

# 韭菜培土机设计与试验

杨 杰<sup>a,b</sup>, 廖 敏<sup>a,b</sup>, 张 强<sup>a,b</sup>, 张 宇<sup>a,b</sup>

(西华大学 a.现代农业装备研究院; b.机械工程学院, 成都 610039)

**摘 要:** 根据农艺需求,韭菜进入动态生长期后要进行 2~3 次培土工作,且随着韭菜假茎不断长高,培土高度也不断增加。为此,针对国内外现有中耕培土机培土易损伤韭菜茎叶、扶苗困难、不适合韭菜多次培土的问题,设计了一种韭菜培土机,经过对扶苗装置、培土刀的理论研究,确定了工作参数,并采用离散元法模拟了韭菜培土过程,分析了培土装置作业参数对土壤颗粒各轴向运动速度和垄上颗粒数量的影响。通过数据处理软件对田间试验结果进行分析,得到了最优组合参数,即刀具转速为 370r/min、内挡土板展开角为 93°、外挡土板展开角为 68°、培土宽度为 365mm、培土厚度为 94mm、韭菜真叶土壤覆盖量为 72g。

**关键词:** 韭菜; 培土机; 扶苗; 离散元

**中图分类号:** S224.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-188X(2024)06-0086-10

## 0 引言

韭菜又被称作长生韭,在我国有悠久的种植历史<sup>[1]</sup>。全球韭菜生产中,我国是主要产区,2020 年种植面积大约在 35.33 万  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>。目前,韭菜种植趋于规模化发展,但其种植模式不统一、不规范,主要以人工种植为主,影响了菜农的收入,制约了韭菜产业发展<sup>[3]</sup>。

韭菜生长过程中,需要 2~3 次培土作业。韭菜生长到一定高度时,其茎叶会倒伏在垄面上,培土要求土壤不能覆盖在韭菜叶子上,每次培土的高度不宜太高,以埋住新根为宜,培土后垄形截面呈梯形。韭菜培土可以促进韭菜新根的生长发育、防止倒伏、提高产量,黄化韭菜称为韭黄<sup>[4-6]</sup>。目前,韭菜培土主要靠人工,需要 3 人同时完成培土:1 个人用两根竹竿分别靠近并插入每行韭菜根部两侧,再向上提起竹竿一端,夹住并扶起倒伏于垄面的韭菜茎叶,露出韭菜根部假茎和垄面;另外两人用锄头分别从两旁培土到韭菜根部,劳动强度大、作业效率低,增加了菜农的种植成本。目前,国内外培土机(如大葱培土机)等,用于韭菜培土时无法解决扶苗问题,易损伤韭菜茎叶,培土后造成韭菜茎叶被土壤掩埋,土壤无法到达韭菜根

部,垄形呈锥形,不适合韭菜多次培土需要,不满足韭菜培土农艺要求。

国内外针对作物的扶苗和培土技术方面有一些研究。陈海涛等<sup>[7]</sup>对大豆扶禾器建立了三维模型,利用 Adams 软件实现了扶禾仿真过程;扶禾装置能扶起大豆植株的主要原因是扶禾器为与地面有一定夹角的等腰三角形板且大豆植株为硬性的杆状物。高建民等<sup>[8]</sup>对甘蔗螺旋扶起装置建立了力学模型,模拟甘蔗起扶过程,采用滚筒形状以及螺旋结构的交互作用,顺利扶起甘蔗。贺俊林等<sup>[9]</sup>动态模拟了玉米收获机扶禾杆在不同作业参数情况的扶禾过程,能直立的扶起玉米茎秆。张永良<sup>[10]</sup>对逆转旋耕施肥播种机的抛土性能进行了研究,刀具逆转旋耕时被切削土壤因张力作用沿刀具旋转方向向前抛出或向后抛出,被抛出过程中在与罩壳碰撞作用后二次被旋耕刀抛出,多数土壤颗粒沿机具前进方向后抛出。杨庆璐<sup>[11]</sup>等设计了一种自走式小型棉田培土机,重新设计了传动部件,在普通培土刀的基础上改进了一种刀尖有焊耳的培土机具,提高了碎土、抛土能力。Gao 等<sup>[12]</sup>通过室内土槽试验,建立了反旋耕作时的理论抛土模型,当作业深度、前进速度和刀轴转速不同时,得出了旋转作业分层抛土原理。由此可见,现有扶苗技术主要用于硬性杆状物,而不适合韭菜假茎扶苗,就扶苗对象而言存在着本质区别。现有扶苗装置体积和质量过大,扶苗宽度和高度不能调节,不满足韭菜多次培土时扶苗的农艺要求,不适用于韭菜扶苗。

针对上述问题,本文重点研究了韭菜培土机的扶苗和培土装置,并进行了韭菜培土的离散元仿真及田

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 四川省科技厅项目(2021YFQ0070);四川省农业科学院委托项目(202065)

作者简介: 杨 杰(1999-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,(E-mail) 245646564@qq.com。

通讯作者: 廖 敏(1971-),男,四川资中人,教授,硕士生导师,(E-mail) 848264319@qq.com。

间试验。

1 总体结构设计及工作原理

1.1 韭菜培土机总体结构设计

韭菜培土机主要由扶苗装置、培土装置、整形装置、行走装置、发动机和操纵装置等工作部件构成,如图 1 所示。整机为手扶式单行韭菜培土机,扶苗装置安装在最前端,整形装置固定在扶苗装置后端下方,行走装置安装在转动装置下端,传动装置安装在机器中部,分别与发动机、行走装置和培土装置相连,发动机上方设置有操纵装置。

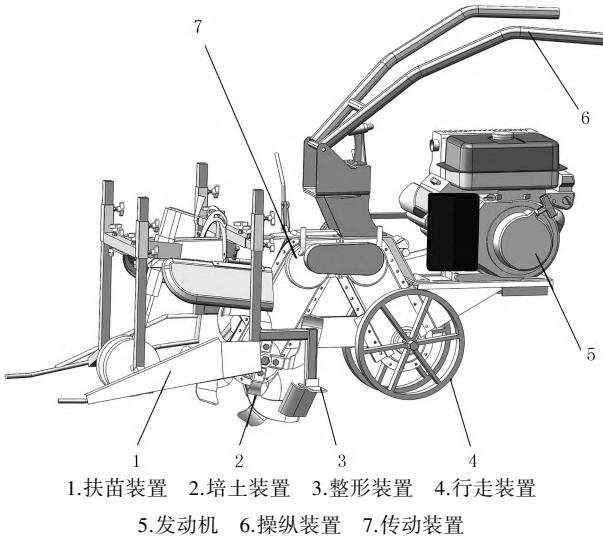


图 1 韭菜培土机  
Fig.1 Leek cultivator

1.2 工作原理

韭菜培土机的培土过程分为扶苗、培土、垄面整形 3 个阶段。机器作业前,通过调节扶苗装置来适应不同的垄沟宽度和高度;然后启动发动机,通过设置操纵装置,将动力通过传动装置输送至培土装置和行走装置;培土装置使沟底土壤抛至垄面且到达韭菜根部,行走装置驱动整机前进,通过扶苗装置依次将韭菜假茎竖直扶起,经过垄面整形装置作业后,垄面呈梯形状,土壤不会落入垄沟,完成整个培土作业过程。

