

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.004

基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法

颜丙新 付卫强 武广伟 肖跃进 孟志军

(北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 玉米植株的精确空间位置分布信息可为中耕、植保、对行收获等田间精准作业提供数据支撑,是玉米精细化生产的基础。本文提出一种基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法。基于卫星精准定位播种机组位置,结合播种机结构特点构建播种机组与播种单体相对位置模型,基于 EDEM 数值模拟和动态仿真,构建高位精播种子着床补偿模型,搭建种子着床位置预测系统,实现了玉米播种环节种子着床位置的精准预测。田间试验表明,作业速度、定位数据更新率对着床位置偏差影响极显著($p < 0.01$),播种株距对着床位置偏差影响显著($p < 0.05$);作业速度对着床位置预测准确率影响显著($p < 0.05$),播种株距、定位数据更新率对着床位置预测准确率影响不显著($p > 0.05$)。着床位置偏差随着作业速度的减小、播种株距和定位数据更新率的增大而减小;着床位置预测精确率随作业速度的减小而增大。作业速度、播种株距、定位数据更新率为 3 km/h、0.4 m、10 Hz 时,着床位置预测最准确,平均着床位置偏差和着床位置预测准确率分别为 24.3 mm 和 88.9%。该系统能将玉米高位精播种子着床位置的预测控制在厘米级。

关键词: 玉米; 高位精播; 卫星定位; EDEM 仿真; 着床位置预测

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)02-0044-11

OSID:



Seed Location Prediction Method of Maize High-height Precision Planting Based on Satellite Positioning

YAN Bingxin FU Weiqiang WU Guangwei XIAO Yuejin MENG Zhijun
(Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to meet the needs of precision agriculture for crop location information, achieve accurate plant position of crops, and solve the problem of low resource utilization rate and high operation cost caused by repeated identification and positioning of plants in each part of field management, a seed location method at planting process was proposed. Seed position, which was regarded as plant location, was mapped and saved during planting process, and it could be shared and used in the follow-up field management links. This method was based on a seeder equipped with a satellite receiver and four seed quality detection sensors. Seeder was mounted with an automatic navigation tractor. Tractor and seeder were hinge joint, relative positions changing during the operation, thus, satellite receiver was installed on seeder frame girder instead of tractor cab roof. Real-time kinematic (RTK) receiver collected satellite observation data from satellite antenna and fixed base station data from radio antenna at a frequency of 10 Hz, and formed differential data in system for real-time analytical processing, to achieve accurate acquisition of information such as the position of seeding unit and coordinated universal time (UTC). Seed quality detection sensors were triggered when seed passed through seeds tube, and signal acquisition circuit recorded trigger time and row number at the same time, then transmitted the information to main controller. Seed touched ditch time was determined in combination with UTC time, trigger time and time difference. Position of seeding unit at seed touched ditch time was determined by using equal velocity interpolation method. A mathematic model of seeding unit and planter monomer relative position was

收稿日期: 2020-11-06 修回日期: 2021-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700402)、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@nercita.org.cn

established based on spatial location of the seeder, planter monomer position could be extrapolated by this model. Combining with E-discrete element method (EDEM) numerical simulation and dynamic simulation, time and distance difference compensation model was established, seeds localization could be predicted. The operation quality of the seed location method was evaluated for the operation speed (3 km/h, 5 km/h and 7 km/h), sowing spacing (0.2 m, 0.3 m and 0.4 m) and GPS frequency (1 Hz, 5 Hz and 10 Hz) by deviation of implantation position (D_{IP}) and accuracy of implantation position (A_{IP}). Field trials results showed that operation speed and GPS frequency significantly affected D_{IP} ($p < 0.01$), sowing spacing affected D_{IP} ($p < 0.05$); operation speed affected A_{IP} ($p < 0.05$), while sowing spacing and GPS frequency had no significant effect on A_{IP} ($p > 0.05$). With the decrease of operation speed, the increase of sowing spacing and GPS frequency, the D_{IP} was decreased. With the decrease of operation speed, the A_{IP} was increased. At the operation speed of 3 km/h, sowing spacing of 0.4 m and GPS frequency of 10 Hz, the system gave the best D_{IP} and A_{IP} of 24.3 mm and 88.9%, respectively. This method can provide theoretical reference for synchronous generation of seed map in seeding process, provide position information support for each link of field management in crop growth process, such as precise weeding, top dressing and application, and provide technical and data support for digital and intelligent precision operations.

Key words: maize; high-height precision planting; satellite positioning; EDEM simulation; seed location predicting

0 引言

玉米植株的精确空间位置分布信息可为中耕、植保、对行收获等田间精准作业提供数据源,有助于水、肥、药的精确施用和植株的对行因苗管理,能有效提高资源利用率,节约农业成本,提高农民收益^[1-6],是玉米精细化生产的基础。

目前,玉米植株位置信息获取多依靠视觉、激光雷达等技术,在苗期直接识别植株,获取位置^[7-15]。植株识别过程易受枝叶交错、苗草簇生及自然光照等多变环境因素的干扰。所得植株位置为基于作业机具的相对位置数据,具有即获取即使用的特点,不能与其他环节共享。而玉米精播过程种子着床位置预测技术可以在播种环节获取种子着床绝对位置信息,间接定位玉米植株。避免了多变环境因素对植株识别的影响,绝对位置数据还可供后续各环节共享使用,一定程度上弥补了苗期玉米植株识别定位的不足。

精播过程种子着床位置预测技术起源于20世纪末,伴随着精准农业的发展,作物按株作业随之兴起,准确获取高精度种子位置图成为重要研究内容。GRIEPENTROG等^[16-17]利用RTK GPS (Real time kinematic global positioning system)改进精量播种机,使开沟器搭载光电种子检测传感器并配合数据采集系统,进行甜菜精量播种和种子定位。NORREMARK等^[18-19]在上述研究基础上,提出了一种提高定位精度的方法,该方法在试验田添加已知位置的标识,并在播种机上添加识别该标识的光电传感器,当播种机经过标识时,定位坐标与标识坐

