

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.10.004

种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立与验证

卢琦^{1,2} 刘芳建^{1,2} 刘立晶^{1,2} 刘忠军^{1,2} 刘云强^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对研究播种机覆土装置作业过程中种沟土壤及种子微观运动规律时, 缺乏准确可靠的种沟土壤-种子-覆土装置三者互作离散元模型的问题, 以含水率为 $(15.7 \pm 0.25)\%$ 的黏土为研究对象, 基于 EDEM 软件对相关参数及模型进行标定。建立覆土装置与种沟土壤互作模型, 通过 Plackett - Burman 试验, 以覆土作业牵引阻力为响应值, 筛选出对牵引阻力影响敏感的参数为土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-65Mn 静摩擦因数、临界法向应力、临界切向应力, 通过最陡爬坡试验确定各敏感参数的取值范围, 通过 Box - Behnken 试验优化得出土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-65Mn 静摩擦因数、临界法向应力、临界切向应力分别为 0.15、0.31、18.45 kPa、18.58 kPa。以大豆种子为例, 建立了种沟土壤与种子互作离散元模型, 以种沟土壤与大豆种子碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数为试验因素, 以仿真堆积角为评价指标, 通过 Box - Behnken 试验优化得出各试验因素取值分别为 0.57、0.33、0.08。建立了种沟土壤-种子-覆土装置三者互作离散元模型, 并开展了试验验证。结果表明, 牵引阻力仿真值与实测值相对误差平均值为 2.22%, 堆积角仿真值与实测值相对误差为 1.61%, 覆土厚度和种子粒距变异系数仿真值与实测值相对误差分别为 4.89%、5.90%, 均较小, 所建立的种沟土壤-种子-覆土装置三者互作离散元模型准确。

关键词: 种沟土壤; 覆土装置; 离散元法; 互作模型; 参数标定

中图分类号: S152.9; S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0046-12 OSID: 

Establishment and Verification of Discrete Element Model for Seed Furrow Soil - Seed - Covering Device

LU Qi^{1,2} LIU Fangjian^{1,2} LIU Lijing^{1,2} LIU Zhongjun^{1,2} LIU Yunqiang^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that there is a lack of accurate and reliable discrete element interaction model of seed furrow soil - seed - covering device in the study of the micro-movement law of seed furrow soil and seed in the operation of covering device of planter. Taking the cohesive soil with moisture content of $(15.7 \pm 0.25)\%$ as research object, the relevant parameters and models were calibrated based on EDEM. The traction resistance of soil covering operation was taken as the response value. Based on Plackett - Burman test, the parameters sensitive to traction resistance were selected as soil - soil rolling friction coefficient, soil - 65Mn static friction coefficient, critical normal stress and critical shear stress. The range of values for each sensitive parameter was determined based on the steepest ascent test. Based on Box - Behnken experimental optimization, the values of soil - soil rolling friction coefficient, soil - 65Mn static friction coefficient, critical normal stress, and critical shear stress were obtained as 0.15, 0.31, 18.45 kPa, and 18.58 kPa, respectively. Secondly, taking soybean seeds as example, the discrete element interaction model of seed furrow soil - seed was established. The collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient between seed furrow soil and soybean seeds were taken as the experimental factors. The simulation stacking angle was taken as the evaluation index. Through the optimization of Box - Behnken test, the values of each test factor were

收稿日期: 2023-04-11 修回日期: 2023-05-18

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科技专项(ZDZX2020-2)

作者简介: 卢琦(1991—), 男, 博士生, 主要从事农业机械设计及理论研究, E-mail: sxndluqi@163.com

通信作者: 刘立晶(1976—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机械化研究, E-mail: xylilj@ sina.com

0.57, 0.33, 0.08, respectively. Finally, the discrete element interaction model of seed furrow soil – seed – covering device was established, and the experimental verification was carried out. The results showed that the average relative error between the simulated and measured values of traction resistance was 2.22%. The relative error between the simulated and measured values of the stacking angle was 1.61%. The relative errors between the simulated and measured values of soil cover thickness and seed spacing variation coefficient were 4.89% and 5.90%, respectively. They were all small. The established discrete element interaction model of seed furrow soil – seed – covering device was accurate.

Key words: seed furrow soil; covering device; discrete element method; interaction model; parameter calibration

0 引言

覆土装置作为播种机的重要组成部分,对播种机作业质量有重要影响。覆土装置作为触土部件直接参与土壤耕作,其作业性能与土壤质地有关。双圆盘开沟器作业过程伴随着限深轮对种沟两侧土壤的压实,造成种沟土壤流动性变差,传统 V 形覆土镇压装置作业时,可能只将种沟上层表土闭合,种沟内种子与土壤接触不良,造成种子“架空”,严重时种沟土壤不能闭合,造成“晾种”,影响种子发芽和出苗质量。黏土条件下,此种现象尤为突出。此外,覆土过程覆土厚度及种沟土流运动会影响种子播深和位置的变化,降低播种质量^[1-3]。因此在研究开发新的覆土装置时,应系统考虑种沟土壤、种子、覆土装置之间的互作关系。

传统的土槽、田间试验等方法只能分析土壤宏观扰动状况,很难从微观的角度去剖析运动规律^[4]。离散元法是一种用于模拟并分析散体介质系统动力学行为的数值方法^[5]。研究表明,该方法在用于土壤与触土部件互作关系研究时,仿真结果与实际情况高度一致^[6-7]。其模拟仿真的可信度在很大程度上取决于选用接触模型和设定的仿真参数^[8]。由于土壤的复杂性与多样性,目前尚未有一种准确的数学模型能替代所有类型土壤的本构模型^[9]。因此在基于离散元法开展种沟土壤-种子-覆土装置互作机理研究时,应对种沟土壤与种子、种沟土壤与覆土装置间的仿真参数进行标定,以达到接近真实作业的目的。

目前,国内外学者基于离散元法对不同土壤类型参数标定开展了一系列研究。张锐等^[10]选用 Hertz-Mindlin 接触模型,对沙土颗粒的离散元模型参数进行了标定。王宪良等^[11]以华北麦玉两熟区免耕壤土为研究对象,基于 The Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion (EEPA) 非线性弹塑性接触模型标定了常年免耕农田土壤离散元仿真模型参数。文献[12-15]选用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型,基于堆积试验分别对南方地区砂壤土、黏壤土、

壤土、西南区坡耕地紫色土壤的离散元模型参数进行了标定。李俊伟等^[9]选用 Hertz-Mindlin with JKR 模型标定了不同含水率的黏重黑土离散元仿真参数。

