

基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统设计与试验

翟长远^{1,2} 张焱龙^{1,2} 邹伟^{2,3} 宋健^{2,3} 韩长杰¹ 窦汉杰^{2,3}

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097;

3. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对现有大田精准施药系统主要以药量变量控制为主, 缺乏农药喷施作业数据远程监测与溯源管理等问题, 本文设计了基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统, 可实现农药精准变量喷施, 作业地块、作业时间、作业面积、农药种类与配比、喷施药量、喷雾压力、实时流量和作业速度等信息的在线监测、实时显示和溯源管理。基于该系统分别开展了施药量计算精度、作业面积计算精度、物联网数据传输稳定性、变量调控系统动态响应、变量调控精度和农药喷施均匀性等试验。试验结果表明, 北斗定位测速最大误差为 1.33%, 平均误差为 0.82%, 施药量计算误差为 1.73%, 作业面积计算误差为 2.61%, 数据丢失率为 3.51%; 速度连续变化下系统稳定调节时间为 4~5 s; 不同设定施药量和作业速度下, 变量调控精度误差为 2.45%; 雾滴沉积点密度大于 20 滴/cm² 下, 在喷雾机行走和喷雾方向上的喷雾覆盖率变异系数均小于 10%, 满足精准变量作业要求。本研究可在实现药量变量调控下对农药喷施数据进行溯源管理, 为后续开展大田作物农药残留风险评估提供支撑。

关键词: 喷杆喷雾机; 精准施药; 变量控制; 远程监测; 溯源管理

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0160-10

OSID:



Design and Test of Precision Variable-rate Spray Monitoring and Control System Based on Pesticide Spraying Traceability

ZHAI Changyuan^{1,2} ZHANG Yanlong^{1,2} ZOU Wei^{2,3} SONG Jian^{2,3} HAN Changjie¹ DOU Hanjie^{2,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

3. National Engineering Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: The existing field spraying system mainly control spray volume by the variable-rate technology, which is lack of pesticide spraying data remote monitoring and traceability management. A precision variable-rate monitoring and control system was designed based on pesticide spraying traceability. The system can realize precision variable-rate spraying, on-line monitor and real-time display different spray information, including spray plot, spray time, spray area, type and ratio of pesticide, spray volume, spray pressure, real-time spray flow and spray speed, which can be used to pesticide spraying traceability management. Based on the system, the tests of spray volume calculation accuracy, spray area calculation accuracy, data transmission stability of Internet of things, dynamic response of variable-rate control system, variable control precision and pesticide spraying uniformity were carried out respectively. The test results showed that the maximum error of Beidou positioning speed measurement was 1.33% and the mean error was 0.82%, the calculation error of spray volume was 1.73%, the calculation error of spray area was 2.61%, the data loss rate was 3.51%, the system stability adjustment time under continuous speed change was 4~5 s, the variable-rate regulation accuracy was 2.45%, the density of droplet deposition was greater than 20 drops/cm², and the variation coefficient of spray coverage in sprayer walking and spray direction was less than 10%, which met the operation requirements of precision variable-rate spray. The research can realize the traceability management of the pesticide spraying data

收稿日期: 2023-12-06 修回日期: 2023-12-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1000105-4)、国家自然科学基金面上项目(32372573)和中国博士后科学基金面上项目(2023M740312)

作者简介: 翟长远(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业智能装备技术研究, E-mail: zhaicy@nercita.org.cn

通信作者: 窦汉杰(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事农业智能装备技术研究, E-mail: douhj@nercita.org.cn

under the precision variable-rate adjustment of spray volume, and provide support for the pesticide residue risk assessment in field crops.

Key words: boom sprayer; precision spraying; variable-rate control; remote monitoring; traceability management

0 引言

喷杆式喷药机具有较好的喷雾效果和较高的作业效率,已成为当前大田喷药主要作业机具。为提高农药利用率和喷施均匀性,大田喷药逐步采用精准施药技术^[1-2]。农药喷施中,不仅需要对喷施量进行精准变量调控,而且对喷施作业信息进行在线监测和溯源管理,同样至关重要,可为农药监管和农药残留风险评估提供数据支撑^[3-4]。

针对精准施药技术,国外率先开展相关方面研究,YUKI 等^[5]基于 CAN 总线设计喷杆式喷雾机变量喷药控制系统,可根据拖拉机行驶速度和喷雾压力实现药量变量调控;KIM 等^[6]提出了一种对喷杆喷雾机喷雾系统旁路分段调控的方法,提高了喷雾机沿弯行道喷洒时左、中、右喷杆段喷雾均匀性;HUSSAIN 等^[7]针对大田变量喷药,提出一种模型预测控制算法(MPC),可提高变量调控过程中瞬态响应和减少峰值超调;文献[8-9]通过对喷杆喷雾机单个喷头流量控制,实现喷施药量变量调控;国外喷药机生产企业,以 John Deer、Hardi 和 Spraying System 等公司为代表,开展了大田精准变量调控技术研究,已经形成了多款商业化精准变量喷药控制系统产品,可实现喷药精准调控和作业信息远程监测,并根据农药喷施作业信息进行作业质量评价。

国内在这方面研究起步较晚,目前研究主要集中在药量精准变量调控技术或农药喷施作业信息监测技术,二者融合的一体化监控系统研究较少。文献[10-12]设计了一种基于 PID 算法的喷杆式喷药机变量喷药控制系统,通过多回流式变量调控实现管道流量调节。文献[13-15]分别基于模糊 PID 和神经网络 PID 设计了变量喷药控制系统,提高了系统稳态精度和动态性能。文献[16-17]针对国产 3W-250 型喷杆喷雾机,采用模糊 PID 控制与基于喷药流体网络模型的 Smith 预估控制相结合,设计了旁路节流式变量喷药控制系统,提高了系统动态响应性和鲁棒性。翟长远等^[18-20]设计了可同时监测施药压力和施药流量的施药监测系统。孙文峰等^[21]基于 LabVIEW 开发上位机监测软件,监测车速、流量和压力等信息。国内喷药机生产企业针对喷杆喷药机也相应研发系列精准变量喷药控制系统,以上海联适导航技术股份有限公司、宁波力成农

