doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.009

免耕播种机漏播补偿系统设计与试验

吴　南[1,2]　林　静[1]　李宝筏[1]　张本华[1]　谷士艳[1]

(1.沈阳农业大学工程学院,沈阳 110866;2.辽宁机电职业技术学院材料工程系,丹东 118009)

摘要:针对免耕播种机作业时存在漏播问题,设计了一种漏播自动补偿系统,建立了补偿装置驱动的数学模型,应用滑模变结构控制算法设计了补偿系统控制器,并对补偿系统的动态响应性能进行了仿真分析。通过补种控制算法,确定了补种机构与主排种器的距离 S 和离地高度 H,得到了补种排种盘转速 n 和播种机行进速度 v_m、粒距 L_1之间的关系曲线,对排种器安装高度 H、粒距 L_1、传送带速度 v_m进行了二次回归正交试验,验证了漏播补偿系统的补种性能。台架试验的最佳工况组合为,补种排种器安装高度 15.33 cm、粒距 25.16 cm、传送带速度 3.52 km/h 时,补种成功率可达 96.5%。田间试验表明,安装漏播补偿系统后,免耕播种机播种合格率均值为 98.72%,有效提高了播种质量。

关键词:免耕播种机;漏播补偿系统;滑模控制;正交试验

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)07-0069-09

Design and Test on No-tillage Planter Reseeding System for Miss-seeding

WU Nan[1,2]　LIN Jing[1]　LI Baofa[1]　ZHANG Benhua[1]　GU Shiyan[1]

(1. *College of Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*
2. *Department of Materials Engineering*, *Liaoning Mechatronics College*, *Dandong* 118009, *China*)

Abstract: An adaptive miss-seeding reseed device of no-tillage planter was developed to solve miss-seeding problems when working, and the mathematical model of the reseed device driver was established to implement the simulation analysis on the dynamic response performance of the compensation system device. Through the reseeding control algorithm, the distance (S) of reseeding device to main seed-metering device and the height (H) of seed-metering device to ground were determined and the relationship curves among reseed-metering plate speed (n), the seeding machine moving speed (v_m) and the seed distance (L_1) were achieved, which further achieved the self-adaption performance of the reseeding machine. The bench test results on reseeding detection accuracy showed that the miss-seeding detection accuracy was 93.23%, the rate of reseeding of the system was 95.11%, the actual reseeding rate of reseeding was 91.95%, the detection error rate was 3.16%, the reseeding success rate of the system was 96.38%, the actual reseeding success rate was 89.89%, and the detection error rate was 6.49%. The tests of quadratic orthogonal regression on the height (H) of seed-metering device to ground, the seed distance (L_1) and the seeding machine moving speed (v_m) showed that the performance of the reseeding device was the best with the height (H) of seed-metering device to ground of 15.33 cm, the seed distance (L_1) of 25.16 cm and the seeding machine moving speed (v_m) of 3.52 km/h, and the reseeding success rate was 96.5%. The field test results on reseeding performance showed that the average seeding qualification rate was 98.72%, which had an increase of 4.56% at speed of 3 km/h to 6 km/h. The research effectively improved the seeding quality and also provided reference for further study on seeding performance improvement of no-tillage planter as well as the promotion of agriculture mechanization level with information technology.

Key words: no-tillage planter; reseeding system for miss-seeding; sliding mode control; orthogonal test

收稿日期:2017-04-16　修回日期:2017-05-04

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503116-09)和国家自然科学基金项目(51275318)

作者简介:吴南(1982—),男,博士生,辽宁机电职业技术学院讲师,主要从事旱作农业机械化研究,E-mail:lfwunan@163.com

通信作者:林静(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事旱作农业机械化及智能化装备研究,E-mail:synydxlj69@163.com

引言

免耕精量播种是保护性耕作主要的技术环节，具有省种、工作效率高、出苗好等优点[1-2]。免耕精量播种机的核心部件是精密排种器，在有秸秆覆盖、根茬残留、凹凸不平的地面进行播种作业时，不可避免地会发生漏播，漏播发生将严重影响农作物的产量。为了对漏播位置进行补种，需等到出苗后进行人工补种，既浪费人力，又因错过最佳播种时间而影响作物生长。

目前，国内外已有对漏播补偿的相关研究。金衡模等[3]研制一套补种系统，通过打开空气控制阀，利用压缩空气把预先等待在 U 型管内的种子吹出来进行补种，可准确发现漏播并及时补种。张平华[4]基于虚拟仪器进行了漏播检测及补偿技术的研究，设计了漏播补偿电磁阀驱动电路及补偿装置，当检测到漏播时，触发执行机构进行补种。朱瑞祥等[5]研制了一种利用超越离合器的单向锁合原理，漏播时启动超越离合器，切换至由步进电动机控制排种器，使其加速旋转的方法进行补种，平均成功补种率为 92.98%。丁幼春等[6]针对油菜籽漏播问题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。基于国内外专家学者对播种机漏播补偿的研究，本文针对免耕播种复杂的田间工况，运用先进的滑模变结构控制算法设计滑模控制器，实现在未耕整的茬地上进行漏播补偿，以进一步提高免耕精量播种机的播种质量。

1 补种系统结构与工作原理

免耕播种机漏播补种系统结构如图 1 所示。

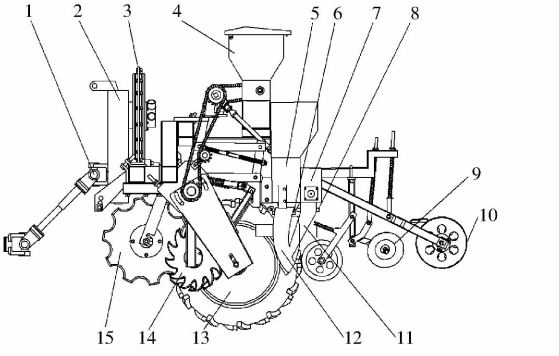

图 1 玉米垄作免耕播种机补种系统结构示意图

Fig. 1 General structure diagram of corn ridge planting no-tillage planter and reseeding device

