

果园悬挂式柔性对靶喷雾装置研制与试验

陈泽鸿¹, 陈建泽², 宋淑然^{1,3,4*}, 孙道宗^{1,3,4}

(1. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 2. 广东利元亨智能装备股份有限公司, 惠州 516000; 3. 广东省农情信息监测工程技术研究中心, 广州 510642; 4. 国家柑橘产业技术体系机械化研究室, 广州 510642)

摘要: 为减少农药飘移损失, 保护生态环境, 该研究从提高喷雾有效性和降低喷雾装置对果树枝叶的机械性损伤出发, 研制了一种悬挂式柔性对靶喷雾装置。该装置以东方红 MS-304 拖拉机为载体, 采用超声波传感器探测树冠位置, 利用霍尔传感器构建测速模块。对株距 4.0 m、树高 1.6 m、树冠直径 1.4 m 的橘树进行对靶喷雾试验验证悬挂式柔性对靶喷雾装置作业性能。试验结果表明: 拖拉机行驶速度为 0.5 m/s 时, 喷雾压力 0.4、0.5 及 0.6 MPa 对应的平均药液附着率分别为 84.7%、91.7%、88.9%, 药液附着率较高且接近, 喷雾压力对药液附着率的影响不明显; 拖拉机行驶速度为 1.0 m/s 时, 喷雾压力 0.4、0.5 和 0.6 MPa 对应的平均药液附着率分别为 64.2%、70.3%、75.8%, 喷雾压力越大, 药液附着率越高; 拖拉机行驶速度为 1.5 m/s 时, 平均药液附着率低于 50%, 且喷雾飘移较为严重, 不适宜进行自动对靶喷雾; 拖拉机行驶速度和喷雾压力相同时, 药液附着率按树冠上、中、下层顺序呈递减规律, 且速度越高, 递减规律越明显。研究结果对提高果园对靶喷雾的药液附着率具有较好的实用价值。

关键词: 植保机械; 果园; 对靶喷雾; 柔性; 超声波测距; 附着率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.18.002

中图分类号: S491

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-18-0011-10

陈泽鸿, 陈建泽, 宋淑然, 等. 果园悬挂式柔性对靶喷雾装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 11-20.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.18.002 <http://www.tcsae.org>

Chen Zehong, Chen Jianze, Song Shuran, et al. Development and experiments of the hanging flexible targeted spray device for orchards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(18): 11-20. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.18.002 <http://www.tcsae.org>

0 引言

水果已成为中国继粮食和蔬菜后第三大种植产业^[1]。但果园植保难题尚未解决, 果园植保主要依靠喷施农药进行化学防治, 随着农药的广泛使用, 出现了农药残留、环境污染、损害人身安全等一系列负面问题。其主要原因在于国内植保机械作业效率较低、施药技术落后, 农民劳动强度过大, 导致农药的有效利用率低于 30%^[2-3]。要解决以上问题, 就需要让农药尽可能多地喷施在果树上, 流失在其他区域的农药最少^[4], 即实现精准施药。精准施药技术就是结合自动化与喷雾技术, 实现果园喷雾机自动识别靶标, 减少靶标间隙处的农药浪费, 在减少农药使用量的同时提高农药利用率, 避免农药在环境中残留^[5-6]。

早在 20 世纪 80 年代, 国内许多研究单位已先后成功研制出了牵引式、半悬挂式风送喷雾机, 不仅作业效果好, 且价格易于果农接受^[7-9]。近年来, 国内外更有不少研究人员从各角度出发进行自动化对靶喷雾研究与试验^[10]。

针对靶标检测问题, 许多学者利用实时传感器技术, 根

据采集到的树冠图像、激光、超声波以及红外光信号, 判断果树形状、位置, 进而控制喷头响应位置与电磁阀启闭动作, 建立针对果树树冠的对靶喷雾系统或基于树冠形状的仿形喷雾系统^[11-15]。李井祝等利用激光测距传感器探测喷雾机与靶标之间的距离, PLC 根据其反馈的距离数值判断靶标是否存在进而控制喷头启闭动作^[16]; 对于传统数字电路式红外靶标探测器发功率小、发光强度低等问题, 基于模拟正弦调制的红外靶标探测系统能够很好地解决, 采用模拟调制解调电路来代替数字编码解码电路, 使靶标反射更多红外光, 从而提高红外探测系统整体性能^[17]; 同样, 为解决红外靶标探测系统易受光照影响、探测距离近、工作不稳定等问题, 可通过集成电路实现红外光信号脉冲编码与解码, 在红外发射管与接收头处加装凸透镜, 改善光束分布^[18]; 还有许多研究人员将机器视觉与图像处理技术结合, 对作物靶标与土壤背景进行分割以实现靶标识别^[19-24]。

在对靶喷雾控制研究方面, 如何利用喷雾机延时喷雾来补偿系统响应时间是对靶喷雾成功与否的关键问题。针对该问题, 有学者采用自适应延时法补偿系统响应时间, 通过 EDA 仿真软件 (Proteus) 比较单片机采用 M 法、T 法对地速传感器 (TGSS) 信号计算的误差大小, 将 TGSS 信号频率与喷雾机速度进行拟合, 设计了自适应延时喷雾模型^[25]; 为避免激光传感器因激光光束较细导致的将树冠内空洞、枝间间隙等误判为果树间空隙而出现的电磁阀频繁启闭动作, 国内研究者采用连续 3 次检测靶标判别法设计了履带自走式自动对靶喷雾系统, 并通过动态靶标识别间

收稿日期: 2022-05-18 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31671591); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金项目 (2022KJ108); 广州市科技计划项目 (202002030245); 国家现代农业产业技术体系资助项目 (CARS-26)

作者简介: 陈泽鸿, 研究方向为对靶喷雾。Email: chenzehong@stu.scau.edu.cn

*通信作者: 宋淑然, 博士, 教授, 研究方向为喷雾技术及测控技术。

Email: songshuran@scau.edu.cn

距试验, 确定喷雾机提前与延后喷雾距离^[26]; 此外, 还有不少学者利用高压静电装置对喷头施加电压, 在喷头与靶标作物之间建立静电场, 使农药雾滴在静电力与其他外力共同作用下定向运动, 实现对靶喷雾^[27-30]。

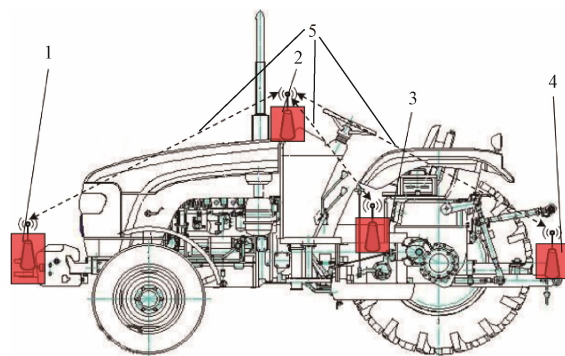
已有对靶喷雾研究采用的每种技术都各有优缺点。其中大部分对靶喷雾装置的喷雾机构都是固定的, 无法根据靶标探测结果进行移位^[31], 遇到不规则树体时, 喷雾装置会损伤靶标果树。为此, 本文提出一种悬挂式柔性对靶喷雾装置, 并该装置进行田间对靶喷雾试验, 以提高果园对靶喷雾的药液沉积率。