用喷雾技术有限公司等为代表,主要以药量变量调控为主。

综上,大田精准施药技术在国外研究起步较早,已实现商品化应用,相应产品不仅具备变量调控功能,而且可对作业参数信息进行远程监测与溯源管理。国内相关研究主要以精准变量调控为主,施药作业参数监测大多用于远程显示,缺乏药量变量调控与作业参数远程监测与溯源管理一体化系统。

本文设计基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统,主要由药量精准变量调控系统和物联网远程监测溯源管理系统等组成,以实现农药精准变量喷施,作业地块、作业时间、作业面积、农药种类与配比、喷施药量、喷雾压力、实时流量和作业速度等信息的在线监测、实时显示和溯源管理,以期为大田病虫害防治农药监测和农药残留风险评估提供数据支撑。

1 系统设计

1.1 系统硬件组成

基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统包括药量精准变量调控、喷药作业信息监测和农药喷施溯源管理等子系统,整个系统组成如图 1 所示。其中,药量变量调控子系统主要由电子控制单元(Electronic control unit, ECU; C37 型,苏州禾晟微电子科技有限公司)、分段控制阀组、流量传感器、压力传感器(LC-21-5 型,宁波力成农用喷雾技术有限公司)和车载监控终端(EM6104GG 型,北京博创联动科技股份有限公司)等组成,支持自动与手动变量调控两种模式,可根据作业速度变化动态调节分段控制阀组上调压阀开度,通过控制回流比例实现喷雾压力和流量调控,同时区块阀可控制喷杆不同区域喷头开启;喷药作业信息监测子系统主要由扫码枪、摄像头、北斗定位传感器、车载监控终端等组成,扫码枪用于获取喷施农药种类、配比和生产日期等信息,北斗定位天线可实时获取喷药机作业位置和速度信息,摄像头可实时拍摄喷药作业场景图像信息,车载监控终端内置 4G 无线传输模块,可对获取的喷药作业信息进行远程传输;农药喷施溯源管理子系统主要由计算机端和手机端软件组成,可实时显示喷药作业地块、作业时间、作业面积、作业轨迹、农药种类、农药配比、累计喷药量、单次喷药量、实时流量和喷雾压力等作业信息,并将上述信息

