

甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验

史宇亮¹ 陈新予² 陈明东³ 王东伟³ 尚书旗³

(1. 青岛农业大学园艺学院, 青岛 266109; 2. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083;
3. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 针对现有甘薯起垄整形机起垄效果较差、牵引阻力大等问题,设计了一种甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置,并阐述了其主要结构和工作原理。结合甘薯种植模式和垄型结构农艺要求,采用水平直线法确定了开沟起垄装置犁体曲面的结构参数及其取值范围。运用 EDEM 离散元仿真软件,建立了犁铧式开沟起垄装置-土壤互动仿真模型。选取开沟犁体曲面安装角、推土角、元线角差值为试验因素,以犁体土壤抛送距离和牵引阻力为评价指标,进行了 Box - Behnken 中心组合设计试验。仿真试验结果表明,当作业速度为 3.33 km/h 时,安装角、推土角和元线角差值最优组合为 27.19°、38.05°和 10.69°。基于优化的最优组合参数进行了田间试验,田间试验结果表明,犁铧式开沟起垄装置垄高稳定性系数为 98.53%,垄体土壤紧实度为 236 kPa,拖拉机作业油耗为 11.94 L/h,满足甘薯开沟起垄农艺要求,且均优于板式起垄装置作业效果。

关键词: 甘薯; 起垄整形; 犁铧式; 犁体曲面; 离散元法

中图分类号: S222.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0016-10

OSID:



Design and Experiment on Ploughshare Furrowing Ridging Device of Sweet Potato Ridging Shaping Machine

SHI Yuliang¹ CHEN Xinyu² CHEN Mingdong³ WANG Dongwei³ SHANG Shuqi³

(1. College of Horticulture, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. Modern Agricultural and Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to solve problems of poor ridging effect and high traction resistance of existing sweet potato ridging shaping machine, a ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine was designed and its main structure and working principle were explained. According to the sweet potato planting pattern and ridging structure agronomic requirements, the structure parameters and value range of the plow body surface of the furrowing ridging device were determined by the horizontal straight element line method. The EDEM discrete element simulation software was used to establish interaction model of the ploughshare furrowing ridging device and soil. The installation angle, bulldozing angle and element line angle difference of the furrowing plow body surface were selected as the experiment factors, and the evaluation indexes were the soil throwing distance and traction resistance of the plow body, the Box - Behnken central composite design experiment was carried out. The simulation experiment results showed that the optimal combinations of the installation angle, bulldozing angle and element line angle difference were 27.19°, 38.05° and 10.69° when the operating speed of the sweet potato ridging shaping machine was 3.33 km/h. Field experiment were carried out based on the optimal combination parameters. The ploughshare furrowing ridging device experiment results showed that the ridge height stability coefficient was 98.53%, the ridge soil firmness was 236 kPa, the fuel consumption of tractor operating was 11.94 L/h, which can meet the sweet potato furrowing ridging agronomic requirements. The operating effect of the ploughshare furrowing ridging device was better than that of the now existing plate type ridging device.

Key words: sweet potato; ridging shaping; ploughshare; plough body surface; discrete element method

收稿日期: 2022-05-19 修回日期: 2022-08-20

基金项目: 山东省重点研发计划项目(LJNY202104)

作者简介: 史宇亮(1981—),女,副教授,博士,主要从事设施机械与控制研究,E-mail: Shiyuliang1981@126.com

通信作者: 尚书旗(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: sqshang@qau.edu.cn

0 引言

甘薯是我国重要的粮食作物,其种植面积约为 $3.36 \times 10^6 \text{ hm}^2$,居世界第 1 位。鉴于垄作有利于作物根系生长、保墒和灌溉等优势,我国甘薯种植模式以高垄种植为主。因此,起垄整形作业是甘薯机械化生产的重要环节^[1-2]。

目前,王伯凯等^[3]设计了一种甘薯双垄起垄覆膜机,犁体主要起开沟作用,回土量大。包攀峰等^[4]设计了一种犁旋组合式油菜开沟起垄机,采用犁体式成沟部件进行开沟起垄作业,相较于传统起垄犁体,土壤回落问题有明显改善。鉴于犁铧曲面具有一定的导翻土特性,被广泛的应用于玉米和马铃薯等作物的中耕培土作业,并取得了较好的培土效果^[5-6]。陈超鹏^[7]设计了一种铧式垄沟开沟器,有效降低了土壤扰动及牵引阻力。刘晓鹏等^[8]设计了船型开沟器和开沟质量试验,沟宽和沟深稳定性系数均达 90% 以上。KUMAR SAHU 等^[9]对不同开沟器开沟性能和燃油进行了对比。为了提高作业效率,多功能复式作业的耕整地机械也逐渐开发,但整机结构复杂、能耗高^[10-12]。随着计算机技术的不断发展,FIAZ 等^[13]对水稻土圆盘开沟器进行了离散元模拟。赵淑红等^[14-15]采用离散元法优化了玉米开沟器和深松铲结构参数,为开沟犁结构参数优化提供了理论指导。近年来,为了降低耕整地环节作业机具能耗,研究人员已经开展了起垄装置旋耕和开沟部件的能耗预测,并开展了相关试验测试^[16-18]。现有开沟装置的研究主要以开沟、筑沟作业为主,垄体稳定性差,土壤回流严重,垄型一致性差。

本文针对山东省甘薯产区种植模式,以开沟、筑沟及起垄作业为目标,设计一种甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置,构建犁铧式开沟起垄装置-土壤互作仿真模型,确定影响甘薯起垄作业效果的主要因素并进行仿真试验,以期获得犁铧式开沟起垄装置最优工作参数组合,并开展田间验证试验。

1 总体结构及工作原理

甘薯起垄整形机由拖拉机牵引,能够一次性完成旋耕、起垄和整形功能。整机结构如图 1 所示。

整机分为旋耕装置、开沟起垄装置及镇压整形装置。主要由机架、三点式悬挂、变速箱、旋耕刀及镇压辊等装置组成。田间作业过程中,旋耕装置将土壤破碎并向垄体方向聚拢,开沟起垄装置开出垄沟、导土并初步形成垄型,镇压整形装置对垄体进行压实整形,提升垄体强度并使其符合农艺要求。