1 悬挂式柔性对靶喷雾试验平台

悬挂式柔性对靶喷雾装置以东方红 MS-304 拖拉机为搭载平台, 采用三点悬挂机构将喷雾架搭载在拖拉机后侧。拖拉机外形尺寸为 3.6 m×1.5 m×1.6 m, 其动力输出最大功率为 17.78 kW, 额定牵引力为 6.7 kN。装置各模块在拖拉机上的安装位置如图 1 所示, 包括超声波靶标检测模块、主控制器、测速模块、电磁阀控制模块。与现有大部分对靶喷雾装置相比, 主控制器作为协调核心, 采用无线通信与另外 3 个模块进行数据传送, 如图 1 中虚线表示, 可减少拖拉机上的复杂布线, 提高通信可靠性。

喷雾架结构如图 2 所示, 总质量约为 200 kg, 主要包括承重架、升降导轨、升降架、一级展臂、二级展臂、吊挂喷杆、倒 Y 型喷头支架和喷头。其中, 承重架的长宽高尺寸为 850 mm×700 mm×1 200 mm, 分为上下两层, 上层放置一个容量为 450 L 的药液箱, 下层安装流量为 135 L/min 的隔膜泵; 升降架上的轴承嵌入升降导轨内, 通过调节手柄和滑轮组可上下调节喷雾臂, 整个水平药液管道的总质量约为 100 kg, 具有约为 1 000 N 的重力, 调节手柄的杠杆比例为 5:1, 结合动滑轮组在理想情况下仅需使用约 50 N 的拉力即可调节升降架; 升降架、一

级展臂和二级展臂共同组成喷雾臂并可二次折叠, 便于移动和运输; 水平喷雾臂总长度为 8.7 m, 可适应多种果树种植行距, 可调节高度为 1.5~2.2 m; 为增大喷幅, 同时减少药液流失, 选用雾锥角为 110°、孔径小、低流量、喷雾几何形状为扇形的德国 Lechler 公司的 TR110-015 喷头, 压力范围 0.2~2.0 MPa; 喷雾臂左右两侧的倒 Y 型喷头支架上安装 4 个喷头, 用于对树冠顶部进行喷雾; 吊挂喷杆长度为 1.2 m, 在水平方向上 2 个倒 Y 型喷头支架和 4 个吊挂喷杆在初始安装点两侧 0.5 m 范围内可调; 喷雾时, 在拖拉机前进方向上, 两侧门型喷雾结构的吊挂喷杆与倒 Y 型喷头可同时以扫场的方式对树冠直径小于 2 m, 高度小于 2 m 的左右两排果树进行围绕喷雾; 吊挂喷杆与喷雾臂之间使用双十字万向节进行柔性连接, 吊挂喷杆可以多角度多方向自由转动, 喷杆末端与喷头之间使用柔性喷雾软管连接。由于万向节可自由摆动且喷雾软管为柔性, 当果树阻碍喷杆行进时, 吊挂喷杆可柔性绕开, 降低对果树的损害, 从而实现柔性喷雾。



1.靶标检测模块 2.主控制器 3.测速模块 4.电磁阀控制模块 5.无线通信
1.Target detection module 2.Main controller 3.Speed measuring module 4.Solenoid valve control module 5.Wireless communication

图 1 各模块安装位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the installation position of each module

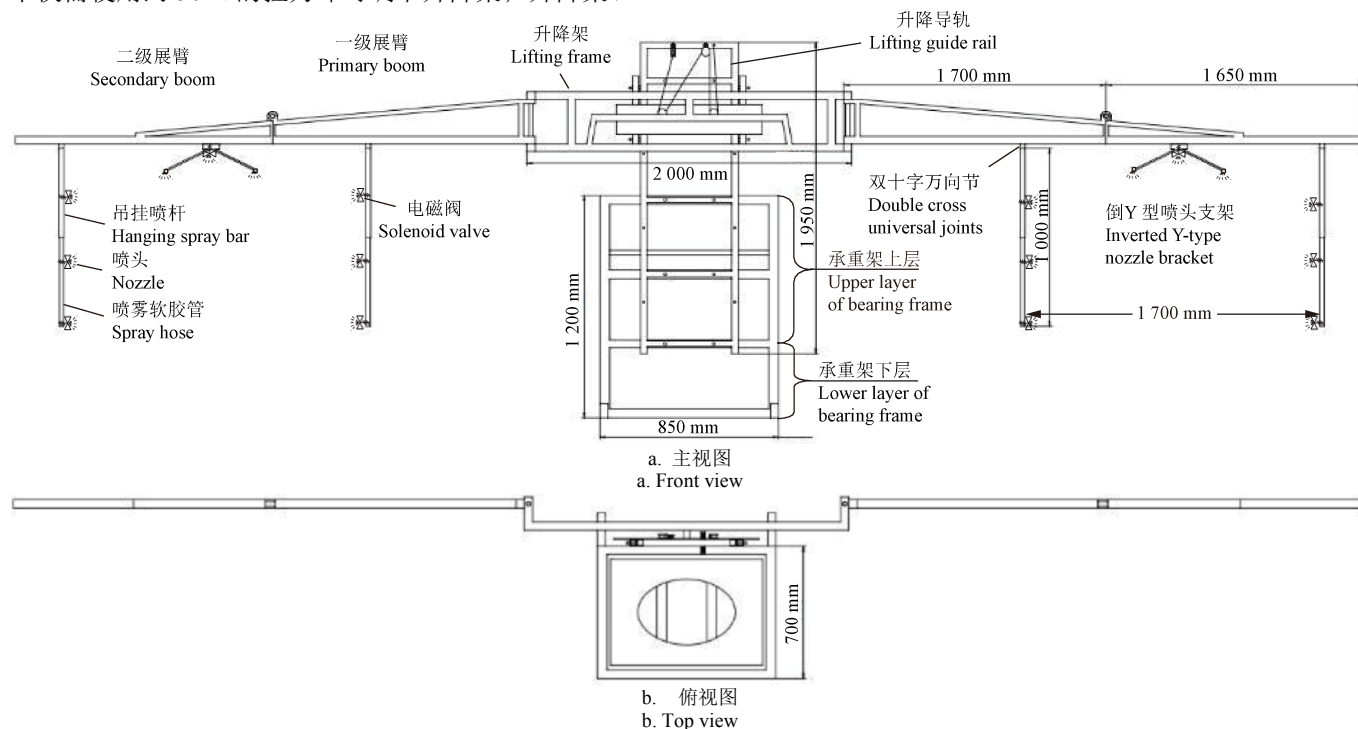


图 2 喷雾架结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the structure of spray rack

2 对靶喷雾装置

对靶喷雾装置主要包括主控制器、超声波靶标检测模块、拖拉机在线测速模块和电磁阀控制模块。其中主控制器为协调核心，负责与另外 3 个模块进行数据传输。

2.1 主控制器

主控制器的主要作用是实现超声波靶标检测模块、测速模块及电磁阀控制模块电路之间的信息实时互传。显示超声波测距距离、速度、电磁阀开启状态等信息，向电磁阀控制模块发送控制命令，切换“手动”与“自动”模式，兼做人机交互模块。主控制器的工作流程图如图 3 所示。