在土壤与触土部件的离散元仿真参数标定方面, AIKINS 等^[16]整合 Hysteretic Spring 模型和 Linear Cohesion 模型对粘性土壤的离散元参数进行了标定,开沟器性能验证试验表明仿真结果与试验结果吻合,并表现出相似的趋势。KOUSHKAKI 等^[17]联合 Hysteretic spring 模型和 Linear adhesion/cohesion 模型以不同前进速度和工作深度对牵引力的影响为目标,对粘土与深松犁互作的离散元模型及参数进行了标定和验证。ZENG 等^[18]建立土壤-机具-秸秆残茬相互作用的离散元仿真模型,以 4 种不同的铲进行了土槽试验,以土壤切削力、土壤和秸秆残茬的位移以及秸秆残茬的覆盖率为指标验证了模型的准确性。丁启朔等^[19]利用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型建立了黏性水稻土的机械深松耕作离散元模型。孙景彬等^[20]选用 Hertz-Mindlin with JKR 对黄土高原坡地土壤进行了仿真参数标定,并通过坡地旋耕试验验证了模型参数的有效性。石林榕等^[21]整合延迟弹性模型和线性内聚力模型,标定了 6 种不同含水率的西北旱区农田土壤仿真参数,建立了直插穴播鸭嘴-土壤互作仿真模型,并通过鸭嘴插入阻力曲线验证了仿真模型和参数的可靠性。

在种子离散元仿真参数标定方面,主要研究集中在种子与种子之间、种子与排种器材料之间的接触参数标定,种子与土壤互作模型离散元标定方面,研究较少。文献[22-23]通过碰撞试验研究了大豆种子与松散土壤的离散元参数,闫东旭^[24]通过堆积角试验标定了大豆种子与未经扰动土壤间的离散元参数。

综上所述,目前多数研究为单一系统或土壤-机器、种子-机器互作系统,系统考虑土壤-种子-机器之间互作关系的离散元模型研究相对较少。此外,上述研究虽对不同土壤类型进行了离散元参数标

定,但所研究的土壤都处于自然粘结状态,而种沟土壤是经过播种机开沟器耕作、限深轮压实的土壤,上述的模型和参数已不再适用于种沟土壤的建模和仿真。基于此,本文根据种沟土壤特点,选用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型对种沟土壤进行仿真参数标定,建立播种机覆土装置与种沟土壤的互作模型,选用 Hertz - Mindlin(no slip)模型,对种沟土壤与种子互作参数进行标定,最终建立种沟土壤-种子-覆土装置三者互作离散元模型,并对仿真参数进行试验验证,以期对覆土装置工作原理及覆土过程土壤、种子微观运动的研究提供基础。

1 种沟土壤-覆土装置互作离散元仿真参数标定

1.1 接触模型选取

离散元法中 Hertze - Mindlin 接触模型只考虑了颗粒的弹性形变,不涉及颗粒间的粘聚力^[4],常用于粘性较小的土壤,如沙土。Hysteretic spring 接触模型当外力未达到预先设定的应力强度时,颗粒间执行线弹性方程,当颗粒接触面的总应力超过设定的应力时,颗粒间执行塑性方程^[21],不符合土壤弹塑性的特点。Hertz - Mindlin with JKR 模型考虑了土壤颗粒间的弹性特征和粘聚力,适用于有一定湿度的土壤,但不适用于被压实的土壤。Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型常用来模拟粘结颗粒,颗粒间通过 Bond 键固定在一起,可代替土壤颗粒间的液桥,承受一定的力和力矩,当 Bond 键形变产生的力或力矩达到一定程度时,粘结键断裂,粘结颗粒互相分开发生破碎后,Bond 键不再重组,该模型可以很好地表达黏性土壤的破碎过程^[19,25-26]。本文研究的种沟土壤是经播种机限深轮压实后,经覆土装置切碎、转移,完成种沟闭合的黏土,因而选取 Hertz - Mindlin with Bonding 模型为种沟土壤离散元仿真模型。

种沟土壤与覆土装置之间的接触模型选取 Hertz - Mindlin(no slip)模型^[20,27]。

1.2 本征参数测定

基于离散元法进行土壤与触土部件仿真研究时,需设置材料的本征参数、接触参数、接触模型参数。其中,土壤颗粒本征参数包括颗粒形状尺寸、密度、含水率等物理参数和泊松比、剪切模量等力学参数,一般可通过试验或查阅文献获得。

土壤样品选自中国农业机械化科学研究院集团有限公司农业装备技术全国重点实验室土槽实验室的土壤,试验装置为团队自主研发的 QXDYB 型电驱播种单体(图 1a),测试时在不安装播种单体覆土

镇压装置的情况下,根据农艺要求,调整限深轮高度,控制播种深度为 5 cm,进行开沟作业,取开沟器切开后经限深轮压实、限深轮正下方的土壤为种沟土壤,种沟土壤制备过程如图 1 所示。为建立仿真模型,取种沟两侧深度为 0 ~ 15 cm 的土壤样品,采用干燥法测得土壤密度为 $1.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,平均含水率为 $(15.7 \pm 0.25) \%$ 。

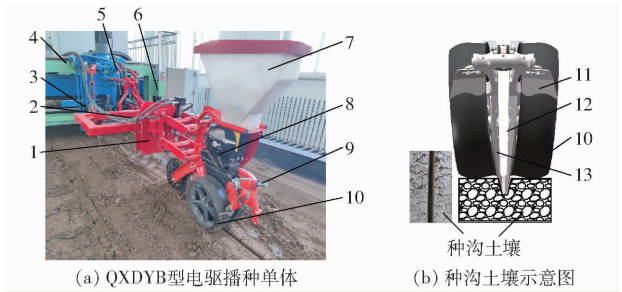


图 1 种沟土壤制备过程

Fig. 1 Preparation process of seed furrow soil

1. 破茬圆盘 2. 六分力测试系统 3. 机架 4. 台车 5. 悬挂装置 6. 下压力油缸 7. 种箱 8. 排种器 9. 播深调节装置 10. 限深轮 11. 刮土板 12. 导种管 13. 双圆盘开沟器

通过 BT - 9300ST 型激光粒度分布仪对土壤的颗粒粒度分布进行分析,不同粒径土壤分布占比如图 2 所示,土壤样品中砂粒(0.02 ~ 2 mm)占 22.54%,粉粒(0.002 ~ 0.02 mm)占 29.22%,黏粒(0 ~ 0.002 mm)占 48.24%,根据国际制土壤质地分类标准,本试验所用土壤为黏土。

