

考虑喷雾高度的大田蔬菜对靶喷雾系统设计与试验

赵学观^{1,3}, 郑申玉^{1,2}, 易克传², 王 秀^{1,3}, 邹 伟^{1,3}, 翟长远^{1,3*}

(1. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 安徽科技学院机械工程学院, 凤阳 233100;
3. 农芯(南京)智慧农业研究院有限公司, 南京 211800)

摘 要: 针对喷雾高度影响大田对靶喷雾准确性问题, 该研究设计了融合喷雾高度的大田蔬菜对靶喷雾系统, 适用于株间距大、冠层尺寸小的作物。介绍了大田蔬菜对靶喷雾系统的结构组成及工作原理, 根据对靶喷雾作业环节的滞后特性, 建立对靶喷雾滞后模型, 提出融合靶标位置、靶标大小、喷雾机作业速度和喷雾高度的对靶喷雾控制方法, 基于 C37 控制器设计了稳压喷雾系统和对靶喷雾控制系统, 并进行试验验证。不同喷雾高度对靶试验结果表明, 在作业速度为 0.52 m/s 的情况下, 融合喷雾高度的对靶喷雾平均绝对误差和均方根误差分别不高于 3.63 和 4.26 cm, 比未融合喷雾高度的平均绝对误差平均减小 4.30 cm, 均方根误差平均减小 4.57 cm, 有效喷施率不低于 92.6%, 验证了融合喷雾高度对靶喷雾的可行性。田间试验结果表明, 随着作业速度的增加, 对靶喷雾有效喷施率和平均有效覆盖率下降。在作业速度不大于 0.49 m/s 时, 对靶喷雾有效喷施率为 93.5%, 平均有效覆盖率为 80.2%。较于连续喷雾方式, 对靶喷雾节药率可达 33.8%, 可满足大田株间距大、冠层尺寸小的作物对靶植保作业需求。

关键词: 植保机械; 传感器; 对靶; 喷杆式; 喷雾; 喷雾高度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.001

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-11-0001-11

赵学观, 郑申玉, 易克传, 等. 考虑喷雾高度的大田蔬菜对靶喷雾系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 1-11. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.001 http://www.tcsae.org

Zhao Xueguan, Zheng Shenyu, Yi Kechuan, et al. Design and experiment of the target-oriented spraying system for field vegetable considering spray height[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 1-11. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.001 http://www.tcsae.org

0 引 言

作为大田作业中的常见喷雾方式, 喷杆式喷雾主要应用在小麦、玉米及蔬菜等植保作业, 可针对性地喷施杀虫剂、杀菌剂、除草剂及植物生长调节剂等^[1-2]。国内外学者在喷杆高度调节^[3-5]、喷杆喷雾均匀性及作业稳定性^[6]、变量施药^[7-9]、雾滴雾化特性^[10-12]和雾滴防飘移^[13]等方面开展了相关研究。对于甘蓝、玉米和棉花等一些行距和株距较大的作物, 生长初期植株冠层较小, 作物株间空隙比较大, 在进行连续喷雾作业时, 喷施在植株间隙的药液造成极大浪费和土壤污染^[14]。对靶喷雾技术将靶标识别与喷雾作业相结合, 根据喷雾机作业速度控制喷头对准靶标位置进行喷雾, 可大大降低非靶标区域喷施概率, 对提高农药利用率、降低环境污染有十分重要的意义。

目前, 对靶喷雾技术在大田作业中应用较少。针对

大田对靶喷雾的研究主要集中在靶标, 包括作物^[14-16]、病虫害^[17-20]、杂草^[21-25]等的识别, 对靶喷雾控制的研究较少, 对靶是实现精准喷施的关键环节, 对实际作业效果影响重大。

在基于传感器的对靶喷雾控制系统中, 如何精准获取和补偿系统延时是实现精准对靶的关键。前人相关研究表明, 控制系统延时主要来源于靶标识别(传感器数据缓冲)、喷雾指令计算、通信及电磁阀响应^[26-30], 没有考虑药液喷出后的沉降时间。而在喷雾作业中, 药液经喷头喷出后与空气撞击形成雾滴, 在其沉降过程中, 由于受到空气阻力的影响, 在行进方向上会产生一定的滞后, 进而影响对靶喷雾精度。

因此, 药液喷出至雾滴附着在靶标上的这部分时间也需要计算在延迟补偿时间内。植株生长过程中冠层高度的变化、不同地块的垄台高度差别、不同作物的大田喷雾高度以及土壤类型都会影响喷杆高度调节, 进而影响喷雾高度。喷雾高度不同, 药液沉降时间也不同, 这对获取准确的系统响应时间造成极大挑战, 并直接影响着对靶喷雾精度。

针对喷雾高度影响大田对靶喷雾准确性问题, 本文基于大田甘蓝种植模式及生长特性(甘蓝主要采用机械化移栽, 行距为 35 cm, 株距为 40 cm, 其生长周期为 45~65 d), 面向甘蓝生长早中期, 在利用视觉识别技术获取靶标位置信息的基础上, 通过超声波传感器实时探测喷

收稿日期: 2022-01-18 修订日期: 2022-05-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28090108); 北京市农林科学院农业科技示范推广项目(2020605); 江苏省重点研发计划项目(BE2021302); 北京市农林科学院智能装备技术研究中心开放课题(KF2020W010)

作者简介: 赵学观, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能化农业装备技术。

Email: zhaoxg@nrcita.org.cn

*通信作者: 翟长远, 博士, 研究员, 研究方向为精准施药技术。

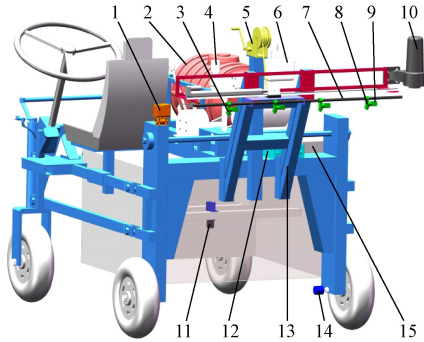
Email: zhaicy@nrcita.org.cn

雾高度, 构建系统滞后模型, 提出融合喷雾高度的大田蔬菜对靶喷雾系统, 并进行相关性能试验研究。

1 大田蔬菜对靶喷雾系统搭建

1.1 硬件组成与工作原理

本文搭建的大田蔬菜对靶喷雾系统中, 喷雾机结构如图 1 所示, 主要包括行走机构、柴油机、柱塞泵、药液箱、过滤器、喷头、工业相机、控制器、压力传感器、电动球阀、超声波传感器、编码器、电磁阀和锂电池。



1. 电动球阀 2. 药液箱 3. 1 号喷头 4. 柱塞泵 5. 手摇绞盘 6. 柴油机
7. 喷杆 8. 4 号喷头 9. 4 号电磁阀 10. 超声波传感器 11. 工业相机 12. 锂电池 13. 喷杆高度调节机构 14. 编码器 15. 控制盒
1. Electric actuated ball valves 2. Chemical tank 3. Nozzle 1 4. Plunger pump
5. Crank capstan 6. Diesel engine 7. Spray rod 8. Nozzle 4 9. Solenoid valve 4 10. Ultrasonic sensor 11. Industrial camera 12. Lithium battery
13. Spray bar height adjustment mechanism 14. Encoder 15. Control box