2 扶苗装置设计

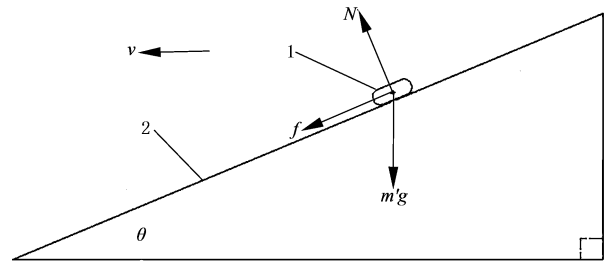
2.1 韭菜扶苗受力分析

韭菜培土作业是一个持续前进的过程,机具接触到韭菜茎叶瞬间扶苗装置会对韭菜茎叶产生冲击。设机具接触韭菜茎叶的前进速度为  $v$ ,冲击时间为  $t_s$ ,韭菜质量为  $m'$ ,此时韭菜受到的冲击力为  $F'$  为

$$F' = \frac{m'v_m(1 + e)}{ts} \quad (1)$$

式中  $F'$ —韭菜受到的冲击力(N);  
 $m'$ —韭菜假茎质量(kg);  
 $v_m$ —整机前进速度(m/s);  
 $e$ —速度恢复系数, $0 < e < 1$ ,由于韭菜反弹速度为 0,取  $e = 0$ ;  
 $t_s$ —冲击时间,在 20 ~ 100ms 之间,取  $t_s = 25\text{ms}^{[13]}$ 。

韭菜培土作业时,扶苗装置将倒伏在垄面的韭菜茎叶向上扶起,能否扶起取决于扶苗装置倾角  $\theta$  的大小,如图 2 所示。当扶苗装置跟随机具沿速度  $v$  方向运动时,韭菜茎叶顺着扶苗装置反向滑动,韭菜茎叶受到冲击力  $F'$  的方向与速度  $v$  相反;在韭菜茎叶不被推倒的情况下,倾斜角  $\theta$  处于  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。



1.韭菜茎叶 2.扶苗板  
图 2 韭菜茎叶受力分析

Fig.2 Stress analysis of stem and leaf of leek

以韭菜茎叶为研究对象,建立韭菜假茎与扶苗装置的相互作用的静力学模型。忽略机具前进对韭菜茎叶强度的影响,韭菜茎叶在不被推倒的情况下扶起,则韭菜茎叶受力需满足的条件为

$$\begin{cases} N = F' \sin \theta + mg \cos \theta \\ f = f_s N \\ F' \cos \theta \geq f \end{cases} \quad (2)$$

式中  $N$ —扶苗装置对韭菜茎叶的支持力(N);  
 $\theta$ —扶苗装置倾斜角( $^\circ$ );  
 $g$ —重力加速度( $\text{m}^2/\text{s}$ );  
 $f$ —韭菜与扶苗装置的摩擦力(N);  
 $f_s$ —韭菜与扶苗装置的摩擦因数,在 0.2 ~ 0.6 之间,取  $f_s = 0.3^{[14]}$ 。

将式(1)代入式(2)中得

$$\tan \theta \geq \frac{v - f_s g t_s}{f_s v + g t_s} \quad (3)$$

机具前进速度一般为 0.2 ~ 0.5m/s,将其代入式(3),得到倾斜角  $\theta = 22.5^\circ \sim 47^\circ$ 。为保证扶苗装置作业时能顺利将倒伏的韭菜茎叶扶起,需要考虑到韭菜茎叶不受损伤,避免韭菜受到过度损伤后坏死或生长速度减缓,故取倾斜角度  $\theta = 25^\circ$ 。

2.2 扶苗装置结构设计

采用 SolidWorks 软件对扶苗装置进行结构设计,左侧扶苗器如图 3 所示。扶苗器主要由导杆和导板组成,采用单侧扶苗,减小了扶苗装置的体积。为防止作业过程中扶苗器底部对未进入导板的韭菜茎叶造成损伤,根据韭菜扶苗分析结果,设置导板上斜边与水平夹角设为 25°,导板底部与水平夹角设为 10°。为了韭菜不被拖倒或损伤,扶苗器的高度取 190mm。

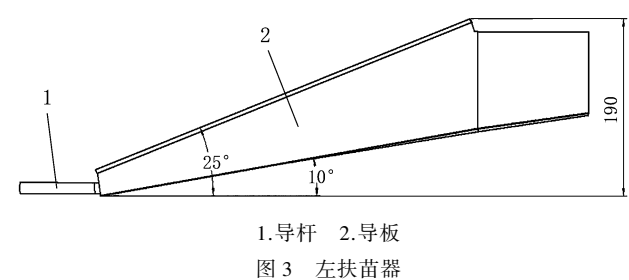


Fig.3 Left seedling supporting device

韭菜的种植的模式为单垄单行,垄距为 750 ~ 800mm,韭菜收获前需进行 2~3 次培土作业,每次作业的垄高不同,扶苗装置的设计需要满足宽度和高度的调节。扶苗装置的设计如图 4 所示。扶苗器固定设置在扶苗框架外表面,呈三角形布局,扶苗器与水平面呈 75°,使整个扶苗器呈锥形状。支架可在高度调节杆内上下活动,高度调节杆通过宽度调节杆安装于安装座内,通过宽度调节杆的左右移动实现扶苗装置的宽度的调节,扶苗装置中前支架向内凹设置,防止扶苗过程中将韭菜推倒被土壤掩埋,两侧扶苗器对称设置。培土机作业时,为保护韭菜根部不受损伤,高度  $G$  取 625mm,有效调节行程为 340mm,能够满足垄高要求。

