

基于行星轮系的玉米穴施肥自动对种系统设计与试验

刘正道 王星力 李爽 黄玉祥 闫小丽 赵宏波
(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 玉米播种同步穴施肥是提高肥料利用率的有效手段,本文针对现有穴施肥装置用于精量播种作业时种肥相对位置无法实时检测和控制的难题,设计了一种玉米自动对种穴施肥装置。提出了基于行星轮系的自动对种方法,在确保种距和肥距相等的前提下实时调节排种盘和排肥盘相位差,实现播种作业过程中种肥相对位置的实时调控。通过分析机具前进速度、排种器排肥器间距、株距等对落种落肥位置的影响,得到种肥相对位置计算方法,设计了穴施肥自动对种控制算法。搭建了基于 STM32F103 的控制系统,并完成硬件系统和软件系统的设计,可完成落种落肥等信息的检测和种肥相对位置的实时调控。验证试验结果表明,当前进速度分别为 3、4、5、6 km/h 时,种肥纵向平均间距分别为 8.6、6.1、11.7、8.5 mm,满足对种穴施肥需求。

关键词: 玉米穴施肥; 行星轮系; 自动对种; 控制系统

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0060-08 OSID: 

Design of Maize Automatic Hole Fertilization System Targeting at Seed Based on Planetary Gear Train

LIU Zhengdao WANG Xingli LI Shuang HUANG Yuxiang YAN Xiaoli ZHAO Hongbo
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Maize hole fertilization synchronizing with seeding is an effective means to improve fertilizer utilization efficiency. To solve the problem that the relative position of seed and fertilizer could not be detected and controlled in real time with the present hole fertilization device, a maize automatic hole fertilization device was designed, and an automatic targeting at seed method based on planetary gear train was put forward. On the premise of the same seed distance and fertilizer distance, the phase difference between seed trays and fertilizer trays was adjusted in real time to realize the real-time control of the relative position of seeds and fertilizers during seeding. The influence of the advancing speed, the distance between the seed metering device and fertilizer discharging device and the spacing in the rows on the position of seed and fertilizer dropping was analyzed, the calculation method of the relative position of seed and fertilizer was obtained, and the automatic seed control algorithm of hole fertilization was designed. A control system based on STM32F103 was built, and the hardware system and software system were designed, seed and fertilizer dropping information was detected and controlled in real time. The experiment result showed that the average distance of seed and fertilizer was 8.6 mm, 6.1 mm, 11.7 mm and 8.5 mm, while the forward speed was 3 km/h, 4 km/h, 5 km/h and 6 km/h, respectively, which met the requirements of seed hole fertilization.

Key words: maize hole fertilization; planetary gear train; automatic targeting at seed; control system

0 引言

我国化肥施用存在施肥量大、利用率低等问题,

精准施肥是提高化肥利用率,实现农业可持续发展的重要途径^[1-3]。目前我国玉米施肥以播种同步条施颗粒肥为主,但玉米苗期根系范围小,相邻种子间

收稿日期: 2022-10-04 修回日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101629)、陕西省重点研发计划项目(2022NY-227)和中国博士后基金项目(2021M692657)

作者简介: 刘正道(1992—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: liuzd@nwfu.edu.cn

通信作者: 黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

肥料不易被吸收,造成肥料利用率低。玉米穴施肥技术根据玉米需肥规律,将化肥呈团状施入种子附近,可达到按需定量定点施肥的目的^[4-5],相关研究表明可有效提高化肥利用率^[6-11]。

目前国外玉米穴施肥主要以液态肥为主,如美国大平原公司的 Accushot 精准施肥系统,国内液态肥穴施肥主要用于水稻,玉米施肥仍以颗粒肥为主^[12-13]。围绕颗粒肥穴施装置,相关学者进行了一系列的研究,根据工作原理不同可分为2种:①堆积释放法,通过开关机构使肥料间歇性堆积释放,实现间歇分肥和投肥,如胡红等^[14]设计的回转挡肥块、王紫玉等^[15]设计的回转挡片、张俊雄等^[16]设计的翻板开合机构均可实现间歇排肥。②回转取肥法,通过回转的排肥盘从肥箱中取出定量肥料,携运到指定位置后定点投送,如袁文胜等^[17]设计的勺轮式穴施肥排肥器、李树伟^[18]设计的电驱式外槽轮穴施肥排肥器、都鑫等^[19]设计的倾斜梯形孔式穴施肥排肥器和刘正道等^[20-21]设计的腔盘回转式穴施肥装置。堆积施肥法穴施肥装置均配备相应的扎穴机构^[22-24](鸭嘴式或凸轮驱动),且排种和排肥机构相互联动,以确保肥穴和种穴位置的相互匹配,但扎穴机构入土性能受土壤条件和作业速度影响较大。回转取肥法则采用开沟器制备肥床^[25-26],受土壤条件和作业速度影响相对较小,适用于免耕播种等,但种子和肥料相对位置受机具前进速度、排种器排肥器间距、株距等诸多因素影响,通过单一机械结构难以实现播种过程种肥相对位置的实时调控,需要设计专用的种肥匹配系统。

