doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.009

链勺翻转清种式蚕豆精密排种器设计与试验

赖庆辉　谢观福　苏　微　赵瑾汶　孙文强　陈朝阳
(昆明理工大学现代农业工程学院,昆明 650500)

摘要:针对蚕豆种子三轴尺寸差异大、清种难、易重播的问题,设计了一种链勺翻转清种式蚕豆精密排种器。对排种器关键部件参数进行设计,通过理论分析建立了种子在清种区的动力学模型;利用 DEM - MBD 耦合方法进一步分析了弹簧张紧力、种层高度、作业速度、清种区排种链倾角和充种区排种链倾角对排种性能的影响,校核了弹簧刚度,确定了弹簧张紧力为 50 N,种层高度为 75 mm。以充种区排种链倾角、清种区排种链倾角和作业速度为试验因素,合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标,采用二次回归正交旋转组合试验方法进行台架试验;试验结果表明,最优参数组合为:作业速度 4.25 km/h、清种区排种链倾角 -2.9°、充种区排种链倾角 74°;对上述组合参数进行排种性能试验验证,得到此时合格指数为 93.83%,重播指数为 5.67%,漏播指数为 0.50%,满足蚕豆播种要求。

关键词:蚕豆;排种器;链勺翻转清种式;DEM - MBD;正交试验
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)08-0082-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Precision Seed Metering Device for Broad Bean with Chain Spoon Flipping Seed Cleaning

LAI Qinghui　XIE Guanfu　SU Wei　ZHAO Jinwen　SUN Wenqiang　CHEN Zhaoyang
(*Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: Aiming at the big difference in the three-axis size of broad bean seeds, which leads to the difficulty of seed clearing and easy reseeding, a precision seed metering device for broad bean was designed with a chain spoon flip-over clearing type. The structural parameters of the key components were determined through theoretical calculations, and the dynamic model of the seed cleaning process was established. The factors that affected the seeding performance indicators were obtained as follows: spring tension, seed layer height, operating speed, seed cleaning area, inclination of the chain and the inclination of the chain in the filling zone. The DEM - MBD coupling method was used to further determine the influencing factors, and the spring stiffness coefficient was checked, and the spring tension was determined to be 50 N and the seed layer height to be 75 mm. Taking the inclination angle of the seeding chain in the filling area, the inclination angle of the seeding chain in the cleaning area and the operating speed as the test factors, the qualified index, the replay index, and the missed seeding index as the test indicators, and the quadratic regression orthogonal rotation combined test method was used for the bench test. The test results showed that the optimal parameter combination was the operating speed of 4.25 km/h, the inclination of the seeding chain in the clearing zone was -2.9°, and the inclination of the seeding chain in the filling zone was 74°. It was obtained that the qualified index was 93.83%, the replay index was 5.67%, and the missed seeding index was 0.50%, which met the requirements of broad bean seeding.

Key words: broad bean; seed metering device; chain spoon flipping seed clearing style; DEM - MBD; orthogonal experiment

收稿日期:2021-09-17　修回日期:2021-11-15
基金项目:国家自然科学基金项目(52165031、51975265)、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,主要从事农业机械装备研究,E-mail:laisubo@163.com

0　引言

蚕豆是世界上第三大冬季食用豆，中国蚕豆种植面积和产量均居世界第一位[1]；但是目前我国蚕豆播种大多采用人工点播，劳动强度大、作业质量差、生产效率低，严重制约了蚕豆产业的发展[2]，因此提高蚕豆机械化水平十分重要。

精密排种器作为蚕豆播种的核心部件，其工作性能直接影响播种质量[3-7]，按大类可分为气力式排种器和机械式排种器，由于我国蚕豆种植地形复杂，地块小而分散，而气力式排种器又存在能耗大、成本高、地头气压难以保证等问题，不适合小地块作业，且对蚕豆的吸附效果差，故气力式排种器在我国不适用[8-9]。而机械式排种器结构简单、成本低，适合我国丘陵坡地小地块的蚕豆精密播种；李玉环等[2]设计了一种勺夹式蚕豆精量排种器，有效提高了排种器对种子的适应性；周春健等[10]设计了一种外槽轮式排种器，提高了播种效率和质量；荆毅[11]研制了 2BCL－3 型蚕豆精量播种机，依据蚕豆外形尺寸和投种过程的力学分析，对排种器型孔进行结构参数设计，提高了排种器对蚕豆种子的适应性；韩国 Jang Automation 公司[12]研制了 JP－6 型手扶窝眼轮式蚕豆播种机，设计了不同型孔尺寸的窝眼轮，能根据种子的不同外形尺寸和农艺要求进行更换。上述研究均解决了蚕豆种子充种困难问题，提高了播种效率。但蚕豆种子呈扁平状，其三轴尺寸差异大，型孔尺寸难以确定，清种难，易重播。

针对上述问题，本文设计一种链勺翻转清种式蚕豆精密排种器，利用 L 型种勺的结构特性，通过种勺翻转，处于取种部分内侧的种子滑躺在留种部分，多余的种子掉落，达到清种目的，增加角度调节装置调节充种区排种链倾角和清种区排种链倾角，利用 EDEM 和 RecurDyn 联合仿真方法进行单因素试验，分析链条抖动量对排种性能的影响，校核弹簧刚度，确定因素较优范围，采用二次回归正交旋转组合试验方法进行台架试验，得到最优工作组合，并对工作性能进行验证，以期解决由蚕豆种子三轴尺寸差异大造成的清种难度大和重播指数高的问题。

1　排种器整体结构与工作原理

1.1　排种器整体结构

链勺翻转清种式蚕豆精密排种器结构示意图如图 1 所示，主要包括排种器壳体、护种板、主动链轮、种勺、护链板、角度调节装置、清种链轮、种箱、张紧装置、张紧弹簧、排种链轮。

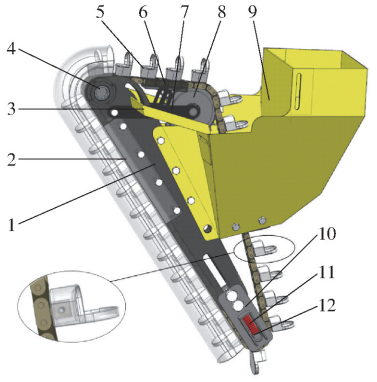


图 1　链勺翻转清种式蚕豆精密排种器结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of precision seed metering device for broad bean with flipping and clearing type of chain spoon

1. 排种器壳体　2. 护种板　3. 回流板　4. 主动链轮　5. 种勺　6. 护链板　7. 角度调节装置　8. 清种链轮　9. 种箱　10. 张紧装置　11. 张紧弹簧　12. 排种链轮

