doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.003

砂壤土条件下马铃薯中耕机关键部件设计与试验

吕金庆[1]　刘齐卉[1]　杨德秋[2]　李季成[1]　刘中原[1]　于　晶[1]

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对砂壤土条件下马铃薯出苗前期中耕机土壤回流严重、垄型一致性差等问题,设计了犁铲式马铃薯中耕机,并阐述了其主要结构及工作原理。对塑型部件培土器的结构参数进行设计分析,根据砂壤土土质特征,对土壤颗粒进行了运动学分析,确定了影响马铃薯中耕作业效果的主要因素。运用 EDEM 仿真试验,以培土犁与培土器间距及作业速度为试验因素,以回土量与垄型拟合度为评价指标,进行了二次正交旋转试验。对试验结果进行优化分析,当间距为 600 mm、作业速度为 1.3 m/s 时,回土量为 12.3%,垄型拟合度为 0.024。对优化数据进行了田间试验,结果表明,犁铲式马铃薯中耕机回土量为 12.5%,土垄垄型一致性为 98.3%,土壤扰动系数为 67%,碎土率为 94.7%,培土高度为 8.4 cm,油耗为 14.6 kg/hm^2,满足马铃薯中耕培土要求。

关键词: 马铃薯; 砂壤土; 犁铲式中耕机; 离散元法

中图分类号: S224.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)08-0027-13　　**OSID**:

Design and Test of Key Components of Ploughshare Potato Field Cultivator in Sandy Loam

LÜ Jinqing[1]　LIU Qihui[1]　YANG Deqiu[2]　LI Jicheng[1]　LIU Zhongyuan[1]　YU Jing[1]

(1. *College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*

2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of serious soil backflow and poor ridge consistency after the potato field cultivator operation in the early stage of potato emergence in the sandy loam environment, a type of ploughshare potato field cultivator was designed, and its main structure and working principle were described. The structural parameters of the shaping device on the potato field cultivator were designed, and the main factors affecting the effect of potato field cultivation were determined by analyzing the soil particle dynamics through the physical properties of sandy loam soil. Using EDEM simulation test, the distance between the soil plow and the soil cultivator on the ploughshare potato field cultivator and the operating speed of the potato field cultivator were used as the experimental factors, the soil return amount and the fit of the ridge shape after the simulation operation were used as the evaluation index, and the second orthogonal rotation test was carried out. According to the simulation test results, the test factors were optimized and analyzed. The results showed that when the distance between the potato field cultivator plow and the soil cultivator was 600 mm, and the field cultivator's operating speed was 1.3 m/s, the soil return amount was 12.3%, and the ridge shape was fitted. The degree was 0.024. Field experiments on the optimized data showed that the ploughshare potato field cultivator developed had soil return amount of 12.5%, soil ridge consistency of 98.3%, the soil disturbance coefficient was 67%, soil crushing rate of 94.7%, and soil cultivation height of 8.4 cm, the fuel consumption was 14.6 kg/hm^2, which met the requirements of potato field cultivation.

Key words: potato; sandy loam; ploughshare cultivator; discrete element method

收稿日期: 2021-03-11　修回日期: 2021-04-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700705)和现代农业产业技术体系建设专项(CARS-09-P23)

作者简介: 吕金庆(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事马铃薯田间技术与装备研究,E-mail: ljq8888866666@163.com

0 引言

马铃薯中耕作业主要包括培土筑垄、松土碎土、破除板结、除草追肥等,是马铃薯生产的关键技术之一,对提高马铃薯结薯率及单位面积产量具有重要影响,因此设计高效、可靠的马铃薯中耕机至关重要[1-2]。

国外对马铃薯中耕机研究较早,且机械化程度较高。具有代表性的德国格立莫公司生产的 GF400-75 型马铃薯中耕机采用驱动式旋转工作部件,液压控制耕深,适用于黏重土壤下的中耕作业,当耕作区域石块较多时,机器损伤较为严重[3];意大利 MECANICA CEAHLAU 公司生产的马铃薯中耕机的行间主要工作部件锄铲两侧装有护苗器[4],但在砂壤土环境下土壤流向不易控制。我国在引进吸收国外机具成熟结构设计的基础上,已研制了多种型号的马铃薯中耕机。吕金庆等[5]研制的驱动式马铃薯中耕机采用旋耕刀组为主要工作部件,在东北地区黏重土壤条件下仍能保持较好的碎土性能;衣淑娟等[6]研制的马铃薯中耕机采用圆盘式碎土部件,碎土性能较好,培土阻力小。现有马铃薯中耕机均能满足中耕作业需求[7-8],可靠性较高,但大多数适应性较差,在砂壤土条件下进行中耕作业时存在土壤流向不易控制、土壤回流严重、垄型一致性差、作业效果不佳等问题。

本文针对砂壤土条件下种植模式为单垄单行的马铃薯中耕作业,设计一种犁铧式马铃薯中耕机,并对其塑型部件培土器进行设计,通过土壤颗粒培土过程的动力学分析,明确影响马铃薯中耕作业效果的主要因素,并进行仿真试验,以期获得犁铧式马铃薯中耕机的最优工作参数组合,并通过田间试验进行验证。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

该犁铧式马铃薯中耕机主要由悬挂架、机架、侧板、弹齿、培土犁、塑型装置等组成,如图 1 所示。机架前端横梁装有 5 组弹齿,每组弹齿由 3 个 S 形弹齿组成,中间横梁上安有 5 组培土犁,与弹齿纵向安装位置相对应,可同时进行 4 行中耕作业,塑型装置挂接于机架末端。

1.2 工作原理

悬挂架与拖拉机三点悬挂连接,由拖拉机液压控制升降,提供动力。作业时,弹齿组首先入土,破坏垄间土壤板结,清除垄沟内石块,后培土犁入土并将沟底土壤翻至两侧马铃薯垄上,同时完成松土碎土、去除杂草等作业,处理后的土壤由塑型装置塑型,以形成满足马铃薯中耕作业要求的合适垄型[9-10]。

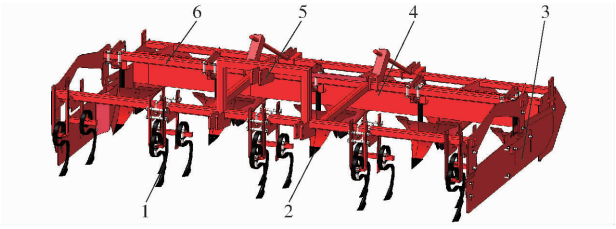


图 1 犁铧式马铃薯中耕机整体结构图

Fig. 1 Integral structure diagram of ploughshare potato field cultivator

1. S 形弹齿 2. 培土犁 3. 侧板 4. 塑型装置 5. 悬挂机构 6. 机架

1.3 技术参数

根据国内马铃薯中耕的主导种植模式及农艺要求[11],设计的犁铧式马铃薯中耕机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 犁铧式马铃薯中耕机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of ploughshare potato field cultivator

参数	数值/方式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 380×3 270×1 500
挂接方式	三点悬挂
发动机功率/kW	≥50
整机质量/kg	950
作业行数	4
作业行宽/mm	750~920
作业幅宽/mm	2 800~3 600

2 关键部件设计

2.1 弹齿

马铃薯中耕机弹齿部分位于中耕机最前端横梁,结构如图 2 所示,固定支座通过 U 形卡与机架横梁连接,并可调节机架上相对位置;弹齿单体呈三角形安装于高度调节架上,高度调节架与固定支座螺栓连接,且上下位置可调。工作时,弹齿对垄沟土壤进行深松作业,弹齿齿身呈 S 形,可有效缓冲石块对工作部件造成的撞击,通过调节弹齿相对机架上下安装位置,及后端两弹齿单体间距,改变耕深及耕宽,以适应不同耕作需求。

弹齿单体参数设计对土壤的深松扰动有重大影响。齿身主要尺寸参照国家标准 GB/T 19988—2005[12]的 1 型 S 形弹齿确定,如图 3 所示。S 形弹齿齿尖长度为 140 mm,宽度为 40 mm,采用铸钢材料,增强其耐磨性,并由沉头螺栓安装在弹齿前端,便于磨损变形后更换。