标进行比较,来校准定位数据,田间试验结果表明,在作业速度5.3 km/h时,95%的甜菜种子在定位位置37.3 mm范围内出苗。PEREZ-RUIZ等^[20]将种子着床位置预测技术应用在番茄移栽中,田间试验表明,在作业速度1.6 km/h时,该控制系统对番茄主茎定位平均中心误差为8 mm。国内外学者还进行了大量方法上的尝试^[21-22],但均基于排种器低位投种(排种器排种口距离种床小于20 cm),研究中种子检测位置即为种子着床位置。

随着国内保护性耕作技术的推广,玉米免耕播种面积逐年增加,为减小作业过程土壤颗粒和秸秆对排种器型孔的阻塞和对排种检测传感器的遮挡,大量播种机采用高位投种方式^[23](排种器排种口距离种床30~50 cm),种子离开排种盘,经过导种管后着床。而排种检测传感器多安装在导种管中间,种子检测位置距种床较远,不宜继续采用检测位置即着床位置的理论。

本文提出一种基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法。基于卫星精准定位播种机组位置,结合播种机结构特点构建播种机组与播种单体相对位置模型;基于EDEM数值模拟和动态仿真,构建高位精播种子着床补偿模型,明确种子从排种检测传感器到种床过程的时间延迟和位置滞后,搭建种子着床位置预测系统,实现玉米高位精播环节种子着床位置的精准预测。

1 系统组成

种子着床位置预测系统组成如图1所示,主要包括:12 V电源(实际作业过程中可直接使用拖拉

机 12 V 电源供电)、主控制器(以 STM32F407VGT6 微控制器为主芯片)、排种检测传感器^[24](对射式红外光电传感器,种子识别精度 97%)、RTK 接收机(联适 R60U 型接收机,RTK 接收机工作时用到的固定基站位于作业地块 2 km 范围内,RTK 接收机平面定位精度为 ± 12 mm)、卫星天线、电台天线和数据记录仪等。所有硬件安装在由拖拉机和 4 行气吸式播种机组成的播种机组上。

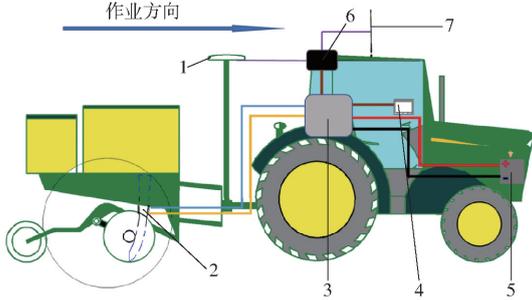


图 1 种子着床位置预测系统组成

Fig. 1 Components of seed location prediction system

1. 卫星天线
2. 排种检测传感器
3. 主控制器
4. 数据记录仪
5. 电源
6. RTK 接收机
7. 电台天线

2 种子着床位置预测原理

种子着床位置预测过程可以分为数据获取和位置预测两个过程。以卫星天线在作业平面的投影位置反映播种机组位置,排种检测传感器在作业平面的投影位置反映播种单体位置。种子着床位置预测系统原理如图 2 所示,播种机开始作业时,RTK 接收机采集来自卫星天线的卫星观测数据和来自电台天线的固定基站数据,在系统内组成差分观测值进行实时解析处理,并采用 NMEA-0183 协议输出包含 \$GPRMC 字段的定位数据,实现播种机组位置、UTC 时间等信息的精确获取;各单体排种检测传感器预先分配行号,当种子经过导种管时,排种检测传感器被触发,触发信号和对应行号被传递给主控制器,通过 RS232 存储到数据记录仪,完成数据获取;播种结束后,综合 UTC 时间、传感器触发时间以及种子从排种检测传感器到着床过程的时间延迟,确定种子的着床时间;以着床时间为基准采用等速插值方法,结合 RTK 接收机获取的位置信息,确定种子着床时刻播种机组位置;综合播种机组与播种单体相对位置模型,解算此时各播种单体位置;最后考虑位置滞后补偿确定着床种子最终位置,完成着床种子位置预测。

2.1 数据获取过程

数据获取流程如图 3 所示,主控制器上电后,对 RTK 接收机、串口、CAN bus、排种检测传感器等外设进行初始化。初始化完成后程序开始接收来自

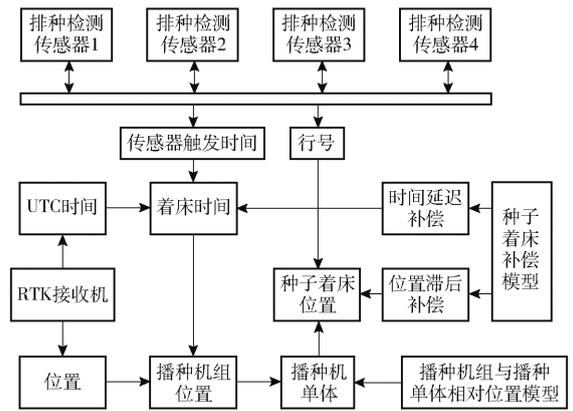


图 2 位置预测系统原理图

Fig. 2 Position principle of seed location prediction system

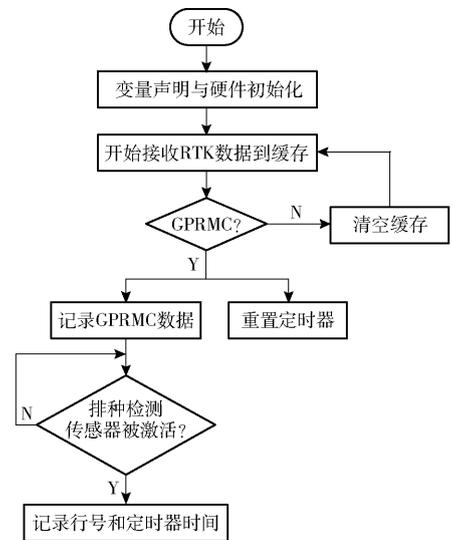


图 3 数据获取流程图

Fig. 3 Data acquisition flowchart

RTK 接收机的数据到缓存器中,并判断缓存器中的数据是否含有 \$GPRMC 字段,没有则清空缓存器,继续接收数据,有则将数据传递给数据记录仪,同时复位指定定时器。两个 \$GPRMC 字段之间的时间间隔为一个接收周期,在一个接收周期内,当排种检测传感器被激活时,数据记录仪记录行号和激活时刻定时器时间,如此循环直到播种结束。

