

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.03.009

基于 DEM – MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究

赖庆辉¹ 贾广鑫¹ 苏微¹ 赵立军² 邱小宝³ 吕勤¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 重庆文理学院智能制造工程学院, 重庆 402160;
3. 霸州市海宝科技有限公司, 廊坊 065700)

摘要: 人参播种中存在因人参种子形状不规则、流动性差, 种子在播种前需进行催芽处理, 催芽的种子易损伤, 造成充种困难、易伤种等问题, 为此设计一种链勺式人参精密排种器。通过对充种过程中种子受力情况和运动状态的分析, 阐明倾斜充种可提高充种性能的机理; 通过对携种过程的理论计算和力学分析, 并基于 DEM – MBD 耦合的单因素仿真试验, 分析了不同排种链条的张紧力、不同排种器结构参数和工作参数对其工作性能的影响, 确定了链勺式排种器的结构参数; 以主动链轮转速、充种倾角和种层高度为试验因素, 以充种的单粒率(1 粒/勺)、复充率(≥ 2 粒/勺)、漏充率(0 粒/勺)为试验指标, 基于 DEM – MBD 耦合进行了二次回归正交旋转组合仿真试验。结果表明: 影响单粒率的主次顺序为充种倾角、主动链轮转速、种层高度; 当充种倾角为 71.73° 、主动链轮转速为 79.10 r/min 、种层高度为 84.28 mm 时, 充种性能最佳, 单粒率为 95.68% 、复充率为 3.57% 、漏充率为 0.75% ; 为验证排种器的工作性能, 进行了台架试验, 结果表明链勺式人参精密排种器的工作性能较好, 满足我国非林地人参种植的播种要求。

关键词: 人参; 链勺式; 精密排种器; DEM – MBD 耦合

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0091-14 OSID: 

Design and Test of Chain-spoon Type Precision Seed-metering Device for Ginseng Based on DEM – MBD Coupling

LAI Qinghui¹ JIA Guangxin¹ SU Wei¹ ZHAO Lijun² QIU Xiaobao³ LÜ Qin¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. College of Intelligent and Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China
3. Bazhou Haibao Technology Co., Ltd., Langfang 065700, China)

Abstract: Because of irregular shape and poor fluidity of ginseng seeds, the seeds need to be spewed before sowing. The spewed seeds are easy to be damaged, resulting in difficult seed filling and easy seed damage. A chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng was designed. Through the analysis of the force and motion of seeds in the process of seed filling, the mechanism of tilting filling-seed improving the filling-seed performance was expounded. And through theoretical calculation, static and dynamic analysis of seed carried by seed's spoon was done, and the single factor simulation test was conducted through the DEM – MBD coupling. The influence of different structural parameters and working parameters of seed-metering device on its working performance were analyzed and the structural parameters of chain-spoon type precision seed-metering device were ascertained. Based on DEM – MBD coupling simulation, the quadratic regression orthogonal rotation combination test was done, with the rotation rate of drive sprocket, filling-seed angle and seed's height as the test indexes. Experimental results showed that the primary and secondary order of influencing conformity index was filling-seed angle, rotation rate of drive sprocket and seed's height. When filling-seed angle was 71.73° , the rotation rate of drive sprocket was 79.10 r/min and seed's height was 84.28 mm , filling-seed performance was the

收稿日期: 2021 – 03 – 04 修回日期: 2021 – 06 – 01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960366、51975265、52165031)、云南省高校工程研究中心建设计划项目和云南省院士(专家)工作站项目(202105AF150030)

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研究,E-mail: laisubo@163.com

optimum, and the single grain rate was 95.68%, the refilling rate was 3.57%, and the missing filling rate was 0.75%. The bench test was conducted to testify the working performance of seed-metering device, which showed that the chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng had better performance on filling-seed and can meet the requirements of non-forest ginseng sowing.

Key words: ginseng; chain-spoon type; precision seed-metering device; DEM – MBD coupling

0 引言

近年来,随着国家政策的调整和药食同源的提倡,人参采用参畦 1.2 ~ 1.7 m、株距 3 ~ 5 cm 和行距 15 ~ 18 cm 的非林地直播种植技术得到了大面积推广。但是,仅在耕整地环节实现了机械化,而在需要“抢农时”的人参播种环节仍沿用传统人工点播或半机械化点播方式,严重制约着我国人参种植规模化、产业化和工厂化的发展,因此需发展非林地人参种植机械化精密直播技术^[1]。

解决非林地人参种植精密直播技术的关键在于排种器。人参种子形状不规则、表面褶皱,流动性差,且播种前经过催芽后,有裂口、易损伤等特点,成为排种器设计的难点。总结国内外关于人参播种机的文献报道可知,国内外人参种植农艺差异大,进口人参播种机对我国农艺不适用且价格昂贵。国内对人参播种机械的研究多集中于气力式和机械式:气力式人参播种机械的研究以气吸针式和气吸滚筒式为主,作业过程功率消耗大、结构复杂,且均处在实验室阶段;机械式播种机械的研究以型孔式和半自动机械为主,型孔式易伤种,播种前需要对种子分级,对种子适应性差,半自动机械劳动强度大。因此,选择适用人参种子的伤种率低、结构简单的机械式精密排种器,是研究人参精密排种器的前提^[2-4]。链勺式排种技术利用链条带动种勺舀种,具有对种子形状适用性强、易充种和易实现单粒排种等特点,且在充种过程中对种子无剪切载荷、损伤率低,已成为国内外解决形状不规则种子的主要排种技术,目前广泛应用于马铃薯、大蒜、甘蔗等种子形状不规则的作物精密播种中^[5-12]。但是将链勺式精密排种器应用到人参等中、小粒径种子作物的精密播种研究中,鲜有报道。

链勺式精密排种器中排种链条的运动状态不仅影响着种子的运动状态,也是影响排种器充种性能的重要因素。由于种子在链勺式排种器中受颗粒力学系统和多体动力学系统组成的复杂系统的共同作用,用数学模型难以准确描述种子的运动特性及排种器排种链条的运动状态,需要使用辅助软件进行分析^[13-15]。近年来,随着离散元法 (DEM) 和多体动力学 (MBD) 的发展,DEM – MBD 耦合数值模拟技

术已在农业领域得到了广泛应用^[16-17]。因此,构建基于 DEM – MBD 耦合的链勺式人参精密排种器仿真体系,分析人参种子在链勺式排种器多体动力学系统下的受力情况和运动状态,提高链勺式排种器充种性能和实现零伤种成为本文研究的关键。

针对上述问题,研制一种链勺式人参精密排种器,以 DEM – MBD 耦合仿真为技术手段,探索链勺式排种器的充种机理,优化排种器的主要结构参数和工作参数来提高链勺式排种器的工作性能,并通过台架试验对排种器的工作性能进行验证,以期链勺式排种器设计提供技术支持和理论指导,并解决人参精密播种中存在的充种困难、易伤种的难题。

1 排种器工作原理与充种过程分析

1.1 排种器工作原理

链勺式人参精密排种器为单行单体式排种器,结构如图 1 所示。排种器主要由排种器壳体、护种板、主动链轮、排种链条、种勺、排种链轮、从动链轮和种箱等组成。

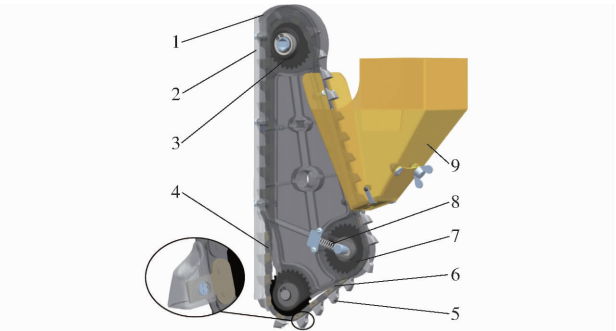


图 1 链勺式人参精密排种器结构示意图
Fig. 1 Structure sketch of ginseng chain-spoon type precision seed-metering device

1. 排种器壳体 2. 护种板 3. 主动链轮 4. 排种链条 5. 种勺
6. 排种链轮 7. 从动链轮 8. 张紧弹簧 9. 种箱

如图 2,排种器工作时,人参种子在重力和种间作用力的共同作用下流入种箱充种区;动力从主动链轮输入带动排种链条转动,充种区一侧的排种链条向上运动,链条上的种勺依次进入充种区,充种区内待充种子在重力与种间作用力的共同作用下充入种勺的型孔内;完成充种的种勺在突破种层后携种继续向上运动的过程中,冗余的种子受排种链链条运转所产生的抖动、排种链条运行速度、种勺托持

力、种子自身重力和种间摩擦力共同作用的影响落回种箱；种勺运动至最高点翻越主动链轮，型孔内的种子受到重力和离心力的作用脱离型孔落至前一个种勺的底部，并进入护种区；护种区内，位于种勺底部的种子处在相邻两个种勺与护种板形成的独立空间内，随着链条的运动至投种区点，种子失去支持力自由落体至种沟内；种勺绕过排种链轮经从动链轮翻转进入下一个循环，完成整个排种过程。

