

油菜高速机械离心式集排器设计与试验

廖庆喜^{1,2} 沈文惠^{1,2} 王磊^{1,2} 霍佳琪^{1,2} 罗湛程^{1,2} 廖宜涛^{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: 针对传统油菜机械离心式集排器高速作业时供种及投种能力不足, 导致排种量与作业速度不匹配、排种性能不稳定等问题, 设计了一种被动式供种、“圆孔+渐变孔柱”组合式型孔投种的油菜高速机械离心式集排器。构建了供种、投种过程中的力学模型, 分析确定了影响排种性能的关键结构参数; 利用 EDEM 离散元仿真开展了供种调节高度对供种速率调节量影响的试验, 结果表明当供种调节高度为 3~8 mm 时, 供种速率在 64.95~357.54 g/min 范围内可调; 采用两因素三水平正交试验分析了限种套筒下摆高度及倾角对初始种量、临界转速及环状种层最大高度的影响。通过台架试验确定了较优限种套筒结构参数, 结合高速摄影对比了 5 种型孔结构下动锥体转速与排种量关系, 确定最优型孔结构为“圆孔+渐变孔柱”组合式型孔。较优参数组合集排器排种性能验证试验结果表明: 当转速为 115~205 r/min 时, 排种速率为 60.96~355.76 g/min, 油菜各行排量一致性变异系数均低于 5.2%, 总排量稳定性变异系数均低于 1.3%, 破损率低于 0.5%, 满足作业速度 6~12 km/h 时的排种量要求。田间试验结果表明, 当机组作业速度为 7.89、11.98 km/h 时, 油菜各行植株均匀性变异系数低于 11%, 种植密度为 43~58 株/m², 满足油菜精量播种要求。

关键词: 油菜; 高速机械离心式集排器; 型孔结构; 离散元仿真

中图分类号: S223.2⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0154-14

OSID:



Design and Experiment of High-speed Mechanical Centrifugal Centralized Seed Metering Device for Rapeseed

LIAO Qingxi^{1,2} SHEN Wenhui^{1,2} WANG Lei^{1,2} HUO Jiaqi^{1,2} LUO Zhancheng^{1,2} LIAO Yitao^{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 practical problems that the inadequate seed supply and discharge capacity at high speed operations in the existing mechanical centrifugal metering device for rapeseed which led to mismatch between the amount of seed row and the operation speed, and poor seed row performance, a type of metering device with passive seed filling and “round hole + gradient hole column” combined type holes for seed discharge was designed. The mechanical model of seed supply and discharge process was constructed and the key structural parameters affecting seed discharge performance were analyzed and determined. The experiment on the influence of the seed supply adjustable height on the adjustment range of the seed supply rate was simulated by using EDEM discrete element simulation software, which revealed the seed supply rate was adjustable in the range of 64.95~357.54 g/min when the seed supply adjustable height was in the range of 3~8 mm. The influence of the hem height and inclination angle of the seed limiting sleeve on the initial seed quantity, critical speed and the maximum height of the annular seed layer was analyzed by using two factors and three levels orthogonal test. The optimum structural parameters of seed limiting sleeve were determined by bench test. Combined with high-speed photography, the relationship between the rotating speed of the moving cone and the seed metering amount under five kinds of hole structures was compared, and the optimal hole structure was determined as “round hole + gradient hole column” combined type holes. The bench verification test results of the metering performance of the metering device with better parameter combination at different rotating speeds

收稿日期: 2023-11-09 修回日期: 2024-01-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)

作者简介: 廖庆喜(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

showed that when the speed of the metering device was 115 ~ 205 r/min, the seeding amount rate was 60.96 ~ 355.76 g/min, the apiece row consistency variation coefficient was less than 5.2%, the single row stability variation coefficient was less than 1.3%, and the damage rate was less than 0.5%, which can meet the working speed of 6 ~ 12 km/h. The field experiment showed that when the planting speed was 7.89 km/h and 11.98 km/h, the apiece row plant distribution consistency of rapeseed was less than 11%, and the planting density was 43 ~ 58 plants/m², which could meet the seeding performance requirements of rapeseed.

Key words: rape; high speed mechanical centrifugal centralized seed metering device; hole structure; discrete element simulation

0 引言

油菜是提升我国食用植物油自给率潜力最大的油料作物,在油料供应中占比较大^[1],2022 年我国油菜机械化播种水平仅为 42.29%。随着农村劳动力流失和现代农业发展需要,农村土地分散经营已向适度规模经营转变,高速直播技术是推动油菜产业可持续发展的重要途径之一^[2-5]。开发轻简实用高速可适应大面积地块作业需求的排种装置,已成为排种器发展的重要方向^[6]。离心式集排器因其排种过程简单、种子破损率低等特点被广泛运用于播种作业^[7-9],但播种速度大多为 1.6 ~ 6 km/h,难以满足大田块高速高效播种需求。

为匹配高速播种作业,国内外学者针对排种装置开展了深入研究。德国 Amazone 公司 DEX 气力集排式播种机作业速度可达 15 km/h,其采用正压滚筒集中充种投种后通过气送投种,工作幅宽可达 9 m^[10];YATSKUL 等^[11]对 Kuhn 高速气送式播种机分配装置进行试验,探究了倾斜角、输种管长度、排种口堵塞对排种性能的影响;文献[12-14]设计了一种基于文丘里原理的混种部件,并优化了匀种涡轮及穹顶状分配装置,解决了由气流、地表坡度等导致油麦兼用气送式集排器排种性能降低的问题;李沐桐等^[15]提出离心锥盘推送式充种方式,充分利用种层离心力对籽粒进行充填,解决了高速作业时排种稳定性差的问题;董建鑫等^[16]采用双侧种盘对置、单列排种的结构布局,可有效提高玉米高速播种作业条件下排种均匀性;王东伟等^[17]将搅种凹槽、取种槽口、吸种型孔组合设计构成组合槽,保证高速作业时的排种性能;姚露等^[18-19]提出一种螺旋进种条供种、Bezier 曲线分种的油菜集排器,可实现高速均匀排种。上述研究表明,应用于高速播种的排种器大多为气力式排种器,机械式排种器在高速作业过程中会出现充种稳定性差等问题影响排种性能,对于大粒径作物主要通过机械结构辅助充种来实现高速下的稳定作业。由于油菜种子表皮较薄,极易破损,在高转速下机械辅助充种结构会造成油菜种

子表皮破损,影响出苗率,而传统机械离心式集排器依靠离心作用力和种群作用力实现排种作业,作业过程中减少机械结构对油菜种子的作用,破损率很低,但因其供种可调性不足、型孔结构限制导致排种能力不足,无法满足高速高效播种需求,制约了机械离心式集排器发展。

本文基于油菜种子机械物理特性及农艺要求,设计一种一器八行的油菜高速机械离心式集排器,采用被动式供种、“圆孔+渐变孔柱”组合式型孔投种,应用 EDEM 仿真进行排种性能台架试验,探究限种套筒结构和转速对排种速率及其各行一致性变异系数和破损率的影响,结合高速摄影确定较优的型孔结构,通过田间试验验证排种器性能,以期为高速机械式集排器结构改进提供参考。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构

油菜高速机械离心式播种机整体结构如图 1 所示,主要由机架、仿形地轮、旋耕装置、开沟起垄装置、排肥装置、排种装置和双圆盘开沟器等组成。该机能一次性完成旋耕、灭茬、施肥、播种、开畦沟、覆土等作业环节。

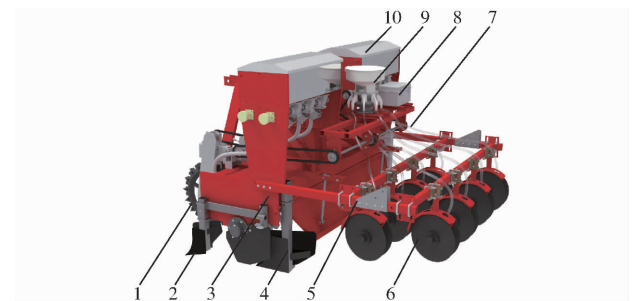


图 1 播种机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of seeding machine

1. 仿形地轮 2. 开畦沟前犁 3. 旋耕装置 4. 开畦沟后犁 5. 机架 6. 双圆盘开沟器 7. 导种管 8. 调速控制箱 9. 油菜高速机械离心式集排器 10. 肥箱