2.2 播种机组与播种单体相对位置模型构建

采用单一卫星天线可以简化整体结构,降低系统成本,但只能直接获取一个定位点数据。为预测 4 行播种机所有种子的位置数据,需对每个播种单体进行定位。HE 等^[25]将卫星天线固定在拖拉机驾驶室上方,利用单一位置信息,结合播种机组的航向,播种机组与播种单体相对位置关系确定了各播种单体的位置。由于播种机与拖拉机挂接部位存在铰接关系,在作业过程中播种单体与拖拉机上的卫星天线相对位置会发生变化,同时相同播种机挂接到不同拖拉机上也会造成相对位置的变化,需要重新标定相对位置模型。

为了避免以上问题,本研究将卫星天线直接固定在播种机主梁上。播种机组与播种单体相对位置示意图如图4所示,坐标系为高斯-克吕格平面直角坐标系。假设卫星天线在作业平面的投影坐标为 (x, y) ,则第 i 行播种单体的位置坐标 (x_i, y_i) 为

$$\begin{cases} x_i = x - L\cos\theta + [d - (4 - i)m] \sin\theta \\ y_i = y - L\sin\theta - [d - (4 - i)m] \cos\theta \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中 m ——播种行距, m

L ——卫星天线与播种单体在播种前进方向上的距离, m

d ——卫星天线与边缘播种单体在垂直前进方向的距离, m

θ ——航向角, ($^\circ$)

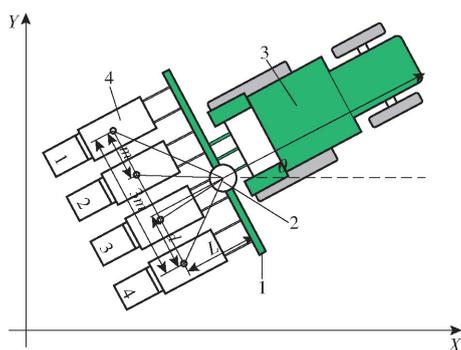


图4 播种机组与播种单体相对位置示意图

Fig.4 Relative position diagram of seeding unit and planter monomer

1. 播种机主梁 2. 卫星天线 3. 拖拉机 4. 播种单体

2.3 种子从播种单体到着床过程运动分析

种子经过安装在播种单体上的排种检测传感器后的运动无法被系统捕获。该过程中,种子经过导种管的输运后,到达种床,与种床接触弹跳或滚动释放多余动能后停止,完成着床。

2.3.1 运动轨迹分析

种子从离开排种器到着床过程,种子相对排种器的运动轨迹如图5所示。

在不受导种管约束,接触种床无弹跳滚动的理想状态下,种子从离开排种器到着床过程相对排种器沿作业方向的运动距离 ΔS 可表示为

$$\Delta S = v_h t \sin\varphi \quad (2)$$

其中

$$v_h = \frac{2\pi rv}{3.6nl} \quad (3)$$

种子与播种单体的滞后距离 Δs 可表示为

$$\Delta s = \Delta S - \Delta L \quad (4)$$

种子从排种检测传感器到着床过程的时间延迟 Δt 可表示为

$$\Delta t = t - t' \quad (5)$$

式中 v ——作业速度, km/h

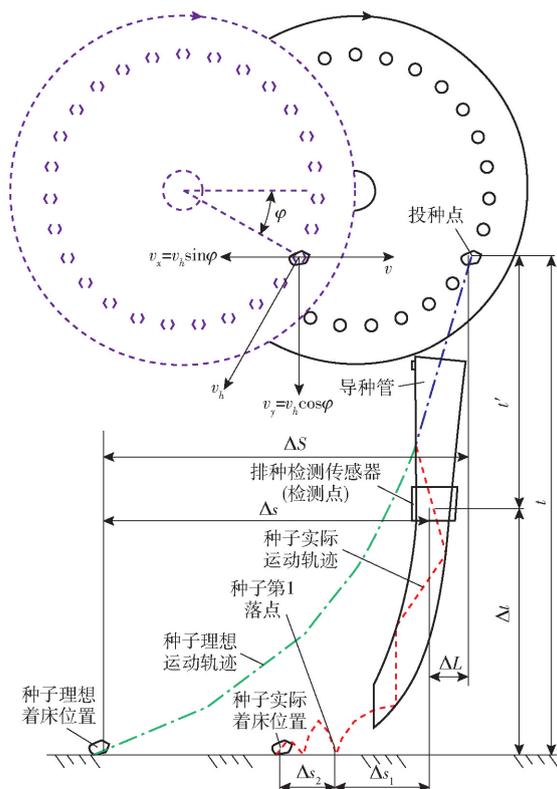


图5 种子着床过程相对排种器的运动轨迹

Fig.5 Motion trajectory of seed relative to seed-meter

v_h ——种子线速度, m/s

t ——着床耗时(种子从脱离排种器到着床过程耗时), s

φ ——投种角, 实测值 15°

n ——排种盘型孔数, 取 27 个

r ——排种半径, m

l ——播种株距, m

ΔL ——投种点与检测点距离差, m

t' ——检测耗时(种子从脱离排种器到达排种检测传感器耗时), s

理想状况下,对于特定的播种机,投种角 φ 、投种点与检测点距离差 ΔL 不变,滞后距离 Δs 主要与种子线速度 v_h 和着床耗时 t 有关。种子线速度越大,着床耗时越长,滞后距离越大。种子线速度主要与排种半径 r 、作业速度 v 、排种盘型孔数 n 、播种株距 l 有关,而排种半径和排种盘型孔数一定时,作业速度越快,播种株距越小,种子线速度越大。即作业速度越快、播种株距越小、着床耗时越长,滞后距离越大。时间延迟 Δt 主要与着床耗时 t 和检测耗时 t' 有关,着床耗时和检测耗时越接近,时间延迟越小。

如图5红色轨迹所示,在实际作业过程中,定义种子第1次接触种床的位置为第1落点。以第1落点为参考,将种子从播种单体到着床过程分解为两部分:种子从排种检测传感器到第1落点为落种过程,种子从第1落点到静止着床为弹跳移位过程。

