

中间集抛后送式双侧斜输烟草培土机设计与试验

罗海峰^{1,2} 张 晟¹ 吴明亮^{1,2} 王成伟¹ 何激光³ 蒋啸虎^{1,2}

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 长沙 410128;
3. 湖南省长沙市烟草公司宁乡市分公司, 宁乡 410600)

摘要: 针对南方丘陵山区烟叶种植区传统铤抛式培土作业存在土块抛送不集中、定点覆土效果差等问题,采用“旋耕碎土—集中后抛—斜置送土”的作业方式,设计一款中间集抛后送式双侧斜输烟草培土机。根据土壤铤削加工和土壤螺旋输送机输送原理,对整机土壤加工关键部件进行了研究,分析集中后抛斜输过程,确定了培土机的主要结构和工作参数。利用 EDEM 离散元仿真,建立培土作业仿真模型,以机具前进速度、旋耕深度、螺旋输送机轴转速为试验因素,培土高度、培土幅度、取土率为试验指标,进行了二次正交旋转回归仿真试验与优化,得到最优工作参数。田间试验结果表明,作业后沟底土壤松碎,培土土量均匀,培土高度为 24.37 mm,培土幅度为 130.42 mm,取土率为 21.19%,与仿真结果误差分别为 12.21%、1.90%、10.44%。能够满足烟田培土需求,为烟草培土技术农机农艺融合提供了新途径。

关键词: 烟草; 培土机; 螺旋输送机; 中间集抛后送式; 双侧斜输

中图分类号: S224.1⁺6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)12-0097-12

OSID:



Design and Test of Soil-banking Machine with Centralized Soil Feeding and Double-sided Lateral Delivery for Tobacco

LUO Haifeng^{1,2} ZHANG Sheng¹ WU Mingliang^{1,2} WANG Chengwei¹ HE Jiguang³ JIANG Xiaohu^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Machinery and Equipment, Changsha 410128, China

3. Ningxiang Branch, Changsha Tobacco Company, Ningxiang 410600, China)

Abstract: Soil cultivation, the part and parcel of crop farming, can provide a good peripheral environment for tobacco growth. In order to solve the problems of traditional soil cultivation's operation, including the lack of centralized throwing soil and the poor effect of fixed-point covering soil at tobacco fields in southern China. The soil-banking machine with centralized soil feeding and double-sided lateral delivery was designed for tobacco based on the mode of breaking up the soil after rotary tilling, centralizing throwing soil and soil lateral delivery. The soil engaging component was researched and the process about centralized soil throwing and lateral delivery on the basis of the theory of soil milling and soil auger conveying was analyzed, and the main structure and operation parameters of the equipment was confirmed. Based on the EDEM discrete element simulation technology, a component-soil simulation model was established. The forward speed, rotary tillage depth, and rotation speed of the auger shaft were the test factors. The soil height, soil width, and soil fetching rate were used as test indicators, and the simulated quadratic orthogonal rotation regression test was carried out. Field experiments were conducted on the basis of simulation. On the basis of simulation test values, the test factors were optimized and analyzed. It illuminated that when the forward speed was 0.4 m/s, the rotary tillage depth was 60 mm and rotation speed of the auger shaft was 339 r/min, and the soil height was 27.76 mm, the soil width was 132.94 mm, and the soil fetching rate was 23.66%. The field test results showed that the

收稿日期: 2023-07-28 修回日期: 2023-09-27

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30344)、湖南省自然科学基金青年基金项目(2022JJ40168)和湖南省长沙市烟草公司一般项目(2021kjc-js166)

作者简介: 罗海峰(1976—),男,教授,博士,主要从事农业机械设计研究,E-mail: luohaifeng@hunau.edu.cn

通信作者: 蒋啸虎(1993—),男,讲师,博士,主要从事智能农业机械装备与技术研究,E-mail: xiaohujiang@hunau.edu.cn

soil at the trench was loosened and cultivated soil working was stable, and its soil height was 24.37 mm, soil width was 130.42 mm, and soil fetching rate was 21.19%. The deviation of the test index was respectively 12.21%, 1.90% and 10.44%, and the research result would provide a way to strengthen integration of agricultural machinery and agronomy about tobacco soil cultivation technology.

Key words: tobacco; soil-banking machine; auger; centralized soil feeding; double-sided lateral delivery

0 引言

烟草在我国国民经济中占有重要地位,是我国重要的经济作物^[1-2]。2023 年,国内烟草种植面积超 10⁶ hm²。在烟草田间管理过程中,需进行培土作业。培土能为烟草生长提供良好的外围环境,可以使土壤松散,增强其透气通气性,还能保持地温^[3-6],其作业质量直接影响着烟叶生产的质量与产量^[7]。目前大部分地区主要以人工进行培土作业,培土效率低、劳动强度大,制约了烟草产业的快速发展^[8-9]。

培土部件作为培土机械的核心部分,其结构设计直接影响作业质量与作物产量。国外多以高效自动化,大规模作业为目标,其培土机械化技术研究较早,且市场应用较广泛。荷兰 STRUIK 公司、美国吉尔森公司、法国 LIOT 公司等配套本国作物农艺研制的培土机具,作业幅宽大,效率高,可根据实际要求完成多行多项作业。日韩两国 K652NH-D 型培土机、圣地亚 3TG-4Q 系列培土机,都有较强的田间通过性,利用底盘上动力输出轴装配各种作业部件完成各项作业,拆装便利、适应性较强^[10]。在丘陵山区多采用手扶拖拉机挂接机具或小型机具作业。与其他作物如马铃薯、甘蔗、玉米等^[11-18]相比,烟田培土机械化技术具有较大发展空间。文献[19]以提高作业效率为目标,开发出集旋耕、除草、培土等于一体的多功能烟田管理机。张传斌等^[20]为满足烟田中后期培土需求研制了一款机动性较好的高地隙烟田作业机械。肖名涛等^[21]为解决南方稻烟轮作时机组打滑下陷,培土效果不佳,研制了一款小型履带底盘式培土机,张秀丽等^[22]基于复合切削原理设计出一款适用于平原大规模作业的烟草培土机。文献[23]利用导流罩干预旋耕后土壤的流向,设计了适用于烤烟田块的复式作业机,并运用 ANSYS、EDEM 技术对关键部件进行仿真,确定了最佳作业参数组合。综合培土机械化技术发展历程,我国烟草专用培土机械研究未能完全满足当前多元化种植需求^[24-25]。当前研发的培土机主要采用旋耕高速铤削侧抛式作业,存在抛土落点不精准、土量不可控等不足。为此张阳光等^[26]采用“旋耕刀+螺旋输送机”方式设计了一种新型培土部

件,实现了螺旋输送机与旋耕刀一体化作业,但存在抛土量不足、易缠草等问题。

为实现精准送土定点培土作业,本文采用“旋耕碎土—集中后抛—斜置送土”的作业方式,设计一种中间集抛后送式双侧斜输烟草培土机。对关键部件进行设计分析与计算,利用 EDEM 开展仿真试验得到装置较优参数组合,进行田间验证试验,期为烟草培土机农机农艺融合提供新途径。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

烟草培土机如图 1 所示。整机包括动力底盘、操作系统和培土工作部件,培土工作部件主要包括旋耕碎土装置、水平螺旋输送机装置与斜置螺旋输送机装置。

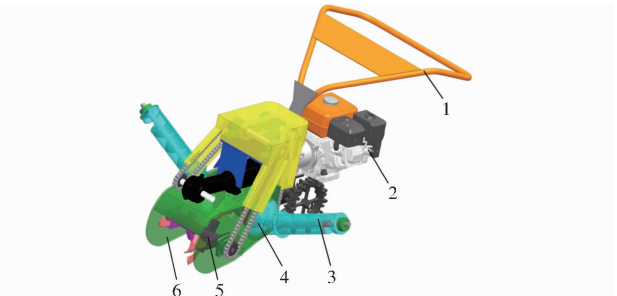


图 1 培土机结构示意图

Fig.1 Schematic of banking machine

1. 操作系统 2. 动力底盘 3. 斜置螺旋输送机装置 4. 水平螺旋输送机装置 5. 旋耕碎土装置 6. 存土箱

旋耕碎土装置主要由旋耕刀轴、旋耕刀片等组成,水平螺旋输送机装置由水平螺旋输送机、非标轴承座等组成,斜置螺旋输送机由螺旋输送机、变径管、轴承座、斜置管等组成,培土部件采用前端挂接安装方式,整机技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 790×1 280×900
整机质量/kg	80
配套动力/kW	4
作业幅宽/mm	1 100~1 200
旋耕深度/mm	0~65
纯工作时间生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	2~3

