

免耕播种机精量穴施肥系统设计与试验

吴南^{1,2} 林静¹ 李宝筏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:为实现玉米精量穴施肥农业技术要求,提高穴施肥质量,设计了一种穴施肥控制系统。应用颗粒系统仿真软件 EDEM 对穴施肥控制装置成穴性能进行了仿真研究,表明穴施肥装置在播种速度 3~7 km/h 时,鸭嘴阀成穴性能较好,成穴性能随着播种机速度增加逐渐减弱。通过穴施肥控制算法,调节种子脱离排种口与肥料脱离排肥口的时间间隔 t_3 ,控制穴施肥料与穴播种子水平距离 a ,实现穴施肥位置控制;调节排肥轴转速和鸭嘴阀开合频率,实现穴施肥量控制。采用正交旋转组合试验,以播种机行进速度、鸭嘴阀旋转角、穴施肥装置安装高度为试验因素,穴距精度和穴施肥量精度为试验指标,应用响应面分析法,进行三因素五水平正交试验,结果表明,在播种机行进速度为 7 km/h,最佳参数组合为:旋转角 33.37°,安装高度 17.30 cm。田间试验结果表明,在播种机行进速度 3~7 km/h,旋转角 33.37°,安装高度 17.30 cm 时,穴距精度可达 84.76%,穴施肥量精度可达 87.20%,满足玉米精量穴施肥控制技术农业要求。

关键词: 免耕播种机; 穴施肥; 控制系统; 鸭嘴阀; 正交试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0064-09

Design and Test on No-tillage Planter Precise Hole Fertilization System

WU Nan^{1,2} LIN Jing¹ LI Baofa¹

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

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

Abstract: A hole fertilization system was designed to satisfy the technology demand on precise hole fertilization agriculture which applied a discrete element method software EDEM to simulate the hole fertilization controlling device. The result demonstrated that the mean hole distance was 24.90 cm, 23.79 cm and 23.28 cm, respectively, when planter speed was 3 km/h, 5 km/h and 7 km/h, and the soil opener working performance of the hole fertilization system was weakened as the speed of the planter was increased. Based on the hole fertilization controlling algorithm, the hole fertilization position controlling was achieved by adjusting the time interval between the seed out of the seed outlet and the fertilizer out of the fertilizer outlet (t_3) and controlling the horizontal distance between the fertilizer and the seeds (a); the hole fertilization amount controlling was achieved by adjusting the opening and closing frequency of the fertilizer axis speed and the duckbill valve. Based on the orthogonal rotation design test of quadratic regression and the response surface methodology, the speed of the seeding machine, the opening and closing angle of the duckbill valve and the installment height of the hole fertilization device were taken as test factors, the precision of hole distance and the precision of the fertilization amount were taken as test indicators to implement the orthogonal test. The result showed that the precision of hole distance and the fertilization amount was 86.03% and 84.60%, respectively, when the speed of the seeding machine, the opening and closing angle of the duckbill valve and the installment height of the hole fertilization was 7 km/h, 33.37° and 17.30 cm when the hole fertilization was at optimum working performance. By testing on the precision of hole distance and the fertilization amount with the opening and closing angle and the installment of 33.37° and 17.30 cm, the speed of the planter as 3 km/h, 5 km/h and 7 km/h, the field validation test result was similar to the theoretical result. Furthermore, the

收稿日期: 2018-02-08 修回日期: 2018-05-08

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

作者简介: 吴南(1982—),男,博士生,辽宁机电职业技术学院副教授,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

precision of the hole fertilization controlling system was decreased slightly as the moving speed was increased and the precision of hole distance and the fertilization amount was 84.76% and 87.20% , respectively, which can satisfy the precision and amount controlling demands on the hole fertilization of corn.

Key words: no-tillage planter; hole fertilization; control system; duckbill valve; orthogonal test

0 引言

科学施肥是保护性耕作的一项重要内容,是提高作物产量的重要因素之一。精量穴施肥技术是一种提高肥料利用率、保护土壤环境的有效途径,对实现“高产、优质、高效、环保和改土”农业综合目标具有重要意义^[1-3]。目前,国内免耕播种施肥主要采用侧位分施,一般为侧深施,采取粗放的条沟施肥方式一次播排混合肥料,没有针对特定种子,易造成营养成分过剩,肥料利用率不高,不仅造成经济损失,而且使土壤环境的营养平衡受到破坏,长期如此将造成严重的地下水污染、土壤矿化变硬、破坏耕层等问题^[4-13]。

穴施肥技术针对每一粒种子施用一定量的肥料,可以提高肥料利用率,降低化肥使用成本,改善因化肥施用不当造成的农业污染问题^[14]。张勋等^[15]设计了穴播穴施肥装置控制系统,在窝眼轮式排肥装置上增加了肥料二次定位机构,实现了穴播穴施肥控制功能。李沐桐等^[16]通过试验分析穴施肥控制机构的结构和工作参数,研究施肥传动机构工作参数对施肥控制精度的影响规律,设计了玉米苗期自动穴施肥控制机构,实现了对中耕作物的自动穴施肥。胡红等^[17]设计了一种玉米行间定点扎穴深施追肥机,能够在行间距 600 mm 的玉米行间进行追肥作业,1 次完成 2 行玉米扎穴追肥。开鲁县吉祥农机制造有限责任公司^[18]发明了一种直插式中耕穴施肥机,可将化肥精确地施在农作物附近,提高化肥吸收率。张培坤^[19]发明了一种起垄施肥机用穴施肥机构,通过在肥料出口设置肥料扩散堵盘,利用凸轮控制堵盘升降实现穴施肥。基于国内外专家学者对穴施肥装置的研究,本文结合玉米穴播穴施肥技术要求,设计一种穴施肥控制系统,通过穴施肥控制算法实现穴施肥位置控制。通过调节排肥轴转速和鸭嘴阀开合频率,实现穴施肥量控制。通过台架试验获得穴施肥装置较优的工作参数组合,以提高穴施肥系统的精确度和肥料利用率。