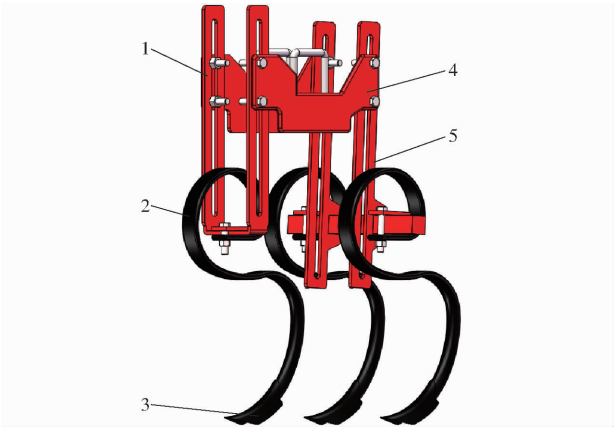


图 2　弹齿组结构示意图

Fig. 2　Schematic of S-tines group structure

1. U 形高度调节架　2. S 形弹齿单体　3. 齿尖　4. 固定支座　5. 后高度调节架

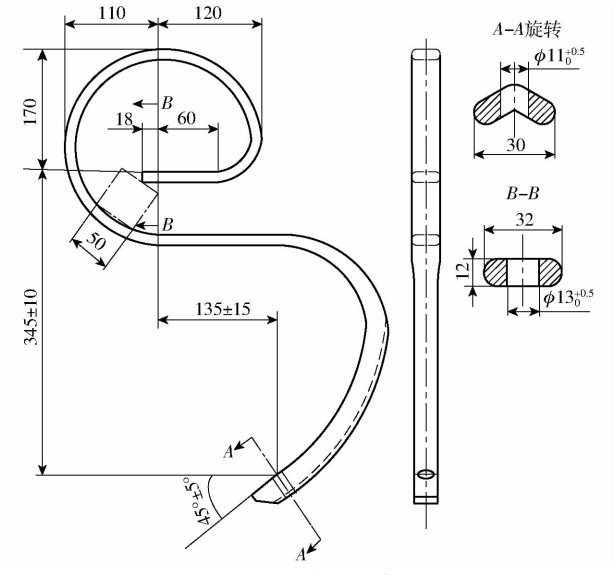


图 3　S 形弹齿尺寸参数图

Fig. 3　S-tines size parameter diagram

松土弹齿土壤变形区的界限为：前面为与工作部件尖端法线呈 σ 的平面，两侧是与工作部件的工作幅宽所限定的垂直面呈 $\xi/2$ 的平面，如图 4 所示。

土壤变形区域宽度为

$$b = d + \frac{2c\tan\frac{\xi}{2}}{\cos(\sigma+\iota)} \tag{1}$$

式中　b——土壤变形区宽度，mm

d——工作部件宽度，mm

c——弹齿入土深度，mm

σ——土壤对金属的摩擦角，取 25°

ξ——土壤剪切角，取 50°

ι——弹齿入土角，(°)

由式(1)可知，变形区域宽度与土壤类型、中耕深度及弹齿入土角有关。为避免弹齿间距太小造成堵塞，或间距太大造成漏耕，弹齿间间距与土壤变形区的关系为

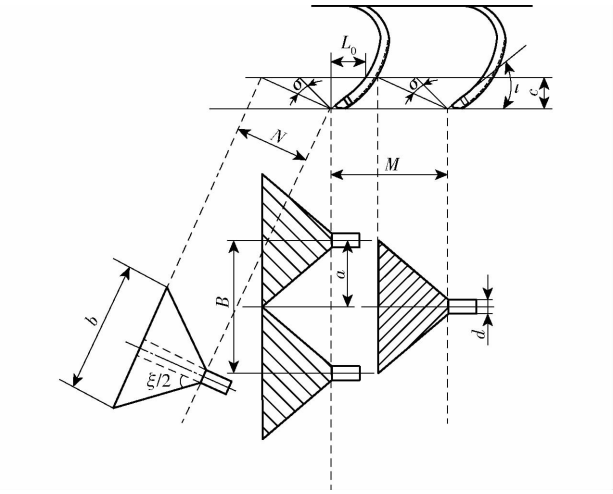


图 4　弹齿土壤变形区域分布

Fig. 4　Distribution of elastic tooth soil deformation area

$$2b > B > b \tag{2}$$

式中　B——后方两弹齿中心线的距离，mm

弹齿前后距离 M 应满足

$$M \geqslant c\tan(\sigma+\iota) + L_0 \tag{3}$$

式中　L_0——弹齿伸出量，mm

根据实际作业情况，弹齿入土深度为 130 mm，工作部件宽度为 30 mm，弹齿入土角为 45°。代入式(1)求得土壤变形区的宽度为 224 mm，后方两弹齿间距离为 224 ~ 448 mm，此处取 270 mm，前后弹齿间距离为 457.5 ~ 530 mm，此处取 470 mm。

2.2　培土犁

培土犁为犁铲式中耕机主要碎土部件，5 组培土犁等间距安装在弹齿后方机架横梁上，培土犁单体主要由铲尖、主犁体、引导板、犁柱、固定调节座等组成，其各部分结构及位置关系如图 5 所示。固定调节座位于犁柱上端用于将培土犁安装于机架横梁上，且在横梁上相对位置可调，调节座上开有纵向排列的螺栓孔，犁柱与不同螺栓孔连接可改变犁体相对机架入土深度；铲尖由沉头螺栓安装于主犁体尖端，能有效保护主犁体且便于更换；引导板由沉头螺栓对称安装于主犁体左右两端，增加犁体作业面积的同时，引导垄沟内土壤顺利培于马铃薯垄上。

工作时，可先根据需求调节犁体入土深度，调节范围为 100 ~ 150 mm；培土犁切削入土将弹齿预处理后的土壤向两侧疏导，并使土壤随犁体和引导板曲面输送至马铃薯土垄顶端，最终由于重力因素掉落至所培垄上[13-14]。

培土犁在进行中耕作业时，需要满足将垄沟内土壤提升至垄上，同时对土壤还有一定的碎土作用，使根茎不会暴露在外，且适当的碎土率能保证根茎

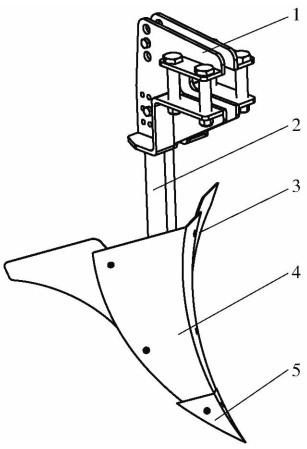


图 5 培土犁结构示意图

Fig. 5 Schematic of soil plow structure

1. 固定调节座 2. 犁柱 3. 引导板 4. 主犁体 5. 铲尖

呼吸作用,利于马铃薯生长[15-16]。犁体曲面参数可由水平直元线法得出,将犁体曲面看作水平元线沿导曲线运动形成,且导曲线夹角与长度会随位置改变呈一定规律变化。

2.3 塑型装置

塑型装置安装于中耕机末端,主要由铲尖、培土器、培土面板、培土架、缓冲装置等组成,其结构如图 6 所示。

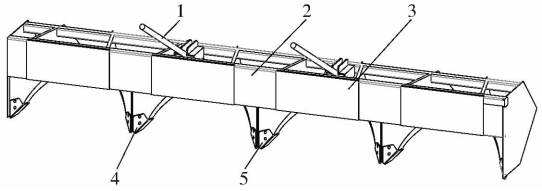


图 6 塑型装置结构示意图

Fig. 6 Schematic of shaping device

1. 缓冲装置 2. 培土架 3. 培土面板 4. 铲尖 5. 培土器

当进行出苗前的中耕作业,培土器两对称曲面以及培土面板为作业面,分别对土垄的两侧面及上表面进行塑型[17];出苗后,拆除培土面板,防止压苗。

2.3.1 培土器工作面参数确定

培土器结构参数的确定主要参考马铃薯单垄单行种植模式下垄型断面尺寸[18-19],如图 7 所示。再根据垄型尺寸采用制图法绘制培土器正投影图与水平投影图,得到培土器结构主要参数。