1.2 传动系统

整机传动系统如图 2 所示,采用 1:1 传动。工作时,动力从动力输出轴传递至过桥一轴,再由过桥一轴将动力传递至旋耕刀轴,使得旋耕刀轴旋转;此外过桥一轴还将动力通过过桥二轴传递至水平螺旋输送机轴,当水平螺旋输送机运作时,其万向节连接的斜置螺旋输送机轴也随之旋转。

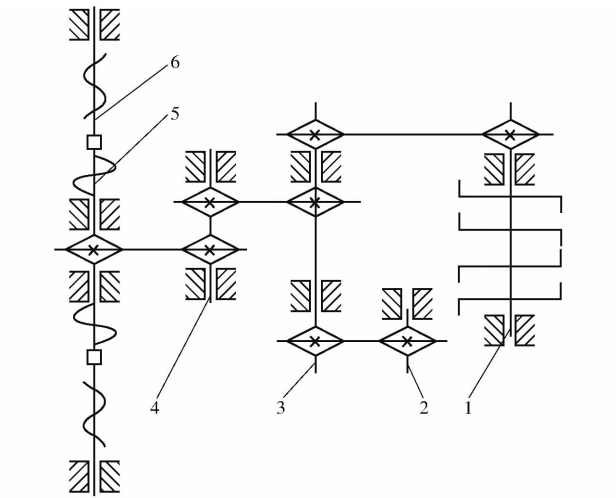


图 2 传动系统简图
Fig.2 Schematic of drive system

1. 旋耕刀轴 2. 动力输出轴 3. 过桥一轴 4. 过桥二轴 5. 水平螺旋输送机轴 6. 斜置螺旋输送机轴

1.3 工作原理

如图 3 所示,培土作业时,旋耕碎土装置高速旋转切削沟底土壤,刀片与沟底土壤接触,切碎的土壤在刀片离心力及存土箱两侧侧板封闭的作用下,实现了土壤集中后抛,后抛土壤集中输送到中间水平螺旋输送机叶片,在存土箱后侧板密闭条件下,水平螺旋输送机完成了左右两侧土壤水平推送,将土壤推至斜置螺旋输送机喂入口,土壤在斜置螺旋输送机作用下向两侧推送并排出机体外并输送至垄面,实现了集中定点培土。整机采用“旋耕碎土—集中后抛—斜置送土”的作业原理,一次性完成了土壤铧削、抛送、水平推送、侧向输送等作业。

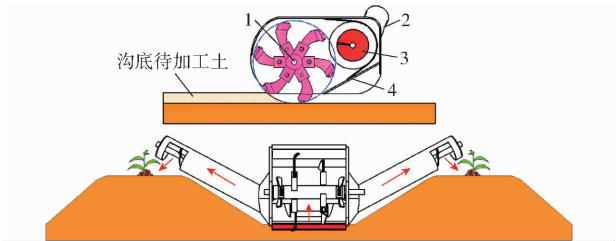


图 3 培土作业原理
Fig.3 Schematic of operation

1. 旋耕刀轴 2. 斜置螺旋输送机装置 3. 水平螺旋输送机装置 4. 铲土板

2 关键部件结构及参数设计

2.1 取土送土装置

2.1.1 旋耕碎土装置

旋耕碎土装置(图 4)由轴承座、旋耕刀片及旋耕刀轴、旋耕刀座组成,轴承座用于刀轴旋转与固定,其定位孔与存土箱侧板腰孔相对应,两孔安装位置可适应不同条件下的耕深需求。

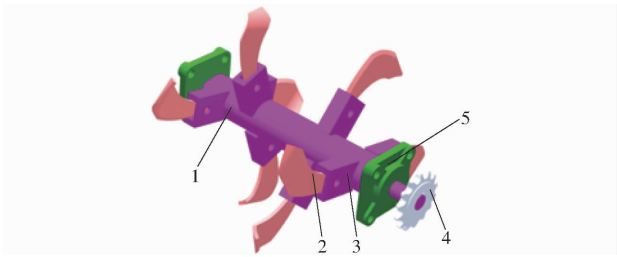


图 4 旋耕碎土装置结构图
Fig.4 Schematic of rotary tillage device
1. 旋耕刀轴 2. 旋耕刀片 3. 旋耕刀座 4. 链轮 5. 轴承座

旋耕刀作为旋耕碎土装置关键部件,其参数型号直接关系旋耕作业效果^[27-28]。通过市场上多类刀片型号对比,结合烟田耕地常态,选取标准旋耕弯刀片ⅢS150 为旋耕单元并配套该型号刀座,查阅相关标准可知其结构参数如表 2 所示。

表 2 ⅢS150 型旋耕弯刀结构参数
Tab.2 Structural parameters of rotary blade about ⅢS150

参数	刀辊回	侧切刃	侧切刃终	侧切刃	工作	正切面
	转半径	起始半径	点半径	包角	幅宽	折弯角
	R/mm	R_0/mm	R_1/mm	$\theta_{\max}/(^{\circ})$	b/mm	$\beta/(^{\circ})$
数值	147 ~ 150	112	146 ± 2	21	25 ~ 35	120

从土壤后抛角度考虑,采用正转旋耕方式:刀轴转向与机组轮子前进时旋向一致。查阅文献[29]可知,旋耕时常用转速为 200 ~ 300 r/min。则刀轴线速度计算式为

$$u = \omega R = (300 \times 2 \times \pi / 60) \times 0.15 = 4.71 \text{ m/s}$$

式中 ω ——刀轴角速度,rad/s

旋耕部件运动及结构参数决定切土节距 S_q (同一纵向平面内单位周转时相邻两刀片先后切入土壤的距离),即在刀轴转动 $2\pi/z$ 角度的时间内,刀轴前进距离。关系式为

$$S_q = v_m t = \frac{2\pi v_m}{z\omega} = \frac{2\pi R v_m}{z\omega R} = \frac{2\pi R}{z\lambda} = \frac{60 v_m}{z n_d} \tag{1}$$

式中 v_m ——机组前进速度,m/s

t ——时间,s

z ——同一旋转切削面刀片数量

λ ——旋耕速比

n_d ——刀轴转速, r/min

由式(1)知,切土节距 S_q 与机组前进速度 v_m 成正比,与刀片数量 z 、刀轴角速度 ω 成反比。切土节距较小时可以提高碎土率,但机组前进较慢,生产效率低;若刀轴用高转速,整机安全性能降低;加装刀片较多,刀片间的空隙较小,易壅土缠草,会加大作业时整机质量。根据农艺要求,一般正旋耕时切土节距取 3 ~ 6 cm 即能满足耕后垄沟土壤细碎,取 5 cm 进行计算,旋耕刀轴转速 300 r/min,机具前进速度为 0.326 m/s,同一单位回转切面刀片数量 z 为 1.304,圆整为 2 后计算旋耕速比 λ 为 9.42。

通常情况下刀片以螺形布置平衡两端轴承。鉴于垄沟尺寸,为避免堵塞,在相同相位角下须布置 1 把刀,且刀间距为 50 mm。

2.1.2 存土箱结构及参数

为保证整机在作业过程中存土箱不干涉两侧垄腹,存土箱宽度取值为 $250 \leq l_f < 300$ mm。存土箱如图 5 所示。根据作业实际情况需求, l_f 取 260 mm。为便于后抛松碎土粒的收集,通过现有参数将底板角度 τ 设置为 28° ,且铲土板铲尖位于旋耕碎土装置回转直径 D_0 切向;旋耕碎土装置与封板之间的安全间隙 δ_1 为 30 mm;为便于旋切土壤,旋耕深度 H 设为 65 mm;旋耕碎土装置与水平螺旋输送机之间的安全间隙 δ_2 为 25 mm;水平螺旋输送机回转直径与弧板之间间隙 δ_3 为 5 mm。其中,为控制正旋耕后土壤流向及便于检视箱体内部装置,设置顶板前部罩板与水平面之间夹角 θ_0 为 10° 。

