

带式玉米高速导种装置旋夹纳种机理分析与参数优化

马成成¹ 衣淑娟¹ 陶桂香¹ 李衣菲¹ 陈 涛¹ 刘汉武²

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 德邦大为(佳木斯)农机有限公司, 佳木斯 100176)

摘要: 针对玉米在高速(12~16 km/h)播种时籽粒脱离种盘初速度大,与带式导种装置种腔内壁碰撞弹跳,发生碰撞异位,导致籽粒进入种腔精准度低等问题,以具有纳种机构的带式玉米高速导种装置为研究对象,建立籽粒夹取、转运和排放动力学模型,提出在拨指表面添加人字形纹路的改进方法,明确影响纳种稳定性与籽粒进入种腔精准度的主要因素。利用高速摄像与图像目标追踪技术进行单因素对比试验及多因素优化试验。单因素试验结果表明,播种速度较快时,有人字形纹路拨指轮纳种合格指数和种腔间隔变异系数均明显优于无人字形纹路拨指轮。为获得拨指轮改进后的纳种机构最佳性能参数,以轮心距、拨指轮转速及拨指长度为试验因素,以纳种合格指数与种腔间隔变异系数为评价指标,进行三因素五水平二次正交旋转组合试验,采用多目标优化方法,确定当轮心距为36.8 mm,拨指轮转速为584.97 r/min,拨指长度为10.8 mm时,纳种合格指数为98.23%,种腔间隔变异系数为0.24%。对优化结果进行验证试验,验证结果与优化结果基本一致。在相同条件下进行台架对比试验,结果表明,有带式玉米高速导种装置的作业性能远优于不安装带式玉米高速导种装置的作业性能。

关键词: 玉米; 高速播种机; 导种装置纳种机构

中图分类号: S224.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)07-0134-10

OSID:



Mechanism Analysis and Parameter Optimization of Corn Seeds Receiving by Rotating Clamp of Belt-type High-speed Seed Guiding Device

MA Chengcheng¹ YI Shujuan¹ TAO Guixiang¹ LI Yifei¹ CHEN Tao¹ LIU Hanwu²

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Debon Dawei (Jiamusi) Agricultural Machinery Co., Ltd., Jiamusi 100176, China)

Abstract: When corn is sown at high speed (12~16 km/h), the initial speed of the seeds leaving the dish is high, and the seeds collide with the seed cavity wall of the belt-type seed guide device, resulting in collision and dislocation, which leads to the low precision of the seeds entering the seed cavity. The belt-type high-speed corn seed guide device with seed receiving mechanism was taken as the research object, and the dynamic model of clamping, transportation, and discharge of the seeds was established. The main factors that affect the seed receiving stability and the precision of the seeds entering the seed cavity were identified, and the improvement method of adding herringbone lines on the surface of the finger was put forward. Single-factor comparison tests and multi-factor optimization tests were carried out by using high-speed camera and image target tracking technology. The single factor test showed that the seed acceptance index and variation coefficient of seed cavity spacing of the finger wheel with improved herringbone lines were obviously better than those of the finger wheel without herringbone lines when the sowing speed was fast. In order to obtain the best performance parameters of the improved seeding mechanism, taking the wheel center distance, the rotation speed of the finger wheel, and the finger length as test factors and the qualified index of seed acceptance and the variation of seed cavity spacing as evaluation indexes, a quadratic orthogonal rotation combination test with three factors and five levels was carried out. By using the multi-objective optimization method, it was determined that when the wheel

收稿日期: 2022-12-12 修回日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52275246)、黑龙江省“百千万”工程科技重大专项支撑行动计划项目(2020ZX17B01-3)和黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2022-202)

作者简介: 马成成(1995—),男,博士生,主要从事玉米播种机械研究,E-mail: 1601147341@qq.com

通信作者: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事玉米播种机械研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

center distance was 36.8 mm, the rotating speed of the finger wheel was 584.97 r/min, and the finger length was 10.8 mm, the qualified index of seed acceptance was 98.23%, and the coefficient of variation of seed cavity spacing was 0.24%. The optimization results were verified, and the verification results were basically consistent with the optimization results. Under the same conditions, the bench comparison test showed that the sowing performance with a high-speed seed guide device was better than that without high-speed seed guide device.

Key words: corn; high speed seeder; receiving mechanism of seed guiding device

0 引言

玉米种植面积大,播种时间短,且播种质量直接影响其产量,这就要求玉米播种在保证高质量的同时还要满足高速^[1-2]。采用无约束及欠约束导种方式在高速导种时,籽粒与导种部件内壁碰撞加剧,造成籽粒的落点精度降低,播种均匀性差^[3-6]。带式导种装置采用输种带同步运移籽粒的方式实现了全约束导种,降低籽粒运移过程中的碰撞剧烈程度,保证从排种器排出籽粒的均匀有序状态,能够满足精密播种机的高速作业^[7]。

带式导种装置作为高速播种技术的核心部件,是国内外学者研究的重点与热点^[8-12]。目前国内学者对带式导种装置的研究主要集中于导种执行部件的理论研究与改进设计。陈学庚等^[13]设计了一种与排种盘转速、播种机行走速度相关,且传动与投种机构一体的带式导种装置,但籽粒是在重力的作用下从排种盘掉落到种子输种带种腔,仅适合排种盘工作转速为 30 r/min 播种作业。在此基础上,刘全威^[14]设计一种拨指同步带式导种装置,在排种盘与输种带之间加入推种板,在推种板推力和种子自重的作用下脱离排种盘型孔并掉落至种子导种装置的种腔内,但当作业速度超过 9.7 km/h 时,粒距合格指数的降幅和粒距变异系数的增幅均迅速增大。国外关于玉米带式高速导种装置研究起步较早^[15-18],具有代表性的有美国 John Deere 公司研发了毛刷带式导种装置^[19],采用毛刷带作为运种部件,实现毛刷带携种运动,提高在高速条件下的导种稳定性,但毛刷材质带体在持续高速作业下易产生磨损^[20]。Precision Planting 公司研发的一种具有主动纳种功能的带式高速导种装置^[21],对从排种盘进入种腔内的籽粒进行约束,提高籽粒从排种盘过渡到种腔的稳定性,实现了 16 km/h 高速精量播种作业,因其有破损率低、适应性好等优点,该导种技术逐渐引入国内应用于玉米高速精密播种作业中^[22]。但其拨指轮旋夹纳种机理尚未有研究报道,影响其纳种性能因素尚不明确,因此,探究该导种装置旋夹纳种机理,对其关键部件改进与优化具有实际意义。

