

电动自走式玉米-花生带状复合种植模式施药机设计与试验

郝建军^{1,2} 艾庆贺¹ 袁大超¹ 李兆玮¹ 杨淑华¹ 赵建国¹

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001;

2. 河北省智慧农业装备技术创新中心, 保定 071001)

摘要: 针对玉米-花生带状复合种植模式施药农艺要求,设计了一款基于 STM32 单片机控制系统的电动自走式玉米-花生带状复合种植模式施药机。对施药机的驱动电机、转向机构、喷杆及防飘装置、施药管路等关键部件进行了选型与设计;采用流量传感器和速度传感器实时采集管路药液流量和底盘行驶速度,通过增量式 PID 算法实时调节比例控制阀开度,实现了变量施药控制;开发了基于 Android 手机的 APP 控制软件,实现了对施药机的远程控制。流量控制精度试验表明,调控后单个喷头目标流量与实际流量的相对误差 $\eta \leq 4.0\%$;变量施药试验表明,施药系统平均超调量为 2.7%,施药量与理论值相差 2.1%;雾滴沉积试验表明,雾滴沉积个数极差为 4 个/cm²,单位面积最低沉积量为 35 个/cm²,符合国家标准。

关键词: 玉米-花生带状复合种植模式;电动自走式施药机;变量施药;APP 控制

中图分类号: S491.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0216-10

OSID:



Design and Experiment of Electric Self-propelled Maize – Peanut Strip Compound Planting Pesticide Applicator

HAO Jianjun^{1,2} AI Qinghe¹ YUAN Dachao¹ LI Zhaowei¹ YANG Shuhua¹ ZHAO Jianguo¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. Technology Innovation Center of Intelligent Agricultural Equipment of Hebei Province, Baoding 071001, China)

Abstract: A control system based on STM32 microcontroller was designed for the electric self-propelled maize – peanut strip compound planting pesticide application machine, in order to meet the agronomic requirements for the pesticide application of maize – peanut strip compound planting. The selection and design of key components such as the driving motor, steering mechanism, spray boom and anti-drift device, and pesticide application pipeline for the pesticide application machine were carried out. Real-time data collection is achieved using flow sensors to monitor pipeline liquid flow and speed sensors to track chassis driving speed. The incremental PID algorithm is employed to adjust the proportional control valve opening in real-time. This dynamic adjustment ensures accurate and responsive control over the pesticide application process. As a result, the system implements variable spray control. An APP control software was developed based on Android phones, achieving remote control of the pesticide applicator. The accuracy test of flow control showed that the relative error between the target flow rate of a single nozzle after regulation and the actual flow rate $\eta \leq 4.0\%$. The variable application experiment showed that during the experiment, the average overshoot of the application system was 2.7%, and the difference between the application amount and the theoretical value was 2.1%. The fog droplet deposition test showed that the number of fog droplets deposited had a range of 4 drops/cm², and the minimum deposition amount per unit area was 35 drops/cm², which met the national standard.

Key words: strip compound planting system of maize and peanut; electric self-propelled pesticide applicator; variable rate application; APP control

收稿日期: 2023-12-14 修回日期: 2024-01-16

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系创新团队项目(HBCT2023030207)

作者简介: 郝建军(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化自动化技术及装备研究,E-mail: hjpaper@163.com

0 引言

玉米-花生带状复合种植技术可充分利用玉米的边行优势,实现玉米与花生带状间作套种,达到一季双收目的,是当前全国重点推广的一项农业增产增效技术^[1-3],但目前玉米-花生带状复合种植模式不统一,施药要求差异较大,传统施药机械不能很好满足生产需求。

近年来,科技工作者针对复合种植模式变量施药机械开展了研究。张荣成等^[4]针对玉米-大豆带状复合种植施药环节药液飘移问题,设计了一种基于地轮仿形的全封闭施药机,有效解决了药液飘移易产生药害的问题;尚增强^[5]、程上上^[6]根据玉米-大豆2:2~4的带状种植模式,设计了一种四轮电驱动、轮距可调的小型电动自走式分带喷杆施药机,可满足大豆、玉米分带施药农艺要求;GONZALEZ等^[7]设计了一种温室移动式施药机压力调节式变量施药系统,实现了对系统流量的精确控制;王相友等^[8]针对宽幅施药机在施药过程中施药方式不合理、控制方式单一等问题,设计了一种根据施药机行驶速度来调节流量的多回流式变量施药控制系统;徐艳蕾等^[9]设计了一种多喷头组合变量施药系统,实现了对不同施药目标的喷施控制;孙文峰等^[10]针对变量施药雾滴分布不均的问题,设计了一种基于神经网络整定的PID控制变量施药系统,实现了较高精度的变量施药。以上研究对带状复合种植模式以及施药方式进行了深入的研究,但是针对玉米-花生带状复合种植模式并没有提出有效的施药方式。

针对玉米-花生带状复合种植模式,本文设计一种基于STM32单片机控制系统的电动自走式变量施药机,并通过样机试验对其性能加以验证。

1 整机结构与工作原理

1.1 带状复合种植农艺

在玉米-花生带状复合种植模式中,物质分配和系统产量与玉米花生行比配置存在密切联系。科学的行比配置可充分利用空间资源、土地养分资源和光能资源,有效缓解种内种间竞争^[11-12]。实践证明,玉米-花生带状复合种植的收益远大于仅种植玉米或花生单一作物^[13]。目前,玉米-花生带状复合种植的玉米-花生行比配置多采用2:4、2:5、2:6(图1),不同种植模式的带内行距、带间行距和株距等参数设置如表1所示。

1.2 整机结构

电动自走式玉米-花生带状复合种植施药机整机结构主要依据2行玉米带和4~6行花生带配比

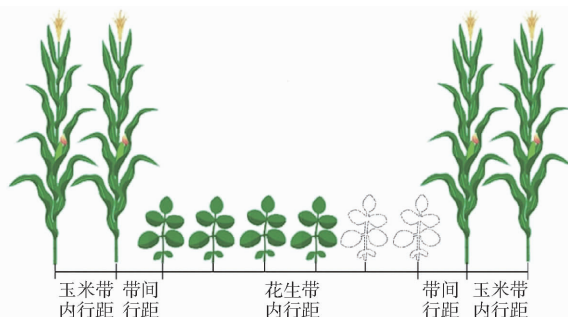


图1 2行玉米4~6行花生种植模式示意图

Fig. 1 Schematic of planting patterns for two rows of maize and 4~6 rows of peanut

表1 玉米花生不同种植模式参数设置

Tab. 1 Parameters setting for different planting patterns of maize and peanut

玉米花生 行比	带内行距/cm		株距/cm		带间行距/ cm
	玉米	花生	玉米	花生	
2:4	30	25~30	10	14	50~60
2:5	30	20~35	11	14	50~60
2:6	30	20~25	12	15	50~60

