doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.015

勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验

李玉环[1]　杨　丽[1]　韩　英[2]　张东兴[1]　崔　涛[1]　虞异茗[1]
(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

摘要:为提高蚕豆机械化播种质量,解决蚕豆精量播种难题,结合勺轮式排种器和指夹式排种器的优点,设计了一种勺夹式蚕豆精量排种器。根据蚕豆种子物理特性,分析确定了种盘工作区域范围、弧形滑道结构参数、种夹机构参数以及托种板关键参数。以种夹长度、种夹宽度和弯折角为试验因素进行了 3 因素 3 水平正交试验,通过试验确定了种夹较优参数组合为种夹长度 15.5 mm,种夹宽度 10 mm,弯折角 35°,在较优参数组合下本排种器的株距合格指数为 95.11%、漏播指数为 1.61% 、重播指数为 3.28% ,满足设计要求,为蚕豆精量排种器的设计提供理论指导。

关键词:精量播种;蚕豆;排种器;勺夹式
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)S0-0108-09

Design and Experiment of Spoon-clamping Type Metering Device for Faba Beans

LI Yuhuan[1]　YANG Li[1]　HAN Ying[2]　ZHANG Dongxing[1]　CUI Tao[1]　YU Yiming[1]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of sowing faba beans and improve its mechanized level, a new type seed metering device was designed and evaluated. To analyze the pros and cons of the existed productions, an overall structure of the new spoon-clamping type seed metering device was built. Combined with physical characteristics of faba beans, the metering plate area, cambered slipway parameters and spoon-clip parameters were researched. For this metering device, there were different working areas and angles on metering plate, among which the seed-filling area was 105°, seed-clearing area was 130°, seed-protecting was 90°, seed-dropping area was 35°. And according to the theory of spoon-clamping type seed metering device, the range of length, width and bending angle of the new spoon can be optimized by measuring three-axis dimension. Bench experiments were conducted for the newly-designed spoon-clipping type seed-metering device. For confirming the optimal parameters of the new spoon-clamping type seed metering device, the orthogonal test was adopted with three levels and three factors. Three test parameters, i.e. length of spoon-clamp, width of spoon-clamp and bending angle were chosen as the influence factors of test experiment. The best working parameters were as below: the length of spoon-clamp was 15.5 mm, the width of spoon-clamp was 10 mm and the bending angle was 35°. The corresponding performance indexes were as following: the qualified index of seed spacing was 95.11% ,the multiple index was 3.28% , and the missing-seeding index was 1.61% , which could completely meet the requirement of the technical specifications of quality evaluation for faba beans metering device in China. The research provided a reference for further improving quality and optimizing the parameter for spoon-clamping type metering device.

Key words: precision seeding; faba beans; metering device; spoon-clamping type

0　引言

我国是世界上蚕豆栽培面积最大、总产量最高的国家。据统计,2016 年蚕豆种植面积达 80 万 hm^2,占世界总面积的 33.6% ,总产量超过 160 万 t,占世界总产量的 36.1%[1-3]。蚕豆作为增产、增效、养

收稿日期:2018-07-15　修回日期:2018-08-30
基金项目:国家食用豆产业技术体系建设项目(CARS-08)和农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室项目
作者简介:李玉环(1991—),男,博士生,主要从事农业装备设计与理论研究,E-mail:18612897966@163.com
通信作者:杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail:yangli@cau.edu.cn

地的重要经济作物，势必会增加种植面积。但蚕豆多数采用人工点播的落后种植方式，机械化水平低，劳动强度大，生产成本高，严重阻碍了蚕豆产业的发展[4-6]。

精量排种器作为精量播种机械的核心部件，是保证播种粒距均匀性的重要手段[6]。国内外学者关于蚕豆精量排种机械的相关研究报告较少，蚕豆精量排种器主要通过玉米精量排种器改装使用，包括气力式蚕豆精量排种器和机械式蚕豆精量排种器，其中气力式蚕豆精量排种器具有对种子适应性强、损伤小、效率高等优势，但也存在地头气压难以保证、成本高、不适用小地块作业等问题，国外种植集中，地块面积大，多采用气力式蚕豆精量排种器进行播种作业，但我国蚕豆种植分散，地块小，气力式蚕豆精量排种装置很难在我国推广应用[7-10]。机械式蚕豆精量排种装置主要通过勺轮式和窝眼式排种器改装使用，两种排种器虽然结构简单、成本低廉，但存在播种精度低，对扁平状大粒蚕豆种子适用性差，种子损伤严重等问题，未能大面积推广应用[11-14]。本文根据我国蚕豆种子的物理特性，设计一款适合我国蚕豆机械化种植的精量排种器。

1　排种器结构和工作原理

勺夹式精量排种器整体结构如图 1 所示。主要由后壳体、排种盘、前壳体、种夹结构、排种轴、弧形滑道、卸种板、托种板、复位拉簧等构成。其中种夹机构为该型排种器的核心部件，其结构如图 2 所示，主要由种夹、种夹轴、链接轴承、复位拉簧、滚珠等结构组成。种夹机构通过链接轴承安装在种盘上，随种盘一起转动，种夹与种夹轴相连，形成一个整体，为了减小种夹机构在弧形滑道运动过程的摩擦力，在种夹轴末端安装了滚珠，滚珠附着在弧形滑道上，保证种夹机构在滑道上的柔顺运动，防止卡滞现象的发生；复位弹簧链接种夹轴和种盘，与弧形滑道配合作用控制种夹开闭；种夹在种盘托种板上方，与托种板形成容种空间，保证种子顺利充种。工作时，动力通过排种轴带动种盘圆周转动，种夹机构一方面随种盘做圆周运动，一方面在弧形滑道和复位拉簧的控制下实现种夹的精准开闭运动，完成充种、清种、护种和投种功能。