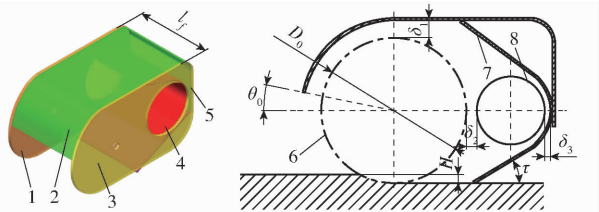


图 5 存土箱结构示意图

Fig. 5 Schematic of box

1. 存土箱右侧板 2. 存土箱封板 3. 存土箱左侧板 4. 水平螺旋输送机推土孔 5. 立板 6. 旋耕碎土装置回转外径 7. 弧板 8. 水平螺旋输送机回转外径

2.2 螺旋输送机装置结构及参数设计

2.2.1 斜置螺旋输送机装置结构与参数

沟底土壤松碎后,采用斜置螺旋输送机装置将耕后土壤向两侧输送至垄顶作物附近。该装置由轴承座、螺旋输送机、管及变径管等组成。由前期数据采集及机具现有参数可得相关数值,示意图如图 6 所示,其中, l_d 为万向节水平长度, mm; l_e 为两垄中心距长度一半, mm。

斜置管倾角 θ 近似为垄腹与垄沟的夹角,现有

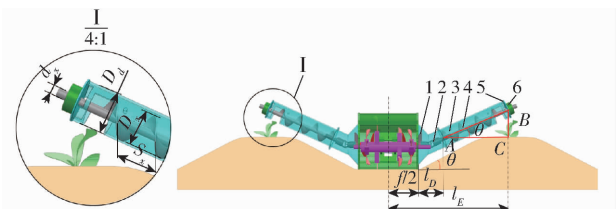


图 6 斜置螺旋输送机结构示意图

Fig. 6 Schematic of inclined-placed auger

1. 变径管 2. 万向节 3. 管 4. 螺旋输送机 5. 封板 6. 轴承座

农艺要求中 $l_e = 600$ mm, $\theta = 30^\circ$, 由前文可得 $l_f/2 = 130$ mm, 设置 $l_d = 110$ mm, 斜置管水平投影长度 $l_{AC} = l_e - (l_d + l_f/2)$, 则有 $\arccos\theta = [l_e - (l_d + l_f/2)]/l_{AB} = 30^\circ$, 故斜置管长度 $l_{AB} = 415.69$ mm, 圆整为 415 mm。

2.2.2 螺旋输送机输送量

输送量是衡量螺旋输送机生产效率的一个重要指标,计算式为

$$\begin{cases} Q_v = \frac{\varphi \pi (R_i^2 - r_i^2) \varepsilon S' n}{60} \\ Q_m = 47 (D_i^2 - d_i^2) S' n \varphi \lambda_m \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中 Q_v ——体积输送量, m^3/h

Q_m ——质量输送量, t/h

λ_m ——物料密度或容重, t/m^3

ε ——倾斜系数,螺旋输送机水平放置时取 1,其余角度对应可查

D_i ——螺旋叶片外径, m

R_i ——叶片半径, m

d_i ——螺旋轴直径, m

r_i ——螺旋轴半径, m

S' ——螺距, m

n ——螺旋输送机轴转速, r/min

φ ——填充系数

针对农艺要求中培土量,设斜置螺旋输送机输送量为 Q_{m2} ,为避免水平螺旋输送机两侧输土作业不及时在存土箱内壅土,设水平螺旋输送机输送量为 Q_{m1} ,理论上则有 $Q_{m2} = Q_{m1}$,此时机具土壤输送及时,存土箱内无富余。但因为实际存土箱内容积大于斜置管容积,水平螺旋输送机与斜置螺旋输送机共轴连接且转速一致。为实现土壤斜置输送,存土箱需有一定富余土壤,故取 $Q_{m1} \geq Q_{m2}$,即存在

$$Q_{m1} = (1 + \zeta) Q_{m2} \quad (3)$$

式中 ζ ——修正系数,取 0.61

2.2.3 取土率

根据农艺要求,为避免垄腹取土伤苗,机组前进过程中,对沟底土壤(1区)松碎并斜置输送至垄顶(2区)^[22]。实际培土作业时培土高度 $h \geq 20$ mm;培土幅度 l 为 120 mm;旋耕深度 $H \leq 65$ mm;取土位置宽度 L 为 260 mm。经风蚀与雨水冲刷后垄高 $h_l =$

220 mm,建立如图 7 所示简图。设 Q_g 为单位时间内沟底取土土壤质量; Q_n 为单位时间内所浪费的土壤质量,包括机体富余土壤与回流沟底土壤质量之和。则有

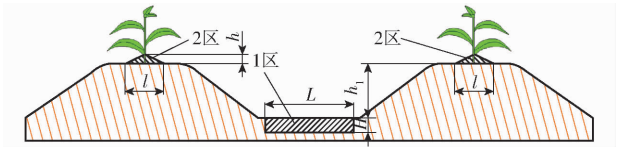


图 7 作业前后垄形横截面

Fig. 7 Cross section shape of ridge after operation

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = Q_g - Q_n = 2Q_m \\ k = \frac{2Q_m}{Q_g} = \frac{2S_2}{S_1} = \frac{lh}{LH} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

式中 k ——取土率, %

S_1 ——1 区土壤截面积, m^2

S_2 ——2 区土壤截面积, m^2

在机具前进过程中存土箱内始终富余有新的松碎土粒,在满足培土农艺要求的前提下,较小值的取土率是合格可行的。

2.2.4 水平螺旋输送机结构及参数

工作时,为确保存土箱土壤向两侧推送,水平螺旋输送机螺旋一半左旋一半右旋,其旋向同刀轴旋向一致,如图 8 所示。

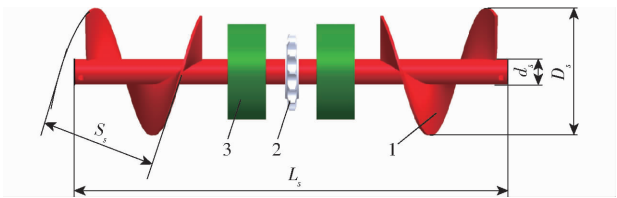


图 8 水平螺旋输送机结构示意图

Fig. 8 Schematic of horizontal auger

1. 水平螺旋输送机 2. 链轮 3. 非标轴承座

综合图 6 ~ 8、式(2) ~ (4),计算得水平螺旋输送机外径 $D_s \approx 0.097 \text{ m}$,圆整取 100 mm;水平螺旋输送机螺距 $S_s = (0.8 \sim 1) D_s = 90 \text{ mm}$;水平螺旋输送机内径 $d_s = (0.2 \sim 0.35) D_s = 20 \text{ mm}$,考虑到箱体宽度 $f = 260 \text{ mm}$,为便于水平螺旋输送机同万向节的装配,水平螺旋输送机轴长度 $L_s = 300 \text{ mm}$ 。

斜置螺旋输送机外径 $D_x \approx 0.086 \text{ m}$,圆整为 90 mm,其螺旋输送机螺距 $S_x = (0.8 \sim 1) D_x = 90 \text{ mm}$,斜置螺旋输送机内径 $d_x = (0.2 \sim 0.35) D_x = 20 \text{ mm}$ 。斜置管管径 $D_d \geq D_x$,取 94 mm 对应无缝钢管 $\phi 102 \times 4$ 。

2.3 斜置螺旋输送机培土过程中土壤运动学与动力学分析

假设土壤在输送过程中稳定,相邻土块间相对运动可忽略不计,且土块粒群中一土块 P 在叶片面

径向无位移。建立斜置螺旋输送机输送管内土块 P 运动模型,如图 9a 所示。 v 、 h 为铅直面和水平面正方向; z 为输送机轴线方向; ω_x 为螺旋输送机轴角速度; R_x 为斜置螺旋输送机外半径; r_x 为斜置螺旋输送机内半径。

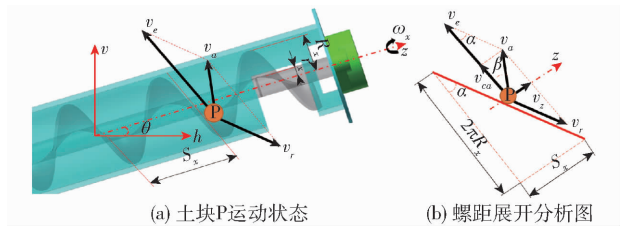


图 9 斜置螺旋输送机螺旋面运动学建模

Fig. 9 Kinematics modeling of inclined-placed auger's surface

土块 P 的运动状态,沿螺旋单位螺距展开后如图 9b 所示。由运动合成及速度三角形可知土块 P 处各速度关系为

$$\begin{cases} v_a = v_r + v_e \\ v_z = v_{ca} \tan \beta \\ v_{ca} = v_a \cos \beta \\ \tan \alpha = S_x / (2\pi R_x) \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{v_a}{\sin \alpha} = \frac{v_e}{\sin(\pi - \alpha - \beta)} \quad (6)$$