本研究以具有拨指轮纳种机构的带式高速导种装置为研究对象,研究拨指轮旋夹纳种作用机理,建立拨指轮纳种动力学模型,探究影响纳种性能因素,对拨指轮结构及工作参数进行改进优化。在拨指表面添加人字形纹路,增大拨指轮对籽粒的摩擦力,提高纳种稳定性。采用多因素试验对添加人字形纹路拨指轮的纳种机构进行参数优化,以获取最佳纳种效果。

1 带式玉米高速导种装置结构与工作原理

整体结构如图 1 所示,该装置主要由输种带、拨指轮、投种板、预紧弹簧、清种爪、主动带轮、被动带轮、电机、护种罩壳、齿轮箱以及输种带壳体等部件组成,其工作过程分为纳种、运种和投种 3 个串联阶段。

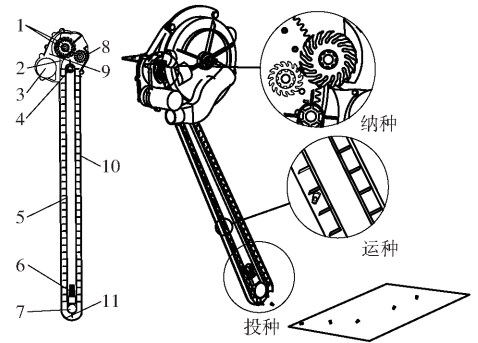


图 1 带式玉米高速导种装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of belt type corn high-speed seed guide device

1. 拨指轮 2. 清种爪 3. 电机 4. 主动带轮 5. 输种带 6. 预紧弹簧 7. 被动带轮 8. 齿轮箱 9. 护种罩壳 10. 输种带壳体 11. 投种板

该导种装置安装于排种器卸种口处,播种时,主副拨指轮在籽粒脱离种盘之前利用旋转夹取的方式将籽粒取下,随后将籽粒转运并排放至输种带种腔,籽粒在输种带转动下运移到投种口并将籽粒投放到种沟中,平均作业速度可达 16 km/h。

2 旋夹纳种机理分析

2.1 纳种机构组成与工作原理

为降低籽粒与种腔壁间的弹跳碰撞作用,在输种带上方配置纳种机构,以拨指轮旋夹方式对籽粒

进行运动约束,提高在高速播种过程中籽粒从排种盘进入输种带种腔的稳定性与精准度。

该导种装置纳种机构主要由主拨指轮、副拨指轮、清种爪、齿轮轴、齿轮箱、电机以及后盖壳等部件组成(图2)。其中主副拨指轮种带作为纳种机构的核心工作部件,直接影响籽粒从排种盘过渡到输种带种腔的稳定性与精准度。拨指轮采用橡胶材料制作,主拨指轮下侧设有清种爪,避免因籽粒卡在主拨指轮的拨指之间影响纳种工作。主副拨指轮半径比为1.7,拨指轮圆周均匀分布倾斜弧形结构的拨指,其中主拨指轮分布有17个拨指,副拨指轮上分布有15个拨指。

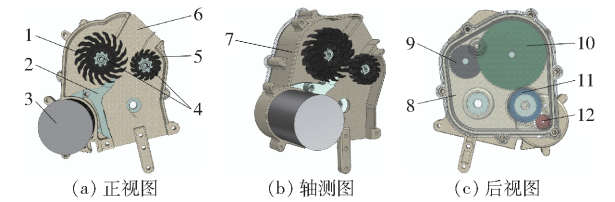


图2 纳种机构结构示意图

Fig.2 Schematics of seed-receiving institution

1.主拨指轮 2.清种爪 3.电机 4.齿轮轴 5.副拨指轮 6.纳种口 7.齿轮箱 8.后盖壳 9.驱动副拨指轮齿轮 10.驱动主拨指轮齿轮(双联齿轮) 11.过桥齿轮 12.电机齿轮

根据纳种机构作业过程,将其分为夹取籽粒、转运籽粒与排放籽粒3个工作阶段,如图3所示。图3中 v_0 为播种前进速度, m/s ; ω_1 为主拨指轮旋转角速度, rad/s ; ω_2 为副拨指轮旋转角速度, rad/s ; $\omega_2 = 1.7\omega_1$ 。在纳种过程中,电机驱动主拨指轮与副拨指轮相向转动。当排种盘携带单粒籽粒运动至纳种口时,柔性主副拨指轮通过旋转夹取的方式将籽粒“摘”下,该工作过程为夹取籽粒;被夹取的籽粒在主副拨指轮的旋转夹持下运动,该工作过程为转运籽粒;随后拨指轮将籽粒排放到下方输种带种腔中,该工作过程为排放籽粒。利用这种先“摘”后“放”的纳种方式,能够在不伤种的前提下使得籽粒从排种盘稳定均匀地过渡到输种带的种腔中。

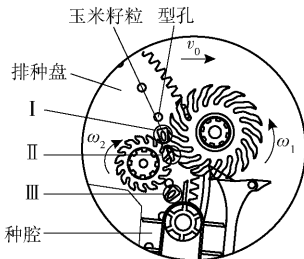


图3 旋夹纳种原理图

Fig.3 Schematic of working principle

I.夹取籽粒 II.转运籽粒 III.排放籽粒

2.2 纳种过程力学分析

为研究该机构纳种稳定性与籽粒进入种腔精准

度,建立了拨指轮夹取、转运和排放籽粒过程中籽粒力学模型,对这3个阶段籽粒的受力情况进行分析。

2.2.1 拨指轮夹取籽粒力学分析

拨指轮夹取籽粒时,主副拨指轮瞬时对籽粒施加摩擦力 f_1 、 f_2 , f_1 与 f_2 的合力构成拨指轮对籽粒的旋夹力 F_c ,此外,籽粒还受重力 G 、离心力 J 、负压对籽粒的吸附力 P 以及型孔对籽粒的支持力 N ,受力如图4所示。

