

# 马铃薯碎土整地联合作业机设计与试验

吕金庆<sup>1</sup> 刘金妮<sup>1</sup> 赵治明<sup>1</sup> 杨德秋<sup>2</sup> 李季成<sup>1</sup> 孙 琪<sup>1</sup>

(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集团有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对东北地区整地作业中, 结块多、土壤残茬严重、犁底层加厚等问题, 根据我国现有的东方红-75/802 型拖拉机的动力条件, 设计了一种适用于马铃薯田的驱动式碎土整地联合作业机。该机是根据国外先进的土壤保护耕作法, 结合东北地区土壤情况和马铃薯田整地要求设计的一种机具。本文阐述了机器整体结构及工作原理, 设计了碎土辊, 分析了碎土辊运动过程、碎土辊工作过程中楔形齿所受的阻力及碎土辊作业时所需功率, 基于 EDEM 离散元仿真技术, 建立了部件-土壤仿真模型, 以土壤破碎率为试验指标, 以碎土直齿末端倾角、碎土直齿边长和机组速度为试验因素进行仿真试验, 在仿真基础上进行田间试验, 试验结果表明, 所设计的碎土整地联合作业机碎土率为 98.45%、平均耕深为 14.5 cm、机组速度为 5.7 m/s、碎土辊消耗功率为 19.24 kW, 具有良好的作业效果, 满足马铃薯田整地作业要求。

**关键词:** 马铃薯; 整地联合作业机; 楔齿碎土辊; 离散元法

中图分类号: S224.1      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2023)08-0019-11      OSID: 

## Design and Test of Key Components of Potato Soil-crushing Site Preparation Machine

LÜ Jinqing<sup>1</sup> LIU Jinni<sup>1</sup> ZHAO Zhiming<sup>1</sup> YANG Deqiu<sup>2</sup> LI Jicheng<sup>1</sup> SUN Qi<sup>1</sup>

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

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** In view of the problems faced in the land preparation operation in northeast China, such as more clods, serious soil stubble and thickened plow bottom layer, a driven soil crushing and preparation combination machine mainly applicable to potato fields was designed according to the power conditions of the existing Dongfanghong-75 and 802 tractors. This was a new type of machine designed according to the advanced foreign soil conservation tillage method and developed by combining the soil conditions of the northeast and the requirements of potato field preparation. The overall structure and working principle of the machine were described. By designing the soil crushing roller, the author clarified and analyzed the soil crushing roller motion process, the resistance of the wedge-shaped teeth during the working process of the soil crushing roller and the power required during the operation of the soil crushing roller. Based on EDEM discrete element simulation technology, a component-soil simulation model was established with soil crushing rate as test index, and end deflection angle of crushing straight tooth, length of crushing straight edge and unit speed as test influencing factors for simulation experiments. The field tests were conducted on the basis of simulation. The test results showed that the designed soil crusher had a soil crushing rate of 98.45%, an average tillage depth of 14.5 cm, a unit speed of 5.7 m/s and a crushing roller power consumption of 19.24 kW, which proved to have a good operation effect and met the requirements of potato field preparation.

**Key words:** potato; soil preparation machine; wedge-toothed soil crushing roller; discrete element method

## 0 引言

马铃薯作为一种生长在土壤中的块茎作物,对土壤要求较高,种植前需要对土壤进行细碎、蓬松。目前,东北地区由于化肥的过量施用、有机肥的减少、过度耕作等原因,存在着土壤板结、结块多、土壤残茬严重、犁底层加厚等问题,严重影响马铃薯机械化播种、收获等田间作业以及马铃薯的产量与品质。研究马铃薯种床土壤保护性耕整地技术及装备具有重要意义<sup>[1]</sup>。

采用土壤保护耕作方法,能减少土壤表土的风蚀、水蚀、沙蚀、土壤有机质的流失程度<sup>[2]</sup>。采用土壤保护耕作,表土侵蚀将减少 50%;燃油消耗减少 30%~40%;农作物产量提升 10%~15%;在干旱年份增产的幅度更大<sup>[3]</sup>。目前,各个国家都在向更加节能高效、联合少耕的机械化发展,有效地提高翻耕与播种质量<sup>[4]</sup>。保护性耕作整地机械多适用于小麦、大豆等作物,对马铃薯田整地适应性较差<sup>[5-6]</sup>。

碎土机械,包括铧式犁、圆盘犁、耕耙犁、深松机、松耙机和旋耕机等<sup>[7-8]</sup>。近年,国外回转式耕作机械发展迅速<sup>[9]</sup>,配合大动力拖拉机使用,效率和质量都较高<sup>[10]</sup>。具有代表性的格兰 CTS 系列保护性耕作大型联合整地机,可有效地混合作物残茬,打破犁底层,一次可完成种床准备。美国 Yetter 2984 Maverick HR Plus 型条带耕整机,安装有安全回位弹簧,可以根据作业要求单独调节,提高其仿形能力和寿命,但碎土能力不强。国内保护性耕作与国外相比发展较晚,近年来逐渐引起人们重视<sup>[11]</sup>。解宏图等<sup>[12]</sup>设计了一种秸秆覆盖条带深松浅耙联合整地机,配有粉碎机构、深松犁、浅旋机构、深旋机构和镇压机构,主要针对东北地区玉米作物保护性耕作需求。黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的 1GZL-350 型深松联合整地机<sup>[13]</sup>,一次进地可完成耕地的灭茬、旋耕、碎土、深松、起垄和镇压等作业,主要适用于玉米、高粱和烤烟等作物。东北马铃薯田保护性耕作的机具较少,大多数用于保护性耕作的整地机在土壤板结等复杂情况下碎土率难以保证,不能达到东北地区马铃薯田碎土整地的预期效果<sup>[14]</sup>。

本文针对我国东北地区马铃薯田结块多、土壤残茬严重、犁底层加厚情况,设计一种马铃薯碎土整地联合作业机。对关键部件碎土辊进行设计,阐述并分析碎土辊轴运动过程、碎土辊回转过程中楔齿所受的阻力及碎土辊工作时消耗的功率,同时进行仿真模拟试验,获得碎土直尺最优参数组合和最优

运行速度,并对仿真结果进行田间验证。

## 1 整体结构与工作原理

### 1.1 整体结构

碎土整地联合作业机结构图如图 1 所示,整机主要由深松铲、碎土辊、悬挂架和镇压辊等关键部件组成。

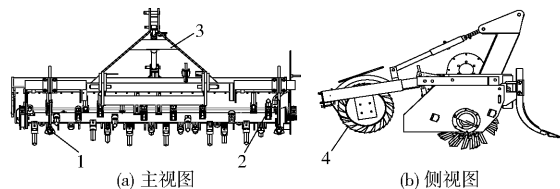


图 1 碎土整地联合作业机整体结构图  
Fig. 1 Overall structure diagrams of soil crushing and land preparation machine  
1. 深松铲 2. 碎土辊 3. 悬挂架 4. 镇压辊

