doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.020

黄精块根苗横向交错移栽装置设计与试验

张福增　吴　敏　李爱潮　魏　青　郑志安
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：目前黄精种植生产环节仍以人工作业为主，特别是黄精移栽人工作业方式存在工作强度大、效率低、合格率差、种苗损伤率高等问题。为提升黄精移栽机械化水平，设计了一种黄精块根苗横向交错移栽机具。该移栽机主要由输送组件、传动电控组件、开沟组件、覆土组件、镇压组件、地轮组件、底架等组成。基于黄精块根苗移栽农艺要求及形态学和力学特性参数，采用柔性带式输送方式确定输送带、苗槽、开沟器等结构参数和苗槽布置形式；离散元仿真结果表明，开沟深度和前进速度影响移栽作业效果及效率，采用响应面优化最佳作业参数区间为：开沟深度85~110 mm、前进速度0.3~0.5 km/h；设计试验样机并验证，得到平均伤苗率为0.52%，平均芽头朝向合格率为88.6%，平均株距为（10.99±1.75）cm，株距变异系数为15.93%，平均移栽深度为（9.525±0.48）cm，移栽深度变异系数为5.04%。试验结果表明，整机结构设计合理，作业效果可靠稳定，满足黄精块根苗移栽农艺要求。

关键词：黄精；块根苗；移栽；横向交错；离散元
中图分类号：S223.9　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0186-11

Design and Experiment of *Polygonatum sibiricum* Root Seedlings Transverse Staggered Transplanting Device

ZHANG Fuzeng　WU Min　LI Aichao　WEI Qing　ZHENG Zhian
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: At present, the planting and production process of *Polygonatum sibiricum* is still dominated by manual operations, especially the manual operation mode of transplanting *Polygonatum sibiricum* has problems such as high work intensity, low efficiency, poor pass rate, and high seedling damage rate. In order to improve the mechanization level of transplanting of *Polygonatum sibiricum*, a transverse staggered transplanting machine was designed. The transplanting machine was mainly composed of conveying components, transmission electronic control components, ditching components, covering components, suppression components, ground wheel components, underframes, etc. Based on the agronomic requirements and morphological and mechanical characteristics parameters of transplanting root seedlings of *Polygonatum sibiricum* tuber, the conveying mode was designed as flexible belt conveying, and the structural parameters such as conveyor belt, seedling trough and furrow opener and the layout form of seedling trough were determined. The results of discrete element simulation showed that the combination of ditching depth and forward speed affected the effect and efficiency of transplanting operation, and the optimal operation parameter interval of response surface optimization was as follows: trenching depth was 85~110 mm, and forward speed was 0.3~0.5 km/h. The experimental prototype was designed and verified, and the average seedling injury rate was 0.52%, the average bud head orientation pass rate was 88.6%, the average plant spacing was (10.99±1.75) cm, the plant spacing variation coefficient was 15.93%, the average transplanting depth was (9.525±0.48) cm, and the transplanting depth variation coefficient was 5.04%. The test results showed that the structure design of the whole machine was reasonable, the operation effect was reliable and stable, and it met the agronomic requirements of transplanting root seedlings of *Polygonatum sibiricum* tuber.

Key words: *Polygonatum sibiricum*; root seedlings; transplanting; transverse staggering; discrete elements

收稿日期：2024－07－18　修回日期：2024－09－08
基金项目：财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-21)
作者简介：张福增(1999—)，男，硕士生，主要从事中药材种植机械化工程研究，E-mail: 809459210@qq.com
通信作者：郑志安(1965—)，男，教授，博士生导师，主要从事中药材生产机械化工程、农业系统工程研究，E-mail: zhengza@cau.edu.cn

0　引言

黄精（鸡头黄精）移栽主要包括带茎叶苗移栽和不带茎叶块根移栽两种[1-3]，块根移栽应用最广。传统块根苗移栽依赖人工按照株行距、栽深、芽头朝向等要求顺沟摆放种植，存在工作强度大、工作效率底、移栽效果差、种苗易损伤等问题。为保证移栽质量、减少人力成本及提高作业效率，设计一款适应种苗特征及农艺要求的黄精块根苗移栽装置尤为重要。

目前黄精移栽环节专用装备研发和相关研究较少。云南农业大学[4]设计了一种滇黄精快速移栽装置，主要针对滇黄精带茎叶移栽苗移栽，通过电机带动拨轮，将种苗拨送至输送苗管中，鸭嘴上下往复实现种苗移栽。文献[5-6]设计的滇黄精块茎移栽装置，主要通过对滇黄精切块导送进行移栽，但切块随机，无法保证切块上带有生长芽点，而且不适宜鸡头黄精移栽农艺要求。目前越来越多经济作物的机械化移栽不再简单复刻传统农艺，而是寻求农机农艺的创新融合，同属根茎类中药材移栽的党参、黄芪也有相关的应用研究，马小龙等[7]设计一款党参露头栽培作业机，探究露头栽植新农艺，并与农机相结合，通过采用人工投苗的方式，利用链板式苗槽输送党参苗，后经覆土镇压可完成露头栽种；沈立新等[8]设计一款槽轮式黄芪移栽关键部件，利用斜置槽轮转动输送黄芪种苗，黄芪落地倾斜栽植，较于传统农艺有所改进。但此类装置针对性强，结构复杂，易损伤种苗，只适应单垄栽植农艺。基于前述研究发现，滇黄精块根移栽主要采用切块方式，对鸡头黄精适应性较差，党参、黄芪横栽农艺利用链板苗槽和槽轮机构可实现机艺适配，但损伤率高，本文基于黄精块根苗种苗特征和移栽农艺要求，设计一款可以实现横向交错移栽农艺要求且低损输送的移栽装置，利用响应面中心组合试验方法结合离散元仿真优化作业参数，完成样机设计与试验验证，以期为黄精移栽机械化发展提供参考。

1　黄精块根苗特征参数和移栽要求

1.1　黄精块根苗特征参数

作业对象的物理力学特性试验[9]是机械装备设计研发的基础，以在辽宁省辽阳市采集的黄精块根苗为研究对象，针对其种苗特征和农艺要求开展前期研究。如图1所示，移栽用块根苗分拣后得到单芽头苗和双芽头分岔苗。黄精块根苗整体呈黄白色，具有通透明质感，表皮有纵波皱纹，须根众多且相互缠绕。主体包括芽头、根茎、须根、疤眼4部分，芽头幼嫩水润，易受损伤。



（a）单芽头苗　　（b）双芽头分岔苗

图1　黄精块根苗各部位示意图

Fig. 1　Schematics of parts of *Polygonatum sibiricum* root seedlings

1. 芽头　2. 根茎　3. 须根　4. 疤眼

选取3年生、5年生种苗开展形态学和力学特性试验，每种随机选取30株。形态学测量指标主要包括种苗整体长度、芽头长度、整体宽幅、芽头直径、块根直径、整株质量、含水率。力学特性测量指标包括芽头连接力、块根折断力、块根挤压力。测量结果如表1、2所示。