油菜高速机械离心式集排器主要由种箱、调节旋钮、上盖板、环状型孔筒、定锥壳体、动锥体、限种套筒、分种锥台、导种嘴等组成,结构如图 2 所示。

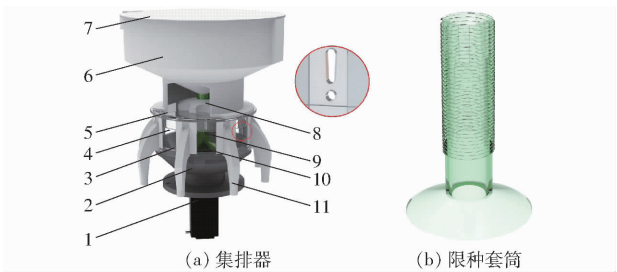


图 2 集排器结构示意图

Fig. 2 Structure diagrams of metering device

1. 电机 2. 定锥壳体 3. 动锥体 4. 环状型孔筒 5. 上盖板
6. 种箱盖 7. 种箱 8. 调节旋钮 9. 限种套筒体 10. 分种锥台
11. 导种嘴

其中限种套筒是稳定供种的核心部件,型孔是满足高速投种的核心部件。

1.2 工作过程

初始供种环节:集排器工作前,油菜种子在重力作用下从种箱底部出种口流出,经限种套筒和分种锥台间隙均匀连续地流入动锥体内,当筒内种量达到一定量时,在已有种群的挤压力等作用下,种箱内油菜种子粒不再下流,形成静平衡状态。

稳定投种环节:动锥体和分种锥台在电机驱动下绕驱动轴转动,动锥体内油菜种子在离心力作用下沿动锥体外壁上升,种群静平衡被打破,种箱内种子在重力作用下继续经限种套筒和分种锥台间隙均匀连续地流入动锥体。动锥体内油菜种子在离心力、重力、动锥体支持力和种群作用力等综合作用下沿环状型孔筒壁呈螺旋线上升,紧贴筒内壁形成规则稳定的环状种子流,最外侧种子被环状型孔筒上的型孔囊入并投出,经过导种嘴进入导种管,完成排种。集排器工作前可调节旋钮角度以及动锥体转速,以配合机组前进速度提供所需播量。

2 关键部件结构设计与参数分析

2.1 供种过程

供种装置是集排器关键部件之一,是连接种箱和动锥体的通道。供种性能对集排器排种稳定性与作业效率有重要影响。限种套筒和分种锥台作为供种装置的核心部件,其主要结构参数包括限种套筒上端高度及直径,限种套筒下摆角度及高度、分种锥台斜面倾角等。试验中限种套筒及分种锥台采用工程塑料 ABS 进行 3D 打印加工。

2.1.1 持续充种阶段

集排器工作前,种箱内种子在重力作用下从种箱底部出种口流出,流经限种套筒上部到达套筒下摆与分种锥台连接处,并穿过限种套筒下摆与分种锥台间隙,沿分种锥台斜面下滑至动锥体底部。离

心式集排器充种过程如图 3 所示。

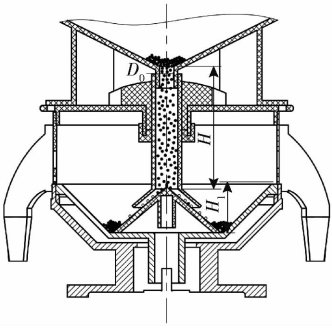


图 3 充种过程示意图

Fig. 3 Schematic of seed filling process

种箱底部出种孔较小时极易出现结拱现象,导致种子无法顺利下落。为实现种子顺利下落,种箱下部圆形出种口直径应不小于油菜种子直径 6 ~ 12 倍^[20],油菜种子平均直径为 2 mm,故取种箱出种口直径 $D_0 = 24\text{ mm}$ 。

油菜种子从种箱底部开始下落,至分种锥台顶端时速度为 v_0 ,随即沿倾斜角度为 α 的分种锥台斜面向下滑,受到沿斜面向上的摩擦力 F_f 以及空气阻力 F_a ,以油菜种子质心为坐标原点建立直角坐标系 xoy 对其进行动力学分析,如图 4b 所示,根据质点相对运动力学分析,建立油菜种子种群动力学基本方程

$$\begin{cases} F_N = m_0 g \cos \alpha \\ F_f = \mu F_N = F_1 \\ F_a = m_0 g v_t^2 / v_a^2 \\ F_1 = m_0 g \sin \alpha \\ F_x = F_1 - F_a - F_f \\ F_x = m_0 a_0 \\ G = m_0 g \\ l = D_n / (2 \cos \alpha) \\ v_0 = \sqrt{2gH \sin \alpha} \\ v_t = \sqrt{v_0^2 + 2a_0(l - h_e / \sin \alpha)} \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 m_0 ——油菜种子质量,kg
 a_0 ——油菜种子沿斜面向下加速度, m/s^2
 F_N ——锥台斜面对油菜种子的支反力,N
 v_t ——油菜种子瞬时速度, m/s
 v_a ——油菜种子飘浮速度, m/s
 μ ——油菜种子在分种锥台上的滑动摩擦因数,取 0.86
 H ——种箱到分种锥台顶端高度, mm
 D_n ——动锥体内底直径, mm
 h_e ——动锥体已有种群高度, mm
 l ——分种锥台母线长度, mm

g ——重力加速度,取 $9.81 \text{ m}^2/\text{s}$

G ——油菜种子重力, N

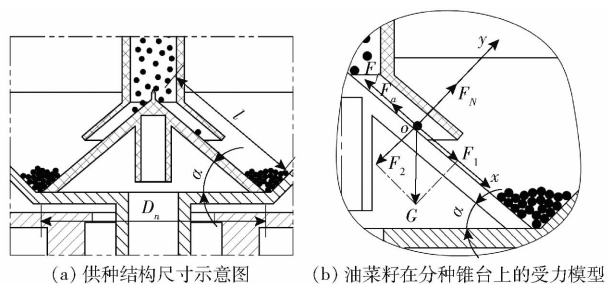


图 4 油菜种子运动与受力

Fig.4 Schematics of rapeseed movement and forces

供种初期油菜种子沿斜面滑落到动锥体底部后会与铝合金底部产生碰撞并向上弹起,若下滑速度较大,碰撞回弹较高,种子极易从上方筒壁的类型孔处排出。由前期测试油菜种子碰撞恢复系数可知,油菜种子与铝合金的碰撞恢复系数 e_1 为 0.65,与油菜种子种群的碰撞恢复系数 e_2 为 0.58。因此,油菜种子下落后与铝合金或油菜种群接触后回弹速度满足

$$\begin{cases} v_{\tau 1} = e_1 v_i \sin \alpha \\ v_{\tau 2} = e_2 v_i \sin \alpha \\ h_{\tau 1} = \frac{v_{\tau 1}^2}{2(g + F_a/m_0)} \leq H_1 \\ h_{\tau 2} = \frac{v_{\tau 2}^2}{2(g + F_a/m_0)} \leq H_1 - h_e \end{cases} \quad (2)$$

式中 $v_{\tau 1}$ ——油菜种子与铝合金碰撞后速度, m/s
 $v_{\tau 2}$ ——油菜种子与油菜种群碰撞后速度, m/s
 $h_{\tau 1}$ ——与铝合金碰撞后回弹高度, mm
 $h_{\tau 2}$ ——与油菜种子种群碰撞后回弹高度, mm
 H_1 ——动锥体底部到动锥体上边缘的高度, mm

由式(1)和式(2)可得

$$H \sin^3 \alpha + l \sin^2 \alpha + 2\mu l \cos \alpha \sin \alpha \leq H_1/e_1 \quad (3)$$

为简化计算过程,将油菜视为大小均匀一致的刚体,质量为 m ,所受力均作用在油菜种子粒质心;油菜种子与种群碰撞后会产生缓冲,碰撞后弹跳相对于铝合金底盘小,因此忽略与种群碰撞的弹跳;由于空气阻力相对于其他力较小,忽略空气阻力对于落种过程的影响。其中,动锥体底部到最低型孔高度 H_1 为 45 mm,种箱到分种锥台顶端高度 H 为 136 mm,代入式(3),可得 $\alpha \leq 53.83^\circ$,同时分种锥台角度应大于油菜种子休止角,前期试验测得 3 种油菜种子平均休止角为 26.71° ,取整后为 27° 。可确定锥台斜面倾角 $27^\circ \leq \alpha \leq 53.83^\circ$,由式(2)可知,斜面倾角 α 越大,对种群扰动越大,有利于种群顺利向下流动,但倾角过大,与套筒上端内壁夹角越

