

玉米免耕播种机漏播补偿方法对比研究

吴南

(辽宁机电职业技术学院材料工程系, 丹东 118009)

摘要:为解决玉米免耕播种机播种作业时存在漏播的问题,针对漏播自补偿和漏播辅助补偿方法进行了对比研究。对水平圆盘排种器的排种性能进行试验,获取了排种器在不同排种盘转速和播种粒距下排种合格指数、漏播指数和重播指数。由漏播自补偿补种性能分析可得,在排种口检测漏播信号进行加速补种,补种的实际粒距 $L_{PR} > 1.5L$,补种粒距依然为漏播,无法实现漏播补偿功能,若在种子脱离排种口之前检测到漏播信号,提前做好加速准备再进行补种,可实现漏播自补偿功能。由漏播自补偿试验可知,漏播自补偿受播种速度和播种粒距影响较大,在播种粒距为 20、25 cm,播种速度不大于 5 km/h 时,补种合格率不小于 88%,在播种粒距为 15 cm 或播种速度大于 5 km/h 时,补种合格率较低;由漏播辅助补偿补种性能试验可知,在播种速度 3~7 km/h,粒距 15~25 cm 下,补种成功率不小于 89%,在播种速度不大于 5 km/h,补种合格率不小于 96%。为了保证补种位置精确,采用漏播辅助补偿装置进行补种,需合理设计漏播补偿装置安装位置,同时受播种速度、播种粒距、排种盘线速度、投种角的影响,通过合理设计补种装置安装参数后,控制补种装置响应时间 t 和补偿装置排种盘的线速度 v_b 实现补种位置的精确控制。

关键词:玉米免耕播种机;漏播补偿;性能试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0041-06

Comparative Research on Miss-seeding Reseed Method in No-tillage Corn Planter

WU Nan

(Department of Materials Engineering, Liaoning Mechatronics College, Dandong 118009, China)

Abstract: Comparison research was carried out on the performance of self compensation and auxiliary compensation in seed metering device, in order to solve the issue of miss-seeding in no-tillage corn planter. The performance indicators of metering device at different disc speeds and seed spacing were obtained through the performance test of horizontal disc seed metering device, and the indicators included seeding qualification index, miss-seeding index and reseeding index. Based on these, the reseeding performance under self compensation and auxiliary compensation methods for missing seeding could be analyzed. The test result showed that when the seeding speed was from 3 km/h to 7 km/h and the seed spacing was 15 cm, 20 cm and 25 cm, the qualification index of the metering device was decreased with the increase of the seeding speed, and the smaller the seed spacing was, the lower the qualified rate was at the same speed; the miss-seeding index was increased with the increase of seeding speed, and the smaller the seed spacing was, the higher the miss-seeding index was. The analysis of the performance of self compensation for miss-seeding shows that after detecting miss-seeding signals at the seeding metering port and carrying out accelerated reseeding, the actual seed spacing L_{PR} was larger than $1.5L$, and the reseeding spacing was still miss-seeding, despite that the miss-seeding spacing was lowered, where precise missing reseeding function could not be realized. In case the miss-seeding signal could be detected before the seed left the metering hole, and the acceleration preparation was made in advance, then the miss-seeding could be realized. Self-compensation for missed seeding was greatly affected by seeding speed and seeding spacing. When the seeding spacing was 20 cm and 25 cm and the seeding speed was not more than 5 km/h, the qualified rate of reseeding was above 88%. When the seeding spacing was 15 cm or the seeding speed was above 5 km/h, the qualified rate of reseeding was lower. The

收稿日期: 2020-08-09 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究经费项目(IX202001)和辽宁机电职业技术学院科研项目(ky202003)

作者简介: 吴南(1982—),男,副教授,博士,主要从事旱作农业机械化及智能化装备研究, E-mail: lfwunan@163.com

performance of variable speed seeding would gradually weaken with the increase of seeding speed. Through the analysis of the performance of the auxiliary compensation device for miss-seeding, at the seeding speed of 3 ~ 7 km/h and the grain spacing of 15 ~ 25 cm, the success rate of reseeded was above 89%, and the qualified rate of reseeded was above 96% at the seeding speed of 5 km/h or below. It was concluded that the reseeded position should be ensured to be precise, where the installation position of the compensation device for miss-seeding should be reasonably designed. In the meantime, after reasonably design of the compensation reseeded device installation indicators, the t (response time) and v_b (linear speed of compensation device seeding discs) should be controlled to realize the precise control of the reseeded position, as they may be affected by seeding speed, seeding spacing, seeding disc linear speed and the seeding angle.

