

播种机星齿球面盘式覆土装置设计与试验

卢琦^{1,2} 刘立晶^{1,2} 刘忠军^{1,2} 靳文婷^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对 V 型挤压式覆土装置在黏土条件下作业不可靠, 种沟闭合不严密, 易造成种子“架空”和“晾种”的生产实际问题, 设计一种星齿球面盘式覆土装置, 提高播种机覆土质量。分析了星齿球面盘式覆土装置的作业原理, 通过对覆土作业过程中土壤颗粒的运动学分析, 确定了影响覆土作业质量的主要结构参数, 并对星齿球面覆土盘主要结构参数和安装参数进行了设计。借助 EDEM 离散元仿真技术, 建立了土壤与覆土装置的互作模型, 以星齿球面覆土盘安装倾角、安装间距、入土深度为试验因素, 以覆土量与覆土量变异系数为评价指标, 分别进行了单因素与 Box - Behnken 试验, 确定了星齿球面覆土盘的最优结构参数组合为安装倾角 25.03°、安装间距 196.66 mm、入土深度 77.65 mm。取安装倾角 25°、安装间距 197 mm、入土深度 77 mm 进行了田间验证试验, 试验结果表明: 最优参数组合下, 覆土量平均值为 241.46 g, 与仿真结果基本一致, 相对误差为 5.12%, 覆土量变异系数为 3.71%, 覆土均匀, 作业质量好, 覆土作业后种子播深满足农艺要求, 星齿球面盘式覆土装置能有效改善播种机的覆土性能。

关键词: 播种机; 覆土装置; 星齿球面盘; EDEM 仿真

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)04-0023-09

OSID:



Design and Experiment of Star-tooth Spherical Disc Soil-covering Device for Planter

LU Qi^{1,2} LIU Lijing^{1,2} LIU Zhongjun^{1,2} JIN Wenting^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the unreliable operation of the V-type extrusion soil-covering device under clay conditions, the seed furrow is not tightly closed, which is easy to cause the actual production problems of seed “overhead” and “seed drying”. A star-toothed spherical disc soil-covering device was designed to improve the soil covering quality of the planter. The working principle of the star-tooth spherical disc soil-covering device was analyzed. Through the kinematic analysis of soil particle in the process of soil covering operation, the main structural parameters affecting the quality of soil covering operation were determined, and the main structural parameters and installation parameters of the star-tooth spherical soil-covering disc were designed. The interaction model between soil and soil-covering device was established by using EDEM. The single factor and Box - Behnken tests were carried out with the installation inclination angle, installation distance and penetration depth of the star-tooth spherical disc as the test factors, and the weight of the covering soil and the coefficient of variation of the covering soil weight as the evaluation index. The optimal structural parameter combination of the star-tooth spherical soil-covering disc was determined as installation inclination angle of 25.03°, installation distance of 196.66 mm, and penetration depth of 77.65 mm. A field validation test was conducted under this parameter combination. The field validation test was carried out by taking the installation inclination angle of 25°, installation distance of 197 mm, and penetration depth of 77 mm. The test results showed that the average weight of covering soil was 241.46 g, which was consistent with the simulation results, and the relative error was 5.12%. The coefficient of variation of the covering soil weight was 3.71%. The weight of covering soil was uniform and the operation quality was good. The seed sowing depth met the agronomic requirements after the soil covering operation. The star-tooth spherical disc soil-covering device can effectively improve the soil-covering performance of the planter.

Key words: planter; soil-covering device; star-tooth spherical disc; EDEM simulation

收稿日期: 2023-08-10 修回日期: 2023-10-24

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科技专项(ZDZX2020-2)

作者简介: 卢琦(1991—), 男, 博士生, 主要从事农业机械设计与理论研究, E-mail: sxndluqi@163.com

通信作者: 刘立晶(1976—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事种植机械技术与装备研究, E-mail: xylilj@ sina.com

0 引言

覆土装置作为播种机重要工作部件之一,主要在开沟下种后完成覆土盖种作业^[1]。覆土作业应满足将种沟内的种子覆盖严密,并达到覆土量适宜和覆土均匀的目的^[2]。其作业性能决定了种子生长的土壤环境,进而影响种子发芽及出苗^[3-4]。目前,常见覆土装置工作时主要利用对土壤的侧向推移进行种沟覆土,按结构分主要有拖环式、八字型刮板式、双圆盘式、V 型挤压式 4 种^[5-6],其中 V 型挤压式覆土装置集覆土和镇压功能为一体,也称为 V 型镇压器,在玉米精量播种机上应用最为广泛。但实际生产过程中,V 型挤压式覆土装置有时只能将种沟上层表土闭合,种沟内的种子不能很好地和土壤接触,在种子上方形成空穴,造成种子“架空”,严重时种沟土壤不能闭合,造成“晾种”,影响种子发芽及出苗,在土壤流动性较差的黏土中表现尤为明显,因此需要对覆土装置进一步研究。

近年来,对于播种机质量控制研究大多集中在开沟器、排种器、导种装置及电驱控制系统等方面,对于结构相对简单的覆土装置研究较少。王景立^[5]利用高速摄影技术对种子被覆盖前产生的位移进行研究,结果表明决定覆土过程中种子位移变化的主要原因是种子被覆盖后随土流一起运动。刘选伟等^[7]为了减少覆土过程中种子位移,采用均匀设计方法,设计了双层圆盘式覆土器,并进行了试验研究。陈海涛等^[8]为提高 2BMFJ 系列原茬地免耕覆秸精量播种机作业过程中覆土镇压及防粘土性能,设计一种兼具覆土、镇压和减粘功能的三向可调式 V 型覆土镇压器。郭慧等^[6]为简化机具结构,同时解决传统播种作业过程中覆土及镇压作业稳定性不佳的问题,设计了一种由左右 2 个具有锥形结构的覆土镇压轮组成,兼具覆土和镇压功能的覆土镇压器。张志君等^[1]认为覆土装置无法将大土块有效破碎,造成了空穴的形成,为此设计了破碎式仿生覆土装置。但以上研究多适用于流动性较好的土壤条件,在黏重土壤条件下适应性不强,种沟闭合不严实的现象依旧存在。