图 1 喷雾机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of sprayer structure

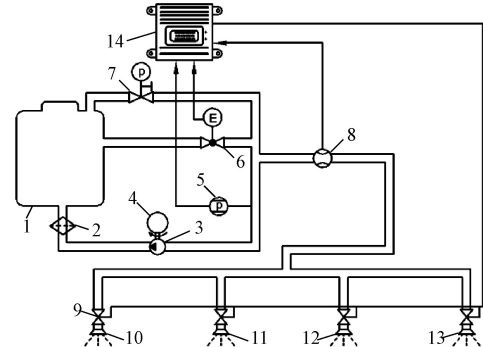
使用 MER-131-210U3M/C 型工业相机 (中国大恒有限公司, 相机分辨率为 1280×1024 像素, 帧率为 210 帧/s) 进行靶标探测, 相机安装在喷雾机中部位置。另外, 在喷雾机供药系统加装 2W-050-08ES-V-DC12V 型电磁阀 (余姚市仪表四厂)、FRY-02T 智能调节型电动球阀 (江苏阅瑞亿阀门设备有限公司, 控制电压信号为 DC 0~10 V)、131-B 型压力传感器 (北京澳升自动化科技有限公司, 压力量程为 0~2.5 MPa)、HI2144 型流量传感器 (乐清市颇耐传感科技有限公司, 流量范围 1~30 L/min), 并在右后车轮上装 HTS-5008 型编码器 (无锡恒特科技有限公司, 编码器脉冲数为 1 000, 响应频率 300 kHz) 测量驱动轮转速, 车身尾部加装 MB7155 型超声波传感器 (美国, MaxBotix 公司, 探测范围 20~765 cm, 频率 10 Hz) 探测喷雾高度, 控制器为 C37 (北京英智杰科技有限公司)。C37 控制器是基于 Codesys2.3 软件平台开发的现场可编程控制器, 拥有 12 路 PWM 输出、6 路 10 位分辨率模拟量输入和 4 路脉冲量输入, 并支持 CAN 通信。系统通过 USBCAN 转换器 (北京乐电新南科技有限公司) 实现上下位机通信。系统工作压力为 0.3~0.5 MPa, 采用锂电池供电, 电池容量为 100 Ah。喷头选用 102A-1/2 型扇形喷头 (宁波力成农用喷雾技术有限公司), 喷雾角为 110° 。

系统集成靶标识别与对靶喷雾控制功能, 利用工业相机获取靶标位置信息, 并在此基础上进行对靶喷雾控制。

作业时, C37 控制器分别利用压力传感器和电动球阀实现压力监测和稳定管路内压力。检测到靶标时, C37 控制器经 USBCAN 转换器接收上位机发送的触发信号, 同时控制器通过编码器获取的车速和超声波传感器获取的喷雾高度实时调节系统延迟时间, 以补偿系统滞后, 精准控制电磁阀开闭, 实现对靶喷雾。

1.2 供药系统设计

机械化种植的大田甘蓝每垄 4 行, 行距为 35 cm, 株距为 40 cm。本文设计的供药系统有 4 个喷头, 喷头的间距即为甘蓝行距。供药系统示意如图 2 所示。



1. 药液箱 2. 过滤器 3. 柱塞泵 4. 柴油机动力输出轴 5. 压力传感器 6. 电动球阀 7. 手动调节阀 8. 流量传感器 9. 电磁阀 10. 1 号喷头 11. 2 号喷头 12. 3 号喷头 13. 4 号喷头 14. C37 控制器
1. Chemical tank 2. Filter 3. Plunger pump 4. Power output shaft of diesel engine 5. Pressure sensor 6. Electric actuated ball valves 7. Manual regulating valve 8. Flow rate sensor 9. Solenoid valve 10. Nozzle 1 11. Nozzle 2 12. Nozzle 3 13. Nozzle 4 14. C37 controller

图 2 供药系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of drug supply system

作业时, 在柴油机动力输出轴的驱动下, 柱塞泵经过滤器吸入药液, 并将其泵入到喷施管路中。C37 控制器根据从压力传感器获取的实时管路内压力调节电动球阀的阀门开度, 以保持管路内压力稳定。控制器通过流量传感器获取喷施流量, 并将压力和流量数据定时传输到上位机中。各电磁阀由 C37 控制器输出的多路独立开关量信号分别控制。电磁阀开启时, 药液经喷头喷出。电磁阀关闭时, 喷头停止喷雾。

1.3 控制系统界面设计

在 windows 系统下采用 C++ 语言开发大田蔬菜对靶喷雾控制系统软件, 操作界面如图 3 所示, 主要分为图像显示区、串口控制区、参数显示区和设备控制区。图像显示区可根据需要动态显示原始图像或处理结果, 该区域分为 4 个部分, 每个部分对应 1~4 号喷头。图像显示区设有定位线, 并基于视频追踪的方式判别靶标位置。当靶标接触设定的定位线, 上位机下发触发信号并同时目标与视场底端的固定距离 L_1 和行进方向上靶标垂直投影长度 M 发送至 C37 控制器; 串口控制区用于上位机与下位机的通讯控制; 参数显示区实时显示下位机上传的速度、流量及压力信息; 设备控制区用于工业相机开闭以及作业启停控制。

该系统可用于大株距、小冠层尺寸作物的农药、叶面肥、作物激素、营养液等对靶喷施。具体操作步骤如

下：首先，根据田间作物生长高度和大小，调节工业相机高度及喷雾高度；然后，启动大田蔬菜对靶喷雾系统软件，设置流量及幅宽等参数，通过通讯控制区打开串口实现上位机与下位机通讯；接着打开工业相机，根据显示的图像处理结果调节上位机参数，使图像显示达到最佳状态；单击“开始作业”进入实时靶标识别与处理状态；最后启动喷雾机，系统检测当前行走速度，实时判断设定的靶标识别定位条件，满足对靶喷施条件时，上位机将对靶喷施作业指令通过串口下发给下位机控制器，实现喷头的开闭控制。

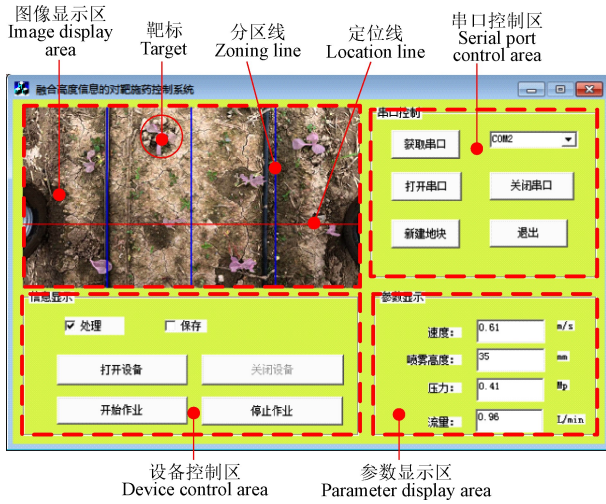


图 3 大田蔬菜对靶喷雾控制系统操作界面

Fig.3 Operation interface of field vegetable target-oriented spraying control system

2 融合喷雾高度的对靶喷雾控制方法

2.1 供药系统压力控制

电动球阀的控制电压信号为 DC 0~10 V，球阀阀门的开度（0~100%）和控制电压信号呈线性相关（开度 0 对应 0 V，开度 100%对应 10 V）。由于 C37 控制器的 PWM 信号不能直接用于电动球阀调节，所以在系统中加装一个 PWM 电压转换模块，将 PWM 信号转换成模拟电压信号，并通过调节 PWM 信号的占空比改变电压大小，实现阀门开度调节。作业时，首先设定系统初始喷雾压力，然后根据设定喷雾压力和压力传感器获取压力之间的差值，实时调节 PWM 信号的占空比，以改变电动球阀的阀门开度。当设定压力大于传感器获取压力时，阀门开度变小；当设定压力小于传感器获取压力时，阀门开度变大，最终实现喷雾压力的实时调节。另外，为避免阀门开度的频繁调节对电动球阀使用寿命造成影响，设定压力与传感器获取压力的差值不大于设定压力值的 10%时不进行调节。