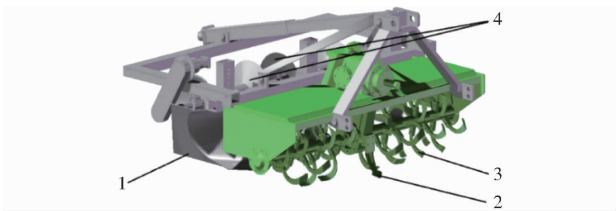


图 1 甘薯起垄整形机三维结构图
Fig. 1 3D structure diagram of sweet potato ridging shaping machine

1. 开沟起垄装置 2. 小前犁 3. 旋耕装置 4. 镇压整形装置

2 犁铧式开沟起垄装置设计

犁铧式开沟起垄装置主要由开沟起垄曲面、固定调节架及翼板组成,总体结构如图 2 所示。

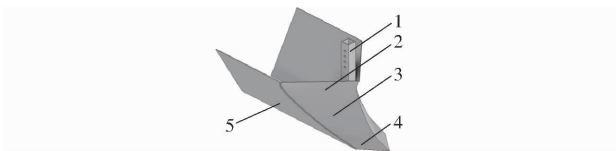


图 2 犁铧式开沟起垄装置结构图
Fig. 2 Structure diagram of plowshare furrowing ridging device

1. 固定调节架 2. 翻抛曲面 3. 导土曲面 4. 起土曲面 5. 翼板

开沟犁体由起土曲面、导土曲面及翻抛曲面组成,固定调节架可调整犁铧式开沟起垄装置的入土深度,翼板为板状结构。

田间作业时,随着机器前进,开沟起垄曲面中起土曲面将土壤抬升,送至导土曲面;导土曲面将土壤分至两侧,并提升到地面高度;翻抛曲面将已抬升至地面高度的土壤导引翻抛至垄顶。翼板为前窄后宽设计,与开沟犁体相连接处最窄,随前进方向逐渐向外扩宽。在开沟犁体形成垄沟后,对两侧垄体侧壁进行挤压,形成初步垄体,同时对开沟犁体上导至垄顶的土壤进行引导,推至垄顶中间,防止土壤回落至沟内。

2.1 犁铧式开沟起垄装置参数设计

2.1.1 甘薯种植农艺模式

结合当地常用拖拉机轮距、地块条件和农艺要求,选定双垄双行梯形垄种植模式。具体垄型参数为:垄底宽 600 mm,垄顶宽 400 mm,垄沟宽 200 mm,垄高 250 mm,垄距 800 mm。甘薯起垄整形机工作过程中,开沟起垄曲面将垄沟中的土壤升运至垄台部分且使土壤向两侧分离,并在翼板的挤压作用下最终稳定在垄顶,实现垄沟与垄台的土壤互换,甘薯种植垄型断面如图 3 所示。

图 3 中基准线为作业前的地表高度,基准线上方为垄台,基准线下方为垄沟。垄体倾角可表示为

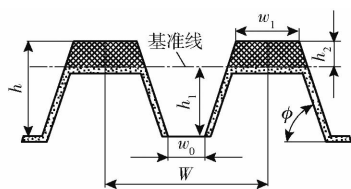


图3 甘薯种植垄型断面图

Fig.3 Ridge cross section of sweet potato planting

$$\phi = \arctan \frac{h}{\frac{1}{2}(W - w_0) - w_1} \quad (1)$$

式中 h ——垄高, m W ——垄距, m

w_0 ——垄沟宽, m w_1 ——垄顶宽, m

土壤在经过旋耕破碎和上送作业过程后, 土壤体积会增大, 开沟起垄曲面最小入土深度 h_1 可表示为

$$h_1 = \frac{\lambda(w_1 + w_1 + h_2 \cot \phi)h_2}{w_0 + w_0 + h_1 \cot \phi} \quad (2)$$

式中 λ ——旋耕前后土壤体积比, 取 1.2^[13]

h_2 ——基准线上方垄台高度, m

甘薯种植农艺要求为单垄单行, 垄顶、垄沟和垄高分别为 0.4、0.2、0.25 m, 计算得垄体倾角 ϕ 为 63°, 理论最小入土深度为 0.192 m。

考虑旋耕后土壤较为蓬松、开沟起垄装置前行过程中土壤在垄顶堆积等问题, 开沟起垄装置的高度应大于作业后垄顶土壤堆积高度, 开沟起垄装置顶宽可表示为

$$W_k = (w_0 + 2H_k \cot \phi) \lambda \quad (3)$$

式中 W_k ——开沟起垄装置顶宽, m

H_k ——开沟起垄装置高度, m

根据甘薯起垄作业农艺要求, 开沟起垄装置高度 H_k 取 0.41 m, 计算得到开沟起垄装置顶宽为 0.670 m。

2.1.2 开沟起垄曲面设计

开沟起垄曲面看作水平直线沿导曲线运动形成, 且水平直线与导曲线的夹角呈一定变化规律, 导曲线由始端直线 AB、耕深以下曲线段 BC 和挖深以上曲线段 CD 组成。端点 $A(0, 0)$ 、 $B(x_b, z_b)$ 、 $C(x_c, z_c)$ 、 $D(x_d, z_d)$ 间平滑过渡连接, 导曲线如图 4 所示。

导曲线参数方程可表示为

$$f(x) = \begin{cases} kx & (0 < x \leq x_b) \\ ax^2 + bx + c & (x_b < x \leq x_c) \\ \sqrt{R^2 - x^2} + d & (x_c < x \leq x_d) \end{cases} \quad (4)$$

式中 k, a, b, c, d ——常数

R ——CD 段圆弧半径, m

导曲线参数方程由 AB 段斜率(即起土角 α)和

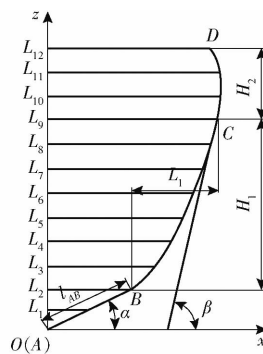


图4 导曲线示意图

Fig.4 Schematic of guiding curve

l_{AB} 、BC 段高度 H_1 和开度 L_1 、CD 段高度 H_2 决定。根据甘薯起垄作业要求, 开沟起垄曲面导曲线参数为: 起土角 α 取 25°, l_{AB} 取 85 mm, BC 段开度 L_1 取 150 mm, 高度 H_1 取 245 mm, CD 段高度 H_2 取 125 mm, CD 段圆弧的半径 R 取 150 mm。导曲线交点 B、C 斜率可表示为

$$\begin{cases} \tan \alpha = k = 2a + b \\ \tan \beta = 2bx_c + c = \frac{-x_c}{\sqrt{R^2 - x_c^2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中 β ——切线角