针对上述问题,本文提出一种星齿球面盘式覆土装置,对其主要结构参数进行设计,通过理论分析和仿真试验相结合的方法确定最佳工作参数,并通过田间对比试验对性能加以验证。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

播种单体整体结构如图 1 所示,主要由播种

单体主体、星齿球面盘式覆土装置、镇压装置等组成,其中星齿球面盘式覆土装置安装在播种单体主体和镇压装置之间。星齿球面盘式覆土装置结构如图 2 所示,主要由星齿球面覆土盘、覆土盘安装侧板、深度调节弹簧、丝杠、轴套、固定架、轴承座等组成。固定架与播种单体机架通过螺栓固连,覆土盘安装侧板与播种单体机架铰接。左、右两星齿球面覆土盘通过螺栓与覆土盘安装侧板连接,并与竖直面呈一定的夹角,通过更换不同长度的轴套可改变左、右两星齿球面覆土盘的安装间距。为了增强覆土装置强度,两侧覆土盘安装侧板通过加强筋固连。通过调节丝杠有效工作长度(即调节弹簧压缩量)来调节覆土盘作业深度。

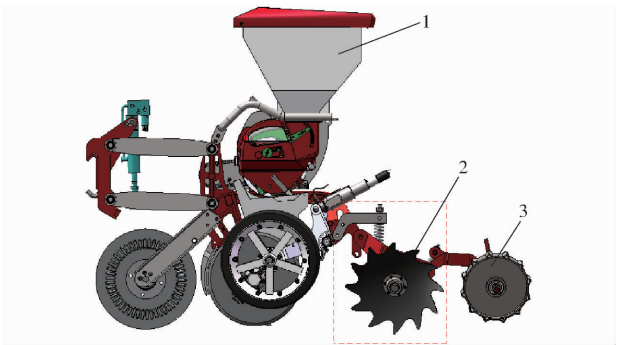


图 1 播种单体整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of planter unit

1. 播种单体主体 2. 星齿球面盘式覆土装置 3. 镇压装置

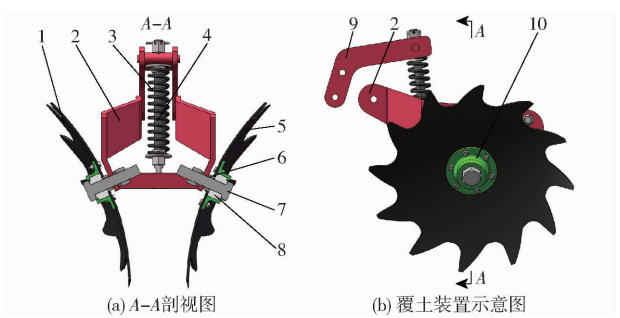


图 2 星齿球面盘式覆土装置结构图

Fig. 2 Structure diagrams of star-tooth spherical disc soil-covering device

disc soil-covering device

1. 左覆土盘 2. 覆土盘安装侧板 3. 深度调节弹簧 4. 丝杠
5. 右覆土盘 6. 轴套 7. 螺栓 8. 轴承 9. 固定架 10. 轴承座

1.2 工作原理

覆土作业时,左、右覆土盘一方面依靠覆土盘与种沟两侧土壤之间的摩擦做被动的旋转运动,一方面随机组前进做直线运动。由于种沟两侧的土壤经双圆盘开沟器和限深轮的耕作压实后,土壤密实,流动性差,覆土过程首先由覆土盘上的星齿强制切开种沟土壤,在机组不断前进过程中,星齿球面覆土盘不断切开种沟土壤,原本密实的种沟土壤被破碎,使

得土壤之间的粘结力变小,增强了流动性;其次,当星齿完成切土后,在左、右覆土盘凸弧面的作用下,将种沟两侧的土壤向种沟挤压,由于种沟土壤变得细碎,在覆土盘挤压作用下很容易向种沟中心移动,实现覆土作业,有效改善了种子与土壤的接触,避免了种子“架空”和“晾种”现象。

2 星齿球面盘式覆土装置结构设计

2.1 覆土作业运动学分析

星齿球面式覆土装置主要作用是将双圆盘开沟器与限深轮形成的种沟完全闭合,让种子更好地与

土壤接触,种沟的闭合是由于土壤颗粒的横向运动导致的,因此需对主要工作部件星齿球面覆土盘作业过程中种沟土壤颗粒运动情况进行分析。如图 3 所示,因左、右覆土盘对称安装,两侧种沟内的土壤颗粒受力及运动情况一致,选择左侧种沟内任一点土壤颗粒 M 进行运动学分析。假设在整个覆土作业过程中星齿球面盘为匀速运动且入土深度保持稳定^[9],星齿球面盘对土壤颗粒的作用点位于入土深度的 1/2 处^[10-11]。覆土作业时,土壤颗粒 M 主要受力有覆土盘挤压力 N 、覆土盘摩擦力 f 、重力 G 、土壤间粘结阻力 Q 。