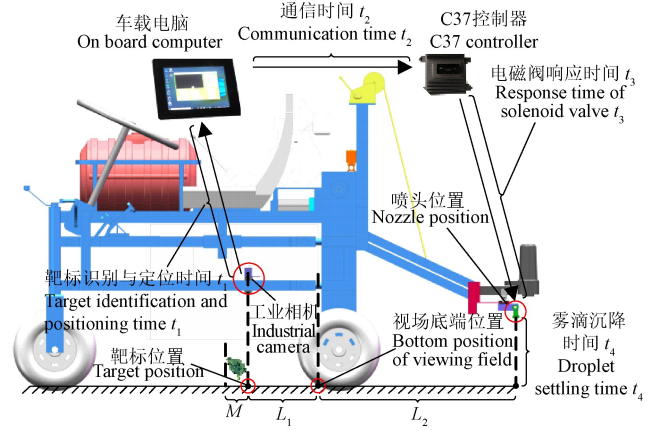
2.2 控制系统延时补偿模型

由图 4 可知，控制系统延迟时间 t 包括靶标识别与定位时间 t_1 、通信时间 t_2 、电磁阀响应时间 t_3 以及雾滴沉降时间 t_4 。其中，雾滴沉降时间随着喷雾高度的变化而变化，通过融合超声波传感器探测的实时喷雾高度，并根据喷雾高度与雾滴沉降时间的关系实时补偿系统延时。

由图 4 可知，需要补偿的系统滞后距离 d 由系统延迟时间 t 、靶标与视场底端的固定距离 L_1 、喷头与视场底端的水平距离 L_2 和喷雾机行驶速度 v 共同确定，计算式为

$$d = L_1 + L_2 - vt \quad (1)$$

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (2)$$



注： M 为行进方向上靶标垂直投影长度，cm； L_1 为靶标与视场底端的固定距离，cm； L_2 为喷头与视场底端的水平距离，cm。

Note: M is the vertical projection length of the target in the direction of travel, cm; L_1 is the fixed distance between target and the bottom of viewing field, cm; L_2 is the horizontal distance between the nozzle and the bottom of viewing field, cm.

图 4 系统滞后距离补偿原理图

Fig.4 Schematic diagram of system lag distance compensation

编码器在车轮转动时产生脉冲频率，控制器对获取的编码器数据经滑动窗口滤波得到相对稳定的脉冲频率 f ，并通过计算脉冲频率 f 和一个脉冲对应喷雾机行驶距离 l 的乘积得到喷雾机行驶速度 v 。利用定时器每隔 40 ms 累计一次喷雾机行驶距离，得到当前喷雾机行驶距离 s 。喷雾机速度 v 和行驶距离 s 计算式如下：

$$v = fl \quad (3)$$

$$s = s' + 0.04v \quad (4)$$

式中 s' 为 40 ms 之前的喷雾机行驶距离。

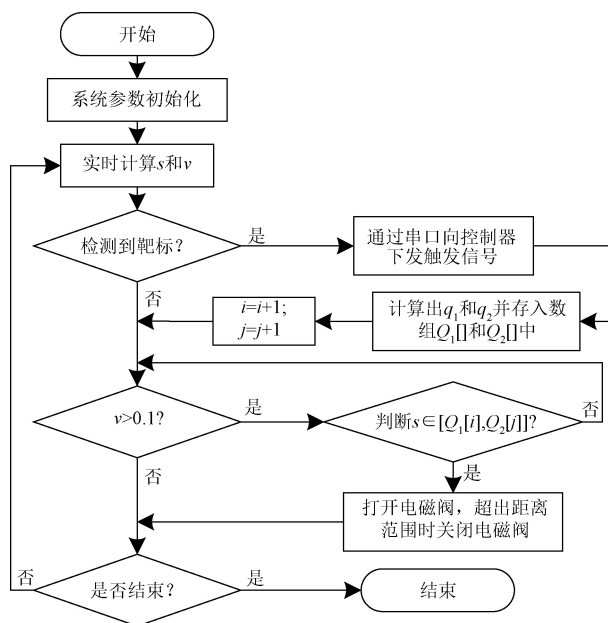
根据需要补偿的系统滞后距离 d 和当前喷雾机行驶距离，计算出开启电磁阀对应的位置 q_1 ，并根据行进方向上靶标垂直投影长度 M 设置喷雾宽度，得到关闭电磁阀的位置 q_2 。另外，通过预试验可知对靶喷雾平均绝对误差不超过 4 cm，为提高对靶喷雾系统的容错率，在上述基础上设置提前 4 cm 开始喷雾，延迟 4 cm 结束喷雾。 q_1 和 q_2 的计算式如下：

$$q_1 = L_1 + L_2 - vt + s - 0.04 \quad (5)$$

$$q_2 = L_1 + L_2 - vt + s + M + 0.04 \quad (6)$$

对靶喷雾系统的控制流程如图 5 所示。其中， $Q_1[]$ 和 $Q_2[]$ 为 2 个数组，分别储存 q_1 和 q_2 的值， i 和 j 为数组 $Q_1[]$ 和 $Q_2[]$ 的游标。数组长度依据实际作业中工业相机和喷头之间的甘蓝株数设置（经测量，作业中工业相机与喷头之间距离不超过 2 m，甘蓝株距为 40 cm，所以两者之间的甘蓝不超过 6 株），本文设置为 6，以避免数组中数据在作业前被覆盖。系统进行初始化后，控制器利用

式 (3) ~ (4) 实时计算出喷雾机速度 v 和行驶距离 s 。当识别软件检测到靶标时, 上位机通过串口通信向 C37 控制器下发触发信号, 控制器根据式 (5) ~ (6) 计算出 q_1 和 q_2 并分别储存在数组 $Q_1[]$ 和 $Q_2[]$ 中, 并对 i 和 j 进行循环后移一位以保证数据有序储存; 最后遍历数组 $Q_1[]$ 和 $Q_2[]$ 中数据值, 并判定当前的行驶距离 s 是否处于 $Q_1[i]$ 和 $Q_2[j]$ 同一层位置区间内。如果行驶距离 s 满足条件, 打开电磁阀。否则关闭电磁阀。



注: s 为喷雾机行驶距离, m ; v 为喷雾机行驶速度, $m \cdot s^{-1}$; q_1 为开启电磁阀对应的位置, cm ; q_2 为关闭电磁阀对应的位置, cm ; $Q_1[]$ 为储存 q_1 的数组; $Q_2[]$ 为储存 q_2 的数组; i 为数组 $Q_1[]$ 的游标; j 为数组 $Q_2[]$ 的游标。
Note: s is the distance traveled by the sprayer, m ; v is the speed of the sprayer, $m \cdot s^{-1}$; q_1 is the position corresponding to the open solenoid valve, cm ; q_2 is the position corresponding to the closing solenoid valve, cm ; $Q_1[]$ is the array that stores q_1 ; $Q_2[]$ is the array that stores q_2 ; i is the cursor of the array $Q_1[]$; j is the cursor of the array $Q_2[]$.