小,会产生种子破损现象,故取锥台斜面倾角 α 为 45° 。

2.1.2 静平衡阶段

油菜种子下落一段时间后,在动锥体底部堆积,种群下落直达到限种套筒下摆底部,在种群反作用力和分种锥台表面摩擦力等作用下,种箱内油菜种子不会继续下落,达到静平衡状态,如图 5 所示,此时动锥体内油菜种子总量即为集排器初始种量。由离心式集排器的工作原理可知,油菜种子主要利用离心力和种群作用力完成型孔投种,而种群作用力与集排器初始种量有关,为使集排器具有较优排种性能,需探明动锥体内最优初始种量及其影响因素。

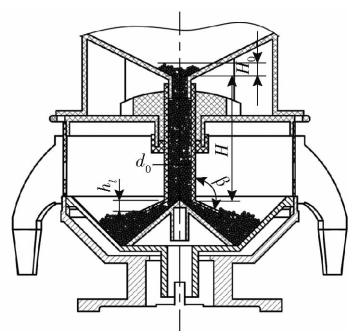


图 5 静平衡阶段示意图

Fig.5 Schematic of stationary equilibrium phase

现对此状态下油菜种群进行受力分析,此时油菜种群处于静平衡状态,将种群分割为如图 6a 所示 3 部分,蓝色部分为滞留层,橙色部分为中间层,绿色部分为存储层。为清晰地表示每部分种层的受力情况,将其简化为 3 个质量块,并依次对 3 个质量块进行受力分析如图 6b 所示,因静止状态下种层间摩擦力较小,故忽略不计。

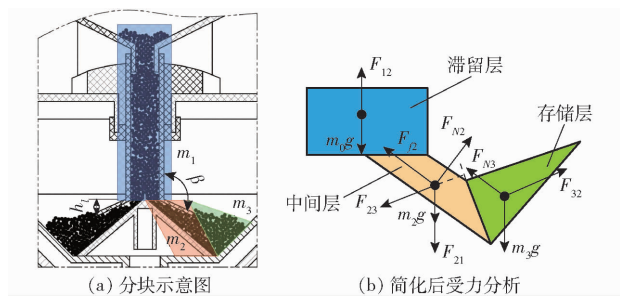


图 6 静平衡阶段种群受力分析

Fig.6 Force analysis of stationary equilibrium phase

对滞留层进行受力分析,可得

$$\begin{cases} m_1 g = 2F_{12} \\ V_0 = \frac{\pi d_0^2 (H + H_0)}{4} \\ m_1 g = \gamma V_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 m_1 ——滞留层油菜种子质量, kg

V_0 ——滞留层油菜种子体积, mm^3
 d_0 ——限种套筒上部直径, mm
 F_{12} ——单侧中间层对滞留层油菜种子支反力, N
 γ ——油菜种子容重, N/m^3

对中间层单独进行分析, 建立直角坐标系 $x_1o_1y_1$, 沿动锥体斜面向下为 x_1 轴正方向, 垂直于斜面向上为 y_1 轴正方向, 受力分析如图 7 所示。

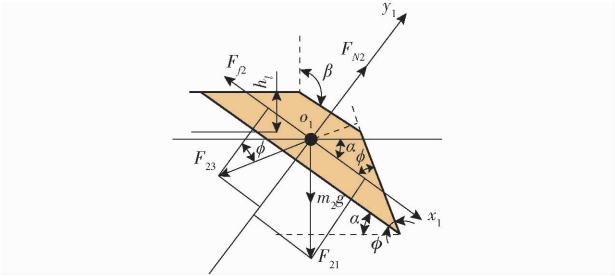


图 7 中间层受力分析

Fig. 7 Force analysis of middle layer

对中间层进行受力分析, 可得

$$\begin{cases} (m_2g + F_{21})\sin\alpha - F_{f2} - F_{23}\sin\phi = 0 \\ F_{N2} - (m_2g + F_{21})\cos\alpha - F_{23}\cos\phi = 0 \\ \tan(\alpha + \phi) = \frac{l\sin\alpha - h_l}{l\cos\alpha - d_0/2 - h_l/\tan(180^\circ - \beta)} \\ F_{f2} = \mu F_{N2} \\ F_{21} = F_{12} \end{cases} \quad (5)$$

式中 m_2 ——中间层油菜种子质量, kg
 F_{21} ——滞留层对中间层油菜种子的作用力, N
 F_{23} ——存储层对中间层油菜种子的作用力, N
 F_{f2} ——锥台斜面对油菜种子的滑动摩擦力, N
 F_{N2} ——锥台斜面对油菜种子的支反力, N
 h_l ——限种套筒下摆高度, mm
 β ——限种套筒下摆与上壁夹角, $(^\circ)$
 ϕ ——中间层种群与分种锥台母线的夹角, $(^\circ)$

对存储层进行分析, 建立直角坐标系 $x_2o_2y_2$, 以中间层与存储层接触面方向向下为 x_2 轴正方向, 以中间层对存储层作用力方向为 y_2 轴正方向, 受力分析如图 8 所示。

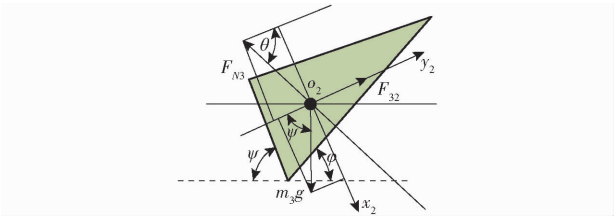


图 8 存储层受力分析

Fig. 8 Force analysis of storage layer

对存储层进行受力分析, 可得

$$\begin{cases} m_3g\sin\psi - F_{N3}\sin\theta = 0 \\ F_{32} - F_{N3}\cos\theta - m_3g\cos\psi = 0 \\ \psi = \alpha + \phi \\ \theta = 90^\circ - \psi + \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中 m_3 ——存储层油菜种子质量, kg
 F_{32} ——中间层对存储层油菜种子的作用力, N
 F_{N3} ——动锥体侧壁对存储层的支反力, N
 ψ ——接触面与水平面夹角, $(^\circ)$
 θ ——动锥体侧壁对存储层支反力与 x_2 轴夹角, $(^\circ)$
 φ ——动锥体侧壁与水平面夹角, $(^\circ)$

集排器电机启动后, 中间层和存储层的油菜种群在离心力等的作用下迅速向四周散去, 因此集排器初始种量为中间层和存储层种量之和。综合式(4)~(6)可得

$$m_e = m_2 + m_3 = \frac{\sqrt{2}m_3}{2(2 - \mu)\cos\phi} + \frac{\gamma\mu d_0(H + H_0)}{2g(1 - \mu)} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} \phi = \arctan \frac{d_0\tan\beta - 2h_l\tan\beta - 2h_l}{(2\sqrt{2}l - 2h_l - d_0)\tan\beta + 2h_l} \\ 90^\circ < \beta < 180^\circ - \alpha \\ \frac{1}{8}D_n\tan\alpha < h_l < \frac{3}{8}D_n\tan\alpha \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)可知, 集排器初始种量 m_e 与中间层种量下夹角 ϕ 有关。由式(8)可知, 中间层种群与分种锥台母线的夹角 ϕ 与限种套筒下摆高度 h_l 、限种套筒下摆与上壁夹角 β 有关。下摆高度 h_l 越短、夹角 β 越大, 初始种量 m_e 越多。故限种套筒结构参数是影响排种器稳定性的主要因素之一。为使种箱内种子沿锥台顺利下落, 限种套筒下摆斜面最大应平行于分种锥台斜面, 考虑到启动前动锥体内初始种量高度应低于型孔最低处, 下摆倾角具有最小极限值 90° 。