1 系统总体设计

1.1 穴施肥控制系统总体结构

为了提高免耕播种机施肥过程中肥料利用率,针对研制的 2BMGYF-2 型玉米垄作免耕播种机结

构特点,设计了一种精量穴施肥装置,将其安装在免耕播种机原排肥器下方,实现免耕播种机精量穴施肥功能。免耕播种机穴施肥控制系统结构如图 1 所示^[20]。

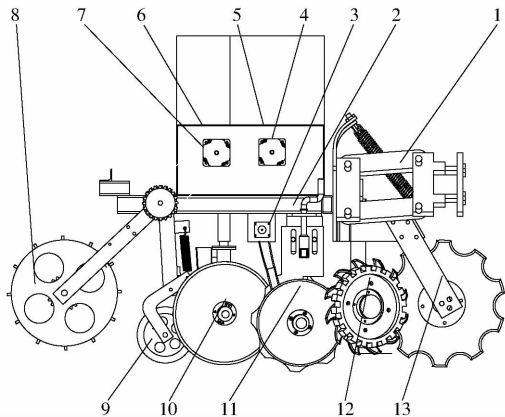


图 1 免耕播种机穴施肥控制系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of control system for fertilization control system of no-tillage planter

- 1. 四连杆机构 2. 机架 3. 穴施肥装置 4. 施肥驱动电动机
- 5. 肥箱 6. 种箱 7. 排种驱动电动机 8. 镇压轮 9. 覆土轮
- 10. 播种开沟器 11. 测深施肥开沟器 12. 清垄轮 13. 破茬盘

1.2 穴施肥控制原理

穴施肥控制系统由穴施肥控制器、播种控制、施肥量控制、肥料成穴控制 4 部分组成。控制系统原理如图 2 所示。

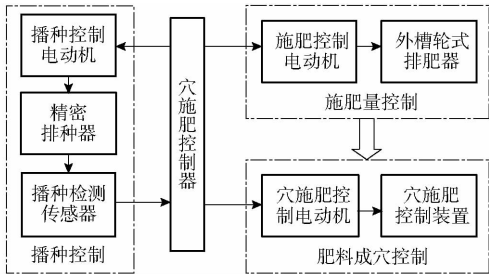


图 2 控制系统原理图

Fig.2 Structure diagram of control system

施肥控制电动机与外槽轮式排肥器排肥轴相连,通过控制电动机转速实现施肥量控制,在播种施肥作业时,排肥器根据设定的施肥量适时旋转,肥料经过排肥口落入穴施肥控制装置中,当播种检测传感器检测到播种信号,鸭嘴阀适时打开,将每穴肥料集中施入合理位置,穴施肥完成后,鸭嘴阀快速关闭,续存下一穴肥料,进而实现精量穴施肥控制。

2 穴施肥控制装置设计

穴施肥控制装置由穴施肥装置和控制电动机组成,穴施肥装置成穴部件是鸭嘴阀。玉米免耕播种机在较高工作速度下进行精密播种施肥作业,要实现精准穴播种肥,鸭嘴阀开合需具有较高的频率,摇杆机构直接控制鸭嘴开合,其参数对穴播质量至关重要,穴施肥装置由摇杆、推杆、导肥管、鸭嘴阀等组成,结构如图 3 所示。

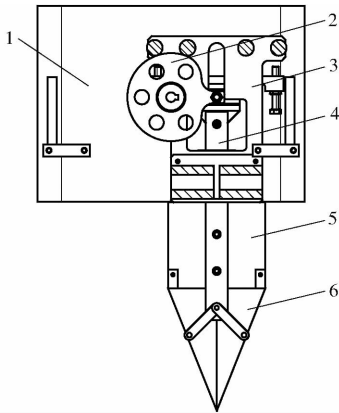


图 3 穴施肥装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of hole fertilization mechanism

1. 外壳 2. 摇杆 3. 支架 4. 推杆 5. 导肥管 6. 鸭嘴阀

2.1 穴施肥装置设计

根据穴施肥运动要求及其结构尺寸,建立图 4 所示直角坐标系, α 为鸭嘴阀支点 C 和 F 连线与水平方向夹角, β 为鸭嘴阀侧边 BE 与垂直方向夹角, θ 为推杆 AD 与连杆 CD 之间的夹角, δ 为摇杆 HG 运动到 IG 转过的角度,均为角度变量^[21]。

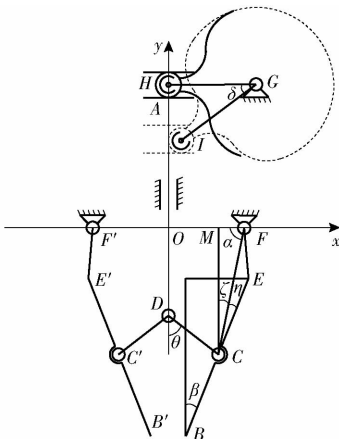


图 4 穴施肥装置简图

Fig. 4 Diagram of hole fertilization mechanism

由图 4 的几何关系可以得到点 $C(x_0, y_0)$ 的坐标方程为

$$\begin{cases} x_0 = l_{OF} - l_{CF} \cos \alpha \\ y_0 = -l_{CF} \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

