

油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验

施彬彬¹ 王传奇¹ 陈雪儿¹ 何凯威¹ 廖庆喜^{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: 针对现有油麦兼用气送式集排器供种装置兼用供种结构复杂、大播量工况下供种量不足等问题,设计了一种立槽式高通量油麦兼用供种装置。阐述了立槽式供种装置工作原理,确定了变容积供种机构主要结构参数,分析了供种转速和立式槽轮叶片伸出量等工作参数对供种装置油菜、小麦供种性能的影响规律,明确了油菜、小麦供种性能较优时的工作参数范围。EDEM 仿真试验结果表明,立槽式供种装置具有良好的破拱充种性能及供种过程种子运动轨迹一致性,当小麦供种转速不小于 20 r/min、叶片伸出量不小于 9 mm 时,可有效避免脉动供种问题对其供种性能的影响,实现油麦兼用稳定供种。台架试验结果表明,排种油菜时,供种转速为 10~30 r/min,供种装置供种速率可达 66.20~210.41 g/min,供种速率稳定性变异系数小于 2.3%,种子破损率小于 0.65%;排种小麦时,供种转速为 20~50 r/min,叶片伸出量为 9~21 mm,供种装置供种速率可达 1184.20~6080.44 g/min,供种速率稳定性变异系数小于 1.9%,种子破损率小于 0.4%。田间试验结果表明,当油菜、小麦播种量分别为 6.5、180 kg/hm²时,搭载立槽式供种装置播种机总播量误差分别为 1.68% 和 4.16%,出苗后测量得油菜、小麦平均株距分别为 56.96、23.34 mm,各行株数一致性变异系数分别为 16.92%、18.02%,满足油麦兼用播种作业标准要求。

关键词: 油菜; 小麦; 立槽式供种装置; 变容积空间体积; 气送式集排器

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0102-14

OSID:



Design and Experiment of Vertical Groove Seed Feeding Device in Air-assisted Centralized Metering Device for Rapeseed and Wheat

SHI Binbin¹ WANG Chuanqi¹ CHEN Xueer¹ HE Kaiwei¹ LIAO Qingxi^{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: Aiming at the problems of complex seeding structures and insufficient seeding rates under high-volume conditions in existing pneumatic seeding devices for both rapeseed and wheat, a vertical trough high-throughput seeding device was designed. The working principle of the seeding device was expounded, the main structural parameters of the variable volume seeding mechanism were determined, the effects of working parameters such as seeding speed and the extension length of vertical trough wheel blades on the seeding performance for rapeseed and wheat were analyzed, and the optimal working parameter ranges for the seeding performance of rapeseed and wheat were clarified. The EDEM simulation test results showed that vertical trough seed supply device had good arch-breaking and seed-filling performance, as well as consistency of seed movement trajectory during seed supply. When the seeding speed for wheat was not less than 20 r/min and the blade extension length was not less than 9 mm, it can effectively avoid pulsation seeding issues and achieve stable seeding for both rapeseed and wheat. Bench test results indicated that when seeding rapeseed at a seeding speed of 10~30 r/min, the seeding device's seeding rate can reach 66.20~210.41 g/min, with coefficient of variation for seeding rate stability of less than 2.3% and seed breakage rate of less than 0.65%. When seeding wheat at seeding

收稿日期: 2024-06-10 修回日期: 2024-06-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)、国家自然科学基金项目(51975238)、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12-17)和湖北省农机装备补短板项目(202310)

作者简介: 施彬彬(1998—),男,博士生,主要从事农机装备智能化研究,E-mail: shibinbin@webmail.hzau.edu.cn

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

speed of 20 ~ 50 r/min and blade extension length of 9 ~ 21 mm, the seeding device's seeding rate can reach 1 184.20 ~ 6 080.44 g/min, with coefficient of variation for seeding rate stability of less than 1.9% and seed breakage rate of less than 0.4%. Field test results showed that when the seeding rates for rapeseed and wheat was 6.5 kg/hm² and 180 kg/hm², respectively, the total seeding errors for the seeder equipped with the vertical trough seeding device was 1.68% and 4.16%, respectively. Post-emergence measurements indicated that the average plant spacing for rapeseed and wheat was 56.96 mm and 23.34 mm, respectively, and the coefficient of variation of the consistency of each row was 16.92% and 18.02%, respectively, meeting the standard requirements of seeding operations.

Key words: rapeseed; wheat; vertical groove seed feeding device; variable volume of seed space; air-assisted centralized metering device

0 引言

油菜、小麦是中国重要油粮作物和南方地区主要冬季种植作物,两者播期毗邻,机械化播种工序相似^[1-2],研发油麦兼用精量播种机可显著降低南方地区机械化生产固定资产投资及冬闲田抛荒概率。气送式排种技术因其种子外形尺寸适应性强、作业效率高等优点^[3-4],可用于兼用播种^[5-6],目前气送式排种器多采用“机械定量供种+气流分配输种”方式排种^[7],供种装置是排种器排种过程中连续稳定种子流供给的关键部件^[8]。由于油菜种子粒径小、球形度高、流动性好,而小麦种子粒径是油菜种子2~4倍、表面粗糙、流动性差,且小麦播种量是油菜的25~65倍,导致供种装置在油麦兼用时稳定充种、足量供种难度较大。

为提高供种装置充种性能,国内外学者通过在充种室内添加激振或搅种装置扰动种群,提高种群离散度^[9-13];采用分层充种室或多充种室串联充种方式维持适宜种层厚度,减少因种间挤压力及摩擦力造成的种层“拖带现象”^[14];根据种子机械物理特性设计匹配槽孔曲线结构^[15-16],并增加导种槽或导种条辅助充种,改善槽孔囊种性能等方式^[17-19],有效实现了供种装置针对单一作物供种时的稳定充种性能。为实现兼用供种,现有研究多在单一作物专用供种装置基础上,通过不同作物更换对应槽轮方式满足多作物兼用充种需求^[20];通过调整槽轮数量、调节槽轮转速及改变槽孔容积等方式满足多作物兼用播量需求^[6],研究结果基本可实现供种装置兼用供种需求,但针对油麦兼用等种子机械物理特性存在多维度差异、播量相差较大工况时,仍存在供种装置结构复杂、体积过大,需增加搅种装置提高种群流动性,大供种量精度不足等问题。

针对上述问题,本文设计一种油麦兼用型立槽式供种装置,该供种装置基于内部容种空间封闭容种原理,采用集取种、搅种、携种功能为一体,可大幅调节容种空间容积的变容积供种机构,以实现小体

积、高通量、油麦兼用供种需求。通过理论分析确定其主要结构参数,通过 EDEM 仿真验证其油菜、小麦供种性能,通过台架试验得到其油菜、小麦供种性能较优时的工作参数范围,通过田间试验检验搭载立槽式供种装置的气送式集排器实际油麦兼用排种性能,以期为油麦兼用气送式集排器供种装置结构设计提供参考。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构

油麦兼用气送式集排器主要由直流风机、文丘里管、步进电机、立槽式供种装置、混种管、分配器、增压管、输种管及种箱等组成,总体结构如图1所示。其中,立槽式供种装置是实现气送式集排器油麦兼用排种的关键部件,主要由外壳体、挡种块、变容积供种机构、导流板、锁紧螺母、传动主轴等组成,通过调整变容积供种机构容种空间体积可实现油麦种子兼用供种。

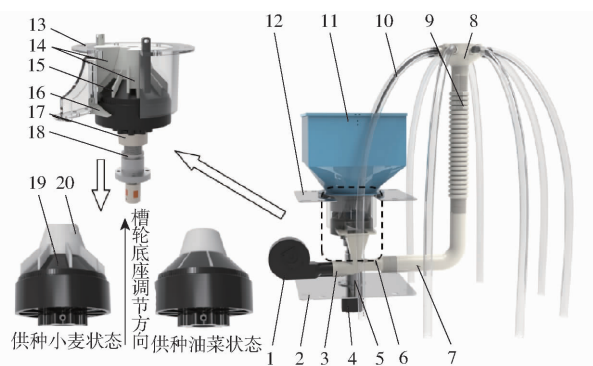


图1 油麦兼用气送式集排器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat

1. 直流风机 2. 下支撑板 3. 文丘里管 4. 步进电机 5. 法兰盘支撑柱 6. 立槽式供种装置 7. 混种管 8. 分配器 9. 增压管 10. 输种管 11. 种箱 12. 上支撑板 13. 外壳体 14. 挡种块 15. 变容积供种机构 16. 导流板 17. 锁紧螺母 18. 传动主轴 19. 槽轮底座 20. 立式槽轮