2.1.3 稳定供给阶段

集排器电机启动后, 动锥体内油菜种群的静平衡被打破, 动锥体内已存在的种群在离心力等的作用下离开分种锥台沿动锥体内壁逐渐向上攀升。堆积在限种套筒内的油菜种子继续向下流动, 经由限种套筒与分种锥台间隙进入动锥体, 如图 9 所示。

为实现集排器稳定排种, 供种量应与排种量保持一致。实际田间作业中农艺要求的排种速率为

$$Z = \frac{vBQ}{10} \quad (9)$$

式中 Z ——播种机排种速率, g/min
 v ——播种机作业速度, 取 $6 \sim 12 \text{ km}/\text{h}$
 B ——播种机作业幅宽, 取 2.3 m

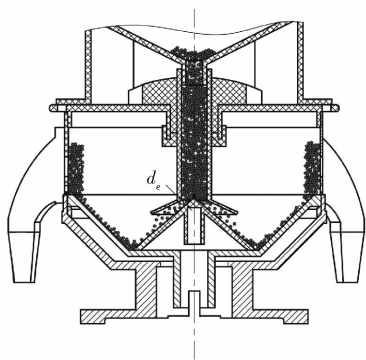


图 9 稳定供给阶段示意图

Fig. 9 Schematic of supply stabilization phase

Q ——播种机播量, kg/hm^2

根据长江中下游和新疆地区油菜播种作业试验可知,油菜播量为 $3 \sim 7.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$,代入式(9)可得油菜排种速率为 $65.99 \sim 365.52 \text{ g}/\text{min}$ 。

通常将球形种子从水平孔口重力流出与粘性液体从孔口流出类比^[21-23],集排器充种口结构如图 10 所示,因此油菜流出速度为

$$\begin{cases} Q_g = K\gamma_b [2g/(Cm\mu)]^{\frac{1}{2}} \left(S - \frac{1}{2}C\varphi_g \right)^{\frac{3}{2}} \\ C = \pi D_0 d_e - \frac{\sqrt{2}\pi d_e^2}{2} \\ S = \frac{3\sqrt{2}\pi D_0^2 d_e - 3D_0 d_e^2 + \sqrt{2}d_e^3}{8} \\ d_e = \frac{\sqrt{2}}{2}h_e \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} S \leq \frac{\pi D_0^2}{4} \\ d_e \geq 2 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$

式中 K ——流量修正系数,取 $0.648 \sim 1.00$

S ——孔口面积, mm^2

C ——孔口周长, mm

m ——油菜种子质量, g

φ_g ——油菜种子平均直径,取 2 mm

γ_b ——油菜种子容重,取 $362.41 \text{ g}/\text{L}$

Q_g ——油菜种子流量, g/min

d_e ——限种套筒与分种锥台间隙, mm

h_e ——供种调节高度, mm

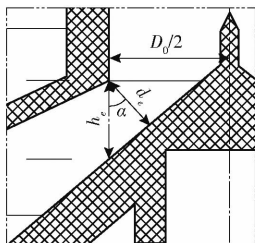


图 10 集排器充种结构尺寸示意图

Fig. 10 Schematic of structural dimensions

由式(10)可知,通过水平孔口流量与孔口形状、尺寸有关。因此,由限种套筒进入动锥体的种子流量与出口截面积成正比,即限种套筒与分种锥台间隙 d_e 成正比。为使油菜种子顺利流出,供种间隙 d_e 应大于油菜种子直径;为实现供种间隙对供种量的控制,孔口最大面积应小于限种套筒内管面积,如式(11)。综合式(10)、(11),可得

$$2.83 \text{ mm} \leq h_e \leq 8.23 \text{ mm} \quad (12)$$

由式(12)可知,供种调节高度 h_e 为 $2.83 \sim 8.23 \text{ mm}$,限种套筒上端与调节旋钮为螺纹配合,可通过旋转调节旋钮实现限种套筒配合高度 h_e 调节,进而控制供种间隙 d_e 。可通过 EDEM 仿真确定不同限种套筒配合高度 h_e 下的供种量 Q_g 。

2.2 投种过程分析

2.2.1 投种过程建模与分析

由前期研究可知,型孔结构取决于型孔囊入种子临界状态^[24]。设定油菜种子大小均匀,质量为 m 的刚体,且所受力均作用在油菜种子质心;与动锥体接触一段时间后的油菜种子具有与动锥体相同的回转速度;油菜种子进入型孔过程中,因空气阻力相对其他力而言较小,因此忽略空气阻力对油菜运动的影响。

集排器投种阶段初始状态如图 11 所示。与动锥体接触的油菜种子在摩擦力和离心力的作用下向上运移并加入环状种柱中。

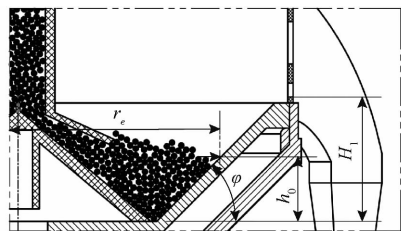


图 11 投种阶段初始状态示意图

Fig. 11 Schematic of initial state of seeding stage

选取 1 粒动锥体上的油菜种子进行受力分析,如图 12 所示,建立油菜种子动力学方程

$$\begin{cases} \frac{1}{2}m_e v^2 + F_e(H_h - h_0) \cos \varphi - G(H_h - h_0) - F_f s = 0 \\ v = \omega r_e \\ F_e = m_e r_e \omega^2 \\ G_e = m_e g \\ F_N = F_e \sin \varphi + G \cos \varphi \\ F_f = \mu_n F_N \\ \omega = 2\pi n/60 \\ G \sin \varphi + F_f = F_e \cos \varphi \end{cases} \quad (13)$$

式中 F_e ——油菜受到的离心力, N

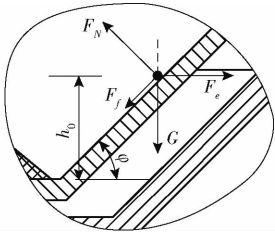


图 12 油菜种子在动锥体上受力分析示意图
Fig. 12 Schematic analysis of force on moving cone of rapeseed

- F_N ——动锥体侧壁对油菜的支反力, N
 F_f ——动锥体侧壁对油菜的摩擦力, N
 μ_n ——动锥体侧壁滑动摩擦因数, 取 0.39
 H_h ——油菜种子上升到达最大高度, mm
 h_0 ——静止平衡状态下油菜最大高度, mm
 ω ——动锥体转动角速度, rad/s
 n ——动锥体转速, r/min
 m_e ——初始种量
 s ——油菜种子沿斜面下滑的距离, mm
 r_e ——静平衡状态下动锥体内油菜种群的回转半径, mm

排种必要条件为

$$H_h - H_1 \geq 0 \quad (14)$$

综合式(13)、(14)可得

$$n \geq 30 \sqrt{\frac{g + \frac{4\mu_n g}{1 - \mu_n} + 2\mu_n g}{\left[\frac{1}{2(H_1 - h_0)} r_e^2 + r_e^2 \right] \pi^2}} \quad (15)$$

$$H_h = \frac{m_e \pi^2 n^2 r_e^2}{15(\sqrt{2}\mu_n \sin \varphi + \cos \varphi)} + h_0 \quad (16)$$

由式(15)可知,动锥体初始种层厚度越高,即静止平衡状态下油菜种子最大高度 h_0 越大,种子从型孔处投出所需的最低转速 n 越小。当静止平衡状态下油菜种子最大高度 h_0 无限接近动锥体外边缘时,此时种子从型孔处甩投出所需动锥体转速为 98.53 r/min,因此集排器最小临界转速 n 需大于等于 98.53 r/min。由式(16)可知,环状种层最大高度 H_h 与动锥体转速 n 和初始种量 m_e 呈正相关。

脱离动锥体上边沿油菜种子在种群作用力以及离心力作用下,绕驱动轴中心转动同时紧贴环状型孔筒内壁向上移动。取环状种层中间 1 粒临界状态(在某一时刻下达到受力平衡状态)种子为研究对象进行受力分析,以该临界油菜种子为中心,水平方向向右为 x_3 轴正方向,沿垂直方向向上为 y_3 轴正方向,如图 13 所示。对与其同一高度油菜种子而言,越远离旋转中心,受到的离心力越大,故此时水平方向上,油菜种子受到外侧种群的

x_3 轴负方向的挤压力 F_{qn} 和自身角速度提供的离心力 F_e 相等;沿 y_3 轴方向受到上方种层向下的压力 F_{qg} 和下方种群向上的支撑力 F_{qN} 相等。由牛顿第二定律可知,该位置油菜种子加速度为 0。沿 y_3 轴正方向及 x_3 轴负方向继续做减速运动移动且速度不断降低直至为 0,到达最大高度,随即缓慢下落回到动锥体上边沿继续向上攀升。不断重复此过程直至从型孔排出。

