

马铃薯播种机两段式组合起垄装置设计与试验

张 还¹ 郭鑫雨¹ 张 健^{1,2} 杨然兵^{1,2} 王伟静¹ 戚晟淳¹

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 海南大学机电工程学院, 海口 570228)

摘要: 起垄有利于增加土壤的透气性及保水能力,是马铃薯种植环节中重要的一环。针对目前马铃薯播种机起垄装置功能单一、效率低、作业效果差等问题,提出一种适用于山东地区的两段式组合起垄装置,通过覆土圆盘和翼面铲的配套作业,同时完成覆土、起垄和整形作业,有利于种薯扎根稳定、生长发达,提高马铃薯播种机的作业效率和质量。通过分析覆土圆盘、翼面铲的作业过程以及土壤的运动过程,对翼面铲的总体尺寸及铲尖、铲面、翼板等主要部件进行参数设计。利用 EDEM 仿真软件建立土壤与两段式组合起垄装置的联合仿真模型并进行试验,对两段式组合起垄装置的起垄量模拟曲线进行分析,得出装置的作业质量相比仅依靠覆土圆盘作业有显著提升。田间试验表明,当马铃薯播种机前进速度为 0.25 m/s 时,两段式组合起垄装置所起土垄平均高度为 251 mm,平均垄底宽为 698 mm,平均垄距为 902 mm,平均垄体土壤紧实度可达到 390.33 kPa,作业效果良好,满足山东地区马铃薯起垄农艺要求。

关键词: 马铃薯播种机; 两段式; 起垄整形装置; EDEM; 田间试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0076-08

Design and Experiment of Two-stage Combined Ridging Device for Potato Planter

ZHANG Huan¹ GUO Xinyu¹ ZHANG Jian^{1,2} YANG Ranbing^{1,2} WANG Weijing¹ QI Shengchun¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Ridging is beneficial for increasing soil permeability and water retention capacity, and is an important part of potato cultivation. A two-stage combined ridging device suitable for Shandong region was proposed to address the problems of single function, low efficiency, and poor operation effect of the current potato seeder ridging device. By combining the soil covering disc and wing shovel, the device can simultaneously complete the soil covering, ridging, and shaping operations, which was conducive to stable rooting and developed growth of potatoes, and improved the efficiency and quality of potato seeder operations. By analyzing the operation process of the soil covering disc and wing shovel, as well as the movement process of the soil, the overall size of the shovel and the main components such as the shovel tip, shovel surface, and wing plate were designed with parameters. Using EDEM simulation software to establish a joint simulation model of soil combined two-stage combined ridging device, and conducting experiments, the simulation curve of ridging amount of the device was analyzed. It was found that compared with relying solely on the covered disc for ridging operation, the operation quality of the two-stage combined ridging device was significantly improved. Field experiments showed that when the potato seeder advanced at a speed of 0.25 m/s, the average height of the soil ridge raised by the two-stage combined ridging device was 251 mm, the average width of the ridge bottom was 698 mm, the average ridge distance was 902 mm, and the average soil compaction of the ridge can reach 390.33 kPa. The operation effect was good, meeting the agricultural requirements of the potato ridge raising in Shandong.

Key words: potato planter; two-stage; ridging and shaping device; EDEM; field experiment

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-10-P32)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MF306)和青岛农业大学高层次人才科研基金项目(1116002)

作者简介: 张还(1974—),男,副教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail: huan0804@163.com

通信作者: 杨然兵(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: yangranbing@163.com

0 引言

马铃薯是一种重要的全球性粮食作物,其种植面积和产量逐年增加^[1-2]。在马铃薯的种植过程中,起垄整形作为一项关键环节,能够较好地土壤覆盖在种薯上,并形成整齐的土垄^[3]。此技术能够极大地发挥垄作栽培的优势,增加土壤透气性和保水能力^[4-6],使种薯扎根稳定、生长发达,对促进马铃薯的生长发育和稳产高产起着不可忽视的作用。

目前,国内外学者针对马铃薯起垄整形技术进行了一系列的研究。例如,李同辉^[7]研发的马铃薯直插式膜上播种机,利用取土覆土装置和可调式镇压轮配合作业,结构新颖,但需单独起垄,故作业效率不高。ZHENG 等^[8]研发的马铃薯播种机,采用联动微调覆土圆盘装置,可在丘陵山区等地进行覆土作业,但其缺乏整形功能,功能较为单一。英国 George Moate 公司的马铃薯旋耕起垄机,配备圆盘起垄器和垄体成型板,作业可靠,但其体积较大,不适用于中小地块^[9]。比利时 AVR 公司生产的马铃薯中耕机,配备圆形培土盘和高速起垄罩,通过液压系统调节作业压力,以保证起垄的连续性,但操作复杂、维护成本较高。德国 GRIMME 公司生产的 GF 型马铃薯中耕机,其培土整形板装置可实现大而稳定的垄形,但其价格昂贵,且达到 2 000 kg,易造成土壤压实现象^[5]。综合以上分析,现阶段马铃薯播种机起垄整形装置的设计主要存在功能单一、效率低、适应性差等问题^[10-12]。