设计,整机由机架、喷杆、施药总成、驱动总成、四连杆转向机构、轮距调节机构、控制系统等构成,如图2所示。其主要设计参数如表2所示。

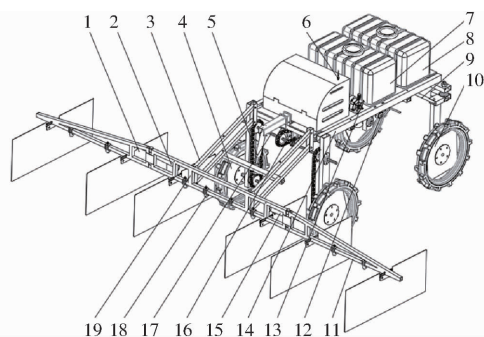


图2 自走式玉米-花生带状复合种植模式施药机结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of self-propelled maize-peanut strip composite planting applicator

1. 防飘隔板 2. 左侧杆架电推杆 3. 平行四杆升降机构 4. 高地隙驱动轮 5. 中心杆架电推杆 6. 天线 7. 玉米药液箱
8. 花生药液箱 9. 转向总成 10. 高地隙转向轮 11. 右侧杆架
12. 摇把 13. 隔膜泵 14. 机架 15. 右侧杆架电推杆 16. 驱动总成 17. 传动轴 18. 防飘喷头 19. 中心杆架

机架的作用是承载喷杆、施药总成、传动机构、轮距调节机构与控制系统等部件。喷杆分为左侧杆架、右侧杆架与中心杆架,左右两侧杆架铰接于中心杆架,通过两侧电推杆实现折叠与展开;施药总成由玉米药液箱、花生药液箱、防飘喷头、防飘隔板、隔膜泵等组成,防飘喷头与防飘隔板安装于喷杆下方,药液由隔膜泵输送到比例开关阀,通过比例开关阀控制管路开口,实现施药量控制;驱动总成由链轮链

表2 主要设计参数

Tab.2 Main technical parameters

参数	数值
轮距/m	1.0~1.4
轴距/m	1.2
作业幅宽/m	4.0
作业速度/(km·h ⁻¹)	2.0~4.3
电机功率/kW	4.0
驱动电机电池电压/V	72
控制系统电池电压/V	12
隔膜泵流量/(L·min ⁻¹)	10~12
玉米药箱容积/L	100
花生药箱容积/L	100
作业时间/h	4
满载质量/kg	600

条、驱动电机、传动轴等组成。通过传动轴将驱动电机的动力传送到驱动轮,实现行走功能;四连杆转向机构由转向杆、转向轴、电推杆等组成。通过电推杆的伸缩带动转向轮转动实现施药机转向;轮距调节机构由滑轨与摇把组成,通过转动摇把调节施药机

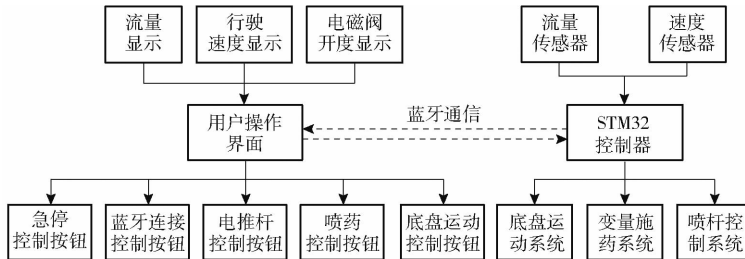


图3 系统工作框图

Fig.3 System working framework

2 关键部件设计

2.1 驱动电机匹配

对驱动电机选型时,需要确保其提供足够的动力,保证整机的正常运行和高效作业。根据我国农田坡度(25°以下)^[14],对驱动电机以整机满负荷攀爬25°斜坡(图4)为指标进行匹配选型。

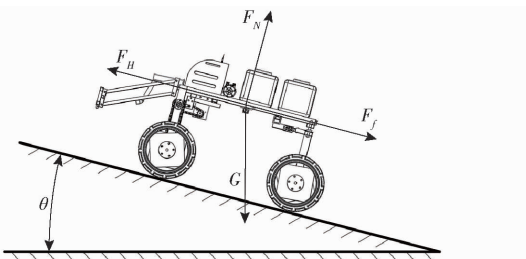


图4 高地隙底盘爬坡示意图

Fig.4 Schematic of climbing of high clearance drive self-moving chassis

根据设计指标,整机满载后质量约为600 kg,受到的阻力主要为滚动阻力和空气阻力,以最大作业速度4.3 km/s通过坡度25°的斜坡,由Solidworks软

底盘间距。控制系统由STM32控制器、手机APP、检测元件与执行元件等组成。通过STM32控制器连接整机所有执行元件与检测元件,采用手机APP操作软件远程控制整机作业。

1.3 工作原理

电动自走式玉米-花生带状复合种植模式施药机系统工作框图如图3所示。工作时,操作人员首先通过手机APP的蓝牙功能连接主控系统,分别将事先定好的每公顷玉米、花生施药量和施药机行走速度等参数传入STM32控制器,然后通过电推杆控制按钮控制电推杆展开,调整好喷杆位置并在喷杆下方相应位置挂载防飘隔板。准备完成后,按下施药按钮后,施药系统启动,通过运动控制按钮控制施药机行进,系统根据底盘行驶速度自动调节喷出流量。当遇到紧急情况时,按下急停控制按钮,即可停止施药机移动和施药作业。另外,主控系统可自动将流量传感器和速度传感器的数据上传到手机APP,为操作人员提供数据参考。

件计算得到整机迎风面积 $A = 0.62 \text{ m}^2$,滚动阻力系数 $f^{[15]}$ 参考表3选取0.15,风阻系数 $C_d = 0.3$,空气密度 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$,由公式

$$P_w = \frac{v_{\max}}{3600} \left(mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_d A \rho v_{\max}^2}{2} \right) \quad (1)$$

式中 P_w ——驱动电机额定功率,kW

m ——整车质量,kg

g ——重力加速度, m/s^2

θ ——地面坡度,(°)

v_{\max} ——最高作业速度,km/h

计算得到驱动电机所需的额定功率 $P_w = 3.8 \text{ kW}$ 。

表3 滚动阻力系数

Tab.3 Rolling resistance coefficient

路面类型	滚动阻力系数
沥青路面	0.010~0.020
碎石路面	0.010~0.020
泥泞土路	0.100~0.250
压紧土路	0.025~0.035

与普通车辆相比,施药机作业时需要较高的驱

动力,直流电机最高转速一般在 3 500 /min 左右,高地隙驱动轮选用万宝达公司生产的 615 高地隙轮,其直径 $D = 0.615$ m。减速器减速比 i 为

$$i = \frac{3.6n_c}{60v_{\max}}\pi D \quad (2)$$

式中 n_c ——驱动电机最高转速, r/min

驱动电机所需转矩 T 为

$$T = \frac{D}{2i} \left(mgf\cos\theta_1 + mg\sin\theta_1 + \frac{C_d A \rho v_{\max}^2}{2} \right) \quad (3)$$

