doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.025

基于力矩不平衡效应的三七种苗定向移栽装置设计与试验

苏 微[1] 马 遥[1] 赖庆辉[2] 张 弦[1] 王凤花[1]

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500；2. 云南师范大学能源与环境科学学院，昆明 650091)

摘要：针对传统自动移栽装置难以实现三七种苗精准调姿定向等问题，利用高速摄影分析三七种苗不同释放姿态下种苗姿态变化规律，设计了一种基于力矩不平衡效应的三七种苗定向移栽装置，试验结果表明，力矩不平衡效应下种苗剪口呈向下趋势，对种苗掉落过程进行受力分析，揭示了力矩不平衡效应对种苗姿态变化的影响规律；通过理论计算与仿真分析对定向装置关键部件进行设计，建立了种苗调姿定向过程动力学模型，揭示了种苗定向机理；为优化定向装置工作性能，以输送速度、水平间距和垂直高度为试验因素，以定向合格指数为指标，进行单因素试验和Box-Behnken试验。试验结果表明，影响定向合格指数的主次顺序为输送速度、水平间距、垂直高度，当输送速度为90.564~110.468 mm/s、水平间距为24.931~27.701 mm、垂直高度为8.5 mm时，定向合格指数大于85%，结果满足三七种苗移栽要求。

关键词：三七种苗；定向移栽；力矩不平衡；高速摄影；姿态变化

中图分类号：S223.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S1-0237-09

Design and Experiment of Directional Transplanting Device for *Panax notoginseng* Seedlings Based on Torque Imbalance Effect

SU Wei[1] MA Yao[1] LAI Qinghui[2] ZHANG Xian[1] WANG Fenghua[1]

(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*
2. *Faculty of Energy and Environmental Sciences, Yunnan Normal University, Kunming* 650091, *China*)

Abstract: Addressing the relatively slow progress in research on mechanized transplanting technology for *Panax notoginseng* seedlings in China, as well as the difficulty of traditional automatic transplanting devices in achieving precise posture adjustment and orientation for these seedlings, a Panax notoginseng seedling oriented transplanting device based on the moment imbalance effect is proposed. High speed photography is utilized to analyze the changes in seedling posture under different release attitudes. Experimental results demonstrate that, under the influence of the moment imbalance effect, the cutting edge of the seedlings tends to face downwards. A force analysis of the seedling's falling process is conducted, revealing the influence pattern of the moment imbalance effect on the seedlings' posture changes. Through theoretical calculations and simulation analyses, the key components of the orientation device are designed, and a dynamic model of the seedling posture adjustment and orientation process is established, uncovering the mechanism of seedling orientation. To optimize the performance of the orientation device, single factor experiments and Box-Behnken experiments are conducted, with conveying speed, horizontal spacing, and vertical height as the experimental factors, and the orientation qualification index as the experimental indicator. The experimental results indicate that the primary and secondary order of influence on the orientation qualification index is conveying speed, horizontal spacing, and vertical height. When the conveying speed ranges from 90.564 mm/s to 110.468 mm/s, the horizontal spacing was between 24.931 mm and 27.701 mm, and the vertical height was 8.5 mm, the orientation qualification index exceeds 85%. Parameter optimization is then carried out, and the optimized results meet the requirements for *Panax notoginseng* seedling transplanting.

Key words: *Panax notoginseng* seedlings; directional transplanting; torque imbalance; high-speed photography; posture change

收稿日期：2024-07-18 修回日期：2024-09-08

基金项目：国家自然科学基金项目(52165031)

作者简介：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

通信作者：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

0 引言

三七(*Panax notoginseng*)是我国名贵中药材[1]。云南省文山市是我国三七主要产区,2023年文山市三七种植面积为1530.26 km^2,产量3×10^5 t,三七产业综合产值达到351.51亿元,较上年增加13.3%[2]。定向移栽是指在普通移栽技术要求基础上,控制种苗种植方向,使种苗按照与垄向垂直方向有序伸展,能够提高植株对光能的利用率、增强田间的通风效果以及增加种植密度[3-4]。

在农业机械化与智能化发展中,移栽机械作为关键农业技术装备,受国内外学者的广泛关注。韩国实业有限公司研制的SM-205B型人参移栽机[5],印度SHARMA等[6-7]研制了半自动移栽机蔬菜穴苗移栽机构,美国KUMAR等[8]研制了FMC全自动蔬菜移栽机。俞高红等[9-10]针对蔬菜、水稻研制了小株距高密度的蔬菜移栽机构以及夹钵式水稻钵苗移栽机构,这类移栽机主要适用于蔬菜等钵苗移栽。王军增等[11]设计了垄畦覆膜种行覆土党参种苗移栽机,王徐建[12]设计了一种甘草倾斜移栽机。而目前市面上裸苗类移栽机多以半自动为主,仍需要大量人力。并且根据三七机械化移栽技术规程标准显示,三七种苗机械化移栽种苗朝向宜保持一致[13];进而限制了传统移栽机械在三七种苗移栽作业中的应用[14]。MOTABAR等[15]基于准球形番茄在滚动过程的惯性效应,提出了一种基于两条平行轨道的自动定向方法。ANDRESEN等[16]提出一种鱼头尾定向装置,基于鱼体与鱼头刚度不同的特性设计一种鱼头尾定向装置。俞亚新等[17]基于稻种单轴对称特性设计了振动式稻种定向排序排种器,刘向东等[18]基于空间最小作用量原理设计了鲜杏动态定向输送装置。国内外学者对于自动定向技术研究常常基于物料自身物理特性进行研究,但大多针对物料定向输送以及排种进行研究,对于裸根苗类定向研究较少。本团队先前基于气吸原理研制一种可变气吸式三七种苗定向移栽装置[19],由于作业时需要较大负压来吸附种苗,吸附圆盘转速低,其作业效率有待提高。

本文提出一种基于力矩不平衡效应的三七种苗定向移栽装置,通过高速摄影分析种苗不同释放姿态下种苗姿态变化规律,阐明力矩不平衡效应下种苗定向调姿机理。开展单因素试验和Box-Behnken试验,探究各试验因素对种苗定向调姿的影响规律,以期为裸根苗定向技术研究提供依据。

