

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010

指夹式精量玉米排种器改进设计与试验*

王金武 唐 汉 周文琪 杨文盼 王 奇

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为满足精密播种作业要求,采用夹持充种、振动清种及柔性导种等方式,对指夹式精量玉米排种器进行了改进设计。通过对其工作原理的分析,对关键部件取种指夹、振动区及零速导种带的结构参数进行了优化。为提高排种器作业性能,得出其最佳工作参数,以工作转速和弹簧丝径为试验因素,粒距合格指数、重播指数和漏播指数为试验指标进行二次正交旋转组合设计试验,运用 Design-Expert 6.0.10 软件进行试验数据处理,建立因素与指标之间数学模型以进一步优化。试验结果表明,弹簧丝径为 0.77 mm,排种器转速小于 19.2 r/min 时,合格指数为 86.90%,重播指数为 9.62%,漏播指数为 3.51%,合格指数比改进前提高 13.5%,破损率为 0.4%。在此基础上进行排种适应性试验,结果表明指夹式精量玉米排种器对大扁马齿型籽粒具有良好的适应性,满足精密播种农艺要求。

关键词: 玉米 精量排种器 指夹式 设计 试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0068-09

Improved Design and Experiment on Pickup Finger Precision Seed Metering Device

Wang Jinwu Tang Han Zhou Wenqi Yang Wenpan Wang Qi

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to meet the requirements of precision planting, pickup finger precision seed metering device was designed, which can perform operations of seed clamping, seed vibration cleaning and seed flexible guiding. The optimal designs of structural parameters in key components, such as the pickup finger, the vibration cleaning area, and the zero speed guiding belt, were conducted based on the analysis of working principle. To improve the working performance of the metering device and obtain the best operation parameters, the quadratic general rotary unitized design was carried out with the rotational speed of seed meter and the wire diameter of spring as the experiment factors and the seeding qualified index, the relaying seed qualified index and the missing seed qualified index as the experimental indexes. Based on experimental data, a mathematical model was built by using the Design-Expert 6.0.10 software, the experimental factors were optimized, and the best combination was achieved. Test results showed that when the spring's wire diameter was 0.77 mm and the rotational speeds were less than 19.2 r/min, the seeding qualified index was 86.90%, the relaying seed qualified index was 9.62%, the missing seed qualified index was 3.51%, the improved metering device exceeded the original one by 13.5% in terms of the seeding qualified index, the damage rate of corn seed was 0.4%. On this basis, metering adaptability test was carried out which proved that the pickup finger seed precision metering device had good adaptability to corn of big flat dent, which met the requirements of precision seed sowing.

Key words: Corn Precision seed metering device Pickup finger Design Experiment

收稿日期: 2015-02-02 修回日期: 2015-03-07

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B04)

作者简介: 王金武, 教授, 博士生导师, 主要从事田间机械及机械可靠性研究, E-mail: jinwu@163.com

引言

排种器是实现精密播种的核心工作部件,其性能直接影响农作物种植质量和农民劳动成本^[1-4]。精密排种器按工作原理分为机械式和气力式两类^[5-7]。气力式排种器具有通用性好、可靠性高等优点,但存在结构复杂、故障率高等问题。现阶段机械式排种器因结构简单、维修方便、造价低廉等特点仍被广泛应用,目前市场应用较广的几类机械式排种器主要有:窝眼轮式、圆盘式、勺式等,作业过程中多存在籽粒破损率高、作业性能不稳定、难以适应高速作业等缺点,无法满足精密播种要求^[8-12]。相对而言,指夹式排种器是一种依靠取种指夹柔性夹持排种的机械式排种器,可提高播种精度,解决伤种严重和排种适用性差等问题。

从20世纪80年代开始,国内外学者开始对指夹式排种器进行研究^[13-14]。目前对此类排种器的研究以结构形式创新居多,对关键部件理论分析和影响因素研究较少,机具作业质量及效率较低,无法满足实际生产需求。

针对玉米精密播种要求,本文通过夹持充种、振动清种及柔性导种等方式,改进设计一种指夹式精

量玉米排种器,对其工作原理进行分析,优化关键部件结构参数,并通过台架试验得到其最佳工作组合参数,以实现高单粒率、高速均匀、低破损的作业要求。

1 排种器结构与工作原理

1.1 主要结构

如图1a所示,排种器主要由排种盘、指夹盘(取种指夹和微调弹簧)、凸轮、排种轴、指夹压盘、导种带、导种带轮(I、II)、清种毛刷、充种盖和导种端盖等部件组成。其中指夹盘和凸轮是排种器的核心部件之一,其设计及配合的合理性直接影响到机具作业质量。指夹盘是由12个取种指夹通过微调弹簧连接成的组合件,与凸轮依次安装在指夹压盘内侧。凸轮依靠止动键槽与排种盘固定装配。排种盘由镀锌钢板制成,以增加玉米籽粒的摩擦特性,其表面设有凹凸不平的振动区和导种口,振动区与清种毛刷配合提高清种效果,将玉米籽粒从导种口推入后侧导种室。导种带由橡胶制成,其圆周上配有12个倾斜叶片,与导种端盖及机壳形成12个导种室。排种器后端盖设有窥视孔,可实时对导种区进行监测。清种毛刷由猪鬃制成,可人为调整毛刷角度以控制清种程度。

