

气力辅助式对种穴施肥装置设计与试验

李贵蓉^{1,2} 苏欣彤¹ 周鑫¹ 张旭^{3,4} 王庆杰^{1,2} 王超^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083;

3. 辽宁省农业机械化研究所, 沈阳 110161; 4. 辽宁省农业机械装备再制造创新重点实验室, 沈阳 110161)

摘要: 针对玉米播种同步穴施肥过程中存在种-肥施用位置和施肥量不精准、穴施肥装置施肥成穴性较差等问题, 设计一种气力辅助式对种穴施肥装置。依据检测的落种信号, 气力辅助式间歇排肥装置将从外槽轮式排肥器排出的连续肥料转换为间歇肥团, 并施用在距种子一定位置处。阐述该装置结构组成和工作原理, 对其中关键结构尺寸进行理论分析, 分析气流对挡板的作用, 验证该装置的理论可行性。基于 STM32 单片机开发气力辅助式对种穴施肥控制系统, 依据气力辅助式对种穴施肥工作方式, 构建适用于高频间歇施肥场景的对种穴施肥控制模型, 并设计硬件电路和控制程序。基于 EDEM 离散元进行仿真试验, 结果表明, 当前进速度为 3~7 km/h、穴距为 300 mm 时, 平均施肥长度为 69.8~169.1 mm, 施肥长度变异系数为 3.9%~11.9%, 排肥量误差为 1.7%~5.5%。通过观察仿真过程中气力辅助式间歇排肥装置内部肥料运动状态, 确定挡板开启持续时间为 100 ms 时排肥效果最佳。台架试验结果表明, 单独穴施肥时平均施肥长度为 75~187 mm, 施肥长度变异系数为 5.3%~12.4%, 排肥量误差为 5.6%~12.8%, 穴距误差为 2.5%~6.5%。对种穴施肥结果, 平均种-肥纵向间距为 14~113 mm。田间试验结果表明, 当施肥量为 5 g/穴时, 平均施肥长度为 93~189 mm, 平均种-肥纵向间距为 34~119 mm, 种-肥同步性较好, 满足玉米播种同步穴施肥作业要求, 试验结果与仿真试验值和台架试验值基本一致, 验证了仿真试验和台架试验的可靠性。

关键词: 穴施肥装置; 种-肥同步施用; 气力辅助式

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0191-10

OSID:



Design and Experiment of Pneumatic Assisted Hole Fertilization Targeting Seed Position Device

LI Guirong^{1,2} SU Xintong¹ ZHOU Xin¹ ZHANG Xu^{3,4} WANG Qingjie^{1,2} WANG Chao^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. Liaoning Provincial Institute of Agricultural Mechanization, Shenyang 110161, China

4. Key Laboratory of Remanufacture and Innovation of Agricultural Machinery and Equipment, Liaoning Province, Shenyang 110161, China)

Abstract: Aiming at the maize sowing synchronous hole fertilization process exists in the seed - fertilizer application position and the amount of fertilizer application is not accurate, poor hole formation of fertilizer by hole application devices and other difficult problems, a kind of pneumatic assisted hole fertilization targeting seed position device was designed. Based on the detected seed drop signal, the pneumatic assisted intermittent fertilizer discharge device converted the continuous fertilizer discharged from the outer chute wheel fertilizer discharger into intermittent fertilizer mass and applied it at a certain position from the seed. The structural composition and working principle of the device were described, the key structural dimensions of which were theoretically analyzed, and the role of airflow on the baffle was analyzed to verify the theoretical feasibility of the device. Based on STM32 microcontroller, a pneumatic assisted hole fertilization targeting seed position control system was developed. Based on the working mode of pneumatic assisted hole fertilization targeting seed position, a hole fertilization targeting

收稿日期: 2024-01-23 修回日期: 2024-04-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500600)

作者简介: 李贵蓉(2000—), 男, 硕士生, 主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: 1670981038@qq.com

通信作者: 王庆杰(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

seed position control model applicable to high frequency intermittent fertilizer application scenario was constructed, and the hardware circuit and control program were designed. In order to study the performance of hole formation and fertilizer discharge stability of pneumatic assisted intermittent fertilizer discharge device, a discrete element simulation test was conducted based on EDEM. When the forward speed was 3 ~ 7 km/h, the average length of fertilizer application was 69.8 ~ 169.1 mm, the coefficient of variation of fertilizer application length was 3.9% ~ 11.9%, and the error of fertilizer discharge ranged was 1.7% ~ 5.5%. By observing the movement state of fertilizer inside the pneumatic assisted intermittent fertilizer discharge device during the simulation process, it was determined that the fertilizer discharge effect was the best when the baffle opening duration was 100 ms. Bench test was carried out, the average length of fertilizer applied in individual holes was 75 ~ 187 mm, the coefficient of variation of fertilizer length was 5.3% ~ 12.4%, the error of fertilizer discharge was 5.6% ~ 12.8%, and the error of hole spacing was 2.5% ~ 6.5%. When targeting seed position hole application was carried out, the average seed - fertilizer longitudinal spacing was 14 ~ 113 mm. The field experiment results showed that the average fertilization length was 93 ~ 189 mm and the average seed - fertilizer longitudinal spacing was 34 ~ 119 mm when the fertilizer amount was 5 g/hole. Seed - fertilizer synchronization was good, meeting the maize sowing synchronous hole fertilization operation requirements. The test results were basically consistent with the simulation experiment and the bench test, which verified the reliability of the simulation experiment and the bench test.