变容积供种机构由立式槽轮及槽轮底座组成,其中立式槽轮上端与挡种块内表面贴合,下端嵌套

于变容积调节器内,周向均布有9个呈平行四边形叶片,安装位置与传动主轴相对固定,相邻两叶片可与挡种块、槽轮底座、外壳体配合形成扇形锥槽状容种空间;槽轮底座底端设有调节螺母,可通过螺纹连接在传动主轴上实现轴向移动、固定,侧边设有环状深凹槽,可与挡种块、外壳体配合形成环槽状容种空间。

通过改变立式槽轮叶片相对于槽轮底座的伸出量,可将变容积供种机构分为供种油菜和供种小麦2种状态。由图1可知,当变容积供种机构处于供种小麦状态时,叶片伸出量大于0,供种机构依靠立式槽轮叶片间锥槽状空间和槽轮底座侧边环槽状空间容种,容种空间体积与伸出量成正比;随着槽轮底座上移,叶片伸出量逐渐减小直至为0,此时变容积供种机构处于供种油菜状态,仅依靠槽轮底座侧边环槽状空间容种。

1.2 工作过程

集排器工作时,立槽式供种装置在电机驱动下按照播量要求输出连续均匀的油菜、小麦定量种子流,种子流在自身重力及离心力作用下自落种口落入文丘里管中,与风机产生的高速气流交汇、混合形成气固两相流,两相流经混种管进一步混合及增压管增压后被输送至分配器,由分配器均匀分配后经输种管排出,进而完成排种过程。

通过外壳体、挡种块及变容积供种机构间的相互配合,可划分立槽式供种装置内部空间为充种区、携种区、投种区及过渡区,分别以I、II、III、IV表示,如图2所示。供种装置工作时,种子依靠自身重力从种箱落下填满充种区内的容种空间,电机通过传动主轴驱动变容积供种机构周向旋转,种子在自身重力、种群压力、立式槽轮叶片扰动力等作用下随之产生周向运动;当转动至携种区时,锥槽状及环槽状容种空间外部的种群被挡种块阻挡滞留在充种区,容种空间内部的种群在侧壁支持力、种群间摩擦力等作用下穿过携种区转至投种区;到达投种区后,随着外壳体对种群支持力的消失,种群在自身重力及离心力作用下掉入落种口,供种装置实现无序种群向连续均匀定量种子流的转变。

2 变容积供种机构设计与参数分析

变容积供种机构是实现立槽式供种装置高通量兼用稳定供种的核心部件,由于相较于油菜种子,小麦种子播量需求较大、流动性较差,且供种过程需同时使用锥槽状及环槽状容种结构,因此为实现油麦兼用,变容积供种机构主体结构参数设计以小麦种子为依据,同时兼顾油菜种子供种需求。选取长江

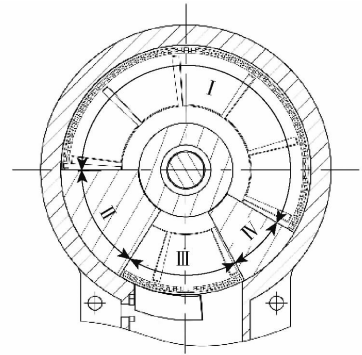


图2 立槽式供种装置供种环节划分示意图
Fig.2 Schematic of division of seed supply process in vertical groove seed feeding device

中下游地区代表性小麦、油菜品种,测定其部分机械物理特性参数如表1所示,测定发现小麦种子整体呈纺锤状,表面粗糙且在长轴方向存在凹陷,种群流动性较差;油菜种子呈类球形,表面光滑但易破损,种群流动性较好。

表1 油菜、小麦种子机械物理特性参数
Tab.1 Mechanical and physical properties of rapeseed and wheat seeds

参数	郑麦 9023	华油杂 62
长度/mm	6.28	2.40
宽度/mm	3.12	2.18
厚度/mm	2.69	2.05
几何平均粒径/mm	3.75	2.21
球形度/%	59.70	92.08
千粒质量/g	42.82	3.77
自然休止角/(°)	29.60	27.10
含水率/%	8.10	4.58

2.1 立式槽轮结构参数

立式槽轮集取种、搅种、小麦携种功能为一体,是影响供种装置小麦供种性能、决定供种装置整体尺寸的重要部件,主要由锥台、柱体及柱体外侧多个平行四边形叶片等组成,如图3所示。

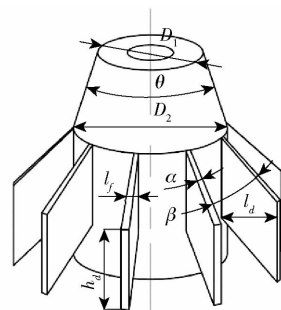


图3 立式槽轮结构示意图

Fig.3 Schematic of vertical slotted wheel structure

由于种箱出种口径较小时,种箱侧壁处种群与中心处种群流速差异较大,易在出种口处产生“结拱”现象^[8],导致种群流动堵塞、离散度不足,进

而造成供种装置取种性能较差、供种不均等问题,设计立式槽轮顶部为锥面光滑过渡的正圆锥台结构,通过锥顶对出种口处种群扰动与锥面对种群导向作用,提高立式槽轮取种能力,其顶角需满足^[21]

$$\theta \leq 180^\circ - 2\theta_0 \quad (1)$$

式中 θ ——锥台顶角, ($^\circ$)

θ_0 ——小麦种子自然休止角,取 29.60°

计算得 $\theta \leq 120.8^\circ$, 由于锥台对种群的扰动性能与高度成正比,导向性能与顶角成反比,因此锥台高度越高、顶角越小,立式槽轮取种性能越好,但锥台高度过高、顶角过小时,锥台强度较差且易造成种子破损,综合考虑后取 θ 为 30° ,锥台高度等于底圆半径;同时,为避免连锁拱现象,锥台顶圆直径需不小于种子直径的 $6 \sim 12$ 倍^[22],可得

$$\begin{cases} D_1 \geq (6 \sim 12)d_0 \\ D_2 = \frac{D_1}{1 - \tan \frac{\theta}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中 D_1 ——锥台顶圆直径,mm

d_0 ——小麦种子几何平均粒径,取 3.75 mm

D_2 ——锥台底圆直径,mm

计算得 $D_1 \geq 45$ mm,考虑供种装置小体积设计需求,锥台尺寸应取适宜范围内较小值,因此确定 D_1 为 45 mm、 D_2 为 62 mm。

槽轮叶片是立式槽轮实现搅种、小麦携种功能的载体,其长度、宽度及数量直接影响供种装置供种均匀性及供种量稳定性。为保证叶片强度、防止供种过程中叶片与挡种块间卡种,设计叶片最小宽度不小于 1 个油菜种子几何平均粒径、最大宽度不大于 1 个小麦种子几何平均粒径,即

$$\begin{cases} l_{f\min} \geq d_1 \\ l_{f\max} \leq d_0 \\ l_{f\min} = \frac{\alpha\pi D_2}{360^\circ} \\ l_{f\max} = \frac{\alpha\pi(D_2 + 2l_d)}{360^\circ} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $l_{f\min}$ ——槽轮叶片最小弧段宽度,mm

$l_{f\max}$ ——槽轮叶片最大弧段宽度,mm

d_1 ——油菜种子几何平均粒径,取 2.21 mm

α ——槽轮叶片宽度对应槽轮轴心角, ($^\circ$)

l_d ——槽轮叶片长度,mm

计算得 $\alpha \geq 4^\circ$, 由于锥槽状空间容种量与 α 成反比,与 l_d 成正比,考虑供种装置大播量设计需求,取 α 为 4° ,代入式(3)取整后得到 l_d 为 23 mm。由立式槽轮结构可知,槽轮叶片数为

$$Z = \frac{360^\circ}{\alpha + \beta} \quad (4)$$

式中 Z ——立式槽轮叶片数

β ——单个槽孔对应槽轮轴心角, ($^\circ$)

