

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.S1.012

山地作物移栽机井窖式单线螺旋成穴装置设计与试验

史玉鹏¹ 薛 博² 臧传江² 焦 伟¹ 侯加林³ 李 慧¹

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 山东潍坊烟草有限公司, 潍坊 261061;
3. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

摘要: 当前井窖移栽机成穴装置挖掘井窖稳定性差、易坍塌、土壤回流严重、直立度差,无法满足深井窖移栽成穴农艺要求。为此设计一种井窖移栽机单线螺旋成穴装置。对单线螺旋成穴装置的锥形钻尖、螺旋叶片、中心钻杆等关键结构进行设计,并采用动力学方法对其作业过程的入土阶段、切土阶段和排土阶段的成穴机理进行分析,确定了单线螺旋成穴装置的直径、螺距和转速为影响其作业质量的关键参数。应用离散元仿真软件 EDEM 对成穴装置作业过程进行仿真分析,以井窖深度、井窖直径、井窖直立度和土壤回流程度为评价指标,以直径、螺距、转速为试验因素,进行单因素试验确定关键参数的取值范围。根据取值范围,利用二次正交旋转中心组合试验方法建立单线螺旋成穴装置响应指标与试验因素的回归方程,并通过响应曲面得到其影响趋势和交互关系,结果表明各因素对井窖深度影响的主次顺序为螺距、转速、直径,对井窖直径影响的主次顺序为直径、螺距、转速。以回归方程为基础,采用多目标函数优化获取单线螺旋成穴装置的优化参数组合。根据优化后的参数组合研制单线螺旋成穴装置及田间作业平台并进行田间试验,试验结果表明:成穴装置直径为 100 mm、螺距为 75 mm、转速为 350 r/min 时作业效果最佳,此时井窖深度为 182 mm、井窖直径为 80.7 mm,优化后的单线螺旋成穴装置满足井窖移栽成穴的农艺要求。

关键词: 山地作物移栽机; 井窖式; 成穴装置; 离散元; 入土部件

中图分类号: S223.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0103-12

Design and Experiment of Hole-forming Drill Bit for Cellar Type Transplanter

SHI Yupeng¹ XUE Bo² ZANG Chuanjiang¹ JIAO Wei¹ HOU Jialin³ LI Hui¹

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China
2. Shandong Weifang Tobacco Company, Weifang 261061, China
3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: At present, the hole formed by the pit-type transplanter has poor stability, which is easy to collapse, and the soil backflow is serious. Aiming at the transplanting characteristics of the water flushing well cellar type multifunctional transplanting machine and the agronomic requirements of well cellar transplanting technology, in order to improve the quality of the hole and reduce the rate of seedling leakage, a hole-forming drill was designed, and its main structure and work were expounded. Mechanism and perform performance tests were carried out. The burrowing process was divided into three stages. Through the research methods of dynamics and kinematics, the force of soil particles in each stage was analyzed, the key structural parameters and operation parameters were determined, and the relationship between the key operation parameters and the burrowing quality was clearly analyzed, and the burrowing was improved. Taking the number of soil particles in the grid bin group as the response index, a discrete element simulation experiment was carried out, and the value range of each factor was determined by statistical analysis of the least significant difference; a quadratic orthogonal rotation combination experiment was arranged, and the Design-Expert software was used to analyze the test data, and the order of the influence of each factor on the index value was obtained. The results showed that the drill bit

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 山东省烟草产业技术体系机械与智能化岗位项目(SDAIT-25-04)、山东省农业科技创新工程项目(CXGC2023B04)、山东烟草区烟草农机农艺标准体系研究与推广项目(2022370700240356)和山东省重点研发计划项目(2022CXGC010611)

作者简介: 史玉鹏(1997—),男,工程师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: shiyupeng1997@163.com

通信作者: 李慧(1984—),女,高级工程师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: lihuictre@shandong.cn

diameter was 100 mm, the pitch was 75 mm, and the rotational speed was 350 r/min. The device had the best performance. The depth of the hole and the diameter of the hole were 182 mm and 80.7 mm, respectively. The optimization factors were tested and verified, and the test and optimization results were basically consistent, meeting the agronomic requirements of well cellar transplanting.

Key words: transplanter for crops of hilly mountains; well cellar style; acupuncture device; discrete element method; components in contact with soil

0 引言

井窖式移栽是指将部分种植在高海拔寒冷山区作物小苗(如辣椒、油菜等),移栽到一定规格孔穴内,实现高垄深栽的技术^[1]。与常规移栽方式相比,井窖式移栽作物小苗根系发达、抗病抗逆性强,且减少了外界不良因素对作物小苗生长影响,可实现小苗深栽早栽,解决了高海拔寒冷山地春旱难栽的问题,目前,井窖式移栽已经成为高寒山地作物提质增效、减工降本的一种栽培方式^[2-4]。成穴装置是井窖移栽机实现打穴移栽的关键,为此山东省农业机械科学研究院研制了用于山地作物移栽机的井窖式成穴装置,该装置较传统鸭嘴式移栽机可实现直立打穴,解决了传统移栽机出现“喇叭形”穴体的问题,但所成井窖依然存在土壤颗粒回流、穴体坍塌等问题,无法满足井窖式移栽农艺要求,所以需要进一步对成穴装置入土部件的工作过程进行研究。

我国学者近年来对成穴装置的入土部件进行了大量研究。陈英凯^[5]基于 ANSYS Workbench 对钻头进行模态分析,分析了各阶振型对钻头工作的影响,为钻头的优化设计和改进提供了依据。郭贵生^[6]运用 Matlab 软件对钻头的结构、运动参数及其之间的影响进行了直观系统的分析,找出了这些参数对入土部件的影响,为设计性能优良的入土部件提供了依据。胡长寿等^[7]研究发现,钻头顶端安装切削刃与三角钻尖后可增加其切削力、耐磨性及提升力。喻丽华等^[8-9]研制了一种陀螺型成穴钻头,所制作的井窖不易坍塌,成穴效率高,操作简单方便,但存在井窖内壁光滑,紧实度大的问题。陈超鹏等^[10]使用 EDEM 软件对锥形钻头进行了离散元仿真试验,并利用 Design-Expert 优化了其作业参数与结构参数。用于成穴装置的入土部件钻头主要有螺旋叶片式与陀螺式,螺旋叶片式制成的井窖最有利于小苗的生长,但穴体疏松,易坍塌,难以成型;陀螺式对土壤进行挤压所制作的穴体,内壁光滑坚实,不易坍塌,但不利于小苗前期生长发育,若降雨量较大,井窖内部容易积水造成淹苗,因此采用现有成穴钻头无法制作符合井窖移栽农艺要求的穴体。

本文根据井窖移栽技术农艺要求,结合螺旋输送机强制输送与挤密效应的原理,设计一种用于高

海拔寒冷山地移栽机的单线螺旋成穴装置,通过对其入土过程进行分析,研究不同阶段土壤与单线螺旋成穴装置互作状态,借助 EDEM 仿真软件,进一步得到单线螺旋成穴装置的结构和作业参数范围,并通过正交试验确定最佳参数组合。

1 农艺要求与成穴装置

1.1 农艺要求

井窖是上下直径一致并具有一定深度的孔体,其内部由外界变化影响产生的水力梯度,使内部水分蒸发,从而令井窖内温湿度相对稳定^[11],利用此特点,可提高作物小苗的生产周期和品质^[12]。

井窖尺寸如图 1 所示。垄距 100 ~ 120 cm、高海拔寒冷山地地块垄高 25 cm 以上,垄顶宽 30 ~ 35 cm、垄底宽 70 ~ 80 cm,井窖直径 8 ~ 10 cm、深 15 ~ 20 cm(即水渗下后的实际深度)、底部要求为锥形,深 5 ~ 8 cm、井窖间距 45 ~ 50 cm。在井窖制作过程中要求内壁牢固不塌陷,孔体直径上下均匀,可有少量回土,回土深度 2.5 ~ 4 cm。

