



王尊, 赵武云, 石林榕, 孙步功, 孙伟, 戴飞, 周刚, 郭军海, 饶罡, 李辉. 基于DEM-MBD耦合的滚勺式精量穴播器成穴器运动参数优化[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(01):66-77.

WANG Zun, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, SUN Bugong, SUN Wei, DAI Fei, ZHOU Gang, GUO Junhai, RAO Gang, LI Hui. Optimization of the motion parameters of a rolling spoon type precision hole planter based on DEM-MBD coupling[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(01):66-77.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.01.06

基于DEM-MBD耦合的滚勺式精量穴播器成穴器运动参数优化

王尊¹ 赵武云¹ 石林榕^{1*} 孙步功¹ 孙伟¹ 戴飞¹ 周刚²

郭军海¹ 饶罡¹ 李辉¹

(1. 甘肃农业大学 机电工程学院, 兰州 730070;

2. 甘肃省农科院 旱地农业研究所, 兰州 730070)

摘要 针对滚勺式精量穴播器固定成穴器成穴轨迹呈余摆线, 余摆线过大造成撕膜和挑膜的问题, 同时为降低株距的差异性, 基于离散元法和多体动力学耦合方法对穴播器成穴器运动过程进行仿真分析。以牵引速度、牵引角度和穴播器质量为影响因素, 以余摆线宽度、株距和播种深度为响应值, 通过预试验和单因素试验确定各因素对响应值的影响规律, 基于前期仿真试验结果开展多因素仿真试验获得最优参数组合, 并通过田间试验验证最优结果的可靠性。结果表明: 滚勺式精量穴播器成穴器运动的最优参数组合为, 牵引速度523.43 mm/s、牵引角度21.9°、穴播器质量18.2 kg, 此时株距为196.84 mm, 余摆线宽度13.98 mm。以最优参数组合进行验证试验, 株距为193.86 mm, 相对误差1.51%; 余摆线宽度13.28 mm, 其相对误差4.39%。

关键词 穴播器; 成穴器; DEM-MBD耦合; 仿真优化

中图分类号 S223.2

文章编号 1007-4333(2024)01-0066-12

文献标志码 A

Optimization of the motion parameters of a rolling spoon type precision hole planter based on DEM-MBD coupling

WANG Zun¹, ZHAO Wuyun¹, SHI Linrong^{1*}, SUN Bugong¹, SUN Wei¹, DAI Fei¹,
ZHOU Gang², GUO Junhai¹, RAO Gang¹, LI Hui¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Dryland Agriculture Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract Aiming at the problems that the trajectory of fixed cavity formers of rolling spoon-type precision cavity seeders is in the form of a residual pendulum line, and the residual pendulum line is too large, which causes tearing and picking of the film, and in order to reduce the variability of the spacing of the plants, the simulation and analysis of the motion process of the cavity seeders are conducted based on discrete element method and multi-body dynamics coupling method. Taking the traction speed, traction angle and cavity seeder quality as the influencing factors, and the residual pendulum width, plant spacing and sowing depth as the response values, the influence law of each factor on the response values is determined through pre-test and single-factor test. Based on the results of the pre-simulation test, a multi-factor simulation test is carried out to obtain the optimal parameter combinations and to verify the reliability of the optimal results through the field test. The results show that: The optimal parameter combination of rolling spoon-type

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 甘肃省科技计划项目(21ZD4NA012); 国家自然科学基金项目(52065004, 52165028); 甘肃省农科院重点研发计划(2021GAAS23)

第一作者: 王尊(ORCID: 0000-0001-7687-9435), 硕士研究生, E-mail: 2323908271@qq.com

通讯作者: 石林榕(ORCID: 0000-0003-2744-4237), 副教授, 主要从事西北旱区精密、智能播种关键技术与装备研究, E-mail: shilr@gsau.edu.cn

precision cavity formers is traction speed 523.43 mm/s, traction angle 21.9° and cavity seeder mass 18.2 kg. Under above condition, the plant spacing is 196.84 mm, and the width of the residual pendulum line is 13.98 mm. The optimal parameter combinations for the validation test are the plant spacing 193.86 mm with relative error 1.51%, the residual pendulum line 13.28 mm with relative error 4.39%.

Keywords cavity seeders; cavity formers; DEM-MBD coupling; simulation optimization

穴播是重要的农艺技术^[1],常应用于花生、燕麦、玉米等作物的种植中^[2-4]。成穴器是滚勺式穴播器作业过程中的关键部件,但其播种时存在撕膜、挑膜和穴位错孔的现象^[5-7],因此,成穴器成穴过程的分析及优化对提高穴播器膜上播种的可靠性,减少其对地膜的损伤具有重要意义。

现有研究对穴播器关键部件运动轨迹进行了深入研究。李亚军等^[8]利用Solidworks对穴播轮鸭嘴运动轨迹进行仿真与分析,以鸭嘴入土轨迹交叉最大距离为试验指标,优化穴播轮牵引速度和滑移距离,减少了对地膜撕裂和跳动问题,降低了空穴率;石林榕等^[9]根据直插穴播机穴播过程,设计出强排强启装置,实现玉米种子有效取种和强排,降低了地面起伏对播种性能的影响,成功提高直插穴播机的可靠性及穴粒数合格率;戴飞等^[10]设计了气动直插式穴播机,对其播种运动轨迹进行仿真分析,借助有限元法获得Mises应力云图、空间位移图和塑性应变图,筛选出具有更好性能的成穴器形状;魏宏安等^[11]对小麦覆膜穴播机结构、成穴器运动轨迹、穴孔形成过程及成穴器形状进行分析,提出该类穴播机穴距不一致和挑膜现象严重等实际问题,对覆膜穴播机优化提供依据;王平等^[12]对直插杆运动轨迹仿真,优化整机前进速度和

