doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.018

马铃薯全面耕耘机鼠笼压辊式镇压装置设计与试验

吕伊宁[1]　赵治明[2]　竹筱歆[2]　刘金妮[2]

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对传统整地模式土壤扰动强度过大、犁底层加厚及风蚀水蚀加剧等问题,本文开展了马铃薯宽幅全面耕耘机镇压装置优化设计与性能分析,对马铃薯播种前保护性耕作整地作业中的土壤破碎与平整处理工艺进行了研究。采用理论分析与数值模拟相结合的方法,通过建立镇压辊压条-土壤接触力学模型,解析了装置自重与土壤作用机理对作业效果的影响规律,确定了镇压辊关键结构参数与工作参数的优化区间。基于 EDEM 离散元法构建了镇压装置-土壤互作仿真模型,采用三因素五水平二次正交旋转回归试验设计,以作业速度、镇压辊压条直径和压条旋转角为试验因素,以碎土率和土壤平整度为评价指标开展仿真试验,结果为碎土率为 86.32%,土壤平整度为 21.55 mm。田间试验结果表明,优化后镇压装置作业性能显著提升,碎土率达到 85.31%,较传统设备提升 12.45%,地表平整度为 25.2 mm,较 ZY-180 型镇压器分别提高 2.09 个百分点、6.9 mm。设计的鼠笼式压辊镇压装置不仅与整机具有良好的匹配性,其作业质量可满足马铃薯田整地农艺技术要求。

关键词: 马铃薯; 保护性耕作; 全面耕耘机; 镇压装置; 离散元法

中图分类号: S222.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0194-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Squirrel Cage Pressure Roller Type Suppression Device for Potato Full-scale Cultivator

LÜ Yining[1]　ZHAO Zhiming[2]　ZHU Xiaoxin[2]　LIU Jinni[2]

(1. *College of Biosystems Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*
2. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of excessive soil disturbance, thickened plow pan, and intensified wind/water erosion associated with conventional land preparation methods. It focused on the optimized design and performance analysis of a compaction device for a wide-width comprehensive tillage machine used in potato cultivation, systematically investigating soil fragmentation and leveling techniques during pre-planting land preparation. Combining theoretical analysis with numerical simulation, a contact mechanics model between the roller bars and soil was established to analyze the influence of device weight and soil interaction mechanisms on operational effectiveness. This approach identified optimal ranges for key structural and operational parameters of the compaction roller. An EDEM-based discrete element model of the soil-compaction device interaction was developed. A three-factor, five-level quadratic orthogonal rotation regression test was conducted, considering operational speed, roller bar diameter, and bar rotation angle as test factors, with soil fragmentation rate and surface leveling as evaluation metrics. Simulation results demonstrated soil fragmentation rate of 86.32% and leveling precision of 21.55 mm. Field validation tests confirmed significant performance improvements: the optimized device achieved soil fragmentation rate of 85.31% (2.09 percentage points higher than that of conventional equipment) and surface leveling precision of 25.2 mm (6.9 mm improvement over that of the ZY-180 roller). Experimental data verified that the designed cage-type roller not only integrated well with the host machine but also met agronomic requirements for potato field preparation.

Key words: potato; conservation tillage; full-scale cultivator; suppressor device; discrete element method

收稿日期: 2025-04-21　修回日期: 2025-08-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000901)

作者简介: 吕伊宁(2001—),女,博士生,主要从事机械设计理论及智能农机装备研究,E-mail: 455082014@qq.com

通信作者: 竹筱歆(1992—),女,工程师,博士生,主要从事机械设计理论及马铃薯机械化技术装备研究,E-mail: neau_zxx@163.com

0　引言

马铃薯是我国第四大粮食作物，种植规模位居全球首位。播前整地质量直接影响马铃薯出苗率及后续生长发育[1-2]。研究表明，免耕结合稻草覆盖等保护性耕作模式可显著提升块茎成熟均匀度及单产水平，进而增强经济效益[3-4]。

全面耕耘机是保护性耕作的关键配套装备，主要用于未耕软茬地或经深松、深翻后土壤精细整地作业[5]。其作业后能显著提升土壤破碎度与地表平整度，形成细碎均匀的耕层结构，为马铃薯播种提供理想的种床条件，进而优化播种质量与出苗率[6]。镇压装置作为核心部件，可进一步细化土壤颗粒并压实表层，显著调控土壤物理特性，包括含水率、硬度及温度等关键参数。适度的镇压作用能增强土壤硬度，改善含水率保持能力，并稳定地温环境，从而为种子萌发及幼苗生长创造适宜条件[7-8]。

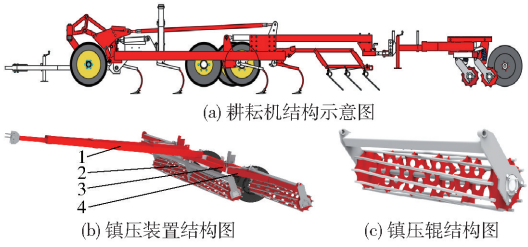
国外对耕耘机研究较早且广泛应用，机具可实现切碎-混合-镇压一体化作业、规模化作业与多功能整合，镇压装置设计兼顾碎土、平整及土壤物理性质调控（含水率、硬度等），技术体系成熟。美国 John Deere 公司 2310 型耕耘机宽幅可达 13.95 m，可调节土壤切碎程度，镇压装置采用方铁螺旋输送器式镇压辊，适用于玉米、高粱等硬茬处理，作业效率和土壤适应性显著领先[9]。国内普遍采用免耕、稻草覆盖等保护性耕作方式，可提升土壤蓄水保墒能力和出苗均匀性。由于对传统耕作模式依赖性较高，国内仍需多机配合，功能碎片化问题突出，宽幅全面耕耘机近乎空白。目前东北等主产区的整地机具研发取得进展，JIANG 等[10]设计的油菜联合整地机可一次性完成多项作业，其螺旋式镇压辊可实现土壤逐级输送至种沟两侧，土地平整度较高，但作业效率和幅宽与发达国家仍存在差距[11]。吕金庆等[12]设计的驱动式马铃薯整地机工作幅宽为 2 m，采用弧齿式镇压装置，有效提高了东北地区马铃薯田碎土率和土壤平整度。