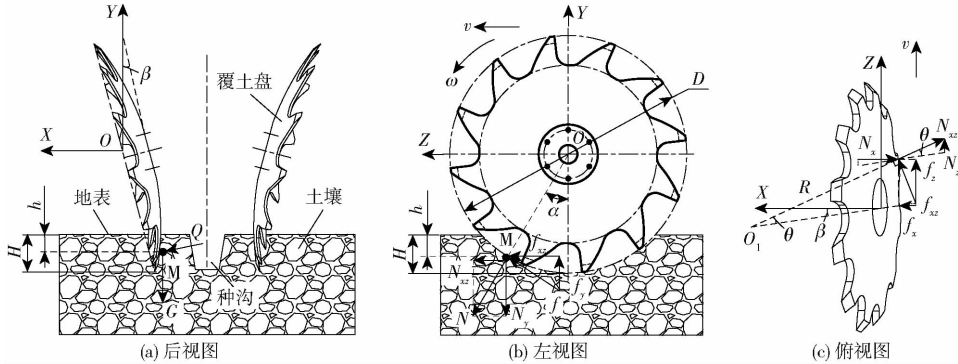


图 3 土壤颗粒受力分析
Fig. 3 Soil particle force analysis

因覆土盘盘面为球面,作业时盘面对土壤颗粒的作用力为空间力系,以覆土盘盘面回转中心 O 为原点建立如图 3 所示的空间直角坐标系 $OXYZ$, Z 轴为机组前进方向, Y 轴为竖直方向, X 轴为水平面内与 Z 轴垂直方向。根据空间力系的二次投影法,将土壤颗粒 M 所受的作用力分别沿 X 、 Y 、 Z 方向进行分解,可得

$$\begin{cases} f \cos \alpha \sin \theta \cos \beta - N \sin \alpha \cos \theta \cos \beta + Q_x = m \frac{d^2 X}{dt^2} \\ f \sin \alpha \cos \beta - N \cos \alpha \cos \beta - G + Q_y = m \frac{d^2 Y}{dt^2} \\ f \cos \alpha \cos \theta + N \sin \alpha \sin \theta + Q_z = m \frac{d^2 Z}{dt^2} \\ f = N \tan \varphi \\ G = mg \\ \sin \alpha = \frac{D - H}{D} \\ \sin \theta = \frac{\sqrt{D^2 - (D - H)^2}}{2R} \end{cases} \quad (1)$$

式中 α ——盘面中心 O 与土壤颗粒 M 的连线与竖直方向夹角, ($^\circ$)
 β ——盘面与竖直面夹角,即安装倾角, ($^\circ$)

θ ——球面曲率中心 O_1 与土壤颗粒 M 的连线与盘面垂线夹角, ($^\circ$)

φ ——土壤与覆土盘间摩擦角, ($^\circ$)

R ——球面半径, mm

m ——土壤颗粒质量, kg

H ——覆土盘作业深度, mm

g ——重力加速度, m/s^2

t ——覆土盘与土壤颗粒的作用时间, s

D ——覆土盘盘面直径, mm

Q_x ——土壤间粘结阻力 Q 在 X 方向分力, N

Q_y ——土壤间粘结阻力 Q 在 Y 方向分力, N

Q_z ——土壤间粘结阻力 Q 在 Z 方向分力, N

由式(1)可得土壤颗粒 M 在覆土盘作用下 X 、 Y 、 Z 方向上的速度分别为

$$\begin{cases} v_x = \frac{t}{m} (N \tan \varphi \cos \alpha \sin \theta \cos \beta - N \sin \alpha \cos \theta \cos \beta + Q_x) \\ v_y = \frac{t}{m} (N \tan \varphi \sin \alpha \cos \beta - N \cos \alpha \cos \beta + Q_y) - gt \\ v_z = \frac{t}{m} (N \tan \varphi \cos \alpha \cos \theta + N \sin \alpha \sin \theta + Q_z) \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_x ——土壤颗粒在 X 方向上的速度, m/s
 v_y ——土壤颗粒在 Y 方向上的速度, m/s
 v_z ——土壤颗粒在 Z 方向上的速度, m/s

宜过大。齿根相切圆弧半径 R_3 不参与切土,仅起过渡作用,因此 R_3 对星齿球面覆土盘作业性能影响不大。综合考虑本设计取 $R_2 = R_3 = 20\text{ mm}$ 。

2.2.6 齿数 n

星齿齿数越多,对种沟两侧土壤的细碎程度越高,土壤的流动性越好,覆土作业的质量越好。根据星齿设计的几何参数,齿数 n 计算公式为

$$n = \frac{2\pi}{s} \left(\frac{D}{2} - h_1 \right) \tag{10}$$

式中 s ——单个星齿齿根弧长,mm

取星齿轮周向可布置的最大齿数为本设计的齿数,经计算, n 取整为 12。

2.3 星齿球面覆土盘安装间距确定

星齿球面覆土盘安装间距影响覆土作业效果。如图 6 所示,若安装间距过小,挤压土壤的厚度不足,覆土作业过程中土壤颗粒的总量不足以将种沟完全闭合。若间距过大,覆土盘离种沟中心的距离增大,挤土厚度虽增加,但由于土壤颗粒间的粘结作用,覆土盘对种沟两侧土壤的挤压作用将变小,覆土效果变差,种沟也将无法闭合。这都将影响覆土作业后种子生长的土壤环境,影响种子的发芽和出苗,因此需对覆土盘安装间距进行分析 and 确定。