针对以上问题,本文提出一种马铃薯播种机两段式组合起垄装置,通过覆土圆盘和翼面铲的组合作业,同时完成覆土、起垄和整形作业,提高马铃薯播种机的作业效率和质量。

1 整机结构与工作原理

本文提出的两段式组合起垄装置依托于 2CM-2Y 型马铃薯播种机,整机主要包括主机架、地轮、施肥装置、排种装置和起垄整形装置等,机器由拖拉机牵引,能够一次性完成开沟、施肥、播种、起垄、覆土、整形镇压等环节,如图 1 所示。

田间作业时,开沟器位于马铃薯播种机的前部,随着机器的前进开出种沟。施肥装置通过排肥管将肥料施入种沟内。地轮通过传动系统带动排种装置转动,种薯经导种管落入种沟内。最后由两段式组合起垄装置进行覆土、起垄、整形作业,实现对种薯的及时覆盖以及对土垄的修整镇压。

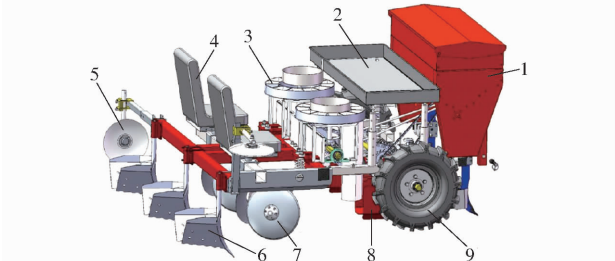


图 1 2CM-2Y 型马铃薯播种机结构三维图

Fig. 1 3D illustration of 2CM-2Y potato planter

1. 施肥装置 2. 种薯托盘 3. 排种装置 4. 座椅 5. 划线器
6. 翼面整形铲 7. 覆土圆盘 8. 开沟装置 9. 地轮

2 两段式组合起垄装置设计

2.1 农艺要求与覆土圆盘起垄问题分析

山东地区属于我国马铃薯中原二作区,实行春秋两季栽培,土质以砂壤土为主。马铃薯种植前需对地块进行耕整处理,一般深耕 30 cm 左右,以确保土壤松散;播种一般采用切块薯,每块种薯大小均匀为宜,并保证有 1 或 2 个芽眼;另外,应在播前进行基础施肥,在种薯生长期间及时追肥与灌溉,以满足马铃薯不同阶段的营养需求。

马铃薯种植模式主要分为平作和垄作,山东地区主要采用垄作栽培,有利于保水保肥,加快出苗结薯,促进高产增收。马铃薯种植的垄形分为梯形和半圆形,相比之下梯形垄更适合机械化起垄和种植^[13]。结合当地地块条件及种植农艺要求,确定马铃薯主要垄形参数为:垄高 250 mm,垄距 900 mm,垄底宽 700 mm,垄顶宽 450 mm,垄沟宽 200 mm,垄形剖面如图 2 所示。

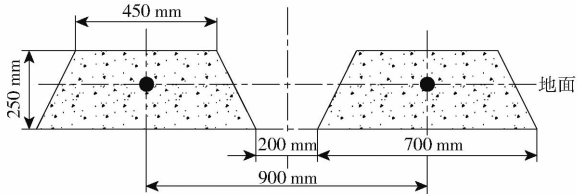


图 2 马铃薯种植垄形示意图

Fig. 2 Ridge schematic of potato planting

2CM-2Y 型马铃薯播种机采用双圆盘进行覆土、起垄作业,双圆盘起垄器具有结构简单、工作阻力小、起土量可调整等优点^[14],故使用较为广泛(图 3)。覆土圆盘作业时,两个圆盘以凹面作为工作部分,在牵引力的作用下,圆盘边前进边旋转刮土,形成中央凸起的垄体,并覆盖种薯,同时在垄侧形成垄沟。覆土圆盘材料选用耐磨、抗腐蚀和耐用的高强度钢 65Mn,参考现有研究,确定圆盘厚度为 6 mm,直径为 500 mm^[15]。

由覆土圆盘的作业过程可知,圆盘作业时会切



图 3 圆盘起垄机构
Fig. 3 Disc ridging mechanism

入土壤,在圆盘入土截面图中(图 4),设 EF 为地面与圆盘的截交线, θ 为圆心角的一半,则

$$\theta = \arccos \frac{R - h'}{R} \quad (1)$$

式中 R ——圆盘半径,取 250 mm

h' ——圆盘入土深度,取 70 mm

计算得 θ 约为 43.94° ,取值 44° 。

则覆土圆盘对土壤的推翻面积 S_p 可表示为

$$S_p = 2 \left[\frac{\theta \pi R^2}{180} - (R - h')^2 \tan \theta \right] \quad (2)$$