针对我国东北地区马铃薯保护性耕作整地农艺要求，本文设计一款幅宽 7.4 m 的马铃薯全面耕耘机，对全面耕耘机镇压装置开展优化设计。通过解析镇压辊压条-土块接触点受力特性及镇压辊质量分布规律，确定镇压辊半径、压条半径及压条数量等关键参数。结合土壤动力学特性和马铃薯种植农艺要求，建立镇压装置作业参数优化模型。在理论分析基础上，采用 EDEM 离散元仿真构建镇压装置-土壤互作模型，获取最优作业参数组合，并进行田间验证试验。以期为改善耕作质量、减少土壤侵蚀提供可靠的技术支撑。

1　材料与方法

1.1　整机结构与工作原理

耕耘机整机及关键部件结构如图 1 所示，主要由耕耘铲部件、弹齿部件和镇压装置 3 部分构成。整机采用前后分段式设计，通过悬挂连接实现联合作业或独立作业模式。前端配置双翼平型碎土铲与双尖箭型松土铲，分别实现土壤破碎与疏松功能；中部为可调深度的弹齿耙；末端配备镇压装置，与碎土铲协同完成土壤细碎和镇压作业。作为核心部件，镇压装置对经耕耘铲和弹齿耙处理后的土壤进行二次细碎与平整，有效提升土壤保墒能力。



(a) 耕耘机结构示意图

(b) 镇压装置结构图　　(c) 镇压辊结构图

图 1　耕耘机整体及关键部件结构

Fig. 1　Overall and key component structure diagrams of cultivator

1. 牵引装置　2. 镇压辊　3. 中间架　4. 侧边架

针对东北地区粘重板结土壤特性，设计了鼠笼压辊式镇压装置，其设计需满足：低能耗作业、宽幅工作、平整度小于等于 25 mm 和碎土率大于等于 85%。如图 1b 所示，镇压装置由中间架、牵引架、侧边架和镇压辊等关键部件组成。镇压装置在自身重力作用下平整表层土壤，随着镇压辊旋转，对土壤进行进一步细碎，既起到细碎土壤作用，又减少扬尘和土壤水分流失。全面耕耘机在运输时：机器折叠宽度为 3 800 mm，便于机器运输。工作时：拖拉机采用三点悬挂带动耕耘机组前进，松土铲对土壤进行松动，减少碎土阻力提高碎土能力，然后碎土铲对土壤进行第 1 步破碎；随着耕耘机前进，弹齿能够清理土壤中的杂草，同时起到一定的碎土整平效果；最后耕耘机镇压装置对土壤进行镇压整平，完成对相对疏松的土壤进一步细碎作业，实现土壤疏松、地表平整、无杂草的播前土壤状态。设计的马铃薯宽幅全面耕耘机主要参数如表 1 所示。

1.2　镇压辊配置与理论分析

镇压辊自身重力会直接影响镇压后对土块破碎以及土壤平整度，在同等重量条件下，镇压辊所受阻力会随着镇压辊直径和宽度增大而减小[13]。但镇压辊直径和宽度增加，不仅会增大重量和成本，同时镇压装置稳定性也难以保证。查阅《农业机械

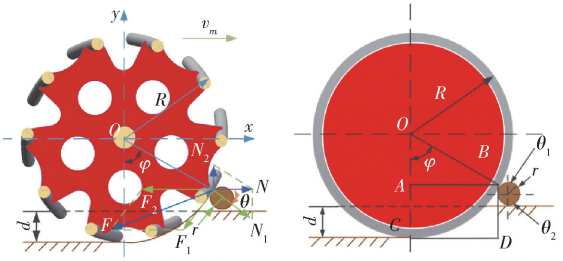
表 1 全面耕耘机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of full-scale cultivator

参数	数值
整机质量/kg	6 388
作业幅宽/mm	7 400
作业速度/(km·h^{-1})	6 ~ 12
生产效率/(hm^2·h^{-1})	4 ~ 8
耕耘铲深度 h_2/mm	80 ~ 150
弹齿深度 h_3/mm	50 ~ 100
镇压深度 h_4/mm	50 ~ 80

手册》可知,压实表层土壤镇压辊直径一般选 160 ~ 500 mm,单个承压力为 0.05 ~ 0.20 MPa。在工作速度 6.4 km/h 下,普通光滑圆柱镇压辊工作产生振动和噪声分别是空心曲杆镇压辊 1.2 倍和 3 倍,空心直杆镇压辊工作产生的振动和噪声分别是空心曲杆镇压辊 2.8 倍和 4.3 倍[14-16]。综合考虑到宽幅 7.4 m 的耕耘机对机具稳定性和噪声的要求,设计一种鼠笼压辊式镇压装置,镇压深度为 50 ~ 80 mm,单个镇压辊长度为 1 972 mm。4 个镇压辊以中心对称安装。