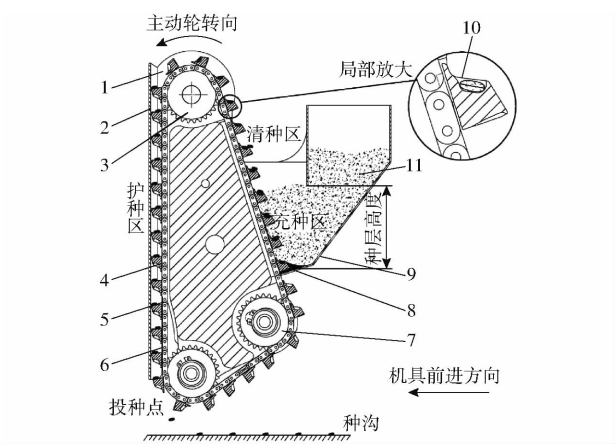


图 2 排种器工作原理图

Fig. 2 Work diagram of seed-metering device

1. 排种器壳体 2. 护种板 3. 主动链轮 4. 排种链条 5. 种勺
6. 排种链轮 7. 从动链轮 8. 挡种毛刷 9. 种箱 10. 型孔
11. 种子

1.2 排种器充种过程分析

排种器的充种过程是影响排种器播种精度的重要环节。排种器在工作时，根据种子的受力状态和所处位置的变化规律，可将充种过程分为脱离种群和种子回填两个阶段。

脱离种群阶段：种子在自身重力、种子间作用力和种子与种勺间作用力的共同作用下充入种勺的型孔内，充入种勺的目标种子与种群形成隔离，并随着种勺的运动脱离种群。为在该阶段提高排种器的充种性能与充种精度，应结合人参种子的形状与尺寸和最小势能原理，设计种勺型孔进而使更多的种子以稳定状态充入型孔^[4]。

种子回填阶段：充种状态下的种勺占据了种群一定空间，使种群形成了瞬时“空穴”，随着种勺在种群中运动，种子在自身重力和种间作用力的共同作用下流入“空穴”，为下一个种勺的充种做准备。种子回填不及时直接影响下一个种勺的充种，且排种器作业速度越快，充种效果越差。为在该阶段提高排种器的充种性能，将排种器设计成倾斜充种。倾斜充种改变了两个种勺间的空间结构，改变了种群回填流动方向，增大了种子回填数量，为下一个种勺的充种提供了待充条件，如图 3 所示。

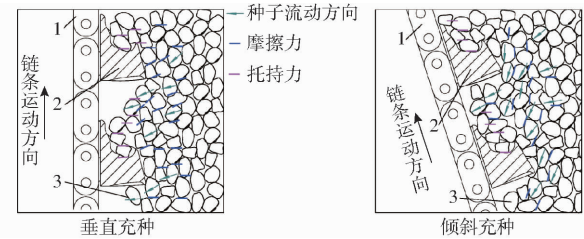


图 3 不同充种方式对种群的影响

Fig. 3 Effects of different filling methods on population

1. 排种链条 2. 种勺 3. 充种区内种子

2 关键部件设计

2.1 排种链条选型

排种链条属于与种子直接接触部件，为防止链条卡种，所选链条的滚子间隙及链板内宽与人参种子三轴尺寸有直接关系。播种时催芽人参种子的长、宽、厚分别为 4.05 ~ 6.50 mm、2.19 ~ 5.72 mm、2.08 ~ 3.60 mm；其三轴尺寸长、宽、厚平均值 L_{ave} 、 W_{ave} 、 H_{ave} 分别为 5.8、4.7、3.0 mm，球度 S_p 为 74.84%，呈“肾形”扁平状^[4]。参考 GB/T 1243 — 2006《传动用短节距精密滚子链、套筒链、附件和链轮》选择 04C 链号的链条作为排种链条，04C 链条主要结构参数如表 1，主要结构如图 4 所示。

表 1 04C 链条主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters of 04C chain

参数	数值
04C 链条节距/mm	6.35
链条内链板高度/mm	6.02
单排链条销轴长度/mm	9.10
单排链条测量力/N	50.00
链条附板厚/mm	0.80
链条附板高/mm	11.70
链条附板宽/mm	5.60
链条附板孔径/mm	3.40

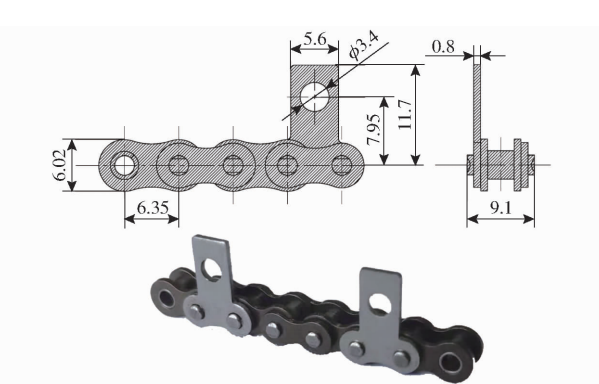


图 4 04C 链条结构示意图

Fig. 4 Schematic of 04C chain structure

2.2 种勺结构与分布设计

种勺是链勺式人参精密排种器将单粒人参种子

从种群分离,并将种子平稳输送到投种区完成排种过程的关键部件。为防止型孔外缘“托种”造成重播,并保证种勺底部与护种板形成独立空间,因此将种勺设计成“天圆地方”结构。其主要结构参数包括型孔尺寸、种勺倾角和种勺形体尺寸。种勺结构示意图如图 5 所示,其中 A_1 、 B_1 、 C_1 分别为种勺长度、宽度、高度, A 、 B 、 C 分别为型孔长度、宽度、深度, θ 为种勺倾角。

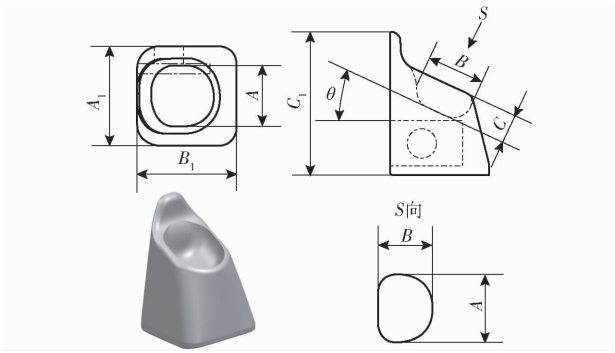


图 5 种勺结构示意图

Fig. 5 Schematic of seed spoon structure

2.2.1 型孔尺寸

种勺型孔的形状和尺寸取决于种子的形状和尺寸,是影响充种性能的重要因素。根据催芽后人参种子的三轴尺寸和最小势能原理可知,种子“平躺”状态为最稳定状态,种子在扰动状态下以最稳定状态充入型孔的几率最高^[18]。其中型孔的长度、宽度和深度应满足

$$\begin{cases} L_{\max} < A < L_{\text{ave}} + H_{\min} \\ W_{\max} < B < 2H_{\text{ave}} \\ \frac{2}{3}H_{\max} < C < 2H_{\min} \\ C < B < A \end{cases} \quad (1)$$

式中 $L_{\max}$ ——人参种子长度最大值,mm
 $W_{\max}$ ——人参种子宽度最大值,mm
 $H_{\max}$ ——人参种子厚度最大值,mm
 $H_{\min}$ ——人参种子厚度最小值,mm

结合人参种子的三轴尺寸和形状,为使充种更加顺利,在参数范围内 A 、 B 、 C 尽可能取最大值,因此选择种勺的型孔长度 A 、宽度 B 、深度 C 分别为 7.5、6.0、3.5 mm 的“D 形孔”结构。

2.2.2 种勺倾角

种勺倾角为种勺运动方向的法向与种勺底部平面的内夹角。种勺倾角具有种勺在完成充种而突破种层后,携种继续向上运动的过程中清种的作用。为防止种勺在充种过程中过多携带种子,应满足

$$\theta \geq 90^\circ - \alpha \quad (2)$$

式中 α ——充种倾角, (°)

选择种勺型孔完全突破种层时刻,以种勺所携带的型孔外的种子为研究对象,进行运动学和静力学分析,如图 6 所示。

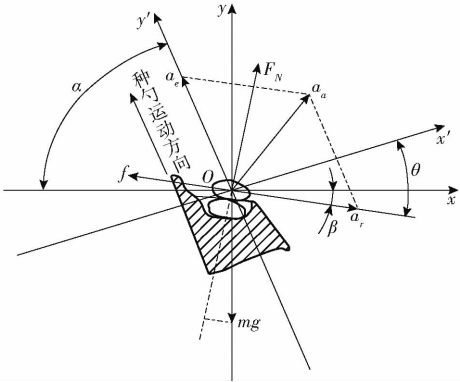


图 6 种勺携带型孔外种子运动学和静力学分析

Fig. 6 Kinematics and static analysis of seed spoon carrying type outside hole seeds