表1　黄精块根苗物理特性参数

Tab. 1　Physical characteristics of *Polygonatum sibiricum* root seedlings

参数	3年生种苗			5年生种苗		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
整体长度/cm	6.00	16.80	10.68±2.58	5.90	17.60	11.48±2.91
整体宽幅/cm	1.00	5.60	3.42±1.21	1.00	6.30	3.33±1.36
整株质量/g	1.50	48.64	15.33±11.13	1.59	46.40	17.13±11.59
芽头长度/mm	13.86	48.27	27.59±9.75	13.05	73.36	31.53±13.10
芽头直径/mm	3.17	9.14	5.56±1.52	3.25	10.28	6.50±1.82
块根直径/mm	5.26	23.64	12.21±4.93	5.60	22.72	14.13±4.90
含水率/%			72.16±3.21			71.04±3.80

由表1可以看出，不同生长年限块根苗形态特征差异性较大，其中，5年生种苗各项参数比3年生略高，确定后续苗槽长度及开沟器落苗区宽度设计时不能小于14.39 cm。由表2可知，种苗芽头幼嫩，最小破坏载荷仅为4~5 N。移栽装置输送方式可选为柔性带式输送，材料选择PVC。

1.2　移栽要求和设计目标

针对目前黄精顺沟移栽存在的黄精苗间距及栽深不一、芽头相对等问题，提出了一种块根苗横向交错移栽新模式，更适宜黄精块根地下生长发育，更利于机械化实现，但相应移栽农艺要求更严格，基本农艺要求为：

表2　黄精块根苗力学特性参数

Tab. 2　Mechanical characteristics parameters of *Polygonatum sibiricum* root seedlings　　N

参数	3年生种苗				5年生种苗			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
块根挤压力	222.00	47.80	137.10	55.28	310.30	56.5	141.50	58.04
块根折断力	179.90	8.30	50.73	42.72	197.40	12.10	67.95	48.69
芽头连接力	39.80	4.70	15.73	9.84	47.60	5.30	16.90	11.64

起高畦、畦高15~20 cm、畦面宽1.4~1.5 m、作业道50~60 cm、每畦4行种植、栽深为10 cm左右、株距为10~11 cm、用苗量180 000~195 000株/hm²左右，摆苗要求位于外侧两行芽头朝向畦内，中间两行芽头向内向外均可，且相邻两行之间交错排布种苗，移栽示意图如图2所示。移栽时需注意保护块根苗芽头和表皮，芽头损伤易造成腐烂不萌发，表皮损伤易造成烂根。

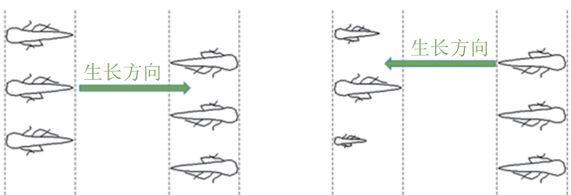


图2 横向交错移栽示意图

Fig. 2 Schematic of transverse staggered transplanting

农机农艺融合发展是当下农机设计的核心思想[10]，结合农艺探究，对应黄精块根苗移栽装置设计时首先要满足横向交错、种苗低损农艺要求；此外，为适应现有动力拖拉机，实现装置地头小半径转弯，移栽装置采用三点悬挂组件；为适应不同地区的不同农艺要求，移栽装置开沟覆土镇压组件和地轮组件都可进行高度调整；为适应不同劳动强度，移栽株距可调控，移栽装置采用单独电机控制，输送速度可调。

2 整机结构与工作原理

2.1 整体结构

移栽装置整机结构如图3所示，整机参数如表3所示。整机主要由底架、带式输送组件、开沟组件、导流覆土组件、镇压组件、地轮组件、三点悬挂组件、传动电控组件、座椅组件和苗箱组成。带式输送组件主要包括柔性输送带、输送滚筒、前后防护板、种苗引导板等组成，输送带上设置有交错均布的苗槽，用于摆放黄精块根苗；开沟组件由4个宽幅修型开沟器、开沟组件连接架等组成，安装于底架前部，可通过调整螺栓实现开沟深度调节；导流覆土组件由2个覆土侧板、3个V形覆土板、覆土板安装架等组成，覆土安装架置于底架中部，可通过调整螺栓实现覆土量控制；镇压组件主要由一体式镇压辊和镇压组件安装侧板组成；地轮组件由地轮、连接侧板、升降螺杆等组成，安装于底架两侧，用于机器运输和工作时限深；座椅组件电控组件主要由步进电机、驱动器、减速机、蓄电池、数显调速控制器、电源转换器升压模块、电控箱等组成，通过链条、链轮与输送组件的主动滚筒连接，用于输送组件动力供应，蓄电池电压12 V，通过电源转换器升压模块将蓄电池电压转换为电机工作电压48 V和数显调速控制器工作电压24 V。

2.2 工作原理

作业前将移栽装置通过三点悬挂组件连接于动力设备拖拉机上，通过调节开沟、覆土、镇压及地轮组件两侧螺栓在滑槽中位置，调整所需开沟覆土高度；工人坐于座椅上将种苗按照芽头朝向置于输送带上苗槽内，传动电控组件调整输送带转速达到所需株距要求后，独立电机带动柔性输送带上苗槽开始转动，块根苗随动到输送末端时，沿引导下板滑落进入开沟器内部的楔形引导腔，最终落至宽幅修型开沟器开好的平底种植沟内，随后导流覆土组件将沟两侧雍土引导至沟内，在种苗上方形成镇压土条，一体式镇压辊对覆土后种植畦进行有效镇压和平整。

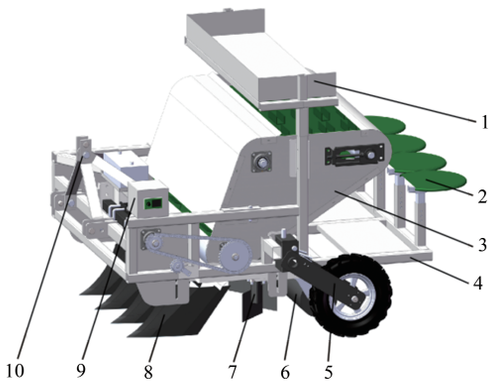


图3 黄精块根苗移栽装置整机结构

Fig. 3 Whole machine structure of *Polygonatum sibiricum* root seedlings

1. 苗箱 2. 座椅组件 3. 带式输送组件 4. 底架 5. 地轮组件 6. 镇压组件 7. 导流覆土组件 8. 开沟组件 9. 电控组件 10. 三点悬挂组件

表3 整机参数

Tab. 3 Machine parameters

参数	数值/型式
结构型式	悬挂式
输送驱动型式	步进电机独立驱动
移栽行数	4
整机配套动力/kW	≥30(爬坡挡)
行距/mm	350
株距/mm	50~150
开沟深度/mm	50~100
覆土厚度/mm	50~100
移栽效率/(株·min⁻¹·行⁻¹)	≤50
芽头朝向合格率/%	≥80
种苗损伤率/%	≤5
纯作业生产率/(hm²·h⁻¹)	0.06~0.10