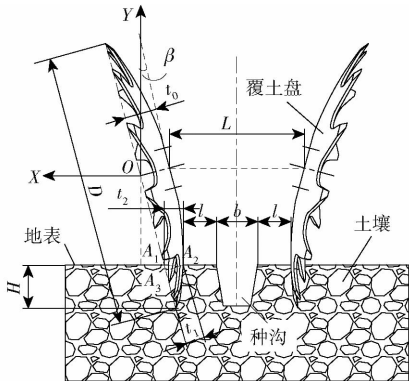


图 6 覆土盘安装示意图

Fig. 6 Installation diagram of star-tooth spherical soil-covering disc

由几何关系可知

$$\begin{cases} L = 2 \left[\left(\frac{D}{2} \cos \beta - H \right) \tan \beta + t_2 + l + \frac{b}{2} - t_0 \cos \beta \right] \\ t_0 = \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2} \\ t_1 = \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} - H \right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2} \\ t_2 = t_1 / \cos \beta \end{cases} \tag{11}$$

式中 L ——覆土盘安装间距,mm

b ——种沟地表宽度,mm

l ——覆土盘与种沟侧壁之间的土块厚度,即单侧覆土盘挤土厚度,mm

t_0 ——覆土盘深度,mm

t_1 ——交点 A_2 到盘面的垂直距离,即线段 A_2A_3 长度,mm

t_2 ——覆土盘在切土深度为 H 处与地表交点 A_1A_2 的距离,mm

由公式(11)可知,覆土盘安装间距 L 除了与覆土盘结构参数 D 、 R 、 d 、 t_0 有关,还与种沟地表宽度 b 、覆土盘与种沟侧壁之间的土块厚度 l 、安装倾角 β 以及参数 t_2 有关。其中 t_2 由 R 、 D 、 β 决定,种沟地表宽度 b 由播种机开沟器结构决定。安装倾角 β 取 $6^\circ \sim 30^\circ$ [10]。覆土盘的挤土量能完全使得种沟闭合,则覆土盘与种沟侧壁之间的最小土块厚度 $l_{\min} > b/2$,将上述分析确定的相关参数代入式(11)即可求得最小安装间距 $L_{\min}$ 。此外,由于覆土盘安装在播种机限深轮的正后方,主要作用是将限深轮和双圆盘开沟器形成的种沟闭合,因此,覆土盘的安装间距最大值不应超过两限深轮的外侧间距。根据播种机实际结构参数,安装间距 L 取 $160 \sim 300\text{ mm}$ 。

3 EDEM 仿真

3.1 仿真模型建立

在 EDEM 中建立长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $1\,000\text{ mm} \times 450\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的虚拟土槽,综合考虑计算机性能和仿真精度,采用半径为 5 mm 球形颗粒模拟田间土壤颗粒 [14-16],选择 Hertz - Mindlin with Bonding 模型为土壤颗粒间接触模型 [17-18]。实际作业过程中,星齿球面覆土盘为主要作业部件,为了减小仿真过程的计算量,对覆土装置进行简化处理,在不影响仿真精度的前提下,去除仿真过程中无关部件 [9-10,19]。通过 Solidworks 软件对星齿球面覆土盘进行 1:1 建模,保存 .igs 格式导入 EDEM 软件中,设置仿真模型材料为 65Mn 钢。根据前期对黏重土壤参数的标定结果,建立的土壤-覆土装置互作仿真模型如图 7 所示,离散元仿真基本参数如表 1 所示。

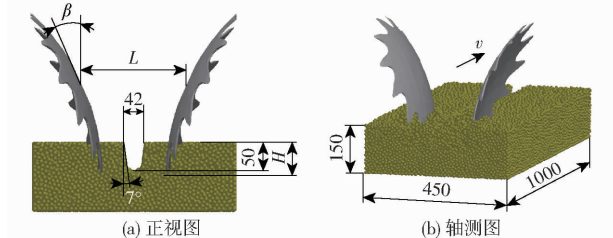


图 7 仿真模型

Fig. 7 Simulation models

表 1 离散元仿真模型参数

Tab. 1 Parameters of discrete element simulation model

材料	参数	数值
土壤	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.68×10^3
	泊松比	0.43
	剪切模量/Pa	1×10^6
65Mn 钢	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7.861×10^3
	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.90×10^{10}
土壤-土壤	恢复系数	0.55
	静摩擦因数	0.80
	滚动摩擦因数	0.15
土壤-65Mn 钢	恢复系数	0.45
	静摩擦因数	0.31
	滚动摩擦因数	0.125

3.2 试验因素和评价指标

为了研究不同作业参数条件下星齿球面覆土盘的作业效果,根据理论分析结果,确定星齿球面覆土盘安装倾角 β 、安装间距 L 、入土深度 H 为试验因素,先后开展单因素试验和 Box - Behnken 试验。

根据农艺要求,覆土作业后种沟内应完全填满土壤颗粒,一定范围内,种沟内土壤颗粒的质量越大,说明覆土作业过程中,进入种沟内的土壤颗粒越多,覆土效果越好,同时覆土过程应具有良好的覆土均匀性,因此选取种沟覆土量 W 和覆土量变异系数 C_V 为试验评价指标。

仿真数据采集时,利用 EDEM 后处理 Analyst 模块,在土槽中间位置共设 7 个数据采集点,分别为 $Q_1 \sim Q_7$,单个区域大小设置为 $35\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,使其处于整个种沟之间,数据采集方法如图 8 所示。

3.3 单因素试验

为了确定星齿球面覆土盘安装倾角 β 、安装间距 L 、入土深度 H 的最佳作业参数范围,根据播种机实际作业情况,设置机组作业速度为 8 km/h 进行仿真分析。为保证仿真的连续性,设置其固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 15%,总时间为 10 s ,网格尺寸设置为土壤颗粒尺寸的 2 倍,以便对后续数据