联立方程(4)、(5)可得

$$\begin{cases} k = \tan \alpha \\ a = \frac{H_1 - L_1 \tan \alpha}{(x_b + x_c - 2)L_1} \\ b = \tan \alpha - \frac{2(H_1 - L_1 \tan \alpha)}{(x_b + x_c - 2)L_1} \\ c = z_c - (ax_c^2 + bx_c) \\ d = z_c - \frac{x_c}{2bx_c + b} \end{cases} \quad (6)$$

代入式(6)求得 k 为 0.47, a 为 0.05, b 为 0.37, c 为 2.2, d 为 16.8。

开沟起垄装置在旋耕装置碎土后工作, 主要完成导土和翻土作业, 根据《农业机械设计手册》, 半螺旋曲面翻土效果较好, 碎土效果较差。因此, 开沟起垄曲面采用半螺旋形曲面。元线角 θ 在导土曲面增长缓慢, 在翻抛曲面增长较快。起始元线角也是曲面与沟墙夹角, 即推土角 γ_1 。为减小开沟阻力, 避免过大的土壤扰动, 曲面起始元线角 θ_0 取较小值, 同时为方便土壤上升, 随土壤高度的上升线性减小到 $\theta_{\min}$, 本文起始元线角 θ_0 取 35°。在导曲线中 AB 段与 BC 段相接处元线角减小至最小值 32°。随后元线角 θ 随导曲线高度持续增长至 $\theta_{\max}$, 参考《农业机械设计手册》, 半螺旋型曲面元线角最大值与最小值差值为 7°~15°, 本文所设计的开沟犁体曲面在整机结构中位于旋耕装置后部, 开沟犁主要功

能是将土壤上导、翻抛。文献[19]表明半螺旋型曲面元线角差值为 10° 时,犁体曲面能够实现开沟后土垡翻抛功能。同时,较大的元线角差值会导致犁体曲面顶部的元线角过大,增大牵引阻力。从半螺旋型曲面实现土垡翻抛和降低能耗角度考虑,取元线角差值为 $10^\circ \sim 14^\circ$ 。

开沟起垄装置设计在旋耕装置之后,土壤已经过旋耕刀破碎作业,故开沟起垄曲面的元线角变化曲线采取内凹的抛物线,可表示为

$$\theta_n = \theta_{\min} + \Delta\theta \frac{L_n^2}{L_{10}^2} \quad (n = 1, 2, \dots, 10) \quad (7)$$

式中 θ_n ——第 n 个高度元线角, $(^\circ)$

$\theta_{\min}$ ——元线角最小值, $(^\circ)$

$\Delta\theta$ ——元线角差值, $(^\circ)$

L_n ——导曲线高度, m

L_{10} ——导曲线 BC 段和 CD 段总高度, m

导曲线 BC 段和 CD 段总高度为 370 mm, 将总高度均匀分为 10 份, 各元线间高度差为 37 mm。

2.1.3 翼板参数设计

开沟起垄曲面作业后,需要对垄体侧边进行压实,防止土脊中的部分土壤回落至垄沟。为解决这一问题,在开沟起垄曲面的侧边设计安装了向机具后部延伸的翼板对垄体侧边进行压实成型作业,如图 5 所示。考虑到压制作业后土壤的塌落和蓬松问题,翼板采用前窄后宽型设计,前部宽度 P_1 与开沟起垄装置顶宽相同,后部宽度 P_2 较前部宽度有一倾斜角 ω ,综合考虑取 3° 。翼板高度与开沟起垄曲面高度相同。翼板长度由两部分组成,前部长度 D_1 只与开沟起垄曲面参数有关,后部长度 D_2 与甘薯起垄整形机前行速度、垄体高度有关。

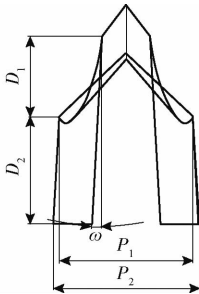


图 5 翼板结构示意图

Fig. 5 Schematic of wing plate

土壤颗粒下落至垄沟过程中的运动轨迹为

$$\begin{cases} D_2 = (\sqrt{V_z^2 + 4gh} - V_x) \frac{V_x}{g} \\ V_z = gt \\ h_L = \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 V_x 、 V_z ——土壤颗粒在前行方向和竖直方向

的速度, m/s

h_L ——土壤颗粒下落高度, m

g ——重力加速度, m/s^2

t ——土壤颗粒下落时间, s

土壤颗粒在前进方向的运动速度 V_x 与机具前进速度相同,取 0.8 m/s,土壤颗粒下落高度 h 略大于开沟起垄装置高度,取 0.41 m,根据公式计算得到翼板后部长度 D_2 为 270 mm。

2.2 牵引阻力分析

犁铧式开沟起垄装置所受到牵引阻力主要为开沟起垄曲面和翼板与土壤相互作用。犁铧式开沟起垄装置牵引阻力 F 可表示为

$$F = F_1 + F_2 \quad (9)$$

式中 F_1 ——开沟起垄曲面牵引阻力, N

F_2 ——翼板牵引阻力, N

2.2.1 开沟起垄曲面受力分析

开沟起垄曲面的结构参数和形状变化是影响牵引阻力的主要因素。开沟起垄曲面的主要结构参数包括土壤在 x 和 y 方向的进入角 α_1 和 β_1 、土壤离去角 β_2 和推土角 x_2 、曲面安装角 x_1 ,受力如图 6 所示。

