

气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验

王磊^{1,2} 廖宜涛^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 齐天翔^{1,2} 张青松^{1,2} 王宝山^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对现有气送式播种机集排器供种装置在油菜种植区域地表坡度变化范围大时供种量稳定性不足等问题, 设计了一种采用调节弹簧调节清种毛刷与外切圆弧型孔轮距离, 从而控制充种及清种量、实现坡地播种、稳定供种的供种装置。阐述了供种装置的工作原理, 确定了外切圆弧型孔曲线方程、主圆弧偏转角及种量调节机构结构参数, 分析了种量调节机构与型孔轮间的力学关系。利用智能种植机械测试平台进行了供种装置性能优化试验, 以清种毛刷厚度、调节弹簧有效圈数、调节板厚度、主圆弧偏转角为试验因素, 采用二次旋转正交组合试验分析各因素对坡度地表供种量稳定性的影响。采用主要目标法确定最佳参数组合为: 清种毛刷厚度为 13 mm、调节弹簧有效圈数为 82.5、调节板厚度为 7.8 mm、主圆弧偏转角为 7.7°, 固定倾斜 -5° ~ 5° 相对无倾斜下的供种速率变化率不超过 4.29%、供种速率稳定性变异系数不超过 0.52%, 供种稳定性较优。最优参数组合下的台架验证试验表明, 供种速率在摆动 -5° ~ 5° 相对无倾斜状态的变化率不超过 1.6%, 供种速率稳定性变异系数不超过 0.86%, 满足油菜坡地播种供种量稳定性要求。

关键词: 油菜播种机; 气送式集排器; 供种装置; 种量调节机构

中图分类号: S223.2*3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)02-0075-11 OSID: 

Design and Test on Centralized Metering Seed Feeding Device of Air-assisted Planter for Rapeseed

WANG Lei^{1,2} LIAO Yitao^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} QI Tianxiang^{1,2} ZHANG Qingsong^{1,2} WANG Baoshan^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering the problem that the large range of land slope changes in rapeseed planting area leads to the seed feeding quantity insufficient stability of the seed feeding device of air-assisted centralized metering device of the planter, a prototype of seed feeding device was developed to improve the stability of seed feeding quantity in slope land planting based on adjusting spring to adjust the distance between seed cleaning brush and circular arc type-hole wheel for controlling feeding and cleaning seed quantity. The working process and principle of the seed feeding device were elaborated. The curvilinear equation of the circular arc type-hole, main arc deflection angle, and structural parameters of seed quantity regulating mechanism was determined. The mechanical relationship between seed quantity regulating mechanism and type-hole wheel was analyzed. Using the intelligent planting machine test platform, the influence experiment of land slope on seed feeding performance was carried out. The influence of seed cleaning brush thickness, adjusting spring effective turns, adjusting plate thickness, and main arc deflection angle on stability of seed feeding quantity in land slope was tested with quadratic rotation orthogonal combination test. The experiment results indicated that using the main objective method in multi-objective optimization, when the seed cleaning brush thickness was 13 mm, the adjusting spring effective turns was 82.5, the adjusting plate thickness was 7.8 mm, and the main arc deflection angle was 7.7°, the variation of seed feeding rate at 5° tilt was 2.32% compared with no tilt, the variation of seed feeding rate at -5° tilt was 4.29% compared with no tilt, the variation coefficient of seed feeding rate stability

收稿日期: 2020-05-27 修回日期: 2020-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229)、国家油菜产业体系专项(CARS-12)和湖北省科技厅农业科技创新行动项目

作者简介: 王磊(1988—), 男, 博士生, 主要从事油菜播种技术与装备研究, E-mail: wangchong12356@126.com

通信作者: 廖宜涛(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

was no higher than 0.52% , and the seed feeding stability was better. The bench test results showed that on the relatively flat land with variation of seed feeding rate in the state of oscillation in range of -5° to 5° relative to no tilt was no higher than 1.6% , the variation coefficient of seed feeding rate stability was no higher than 0.86% under the optimum combination of parameters. It could meet the requirement of seed feeding quantity stability in the land slope field planting.

Key words: planter for rapeseed; air-assisted centralized metering device; seed feeding device; seed quantity regulating mechanism

0 引言

油菜种植区域的耕地坡度为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$,适于高速、宽幅油菜播种机^[1-2]作业。气送式油菜播种机整机和传动系统简单,适应高速、宽幅等作业特点,满足油菜高效播种作业需求^[3-6]。气送式油菜精量宽幅免耕播种机作业时,受地表坡度影响,供种装置随播种机前后倾斜及摆动,导致供种装置单位时间内的供种量差异较大,供种稳定性较差^[7-9]。

为提高气送式集排器排种性能,国内外学者进行了许多相关研究。文献[10-11]应用计算流体力学方法设计并优化了导流涡轮结构,以提高气送式集排器内气流场的有序性;文献[12-14]设计倾斜抛物线型孔轮,安装搅种装置,并应用 EDEM 仿真确定种层调节板参数,以提高气送式集排器充种性能;文献[15-17]设计分配器上凸盖结构,并利用 CFD 仿真分析排种分配系统参数对气流场的影响,应用 DEM-CFD 耦合仿真优化气送式集排器送料装置、增压管、碗式分配器结构,以提高集排器各行排量一致性;文献[18-21]研究了风机风压、气流流速、气流种子比、输种管结构对气送式排种系统排种性能的影响。上述研究提高了气送式集排器的排种性能,但有关作业地表坡度对气送式集排器供种性能影响及提高气送式集排器对地表坡度适应性的研究却鲜见报道。

针对现有气送式油菜集排器供种装置在油菜种植区域地表坡度变化范围大时供种量稳定性不足等问题,设计一种采用调节弹簧控制毛刷与外切圆弧型孔轮距离,实现坡地播种、稳定供种的供种装置,确定外切圆弧型孔曲线方程、主圆弧偏转角及种量调节机构结构参数,利用智能种植机械测试平台进行供种装置优化试验,以期气送式集排器结构改进提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 气送式排种系统总体结构