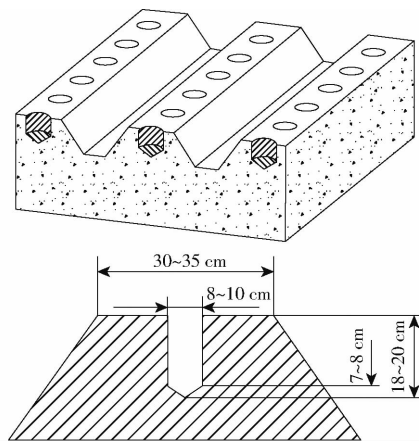


图1 井窖移栽农艺要求

Fig.1 Agronomic requirements for cellar cavitation

1.2 成穴移栽装置

作业时,将作物小苗放入苗杯,驱动盘驱动苗杯运动到指定位置时苗杯的下盖打开,作物小苗落入鸭嘴栽植器中。在动力的驱动下成穴移栽装置开始工作,随着曲柄的转动,安装在换向器上的单线螺旋成穴装置利用链传动传递的动力不断旋转,固定在四杆机构后端的鸭嘴栽植器与单线螺旋成穴装置随四杆机构共同运动,随着机具不断前进,成穴移栽装

置开始连续作业^[13]。

成穴移栽装置结构如图 2 所示,主要由平行四杆机构、非圆齿轮、直齿圆柱齿轮、锥齿轮换向减速器、单线螺旋成穴装置组成。其中单线螺旋成穴装置底部由锥型钻尖、中心钻杆、螺旋叶片组成。直齿圆柱齿轮 1、2、3 和非圆齿轮 1、2 组成动力传递机构,并固定在安装板上;直齿圆柱齿轮 4 安装在装置前端,直齿圆柱齿轮 5 固联安装在锥齿轮换向减速器顶部动力输入轴上,与直齿圆柱齿轮 4 组成齿轮传动机构,单线螺旋成穴装置安装在锥齿轮换向减速器底部动力输出轴上^[14]。正常作业时,井窖式移栽机通过动力传递机构、齿轮传动机构以及锥齿轮换向减速器将动力传递至单线螺旋成穴装置,带动单线螺旋成穴装置转动制作井窖。

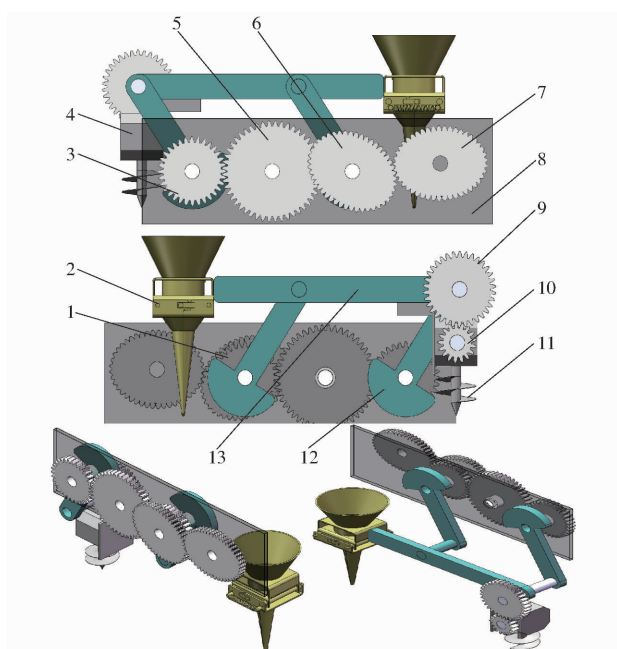


图 2 成穴装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of hole forming device

1. 直齿圆柱齿轮 3 2. 鸭嘴栽植器 3. 直齿圆柱齿轮 1 4. 锥齿轮
 5. 直齿圆柱齿轮 2 6. 非圆齿轮 1 7. 非圆齿轮 2
 8. 安装板 9. 直齿圆柱齿轮 5 10. 直齿圆柱齿轮 4 11. 单线螺旋成穴装置
 12. 曲柄 13. 连杆

成穴装置利用非圆齿轮-平行四边形机构近似匀速直线运动的特性,抵消穴盘移栽机前进作业速度,在移栽机连续作业的情况下形成适用于井窖式移栽的大深度井窖,但所成井窖依然存在易坍塌、稳定性差等问题,因此需要对入土部件单线螺旋成穴装置做进一步研究。

2 成穴过程分析

根据成穴过程中单线螺旋装置所处位置的不同,可将制作井窖过程分为3个阶段^[15]:①入土阶段。在输入动力的作用下,锥形钻尖首先入土,利用

挤密效应初步形成穴体。②切土阶段。随着单线螺旋成穴装置持续深入,井窖内壁上的土壤被切削下来,并在螺旋面强制推动与内壁约束的作用下,堆积在螺旋叶片之间。③排土阶段。在达到井窖穴体农艺要求的深度后,单线螺旋成穴装置开始向上提升,土壤颗粒在螺旋叶片上表面螺旋推力作用下强制排除井窖,落至地面。为了分析成穴过程中影响单线螺旋成穴装置切削输送土壤及锥形钻尖挤密土壤的关键因素,对各阶段土壤颗粒和单线螺旋器进行受力分析。

2.1 入土阶段分析

在入土阶段,单线螺旋成穴装置利用底部锥形钻尖对土壤的挤压变形产生的挤密效应初步制作井窖。结合圆孔扩张理论,土块受到较大的径向挤压力,从弹性状态进入塑性状态,自中心向外可分为3部分:破坏区、塑性区(屈服区)、弹性区^[16],如图3所示。

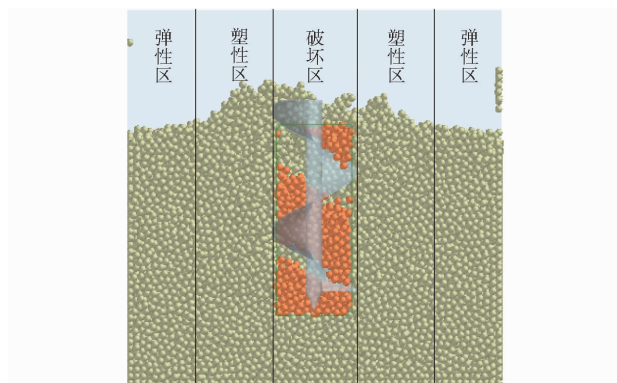


图3 井窖扩张模型

Fig. 3 Well cellar expansion model

底部锥形钻尖主要是利用挤密效应成穴,对周围土壤的作用力简图如图 4 所示,垂直于锥型钻尖表面的作用力 F 和相切于锥形钻尖表面的作用力 F_T 共同作用在土壤表面。垂直于锥形钻尖表面的作用力分解为水平方向分力 F_H 与竖直方向分力 F_V , 竖直方向的分力 F_V 为锥形钻尖周围的土壤提供竖直方向的加速度,使土壤做竖直方向上的运动,产生竖直方向位移,而水平方向上的分力 F_H 则为锥形