1. 万向节 2. 机架 3. 风机 4. 肥料箱 5. 播种排种器 6. 漏播检测传感器 7. 补种器 8. 补种检测传感器 9. 覆土器 10. 镇压器 11. 补种导种管 12. 播种导种管 13. 地轮 14. 清垄轮 15. 破茬盘

补种系统以漏播补偿监控系统为核心，将步进电动机与补种器的排种轴直连，通过控制步进电动机的转速和转角来实现漏播补种。漏播补偿控制器、步进驱动器、步进电动机和脉冲编码器构成控制补种轮旋转的闭环控制系统，能够精确控制补种轮的转速和转角，保证补种器快速、准确进行补种。

种子从排种器和补种器下落形成质点流，符合泊松流的 3 个条件：平稳性，只与时间间隔的长度有关，与时间的起点无关；无后效性，与以前的情况无关；普通性，在充分小的时间间隔中不可能出现 2 个或 2 个以上事件。由以上可证明，单位时间内种子下落服从泊松分布，则两粒种子下落的时间间隔服从指数分布。由此，可以由理论粒距 L_1(cm)、播种机前进速度 v_m(km/h)推导出种子从排种器下落的理论时间间隔 $\Delta t = L_1/v_m$。依据玉米免耕播种机作业质量标准，落粒实际时间间隔 $\Delta t_s > 1.5\Delta t$ 时发生漏播，此时步进电动机驱动的补种机构进行补种，保证补种的籽粒落入合格的粒距范围内，提高播种质量。补种系统结构如图 2 所示[7]。

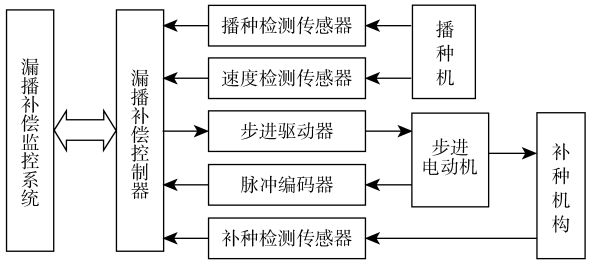

图 2 补种装置结构框图

Fig. 2 Structure diagram of reseeding device

漏播和补种检测选用 2 个矩形光纤传感器对排种器和补种器进行计数，矩形光纤传感器为区域检测，设计的检测区域为 10 cm^2，只要种子落入该区域，不会产生漏检。漏播检测传感器可以检测播种机的漏播数和漏播发生的位置，补种检测传感器可以检测补种数和补种的位置，通过漏播发生的位置和补种位置的比较可以得到补种的合格数。

2 补种驱动数学模型与控制器设计

2.1 补种驱动数学模型

系统的补种机构采用窝眼式排种器，由步进电动机驱动，为了提升步进电动机驱动的控制性能，建立了步进电动机的数学模型，设计步进电动机的加速算法对步进电动机的启动进行控制，解决启动慢、丢步等启动问题，保证系统补种的快速性和准确性[8-10]。

为简化分析，忽略各相的自电感及互电感等因素，以 A 为参考相，则两相混合式步进电动机的电

压平衡方程可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 \\ 0 & L_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_m\omega & 0 \\ 0 & -K_m\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(Z_r\theta) \\ \sin(Z_r\theta - \pi) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中　u_a、u_b、i_a、i_b——两相混合式步进电动机 A、B 相电压和相电流

L_a、L_b、R_a、R_b——步进电动机 A、B 相绕组自感和电阻

K_m——电动机力矩常数，N·m/A

ω——角速度，rad/s

θ——角位移

Z_r——电动机转子齿数

转子力矩平衡方程为

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + K_m i_a \sin(Z_r\theta) + K_m i_b \sin(Z_r\theta - \pi) + T_L = 0 \tag{2}$$

式中　J——电动机转子本身及其所带负载的总惯量，kg·m^2

B——粘滞摩擦系数，N·m/(rad/s)

T_L——负载转矩，N·m

选用57HS13 步进电动机作为驱动补种机构的电动机，齿数 Z_r 为 40、感抗 L 为 2.1 mH、转动惯量为 460 g·cm^2、粘滞摩擦系数为 0.07 N·m/(rad/s)、相电流为 2.8 A。

补种驱动控制系统的脉冲编码器和补种检测传感器作为角度和补种粒数测量器件，测量得到的偏差信号通过响应驱动信号使步进电动机转动补偿转角和补种粒数偏差，从而使补种系统达到漏播补偿的控制要求。补种控制系统主要由 2 个闭环回路组成：脉冲编码器为测量元件的角度控制回路；补种检测传感器为测量元件的补种粒数控制回路。补种驱动系统原理图如图 3a 所示，图 3b 为补种驱动系统仿真数学模型。

2.2　补种系统控制器设计与仿真

免耕播种机漏播补偿系统为一类特殊的非线性控制，主要特点为控制的不连续性，滑模控制是变结构控制系统的一种控制策略，与常规控制的根本区别在于控制的不连续性，可使系统在一定条件下沿规定的状态轨迹作小幅、高频率的上下运动，即“滑动模态”，它与系统的参数和扰动无关，具有响应速度快、无需系统在线辨识，物理实现简单，具有很好的鲁棒性等优点，符合漏播补偿系统的控制要求，为此，采用滑模变结构控制算法进行补种控制器的设计，可使系统快速接近期望值，降低系统振荡，提高系统的稳态精度[11-12]。