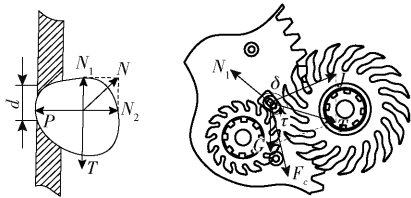


图4 拨指轮夹取籽粒受力示意图

Fig.4 Schematic of seed incorporation process

若保证籽粒被平稳取下,则需拨指轮对籽粒的夹取力 F_c 大于 T (籽粒重力 G 与离心力 J 的合力)^[23]与 N_1 (型孔对籽粒沿平行排种盘方向的支持力)的合力,即

$$F_c > \sqrt{T^2 + N_1^2 + 2TN_1 \cos \delta} \tag{1}$$

式中 δ —— T 与 N_1 的夹角, ($^\circ$)

籽粒重力与离心力的合力 T 、型孔对籽粒沿平行排种盘方向的支持力 N_1 可表示为

$$\begin{cases} T = JG \sin \tau \\ N_1 = PN_c \end{cases} \tag{2}$$

式中 τ —— G 与 J 的夹角, ($^\circ$)

N_c ——支持力系数

将式(1)、(2)合并整理得

$$F_c > \sqrt{J^2 G^2 \sin^2 \tau + N_c^2 P^2 + 2JG \sin \tau N_c P} \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} J = 4\pi^2 m D n_1^2 \\ P = (\pi d^2 / 4) (p_a - p_0) \end{cases} \tag{4}$$

式中

- m ——籽粒质量, kg
- D ——籽粒重心到型孔圆心的距离, mm
- n_1 ——排种盘转速, r/min
- p_a ——大气压力, Pa
- p_0 ——真空室压力, Pa
- d ——吸孔直径, m
- J ——排种盘对籽粒的离心力, N
- G ——籽粒重力, N

式(3)、(4)表明,拨指轮夹取籽粒需要克服排种盘对籽粒的离心力以及风机对籽粒的吸附力。而在高速播种过程中,要求排种盘转速高,籽粒的离心力随之增大,同时,为保证型孔在高速条件下稳定充种,风机提供的负压应比常规播种速度所需的负压大^[24],这就要求拨指轮提供足够的旋夹力,即提高

拨指与籽粒间的摩擦力,才能实现在排种盘高转速、风机高压条件下将籽粒从型孔上取下。

2.2.2 拨指轮转运籽粒力学分析

主副拨指轮将籽粒取下后,进入转运阶段,籽粒受到拨指轮对籽粒的夹取力 F_c (f_1 与 f_2 的合力)、主副拨指轮对籽粒的支持力 F_{N1} 、 F_{N2} ,以及籽粒自身重力 G 。以籽粒中心为坐标原点 o ,建立直角坐标系 xoy ,此时籽粒受力如图 5 所示。

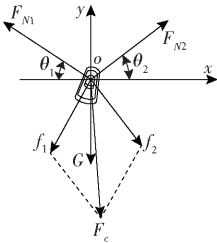


图 5 转运籽粒受力示意图

Fig. 5 Schematic of force during movement

主副拨指轮对籽粒的支持力 F_{N1} 、 F_{N2} 可表示为

$$\begin{cases} F_{N1} = \frac{G}{\sin\theta_1} \\ F_{N2} = \frac{G}{\sin\theta_2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 θ_1 ——主拨指轮对籽粒支持力与水平面夹角, ($^\circ$)

θ_2 ——副拨指轮对籽粒支持力与水平面夹角, ($^\circ$)

主副拨指轮对某一时间点籽粒的摩擦力 f_1 与 f_2 的合力形成夹取力 F_c , 即

$$F_c = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + 2f_1f_2\cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \mu F_{N1} \\ f_2 = \mu F_{N2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 μ ——拨指与籽粒间的摩擦因数

联立式(5)~(7)可得

$$F_c = \mu G \sqrt{\frac{1}{\sin^2\theta_1} + \frac{1}{\sin^2\theta_2} + \frac{2\cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin\theta_1\sin\theta_2}} \quad (8)$$

式(8)表明,转运籽粒时,籽粒所受旋夹力 F_c 受 θ_1 、 θ_2 及 μ 的影响。增大拨指与籽粒间的摩擦因数会提高拨指与籽粒的摩擦力,避免拨指与籽粒出现滑移。由图 6 可知,在同一时间点,拨指轮对籽粒支持力与水平面的夹角与轮心距 L 有关,随轮心距 L 减小, θ_1 、 θ_2 增大 ($\theta_1 > \theta'_1$; $\theta_2 > \theta'_2$), 拨指轮对籽粒的支持力随之增大 ($F_{N1} > F'_{N1}$; $F_{N2} > F'_{N2}$), 提高了拨指与籽粒间的摩擦力,避免拨指与籽粒发生滑移现象。但轮心距过小会增加纳种载荷,加剧拨指磨损,严重时会出现籽粒堆积堵塞;轮心距过大,拨指与籽粒间则会相对滑移,失去主动纳种作用。因此,为进一步明确轮心距对纳种效果的影响,本文对其进行试验

优化。

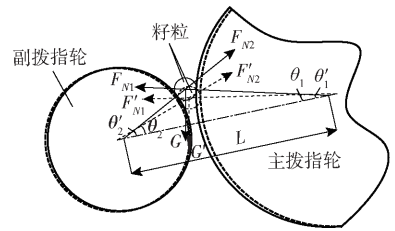


图 6 支持力随轮心距变化示意图

Fig. 6 Schematic of change of supporting force with distance between main and auxiliary wheels

