

# 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究

颜丙新<sup>1</sup> 武广伟<sup>1</sup> 付卫强<sup>1</sup> 高娜娜<sup>1</sup> 孟志军<sup>1</sup> 朱鹏<sup>2</sup>

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 山东大华机械有限公司, 济宁 272000)

**摘要:** 玉米精量播种机多采用高位投种, 种子着床过程弹跳移位, 粒距一致性变差的问题突出。为了探明高位投种着床位置影响因素, 利用三维激光绝对臂测量机, 扫描真实种沟外形, 通过逆向建模方法构建种沟三维数字模型, 采用正向测量和逆向验证组合标定种子与土壤接触参数: 滚动摩擦因数 0.22, 滑动摩擦因数 0.727, 碰撞恢复系数 0.16。基于标定参数的仿真试验与真实试验相比, 着床种子与导种管出口距离误差为 4.7%, 仿真种子着床过程与真实过程接近。以播种作业速度、粒距和投种角为因素, 以种子着床点与第 1 落点的纵向偏移量为指标, 基于种沟三维数字模型, 开展单因素仿真试验和两因素四水平仿真试验, 单因素试验结果表明: 高位投种过程中, 粒距对种子纵向偏移量影响不显著 ( $P > 0.05$ ), 投种角和作业速度对种子纵向偏移量有显著影响 ( $P < 0.01$ ); 两因素四水平试验表明: 相同投种角条件下, 纵向偏移量随着作业速度的增大而增大; 相同作业速度条件下, 纵向偏移量随投种角的增大而增大; 着床时种子与种床的纵向速度 (种子速度沿作业方向的分量) 与纵向偏移量呈线性相关关系, 作业速度和投种角通过影响种子与种床的纵向速度影响种子着床分布。田间试验表明: 随纵向速度增加, 粒距合格指数先增大后减小, 变异系数先减小后增加; 粒距合格指数最大值出现在纵向速度为 0.14 m/s 时, 粒距变异系数最小值出现在纵向速度 -0.18 m/s 时, 说明纵向速度越接近零, 播种效果越好, 进一步验证了仿真试验结论。

**关键词:** 玉米精量播种; 高位投种; 着床分布; 种沟数字模型; EDEM 仿真

中图分类号: S223.2<sup>+</sup>3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0047-08

## Influencing Factors of Corn Implantation Distribution for High-height Planting Based on EDEM

YAN Bingxin<sup>1</sup> WU Guangwei<sup>1</sup> FU Weiqiang<sup>1</sup> GAO Nana<sup>1</sup> MENG Zhijun<sup>1</sup> ZHU Peng<sup>2</sup>

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Shandong Dahua Machinery Co., Ltd., Jining 272000, China)

**Abstract:** Seed-meter is high-height installed by many precision planters. Seeds go through tube and get a high speed before implantation in those planters. Shift caused by a collision in high speed leads to bad uniformity of seed distance. To explore the law of seed implantation distribution based on high-height planting, an absolute arm with three-dimensional (3D) laser was used to scan the soil surface profile of seed furrow, a 3D digital model of seed furrow was constructed, contact parameters between seeds and soil were calibrated. Coefficient of rolling friction, coefficient of sliding friction and collision recovery coefficient were 0.22, 0.727 and 0.16, respectively. Compared with the real test results, the distance error between implanted seed and outlet of seed tube by simulation was 4.7%. Operating speed, spacing in the rows and seed throwing angle were taken into account. Longitudinal offset of seed implantation point and the first landing point were taken as the indexes. A single factor test and a 2 × 4 full factor test were carried out. Single-factor test results showed that spacing in the row had no significant effect on longitudinal offset ( $P > 0.05$ ), while seed throwing angle and operation speed had significant effect on the longitudinal offset of seeds ( $P < 0.01$ ). Full factor test result indicated that longitudinal offset was increased with the increase of operation speed under same seed throwing angle; longitudinal offset was increased with the increase of seed throwing angle under the condition of same operating speed. There

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010732)和现代农业产业技术体系专项(CARS-02)

作者简介: 颜丙新(1988—),男,博士后,主要从事农业装备及其智能化研究, E-mail: ybx0122@126.com

通信作者: 孟志军(1975—),男,研究员,主要从事农业装备及其智能化研究, E-mail: mengzj@nrcita.org.cn

was a linear correlation between longitudinal (along operation direction) velocity and longitudinal offset. Operation speed and seed throwing angle affected seed implantation distribution by influencing the longitudinal velocity between seed and seedbed. Field trials were conducted, results showed that with the increase of longitudinal velocity, the qualified index of spacing in the row first was increased and then decreased, and the coefficient of variation was firstly decreased and then increased, which further verified the conclusion of simulation test.