1.2　工作原理

排种器工作过程分为充种区、清种区、携种区、护种区、投种区 5 个阶段，如图 2 所示。在排种器工作前先调整到合适的种层高度，蚕豆种子进入种箱后形成种子群；主动链轮在动力驱动下带动排种链运动，种群中下层蚕豆种子在重力、种子间和种子与种箱内壁间相互作用力的共同作用下充入种勺取种部分，排种链上的种勺依次舀取 1 粒或 2 粒蚕豆种子，提高充种效果，避免漏播；当种勺运动至清种区翻越清种链轮时，处于取种部分内侧的种子滑躺在种勺留种部分，多余的种子掉落，落入回流板，通过自身重力落回种箱；进入携种区，若仍有处于堆积状态的种子，其受力不稳定，可通过链条自振实现二次清种；当种勺运动至主动链轮，种勺留种部分的种子在重力和惯性共同作用下落入前一种勺的背部，并

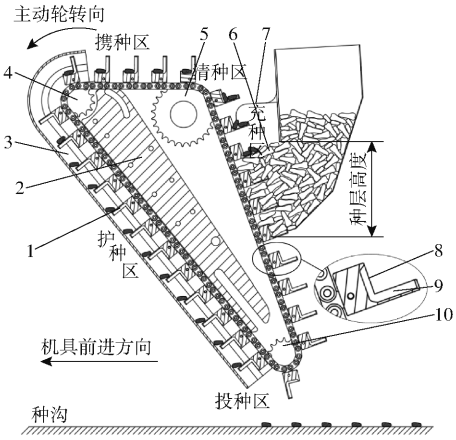


图 2　排种器工作示意图

Fig. 2　Schematic of seed metering device

1. 种勺　2. 排种器壳体　3. 护种板　4. 主动链轮　5. 清种链轮　6. 种群　7. 种箱　8. 种勺留种部分　9. 种勺取种部分　10. 排种链轮

进入护种区;在护种区上下两种勺和护种板形成一个封闭空间,种子在封闭空间内随链条继续运动;到达投种区后,封闭空间被打开,种子失去支持力落入种沟,完成投种。

2 关键部件设计

2.1 种勺结构与参数设计

种勺型孔参数是排种器设计的关键,直接影响到排种器的充种、清种和投种过程,型孔的结构形式、容积,种子即将进入型孔的姿态,以及种子在型孔中的排列状态和稳定程度都会直接影响排种的精确性[13]。

由于蚕豆种子的长度、宽度和厚度差异较大,在工作过程中易造成重播,仅依靠链条自振清种,清种难度大,因此本文设计了一种 L 型种勺,利用种勺翻转实现清种功能,其结构示意图如图 3 所示,分为取种部分和留种部分,为提高种子对种勺的适应性,种勺结构尺寸依据蚕豆种子的三轴尺寸设计,将种勺取种部分和留种部分型孔设计成方形。

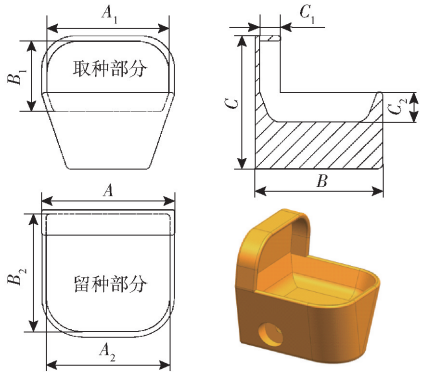


图 3 种勺结构示意图

Fig. 3 Schematic of seed spoon structure

2.1.1 蚕豆种子基本参数

本文随机选取了 1 000 粒蚕豆种子,对其长 d_l、宽 d_w、大端厚 h_b和小端厚 h_s进行统计,其中:种子长度 d_l正态分布均值为 20.16 mm;种子宽度 d_w正态分布均值为 14.65 mm;种子大端厚度 h_b正态分布均值为 7.41 mm;种子小端厚度 h_s正态分布均值为 4.96 mm。蚕豆种子尺寸如图 4 所示。

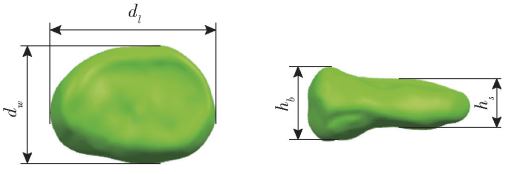
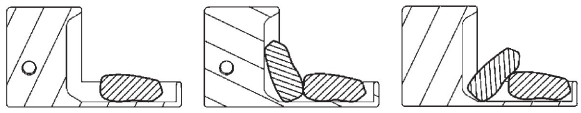


图 4 蚕豆种子尺寸示意图

Fig. 4 Schematic of broad bean seed size

2.1.2 种勺取种部分设计

蚕豆种子的长度、宽度和厚度差异较大,在种箱中受到了其余种子的挤压作用,容易造成多充现象,若充入种勺的种子数量超过 2 粒,则会增加清种时的难度,因此以充入 1 粒或 2 粒种子为设计目标,以概率较高的 3 种充种姿态为目标充种姿态,如图 5 所示。



(a) 平躺 (b) 竖立+平躺 (c) 侧卧+平躺

图 5 目标充种姿态

Fig. 5 Ideal full posture

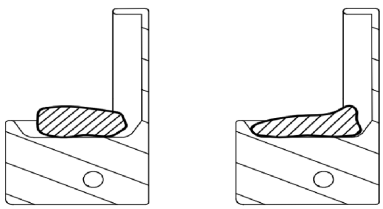
根据种子目标充种姿态对取种部分进行设计,如图 3 所示。取种部分型孔的长度 A_1、宽度 B_1和深度 C_1需满足

$$\begin{cases} d_l < A_1 < d_l + h_s \\ d_w < B_1 < d_w + 2h_s \\ \dfrac{1}{2}h_b < C_1 < \dfrac{3}{2}h_s \end{cases} \tag{1}$$

将蚕豆种子尺寸参数代入公式(1),计算得到取种部分型孔的长度 A_1、宽度 B_1、深度 C_1范围分别为 20.16 ~ 25.12 mm、14.65 ~ 24.57 mm、3.71 ~ 7.44 mm;为了便于充种,且降低重播指数,种勺取种部分型孔的长度、宽度、深度设计为 A_1 = 24 mm、B_1 = 16 mm、C_1 = 4 mm,对此设计参数下的种勺进行充种试验,得到目标充种姿态的概率超过 95%,满足设计要求。