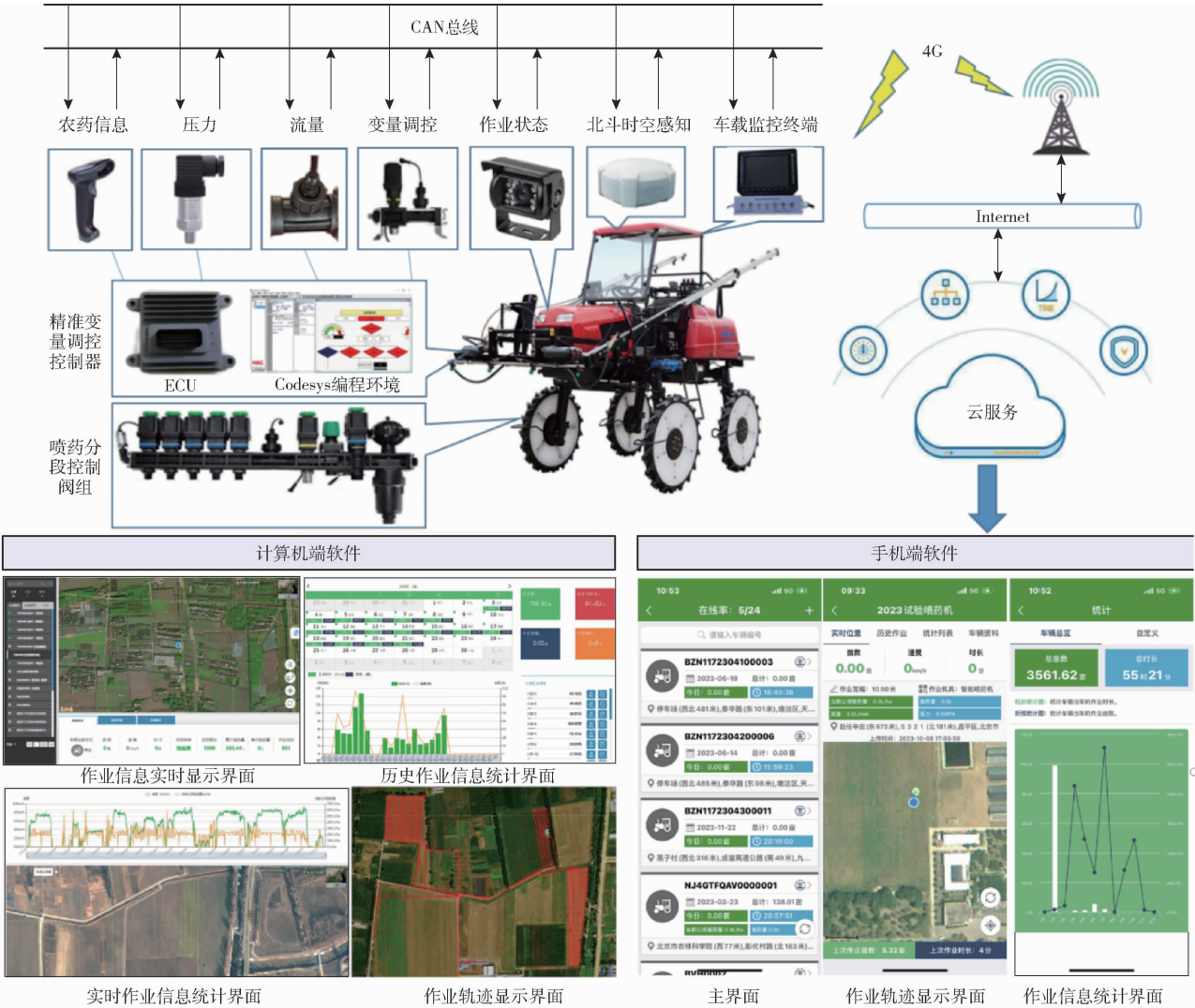


图 1 系统组成

Fig. 1 System composition

作为历史数据进行存储,同时支持历史作业数据统计分析、查询和溯源管理。

1.2 系统软件设计

基于上述系统硬件组成,结合大田喷药作业需求,设计了精准变量喷药控制和喷药作业信息监测与溯源管理等子系统程序运行流程图,如图 2 所示。

药量变量调控时,首先通过车载监控终端输入设定施药量和作业幅宽等信息,系统先判断用户选择的作业模式,如选择手动作业模式,系统会推荐不同作业速度下喷雾系统流量,用户只需根据推荐流量,通过手动控制盒调节调压阀开度到设定流量,驾驶喷药机按选择作业速度喷药即可,这种作业模式还可以作为自动模式失效后应急模式;如选择自动模式,系统会先读取当前作业速度信息,根据设定喷药量计算出系统所需理论流量,并与读取的系统当前流量进行比较,根据二者差值判断调压阀调控方向和开度。系统采用的调压阀为电动球阀,开度调节动态响应受限,而作业过程地面起伏和操作人员

油门控制不稳定等都会引起系统频繁调节,这对变量调控系统提出了较高要求。为了解决这一问题,从实际应用出发,通过长期田间试验测试,提出了一种喷雾系统流量分段调控算法。根据理论流量与当前系统流量的差值范围,将调控过程分成 4 个不同阈值区间,在不同的区域范围内控制调压阀开启时间,进而控制系统回流速度,实现流量快速响应调节,区间阈值范围和调压阀控制信息如图 2a 所示。理论流量计算公式为

$$q = \frac{Qfv}{600}$$

(1)

式中 Q ——设定施药量, L/hm^2
 q ——理论流量, L/min
 v ——作业速度, km/h
 f ——作业幅宽, m

针对喷药作业信息监测与溯源管理,系统通过扫码枪、流量与压力传感器、北斗定位传感器,分别获取喷施农药种类与配比、喷雾系统流量与压力、作

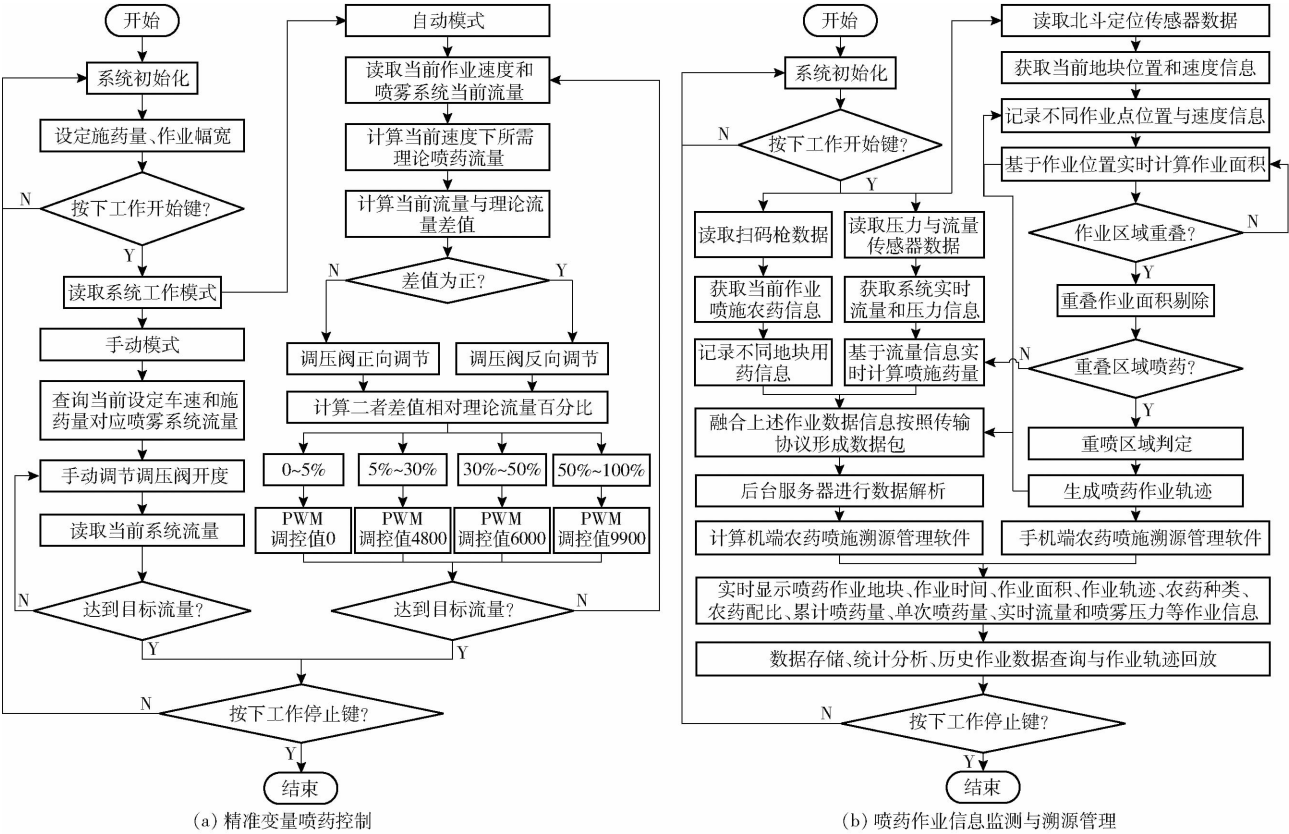


图 2 程序流程图

Fig. 2 Flowchart of program

业地块位置、轨迹和作业面积等信息。车载监控终端将上述作业信息进行融合,通过 4G 网络打包发送给后台服务器,后台服务器将数据转发到计算机端和手机端软件,实现整个喷药过程作业信息实时显示、存储、统计分析、历史作业数据查询和作业轨迹回放等功能。同时,在进行作业面积计算时,通过匹配不同作业位置北斗定位信息,结合喷雾机作业幅宽,实时计算作业面积;作业中,如作业轨迹发生重叠,系统会自动判别重叠区域,并进行作业面积自动修正;在重叠区域内,融合喷雾系统流量,在作业轨迹中标出农药重喷区域,再结合获取的农药种类、喷药时间和喷施量等信息,对当前区域农药残留进行重点关注,实现整个农药喷施过程溯源管理。

