

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2023.10.004

王宗源, 明家锐, 王其欢, 等. 机械式漏播检测与补种装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10): 21-29

Wang Zongyuan, Ming Jiarui, Wang Qihuan, et al. Design and test of mechanical leakage detection and reseeding device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 21-29

机械式漏播检测与补种装置设计与试验^{*}

王宗源, 明家锐, 王其欢, 张策, 岳栋, 耿端阳

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博, 255000)

摘要:针对玉米播种作业过程中常出现的漏播问题,采用冗余设计方法,研究一种机械式漏播检测与补种装置。通过跨越式探种杆对主排种窝眼轮充种情况进行持续检测,并带动锁杆完成对补种装置锁定与解锁,实现漏播补种。设计一种新型探种杆结构,采用双压头结构的探种杆,提高漏播检测精度;优化检测装置结构参数,实现对补种装置的快速锁定与解锁;通过对补种装置进行运动分析,确定补种装置结构参数及同步补种条件,提高播种质量。结合理论分析,选取作业速度、探种角度和补种复位弹簧最大作用力为试验因素,以漏播指数与合格指数为性能指标进行单因素试验与正交试验。确定较优的参数组合:作业速度 0.9 m/s,探种角度 45°,复位弹簧最大作用力 12 N。在该条件下漏播指数为 3.4%,合格指数为 94.5%,满足精量播种作业要求。

关键词:玉米;播种;漏播;机械检测;补种装置

中图分类号:S223.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2023) 10-0021-09

Design and test of mechanical leakage detection and reseeding device

Wang Zongyuan, Ming Jiarui, Wang Qihuan, Zhang Ce, Yue Dong, Geng Duanyang

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, 255000, China)

Abstract: Aiming at the problems of missed seeding in the process of corn sowing, a mechanical missing seeding detection and reseeding device was studied by using the redundancy design method. The seed filling of the main seed metering device was continuously detected through the spanning seed probe rod, and the locking rod was driven to lock and unlock the reseeding device, so as to realize reseeding. A new type of seed probe rod structure was designed, adopting the double-deck structure of the seed probe rod, to improve the precision of missed seeding detection. Optimizing the structural parameters of the detection device to realize the quick locking and unlocking of the reseeding device. Through the motion analysis of the reseeding device, the structural parameters of the reseeding device and the conditions for synchronous reseeding were determined to improve the seeding quality. Combined with the theoretical analysis, the single factor test and orthogonal test were carried out with speed of advance, seed exploration angle, and the maximum force of the reseeding return spring as the test factors, and the missed seeding index and qualified index as the performance indicators. The optimal parameter combination was determined as follows: the speed of advance was 0.9 m/s, the seed exploration angle was 45°, and the maximum force of the reseeding return spring was 12 N. Under this condition, the missed seeding index was 3.4%, and the qualified index was 94.5%, which could conform to the relevant national standards.

Keywords: corn; sow; missing seed; mechanical detection; reseeding device

0 引言

随着我国玉米播种机械化技术的快速发展,玉米

精密播种已经达到了很高的水平^[1]。但由于排种器结构限制,现有玉米、大豆等大籽粒作物精量播种机,平均漏播率仍在 11.7% 左右,玉米漏播损失达到

收稿日期:2022年10月15日 修回日期:2023年3月1日

^{*} 基金项目:山东省现代农业产业技术体系玉米产业创新团队项目(SDAIT-02-12)

第一作者:王宗源,男,1998年生,山东淄博人,硕士研究生;研究方向为农业机械化。E-mail: 1594713686@qq.com

通讯作者:耿端阳,男,1969年生,陕西澄城人,博士,教授;研究方向为新型农业机械装备。E-mail: dygxt@sdu.edu.cn

100 kg/hm² 以上^[2-5]。排种器作为播种机的核心部件,排种器形成种子流的稳定性和均匀性成为排种器性能优劣的关键,也成为影响播种机作业质量的关键参数。以玉米排种器为例,先后出现了外槽轮式、水平圆盘式、勺轮式、指夹式以及气吸/吹式排种器等多种结构形式^[6],这些结构形式都是为了提高玉米播种过程的稳定性和均匀性。

为了减少播种机作业过程的漏播问题,国内外学者对排种检测与补偿技术进行了大量研究。20 世纪 90 年代末 Garcia 等^[7]采用计算机视觉处理技术,实现了玉米播种过程的在线监测。Al-Yamani 等^[8]采用编码与监控相结合的方式,实现了播种过程漏种位置监测与补种,降低了玉米播种机作业的漏播率。

国内在提高排种器均匀分种研究的基础上,也对漏播检测与补种技术也进行了大量研究。如孙伟等^[9]针对马铃薯种植过程中存在的漏种问题,开发了由漏播检测系统与播种系统组成的自动补种技术,解决了马铃薯排种器作业过程的漏种问题。朱瑞祥等^[10]激光光电传感器和霍尔传感器检测方法,实现了漏播位置的无偏差补种,保证了播种过程种子流的稳定性和均匀性。

针对上述玉米漏播导致玉米产量损失的问题,本文采用冗余设计的方式,研究一种机械式漏播检测与补种装置。通过对漏播检测装置以及补种装置的结构设计与运动分析,确定影响播种质量的关键参数。应用正交试验对机械式漏播检测与补种装置进行试验研究,获得最佳作业参数组合,以期提高播种质量。

1 排种器精准播种策略与工作原理

1.1 排种器精准播种策略

减少排种器漏播问题的策略有两种,一种是采用新原理和新方法提高排种精度,减少漏播问题;另一种是采用可靠性设计中的冗余设计方法,即采用冗余系统防止漏播问题的发生。然而,新原理、新方法需要较长时间的技术积累和积极的探索,一般具有周期长、成本高的特点,所以本研究选择冗余设计方法降低排种器的漏播率。假设所选排种器的播种率为 q ,则漏播率为 $1-q$,其可靠性模型如图 1 所示。