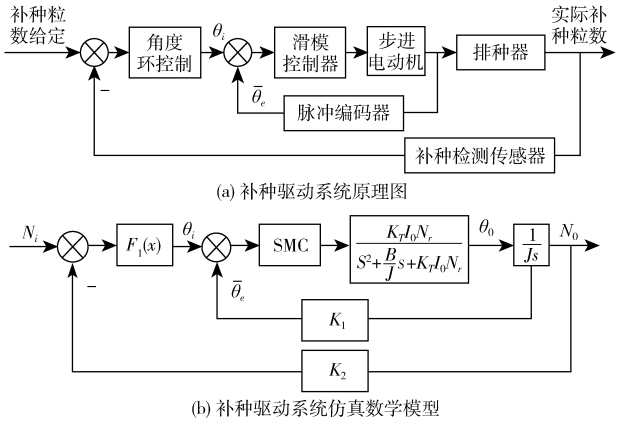

图 3　补种驱动系统控制原理图

Fig. 3　Principle diagrams of reseeding drive system control

将步进电动机的数学模型转化为状态空间模型

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}u \\ y = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \end{cases} \tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{A}$——系统矩阵　　$\boldsymbol{B}$——控制矩阵

$\boldsymbol{C}$——输出矩阵　　$\boldsymbol{x}$——状态向量

u——控制角度　　y——输出角度

设目标轨迹 r 为阶跃信号，跟踪误差为

$$e = y - r \tag{5}$$

定义滑模面为

$$s = \eta e + \dot{e} \tag{6}$$

趋近律采用指数趋近律形式，表达式为

$$\dot{s} = -\varepsilon\mathrm{sgn}(s) - ks \quad (\varepsilon > 0, k > 0) \tag{7}$$

式中　η——设计系数

ε——时变切换增益

k——滑模增益

则滑模控制器为

$$u = -\frac{\boldsymbol{CA}(\eta\boldsymbol{I} + \boldsymbol{A})\boldsymbol{x} + \varepsilon\mathrm{sgn}(s) + ks}{\boldsymbol{CAB}} \tag{8}$$

闭环误差系统为

$$\dot{e} = -(\eta + k)\dot{e} - k\eta e - \varepsilon\mathrm{sgn}(s) \tag{9}$$

由 $\eta > 0, k > 0$ 可知闭环误差系统渐近稳定。

对该滑模控制器构造 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}s^2 \geqslant 0 \tag{10}$$

则　　$\dot{V} = -\varepsilon s\mathrm{sgn}(s) - ks^2 \leqslant 0$

由此可见，闭环系统状态在有限时间内满足可达性条件，即

$$\lim_{t\to\infty} e = \lim_{t\to\infty}(y - r) = 0$$

为了验证所设计的滑模控制器在步进电动机位置控制系统中的控制效果，利用 Matlab/Simulink 软件对控制系统进行仿真验证，仿真模型如图 4 所示。

滑模控制器参数取 $\eta = 120, \varepsilon = 1, k = 100$，由仿

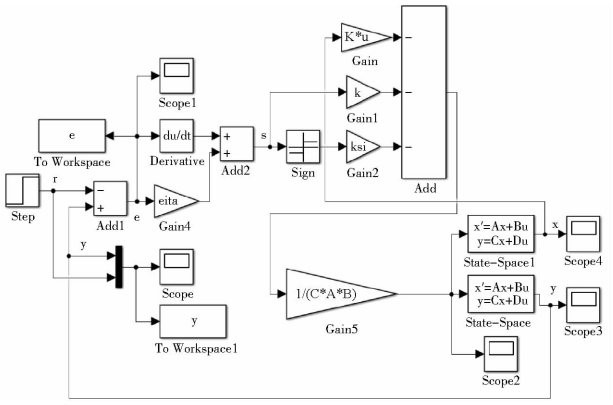

图 4 滑模控制器数学模型

Fig. 4 Sliding mode controller mathematical model

真结果(图 5)可知,在输入为阶跃信号时,在时间 0.1 s 内均可达稳定状态,跟踪误差在 0.1 s 内均可趋近于零。由此得出,在进行单粒和连续补种时,该补偿系统装置均能够实现快速响应,稳定运行。