勺夹式蚕豆精量排种器的工作过程主要由 4 个阶段组成，分别为充种、清种、护种和投种。工作时，动力通过排种轴带动种盘逆时针转动，经过充种区时，在弧形滑道的作用下，种夹处于打开状态，与种盘侧面附着的托种板形成容种空间，充种区内的种子进入容种空间，随着排种盘的转动，在复位拉簧作

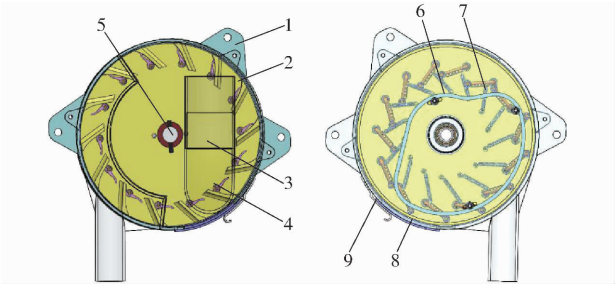

图 1　勺夹式蚕豆精量排种器结构

Fig. 1　Structure of spoon-clamping type metering device for broad seeds

1. 后壳体　2. 排种盘　3. 前壳体　4. 种夹机构　5. 排种轴　6. 弧形滑道　7. 复位拉簧　8. 卸种板　9. 卸种板托

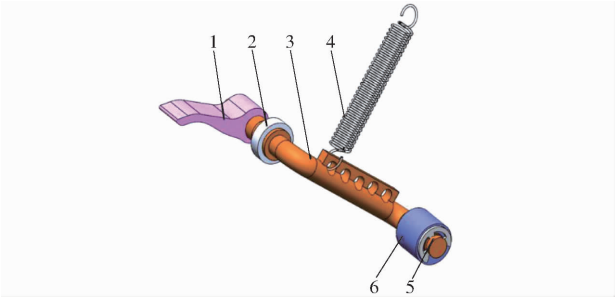

图 2　种夹机构结构

Fig. 2　Structure of seed finger clip

1. 种夹　2. 链接轴承　3. 种夹轴　4. 复位拉簧　5. 卡簧　6. 滚珠

用下种夹逐渐关闭，完成充种过程；当种盘转至清种区，种夹始终保持闭合夹持状态，未被稳定夹持的种子在托种板倾角和种子自身重力作用下掉回充种区，留有 1～3 粒种子稳定夹持进入导种区；排种盘转动至导种区时，在弧形滑道的支撑作用下种夹逐渐打开，种子脱离种夹和托种板形成的容种空间落至前一个托种板背面，相邻两个托种板与导种通道内壁形成密闭独立空间，使得种子稳定有序地运送至投种区，完成导种过程；进入投种区的种子通过导种管脱离排种器，完成投种过程，实现精量播种作业。

2　勺夹式精量排种器关键参数设计

2.1　种盘功能区域划分

种子在种盘和前壳体之间完成充种、清种、导种和投种过程，该过程主要通过弧形滑道和复位拉簧配合作用于种夹机构控制种夹开闭实现，为了准确适时控制种夹的开闭，必须对种盘的功能区域进行划分，以便确定弧形滑道形状参数。充种区域设计，考虑到蚕豆种子粒型较大，流动性和充种性能较差，为保证充种的稳定和可靠，充种区域设计时要尽量扩大充种范围，根据具体种群位置，当种夹转到水平位置时，脱离了种群位置即失去了充种的作用，同时兼顾投种的顺畅性[15-16]，最终确定了充种作用范围

如图 3 中①区的位置,即为[345°,0°]∪[0°,90°]。

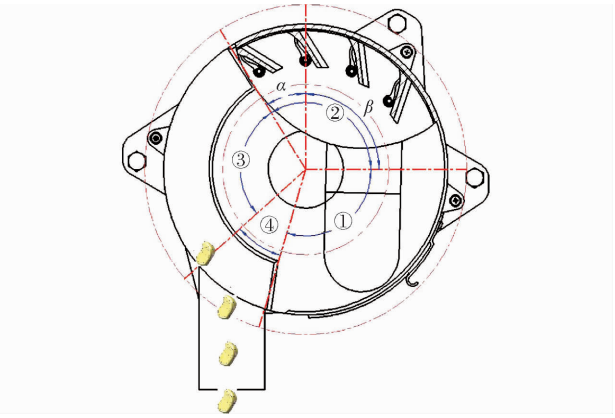

图 3 种盘划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of disc division

清种区设计,清种区主要是为了防止出现重播而设置。蚕豆播种农艺要求每穴 1 ~ 3 粒,为了保证每穴充足的种子量,本设计采用重力清种,靠重力将托种板上未稳定夹持的种子清除,保留种夹中稳定夹持的 1 ~ 3 粒种子。如图 3 所示,清种区②的范围主要由 α 和 β 区组成,其中 β 为初清阶段,即当种盘经过充种区时,种夹闭合,多粒种子随种盘一起进入初清阶段,未被种夹夹持的种子在重力作用下沿着托种板滑落至充种区,完成初步清种,该区域为[90°,180°]。当排种盘继续逆时针旋转,转至 α 区域时,种夹的夹持作用将种子固定在种夹和托种板之间,由于蚕豆种子质量较大,未被稳定夹持的种子在重力作用下,落入充种区,完成整个清种过程。如图 4 所示,种子经过二次清种 α 区时,种子 B 在初速度和重力作用下形成抛物线运动,运动至 A 点脱离托种板位置,为避免被清种子误入护种通道,二次清种区域 α 应大于临界值 δ。其中已知护种通道内侧曲面半径为 r,种盘半径为 R, A 点与排种盘中心的连线和竖直方向间夹角为 δ,种子下落点与竖直中心线间的距离为 h_2,种子下落点与排种盘外圆上切线间的距离为 h_1。因此对种子 B 下落过程进行运动学分析有