培后马铃薯垄上土壤体积为

$$V_0 = (a_0 + h_0\cot\varphi)h_0 \tag{4}$$

式中 V_0——所培土垄体积,mm^3

a_0——垄顶宽,mm

h_0——垄与原土壤表面高,mm

φ——土壤自然休止角,(°)

垄沟内翻出土壤体积为

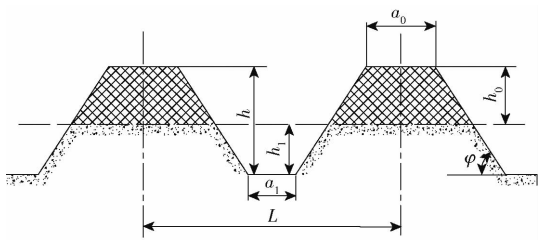


图 7 培后土垄剖视图

Fig. 7 Sectional view of soil ridge after soil cultivation

$$V_1 = [a_1 + (h - h_0)\cot\varphi](h - h_0) \tag{5}$$

式中 V_1——垄沟内土垄体积,mm^3

a_1——垄底宽,mm

h——垄总高度,mm

由于土壤经由培土犁松碎处理,体积变大,因此培土前垄沟内土壤体积与培土后马铃薯垄上土壤体积有倍数关系,蓬松系数为 λ,根据文献[20]确定蓬松系数为 1.2,则前后体积关系为

$$V_1 = \lambda V_0$$

$$\lambda(a_0 + h_0\cot\varphi)h_0 = [a_1 + (h - h_0)\cot\varphi](h - h_0) \tag{6}$$

即可求得

$$h = h_0 - \frac{a_1}{2\cot\varphi} \pm \sqrt{\frac{a_1^2}{4\cot^2\varphi} + \frac{\lambda}{\cot\varphi}(a_0 + h_0\cot\varphi)h_0} \tag{7}$$

由图 7 几何关系可得

$$h = \frac{L - a_1 - a_0}{2}\tan\varphi \tag{8}$$

式中 L——垄距,mm

根据马铃薯中耕农艺要求[21-22],行距 L 为 700 ~ 900 mm,土壤自然休止角 φ 为 40° ~ 50°,垄宽 a_0 为 310 ~ 400 mm,垄底宽 a_1 为 84 ~ 90 mm。考虑机具的通用性及实际马铃薯垄型断面,取 L = 900 mm,φ = 45°,a_0 = 350 mm,a_1 = 87 mm,即可得垄总高 h = 230 mm,垄与原土壤表面高 h_0 = 130 mm,挖出土壤深度 h_1 = 100 mm。

根据求得的 a_0、h_0、a_1、h 和 φ 即可做出培土器工作面投影图,再由绘图法对培土器工作面进行设计[23]。作培土器正视投影,即作上述所求得的高为 h,底边与顶边分别为 a_1 与 $L - a_0$ 的等腰梯形,端点为 A、B、C、D,做其轴线。此梯形为培土器工作后所形成的凹槽。培土器工作时带动土壤随之运动使其获得一定动能,并膨胀,所以实际培土高度大于所设计的培土高度 h,且当培土器上端不高于实际垄高时,会出现土壤越过培土器的现象,因此培土器高度 $h_2 = (1.1 \sim 1.2)h$。通过计算可知 h = 230 mm,h_2 取值范围为 253 ~ 276 mm,为避免垄沟底浮土过厚而

垄台培土量不够，本设计取 $h_2=270$ mm。过点 C、D 向上引一段长度为 $0.1h$ 的线段，其端点为 E、F。点 A、B、C、D、E、F 所围成图形即为培土器工作面正投影图，如图 8 所示。

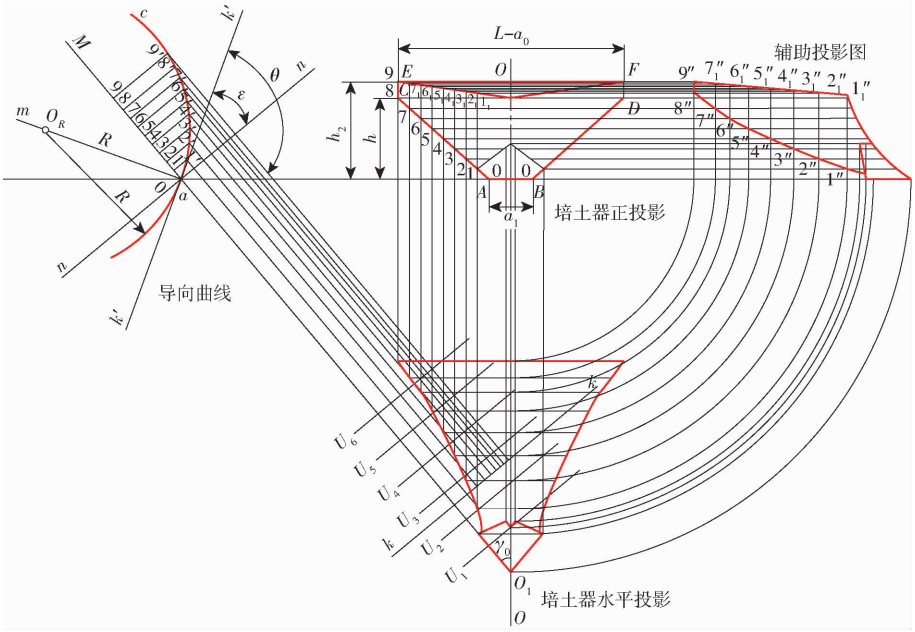


图 8　培土器工作面投影图

Fig. 8　Projection drawing method for working surface of soil cultivator

在 OO 轴线上取一点 O_1，由点 O_1 作直线 O_1M 与轴线夹角为 γ_0，此直线限定了培土器铧尖刃口的大小。培土器角 γ_0 在 26°～35°范围内变化，为保证培土器具有良好的开沟性能，取 $\gamma_0=26°$。在距离点 O_1 的 $L/3$ 行距处作垂线 kk，此线为垂直截面的迹。作其导向曲线，半径为 R，其表达式为

$$R=\frac{h}{\left(\frac{\pi}{2}-\varepsilon\right)\cos\gamma_0} \tag{9}$$

式中　ε——导向曲线切线 $k'k'$ 与垂直截面的迹 nn 间的夹角，培土器 $\varepsilon=30°$

过点 a 作直线 am 垂直于导曲线切线 $k'k'$，并在直线上取一点 O_R，使 aO_R 长度为 R，以 O_R 为圆心，R 为半径作圆弧 $\overset{\frown}{ac}$，弧长由 $90°-\varepsilon-\Delta\varepsilon$ 确定。与犁体曲面成型原理相似，为使培土器能有更好的塑型能力，$\Delta\varepsilon$ 取 5°。自点 c 引一切线与直线 $k'k'$ 的夹角 θ 为 120°。因抛物线比圆能更好地保证翻耕土层，所以培土器工作面导曲线选为抛物线，沿半径 R 的圆弧 ac 即为导曲线抛物线。

