

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.006

基于 DEM - CFD 的气吸式三七种苗定向移栽装置研究

赖庆辉 赵瑾汶 苏微 贾广鑫 李俊宏 吕勤

(昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500)

摘要:为实现机械化移栽、解决三七种苗调姿定向问题,设计了一种振动辅助吸苗气吸式三七种苗定向移栽装置。通过分析种苗的吸附状态受力及种苗在升力作用下产生旋转力矩、实现调姿的过程,阐明了种苗吸附调姿的机理;利用 DEM - CFD 气固两相流耦合仿真方法对种苗吸附调姿过程进行分析,验证了种苗吸附调姿的可行性,仿真结果表明,当主吸孔与辅助定位吸孔夹角为 23° 、与调姿转向吸孔夹角为 30° 时,种苗因受到压力差而产生的升力能使其调姿并定位。为优化移栽装置的工作性能,以主吸孔负压、动吸盘转速和调姿转向吸孔直径为试验因素,以定向合格指数和漏吸指数为试验指标,进行了二次回归正交旋转组合台架试验。试验表明,影响定向合格指数的主次顺序为调姿转向吸孔直径、主吸孔负压、动吸盘转速,当调姿转向吸孔直径为 4.5 mm、主吸孔负压为 1.03 ~ 2.11 kPa、动吸盘转速为 4.67 ~ 6.08 r/min 时,定向移栽装置平均定向合格指数为 85.87%、平均漏吸指数为 6.33%,可满足三七种苗移栽要求。

关键词:三七种苗;定向移栽装置;吸附调姿;DEM - CFD

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0060-11

OSID:



Design and Test of Air Suction Directional Transplanting Device for *Panax notoginseng* Seedlings Based on DEM - CFD Coupling

LAI Qinghui ZHAO Jinwen SU Wei JIA Guangxin LI Junhong LÜ Qin

(College of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to solve the orientation problem of *Panax notoginseng* seedling and realize mechanized transplanting, air suction directional transplanting device of *Panax notoginseng* seedling assisted by vibration was designed. The mechanism of seedling adsorption posture adjustment was clarified based on the stress analysis of adsorption state of seedlings and the process under the action of lifting force, the seedlings generated rotation torque to realize posture adjustment. The process of seedling adsorption attitude adjustment was analyzed and the feasibility of posture adjustment was verified by seedling adsorption through DEM - CFD gas solid two phase flow coupling simulation. And the results showed that when the angle between the main suction hole and the auxiliary positioning suction hole was 23° and the angle between the attitude adjustment and steering suction hole was 30° , the posture of those seedlings can be adjusted and positioned by the raising force produced by the pressure difference on them. To test the performance of directional transplanting device, the quadratic regression orthogonal rotary combination bench tests were carried out, with the negative pressure value of main suction hole, rotating speed of dynamic sucker and diameter of suction hole for attitude adjustment and steering as experimental factors, the directional qualified index and missing planting index as indicators. As the results shown, factors arranged in important order were as follows: diameter of suction hole for attitude adjustment and steering, rotating speed of dynamic sucker, negative pressure value of main suction hole. The diameter of suction hole for attitude adjustment and steering was 4.5 mm, the negative pressure of main suction hole was 1.03 ~ 2.11 kPa, the rotating speed of the dynamic sucker was 4.67 ~ 6.08 r/min, the directional

收稿日期: 2021-03-02 修回日期: 2021-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(31960366)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700600 - 2017YFD0700604)、云南省重大科技专项(2016ZF001、2017ZF001、2018ZC001 - 3、2018ZC001 - 4、2018ZC001 - 5)和云南省高校工程研究中心建设计划项目

作者简介:赖庆辉(1980—),男,教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

通信作者:苏微(1979—),女,副教授,主要从事农业机械化生产和管理研究,E-mail: laisubo@163.com

qualification index was 85.87%, the missing planting index was 6.33%, which satisfied the needs of transplanting of *Panax notoginseng*.

Key words: *Panax notoginseng* seedling; directional transplanting device; adsorption posture adjustment; DEM-CFD

0 引言

目前,三七生产作业过程机械化程度较低,三七移栽环节全部采用传统的人工作业方式,其劳动强度大、作业质量差、生产效率低。因此,亟需研发满足三七种苗移栽农艺要求的移栽装置^[1-3]。在三七移栽过程中要求种苗头部朝同一方向^[4-5],这样可以提高移栽后的成活率,有利于种苗充分吸收光照和养分,同时保证三七出苗株距相同,且出苗方向一致,既可提高三七产量,又方便田间管理。由于三七移栽采用作畦裸苗移栽,故无法确定栽植后的种苗姿态。传统机械式移栽伤苗率高,难以实现定向移栽。因此,设计一种气吸式三七种苗定向移栽装置,对提高三七产量、减轻田间管理难度,实现三七规范化种植具有重要意义。

国内外关于移栽机械已有较多的报道^[6-12]。意大利 FABRIZIO 等^[13]研制的葡萄切割移栽系统和美国的 FMC 全自动蔬菜移栽机^[14-15],胡建平^[16-17]研制的自走式全自动钵苗移栽机,这些移栽机械融合了先进的自动控制技术,能完成相关作物的全自动移栽作业,但主要应用在蔬菜、烟草等适合钵苗移栽的经济作物上。三七的密集种植及移栽后剪口朝向一致的要求限制了传统移栽机械在三七种苗移栽中的应用^[18]。关于其他根茎类中药材的移栽,韩国研制了 SM-205B 型链夹式人参移栽机,但需要人工喂苗、存在苗夹夹持伤苗率高等问题^[19-20]。姜彩宇等^[21]研制了适用于畦床作业的半自动人参移栽机,其结构简单,但作业速度慢,对土地平整度要求高,且无法实现种苗定向。关于定向种植装置,澳大利亚 DISSANAYAK 等^[22]通过对银胶菊的研究发现,定向播种可有效改善银胶菊的发芽和生长状况,提高其品质及产量。王侨等^[23]基于机器视觉研制了玉米种子定向摆位装置,但其识别效率较低,同样无法满足三七移栽农艺要求。权龙哲等^[24]基于电磁振动设计了玉米种群定向整列系统,对整个系统进行了动力学分析,在无机结构辅助的情况下,其定向成功率和整列率均较高。目前,国内外尚未见三七种苗定向的相关研究报道。