3 补种控制系统设计

3.1 补种运动控制算法

补种系统分析如图 6 所示。排种器工作时,种子一面旋转,一面随播种机前进,因此种子的绝对运动是排种器旋转和播种机前进两种运动的合成,其运动轨迹是摆线[13]。

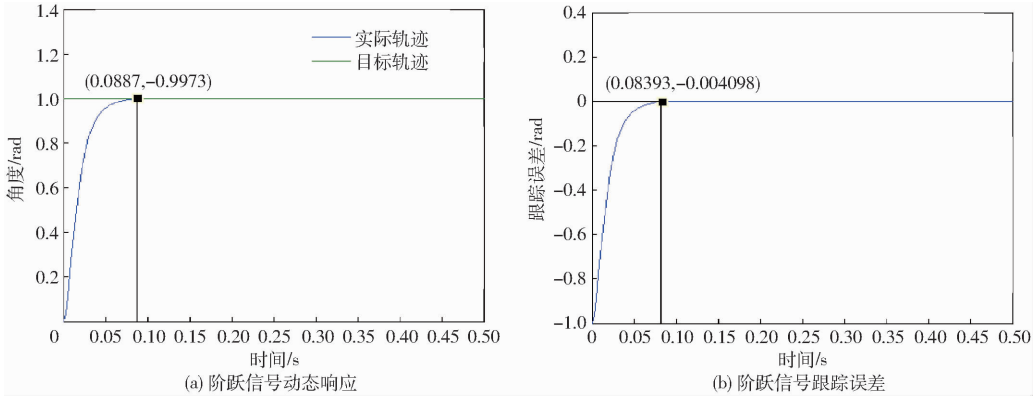

图 5 补种系统响应曲线

Fig. 5 Reseeding system response curves

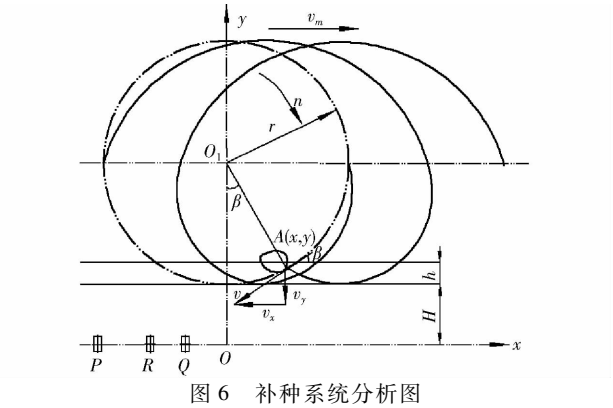

图 6 补种系统分析图

Fig. 6 Analysis diagram of reseeding system

图中 h 为排种口与排种轮底部垂直距离;n 为排种盘转速;β 为种子的投种角度;H 为排种轮底部与地面距离;v_m 为播种机前进速度;r 为排种盘半径;P 为播种第 N 粒种子位置;Q 为播种第 $N+1$ 粒种子位置;R 为补种机构补种籽粒位置。当 $N+1$ 粒种子发生漏播,即 PQ 的距离 L_{PQ} 大于 $1.5L_1$,补种籽粒与第 N 粒种子距离 L_{PR},满足 $0.5L_1 \leqslant L_{PR} \leqslant 1.5L_1$,可保证播种精度。假设补种排种器在 A 点开始投种,种子脱离排种口时的水平和垂直速度分别为

$$\begin{cases} v_x = v_m - v\cos\beta \\ v_y = -n\sin\beta \\ h = r(1-\cos\beta) \end{cases} \tag{11}$$

式中 v_x——种子脱离排种口水平分速度,m/s

v_y——种子脱离排种口垂直分速度,m/s

种子从投种口落入地面的运动时间 t 满足

$$H + h = v_y t + \frac{1}{2}gt^2$$

即

$$t = \left[-v_y + \sqrt{v_y^2 + 2g(H+h)} \right] / g \tag{12}$$

种子脱离排种口到落于地面上的位移

$$S_1 = v_x t - r\sin\beta \tag{13}$$

忽略传感器检测响应时间及扰动,则从发现漏播到补种器完成补种的时间为 t_s,依据图 4 的仿真结果取 $t_s = 0.1$ s,此时,播种机前进的距离 $S_2 = 0.1v_m$。补种器与排种器的距离为 S,则补种籽粒与第 N 粒种子距离满足

$$S = S_1 + S_2 - L_{PR} + L_{PQ} \tag{14}$$

若 $L_{PR} = L_1$,$L_{PQ} = 1.5L_1$,$\beta = 0°$,$h = 0$,则

$$S = (v_m - v)\frac{\sqrt{2gH}}{g} + 0.1v_m + 0.5L_1 \tag{15}$$

由此可知,在参数 S 和 H 确定后,可求出补种器排种盘速度与播种机速度、播种粒距之间为线性关系。当 $S = 30$ cm,$H = 20$ cm 时,n、v_m、L_1 三者的关系如图 7 所示。

3.2 系统装置设计

系统硬件由排种器、补种器、PLC 控制器、触摸

屏、漏播检测传感器、补种检测传感器、速度检测传感器、步进电动机驱动器和步进电动机组成[14-22]。硬件配置如表 1 所示。

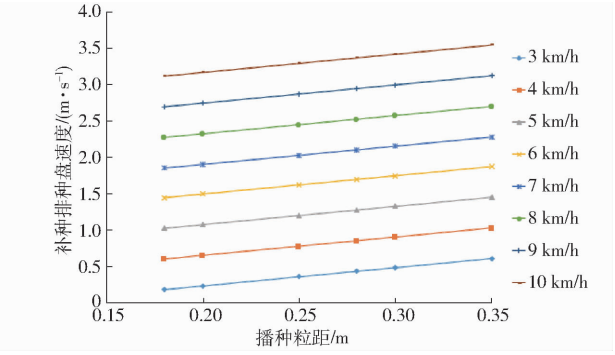

图 7　补种排种盘速度随播种速度、粒距的变化曲线

Fig. 7　Changing curves of reseeding planter plate, seeding speed and seed spacing

表 1　补种系统硬件配置

Tab. 1　Reseeding system hardware configuration

硬件名称	规格型号
补种器	窝眼轮式排种器
播种检测传感器	力科 PT-20ML-10
光纤放大器	欧姆龙 E3X-NA11
速度传感器	E3S-GS30E4
可编程控制器	台达 DVP20SX211T
步进电动机	57HS13
步进驱动器	HBS860H
触摸屏	台达 DOP-B07S411

系统软件由 PLC 梯形图作为系统控制核心。触摸屏为系统起停、参数设置和播种、补种信息的实时交互平台。通过触摸屏设置好工作参数，系统运行后，PLC 控制器对排种器播种精度实时检测，当发生漏播时，迅速启动补偿机构，进行漏播补偿[23-27]。系统控制的流程如图 8 所示。