2.1.3 种勺留种部分设计

在种勺翻转过程中,种子受力平衡被破坏而掉落,做近似自由落体运动,其姿态有平躺、侧卧和竖立 3 种,因此对种子进行自由落体试验,得种子落下后平躺、侧卧和竖立 3 种状态的概率分别为 95%、4% 和 1%,平躺姿态概率远高于侧卧和竖立,故根据种子平躺姿态尺寸来确定种勺留种部分型孔尺寸,种勺留种部分携种状态如图 6 所示。



(a) 种子横躺 (b) 种子纵躺

图 6 留种部分携种状态

Fig. 6 Carrying status in seeding area

结合留种部分种子平躺的特性,为保证留种部分内种子单粒,留种部分型孔的长度 A_2、宽度 B_2和深度 C_2需满足

$$\begin{cases} d_l < A_2 < d_l + h_s \\ d_l < B_2 < d_l + h_s \\ \dfrac{1}{2}h_b < C_2 < \dfrac{3}{2}h_s \end{cases} \tag{2}$$

根据公式(2)得留种部分型孔的长度 A_2、宽度 B_2、深度 C_2 的取值范围分别为 20.16 ~ 25.12 mm、20.16 ~ 25.12 mm、3.71 ~ 7.44 mm；为降低漏播指数，且保证合格指数，留种部分型孔尺寸应尽可能取中间值，因此选择留种部分型孔长度 A_2、宽度 B_2、深度 C_2 分别为 24、23、6 mm。

综合上述分析，在满足种勺强度的前提下，种勺壁厚取 1 mm，因此种勺长度 A、宽度 B、高度 C 分别取 26、25、27 mm。

2.1.4　种勺安装间距选择

理想状态下，在相同时间内，排种器投出的种子数量和落入种沟的种子数量相等，则有

$$\frac{v_1\Delta t}{L}=\frac{v\Delta t}{l} \tag{3}$$

式中　v_1——播种机作业速度，m/s

v——链条线速度，m/s

L——理论播种株距，mm

l——种勺安装间距，mm

Δt——投种时间间隔，s

由于蚕豆的播种株距为 13 ~ 14 cm，播种机作业速度一般在 4 ~ 6 km/h 之间[14]，链条线速度一般不超过 0.55 m/s[15]，由公式(3)得，在极限作业条件下种勺最大安装间距为 46.1 mm；为了提高充种效率，种勺安装间距应大于种子长度 d_l，即种勺最小安装间距为 20.16 mm。本文链条选择 06B 型[16]，其链条节距 p 为 9.525 mm，链板高度 h 为 8.23 mm，种勺安装在外链板上，故种勺分布间距需满足：$2np\in[20.16\ \text{mm},46.1\ \text{mm}]$，$n$ 为链节数。计算可得 n 为 2，种勺间距 l 为 38.1 mm。

2.2　充种区排种链倾角设计

为使种子在取种部分保持平稳，将链条呈一定角度倾斜布置[17]，结合 2.1.4 节种勺安装间距设计，充种区排种链倾角示意图如图 7 所示。为了能让未落入上一种勺的种子顺利回填，相邻两种勺顶部的水平距离 W_t 应大于种子的小端厚度 h_s；为了提高种子流动性，防止种子堆积，充种区排种链倾角 α 应大于蚕豆种子堆积角 φ。综上，充种区排种链倾角设计需满足

$$\begin{cases}W_t\geqslant h_s\\ \cos\alpha=\dfrac{W_t}{l}\\ \alpha\geqslant\varphi\end{cases} \tag{4}$$

前期试验测得的蚕豆种子堆积角 φ 为 40.3°，代入式(4)得充种区排种链倾角 40.3°≤α≤82.5°。

2.3　清种过程分析

种勺在充种区充入 1 粒或 2 粒蚕豆种子，如

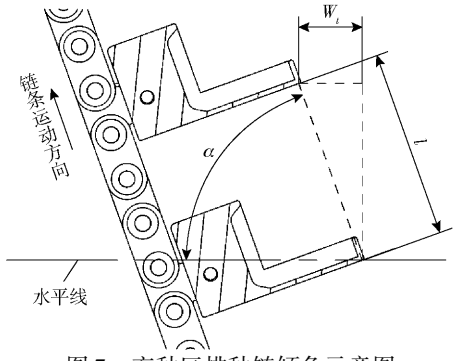


图 7　充种区排种链倾角示意图

Fig. 7　Schematic of inclination angle of seeding chain in filling area

图 8 所示，种勺处于状态 1 时，种子 2 在种勺取种部分的支撑下始终保持稳定状态；当种勺翻越清种链轮时，种子 1 滑躺在留种部分，种子 2 由于受力平衡被破坏而掉落，进入回流板并落回种箱；若仍有多余的种子在种勺翻转过程中未能清出，由于种子 2 与种子 1 接触面积较小，始终处于不稳定状态，可在携种过程通过链条自振实现二次清种，保证种勺中为单粒种子。

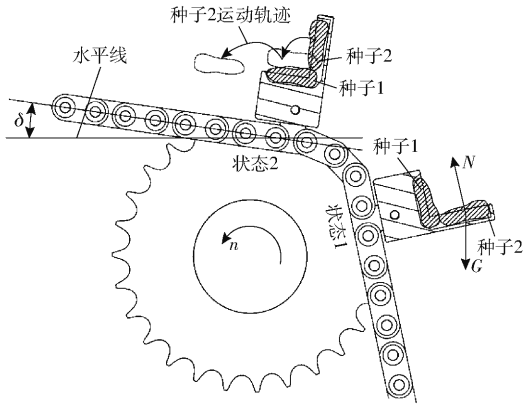


图 8　种勺清种过程示意图

Fig. 8　Schematic of seed cleaning process

在清种过程中，为了能够通过改变清种区排种链倾角来调节清种效果，设计了角度调节装置，如图 1 所示，其一端固定在排种器壳体上，另一端固定在清种链轮上，中间通过一根轴沿着圆形滑槽滑动，从而改变链轮相对位置，达到调节清种区排种链倾角的目的；清种区排种链倾角如图 8 所示，种勺运动方向与水平位置之间的夹角 δ 为清种区排种链倾角，图示的角度为正值，反之为负值。

2.4　清种链轮设计

充种完成后，种勺在斜上充种末端翻越清种链轮时，由于种子质心高于受力点，若种子在 x 方向所受合力无法满足向心力需求时，将会产生一个力矩，将种子甩出种勺，造成漏播；因此利用达朗贝尔原理对临界状态下取种部分的蚕豆种子进行受力分析，如图 9 所示。