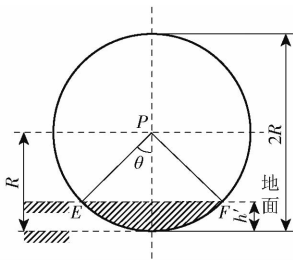


图 4 圆盘入土截面图
Fig. 4 Cross section of disc into soil

由于马铃薯播种机为人工放种,为避免重、漏播等现象,机具前进速度不宜过快,一般设定为 0.25 m/s,则单位时间内每对覆土圆盘所起土壤体积 V_p 可表示为

$$V_p = S_p v \quad (3)$$

式中 v ——机器前进速度

经计算, V_p 为 $1.625 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 。

根据图 2 可知,标准农艺理论上单位时间内单侧起垄体积 V 为

$$V = S_T v \quad (4)$$

式中 S_T ——土垄梯形截面面积

经计算得 V 为 $3.59 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 。

由上述分析可知, V_p 远小于标准农艺下理论上的单侧起垄体积量 V ,且覆土圆盘在实际田间作业中,存在起垄高度低、垄形松散、种床上方合土不严等问题,无法满足马铃薯种植起垄要求。

2.2 翼面铲参数设计

2.2.1 翼面铲作业过程分析

针对上述问题,起垄装置常伴随着整形镇压机构,对土垄进行二次修整及镇压,以形成外紧内松、

适合马铃薯生长的垄体^[16-17]。

因此,为提升马铃薯播种机的起垄质量,本文设计 3 套翼面铲,与覆土圆盘配套使用,实现对土垄的整形镇压。参考图 1 可知,其位置设定在覆土圆盘的后方,左右两铲分别与两地轮对齐,中间铲与两对覆土圆盘的中间位置对齐,以保证 3 套铲的前进轨迹与覆土圆盘初步形成的垄沟重合。

如图 5 所示,翼面铲主要由铲尖、铲面、翼板、支撑管等部分紧密焊接而成。翼面铲作业时先由铲尖入土,随着机器带动前进,铲尖对垄沟中的土壤进行初步破碎并将其上升至铲面,再由铲面将堆积的土壤分离至两侧并向上抛运至垄的表面,最后在翼板的挤压作用下对垄顶及垄侧的土壤进行修整及压实,以实现土垄良好的稳定性。

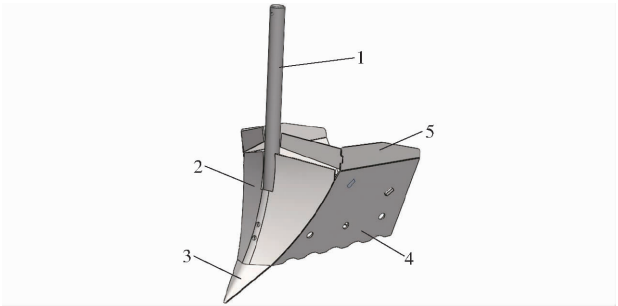


图 5 翼面铲结构图
Fig. 5 Structural diagram of shovel
1. 支撑管 2. 铲面 3. 铲尖 4. 翼板 5. 加高板

2.2.2 翼面铲整体参数设计

为便于对翼面铲参数进行计算,将垄顶和原垄沟内的土壤体积从中心位置进行划分,如图 6 所示,并将地面水平线设为基准线^[18]。

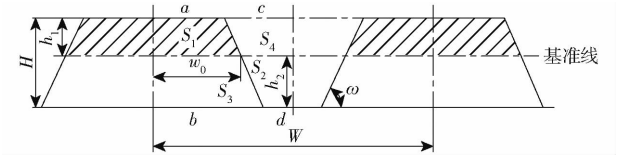


图 6 马铃薯种植垄形断面图
Fig. 6 Ridge cross section of potato planting

由翼面铲的作业过程可知,垄顶 S_1 处土壤可看作翼面铲将地面以下 S_2 处土壤抛运形成,即垄顶 S_1 处土壤体积 V_1 等于地面以下 S_2 处土壤体积 V_2 。由于任意时刻土垄与垄沟的长度相同,故垄沟与垄顶土壤互换关系可表示为

$$\begin{cases} S_1 = S_2 \\ S_1 = \frac{(a + w_0) h_1}{2} \\ S_2 = \frac{(0.5W - w_0 + d)(H - h_1)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

根据梯形面积的比例关系可知

$$\begin{cases} \frac{S_1 + S_3}{S_2 + S_4} = \frac{a + b}{c + d} \\ S_3 = \frac{(b + w_0)(H - h_1)}{2} \\ S_4 = \frac{h_1(c + 0.5W - w_0)}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 a ——1/2 垄顶宽,取 225 mm
 b ——1/2 垄底宽,取 350 mm
 c ——1/2 垄沟顶宽,取 225 mm
 d ——1/2 垄沟底宽,取 100 mm
 h_1 ——基准线以上垄高,mm
 H ——垄高,取 250 mm
 W ——垄距,取 900 mm
 w_0 ——常数,mm