Key words: no-tillage corn planter; miss-seeding reseed; performance testing

0 引言

玉米免耕播种机在播种作业时,由于机械振动使排种器不可避免的发生漏播,尤其是在玉米残茬覆盖、地表起伏不平的环境下进行播种作业。针对免耕播种机播种作业时复杂的田间工况,采用漏播补偿的方法可以有效解决免耕播种机在高速播种时产生的漏播问题^[1-5]。

目前,国内外学者对精密播种技术开展了相关研究。AI-YAMANI等^[6]通过对种子排序编码进行优化补种研究,当监测设备和控制器监测到漏播信号后,会有一粒新的编码种子进行补种,播种质量得到了显著的提高。SINGH等^[7]开发了一种播种、施肥控制器,排种器和排肥器由24V直流电动机驱动,应用脉冲宽度调制(PWM)控制直流电动机运行,通过速度传感器监测播种机前进速度,通过控制器计算出直流电动机转速,使播种机按照设定的参数进行精确的播种控制。ARZU等^[8]应用响应面法对精密播种机播种间距的均匀性进行了优化,结果表明种子盘圆周速度越低,播种间距的均匀性越好。孙伟等^[9]以ATmega16单片机为核心,设计了由定位和测薯模块组成的漏播检测系统和由固态继电器和电磁铁组成的速动补薯装置,如发生漏播,控制系统发出补薯指令,速动补薯装置将待补薯种击打至预定位置,实现自动补种。朱瑞祥等^[10]提出了一种基于超越离合器的大籽粒作物漏播补种方法,漏播时启动超越离合器,切换至由步进电动机控制排种器,使其加速旋转进行补种,平均成功补种率为92.98%。丁幼春等^[11]设计了一套集漏播检测和自动补种于一体的油菜籽漏播螺管式补种系统,有效解决了小籽粒作物漏播的问题。陈刚等^[12]研制的漏播补偿系统,采用等待补种、实时充种的方式,根据补种过程各动作时间关系,控制电磁阀和补种系统排种器动作时间,实现适时补种。谯睿等^[13]针对小行株距三七精密播种存在的重播漏播问题,设计

了一套基于双层对射式激光传感器的五管集排式重播漏播检测系统,可以检测三七这种小行株距作物的单粒漏播以及种子上下紧密跟随的双粒重播。本文针对玉米免耕播种机不同的漏播补偿方法,以水平圆盘排种器为例,进行对比研究,以期提高玉米免耕播种机的播种质量。

1 漏播补偿方案

1.1 漏播自补偿

漏播自补偿采用排种器变加速的方式实现补种。首先由漏播检测传感器检测漏播籽粒信号,当检测到漏播信号时,漏播补偿控制器启动排种器加速控制指令,使排种器加速运行,快速超越漏播空穴位置实现补种。此种方法需采用电动机驱动排种器,要求电动机具有快速、稳定的加速性能,同时能够对排种器的转动角进行精确控制。因此一般采用步进电动机或伺服电动机进行漏播自补偿控制。

1.2 漏播辅助补偿

漏播辅助补偿是在原播种机的基础上增加一个辅助的补种排种器,当漏播检测传感器检测到漏播籽粒信号时,快速驱动补种排种器进行补种。此种方法,补种器需电动机驱动,只在发生漏播时启动,对电动机的启动加速性能要求较高。辅助补偿法易于实现,但是需要合理设计补种器的安装位置,结合精确的补种控制算法,以保证补种位置精确。

2 漏播补偿性能分析

由排种器性能试验结果可知,排种器的排种性能与播种机行进速度、播种粒距、排种轮转速有关。当发生漏播时,为实现精确的漏播补偿功能,需综合考虑各相关因素^[14-20]。