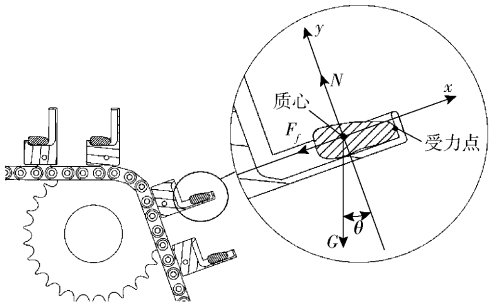


图 9 清种区蚕豆种子受力分析

Fig. 9 Analysis on force of broad bean seeds in clearing area

在临界状态下，x 方向的合力完全充当了种子圆周运动所需的向心力，种子的受力方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_f + G\sin\theta \geqslant F_n \\ \sum F_y = N - G\cos\theta = 0 \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\begin{cases} F_N = m\dfrac{v^2}{r \times 10^3} \\ F_f = \mu N \\ G = mg \\ \theta = 90° - \alpha \\ r = \dfrac{d+h}{2} + H - \dfrac{d_l}{2} \end{cases} \tag{6}$$

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_N——种子所需向心力，N

F_f——种子与种勺取种部分的摩擦力，N

N——种勺取种部分对种子支持力，N

G——种子重力，N

θ——G 与 y 轴负向夹角，(°)

r——旋转半径，mm

μ——种子与种勺间的摩擦因数

d——清种链轮的分度圆直径，mm

g——重力加速度，m/s^2

联立公式(5)、(6)得

$$r \geqslant \frac{v^2 \times 10^3}{g(\sin\theta + \mu\cos\theta)} \tag{7}$$

由前期试验测得种子与取种部分的摩擦因数 μ 为 0.452，当种勺间距 l = 38.1 mm 时，代入公式(3)求得链条最大线速度为 0.49 m/s，重力 G 和 y 轴负向的夹角满足 7.5°≤θ≤49.7°，则转动半径应满足 r≥41.9 mm，减去种勺底座厚度和半个链板高度后，分度圆直径应满足 d≥53.6 mm。较大的分度圆直径可减小链条的弯曲应力，延长链条使用寿命[15]，但直径过大会导致排种器体型庞大，因此综合考虑，确定清种链轮分度圆直径 d = 82.04 mm，即 27 齿。

2.5 张紧装置设计

链条抖动量是影响排种器充种、清种、携种和投种的重要因素，抖动量过大易造成漏播，且易造成排种器各部件损伤，抖动量过小则不利于清种。因此设计了张紧装置来控制链条抖动量，由于在调整充种区和清种区排种链倾角时，张紧链轮相对位置会随之改变，故将张紧装置设计成可滑动结构，如图 10a 所示。张紧装置采用弹簧自动张紧方式，对称布置，如图 10b 所示，根据 06B 链条单排链测量力为 70 N，弹簧张紧力需满足

$$\begin{cases} F_s \leqslant 70\ \text{N} \\ F_s = 2kX_c \\ k = \dfrac{G' d_m^4}{8D_m^3 N_c} g \end{cases} \tag{8}$$

式中 F_s——弹簧张紧力，N

G'——不锈钢线的刚性模数，7 300 N/mm

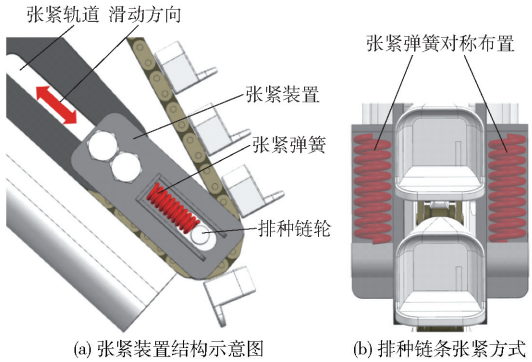
k——弹簧刚度，N/mm

N_c——弹簧有效圈数

X_c——弹簧压缩量，mm

d_m——弹簧线径，mm

D_m——弹簧外径，mm



(a) 张紧装置结构示意图 (b) 排种链条张紧方式

图 10 排种链张紧示意图

Fig. 10 Schematics of seeding chain tension

由式(8)可知，在弹簧线径、外径、自由长度和弹簧压缩量确定的情况下，可由张紧力计算得到弹簧刚度和有效圈数，因此需进一步研究链条所需的张紧力。

3 单因素仿真试验

3.1 仿真模型建立

由于蚕豆在播种过程中，受到各个部件的随机碰撞，其运动极不规律，在台架或者田间试验中很难观察到其运动规律，因此借助 EDEM 软件来直观地观察蚕豆在播种过程中的运动状态；而为了探讨排种器工作过程中链条抖动量，可利用 RecurDyn 软件实现链条与链轮配合这种复杂刚体运动，因此采用 EDEM－RecurDyn 联合仿真的方法来验证理论分

析，为了减少仿真计算量，将回流板和种箱合并，去除角度调节装置，由于排种链轮既需要设置转动副又需要设置滑动副，因此将张紧装置简化，排种链轮沿着滚动轴转动，同时随着滑动轴滑动，简化模型如图 11 所示。

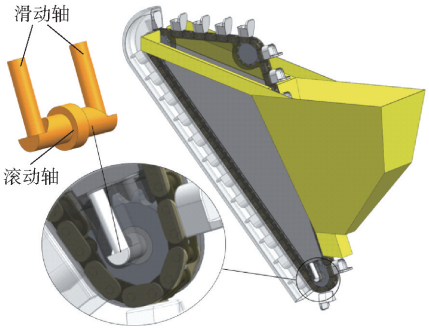
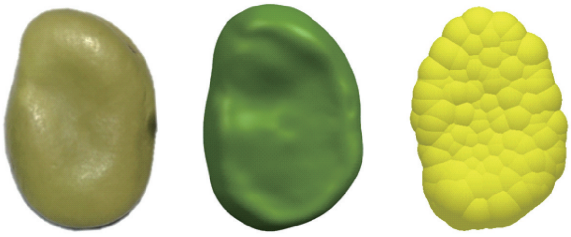


图 11　排种器简化模型

Fig. 11　Simplified model of seed metering device

试验采用云南省农业科学院育成的云豆早 7 蚕豆种子作为建模对象，选取与种子平均三轴尺寸相接近的蚕豆种子，利用三维激光扫描得到蚕豆种子的三维空间点云数据，运用 Geomagic studio 软件后处理获得蚕豆种子网格几何模型。将模型导入 EDEM 软件并利用非球颗粒快速填充功能，获得蚕豆种子离散元模型，如图 12 所示。



(a) 真实种子　(b) 三维几何模型　(c) 离散元模型

图 12　蚕豆种子实物图与离散元模型

Fig. 12　Physical map and discrete element models of broad bean seeds

根据排种器加工所用材料，赋予每个部件相应材质特性，设定排种链条和种箱为不锈钢材料，其余部件为 ABS 材料。通过查阅文献得到不锈钢和 ABS 塑料的泊松比、剪切模量及密度[18]，并由前期物性参数试验测得其余参数，蚕豆种子、不锈钢、ABS 塑料的力学性能和相互之间的物理特性参数如表 1 所示。