1.3 数据通讯协议设计

基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统通讯协议包括车载监控终端与 ECU 之间数据通讯和车载监控终端与后台服务器之间通讯。其中,车载监控终端与 ECU 之间数据通讯采用 CAN 总线通讯,根据 ISO 11783-3:2014 规定,本协议采用多包消息的方式,将报文参数组编号 (Parameter group numbers,PGN) 的数据信息,包含设定施药量、作业幅宽、作业速度和实时喷药流量等数据分包发送。参照 ISO 11783-7:2015 对机具消息应用层的规

定^[22-23],制订协议如表 1 所示。

表 1 数据传输协议				
Tab.1 Data communication protocol				
协议类型	ID	数据表内容	长度	数据类型
变量喷药 控制系统 CAN 通讯 协议	0x00FE0101	作业启停控制	1	BYTE
		设定施药量	2	BYTE
		作业幅宽	2	BYTE
		流量校核系数	2	BYTE
		压力校核系统	2	BYTE
	0x18FF0101	作业速度	2	BYTE
		实时公顷喷药量	2	BYTE
		实时喷药流量	2	BYTE
		实时喷药压力	2	BYTE
		作业类型	1	BYTE
		作业机具	1	BYTE
		作业幅宽	2	WORD
		作业地块	7	BYTE
物联网 数据传 输协议	NJHYOPWAU0000130 (车载监控终端 编号)	作业面积	4	DWORD
		作业开始时间	6	BYTE
		作业结束时间	6	BYTE
		作业开始纬度	4	DWORD
		作业开始经度	4	DWORD
		当前地块设定 施药量	2	WORD
		农药种类	2	WORD
		农药配比	2	WORD
		累计施药量	3	WORD
		实时地块施药量	2	WORD
		实时喷药流量	2	WORD
		实时喷雾压力	2	WORD

针对车载监控终端与后台服务器之间通讯,参照行业标准 NY/T 3892—2021^[24],制定数据通讯协议,如表 1 所示。上下级平台之间采用 TCP、UDP 协议等长连接方式,数据传输采用大端模式,通信链路通过上下级平台之间定时发送链路保持数据包,检测链路连接状态,实现对链路连接的可靠性确认。数据传输时,车载监控终端与后台服务器之间先建立连接,一旦连接成功,数据会通过网关存储到后台服务器上,后台服务器根据事先制定的数据解析协议,基于车载监控终端编号进行作业机具识别,对应解析相应作业数据。

2 试验与结果分析

2.1 流量传感器校准

为了提高喷药系统流量监控精度,需对分段控制阀中流量传感器进行校准,校准试验如图 3 所示。试验时,通过搭建的喷雾系统模拟试验台控制系统流量,利用量筒测量系统出口流量,流量传感器输出脉冲通过数据采集模块(C-3402 型,凌力电子科技有限公司)进行采集,记录脉冲输出个数,试验重复进行 5 次,取平均值作为传感器校准系数,如表 2 所示。可知,流量传感器脉冲输出系数为 90.17 脉冲/L。



图 3 流量传感器校准试验
Fig.3 Flow sensor calibration test

表 2 传感器校准结果
Tab.2 Sensor check-out

试验 编号	流量/ L	输出脉冲数/ 脉冲	系数/ (脉冲·L ⁻¹)	平均系数/ (脉冲·L ⁻¹)
1	3.28	293	89.33	90.17
2	3.44	311	90.41	
3	3.60	325	90.28	
4	4.02	367	91.29	
5	3.49	313	89.68	

2.2 单喷头流量测量试验

试验采用的喷杆喷雾机作业幅宽为 18 m,喷头数量为 37,试验前为明确不同喷头流量和喷雾系统流量调控范围,采用喷头流量测量仪(SpotOn 型,AAMS 公司,比利时)对单个喷头流量进行了测量,如图 4 所示。试验时,系统压力设为 0.4 MPa,通过系统手动模式将调压阀开度调节到最大,分别测量每

个喷头流量,每次试验重复 3 次,试验结果如图 5 所示。可知,单个喷头流量之间相对误差为 3.71%,差异较小,对后续喷雾均匀性评价试验影响较小。



图 4 流量采集准确率试验

Fig.4 Precision rate test of flow acquisition

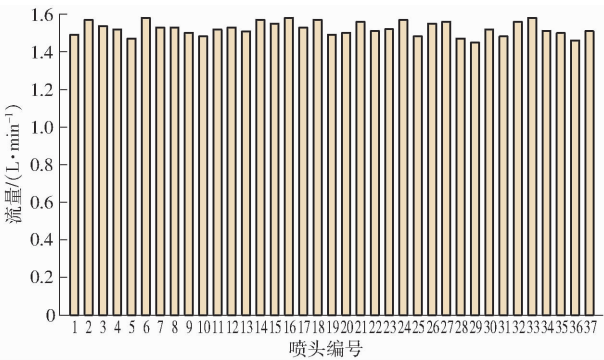


图 5 单喷头流量

Fig.5 Single nozzle flow

2.3 北斗定位测速精度试验

参照国家标准 GB/T 40331.1—2021^[25],用卷尺划定距离 100 m,驾驶喷雾机沿着划定区域作业,为了避免喷雾机启动时速度不稳定造成误差,喷雾机起始位置设定距离试验区域范围起始点 20 m 位置。驾驶喷药机通过试验区域,用秒表记录喷药机通过时间。同时,记录车载监控终端显示的作业速度,试验重复进行 6 次,试验结果如表 3 所示。可知,北斗定位测速最大误差为 1.33%,平均误差为 0.82%,测速精度满足实际作业需求。

表 3 北斗定位测速试验结果

Tab.3 Test results of Beidou speed measurement

试验编号	系统速度/ (m·s ⁻¹)	测量速度/ (m·s ⁻¹)	误差/%	平均误差/ %
1	3.64	3.60	1.11	0.82
2	4.12	4.14	0.43	
3	5.18	5.14	0.72	
4	5.92	6.00	1.33	
5	7.24	7.20	0.56	
6	8.12	8.18	0.76	