1 三七种苗力矩不平衡效应分析

1.1 三七种苗结构特性

图1为三七种苗结构示意图,从主根开始其外形轮廓呈上宽下窄,而这种结构几何形状不对称性,使其存在结构中心与质心位置不重合的特性。意味着种苗结构中心两侧质量分布不均匀,因此,当三七种苗受到不对称外部作用力时,将产生相对于结构中心的不均匀的力矩,导致物体在运动过程中倾向于翻转或旋转,趋向于达到平衡状态。测量200株三七种苗主根长度l_1、主根直径d_1、休眠芽长度l_2和休眠芽直径d_2,三七种苗尺寸参数如表1所示。

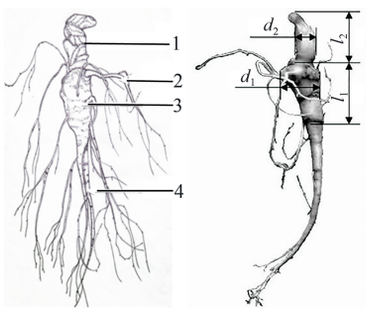


图1 三七种苗结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of *Panax notoginseng* seedling

1. 休眠芽(剪口) 2. 侧根 3. 主根 4. 须根

表1 三七种苗尺寸参数

Tab. 1 Size parameters of *Panax notoginseng* seedling mm

参数	l_1	d_1	l_2	d_2
最大值	26.12	15.68	17.74	8.89
最小值	17.50	9.08	8.38	4.35
平均值	22.42	12.64	13.28	6.15

1.2 种苗掉落试验

为探究力矩不平衡状态下种苗翻转规律,利用高速摄影技术开展种苗掉落试验,观察种苗水平释放、竖直释放、倾斜释放以及释放初始阶段剪口朝向情况下种苗在掉落过程中剪口朝向变化情况,分析其姿态变化规律和运动轨迹,阐明力矩不平衡效应下的种苗调姿定向机理。图2为种苗掉落试验台架。由人工手持镊子夹紧种苗,在距离桌面高度50 cm位置将种苗按不同释放姿态进行释放,由高速摄影镜头记录种苗掉落过程姿态变化情况,利用软件分析种苗下落过程中姿态变化规律和运动轨迹。试验选用一级种苗作为试验对象,为避免由于人手抖动产生误差,每组释放姿态拍摄3次。种苗掉落试验姿态变化过程如图3所示。

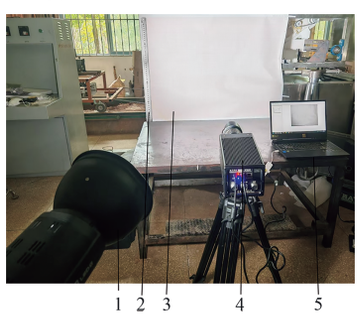


图2 三七种苗掉落试验

Fig. 2 Experiment on drop of *Panax notoginseng* seedlings

1. 光源 2. 50 cm钢尺 3. 背景布 4. 高速摄影镜头 5. 计算机

图3a、3b为竖直释放剪口向下和向上时种苗掉落过程姿态变化图。由图可知,剪口向下释放时,种苗无明显翻转现象,而剪口向上释放时,种苗掉落最后阶段有

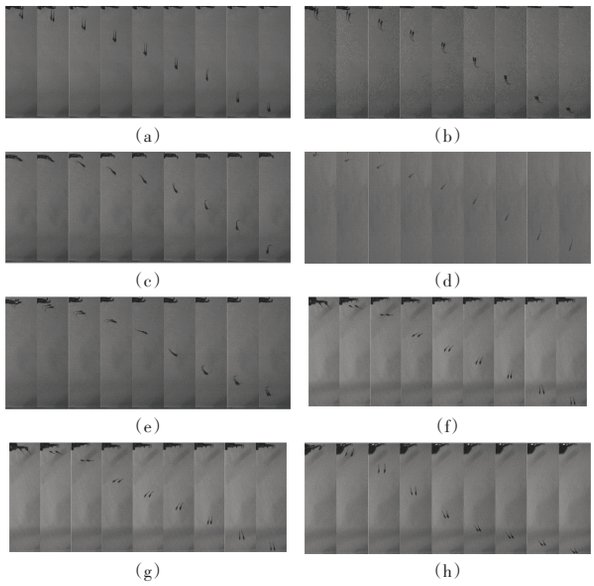


图3　种苗掉落姿态变化图

Fig. 3　Diagram of *Panax notoginseng* seedlings drop posture changes

向左翻转倾向。图3c、3d为水平释放剪口向左侧和右侧时种苗掉落过程姿态变化图。由图可知，种苗掉落过程中发生明显翻转现象，姿态变化过程为：水平–倾斜–竖直。图3e、3f为倾斜释放剪口朝向分别为右上以及左上时种苗掉落过程姿态变化图。由图可知，种苗下落时先由倾斜姿态转变为水平姿态，再逐渐变换为剪口向下的姿态。图3g、3h为倾斜释放剪口朝向分别为右下以及左下时种苗掉落过程姿态变化图。由图可知，种苗下落时由倾斜姿态逐渐翻转为竖直姿态，图3h中种苗掉落最后阶段姿态呈现剪口朝向右侧的翻转趋势。

由图3可知，三七种苗掉落过程姿态最终都趋向竖直剪口向下。造成这一现象主要原因是三七种苗质量分布不均匀，使得其重心位置趋近于剪口位置。由图4可知，种苗在下落过程中，由于受到空气阻力的影响，在重心位置两侧所受空气阻力合力F_1、F_2不均匀，且F_1、F_2产生的相对于重心位置的力矩M_1<M_2，进而引起种苗翻转。由于种苗在翻转过程中迎风面积会随着姿态的改变而变化，所受空气阻力也会随之变化，当种苗处于竖直姿态下落时，种苗长轴L两侧的对称性优于沿长轴方向对称性，使得种苗在竖直姿态下落所受到的力矩不平衡效应影响较小，因此，种苗在力矩不平衡影响下姿态将逐渐趋向于竖直剪口向下姿态。但由于种苗外形轮廓复杂，即使是竖直姿态下依旧存在力矩不平衡情况，进而出现如图3b、3h所示现象，即种苗掉落最后阶段依然呈现翻转趋势。