其中

$$v_e = \omega_x R_x$$

式中 v_a 、 v_r 、 v_e ——土块绝对速度、相对叶片速度和牵连速度

v_{ca} —— v_a 沿螺旋圆周方向的速度分量

v_z ——物料输送的轴向速度

α ——叶片螺旋升角, ($^\circ$)

β —— v_a 与 v_e 的夹角,即物料升角, ($^\circ$)

联立式(5)、(6)得

$$v_z = \frac{\omega_x S_x}{2\pi} \frac{\tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (7)$$

故土块 P 运动轨迹是单向螺旋,其中心线与螺旋输送机轴线吻合,升角为 β ,旋向与螺旋输送机叶片旋向反向,且运动轨迹曲率半径 $R_e \approx r_x = R_x / \cos^2 \beta$ 。

2.4 斜置螺旋输送机轴向输送土壤最低转速分析

临界角速度是在作业过程中土块产生运移时的最低角速度,记作 ω_j ,工作时实际角速度需大于 ω_j [30]。取斜置螺旋输送机叶片外沿处任意土块 N 为研究对象,其受力图如图 10 所示。当 $\omega = \omega_j$ 时, $v_r = 0$, $v_a = v_e$, $\beta = 0^\circ$ 。土块 N 绕轴做圆周运动,运动轨迹为圆, A、B 分别为土块 N 输送轨迹最高点与最低点。 γ 为 C-C 图中标记土块位置的圆心角。

根据图 10、11 受力分析可得,颗粒在重力 G 、螺旋叶片支撑力 N_s 和摩擦力 F_s 、输送管内壁的支撑力

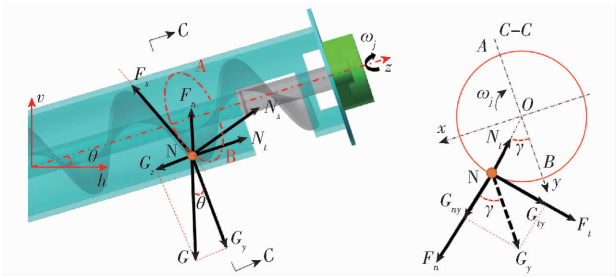


图 10 临界状态下土块 N 的受力分析

Fig. 10 Stress analysis of particles in critical state at soil particle N

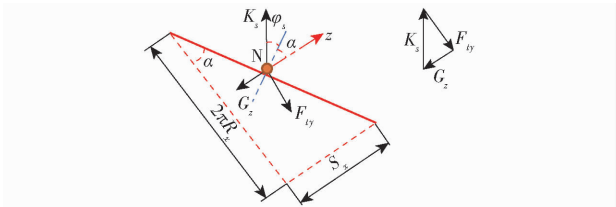


图 11 临界角速度时展开螺旋面上颗粒的受力分析

Fig. 11 Stress analysis of particles on helical surface at critical speed

N_t 和摩擦力 F_t 、离心力 F_n 的共同作用下达平衡状态。 $F_s = \mu_s N_s$, $F_t = \mu_t N_t$ (μ_s 、 μ_t 分别为土块与螺旋输送机片、输送管内壁摩擦因数); 且 $F_{ty} = G_{ty} + F_t$, 在临界状态下, 土块 N 运动必须满足全反力 $K_s > F_{ty} > G_z$ 。即

$$\begin{cases} G = G_z e_z + G_{ny} e_n + G_{ty} e_t \\ N_t = G_{ny} + F_n \\ F_n = m_n \omega_j^2 R_x \\ \tan(\pi/2 - (\alpha + \varphi_s)) = G_z / F_t \end{cases} \quad (8)$$

式中 G_z 、 G_{ny} 、 G_{ty} ——土块 N 自重 G 轴向、法向和切向分力, kN

e_z 、 e_n 、 e_t ——轴向、法向、切向的单位向量

m_n ——土块 N 质量, g

F_{ty} ——土块 N 切向合力, kN

φ_s ——物料与螺旋叶片之间的摩擦角, ($^\circ$)

由式(8)求解得

$$\begin{cases} \omega_j(\gamma) = \sqrt{\frac{g \cos \theta}{\mu_t R_x} (\tan(\alpha_j + \varphi_s) - \tan \theta \sqrt{\mu_t^2 + 1} \sin(\gamma + \varphi_t))} \\ \varphi_s = \arctan \mu_s \\ \varphi_t = \arctan \mu_t \end{cases} \quad (9)$$

式中 α_j ——螺旋叶片外缘处的螺旋升角, ($^\circ$)

φ_t ——物料与输送管内壁之间的摩擦角, ($^\circ$)

g ——重力加速度, m/s^2

由式(9)可知, $\gamma = 0^\circ$ 时, 土块 N 位于轨迹最低点 B, 对应临界角速度为 ω_{jB} ; $\gamma = \pi$ 时, 土块 N 位于轨迹最高点 A, 对应临界角速度 ω_{jA} 。则有 $\omega_j =$

$$\min \{ \omega_{jB}, \omega_{jA} \}。$$

当土块 N 位于点 B 处时, 其 F_n 、 G_{ny} 与 y 轴共线同向, 为确保土块受力平衡, 螺旋输送机叶片外缘离心力为同一轨迹上的最小值。故

$$\omega_j = \sqrt{\frac{g \cos \theta}{\mu_t R_x} (\tan(\alpha_j + \varphi_s) - \tan \theta \sin \varphi_t \sqrt{\mu_t^2 + 1})} \quad (10)$$

由式(10)可知, 螺旋升角与半径成反比, 当 R_x 为螺旋输送机叶片外缘的半径时, ω_j 有最小值 ω_{jB} , 等同于斜置螺旋输送机轴最低输送角速度。

相对于小麦、砂石骨料、粉尘类等物料, 由式(2)可知, 当螺径螺距确定时, 不同土壤质地存在不同容重对应不同输送量, 此时螺旋输送机轴最大临界转速校核值并非固定值。因此忽略螺旋部件转速过快对物料的搅拌作用, 只考虑土壤在斜置输送产生运动时最低转速, 将其作为分析指标。

将前文参数 ($D_x = 90 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 16^\circ$ 、 $\varphi_s = \arctan \mu_s = 21.05^\circ$ 、 $\varphi_t = \arctan \mu_t = 26.57^\circ$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $\theta = 30^\circ$) 代入式(10)得 $\omega_j \approx 12.46 \text{ rad/s}$, 即 $n_j \approx 30\omega_j/\pi = 119.03 \text{ r/min}$ 。

3 仿真试验

3.1 几何建模及参数设立

3.1.1 土壤-部件仿真模型

采用 SolidWorks 三维软件对烟草培土机作业部件进行实体建模, 以 .step 格式导入 EDEM 中: 为便于讨论, 设置培土部件整体材料为 65Mn 钢; 针对南方土壤结构特点进行简化, 以单球颗粒模拟土壤组成, 设置半径为 8 mm, 采用实体 BOX 堆积法填充土槽^[31-32]。填充时颗粒数生成方式为 random (1 ~ 1.5)。考虑仿真时计算量, 选用 Hertz Mindlin (no slip) 接触模型^[33]。

3.1.2 离散元模型材料参数与接触参数

将所建立的培土部件与土壤颗粒导入 EDEM 后, 通过前期测验及查阅文献, 对土壤、部件的材料参数与土壤-土壤、土壤-部件接触参数进行设定, 仿真参数如表 3 所示。

在 EDEM 中设置虚拟土槽, 其基本尺寸(长 × 宽 × 高)为 3 500 mm × 1 450 mm × 230 mm, 设置平面颗粒工厂与 BOX 土槽 z 轴正向上表面重合, 以速率 5.8×10^5 个/s 生成土壤颗粒, 总量 5.8×10^5 个, 生成颗粒总时间为 1.6 s。结合烟田作业实际情况, 机具两侧设置虚拟垄顶尺寸 3 500 mm × 300 mm × 30 mm, 采用上述步骤生成颗粒总量 50 000 个, 总时间 1 s。