2.2.3 拨指轮排放籽粒力学分析

籽粒经拨指轮转运后被排放到输种带种腔中,籽粒在脱离拨指轮瞬时会在拨指对籽粒的弹力 F_{t1} 、 F_{t2} 和籽粒重力 G 的作用下做斜下抛运动进入种腔(图 7), F_e 为拨指对籽粒的弹力 F_t 与籽粒重力的合力。

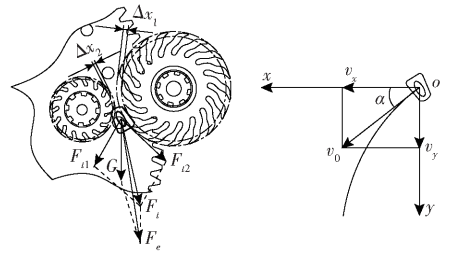


图 7 排放籽粒受力与运动示意图

Fig. 7 Schematic of force and movement of seed discharged

拨指在恢复原状时对籽粒产生的弹力及籽粒自身重力为

$$\begin{cases} F_{t1} = k\Delta x_1 \\ F_{t2} = k\Delta x_2 \\ G = mg \end{cases} \quad (9)$$

式中 F_{t1} ——主拨指轮拨指对籽粒的弹力, N

F_{t2} ——副拨指轮拨指对籽粒的弹力, N

Δx_1 ——主拨指轮拨指形变量, mm

Δx_2 ——副拨指轮拨指形变量, mm

k ——拨指弹性系数, N/mm

g ——重力加速度, m/s^2

籽粒脱离拨指轮做斜下抛运动的加速度为

$$a = \frac{F_c}{m} \quad (10)$$

籽粒做斜下抛运动进入种腔沿 x 、 y 轴的速度为

$$\begin{cases} v_x = v_0 \cos\alpha \\ v_y = v_0 \sin\alpha + at \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$v_0 = 2\pi R n_2 \quad (12)$$

式中 v_x ——籽粒在 x 轴方向的速度, m/s

v_y ——籽粒在 y 轴方向的速度, m/s

R ——拨指轮半径, mm

n_2 ——拨指轮转速, r/min

v_0 ——籽粒斜下抛初速度, m/s

α ——籽粒斜下抛角度, ($^{\circ}$)

t ——籽粒进入种腔所用的时间, s

联立式(10)~(12)可得

$$\begin{cases} v_x = 2\pi R n_2 \cos\alpha \\ v_y = 2\pi R n_2 \sin\alpha + F_e t/m \end{cases} \quad (13)$$

式(13)表明,籽粒进入种腔的速度与拨指形变量、拨指轮转速及拨指轮半径相关。拨指形变量与拨指长度及其材料特性相关,在加工材料不变的情况下,拨指越长,与籽粒接触时产生的形变量就越大,弹力就越大,加速种子进入种腔,但拨指过长会增加拨指间的卡种风险。拨指轮转速越大,斜下抛初速度越大,进入种腔的速度就越大,但过大会导致籽粒进入种腔时与种腔内壁碰撞加剧,降低籽粒进入种腔的精准度。鉴于拨指轮圆周由柔性拨指组成,与籽粒接触时,拨指产生形变,使得拨指轮圆周半径会不断变化且无法控制,为提高台架试验可操作性及准确性,本文对拨指形变量、拨指轮转速进行试验优化。

3 关键部件改进方案

对拨指轮夹取、转运和排放籽粒 3 个阶段籽粒的受力情况分析可知,增大拨指与籽粒间的摩擦因数能有效提高拨指轮对籽粒的旋夹力,故本研究利用人字形纹路摩擦因数大,防滑性好,且具有导向性的特点^[25],在拨指表面添加人字形纹路(图 8)。通过建立的力学数学模型明确出影响纳种稳定性与籽粒进入输种带种腔精准度的主要因素为轮心距、拨指轮转速以及拨指长度。因此,在后续试验阶段,将结合高速摄像与图像目标追踪技术对带有人字形纹路和无人字形纹路的拨指轮进行试验对比,探究带有人字形纹路的拨指轮对纳种性能的影响,并通过多因素试验对轮心距、拨指轮转速以及拨指长度进行参数优化。

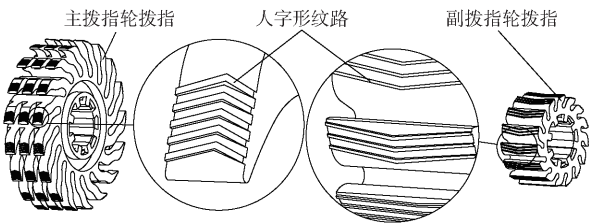


图 8 添加人字形纹路的主副拨指轮
Fig. 8 Main and auxiliary finger wheels with herringbone lines

4 试验材料与方法

4.1 试验材料

试验材料为黑龙江省广泛种植的“德美亚 1

号”玉米品种,经人工分级清选处理,保证供试籽粒饱满、无损伤及虫害,测定其形态为硬粒型,千粒质量为 289.61 g,含水率为 12.3%,密度平均值为 1.223 g/cm³,平均几何尺寸为:长度 9.31 mm、宽度 7.35 mm、厚度 4.06 mm(对 100 粒籽粒进行测量取平均值)。

4.2 试验条件

试验地点为黑龙江八一农垦大学播种实验室,试验装置主要由 JPS-16 型计算机视觉排种器试验台、PCO. dimaxCS3 型高速摄像机(德国 pco. dimax cs 高速摄像机, Nikon 镜头,图像拍摄程序为 Camware,图像处理程序为 TEMA)、改装的气吸式玉米精量排种器、带式玉米高速导种装置以及 PC 机(美国惠普 HP 公司)等搭建组成,如图 9 所示。



图 9 纳种机构性能检测试验台

Fig. 9 Seed receiving performance test bed

1. 气吸式玉米排种器 2. 排种驱动电机 3. 带式玉米高速导种装置 4. 种床带 5. 计算机 6. 排种器试验台综合操作柜 7. LED 照明灯 8. 高速摄像机