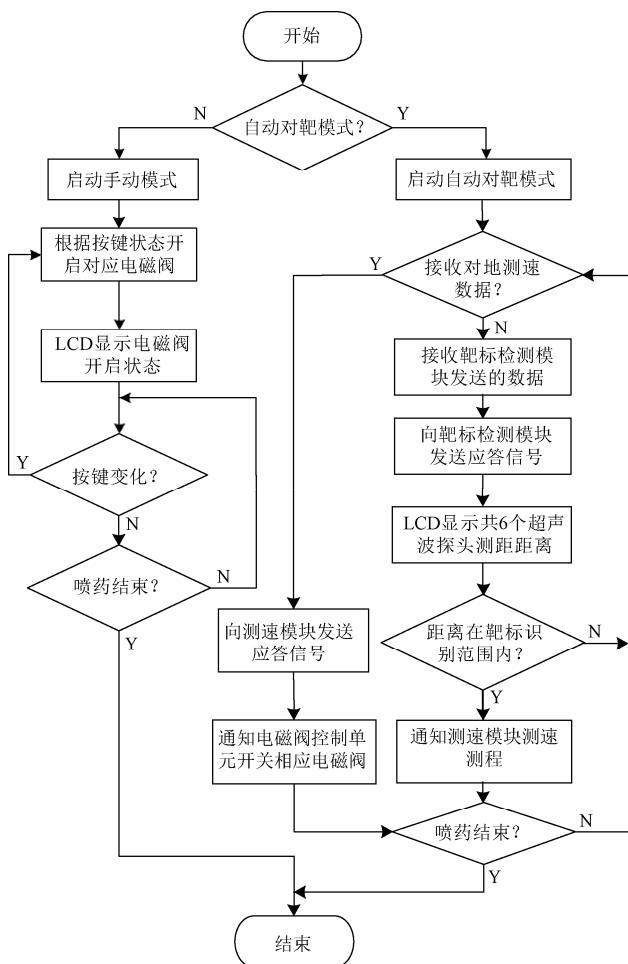


图 3 主控制器工作流程图

Fig.3 Flow chart of main controller

由于数据处理量较大，且实时性要求较高，故该模块选择综合性能较好的 STM32F103ZET6 处理器。该处理器基于 ARM Cortex-M3 内核，时钟频率可达 72 MHz 主频，单周期精简指令集（RSIC），具有低功耗、高性能的微控制器，在 72 MHz 主频下的电流为 36 mA，代码安全性高。

主控制器的控制电路板安装在电控箱内，电路板由容量为 4.4 Ah、供电电压为 DC-12V 的锂电池供电，电控箱长宽高尺寸为 40 cm×30 cm×25 cm。为增强无线信号的收发能力，从电控箱内部引出天线，电控箱面板上设计 1 个电源开关、1 个手动与自动模式的切换开关和 14 个电

磁阀独立控制开关。

预试验表明，当各模块同时发送数据时，主控制器会先接收完其中一个模块所发送的数据后，再接收另一个模块的数据，不会出现数据交叉的情况。此外，通过为不同模块分配不同地址码，接收数据时，先匹配地址码，即可避免数据冲突。为确保主控制器与其余模块进行可靠通信，对主控制器模块进行通信测试：每间隔 200 ms，令靶标检测模块向主控制器发送特定的数据包，主控制器接收到数据包后回发响应信号，循环发送 1 000 次，电脑同步接收并存储数据包和响应信号，通过对比发送数据与电脑存储数据计算通信误码率；每间隔 300 ms，拖拉机测速模块向主控制器发送特定的数据包，主控制器接收到数据包后回发响应信号，循环发送 1 000 次，电脑同步接收并存储数据包和响应信号，通过对比发送数据与电脑存储数据计算通信误码率。在测试通信可靠性时，先对各模块进行单独测试，查看误码率，再同时对各模块进行测试与查看误码率。由于 200 与 300 的最小公倍数为 600，即每间隔 600 ms，靶标检测模块与测速模块将有 1 次几乎同时发送数据的情况出现，因此特别检查每间隔 600 ms 的误码率。主控制器与电磁阀控制模块的通信与响应测试在电磁阀控制模块部分单独讲述。

经测试，主控制器与超声波测距对靶模块、测速模块之间的通信误码率为 0，并且主控制器接收到数据包后能做出正确响应，正确响应率为 100%，主控制器能与靶标检测模块和拖拉机测速模块之间进行可靠通信。

2.2 靶标检测模块

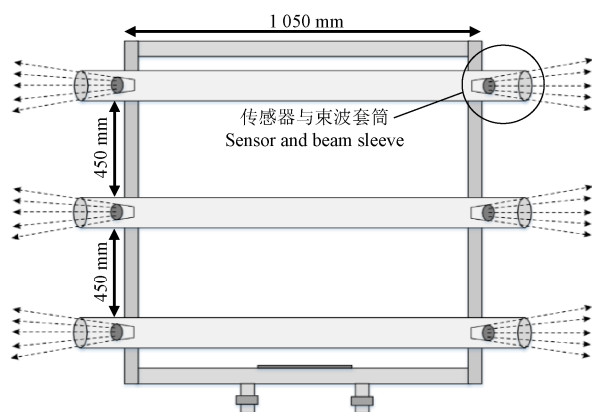
在拖拉机左右两侧各安装 3 个 TCF40-16TR1 超声波测距传感器，其中心频率为 40 kHz，波束角为 60°。在垂直方向上将超声波传感器按照上、中、下顺序进行安装，分别探测各高度处在水平方向上是否存在靶标。

当超声波测距传感器与靶标果树的水平距离发生变化时，若探测距离增大，则探测范围也会增大，这将导致拖拉机向行驶提前对非靶标物体错误触发喷雾或者错误触发不同冠层高度下的喷头喷雾，造成农药浪费。故本文将超声波传感器放在套筒内，传感器探头与套筒外沿距离 20 mm，以削弱超声波传感器在波束中轴线以外方向上的超声波能量，达到增强传感器方向性的目的。超声波传感器固定架置于拖拉机最前方，与喷雾架之间的水平距离为 4.1 m，各超声波测距传感器的安装如图 4a 所示。

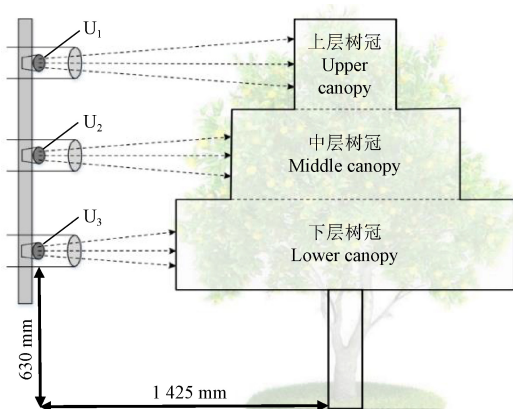
在同一个果园中，果树品种、生长环境及树龄、高基本一致。选取 3 棵树高约为 1.6 m，树冠直径约为 1.4 m 的橘树，将树冠均匀分为上、中、下 3 层，超声波传感器固定架上的上层、中层、下层分别与树冠的上层、中层、下层一一对应，如图 4b 所示。当果树树冠高度变化时，手动调整定位架上传感器与束波套筒的高度，使各超声波传感器与树冠各层对应，并通过调节手柄与滑轮组上下调节喷雾臂实现对靶喷雾。

在自动对靶装置中，靶标识别间距直接影响装置对靶标的正确识别，因此对该对靶喷雾装置的靶标识别间

距进行测试, 靶标识别间距包括静态靶标识别间距和动态靶标识别间距。



a. 超声波测距传感器安装示意图
a. Installation diagram of ultrasonic ranging sensor



b. 靶标分层识别示意图
b. Schematic diagram of target hierarchical recognition

注: U_1 为右上层超声波测距传感器, U_2 为右中层超声波测距传感器, U_3 为右下层超声波测距传感器。

Note: U_1 is upper right ultrasonic ranging sensor, U_2 is right middle layer ultrasonic ranging sensor, U_3 is lower right ultrasonic ranging sensor.