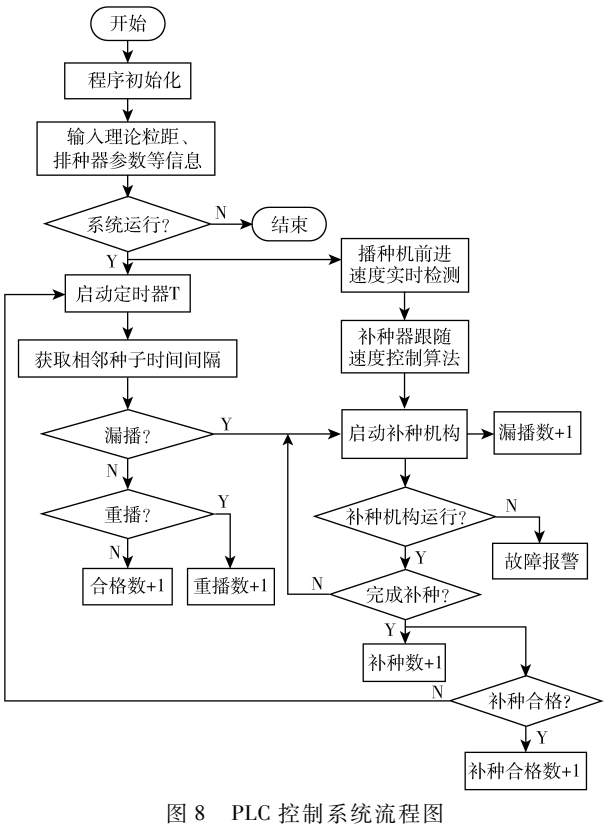

图 8　PLC 控制系统流程图

Fig. 8　Flow chart of PLC control system

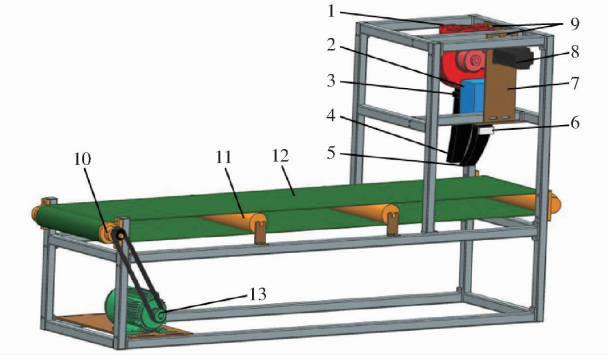

图 9　补种试验台结构图

Fig. 9　Reseeding test-bed structure

1. 主排种器　2. 补种排种器　3. 播种检测传感器　4. 导种管　5. 补种导种管　6. 漏播检测传感器　7. 补种驱动电动机　8. 播种驱动电动机　9. 排种器位置调节板　10. 驱动滚筒　11. 托辊　12. 传送带　13. 传送带驱动电动机

4　系统试验

4.1　补种试验台

补种试验台结构如图 9 所示。主排种器为勺轮式精密排种器，补种器选用窝眼式排种器，排种器均由带有脉冲编码器的步进电动机控制，构成半闭环控制系统。主排种器和补种器平行放置，距离 150 mm，便于在传送带上区分播种籽粒和补种籽粒。传送带长 2 000 mm，宽 500 mm，以种子粒距 200 mm 计算，可保留 9 或 10 粒种子。传送带上附有双面胶带，以防止落下的种子发生滚动和弹跳。传送带由 1 台 0.75 kW 的三相交流异步电动机驱动，电动机由 VFD007M438-A 变频器控制，可实现无级调速[28-32]。

4.2　试验条件

为检验系统的补种性能和工作的可靠性，对系统进行台架试验，如图 10 所示。为了检测补偿系统装置性能，采用人工封堵排种穴，以便更好的监测补种机构补种的成功率和补种位置的准确度。试验选用郑单 958 玉米种子，从 20 kg 种子中随机选取 1 000 粒作为主排种器试验样本，选用 500 粒红色包衣的种子作为补种籽粒，便于肉眼区分。排种器选用辽宁省新民市天和兴达机械制造有限公司生产的勺轮式精密排种器，排种勺轮直径为 240 mm，分种

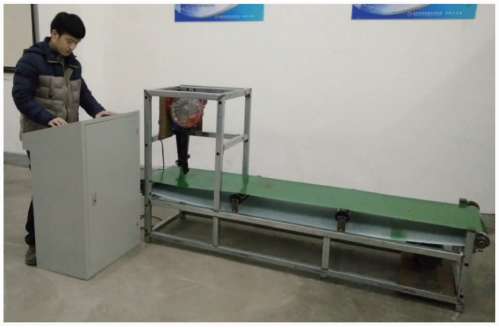

图 10 台架试验

Fig. 10 Bench test on site

勺数 18 个,人工封堵 4 个分种勺,种勺间距为 45 mm,导种轮直径 237 mm,导种轮凹槽数为 18 个。试验过程中,系统随机停机,人工检测补种籽粒的位置,记录补种位置是否合格,每一工况测试 200 个漏播籽粒的补种情况作为一组试验数据。

4.3 补种系统检测精度试验

在排种轮转速为 35 r/min、传送带速度为 5 km/h、株距 15 cm 条件下进行补种数和补种合格数的检测,系统检测漏播数为 100 粒作为一组试验数据,与人工统计的数据进行比较,对比结果如表 2 所示。

表 2 补种精度检测结果

Tab. 2 Test result of reseeding accuracy

编号		漏播数	补种数	补种合格数	补种率/%	补种合格率/%	漏播检测精度/%
1	检测数据	100	98	95	98	96.94	92.59
	实际数据	108	101	93	93.52	92.08	
2	检测数据	100	95	92	95	96.84	94.34
	实际数据	106	99	89	93.40	89.90	
3	检测数据	100	93	93	93	100	94.34
	实际数据	106	97	91	91.51	93.81	
4	检测数据	100	96	95	96	98.96	91.74
	实际数据	109	101	94	92.66	93.07	
5	检测数据	100	96	92	96	95.83	96.15
	实际数据	104	99	87	95.19	87.88	
6	检测数据	100	94	91	94	96.81	90.90
	实际数据	110	101	86	91.82	85.15	
7	检测数据	100	93	89	93	95.70	97.08
	实际数据	103	93	87	90.29	93.55	
8	检测数据	100	95	87	95	91.58	93.46
	实际数据	107	98	84	91.59	85.71	
9	检测数据	100	96	91	96	94.79	88.50
	实际数据	113	99	87	87.61	87.88	