根据运动学分析可知,种勺携带型孔外种子的牵连加速度 a_e 和相对加速度 a_r 的方向分别与种勺运动方向和种勺倾角有关。保证种勺倾角具有自动清种能力,应满足种勺携带型孔外种子的绝对加速度 a_a 在 Oxy 坐标系第一象限内。所以,对种勺携带型孔外种子进行静力学分析,应满足

$$\begin{cases} a_r > 0 \\ \beta < \varphi_{\text{abs}} \\ \beta = \theta - (90^\circ - \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_N = mg \cos \beta \\ f = F_N \mu_s \\ ma_r = mg \sin \beta - f \end{cases} \quad (4)$$

式中 β ——型孔相对倾角, (°)
 φ_{abs} ——种子与种勺材料最大摩擦角, (°)
 F_N ——种勺携带型孔外种子所受正压力,N
 f ——种勺携带型孔外种子所受摩擦力,N
 μ_s ——人参种间动摩擦因数
 m ——人参种子质量,kg
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

试验测得种子与种勺材料的最大摩擦角 $\varphi_{\text{abs}} = 24.6^\circ$ (种勺使用 ABS 塑料注塑而成),人参种子间的动摩擦因数 $\mu_s = 0.613$,因此得到型孔相对倾角 β 为 $4.97^\circ \sim 24.6^\circ$,种勺倾角 θ 需要充种倾角 α 确定后才能确定。

2.2.3 种勺形体尺寸

种勺形体尺寸取决于链条附板宽度、型孔尺寸、种勺倾角、种勺分布和充种倾角等因素,决定着排种器尺寸,是影响充种效果的重要因素。根据图 5 结合 2.1 节和 2.2.1 节内容,种勺形体尺寸需满足

$$\begin{cases} A_1 > 1.2b_4 \\ B_1 > h_3 - \frac{1}{2}h_2 \\ l > C_1 > w_3 + B\sin\theta_{\max} \\ A_1 \geq B_1 \\ C_1 - \frac{1}{2}w_3 > 1.5p \end{cases} \quad (5)$$

式中 b_4 ——单排链条销轴长度,mm
 h_2 ——链条内链板高度,mm
 h_3 ——链条附板高度,mm
 w_3 ——链条附板宽度,mm
 p ——04C 链条节距,mm

根据表 1 中 04C 链条主要结构参数和式(5)确定种勺长度 A_1 为 11 mm,种勺宽度 B_1 为 11 mm,种勺高度 C_1 为 16 mm,在种勺贴近链条一侧的型孔上部设计“塔形”过渡凸起,防止种勺与链条贴合处卡种。

2.2.4 种勺分布

理想状态下,单粒播种在相同时间内落入种沟的人参种子数量等于排种器排出种子的数量,满足

$$\frac{v_1 \Delta t}{S} = \frac{v \Delta t}{l} \quad (6)$$

式中 v_1 ——播种机前进速度,m/s
 v ——排种链条线速度,m/s
 S ——理论株距,mm
 l ——种勺间距,mm
 Δt ——落种时间间隔,s

人参播种株距介于 25 ~ 50 mm,机械自走式播种机速度一般为 1 ~ 2 km/h,为保证充种质量,排种链条线速度不超过 0.55 m/s^[19],经计算,在播种机极限速度下,种勺分布间距为 24.75 ~ 49.5 mm;结合种勺安装在链条附板上的排种器结构设计,种勺分布间距应满足 $24.75 \text{ mm} \leq 2np \leq 49.5 \text{ mm}$ (n 为链节数)。链条节距为 6.35 mm, n 可取 2 和 3,为提高链条利用率和使链条转速最小化, n 取 2。故种勺分布间距 l 为 25.4 mm。

2.3 充种倾角

由 1.2 节充种过程分析可知,倾斜充种可有效提高排种器的充种性能,结合 2.2.3 节种勺分布设计,充种区链条与种勺结构如图 7。为使充种区种子更顺畅地流入两个种间,应满足

$$\begin{cases} W_t \geq L_{\max} \\ \cos\alpha = \frac{W_t}{l} \\ \alpha \geq \varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中 W_t ——种子流入通道宽度,mm
 φ ——种子自然休止角, (°)

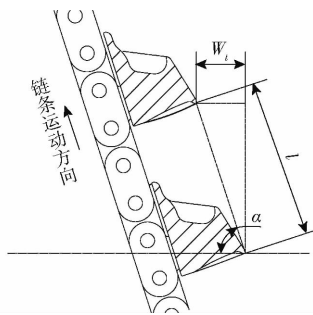


图 7 倾斜充种示意图

Fig.7 Schematic of inclined seed filling

试验测得种子自然休止角 φ 为 30.05°,故得到充种倾角 $30.05^\circ \leq \alpha \leq 75.17^\circ$,将护种段的链条运动方向设计成垂直地面方向,可以使种子更稳定地落入种沟内,排种链条布置如图 8。为了提高排种链条在充种段的利用率,充种倾角为 $45^\circ \leq \alpha \leq 75.17^\circ$ 。

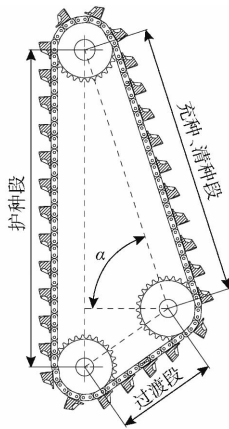


图 8 排种链条布置示意图

Fig.8 Schematic of chain of seeding

2.4 主动链轮

人参种子在随着种勺翻越主动链轮过程中,若所受的惯性力过大,则会被甩出种勺,无法进入护种板,造成漏播。对翻越主动链轮时种勺内的种子进行受力分析,如图 9 所示。

以人参种子质心为原点,垂直于种子与勺壁接触面指向勺壁方向为 x 轴正向,垂直于 x 轴指向种

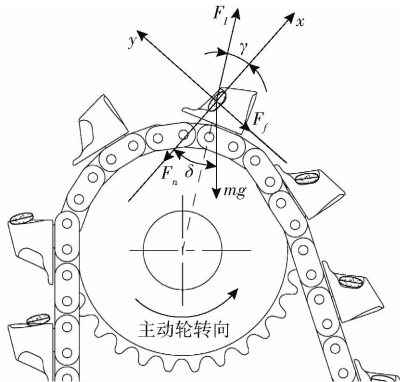


图 9 翻越主动链轮时种勺内的种子受力分析

Fig.9 Stress analysis of seeds in seed spoon when climbing over driving sprocket

子具有运动趋势的方向为 y 轴正向,建立直角坐标系,则临界状态下保证种子不被甩出应满足

$$\begin{cases} \sum F_x = F_l \cos \gamma - F_n - mg \cos \delta = 0 \\ \sum F_y = F_l \sin \gamma - F_f - mg \sin \delta \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} F_l = m \frac{v^2}{10^3 R} \\ F_f = \mu F \\ R = \frac{d + h_3 + B_1}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\sum F_x$ ——种子在 x 方向所受合力, N

$\sum F_y$ ——种子在 y 方向所受合力, N

F_l ——转动惯性力, N

F_f ——种子与种勺间的摩擦力, N

F_n ——种勺壁对种子支持力, N

γ —— F_l 与 x 轴正向夹角, ($^\circ$)

δ ——重力与 x 轴负向夹角, ($^\circ$)

R ——转动半径, mm

μ ——种子与种勺间的摩擦因数

d ——主动链轮分度圆直径, mm

联立公式(8)、(9)得

$$d \geq \frac{2v^2 (\sin \gamma - \mu \cos \gamma)}{g (\sin \delta - \mu \sin \delta)} - h_3 - B_1 \quad (10)$$

当种勺间距 $l = 25.4$ mm 时,根据公式(6)计算得排种链条最大线速度 $v_{\max} = 0.56$ m/s,分度圆直径应满足 $d \geq 53$ mm,即当 F_l 与 mg 共线时 $d = 53$ mm,较大的分度圆直径可减小链条的弯曲应力,综合考虑,确定主动链轮分度圆直径 $d = 56.71$ mm,即 28 齿。

2.5 排种链条张紧装置

张紧装置是保证链勺式排种器充种、排种稳定和保护排种器各部件在工作过程中不被损坏的重要部件。排种链条的充种、清种段和过渡段易受外力影响,参考《机械设计手册》链传动布置与张紧,将从动链轮设计为张紧轮,张紧方向在排种链条充种、清种段和过渡段的角分线上,如图 10a 所示。张紧方式为弹簧自动张紧^[20],从动链轮张紧采用双弹簧对称张紧方式,如图 10b 所示,结合排种器结构和常用弹簧参数,选择弹簧线径 d_m 为 1.5 mm、弹簧外径 D_m 为 10 mm、自由长度 L_f 为 35 mm 的不锈钢弹簧,设计弹簧压缩量 X_c 为 5 mm 时,应满足

$$\begin{cases} F_s \leq 50 \text{ N} \\ F_s = 2kX_c \\ k = \frac{Gd_m}{8D_m N_c} g \end{cases} \quad (11)$$