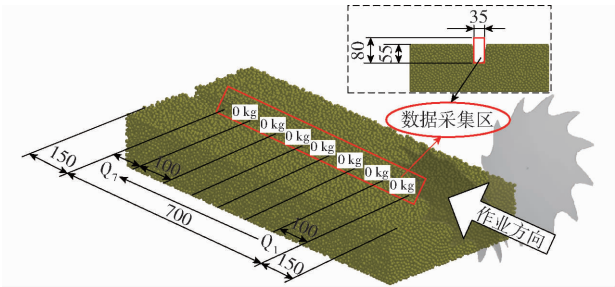


图 8 数据采集方法示意图

Fig. 8 Schematic of data collection method

精准处理。试验结果如图 9 所示。

在实际覆土作业时,农艺要求在不影响播深的情况下,需要较大的覆土量和较小的覆土量变异系数,以保证种沟完全闭合且覆土均匀。如图 9a 所示,随安装倾角的增大,覆土量逐渐增加,覆土量变异系数逐渐减小。当安装倾角为 $6^\circ \sim 12^\circ$ 时,覆土量较小,覆土量变异系数较大,表明该条件下种沟不能完全闭合,覆土均匀性较差,不满足农艺要求。当安装倾角为 $18^\circ \sim 30^\circ$,覆土量快速增大,同时覆土量变异系数减小,覆土质量明显改善,因此选择安装倾角为 $18^\circ \sim 30^\circ$ 。如图 9b 所示,覆土量随安装间距的增大先增大后减小,覆土量变异系数随安装间距的增大而增大。当安装间距为 $160 \sim 230\text{ mm}$,覆土量大于 200 g ,覆土量变异系数小于 10% ,均处于较优水平。当安装间距超过 230 mm 后,覆土量快速减小,覆土量变异系数明显增大,作业质量明显变差,因此选择安装间距为 $160 \sim 230\text{ mm}$ 。如图 9c 所示,覆土量随入土深度的增大而增大,覆土量变异系数随入土深度的增大而减小,即作业质量随入土深度增加而变优。当入土深度大于 60 mm 时,覆土量增加速率减慢,覆土量变异系数减小速率也减慢,此时作业质量已达到较优水平,因此选择入土深度为 $60 \sim 80\text{ mm}$ 。

3.4 Box - Behnken 试验

3.4.1 试验设计

根据单因素试验结果,为确定星齿球面覆土盘的最优参数组合,利用 Design-Expert 软件进一步开

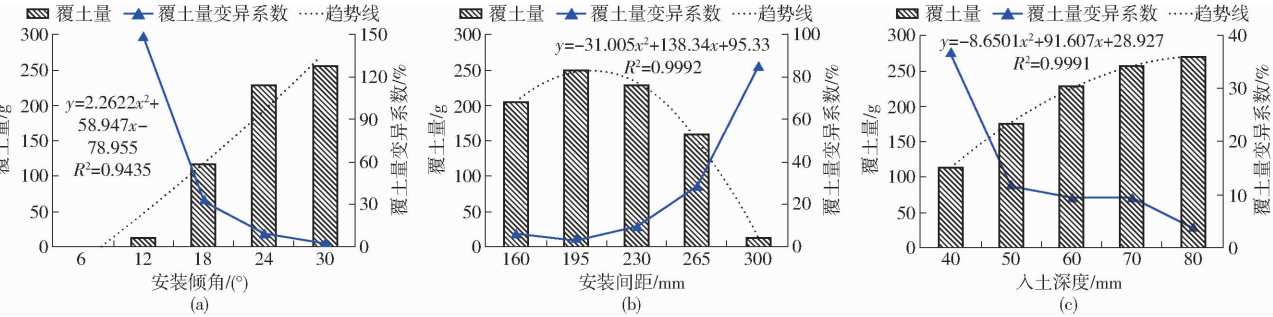


图 9 不同参数下作业质量性能参数变化

Fig. 9 Variations of performance parameters for operation quality under different parameters

展 Box – Behnken 试验,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Test factors and coding

编码	因素		
	$\beta/(^{\circ})$	L/mm	H/mm
−1	18	160	60
0	24	195	70
1	30	230	80

3.4.2 试验结果与分析

Box – Behnken 试验设计方案与结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为安装倾角 β 、安装间距 L 、入土深度 H 的编码值。通过 Design-Expert 软件分别对覆土量和覆土量变异系数进行方差分析。

表 3 试验设计方案与结果
Tab.3 Experimental design and results

试验 序号	因素			W/g	$C_v/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	−1	−1	0	169.82	3.12
2	1	−1	0	172.27	3.59
3	−1	1	0	176.48	14.34
4	1	1	0	241.92	5.18
5	−1	0	−1	201.68	6.18
6	1	0	−1	232.42	3.99
7	−1	0	1	225.50	4.23
8	1	0	1	250.71	2.99
9	0	−1	−1	192.73	3.22
10	0	1	−1	207.95	8.81
11	0	−1	1	201.18	3.89
12	0	1	1	240.71	4.26
13	0	0	0	228.53	3.68
14	0	0	0	245.95	2.41
15	0	0	0	239.20	2.56
16	0	0	0	243.70	3.44
17	0	0	0	245.95	4.02

覆土量方差分析结果如表 4 所示,整体模型极显著($P < 0.01$),且失拟项不显著($P > 0.05$),表明该模型拟合良好,模型可信。 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 影响极显著。各因素对覆土量影响由大到小顺序为:安装间距 X_2 、安装倾角 X_1 、入土深度 X_3 。对试验结果进行多元回归拟合,可得到各因素对覆土量 W 的回归方程为

$$W = 240.67 + 15.48X_1 + 16.38X_2 + 10.42X_3 + 15.75X_1X_2 - 1.38X_1X_3 + 6.08X_2X_3 - 16.8X_1^2 - 33.74X_2^2 + 3.72X_3^2$$