点 $B(x_1, y_1)$ 的坐标方程为

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - l_{BC} \sin \beta \\ y_1 = y_0 - l_{BC} \cos \beta \end{cases} \quad (2)$$

点 $D(x_2, y_2)$ 的坐标方程为

$$\begin{cases} x_2 = 0 \\ y_2 = y_0 + l_{CD} \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

由此可得推杆顶点 $A(x_3, y_3)$ 的坐标方程为

$$\begin{cases} x_3 = 0 \\ y_3 = y_2 + l_{AD} \end{cases} \quad (4)$$

2BMGYF-2 型玉米垄作免耕播种机播种开沟器播种深度为 40 ~ 70 mm,施肥开沟器施肥深度为 70 ~ 100 mm。施肥开沟器采用双圆盘侧深施肥开沟器,施肥肥沟一侧为缺口圆盘,半径 170 mm;另一侧为光面圆盘,半径 150 mm,与缺口圆盘呈 7° 斜角^[22-23]。穴施肥控制装置的鸭嘴阀安装在双圆盘开沟器夹角内,使穴施肥时不受外界环境和开沟深度影响。依据 2BMGYF-2 型玉米垄作免耕播种机侧深施肥器结构尺寸要求,鸭嘴阀开合工作时不能与双圆盘开沟器干涉,将鸭嘴阀安装在双圆盘开沟器后上方,鸭嘴阀顶点可在圆盘轴轴线上,鸭嘴阀横向长度和高度应小于 125 mm。双圆盘侧深施肥器结构如图 5 所示。

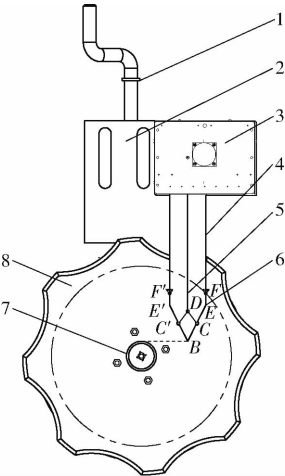


图 5 双圆盘侧深施肥器结构图

Fig. 5 Diagram of double disc fertilizer attachment

1. 摇把 2. 立板 3. 穴施肥控制装置 4. 导肥管 5. 推杆
6. 鸭嘴阀 7. 圆盘轴 8. 缺口圆盘

综合以上因素,本设计中鸭嘴阀横向长度取 60 mm,纵向长度取 20 mm,高度取 80 mm,推杆长度 l_{AD} 取 240 mm, l_{EF} 取 20 mm, l_{CD} 取 25 mm,当鸭嘴阀闭合时, l_{OD} 取 30 mm,则 $l_{BD} = 50$ mm。可求得 $l_{BE} = 67.08$ mm, $\beta = 26.57^\circ$, $\theta = 36.88^\circ$, $l_{CF} = 52.20$ mm,各点坐标为 $C(15, -50)$, $B(0, -80)$, $D(0, -30)$, $A(0, 210)$ 。依据各点坐标可知 $\zeta = 16.70^\circ$, $\eta = 9.87^\circ$, $\beta = 99.86^\circ - \alpha$,从而可得

$$\cos \alpha = \frac{30 - 25 \sin \theta}{52.2} \quad (5)$$

当鸭嘴阀开角最大时,即 $\theta = 90^\circ$,各点坐标为 $C(25, -51.96)$, $B(16.12, -84.29)$, $D(0, -51.96)$, $A(0, 188.04)$ 。由此可知,鸭嘴阀推杆移动范围为 $0 \sim 21.96$ mm。滚子半径取 5 mm,当滚子由 $H(x_4, y_4)$ 运动到 $I(x_5, y_5)$ 点时,推杆向下运动 21.96 mm,此时滚子与推杆中心相切,由此可知

$$\begin{cases} x_5 = l_{HC}(1 - \cos\delta) \\ y_5 = y_4 - l_{HC}\sin\delta \end{cases} \quad (6)$$

得摇杆 l_{HC} 为 50.72 mm。以吉农 4 号肥,每穴施肥量 10 g 为例,肥料颗粒密度为 1.22 g/cm³ [24], 10 g 肥料所占体积为 8.22 cm³。鸭嘴阀为锥形结构,续存 10 g 肥料的高度约为 2.06 cm。

2.2 穴施肥装置仿真

为保证穴施肥性能,对穴施肥装置成穴性进行仿真试验。试验以吉农 4 号肥为研究对象,肥料颗

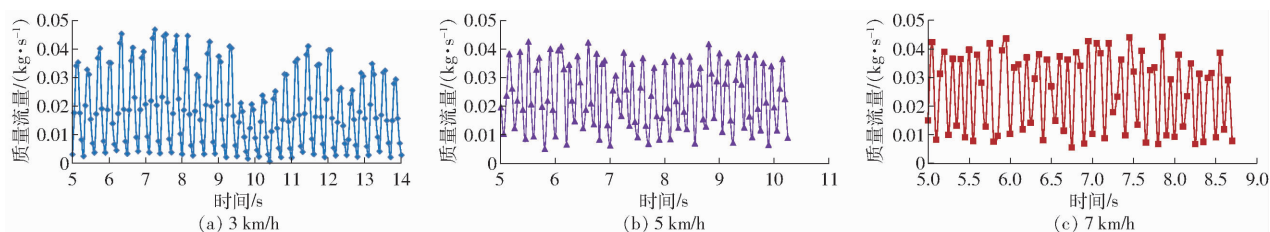


图 6 穴施肥量仿真曲线

Fig. 6 Simulated curves of hole fertilization

穴施肥仿真试验数据表明,播种速度 3 km/h, 8.7 s 施肥 30 穴,平均穴距 24.90 cm;播种速度 5 km/h 时, 5 s 施肥 30 穴,平均穴距 23.79 cm;播种速度 7 km/h 时, 3.6 s 施肥 30 穴,平均穴距 23.28 cm。穴施肥仿真曲线表明,速度 3 km/h 时,波谷接近于零,表明肥料成穴性显著,随着速度上升,波谷波动较大,但波峰波谷分界显著,试验结果表明,在播种速度 $3 \sim 7$ km/h 时,鸭嘴阀成穴性能较好,随着播种机速度的增加,成穴性能逐渐减弱。