本文设计一种气吸式三七种苗定向移栽装置,借助 DEM-CFD 耦合仿真计算方法,验证种苗吸附调姿的可行性,进行定向移栽装置单因素试验和二

次旋转正交组合试验,对其工作性能进行试验验证,优化主要结构参数,以期解决三七种苗机械化定向移栽的难题。

1 结构与工作原理

1.1 定向移栽装置结构

气吸式定向移栽装置试验台主要由定向移栽装置及支架组成,如图 1 所示。定向移栽装置主要由振动辅助吸苗机构、动吸盘、定吸盘、气室壳体和传动机构组成。

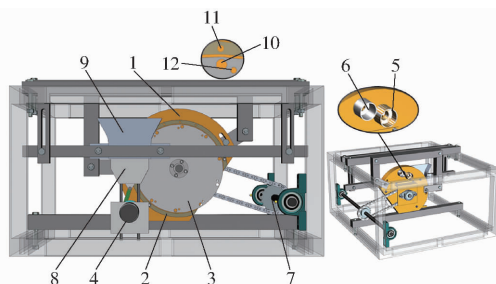


图 1 气吸式定向移栽装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of air suction directional transplanting device

1. 气室壳体 2. 定吸盘 3. 动吸盘 4. 振动辅助吸苗机构 5. 主气室接口 6. 辅助气室接口 7. 传动机构 8. 主种箱 9. 副种箱 10. 主吸孔 11. 调姿转向吸孔 12. 辅助定位吸孔

1.2 工作原理

定向移栽装置工作前,先经过分离装置^[25]将三七种苗分离后放入种箱中,振动辅助吸苗机构带动种箱上下振动,实现种苗离散化,当动吸盘转至吸苗区时,种苗主根在振动辅助吸苗机构的作用下被吸附在动吸盘的主吸孔上,完成种苗吸附过程。动吸盘带动种苗继续顺时针转动至调姿定位区时,定吸盘上均匀分布的调姿转向吸孔内气流与动吸盘表面气流形成流速差,进而产生压力差,则垂直于压力差方向产生的升力使得种苗旋转至刚好遮挡住主吸孔右下方的辅助定位吸孔,当压力差平衡,种苗静止,且剪口朝向动吸盘转动的反方向,完成调姿过程。动吸盘继续带动种苗转动至投苗区,种苗依靠自身重力掉落,完成投苗过程。

2 关键部件设计与吸附调姿过程分析

2.1 三七种苗基本参数

三七种苗含水率为 66.09% ~ 68.91%,主根平

均长度 l_1 为 23.52 mm, 主根平均直径 d_1 为 12.95 mm、剪口平均长度 l_2 为 15.50 mm、剪口平均直径 d_2 为 6.68 mm, 三七种苗尺寸如图 2 所示^[26]。

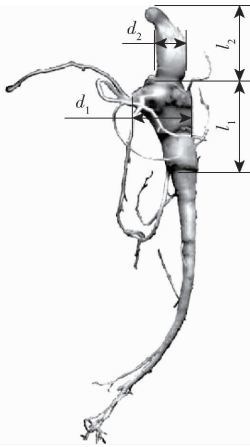


图2 三七种苗尺寸

Fig. 2 Seedling size of *Panax notoginseng*

2.2 组合吸盘设计

组合吸盘作为整个定向移栽装置的核心部件, 主要由动吸盘和定吸盘组成, 其结构如图 3 所示。

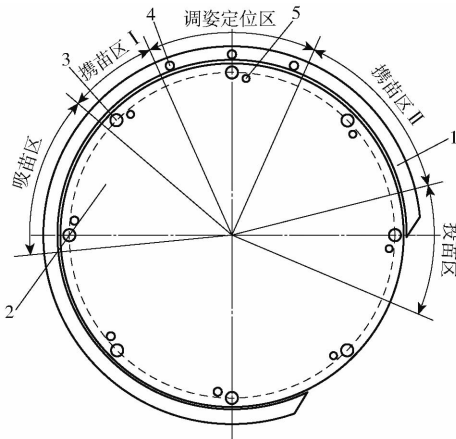


图3 组合吸盘结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of combined sucker

1. 定吸盘
2. 动吸盘
3. 主吸孔
4. 调姿转向吸孔
5. 辅助定位吸孔

2.2.1 动吸盘直径

动吸盘上设有均匀分布的主吸孔和辅助定位吸孔。一般来说, 主吸孔停留在吸苗区的时间越长, 即认为吸苗可靠性和吸附性能越高^[27], 而动吸盘参数直接决定了定向移栽装置的整体结构及气室结构尺寸。

为研究动吸盘直径对于种苗吸附过程的影响, 计算主吸孔在吸苗区停留时间 t_0 为

$$t_0 = \frac{L_0}{v_0} = \frac{\delta(10^3 D - \Delta h)}{\pi n_p (10^3 D - \Delta h)} = \frac{30\delta}{\pi n_p} \quad (1)$$

式中 L_0 ——吸苗区弧长, m

v_0 ——动吸盘主吸孔处线速度, m/s

Δh ——动吸盘直径与主吸孔分布圆直径 D_1 之差, m

D ——动吸盘直径, mm

n_p ——动吸盘转速, r/min

δ ——吸苗区角度, rad

由式(1)可知, 主吸孔在吸苗区停留时间 t_0 只与吸苗区角度及动吸盘转速有关, 而与动吸盘直径无关。因此其直径的确定只需要考虑栽植作业速度、种苗主根和剪口长度以及定向移栽装置整体结构等因素, 综合考虑后选取动吸盘直径 $D = 236$ mm。

2.2.2 主吸孔数量

在作业速度和株距确定的情况下, 适当增加动吸盘上的主吸孔数量, 有利于提高种苗吸附性能。但主吸孔数量过多时, 在风机所提供负压一定的情况下, 每个主吸孔所分得的负压会同步降低, 不利于种苗的稳定吸附。动吸盘上主吸孔数量 N 应满足^[28]

$$N = \frac{60v_m}{L_b n_p (1 - c)} \quad (2)$$

式中 v_m ——作业速度, m/s

L_b ——栽植株距, m

c ——地轮滑移系数

动吸盘直径 $D = 236$ mm, 移栽作业速度 v_m 取 0.3 m/s, 根据农艺要求, 三七种苗移栽的株距 L_b 为 0.15 m, 取动吸盘转速 $n_p = 10$ r/min, 地轮滑移系数 0.08, 综合考虑计算结果及单个主吸孔所能获得的负压, 选取主吸孔数量 $N = 10$ 。

2.2.3 主吸孔直径

主吸孔直径是影响气吸式定向移栽装置性能的重要因素之一。当主气室负压一定时, 若主吸孔直径过大, 则会造成单位面积上对种苗的吸附力不足, 容易造成漏吸, 反之, 主吸孔直径过小时, 由于总吸附面积的限制, 虽然单位面积的吸附力增加, 但是无法克服种苗自身重力同样会造成漏吸。同时, 为便于加工, 选取动吸盘上主吸孔类型为圆柱型孔, 参考气吸式排种器气吸孔的相关设计公式, 其直径 d 计算公式为

$$d = (0.6 \sim 0.7) d_1 \quad (3)$$

因此可按式(3)确定主吸孔直径为 8.6 mm。

2.3 气室设计

气室结构形式主要有圆环形和马蹄形两种, 气室内流场满足^[29]