$$r\sin\delta = v_x t + h_2 \tag{1}$$

$$h_1 + \frac{1}{2}gt^2 + r\cos\delta = R \tag{2}$$

$$v_x = \omega\left(r\cos\delta + \frac{1}{2}gt^2\right) \tag{3}$$

式中 v_x——种子掉落初速度,m/s

g——重力加速度,m/s^2

t——时间,s

通过式(1) ~ (3),利用 Excel 规划求解方法,求得 $t \approx 0.101$ s,$\delta \approx 33.67°$ 。

因此,为了避免清除的多余种子落入护种区,二次清种区 α 需大于临界值 33.67°,为了保证清种可靠性,这里取 40°,因此清种区②$\alpha + \beta = 130°$,即为[90°,220°]。

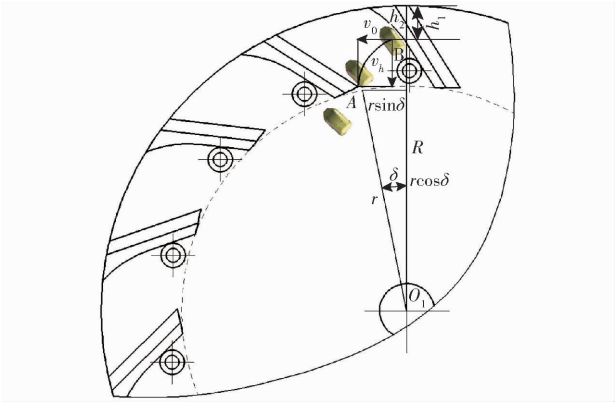

图 4 护种通道起始处种子掉落运动图

Fig. 4 Seed drop motion map at the beginning of seedling channel

护种区和投种区的设计,护种区相邻 2 个托种板与导种通道内壁形成密闭独立空间,种子经过护种区时,种夹打开,种子脱离种夹落入托种板背面,随种盘运动至投种口,完成护种和投种过程。护种区和投种区划分时应考虑种子在护种区稳定输送,避免种夹对种子的连带作用,以保证排种器有效零速投种[17-18],依据上述原则,确定护种区为 90°,即为[220°,310°],投种区为 35°,即为[310°,345°]。

2.2 弧形滑道结构设计

弧形滑道作为控制种夹开闭的关键部件,其安装在后壳体上,如图 5 所示。种夹的行程主要包括逐渐打开、完全打开、逐渐闭合、完全闭合 4 个行程,即 φ 为种夹完全打开区,$\rho + \chi$ 为种夹渐闭区,γ 为种夹完全闭合区,$\sigma + \eta$ 为种夹渐开区,种夹的开闭由种夹轴末端空心滚珠和弧形滑接触控制,保证开闭的顺畅性。弧形滑道在设计时为提高排种器充种性能,在充种区范围内应尽量增大充种持续角度;为保证籽粒被平稳夹持,种夹在充种区末端逐渐关闭,弧形滑道平缓过渡至清种区;为保证种子进入护种区后顺利脱离种夹,为精准投种做准备,在进入护种阶段应快速及时开启,故弧形滑道渐开斜面较陡峭。为保证蚕豆种子顺利进入护种通道,完全进入护种通道内,种夹快速打开,蚕豆种子脱离种夹,进入护种空间,打开角度需要满足小于护种角、投种角、充种角之和。根据上述设计原则,结合种盘划分情况,最终确定种夹开合距离的相位角关系如图 6 所示。

为了保证种子顺畅进入种夹和托种板形成的充种空间,种夹开启距离需大于种子最大长度[18-19],通过实测可知渝蚕 1 号蚕豆种子的最大长度为 18.85 mm,本设计种夹开启距离选取为 20 mm。充

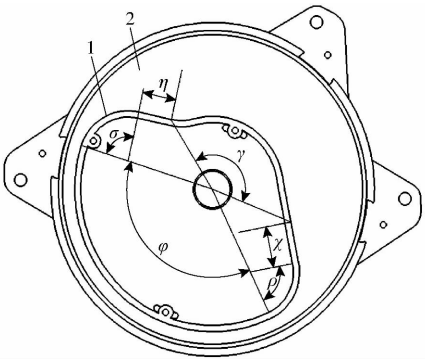

图 5　弧形滑道结构示意图

Fig. 5　Schematic diagram of curved slide

1. 弧形滑道　2. 后壳体

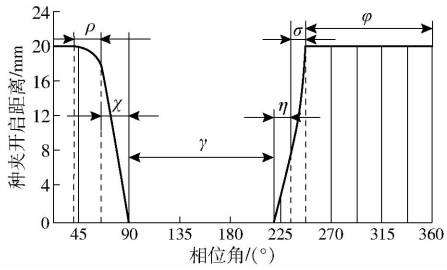

图 6　种夹开闭相位角关系图

Fig. 6　Relationship between opening and closing phase angle of clip

种区至清种区经过闭合过渡区 ρ 和闭合区 χ，应保证种夹逐渐平稳闭合，增加夹持的稳定性，$\rho+\chi$ 为 50°；种夹经过充种区进入护种区后打开，$\sigma+\eta$ 为种夹渐开区，σ 为平缓过渡阶段，η 为种夹打开阶段，种夹由闭合段平稳过渡，并迅速打开，保证了投种的顺畅性，$\sigma+\eta$ 为 30°；种夹进入护种区打开种夹，至投种区末端逐渐闭合，种夹开启阶段 φ 包括部分护种区、全部投种区和部分充种区，即 φ 为 150°；种夹闭合段 γ 涵盖整个清种区，即 γ 为 130°。