3 穴施肥控制系统设计

3.1 穴施肥控制算法

玉米穴施肥是将肥料成穴施入距穴播种子一定间距的位置,肥料成穴位于种子侧下方。肥料施用位置不同,直接影响增产效果和肥料利用率。穴施肥时肥料与种子垂直距离 h_2 、水平距离 a 和播深是决定施肥位置的主要参数 [27-30], h_2 由排种口和排肥口的安装位置决定, a 可由穴施肥控制算法调节,播深由免耕播种机的开沟深度决定。种肥位置分布如图 7 所示。

图中 h_1 为排种口与排种轮底部垂直距离; n_1 为排种盘转速; σ 为种子的投种角度; r 为排种盘半径; H_1 为排种轮底部与种沟距离; H_2 为排肥口底部与肥

粒平均密度为 1.22 g/cm³,等效直径为 4.35 mm,肥料颗粒基本呈圆形,球形率 0.95 。应用颗粒系统仿真软件 EDEM,分析在施肥粒距 25 cm,穴施肥量 5 g,播种速度 3 、 5 、 7 km/h 条件下鸭嘴阀的成穴性能 [25]。

在播种速度 3 、 5 、 7 km/h 时,对应肥料颗粒流量分别为 0.01667 、 0.02778 、 0.03876 kg/s,鸭嘴阀开合周期分别为 0.30 、 0.18 、 0.13 s,鸭嘴阀向两侧旋转角度为 11.21° 。试验在 3 种工况下从第 5 秒开始,记录 30 穴的施肥量,分析穴施肥效果。试验中设置流量传感器,每隔 0.05 s 记录一次落到地面的肥料质量流量数据 [26],肥料质量流量随时间变化,每穴施肥量为肥料质量流量对时间积分,穴距为相邻两个质量流量峰值的间隔时间与传送带速度的乘积,穴施肥量仿真曲线如图 6 所示。

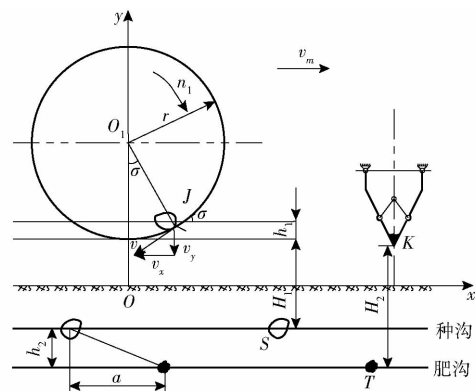


图 7 种肥位置分布图

Fig. 7 Distribution diagram of seeds and fertilizer location

沟距离; v_m 为播种机前进速度; S 为第 N 粒种子的位置; T 为第 N 粒种子穴施肥位置。排种器在 J 点开始投种,种子脱离排种口时水平速度和垂直速度分别为

$$\begin{cases} v_x = v_m - v \cos\sigma \\ v_y = -v \sin\sigma \end{cases} \quad (7)$$

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

种子从投种口落入种沟的运动时间 t_1 满足

$$H_1 + h_1 = v_y t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2$$

其中

$$h_1 = r(1 - \cos\sigma)$$

即
$$t_1 = [-v_y + \sqrt{v_y^2 + 2g(H_1 + h_1)}] / g \quad (8)$$

种子脱离排种口到落于种沟的位移为
$$S_1 = v_x t_1 - r \sin \sigma \quad (9)$$

穴施肥装置在 K 点开始施肥,忽略肥料间作用力和空气阻力,肥料脱离排肥口水平和垂直速度分别为

$$\begin{cases} v'_x = v_m \\ v'_y = 0 \end{cases} \quad (10)$$

肥料脱离排肥口落入地面的运动时间 t_2 满足
$$H_2 = \frac{1}{2} g t_2^2 \quad (11)$$

肥料脱离排肥口到落于肥沟上的位移为
$$S_2 = v'_x t_2 \quad (12)$$

排种口与排肥口的水平距离为 b ,种子脱离排种口与肥料脱离排肥口的时间间隔为 t_3 ,若 $\sigma = 0^\circ$,则 $h_1 = 0$,肥料与种子落于沟底的水平距离为

$$a = S_1 - S_2 + b + v_m t_3 \quad (13)$$

当 $t_3 = 0$ 时,肥料与种子落于沟底的最小水平距离为

$$a_{\min} = S_1 - S_2 + b \quad (14)$$

穴施肥控制系统可以通过控制 t_3 的值,实现肥料施用位置的有效调节。

玉米免耕播种每穴施肥量要综合分析考虑多种因素,包括种子特性、土壤条件、产量水平以及栽培方式等。每穴施肥量由外槽轮式排肥器和穴施肥装置联合控制,由槽轮旋转将肥料通过导肥管送入鸭嘴阀中,外槽轮式排肥器槽轮每转的排肥量为

$$q_1 = f_q L \gamma z \quad (15)$$

式中 f_q ——每个凹槽截面积, cm^2
 L ——槽轮有效工作长度, cm
 γ ——肥料密度, g/cm^3
 z ——凹槽个数

若每穴施肥量为 q ,则

$$n = \frac{60q}{t_2 q_1} \quad (16)$$

式中 n ——排肥轴转速, r/min

3.2 控制系统设计

系统采用台达 DVP-SX2 系列 PLC 控制器,控制量主要包括 2 个 100 kHz 高速脉冲输出接口,控制排种器和穴施肥控制装置的驱动电动机,2 个模拟输出接口控制外槽轮式排肥器和传送带驱动电动机;输入量主要包括 2 个 100 kHz 高速脉冲输入接口,检测排种器和穴施肥控制装置的工作速度,1 个 10 kHz 高速脉冲输入接口,检测穴播籽粒信号。控制系统硬件配置如表 1 所示。