试验数据取平均值,漏播补偿系统的漏播检测精度为 93.23%,系统检测补种率为 95.11%,实际补种率为 91.95%,检测误差为 3.16%,系统检测的补种成功率为 96.38%,实际补种成功率为 89.89%,检测误差为 6.49%。台架试验表明,补偿系统检测装置能够为田间试验提供有效的试验数据参考。

4.4 补种性能试验

为验证漏播补偿系统补种性能,在其它因素不变的情况下,试验研究排种轮底部与地面高度 H、粒距 L_1 和传送带速度 v_m 与补种性能的数学模型和试验因素的最佳组合,对漏播补偿系统的补种成功率进行二次回归正交设计试验,因素编码如表 3 所示。

表 3 因素编码

Tab. 3 Coding for factors and levels

编码	排种器高度 H/cm	粒距 L_1/cm	传送带速度 v_m/(km·h^{-1})
1.353	20.00	30.00	7.00
1	18.04	28.04	6.48
0	12.50	22.50	5.00
-1	6.96	16.96	3.52
-1.353	5.00	15.00	3.00

根据三因素五水平二次回归正交试验设计,安排 17 次试验,试验方案与结果如表 4 所示。X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Test scheme and results

试验号	X_1	X_2	X_3	补种成功率 y_1/%
1	1	1	1	92.5
2	1	1	-1	96.5
3	1	-1	1	92.0
4	1	-1	-1	93.0
5	-1	1	1	92.5
6	-1	1	-1	93.5
7	-1	-1	1	92.0
8	-1	-1	-1	92.5
9	1.353	0	0	93.5
10	-1.353	0	0	92.5
11	0	1.353	0	93.0
12	0	-1.353	0	92.5
13	0	0	1.353	92.5
14	0	0	-1.353	96.5
15	0	0	0	95.0
16	0	0	0	96.0
17	0	0	0	95.5

根据试验结果,求解得出补种合格率与影响因素间的数学模型为

$$y_1 = 95.21 + 0.42X_1 + 0.53X_2 - 1.02X_3 + 0.31X_1X_2 - 0.44X_1X_3 - 0.44X_2X_3 - 1.0X_1^2 - 1.14X_2^2 - 0.18X_3^2 \quad (16)$$

为检验回归方程的显著性,对合格率回归方程进行了检验,显著性检验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,$F_1 = 3.11 < F_{0.25}(5,2) = 3.28$ 是不显著的,说明回归方程拟合较好,故可进一步用统

表 5　方差分析结果

Tab. 5　Results of variance analysis

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F	F_α
模型	36.88	9	4.10	6.54	3.68($\alpha=0.05$)
残差	4.39	7	0.63		
失拟	3.89	5	0.78	3.11	3.28($\alpha=0.25$)
误差	0.50	2	0.25		
总和	41.26	16			

计量 F_2 进行检验。其中 $F_2=6.54>F_{0.05}(9,7)=3.68$，说明方程在 $\alpha=0.05$ 水平显著，与试验数据拟合较好。应用 Design-Expert 8.0.6 软件得到试验因素对补种合格率影响指数响应面，可以直观看出试验指标与各因素之间的关系，结果如图 11 所示。

回归方程的响应面表明，传送带速度对系统影响最为显著，为主要因素；排种器高度和粒距交互作用较小，为次要因素。补种合格率随着传送带速度的增加而降低，在传送带速度较低、排种器高度和粒距较大时，补种合格率较高。将因素编码转换为实际值得到补种合格率 y_1 的回归方程

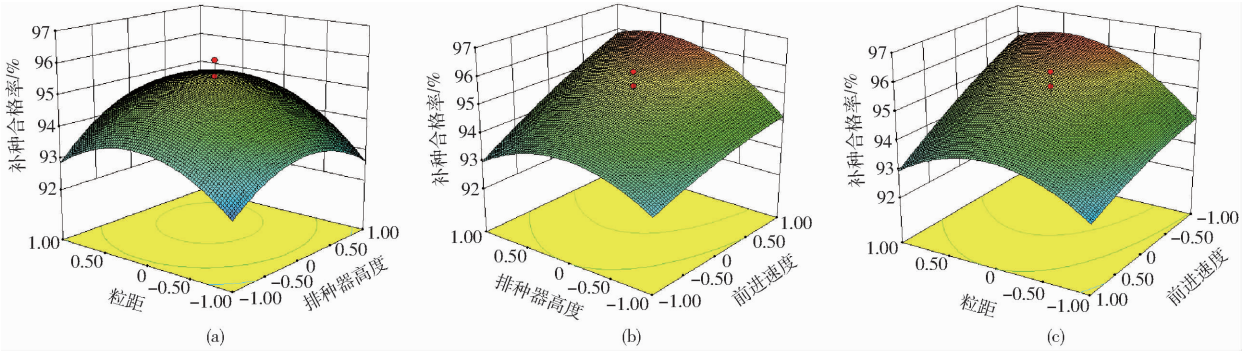

图 11　试验因素对补种合格率影响的响应曲面

Fig. 11　Response surfaces of impact of test factors on reseeding qualified rate

$$y_1=63.20+0.93H+1.90L_1+2.00v_m+0.01HL_1-0.05Hv_m-0.05L_1v_m-0.03H^2-0.04L_1^2-0.08v_m^2 \quad (17)$$