2.1 自补偿

漏播自补偿法是应用电动机变加速补种的方式进行补种。补种性能分析如图1所示。

图中 v_m 为播种机行进速度, r 为排种盘半径, n

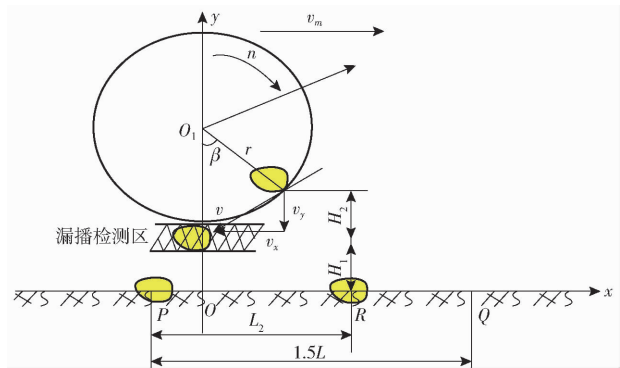


图 1 补种性能分析

Fig. 1 Self reseeding performance analysis

为排种盘转速, β 为种子投种角, L 为播种粒距, L_2 为实际播种粒距, 排种盘型孔数为 18 个, 漏播检测传感器与地面距离为 H_1 , 与排种口距离为 H_2 。P 为播种第 N 粒种子位置; Q 为播种第 $N+1$ 粒种子位置; R 为补种籽粒位置。当 $N+1$ 粒种子发生漏播, 即 PQ 的距离 L_{PQ} 大于 $1.5L$, 补种籽粒与第 N 粒种子距离 L_{PR} , 满足 $0.5L < L_2 = L_{PR} \leq 1.5L$, 可保证补种精度。

由图 1 可知, 当第 N 粒种子通过漏播检测传感器播入点 P 后, 为检测到第 $N+1$ 粒种子是否发生漏播, 则需漏播检测传感器在检测到第 N 粒信号后, 经过 $1.5\Delta t$ 时间方可检测到漏播信号, 其中

$$\Delta t = \frac{L}{v_m} \quad (1)$$

式中 Δt ——理论时间间隔, s

若此时加速补种, 忽略补种响应时间, 此时补种位置为点 Q, 结合实际情况得出, 变速补种的实际粒距 $L_{PR} > 1.5L$, 补种粒距依然为漏播。因此, 若采用此种方式补种, 补种粒距一定为漏播, 只是降低了漏播粒距, 无法实现精确的漏播补偿功能原因为漏播检测时间滞后, 因此若能在种子脱离排种口之前检测到漏播信号, 提前做好加速准备再进行补种, 能够实现漏播自补偿功能。自补偿方式如图 2 所示。

I_1 为投种口位置, 安装有播种检测传感器 1, 标

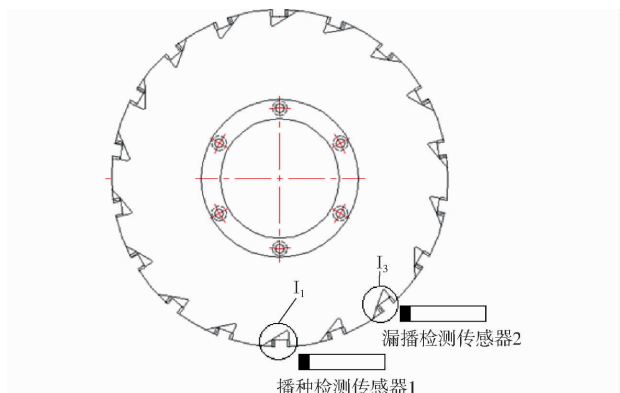


图 2 自补偿方式

Fig. 2 Self compensation method analyzing diagram

记为第 1 号型孔, 漏播检测传感器 2 安装在 I_3 位置, 位于第 3 号型孔处。漏播自补偿工作原理为: 当漏播检测传感器 2 检测型孔 3 有空穴信号后, 播种检测传感器 1 检测到 2 号播种信号后排种器开始加速运行, 待播种检测传感器再一次检测到播种信号, 即完成变速补种后, 排种器开始在正常速度下运行。