机架前安装 2 个深松铲左右对称排列,深松铲尖切削入土,并将两端土壤向两侧进行挤压,同时对 200~250 mm 犁底层和部分 250 mm 以上心土层的板结土壤进行破除,减小碎土辊碎土过程中所受阻力<sup>[15]</sup>;为播种创造良好种床条件,中间装有碎土辊,起到强烈切碎土壤的作用。随即镇压辊镇压,使其土壤容重有所增加,一般达 1.2 g/cm<sup>3</sup> 以上,防止水分蒸发,有利于种子与土壤接触及吸收水分出全苗。通过采用碎土辊机架配置的托板和改变镇压辊相对于碎土辊的位置调节耕深,并用拖拉机液压悬挂装置限制碎土辊的最大耕深。

### 1.2 工作原理和主要技术参数

#### 1.2.1 工作原理

采用三点全悬挂式与拖拉机挂接。作业时深松铲先对土壤进行深松,碎土辊在已翻地和未翻的熟地上耙碎土垡,并将大土块从土层中分离抛出,由后面齿形滚筒镇压器进一步碎土和压实表层土壤,起到土壤表土的防蚀作用。为了避免作业时遇到大石块碎土辊上的钉齿折断,设计时应考虑以镇压辊为支点,碎土辊升起,越过大石块。此过程由可伸缩式的上拉杆来实现。

#### 1.2.2 主要技术参数

设计的碎土整地联合作业机主要参数如表 1 所示。

## 2 关键部件设计

### 2.1 楔齿碎土辊装置设计

楔齿碎土辊结构图如图 2 所示,35 个碎土直齿安装在齿座中,齿座在碎土辊轴上以螺旋方式进行焊合。

碎土辊主要作用是破碎土块,为马铃薯播种创

表 1 碎土整地联合作业机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of soil crushing and soil preparation machine

| 参数                           | 数值                |
|------------------------------|-------------------|
| 外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)       | 1 700×2 400×1 350 |
| 发动机功率/kW                     | 55                |
| 整机质量/kg                      | 950               |
| 工作幅宽/mm                      | 2 000             |
| 碎土辊工作直径/mm                   | 500               |
| 碎土辊转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 294               |
| 碎土辊工作深度/mm                   | 80~140            |

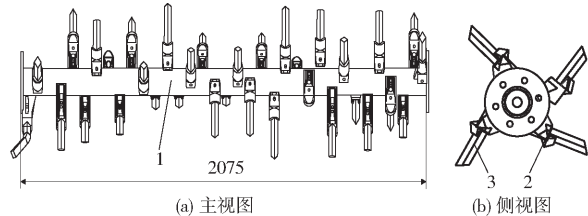


图 2 楔齿碎土辊整体结构图

Fig. 2 Overall structure diagrams of wedge-shaped soil crushing roller

1. 碎土辊轴 2. 齿座 3. 碎土直齿

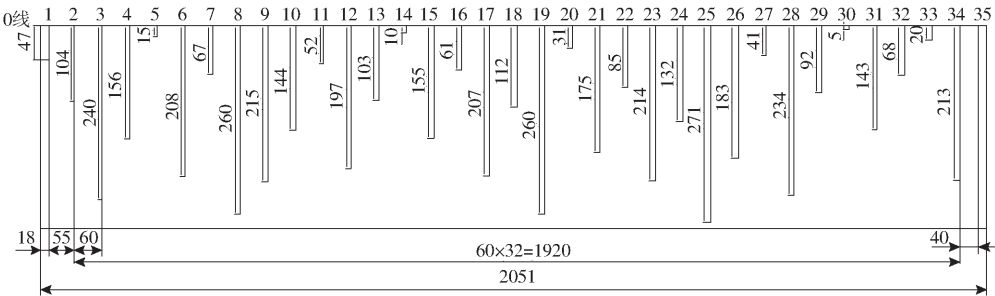


图 3 碎土辊楔齿配置图

Fig. 3 Configuration diagram of wedge teeth of earth crusher roll

根据东北地区粘重土壤条件和保护性耕作要求<sup>[17]</sup>,选用直齿,增加碎土能力以及减少缠草现象的同时,作业效果好、作业质量高且更换容易,更能实现马铃薯田的整地需求。为保证齿座与直齿安装的可靠性,直齿截面采用正方形,用 65Mn 钢制造,采用正火调质,HB 不大于 217。

2.2 碎土直齿设计及影响参数

图 4 为碎土直齿的结构图,主要由碎土直齿和齿座两部分组成。碎土直齿的结构和设计直接影响碎土过程中所受阻力和碎土质量。碎土直齿设计因素主要包括碎土直齿末端倾角  $\theta$  和碎土直齿边长  $L_0$ 。

2.3 碎土辊楔齿的运动学分析

碎土辊具有两种运动,以圆周角速度  $\omega$  绕自身轴线的转动(相对运动)及与机组以速度  $v_m$  前进的直线运动。

2.3.1 碎土辊楔齿端点的运动方程

根据相对速度和牵连速度的不同速比  $\lambda = v_0/v_m$

造良好种床条件。根据黑龙江省土壤情况和马铃薯土壤播种要求,设计碎土辊时应满足以下条件:满足碎土作业农业技术及质量要求。根据土壤墒情和耙地时间,确定耙深,一般轻耙为 8~10 cm,重耙为 12~15 cm。耙深误差在  $\pm 1$  cm 范围内。碎土后耕层内无大土块及空隙,每平方米耕层内,直径 5~10 cm 土块不得超过 5 个;沿播种垂直方向,在 4 m 宽地面上,高低差不超过 3 cm<sup>[16]</sup>。不漏耙,不拖堆。相邻作业幅重复耙量不超过 15 cm。

碎土辊主要包括碎土辊轴、齿座、碎土直齿 3 部分。碎土辊轴直径设计为 89 mm,长为 2 075 mm。为保证东北地区马铃薯田的碎土要求,实现耕深在 130 mm 左右,碎土直齿长度设计为 188 mm,与齿座装配部分长 58 mm,切削部分长度为 130 mm。碎土辊轴与接盘焊接后,然后焊合齿座,齿座需较好焊接工艺,使该轴变形最小以保证其直线度。碎土直齿通过单向螺旋的排列方式安装在齿座上,固定在碎土辊轴上,排列方式如图 3 所示。

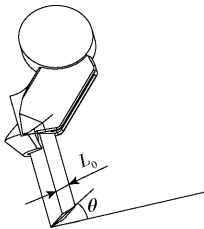


图 4 碎土直齿结构图

Fig. 4 Design drawing of key factors of broken soil teeth

确定工作部件的运动轨迹。为推导楔齿端点的运动方程,建立固定的坐标系(图 5),坐标系原点定于辊轴中心(点 O),x 轴方向和机具运动方向一致,在运动开始时 y 轴可以通过滚筒轴心  $O_1$ 。

当滚筒在时间  $t$  内,由起始位置转过角  $\omega t$ ,此时碎土辊正转时的点 A(A 是楔齿端点)分别移动到点  $A_0$ 。然而,由于碎土辊的牵连运动,所以点 A 和  $A_0$  同时也移动一距离  $v_m t$ ,到点  $A_1$  处。点  $A_1$  的运动轨迹用余摆线方程确定