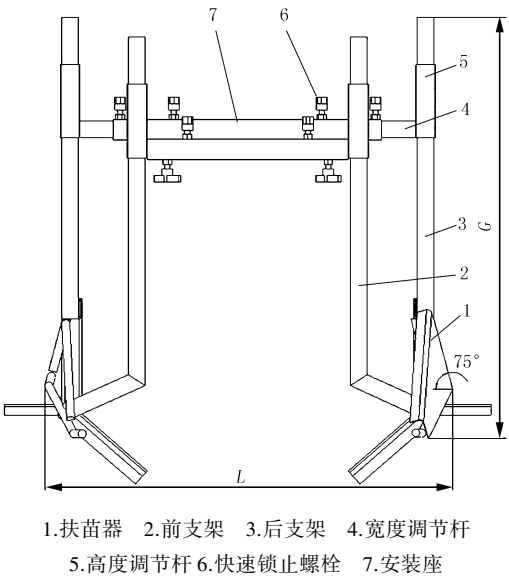


图 4 扶苗装置  
Fig.4 Seedling supporting device

3 培土刀选型与运动分析

3.1 培土刀的选型

培土机的作业方式与旋耕机相似,都是用刀片旋转的方式切削土壤,使土壤变得松散、细碎。小型培土机使用的培土刀回转半径为 175mm,其实际尺寸数据,旋耕机械刀分别与刀座的国家标准存在一定差距<sup>[15]</sup>。本文研究的韭菜培土机采用反转抛土方式,即培土刀由下而上切土,土壤被切削后由于张力作用而破碎,被旋转的培土刀抛至斜前方或正前方,在挡土板的作用下落于两侧的垄顶上,完成左右两侧的培土作业。根据正反转旋耕作业性能的研究,在相同作业参数条件下,反转培土刀具有切土速度较大、刀具受力较小的特点,使得其碎土性能较高,且能够保证耕深<sup>[16]</sup>。

韭菜培土作业的关键取决于培土刀打碎土壤和将土壤翻至韭菜根部的能力,能力越强,土壤被翻转至挡土板后的破碎效果就越好。由于普通培土刀的参数基本能满足韭菜培土作业要求,因此选用普通培土刀,如图 5 所示。



图 5 普通培土刀  
Fig.5 Common earthwork knife

3.2 培土刀运动分析

采取培土刀的转动中心为坐标原点构建坐标系,如图 6 所示。设  $x$  轴正方向为整机前进方向, $y$  轴正方向垂直于  $x$  轴向上, $z$  轴正方向垂直于  $xoy$  平面向外,刀尖的运动由机具前进速度  $v_m$  和刀轴转速  $\omega$  合成,其运动方程式为

$$\begin{cases} x = R\cos(\omega t) + v_m t \\ y = R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $x$ —培土刀刀尖水平方向位移分量(m);  
 $y$ —培土刀刀尖竖直方向位移分量(m);  
 $R$ —培土刀刀尖的旋转半径(mm);

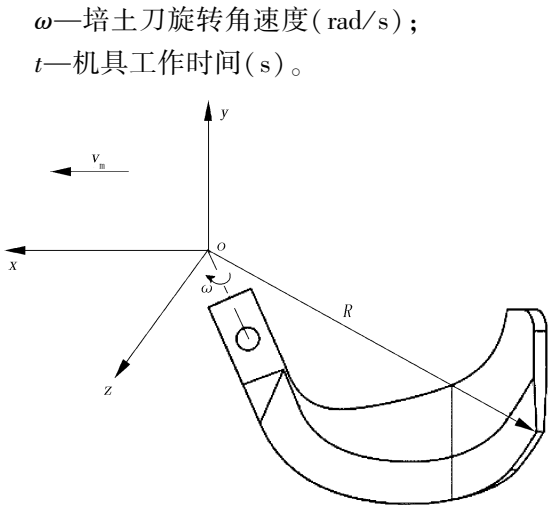


图 6 培土刀反转示意图

Fig.6 Schematic diagram of reversing earthwork knife

对式(4)进行导数运算,得出培土刀刀尖在  $x$ 、 $y$  两轴的速度,其表达式为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v_m - R\omega\sin(\omega t) \\ v_y = \frac{dy}{dt} = R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)中的  $v_x$  和  $v_y$  可得刀尖的绝对速度  $v$ ,其表达式为

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ &= v_m \sqrt{1 + (R\omega)^2 - 2 \frac{R\omega}{v_m} \sin(\omega t)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $v_x$ —培土刀刀尖沿  $x$  轴上的速度分量 (m/s);  
 $v_y$ —培土刀刀尖沿  $y$  轴上的速度分量 (m/s);  
 $v$ —培土刀刀尖的绝对速度 (m/s)。

定义培土刀具的圆周速度  $R\omega$  与机具前进速度  $v_m$  的比值为培土刀具转速比,用符号  $\lambda$  表示<sup>[17]</sup>,计算方程式为

$$\lambda = R\omega/v_m \quad (7)$$

根据式(7)可知,转速比  $\lambda$  与培土刀旋转速度  $\omega$ 、机具前进速度  $v_m$  有关。由于培土机在作业过程中的圆周速度和机具前进速度是随时变化的,因此转速比  $\lambda$  发生变化。

将式(7)代入式(6)简化得到刀尖的绝对速度  $v$ ,其方程式为

$$v = \frac{R\omega\sqrt{1 - 2\lambda\sin(\omega t) + \lambda^2}}{\lambda} \quad (8)$$

根据式(8)可知,培土刀碎土效果与转速比  $\lambda$  有关。当  $\lambda < 1$  时,圆周速度小于机具前进速度,无法完成抛土动作,基本没有碎土效果;当  $\lambda = 1$  时,圆周速度与机具前进速度相等,培土刀旋转 1 圈的直径与机

具前进距离相同,碎土的效果较差;当  $\lambda > 1$  时,圆周速度大于机具前进速度,培土刀碎土效果明显。因此, $\lambda$  越大,对抛起的土壤反复切削次数越多,碎土效果越好<sup>[18]</sup>。

4 培土机作业过程仿真

4.1 土壤颗粒模型的建立

使用 SolidWorks 软件对机具进行结构设计,如图 7 所示。将设计好的三维结构保存为 .step 格式,根据样机模型设置模型结构参数,挡土板与传动箱的材料为 45 钢,培土刀的材料为 65Mn 钢。对培土机作业过程进行仿真,分析刀具转速的改变对土壤轴向运动速度和垄上土壤颗粒数量的影响。