图5 大田蔬菜靶标喷雾控制系统流程图

Fig.5 Flow chart of field vegetable target-oriented spraying control system

2.3 系统延迟时间标定

延迟时间是系统动态特性的重要指标, 获取各环节延迟时间可为对靶误差修正提供依据。

2.3.1 靶标识别与定位时间

靶标识别与定位时间由上位机图像处理软件获取, 该时间是识别靶标并计算靶标位置最终形成喷雾指令的运算时间, 其值在车载电脑硬件确定的情况下是固定的。靶标识别与定位时间利用上位机软件中 GetTickCount() 计时函数测量, 具体方法是: 图像采集开始计时, 发出喷雾指令结束计时, 经计时函数测量, 该时间为 38 ms。

2.3.2 通信时间

通信时间为上位机软件将靶标位置信息发送给 C37 控制器所需时间, 本文采用 USB 转 CAN 的通信方式, 通信时间由式 (7) 计算:

$$\begin{cases} t_2 = \frac{8p}{I} \\ I = S \cdot \log_2 N \end{cases} \quad (7)$$

式中 I 为传信率, bit/s ; S 为波特率; N 为每个符号承载的信息量, bit ; p 为串口通信的字节数。

上位机与 C37 控制器之间的通信采用乐电新南 CAN 转换器的包模式, 串口处为固定 16 byte 包长, 通信数据 1 byte 包首标识, 1 byte 扩展帧标识, 1 byte 远程帧标识, 1 byte 有效数据长度, 4 byte ID 标识, 和 8 byte 数据段, 有效数据不足 8 byte 后边补 00。上位机将 4 个喷头的数据分开发送, 所以每次占用数据长度为 2 byte。串口波特率为 115 200, 通用异步收发传输器是按二进制发送数据, 所以 $N=2$ bit。最终, 根据式 (7) 计算出通信时间为 1 ms。

2.3.3 电磁阀响应时间

电磁阀响应时间是电磁阀接收喷雾指令到喷头开始喷雾所需时间。为获取该时间, 借助高速摄影技术记录喷头喷雾状态^[31], 并利用图像处理软件对高速摄影单帧图像进行处理, 找出喷雾状态最为接近的相邻帧图片, 根据两帧图片的时间差确定电磁阀响应周期。通过计算电磁阀响应周期与喷雾指令发送周期差值得到电磁阀的响应时间。试验通过 C37 控制器控制电磁阀每隔 0.1 s 开启一次, 使用美国 SVSI 的 GigaView 系列高速摄影仪, 设置图片分辨率为 640×512 像素, 以每秒 1 000 帧拍摄带有时间戳的图片序列, 试验重复 3 次。

将获取的试验图片基于 opencv4.0 库进行处理。处理方式如下: 首先, 将每张图片阈值设定为 30 进行二值化处理, 实现喷雾场和背景分割; 然后, 提取喷雾场的像素点个数 (软件中, 在喷头底端位置设置标记线, 并统计标记线下方的像素点个数); 随机选取一张喷雾图片作为一个周期开始, 记为基准帧, 随后将一个喷雾周期内基准帧后每一帧的喷雾场像素点个数与基准帧的喷雾场像素点个数作差, 记为像素对比差值, 与基准帧相比像素对比差值最小的帧作为该周期结束, 并将两张图片的帧差换算为时间即为电磁阀响应周期。通过计算电磁阀响应周期和喷雾指令周期差值, 并计算 3 次试验结果的均值, 得到电磁阀响应时间。电磁阀响应时间标定过程软件处理结果如图 6 所示。

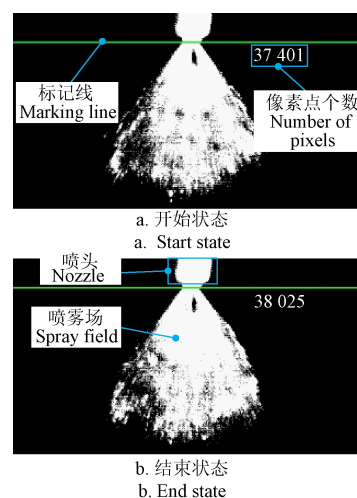


图6 电磁阀响应时间标定过程软件处理结果
Fig.6 Software processing results of solenoid valve response time calibration process

2.3.4 雾滴沉降时间

雾滴沉降时间是药液经喷头喷出至附着在靶标上所需要的时间。在喷头旁边布置带有刻度的直杆，刻度范围为 0~50 cm（刻度为 0、20、30、40 和 50 cm），记录喷头开始喷雾至雾滴沉降到每个指定距离所需时间。试验时，设定工作水压为 0.4 MPa，并重复 3 次试验。

将获取的试验图片基于 opencv4.0 库进行处理，具体处理方式如下：首先，把每组图片中没有喷施水迹的最后一帧图片作为喷施起点，记为第 1 帧。测量图片中直杆上每个刻度的对应长度（以图片顶部为测量起点）；然后，将喷施起点后的每张图片阈值设定为 30 进行二值化处理，实现喷雾场和背景的分割；对处理后的图片进行腐蚀与膨胀，操作重复 2 次（腐蚀半径 7 个像素，膨胀半径 5 个像素），获取雾滴群轮廓；选取轮廓最低点作为雾场沉降高度，并测量图片中的雾滴沉降像素距离（以图片顶部到喷雾场底端位置）；最后，计算 3 次试验中每帧图片的雾滴沉降像素距离均值，并将计算结果与直杆刻度值进行对比，找出最接近刻度值的雾滴沉降距离。再根据每帧图片的时间差，确定雾滴沉降时间。

雾滴沉降时间标定试验如图 7 所示。其中，图 a 为试验现场照片；图 b 为未经二值化处理的喷头打开时刻图片，图中显示了直杆每个刻度的准确位置；图 c~f 为雾滴沉降 20~50 cm 距离对应的二值化及腐蚀膨胀处理后图片。

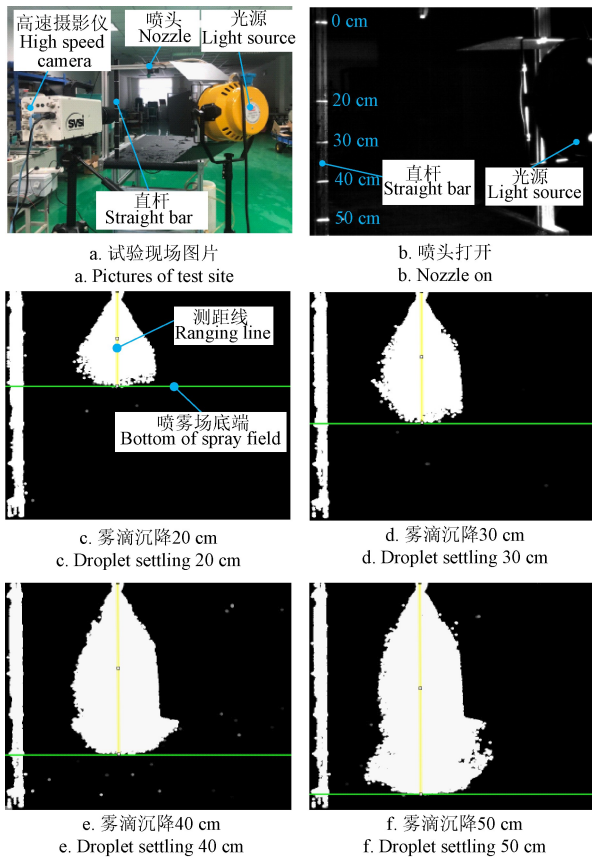
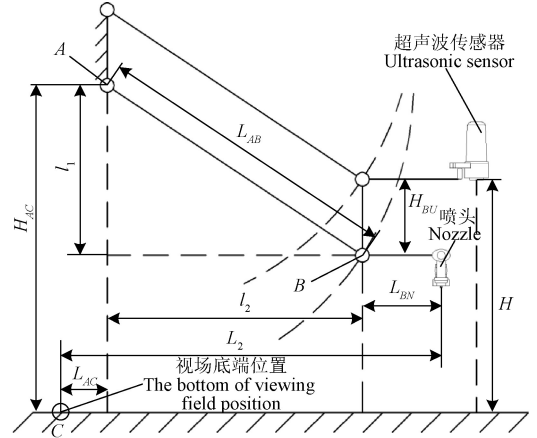


图 7 雾滴沉降时间标定试验

Fig.7 Calibration test of droplet settling time

2.4 喷雾高度调节

喷杆高度调节机构的运动简图如图 8 所示。利用手动绞盘调节喷雾高度的同时，喷头与视场底端的水平距离 L_2 也会发生改变。



注：A 点为四杆机构机架的最低点；B 点为四杆机构连杆的最低点；C 点为视场底端位置； H_{AC} 为 A 点到地面的垂直距离，m； L_{AB} 为 A、B 两点的距离，m； H_{BU} 为超声波传感器到 B 点的垂直距离，m； L_{BN} 为喷头到 B 点的水平距离，m； L_{AC} 为 A 点到视场底端的水平距离，m； l_1 为 A、B 两点的垂直距离，m； l_2 为 A、B 两点的水平距离，m。

Note: Point A is the lowest point of the four-bar mechanism frame; Point B is the lowest point of the connecting rod of the four-bar mechanism; Point C is the bottom of viewing field position; H_{AC} is the vertical distance from point a to the ground, m; L_{AB} is the distance between points A and B, m; H_{BU} is the vertical distance from the ultrasonic sensor to point B, m; L_{BN} is the horizontal distance from the nozzle to point B, m; L_{AC} is the horizontal distance from point a to the bottom of viewing field, m; l_1 is the vertical distance between points A and B, m; l_2 is the horizontal distance between points A and B, m.