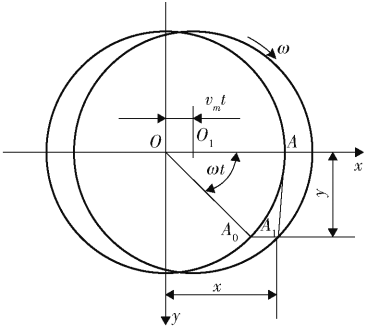


图 5 楔形齿运动方程简图

Fig. 5 Motion equation diagram of wedge tooth

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) \\ v_0 = \omega R \end{cases} \quad (1)$$

式中  $t$ ——碎土辊旋转一周的时间, s

$v_0$ ——碎土辊转速, m/s

$R$ ——碎土辊半径, mm

$\omega$ ——碎土辊旋转角速度, rad/s

由式(1)可得,点 A 的轨迹方程为

$$x = \frac{v_m}{\omega} \arcsin \frac{y}{R} + \sqrt{R^2 - y^2} \quad (2)$$

所以碎土辊上任意一点的运动方程为

$$x_i = \frac{v_m}{\omega} \arcsin \frac{y_i}{r_i} + \sqrt{r_i^2 - y_i^2} \quad (3)$$

2.3.2 碎土整地联合作业机楔齿运动摆线

任意运动轨迹由比值  $\lambda_i = \frac{\omega r_i}{v_m}$  确定,  $\omega r_i$  为任意一点  $i$  的相对圆周速度, 可得

$$\lambda_i = \frac{r_i}{R} \lambda \quad (4)$$

当  $\lambda_i = 1$  时,  $r_i = r$  为动形心半径。  $\lambda < 1$  时轨迹是无扣的短幅摆线。通常, 转动式土壤耕作机械  $\lambda > 1$ 。因此, 转动式工作部件绝对运动轨迹为长幅摆线。运动学参数由其传动系统和拖拉机前进速度来确定。其计算为:  $v_m = 1.27 \text{ m/s}$  (东方红-75 型拖拉机、I 挡作业、前进速度为  $4.55 \text{ km/h}$ ) ;  $v_0 = 7.7 \text{ m/s}$  (碎土辊转速  $n = 294 \text{ r/min}$ , 碎土辊半径  $R = 0.25 \text{ m}$ )。计算出  $\lambda \approx 6$ ,  $r_i \approx 40.9 \text{ mm}$ 。

碎土辊转一圈刀轴中心的偏移量为

$$L = 2\pi r = 2\pi \frac{R}{\lambda} \approx 257 \text{ mm} \quad (5)$$

式中  $r$ ——动形心半径, mm

转动  $1/4$  周时点  $O$  移动  $L/4$ 。圆弧四等分, 当旋转  $\pi/8$  时, 点  $A$  移动到  $a$ , 碎土辊中心移动到  $a'$ , 连接  $O_1$ , 过点  $a'$  且与  $Oa'$  平行, 推断出点  $B$ , 以此方法, 找到点  $C$ 、 $D$ 、 $E$  等, 如图 6 所示。

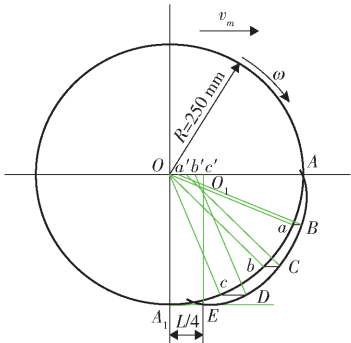


图 6 碎土辊楔齿端点摆线

Fig. 6 End point cycloid of wedge tooth of earth

crusher roller

2.3.3 碎土辊进距

碎土辊上每一垂直面上只有一个楔齿, 研究碎土辊转动相邻两周的楔齿切削土壤过程, 需引入碎土辊进距。两周间楔齿间轨迹的水平距离  $S$  称楔齿进距,  $S = v_m t$ , 进距计算式为

$$S = \frac{2\pi R}{\lambda z} \quad (6)$$

式中  $z$ ——每一圆周的楔齿数

由式(6)可知, 楔齿进距为常数, 其值取决于碎土辊半径  $R$ 、辊上每一圆周的楔齿数  $z$  和运动学参数比  $\lambda$ 。

楔齿进距为转动式土壤耕作机械的主要工艺参数之一, 其决定被耕作土壤的碎土程度<sup>[18]</sup>。计算得碎土整地联合作业机楔齿进距  $S = 25 \text{ cm}$ 。

2.3.4 切削速度及碎土辊运动绝对速度

将式(1)对时间求导, 可得到坐标轴上投影为楔齿端点的速度为

$$\begin{cases} v_x = v_m - R\omega \sin(\omega t) \\ v_y = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

此时, 楔齿端点的绝对速度为

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_m^2 - 2R\omega v_m \sin(\omega t) + R^2 \omega^2} \quad (8)$$

其中  $\alpha = \omega t$ , 其余为定值。

由式(8)可知, 楔齿端点的绝对速度(切削土壤的速度)是变化的, 其变化程度取决于楔齿辊相对运动的转角。

切削速度的方向沿着楔齿绝对运动的切线方向。在  $\alpha = \pi/2$  和  $\alpha = 3\pi/2$  的 2 个位置上, 绝对速度等于速度  $v_m$  和  $v_0$  的代数和。其方向沿碎土辊圆周的切向。从图 7 可看出以上两位置在点  $A_2$ 、 $A_4$  处。点  $A_2$ 、 $A_4$  的绝对速度为

$$\begin{cases} v_{a2} = \omega R \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right) \\ v_{a4} = \omega R \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $v_{a2}$ 、 $v_{a4}$ ——点  $A_2$ 、 $A_4$  的绝对速度, m/s

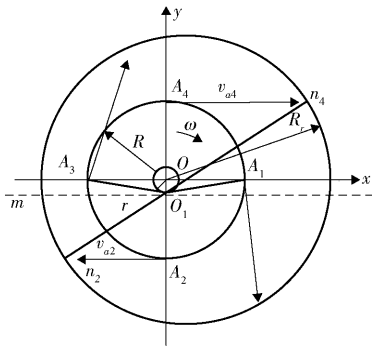


图 7 碎土辊楔齿绝对速度矢量端迹图

Fig. 7 Graph of absolute velocity vector end-trace of wedge tooth of soil crusher roller

## 2.4 碎土辊工作过程阻力分析

碎土齿辊随机具前进的同时碎土直齿绕着碎土辊做圆周运动耕耘土壤, 碎土和向后抛土发生在同一过程。碎土直齿在工作过程中, 主要受到的阻力  $F$  计算式为<sup>[19]</sup>

$$F = F_{TP} + F_q + F_{OT} \quad (10)$$

式中  $F_{TP}$ ——碎土直齿与土壤间的摩擦阻力, N  
 $F_q$ ——切削阻力与被切削垡块变形的阻力和, N  
 $F_{OT}$ ——抛掷土壤阻力, N