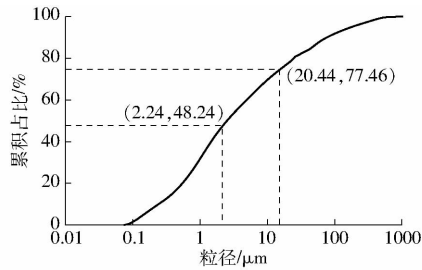


图 2 土壤粒径分布

Fig. 2 Soil particle size distribution

采用 ZJ 型应变控制式直剪仪测得试验土壤的内摩擦角 $\varphi = 17.5^\circ$,根据材料力学中广义胡克定律可推导求得土壤侧压力系数与泊松比 ν 的相互关系^[20-21],计算式为

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \tag{1}$$

$$\text{其中} \quad K_0 = 1 - \sin \varphi \tag{2}$$

式中 K_0 ——侧压力系数

经计算确定泊松比 $\nu = 0.41$ 。根据文献设定试验土壤的剪切模量为 $1 \times 10^6 \text{ Pa}$ ^[9,20,28]。

覆土装置的材料选用 65Mn,经查阅文献获得。综合可得离散元仿真的本征参数如表 1 所示。

表 1 材料本征参数
Tab.1 Material intrinsic parameters

材料	参数	数值	来源
土壤	密度/(kg·m ⁻³)	1.68 × 10 ³	测定
	泊松比	0.41	测定
	剪切模量/Pa	1.0 × 10 ⁶	文献[9,20,28]
65 Mn	密度/(kg·m ⁻³)	7.861 × 10 ³	文献[29]
	泊松比	0.3	文献[20]
	剪切模量/Pa	7.90 × 10 ¹⁰	文献[29-30]

1.3 覆土装置作业阻力测定

试验在中国农业机械化科学研究院集团有限公司农业装备技术全国重点实验室土槽试验台上进行。试验前,通过人工制备土壤条件,包括旋耕、洒水、静置、压实等作业,洒水后静置 24 h,以保证试验土壤含水率均匀。种沟土壤制备方法及土壤条件同 1.2 节。

阻力测定时,将覆土装置通过连接架与六分力测试系统通过三点悬挂装置挂在土槽台车上,如图 3a 所示。通过调节横移电机使得两覆土盘的中心位于种沟中心,通过升降电机调节覆土装置的入土深度。试验时,通过操作土槽控制台上的计算机设定台车速度,将六分力测试系统测得的覆土作业土壤牵引阻力实时存储在计算机上,采样频率为 10 Hz。试验重复 3 次,取牵引阻力稳定阶段平均值为实测值,试验结果如图 3b 所示。

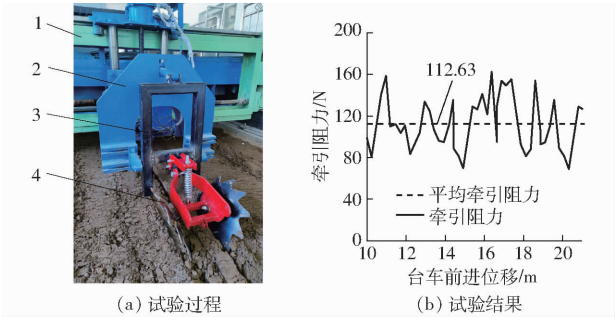


图 3 土槽试验过程及结果

Fig.3 Soil bin test and results

1. 台车 2. 六分力测试系统 3. 连接架 4. 覆土装置

经测定,当前进速度为 8 km/h,覆土盘入土深度为 70 mm,覆土盘安装间距为 220 mm,覆土盘与竖直面的安装倾角为 12°时,覆土装置受到土壤平均牵引阻力为 112.63 N。

1.4 接触参数和模型参数标定

材料接触参数包括土壤颗粒间以及土壤颗粒与覆土装置材料间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数 6 个参数。现有的土壤接触参数标定往往基于土壤的堆积试验获得,而堆积试验一般是由松散的颗粒物料在堆积过程中受到重力和摩擦力影响形

成^[31]。而本文研究的种沟土壤应视为土粒群相互粘结的紧实整体,已无法采用堆积试验直接标定材料接触参数。

选用的 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型中的粘结参数主要有法向刚度、切向刚度、临界法向应力、临界切向应力及粘结半径共 5 个。其中,前面 4 个参数反映颗粒之间的粘性,为了减少标定参数的个数,根据文献[25,32-34]可知,该模型下颗粒行为对粘结刚度参数变化不敏感,取土壤粘结法向刚度为 1 × 10⁸ N/m³、切向刚度为 5 × 10⁷ N/m³。而临界应力是判断粘结键是否断裂的重要指标,其取值与粘结强度密切相关,将直接影响仿真中土壤的破碎程度及作业阻力,本文选择通过仿真试验标定获得。颗粒粘结半径 R_b 则可以反映湿颗粒含水率,在颗粒半径一定的情况下,湿颗粒的粘结半径 R_b 可根据材料密度、含水率计算得到^[34],计算式为

$$\omega = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \times 100\% \tag{3}$$

其中 $V_1 = \frac{4}{3} \pi R^3$ (4)

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi R_b^3 - \frac{4}{3} \pi R^3 \tag{5}$$

式中 ω ——土壤含水率,取 15%
 ρ_1 ——土壤密度,kg/m³
 ρ_2 ——水分密度,取 1 000 kg/m³
 V_1 ——土壤颗粒所占体积,m³
 V_2 ——水分所占体积,m³
 R ——颗粒半径,取 5 mm

经计算得到 $R_b = 5.45$ mm。

综合以上分析,本文选用仿真试验逼近的方式对材料接触参数和模型参数中未能确定的 8 个参数进行标定。具体方法是在 EDEM 软件中建立土壤与覆土装置互作的仿真模型,首先通过 Plackett - Burman 试验,以牵引阻力为响应值,筛选出对牵引阻力影响敏感的参数;其次以覆土装置田间试验牵引阻力实测值为目标值,通过对比相同作业条件下仿真值与实测值的相对误差,通过最陡爬坡试验确定各敏感参数的取值范围;最后通过 Box - Behnken 试验选出各参数的最优组合,并通过田间试验验证仿真模型和参数的可信度。

1.4.1 种沟土壤与覆土装置互作模型建立

根据播种机实际作业情况,建立尺寸(长 × 宽 × 高)为 1 000 mm × 450 mm × 150 mm 的虚拟土槽。选用球形颗粒模拟田间土壤颗粒,离散元仿真中颗粒尺寸减小会导致仿真运行时间呈几何级数增长^[35],综合考虑计算机性能和仿真精度,本文选取