落种过程种子由于导种管的约束导致与导种管壁发生多次碰撞,造成种子速度的大小和方向发生变化,种子的运动轨迹杂乱无章^[26-28];另外,种子弹跳移位过程影响种子着床位置预测。理想状态下的时间延迟和位置滞后计算方法不再适用。

实际作业过程中

$$\begin{cases} \Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 \\ \Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 Δs_1 ——种子着床时刻,第1落点与排种检测传感器在作业方向上的距离,m

Δs_2 ——实际着床位置与第1落点在作业方向上的距离,m

Δt_1 ——落种过程耗时,s

Δt_2 ——弹跳移位过程耗时,s

采用 EDEM 数值仿真方法模拟落种过程,并分析弹跳移位过程种子的运动状况,以探明种子从播种单体到着床消耗的时间和相对排种器的位移,最终预测种子着床位置。

2.3.2 落种过程分析

EDEM 软件可快速、简便地构建种子颗粒模型,结合物料性质、力学性质和接触参数等准确计算种子运动,仿真模型在近几年的精量播种过程研究中被广泛验证和使用^[29-32]。

2.3.2.1 仿真模型构建

以郑单 958 玉米种子作为仿真颗粒建模对象,建模时将种子分为圆扁型、细长型、类球型 3 类,以提高仿真精度^[33]。借助 EDEM 软件采用多球面组合填充方式构建种子仿真颗粒模型^[34-37]。

借助 SolidWorks 构建仿真用几何模型,如图 6 所示,主要包括种床、导种管、排种检测传感器和颗粒工厂。其中,颗粒工厂位于排种器排种口处,与导种管上端相距 11 cm,导种管长度 45 cm,导种管下端距离种床 4 cm,排种检测传感器距离导种管下端 24 cm。仿真过程中,颗粒工厂按圆扁型、细长型、类球型 3 类种子所占比例 4:5:1^[34],随机间隔产生种子颗粒代替排种过程。同时导种管、排种检测传感器和颗粒工厂沿作业方向以设定速度运动。忽略种子着床弹跳。仿真过程保存时间间隔设置为 0.001 s,以保证准确定位种子着床瞬间。

2.3.2.2 仿真试验设计与结果分析

排种盘型孔数 $n = 27$,型孔所在圆周半径 $r = 0.07$ m,播种株距 l 取 0.2、0.3、0.4 m,作业速度 v 取 3、5、7 km/h,种子初速度分解为竖直方向初速度和作业方向初速度,排种频率 q (Hz)、种子竖直方向初速度 v_0 (m/s) 和水平方向初速度 v'_0 (m/s) 关系为

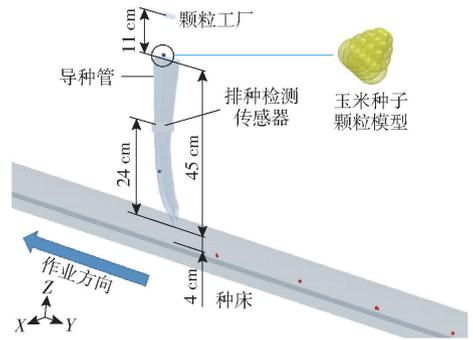


图 6 3D 仿真模型示意图

Fig. 6 Diagram of simulation 3D model

$$\begin{cases} q = \frac{v}{3.6l} \\ v_0 = v - v_y \\ v'_0 = v_x \end{cases} \quad (7)$$

式中 v_x ——种子相对排种盘的水平方向速度,m/s

v_y ——种子相对排种盘的竖直方向速度,m/s

试验参数如表 1 所示。

表 1 仿真试验参数

Tab. 1 Test parameters of simulation tests

试验序号	作业速度/ (km·h ⁻¹)	播种 株距/m	排种 频率/ Hz	水平方向 初速度/ (m·s ⁻¹)	竖直方向 初速度/ (m·s ⁻¹)
1	3	0.2	4.17	0.066	0.816
2	3	0.3	2.78	0.044	0.822
3	3	0.4	2.08	0.033	0.825
4	5	0.2	6.94	0.109	1.360
5	5	0.3	4.63	0.073	1.369
6	5	0.4	3.47	0.055	1.374
7	7	0.2	9.72	0.153	1.903
8	7	0.3	6.48	0.102	1.917
9	7	0.4	4.86	0.076	1.924

每组试验分别记录 30 粒种子的 Δt_1 和 Δs_1 数据,并对数据进行分析,仿真结果如表 2 所示。

表 2 仿真结果

Tab. 2 Results of simulation

试验序号	Δs_1 /mm		Δt_1 /s	
	均值	标准差	均值	标准差
1	104.6	17.6	0.151 2	0.014 3
2	104.6	12.4	0.146 3	0.007 9
3	104.1	11.4	0.148 3	0.011 3
4	103.0	14.4	0.146 8	0.013 8
5	102.1	14.1	0.149 7	0.015 0
6	105.7	17.3	0.145 5	0.010 2
7	106.5	12.2	0.145 8	0.014 5
8	101.1	16.7	0.145 1	0.009 2
9	108.8	19.8	0.147 1	0.014 1
平均	104.5	15.1	0.147 3	0.012 3
方差分析 p	速度	0.611	0.464	
	株距	0.240	0.856	

方差分析结果显示, Δs_1 、 Δt_1 对作业速度和播种株距影响均不显著 ($p > 0.05$)。在着床位置预测模型中, 取 Δs_1 和 Δt_1 平均值 104.5 mm、0.1473 s 进行补偿。