Key words: hole fertilization device; simultaneous seed - fertilizer application; pneumatic assisted type

0 引言

玉米是我国主要粮食作物,在我国农业生产和国民经济发展中具有重要地位^[1-2]。合理施用肥料可以提高玉米产量,是实现农业高产和高效的重要保证^[3-6]。但由于施肥技术和施肥装置落后等原因导致我国化肥过量施用,全国玉米主要生产区过量施肥程度均值超过 50%^[7]。玉米肥料施用过程中普遍采用条施,施肥量大,肥料利用率低,生产成本低,对环境不友好^[8]。化肥盲目过量施用,导致农作物产量品质降低、土壤板结退化、肥力下降和水体严重污染^[9-11]。

精准施肥是实现农业可持续发展的重要途径^[12]。玉米穴施肥技术是指在玉米种子或植株的侧下方或正下方一定距离施用定量穴状肥料,可提高肥料利用率和减少玉米生产成本^[13-17]。工作性能高效且可靠的穴施肥装置是推广穴施肥技术的关键。国外关于颗粒穴施肥装置研究相对较少,主要以穴施液态肥为主。DA SILVA 等^[18]设计了一种打孔注射液态肥装置,土壤扎孔和液体肥料注入土壤相结合,减小对根系、作物残茬和土壤扰动,提高植物对肥料利用率。杨杰等^[19-20]设计了一套可以水平和高低调节的精准穴施肥试验机构,可适应地形起伏同时保证扎穴点与植株的合适距离,通过仿真试验分析鸭嘴部件扎穴过程运动机理及受力情况。刘正道等^[21-22]设计了一种腔盘式精量穴施肥装置,通过有槽转盘从肥箱回转取肥,同时出肥口处连接有进气管,使肥料快速下落。都鑫等^[23]设计了一种倾斜梯形孔式定量穴排肥器,气流通过进气孔作用

于排肥孔底部,肥料颗粒在重力、离心力和外部气流的辅助作用下快速投出。刘正道等^[24]基于行星轮系设计了自动对种穴施肥系统,通过行星轮系根据落种、落肥信息调节排种盘,实现了自动对种穴施肥。廖庆喜等^[25]根据油菜种植施肥农艺设计了一种油菜侧深穴施肥装置,通过仿真试验分析确定了成穴性能较优的参数组合。

玉米穴施肥技术对机械自动化水平要求高,国内穴施肥装置研究大部分还处于试验阶段,在生产中尚未见实用、成熟、大面积推广的穴施肥装备。本文结合玉米精量播种穴施肥特点,设计一种气力辅助式对种穴施肥装置,在现有连续排肥装置的基础上加装气力辅助式间歇排肥装置,实现肥料成团状快速间歇排出,配合玉米对种穴施肥控制系统,实现对种穴施肥,以期对玉米播种同步穴施肥技术提供参考。

1 整体结构与工作原理

气力辅助式对种穴施肥装置主要由气力辅助式间歇排肥装置、电动外槽轮式排肥器、肥箱、排肥管、电磁阀、空气压缩机和控制单元等构成。装置组成与工作流程如图 1 所示,装置工作时,依据作业速度,设置电动外槽轮式排肥器排肥流量。肥料从电动外槽轮式排肥器排出,连续地落入气力辅助式间歇排肥装置。当种子检测传感器未检测到落种信号时,在装有复位扭转弹簧的挡板阻碍下,肥料在气力辅助式间歇排肥器壳壁与挡板形成的积肥腔处积聚,形成肥团。当检测到落种信号后,控制单元依据对种穴施肥控制模型,延迟一定时间

后控制电磁阀打开,高速气流从喷嘴喷出,冲击挡板,使挡板打开,肥团在自身重力以及气流推力作用下离开导肥管,落在种子附近,一定时间后电磁阀关闭,挡板在复位弹簧作用下复位,继续积聚肥料等待下一次气流冲击挡板,由此实现对种穴施肥。

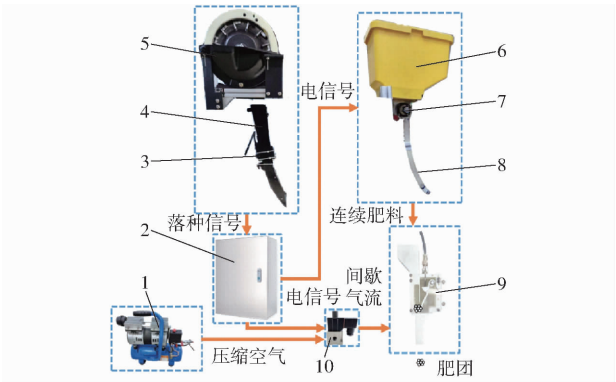


图 1 气力辅助式对种穴施肥装置组成示意图

Fig.1 Schematic of composition of pneumatic assisted hole fertilization targeting seed position device

1. 空气压缩机 2. 控制单元 3. 种子检测传感器 4. 导种管
5. 指夹排种器 6. 肥箱 7. 电动外槽轮式排肥器 8. 排肥管
9. 气力辅助式间歇排肥装置 10. 电磁阀

2 关键部件设计

2.1 气力辅助式间歇排肥装置设计

如图 2 所示,气力辅助式间歇排肥装置主要由壳体、挡板、复位扭转弹簧、喷嘴、盖板、接肥漏斗和导肥管等组成。气力辅助式间歇排肥装置的接肥漏斗通过排肥管与上方的电动外槽轮式排肥器出肥口连接。喷嘴的安装位置上下可调节,壳体的喷嘴利用螺栓螺母紧固。弹簧弹力调节块可以上下滑动并利用螺栓螺母紧固,用于调节弹簧作用在挡板的弹力。选定的喷嘴口位置正对于挡板凸起结构,可避免气流直接冲击肥料,造成肥料弹跳和排肥受阻。

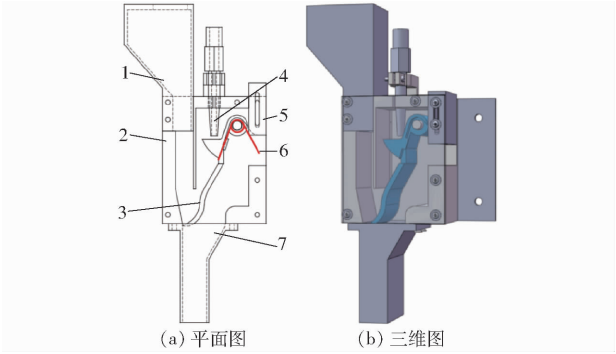


图 2 气力辅助式间歇排肥装置结构图

Fig.2 Structure diagrams of pneumatic assisted intermittent fertilizer application device