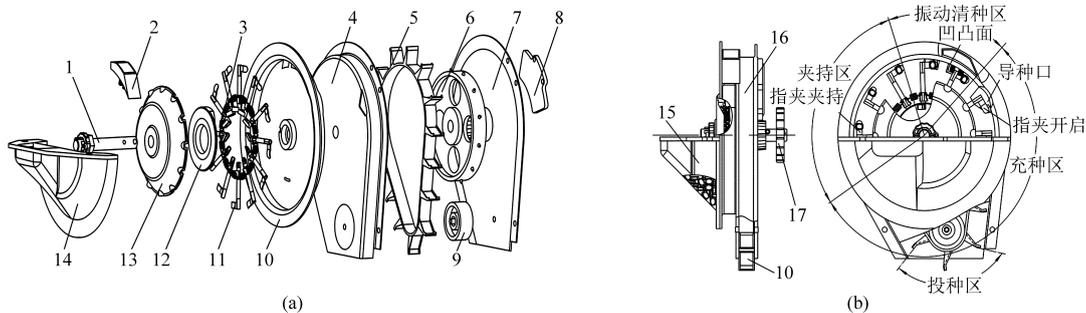


图1 指夹式精量玉米排种器

Fig. 1 Pickup finger precision seed metering device

(a) 结构示意图 (b) 工作原理图

1. 排种轴 2. 清种毛刷 3. 微调弹簧 4. 导种端盖 5. 导种带 6. 导种带轮 I 7. 导种护罩 8. 窥视胶垫 9. 导种带轮 II 10. 排种盘
11. 取种指夹 12. 凸轮 13. 指夹压盘 14. 充种盖 15. 充种室 16. 导种室 17. 驱动链轮

1.2 工作原理

排种器工作过程主要分为充种、清种、导种和投种4个阶段。如图1b所示,正常作业时,玉米籽粒由种箱填充至充种室内,机具行走轮通过链传动将动力传至排种轴,并带动指夹压盘和指夹盘进行旋转运动,凸轮固定不动与微调弹簧共同控制取种指夹定时开闭。当指夹开启时,进入充种区进行充种夹持;当指夹闭合时,将夹持多粒玉米籽粒离开充种区,完成充种过程。当指夹推送籽粒运动至排种盘凹凸振动区时,通过夹持压力的反复变化引起籽粒

振动,配合清种毛刷作用除去多余籽粒,完成清种过程。单粒玉米由导种口被投入排种器背面的导种室内,导种带与指夹盘同步旋转,将单粒籽粒送入排种口进行投种,完成导种、投种过程,实现精量播种作业。

2 排种器关键部件结构改进设计

2.1 取种指夹

取种指夹是排种器的关键部件之一,其结构形状及尺寸参数的设计直接影响到充种夹持性能。但

由于不同玉米品种类型、尺寸间差异性较大,使得常规取种指夹的适应性较差,因此本文对取种指夹进行结构参数优化设计,以提高其夹持性能及适应范围。

如图2所示,取种指夹由指夹片、指夹杆、指夹挂耳及指夹尾片组合而成。其中指夹片对籽粒进行夹持推送;指夹挂耳将微调弹簧与指夹连接成统一整体,对其整体进行定位;指夹尾片与凸轮相互接触摩擦,控制指夹开启空间,并支撑指夹整体旋转开闭。其结构参数主要包括指夹片长度 L_1 、宽度 L_2 和尾片间隙角 β 。

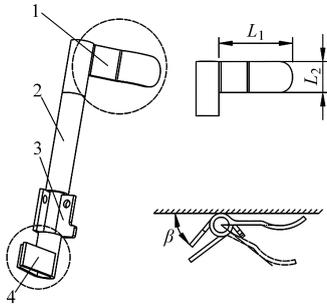


图2 取种指夹结构图

Fig. 2 Diagram of pickup finger

1. 指夹片 2. 指夹杆 3. 指夹挂耳 4. 指夹尾片

取种指夹结构参数主要与所夹持玉米总体尺寸有关,其设计遵循 $2b > L_1 > L_2 > l$ 原则。其中, b 为玉米籽粒宽度, l 为玉米籽粒长度。

为提高夹持取种适应范围,优化设计出指夹合理结构参数,选取种植范围较广且籽粒尺寸等级不同的3种类型玉米品种(东农253、德美亚1号、丰和7号)为依据。对每个品种随机抽取1000粒,测量籽粒外形尺寸,统计数据平均值,结果如表1所示。

表1 玉米籽粒外形尺寸统计结果

Tab. 1 Overall dimension of corn grain mm

品种	长度	宽度	厚度
东农253	11.35	9.24	8.70
德美亚1号	10.27	8.79	6.11
丰和7号	9.14	7.01	5.99

根据表1中玉米籽粒尺寸参数,设计指夹片长度 $L_1 = 20$ mm,指夹片宽度 $L_2 = 11.5$ mm。为防止夹持运动中出现籽粒游离脱落现象,指夹片采用两段式波浪弧形设计,使被夹籽粒受力均匀平稳。