3 关键部件设计

3.1 输送组件结构与参数

3.1.1 输送组件整体结构形式

基于上述力学特性试验研究，为减少黄精块根在移栽过程中的运动破损，输送组件采用柔性带式输送结构[11-13]，主体包括苗槽、输送带、前端防护板、从动滚筒、张紧座、安装卡槽、输送侧板、折弯滚筒、后端防护板、圆弧引导板、主动滚筒、锯齿引导板，如图4所示。

带式输送结构移栽时需确保有置苗承载区、输送区

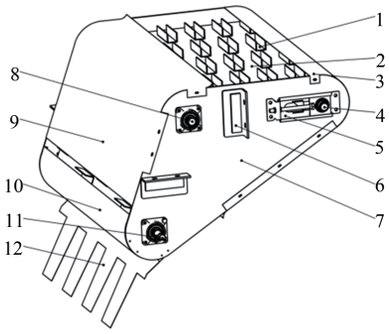


图4　输送组件结构

Fig. 4　Conveying component structure

1. 苗槽　2. 输送带　3. 前端防护板　4. 从动滚筒　5. 张紧座　6. 安装卡槽　7. 输送侧板　8. 折弯滚筒　9. 后端防护板　10. 圆弧引导板　11. 主动滚筒　12. 锯齿引导板

和回行区[14]，为保证人工投苗时拥有足够的作业空间，考虑采用三滚筒布置，如图5所示，高度L_1依据人坐姿空间确定，取645 mm；长度L_2依据手部伸展空间确定，取700 mm；下行输送区角度α_s关系到种苗输送时是否会脱离，同样会影响输送装置的总体尺寸，α_s越大，下行输送越陡，种苗越容易翻越，但结构尺寸越小，α_s越小，种苗越不易翻越，但结构尺寸越大，结合L_1、L_2尺寸，以及开沟、覆土、镇压组件配合尺寸和整机重心位置确定α_s为70°。

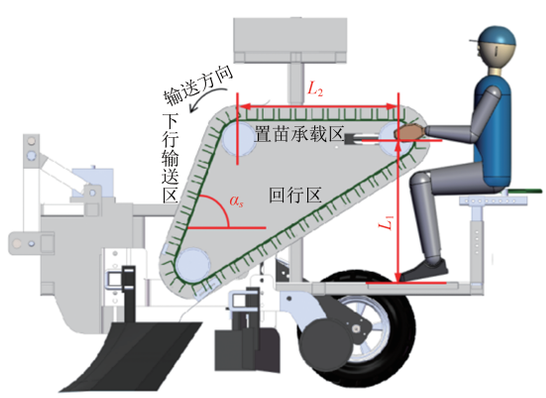


图5　输送组件排布方式

Fig. 5　Arrangement of conveying components

为保证块根苗按照农艺要求横向交错摆放黄精块根苗，并尽可能减少制造难度，降低整机成本，输送带采用一体式设计，并在输送带表面按要求交错均布输送苗槽，具体结构如图6所示。输送带材质选用聚氯乙烯(PVC)，带宽1 400 mm，带厚5 mm，带总长度为2 650 mm。

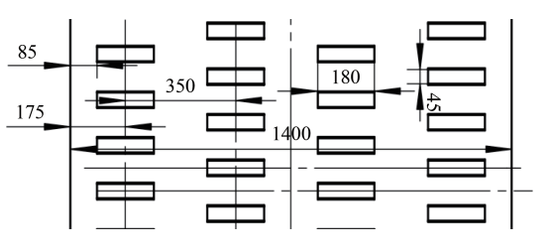


图6　输送带及苗槽布置形式

Fig. 6　Conveyor belt and seedling trough arrangement

3.1.2　种苗翻越滚筒

为避免种苗随动过程中，由于输送带输送方向变化而使块根苗从输送带上脱落[15-16]，对黄精块根苗翻越滚筒时进行受力分析，如图7所示。苗槽边板垂直粘贴在输送带上，忽略其厚度，可以看作始终垂直于输送带；其从侧切面看，将黄精块根苗等效成圆，以质心为原点，黄精块根苗在翻越滚筒时，转动惯性力过滚筒中心，忽略块根苗直径，输送失效形式即为沿苗槽下板滑出，与底部输送带刚分离，以种苗相对苗槽下板有相对运动趋势方向为x轴正方向，支持力方向为y轴正方向建立坐标系。

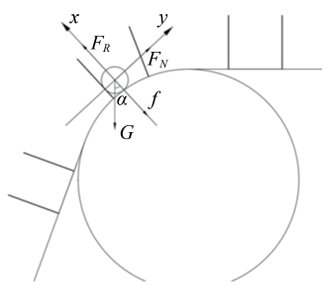


图7　种苗输送临界受力示意图

Fig. 7　Schematic of critical force of seedling transport

为保证黄精块根苗不会甩出苗槽，需满足

$$\begin{cases} \sum x = F_R - G\cos\alpha - f < 0 \\ \sum y = F_N - G\sin\alpha = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$F_R = m\frac{v^2}{R} \tag{2}$$

$$G = mg \tag{3}$$

$$f = \mu F_N \tag{4}$$

式中　G——种苗所受重力，N

F_R——转动惯性力，N

α——重力与x轴反方向夹角，(°)

f——滑动面摩擦力，N

F_N——所受滑动面支持力，N

m——种苗整株质量，g

v——种苗速度，m/s

R——种苗所作圆周运动半径，m

μ——黄精块根苗和输送带之间摩擦因数

联立式(11)~(14)可得

$$v^2 < gR(\cos\alpha + \mu\sin\alpha) \tag{5}$$

令$f(\alpha)=\cos\alpha + \mu\sin\alpha(\alpha < 90°)$，对$f(\alpha)$求导有

$$\frac{\mathrm{d}f(\alpha)}{\mathrm{d}\alpha} = \mu\cos\alpha - \sin\alpha \tag{6}$$

由式(6)可知，$f(\alpha)$在$(0, \arctan\mu)$递增，在$(\arctan\mu, \frac{\pi}{2})$递减，$f(0)=1$，$f(\frac{\pi}{2})=\mu$，又因为$\mu<1$，则函数$\cos\alpha+\mu\sin\alpha$在$(0, \frac{\pi}{2})$内最小值为$\mu gR$，即$v^2<\mu gR$。设计滚筒半径为77.5 mm，黄精块根苗与输送带摩擦因数为0.69，则为保证黄精块根苗不被甩出，其

最大速度为0.724 m/s，移栽机作业时速度远小于最大速度，说明设计可靠。

3.2 传动电控组件选型设计

为实现移栽作业时可以适配不同的移栽株距要求及不同工人移栽速度差异，输送组件动力供给独立设置，为保证输送带转速可以无级调控，选用步进电机作为动力源。为保证输送装置正常工作而不发生打滑[17]，电机保持转矩经减速组件传递后能超过负载所需转矩，对输送带负载情况进行分析确定传动电控组件选型。

输送带各部位总有效张力为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{7}$$

其中

$$\begin{cases} F_1 = f_d(W_G + W_1 + W_2)L \\ F_2 = f_d(W_1 + W_3)L \\ F_3 = W_G H \end{cases} \tag{8}$$