2.3　种夹结构设计

种夹结构参数主要由种夹内表面长度 L，宽度 W 和弯折角 θ 构成，如图 7 所示。为了保证夹持的稳定性和准确性，设计时需要根据蚕豆三轴尺寸确定，本设计采用秋播区种植较广的渝蚕 1 号的三轴尺寸为依据，其中渝蚕 1 号的三轴尺寸如表 1 所示。

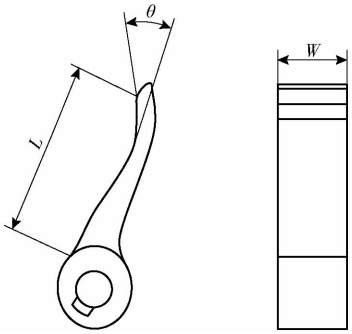

图 7　种夹结构示意图

Fig. 7　Schematic diagram of seed clip structure

表 1　蚕豆种子的外形尺寸

Tab. 1　Geometric sizes of faba bean　　mm

品种	长度	宽度	脐端厚度	中端厚度
渝蚕 1 号	14.46	10.78	8.03	6.26

2.3.1　折弯角

种夹是整个种夹机构的关键部件之一，其结构及尺寸参数直接影响充种夹持性能。为了保证种夹的夹持性能，种夹外形设计应充分考虑蚕豆外形结构，依据蚕豆外形曲面设计种夹结构，用于稳定夹取容种空间内的种子。由于蚕豆种子脐端厚度大于尾端厚度，导致充种区及托种板上的种子形态多以脐端朝下分布，因此依据蚕豆形状，种夹设计成顶端折弯结构，使其具有更好的包覆作用，蚕豆种子夹取简化模型如图 8 所示。蚕豆种子脐端可近似为直径 T_2，圆心 O 的 2/3 圆，图中 θ 为种夹弯折角，种夹内曲面顶端 B 点处于 OE 延长线上，BD 与 BA 均为圆 O 的切线，点 A 处于种子长度的中点，$\triangle ABE$ 与 $\triangle DBE$ 为全等三角形，可得

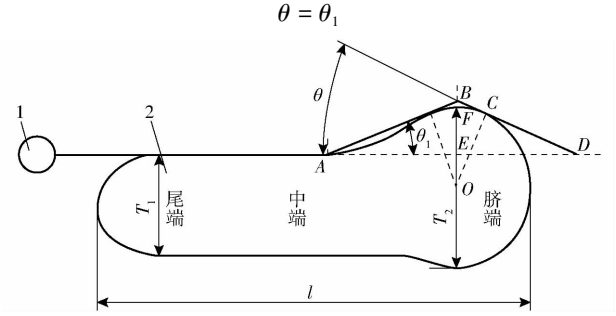

图 8　蚕豆种子夹取简化模型

Fig. 8　Simplified model of broad bean seed collection

1. 种夹　2. 蚕豆种子

在 $\triangle ABE$ 中

$$l_{AE}=\frac{1}{2}l-\frac{1}{2}T_2 \tag{4}$$

$$l_{BE}=\Delta l+\frac{1}{2}T_2-\frac{1}{2}T_1 \tag{5}$$

则根据三角函数可得

$$\tan\theta=\tan\theta_1=\frac{l_{BE}}{l_{AE}}=\frac{\Delta l+\frac{1}{2}T_2-\frac{1}{2}T_1}{\frac{1}{2}l-\frac{1}{2}T_2} \tag{6}$$

式中　l——种子长度，mm

T_1——中端厚度，mm

T_2——脐端厚度，mm

Δl——BF 的距离，mm

为保证种夹对种子的适应性，将渝蚕 1 号的三轴尺寸代入式(6)，得

$$\tan\theta=0.27+\frac{2\Delta l}{3.215}\geqslant 0.27$$

即 $\theta \geqslant 15.11°$

2.3.2 种夹长度和宽度

种夹长度和宽度是影响种夹夹持效果的关键参数,种夹长度和宽度过大会导致种夹夹持种子的粒数较多,导致重播严重;种夹长度和宽度过小会导致种夹夹持困难,漏播严重,因此在设计种夹长度和宽度时,需充分考虑种子外形尺寸,避免过大或过小影响排种效果。设计时以渝蚕 1 号种子为研究对象,分析了种子在种夹中的夹持状态,以确定种夹长度和宽度的取值。根据 2017 年蚕豆生产技术指导意见,将 1 ~ 3 粒/穴视为合格,4 粒及 4 粒以上为重播。

蚕豆种子多呈扁平状,各轴尺寸之间差异较大,在夹持过程中易发生叠加等情况,具体夹持状态如图 9 所示。图 9a ~ 9e 所示 5 种合格夹持状态,其中图 9a、9b 为单粒夹持状态,从单粒的长度或宽度方向夹取种子;图 9c、9d 为双粒夹持状态,图 9c 为双粒种子的宽度方向平行夹取,图 9d 为双粒种子的长度方向叠加两层夹取;图 9e 表示 3 粒种子的长宽混合方向叠加两层夹取。试验发现,在合格夹取的情况下,种子夹取时多为图 9a ~ 9d 状态,图 9e 状态的 3 粒种子叠加 2 层夹取状态极少出现。