在正视图上以相等间距引平行线 1－1、2－2 等，这些线即为构成线的投影。自点 a 在直线 O_1M 作与正视图间距相同的点 1、2、3…，与导曲线相交于 1′、2′、3′ …，过交点作平行 OM 的线交 kk 于点 $1_1'$、$2_1'$、$3_1'$ …，过这些点引成 γ_n 的构成线，γ_n 的计算式为

$$\gamma_n=\gamma_0+iy \tag{10}$$

其中

$$y=\frac{6.2x^2}{x^2+100} \tag{11}$$

式中　x——角 γ_n 的横坐标，mm

y——角 γ_n 的纵坐标，mm

γ_n——高度 y 时构成线夹角，(°)

i——角 γ_n 的纵坐标系数，(°)/mm

由式(10)、(11)可得

$$\gamma_n=\gamma_0+i\frac{6.2x^2}{x^2+100} \tag{12}$$

其中

$$i=\frac{\Delta\gamma}{y_{\max}} \tag{13}$$

式中　$\Delta\gamma$——角 γ 最大与最小差值，为 5°

$y_{\max}$——角 γ_n 的最大纵坐标，mm

构成曲线绘制完成后，将正投影图上点 1、2、3、…向水平投影图作垂线，用平滑曲线将交点连接，即为水平投影图上培土器外形，对称后即可得到培土器完整外形曲线，并对三维培土器进行建模，如图 9 所示。

2.3.2　土壤运动分析

(1)犁面轨迹终端运动分析

由于砂壤土粘聚性较小，在犁面的作用下，土垡到达其轨迹终端时，土垡相互之间已基本失去制约，可以看成单个土粒自由抛出，以土粒 M 离开犁面时的坐标为原点建立坐标系，如图 10 所示。

土粒 M 在犁面轨迹终端的瞬时相对运动速度为

$$v_r=\sqrt{v_{rx}^2+v_{ry}^2+v_{rz}^2} \tag{14}$$

式中　v_r——土粒 M 轨迹终端瞬时相对运动速度，m/s

v_{rx}——土粒 M 轨迹终端瞬时相对运动速度

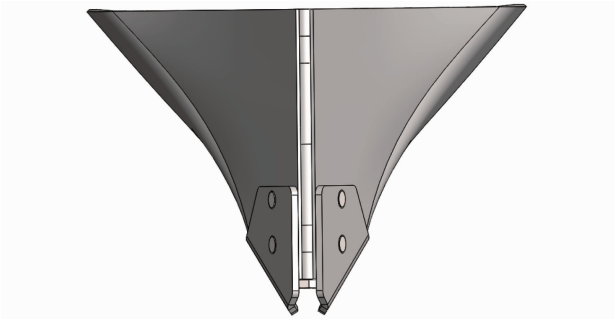


图 9 培土器三维实体模型水平视图

Fig. 9 Horizontal view of three-dimensional solid model of soil cultivator

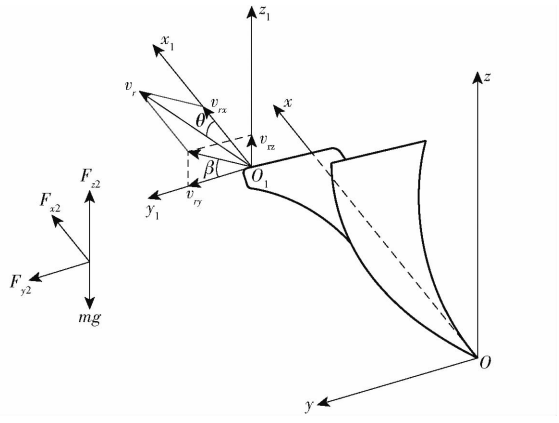


图 10 土粒 M 犁面轨迹终端及离开犁面后运动分析

Fig. 10 Analysis diagram of terminal motion and after leaving plough surface of soil particle M

在 x 轴分量,m/s

v_{ry}——土粒 M 轨迹终端瞬时相对运动速度在 y 轴分量,m/s

v_{rz}——土粒 M 轨迹终端瞬时相对运动速度在 z 轴分量,m/s

此时犁面轨迹终端运动绝对速度为

$$\begin{cases} v_{x1} = v_{rx} - v_e \\ v_{y1} = v_{ry} \\ v_{z1} = v_{rz} \\ v = \sqrt{v_r^2 - 2v_{rx}v_e + v_e^2} \end{cases} \tag{15}$$

式中 v_e——犁耕速度,即牵连速度,m/s

v——土粒 M 轨迹终端时绝对运动速度,m/s

v_{x1}——土粒 M 轨迹终端时绝对运动速度在 x 轴分量,m/s

v_{y1}——土粒 M 轨迹终端时绝对运动速度在 y 轴分量,m/s

v_{z1}——土粒 M 轨迹终端时绝对运动速度在 z 轴分量,m/s

用犁耕速度表示相对速度,表达式为

$$\begin{cases} v_{rx} = \rho v_e \cos\delta \\ v_{ry} = \rho v_e \sin\delta\cos\beta \\ v_{rz} = \rho v_e \sin\delta\sin\beta \end{cases} \tag{16}$$

其中 $$\rho = \frac{v_r}{v_e} \tag{17}$$

式中 δ——土粒 M 运动轨迹切线与 x 轴夹角,(°)

β——土粒 M 运动轨迹的切线在 yOz 面的投影与 y 轴夹角,(°)

绝对速度可表示为

$$\begin{cases} v_{x1} = v_e(\rho\cos\delta - 1) \\ v_{y1} = \rho\sin\delta\cos\beta \\ v_{z1} = \rho v_e \sin\delta\sin\beta \\ v = v_e\sqrt{\rho^2 - 2\rho\cos\delta + 1} \end{cases} \tag{18}$$

(2)离开犁面后运动分析

土粒离开犁面后的运动微分方程为

$$\begin{cases} F_{x2} = m\ddot{x}_2 = ma_{x2} \\ F_{y2} = m\ddot{y}_2 = ma_{y2} \\ F_{z2} = m\ddot{z}_2 = ma_{z2} - mg \end{cases} \tag{19}$$

式中 m——土粒质量,g

a_{x2}——土粒合加速度在 x 轴方向分量,m/s^2

a_{y2}——土粒合加速度在 y 轴方向分量,m/s^2

a_{z2}——土粒合加速度在 z 轴方向分量,m/s^2

F_{x2}——土粒所受合力在 x 轴方向分量,N

F_{y2}——土粒所受合力在 y 轴方向分量,N

F_{z2}——土粒所受合力在 z 轴方向分量,N

由式(19)得土粒离开犁面后的加速度为

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 = a_{x2} \\ \ddot{y}_2 = a_{y2} \\ \ddot{z}_2 = a_{z2} - g \end{cases} \tag{20}$$

将式(20)对 t 积分,利用初始条件 $t=0$ 时,$\dot{x}_2 = v_{x1}$,$\dot{y}_2 = v_{y1}$,$\dot{z}_2 = v_{z1}$,得土粒离开犁面后速度为

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = v_{x2} = v_e(\rho\cos\delta - 1) \\ \dot{y}_2 = v_{y2} = \rho v_e \sin\delta\cos\beta \\ \dot{z}_2 = v_{z2} = \rho v_e \sin\delta\sin\beta - gt \end{cases} \tag{21}$$

式中 t——土粒 M 离开犁面后的时间,s

v_{x2}——土粒 M 离开犁面后绝对运动速度在 x 轴分量,m/s

v_{y2}——土粒 M 离开犁面后绝对运动速度在 y 轴分量,m/s

v_{z2}——土粒 M 离开犁面后绝对运动速度在 z 轴分量,m/s

将式(21)对 t 再积分,利用初始条件 $t=0$ 时,$x_2 = y_2 = z_2 = 0$,得土粒 M 离开犁面后的运动方程为

$$\begin{cases} x_2 = v_e(\rho\cos\delta - 1)t \\ y_2 = \rho v_e \sin\delta\cos\beta t \\ z_2 = \rho v_e \sin\delta\sin\beta t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{22}$$

式中　x_2——土粒 M 离开犁面 x 轴方向位移，mm

y_2——土粒 M 离开犁面 y 轴方向位移，mm

z_2——土粒 M 离开犁面 z 轴方向位移，mm

由式(22)可得土粒 M 离开犁面后的轨迹方程为

$$\begin{cases} y_2 = \dfrac{\rho\sin\delta\cos\beta}{\rho\cos\delta - 1}x_2 \\ z_2 = \dfrac{2\rho\sin\delta\cos\beta v_e^2 - g x_2^2}{2v_e^2\ (\rho\cos\delta - 1)^2} \end{cases} \tag{23}$$