气送式油菜排种系统主要由高压风机、气流分配管、种箱、供种装置、等分送料装置、送料管、分配器、输种管等组成,该系统可提供气送式集排器

24 行种子输送所需气流,完成供种、分种、混种、送种、排种、输种环节,结构如图 1 所示。

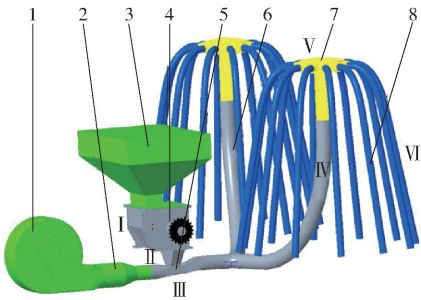


图 1 气送式排种系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of air-assisted metering system

1. 高压风机 2. 气流分配管 3. 种箱 4. 供种装置 5. 等分送料装置 6. 送料管 7. 分配器 8. 输种管 I. 供种环节 II. 分种环节 III. 混种环节 IV. 送种环节 V. 排种环节 VI. 输种环节

1.2 供种装置结构

供种装置主要由卸种板、供种壳体、外切圆弧型孔轮、播量调控轮、隔板、调节板、清种毛刷、进种隔板、种箱、种室隔板、调节弹簧、硅胶刮种板、传动轴、充种室、转轴、供种口等组成,结构如图 2 所示。

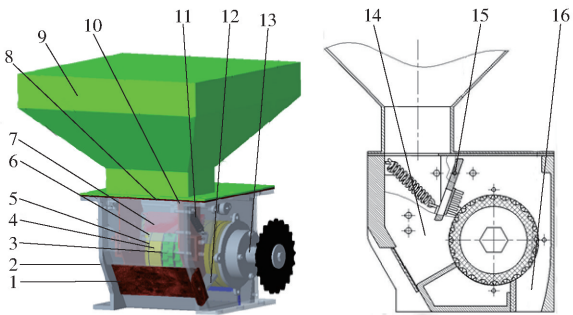


图 2 供种装置结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of seed feeding device

1. 卸种板 2. 供种壳体 3. 外切圆弧型孔轮 4. 播量调控轮 5. 隔板 6. 调节板 7. 清种毛刷 8. 进种隔板 9. 种箱 10. 种室隔板 11. 调节弹簧 12. 硅胶刮种板 13. 传动轴 14. 充种室 15. 转轴 16. 供种口

1.3 工作过程及工作原理

播种作业时,供种装置供种过程包括充种、清种、携种、投种,供种装置相对平整地表的状态如图 3 所示。定义供种装置逆时针倾斜为正向倾斜,顺时针倾斜为负向倾斜,调节板与外切圆弧型孔轮

间距离最小处种层厚度为充种量调控区种层厚度 h 。理想状态下, 供种装置为水平状态 1, 清种毛刷将清除型孔中的部分种子; 遇坡度地表上坡作业时, 供种装置为倾斜状态 2, 供种装置负向倾斜角 θ , 调节弹簧伸长, 清种量增加, 且充种量调控区种层厚度降低, 由清种增加及充种量调控区种层厚度降低减

小的型孔充种量可平衡负向倾斜导致的充种增加量; 遇坡度地表下坡作业时, 供种装置为倾斜状态 3, 供种装置正向倾斜角 θ , 调节弹簧缩短, 清种量减少, 且充种量调控区种层厚度增加, 由充种量调控区种层厚度增加而增大的型孔充种量可平衡正向倾斜导致的充种减少量, 实现坡地动态稳定供种。

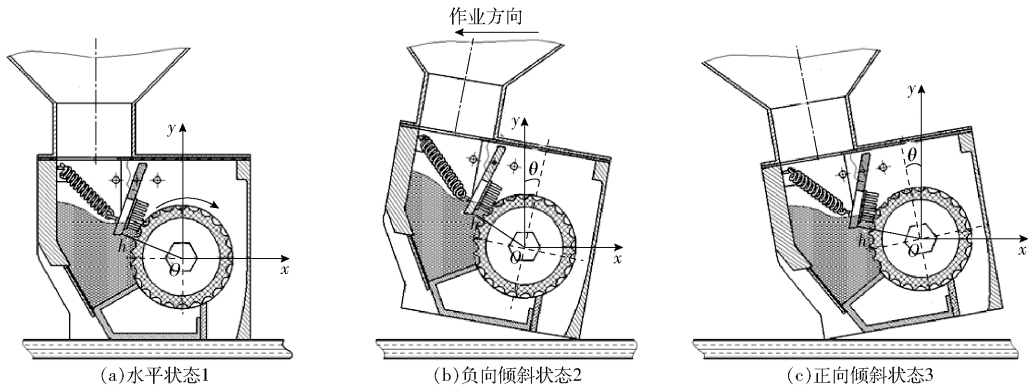


图 3 供种装置相对平整地表示意图

Fig. 3 Diagrams of seed feeding device relative to leveling land

2 供种装置设计

2.1 型孔轮参数

因油菜种子近似球形、表皮光滑且流动性好, 确定型孔轮为圆柱形。播种机播量与油菜供种装置供种量关系方程为

$$\begin{cases} Q_b = \frac{Bv_m}{ab} \\ Q_m = \frac{NZqn}{60} \end{cases} \quad (1)$$

式中 Q_b ——农艺要求油菜播量, 粒/s
 B ——免耕播种机作业幅宽, m
 v_m ——播种机前进速度, m/s
 a ——播种行距, m
 b ——播种粒距, m
 Q_m ——供种装置供种量, 粒/s
 N ——型孔轮数
 Z ——单个型孔轮径向型孔数
 q ——单个型孔充入种子数
 n ——型孔轮转速, r/min

供种装置供种量与种植农艺要求播量相同, 由式(1)得

$$Z = \frac{60Bv_m}{Nabqn} \quad (2)$$

由式(2)可知, 单个型孔轮径向型孔数与作业幅宽、前进速度成正比, 与型孔轮数、播种行距、播种粒距、单个型孔充入种子数、型孔轮转速成反比。综合考虑长江中下游和新疆地区油菜播种作业速度为 4 ~ 10 km/h, 播量为 3.75 ~ 8.25 kg/hm², 播种机幅

宽为 4.8 mm, 行距为 200 mm, 确定型孔轮直径为 80 mm。根据油菜品种千粒质量差异, 确定型孔理论充种粒数为 10 ~ 15, 传动轴上为 4 ~ 8 个型孔轮交错排布, 单个型孔轮径向型孔数为 24, 型孔轮工作转速为 20 ~ 50 r/min^[22]。

2.2 型孔设计

为满足供种装置型孔高速作业下不伤种, 精量播种中供种应连续稳定。综合考虑供种装置作业工况及减少拖带充种, 设计增加种群扰动且易于种子充种及流动的外切圆弧型孔, 截面形状如图 4 所示。