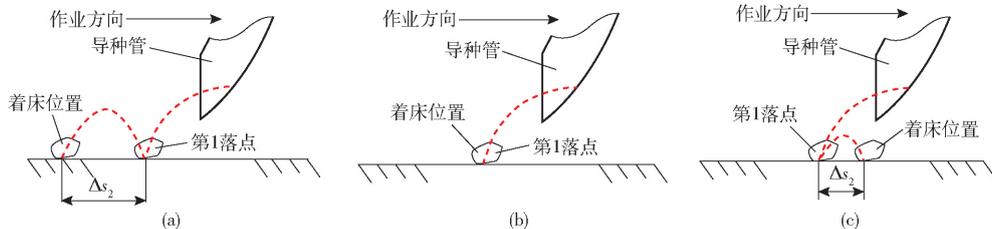


图7 着床位置相对第1落点分布情况

Fig.7 Implantation position related to the first drop point

如图7a所示, 种子着床位置位于第1落点后, 种子接触种床后向后方弹跳或滚动, 在着床位置停止。这种情况会导致预测位置位于实际位置前方。

如图7b所示, 种子着床位置位于第1落点处, 种子接触种床后立即停止运动。这种情况下种子预测位置较为准确。

如图7c所示, 种子着床位置位于第1落点前方, 种子接触种床后向前方弹跳或滚动, 在着床位置停止。这种情况会导致预测位置位于实际位置后方。

综合上述分析可知, 弹跳位移过程造成种子着床位置的差异。这种位置差异因种床土壤类型、颗粒大小、含水率、紧实度、种子触土位置、速度等不同, 而有差异, 暂无合适手段预测, 故时间延迟和位置滞后作近似处理, 即

$$\begin{cases} \Delta s \approx \Delta s_1 \\ \Delta t \approx \Delta t_1 \end{cases} \quad (8)$$

2.4 种子着床位置预测

2.4.1 种子着床时间确定

精确的种子着床时间是位置预测的关键, 由图2可以看出, 位置预测过程涉及 UTC 时间 t_{UTC} 、传感器触发时间 t_T 和时间延迟 Δt 共3个时间量。其中 t_{UTC} 以卫星定位数据的 UTC 时间为基准, 而 t_T 和 Δt 以系统硬件时间为基准。为了将不同时间基准统一, 在系统中单设定定时器一个, 每当系统解析到 \$GPRMC 时, 重置定时器, 以种子触发排种检测传感器时, 定时器的时间作为传感器触发时间。在这个过程中, 主控制器从接收到识别 \$GPRMC 字段存在固定时延, 用 ΔT 表示, 对于固定系统而言 ΔT 一定, 该系统中为 7.73×10^{-3} s。则种子着床时间 T 可表示为

$$T = t_{UTC} + t_T + \Delta t + \Delta T \quad (9)$$

2.4.2 着床时刻播种机组定位

RTK 接收机按定位数据更新率输出播种机组

2.3.3 弹跳移位过程分析

以种子第1落点为参考, 种子着床位置与第1落点在作业方向上的位移为 Δs_2 , 种子着床位置与第1落点相对位置存在3种不同情况, 如图7所示。

的定位数据是点状信息, 很难覆盖种子着床时刻所有播种机组位置, 故采用等速插值方法弥补。

假设 T 时刻前后播种机组位置数据对应的 UTC 时间分别是 T_{n-1} 、 T_{n+1} , 基于西安 80 坐标系 6 度带, 经过高斯投影变换后对应的平面坐标分别为 (x_{n-1}, y_{n-1}) 、 (x_{n+1}, y_{n+1}) , 播种机组在两点之间视为匀速运动, 则 T 时刻播种机组的位置坐标 (x, y) 可表示为

$$\begin{cases} x = x_{n-1} + \frac{T - T_{n-1}}{T_{n+1} - T_{n-1}}(x_{n+1} - x_{n-1}) \\ y = y_{n-1} + \frac{T - T_{n-1}}{T_{n+1} - T_{n-1}}(y_{n+1} - y_{n-1}) \end{cases} \quad (10)$$

综合播种机组与播种单体相对位置模型获取各播种单体的坐标 (x_i, y_i) 。如图5所示, 在作业方向上种子着床位置比排种检测传感器位置滞后, 结合仿真获取的传感器与着床位置的 Δs , 着床位置 (x_{zi}, y_{zi}) 可表示为

$$\begin{cases} x_{zi} = x_i - \Delta s \cos \theta \\ y_{zi} = y_i - \Delta s \sin \theta \end{cases} \quad (11)$$

种子着床时刻航向角 θ 近似为 T_{n-1} 、 T_{n+1} 时刻播种机组位置坐标 (x_{n-1}, y_{n-1}) 、 (x_{n+1}, y_{n+1}) 连线与 X 轴正方向的夹角, 计算式为

$$\begin{cases} \cos \theta = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{\sqrt{(x_{n+1} - x_{n-1})^2 + (y_{n+1} - y_{n-1})^2}} \\ \sin \theta = \frac{y_{n+1} - y_{n-1}}{\sqrt{(x_{n+1} - x_{n-1})^2 + (y_{n+1} - y_{n-1})^2}} \end{cases} \quad (12)$$

3 系统性能试验

为检验系统位置预测精度, 基于4行气吸式精量播种机, 搭建播种过程种子着床位置预测系统, 在北京市农林科学院实验基地 (116.46°E, 40.18°N) 进行种子着床位置预测试验。试验前对地块进行旋耕 15 cm 处理, 地表平整无石块。

3.1 试验仪器与设备

试验过程使用了一台4行精量气吸式播种机(德邦大为公司,中国),播种机风机由液压泵提供动力,排种器作业风压不低于4 kPa。排种器高位安装,由地轮提供动力,种子从排种器排出后,经过导种管着床,排种检测传感器安装导种管中段;开沟器为双圆盘开沟器,可形成V形种沟。播种机由一台88 kW 拖拉机(约翰迪尔公司,美国)牵引。如图8所示。



图8 田间试验播种机组

Fig. 8 Seeder unit for field trials

3.2 种子实际位置测量方法与评价指标

按照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,在进行播种质量检测时,将已播玉米种子表面土壤剥离,露出种子,认为露出的种子即为种子着床的位置,本研究采用人工挖种的方式暴露种子的实际着床位置。利用卫星定位机构测量挖出种子的坐标,作为着床种子的实际位置。将实际位置与种子着床位置预测系统所得预测位置进行比较,以评价系统位置预测精度。

种子实际位置测量与种子着床位置预测采用相同的卫星天线、RTK 接收机、数据记录仪等硬件设备,以避免硬件差异导致的误差。如图9所示,将卫星天线置于三角架对中杆上端,调平三角架,使得对中杆下端处于被挖种子正上方,记录此时卫星天线的位置,作为种子的实际位置,为方便比较计算,种子实际位置同样基于西安80坐标系6度带经过高斯投影转换为平面坐标,表示为 (x'_{zi}, y'_{zi}) 。