3.2　仿真单因素试验设计

结合前文排种器结构设计的参数，作业速度、充种区排种链倾角、清种区排种链倾角、种层高度和排种链条张紧力为本试验的可变参数，也是影响排种性能的重要因素。通过预试验，确定作业速度、充种区排种链倾角、清种区排种链倾角、种层高度、排种链条张紧力的固定值分别为 4.2 km/h、70°、0°、75 mm、50 N，进行单因素试验。试验指标包括合格指数、重播指数和漏播指数，每组试验重复 3 次，每次统计 200 个种勺的取种情况。

表 1　蚕豆种子仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters of broad bean seeds

参数	蚕豆颗粒	不锈钢	ABS 塑料
泊松比	0.35	0.30	0.34
剪切模量/Pa	3.91×10^{7}	7.0×10^{10}	3.0×10^{9}
密度/(g·cm^{-3})	1.094	7.800	1.250
碰撞恢复系数(与蚕豆颗粒)	0.241	0.514	0.434
静摩擦因数(与蚕豆颗粒)	0.531	0.397	0.452
滚动摩擦因数(与蚕豆颗粒)	0.0957	0.062	0.087

3.3　排种链条张紧力试验

3.3.1　排种链条张紧力确定

根据 06B 单排链条测量力为 70 N，可沿着滑动轴方向添加弹簧预紧力，分析预紧力分别为 30、40、50、60、70 N 时对排种器工作性能的影响，故分别沿着两对称滑动轴从排种器壳体指向排种链轮方向添加 15、20、25、30、35 N 的力，试验结果如表 2 所示。

表 2　张紧力单因素试验结果

Tab. 2　Tension force single factor test results　%

张紧力/N	合格指数	重播指数	漏播指数
30	71.50	4.83	23.67
40	84.17	5.67	10.16
50	90.33	6.17	3.50
60	84.83	12.00	3.17
70	74.67	22.50	2.83

试验结果表明，随着链条施加的预紧力逐渐增大，合格指数呈先增加后减小的趋势，重播指数呈逐渐增大趋势，漏播指数呈逐渐减小趋势并趋向平稳，张紧力为 50 N 时合格指数最高，重播指数最低，漏播指数处于较低值。根据《机械设计手册》选择弹簧线径 d_m 为 1.5 mm，外径 D_m 为 10 mm，自由长度 L_f 为 30 mm 的不锈钢弹簧，设计弹簧压缩量 X_c 为 5 mm 时，计算得到有效圈数 N_c 为 9，弹簧的刚度 k 为 5 N/mm。

为了进一步分析张紧力对排种性能影响的原因，利用 RecurDyn 的后处理功能，分析排种器工作过程中排种链条的法向位移，不同载荷下链条抖动量曲线如图 13 所示。结合表 2 可以看出，随着张紧力的逐渐增大，排种链条法向位移逐渐减小，链条抖动随之减小，漏播情况逐渐减少，因此合格指数呈逐渐增大的趋势。张紧力为 50 N 时，合格指数相对较高。当张紧力大于 50 N 时，排种链条法向位移过小，即链条振动过小，导致重播指数逐渐增加，故合

格指数逐渐减小。

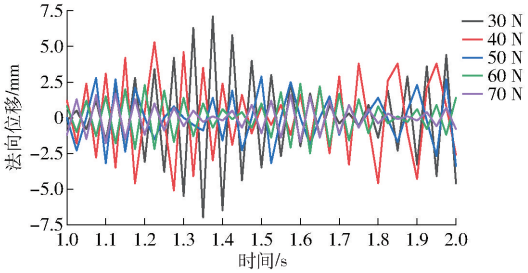


图 13 不同张紧力下链条抖动量变化曲线

Fig. 13 Change curves of chain jitter amount under different tensions

3.3.2 弹簧刚度校核

由于通过理论计算的刚度与仿真状态下存在些许偏差,为了得到张紧力为 50 N 时仿真状态下的刚度,设计了一种阻尼器,阻尼器自由长度 L_z 为 25 mm,利用最陡爬坡试验方法校核弹簧的刚度,如图 14a 所示。

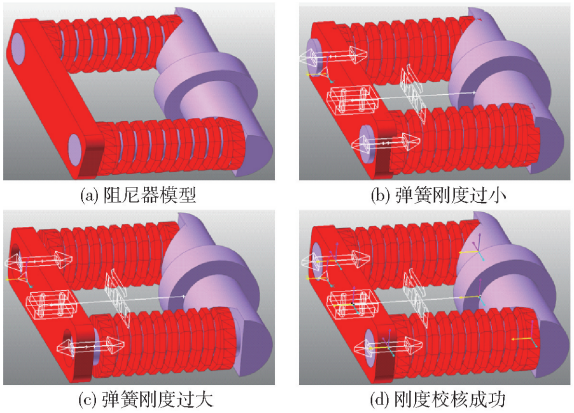


图 14 阻尼器示意图

Fig. 14 Schematics of damper

试验原理为在试验过程中分别沿着两对称滑动轴从滚动轴指向机架方向添加 25 N 的力,逐步调整仿真弹簧的刚度,测量滑动轴与机架的相对位移。当弹簧刚度过小,阻尼器压缩弹簧,此时相对位移为正,如图 14b 所示;当弹簧刚度过大,滑动轴向外滑动,此时相对位移为负,如图 14c 所示;当弹簧刚度校核成功时,滑动轴相对机架不存在相对滑动,即相对位移为 0,如图 14d 所示;最终得到该弹簧在排种器张紧力为 50 N 时的刚度。

以刚度为试验因素,相对位移为试验指标,根据前期理论计算,取刚度的范围为 3.5 ~ 6.5 N/mm,取步长为 0.5 N/mm,进行 7 组仿真试验,设计方案与结果如表 3 所示。

表 3 弹簧刚度仿真试验结果

Tab. 3 Spring stiffness simulation test results

相对位移/mm	-2.4	-1.5	-0.8	-0.2	0.3	0.7	1.0
刚度/(N·mm^{-1})	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5