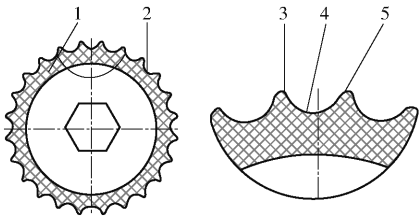


图 4 型孔轮结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of type-hole wheel

1. 外切圆弧型孔轮 2. 外切圆弧型孔 3. 补充圆弧 4. 主圆弧 5. 导流圆弧

外切圆弧型孔由补充圆弧、主圆弧、导流圆弧组成, 补充圆弧、导流圆弧均与主圆弧外切。外切圆弧型孔结构参数设计依据华油杂 62 油菜种子, 当量直径为 1.9 ~ 2.1 mm, 球形度大于 94.5%。为保证油菜种子有效充入型孔且在投种区顺利从型孔中排出, 主圆弧对应圆周角应小于 180°。根据型孔轮布局, 外切圆弧型孔无偏转时, 型孔轮、主圆弧、种子相对位置如图 5 所示。为实现种子有效充入型孔, 基于几何关系可知

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_c^2 \\ 2R \sin \frac{\beta}{2} = l_R \\ 2R_c \sin \frac{\delta}{2} = l_t \\ \beta = \frac{360}{Z} \\ 2r \leq h_c \leq 4r \leq R_c \\ l_t \leq l_R \end{cases} \quad (3)$$

式中 R_c ——主圆弧半径, mm
 R ——型孔轮半径, 取 40 mm
 β ——型孔对应型孔轮圆心角, ($^\circ$)
 l_R ——型孔对应型孔轮弦长, mm
 δ ——型孔对应主圆弧圆心角, ($^\circ$)
 l_t ——型孔对应主圆弧弦长, mm
 r ——油菜种子半径, 1 mm
 h_c ——主圆弧深度, mm

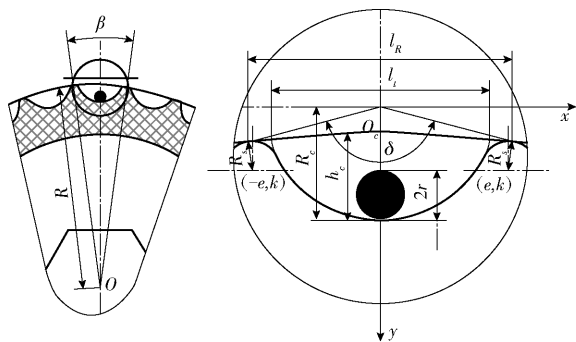


图5 相对位置示意图

Fig.5 Sketch of relative position

由式(3)可知

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_c^2 \\ 2R_c \sin \frac{\delta}{2} \leq 10.44 \\ 2 \leq h_c \leq 4 \leq R_c \end{cases} \quad (4)$$

综合考虑满足冬油菜、春油菜播量要求, 且实现有效供种, 结合式(4)确定主圆弧半径为 4.5 mm, 主圆弧深度为 3.5 mm。主圆弧方程为

$$x^2 + y^2 = 20.25 \quad (5)$$

根据主圆弧、补充圆弧、导流圆弧与型孔轮间相对位置关系, 补充圆弧、导流圆弧方程关系式为

$$\begin{cases} (x - e)^2 + (y - k)^2 = R_s^2 \\ x^2 + (y - 4.5)^2 = 20.25 \\ k = 7.6e + 41 \\ e^2 + k^2 = (4.5 + R_s)^2 \\ (41 - k)^2 + e^2 = (40 - R_s)^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 R_s ——补充圆弧、导流圆弧的半径, mm

e ——补充圆弧圆心的 x 轴坐标

k ——补充圆弧、导流圆弧圆心的 y 轴坐标

根据式(5)、(6)得外切圆弧型孔方程为

$$y = \begin{cases} 2.48 - (-10.14x - x^2 - 24.4)^{\frac{1}{2}} & (-5.22 \text{ mm} \leq x < -4.04 \text{ mm}) \\ (20.25 - x^2)^{\frac{1}{2}} & (-4.04 \text{ mm} \leq x < 4.04 \text{ mm}) \\ 2.48 - (10.14x - x^2 - 24.4)^{\frac{1}{2}} & (4.04 \text{ mm} \leq x < 5.22 \text{ mm}) \end{cases} \quad (7)$$

外切圆弧型孔主圆弧是决定型孔供种性能的关键, 为提高供种装置的供种稳定性, 以无偏转时主圆弧二分之一半径处的坐标 O_e 为偏转中心, 偏转主圆弧, 如图 6 所示, 可得偏转主圆弧方程与以 O_e 为圆心、主圆弧半径为直径的偏转圆方程关系式

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_c^2 \\ (x - m_1)^2 + (y - n_1)^2 = \left(\frac{R_c}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 m_1 ——偏转主圆弧圆心 x 轴坐标

n_1 ——偏转主圆弧圆心 y 轴坐标

为保证主圆弧偏转过程中的完整性, 最大偏转角时, 偏转主圆弧应与直线 OD 相切, 方程应满足关系式

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_c^2 \\ (x - m_1)^2 + (y - n_1)^2 = \left(\frac{R_c}{2}\right)^2 \\ y = k_1 x + b_1 \\ \frac{(m_1 k_1 - n_1 + b_1)^2}{1 + k_1^2} = R_c^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 k_1 ——直线 OD 斜率, 计算结果为 7.59

b_1 ——直线 OD 截距, 计算结果为 40.85

由式(9)可得偏转主圆弧偏转最大角度时圆心坐标 $O_n(-3.15 \text{ mm}, 0.58 \text{ mm})$ 。根据主圆弧方程圆心坐标 O_c 、偏转主圆弧方程圆心坐标 O_n 、偏转圆方程圆心坐标 O_e 的几何关系, 可得偏转主圆弧绕点 O_e 顺时针转动的最大偏转角 α 为 20.48° 。