式中 F——总有效张力，kg

F_1——承载侧有效张力，kg

F_2——回行侧有效张力，kg

F_3——垂直侧有效张力，kg

f_d——滚筒旋转摩擦因数，取0.3

W_G——每1 m长度搬运物体质量，取30 kg/m

W_1——每1 m长度皮带质量，取15 kg/m

W_2——每1 m长度主动滚筒质量，取50 kg/m

W_3——每1 m长度从动滚筒质量，取50 kg/m

L——输送装置水平长度，取1 m

H——垂直高度，取1 m

计算得有效张力为82.5 kg。

负载端所需功率为

$$P = \frac{FV}{6\,120} \tag{9}$$

式中 P——负载端所需功率，kW

V——皮带速度，取9 m/min

计算得负载端所需功率为0.121 kW。

电动机输出功率为

$$P_m = \frac{P}{\eta} \tag{10}$$

式中 P_m——电动机输出功率，kW

η——电动机到负载之间传递机械效率，取0.6

计算得电机输出功率0.202 kW。

主动滚筒转矩计算式为

$$T_1 = \frac{9\,550P}{n_t} \tag{11}$$

其中

$$n_t = \frac{60 \times 1\,000V_S}{\pi D} \tag{12}$$

式中 T_1——主动滚筒转矩，N·m

n_t——主动滚筒转速，r/min

V_S——皮带线速度，取0.15 m/s

D——主动滚筒直径，取157 mm

计算得滚筒转速为18.25 r/min，主动滚筒转矩为63.32 N·m。

综合上述计算结果选择86步进电机，保持转矩为8.5 N·m、功率300 W，为可匹配步进电机转速与输送装置滚筒转速，选择减速比为1∶10的86行星减速机，外部链传动减速比为1∶2，为适应农机使用工况，链传动选用12A-1型，主动轮齿数为17，从动轮齿数为34，连接如图8所示。

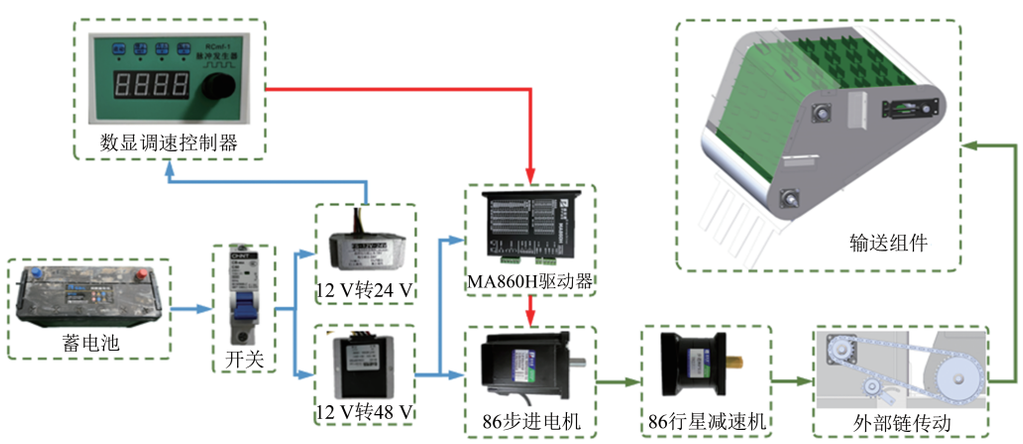


图8 传动电控组件连接图

Fig. 8 Connection diagram of transmission electronic control components

3.3 宽幅修型开沟器结构设计

为满足横向种植要求，开沟器所开种植沟底须有足够的空间适配种苗，但随着开沟宽度增加不仅会导致开沟阻力增加，还会造成土壤扰动加剧，在黄精种植行距要求内开沟器太宽会导致土壤扰动后移困难，造成雍土而超过开沟器高度现象。在有限的设计空间中对开沟器合理的空间结构进行设计，使开沟器底修型板修整沟底，输送组件的锯齿引导板与开沟器中间连接板在开沟器内部形成种苗下落楔形空间，让种苗落于修整沟底，以避免回流土造成种苗埋深和姿态的变化。

宽幅修型开沟器结构示意图如图9所示，主体包括安装板、犁柱、破土曲板、导土板、修型尾板、中间连接板和修型底板。

芯铧式开沟器[18]脊线通常由3段组成，即起始段直线、挖深段曲线、挖深以上曲线。开沟脊线形状连续均匀性会使开沟器在开沟切削土壤时具有更好的切削性

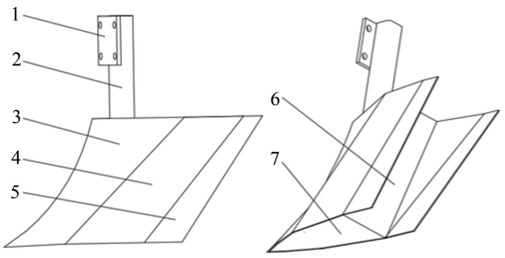


图9　宽幅修型开沟器结构示意图

Fig. 9　Wide-width modified trencher structure

1. 安装板　2. 犁柱　3. 破土板　4. 导土板　5. 修型尾板　6. 中间连接板　7. 修型底板

能，为使开沟阻力尽量小，设计开沟脊线由2段线组成，起始段直线和圆弧曲线，起始段直线与圆弧曲线相切。开沟脊线设计时主要相关参数有起始线长度S、入土角α_0、隙角ε、脊线曲率半径R、开沟器高度H_k、脊线开度L_k，如图10所示。以开沟器犁尖点为坐标系原点建立直角坐标系，直线OA为起始直线，圆弧段曲线AB与起始段直线OA相切于点A，O'为圆弧曲线段圆心。由此开沟器脊线参数方程可表示为

$$\begin{cases} y = kx \\ (x-h)^2 + (y-k)^2 = R^2 \end{cases} \tag{13}$$

其中　　$k = \tan\alpha_0$

式中　h、k——圆弧曲线圆心坐标值

设切点坐标为(x_0, y_0)，切点到原点距离为S，则有

$$\begin{cases} y = x\tan\alpha_0 \quad (0 \leqslant x \leqslant S\cos\alpha_0) \\ \left[x - \left(S\cos\alpha_0 - \dfrac{R\cos\alpha_0}{\tan\alpha_0}\right)\right]^2 + \left[y - \left(S\tan\alpha_0\cos\alpha_0 + R\cos\alpha_0\right)\right]^2 = R^2 \quad \left(S\cos\alpha_0 < x \leqslant L_k\right) \end{cases} \tag{18}$$

宽幅修型开沟器结构参数如表4所示。

表4　宽幅修型开沟器结构参数

Tab. 4　Structural parameters of wide-width trimmed trencher

参数	数值
起始线长度S/mm	70
入土角α_0/(°)	25
脊线曲率半径R/mm	300
开沟器高度H_k/mm	310
脊线开度L_k/mm	236.65