图9 种子实际位置测量

Fig. 9 Measurement of actual seed position

1. 卫星天线 2. 三角架 3. 对中杆

系统预测位置与实际位置越接近,位置预测精度越高^[17],定义种子预测位置 (x_{zi}, y_{zi}) 与实际位置

(x'_{zi}, y'_{zi}) 的距离差为着床位置偏差 D_{IP} (Deviation of implantation position)。所预测种子位置主要用于后期植保环节按株作业,为了避免伤苗,玉米按株作业通常设置主茎安全区,以预测位置为圆心,半径5 cm 范围设置为安全区,可以实现93.46%的安全作业区域覆盖(以20 cm 株距,60 cm 行距的常规玉米播种为例)^[38]。定义落在以预测位置为圆心,半径5 cm 范围内的种子数量所占比例为着床位置预测准确率 A_{IP} (Accuracy of implantation position)。以着床位置偏差和着床位置预测准确率为指标,评价位置预测系统的工作性能, D_{IP} 越小, A_{IP} 越大,说明位置预测越精确。 D_{IP} 和 A_{IP} 计算式为

$$\begin{cases} D_{IP} = \sqrt{(y_{zi} - y'_{zi})^2 + (x_{zi} - x'_{zi})^2} \\ A_{IP} = \frac{N_0}{N} \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

式中 N_0 ——落在以预测位置为圆心、半径5 cm 范围内的样本数量

N ——所测样本总数

3.3 试验设计

以作业速度、株距和定位数据更新率为试验因素,开展三因素三水平正交试验,因素水平设置如表3所示。选用郑丹958玉米种子,每组播种作业区域总长50 m,前后各10 m 分别为启动区和停止区,试验数据采集区长度30 m,播种深度设置3 cm,作业速度3 km/h。试验过程通过位置预测系统采集播种数据,预测种子着床位置。播种后,在试验数据采集区随机确定采样起点,进行连续取样,每行测量20粒种子的实际位置。

表3 正交试验因素水平

Tab. 3 Factor levels of tests

水平	因素		
	作业速度 A/(km·h ⁻¹)	株距 B/m	定位数据更新率 C/Hz
1	3	0.2	1
2	5	0.3	5
3	7	0.4	10

图10为播种株距0.4 m、作业速度3 km/h、定位数据更新率10 Hz时实际位置与预测位置对比试验结果。

4 试验结果与讨论

根据 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验方案,如表4所示。对试验结果首先采用极差分析法确定各因素对 D_{IP} 和 A_{IP} 的影响主次关系。由极差分析结果可知,各因素对 D_{IP} 的影响主次顺序为作业速度、定位数据更新率、播种株距。根据 D_{IP} 越小,位置预测越精确的原则,最

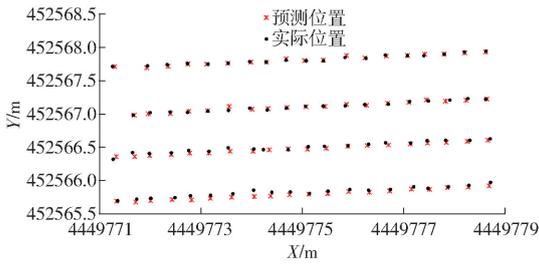


图 10 播种株距 0.4 m、作业速度 3 km/h、定位数据更新率 10 Hz 时的试验结果

Fig. 10 Test result at 0.4 m, 3 km/h, 10 Hz

表 4 正交试验方案及结果

Tab. 4 Test scheme and results

试验序号	因素			着床位置	着床位置预
	A	B	C	偏差/mm	测准确率/%
1	1	1	1	38.8	80.0
2	1	2	2	33.1	76.7
3	1	3	3	24.3	88.9
4	2	1	2	51.3	53.3
5	2	2	3	43.8	61.5
6	2	3	1	48.9	63.3
7	3	1	3	55.9	46.7
8	3	2	1	64.6	33.3
9	3	3	2	57.2	50.0
D_{IP}	K_1	96.2	146.0	152.3	
	K_2	144.0	141.5	141.5	
	K_3	177.7	130.4	124.0	
	R	27.2	5.2	9.4	
	A_{IP}	K_1	245.6	180.0	176.7
K_2		178.2	171.6	180.0	
K_3		130.0	202.2	197.1	
R		38.5	10.2	6.8	

优的方案组合为 $A_1B_3C_3$, 即作业速度 3 km/h、播种株距 0.4 m、定位数据更新率 10 Hz。各因素对 A_{IP} 的影响主次顺序为作业速度、播种株距、定位数据更新率。根据 A_{IP} 越高, 位置预测越精确的原则, 最优的方案组合也是 $A_1B_3C_3$ 。该方案下的平均着床位置偏差和着床位置预测偏差分别为 24.3 mm 和 88.9%。

为了明确作业速度、播种株距、定位数据更新率

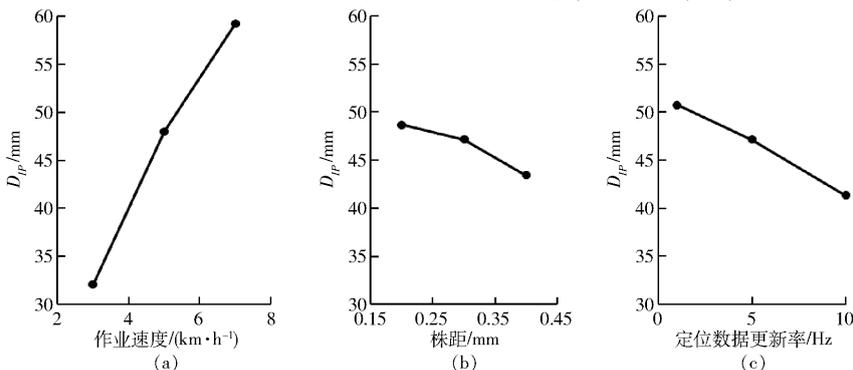


图 11 着床位置偏差变化曲线

Fig. 11 D_{IP} trend chart

对 D_{IP} 和 A_{IP} 影响的重要程度, 采用 IBM SPSS Statistics 对试验结果进行方差分析, 如表 5 所示: 作业速度和定位数据更新率对 D_{IP} 影响极显著 ($p < 0.01$), 播种株距对 D_{IP} 影响显著 ($p < 0.05$); 作业速度对 A_{IP} 影响显著 ($p < 0.05$), 播种株距和定位数据更新率对 A_{IP} 影响不显著 ($p > 0.05$)。