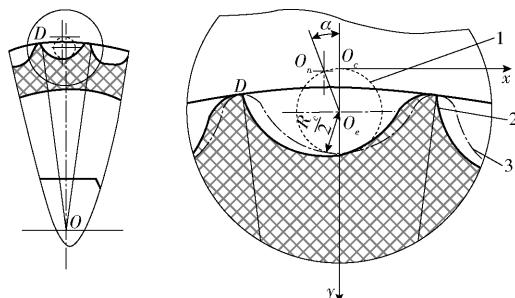


图6 偏转主圆弧偏转示意图

Fig.6 Deflection sketch of deflected main arc

1. 偏转圆 2. 偏转主圆弧 3. 主圆弧

2.3 种量调节机构

2.3.1 种量调节机构受力分析

种量调节机构由调节弹簧、调节板、清种毛刷、

转轴等组成,结构如图 7 所示。通过调节弹簧控制调节板与型孔轮间距离,以控制充种量调控区种层厚度、型孔的充种及清种量,并控制清种毛刷与型孔轮间距离。以固定连接的调节板和清种毛刷为刚体,其在平整地表受力如图 8 所示。

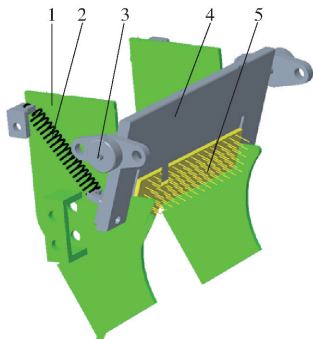


图 7 种量调节机构结构示意图

Fig. 7 Structural diagram of seed quantity regulating mechanism

1. 种室隔板 2. 调节弹簧 3. 转轴 4. 调节板 5. 清种毛刷

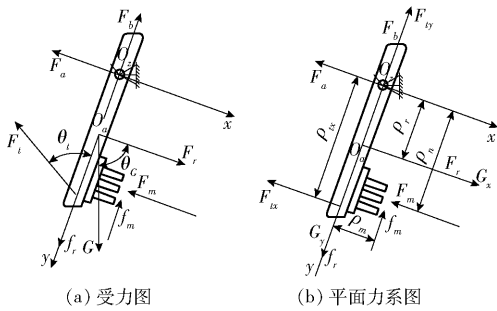


图 8 刚体力系示意图

Fig. 8 Sketches of force system on rigid body

刚体在平面 xy 内绕转轴固定铰链 O_z 转动,力系平衡。基于平面力系平衡,力系主矢、主矩均为零。建立平衡方程

$$\begin{cases} G \sin \theta_G + f_r = F_t \cos \theta_t + f_m + F_b \\ G \cos \theta_G + F_r = F_t \sin \theta_t + F_a + F_m \\ F_{tx} \rho_{tx} + F_m \rho_n = G_x \rho_r + F_r \rho_r + f_m \rho_m \\ F_{tx} = F_t \sin \theta_t \\ F_{ty} = F_t \cos \theta_t \\ G_x = G \cos \theta_G \\ G_y = G \sin \theta_G \\ f_m = \mu_m F_m \\ f_r = \mu_r F_r \end{cases} \quad (10)$$

式中 μ_m ——种子与清种毛刷间的摩擦因数
 μ_r ——种子与调节板间的摩擦因数
 θ_t ——调节弹簧对刚体的拉力与 y 轴夹角, ($^\circ$)
 θ_G ——刚体重力与 x 轴夹角, ($^\circ$)
 F_a ——转轴对刚体 x 轴上的约束力, N

F_b ——转轴对刚体 y 轴上的约束力, N
 F_t ——调节弹簧对刚体的拉力, N
 F_{tx} ——调节弹簧对刚体的拉力在 x 轴方向分力, N
 F_{ty} ——调节弹簧对刚体的拉力在 y 轴方向分力, N
 ρ_{tx} ——调节弹簧对刚体的拉力在 x 轴方向分力的力臂, m
 F_m ——型孔内种子对刚体的支持力, N
 ρ_n ——型孔内种子对刚体支持力的力臂, m
 f_m ——型孔内种子对刚体的摩擦力, N
 ρ_m ——型孔内种子对刚体摩擦力的力臂, m
 F_r ——充种室内种群对刚体在质心 O_a 处压力, N
 f_r ——充种室内种群对刚体的摩擦力, N
 G ——刚体重力, N
 G_x ——刚体重力在 x 轴方向分力, N
 G_y ——刚体重力在 y 轴方向分力, N
 ρ_r ——刚体重力在 x 轴方向分力和充种室内种群对刚体在质心点 O_a 处压力的力臂, m

种量调节机构是由转轴实现固定铰链约束,基于固定铰链约束的力学特性, F_a 、 F_b 是大小未知的正交分力, F_a 、 F_b 对固定铰链 O_z 的主矩为 0, 故地表具有坡度, 供种装置绕型孔中心点 O 转动 θ 时, 由式 (10) 可知调节弹簧对刚体的拉力为

$$F_t = \frac{\rho_r G \cos \theta_G + F_r \rho_r + \rho_m \mu_m F_m - F_m \rho_n}{\rho_{tx} \sin \theta_t} \quad (11)$$

遇坡度地表上坡作业时, 刚体重力与 x 轴夹角 θ_G 随供种装置负向倾斜角 θ 的增加而逐渐减小; 基于散粒体对侧壁压力变化规律, 充种室内种群对刚体的压力 F_r 随 θ 的增加而逐渐增大。负向倾斜时调节弹簧对刚体的拉力为

$$F_t = \frac{\rho_r (G \cos (\theta_G - \theta) + F_r) + F_m (\rho_m \mu_m - \rho_n)}{\rho_{tx} \sin \theta_t} \quad (12)$$

基于供种装置为整体倾斜, 倾斜过程中, F_r 逐渐减小, 力臂 ρ_r 、 ρ_{tx} 、 ρ_m 、 ρ_n 不变, 为实现力矩平衡, 调节弹簧对刚体的拉力 F_t 随倾斜角 θ 的增加而逐渐增大, 调节弹簧伸长量增加, 迫使刚体绕点 O_z 逆时针转动, 清种毛刷与型孔间距离减小, 增加了清种量, 当清种毛刷与型孔间距减小到一定值时, F_m 增大, 可实现力系平衡。

遇坡度地表下坡作业时, 调节弹簧对刚体的拉力 F_t 为

$$F_t = \frac{\rho_r (G \cos(\theta_G + \theta) + F_r) + F_m (\rho_m \mu_m - \rho_n)}{\rho_{tx} \sin \theta_t} \quad (13)$$