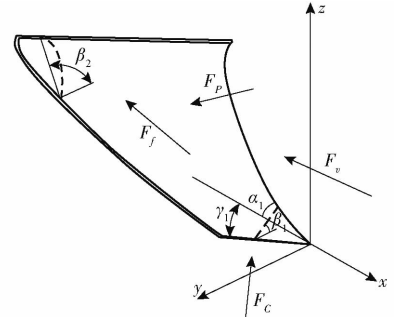


图 6 开沟起垄曲面受力分析

Fig. 6 Force analysis on surface of furrowing ridging

在曲面高度和轮廓确定的情况下, β_1 和 β_2 与元线角差值及初始元线角有关, α_1 和推土角 γ_1 有关。开沟起垄曲面的牵引阻力 F_1 可表示为

$$F_1 = F_C + F_p + F_f + F_v \quad (10)$$

式中 F_C ——曲面对土壤的切割力, N

F_p ——土壤总压力, N

F_f ——土壤与曲面间的摩擦阻力, N

F_v ——带动土壤运动的力, N

设开沟起垄曲面作业宽度为 E , 深度为 Q , 垂直截面曲线的形状和尺寸以 $\rho = \rho(\varepsilon)$ 形式表示, 开沟起垄曲面牵引阻力是关于犁体曲面参数 β_1 、 β_2 、 γ_1 、 δ 的关系式, 可表示为

$$\begin{cases} F_C = (\delta, \gamma_1, \varepsilon_1) \rho(\varepsilon) d\varepsilon \\ F_p = EQ(\gamma_1, \varepsilon_1) K \\ F_f = EQ(\beta_1, \varepsilon_1, \gamma_1) f g v_e \\ F_v = EQ(\beta_2, \gamma_1) g v_e \end{cases} \quad (11)$$

式中 δ ——土壤摩擦角
 K ——土壤性质
 f ——综合摩擦因数
 v_e ——开沟起垄装置前行速度, m/s

犁体曲面初始元线角即为推土角,参考《农业机械设计手册》,半螺旋形犁体推土角取值为 $35^\circ \sim 40^\circ$ 。较小的推土角可显著提升犁体曲面的入土性能,降低牵引阻力,但可能会导致犁体顶部的元线角过小,从而影响犁体曲面的翻抛性能。同时,安装角会对土壤颗粒进入犁体曲面时的运动轨迹和速度方向产生影响,从而导致开沟犁体曲面阻力产生较大差别。《农业机械设计手册》中安装角取值范围为 $25^\circ \sim 30^\circ$ 。较小的安装角会导致起土曲面与垄沟底部产生刮擦,从而破坏垄沟形状。而较大的安装角会增强犁体曲面的碎土能力,进而增大犁体曲面阻力。结合甘薯起垄作业翻抛性能和降低作业能耗要求,选取仿真试验因素推土角和安装角分别为 $36^\circ \sim 40^\circ$ 和 $26^\circ \sim 28^\circ$ 。

牵引阻力主要由开沟犁体曲面阻力决定,推土角、安装角及元线角差值是开沟犁体曲面设计的主要参数,通过离散元仿真试验研究推土角、安装角及元线角差值对牵引阻力的影响规律,实现开沟起垄装置优化。

2.2.2 翼板受力分析

整机作业时,翼板所受到的牵引阻力主要由翼板受土壤挤压力和摩擦力组成,受力如图 7 所示,翼板所受牵引阻力 F_2 表示为

$$F_2 = f_x + F_d \tag{12}$$

式中 F_d ——翼板受挤压力, N
 f_x ——翼板受摩擦力, N

开沟起垄装置在田间作业过程中,除自身重力外还承载甘薯起垄整形机部分重力。土壤对翼板的支持力包括地面对翼板支持力、垄体侧边对翼板支持力和土壤挤压反力对翼板支持力。由于翼板重力主要作用在垄体侧边,在计算摩擦力过程中忽略地面对翼板支持力,摩擦力 f_x 表示为

$$f_x = \mu [(mg + T_1) \sin\phi + N_3] \tag{13}$$

式中 μ ——翼板与土壤摩擦因数
 m ——翼板质量, kg
 T_1 ——甘薯起垄整形机对翼板的压力, N
 N_3 ——土壤挤压反力对翼板的支持力, N

当机具和开沟起垄装置结构参数确定时,翼板前后宽度差形成的倾斜角直接决定土壤挤压反力。倾斜角越大,会显著增加翼板牵引阻力,反之翼板牵引阻力降低。

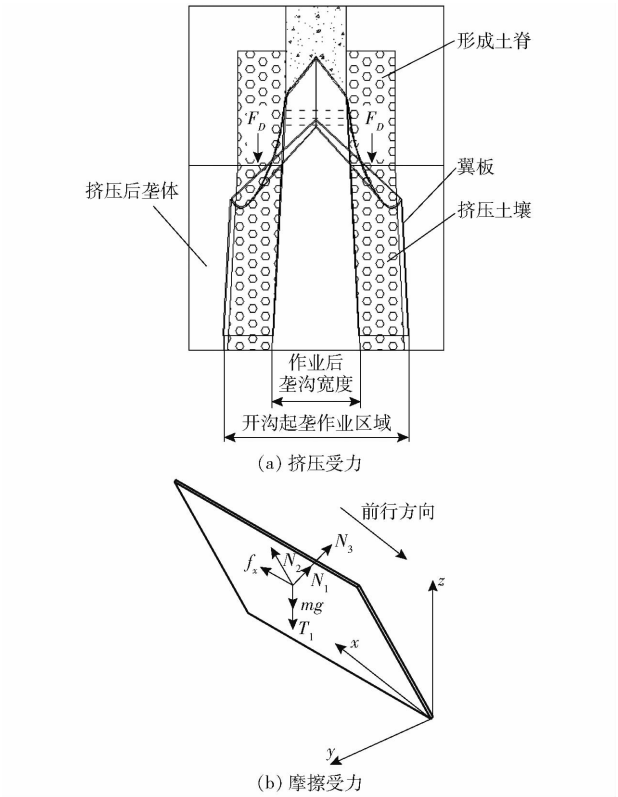


图 7 翼板受力分析

Fig. 7 Force analysis of wing plate

3 仿真试验

3.1 离散元模型建立及参数设定

通过 Inventor 软件建立犁铧式开沟起垄装置三维模型。将模型转换为 STEP 格式导入 EDEM 软件中。为提高 EDEM 软件计算速度和运行效率,将犁铧式开沟起垄装置不与土壤产生接触的零部件省略以简化模型(图 8)。