表 3 离散元模型基本参数

参数	数值
土壤泊松比	0.25
土壤密度/(kg·m ⁻³)	2 780
土壤剪切模量/Pa	1.0×10 ⁶
土壤-土壤恢复系数	0.15
土壤-土壤静摩擦因数	0.35
土壤-土壤动摩擦因数	0.2
部件泊松比	0.3
部件密度/(kg·m ⁻³)	7 850
部件剪切模量/Pa	7.8×10 ¹⁰
土壤-部件恢复系数	0.17
土壤-部件静摩擦因数	0.4
土壤-部件动摩擦因数	0.3

3.2 仿真过程与评价指标

3.2.1 仿真建模

仿真开始时,培土部件位于土槽一侧沿 X 轴水平方向准备作业,如图 12 所示,总时间设置 15 s,每 0.1 s 记录一次数据。

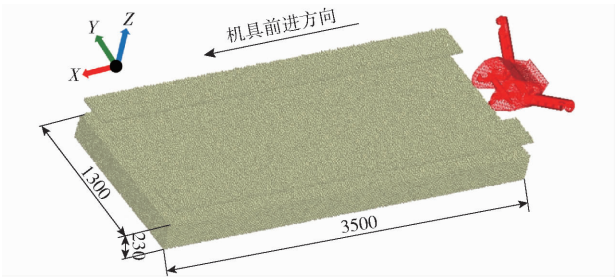


图 12 EDEM 仿真建模

Fig. 12 Virtual simulation modeling of EDEM

3.2.2 评价指标

参照 YC/T 569—2018《烟草田间作业机械选型测试规程》、JB/T 7679—2008《螺旋输送机》,选取培土高度 h 、培土幅度 l 、取土率 k 为评价指标。所选评价指标如图 13 所示。

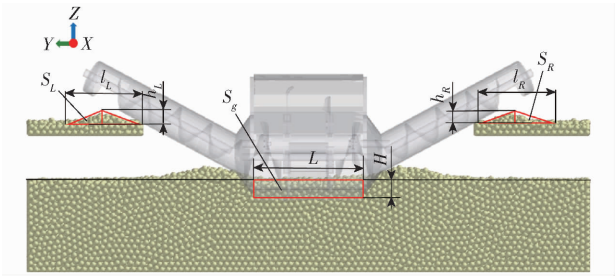


图 13 仿真评价指标示意图

Fig. 13 Schematic of virtual simulation evaluation index

(1) 培土高度与培土幅度

培土高度为培土后高于垄面的土壤所堆积的铅锤高度;培土幅度为堆积后土壤的底部宽度,适宜高度与幅度利于烟草不定根系生长。EDEM 仿真作业结束后选取机组前进方向平面 ZOY 的垂直颗粒截

面,分别对两侧堆积土壤的高度及底宽进行测量,求平均值。计算公式^[34]为

$$\begin{cases} h = \frac{h_L + h_R}{2} \\ l = \frac{l_L + l_R}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中 h_L ——左侧土垄培土高度,mm
 h_R ——右侧土垄培土高度,mm
 l_L ——左侧土垄培土幅度,mm
 l_R ——右侧土垄培土幅度,mm

(2) 取土率

作业效果涉及到培土土量,此处根据实际要求,以取土率为评价指标,即左右螺旋输送机输送土壤质量总和与沟底铣削土壤质量之比。计算式为

$$k = \frac{l_L h_L + l_R h_R}{2LH} \times 100\% = \frac{S_R + S_L}{S_g} \times 100\% \approx \frac{lh}{LH} \times 100\% \quad (12)$$

式中 S_L ——左侧输送土壤堆积截面积,mm²
 S_R ——右侧输送土壤堆积截面积,mm²
 t_f ——机具平稳作业时仿真时长,s
 ρ ——仿真颗粒密度,kg/m³
 S_g ——取土位置面积,mm²

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 试验方案与结果

根据试验原理,采用 CCD 设计方法制定试验方案,以机具前进速度、旋耕深度、螺旋输送机轴转速为试验因素;以培土高度、培土幅度、取土率为试验指标。通过对因素水平编码确定机具作业参数,分别进行建模仿真。并对仿真结果中影响试验指标的因素进行显著性分析,将各因素组合进行参数优化,最终获取较适宜的各试验因素组合。试验因素编码如表 4 所示,试验方案与结果如表 5 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Experimental factors and codes			
编码	因素		
	机具前进速度	旋耕深度	螺旋输送机轴转速
	$x_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	x_2 / mm	$x_3 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
-1.682	0.180	46.6	232.73
-1	0.239	50.0	260.00
0	0.326	55.0	300.00
1	0.413	60.0	340.00
1.682	0.472	63.4	367.27

3.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 12 软件对试验结果进行二

表 5 试验方案与结果
Tab.5 Test plan and result

试验号	因素			培土高度	培土幅度	取土率
	X_1	X_2	X_3	h/mm	l/mm	$k/\%$
1	-1	-1	-1	21.28	126.49	20.71
2	1	-1	-1	21.84	127.85	21.48
3	-1	1	-1	23.68	129.14	19.60
4	1	1	-1	22.97	128.70	18.95
5	-1	-1	1	24.57	128.93	24.37
6	1	-1	1	26.02	131.64	26.35
7	-1	1	1	25.73	131.29	21.65
8	1	1	1	28.08	133.81	24.09
9	-1.682	0	0	24.45	129.19	22.09
10	1.682	0	0	25.67	130.74	23.47
11	0	-1.682	0	23.32	128.52	24.74
12	0	1.682	0	25.43	130.38	20.11
13	0	0	-1.682	21.61	126.61	19.13
14	0	0	1.682	29.27	134.50	27.53
15	0	0	0	23.40	128.57	21.04
16	0	0	0	23.83	128.21	21.37
17	0	0	0	23.29	128.98	21.01
18	0	0	0	23.10	128.06	20.69
19	0	0	0	21.93	126.62	19.42
20	0	0	0	23.20	128.49	20.85
21	0	0	0	22.35	127.75	19.97
22	0	0	0	23.04	128.36	20.68
23	0	0	0	23.16	128.19	20.76

次回归分析,并进行多元回归拟合^[35-36],得到培土高度 h 、培土幅度 l 及取土率 k 关于 X_1 、 X_2 、 X_3 的回归方程,并进行显著性检验。

培土高度 h 方差分析如表 6 所示。其中 X_3 对 h 的影响极显著 ($P < 0.01$); X_1 、 X_2 、 X_1^2 、 X_3^2 对 h 影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$); 其余因素对 h 影响不显著 ($P > 0.1$)。各因素对培土高度 h 影响的回归方程为

$$h = 23.05 + 0.42X_1 + 0.75X_2 + 2.01X_3 + 0.55X_1^2 + 0.68X_3^2$$

对上述回归方程进行失拟检验,结果如表 6 所示,失拟项 $P = 0.1559$,不显著 ($P > 0.1$),证明不存在其他影响试验指标的主要因素。试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

培土幅度 l 方差分析如表 7 所示。其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 对 l 影响极显著 ($P < 0.01$); 其余因素对 l 影响不显著 ($P > 0.1$)。各因素对培土幅度 l 影响的回归方程为

$$l = 128.15 + 0.64X_1 + 0.82X_2 + 1.96X_3 + 0.57X_1^2 + 0.78X_3^2$$

对上述回归方程进行失拟检验,结果如表 7 所示,失拟项 $P = 0.3063$,不显著 ($P > 0.1$),证明不存

在其他影响试验指标的主要因素。试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

表 6 培土高度 h 方差分析
Tab.6 Variance analysis for soil height h

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	81.13	9	9.01	19.30	<0.0001**
X_1	2.38	1	2.38	5.10	0.0418*
X_2	7.77	1	7.77	16.63	0.0013*
X_3	55.43	1	55.43	118.66	<0.0001**
X_1X_2	0.0171	1	0.0171	0.0366	0.8512
X_1X_3	1.95	1	1.95	4.18	0.0618
X_2X_3	0.0120	1	0.0120	0.0257	0.8751
X_1^2	4.80	1	4.80	10.28	0.0069*
X_2^2	1.50	1	1.50	3.22	0.0960
X_3^2	7.44	1	7.44	15.92	0.0015*
残差	6.07	13	0.4671		
失拟项	3.50	5	0.7009	2.18	0.1559
总和	87.21	22			

注:**表示极显著 ($P < 0.01$), *表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。下同。