槽轮叶片数具有适宜区间,当叶片数过大时,两叶片之间所夹槽孔最小弧段弧长较小,槽孔充种较困难;叶片数过小时,槽孔最小弧段弧长较大,种群单位时间内充入量较大,但叶片数较少对种群扰动性能不足,易造成充种区内种群“架空”,进而导致脉动供种现象发生。根据预试验结果,取槽孔最小弧段弧长适宜范围为小麦种子几何平均粒径的 $4 \sim 7$ 倍,即

$$4d_0 < \frac{\beta\pi D_2}{360^\circ} < 7d_0 \quad (5)$$

计算得 β 为 $27.72^\circ \sim 48.52^\circ$,代入式(4)取整后可得 Z 为 $7 \sim 11$,综合考虑后取 Z 为 9 。

2.2 槽轮底座结构参数

槽轮底座是实现立槽式供种装置油麦兼用精量供种的关键部件,主要由侧边环槽、柱体及顶部锥台等组成。通过分析工作原理可知,立槽式供种装置理论供种速率由单位时间内内容种空间种量及叶片上方带动层种量组成^[21],考虑带动层种群易造成变容积供种机构与挡种块间卡种而影响供种性能,采用在挡种块内表面添加柔性清种毛刷方式隔绝带动层种群,但由于油菜种子三轴尺寸较小、流动性较好,供种时部分油菜种子易在外侧种群及变容积供种机构复合作用力下穿过柔性毛刷进入投种区,因此立槽式供种装置理论供种速率可表示为

$$\begin{cases} Q_x = Q_z + Q_h \\ Q_y = Q_h + Q_d \\ Q_z = PV_z n \varepsilon \gamma \\ Q_h = V_h n \varepsilon \gamma \\ Q_d = kV_d n \varepsilon \gamma \end{cases} \quad (6)$$

式中 Q_x ——供种装置小麦供种速率, g/min

Q_z ——单位时间锥槽容种空间供种量, g/min

Q_h ——单位时间环槽容种空间供种量, g/min

Q_y ——供种装置油菜供种速率, g/min

Q_d ——单位时间带动层种群量, g/min

P ——立式槽轮槽孔数,取 9

V_z ——单个锥槽容种空间体积, mm^3

n ——供种装置传动主轴转速, r/min

ε ——种子充满系数,取 0.8

γ ——种子密度,油菜种子取 6.2×10^{-4} g/ mm^3 ,

小麦种子取 8×10^{-4} g/ mm^3

V_h ——槽轮底座环槽容种空间体积, mm^3

k ——油菜种子清种毛刷通过系数,取 0.2

V_d ——带动层种群分布空间体积, mm^3

槽轮底座环槽侧壁径向截面曲线设计为倾斜直线-圆弧组合型,如图4所示,通过倾斜直线结构提

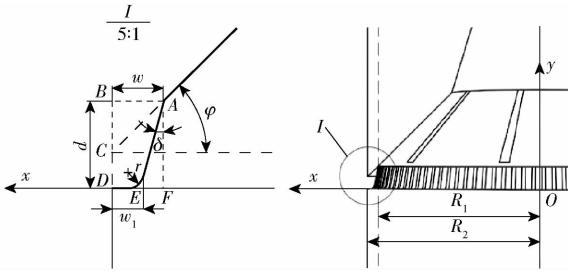


图4 槽轮底座环槽截面结构示意图

Fig.4 Structure of radial section of deep recess of variable volume regulator

高立式环槽充种效率;通过底部圆弧结构实现投种过程种子平稳运移。同时,为保证携种过程中种群随环槽侧壁转动,设计环槽侧壁表面周向均布竖状小槽孔,以增大种群与环槽侧壁间摩擦力,考虑单个竖状槽孔宽度远小于油菜种子几何平均粒径,容纳种子的概率几乎为零,因此理论计算时可忽略此结构对环槽容种空间体积的影响,可得

$$V_h = \frac{\pi d(R_2^2 - R_1^2)S_c}{S} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} R_1 = \frac{D_2}{2} + l_d + \tau \\ R_2 = R_1 + w \end{cases} \quad (8)$$

式中

- d ——槽轮底座环槽深度,mm
- R_2 ——槽轮底座柱体半径,mm
- R_1 ——槽轮底座锥台底圆半径,mm
- S_c ——环槽容种空间截面面积,mm²
- S ——环槽容种空间截面外切矩形面积,mm²
- τ ——立式槽轮安装安全距离,取2 mm
- w ——槽轮底座环槽宽度,mm

其中,环槽容种空间截面外切矩形即为矩形 $ABDF$,环槽容种空间截面即为图形 ACD ,由于环槽底部弧段较短,因此环槽容种空间截面面积 S_c 可近似看作外切矩形面积 S 与三角形 ABC 面积 S_1 、三角形 AEF 面积 S_2 之差,即

$$\begin{cases} S_c = S - S_1 - S_2 \\ S = wd \\ S_1 = \frac{w^2 \tan \varphi}{2} \\ S_2 = \frac{d^2 \tan \delta}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 φ ——槽轮底座锥体锥面倾角,(°)

δ ——槽轮底座环槽侧壁倾角,(°)

参考《农业机械设计手册》,槽轮底座锥体锥面倾角 φ 适宜范围为 $30^\circ \sim 50^\circ$,环槽侧壁倾角 δ 需小于种子自然休止角以提高环槽充种能力,综合考虑后确定 φ 为 45° , δ 为 15° 。同时,为避免油菜种子在环槽中运动规律紊乱并提高环槽投种能力,环槽底

部宽度 w_1 取值范围应在 $1 \sim 1.5$ 个油菜种子几何平均粒径之间,且底部圆弧半径 r 应与油菜种子几何平均粒径半径相等,圆整后确定 $w_1 = 3$ mm, $r = 1$ mm,代入式(6)~(9)可得

$$Q_h = \pi n \varepsilon \gamma (w + 112) (wd - 0.5w^2 - 0.134d^2) \quad (10)$$

其中

$$d = \frac{w - 2.8}{\tan 15^\circ} \quad (11)$$

而由图1可知,锥槽状容种空间与带动层种群空间均为环状正圆锥台结构,体积可由几何图形空间结构求得,以单个锥槽容种空间为例,构建其空间图形如图5所示,定义圆锥体 $PHIO_1$ 为 U_1 、 $QJKO_2$ 为 U_2 、 $PLMQ$ 为 U_3 、 $QNSO_3$ 为 U_4 ,圆柱体 $QMSO_3$ 为 V_1 、 O_1IKO_2 为 V_2 ,可得

$$V_z = \frac{\beta [V_{U_1} + V_{V_2} - V_{U_2} - (V_{U_3} + V_{V_1} - V_{U_4})]}{360^\circ} \quad (12)$$

式中

- V_{U_1} ——圆锥体 U_1 体积,mm³
- V_{V_2} ——圆柱体 V_2 体积,mm³
- V_{U_2} ——圆锥体 U_2 体积,mm³
- V_{U_3} ——圆锥体 U_3 体积,mm³
- V_{V_1} ——圆柱体 V_1 体积,mm³
- V_{U_4} ——圆锥体 U_4 体积,mm³

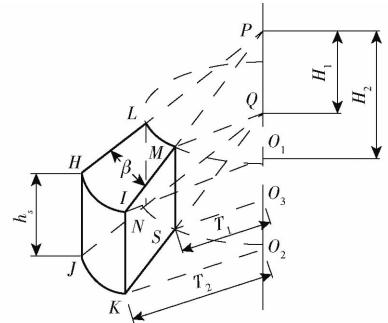


图5 立式槽轮单个槽孔有效容种空间结构图

Fig.5 Structure of single slot hole effective seed space of vertical groove wheel

由于立式槽轮叶片呈平行四边形,可得

$$\begin{cases} V_{U_1} = V_{U_2} = \frac{\pi T_2^2 H_2}{3} \\ V_{U_3} = V_{U_4} = \frac{\pi T_1^2 H_1}{3} \\ V_{V_1} = \pi T_1^2 h_s \\ V_{V_2} = \pi T_2^2 h_s \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} T_1 = \frac{D_2}{2} \\ T_2 = R_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中 T_2 ——圆锥体 $PHIO_1$ 半径,mm

H_2 ——圆锥体 $PHIO_1$ 高度, mm
 T_1 ——圆锥体 $PLMQ$ 半径, mm
 H_1 ——圆锥体 $PLMQ$ 高度, mm
 h_s ——槽轮叶片相对槽轮底座伸出量, mm