为得到仿真试验中刚度与滑动轴相对位移之间的关系,对表 3 中的试验数据进行曲线拟合,得到多项式拟合曲线如图 15 所示,曲线方程为

$$y = -0.23x^2 + 3.42x - 11.53 \tag{9}$$

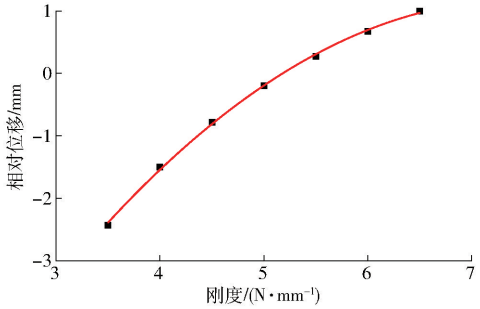


图 15 仿真刚度与相对位移拟合曲线

Fig. 15 Simulation stiffness coefficient and relative displacement fitting curve

公式(9)的决定系数 $R^2 = 0.998\ 74$,接近 1,表明该方程拟合的可靠度高。将相对位移为 0 代入公式(9)中,求得刚度为 5.2 N/mm。将 5.2 N/mm 输入 RecurDyn 中进行验证试验,测得相对位移量为 0.003 84 mm,由此表明弹簧刚度校核成功。

3.4 种层高度试验

为探讨种层高度对排种器工作性能的影响规律,根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,在种箱内蚕豆种子数量为满箱、半箱和 1/8 箱时进行试验,即种层高度为 150、75、19 mm 时进行单因素试验,试验结果如表 4 所示。

表 4 种层高度单因素试验结果

Tab. 4 Single factor test result of seed layer height

%

种层高度/mm	合格指数	重播指数	漏播指数
19	82.50	5.17	12.33
75	91.17	5.33	3.50
150	87.83	10.00	2.17

试验结果表明,随种层高度的增加,合格指数先增大后减小,重播指数逐渐增大,漏播指数逐渐减小。种层高度为 75 mm 时合格指数最高,重播指数和漏播指数均处于较低值。

3.5 充种区排种链倾角试验

为探讨充种区排种链倾角对排种器工作性能的影响规律,分别在充种区排种链倾角为 40°、50°、60°、70°、80°时进行单因素试验,试验结果如表 5 所示。

试验结果表明,随着充种区排种链倾角的增大,排种器工作时合格指数先增大后减小,重播指数逐渐减小,漏播指数逐渐增大,充种区排种链倾角在 60° ~ 80°之间时合格指数大于 85%,此时重播指数

表 5　不同充种区排种链倾角试验结果

Tab. 5　Test results of inclination angle of seeding chain in different filling area　%

充种区排种链倾角/(°)	合格指数	重播指数	漏播指数
40	73.50	26.67	0.83
50	80.67	17.66	1.67
60	86.33	10.17	3.50
70	90.33	6.34	3.33
80	88.17	5.16	6.67

和漏播指数均处于较低值，因此确定充种区排种链倾角为 60°～80°。

3.6　清种区排种链倾角试验

为探讨清种区排种链倾角对排种器工作性能的影响规律，分别在清种区排种链倾角为 -10°、-5°、0°、5°和 10°时进行单因素试验，试验结果如表 6 所示。

表 6　不同清种区排种链倾角试验结果

Tab. 6　Test results of inclination angle of seeding chain in different clearing areas　%

清种区排种链倾角/(°)	合格指数	重播指数	漏播指数
-10	79.67	4.50	15.83
-5	87.67	4.83	7.50
0	90.83	5.50	3.67
5	88.50	8.67	2.83
10	81.83	18.84	2.33

试验结果表明，随着清种区排种链倾角的增大，合格指数先增大后减小，重播指数逐渐增大，漏播指数逐渐减小，清种区排种链倾角在 -5°～5°之间时合格指数均大于 85%，重播指数和漏播指数均处于较低值，因此确定清种区排种链倾角为 -5°～5°。

3.7　作业速度试验

为探讨作业速度对排种器工作性能的影响规律，将链条最大线速度代入公式(3)得作业速度不超过 6.4 km/h，故分别在作业速度为 4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 km/h 时进行单因素试验，试验结果如表 7 所示。

表 7　不同作业速度试验结果

Tab. 7　Test results at different operating speeds　%

作业速度/(km·h^{-1})	合格指数	重播指数	漏播指数
4.0	87.83	9.83	2.33
4.5	90.17	7.16	2.67
5.0	88.67	6.83	4.50
5.5	82.67	6.00	11.33
6.0	78.67	2.50	18.83

试验结果表明，随着作业速度的增大，排种器工作时合格指数先增大后减小，重播指数逐渐减小，漏播指数逐渐增大，作业速度在 4～5 km/h 时，合格指数均大于 85%，且重播指数和漏播指数均处于较低值，因此确定作业速度在 4～5 km/h 之间。

4　二次回归正交旋转组合试验

4.1　试验材料与仪器设备

试验采用平均含水率为 10.98% 的云豆早 7 蚕豆种子作为试验对象，试验装置采用昆明理工大学现代农业工程学院的 JPS-12 型视觉排种器性能试验台，如图 16 所示，并通过合肥富煌君达高科信息技术有限公司生产的千眼狼 5F01 型高速摄像机对蚕豆排种过程进行分析。

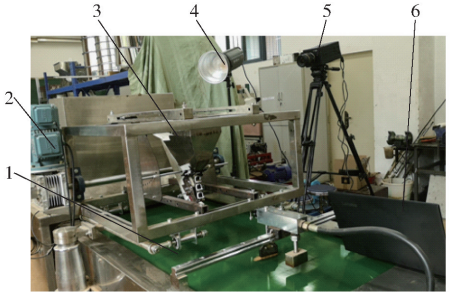


图 16　排种器性能试验装置

Fig. 16　Seed-metering device performance test

1. 排种带　2. 电机　3. 链勺翻转清种式蚕豆精密排种器　4. 补光灯　5. 高速摄像装置　6. 计算机

4.2　试验设计

在前期单因素试验中确定了作业速度的取值范围为 4～5 km/h，清种区排种链倾角的取值范围为 -5°～5°，充种区排种链倾角取值范围为 60°～80°，为寻找使得排种器具有最佳工作性能的因素组合，选择用二次回归正交旋转组合试验方法，试验因素编码如表 8 所示，试验指标分别为合格指数 Y_1、重播指数 Y_2 和漏播指数 Y_3，在排种器稳定工作状态下，对连续 200 个种勺的排种情况进行检测，每组试验重复 3 次取平均值，试验设计方案与试验结果如表 9 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 8　试验因素编码

Tab. 8　Experimental factors and codes

编码	因素		
	作业速度/(km·h^{-1})	清种区排种链倾角/(°)	充种区排种链倾角/(°)
-1.682	4.0	-5	60
-1	4.2	-3	64
0	4.5	0	70
1	4.8	3	76
1.682	5.0	5	80