漏播自补偿法排种器变速范围计算方法如下: 在 3 号型孔出现漏播时, 2 号型孔投种之后, 需用 1 个粒距的时间间隔 Δt 转过 2 个粒距的角度, 则根据式 (1) 可知, 在进行变速补种时, 排种器加速转速为

$$n_b = 2n = \frac{2000v_m}{1080L} \quad (2)$$

式中 n_b ——排种器加速转速, r/min

若在 3 号、4 号型孔出现连续两粒漏播时, 2 号型孔投种之后, 需用 1 个粒距的时间间隔 Δt 转过 3 个粒距的角度, 则根据式 (1) 可知, 在进行变速补种时, 排种器加速转速为

$$n_b = 3n = \frac{3000v_m}{1080L} \quad (3)$$

若播种时只发生单粒漏播, 依据水平圆盘排种器进行漏播自补偿, 排种器变速补种转速如表 1 所示。

表 1 排种器变速补种转速

粒距/ cm	播种速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)				
	3	4	5	6	7
15	37.00	49.33	61.67	74.00	86.33
20	27.75	37.00	46.25	55.50	64.75
25	22.20	29.60	37.00	44.40	51.80

2.2 辅助补偿

漏播辅助补偿法是应用安装辅助补种装置进行进行补种。辅助补偿法性能分析如图 3 所示。

图 3 中漏播检测传感器位于排种器排种口, 以排种器排种口点 O 为坐标原点建立直角坐标系。

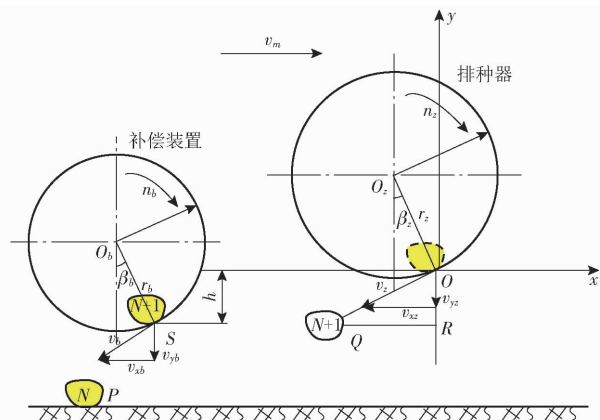


图 3 辅助补种性能分析

Fig. 3 Auxiliary reseeding performance analysis

点 P 为播种的第 N 粒种子位置,点 Q 为播种的第 $N+1$ 粒种子位置,点 S 为补种装置投种位置,排种口与补种排种口的水平距离为 S_1 ,垂直距离为 h 。若 Δt 为相邻两粒种子的时间间隔,第 $N+1$ 粒种子发生漏播,则需经过与第 N 粒种子 $1.5\Delta t$ 时间检测到漏播信号,漏播补偿装置开始对第 $N+1$ 粒种子进行补种。此时第 $N+1$ 粒种子脱离排种口时间为 $0.5\Delta t$,点 Q 位移坐标计算方法如下:

排种器排出种子脱离排种口的水平和垂直速度分别为

$$\begin{cases} v_{xz} = v_m - v_z \cos\beta_z \\ v_{yz} = -v_z \sin\beta_z \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_{xz} ——排种器种子脱离排种口水平分速度, m/s

v_{yz} ——排种器种子脱离排种口垂直分速度, m/s

v_z ——播种排种盘线速度, m/s

β_z ——排种器投种角, ($^\circ$)

第 $N+1$ 粒种子的坐标方程为

$$\begin{cases} x_{q1} = 0.5\Delta t(v_m - v_z \cos\beta_z) \\ y_{q1} = -0.5\Delta t v_z \sin\beta_z + 0.25g\Delta t^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中 x_{q1} ——第 $N+1$ 粒种子经过 $0.5\Delta t$ 的水平位移, m

y_{q1} ——第 $N+1$ 粒种子经过 $0.5\Delta t$ 的垂直位移, m

g ——重力加速度, m/s²

检测到漏播信号,漏播补偿装置开始补种,补种种子脱离排种口时的水平和垂直速度分别为

$$\begin{cases} v_{xb} = v_m - v_b \cos\beta_b \\ v_{yb} = -v_b \sin\beta_b \end{cases} \quad (6)$$