(12)

覆土量变异系数方差分析结果如表 5 所示,整体模型极显著($P < 0.01$),且失拟项不显著($P > 0.05$),表明该模型拟合良好,模型可信。 X_2 、 X_1X_2 影响极显著, X_1 、 X_2^2 影响显著。各因素对覆土量变异系数影响由大到小顺序为:安装间距 X_2 、安装倾

表 4 覆土量方差分析

Tab.4 Variance analysis of covering soil weight					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	12 333.30	9	1 370.37	33.02	<0.000 1 **
X_1	1 917.04	1	1 917.04	46.19	0.000 3 **
X_2	2 147.09	1	2 147.09	51.74	0.000 2 **
X_3	867.78	1	867.78	20.91	0.002 6 **
X_1X_2	991.94	1	991.94	23.90	0.001 8 **
X_1X_3	7.65	1	7.65	0.18	0.680 7
X_2X_3	147.74	1	147.74	3.56	0.101 1
X_1^2	1 188.98	1	1 188.98	28.65	0.001 1 **
X_2^2	4 793.00	1	4 793.00	115.49	<0.000 1 **
X_3^2	58.13	1	58.13	1.40	0.275 2
残差	290.50	7	41.50		
失拟项	76.03	3	25.34	0.47	0.7179
纯误差	214.48	4	53.62		
总和	12 623.81	16			

注: ** 表示极显著($P < 0.01$)。下同。

表 5 覆土量变异系数方差分析

Tab.5 Variance analysis of variation coefficient of covering soil weight					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	124.15	9	13.79	8.45	0.005 1 **
X_1	18.36	1	18.36	11.25	0.012 2 *
X_2	44.04	1	44.04	26.99	0.001 3 **
X_3	5.83	1	5.83	3.57	0.100 6
X_1X_2	23.18	1	23.18	14.21	0.007 0 **
X_1X_3	0.23	1	0.23	0.14	0.721 0
X_2X_3	6.81	1	6.81	4.17	0.080 3
X_1^2	7.33	1	7.33	4.49	0.071 9
X_2^2	17.12	1	17.12	10.49	0.014 3 *
X_3^2	0.16	1	0.16	0.10	0.765 0
残差	11.42	7	1.63		
失拟项	9.43	3	3.14	6.31	0.053 6
纯误差	1.99	4	0.50		
总和	135.57	16			

注: * 表示显著($0.01 \leq P < 0.05$)。

角 X_1 、入土深度 X_3 。对试验结果进行多元回归拟合,可得到各因素对覆土量变异系数 C_v 的回归方程为

$$C_v = 3.22 - 1.52X_1 + 2.35X_2 - 0.85X_3 - 2.41X_1X_2 + 0.24X_1X_3 - 1.31X_2X_3 + 1.32X_1^2 + 2.02X_2^2 - 0.19X_3^2$$

(13)

3.4.3 参数优化

为了得到星齿球面盘式覆土装置的最优工作参数组合,采用多目标变量优化方法,对影响覆土量和覆土量变异系数的各因素进行优化设计,根据实际作业要求,在目标范围内,以提高覆土量和覆土均匀性为原则,根据各试验因素的边界条件,建立参数优化目标函数为

$\max W(\beta, L, H)$

$\min C_v(\beta, L, H)$

s. t.

$18^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$

$160 \text{ mm} \leq L \leq 230 \text{ mm}$

$60 \text{ mm} \leq H \leq 80 \text{ mm}$

(14)

基于 Design-Expert 软件中 Optimization 模块对目标函数进行参数优化并求解,结合星齿球面盘式覆土装置的结构和实际作业要求,得到最优参数组合,即安装倾角为 25.03°、安装间距为 196.66 mm、入土深度为 77.65 mm 时,该覆土装置覆土量为 253.83 g,覆土量变异系数为 2.31%。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证星齿球面盘式覆土装置在田间的作业性能,于 2023 年 5 月在黑龙江省齐齐哈尔市甘南县甘南镇边江村开展田间试验。试验地前茬作物为玉米,玉米收获后对玉米秸秆进行回收处理,地表有玉米根茬和少量秸秆,玉米根茬平均高度为 15.6 cm,平均秸秆覆盖量为 0.73 kg/m²。试验田土壤为黑黏土,0~10 cm 平均土壤含水率为 27.64%,0~10 cm 处平均土壤紧实度为 11.47 kg/cm²,0~20 cm 处平均土壤紧实度为 23.78 kg/cm²。根据优化后的最优工作参数,考虑实际加工精度及测量精度,选择安装倾角为 25°、安装间距为 197 mm、入土深度为 77 mm,加工试制了星齿球面盘式覆土装置,并安装在中农机 2BMY-2 型玉米免耕精量播种机上,配套动力为博马 654 型拖拉机,播种作业速度为 8 km/h。

4.2 覆土性能验证试验

为了验证星齿球面盘式覆土装置的覆土性能,同时验证仿真试验的准确性,将 2BMY-2 型玉米免耕精量播种机左侧行的 V 型镇压器更换成星齿球面盘式覆土装置,进行覆土作业。试验过程及结果如图 10 所示。