**Key words:** corn precision planting; high-height planting; implantation distribution; digital model of seed furrow; EDEM simulation

## 0 引言

联合国粮农组织预测 2050 年全球人口将超过 90 亿,地球面临着巨大的粮食增产压力<sup>[1]</sup>,玉米是我国第一大粮食作物,保证玉米产量对于保证我国粮食安全具有重要意义。

稳定一致的粒距能够保证植株田间分布的均匀性,最大限度地减小植株间对土壤水分、养分和光照的竞争从而提高产量,是精密播种的重要目标之一<sup>[2-4]</sup>。随着排种器作业速度的提高,种子着床过程弹跳移位对粒距一致性的影响越来越大。零速投种能最大限度减小种子着床移位,提高粒距一致性。文献[5]设计了一款电驱式二次投种装置,试验表明,高速作业(10~14 km/h)状态下,配备有电驱式二次投种装置的播种行作业效果优于传统导种管<sup>[5]</sup>。约翰迪尔公司设计了一种毛刷式二次送种装置,来自排种器的种子由毛刷与侧壁夹持,同时毛刷转速随作业速度变化,减小种子着床时竖直方向的速度并实现作业方向的零速投种<sup>[6]</sup>; Precision Planting 公司采用隔断代替毛刷送种,每个隔断承接排种器的单粒种子,隔断式送种带转速随作业速度调整,实现零速投种<sup>[7]</sup>。但是由于结构复杂,成本较高,不适合我国玉米播种现状。我国目前主要使用的精密播种机多以排种器高位安装与导种管送种组合为主。探明高位投种着床位置影响因素,对进一步提升种子着床精度,减少着床弹跳,保证粒距一致性具有重要意义。

文献[8]采用光电传感器测定种子着床速度,对种子着床后的弹跳滚动位移进行了初步测量和建模;文献[9]对理想状况下种薯与土壤接触后的弹跳进行了运动学和动力学分析,确定了种薯碰撞过程的运动轨迹方程;文献[10]采用高速摄像机和高分辨率摄像头对水稻种子与斜面碰撞运动规律进行了研究;文献[11]通过种子以已知速度和角度碰撞土壤表面,测量弹跳和滚动产生的位移量,发现碰撞速度越小,相对弹跳移位越小。上述研究为种子着床研究提供了理论根据,但针对高位投种过程种子着床位置影响因素的研究鲜见报道。

为此,本文以探明高位投种过程种子着床位置影响因素为目的,借助三维激光绝对臂测量机扫描土壤种沟表面情况,通过逆向建模方法构建种沟三维数字模型,标定种子与土壤的接触参数,开展基于离散单元法(E-discrete element method, EDEM)的仿真试验,以种子着床纵向偏移量为指标,研究作业速度、投种角和株距对种子着床位置的影响,并通过田间播种试验,对仿真结果进行验证。

## 1 种沟模型构建

### 1.1 种沟三维数字模型构建

由于土壤的复杂性和多样性,目前没有准确的土壤数字模型。国内外学者往往以特定土壤类型为研究对象,采用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion、The Edinburgh Elasto - Plastic Cohesion、Hysteretic spring contact model 及 liner Cohesion model 等模型基于颗粒填充方法构建土壤数字模型<sup>[12]</sup>。由于实际土壤颗粒绝对尺寸小,而相对尺寸差异大,为减小运算量,降低颗粒数量,仿真时在实际土壤颗粒直径 0.02~2 mm 的基础上放大数十倍甚至上百倍,将仿真颗粒设置为 2~10 mm 不等。在触土部件尺寸与土壤颗粒直径差异较大时,这种土壤颗粒半径的设置对实际仿真效果影响不大,但在种子与土壤的接触过程中,土壤颗粒的放大设置对运动状态的影响较大。而按实际尺寸采用球面填充构建土壤模型,颗粒数量多,运算量大。种子与土壤接触碰撞,受种子外形和种沟土壤轮廓影响较大,受土壤颗粒间作用力的影响较小,故本研究借助三维激光绝对臂测量机扫描土壤种沟表面情况,通过逆向建模方法构建具有实际种沟外形特征的三维数字模型。

种沟模型构建所需硬件如图 1 所示,微型土槽土壤取自北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地,褐土,含水率 12%。采用玉米精量播种机常用典型双圆盘开沟器,进行播深 3 cm 的开沟,开沟圆盘直径 380 mm,夹角 15°,聚点高度 55°。双圆盘开沟器匀速划过土壤表层后留下种沟。在微型土槽上方放置中间开口的白色纸板,开口处为种沟,