式中 v_{xb} ——补种种子脱离排种口水平分速度, m/s

v_{yb} ——补种种子脱离排种口垂直分速度, m/s

v_b ——补种排种盘线速度, m/s

β_b ——补种装置投种角, ($^\circ$)

若经过时间 t 后,漏播补偿装置完成补种,则补种种子点 S 的坐标方程为

$$\begin{cases} x_s = v_m t - v_b \cos\beta_b t + S_1 \\ y_s = -v_b \sin\beta_b t + \frac{1}{2}gt^2 + h \end{cases} \quad (7)$$

此时,第 $N+1$ 粒种子的点 Q 坐标方程为

$$\begin{cases} x_{q2} = 0.5\Delta t(v_m - v_z \cos\beta_z) + v_m t \\ y_{q2} = -0.5\Delta t v_z \sin\beta_z + 0.25g\Delta t^2 + \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (8)$$

为了完成精确补种,需点 S 与点 Q 重合,即

$$\begin{cases} -v_b \cos\beta_b t + S_1 = 0.5\Delta t(v_m - v_z \cos\beta_z) \\ -v_b \sin\beta_b t + h = -0.5\Delta t v_z \sin\beta_z + 0.25g\Delta t^2 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,采用漏播辅助补偿装置进行补种,需合理设计漏播补偿装置安装位置,同时受播种速度、播种粒距、排种盘线速度、投种角影响。在确定播种参数后,可通过控制时间 t 或补偿装置排种盘线速度 v_b 实现补种位置的精确控制。

3 补偿性能试验

3.1 自补偿

玉米免耕播种机选用不同的排种器,在不同的播种速度、粒距下播种质量不同,对玉米免耕播种机进行漏播补偿同样受到排种器、播种速度、粒距的影响,其参数直接影响漏播补偿性能。为深入研究玉米免耕播种机漏播补偿性能,对水平圆盘排种器进行漏播自补偿性能试验。

试验在辽宁省农业机械化研究所实验室进行,排种器性能试验检测装置为 JPS-12 型计算机视觉排种器试验台,种床带速度范围为 1.5~12 km/h,排种轴转速范围为 15~120 r/min。将水平圆盘排种器安装在种子输送机构安装架上,由电动机控制排种轴转速,采用高速摄像装置,对水平圆盘排种器排种性能进行实时检测^[21-25,5]。排种器性能检测试验如图 4 所示。

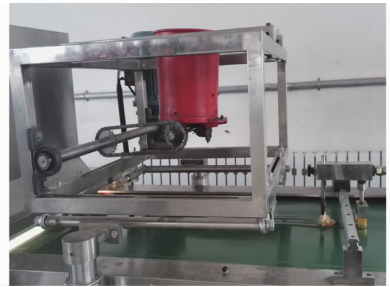


图 4 排种器性能检测试验

Fig. 4 Performance test of seed metering

试验选用丹玉 508 玉米种子,千粒质量为 365 g,籽粒含水率为 12.4%。试验时种床带速度 v_m 分别设定为 3、4、5、6、7 km/h,理论粒距 L 分别设定为 15、20、25 cm,每个速度、粒距测试 200 粒种子的实际粒距,进行 3 次重复试验,排种盘型孔数为 18 个,则排种盘转速为

$$n = \frac{1000v_m}{1080L} \quad (10)$$

由此可以计算出每次试验对应的排种盘转速如表 2 所示。

在播种速度 3~7 km/h,播种粒距为 15、20、25 cm 时进行播种性能试验,试验结果如表 3 所示。

由表 3 可看出,排种器合格指数随播种速度上升而降低,相同速度下粒距越小合格率越低,3~4 km/h 区域粒距合格指数低的原因主要是重播

表 2 排种盘转速

Tab. 2 Seeding wheel tachometer r/min

粒距/cm	播种速度/(km·h ⁻¹)				
	3	4	5	6	7
15	18.52	24.69	30.86	37.04	43.21
20	13.89	18.52	23.15	27.78	32.41
25	11.11	14.81	18.52	22.22	25.93