式中 F_s ——弹簧张紧力, N

G ——不锈钢丝的刚性模数,取 7 300 N/mm

k ——弹簧刚度, N/mm

N_c ——弹簧有效圈数

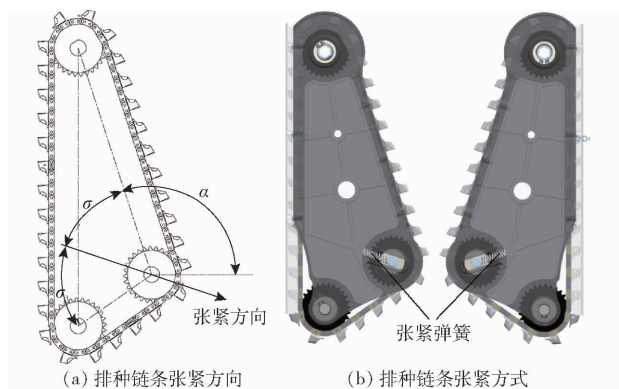


图 10 排种链条张紧示意图

Fig. 10 Schematics of tension of seeding chain

由此可知弹簧的有效圈数决定了弹簧刚度系数,弹簧刚度系数需根据张紧力确定。链传动系统的张紧力决定着链传动系统的使用寿命和排种链条运转过程中的抖动量。链条的抖动量直接影响排种器的充种性能,因此张紧力的大小需要进一步分析排种器的充种效果和链传动系统的使用寿命而确定。所以,张紧力 F_s 、弹簧刚度 k 和弹簧的有效圈数 N_c ,需要进一步试验分析后确定。

2.6 种层高度

如图 2 所示,种层高度是影响充种、清种效果的关键因素。在排种链条的充种、清种段,为保证充种效果,种层高度应至少高过 1 个种勺;为保证清种效果,种层高度不高过充种、清种段长度的二分之一。本文结合排种器结构,定义充种、清种段长度为 $L_c = 250$ mm,为此种层高度应满足

$$C_1 \sin \alpha_{\max} \leq H_s \leq \frac{1}{2} L_c \sin \alpha_{\max} \quad (12)$$

式中 H_s ——种层高度, mm

$\alpha_{\max}$ ——充种倾角最大值, ($^\circ$)

根据 2.3 节可知,充种倾角最大值为 75.17° ,故由式(12)得到 $15.47 \text{ mm} \leq H_s \leq 120.84 \text{ mm}$,考虑种箱底部安装有挡种毛刷的影响,本文种层高度为 $20 \text{ mm} \leq H_s \leq 120 \text{ mm}$ 。

3 基于 DEM - MBD 耦合仿真试验

离散元法 (Discrete element method, DEM) 和多体动力学 (Model based definition, MBD) 近年来开始应用于农业工程领域,在链勺式排种器中,种子以颗粒的形式受随链条运动的种勺的作用将种子从种群分离。由于排种器工作中种子颗粒受种间作用力影响,需要应用离散元进行分析;排种链条在运转过程中具有振动特性,需要应用多体动力学进行分析;待播种子的运动轨迹与链条运转轨迹大致相同,且常

用的离散元仿真软件和多体动力学仿真软件无法单独完成上述要求,因此采用 DEM-MBD 耦合的方法进行分析。

3.1 仿真模型建立

在 DEM-MBD 耦合仿真试验中,离散元仿真软件使用 EDEM,近年来 EDEM 在农业工程领域应用最为广泛;多体动力学仿真软件使用 RecurDyn (Recursive Dynamic),RecurDyn 是由韩国 FunctionBay 公司开发的新一代多体系统动力学仿真软件。它采用相对坐标系运动方程理论和完全递归算法,非常适合于求解大规模的多体系统动力学问题^[21-22]。

3.1.1 多体动力学模型

利用 RecurDyn 多体动力学软件可以实现链勺式排种器中排种链的传动,并利用其后处理功能,对排种链条的运动特性进行分析。

排种链系统的机械传动相对复杂,其中链节众多,各链节中又包括内链板、外链板、附板、销轴、套筒和滚子等零部件,因此在 RecurDyn 中直接建立链传动模型不太容易实现。因此,利用三维建模软件 NX 建立模型,为提高建模效率和后期仿真效率,故将模型简化。在 NX 中完成建模与装配后,把装配好的排种链系统模型转化为 step 格式导入到 RecurDyn 中进行动力学仿真。

在多体动力学仿真过程中可将仿真结果不产生影响的零件省去或者简化,以此减少仿真过程中不必要约束的添加和数量,提高仿真效率。因此将排种链多体动力学仿真模型的各零部件简化为:内链板与套筒、滚子合为内链节,外链板(或附板)、销轴合为外链节(或附板链节)。简化后排种链条各部件及装配三维模型如图 11 所示。



图 11 简化后排种链条各部件及装配三维模型

Fig. 11 Simplified 3D model of all components and assembly of rear type chain

将装配好的排种器模型所生成的 step 格式模型文件导入至 RecurDyn 中,如图 12。使用 Library 模块将排种链条、链轮和种箱设定为 steel;由于种勺、排种器壳体和护种板为 ABS 材料,故使用 Density 模块将种勺、排种器壳体和护种板的密度设置为 $1.25 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 。

链勺式排种器工作过程中,主动链轮旋转,链条通过与链轮轮齿啮合,带动种勺完成充种、清种、携种、护种和排种功能。因此,在 RecurDyn 中需要添

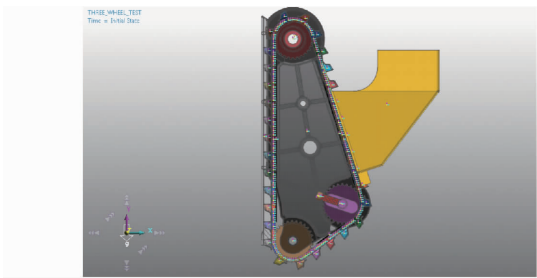


图 12 导入 RecurDyn 中的排种器模型

Fig. 12 Imported seed planter model in RecurDyn

加约束,添加的主要约束为:主动链轮、排种链轮和从动链轮分别以 Ground 为参考系添加旋转副;排种壳体、护种板和种箱分别以 Ground 为参考系添加固定副;内链节分别与主动链轮、排种链轮和从动链轮之间添加接触副;内链节分别与外链节或附板链节之间添加旋转副;种勺与附板链节之间添加固定副。在主动链轮的旋转副上添加驱动函数,考虑与 EDEM 耦合时,生成种子期间排种器不工作,故选用 $IF(time - t_1; 0, 0, x * pi)$ 驱动函数,其含义:在 t_1 前主动链轮转速为 0,在 t_1 后主动链轮转速为 $x(\text{rad/s})$, pi 代表圆周率^[21]。

3.1.2 离散元模型

在保证 EDEM 与 RecurDyn 耦合接口连接情况下,由于离散元仿真中,链轮不参与仿真,因此利用 RecurDyn 中 External SPI 功能模块下的 EDEM 接口模块将各链节、种勺排种器壳体、护种板和种箱以 wall 文件形式导出,然后通过 EDEM 中 Geometries 模块下的 Import Geometry from RecurDyn 功能将生成的 wall 文件导入 EDEM,导入 EDEM 排种器模型如图 13 所示。

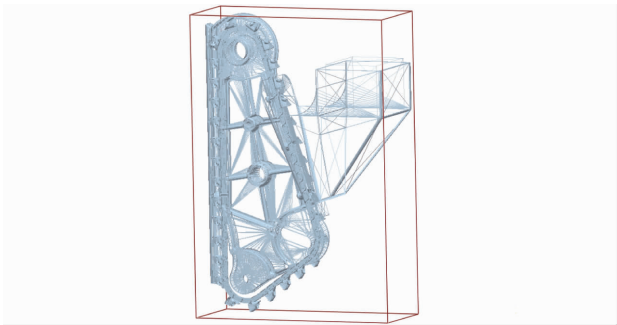


图 13 导入 EDEM 中的排种器模型

Fig. 13 Imported seed planter model in EDEM

仿真试验所采用的颗粒模型,采用长白山地区常见的“大马牙”人参种子。种子颗粒通过逆向工程技术得到三维模型后导入 EDEM,并通过颗粒快速填充功能,得到种子的多球面聚合颗粒模型,如图 14。

颗粒-颗粒和颗粒-排种器模型的接触模型均为 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型。排种器与种子接