表 5 方差分析结果

Tab. 5 ANOVA results

参数	D_{IP}	A_{IP}
作业速度	0.001 **	0.020 **
播种株距	0.023 *	0.212
定位数据更新率	0.007 **	0.358

注: ** 表示影响极显著 ($p < 0.01$); * 表示影响显著 ($0.01 < p < 0.05$)。

D_{IP} 变化曲线如图 11 所示。由图 11a 可知, 随作业速度从 3 km/h 增至 7 km/h, 平均 D_{IP} 从 32.1 mm 增至 59.2 mm, 增加了 84.4%。造成这一现象的可能原因是: 随着作业速度的增加, 种子到达第 1 落点时相对种床的速度增加, 导致在弹跳移位过程中 Δs_2 增加, D_{IP} 增大。3 km/h 状态下的 D_{IP} 平均值与 EHSANI 等^[22] 以相同速度使用低位投种播种机播种玉米时的平均距离差 34 mm 接近, 说明高位投种播种机也可以实现播种过程种子着床位置的预测。

由图 11b 可知, 随着播种株距从 0.2 m 增加到 0.4 m, D_{IP} 从 48.7 mm 减小到 43.5 mm, 减小了 10.7%。对于特定播种机, 播种株距增大, 排种盘转速减小, 种子到达第 1 落点时相对种床的速度减小, 导致在弹跳移位过程中 Δs_2 减小, 因碰撞引起的着床位置偏差变小。BUFTON 等^[39] 研究也证实了随着种子着床速度的增加, 种子着床弹跳和滚动移位随之增加。

由图 11c 可知, 随着定位数据更新率从 1 Hz 增加到 10 Hz, D_{IP} 从 50.8 mm 减小到 41.3 mm, 减小了 18.7%。导致这一现象的可能原因是随着定位数据更新率的增加, 相同时间内系统可获取更多定位点信息, 根据式 (11) 进行着床时刻播种机组位

置预测时,两已知位置点的距离减小,预测位置更加精确。

A_{IP} 变化曲线如图12所示,由图12a可知,随作

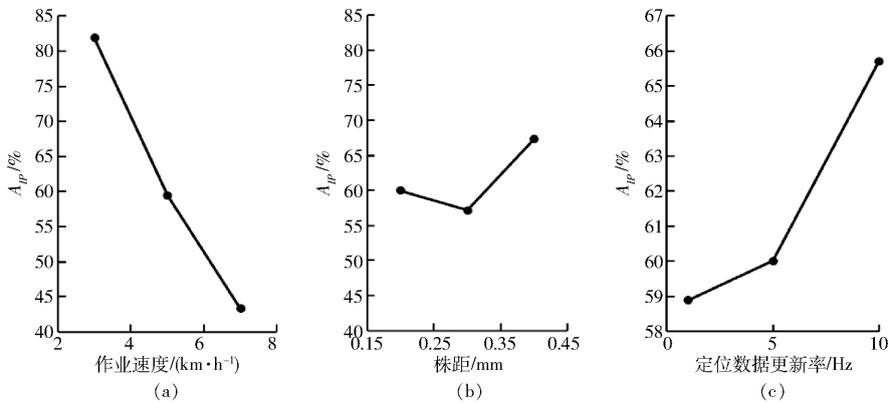


图12 着床位置预测准确率变化曲线

Fig. 12 A_{IP} trend chart

在作业速度 3 km/h 时, A_{IP} 最高, 但与 NORREMARK 等^[19]以最高 5.3 km/h 采用低位零速度投种方式播种甜菜时 95% 的种子落在预测位 3.73 cm 范围内的结果相比, 存在较大差异。主要原因是: 本研究所用高位投种播种机, 种子经过导种管后着床, 由于种子与导种管内壁碰撞, 无法实现零速投种, 导致种子着床弹跳移位, 是造成这一结果的可能原因之一; NORREMARK 等^[19]在种子位置预测过程中, 添加已知位置的标识, 以校准动态定位数据, 是定位精度更高的另一可能原因。播种株距和定位数据更新率对 A_{IP} 影响不显著。

综合上述分析, 可见进一步减小 D_{IP} 、提高 A_{IP} 可以从减小种子着床弹跳移位和改善卫星动态定位精度入手。

5 结论

(1) 提出了一种基于卫星定位的玉米高位精播

业速度从 3 km/h 增加到 7 km/h, 平均 A_{IP} 从 81.9% 下降到 43.3%, 下降了 49.6%。弹跳移位过程 Δs_2 的变化同样是导致这一现象的主要原因。

种子着床位置预测方法, 搭建了试验系统, 将玉米高位精播种子着床位置的预测控制在了厘米级。

(2) 各因素对着床位置偏差影响的主次顺序是: 作业速度、定位数据更新率、播种株距, 其中作业速度、定位数据更新率对着床位置偏差影响极显著 ($p < 0.01$), 播种株距对着床位置偏差影响显著 ($p < 0.05$); 各因素对着床位置预测准确率影响的主次顺序是: 作业速度、播种株距、定位数据更新率, 其中作业速度对着床位置预测准确率影响显著 ($p < 0.05$), 播种株距和定位数据更新率对着床位置预测准确率不显著 ($p > 0.05$)。

(3) 正交试验结果表明: 着床位置偏差随着作业速度的增加、播种株距的减小、定位数据更新率的减小而增加, 着床位置预测精确率随作业速度的增加而减小。作业速度、播种株距、定位数据更新率为 3 km/h、0.4 m、10 Hz 时, 着床位置预测最准确, 着床位置偏差和着床位置预测准确率分别为 24.3 mm 和 88.9%。

参 考 文 献

- [1] 潘瑜春, 赵春江. 地理信息技术在精准农业中的应用[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 1-6.
PAN Yuchun, ZHAO Chunjiang. Application of geographic information technologies in precision agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 1-6. (in Chinese)
- [2] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)
- [3] 何东健, 何勇, 李明赞, 等. 精准农业中信息相关科学问题研究进展[J]. 中国科学基金, 2011, 25(1): 10-16.
HE Dongjian, HE Yong, LI Mingzan, et al. Research progress of information science-related problems in precision agriculture [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2011, 25(1): 10-16. (in Chinese)
- [4] 傅泽田, 祁力钧, 王俊红. 精准施药技术研究进展与对策[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 189-192.
FU Zetian, QI Lijun, WANG Junhong. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 189-192. (in Chinese)
- [5] 张辉, 张永江, 杨易. 美国、加拿大精准农业发展实践及启示[J]. 世界农业, 2018(1): 175-178.
- [6] 丁友强, 刘彦伟, 杨丽, 等. 基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 33-41, 62.