通过观察覆土后种沟的闭合情况,可以明显看出,安装 V 型镇压器的一侧,会断断续续出现种沟闭合不严的情况,而采用星齿球面盘式覆土装置的一侧,种沟两侧土壤被挤向种沟的中心位置,种沟完全闭合,未出现种沟闭合不严实的现象。田间对比试验表明,星齿球面盘式覆土装置相对于 V 型镇压器可以有效地避免黏重土壤条件下种沟闭合不严实的现象。此外,由图 10 也可以发现,星齿球面盘式覆土装置作业的左侧,其动土量明显高于 V 型镇压器作业的右侧,增加了土壤水分的蒸发,不利于土壤的保墒,需进一步改进。

完成覆土作业后,采用自制的取土装置收集种

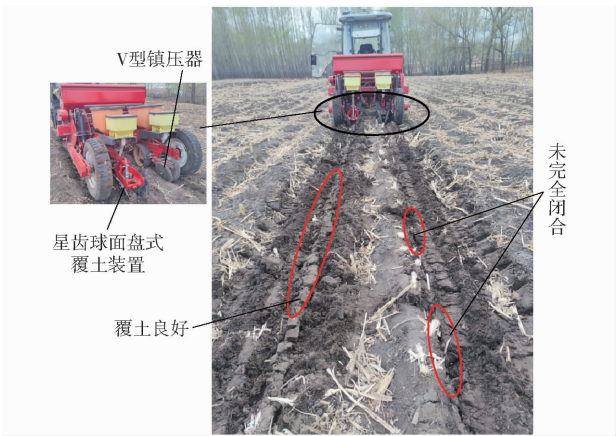


图 10 覆土性能试验

Fig. 10 Soil covering performance test

沟内的土壤,取土装置的尺寸和取土位置同仿真中数据采集区域大小和位置一致,以保证田间试验和仿真过程一致,取出土壤后用电子秤称量,并记录数据。得到覆土量平均值为 241.46 g,与最优参数组合下仿真结果基本一致,相对误差为 5.12%,覆土量变异系数为 3.71%,覆土均匀,作业质量好。

4.3 播深验证试验

播种机覆土作业后,若覆土量过大,在经镇压后覆土厚度将偏大,随之播深偏深;若覆土量过小,在经镇压后覆土厚度将偏小,随之播深变浅。播种过深或过浅都将影响种子生长的土壤环境,影响发芽和出苗。根据当地玉米种植农艺,播深以 40~50 mm 为宜。为了验证上述最优参数组合下的覆土量经镇压后是否满足农艺生产要求,开展了田间对比试验。试验时在玉米免耕精量播种机左侧行 V 型镇压器的前方加装星齿球面盘式覆土装置,调整两行 V 型镇压器压力一致,完成播种作业后,测量两行种子的播种深度。试验过程如图 11 所示。



图 11 播深验证试验

Fig. 11 Sowing depth verification test

试验数据如表 6 所示。试验结果表明在该试验土壤条件下,右侧行播深平均值为 (38.4 ± 7.96) mm,偏浅,而加装星齿球面盘式覆土装置的左侧行,播深平均值为 (46.4 ± 2.87) mm,满足生产要求,同时播深

一致性左侧行优于右侧行。结合覆土性能试验结果,分析造成播深偏浅的原因是右侧行在部分地方出现了种沟闭合不严实现象,造成了种子上方覆土量不足。综合分析可知,本文设计的星齿球面盘式覆土装置可有效改善播种机覆土性能。

表 6 播深测量结果

Tab. 6 Sowing depth measurement results mm		
试验序号	左侧行播深	右侧行播深
1	48	46
2	43	30
3	51	41
4	46	47
5	44	28
均值±标准差	46.40±2.87	38.40±7.96

5 结论

(1)设计了一种星齿球面盘式覆土装置,分析

了其作业原理,通过理论分析和数值计算确定了覆土盘的主要结构参数。

(2)以星齿球面覆土盘安装倾角 β 、安装间距 L 、入土深度 H 为试验因素,以覆土量和覆土量变异系数为评价指标,基于 EDEM 软件先后开展单因素和 Box - Behnken 仿真试验。单因素试验确定了各试验因素的取值范围为 $18^{\circ}\leq\beta\leq30^{\circ}$ 、 $160\text{ mm}\leq L\leq230\text{ mm}$ 、 $60\text{ mm}\leq H\leq80\text{ mm}$ 。Box - Behnken 仿真试验得到了最优参数组合:安装倾角为 25.03° 、安装间距为 196.66 mm 、入土深度为 77.65 mm ,此时覆土量为 253.83 g ,覆土量变异系数为 2.31% 。

(3)田间验证试验结果表明,最优参数组合下,覆土量平均值为 241.46 g ,与仿真结果基本一致,相对误差为 5.12% ,覆土量变异系数为 3.71% ,覆土均匀,作业质量好,覆土作业后种子播深满足农艺要求,星齿球面盘式覆土装置能有效改善播种机覆土性能。

参 考 文 献

[1] 张志君,孙旭伟,金柱男,等. 大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 34 - 40, 73. ZHANG Zhijun, SUN Xuwei, JIN Zhu'nan, et al. Design and test of crushing bionic soil covering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 34 - 40, 73. (in Chinese)

[2] 贾洪雷,陈忠亮,马成林,等. 北方旱作农业区耕作体系关键技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 59 - 63. JIA Honglei, CHEN Zhongliang, MA Chenglin, et al. Key technologies for the tillage system in area of dry farming of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 59 - 63. (in Chinese)

[3] PANNING J W, KOCHER M F, SMITH J A, et al. Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugarbeet planters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(1): 7 - 13.

[4] ÖZMERZI A, KARAYEL D, TOPAKCI M. Effect of sowing depth on precision seeder uniformity[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(2): 227 - 230.