通过对种苗进行掉落试验，可知在力矩不平衡效应下种苗姿态将发生翻转，并且逐渐趋向于剪口向下姿态，使其剪口朝向保持一致。因此，本文根据力矩不平衡效应种苗姿态变化趋势提出一种基于力矩不平衡效应的三七种苗定向移栽装置，实现三七种苗机械化移栽。

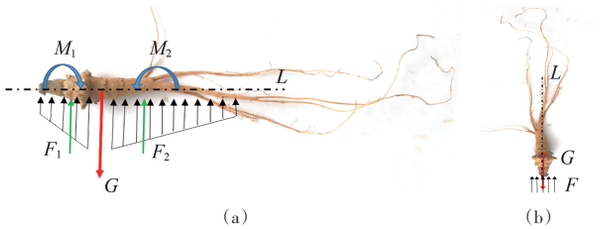


图4　种苗掉落过程受力分析

Fig. 4　Force analysis of *Panax notoginseng* seedlings falling process

2　装置结构与工作原理

2.1　装置结构

该装置主要由机架、梳刷喂入机构、均匀输送机构以及定向机构组成。如图5所示，梳刷喂入机构包括种苗箱、拨苗辊、毛刷电机和气动振动器，均匀输送机构主要由U形输送槽、振动电机组成，定向机构主要由输送带、输送带电机、导向板组成。

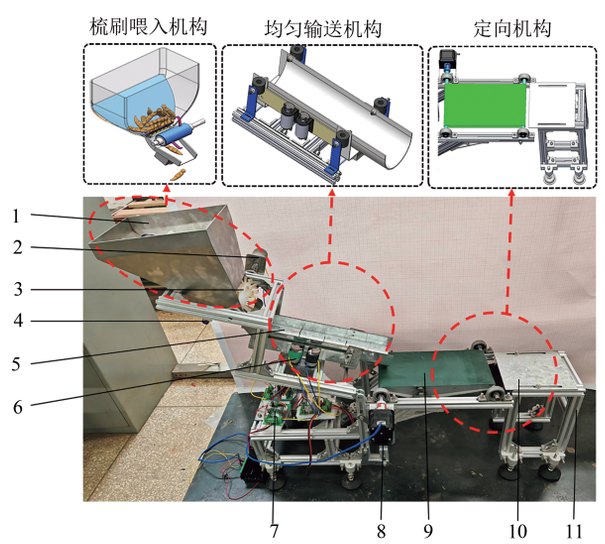


图5　定向装置结构示意图

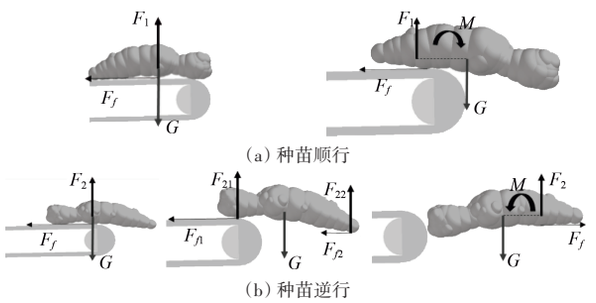
Fig. 5　Schematic of directional device structure

1. 种苗箱　2. 毛刷电机　3. 拨苗辊　4. 气动振动器　5. U形输送槽　6. 惯性振动器　7. 控制器　8. 输送带电机　9. 输送带　10. 导向板　11. 机架

2.2　工作原理

种苗经分离装置分散后进入梳刷喂入装置，气动振动器与拨苗辊相互结合能够进一步将分散不完全的种苗分离并使其单个落入U形输送槽内，进入均匀输送机构。种苗在U形输送槽的振动作用下其剪口朝向将调整为沿输送方向正方向（顺行）和负方向（逆行）两种情况，并进行输送。种苗随后进入输送带，在输送带的输送作用下进入定向机构完成定向。如图6a所示，当种苗顺行时，种苗在输送带输送下其重心位置相对于输送带支撑面出现移动，产生重心偏移的现象，而重心偏移会引起物体受力状况的变化。此时，种苗受力状态将由竖直方向的的力平衡转变为支持力相对于重心位置的力矩，出现力矩不平衡现象，种苗在力矩不平衡效应下发生翻转，使其剪口向下完成定向。如图6b所示，种苗逆

行时，种苗须根会与导向板接触，输送带与导向板将对种苗提供支持力是种苗保持力矩平衡的状态。当剪口脱离输送带时，种苗又将转变为力矩不平衡状态，进而发生翻转完成定向。



(a) 种苗顺行

(b) 种苗逆行

图6 种苗输送过程

Fig. 6 Seeding transportation process

对种苗定向调姿过程进行受力分析，如图7所示。

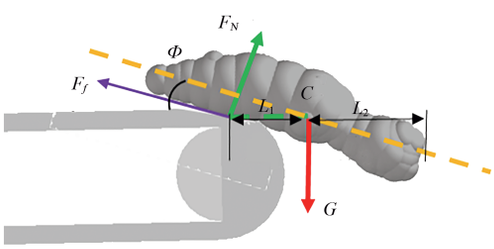


图7 种苗定向调姿过程受力分析

Fig. 7 Force analysis of seedling orientation and posture adjustment process

种苗定向调姿动力学模型为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}^2L}{\mathrm{d}t^2} = mg\sin\Phi - F_f \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2h}{\mathrm{d}t^2} = mg\cos\Phi - F_N \\ J_C\dfrac{\mathrm{d}^2\phi}{\mathrm{d}t^2} = F_NL_1 + F_fR \end{cases} \tag{1}$$

$$h = L_2\tan\Phi\, L = L_1 + L_2 \tag{2}$$

式中 m——三七种苗质量，kg

Φ——种苗定向过程中翻转角，(°)