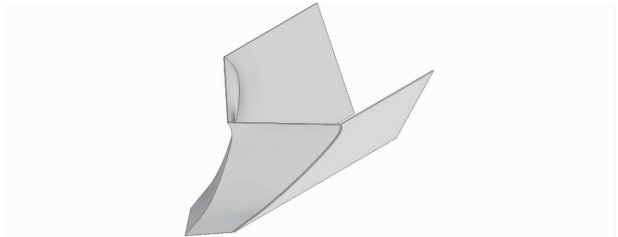


图 8 简化后犁铧式开沟起垄装置仿真模型

Fig. 8 Simplified plowshare furrowing ridging device

为满足仿真要求,避免仿真土槽边界对仿真试验产生影响,建立长×宽×高为 $4\,000\text{ mm} \times 2\,500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的仿真土槽,其中土壤高度为 300 mm 。设定土壤颗粒为规则及相同形状,采用半径为 6 mm 的球形颗粒组成单个土壤颗粒。JKR 模型相较于 bonding 模型,更侧重于土壤运动分析,本文选取 JKR 模型^[7],接触参数通过文献[20–21]和借助 GEMM 数据库推荐的土壤接触力学参数选取范围,离散元仿真参数如表 1 所示。

表 1 离散元仿真参数设定

Tab. 1 Discrete element simulation parameters

参数	数值
65Mn 钢板密度/(kg·m ⁻³)	7 800
65Mn 钢板剪切模量/Pa	7.0×10 ⁷
65Mn 钢板泊松比	0.4
土壤密度/(kg·m ⁻³)	2 600
土壤泊松比	0.3
土壤剪切模量/Pa	1×10 ⁶
土壤-土壤恢复系数	0.6
土壤-土壤静摩擦因数	0.8
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.3
JKR 表面能/(J·m ⁻²)	9.5
土壤-钢恢复系数	0.3
土壤-钢静摩擦因数	0.3
土壤-钢滚动摩擦因数	0.05

3.2 仿真试验结果与分析

3.2.1 仿真方案及结果

由土壤运动规律和开沟起垄曲面参数设计 & 分析可知,安装角 x_1 、推土角 x_2 及元线角差值 x_3 为影响开沟起垄装置牵引阻力的主要因素。为探究这 3 个主要因素对犁铧式开沟起垄装置作业性能和牵引阻力的影响规律及最优参数组合,利用 Design-Expert 软件中响应面 Box - Behnken 试验方法进行试验设计。以土壤抛送距离和牵引阻力为评价指标,设计了三因素三水平 Box - Behnken 中心组合设计试验,因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors and codes (°)

编码	因素		
	安装角 x_1	推土角 x_2	元线角差值 x_3
-1	26	36	10
0	27	38	12
1	28	40	14

土壤抛送距离反映土壤经翻抛后在垄顶分布和土脊形成情况。使用 EDEM 仿真软件中后处理模块区域选取功能,以仿真土槽 YOZ 平面作为基准面,以厚度 20 mm 对土槽试验区域进行切片,每个切片间隔 200 mm。选中每个切片中垄顶以上部分土壤颗粒,将土壤颗粒在 YOZ 平面中的坐标数据导出,计算垄顶边缘 Y 轴坐标到本侧土脊最远端的 Y 轴坐标,计算公式表示为

$$S = |Y_{\max} - Y_{\min}| \tag{14}$$

式中 S——土壤抛送距离,m

$Y_{\max}$ ——垄顶最远端颗粒坐标

$Y_{\min}$ ——垄顶最近端颗粒坐标

利用 EDEM 仿真软件后处理模块中的图表生

成功能,可直接对开沟起垄装置在 X、Y、Z 方向所受合力以折线输出。在仿真试验中,开沟起垄装置前行方向为 X 轴,起垄装置沿 X 轴方向做匀速直线运动,开沟起垄装置在 X 轴所受的合力即为牵引阻力,仿真试验中,机器作业速度为 3.33 km/h、固定入土深度为 200 mm,犁铧式开沟起垄装置仿真作业过程如图 9 所示。试验结果如表 3 所示。其中, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

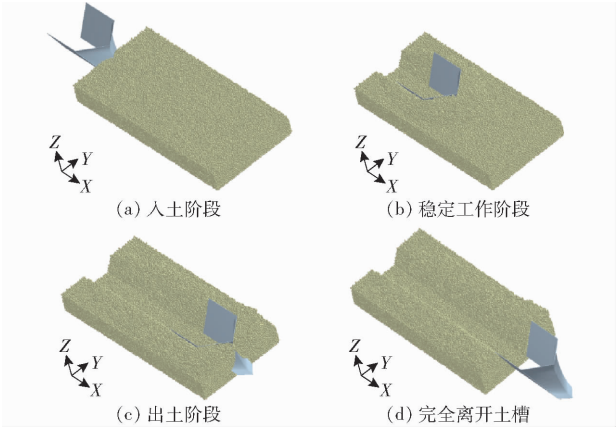


图 9 犁铧式开沟起垄装置仿真作业过程

Fig. 9 Simulation operating process of plowshare furrowing ridging device

表 3 试验结果

Tab. 3 Experimental results

试验 序号	因素			土壤抛送 距离/mm	牵引阻 力/N
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	214.90	1 371.18
2	0	-1	-1	229.19	1 353.22
3	1	1	0	220.57	1 397.33
4	0	0	0	218.37	1 369.82
5	-1	1	0	199.45	1 386.26
6	0	0	0	219.09	1 375.82
7	1	0	1	225.10	1 380.65
8	0	0	0	216.66	1 373.55
9	1	-1	0	211.25	1 366.12
10	0	0	0	216.88	1 368.39
11	1	0	-1	241.54	1 366.52
12	-1	0	-1	246.22	1 363.86
13	-1	0	1	233.87	1 398.64
14	-1	-1	0	230.66	1 374.63
15	0	1	1	220.44	1 389.53
16	0	1	-1	242.78	1 392.81
17	0	-1	1	229.49	1 397.70