鼠笼压辊式镇压装置设计的关键影响因素为镇压辊直径和镇压辊压条数量。工作过程中,镇压辊压条高速旋转,对耕耘机浅翻后的土壤进行细碎和进一步压实。合理的镇压辊直径可有效压碎土块并进行平整,是保证镇压效果的关键因素;直径过小会使土块被推到镇压辊前端造成堵塞,工作阻力逐渐增大,影响镇压辊工作效果。因此对镇压辊工作过程进行分析,确定镇压辊直径。镇压辊压条受力情况如图 2a 所示,在镇压辊压条与土块接触时,由镇压辊压条与土块接触点受力可得



(a) 镇压辊压条受力分析 (b) 镇压辊压条尺寸分析

图 2 镇压辊压条与土块接触点分析

Fig. 2 Force analysis of contact point between suppression roller and soil block

$$\begin{cases} N_1\sin\varphi - F_1\cos\varphi - F_2 = 0 \\ N_2 - N_1\cos\varphi - F_1\sin\varphi = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} F_1 = \mu_1 N_1 \\ F_2 = \mu_2 N_2 \\ \varphi = \dfrac{\pi}{2} - \theta \end{cases} \tag{2}$$

式中 N_1——镇压辊压条对土块作用力,N

N_2——土壤对土块作用力,N

F_1——镇压辊压条与土块之间摩擦力,N

F_2——土块与土壤之间摩擦力,N

φ——夹持角,(°)

μ_1——镇压辊与土块之间摩擦因数

μ_2——土块与土壤之间摩擦因数

θ——镇压辊压条对土块作用力和水平夹角,(°)

整理式(1)、(2)可得

$$\tan\varphi = \frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1\mu_2} \tag{3}$$

由图 2b 可知

$$\cos\varphi = \frac{R + d + r(1 + \cos(\theta_1 + \theta_2))}{R}$$

$$\sin\varphi = \frac{\sqrt{R^2 - [R - d + r(1 + \cos(\theta_1 + \theta_2))]^2}}{R} \tag{4}$$

$$l_{AC} = l_{BD} = d + r + r\cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{5}$$

式中 d——镇压辊压实土壤深度,mm

R——镇压辊半径,mm

r——土块半径,mm

θ_1——镇压辊与土块之间的摩擦角,(°)

θ_2——土块与土壤之间的摩擦角,(°)

镇压辊压实土壤深度 d 设计为 50 ~ 80 mm,当土块半径取最大值时,镇压辊半径取最小值。可得

$$R_{\min} = 2\left[d + r_{\max}(1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)) + \frac{d - \cos(\theta_1 + \theta_2)(1 - \mu_1\mu_2)}{\mu_1 + \mu_2}\right] \tag{6}$$

式中 $R_{\min}$——镇压辊半径最小值,mm

$r_{\max}$——最大土块半径,mm

通过计算分析得到镇压辊半径与土块半径、压实土壤深度、摩擦角和摩擦因数之间的关系。经过耕耘机耕耘铲和弹齿细碎后,表层土壤多为小土块和中土块,小土块尺寸一般小于 40 mm,中土块尺寸为 40 ~ 80 mm。所以,取 $r_{\max}$ = 80 mm,初步理论计算,镇压辊直径应为 350 mm。基于保护性耕作农艺要求,镇压装置需在确保表层土壤细碎与适度紧实的同时,避免对深层土壤结构造成破坏。研究表明,轻型小直径(160 ~ 500 mm)镇压装置可有效满足作业效率与表层土壤作用效果[17-18],选取镇压辊直径为 350 mm,既能保证足够的镇压强度,又可最大限度降低对土壤结构的扰动。

1.3 镇压装置质量与压条设计

镇压装置工作时通过自身重量对土壤进行压实平整,镇压深度要求为 50 ~ 80 mm。镇压装置总质量为

$$M = M_1 + M_2 \tag{7}$$

其中

$$M_1 = M_3 + \rho n \pi d_s^2 L_p \tag{8}$$

$$L_p = \frac{L}{\cos\alpha} \tag{9}$$

式中　M——镇压装置总质量，kg

M_1——镇压辊质量，kg

M_2——镇压装置机架质量，kg

M_3——镇压辊幅板和镇压辊轴质量，kg

d_s——镇压辊压条半径，mm

n——镇压辊压条数量

ρ——镇压辊材料密度，kg/m^3

L_p——镇压辊压条长度，mm

L——单个镇压辊宽度，mm

α——镇压辊压条扭转角度，(°)

由整机尺寸可知，镇压装置工作幅宽为 7.4 m，4 个镇压辊对称安装，单个镇压辊宽度为 1.85 m，镇压辊压条长度与压条扭转角度成正比，镇压辊压条半径与压条数量成反比。当镇压辊压条半径增大时，镇压辊压条数量相应减少，会导致相邻镇压辊压条间距增大，影响镇压效果与质量。镇压辊压条数量选取多为偶数[12]，计算得压条直径为 18.6 ~ 22.0 mm。

2　仿真与试验

2.1　仿真方案

利用 Solidworks 对宽幅 7.4 m 全面耕耘机镇压装置进行等比例建模，为提高仿真速度，选取单个镇压辊 0.4 倍长度作为仿真对象，将实体模型导入 EDEM 软件中。选取镇压辊材料为 65Mn 钢，其泊松比为 0.3，剪切模量为 7.96×10^{10} Pa，密度为 7 800 kg/m^3[19-20]。

针对土壤颗粒复杂性，为保证土壤形状要求，并兼顾计算精度，将土壤按尺寸简化成球形颗粒、三球形颗粒、方形颗粒和柱形颗粒 4 种，如图 3a 所示。在 EDEM 中对 4 种颗粒进行设定，单个球形半径设为 5 mm，土壤颗粒尺寸采用正态分布，填充数目比为 3∶2∶3∶2。土壤泊松比为 0.34，剪切模量为 1×10^6 Pa，密度为 2 650 kg/m^3。