由式(13)可知,随供种装置倾斜角 θ 的增加, F_r 逐渐减小,力臂 ρ_r 、 ρ_{tx} 、 ρ_m 、 ρ_n 不变,为实现力矩平衡,调节弹簧对刚体的拉力 F_t 随倾斜角 θ 的增加而逐渐减小,调节弹簧伸长量减小,迫使刚体绕点 O_2 顺时针转动,增加了清种毛刷与型孔间距离,减小了清种量,当清种毛刷与型孔间距增大到一定值时, F_m 减小,可实现力系平衡。

2.3.2 调节板与清种毛刷设计

综合考虑供种装置结构、充种室布局及种量调节机构与型孔轮的相对位置,确定种量调节机构与型孔轮几何关系如图9所示。

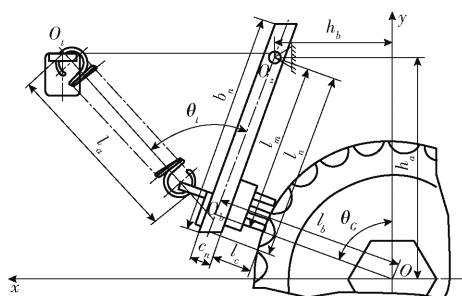


图9 种量调节机构与型孔轮几何关系示意图

Fig. 9 Sketch of seed quantity regulating mechanism and type-hole wheel geometric relationship

地表平整时,为保证清种毛刷有效清种且不卡种,清种毛刷安装最低点应为调节板与型孔轮距离最小处,结合图9可得调节板与型孔轮距离关系方程

$$\begin{cases} h_a^2 + h_b^2 = l_m^2 + l_n^2 \\ h_a - l_m \sin \theta_G = l_b \cos \theta_G \\ l_b \leq l_c + R + \frac{c_n}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式中 h_a ——转轴至 x 轴距离,mm

h_b ——转轴至 y 轴距离,mm

l_m ——转轴至清种毛刷安装最低点距离,mm

l_b ——调节板对称中心线至型孔轮圆心距离,mm

l_c ——清种毛刷厚度,mm

c_n ——调节板厚度,mm

由式(14)可知清种毛刷厚度、调节板厚度与地表平整时转轴至型孔轮中心距离间的关系。依据设计尺寸, h_a 为64 mm, h_b 为34 mm, R 为40 mm, h_c 为3.5 mm,参考适应于平整地表油菜种子供种装置种层调节板安装角度及油菜种子滑动摩擦角,确定 θ_G 为 70° ,可得不等式方程

$$13.82 \leq l_c + \frac{c_n}{2} \quad (15)$$

由式(15)可确定清种毛刷厚度和调节板厚度范围,依据适应平整地表作业供种装置的调节板安装位置并结合实际加工工艺,确定清种毛刷厚度为11~15 mm,长度为80 mm,宽度为15 mm,材料为尼龙丝;调节板厚度为6~10 mm。

供种装置工作过程中,型孔轮转动使充种室内充种量调控区种层厚度高于种量调节装置底边位置,为避免清种毛刷的安装导致提前清种,则应满足关系式

$$b_n \geq l_n \geq l_m \quad (16)$$

式中 l_n ——转轴至调节板最低点距离,mm

b_n ——调节板宽度,mm

根据 h_a 、 h_b 、 R 设计尺寸,并结合式(14)~(16)可得转轴至清种毛刷安装最低点的距离 l_m 为48.53 mm,转轴至调节板最低点距离应大于 l_m ,综合考虑转轴在调节板上的相对位置、种箱中油菜种子供给速率及实际作业中油菜播量需求,确定调节板宽度 b_n 为64 mm。

2.3.3 调节弹簧设计

由图9中调节弹簧与调节板的几何关系,根据余弦定理可得调节弹簧与调节板宽度关系方程

$$\frac{l_m}{\sin(180^\circ - \theta_t - \theta_G)} \leq \frac{\lambda l_a}{\sin \theta_G} \leq \frac{l_n}{\sin(180^\circ - \theta_t - \theta_G)} \quad (17)$$

式中 l_a ——调节弹簧长度,mm

λ ——调节弹簧固定系数,取1.3

由式(17)可得地表平整下调节弹簧长度与转轴至调节板最低点距离、转轴至清种毛刷安装最低点距离间关系。依据设计尺寸, l_n 为54 mm, l_m 为48.53 mm, θ_t 为 63° ,可得调节弹簧长度为47.96~53.37 mm。

调节弹簧选用圆柱螺旋拉伸弹簧,弹簧拉力计算公式^[23]为

$$F_t = \frac{G_t d^4}{8 D^3 n_t} x_t \quad (18)$$

式中 G_t ——弹簧切变模量,取79 GPa

d ——弹簧钢丝直径,mm

D ——弹簧中径,mm

n_t ——有效圈数

x_t ——弹簧形变量,mm

基于散粒体堆积特性,充种室内种群对调节板的压力小于种群的重力,充种室内种群对调节板压力计算式为

$$F_r = \frac{G_r}{2\sin\theta_c} \tag{19}$$

式中 G_r ——充种室内种子重力,N

调节弹簧为2根对称安装,根据调节弹簧最小工作载荷、最大工作载荷长度及自由长度关系,结合式(12)、(19)可得调节弹簧参数与充种室内种群对调节板压力及调节板重力的关系

$$\begin{cases} \frac{G_r d^4}{4D^3 n_t} x_t \geq \frac{\rho_r \left(G \cos\theta_c + \frac{G_r}{2\sin\theta_c} \right) + F_m (\rho_m \mu_m - \rho_n)}{\rho_{tx} \sin\theta_t} \\ G = a_n b_n c_n p_n g \\ l_a - x_t = 2D + n_t d \end{cases} \tag{20}$$

式中 a_n ——调节板长度,取115 mm

p_n ——调节板密度,取7 900 kg/m³

g ——重力加速度,取9.81 m/s²

根据式(20),为满足圆柱螺旋拉伸弹簧的力学特性及几何参数关系,确定选用碳素弹簧钢丝,计算得钢丝直径为0.3~0.5 mm,弹簧中径为5 mm,有效圈数为70~90,弹性模量为206 GPa。预试验中将钢丝直径为0.3~0.5 mm的调节弹簧分别安装至供种装置,试验结果表明钢丝直径为0.3 mm的调节弹簧工作时未能有效回弹,钢丝直径为0.5 mm的调节弹簧工作时所受作用力小于调节弹簧的初拉力,故钢丝直径确定为0.4 mm。