1. 接肥漏斗 2. 壳体 3. 挡板 4. 喷嘴 5. 弹簧弹力调节块
6. 复位扭转弹簧 7. 导肥管

2.1.1 挡板受力分析

在喷嘴无气流喷出时,为了阻止肥料下落,扭转弹簧初始弹力产生的扭矩需克服挡板重力以及肥料对挡板的作用力。对挡板进行受力分析,如图 3 所示。为方便计算,将挡板看作直杆,挡板重力和肥料重力对挡板扭矩为

$$M_1 = F_2 L_b \cos \theta \sin \alpha + F_2 L_b \sin \theta \cos \alpha + m_1 g \frac{L_a}{2} \sin \alpha$$

(1)

其中

$$F_2 = \frac{m_2 g}{\cos \theta}$$

(2)

- 式中
- M_1 ——挡板重力和肥料重力对挡板扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
- F_2 ——肥料对挡板的作用力, N
- L_a ——挡板长度,取 0.094 m
- L_b ——肥料对挡板力的作用点到挡板旋转轴的距离,取 0.091 m
- m_1 ——挡板质量,取 0.042 kg
- g ——重力加速度,取 9.8 N/kg
- θ ——肥料对挡板的作用力与竖直方向上的夹角,取 30°
- α ——挡板与竖直方向夹角,取 25.5°
- m_2 ——肥料质量,取 0.007 g

将数据代入式(1)、(2)得 M_1 为 $0.014 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

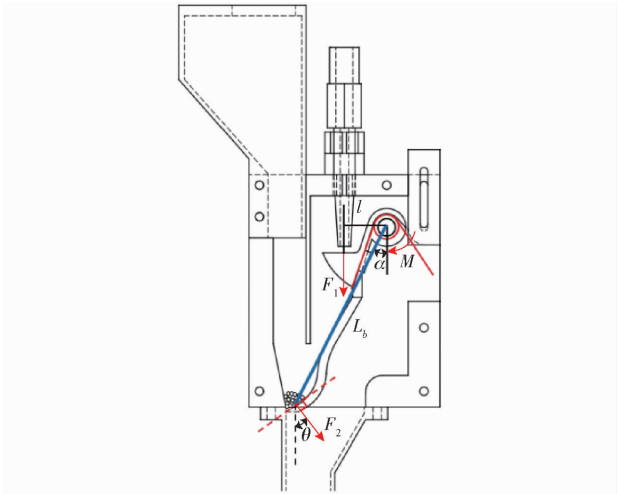


图 3 受力分析

Fig.3 Force analysis diagram

2.1.2 扭转弹簧设计

考虑到肥料下落时对挡板的冲击,取初始弹簧对挡板扭矩不小于 $0.016 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。扭力弹簧是一种储存扭矩的弹簧,当外力未超过弹簧许用应力时,扭转弹簧扭矩 M 与扭转弹簧扭转角 φ 之间呈线性相关,即

$$M = k_T \varphi$$

(3)

- 式中
- k_T ——扭转弹簧扭转刚度, $\text{N} \cdot \text{m}/(^\circ)$
- 扭转弹簧一般主要承受转矩作用,所以在扭转

弹簧材料任意截面上只考虑弯矩,则有

$$k_T = \frac{Ed_s^4}{3670DN} \quad (4)$$

式中 E ——扭转弹簧材料弹性模量,取 200 GPa

d_s ——扭转弹簧线径,取 0.001 m

D ——扭转弹簧中径,取 0.01 m

N ——扭转弹簧有效圈数,取 3

代入数据计算得 $k_T = 0.0018 \text{ N} \cdot \text{m}/(^{\circ})$ 。

挡板未被气流冲击时,扭转弹簧扭转角 φ 为 10° ,扭转弹簧对挡板的扭矩 $M = k_T \varphi = 0.018 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。弹簧对挡板产生的扭矩能够阻止挡板打开,阻止肥料下落。

2.1.3 气流冲击挡板受力分析

为了能让气流顺利推开挡板使肥料下落,需计算验证气体对挡板产生的作用力是否能够克服阻力让挡板打开,喷嘴直径为 4 mm,一般自动化设备的空气压缩机气罐压力为 0.3 ~ 0.8 MPa。根据工程流体力学理论知识,为了简化计算,假设储气罐在排气过程为绝热过程,气罐温度为 3°C ,排气口没有扩张;排气过程中,储气罐内近似为准稳态,出口为从罐内向罐外的最小截面。排气孔打开瞬间,气罐内部参数为滞止参数,即滞止压力 P_0 为 0.3 ~ 0.8 MPa,滞止温度 T_0 为 303 K,气流喷入大气,外部压力为一个大气压,若出口压力等于外部环境压力,则有

$$\frac{P}{P_0} < \frac{P_*}{P_0} = 0.528 \quad (5)$$

式中 P_* ——临界压力,MPa

P ——外部压力,取 0.1 MPa

对于直管或渐缩管,出气口处流速只能达到声速,而且不能继续增大流速,该现象为阻塞现象,此时

$$\frac{T_*}{T_0} = \frac{2}{k+1} = 0.8333 \quad (6)$$

式中 T_* ——临界温度,K

k ——绝热指数,对于空气取 1.4

求出口温度 $T_e = T_* = 0.8333 T_0 = 252.5 \text{ K}$ 。

故出气口气流速度为

$$V = c_e = \sqrt{kRT_e} = 318.5 \text{ m/s} \quad (7)$$

式中 c_e ——当地声速,m/s

V ——出气口流速,m/s

R ——气体常数,空气取 $287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

气流冲击挡板简化图如图 4 所示。

沿竖直方向列动量方程为

$$-F = \rho \frac{\pi d^2}{4} V(0 - V) \quad (8)$$

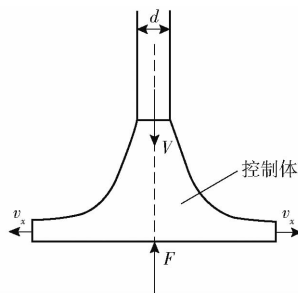


图 4 气流冲击挡板简化图

Fig. 4 Simplified diagram of airflow impact baffle

式中 F ——挡板对流体的作用力,N

ρ ——空气密度,取 $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$

d ——出气口直径,取 0.004 m

挡板所受气流冲击力为

$$F_3 = F = \frac{\pi d^2}{4} \rho V^2 = 1.64 \text{ N} \quad (9)$$

式中 F_3 ——流体对挡板的作用力,N

需要注意的是实际气流对挡板的作用力大于通过简化模型计算得到的气流对挡板的作用力。

气流冲击挡板产生的扭矩为

$$M_2 = F_3 l = 0.033 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (10)$$