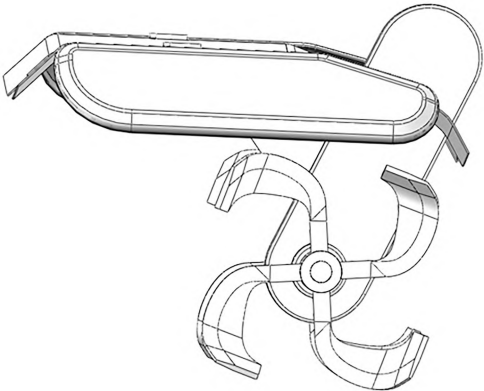


图 7 培土部件结构

Fig.7 Earthen component structure

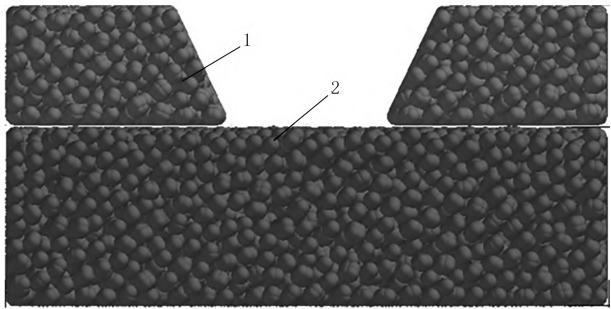
土壤颗粒的力学接触模型选择 Hertz-Mindlin with bonding。由于垄上土壤与沟底土壤坚实度存在差异,所以在生成颗粒模型时出现分层,即垄上层与沟底层<sup>[19]</sup>,各参数设置如表 1 所示。利用 SolidWorks 三维绘图软件将垄上土壤模型和沟底土壤模型绘制好后以 .step 文件格式导入 EDEM 软件中,对垄上和沟底层分别进行填充土壤颗粒,填充完毕后的土壤模型如图 8 所示。

表 1 仿真参数设置

| Table 1 Simulation Parameter Setting |      |                   |                      |
|--------------------------------------|------|-------------------|----------------------|
| 类型                                   | 参数   | 单位                | 数值                   |
| 土壤颗粒                                 | 泊松比  |                   | 0.4                  |
|                                      | 剪切模量 | Pa                | $1.0 \times 10^6$    |
|                                      | 密度   | kg/m <sup>3</sup> | 1722                 |
| 45 钢                                 | 泊松比  |                   | 0.31                 |
|                                      | 剪切模量 | Pa                | $1.0 \times 10^{10}$ |
|                                      | 密度   | kg/m <sup>3</sup> | 7800                 |

续表 1

| 类型        | 参数       | 单位              | 数值                    |
|-----------|----------|-----------------|-----------------------|
| 65Mn      | 泊松比      |                 | 0.35                  |
|           | 剪切模量     | Pa              | $7.27 \times 10^{10}$ |
|           | 密度       | $\text{kg/m}^3$ | 7830                  |
| 土壤颗粒-土壤颗粒 | 动摩擦因数    |                 | 0.2                   |
|           | 静摩擦因数    |                 | 0.5                   |
|           | 恢复系数     |                 | 0.2                   |
| 土壤颗粒-45 钢 | 动摩擦因数    |                 | 0.04                  |
|           | 静摩擦因数    |                 | 0.5                   |
|           | 恢复系数     |                 | 0.28                  |
| 土壤颗粒-65Mn | 动摩擦因数    |                 | 0.05                  |
|           | 静摩擦因数    |                 | 0.5                   |
|           | 恢复系数     |                 | 0.3                   |
| 垄上土壤颗粒    | 单位面积法向刚度 |                 | $2.1 \times 10^7$     |
|           | 单位面积剪切刚度 |                 | $8.0 \times 10^7$     |
|           | 临界法向应力   |                 | $1.5 \times 10^5$     |
|           | 临界剪切应力   |                 | $8.0 \times 10^4$     |
| 沟底土壤颗粒    | 单位面积法向刚度 |                 | $2.1 \times 10^8$     |
|           | 单位面积剪切刚度 |                 | $8.0 \times 10^8$     |
|           | 临界法向应力   |                 | $1.5 \times 10^6$     |
|           | 临界剪切应力   |                 | $8.0 \times 10^5$     |



1. 垄上层 2. 沟底层

图 8 土壤模型

Fig.8 Soil model

4.2 结果与分析

图 9 为培土装置作业过程中土壤颗粒被抛出时的速度矢量图。由图 9 可以看出:土壤颗粒在培土刀的作用下被切削、抛至垄顶,沟底土壤颗粒被培土刀抛出,大部分土壤颗粒在刀具抛洒作用下,沿着垄沟斜面向上运动至挡土板,与挡土板发生碰撞后,土壤

流向两侧垄顶,少部分土壤落回垄沟。

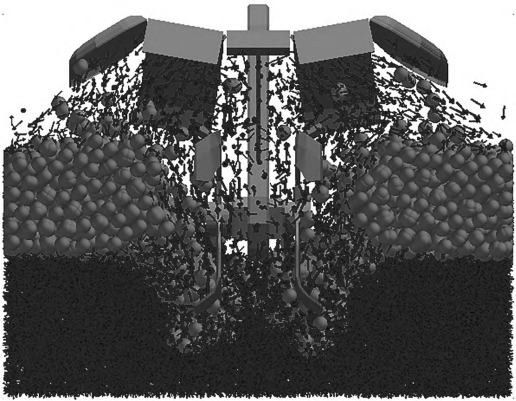


图 9 土壤运动过程速度矢量图

Fig.9 Soil movement process speed vector illustration

为了解土壤颗粒在各轴向的运动速度情况,当机具达到稳定作业后,求取稳定工作范围内颗粒的平均运动速度代表颗粒被抛出时的运动速度,得出颗粒各轴向速度大小随刀具转速变化曲线,如图 10 所示。由图 10 可知:当刀具转速为 300~340r/min 时,土壤颗粒各轴向运动速度变化较小,土壤颗粒沿 X 轴方向运动速度较低,沿 Y 轴、Z 轴方向的运动速度较大;当刀具转速为 340~370r/min 时,土壤颗粒沿 X 轴和 Y 轴方向运动速度增加且增幅较大,土壤颗粒沿 Z 轴方向的运动速度有增幅但较小;当刀具转速为 370~380r/min 时,土壤颗粒沿 Z 轴方向的运动速度逐渐增加,但土壤颗粒沿 X 和 Y 轴方向的运动速度逐渐减小。