选用绝对臂测量机(海克斯康测量技术(青岛)有限公司,RS2 型激光探头,扫描速度 460 000 点/s,精度 30  $\mu\text{m}$ ,最小点间距 0.014 mm)扫描种沟表面,为了减小扫描点的数量,仅扫描白色纸板内的区域,获取种沟点云。对点云进行多边形拟合,曲面构造,最终形成三维种沟实体模型,如图 2 所示。对模型进行拼接,构建长度为 10 m 的仿真用种沟模型。

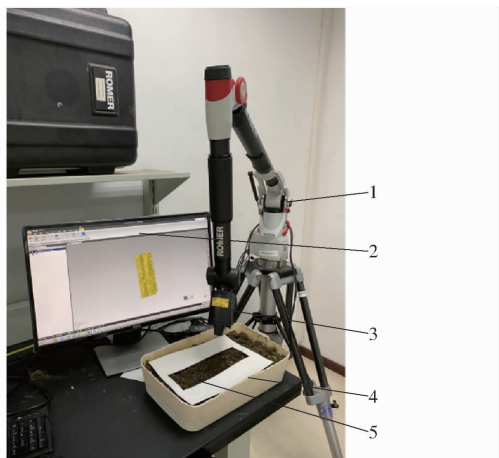


图 1 种沟模型构建硬件组成

Fig. 1 Test devices for seed-bed modelling

1. 绝对臂测量机 2. 计算机 3. RS2 型激光探头 4. 微型土槽  
5. 种沟

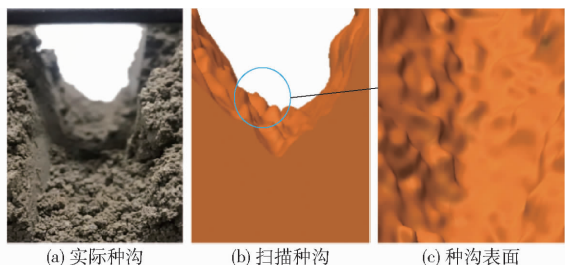


图 2 种沟模型

Fig. 2 Seed-bed model

## 1.2 玉米种子与土壤参数标定

EDEM 已经广泛应用于农业研究,种子、土壤本征参数以及种子与不同物料间的接触参数被广泛研究<sup>[13-14]</sup>,研究方法成熟且数据完备<sup>[15-17]</sup>。本研究选用郑单 958 玉米种子,其本征参数参照文献[18]确定。土壤本征参数参照文献[19]。种子与导种管接触参数参照文献[20]中种子与塑料排种盘接触参数,具体参数见表 1。

### 1.2.1 玉米种子与土壤接触参数标定

仿真过程除了需要确定种子、导种管、土壤本征参数(泊松比、密度、剪切模量等),种子与导种管接触参数(碰撞恢复系数、滑动摩擦因数、滚动摩擦因数等)外,还需确定种子与土壤的接触参数。本文采用正向测量和逆向验证结合的方式确定种子与土壤的接触参数。首先实测玉米种子与土壤接触的滚

表 1 物料参数

Tab. 1 Physical parameters

材料	泊松比	剪切模量/ MPa	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
玉米种子	0.40	137	1.197
导种管	0.50	177	1.180
土壤	0.38	1	1.850
玉米种子与导 种管接触参数	滑动摩擦因数	0.093 1	
	滚动摩擦因数	0.482 0	
	碰撞恢复系数	0.621 0	