为便于对纳种时的玉米籽粒位移轨迹进行捕捉,将排种器进行可视化处理,将原有排种器局部外壳、排种盘及橡胶密封圈采用透明 3D 打印技术实现透明化,并将排种器与导种装置相对固定在安装台架上。试验时,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,玉米籽粒从投种口落至涂有油层的种床带上^[26-28]。

为防止拍摄角度对籽粒轨迹位移数据采集产生影响,将高速摄像机固定于水平位置。为得到籽粒纳种过程中实际位移变化,应保证各组试验中高速摄像机与籽粒运动平面的垂直距离一致,在籽粒运动平面内放置刻度尺作为标定,提高试验测量精确度。

4.3 试验方法

由上述拨指轮对籽粒夹取转运机理分析可知,籽粒纳种稳定性与拨指轮转速、轮心距及拨指长度有关,故本研究选取拨指轮转速、轮心距及拨指长度为试验因素进行纳种性能试验。采用 3D 打印技术获取不同拨指长度的橡胶拨指轮,其中主拨指轮与副拨指轮的拨指长度按等比扩大或缩小(主副拨指轮拨指长度比为 3:1)。采用调节拨指轮传动齿轮

半径的方式改变轮心距。利用 PWM 电机调速器控制拨指轮转速,利用红外线转速仪检测拨指轮转速。通过前期预试验选取 18 孔排种盘作为试验排种盘。

4.4 籽粒轨迹追踪后处理

轨迹测定过程中,为获得适合本研究高速纳种时籽粒运动轨迹图形分辨率,设置高速摄像机帧率为 500 f/s,采集域为 200 mm × 200 mm,曝光时长为 2 ms,图像为 1 920 像素 × 1 440 像素。调整轮心距、拨指轮转速及拨指长度至指定值进行试验,通过摄像机将所采集籽粒运动轨迹图像实时存储于计算机内,待试验结束后保存为 .avi 格式视频文件。利用 TEMA 控制软件对视频文件进行图像目标追踪,并提取不同帧图像中玉米籽粒质心点坐标,绘制出各条件下籽粒位移轨迹。

为准确记录籽粒位移变化,以刻度尺底部 *o* 为坐标原点,建立直角坐标系 *xoy*。高速摄像机拍摄下的拨指轮对籽粒的夹取、转运和排放捕捉实际效果如图 10 所示。

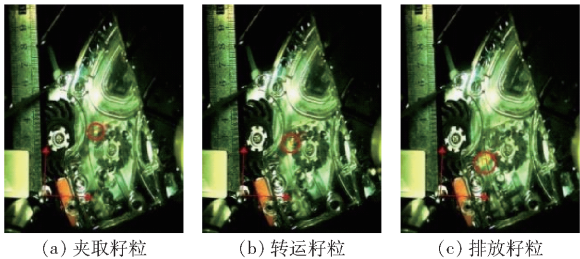


图 10 高速摄像下纳种过程

Fig. 10 Process of seed receiving under high-speed camera

通过高速摄像与图像目标追踪技术将各帧图像内籽粒质心点坐标值记录到 Excel 软件中,即可得出籽粒运动位移轨迹。图 11 为 5 组籽粒在被夹取转运过程中和与拨指轮发生碰撞弹跳时的位移时间曲线。

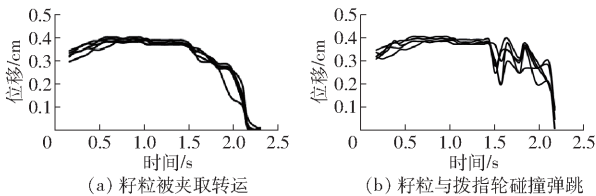


图 11 籽粒位移变化曲线

Fig. 11 Displacement changes of seeds

图 11a 籽粒位移轨迹平滑,且各组试验中籽粒位移轨迹未出现波动,证明籽粒被拨指轮稳定纳入,其中在 0 ~ 1.5 s 时间段内籽粒随种盘运动,在 1.5 s 时刻位移曲线出现转折,该转折点为籽粒被夹取,1.5 ~ 2.0 s 为籽粒转运阶段。图 11b 为籽粒与拨指轮出现碰撞弹跳时的位移轨迹曲线,在 1.5 ~ 2.5 s 时间段内籽粒运动轨迹呈波浪状,证明此时籽粒出现弹跳现象。故本研究以籽粒位移轨迹曲线平滑与

波动统计纳种合格指数。

籽粒经纳种机构进入输种带种腔的分布状态如图 12 所示。图 12a 中籽粒 A 与籽粒 B 间隔 7 个种腔,籽粒 B 与籽粒 C 间隔 4 个种腔,籽粒在输种带分布不均匀,种腔间隔变异系数大;图 12b 中籽粒 A、籽粒 B 与籽粒 C 间隔均为 6 个种腔,籽粒在输种带分布较均匀,种腔间隔变异系数小。故本研究通过计算每组试验籽粒种腔间隔变异系数衡量籽粒进入输种带种腔的精准度。

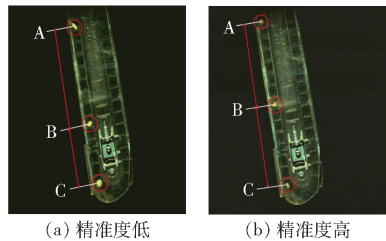


图 12 籽粒在输种带种腔的分布状态

Fig. 12 Distribution of seeds in cavities of seed belt

5 试验结果与分析

5.1 单因素试验

为验证拨指表面添加人字形纹路对纳种性能的影响,分别在有人字形纹路和无人字形纹路条件下进行台架对比试验。其中主拨指轮每个拨指有 5 条纹路,副拨指轮为 3 条,纹路弯折角度为 120°,间隔 1 mm,宽、高均为 0.5 mm。将排种盘转速依次设置为 41、45、48、51、55 r/min 进行试验,对应的播种前进速度依次为 12、13、14、15、16 km/h,各进行 3 次重复试验,取平均值,试验方法同上,试验结果如图 13 所示。