土壤颗粒半径为 5 mm^[36-37]。

根据种沟土壤制备过程,建立种沟土壤模型,如图 4 所示,种沟上表面宽度为 42 mm,种沟深度为 50 mm,开沟器安装倾角为 7°。

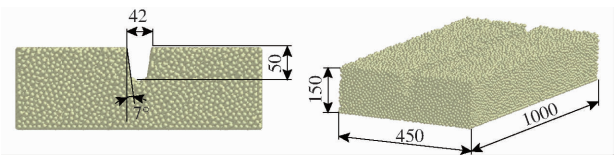


图 4 种沟土壤模型

Fig. 4 Model of seed furrow soil

利用 SolidWorks 软件对覆土装置结构按 1:1 的比例建立 3D 模型,保存成 .STEP 格式后导入 EDEM 软件,为了缩短仿真计算时间,在不影响计算结果的前提下,删除不参与土壤耕作的附属零件,只保留左、右覆土盘进行仿真计算,左覆土盘结构及参数如图 5 所示,其中盘面直径 $D=400$ mm,安装盘面直径 $d=100$ mm,球面半径 $R_s=504$ mm,右覆土盘结构与参数同左覆土盘。

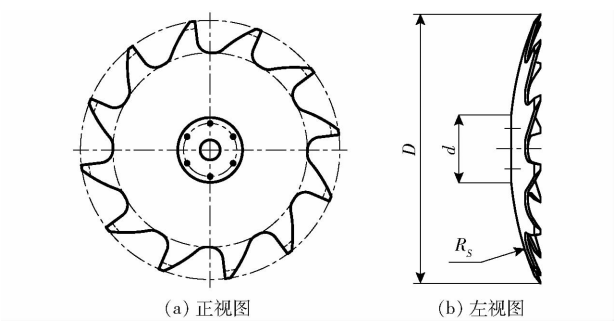


图 5 左覆土盘结构图

Fig. 5 Structural drawings of left cover plate

EDEM 仿真时,覆土盘的运动参数设置同 1.3 节。仿真模型及过程如图 6 所示。

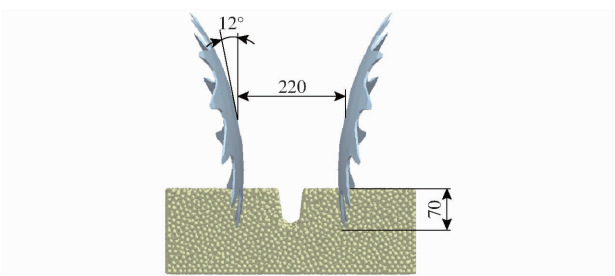


图 6 种沟土壤与覆土装置互作模型

Fig. 6 Interaction model of seed furrow soil and covering device

1.4.2 Plackett – Burman 试验

根据现有学者研究成果,综合分析后,确定了待标定参数的取值范围,应用 Design-Expert 软件进行 Plackett – Burman 筛选试验,以牵引阻力 Y 为响应值,筛选出对阻力影响显著的参数。试验因素及水平如表 2 所示,Plackett – Burman 试验设计及结果如表 3 所示, $X_1 \sim X_8$ 分别为各因素的编码值。

表 2 Plackett – Burman 试验因素及水平			
Tab.2 Factors and levels of Plackett – Burman test			
标定参数	低水平 (-1)	高水 平(1)	来源
土壤-土壤碰撞恢复系数 x_1	0.3	0.8	文献[9,14,38]
土壤-土壤静摩擦因数 x_2	0.6	1.0	文献[9,12-13]
土壤-土壤滚动摩擦因数 x_3	0.05	0.2	文献[20]
土壤-65Mn 碰撞恢复系数 x_4	0.2	0.7	文献[9,20]
土壤-65Mn 静摩擦因数 x_5	0.3	0.6	文献[9,20]
土壤-65Mn 滚动摩擦因数 x_6	0.05	0.2	文献[9,20]
临界法向应力 x_7 /kPa	10	40	文献[25,39]
临界切向应力 x_8 /kPa	10	40	文献[25,39]

表 3 Plackett – Burman 试验设计及结果									
Tab.3 Design and results of Plackett – Burman test									
序号	标定参数								Y/N
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	103.67
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	145.40
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	143.92
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	130.82
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	143.87
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	79.19
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	126.85
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	80.54
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	102.38
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	91.24
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	108.23
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	60.55

用 Design-Expert 进行方差分析,得到各个参数的影响效果,试验参数显著性分析如表 4 所示。由表 4 可知,对覆土装置牵引阻力影响的贡献度由大到小排序依次为 X_5 、 X_3 、 X_7 、 X_8 、 X_6 、 X_1 、 X_2 、 X_4 ;由 P 值可知, X_5 、 X_3 、 X_7 、 X_8 对牵引阻力影响显著, X_6 、 X_1 、 X_2 、 X_4 对牵引阻力影响不显著。综合分析,选用 x_5 、 x_3 、 x_7 、 x_8 4 个参数开展最陡爬坡试验,其他 4 个参数 x_6 、 x_1 、 x_2 、 x_4 分别取其中间值进行仿真试验,即 x_6 、

表 4 Plackett – Burman 试验参数显著性分析					
Tab.4 Significance analysis of Plackett – Burman test parameters					
参数	P	效应	均方和	影响率/%	排序
X_1	0.720 6	2.42	17.55	0.20	6
X_2	0.831 7	-1.43	6.10	0.07	7
X_3	0.025 4 *	25.57	1 961.46	21.84	2
X_4	0.950 0	-0.42	0.53	0.01	8
X_5	0.012 2 *	33.50	3 367.40	37.49	1
X_6	0.130 0	12.75	487.87	5.43	5
X_7	0.031 9 *	23.41	1 644.41	18.31	3
X_8	0.049 7 *	19.63	1 156.21	12.87	4

注: * 表示显著($P < 0.05$),下同。

x_1 、 x_2 、 x_4 分别取值为 0.125、0.55、0.8、0.45。

1.4.3 最陡爬坡试验

基于 Plackett – Burman 试验结果,筛选出 x_3 、 x_5 、 x_7 、 x_8 共 4 个显著性影响参数,选取 x_3 、 x_5 、 x_7 、 x_8 初值分别为 0.05、0.3、10 kPa、10 kPa,步长分别为 0.05、0.1、8 kPa、8 kPa 开展最陡爬坡试验,以覆土装置田间作业牵引阻力 112.63 N 为实测值,与仿真结果进行对比,进一步寻找各参数范围。试验方案及结果如表 5 所示。