表 3 播种性能指标

Tab. 3 Seeding performance index %

粒距/cm		播种速度/(km·h ⁻¹)				
		3	4	5	6	7
15	合格指数	88	88	82	81	79
	漏播指数	6	7	12	13	15
	重播指数	6	4	6	6	6
20	合格指数	91	94	92	91	87
	漏播指数	4	2	4	6	10
	重播指数	5	4	4	3	4
25	合格指数	90	93	95	95	92
	漏播指数	3	2	3	3	5
	重播指数	7	5	2	2	3

指数拉低了合格指数;漏播指数基本上随着播种速度的增加,粒距越小,漏播指数越高,主要原因是粒距越小,排种盘转速越高,漏播率越低;在播种速度较低时,重播指数较高,播种速度在 5 km/h 以上时,重播指数较稳定^[26-32]。

将玉米免耕播种机漏播补偿系统连接至水平圆盘排种器上,增加漏播自补偿控制程序,实现漏播自补偿功能^[33-34]。

在播种速度 3、5、7 km/h,粒距分别为 15、20、25 cm 条件下,采用人工封堵排种穴,进行 9 次漏播自补偿试验,每一工况测试 100 个漏播籽粒为一组试验数据。试验结果如表 4 所示。

表 4 自补偿补种合格率

Tab. 4 Qualified rate of self compensation %

粒距/cm	播种速度/(km·h ⁻¹)		
	3	5	7
15	83	77	63
20	92	88	68
25	95	92	71

3.2 辅助补偿

在与漏播自补偿相同的试验条件下^[35],进行漏播辅助补偿性能试验,试验结果如表 5 所示。

表 5 辅助补偿补种合格率

Tab. 5 Qualified rate of auxiliary compensation %

粒距/cm	播种速度/(km·h ⁻¹)		
	3	5	7
15	97	96	89
20	97	97	93
25	99	97	95

由表 4、5 可知,漏播自补偿受播种速度和播种粒距影响较大,在播种粒距为 20、25 cm,播种速度为不大于 5 km/h 时,补种合格率不小于 88%,在播种粒距为 15 cm 或播种速度在 5 km/h 以上时,补种合格率较低;漏播辅助补偿在播种速度 3~7 km/h,粒距 15~25 cm 时,补种成功率不小于 89%,在播种速度不大于 5 km/h 时补种合格率不小于 96%。由此可见,在提前检测漏播信号的前提下,在特定的粒距和播种速度下,结合先进的电机转速控制方法,设计先进的控制器,能够实现漏播自补偿功能。漏播自补偿结构简单,补种效果主要取决于排种器的排种性能,若排种器能够在高转速下实现精确播种,采用漏播自补偿法能够显著提升播种质量。漏播辅助补偿,结构复杂,需增加补种机构,并合理设计补偿装置安装位置,同时受播种速度、播种粒距、排种盘线速度、投种角的影响。在确定播种参数后,可通过控制补种时间实现精确补种。

4 结论

(1) 在排种器内部安装漏播检测传感器提前检测漏播信号,在特定的粒距和播种速度下,能够实现漏播自补偿功能。漏播自补偿的补种性能主要由排种器加速补种时的排种性能决定。

(2) 通过合理设计补种器与主排种器的安装位置,结合控制算法,提升控制器的动态响应性能,可实现精确的漏播补偿功能。

(3) 通过漏播自补偿和辅助补偿对比试验,结果表明,漏播自补偿结构简单,补种效果主要取决于排种器的排种性能,若排种器能够在高转速下实现精确播种,采用漏播自补偿法能够显著提升播种质量。漏播辅助补偿,结构复杂,需增加补种机构,且需设计补偿装置安装位置,同时受播种速度、播种粒距、排种盘线速度、投种角的影响。在确定播种参数后,可通过控制补种时间实现精确补种。

参 考 文 献

- [1] 高焕文,何明,尚书旗,等. 保护性耕作高产高效体系[J]. 农业机械学报,2013,44(6):35-38,49. GAO Huanwen, HE Ming, SHANG Shuqi, et al. High yield and benefit system for conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):35-38, 49. (in Chinese)
- [2] 金衡模,高焕文. 玉米精播机漏播补偿系统设计[J]. 农业机械学报,2002,33(5):44-47.