表 9 试验方案与结果

Tab. 9 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	90.83	6.33	2.83
2	1	-1	-1	88.50	8.50	3.00
3	-1	1	-1	89.33	8.17	2.50
4	1	1	-1	88.50	8.83	2.67
5	-1	-1	1	94.67	4.50	0.83
6	1	-1	1	90.67	8.00	1.33
7	-1	1	1	90.17	8.67	1.17
8	1	1	1	89.67	6.67	3.67
9	-1.682	0	0	91.67	7.00	1.33
10	1.682	0	0	87.83	9.00	3.17
11	0	-1.682	0	93.00	6.33	0.67
12	0	1.682	0	89.17	8.17	2.67
13	0	0	-1.682	88.67	7.50	3.83
14	0	0	1.682	90.50	8.83	0.67
15	0	0	0	93.83	5.33	0.83
16	0	0	0	92.17	6.17	1.67
17	0	0	0	93.17	5.17	1.67
18	0	0	0	92.67	6.00	1.33
19	0	0	0	93.67	5.33	1.00
20	0	0	0	94.17	5.00	0.83
21	0	0	0	92.50	5.67	1.83
22	0	0	0	91.33	7.17	1.50
23	0	0	0	92.67	6.00	1.33

4.3 回归方程建立与显著性检验

为了建立合格指数 Y_1、重播指数 Y_2和漏播指数 Y_3的数学模型,应用 Design-Expert 12.0.3 软件对试验数据进行分析和拟合,显著性检验结果如表 10 所示。

4.3.1 合格指数 Y_1

根据表 10 可知,合格指数 Y_1的模型拟合度为极显著($P<0.01$),其中 X_1X_3和 X_2X_3对合格指数不显著($P>0.05$),其余各项均为显著或极显著,所选试验因素对合格指数的影响有二次关系,失拟项 $P=0.7918$,不显著,因此不存在其它对试验指标具有影响作用的因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1=92.90-1.03X_1-0.9842X_2+0.8126X_3+0.6250X_1X_2-1.05X_1^2-0.5784X_2^2-1.11X_3^2 \quad (10)$$

影响合格指数的因素主次顺序为作业速度、清种区排种链倾角、充种区排种链倾角。

4.3.2 重播指数 Y_2

根据表 10 可知,重播指数 Y_2的模型拟合度为极显著($P<0.01$),其中 X_3、X_1X_3、X_2X_3和 X_2^2 对重播指数不显著($P>0.05$),其余各项均为显著或极显著,所选试验因素对重播指数的影响有二次关系,失拟项 $P=0.1293$,不显著,因此不存在其它对试验指标具有影响作用的因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2=6.03+0.5633X_1+0.5934X_2-0.8762X_1X_2+0.6915X_1^2+0.7598X_3^2 \quad (11)$$

影响重播指数的因素主次顺序为清种区排种链倾角、作业速度、充种区排种链倾角。

4.3.3 漏播指数 Y_3

根据表 10 可知,漏播指数 Y_3的模型拟合度为极显著($P<0.01$),其中 X_1X_2、X_1X_3和 X_2^2 对漏播指数不显著($P>0.05$),其余各项均为显著或极显著,

表 10 合格指数、重播指数与漏播指数方差分析

Tab. 10 Variance analysis of qualified index, replay index and missed index

方差来源	合格指数				重播指数				漏播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	84.05	9	14.8	<0.0001 **	35.14	9	5.67	0.0027 **	18.62	9	9.72	0.0002 **
X_1	14.59	1	22.9	0.0004 **	4.33	1	6.29	0.0261 *	3.03	1	14.20	0.0023 **
X_2	13.23	1	20.8	0.0005 **	4.81	1	6.98	0.0203 *	2.12	1	9.97	0.0076 **
X_3	9.02	1	14.2	0.0024 **	0.23	1	0.33	0.5773	6.35	1	29.9	0.0001 **
X_1X_2	3.13	1	4.91	0.0452 *	6.14	1	8.92	0.0105 *	0.50	1	2.35	0.1493
X_1X_3	0.22	1	0.35	0.5628	0.22	1	0.32	0.5806	0.88	1	4.16	0.0624
X_2X_3	2.00	1	3.14	0.0997	0.06	1	0.08	0.7798	1.39	1	6.55	0.0238 *
X_1^2	17.53	1	27.5	0.0002 **	7.66	1	11.1	0.0054 *	2.01	1	9.45	0.0089 **
X_2^2	5.32	1	8.35	0.0126 *	2.93	1	4.25	0.0598	0.36	1	1.70	0.2153
X_3^2	19.53	1	30.7	<0.0001 **	9.00	1	13.1	0.0031 *	2.01	1	9.45	0.0089 **
残差	8.27	13			22.32	13			2.77	13		
失拟	1.87	5	0.47	0.7918	12.28	5	2.41	0.1293	1.65	5	2.38	0.1321
误差	6.41	8			10.03	8			1.11	8		
总和	92.32	22			410.06	22			21.39	22		

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

所选试验因素对漏播指数的影响有二次关系，失拟项 $P=0.132\,1$，不显著，因此不存在其它对试验指标具有影响作用的因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3=1.42+0.471\,2X_1+0.394\,2X_2-0.682\,0X_3+0.417\,5X_2X_3+0.354\,8X_1^2+0.354\,8X_3^2 \quad (12)$$

影响重播指数的因素主次顺序为充种区排种链倾角、作业速度、清种区排种链倾角。

4.4　试验因素响应分析

为分析交互项对试验指标的影响，绘制了显著交互项的响应曲面，如图 17 所示。

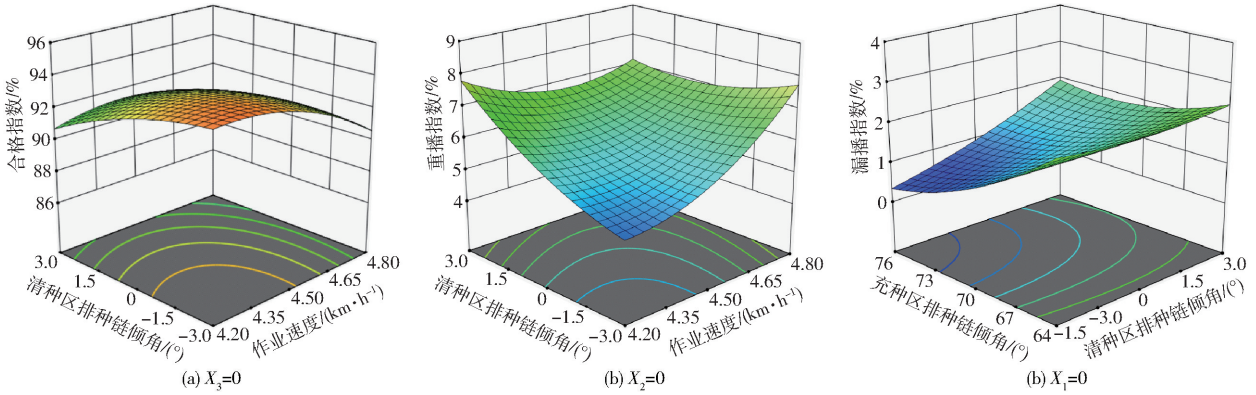


图 17　因素交互作用影响合格指数和漏播指数的响应曲面

Fig. 17　Response surfaces of factors interaction affecting qualification index and leakage index