为满足免耕条件下玉米精准对种穴施肥需求,本文针对所设计的腔盘回转式颗粒肥穴施装置,研究自动对种控制算法,并基于行星轮系调速原理,开发玉米自动对种穴施肥系统,以期实现精准对种穴施肥,为我国玉米精准施肥提供装备和技术支撑。

1 系统结构及工作原理

玉米自动对种穴施肥装置主要由播种单元、穴施肥单元和调控单元组成,其中播种单元由播种开沟器、玉米精量排种器、镇压轮、地轮等组成,穴施肥单元主要由穴施肥排肥器、施肥开沟器等组成,调控单元主要由调控电机、行星轮系等组成,其结构如图1所示。其工作原理为:穴施肥单元安装于播种单元前方,二者具有一定的横向间距,以实现玉米种侧施肥。工作时,穴施肥排肥器从肥箱中取出团状肥料,经排肥管排入肥沟内;播种单元采用勺轮式排种器实现玉米精量排种;调控单元的核心部件为行星轮系和调控电机。排肥器和排种器均安装有相应的

检测装置,实时检测落种落肥信息,并计算种子和肥料的相对位置;当肥料与种子位置对应时,调控电机锁死,排种盘和排肥盘保持固定传动比,以确保种距和肥距相等;当发现种子和肥料位置出现偏差时,调控电机工作,改变排种盘和排肥盘相位差,进而调整种子和肥料相对位置关系,当重新对应后调控电机再次锁死。

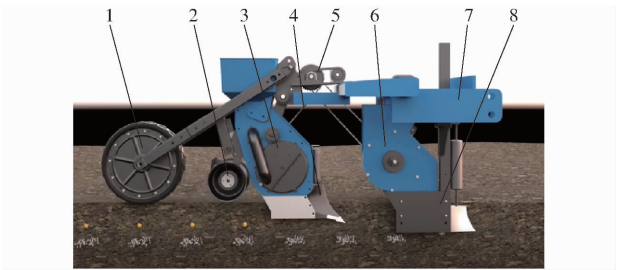


图1 穴式排肥装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of hole-type fertilization device

1. 地轮 2. 镇压轮 3. 玉米精量排种器 4. 播种开沟器 5. 行星轮系调速机构 6. 穴施肥排肥器 7. 机架 8. 施肥开沟器

2 关键部件设计

2.1 穴施肥单元

穴施肥单元采用前期设计的腔盘回转式穴施肥装置^[15-16],固定安装于机架上,与播种单元配套使用,主要由施肥开沟器、二级肥箱、排肥盘、清肥机构、护肥腔等组成,结构如图2所示。

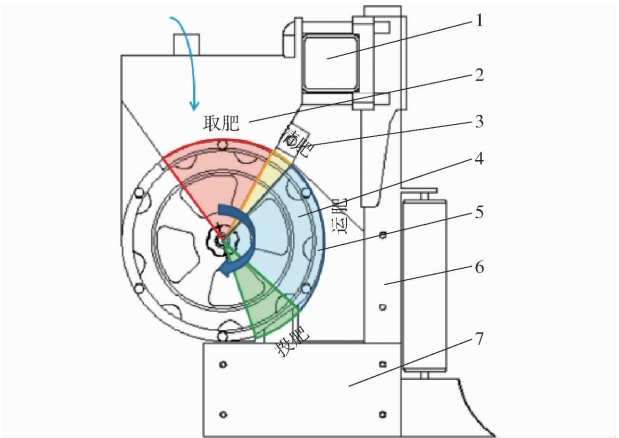


图2 穴施肥装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of hole fertilization device

1. 机具前梁 2. 二级肥箱 3. 清肥机构 4. 排肥盘 5. 护肥腔 6. 施肥开沟器 7. 挡土板

穴施肥开沟器采用免耕播种机防堵开沟器,在土壤中开出肥沟,开沟器后设计有挡土板,使开沟器后端一定距离内保持完整的沟型。肥料从肥箱落入肥沟的过程可分为取肥、清肥、运肥和投肥4个阶段:

(1)取肥:排肥盘周围均布若干个肥腔,在驱动力的带动下绕中心轴在护肥腔和二级肥箱内转动,

主肥箱中的肥料经排肥管直接进入二级肥箱,当肥腔经过二级肥箱时充满肥料。

(2)清肥:充满肥料的肥腔在离开二级肥箱时,其中多余的肥料被清肥机构清出,并进入护肥腔。

(3)运肥:在护肥腔的保护下,肥料始终以团状形式保持在肥腔内,并随排肥盘的转动被输送至装置底部。

(4)投肥:投肥口位于装置底部与风机连接,当肥腔携带肥料经过投肥口时,肥腔内团状肥料在气流和自重作用下快速排出肥腔并投送到肥沟内,完成穴式排肥。

2.2 播种单元

播种单元直接采用河北农哈哈机械集团有限公司 2BYFSF-2 型玉米仿形播种机的播种单体,主要由排种器、传动机构、播种开沟器、种箱、限深轮和地轮等部分组成,结构如图 3 所示。

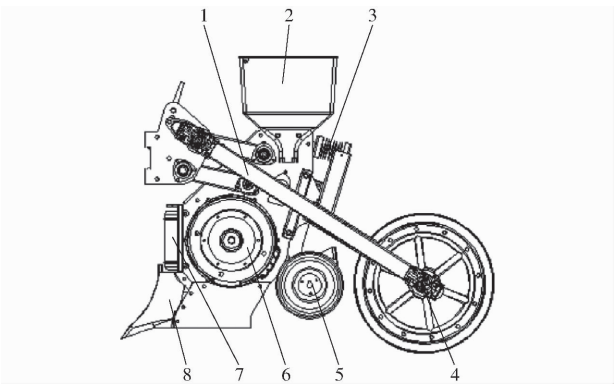


图 3 玉米精量播种单元结构图

Fig. 3 Structure diagram of maize precision seeding device
1. 传动机构 2. 种箱 3. 调节弹簧 4. 地轮 5. 限深轮 6. 排种器 7. 拔草轮 8. 播种开沟器

播种单元通过平行四杆机构安装于机架上,可随地面浮动;排种器采用勺轮式精量排种器,排种器底部靠近地面,可实现低位投种,减少种子在土壤中的弹跳;限深轮紧贴排种器后方,调节其安装高度可实现播种深度的调节;地轮提供动力的同时起镇压作用。

2.3 调控单元

调控单元主要由行星轮系、调控电机、排肥链轮、排种链轮及调控链轮等组成,结构如图 4 所示。其中,排肥链轮固定安装在太阳轮轴上并与穴施肥单元排肥盘相连,排种链轮固定安装在行星架上并与播种单元排种盘相连,调控链轮固定安装在外齿圈轴上并与调控电机相连,各部件装配关系如图 5 所示。

在行星轮系中,太阳轮(排肥链轮)、行星架(排种链轮)和外齿圈(调控链轮)的转速关系为

$$n_1 + an_2 - (1 + a)n_3 = 0 \tag{1}$$

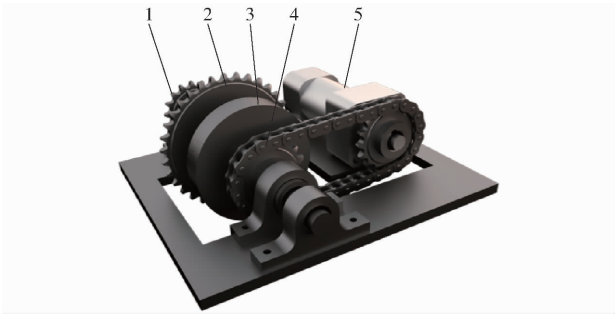


图 4 调控单元三维结构图

Fig. 4 3D structure diagram of control unit

1. 排肥链轮 2. 排种链轮 3. 行星轮系 4. 调控链轮 5. 调控电机

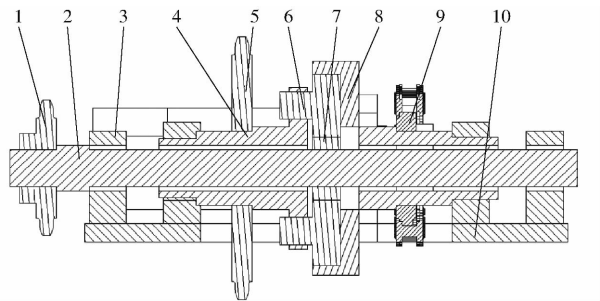


图 5 调控单元各部件装配关系

Fig. 5 Assembly relationship of each component of control unit

1. 排肥链轮 2. 太阳轮轴 3. 轴承座 4. 行星架(轴) 5. 排种链轮 6. 行星轮 7. 太阳轮 8. 外齿圈(轴) 9. 调控链轮 10. 机架

式中 n_1 ——太阳轮转速
 n_2 ——外齿圈转速
 n_3 ——行星架转速
 a ——行星轮系传动比,即外齿圈齿数与太阳轮齿数之比

调控单元工作原理为:

(1)当种子和肥料位置相互对应时,外齿圈(调控电机)锁死不工作,此时调控单元传动关系为

$$n_1 = (1 + a)n_3 \tag{2}$$

排种盘和排肥盘保持固定传动比,以确保种距和肥距相等。

(2)当种子和肥料位置出现偏差时,调控电机带动外齿圈经过一个短时间的加速和减速过程,使排肥盘相对于排种盘多转动(或少转动)一定角度,即肥料相对于种子前移(或后移)一定距离,当种子和肥料位置重新对应后,调速电机锁死,排种盘和排肥盘继续保持固定传动比工作。

本文所采用勺轮式排种器为每周 18 勺,排肥盘每周肥腔数为 9,则排肥盘转速应为排种盘转速的 2 倍。取排肥链轮与排肥盘间传动比为 1:1,排种链轮与排种盘间传动比为 1:2,则 $n_1 = 4n_3$,即 $a = 3$,取

太阳轮齿数为 17, 外圈齿数为 51。

3 自动对种控制算法

由于施肥单体和播种单体间具有一定的安装间距, 作业过程中先施肥后播种, 为实现种肥位置的一一对应, 须根据落种、落肥信息提前预判种肥相对位置, 在计算过程中提出 2 个假设条件: 播种机作业过程前进速度不发生突变, 即在一定距离内作业速度恒定。种子和肥料入土后位置不变, 即计算种肥位置时忽略因种子和肥料弹跳造成的误差。

根据自动对种系统结构, 控制算法模型如图 6 所示。落种落肥时间统一以系统时间定义, 即设定开机时刻为 0, 某粒种子的落种时间为种子入土时刻距开机时间的时间间隔, 某穴肥料的落肥时间为肥料入土时刻距开机时刻的时间间隔, 则落肥时间与落种时间应满足关系

$$t_f = \frac{\Delta l_{sf}}{1\,000 v_{\min}} + t_s \quad (3)$$

其中 $\Delta l_{sf} = l_{sf} - N_0 l_s$ (4)

式中 t_s ——系统监测并计算出的最后一次落种时间, s

t_f ——监测到落种时间后计算所得首次落肥时间, s

$v_{\min}$ ——左右地轮计算所得机具前进速度最小值, m/s

Δl_{sf} ——安装偏差, mm

l_{sf} ——施肥单体与播种单体安装间距

l_s ——播种株距, mm

N_0 ——安装间距内最多株距个数

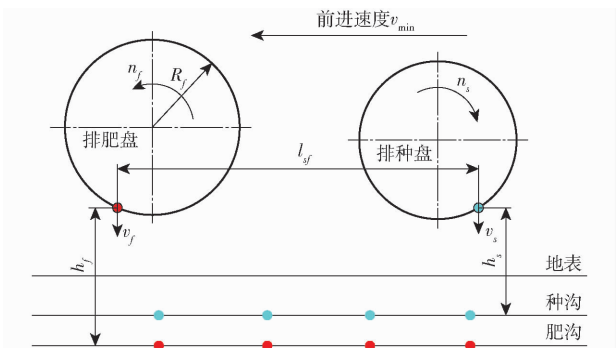


图 6 控制算法模型简图

Fig. 6 Diagram of control algorithm model

播种株距为监测到的最后 10 个株距的平均值, 即

$$l_s = 100 (t_s - t_{s-10}) v_{\min} \quad (5)$$

式中 t_{s-10} ——倒数第 11 次检测到的落种时间, s

落种时间由监测系统监测到种子的时间和落种速度计算得到, 由于排种器投种口位于排种盘最低

端, 落种过程可看作自由落体运动, 则落种时间计算式为

$$t_s = \sqrt{\frac{2h_s}{1\,000g}} - \sqrt{\frac{2h_m}{1\,000g}} + t_{sm} \quad (6)$$

式中 h_s ——排种器出种口距地面的高度, mm

h_m ——种子监测传感器安装位置距地面的安装高度, mm

t_{sm} ——种子监测传感器最后一次监测到种子的时间, s

由式(3)~(6)可得理论落肥时间为

$$t_f = \frac{l_{sf} - 100 N_0 (t_s - t_{s-10}) v_{\min}}{1\,000 v_{\min}} + \sqrt{\frac{2h_s}{1\,000g}} - \sqrt{\frac{2h_m}{1\,000g}} + t_{sm} \quad (7)$$