在试验结果分析和模型拟合的基础上，利用 Design-Expert 8.0.6 对试验参数进行优化设计，即在获得最大的补种合格率情况下，各因素取值的最佳工况组合。从软件优化结果可以看出，在排种器安装高度为 15.33 cm，粒距为 25.16 cm，传送带速度为 3.52 km/h，可获得补种合格率为 96.5%，根据系统的最佳工况组合，进行试验验证，试验结果如表 6 所示，表中验证值为 10 次试验结果的均值。试验结果表明，在最佳的工作参数下，实际结果与理论结果相近，补种性能最好。

表 6　试验验证结果

Tab. 6　Verification result of test

类别	排种器高度/cm	粒距/cm	机器前进速度/(km·h^{-1})	补种合格率/%
优化值	15.33	25.16	3.52	96.5
验证值	15.00	25.00	3.50	96.0

4.5　田间试验

为验证免耕播种机漏播补偿系统田间工作时的补种性能和可靠性，2017 年 4 月 13 日在沈阳农业大学科技基地试验田进行了田间试验，补种机构安装在 2BG－2 型免耕精密播种机上，受免耕播种机机械结构限制，补种排种器的安装高度为 35 cm，粒距为 25 cm，在不同行进速度下进行试验，由东方红 354 型拖拉机牵引，试验设备包括 SM－2 型高精度土壤水分测量仪（澳作生态仪器有限公司），测量范围 0.05～0.6 m^3/m^3，0～40℃精度为 ±0.05 m^3/m^3；SC900 型土壤紧实度测量仪（澳作生态仪器有限公司），量程 0～45 cm、0～7 000 kPa，最大加载 95 kg，分辨率 2.5 cm，35 kPa，质量 1.25 kg。测得试验留茬地的土壤含水率平均值为 18.95%，10 cm 深土壤紧实度均值为 0.45 MPa，15 cm 深均值为0.57 MPa，土壤容重 1.24 g/cm^3。试验选用郑单 958 玉米种子，选用红色包衣种子作为补种籽粒，分别在行进速度为 3、4、5、6 km/h 下进行了 10 次试验，每次试验测试距离为 20 m，每一工况进行 10 次试验，如图 12 所示。

试验中测量主排种器播种数 S、漏播数 F、补



图 12　田间试验

Fig. 12　Field test

种数 A、补种合格数 H、补后漏播数 K。试验结果见表 7。从表 7 可以看出,播种机的漏播补偿系统能够根据检测的漏播信号快速响应驱动补种机构进行补种,根据播种机行进的速度变化能够进行补种,受补种器安装高度的影响较小。随着播种机行进速度的增加,补种性能有所降低,但综合试验数据表明,安装漏播补偿系统后,在 3 ~ 6 km/h 速度下播种合格率提升至 99.22%、99.22%、98.70%、97.74%。以上分析表明,该漏播补偿系统具有良好的补种性能,若能提高漏播检测传感器的精度和电动机的响应时间,播种性能将进一步提升。

表 7 田间补种性能试验结果

Tab.7 Result of field reseeding performance test

试验序号	播种速度 v_m/(km·h^{-1})																			
	3					4					5					6				
	S	F	A	H	K	S	F	A	H	K	S	F	A	H	K	S	F	A	H	K
1	107	5	5	5	0	100	6	5	4	2	98	4	4	3	1	97	11	7	6	5
2	102	4	4	4	0	102	3	3	3	0	101	6	5	3	3	95	8	8	8	0
3	97	6	4	4	2	101	3	3	3	0	99	5	4	4	1	97	7	7	5	2
4	102	3	3	3	0	105	5	3	2	3	97	7	6	5	2	94	12	9	7	5
5	103	4	3	3	1	102	4	4	4	0	103	5	4	4	1	102	8	8	8	0
6	103	6	5	3	3	103	6	6	6	0	103	4	4	3	1	95	6	6	5	1
7	102	4	4	4	0	104	5	5	3	2	98	5	5	5	0	97	9	8	8	1
8	97	5	5	5	0	105	4	4	4	0	103	8	7	5	3	103	9	8	5	4
9	106	4	4	3	1	101	3	3	3	0	99	5	5	5	0	93	11	9	7	4
10	101	5	4	4	1	104	3	2	2	1	101	7	6	6	1	99	8	8	8	0
均值	102	4.6	4.1	3.8	0.8	102.7	4.2	3.8	3.4	0.8	100.2	5.6	5	4.3	1.3	97.2	8.9	7.8	6.7	2.2
漏播率/%	4.51					4.09					5.59					9.16				
补种率/%	89.13					90.48					89.29					87.64				
补种成功率/%	92.68					89.47					86.00					85.90				
补后漏播率/%	0.784					0.779					1.297					2.263				

5 结论

(1)建立了补种机构驱动的数学模型,运用滑模变结构控制算法设计了补种控制器,仿真结果表明在输入为阶跃信号时,系统响应在 0.1 s 内均可达稳定状态,跟踪误差在 0.1 s 内均可趋近于零。在进行单粒补种和连续补种时,该补偿系统装置均能够实现快速响应,稳定运行。

(2)设计了补种的控制算法,在确定补种机构安装位置后,可以得到补种机构转速和免耕播种机行进速度、播种粒距的对应曲线,保证补种精度。

(3)台架试验表明,系统补种成功率受传送带速度影响最为显著,与排种器高度和粒距之间存在交互作用,试验优化设计结果显示,在试验台上发挥系统最佳性能的工况组合是:排种器安装高度为 15.33 cm,粒距为 25.16 cm,传送带速度为 3.52 km/h,此时补种合格率可达 96.5%。

(4)通过田间试验,在 3 ~ 6 km/h 速度下,免耕播种机漏播补偿系统平均补种率为 89.14%,平均补种成功率为 88.51%,与台架试验对比表明,在田间复杂工作环境下,补种率和补种成功率均有所降低,综合试验结果表明,在安装漏播补偿系统后,免耕播种机播种合格率均值为 98.72%,有效提高了播种质量。