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

式中 ω_x 、 ω_y 、 ω_z ——气室内一质点 x 、 y 、 z 方向的旋转角速度, rad/s

由式(4)~(6)可以看出,气室内压力与气室形状无关,因此假定其内部为等势流场,即气室内部压力相等。综合考虑气室的结构尺寸,选择气室形状为圆环型。为使种苗能获得较大压力差产生旋转力矩,在原有环形主气室的基础上增加环形辅助气室,其结构如图 4 所示。

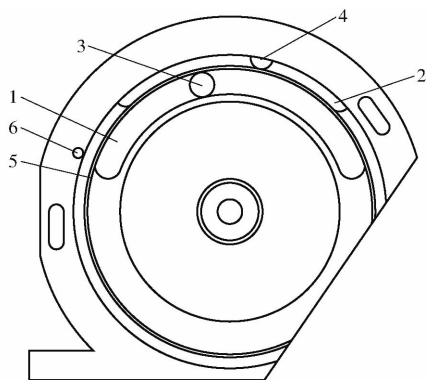


图 4 气室结构示意图

Fig.4 Schematic of air chamber structure

1. 主气室 2. 辅助气室 3. 主气室接口 4. 辅助气室接口
5. 气室隔板 6. 拨苗杆

将种苗主根吸附在主吸孔上时剪口的位置划分为 4 个区域,如图 5 所示,其中区域 I 和区域 IV 由于需要旋转的角度过大,不利于种苗在调姿定位区的旋转调姿。因此,为使种苗能够按照预期进行调姿,在气室体表面设有一个拨苗杆,使剪口位于区域 I 和区域 IV 的种苗随动吸盘转动的过程中,在拨苗杆的作用下旋转至剪口位于区域 II。同时,由于种苗主根下方的根部较长,而剪口长度较短,拨苗杆仅对剪口位于区域 I 和区域 IV 的种苗起作用,最终种苗的吸附状态应为剪口位于区域 II 和区域 III。

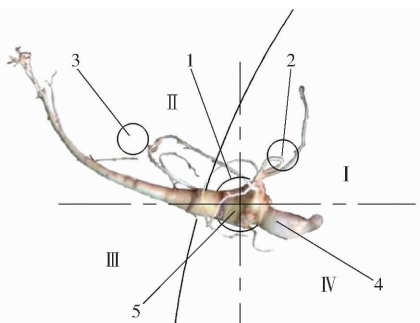


图 5 种苗主根吸附时剪口所在位置示意图

Fig.5 Schematic of position of scissor when main root of seedling was adsorbed

1. 主吸孔 2. 辅助定位吸孔 3. 拨苗杆 4. 种苗剪口 5. 种苗主根

2.4 振动辅助吸苗机构设计

三七种苗存在流动性差的问题,不利于种苗吸附。因此针对三七种苗设计出一种偏心轮式振动辅助吸苗机构,可降低种群内部摩擦力,促使单个种苗从种群中分离出来。

振动辅助吸苗机构如图 6 所示,直流电机的转动带动偏心凸轮逆时针旋转,在连杆长度及直线轴承的限位作用下,连杆带动种箱上下往复振动,从而增大种群扰动。

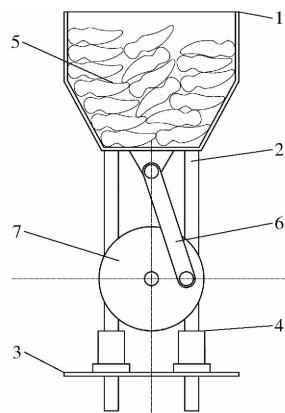


图 6 偏心轮式振动辅助吸苗机构结构示意图

Fig.6 Structural diagram of eccentric wheel vibration assisted seedling suction mechanism

1. 种箱 2. 圆轴 3. 架板 4. 直线轴承 5. 三七种苗种群 6. 连杆 7. 偏心凸轮

计算出三七种苗在竖直方向速度 v_y 和加速度 a_y 以及种箱加速度 a' 分别为

$$v_y = A k \sin \theta \cos (k t) \quad (7)$$

$$a_y = -A k^2 \sin \theta \sin (k t) \quad (8)$$

$$a' = 2A \pi^2 f^2 (\cos (2 \pi f t) + \lambda \cos (2 \pi f t)) \quad (9)$$

式中 f ——振动频率, Hz

A ——振动幅度, m

θ ——该点振动方向与水平方向的夹角, ($^\circ$)

k ——振动圆频率, rad/s

t ——振动时间, s λ ——常数

为了使种群处于“沸腾”状态,则振动板加速度的最大值应满足

$$\max (a') > g \quad (10)$$

式中 g ——重力加速度, m/s^2

由式(9)、(10)可知,振动频率和振动幅度会影响种群的运动状态,因此引入抛掷指数,抛掷指数 K_p 与振动频率 f 、振动幅度 A 之间的关系为

$$K_p = \frac{4 \pi^2 A f^2 \sin \theta}{g} \quad (11)$$

当 $K_p = 1$ 时,种箱最大加速度等于重力加速度,种苗在种箱中处于临界状态;当 $K_p > 1$ 时,振动板最大加速度大于重力加速度,种苗被分离开,且连续被

抛起^[30]。因此令 $K_p > 1$, 经过计算后选取振动频率为 5 Hz, 振动幅度为 25 mm 时, 种群离散度较高, 利于种苗在吸苗区的吸附。

2.5 吸附过程分析

为研究吸附过程中种苗的受力情况, 建立种苗吸附模型, 种苗位于携苗区 I 时受力情况如图 7 所示

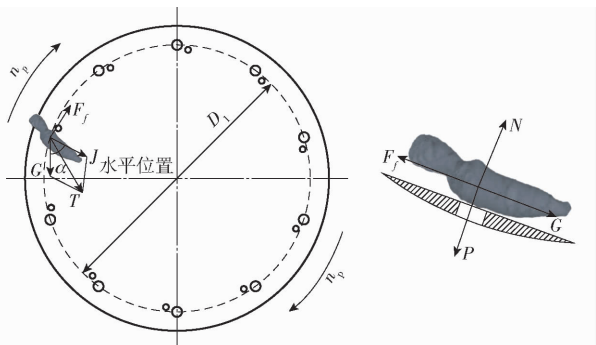


图 7 携苗区 I 种苗受力情况分析

Fig. 7 Analysis on stress of the first seedling in seedling carrying area

当动吸盘转动时, 种苗受到的外力主要有种苗自身重力 G 、吸附力 P 、旋转惯性力 J , 动吸盘对种苗的支持力 N 以及种苗与动吸盘之间的摩擦力 F_f , 种苗在振动辅助吸苗机构作用下离开种群开始移动时所产生的摩擦力忽略不计。其中惯性力 J 计算式为

$$J = m r \omega^2 \quad (12)$$

式中 m ——种苗质量, kg

r ——主吸孔中心到动吸盘转动轴的距离, m

ω ——动吸盘转动角速度, rad/s

吸附力 P 计算式为

$$P = \frac{\pi d^2}{4} (p_1 - p_2) \quad (13)$$

式中 p_1 ——标准大气压, kPa

p_2 ——主吸孔负压, kPa

重力 G 与惯性力 J 的夹角为 α , 合力为 T , 其计算式为

$$T = \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ \cos \alpha} \quad (14)$$