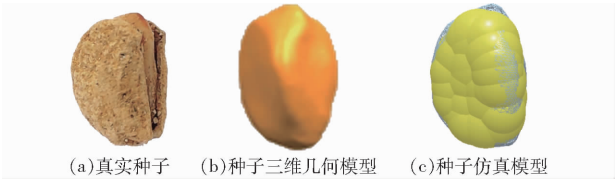


图 14 人参种子
Fig. 14 Ginseng seed

触的部件有排种器壳体、护种板、排种链条、种勺和种箱,其中排种器壳体、护种板和种勺为 ABS 注塑件,排种链条和种箱为不锈钢件。经参数标定后,种子颗粒、钢材和 ABS 塑料的本征参数及相互间的接触参数如表 2 所示^[4]。

表 2 离散元仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of EDEM

参数	人参颗粒	不锈钢	ABS 塑料
泊松比	0.37	0.30	0.34
剪切模量/Pa	1.28×10^7	7.0×10^{10}	3.0×10^9
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.972	7.800	1.250
碰撞恢复系数(与人参颗粒)	0.431	0.465	0.321
静摩擦因数(与人参颗粒)	0.613	0.414	0.457
滚动摩擦因数(与人参颗粒)	0.087	0.075	0.060

3.2 单因素仿真试验

为使链勺式排种器设计参数进一步具体化,基于 DEM-MBD 耦合对排种器的工作性能进行单因素仿真试验分析。根据第 2 节对关键参数的设计,结合现有链勺式排种器的研究成果,固定主动链轮转速为 89.29 r/min(即株距为 4 cm,作业速度为 1.5 km/h 时的作业频率为 625 次/min)、种层高度为 85 mm,充种倾角为 70°,型孔相对倾角为 0°,对排种链条张紧力、充种倾角、型孔相对倾角和种层高度进行分析^[23]。

试验中以充种单粒率(1 粒/勺)和漏充率(0 粒/勺)为试验指标。充种区内种子数量和种勺外侧种间相对运动状态是影响充种性能的重要因素,因此结合 EDEM 后处理功能,采用充种区种子回填质量和种勺外种间法向力分别衡量不同时步下种子回填效果和种勺外侧种间相对运动状态,其中充种区种子回填质量越大,充种效果就越好。为监测充种区局部种子质量和种勺外局部种群相对运动状态,需要在种群中建立监测器,如图 15,其中监测器 1 监测充种区局部种子质量,监测器 2 监测种勺外局部种群相对运动状态。如图 16 所示,工作状态的种勺与监测器 1 的相对位置变化,可由充种区局部种子质量变化曲线分为充种过程和种子回填过程。

耦合仿真试验中,在 EDEM 中设置 DEM 的

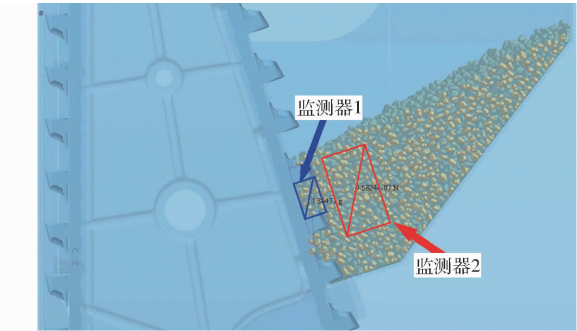


图 15 仿真试验建立的监测器
Fig. 15 Established monitors in simulation test

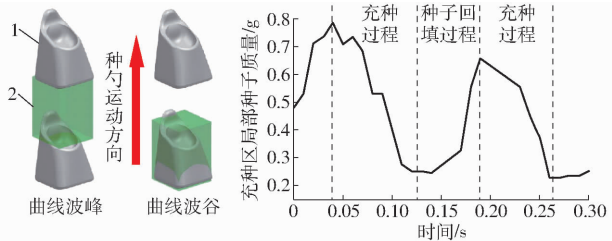


图 16 种勺与监测器 1 相对位置示意图
Fig. 16 Schematic of relative position of planting spoon and bin group 1
1. 种勺 2. 监测器 1

Rayleigh 时间步长为 1%,在 RecurDyn 中设置仿真总时长为 13 s,步长为 500 步,每组试验做 3 次,每次统计 100 个种勺的取种情况。

3.2.1 排种链条张紧力

根据 2.5 节的理论分析和 3.1 节中建模方法,在从动链轮上添加张紧桁架,并沿张紧方向添加外施恒力载荷,如图 17。

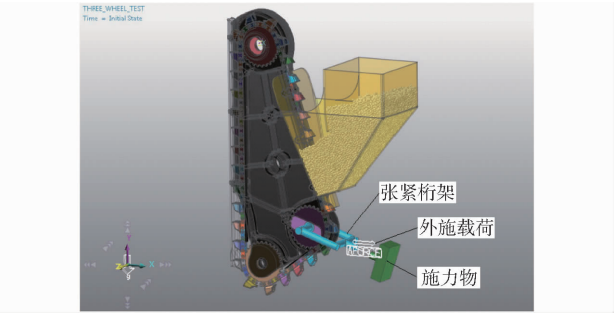


图 17 DEM-MBD 耦合张紧载荷示意图
Fig. 17 Schematic of DEM-MBD coupling tension load

根据 04C 单排链条测量力为 50 N,分析外施载荷分别为 10、20、30、40、50 N 时对排种器工作性能的影响,仿真结果如表 3 所示。

根据表 3 可知,随着载荷增大,充种单粒率先增加后减小,漏充率减小。为进一步分析排种链条张紧力对充种性能的影响,利用 RecurDyn 后处理功能,分别分析不同载荷下,目标种勺在充种、清种过程排种链条法向位移(即充种、清种段链条的抖动量)和链条与主动链轮啮合时啮合冲击力,

表 3 排种链条不同载荷下的仿真结果

Tab.3 Simulation results of seeding chain under different loads %

载荷/ N	单粒 率	漏充 率	单粒率 平均值	单粒率 变异 系数	漏充率 平均值	漏充率 变异 系数
10	82/75/82	16/24/17	79.67	5.07	19.00	22.94
20	88/91/94	9/7/4	91.00	3.30	6.67	37.75
30	93/96/92	3/4/3	93.67	2.22	3.67	31.49
40	94/96/93	1/2/1	94.33	1.62	1.33	43.30
50	92/90/93	1/0/0	91.67	1.67	0.33	173.21

利用 EDEM 后处理功能,分别分析不同张紧力下,充种区局部种子回填质量和种勺外局部种群运动状态,如图 18。

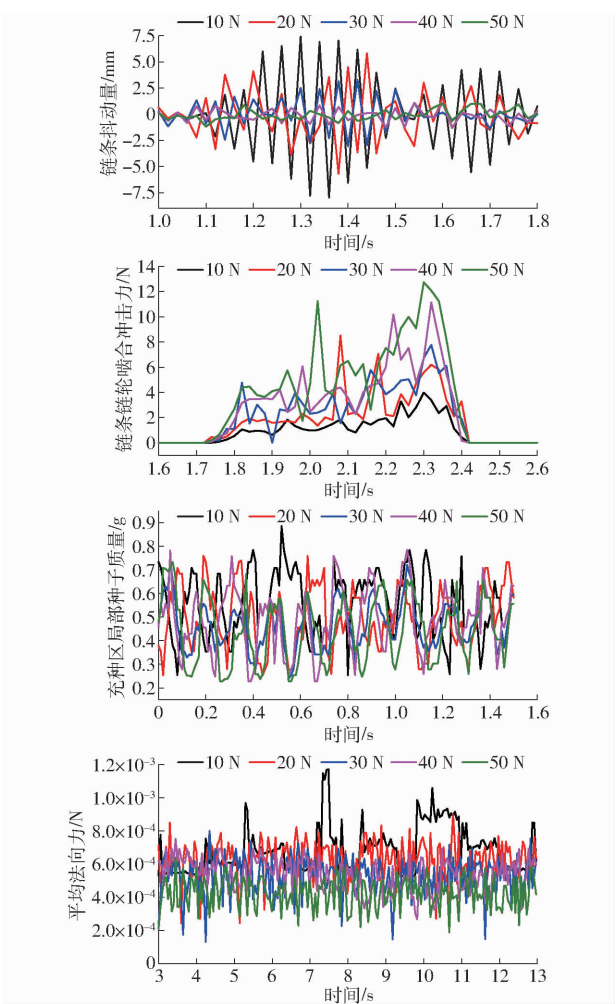


图 18 不同张紧力对链传动系统和种群的影响

Fig. 18 Influence of different loads on chain drive system and population

由图 18、表 3 可知,随着载荷的增加,链条抖动量减小,链条与主动链轮的啮合冲击力增大;链条抖动量越小,充种区局部种子回填质量越稳定,种勺外局部种群单粒种子平均法向力越小,且平均法向力波动越小,越有利于充种。当载荷为 50 N 时,单粒率下降,漏充率最低,因为排种链条抖动量越小越不