取种指夹的开启空间与排种器充种效果有直接关系,开启空间过大,易夹持多粒玉米籽粒,出现重播现象;开启空间过小,易夹持不到玉米籽粒或损伤籽粒,出现漏播或伤种现象。指夹主要通过指夹尾片间隙角 β 控制开启空间的大小。图3表示指夹夹

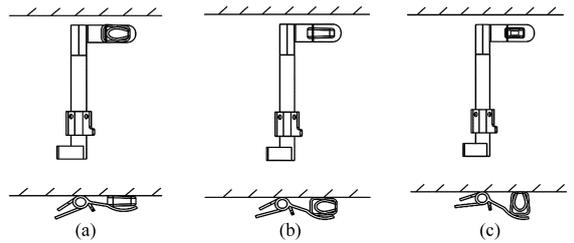


图3 籽粒夹持状态图

Fig. 3 Diagram of clamping states in different phases

(a) 厚度方向夹持 (b) 宽度方向夹持 (c) 高度方向夹持

持取种的3种状态:夹持籽粒厚度方向,开启空间最小,如图3a所示;夹持籽粒宽度方向,开启空间较大,如图3b所示;夹持籽粒高度方向,开启空间最大,如图3c所示。分析可知,厚度方向的夹持运动最稳定且受力较均匀,为理想夹持状态。根据取种指夹整体结构、玉米籽粒尺寸参数及夹持空间约束,设计指夹开启间隙为8 mm,尾片间隙角 β 约为 30° 。

2.2 充种控制机构

充种过程是整个排种过程中最关键的环节之一,准确定时控制取种指夹开启与闭合是提高充种质量的有效方法。目前常规排种器多采用空间凸轮机构与指夹盘配合的形式进行控制充种,但仍存在因指夹开闭时间及角度不合理而导致的籽粒滑落或卡种等问题,因此本文对控制凸轮工作圆周角度进行优化调整,以准确控制指夹工作状态的变化。根据实际作业要求,将指夹盘圆周角分为指夹开启角、充种持续角、指夹夹持角及指夹推送角4部分,分别表示指夹工作的4个状态,如图4所示。在充种过程中,取种指夹在指夹压盘的带动下旋转运动,当指夹尾片与凸轮渐开斜面接触时,逐渐克服弹簧拉力绕指夹杆轴发生旋转,使指夹片开启至最大空间,并以此种状态进入充种区;当指夹杆转过充种持续角后,指夹尾片与凸轮闭合斜面接触,逐渐脱离凸轮的接触,通过逐渐增大的弹簧力拉动指夹片闭合,并夹持玉米籽粒。在推送过程中,指夹靠微调弹簧作用以一定压力推送玉米籽粒平稳运动至导种口,完成充种夹持过程。

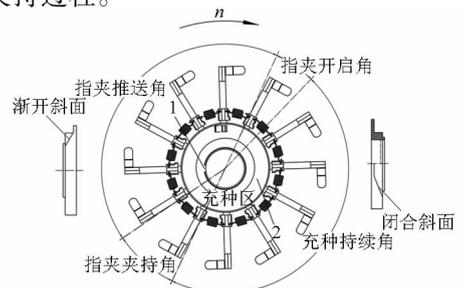


图4 控制机构运动阶段图

Fig. 4 Diagram of adjusting mechanism in different phases

1. 制键台 2. 凸轮

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,使指夹在充种区内稳定关闭,设计凸轮闭合斜面较平缓。为保证玉米籽粒精准推送入导种区并防止指夹卡入导种口造成部件损坏,应使指夹快速及时开启,设计凸轮渐开斜面较陡峭;根据导种口位置及种群位置,设计指夹开启角为 20° ,充种持续角为 160° ,指夹夹持角为 30° ,指夹推送角为 150° 。

2.3 充种夹持过程分析

在充种夹持过程中,取种指夹对玉米籽粒的压力主要由两侧微调弹簧提供,此压力将直接影响到籽粒充种效果及破损率。压力过小,籽粒易脱落,增加漏播率,降低排种性能质量;压力过大,籽粒易损伤,加快指夹尾片的磨损程度^[15]。

图5表示指夹夹持在旋转运动中的3种状态形式,即闭合、夹持和开启。对夹持状态中的取种指夹进行受力分析,具体如下:

若保证取种指夹及玉米籽粒平稳运动,必须使指夹杆中心轴所受力矩平衡,即

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

$$fr + P_1u_1 + P_2u_2 = P_N b_n \quad (2)$$

$$P_N = \frac{fr + P_1u_1 + P_2u_2}{b_n} \quad (3)$$

- 式中 M ——指夹杆轴心力矩, $N \cdot m$
 f ——排种盘对指夹杆摩擦力, N
 P_N ——指夹夹持力, N
 P_1 ——弹簧1拉力, N
 P_2 ——弹簧2拉力, N
 u_1 ——弹簧1力臂, mm
 u_2 ——弹簧2力臂, mm
 r ——指夹杆半径, mm
 b_n ——被夹持玉米籽粒宽度, mm