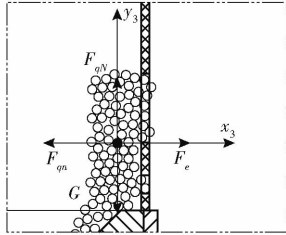


图 13 环状种层处油菜种子受力分析示意图
Fig. 13 Schematic of force analysis of rapeseed at annular seed layer

环状种层高度 H_h 会随着转速的增加而不断升高并趋于一定值。为实现油菜高速播种作业要求,集排器型孔高度可依据环状种层最大高度 h_{hmax} 而定,型孔中投出种量随转速增加不断增大,以匹配不同前进速度和播量作业需求。

2.2.2 型孔结构设计

为增大现有集排器排种量,同时保证集排器在中低速作业条件下可正常工作,根据集排器排种量与转速设计 5 种型孔结构,如图 14 所示。由前期研究可知,型孔直径为 3.8 mm 时型孔无堵塞,因此 5 种型孔结构分别为:Ⅰ为非等距 3.8 mm,Ⅱ为等距 3.8 mm,Ⅲ为 3.8 mm 孔 + 3.8 mm 孔柱组合,Ⅳ为 3.8 mm 孔 + (3.8 ± 2) mm 渐变孔柱组合,Ⅴ为 3.0 ~ 3.8 mm 渐变孔柱。

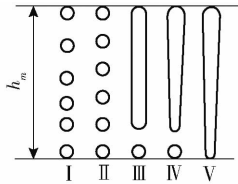


图 14 5 种不同型孔结构

Fig. 14 Five different types of hole structures

由 2.2.1 节可知,在一定转速范围内,动锥体转速越高,环状种层高度越高,排量越大,型孔Ⅰ和Ⅱ根据不同转速范围下环状种层高度所覆盖的型孔数量对排量进行调节。型孔Ⅲ和Ⅳ在低转速低种层高度下仅从单个型孔处投种,在高转速范围下根据环状种层高度所覆盖型孔长度对排量进行调节。型孔Ⅴ根据转速范围内环状种层高度所覆盖型孔长度对排量进行调节。

3 关键过程仿真试验

结合集排器结构参数与工作过程分析可知,影响集排器供种性能参数为限种套筒下端高度 h_l 、限种套筒下摆倾角 β 以及供种调节高度 h_e 。采用 EDEM 仿真分析颗粒堆积和流动过程,模拟供种装置对种群颗粒的作用效果并分析种群运动规律,探究不同限种套筒结构参数组合下动锥体内初始种量及临界转速的变化情况,以及供种调节高度对供种速率调节量的影响。

3.1 仿真模型建立

运用 Solidworks 绘制不同结构参数组合的集排器三维模型,并将其导入 EDEM 2020 进行仿真,设置相关参数如表 1 所示。油菜种子模拟华油杂 62,其直径为 2 mm,由于油菜种子本征参数和种间几乎无表面粘附力等因素,籽粒与集排器、籽粒之间均采用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触力学模型。

表 1 仿真与接触参数

Tab.1 Parameters of simulation and contact

项目	参数	数值
油菜种子	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 060
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^7
工程塑料 ABS	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 060
	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10^8
铝合金	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 700
	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	2.7×10^{10}
油菜种子-油菜种子	碰撞恢复系数	0.28
	静摩擦因数	0.57
	动摩擦因数	0.01
	碰撞恢复系数	0.36
油菜种子-工程塑料 ABS	静摩擦因数	0.49
	动摩擦因数	0.04
	碰撞恢复系数	0.6
油菜种子-铝合金	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01

3.2 集排器排种过程模拟

运用 EDEM 研究种子运动过程,在种箱上方设置颗粒工厂,使种子自由落体经限种套筒落到动锥体,设置种子生成总量为 2×10^5 粒,设置种子生成时间为 1 s,时间步长设置为 6.72×10^{-6} s,动锥体于第 10 秒开始转动,由 2.2.1 节可知,动锥体转速 $n\geq98.53\text{ r/min}$,因此设置初始转速为 100 r/min,加速度为 12.56 rad/s^2 ,仿真总时长为 30 s。仿真阶段型孔采用单一圆孔结构。仿真结束后,在 EDEM 后处理界面任选一粒排出的油菜种子粒,编号为

284889,其运动轨迹如图 15 所示。

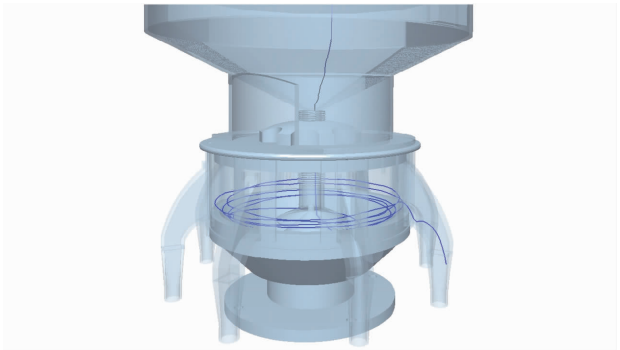


图 15 油菜种子粒 284889 运动轨迹
Fig. 15 Trajectory of seed No. 284889

由图 15 可知,持续充种阶段,籽粒在重力作用下由种箱下落,经供种间隙堆积于锥台与限种套筒之间;10 s 后排种盘以初速度 100 r/min 作匀加速圆周运动,籽粒沿锥体内壁螺旋上升并脱离动锥体内壁,在种群带动下沿环状型孔筒内壁旋转,远离型孔出口时籽粒高度较低,靠近型孔出口时籽粒高度越高,如此反复数圈后,经过型孔时在惯性离心力及种群作用力等作用下由型孔进入导种管,被顺利排出。

由 2.2.1 节可知,集排器型孔结构尺寸与环状种层高度 H_h 有关,为验证环状种层高度与动锥体转速关系,揭示不同转速下油菜种子运动速度及其分布情况,开展仿真试验。限种套筒下端高度 10 mm、下摆倾角 115° 时,集排器内种层随转速变化过程如图 16 所示。

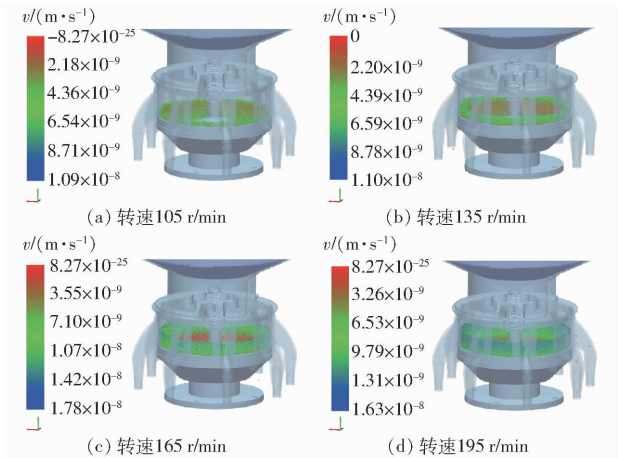


图 16 不同转速下油菜种子运动情况
Fig. 16 Simulation model and process

由图 16 可知,当转速超过临界转速,即有少量油菜种子开始到达内锥筒上部,受到其他油菜种子的碰撞与锥体内壁摩擦力的作用下速度减小,此时颗粒颜色显示为绿色^[25]。随着转速不断增加,大部分油菜种子逐渐脱离动锥体,紧贴环状型孔筒内壁,环状种层高度不断上升。随着油菜种子高度上升,脱离动锥体提供的离心力,受到外壁碰撞和摩擦,速