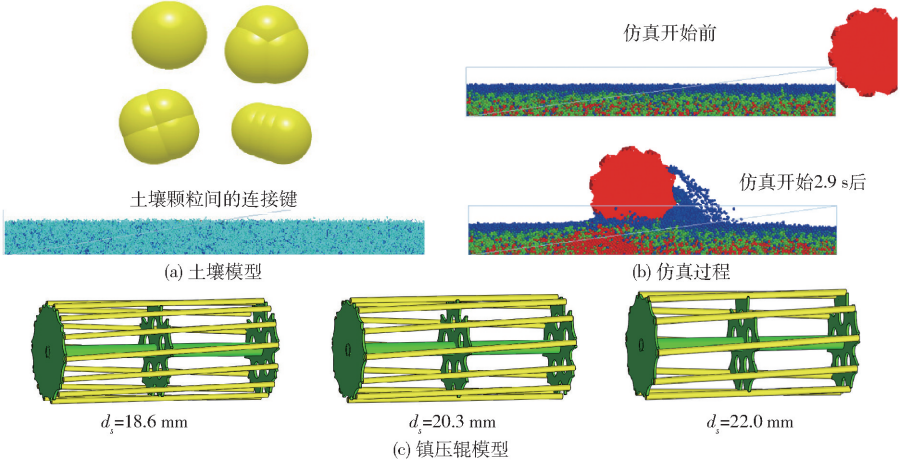


图 3　仿真模型及过程

Fig. 3　Simulation models and processes

建立土槽尺寸为 800 mm × 1 500 mm × 200 mm，根据土槽体积计算得到所需颗粒总体积，设置虚拟颗粒工厂尺寸为 800 mm × 1 500 mm，以速度 7.0×10^4 个/s 生成土壤颗粒，在 1.86 s 内共计生成颗粒 1.3×10^5 个。将所建立的镇压辊简化模型、土槽导入 EDEM 软件后，对土壤-土壤、土壤-镇压辊间的接触参数进行设置，相关参数如表 2 所示。

为模拟镇压装置对土壤的细碎程度，土壤颗粒选取 Hertz - Mindlin Bonding 模型，对 Bonding 键设置，开始生成时间为 1.85 s，共计生成 398 947 个 Bonding 键，相关参数见表 3[14]。

仿真过程及模型如图 3b、3c 所示，镇压辊位于土槽一侧，根据镇压辊镇压深度设置镇压辊末端到土槽上平面距离，初始入土深度设置为镇压辊镇压深度中间值 65 mm。在拖拉机牵引下镇压辊向前运动，设置镇压辊前进速度为 1.2 m/s，绕轴旋转角速度为 6.35 rad/s，当镇压辊前进时，压条周期性冲击土壤表面，形成镇压痕迹。采用二次旋转正交组合试验设计试验，以镇压辊压条直径、镇压辊压条旋转

表 2　离散元模型基本参数

Tab. 2　Basic parameters of discrete element model

参数	数值
土壤-土壤间碰撞恢复系数	0.60
土壤-土壤间动摩擦因数	0.40
土壤-土壤间静摩擦因数	0.60
土壤-镇压辊间碰撞恢复系数	0.60
土壤-镇压辊间动摩擦因数	0.05
土壤-镇压辊间静摩擦因数	0.60

表 3 Bonding 键参数设置

Tab. 3 Bonding key parameter settings

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	4 000
单位面积切向刚度/(N·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	6

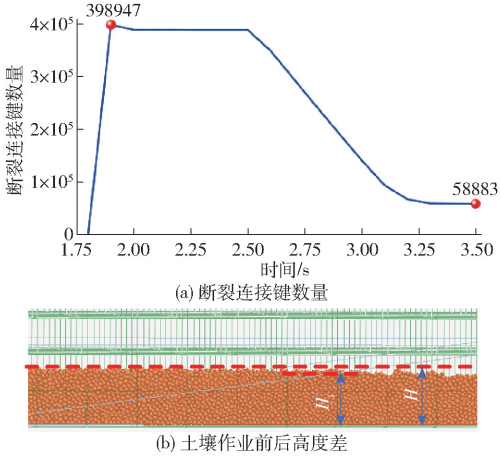
角、作业速度为试验因素;以碎土率 S_1 和土壤平整度 S_2 为评价指标[21-22]。根据试验方案所设计的试验参数分别建模并仿真,通过仿真结果对影响碎土率和平整度的因素进行显著性分析,并对各组合进行优化,获得合适的试验因素组合。试验因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Test factors and codes

编码	因素		
	作业速度/(m·s^{-1})	镇压辊压条直径/mm	旋转角度/(°)
1.682	3.89	23.16	9.36
1	3.33	22.00	8.00
0	2.50	20.30	6.00
-1	1.67	18.60	4.00
-1.682	1.11	17.44	2.64

利用断裂 Bonding 键数量和镇压作业前后土壤在单位网格内高度差变化来反映碎土率及土壤平整度变化如图 4 所示。



(a) 断裂连接键数量

(b) 土壤作业前后高度差

图 4 评价指标计算方法

Fig. 4 Calculation of evaluation indicators

利用断裂 Bonding 键数量模拟碎土过程,并进行碎土率计算,粘结键土壤颗粒数量与时间关系曲线如图 4a 所示。碎土率计算式为

$$S_1 = \frac{n_2}{n_1} \times 100\% \tag{10}$$

式中 n_2——作业区域断裂粘结键土壤颗粒数

n_1——作业区域土壤颗粒总数

镇压前后单位网格内高度差可用来模拟机具工作后土壤平整度变化。在 EDEM 仿真后处理界面,将土槽沿 y 轴划分 15 份,沿 x 轴划分 8 份,如图 4b 所示。耕作后平整土壤可增加土壤蓄水保墒能力,增加土壤含水率。土壤平整度计算式为

$$S_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} (H - H_i)}{n_3} \tag{11}$$