联立式 (5)、(6) 得出基准线高度 h_1 约为 105.03 mm,故翼面铲理论最小入土深度 h_2 约为 144.97 mm。

将垄体倾角记作 ω ,由图 6 知

$$\omega = \arctan \frac{H}{b - a} \quad (7)$$

得到垄体倾角 ω 为 63.4°。

结合马铃薯起垄农艺要求,翼面铲高度 H_c 应略大于作业后垄顶土壤堆积高度,取 $H_c = 300$ mm,则翼面铲顶宽 W_c 可表示为

$$W_c = 2d + 2H_c \cot \omega \quad (8)$$

计算得翼面铲顶宽为 500 mm。

2.2.3 铲尖参数设计

在自身重力及马铃薯播种机的牵引作用下,翼面铲的铲尖插入土壤,对土壤起到初步的破碎效果,再将堆积的土壤导引至上方铲面。

铲尖与垄沟底部平面的夹角为入土角,记作 α_1 , α_1 的大小直接影响铲的入土能力和前进阻力,为减小入土阻力,入土角 α_1 一般在 25°~35° 范围内^[19-20]。铲尖张角过大,易发生土壤外翻、粘土、缠绕杂草等现象;铲尖张角过小,铲切断草根的能力减弱。由于翼面铲是在整地状况良好的条件下作业,综合考虑设定入土角 $\alpha_1 = 30^\circ$,铲尖张角 $\gamma = 40^\circ$ ^[21-22]。

由翼面铲总体结构可知,铲的总高度 H_c 可表示为

$$H_c = h_3 + h_4 \quad (9)$$

式中 h_3 ——铲尖垂直高度,mm
 h_4 ——铲面垂直高度,mm

由 2.2.2 节可知 H_c 取 300 mm,参考《农业机械设计手册》及相关文献,取 h_3 、 h_4 分别为 80、220 mm。综上,铲尖入土角 $\alpha_1 = 30^\circ$,铲尖张角 $\gamma = 40^\circ$,铲尖

高度 $h_3 = 80$ mm。

2.2.4 铲面参数设计

翼面铲的铲尖与铲面平滑连接,因此整条铲曲线可看作由铲尖 OM 段直线与铲面 MN 段曲线组成,并在点 M 平滑过渡,如图 7 所示。

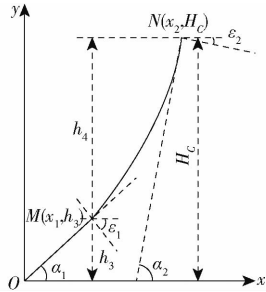


图 7 翼面铲总曲线

Fig. 7 Curve diagram of shovel

将铲面 MN 段曲线设计为抛物线^[23],则直线 OM 为曲线 MN 在点 M 的切线。将点 M 坐标记作 (x_1, h_3) ,铲面最高点 N 坐标记作 (x_2, H_c) ,则翼面铲的总曲线方程可表示为

$$y = \begin{cases} \tan \alpha_1 x & (0 \leq x \leq x_1) \\ ax^2 & (x_1 < x \leq x_2) \end{cases} \quad (10)$$

将铲面曲线在点 M 、 N 处的切线与 x 轴的夹角分别记作 α_1 、 α_2 ,则曲线在点 M 、 N 的斜率满足导曲线方程

$$\begin{cases} y'_M = 2ax_1 = \tan \alpha_1 \\ y'_N = 2ax_2 = \tan \alpha_2 \end{cases} \quad (11)$$

将式 (11) 中 x_1 、 x_2 代入式 (10) 翼面铲的总曲线方程,可知

$$H_c - h_3 = \frac{\tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_1}{4a} \quad (12)$$

得到铲面 MN 段曲线方程为

$$y = \frac{\tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_1}{4h_4} x^2 \quad (13)$$

如图 8 所示,翼面铲作业时,某土壤颗粒 D 在 MN 段铲面上的受力主要有: D 受铲面的法向支撑力 F_N ,方向为铲面上点 D 的法线方向; D 受铲面的滑动摩擦力 F_f ,方向为铲面上点 D 的切线方向; D 受其它土壤的阻力 T ,方向与机器前进方向相反,单

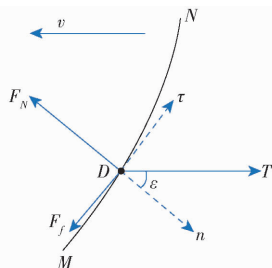


图 8 土壤颗粒受力分析

Fig. 8 Force analysis of soil particles

位均为 N。

设 ε 为 MN 段铲面所受工作阻力与正压力在点 D 的夹角,土壤颗粒 D 从点 M 被升运至点 N 必须满足条件

$$\begin{cases} \sum F_{\tau} = T\sin\varepsilon - F_f \geq 0 \\ \sum F_n = F_N - T\cos\varepsilon = 0 \end{cases} \quad (14)$$

设 φ 为土壤颗粒与铲面之间的摩擦角,根据山东地区的土壤类型、土壤湿度条件,土壤颗粒与钢板之间的摩擦角一般在 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间,取 $\varphi = 35^{\circ}$,则摩擦力 F_f 可表示为

$$F_f = \tan\varphi F_N \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)得出: $\tan\varepsilon - \tan\varphi \geq 0$, 即 $\varepsilon \geq \varphi$ 。

由图 7 可知曲线 MN 上任意点切线与 x 轴的夹角满足: $\alpha = 90^{\circ} - \varepsilon \leq 90^{\circ} - \varphi = 55^{\circ}$ 。