式中 M_2 ——气流冲击挡板产生的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

l ——喷嘴中心与挡板旋转中心的水平距离,取 0.02 m

气流能够推动挡板应满足

$$M_2 > M - M_1 \quad (11)$$

代入数据计算可知满足式(11),通过 3D 打印试制模型初步试验验证可知,气流冲击挡板产生的作用力能够使挡板顺利打开。

2.2 外槽轮排肥器排肥流量计算

外槽轮式排肥器因其结构简单可靠、实用性强、成本较低而被广泛应用^[26]。张小成^[27]对外槽轮排肥器排肥量进行了研究,外槽轮式排肥器排肥量计算涉及多个因素,外槽轮式排肥器排肥性能与肥料种类、含水率、颗粒均匀度、颗粒尺寸、排肥轴转速稳定性、排肥槽槽数、排肥槽的有效工作长度等都关系。计算较为复杂,一般实际使用试验法测得并调节外槽轮式排肥器排肥量。

选择外槽轮式排肥器时,所需外槽轮式排肥器排肥流量需为

$$Q = \frac{m_0 v}{s} \quad (12)$$

式中 Q ——排肥器流量,g/s

m_0 ——单穴肥料质量,g

v ——机具前进速度,m/s

s ——施肥间距,m

选定作业速度为 3 ~ 7 km/h。目前我国玉米种

肥施用以条施颗粒复合肥为主,采用穴式施肥方式可以适当降低施肥量,穴距为 200 ~ 300 mm,单穴肥料质量为 2 ~ 7 g^[21],代入式(12)计算得到排肥流量为 5.6 ~ 68.1 g/s。

3 控制系统设计

3.1 玉米对种穴施肥控制模型构建

在玉米播种同步穴施肥时,控制种-肥距离是实现种-肥精准施用的关键。排肥装置后置式对种穴施肥过程如图 5 所示,导种管与导肥管出口离地高度分别为 4、6 cm,玉米种子从导种管落到种沟,随后施用一定量的肥料在肥沟中,玉米种子和肥团在机具前进方向上的距离为 0,通过两者的横向(与机具前进方向垂直)偏置实现两者相隔一定距离。

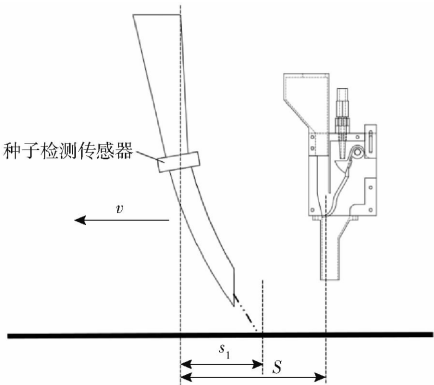


图 5 排肥装置后置式对种穴施肥示意图
Fig. 5 Schematic of hole fertilization targeting seed position by rear fertilizer discharge device

作业时,当控制单元接收到种子检测传感器检测的落种信号后,根据当前作业速度,在延时 t 后向继电器发送信号,继电器控制电磁阀开启一定时间,气流冲开挡板,肥团随气流一起喷出,为了使肥料与种子的距离满足作业要求(种子和肥料在机具前进方向上距离为 0,横向距离为 30 mm),控制器从接收到种子信号到发出开启电磁阀信号之间的延迟时间 t 应满足

$$t = \frac{S - s_1 + vt_1 - vt_2 - vt_3}{v} \quad (13)$$

式中 t ——延迟时间,s

t_1 ——种子从种子检测传感器处下落时间,取 0.13 s

t_2 ——肥料从积肥腔处下落时间,取 0.23 s

t_3 ——喷肥滞后时间,在程序未添加设置延迟时间时,检测到落种信号到间歇机构挡板开启时间,经试验测得 0.06 s

S ——种子检测传感器检测落种点与积肥点的水平距离,取 0.45 m

s_1 ——种子检测传感器与种子落地点之间的水平距离,取 0.13 m

由于延时时间不能为负数,当 $t = 0$ s、 $v = 7$ km/h 时,为了实现种肥同步,由式(13)计算得 S 最小值为 0.441 m。

排肥装置前置式对种穴施肥过程如图 6 所示。

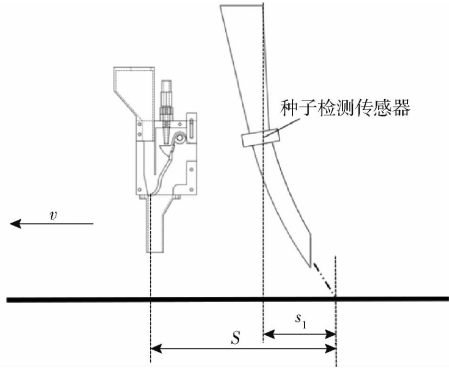


图 6 排肥装置前置式对种穴施肥示意图
Fig. 6 Schematic of hole fertilization targeting seed position by front fertilizer discharge device

控制器从接收到种子信号到发出开启电磁阀信号之间的延时时间 t 应满足

$$t = \frac{sk_s - (S - s_1 - vt_1 + vt_2 + vt_3)}{v} \quad (14)$$

机具开始工作时,能得到施肥的第 k_s 个种子, k_s 取 1 ~ 2,满足

$$sk_s \geq S - s_1 - vt_1 + vt_2 + vt_3 \quad (15)$$

由式(14)可知,由于施肥装置是检测到落种信号后才开始施肥,存在滞后性,采用排肥装置前置式对种穴施肥会导致机具刚开始作业的第 1 粒和第 2 粒玉米种子不能得到施肥。