h——种苗定向过程中重心下降垂直高度，mm

L_1——种苗重心到输送带支撑点的水平距离，mm

L_2——种苗剪口顶部到种苗重心的水平距离，mm

R——种苗短轴半径，mm

L——种苗剪口顶部到输送带支撑点水平距离，mm

t——翻转时间，s

J_C——种苗绕重心转动惯量，kg·m^2

F_N——种苗所受支撑力，N

F_f——种苗所受摩檫力，N

3 关键部件设计

3.1 梳刷喂入装置

为解决种苗均匀喂入以及种苗分离不充分等问题，设计了梳刷喂入装置。根据三七种苗几何尺寸以及自然休止角等参数进行了设计，旨在优化种箱形状和结构尺寸，其结构如图8所示。种箱的外形采用上宽下窄的结构，能够引导三七种苗向出苗口聚拢，确保种苗稳定输出。种苗自然休止角为64.45°，为方便安装取β为65°。已知三七种苗平均长度为45.55 mm[20]，为了确保种苗在输送过程中不会堵塞出苗口，将出苗口宽度l设计成种苗长度的1.5～2倍。经综合考量，此处出苗口宽度l最终确定为86 mm。

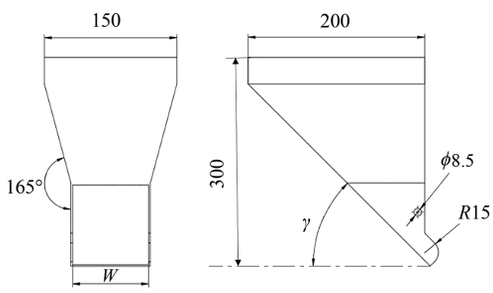


图8 种箱结构示意图

Fig. 8 Schematic of seed box structure

3.1.1 气动振动器

为了使种群处于“活跃”状态，便于拨苗辊将种苗单一刮出。气动振动器设置在种箱底部，种苗在种苗箱内受力分析如图9所示。

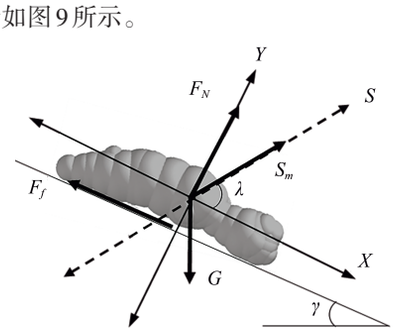


图9 种苗在种箱内受力示意图

Fig. 9 Schematic of seed box structure

在气动振动器作用下[21-22]，种苗产生沿S方向位移S_m。计算得三七种苗在S方向速度v_S和加速度a_S。计算式为

$$\begin{cases} S_m = A\sin(\omega t_1) \\ v_S = A\omega\cos(\omega t_1) \\ a_S = -A\omega^2\sin(\omega t_1) \end{cases} \tag{3}$$

式中 A——振幅，mm

ω——振动圆频率，rad/s

t_1——振动时间，s

若需要保证种苗处于“跳动”且向下滑移姿态，则需要满足

$$\frac{a_S\sin\lambda}{\cos\gamma} > g \tag{4}$$

式中 g——重力加速度，m/s^2

由式(3)、(4)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[23]，抛掷指数K_p与振

动圆频率ω和振幅A之间关系为

$$K_p = \frac{A\omega^2 \sin\lambda}{g} \tag{5}$$

式中　λ——振动方向角，(°)

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。因此令K_p>1，经计算选取振动频率为40 Hz、振幅为8 mm，此时，种群离散度较高。选用耐尔达GT-08型气动振动器。

3.1.2　拨苗辊

拨苗辊位于种箱的出苗口处，主要由柔性毛刷和辊子组成，作为主动部件使用，拨苗辊可以将出苗口处的种苗均匀拨出，达到均匀供苗目的。本装置拨苗辊选用螺旋式结构，柔性毛刷沿螺旋线均匀分布在辊子表面，如图10所示。为了保证拨苗辊能够将种苗从种箱内顺利拨出，避免堵塞种箱，拨苗辊长度l应设计成三七种苗长度1.5～2倍，拨苗辊半径应满足种箱装配需求，毛刷高度h应介于三七种苗主根直径1.5～2倍之间[24-25]。综合考虑，拨苗辊长度l取80 mm，拨苗辊半径R取30 mm，毛刷高度h取20 mm，螺旋倾角β取73°。螺旋式拨苗辊供苗率计算式为[26]

$$Q = qn \tag{6}$$

其中

$$q = 2\pi Rl\rho\left(\frac{\alpha S}{P} + \lambda_1\right)$$

式中　Q——供苗率，株/min

q——拨苗辊排放量，株/r

ρ——三七种苗密度，g/cm^3

α——拨苗辊凹槽内种苗充满系数

S_1——拨苗辊凹槽横截面积，mm^2

P——螺旋线节距，mm

λ_1——带动层特性参数

R——拨苗辊半径，mm

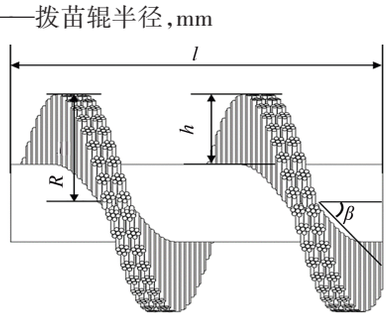


图10　拨苗辊结构示意图

Fig. 10　Schematic of structure of seedling roller

3.2　均匀输送机构设计

3.2.1　惯性振动器

惯性振动器由两个双轴惯性振动电机组成，通过两个电机同步反向旋转产生两个大小相等、方向不同的离心惯性力F_1、F_2。在某一瞬时，沿y方向离心惯性力F_1、F_2叠加，此时，合力最大，并形成沿y方向的简谐力，实现U形输送槽左右往复直线振动，而沿x方向离心惯性力F_1、F_2相互抵消。其工作原理如图11所示。