为了使种苗被稳定吸附在主吸孔上, 应满足

$$\frac{P k_1 d}{2} \geq T b \quad (15)$$

式中 b ——种苗重心与动吸盘的距离, mm

k_1 ——种苗重心距主吸孔中心距离与主吸孔直径的比值

已知种苗重心距主吸孔中心距离为 3 mm, 计算出 $k_1 = 0.35$, 取主吸孔负压为 1 kPa, 代入式(15)成立, 则在此条件下种苗能被稳定吸附在主吸孔上。

2.6 调姿过程分析

当动吸盘开始转动时, 种苗受到的惯性力 J 大

小保持不变, 但其方向在不断改变, 而重力 G 的大小和方向都保持不变, 由图 5 可以得出, 种苗在吸苗区时吸附力达到最大值, 随后逐渐减小, 在到达动吸盘顶部时所受的吸附力最小, 因此, 将调姿定位区设计至动吸盘顶端。

种苗位于调姿定位区时, 动吸盘上一点处压力为 p_3 , 其大小为大气压力, 调姿转向吸孔内压力为 p_4 。根据伯努利原理, 即截面积越小, 流速越大, 截面积越大, 流速越小, 因此流速差导致了压力差, 则垂直于压力差方向产生升力, 进而产生旋转力矩使种苗开始旋转, 当种苗旋转至根部刚好遮挡住辅助定位吸孔内的气流时, 根据连续性原理, 即流速大的地方压力小, 流速小的地方压力大, 则 p_3 与 p_4 之间压力平衡, 种苗静止, 调姿完成, 种苗调姿原理如图 8 所示。

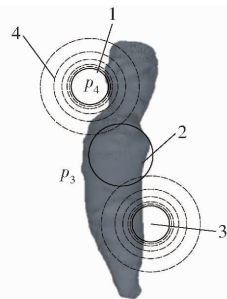


图 8 调姿原理示意图

Fig. 8 Schematic of attitude adjustment principle

1. 调姿转向吸孔 2. 主吸孔 3. 辅助定位吸孔 4. 等势线

种苗最终的吸附状态有 3 种, 如图 9 所示, 其中, 吸附状态 3 为理想位姿, 不需要对其进行调姿; 吸附状态 1 和吸附状态 2 均是由压力差产生升力 F_{L1} 和 F_{L2} , 进而产生旋转力矩 M_1 和 M_2 。当种苗处于吸附状态 1 时, F_{L1} 产生向下力矩, F_{L2} 产生向上力矩, 合力矩使种苗逆时针旋转; 当种苗处于吸附状态 2 时, F_{L1} 产生向上力矩, F_{L2} 产生向下力矩, 合力矩使种苗顺时针旋转。

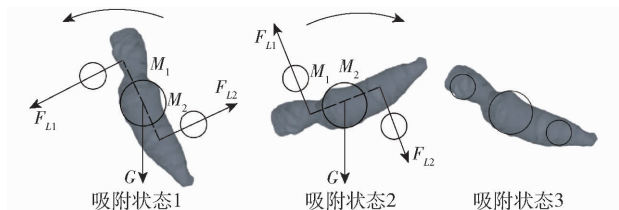


图 9 种苗吸附状态示意图

Fig. 9 Schematic of seedling adsorption state

根据伯努利方程, p_3 与 p_4 之间应满足

$$p_3 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_4 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (16)$$

式中 v_1 ——空气流速, m/s

v_2 ——调姿转向吸孔内流体流速, m/s

ρ ——空气密度, kg/m³

h_1 ——动吸盘上一点距基准面的高度, m

h_2 ——调姿转向吸孔中心距基准面高度, m

为方便计算, 忽略动吸盘上一点距基准面与调姿转向吸孔中心距基准面之间的高度差, 则所产生的压力差为

$$p_3 - p_4 = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2) \quad (17)$$

根据式(17)种苗所获得的升力 F_s 计算式为

$$F_s = S(p_3 - p_4) = \frac{1}{2}\rho S(v_1^2 - v_2^2) \quad (18)$$

式中 S ——种苗被吸附在调姿转向吸孔上的作用面积, m^2

3 DEM - CFD 吸孔耦合仿真验证与分析

3.1 仿真模型建立

以云南文山三七种植基地的三七种苗为建模对象, 选取与种苗平均三轴尺寸相接近的三七种苗, 利用三维激光扫描得到三七种苗的三维空间点云数据, 运用 Geomagic studio 软件后处理获得三七种苗网格几何模型^[31]。将模型导入 EDEM 软件并利用非球颗粒快速填充功能, 获得三七种苗离散元模型, 如图 10 所示。



图 10 三七种苗实物图与离散元模型

Fig. 10 Physical picture and discrete element model of *Panax notoginseng* seedlings

利用 UG 软件建立吸孔计算域的仿真模型, 导入到 EDEM 软件中, 对其用 ICEM - CFD 软件划分六面体非结构网格, 设定压力出入口, 其余边界定义为壁面, 之后导入 Fluent 软件中, 如图 11 所示。

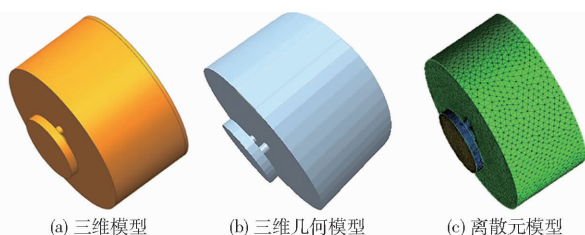


图 11 吸孔计算域仿真模型

Fig. 11 Simulation model of calculation domain of profile hole

3.2 仿真参数确定

经种苗接触参数标定后确定种苗-种苗和种苗-吸孔计算域模型的接触参数, 三七种苗和不锈钢本征参数如表 1 所示^[26]。

表 1 三七种苗仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of *Panax notoginseng* seedlings

参数	种苗	不锈钢
泊松比	0.402	0.300
剪切模量/Pa	2.29×10^6	7.00×10^{10}
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.05	7.80
恢复系数(与种苗)	0.293	0.497
静摩擦因数(与种苗)	0.200	0.693
滚动摩擦因数(与种苗)	0.70	0.16