图 8 喷杆高度调节机构运动简图

Fig.8 Schematic diagram of the movement of the boom height adjustment mechanism

喷杆高度调节机构为平行四杆机构，已知 H_{AC} 、 L_{AB} 、 H_{BU} 、 L_{BN} 和 L_{AC} 长度分别为 1.1、0.8、0.2、0.2 和 0.15 m。喷头与视场底端的水平距离 L_2 由式 (8) 计算：

$$\begin{cases} L_2 = l_2 + L_{BN} + L_{AC} \\ l_1 = H_{AC} - H + H_{BU} \\ l_2^2 = L_{AB}^2 - l_1^2 \end{cases} \quad (8)$$

带入各参数可得

$$L_2 = \sqrt{-H^2 + 2.6H - 1.05} + 0.35 \quad (9)$$

式中 H 为超声波传感器探测高度，m。

根据式 (9) 和超声波传感器探测高度，即可实时获取 L_2 。至此，需要补偿的系统滞后距离 d 各参数均已获得，控制系统延时补偿模型构建完成。

3 结果与分析

3.1 电磁阀响应时间与雾滴沉降时间标定结果

电磁阀响应时间试验结果如表 1 所示。在 3 次试验中，与基准帧像素点个数对比差值最小的均为第 121 帧图片。

根据每帧时间间隔为 1 ms，得到电磁阀响应周期为 120 ms。其中，控制器控制电磁阀开启指令周期为 100 ms，所以电磁阀的响应时间为 20 ms。

表 1 电磁阀响应时间标定试验结果

Table 1 Calibration test results of response time of solenoid valve

试验号 Test No.	帧数 Frame	像素点个数 Number of pixels	像素对比差值 Pixel contrast difference/pixels
1	基准	7 422	—
	120	5 380	-2 042
	121	8 042	620
	122	10 962	3 540
2	基准	17 626	—
	120	13 539	-4 087
	121	17 042	-584
	122	20 630	3 004
3	基准	37 401	—
	120	32 351	-5 050
	121	38 025	624
	122	41 053	3 652

雾滴沉降时间标定试验结果如表 2 所示。

表 2 雾滴沉降时间标定试验结果

Table 2 Calibration test results of droplet settling time

直杆刻度 Straight bar scale/cm	帧数 Frame	刻度值 Scale value/pixels	雾滴沉降像素距离均值 Mean droplet settling pixel distance/pixels
0	1	32	—
20	37	208	212
30	78	296	293
40	151	384	385
50	226	472	472

根据对应帧图片的时间差，建立雾滴沉降时间模型，如图 9 所示，模型拟合优度为 0.998 6。根据图 9 得到雾滴在 0~50 cm 距离的沉降时间，再利用从超声波传感器探测的喷雾高度，即可实时获取对应喷雾高度的雾滴沉降时间。

综上所述，根据式（2）和系统各环节延迟时间可得系统延迟时间 t 为

$$t = (0.0919h^2 - 0.0495h + 58.7496) \times 10^{-3} \quad (10)$$

式中 h 为喷雾高度，cm。

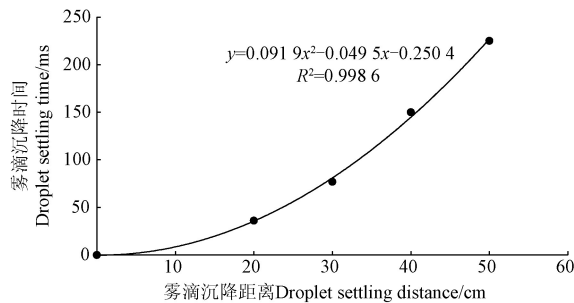


图 9 雾滴沉降时间与沉降距离关系

Fig.9 Relationship between droplet settling time and settling distance

3.2 喷雾高度对对靶喷雾准确性影响试验

为验证喷雾高度对对靶喷雾准确性的影响，于 2022 年 4 月 7 日（天气晴，风向为 114°~158°，风速为 0.6~1.5 m/s，日间气温 21~25℃）在北京市昌平区小汤山镇

国家精准农业研究示范基地进行试验，如图 10 所示。

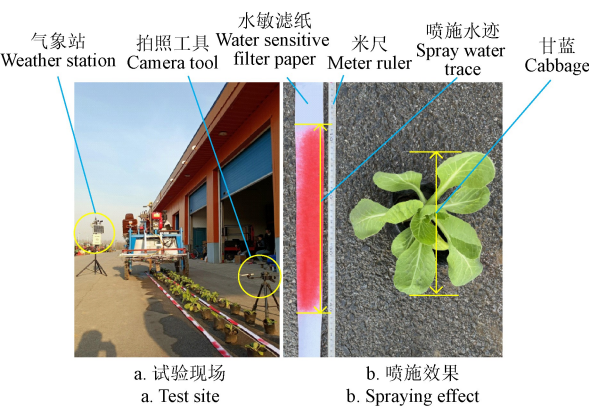


图 10 对靶喷雾准确性试验

Fig.10 Target-oriented spraying accuracy test

试验设置两行盆栽甘蓝，行距为 35 cm，株距为 40 cm，每行 20 株甘蓝，在每行甘蓝左侧布置米尺和白色水敏滤纸（深圳创宝达科技有限公司）。将可移动式喷杆上 2、3 号喷头分别对准两条白色水敏滤纸位置。试验时，通过调节电动球阀阀门开度，设定初始工作水压为 0.4 MPa，只开启 2、3 号喷头，并在两个喷头之间增加挡板以防止喷施时相互干扰。通过喷雾机的手摇绞盘调节喷雾高度（最低喷雾高度为 24.6 cm），分别为 24.6、35 和 50 cm，每一高度各进行 3 次试验。为避免作业速度对试验结果的影响，试验时均采用喷雾机 I 档低速（0.45~0.60 m/s）。考虑试验过程中，车身震动和路况不平造成的超声波传感器探测误差，C37 控制器经滑动窗口滤波对传感器原始数据进行平滑处理，并通过串口每隔 0.5 s 将处理数据保存至上位机。在相同试验条件下，关闭超声波传感器进行未融合喷雾高度的对比试验。

本文定义行进方向滤纸喷施水迹中心与靶标中心距离为对靶误差；行进方向喷施水迹覆盖靶标纵向长度为有效喷施长度，有效喷施长度占靶标纵向总长度的 80% 为有效喷施，有效喷施靶标数与总靶标数的比值为有效喷施率；在有效喷施条件下，有效喷施长度占喷施水迹长度的比值作为有效覆盖率，各指标测量如图 11 所示。