动摩擦因数、滑动摩擦因数和碰撞恢复系数;然后进行真实种子着床分布试验;最后开展仿真试验,以真实试验测定的种子着床分布规律为指标,逆向验证接触参数。

滚动摩擦因数的测定根据能量守恒定律,构建土壤平面,如图 3 所示,种子从土壤平面 A 点静止开始纯滚动到达 B 点满足公式<sup>[21]</sup>

$$mgL\sin\theta - \mu mg\cos\theta - \frac{1}{2}mV^2 = 0 \quad (1)$$

式中  $m$ ——种子质量,kg

$g$ ——重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$

$L$ ——种子在土壤表面滚动的长度,m

$\theta$ ——土壤表面与水平面夹角, $(^\circ)$

$\mu$ ——滚动摩擦因数

$V$ ——种子离开土壤表面时的速度, $\text{m}/\text{s}$

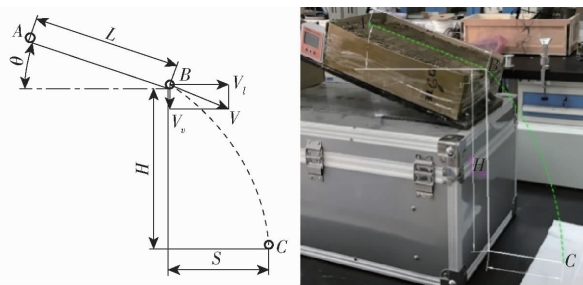


图 3 滚动摩擦因数测量原理图

Fig. 3 Measuring schematic for coefficient of rolling friction

从 B 点到达 C 点满足公式

$$\begin{cases} H = V_v t + \frac{1}{2}gt^2 \\ S = V_h t \end{cases} \quad (2)$$

式中  $V_v$ ——种子速度竖直分量, $\text{m}/\text{s}$

$V_h$ ——种子速度水平分量, $\text{m}/\text{s}$

$H$ ——种子离开土壤表面位置与落点平面的高度,m

$t$ ——种子离开土壤表面到接触落点平面消耗的时间,s

$S$ ——种子从 B 点到接触落点 C 的水平距离,m

整理式(2)得滚动摩擦因数

$$\mu = \{L \sin \theta - S^2 / [4 \cos^2 \theta (H - S \tan \theta)]\} / L \cos \theta \quad (3)$$

滚动摩擦因数测定基于玉米种子纯滚动,玉米种子外形差异较大,为获取较为准确的测量结果,选取球度大于0.8的10粒种子进行试验。测量 $S$ 的数值,并计算对应滚动摩擦因数,10粒种子平均滚动摩擦因数为0.22。

滑动摩擦因数 $\mu_s$ 采用斜面法测定,将种子置于土壤表面,缓慢增加倾角,直到种子滑动,记录10次倾角结果,平均值为 $36.02^\circ$ ,滑动摩擦因数为0.727。

碰撞恢复系数是两物体碰撞后的分离速度与碰撞前的接近速度的比值,将玉米种子从高度 $H_1$ 处静止释放,自由落体运动与土壤碰撞弹跳,弹起高度为 $h_1$ ,碰撞恢复系数可表示为

$$C_r = \frac{0 - v'}{v - 0} = \frac{\sqrt{2gh_1}}{\sqrt{2gH_1}} = \sqrt{\frac{h_1}{H_1}} \quad (4)$$

式中  $C_r$ ——碰撞恢复系数

$v$ ——碰撞前种子接近土壤的速度, m/s

$v'$ ——碰撞后种子远离土壤的速度, m/s

在距离土壤平面600 mm高度释放种子,利用高速相机记录种子下落过程,找到种子弹跳恢复到最高点时的高度,记录10粒种子的结果,并计算平均碰撞恢复系数为0.16。

## 1.2.2 仿真参数验证

### 1.2.2.1 台架试验

如图4a所示排种器采用Precision Planting公司的精量玉米排种器,排种器安装在排种质量检测仪上,由排种质量检测仪风机提供风压,由排种质量检测仪电机提供排种盘转动动力。导种管在排种器正下方排种口处,以投种角 $40^\circ$ ,距离种床4 cm安装。导种管出口处固定有微型土槽。

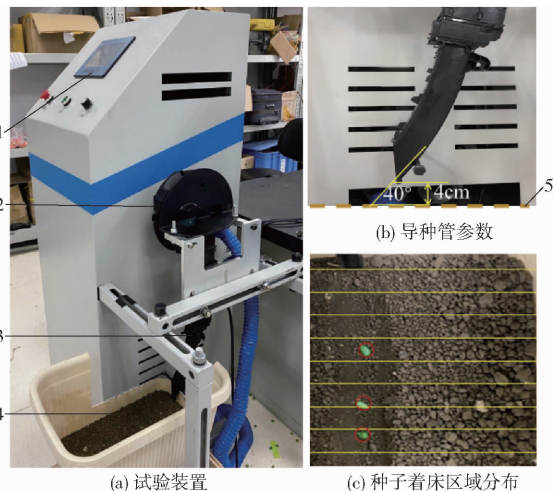


图4 种子着床分布试验

Fig.4 Seed implantation distribution test

1. 排种质量检测仪 2. 排种器 3. 导种管 4. 微型土槽 5. 种床

试验材料选取郑单958玉米种子,千粒质量307 g。作业速度设置为6 km/h,粒距为30 cm。进行无种子固定结构的种子自由着床试验。为避免种子间碰撞造成非播种状态的弹跳,每次试验种子数不超过3粒,每组试验累计取20粒种子,用摄像机记录种子静止后的种床状态。以导种管出口为起点,每隔2 cm为一个区域长度,统计种子落在不同区域的情况,如图4c所示。