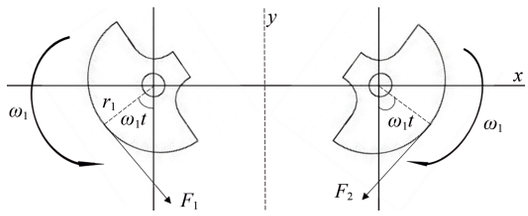


图11　惯性振动器工作原理图

Fig. 11　Working principle diagram of inertia vibrator

通过分析惯性振动器偏心块在运动过程中的受力情况，得到惯性振动器所受到的激振力随时间变化的函数关系式

$$\begin{cases} \sum F_y = F_{1y} + F_{2y} = 2m_1 r_1 \omega_1^2 \sin(\omega_1 t_2) \\ \sum F_x = F_{1x} - F_{2x} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中　F_x——合力F在x方向分力，N

F_y——合力F在y方向分力，N

m_1——偏心块质量，kg

r_1——偏心块半径，mm

ω_1——偏心块角速度，rad/s

t_2——转动时间，s

由式(7)可知，惯性振动器在工作过程中，其两个电动马达协同工作，以相同速度但相反的方向旋转，从而生成一个沿特定方向作用的简谐振动力[27]。满足U形输送装置对直线振动特性的需求。选用新永泰双轴扇形直流无刷振动电机RK-370SA-14350型。

3.2.2　U形输送槽

为了提高种苗定向合格率，在输送带上形成均匀、连续的种苗流是必要的。输送槽对种苗的限位作用决定了种苗有序排队状态[28]。如果种子在输送带上的剪口朝向与位置随机，将影响种苗对行或对沟的效果，进而影响种苗移栽。为此，需要设计一款输送槽以确保种苗在输送带上均匀、连续的状态，如图12所示。

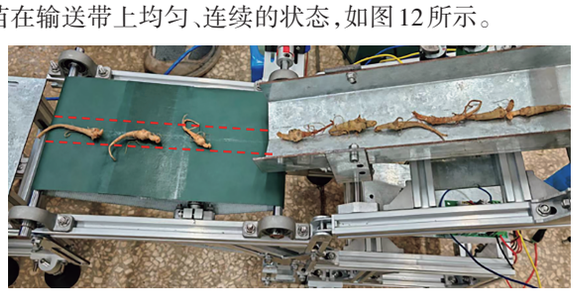


图12　种苗在输送带上的均匀输送示意图

Fig. 12　Schematic of uniform transportation of seedlings on conveyor belt

为了探究不同形状输送槽对种苗均匀输送的性能影响，设计夹角为135°与150°的V形输送槽、直径为40～80 mm的U形输送槽，并基于EDEM软件进行仿真试验，振动参数：频率为85 Hz、振幅为0.6 mm、输送槽安装倾角为15°，左右往复振动。结果如图13所示，V形夹角

135°与U形直径40、50、60 mm 4种输送槽内种苗存在明显堆积挤压现象，由于三七种苗须根较多，堆积挤压容易造成种苗重新缠绕，导致输送槽内无法形成均匀连续的种苗流，并且V形夹角135°输送槽的种苗落入输送带时其剪口朝向与输送方向重合度较低。V形夹角150°与U形直径70、80 mm 3种输送槽无明显堆积现象，且剪口朝向与输送方向重合度较高。引入侧偏角θ作为剪口朝向与输送方向重合度的评判标准，如图14所示。通过测量种苗在各输送槽内的间距以及在输送带上的侧偏角，如图15所示。U形直径70 mm输送槽的间距标准差与侧偏角标准差明显低于其他类型输送槽，说明U形直径70 mm输送槽能够更好地实现种苗的均匀输送，因此，选择U形直径70 mm输送槽作为种苗均匀输送装置，为确保种苗有足够排序时间，输送槽长度取300 mm。