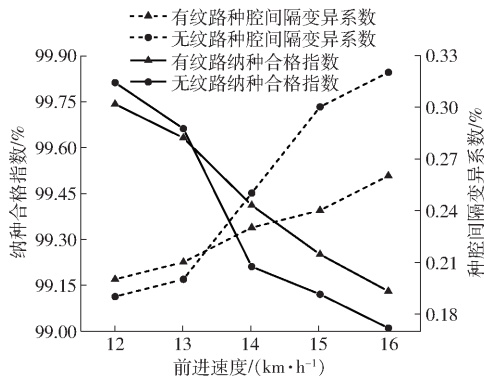


图 13 有无人字形纹路时对比试验曲线

Fig. 13 Contrast test curves with and without herringbone lines

图 13 表明,低速播种时,无人字形纹路和有人字形纹路的拨指轮纳种合格指数与种腔间隔变异系数无明显差异,当播种速度为 13 ~ 16 km/h 时,有人字形纹路拨指轮纳种合格指数和种腔间隔变异系数均明显优于无人字形纹路拨指轮,证明拨指表面添

加人字形纹路可以提高拨指轮的纳种性能。

5.2 多因素试验

为研究拨指轮改进后的纳种机构纳种稳定性与籽粒进入输种带种腔精准度,采用三因素五水平正交旋转组合试验探究纳种机构最佳作业性能,根据前期理论分析及田间实际播种作业需求,配合各因素可控有效范围,选取轮心距为 35 ~ 39 mm,拨指轮转速为 500 ~ 620 r/min,拨指长度为 10 ~ 14 mm,试验因素编码如表 1 所示。表中均以主拨指轮的拨指长度及转速进行表述,其中主、副拨指轮拨指长度比为 3:1,转速比为 1:1.7。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Test factors and codes

编码	因素		
	轮心距	拨指轮转速	拨指长度
	x_1/mm	$x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	x_3/mm
1.682	39.0	620.0	14.0
1	38.2	595.7	13.2
0	37.0	560.0	12.0
-1	35.8	524.3	10.8
-1.682	35.0	500.0	10.0

选取试验指标为纳种合格指数 y_1 和籽粒在种腔间隔变异系数 y_2 ,以评价机构的纳种稳定性与籽粒进入种腔精准度。试验时,保证各组试验测定籽粒数量超过 1 000 粒,其他各项参数保持恒定。试验方案与结果如表 2 所示。

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据回归分析,进行因素方差分析,筛选出影响较为显著因素,进而得到性能指标与因素编码值回归方程

$$y_1 = 98.91 - 0.25X_2 - 0.45X_1X_2 - 1.87X_1^2 - 2.15X_2^2 + 0.06X_3^2 \quad (14)$$

$$y_2 = 0.26 + 0.0096X_1 - 0.0052X_2 - 0.0075X_1X_2 + 0.0051X_1^2 - 0.0051X_2^2 - 0.0051X_3^2 \quad (15)$$

式中 X_1 、 X_2 、 X_3 ——因素编码值

为直观地分析试验指标与因素间关系,运用 Design-Expert 8.0.6 软件得到响应曲面。因交互作用项轮心距和拨指轮转速对纳种合格指数与种腔间隔变异系数影响均显著,故分析轮心距和拨指轮转速的交互作用对试验性能指标的影响,如图 14 所示。

图 14a 为拨指长度位于中心水平时(12 mm),轮心距和拨指轮转速的交互作用对纳种合格指数影响的响应曲面,由图可知,当拨指长度一定时,纳种合格指数随轮心距的增加呈先增大后减小的趋势;当轮心距一定时,纳种合格指数随着拨指轮转速的增加呈先增大后减小的趋势;图 14b 为拨指长度位

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test scheme and results

序号	因素			纳种合格	种腔间隔
	轮心距	拨指轮转速	拨指长度	指数	变异系数
	x_1/mm	$x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	x_3/mm	$y_1/\%$	$y_2/\%$
1	35.8	524.3	10.8	93.02	0.23
2	38.2	524.3	10.8	94.47	0.26
3	35.8	595.7	10.8	96.18	0.23
4	38.2	595.7	10.8	94.62	0.23
5	35.8	524.3	13.2	96.02	0.23
6	38.2	524.3	13.2	96.65	0.27
7	35.8	595.7	13.2	94.01	0.25
8	38.2	595.7	13.2	94.05	0.26
9	35.0	560.0	12.0	92.93	0.23
10	39.0	560.0	12.0	94.47	0.26
11	37.0	500.0	12.0	93.55	0.26
12	37.0	620.0	12.0	92.27	0.23
13	37.0	560.0	10.0	99.21	0.23
14	37.0	560.0	14.0	99.10	0.26
15	37.0	560.0	12.0	98.90	0.24
16	37.0	560.0	12.0	99.15	0.26
17	37.0	560.0	12.0	99.32	0.27
18	37.0	560.0	12.0	98.17	0.28
19	37.0	560.0	12.0	99.01	0.26
20	37.0	560.0	12.0	98.37	0.26
21	37.0	560.0	12.0	99.21	0.24
22	37.0	560.0	12.0	99.31	0.27
23	37.0	560.0	12.0	98.74	0.26

于中心水平时(12 mm),轮心距和拨指轮转速的交

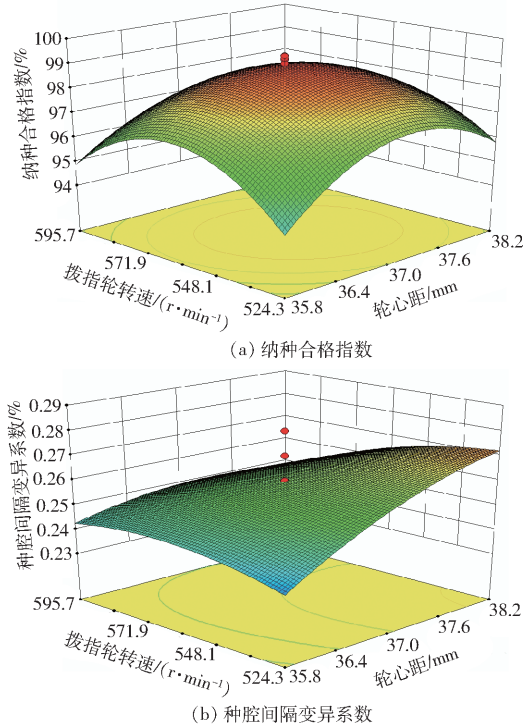


图 14 因素交互作用对试验性能影响的响应曲面
Fig.14 Effect of factor interaction on test performance by response surface