结合以上分析,驱动电机所需减速比 $i = 94$,驱动电机所需转矩 $T = 10.6$ N·m。驱动电机所需功率 $P_w = 3.8$ kW,所需转矩 $T = 10.6$ N·m,综合考虑,驱动电机选用锡安驰 72 V、4 kW 永磁直流无刷电机。

施药机采用全电力驱动,作业时间为 4 h,选用 3 组 6 - EVF - 45 型石墨烯电池作为施药机的动力。

高地隙喷药机底盘由于重心较高,当左右车身不在同一水平面上时,易发生横向侧翻。利用静力学方程对横向侧翻进行分析,如图 5 所示。

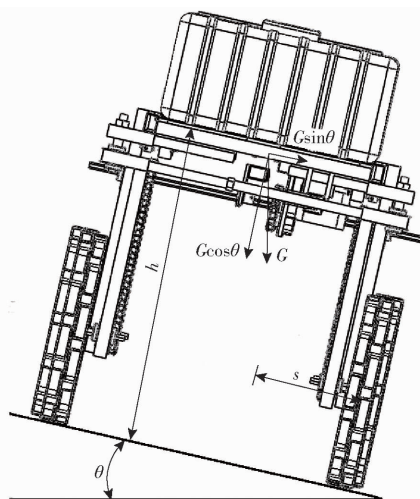


图5 横向行驶稳定性分析

Fig.5 Lateral driving stability analysis diagram

当发生横向侧翻时,自走式施药机将沿着低侧车轮发生旋转。当发生偏转临界条件时,极限方程可以简化为

$$hG\sin\theta - sG\cos\theta = 0 \quad (4)$$

式中 h ——施药机重心到地面距离, mm

s ——施药机重心到一侧轮胎的最小距离, mm

设计参数 $h = 800$ mm, $s = 450$ mm,由公式(4)可知:当斜坡角度 $\theta < 29^\circ$ 时,施药机不会发生侧翻,满足跨越最大 25° 斜坡的设计指标。

2.2 四连杆转向机构

四连杆转向机构(图6)主要由机架、转向轴承、

电推杆、横拉杆和转向杆等组成,底盘转向时,电推杆带动转向板与机架形成的平行四边形结构滑移,驱动底盘后轮转动,实现转向功能。

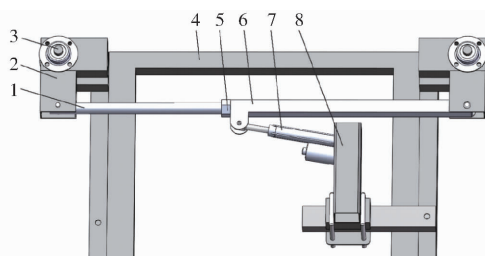


图6 四连杆转向机构三维模型

Fig.6 Three-dimensional model of four link steering mechanism

1. 伸缩轴 2. 转向板 3. 转向轴承 4. 机架 5. 固定螺母 6. 伸缩套筒 7. 电推杆 8. 固定矩管

施药机在田间转向时的最小转向半径 R_{\min} 应为 4 行花生带、4 行玉米带和两种作物带间距离总和的一半,如图 7 所示。有

$$R_{\min} = \frac{2M_1 + 3M_2 + 2H_1}{2} \quad (5)$$

式中 M_1 ——玉米带内间距, m

M_2 ——花生带内间距, m

H_1 ——玉米花生带间间距, m

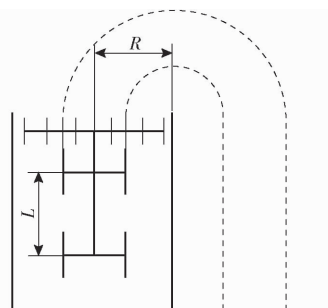


图7 施药机底盘转向模型

Fig.7 Mathematical model of steering mechanism

由式(5)计算得到施药机所需最小转向半径 $R_{\min} = 1.65$ m,为保证转向留有部分余地,设计转向半径 $R = 1.6$ m。施药机最大转向角为

$$\theta_2 = \arcsin \frac{L}{R} \quad (6)$$

式中 L ——底盘轴距, m

施药机底盘轴距 $L = 1.2$ m。由式(6)计算得到施药机所需的最大转向角 $\theta_2 = 48^\circ$ 。

为确保四连杆转向模型(图8)中,左右转向角一致,需计算电推杆安装时,底部与机架中心 D_2 距离 L_2 。电推杆底部安装于机架 D_1 处,顶部安装于横拉杆的中心 D_3 处。转向杆长度 $L_3 = 125$ mm,转向轴承与机架的垂直距离 $L_4 = 200$ mm。有

$$L_1 = L_4 - L_3 \cos\theta_2 \quad (7)$$

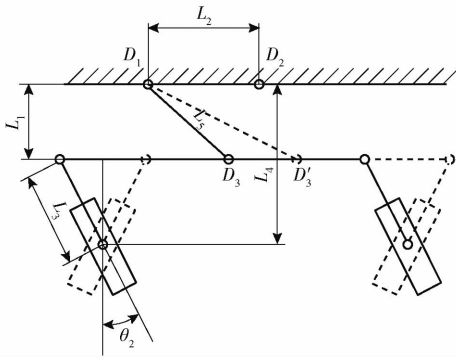


图8 四连杆转向模型

Fig. 8 Four link steering mode

式中 L_1 ——机架与横拉杆的最大距离, mm

由式(7)计算得到机架与横拉杆最大距离 $L_1 = 116$ mm, 因此转向电推杆选取 PFDE12V-100 型直流电推杆, 其总长为 200~300 mm, 行程为 100 mm。

当 $L_5 = 200$ mm 时转向机构向左达到最大偏移量, 当 $L_5 = 300$ mm 时转向机构向右达到最大偏移量, 且左右最大偏移量必须相等, 因此以 L_5 为半径, D_3 为圆心作圆, 与机架的交点 D_1 即为电推杆底部的安装位置。 D_1 与 D_2 距离为

$$L_2 = \frac{1}{2} \sqrt{300^2 - L_1^2} + \frac{1}{2} \sqrt{200^2 - L_1^2} \quad (8)$$

由式(8)计算得到 $L_2 = 440$ mm。

2.3 喷杆

喷杆主要由防飘隔板、四杆升降机构、喷头、侧杆架和中心杆架组成, 侧杆架长度为 1.4 m, 中心杆架长度为 1.5 m, 杆架完全展开后总体长度为 4.3 m, 如图 9 所示。