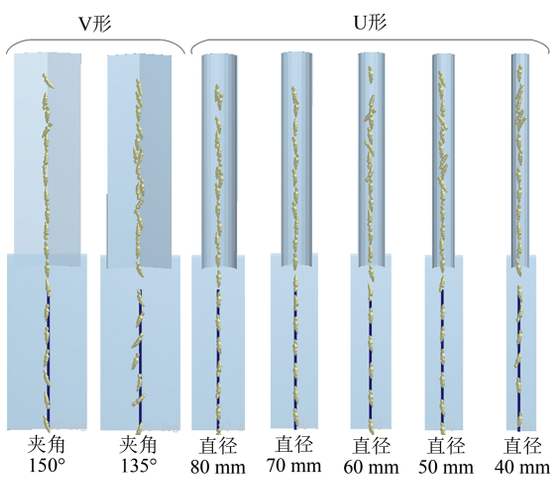


图13 不同输送槽内的种苗流状态

Fig. 13 Seedling flow state in different conveying troughs

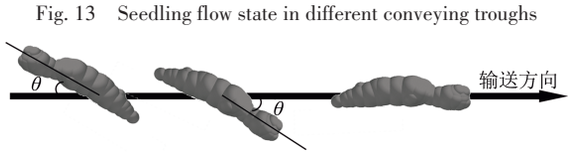


图14 侧偏角示意图

Fig. 14 Schematic of sideslip angle

4 定向移栽装置性能试验

4.1 单因素试验

以云南文山三七种植基地的三七种苗为研究对象，

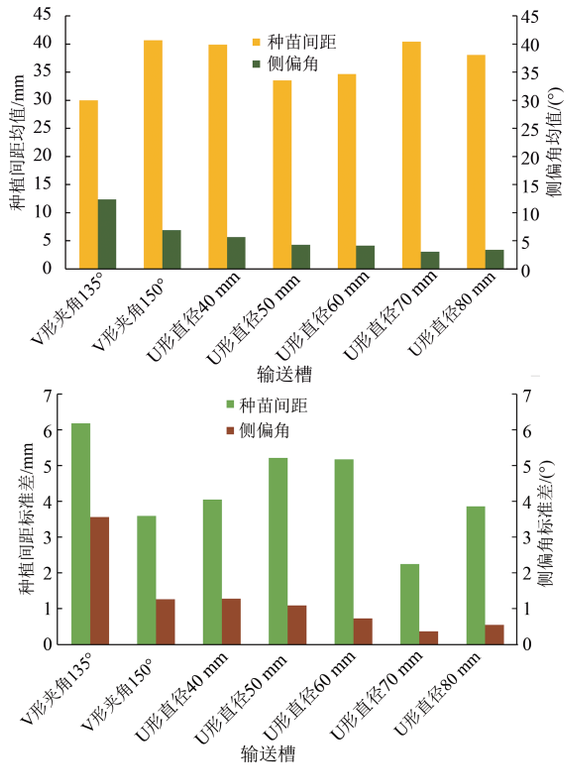
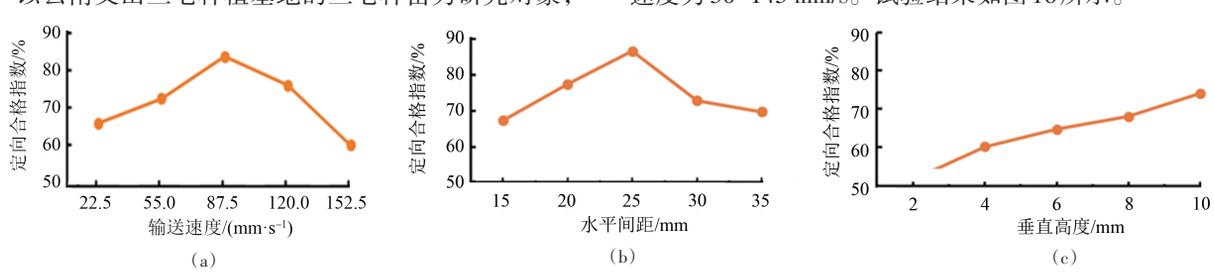


图15 种苗间距与侧偏角均值和标准差

Fig. 15 Mean and standard deviation of seedling spacing and sideslip angle

严格按照国际标准ISO 20408《中医药—三七种子和种苗》进行种苗分级，精选出一、二级优质种苗。在昆明理工大学现代农业工程学院进行试验，采用自制的定向装置试验台架进行试验，以确保移栽过程的精确性和结果的科学性。以定向合格（剪口竖直向下）指数为试验指标，选取对试验指标影响较为显著的输送带输送速度、输送带与导向板间的水平距离、垂直高度为试验因素，并进行单因素试验。

为保证种苗能顺利从定向机构中下落，根据三七种苗主根平均尺寸参数，选取水平间距为15~35 mm；选取垂直高度为2~10 mm；根据三七机械化移栽技术规程规定，三七机械化移栽速率不能低于35株/（min·行）。试验装置中输送带轴距为150 mm，通过理论计算当输送速度为87.5 mm/s时恰好满足移栽需求，因此选取输送速度为30~145 mm/s。试验结果如图16所示。



(a) (b) (c)

图16 单因素试验结果

Fig. 16 Single factor test results

由图16a可知，随着输送速度的增大，定向合格指数呈先升高后降低趋势，输送速度在87.5 mm/s时定向合格指数达到最高，为83.67%。由图16b可知，随着水平间距的增大，定向合格指数呈先升高后降低趋势，水平间距在25 mm时定向合格指数达到最高，为86.51%。由图16c可知，随着垂直间距的增大，定向合格指数呈逐渐升高趋势，且在垂直高度为10 mm时定向合格指数达到为84.05%。

4.2　Box-Behnken试验

为了深入探究输送速度、输送带与导向板之间的水平距离以及垂直高度等参数，以及这些参数的二次项和交互作用对定向移栽装置的工作性能的影响，基于单因素试验结果，开展Box-Behnken试验，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分别为输送速度、水平距离和垂直高度的编码值，试验指标为定向合格指数Y_1。

表2　试验因素编码

Tab. 2　Test factors coding

编码	因素		
	输送速度/(mm·s^{-1})	水平间距/mm	垂直高度/mm
−1	55.0	20	4
0	87.5	25	8
1	120.0	30	12

表3　试验结果

Tab. 3　Test results

序号	因素			Y_1/%
	X_1	X_2	X_3	
1	0	0	0	83.35
2	−1	−1	0	68.70
3	1	0	−1	67.47
4	−1	0	1	67.64
5	0	1	1	70.29
6	0	1	−1	69.93
7	0	−1	−1	57.50
8	0	0	0	81.31
9	1	−1	0	65.47
10	0	0	0	87.51
11	1	0	1	74.72
12	−1	0	−1	60.74
13	0	0	0	85.07
14	1	1	0	80.07
15	−1	1	0	56.66
16	0	−1	1	66.69
17	0	0	0	83.86

利用Design-Expert软件对试验数据进行方差分析，回归方程显著性检验结果如表4所示。合格指数Y_1拟合度极显著($P<0.01$)。失拟项P=0.265 1，不显著，说明无其他影响指标的主要因素。各因素对合格指数影响由大到小为输送速度X_1、垂直高度X_3、水平间距X_2。交互项中输送速度与水平间距的交互项(X_1X_2)以及输送速度、水平间距、垂直高度的二次项(X_1^2、X_2^2、X_3^2)影响显著，且定向合格指数Y_1回归模型为

$$\begin{aligned}Y_1 = {} & 84.22 + 4.25X_1 + 2.32X_2 + 2.96X_3 + \\ & 6.44X_1X_2 + 0.0875X_1X_3 - 2.21X_2X_3 - \\ & 7.48X_1^2 - 9.02X_2^2 - 9.10X_3^2\end{aligned} \quad (8)$$

表4　方差分析

Tab. 4　Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	F	p
模型	1 489.07	9	22.58	0.000 2**
X_1	144.42	1	19.71	0.003 0**
X_2	43.20	1	5.89	0.045 6*
X_3	70.21	1	9.58	0.017 4*
X_1X_2	177.42	1	24.21	0.001 7**
X_1X_3	0.030 6	1	0.004 2	0.950 3
X_2X_3	19.49	1	2.66	0.146 9
X_1^2	235.42	1	32.13	0.000 8**
X_2^2	342.38	1	46.72	0.000 2**
X_3^2	348.67	1	47.58	0.000 2**
残差	51.30	7		
失拟项	30.40	3	1.94	0.265 1
误差	20.90	4		
总和	1 540.36	16		

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

4.3　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，可得输送速度、水平间距、垂直高度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。