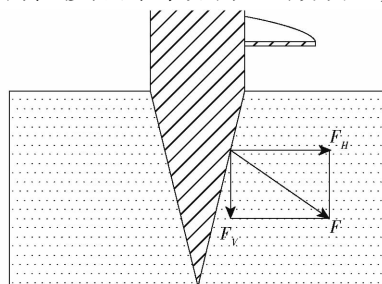


图 4 锥形钻尖对周围土壤的作用力简图

Fig.4 Schematic of force exerted by conical drill tip
on surrounding soil

钻尖周围的土壤提供径向加速度,使土壤做径向运动,产生径向位移;相切于锥形钻尖表面的作用力 F_T 为其附近的土壤提供切向加速度,使土壤做切向运动,产生切向位移做楔切变形。土壤作为孔介质在径向和轴向移动的作用下挤出空隙中的水和气体,孔隙缩小,土壤颗粒不断相互靠拢,产生压缩变形^[17]。

2.2 切土阶段分析

当锥形钻尖完全没入土壤,螺旋叶片开始工作,进入切削土壤阶段,随着螺旋叶片转动,井窖内壁上土壤被切离土层并被输送至上一个螺距内,经过一定时间,土壤颗粒堆积在螺旋叶片之间。

土壤颗粒被螺旋叶片切离井窖内壁并随叶片旋转,在离心力的作用下向叶片边缘滑移的同时与穴体接触,如图 5 所示。此时,离心力与土壤颗粒重力的径向分力同时作用于穴体内壁,并使土壤颗粒产生规律性运动变化。不考虑科氏加速度影响,可得土壤颗粒与穴体内壁间摩擦力 $F_{f1} = \mu F_L$,式中 μ 为土壤颗粒与井窖内壁间的摩擦因数, F_L 为离心力与土壤颗粒重力径向分力的合力;摩擦力方向与土壤颗粒沿螺旋叶片旋转方向相反,它是土壤颗粒上升的动力,阻止土块随螺旋叶片同步旋转,并且使土块沿螺旋叶片向上滚动或滑动^[18]。

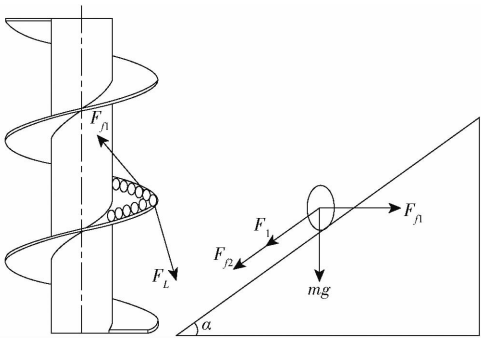


图 5 螺旋叶片与土壤颗粒的作用力

Fig. 5 Interaction between helical blade and soil particles

土壤颗粒与螺旋叶片间的摩擦力 F_{f2} 和下滑力 F_{f1} 分别为

$$F_{f2} = \mu_i mg \cos \alpha \tag{1}$$

$$F_{f1} = mg \sin \alpha \tag{2}$$

式中 μ_i ——土壤与叶片间摩擦因数
 m ——切削刃切削土块质量
 α ——螺旋升角
 g ——重力加速度

下滑力 F_{f1} 与螺旋叶片间的摩擦力 F_{f2} 阻止土壤颗粒沿螺旋叶片向上运动,因此它们的方向沿螺旋叶片向下。

当土壤颗粒具有向上运动的趋势时,此时的土壤颗粒可看作螺旋叶片外缘的一点随螺旋叶片一同

旋转,没有向上运动,称为临界状态,土块受力平衡方程为^[19]

$$F_{f1} \cos \alpha = \mu_i F_{f1} \sin \alpha + F_{f2} + F_{f1} \tag{3}$$

其中 $F_{f1} = \mu F = \mu m a \tag{4}$

$$a = R \omega_0^2 = \frac{R \pi^2 n_0^2}{900} \tag{5}$$

式中 a ——土壤颗粒径向加速度
 ω_0 ——土壤颗粒临界角速度
 R ——穴体半径
 n_0 ——土壤颗粒临界转速

在不考虑科氏加速度的情况下,将式(1)、(2)、(4)代入式(3)得

$$n_0 = 29.9 \sqrt{\frac{4 \cos \alpha + 2 \sin \alpha}{D \mu (\cos \alpha - \mu_i \sin \alpha)}} \tag{6}$$

式中 D ——成穴装置直径

若考虑科氏加速度的影响,则土壤颗粒与穴体内壁间的摩擦力向下偏移,出现土壤颗粒运动轨迹螺旋角 β 且增加惯性力 P_f ,因此式(6)变为

$$n_0 = 29.9 \sqrt{\frac{4 \cos \alpha + 2 \sin \alpha}{(1 - 2K - K^2) D \mu (\cos(\alpha + \beta) - \mu_i \sin(\alpha + \beta))}} \tag{7}$$

其中 $K = -\frac{n_r}{n_0} \tag{8}$

$$\beta = \arctan \frac{\pi n_r D \tan \alpha - v}{\pi D n_0} \tag{9}$$

式中 K ——土壤颗粒和叶片间相对转速与土壤颗粒临界转速之比

n_r ——土壤颗粒与叶片间相对转速

v ——成穴装置钻进速度

土壤颗粒的运动是土壤颗粒沿螺旋叶片向上位移的相对运动和成穴装置旋转的牵连运动,土壤颗粒的绝对速度等于土壤颗粒和螺旋叶片转速 n_r 与成穴装置的牵连速度 n 之和,土壤颗粒的绝对速度实际上等于土壤颗粒的临界转速。由于 $n > n_0$,土壤颗粒随螺旋叶片向上运动,于是令其等于 n_0 ,可得

$$n_0 = n + n_r \tag{10}$$

由于 n_r 与 n 转向相反,成穴装置的工作效率和稳定性主要受 n_r 的影响,所以 K 取负值, K 的取值范围一般为 $-0.5 \sim -0.35$ 。穴体直径较大时 K 取大值,穴体直径较小时 K 取小值,故

$$n_r = -(0.35 \sim 0.5) n_0 \tag{11}$$

2.3 排土阶段分析

在这一阶段单线螺旋成穴装置应满足两个条件,切削的土壤颗粒不回流至井窖内,排出的土壤颗

粒不能被抛撒太远。在排出土壤阶段对土壤颗粒做受力分析,如图 6 所示,叶片切削下来的土壤颗粒堆积在相邻螺旋叶片间,其受到重力 G 、螺旋面对其摩擦力 f 与离心力 F_c ,土壤颗粒受离心力作用被抛撒至地面。若土壤颗粒不回流至井窖内,螺旋面对土壤颗粒的径向摩擦力 f_i 必须小于土壤所受离心力 F_c ,即

$$f_i < F_c \quad (12)$$

其中

$$f_i = \mu_i mg \cos \alpha \quad (13)$$

$$F_c = \frac{m_i \omega D^2}{4} \quad (14)$$

将式(13)、(14)代入式(12)并化简得

$$\omega \geq \frac{4\mu g \cos \alpha}{D^2} \quad (15)$$

式中 ω ——成穴装置角速度

式中 μ 、 g 均为常数,土壤颗粒沿叶片上升至离开井窖后,其所受摩擦力 f_i 小于离心力 F_c ,土壤颗粒受离心力作用自叶片间抛出,转速越高,离心力越大,土壤颗粒抛撒越远,因此转速必须被限制。设 L 为土壤颗粒被抛出井窖中心的距离, $L_{\max}$ 为抛出距离最大值,则

$$L_{\max} \geq L \quad (16)$$

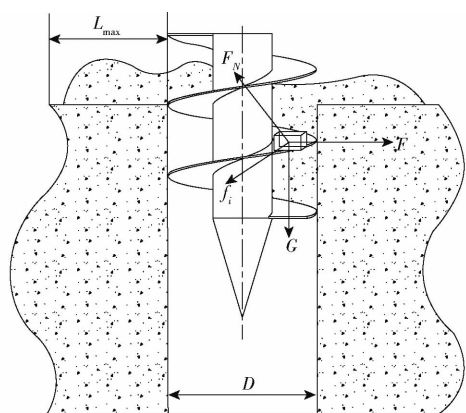


图 6 排土阶段土壤力学分析

Fig. 6 Soil stress analysis in soil discharge stage

土壤颗粒在离开螺旋面的瞬时运动速度可分解为沿螺旋向上的提升速度 V_n 和沿螺旋外沿切线方向的速度 V_τ ,即土壤颗粒离开螺旋面时,做向上抛物线运动,从起抛到落地的时间 t ,计算式为^[20]

$$t = 2V_n / g \quad (17)$$

被抛撒土壤颗粒距中心的距离为

$$L_h = V_\tau t = 2V_\tau V_n / g \quad (18)$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + L_h^2} = \sqrt{\frac{D^2}{4} + \frac{4V_\tau^2 V_n^2}{g^2}} = \frac{1}{2g} \sqrt{D^2 g^2 + 16V_\tau^2 V_n^2} \quad (19)$$