3.3 吸孔吸附种苗过程模拟

为了验证种苗旋转调姿的可行性, 对应调姿过程分析中的前两种吸附状态, 进行了基于欧拉(Eulerian)模型^[32]的吸孔吸附种苗气固两相流耦合仿真, 如图 12 所示。

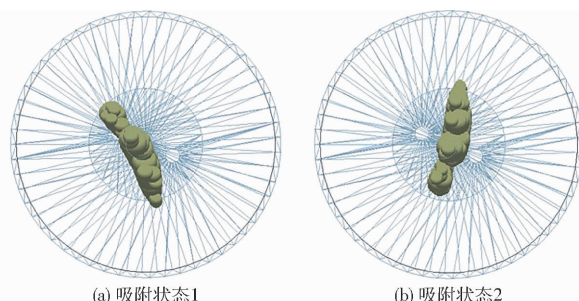


图 12 种苗吸附状态仿真

Fig. 12 Simulation of seedling adsorption states

种苗由设置在气流入口处的颗粒工厂生成, 生成的种苗在竖直方向以速度 $2 m/s$ 及自身重力的作用下进入吸孔计算域模型内。设置压力入口边界条件为 $0 kPa$, 主吸孔压力出口 1 边界条件为 $2 kPa$, 调姿转向吸孔压力出口 2 边界条件为 $1.3 kPa$ 。种苗在压力差的作用下被吸附在主吸孔上并进行旋转调姿, 在此过程中 EDEM 软件获取组成种苗颗粒的实时位置与接触信息, 将所获取的信息通过耦合接口传递到 Fluent 软件中, 利用 Fluent 软件根据颗粒场对流场的影响情况进行计算, 最后将所获得的流场信息传递到 EDEM 软件中, 模拟流场对颗粒体的影响情况, 气固双向耦合仿真中上述过程依次循环。仿真过程中设置 EDEM 时间步长为 $1 \times 10^{-5} s$, Fluent 时间步长为 $5 \times 10^{-4} s$, 为 EDEM 的整数倍; 设置 Fluent 计算步数为 6 000 步, 每个时间步长仿真迭代 50 次; 为尽可能详细获取颗粒运动信息, 在 EDEM 和 Fluent 内, 每 $0.002 s$ 保存一次数据。根据组合吸盘的设计, 取主吸孔与辅助定位吸孔夹角为

23°,主吸孔与调姿转向吸孔夹角分别为20°、25°和30°时进行仿真,探寻能使种苗进行调姿定位的临界角。

3.4 仿真结果分析

根据仿真结果,分析夹角不同时种苗的调姿和定向效果。主吸孔与调姿转向吸孔夹角为20°时,位于吸附状态1和吸附状态2的种苗均不会发生旋转;夹角为25°时,位于吸附状态2的种苗会发生旋转,而位于吸附状态1的种苗有开始旋转的趋势,气流仅对其产生了一定的扰动作用;夹角为30°时,位于吸附状态1和吸附状态2的种苗均发生了旋转,且在辅助定位吸孔的作用下,达到理想位姿后静止,如图13、14所示。

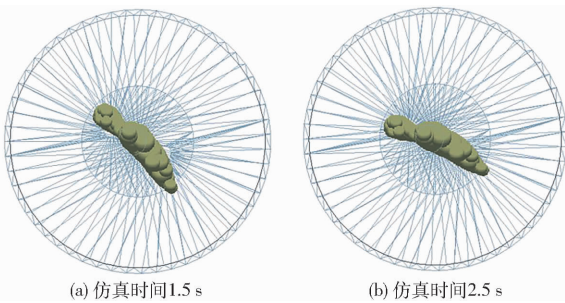


图13 主吸孔与调姿转向吸孔夹角为30°吸附状态1仿真结果

Fig. 13 Simulation results of adsorption state 1 when angle between main suction hole and attitude adjustment steering suction hole was 30°

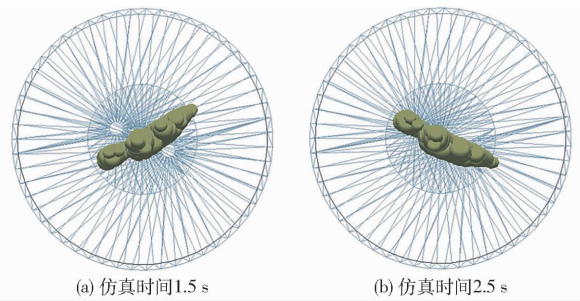


图14 主吸孔与调姿转向吸孔夹角为30°吸附状态2仿真结果

Fig. 14 Simulation results of adsorption state 2 when angle between main suction hole and attitude adjustment steering suction hole was 30°

摄调姿定向情况,在定向移栽装置稳定作业阶段连续测量200棵三七种苗的定向移栽效果为一组试验,每组试验重复3次取平均值。

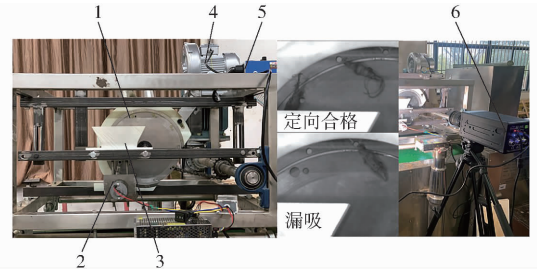


图15 气吸式定向移栽装置试验台

Fig. 15 Test bed of air suction directional transplanting device

1. 气吸式定向移栽装置主体
2. 振动辅助吸苗机构
3. 副种箱
4. 辅助风机
5. 风机调速器
6. 高速摄影装置

4 性能试验与分析

4.1 试验材料与仪器设备

试验采用云南文山三七种植基地的三七种苗,根据国际标准 ISO 20408《中医药——三七种子和种苗》对三七种苗进行分级,挑选出一、二级种苗,试验地点为昆明理工大学农业与食品学院。试验采用自制定向移栽装置试验台,如图15所示,试验过程中,定向移栽装置固定安装在 JPS-12 型视觉排种器性能试验台上,并利用合肥富煌君达高科信息技术有限公司提供的千眼狼 5F01 型高速摄像机拍

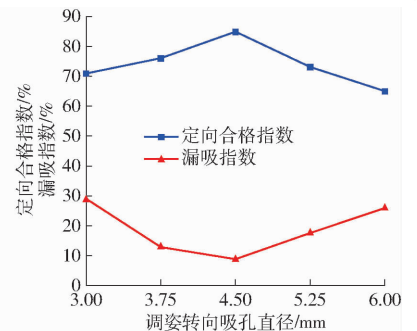
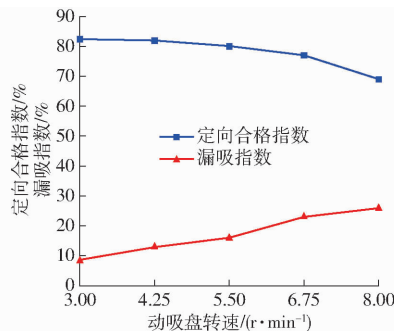
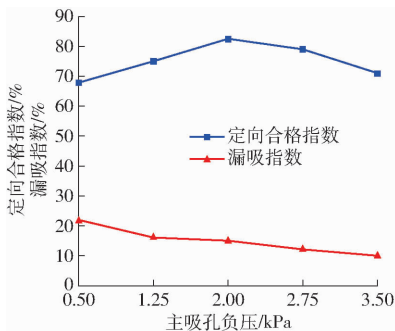