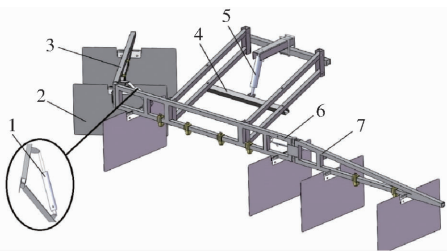


图9 折叠喷杆及防飘装置三维模型

Fig. 9 Three dimensional model of folding spray

bar and anti floating device

1. 侧杆架电推杆
2. 防飘隔板
3. 左侧杆架
4. 平行四杆升降机构
5. 中心杆架电推杆
6. 中心杆架
7. 右侧杆架

侧杆架铰接于中心杆架上, 通过两侧的电推杆实现折叠和展开, 以便于运输和宽幅施药。中心杆架焊接于平行四杆升降机构, 由中心电推杆控制喷杆整体升降, 实现对不同高度植株的作业。

侧杆架需 $0^\circ \sim 90^\circ$ 折叠(图 10), 电推杆的顶部安装于点 A, 底部安装于点 B, 侧杆架折叠处设计 $L_6 = 30$ mm、 $L_7 = 180$ mm、 $L_8 = 240$ mm。电推杆长度

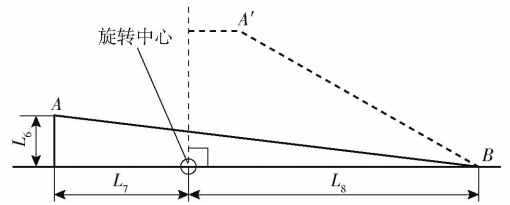


图10 侧杆架折叠模型

Fig. 10 Folding model of side bar frame

极值为

$$\begin{cases} L_{AB\max} = \sqrt{L_6^2 + (L_7 + L_8)^2} \\ L_{AB\min} = \sqrt{L_7^2 + L_8^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 L_6 ——侧杆架突起长度, mm

L_7 ——突起底部距旋转中心长度, mm

L_8 ——电推杆底部距旋转中心长度, mm

由式(9)得到电推杆尺寸范围为 300~421 mm。综合考虑, 侧杆架电推杆选用 PFDE12V-200 型直流电推杆, 其行程为 200 mm, 总长为 305~505 mm。同时为保证喷杆具有一定的升降空间, 方便施药机移动和转向, 使用电推杆控制平行四杆升降机构进行升降, 其型号为 PFDE12V-150, 行程为 150 mm, 总长为 255~405 mm。

2.4 防飘隔板

为最大程度减少喷洒作业时的药液飘移, 采用分带隔板对药液飘移进行抑制。分带隔板尺寸过小抑制效果不明显, 尺寸过大又会影响整机机动性。

因此本文采用 Fluent 软件模拟雾滴在风场中的运动轨迹, 结合雾滴下降距离, 确定分带隔板最佳尺寸, 如图 11 所示。喷雾计算域尺寸设置为 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$, 喷头位于隔板中间位置, 进出口均以风速作为边界条件, 空气密度设置为 1.29 kg/m^3 , 边界条件设置为 trap, 喷头压力设置为 0.5 MPa , 雾滴直径设置为 $340\text{ }\mu\text{m}$ ^[16-17]。通常, 在小于三级风(气流速度 $3.4 \sim 5.4\text{ m/s}$) 条件下进行大田施药作业, 因此本文以气流速度 5.4 m/s 作为边界条件确定挡板尺寸。

由雾滴轨迹散点云图(图 12)可见, 当气流速度达到 5.4 m/s 时, 只有少量雾滴的飘移距离达到 0.6 m 。因此以雾滴飘移距离 0.6 m 为依据, 确定防飘隔板长度为 1.2 m , 在此长度下可以阻挡大部分雾滴飘移。此外, 施药作业时喷头距植株顶端一般为 $0.5 \sim 1.0\text{ m}$, 考虑到防飘隔板过短会加重药液漂移现象, 过长又会切割作物, 综合考虑选取防飘隔板的宽度为 0.7 m , 确定防飘隔板的尺寸为 $1.2\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ 。

2.5 施药系统

施药系统是电动自走式玉米-花生带状复合种

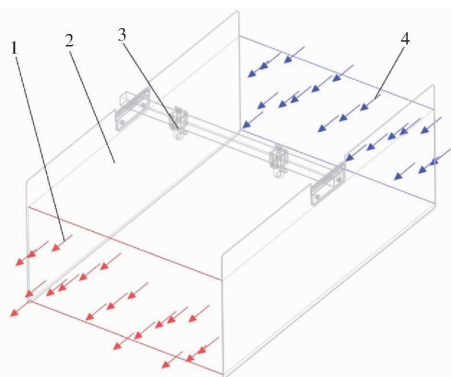


图 11 喷雾范围计算域

Fig. 11 Simulation structure diagram of spray range

1. 出风口 2. 分带隔板 3. 喷头 4. 进风口

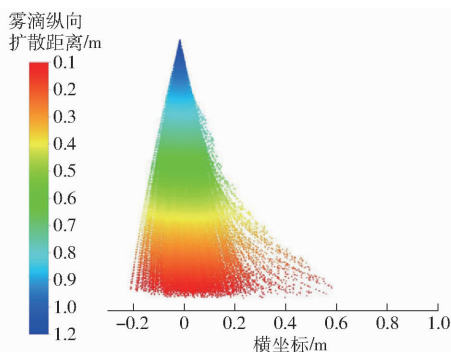


图 12 5.4 m/s 气流对雾滴飘移的影响

Fig. 12 Effect of 5.4 m/s airflow on droplet drift

植施药机的核心部分。施药系统的设计直接关系到整机的工作效率和作业效果。由于玉米-花生两种作物施药需求不同,因此需设计两套独立施药系统,该系统由玉米药液箱、花生药液箱、隔膜泵、多路控制阀、主控制器、流量传感器、速度传感器和防飘喷头等组成,施药系统工作原理如图 13 所示。

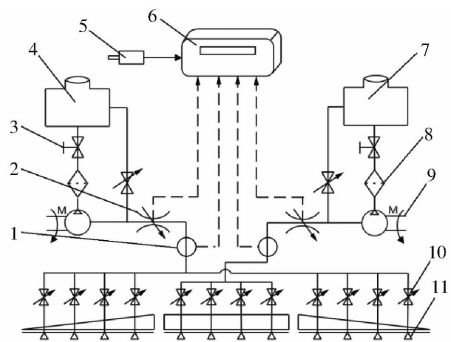


图 13 施药系统工作原理图

Fig. 13 Working principle diagram of application system

1. 流量传感器 2. 比例控制阀 3. 管路总阀 4. 玉米药液箱
5. 速度传感器 6. STM32 主控制器 7. 花生药液箱 8. 过滤器
9. 隔膜泵 10. 手动调节阀 11. 防飘喷头