表 5 最陡爬坡试验方案及结果

Tab.5 Steepest ascent test program and results						
序号	x_3	x_5	x_7 /kPa	x_8 /kPa	Y/N	相对误差/%
1	0.05	0.3	10	10	69.58	38.22
2	0.10	0.4	18	18	104.57	7.16
3	0.15	0.5	26	26	152.16	35.10
4	0.20	0.6	34	34	197.09	74.99
5	0.25	0.7	42	42	214.58	90.52

由表 5 可知,2 号试验的阻力误差最小,为 7.16%。因此基于最陡爬坡试验结果确定 2 号试验中的各个参数作为后期试验的中心点,1 号、3 号试验参数为低水平和高水平,开展 Box – Behnken 试验,找出最优参数组合。

1.4.4 Box – Behnken 试验

利用 Design-Expert 进行四因素三水平响应曲面试验设计,共进行 29 组仿真试验,试验设计方案与结果如表 6 所示。方差分析结果如表 7 所示。

对试验数据进行多元回归拟合,可得到因素编码值 X_3 、 X_5 、 X_7 、 X_8 表示的牵引阻力 Y 二阶回归方程为

$$Y = 117.95 + 12.35X_3 + 13.67X_5 + 6.09X_7 + 9.79X_8 + 0.017X_3X_5 - 1.52X_3X_7 + 1.48X_3X_8 - 0.86X_5X_7 - 2.36X_5X_8 + 2.26X_7X_8 - 3.90X_3^2 - 4.13X_5^2 - 6.48X_7^2 - 6.83X_8^2 \quad (6)$$

由表 7 可知,该模型差异性极显著 ($P < 0.01$),且失拟项不显著 ($P > 0.05$),表明该模型拟合良好,模型可信。变异系数为 4.63%,决定系数 $R^2 = 0.9460$,校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.8920$,表明该试验具有较好的可靠性,拟合方程可靠度高。 X_3 、 X_5 、 X_7 、 X_8 对牵引阻力 Y 影响极显著 ($P < 0.01$);二次项 X_7^2 、 X_8^2 对牵引阻力 Y 影响极显著 ($P < 0.01$)。对比 F 值可知,各因素对牵引阻力影响由大到小为: X_5 、 X_3 、 X_8 、 X_7 。

1.4.5 参数优化与仿真验证

利用 Design-Expert 软件中的优化模块,以覆土

表 6 Box – Behnken 试验设计方案及结果

Tab.6 Design and results of Box – Behnken test

序号	因素				Y/N
	X_3	X_5	X_7	X_8	
1	−1	−1	0	0	84.13
2	1	−1	0	0	115.64
3	−1	1	0	0	104.59
4	1	1	0	0	136.17
5	0	0	−1	−1	95.15
6	0	0	1	−1	100.69
7	0	0	−1	1	104.48
8	0	0	1	1	119.07
9	−1	0	0	−1	87.59
10	1	0	0	−1	100.03
11	−1	0	0	1	107.79
12	1	0	0	1	126.16
13	0	−1	−1	0	80.66
14	0	1	−1	0	114.39
15	0	−1	1	0	98.35
16	0	1	1	0	128.65
17	−1	0	−1	0	88.87
18	1	0	−1	0	119.03
19	−1	0	1	0	102.39
20	1	0	1	0	126.47
21	0	−1	0	−1	80.66
22	0	1	0	−1	114.89
23	0	−1	0	1	107.07
24	0	1	0	1	131.87
25	0	0	0	0	114.04
26	0	0	0	0	117.34
27	0	0	0	0	119.20
28	0	0	0	0	120.54
29	0	0	0	0	118.64

表 7 方差分析

Tab.7 Variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	6 256.44	14	446.89	17.52	<0.000 1 **
X_3	1 828.79	1	1 828.79	71.71	<0.000 1 **
X_5	2 242.70	1	2 242.70	87.94	<0.000 1 **
X_7	444.57	1	444.57	17.43	0.000 9 **
X_8	1 149.15	1	1 149.15	45.06	<0.000 1 **
X_3X_5	0.00	1	0.00	0.00	0.994 6
X_3X_7	9.24	1	9.24	0.36	0.556 8
X_3X_8	8.79	1	8.79	0.34	0.566 5
X_5X_7	2.94	1	2.94	0.12	0.739 2
X_5X_8	22.23	1	22.23	0.87	0.366 3
X_7X_8	20.48	1	20.48	0.80	0.385 4
X_3^2	98.73	1	98.73	3.87	0.069 3
X_5^2	110.38	1	110.38	4.33	0.056 3
X_7^2	272.70	1	272.70	10.69	0.005 6 **
X_8^2	302.38	1	302.38	11.86	0.004 0 **
残差	357.05	14	25.50		
失拟项	332.64	10	33.26	5.45	0.058 3
纯误差	24.41	4	6.10		
总和	6 613.49	28			

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$),下同。

作业牵引阻力实测值 112.63 N 为目标值进行求解,得到与实测值相近的一组解为:土壤-土壤滚动摩擦因数 $x_3 = 0.15$ 、土壤-65Mn 静摩擦因数 $x_5 = 0.31$ 、临界法向应力 $x_7 = 18.45$ kPa、临界切向应力 $x_8 = 18.58$ kPa。为了验证该组参数的可靠性,以上述参数为 EDEM 仿真参数,进行 3 组仿真试验,求得阻力平均值为 111.73 N,与实测值相对误差为 0.80%,表明该组仿真参数具有较高的可靠性和真实性。

2 种沟土壤与种子互作离散元参数标定

2.1 种子建模

选择绥农 14 号大豆种子为研究对象,经反复测量,其三轴尺寸(长、宽、厚)平均值为 7.33、7.26、6.56 mm。由于大豆种子相对规则,可近似椭球体^[40],采用 3 球填充方法,建立的大豆种子离散元模型如图 7 所示。



图 7 大豆种子离散元模型
Fig. 7 Discrete element model of soybean seeds

2.2 离散元参数标定

仿真计算时大豆颗粒与大豆颗粒、大豆颗粒与种沟土壤接触模型都选用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型^[24]。目前对大豆种子离散元参数标定研究较多,大豆种子本征参数和大豆种子间的接触参数可通过测定或查阅文献得到(表 8),但种沟土壤与大豆种子的接触参数需要进一步标定。具体方法是以大豆种子在种沟土壤表面的堆积角为评价指标^[24],通过 Box - Behnken 试验,以堆积角实测为优化目标,得到最优的接触参数组合。