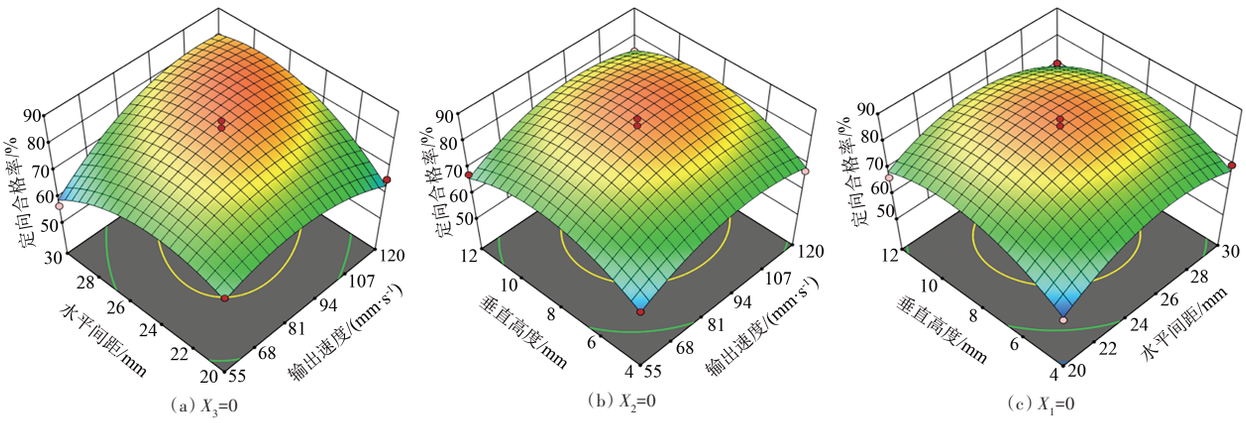
由图17a可知，当输送速度为95.373 ~ 120 mm/s、水平间距为24.505 ~ 30 mm时，定向合格指数较高，大于80%。输送速度一定时，随着水平间距增大，定向合格指数呈先上升后下降趋势。水平间距一定时，随着输送速度增加，定向合格指数呈先上升趋势。

由图17b可知，当输送速度为69.771 ~ 120 mm/s、垂直高度为7.803 ~ 10.265 mm时，定向合格指数较高，大于80%。输送速度一定时，随着垂直高度增大，定向合格指数呈先上升后下降趋势。垂直高度一定时，随着输送速度增加，定向合格指数呈先上升后下降趋势。

由图17c可知，当水平距离为22.009 ~ 29.099 mm、垂直高度为5.765 ~ 11.152 mm时，定向合格指数较高，大于80 %。水平距离一定时，随着垂直高度增大，定向合格指数呈先上升后下降趋势。垂直高度一定时，随着水平距离增加，定向合格指数呈先上升后下降趋势。

4.4　参数优化与试验验证

为确定定向装置最佳工作参数取值范围，对各参数进行多目标优化。各参数以定向合格指数最大为目标进行选取。综合实际定向装置的工作状态及工作时的各参数对试验指标的影响进行优化求解。目标函数和约束条件为



(a) X_3=0 (b) X_2=0 (c) X_1=0

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 affected response surface result of directional conformity index

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

优化所得最佳参数范围如图18所示，当输送速度为90.564～110.468 mm/s、水平间距为24.931～27.701 mm、垂直高度为8.5 mm时，定向合格指数大于85%，为验证优化分析结果的正确性，在相同试验条件下，设定输送速度为100.5 mm/s、水平间距为26.3 mm、垂直高度为8.5 mm进行台架验证试验，重复试验3次，3次定向合格指数平均值为85.106%。验证试验结果表明优化结果可靠。

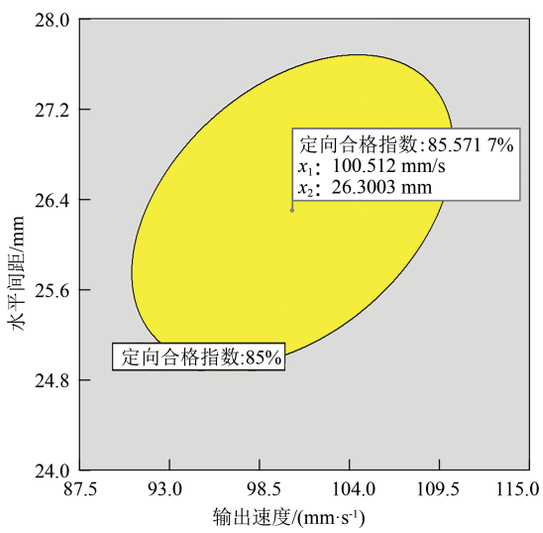


图18 参数优化分布

Fig. 18 Parameter optimization distribution map

5 结论

(1)开展了三七种苗掉落试验，利用高速摄影技术分析了种苗在不同释放姿态下姿态变化情况，结果表明：在力矩不平衡效应下种苗呈出剪口向下的翻转趋势。对种苗掉落过程进行受力分析，阐明了力矩不平衡效应下种苗姿态变化规律，揭示了种苗定向调姿机理。

(2)设计了一种基于力矩不平衡效应的三七种苗定向移栽装置，并对种苗调姿定向过程进行受力分析，建立了种苗调姿定向动力学模型；通过理论计算与仿真分析，确定了种苗箱、拨苗辊、输送槽、气动振动器以及惯性振动器关键结构参数与型号。

(3)通过单因素试验，确定了试验因素参数范围。以输送速度、水平间距和垂直高度为试验因素，以定向合格指数为试验指标进行了Box-Behnken试验，试验结果表明：影响定向合格指数主要因素依次为输送速度、垂直高度和水平间距。当输送速度为90.564~110.468 mm/s、水平间距为24.931~27.701 mm、垂直高度为8.5 mm时，定向合格指数可超过85%。为验证优化结果，在相同试验条件下进行台架验证试验，试验结果表明，定向合格指数为85.106%，与优化结果一致。

参 考 文 献

[1] 崔秀明，黄璐琦，郭兰萍，等. 中国三七产业现状及发展对策[J]. 中国中药杂志，2014，39(4)：553－557.
CUI Xiuming，HUANG Luqi，GUO Lanping，et al. Chinese *Panax notoginseng* industry status and development countermeasures [J]. China Journal of Chinese Material Medical，2014，39(4)：553－557.(in Chinese)

[2] 2023年度云南省中药材产业发展报告[R]. 昆明：云南省农业农村厅，2024：129－131.