施药系统工作时,两路药液分别经过滤器由隔膜泵输送到比例控制阀,主控制器通过改变调节比例控制阀的开度从而控制施药量,最后经由开关控制阀通过喷头雾化后作用于作物上。同时,每条管

路装有流量传感器,可以实时检测管路中的流量,并反馈给 STM32 主控制器形成闭环控制。当施药管路压力过大时,安全阀泄压,通过安全阀将多余的药液经由回流管路送回药箱,使压力不超过设定值,防止水管爆裂。

3 控制系统设计

3.1 主控系统

主控制器芯片选择 ARM 公司生产的 STM32F103RCT6^[18-19],该微处理器内核采用哈佛结构,拥有独立的指令总线和数据总线,系统数据访问同时进行,时钟频率最高可达 72 MHz,使运行速度最大化。其中,采用立创 EDA 软件^[20]完成推杆控制、隔膜泵控制、底盘运动控制、电磁阀控制、蓝牙通讯接口等电路原理图和 PCB 设计,控制程序采用 Keil uVision 5 软件编写,制作完成后的控制系统电路板实物如图 14 所示。

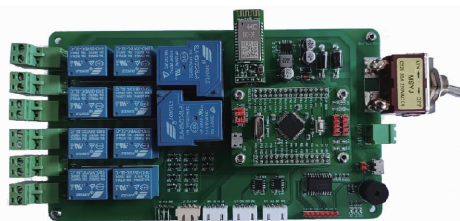


图 14 STM32 主控板

Fig. 14 STM32 main control board

3.2 手机上位机

为实现操作简洁化和数据可视化,开发了基于 Android 系统的 APP,其人机交互界面如图 15 所示。

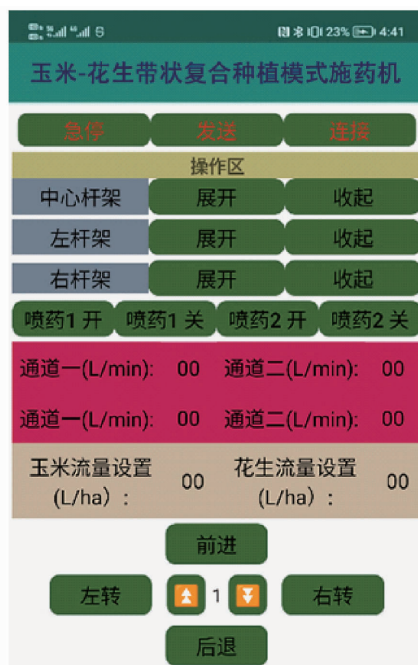


图 15 Android 手机 APP 主界面

Fig. 15 Android mobile APP main interface

该 APP 采用 Android studio^[21] 软件进行程序编写与界面设计。施药作业时,操作人员通过 Android 手机的蓝牙功能与主控系统建立通讯,将操作指令传入主控系统,实现对整机远程控制与数据监控。APP 的主要功能有施药杆架展开和收起、隔膜泵开关、底盘移动控制、电磁阀开度监控、输出流量设置和监控等。本系统蓝牙模块采用 DX-BT28 远距离无线透传模块、蓝牙 5.0 协议,与手机的最远通信距离为 230 m,传输速率为 11 kB/s。

3.3 电源分配

施药机控制系统采用 12 V 蓄电池供电,而多组传感器和主控芯片采用 5 V 或 3.3 V 供电,其电源分配关系如图 16 所示,因此采用降压电路将电压稳定在 5 V 或 3.3 V。DC-DC 降压模块采用 TPS5430 和 AMS1117-3.3 降压芯片^[22] 组合使用,采用 TPS5430 将 12 V 电压稳定在 5 V,采用 AMS1117-3.3 将 5 V 电压稳定在 3.3 V。

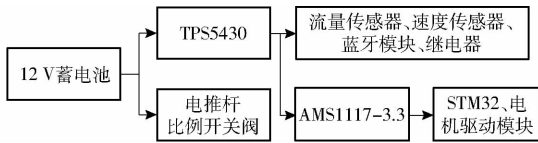


图 16 电源分配关系框图

Fig. 16 Voltage distribution relationship

3.4 变量施药程序

为适应田间复杂路况,使用增量式 PID 算法^[23] 实时调节出药量,使其与底盘行走速度匹配,实现变量施药,增量式 PID 控制算法框图如图 17 所示。作业前,需根据每公顷玉米和花生施药量需求在 APP 界面设定好底盘的前进速度和施药量等参数,点击确定按钮将信息传入主控系统。主控系统采用增量式编码器采集底盘的实时速度,由同步带轮连接主轴和增量式编码器,将速度信息反馈到 STM32 主控系统,主控制器根据设定参数计算出期望流量,通过流量传感器测量输出端实际流量反馈给主控制器,主控制器将期望流量与实际流量进行比较,并将两者的偏差通过增量式 PID 算法计算下一次输出量。

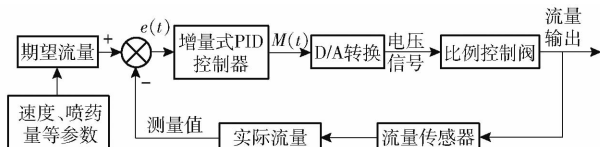


图 17 增量式 PID 闭环控制算法框图

Fig. 17 Incremental PID closed-loop control algorithm block diagram

3806 增量式编码器最高转速为 2 000 r/min,最高响应频率为 20 kHz,脉冲信号输出模式为 NPN

型,采用 M 法^[24] 测速计算底盘行驶速度,底盘速度计算公式为

$$v_m = \frac{216M_3}{PT} i_1 \quad (10)$$

式中 v_m ——底盘行驶速度,km/h

M_3 ——每周期的采样数

P ——编码器旋转一周发出的脉冲个数

T ——采样周期,ms

i_1 ——高地隙轮与编码器传动比

作业前需通过 APP 设定施药量 C ,通过公式

$$e(t) = Q_w - \frac{Cdmv_m}{6000} \quad (11)$$

式中 $e(t)$ ——期望流量与实际流量的偏差,L/min

Q_w ——实际流量,L/min

C ——施药量,L/hm²

d ——喷嘴间距,cm

m ——喷头数

得到底盘行驶速度与流量偏差的关系。

通过公式

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{K_I} \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d(e(t))}{dt} \right) \quad (12)$$

式中 $u(t)$ ——控制器输出值

K_p ——比例放大系数

K_I ——积分时间系数

K_D ——微分时间系数

得到增量式 PID 计算流量的输出值,通过 D/A 转换器将数字量信号转换为模拟量电压信号,最终输出到比例控制阀,比例控制阀对阀门开度进行实时调节,使实际流量与期望流量保持相同,最终实现施药系统闭环控制。