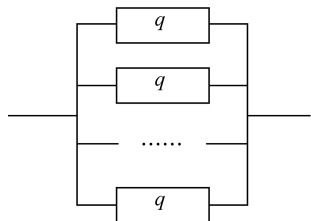


图 1 补种减排排种器可靠性模型

Fig. 1 Reliability model of reseeding and reducing missing seed metering device

假设冗余系统有 n 个结构一致的排种器,则有系统的播种率

$$Q_0 = 1 - (1 - q)^n \quad (1)$$

式中: Q_0 ——排种系统播种率, %。

根据国家播种机质量评价技术规范,玉米精量播种机漏播率为 10% 的标准,则冗余 2 个排种器,其系统漏播率由原来的 10% 降到 1%,大幅提高了排种器的排种稳定性。所以本研究采用以价格低廉的窝眼轮式排种器为基础,以冗余设计为手段的机械结构的漏播补种排种器,其原理如图 2 所示。

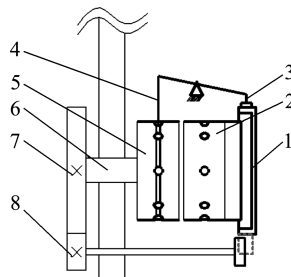


图 2 冗余排种系统原理

Fig. 2 Principle of redundant seeder metering system

1. 补种装置 2. 补种窝眼轮 3. 锁杆 4. 探种杆
5. 主排种窝眼轮 6. 排种器轴 7. 传动装置 8. 动力

排种系统采用两套排种器。工作时主排种窝眼轮在排种器轴的带动下,实现种子的单粒稳定分种。同时,由于窝眼有种子存在,则探种杆被窝眼中的种子顶起,并带动锁杆锁定补种装置,使补种装置与动力分离,补种窝眼轮处于停转状态;而一旦主排种窝眼轮出现了未充种的情况,探种杆下压并带动锁杆抬起,使补种装置与动力接合,补种窝眼轮进行工作,在该模式下主排种窝眼轮与补种窝眼轮同时运转,实现补种功能。

1.2 排种器结构与工作原理

在上述设计策略指导下,研究了一种配套滚筒式播种单体的漏播检测与补种装置,如图 3 所示。

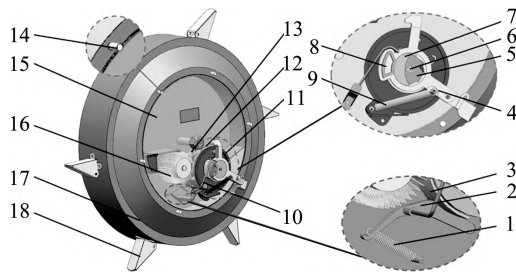


图 3 配套机械检测与补种装置的滚筒式播种单体结构图

Fig. 3 Structure diagram of drum seed metering device matched with mechanical testing and reseeding device

1. 探种预紧弹簧 2. 探种杆 3. 护种板 4. 转臂 5. 超越离合器
6. 补种轴 7. 超越离合器端盖 8. 锁块 9. 补种复位弹簧 10. 锁杆
11. 补种固定盘 12. 补种窝眼轮 13. 主排种窝眼轮 14. 拨杆
15. 壳体端盖 16. 清种毛刷 17. 壳体 18. 鸭嘴装置

该装置由主排种装置、检测装置和补种装置等构成。其中主排种装置包括主排种窝眼轮、清种毛刷和

护种板;检测装置包括探种杆、探种预紧弹簧以及锁杆;补种装置包括补种窝眼轮、补种固定盘、补种轴、转臂、拨杆、补种复位弹簧、超越离合器及其端盖。主排种窝眼轮通过壳体内部的传动机构带动工作;补种装置通过补种固定盘偏心安装于壳体端盖上,并由沿壳体圆周分布的数个拨杆转动时推动转臂进行工作。

工作时,主排种窝眼轮与清种毛刷随着机具的前进转动,同时漏播检测装置对主排种窝眼轮的充种状况进行检测。当检测装置的探种杆检测到主排种窝眼轮出现未充种状况时,主排种窝眼轮继续转动,同时探种杆在探种预紧弹簧的作用下压入主排种窝眼轮导槽底部,带动与探种杆固接的锁杆转动并解除对补种装置的锁定。解锁后的补种装置转臂在补种复位弹簧的作用下转动直至被补种固定盘卡住,后由随壳体转动的拨杆推动复位后的转臂进行转动。由于转臂与补种窝眼轮通过超越离合器连接,使拨杆推动转臂时的动力能够传递至补种窝眼轮,而在补种复位弹簧作用下发生的转动不会带动补种窝眼轮。又因转臂与机具中心呈偏心布置,使拨杆推动转臂转动一定角度后会与转臂脱离,即可使补种窝眼轮完成一次补种。若主排种窝眼轮下一窝眼依旧未充种,则探种杆继续压入主排种窝眼轮导槽底部,锁杆不对补种装置进行锁定,补种装置继续在补种复位弹簧以及拨杆的作用下带动补种窝眼轮工作;若主排种窝眼轮下一窝眼中充有种子,则种子克服探种预紧弹簧作用力将探种杆顶起,带动锁杆转动锁定补种装置,阻止补种装置在补种复位弹簧的作用下转动,此时补种装置处于静止状态,拨杆无法推动补种装置,只有主排种窝眼轮工作。