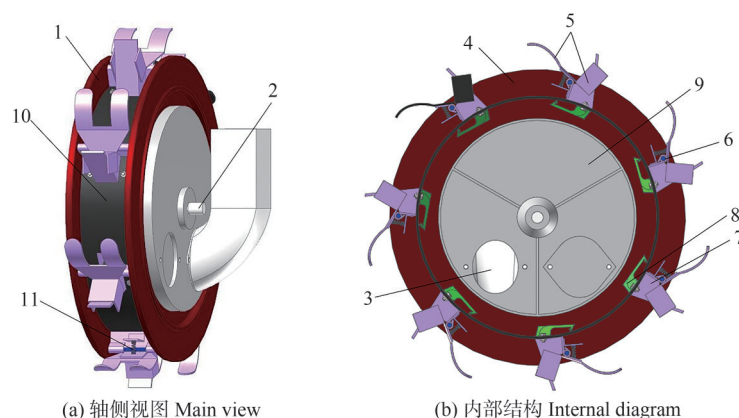
主动齿轮转速,设计出一款能实现成穴器“零速”播种的直插机构,减少了对地膜破坏,提高膜保温性和抗风性;郭笑欢等^[13]采用Solidworks对直插式装置运动轨迹仿真,优化成穴器相对于前进方向的速度差和排种管入土后水平位移差,实现播种时成穴器“零速”播种,不易挑膜、撕膜。

目前针对穴播器成穴器运动轨迹的研究较少,为优化穴播器成穴器运动轨迹,提高穴播器可靠性,本研究基于DEM-MBD联合仿真技术对滚勺式穴播器运动过程进行仿真分析,采用预试验和单因素试验研究牵引角度、牵引速度和穴播器质量对株距、余摆线宽度和播种深度的影响,确定最优参数组合,并进行田间试验验证,以期对滚勺式穴播器优化和工作参数设置提供参考。

1 仿真模型建立

1.1 滚勺式精量穴播器

滚勺式精量穴播器主要由外壳、舀种勺、活动成穴器和固定成穴器等组成(图1)。工作时,滚勺式穴播器逆时针旋转,种群在摩擦和自重的作用下流入舀种勺,并从方形孔进入成穴器,成穴器被穴播器压入土壤形成穴孔,穴播器继续转动,固定成



1. 外壳I; 2. 旋转轴; 3. 进种口; 4. 外壳II; 5. 活动成穴器; 6. 销钉; 7. 固定成穴器; 8. 舀种勺; 9. 外壳III; 10. 穴播器固定板; 11. 复位弹簧。
1. Shell I; 2. Rotating shaft; 3. Seed inlet; 4. Shell II; 5. Movable cavity formers; 6. Pins; 7. Fixed cavity formers; 8. Seed scoop; 9. Shell III; 10. Cavity seeder fixing plate; 11. Reset spring.

图1 滚勺式精量穴播器组成

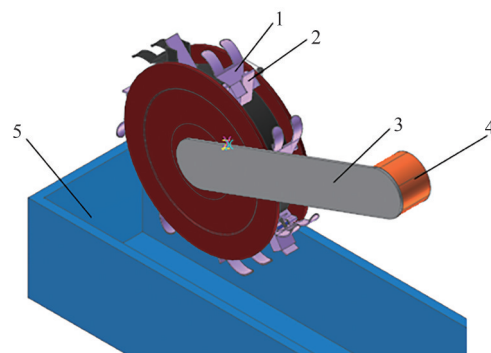
Fig. 1 Rolling spoon-type precision cavity seeder composition

穴器作为支点不动,活动成穴器打开,种子从成穴器排出进入穴孔,后经弹簧恢复原有状态,如此循环完成排种。

1.2 穴播器多体动力学模型

借助 Solidworks 将建立好的穴播器模型导出为 x_t 格式,导入到 Recurdyn V9R2 软件。将不影响运动过程的零件合并为一个整体来降低模型复杂程度,取种器固定板、舀种勺和螺栓螺母使用 Merge 功能整合成一个整体^[14],外壳与旋转轴以旋转副连接。旋转轴与牵引杆之间建立与旋转轴相同半径的圆柱体,以固定副连接,外壳 I 和旋转轴以旋转副连接,穴播器固定板与外壳 I 和外壳 II 以固定副连接。为控制牵引角度作为变量并在仿真中始终保持定值,保证牵引杆与水平夹角运动过程中不变,将主动件、旋转轴延长体与牵引杆均以固定副连接。穴播器多体动力学模型见图 2。

穴播器作业过程中竖直方向存在位移,为保证仿真过程与实际更为接近,在主动件上建立辅助体,辅助体与 Ground 建立上下方向的平动副,主动件和辅助体建立水平方向的平动副(图 3(a)),由此可实现主动件在水平运动过程中上下起伏运动不受影响。定义水平方向平动副 Motion 函数为 $\text{STEP}(\text{Time}, 0.2,$

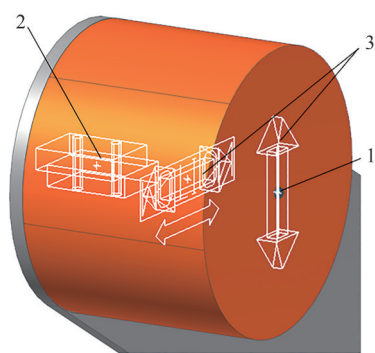


1. 活动成穴器;2. 固定成穴器;3. 牵引杆;4. 主动件;5 土槽。
1. Movable cavity formers; 2. Fixed cavity formers; 3. Traction bars; 4. Active parts; 5 soil groove.