根据牛顿运动定律，可得土粒在 x 轴方向运动方程式为

$$\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = \frac{k}{m}v_{x2} \tag{24}$$

分离变量求解微分方程可得

$$x_2 = \frac{m}{k}v_{x2}(1 - \mathrm{e}^{\frac{k}{m}t}) \tag{25}$$

将式(21)求得的 v_{x2} 及式(22)求得的 t 代入式(25)得

$$x_2 = \frac{m}{k}v_e(\rho\cos\delta - 1)\left[1 - \mathrm{e}^{\frac{k}{m}\frac{x_2}{v_e(\rho\cos\delta - 1)}}\right] \tag{26}$$

将 $\mathrm{e}^{\frac{k}{m}\frac{x_2}{v_e(\rho\cos\delta - 1)}}$ 展开取到二项式可得

$$\mathrm{e}^{\frac{k}{m}\frac{x_2}{v_e(\rho\cos\delta - 1)}} \approx 1 + \frac{k}{m}\frac{x_2}{v_e(\rho\cos\delta - 1)} + \frac{k^2 x_2^2}{2m^2 v_e^2\ (\rho\cos\delta - 1)^2} \tag{27}$$

代入式(26)可得

$$x_2 = 4mv_e(1 - \rho\cos\delta) \tag{28}$$

将计算结果代入式(23)得

$$\begin{cases} y_2 = 4m\rho v_e\sin\delta\cos\beta \\ z_2 = \dfrac{\sin\delta\cos\beta}{(\cos\delta - 1)^2} - 8gm^2 \end{cases} \tag{29}$$

土粒从培土犁运动到马铃薯垄的落点位置只与土粒的牵连速度即犁耕作业速度有关，因此作业速度与垄型密切相关。根据中耕培土农艺要求，结合土壤颗粒抛出运动表达式及中耕机实际工况，确定犁耕作业速度为 0.8 ~ 2 m/s。

(3)垄上土粒运动分析

砂壤土土质较为疏松，犁体工作时对各土层土壤进行破碎，此时土壤状态细碎，可视为散粒体[24-25]。将单个土粒 M 作为研究对象，忽略土壤间相互作用力，其受力如图 11 所示，在合力的作用下土粒产生回流，并沿沟壁下滑。

以土壤颗粒为研究对象，可得

$$\begin{cases} F_S - mg\cos\theta = ma_x \\ \sum F_y = F_N - G\sin\alpha = 0 \\ F_S = \mu F_N \end{cases} \tag{30}$$

式中　F_S——斜面摩擦力，N

α——斜面与竖直方向夹角，(°)

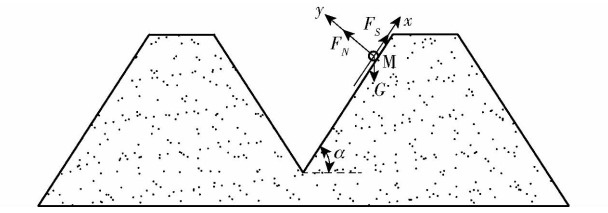


图 11　垄上土壤颗粒受力图

Fig. 11　Force analysis of soil particles on ridge

a_x——土壤颗粒沿 x 轴方向加速度，m/s²

F_N——斜面支持力，N

μ——滑动摩擦因数

根据土壤颗粒在 x 轴方向的运动方程，可求得土壤颗粒沿 x 轴方向的位移 S_T，即土壤回流位移为

$$S_T = \frac{1}{2}a_x t_T^2 \tag{31}$$

其中

$$a_x = \mu g\sin\alpha - g\cos\alpha \tag{32}$$

$$t_T = \frac{l}{v_e} \tag{33}$$

式中　S_T——土壤颗粒沿 x 轴方向位移，mm

t_T——土粒回土运动时间，s

l——培土犁与培土器间距，mm

因竖直面与斜面夹角 α、摩擦因数 μ、重力加速度 g 均为定值，故土壤颗粒回流位移只与时间 t_T 有关。

将式(32)、(33)代入式(31)可得培土器间距表达式

$$l = \sqrt{\frac{2S_T v_e}{\mu g\sin\alpha - g\cos\alpha}} \tag{34}$$

考虑整机结构尺寸，装置间的干涉问题，结合式(34)中各参数选取范围，培土犁培土器间距选取 400 ~ 800 mm。

3　仿真试验

3.1　仿真建模及参数设定

3.1.1　边界模型

离散元土壤耕作模型中，边界模型主要是指机械结构模型[26]，应用 SolidWorks 三维制图软件对犁铧式马铃薯中耕机进行建模，考虑计算量，因此将模型简化为两组单行起垄，如图 12 所示。

由于弹齿具有一定弹性，可将其视为柔性体，在作业过程中与土壤接触产生一定变形，而直接导入到 EDEM 软件中模型呈刚性，无法产生变形，与实际不符。Recurdyn 多体系统动力学仿真软件中具有求解柔性体变形的柔性体动力学分析模块，将简化后的整机模型导入到 Recurdyn 软件软件，在 Recurdyn 软件中将弹齿部分进行 Flexible 柔性化，设置中耕机各部件间连接方式均为固定连接，并沿

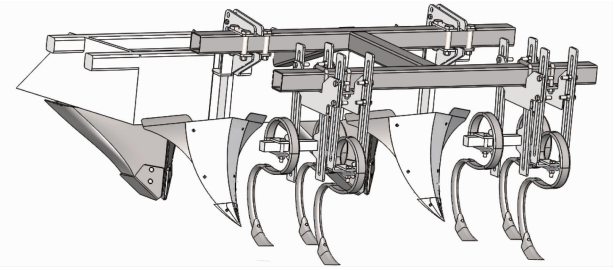


图 12 简化后马铃薯中耕机结构示意图

Fig. 12 Simplified structure diagram of potato field cultivator

x 轴方向平动,后对弹齿部分进行网格划分,利用 Recurdyn中 External SPI 耦合模块将处理后的模型以.wall 文件格式导入到 EDEM 软件中,耦合建立离散元仿真模型。

3.1.2 土壤模型

本仿真建立的土槽尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 500 mm,在土槽上表面设置颗粒工厂,考虑到计算机性能及仿真时间,将仿真土壤颗粒设置为单颗球状颗粒,半径为 5 mm,设置颗粒总量为 2.7×10^6 个,生成速度为 1×10^5 个/s。

3.1.3 接触参数设置

由于砂壤土颗粒表面具有一定粘附力,选定土壤间接触模型为 Hertz - Mindlin with Bonding[27],粘结键参数设定如表 2 所示。土壤颗粒与机械模型间采用无滑动 Hertz - Mindlin (no slip)模型[28]。

表 2 颗粒间接触模型参数

Tab. 2 Parameters of particle contact model

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	5×10^7
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	5×10^7
临界法向应力/Pa	3×10^5
临界切向应力/Pa	3×10^5
粘结键半径/mm	5.5

根据砂壤土特性,对接触参数土壤-土壤、土壤-模型间参数进行设定,仿真参数如表 3 所示。

表 3 离散元模型基本参数

Tab. 3 Basic parameters of discrete element model

参数	数值
土壤-土壤间恢复系数 e_1	0.6
土壤-土壤间动摩擦因数 e_2	0.2
土壤-土壤间静摩擦因数 e_3	0.3
土壤-培土犁间恢复系数 f_1	0.6
土壤-培土犁间动摩擦因数 f_2	0.105
土壤-培土犁间静摩擦因数 f_3	0.46