2 关键部件设计

2.1 机械式漏播检测装置设计

2.1.1 漏播检测方案

为了实现漏播的及时、可靠补种,需要对主排种窝眼轮充种状态进行连续、可靠的检测,在主排种窝眼轮圆周设有探种杆,并通过探种预紧弹簧使其紧压窝眼,所以在主排种窝眼轮圆周设有保证探种杆位置稳定的导向槽;为避免因为种子尺寸、位置偏斜导致的探种杆漏检问题,该导向槽采用了双槽结构,最终形成如图 4 所示的双导向槽主排种窝眼轮检测结构。

由上述可知,为减少漏播应尽量减少主排种窝眼轮的漏播率,见式(1),所以为了保证主排种窝眼轮的播种合格率,应该选择合适的窝眼形状和大小。

以黄淮海地区广泛种植的郑单 958 种子为研究对象,其结构为棱台结构,测得种子长、上宽、下宽、厚,其均值分别为 11.5 mm、9.3 mm、7.1 mm、4.9 mm,借

鉴刘娜等研究成果,设计窝眼孔直径 d_0 为 13 mm,孔深 h_0 为 8.5 mm^[11-12]。

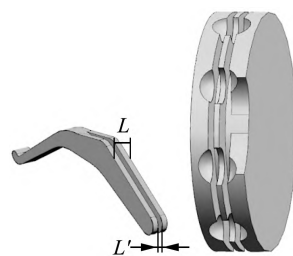


图 4 窝眼轮导槽结构

Fig. 4 Socket of wheel-type seed metering device

为了提高检测准确性,采用双导向槽—双压头探种杆的检测方式进行检测,窝眼孔由双导向槽分为三部分。为了保证窝眼孔中所有籽粒都能被及时检测到,应使探种杆与窝眼孔边缘之间、探种杆双压头之间的距离都小于种子厚度(保守考虑使其小于测得的种子最小厚度,3.8 mm),因此双压头探种杆的双压头外边沿宽度与双压头内边沿宽度应满足式(2)。

$$\begin{cases} L \geq d_0 - 2b_{\min} \\ 0 \leq L' \leq b_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L ——探种杆检测范围,mm;

L' ——双压头内边沿宽度,mm;

$b_{\min}$ ——玉米种子最小厚度,mm。

为满足式(2),可得 L 为 5.4~13 mm, L' 为 0~3.9 mm。综合考虑窝眼孔与种子尺寸要求,确定探种杆双压头外沿距离 L 为 6 mm,双压头内沿距离 L' 为 2 mm。

2.1.2 探种角度分析

根据前文所述的检测方案,补种装置是在漏播检测装置发现主排种窝眼轮未充种后才进行工作;为了保证补种作业时的准确性,应使漏种窝眼在经过检测位置到达投种点的时间内,补种装置能够完成补种作业。本研究采用尽量提早发现的检测方式,即以投种口 A 之前的窝眼孔 B 为检测点,假设检测点 B 与投种点 A 相对于主排种装置回转中心的相位角为 γ ,称探种角,如图 5 所示。

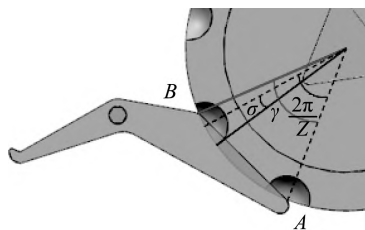


图 5 探种杆与主排种窝眼轮的位置关系

Fig. 5 Position relationship between rod for seed testing and main seed metering device

同时,为保证在正常工况下,即主排种窝眼轮无漏播的情况下,锁杆一直将补种装置锁定,避免连续作业

时补种装置工作造成重播,为此探种杆的检测压头为以 B 点为起点跨越探种角 γ 到投种点 A 点的跨越式结构,使窝眼中前一个种子滑过探种杆后,后续窝眼中的种子可以继续将探种杆顶起,从而使锁杆与补种装置保持锁定。因此,探种角度 γ 应大于两窝眼的夹角,即 γ 满足式(3)。

$$\gamma \geq \frac{2\pi}{Z} \quad (3)$$

式中: γ ——探种角, ($^{\circ}$);

Z ——窝眼数,个。

当窝眼中出现漏种时,锁杆需及时与补种装置分离,实现补种。考虑种子尺寸以及在型孔中充种姿态可能影响锁杆与补种装置的锁定状态,即极限情况下,种子位于窝眼孔的侧边,从而形成最大影响范围为半侧型孔相对于排种器的相位角 $\pm\sigma$,以及探种杆带动锁杆转至与补种装置解锁与锁定存在滞后时间 Δt 。因此增大探种角 γ 来提前该运动的时间,以消除漏播检测装置时机上的滞后, γ 可表示为

$$\gamma = \frac{2\pi}{Z} \pm \sigma + \omega \Delta t \quad (4)$$

式中: σ ——充种姿态的影响范围, ($^{\circ}$);

ω ——窝眼轮角速度, rad/s;

Δt ——锁杆结合补种装置所需时间, s。

又窝眼轮角速度可用机具前进速度、株距等表示,如式(5)所示。

$$\omega = \frac{2\pi v_m}{ZS} \quad (5)$$

式中: v_m ——作业速度, m/s;

S ——株距,取 0.22 m。

根据如图 5 所示的窝眼与窝眼轮的几何关系, σ 可表示为

$$\sigma = \arcsin \frac{d_0}{2R} \quad (6)$$

式中: R ——主排种窝眼轮直径, mm。

为保证排种器结构的紧凑,同时降低种子在随排种器转动时所受的离心力,窝眼轮的尺寸不宜过大,设定窝眼轮的半径 R 为 45 mm;同时在保证充种时间同时避免清种毛刷对相邻窝眼充种的影响^[13-14],设计窝眼个数 Z 为 9 个。