3.4　导流覆土镇压组件结构设计

3.4.1　导流覆土镇压原理

为解决传统覆土镇压模式的“气隙问题”[19]，同时使装置结构设计简单，降低开发成本，本装置导流覆土镇压原理主要如图11、12所示，覆土器采用刮板式设计，镇压辊采用一体式[20]设计。当开沟器将种植沟开设完成，种苗落入沟底，覆土器中轴线正对沟与沟之间未扰动区上部的扰动土壤，开沟器在随机器前行过程中，将扰动区土壤导流至种植沟内黄精块根苗上部，并会在土壤回流区顶部形成略突起的土堆条。在覆土器作用下，扰动土壤回到种植沟并在畦面形成规律性土壤条列排布，一体式镇压辊在覆土后的畦面上滚过，突起的土堆条被整根镇压辊均匀压下，有效解决开沟回土存在的气隙问题，而且整辊镇压畦面也会使畦面更平整，畦内黄精块根苗移栽深度一致。

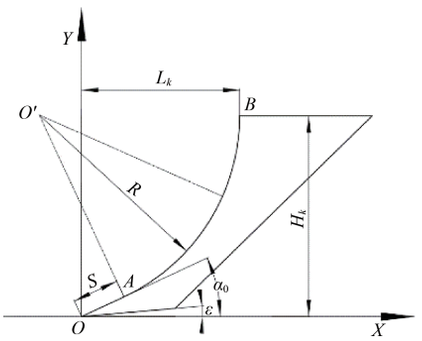


图10　开沟器脊线设计示意图

Fig. 10　Schematic of ridge line design of ditcher

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2} = S \tag{14}$$

又已知$x_0 = S\cos\alpha_0$，$y_0 = S\sin\alpha_0$，代入式(14)可得

$$\sqrt{\left(S\cos\alpha_0\right)^2 + \left(S\sin\alpha_0\right)^2} = S \tag{15}$$

圆心到原点距离关系式为

$$R^2 + S^2 = h^2 + k^2 \tag{16}$$

圆心到切点距离计算式为

$$\left(S\cos\alpha_0 - h\right)^2 + \left(S\sin\alpha_0 - k\right)^2 = R^2 \tag{17}$$

联立解得圆弧曲线圆心坐标为

$$\left(S\cos\alpha_0 - \frac{R\cos\alpha_0}{\tan\alpha_0}, S\tan\alpha_0\cos\alpha_0 + R\cos\alpha_0\right)。$$

即脊线参数方程为

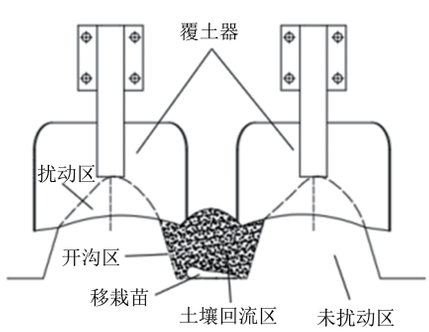


图11　覆土原理图

Fig. 11　Schematic of soil covering

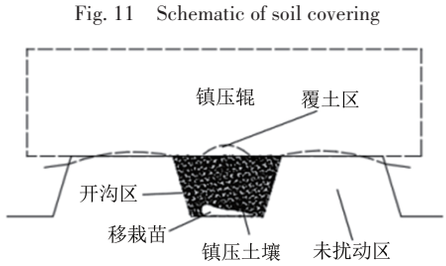


图12　镇压原理图

Fig. 12　Schematic of repression

3.4.2 导流覆土器结构参数确定

导流覆土器主体包括覆土器安装板、连接梁、V形覆土板3部分，如图13所示，两侧覆土器覆土板只有一侧板。V形覆土板是直接与土壤接触的部件，其前端折弯角度影响覆土时阻力，角度越大，土壤沿板斜面滑动距离越小，中部土壤堆积越严重，堆积土壤容易翻越覆土板，阻力也越大；角度小时结果相反，但过小会导致覆土板长度变长，土壤沿板斜面滑动距离过长，覆土器滑动摩擦土壤时间变长，也会导致阻力增大。覆土板折弯角度设置为80°；为保证种植区内土壤中的土块顺利通过覆土器，不会堵塞覆土器和覆土器之间豁口，其豁口距离设置为70 mm，V形覆土板前端高180 mm，尾端高200 mm。导流覆土组件如图14所示。

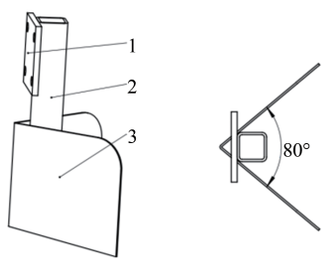


图13 导流覆土器结构示意图

Fig. 13 Diversionary mulch structure diagram

1. 覆土器安装板 2. 连接梁 3. V形覆土板

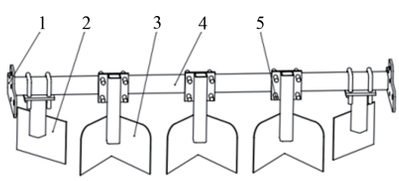


图14 覆土组件示意图

Fig. 14 Mulch components diagram

1. 覆土安装侧板 2. 边侧覆土器 3. V形覆土器 4. 覆土安装梁 5. 安装U形螺栓

4 基于EDEM的开沟深度和前进速度优化

4.1 离散元模型建立与参数设定

为提高仿真计算速度和运行效率，移栽装置除去触土开沟部件以外，宽幅修型开沟器仅以要求行距布置的相邻两个（图15）导入EDEM软件中，观察测量两相邻开沟器作业效果[21]。



图15 开沟组件仿真模型

Fig. 15 Simulation model of trenching component

试验颗粒半径选择5 mm，土壤颗粒床尺寸设置为1 000 mm×2 000 mm×300 mm，随后生成颗粒工厂，设置生成颗粒数5.5×10^5，选取Hertz-Mindlin（no slip）with bonding模型作为土壤颗粒床建立的接触模型。接触参数通过实地测量和文献[22-25]选定，具体离散元仿真参数如表5所示。

表5 离散元仿真参数设定

Tab. 5 Discrete element simulation parameters

参数	数值
土壤颗粒密度/(g·cm^{-3})	1.85
土壤颗粒泊松比	0.30
土壤剪切模量/Pa	1.2×10^8
土壤-土壤碰撞恢复系数	0.30
土壤-土壤静摩擦因数	0.35
土壤-土壤动摩擦因数	0.25
65 Mn钢密度/(g·cm^{-3})	7.86
65 Mn钢泊松比	0.35
65 Mn钢剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
土壤-65 Mn钢碰撞恢复系数	0.30
土壤-65 Mn静摩擦因数	0.50
土壤-65 Mn动摩擦因数	0.10
粘结半径/mm	6.00
法向极限应力/Pa	2.0×10^4
切向极限应力/Pa	1.5×10^4
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	2.5×10^5
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	1.0×10^5

4.2 仿真试验

4.2.1 仿真试验方案

为满足移栽装置适应不同地区农艺的要求，探究不同移栽深度和前进速度下，宽幅修型开沟器一字型布置形式下土壤扰动情况，选取开沟深度和前进速度为试验因素，开沟阻力、开沟器间堆土高度、沟底回土深度为试验指标，试验指标测量在EDEM软件中后处理[26]模块进行，阻力选取前进方向稳定阶段合力。采用基于响应面的二因素五水平中心组合试验方法[27]进行仿真试验，试验因素编码如表6所示，共需仿真13组试验，每组试验重复3次取平均值作为试验数据，利用Design-Expert 10.0.1软件进行试验结果处理。