每次试验结束后，对每个喷施靶标进行单独拍照。首先读取米尺上的靶标和滤纸条带喷施水迹的起止刻度并记录在 EXCEL 中，分别计算靶标中心刻度和滤纸条带中心刻度，得到对靶误差。之后，将每个喷雾高度下（3 次试验共计 120 个数据）所有试验数据中的最大最小值去除，计算平均绝对误差和均方根误差。同时，通过靶标和滤纸条带喷施水迹起止刻度分别计算出喷施水迹长度、靶标长度和有效喷施长度，得到有效喷施率和有效覆盖率。最后，计算每个喷雾高度下的平均有效覆盖率。

超声波传感器喷雾高度探测误差如图 12 所示。由图可知，喷雾高度探测误差在 ±0.7 cm 范围内，表明超声波传感器喷雾高度探测精度较高，可以满足对靶喷雾系统喷雾高度探测需求。

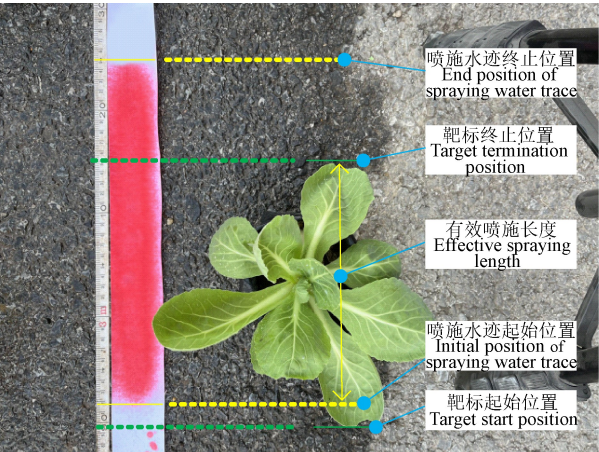


图 11 试验指标测量
Fig.11 Test index measurement

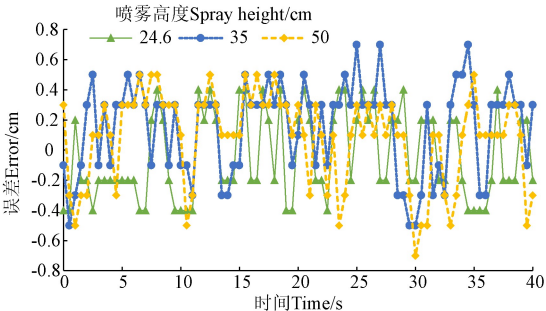


图 12 超声波传感器喷雾高度探测误差
Fig.12 Detection spray height errors of ultrasonic sensor

经统计，在 24.6、35 和 50 cm 3 种不同的喷雾高度下，实际车速均值为 0.52 m/s，不同喷雾高度的对靶喷雾试验结果如表 3 所示。

表 3 不同喷雾高度的对靶喷雾试验结果
Table 3 Test results of target-oriented spraying with different spray heights

喷雾高度 Spray height/cm	融合喷雾高度 Fusion spray height	平均绝对误差 Mean absolute error/cm	均方根误差 Root mean square error/cm	有效喷施率 Effective spraying rate/%	平均有效覆盖率 Average effective coverage/%
24.6	是	2.77	3.20	97.1	81.3
	否	3.85	4.61	87.2	
35	是	3.31	3.77	94.3	78.5
	否	6.16	7.23	52.7	
50	是	3.63	4.26	92.6	76.6
	否	12.61	13.11	31.3	

由表 3 可知，随着喷雾高度的增加，未融合喷雾高度的平均绝对误差和均方根误差逐渐增大，有效喷施率不断下降。较于未融合喷雾高度对靶喷雾，融合喷雾高度的对靶喷雾平均绝对误差平均减小了 4.30 cm，均方根误差平均减小了 4.57 cm。两者平均绝对误差差值在喷雾高度为 50 cm 时最大，为 8.89 cm，此时的均方根误差差值为 8.85 cm，有效喷施率差值为 61.3 个百分点。另外，随着喷雾高度的增加，融合喷雾高度的对靶喷雾平均绝对误差略有增大，平均有效覆盖率下降，分析认为随着喷雾高度的增加，雾滴飘失环节带来的雾滴偏移量越大，造成对靶喷雾的准确性下降。

不同喷雾高度对靶喷雾试验结果表明，在作业速度为 0.52 m/s 的情况下，融合喷雾高度的对靶喷雾平均绝对误差和均方根误差分别不高于 3.63 和 4.26 cm，比未融合喷雾高度的平均绝对误差平均减小了 4.30 cm，均方根误差平均减小了 4.57 cm，有效喷施率不低于 92.6%，验证了融合喷雾高度对靶喷雾的可行性。

为提高有效喷施率可增大电磁阀提前打开和延迟关闭的距离，但是会降低有效覆盖率。同时，当植株冠层较大时株间冠层距离较小，不再适宜对靶喷雾。本文设定电磁阀提前打开距离 4 cm、延迟关闭距离 4 cm，由此得到适宜对靶喷雾的甘蓝冠层尺寸最大为 32 cm。经测量，甘蓝由初始移栽到生长至该冠层尺寸，株高变化范围为 8.8~18.5 cm，按照喷杆式喷雾机喷施杀虫剂及杀菌剂时喷头离作物高度 0.3 m 的作业标准^[32]，甘蓝对靶喷雾高度需求范围为 38.8~48.5 cm，本试验中喷雾高度范围为 24.6~50 cm，有效喷施率不低于 92.6%，可满足实际作业需求。

3.3 田间试验

为验证大田蔬菜对靶喷雾系统实际田间作业效果，于 2022 年 4 月 8 日（天气晴，风向为 91°~154°，风速为 0.8~1.8 m/s，日间气温 16~20 ℃）在北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地甘蓝地进行试验。甘蓝行距为 35 cm，株距为 40 cm，行向总长度为 30 m。试验前，调节喷头离地高度为 24.6 cm，在每行甘蓝左侧布置米尺和白色水敏滤纸。将可移动式喷杆上 2、3 号喷头分别对准两条白色水敏滤纸位置。试验时，通过调节电动球阀阀门开度，设定初始工作压力为 0.4 MPa，分别在喷雾机 I 档低速（0.45~0.60 m/s）、I 档高速（0.55~0.70 m/s）和 II 档低速（0.65~0.80 m/s）3 种车速沿作物行各进行 3 次试验，另外，在相同的试验条件进行连续喷雾作业，分别统计连续喷雾与对靶喷雾作业的 9 次试验（3 种作业速度，每种速度重复 3 次试验）施药量。试验现场和实际对靶喷雾效果如图 13 所示。

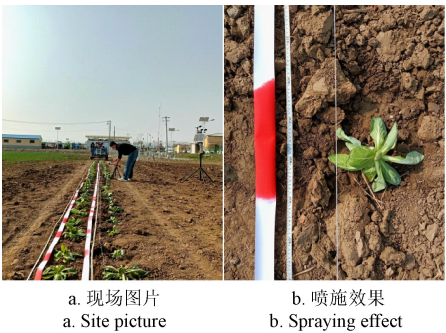


图 13 田间试验
Fig.13 Field experiment

每次试验结束后，对每个喷施靶标进行单独拍照。通过读取米尺上靶标和滤纸条带喷施水迹的起止刻度计算对靶误差。剔除每种速度下（3 次试验共计 300 个数据）所有试验数据中的最大和最小值，计算平均绝对误差和均方根误差。通过靶标和滤纸条带喷施水迹起止刻度计算有效喷施率和有效覆盖率，最后计算每种速度下的平均有效覆盖率。

田间试验结果如表 4 所示。在融合喷雾高度的对靶喷雾过程中,平均绝对误差和均方根误差随着车速增大而增大,有效喷施率和平均有效覆盖率随着车速的增大而减小。车速 0.49 m/s 时平均绝对误差和均方根误差均最小,分别为 3.17 和 3.77 cm,有效喷施率和平均有效覆盖率分别为 93.5%和 80.2%;车速 0.77 m/s 时,平均绝对误差和均方根误差最大,有效喷施率和平均有效覆