将式(5)、式(6)代入式(4),可得式(7)。

$$\gamma = \frac{2\pi}{Z} \pm \arcsin \left(\frac{d_0}{2R} \right) + \frac{2\pi v_m}{ZS} \Delta t \quad (7)$$

显然在窝眼排种器结构一定的情况下探种角受到作业速度以及充种姿态的影响。随作业速度增大,锁杆转动锁定补种装置所需的时间越小;种子姿态越靠近投种点,所需的探种角越小。因在种子随窝眼转动的过程

中,种子的充种姿态具有不确定性,故在 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 范围内采用了台架试验的方式确定探种角 γ 的最优值。

2.1.3 探种杆结构设计

为了实现锁杆与补种装置的快速结合与分离,探种杆应能在窝眼孔中受到种子支持力的作用下绕其回转中心旋转一定角度,带动与探种杆固连的锁杆转动,进而锁定与解锁补种装置。在保证能够锁定与解锁补种装置的前提下,消耗时间最短,探种杆与主排种窝眼轮位置关系如图 6 所示。

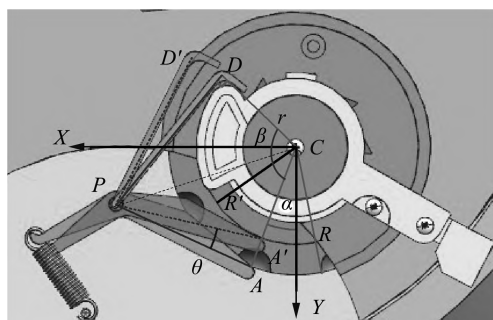


图 6 探种杆旋转角度与排种装置位置关系

Fig. 6 Relationship between the rotation angle of the seed probe and the position of the main seed metering device

设探种杆长度为 l_{AP} ,探测过程转动的角度为 θ 可表示为

$$\theta = \arctan \frac{R - R'}{l_{AP}} \quad (8)$$

式中: θ ——探种杆转动角度, ($^{\circ}$);

R' ——导槽半径, mm;

l_{AP} ——探种杆长度, mm。

由式(8)可知,探种杆长度 l_{AP} 越长,导槽半径 R' 越大,则探种杆的旋转角度 θ 越小。考虑到排种器传动机构空间位置,在保证窝眼轮材料强度的前提下,设计导槽半径 R' 为 35 mm。

为确定探种杆的长度 l_{AP} ,设主排种窝眼轮旋转中心 C 为原点,以机器前进方向为 X 轴,投种方向为 Y 轴,建立图 6 所示直角坐标系。

根据几何关系可知,探种杆回转中心 P 位于圆 C (以 C 为圆心,销块外圆 r 为半径)在 D 点的切线与圆 A (以 A 为圆心, l_{AP} 为半径)的交点处。并使探种杆 AP 与主排种窝眼轮外径相切,以保证最小转角^[15],则点 P 需满足式(9)。

$$x_P^2 + y_P^2 = l_{AP}^2 + R^2 \quad (9)$$

式中: x_P —— P 点横坐标, mm;

y_P —— P 点纵坐标, mm。

为使锁杆牢固得将补种装置锁定,正常工况下锁杆需与锁块外圆相切。

$$(x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2 + r^2 = x_P^2 + y_P^2 \quad (10)$$

式中: x_D —— D 点横坐标, mm;

y_D —— D 点纵坐标, mm;

r ——锁块外圆半径, mm。

其中锁杆将补种装置锁止的位置 D 可表示为

$$\begin{cases} x_D = r \cos\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \\ y_D = -r \sin\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: α ——窝眼轮投种角;

β ——投种点 A 与回转中心 C 、锁止点 D 与回转中心 C 连线的夹角, ($^\circ$)。

合并式(9)~式(11)得式(12)。

$$l_{AP}^2 + R^2 = \left[x_p - r \cos\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \right]^2 + \left[y_p + r \sin\left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \right]^2 + r^2 \quad (12)$$

由式(12)可知, 探种杆 l_{AP} 的长度随 β 的增大而增大, 探测过程转动的角度 θ 随 β 的增大而减小。参照《农业机械设计手册》, 设计窝眼轮的投种角 α 为 15° 。综合考虑机具结构的紧凑性与探种杆旋转角度, 设计 θ 为 12° 。此时夹角 β 为 120° , 探种杆 l_{AP} 长为 70 mm, 回转中心 P 点坐标为 (67.6 mm, 30.2 mm)。

2.2 补种装置设计

2.2.1 补种装置运动分析

根据所述补种方案, 补种窝眼轮的转动是靠补种装置转臂带动的, 由窝眼轮式排种器的工作原理可知, 为使补种窝眼轮排出一粒种子, 拨杆带动补种装置转臂转动的角度应等于 $2\pi/Z$ 。

考虑到采用补种装置进行补种时受其安装位置的影响^[16]。为了提高补种质量, 以机具回转中心 O 为圆心, 竖直向下为 Y 轴, 机具前进的反方向为 X 轴, 建立如图 7 所示直角坐标系, 对补种装置转臂被拨杆推动的运动过程进行分析。

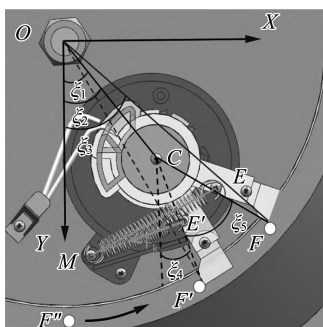


图 7 补种装置运动分析

Fig. 7 Motion analysis of reseeding device

根据几何关系可知, 拨杆带动转臂转动的角度 ξ_5 可表示为

$$\xi_5 = \pi + \xi_2 - \xi_4 - \angle OCF \quad (13)$$

式中: ξ_5 ——拨杆带动转臂转动的角度, ($^\circ$);