对喷出流量做 PID 参数调节,设置被控对象为流量,采样周期设定在 20 ms 左右。首先加入比例环节,将比例放大系数由小到大给定,通过多次试验观察响应现象,直到系统出现迅速而又不明显振荡后加入积分环节,调节积分时间常数,使系统能保持较小的稳态误差和较小的振荡时间,之后由小到大加入微分环节,同时调节比例放大系数和积分时间,对于不同作业环境分多次试验进行调节,取最优值。

4 样机试验

4.1 试验方法

样机试验主要包括流量控制精度试验、变量施药试验和雾滴沉积性能试验。其中,流量控制精度试验在河北农业大学喷雾实验室进行,台架试验如

图 18a 所示;变量施药试验和雾滴沉积性能试验在河南省郑州市颖阳镇玉米-花生带状复合种植田块进行,样机田间试验如图 18b 所示。雾滴沉积性能试验采用水敏纸进行检测,共设置 6 组田块,水敏纸布置如图 18c、18d 所示。

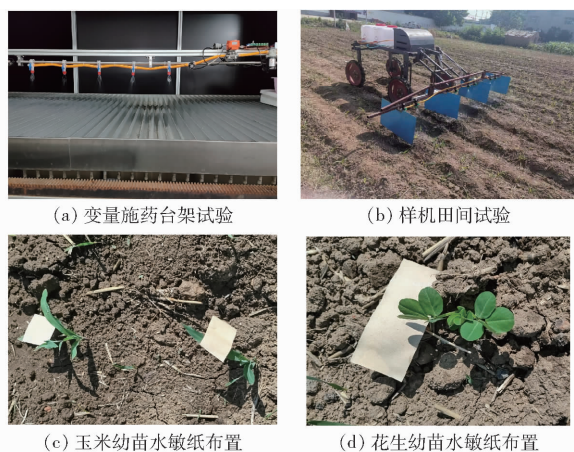


图 18 自走式玉米-花生带状复合种植模式施药机试验

Fig. 18 Tests of self-propelled maize-peanut strip compound planting pesticide applicator

本系统隔膜泵采用信利德公司的 SL-DP16 型双核隔膜泵,该泵额定电压为 12 V,输出流量为 10~12 L/min;采用 PM-01 调节型比例控制阀,该阀门横截面积由球型阀门的开度角控制,通过主控系统产生的 PWM 脉冲控制球型阀门转动,从而控制流量;流量传感器选用 YF-S201 型霍尔流量传感器,该型传感器通过内置霍尔传感器产生的脉冲信号检测流量;采用德国迪科爱农公司 AirMix 系列 110-03 型扇形蓝色喷头,喷嘴雾锥角为 110°。

4.2 流量控制精度试验

比例控制阀调控的精准与否是实现变量施药的前提。通过台架试验,分别检测 4 个喷头的实际流量,并与目标流量作对比得出相对误差,测试比例控制阀的调控作用。试验时将目标流量分别设置为 6.0、8.0、10.0、12.0 L/min,通过计算得出单个喷头目标流量,用水桶分别接取 4 个喷嘴处的水,测试时间为 15 min,将测得的单个喷头实际流量与单个喷头目标流量进行比较,其试验结果如表 4 所示。

由表 4 可知,目标流量设定较高时相对误差较低,调控后单个喷头目标流量与实际流量的相对误差 $\eta \leq 4.0\%$,满足本设计精准调控要求。

4.3 变量施药试验

为验证变量施药系统可靠性与各项参数可行性,将台架试验调试完成的施药系统搭建在设计完成的实体样机上,测试变量施药系统的实际效果。

表 4 流量控制精度测试结果

Tab. 4 Flow accuracy test results

目标流量/ (L·min ⁻¹)	实际流量/ (L·min ⁻¹)	单个喷头 目标流量/ (L·min ⁻¹)	单个喷头 实际流量/ (L·min ⁻¹)	相对 误差 $\eta/\%$
6.0	6.08	1.5	1.48	1.33
			1.54	2.67
			1.48	1.33
			1.56	4.00
8.0	8.16	2.0	2.07	3.50
			2.05	2.50
			2.08	4.00
			1.96	2.00
10.0	10.19	2.5	2.59	3.60
			2.45	2.00
			2.58	3.20
			2.57	2.80
12.0	12.10	3.0	3.08	2.67
			3.11	3.67
			2.95	1.67
			2.96	1.33

本次试验共设置 2.0、3.2、4.0 km/h 共 3 种速度,通过旋转编码器测试底盘实时速度,并通过蓝牙模块将速度信息上传并记录到 PC 端,测试时间为 300 s,动态车速曲线如图 19 所示。

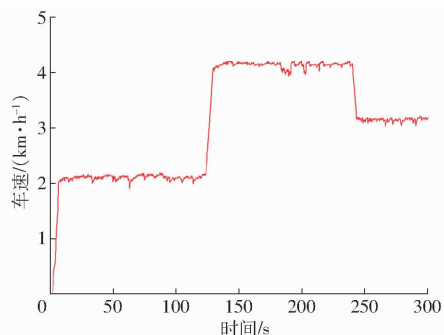


图 19 动态车速变化曲线

Fig. 19 Dynamic speed curve

系统启动后每 3 s 记录一次桶内喷出的药液,测试时间为 5 min,管路喷出药液跟随车速的动态曲线如图 20 所示。

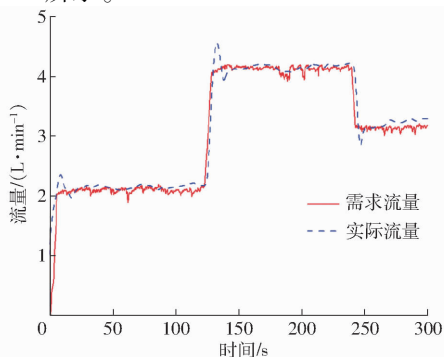


图 20 流量跟随动态车速响应曲线

Fig. 20 Flow follows dynamic speed response curves

试验过程中,施药机在 0 s 与 126 s 时加速行进,在 240 s 时减速行进。系统启动时,施药系统进行相应调节,在样机加速和减速阶段,施药系统由于惯性均出现超调现象,随之速度趋于稳定,期间耗时最长为 8 s,当车速稳定运行时,需求流量曲线与实际流量曲线均能较好地拟合,说明经过控制系统调节,施药系统均能跟随动态车速的变化而变化,并且保持较小的偏差,实现动态跟随。经计算,系统平均超调量为 2.7%,在 300 s 内实际喷出的药量为 15.6 L,与理论值相差 2.1%。

4.4 雾滴沉积性能试验

为尽量减小误差,本次试验共设置 6 组取样区域,每个取样区域面积为 1 m^2 ,每组距离至少间隔 1 m,将水敏纸用透明胶带固定在玉米和花生枝叶上,每组区域设置 5 个取样点,雾滴沉积数量取平均值,试验时将样机以不同速度驶过水敏纸设置区域,作业后取下水敏纸带回实验室进行统计分析,试验取 1 cm^2 雾滴沉积数为试验指标。在不同行驶速度下的雾滴沉积数量如图 21 所示。