图16 单因素试验结果

Fig. 16 Single factor test results

4.2 单因素试验

根据预试验结果,以定向合格(主吸孔吸取一棵种苗,使其剪口朝向动吸盘转动的反方向且种苗剪口与主根连线方向与水平方向夹角为20°~30°)指数和漏吸(主吸孔没有吸附到种苗)指数为试验指标,选取对试验指标影响较为显著的主吸孔负压、动吸盘转速和调姿转向吸孔直径为试验因素,进行单因素试验,试验结果如图16所示。随主吸孔负压的增大,定向合格指数呈先升高后降低趋势,漏吸指数呈逐渐减小趋势。主气室负压在2 kPa时定向合

格指数达到最高,为82.33%。随动吸盘转速的增大,定向合格指数呈逐渐下降趋势,漏吸指数呈逐渐增大趋势。动吸盘转速在5.5 r/min以下时定向合格指数大于80%。随调姿转向吸孔直径的增大,定向合格指数呈先升高后降低趋势,漏吸指数呈先降低后升高趋势。调姿转向吸孔直径在4.5 mm时定向合格指数达到最高,为84.67%。

4.3 二次回归旋转正交试验

为进一步研究主吸孔负压、动吸盘转速和调姿转向吸孔直径及各因素二次项和交互项对定向移栽装置工作性能的影响,基于单因素试验的结果采用二次回归旋转正交组合试验研究定向移栽装置最佳作业性能参数。试验因素编码如表2所示,试验设计方案与结果如表3所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为主吸孔负压、动吸盘转速和调姿转向吸孔直径的编码值,试验指标分别为定向合格指数 Y_1 和漏吸指数 Y_2 。

表2 试验因素编码

Tab.2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	主吸孔负压/ kPa	动吸盘转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	调姿转向吸孔 直径/mm
-1.682	1.0	4.0	3.5
-1	1.4	4.6	3.9
0	2.0	5.5	4.5
1	2.6	6.4	5.1
1.682	3.0	7.0	5.5

4.4 试验结果分析

4.4.1 定向合格指数 Y_1

利用Design-Expert软件对定向合格指数试验数据进行方差分析,回归方程的显著性检验结果如表4所示。定向合格指数模型 Y_1 的拟合度极显著($P < 0.01$)。失拟项 $P = 0.2245$,不显著,说明无其他影响指标的主要因素。各因素对定向合格指数影响由大到小依次为调姿转向吸孔直径 X_3 、主吸孔负压 X_1 、动吸盘转速 X_2 。动吸盘转速与调姿转向吸孔直径的交互项(X_2X_3)以及主吸孔负压与动吸盘转速二次项(X_1^2 、 X_2^2)影响显著,剔除交互项中不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 81.49 - 1.76X_1 - 1.68X_2 - 2.15X_3 - 1.88X_2X_3 - 2.39X_1^2 - 2.11X_2^2 - 1.33X_3^2 \quad (19)$$

4.4.2 漏吸指数 Y_2

利用Design-Expert软件对漏吸指数试验数据进行方差分析,回归方程的显著性检验结果如表4所示。漏吸指数模型 Y_2 的拟合度极显著($P < 0.01$)。失拟项 $P = 0.0964$,不显著,说明无其他影

表3 试验方案与结果

Tab.3 Experiment design and results

序号	因素			试验指标	
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	-1	80.13	11.33
2	1	-1	-1	78.67	8.67
3	-1	1	-1	81.33	16.83
4	1	1	-1	75.87	4.33
5	-1	-1	1	78.83	8.33
6	1	-1	1	74.83	6.17
7	-1	1	1	72.13	21.67
8	1	1	1	64.87	22.33
9	-1.682	0	0	77.17	13.33
10	1.682	0	0	73.71	11.67
11	0	-1.682	0	77.63	7.17
12	0	1.682	0	74.87	18.33
13	0	0	-1.682	81.57	8.33
14	0	0	1.682	79.17	16.33
15	0	0	0	81.87	9.33
16	0	0	0	82.87	8.33
17	0	0	0	80.33	10.83
18	0	0	0	84.17	7.17
19	0	0	0	79.33	6.33
20	0	0	0	80.67	9.67
21	0	0	0	82.87	8.17
22	0	0	0	83.17	7.83
23	0	0	0	77.87	10.17

响指标的主要因素。各因素对漏吸指数影响由大到小依次为动吸盘转速 X_2 、调姿转向吸孔直径 X_3 、主吸孔负压 X_1 。主吸孔负压与调姿转向吸孔直径(X_1X_3)、动吸盘转速与调姿转向吸孔直径的交互项(X_2X_3)以及主吸孔负压、动吸盘转速与调姿转向吸孔直径的二次项(X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2)影响显著,剔除交互项中不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 8.65 - 1.42X_1 + 3.62X_2 + 2.25X_3 + 1.71X_1X_3 + 3.54X_2X_3 + 1.30X_1^2 + 1.39X_2^2 + 1.24X_3^2 \quad (20)$$

4.5 各因素交互作用对定向合格指数的影响

通过对试验数据进行处理,可得主吸孔负压、动吸盘转速、调姿转向吸孔直径交互作用对定向合格指数 Y_1 的影响,其响应曲面如图17所示。

4.5.1 主吸孔负压和动吸盘转速的交互作用

由图17a可知,在主吸孔负压为1.58~1.82 kPa,动吸盘转速为4.81~5.19 r/min时,定向合格指数较高。主吸孔负压一定时,随着动吸盘转速的增大,定向合格指数呈先上升后下降的趋势。动吸盘转速一定时,随着主吸孔负压的增加,定向合格指数呈先上升后下降的趋势。