[5] 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春:吉林大学, 2012. WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in process of soil covering and rolling with precision seeder[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)

[6] 郭慧,陈志,贾洪雷,等. 锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 56 - 65. GUO Hui, CHEN Zhi, JIA Honglei, et al. Design and experiment of soil-covering and soil-compacting device with cone-shaped structure of wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 56 - 65. (in Chinese)

[7] 刘选伟,金亮,赵亚祥,等. 基于均匀设计的双层圆盘式覆土器的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 26 - 28. LIU Xuanwei, JIN Liang, ZHAO Yaxiang, et al. Experimental research on double-deck disk coverer based on uniform design[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 26 - 28. (in Chinese)

[8] 陈海涛,徐源,史乃煜. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(11): 65 - 73. CHEN Haitao, XU Yuan, SHI Naiyu. Design and experiment on three-way adjustable V-type soil-covering and soil-compacting device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11): 65 - 73. (in Chinese)

[9] 王奇,贾洪雷,朱龙图,等. 免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 68 - 77. WANG Qi, JIA Honglei, ZHU Longtu, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68 - 77. (in Chinese)

[10] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等. 免耕播种机切茬除草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 67 - 78. HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, et al. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67 - 78. (in Chinese)

[11] 李宝筏. 农业机械学[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2017.

[12] 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, 2017.

[13] 张才权. 水田耙星形耙片几何参数的研究[J]. 农业机械学报, 1979, 10(2): 85 - 95. ZHANG Caiquan. Research of geometric parameters of star-shape disc for paddy field harrow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(2): 85 - 95. (in Chinese)

WANG Haihui, CUI Guozeng, LI Ze, et al. Fixed-time adaptive trajectory tracking control for quadrotor[J]. Control Engineering of China,2022,29(5):861 – 866. (in Chinese)

[11] TAN J, GUO S. Backstepping control with fixed-time prescribed performance for fixed wing UAV under model uncertainties and external disturbances[J]. International Journal of Control, 2022, 95(4): 934 – 951.

[12] 季晓明,文怀海. 自适应神经网络四旋翼无人机有限时间轨迹跟踪控制[J]. 智能系统学报,2022,17(3):540 – 546.
JI Xiaoming, WEN Huaihai. Adaptive neural network quadrotor UAV finite time trajectory tracking control[J]. Journal of Intelligent Systems,2022,17(3):540 – 546. (in Chinese)

[13] BECHLIOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090 – 2099.

[14] CUI G, YANG W, YU J, et al. Fixed-time prescribed performance adaptive trajectory tracking control for a QUAV[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(2): 494 – 498.

[15] WU X, ZHENG W, ZHOU X, et al. Adaptive dynamic surface and sliding mode tracking control for uncertain QUAV with time-varying load and appointed-time prescribed performance[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(8): 4178 – 4208.

[16] ZHANG W, SHAO X, ZHANG W, et al. Unknown input observer-based appointed-time funnel control for quadrotors[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 126: 107351.

[17] SHEN Z, LI F, CAO X, et al. Prescribed performance dynamic surface control for trajectory tracking of quadrotor UAV with uncertainties and input constraints[J]. International Journal of Control, 2021, 94(11): 2945 – 2955.

[18] SHAO X, ZHANG W, ZHANG W. Improved prescribed performance anti-disturbance control for quadrotors[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 97: 501 – 521.

[19] RAZMI H, AFSHINFAR S. Neural network-based adaptive sliding mode control design for position and attitude control of a quadrotor UAV[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 12 – 27.

[20] ZHANG Y, WU G, YANG X, et al. Appointed-time prescribed performance control for 6-DOF spacecraft rendezvous and docking operations under input saturation[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 128: 107744.

[21] SHI X, CHENG Y, YIN C, et al. Design of adaptive backstepping dynamic surface control method with RBF neural network for uncertain nonlinear system[J]. Neurocomputing, 2019, 330: 490 – 503.

[22] LIU K, WANG R, WANG X, et al. Anti-saturation adaptive finite-time neural network based fault-tolerant tracking control for a quadrotor UAV with external disturbances[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 115: 106790.

[23] ZHANG C, MA G, SUN Y, et al. Observer-based prescribed performance attitude control for flexible spacecraft with actuator saturation[J]. ISA Transactions, 2019, 89: 84 – 95.

[24] LIU H, ZHENG H, ZHANG Y, et al. Fixed-time self-structuring neuron network-based adjustable prescribed performance control for a quadrotor UAV with input saturation[J]. IEEE Access, 2023,12:2474 – 2489.

(上接第 31 页)

[14] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78 – 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 – 85. (in Chinese)

[15] 何晓宁,张学军,赵壮,等. 反向旋抛式油莎豆起挖装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 34 – 43.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and optimization tests of reverse spin-throwing *Cyperus edulis* starting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 34 – 43. (in Chinese)

[16] YUAN P P, LI H W, HUANG S H, et al. Parameter optimization and experiment of a seed furrow cleaning device for no-till maize seeding[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1901.

[17] 丁启朔,任骏,ADAM BELAL Eisa,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38 – 48.
DING Qishuo, REN Jun, ADAM BELAL Eisa, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38 – 48. (in Chinese)

[18] 王学振,岳斌,高喜杰,等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124 – 136.
WANG Xuezen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler’s wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):124 – 136. (in Chinese)

[19] 林静,吕洲翼,李宏哲,等. 垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 19 – 27, 37.
LIN Jing, LÜ Zhouyi, LI Hongzhe, et al. Design and experiment of passive anti-winding stubble breaking and ridge cleaning device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 19 – 27,37. (in Chinese)