3.2 离散元仿真过程与评价指标

3.2.1 仿真过程

将简化后的中耕机模型导入,使其沿 x 轴方向作匀速直线运动。设置时间为 4 s,每隔 0.02 s 记录一次数据,仿真过程如图 13 所示。

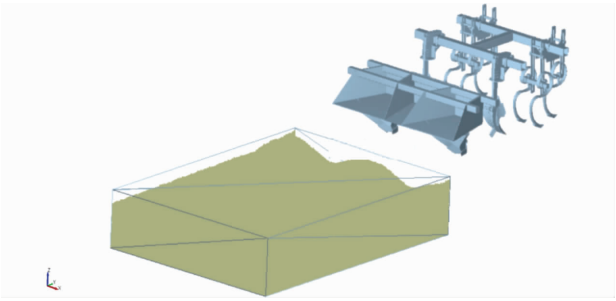
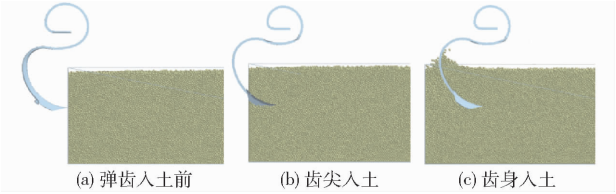


图 13 EDEM 仿真过程

Fig. 13 EDEM simulation process

由 S 形弹齿作业过程的变形可知,松土铲最大变形发生在下半端拐弯处,在进行深松作业时,S 形弹齿硬度较小,且在底层土壤支持力的作用下,拐弯处夹角增大并有所上升,弯曲处以下部分有被拉直的趋势,弹齿各阶段变形如图 14 所示。



(a) 弹齿入土前 (b) 齿尖入土 (c) 齿身入土

图 14 S 形弹齿对土壤的作用过程及变形情况

Fig. 14 Action process and deformation of S-shaped spring teeth on soil

3.2.2 评价指标

参照文献[29]对仿真后马铃薯土垄的作业效果进行评价,选取回土量、垄型拟合度为评价指标。

在仿真平稳段随机取 5 个横截面,横截面示意图如图 15 所示,采用回土体积与理论沟型体积比作为回土量的计算方法[30],采用端面法进行回土量计算,测量开沟的实际深度及去除回土后的理论开沟深度,回土量计算式为

$$\zeta = \frac{V_s}{V_l} \times 100\% = \frac{(I' - I)^2}{I'^2} \times 100\% \tag{35}$$

式中 ζ——仿真回土量,%

V_s——仿真实际回土体积,mm^3

V_l——仿真理论开沟体积,mm^3

I——仿真实际垄沟深度,mm

I'——仿真理论开沟深度,mm

垄型拟合度能反映培后垄型一致度,是中耕作业效果的重要指标之一[31],在仿真作业稳定区随机选取两处截面作为观测区,利用 edge 函数绘制出对象的便捷和提取边界坐标信息,后用 Frechet Distance 比较两处曲线的相似度,数值越小相似度越高。

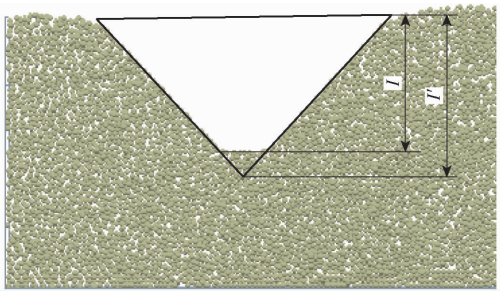


图 15　仿真种沟截面示意图

Fig. 15　Schematic of cross-section of simulation seed groove

3.3　仿真试验结果与分析

3.3.1　试验方案与结果

选取培土犁培土器间距、作业速度为试验因素，回土量 Y_1、垄型拟合度 Y_2 作为试验指标，利用 Design-Expert 软件进行试验，并对参数组合完成优化，根据编码后的试验方案及设计的理论参数，进行仿真试验。试验因素编码如表 4 所示，试验方案及结果如表 5 所示，X_1、X_2 为因素编码值。

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Experimental factors and codes

编码	因素	
	间距 x_1/mm	作业速度 x_2/(m·s^{-1})
1.414	800.00	2.00
1	741.42	1.82
0	600.00	1.40
−1	458.58	0.98
−1.414	400.00	0.80

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Test plan and experimental data

序号	因素		回土量	垄型拟合度
	X_1	X_2	Y_1/%	Y_2
1	−1	−1	13.6	0.022 3
2	1	−1	15.0	0.008 7
3	−1	1	5.0	0.027 9
4	1	1	13.9	0.025 9
5	−1.414	0	10.2	0.024 3
6	1.414	0	17.4	0.014 4
7	0	−1.414	15.1	0.015 5
8	0	1.414	8.0	0.031 7
9	0	0	11.4	0.020 3
10	0	0	12.5	0.021 1
11	0	0	11.7	0.019 4
12	0	0	12.0	0.021 5
13	0	0	11.9	0.023 5
14	0	0	13.4	0.020 3
15	0	0	12.8	0.021 3
16	0	0	12.4	0.024 7

3.3.2　试验结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析，并进行多元回归拟合[32-33]，得到回土量和垄型拟合度两个试验指标的回归方程，并进行显著性检验。

通过对试验数据的分析和拟合，回土量方差分析如表 6 所示。由表 6 可知，因素和因素间的交互作用影响的主次顺序是 x_1、x_2、x_1x_2、x_1^2、x_2^2；其中间距 x_1、作业速度 x_2、间距和作业速度的交互项 x_1x_2 对回土量的影响极显著；间距二次项 x_1^2 和作业速度二次项 x_2^2 对回土量的影响显著；无不显著项。得到各因素对回土量影响的回归方程为

$$Y_1 = 12.26 + 2.56X_1 - 2.47X_2 + 1.88X_1X_2 + 0.57X_1^2 - 0.56X_2^2 \quad (36)$$

表 6　回土量方差分析

Tab. 6　Variance analysis for soil return

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	120.28	5	24.06	57.07	0.000 1 ***
x_1	52.44	1	52.44	124.41	0.000 1 ***
x_2	48.71	1	48.71	115.57	0.000 1 ***
x_1x_2	14.06	1	14.06	33.36	0.000 2 ***
x_1^2	2.59	1	2.59	6.14	0.032 7 **
x_2^2	2.48	1	2.48	5.87	0.035 9 **
残差	4.22	10	0.42		
失拟项	1.30	3	0.43	1.04	0.433 4
总和	124.49	15			

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

对回归方程(36)进行失拟检验，结果如表 6 所示，失拟项 $P = 0.433\,4$，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。

通过对试验数据的分析和多元回归拟合，试验指标垄型拟合度方差分析如表 7 所示。由表 7 可知，因素影响的主次顺序是 x_2、x_1、x_1x_2、x_1^2、x_2^2；其中间距 x_1、作业速度 x_2 和间距与作业速度的交互项

表 7　垄型拟合度方差分析

Tab. 7　Variance analysis for ridge fit

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.042	5	8.451×10^{-3}	38.06	0.000 1 ***
x_1	0.011	1	0.011	49.33	0.000 1 ***
x_2	0.026	1	0.026	117.64	0.000 1 ***
x_1x_2	3.364×10^{-3}	1	3.364×10^{-3}	15.15	0.003 0 ***
x_1^2	1.058×10^{-3}	1	1.058×10^{-3}	4.77	0.054 0 *
x_2^2	7.605×10^{-4}	1	7.605×10^{-4}	3.43	0.093 9 *
残差	2.220×10^{-5}	10	2.220×10^{-4}		
失拟项	4.725×10^{-3}	3	3.104×10^{-4}	0.051	0.983 7
总和	0.044	15			

注：*** 表示极显著（$P < 0.01$），* 表示较显著（$0.05 < P < 0.1$）。

x_1x_2对垄型拟合度的影响极显著;间距的二次项x_1^2、作业速度的二次项x_2^2对垄型拟合度的影响较显著;无不显著项。得到各因素对垄型拟合度影响的回归方程为

$$Y_2 = 0.022 - 0.003\,7X_1 + 0.005\,714X_2 + 0.002\,9X_1X_2 - 0.001\,15X_1^2 + 0.000\,975X_2^2 \quad (37)$$

对回归方程(37)进行失拟性检验,如表 7 所示,其中 $P = 0.983\,7$,不显著($P > 0.1$),证明不存在其他影响指标的主要因素,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

3.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据的处理,得出间距x_1、作业速度x_2对回土量、垄型拟合度影响的响应曲面,如图 16 所示。