互作用对种腔间隔变异系数影响的响应曲面,由图可知,当拨指轮转速一定时,种腔间隔变异系数随着轮心距的增加而增大;当轮心距一定时,种腔间隔变异系数随着拨指轮转速的增加呈先增大后减小的趋势。

分析其变化原因为:轮心距较小时,会增大拨指轮纳种阻力,降低籽粒的通过性;轮心距较大时,拨指轮失去主动纳种作用,增大拨指与籽粒间的滑移。拨指轮转速较慢时,拨指轮纳种效率降低,造成籽粒阻塞;拨指轮转速较快时,会增大拨指对籽粒的碰撞,导致籽粒弹跳加剧。

在此基础上,为得到试验因素最佳水平组合,即纳种机构最佳工作参数组合,对试验进行优化设计。建立参数优化数学模型,结合试验因素的边界条件,对纳种合格指数和种腔间隔变异系数回归方程进行分析,得到其非线性规划的优化模型为

$\max y_1(x_1, x_2, x_3)$

$\min y_2(x_1, x_2, x_3)$

s. t.

$35\text{ mm} \leq x_1 \leq 39\text{ mm}$

$500\text{ r/min} \leq x_2 \leq 620\text{ r/min}$

$10\text{ mm} \leq x_3 \leq 14\text{ mm}$

(16)

通过优化求解,得出当轮心距为 36.8 mm、拨指轮转速为 584.97 r/min、拨指长度为 10.8 mm 时,纳种稳定性与排种精准度最佳,在此最优参数组合下对应的纳种合格指数为 98.23%,种腔间隔变异系数为 0.24%。根据优化结果进行试验验证,纳种合格指数为 98.52%,种腔间隔变异系数为 0.25%,与优化结果基本一致,误差在可接受范围内。

5.3 对比试验

为了进一步验证优化后的带式玉米高速导种装置作业性能,将其与不安装高速导种装置的性能进行台架试验对比。设置播种前进速度依次为 12、13、14、15、16 km/h,试验指标为合格率与变异系数,各进行 3 次重复试验,取平均值,试验方法同上,试验结果如表 3 所示。

由表 3 可知,有高速导种装置的排种器在 12、

表 3 有无高速导种装置时试验结果

Tab.3 Test results with and without high-speed seed guide device

播种速度/ (km·h ⁻¹)	有高速导种装置		无高速导种装置	
	合格率	变异系数	合格率	变异系数
12	99.02	7.12	85.23	12.45
13	98.85	7.86	83.89	12.87
14	98.24	9.20	80.26	13.64
15	98.05	10.27	78.32	14.54
16	97.84	13.11	76.82	16.23

13、14、15、16 km/h 的播种速度下比无高速导种装置合格率提高 13.79、14.96、17.98、19.73、21.02 个百分点;变异系数提高 5.33、5.01、4.44、4.27、3.12 个百分点,可见装有高速导种装置的播种效果远优于无高速导种装置。

6 结论

(1)以具有纳种机构的带式玉米高速导种装置为研究对象,对其旋夹纳种机理进行分析,建立了拨指轮夹取、转运和排放籽粒过程中籽粒动力学模型,提出在拨指表面添加人字形纹路的改进方法,并明确得出影响纳种稳定性与籽粒进入输种带种腔精度的主要因素为轮心距、拨指轮转速及拨指长度。

(2)单因素试验结果表明,播种作业速度较高时,添加人字形纹路拨指轮纳种合格指数和种腔间隔变异系数均明显优于无人字形纹路拨指轮,证明拨指表面添加人字形纹路可以提高纳种性能。

(3)对拨指轮改进后的纳种机构进行多因素试验,结果表明,当轮心距为 36.8 mm、拨指轮转速为 584.97 r/min、拨指长度为 10.8 mm 时,纳种稳定性及籽粒进入输种带种腔精准度最优,在此条件下,纳种合格指数为 98.23%,种腔间隔变异系数为 0.24%。实际结果与优化值差异较小,优化值准确可靠。

(4)在优化参数组合条件下,进行台架对比试验,结果表明,有带式玉米高速导种装置的作业性能远优于不安装带式玉米高速导种装置的作业性能。

参 考 文 献

[1] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2021,52(10):1-15. WANG Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10): 1-15. (in Chinese)

[2] 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013,29(18):8-15. QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(18):8-15. (in Chinese)

