子颗粒可视为球体，增压管壁面为平面，忽略颗粒变形与壁面弹性形变，碰撞过程分为法向碰撞（垂直壁面方向）与切向碰撞（平行壁面方向），由于碰撞时间极短，可忽略碰撞期间气流作用力[25]。小麦种子颗粒法向碰撞恢复系数 e_n、切向碰撞恢复系数 e_t 和角速度恢复系数 e_ω 计算式为

$$\begin{cases} e_n = -\dfrac{v_n'}{v_n} \\ e_t = \dfrac{v_t'}{v_t} \\ e_\omega = -\dfrac{\omega'}{\omega} \end{cases} \tag{15}$$

其中

$$\begin{cases} v_t' = (\boldsymbol{v}_n' + \boldsymbol{v}_t') \cos\alpha_A \\ v_n = (\boldsymbol{v}_n' + \boldsymbol{v}_t') \sin\alpha_A \\ v_t = (\boldsymbol{v}_n + \boldsymbol{v}_t) \cos\alpha_B \\ v_n = (\boldsymbol{v}_n + \boldsymbol{v}_t) \sin\alpha_B \end{cases} \tag{16}$$

式中　v_n、v_n'——碰撞前后法向速度，m/s

v_t、v_t'——碰撞前后切向速度，m/s

ω、ω'——碰撞前后角速度，rad/s

α_A——种子与壁面碰撞时入射角，(°)

α_B——种子与壁面碰撞时反射角，(°)

碰撞过程中法向碰撞恢复系数 e_n 主要与种子颗粒及增压管的材料相关，在碰撞后，可以用碰撞前各个速度分量和法向碰撞恢复系数关系式来表达种子颗粒各个速度分量。

种子在增压管内的输送过程中，由于气流作用，小麦颗粒群内各颗粒速度大小和方向基本一致，因此种子颗粒之间碰撞概率相对较低，在输送过程中可能由于气流不稳定会使颗粒速度波动，从而增加碰撞可能，颗粒自转可能扰乱周围流场，引发碰撞。在发生颗粒间的碰撞时，因其相对速度较小，碰撞可以被认为是弹性碰撞。碰撞瞬间，颗粒间产生接触力。根据赫兹接触理论，对于近似球形的小麦颗粒，接触力与颗粒的弹性模量、泊松比、颗粒半径以及接触形变位移相关计算式为

$$F = 4/3 E^* \sqrt{R\delta^3} \tag{17}$$

式中　E^*——等效弹性模量，Pa

R——等效半径，mm

δ——接触形变位移，mm

在碰撞过程中对种子颗粒群的输送影响相对较小，遵循动量守恒定律即

$$m_1 v_{p1} + m_2 v_{p2} = m_1 v_{p1}' + m_2 v_{p2}' \tag{18}$$

式中　m_1、m_2——小麦种子颗粒质量，kg

v_{p1}、v_{p2}——碰撞前速度，m/s

v_{p1}'、v_{p2}'——碰撞后速度，m/s

在种子颗粒气力输送过程中，摩擦与压力损失是影响输送效率和能耗的关键因素。气体在管道内流动时，由于粘性作用，近壁面处会形成边界层，产生沿程摩擦阻力[26]，可用达西-魏斯巴赫公式描述

单相流摩擦压降即

$$\Delta P_f = \lambda \frac{L}{D_1}\frac{\rho_f v_1^2}{2} \tag{19}$$

式中 ΔP_f——阻力损失,Pa

λ——摩擦因数

L——增压管长度,m

D_1——增压管直径,m

颗粒在气流中运动时,与管壁碰撞、滑动或滚动,产生接触摩擦阻力和碰撞耗散。颗粒对壁面的摩擦作用会加剧边界层扰动,增大气体湍流强度,间接增加气体摩擦损失。颗粒沿壁面的滑动摩擦符合库仑摩擦定律即

$$F_f = \mu_s N_n \tag{20}$$

式中 μ_s——颗粒-壁面静摩擦因数

N_n——法向接触力,N

对种子颗粒的理论分析表明,影响种子颗粒运动的因素较多。无碰撞时,影响因素主要是气流输送速度和增压管结构参数。有碰撞时,气流输送速度过大,种子颗粒易破碎,影响播种质量,速度过小则会使种子输送受阻,降低输送效率。