系统软件在台达 WPLSoft 2.37 平台采用梯形

表 1 控制系统硬件配置	
Tab.1 Hardware configuration of control system	
硬件名称	规格型号
PLC CPU	台达 DVP20SX211T,24 VDC 供电, 8 DI/6 DO/4 AI/2 AO
触摸屏	台达 DOP-B07S411, 24 VDC 供电
排肥器驱动电动机	直流电动机,12 V,50 W
穴施肥装置驱动电动机	雷赛 57HS13,步距角 1.8°,转矩 0.9 N·m
穴施肥电动机驱动器	雷赛 M542M542-05,24 VDC 供电
排种器驱动电动机	步伺 86HBS120,步距角 1.8°,转矩 12 N·m
排种电动机驱动器	步伺 HBS860H,24 VDC 供电
播种检测传感器	力科 PT-20ML-10,24 VDC 供电
光纤放大器	欧姆龙 E3X-NA11,响应时间小于 400 μs

图开发控制程序,在 DOPSoft 2.00.04 平台开发监控系统程序。主要功能包括穴施肥工作参数录入、工作实时参数监测、穴施肥控制算法、驱动电动机控制、电动机速度检测、播种检测等。系统程序流程:系统初始化;穴施肥工作参数设定;穴施肥位置和穴施肥量控制算法;等待播种籽粒信号,当检测到播种籽粒信号,启动穴施肥控制装置,进行精量穴施肥^[31-33]。

4 台架试验

4.1 试验材料

为检验穴施肥控制系统性能和工作可靠性,进行了台架试验。试验台为自主研发的播种机性能检测试验装置,如图 8 所示。包括台架、传送带、电气控制系统、监控系统、传送带驱动电动机、勺轮式精密排种器、排种器驱动电动机、外槽轮式排肥器、穴施肥控制装置、穴施肥装置驱动电动机、播种检测传感器等。输送带上贴有强力网状双面胶带,以增加种子和肥料落入传送带时的摩擦力,防止种子和肥料弹跳,影响穴施肥性能检测。选用郑单 958 玉米种子和吉农 4 号肥料作为穴施肥控制系统性能检测试验样本。

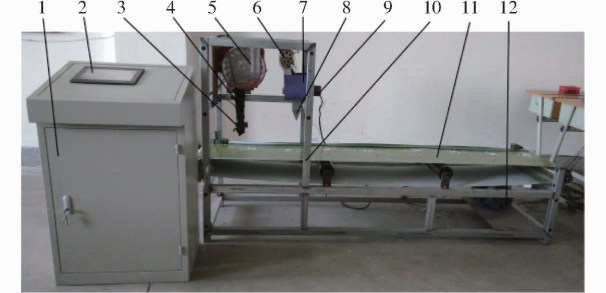


图 8 穴施肥性能试验台

Fig.8 Performance test bench of hole fertilization

1. 电气控制柜 2. 监控系统 3. 播种检测传感器 4. 导种管
5. 勺轮式排种器 6. 外槽轮式排肥器 7. 穴施肥控制装置 8. 鸭嘴阀 9. 穴施肥装置驱动电动机 10. 台架 11. 传送带 12. 传送带驱动电动机

4.2 试验方法

将排种器、排肥器和穴施肥控制装置固定在试验台上,通过控制传送带速度模拟田间作业。排种器投种角度 $\sigma=0^\circ$,排种口与传送带距离 $H_1=10\text{ cm}$,排种盘半径 12 cm ,肥料与种子垂直距离 $h_2=10\text{ cm}$,排肥口与传送带距离 H_2 为 $15\sim30\text{ cm}$,排种口与排肥口的水平距离为 $b=20\text{ cm}$,穴施肥控制系统设定每穴肥料中心点与种子水平距离 $a=5\text{ cm}$,排肥器轮外径 $d=6.8\text{ cm}$,凹槽截面积 0.188 cm^2 ,槽轮有效工作长度 $L=1.5\text{ cm}$,凹槽个数 9 个,排肥器每转排肥量 3.1 g 。播种实际粒距为 L_2 ,每穴施肥量 $q_2=5\text{ g}$,每穴肥料中心点的距离为 L_3 ,每穴肥料实际质量为 q_3 ,则穴距精度

$$y_1 = \left(1 - \frac{|L_3 - L_2|}{L_2}\right) \times 100\% \tag{17}$$

穴施肥量精度

$$y_2 = \left(1 - \frac{|q_3 - q_2|}{q_2}\right) \times 100\% \tag{18}$$

按照试验要求,系统运行后,穴播种子和肥料以一定的间距落到运行的传送带上,停机后,人工测量穴播施肥量和穴播位置,检测穴施肥控制系统性能。

4.3 试验结果与分析

播种机行进速度 v_m 、鸭嘴阀旋转角度 $\Omega=2\beta$ 、排肥口安装高度是影响穴施肥性能的重要参数,将其作为试验的 3 个因素,根据试验装置特点,连杆 l_{CD} 取 30 mm ,各因素变化范围:播种机行进速度为 $3\sim7\text{ km/h}$,鸭嘴阀旋转角为 $26.56^\circ\sim37.71^\circ$,排肥口安装高度为 $15\sim30\text{ cm}$ 。每次试验测量 4 m 施肥数据,每次试验重复 3 次取平均值作为试验指标。试验因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码
Tab.2 Coding for factors