结合式(6)、(12)~(14)可得

$$Q_z = \frac{Pn\epsilon\gamma\pi\beta h_s(w^2 + 112w + 2175)}{360^\circ} \quad (15)$$

同理可得,单位时间内带动层种群量为

$$Q_d = kn\epsilon\gamma\pi h_a(w^2 + 112w + 2175) \quad (16)$$

式中 h_a ——带动层种群厚度,取1个油菜种子几何平均粒径,即2.21 mm

由于供种装置供种量需满足播种机农艺要求播量,而播种机播种速率为

$$Q_M = \frac{5MB_m V_m}{3} \quad (17)$$

式中 Q_M ——播种机农艺要求播种速率, g/min

M ——播种机农艺要求播量, kg/hm²

B_m ——播种机工作幅宽, m

V_m ——播种机作业速度, km/h

结合南方地区油菜、小麦种植场景,确定农艺要求油菜、小麦播量 M 分别为 6.5、180 kg/hm², B_m 为 2.3 m, V_m 为 2~8 km/h, 供种装置转速 n 对应油菜、小麦供种适宜范围分别为 10~30 r/min 和 10~50 r/min^[23-24]。代入式(6)、(10)、(11)、(16)、(17)后可得满足油麦兼用播种需求的 w 为 5.5 mm, d 为 10 mm, h_s 极限值为 21 mm。

3 仿真试验

为验证所设计立槽式供种装置的结构可行性及油麦兼用供种性能,开展 EDEM 离散元仿真试验,观察供种过程中种子运动轨迹,分析种子运动规律,并探究供种转速及立式槽轮叶片伸出量等因素对供种装置油菜、小麦供种性能的影响。

3.1 仿真模型建立

为提高仿真效率,仅保留供种装置种箱、外壳体、变容积供种机构、挡种块、传动主轴等关键部件,并将变容积供种机构、传动主轴等同步旋转部件合并为整体,将简化后模型导入 EDEM 2020 前处理模块中,于种箱上方建立颗粒工厂,使种子自由下落至充种室,依据表1的油菜、小麦种子三轴尺寸,构建仿真颗粒模型三轴尺寸分别为 2.0 mm × 2.0 mm × 2.0 mm、6.5 mm × 3.2 mm × 3.2 mm,颗粒模型尺寸呈正态分布,标准差设为 0.05 mm,仿真模型如图6所示。

种子与种子、种子与供种装置间均采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型,设置种箱材料为铝合金,

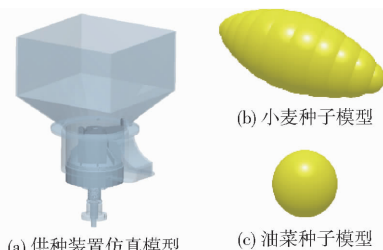


图6 仿真模型

Fig. 6 Simulation models

变容积供种机构、外壳体和挡种块材料均为 ABS,具体仿真参数^[25-26]见表2、3。

表2 仿真颗粒与接触材料特性参数

Tab. 2 Characteristic parameters of simulated particles and contact materials

项目	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	剪切模量/Pa
小麦种子	1 350	0.42	5.1 × 10 ⁷
油菜种子	1 060	0.25	1.1 × 10 ⁷
ABS	1 060	0.394	8.96 × 10 ⁸
铝合金	2 700	0.3	2.7 × 10 ¹⁰

表3 仿真颗粒与仿真模型接触参数

Tab. 3 Contact parameters between seed particles and simulation model

项目	参数	小麦	油菜
种子-种子	碰撞恢复系数	0.42	0.6
	静摩擦因数	0.35	0.5
	动摩擦因数	0.05	0.01
种子-ABS	碰撞恢复系数	0.6	0.75
	静摩擦因数	0.4	0.3
	动摩擦因数	0.05	0.01
种子-铝合金	碰撞恢复系数	0.5	0.6
	静摩擦因数	0.4	0.3
	动摩擦因数	0.05	0.01

3.2 仿真试验方法

设置总仿真时间为 8 s, 0~0.5 s 为颗粒工厂生成种子阶段,其中油菜、小麦颗粒工厂数量分别为 3 × 10⁵ 和 7.5 × 10⁴,种子自由下落完成后静置 0.5 s,传动主轴从第 1 秒开始转动。依据前述理论分析,小麦供种试验时,分别设置供种转速 n 为 10、30、50 r/min,立式槽轮叶片伸出量 h_s 为 5、9、13、17、21 mm 开展全因子试验;油菜供种试验时,分别设置供种转速 n 为 10、20、30 r/min,立式槽轮叶片伸出量 h_s 为 0 mm 开展全因子试验,仿真完成后运用 EDEM 后处理模块提取各组试验仿真数据进行分析。

3.3 仿真结果

3.3.1 供种装置供种过程

为直观观察种箱内种群填充性能,分析供种装置供种过程种子运动规律,以供种转速为 30 r/min、

叶片伸出量为 13 mm 时的小麦供种试验为例,选取种子颗粒运动速度为指标,在第 8 秒仿真时间为种群添加颜色标识;同时在供种装置内部不同区域随机选取 9 颗种子颗粒,绘制其 1~8 s 仿真时间内运动轨迹曲线,得到仿真结果如图 7 所示。

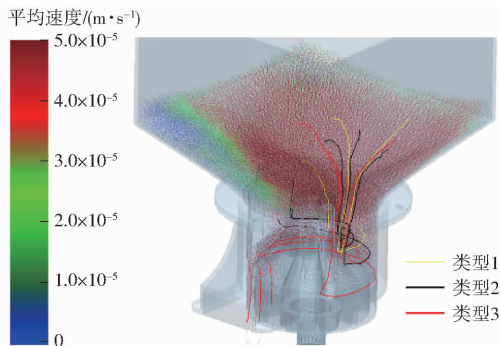


图 7 供种装置仿真结果

Fig. 7 Simulation results of seed supply device

由图 7 可知,第 8 秒仿真时间时,种箱内种群处于向供种装置充种区运动的状态,其中位于充种区上方的种群运动速度较大,位于种箱侧壁及夹角处的种群运动速度较小,且随着种子空间位

置向充种区靠近,种子运动速度呈递增趋势,表明供种装置工作时,种箱内种群流动性良好,未出现结拱堵塞现象,供种装置破拱充种性能与理论设计结论相符。同时,通过分析 9 颗选中种子的运动轨迹曲线后发现,供种装置内种子依据运动轨迹不同主要分为 3 种类型,其中类型 1 为开始供种时种子在种箱内的位置距离充种区较远,种子向充种区转移却未能进入充种区或进入充种区但停滞在充种区中程位置类型;类型 2 为供种时种子顺利进入充种区但未能进入容种空间,在槽轮叶片带动下种子可穿过充种区抵达携种区边缘,但因被挡种块阻挡未能进入携种区类型;类型 3 为供种时种子顺利进入充种区容种空间内部,并在槽轮叶片带动下依次穿过充种区、携种区及投种区后被顺利排出类型。

以种子重力势能及运动速度为指标分析种子运动过程,选取种箱底部出种平面为零势能面,导出 9 颗选中种子 1~8 s 仿真时间内重力势能及运动速度随时间的变化曲线如图 8 所示,图中①、②、③表示种子运动过程发生显著变化的时间节点。

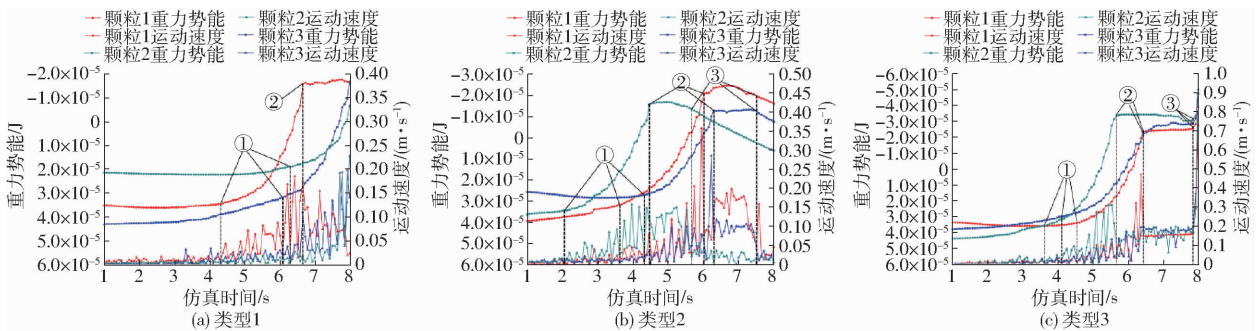


图 8 不同类型种子运动过程参数随时间的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of parameters of seed movement process with time for different types of seeds