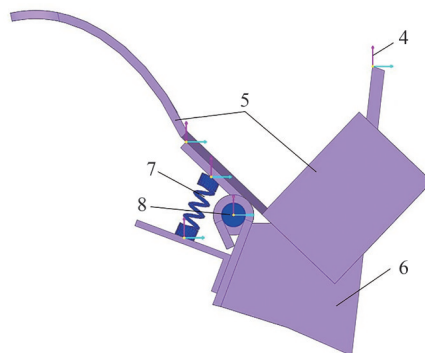
图 2 Recurdyn 中穴播器的模型

Fig. 2 Modeling of cavity seeder in Recurdyn

$0, 0.2, v) + \text{STEP}(\text{Time}, 2.2, 0, 2.2, -v) + \text{STEP}(\text{Time}, 2.2, 0, 2.2, v)$, 其中 v 为所需牵引速度,单位为 mm/s。该函数的作用是在 0.2 s 前无任何外力,0.2 s 后速度立即上升为 v 并保持此速度到仿真结束。销钉采用固定副与外壳 I 连接,活动成穴器和销钉通过旋转副连接,在两板的中心建立复位弹簧(图 3(b)),将复位弹簧的弹性系数设置为 5 N/mm,在固定成穴器上建立 Marker 点便于仿真时显示固定成穴器轨迹。



(a) 牵引装置运动副
Traction unit kinematics



(b) 成穴器
Cavity formers

1. 辅助体;2. 固定副;3. 平动副;4. Marker 点;5. 活动成穴器;6. 固定成穴器;7. 复位弹簧;8. 销钉。

1. Auxiliary body; 2. Fixed vice; 3. Flat vice; 4. Marker point; 5. Active cavity formers; 6. Fixed cavity formers; 7. Reset spring; 8. Pin.

图 3 Recurdyn 中牵引装置运动副的建立和成穴器的构成

Fig. 3 Creation of a kinematic pair of traction devices and composition of cavity formers in Recurdyn

1.3 土壤模型及参数

根据石林榕等^[15]针对西北旱区农田土壤颗粒模型标定, EDEM 接触模型采用 Hysteretic spring contact model (HSCM)、Standard rolling friction 和

Linear Cohesion model (LCM), 颗粒间的阻尼系数和刚度系数为 0.05 和 0.95, 其他参数参考见表 1。

土壤颗粒模型采用 EDEM 数据库中土壤颗粒三球模型。为减小仿真规模缩短仿真时间^[16], 将颗

表 1 土壤仿真参数^[15]

Table 1 Soil simulation parameters^[15]

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
土壤颗粒间的静摩擦因数 Coefficient of static friction between soil particles	0.392	土壤颗粒间的能量密度/(J/m ³) Energy density between soil particles	8 150
土壤颗粒间的动摩擦因数 Coefficient of dynamic friction between soil particles	0.12	土壤密度/(kg/m ³) Density of soil	2 600
土壤颗粒间的恢复因数 Coefficient of restitution between soil particles	0.6	土壤颗粒泊松比 Poisson's ratio of soil particles	0.41
土壤颗粒与穴播器间静摩擦因数 Coefficient of static friction between soil particles and cavity seeder	0.5	土壤颗粒剪切模量/GPa Shear modulus of soil particles	24.7
土壤颗粒与穴播器间动摩擦因数 Coefficient of dynamic friction between soil particles and cavity seeder	0.05	穴播器泊松比 Poisson's ratio of cavity seeder	0.3
土壤颗粒与穴播器间恢复因数 Coefficient of restitution between soil particles and cavity seeder	0.6	穴播器剪切模量/GPa Shear modulus of cavity seeder	79
土壤颗粒屈服强度/MPa Yield strength of soil particles	0.23		

粒半径调整为 11.132 mm。根据仿真所需土槽长度,在 Recurdyn 中建立无顶长方体,将其作为 wall 导入到 EDEM 中,建立颗粒工厂并在土槽中生成土

壤颗粒,后导入与土壤接触部件:活动成穴器、固定成穴器、穴播器固定板、外壳 I、外壳 II。本研究所建立的离散元仿真模型见图 4。

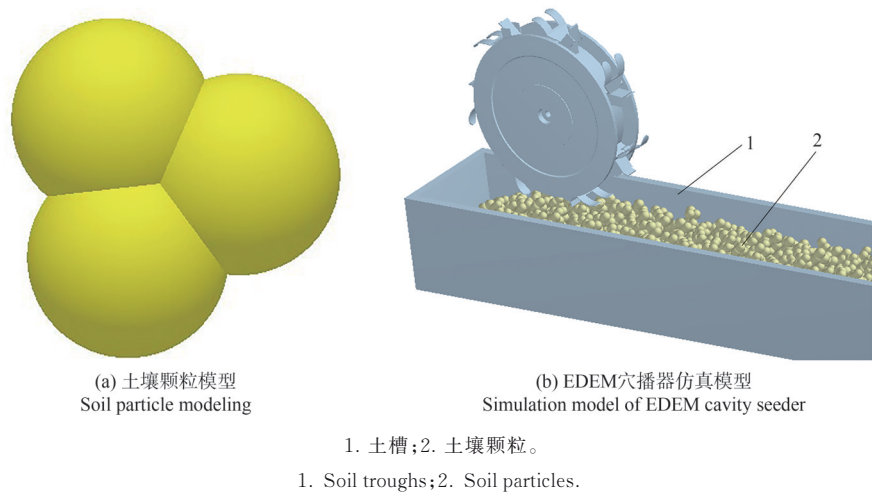


图 4 土壤颗粒模型与穴播器的 EDEM 仿真模型

Fig. 4 Soil particle modeling and EDEM simulation modeling of cavity seeder

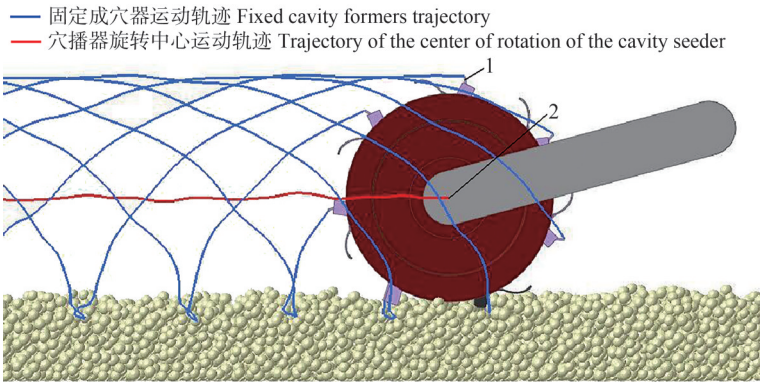
1.4 耦合模型

在穴播器与土壤相互作用的耦合仿真中,虚拟

样机中与离散元法土壤的相互作用的部分需要以 wall 的形式输出。Recurdyn 通过 wall 接收来自

EDEM的外力,EDEM则通过 wall 接收 Recurdyn 的接触几何的运动数据^[17], wall 文件通过 EDEM 中“Import Geometry from RecurDyn”功能