- DING Youqiang, LIU Yanwei, YANG Li, et al. Monitoring system of maize precision planter based on android and CAN Bus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 33-41, 62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191204&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.004. (in Chinese)
- [7] 孙俊, 何小飞, 谭文军, 等. 空洞卷积结合全局池化的卷积神经网络识别作物幼苗与杂草[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 159-165.
SUN Jun, HE Xiaofei, TAN Wenjun, et al. Recognition of crop seeding and weed recognition based on dilated convolution and global pooling in CNN[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 159-165. (in Chinese)
- [8] 舒田, 岳延滨, 李莉婕, 等. 基于高光谱遥感的农作物识别[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1310-1314.
SHU Tian, YUE Yanbin, LI Lijie, et al. Crop identification based on hyperspectral remote sensing[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016, 32(6): 1310-1314. (in Chinese)
- [9] 刘路, 潘艳娟, 陈志健, 等. 高遮挡环境下玉米植保机器人作物行间导航研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 11-17.
LIU Lu, PAN Yanjuan, CHEN Zhijian, et al. Inter-rows navigation method for corn crop protection vehicles under high occlusion environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 11-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201002&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.002. (in Chinese)
- [10] 翟志强. 基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
ZHAI Zhiqiang. A test method of binocular vision-based guidance for tractor based on virtual reality[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [11] 翟志强, 朱忠祥, 杜岳峰, 等. 基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 56-65.
ZHAI Zhiqiang, ZHU Zhongxiang, DU Yuefeng, et al. Test of binocular vision-based guidance for tractor based on virtual reality[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 56-65. (in Chinese)
- [12] CORDILL C, GRIFT T E. Design and testing of an intra-row mechanical weeding machine for corn [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 247-252.
- [13] 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12-18.
HU Lian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12-18. (in Chinese)
- [14] 李南, 陈子文, 朱成兵, 等. 电驱锄草机器人系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 15-20.
LI Nan, CHEN Ziwen, ZHU Chengbing, et al. System design and experiment of electric driven weeding robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 15-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160503&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.003. (in Chinese)
- [15] 陈子文, 张春龙, 李南, 等. 智能高效株间锄草机器人研究进展与分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 1-8.
CHEN Ziwen, ZHANG Chunlong, LI Nan, et al. Study review and analysis of high performance intra-row weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 1-8. (in Chinese)
- [16] GRIEPE NTROG H W, NORRE MARK M, NIELSEN H, et al. Seed mapping of sugar beet[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(2): 157-165.
- [17] GRIEPE NTROG H W, NORRE MARK M, NIELSEN H, et al. Individual plant care in cropping systems [C]//4th European Conference on DI Precision Agriculture, 2003: 247-251.
- [18] NORRE MARK M, GRIEPE NTROG H W, NIELSEN H, et al. A method for high accuracy geo-referencing of data from field operations[C]//4th European Conference on DI Precision Agriculture, 2003: 463-467.
- [19] NORRE MARK M, SOGAARD H T, GRIEPE NTROG H W, et al. Instrumentation and method for high accuracy geo-referencing of sugar beet plants[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 130-146.
- [20] PEREZ-RUIZ M, SLANGHTER D C, GLIEVER C J, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 41-49.
- [21] SUN H, SLANGHTER D C, PEREZ-RUIZ M, et al. RTK GPS mapping of transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 32-37.
- [22] EHSANI M R, UPADHYAYA S K, MATTSON M L. Seed location mapping using RTK GPS[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 909-914.
- [23] 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.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [24] 梅鹤波, 乔晓东, 高娜娜, 等. 排种检测装置: 中国, ZL20192115703.2[P]. 2020-02-14.

- [25] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters part I: design and laboratory experiment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,162:318-327.
- [26] 刘全威. 高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
LIU Quanwei. Design and experiment of seed precision delivery mechanism for high-speed planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [27] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8-15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8-15. (in Chinese)
- [28] Seed Tube[EB/OL]. <https://www.precisionplanting.com/products/product/speedtube>, 2019-11-11.
- [29] 王福林, 尚家杰, 刘宏新, 等. EDEM 颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(2): 110-114.
WANG Fulin, SHANG Jiajie, LIU Hongxin, et al. Application of EDEM particles simulation on seed-metering device research [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(2): 110-114. (in Chinese)
- [30] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019. (in Chinese)
- [31] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62-69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined maize precision seed-metering device based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62-69. (in Chinese)
- [32] HAN Dandan, ZHANG Dongxing, JING Huirong, et al. DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 426-438.
- [33] 颜丙新. 盘室同步气吸式精量排种器设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
YAN Bingxin. Design and Research of vacuum precision seed-metering device with synchronously rotating plate and chamber [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [34] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM-CFD 模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 23-31.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. EDEM-CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 23-31. (in Chinese)
- [35] 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)
- [36] 颜丙新, 武广伟, 付卫强, 等. 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 47-54.
YAN Bingxin, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 47-54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s206&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.006. (in Chinese)
- [37] 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.j-csam.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)
- [38] 贾洪雷, 李森森, 王刚, 等. 中耕期玉米田间避苗除草装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 15-22.
JIA Honglei, LI Sensen, WANG Gang, et al. Design and experiment of seedling avoidable weeding control device for intertillage maize (*Zea Mays* L.) [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 15-22. (in Chinese)
- [39] 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.