2.1.5 集中定量供种装置设计

(1)种箱容积设计

集中定量供种装置主要由种箱、外槽轮排种器电机、外槽轮排种器、卸种口等组成。种箱底部安装有外槽轮排种器,由电机驱动使机具在作业过程中供种均匀平稳。

根据小麦品种、种植密度和农艺要求确定播种量,通过小麦播种量和作业面积计算种箱容积,种箱容积计算式为

$$V = \frac{M}{\rho_p}k_1 \tag{21}$$

式中 V——种箱容积,m^3

M——播种总面积所需的种子质量,kg

k_1——余量系数,取 1.2 ~ 1.5

设计种箱长为 1 500 mm、宽为 330 mm,高为 430 mm,底部为锥形,如图 8 所示,种箱容积约为 0.149 m^3。假设小麦种植农艺要求最大播种量为 360 kg/hm^2,该播种机一次加种可完成作业面积约为 0.366 7 hm^2。

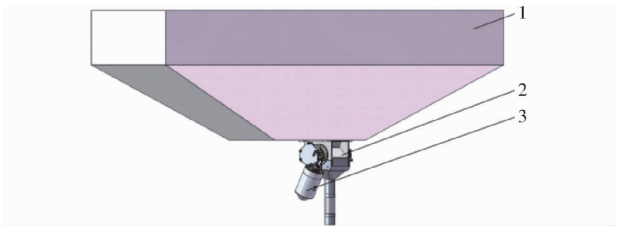


图 8 集中定量排种系统

Fig. 8 Centralized quantitative seeding system

1. 种箱 2. 外槽轮排种器 3. 12 V 直流电机

(2)外槽轮排种器转速计算

集中定量供种装置应该能够在不同作业速度下均匀、连续地供种。整机采用一个集中定量供种装置,需要同时满足 12 个排种管供种需求,农作物播种量在不同土壤墒情下差异较大,因此集中定量供种装置应具有一定的播量调节功能。为满足不同区域、不同土壤墒情的播种需求,设计集中定量供种装置播量为 300 ~ 360 kg/hm^2。

每小时所需供种量 Q_1 计算式为

$$Q_1 = A_b S_1 \tag{22}$$

式中 A_b——播种量,kg/hm^2

S_1——播种面积,hm^2/h

外槽轮排种器供种量 Q_2 计算式为

$$Q_2 = 60\pi D_2 n_1 L_2 \rho \frac{\gamma}{1\ 000} \tag{23}$$

式中 D_2——外槽轮直径,mm

n_1——外槽轮转速,r/min

L_2——外槽轮有效长度,mm

γ——填充系数,取 0.8

当播量一定时,如外槽轮直径过大,其工作长度和转速相应减小,送种脉动性增大,影响送种均匀性。而直径过小,须提高转速,导致种子损伤率增高。由于所设计的集中定量供种装置播量较大,在考虑对供种均匀性影响较小情况下,取 D_2 = 75 mm,L_2 = 85 mm。外槽轮槽数 Z = 7,凹槽深度 h = 15 mm,如图 9 所示。