表 8 大豆种子仿真参数

Tab. 8 Soybean seed simulation parameters			
材料	参数	数值	来源
大豆	密度/(kg·m ⁻³)	1.21 × 10 ³	测定
	泊松比	0.4	文献[40]
	剪切模量/Pa	5.09 × 10 ⁷	文献[40]
	碰撞恢复系数	0.6	文献[41]
大豆-大豆	静摩擦因数	0.5	文献[41]
	滚动摩擦因数	0.01	文献[41]

2.2.1 实际堆积角测定

堆积角测定装置如图 8a 所示,主要由盛料箱、

抽板、土壤盘等组成。种沟土壤制备方法及土壤条件同 1.2 节,将种沟土壤放置在土壤盘内,盛料箱装满大豆种子颗粒后放置在土壤盘上,移走抽板,大豆种子颗粒会流出盛料箱,并在种沟土壤上形成一个堆积角 β 。通过 CAD 软件对堆积角进行测量,试验结果如图 8b 所示。试验重复 3 次,得到平均堆积角为 23.57°。

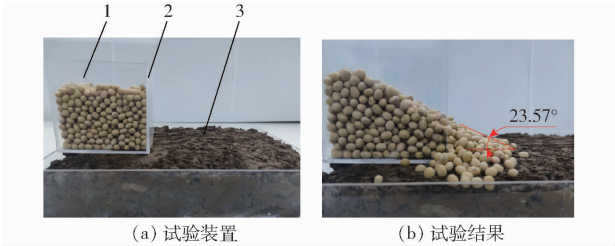


图 8 堆积角测定试验

Fig. 8 Stacking angle measurement test

1. 盛料箱 2. 抽板 3. 土壤盘

2.2.2 Box - Behnken 试验

根据文献[23 - 24]研究成果,综合分析后,确定了待标定参数种沟土壤与大豆种子碰撞恢复系数 z_1 、静摩擦因数 z_2 、滚动摩擦因数 z_3 的取值范围,各因素编码如表 9 所示。以堆积角仿真值为试验指标,应用 Design-Expert 软件设计三因素三水平正交回归试验,仿真试验中种沟土壤参数设置为前文标定参数,仿真试验过程如图 9 所示,试验设计方案及结果如表 10 所示,方差分析结果如表 11 所示。 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为因素 z_1 、 z_2 、 z_3 的编码值。

表 9 堆积角仿真试验因素编码

Tab. 9 Stacking angle simulation test factors codes			
编码	因素		
	z_1	z_2	z_3
-1	0.5	0.20	0.01
0	0.6	0.35	0.06
1	0.7	0.50	0.11

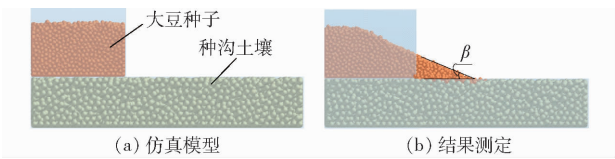


图 9 堆积角仿真试验

Fig. 9 Stacking angle simulation test

对试验数据进行多元回归拟合,可得到因素编码值 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 表示的堆积角 β 二阶回归方程为 $\beta = 22.96 - 0.51Z_1 - 0.28Z_2 + 1.1Z_3 + 0.01Z_1Z_2 + 0.077Z_1Z_3 - 0.08Z_2Z_3 - 0.27Z_1^2 - 0.29Z_2^2 + 0.015Z_3^2$ (7)

由表 11 可知,回归模型极显著 ($P < 0.01$),且失拟项不显著 ($P > 0.05$),表明该模型拟合良好,模

表 10 堆积角仿真试验方案及结果

Tab.10 Design and results of stacking angle simulation test

序号	因素			$\beta/(^{\circ})$
	Z_1	Z_2	Z_3	
1	-1	-1	0	23.36
2	1	-1	0	22.03
3	-1	1	0	22.75
4	1	1	0	21.46
5	-1	0	-1	21.79
6	1	0	-1	20.90
7	-1	0	1	24.35
8	1	0	1	23.77
9	0	-1	-1	22.03
10	0	1	-1	21.67
11	0	-1	1	23.87
12	0	1	1	23.19
13	0	0	0	22.93
14	0	0	0	22.53
15	0	0	0	22.86
16	0	0	0	23.12
17	0	0	0	23.37

表 11 堆积角仿真试验方差分析

Tab.11 Variance analysis of stacking angle simulation test

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	13.12	9	1.46	9.34	0.003 8 **
Z_1	2.09	1	2.09	13.39	0.008 1 **
Z_2	0.62	1	0.62	3.95	0.087 3
Z_3	9.66	1	9.66	61.86	0.000 1 **
Z_1Z_2	<0.001	1	0.00	0.00	0.961 0
Z_1Z_3	0.02	1	0.02	0.15	0.706 5
Z_2Z_3	0.03	1	0.03	0.16	0.697 6
Z_1^2	0.32	1	0.32	2.04	0.196 7
Z_2^2	0.35	1	0.35	2.23	0.179 4
Z_3^2	0.00	1	0.00	0.01	0.939 1
残差	1.09	7	0.16		
失拟项	0.70	3	0.23	2.41	0.207 6
纯误差	0.39	4	0.10		
总和	14.21	16			

型可信。变异系数为 1.74%，决定系数 $R^2=0.923\ 1$ ，表明该试验具有较好的可靠性，拟合方程可以较好地 对优化试验中各种试验结果进行预测。其中模型的 Z_1 、 Z_3 对堆积角 β 影响极显著，其余各项均不显著。对比 F 值可知，各因素对堆积角影响由大到小为： Z_3 、 Z_1 、 Z_2 。

2.2.3 参数优化

利用 Design-Expert 软件中的优化模块，以 2.2.1 节中实测大豆种子在种沟土壤表面的堆积角 $\beta=23.57^{\circ}$ 为目标值，进行优化求解，获得种沟土壤

与大豆种子接触参数最优标定组合为 $z_1=0.57$ ， $z_2=0.33$ ， $z_3=0.08$ ，即种沟土壤与大豆种子碰撞恢复系数为 0.57、静摩擦因数为 0.33、滚动摩擦因数为 0.08。

3 种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立与验证

3.1 种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立

根据前文对种沟土壤与覆土装置、大豆种子与土壤互作离散元参数标定结果，建立种沟土壤-种子-覆土装置三者互作的离散元模型，如图 10 所示。为了模型的准确性，在种沟土壤模型稳定后，在种沟内随机生成大豆种子 7 粒，依次记为 S1 ~ S7，结合大豆种植农艺特点，相隔两粒种子之间的间距为 10 cm。