3 试验与结果分析

3.1 地表坡度对供种性能影响试验

为探究地表坡度对供种性能影响规律,开展坡度地表供种性能稳定性试验。

3.1.1 试验条件

试验装置为外切圆弧型孔主圆弧无偏转的供种装置,模拟地表坡度设备为华中农业大学自主研发的智能种植机械测试平台,如图10所示。该平台可模拟并实时显示播种机在田间作业的工作状态,通过液压马达驱动供种装置传动轴转动,通过液压缸驱动六自由度平台实现播种机前后、左右方向-5°~5°倾斜及摆动。

3.1.2 试验方法

试验供种装置采用4个外切圆弧型孔轮交错排布,种箱中装入5 kg油菜种子,以减少种量变化对供种性能的影响。供种装置调节板固定安装,参考适应平整地表供种装置调节板安装位置,确定调节板与型孔轮轴心距离为51 mm,未安装调节弹簧与清种毛刷,试验材料为华油杂62油菜种子,千粒质



(a) 供种装置 (b) 播种机
图10 智能种植机械测试平台

Fig. 10 Intelligent planting machine test platform

量为4.67 g。试验中以地表坡度为试验因素,综合考虑长江中下游及新疆地区油菜播种机作业工况,地表坡度设置为0°~5°,设置供种装置转速为30 r/min,以满足实际油菜播种的供种量需求。为更好地研究地表坡度前后倾斜对供种性能的影响规律,简化地表坡度形式。开展固定倾斜角度对供种性能影响单因素试验,试验水平为供种装置倾斜-5°~5°,每间隔1°为一个水平,试验重复5次;开展供种装置摆动对供种性能影响单因素试验,摆动周期为10 s,试验水平为供种装置摆动-1°~1°、-2°~2°、-3°~3°、-4°~4°、-5°~5°,试验重复5次。以供种装置60 s内供种质量为供种速率,确定供种速率稳定性变异系数。

3.1.3 结果分析

由图11可知,固定倾斜供种速率随供种装置倾斜角的增加而逐渐减小;负向倾斜时,固定倾斜-5°相对无倾斜供种速率的增加量大于34%;正向倾斜时,固定倾斜5°相对无倾斜供种速率的减少率大于25%,表明供种装置倾斜对供种速率有显著的影响。供种速率稳定性变异系数随固定倾斜角的增加无明显变化规律。

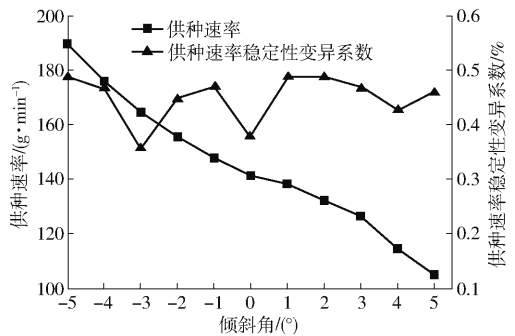


图11 不同倾斜角时供种性能变化曲线

Fig. 11 Effect curves of seed feeding performance under different fixed tilt angles

由图12可知,供种装置摆动时供种速率随供种装置摆动角范围的增加而逐渐增大,表明相同倾斜角时,负向倾斜引起的供种速率增加量高于正向倾斜引起的供种速率减少量,是由于负向倾斜外切圆弧型孔种子增加量高于正向倾斜外切圆弧型孔种子减少量,故摆动的供种速率均大于无倾斜时供种速

率。供种速率稳定性变异系数随摆动角的增加无明显变化规律。

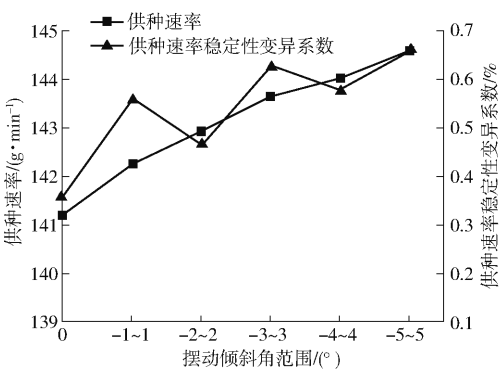


图 12 不同摆动角时供种性能变化曲线

Fig. 12 Effect curves of seed feeding performance under different swing angles

3.2 供种性能优化试验

为分析种量调节机构及型孔参数对供种速率的影响,开展二次旋转正交组合试验确定供种装置参数组合。

3.2.1 试验装备

试验装置为安装种量调节机构的供种装置,设备为智能种植机械测试平台。

3.2.2 试验方法

设置供种装置转速为 30 r/min,以固定倾斜 5° 相对无倾斜下的供种速率变化率(相对变化率 Y_1)和固定倾斜 -5° 相对无倾斜下的供种速率变化率(相对变化率 Y_2)作为坡度地表供种稳定性评价指标。相对变化率 Y_1 计算式为

$$Y_1 = \frac{q_z - q_a}{q_z} \times 100\%$$
 (21)

式中 q_a ——固定倾斜 5° 时的供种速率, g/min

q_z ——无倾斜时的供种速率, g/min

相对变化率 Y_2 计算式为

$$Y_2 = \frac{q_b - q_z}{q_z} \times 100\%$$
 (22)

式中 q_b ——固定倾斜 -5° 时的供种速率, g/min

3.2.3 二次旋转正交组合试验

通过对种量调节机构的设计与参数分析,确定清种毛刷厚度、调节弹簧有效圈数、调节板厚度、外切圆弧型孔主圆弧偏转角为影响供种速率相对变化量的主要因素。采用响应面优化法开展二次旋转正交组合试验^[24-25],确定种量调节机构最佳参数组合。基于理论分析和实际加工工艺,确定试验因素水平如表 1 所示。试验中不同主圆弧偏转角的外切圆弧型孔轮采用 3D 打印加工。根据四因素五水平二次旋转正交组合试验表开展试验,每组试验重复 5 次。试验方案与结果见表 2。

表 1 因素水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素			
	清种毛刷厚度 X_1 /mm	调节弹簧有效圈数 X_2	调节板厚度 X_3 /mm	主圆弧偏转角 X_4 /(°)
1	11	70	6	0
2	12	75	7	5
3	13	80	8	10
4	14	85	9	15
5	15	90	10	20

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Experiment scheme and results