图4 靶标检测单元示意图

Fig.4 Schematic diagram of target detection unit

静态靶标识别间距测量试验以右中层超声波测距传感器为代表, 在室外水泥平地上进行。在 2 块尺寸为 400 mm×600 mm 的 KT 板上粘贴橘树枝叶用于模拟 2 棵靶标果树, 将其固定在支架上, KT 板中心位置距离地面 1.2 m, 中心位置与超声波测距传感器中轴线对齐。拖拉机静止, 超声波测距传感器中心线垂直于靶标所在平面, 传感器仰角为 0°。试验时, 设传感器与靶标水平距离在 0~2.5 m 范围内每间隔 0.5 m 设置一个测点。测试时, 先将左侧靶标从左端缓慢向超声波测距传感器中轴线靠近, 当在电脑中初次观察到有效测距数据时, 则判断为探测到靶标, 记录靶标位置为 D1 点, 再将右侧靶标按同样方式从右端缓慢向超声波测距传感器中轴线移动, 记录探测到靶标的 D2 点, D1 与 D2 的间距即为超声波测距传感器的静态靶标识别间距, 试验重复 3 次, 以 3 次测试的平均值作为最终测试结果。

测试结果如表 1 所示。超声波传感器静态靶标识别间距随探测距离增加呈先增大后减小的趋势, 是由于波束远距离传播后波束能量减少而引起。静态靶标识别间

距的最小值 105 mm 出现在距靶标最近距离 0.5 m 处, 最大值 270 mm 出现在距靶标 2.0 m 处。

表 1 静态靶标识别间距测试结果
Table 1 Test results of static target spacing

探测距离 Detection range/m	左侧识别距离 Left discernible distance/mm	右侧识别距离 Right discernible distance/mm	识别间距 Discernible spacing/mm
0.5	63	42	105
1.0	103	53	156
1.5	143	76	219
2.0	170	100	270
2.5	106	83	189

探测范围小于 3 000 mm, 超声波对靶装置的数据处理周期小于 50 ms。根据技术文档, 电磁阀励磁时间为 50 ms, 为了给电磁阀足够的励磁时间, 设其励磁时间为 80 ms。在试验样机上, 超声波传感器与喷雾臂之间距离为 4.1 m。在探测到靶标后, 可以对电磁阀的响应时间、各装置的数据处理时间进行足够的时间补偿, 且超声波靶标检测模块与电磁阀控制模块工作时相互独立, 故取二者中工作周期较长的作为动态靶标识别间距的最大识别周期, 即 80 ms。则拖拉机在 1 m/s 行驶速度下, 喷雾装置理论识别间距为 80 mm。装置的理论动态靶标识别间距为理论值 80 mm 与静态靶标识别间距之和, 结合表 1 可知, 拖拉机在 1 m/s 行驶速度下, 对应的理论动态靶标识别间距如表 2 所示。

表 2 行驶速度为 1 m·s⁻¹ 时的理论动态靶标识别间距
Table 2 Theoretical dynamic target discernible spacing at the driving speed of 1 m·s⁻¹

探测距离 Detection range/m	理论动态靶标间距 Theoretical dynamic target discernible spacing/mm
0.5	185
1.0	236
1.5	299
2.0	350
2.5	269

实际果园中树冠之间的间隙一般大于 1 000 mm, 由表 2 可知, 拖拉机行驶速度为 1 m/s 时, 超声波靶标检测模块的理论动态靶标识别间距最大值为 350 mm, 远小于 1 000 mm。预试验中, 橘树株距 4.0 m、树冠直径 1.4 m, 树冠之间的间隙为 1 200 mm, 远大于 350 mm, 故该对靶喷雾装置可在果园中进行自动对靶喷雾试验。

2.3 拖拉机在线测速模块

为研究对靶喷雾装置喷雾效率与拖拉机行驶速度之间的关系, 设计拖拉机在线测速模块以实现拖拉机行驶速度的实时测量。当超声波传感器靶标识别状态发生变化时, 开始计算拖拉机行进路程, 当拖拉机的行进距离等于超声波传感器与喷雾臂之间的距离时, 主控制器控制电磁阀打开, 控制喷头开启, 进行对靶喷雾。

测速模块包括 CHE18-15N11-H710 霍尔传感器、ATmega16 处理器、ZigBee 无线通信模块以及钕铁硼磁铁 (又称永磁王)。拖拉机轮毂直径为 590 mm, 周长约为 1 854 mm, 轮辋较平整部分宽度为 20 mm, 为增强磁场,

选用长宽高为 20 mm×15 mm×5 mm 的钕铁硼磁铁，为提高测试精度，在轮辋每隔 15 mm 处安装一块磁铁，共安装 61 块磁铁，磁铁安装实物图如图 5a 所示。由于霍尔传感器对磁铁 N 极更为敏感，故将磁铁 N 极朝向霍尔传感器探头，霍尔传感器具体安装位置如图 5b 所示。

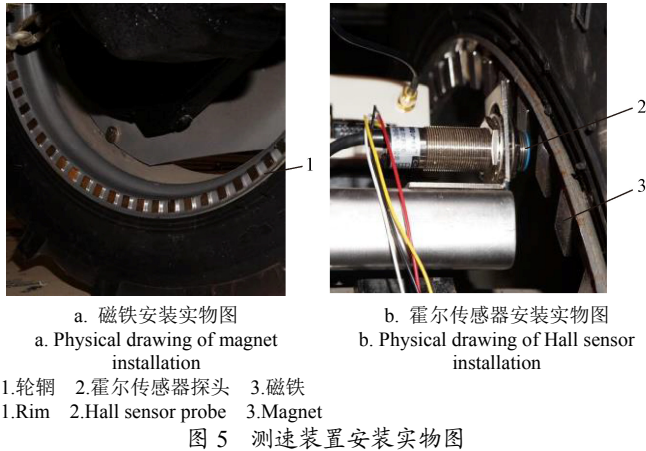


Fig.5 Physical drawing of speed measuring device installation

霍尔传感器探头固定于离磁铁 N 极表面 5~10 mm 的位置上，利用霍尔传感器检测拖拉机轮辋磁性强弱变化而输出脉冲信号，再根据单位时间内的脉冲数计算拖拉机实时行驶速度。由于拖拉机在地面较为平整的果树行间行驶，且不需要深耕作业，滑转率不超过 0.1^[32]，可忽略不计。