实际落肥时间由落肥口高度、落肥速度决定, 其计算公式为

$$t'_f = \frac{2h_f}{1\,000 (v_{fo} - v_{fi})} + t_{fm} \quad (8)$$

式中 t_{fm} ——监测到的实际落肥时间, s

h_f ——排肥盘出肥口距肥沟底部高度差, mm

v_{fo} ——肥料落入肥沟时速度, m/s

v_{fi} ——排肥盘出肥口肥料竖直方向速度, m/s

排肥盘出肥口与竖直方向夹角为 θ , 则

$$v_{fi} = \frac{2\pi n_{fm}}{60\,000} R \sin \theta \quad (9)$$

式中 n_{fm} ——监测到的排肥盘转速, r/min

R ——排肥盘直径, mm

由式(8)、(9)得

$$t'_f = \frac{2h_f}{1\,000 v_{fo} - \frac{2\pi n_{fm}}{60} R \sin \theta} + t_{fm} \quad (10)$$

落肥时间理论值和实际值差值为

$$\Delta t_f = t_f - t'_f \quad (11)$$

当 $\Delta t_f \neq 0$ 时种肥位置存在偏差, 需通过调控电机带动外齿圈转动, 短暂改变排种盘和排肥盘间传动比, 对种肥相对位置进行修正。当种肥位置存在偏差时, 设定调控电机调节过程是一个匀加速和匀减速的过程, 且在机具前进一个株距的距离内完成调节, 则调节过程调控电机最大转速为

$$n_{\max} = \frac{40}{N \left(\frac{l_s}{1\,000 v_{\min}} + \Delta t_f \right)} \quad (12)$$

式中 N ——排肥盘肥腔个数, 即排肥盘每转一周排肥穴数, 穴/r

$n_{\max}$ ——调节过程排肥盘最大转速, r/min

4 自动对种控制系统设计

控制系统作为自动对种穴施肥装置的控制核心,主要由硬件和软件组成,实现机具前进速度、落种时间、落肥时间的信息采集、通讯、处理,并实时控制执行机构以及人际交互界面显示。

4.1 硬件设计

自动对种控制系统原理如图 7 所示,主要由核心处理器模块、电源模块、数据检测模块和驱动执行模块组成,核心处理器模块包括单片机及其基本外围电路,用于数据的接收和处理;数据检测模块包括落种信息检测、落肥信息检测和前进速度检测;驱动执行模块用于控制调控电机转速。

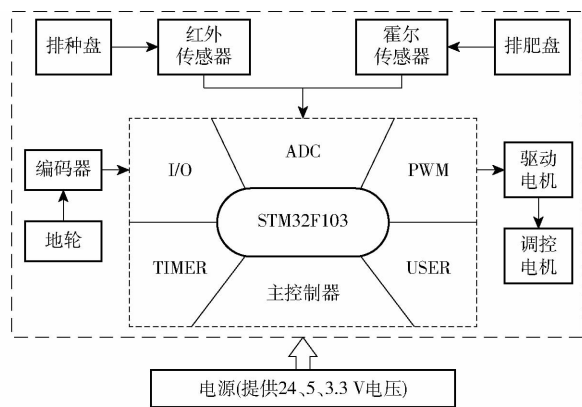


图 7 控制系统原理图

Fig. 7 Hardware structure of control system

机具前进速度检测选用欧姆龙 E6B2 - CWZ3E 型编码器,工作电压为 5 V,2 个编码器分别安装在左右 2 个地轮的转轴上,分别检测 2 个地轮转速。为尽量降低地轮滑移对检测结果的影响,取 2 个地轮中转速较低者作为机具前进速度。

落种信息通过红外光电传感器检测,传感器为对射式,安装在落种口下侧,每当种子下落经过发光元件和光敏元件中间时,检测到种子信号。为避免漏检,落种口下方并排安装 3 组传感器。

落肥信息采用台邦电子 NJK - 5002C 型霍尔接近开关,感应物体为磁铁,工作电压为 10 ~ 36 V,检测距离为 10 mm。安装时,排肥盘圆周上均布 9 个永久磁铁,永久磁铁与肥腔一一对应。排肥盘每转动一周可获得 9 次脉冲信号,根据每秒检测到脉冲信号个数即可得到排肥盘转速,根据排肥盘转速和检测到脉冲信号的时间即可得到落肥时间。

当肥料与种子位置对应时,调控电机和外齿圈不转动,但动力经行星轮系传递时,外齿圈仍受到一定扭矩并作用在调控电机上,为避免长时间零速带载状态对调控电机的损坏,本文选用带刹车的直流调速电机作为调控电机,工作电压为 24 V。

系统电源由拖拉机自带的 12 V 蓄电池提供,为获得 24 V 和 5 V 电压,分别对 12 V 电压进行升压和降压处理,增加 12 V 转 24 V 和 12 V 转 5 V 模块。其中 12 V 转 5 V 降压模块采用 LM2596 芯片,12 V 转 5 V 升压模块采用 MC34063 升压转换用调整器。