种子着床平均所在区间为5.35,即着床种子与导种管出口平均距离差为10.7 cm。

### 1.2.2.2 仿真试验

按实测接触参数开展种子着床静态分布仿真试验,各试验参数与真实试验一致。每次仿真最多产生3粒种子,共记录20粒种子的着床分布。仿真中着床种子与导种管出口平均距离差为11.2 cm,与真实试验相比误差为4.7%,该套仿真参数使仿真种子着床过程与真实过程相近。说明仿真建立的种子、种沟模型及对应参数可靠,能基本反映真实种子着床情况。

## 2 着床位置影响因素试验

种子着床位置受作业速度、投种角、播种深度、土壤含水率、土壤紧实度等因素的影响<sup>[11]</sup>。实际播种作业过程中,由于土壤自身条件复杂多变,不宜控制变量;高位投种作业,播种深度的变化不影响导种管与种床高度差;低位投种过程中,粒距变化对种子着床分布影响显著,高位投种过程中粒距对着床速度的影响不明确,所以本研究选择作业速度 $V_0$ 、投种角 $\alpha$ 、粒距 $n$ 为影响因素开展研究。

根据玉米实际播种状况,选择粒距15、20、25、30 cm,作业速度4、6、8、10 km/h,投种角 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ ,进行试验。

仿真模型如图5所示,导种管正上方布置有颗粒工厂,颗粒工厂按落种频率产生种子颗粒,种子颗粒采用球面填充方式建模<sup>[21]</sup>;投种角 $\alpha$ 定义为导种管出口切线与水平面的夹角;导种管距离种床高度以实测德邦大为4行气吸式精密播种机(田间试验选用的机型)为准,取4 cm。仿真选用Hertz-Mindlin接触模型,仿真瑞利时间步长设置为 $1.4 \times 10^{-5}$  s,保存时间步长设为0.005 s。

### 2.1 评价方法

由于种沟限制,种子在幅宽方向的着床位置变异系数低于4%,变化不显著<sup>[22]</sup>,本研究重点考察沿播种机作业方向的着床位置纵向偏移量。定义种子着床点与第1落点沿作业方向的距离差为纵向偏移量 $\Delta L$ ,定义种子着床时刻沿作业方向的速度为纵



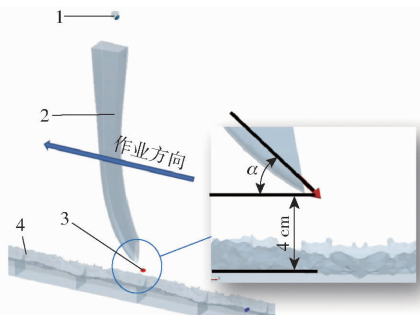


图 5 仿真模型

Fig. 5 Simulation model

1. 颗粒工厂 2. 导种管 3. 种子 4. 种沟

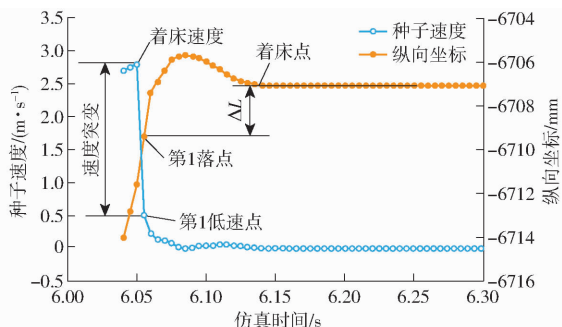
向速度  $\Delta V$ 。

$$\Delta L = X_1 - X_2 \quad (5)$$

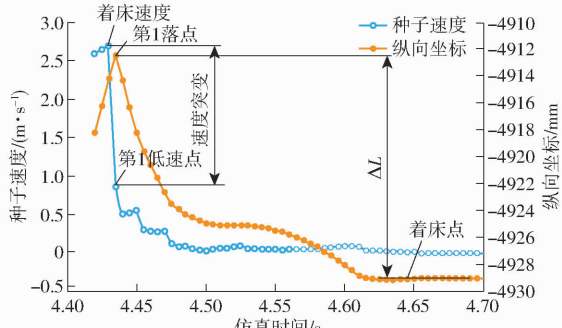
式中  $X_1$ ——第 1 落点纵坐标, mm

$X_2$ ——着床点纵坐标, mm

以仿真过程中的某粒种子为例, 绘制种子速度、纵向坐标随仿真时间变化曲线, 如图 6 所示。种子接触种床后, 运动状态发生改变(种子弹跳、滚动、减速等), 造成速度突变, 突变后第 1 个低速点对应的位置为第 1 落点位置, 着床点为纵向坐标稳定后的值, 着床点和第 1 落点之间的纵向坐标差即为纵向偏移量, 着床速度沿作业方向的分量即为纵向速度。