度降低,此时最高处油菜种子颜色显示为蓝色。因此最大环状种层高度与转速及动锥体内初始种量呈正相关,与理论分析一致。

3.3 限种套筒对供种性能的影响

由 2.1.2 节可知,限种套筒结构尺寸决定动锥体内初始种量,继而影响集排器临界转速及环状种层最大高度。前述理论分析及前期预试验确定影响的主要因素及其取值范围:限种套筒下端高度 h_l 为 5 ~ 25 mm,限种套筒下摆倾角 β 为 $100^{\circ} \sim 130^{\circ}$ 。试验中限种套筒下端高度设 10、15、20 mm,限种套筒下摆倾角设为 115° 、 120° 、 125° 。通过仿真试验得到不同限种套筒下端高度、下摆倾角参数组合下集排器的初始种量、临界转速及环状种层最大高度。在 EDEM 后处理界面通过 Selection Group 功能添加 Geometry Bin 至动锥筒区域,统计第 10 秒动锥筒内堆积种子质量总和,记录集排器投种口开始有种子排出时仿真时间,计算此时动锥体转速,并通过 Ruler 功能测量种层最高处籽粒到动锥体上边沿的垂直距离。每组试验重复 3 次取平均值,结果见表 2。

表 2 限种套筒对供种性能影响

Tab.2 Influence of seed-limiting sleeves on seed supply performance

限种套筒下摆高度 h_l/mm	限种套筒下摆倾角 $\beta/({}^{\circ})$	初始种量 m_e/g	临界转速 $n_0/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	环状种层最大高度 $H_{h\text{max}}/\text{mm}$
10	115	86.05	103	24.18
10	120	79.46	107	21.95
10	125	70.12	112	19.22
15	115	64.75	115	18.49
15	120	60.31	118	17.31
15	125	55.69	120	16.07
20	115	50.46	122	14.88
20	120	47.03	125	13.37
20	125	35.34	127	12.14

由表 2 可知,当限种套筒下摆高度 h_l 相同时,下摆倾角 β 越小,动锥筒内初始种量 m_e 越多,临界转速 n_0 越小,环状种层最大高度 $H_{h\text{max}}$ 越大,最大高度可达 24.18 mm;当限种套筒下摆倾角 β 相同时,下摆高度 h_l 越大,动锥筒内初始种量 m_e 越少,临界转速 n_0 越大,环状种层最大高度 $H_{h\text{max}}$ 越小,最小高度为 12.14 mm。9 种结构参数组合下,所需临界转速最小为 103 r/min。

3.4 供种调节高度对供种性能的影响

为获得不同供种调节高度下的集排器供种量,探究分种锥台转速对供种量的影响规律,开展 EDEM 仿真试验。通过前述理论分析,供种调节高度为 2.83 ~ 8.23 mm。转速应大于 3.3 节仿真试验得到的最小临界转速,即 103 r/min。供种调节高度

取 3、4、5、6、7、8 mm 6 个水平,转速取 110、130、150、170 r/min 4 个水平。设置种子生成总量为 2×10^5 粒,设置种子生成时间为 1 s,时间步长设置为 6.72×10^{-6} s,仿真总时长为 25 s,分种锥台于第 5 秒开始旋转,工作总时长为 20 s。仿真开始 10 s 后,种群运动状态稳定,此时开始统计经供种间隙 d_e 流入动锥体内的油菜质量。

由图 17 可知,转速变化对供种速率没有明显影响,供种调节高度 h_e 增大,供种速率呈线性关系,其决定系数为 0.981,因此,可通过调节供种调节高度 h_e 对供种速率 Q_g 进行控制调节。由结果可知,高速机械集排器供种装置供种速率为 64.95 ~ 357.54 g/min,可满足不同情况下的播种量需求。实际田间作业中可通过调节相应供种调节高度得到与之相匹配的供种速率,实现不同播期、不同地区及作业速度的播量要求。

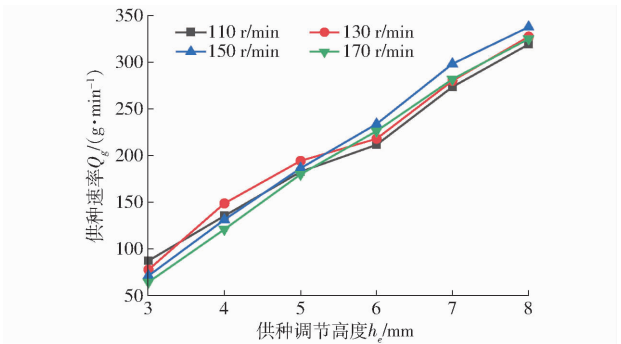


图 17 供种调节高度对供种性能影响

Fig.17 Influence of seed supply gap on seed supply performance

4 排种性能台架试验

为探究最优型孔结构参数,并验证理论分析的合理性,以华油杂 62 为试验材料,千粒质量为 4.64 g,含水率为 4.37%。将集排器安装于自制的排种试验台上开展台架试验,如图 18 所示。



图 18 台架试验装置

Fig.18 Bench test device

1. 集排器 2. 开关电源 3. 编码器 4. 步进调速控制器 5. 导种管 6. 储种盒

4.1 初始种量对集排器排种性能的影响

根据 EDEM 仿真试验的试验结果,得到不同限种套筒下摆高度及倾角参数匹配下的临界转速和初始种量,为获得集排器最优结构参数,采用 3D 打印技术,得到 9 种参数组合下的限种套筒,进行台架试验,探究不同初始种量条件下集排器排种作业性能(图 19)。试验前往种箱内加入 1 000 g 无破损的油菜种子,以各自临界转速为起始转速,10 r/min 为间隔,每一组测量时间 60 s,分别收集 8 个出种孔排出的种子并称量,剔除破碎损伤的种籽后称其质量,计算破碎种子质量占样本总质量的百分比,得到不同处理下的破损率,并计算不同处理下各行排量一致

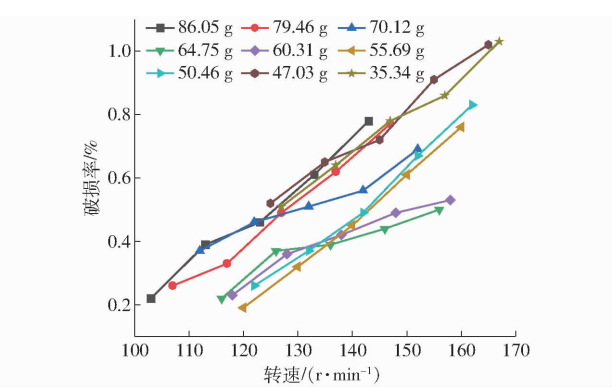


图 19 转速对破损率影响

Fig. 19 Influence of rotational speed on breakage rate

性变异系数。试验结果如表 3 所示。

表 3 限种套筒结构对排种性能影响														
Tab.3 Influence of seed limiting sleeve structure on seed metering performance														
限种套 筒下摆 高度 h_l/mm	限种套 筒下摆 倾角 $\beta/$ ($^\circ$)	初始 种量 m_g/g	转速/ ($\text{r}\cdot$ min^{-1})	各行排 量一致 性变异 系数/%	限种套 筒下摆 高度 h_l/mm	限种套 筒下摆 倾角 $\beta/$ ($^\circ$)	初始 种量 m_g/g	转速/ ($\text{r}\cdot$ min^{-1})	各行排 量一致 性变异 系数/%	限种套 筒下摆 高度 h_l/mm	限种套 筒下摆 倾角 $\beta/$ ($^\circ$)	初始 种量 m_g/g	转速/ ($\text{r}\cdot$ min^{-1})	各行排 量一致 性变异 系数/%
10	115	86.05	103	3.37	15	120	60.31	115	5.18	20	120	47.03	122	12.72
			113	3.31				125	4.82				132	12.19
			123	3.07				135	4.21				142	10.14
			133	2.92				145	3.64				152	9.70
			143	2.30				155	2.39				162	8.51
	120	79.46	107	4.54		125	55.69	118	7.03		125	35.34	125	13.51
			117	4.13				128	6.66				135	12.19
			127	3.78				138	5.88				145	11.25
			137	3.41				148	3.95				155	10.72
			147	2.33				158	2.69				165	10.23
	125	70.12	112	4.94		125	55.69	120	10.26		125	35.34	127	17.07
			122	4.82				130	8.39				137	15.49
			132	4.21				140	6.18				147	13.36
			142	3.64				150	5.90				157	13.05
			152	2.79				160	5.50				167	12.36