序号	因素				响应值	
	X_1 /mm	X_2	X_3 /mm	X_4 /(°)	Y_1 /%	Y_2 /%
1	13	80	6	10	11.35	14.27
2	11	80	8	10	12.13	22.56
3	13	80	8	10	3.45	5.45
4	14	85	9	5	9.16	14.05
5	12	85	7	15	10.07	15.16
6	13	90	8	10	14.25	15.26
7	14	85	7	5	8.30	12.38
8	12	75	7	5	18.28	23.38
9	14	85	7	15	9.08	12.45
10	14	75	7	5	18.75	22.53
11	12	85	9	15	12.22	14.71
12	12	85	9	5	9.45	11.99
13	15	80	8	10	11.28	21.38
14	12	75	9	15	21.49	23.54
15	12	85	7	5	8.97	12.15
16	12	75	7	15	19.35	23.73
17	13	80	8	10	3.69	5.52
18	14	75	9	15	21.08	22.44
19	12	75	9	5	19.15	23.26
20	13	80	8	10	3.26	5.25
21	13	70	8	10	33.91	33.95
22	13	80	8	10	3.45	5.57
23	13	80	8	0	7.54	10.34
24	13	80	8	10	3.34	5.48
25	13	80	8	20	10.46	11.24
26	14	85	9	15	10.84	14.26
27	14	75	9	5	19.48	24.31
28	13	80	8	10	3.76	5.49
29	14	75	7	15	18.75	20.15
30	13	80	10	10	14.16	16.29

3.2.4 回归分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对回归方程进行方差分析,结果表明, X_1X_3 、 X_2X_3 、 X_2X_4 对 Y_1 影响不显著, X_2X_3 、 X_3X_4 对 Y_2 影响不显著,剔除不显著因素的方差分析结果如表 3 所示。

剔除不显著因素后,建立 Y_1 、 Y_2 真实值的回归方程,并检验其显著性。各因素对 Y_1 影响的回归模

表3 方差分析
Tab.3 Variance analysis

方差来源	Y ₁					Y ₂				
	方差和	自由度	均方差	F	P	方差和	自由度	均方差	F	P
模型	1 458.32	11	132.57	2 873.58	<0.001	1 574.36	12	131.20	6 304.18	<0.001
X ₁	1.14	1	1.14	24.80	<0.001	2.48	1	2.48	119.02	<0.001
X ₂	575.85	1	575.85	12 481.63	<0.001	537.42	1	537.42	25 823.94	<0.001
X ₃	11.96	1	11.96	259.17	<0.001	4.74	1	4.74	227.94	<0.001
X ₄	12.30	1	12.30	266.56	<0.001	0.731 5	1	0.731 5	35.15	<0.001
X ₁ X ₂	0.608 4	1	0.608 4	13.19	0.001 9	0.814 5	1	0.814 5	39.14	<0.001
X ₁ X ₃						4.48	1	4.48	215.45	<0.001
X ₁ X ₄	0.648 0	1	0.648 0	14.05	0.001 5	6.67	1	6.67	320.47	<0.001
X ₂ X ₄						5.80	1	5.80	278.51	<0.001
X ₃ X ₄	1.85	1	1.85	40.09	<0.001					
X ₁ ²	120.70	1	120.70	2 616.11	<0.001	467.07	1	467.07	23 429.54	<0.000 1
X ₂ ²	739.23	1	739.23	16 023.05	<0.001	628.09	1	628.09	31 507.04	<0.000 1
X ₃ ²	152.79	1	152.79	3 311.82	<0.001	165.19	1	165.19	8 286.25	<0.000 1
X ₄ ²	55.42	1	55.42	1 201.25	<0.001	48.63	1	48.63	2 439.55	<0.000 1
残差	0.830 4	18	0.046 1			0.353 8	17	0.020 8		
失拟项	0.639 0	13	0.049 2	1.28	0.417 9	0.292 6	12	0.024 4	1.99	0.230 6
纯误差	0.191 5	5	0.038 3			0.061 2	5	0.012 2		
总和	1 459.15	29				1 574.71	29			

型为

$$Y_1=3.49-0.22X_1-4.9X_2+0.71X_3+0.72X_4-0.2X_1X_2-0.2X_1X_4+0.34X_3X_4+2.1X_1^2+5.2X_2^2+2.36X_3^2+1.42X_4^2$$

(23)

由表3可知,对Y₁影响极显著(P<0.01)的
次顺序为X₂²、X₂、X₃²、X₁²、X₄²、X₄、X₃、X₃X₄、X₁、X₁X₄、
X₁X₂。对回归方程进行失拟检验,P值为0.4179,
不显著,表明不存在其他影响试验指标的主要因素。

各因素对Y₂影响的回归模型为

$$Y_2=5.46-0.32X_1-4.73X_2+0.44X_3+0.17X_4+0.23X_1X_2+0.53X_1X_3-0.65X_1X_4+0.6X_2X_4+4.13X_1^2+4.79X_2^2+2.45X_3^2+1.33X_4^2$$

(24)

对Y₂影响极显著(P<0.01)的
次顺序为X₂²、X₂、X₁²、X₃²、X₄²、X₁X₄、X₂X₄、X₃、X₁X₃、X₁、X₁X₂、X₄。
对回归方程进行失拟检验,P值为0.2306,不显著,
表明不存在其他影响试验指标的主要因素。

3.2.5 参数优化

基于理论分析、试验结果和数据分析可知,调节
弹簧有效圈数、清种毛刷厚度、调节板厚度、主圆弧
偏转角对Y₁、Y₂均有显著影响。

基于油菜种植农艺要求中对成苗数的要求,播
量偏高,通过后后期油菜苗竞争生长,可保证有效成苗
数,播量偏低难以满足成苗数要求。依据NY/T
2709—2015《油菜播种机作业质量》的要求,以固定
倾斜5°相对无倾斜下的供种速率变化率为多目标
优化目标,结合各因素边界条件,建立参数优化数学

模型,目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min F_x=Y_1 \\ Y_2\leqslant 4.5\% \\ 11\text{ mm}\leqslant X_1\leqslant 15\text{ mm} \\ 70\leqslant X_2\leqslant 90 \\ 6\text{ mm}\leqslant X_3\leqslant 10\text{ mm} \\ 0^\circ\leqslant X_4\leqslant 20^\circ \end{cases}$$

(25)

通过Design-Expert 8.0.6软件的优化模块,求
解约束目标,清种毛刷厚度为12.95 mm、调节弹簧
有效圈数为82.32、调节板厚度为7.78 mm、主圆弧
偏转角为7.71°时,Y₁最低。