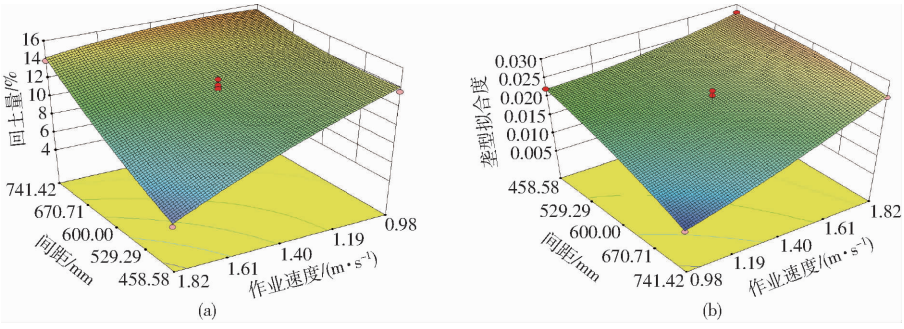


图 16 间距和垄型拟合度双因素响应曲面

Fig. 16 Response surfaces of double parameters about soil return amount and ridge fit

由图 16a 可知,回土量随间距增加呈逐渐增大趋势,最优间距为 458.58 ~ 670.71 mm;随速度增加逐渐减小,最优速度为 1.19 ~ 1.82 m/s,其中间距是影响回土量的主要因素。

由图 16b 可知,垄型拟合度随间距增加呈减小趋势,最优间距为 529.29 ~ 741.42 mm;随速度增加逐渐增大,最优速度为 0.98 ~ 1.61 m/s,其中速度是影响垄型拟合度的主要因素。

3.3.4 参数优化

通过对图 16 中 2 个响应曲面的分析,为得到最佳的试验因素水平组合,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对两个回归模型进行求解,根据犁铧式马铃薯中耕机的实际工作条件、作业性能要求及上述相关模型分析结果,选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(x_1, x_2) \\ \min Y_2(x_1, x_2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 529.29\ \text{mm} \leqslant x_1 \leqslant 670.71\ \text{mm} \\ 1.19\ \text{m/s} \leqslant x_2 \leqslant 1.61\ \text{m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (38)$$

由式(38)可得,当间距为 600 mm、速度为 1.3 m/s 时,机具综合作业性能较理想,预测回土量为 12.8%,垄型拟合度为 0.02,对这组数据进行仿真验证。

为保证后续培土效果,根据深松作业质量评定标准,弹齿深松作业后土壤扰动系数应不小于 50%。

仿真结果表明,弹齿土壤扰动系数为 67.2%,中耕机回土量为 12.3%,垄型拟合度为 0.024,满足深松及马铃薯中耕作业要求,对仿真优化所得参数进行田间验证试验。

4 田间试验

4.1 试验条件

2020 年 5 月在东北农业大学试验示范基地,进行犁铧式马铃薯中耕机的培土性能试验和对照试验。试验区域尚未长出马铃薯幼苗,试验土地平整,土壤坚实度为 412 kPa,土壤含水率为 8.3%。试验过程如图 17 所示,犁铧式马铃薯中耕机以作业速度 1.3 m/s 对试验田进行作业,配套动力为 99.2 kW 约翰迪尔 1345 型拖拉机。



图 17 田间验证试验过程

Fig. 17 Process of field validation test

4.2 评价指标

参照国家标准 JB/T 7864—2013《旱田中耕追肥机试验办法》规定的试验方法与指标,选取回土量、土垄垄型一致性等为试验指标。

4.2.1 回土量

实际回土量使用回土体积与理论沟型体积比作

为回土量的计算方法，在作业稳定区域中取 15 m 的范围，随机取 5 个横断面，测量垄沟实际深度及去除回土后的理论深度，其计算公式为

$$\psi = \frac{V'}{V} \times 100\% = \frac{(H' - H)^2}{H'^2} \times 100\% \tag{39}$$

式中　ψ——现实回土量，%

V'——现实实际回土体积，mm^3

V——现实理论开沟体积，mm^3

H——现实实际垄沟深度，mm

H'——现实理论开沟深度，mm

4.2.2　垄型一致性

马铃薯土垄垄型一致性是反映中耕机培土起垄效果的重要指标之一[34]，提取仿真垄型截面曲线，计算两曲线对应点间距离，数值越小表示垄型一致性越好。在中耕区域内往返行程中各选取 3 个行程稳定区为观测区，各观测区长度应不少于 30 m。在观测区内每单程选择两处为观测点，在观测处切开垄的断面，用直尺测出垄底宽、垄顶宽、起垄高度、垄距等。具体计算公式为

$$\omega = \left(1 - \frac{S_S}{\overline{A}}\right) \times 100\% \tag{40}$$

其中

$$S_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - \overline{A})^2}{n - 1}} \tag{41}$$

$$S_i = \frac{(a_{0i} + a_{1i}) h_i}{2} \tag{42}$$

式中　a_{0i}——测试点垄顶宽，mm

a_{1i}——测试点垄底宽，mm

h_i——测试点垄高，mm

S_i——测试点土垄横截面积，mm^2

S_S——土垄横截面积标准差，mm^2

$\overline{A}$——土垄横截面积平均值，mm^2

ω——土垄垄型一致性，%

4.2.3　土壤扰动系数

土壤扰动情况是衡量松土装置弹齿的一个重要指标，与仿真测定方法相同，可用耕前地表至实际深松沟底的横断面积与耕前地表至理论深松沟底的横断面积百分比来表示。

4.3　试验结果与分析

田间试验结果表明，犁铧式马铃薯中耕机起垄效果好、培土均匀，能够满足马铃薯中耕作业要求，结果如表 8 所示，所测得的试验值均优于行业标准和国家标准。

表 8　犁铧式马铃薯中耕机试验结果

Tab. 8　Ploughshare-type potato cultivator test results

中耕机	回土量/%	垄型一致性/%	土壤扰动系数/%	碎土率/%	培土高度/cm	油耗/(kg·hm^{-2})
犁铧式	12.5	98.3	67.0	94.7	8.4	14.6
锄铲式	23.7	93.2	64.9	91.6	6.8	18.8

对照结果表明，犁铧式马铃薯中耕机的回土量、垄型一致性、碎土率、培土高度及油耗均优于对照组锄铲式马铃薯中耕机。使用弹齿、培土犁、培土器为主要工作部件，对土壤进行松土、培土、塑型等作业，相较于传统的锄铲式马铃薯中耕机在提高碎土率的同时，能较好地扰动垄沟内土壤，并将其沿犁体表面培于马铃薯垄上更能满足作业要求；而相较于驱动式马铃薯中耕机犁铧式马铃薯中耕机结构设计更为简单，可靠性高，能避免部件被杂草缠住等现象，且培土过程简单，能更好地避免砂壤土条件下土壤流向难以控制等现象产生。犁铧式马铃薯中耕机提高了作业功效和马铃薯中耕作业质量，达到了马铃薯中耕作业要求。

5　结论

（1）根据砂壤土物理特性对犁铧式马铃薯中耕机塑型部件培土器进行了参数设计，根据马铃薯垄型尺寸农艺要求，利用投影法对培土器导曲线及外形曲线进行设计，并对土壤到达培土犁临界位置、土壤离开犁面后及土壤到达垄上进行动力学分析，得出马铃薯垄垄型、回土量和培土犁与培土器间距、中耕机作业速度有关。

（2）运用 EDEM 软件对简化后犁铧式中耕机作业过程进行了仿真试验，以培土犁与培土器间距以及中耕机作业速度为试验因素，以回土量及垄型拟合度为试验指标，建立了试验因素与指标间的回归数学模型，进行了正交仿真试验。结果表明，当培土犁与培土器间距为 600 mm、作业速度为 1.3 m/s 时，机具综合作业性能较理想，仿真回土量为 12.3%，垄型拟合度为 0.024，并计算得弹齿土壤扰动系数为 67.2%。