由表 3 可知,限种套筒下摆高度、下摆倾角以及转速对集排器排种均匀性均有影响。在限种套筒下摆高度以及倾角相同的情况下,动锥筒转速越高,各行排量一致性变异系数越低;当限种套筒下摆高度相同时,下摆倾角越大,各转速下各行排量一致性变异系数越低;当限种套筒下摆倾角相同时,下摆高度越小,各转速下各行排量一致性变异系数越高。

由图 19 可知,不同初始种量和转速对集排器的破损率均有影响。在同一初始种量水平下,转速越高,破损率越大。随着初始种量的增加,破损率先增大后减小,其中初始种量为 64.75 g 时,在各转速水平下破损率均较低。以各行排量一致性变异系数和破损率均较低为标准,确定集排器限种套筒下摆高度及倾角较优值分别为 15 mm、115°。

4.2 集排器最优型孔结构参数验证试验

型孔结构参数是影响集排器排量的重要影响因素。在确定限种套筒较优参数的基础上,探究不同转速下集排器环状种层高度的变化趋势以及单一型孔的排量变化趋势。已知该限种套筒参数下最低转速为 115 r/min,以 10 r/min 为间隔,分别取 10 个水平,统计不同水平下的环状种层高度以及单一型孔的排种量,进行 3 次重复试验并计算平均值,试验结果如图 20 所示。

由图 20 可知,随着转速的增加,集排器单孔排量以及环状种层高度均逐渐升高,当转速达 135 r/min 后,单孔排速率趋于稳定且有下降趋势,环状种层高度增长至 10.5 mm 后增速减缓并趋于稳定。集排器单孔排量最大为 13.38 g/min,环状种层最大高度为 18.5 mm,与 3.3 节限种套筒对供种性能影响中

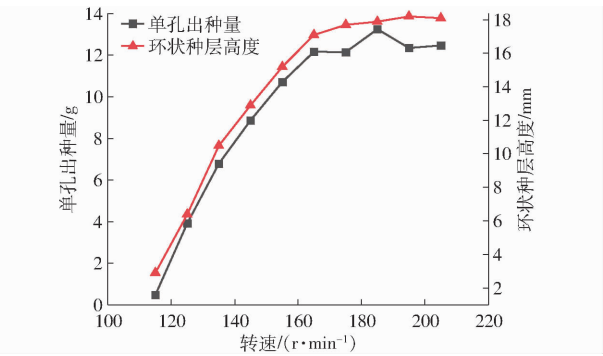


图 20 转速对单孔投种孔出种量及环状种层高度的影响

Fig. 20 Influence of rotational speed on single-hole seeding holes

仿真试验结果基本一致。为使集排器播量随转速呈线性不断增加,确定型孔总长度为环状种层最大高度 18.5 mm,孔柱位置应在单一型孔排量转折时环状种层高度处,即孔柱位置高度为 10.5 mm。如图 21 所示。

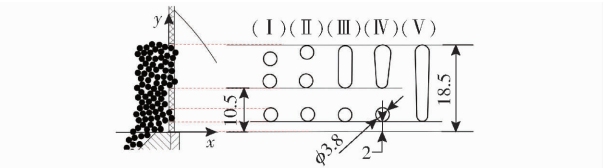


图 21 5 种型孔结构尺寸示意图

Fig. 21 Five types of hole structure dimensions diagram

利用高速摄影仪(美国 Vision Research 公司,型号 Phantom v2640,400 万像素)观测不同型孔下投种情况,当转速为 205 r/min 时 5 种型孔投种情况如图 22 所示。设置动锥体转速为 115 ~ 205 r/min,每间隔 10 r/min 为一个水平,收集集排器 8 个导种口处 1 min 排出种子量总和,每组试验条件下重复 5 次,计算平均值,结果如图 23 所示。

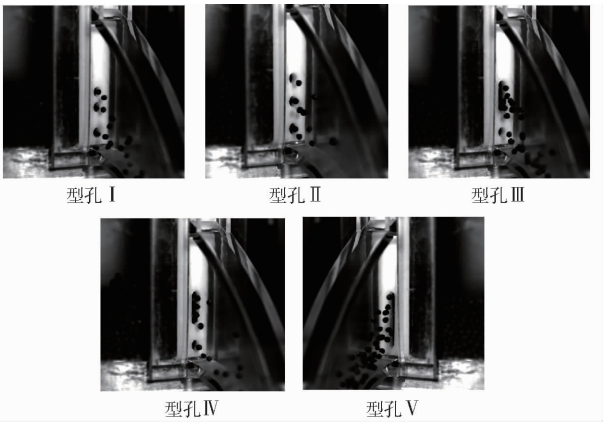


图 22 5 种型孔投种情况

Fig. 22 Five types of pore seed transport trajectories

由图 23 可知,当转速为 115 ~ 205 r/min 时,型孔 I、II 转速与排种速率呈阶段性增长,在 195 r/min 后趋于稳定,最大值分别为 31.38、27.64 g/min,不满足播

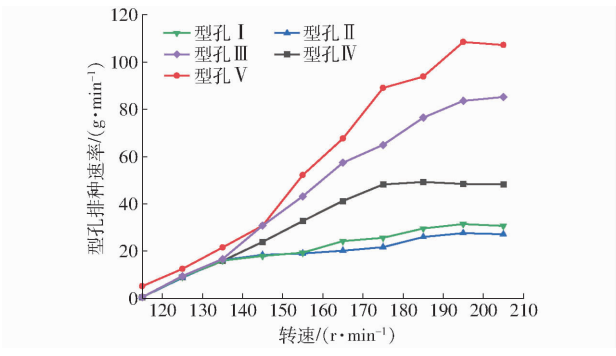


图 23 转速对改进后型孔排量影响

Fig. 23 Influence of rotational speed on improved orifice displacement

种前进速度 12 km/h 所需排种量的要求;型孔 III、V 转速与排种量呈线性增长,但增速过快,在播种作业过程中无法实现播量精准调节。型孔 IV 转速与排种量呈线性缓慢增长,在转速为 115 ~ 135 r/min 时,环状种层高度低于 10.5 mm,仅有圆孔投种,且单行排种量小于 10.71 g/min,可满足作业速度 6 km/h,播量 3 ~ 3.75 kg/hm² 要求;在转速为 135 ~ 185 r/min 时,圆孔和柱孔均可投种,且随着转速增加,环状种层逐渐增高,排种量逐渐增大,在转速为 185 r/min 时达到 45.44 g,后趋于一致,满足播种前进速度 12 km/h 所需的最大播量要求。可实现前进速度、动锥体转速与排量匹配。故集排器最优型孔结构为“圆孔 + 渐变孔柱”组合式型孔(IV),满足 6 ~ 12 km/h 的播种量要求。

4.3 总排量与转速匹配试验

为验证供种控制高度与供种速率 EDEM 仿真试验结果的准确性,选取转速与供种调节高度 h_e 为试验因素,以各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数及平均破损率为评价指标,开展排种性能试验。启动集排器后,在相同转速和供种调节高度下,每隔 2 min 测定 1 min 内集排器总排量,测 5 次,共测 3 组,计算得集排器总排量稳定性变异系数,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,当转速为 115 ~ 205 r/min 时,排种量为 60.96 ~ 355.76 g/min,油菜各行排量一致性变异系数均低于 5.2%,总排量稳定性变异系数低于 1.3%,可见供种调节高度仿真试验结果准确,破损率随着转速的提高而逐渐增大但整体均低于 0.5%,满足 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》对油菜排种性能的要求,且可通过改变转速来满足不同的前进速度及播量的需求。

5 田间播种试验

为检验油菜高速机械离心式集排器的排种性能,

表 4 集排器排种性能试验结果

Tab.4 Seeding performance test results of centralized metering device

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	套筒上移 高度/ mm	各行平均 排种量/g	各行排量	总排种量	平均破 损率/%
			一致性变 异系数/%	稳定性变 异系数/%	
115	3.0	7.62	5.18	1.21	0.12
125	3.5	11.91	4.82	0.93	0.27
135	4.0	17.78	4.21	0.47	0.31
145	4.5	21.86	3.64	0.42	0.34
155	5.0	25.71	2.39	0.55	0.40
165	6.0	29.19	2.41	0.63	0.42
175	6.5	32.14	2.45	0.65	0.44
185	7.5	39.24	2.36	0.68	0.45
195	8.0	44.47	2.32	0.57	0.43
205	7.5	40.23	2.39	0.61	0.47