2.4 施药量计算精度试验

为了对系统喷施药量计算精度进行评价,设计

了施药量监测精度试验。试验时,用涡轮数显流量计(LWGY 型,杭州逸控科技有限公司)记录喷药机药箱加药量,手动控制调压阀开度到最大,原地进行喷药,待喷药结束后,读取车载监控终端上显示喷药量数据。按不同加药量梯度设计 6 组试验,试验结果如表 4 所示。可知,施药量监测最大误差为 2.40%,平均监测误差为 1.73%,喷施药量计算精度较高,可用于实际喷药作业药量在线计算与监测。

表 4 施药量计算精度试验结果

Tab.4 Test results of calculation accuracy of spray volume

试验编号	加药量/ L	监测量/ L	误差/%	平均误差/ %
1	75.22	76.81	2.11	1.73
2	136.24	138.68	1.79	
3	227.63	231.73	1.80	
4	359.14	365.62	1.80	
5	394.68	396.53	0.47	
6	463.64	452.52	2.40	

2.5 作业面积计算精度试验

作业面积计算对农药溯源管理至关重要,为了对系统设计的作业面积计算算法进行验证,设计了精度评测试验。试验按作业面积从小到大设置 6 组试验,每组试验作业面积首先通过人工测量方式获得作业区域面积,驾驶喷药机作业,记录车载监控终端上显示的作业面积;同时,为了验证重喷作业面积修正精度,在第 4、5、6 组试验中分别设置 0.39、0.97、1.69 hm²的重叠作业区域(图 6),试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,作业面积计算平均误差为 2.61%,但当作业面积较小时,面积计算精度误差较大,随着作业面积增加,计算精度提高。这是由于面积计算基于北斗单点定位获取的作业位置信息。当作业面积较小时,喷药机单行作业,作业面积等于作业行走距离与作业幅宽的乘积,单点北斗定位误差一般小于 3 m,起始作业位置定位误差造成小区域作业面积计算误差。随着作业区域增加,面积计算算法会根据喷药机不同作业行位置信息进行作业区

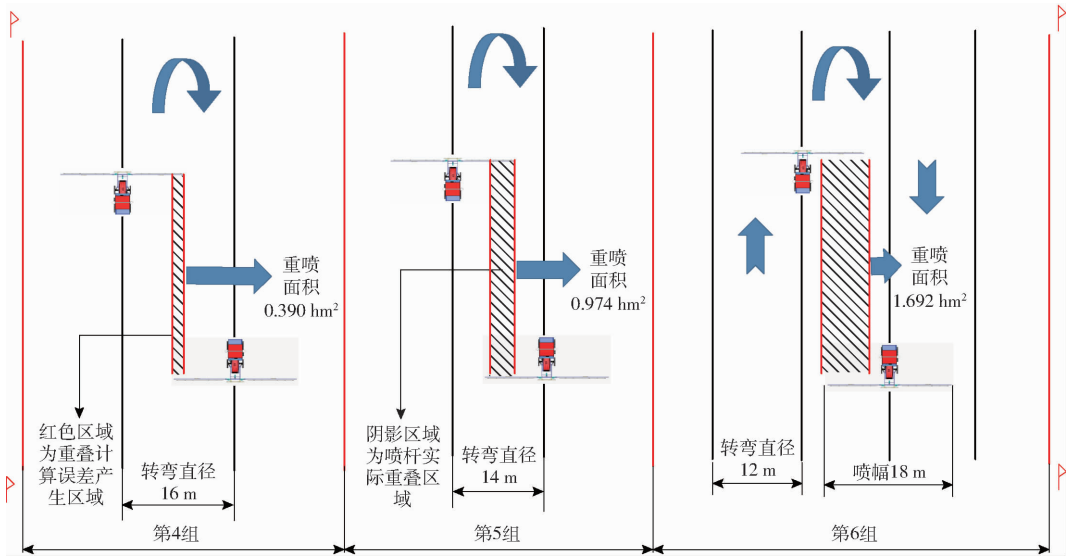


图 6 作业面积重叠区域示意图

Fig. 6 Schematic of overlapping area of spraying area

表 5 作业面积计算精度试验结果

Tab.5 Test results of working area calculation accuracy

试验编号	计量面积/ hm ²	实际面积/ hm ²	误差/%	平均误差/ %
1	0.19	0.18	7.77	2.61
2	2.03	2.01	1.22	
3	8.93	8.54	4.31	
4	17.48	17.44	0.19	
5	30.20	30.61	1.34	
6	45.58	45.22	0.80	

域定位点修正,减少单点定位带来的误差。

2.6 物联网数据传输稳定性试验

车载监控终端与后台服务器数据交互中,由于外界因素干扰,会存在数据丢包问题。为了评价物联网数据传输稳定性,采用 CAN 数据记录仪记录车载监控终端喷药作业信息,与后台服务器记录数据进行对比,通过对数据数量和有效性分析,数据传输稳定性试验结果如表 6 所示。

由表 6 可知,数据平均丢失率为 3.51%,可能由于网络信号不稳定或数据清洗算法,系统存在数据丢失问题,丢失数据大多为作业速度较小(地头

表 6 数据传输稳定性试验结果

Tab.6 Data transmission stability tests result				
试验编号	CAN 分析仪	服务器记录	误差/%	平均误差/%
	记录数据量	数据量		
1	766	729	4.83	3.51
2	878	851	3.08	
3	921	887	3.69	
4	1068	1042	2.43	
5	1447	1396	3.52	

转弯,如图 7 所示)时段的数据,此时段相同作业距离下作业点密度相对较大,作业位置之间间隔距离较小,对喷药信息有效性影响较小,不会对喷药作业信息溯源管理造成影响。图中红色圆圈区域为数据丢失位置。