由此验证入土角 α_1 取 30° 可行,综合考虑取 $\alpha_1 = 30^{\circ}, \alpha_2 = 50^{\circ}$ 。

综上,翼面铲的铲面高度 $h_4 = 220$ mm,翼面铲的总曲线方程为

$$y = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{3}x & (0 \leq x \leq x_1) \\ \frac{3\tan^2 50^{\circ} - 1}{2640}x^2 & (x_1 < x \leq x_2) \end{cases} \quad (16)$$

2.2.5 翼板参数设计

翼板分布于铲的两侧,与铲面连接并向后延伸,主要用于支撑铲面,并对垄顶及垄侧的土壤进行修整及压实。翼板长度 L 与机具前行速度、土壤下落的高度有关,分析土壤颗粒 D 从最高点下落至垄沟的运动轨迹^[19],满足

$$\begin{cases} y_D = (\sqrt{V_y^2 + 4gh} - V_x) \frac{V_x}{g} \\ V_y = gt \\ h_d = \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中 $V_x、V_y$ ——土壤颗粒在水平和竖直方向的速度, m/s

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

t ——土壤颗粒下落时间, s

h_d ——土壤颗粒下落高度,取 250 mm

其中 V_x 与机具速度相等,即 $V_x = 0.25 \text{ m/s}$,计算得翼板最小长度为 228.6 mm,取翼板长度 $L = 230$ mm。设计翼板宽度 P 与整形铲顶宽相同,取 $P = 500$ mm,翼板高度 H_e 与铲面高度相同,取 $H_e = 220$ mm。

3 仿真试验

为了检验两段式组合起垄装置的可行性,基于

离散元法,采用仿真软件 EDEM 建立了土壤与装置的联合仿真模型,通过模拟装置的覆土、起垄、整形、镇压过程,对比仅靠覆土圆盘和采用两段式组合起垄装置两种作业方式不同的起垄效果,并对后续的田间试验提供指导。

3.1 仿真模型建立

为模拟山东地区砂壤土环境下的复杂性,对土壤颗粒模型进行设定:砂壤土虽结构松散,但水分的存在令土壤颗粒表面具有一定粘结效果,且 JKR 模型相较于 bonding 模型更侧重于土壤运动分析,故选取 JKR 模型^[24]。现有研究表明,砂壤土颗粒主要包括球形颗粒、柱状颗粒、核状颗粒、块状三角形颗粒,故设定由单球形、柱形、三角形、菱形 4 种不同形状的颗粒组成土壤模型^[25],如图 9 所示,具体参数设定见表 1^[26-27]。

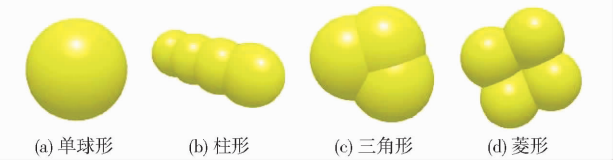


图 9 土壤颗粒模型

Fig. 9 Model of soil particles

表 1 仿真参数设定

Tab. 1 Simulation parameter settings

参数	数值	来源
土壤颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 600	文献[27]
土壤泊松比	0.41	文献[27]
土壤剪切模量/Pa	1×10^6	文献[26]
土壤-土壤恢复系数	0.6	文献[27]
土壤-土壤静摩擦因数	0.35	文献[27]
土壤-土壤动摩擦因数	0.24	文献[27]
钢板密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 800	文献[27]
钢板泊松比	0.3	文献[27]
钢板剪切模量/Pa	7×10^7	文献[26]
土壤-钢恢复系数	0.6	文献[27]
土壤-钢静摩擦因数	0.5	文献[27]
土壤-钢动摩擦因数	0.05	文献[27]
JKR 表面能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)	9.5	文献[26]

在 EDEM 中建立土槽模型,尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)设定为 $2\,500 \text{ mm} \times 1\,500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,土壤高度设为 300 mm。在土槽上方建立颗粒工厂以生成土壤颗粒,颗粒沿 Y 轴负方向以重力加速度 -9.81 m/s^2 下落,直到填满土槽为止,形成图 10 所示土层。将简化后的两段式组合起垄装置三维模型转换为 STEP 格式,并导入至 EDEM 中,仿真模型如图 11 所示。

3.2 仿真过程

仿真总时间设定为 26 s , 12 s 用于生成马铃薯

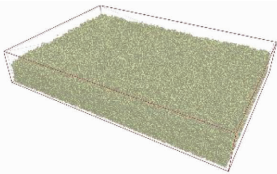


图 10 土壤仿真模型
Fig. 10 Simulation model of soil

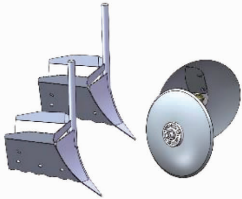


图 11 装置简化模型
Fig. 11 Simplified model of ridging and shaping device

土槽模型,14 s 用于模拟组合装置在田间作业的过程,时间步设定为 10%,时间保存间隔设定为 0.1 s。

结合马铃薯起垄农艺要求和装置在田间作业情况,对其工作参数进行设定:两段式组合起垄装置前进速度为 0.25 m/s、圆盘转速为 9.6 r/min、入土深度为 145 mm。模拟运动开始时,装置位于土槽一端,如图 12a 所示。在工作过程中,覆土圆盘一边前进一边旋转刮土,初步形成垄体;后方的翼面铲沿垄沟前进,使更多土壤上升并堆积到垄顶。仿真结束后,装置离开土槽,形成一条稳定、饱满的垄体。