如图 17a，随着清种区排种链倾角和作业速度减小，合格指数升高，当清种区排种链倾角和作业速度达到一定水平时，合格指数的增加趋势趋于平缓。如图 17b，随着清种区排种链倾角和作业速度的减小，重播指数不断减小，当清种区排种链倾角和作业速度达到一定水平时，重播指数的增加趋势趋于平缓。如图 17c，随着充种区排种链倾角的增加且清种区排种链倾角减小，漏播指数不断减小，当充种区排种链倾角和清种区排种链倾角达到一定水平时，漏播指数的增加趋势趋于平缓。因此，各交互项对排种器工作性能影响较大。

4.5　参数优化与试验验证

为了获得最佳排种作业参数，优化工作参数，实现因素间参数的合理匹配是提高合格指数的关键。以合格指数最高、重播指数和漏播指数最低为目标，目标函数和各因素选取条件为

$$\begin{cases}\max Y_1\\ \min Y_2\\ \min Y_3\\ -1.682\leqslant X_1\leqslant 1.682\\ -1.682\leqslant X_2\leqslant 1.682\\ -1.682\leqslant X_3\leqslant 1.682\end{cases} \quad (13)$$

求得作业速度为 4.25 km/h、清种区排种链倾角为 −2.9°、充种区排种链倾角为 74°时，合格指数最高、重播指数和漏播指数最低，分别为 94.44%、5.18%、0.38%。

为了验证优化结果的准确性，在相同条件下进行验证试验，其结果为合格指数 93.83%，重播指数为 5.67%，漏播指数为 0.50%，均达到排种要求，由此可见，优化结果可靠。

5　结论

（1）设计了一种链勺翻转清种式蚕豆精密排种器。对翻转清种过程中种子受力情况和运动状态进行了分析，阐明了种勺翻转清种的机理；通过对排种过程的理论计算和力学分析，确定了种勺取种部分型孔的长度 L_1、宽度 W_1、深度 H_1 分别为 24、16、4 mm，留种部分型孔长度 L_2、宽度 W_2、深度 H_2 分别为 24、23、6 mm，种勺分布间距为 38.1 mm，清种链轮为 27 齿。

（2）利用 EDEM 和 RecurDyn 联合仿真方法进行单因素仿真试验，确定了排种器张紧力为 50 N、种层高度为 75 mm 时排种性能较好，并得到了充种区排种链倾角、清种区排种链倾角、作业速度的最优区间，对弹簧刚度进行了校核，得到弹簧张紧力在 50 N 时刚度为 5.2 N/mm。

（3）采用二次回归正交旋转组合试验方法进行台架试验，建立了合格指数、重播指数、漏播指数与作业速度、清种区排种链倾角、充种区排种链倾角之间的数学回归模型，得出了因素主次顺序，运用响应曲面分析了交互项对试验指标的影响，采用多目标优化方法，得到了各因素的最优组合为作业速度 4.25 km/h、清种区排种链倾角 −2.9°和充种区排种链倾角 74°，并对排种性能进行验证，试验结果表明，在作业速度 4.25 km/h、清种区排种链倾角 −2.9°和充种区排种链倾角 74°时，排种的合格指数为 93.83%，重播指数为 5.67%，漏播指数为 0.50%，满足蚕豆的播种要求。

参 考 文 献

[1] 周俊玲,张蕙杰. 世界蚕豆生产及贸易形势分析[J]. 世界农业,2016(11):107 - 111.
ZHOU Junling, ZHANG Huijie. Analysis of world broad bean production and trade situation[J]. World Agriculture, 2016(11): 107 - 111. (in Chinese)

[2] 李玉环,杨丽,韩英,等. 勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):108 - 116.
LI Yuhuan, YANG Li, HAN Ying, et al. Design and experiment of spoon-clamping type metering device for faba beans[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):108 - 116. (in Chinese)

[3] 周勇,胡梦杰,夏俊芳,等. 内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):59 - 67.
ZHOU Yong, HU Mengjie, XIA Junfang, et al. Design and experiment of inside-filling adjustable precision seed-metering device with combined hole for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 59 - 67. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):61 - 70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61 - 70. (in Chinese)

[6] 苏微,洪方伟,赖庆辉,等. 预切种甘蔗勺链式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):88 - 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):88 - 97. (in Chinese)

[7] 胡梦杰,夏俊芳,郑侃,等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):73 - 85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(8):73 - 85. (in Chinese)

[8] 杨丽,史嵩,崔涛,等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):48 - 53.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48 - 53. (in Chinese)

[9] 王英博,李洪文,王庆杰,等. 机械式小麦射播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):73 - 84.
WANG Yingbo, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat mechanical shooting seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 73 - 84. (in Chinese)

[10] 周春健,俞志轩,成松松. 稻茬田绿肥蚕豆播种机的设计与试验[J]. 农业开发与装备,2020(8):30 - 32,95.
ZHOU Chunjian, YU Zhixuan, CHENG Songsong. Design and experiment of green manure broad bean planter in rice stubble field[J]. Agricultural Development and Equipment, 2020(8):30 - 32,95. (in Chinese)

[11] 荆毅. 2BCL - 3 型蚕豆播种机的研制与应用[J]. 机械研究与应用,2010,23(6):123 - 124.
JING Yi. Development and application of 2BCL - 3 broad bean seeder[J]. Mechanical Research and Application, 2010,23(6):123 - 124. (in Chinese)

[12] JP - 6[EB/OL][2020 - 5 - 21]. http://www.jangauto.com.

[13] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(13):23 - 34.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(13):23 - 34. (in Chinese)

[14] DB5329/T 56—2019 洱海流域蚕豆生态种植技术规程[S]. 2019.

[15] 吕金庆,王鹏榕,杨晓涵,等. 舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):51 - 60.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, YANG Xiaohan, et al. Design and experiment of seed-clearing device for cup-belt type patato seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):51 - 60. (in Chinese)

[16] GB/T 1243—2006 传动用短节距精密滚子链、套筒链、附件和链轮[S]. 2006.

[17] 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)

[18] 曹秀龙. 三七压穴精密播种机设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.
CAO Xiulong. Design and experiment of precision feeding machine for hill-drop planter for panax notoginseng[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)