编码	因素		
	行进速度	旋转角	安装高度
	$v_m/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$\Omega/(^\circ)$	H/cm
1.682	7	37.71	30
1	6.19	35.45	26.96
0	5	32.14	22.50
-1	3.81	28.83	18.04
-1.682	3	26.56	15

根据试验设计原理进行三元二次回归正交旋转组合设计试验,试验方案与结果如表 3 所示。 A 、 B 、 C 为因素编码值。

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行回归分析,确定试验指标在不同因素影响下的变化规律。穴距精度和穴施肥量精度回归方程显著性分析结果如表 4 所示。

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Test scheme and results

试验 序号	A	B	C	穴距精度	穴施肥量精度
				$y_1/\%$	$y_2/\%$
1	-1	-1	-1	96.40	90.80
2	1	-1	-1	91.60	86.60
3	-1	1	-1	98.40	92.00
4	1	1	-1	90.80	88.20
5	-1	-1	1	93.20	87.80
6	1	-1	1	88.00	86.20
7	-1	1	1	91.60	88.20
8	1	1	1	88.80	84.80
9	-1.682	0	0	96.80	91.20
10	1.682	0	0	88.40	84.80
11	0	-1.682	0	90.80	88.80
12	0	1.682	0	95.60	87.20
13	0	0	-1.682	96.20	91.20
14	0	0	1.682	89.20	84.80
15	0	0	0	95.20	90.60
16	0	0	0	94.80	91.20
17	0	0	0	96.40	90.40
18	0	0	0	95.20	89.80
19	0	0	0	94.40	91.20
20	0	0	0	94.80	91.60
21	0	0	0	95.60	90.80
22	0	0	0	93.60	90.20
23	0	0	0	93.20	91.40

表 4 方差分析
Tab.4 Variance analysis

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
穴距精度	模型	178.70	9	19.86	14.47	<0.000 1
	残差	17.83	13	1.37		
	失拟	10.15	5	2.03	2.12	0.165 4
	误差	7.68	8	0.96		
	总和	196.53	22			
穴施肥量精度	模型	119.47	9	13.27	25.89	<0.000 1
	残差	6.67	13	0.51		
	失拟	3.79	5	0.76	2.10	0.167 2
	误差	2.88	8	0.36		
	总和	126.14	22			

由方差分析结果可知,失拟项 P 值大于 0.05 ,说明回归方程拟合较好,模型 P 值小于 $0.000\ 1$,说明方程显著,与试验数据拟合较好。进而得出相应的回归方程为

$$y_1 = 10.525 + 2.005v_m + 4.394\Omega + 1.425H - 0.013v_m\Omega + 0.104v_mH - 0.017\Omega H - 0.608v_m^2 - 0.059\Omega^2 - 0.041H^2 \tag{19}$$

$$y_2 = -44.941 + 5.051v_m + 6.437\Omega + 2.454H - 0.045v_m\Omega + 0.071v_mH - 0.032\Omega H - 0.669v_m^2 - 0.086\Omega^2 - 0.047H^2 \tag{20}$$

为直观分析试验指标与各因素之间的关系,运用 Design-Expert 8.0.6 软件得到穴距精度和穴施肥量精度响应曲面,如图 9 所示。

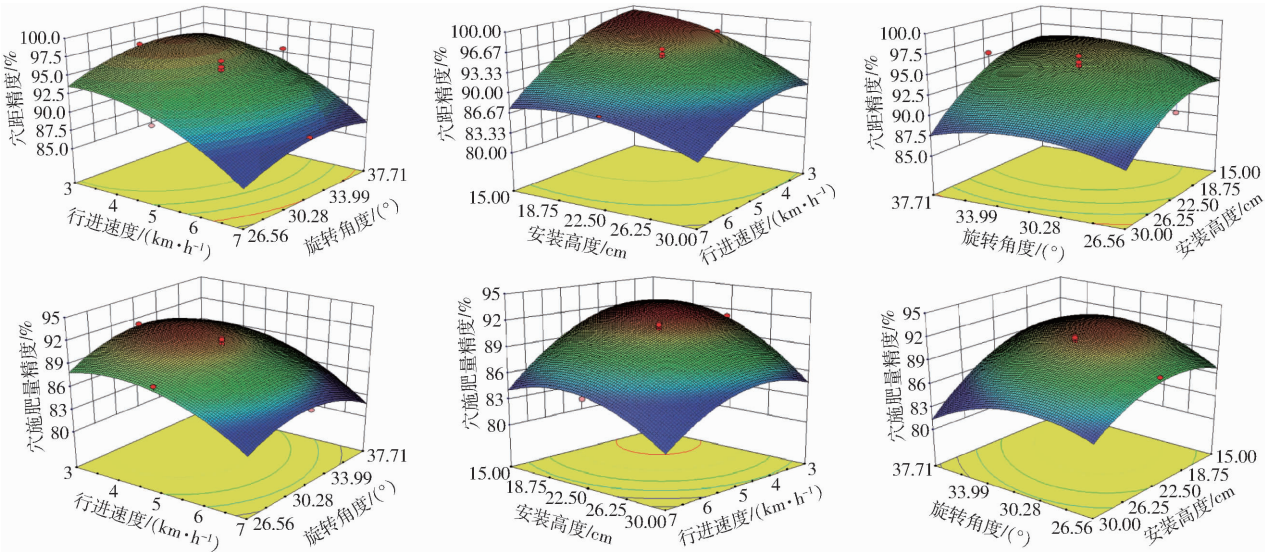


图9 试验因素对各指标的影响

Fig.9 Influences of experimental factors on indicators

根据上述回归方程和响应曲面可知,播种机行进速度、鸭嘴阀旋转角度和安装高度存在交互作用。穴距精度和穴施肥量精度均受行进速度和安装高度影响最为显著,其交互作用影响较大,为主要因素;旋转角度对系统影响较小,与其他两个因素之间存在一定的交互作用。