成穴装置螺旋叶片外沿的线速度为

$$V_\tau = \frac{\omega D}{2} \quad (20)$$

螺旋面向上提升土壤颗粒的速度为

$$V_n = \frac{\pi D \tan \alpha}{2\pi} = \frac{D \omega \tan \alpha}{2} \quad (21)$$

将式(20)、(21)代入式(19)得

$$L = \frac{D}{2g} \sqrt{g^2 + \omega^4 D^2 \tan^2 \alpha} \quad (22)$$

将式(22)代入不等式(16)得出成穴装置的最高转速

$$\omega_{\max} \leq \frac{1}{D} \sqrt[4]{\frac{4g^2 L_{\max}^2 - g^2 D^2}{\tan^2 \alpha}} \quad (23)$$

由式(15)、(23)可得

$$\frac{4\mu g \cos \alpha}{D^2} \leq \omega \leq \frac{1}{D} \sqrt[4]{\frac{4g^2 L_{\max}^2 - g^2 D^2}{\tan^2 \alpha}} \quad (24)$$

由上述内容可知,成穴装置工作的稳定性与工作效率和土壤颗粒的运动均受其直径、螺旋升角(螺距)、角速度(转速)的影响,因此可以确定成穴装置的直径、螺距、转速是影响入土部件成穴质量的关键因素。

3 仿真分析

应用 EDEM 仿真软件对单线螺旋成穴装置作业过程进行仿真分析,通过研究单线螺旋成穴装置结构参数与工作参数对井窖质量的影响规律,确定各参数取值范围。在 EDEM 软件中的 Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Model (EEPA) 模型下建立烟田土壤模型^[21-22],通过设置 EEPA 模型的恒定黏结力、表面能、塑性变形比、加载分支指数、黏结分支指数和切向刚度因子 6 个参数来表征土壤物理特性^[23]。

根据相关资料^[24],假设土壤为均匀分布各向同性弹塑性材料,成穴过程中最大有效挤密半径 R_1 计算公式为

$$R_1 = R_n \sqrt{\frac{G}{c \cos \varphi + q \sin \varphi}} \quad (25)$$

其中

$$G = \frac{E_0}{2(1 + \mu_b)} \quad (26)$$

式中 R_n ——锥形钻尖半径

c ——土壤内聚力

φ ——土壤内摩擦角

q ——土壤原始固结压力

G ——土壤剪切模量

E_0 ——土壤弹性模量

μ_b ——土壤泊松比

通过式(26)可得土壤剪切模量 1.154×10^7 Pa,将其

代入式(25)得到有效挤密半径与成穴装置半径 R_n 的关系为 $R_1 = 2.8R_n$ 。可知土壤水平方向有效挤密半径大约是成穴装置半径的 2.8 倍,若再考虑孔隙水压力等其他因素,有效挤密半径应该小于 $2.8R_n$ 。土壤竖直方向有效挤密半径大约是成穴装置入土深度的 2 倍。根据井窖移栽农艺要求及成穴装置结构,水平方向影响半径 14.1 cm,竖直方向影响深度 40 cm。

经过参数标定以及参考相关资料^[25-26],土壤颗粒设置为 3 mm 单个球体,0.25~2 倍混合颗粒半径模型,确定单线螺旋成穴装置与土壤颗粒间的接触模型为 Hertz-Mindlin with JKR,土壤颗粒间的接触模型为 Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Model (EEPA),主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数
Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
土壤含水率/%	30
土壤泊松比	0.38
土壤颗粒密度/(kg·m ⁻³)	1 480
土壤剪切模量/Pa	1.2×10 ⁶
钻头泊松比	0.35
成穴装置密度/(kg·m ⁻³)	7 800
成穴装置剪切模量/Pa	7.8×10 ¹⁰
土壤颗粒恢复系数	0.1
土壤颗粒静摩擦因数	0.3
土壤颗粒动摩擦因数	0.22
土壤-成穴装置恢复系数	0.2
土壤-成穴装置静摩擦因数	0.35
土壤-成穴装置动摩擦因数	0.3
土壤法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	3.3×10 ⁶
土壤切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	1.9×10 ⁶
土壤法向应力/Pa	2.46×10 ⁵
土壤切向应力/Pa	6.2×10 ⁴

根据上文有效挤密半径原理建立 30 cm×30 cm×40 cm(长×宽×高)的长方体土槽。土壤含水率受土壤颗粒接触半径的直接影响,接触半径计算式为

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \\ V_1 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \\ V_2 = \frac{4}{3} \pi R_2^3 - \frac{4}{3} \pi R_0^3 \end{cases} \quad (27)$$

式中 ω_s ——土壤含水率
 $m_1、m_2$ ——土壤和水的质量
 $\rho_1、\rho_2$ ——土壤密度和水密度
 $V_1、V_2$ ——土壤体积和水体积
 R_0 ——土壤颗粒半径
 R_2 ——计算得到的接触半径

通过上文理论分析确定影响井窖质量的关键因素,结合成穴装置自身结构与作物小苗井窖移栽的农艺要求,设置成穴装置直径范围为 50~150 mm,参照现有成穴装置结构参数,设置成穴装置螺距范围为 25~125 mm,参照现有井窖式移栽机作业时成穴装置的转速范围,设置成穴装置转速为 150~400 r/min。现有井窖式移栽机如图 7 所示,各参数如表 2 所示。

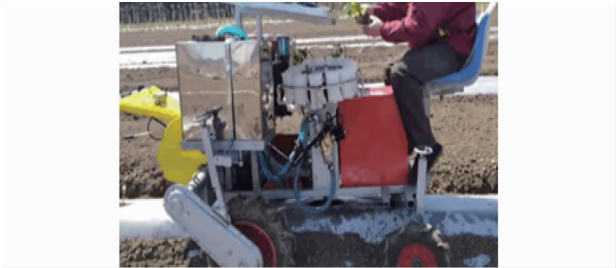


图 7 井窖式移栽机
Fig.7 Well cellar transplanting machine

表 2 井窖式移栽机参数
Tab.2 Indicators of well cellar transplanting machine

参数	数值/型式
作业方式	自走式
前轮距/mm	800~950
后轮距/mm	930~1 250
轴距/mm	800~1 000
栽植机构型式	吊杯鸭嘴式
工作行数/行	1
作业速度/(km·h ⁻¹)	0.5~2.0
成穴装置转速/(r·min ⁻¹)	100~500
移栽深度/mm	170~200

通过前期预试验确定成穴装置钻进速度为 0.4 m/s、钻进时间 0.5 s;提升速度为 0.4 m/s、提升时间 0.5 s 时,土壤颗粒不会大量堆积在螺旋叶片内,且钻进速度、钻进时间、提升速度、提升时间与成穴质量无相关性,故钻进速度设置为 0.4 m/s、钻进时间为 0.5 s;提升速度设置为 0.4 m/s、提升时间为 0.5 s。仿真模型如图 8 所示。