[3] 侯彦龙，徐丽明，陈莉明. 玉米机械化定向播种技术的现状和发展趋势[J]. 农机化研究，2012，34(2)：10－14.
HOU Yanlong，XU Liming，CHEN Liming. The current situation and development trend of corn mechanization oriented seeding technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2012，34(2)：10－14.(in Chinese)

[4] LAI Qinghui，WANG Yongjie，TAN Yu，et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* root orientation transplanting device based on YOLOv5s [J]. Frontiers in Plant Science，2024，15(8)：152－168

[5] 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 trans planter [J]. Farm Machinery Using & Maintenance ，

2018(6)：11－13.(in Chinese)
[6] SHARMA A，KHAR S. Design and development of a vegetable plug seedling transplanting mechanism for a semi-automatic transplanter [J]. Scientia Horticulturae，2024，32(6)：112－127.
[7] SHARMA A，KHAR S. Current developments in vegetable transplanters in developing countries：a comprehensive review [J]. International Journal of Vegetable Science，2022，28(5)：417－440.
[8] KUMAR G，RAHEMAN H. Vegetable trans planters for use in developing countries a review [J]. International Journal of Vegetable Science，2008，14(3)：232－255.
[9] 俞高红，李成虎，汪应萍，等. 小株距高密度蔬菜植苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：96－105，138.
YU Gaohong，LI Chenghu，WANG Yingping，et al. Design and experiment of transplanting mechanism for high density vegetables with small plant spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(3)：96－105，138.(in Chinese)
[10] 俞高红，金也，常数数，等. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(7)：100－108.
YU Gaohong，JIN Ye，CHANG Shushu，et al. Design and test of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(7)：100－108.(in Chinese)
[11] 王军增，孙伟，王虎存，等. 垄畦覆膜种行覆土党参种苗移栽机的设计与试验 [J]. 干旱地区农业研究，2020，38(3)：289－298.
WANG Junzeng，SUN Wei，WANG Hucun，et al. Design and test of *Codonopsis pilosula* seedlings transplanter with ridge-film mulching and soil-covering in seedling rows[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2020，38(3)：289－298.(in Chinese)
[12] 王徐建. 甘草倾斜移栽关键部件设计与试验研究[D]. 北京：中国农业大学，2017.
WANG Xujian. Design and experimental study on key components of licorice tilt transplanting [D]. Beijing：China Agricultural University，2017.(in Chinese)
[13] DB53/T 986—2020　三七机械化移栽技术规程[S]. 2020
[14] 于晓旭，赵匀，陈宝成，等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ，2014，45(8)：44－53.(in Chinese)
[15] MOTABAR P，LEFCOURT A，TASCH U，et al. Use of inertial properties to orient tomatoes [J]. Transactions of the ASABE，2011，54(2)：517－525.
[16] ANDRESEN H，HAMMEREN J E，OPPHEIM P A，et al. Device for orientating fish：EP，EP 2498616 A1[P]. 2012.
[17] 俞亚新，林佳辉，赵匀，等. 基于单轴对称特性的稻种定向排序仿真与试验[J]. 农业机械学报，2013，44(10)：62－67，74.
YU Yaxin，LIN Jiahui，ZHAO Yun，et al. Simulation and test on rice seed orientation based on single axisymmetric properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(10)：62－67，74.(in Chinese)
[18] 刘向东，王学农，王春耀，等. 差速式三通道鲜杏动态定向输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(10)：35－43.
LIU Xiangdong，WANG Xuenong，WANG Chunyao，et al. Design and test of apricot dynamic orientation and conveying device with 3－path differential belts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(10)：35－43.(in Chinese)
[19] 赖庆辉，赵瑾汶，苏微，等. 基于DEM-CFD的气吸式三七种苗定向移栽装置研究 [J]. 农业机械学报，2021，52(7)：60－70.
LAI Qinghui，ZHAO Jinwen，SU Wei. et al. Design and text of air suction directional transplanting device for *Panax Notoginseng* seedlings based on DEM-CFD coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(7)：60－70.(in Chinese)
[20] 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(Agricultural and Life Science Edition)，2018，39(2)：74－79.(in Chinese)
[21] 张学义，邵耀坚，邹黎，等. 电磁振动排种器种子运动分析及试验研究[J]. 农业工程学报，1996，12(1)：81－86.
ZHANG Xueyi，SHAO Yaojian，ZOU Li，et al. Theoretical analysis and experiment on the kinematics of feeding device ender electromagnetic vibration[J]. Transactions of the CSAE，1996，12(1)：81－86.(in Chinese)
[22] 王淑铭，魏天路，周海波. 气动振动式精密排种器工作参数的分析与仿真[J]. 农业工程学报，2010，26(13)：56－60.
WANG Shuming，WEI Tianlu，ZHOU Haibo. Theoretical research and simulation analysis on operation parameters of pneumatic vibration precision seed-metering[J]. Transactions of the CSAE，2010，26(13)：56－60.(in Chinese)
[23] 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)
[24] 施印炎，陈满，汪小旦，等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(7)：97－103.
SHI Yinyan，CHEN Man，WANG Xiaochan，et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(7)：97－103.(in Chinese)
[25] 高筱钧，于涞源，吴晓鹏，等. 气送式玉米高速精量排种器供种系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊1)：66－75.
GAO Xiaojun，YU Laiyuan，WU Xiaopeng，et al. Design and experiment of intelligent seedsupply system of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp.1)：66－75.(in Chinese)
[26] 谢观福. 离心变径气力式玉米高速精量排种系统设计与试验[D]. 昆明：昆明理工大学，2023.
[27] 闻邦椿，刘树英. 振动机械的理论与动态设计方法[M]. 北京：机械工业出版社，2001.
[28] 鹿芳媛. 两级双振动式水稻精密播种器机理分析与试验研究[D]. 广州：华南农业大学，2018.