速度计算公式为

$$v = \frac{nlf}{p} \quad (1)$$

式中 v 为拖拉机实时行驶速度，m/s； n 为实时脉冲数； l 为轮胎转一圈的行驶距离，cm； f 为数据扫描频率，Hz； p 为车轮转一圈对应的脉冲数。

为测试该测速装置的测速准确率，在试验果园进行拖拉机测速试验。每次试验用秒表测量拖拉机行驶 30 m 所用时间，计算出平均速度作为速度真值 v_r ，最后将实时测量速度 v_l 与该速度真值进行比较。为验证测速模块低速行驶时的测速准确性，分别在 0.5、1.0、1.5 和 2.0 m/s 共 4 个行驶速度下进行测速试验，每个行驶速度进行 3 次试验，再分别对 4 个行驶速度的试验结果取平均值，最后根据式 (2) 计算拖拉机测速准确率。

$$\text{测速准确率} = \left(1 - \frac{|v_r - v_l|}{v_r} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中 v_r 为速度真值，m/s； v_l 为速度测量值，m/s。

经分析，在上述速度范围内，在线测速装置的测速准确率在 98% 以上，满足悬挂式柔性对靶喷雾装置的测速精度与稳定性要求。

2.4 电磁阀控制模块

本设计中，电磁阀控制有手动模式和自动模式，电磁阀直接与喷头连接，能否可靠控制电磁阀开关，是影响对靶喷雾稳定性的关键。对靶喷雾装置正常工作时管道压差大于 0.3 MPa，考虑到开关频率较高，工作时间

较短，选用直动式电磁阀。电磁阀内部介质流通孔的等价直径为通径，通径越大，流通能力就越大。对吊挂喷杆上的单喷头体使用通径为 6.36 mm 的电磁阀，倒 Y 型喷头支架的 4 个喷头由一个通径为 12.72 mm 的电磁阀单独控制，电磁阀选用金通 V2A102-03 和 PU225-04A，功率分别为 13 和 23 W，采用 DC-24V 高能锂电池供电。处理器与无线通信模块的电源电压为 3.3 V，采用金升阳 DC-DC 模块将 DC-24V 转成 5 V，再由 AMS31117-3.3 降压稳压得到 3.3 V。

电磁阀控制模块共安装 14 个电磁阀，其中倒 Y 型喷头支架处 4 个喷头开关的电磁阀功率为 23 W，所需工作电流约为 1 A，根据场效应管 (MOS 管) 开关速度快、驱动电流大等优点，选用 N 沟道增强型 MOS 管 IRF540N 作为开关元件。

为测试电磁阀控制模块能否准确响应，将拖拉机启动并固定在试验果园中，用 KT 板遮挡超声波传感器，观察电磁阀能否正确控制喷头进行喷雾，判断电磁阀是否准确响应，每层测试 5 次，共测试 30 次。经测试，所有电磁阀均能准确响应，响应时间约为 50~70 ms。试验中，主控制器、靶标检测装置、电磁阀控制装置等响应时间共约为 132.5 ms，当靶标检测模块最初探测到靶标存在时，主控制器根据拖拉机实时行驶速度及超声波传感器与喷雾臂之间的距离，计算出拖拉机待行走时间，减去总响应时间 132.5 ms，得到电磁阀待启动时间。

3 对靶喷雾试验

3.1 试验仪器与设备

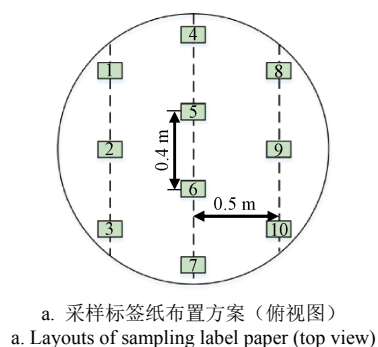
试验仪器包括标智 BENETECH GM8902 数字风速仪 (分辨率为 0.01 m/s，用于测量周围环境风速)；60 mm×40 mm 雾滴采样标签纸，面积与一般橘叶面积相当；美国双杰集团有限公司的电子天平秤 (用于称量染色剂，精度为 0.01 g)；红利来 TCS-500 电子台秤 (用于称量染色溶液，分辨率为 0.01 kg)；根据《JB/T 9782—2014》选用诱惑红染色剂配置染色溶液^[33]，诱惑红染色剂产自上海染料研究所有限公司；数码显微镜 (放大倍率为 1~300，影像解析度为 1 600×1 200)；镀锌管架 (用于观测靶标间隙处的雾滴附着情况)；为便于试验布置，达到喷雾装置水平喷雾臂长度要求，采用仿真橘树 L、仿真橘树 R、真实橘树 T，其中 2 棵仿真橘树均产自广州市庆缘景观园林设计有限公司，3 棵橘树树高均为 1.6 m，树冠直径均为 1.4 m；设计一种定位卡纸，定位卡纸上有 3 个 1 cm×1 cm 的正方形方格，查定时将卡纸覆盖在标签纸上方，观察方格中的雾滴，进而计算每平方厘米上的平均雾滴数。

3.2 试验方案

为验证悬挂式柔性对靶喷雾装置作业性能，对喷雾装置进行喷雾试验，研究不同拖拉机行驶速度与喷雾压力下的药液附着情况。考虑到研制的喷雾装置各个部件能承受的的压力范围，设定了进行试验时喷雾压力范围为 0~0.8 MPa，根据所选喷头，采用低量自动对靶喷雾方式，最终设定工作压力为 0.4、0.5 和 0.6 MPa 三个水平，对应

流量范围为 0.68~0.83 L/min。结合低量自动对靶喷雾方式,设计行驶速度为 0.5、1.0 和 1.5 m/s 三个水平,各因素进行全因子试验。

依据标准《JB/T 9782—2014》,根据树冠冠幅大小按比例在每棵橘树树冠的上、中、下层平面内均匀布置 10 个采样点,与图 4b 各层传感器高度对应,树冠上、中、下层采样平面分别距离地面 150、105 和 60 cm。将雾滴采样标签纸布置在采样点处承接药液,以树冠中层为例,雾滴采样标签纸在树冠截面上布置方案如图 6a 所示,图 6b 为橘树采样标签纸布置实物图。



a. 采样标签纸布置方案 (俯视图)
a. Layouts of sampling label paper (top view)



b. 橘树采样标签纸布置图
b. Layout of sampling label paper on orange tree

注: 1~10 为采样点。
Note: 1-10 are the sampling points.