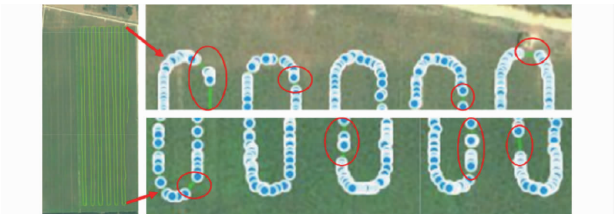


图 7 地头转弯过程数据丢失示意图

Fig.7 Data loss display of turning process for edge of field

2.7 变量调控系统动态响应试验

为探究变量喷药控制系统流量动态变化特性,设定施药量为 200、300、400 L/hm²,变量喷药作业速度在 4 ~ 9 km/h 范围内(施药量为 400 L/hm²,系统流量调控满足速度范围为 4 ~ 7 km/h)。试验时,将速度挂到最高挡位,将手油门拉到最低位,通过手油门调节作业速度,便于短时间内切换作业速度;系统实时流量和作业速度通过 CAN 记录仪进行存储;启动变量喷药控制系统,驾驶喷药机进行喷药作业,每次试验重复进行 3 次,取 3 次试验结果平均值作为最终测量数据,试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,系统流量与作业速度之间具有很好的动态跟随性,随着作业速度变化,系统流量随之变化。当作业速度为 4 ~ 9 km/h 时,变量调控系统出现超调,速度连续变化下系统稳定调节时间为 4 ~ 5 s(采用电动球阀完全关闭到完全打开所需时间为 10 s 左右);施药量为 200、300、400 L/hm²时,系统超调量最大差值区间分别为 50% ~ 70%、30% ~ 50% 和 5% ~ 10%,这是由于施药量为 200 L/hm²时,系统流量相对较小,速度从低向高变化时,电动球阀开度稍微超过目标开度就会引起流量较大波动,进而说明系统设定施药量越大,变量调控效果越佳。变量调控系统采用的分段调控方法具

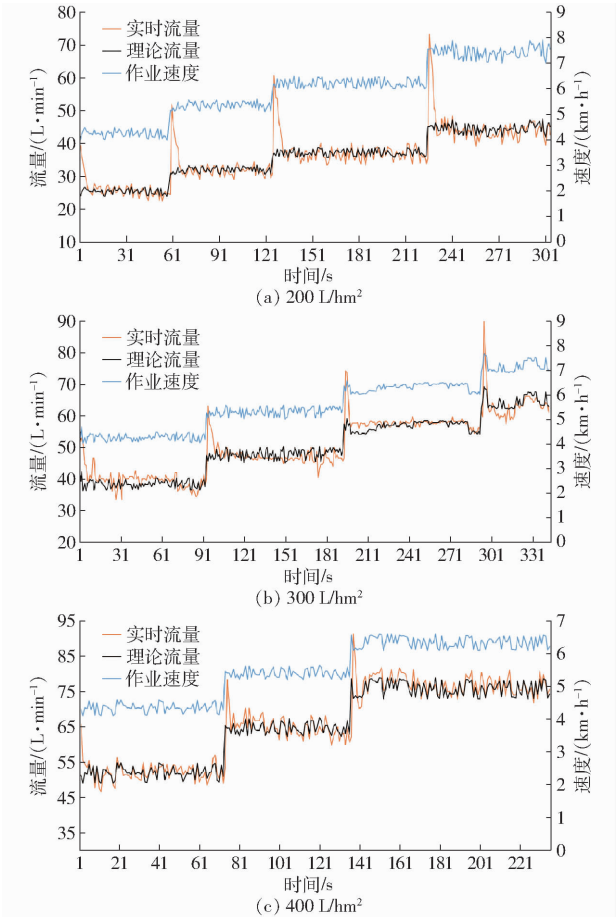


图 8 不同设定施药量和作业速度下变量调控系统动态响应

Fig.8 Dynamic changes of variable-rate control system under different spray volume and spray speeds

有很好的调控效果,可满足流量变量调控需求。

2.8 变量调控精度试验

参照国家标准 GB/T 40331.1—2021^[25],设定施药量为 100 ~ 400 L/hm²和作业速度为 0 ~ 9.0 km/h,开展变量调控精度评价试验。试验时,用卷尺划定距离 100 m(起始与终点位置设定 20 m 缓冲区),驾驶喷药机在该区域内进行喷药作业,记录车载监控终端显示的喷药量,与理论计算喷药量进行比较,获得不同作业速度和设定施药量下试验数据,每次试验重复进行 3 次,取其平均值作为最终数据,如表 7 所示。其中,考虑到试验使用喷头最大流量限制,当设定施药量为 400 L/hm²时,系统最大作业速度不超过 7 km/h。

由表 7 可知,不同设定施药量下,变量调控精度存在差异。施药量为 100 L/hm²时,变量控制误差最大,最大误差为 7.00%,这可能由于同一设定施药量下,随着作业速度增加,变量调控系统超调量增大(图 8),超调量增大引起了实际喷药量误差增大,进而使变量调控误差增大;同时,设定药量 100 L/hm²下系统所需理论流量较小,试验距离选择 100 m,理

表 7 变量调控精度试验数据

Tab.7 Variable regulation accuracy test data

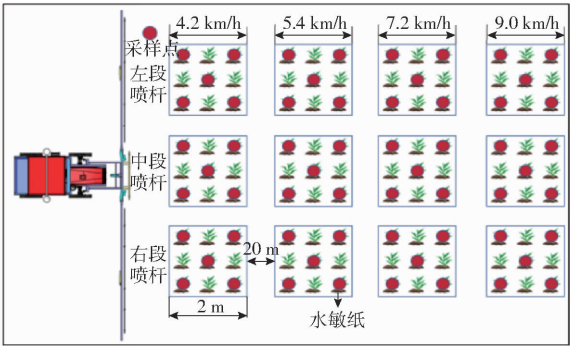
速度/ (km·h ⁻¹)	设定 施药量/ (L·hm ⁻²)	理论计算 喷药量/ L	实际测量 喷药量/ L	实际 施药量/ (L·hm ⁻²)	变量控 制误差/ %
5.4	100	18	17.41	96.72	3.28
7.2	100	18	17.14	95.22	4.78
9.0	100	18	16.74	93.00	7.00
5.4	200	36	35.15	195.28	2.36
7.2	200	36	36.04	200.22	0.11
9.0	200	36	35.34	196.33	1.83
5.4	300	54	53.21	295.61	1.46
7.2	300	54	54.89	304.94	1.65
9.0	300	54	54.57	303.17	1.06
5.0	400	72	73.19	406.61	1.65
6.0	400	72	73.79	409.94	2.49
7.0	400	72	72.06	400.33	0.08
4.2~9.0	100	18	17.54	97.44	2.56
	200	36	37.16	206.44	3.22
4.2~7.0	300	54	55.42	307.78	2.63
	400	72	74.17	412.06	3.01