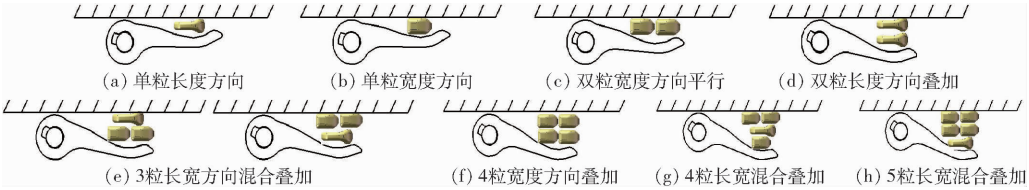

图 9 蚕豆种子充种状态

Fig. 9 Seed filling status of faba beans

图 9f ~ 9h 为 3 种状态重播夹取状态,其中图 9f 为 4 粒种子的宽度方向平行叠加 2 层夹取,图 9g 为 4 粒种子的长宽方向平行叠加 3 层夹取,图 9h 为 5 粒种子的长宽方向平行叠加 3 层夹取。借助高速摄像分析以上重播状态,发现出现重播主要由于蚕豆种子外形为扁平状且长度和宽度差异较大,容易导致一个长度同时叠加多个宽度的情况出现。

为确定种夹长宽尺寸,减少漏播重播情况,对俯视状态的夹持简图进行了分析,如图 10 所示。图 10a ~ 10e 所示 5 种状态为种夹夹持俯视情况,其中图 10a 表示单粒宽度方向夹持,图 10b 表示单粒长度方向夹持,图 10c 表示双粒混合方向夹持,图 10d 表示双粒宽度并列夹持,图 10e 表示 3 粒种子的长度和宽度方向混合夹持。由图 10 可知,当种夹宽度过小时,种子充种空间较小,不能稳定夹持蚕豆种子,容易导致漏播严重问题;当种夹宽度过大时,容易导致重播严重问题。在保证种子夹持可靠性的基础上,兼顾合格优先,避免漏播,减少重播的设计原则[18-20],确定种夹长度、宽度范围为

$$l < L < b + \frac{1}{2}b \tag{7}$$

$$\frac{1}{2}b < W < b \tag{8}$$

式中 b——蚕豆种子宽度,mm

L、W——种夹片的长度、宽度,mm

将渝蚕 1 号蚕豆尺寸参数代入式(7)、(8),得到种夹长宽取值范围为 $14.46\ \text{mm} < L < 21.56\ \text{mm}$、$5.39\ \text{mm} < W < 10.78\ \text{mm}$。

2.4 托种板设计

蚕豆种子粒径偏大且不规则,流动性较差,充种性能较困难,为了保证充种效果,沿种盘周向均匀布置托种板,起到扰动种群,增加种子流动性的作用,并且与种夹形成充种空间,提高充种性能。

如图 11 所示,托种板主要由 l_1 和 l_2 两段组成,l_1 为种子导流段,保证种子由托种板末端进入种夹作用区;l_2 为种夹作用段,与种夹配合,实现稳定夹种。种盘经过 A 点位置进入充种区,由于重力作用,种子在充种区前段多处于托种板底端,在托种板的托

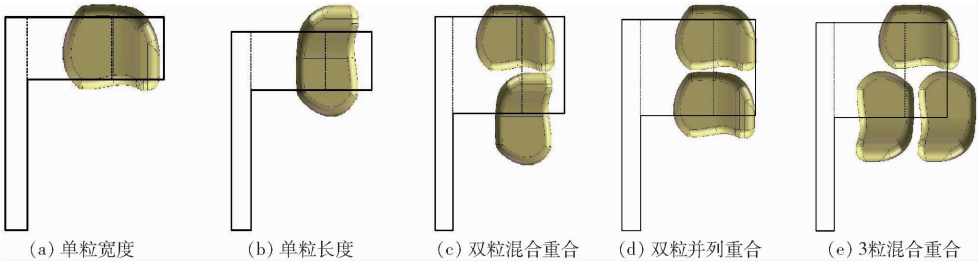

图 10 蚕豆种子俯视充种状态

Fig. 10 Faba bean overlooking states of filling

动下随种盘逆时针转动，当种盘运动到充种区 B 点位置，种夹开始闭合，为了保证种夹对种子的稳定夹持，托种板上的种子在该位置必须滑向种夹作用区，因此 l_1 段在该位置具有向下的倾角，即 τ_1，为保证种子能沿该托种板下滑，则 τ_1 必须大于种子与托种板摩擦角，种盘由 B 点运动至 C 点，经过种盘的闭合区，转动角 θ_1，则在 C 点位置 l_1 与水平线之间的夹角为 τ。经过 C 点进入清种区，种子在重力作用下开始初步清种，为了保证清种的充分性，在经过 C 点位置后立刻开始清种，种子可沿托种板 l_2 段向下滑动，即角 ψ 大于种子与托种板的摩擦角。由以上可知

$$\tau = \tau_1 + \theta_1 \tag{9}$$

$$\tau_1 > \theta_2 \tag{10}$$

$$\psi > \theta_2 \tag{11}$$

式中　ψ——C 点处托种板 l_2 段与水平线之间的夹角，(°)

θ_2——蚕豆种子与托种板的摩擦角，(°)