由式(3)可知,取种压力受微调弹簧拉力和玉米籽粒尺寸的影响,且压力随微调弹簧拉力增加而增加。

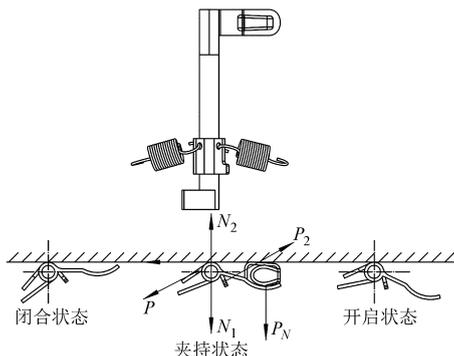


图5 指夹夹持受力示意图

Fig.5 Diagram of force applied to pickup finger

在此基础上,以玉米籽粒为研究对象,研究工作转速与取种压力的关系,如图6所示。

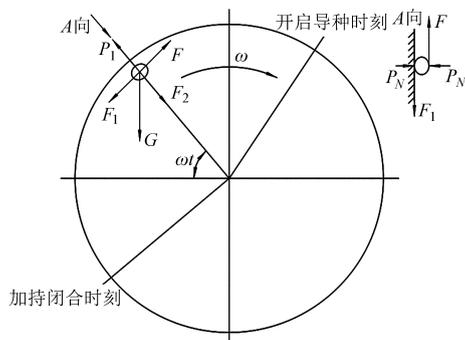


图6 种子运动过程受力示意图

Fig.6 Diagram of force applied to moving seed

由于指夹持种角一定,因此指夹旋转角($\omega t + \theta$)始终在 $(0, \pi)$ 内变化。根据达朗贝尔原理,对径向力进行分解

$$G \sin(\theta + \omega t) + F_2 = mR\omega^2 \quad (4)$$

$$G \sin(\theta + \omega t) + \mu P_N = mR\omega^2 \quad (5)$$

$$P_N = \frac{mR\omega^2 - G \sin(\omega t + \theta)}{\mu} \quad (6)$$

对式(6)进行二阶求导得

$$\frac{d^2 P_N}{d\omega^2} = \frac{m}{\mu} (2R + t^2 g \sin(\omega t + \theta)) \quad (7)$$

- 式中 G ——玉米籽粒所受重力, N
 F ——指夹推力, N
 F_1 ——排种盘横向摩擦力, N
 F_2 ——排种盘径向摩擦力, N
 T_i ——玉米籽粒离心力, N
 m ——玉米籽粒质量, g
 θ ——指夹旋转角, $(^\circ)$
 R ——指夹运动圆周半径, mm
 μ ——籽粒与排种盘间摩擦因数
 t ——夹持推送运动时间, s

式(7)中 $\sin(\omega t + \theta)$ 恒大于零,因此可判定其二阶导数大于零,压力函数以凹曲线趋势变化。分析可知,随工作转速逐渐增加,取种压力先减小后增大。

由式(3)和式(7)可知,指夹夹持性能与工作转速、微调弹簧拉力及玉米籽粒尺寸等因素有关。因此本文在试验阶段选取工作转速和微调弹簧拉力为因素,进行正交旋转组合试验,得出其最佳工作组合参数。在此基础上进行排种适应性试验,检验指夹式精量玉米排种器对不同类型、尺寸籽粒适应情况。

2.4 清种振动区

为降低播种的漏播率,提高作业质量,在排种盘表面设计凹凸不平的清种振动区,与清种毛刷相配合形成清种区域,提高排种器清种效果。如图7所

示,清种振动区位于排种盘表面正上方,由两组不同尺寸参数的凹面组成。当指夹夹持籽粒运动至振动区凹面时,由于振动区作用面方向及作用点的变化,使得籽粒受力方向、接触面积等因素发生突变,打破其力系的平衡,经过连续两次反复作用,配合毛刷清种,清除受力不均衡的多余籽粒,完成清种过程。

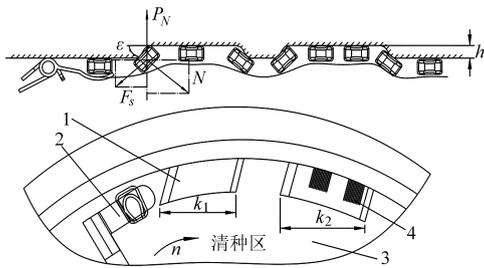


图7 清种区示意图

Fig. 7 Diagram of cleaning area

1. 凹凸振动面 2. 取种指夹 3. 排种盘 4. 清种毛刷

根据指夹片参数及玉米籽粒尺寸设计清种区结构参数。振动凹面过小影响清种效果,过大易出现漏播现象。在凹面坡脚处应设有圆弧角,使得籽粒在弧面上以线接触形式运动,防止发生伤种现象。经过第一振动凹面的籽粒受力较平衡,为提高二次清种效果,应增加第二振动凹面长度。清种区结构参数主要包括凹面区长度 k 、深度 h 和凹面圆弧角 ε 。