ξ_2 —— OC 与纵轴 Y 的夹角, ($^\circ$);

ξ_4 —— CF' 与竖直方向的夹角, ($^\circ$)。

为保证补种装置复位到初始位置时, 拨杆能够推动转臂, 在 $\triangle OCF'$ 中 CF' 的长度应小于转臂长度 l , 则

$$l_{CF'} = \cos(\pi - \xi_2 + \xi_4) l_{OC} + \sqrt{\cos^2(\pi - \xi_2 + \xi_4) l_{OC}^2 - l_{OC}^2 + l_{OF}^2} < l \quad (14)$$

式中: l_{OC} ——补种装置回转中心 C 与 O 点距离, mm;

$l_{CF'}$ ——拨杆转至 F' 时与 C 点距离, mm;

l_{OF} ——拨杆与 O 点距离, mm;

l ——转臂长度, mm。

同时由于补种装置的偏心布置, 转臂在被拨杆推动旋转一定角度后将与拨杆分离。在转臂在转过 ξ_5 后, 处于与拨杆即将分离的临界状态, 即在 $\triangle OCF$ 中 CF 的长度应等于转臂长度 l , 则

$$l_{CF} = \sqrt{l_{OC}^2 + l_{OF}^2 - 2l_{OC}l_{OF}\cos(\xi_3 - \xi_2)} = l \quad (15)$$

式中: l_{CF} ——拨杆转至 F 时与 C 点距离, mm;

ξ_3 ——拨杆由 F'' 转至 F 的角度, ($^\circ$)。

此时在 $\triangle OCF$ 中的 $\angle OCF$ 可以表示为

$$\angle OCF = \arccos \frac{l_{OC}^2 + l_{CF}^2 - l_{OF}^2}{2l_{OC}l_{CF}} \quad (16)$$

针对主排种窝眼轮出现的连续未充种现象, 为保证补种装置作业连续性, 拨杆在从一个行程的起点 F'' 转动到终点 F 的角度 ξ_3 应满足式(17)。

$$\xi_3 = \frac{2\pi}{N} \quad (17)$$

式中: N ——播种单体转动一周排出种子数量, 个。

合并式(13)~式(17)得式(18)。

$$\xi_5 = 2\pi - \arccos \frac{l_{OC}^2 + l_{CF'}^2 - l_{OF}^2}{2l_{OC}l_{CF'}} - \arccos \frac{l_{OC}^2 + l^2 - l_{OF}^2}{2l_{OC}l} \quad (18)$$

由式(18)可知, 当 ξ_5 确定时, 转臂 l 的长度随 l_{OC} 的增大以及 ξ_2 的增大而减小。根据选择的播种单体型号, N 为 6。综合考虑机具的尺寸要求, 确定 l_{OC} 的长度为 82.5 mm、拨杆与机具回转中心的距离 l_{OF} 为 140 mm。当 ξ_1 取 45° 时, 回转中心 C 点坐标为 (53.3, 53.3), 可在结构紧凑的同时满足补种装置运动要求, 此时转臂长度 l 为 64 mm, ξ_4 为 39.5° 。

2.2.2 同步补种条件

为保证补种的准确性, 对补种装置复位过程以及主排种窝眼轮与补种窝眼轮的排种过程进行分析。并根据拨杆运动过程中是否带动补种装置转动, 可将拨

杆的行程分为两部分,如图 7 所示,其一为由 F'' 转至 F' 的空行程,其角度为 ξ_1 ;其二为由 F' 转至 F 的拨杆推动补种装置转动的工作行程,其角度为 $\xi_3 - \xi_1$ 。在拨杆空行程过程中,补种装置在解锁后被补种复位弹簧拉回复位,在拨杆工作行程中带动补种装置工作。

1) 补种装置复位行程分析。为实现补种装置在锁杆解除锁定后能及时复位,使拨杆在 F' 处可以推动转臂,因此拨杆转过空行程角 ξ_1 的时间内,补种装置应从锁止状态在补种复位弹簧的作用下回到初始位置 CF' 。此时补种装置复位所需的时间应小于拨杆由 F'' 转到 F' 位置的时间,即

$$t < \frac{3S\xi_1}{\pi v_m} \quad (19)$$

式中: t ——补种装置复位时间, s;

ξ_1 ——拨杆转动的空行程角, ($^\circ$)。

由 $\triangle OCF'$ 的几何关系可知拨杆的空行程角 ξ_1 可以表示为式(20)。

$$\xi_1 = \xi_2 - \arccos \frac{l_{OC}^2 + l_{OF}^2 - l_{CF'}^2}{2l_{OC}l_{OF}} \quad (20)$$

合并式(13)~式(17)与式(20)可得拨杆空行程角 ξ_1 为 42.8° 。

为使补种复位弹簧更好地带动补种装置复位的同时满足结构的紧凑性,设计补种固定盘上的弹簧固定点 M 与初始位置 CF' 时转臂上的弹簧固定点 E' 垂直,且 l_{CE} 的长度为 35 mm、 $l_{ME'}$ 为 40 mm。当补种复位弹簧弹力越大时,补种装置复位时间越短,根据播种单体的作业速度一般在 0.4~1.4 m/s。选取弹力系数为 2.5 N/cm 的弹簧,进行预试验。以弹簧被拉长至 ME 时弹簧的最大拉力与补种装置复位时间进行试验,其结果如图 8 所示。