盖率最低。较于连续喷雾方式,对靶喷雾节药率为 33.8%。

田间试验结果表明,随着作业速度的增加,有效喷施率和平均有效覆盖率下降,在作业速度不大于 0.49 m/s 时,有效喷施率为 93.5%,平均有效覆盖率为 80.2%。较于连续喷雾方式,对靶喷雾节药率可达 33.8%。满足大田株间距大、冠层尺寸小的作物对靶喷雾作业需求。

表 4 田间试验结果
Table 4 Field test results

喷雾机速度 Speed of sprayer/(m·s ⁻¹)	平均绝对误差 Mean absolute error/cm	均方根误差 Root mean square error/cm	有效喷施率 Effective spraying rate/%	平均有效覆盖率 Average effective coverage rate/%	连续喷雾施药量 Dosage of continuous spray/L	对靶喷雾施药量 Dosage for target-oriented spray/L	节药率 Drug saving rate/%
0.49	3.17	3.77	93.5	80.2			
0.66	4.88	6.15	82.3	74.5	21.3	14.1	33.8
0.77	5.63	6.58	76.2	63.4			

4 讨 论

1) 本文的雾滴沉降时间模型,在 24.6~50 cm 喷雾高度范围内,可有效降低因植株生长过程冠层高度变化、不同地块的垄台高度差别、不同作物大田喷雾高度以及土壤类型而调节喷雾高度时造成的对靶误差,对靶喷雾平均绝对误差不高于 3.63 cm。但由于植株生长后期株间冠层距离过小,已不具有对靶喷雾作业的需求及必要性,该系统仅适用于植株冠层小、株间冠层距离大的对靶喷雾作业。

2) 本文针对喷雾高度影响大田对靶喷雾准确性问题,研究对靶喷雾各作业环节的滞后特性。而雾化后雾滴飘失环节带来的雾滴偏移也是影响对靶准确性的因素之一。但雾滴飘移影响因素较复杂,包括喷雾雾滴(尺寸分布、黏度、表面张力、蒸气压、挥发性、密度等)、喷雾模式(喷头类型、喷雾速度和高度、喷施方法)和外界条件(风速、风向、温度、湿度、气流等环境条件和操作人员技术水平等)等^[33]。对靶喷雾作业通常采用喷量大、雾滴粒径大的扇形喷头,该喷雾方式下的雾滴飘移和沉积特性尚需进一步探索。

3) 本文的对靶喷雾作业考虑了行进方向植株的垂直投影长度。为提高系统的容错性,在实现根据靶标大小控制喷雾长度的基础上,设置提前打开量与滞后关闭量,提前量与滞后量分别设置为 4 cm。试验指标有效覆盖率,受植株冠层识别准确性、控制系统响应准确性、提前打开量与滞后关闭量的影响,通过增大提前打开量与滞后关闭量可提高有效喷施率,但同时也会降低有效覆盖率。在满足对靶喷雾有效喷施需求的同时,如何设置更小的提前打开量与滞后关闭量来提高有效覆盖率尚需进一步研究。

5 结 论

1) 提出了融合靶标位置、靶标大小、喷雾机作业速度和喷雾高度信息的对靶喷雾控制方法,实现了基于超声波传感器的喷雾高度实时探测,并借助高速摄影获取对靶喷雾各环节的延迟时间,建立了融合喷雾高度的系

统控制模型,并搭建了对靶喷雾系统。

2) 不同喷雾高度对靶试验结果表明,在作业速度为 0.52 m/s 的情况下,融合喷雾高度的对靶平均绝对误差和均方根误差分别不高于 3.63 和 4.26 cm,比未融合喷雾高度的平均绝对误差平均减小了 4.30 cm,均方根误差平均减小了 4.57 cm,有效喷施率不低于 92.6%,验证了融合喷雾高度对靶喷雾控制的可行性。

3) 田间试验结果表明,随着作业速度的增加,有效喷施率和平均有效覆盖率下降。在作业速度不大于 0.49 m/s 时,对靶有效喷施率为 93.5%,平均有效覆盖率为 80.2%。较于连续喷雾方式,对靶喷雾节药率可达 33.8%,满足大田株间距大、冠层尺寸小的作物对靶喷雾作业需求。

[参 考 文 献]

[1] 苑进,赵新学,李明,等.高地隙喷杆式与隧道式一体喷雾机的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):60-68.

Yuan Jin, Zhao Xinxue, Li Ming, et al. Design and experiment of high gap sprayer and tunnel integrated sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.2): 60-68. (in Chinese with English abstract)

[2] 张波,翟长远,蔡吉晨,等.喷杆式施药机对行喷雾控制系统设计与试验[J].农机化研究,2017,39(11):49-58.

Zhang Bo, Zhai Changyuan, Cai Jichen, et al. Design and test of spray control system for spray rod spraying machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 49-58. (in Chinese with English abstract)

[3] 魏新华,邵菁,缪丹丹,等.喷杆式喷雾机喷杆高度及平衡在线调控系统[J].农业机械学报,2015,46(8):66-71.

Wei Xinhua, Shao Jing, Miao Dandan, et al. Online control system for boom height and balance of sprayer sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 66-71. (in Chinese with English abstract)

- [4] Andreas H, Hems-Jiirgen O, Werner F, et al. A method for testing automatic spray boom height control systems[C]. 2015 ASABE Annual International Meeting, St. Joseph, Michigan: 152150720.
- [5] Andreas Herbst, Hans-Jürgen Osteroth, Hartje Stendel. A novel method for testing automatic systems for controlling the spray boom height[J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 115-125.
- [6] 薛涛, 李伟, 杜岳峰, 等. 大型高地隙喷雾机喷杆主动悬架自适应模糊滑模控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 47-56.
- Xue Tao, Li Wei, Du Yuefeng, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control of sprayer active suspension for large scale high gap sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(21): 47-56. (in Chinese with English abstract)
- [7] 乔白羽, 何雄奎, 王志翀, 等. 基于 LiDAR 扫描的高地隙宽幅喷雾机变量施药系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 89-95.
- Qiao Baiyu, He Xiongkui, Wang Zhichong, et al. Development of variable rate spraying system for wide gap sprayer based on LiDAR scanning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 89-95. (in Chinese with English abstract)
- [8] 翟长远, 王秀, 密雅荣, 等. PWM 变量喷雾喷头流量模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 40-44.
- Zhai Changyuan, Wang Xiu, Mi Yarong, et al. PWM variable spray nozzle flow model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 40-44. (in Chinese with English abstract)
- [9] Hussain N, Farooque A, Schumann A, et al. Design and development of a smart variable rate sprayer using deep learning[J]. Remote Sensing, 2020, 12(24): 4091.
- [10] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 74-78.
- Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Atomization characteristics of PWM intermittent variable spray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 74-78. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马旭, 郭林杰, 温志成, 等. 静电喷雾的多喷头雾化特性及田间试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 73-82.
- Ma Xu, Guo Linjie, Wen Zhicheng, et al. Atomization characteristics and field test of electrostatic spray for multi nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(7): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张瑞瑞, 李龙龙, 付旺, 等. 脉宽调制变量控制喷头雾化性能及风洞环境雾滴沉积特性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 42-51.
- Zhang Ruirui, Li Longlong, Fu Wang, et al. Pulse width modulation variable control nozzle atomization performance and droplet deposition characteristics in wind tunnel environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 42-51. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张铁, 杨学军, 严荷荣, 等. 超高地隙喷杆喷雾机风幕式防飘移技术研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 77-86.
- Zhang Tie, Yang Xuejun, Yan Herong, et al. Research on air curtain type anti drift technology for super high gap sprayer sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 77-86. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘雪美, 李扬, 李明, 等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 37-44.
- Liu Xuemei, Li Yang, Li Ming, et al. Design and test of precision target spraying system for sprayer sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王璨, 武新慧, 张燕青, 等. 基于双注意力语义分割网络的田间苗期玉米识别与分割[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 211-221.
- Wang Can, Wu Xinhui, Zhang Yanqing, et al. Field seedling maize recognition and segmentation based on double attention semantic segmentation network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 211-221. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐建鹏, 王杰, 徐祥, 等. 基于 RAdam 卷积神经网络的水稻生育期图像识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 143-150.
- Xu Jianpeng, Wang Jie, Xu Xiang, et al. Image recognition for different developmental stages of rice by RAdam deep convolutional neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(8): 143-150. (in Chinese with English abstract)
- [17] 耿爱军, 张晓辉, 曹胜柱, 等. 烟草抑芽剂智能对靶施药系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 35-40.
- Geng Aijun, Zhang Xiaohui, Cao Shengzhu, et al. Design and test of intelligent target application system of tobacco bud inhibitor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 35-40. (in Chinese with English abstract)
- [18] 任守纲, 贾馥玮, 顾兴健, 等. 反卷积引导的番茄叶部病害识别及病斑分割模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12):