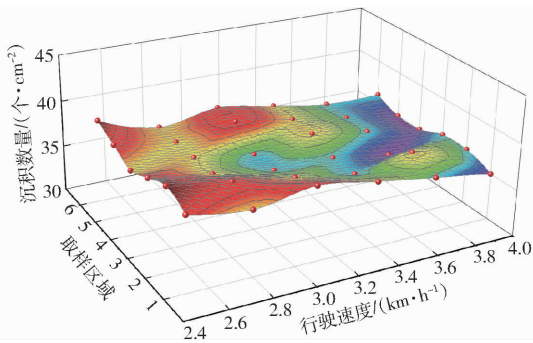


图 21 动态车速下的雾滴沉积曲面

Fig. 21 Droplet deposition surface under dynamic vehicle speed

由图 21 可知,当车速升高时,雾滴沉积数量略微减少,这可能是由于流场作用和相对风速增加而加剧了雾滴飘移,但不同车速下的雾滴沉积个数极差为 4 个/ cm^2 ,数据浮动差异不大,表明变量施药系统具有良好的稳定性。图 22 为施药作业后沉积效果,结合试验数据分析,本系统工作时单位面积最低沉积数量为 35 个/ cm^2 ,作业效果符合国家标准(作物上沉积液滴数量最低为 30 个/ cm^2 ^[25]),可适用于大田作业。

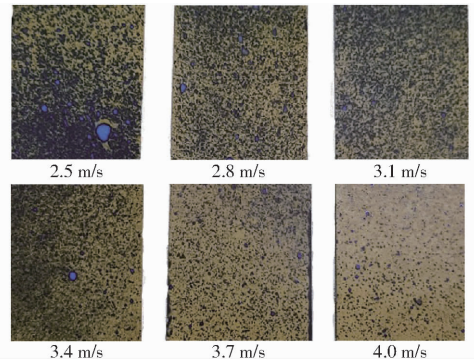


图 22 不同速度作业后水敏纸液滴沉积效果

Fig. 22 Effect of water-sensitive paper droplet deposition after working at different speeds

5 结论

(1)设计了一款针对玉米-花生带状复合种植模式施药作业的自走式施药机。根据文献查阅和现场调研,确定了玉米花生带状复合种植模式施药机的总体设计方案和主要技术参数。根据底盘在满载的工作状态攀爬 25° 斜坡对驱动电机选型,保证了底盘攀爬能力;使用电推杆推动四连杆机构控制后轮转向,设计转向半径为 1.6 m;使用电推杆推动侧杆架伸展与平行四杆升降机构升降;通过 Fluent 软件仿真了雾滴在不同风场下的飘移距离,确定了防飘隔板最佳尺寸。

(2)控制系统设置遥控模块、底盘驱动模块、变量施药模块,能够同时控制多个模块协调工作且互不干涉。设计了基于 Android 手机的 APP 控制软件,实现了对自走式玉米-花生带状复合种植施药机的远程控制;使用流量传感器与比例控制阀组成流量闭环控制,设计增量式 PID 算法精确控制管路的输出流量。

(3)流量控制精度试验表明,施药系统在目标流量较高时相对误差较低,调控后单个喷头目标流量与实际流量的相对误差 $\eta \leq 4.0\%$;变量施药试验表明,施药流量随车速变化而变化,出现超调现象到稳定状态的时间小于 8 s,在试验期间喷出流量的实际值与理论值控制在 2.1% 以内,实现了变量施药,且控制精度较高;雾滴沉积性能试验表明,雾滴沉积个数极差为 4 个/ cm^2 ,单位面积最低沉积数量为 35 个/ cm^2 ,符合国家标准,施药系统性能稳定、均匀性好。

参 考 文 献

- [1] 杨欢,周颖,陈平,等. 玉米-豆科作物带状间套作对养分吸收利用及产量优势的影响[J]. 作物学报,2022,48(6):1476-1487.
YANG Huan, ZHOU Ying, CHEN Ping, et al. Effects of nutrient uptake and utilization on yield of maize-legume strip intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica,2022,48(6):1476-1487. (in Chinese)
- [2] 董奇琦,袁洋,杜琪,等. 玉米花生带状间作对植株氮吸收和土壤微生物群落的影响[J]. 中国油料作物学报,2022,44(6):1296-1306.

- DONG Qiqi, YUAN Yang, DU Qi, et al. Effects of strip intercropping of maize and peanut on nitrogen uptake and soil microbial community diversity[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(6): 1296 – 1306. (in Chinese)
- [3] DU J, HAN T, GAI J, et al. Maize-soybean strip intercropping: achieved a balance between high productivity and sustainability [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(4): 747 – 754.
- [4] 张荣成, 刘天星, 朱松, 等. 玉米大豆带状复合种植专用植保机研制与试验[J]. 江苏农机化, 2022(6): 12 – 16.
ZHANG Rongcheng, LIU Tianxing, ZHU Song, et al. Development and experiment of a special plant protection machine for corn and soybean strip composite planting[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2022(6): 12 – 16. (in Chinese)
- [5] 尚增强. 小型电动自走式分带喷杆喷雾机的设计与试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
SHANG Zengqiang. Design and experimental study of a small electric self propelled spray bar sprayer[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [6] 程上上. 大豆玉米带状复合种植分带喷杆喷雾机设计及试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
CHENG Shangshang. Design and experimental study of spray machine for striped compound planting of soybean and corn[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [7] GONZALEZ R, PAWLOWSKI A, RODRIGUEZ C, et al. Pressure-control system for a mobile sprayer for all. Design and implementation of an automatic greenhouse applications[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2012, 10(4): 939 – 949.
- [8] 王相友, 胡周勋, 李学强, 等. 多回流式变量喷药控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 123 – 131.
WANG Xiangyou, HU Zhouxun, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of multi-reflux variable spraying control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 123 – 131. (in Chinese)
- [9] 徐艳蕾, 包佳林, 付大平, 等. 多喷头组合变量喷药系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 47 – 54.
XU Yanlei, BAO Jialin, FU Daping, et al. Design and experiment of variable spraying system based on multiple combined nozzles [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 47 – 54. (in Chinese)
- [10] 孙文峰, 刘海洋, 王润涛, 等. 基于神经网络整定的 PID 控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 55 – 64, 94.
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 55 – 64, 94. (in Chinese)
- [11] 刘维佳, 曲明静, 焦坤, 等. 花生/玉米间作对昆虫群落多样性及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(3): 600 – 607.
LIU Weijia, QU Mingjing, JIAO Kun, et al. Effects of peanut/maize intercropping on insect community diversity and yield in peanut field[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45(3): 600 – 607. (in Chinese)
- [12] 左元梅, 李晓林, 曹一平, 等. 河南省沙区玉米花生间作对花生铁营养效率及间作优势的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 658 – 663.
ZUO Yuanmei, LI Xiaolin, CAO Yiping, et al. The effects of peanut intercropped with maize on iron nutrition efficiency of peanut and intercropping advantage in sandy soil in Henan Province[J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(5): 658 – 663. (in Chinese)
- [13] 焦念元, 赵春, 宁堂原, 等. 玉米-花生间作对作物产量和光合作用光响应的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 981 – 985.
JIAO Nianyuan, ZHAO Chun, NING Tangyuan, et al. Effects of maize – peanut intercropping on economic yield and light response of photosynthesis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 981 – 985. (in Chinese)
- [14] 刘平义, 高金成, 李海涛, 等. 农用全地形仿形行走底盘地面力学特性[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 36 – 40.
LIU Pingyi, GAO Jincheng, LI Haitao, et al. Terramechanics of all terrain adaptive locomotion chassis for farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 36 – 40. (in Chinese)
- [15] 李丹, 朱德兰, 刘柯楠, 等. 平移式喷灌机行走阻力的确定及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 19 – 27.
LI Dan, ZHU Delan, LIU Kenan, et al. Determination and application verification for driving resistance of lateral move sprinkling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 19 – 27. (in Chinese)
- [16] 张慧春, DORR Gary, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53 – 57, 52.
ZHANG Huichun, DORR Gary, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 53 – 57, 52. (in Chinese)
- [17] 丁素明, 薛新宇, 董祥, 等. 喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 308 – 315.
DING Suming, XUE Xinyu, DONG Xiang, et al. Effects of spraying parameters on droplet deposition performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 308 – 315. (in Chinese)
- [18] 徐建春. 电子设计软件 Altium Designer 的多通道设计应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(3): 33 – 35.
XU Jianchun. Altium Designer multi-channel design application[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2019, 19(3): 33 – 35. (in Chinese)
- [19] 马荣廷, 柳静, 刘明明, 等. 嵌入式测试系统用高精度数控恒压恒流源[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018, 18(6): 65 – 68, 73.
MA Rongting, LIU Jing, LIU Mingming, et al. Design of programmable DC power supply used in embedded system[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2018, 18(6): 65 – 68, 73. (in Chinese)