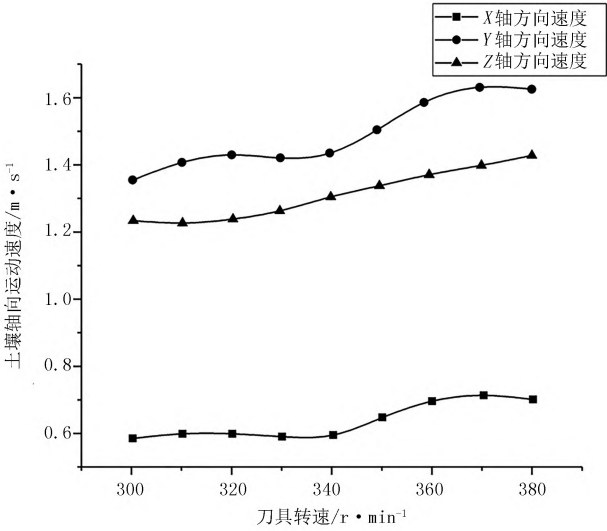


图 10 土壤颗粒各轴向运动速度随刀具转速变化曲线

Fig.10 Curve of axial movement velocity of soil particles changing with tool speed

为了解培土作业后土壤颗粒到达垄面的情况,求取垄上的土壤颗粒数量,得出垄上颗粒数量随刀具转速变化曲线,如图 11 所示。由图 11 可知:当刀具转速为 300~340r/min 时,垄上颗粒数量较少且增幅较

小;当刀具转速为 340~370r/min 时,垄上颗粒数量剧增;当刀具转速为 370~380r/min 时,垄上颗粒数量逐渐减小。

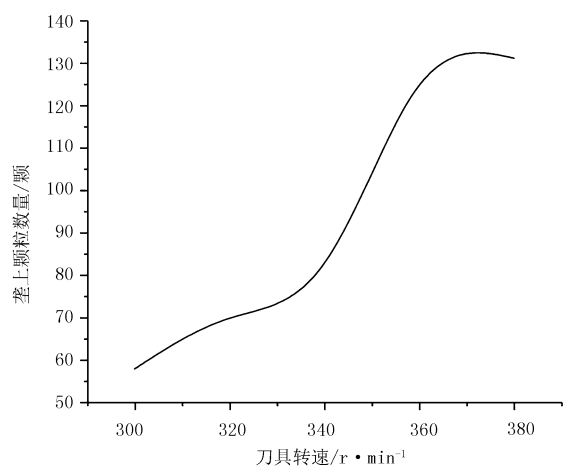
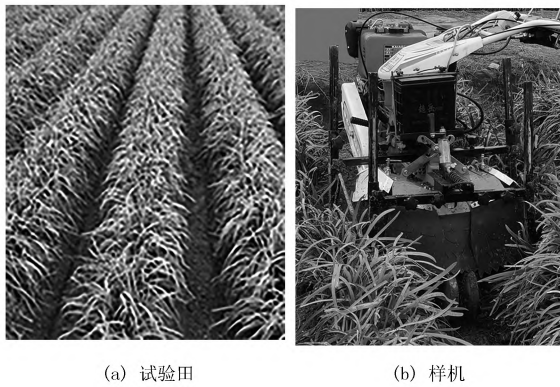


图 11 垄上颗粒数量随刀具转速变化曲线  
Fig.11 Curve of grain number on ridge with tool speed

5 田间试验与结果分析

5.1 试验条件

2021 年 12 月,在四川省成都市郫都区唐元镇韭菜基地进行培土试验,试验田和样机如图 12 所示。韭菜种植的垄距 800mm,垄台平均高 200mm,株高 350mm,用土壤含水率测试仪及土壤紧实度测量仪测得沟底 100mm 处含水率和紧实度,土壤含水率为 14%,土壤紧实度为 13.12kg/cm<sup>2</sup>。



(a) 试验田 (b) 样机

图 12 试验田和样机

Fig.12 Test plots and prototypes

5.2 韭菜培土正交试验设计

按照国标《GB/T 5262-2008 农业机械试验条件测定方法的一般规定》的方法<sup>[20]</sup>,对培土宽度、培土厚度、韭菜真叶土壤覆盖量进行测量。根据前期研究结果可知,刀具转速 A、内挡土板展开角 B、外挡土板展开角 C 对培土效果影响显著。为了进一步研究上述因素的相互作用对整机培土效果的影响,进行了正

交虚拟试验,整机的试验因子和水平如表 2 所示。

表 2 培土效果正交试验因素水平表

| Table 2 Table of factors level of orthogonal test of soil preparation effect |                                  |                       |                       |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 水平                                                                           | 刀具转速 A<br>/r · min <sup>-1</sup> | 内挡土板<br>展开角 B<br>/(°) | 外挡土板<br>展开角 C<br>/(°) |
| 1                                                                            | 340                              | 90                    | 40                    |
| 2                                                                            | 360                              | 100                   | 60                    |
| 3                                                                            | 380                              | 110                   | 80                    |

5.3 试验结果与分析

通过田间试验记录的韭菜培土正交试验结果如表 3 所示。

表 3 培土试验结果

| Table 3 Experimental result |                      |               |               |       |       |         |
|-----------------------------|----------------------|---------------|---------------|-------|-------|---------|
| 序号                          | 试验因素与水平              |               |               | 试验指标  |       |         |
|                             | A                    | B             | C             | 培土宽度  | 培土厚度  | 韭菜真叶    |
|                             | $/r \cdot \min^{-1}$ | $/(^{\circ})$ | $/(^{\circ})$ | $Y_1$ | $Y_2$ | 土壤覆盖量   |
|                             |                      |               |               | $/mm$ | $/mm$ | $Y_3/g$ |
| 1                           | 340                  | 100           | 40            | 309   | 69    | 49.14   |
| 2                           | 340                  | 90            | 60            | 302   | 62    | 51.13   |
| 3                           | 340                  | 110           | 60            | 321   | 71    | 54.09   |
| 4                           | 340                  | 100           | 80            | 329   | 68    | 56.36   |
| 5                           | 360                  | 90            | 40            | 329   | 79    | 56.89   |
| 6                           | 360                  | 90            | 80            | 346   | 78    | 58.97   |
| 7                           | 360                  | 110           | 40            | 336   | 75    | 62.45   |
| 8                           | 360                  | 100           | 60            | 342   | 79    | 61.05   |
| 9                           | 360                  | 110           | 80            | 338   | 76    | 63.14   |
| 10                          | 360                  | 100           | 60            | 345   | 81    | 68.01   |
| 11                          | 360                  | 100           | 60            | 339   | 78    | 65.01   |
| 12                          | 360                  | 100           | 60            | 350   | 76    | 62.64   |
| 13                          | 360                  | 100           | 60            | 348   | 78    | 67.12   |
| 14                          | 380                  | 100           | 40            | 359   | 91    | 76.34   |
| 15                          | 380                  | 90            | 60            | 364   | 94    | 71.39   |
| 16                          | 380                  | 110           | 60            | 366   | 95    | 72.46   |
| 17                          | 380                  | 100           | 80            | 382   | 89    | 78.46   |