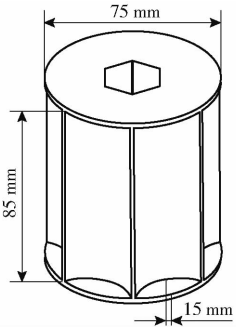


图 9 外槽轮示意图

Fig. 9 Schematic of external groove wheel

外槽轮单个半圆凹槽可近似看作一个半圆柱体,其单个凹槽容积 V_1 为

$$V_1 = \frac{\pi}{2}h^2 L_2 \tag{24}$$

外槽轮共 7 个凹槽,总容积为 210.03 mm^3,实际填充时,物料无法完全填满凹槽,需引入填充系数 γ,种子质量为

$$W = 7V_1\gamma\rho \tag{25}$$

式中 W——小麦种子质量,kg

取外槽轮单圈供种量为 220 g，供种量为 300 ~ 360 kg/hm^2，作业速度为 8 ~ 10 km/h。当外槽轮排种器供种量和所需供种量一致时，联立式(22)、(23)计算可得外槽轮转速 n_1 为 32 ~ 45 r/min，选择转速为 30 ~ 50 r/min 范围内调节的小型直流电机。

2.2　其他关键部件设计

2.2.1　开沟部件设计

套种模式要求小麦播种深度控制为 3 ~ 4 cm，且需在预留行与小麦行交替播种。双圆盘开沟器通过两圆盘的旋转切入土壤，可精准控制开沟深度，适应不同行距的连续作业，避免传统单圆盘开沟器在窄行距下的壅土问题。双圆盘开沟器直径为 250 mm，圆盘夹角为 16°，如图 10 所示。

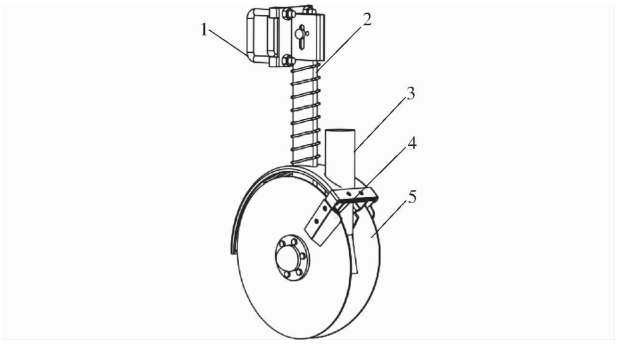


图 10　气力集排播种机双圆盘开沟器

Fig. 10　Pneumatic collection and seeding machine double disc trencher

1. 开沟器安装支架　2. 仿形连杆　3. 导种管　4. 刮土板　5. 开沟圆盘

2.2.2　覆土部件设计

覆土轮安装于双圆盘开沟器后方，通过碾压与抛土动作，将沟两侧土壤回填覆盖种子，兼具镇压功能，回填后轻压土壤，减少水分蒸发，促进种子与土壤贴合，保障种子发芽环境。覆土轮通过弹簧悬架连接机架，随地形起伏调整覆土压力，保证不同地块覆土厚度均匀。

平土板置于滴灌带铺设装置后方，将滴灌带埋入 20 ~ 30 mm 浅土层，平土板与滴灌带铺设机构的水平间距为 200 mm，通过螺杆控制平土板距地面高度，匹配不同埋管深度需求，通过仿形机构，随地形起伏自动调整板体角度，保证滴灌带埋深均匀。

2.2.3　滴灌带铺设部件设计

为防御风害并减少水分蒸发，滴灌带需浅埋至 3 ~ 5 cm 的土层中。设计滴灌带铺设机构如图 11 所示，通过四连杆仿形机构与播种机机架相连。当播种机在不同地形条件下作业时，四连杆仿形机能够吸收地形起伏产生的冲击力，使铺设机构能够随地形自动上下调整，保持与地面的合适距离，进而保证滴灌带埋深稳定在 3 ~ 5 cm 内。