3.2 控制系统硬件设计

控制系统以 STM32F103C8T6 单片机为控制核心,硬件组成如图 7 所示,主要由 STM32 单片机最小系统板、种子检测传感器、继电器、5 V 稳压模块、12 V 铅电池、24 V 开关电源、OLED 显示屏、按键、霍尔传感器(内嵌于直流无刷电机)等组成。

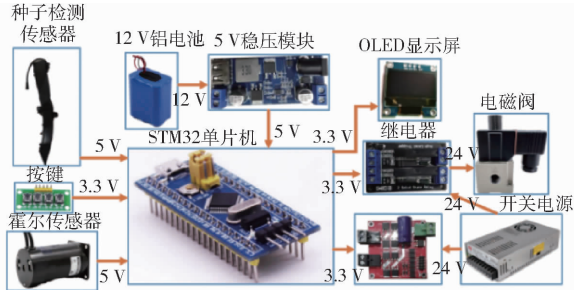


图 7 控制系统硬件组成图

Fig. 7 Diagram of control system hardware composition

控制系统中各部件所需要的电源电压分别为 24、5 V,24 V 电压由开关电源提供,5 V 电压

由 12 V 铝电池通过 5 V 稳压模块降压获得。种子检测传感器选用多组对射式光电传感器,输出信号电压为 5 V,安装在导种管中部,检测范围覆盖导种管截面。通过检测直流无刷电机上的霍尔传感器信号获取排种器转速。选用 OLED 显示屏显示用户设置的目标排肥量、排种器转速和排肥器电机转速。选用最高工作频率为 10 Hz 的电磁阀控制气流间歇从喷嘴喷出,工作电压为 24 V,因此 STM32 单片机需要通过继电器间接控制电磁阀开闭。单片机输出的 PWM 控制信号通过双路 L298 直流电机驱动模块控制排肥器电机转速。

3.3 控制系统程序设计

控制系统整体控制流程如图 8 所示,系统上电后初始化各参数,通过按键设置每穴施肥量并开启后续程序任务。种子检测程序 GPIO 引脚接收从对射式光电传感器传来的高低电平变化,并消除种子下落信号的噪声。安装在排种器电机上的霍尔传感器实时检测排种器电机转速,可推算出当前机具作业速度。当检测到种子下落信号后,单片机根据上述对种穴施肥控制模型计算出喷气延时时间,延迟一定时间后,单片机通过 GPIO 引脚发出高电平,控制继电器导通,使电磁阀打开,当达到设置电磁阀开启时长后,电磁阀关闭,喷嘴喷气一次,使肥团落在距种子一定偏移位置处,实现玉米对种穴施肥。

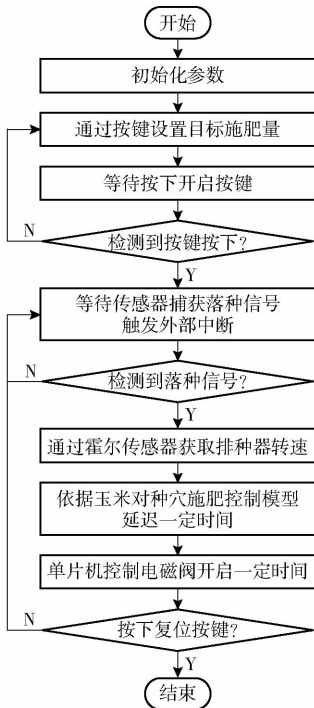


图 8 控制系统流程图
Fig. 8 Control system flow diagram

4 仿真

为研究气力辅助式间歇排肥装置成穴性能与排肥稳定性,采用 Solidworks 和离散元仿真软件 EDEM 分别建立装置模型和肥料仿真模型进行仿真。分析作业速度和排肥量对气力辅助式间歇排肥装置成穴性能的影响,不同挡板开启持续时间对清肥性能的影响。

4.1 参数设定

选取颗粒状复合肥为试验对象,据文献[22,24]建立颗粒模型,仿真材料物性参数如表 1 所示。

表 1 材料的物理特性参数

Tab.1 Parameters of physical properties of materials			
参数	肥料	塑料	传送带
泊松比	0.25	0.50	0.35
剪切模量/Pa	1.25×10^8	1.77×10^8	7.27×10^8
密度/(g·cm ⁻³)	1.575	1.180	1.357
恢复系数	0.31	0.45	0.02
静摩擦因数	0.37	0.25	1.25
滚动摩擦因数	0.12	0.19	1.24

4.2 仿真试验设计与试验指标

为研究不同试验因素对气力辅助式间歇排肥装置作业性能的影响,取作业速度为 3~7 km/h,每穴施肥量为 3~7 g,肥料穴距为 300 mm,挡板开启持续时间为 100 ms。由预试验可知气流冲击挡板后,气流速度减小到 2.5 m/s 左右,对肥料运动影响较小且装置内气流变化频繁,难以模拟,故本次仿真不考虑气流影响。以平均施肥长度、施肥长度变异系数、排肥量误差为评价指标。施肥长度以每穴肥料堆积最密集点为中心点,量取绝大多数肥料颗粒散落的长度为施肥长度,在 EDEM 后处理界面添加 Grid Bin Group,位于传送带中间位置,记录 Grid Bin Group 内单穴肥料质量,每次统计传送带上的 10 穴肥料颗粒成穴情况,如图 9 所示。



图 9 仿真试验示意图
Fig. 9 Simulation experiment diagram

排肥量误差计算公式为

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Q_i - Q_0|}{Q_0}}{n} \times 100\% \tag{16}$$

式中 q ——排肥量误差,%
 Q_0 ——每穴预设排肥量,g
 Q_i ——第 i 取样点肥量,g

n ——取样点数量,取 10
施肥长度变异系数计算式为

$$C_V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}}{\bar{L}} \times 100\% \quad (17)$$

式中 C_V ——施肥长度变异系数,%
 L_i ——第 i 取样点的施肥长度,mm
 $\bar{L}$ ——平均施肥长度,mm

4.3 仿真试验结果与分析

4.3.1 各因素对成穴性能的影响

试验结果如表 2 所示,当前进速度为 3 ~ 7 km/h 时,平均施肥长度为 69.8 ~ 169.1 mm 且随着前进速度和施肥量的增大而增大。施肥长度变异系数为 3.9% ~ 11.9%。排肥量误差为 1.7% ~ 5.5%,在相同前进速度下,排肥量误差随着目标穴施肥量增大而减小。