论施药量较小,由表 4 可知,系统施药量计算精度在施药量较小时存在相对较大的监测误差,这也是造成系统调控误差增大的原因。随着设定施药量增加,误差减小,不同作业速度下的误差在 3.00% 范围内;当作业速度为 4.2~9.0 km/h 时,设定施药量为 100~300 L/hm²时,变量调控误差小于 3.22%;设定施药量为 400 L/hm²时,作业速度为 4.2~7.0 km/h 时,变量调控误差为 3.01%;随着设定施药量和作业速度的连续变化,系统控制误差在 2%~4% 范围内,具有较好的动态调控精度。不同设定施药量和作业速度下,基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统的变量调控精度平均误差为 2.45%,系统具有较高精度,满足大田变量喷药应用需求。

2.9 农药喷施均匀性试验

试验于 2023 年 6 月 20 日—7 月 20 日在北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地试验田进行,试验作物为玉米,以清水代替农药。喷药机选用青州东禾农业科技有限公司生产的喷杆喷雾机。该喷雾机采用桁架结构,作业幅宽为 18 m,药泵最大流量为 100 L/min,压力为 0~3 MPa。试验地块长度为 108 m,距离喷药区域起始与终止位置处各设置 20 m 的缓冲区,将喷杆分为左、中和右 3 个区段,在每个区段下方布置 1 个采样区域,采样区域为 2 m×2 m,参照国家标准 GB/T 40331.2—2021^[26],在采样区域内布置 5 个采样点,每个采样点位置放置 1 张水敏纸。试验共设置 4 个速度区段

(4.2、5.4、7.2、9.0 km/h),共 60 个采样点,如图 9a 所示。



(a) 采样点布置方案



(b) 水敏纸布置

图 9 农药喷施均匀性试验

Fig.9 Pesticide spraying uniformity test

试验时,往喷药机内加入一定量清水,开启系统自动调控模式,驾驶拖拉机沿划定轨迹进行喷药作业。为了便于不同采样区域之间速度切换,在每个采样区域间隔位置放置了红色标牌,驾驶人员根据标牌示意进行作业速度切换,每次试验重复进行 3 次,试验结束后,利用带有标记的塑封袋搜集不同采样点位置处的水敏纸,如图 9b 所示。试验过程中,气象站记录的平均风速为 1.2 m/s,风向为西南风,环境温度为 36.58℃,空气相对湿度为 28.46%。

利用天彩电子(深圳)有限公司研发的 TSN450 型扫描仪对试验采样水敏纸进行扫描,获取水敏纸灰度图像,用重庆六六山下有限公司研发的雾滴沉积分析软件对水敏纸扫描图像进行分析,获得雾滴覆盖率和沉积点密度等各项喷雾效果检测指标,试验结果如表 8 所示。可知,不同作业速度下,各个采样点位置处雾滴沉积点密度均大于 20 滴/cm²,满足病虫害防治要求^[27]。不同采样区域内各个采样点雾滴覆盖率在 20%~60% 范围内,同一采样区域内各个采样点的雾滴覆盖率变异系数小于 10%;沿喷杆方向,同一喷雾区域,作业速度为 4.2、5.4、7.2、9.0 km/h 时,雾滴覆盖率变异系数分别为 6.73%、5.83%、5.94% 和 5.64%;沿行走方向,相同作业速

度和喷杆左、中和右 3 个不同喷雾区域,雾滴覆盖率变异系数分别为 8.13%、5.68% 和 6.83%。综上,在喷雾机行走和喷雾方向上喷雾覆盖率变异系数均小于 10%。国标 GB/T 17997—2008^[28] 规定:喷杆上喷头喷量分布均匀性变异系数小于 15%,说明本文设计系统满足变量喷药作业需求。

表 8 农药喷施均匀性试验数据
Tab.8 Pesticide spraying uniformity test data

速度/ (km·h ⁻¹)	喷杆左侧区域			喷杆中间区域			喷杆右侧区域		
	覆盖率/ %	沉积点密度/ (滴·cm ⁻²)	变异系数/ %	覆盖率/ %	沉积点密度/ (滴·cm ⁻²)	变异系数/ %	覆盖率/ %	沉积点密度/ (滴·cm ⁻²)	变异系数/ %
4.2	39.16	150.90	9.52	44.06	158.45	1.26	41.55	183.66	3.01
	45.61	135.65		46.03	151.23		48.41	125.49	
	39.08	170.36		47.41	156.42		46.22	104.62	
	20.76	105.87		46.49	125.24		41.46	152.38	
	41.00	145.91		46.70	142.14		44.81	152.48	
5.4	49.57	130.54	4.42	43.49	143.63	4.62	46.79	138.05	7.95
	48.99	139.08		54.64	119.88		41.29	87.27	
	43.79	151.70		49.32	126.16		56.52	63.10	
	49.40	138.65		43.95	146.58		34.83	197.18	
	56.22	92.63		49.78	97.66		44.97	128.26	
7.2	48.12	144.73	6.86	33.32	187.00	5.62	32.68	177.96	2.30
	41.4	144.76		36.14	106.84		35.67	147.72	
	36.62	183.60		39.21	128.36		29.99	194.22	
	30.62	181.96		44.53	153.70		32.61	198.84	
	44.61	113.94		46.77	114.54		35.23	153.96	
9.0	53.25	131.69	6.03	48.60	108.99	7.26	37.36	148.93	4.51
	45.19	136.66		47.58	131.13		44.72	141.58	
	37.10	227.56		46.26	138.63		49.38	130.78	
	46.63	147.74		49.66	136.65		46.88	158.39	
	49.65	155.90		32.03	93.41		45.53	138.99	

3 结 论

(1)基于自动控制、物联网和传感器等技术,设计了基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统,可实现农药精准变量喷施,作业地块、作业时间、作业面积、农药种类与配比、喷施药量、喷雾压力、实时流量和作业速度等信息的在线监测、实时显示和溯源管理。