式中 H——作业前网格内土壤高度,mm

H_i——作业后第 i 个网格内土壤高度,mm

n_3——网格数量

2.2 田间试验方案

为验证离散元仿真结果准确性,2024 年 5 月 3—5 日在东北农业大学试验示范基地,测试马铃薯全面耕耘机镇压装置碎土率、平整度性能。选取长度为 100 m、宽度为 100 m 的地块作为试验区,通过试验测得土壤含水率为 15.3%,土壤剪切强度为 148.3 kPa,试验区内各处土壤条件基本一致。所需试验设备有 TZS-2X-G 型土壤水分测量仪、游标卡尺、卷尺、取样刀、土壤盒和电子秤等。

在约翰迪尔拖拉机牵引下,马铃薯宽幅全面耕耘机以作业速度 3.0~3.3 m/s 对试验田进行作业,选用镇压辊压条直径为 22 mm,镇压辊压条旋转角为 8°开展试验。为验证设计的宽幅鼠笼压辊式镇压装置作业性能,增加了与传统机型的对照试验,在同一地块进行整地镇压作业。参考镇压器作业效果设计评价标准[23-25],以碎土率和整地前后土地平整度作为试验指标。

碎土率通过测量满足碎土标准土块质量占总质量百分比表示。测定方法为:在机具作业结束后,依据五点取样法选取测量区域,并将每个区域划分为 300 mm×300 mm 方格。试验设置 2 种作业模式:镇压装置单独作业和耕耘镇压联合作业,分别使用土壤盒进行取样。根据整地碎土标准,合格土块直径应小于 25 mm。每个取样区进行 5 次重复测量,取平均值作为单次试验结果。平整度测定方向垂直于机组前进方向。

选取高于土壤任意高度作为水平基准线,长度选取全面耕耘机的工作幅宽,选取两个行程,每一行程等分为 25 份,测量作业前、作业后各点到水平基线距离,每个点测量 3 次取平均值作为该点计算数据。

3　结果与讨论

3.1　仿真试验结果

3.1.1　仿真方案设计与结果

根据 Design-Expert 8.0.6 提供的设计方案，完成仿真试验，结果如表 5 所示，A、B、C 为因素编码值。

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，得到碎土率 S_1 和土壤平整度 S_2 回归方程，并进行显著性检验。

通过对试验数据分析和拟合，碎土率 S_1 和土壤平整度 S_2 方差分析结果如表 6、7 所示。将不显著交互作用项的回归平方及结果并入残差项，对碎土率和土壤平整度内学生化残差进行分析（图 5），结果表明内学生化残差均小于 2，不存在潜在异常阈值，验证了多元线性回归模型的可靠性，得到评价指标回归模型为

$$S_1 = 85.12 + 0.67A + 0.33B - 0.33C + 0.41AB + 0.69BC - 0.34B^2 - 0.31C^2 \quad (12)$$

$$S_2 = 23.61 + 1.31A - 2.33B - 0.94C - 1.46AB - 2.21AC + 1.18A^2 - 2.08B^2 - 3.74C^2 \quad (13)$$

3.1.2　响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行处理，得出镇压辊压条直径、镇压辊压条旋转角、作业速度之间的显著和较显著交互作用对碎土率 S_1 和土壤平整度 S_2 2 个试验指标影响的响应曲面，如图 6 所示。

表 5　仿真试验结果

Tab.5　Test plan and experimental data

序号	因素			碎土率 S_1/%	土壤平整度 S_2/mm
	作业速度 A	镇压辊压条直径 B	旋转角度 C		
1	-1	-1	-1	84.8	17.5
2	1	-1	-1	85.5	26.8
3	-1	1	-1	83.5	12.8
4	1	1	-1	85.6	17.9
5	-1	-1	1	83.4	18.7
6	1	-1	1	83.1	20.8
7	-1	1	1	84.6	18.9
8	1	1	1	86.2	13.5
9	-1.682	0	0	83.7	25.8
10	1.682	0	0	86.7	29.8
11	0	-1.682	0	83.6	21.9
12	0	1.682	0	84.4	15.3
13	0	0	-1.682	84.8	16.8
14	0	0	1.682	83.4	11.0
15	0	0	0	85.5	23.9
16	0	0	0	84.5	22.3
17	0	0	0	84.7	21.3
18	0	0	0	85.2	24.9
19	0	0	0	85.5	21.2
20	0	0	0	84.7	25.7
21	0	0	0	85.3	23.5
22	0	0	0	84.9	25.1
23	0	0	0	85.4	24.3