表 7 培土幅度 l 方差分析
Tab.7 Variance analysis for soil width l

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	87.06	9	9.67	18.68	<0.0001**
X_1	5.61	1	5.61	10.85	0.0058**
X_2	9.12	1	9.12	17.61	0.0010**
X_3	52.43	1	52.43	101.27	<0.0001**
X_1X_2	0.4950	1	0.4950	0.9561	0.3460
X_1X_3	2.32	1	2.32	4.48	0.0540
X_2X_3	0.1326	1	0.1326	0.2561	0.6213
X_1^2	5.15	1	5.15	9.95	0.0076**
X_2^2	2.38	1	2.38	4.61	0.0513
X_3^2	9.62	1	9.62	18.58	0.0008**
残差	6.73	13	0.5177		
失拟项	3.19	5	0.6386	1.44	0.3063
总和	93.79	22			

取土率 k 方差分析如表 8 所示。其中 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 对 k 的影响极显著 ($P < 0.01$); X_1 、 X_2^2 对 k 的影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$); 其余因素对 k 影响不显著 ($P > 0.1$)。各因素对取土率 k 影响的回归方程为

$$k = 20.66 + 0.5X_1 - 1.2X_2 + 2.19X_3 + 0.59X_1^2 + 0.46X_2^2 + 0.78X_3^2$$

对上述回归方程进行失拟检验,结果如表 8 所示,失拟项 $P = 0.1492$,不显著 ($P > 0.1$),证明不存在其他影响试验指标的主要因素。试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

3.4 响应曲面分析

使用 Design-Expert 12 软件将数据处理,得出机

表 8 取土率 k 方差分析

Tab. 8 Variance analysis for soil fetching rate k					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	109.17	9	12.13	23.25	<0.000 1 **
X_1	3.45	1	3.45	6.61	0.023 3 *
X_2	19.71	1	19.71	37.78	<0.000 1 **
X_3	65.23	1	65.23	125.03	<0.000 1 **
X_1X_2	0.115 2	1	0.115 2	0.220 8	0.646 2
X_1X_3	2.31	1	2.31	4.43	0.055 3
X_2X_3	0.224 4	1	0.224 4	0.430 2	0.523 3
X_1^2	5.41	1	5.41	10.37	0.006 7 **
X_2^2	3.33	1	3.33	6.39	0.025 2 *
X_3^2	9.62	1	9.62	18.44	0.000 9 **
残差	6.78	13	0.521 7		
失拟项	3.95	5	0.790 6	2.24	0.149 2
总和	115.95	22			

具前进速度 x_1 、旋耕深度 x_2 、螺旋输送机轴转速 x_3 之间的显著和较显著交互作用对培土高度 h 、培土幅度 l 、取土率 k 3 个试验指标影响的响应曲面,如图 14 所示。

如图 14a 所示,当机具前进速度一定时,培土高度随螺旋输送机轴转速增大而增大,。如图 14b 所示,当螺旋输送机轴转速一定时,培土高度随旋耕深度增加而增加。

如图 14c 所示,培土幅度随螺旋输送机轴转速增加而增加,随机具前进速度增加而略微增加。其中影响培土幅度的主要试验因素是螺旋输送机轴转速。如图 14d 所示,当旋耕深度一定时,培土幅度随

螺旋输送机轴转速增加而增加。
如图 14e 所示,机具前进速度增加、螺旋输送机轴转速增加使取土率增大。如图 14f 所示,当螺旋输送机轴转速取较小值时,取土率随旋耕深度增大而减小。
借助 Design-Expert 12 软件中的优化功能对 6 个回归模型求解,根据烟田农艺要求和作业实际情况及上述模型的分析结果,选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

选取一组合理参数组合,即当机具前进速度为 0.4 m/s、旋耕深度为 60 mm、螺旋输送机轴转速为 339 r/min 时,机具综合作业性能较理想。对这组数据进行离散元模拟试验,仿真试验结果表明,培土高度为 27.76 mm,培土幅度为 132.94 mm,取土率为 23.66%。

4 田间试验

4.1 试验条件

田间试验选在湖南省宁乡市双凫铺镇合轩村烟草种植基地,垄沟土壤含水率为 10.1%,土壤坚实度为 632 kPa。机具以最佳作业参数组合对试验田

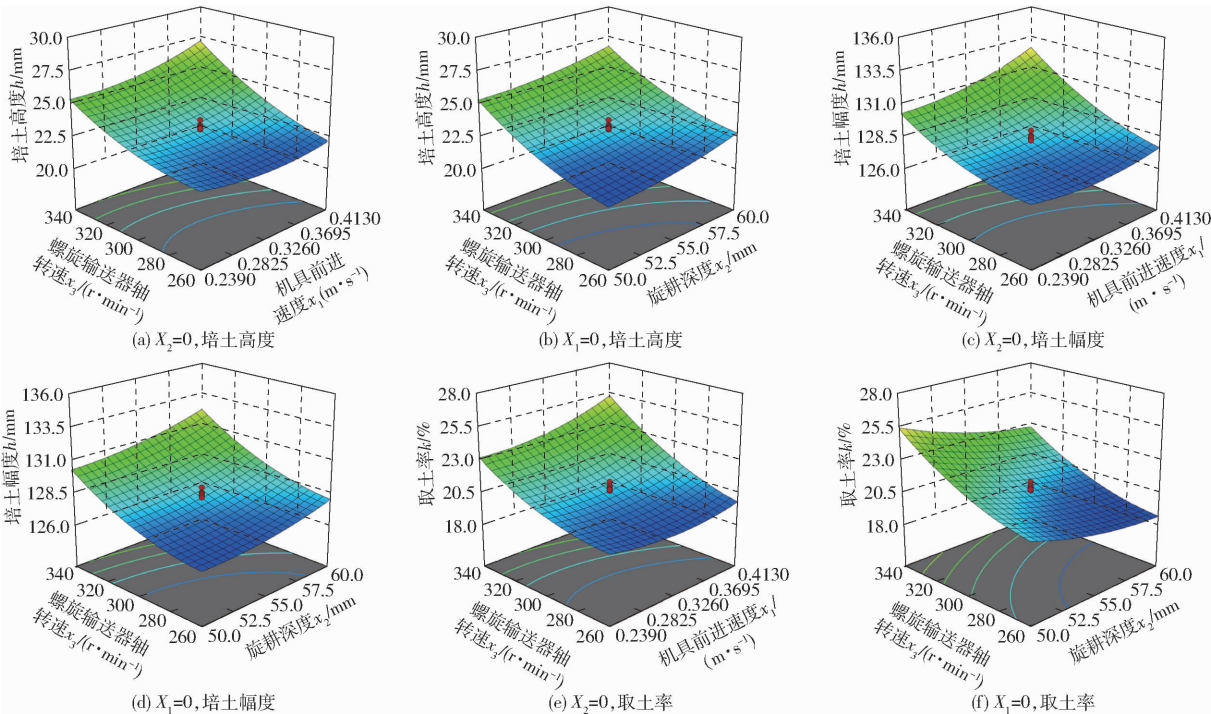


图 14 试验因素对指标影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces of influence of test factors on index

开展作业。试验装置及田间试验如图 15 所示。



图 15 田间试验

Fig. 15 Field test diagram

4.2 评价指标

参考 YC/T 569—2018《烟草田间作业机械选型测试规程》、JB/T 7679—2008《螺旋输送机》选取培土高度、培土幅度等为试验指标。

4.2.1 培土高度与培土幅度

在试验作业行程稳定区随机取 11 处作为观测地,同一水平处垂直面位置左右各测 1 点,分别测量 11 处观测地高于作业前地表的土壤高度并求均值。以及新覆土层土壤宽度并求均值,共 22 点,其公式为

$$\left\{ \begin{aligned} a_{k1} &= \frac{\sum_{i=1}^{n_{k1}} a_{k1i}}{n_k} \\ a_{k2} &= \frac{\sum_{i=1}^{n_k} a_{k2i}}{n_k} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} a_1 &= \frac{\sum_{k=1}^N a_{k1}}{N} \\ a_2 &= \frac{\sum_{k=1}^N a_{k2}}{N} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中 a_{k1} 、 a_{k2} ——第 k 个行程的培土高度与培土幅度均值,mm

a_{k1i} 、 a_{k2i} ——第 k 个行程中的第 i 点的培土高度与培土幅度,mm

n_k ——某个行程中所测的点数,个

a_1 、 a_2 ——工况的培土高度与培土幅度平均值,mm

N ——同一工况的行程数

4.2.2 取土率

对试验区域内 22 处取点位置的培土高度与培土幅度进行统计测算,结合式 (12) 可知,在工况相同前提下,取土率为沟底取土位置截面面积与两侧培土截面面积之比,其计算公式为

$$k = \frac{a_1 a_2}{LH} \times 100\% \quad (16)$$

4.3 试验结果与分析

田间试验结果如表 9 所示。

表 9 整机性能田间试验结果

Tab. 9 Field test results of prototype

工况	培土高度/mm	培土幅度/mm	取土率/%
1	24.34	130.31	21.14
2	23.92	129.75	20.69
3	24.86	131.21	21.74
平均值	24.37	130.42	21.19