图 6 采样标签纸分布图
Fig.6 Distribution diagram of sampling label paper

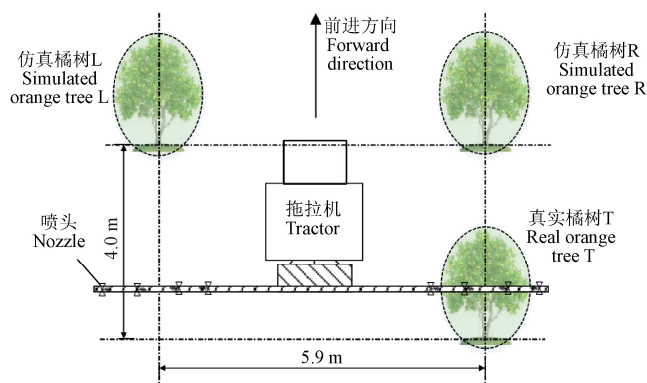
由于雾滴采样标签纸正反面均能承接雾滴,选择其中一面左上角进行标记,在每个植株上、中、下层各设 10 个采样点并标记编号。

3.3 对靶喷雾药液附着率试验

试验开始前,使用电子天平(精度为 0.01 g)称取 20.00 g 诱惑红染色剂,再使用电子台秤(精度为 0.01 kg)称取 100.00 kg 清水,将染色剂倒入清水中,配置成 1:5 000 的诱惑红染色液。

试验以仿真橘树 L、仿真橘树 R、真实橘树 T 为对象,橘树的分布情况如图 7a 所示,现场试验如图 7b 所示。将镀锌管架并排放置于靶标间隙处;使用长尾夹将采样标签纸固定在橘树指定位置;根据试验因素与水平,将拖拉机油门固定在某一位置,经多次调试使速度稳定在设置水平;调节压力使当前拖拉机喷雾压力达到设置水平;使用风速仪测量周围环境风速,待室外风速小于 0.2 m/s 时,拖拉机开始行进喷雾。拖拉机行进过程中,对靶喷雾装置在超声波测距检测靶标的同时检测拖拉机的行驶

速度,再向电磁阀驱动电路发送命令,控制喷头的开启与关闭,进行对靶喷雾。当拖拉机完全驶过所有橘树且对靶喷雾自动停止后,试验结束。



a. 橘树分布示意图
a. Schematic diagram of orange tree distribution



b. 试验现场
b. Testing field
1.喷雾软管 2.喷头 3.吊挂喷杆 4.电磁阀 5.双十字万向节 6.升降导轨 7.升降架 8.一级展臂 9.二级展臂 10.倒 Y 型喷头支架
1. Spray hose 2. Nozzle 3. Hanging spray bar 4. Solenoid valve 5. Double cross universal joints 6. Lifting guide rail 7. Lifting frame 8. Primary boom 9. Secondary boom 10. Inverted Y-type nozzle bracket

图 7 对靶喷雾试验

Fig.7 Targeted spray test

4 试验结果与分析

试验结束后,待采样标签纸风干,收集采样标签纸,查定时将定位卡纸置于标签纸上使二者重合,用数码显微镜对定位卡纸上 3 个方格中的雾滴进行放大并统计雾滴数,计算每平方厘米上的平均雾滴数,得到药液附着密度。

根据《JB/T 9782—2014》,将查定后的雾滴采样标签纸进行分级:无效 0 级(无药液附着)、有效 1 级(药液附着面积为观察面积的 $>0\sim 1/4$)、有效 2 级(药液附着面积为观察面积的 $>1/4\sim 1/2$)、有效 3 级(药液附着面积为观察面积的 $>1/2\sim 3/4$)、有效 4 级(药液附着面积为观察面积的 $3/4$ 以上),分级完成后,根据式(3)计算叶面与叶背的药液附着率。

$$\text{药液附着率} = \frac{N_1 \times 1 + N_2 \times 2 + N_3 \times 3 + N_4 \times 4}{N \times 4} \times 100\%$$

(3)

式中 N_1 为有效 1 级叶片数; N_2 为有效 2 级叶片数; N_3 为有效 3 级叶片数; N_4 为有效 4 级叶片数; N 为观察叶片总数。

试验结果如表 3 所示。试验结果统计发现拖拉机行驶速度为 1.5 m/s 时,不同压力下药液附着情况普遍较差,

只有树冠上层叶面的药液附着率超过 50%，且试验中喷雾飘移现象严重，因此该速度下不宜进行对靶喷雾作业。

此外，在进行田间喷雾试验时，在地面镀锌管架上观察了药液附着情况，发现药液附着面积为观察面积的 1/4 以下，根据《JB/T 9782—2014》，将其视为无效喷雾。

由表 3 可知，拖拉机行驶速度为 0.5 m/s 时，喷雾压力 0.4、0.5 和 0.6 MPa 对应的平均药液附着率分别为 84.7%、91.7%、88.9%，药液附着率较高且接近，即该试验速度下喷雾压力对药液附着率无较大影响，故建议在 0.5 m/s 的速度下行驶时，应当选择较低喷雾压力进行喷雾，以减少药液损失；速度为 1.0 m/s 时，喷雾压力 0.4、0.5 和 0.6 MPa 对应的平均药液附着率分别为 64.2%、70.3%、75.8%，均低于 0.5 m/s 的平均药液附着率，喷雾压力对药液附着率影响较大，喷雾压力越大，药液附着

率越高，故建议在 1.0 m/s 的速度下，应当使用较高喷雾压力提高药液附着率；在 0.5 与 1.0 m/s 的行驶速度下，叶背的平均药液附着率大部分低于 30%，远低于叶面的药液附着率，其根本原因是该悬挂式柔性对靶喷雾非风送式对靶喷雾，大部分药液经喷雾架喷施后在重力作用下沉降在叶片表面，只有小部分药液在环境风力等作用下附着在叶背；药液附着率在树冠上、中、下层呈递减规律，且在拖拉机较高速行驶时，药液附着率递减规律尤为明显，原因在于除喷雾架上的吊挂喷杆对水平方向的树冠各层进行喷施以外，树冠上层与倒 Y 型喷头支架之间距离较近且无遮挡，故树冠上层喷雾效果最好，而树冠中、下层在垂直方向上受到不同程度遮挡，喷雾效果受到不同程度影响，此外，拖拉机行驶速度越大，喷雾飘移情况越严重，药液附着率递减规律越明显。

表 3 不同行驶速度与喷雾压力下的药液附着率
Table 3 Droplet adhesion rate under different driving speed and spray pressure

速度 Speed/(m·s ⁻¹)	位置 Position	喷雾压力 Spray pressure/MPa	上层树冠 Upper canopy			中层树冠 Middle canopy			下层树冠 Lower canopy			平均值 Average/%
			L	R	T	L	R	T	L	R	T	
0.5	叶面	0.4	95.0	92.5	87.5	90.0	87.5	80.0	77.5	85.0	67.5	84.7
		0.5	95.0	100.0	90.0	90.0	100.0	90.0	90.0	100.0	70.0	91.7
		0.6	97.5	100.0	95.0	85.0	90.0	87.5	87.5	82.5	75.0	88.9
	叶背	0.4	35.0	37.5	27.5	35.0	40.0	42.5	10.0	12.5	25.0	29.4
		0.5	32.5	32.5	55.0	32.5	37.5	55.0	22.5	27.5	45.0	37.8
		0.6	40.0	37.5	50.0	30.0	27.5	52.5	17.5	22.5	27.5	33.9
1.0	叶面	0.4	82.5	85.0	80.0	60.0	65.0	60.0	47.5	40.0	57.5	64.2
		0.5	85.0	80.0	82.5	72.5	67.5	75.0	57.5	60.0	52.5	70.3
		0.6	87.5	87.5	90.0	80.0	70.0	82.5	67.5	57.5	60.0	75.8
	叶背	0.4	22.5	25.0	32.5	17.5	15.0	30.0	17.5	17.5	27.5	22.8
		0.5	27.5	27.5	32.5	22.5	25.0	32.5	20.0	17.5	30.0	26.1
		0.6	35.0	32.5	37.5	25.0	27.5	25.0	30.0	20.0	22.5	28.3