控制系统各部分电路原理图如图 8 所示。

4.2 软件设计

在实际作业过程中,受排种器和排肥器工作性能、检测精度、机具振动等因素影响,落种位置和落肥位置不可能始终完全对应,即实际落肥时间和理论落肥时间的差值不可能始终为 0。为降低控制难度,设定种肥位置偏差在 1 cm 以内为合格,当偏差大于 1 cm 时才进行修正。为满足不同前进速度下作业要求,取播种机前进速度较高时(2 m/s)计算落肥时间的理论值与实际值的最大偏差为 0.005 s。

自动对种施肥系统软件整体流程如图 9 所示,系统上电后初始化各参数,包括开关状态、系统时间以及液晶显示屏的显示数据等。机具开始作业后,编码器开始检测地轮转速并计算出机具前进速度;红外传感器持续检测落种信息,当检测到种子信号数大于 11 时,计算最近 11 粒种子平均间距,根据检测到种子的时间和机具前进速度,计算出理论落肥时间;安装在排肥盘上的霍尔传感器实时检测排肥盘实际转速,并根据接收到霍尔传感器脉冲信号的时间,计算实际落肥时间,若实际落肥时间与理论落肥时间差值小于等于 0.005 s,则调控电机处于刹车制动状态,若实际落肥时间与理论落肥时间差值大于 0.005 s,则调控电机运转,对种肥相对位置进行修正,使实际落肥时间与理论落肥时间吻合。

5 验证试验

为验证控制系统实际工作性能,将控制系统应用于玉米免耕播种机进行验证试验。由于肥料入土覆盖后难以观察和取样,在测量种肥间距及肥料分布情况时,将播种和施肥深度均调至 0,使种子和肥料落在地表,田间试验及种肥分布情况如图 10 所示。为测试不同前进速度下作业性能,分别取机具前进速度为 3、4、5、6 km/h 时进行验证试验。每组试验作业长度为 100 m,取中间 60 m 为稳定作业区。

主要试验指标及测试方法:

(1) 肥料分布长度:即单穴肥料在机具前进方向上的长度,播种作业后,在稳定作业区随机选取 5 处,每处连续取 20 穴记录数据,计算肥料平均分布长度。

(2) 种肥间距:分为横向种肥间距和纵向种肥间距,纵向种肥间距指在机具前进方向上,玉米种子

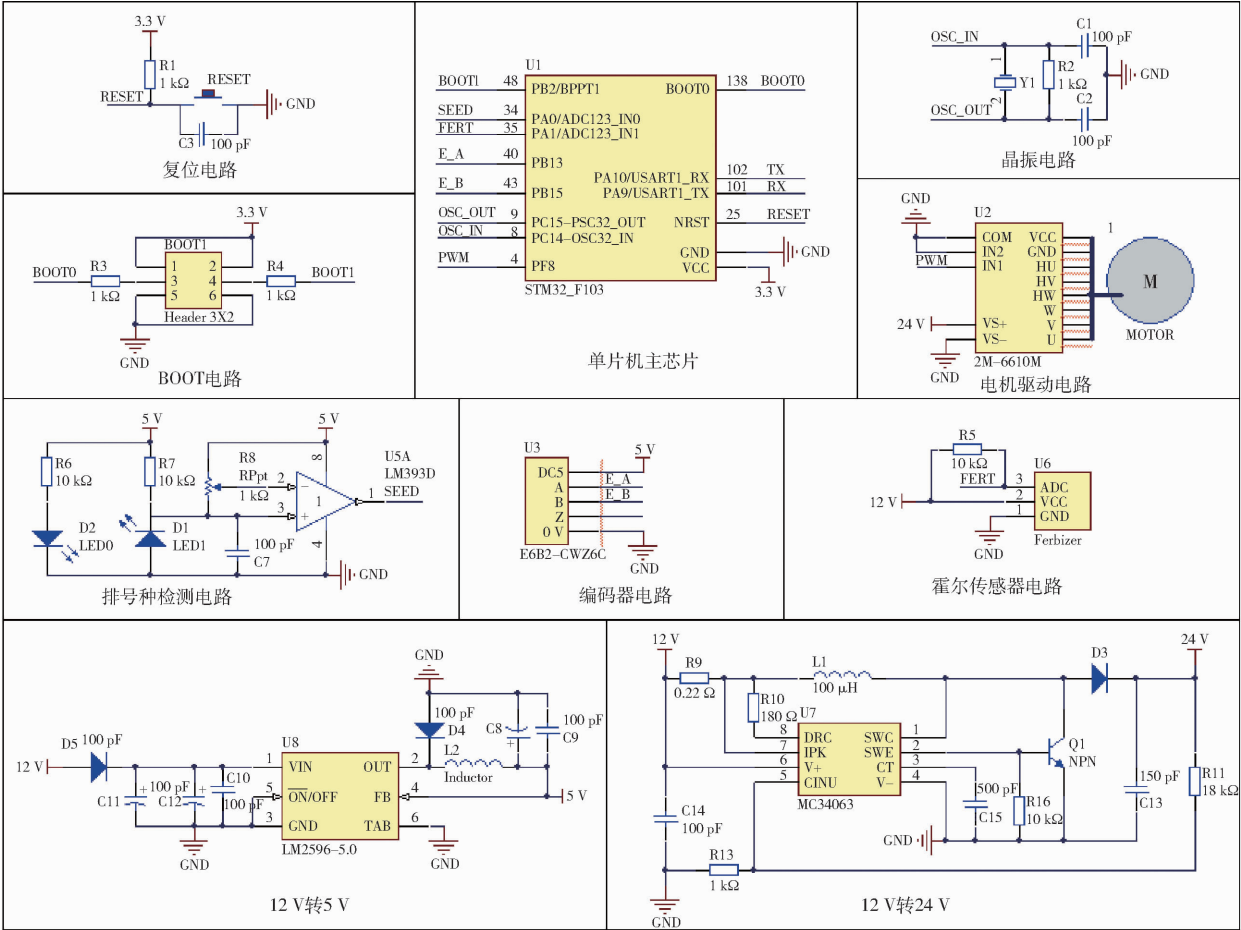


图 8 控制系统电路原理图

Fig. 8 Circuit diagram of control system

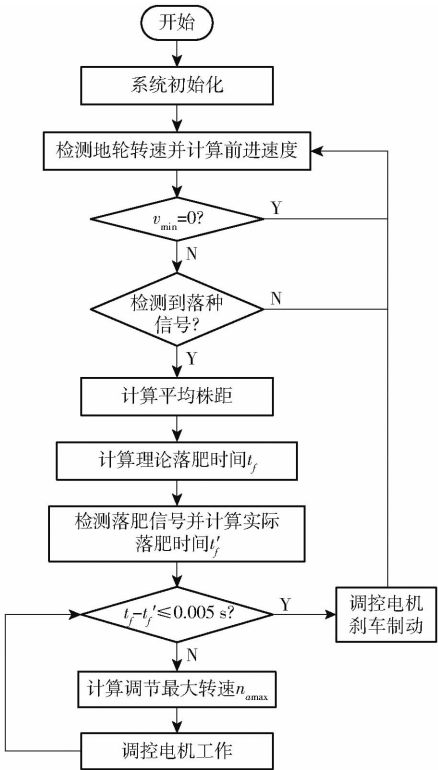


图 9 控制系统流程图

Fig. 9 Flow chart of control system

距肥料分布中心的距离；横向种肥间距指与机具前



图 10 田间试验及种肥分布情况

Fig. 10 Field experiment and distribution of seeds and fertilizer

进方向垂直的方向上,玉米种子距肥料分布中心的距离。测试过程取样方法和计算方法与肥料分布长度相同。

不同作业速度下试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,不同作业速度下,种肥间距无显著差异,平均种肥横向间距为 47.4 mm,平均种肥纵向间距为 8.7 mm,可以实现种肥相对位置的一一对应,满足设计要求。肥料分布长度随作业速度增大而增大,由于肥料在土壤中分布长度与投肥时间和机具前进

表 1 不同前进速度下作业性能

Tab. 1 Operating performance at different speeds			
作业速度/ (km·h ⁻¹)	种肥横向间 距/mm	种肥纵向间 距/mm	肥料分布长 度/mm
3	48.8	8.6	64.5
4	45.5	6.1	70.2
5	47.1	11.7	91.3
6	48.2	8.5	102.9
平均值	47.4	8.7	82.2

速度有关,随机具前进速度增大,相同投肥时间下肥料在土壤中分布长度增大。

6 结论

(1)提出了基于行星轮系的自动对种方法,并

设计了自动对种穴施肥系统,系统根据检测到的前进速度、落种落肥信息等判断种肥相对位置关系并在作业过程中进行实时调控,实现种肥位置的精准匹配,满足玉米按需定点穴施肥需求。

(2)通过分析前进速度、排种器排肥器间距、株距等对落种落肥位置的影响,得到种肥相对位置计算方法,并设计了穴施肥自动对种控制算法;搭建了基于 STM32F103 的控制系统,并完成系统软硬件设计。

(3)验证试验表明,不同作业速度下种肥横向间距和纵向间距均无显著差异,在前进速度分别为 3、4、5、6 km/h 时,种肥纵向平均间距分别为 8.6、6.1、11.7、8.5 mm,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 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)