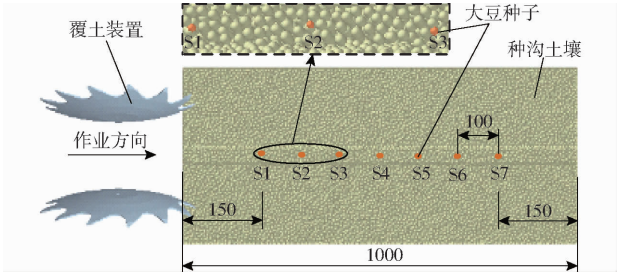


图 10 种沟土壤-种子-覆土装置离散元模型

Fig.10 Discrete element model of seed furrow soil - seed - covering device

3.2 验证试验

3.2.1 种沟土壤-覆土装置互作离散元模型及参数验证

采用不同的土壤接触参数和模型参数建模，土壤所表现出来的宏观性质是不同的，其中表现较明显的是触土部件在土壤中运动时受到的阻力^[27]。因为上文离散元仿真参数的标定是在特定的作业条件下完成，为了验证标定结果是否具有普遍性和真实性，采用自主设计的覆土装置进行覆土作业，选择不同的作业工况，对比分析覆土作业时受到牵引阻力的实测值与相同作业条件下 EDEM 中仿真值，以相对误差为评价指标来验证种沟土壤与覆土装置离散元参数标定的可靠性和准确性。试验条件和试验过程同 1.3 节，试验重复 3 次。

试验结果如表 12 所示，当覆土装置入土深度为 70 mm，覆土盘安装间距为 220 mm，覆土盘与竖直面安装倾角为 12°，作业速度为 4、6、8 km/h 时，牵引阻力实测值与仿真值的相对误差分别为 2.65%、3.34%、0.68%，相对误差的平均值为 2.22%。结果表明种沟土壤-覆土装置互作离散元模型及参数

表 12 牵引阻力试验结果
Tab. 12 Test result of draught force

作业速度/(km·h ⁻¹)	实测值/N	仿真值/N	相对误差/%
4	95.35	92.82	2.65
6	103.22	96.87	3.34
8	112.63	111.73	0.68
平均值			2.22

标定准确可靠。

3.2.2 种沟土壤-种子互作离散元模型及参数验证

采用种沟土壤与大豆种子接触参数最优组合：碰撞恢复系数为 0.57、静摩擦因数为 0.33、滚动摩擦因数为 0.08 开展仿真验证,3 次重复试验得到仿真堆积角分别为 22.98°、23.94°、22.65°, 均值为 23.19°, 标准差为 0.67°, 与实测堆积角 23.57° 相比,相对误差为 1.61%, 结果表明种沟土壤-种子互作离散元参数标定准确。

3.2.3 种沟土壤-种子-覆土装置离散元模型验证

根据播种机和覆土装置作业性能要求,选用覆土厚度 H 和种子粒距变异系数 C_v 为评价指标开展验证试验。

仿真试验结束后,利用 EDEM 后处理 Analyst 模块中 Clipping 功能,找出各种子的位置,利用测量工具测量种子至表层土壤的深度,即为该粒种子的覆土厚度。取种子 S1 ~ S7 覆土厚度的平均值为仿真值。田间试验时,在不安装覆土装置的情况下,完成开沟作业后,将大豆种子按图 10 的方法依次放置在种沟内,待完成覆土作业后,取各种子位置的横断面,量取各种子的覆土厚度,取覆土厚度的平均值为实测值。

为了减少测量累积误差,分别记录种子仿真后和试验后在前进方向的位置坐标,种子粒距变异系数计算式为

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (L_i - \bar{L})^2}}{\bar{L}} \times 100\% \tag{8}$$

其中

$$L_i = l_{i+1} - l_i \tag{9}$$

$$\bar{L} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 L_i \tag{10}$$

式中 i ——种子编号,取 1 ~ 6

l_i ——第 i 个种子在前进方向的位置坐标, mm

L_i ——第 $i+1$ 和第 i 个种子的粒距, mm

$\bar{L}$ ——粒距平均值, mm

覆土厚度和粒距变异系数测量试验过程如图 11、12 所示。

验证试验结果如表 13 所示,覆土厚度仿真值与

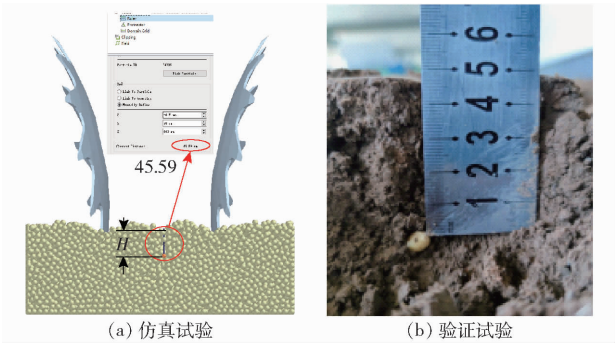


图 11 覆土厚度验证试验

Fig. 11 Verification test of soil cover thickness

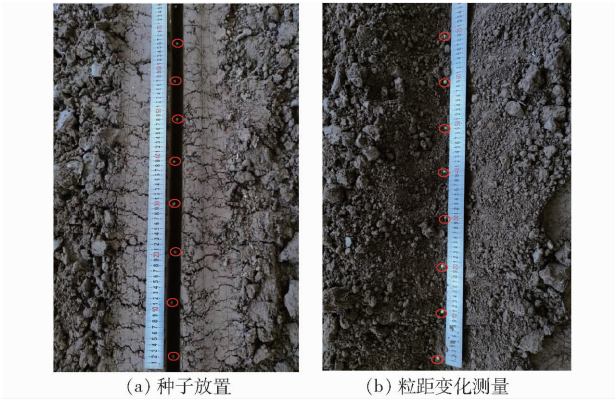


图 12 种子粒距变化测量

Fig. 12 Measurement of changes in seed spacing

表 13 覆土作业试验结果

Tab. 13 Test result of soil covering operation

参数	覆土厚度/mm	粒距变异系数/%
仿真值	46.33	3.59
实测值	48.70	3.39
相对误差/%	4.89	5.90

实测值分别为 46.33、48.70 mm, 相对误差为 4.89%; 粒距变异系数仿真值与实测值分别为 3.59%、3.39%, 相对误差为 5.90%。结果表明,覆土厚度和粒距变异系数实测值和仿真值相对误差均较小,所建立的种沟土壤-种子-覆土装置三者互作离散元模型准确,可以很好地模拟播种机种沟覆土过程及覆土过程中种子运动规律。