利于清种。因此,充分利用链条工作时所产生的振动,使其有利于清种,为使链条链轮啮合冲击力适当,延长链传动系统的使用寿命,故确定链条张紧力为 30 ~ 40 N。

结合 2.5 节理论分析,当选择弹簧有效圈数 N_s 为 8 时,确定弹簧刚度 k 为 3.40 N/mm,排种链条张紧力 F_s 为 34 N。

3.2.2 充种倾角

根据 1.2 节中对链勺式排种器充种过程分析和 2.3 节中充种倾角的参数化设计结果,结合 3.2.1 节得出的排种链条张紧力研究结果,分析充种倾角为 45°、55°、65°、75°、90°(即无充种倾角)时对排种器工作性能的影响,仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同充种倾角下的仿真结果

Tab.4 Simulation results of different filling angles %

充种 倾角/ (°)	单粒 率	漏充 率	单粒率 平均值	单粒率 变异 系数	漏充率 平均值	漏充率 变异 系数
45	59/47/33	0/0/0	46.33	28.09	0	
55	63/75/54	0/0/1	64.00	16.46	0.33	173.21
65	86/82/88	1/0/1	85.33	3.58	0.67	86.60
75	96/94/93	3/5/5	94.33	1.62	1.33	43.30
90	92/90/89	2/8/7	90.33	1.69	5.67	56.73

由表 4 可知,随着充种倾角的增大,充种单粒率先增大后减小,漏充率增大,单粒率的变异系数增大,漏充率变异系数先增大后减小,当无充种倾角时,漏充率最高。为进一步分析充种倾角对链勺式排种器充种单粒率的影响,在 EDEM 中分别导出不同试验充种区局部种子质量和种勺外局部种群单粒种子平均法向力,如图 19 所示。随着充种倾角的增大,充种区局部种子质量增大,种勺外局部种群单粒种子平均法向力减小,平均法向力波动减小。所以,较小的充种倾角,有利于充种区种子回填,有利于种勺外种群流动,有利于充种。随着充种倾角的增大,充种单粒率先增大后减小,充种漏充率减小,主要因为较小的充种倾角增大了充种复充率(≥ 2 粒/勺),因此验证了一定范围内的充种倾角可提高排种器的工作性能。为保证充种单粒率最大,充种漏充率最小,故选定充种倾角为 65° ~ 75°。

3.2.3 型孔相对倾角

根据 2.2.2 节对种勺倾角的理论设计,结合 3.2.1 节和 3.2.2 节的试验结果,分析型孔相对倾角为 0°(即无型孔相对倾角时)、5°、10°、15°、20°、25°对排种器工作性能的影响,仿真结果如表 5 所示。

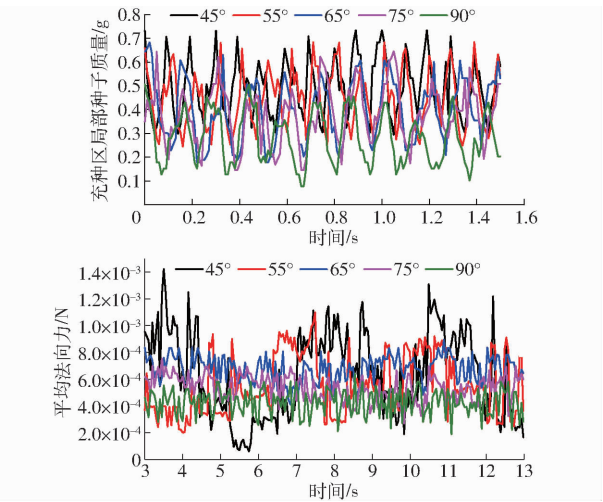


图 19 不同充种倾角对种群的影响

Fig. 19 Influence of different filling angle on population

表 5 不同型孔相对倾角下的仿真结果
Tab. 5 Simulation results of different hole inclination compensation angles %

型孔相对倾角/ (°)	单粒率	漏充率	单粒率 平均值	单粒率 变异系数	漏充率 平均值	漏充率 变异系数
0	90/88/91	1/1/0	89.67	1.7	0.67	86.60
5	97/96/96	1/2/1	96.33	0.60	1.33	43.30
10	94/97/95	3/1/3	95.33	1.60	2.33	49.49
15	93/95/92	3/5/4	93.33	1.64	4.67	32.73
20	90/93/89	8/6/5	90.67	2.30	6.33	24.12
25	85/79/82	14/19/17	82.00	3.66	16.67	15.10

由表 5 可知,随着种勺倾角的增大充种单粒率先增大后减小,漏充率增大,单粒率变异系数均相对稳定。当型孔相对倾角为 0°时,单粒率和漏充率均相对较低,因为在清种过程中,利用排种链条运转所产生的抖动不易清掉种勺中复充的种子;当型孔相对倾角为 25°时,排种链条运转所产生的抖动,致使种勺囊种效果变差,漏充率增大,充种单粒率不稳定。由此可知,型孔相对倾角有利于结合排种链条的运转所产生的抖动进行清种,但是型孔相对倾角过大,会降低排种器的单粒率,并使单粒率的变异系数增大。根据试验结果,选定型孔相对倾角为 5°。

3.2.4 种层高度

种层高度是影响充种过程和清种过程的重要因素,决定着种箱结构参数设计。结合 3.2.1 ~ 3.2.3 节的单因素仿真试验分析,为保证充种效果和保证排种链条运行所产生的抖动具有清种效果,需满足 $20\text{ mm} \leq H_s \leq 120\text{ mm}$ 。为此分析种层高度为 20、45、70、95、120 mm 时对排种器充种和清种效果的影响,仿真结果如表 6 所示。

表 6 不同种层高度下的仿真结果
Tab. 6 Simulation results of different seed heights

种层高度/ mm	单粒率	漏充率	单粒率 平均值	单粒率 变异系数	漏充率 平均值	漏充率 变异系数
20	85/78/81	14/21/19	81.33	4.32	18.00	20.03
45	82/86/90	16/13/9	86.00	4.65	12.67	27.73
70	93/95/92	2/3/2	93.33	1.64	2.33	24.74
95	94/96/96	1/2/1	95.33	1.21	1.33	43.30
120	81/79/83	1/1/0	81.00	2.47	0.67	86.60

随着同时处于种群内种勺数量的增加,单粒率先增大后减小,漏充率较小,当种层高度为 70 mm 和 95 mm 时,单粒率变异系数相对稳定;当种层高度为 20 mm 时,漏充率最大,说明较小的种层高度不利于充种;当种层高度为 120 mm 时,漏充率最小,单粒率相对减小,说明较大的种层高度导致种勺复充,不利于清种。结合图 20 可知,随着种层高度的增加,充种区局部种子质量增大,种勺外单粒种子的平均法向力先减小后增大,种层高度的增加有利于在充种过程中种子回填,种勺外种群状态更加稳定,当种层高度为 20 mm 时,单粒种子的平均法向力最大,是因为种层高度最小,种子间相互压力最小,种群流动时最活跃,导致法向力波动较大;当种层高度为 120 mm 时,种层高度最大,种子间压力最大,种群流动时更加稳定,法向力波动较小。故选择种层高度为 70 ~ 95 mm。

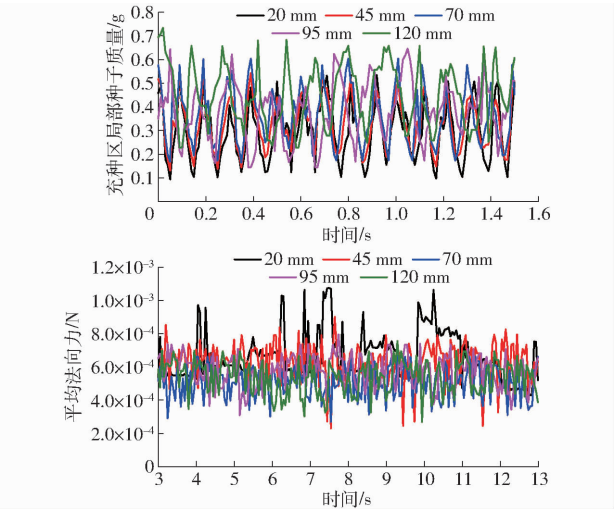


图 20 不同种层高度对种群的影响

Fig. 20 Influence of different seed heights

3.3 二次回归正交旋转组合仿真试验

3.3.1 试验方案与结果分析

为进一步研究主动链轮转速、充种倾角和种层高度对链勺式排种器工作性能的影响,基于关键部件及工作参数设计和单因素仿真试验所确定的设计

参数,进一步研究各因素对排种器工作性能的影响。试验因素编码如表 7 所示,试验设计方案与试验结果如表 8 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为主动链轮转速、充种倾角、种层高度的编码值,试验指标 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别为单粒率、复充率、漏充率。