导入。固定成穴器运动轨迹经 Trace 功能将建立的 Marker 点和旋转中心的轨迹显示出来(图 5)。



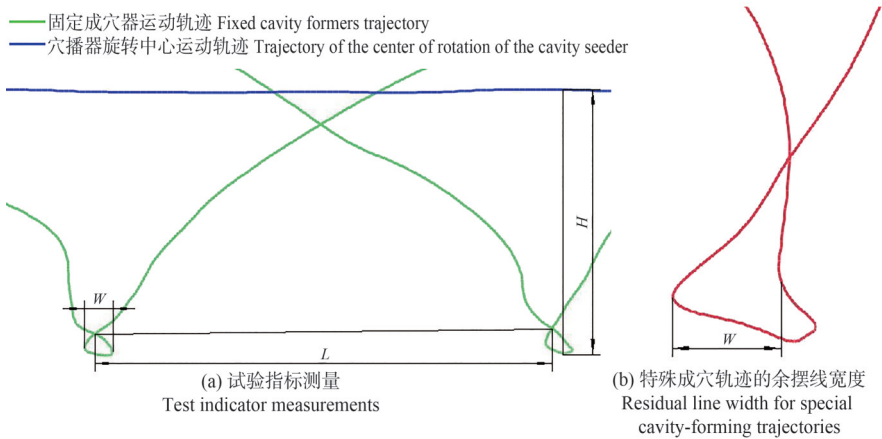
1. 固定成穴器;2. 旋转中心。
1. Fixing the hole-former; 2. Rotating the center.
图 5 固定成穴器和旋转中心运动轨迹
Fig. 5 Fixed cavity formers and center of rotation trajectories

2 仿真试验

2.1 试验指标

本研究试验指标为株距、播种深度和余摆线宽度。使用 Recurdyn 测量轨迹上点的坐标。如图 6 所示:株距 L 为相邻交叉点 x 坐标的差值;播种深度 H 为最低点 y 坐标值与穴播器旋转中心轨迹中同一横坐标所对应 y 值的差值,再减去外壳 I 半径

193.5 mm,目标播种深度为 35 mm;余摆线宽度为闭合曲线最右端与最左端 x 值的差,受限于颗粒模型,固定成穴器遇到三球颗粒中心处无法正常运动,会产生特殊曲线,特殊闭合曲线最右端取拐角处即可。为降低仿真试验误差,对株距、余摆线宽度和播种深度均取 6 个测试值,去其最大最小值后 4 个测试值的平均值作为此次仿真试验结果。



L 为株距; H 为最低点距穴播器中心距离; W 为余摆线宽度。
 L is the plant spacing. H is the distance of the lowest point from the center of the cavity seeder. W is the width of the residual swing line.

图 6 试验指标测量和特殊成穴轨迹余摆线宽度

Fig. 6 Measurement of test indexes and the width of the residual pendulum line of the special cavity-forming trajectory

2.2 牵引杆角度范围

以穴播器旋转轴中心为原点,穴播器前进方向为 x 轴正方向,将牵引杆在不同象限作为试验变量,株距、余摆线宽度和播种深度作为试验指标。牵引角度分别设为 10° , -10° , 170° , -170° , 0° , 180° 判断牵引杆在 4 个象限的效果,初步缩小牵引角度范围。参考现有穴

播器质量,将穴播器质量设置为 17.9 kg,牵引速度 500 mm/s。EDEM 软件中设仿真时间为 5 s,时间步长 4×10^{-6} s,在 Recurdyn 中设置仿真总时长为 5 s,共 1 200 个时间间隔,牵引角度预试验仿真结果见表 2。株距和余摆线的宽度第一象限最优,播种深度差距不明显,因此将牵引角度的单因素试验确定在第一象限。

表 2 牵引角度预试验结果
Table 2 Traction angle pre-test results

牵引角度 / ($^{\circ}$) Traction angle	株距 / mm Plant spacing	余摆线宽度 / mm Residual pendulum width	播种深度 / mm Sowing depth
10	197.05	14.57	34.76
0	187.04	16.48	34.78
-170	183.39	17.61	33.09
180	196.38	16.29	34.32
170	192.43	15.49	34.38
-10	187.59	16.35	34.84

2.3 单因素试验

2.3.1 牵引速度对成穴轨迹的影响

曲浩等^[19]设计了一款带蓄土装置的胡麻播种机,机具前进速度为 0.6 m/s;康建明等^[20]对花生穴播器投种性能进行优化,其中机具前进速度优化结果为 3.85 km/h (1.07 m/s)。当牵引速度为 1 000 mm/s 时,由于牵引速度过高,入土轨迹和出土轨迹 2 次相交(图 7),影响成穴器成穴效果,由此本研究穴播器的前进速度分别取 400、600、800、1 000 和 1 100 mm/s。穴播器质量设置为 17.9 kg,角度为第一象限 10° 。EDEM 软件中仿真时间设为 6 s,时间步长 4×10^{-6} s,Recurdyn 中运动时间 6 s,共 1 500 个时间间隔。牵引速度单因素仿真试验结果见表 3。可见,株距随着速度的增大先增大后减小;余摆线宽度随