- [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 177 – 183.
- [26] ZULPE N, PAWAR V. GLCM textural features for brain tumor classification[J]. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 2012, 9(3): 354.
- [27] CAO R, CHEN Y, SHEN M, et al. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky – Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 244 – 257.
- [28] XUE H, XU X, ZHU Q, et al. Object-oriented crop classification using time series sentinel images from Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1353.
- [29] CHAN J C W, PAELINCKX D. Evaluation of random forest and Adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 2999 – 3011.
- [30] 何云, 黄翀, 李贺, 等. 基于 Sentinel – 2A 影像特征优选的随机森林土地覆盖分类[J]. *资源科学*, 2019, 41(5): 992 – 1001.
HE Yun, HUANG Chong, LI He, et al. Land-cover classification of random forest based on Sentinel – 2A image feature optimization[J]. *Resources Science*, 2019, 41(5): 992 – 1001. (in Chinese)
- [31] IMMITZER M, VUOLO F, ATZBERGER C. First experience with Sentinel – 2 data for crop and tree species classifications in central Europe[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 166.
- [32] PERSSON M, LINDBERG E, REESE H. Tree species classification with multi-temporal Sentinel – 2 data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1794.
- [33] THENKABAIL P S, ENCLONA E A, ASHTON M S, et al. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3 – 4): 354 – 376.
- [34] YOU N, DONG J, HUANG J, et al. The 10-m crop type maps in Northeast China during 2017—2019[J]. *Scientific Data*, 2021, 8(1): 41.
- [35] TEKE A, KAVZOGLU T. Determination of effective predisposing factors using random forest-based Gini index in landslide susceptibility mapping[J]. *Intercontinental Geoinformation Days*, 2021(2): 198 – 201.
- [36] ZHANG H, WANG Y, SHANG J, et al. Investigating the impact of classification features and classifiers on crop mapping performance in heterogeneous agricultural landscapes [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102388.
- [37] 牛乾坤, 刘浏, 黄冠华, 等. 基于 GEE 和机器学习的河套灌区复杂种植结构识别[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 165 – 174.
NIU Qiankun, LIU Liu, HUANG Guanhua, et al. Extraction of complex crop structure in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using GEE and machine learning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(6): 165 – 174. (in Chinese)
- [38] ZHANG D, ZHANG M, LIN F, et al. Fast extraction of winter wheat planting area in Huang – Huai – Hai Plain using high-resolution satellite imagery on a cloud computing platform [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(1): 241 – 250.
- [39] 刘昊. 基于 Sentinel – 2 影像的河套灌区作物种植结构提取[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(2): 88 – 95.
LIU Hao. Extraction of crop planting structure in Hetao irrigated area based on Sentinel – 2 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(2): 88 – 95. (in Chinese)
- [40] 张超, 乔敏, 刘哲, 等. 基于时序光谱和高分纹理分析的制种玉米田遥感识别[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 218 – 225.
ZHANG Chao, QIAO Min, LIU Zhe, et al. Seed maize field identification based on analysis of remote sensing timing spectrum and high resolution texture [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 218 – 225. (in Chinese)

(上接第 225 页)

- [20] 黄丽冰, 黄志明, 莫金莲, 等. 立创 EDA 结合 Altium Designer 快速完成 PCB 设计思路[J]. *现代制造技术与装备*, 2020, 56(10): 65 – 67.
HUANG Libing, HUANG Zhiming, MO Jinlian, et al. EDA combined with Altium Designer to quickly complete PCB design ideas [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2020, 56(10): 65 – 67. (in Chinese)
- [21] ANUSHA A P, KAUR G. Artificial intelligence-based method to improve tourism with the help of Android studio [J]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2021, 10(6): 50 – 53.
- [22] LIU Z S. Research on switch power module parallel operation system [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 3360(599 – 601): 1657 – 1660.
- [23] 曲志强, 夏铁铮, 于虹博. 一种分离式变增量积分 PID 算法设计[J]. *电子设计工程*, 2023, 31(7): 52 – 56.
QU Zhiqiang, XIA Tiezheng, YU Hongbo. Design of a separate variable increment integral PID algorithm [J]. *Electronic Design Engineering*, 2023, 31(7): 52 – 56. (in Chinese)
- [24] 王辉, 胡建华, 王慎航. 增量式光电编码器角位移拟合测速法[J]. *仪表技术与传感器*, 2014(10): 99 – 101.
WANG Hui, HU Jianhua, WANG Shenhang. Angular position fitting velocity detection of incremental optical encoder [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(10): 99 – 101. (in Chinese)
- [25] GB/T 17997—2008 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定[S]. 2008.