表6 试验因素编码

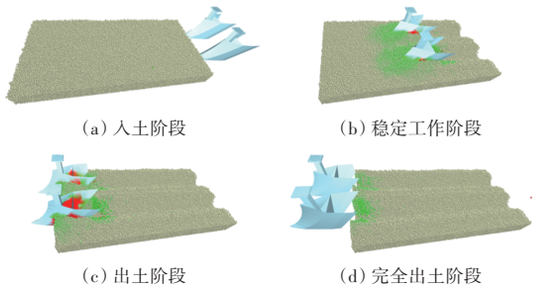
Tab. 6 Test factors and codes

编码	因素	
	开沟深度X_1/mm	前进速度X_2/km/h
1.414	140.00	0.50
1	128.28	0.47
0	100.00	0.40
-1	71.72	0.33
-1.414	60.00	0.30

4.2.2 仿真结果

依据试验进行相关参数组合试验，仿真作业过程如图16所示，试验方案和仿真结果如表7所示，x_1、x_2为因

素编码值。



（a）入土阶段　（b）稳定工作阶段　（c）出土阶段　（d）完全出土阶段

图 16　仿真作业过程

Fig. 16　Simulation operating process

4.2.3　方差分析

通过 Design-Expert 10.0.1 软件对表 7 中数据展开方差分析，结果如表 8 所示，展开多元回归拟合分析，建立 Y_1、Y_2、Y_3 对 x_1、x_2 的响应面回归模型为

$$Y_1 = 306.64 + 173.63x_1 + 18.51x_2 + 2.54x_1x_2 + 23.44x_1^2 + 5.26x_2^2 \quad (19)$$

$$Y_2 = 132.04 + 49.28x_1 + 7.39x_2 + 3.48x_1x_2 \quad (20)$$

$$Y_3 = 35.47 + 20.08x_1 - 2.83x_2 - 3.25x_1x_2 + 2.24x_1^2 \quad (21)$$

表 7　仿真试验结果

Tab. 7　Simulation test results

序号	因素		前行阻力	堆土高度	回土高度
	x_1	x_2	Y_1/N	Y_2/mm	Y_3/mm
1	−1	−1	147.61	79.4	17.5
2	1	−1	486.97	172.7	61.9
3	−1	1	179.78	87.6	20.9
4	1	1	529.32	194.8	52.3
5	−1.414	0	105.37	63.1	9.5
6	1.414	0	600.47	200.1	69.5
7	0	−1.414	290.54	121.9	41.2
8	0	1.414	342.58	142.3	29.6
9	0	0	307.43	130.1	35.7
10	0	0	307.37	132.3	36.9
11	0	0	304.41	130.3	35.5
12	0	0	306.76	130.7	34.7
13	0	0	307.21	131.2	33.8

表 8　方差分析

Tab. 8　Analysis of variance

分析来源	前行阻力 Y_1				堆土高度 Y_2				回土高度 Y_3			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	247 800	5	1 3736.22	<0.000 1**	19 924.87	5	1 813.08	<0.000 1**	3368.02	5	159.25	<0.000 1**
x_1	241 200	1	6 6845.39	<0.000 1**	19 428.86	1	8 839.72	<0.000 1**	3226.17	1	762.70	<0.000 1**
x_2	2 742.28	1	760.01	<0.0001**	437.34	1	198.98	<0.000 1**	63.87	1	15.10	0.006 0**
x_1x_2	25.91	1	7.18	0.0316*	48.30	1	21.99	0.002 2**	42.25	1	9.99	0.015 9*
x_1^2	3 821.17	1	1 059.02	<0.000 1**	4.25	1	1.93	0.206 9	35.69	1	8.44	0.022 8*
x_2^2	192.25	1	53.28	0.000 2**	7.41	1	3.37	0.109 1	0.32	1	0.08	0.790 7
残差	25.26	7			15.39	7			29.61	7		
失拟	18.79	3	3.87	0.111 9	12.26	3	5.24	0.071 7	24.24	3	6.02	0.057 8
纯误差	6.47	4			3.12	4			5.37	4		
总离差	247 800	12			19 940.26	12			3 397.63	12		

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

由表 8 可知，前行阻力 Y_1、堆土高度 Y_2、回土高度 Y_3 的 P 均小于 0.000 1，表明 3 个模型影响极显著；其失拟项 P 分别为 0.111 9、0.071 7、0.057 8，均大于 0.05，表明 3 个模型拟合程度较高，建立的回归模型可以预测装置工作参数。

依据试验结果，考察开沟深度 x_1 和前进速度 x_2 对各指标的影响，响应曲面如图 17 所示，从图 17a、17b 可看出，开沟深度和前进速度增加都会使前行阻力和堆土高度增加，其原因为开沟深度增加时动土量增大，开沟器间土量增加，相应的前行阻力和堆土高度增加；从图 17c 可看出，开沟深度增加回土高度会增加，其原因同上，而前进速度增加回土高度减小，其原因为本装置为低速运行，前进速度相对较低时，开沟器间扰动土壤向后移动速度较慢，在沟间堆土较多，进入沟底相对较少，当前进速度增加时，结果相反。

4.3　试验因素优化

为保证黄精块根苗移栽装置工作时开沟器间堆土高度不会超过开沟器高度，前行阻力应尽量小、回土高度尽量大，在此前提下提高作业速度。在 Design-Expert 10.0.1 软件的 Optimization 中选择优化参数为：前行阻力 120~450 N、堆土高度 70~160 mm、回土高度 22~65 mm，最佳参数组合范围如图 18 所示，机器开沟深度应尽量保证在 85~110 mm，前进速度可选择 0.3~0.5 km/h。综合针对辽宁省黄精块根苗移栽要求选定最佳组合为机器前进速度 0.4 km/h、开沟深度 10 cm。

4.4　仿真试验验证

为校验回归模型确定的组合参数是否正确，比对仿真试验结果与回归模型预测值。在参数组合范围内选取开沟深度为 90 mm，以前进速度 0.3、0.4、0.5 km/h 进行仿真试验，以前行阻力、堆土高度、回土高度作为试验指标，每组试验重复 3 次取平均值，结果如表 9 所示。

由表 9 可看出，仿真值与预测值之间的相对误差较小，均不大于 4.04，且仿真值在最佳参数组合范围之内，说明利用响应面中心组合设计的方法寻求开沟组件最佳组合作业参数的可行性，回归模型可靠性高，参数优化范围合理。