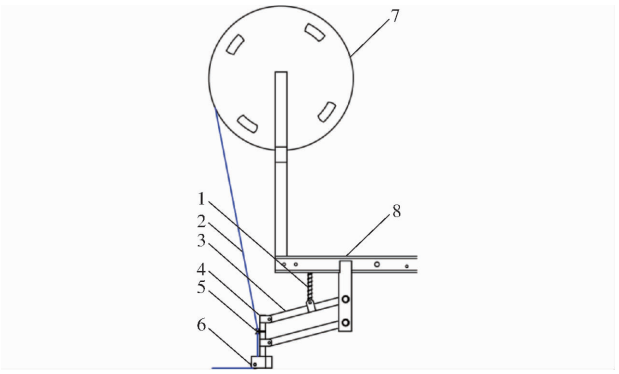


图 11　滴灌带铺设机构

Fig. 11　Drip irrigation tape laying mechanism

1. 限位弹簧　2. 滴灌带　3. 四连杆仿形机构　4. 开沟器　5. 滴灌带引导器　6. 过带轮　7. 滴灌带安装挡板　8. 机架

3　台架试验

3.1　试验材料

选用新春 6 号小麦品种作为试验对象，小麦种子长度为 6.5 mm、宽度为 3.43 mm、厚度为 2.97 mm、等效直径为 4.02 mm、球度为 0.6，种子密度为 1 330 kg/m^3。

搭建小麦气力集排式排种系统试验台架如图 12 所示，由集中定量供种装置、混种装置、调速风机、输种管、增压管和分配器等组成，风机控制系统参数如表 1 所示。

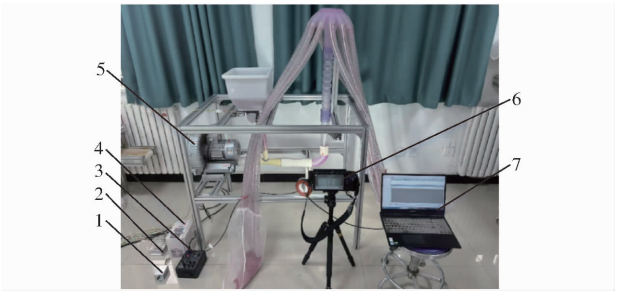


图 12　气力集排播种装置以及高速摄像系统

Fig. 12　Pneumatic collection and seeding device and high-speed camera system

1. 定量播种调速器　2. 12 V 电源　3. 光源控制器　4. 变频器　5. 气力集排系统　6. 高速摄像机　7. 高速摄像处理软件

表 1　调速风机控制系统参数

Tab. 1　Parameters of fan control system

参数	数值/型式
风机型号	RB－51D－3 型
调速风机功率/kW	1.6
调速风机转速/(r·min^{-1})	100 ~ 2 800
高精度风速测量仪/(m·s^{-1})	0 ~ 30
变频器功率/kW	2.2
变频器频率/Hz	0 ~ 50

试验中采用高速摄像机观察小麦种子在增压管

中的运动状态,高速摄像机帧率为 1 000 f/s,分辨率为 1 280 像素 ×1 024 像素,对拍摄视频进行逐帧分析,通过测量种子在单位时间内的位移,可以计算出种子运动速度。

3.2 试验方法与指标

种子在增压管气流场中进行减速增压,使种子分布更均匀。为验证不同风速下增压管对小麦种子减速增压效果,通过高速摄像机分析小麦种子在进入增压管前和增压管内的速度变化,确定气力集排系统最佳风速范围。

为进一步研究气力集排式排种系统结构参数对各行排量一致性变异系数的影响,根据标准 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》对气力集排式排种系统进行台架试验,试验前先在种箱内充填足量小麦种子后启动风机,待调速风机工作稳定后通过电机驱动外槽轮排种器进行供种。气力集排系统将种子均匀分配到 12 个导种管中,在出种口处套上网袋进行种子计量试验。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 V 形增压管性能试验

气力集排系统在不同风速下,随机选择 3 粒小麦种子,根据小麦种子在时间序列中的位置变化,计算每粒种子位移。位移通过小麦种子初始位置和最终位置距离来计算,分析其在输种管与增压管内速度变化。不同风速下增压管内小麦颗粒分布情况如图 13 所示。由图 13 可知,随着风速增加,增压管内小麦颗粒分布密度逐渐降低。当风速为 18 m/s 时,颗粒相对较为密集,说明此时颗粒在管内运动速度较慢,在同一观测区域内聚集较多;当风速为 28 m/s 时,颗粒分布更为稀疏,在相同观测时间和区域内,颗粒分散得更开。风速较低时,颗粒分布密集且运动杂乱,容易导致播种时种子聚集,出现局部种子过多的情况;风速较高时,颗粒分布稀疏,更利于实现均匀播种,但如果风速过高,可能会使种子出现破损情况而影响出苗质量。