(a) 着床点在第 1 落点前方



(b) 着床点在第 1 落点后方

图 6 种子速度、纵向坐标随仿真时间变化曲线

Fig. 6 Changing trend of seed velocity/longitudinal coordinates with simulation time

## 2.2 单因素试验

分别对粒距、作业速度、投种角进行单因素试验, 考察各因素对纵向偏移量是否有影响。不同因

素水平下进行一次仿真, 每次仿真提取 20 粒种子的试验数据, 方差分析结果如表 2 所示。

表 2 单因素试验方差分析结果

Tab. 2 ANOVA of single factor experiment

因素	Sig.	相关性
粒距	0.395	—
投种角	0	**
作业速度	0	**

注: “—”表示无显著性差异( $P > 0.05$ ), “\*\*”表示有显著差异( $P < 0.01$ )。

粒距对种子纵向偏移量没有显著影响( $P > 0.05$ ), 投种角和作业速度对种子偏移量有显著影响( $P < 0.01$ )。这一结果与低位投种不同, 低位投种时, 纵向速度直接由作业速度、排种盘型孔数和粒距决定, 而高位投种时, 种子经过导种管的加速或者减速, 纵向速度被改变, 削弱了粒距对纵向偏移量的影响。

## 2.3 两因素四水平试验

为进一步探明投种角和作业速度对纵向偏移量的影响规律, 开展两因素四水平试验。作业过程中导种管与颗粒工厂沿种沟方向移动, 试验安排和仿真参数设置如表 3 所示, 仿真初始参数包括投种角、落种频率、初始水平速度和初始垂直速度。落种频率通过粒距、作业速度之间函数关系确定; 初始水平速度为作业速度; 初始垂直速度为种子离开排种盘的线速度, 落种频率  $F_r$  和初始垂直速度  $V_v$  计算式为

$$F_r = \frac{V_0}{3.6n} \quad (6)$$

$$V_v = 2\pi r \times 100 \frac{V_0}{3.6nN_h} \quad (7)$$

表 3 试验安排和仿真参数设置

Tab. 3 Test arrangement and simulation parameters

序号	投种角/ (°)	作业速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	落种频率/ Hz	初始垂直速 度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	30	4	3.704	1.111
2	40	6	5.556	1.667
3	50	8	7.407	2.222
4	60	10	9.259	2.778
5	30	6	5.556	1.667
6	40	4	3.704	1.111
7	50	10	9.259	2.778
8	60	8	7.407	2.222
9	30	8	7.407	2.222
10	40	10	9.259	2.778
11	50	4	3.704	1.111
12	60	6	5.556	1.667
13	30	10	9.259	2.778
14	40	8	7.407	2.222
15	50	6	5.556	1.667
16	60	4	3.704	1.111

式中  $V_0$ ——作业速度

$n$ ——排种器型孔数目, 27 个

$r$ ——排种器型孔所在圆周半径, 取 0.07 m

$N_h$ ——粒距, cm

## 2.4 仿真试验结果与讨论

每组试验进行一次, 每次取 20 粒种子进行数据提取, 并计算 20 粒种子的纵向偏移量。双因素试验方差分析如表 4 所示, 投种角和作业速度对纵向偏移量有显著影响(与单因素试验结果一致), 交互作用不显著。

表 4 双因素试验方差分析

Tab. 4 ANOVA of two-factor experiment

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	Sig.
投种角	7 774.2	3	2 591.4	19.150	0
作业速度	11 749.8	3	3 916.6	28.940	0
交互作用	1 088.0	9	120.9	0.893	0.531
误差	41 138.2	304	135.3		
综合	61 750.2	320			

仿真试验结果如图 7 所示, 其中正值表示种子着床点在第 1 落点之后, 负值表示种子着床点在第 1 落点前。相同投种角条件下, 纵向偏移量随作业速度的增加而增大; 相同作业速度条件下, 纵向偏移量随投种角的增加而增大。