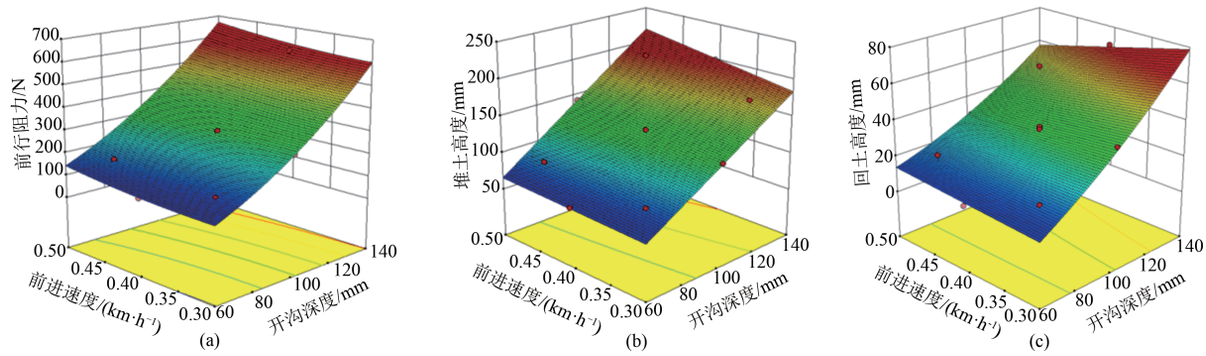


图17 前进速度和开沟深度交互作用对各指标的响应曲面

Fig. 17 Influence of trenching depth and forward speed on indicators

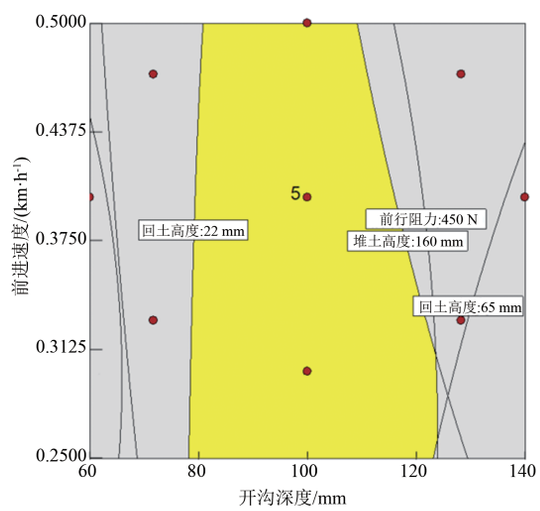


图18 优化结果

Fig. 18 Optimization result

5 土槽试验验证

为进一步验证在仿真试验优化的工作参数下机具实际性能[28]，2024年1月在辽宁省农业机械化研究所土槽实验室进行试验验证，主要参照文献[29-30]，以及黄精块根苗移栽时的农艺要求，测量黄精块根苗机械化移栽时伤苗率、芽头朝向合格率、株距变异系数、栽植深度变异系数为作业性能指标。

以人工投苗速度45株/min、调整株距11 cm、机器前进速度0.4 km/h进行试验。测量时以侧边两行芽头朝向畦内上下偏转45°以内株数，中间两行横向上下偏转45°以内的株数作为芽头朝向合格株数；统计黄精块根苗表皮有明显破损，伤口最大直径超过2 mm株数；测量每一行相邻黄精块根苗中轴线间距作为株距，统计株距平均值和标准差，株距标准差除以平均值作为株距变异系数。种苗落地效果试验时至少选取5区段进行测量，统计每一行数据情况，落地效果如图19所示。土槽试验结果如表10所示。

由表10可知，最终测量得平均伤苗率0.52%，平均芽头朝向合格率为88.6%，平均株距为(10.99±1.75) cm，株距变异系数为15.93%。

表9 仿真验证结果

Tab. 9 Simulation verification results

因素		指标	仿真值	预测值	绝对误差	相对误差
开沟深度 X_1/mm	前进速度 X_2/(km·h^{-1})					
90	0.3	前行阻力 Y_1	240.76 N	231.42 N	−9.34 N	−4.04%
	0.4		250.37 N	245.83 N	−4.54 N	−1.85%
	0.5		284.98 N	281.26 N	−3.72 N	−1.32%
90	0.3	堆土高度 Y_2	108.26 mm	105.88 mm	−2.38 mm	−2.25%
	0.4		116.33 mm	114.60 mm	−1.73 mm	−1.51%
	0.5		122.84 mm	123.33 mm	0.49 mm	0.40%
90	0.3	回土高度 Y_3	33.10 mm	32.60 mm	−0.50 mm	−1.53%
	0.4		30.96 mm	30.23 mm	−0.73 mm	−2.41%
	0.5		27.54 mm	27.86 mm	0.32 mm	1.15%



图19 种苗落地效果

Fig. 19 Renderings of seedlings on ground

以人工投苗速度45株/min、机器前进速度0.4 km/h、开沟深度10 cm进行试验，每隔1m测量3段种苗深度，每次试验测10 m，共试验3组，测量如图20所示。测量结果表明，平均移栽深度为(9.525±0.48) cm，移栽深度变异系数为5.04%。

由表10可知，相关数据结果符合设计要求，机器作

表 10　土槽试验结果

Tab. 10　Soil groove test results

试验区	测量行	种苗数	摆苗不合格数	种苗损伤数	株距/cm								
1	1	10	2	0	10.7	11.0	10.4	8.9	9.5	10.6	11.0	11.3	11.2
	2	10	2	0	10.5	8.9	9.2	12.5	11.1	11.3	10.8	12.3	10.2
	3	10	1	0	12.2	11.6	7.0	14.6	10.6	11.6	7.9	13.8	11.1
	4	10	1	0	10.6	10.7	11.4	10.9	9.8	10.5	11.2	11.6	10.5
2	1	9	2	0	12.3	10.9	10.1	13.5	6.9	13.2	13.5	12.0	
	2	10	3	1	12.3	11.5	9.6	12.0	7.0	15.4	12.5	11.3	6.3
	3	9	1	0	11.5	11.3	1.7	10.0	10.9	14.0	7.0	11.5	
	4	10	0	0	12.0	10.5	10.5	12.0	11.0	11.0	11.0	13.5	9.7
3	1	9	0	0	12.5	10.0	12.5	10.0	12.5	8.0	13.5	11.7	
	2	9	1	0	13.0	9.9	13.5	9.2	9.9	13.5	11.5	11.3	
	3	9	0	0	10.3	12.5	8.5	10.1	14.4	11.1	11.0	12.6	
	4	10	1	0	7.8	11.0	11.0	12.0	11.3	10.5	13.1	10.6	10.5
4	1	10	1	0	12.2	11.5	9.5	9.8	10.7	10.8	10.6	11.1	11.5
	2	9	0	0	13.5	14.0	6.0	10.1	11.2	10.9	11.3	11.1	
	3	10	0	0	7.8	13.0	9.9	12.1	11.0	11.4	11.1	11.3	10.6
	4	9	2	0	13.1	9.5	11.0	11.2	10.8	10.4	11.7	9.5	
5	1	10	2	0	11.5	11.7	12.5	10.0	13.6	9.9	12.0	11.1	11.4
	2	10	1	0	13.2	8.9	11.5	10.9	10.1	12.6	11.2	11.9	10.6
	3	10	1	0	10.7	10.9	10.1	13.5	6.9	12.0	11.1	11.5	11.7
	4	10	1	0	10.3	9.9	13.5	9.2	9.5	11.5	10.1	11.7	11.4