由于  $F_{TP}$  求解困难, 所以简化模型, 简化后方程为

$$F = F_q + F_{OT} \quad (11)$$

由于碎土直齿切削和抛掷土壤所受阻力随着切削角的变化而不断变化。为计算方便, 引入切削比阻系数  $k_q$ , 计算式为

$$k_q = k k_\lambda \quad (12)$$

式中  $k_\lambda$ ——碎土比阻, N/cm<sup>2</sup>  
 $k$ ——比例系数

在熟地, 耕深  $a = 10$  cm 时,  $k = 3.5$ ; 当耕深  $a = 4$  cm 时,  $k = 10$ , 由此碎土辊耕深取  $k = 3.5$ 。

切削垡块横截面积为

$$D = \delta b \quad (13)$$

其中, 被切削垡块厚度  $\delta$  也随切削角的变化而变化, 计算式为

$$\delta = c \sin \beta \quad (14)$$

最大横截面积为

$$D_{\max} = \delta_{\max} b \quad (15)$$

式中  $\delta_{\max}$ ——垡块最大厚度, cm  
 $b$ ——单齿幅宽, cm  
 $c$ ——切土节距, cm  
 $\beta$ ——切削角, (°)

可得

$$F_q = k_q b c \sin \beta \quad (16)$$

抛土过程在碎土直齿作用下的运动十分复杂, 齿的形状和尺寸、在碎土辊上安装方法、碎土齿切削角、碎土工况、土壤条件和垡块状态都会产生影响。抛掷土壤阻力主要与垡块质量和速度有关, 且质量越大、速度越快则阻力越大, 抛掷时作用于土粒的力如图 8 所示。应用达兰贝尔原理, 可得<sup>[20]</sup>

$$\begin{aligned} dF_{OT} dL - dJ_a dL - dJ_n f dL - \\ f dQ \cos(\varphi - \alpha_2) dL - dQ \sin(\varphi - \alpha_2) dL - \\ dQ \sin(\varphi - \alpha_2) dL = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式中  $dJ_a$ ——惯性切向力, N

$dJ_n$ ——惯性法向力, N

$f$ ——摩擦因数

$\varphi$ ——土粒从运动起始位置的旋转角, (°)

$\alpha_2$ ——确定土粒在垡块中位置的起始角, (°)

化简积分得

$$F_{OT} = R^2 \varepsilon \frac{\gamma_n}{g} \delta c c'_1 + f \gamma_n \delta c c'_2 +$$

$$\gamma_n \delta c c'_3 + f R^2 \frac{\gamma_n}{g} \delta c c'_4 =$$

$$R \gamma_n b S \left( \frac{R \varepsilon c'_1}{g} + f c'_2 + c'_3 + \frac{R f c'_4}{g} \right) \quad (18)$$

式中  $\gamma_n$ ——土壤容重, kg/dm<sup>3</sup>

$\varepsilon$ ——加速度, m/s<sup>2</sup>

$c'_1$ 、 $c'_2$ 、 $c'_3$ 、 $c'_4$ ——积分简化系数, 为定值

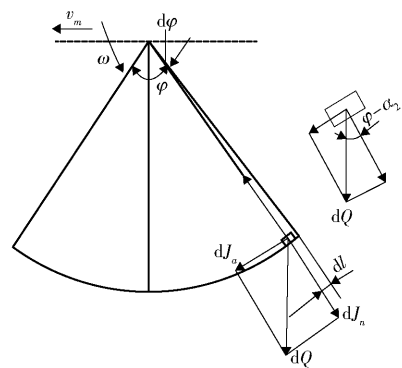


图 8 抛掷时作用于土粒的力

Fig. 8 Force acting on a grain of soil when thrown

## 2.5 碎土辊作业所需功率

碎土辊以一定的速度在已翻过的土壤工作时, 其消耗功率为<sup>[21]</sup>

$$N_1 = N_p + N_{OTE} + N_{nep} + N_{TP} + N_\pi \quad (19)$$

式中  $N_p$ ——切削土壤的功率, kW

$N_{nep}$ ——托板滑动所损耗的功率, kW

$N_{TP}$ ——机械传动部分所损耗的功率, kW

$N_\pi$ ——克服楔齿阻力消耗功率, kW

$N_{OTE}$ ——抛掷土壤消耗功率, kW

碎土辊作业时,为求消耗在切削和抛掷土壤消耗的功率,引入比功  $A_{\gamma\pi}$  的概念<sup>[22]</sup>,即碎土辊转动一周,消耗在旋耕土壤上的功,碎土辊转动一周所作的功  $A$  为

$$A = 2\pi M_{kp} \tag{20}$$

式中  $M_{kp}$ ——碎土辊轴上的驱动力矩

将该功除以碎土辊转动一周所抛土壤的体积使得比功为

$$A_{\gamma\pi} = \frac{A}{V} = \frac{2\pi M_{kp}}{V} \tag{21}$$

其中  $A_{\gamma\pi} = A_p + A_\pi$  (22)

式中  $V$ ——所抛土壤体积,  $\text{cm}^3$

别尔那茨卡还指出,  $A_p$  是由于切削土壤的阻力而形成,并与切削速度无关。动力比功分量  $A_\pi$  是为把动能传给土壤所消耗的功。

旋耕时比阻  $K$  和切削比功之间存在关系

$$A_p = CK \tag{23}$$

式中  $K$ ——耕地时比阻,  $\text{kg} \cdot \text{N}/\text{m}^2$

$C$ ——比例系数,当耕深  $a$  为 13 ~ 15 cm 时,  $C$  取 1.5 ~ 3.5

选定比阻  $K = 2\,000\text{ kg} \cdot \text{N}/\text{m}^2$ , 则  $C = 3$ , 计算  $A_p = 6\,000\text{ kg} \cdot \text{N}/\text{m}^3$ 。

动力比功  $A_\pi = \alpha_v v^2$ ,  $\alpha_v$  为比例系数,耕深  $\alpha$  为 10 ~ 15 cm, 进程  $S$  为 15 ~ 25 cm 时, 则  $\alpha_v$  为 (100 ~ 150)  $\lambda^2$ ,  $A_\pi = 100\lambda^2 v^2 = 5\,929\text{ kg} \cdot \text{N}/\text{m}^3$ ,  $A_{\gamma\pi} = 11\,929\text{ kg} \cdot \text{N}/\text{m}^3$ ,  $N_p + N_{OTE} = A_{\gamma\pi} = 23.9\text{ kW}$ 。

选取万向节传动效率为 0.98; 锥齿轮传动效率为 0.96; 侧边链传动效率为 0.96, 机械传动部分消耗功率为  $N_T P = (1 - \eta) (N_p + N_{OTE}) = 2.39\text{ kW}$ 。

根据《农业机械设计手册》表 3.2 - 1 得知每齿阻力为 38.25 ~ 48.05 N, 楔齿阻力计算值为  $48.05 \times 35 = 1\,681.75\text{ N}$ , 克服楔齿的阻力所消耗的功率为  $N_\pi = 1\,681.75 \times 1.27/75 = 28.48\text{ kW}$ 。

碎土辊及机架质量  $Q_1 = 500\text{ kg}$ , 滑动摩擦因数  $f = 0.4$ , 计算托板滑动所消耗的功率为  $N_{nep} = Q_1 f v / 75 = 0.809\text{ kW}$ 。