清种凹面区长度由指夹片长度确定,凹面区深度由籽粒厚度确定,其设计遵循

$$\begin{cases} 1. 6L_1 \geq k_2 > k_1 \geq 1.1L_1 \\ 1. 5s_{\min} \geq h_1 = h_2 \geq s_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中 s_{\min} ——玉米籽粒厚度最小值,mm

s_{\max} ——玉米籽粒厚度最大值,mm

根据指夹片尺寸及测得玉米几何数据,设计第二振动凹面长度 $k_2 = 28$ mm,第一振动凹面长度 $k_1 = 24$ mm,振动凹面深度 $h_1 = h_2 = 8$ mm。

为提高清种性能,有效打破籽粒间力系平衡状态,对振动凹面圆弧角 ε 进行设计分析。图7中受力分析表示被夹持籽粒经过凹面下坡时运动状态,由于籽粒运动方向及作用点发生变化,使籽粒处于非平衡状态,有

$$\begin{cases} P_N \geq F_s \sin \varepsilon + N \cos \varepsilon \\ N \sin \varepsilon \leq F_c \cos \varepsilon \end{cases} \quad (9)$$

式中 F_s ——籽粒所受摩擦力,N

N ——籽粒所受支持力,N

其中,籽粒所受摩擦力 $F_s = \mu N$ 。

将式(9)和式(6)合并得

$$\begin{cases} \cos \varepsilon \leq \frac{mR\omega^2 - G \sin(\omega t + \theta)}{\mu(\mu^2 + 1)N} \\ \tan \varepsilon \leq \mu \end{cases} \quad (10)$$

由于清种区位于排种盘上方, $\omega t + \theta \approx 90^\circ$, 因此将式(10)进一步化简得

$$\arctan \mu \geq \varepsilon \geq \arccos \frac{4\pi^2 m R n^2 - G}{\mu(\mu^2 + 1)N} \quad (11)$$

正常工作时,排种器的工作转速 n 为 15 ~ 35 r/min,测量玉米籽粒千粒质量及动摩擦因数,得出 $m = 0.27$ g, $\mu = 0.12 \sim 0.15$,代入式(11)中确定振动凹面圆弧角 $\varepsilon \in (2.7^\circ, 7^\circ)$,同时振动凹面上坡应平缓些,有利于籽粒的推出,下坡应陡峭些,有利于籽粒的清种分离。

2.5 导种带

为提高播种的均匀性和直线度,降低投种点高度,减小籽粒落入种沟的瞬时速度,在排种器后侧部设计柔性导种区。导种区主要由导种带、导种带轮(I、II)及导种端盖等部件组成,其中导种带圆周上配有12个倾斜叶片,与两侧机盖壳体构成12个封闭导种室,在排种轴驱动下与指夹盘同步旋转,当籽粒被运送至投种点时,在重力作用下落入种沟,完成投种作业。导种带结构参数主要包括导种叶片间距离 S 和叶片倾斜角 τ 。

如图8所示,对导种过程玉米籽粒运动状态进行分析,建立直角坐标系 Oxy ,坐标原点 O 与导种带轮 I 旋转中心相重合,籽粒在导种带传送下进行旋转运动,同时随播种机具前进。

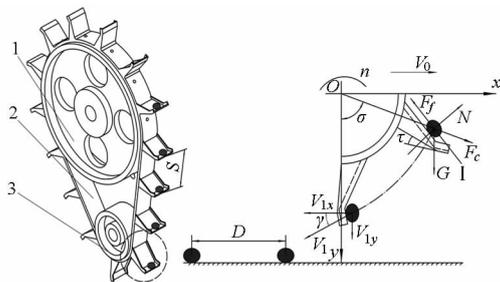


图8 导种运动分析图

Fig. 8 Diagram of kinematics analysis in guiding seed phases

1. 导种带轮 II 2. 导种带 3. 导种带轮 I

当叶片处于投种点 I 位置时,籽粒应保持相对平衡,避免在倾斜叶片上产生相对运动而影响投种轨迹,其临界条件为

$$\begin{cases} F_c = \frac{mV_1^2}{R_1} \\ V_1 = 2\pi n R_2 \\ F_f = G \cos \sigma + F_c \sin \tau \\ F_c + G \sin \sigma \leq F_f \cos \tau \end{cases} \quad (12)$$

式中 F_c ——籽粒所受离心力,N

F_f ——斜面叶片对籽粒摩擦力,N

R_1 ——导种带轮 I (从动轮)半径,mm

R_2 ——导种带轮Ⅱ(主动轮)半径,mm

V_1 ——导种带线速度,m/s

σ ——导种带旋转圆周角,(°)

本文设计的导种带选用橡胶材料定制,由于排种器整体结构限制,导种带轮直径不可太大,设定导种带轮Ⅰ半径 R_1 为50~60 mm,导种带轮Ⅱ半径 R_2 为100~110 mm,投种点Ⅰ旋转圆周角 σ 为55°~65°,将以上参数代入式(12)中可得叶片倾斜角 $\tau \leq 22.3^\circ$ 。