- KIM Hyungmo, GAO Huanwen. Design of a microcomputer-controlled loss sowing compensation system for a maize precision drill [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5):44-47. (in Chinese)
- [3] 张平华. 基于虚拟仪器的精密排种器漏播检测及补偿技术研究[D]. 武汉:华中农业大学,2006.
ZHANG Pinghua. Study on precise seed-meter of loss testing and compensation technique based on virtual instrument [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [4] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:60-64.
- [5] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于GPS和GPRS的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报,2016,32(6):162-168.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Remote monitoring system for corn seeding quality based on GPS and GPRS[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 162-168. (in Chinese)
- [6] AL-YAMANI A A, MITRA S, MCCLUSKEY E J, et al. Optimized reseeded by seed ordering and encoding[J]. Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2005,24(2): 264-270.
- [7] SINGH C D, SINGH R C. Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field[J]. Journal of Terramechanics, 2011,48(5): 333-338.
- [8] ARZU Y, ADNAN D. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007,97:347-356.
- [9] 孙伟,王关平,吴建民. 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. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(11):8-15. (in Chinese)
- [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 reseeded device for miss-seeding of crops with large grain[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 1-8. (in Chinese)
- [11] 丁幼春,王雪玲,廖庆喜,等. 油菜籽漏播螺旋式补种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(22):16-24.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on spiral-tube reseeded device for loss sowing of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 16-24. (in Chinese)
- [12] 陈刚,孙宜田,孙永佳,等. 玉米免耕精密播种机漏播补偿系统的研究[J]. 农机化研究,2019,41(7):95-99.
CHEN Gang, SUN Yitian, SUN Yongjia, et al. Study on the miss seeding compensation system of maize no-tillage precision seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 95-99. (in Chinese)
- [13] 谯睿,杨文彩,韩文霆,等. 三七精密播种机漏播重播检测系统设计与试验[J]. 传感技术学报,2019,32(7):1115-1122.
QIAO Rui, YANG Wencai, HAN Wenting, et al. Design and test of missed broadcast and over sowing system for panax precision seeder[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019,32(7):1115-1122. (in Chinese)
- [14] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982:334-340.
- [15] 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)
- [16] 周利明,马明,苑严伟,等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(24):44-51.
ZHOU Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24):44-51. (in Chinese)
- [17] 陈福德. 玉米精密排种器排种性能的试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
CHEN Fude. The experimental study on the seeding performance of corn precision metering device [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2012. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 吴泽全,徐冬,程睿,等. 排种器试验台检测系统的设计与试验[J]. 农机化研究,2011,33(2):65-69.
WU Zequan, XU Dong, CHENG Rui, et al. The detection system design and experimental of seed metering test-bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(2):65-69. (in Chinese)
- [20] 崔红梅,陈福德,杜文亮. 气吸式玉米精密排种器排种性能试验研究[J]. 农机化研究,2014,36(3):154-158.
CUI Hongmei, CHEN Fude, DU Wenliang. Experimental study on the seeding performance of the air-suction corn precision metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(3):154-158. (in Chinese)
- [21] MCDONALD T P, FULTON J P, DARR M J, et al. Evaluation of a system to spatially monitor hand planting of pine seedlings [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008,64:173-182.
- [22] ZHAO Zhan, WU Yafang, YIN Jianjun, et al. Monitoring method of rice seeds mass in vibrating tray for vacuum-panel precision seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015,114:25-31.
- [23] LOWTHE-THOMAS S C, SLATER F M, RANDERSON P F. Reducing the establishment costs of short rotation willow coppice (SRC)—a trial of a novel layflat planting system at an upland site in mid-Wales[J]. Biomass and Bioenergy, 2010,34:677-686.
- [24] ARZU Y, ADNAN D. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007,97:347-356.
- [25] YI Shujuan, LIU Yongfen, WANG Chun, et al. Experimental study on the performance of bowl-tray rice precision seeder[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014,7(1):17-25.