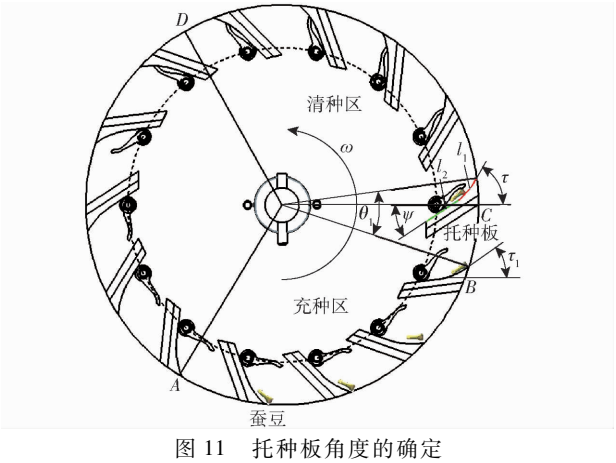

图 11　托种板角度的确定

Fig. 11　Determination of angle of tray

经测量蚕豆与未来树脂 8000 材料的摩擦角为 20.67°。

考虑托种板在整个充种区的托种作用，防止种夹未闭合时种子滑出种夹作用区，因此 ψ 和 τ 不宜过大，最终通过试验确定 ψ 和 τ 为 32°和 58°。其中托种板采用未来树脂 8000 通过 3D 打印的方式加工获得。

3　试验设计与数据分析

种夹作为该排种器最关键的部件之一，其结构参数直接决定了排种效果。在设计过程中，对种夹结构参数的取值范围进行了理论分析。为了获得最佳的排种效果，选取种夹长、宽和弯折角 3 个结构参数进行正交试验，以确定种夹结构参数的最优组合。

3.1　试验条件与装置

试验材料采用秋播区应用较为广泛的蚕豆品种渝蚕 1 号，其物理特性参数见表 1。排种检测装置选用中国农业大学自主研发的排种器性能检测仪[21]，如图 12 所示。试验时，排种器安装在排种器性能检测仪的安装架上，通过检测仪配套的电机驱动排种盘转动，导种管安装于排种器投种口下方，红外传感器安装在导种管中间，检测结果直接在显示屏上显示。为了保证株数，蚕豆种植农艺要求每穴 1 ~3 粒，因此在本检测仪检测的基础上，利用美国 Vision Research 公司的 Phantom 系列高速数字摄像机，对种夹投种过程进行图像分析，定义种夹内种子数 1 ~3 粒为合格，3 粒以上为重播。

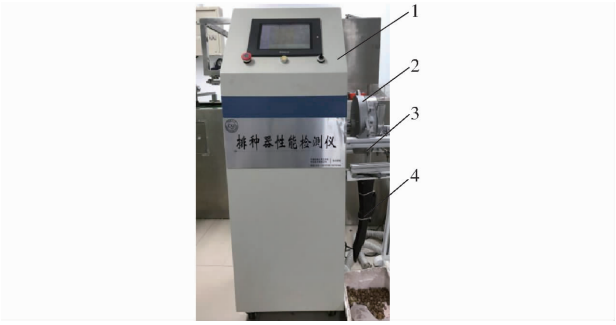

图 12　排种器性能检测试验

Fig. 12　Test of seeding performance experiments

1. 勺夹式精量排种器　2. 机架　3. 导种管　4. 排种器性能检测仪

根据国家标准 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》[22] 以及 2017 年蚕豆生产技术指导意见，确定合格指数、漏播指数、重播指数的计算公式为

$$A = \frac{n_1}{N} \times 100\% \tag{12}$$

$$D = \frac{n_2}{N} \times 100\% \tag{13}$$

$$M = \frac{n_3}{N} \times 100\% \tag{14}$$

式中　A——合格指数，%

D——重播指数，%

M——漏播指数，%

n_1——1 ~3 粒种子穴数

n_2——3 粒以上种子穴数

n_3——空穴数

N——理论排种穴数

3.2　试验方案与结果

为了寻求最优的参数组合，对所选 3 个参数进行了三因素三水平的正交试验，即选用正交表 $L_9(3^3)$ 进行试验设计与分析。在取值范围基础上，遵循精量播种要求来安排因素水平，其因素与水平表如表 2 所示。试验结果如表 3 所示，A、B、C 为因素水平值。

表 2 试验因素与水平

Tab. 2 Experimental factors and levels

水平	因素		
	长度 L/mm	宽度 W/mm	弯折角 θ/(°)
1	15.5	6	15
2	18.5	8	25
3	21.5	10	35

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test design scheme and results

序号	A	B	C	合格指数/%	漏播指数/%	重播指数/%
1	1	1	1	83.50	15.40	1.10
2	1	2	2	92.86	4.84	2.30
3	1	3	3	94.61	1.80	3.59
4	2	1	2	84.81	12.56	2.63
5	2	2	3	93.58	1.08	5.34
6	2	3	1	94.90	1.26	3.84
7	3	1	3	87.36	7.92	4.72
8	3	2	1	92.14	2.62	5.24
9	3	3	2	90.02	0.58	9.40

3.3 试验结果与分析

3.3.1 极差分析

为获得最佳的参数组合,对试验结果进行了极差分析,结果如表 4 所示。种夹长度、种夹宽度和弯折角各水平对排种性能指标的影响规律如图 13 所示,各考察因素的极差越大,说明该因素对试验指标的影响越大。

3.3.2 方差分析

对试验结果进行了方差分析,如表 5 所示,结果表明,种夹长度、种夹宽度和弯折角对排种性能指标的影响各不相同,其中种夹宽度对漏播指数具有极显著影响,对合格指数具有显著影响,对重播指数影响较小;种夹长度对漏播指数具有显著影响,对重播指数和合格指数影响较小;弯折角对合格指数、漏播指数和重播指数影响较小。