（3）田间试验表明：犁铧式马铃薯中耕机作业后，回土量为 12.5%，土垄垄型一致性为 98.3%，土壤扰动系数为 67.0%，碎土率为 94.7%，培土高度为 8.4 cm，油耗为 14.6 kg/hm^2，能较好地满足马铃薯中耕培土作业要求。

参　考　文　献

[1]　李紫辉，温信宇，吕金庆，等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J/OL]. 农机机械学报，2019，

50(3):1 - 16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190301&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001. (in Chinese)
[2] KEMPENAAR C, STRUIK P C. The canon of potato science: haulm killing[J]. Potato Research, 2008, 50(3): 341 - 345.
[3] 赵弢. 格立莫马铃薯生产全程机械化装备[J]. 农业机械, 2015(16): 16 - 23.
[4] 戴兴任. 国外中耕机械发展概况[J]. 粮油加工与食品机械, 1979(7): 10 - 27.
[5] 吕金庆, 杨晓涵, 温信宇. 马铃薯中耕机的研究现状与发展趋势[A]. 中国作物学会马铃薯专业委员会、湖北省农业农村厅、恩施州人民政府. 马铃薯产业与健康消费(2019).
[6] 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/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 98 - 108.
YI Shujuan, SUN Zhijiang, LI Yifei, et al. Design and test of disc potato cultivator at early inter-tillage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 98 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200811&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.011. (in Chinese)
[7] 五征 3CM - 4 马铃薯全程作业机械[J]. 现代农机, 2014(4): 44.
[8] 彭曼曼, 吕金庆, 兑瀚, 等. 驱动式马铃薯中耕机的设计与仿真分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 58 - 63.
PENG Manman, LÜ Jinqing, DUI Han, et al. Design and simulation analysis of driving-type potato cultivator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 58 - 63. (in Chinese)
[9] 路战远, 程玉臣, 张德健, 等. 马铃薯高垄滴灌栽培技术规程[J]. 北方农业学报, 2015, 43(6): 118 - 119.
LU Zhanyuan, CHENG Yuchen, ZHANG Dejian, et al. The cultivation technology procedures of potato with high ridge drip irrigation[J]. Journal of Northern Agriculture, 2015, 43(6): 118 - 119. (in Chinese)
[10] 刘如霞. 定边县马铃薯栽培中存在的问题及发展对策[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
LIU Ruxia. The cultivation problems and countermeasures of potatoes in Dingbian[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
[11] 张明远, 丁洁, 任德志. 北方一季作区脱毒马铃薯种薯机械化栽培技术[J]. 现代农村科技, 2012(4): 18 - 20.
[12] 中国国家标准化管理委员会. 农业机械 土壤工作部件 S 型弹齿 主要尺寸和间隙范围: GB/T 19988—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
[13] 魏国梁, 张青松, 刘立超, 等. 犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 38 - 46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38 - 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200604&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.004. (in Chinese)
[14] LUO Feng, ZHU Lin, WEI Min, et al. Tillage condition effects on soil/plow-breast flow interaction of a horizontally reversible plow[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 35: 980 - 985.
[15] 吕金庆, 王英博, 兑瀚, 等. 驱动式马铃薯中耕机关键部件设计与碎土效果试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 49 - 58.
LÜ Jinqing, WANG Yingbo, DUI Han, et al. Design of key components of driving-type potato cultivator and its soil-broken effect experiment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 49 - 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171006&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.006. (in Chinese)
[16] 崔元红, 张俊芳, 马德良. 马铃薯机械化垄作栽培技术[J]. 当代农机, 2019(3): 67 - 69.
[17] MOHAMED K E, KHALID A A-G, ABDALHALEEM A H, 等. 土壤压实度对马铃薯块茎工程性能的影响[J]. 农业工程技术, 2020, 40(24): 86.
[18] 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)
[19] 崔元红, 张俊芳, 马德良. 马铃薯机械化垄作栽培技术规程[J]. 农业机械, 2018(11): 71 - 73.
[20] 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)
[21] 李爱芳. 马铃薯栽培技术要点[J]. 农业科技与信息, 2020(23): 25 - 26.
[22] 丁连武. 马铃薯高产栽培技术[J]. 现代畜牧科技, 2020(10): 70 - 71.
[23] 瓦西连科 П M, 巴比 П T. 中耕机[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
[24] 梅占舰, 李骅, 齐新丹, 等. 砂壤土力学特性的测试与分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(5): 605 - 612.

MEI Zhanjian, LI Hua, QI Xindan, et al. Analysis of mechanical properties of sandy soil[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(5): 605 - 612. (in Chinese)

[25] 王徐建,宋建农,刘彩玲,等. 甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(13):16 - 23.
WANG Xujian, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13):16 - 23. (in Chinese)

[26] 王立冬. 双耦合仿生减阻深松铲性能试验研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
WANG Lidong. Experimental study on the performance of double-coupling bionic drag-reducing subsoiler[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)

[27] JOHANNES Q. Cone crusher modelling and simulation using DEM[J]. Chalmers University of Techinology,2012,85:92 - 105.

[28] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Applied Physics, 1953, 24(8): 981 - 988.

[29] 中国农业机械化科学研究院耕作种植机械研究所. 旱田中耕追肥机. 试验方法:JB/T 7864—1999[S]. 北京:中国标准出版社,1999.

[30] 吕金庆,衣淑娟,陶桂香,等. 马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(4):44 - 54.
LÜ Jinqing, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potato planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):44 - 54. (in Chinese)

[31] 胡金钊. 甘薯垄芯弧形施肥施药装备关键部件设计与试验研究[D]. 北京:中国农业科学院,2020.
HU Jinzhao. Design and experimental study of key components of ridge core arc precise fertilization and application equipment for sweet potato[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2020. (in Chinese)

[32] 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.

[33] 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.

[34] 唐溦,罗俊勇,胡雷,等. 烟田双螺旋旋耕起垄机的设计[J]. 南方农机,2018,49(15):63 - 64,70.
TANG Wei, LUO Junyong, HU Lei, et al. Design of the tobacco double helixes rotary tillage ridging machine[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(15): 63 - 64,70. (in Chinese)

(上接第 26 页)

[13] CHEN Y C, SU T F, LAI S H. Integrated vehicle and lane detection with distance estimation[C]// Asian Conference on Computer Vision,2014.

[14] CHEEIN F A, STEINER G, PAINA G P, et al. Optimized EIF - SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2011,78(2):195 - 207.

[15] SHALAL N, LOW T, MCCARTHY C, et al. Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion-Part A:Tree detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,119:254 - 266.

[16] CHEN X, ZHANG B, LUO L. Multi-feature fusion tree trunk detection and orchard mobile robot localization using camera/ultrasonic sensors[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,147:91 - 108.

[17] 刘慧,朱晟辉,沈跃,等. 基于多特征融合的树干快速分割算法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):221 - 229.
LIU Hui, ZHU Shenghui, SHEN Yue, et al. Fast segmentation algorithm of tree trunks based on multi-feature fusion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):221 - 229. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200124&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.024. (in Chinese)

[18] MOGHADAM P, STARZYK J A, WIJESOMA W S. Fast vanishing-point detection in unstructured environments[J]. IEEE Transactions on Image Processing a Publication of the IEEE Signal Processing Society,2012,21(1):425 - 430.

[19] KONG H, AUDIBERT J Y, PONCE J. Vanishing point detection for road detection[C]// Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Computer Vision,2009:96 - 103.

[20] NGUYEN L, PHUNG S L, BOUZERDOUM A. Enhanced pixel-wise voting for image vanishing point detection in road scenes[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing,2017:1852 - 1856.

[21] SHI J, WANG J, FU F. Fast and robust vanishing point detection for unstructured road following[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2016,17(4):970 - 979.

[22] HE Kaiming, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R - CNN[C]// Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision,2017.

[23] GAO S, CHENG M M, ZHAO K, et al. Res2Net: a new multi-scale backbone architecture[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2019,43(2):652 - 662.

[24] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Deep residual learning for image recognition[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Computer Vision,2016.