表 2 仿真试验设计与结果

Tab.2 Simulation test design and results

作业速度/ (km·h ⁻¹)	目标穴施 肥量/g	平均施肥 长度/mm	施肥长度变 异系数/%	排肥量误 差/%
3	3	69.8	10.8	5.5
	5	73.3	9.0	3.4
	7	76.4	6.1	1.8
5	3	94.5	7.0	4.0
	5	113.0	8.3	3.2
	7	122.3	6.1	3.1
7	3	136.6	11.9	4.4
	5	143.0	8.3	2.2
	7	169.1	3.9	1.7

4.3.2 挡板开启时间对清肥性能的影响

当目标穴施肥量为 7 g,挡板开启持续时间为 80、100、120 ms 时,通过观察仿真过程中气力辅助式间歇排肥装置内部肥料的运动状态(图 10),可知气力辅助式间歇排肥装置的清肥性能与挡板的开启持续时间密切相关。当挡板开启持续时间为 80 ms 时,部分积聚在积分腔处的肥料在挡板开启持续时间内并不能有效排出,导致排出的单穴肥料小于 7 g。当挡板开启持续时间为 100 ms 时,绝大部分积聚在积分腔处的肥料在挡板开启持续时间内刚好排出。挡板开启持续时间为 120 ms 时,绝大部分积聚在积分腔处的肥料排出后挡板仍未关闭,肥料继续下落影响成穴性。因此,挡板开启持续时间为 100 ms 时排肥效果最佳。

5 台架试验

为验证气力辅助式对种穴施肥装置以及基于

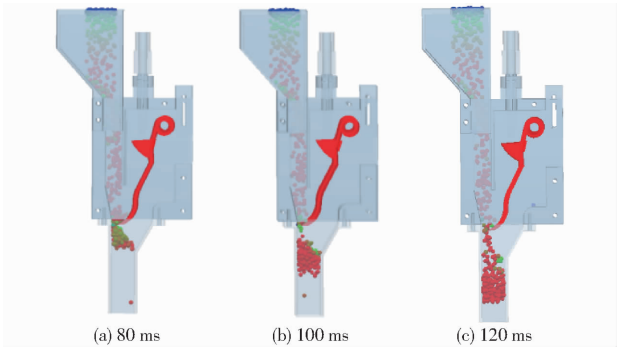


图 10 不同挡板开启持续时间下肥料运动状态

Fig. 10 Fertilizer movement under different baffle opening durations

STM32 单片机的对种穴施肥控制系统在不同前进速度、不同每穴肥量下的可靠性和稳定性,进行了室内台架试验。为了模拟玉米播种同步穴施肥作业状况,在试验台架上加装了电驱排种系统,用于模拟不同作业速度和株距下玉米播种作业效果。整个试验台架安装在有传送带的排种试验台上,可模拟装置不同的作业前进速度。

5.1 试验设备与仪器

气力辅助式对种穴施肥装置台架试验于 2023 年 10 月在河北省涿州市中国农业大学涿州试验站进行。如图 11 所示,试验设备和仪器主要包括气力辅助式间歇排肥装置、JPS 系列计算机视觉排种试验台(黑龙江省农业机械工程科学研究院,传送带

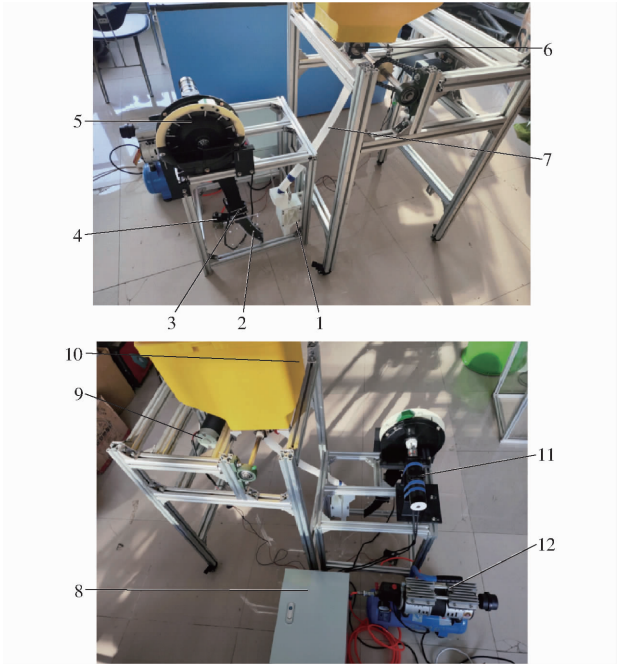


图 11 试验台架实物图

Fig. 11 Physical diagrams of experimental bench

1. 气力辅助式间歇排肥装置 2. 导种管 3. 种子检测传感器
4. 电磁阀 5. 指夹排种器 6. 外槽轮式排肥器 7. 排肥管 8. 控制箱 9. 排肥器驱动电机 10. 肥箱 11. 直流无刷电机 12. 空气压缩机

上涂有条带状油层,可减小种子和肥料弹跳)、外槽轮式排肥器(哈尔滨市哈农三方农业机械制造有限公司)、排肥器驱动电机、VT317-5G-02 型电磁阀(日本 SMC 自动化有限公司)、控制单元、指夹排种器(美国 Precision Planting 公司)、57BL115S21-230 型直流无刷电机(北京时代超群电器科技有限公司)、电机驱动器、减速器(减速比为 36)、联轴器、排肥管、空气压缩机、导种管、种子检测传感器(常州市怀玉电子有限公司)、铝型材框架、LRS-350-24 型开关电源(明纬企业股份有限公司)、管件和各种部件安装板等。

5.2 试验方法与指标

为研究不同试验因素对气力辅助式对种穴施肥装置作业性能的影响,选定作业速度为 3~7 km/h,目标穴施肥量为 3~7 g,设置肥料穴距为 300 mm,选用肥料为缓释复合肥(中农集团,N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15),肥料颗粒基本呈圆球形,颗粒大小随机分布,千粒质量为 62.5 g。