(2)开展了流量传感器校准、单喷头流量测量、北斗定位测速精度、施药量计算精度、作业面积计算精度和物联网数据传输稳定性等试验。试验结果表

明,北斗定位测速最大误差为 1.33%,平均误差为 0.82%;施药量计算误差为 1.73%;作业面积计算误差为 2.61%;数据丢失率为 3.51%。

(3)开展了变量调控系统动态响应、变量调控精度和农药喷施均匀性等田间试验。试验结果表明,速度连续变化下系统稳定调节时间为 4~5 s;不同设定施药量和作业速度下,变量调控精度误差为 2.45%;雾滴沉积点密度大于 20 滴/cm²下,在喷雾机行走和喷雾方向上的喷雾覆盖率变异系数均小于 10%,满足精准变量作业需求。

参 考 文 献

[1] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133-146.
HE Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133-146. (in Chinese)

[2] 庄腾飞,杨学军,董祥,等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 189-198.
ZHUANG Tengfei, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 189-198. (in Chinese)

[3] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状及展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1-20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 1-20. (in Chinese)

[4] 赵博,张巍朋,苑严伟,等. 农业装备运维与作业服务管理信息化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 1-26.
ZHAO Bo, ZHANG Weipeng, YUAN Yanwei, et al. Research progress in information technology for agricultural equipment maintenance and operation service management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,

54(12): 1 – 26. (in Chinese)

[5] YUKI S, YASUDA H, MATSUBAYASHI T, et al. Development of tractor automatic controlled boom sprayer using CAN-BUS [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 264 – 269.

[6] KIM E S, KIM Y J, RHEE J Y. Sectional flow-rate control of boom sprayer according to the steering radius along winding rows [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2006, 31(3): 146 – 152.

[7] HUSSAIN I, REHMAN H U, DIN Z U. Advanced pressure regulation system for agricultural sprayers using model predictive control[J]. Pakistan Journal of Engineering and Technology, 2023, 6(2): 32 – 41.

[8] LUCK J D, SHEARER S A, SAMA M P. Development and preliminary evaluation of an integrated individual nozzle direct injection and carrier flow rate control system for pesticide applications[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2): 505 – 514.

[9] SHARDA A, FULTON J P, MCDONALD T P, et al. Real-time pressure and flow dynamics due to boom section and individual nozzle control on agricultural sprayers[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(5): 1363 – 1371.

[10] 胡周勋. 马铃薯喷药机变量喷药及喷杆平衡控制系统的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2019.
HU Zhouxun. Research of variable spraying and boom balance control system of potato sprayer[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 沈景新, 李青龙, 孙永佳, 等. 喷杆喷雾机智能控制系统设计及试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 133 – 137.
SHEN Jingxin, LI Qinglong, SUN Yongjia, et al. Design and experiment of intelligent control system of spray bar sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 133 – 137. (in Chinese)

[13] 朱子涵. 基于机器视觉和模糊-PID 复合控制的变量喷药除草系统研究[D]. 长春:吉林农业大学,2019.
ZHU Zihan. Research on variable spraying weeding system based on machine vision technique and fuzzy – PID compound control[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[14] 朱子涵, 李士军, 宫鹤, 等. 基于模糊-PID 复合控制的变量喷药除草系统设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(1): 110 – 115, 121.
ZHU Zihan, LI Shijun, GONG He, et al. Design of variable spraying weeding system based on fuzzy – PID compound control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(1): 110 – 115, 121. (in Chinese)

[15] 岑振钊, 岳学军, 王林惠, 等. 基于神经网络 PID 的无人机自适应变量喷雾系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 100 – 108.
CEN Zhenzhao, YUE Xuejun, WANG Linhui, et al. Design and test of self-adaptive variable spray system of UAV based on neural network PID[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 100 – 108. (in Chinese)

[16] 吴吉麟. 变量喷雾装置喷雾特性及其控制系统的研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
WU Jilin. Research on spraying characteristics and control system of variable-rate spraying device[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2012. (in Chinese)

[17] 郭娜, 胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 56 – 64.
GUO Na, HU Jingtao. Design and experiment of variable rate spaying system on Smith – fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 56 – 64. (in Chinese)

[18] 翟长远, 朱瑞祥, 随顺涛, 等. 车载式变量施药机控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 105 – 109.
ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, SUI Shuntao, et al. Design and test of vehicle-type variable dispensing machine control system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 105 – 109. (in Chinese)

[19] 翟长远, 朱瑞祥, 黄胜, 等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 70 – 74, 84.
ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, HUANG Sheng, et al. Design and test of drug application monitoring system based on ship [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 70 – 74, 84. (in Chinese)

[20] MA H, ZHAO C, ZHAI C, et al. Design and field experiment of precise control and monitoring system for a solid fumigant sterilizer based on IoT[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106387.

[21] 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及试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 55 – 64, 94.
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and testing of PID control variables based on neural network setting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 55 – 64, 94. (in Chinese)

[22] AL-MALLAHI A, NATARAJAN M, SHIRZADIFAR A. Development of robust communication algorithm between machine vision and boom sprayer for spot application via ISO 11783[J]. Smart Agricultural Technology, 2023, 4: 100212.

[23] 窦汉杰, 翟长远, 王秀, 等. 基于 LiDAR 的果园对靶变量喷药控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 11 – 21.
DOU Hanjie, ZHAI Changyuan, WANG Xiu, et al. Design and experiment of the orchard target variable spraying control system based on LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(3): 11 – 21. (in Chinese)

[24] NY/T 3892—2021 农机作业远程监测管理平台数据交换技术规范[S]. 2021.

[25] GB/T 40331.1—2021 植物保护机械 大田作物喷雾沉积量的测试 第1部分:在水平地面上的测试[S].2021.

[26] GB/T 40331.2—2021 植物保护机械 大田作物喷雾沉积量的测试 第2部分:在作物上的测试[S].2021.

[27] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 9 – 16.
YUAN Huizhu, WANG Guobin. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides [J]. Crop Protection, 2015, 41(6): 9 – 16. (in Chinese)

[28] 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.