4.4 参数优化

为发挥穴施肥控制系统最佳工作性能,对试验因素进行优化设计。建立参数化数学模型,结合试验因素的实际工作情况,对穴距精度和穴施肥量精度的回归方程进行分析,得到其非线性规划的数学模型为

$\max y_1$

$\max y_2$

$s. t.$

$v_m = 7 \text{ km/h}$

$26.56^\circ \leq \Omega \leq 37.71^\circ$

$15 \text{ cm} \leq H \leq 30 \text{ cm}$

$0 < y_1(v_m, \Omega, H) \leq 100\%$

$0 < y_2(v_m, \Omega, H) \leq 100\%$

(21)

当播种机行进速度为 7 km/h, 旋转角为 33.37°, 安装高度为 17.30 cm 时, 穴距精度和穴施肥量精度综合效果最优, 分别为 86.03% 和 84.60%。

5 田间试验

为了验证穴施肥控制装置田间工作性能和可靠性, 2017 年 4 月和 10 月在辽宁省新民市公主屯镇马屯村玉米田地进行了田间试验, 如图 10 所示。穴施肥控制装置安装在 2BMGYF-2 型免耕精密播种机上, 拆除覆土轮, 便于测量穴施肥装置的穴距, 播

种开沟深度 40 ~ 70 mm, 施肥开沟深度种下 30 mm, 与播种开沟器侧向距离 50 mm。鸭嘴阀顶端与缺口圆盘底端距离 17.30 cm, 鸭嘴阀旋转角 33.37°, 排种器投种角度 $\sigma = 0^\circ$, 排种口与种沟距离 $H_1 = 30 \text{ cm}$, 排种口与排肥口的水平距离为 $b = 30 \text{ cm}$ 。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 m³/m³, 在 0 ~ 40℃ 时精度为 $\pm 0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$; 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; 卷尺、皮尺、直尺、蓄电池。测得试验留茬地的土壤含水率的平均值为 19.16%, 15 cm 深土壤紧实度均值为 1 370 kPa。试验选用郑单 958 玉米种子和洋丰复合肥料, 播种粒距为 25 cm, 每穴施肥量 $q_2 = 10 \text{ g}$, 分别在播种机行进速度 3、5、7 km/h 下进行 9 次试验, 每次试验测试距离为 10 m, 测量播种粒距和施肥穴距, 计算出相邻两穴种子平均粒距和肥料平均穴距, 每穴施肥量为施肥总量与施肥总穴数的比值。



图10 田间试验

Fig.10 Field test

穴施肥试验数据取平均值,试验验证结果如表 5 所示。

表 5 试验验证结果
Tab.5 Verification of testing result

行进速度/ (km·h ⁻¹)	播种 粒距/cm	施肥 穴距/cm	穴施 肥量/g	穴距 精度/%	穴施肥量 精度/%
3	23.83	22.30	9.23	93.58	92.30
5	27.35	25.10	10.97	91.77	90.30
7	28.61	24.25	8.72	84.76	87.20

可见,在最优的穴施肥装置参数作用下,速度在 3~7 km/h 时,穴施肥性能受系统参数变化影响较小,穴施肥精度随着播种机行进速度的增加略有下降,穴距精度不小于 84.76%,穴施肥量精度不小于 87.20%。

6 结论

(1)为实现玉米精量穴施肥农业技术要求,设计了穴施肥控制装置。根据其结构特点和安装要求,对穴施肥装置的结构参数进行了优化设计,使其能够在 3~7 km/h 速度下实现精准精量穴施肥功

能,满足免耕播种施肥的农艺要求。
(2)应用 EDEM 软件对鸭嘴阀的成穴性能进行了仿真试验。试验在播种速度 3、5、7 km/h 时,肥料平均穴距分别为 24.9、23.79、23.28 cm,表明在播种速度 3~7 km/h 时,鸭嘴阀成穴性能较好,随着播种机速度的增加,成穴性能逐渐减弱。
(3)设计了穴施肥控制算法。穴施肥控制系统通过控制种子脱离排种口与肥料脱离排肥口的时间间隔 t_3 ,实现对肥料与种子水平距离 a 的适时调节,保证穴施肥位置的精确性。通过控制排肥轴转速和鸭嘴阀的开合频率,实现穴施肥量调节,保证穴施肥量的精度。
(4)进行穴施肥装置性能优化试验,运用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,利用响应面法对回归方程数学模型进行多因素优化,得到播种机行进速度 7 km/h 时最优参数为:鸭嘴阀旋转角为 33.37°,安装高度为 17.30 cm。田间试验表明,在速度 3~7 km/h 范围内,鸭嘴阀旋转角为 33.37°,安装高度为 17.30 cm,穴施肥控制装置的穴距精度不小于 84.76%,穴施肥量精度不小于 87.20%。

参 考 文 献

1 杨海涛. 保护性耕作不同施肥模式下土壤特性与春玉米生长发育研究 [D]. 北京:中国农业大学,2005.
YANG Haitao. Researches on soil characteristics and growth of spring corn under different fertilization mode of conservation tillage [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)

2 陆景陵,陈伦寿,曹一平. 科学施肥必读 [M]. 北京:中国林业出版社,2008:181-206.