31-39.

CHEN Jianneng, XIA Xudong, WANG Ying, et al. Differential equation of motion of pot seedlings in duckbill planting mechanism and application experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 31-39. (in Chinese)

- [18] 刘姣娣,曹卫彬,田东洋,等. 钵苗有效零速移栽栽植机构运动学分析与试验[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 76-84.
LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang, et al. Kinematics analysis and experiment of effective zero-speed transplanting planting mechanism for pot seedlings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 76-84. (in Chinese)
- [19] 尹大庆,张诺一,周脉乐,等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 65-72.
YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimized design and experiment of duckbill planting mechanism with high-speed changing posture receiving seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 65-72. (in Chinese)
- [20] 吴畏,孙松林,肖名涛,等. 2ZY-1型烟草移栽机栽植器的优化设计[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(2): 166-170.
WU Wei, SUN Songlin, XIAO Mingtao, et al. Optimal design of 2ZY-1 tobacco transplanter planting institution[J]. Chinese Journal of Engineering Machinery, 2012, 10(2): 166-170. (in Chinese)
- [21] 申屠留芳,吴旋,孙星钊,等. 基于遗传算法的红薯栽植机构设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 6-11.
SHENTU Liufang, WU Xuan, SUN Xingzhao, et al. Design of sweet potato planting mechanism based on genetic algorithm [J]. China Agricultural Mechanization Research, 2019, 40(12): 6-11. (in Chinese)
- [22] 胡建平,潘杰,张晨迪,等. 行星轮栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 78-86.
HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimization design and experiment on planetary gears planting mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78-86. (in Chinese)

(上接第 46 页)

- [26] 宋鹏,张俊雄,李伟,等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 71-74.
SONG Peng, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Real-time monitoring system for accuracy of precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 71-74. (in Chinese)
- [27] 李雷霞,郝志明,杨薇,等. 精密播种机排种性能检测系统的研制[J]. 农业工程, 2012, 2(8): 16-19.
LI Leixia, HAO Zhiming, YANG Wei, et al. Design of seeding performance detection system for precision seeder [J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(8): 16-19. (in Chinese)
- [28] 金宏亮,邱立春,钱伟. 播种机排种监测系统设计与试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(6): 743-746.
JIN Hongliang, QIU Lichun, QIAN Wei. Design and experiment of seeding monitoring system for seed drill[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(9): 743-746. (in Chinese)
- [29] 赵斌,匡丽红,张伟. 气吸式精播机种、肥作业智能计量监测系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 147-153.
ZHAO Bin, KUANG Lihong, ZHANG Wei. Seed and fertilizer intelligent gauging and monitoring system of suction precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 147-153. (in Chinese)
- [30] 张锡志,李敏,孟臣. 精密播种智能监测仪的研制[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 136-139.
ZHANG Xizhi, LI Min, MENG Chen. Research and development of precision seeding intelligent monitor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 136-139. (in Chinese)
- [31] 窦钰程,欧阳斌林,陈海涛. 光敏式气吸播种机监测装置研究[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 133-136.
DOU Yucheng, OUYANG Binlin, CHEN Haitao. Study on photosensitive-type suction planter monitoring apparatus [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(9): 133-136. (in Chinese)
- [32] 张继成,陈海涛,欧阳斌林,等. 基于光敏传感器的精密播种机监测装置[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(2): 265-268, 273.
ZHANG Jicheng, CHEN Haitao, OUYANG Binlin, et al. Monitoring system for precision seeders based on a photosensitive sensor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(2): 265-268, 273. (in Chinese)
- [33] 吴南,林静,李宝筏,等. 免耕播种机排种器性能监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 69-75.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on performance monitoring system of no-tillage planter seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 69-75. (in Chinese)
- [34] 吴南,林静,李宝筏,等. 免耕播种机漏播补偿系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 69-77, 120.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on no-tillage planter reseeding system for miss-seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 69-77, 120. (in Chinese)