于 2023 年 9 月 2 日在华中农业大学现代农业科学试验基地开展不同前进速度以及不同播量水平的油菜田间播种试验,如图 24a 所示。田间试验时,以雷沃 M1004-3B 型拖拉机为配套动力,2BYMQ-8 型油菜精量联合直播机为平台,经田间预试验确定拖拉机中 2、高 2 挡对应前进速度为 7.89、11.98 km/h,每



图 24 田间播种试验

Fig.24 Field seeding experiment

个前进速度下播种量为 3.75、4.5 kg/hm²,播种行数为 8 行,行距为 300 mm,播后 45 d 苗期长势如图 24b~24d 所示。

播种 45 d 后对播种区域进行测定,不同前进速度下的 8 行 1 m 内油菜出苗数量,随机选取 5 处,每处选取 1 m,即 5 处 2.3 m×1 m 播种区域,统计单位面积范围内 8 行油菜苗总数量及各行植株分布一致性变异系数,结果如表 5 所示。

表 5 油菜植株田间分布

Tab.5 Field distribution for rapeseed

前进速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	播种量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	集排器转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	1 m 内植株数量								每平方米 植株数量/ ($\text{株} \cdot \text{m}^{-2}$)	各行株数一 致性变异 系数/%	稳定性变 异系数/%
			1	2	3	4	5	6	7	8			
7.89	3.75	125	9.7	11.3	10.1	11.4	12.4	12.7	10.9	9.4	43.95	10.26	10.81
	4.50	135	12.2	14.7	13.4	14.9	15.3	16.2	14.8	13.1	57.30	8.57	11.21
11.98	3.75	145	8.9	10.5	10.8	12.5	12.3	12.1	11.5	9.8	44.20	10.85	12.07
	4.50	155	12.1	12.3	13.6	13.7	14.9	15.6	14.4	11.9	54.25	9.42	11.44

由表 5 可知,不同作业速度及播种量下油菜植株一致性变异系数小于 11%,种植密度为 43~58 株/m²,稳定性变异系数低于 13%。不同作业速度及播量下,各行植株分布均匀性均较好,苗期长势较好,满足油菜精量播种要求。

6 结论

(1)结合油菜机械物理特性及种植农艺要求,设计一种适用于高速作业的油菜机械离心式集排器,其采用被动方式充种、“圆孔+渐变孔柱”组合式型孔投种,可匹配拖拉机前进速度 6~12 km/h。

(2)应用 EDEM 仿真分析了不同限种套筒结构参数下集排器初始种量、临界转速及环状种层最大高度的变化趋势,开展了供种调节高度对供种速率调节量的影响试验。试验结果表明:限种套筒下摆高度越低、倾角越小,初始种量越大,临界转速越低,环状种

层最大高度越高;供种调节高度为 3~8 mm 时,供种速率在 64.95~357.54 g/min 范围内可调。开展了不同限种套筒结构下的台架试验,试验结果表明限种套筒下摆高度为 15 mm、下摆倾角为 115°时,集排器排种性能在各转速下皆较优。

(3)台架试验分析了转速对环状种层高度及单孔排种量的影响规律,得到适合高速的较优型孔结构参数,验证了在此较优参数组合下不同转速对集排器排种性能的影响,试验结果表明:转速为 115~205 r/min 时,排种速率为 60.96~355.76 g/min,油菜各行排量一致性变异系数均低于 5.2%,总排量稳定性变异系数低 1.3%,破损率低于 0.5%。田间试验表明:在前进速度为 7.89、11.98 km/h 时,油菜各行植株数量分布一致性变异系数低于 11%,油菜种植密度为 43~58 株/m²,植株田间分布稳定性变异系数低于 13%,集排器可实现高速播种,满足油菜播种性能要求。

参 考 文 献

- [1] 刘成,冯中朝,肖唐华,等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485–489.
LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(4): 485–489. (in Chinese)
- [2] PAWAR D A, JOSHI D C, SHARMA A K, et al. Design and development of precision planter for paddy direct seeding[J]. Indian Society of Agricultural Engineers, 2020, 57(4): 302–314.
- [3] LEI Xiaolong, HU Hongji, REN Wanjun. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203(203): 22–33.
- [4] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 12–22.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12–22. (in Chinese)
- [5] 李晓冉,廖庆喜,王磊,等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 35–48.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 35–48. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 48–51, 95.
LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48–51, 95. (in Chinese)
- [8] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77–84. (in Chinese)
- [9] 王都,舒彩霞,廖宜涛,等. 集排离心式油菜精量排种器充种控制方法与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(6): 182–189.
WANG Du, SHU Caixia, LIAO Yitao, et al. Control method test of seed-filling of centralized centrifugal precision seed-metering device for rapeseed[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(6): 182–189. (in Chinese)
- [10] MANBUS D L, SHARDA A, FLIPPO D, et al. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142(Part A): 314–325.
- [11] 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, 161 120–134.
- [12] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10–18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10–18. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 62–72, 97.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62–72, 97. (in Chinese)
- [15] 李沐桐,李天宇,官晓东,等. 锥盘排种器离心推送结构设计与充种机理分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 77–85.
LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design on push structure of centrifugal cone seed-metering device and its filling mechanism analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 77–85. (in Chinese)
- [16] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 高速播种机玉米姿控驱动式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 108–119.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 108–119. (in Chinese)
- [17] 王东伟,纪瑞琪,何晓宁,等. 驱动组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 59–70, 149.
WANG Dongwei, JI Ruiqi, HE Xiaoning, et al. Drive-guided combination slot-assisted seed-attached air-absorbing peanut

high-speed precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 59 – 70, 149. (in Chinese)

[18] 姚露,廖庆喜,王磊,等. 油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 78 – 88.
YAO Lu, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiment of spiral seed feeding device in spinning disc high-speed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 78 – 88. (in Chinese)

[19] 姚露,廖庆喜,沈文惠,等. 基于 Bezier 曲线的油菜旋转盘式精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 56 – 66, 83.
YAO Lu, LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, et al. Design and experiment of spinning disc precision centralied metering device for rapeseed based on Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 56 – 66, 83. (in Chinese)

[20] 姚露. 油菜旋转盘式精量集排器设计及其工作机理[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
YAO Lu. Design and working mechanism of spinning disc precision centralized metering device for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[21] 尤晓东. 振动对种子流出过程的作用分析[J]. 农业科技与装备, 2014(12): 20 – 21.
YOU Xiaodong. Analysis of vibration function in the process of seed outflow[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014(12): 20 – 21. (in Chinese)

[22] 马继军,朱红. 散粒体流体力学与农业工程[J]. 山东工程学院学报, 1997(3): 61 – 63.
MA Jijun, ZHU Hong. Flow mechanics of particle material agricultural engineering[J]. Journal of Shandong Institute of Eng. , 1997(3): 61 – 63. (in Chinese)

[23] 雷水旺,华云龙,宋建农,等. 谷物穿过水平孔口重力流动的流量[J]. 农业工程学报, 1992, 7(2): 45 – 50.
LEI Shuiwang, HUA Yunlong, SONG Jiannong, et al. Grain gravity flow rate through horizontal holes[J]. Transactions of the CSAE, 1992, 7(2): 45 – 50. (in Chinese)

[24] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 40 – 46.
CAO Xiuying, LIAO Qingxi, CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 40 – 46. (in Chinese)

[25] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109 – 114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109 – 114. (in Chinese)

(上接第 153 页)

[19] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982:256 – 258.

[20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:270 – 273.

[21] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):37 – 46.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of seed unloading mechanism of air suction seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37 – 46. (in Chinese)

[22] 史嵩,刘虎,位国建,等. 基于 DEM – CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5): 54 – 66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM – CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54 – 66. (in Chinese)

[23] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 – 68. (in Chinese)

[24] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22): 36 – 42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 – 42. (in Chinese)

[25] 王英博,李洪文,何进,等. 机械式小麦射播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(21):1 – 10.
WANG Yingbo, LI Hongwen, HE Jin, et al. Parameters optimization and experiment of mechanical wheat shooting seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 1 – 10. (in Chinese)