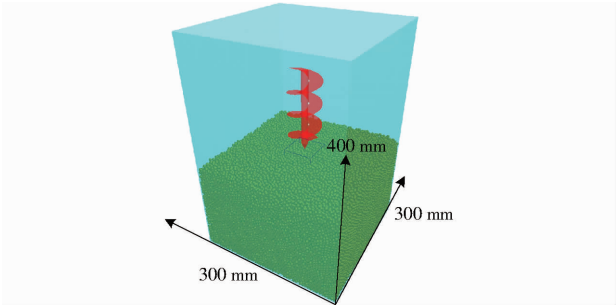


图 8 成穴仿真模型
Fig.8 Schematic of cavitation simulation

成穴仿真过程如图 9(仿真参数为直径 90 mm、

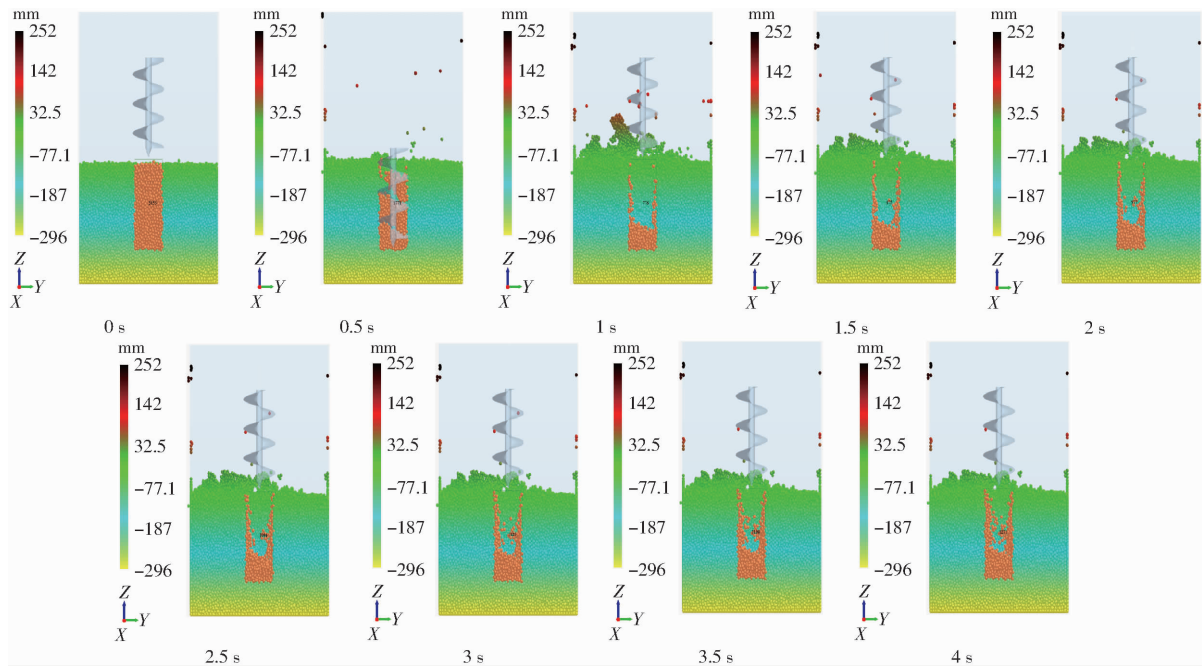


图9 成穴仿真过程

Fig.9 Simulation process of hole-forming

螺距 65 mm、转速 250 r/min),采用 Grid Bin Group 内剩余颗粒数量为成穴质量指标,Grid Bin Group 将模型域划分为一个网格,每个网格称为一个容器组,每个单元格称为一个容器,任何进入或通过每个单元格的颗粒都可以被监测。创建 Grid Bin Group,使单元格尺寸与井窖移栽穴体农艺要求尺寸一致;利用 EDEM 软件 Analyst 模块处理仿真数据,得到不同作业参数与结构参数下,Grid Bin Group 内土壤颗粒数量随时间的变化图像。

3.1 单线螺旋成穴装置直径对成穴质量的影响

确定单线螺旋成穴装置转速为 350 r/min,螺距为 65 mm,直径分别选取 50、70、90、110、130、150 mm,共进行 6 组仿真试验,试验结果如图 10 所示。

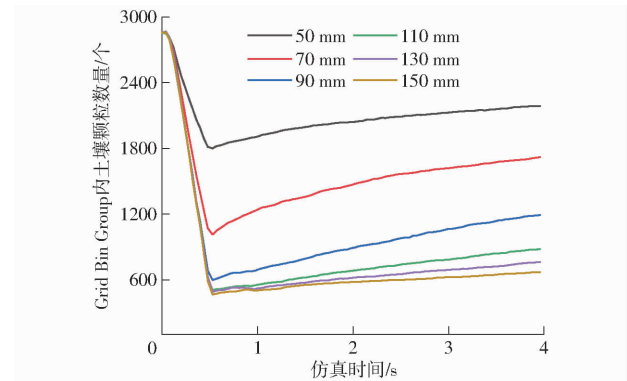


图10 不同直径时 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量变化曲线

Fig.10 Variation curves of soil particle number in Grid Bin Group with different diameters

试验结果表明,直径为 110、130、150 mm 时 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量较少,成穴质量较高,且

Grid Bin Group 内土壤颗粒数量随仿真时间变化趋势基本相同;当直径为 90 mm 时,在钻进时间 0.5 s 内 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量变化基本与 110、130、150 mm 时相同,但在提升时间内土壤颗粒回流较多;直径为 50、70 mm 时 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量较多,均由于所成井窖体积小于 Grid Bin Group 网格体积即未达到井窖移栽农艺要求,导致网格内土壤颗粒并未被排至地面。虽然直径为 130、150 mm 时井窖质量较好,但所成井窖直径过大,不符合井窖移栽农艺要求。随着直径增加 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量有减少趋势,但在直径 110 mm 之后减少效果不明显。

3.2 单线螺旋成穴装置螺距对成穴质量的影响

确定单线螺旋成穴装置转速为 350 r/min,直径为 90 mm,螺距分别选取 25、45、65、85、105、125 mm,共进行 6 组仿真试验,试验结果如图 11 所示。

试验结果表明,螺距为 25 mm 时,在钻进时间内 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量下降趋势明显,明显高于其他螺距水平,但在提升时间内土壤颗粒回流现象较其他螺距水平严重,因为螺距 25 mm 相较于其他螺距水平最小,部分土壤颗粒不能进入螺旋叶片内部,无法排至地面被挤压到四周,因此在开始上升时土壤颗粒开始迅速回流至穴体内部;螺距为 45 mm 时同样由于螺距较小钻进时间内部分颗粒受挤压进入周围土壤,提升时间内又开始回流,但是因为大于 25 mm 螺距,受挤压颗粒与回流颗粒均少于 25 mm 螺距;螺距为 65、85、105、125 mm 时,在钻进时间内 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量随仿真

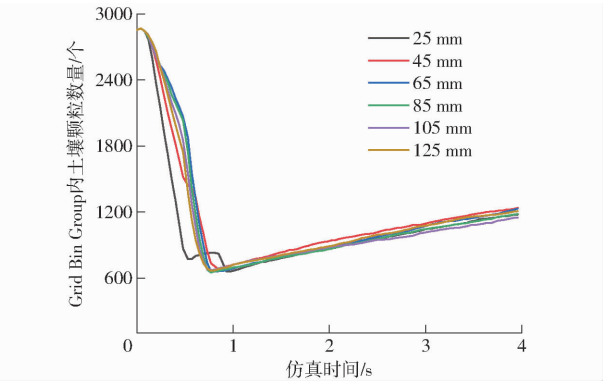


图 11 不同螺距时 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量变化曲线

Fig. 11 Variation curves of soil particle number in Grid Bin Group with different pitches