表 6　碎土率 S_1 方差分析结果

Tab.6　Variance analysis of soil fragmentation rate S_1

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	17.88/17.60	9/8	1.99/2.20	13.21/13.77	<0.0001 **/ <0.0001 **
A	6.12/6.12	1/1	6.12/6.12	40.71/38.33	<0.0001 **/ <0.0001 **
B	1.45/1.45	1/1	1.45/1.45	9.62/9.06	0.0184 */0.0194 *
C	1.45/1.45	1/1	1.45/1.45	9.66/9.09	0.0083 **/0.0093 **
AB	1.36/1.36	1/1	1.361.36	9.05/8.52	0.0101 */0.0112 *
AC	0.28	1	0.28	1.87	0.1947
BC	3.78/3.78	1/1	3.78/3.78	25.13/23.67	0.0002 **/0.0003 **
A^2	0.11/0.11	1/1	0.11/.11	0.73/0.69	0.4075/0.4202
B^2	1.85/1.85	1/1	1.85/1.85	12.28/11.56	0.0039 **/0.0043 **
C^2	1.45/1.48	1/1	1.48/1.48	9.87/9.29	0.0078 ** /0.0087 **
残差	0.78/1.06	5/6	0.16/0.18	1.06/1.20	0.4464/0.3927
失拟差	1.18/1.18	8/8	0.15/0.15		
总和	19.83/19.83	22/22			

注：“/”后数字为剔除不显著因素后碎土率方差分析结果；** 表示影响极显著（$P<0.01$）；* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P<0.05$），下同。

由图 6a 可知，当压条直径不变时，碎土率随作业速度增加呈逐渐递增趋势，最优作业速度为 2.92 ~ 3.33 m/s；当作业速度不变时，碎土率随压条直径的增加呈先增加后减小的趋势，最优压条直径为 19.45 ~ 21.15 mm，其中作业速度是影响碎土率的主要试验因素。

由图 6b 可知，当碎土辊压条直径不变时，碎土率随镇压辊压条旋转角增加呈逐渐先增加后减小趋势，最优镇压辊压条旋转角度为 5° ~ 7°；当镇压辊压条旋转角一定时，碎土率随压条直径的增加呈先增

表 7 土壤平整度 S_2 方差分析结果

Tab. 7 Variance analysis of soil flatness S_2

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	483. 32/478. 04	9/8	53. 70/59. 76	18. 45/19. 40	<0. 000 1 **/ <0. 000 1 **
A	23. 27/23. 27	1/1	23. 27/23. 27	8. 00/7. 56	0. 014 3 */0. 015 7 *
B	74. 05/74. 05	1/1	74. 05/74. 05	25. 44/24. 04	0. 000 2 **/0. 000 2 **
C	12. 10/12. 10	1/1	12. 10/12. 10	4. 16/3. 93	0. 062 3/0. 067 4
AB	17. 11/17. 11	1/1	17. 11/17. 11	5. 88/5. 56	0. 030 6 */0. 033 5 *
AC	39. 16/39. 16	1/1	39. 16/39. 16	13. 46/12. 72	0. 002 8 **/0. 003 1 **
BC	5. 28	1	5. 28	1. 81	0. 201 0
A^2	21. 98/21. 98	1/1	21. 98/21. 98	7. 55/7. 14	0. 016 6 */0. 018 2 *
B^2	68. 51/68. 51	1/1	68. 51/68. 51	23. 54/22. 25	0. 000 3 **/0. 000 3 **
C^2	222. 03/222. 03	1/1	222. 03/222. 03	76. 30/72. 10	<0. 000 1 ** / <0. 000 1 **
残差	16. 16/21. 44	5/6	3. 23/3. 57	1. 19/1. 32	0. 391 8/0. 348 9
失拟差	21. 68/21. 68	8/8	2. 71/2. 71		
总和	521. 16/521. 16	22/22			

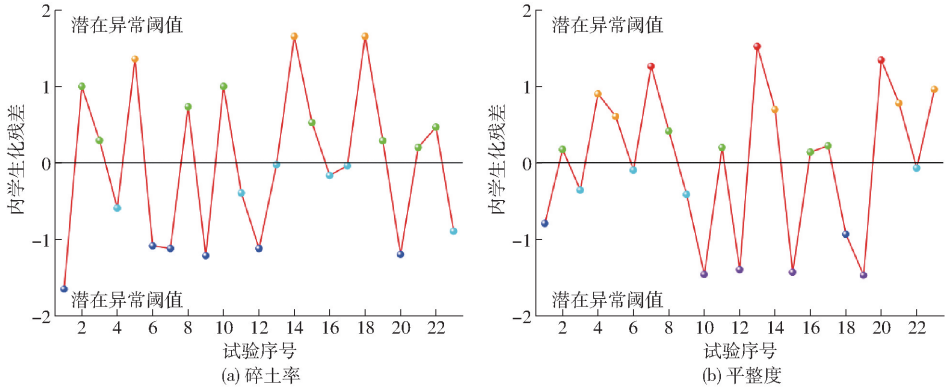


图 5 内学生化残差分析

Fig. 5 Internal studentized residual analysis

加后减小的趋势,最优压条直径为 19. 45 ~ 21. 15 mm,其中镇压辊压条旋转角度是影响碎土率的主要试验因素。

由图 6c 可知,当压条直径不变时,土壤平整度随作业速度增加呈先减小后增加趋势,最优作业速度为 2. 09 ~ 3. 33 m/s;当作业速度不变时,土壤平整度随压条直径增加逐渐减小,最优压条直径为 21. 15 ~ 22. 00 mm,其中镇压辊压条直径是影响土壤平整度的主要试验因素。

由图 6d 可知,当作业速度不变条件下,土壤平整度随镇压辊压条旋转角增加呈先增加后减小趋势,最优镇压辊压条旋转角度为 6° ~ 8°;当镇压辊压条旋转角度一定时,土壤平整度随作业速度增加呈先减小后增加趋势,最优作业速度为 2. 09 ~ 2. 92 m/s,其中作业速度是影响土壤平整度的主要试验因素。

利用 Design-Expert 8. 0. 6 软件中的 Optimization 功能对 4 个模型进行求解[24],通过模型分析结果和宽幅全面耕耘机镇压装置实际作业性能要求,建立优化模型为