图 20　移栽深度测量图

Fig. 20　Transplanting depth measurement diagram

业效果相对可靠稳定，可以达到横向交错移栽设计目标。但从株距结果来看，其标准差和株距变异系数还有很大提升的空间，原因为：黄精块根苗形态学测量时发现，黄精块根苗形态上差异性较大，黄精标准化育苗相关产业还欠缺，种苗差异性较大一直是黄精种植的重要影响因素，在试验过程中也发现，形态不同的种苗下落脱离时的姿态略有不同，而且种苗脱离输送装置到沟底的距离也较高，容易将脱离姿态的细微差异放大，造成株距及移栽时芽头朝向不合格。

6　结论

（1）结合黄精块根苗种植农艺要求、种苗形态特征和力学特性，提出了黄精横向交错移栽模式，并设计了一种适应黄精块根苗横向交错移栽的移栽装置，主体包括带式输送组件、开沟组件、导流覆土组件、镇压组件、传动电控组件等部分，并对主要结构部件进行参数确定；装置可通过电控组件独立电机调节输送带速度进而实现株距调节，还可以通过调节开沟、覆土镇压及地轮组件两侧调整螺栓实现装置开沟深度调整，可实现黄精块根苗移栽要求。

（2）采用响应面CCD试验方法结合离散元仿真方法，以不同前进速度和开沟深度组合试验，通过开沟阻力、堆土高度、回土高度评价指标，确定机器作业最优组合参数：开沟深度为85~110 mm、前进速度为0.3~0.5 km/h。

（3）开展移栽装置样机试制与试验验证，投苗试验结果表明，机器作业时人工投苗速度为50株/min以内，投苗合格率为96%以上；以投苗速度为45株/min、株距为11 cm、机器前进速度为0.4 km/h、移栽深度为10 cm进行试验验证，测量得平均伤苗率为0.52%，平均芽头朝向合格率为88.6%，平均株距为（10.99±1.75）cm，株距变异系数为15.93%，平均移栽深度为（9.525±0.48）cm，移栽深度变异系数为5.04%。

参　考　文　献

[1]　国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京：中国医药科技出版社，2020

[2]　仉劲，李国清，李景宇，等. 泰山黄精栽培研究进展[J]. 山东林业科技，2021，51(1)：87－91.
ZHANG Jin，LI Guoqing，LI Jingyu，et al. The research progress of the taishan polygonatum on cultivation[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology，2021，51(1)：87－91.（in Chinese）

[3]　鸡头黄精种植技术规程：DB43/T 2103-2021[S]. 2021.

[4]　云南农业大学. 一种滇黄精快速移栽装置：CN202221004800. 7[P]. 2022-08-12.

[5] 重庆文理学院. 一种黄精的块茎种植装置:CN202211424166.7[P]. 2023-01-03.
[6] 张逵. 一种滇黄精规模化种植装置:CN202122932418.4[P]. 2022-04-08.
[7] 马小龙,张陆海,刘鹏霞,等. 党参露头栽培覆膜覆土联合作业机设计与田间试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(7): 82-88.
MA Xiaolong, ZHANG Luhai, LIU Pengxia, et al. Design and field test of codonopsis outcrop cultivation film and soil[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(7): 82-88. (in Chinese)
[8] 沈立新,陈文辉,滕淑霞,等. 槽轮式黄芪移栽机关键部件设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2):71-78.
SHEN Lixin, CHEN Wenhui, TENG Shuxia, et al. Design and experiment of the key components of the grooved astragalus transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2):71-78. (in Chinese)
[9] 申海洋,纪龙龙,胡良龙,等. 甘薯收获期薯块机械物理特性参数研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12):55-61.
SHEN Haiyang, JI Longlong, HU Lianglong, et al. Study on the mechanical andphysical parameters of sweet potato tuber during harvest[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12):55-61. (in Chinese)
[10] 湛小梅,曹中华,周玉华,等. 丘陵山区农机与农艺融合问题研究[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(8):112-114.
[11] 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.
[12] RYBKA A, HENMANEK P, HONZIK I, et al. The effect of work of inclined belt conveyors on the quality of hop separation in hop picking line[J]. Plant, Soil and Environment, 2014,60(4): 184-190.
[13] HOLLAND R M, CHEN J R, GAZULA H, et al. Environmental and fecal indicator organisms on fruit contact surfaces and fruit from blueberry mechanical harvesters[J]. Horticulturae, 2021,8(1): 20-20.
[14] 马锃宏,李南,李涛,等. 钵体苗带式供苗移栽机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3):216-222.
MA Zenghong, LI Nan, LI Tao, et al. Design and experiments on a transplanter with belt feeding on block seedling[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(3):216-222. (in Chinese)
[15] 苏微,洪方伟,赖庆辉,等. 预切种甘蔗勺链式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10):87-97.
SU Wei, HONG Fangwei, LAI Qinghui, et al. Design and test of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):87-97. (in Chinese)
[16] 王希英. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
WANG Xiying. Design and experimental research on double-row criss-cross spoon-belt potato precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[17] 俞晶,李军霞,张文,等. 带式输送机启动不打滑的动态特性研究与应用[J]. 煤炭科学技术,2014,42(10):79-83.
YU Jing, LI Jun xia, ZHANG Wen, et al. Application and dynamic characteristics research of start non-skid for belt conveyor[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10):79-83. (in Chinese)
[18] 贾洪雷,孟凡豪,刘立晶,等. 芯铧式开沟器仿生设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4):44-49, 77.
JIA Honglei, MENG Fanhao, LIU Lijing, et al. Biomimetic design and experiment of core-share furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):44-49,77. (in Chinese)
[19] 何勋,张景风,张润,等. 小麦宽苗带种沟镇压播种装置研制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18):18-29.
[20] 杨文彩,蒲望,潘吴建,等. 三七育苗播种覆土镇压装置的研究设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2022,43(2):122-132.
YANG Wencai, PU Wang, PAN Wujian, et al. Design and experiment of soil covering and compacting device for *Panax notoginseng* seedling sowing[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(2): 122-132. (in Chinese)
[21] 陈红霞,齐威龙,王纪华,等. 基于离散元法和响应面法的铧式开沟器设计[J]. 机械设计, 2023, 40(1):65-71.
[22] JOZEF H, MAREK M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: review[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147:206-225.
[23] FAN Y, ZHAO P, QIU L, et al. The effect of potatoes' compressive mechanical properties under different moisture contents: an experimental study[J]. Inmateh & Agricultural Engineering, 2015, 56(3):165-174.
[24] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10):16-25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10):16-25. (in Chinese)
[25] FANG W Q, WANG X Z, HAN D L, et al. Review of material parameter calibration method[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 706.
[26] WANG Z P, ZHU T, WANG Y Z, et al. Simulation and analysis of soil homogenization drills based on discrete element method and response surface methodology[J]. Particuology, 2024, 88:128-148.
[27] 顾志远. 马铃薯曲面式播种开沟器设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
GU Zhiyuan. Design and experiment of potato curved surface sowing furrow opener[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[28] 蒲望. 基于EDEM的三七育苗播种覆土镇压装置设计研究与试验[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
PU Wang. Design and test of soil covering and pressing device for *Panax notoginseng* seedling based on EDEM[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[29] JB/T 10291-2013 旱地栽植机械[S]. 2013.
[30] DB62/T 4505-2022 根茎类中药材移栽机 作业质量[S]. 2022.