时间变化趋势基本相同。随着螺距增加 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量有减少的趋势,但减少效果不明显。

3.3 单线螺旋成穴装置转速对成穴质量的影响

确定单线螺旋成穴装置直径为 90 mm,螺距为 65 mm,转速选取 150、200、250、300、350、400 r/min,共进行 6 组仿真试验,试验结果如图 12 所示。

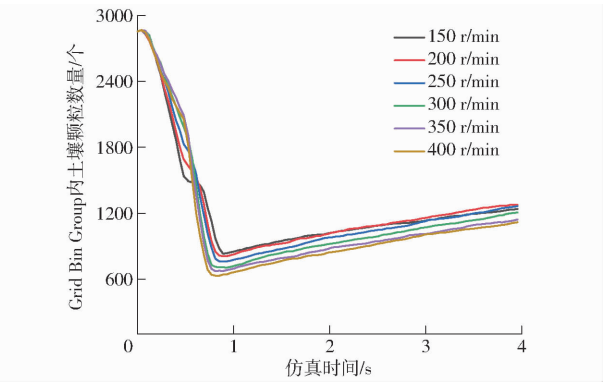


图 12 不同转速时 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量变化曲线

Fig. 12 Variation curves of soil particle number in Grid Bin Group at different rotational speeds

试验结果表明,在钻进时间内随着转速水平增加 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量有增加趋势,当转速为 150 r/min 时,Grid Bin Group 内土壤颗粒数量最少,为 400 r/min 时,Grid Bin Group 内土壤颗粒数量最多;在提升时间内随着转速水平的提高,土壤颗粒回流现象逐渐减少。转速对 Grid Bin Group 内土壤颗粒数量影响较大,在 0.5 ~ 0.8 s 内随着转速增加,Grid Bin Group 内土壤颗粒数量减少较为明显。

4 台架试验

2022 年 8 月于山东省农业机械科学研究院试验基地进行单线螺旋成穴装置的性能试验。试验基

地内土壤含水率为 27.98%,密度为 2 376 kg/m³。试验台架如图 13 所示,各参数如表 3 所示。



图 13 试验台架

Fig. 13 Test bench

1. 控制柜 2. 钻进电机 3. 旋转电机 4. 单线螺旋成穴装置

表 3 试验台架参数

Tab. 3 Test bench parameters

参数	数值
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	2 350 × 1 500 × 1 250
电机功率/kW	3
升降行程/mm	350
打穴距离/mm	500
工作行数/行	1
可安装成穴装置数量/个	4

4.1 试验因素与指标

通过仿真分析得到各试验因素影响井窖质量的规律,确定单线螺旋成穴装置的最优直径、螺距、转速为试验因素,进行二次旋转正交组合试验,将井窖深度、井窖直径作为评价指标。

4.2 试验方案与方法

结合井窖移栽的实际需求、前期仿真试验和国内外相关研究成果,确定单线螺旋成穴装置直径为 90 ~ 110 mm、螺距为 65 ~ 85 mm、转速为 300 ~ 400 r/min,进行 Box - Behnken 试验,对指标的显著性进行分析,确定各因素对试验指标的影响规律,得到成穴装置最佳参数组合。试验因素编码如表 4 所示。试验方案与结果如表 5 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Experimental variables codes

编码	因素		
	直径/mm	螺距/mm	转速/(r·min ⁻¹)
-1	90	65	300
0	100	75	350
1	110	85	400

对试验结果进行二次回归分析,并进行多元参数拟合,得到两个评价指标井窖深度 Y_1 和井窖直径 Y_2 的回归方程,检验其显著性。

表 5 试验方案与结果
Tab.5 Test scheme and result

试验 编号	因素			井窖深度 Y_1/mm	井窖直径 Y_2/mm
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	0	174	76
2	1	-1	0	181	80
3	-1	1	0	182	77
4	1	1	0	182	90
5	-1	0	0	179	74
6	1	0	0	182	78
7	-1	0	1	178	72
8	1	0	1	177	84
9	0	-1	-1	181	78
10	0	1	-1	177	85
11	0	-1	1	169	84
12	0	1	1	181	84
13	0	0	0	194	92
14	0	0	0	196	95
15	0	0	0	194	93
16	0	0	0	195	92
17	0	0	0	195	93

由表 6 可知,试验模型极显著($P < 0.01$)。各因素对井窖深度影响的主次顺序为 x_2 、 x_3 、 x_1 ,螺距对井窖深度影响最为显著,转速影响极显著,直径影响显著,交互项中螺距和转速对井窖深度影响最为显著,直径与螺距影响显著,直径与转速影响较为显著。二次主效应项中影响均为极显著,得到井窖深度的回归方程为

$$Y_1 = 194.80 + 1.13x_1 + 2.13x_2 - 1.75x_3 - 1.75x_1x_2 - 1.00x_1x_3 + 4.00x_2x_3 - 6.53x_1^2 - 8.53x_2^2 - 9.27x_3^2 \quad (28)$$

该回归方程失拟项 $P = 0.289\,0 > 0.1$,不显著,证明试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

表 6 井窖深度方差分析
Tab.6 Variance analysis of well depth

来源	平方和	均方	F	P
模型	1 095.33	121.70	130.06	<0.000 1 ***
x_1	10.13	10.13	10.82	0.013 3 **
x_2	36.13	36.13	38.61	0.000 4 ***
x_3	24.50	24.50	26.18	0.001 4 ***
x_1x_2	12.25	12.25	13.09	0.008 5 ***
x_1x_3	4.00	4.00	4.27	0.077 5 *
x_2x_3	64.00	64.00	68.40	<0.000 1 ***
x_1^2	179.27	179.27	191.58	<0.000 1 ***
x_2^2	306.00	306.00	327.03	<0.000 1 ***
x_3^2	362.21	362.21	387.10	<0.000 1 ***
残差	2.80	0.70		
总和	1 101.88			

注:***表示影响极显著($P < 0.01$);**表示影响显著($0.01 \leq P \leq 0.05$);*表示影响较显著($0.05 < P < 0.1$)。下同。

由表 7 可知,试验模型极显著($P < 0.01$)。各

因素对井窖直径影响的主次顺序为 x_1 、 x_2 、 x_3 ,直径对井窖直径影响最为显著,螺距影响极显著,转速影响显著,交互项中直径和螺距对井窖直径影响最为显著,直径与转速影响极显著,螺距与转速影响显著。二次主效应中影响均为极显著,得到井窖直径的回归方程为

$$Y_2 = 93.00 + 4.13x_1 + 2.25x_2 + 1.13x_3 + 2.25x_1x_2 + 2.00x_1x_3 - 1.75x_2x_3 - 9.00x_1^2 - 3.25x_2^2 - 7.00x_3^2 \quad (29)$$

表 7 井窖直径方差分析
Tab.7 Variance analysis of well diameter

来源	平方和	均方	F	P
模型	884.69	98.30	83.41	<0.000 1 ***
x_1	136.13	136.13	115.50	<0.000 1 ***
x_2	40.50	40.50	34.36	0.000 6 ***
x_3	10.13	10.13	8.59	0.022 0 **
x_1x_2	20.25	20.25	17.18	0.004 3 ***
x_1x_3	16.00	16.00	13.58	0.007 8 ***
x_2x_3	12.25	12.25	10.39	0.014 6 **
x_1^2	341.05	341.05	289.38	<0.000 1 ***
x_2^2	44.47	44.47	37.74	0.000 5 ***
x_3^2	206.32	206.32	175.06	<0.000 1 ***
残差	6.00	1.50		
总和	892.94			