- 186-195.
- Ren Shougang, Jia Fuwei, Gu Xingjian, et al. Deconvolution guided tomato leaf disease identification and lesion segmentation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 186-195. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙俊, 朱伟栋, 罗元秋, 等. 基于改进 MobileNet-V2 的田间农作物叶片病害识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 161-169.
- Sun Jun, Zhu Weidong, Luo Yuanqiu, et al. Recognizing the diseases of crop leaves in fields using improved Mobilenet-V2[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 161-169. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孔建磊, 金学波, 陶冶, 等. 基于多流高斯概率融合网络的病虫害细粒度识别[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 148-157.
- Kong Jianlei, Jin Xuebo, Tao Zhi, et al. Fine grained identification of diseases and pests based on multi stream Gaussian probability fusion network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 148-157. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵辉, 曹宇航, 岳有军, 等. 基于改进 DenseNet 的田间杂草识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 136-142.
- Zhao Hui, Cao Yuhang, Yue Youjun, et al. Field weed identification based on improved densenet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(18): 136-142. (in Chinese with English abstract)
- [22] 樊湘鹏, 周建平, 许燕, 等. 基于优化 Faster R-CNN 的棉花苗期杂草识别与定位[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 26-34.
- Fan Xiangpeng, Zhou Jianping, Xu Yan, et al. Weed identification and location in cotton seedling stage based on optimized Faster R-CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 26-34. (in Chinese with English abstract)
- [23] Loghavi M, Behzadi M B. Development of a target oriented weed control system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 112-118.
- [24] Wang Y, Zhang X, Ma G, et al. Recognition of weeds at asparagus fields using multi-feature fusion and backpropagation neural network[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 190-198.
- [25] Espejo-Garcia B, Malounas L, Eleanna V, et al. Testing the suitability of automated machine learning for weeds identification[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2021, 2(1): 34-47.
- [26] 袁鹏成, 李秋洁, 邓贤, 等. 基于 LiDAR 的对靶喷雾实时控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 273-280.
- Yuan Pengcheng, Li Qiujie, Deng Xian, et al. Design and experiment of target spray real-time control system based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 273-280. (in Chinese with English abstract)
- [27] Chen Y, Zhu H, Ozkan H E. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(3): 773-781.
- [28] Sharda A, Fulton J P, McDonald T P, et al. Real-time nozzle flow uniformity when using automatic section control on agricultural sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 169-179.
- [29] 翟长远, 赵春江, 王秀, 等. 幼树靶标探测器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 18-22.
- Zhai Changyuan, Zhao Chunjiang, Wang Xiu, et al. Design and test of young tree target detector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(2): 18-22. (in Chinese with English abstract)
- [30] 许林云, 张昊天, 张海锋, 等. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 1-9.
- Xu Linyun, Zhang Haotian, Zhang Haifeng, et al. Development and experiment of automatic target spraying control system for orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(22): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [31] 束义平. 基于激光雷达探测技术的果园变量喷雾控制系统研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- Shu Yiping. Research on Orchard Variable Spray Control System Based on Lidar Detection Technology[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [32] 中华人民共和国农业部, 喷杆式喷雾机安全施药技术规范 NY/T 1876-2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [33] 刘晓慧, 袁亮亮, 石鑫, 等. 植保施药机械喷雾雾滴飘移研究进展[J]. 农药学报, 2022, 24(2): 232-247.
- Liu Xiaohui, Yuan Liangliang, Shi Xin, et al. Research progress on droplet drift of plant protection spraying mechanical sprays [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24(2): 232-247. (in Chinese with English abstract)

Design and experiment of the target-oriented spraying system for field vegetable considering spray height

Zhao Xueguan^{1,3}, Zheng Shenyu^{1,2}, Yi Kechuan², Wang Xiu^{1,3}, Zou Wei^{1,3}, Zhai Changyuan^{1,3*}

(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

2. College of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China;

3. Nongxin (Nanjing) Intelligent Agricultural Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

Abstract: A target-oriented spraying system was designed for the field vegetables using height data, in order to explore the effect of spray height on accuracy. A systematic analysis was made to determine the structure and working principle of the target-oriented spraying system. High-speed photography was also utilized to identify the lagging characteristics of all the links in the target-oriented spraying operation. The delay time of each part was selected to establish the target-oriented spraying lag model. As such, a target-controlled injection was proposed to integrate the target location, target shape, spray speed, and spray height. A steady-pressure and target-oriented spraying control system was then designed to combine the target recognition, target-oriented spraying control, and voltage stabilizing control using the C37 controller. Among them, an industrial camera was utilized to capture the position information of the target for the spraying control system. During the operation, the initial spray pressure of the system was first set to determine the difference between the spray pressure and that from the pressure sensor. Then, the duty cycle of the Pulse-Width Modulation (PWM) signal was adjusted in real time to change the valve opening of the electric ball valve. Finally, the real-time adjustment of the spray pressure was realized to stabilize the spray system. Once the difference between the set pressure and that from the sensor was within 10% of the set pressure value, no operation was made to avoid the impact of frequent adjustment of valve opening on the service life of the electric ball valve. The C++ programming language was used to develop the field operation software in the Windows system. The target spray system was mainly divided into the image display, the serial port control, the parameter display, and the equipment control modules. The software operation interface was used to dynamically display the original image or processing data as required. The image display area was divided into four parts, each of which corresponded to the different nozzles 1-4. The target position of nozzles was then monitored using video tracking. Once the target contacted the set positioning line, the upper computer was used to send a trigger signal through the USBCAN converter, including the fixed distance between the target and the bottom of the field of view, while the vertical projection length of the target in the traveling direction to the C37 controller. At the same time, the controller adjusted the delay time to encode the speed by the encoder and the spray height obtained by the ultrasonic sensor. The lag distance was then compensated to complete the precise control of the opening and closing of electromagnetic valves for the target-oriented spraying. Finally, the performance test of the target-oriented spraying system was carried out to verify the simulation. When the walking speed was 0.52 m/s, the Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) of the target with the height information were less than 3.63 and 4.26 cm, respectively, which were reduced by 4.30 and 4.57 cm, respectively. The effective spraying rate was less than 92.6%, indicating the feasibility of the fusion height information for the target-oriented spraying control. The field experiment showed the effective spraying rate decreased with the increase in speed. Specifically, the effective spraying rate on the target-oriented system reached 93.5%, while the average effective coverage was 80.2% when the speed was less than 0.49 m/s, compared with the continuous spraying method, the drug saving rate of target-oriented spraying can reach 33.8%. Consequently, the system can fully meet the target operation requirements of wide row spacing crops in the field.

Keywords: plant protection machinery; sensors; target-oriented; spray bar; spray; spray height