[3] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020,51(12):1-14. LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):1–14. (in Chinese)
- [4] 赵淑红,陈君执,王加一,等. 精量播种机 V 型凹槽拨轮式导种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(6):146–158.
ZHAO Shuhong, CHEN Junzhi, WANG Jiayi, et al. Design and experiment on V-groove dialing round type guiding-seed device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6):146–158. (in Chinese)
- [5] 刘立晶,杨慧. 基于 Geomagic Design 软件的导种管三维逆向工程设计[J]. 农业工程学报, 2015,31(11):40–45.
LIU Lijing, YANH Hui. 3D reverse engineering design on seed tube based on Geomagic Design software[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(11):40–45. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 康建明,温浩军,王士国,等. 带式导种装置对排种均匀性影响的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2015,36(5):42–45.
KANG Jianming, WEN Haojun, WANG Shiguo, et al. Experimental study on impact of belt type conductor delivery on seeding uniformity[J]. Journal of China Agricultural Mechanization, 2015,36(5):42–45. (in Chinese)
- [8] YANG L, HE X, CUI T, et al. Development of meharonic driving system for seed meters equipped on conventional precision com planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1–9.
- [9] BABATUNDE S. Design and fabrication of an electrically powered maize planter[J]. Journal of Engineering Studies and Research,2020, 26(3): 204–211.
- [10] GIERZ L, KESKA W. Simulation and laboratory tests of transport time of rape grain in the drill seed tube[J]. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2012, 57(2): 73–78.
- [11] 陈晨. 精量播种机带式导种装置结构设计 with 性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016.
CHEN Chen. Structure design and performance test research of the belt seed guide device of precision planter[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [12] 金秀南,张军昌,薛晶峰,等. 玉米种子与橡胶带离散元接触参数标定[J]. 农机化研究, 2022,44(7):39–43.
JIN Xiunan, ZHANG Junchang, XUE Jingfeng, et al. Calibration of discrete element contact parameters of maize seed and rubber belt[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(7):39–43. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 刘全威. 高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
LIU Quanwei. Design and experiment of seed precise delivery mechanism of high-speed planter [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [15] KOCHER M F, COLEMAN J M, SMITH J A, et al. Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011,27:177–183.
- [16] SAUDER G A, DILL K R, DUNLAP D L, et al. Apparatus and method for controlled delivery of seed to an open furrow: US 6681706[P]. 2002–02–26.
- [17] TANG H, XU C, WANG Z, et al. Monitoring system development and experiment for a long-belt finger-clip precision corn seed metering device[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:814747.
- [18] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129:298–306.
- [19] JI J, SANG Y, HE Z, et al. Designing an intelligent monitoring system for corn seeding by machine vision and Genetic algorithm-optimized back propagation algorithm under precision positioning[J]. Plos One, 2021,16(7): e0254544.
- [20] 杨丽,史嵩,崔涛,等. 气吸与机械辅助助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)
- [21] LIU Z, XIA J, HU M, et al. Design and analysis of a performance monitoring system for a seed metering device based on pulse width recognition[J]. Plos One, 2021, 16(12): e0261593.
- [22] 陈永亮. 高速免耕播种机单体设计与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2020.
CHEN Yongliang. Design and experimental study of high speed no tillage seeder monomer [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [23] 刘文忠,赵满全,王文明,等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010,26(9):133–138.
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9):133–138. (in Chinese)
- [24] 陈立东,何堤,谢宇峰. 气吸式排种器压力与转速关系的试验研究[J]. 农机化研究,2006,28(9):130–131.
CHEN Lidong, HE Di, XIE Yufeng. Experimental research of suction seed metering device about pressure and rotation speed [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006,28(9):130–131. (in Chinese)
- [25] 杜淑雅,桑为民,庞润. 基于数值模拟的 2 种条纹沟槽减阻特性对比分析[J]. 西北工业大学学报,2022,40(2):261–270.
DU Shuya, SANG Weimin, PANG Run. Comparative analysis of drag reduction characteristics of two type riblets based on numerical simulation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022,40(2):261–270. (in Chinese)

[26] 余佳佳,丁幼春,廖宜涛,等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3):103 – 108.
YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014,33(3):103 – 108. (in Chinese)

[27] 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2017,48(1): 29 – 37,46.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1):29 – 37,46. (in Chinese)

[28] 王金武,唐汉,关睿,等. 动定指勾夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):48 – 57.
WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimal design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):48 – 57. (in Chinese)

(上接第 78 页)

[22] 张朝宇,董万静,熊子庆,等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 105 – 114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(12):105 – 114. (in Chinese)

[23] 张智刚,王桂民,罗锡文,等. 拖拉机自动驾驶转向轮角检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 352 – 357.
ZHANG Zhigang, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Detection method of steering wheel angle for tractor automatic driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(3):352 – 357. (in Chinese)

[24] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1 – 18.
ZHANG Man,JI Yuhan,LI Shichao,et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):1 – 18. (in Chinese)

[25] GAO X, LI J, FAN L, et al. Review of wheeled mobile robots’ navigation problems and application prospects in agriculture [J]. IEEE Access, 2018, 6: 49248 – 49268.

[26] 熊璐,杨兴,卓桂荣,等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127 – 143.
XIONG Lu, YANG Xing, ZHUO Guirong, et al. Review on motion control of autonomous vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(10):127 – 143. (in Chinese)

[27] 张雁,李彦明,刘翔鹏,等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 30 – 37.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):30 – 37. (in Chinese)

[28] YIN J, ZHU D, LIAO J, et al. Automatic steering control algorithm based on compound fuzzy PID for rice transplanter[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2666.

[29] 丁幼春,何志博,夏中州,等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 12 – 20.
DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 12 – 20. (in Chinese)

[30] 丁幼春,夏中州,彭靖叶,等. 联合收获机单神经元 PID 导航控制器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 34 – 42.
DING Youchun, XIA Zhongzhou, PENG Jingye, et al. Design and experiment of the single-neuron PID navigation controller for a combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7):34 – 42. (in Chinese)

[31] 周明宽,夏俊芳,郑侃,等. 基于变增益单神经元 PID 的秸秆旋埋还田导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 31 – 40.
ZHOU Mingkuan, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Development of rotary straw burying and returning navigation system based on variable-gain single-neuron PID[J]. Transactions of the CSAE,2021, 37(5): 31 – 40. (in Chinese)

[32] 王定康,于丰华,许童羽,等. 基于单神经元 PID 的变量喷雾系统精准控制方法研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 61 – 66.
WANG Dingkang, YU Fenghua, XU Tongyu,et al. Research on precision control method of variable spray system based on single neuron PID[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(1): 61 – 66. (in Chinese)

[33] 赵祚喜,罗阳帆,马昆鹏,等. 基于全站仪的插秧机卫星导航作业精度检验方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 50 – 56.
ZHAO Zuoxi, LUO Yangfan, MA Kunpeng, et al. Satellite navigation operating accuracy testing method of rice transplanter based on total station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(Supp.):50 – 56. (in Chinese)