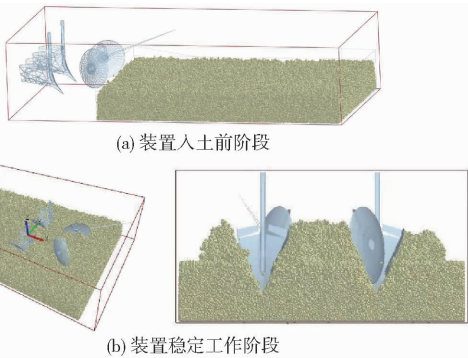


图 12 两段式组合起垄装置运动仿真过程
Fig. 12 Simulation process of two-stage combined ridging device

3.3 结果分析

如图 13 所示,在 EDEM - Analyst 界面中选取仿真形成的单垄作为 Grid Bin Group 计算区域。通过生成域内土壤总体积随时间的变化曲线,以显示两段式组合起垄装置运动全程所起土垄的总体积变化情况,结果如图 14 所示。

参考图 14 中 5 ~ 10 s 两段式组合起垄装置稳定工作阶段,可知装置起垄的总体积呈现缓慢增加的趋势,单位时间内装置起垄体积 V_z 可表示为

$$V_z = \frac{V_{10} - V_5}{5} \quad (18)$$

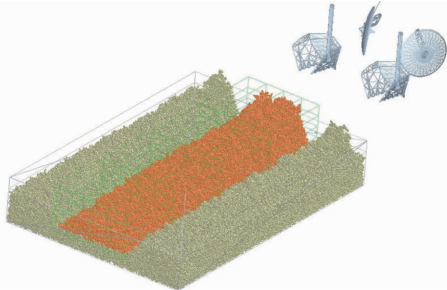


图 13 框选的特定计算区域
Fig. 13 Box selected specific calculation area

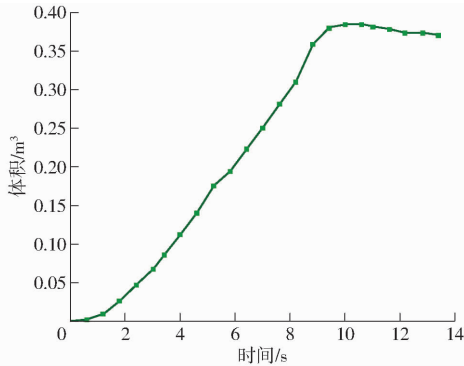


图 14 起垄总体积变化曲线
Fig. 14 Total volume change curve of ridging

式中 V_5 ——装置在第 5 秒起垄总体积,为 $1.758 \times 10^{-2} \text{ m}^3$
 V_{10} ——装置在第 10 秒起垄总体积,为 $3.845 \times 10^{-2} \text{ m}^3$

计算得到两段式组合起垄装置每秒单侧起垄体积 $V_z = 4.17 \times 10^{-2} \text{ m}^3$,结合 2.1 节对理论上单侧起垄体积 V 和每对覆土圆盘起垄量 V_p 的分析,得出 $V_z > V > V_p$ 。因此,相比仅依靠覆土圆盘进行起垄作业,两段式组合起垄装置在作业性能、工作效率等方面具有更加良好的优越性。

4 田间试验

4.1 试验方法

为进一步验证两段式组合起垄装置与整机的适配性及作业效果,于 2023 年 4 月在青岛市洪珠马铃薯试验基地开展田间试验(图 15)。试验前使用旋耕机对土壤进行疏松,清除地表障碍物,检查整机各连接件是否紧固,并准备好土壤紧实度测量仪、直尺、卷尺等工具。

试验配套动力选用雷沃欧豹 1404 型拖拉机,前进速度设定为 0.25 m/s,共作业 6 条土垄,在每条土垄的中段工作稳定区域随机选取 2 个点,以垄体尺寸、垄体紧实度为试验指标进行测量,每项共测得 12 组数据,舍弃极值后各项保留 10 组数据,进行记录并求取平均值^[28]。



图 15 田间试验

Fig. 15 Field experiment

4.2 试验结果与分析

4.2.1 垄形参数

选取垄高、垄宽、垄距等作为主要垄形参数,对试验垄进行测量,以检测装置的起垄效果,结果如表 2 所示。

表 2 垄形参数测量结果

Tab.2 Measurement results of ridge type parameters

mm			
序号	垄高	垄底宽	垄距
1	260	694	903
2	255	699	896
3	243	705	904
4	248	704	908
5	256	702	901
6	252	698	897
7	250	687	889
8	249	689	905
9	253	696	910
10	244	706	907
平均值	251	698	902

4.2.2 垄体紧实度

整形镇压作业能够缩小土壤中大的孔隙,使得土壤较为紧密且分布均匀,以此改善土壤的水热状况和微生物环境,促进马铃薯的生长发育^[29]。因此,将垄体紧实度作为一项试验指标,以检测装置的整形镇压效果。