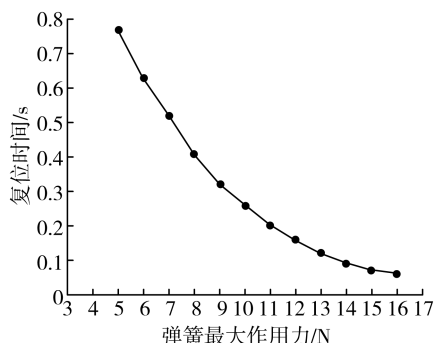


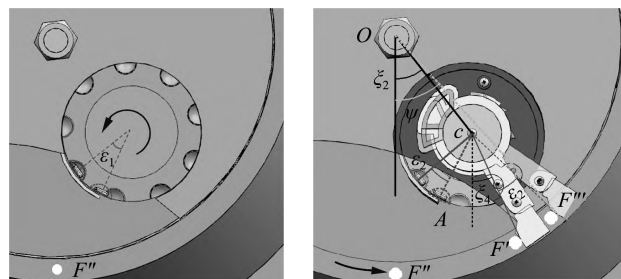
图 8 弹簧最大作用力与补种装置复位时间关系图

Fig. 8 Relationship between maximum spring force and reseeding device reset time

根据试验结果选择补种复位弹簧的最大作用力 F_{kmax} 为 8~15 N 进行后续试验。

2) 补种装置排种时序分析。为实现同步补种,当主排种窝眼轮出现未充种状况时,主排种窝眼轮的待

排种窝眼轮转至投种点时,补种装置应带动补种窝眼轮中的种子同时到达投种点,对其排种行程进行分析,如图 9 所示。



(a) 待排种角位置

(b) 待补种角位置

图 9 待排种角与待补种角位置关系

Fig. 9 Position relationship between angle to be seeded and angle to be replanted

在排种系统完成一个工作行程后,主排种窝眼轮待排种的窝眼与投种点 A 相对于回转中心 C 的角度为 ϵ_1 ,称为待排种角;补种窝眼轮待补种窝眼与投种口相对于回转中心 C 的角度为 ϵ_2 ,称为待补种角。设当拨杆转至 F''' 时,可使补种窝眼轮转过 ϵ_2 将种子排出。对一个工作行程中拨杆从 F'' 位置转至 F''' 位置经过的时间 t' 进行分析,此时 t' 可以表示为式(21)。

$$t' = \frac{NS\Psi}{2\pi v_m} \quad (21)$$

式中: t' ——补种装置排种时间, s;

Ψ ——拨杆由 F'' 转至 F''' 经过的角度, ($^\circ$)。

由 $\triangle OCF'''$ 的几何关系可知当拨杆带动转臂转过 ϵ_2 时,拨杆转过的角度 Ψ 可表示为式(22)。

$$\Psi = \xi_4 + \epsilon_2 - \arcsin \left[\frac{l_{OC}}{l_{OF}} \sin(\pi + \xi_2 - \xi_4 - \epsilon_2) \right] \quad (22)$$

显然,为实现同步补种,在补种装置排出种子的同时主排种窝眼轮未充种的窝眼也应转过角度 ϵ_1 到达投种点,即 ϵ_1 应满足式(23)。

$$\epsilon_1 = \frac{2\pi v_m t'}{NS} \quad (23)$$

结合式(21)~式(23)可得,当补种窝眼轮待补种角 ϵ_2 大于 0° ,即主排种窝眼轮待排种角度 ϵ_1 大于 28.5° 时可满足待补种装置随主排种装置同步补种的条件。为避免窝眼过于靠近投种口,出现种子脱离窝眼落入投种装置的情况造成重播,因此 ϵ_2 不宜过小,结合型孔的大小确定待补种角 ϵ_2 为 10° ,待排种角 ϵ_1 为 31.3° ,满足同步补种需求。

3 台架性能试验

3.1 试验条件

试验材料为在黄淮海地区广泛种植的郑单 958 包

衣种子,并通过JPS-12型排种器性能检测试验台对排种器性能进行试验。

3.2 试验方法

根据对检测装置与补种装置的原理分析以及预试验确定了影响播种质量的主要因素为机具前进速度、补种装置复位弹簧拉力以及探种角度。试验中通过调整电机转速进而改变机具前进速度;更换不同规格弹簧以调节弹簧拉力;更换探种杆以调节探种角度。试验过程中对三个因素开展单因素试验与正交试验,对播种装置参数进行优化。

按照GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[17],选取漏播指数与合格指数为试验评价指标,其计算公式如式(24)~式(25)所示。

$$S_1 = \frac{n_1}{N_0} \times 100\% \quad (24)$$

$$S_2 = \frac{n_2}{N_0} \times 100\% \quad (25)$$

式中: S_1 ——漏播指数, %;

S_2 ——合格指数, %;

N_0 ——播种数量, 个;

n_1 ——漏播个数, 个;

n_2 ——合格个数, 个。

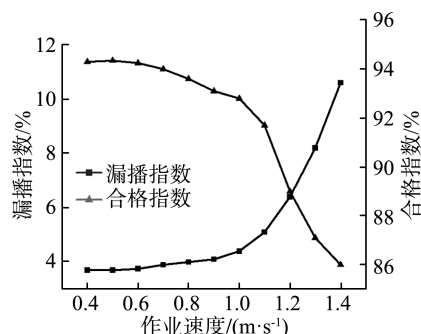
3.3 单因素试验

为分析各因素对播种机作业性能的影响,综合考虑作业速度及其他各因素的控制范围,采用单因素试验,选择作业速度为0.4~1.4 m/s;探种角度40°~50°;弹簧最大作用力8~15 N。每组试验重复3次取平均值。