5 结 论

本文设计了悬挂式柔性对靶喷雾装置通过不同喷雾作业参数下的药液附着率试验，得出以下主要结论：

1) 在拖拉机行驶速度为 0.5 m/s 时，喷雾压力 0.4、0.5 和 0.6 MPa 对应的平均药液附着率分别为 84.7%、91.7%、88.9%，药液附着率较高且接近，建议选择较低喷雾压力，减少药液流失；行驶速度为 1.0 m/s 时，喷雾压力 0.4、0.5 和 0.6 MPa 对应的平均药液附着率分别为 64.2%、70.3%、75.8%，喷雾压力对药液附着率影响较大，建议选择较高喷雾压力，提高药液附着率。

2) 拖拉机行驶速度为 1.5 m/s 时，药液附着情况较差，喷雾飘移现象较为严重，故该对靶喷雾装置不适宜在此行驶速度下进行对靶喷雾试验，今后如需在此行驶速度下进行试验，可结合风送式对靶喷雾技术来实现。

3) 药液附着率在树冠上、中、下层呈递减规律，随着拖拉机速度增大，递减规律越明显。

4) 喷雾试验表明，在 0.5 与 1.0 m/s 的行驶速度下，叶背的平均药液附着率大部分低于 30%，远低于叶面的药液附着率，故该装置暂不适用于对叶背药液附着率要求高的果树进行喷雾。

该果园柔性对靶喷雾装置能同时对 2 行果树进行对靶喷雾，田间药液附着率试验中所测得的结果符合实际果树对喷雾有效性的需求。与现有大部分对靶喷雾装置的喷雾机构相比，所设计的柔性喷雾机构可在树冠遮挡门型喷雾架前进时，吊挂喷杆被动式柔性通过果树冠层，降低了对果树的损害；树冠分层靶标识别装置采用无线通信方式传输靶标识别信息，减少了拖拉机上的复杂布线，提高了通信可靠性。

当果园中种植的果树生长情况较一致时，在喷雾作业前应调整好喷雾臂高度及定位架上各放置传感器的束波套筒之间的垂直距离；对于果树生长情况差异较大的果园，可适当改变超声波测距传感器与束波套筒边沿的距离，或是考虑增加传感器数量，进一步调整探测范围。

[参 考 文 献]

[1] 乔金亮. 农业部：2020 年果园面积要稳定在 2 亿亩[R]. 农村经济与科技：农业产业化，2016：11-16.

[2] 何雄奎. 植保精准施药技术装备[J]. 农业工程技术，2017，37(30)：22-26.

He Xiongkui. Precision spraying equipment for plant protection[J]. Agricultural Engineering Technology, 2017,

- 37(30): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郑永军, 陈炳太, 吕昊墩, 等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 110-124.
Zheng Yongjun, Chen Bingtai, Lyu Haotun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 110-124. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邓敏, 邢子辉, 李卫, 等. 我国施药技术和施药机械的现状 & 问题[J]. 农机化研究, 2014, 36(5): 235-238.
Deng Min, Xing Zihui, Li Wei, et al. Actuality and problems of pesticide machinery and its application techniques in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(5): 235-238. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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, 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 with English abstract)
- [6] 刘金龙. 对靶喷雾红外探测系统的设计与试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
Liu Jinlong. The Design and Experiment of Infrared Detection System in Target Spray[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵映, 肖宏儒, 梅松, 等. 我国果园机械化生产现状与发展策略[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(6): 116-127.
Zhao Ying, Xiao Hongru, Mei Song, et al. Current status and development strategies of orchard mechanization production in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(6): 116-127. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张海锋, 许林云. 果园喷雾机发展现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(3): 112-118.
Zhang Haifeng, Xu Linyun. Summary of research status on orchard sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(3): 112-118. (in Chinese with English abstract)
- [9] 常有宏, 吕晓兰, 蔺经, 等. 我国果园机械化现状与发展思路[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 21-26.
Chang Youhong, Lyu Xiaolan, Lin Jing, et al. Present state and thinking about development of orchard mechanization in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张富贵, 洪添胜, 王锦坚, 等. 现代农药喷施技术士及装备研究进展[J]. 农机化研究, 2011, 33(2): 209-213.
Zhang Fugui, Hong Tiansheng, Wang Jinjian, et al. Development of modern pesticide spry technique and equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(2): 209-213. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王万章, 洪添胜, 李捷, 等. 果树农药精确喷雾技术[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 98-101.
Wang Wanzhang, Hong Tiansheng, Li Jie, et al. Review of the pesticide precision orchard spraying technolotgies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(6): 98-101. (in Chinese with English abstract)
- [12] Nan Y, Zhang H, Zheng J, et al. Research on profiling tracking control optimization of orchard sprayer based on the phenotypic characteristics of tree crown[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106455.
- [13] 南玉龙, 张慧春, 徐幼林, 等. 农林仿形对靶喷雾及其控制技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4): 54-58.
Nan Yulong, Zhang Huichun, Xu Youlin, et al. Research progress on profiling target spray and its control technology in agriculture and forestry[J]. World Forestry Research, 2018, 31(4): 54-58. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 56-63.
Li Longlong, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(16): 56-63. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70-76.
Li Longlong, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(1): 70-76. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李井祝, 朱凤武. 基于 PLC 自动对靶喷雾控制系统的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(8): 55-58.
Li Jingzhu, Zhu Fengwu. Design and experiment of automatic targeting spraying control system based on PLC[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8): 55-58. (in Chinese with English abstract)