3 个因素对合格指数的影响由大到小为 B、C、A,种夹宽度对合格指数的影响最大,其次为折弯

表 4 各指标极差分析

Tab. 4 Analysis of range of each indicator

性能指标		因素		
		A	B	C
合格指数	k_1	90.32	85.22	90.18
	k_2	91.10	92.86	89.23
	k_3	89.84	93.18	91.85
	R_j	1.26	7.96	2.62
漏播指数	k_1	7.35	11.96	6.43
	k_2	4.97	2.85	5.99
	k_3	3.71	1.21	3.60
	R_j	3.64	10.75	1.01
重播指数	k_1	2.33	2.82	3.39
	k_2	3.94	4.29	4.78
	k_3	6.45	5.61	4.55
	R_j	4.12	2.79	1.39

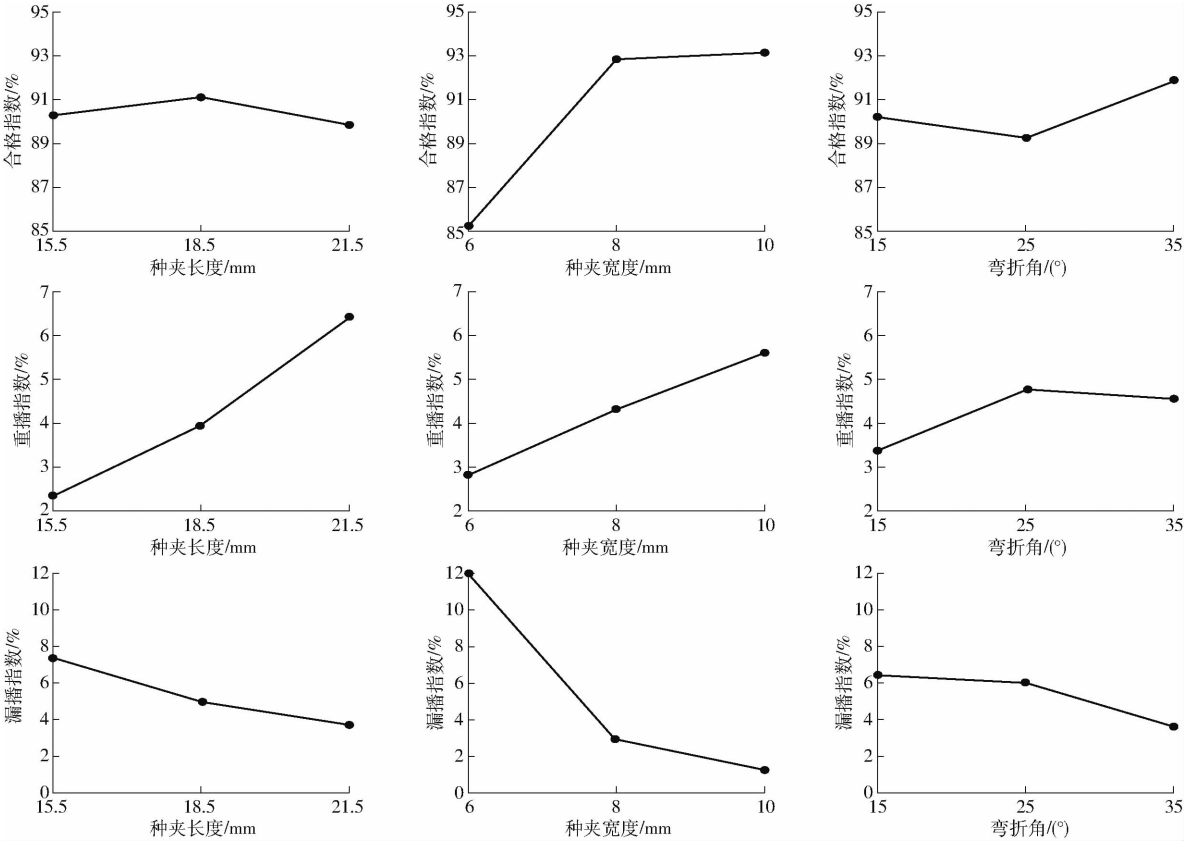

图 13 各项指标对排种性能的影响

Fig. 13 Effect of different levels on rowing performance

表 5　方差分析

Tab. 5　Variance analysis result

试验指标	方差来源	离差平方和	自由度	F	显著性
合格指数	A	2.411	2	0.224	
	B	121.674	2	11.303	*
	C	10.556	2	0.981	
	误差列	10.77	2		
漏播指数	A	20.502	2	10.246	*
	B	201.211	2	100.555	**
	C	13.906	2	6.950	
	误差列	2.00	2		
重播指数	A	25.917	2	5.260	
	B	11.717	2	2.378	
	C	3.303	2	0.670	
	误差列	4.93	2		

注：* 表示影响显著，** 表示影响极显著。

角，种夹长度对合格指数影响最小，因此针对合格指数确定较优参数组合为 $B_3C_3A_2$。

3 个因素对重播指数的影响由大到小为 A、B、C，重播指数相对于种夹长度和种夹宽度均呈正相关，种夹长度和宽度的增加增大了充种空间，提高了多粒种子充种概率，因此使得一夹多粒的情况增加，导致重播指数上升。弯折角对重播影响较小，弯折角的增大，增加了种子夹持的稳定性，对清种具有一定的影响，导致重播指数有所增加。通过试验结果可确定相对重播指数的较优参数组合为 $A_1B_1C_1$。

3 个因素对漏播指数的影响由大到小为 B、A、C，漏播指数相对于种夹长度、种夹宽度以及弯折角均呈负相关，种夹长度、宽度和弯折角的增加均能增加充种空间，提高了充种率，减少漏播情况的发生。通过试验结果最终确定相对漏播指数的较优参数组合为 $B_3A_3C_3$。