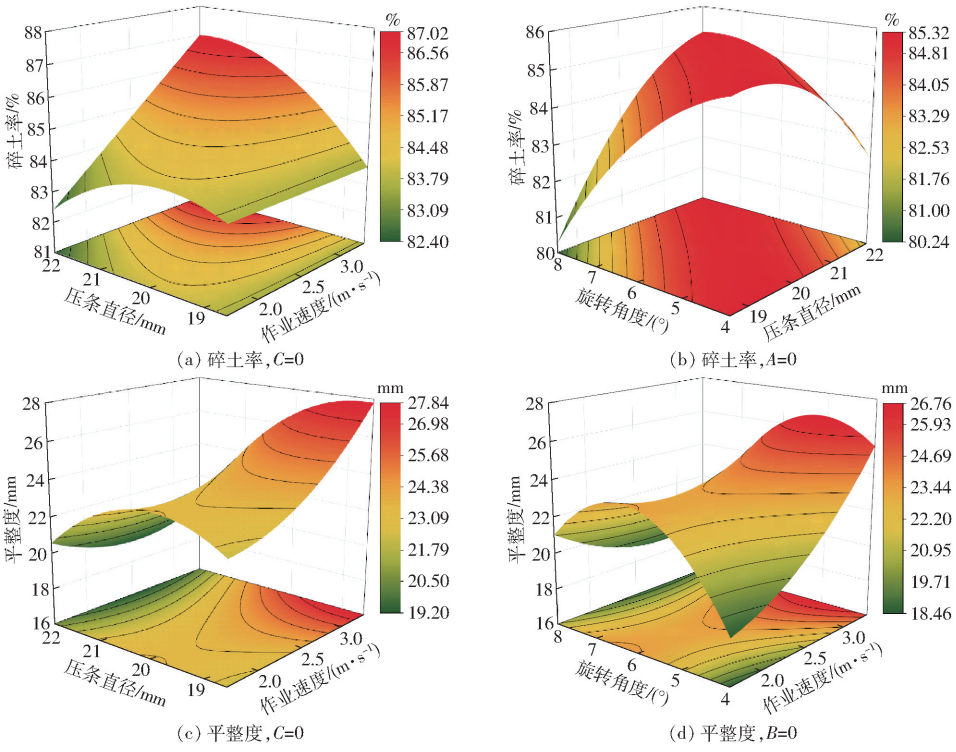
$$\begin{cases} \max S_1(A,B,C) \\ \min S_2(A,B,C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant A \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant B \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant C \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \tag{14}$$

求解模型可得,当作业速度为 3. 33 m/s、镇压辊压条直径为 22 mm、镇压辊压条旋转角度为 8°时,机具综合作业性能较优,此时碎土率为 86. 25%,土壤平整度为 19. 61 mm。

对离散元仿真结果进行验证,得到碎土率为 86. 32%,土壤平整度为 21. 55 mm,在误差允许范围内与优化结果基本一致。因此,所设计的镇压装置镇压辊压条直径为 22 mm,镇压辊压条旋转角度为 8°。

3. 2 田间试验结果

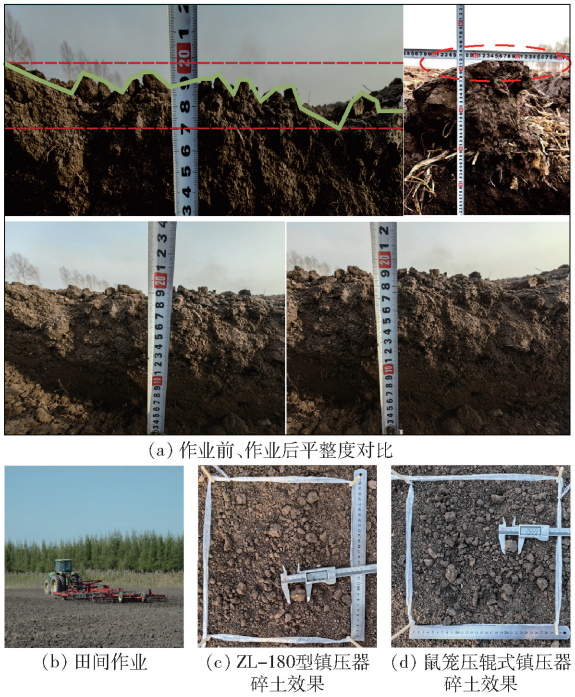
田间对比试验结果如图 7 所示。对比试验结果如图 8 所示,设计的鼠笼压辊式镇压辊配备在宽幅耕耘机上具有较好的作业效果。碎土率、土壤平整度均优于对照组 ZY - 180 型镇压器。相对于 ZY - 180 型镇压器,鼠笼压辊式镇压器碎土率为



(a) 碎土率,C=0　(b) 碎土率,A=0　(c) 平整度,C=0　(d) 平整度,B=0

图 6　试验因素对指标影响的响应曲面

Fig. 6　Response surfaces for effect of test factors on indicators



(a) 作业前、作业后平整度对比

(b) 田间作业　(c) ZL-180型镇压器碎土效果　(d) 鼠笼压辊式镇压器碎土效果

图 7　田间对比试验

Fig. 7　Field comparison tests

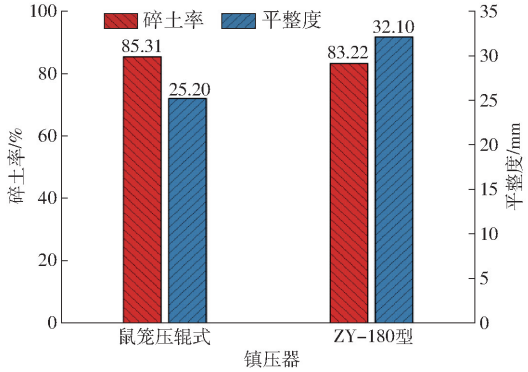


图 8　测试结果对比

Fig. 8　Comparison of test results

85.31%,提高 2.09 个百分点,土壤平整度为 25.20 mm,提高 6.9 mm。

4　结论

(1)对镇压装置进行了结构解析,研究了镇压辊压条与土壤接触界面的力学特性。通过构建镇压辊半径最小值与最大土块半径参数方程,确定了镇压辊几何尺寸。通过质量分析推导出镇压辊压条直径及旋转角方程。