由图 8 可知,相同类型种子重力势能及运动速度整体变化规律基本一致;不同类型种子势能及速度变化规律在运动前期相似,在运动后期差异较大。通过对比各类型种子运动轨迹与运动过程参数变化曲线后发现,1 s~节点①为种子自种箱内不同位置运动至供种装置充种区上方阶段,此时种子作近似平移运动,势能呈缓慢递减趋势,速度呈缓慢递增趋势,不同种子因第 1 秒时与充种区距离不同导致此阶段运动时长差异较大;节点①~②为种子自种箱向供种装置充种区充填阶段,此时种子作近似垂直下落运动,势能急剧降低,速度急剧增加,各类型种子在此阶段运动过程基本一致,充填时长均为 2 s 左右;节点②~③为种子在充种区内随槽轮叶片作周向旋转运动阶段,此时不同类型种子的势能及速度均呈小幅度无规则起伏变化,表明完成供种过程运移种子运动规律一致性较好。

节点③之后不同类型种子的运动过程参数变化规律差异明显,其中类型 1 种子因距离充种区较远,受仿真时长限制暂时未到达此阶段;类型 2 种子因旋转运动阶段被挡种块阻挡未能进入携种区,并在后方同类型种群的持续作用下,沿挡种块侧壁逐渐向上攀升并重新进入种箱,故此阶段种子势能逐渐增加而速度逐渐降低;类型 3 种子因处于容种空间内部,可在旋转运动阶段到达投种区,因此节点③为种子掉入落种口的临界点,故节点③之后种子势能急剧降低,速度急剧增加。

通过上述分析可知,类型 1 种子在供种装置持续工作下将转换为类型 2 或类型 3 种子,而类型 2 种子在持续运动下将重新进入种箱,等待再次填充入充种区,因此在排种器连续工作时,种箱内的种群将全部以类型 3 种子运动轨迹被排出供种装置,表明立槽式供种装置结构设计满足供种功能需求。

3.3.2 供种装置供种性能分析

供种装置内种群离散程度是影响其供种性能的关键因素,离散程度越高,种群流动性越好,种子越易于在重力、种群压力、立式槽轮叶片扰动力等复合作用下充入容种空间;由于离散程度较高的种群,其平均动能较大,且供种装置内种群离散程度与供种转速及搅种装置结构相关^[7,18],而立槽式供种装置仅依靠立式槽轮搅种,因此为探究不同工况下供种装置油麦兼用供种性能,以平均动能为指标为种室内种群添加颜色标识,并截取不同供种转速及立式槽轮叶片伸出量工况下供种装置各供种环节油菜、小麦种群运动状态如图 9 所示。

颗粒长轴尺寸设定为 6.5 mm,大于锥槽状容种空间厚度,导致容种空间内部分以长轴方向近垂直填充的种子,易在槽轮叶片强制带动、挡种块阻挡及种间摩擦等复合作用下以“卡滞”状态进入携种区,且随供种转速增大,叶片带动力增加,携种区“卡滞”种子量增加;当“卡滞”种子随槽轮叶片穿过携种区后,因挡种块阻挡力的瞬间消失,种子将发生剧烈弹跳,即产生“飞种”现象。

通过 EDEM 后处理模块提取供种装置稳定工作时每秒排出的种子质量,计算 1~8 s 仿真时间内各工况下油菜、小麦种子平均供种量及其供种稳定性变异系数如表 4 所示。

表 4 不同工况下供种装置供种性能

Tab. 4 Seed supply performance of seed supply device under different working conditions

种子类别	供种转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	叶片伸出量/ mm	供种量/ ($g \cdot s^{-1}$)	供种稳定性 变异系数/%
油菜	10	5	2.94	14.04
		9	8.03	7.45
		13	14.61	6.46
		17	20.10	5.82
		21	25.09	5.78
小麦	30	5	8.27	6.83
		9	24.74	2.41
		13	42.89	2.42
		17	59.58	2.17
		21	75.92	2.09
油菜	50	5	12.56	6.11
		9	39.19	1.92
		13	70.07	0.96
		17	98.11	1.36
		21	126.03	0.64
小麦	10	0	1.02	2.45
		20	1.99	1.91
		30	3.08	1.49

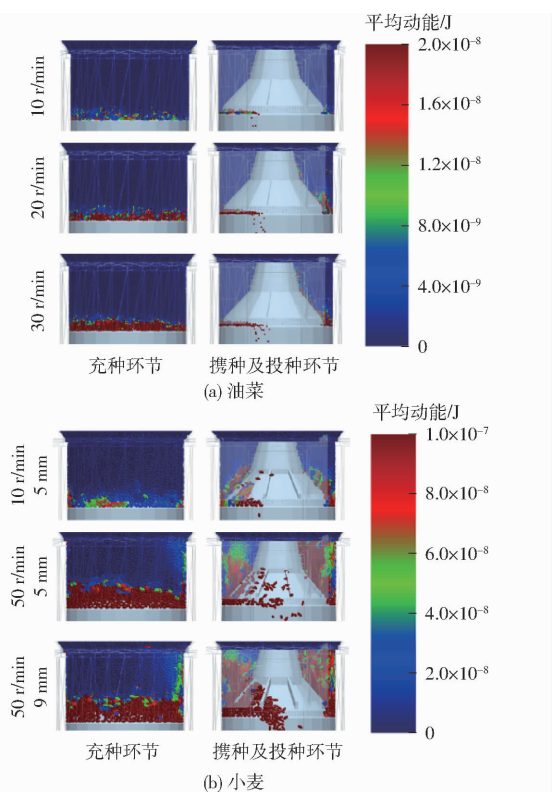


图 9 不同工况下供种过程仿真结果

Fig. 9 Simulation results of seed supply under different working conditions

由图 9 可知,立槽式供种装置各供种环节中,油菜种群平均动能均与供种转速呈正相关关系,小麦种群平均动能均与供种转速及立式槽轮叶片伸出量呈正相关关系。观察各工况下种群运动状态后发现,油菜供种时,不同供种转速下供种装置各供种环节性能良好;小麦供种时,在叶片伸出量为 5 mm 工况下,供种装置充种环节性能良好,携种及投种环节分别出现了“卡种”及“飞种”现象,且随供种转速增加该现象出现概率呈递增趋势,而当叶片伸出量增加为 9 mm 时该现象基本消失,各供种环节性能良好。分析原因为当叶片伸出量为 5 mm 时,因小麦

由表 4 可知,油菜供种工况下,当供种转速由 10 r/min 向 30 r/min 递增时,供种稳定性变异系数呈递减趋势,且各转速下均小于 2.5%,供种稳定性良好。小麦供种工况下,随着供种转速及叶片伸出量的增加,供种稳定性变异系数整体呈降低趋势,其中当叶片伸出量由 5 mm 增至 9 mm 时,供种稳定性变异系数发生显著降低,而当伸出量由 9 mm 向 21 mm 递增时,供种稳定性变异系数呈小幅度递减趋势,分析原因为当叶片伸出量为 5 mm 时,因“卡种”及“飞种”现象影响,小麦供种时出现较多运动状态紊乱的种子,导致供种稳定性较差,而当叶片伸出量增至 9 mm 及以上后,卡种及飞种问题得到解决。同时随着供种转速的增加,小麦供种稳定性变