对投种籽粒进行运动学分析,在时间 t 内导种装置转过导种腔体数量必须是排出籽粒的整数 Z 倍,本设计中 $Z=1$,即

$$Z \frac{V_0 t}{D} = \frac{V_1 t}{S} \quad (13)$$

将式(12)和式(13)合并得

$$S = \frac{2\pi n R_2 D}{Z V_0} \quad (14)$$

式中 V_0 ——机具前进速度,m/s

D ——玉米种植株间距,mm

东北地区玉米播种株距 D 为200~220 mm,设定播种机前进速度 V_0 为5~8 km/h,将以上参数代入式(14)得导种叶片间距离 $S=52$ mm。

考虑导种叶片对下落籽粒的干扰作用,当籽粒运动至投种点位置时,为满足零速投种要求,减小投入种沟的瞬时速度,选取籽粒相对导种装置投送方向为水平方向^[16],设定输送带运动两相邻导种腔距离所需时间为 t ,即

$$t = \frac{S}{V_1} \quad (15)$$

在时间 t 内籽粒相对于排种器下落位移为

$$s = V_1 t \sin\gamma + \frac{1}{2} g t^2 \quad (16)$$

将式(13)、式(15)和式(16)合并得

$$s = S \sin\gamma + \frac{S^2 g}{8\pi^2 \omega^2 R^2} \quad (17)$$

式中 s ——籽粒下落位移,mm

γ ——籽粒投送速度与水平间夹角,(°)

由于籽粒相对导种装置速度为零,故 γ 为0°,代入各参数得 $s=37.7$ mm,因此在下一导种叶片运动到投种位置时,籽粒相对排种器垂直方向已运动37.7 mm,不会干扰籽粒的运动。

3 试验

3.1 试验条件

试验地点为东北农业大学排种性能实验室;试验品种选择德美亚1号玉米籽粒;试验装置为黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的JPS-12型排

种器性能检测试验台,如图9所示。

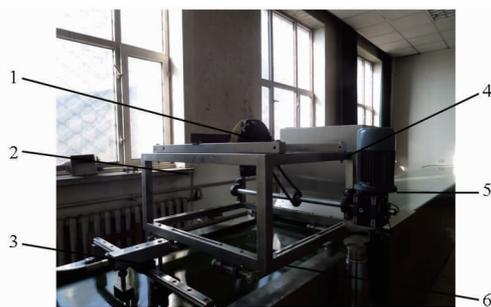


图9 排种性能试验台

Fig. 9 Test bed of seeding performances experiment

1. 指夹式排种器
2. 安装架
3. 喷油泵
4. 摄像处理装置
5. 驱动电动机
6. 种床带

在试验过程中,排种器固定在安装架上,种床带相对于排种器反向运动,模拟播种机前进运动状态,喷油泵将油喷于种床带上,玉米籽粒从排种口落至涂有油层的种床带上,通过摄像处理装置进行实时检测并采集数据,以实现准确测量各项排种性能指标^[17]。

3.2 试验因素与指标选取

由充种过程动力学分析可知,工作转速和弹簧夹持力是影响排种器充种质量的主要因素,因此选取工作转速和弹簧夹持力为试验因素。根据我国高速精密播种相关要求,通过调节JPS-12排种试验台电动机变频器的频率,使排种器在15~35 r/min工况转速下平稳运转。将弹簧夹持力的变化转换为弹簧丝径的变化,定制不同丝径的弹簧进行试验研究。转换公式为

$$\begin{cases} P = k \Delta s \\ k = \frac{1000\delta}{\left(\frac{d}{\delta}\right)^3} \end{cases} \quad (18)$$

式中 P ——弹簧拉力,N

k ——弹簧刚度系数

Δs ——弹簧拉伸变化量,mm

d ——弹簧中径,mm

δ ——弹簧丝径,mm

为检验排种器作业质量,参考GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,选取试验评价指标为合格指数、重播指数和漏播指数。

3.3 试验内容与方法

分别对工作转速和弹簧丝径进行单因素预试验,以合理控制因素变化范围。在此基础上,采用二因素五水平二次旋转组合设计试验以确定排种器最佳组合参数,试验因素水平编码表如表2所示。

3.4 试验结果与分析

试验方案与结果如表3所示,试验参数设计值

表2 试验因素水平编码

Tab.2 Coding table of level and experimental factors

编码	工作转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	弹簧丝径 x_2/mm
1.414	33.7	0.94
1	31.0	0.88
0	24.75	0.73
-1	18.5	0.58
-1.414	15.8	0.52