采用 Design-Expert 软件对表 3 中数据进行回归拟合并进行方差分析,如表 4 所示。由表 4 数据可知:培土宽度、培土厚度、韭菜真叶土壤覆盖量回归模型的拟合度极为显著( $P<0.01$ ),在回归模型高度显著、失拟项不显著的条件下,完成对培土宽度、培土厚度、韭菜真叶土壤覆盖量的回归方程拟合。其回归方

程为

$$\left\{\begin{aligned} Y_1 &= 344.8 + 26.25A + 2.5B + 7.75C - \\ &\quad 4.25AB + 0.75AC - 3.75BC + 0.475A^2 - \\ &\quad 7.03B^2 - 0.525C^2 \\ Y_2 &= 78.4 + 12.37A + 0.5B - 0.375C - \\ &\quad 2AB - 0.25AC + 0.5BC + 2.17A^2 - \\ &\quad 0.075B^2 - 1.32C^2 \\ Y_3 &= 64.77 + 10.99A + 1.72B + 1.51C - \\ &\quad 0.4725AB - 1.28AC - 0.3475BC + \\ &\quad 1.11A^2 - 3.61B^2 - 0.798C^2 \end{aligned}\right. \quad (9)$$

各因素对培土宽度的影响如图 13 所示。其中,图 13(a)为外挡土板展开角保持在 60°时刀具转速和内挡

土板展开角对培土宽度的影响响应曲面图,培土宽度随刀具转速和内挡土板展开角的增加先剧增后趋于平稳;图 13(b)为内挡土板保持在 100°时刀具转速和外挡土板展开角对培土宽度的影响响应曲面图,培土宽度随刀具转速和外挡土板展开角的增加而增加;图 13(c)为刀具转速保持在 360r/min 时内挡土板展开角和外挡土板展开角对培土宽度的影响响应曲面图,随内挡土板展开角和外挡土板展开角的增加,培土宽度基本不受影响。因此,刀具转速是影响培土宽度最重要的影响因素,外挡土板展开角对培土宽度的影响较小,而内挡土板展开角对培土宽度的影响几乎可忽略不计。

表 4 培土方差分析

Table 4 Soil analysis of variance

| 来源    | 培土宽度 $Y_1/\text{mm}$ |     |          |         | 培土厚度 $Y_2/\text{mm}$ |     |          |         | 韭菜真叶土壤覆盖量 $Y_3/\text{mm}$ |     |          |         |
|-------|----------------------|-----|----------|---------|----------------------|-----|----------|---------|---------------------------|-----|----------|---------|
|       | 平方和                  | 自由度 | $F$ 值    | $P$ 值   | 平方和                  | 自由度 | $F$ 值    | $P$ 值   | 平方和                       | 自由度 | $F$ 值    | $P$ 值   |
| Model | 9383.75              | 14  | 28.5400  | <0.0001 | 3151.8500            | 14  | 19.9100  | <0.0001 | 6385.1800                 | 14  | 33.9100  | <0.0001 |
| A     | 8164.08              | 1   | 347.6200 | <0.0001 | 1925.3300            | 1   | 170.2900 | <0.0001 | 2043.6300                 | 1   | 151.9400 | <0.0001 |
| B     | 80.08                | 1   | 3.4100   | 0.0861  | 4.0800               | 1   | 0.3612   | 0.5575  | 47.5600                   | 1   | 3.5400   | 0.0810  |
| C     | 574.08               | 1   | 24.4400  | 0.0002  | 8.3300               | 1   | 0.7371   | 0.4051  | 33.7300                   | 1   | 2.5100   | 0.1356  |
| AB    | 72.25                | 1   | 3.0800   | 0.1013  | 6.2500               | 1   | 0.5528   | 0.4695  | 0.8930                    | 1   | 0.0664   | 0.8004  |
| AC    | 2.25                 | 1   | 0.0958   | 0.7615  | 0.2500               | 1   | 0.0221   | 0.8839  | 6.5000                    | 1   | 0.4834   | 0.4982  |
| BC    | 56.25                | 1   | 2.4000   | 0.1440  | 1.0000               | 1   | 0.0884   | 0.7705  | 0.4830                    | 1   | 0.0359   | 0.8524  |
| $A^2$ | 18.56                | 1   | 0.7904   | 0.3890  | 72.4300              | 1   | 6.4100   | 0.0240  | 3.8400                    | 1   | 0.2853   | 0.6017  |
| $B^2$ | 142.78               | 1   | 6.0800   | 0.0272  | 0.5207               | 1   | 0.0461   | 0.8332  | 32.2500                   | 1   | 2.4000   | 0.1438  |
| $C^2$ | 3.10                 | 1   | 0.1321   | 0.7217  | 23.6200              | 1   | 2.0900   | 0.1703  | 21.8600                   | 1   | 1.6300   | 0.2231  |
| 残差    | 328.80               | 14  |          |         | 158.2800             | 14  |          |         | 188.3000                  | 14  |          |         |
| 失拟    | 250.00               | 10  | 1.2700   | 0.4414  | 145.0800             | 10  | 4.4000   | 0.0832  | 153.8500                  | 10  | 1.7900   | 0.3028  |
| 总和    | 9712.55              | 28  |          |         | 3310.1400            | 28  |          |         | 6573.4800                 | 28  |          |         |

注: $P<0.01$  为极显著, $P<0.05$  为显著。

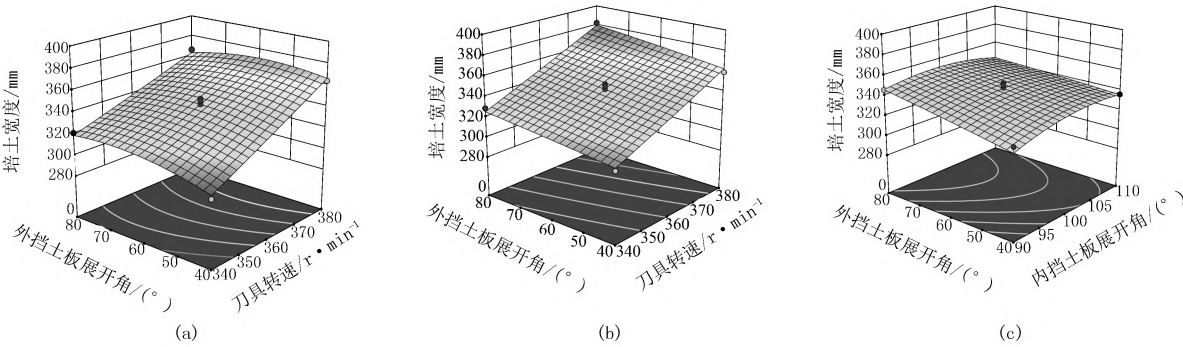


图 13 影响因素相互作用对培土宽度的影响

Fig.13 Influence of interaction of influencing factors on soil width

各因素对培土厚度的影响如图 14 所示。其中,图 14(a)为外挡土板展开角保持在 60°时刀具转速和内挡土板展开角对培土厚度的影响响应曲面图,培土厚度随刀具转速和内挡土板展开角的增加逐步增加;图 14(b)为内挡土板保持在 100°时刀具转速和外挡土板展开角对培土厚度的影响响应曲面图,培土厚度随刀具转速和外挡土板展开角的增加而增加;图 14