表 7 试验因素编码

Tab.7 Experimental factors and codes

编码	因素		
	主动链轮转速/	充种倾角/	种层高度/
	($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	($^{\circ}$)	mm
-1.682	60.00	65.00	70.00
-1	72.16	67.03	75.07
0	90.00	70.00	82.50
1	107.84	72.97	89.93
1.682	120.00	75.00	95.00

表 8 试验方案与结果

Tab.8 Experiment design and results

序号	因素			试验指标		
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	92.00	5.67	2.33
2	1	-1	-1	90.00	7.33	2.67
3	-1	1	-1	90.67	7.33	2.00
4	1	1	-1	89.67	8.00	2.33
5	-1	-1	1	95.33	4.33	0.33
6	1	-1	1	92.00	7.33	0.67
7	-1	1	1	91.67	7.67	0.67
8	1	1	1	91.67	4.67	3.67
9	-1.682	0	0	93.33	5.67	1.00
10	1.682	0	0	89.33	8.67	2.00
11	0	-1.682	0	94.67	5.00	0.33
12	0	1.682	0	90.67	7.00	2.33
13	0	0	-1.682	90.33	6.00	3.67
14	0	0	1.682	91.67	8.33	0
15	0	0	0	95.67	4.00	0.33
16	0	0	0	94.67	4.67	0.67
17	0	0	0	94.67	4.00	1.33
18	0	0	0	94.33	4.67	1.00
19	0	0	0	95.33	4.67	0
20	0	0	0	95.67	3.67	0.67
21	0	0	0	94.00	4.67	1.33
22	0	0	0	94.67	5.00	0.33
23	0	0	0	94.33	4.67	1.00

利用 Design-Expert 12.0.3 软件对试验结果进行多元回归拟合,其中试验结果 $Y_2\leqslant8.67\%$,结合本文研究重点为设计链勺式排种器,解决人参种子在播种过程中充种困难的问题,因此只对链勺式人参精密排种器充种的单粒率和漏充率进行方差分析。表 9 为单粒率与漏充率方差分析,其中二次回归模型均高度显著 ($P<0.01$),失拟项均不显著

($P>0.05$),回归方程不失拟,剔除不显著影响因素后,得到 Y_1 、 Y_3 的回归方程

$$Y_1=94.81-0.96X_1-0.91X_2+0.77X_3+0.54X_1X_2-1.2X_1^2-0.73X_2^2-1.32X_3^2\quad (13)$$

$$Y_3=0.74+0.42X_1+0.44X_2-0.74X_3+0.5X_2X_3+0.32X_1^2+0.43X_3^2\quad (14)$$

表 9 单粒率与漏充率方差分析

Tab.9 Variance analysis of single grain rate and leakage rate

方差来源	单粒率				漏充率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	93.13	9	21.24	<0.000 1	21.92	9	7.36	0.000 8
X_1	12.49	1	25.63	0.000 2	2.36	1	7.15	0.019 1
X_2	11.25	1	23.08	0.000 3	2.66	1	8.05	0.014
X_3	8.19	1	16.81	0.001 3	7.57	1	22.88	0.000 4
X_1X_2	2.35	1	4.82	0.047	0.888 9	1	2.69	0.125 1
X_1X_3	0.013 9	1	0.028 5	0.868 5	0.888 9	1	2.69	0.125 1
X_2X_3	0.680 6	1	1.4	0.258 5	2	1	6.05	0.028 7
X_1^2	22.88	1	46.95	<0.000 1	1.58	1	4.79	0.047 5
X_2^2	8.43	1	17.31	0.001 1	1.05	1	3.17	0.098 4
X_3^2	27.59	1	56.62	<0.000 1	2.99	1	9.03	0.010 1
残差	6.34	13			4.3	13		
失拟	3.42	5	1.88	0.203 9	2.57	5	2.38	0.132 1
误差	2.91	8			1.73	8		
总和	99.47	22			26.22	22		

由表 9 可知,三因素对单粒率影响的主次顺序为主动链轮转速、充种倾角、种层高度,其中主动链轮转速与充种倾角间存在的交互作用不容忽视,二者响应曲面如图 21a 所示。在低转速区单粒率随充种倾角的增大先增大后减小,在高转速区单粒率随充种倾角的增大先增大后减小;在充种倾角较小区单粒率随转速的增大先增大后减小,在充种倾角较大区单粒率随着转速的增加先增大后减小,因此二者具有显著的相关性。三因素对漏充率影响的主次顺序为种层高度、充种倾角、主动链轮转速,其中种层高度与充种倾角间存在的交互作用不容忽视,二者响应曲面如图 21b 所示。在种层高度较小区漏充率随充种倾角的增大而增大,在种层高度较大区漏充率随充种倾角的增大而增大;在充种倾角较小区漏充率随种层高度的增大而增大,在充种倾角较大区漏充率随着种层高度的增加先减小后增大,因此二者具有显著的相关性。

3.3.2 试验结果目标优化

为在水平约束条件下寻求各因素的最优组合,仍将单粒率和漏充率作为评价指标,结合因素边界条件建立数学模型,并对评价指标回归模型进行多

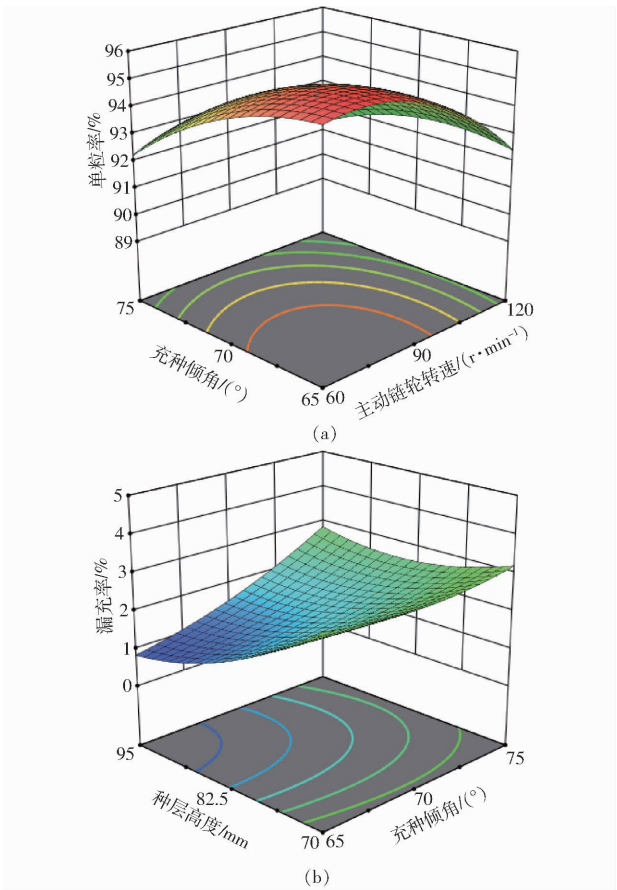


图 21 试验因素交互作用对单粒率和漏充率影响的响应曲面

Fig. 21 Influence of interaction on single grain rate and leakage rate

目标化求解,优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \quad (15)$$

以单粒率最高和漏充率最低为优化目标进行多目标优化,经求解得主动链轮转速为 79.10 r/min、充种倾角为 71.73°、种层高度为 84.28 mm 时性能最优,单粒率为 95.68%、复充率为 3.57%、漏充率为 0.75%。

4 排种器台架试验

4.1 试验材料

按照理论设计参数和仿真试验优化后的参数,排种器壳体、护种板和种勺均使用 ABS 材料,由霸州市海宝科技有限公司经模具制造和注塑成型工艺加工而成,其中排种器外壳的充种倾角为 72°,种勺倾角为 23°;种箱由不锈钢材料经折弯和焊接工艺加工而成,如图 22 所示。试验所使用的种子选取裂

口率在 95% 以上、胚率在 80% 以上、含水率为 40% 左右的长白山“大马牙”人参种子。

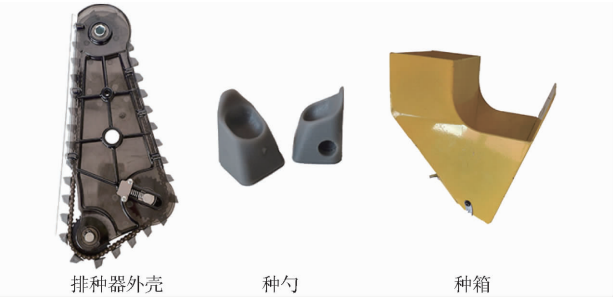


图 22 试验用排种器

Fig. 22 Seed-metering device used in test

4.2 台架试验

试验在昆明理工大学农业机械装备实验室的 JPS-12 型视觉排种器性能试验台上进行,试验装置如图 23 所示。试验时选择 3 个排种器同时试验,固定行距为 15 cm,设置排种器主动链轮工作转速为 79.10 r/min,种层高度为 84 mm。