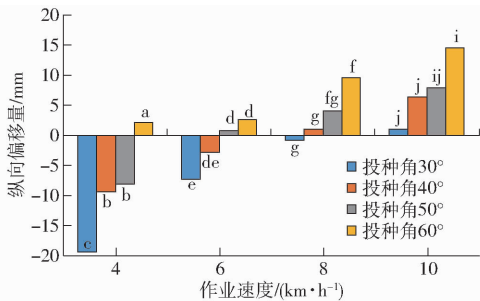


图 7 仿真试验结果

Fig. 7 Results of simulation tests

根据零速投种原理, 种子与种床相对运动速度越小, 种子着床碰撞弹跳越少, 纵向偏移量越小, 提取种子着床时刻与种沟的纵向速度  $\Delta V$ , 绘制纵向速度-纵向偏移量关系, 如图 8 所示。纵向速度与纵向偏移量呈线性相关关系, 对纵向速度和纵向偏移量进行线性拟合, 拟合方程为

$$\Delta L = 10.251\Delta V + 1.3675 \quad (R^2 = 0.9085) \quad (8)$$

当纵向速度小于 0 时, 表示种子纵向速度方向与作业速度方向相同, 当纵向速度大于 0 时, 表示种子纵向速度方向与作业速度方向相反。对于高位投种而言, 作业速度和投种角通过影响种子与种床的纵向速度影响种子着床分布。随着纵向速度的增大, 纵向偏移量减小。而纵向速度绝对值与纵向偏

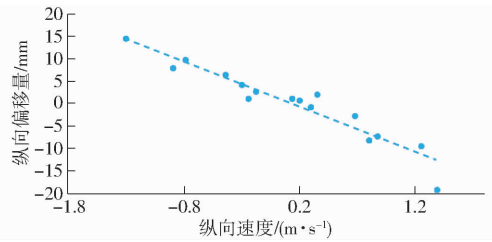


图 8 纵向速度-纵向偏移量关系

Fig. 8 Changing trend of longitudinal velocity with longitudinal offset

移量绝对值成正比, 纵向速度绝对值越小, 纵向偏移量越小, 即不考虑作业方向和纵向偏移量方向的情况下, 纵向速度越接近零, 纵向偏移量越小, 种子分布越稳定, 实际作业中相应的播种粒距合格指数越高, 变异系数越低, 为了验证这一结论, 开展了田间试验。

## 3 田间试验

### 3.1 试验设计

试验采用德邦大为 4 行气吸式精量播种机, 为实现与仿真相同的效果, 取消 V 型镇压轮, 使播种机不具有覆土能力, 粒距设置为 30 cm, 如图 9 所示。试验地点位于北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地, 由于部分土壤自然回流, 每组试验播种作业完成后, 仍需人工挖种, 每组试验记录 250 个粒距。基于 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》对播种合格指数和变异系数进行评价。



图 9 田间试验播种机及无镇压轮单体

Fig. 9 Planter and monomer without press wheel

根据仿真试验结果以等间距原则选取仿真结果中的纵向速度作为主要试验参数, 纵向速度、投种角、作业速度对应关系如表 5 所示。

表 5 田间试验参数设置

Tab. 5 Parameters for field tests

序号	纵向速度/(m·s <sup>-1</sup> )	投种角/(°)	作业速度/(km·h <sup>-1</sup> )
1	-1.30	60	10
2	-0.89	50	10
3	-0.44	40	10
4	-0.18	60	6
5	0.14	40	8
6	0.68	40	6
7	1.25	40	4

### 3.2 结果与分析

田间试验结果如图 10 所示,随着纵向速度的增加,播种机粒距合格指数先增加后减小,在纵向速度为 0.14 m/s 时达到最大值 90.79%;粒距变异系数先减小后增大,最小值出现在纵向速度 -0.18 m/s 时,为 23%,纵向速度越接近零,播种粒距合格指数越高、变异系数越低,作业效果越好。田间试验结果与仿真结果一致。

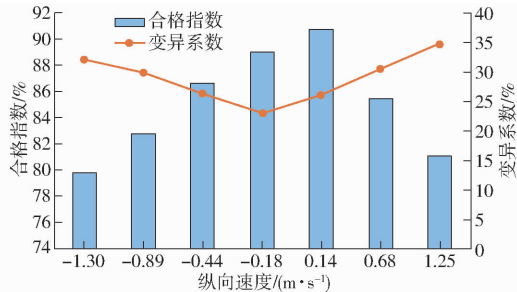


图 10 田间试验结果

Fig. 10 Results of field tests

## 4 结论

(1) 提出了一种三维种沟模型构建方法,借助

绝对臂测量机扫描实际种沟,获取点云-拟合多边形-构造曲面-实现三维种沟模型构建。所构建的模型具有种沟的外形和土壤颗粒表面,为种子与土壤的接触仿真提供新的思路。

(2) 通过正向测量和逆向验证的组合方法确定了种子与土壤的接触参数:滚动摩擦因数 0.22,滑动摩擦因数 0.727,碰撞恢复系数 0.16,该组仿真参数使仿真试验中种子着床分布与真实过程相近,通过对比着床种子与导种管出口平均距离差,发现数据误差为 4.7%。