(c)为刀具转速保持在 360r/min 时内挡土板展开角和外挡土板展开角对培土宽度的影响响应曲面图,随内挡土板展开角和外挡土板展开角的增加,培土宽度基本不受影响。因此,刀具转速是影响培土厚度最重要的影响因素,外挡土板展开角和内挡土板展开角对培土宽度的影响较小。

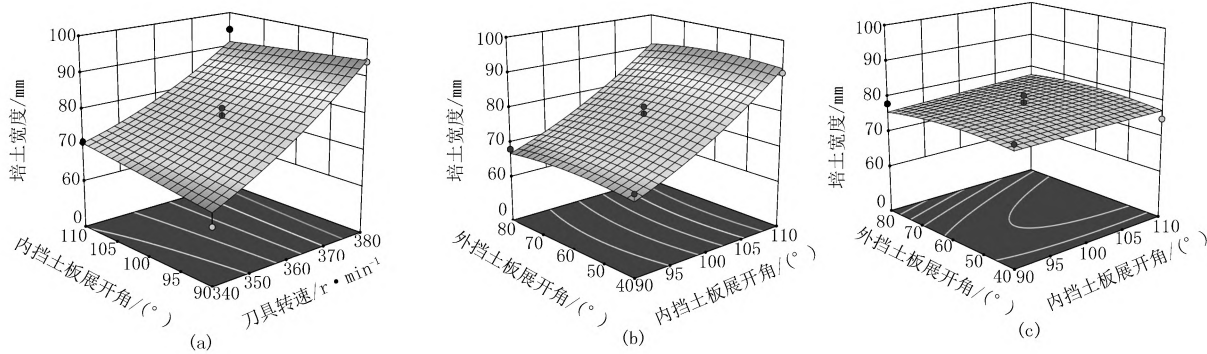


图 14 影响因素相互作用对培土厚度的影响  
Fig.14 Influence of interaction of influencing factors on soil thickness

各因素对韭菜真叶土壤覆盖量的影响如图 15 所示。其中,图 15(a)为外挡土板展开角保持在 60°时刀具转速和内挡土板展开角对韭菜真叶土壤覆盖量的影响响应曲面图,韭菜真叶土壤覆盖量随刀具转速和内挡土板展开角的增加逐步增加至平缓;图 15(b)为内挡土板保持在 100°时刀具转速和外挡土板展开角对韭菜真叶土壤覆盖量的影响响应曲面图,韭菜真叶土壤覆盖量随刀具转速和外挡土板展开角的增加

而增加;图 15(c)为刀具转速保持在 360r/min 时内挡土板展开角和外挡土板展开角对韭菜真叶土壤覆盖量的影响响应曲面图,随内挡土板展开角和外挡土板展开角的增加,韭菜真叶土壤覆盖量基本不受影响。因此,刀具转速是影响韭菜真叶土壤覆盖量最重要的影响因素,外挡土板展开角和内挡土板展开角对培土宽度的影响较小。

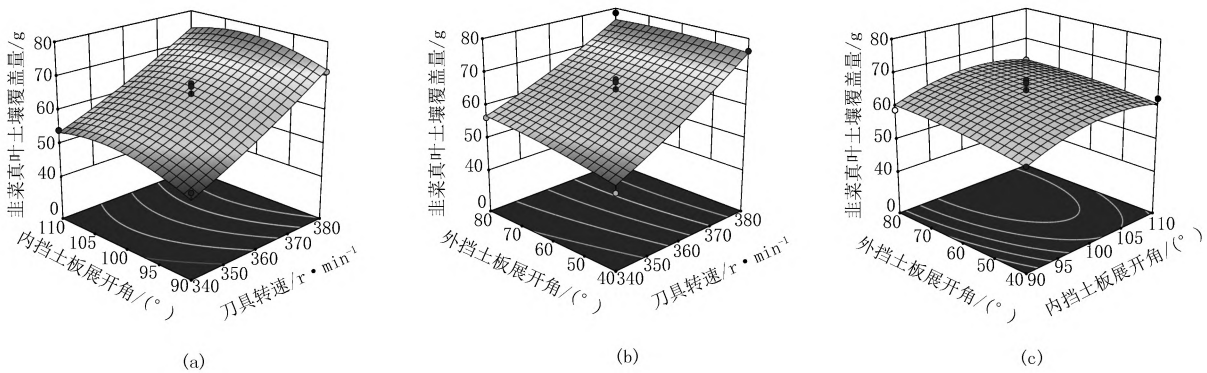


图 15 影响因素相互作用对韭菜真叶土壤覆盖量的影响  
Fig.15 Effect of interaction of influencing factors on soil cover of true leaf of leek

根据农业条件,垄距为 800mm、垄高为 200mm,以韭菜培土宽度、培土厚度和韭菜真叶土壤覆盖量作为试验指标进行了田间性能试验,利用数据处理软件中的优化功能对试验数据进行优化,设置培土宽度为 350~365mm、培土厚度为 90mm 以上,韭菜真叶土壤覆盖量为最小进行最优求解。结果显示:当刀具转速

为 370r/min、内挡土板展开角为 93°、外挡土板展开角为 68°时,培土宽度为 365mm,培土厚度为 94mm,韭菜真叶土壤覆盖量为 72g。韭菜培土前和培土后的效果如图 16 所示。经过试验前后对比可知,此结果满足韭菜田间栽培农艺要求。

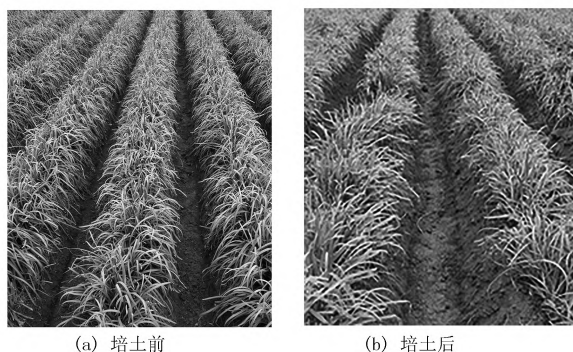


图 16 培土效果

Fig.16 Effect of soil

## 6 结 论

1) 通过韭菜培土机的总体结构设计、工作原理分析、理论推导及离散元仿真之后,确定了影响因素和培土性能的工作参数。其中,影响因素为刀具转速、内挡土板展开角、外挡土板展开角,试验指标为培土宽度、培土厚度、韭菜真叶土壤覆盖量。