异系数呈阶梯式降低趋势,与油菜供种时变异系数变化趋势差异较大,分析其原因是小麦供种时,供种装置内锥槽状容种空间依靠立式槽轮相邻两叶片实现封闭,且各容种空间的第二封闭叶片均为下一相邻容种空间的第一封闭叶片,在某一容种空间第一封闭叶片抵达投种区的瞬间,此容种空间封闭解除,内部种群在自身重力、离心力等作用下开始掉入落种口,但此时该容种空间的第二封闭叶片仍处于携种区中,下一容种空间为封闭状态,且封闭时长为

$$T = \frac{60}{Pn} \quad (18)$$

式中 T ——相邻两容种空间开始出种时间差, s

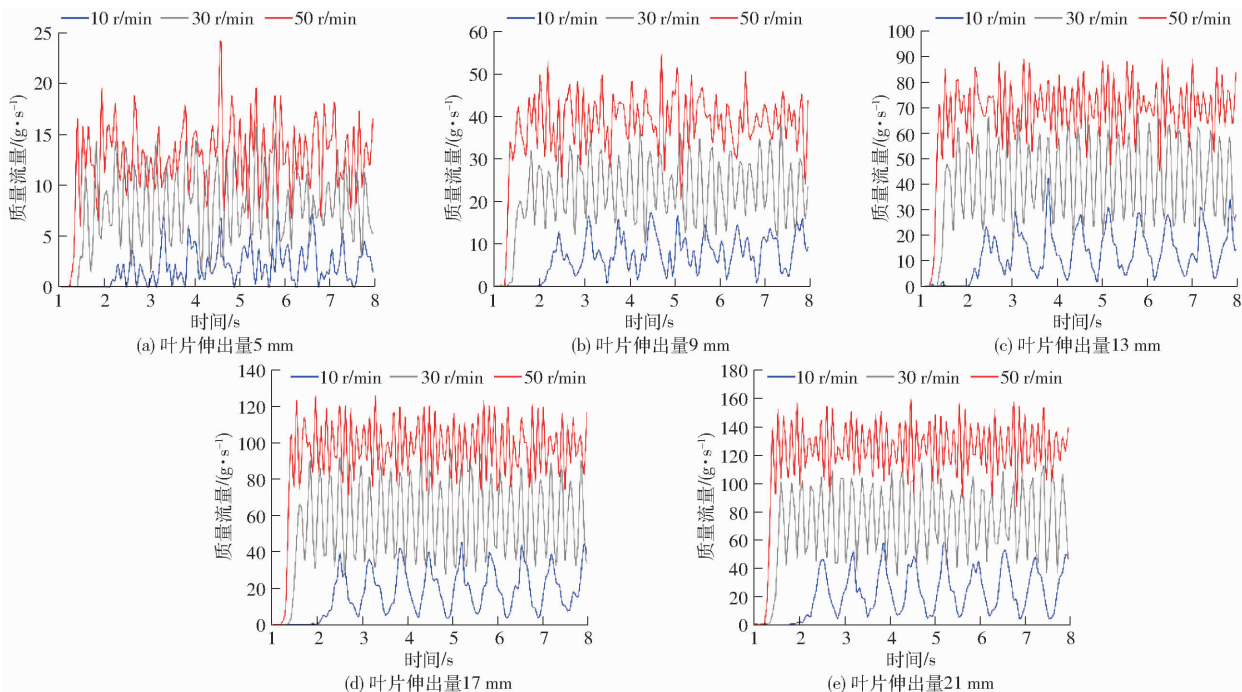


图10 供种装置小麦供种瞬时质量流量变化曲线

Fig. 10 Change curves of instantaneous mass flow of wheat seed supply device

由图10可知,不同供种转速及叶片伸出量下,立槽式供种装置供种瞬时质量流量均呈周期性波动,且随着供种转速及叶片伸出量的增加,质量流量曲线波形稳定性逐渐提高,其中当叶片伸出量为9 mm时,曲线波形已较稳定,符合前述小麦种群成股间隔掉落结论及供种稳定性变异系数变化趋势。对比各质量流量变化曲线后发现,当供种转速相同时,不同叶片伸出量下曲线波动周期基本一致;当叶片伸出量相同时,随着供种转速增加,各曲线波动周期呈变小趋势,且各转速下曲线波动周期与式(18)相邻两容种空间出种时间差计算结果基本一致。

根据供种装置工作原理可知,瞬时质量流量变化曲线波动周期越长、波形稳定性越差,供种装置脉动供种现象越明显。因此为避免脉动供种问题对供

故供种装置排出的小麦种群会以成股状态间隔掉落,导致脉动供种问题产生,进而影响供种稳定性。为探究供种装置脉动供种问题对供种性能的影响规律,应用 EDEM 后处理模块导出 1~8 s 仿真时间内,不同工况下供种装置小麦供种瞬时质量流量变化曲线如图10所示,其中为准确还原质量流量曲线变化规律,参考 Nyquist-Shannon 采样定理,瞬时质量流量采样频率应设置为 10~50 r/min 供种转速工况中每股种群最大掉落频率的两倍,而由式(18)可知,每股种群掉落间隔时长与供种转速呈线性负相关关系,当供种转速为 50 r/min 时,种群掉落间隔为 0.13 s,因此选取供种瞬时质量流量采样周期为 0.06 s。

种装置供种性能的显著影响,应尽量缩短波动周期、提高波形稳定性,使供种装置排出的种群由成股间隔掉落状态转变为连续稳定掉落状态,反映在质量流量变化曲线上即为各波动周期波谷值需大于0,且质量流量变异系数较小。由图10可知,当供种转速为 10 r/min,各叶片伸出量下质量流量波动周期波谷值均接近于0,断条供种风险较大;当供种转速为 30 r/min,波谷值均远大于0,供种连续性较好,因此为探究脉动供种问题对供种装置供种性能影响由强到弱的临界供种转速,在叶片伸出量为 9 mm、供种转速为 10~30 r/min 工况下,以 2 r/min 为间隔开展进一步仿真试验,统计各转速水平下供种瞬时质量流量变化曲线平均波谷值及瞬时质量流量变异系数如图11所示。

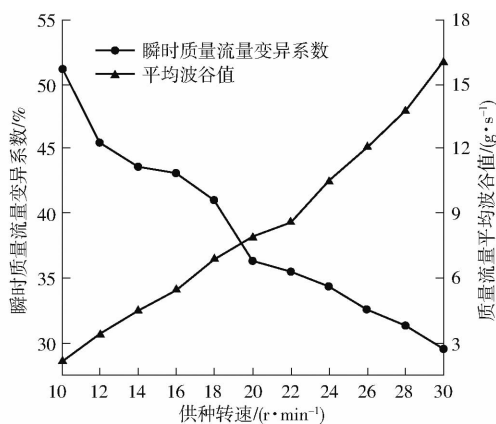


图 11 脉动供种问题对供种性能的影响规律

Fig. 11 Influence law of pulsation feeding problem on feeding performance

由图 11 可知,随着供种转速的增加,供种瞬时质量流量变化曲线平均波谷值以 20 r/min 为分界点呈两段式近线性递增趋势,且 20 r/min 以上时波谷值递增曲线斜率较大,表明此时供种装置供种连续性提升幅度较大。瞬时质量流量变异系数整体呈递减趋势,其中当供种转速小于 20 r/min 时,变异系数变化曲线递减趋势不规则,各点离散度较高,表明此时供种装置供种稳定性不足,受脉动供种问题影响较显著;而当供种转速为 20 r/min 及以上时,质量流量变异系数呈近线性递减趋势,表明此时供种装置供种性能稳定性较高,受脉动供种问题影响较小。综上,供种转速为 20 r/min 及以上时,供种装置供种性能受脉动供种问题影响较低,因此实际作业时在保证小麦供种装置不小于 20 r/min。同时,对比分析瞬时质量流量变异系数及表 4 中每秒供种量稳定性变异系数后发现,两者变化趋势基本一致,但瞬时质量流量变异系数较大,分析原因为瞬时质量流量为供种装置各时刻瞬时排种量,波动性较大,而每秒供种量为供种装置 1 s 内各时刻瞬时排种量累计值,每组数据中瞬时质量流波动趋势一致,数据组间误差较小,故两者变异系数具有较大差异。

4 台架试验

4.1 试验材料与方法

为验证立槽式供种装置实际油菜、小麦供种性能及供种装置对气送式集排器排种性能的影响,采用自制排种性能检测试验台开展试验研究,试验台架如图 12 所示。试验种子采用郑麦 9023 及华油杂 62 商品化种子,相关机械物理特性参数见表 1。