求得碎土辊作业时所需功率为  $N_1 = 29.24\text{ kW}$ 。

所设计的联合整地机碎土辊的运动是由拖拉机驱动, 所受阻力越大, 作业能耗消耗越大。对碎土辊进行运动学分析和动力学分析, 计算出消耗功率, 为得到碎土直齿优化参数、刀辊参数提供理论依据。

由上述分析可知, 切削阻力和抛土阻力与碎土辊结构参数有关。作业过程中阻力越小, 所需功率越小, 则碎土效果越好。主要影响碎土率的参数为切削角  $\beta$  和单齿幅宽  $b$ , 而切削角  $\beta$  和单齿幅宽  $b$  与设计参数碎土直齿末端倾角  $\theta$  和碎土直齿边长  $L$  紧

密相关。为提高碎土直齿入土性能碎土直齿末端倾角取  $27^\circ \sim 37^\circ$ , 碎土辊碎土性能良好; 考虑到碎土直齿的排列方式, 选择碎土直齿边长为 20 ~ 30 mm<sup>[23]</sup>。

3 仿真试验

3.1 几何模型建立及参数设定

3.1.1 碎土直齿仿真模型

应用三维制图软件 SolidWorks 对联合整地机碎土辊齿的碎土直齿单体进行实体建模, 以 igs 格式导入 EDEM 软件中。设置碎土直齿材料为 65Mn 钢, 泊松比为 0.3, 剪切模量为  $7.9 \times 10^{10}\text{ Pa}$ , 密度为  $7\,800\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

3.1.2 土壤颗粒模型

土壤颗粒直径非常小, 颗粒过小会导致 EDEM 仿真运行速度过于缓慢, 针对土壤颗粒的复杂性, 将土壤简化成球形颗粒、三球形颗粒、方形颗粒和柱形颗粒 4 种。在 EDEM 中对 4 种颗粒进行设定, 每一个球形颗粒设置为 3 mm, 如图 9 所示。其中球形颗粒、三球型颗粒、方形颗粒和柱形颗粒以相同比例生成, 每个颗粒都遵循正态分布规则。共生成 900 000 个颗粒<sup>[24]</sup>。

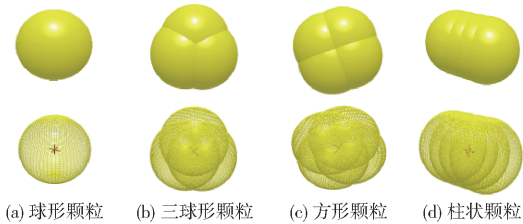


图 9 土壤颗粒离散元模型

Fig. 9 Discrete element simulation models of soil particles

为模拟碎土直齿在工作时对土壤颗粒的碎土过程, 土壤颗粒基础模型采用 Hertz - Mindlin, 附加模型选用 bonding。并对 bonding 进行设置, 开始时间为 0.1 s, 其他参数如表 2 所示<sup>[25]</sup>。

表 2 bonding 键参数设置

| Tab.2 Bonding key parameters setting        |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 参数                                          | 数值    |
| 单位面积法向刚度/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 4 000 |
| 单位面积切向刚度/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 5 500 |
| 最大切向应力/Pa                                   | 9 000 |
| 最大法向应力/Pa                                   | 4 000 |
| 粘结颗粒粒径/mm                                   | 14    |

3.1.3 其他参数确定

设置土壤-土壤、土壤-碎土直齿的接触模型参数如表 3 所示。

设置土槽尺寸为  $1\,500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ , 设置颗粒工厂尺寸为  $1\,400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ , 以速度  $1 \times 10^7$  个/s 生成土壤颗粒, 总量 900 000 个, 在 0.1 s

表 3 离散元模型基本参数

| 参数             | 数值   |
|----------------|------|
| 土壤-土壤间碰撞恢复系数   | 0.6  |
| 土壤-土壤间动摩擦因数    | 0.4  |
| 土壤-土壤间静摩擦因数    | 0.6  |
| 土壤-碎土直齿间碰撞恢复系数 | 0.6  |
| 土壤-碎土直齿间动摩擦因数  | 0.05 |
| 土壤-碎土直齿间静摩擦因数  | 0.6  |

内生成完成。

3.2 仿真过程与评价指标

3.2.1 仿真过程

仿真开始时,碎土直齿水平置于土槽上方准备作业,如图 10 所示。仿真过程中,碎土直齿沿  $y$  轴负方向以速度 1.26 m/s 向前运动,同时绕着简化的碎土轴以转速 274 r/min 绕轴旋转,仿真时间为 1 s,每 0.05 s 记录一次数据。

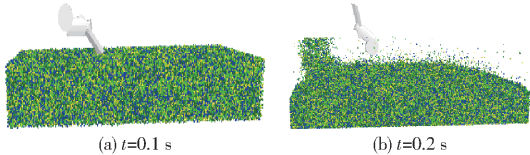


图 10 EDEM 仿真过程

Fig. 10 Virtual simulation process of EDEM

3.2.2 仿真数据分析

在后处理界面,可以得到随着时间变化的粘结键数据,如图 11 所示。

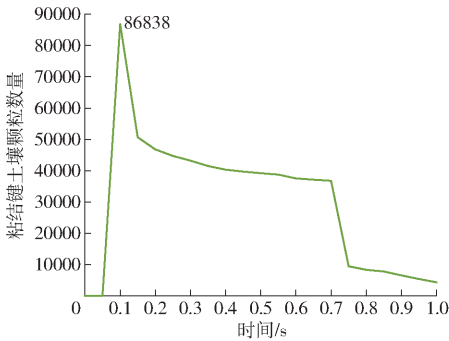


图 11 粘结键土壤颗粒数量与时间关系曲线

Fig. 11 Relationship between number of bond soil articles and time

从 0.1 s 开始生成粘结键,共生成 86 838 个粘结键。从 0.1 s 起,碎土直齿开始向前运动的同时也开始绕碎土辊轴旋转切削土壤,并将土壤向后抛撒。切削土壤时,粘结键的断裂数量较多,变化较大,向后抛撒而断裂的粘结键变化幅度较小。仿真时间 1 s 内,共计断裂 82 496 个粘结键<sup>[26]</sup>。

土壤破碎率计算公式为

$$P = \frac{D_1}{D} \times 100\% \tag{24}$$

式中  $P$ ——土壤破碎率,%

$D_1$ ——作业区域断裂粘结键土壤颗粒数

$D$ ——作业区域土壤颗粒总数

根据式(24)计算,可求到仿真作业的碎土率约为 95%,高于国家规定碎土率,且田间试验中碎土率是指小于 5 cm 土块质量占土壤总质量的比值,考虑到实际误差,初步证实了碎土部件设计的合理性。