不同风速下小麦颗粒速度如图 14 所示。由图 14 可知,随着风速的增加,增压管内种子颗粒速度同样随着风速增加而上升,但上升幅度相对直筒管较为平缓,随着风速增加增压管对颗粒的减速效果更加明显。对比相同风速下输种管和增压管内的种子颗粒速度,输种管颗粒速度始终大于增压管颗粒速度,说明增压管起到减速作用,使得种子分布更均匀。

3.3.2 气力集排式播种系统关键参数优化

选取外槽轮排种器转速、风速和增压管波纹数量为试验因素,通过 Design-Expert 软件设计三因素三水平 Box – Behnken Design 试验,试验因素编码如表 2 所示,以各行排量一致性变异系数(Y)为试验指标。

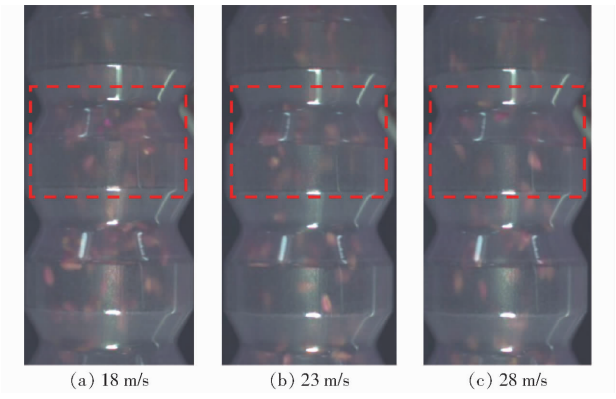


图 13 不同风速下增压管内种子分布情况

Fig. 13 Seed distributions inside booster tube at different wind speeds

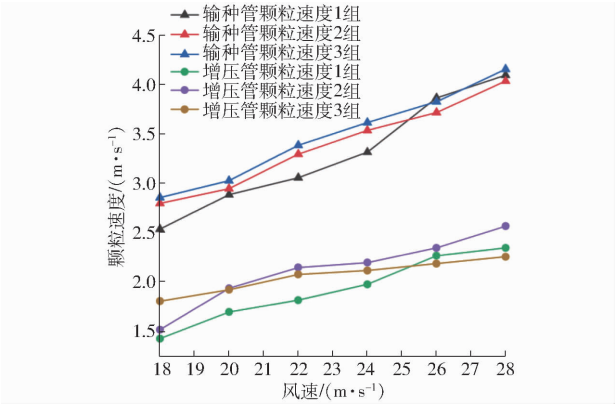


图 14 不同风速下小麦种子颗粒速度

Fig. 14 Wheat particle velocity at different wind speeds

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors and coding

编码	因素		
	外槽轮转速/(r·min⁻¹)	风速/(m·s⁻¹)	增压管波纹数量
-1	35	18	6
0	40	23	8
1	45	28	10

气力集排式排种系统台架试验结果如表 3 所示,A、B、C 为因素编码值。

由表 3 可知,当外槽轮转速为 35 ~ 45 r/min、出风口风速为 18 ~ 28 m/s、增压管波纹数量为 6 ~ 10 时,各行一致性变异系数为 1.94% ~ 10.29%。通过 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,A、B、AB、AC、BC、B^2、C^2 对各行排量一致性变异系数影响极显著,各因素的影响主次顺序为 B、A、C。