3.2.2 土壤抛送距离方差和响应曲面分析

利用 Design-Expert 11 试验设计软件中的 Analysis 功能模块对土壤抛送距离方差分析,如表 4 所示。由表 4 可知,各影响因素和因素交互作用对土壤抛送距离的影响显著性由大到小依次为: X_3^2 、 X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_3 。根据分析可以得到影响因素对土

壤抛送距离的影响的二次多元回归方程为

$$Y_2 = 217.18 - 6.35375X_3 + 10.1325X_1X_2 - 5.66X_2X_3 + 17.2475X_3^2 \quad (15)$$

表 4 土壤抛送距离方差分析

Tab.4 Variance analysis of soil throwing distance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 250.44	9	250.05	13.22	0.000 1 **
X_1	17.23	1	17.23	0.911 1	0.371 6
X_2	37.63	1	37.63	1.99	0.201 2
X_3	322.96	1	322.96	17.08	0.000 1 **
X_1X_2	410.67	1	410.67	21.72	0.002 3 **
X_1X_3	4.18	1	4.18	0.221 2	0.652 5
X_2X_3	128.14	1	128.14	6.78	0.035 3 *
X_1^2	21.41	1	21.41	1.13	0.322 6
X_2^2	65.78	1	65.78	3.48	0.104 4
X_3^2	1 252.53	1	1 252.53	66.24	<0.000 1 **
残差	132.36	7	18.91		
总和	2 382.81	16			

注：**表示差异极显著($P < 0.01$), *表示差异显著($0.01 \leq P < 0.05$)。下同。

推土角和安装角对土壤抛送距离的影响规律如图 10 所示。从图 10 可以看出,土壤抛送距离随推土角和安装角的增大缓慢减小,两者对土壤抛送距离的影响趋势较为一致。当推土角和安装角较小时,土壤抛送距离较大。当推土角为 40°时,土壤抛送距离为最小值,而安装角为 28°时,土壤抛送距离为最小值。

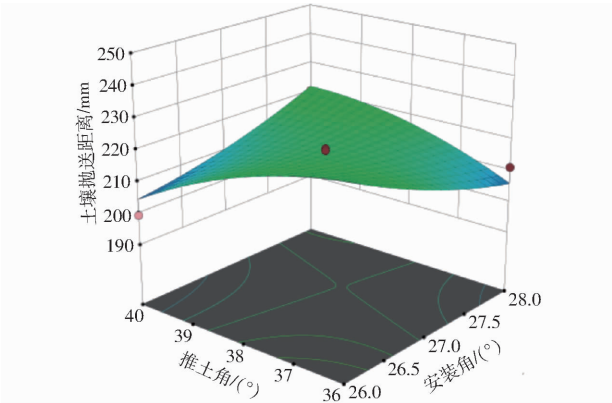


图 10 推土角和安装角对土壤抛送距离影响的响应曲面
Fig. 10 Influence of bulldozing angle and installation angle on soil throwing distance

安装角和元线角差值对土壤抛送距离的影响如图 11 所示。从图 11 可以看出,元线角差值变化方向响应曲面图变化较为陡峭,两端取值时土壤抛送距离较大,在安装角方向变化较为平缓,土壤抛送距离缓慢上升后保持平稳。这表明元线角差值变化对土壤抛送距离的影响较大,而安装角对土壤抛送距离无明显影响。设计中应主要考虑元线角差值变化,使土壤颗粒的抛送距离处在合理范围。

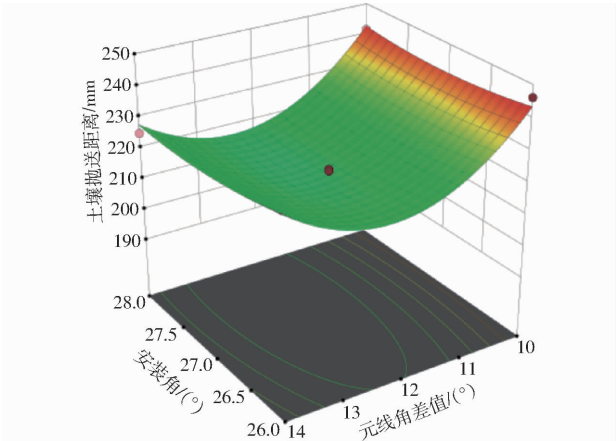


图 11 安装角和元线角差值对土壤抛送距离影响的响应曲面
Fig. 11 Influence of installation angle and element line angle difference on soil throwing distance

利用 Design-Expert 11 试验设计软件中的 Analysis 功能模块对牵引阻力方差分析,如表 5 所示。由表 5 可知,各因素对土壤抛送距离的影响显著性由大到小依次为: X_3 、 X_2 、 X_2X_3 、 X_2^2 、 X_1X_3 、 X_1X_2 。根据分析可以得到影响因素对牵引阻力的影响的二次多元回归方程为

$$Y_3 = 1\,371.75 + 9.2825X_2 + 11.2638X_3 + 4.895X_1X_2 - 5.1625X_1X_3 - 11.94X_2X_3 + 7.61525X_2^2 \quad (16)$$

表 5 牵引阻力方差分析

Tab.5 Variance analysis of traction resistance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 844.99	9	316.11	22.38	0.000 1 **
X_1	20.38	1	20.38	1.44	0.268 7
X_2	689.32	1	689.32	48.80	0.000 2 **
X_3	1 014.98	1	1 014.98	71.85	<0.000 1 **
X_1X_2	95.84	1	95.84	6.78	0.035 2 *
X_1X_3	106.61	1	106.61	7.55	0.028 6 *
X_2X_3	570.25	1	570.25	40.37	0.000 4 **
X_1^2	12.42	1	12.42	0.879 5	0.379 6
X_2^2	244.18	1	244.18	17.29	0.004 3 **
X_3^2	65.62	1	65.62	4.65	0.068 1
残差	98.88	7	14.13		
总和	2 943.88	16			

元线角差值和安装角对牵引阻力的影响如图 12 所示。从图 12 可以看出,牵引阻力随安装角的增大而增大,当安装角为 28°时达到最大值;从响应曲面整体趋势可以看出,在元线角差值一侧响应曲面图较为陡峭,这表明元线角差值对牵引阻力影响较为明显。在安装角一侧则变化较为平缓,牵引阻力缓慢上升。