3.3 仿真试验结果与分析

3.3.1 仿真方案与结果

采用 Box - Behnken 中心组合设计原理设计试验,根据 JB/T 10295—2001 的相关规定,本试验以碎土率作为响应指标;选择碎土直齿末端倾角、碎土直齿边长和作业速度作为试验因素<sup>[27]</sup>。根据试验设计的参数分别建模并仿真,对各影响因素进行分析优化,使响应最大,获得作业效果较为合适的参数组合。实际工作过程中机组前进速度为 1.2 ~ 2 m/s,为保证试验的可靠性和全面性,设计试验行进速度范围为 1.1 ~ 2.1 m/s。试验因素编码如表 4 所示,响应面设计试验方案及结果如表 5 所示。

表 4 仿真试验因素编码

Tab. 4 Coding of simulation test factors

| 编码 | 因素               |               |                               |
|----|------------------|---------------|-------------------------------|
|    | 碎土直齿末端<br>倾角/(°) | 碎土直齿边长/<br>mm | 行进速度/<br>(m·s <sup>-1</sup> ) |
| -1 | 27               | 20            | 1.1                           |
| 0  | 32               | 25            | 1.6                           |
| 1  | 37               | 30            | 2.1                           |

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对各因素进行拟合<sup>[28]</sup>,进行碎土率与碎土直齿末端倾角、碎土直齿边长、行进速度之间关系多种拟合模型的方差分析。建立碎土率回归方程并检验显著性。通过对试验数据的分析和拟合,碎土率方差分析如表 6 所示, $A$ 、 $B$ 、 $C$  为编码值。得到碎土率的二次多项式回归模型为

$$Y = 97.39 + 3.31A + 2.64B - 0.58C - 2.42AB + 1.52AC - 0.52BC - 7.77A^2 - 1.54B^2 - 6.16C^2 \tag{25}$$

由表 6 可知,回归模型的  $P$  小于 0.000 1,表明回归模型显著;失拟项  $P > 0.05$ ,说明失拟值不显著,回归模型拟合程度高<sup>[29]</sup>。试验因素对碎土率的影响从大到小依次为碎土直齿末端倾角、碎土直齿边长、行进速度。该模型的决定系数  $R^2$  与校正决定系数分别为 0.996 5 和 0.992 1,均接近于 1;变异系数和精度分别为 0.62% 和 44.843,表明该拟合模型可靠性较高。

表 5 试验方案与结果

Tab.5 Test plan and experimental results

| 序号 | 因素               |               |                               | 碎土率/<br>% |
|----|------------------|---------------|-------------------------------|-----------|
|    | 碎土直齿末端<br>倾角/(°) | 碎土直齿边<br>长/mm | 行进速度/<br>(m·s <sup>-1</sup> ) |           |
| 1  | 27               | 20            | 1.60                          | 80.12     |
| 2  | 37               | 20            | 1.60                          | 90.89     |
| 3  | 27               | 30            | 1.60                          | 90.12     |
| 4  | 37               | 30            | 1.60                          | 91.20     |
| 5  | 27               | 25            | 1.10                          | 81.95     |
| 6  | 37               | 25            | 1.10                          | 86.23     |
| 7  | 27               | 25            | 2.10                          | 77.65     |
| 8  | 37               | 25            | 2.10                          | 88.02     |
| 9  | 32               | 20            | 1.10                          | 87.02     |
| 10 | 32               | 30            | 1.10                          | 93.45     |
| 11 | 32               | 20            | 2.10                          | 86.98     |
| 12 | 32               | 30            | 2.10                          | 91.35     |
| 13 | 32               | 25            | 1.60                          | 96.98     |
| 14 | 32               | 25            | 1.60                          | 97.65     |
| 15 | 32               | 25            | 1.60                          | 97.62     |
| 16 | 32               | 25            | 1.60                          | 98.03     |
| 17 | 32               | 25            | 1.60                          | 96.69     |

表 6 碎土率方差分析

Tab.6 Variance analysis of soil fragmentation rate

| 变异来源                  | 平方和    | 自由度 | 均方     | <i>F</i> | <i>P</i>     |
|-----------------------|--------|-----|--------|----------|--------------|
| 模型                    | 639.15 | 9   | 71.02  | 224.41   | <0.000 1 *** |
| <i>A</i>              | 87.78  | 1   | 87.78  | 277.38   | <0.000 1 *** |
| <i>B</i>              | 55.70  | 1   | 55.70  | 176.02   | <0.000 1 *** |
| <i>C</i>              | 2.70   | 1   | 2.70   | 8.54     | 0.022 3 **   |
| <i>AB</i>             | 23.47  | 1   | 23.47  | 74.18    | <0.000 1 *** |
| <i>AC</i>             | 9.27   | 1   | 9.27   | 29.30    | 0.001 0 ***  |
| <i>BC</i>             | 1.06   | 1   | 1.06   | 3.35     | 0.109 8      |
| <i>A</i> <sup>2</sup> | 254.50 | 1   | 254.50 | 804.19   | <0.000 1 *** |
| <i>B</i> <sup>2</sup> | 9.95   | 1   | 9.95   | 31.43    | 0.000 8 ***  |
| <i>C</i> <sup>2</sup> | 159.62 | 1   | 159.62 | 504.37   | <0.000 1 *** |
| 残差                    | 2.22   | 7   | 0.32   |          |              |
| 失拟差                   | 1.03   | 3   | 0.34   | 1.15     | 0.430 3      |
| 误差                    | 1.19   | 4   | 0.30   |          |              |
| 总和                    | 641.37 | 16  |        |          |              |

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

3.3.2 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行处理,得出碎土直齿末端倾角、碎土直齿边长、行进速度之间的显著交互作用对碎土率影响的响应曲面,如图 12 所示。

如图 12a 所示,为碎土直齿末端倾角与碎土直齿边长对碎土率的响应曲面。最优碎土率在 95% ~ 100% 之间;碎土直齿末端倾角一定时,碎土率随着碎土直齿边长的增加而逐渐增加;碎土直齿边长一

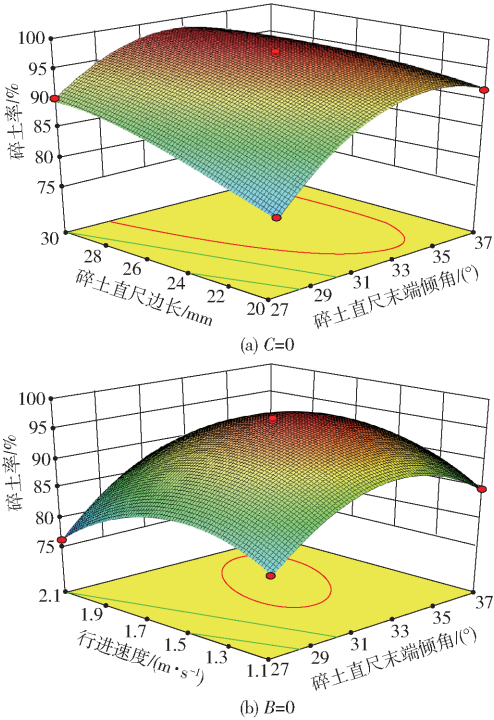


图 12 试验因素对指标影响的响应曲面  
Fig.12 Response surfaces of influence of test factors on index