- [17] 刘金龙, 丁为民, 邓巍. 果园对靶喷雾红外探测系统的设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 370-372.
Liu Jinlong, Ding Weimin, Deng Wei, et al. Design and experiment of infrared detection system for target spray in orchard[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 370-372. (in Chinese with English abstract)
- [18] 邹建军, 曾爱军, 何雄奎, 等. 果园自动对靶喷雾机红外探测控制系统的研制[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 129-132.
Zou Jianjun, Zeng Aijun, He Xiongkui, et al. Research and development of infrared detection system for automatic target sprayer used in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(1): 129-132. (in Chinese with English abstract)
- [19] 肖健. 果树对靶喷雾系统中图像识别技术[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Xiao Jian. Image Recognition Used in Crown Detection for Orchard Spraying System[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [20] 赵茂程, 郑加强, 凌小静. 一种基于小波变换的图像过渡区提取及分割方法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 103-107.
Zhao Maocheng, Zheng Jiaqiang, Ling Xiaojing. Image transition region extraction and segmentation method based on wavelet transform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(11): 103-107. (in Chinese with English abstract)
- [21] Ozluoyun, Omer Baris, Ali Bolat, et al. Design, development, and evaluation of a target oriented weed control system using machine vision[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2019, 43(2): 164-173.
- [22] Tellaeche A, Burgosartizzu X P, Pajares G, et al. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60: 144-155.
- [23] Xu Y, Gao Z, Khot L, et al. A real-time weed mapping and precision herbicide spraying system for row crops[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4245.
- [24] Asaei H, Jafari A, Loghavi M. Site-specific orchard sprayer equipped with machine vision for chemical usage management[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 431-439.
- [25] 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 Real-time Control System for Target Spraying Based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 273-280. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 spray control system used in 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)
- [27] Tavares R M, João P A R Cunha, Alves T C, et al. Electrostatic spraying in the chemical control of *Triozoida limbata* (Enderlein) (Hemiptera: Triozidae) inguava trees (*Psidium guajava* L.)[J]. Pest Management Science, 2017, 73(6): 1148-1153.
- [28] 薛杨春. 果园静电喷雾机的设计与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Xue Yangchun. Design and Test of Orchard Electrostatic Sprayer[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forest Science and Technology University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [29] Cerqueira D T R D, Raetano C G, Pogetto M H F A D, et al. Optimization of spray deposition and *Tetranychus urticae* control with air assisted and electrostatic sprayer[J]. Scientia Agricola, 2017, 74(1): 32-40.
- [30] Zhang W, Hou Y, Liu X, et al. Wind tunnel experimental study on droplet drift reduction by a conical electrostatic nozzle for pesticide spraying[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 87-94.
- [31] 宋淑然, 郑君彬, 洪添胜, 等. 果树对靶喷雾机柔性喷臂控制设计及试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 106-112.
Song Shuran, Zheng Junbin, Hong Tiansheng, et al. Design and experiment of the control of flexible spray arm on orchard targeted spray device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 106-112. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周慧, 鲁植雄, 白学峰, 等. 四轮驱动拖拉机滑转率的测量与特性分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 201, 44(3): 423-427.
Zhou Hui, Lu Zhixiong, Bai Xuefeng, et al. Wheel slip measurement in 4wd tractor based on Labview[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2013, 44(3): 423-427. (in Chinese with English abstract)
- [33] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 9782-2014 植物保护机械-通用试验方法[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.

Development and experiments of the hanging flexible targeted spray device for orchards

Chen Zehong¹, Chen Jianze², Song Shuran^{1,3,4*}, Sun Daozong^{1,3,4}

(1. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Lyric Robot Automation Co., Ltd., Huizhou 516000, China; 3. Guangdong Provincial Agricultural Information Monitoring Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510642, China; 4. Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Spray drift has been one of the major diffuse pollution sources for fertilizers and pesticides in intensive agriculture. Non-target drift loss of pesticides has posed a great risk to the ecological environment in recent years. It is a high demand to improve the utilization rate of pesticides for the reduction of spray drift in an orchard. In this study, a hanging-type, flexible, and targeted spray device was developed to promote the efficiency of spraying with less mechanical damage to the fruit branches and leaves. The spraying device included ultrasonic target detection, a main controller, speed measurement, and a solenoid valve control module. As the core of coordination, the main controller was responsible for the data transmission with the other three modules. A Dongfanhong MS-304 tractor was taken as the carrying platform, with overall dimensions (length \times width \times height) of 3.6 m \times 1.5 m \times 1.6 m. A three-point suspension mechanism was also used to carry the spray frame on the rear side of the tractor. The spray frame mainly included a load-bearing frame, a lifting guide rail, a lifting frame, a first-level spread arm, a second-level spread arm, a hanging spray rod, and an inverted Y-shaped nozzle bracket. Among them, the spray arm was folded twice, including the lifting frame, the first-level spread arm, and the second-level spread arm. A double cross universal joint was used for the flexible connection between the hanging spray boom and the spray arm, and a flexible spray hose was between the hanging spray end and the spray head for the flexible spraying. As such, the flexible and bendable spray hose was utilized to reduce the mechanical damage to the irregular branches and leaves. Different address codes were assigned in various modules, due to a large amount of data processing. The data conflicts were avoided to first match the address codes of the main controller as-received data. Three ultrasonic ranging sensors (TCF40-16TR1) were installed on the left and right sides of the tractor, particularly in the upper, middle, and lower order along the vertical direction. The horizontal distance was 4.1 m between the ultrasonic sensor holder and the spray rack, in order to detect the target at each height. In addition, a sleeve was designed to strengthen the ultrasonic energy of the sensors in the central axis of the beam, in order to reduce the detection range under the same detection distance for better directionality of the spraying. Different levels of spray nozzles were prevented to trigger the spray ahead of time, due to the driving forward of the tractor. Specifically, the Hall sensor was utilized to detect the magnetic field strength on the tractor rim for the real-time running speed of the tractor. 14 solenoid valves were selected to control the sprinklers, four of which the inverted Y-type sprinkler brackets were controlled by one solenoid valve, and each of the rest was controlled by a solenoid valve individually. A target spray test was performed on the orange trees with a planting spacing of 4.0 m, tree height of 1.6 m, and crown diameter of 1.4 m. Two factors and three levels of orthogonal experiment were designed for the test. The first factor was the travel speed with the three levels of 0.5, 1.0, and 1.5 m/s, and the second factor was the spray pressure with the three levels of 0.4, 0.5, and 0.6 MPa. A full factorial experimental design was also performed as follows. Prior to the test, 10 sampling points were evenly arranged on the upper, middle, and lower planes on the crown of each orange tree. The droplet labeling was also arranged at the sampling points to receive the medicinal solution. The allura red staining solution was then prepared. The tractor throttle was fixed, according to the factors of the spray test and the horizontal relationship. The speed of the tractor was stabilized at the speed required for the test after debugging. The pressure was also adjusted to the required. Finally, an anemometer was used to measure the wind speed of the surrounding environment. The tractor started to travel and spray when the outdoor wind speed was less than 0.2 m/s. The spraying was automatically stopped when the tractor completely passed all the orange trees. The test results show that: 1) the average droplet adhesion rates were 84.7%, 91.7%, and 88.9% at the spray pressures of 0.4, 0.5, and 0.6 MPa, respectively, when the tractor traveled at a speed of 0.5 m/s. There was no outstanding effect of spray pressure on the droplet adhesion rate at this speed. A lower spray pressure was then selected to reduce the loss of medicinal solution. 2) Once the driving speed of the tractor was 1.0 m/s, the average droplet adhesion rates of 0.4, 0.5 and 0.6 MPa were 64.2%, 70.3%, and 75.8%, respectively. The higher the spray pressure was, the higher the droplet adhesion rate was. Therefore, a higher spray pressure was selected to improve the droplet adhesion rate in this case. 3) The average droplet adhesion rate was less than 50% at the speed of 1.5 m/s, indicating the serious spray drift unsuitable for the spraying. Decreasing spraying was observed at the droplet adhesion rate in the upper, middle, and lower layers of the canopy when the spray pressure was the same. Consequently, the greater the speed of the tractor was, the more outstanding the decreasing trend was. Furthermore, the droplet adhesion rate of the leaf back was much lower than that on the leaf front, temporarily unsuitable for spraying with high requirements. It is then necessary to adjust the nozzle angle on the hanging spray bar for a higher droplet adhesion rate on the leaf back in the future.

Keywords: plant protection machinery; orchard; target spraying; flexible; ultrasonic distance measurement; droplet adhesion rate