(2)采用 EDEM 离散元构建镇压辊-土壤相互作用仿真模型,以作业速度、压条直径及旋转角为试验因素,碎土率与土壤平整度为评价指标,通过响应面法建立了多参数回归数学模型。得出优化参数组合为作业速度 3.33 m/s、镇压辊压条直径 22 mm、镇压辊压条旋转角度 8°时,镇压装置达到最优作业性能,此时碎土率为 86.32%,平整度为 21.55 mm,与模型预测值结果基本一致,验证了模型可靠性。

(3)田间对比试验结果表明,配置优化镇压装置马铃薯宽幅全面耕耘机作业后,实测碎土率达 85.31%,土壤平整度为 25.2 mm,验证了装置设计的有效性,优于 ZY-180 型镇压器。

参 考 文 献

[1] 汪昕,杨德秋,刘萌萌,等. 自走式马铃薯捡拾机捡拾装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊2):20 - 29.
WANG Xin, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Parameter optimization and experiment of picking device of self-propelled potato collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 20 - 29. (in Chinese)

[2] 吕金庆,田忠恩,吴金娥,等. 4U1Z 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(12):39 - 47.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, WU Jin'e, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 39 - 47. (in Chinese)

[3] 韩固,侯贤清,段瑞兵,等. 免耕覆盖提升土壤水分利用和马铃薯产量的协同效应[J]. 水土保持学报,2025,39(1):120 - 129.
HAN Gu, HOU Xianqing, DUAN Ruibing, et al. Synergistic effects of no-tillage combined with mulching on improving soil moisture use and potato yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 120 - 129. (in Chinese)

[4] ADHI A K, PUTRI T A, PAMBUDY R, et al. The choice of land conservation technique and effects on technical efficiency of potato farming in the highland of Bandung Regency, West Java[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1107(1): 012073.

[5] 杨然兵,田光博,尚书旗,等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):107 - 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107 - 118. (in Chinese)

[6] 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. Conservation tillage technology with Chinese characteristrics[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 1 - 4. (in Chinese)

[7] 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.

[8] 康迪鑫. 深松灭茬镇压联合整地机设计与研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2019.
KANG Dixin. Design and research on subsoiling, stubbling and suppress soil crushing combined tillage machine[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[9] 任文斌. 约翰迪尔 2310 型复式耕耘机[J]. 现代化农业,2014(12):40.

[10] JIANG Lan, TANG Qing, WU Jun, et al. Design and test of seedbed preparation machine before transplanting of rapeseed combined transplanter[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1427.

[11] GHAZAVI M A, HOSSEINZADEH B, LOTFALIAN A. Evaluating physical properties of potato by a combined tillage machine [J]. Nature and Science, 2010, 8(11): 66 - 70.

[12] 吕金庆,刘金妮,赵治明,等. 马铃薯碎土整地组合机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):76 - 89.
LÜ Jinqing, LIU Jinni, ZHAO Zhiming, et al. Design and test of the key components of potato soil-crushing site preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 76 - 89. (in Chinese)

[13] 付作立,宫志超,褚青昕,等. 高速免耕玉米播种单体镇压力主动调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 273 - 284.
FU Zuoli, GONG Zhichao, CHU Qingxin, et al. Design and test of active control system for soil compaction of high speed no-tillage maize planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 273 - 284. (in Chinese)

[14] KORNECKI T S, PRICE A J, RAPER R L, et al. New roller crimper concepts for mechanical termination of cover crops in conservation agriculture[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2009, 24(3): 165 - 173.

[15] 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)

[16] 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)

[17] 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)

[18] 王法安,倪畅,张兆国,等. 三七收获机挖掘铲减阻特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 179 - 190, 199.
WANG Faan, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Analysis and experiment on drag reduction characteristies of digging shovel of *Panax notoginseng* harvesterr[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 179 - 190, 199. (in Chinese)

[19] 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)

[20] 张学宁,尤泳,王得伟,等. 板结羊草草地切根松土镇压机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 135 – 146, 164.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Dewei, et al. Design and experiment of root-cutting and subsoiler for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 135 – 146, 164. (in Chinese)

[21] 邓佳玉,胡军,李庆达,等. 基于 EDEM 离散元法的深松铲仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 14 – 18.
DENG Jiayu, HU Jun, LI Qingda, et al. Simulation and experimental study on the sub soiler based on EDEM discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 14 – 18. (in Chinese)

[22] 张冲,范旭辉,李明森,等. 基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 52 – 59.
ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 52 – 59. (in Chinese)

[23] 黑龙江省质量技术监督局. 耕整地机械 作业质量检测方法: DB23/T 1367—2010[S]. 哈尔滨: 黑龙江省标准出版社, 2010.

[24] SUN Jiyu, WANG Yueming, MA Yunhai, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth > 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 119: 30 – 37.

[25] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 59 – 69.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 59 – 69. (in Chinese)