3 ALEX M, BRETT W, TIHOMIR A, et al. Future directions of precision agriculture[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(1): 7-23.

4 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 163-169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 163-169. (in Chinese)

5 王庆杰,李洪文,何进,等. 并列组合式种肥分施防堵装置的设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 73-77.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on paratactic separate application of fertilizer and seed mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 73-77. (in Chinese)

6 苑严伟,李树君,方宪法,等. 氮磷钾配比施肥决策支持系统 [J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 240-244, 223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130841&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.041.
YUAN Yanwei, LI Shujun, FANG Xianfa, et al. Decision support system of N,P and K ratio fertilization [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 240-244, 223. (in Chinese)

7 伟利国,张小超,苑严伟,等. 2F-6-BP1 型变量配肥施肥机的研制与试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 14-18.
WEI Liguó, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment of 2F-6-BP1 variable rate assorted fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 14-18. (in Chinese)

8 张勋. 玉米穴播穴施肥装置的设计研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.
ZHANG Xun. Research on the equipment of hill-drop drill and fertilization [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)

9 刘阳春. 变量配肥施肥精准作业装备关键技术研究 [D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2012.
LIU Yangchun. Key technology on variable rate application system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2012. (in Chinese)

10 李文军,杨奇勇,杨基峰,等. 长期施肥下洞庭湖水稻土氮素矿化及其温度敏感性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 261-270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171132&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.032.
LI Wenjun, YANG Qiyong, YANG Jifeng, et al. Nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity in paddy soils in Dongting lake region of China under long-term fertilization [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 261-270. (in Chinese)

11 花可可,朱波,杨小林,等. 长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10):

- 167-174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141026&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.026.
- HUA Keke, ZHU Bo, YANG Xiaolin, et al. Effects of long-term different fertilization on soil aggregates and organic carbon fractions on sloping upland of purple soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 167-174. (in Chinese)
- 12 银敏华,李援农,李昊,等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):129-138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160617&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017.
- YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):129-138. (in Chinese)
- 13 李平,郎漫,李煌姗,等. 不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(7):1326-1332.
- LI Ping, LANG Man, LI Huangshan, et al. Effects of different fertilization on nitrification and mineralization in black soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(7):1326-1332. (in Chinese)
- 14 李坤,袁文胜,张文毅,等. 玉米施肥技术与施肥机械的研究现状及趋势[J]. 农机化研究,2017,39(1):264-268.
- LI Kun, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. Research status and development trend of corn fertilizing technology and fertilizing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1):264-268. (in Chinese)
- 15 张勋,朱瑞祥,陈克克. 穴播穴施肥装置控制系统的设计[J]. 农机化研究,2009,31(4):61-63.
- ZHANG Xun, ZHU Ruixiang, CHEN Keke. Design of the control system for fertilizing-seeding device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4):61-63. (in Chinese)
- 16 李沐桐,温翔宇,周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):37-43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.006.
- LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):37-43. (in Chinese)
- 17 胡红,李洪文,王庆杰,等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):26-35.
- HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24):26-35. (in Chinese)
- 18 开鲁县吉祥农机制造有限责任公司. 直插式中耕穴施肥机:201410411412.4[P]. 2014-12-03.
- 19 张培坤. 起垄施肥机用穴施肥机构:201610466114.4[P]. 2016-11-23.
- 20 包文育,林静,霍春明,等. 2BG-2型免耕播种机横向运动稳定性分析[J]. 沈阳农业大学学报,2009,40(3):370-372.
- BAO Wenyu, LIN Jing, HUO Chunming, et al. The stability of crosswise movement of type 2BG-2 no-till planter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(3):370-372. (in Chinese)
- 21 叶秉良,李丽,俞高红,等. 蔬菜钵苗移栽机取苗臂凸轮机构的设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(8):21-29.
- YE Bingliang, LI Li, YU Gaozhong, et al. Design and test on cam mechanism of seedling pick-up arm for vegetable transplanter for pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8):21-29. (in Chinese)
- 22 林静,刘安东,李宝筏,等. 2BG-2型玉米垄作免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(6):43-46.
- LIN Jing, LIU Andong, LI Baofa, et al. 2BG-2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):43-46. (in Chinese)
- 23 林静,钱巍,李宝筏,等. 2BG-2型玉米垄作免耕播种机播种深度数学模型的仿真与验证[J]. 农业工程学报,2015,31(9):19-24.
- LIN Jing, QIAN Wei, LI Baofa, et al. Simulation and validation of seeding depth mathematical model of 2BG-2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9):19-24. (in Chinese)
- 24 吕昊. 外槽轮排肥器优化设计新方法研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
- LÜ Hao. A new kind of method for the optimized design of outer groove-wheel fertilizer apparatuses[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- 25 JONATHAN H. Using discrete element modeling to evaluate material distribution using spinner-disc spreaders[D]. Auburn: Auburn University, 2012.
- 26 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)
- 27 周文琪,王金武,潘振伟,等. 液态施肥机分配机构空间凸轮设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(11):64-69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.010.
- ZHOU Wenqi, WANG Jinwu, PAN Zhenwei, et al. Design and test of spatial cam for liquid fertilizer assigned machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11):64-69. (in Chinese)
- 28 孙恒,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,1994:72-98.
- 29 华大年. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2013:11-35.
- 30 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:60-64.
- 31 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(2):173-182.
- 32 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(3):347-356.
- 33 GREGG A, TREMONT G A, DEER C J L. Planter monitor system and method: US8078367B2[P]. 2011-12-13.