参 考 文 献

1 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(4):1 - 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150401&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):1 - 8. (in Chinese)

2 高焕文,何明,尚书旗,等. 保护性耕作高产高效体系[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6):35 - 38,49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130607&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.007.
GAO Huanwen, HE Ming, SHANG Shuqi, et al. High yield and benefit system for conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):35 - 38, 49. (in Chinese)

3 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)
4 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)
5 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 CSAE, 2014, 30(21): 1 - 8. (in Chinese)
6 丁幼春,王雪玲,廖庆喜,等. 油菜籽漏播螺管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 reseeding device for loss sowing of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 16 - 24. (in Chinese)
7 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/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):69 - 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2016s011&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.011.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on performance monitoring system of no-tillage planter seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):69 - 75. (in Chinese)
8 姜德美,谢守勇,甘露萍. 步进电机启动控制算法设计[J]. 西南大学学报:自然科学版,2007,29(5):128 - 132.
JIANG Demei, XIE Shouyong, GAN Luping. Designing the control algorithm of the stepping motor startuping[J]. Journal of Southwest University:Natural Science Edition, 2007, 29(5):128 - 132. (in Chinese)
9 苏晓明,张品,祝君宇. 广义时变脉冲系统的时域稳定[J]. 自动化学报,2016,42(2):309 - 314.
SU Xiaoming, ZHANG Pin, ZHU Junyu. Finite-time stability of linear time-varying descriptor impulse systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(2):309 - 314. (in Chinese)
10 郑雪钦,郭东辉. 一种实时自适应步进电机 PID 控制器设计[J]. 控制工程,2009,16(5):643 - 646.
ZHENG Xueqin, GUO Donghui. Design of PID controller for real-time adaptive stepping motor[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(5):643 - 646. (in Chinese)
11 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016:80 - 142.
12 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2015:1 - 138.
13 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:60 - 64.
14 付威,罗锡文,曾山,等. 水稻精量旱穴播机穴距电液比例控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015, 31(9):25 - 31.
FU Wei, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Design and experiment of electro-hydraulic proportional control hill distance system of precision rice hill-drop drilling machine for dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 25 - 31. (in Chinese)
15 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(6):743 - 746. (in Chinese)
16 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)
17 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)
18 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.
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. (in Chinese)
19 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)
20 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)
21 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)
22 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)

(下转第 120 页)

Textile Research, 2014, 35(8): 104 - 108. (in Chinese)
12 刘娜,徐伯俊,刘新金. 赛络纺加捻三角区内纤维的受力分析[J]. 纺织学报, 2014,35(12): 41 - 46.
LIU N, XU B J, LIU X J. Research on fiber tension in Siro-spinning triangle[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(12): 41 - 46. (in Chinese)
13 张进武. 赛络纺纱线捻度结构分析[J]. 棉纺织技术, 2006,34(7): 16 - 19.
ZHANG J W. Analyses of twist structure of Siro-spinning yarn [J]. Cotton Textile Technology, 2006, 34(7): 16 - 19. (in Chinese)
14 盛庆石. 赛络纺纱应注意的几个问题[J]. 棉纺织技术, 2010,38(3): 25.
SHENG Q S. Several problems in Siro-spun [J]. Cotton Textile Technology, 2010, 38(3): 25. (in Chinese)
15 LIU X, SU X. Research on Siro-spun yarn torque using airflow false spinning device[J]. Journal of the Textile Institute, 2013, 104(5): 473 - 480.
16 SUN M N, CHENG K. Structure and properties of cotton Siro-spun (R) yarn[J]. Textile Research Journal, 2000, 70(3): 261 - 268.
17 LI S, WANG G H, WANG D C, et al. Design and test of the device forming grass-braid driven by diesel or electricity[C]// 2016 ASABE Annual International Meeting Paper, 162459583.
18 HE J H, ZHANG L N. On convergence point of the two-strand yarn spinning[J]. Textile Research Journal, 2008, 78(11): 1022 - 1024.
19 王光辉,李帅,王德成,等. 一种机电两用的青草成辫成型装置:CN,201410670106.2[P]. 2016 - 04 - 27.
20 耿端阳,张道林,王相友,等. 新编农业机械学[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
21 余永,贺刚,王光辉,等. 苜蓿同向异形制备与堆存试验[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(3): 99 - 105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170312&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.012.
YU Y, HE G, WANG G H, et al. Preparation and storage experiment of cocurrent special-shaped alfalfa[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 99 - 105. (in Chinese)
22 ASAE S358.2 Moisture measurement-forages[S]. 1993.

(上接第 77 页)

23 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.
24 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.
25 LOWTHE-THOMAS F M, SLATER S C, 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(5): 677 - 686.
26 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.
27 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.
28 向阳,谢方平,汤楚宙,等. 输送带铺砂型排种器试验台的研制[J]. 农业工程学报,2009,25(6):136 - 140.
XIANG Yang, XIE Fangping, TANG Chuzhou, et al. Development of the seed-metering test bench with sand-paving conveyor belt [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 136 - 140. (in Chinese)
29 姜鹏. 数控精量排种器性能试验台设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
JIANG Peng. Design of CNC precision seeder performance testing [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
30 周利明,王书茂,张小超,等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报,2012,28(13):16 - 21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16 - 21. (in Chinese)
31 黄东岩,贾洪雷,祁悦,等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报,2013,29(23):15 - 22.
HUANG Dongyan, JIA Honglei, QI Yue, et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinyllidence fluoride piezoelectric film[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 15 - 22. (in Chinese)
32 李民,刘恒新,李伟,等. 2BST - 160 型播种机性能试验台研究[J]. 农业工程学报,2004, 20(3): 100 - 103.
LI Min, LIU Hengxin, LI Wei, et al. Test-bed of the 2BST - 160 corn sower function[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 100 - 103. (in Chinese)