该回归方程失拟项 $P = 0.702\,2 > 0.1$,不显著,证明试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

4.3 响应曲面分析

为分析各因素与试验指标之间的关系,对试验数据进行分析处理,得到螺距与转速交互、直径与螺距交互对井窖深度影响效应响应曲面,如图 14a、14b 所示。由图 14a 可知,当螺距一定时,井窖深度随转速增加先增大后减小,原因是在相同作业时间内,随着转速增加,排土效率增加井窖内土壤颗粒迅速排至地面,但随着转速增加,叶片内的土壤颗粒还未被排至地面便被甩回未完成的井窖内;当转速一定时,井窖深度随螺距增加先增大后减小,原因是在相同作业时间内随着螺距增加,叶片内能够容纳更多的土壤颗粒,使其排至地面,但随着螺距的增加,叶片内部土壤自身的重力也在增加,在排至地面之前便有部分颗粒回流至未完成的井窖内。如图 14b 所示,当转速一定时,井窖深度随螺距的增加先增加后减小;井窖深度与直径呈正相关,原因是随着直径的增加,螺旋叶片长度也在增加,叶片间的空间变大,更多的土壤颗粒进入到叶片内被排至地面。

如图 14c 所示,当直径一定时,井窖直径与转速呈正相关,原因是随着转速的增加,更多的土壤颗粒被排至地面;当转速一定时,井窖直径与直径呈正相

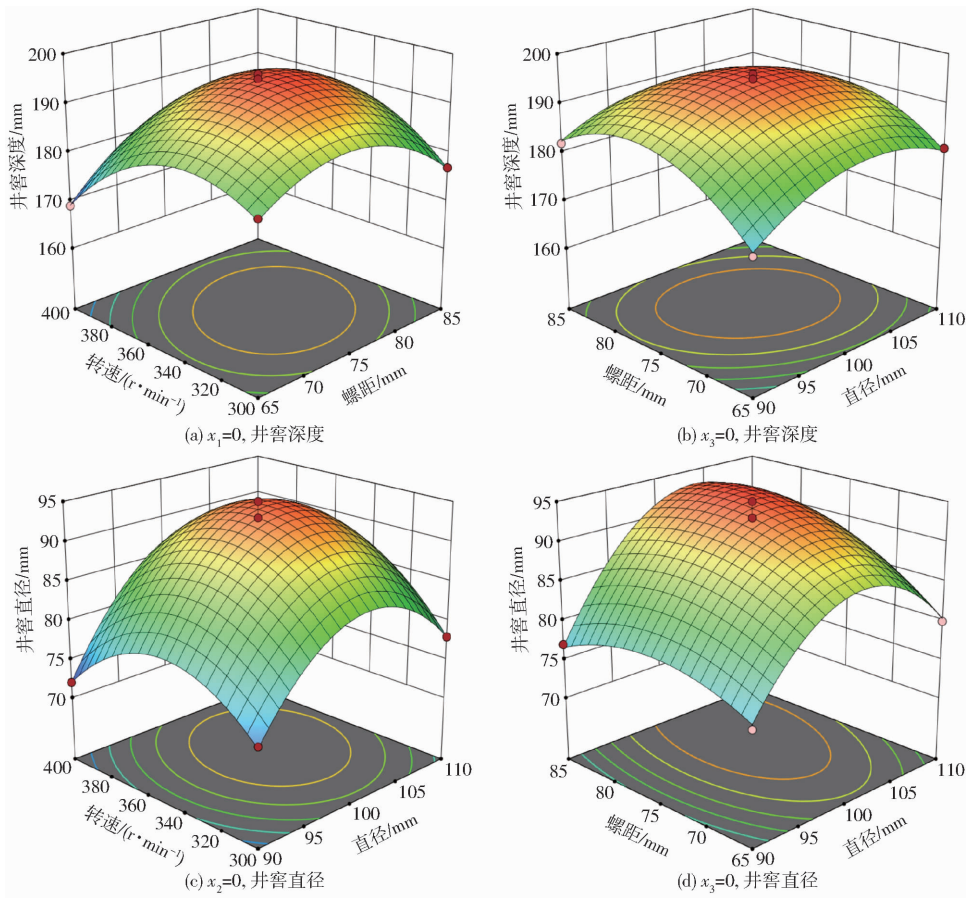


图 14 因素交互作用对评价指标响应曲面

Fig. 14 Interaction analysis of evaluation index

关,原因是随着直径增大,螺旋叶片与地面的接触面积增加,可以切削到更多地面。转速一定时,研究直径和螺距的交互作用对井窖直径的影响,响应曲面如图 14d 所示。当直径一定时,井窖直径与螺距呈正相关,原因是随着螺距增大叶片内空间增大,可以容纳更多被切削下来的土壤颗粒,使井窖直径增加;当螺距一定时,井窖直径与成穴装置直径呈正相关,但随着成穴装置直径的增加,井窖直径有减小的趋势,原因是随着成穴装置直径的增加,轴径与螺旋叶片长度也在增加,导致成穴装置整体质量增加,降低了工作稳定性,使井窖呈现“喇叭”形,即井窖整体上宽下窄。

利用 Design-Expert 软件对试验因素参数进行优化,获得单线螺旋成穴装置的最优结构参数与工作参数,遵循保证井窖移栽农艺要求的前提下,根据试验要求和实际作业条件,确定优化目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \max Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

求得单线螺旋成穴装置最优参数组合为直径 100 mm、螺距 75 mm、转速 350 r/min,此组合参数下井窖深度 195 mm、井窖直径 93 mm。

5 田间试验

为验证上述 EDEM 仿真试验和二次正交旋转试验所得试验结果的准确性,选择含水率为 27.2% 的试验田,试验条件为作物小苗种植常规的大垄,垄高 300 mm,上台宽度 40 mm,下台宽度 90 mm。试验机械为自主设计的水冲井窖式多功能移栽一体机,其主要由底盘、投苗装置、注水装置等组成,如图 15 所示。

测量时用铁铲沿穴体中心位置向外挖开,得到穴体截面,使用卷尺测量井窖深度和直径,随机测量 10 组不同井窖的参数,如图 16 所示。

穴体测量数据如表 8 所示,井窖深度的平均值为 182 mm、井窖直径的平均值为 80.7 mm,与二次正交旋转试验相比存在误差,产生误差的原因是试验田地地形起伏及水冲井窖式多功能移栽一体机本身振动;测量的 10 组穴体中,各组参数也存在差异,原因是试验田地地形不平,试验机械前进过程中发生波动,导致机械前进速度与单线螺旋成穴装置在前

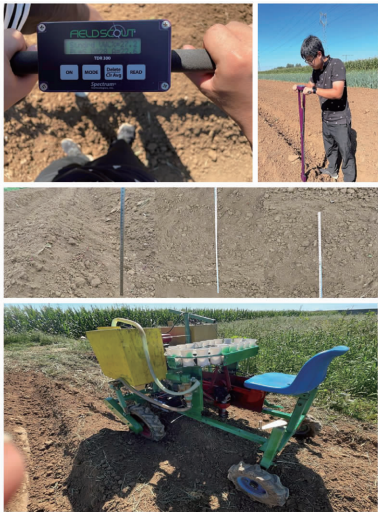


图 15 田间成穴试验
Fig. 15 Field cavitation



图 16 实际形成的井窖界面
Fig. 16 Actually formed cavity section

进方向上的速度差值发生改变,造成各组穴体数据产生差异。

表 8 穴体测量数据

Tab. 8 Measurement data of cavitation mm		
试验序号	井窖深度	井窖直径
1	180	80
2	181	80
3	183	80
4	182	80
5	184	81
6	181	80
7	182	81
8	181	83
9	182	82
10	182	80