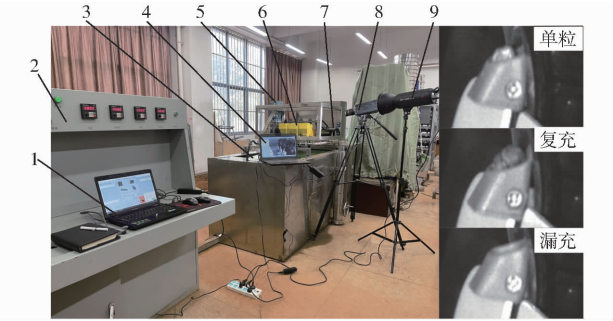


图 23 排种器性能试验装置

Fig. 23 Seed-metering device performance test

1. 计算机I 2. 控制柜 3. 传送带 4. 计算机II 5. 电机 6. 链勺式人参精密排种器 7. 排种轴 8. 高速摄像装置 9. 补光灯

4.2.1 充种性能试验

为方便观察排种器的充种情况,选择排种链条的充种、清种段上端将要与主动链轮啮合处为观测点,使用合肥富煌君达高科信息技术有限公司提供的千眼狼 5F01M 型高速摄像机拍摄种勺的充种情况,待排种器工作稳定后取 200 个种勺统计数据。

根据试验结果可知,链勺式人参精密排种器充种单粒率为 94.33%,其变异系数为 0.81%;漏充率为 1.17%,其变异系数为 24.74%,充种性能稳定,3 排排种器间的差异性不大,结果与仿真试验吻合,基于 DEM-MBD 耦合对链勺式人参精密排种器的仿真试验可靠。通过分析高速摄像的记录,可以看出种子多以“平躺”姿态囊入种勺,复充情况均是两粒种子竖直并列充入型孔,未出现一个种勺充种数量大于等于 3 粒种子的情况。

4.2.2 工作性能试验

为研究排种器的工作性能和播种分布均匀性,

调整落种点与传动带的高度为 75 mm,设置传动带速度为 0.37 m/s(播种株距按 4 cm 计算,机具工作速度为 1.33 km/h),控制油泵在传送带上刷油,待排种稳定后,按照最小测定区段 10 m(250 个粒距)测量,统计区段内种子数量和伤种数量^[24],如图 24 所示,试验结果如表 10 所示。

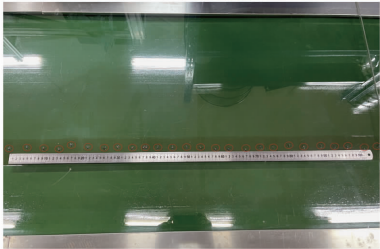


图 24 分段测量
Fig. 24 Sectional measurement

表 10 分段测量试验结果

Tab. 10 Test results of sectional measurement

序号	种子数量均值	种子数量标准差	种子数量变异系数/%	损伤种子数量均值	损伤种子数量标准差	损伤种子数量变异系数/%
1	25.80	0.25	0.97	0	0	
2	26.15	0.45	1.72	1	0.95	95.00
3	25.65	0.39	1.52	0	0	
平均值	25.87	0.36	1.40	0.33	0.32	31.67

由表 10 可知,排种器行内排种量分布均匀性的变异系数为 1.40%,损伤种子数量均值为 0.33,其标准差为 0.32,其变异系数为 31.67%,表明链勺式人参精密排种器工作性能较好,基本达到零伤种标准。

5 结论

(1)设计了一种链勺式人参精密排种器。通过对充种过程中种子受力情况和运动状态的分析,阐明了倾斜充种可提高充种性能的机理;通过对携种过程的理论计算和力学分析,确定了种勺型孔长、宽、深分别为 7.5、6.0、3.5 mm,种勺的长、宽、高分别为 11、11、16 mm,种勺分布间距为 25.4 mm,主动链轮为 28 齿。

(2)利用 DEM－MBD 耦合仿真技术,通过单因素仿真试验,分析了不同排种链条的张紧力、不同排种器结构参数和工作参数对其工作性能的影响,进一步确定了排种器张紧力为 34 N,型孔倾角为 5°。通过设计二次回归正交旋转组合试验研究主动链轮转速、充种倾角和种层高度对排种器工作性能的影响,试验结果表明,在主动链轮转速为 79.10 r/min、充种倾角为 71.73°、种层高度为 84.28 mm 时,单粒率(1 粒/勺)为 95.68%、复充率(≥2 粒/勺)为 3.57%、漏充率(0 粒/勺)为 0.75%,排种器工作性能最佳。

(3)对仿真试验得到的优化结果进行台架试验验证,得到单粒率为 94.33%,其变异系数为 0.81%;漏充率为 1.17%,其变异系数为 24.74%;排种器行内排种量分布均匀性的变异系数为 1.40%,损伤种子数量均值为 0.33,其标准差为 0.32,其变异系数为 31.67%。基于 DEM－MBD 耦合所设计的链勺式人参精密排种器工作性能较好,基本实现零伤种,可满足我国人参非林地精密播种要求。

参 考 文 献

[1] GB/T 34789—2017 人参优质种植技术规范[S]. 2017.

[2] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 60-71. LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of ginseng precision special-hole type seed-metering device with convex hull[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 60-71. (in Chinese)

[3] 黄春洋. 参类种子力学性能及型孔式排种器性能的试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016. HUANG Chunyang. Ginseng seed mechanical properties and pore type metering device performance test research [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[4] 廖宜涛,郑娟,廖庆喜,等. 正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 46-57. LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for american ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46-57. (in Chinese)

[5] 王希英,唐汉,王金武,等. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82-90. WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82-90. (in Chinese)

[6] 牛康. 马铃薯整薯精密播种关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. NIU Kang. Study of key technologies on the whole potato seed precision sowing[D]. Beijing: China Agricultural University,

2017. (in Chinese)
- [7] GULATI S, SINGH M. Design and development of a manually drawn cup type potato planter[J]. Journal of Indian Potato Association, 2003, 30(1-2): 61-62.
- [8] SZCZEPANIAK J. Parameter's identification of agricultural combination tractor-potato planter model[J]. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2008, 53(2):16-20.
- [9] 崔荣江, 荐世春, 杨继鲁, 等. 勾链式大蒜取种器的优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 99-102,107.
CUI Rongjiang, JIAN Shichun, YANG Jilu, et al. Optimization design and test of take garlic spoon[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 99-102, 107. (in Chinese)
- [10] 苏微, 洪方伟, 赖庆辉, 等. 预切种甘蔗勾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)
- [11] MOSLEM N, JALIL R. Development and evaluation of a new double-row sugarcane billet planter with overlap planting pattern[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America: AMA, 2014, 45(2): 57-64.
- [12] TITINAI T, KHWANTRI S, MASAMI U. Analysis of discharge consistency and performance of a sugarcane billet planter with side-conveyer concept[J]. KKU Engineering Journal, 2016, 43(1): 9-12.
- [13] 刘晓蛟, 尚书旗, 王东伟, 等. 气力式西洋参排种装置的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 213-217.
LIU Xiaojiao, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and experimental research of physical strength type seed-metering device for panax quinquefolius[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 213-217. (in Chinese)
- [14] 刘文亮, 刘枫, 付家庆, 等. 人参机械化种植设备的设计研究[J]. 山西农业科学, 2016, 44(10): 1537-1540.
LIU Wenliang, LIU Feng, FU Jiaqing, et al. Study on the design of mechanical planting equipment of ginseng[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 1537-1540. (in Chinese)
- [15] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 92-100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of Venturi feeding tube based on DEM-CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 92-100. (in Chinese)
- [16] 袁军, 于建群. 基于 DEM-MBD 耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1):17-24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiler based on DEM-MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 17-24. (in Chinese)
- [17] SHI Shunwei, GAO Liang, CAI Xiaopei, et al. Effect of tamping operation on mechanical qualities of ballast bed based on DEM-MBD coupling method[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 124:103574.
- [18] 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 108-112.
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108-112. (in Chinese)
- [19] 吕金庆, 杨颖, 李紫辉, 等. 舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 17-25.
LÜ Jinqing, YANG Ying, LI Zihui, et al. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 17-25. (in Chinese)
- [20] 闻邦椿. 机械设计手册(第2卷)[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [21] 刘晓寅. 斗式提升机输送链传动系统的优化设计与仿真研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.
LIU Xiaoyin. Optimization design and simulation study of conveyor chain transmission system for bucket elevator[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [22] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 170-180.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2):170-180. (in Chinese)
- [23] 段宏兵, 陈志鹏, 宋波涛, 等. 三角链半杯勺式丘陵山区马铃薯精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1):96-104.
DUAN Hongbing, CHEN Zhipeng, SONG Botao, et al. Design and experiment of triangular chain half cup spoon-shaped potato precision planter in hilly mountainous[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):96-104. (in Chinese)
- [24] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.