由表 9 可知,整机作业培土高度为 24.37 mm,培土幅度为 130.42 mm,取土率为 21.19%。田间试验中 3 个评价指标与仿真试验基本一致,误差分别为 12.21%、1.90%、10.44%。试验结果显示整机作业质量较稳定,性能符合设计要求。

5 讨论

从仿真试验结果来看,旋耕碎土装置铧削颗粒向后抛送,在单位位移量一致前提下机具存土箱内充土状态相对平稳,随着螺旋输送机轴转速加快,水平螺旋输送机高速旋转可能对后抛颗粒产生击退与回弹,影响机具行驶过程中的充土效果;斜置螺旋输送机装置由于转速变快产生轴流现象,导致斜置输送时土壤颗粒的回流,影响侧置输送效果;此外,击退与回弹的抛掷颗粒在存土箱底板铲扰动下,上层部分土壤颗粒因接触正旋转耕碎土装置而向机组前端喷出,影响存土箱存土效果。

在田间作业环节过程中,旋耕弯刀旋切并抛掷土壤由机体前端喷溅,造成土粒浪费;土壤在水平螺旋输送机与斜置螺旋输送机拐点位置漏输现象较显著;水平螺旋输送机装置与旋耕碎土装置的位置以及斜置螺旋输送机装置变径管拐点处角度选择与结构设计,还具有进一步改进优化的空间。从整机性能和农艺要求考虑,为了避免触土部件铧抛垄腹土壤而破坏烟草不定根系生长,并实现精准定量覆土,采用垄沟取土双侧提升输送于垄面的培土方式,土量决定培土高度与幅度。必要时,机组需非隔行作业。

6 结论

(1) 针对丘陵山区烟草培土作业现状对培土部件进行了参数设计,设计了一种中间集抛后送式双侧斜输烟草培土机,可实现多地形、小田块的烟田培土作业,对螺旋输送机装置进行动力学分析,得出土粒运动与螺旋输送机轴转速之间的关系。

(2) 运用 EDEM 技术建立了土壤-部件仿真模型,以机具前进速度、旋耕深度、螺旋输送机轴转速

为试验因素,以培土高度、培土幅度及取土率为评价指标,结合 Design-Expert 软件得到试验因素与指标间的回归数学模型,进行了仿真试验。其结果表明,当机具前进速度为 0.4 m/s、旋耕深度为 60 mm、螺旋输送机轴转速为 339 r/min 时,其培土高度为 27.76 mm,培土幅度为 132.94 mm,取土率为

23.66%,机具综合作业性能较理想。
(3)田间性能试验结果表明,整机作业后培土高度为 24.37 mm,培土幅度为 130.42 mm,取土率为 21.19%,各项指标误差分别为 12.21%、1.90%、10.44%。为集中后抛斜置输送培土机设计提供了理论依据与技术支持。

参 考 文 献

[1] 王晓磊. 现代烟草农业机械化技术体系构建策略分析[J]. 现代农业研究,2019,43(7):31-32.
WANG Xiaolei. Analysis on the strategy of technical system construction of modern tobacco agricultural mechanization[J]. Modern Agriculture Research,2019(7):31-32. (in Chinese)

[2] 李建华,黄银甫,范沿沿,等. 烟草中耕培土机培土部件研究[J]. 价值工程,2016,35(17):249-251.
LI Jianhua, HUANG Yinfu, FAN Yanyan, et al. Study on covering parts of tobacco cultivators[J]. Value Engineering, 2016, 35(17):249-251. (in Chinese)

[3] 殷寿安,林选知,欧焕财,等. 烟叶中耕培土及机械化作业技术分析[J]. 湖南农机,2012,39(11):30-32,34.
YIN Shouan, LIN Xuanzhi, OU Huancai, et al. Tobacco cultivation and banking and analysis of its mechanical operation technology[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2012, 39(11):30-32,34. (in Chinese)

[4] 王吉亮,王序俭,曹肆林,等. 中耕施肥机械技术研究现状及发展趋势[J]. 安徽农业科学,2013,41(4):1814-1816,1825.
WANG Jiliang, WANG Xujian, CAO Silin, et al. The status and development trend of cultivator and fertilizer mechanization technique[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(4):1814-1816,1825. (in Chinese)

[5] 范沿沿,王龙飞,李建华,等. 基于 AMESim 的某烟草中耕培土机液压系统的仿真分析[J]. 液压气动与密封,2017,37(9):41-43.
FAN Yanyan, WANG Longfei, LI Jianhua, et al. Simulation analysis of hydraulic system for tobacco cultivator based on AMESim[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2017, 37(9):41-43. (in Chinese)

[6] SHADRACK O, NANCY N, CHARLES K, et al. Effect of potato hilling on soil temperature, soil moisture distribution and sediment yield on a sloping terrain[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 184:24-36.

[7] 仝振伟,张秀丽,吴亚文,等. 基于 AMESim 的烟草中耕培土机液压系统设计与仿真研究[J]. 液压与气动,2020(8):139-144.
TONG Zhenwei, ZHANG Xiuli, WU Yawen, et al. Design and simulation of hydraulic system of tobacco hilling machine based on AMESim[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(8):139-144. (in Chinese)

[8] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏,等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):116-126,295.
DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1):116-126,295. (in Chinese)

[9] 王振国,朱鑫,陈天才,等. 围苑培土技术对烟草生长和抗病性的影响[J]. 植物医学,2022,1(3):54-60.
WANG Zhenguo, ZHU Xin, CHEN Tiancai, et al. Effect of enclosure cultivation technology on the growth and disease resistance of tobacco[J]. Plant Health and Medicine, 2022, 1(3):54-60. (in Chinese)

[10] 何激光,张晟,邓志强,等. 中耕培土机械装备研究进展[J]. 农业工程与装备,2022,49(5):1-5.
HE Jiguang, ZHANG Sheng, DENG Zhiqiang, et al. Research progress of the cultivation and banking machine and equipment [J]. Agricultural Engineering and Equipment, 2022, 49(5):1-5. (in Chinese)

[11] 衣淑娟,孙志江,李衣菲,等. 马铃薯中耕前期圆盘式中耕机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):98-108.
YI Shujuan, SUN Zhijiang, LI Yifei, et al. Design and test of disc potato cultivator at early inter-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):98-108. (in Chinese)

[12] 吕金庆,刘齐卉,杨德秋,等. 砂壤土条件下马铃薯中耕机关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):27-39.
LÜ Jinqing, LIU Qihui, YANG Deqiu, et al. Design and test of key components of ploughshare potato field cultivator in sandy loam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):27-39. (in Chinese)

[13] 吕金庆,刘志峰,王鹏榕,等. 驱动式碎土除草多功能马铃薯中耕机设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(10):1-8.
LÜ Jinqing, LIU Zhifeng, WANG Pengrong, et al. Design and experiment of driving-type crushing-weeding multi-functional potato cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10):1-8. (in Chinese)

[14] 吕美巧,刘丽敏,吴玉. V型深沟甘蔗中耕施肥起垄培土机的研究设计[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2019,45(2):251-255.
LÜ Meiqiao, LIU Limin, WU Yu. Research and design of V-shaped deep trench sugarcane cultivating machine[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2019, 45(2):251-255. (in Chinese)

[15] 李明,张婷,董学虎,等. 3ZSP-2 型甘蔗中耕施肥培土机刮板式排肥装置参数优化[J]. 农业工程学报,2016,32(23):36-42.
LI Ming, ZHANG Ting, DONG Xuehu, et al. Parameter optimization on scraper fertilizer feed unit of 3ZSP-2 type sugarcane