定时,碎土直齿末端倾角在 27° ~ 37° 的变化范围内,呈先增大后减小的趋势。

如图 12b 所示,为行进速度和碎土直齿末端倾角对碎土率的响应曲面。行进速度的变化对碎土率的影响较大,为影响碎土率的主要影响因素。当碎土直齿末端倾角一定时,行进速度为 1.0 ~ 2.1 m/s 时,碎土率呈先增加后减小的趋势,且总体趋势下降。行进速度最优解为 1.5 ~ 1.7 m/s。

运用 Design-Expert 8.0.6 软件,以碎土率最大为条件,求解回归方程最优参数为碎土直齿末端倾角 33°、碎土直齿边长 26 mm、行进速度 1.7 m/s,在一定变化范围内,碎土直齿末端倾角越大、前进速度越慢、碎土直齿边长越长碎土效果越好,但所受阻力也会越大。

如图 13a 所示,刚入土时,只有碎土直齿末端受力,受力最大为 134 N。图 13b 为碎土直齿插入土壤时碎土直齿受力情况,受力最大为 677 N,最大受力位置为直齿两侧面。由图 13 可得,受力较为均匀合理。对离散元仿真结果进行验证,土壤破碎率为 98.54%,碎土率变化趋势与优化结果基本一致。

4 田间试验

4.1 试验条件准备

选取地块长度为 200 m,宽度为 100 m。试验地形地势平坦。前茬作物为大豆,土壤类型属于黑黏土,土壤含水率为 16%,地块各处情况基本相同。

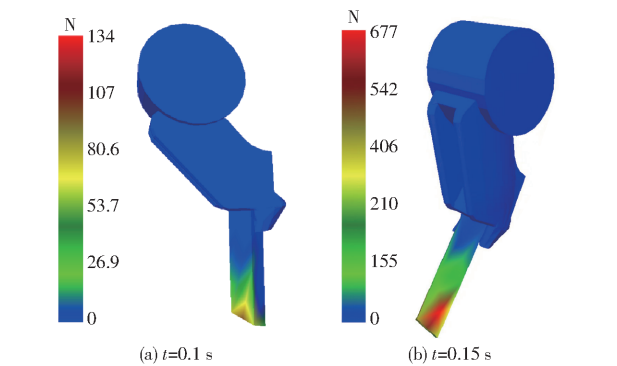


图 13 碎土直齿受力图

Fig. 13 Force diagrams of broken soil ruler

试验设备主要包括电测仪器、皮尺、钢板尺、标杆、秒表、取土用金属框、土壤坚实度仪、取土钻、土壤盒、秤等。

4.2 试验方法

2022 年 10 月 18 日在东北农业大学向阳农场，进行整地联合作业机碎土作业性能试验。碎土联合整地机以作业速度 5.7 km/h 在试验田里进行作业，配套动力为东方红-75/802 型拖拉机，作业现场如图 14 所示。根据实际情况将碎土性能、耕深及耕深稳定性系数等作为试验指标。为验证所设计的碎土联合整地机作业的能耗，增加测定了碎土辊功率消耗。碎土辊功率消耗计算式为

$$N = \frac{M_1 n_1}{716.2}$$
 (26)

式中  $N$ ——碎土辊消耗功率,kW  
 $M_1$ ——整地机动力输入轴平均扭矩,N·m  
 $n_1$ ——整地机输入轴平均转速,r/min



图 14 田间验证试验

Fig. 14 Field validation test

4.2.1 碎土性能测定

碎土性能以各级土块质量占总量的百分比表示。测定方法,在已耕地上用 33 cm×33 cm×10 cm 取土框取样,按主块最长边分为小于 5 cm、大于 5 cm 二级。整地前在测区内画定 5 点,整地后在相应点再测定 5 点,分别算出各级土壤质量所占总质量的百分比,并以小于 5 cm 的土块质量所占总质量的百分比为碎土系数。

如表 7 所示,点号 1~5 为整地前数据,点号 6~

10 为整地后数据。整地前大于 5 cm 土块质量占土壤总质量的 63.15%,小于 5 cm 土块质量占总质量的 36.85%。整地后大于 5 cm 土块质量占土壤总质量只有 1.55%,小于 5 cm 土块质量占土壤总质量达 98.45%。试验表明整地机碎土性能好。

表 7 碎土性能试验结果

| Tab. 7 Experimental results of broken soil properties |                |                |         |            |
|-------------------------------------------------------|----------------|----------------|---------|------------|
| 点号                                                    | 5 cm 以上土块质量/kg | 5 cm 以下土块质量/kg | 土壤质量/kg | 碎土程<br>度/% |
| 1                                                     | 7.05           | 6.00           | 13.05   | 40.4       |
| 2                                                     | 6.75           | 5.80           | 12.55   |            |
| 3                                                     | 9.50           | 4.80           | 14.30   |            |
| 4                                                     | 8.55           | 5.80           | 14.35   |            |
| 5                                                     | 11.50          | 5.06           | 13.73   |            |
| 平均                                                    | 8.67           | 5.49           | 13.59   | 98.45      |
| 6                                                     | 0              | 12.50          | 12.50   |            |
| 7                                                     | 0.3            | 9.00           | 9.30    |            |
| 8                                                     | 0.4            | 8.40           | 8.80    |            |
| 9                                                     | 0              | 10.40          | 10.40   |            |
| 10                                                    | 0.1            | 10.35          | 10.45   |            |
| 平均                                                    | 0.16           | 10.13          | 10.29   |            |

4.2.2 耕深及耕深稳定性测定

沿机组前进方向每隔 2 m 左右测一点,每行程总数不小于 15 点,结果如表 8 所示。

表 8 耕深测量结果

| Tab. 8 Plough depth record |         |         |         |       | cm |
|----------------------------|---------|---------|---------|-------|----|
| 序号                         | 行程 1 耕深 | 行程 2 耕深 | 行程 3 耕深 | 平均耕深  |    |
| 1                          | 15.0    | 15.0    | 14.50   | 14.40 |    |
| 2                          | 14.5    | 14.0    | 14.25   |       |    |
| 3                          | 14.0    | 14.0    | 14.00   |       |    |
| 4                          | 15.0    | 14.0    | 14.50   |       |    |
| 5                          | 14.5    | 14.0    | 14.25   |       |    |
| 6                          | 14.5    | 14.0    | 14.25   |       |    |
| 7                          | 14.0    | 14.0    | 14.00   |       |    |
| 8                          | 15.0    | 13.5    | 14.25   |       |    |
| 9                          | 14.5    | 15.0    | 14.75   |       |    |
| 10                         | 14.5    | 15.0    | 14.75   |       |    |
| 11                         | 14.0    | 14.0    | 14.00   |       |    |
| 12                         | 15.0    | 13.5    | 14.25   |       |    |
| 13                         | 14.5    | 14.0    | 14.75   |       |    |
| 14                         | 14.0    | 14.0    | 14.50   |       |    |
| 15                         | 15.0    | 15.0    | 15.00   |       |    |