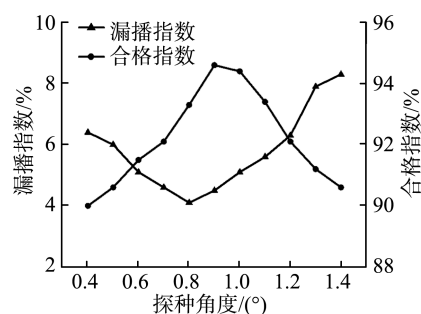
在探种角度为45°、补种复位弹簧最大作用力为12 N的情况下,对作业速度进行单因素试验。由图10(a)可知,随作业速度的增大,漏播指数呈持续上升的趋势,并在1.1 m/s处上升变化增大,合格指数呈持续下降的趋势。这是因为,当前进速度较低时,排种器的充种性能较好,且补种装置的性能较优,而随着前进速度的增大,排种器充种的时间变短,导致充种效果较差,且随前进速度增大,补种装置难以及时复位,导致补种质量差,造成漏播指数上升以及合格指数的下降。其中作业速度0.7~1.1 m/s为正交试验的范围。

在前进速度为0.8 m/s,补种复位弹簧最大作用力为12 N的情况下,对探种角度进行单因素试验。由图10(b)可知,随探种角度的增大,漏播指数呈先下降后升高的趋势,合格指数呈先上升后下降的趋势。当探种角度增大时,漏播检测装置对种子的尺寸及充种姿态适应性更好,能够带动锁杆及时可靠的完成补种装置的结合与分离,降低漏播指数,提高合格指数。随

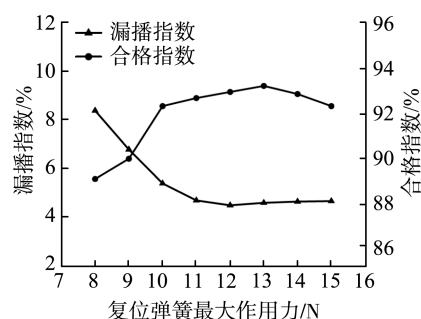
着探种角度的继续增大锁杆过早地去对补种装置进行锁定,导致补种效果变差,漏播指数升高,合格指数下降。因此选取探种角度43°~47°为正交试验的范围。



(a) 探种角度 45°, 弹簧最大作用力 12 N



(b) 作业速度 0.8 m/s, 弹簧最大作用力 12 N



(c) 作业速度 0.8 m/s, 探种角度 45°

图10 单因素试验结果

Fig. 10 Results of single factor tests

在前进速度为0.8 m/s,探种角度为45°的情况下,对复位弹簧最大作用力进行单因素试验。如图10(c)可知,随弹簧最大作用力的增加,漏播指数先下降后呈缓慢上升趋势,合格指数先上升后呈缓慢下降趋势。这是由于在该探种角度及作业速度的条件下,随复位弹簧最大作用力的增大,补种装置复位的时间缩短,使补种装置可以及时复位进行补种,降低了漏播指数并提高合格指数。而随着复位弹簧最大作用力的继续增大,补种装置的复位时间已经满足了对时序的需求,过大的弹簧作用力使机具的震动及负载增大,导致漏播指数上升及合格指数呈下降的趋势。因此选取复位弹簧最大作用力为10~14 N为正交试验的试验范围。

3.4 正交试验

由前述分析可知,播种质量受作业速度、探种角度

和弹簧最大作用力综合影响,得到补种装置的最佳参数组合,根据正交试验设计原理以作业速度、探种角度、弹簧最大作用力为试验指标探究对漏播指数(Y_1)及播种合格指数(Y_2)的影响规律,因此设作业速度为 U 、探种角度为 V 、弹簧最大作用力为 W ,对其进行三因素三水平正交试验,试验因素编码表如表 1 所示。

表 1 试验因素与水平
Tab. 1 Factors and factor levels of experiment

水平	因素		
	作业速度 U $/(m \cdot s^{-1})$	探种角度 V $/(^{\circ})$	弹簧最大 作用力 W/N
1	0.7	43	10
2	0.9	45	12
3	1.1	47	14

通过 SPSS26.0 软件在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,对各因素进行 F 检验并对其进行方差分析,试验结果如表 2 所示,方差分析如表 3 所示。

表 2 试验方案和结果
Tab. 2 Test plan and results

序号	因素编码值			考核指标	
	U	V	W	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	1	1	1	5.7	90.2
2	1	2	2	4.2	91.8
3	1	3	3	6.2	89.7
4	2	1	2	3.6	93.7
5	2	2	3	5.0	94.3
6	2	3	1	4.7	92.6
7	3	1	3	7.2	91.3
8	3	2	1	7.0	92.2
9	3	3	2	5.7	91.4
Y_1	K_1	16.1	16.5	17.4	
	K_2	13.3	16.2	13.5	
	K_3	19.9	16.6	18.4	
	R	3.8	0.4	4.9	
	主次顺序 优化组合	$W、U、V$ $U_2V_1W_2$			
Y_2	K_1	271.7	275.2	275.0	
	K_2	280.6	278.3	276.9	
	K_3	274.9	273.7	275.3	
	R	8.9	4.5	1.9	
	主次顺序 优化组合	$U、V、W$ $U_2V_2W_3$			

结果表明对于漏播指数,作业速度与弹簧最大作用力对其存在显著影响,而探种角度对其并无显著影响,其较优参数组合为 $U_2V_1W_2$ 。对于合格指数来说,三个因素均对其存在显著性关系,较优的参数组合为