综合 3 因素对 3 指标的影响主次关系，考虑各试验因素对排种器性能指标的影响及其优化组合，按照合格指数较高、兼顾漏播指数和重播指数较低的原则[23]，最终确定 $A_1B_3C_3$ 为较优组合，即种夹长度为 15.5 mm、种夹宽度为 10 mm、弯折角为 35°。在该条件下本排种器的株距合格指数为 95.11%、漏播指数为 1.61%、重播指数为 3.28%，满足设计要求。

4　结论

（1）结合指夹式排种器和勺轮式排种器的特点，设计了勺夹式蚕豆精量排种器，为蚕豆播种提供了新方法。

（2）确定了勺夹式蚕豆精量排种器的主要结构和工作参数的设计方法，为该型排种器的进一步改进研究提供了理论基础。

（3）对种夹结构通过正交试验确定了 $A_1B_3C_3$ 为较优组合，即种夹长度为 15.5 mm、种夹宽度为 10 mm、弯折角为 35°。在该条件下本排种器的株距合格指数为 95.11%、漏播指数为 1.61%、重播指数为 3.28%，满足设计要求。

参　考　文　献

1　FARZAD J, NEJAT L A, RASHID G. Physical properties and mechanical behavior in quasi-static loading of faba bean (*Vicia faba* L.)[J]. Quality Assurance & Safety of Crops & Foods, 2012, 4(4):193 – 198.

2　SUNDARRAM P K, SINGH A K, KUMAR S. Studies on some engineering properties of faba bean seeds[J]. Journal of Agrisearch, 2014, 1(1):4 – 8.

3　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.

4　黄品贵. 蚕豆机械化种植及机具推广探讨[J]. 农业开发与装备，2014(8):96.

5　李惠菊. 机械化蚕豆点播技术的应用研究[J]. 农机化研究，2007,29(9):187 – 188.

6　曹文，丁俊华，李再臣. 机械式精密排种器的研究与设计[J]. 农机化研究，2009,31(7):142 – 145.
CAO Wen, DING Junhua, LI Zaichen. Research and design of mechanical precision metering [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7):142 – 145. (in Chinese)

7　史嵩，张东兴，杨丽，等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报，2014,30(5):10 – 18.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):10 – 18. (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/OL]. 农业机械学报，2012,43(增刊):48 – 53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2012s10&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):48 – 53. (in Chinese)

9　LANDRY E J. Faba bean (*Vicia faba* L.) a promising new pulse crop for southeastern Washington[D]. Pullman, Washington: Washington State University, 2014.

10　DAWELBEIT M I. Evalution of different planters for faba bean [J]. AGRIS, 1988, 17:31 – 33.

11　孙伟，吴建民，黄晓鹏，等. 勺匙式玉米精量取种器的设计与试验[J]. 农业工程学报，2011,27(10):17 – 21.
SUN Wei, WU Jianmin, HUANG Xiaopeng, et al. Design and experiment of spoon-shape maize precision seedmeter[J].

Transactions of the CSAE,2011,27(10):17 - 21. (in Chinese)

12 颜辉. 组合内窝孔玉米精密排种器优化设计新方法研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
YAN Hui. A new kind of method for the optimizated design of combination inner-cell corn precision seed metering device [D]. Changchun: Jilin University,2010. (in Chinese)

13 李洪刚. 仿生指夹式排种器[D]. 长春:吉林大学,2010.
LI Honggang. Bionic pinch of metering device [D]. Changchun: Jilin University,2010. (in Chinese)

14 周祖良,钱简可. 指夹式玉米精密播种排种器[J]. 农业机械学报,1986,17(1):47 - 53.
ZHOU Zuliang,QIAN Jianke. The structure design of the picker finger seed metering units of precision corn seed drill. [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1986,17(1):47 - 53. (in Chinese)

15 耿端阳,李玉环,孟鹏祥,等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5): 38 - 45. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.006.
GENG Duanyang,LI Yuhuan,MENG Pengxiang,et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5): 38 - 45. (in Chinese)

16 付威,李树峰,孙嘉忆,等. 强制夹持式玉米精量排种器的设计[J]. 农业工程学报,2011,27(12):38 - 42.
FU Wei,LI Shufeng,SUN Jiayi,et al. Design of compulsory clamp-type precision seed-metering device for corn. [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(12):38 - 42. (in Chinese)

17 佟超. 零速投种技术及其理论设计[J]. 机械研究与应用,1995(1):16 - 18,25.

18 王金武,唐汉,关睿,等. 动定指勺夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):49 - 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171206&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.006.
WAN Jinwu, TANG Han, GUAN Rui,et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):49 - 56. (in Chinese)

19 王金武,唐汉,周文琪,等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):68 - 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010.
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi,et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):68 - 76. (in Chinese)

20 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):43 - 50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi ,et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seeding-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(21):43 - 50. (in Chinese)

21 和贤桃,郝永亮,赵东岳,等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10): 19 - 27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161003&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003.
HE Xiantao,HAO Yongliang,ZHAO Dongyue,et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seedmeter's performance detection [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(10): 19 - 27. (in Chinese)

22 GB/T 6973—2005 单粒(精量)播种机试验方法[S]. 2005.

23 夏连明,王相友,耿端阳,等. 丸粒化玉米种子精密排种器[J]. 农业机械学报,2011,42(6):53 - 57.
XIA Lianming, WANG Xiangyou, GENG Duanyang, et al. Precision seed-metering device for pelleted corn seeds [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6):53 - 57. (in Chinese)