参照 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》,分别针对油菜、小麦开展供种转速单因素试验



图 12 排种性能试验台

Fig. 12 Seed metering performance test bench

1. 开关电源 2. 风机 3. 文丘里管 4. 立槽式供种装置 5. 种箱 6. 分配器 7. 增压管 8. 混种管 9. 电机调速器

和供种转速、立式槽轮叶片伸出量双因素试验,并依据试验结果开展立槽式供种装置对气送式集排器油麦兼用排种性能影响的验证试验。

依据仿真试验结果,油菜供种试验时,设定供种转速为 10 ~ 30 r/min,每间隔 5 r/min 为一个水平,开展单因素五水平全因子试验;小麦供种试验时,设定供种转速为 20 ~ 50 r/min,立式槽轮叶片伸出量为 9 ~ 21 mm,分别间隔 10 r/min 和 4 mm 为一个水平,开展两因素四水平全因子试验。试验均以供种速率、供种速率稳定性变异系数及种子破损率为评价指标,每组试验重复 5 次取平均值。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 供种装置小麦供种性能

小麦供种试验结果如图 13 所示。由图 13 可知,当供种转速为 20 ~ 50 r/min、叶片伸出量为 9 ~ 21 mm 时,立槽式供种装置小麦供种速率可达 1 184.20 ~ 6 080.44 g/min,供种速率稳定性变异系数小于 1.9%,种子破损率小于 0.4%。其中,供种装置小麦供种速率与供种转速和叶片伸出量呈正相关关系;供种速率稳定性变异系数与供种转速和叶片伸出量呈负相关关系,当供种装置供种转速小于 35 r/min 且叶片伸出量小于 14 mm 时,因小麦种群流动性不足,小麦供种速率稳定性变异系数大于 1.5%;种子破损率与供种转速呈正相关关系,与叶片伸出量无明显相关关系,当供种转速小于 45 r/min 时,因供种装置对小麦种群强制搅动力较低,种子破损率小于 0.35%。对比供种速率稳定性变异系数与图 11 中瞬时质量流量变异系数,分析两者差异较大的原因同样为供种速率为单位时间内瞬时质量流量累计值,各组间瞬时质量流量波动趋势一致,使得变异系数较小。

综合仿真及台架试验结果可知,为提高立槽式供种装置小麦供种稳定性,降低种子破损率,实际工作时应尽量取立式槽轮叶片伸出量 14 ~ 21 mm

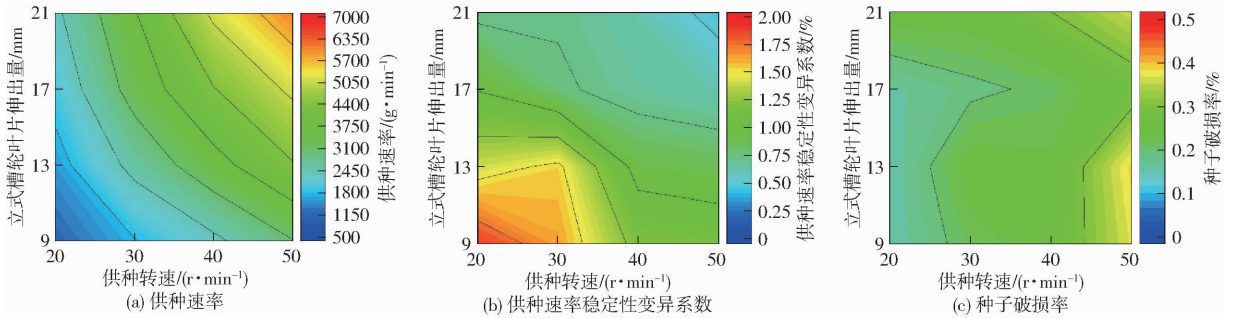


图 13 供种装置供种转速及叶片伸出量对小麦供种性能的影响

Fig. 13 Effects of rotational speed of seed supply device and leaf elongation on seed supply performance of wheat

范围内较大值、供种转速 20 ~ 45 r/min 范围内较小值。

4.2.2 供种装置油菜供种性能

油菜供种试验结果如图 14 所示,由图可知当供种转速为 10 ~ 30 r/min 时,立槽式供种装置油菜供种速率可达 66.20 ~ 210.41 g/min,供种速率稳定性变异系数小于 2.3%,种子破损率小于 0.65%。其中,随着供种转速的增加,供种装置油菜供种速率呈近线性增加趋势;供种速率稳定性变异系数呈小幅度降低趋势,但各转速水平下变异系数均处于 1.5% ~ 2.3% 之间,分析原因为油菜种子球型度较高,流动性较好,稳定供种时对供种装置扰动能力需求较小,使得各转速水平下油菜供种速率稳定性变异系数差异较小,但观察各转速下供种各环节种群运动状态发现,因油菜种子粒径较小,供种装置停止工作时,环槽状容种空间内的种群因惯性力作用仍会排出部分种子,导致相较于小麦供种工况,油菜供种速率稳定性变异系数整体略有增加;种子破损率呈小幅度递增趋势,这是由于随着供种转速增加,供种装置对种群的扰动能力增加,导致种群间碰撞加剧,进而使种子破损率增加,但各转速下种子破损率均小于 0.65%。综合试验结果,为提高供种装置油菜供种性能,实际工作时应尽量使供种转速处于 15 ~ 25 r/min 范围内。

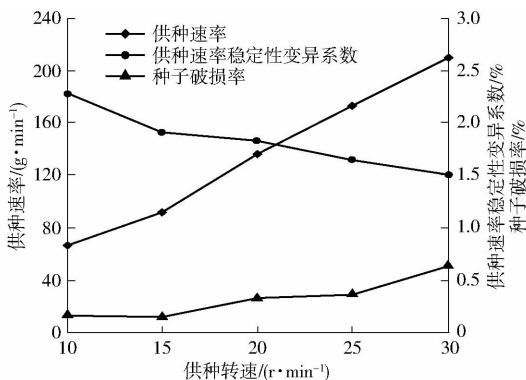


图 14 供种装置供种转速对油菜供种性能的影响

Fig. 14 Effect of rotational speed of seed supply device on seed supply performance of rapeseed

4.2.3 气送式集排器排种性能验证

为检验立槽式供种装置对气送式集排器排种性能的影响,开展气送式集排器排种性能验证试验。依据上述仿真及台架试验结果,试验时分别取小麦供种转速为 35、45 r/min,叶片伸出量为 15、19 mm;油菜供种转速为 15、25 r/min;气流压力为 1 600 Pa 开展全因子试验^[2],每组试验重复 5 次取平均值,试验结果如表 5 所示。由表 5 可知,相同工况下供种装置供种速率与气送式集排器排种速率间相对误差均小于 2%,且不同工况下气送式集排器小麦总排量稳定性变异系数均小于 1.2%,油菜总排量稳定性变异系数均小于 2%,满足油菜、小麦播种农艺需求,表明立槽式供种装置供种性能可满足油菜兼用型气送式集排器排种需求。

表 5 供种及排种性能试验结果

Tab. 5 Test results of seed feeding and seeding performance

作物	供种转速/ (r·min ⁻¹)	叶片 伸出 量/mm	供种速率/ (g·min ⁻¹)	排种速率/ (g·min ⁻¹)	总排量稳 定性变异 系数/%	相对 误差/ %
小麦	35	15	4 401.28	4 377.68	1.12	0.54
		19	5 341.33	5 240.52	0.83	1.92
	45	15	5 148.38	5 125.20	0.97	0.45
		19	6 327.15	6 219.62	0.63	1.73
油菜	15	0	98.63	96.97	1.98	1.68
	25	0	172.93	172.50	1.62	0.25

5 田间试验

为进一步检验搭载立槽式供种装置的油菜兼用型气送式集排器排种性能,分别于 2022 年 10 月 7 日及 11 月 1 日在湖北省武汉市华中农业大学现代农业科学试验基地开展油菜、小麦田间播种试验,其中油菜种子选用华油杂 62 商品化种子,小麦种子选用郑麦 9023 商品化种子,油菜、小麦田间播种试验均以雷沃 M1004 型拖拉机为牵引动力,采用慢 1 挡作业,额定速度为 2.52 km/h,播种厢面宽度为

2.3 m,播种行数为8行。依据立槽式供种装置台架试验数据,播种油菜时,设定目标播量为 6.5 kg/hm^2 ,供种装置供种转速为 10 r/min ;播种小麦时,设定目标播量为 180 kg/hm^2 ,供种装置叶片伸出量为 9 mm ,供种转速为 20 r/min ,作业过程及出苗情况如图15所示。经路面试验测定,此工况下油菜实际播量为 6.39 kg/hm^2 ,小麦实际播量为 187.49 kg/hm^2 ,总播量误差分别为 1.68% 及 4.16% 。