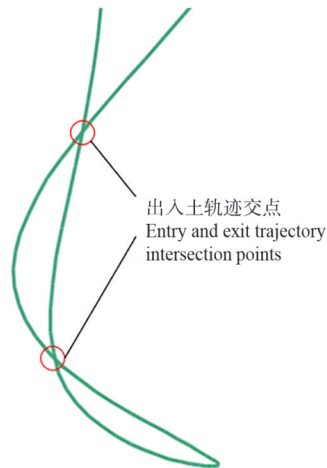


图 7 出入土轨迹 2 次相交
Fig. 7 Entry and exit trajectories intersect twice

表 3 牵引速度单因素仿真试验结果
Table 3 Traction speed single-factor simulation test results

牵引速度 / (mm/s) Traction speed	株距 / mm Plant spacing	余摆线宽度 / mm Residual pendulum width	播种深度 / mm Sowing depth
400	187.32	16.48	34.39
600	198.43	15.34	34.05
800	186.67	14.02	34.29
1 000	189.56	14.71	33.89
1 100	188.27	15.46	33.58

速度增大先减小后增大;播种深度总体上在随速度的增大而减小,但播种深度变化不明显。综上,本研究多因素试验牵引速度的取值范围为400~800 mm/s。

2.3.2 牵引角度对成穴轨迹的影响

对穴播器进行受力分析结果见图8,在水平方向和竖直方向有:

$$\begin{cases} F \cos \alpha = F_f \\ F_n + F \sin \alpha = G \\ F_f = \mu F_n \end{cases} \quad (1)$$

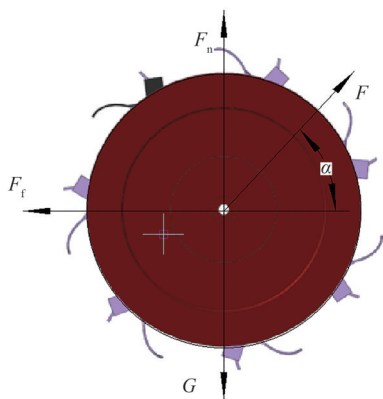
式中: G 为穴播器自身重力; F_n 为土壤对穴播器的支持力; F 为牵引机给予穴播器的牵引力; F_f 为地面对穴播器的摩擦力; α 为牵引力与前进方向的夹角。根据式(1)得:

$$F = \frac{\mu G}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} \quad (2)$$

$$F_n = \frac{G \cos \alpha}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} \quad (3)$$

由式(2)得,穴播器达到平衡状态后,牵引力 F 随 α 的增大而增大;由式(3)得,支持力 F_n 随 α 的增大而减小。由此可见,当 α 增大时,牵引力 F 增大,支持力 F_n 减小。

仿真试验时设穴播器质量为17.9 kg,牵引速度600 mm/s。牵引角度以 0° 为低水平值, 10° 为差值,进行5次仿真试验,仿真试验结果见表4:余摆线宽度随角度



G 为穴播器自身重力; F_n 为土壤对穴播器的支持力; F 为牵引机给予穴播器的牵引力; F_f 为地面对穴播器器的摩擦力; α 为牵引力与前进方向的夹角。

G is the gravity of the planter itself. F_n is the support force of the soil on the planter. F is the traction force given to the planter by the tractor. F_f is the friction force of the ground on the planter. α is the angle between the traction force and the forward direction.

图8 穴播器受力分析

Fig. 8 Force analysis of cavity seeder

增大呈先增大后减小的趋势,牵引角度为 20° 时摆线宽度最小;株距随牵引角度的增大明显呈先增大后减小的趋势,最高值为 10° ;播种深度随牵引角度增大逐渐减小。综上,牵引角度区间取 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。

表4 牵引角度单因素仿真试验结果

Table 4 Traction angle single-factor simulation test results

牵引角度/ $^\circ$ Traction angle	株距/mm Plant spacing	余摆线宽度/mm Residual pendulum width	播种深度/mm Sowing depth
0	187.24	15.68	34.65
10	198.43	15.34	34.05
20	197.86	13.74	33.53
30	193.85	15.89	33.49
40	190.98	16.57	33.01

2.3.3 穴播器质量对指标影响

活动成穴器依靠穴播器自重打开。按照常规穴播器质量为17.9 kg,本研究将穴播器质量分别设为16、17、18、19和20 kg。穴播器质量通过改变材料密度方式进行调整,将牵引速度设为600 mm/s,牵引杆角度为 10° ,穴播器质量单因素仿真试验结果见表5。穴播器质量为17 kg时,株距最优,余摆线宽度和播种深度在各个质量下差距不明显,考虑到仿真试验

的误差,将穴播器质量区间定为16.5~19.5 kg。

2.4 仿真优化

2.4.1 二次正交旋转组合仿真试验

为了进一步研究牵引角度、牵引速度和穴播器质量对穴播器成穴性能(株距、余摆线宽度和播种深度)的影响,基于前期预试验和单因素试验所确定的设计参数,进行多因素正交旋转组合仿真试验,试验方案和试验结果见表6和表7。

表 5 穴播器质量单因素仿真试验结果

Table 5 Results of single-factor simulation test on cavity seeder quality

穴播器质量/kg	株距/mm	余摆线宽度/mm	播种深度/mm
Cavity seeder quality	Plant spacing	Residual pendulum width	Sowing depth
16	193.94	15.05	35.42
17	201.06	14.19	33.61
18	195.30	15.57	34.91
19	196.50	15.71	34.68
20	186.12	15.65	35.89

表 6 成穴器轨迹仿真试验因素与水平

Table 6 Experimental factors and levels for cavity formers trajectory simulation

水平 Level	因素 Factor		
	x_1 , 牵引角度/(°)	x_2 , 牵引速度/(mm/s)	x_3 , 穴播器质量/kg
	Traction angle	Traction speed	Cavity seeder quality
—1	0	400	16.5
0	15	600	18
1	30	800	19.5

表 7 成穴器轨迹仿真试验方案与结果

Table 7 Simulation test program and results of cavity formers trajectory simulation