推土角和安装角对牵引阻力的影响如图 13 所示。从图 13 可以看出,牵引阻力随推土角的增大而

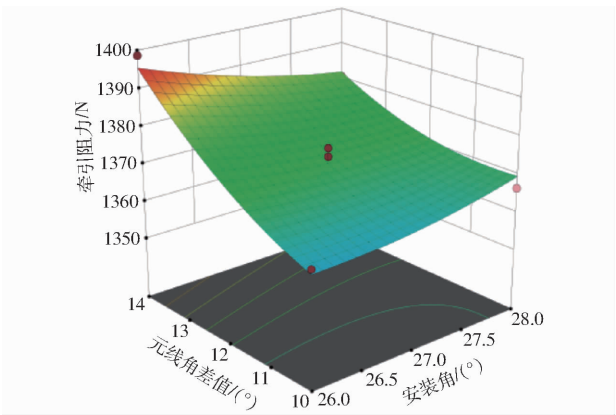


图 12 元线角差值和安装角对牵引阻力影响的响应曲面
Fig. 12 Influence of element line angle difference and installation angle on traction resistance

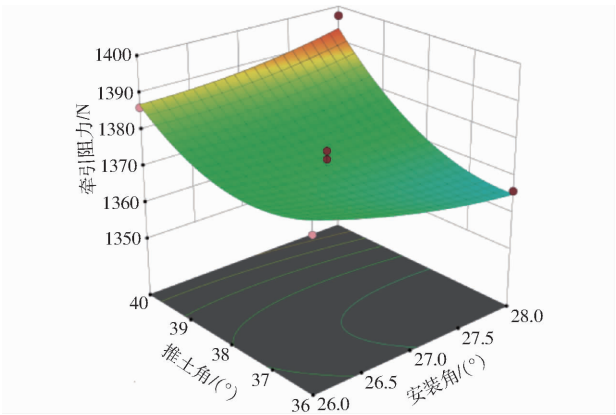


图 13 推土角和安装角对牵引阻力影响的响应曲面
Fig. 13 Influence of bulldozing angle and installation angle on traction resistance

增大,当推土角为 40°时达到最大;推土角和安装角交互作用对牵引阻力大小的影响也较为明显。从响应曲面整体趋势可以看出,安装角和推土角两侧 的响应曲面图均较为陡峭,两因素的变化对牵引阻力的影响均较为明显。

开沟起垄犁体曲面设计中,在保证土壤能够翻抛至垄顶的前提下,以牵引阻力最小为目标,利用 Design-Expert 11 软件 Optimization 功能选出各影响因素的最优组合为:安装角为 27.19°、推土角为 38.05°、元线角差值为 10.69°。最优参数组合工况下,土壤翻抛距离为 228.74 mm,牵引阻力 1 366.99 N。

4 田间试验

4.1 试验条件与方法

按仿真试验优化后的参数对犁铧式开沟起垄装置进行试制。为了验证犁铧式起垄装置工作性能,于 2021 年 10 月在山东火绒农业科技发展公司试验田开展了田间试验。试验现场如图 14 所示,板式和犁铧式开沟起垄装置如图 15 所示。

试验田土壤性质为壤土粘土混合。试验前测得



图 14 甘薯起垄整形机田间试验
Fig. 14 Field experiment of sweet potato ridging shaping machine



(a) 板式起垄装置 (b) 犁铧式开沟起垄装置
图 15 板式和犁铧式开沟起垄装置
Fig. 15 Ridging shaping device of plate type and ploughshare ridging shaping

土壤含水率为 15.7%。甘薯起垄整形机配套动力为东方红 954 型四驱拖拉机。试验测试主要仪器为 SL-TSC 型数字多功能土壤性质测试仪,可同时测量土壤含水率、温度及土壤紧实度。另外,拖拉机安装雷诺 WR-Y2-50-L 型油耗测试仪,测量起垄作业过程中的拖拉机油耗。

4.2 评价指标

参考 JB/T 8401.2—2017《旋耕联合作业机械 第 2 部分:旋耕深松灭茬起垄机》和 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》进行评定,选取垄体土壤紧实度和垄高稳定性系数作为作业效果试验指标。从节能角度考虑,将起垄装置工作过程的油耗作为一项评价指标。

4.2.1 垄高稳定度

测量每次试验垄型,沿拖拉机前行方向等距选取 10 处测量点,相邻测量点间隔 20 m。在垄顶放置卷尺,尽量贴合地面,同时在垄沟中心放置钢尺,两尺相交点距离垄沟底部的高度即为测量点的垄高,取 10 处测量点的垄高平均值为最终垄高,垄高稳定性系数可表示为

$$T = \left(1 - \frac{S_b}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i} \right) \times 100\% \quad (17)$$

式中 T ——垄高稳定性系数,%
 S_b ——垄高标准差,m
 h_i ——第 i 测量点垄体高度,m
 n ——试验中选取的测量点个数,取 10

4.2.2 垄体土壤紧实度

为衡量垄体土壤紧实程度,采用土壤紧实度仪器对起垄整形后的垄面进行测试,测量深度分别为0.1 m,由于垄上部分是先翻土后镇压,选取垄体中心位置为测试点,间隔2 m,取20个测点平均值为垄体土壤紧实度。

4.2.3 作业油耗

将板式起垄装置和犁铧式开沟起垄装置分别安装于同一台甘薯起垄整形机,且两种起垄装置起垄高度和宽度相同。田间试验作业长度为100 m,且每次作业长度相同,利用油耗测试仪及配套设备记录拖拉机每次试验全程油耗数据,利用配套分析程序计算每次试验平均作业油耗数据。两种起垄装置各进行5次田间试验,平均作业油耗取平均值。

4.3 试验结果与分析

田间试验时机具前行速度为3.33 km/h,固定入土深度为0.2 m。试验结果如表6所示。

表6 田间试验结果
Tab.6 Field experiment results

机具	垄高稳定性	垄体土壤紧	拖拉机作业油
	系数/%	实度/kPa	耗/(L·h ⁻¹)
板式起垄装置	96.13	218	12.47
犁铧式开沟起垄装置	98.53	236	11.94