4.5.2 主吸孔负压和调姿转向吸孔直径的交互作用

由图17b可知,在主吸孔负压为1.08~2.41 kPa,

表4 定向合格指数与漏吸指数的方差分析

Tab.4 Analysis of variance of qualified index and leakage index

方差来源	定向合格指数				漏吸指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	347.47	9	7.06	0.001 0*	486.57	9	15.00	<0.000 1**
X_1	42.17	1	7.71	0.015 7*	27.71	1	7.69	0.015 9*
X_2	38.40	1	7.02	0.020 0*	178.90	1	49.62	<0.000 1**
X_3	63.19	1	11.55	0.004 8**	67.44	1	19.26	0.000 7**
X_1X_2	6.59	1	1.20	0.292 4	6.16	1	1.71	0.213 8
X_1X_3	2.35	1	0.43	0.523 3	23.32	1	6.47	0.024 5*
X_2X_3	28.35	1	5.18	0.040 4*	100.39	1	27.85	0.000 1**
X_1^2	90.95	1	16.62	0.001 3**	26.80	1	7.44	0.017 3*
X_2^2	70.48	1	12.88	0.003 3**	30.58	1	8.48	0.012 1*
X_3^2	6.70	1	1.22	0.288 5	24.38	1	6.76	0.022 0*
残差	71.14	13			46.87	13		
失拟	37.40	5	1.77	0.224 5	29.72	5	2.77	0.096 4
误差	33.74	8			17.14	8		
总和	418.61	22			533.44	22		

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

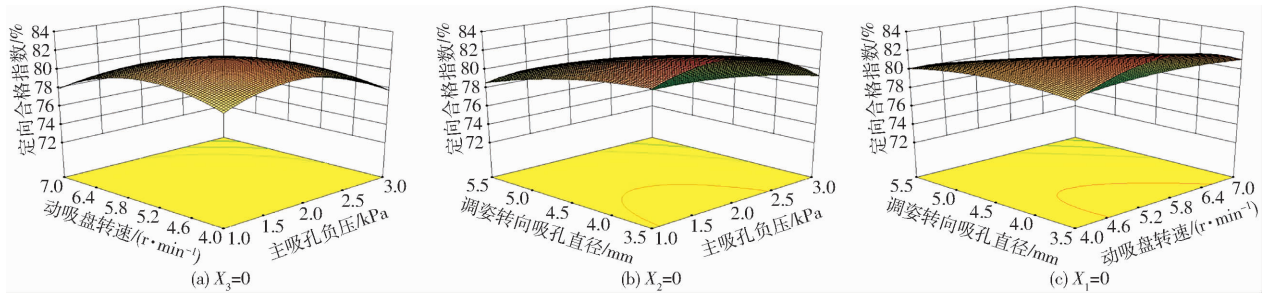


图17 因素交互作用影响定向合格指数的响应曲面

Fig.17 Interaction of factors affecting response surface result of directional conformity index

调姿转向吸孔直径为 3.50 ~ 4.35 mm 时,定向合格指数较高。主吸孔负压一定时,随着调姿转向吸孔直径的增大,定向合格指数呈下降的趋势。调姿转向吸孔直径一定时,随着主吸孔负压的增大,定向合格指数呈先上升后下降的趋势。

4.5.3 动吸盘转速和调姿转向吸孔直径的交互作用

由图 17c 可知,在动吸盘转速为 4.58 ~ 6.56 r/min,调姿转向吸孔直径为 3.50 ~ 4.29 mm 时,定向合格指数较高。动吸盘转速一定时,随着调姿转向吸孔直径的增大,定向合格指数呈下降趋势。调姿转向吸孔直径一定时,随着动吸盘转速的增大,定向合格指数呈先上升后下降的趋势。

4.6 参数优化

为确定最佳参数取值范围,设定定向合格指数大于 81%,漏吸指数小于 9%,设置调姿转向吸孔直径为 4.5 mm,优化所得最佳参数范围如图 18 所示,得到主吸孔负压范围为 1.03 ~ 2.11 kPa,动吸盘转速范围为 4.67 ~ 6.08 r/min。

为验证优化分析结果,在相同试验条件下,选取调姿转向吸孔直径为 4.5 mm,主吸孔负压为 1.03 ~

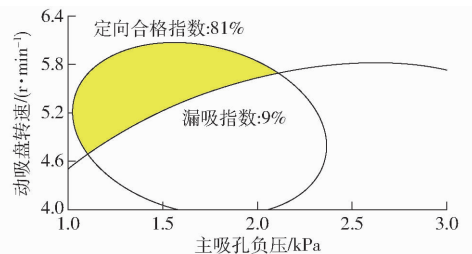


图18 参数优化分布

Fig.18 Parameter optimization distribution map

2.11 kPa、动吸盘转速为 4.67 ~ 6.08 r/min 时进行 3 次重复验证试验,可得该条件下定向移栽装置平均定向合格指数为 85.87%,平均漏吸指数为 6.33%。验证试验结果表明,优化结果可靠。

5 结论

(1)设计了气吸式三七种苗定向移栽装置,通过理论计算和分析确定了动吸盘及振动辅助吸苗机构的基本参数,确定动吸盘直径为 236 mm,主吸孔数量为 10 个,主吸孔直径为 8.6 mm,振动辅助吸苗机构振动频率为 5 Hz,振动幅度为 25 mm。

(2)对种苗吸附和调姿过程进行分析,得出当

主吸孔负压为 1 kPa 时,种苗能被稳定吸附在主吸孔上,从而验证了种苗因受压力差而在升力作用下产生旋转力矩的理论可行性。建立了种苗离散元模型和型孔计算域仿真模型,借助 DEM-CFD 气固两相流耦合仿真验证了种苗在升力作用下能达到理想位姿并定位的可行性,最后确定了主吸孔与辅助定位吸孔夹角为 23° 、主吸孔与调姿转向吸孔夹角为 30° 时,种苗达到调姿定位的临界角度。进行了单因

素试验,为正交试验选取了试验水平中心点。

(3)以主吸孔负压、动吸盘转速和调姿转向吸孔直径为试验因素,以定向合格指数和漏吸指数为试验指标,进行了二次回归旋转正交组合试验,结果表明,当调姿转向吸孔直径为 4.5 mm、主吸孔负压为 1.03 ~ 2.11 kPa、动吸盘转速为 4.67 ~ 6.08 r/min 时,定向移栽装置平均定向合格指数为 85.87%,平均漏吸指数为 6.33%,满足三七移栽要求。