- intertillage fertilizer applicator-cum-hiller[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 36–42. (in Chinese)
- [16] 齐江涛,孙会彬,贾洪雷,等. 曲翼中耕培土装置作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 79–85.
QI Jiangtao, SUN Huibin, JIA Honglei, et al. Optimization and experiment of working parameters of cultivator-ridging-device with curved wing[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 79–85. (in Chinese)
- [17] 林静,王磊,李宝筏,等. 2ZZ-3 型深松培垄施肥联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 9–17.
LIN Jing, WANG Lei, LI Baofa, et al. Design and test of 2ZZ-3 type deep scarification-terrace ridge-fertilization combine intertill machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 9–17. (in Chinese)
- [18] 李明军,于家川,嵇冬玲,等. 棉花中耕培土施肥一体机设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 126–132.
LI Mingjun, YU Jiachuan, ZHUO Dongling, et al. Design and experiment of cotton cultivation and fertilization machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(6): 126–132. (in Chinese)
- [19] 刘剑君. 小型多功能烟田管理机的设计[J]. 农机化研究, 2008, 30(2): 98–100.
LIU Jianjun. The design of a mini-tractor for tobacco-plant[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(2): 98–100. (in Chinese)
- [20] 张传斌,余泳昌,吴亚萍. 高通过性四轮自走式烟草田间作业机的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 37–41.
ZHANG Chuanbin, YU Yongchang, WU Yaping. Design of high trafficability four wheel self-propelled field machine for tobacco[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 37–41. (in Chinese)
- [21] 肖名涛,孙松林,黄国联,等. 小型履带底盘螺旋培土机研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(10): 52–58.
XIAO Mingtao, SUN Songlin, HUANG Guolian, et al. Study on a small track chassis form screw-type banking machine[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(10): 52–58. (in Chinese)
- [22] 张秀丽,仝振伟,李连豪,等. 复合切剖式烟草中耕培土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 73–81.
ZHANG Xiuli, TONG Zhenwei, LI Lianhao, et al. Design and experiment of tobacco hilling machine for compound cutting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 73–81. (in Chinese)
- [23] 刘超. 烤烟中耕培土复式作业机的研制及试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2019.
LIU Chao. Development and experimental study of flue-cured tobacco cultivating soil compounding machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [24] 李晨硕,李继光,代占超. 对实现我国烟田生产机械化的思考和建议[J]. 拖拉机与农用运输车, 2016, 43(5): 1–3.
LI Chenshuo, LI Jiguang, DAI Zhanchao. Thought and suggestion for tobacco farm production mechanization in China[J]. Tractor & Farm Transporter, 2016, 43(5): 1–3. (in Chinese)
- [25] 吴元华,申国明,王勉,等. 湖北烟田地块特征与田间作业农机适用性分析[J]. 农学学报, 2023, 13(1): 51–60.
WU Yuanhua, SHEN Guoming, WANG Mian, et al. The influence of the characteristics of tobacco field on the applicability of agricultural machinery in Hubei Province[J]. Journal of Agriculture, 2023, 13(1): 51–60. (in Chinese)
- [26] 张阳光,卢博友,刘洪萍,等. 新型烟草培土机培土器的设计[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 81–83.
ZHANG Yangguang, LU Boyou, LIU Hongping, et al. The design of new tobacco hiller's covering body[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 81–83. (in Chinese)
- [27] 肖茂华,汪开鑫,杨望,等. 基于东方蜈蚣爪趾的仿生旋耕刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 55–63.
XIAO Maohua, WANG Kaixing, YANG Wang, et al. Design and experiment of bionic rotary blade based on claw toe of *Gryllotalpa orientalis burmeister*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 55–63. (in Chinese)
- [28] 杨玉婉,佟金,马云海,等. 基于鼯鼠多趾结构特征的仿生切土刀片设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 122–128.
YANG Yuwan, TONG Jin, MA Yunhai, et al. Design and experiment of bionic soil-cutting blade based on multi-claw combination of mole rat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 122–128. (in Chinese)
- [29] 郭俊,姬长英,方会敏,等. 正反转旋耕后土壤和秸秆位移试验分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 21–26.
GUO Jun, JI Changying, FANG Huimin, et al. Experimental analysis of soil and straw displacement after up-cut and down-cut rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 21–26. (in Chinese)
- [30] 梅潇,王伟,刘海洋,等. 大倾角螺旋输送机中物料颗粒的运动特性研究[J]. 机械设计与制造, 2018(增刊2): 14–17.
MEI Xiao, WANG Wei, LIU Haiyang, et al. Research on kinematic characteristic of particles in steeply inclined screw conveyor[J]. Machinery Design&Manufacture, 2018(Supp. 2): 14–17. (in Chinese)
- [31] MA Chen, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Operation power consumption and verification tests of a trenching device for orchards in Xinjiang based on discrete element[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021(1): 133–141.
- [32] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 59–69.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 59–69. (in Chinese)

ZHANG Dongliang, MO Rong, SUN Huibin, et al. Tool wear state recognition based on chaotic time series analysis and support vector machine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(8): 2138 – 2146. (in Chinese)

[15] 赵帅, 黄亦翔, 王浩然, 等. 基于随机森林与主成分分析的刀具磨损评估[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 181 – 189.

ZHAO Shuai, HUANG Yixiang, WANG Haoren, et al. Random forest and principle components analysis based on health assessment methodology for tool wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 181 – 189. (in Chinese)

[16] 刘成颖, 吴昊, 王立平, 等. 基于 PSO 优化 LS – SVM 的刀具磨损状态识别[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(9): 975 – 979.

LIU Chengying, WU Hao, WANG Liping, et al. Tool wear state recognition based on LS – SVM with the PSO algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(9): 975 – 979. (in Chinese)

[17] 胡鸿志, 覃畅, 管芳, 等. 基于麻雀搜索算法优化支持向量机的刀具磨损识别[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10755 – 10761.

HU Hongzhi, QIN Chang, GUAN Fang, et al. Tool wear recognition based on sparrow search algorithm optimized support vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10755 – 10761. (in Chinese)

[18] LIAO Xiaoping, ZHOU Gang, ZHANG Zhenkun, et al. Tool wear state recognition based on GWO – SVM with feature selection of genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 1051 – 1063.

[19] 梁柱, 宋小春. WOA – SVM 算法在钛合金端铣刀具磨损预测的研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(15): 166 – 174.

LIANG Zhu, SONG Xiaochun. Research on tool wear prediction of titanium alloy end milling based on WOA – SVM algorithm [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(15): 166 – 174. (in Chinese)

[20] 臧廷朋, 温广瑞, 廖与禾. 基于稳健回归分析的转子系统不平衡量识别[J]. 振动·测试与诊断, 2016, 36(1): 126 – 130, 202.

ZANG Tingpeng, WEN Guangrui, LIAO Yuhe. Estimation of the unbalance of rotor system based on robust regression analysis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(1): 126 – 130, 202. (in Chinese)

[21] 曹肆林, 谢建华, 杨豫新, 等. 侧排式棉秸秆还田及残地膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(5): 1514 – 1528.

CAO Silin, XIE Jianhua, YANG Yuxin, et al. Design and experiment of side row cotton straw returning and residual film recovery combined machine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5): 1514 – 1528. (in Chinese)

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

[23] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm; a novel approach for global optimization[J]. Soft Computing, 2019, 23: 715 – 734.

[24] 王翔. 分布混沌理论及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.

WANG Xiang. Distributional chaos theory and its application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)

[25] MIRJALILI S. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. Knowledge-based Systems, 2016, 96: 120 – 133.

[26] 张小龙, 张氢, 秦仙蓉, 等. 基于 ITD 复杂度和 PSO – SVM 的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 102 – 107, 138.

ZHANG Xiaolong, ZHANG Qing, QIN Xianrong, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on ITD Lempel-ziv complexity and PSO – SVM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24): 102 – 107, 138. (in Chinese)

[27] 高文欣, 刘升, 肖子雅, 等. 柯西变异和自适应权重优化的蝴蝶算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(15): 43 – 50.

GAO Wenxin, LIU Sheng, XIAO Ziya, et al. Butterfly optimization algorithm based on Cauchy variation and adaptive weight [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(15): 43 – 50. (in Chinese)

(上接第 108 页)

[33] 李蒙良, 廖庆喜, 裴立民, 等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 47 – 58.

LI Mengliang, LIAO Qingxi, Pei Liming, et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 47 – 58. (in Chinese)

[34] 吕金庆, 刘齐卉, 李紫辉, 等. 犁铧式马铃薯中耕机培土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 71 – 82.

LÜ Jinqing, LIU Qihui, LI Zihui, et al. Design and experiment of soil cultivating device of plowshare potato field cultivator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 71 – 82. (in Chinese)

[35] 葛宜元, 梁秋艳, 王桂莲. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.

[36] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.