测量工具选用 HM-JSD1 型土壤紧实度测定仪,选取垄侧中心位置、土壤深度约 150 mm 处进行测量,结果如表 3 所示。

4.2.3 试验结果分析

试验结果表明:当马铃薯播种机前进速度为 0.25 m/s 时,两段式组合起垄装置所起土垄平均高

表 3 垄体紧实度测量结果

Tab.3 Measurement results of ridge compactness

kPa	
序号	垄体紧实度
1	376.32
2	385.22
3	401.60
4	389.02
5	381.20
6	392.54
7	395.76
8	394.90
9	390.49
10	396.33
平均值	390.33

度为 251 mm,平均垄底宽为 698 mm,平均垄距为 902 mm,平均垄体土壤紧实度可达到 390.33 kPa,装置与整机适配性较好,能够满足马铃薯种植起垄农艺要求。

5 结论

(1)针对目前马铃薯播种机起垄整形作业中存在的功能单一、效率低、作业效果差等问题,本文提出一种两段式组合起垄装置,能够同时完成覆土、起垄和整形作业,有利于种薯扎根稳定、生长发达,提高马铃薯播种机的作业效率和质量。根据标准农艺下的马铃薯垄形参数,计算得到理论上每秒单侧起垄量 V 。通过分析覆土圆盘的起垄过程,计算得到每秒每对覆土圆盘起垄量 V_p 。通过分析翼面铲的作业过程和土壤(颗粒)的运动过程,对铲的总体尺寸以及铲尖、铲面、翼板等主要部件进行参数设计。

(2)利用离散元软件 EDEM 对两段式组合起垄装置的作业过程进行仿真试验,分析得出 $V_z > V > V_p$,验证了装置作业的可行性,以及装置在作业性能、工作效率等方面更具有优越性。

(3)田间试验表明,当马铃薯播种机前进速度为 0.25 m/s 时,两段式组合起垄装置所起土垄平均高度为 251 mm,平均垄底宽为 698 mm,平均垄距为 902 mm,平均垄体土壤紧实度可达到 390.33 kPa,作业效果满足马铃薯种植起垄农艺要求,验证了装置的可靠性及稳定性。

参 考 文 献

[1] 王建雄,王志虹,景玉川,等. 马铃薯全程机械化高产高效栽培技术分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(27): 33-38.
WANG Jianxiong, WANG Zhihong, JING Yuchuan, et al. Mechanized high yield cultivation techniques for potato[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(27): 33-38. (in Chinese)

[2] 李勤志. 我国马铃薯产业的经济分析[D]. 武汉:华中农业大学, 2005.
LI Qinzhi. An economic analysis of potato industry in China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005. (in

Chinese)

[3] ZHOU Baidong, LI Yexin, ZHANG Cong, et al. Potato planter and planting technology: a review of recent developments[J]. Agriculture, 2022, 12:1600.

[4] 孙江婷,翟稳熙,韩金玲. 薯类作物垄作栽培的生理生态效应研究进展[J]. 河北科技师范学院学报, 2022, 36(3): 48–54. SUN Jiangting, ZHAI Wenxi, HAN Jinling. The research progress on physiological and ecological effects of ridge cultivation of potato crops[J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2022, 36(3): 48–54. (in Chinese)

[5] 刘志峰. 驱动式马铃薯中耕机培土装置的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020. LIU Zhifeng. Design and experiment on soil-cultivating device of driving-type potato cultivator [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[6] 张长生. 中国优质专用薯类生产与加工[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 14.

[7] 李同辉. 马铃薯直插式膜上播种机设计研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2016. LI Tonghui. The design of direct plug-in potato planter on membrane[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[8] ZHENG Zhiqi, FU Zuoli, WANG Chenyang, et al. Design and experimental research on soil covering device with linkage and differential adjustment of potato planter[J]. Agriculture, 2021, 11: 665.

[9] 陈雪婷. 烟草起垄施肥机逐级压实装置设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022. CHEN Xueting. Design and test of successive compaction device of tobacco ridging, fertilization and compaction [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[10] 刘全威,吴建民,王蒂,等. 马铃薯播种机的研究现状及进展[J]. 农机化研究, 2013, 35(6): 238–241. LIU Quanwei, WU Jianmin, WANG Di, et al. Current status and progress of the potato seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 238–241. (in Chinese)

[11] 李永堂. 不同起垄高度对马铃薯产量的影响试验[J]. 农业科技与信息, 2021(19): 32–34. LI Yongtang. Experiment on the effect of different ridge raising heights on potato yield[J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2021(19): 32–34. (in Chinese)

[12] LI Shangping, PAN Jiafeng, ZHONG Jiaqin, et al. Design and evaluation of a machine integrating ridge-breaking, fertilizing, and ridging for ratoon sugarcane without intertillage[J]. Sugar Tech., 2022, 24(6): 1913–1923.

[13] LÜ Changwen, TANG Daobin, ZHANG Kai, et al. Influence of ridges for planting sweet potato on symbiotic ecological factors, photosynthetic abilities and population yield in relay intercropping system[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca,2020, 48(2): 849–861.