表 3　Box－Behnken Design 试验结果

Tab. 3　Box－Behnken Design test results

编号	因素			变异系数/%
	外槽轮转速 A	风速 B	增压管波纹数量 C	
1	0	0	0	3.12
2	－1	－1	0	9.26
3	1	0	1	3.65
4	0	1	1	2.46
5	1	0	－1	1.94
6	1	1	0	2.34
7	0	－1	－1	6.68
8	－1	0	－1	5.99
9	0	1	－1	6.12
10	0	0	0	3.01
11	－1	1	0	2.61
12	0	0	0	3.24
13	0	－1	1	10.29
14	－1	0	1	3.64
15	1	－1	0	5.74
16	0	0	0	2.88
17	0	0	0	3.31

表 4　方差分析结果

Tab. 4　Analysis of variance results

项目	平方和	自由度	F	P
模型	96.97	9	146.26	0.000 1 **
A	7.66	1	104.03	0.000 1 **
B	42.50	1	576.99	0.000 1 **
C	0.059 5	1	0.807 9	0.398 6
AB	2.64	1	35.85	0.000 5 **
AC	4.12	1	55.94	0.000 1 **
BC	13.21	1	179.37	0.000 1 **
A^2	0.526 2	1	7.14	0.031 9 *
B^2	20.92	1	283.98	0.000 1 **
C^2	4.61	1	62.60	0.000 1 **
残差	0.515 7	7		
失拟项	0.395 8	3	4.40	0.093 1
纯误差	0.119 9	4		
总和	97.48	16		

注：* 表示差异显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），** 表示差异极显著（$P < 0.01$）。

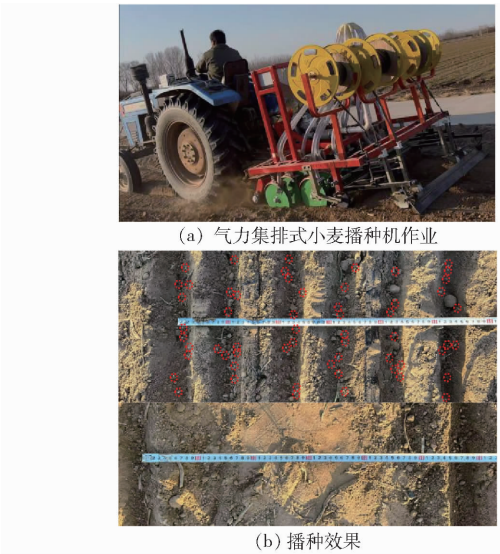
各行排量一致性变异系数与外槽轮排种器转速、风速和增压管波纹数量的二阶回归模型为

$$Y = 3.11 - 0.978\,7A - 2.31B - 0.086\,3C + 0.812\,5AB + 1.02AC - 1.82BC - 0.353\,5A^2 + 2.23B^2 + 1.05C^2 \quad (R^2 = 0.98) \tag{26}$$

通过二阶回归模型求解，确定最佳参数组合：外槽轮转速为 35 r/min、风速为 27 m/s、增压管波纹数量为 9。

4　田间试验

为进一步验证台架试验的最优参数组合下气力集排系统的工作性能，加工气力集排式小麦播种机样机，于 2025 年 2 月在河北省廊坊市固安县马庄镇开展田间试验，播种机配套动力为 44 kW 拖拉机，调速风机的动力供给采用 2 组 12 V 蓄电池经逆变器转换为 220 V 交流电后连接变频器。气力集排式小麦播种机整机田间试验播种作业如图 15a 所示。



(a) 气力集排式小麦播种机作业

(b) 播种效果

图 15　气力集排式小麦播种机作业效果

Fig. 15　Operation effects of pneumatic collection and discharge wheat seeder

田间试验以各行排量一致性变异系数和断条率为评价指标，当作业速度为 8.5 km/h、气流输送速度为 27 m/s、外槽轮转速为 35 r/min 时播种效果如图 15b 所示。