与实际值误差小于 1.1%，可近似以排种器工作转速和弹簧丝径的设计值对结果进行分析。通过 Design - Expert 6.0.10 软件对试验数据回归分析，进行因素方差分析，筛选出较为显著影响因素，进而得出相应的回归方程，其中 x_1 为工作转速， x_2 为弹簧丝径， y_1 为合格指数， y_2 为重播指数， y_3 为漏播指数。

$$y_1 = -125.02 + 10.57x_1 + 49.08x_2 - 2.69x_2^2 - 1.57x_1x_2 \quad (19)$$

$$y_2 = 86.97 - 8.02x_1 - 18.05x_2 + x_2^2 + 1.11x_1x_2 \quad (20)$$

$$y_3 = 150.47 - 4.16x_1 - 33.03x_2 + 1.70x_2^2 + 0.86x_1x_2 \quad (21)$$

为直观地分析试验指标与因素间关系，运用 Design - Expert 6.0.10 软件得到响应曲面，如图 10 所示。

根据上述回归方程和响应曲面图可知，排种器工作转速与弹簧丝径间存在交互作用。由图 10a 可知，当弹簧丝径一定时，合格指数随工作转速增加而降低；当工作转速一定时，合格指数随弹簧丝径增加而先增加后降低；当弹簧丝径变化时，合格指数的变化区间较大，因此弹簧丝径是影响合格指数的主要因素。由图 10b 可知，当弹簧丝径一定时，重播指数随工作转速增加而增加；当工作转速一定时，重播指数随弹簧丝径增加而先降低后增加；当工作转速变化时，重播指数的变化区间较大，因此工作转速是影响重播指数的主要因素。由图 10c 可知，当弹簧丝径一定时，漏播指数随工作转速增加而增加；当工作转速一定时，重播指数随弹簧丝径增加而增加；当弹

簧丝径变化时，漏播指数的变化区间较大，因此弹簧丝径是影响重播指数的主要因素。

表3 试验方案与结果

Tab.3 Results of tests

序号	试验因素		性能指标		
	工作转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	弹簧丝径 x_2/mm	$y_1/\%$	$y_2/\%$	$y_3/\%$
1	18.5	0.58	72.56	18.42	9.02
2	18.5	0.88	71.15	12.32	17.53
3	31.0	0.58	81.96	14.10	3.94
4	31.0	0.88	73.74	8.17	16.09
5	15.8	0.73	79.10	12.70	8.20
6	33.7	0.73	88.28	7.57	4.15
7	24.75	0.52	76.47	18.93	4.60
8	24.75	0.94	67.33	9.90	23.77
9	24.75	0.73	84.32	10.12	5.56
10	24.75	0.73	82.09	10.95	7.98
11	24.75	0.73	81.13	10.17	8.70
12	24.75	0.73	82.46	9.50	8.04
13	24.75	0.73	81.82	11.63	6.55
14	24.75	0.73	85.10	9.30	6.60
15	24.75	0.73	82.73	11.09	6.18
16	24.75	0.73	80.77	10.58	8.65

3.5 试验优化与验证

为得到试验因素最佳水平组合，对试验因素进行优化设计。建立参数化数学模型，结合试验因素的边界条件，对合格指数、重播指数和漏播指数的回归方程进行分析，得到其非线性规划的数学模型为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s. t.} \end{cases} \begin{cases} 15.8 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 33.7 \text{ r/min} \\ 0.52 \text{ mm} \leq x_2 \leq 0.94 \text{ mm} \\ 0 < y_1(x_1, x_2) \leq 1 \\ 0 < y_2(x_1, x_2) \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

当工作转速为 19.2 r/min，弹簧丝径为 0.77 mm 时，排种器性能质量最优，其合格指数为 86.90%，

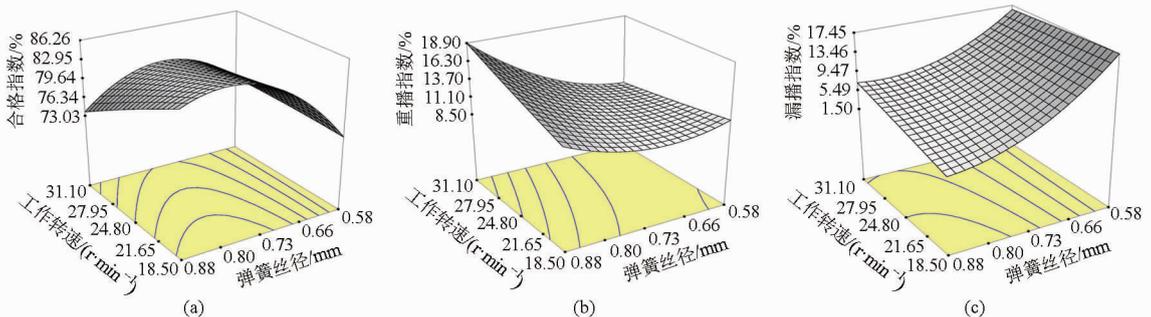


图 10 各因素对试验指标的响应曲面

Fig.10 Response surfaces of all factors on seeding qualified index

(a) 合格指数 (b) 重播指数 (c) 漏播指数

重播指数为 9.62%,漏播指数为 3.51%。根据优化结果进行试验验证,合格指数为 88.12%,重播指数为 7.82%,漏播指数 4.06%,与优化结果基本一致,误差在可接受范围内。以转速 19.2 r/min、前进速度 8 km/h 工况下的试验结果与文献[18]中常规指夹式排种器进行性能对比,其排种合格指数提高了 13.5%,通过试验台摄像处理装置测得籽粒破损率为 0.4%,优于 JB/T 10293—2001《单粒(精密)播种机技术条件》中指标,满足精密播种要求。