编号 Number	因素水平 Factor level			指标 Index		
	X_1	X_2	X_3	Y_1 /mm	Y_2 /mm	Y_3 /mm
1	—1	—1	0	189.85	16.99	34.56
2	1	—1	0	194.31	13.94	34.16
3	—1	1	0	186.78	14.00	33.92
4	1	1	0	186.25	14.78	34.52
5	—1	0	—1	192.82	16.05	34.03
6	1	0	—1	193.73	14.68	34.21
7	—1	0	1	194.58	15.01	33.97
8	1	0	1	193.81	15.47	34.42
9	0	—1	—1	193.87	16.22	33.95
10	0	1	—1	188.83	14.35	33.90
11	0	—1	1	196.40	14.61	34.71
12	0	1	1	185.12	16.10	34.50
13	0	0	0	198.07	14.05	34.43
14	0	0	0	195.02	13.44	34.26
15	0	0	0	196.08	13.65	34.51
16	0	0	0	195.91	14.45	34.46
17	0	0	0	195.70	14.16	34.53

注： X_1, X_2, X_3 分别为牵引角度、牵引速度和穴播器质量的水平值； Y_1, Y_2, Y_3 分别为株距、余摆线宽度和播种深度。

Note: X_1, X_2 , and X_3 are the horizontal values of traction angle, traction speed, and cavity seeder quality, respectively. Y_1, Y_2 , and Y_3 are the plant spacing, residual swing width, and sowing depth, respectively.

对试验结果进行方差分析,结果见表8。可知,株距和余摆线宽度模型均显著,播种深度模型 P 为0.085 6,效果不显著未将其列出。株距模型的决定性系数为0.95,余摆线宽度模型决定系数为0.92,可见模型拟合程度较高,与实际值相差较小。去除不显著影响因素后,分别建立株距 Y_1 和余摆线宽度

Y_2 对牵引角度 x_1 、牵引速度 x_2 、穴播器质量 x_3 的二次多项式回归方程,如下:

$$Y_1 = 196.16 - 3.43x_2 - 1.56x_2x_3 - 2.09x_1^2 - 4.77x_2^2 \tag{4}$$

$$Y_2 = 13.95 - 0.4x_1 + 0.96x_1x_2 + 0.84x_2x_3 + 0.5x_2^2 + 0.87x_3^2 \tag{5}$$

表8 成穴器轨迹仿真试验方差分析

Table 8 Variance analysis of cavity formers trajectory simulation test

来源 Source	Y_1				Y_2			
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	234.03	9	15.790	0.000 7	15.15	9	9.090	0.004 1
x_1	2.07	1	1.260	0.299 2	1.26	1	6.830	0.034 8*
x_2	94.19	1	57.180	0.000 1**	0.80	1	4.320	0.076 2
x_3	0.05	1	0.033	0.860 9	0.01	1	0.008	0.930 5
x_1x_2	6.23	1	3.780	0.093 0	3.67	1	19.810	0.003 0**
x_1x_3	0.71	1	0.430	0.533 7	0.84	1	4.520	0.071 0
x_2x_3	9.73	1	5.910	0.045 4*	2.82	1	15.240	0.005 9**
x_1^2	18.38	1	11.160	0.012 4*	0.97	1	5.240	0.055 9
x_2^2	95.77	1	58.140	0.000 1**	1.04	1	5.630	0.049 4*
x_3^2	0.46	1	0.280	0.612 2	3.21	1	17.310	0.004 2**
残差 Residual	11.53	7			1.30	7		
失拟项 Lack of fit	6.30	3	1.61	0.321 1	0.64	3	1.31	0.387 6
误差 Pure error	5.23	4			0.65	4		
总和 Total	245.56	16			16.45	16		

注:**和*分别表示极显著($P<0.01$)和显著($0.01<P<0.05$)。
Note: ** and * indicate highly significant ($P<0.01$) and significant ($0.01<P<0.05$) respectively.

比较 F 值可知,三因素对株距影响的主次顺序为牵引速度、牵引角度、穴播器质量,牵引速度影响最为显著,牵引速度与穴播器质量交互作用对株距的影响见图9。当牵引角度为 15° 、穴播器质量一定时,随牵引速度的增大,株距先增大后减小;当牵引角度为 15° 、牵引速度处于高水平时,株距随穴播器质量的增大而增大,当牵引角度为 15° 、牵引速度处于低水平时,株距随着穴播器质量的增大而减小。

三因素对余摆线宽度影响的先后顺序为,牵引角度、牵引速度、穴播器质量,交互因素 x_1x_2 的显著性水平 $P<0.01$,其影响不可忽略,牵引角度和牵引速度、牵引速度和穴播器质量的交互项的响应曲面见图10。当穴播器质量为18 kg、牵引速度处于低水平时,余摆线的宽度随着牵引角度的增大而减小,牵引速度处于高水平时,余摆线宽度随

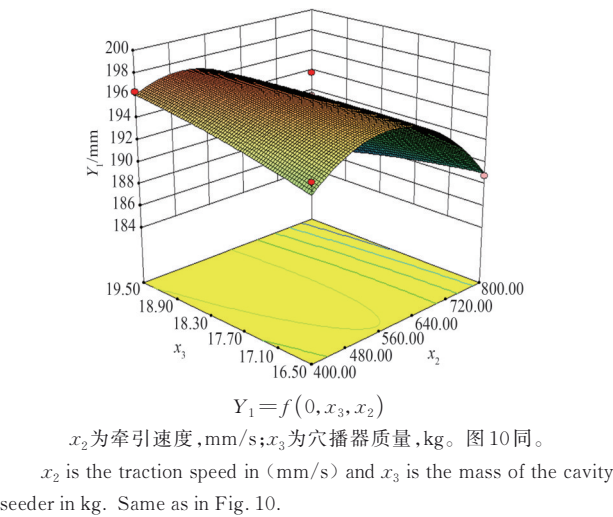


图9 穴播器质量和牵引速度交互因素对株距(Y_1)的影响
Fig. 9 Effect of interaction factors of cavity seeder quality and traction speed on plant spacing (Y_1)

着牵引角度的增大而增大；当穴播器质量为 18 kg、牵引角度处于低水平时，余摆线宽度随着牵引速度的增大而减小，在牵引角度处于高水平时，余摆线宽度随着牵引速度的增大而增大（图 10(a)）。当牵引角度为 15°、牵引速度一定时，余