各行排量一致性变异系数按照 JB/T 6274.1—2001《谷物播种机技术条件》与 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》的规定进行，完成播种后选择 6 行对其测定每行平均排量后计算平均排量 $\bar{x}$、标准差 S，变异系数 Y 计算式为

$$Y = \frac{100S}{\bar{x}} \times 100\% \tag{27}$$

其中

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{28}$$

式中　X——每行排量，g

n——测定行数

每一测区断条率 β 计算式为

$$\beta = \frac{A'}{A_0} \times 100\% \tag{29}$$

式中　A'——1 m 长度内累计断条长度，m

A_0——每个测区检测长度，m

随机抽取单行检测长度 1 m，分为 10 段检测，3 个测区平均值即为最终断条率。

田间试验结果如表 5 所示，当外槽轮转速为 35 r/min、风速为 27 m/s、增压管波纹数量为 9 时，

各行排量一致性变异系数为 3.15%，断条率为 1.83%。试验结果表明气力集排系统精确性和均匀性较好，满足播种作业要求。

表 5 田间试验结果

Tab. 5 Field experiment results %

测区	各行排量一致性变异系数	断条率
1	2.51	1.2
2	3.65	1.9
3	3.29	2.4
平均值	3.15	1.83

5 结论

(1)根据小麦套种模式下播种作业要求，设计了以集中定量供种装置和气力集排系统为核心的小麦播种机，采用文丘里混种装置和波纹式增压管，有效提升气固两相流均匀性。

(2)通过高速摄像机分析了小麦种子在增压管内小麦颗粒速度变化，确定气力集排系统最佳风速范围。风速较低时，颗粒分布密集且运动杂乱，容易导致播种时种子聚集；台架试验结果表明，风速对各行排量一致性变异系数影响最显著，最佳参数组合为外槽轮转速 35 r/min、风速 27 m/s 和增压管波纹数量 9。

(3)田间试验结果表明，各行排量一致性变异系数为 3.15%，断条率为 1.83%。气力集排式小麦播种机能够满足套种模式下播种作业要求。

参 考 文 献

[1] 刘卫国，宋颖，邹俊林，等. LED 灯模拟作物间作套种群体内光环境的设计与应用[J]. 农业工程学报，2011，27(8)：288－292.
LIU Weiguo, SONG Ying, ZOU Junlin, et al. Design and effect of LED simulated illumination environment on intercropping population[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 288－292. (in Chinese)

[2] 李生勇，韩翠莲，郭彦芬，等. 河套灌区小麦套种玉米灌溉制度研究[J]. 节水灌溉，2016(4)：44－46，49.
LI Shengyong, HAN Cuilian, GUO Yanfen, et al. Irrigation regime for wheat interplanting maize in Hetao Irrigation District[J]. Water Saving Irrigation, 2016(4): 44－46, 49. (in Chinese)

[3] 郭敬华，严立斌，董灵迪，等. 小麦套种辣椒轻简化栽培技术模式[J]. 中国蔬菜，2021(11)：103－105.
GOU Jinghua, YAN Libin, DONG Lingdi, et al. Light simplified cultivation technology mode for wheat intercropping pepper[J]. China Vegetables, 2021(11): 103－105. (in Chinese)

[4] 周新国，陈金平，刘安能，等. 麦棉套种共生期不同土壤水分对冬小麦生理特性及产量与品质的影响[J]. 农业工程学报，2006，22(11)：22－26.
ZHOU Xinguo, CHEN Jinping, LIU Anneng, et al. Effects of the different soil moistures on physiological characteristics, yield and quality of winter wheat during the intergrowth stage under the winter wheat and cotton relay intercropping[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 22－26. (in Chinese)

[5] 黄明，吴金芝，李友军，等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报，2009，25(1)：50－54.
HUANG Ming, WU Jinzhi, LI Youjun, et al. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 50－54. (in Chinese)

[6] 王英博，李洪文，王庆杰，等. 机械式小麦射播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：73－84.
WANG Yingbo, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat mechanical shooting seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 73－84. (in Chinese)

[7] 廖庆喜，雷小龙，廖宜涛，等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报，2017，48(9)：1－16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1－16. (in Chinese)

[8] 丛锦玲，余佳佳，曹秀英，等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报，2014，45(1)：46－52.
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46－52. (in Chinese)