[14] 叶恩. 地膜覆盖机主要部件的类型和性能[J]. 农业机械, 2003(5): 65. YE En. Types and performance of main components of plastic film covering machines[J]. Agricultural Machinery, 2003(5): 65. (in Chinese)

[15] 张华卿. 马铃薯 M 型垄铺膜种植模式及起垄机具研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007. ZHANG Huaqing. Research on the M-shaped ridge mulching planting model and ridge raising equipment for potatoes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)

[16] 张艳军,饶敏,张建康,等. 云南玉溪市马铃薯整垄起垄栽培技术对产量和产值的影响[J]. 农业科技通讯, 2014(6): 68–73. ZHANG Yanjun, RAO Min, ZHANG Jiankang, et al. Effects of ridge cultivation techniques on yield and output value of potato in Yuxi City, Yunnan Province[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2014(6): 68–73. (in Chinese)

[17] 马莉. 马铃薯旋耕起垄种植机起垄整形镇压装置的设计分析与性能试验[J]. 农业机械, 2017(10): 97–100. MA Li. Design analysis and performance test of ridge forming and pressing device for potato rotary tillage ridge planter[J]. Agricultural Machinery, 2017(10): 97–100. (in Chinese)

[18] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 16–25. SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16–25. (in Chinese)

[19] 曾山,汤海涛,罗锡文,等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 12–19. ZENG Shan, TANG Haitao, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 12–19. (in Chinese)

[20] 查长流. 灌水沟播机起垄开沟器理论及应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003: 19–57. ZHA Changliu. Research on the theory and application of ridge and trench opening device for irrigation ditch sowers[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003: 19–57. (in Chinese)

[21] 贾洪雷,姜鑫铭,郭明卓,等. V-L 型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 28–33. JIA Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 28–33. (in Chinese)

- [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(2): 235–237. (in Chinese)
- [18] 冯青春, 马伟, 王秀, 等. 温室智能装备系列之三十六——花卉钵苗智能移栽末端执行器设计[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2012, 32(5): 44–46.
FENG Qingchun, MA Wei, WANG Xiu, et al. Design of end-effector for intelligent transplanting of flower pot seeding in greenhouse intelligent equipment series[J]. Agricultural Engineering Technology, 2012, 32(5): 44–46. (in Chinese)
- [19] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 温室穴盘苗自动移栽机设计与实验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 59–67.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Design and experiment of automatic transplanting machine for greenhouse cavity tray seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 59–67. (in Chinese)
- [20] 赵晨希. 生菜移栽机自动喂苗装置设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
ZHAO Chenxi. Design and experimental research of automatic seedling feeding device for lettuce transplanting machine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [21] 王宁, 任玲, 李江全, 等. 穴盘苗移栽机自动取苗技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 59–66.
WANG Ning, REN Ling, LI Jiangquan, et al. Research status and prospect of automatic seedling picking technology of cavity tray seedling transplanting machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 59–66. (in Chinese)
- [22] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 24–29.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Experiment on the physical characteristics of automatic transplanting bowl for cavity tray seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 24–29. (in Chinese)
- [23] 计东, 胡熙, 哲旋瑞, 等. 双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 126–133, 146.
JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linked high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126–133, 146. (in Chinese)
- [24] 王留柱. 温室钵苗移栽机机构设计与移栽动平台研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
WANG Liuzhu. Research on mechanism design and transplanting dynamic platform of greenhouse pot seedling transplanter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [25] 叶维超. 经济林木自动化育苗生产线关键设备设计与试验研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
YE Weichao. Design and experimental research of key equipment for automated seedling production line of economic forest trees[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2023. (in Chinese)
-

(上接第 83 页)

- [22] 朱利元. 2CM-2 马铃薯起垄覆膜播种机的研制与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
ZHU Liyuan. Development and experiment of 2CM-2 potato ridge and film mulching planter[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 陈超鹏. 双翼铧式垄沟开沟器结构设计与试验研究[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)
- [25] 刘齐卉. 犁铧式马铃薯中耕机关键部件设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
LIU Qihui. Design and experiment of key components of ploughshare potato tiller[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [26] 陈新予, 史宇亮, 陈明东. 基于离散元法的甘薯起垄机旋耕刀抛土性能仿真试验[J]. 农业工程, 2021, 11(2): 117–120.
CHEN Xinyu, SHI Yuliang, CHEN Mingdong. Simulation experiment on throwing performance of rotary blade of sweet potato ridger based on discrete element method[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(2): 117–120. (in Chinese)
- [27] 杨娜, 安宗文. 起垄机起垄过程仿真及分析[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(5): 41–43.
YANG Na, AN Zongwen. Simulation and analysis on ridging process of ridging machine[J]. Mechanical Research & Application, 2018, 31(5): 41–43. (in Chinese)
- [28] 吴亚文. 烟草起垄施肥整形一体机的设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
WU Yawen. Design and experiment of an integrated machine for tobacco ridge raising, fertilization and shaping[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [29] 王玉萍, 周晓洁, 卢潇, 等. 土壤紧实度对马铃薯根系、匍匐茎、产量和品质的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1590–1596.
WANG Yuping, ZHOU Xiaojie, LU Xiao, et al. Effect of soil compaction on root, stolon, yield and quality of potato[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1590–1596. (in Chinese)