从表6可以看出,相比于传统板式起垄装置,犁铧式开沟起垄装置垄高稳定性系数提高了2.4个百分点,垄体土壤紧实度提高了18 kPa,提高了垄体稳定性,且适合甘薯移栽作业和块根形成和膨大^[22]。

因此,设计的犁铧式甘薯起垄装置能够满足甘薯起垄农艺要求,为甘薯移栽提供了更好条件。同时,甘薯起垄整形机整机田间试验时,仅在同一台甘薯起垄整形机上,将起垄装置分别更换为板式起垄装置和犁铧式开沟起垄装置进行油耗对比,结果表明,犁铧式开沟起垄装置比板式起垄装置田间作业油耗降低了0.53 L/h,具有较好的节能效果。

5 结论

(1)针对现有甘薯起垄整形机存在起垄效果较差、牵引阻力大等问题,基于甘薯垄型结构尺寸农艺要求,设计了犁旋式甘薯起垄装置,构建了开沟起垄曲面导曲线及元线角变化参数方程、起垄装置整体受力模型。

(2)利用EDEM软件对犁铧式开沟起垄装置作业过程进行仿真试验,选取开沟犁体曲面安装角、推土角、元线角差值为试验因素,以土壤抛送距离、牵引阻力为试验指标,对开沟犁体曲面进行仿真优化,建立了试验因素与试验指标之间的回归数学模型,当机器作业速度为3.33 km/h、固定入土深度为200 mm时,得到优化参数组合为安装角为27.19°、推土角为38.05°、元线角差值为10.69°。

(3)田间对照及验证试验表明,犁铧式开沟起垄装置垄高稳定性系数为98.53%,垄体土壤紧实度为236 kPa,拖拉机作业油耗为11.94 L/h,满足甘薯开沟起垄农艺要求,均优于板式起垄装置作业效果。

参 考 文 献

[1] 胡金钊,张文毅,严伟,等. 国内外甘薯起机械研究状与展望[J]. 中国农机化学报,2018,39(11): 12-16.
HU Jinzhao, ZHANG Wenyi, YAN Wei, et al. Research status and prospect of sweet potato ridging machines at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018,39(11): 12-16. (in Chinese)

[2] 申海洋,王冰,胡良龙,等. 4UZL-1型甘薯联合收获机薯块交接输送机构设计[J]. 农业工程学报,2020,36(17): 9-17.
SHEN Haiyang, WANG Bing, HU Lianglong, et al. Design of potato connecting and conveying mechanism for 4UZL-1 type sweet potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 9-17. (in Chinese)

[3] 王伯凯,胡良龙,王少康,等. 甘薯双垄旋耕起垄覆膜机的设计及试验研究[J]. 中国农业大学学报,2018,23(7): 116-125.
WANG Bokai, HU Lianglong, WANG Shaokang, et al. Design and experiment of sweet potato transplanting operation machine with rotary tillage, ridging and covering film functions[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 116-125. (in Chinese)

[4] 包攀峰,吴明亮,官春云,等. 犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J]. 农业工程学报,2017,33(20): 23-31.
BAO Panfeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 23-31. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 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)

[7] 陈超鹏. 双翼犁式垄沟开沟器结构设计及试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2020.
CHEN Chaopeng. Structural design and experimental study of double-wing moldboard-style furrow opener[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)

- [8] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11): 79–87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79–87. (in Chinese)
- [9] KUMAR SAHU S, TIWARI K B, SHRIVASTAVA P, et al. Optimization of the kinematic parameter and fuel consumption for the side-shift offset rotavator using L and J-shape soil cutting blades[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2018, 7(8): 1970–1982.
- [10] 秦宽,丁为民,方志超,等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(16): 7–16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7–16. (in Chinese)
- [11] DAI Fei, GUO Wenjuan, SONG Xuefeng, et al. Design and field test of crosswise belt type whole plastic-film ridging-mulching corn seeder on double ridges[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(4): 88–96.
- [12] 林静,张桐嘉,陈彬,等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2): 28–39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28–39. (in Chinese)
- [13] FIAZ A, QIU Baijing, DING Qishuo, et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 103–110.
- [14] 赵淑红,刘汉朋,侯磊涛,等. 基于离散元法的免耕深施肥分段式玉米播种开沟器研制[J]. 农业工程学报,2021, 37(13): 1–10.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, HOU Leitao, et al. Development of deep fertilizing no-tillage segmented maize sowing opener using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 1–10. (in Chinese)
- [15] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报,2021,52(3): 75–87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75–87. (in Chinese)
- [16] 刘大为,谢方平,叶强,等. 1K–50 型果园开沟机开沟部件功耗影响因素分析与试验[J]. 农业工程学报,2019, 35(18): 20–29.
LIU Dawei, XIE Fangping, YE Qiang, et al. Analysis and experiment on influencing factors on power of ditching parts for 1K–50 orchard ditching[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 20–29. (in Chinese)
- [17] 胡建平,赵军,潘浩然,等. 基于离散元的双轴旋耕机功耗预测模型[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1): 9–16.
HU Jianping, ZHAO Jun, PAN Haoran, et al. Prediction model of double axis rotary power consumption based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 1): 9–16. (in Chinese)
- [18] 罗红旗,高焕文,李洪文,等. 玉米垄作免耕播种机油耗试验与分析[J]. 农业机械学报,2009,40(10): 49–52.
LUO Hongqi, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Fuel consumption test and analysis for the ridge-till and no-till corn planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 49–52. (in Chinese)
- [19] 肖文芳,舒彩霞,廖庆喜,等. 犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019,38(6): 139–146.
XIAO Wenfang, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 139–146. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 李俊伟,佟金,胡斌,等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2019, 35(6): 130–140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130–140. (in Chinese)
- [22] 史文卿,张彬彬,柳洪鹏,等. 甘薯块根形成和膨大对土壤紧实度的响应机制及与产量的关系[J]. 作物学报,2019, 45(5): 755–763.
SHI Wenqing, ZHANG Binbin, LIU Hongjuan, et al. Response mechanism of sweet potato storage root formation and bulking to soil compaction and its relationship with yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(5): 755–763. (in Chinese)