6 结论

(1)设计了井窖式移栽机专用单线螺旋成穴装置,将作业过程分为入土、切土、排土 3 个阶段,确定了影响成穴质量的关键因素为单线螺旋成穴装置直径、螺距及工作转速,创建了单线螺旋成穴装置在成穴过程中的力学模型。

(2)利用 EDEM 仿真试验与正交试验,通过 Design-Expert 软件建立单线螺旋成穴装置响应指标与试验因素的回归方程,通过响应曲面得出单线螺旋成穴装置试验因素与响应指标的影响趋势和交互关系;以回归方程为基础,采用多目标函数优化得到单线螺旋成穴装置优化参数组合:直径 100 mm、螺距 75 mm、转速 350 r/min。

(3)根据优化后的参数研制单线螺旋成穴装置及试验机械并进行田间试验,试验结果表明:井窖深度为 182 mm,井窖直径为 80.7 mm,优化后的单线螺旋成穴装置满足井窖成穴农艺要求。

参 考 文 献

[1] 崔志燕,郭小宝,杨青玺,等. 烤烟井窖式移栽对井窖内温度、根系活力、生长发育及产质量的影响[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(14):38-39,64.
CUI Zhiyan, GUO Xiaobao, YANG Qingxi, et al. Effects of flue-cured tobacco planting in wells on temperature, root vitality, growth and yield quality in wells[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2018, 24(14):38-39,64. (in Chinese)

[2] 林叶春,陈伟,陈懿,等. 井窖式移栽对烟苗生长和光合特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4):120-126.
LIN Yechun, CHEN Wei, CHEN Yi, et al. Effects of well-cellar style transplanting on growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(4):120-126. (in Chinese)

[3] 曾昭松,吴才源,龙立汪,等. 烤烟井窖式移栽技术的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(6):51-55.
ZENG Shaosong, WU Caiyuan, LONG Liwang, et al. Advances in well-cellar transplanting technology of flue-cured tobacco[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(6):51-55. (in Chinese)

[4] 郭应成,张一丹,李佛琳,等. 烤烟膜下小苗移栽与膜上常规苗移栽的生育期、产值量比较及其与气象要素的关系[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2017, 32(2):246-256.
GUO Yingcheng, ZHANG Yidan, LI Folin, et al. Comparison of growth period, yield and value in flue-cured tobacco pattern of transplanting young seedlings under film to conventional transplanting above film and its correlation with meteorological factors [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(2):246-256. (in Chinese)

[5] 陈英凯. 基于 ANSYSWorkbench 的挖坑机钻头的有限元分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(3):68-70.
CHEN Yingkai. Finite element analysis of drill of earth auger based on ANSYSWorkbench[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017, 55(3):68-70. (in Chinese)

[6] 郭贵生,高梦祥,郭康权,等. 基于 MATLAB 挖坑机螺旋钻头参数的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(3):179-182.
GUO Guisheng, GAO Mengxiang, GUO Kangquan, et al. Study of screw auger parameters of mounted hole digger on the basis of MATLAB[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2003, 31(3):179-182. (in Chinese)

- [7] 胡长寿,喻丽华,徐志波,等. 烟苗移栽井窖制作机关键部件改进及试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10):198–202.
HU Changshou, YU Lihua, XU Zhibo, et al. Improvement and experiment main component of well-cellar making machine for tobacco seedling transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10):198–202. (in Chinese)
- [8] 喻丽华,张富贵,陈懿,等. 烤烟移栽井窖的成穴方法及装置:CN105265069A[P]. 2016–01–27.
- [9] 喻丽华,刘光辉,张富贵,等. 背负式幼苗移栽井窖制作机性能测试分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(3):141–145.
YU Lihua, LIU Guanghui, ZHANG Fugui, et al. Test and analysis for performance on the knapsack well-cellar making machine for seedling transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3):141–145. (in Chinese)
- [10] 陈超鹏,全伟,吴明亮,等. 基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4):433–439.
CHEN Chaopeng, QUAN Wei, WU Mingliang, et al. Parameter optimization of vertical soil-filling hole-forming parts for rapeseed transplantation based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(4):433–439. (in Chinese)
- [11] 程亚东,谭小兵,刘棋,等. 烤烟井窖式移栽不同苗高对烟株生长发育及产质量的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(11):44–48.
CHENG Yadong, TAN Xiaobing, LIU Qi, et al. Effects of different seeding height on growth, yield and quality of tobacco under well-cellar transplanting[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(11):44–48. (in Chinese)
- [12] 刘艳红,张宝贤. 黄瓜、茄子、辣椒山地越夏栽培品种筛选试验[J]. 农业科技通讯, 2017(5):126–128.
LIU Yanhong, ZHANG Baoxian. Screening experiment of cucumber, eggplant and pepper cross-summer mountain cultivars[J]. Bulletin of Agricultural Sciences and Technology, 2017(5):126–128. (in Chinese)
- [13] 王德权,杜传印,荐世春,等. 井窖式烟草移栽机设计与试验[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(1):15–19.
WANG Dequan, DU Chuanyin, JIAN Shichun, et al. Design and experiment of cellar tobacco transplanter[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(1):15–19. (in Chinese)
- [14] 徐高伟,荐世春,宋裕民,等. 丘陵山地作物移栽机井窖式成穴机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3):105–113, 125.
XU Gaowei, JIAN Shichun, SONG Yumin, et al. Design and experiment of cellar cavitation mechanism for crops of hilly mountains transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):105–113, 125. (in Chinese)
- [15] 董晓威. 垂直螺旋式水稻侧深施肥机理与装置参数研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2019.
DONG Xiaowei. Mechanism and parameters of vertical spiral rice deep-side fertilizing device[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [16] 余海岁,周国庆,赵光思,等. 岩土介质小孔扩张理论[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [17] 喻丽华,张富贵,刘光辉,等. 烤烟移栽井窖制作成穴机理与适应性研究[J]. 机械设计与制造, 2018(4):97–100.
YU Lihua, ZHANG Fugui, LIU Guanghui, et al. Study on working mechanism and adaptability of well-cellar making for tobacco transplanting[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4):97–100. (in Chinese)
- [18] 位国建,祁兵,焦伟,等. 水田机械式强制排肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1):154–164.
WEI Guojian, QI Bing, JIAO Wei, et al. Design and experiment of mechanical forced fertilizing device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Suppl. 1):154–164. (in Chinese)
- [19] 王予铭. 螺旋钻机主要参数计算[J]. 筑路机械与施工机械化, 1998(6):8–10.
WANG Yuming. Calculation of main parameters of auger rig[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 1998(6):8–10. (in Chinese)
- [20] 秦贵,宫少俊,李治国. 挖坑机螺旋钻头直径、螺旋升角与转速[J]. 农业机械, 2005(9):102.
QIN Gui, GONG Shaojun, LI Zhiguo. Auger bit diameter, spiral angle and speed of sigger[J]. Farm Machinery, 2005(9):102. (in Chinese)
- [21] THAKUR S C, MORRIEESY J P, SUN J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model[J]. Granular Matter, 2014, 16(3):383–400.
- [22] JANDA A, OOI J Y. DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids[J]. Powder Technology, 2016, 293:60–68.
- [23] 陈桂斌,王庆杰,李问盈,等. 对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12):65–76.
CHEN Guibin, WANG Qingjie, LI Wenying, et al. Design and experiment of double roller differential speed crushing fertilizer device for block organic fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12):65–76. (in Chinese)
- [24] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [25] WANG Xuezhen, LI Peng, HE Jinpu, et al. Discrete element simulations and experiments of soil-winged subsoiler interaction[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(1):50–62.
- [26] 许盛. 井窖式移栽的成穴钻头研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2020.
XU Sheng. Research on drill bit for hole planting[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020. (in Chinese)