(3) 仿真试验表明:高位投种过程中,粒距对种子纵向偏移量没有显著影响 ( $P > 0.05$ ),投种角和作业速度对着床种子纵向偏移量有显著影响 ( $P < 0.01$ );相同投种角条件下,纵向偏移量随着作业速度的增大而增大;相同作业速度条件下,纵向偏移量随投种角的增大而增大。作业速度和投种角通过影响种子与种床的纵向速度影响种子着床分布。纵向速度越接近零,纵向偏移量越小,种子分布越稳定,实际作业中相应的播种粒距合格指数越高,变异系数越低,田间试验进一步验证了这一结论。

### 参 考 文 献

- [1] End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture [EB/OL]. [2020-07-23]. <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/goals/goal-2/zh/>.
- [2] YANG L, YAN B X, CUI T, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(1): 9-26.
- [3] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等. 玉米播种与测控技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 1-18. YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180901&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180901&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001. (in Chinese)
- [4] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48. YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161106&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.10001298.2016.11.00. (in Chinese)
- [5] LIU Quanwei, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experimental study of seed precise delivery mechanism for high-speed maize planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(4): 81-87.
- [6] BrushBelt delivery system [EB/OL]. [2020-07-30]. <https://www.deere.com/assets/publications/index.html?id=6f7a8a69#14>.
- [7] Speed tube [EB/OL]. [2020-07-30]. <https://www.precisionplanting.com/products/product/speedtube>.
- [8] 马旭,于海业,杨海宽. 种子落于种沟后弹跳滚动位移的测定及建模[J]. 农业机械学报, 1998, 29(增刊): 62-66. MA Xu, YU Haiye, YANG Haikuan. The determining and model establishing of seed bouncing and rolling displacement after impact on a furrow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.): 62-66. (in Chinese)
- [9] 吕金庆,王英博,李紫辉,等. 加装导流板的舀勺式马铃薯播种机排种器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 19-28. LÜ Jinqing, WANG Yingbo, LI Zihui, et al. Performance analysis and experiment of cup-belt type potato seed-metering device with flow deflector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 19-28. (in Chinese)
- [10] 任文涛,董滨,崔红光,等. 水稻种子与斜面碰撞后运动规律的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 103-107. REN Wentao, DONG Bin, CUI Hongguang, et al. Experiment on the motion characteristics of rice seeds after collision with

- different slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 103 - 107. (in Chinese)
- [11] BUFTON L P, RICHARDSON P, O'DOHERTY M J. Seed displacement after impact on a soil surface[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1974, 19(4): 327 - 338.
- [12] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 - 56. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170306&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006. (in Chinese)
- [13] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62 - 72. ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62 - 72. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160910&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)
- [14] 方会敏, 姬长英, AHMED A T, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60 - 67. FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw - soil - rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 - 67. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160109&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
- [15] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36 - 42. WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 - 42. (in Chinese)
- [16] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34 - 41. CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34 - 41. (in Chinese)
- [17] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 - 85. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171209&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171209&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)
- [18] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [19] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80 - 88. HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80 - 88. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160712&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
- [20] 颜丙新, 张东兴, 杨丽, 等. 重力辅助充种盘室同步气吸式排种器性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 117 - 124. YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Performance analysis of gravity assist filling precision seed-metering device with synchronously rotating seed plate and vacuum chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 117 - 124. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s016&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s016&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.016. (in Chinese)
- [21] 李贝, 陈羽, 孙平, 等. 滚动摩擦因数工程测量方法与验证[J]. 工程机械, 2017, 48(4): 29 - 32. LI Bei, CHEN Yu, SUN Ping, et al. Engineering measurement method and verification of rolling friction coefficient[J]. Construction Machinery and Equipment, 2017, 48(4): 29 - 32. (in Chinese)
- [22] NORREMARK M, SOGAARD H T, GRIEPENTROG H W, et al. Instrumentation and method for high accuracy georeferencing of sugar beet plant[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 130 - 146.