试验过程中,由于条带油层宽度有限,将导种管和气力辅助式间歇排肥装置安装在沿传送带运动方向上,导种管在前,气力辅助式间歇排肥装置在后,使肥料和种子都落在条带状油层中。待气力辅助式对种穴施肥装置工作稳定后,停下传送带,受限于传送带长度,每次统计传送带上的 10 穴肥料颗粒成穴情况。以平均施肥长度、施肥长度变异系数、排肥量误差、穴距误差、种-肥纵向(传送带运动方向)间距为评价指标。采用对每穴肥料颗粒计数的方式测量排肥量,穴距为两穴肥团中心点之间的距离,种-肥纵向间距为种子和肥团中心之间的纵向距离。穴距误差计算式为

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_i - x_0|}{x_0}}{n} \times 100\%$$

(18)

式中 x ——穴距误差,%
 x_i ——第 i 取样点与相邻肥料的穴距,mm
 x_0 ——目标穴距,取 300 mm

5.3 试验结果与分析

为测试气力辅助式间歇排肥装置工作稳定性,首先对间歇排肥装置进行了试验,随后加入穴施肥程序进行种-肥同步试验。程序设置电磁阀开启的高电平持续时间为 50 ms,挡板开启持续时间约为 100 ms。试验结果如图 12 所示,当传送带前进速度为 3~7 km/h 时,平均施肥长度为 75~187 mm 且随着前进速度和施肥量的增大而增大,其中前进速度是影响施肥长度的首要因素。如表 3 所示,施肥长度变异系数为 5.3%~12.4%,排肥量误差为

5.6%~12.8%,穴距误差为 2.5%~6.5%。当穴施肥量为 5 g 时,肥料成穴如图 12 所示,种子和肥料分布如图 13 所示,基本满足作业要求。

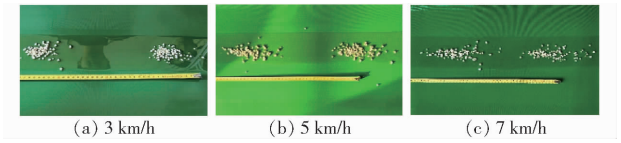


图 12 肥料成穴情况

Fig. 12 Fertilizer hole formation

表 3 穴施肥试验结果

Tab. 3 Results of hole fertilization experiment

作业速度/ (km·h ⁻¹)	目标穴施 肥量/g	平均施肥 长度/mm	施肥长度变 异系数/%	排肥量 误差/%	穴距误 差/%
3	3	75	8.9	10.0	2.7
	5	88	8.8	8.4	4.3
	7	102	7.3	6.5	2.8
5	3	117	6.9	11.0	5.9
	5	138	7.5	8.0	3.9
	7	151	10.0	9.1	6.5
7	3	155	12.4	12.8	2.5
	5	181	7.6	7.8	4.2
	7	187	5.3	5.6	5.6

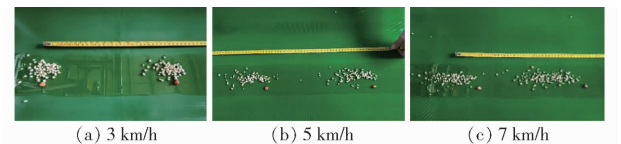


图 13 种子和肥料分布图

Fig. 13 Seed and fertilizer distribution diagrams

加入对种穴施肥程序后,试验结果如表 4 所示,当前进速度为 3~7 km/h、施肥量为 5 g/穴时,平均种-肥纵向间距为 14~113 mm,种-肥纵向间距变异系数为 12.2%~50.1%,种-肥同步性较好。

表 4 对种穴施肥试验结果

Tab. 4 Results of hole fertilization for targeting seed position

作业速度/ (km·h ⁻¹)	平均种-肥纵向 间距/mm	种-肥纵向间距 变异系数/%
3	14	50.1
5	51	20.8
7	113	12.2

6 田间试验验证

为验证气力辅助式对种穴施肥装置的田间工作性能,进行田间试验(图 14)。为方便观察和取样,在播种施肥作业时将播种和施肥深度均调至 0 mm,使种子和肥料落在地表,施肥量设为 5 g/穴,试验结果如表 5 所示。



图 14 田间试验

Fig. 14 Diagram of field experiment

1. 气力辅助式间歇排肥装置 2. 种子检测传感器(安装于两侧板之间) 3. 排种器 4. 空气压缩机 5. 控制箱 6. 肥箱 7. 外槽轮式排肥器

表 5 对种穴施肥田间试验结果

Tab. 5 Results of field experiment on hole fertilization for targeting seed position				mm
作业速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均种-肥纵向 间距	平均种-肥横向 间距	平均施肥 长度	
3	34	40	93	
5	59	44	142	
7	119	42	189	

由表 5 可知,当前进速度为 3 ~ 7 km/h、穴距为 300 mm 时,平均施肥长度为 93 ~ 189 mm,平均施肥长度略大于仿真试验和台架试验结果,平均种-肥纵向间距为 34 ~ 119 mm,与仿真试验和台架试验基本一致,验证了仿真试验和台架试验可靠性。平均种-肥横向间距为 40 ~ 44 mm,满足作业要求。

7 结论

(1)依据玉米播种同步穴施肥作业特点,设计了气力辅助式对种穴施肥装置并阐述该装置工作原理,对其中关键结构尺寸进行了理论计算,对气流对挡板作用进行分析计算,验证了该装置理论可行性。

(2)基于 STM32 单片机开发了对种穴施肥控制系统,依据气力辅助式穴施肥的工作方式,构建了适用于高频间歇施肥场景的对种穴施肥控制模型,设计了硬件电路和软件程序。

(3)离散元仿真试验结果表明,当前进速度为 3 ~ 7 km/h 时,平均施肥长度为 69.8 ~ 169.1 mm,施肥长度变异系数为 3.9% ~ 11.9%。排肥量误差为 1.7% ~ 5.5%。通过观察仿真过程中不同挡板开启持续时间下气力辅助式间歇排肥装置内部肥料的运动状态,发现挡板开启持续时间为 100 ms 时排肥效果最佳。