参 考 文 献

- [1] 唐国政. 三七产业发展的情报分析研究[D]. 昆明:云南大学, 2018.
TANG Guozheng, Information analysis based on the development of the *Panax notoginseng* industry[D]. Kunming: Yunnan University, 2018. (in Chinese)
- [2] 阙祖亮, 庞丹清, 陈勇, 等. 三七的种植及采收加工现状[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(4): 41-45.
QUE Zuliang, PANG Danqing, CHEN Yong, et al. Planting, harvesting and processing status of *Panax notoginseng* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(4): 41-45. (in Chinese)
- [3] 支世敏. 三七发展趋势分析[J]. 中国现代中药, 2014, 16(8): 662-665.
ZHI Shimin. Analysis on the development trend of *Panax notoginseng* [J]. Modern Chinese Medicine, 2014, 16(8): 662-665. (in Chinese)
- [4] 陆家文. 三七实用栽培技术[J]. 云南农业, 2016(11): 28-30.
LU Jiawen. Practical cultivation techniques of *Panax notoginseng*[J]. Yunnan Agriculture, 2016(11): 28-30. (in Chinese)
- [5] 占才学. 三七种苗定向移栽机构设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
ZHAN Caixue. Design and experiment of directional transplanting mechanism of *Panax notoginseng*[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] TSUGA K. Development of fully automatic vegetable transplanter[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2000, 34(1): 21-28.
- [7] 卢勇涛, 李亚雄, 刘洋, 等. 国内外移栽机及移栽技术现状分析[J]. 新疆农机化, 2011(3): 29-32.
LU Yongtao, LI Yaxiong, LIU Yang, et al. Analysis of transplanter and transplanting technology at home and abroad[J]. Agricultural Mechanization in Xinjiang, 2011(3): 29-32. (in Chinese)
- [8] 尚书旗, 隋爱娜, 张子华. 国外钵苗栽植机的几种类型及性能分析[J]. 粮油加工与食品机械, 1998(1): 28-30.
SHANG Shuqi, SUI Aina, ZHANG Zihua. Several types and performance analysis of foreign potted seedling planters [J]. Grain and Oil Processing and Food Machinery, 1998(1): 28-30. (in Chinese)
- [9] 孙裕晶, 马成林, 周德义. 组合振动导苗筒式移栽机研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 141-142.
SUN Yujing, MA Chenglin, ZHOU Deyi. Research on combined vibration seedling guide tube transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 141-142. (in Chinese)
- [10] 周德义, 孙裕晶, 马成林, 等. 组合振动导苗筒式移栽机栽植株距随机误差分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 71-73.
ZHOU Deyi, SUN Yujing, MA Chenglin, et al. Analysis on random errors of seedling distance in row for transplanter with combined guiding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 71-73. (in Chinese)
- [11] 周福君, 杜佳兴, 那明君. 玉米纸筒钵苗移栽机的研制与试验[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(3): 110-116.
ZHOU Fujun, DU Jiaying, NA Mingjun. Design and field experiment of corn paper-pot seedling transplanter [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(3): 110-116. (in Chinese)
- [12] 包春江, 李宝筏, 包文育, 等. 水稻钵苗空气整根气吸式有序移栽机的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 130-134.
BAO Chunjiang, LI Baofu, BAO Wenyu, et al. Air-sucking sequential rice transplanter for air-pruning tray grown seedlings [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 130-134. (in Chinese)
- [13] FABRIZIO M A C. Highly automated vine cutting transplanter based on DGNS - RTK technology integrated with hydraulic devices[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(1): 20-29.
- [14] EDATHIPARAMBIL V T. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 54(4): 181-186.
- [15] KUMAR G V P, RAHEMAN H. Vegetable transplanters for use in developing countries a review[J]. International Journal of Vegetable Science, 2008, 14(3): 232-255.
- [16] 付鹏洋, 胡建平, 刘发, 等. 齿轮连杆凸轮组合式栽植机构仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 52-56.
FU Pengyang, HU Jianping, LIU Fa, et al. Simulation analysis and experiment for gear-linkage-cam combination planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 52-56. (in Chinese)
- [17] 胡建平, 常航, 杨丽红, 等. 自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 78-84.
HU Jianping, CHANG Hang, YANG Lihong, et al. Design and experiment of control system for automatic transplanter picking up and spacing casting whole row of seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49

- (6):78-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.009. (in Chinese)
- [18] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44-53. YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):44-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [19] 刘文亮,张亮,马巍,等. 人参移栽机的改进设计[J]. 农机使用与维修, 2018(6): 11-13. LIU Wenliang, ZHANG Liang, MA Wei, et al. Improved design of ginseng transplanter [J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2018(6): 11-13. (in Chinese)
- [20] 张亮,刘文亮,刘枫,等. 人参移栽机国内外技术对比分析[J]. 内燃机与配件, 2017(19): 120-121. ZHANG Liang, LIU Wenliang, LIU Feng, et al. Comparative analysis of ginseng transplanter technology at home and abroad [J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2017(19): 120-121. (in Chinese)
- [21] 姜彩宇,肖戟,杨光,等. 人参移栽机关键部件设计及试验[J]. 农业与技术, 2015, 35(9): 44-45. JIANG Caiyu, XIAO Ji, YANG Guang, et al. Design and experiment of key components of ginseng transplanter [J]. Agriculture & Technology, 2015, 35(9): 44-45. (in Chinese)
- [22] DISSANAYAKE P, GEORGE D L, GUPTA M L. Direct seeding as an alternative to transplanting for guayule in southeast Queensland[J]. Industrial Crops and Products, 2008, 27(3): 393-399.
- [23] 王侨,陈兵旗,寇春荣,等. 基于机器视觉的玉米种粒定向定位摆放装置研制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 19-28. WANG Qiao, CHEN Bingqi, KOU Chunrong, et al. Development of corn seed directional positioning machine based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 19-28. (in Chinese)
- [24] 权龙哲,奚德君,肖云瀚,等. 基于电磁振动的玉米粒群定向排列系统的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 59-66. QUAN Longzhe, XI Dejun, XIAO Yunhan, et al. Parameters optimization and experiment of oriented alignment system for maize seed group based on electromagnetic vibration[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 59-66. (in Chinese)
- [25] 赖庆辉,袁海阔,胡子武,等. 滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计及试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 121-129. LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and simulation of seedling separation device of *Panax notoginseng* seedlings based on roller zigzag mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):121-129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180414&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.014. (in Chinese)
- [26] 赖庆辉,袁海阔,胡子武,等. 三七种苗物料特性研究及离散元法参数标定[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2018, 39(2): 74-79. LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Experimental study of physical characteristics and parameters calibration of *Panax notoginseng* seedling[J]. Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences), 2018, 39(2): 74-79. (in Chinese)
- [27] 王凤花,孙凯,赖庆辉,等. 单行气吸式微型薯精密播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 66-76. WANG Fenghua, SUN Kai, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of minituber precision single-row air-suction planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):66-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.007. (in Chinese)
- [28] 陈志. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [29] 王晓东,王卫兵,马华永,等. 垂直圆盘气吸式排种器的理论分析与研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 75-78. WANG Xiaodong, WANG Weibing, MA Huayong, et al. Theoretical analysis and research of vertical disc air-suction metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 75-78. (in Chinese)
- [30] 陈进,李耀明. 气吸振动式播种试验台内种子运动规律的研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 47-50. CHEN Jin, LI Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 47-50. (in Chinese)
- [31] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123-132. YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):123-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.014. (in Chinese)
- [32] 史嵩,刘虎,位国建,等. 基于DEM-CFD的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54-66. SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):54-66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.006. (in Chinese)