计算得耕深标准差为 0.53 cm,耕深变异系数为 3.6%。

4.3 碎土辊能耗测定

首先测出机组前进速度、平均耕深及拖拉机动力输出轴转速,然后测出动力输出轴扭矩,结果见表 9。

表 9 碎土辊功率消耗

Tab.9 Power consumption of earth crusher roller

| 项目     | 平均<br>耕深/<br>cm | 机组速度/<br>( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) | 动力输出<br>轴转速/<br>( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 输出轴<br>扭矩/<br>( $\text{N}\cdot\text{m}$ ) | 碎土辊消<br>耗功率/<br>kW |
|--------|-----------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| 第 1 行程 | 14.8            | 5.7                                        | 474.26                                             | 39.07                                     | 19.03              |
| 第 2 行程 | 14.2            | 5.7                                        | 498.26                                             | 38.39                                     | 19.45              |
| 平均值    | 14.5            | 5.7                                        | 483.76                                             | 38.73                                     | 19.24              |

5 结论

(1) 基于 55 kW 的动力条件设计了一种整地联合作业机。并对关键部件碎土辊的结构组成、运动情况及作用于土块总阻力进行了分析,利用达兰贝

尔原理,计算得抛扔阻力方程,并分析碎土辊工作所需功率。

(2) 将碎土辊进行简化,对碎土辊上碎土直齿单体进行了仿真试验,建立了部件-土壤仿真模型,以碎土直齿末端倾角、碎土直齿边长和机器前进速度为试验因素,以碎土率为试验指标,建立了回归数学模型,得出了优化参数组合为碎土直齿末端倾角  $32^\circ$ 、碎土直齿边长 25 mm、机具前进速度 1.6 m/s。将优化结果进行仿真分析,观察工作过程中受力情况,土壤破碎率为 98%,与优化结果趋势一致。

(3) 田间试验表明:碎土整地联合作业机工作后,碎土率为 98.45%、平均耕深为 14.5 cm、碎土辊消耗功率率为 19.24 kW,具有良好的作业效果。

参 考 文 献

[1] 高焕文,李问盈,李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报,2003,19(3):1-4.  
GAO Huanwen, LI Wenying, LI Hongwen, et al. Conservation tillage technology with Chinese characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 1-4. (in Chinese)

[2] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.  
ZHOU Hu, LÜ Yizhong, YANG Zhichen, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1973-1979. (in Chinese)

[3] 田慎重,宁堂原,王瑜,等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(2):373-378.  
TIAN Shenzhong, NING Tangyuan, WANG Yu, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 373-378. (in Chinese)

[4] 谭宏杰. 1GZL-140(2)耕整联合作业机的研究[D]. 长春:吉林大学,2009.  
TAN Hongjie. Study on the 1GZL-140(2) rototilling-tillage combine[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)

[5] 丛福滋. 我国耕整地机械化技术研究[J]. 农业科技与装备,2010(2):12-14.

[6] 吴崇友,张敏,金诚谦,等. 2BYS-6 型水田中耕除草机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):51-54.  
WU Chongyou, ZHANG Min, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of 2BYS-6 type paddy weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 51-54. (in Chinese)

[7] DU Jun, HENG Yifan, ZHENG Kan, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220: 105349.

[8] ZHANG Yifu, LIU Jian, YUAN Wei, et al. Multiple leveling for paddy field preparation with double axis rotary tillage accelerates rice growth and economic benefits[J]. Agriculture, 2021, 11(12): 1223.

[9] CHHOKAR R, SHARMA R, KUMAR N, et al. Advancing sowing time and conservation tillage-the climate-resilient approach to enhance the productivity and profitability of wheat[J]. International Journal of Plant Production, 2022, 17(1): 121-131.

[10] 郑侃,何进,李洪文,等. 反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(8):61-71.  
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 61-71. (in Chinese)

[11] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19.  
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. (in Chinese)

[12] 解宏图,杜海旺,王影,等. 玉米秸秆集行全覆盖还田苗带条耕保护性耕作技术模式[J]. 农业工程,2020,10(3):24-26.  
XIE Hongtu, DU Haiwang, WANG Ying, et al. Protective cultivation technology model of strip tillage with full coverage of corn straw[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(3): 24-26. (in Chinese)

[13] 王晨平,王海礁. 1GZL-350 深松联合整地机结构及安装调试与维护[J]. 现代化农业,2022(10):94-96.

[14] LIU Hongjun, YAN Wei, JI Yao, et al. Working performance of the low-adhesion and anti-slip bionic press roller in the rice-wheat rotation area[J]. Agriculture, 2022, 12(6): 750-757.

[15] 贾洪雷,陈忠亮,刘昭辰,等. 耕整联合作业工艺及配套机具的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(5):40-43.  
JIA Honglei, CHEN Zhongliang, LIU Zhaochen, et al. Study on technology and matching machine for rototilling tillage combined operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 40-43. (in Chinese)

[16] 向发洪,王黎明,刘传兵,等. 武陵山区玉米高产栽培技术[J]. 现代农业科技,2010(1):72-77.

[17] 何进,李洪文,高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):62-67.

- HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 62–67. (in Chinese)
- [18] MAKAROV S. Investigation of kinematic parameters of the rotary working body of a universal rotary cultivator[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 979(1): 58–63.
- [19] 许春林,李连豪,赵大勇,等. 北方大型联合整地机设计与试验[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014:37–39.
- [20] 李守仁,林金天. 驱动式土壤耕作机械的理论与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1997:25–27.
- [21] LISICH M, SHABANOV M, MIRZEHANOV R, et al. Study of the power parameters of the working bodies of tillage machines[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 868(1): 7–15.
- [22] VIVEK R, MUKESH J, HEMANT P, et al. Mathematical modelling for power requirement of power take-off of rotary tiller[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2020,39(6): 46–55.
- [23] 吕金庆,王英博,孙贺,等. 联合整地机. CN205755342U[P]. 2016–12–07.
- [24] CHENG Jian, ZHENG Kan, XIA Junfang, et al. Analysis of adhesion between wet clay soil and rotary tillage part in paddy field based on discrete element method[J]. Processes, 2021, 9(5): 845–861.
- [25] 王英博. 驱动式马铃薯中耕机关键部件设计与碎土效果试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.  
WANG Yingbo. Soil-broken research experiment and design of key components of driving-type potato cultivator[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 王金武,张成亮,许春林,等. 联合整地机平整部件参数优化[J]. 农业机械学报,2013,44(2): 34–37, 11.  
WANG Jinwu, ZHANG Chengliang, XU Chunlin, et al. Parameters optimization on flattening component of combined cultivating implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 34–37, 11. (in Chinese)
- [28] 海洪,汪坤,金文英,等. Box–Behnken 响应面法优化超声波提取蚕沙中叶绿素的工艺研究[J]. 食品工业科技,2009, 30(3): 207–209, 211.  
HAI Hong, WANG Kun, JIN Wenying, et al. Optimization of ultrasonic extraction technology of chorophyll from silkworm faeces by RSM of Box – Behnken[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(3): 207–209, 211. (in Chinese)
- [29] 陈超鹏,全伟,吴明亮,等. 基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(4): 433–439.  
CHEN Chaopeng, QUAN Wei, WU Mingliang, et al. Parameter optimization of vertical soil-filling hole-forming parts for rapeseed transplantation based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(4): 433–439. (in Chinese)