[9] 张婷婷，尚书旗，王东伟. 六行同步小区条播机的研制[J]. 农机化研究，2017，39(5)：144－149.
ZHANG Tingting, SHANG Shuqi, WANG Dongwei. Design of six-line synchronous plot seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 144－149. (in Chinese)

[10] 曹成茂，王安民，秦宽，等. 一器多行环槽推送式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2014，45(4)：128－134.
CAO Chengmao, WANG Anmin, QIN Kuan, et al. Design and experiment of a multi-row ring groove pushing seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 128－134. (in Chinese)

[11] 徐征鑫，李贵蓉，王超，等. 玉米大垄双行气力集排式追肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(4)：52－60.
XU Zhengxin, LI Guirong, WANG Chao, et al. Design and experiment of pneumatic centralized fertilizer application device for maize large ridge double row planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 52－60. (in Chinese)

[12] GE D, LONG H, MA L, et al. Analysis framework of china's grain production system: a spatial resilience perspective[J]. Sustainability, 2017, 9(12): 2340.

[13] GEORGE E. A review of pneumatic conveying status, advances and projections[J]. Powder Technology, 2018, 333: 78 – 90.
[14] YATSKUL A, LEMIERE J. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166: 1 – 12.
[15] 陈凤艳,张晋国,陈凤娟. 槽缝式小麦气吸精密播种机的设计与研究[J]. 农机化研究,2011,33(8):81 – 84.
CHEN Fengyan, ZHANG Jinguo, CHEN Fengjuan. Design and research on suction slot-type precision wheat seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(8): 81 – 84. (in Chinese)
[16] 张晓辉,王永振,仉利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(3):59 – 67.
ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59 – 67. (in Chinese)
[17] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM – CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29 – 39.
[18] 廖宜涛,王传奇,施彬彬,等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12): 134 – 146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and text of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 134 – 146. (in Chinese)
[19] 雷小龙,廖宜涛,王磊,等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报,2017, 33(19):67 – 75.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation of gas – solid two-phase flow and parameter optimization of pressurized tube in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67 – 75. (in Chinese)
[20] 高筱钧,王世同,吴晓鹏,等. 播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):47 – 56,75.
GAO Xiaojun, WANG Shitong, WU Xiaopeng, et al. Seed flow migration characteristics in booster tube of gas-fed collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 47 – 56,75. (in Chinese)
[21] 李衍军. 小麦气流输送式排种系统关键部件研制与分析[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2021.
LI Yanjun. Design and analysis of key components of wheat seed metering system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2021. (in Chinese)
[22] 付作立,李贵川,李海宇,等. 荞麦播种机气力集排系统螺旋式增压管设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(12): 37 – 45,69.
FU Zuoli, LI Guichuan, LI Haiyu, et al. Design and test of spiral booster pipe for pneumatic collecting and discharging system of buckwheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 37 – 45,69. (in Chinese)
[23] 李衍军,刘友华,刘立晶. 气送式播种机输种管长度影响管内气流分布的机理分析[J]. 农业机械学报,2020,51(6): 55 – 64.
LI Yanjun, LIU Youhua, LIU Lijing. Distribution mechanism of airflow in seed tubes of different lengths in pneumatic seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 55 – 64. (in Chinese)
[24] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 98 – 109.
[25] 张鹤,刘马林,黄志勇,等. 大颗粒与壁面碰撞的离散单元法模拟与分析[J]. 原子能科学技术,2017,51(12):2212 – 2217.
ZHANG He, LIU Malin, HUANG Zhiyong, et al. DEM simulation and analysis of collision between single coarse particle and wall[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(12): 2212 – 2217. (in Chinese)
[26] 刘俊孝,王庆杰,李洪文,等. 针孔管式小麦匀播机构气力损耗特性数值分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6): 29 – 37.
LIU Junxiao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Numerical analysis and experiment on pneumatic loss characteristic of pinhole-tube wheat uniform seeding mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 29 – 37. (in Chinese)