$U_2V_2W_3$ 。剔除不显著因素对试验指标的影响,确定最优的参数组合为 $U_2V_2W_2$ 。即作业速度为 0.9 m/s、探种角度为 45°、弹簧最大作用力为 12 N。在该组合下进行试验,播种机的漏播指数为 3.4%,合格指数为 94.5%。

表 3 方差分析
Tab. 3 Analysis of variance

指标	方差源	平方和	自由度	F	显著性
Y_1	U	7.316	2	88.973	0.011*
	V	0.029	2	0.351	0.740
	W	4.469	2	54.351	0.018*
	误差	0.082	2		
Y_2	U	13.227	2	79.360	0.001**
	V	2.540	2	15.240	0.004**
	W	1.647	2	9.880	0.022*
	误差	0.167	2		

注:**表示很显著($P < 0.01$),*表示显著($P < 0.05$)。

3.5 对比试验

为验证该漏播检测与补种装置的性能,在最优参数组合下,与传统滚筒式播种装置开展对比试验,在相同作业速度下,测得两者漏播指数与合格指数,重复三次试验取平均值。传统滚筒式播种装置的漏播指数与合格指数分别为 7.3%与 89.7%,配有补种装置的滚筒式播种装置的漏播指数与合格指数分别为 3.4%与 94.5%。试验结果表明,该工况下配有漏播检测与补种装置的播种装置较传统滚筒式播种装置漏播指数降低了 3.9%,合格指数提高了 4.8%,具有良好的作业效果。

4 结论

1) 针对玉米播种过程中的漏播现象,确定了基于冗余设计原理的排种器漏播补种策略,研究了一种机械式漏播检测补种装置,并根据实际作业条件对其关键部件进行设计,确定了双压头探种杆的结构参数 L 为 6 mm、 L' 为 2 mm;补种装置转臂的长度为 64 mm;探种装置及补种装置回转中心的位置坐标分别为 (67.6 mm, 30.2 mm)、(53.3 mm, 53.3 mm) 以及实现同步补种的条件。

2) 通过对检测装置的漏播监测过程以及补种装置补种过程进行分析,确定影响播种质量的主要因素。并以作业速度、探种角度、弹簧最大作用力为试验因素,以漏播指数、合格指数为试验指标,采用单因素试验确定了各因素的取值范围。

3) 在单因素试验研究的基础上,开展了三因素三水平的正交试验,确定了所选主要参数的最佳组合,即作业速度 0.9 m/s、探种角度 45°、弹簧最大作用力 12 N,此时漏播指数为 3.4%,合格指数为 94.5%,达

到国家标准。在该最优参数组合下与传统滚筒式播种装置进行对比试验,结果表明配有该装置的滚筒式播种装置,漏播指数降低了3.9%,合格指数提高了4.8%,对降低漏播提高播种质量具有较大意义。

参 考 文 献

- [1] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1—11.
Ding Li, Yang Li, Liu Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 1—11.
- [2] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 38—45.
Geng Duanyang, Li Yuhuan, Meng Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 38—45.
- [3] 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米种子分级处理对气力式精量排种器播种效果的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 109—113.
Liu Jia, Cui Tao, Zhang Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 109—113.
- [4] 王铁固, 赵新亮, 张怀胜, 等. 玉米产量的边际效应及与主要农艺性状的相关分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(18): 122—126.
Wang Tiegu, Zhao Xinliang, Zhang Huaisheng, et al. Marginal effect of yield and correlation analysis with main agricultural traits in maize [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(18): 122—126.
- [5] 王铁固, 赵新亮, 张怀胜, 等. 玉米产量及主要农艺性状的边际效应[J]. 广东农业科学, 2012, 39(4): 22—25.
- [6] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
Shi Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [7] Garcia P P, Ito N, Kito K, et al. Computer-based optimal control of seeding rate based on travel speed and seed signals (Part 1) development of seed metering control device [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1997, 59(6): 93—101.
- [8] Al-Yamani A A, Mitra S, McCluskey E J. Optimized reseeded by seed ordering and encoding [J]. IEEE Transactions on Computer-aided design of Integrated Circuits and Systems, 2005, 24(2): 264—270.
- [9] 孙伟, 王关平, 吴建民, 等. 勺链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 8—15.
Sun Wei, Wang Guanping, Wu Jianmin, et al. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(11): 8—15.
- [10] 朱瑞祥, 葛世强, 翟长远, 等. 大籽粒作物漏播自补种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 1—8.
Zhu Ruixiang, Ge Shiqiang, Zhai Changyuan, et al. Design and experiment of automatic reseeding device for miss-seeding of crops with large grain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 1—8.
- [11] 赵建托. 玉米精密穴播器的设计与仿真研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [12] 刘娜. 窝眼轮式玉米精量排种器改进设计与试验研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
Liu Na. Improvement design and experimental study of corn precision seed-metering device [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2019.
- [13] 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.
- [14] 张雷雨, 毛欣, 马跃, 等. 新型窝眼轮式玉米排种装置的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(6): 20—25.
Zhang Leiyu, Mao Xin, Ma Yue, et al. Design and test of new cellular wheel metering device for corn seed [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 20—25.
- [15] 王金武, 王梓名, 徐常塑, 等. 坡耕地鸭嘴式玉米排种器间歇同步充补装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 57—66.
Wang Jinwu, Wang Ziming, Xu Changsu, et al. Design and experiment of intermittent synchronous seeding and reseeding device of duck-billed corn seed metering machine in sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 57—66.
- [16] 吴南. 玉米免耕播种机漏播补偿方法对比研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 41—46, 78.
Wu Nan. Comparative research on miss-seeding reseed method in no-tillage corn planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 41—46, 78.
- [17] GB/T 6973—2005, 单粒(精密)播种机试验方法[S].