3.6 排种适应性试验

在正交组合试验确定其最佳工作参数基础上,为研究排种器对不同玉米品种适应情况,进行排种器适应性试验。选取 3 种不同品种玉米籽粒(东农 253、德美亚 1 号、丰和 7 号)为研究对象,籽粒尺寸如表 1 所示。在转速 19.2 r/min、前进速度 8 km/h 工况下进行 5 次重复试验,进行数据处理取平均值,如表 4 所示。

表 4 适应性试验结果
Tab. 4 Results of suitability tests %

品种	性能指标		
	合格指数	重播指数	漏播指数
东农 253	91.65	3.34	5.01
德美亚 1 号	88.12	7.82	4.06
丰和 7 号	84.53	11.93	3.54

由表 4 可知,排种器对 3 种玉米品种适应性均满足精密播种农艺要求,其中东农 253(呈大扁马齿型)流动性较好,指夹夹持稳定,且易于清种,因此性能指标最好;丰和 7 号(呈小扁圆型)在充种过程中易出现夹持多粒现象,籽粒流动性较差,清种不彻底,易造成重播现象。

4 结论

(1)通过夹持充种、振动清种及柔性导种等方式,改进设计了一种指夹式精量玉米排种器,对其工作原理进行分析,优化设计关键部件结构参数,满足单粒率高、高速均匀、低破损的作业要求。

(2)采用二次正交旋转组合设计试验,建立排种性能指标与试验参数间数学模型,通过响应曲面图直观得出试验因素对指标影响趋势和交互作用关系,表明试验结果与优化结果基本一致。

(3)运用 Design - Expert 6.0.10 软件对试验结果进行分析,对回归数学模型进行多因素优化,得出工作转速为 19.2 r/min,弹簧丝径为 0.77 mm 时,排种合理指数为 88.12%,重播指数为 7.82%,漏播指数为 4.06%。

(4)进行排种适应性试验,表明排种器对大扁马齿型玉米籽粒具有良好的适应性,满足精密播种农艺要求。

参 考 文 献

- 臧英,邢赫,王在满,等. 水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(5):33-38.
Zang Ying, Xing He, Wang Zaiman, et al. Design and experiment of shield device on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(5):33-38. (in Chinese)
- 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报,2014,45(1):46-52.
Cong Jinling, Yu Jiajia, Cao Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):46-52. (in Chinese)
- 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力式组合式玉米精密排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):43-47.
Liu Jia, Cui Tao, Zhang Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):43-47. (in Chinese)
- 姜峰,陈海涛,王业成. 小区育种插装式排种器的设计[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):9-12.
Jiang Feng, Chen Haitao, Wang Yecheng. Design of insert-metering device for sub district breeding seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(Supp.1):9-12. (in Chinese)
- 郭雪峰,李成华,刘玉静. 基于 ADAMS 的勺式玉米精密排种器的动态仿真[J]. 农机化研究,2007,29(6):146-148.
Guo Xuefeng, Li Chenghua, Liu Yujing. Dynamic simulation for disk-scoop-type precision metering device of maize based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(6):146-148. (in Chinese)
- 贾洪雷,赵佳乐,郭明卓. 双凹面摇杆式排种器设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2015,46(1):60-65.
Jia Honglei, Zhao Jiale, Guo Mingzhuo. Design and performance experiment on double-concave surface rocker typr seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):60-65. (in Chinese)
- 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(8):78-83.
Zhao Jiale, Jia Honglei, Jiang Xinming, et al. Sunction type offset double disc seed metering device of soybean seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(8):78-83. (in Chinese)
- 李红. 精密排种器的数字化设计与工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2004.
Li Hong. Digital design and simulation analysis of working process for the precision seed-metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)

- 9 心男. 基于 EDEM - FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Xin Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM - FLUENT [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- 10 Coşkun M B, Ibrahim Yalçın, Cengiz Özarslan. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata Sturt*) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4): 523 - 528.
- 11 杨然兵, 柴恒辉, 尚书旗. 花生播种机倾斜圆盘碟式排种器设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 79 - 84.
Yang Ranbing, Chai Henghui, Shang Shuqi. Performance of metering device with decline with declined discon peanut seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 79 - 84. (in Chinese)
- 12 廖庆喜, 高焕文, 臧英. 玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 109 - 113.
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Zang Ying. Experiment study on the cell of the horizontal plate precision meter for corn seed[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 109 - 113. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 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)
- 15 付威, 李树峰, 孙嘉忆, 等. 强制夹持式玉米精量排种器[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)
- 16 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8 - 15.
Chen Xuegeng, Zhong Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8 - 15. (in Chinese)
- 17 王延耀, 李建东, 王东伟, 等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 54 - 58.
Wang Yanyao, Li Jiandong, Wang Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 54 - 58. (in Chinese)
- 18 刘立晶, 刘忠军, 李长荣, 等. 玉米精密排种器性能对比试验[J]. 农机化研究, 2011, 33(4): 155 - 157.
Liu Lijing, Liu Zhongjun, Li Changrong, et al. Comparative experiment on corn spacing seed feeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 155 - 157. (in Chinese)