4 结论

(1) 基于 EDEM 软件,建立了种沟土壤与覆土装置互作的离散元模型,选用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型对种沟土壤进行离散元参数标定,以覆土装置作业过程牵引阻力为评价指标,优化求解得出对牵引阻力影响显著的因素:土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-65Mn 静摩擦因数、临界法向应力、临界切向应力分别为 0.15、0.31、18.45 kPa、18.58 kPa。该最优解下,牵引阻力仿真值与实测值

相对误差平均值为 2.22%。

(2)建立了种沟土壤与大豆种子互作的离散元模型,以种沟土壤与大豆种子碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数为试验因素,以仿真堆积角为评价指标,优化得出种沟土壤与大豆种子碰撞恢复系数为 0.57、静摩擦因数为 0.33、滚动摩擦因数为 0.08。该最优解下,堆积角仿真值与实测值相对误

差为 1.61%。

(3)建立了种沟土壤-种子-覆土装置三者互作的离散元模型,以覆土厚度和粒距变异系数为评价指标开展验证试验,得到了覆土厚度和种子粒距变异系数仿真值与实测值的相对误差分别为 4.89%、5.90%。结果表明本文建立的种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型真实准确。

参 考 文 献

- [1] 郭慧. 玉米播种质量评价与覆土镇压装置研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
GUO Hui. Study on maize sowing quality evaluation and soil covering-compacting device[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [2] 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春:吉林大学, 2012.
WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in process of soil covering and rolling with precision seeder[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [3] 张志君, 孙旭伟, 金柱男, 等. 大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 34-40, 73.
ZHANG Zhijun, SUN Xuwei, JIN Zhu'nan, et al. Design and test of crushing bionic soil covering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 34-40, 73. (in Chinese)
- [4] 邢洁洁, 张锐, 吴鹏, 等. 海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 158-166.
XING Jiejie, ZHANG Rui, WU Peng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 158-166. (in Chinese)
- [5] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1-20. (in Chinese)
- [6] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105-117.
- [7] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 140-153.
- [8] 刘畅, 陈晓雪, 张文, 等. PFC 数值模拟中平行粘结细观参数标定过程研究[J]. 价值工程, 2017, 36(26): 204-207.
LIU Chang, CHEN Xiaoxue, ZHANG Wen, et al. Study on the calibration process of parallel bonding meso-structure parameter in PFC numerical simulation[J]. Value Engineering, 2017, 36(26): 204-207. (in Chinese)
- [9] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130-140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130-140. (in Chinese)
- [10] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49-56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49-56. (in Chinese)
- [11] 王宪良, 钟晓康, 耿元乐, 等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 100-107.
WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 100-107. (in Chinese)
- [12] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.
WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98. (in Chinese)
- [13] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116-123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116-123. (in Chinese)
- [14] 贺一鸣, 向伟, 吴明亮, 等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的标定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 216-220.

- HE Yiming, XIANG Wei, WU Mingliang, et al. Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(2): 216–220. (in Chinese)
- [15] 聂晨旭, 杨明金, 李守太, 等. 西南区坡耕地紫色土离散元模型参数标定[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 454–463.
- NIE Chenxu, YANG Mingjin, LI Shoutai, et al. Parameter calibration of discrete element model for purple soil on sloping farmland in Southwest China[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2022, 53(3): 454–463. (in Chinese)
- [16] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 213: 105123.
- [17] KOUSHKAKI H R, ESKAFTAKI M M, NEJADIAN H A. Simulation of draught force during chisel ploughing using discrete element method[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2022, 47: 152–166.
- [18] ZENG Zhiwei, MA Xu, CHEN Ying, et al. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM)[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 197: 104505.
- [19] 丁启朔, 任骏, BELAL Eisa Adam, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38–48.
- DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38–48. (in Chinese)
- [20] 孙景彬, 刘琪, 杨福增, 等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 63–73.
- SUN Jingbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 63–73. (in Chinese)
- [21] 石林榕, 赵武云, 孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 181–187.
- SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 181–187. (in Chinese)
- [22] 徐天月. 精密播种单体及其关键部件工作的试验研究与仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- XU Tianyue. Experimental study and simulation analysis of the working process of the precision seeding unit and its key parts [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [23] 睦晋. 大豆种子与土壤的碰撞过程试验研究与仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- SUI Jin. Research on experiment and simulation analysis of soybean collision with soil [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [24] 闫东旭. 大豆种子颗粒建模及投种、覆土镇压过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- YAN Dongxu. Particle modelling of soybean seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-throwing and pressing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [25] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124–136.
- WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124–136. (in Chinese)
- [26] 都鑫, 刘彩玲, 姜萌, 等. 基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 141–149.
- DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Calibration of Bonding model parameters for coated fertilizers based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 141–149. (in Chinese)
- [27] 马帅, 徐丽明, 袁全春, 等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 40–49.
- MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 40–49. (in Chinese)
- [28] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 113–121.
- XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 113–121. (in Chinese)
- [29] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155: 44–54.
- [30] 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.
- [31] 祝英豪, 夏俊芳, 曾荣, 等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 42–50.

- ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42 – 50. (in Chinese)
- [32] AHMAD F, QIU Baijing, DING Qishuo, et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 103 – 110.
- [33] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil tool interaction[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 118: 117 – 122.
- [34] 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.
- [35] 方会敏, 姬长英, Chandio Farman-Ali, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22 – 28.
- FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22 – 28. (in Chinese)
- [36] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78 – 85.
- WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 – 85. (in Chinese)
- [37] 何晓宁, 张学军, 赵壮, 等. 反向旋抛式油莎豆起挖装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 34 – 43.
- HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and optimization tests of reverse spin-throwing *Cyperus edulis* starting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 34 – 43. (in Chinese)
- [38] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 100 – 108, 242.
- TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw – soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100 – 108, 242. (in Chinese)
- [39] 宋占华, 李浩, 闫银发, 等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 21 – 33.
- SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles dem theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 21 – 33. (in Chinese)
- [40] 王扬, 吕凤妍, 徐天月, 等. 大豆籽粒形状和尺寸分析及建模[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018 48(2): 507 – 517.
- WANG Yang, LÜ Fengyan, XU Tianyue, et al. Shape and size analysis of soybean kernel and modeling[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018 48(2): 507 – 517. (in Chinese)
- [41] 陈玉龙, 贾洪雷, 王佳旭, 等. 大豆高速精密播种机凸勾排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 95 – 104.
- CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 95 – 104. (in Chinese)