(4)台架试验结果表明,当前进速度为 3 ~ 7 km/h、穴距为 300 mm 时,单独排肥平均施肥长度为 75 ~ 187 mm,施肥长度变异系数为 5.3% ~ 12.4%,排肥量误差为 5.6% ~ 12.8%,穴距误差为 2.5% ~ 6.5%。种-肥同步施用,平均种-肥纵向间距为 14 ~ 113 mm,对种穴施肥性能较好,满足作业要求。田间试验结果表明,当前进速度为 3 ~ 7 km/h、穴距为 300 mm、施肥量为 5 g/穴时,平均施肥长度为 93 ~ 189 mm,平均种-肥纵向间距为 34 ~ 119 mm,满足作业要求,试验结果与仿真试验和台架试验基本一致,验证了仿真试验和台架试验的可靠性。

参 考 文 献

[1] 陈印军,王琦琪,向雁.我国玉米生产地位、优势与自给率分析[J].中国农业资源与区划,2019,40(1):7-16.
CHEN Yinjun, WANG Qiqi, XIANG Yan. Analysis on the status, superiority and self-sufficiency ratio of maize in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1): 7-16. (in Chinese)

[2] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望[J].中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
LI Shaokun, ZHAO Jiuran, DONG Shuting, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)

[3] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)

[4] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)

[5] CHEN Xinping, CUI Zhenling, FAN Mingsheng, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.

[6] 唐汉,王金武,徐常塑,等.化肥减施增效关键技术研究进展分析[J].农业机械学报,2019,50(4):1-19.
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1-19. (in Chinese)

[7] 史常亮,郭焱,朱俊峰.中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J].农业现代化研究,2016,37(4):671-679.
SHI Changliang, GUO Yan, ZHU Junfeng. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 671-679. (in Chinese)

[8] TIMILSENA Y P, ADHIKARI R, CASEY P, et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1131-1142.

- [9] 尚杰,尹晓宇. 中国化肥面源污染现状及其减量化研究[J]. 生态经济,2016,32(5):196-199.
SHANG Jie, YIN Xiaoyu. Study on the present situation and reduction of fertilizer non-point source pollution of China[J]. Ecological Economy,2016,32(5):196-199. (in Chinese)
- [10] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报,2017,33(6):214-221.
LIU Qipu. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(6):214-221. (in Chinese)
- [11] PARENT S É, DOSSOU-YOVO W, ZIADI N, et al. Corn response to banded phosphorus fertilizers with or without manure application in Eastern Canada[J]. Agronomy Journal, 2020,112: 2176-2187.
- [12] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(1):1-11. (in Chinese)
- [13] 王宜伦,白由路,谭金芳,等. 采用粒片状肥料实现夏玉米一次施肥的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报,2016, 22(4):1126-1132.
WANG Yilun, BAI Youlu, TAN Jinfang, et al. Availability study of once quantitative fertilization in summer maize using fertilizer tablets[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2016,22(4):1126-1132. (in Chinese)
- [14] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. 中国农业科学,2010, 43(15):3151-3158.
WANG Yilun, LI Chaohai, TAN Jinfang, et al. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(15):3151-3158. (in Chinese)
- [15] ADUGYAMF R, AGYINBIRIKORANG S, TINDJINA I, et al. Minimizing nutrient leaching from maize production systems in Northern Ghana with one-time application of multi-nutrient fertilizer briquettes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694:133667.
- [16] 姜超强,王火焰,卢殿君,等. 一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率[J]. 农业工程学报,2018, 34(12):146-153.
JIANG Chaoqiang, WANG Huoyan, LU Dianjun, et al. Single fertilization of urea in root zone improving crop yield[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(12):146-153. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] DA SILVA M, GRAZIANO M P. Modeling and design of an injection dosing system for site-specific management using liquid fertilizer[J]. Precision Agriculture,2019,20:649-662.
- [19] 杨杰,李厂,古冬冬,等. 夏玉米穴施肥作业机械设计与试验——基于新能源技术[J]. 农机化研究,2022,44(4):86-90.
YANG Jie, LI Chang, GU Dongdong, et al. Design and experiment of fixed hole fertilization mechanism for summer maize—based on new energy technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(4):86-90. (in Chinese)
- [20] 古冬冬,张征,杨杰,等. 扎穴施肥单体仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(2):55-61.
GU Dongdong, ZHANG Zheng, YANG Jie, et al. Simulation analysis and test of piercing fertilization monomer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(2):55-61. (in Chinese)
- [21] 刘正道,王庆杰,刘春鸽,等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):137-144,355.
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LIU Chungge, et al. Design of flexible fertilizer protection mechanism for hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):137-144, 355. (in Chinese)
- [22] 刘正道,王庆杰,李洪文,等. 腔盘式穴施肥装置柔性护肥机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):97-103.
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):97-103. (in Chinese)
- [23] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):43-53.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):43-53. (in Chinese)
- [24] 刘正道,王星力,李爽,等. 基于行星轮系的玉米穴施肥自动系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):60-67.
LIU Zhengdao, WANG Xingli, LI Shuang, et al. Design of maize automatic hole fertilization system targeting at seed based on planetary gear train[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):60-67. (in Chinese)
- [25] 廖庆喜,陈勇,张青松,等. 油菜侧深穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):41-52.
LIAO Qingxi, CHEN Yong, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of side deep hole fertilization device for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):41-52. (in Chinese)
- [26] 丁筱玲,崔东云,刘童,等. 精准变量排肥器结构优化设计与试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(1):5-12.
DING Xiaoling, CUI Dongyun, LIU Tong, et al. Optimization design and experiment of precision variable fertilizer device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(1):5-12. (in Chinese)
- [27] 张小成. 外槽轮式排肥器优化设计与关键工作参数对排肥性能的影响[D]. 南京:南京农业大学,2021.
ZHANG Xiaocheng. Optimization design and key working parameters of external trough wheel type fertilizer effect on fertilizer performance[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2021. (in Chinese)