摆线宽度随着穴播器质量的增大先减小后增大；当牵引角度为 15°、穴播器质量处于高水平时，余摆线宽度随着牵引速度增大而增大，穴播器质量处于低水平时，余摆线宽度随牵引速度增大而减小（图 10(b)）。

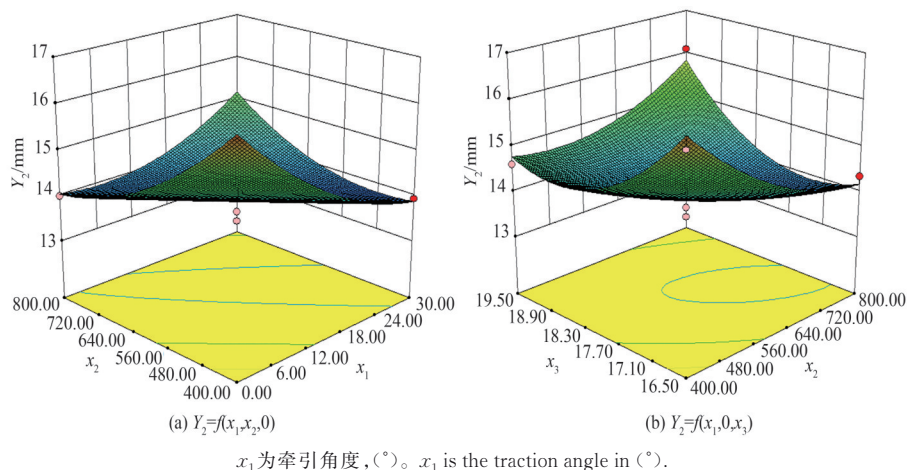


图 10 三因素交互因素对余摆线宽度 (Y_2) 的影响

Fig. 10 Effect of interaction factors on the width of the residual pendulum line (Y_2)

2.4.2 参数优化

为保证穴播器具有良好的成穴性能，获得牵引角度、牵引速度和穴播器质量最优组合，以株距和余摆线宽度作为评价指标，结合各因素试验取值范围，进行参数优化。约束条件为：

$$\begin{cases} \text{Max } Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \text{Min } Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ x_1 \in [-1, 1] \\ x_2 \in [-1, 1] \end{cases} \quad (6)$$

以株距最大、余摆线宽度最小为优化目标，利用 Design-Expert8.06 中的 Optimization-Numerical 模块进行多目标优化求解得到，当牵引速度为 523.43 mm/s、牵引角度为 21.9°、穴播器质量为 18.2 kg 时，成穴轨迹性能最优，株距为 196.84 mm、余摆线宽度 13.89 mm。

3 田间验证试验

滚勺式精量穴播器成穴器成运动参数优化田间验证试验于 2023 年 5 月在甘肃省兰州新区甘肃农业大学试验田进行。调整牵引杆角度为

21.9°，穴播器质量 18.2 kg，电动牵引机作为动力输入，10 s 内带动穴播器前进 523.43 mm。使用手机拍摄穴播器作业过程视频，并将拍摄的视频每 0.1 s 截图 1 次，为减少试验过程中拍摄设备倾斜造成的误差，挑选截图中穴播器直径相同且为圆形的成穴过程，借助 CAXA 电子图板绘制固定成穴器田间试验运动轨迹见图 11，测得余摆线宽度为 13.28 mm。田间验证试验总时间为 10 s，期间穴播器共形成 28 个穴孔，计算出株距为 193.86 mm。



图 11 固定成穴器田间试验的成穴轨迹

Fig. 11 Trajectory of cavity formation in field trials with fixed cavity formers

4 结 论

本研究基于DEM-MBD耦合仿真方法,采用预试验、单因素仿真试验和多因素仿真试验,以牵引速度、牵引角度和穴播器质量为影响因素,以株距和余摆线宽度和播种深度为响应值,对穴播器成穴器成穴轨迹进行仿真分析,探究各因素对响应值的影响规律,得到最优参数组合。开展二次旋转正交组合试验,得到较优参数组合为:牵引速度为523.43 mm/s,牵引角度 21.9° ,穴播器质量18.2 kg。田间验证结果表明,在此参数组合下,株距为193.86 mm,余摆线宽度13.28 mm,与仿真试验预测结果余摆线宽度13.89 mm,株距196.84 mm相比,余摆线宽度相对误差为4.39%,株距相对误差1.51%。