综合考虑供种装置实际加工制造水平,以清种
毛刷厚度为13 mm、调节弹簧有效圈数为82.5、调节
板厚度为7.8 mm、主圆弧偏转角为7.7°的供种装置
开展验证试验。试验结果表明,无倾斜时供种速率
为144.39 g/min,固定倾斜5°时为141.04 g/min,Y₁
为2.32%,供种速率稳定性变异系数为0.46%;固
定倾斜-5°时供种速率为150.58 g/min,Y₂为
4.29%,供种速率稳定性变异系数为0.52%。

3.3 验证试验

为验证安装有种量调节机构的供种装置对坡度
地表作业的适应性及可靠性,利用智能种植机械测
试平台开展摆动对供种性能影响单因素试验。设置
供种装置转速为30 r/min,摆动周期为10 s,试验水
平为供种装置摆动-1°~1°、-2°~2°、-3°~3°、
-4°~4°、-5°~5°,每组试验重复5次。统计供种

速率、摆动相对无倾斜供种速率变化率(相对变化率 Y_3)、供种速率稳定性变异系数,试验结果如图 13 所示。

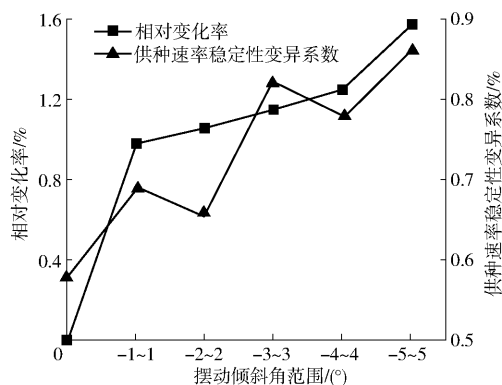


图 13 摆动对供种稳定性影响的试验结果

Fig. 13 Effect of oscillation on seed feeding stability

相对变化率 Y_3 计算式为

$$Y_3 = \frac{q_i - q_z}{q_z} \times 100\% \quad (26)$$

式中 q_i ——往复摆动角度 i 时的供种速率, g/min

由图 13 可知, Y_3 随摆动角范围的增加而逐渐增大, 相对变化率 Y_3 为 0 ~ 1.6%; 供种速率稳定性变

异系数随摆动角的增加在 0.58% ~ 0.86% 内变化, Y_3 和供种速率稳定性变异系数均满足油菜坡地播种供种量稳定性要求。

4 结论

(1) 设计了一种采用调节弹簧调节清种毛刷与外切圆弧型孔轮距离, 从而控制充种及清种量、实现坡地播种、稳定供种的供种装置, 阐述了供种装置的工作原理, 确定了外切圆弧型孔曲线方程、主圆弧偏转角及种量调节机构结构参数, 分析了种量调节机构与型孔轮间的力学关系。

(2) 通过二次旋转正交组合试验, 得到清种毛刷厚度、调节弹簧有效圈数、调节板厚度、主圆弧偏转角与相对变化率的二次回归方程。利用主要目标法确定最佳参数组合为: 清种毛刷厚度 13 mm、调节弹簧有效圈数 82.5、调节板厚度 7.8 mm、主圆弧偏转角 7.7°, 供种稳定性较优。

(3) 台架验证试验表明, 在最优参数组合下, 供种速率在摆动 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 相对无倾斜状态下的变化率不大于 1.6%, 供种速率稳定性变异系数不大于 0.86%, 满足油菜坡地播种供种量稳定性要求。

参 考 文 献

- [1] 胡变运, 李春辉. 基于 ArcGIS 的第三次国土调查耕地坡度级别赋值模型研究与应用[J]. 测绘通报, 2019(增刊): 137-139, 142.
HU Luanyun, LI Chunhui. Research and application of slope grade calculation model of cultivated land based on ArcGIS in the third national land survey[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(Supp.): 137-139, 142. (in Chinese)
- [2] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170901&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [3] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油菜兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57-68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007. (in Chinese)
- [4] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 131(12): 29-39.
- [5] 戴亿政, 罗锡文, 王在满, 等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 36-42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36-42. (in Chinese)
- [6] 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/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 55-64.
LI Yanjun, LIU Youhua, LIU Lijing. Distribution mechanism of airflow in seed tube of different lengths in pneumatic seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 55-64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200606&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.006. (in Chinese)
- [7] 曹秀英, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 77-84.
CAO Xiying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150911&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.011. (in Chinese)
- [8] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161(9): 120-134.
- [9] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166(2): 1-12.

- [10] 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8-15.
QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese)
- [11] 高筱钧,徐杨,贺小伟,等. 气送式高速玉米精量排种器导流涡轮设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 42-52.
GAO Xiaojun, XU Yang, HE Xiaowei, et al. Design and experiment of diversion turbine of air-assisted high speed maize precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 42-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191105&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.005. (in Chinese)
- [12] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):171-180.
LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 171-180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s023&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.023. (in Chinese)
- [13] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6):11-19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11-19. (in Chinese)
- [14] 李兆东,王晴晴,张亚兰,等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):116-124.
LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 116-124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180513&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.013. (in Chinese)
- [15] 常金丽,张晓辉. 2BQ-10型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):136-141.
CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)
- [16] 张晓辉,王永振,仇利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)
- [17] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 150(6): 98-109.
- [18] MANGUS D L, SHARDA A, FLIPPO D. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017, 142(9):314-325.
- [19] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 苜蓿播种机气流输送式排种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):101-107.
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of pneumatic seeding system of teff seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 101-107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s014&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.014. (in Chinese)
- [20] KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 75(1):81-95.
- [21] 雷小龙,李蒙良,张黎骅,等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可定量供肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(19):9-18.
LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 9-18. (in Chinese)
- [22] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 地表坡度对油菜宽幅精量免耕播种机排种性能的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(7):11-21.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Effects of land slope on seeding performance of a broad width precision no-tillage planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 11-21. (in Chinese)
- [23] 中国有色工程设计研究总院. 机械设计手册(第3卷)[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [24] 石林榕,孙步功,赵武云,等. 弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器排种性能参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):88-95,207.
SHI Linrong, SUN Bugong, ZHAO Wuyun, et al. Optimization and test of performance parameters of elastic air suction type corn roller seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 88-95, 207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191010&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.010. (in Chinese)
- [25] 王磊,廖宜涛,张青松,等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):63-73.
WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 63-73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.007. (in Chinese)