[3] 刘鑫. 东北地区玉米种植户化肥减施行为及其影响因素分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
LIU Xin. Analysis on farmers' behavior of fertilizer reduction and its influencing factors in Northeast China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 张磊,宋航,陈小琴,等. 穴施条件下肥料养分在土壤中迁移规律的初步研究[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1145-1151.
ZHANG Lei, SONG Hang, CHEN Xiaoqin, et al. Primary study on nutrient migration under hole fertilization in soils[J]. Soils, 2020, 52(6): 1145-1151. (in Chinese)

[6] 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, nutrient uptake and use efficiency in summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 146-153. (in Chinese)

[7] ADU-GYAMFIR R, AGYIN-BIRIKORANG 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.

[8] 郭娅,刘娇,尹焕丽,等. 单株定量施肥对夏玉米产量及养分吸收利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 924-930.
GUO Ya, LIU Jiao, YIN Huanli, et al. Effects of quantitative fertilization by a single plant on the yield, nutrient absorption, and utilization of summer maize[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6): 924-930. (in Chinese)

[9] 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]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(4): 1126-1132. (in Chinese)

[10] 王秀,赵四申,高清海,等. 夏玉米免耕播种不同机械施肥方式的生态及经济效益分析[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(1): 85-87.
WANG Xiu, ZHAO Sishen, GAO Qinghai, et al. The ecological and economic analysis of mechanical adding fertilizer in zero tillage corn seeding[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(1): 85-87. (in Chinese)

[11] 刘娇. 夏玉米专用肥及精准定量施肥技术研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
LIU Jiao. The study of summer maize special fertilizer and precision fertilization technology [D]. Zhengzhou: Henan

- Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [12] 王金峰, 王金武, 鞠金艳, 等. 深施型液态施肥机扎穴机构研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 157–160.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, JU Jinyan, et al. Research progress on pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(2): 157–160. (in Chinese)
- [13] 刘亚华, 王金武, 王金峰, 等. 深施液态施非圆齿轮扎穴施肥装置试验分析[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(2): 54–58.
LIU Yahua, WANG Jinwu, WANG Jinfeng, et al. Experimental analysis on liquid fertilizer device with noncircular gears for deep-fertilization[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(2): 54–58. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 王紫玉, 梁春英, 王洪超, 等. 玉米变量穴施肥试验台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 166–169.
WANG Ziyu, LIANG Chunying, WANG Hongchao, et al. Design and experiment of corn variable hole fertilizer test bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 166–169. (in Chinese)
- [16] 张俊雄, 刘华猛, 高金, 等. 玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 66–72.
ZHANG Junxiong, LIU Huameng, GAO Jin, et al. Simulation and test of corn layer alignment position hole fertilization seeder based on SPH[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 66–72. (in Chinese)
- [17] 袁文胜, 李坤, 金诚谦, 等. 穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 145–149.
YUAN Wensheng, LI Kun, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of hill placement fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 145–149. (in Chinese)
- [18] 李树伟. 水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥装置设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
LI Shuwei. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization device for precision rice hill-direct-seeding machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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 and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 137–144, 355. (in Chinese)
- [21] 刘正道, 王庆杰, 李洪文, 等. 耦合 CFD–DEM 的气力式种肥穴施装置投肥路径分析与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 18–25.
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Fertilizer injecting route analysis and test for air-blowing seed-fertilizer hole-applicator via CFD–DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 18–25. (in Chinese)
- [22] 万玲, 谢东波, 李杨, 等. 玉米行间滚筒式穴施排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 64–73.
WAN Ling, XIE Dongbo, LI Yang, et al. Design and experiment of roller hole fertilizer application between corn rows[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 64–73. (in Chinese)
- [23] 吴然然, 张刘扬, 钱梵梵, 等. 玉米穴施肥装置的设计与仿真[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(5): 941–946.
WU Ranran, ZHANG Liuyang, QIAN Fanfan, et al. Design and simulation of cave-fertilizer apparatus for maize[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(5): 941–946. (in Chinese)
- [24] 古冬冬, 关阳, 张征, 等. 基于新能源技术的夏玉米穴施肥作业电控设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 121–126.
GU Dongdong, GUAN Yang, ZHANG Zheng, et al. Electrical control design and experiment of summer corn point fertilization based on new energy technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 121–126. (in Chinese)
- [25] 吴南, 林静, 李宝筏. 免耕播种机精量穴施肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 64–72.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa. Design and test on no-tillage planter precise hole fertilization system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 64–72. (in Chinese)
- [26] 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 key components of mechanical hole fertilization device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 41–52. (in Chinese)