图15 田间播种试验及出苗情况

Fig. 15 Field seeding test and seedling emergence

播种45 d后,分别对油菜、小麦出苗情况进行测量,测量方法为:随机选取油菜、小麦出苗田块中5块 $2.3 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 面积田块作为样本区域,分别记录每个样本区域内各行出苗数量。根据测量结果可知,油菜、小麦平均株距分别为 56.96 、 23.34 mm ;如表6所示,各行株数一致性变异系数分别为 16.92% 、 18.02% ,植株分布均匀性较好,符合油菜、小麦种植农艺要求。

表6 各样本区域出苗情况测量值

Tab. 6 Measured values of seedling emergence in each sample area %

样本区域	各行株数一致性变异系数	
	油菜	小麦
A1	21.12	18.10
A2	17.51	18.08
A3	12.06	18.75
A4	17.54	18.33
A5	16.38	16.84
均值	16.92	18.02

6 结论

(1)通过分析油菜、小麦种子的机械物理特性及农艺要求播量,设计了一种油麦兼用型立槽式供种装置,该供种装置基于内部容种空间封闭容种原理,通过采用集取种、搅种、携种功能为一体,可大幅调节容种空间容积的变容积供种机构,有效实现了小体积、高通量、油麦兼用供种需求,并基于理论分析确定了其关键结构参数。

(2)仿真试验结果表明,立槽式供种装置具有良好的破拱充种性能及供种过程种子运动轨迹一致性,且供种装置供种性能与供种转速及立式槽轮叶片伸出量呈显著相关关系,当供种转速为 $20 \sim 50 \text{ r/min}$ 、叶片伸出量为 $9 \sim 21 \text{ mm}$ 时,供种装置具有良好的小麦供种性能;当供种转速为 $10 \sim 30 \text{ r/min}$ 时,供种装置具有良好的油菜供种性能。

(3)供种性能台架试验结果表明,当供种转速为 $10 \sim 30 \text{ r/min}$ 时,立槽式供种装置油菜供种速率可达 $66.20 \sim 210.41 \text{ g/min}$,供种速率稳定性变异系数小于 2.3% ,种子破损率小于 0.65% ;当供种转速为 $20 \sim 50 \text{ r/min}$ 、叶片伸出量为 $9 \sim 21 \text{ mm}$ 时,供种装置小麦供种速率可达 $1184.20 \sim 6080.44 \text{ g/min}$,供种速率稳定性变异系数小于 1.9% ,种子破损率小于 0.4% ,油麦兼用供种性能较优。

(4)气送式集排器排种性能验证试验结果表明,当小麦供种转速为 35 、 45 r/min ,叶片伸出量为 15 、 19 mm ;油菜供种转速为 15 、 25 r/min ;气流压力为 1600 Pa 时,相同工况下供种装置供种速率与气送式集排器排种速率间相对误差均小于 2% ,不同工况下气送式集排器小麦总排量稳定性变异系数均小于 1.2% ,油菜总排量稳定性变异系数均小于 2% ,表明立槽式供种装置供种性能可满足油麦兼用型气送式集排器供种需求。

(5)田间试验结果表明,油菜、小麦种子播种量分别设定为 6.5 、 180 kg/hm^2 时,搭载立槽式供种装置的气送式集排器总播量误差分别为 1.68% 和 4.16% ,出苗后测量得油菜、小麦平均株距分别为 56.96 、 23.34 mm ,各行株数一致性变异系数分别为 16.92% 、 18.02% ,满足油麦兼用播种农艺要求。

参 考 文 献

- [1] 丛锦玲. 油麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
CONG Jinling. Study on seeding system and mechanism of pneumatic precision metering device for wheat and rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [2] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [3] 高筱钧,于涑源,吴晓鹏,等. 气送式玉米高速精量排种器供种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊1):

66-75.

GAO Xiaojun, YU Laiyuan, WU Xiaopeng, et al. Design and experiment of intelligent seed supply system of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 66-75. (in Chinese)

- [4] 廖庆喜,曹梅,王宝山,等. 齿勺气送式芝麻精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):65-76.
LIAO Qingxi, CAO Mei, WANG Baoshan, et al. Design and experiment of slotted-tooth spoon hole and air-assisted precision centralized metering device for sesame[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 65-76. (in Chinese)
- [5] 雷小龙,廖宜涛,丛锦玲,等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12):16-26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16-26. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王磊,舒彩霞,席日晶,等. 小麦气送集排器等宽多边形槽齿轮式供种装置研究[J]. 农业机械学报,2022,53(8):53-63.
WANG Lei, SHU Caixia, XI Rijing, et al. Research on seed feeding device with constant width polygon groove-tooth wheel of air-assisted centralized metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):53-63. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):26-34.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26-34. (in Chinese)
- [10] 周海波,梁秋艳,魏天路,等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):57-61.
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and experiment of quantitative seed supply device with fluted roller used for double-vibrating precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 57-61. (in Chinese)
- [11] 刘彩玲,王超,宋建农,等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):108-115.
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108-115. (in Chinese)
- [12] LIU C L, LI Y N, SONG J N, et al. Simulation design and experiment of a directional seed-feeding device[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26: 16-24.
- [13] 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.
- [14] 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(4):42-48.
XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of stratified seed-filling room on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42-48. (in Chinese)
- [15] 王磊,廖宜涛,廖庆喜,等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):75-85.
WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75-85. (in Chinese)
- [16] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 116-124. (in Chinese)
- [17] 张明华,罗锡文,王在满,等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(9):29-36.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 29-36. (in Chinese)
- [18] 王宝山,王磊,廖宜涛,等. 小粒径种子精量穴播集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):64-75,119.

- WANG Baoshan, WANG Lei, LIAO Yitao, et al. Design and test of seeding wheels of precision hill-seeding centralized metering device for small particle size seeds [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 64–75, 119. (in Chinese)
- [19] 丛锦玲, 廖庆喜, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 30–39. CONG Jinling, LIAO Qingxi, CAO Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 30–39. (in Chinese)
- [20] 王磊. 油麦兼用型宽幅高速气送式播种机关键部件设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. WANG Lei. Design and experiment on broad width and high speed air-assisted planter for rapeseed and wheat [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上)[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 2007.
- [22] TEJCHMAN J. Confined granular flow in silos: experimental and numerical investigations [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [23] 王磊, 廖宜涛, 张青松, 等. 油菜集排器供种装置侧向倾斜排种性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 1–10. WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Experiments and analysis on seeding performance of seed feeding device of rapeseed centralized metering device under lateral tilt [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 1–10. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 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)
- [26] WU Z J, LI M L, LEI X L, et al. Simulation and parameter optimisation of a centrifugal rice seeding spreader for a UAV [J]. Biosystems Engineering, 2020, 192: 275–293.

(上接第 51 页)

- [23] COULTER R C. Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm [R]. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1992.
- [24] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动驾驶作业系统设计 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15–21. LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15–21. (in Chinese)
- [25] LUCA B, DAVIDE A C, MATTEO M. Kinematic trajectory tracking controller for an all-terrain Ackermann steering vehicle [J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(15): 13–18.
- [26] 张闻宇, 丁幼春, 王雪玲, 等. 基于 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 29–36. ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Xueling, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 29–36. (in Chinese)
- [27] 陈龙, 罗杰, 杨旭, 等. 基于模糊纯追踪控制的自动泊车算法研究 [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2019, 41(3): 316–321. CHEN Long, LUO Jie, YANG Xu, et al. Research on automatic parking algorithms based on fuzzy pure tracking control [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2019, 41(3): 316–321. (in Chinese)
- [28] WU Yiyang, XIE Zhijiang, LU Ye. Steering wheel AGV path tracking control based on improved pure pursuit model [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2093(1): 012005.
- [29] YU Lingli, YAN Xiaoxin, KUANG Zongxu, et al. Driverless bus path tracking based on fuzzy pure pursuit control with a Front Axle Reference [J]. Applied Sciences, 2019, 10(1): 010230.
- [30] 张闻宇, 丁幼春, 廖庆喜, 等. 拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 43–50. ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 43–50. (in Chinese)
- [31] 唐小涛. 智能水稻穴直播机导航控制系统的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018. TANG Xiaotao. Research on navigation control system of rice planter [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [32] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Navigation system for agricultural machines: nonlinear model predictive path tracking [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 82: 32–43.