2) 对试验后的数据进行记录,通过数据处理软件建立各性能指标与影响因素之间的二次多项式回归模型,并进行方差分析,最后对数据进行最优求解,得到最优组合参数,即刀具转速为 370r/min、内挡土板展开角为 93°、外挡土板展开角为 68°时,培土宽度为 365mm、培土厚度为 94mm、韭菜真叶土壤覆盖量为 72g,满足韭菜田间栽培农艺要求。

### 参考文献:

- [1] 张研. 北京地区安全营养韭菜品质调控与生产对策研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
- [2] 王娟娟,张曦,蒋靖怡. 关于豇豆、芹菜和韭菜质量安全的思考[J]. 中国蔬菜,2022(6):7-10.
- [3] 刘轩. 韭农安全生产行为影响因素研究[D]. 保定:河北农业大学,2020.
- [4] 罗静红,罗芳耀,干雪梅,等. 韭黄、韭薹采后处理技术[J]. 四川农业科技,2022(6):54-56.

- [5] 高志华. 韭黄高产栽培技术[J]. 园艺与种苗,2021,41(6):43-44.
- [6] 郭文场,周淑荣,董昕瑜,等. 韭黄的栽培管理(1)[J]. 特种经济动植物,2018,21(6):42-44.
- [7] 陈海涛,顿国强. 基于虚拟样机动力学仿真的大豆扶禾器参数优化[J]. 农业工程学报,2012,28(18):23-29.
- [8] 高建民,区颖刚. 甘蔗螺旋扶起机构的理论研究及虚拟样机仿真[J]. 农业工程学报,2004(3):1-5.
- [9] 贺俊林,胡伟,郭玉富,等. 扶禾杆在不对行导入玉米茎秆中的运动仿真[J]. 农业工程学报,2007(6):125-129.
- [10] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2012.
- [11] 杨庆璐,王学诗,范国强,等. 小型手扶自走式棉田培土机的设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(7):69-74.
- [12] JIANMIN GAO, HUIDONG QI. Soil throwing experiments for reverse rotary tillage at various depths, travel speeds, and rotational speeds[J]. Transactions of the ASABE, 2017,60(4):1113-1121.
- [13] 徐胜. 落石冲击力计算方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
- [14] 潘佛维. 密植作物用植保机械分禾装置的研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.
- [15] 国家标准局. 旋耕机械刀和刀座:GB/T 5669-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [16] 丁为民,王耀华,彭嵩植. 正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J]. 南京农业大学学报,2001,24(1):5.
- [17] 王恩民. 基于 SPH 法的林地深松刀具阻力特性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
- [18] 周飞科. 深松机具设计与试验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2018.
- [19] 全振伟. 烟草中耕培土机复合切削部件设计与试验[D]. 郑州:河南农业大学,2020.
- [20] 国家标准局. 农业机械试验条件测定方法的一般规定:GB/T 5262-1985[S]. 北京:中国标准出版社,1985.

## Design and Experiment of Leek Planting Machine

Yang Jie<sup>a,b</sup>, Liao Min<sup>a,b</sup>, Zhang Qiang<sup>a,b</sup>, Zhang Yu<sup>a,b</sup>

(a. Institute of Modern Agricultural Equipment; b. School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** According to the needs of agriculture, leek into the dynamic growth period to carry out 2-3 times of soil cultivation work, leek false stem growing high, soil cultivation height is also increasing, aiming at the existing domestic and foreign soil cultivation machine is easy to damage the stems and leaves of leek, supporting the seedling is difficult, is not suitable for the leek multiple soil cultivation problem, designed a leek soil cultivation machine, after the supporting seedling device, the theoretical research of the soil cultivation knife, The working parameters were determined, the discrete

element method was used to simulate the soil raising process of leek, and the effects of the operating parameters of the soil raising device on the axial velocity of soil particles and the number of particles on the ridge were analyzed. Data processing software was used to analyze the field test results, and the optimal combination parameters were obtained, that is, the tool speed was 370r/min, the inner retaining plate expansion Angle was  $93^\circ$ , the outer retaining plate expansion Angle was  $68^\circ$ , the soil width was 365mm, the soil thickness was 94mm, and the soil cover amount of leek true leaf was 72g.

**Key words:** leek; soil cultivator; seedling support; discrete element

(上接第 85 页)

**Abstract ID:** 1003-188X(2024)06-0080-EA

## Sliding Mode Control for Path Tracking of Rice Transplanter Based on Disturbance Observer

Li Jinyang, Xiong Hongjiang, Zhou Maile

(Key Laboratory of Modern Agriculture Equipment and Techenology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** A sliding mode control method for rice transplanter path tracking based on interference observer is proposed to address the problems that the vehicle is prone to slip under unknown external disturbance during transplanter operation due to complex farmland environment and spatial variability, thus affecting the path tracking effect and long path tracking convergence time. Firstly, an extended kinematic model including slip is established, based on which the composite disturbances in lateral and heading directions are introduced, and a nonlinear disturbance observer is designed to accurately observe the disturbances and reduce the jitter of the sliding mode control. In order to avoid the singularity phenomenon and improve the convergence speed, a controller designed with fast non-singular terminal sliding mode surface and variable exponential power convergence law is proposed to weaken the disturbance. A comparative simulation of the interference-free model is established on the MATLAB software platform. Compared with the fast power convergence law, the variable exponential power convergence law selected in this paper is faster, and compared with the fast terminal sliding mode, the fast non-singular terminal sliding mode has better dynamic performance; the simulation results show that the nonlinear interference observer can accurately observe the composite interference; compared with the sliding mode controller without interference observer, this paper Compared with the sliding mode controller without interference observer, this paper can converge quickly and effectively, weaken the interference and reduce the jitter. In the actual paddy field operation test with the speed of 0.8 m/s, the average absolute deviation of the overall linear path tracking is 2.50 cm and the root mean square is 2.90 cm, and the overall deviation value is small, which can effectively improve the stability and speed of the control system and meet the path tracking accuracy.

**Key words:** rice transplanter; path tracking; disturbance observer; fast non-singular terminal sliding mode; variable exponential power convergence law