参考文献 References

- [1] 杜瑞成, 杨善东, 郭志东, 蔡善儒, 张洪伟. 三种覆膜穴播成穴器方案设计与理论分析[J]. 山东理工大学学报:自然科学版, 2003, 17(2): 15-18
Du R C, Yang S D, Guo Z D, Cai S R, Zhang H W. Design and theoretical analysis of three kinds of punch planting indenting tools [J]. *Journal of Shandong University of Technology: Atural Science Edition*, 2003, 17(2): 15-18 (in Chinese)
- [2] 张春艳, 康建明, 张宁宁, 彭强吉, 张惠, 王小瑜. 花生气吸滚筒式穴播器分种盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 28-37
Zhang C Y, Kang J M, Zhang N N, Peng Q J, Zhang H, Wang X Y. Design and experiment of seed separation tray of air-suction roller dibbler for peanut [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 28-37 (in Chinese)
- [3] 李彦平, 卢琦, 安邦, 乔建伟, 张静, 郑德聪. 燕麦穴播排种器的设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 156-162
Li Y P, Lu Q, An B, Qiao J W, Zhang J, Zheng D C. Design and experiment of oat hole sowing seed metering device [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44 (12): 156-162 (in Chinese)
- [4] 伍皖闽, 陈学庚, 王士国, 颜利民, 蒋德莉, 纪超. 组合型孔轮式玉米精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 60-70
Wu W M, Chen X G, Wang S G, Yan L M, Jiang D L, Ji C. Design and experiment of combined-hole maize precision dibbler [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(3): 60-70 (in Chinese)
- [5] 孙步功, 马军民, 石林榕, 马海军, 吴建民. 间歇式投种玉米穴播装置的设计与试验[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54(12): 10-13
Sun B G, Ma J M, Shi L R, Ma H J, Wu J M. Design and test of intermittent feeding corn planter for maize [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2016, 54(12): 10-13 (in Chinese)
- [6] 王林冲. 小型穴播器的试制研究[J]. 农业开发与装备, 2012(5): 18-22
Wang L C. Study on trial production of small hole seeder [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2012(5): 18-22 (in Chinese)
- [7] 戴飞, 赵武云, 张锋伟, 马海军, 辛尚龙, 马明义. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 1-16
Dai F, Zhao W Y, Zhang F W, Ma H J, Xin S L, Ma M Y. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 1-16 (in Chinese)
- [8] 李亚军, 石林榕. 指夹式玉米穴播轮鸭嘴入土轨迹仿真分析[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(11): 20-23
Li Y J, Shi L R. Simulation analysis of picker finger maize dibbler soil penetration trajectory [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2021, 49(11): 20-23 (in Chinese)
- [9] 石林榕, 赵武云, 杨小平, 孙步功, 孙伟. 玉米直插穴播机强排-强启排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 41-47
Shi L R, Zhao W Y, Yang X P, Sun B G, Sun W. Design and test of metering device with forced seeding and opening for corn direct seeding machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 41-47 (in Chinese)
- [10] 戴飞, 高爱民, 张锋伟, 韩正晟, 赵武云, 王松林. 玉米全膜双垄沟气动直插式穴播机设计与仿真[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 284-289
Dai F, Gao A M, Zhang F W, Han Z S, Zhao W Y, Wang S L. Design and simulation of pneumatic direct insert hill-seeder with corn whole plastic-film on double ridges [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(5): 284-289 (in Chinese)
- [11] 魏宏安, 邵世禄. 滚轮式小麦覆膜穴播机的分析与评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2000, 35(4): 419-423
Wei H A, Shao S L. Analysis and evaluation on a roller type film mulching hill-drop planter for wheat [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2000, 35(4): 419-423 (in Chinese)
- [12] 王平, 石林榕, 赵武云. 旱地全膜双垄沟播直插机构的仿真[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(3): 37-38, 45
Wang P, Shi L R, Zhao W Y. Simulating optimization of direct insert corn planting furrow seeder for whole plastic-film mulching on double ridges in dry land [J]. *Mechanical Research & Application*, 2017, 30(3): 37-38, 45 (in Chinese)
- [13] 郭笑欢, 石林榕, 赵武云, 戴飞, 王久鑫, 赵瑞营. 旱地全膜双垄沟播直插式玉米播种装置的仿真优化[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 278-281
Guo X H, Shi L R, Zhao W Y, Dai F, Wang J X, Zhao R Y. Optimization of simulation of direct-insert corn planting furrow seeder for whole plastic-film mulching on double ridges in dry land [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(2): 278-281 (in Chinese)
- [14] 孟博文, 贾伟健. 一种履带排水车设计方案研究与动力学仿真[J]. 山东工业技术, 2020(4): 98-102
Meng B W, Jia W J. Design research and dynamics simulation of a new crawler drainage vehicle [J]. *Journal of Shandong Industrial Technology*, 2020(4): 98-102 (in Chinese)
- [15] 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 L R, Zhao W Y, Sun W. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 181-187 (in Chinese)
- [16] Fielke J M, Ucgul M, Saunders C. Discrete element modeling of soil-implement interaction considering soil plasticity, cohesion and adhesion [C]//2013 American Society of Agricultural and Biological Engineers,

- 2013; 1
- [17] Shi L R, Zhao W Y, Hua C T, Rao G, Guo J H, Wang Z. Study on the intercropping mechanism and seeding improvement of the cavity planter with vertical insertion using DEM-MBD coupling method [J]. *Agriculture*, 2022, 12(10): 1567
- [18] 王伟才, 杨正, 李晓军, 杨海兰, 寇明杰. 基于平行四连杆机构的垂直入土式玉米穴播机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 18-24
Wang Y C, Yang Z, Li X J, Yang H L, Kou M J. Design and experiment of vertical submerged corn hole seeder based on parallel four-bar linkage mechanism [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(10): 18-24 (in Chinese)
- [19] 曲浩, 石林榕, 辛尚龙, 赵武云, 郭军海, 杨天, 杨金发, 刘凤军. 带有蓄土装置的胡麻精量穴播联合作业机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(8): 186-197
- Qu H, Shi L R, Xin S L, Zhao W Y, Guo J H, Yang T, Yang J F, Liu F J. Design and experiment of flax precision hole-seeding combined, operation machine with soil storage device [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(8): 186-197 (in Chinese)
- [20] 康建明, 向阳, 张春艳, 彭强吉, 张国海, 张宁宁, 王小瑜, 唐朝辉. 气吸滚筒式花生穴播器投种性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 1-11
Kang J M, Xiang Y, Zhang C Y, Peng Q J, Zhang G H, Zhang N N, Wang X Y, Tang C H. Analysis and experiments of the seed feeding performance of air-suction roller dibbler for peanuts [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(14): 1-11 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 王尊, 甘肃农业大学硕士研究生。参与甘肃省科技计划项目、国家自然科学基金项目、甘肃省农科院重点研发计划等多项科研。



通讯作者简介: 石林榕, 中共党员, 甘肃农业大学机电学院副教授, 工学博士。主要研究方向为西北旱区精密播种关键技术与装备。为农业机械学会会员、农业工程学会高级会员、美国农业与生物工程师学会会员、国际土壤耕作研究会会员。主持国家、省级、校级项目多项。发表学术论文多篇, 其中SCI收录6篇, EI收录14篇。授权专利多项, 其中发明专利4项。获省厅级奖多项, 其中省级二等奖2项。立足甘肃农业, 建立了较系统的农业物料参数测定和标定仪器和方法。针对甘肃覆膜种植模式, 研发3种玉米直插穴播机、3款胡麻联合播种机和1款油菜联合播种机等农业装备。