doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.039

苹果树冠层仿形对靶施药控制系统设计与试验

谭玉磊[1,2]　张　景[2,3]　陈金成[2,3]　潘　峰[2]　纪　超[2,3]　赵　岩[1,3]

(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003;2.新疆农垦科学院机械装备研究所,石河子 832003;
3.农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832003)

摘要:针对传统果树喷雾作业药液利用率低、喷施均匀性差的问题,以新疆常规种植果园苹果树为作业对象,设计了一种苹果树冠层摇臂式仿形对靶施药控制系统。通过多路超声波传感器阵列获取苹果树冠层外形信息,采用自适应卡尔曼滤波算法减小测量误差,准确反映树冠边界信息,采用位置式 PID 闭环控制算法动态调控仿形臂精准包络果树冠层,实现了准确仿形。在新疆维吾尔自治区玛纳斯县常规种植苹果园进行了仿形臂最大定位偏差测定试验,结果表明:超声波传感器各点位距离果树冠层 0.6、0.8、1.0 m 处的仿形臂最大定位偏差分别为 32、41、48 mm,最大定位偏差率不超过 5.33%。以平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率和施药变异系数作为量化指标,进行了苹果树冠层仿形对靶施药控制系统作业效果验证试验。结果表明:仿形对靶施药平均雾滴密度为 72.4 个/cm^2,平均雾滴沉积量为 2.03 μL/cm^2,药液附着率为 49.8%,施药变异系数为 26.4%。相同作业条件下与定距对靶施药相比,仿形对靶施药的平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率分别提升 64.2%、40%、29.7%,施药变异系数下降 42.5%,提升了药液利用率与施药均匀性。

关键词:苹果树冠层;自动仿形;精准施药;自适应卡尔曼滤波算法;位置式 PID 算法

中图分类号:S224.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0482-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Apple Tree Canopy Profiling Targeted Spraying Control System

TAN Yulei[1,2]　ZHANG Jing[2,3]　CHEN Jincheng[2,3]　PAN Feng[2]　JI Chao[2,3]　ZHAO Yan[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*
2. *Mechanical Equipment Research Institute*, *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science*, *Shihezi* 832003, *China*
3. *Key Laboratory of Northwest Agriculture Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of low pesticide utilization efficiency and poor spray uniformity in traditional orchard spraying operations, a rocker-arm profiling targeted spraying control system was developed for apple tree canopies in conventional orchards in Xinjiang. The system employed multi-channel ultrasonic sensor arrays to capture canopy contour data, integrated with adaptive Kalman filtering to reduce measurement errors and map canopy boundaries accurately. A positional PID closed-loop control algorithm dynamically adjusted the profiling arm to envelop the canopy precisely. Field trials in Manas County demonstrated maximum positioning deviations of 32 mm, 41 mm, and 48 mm at distances of 0.6 m, 0.8 m, and 1.0 m from the canopy, respectively, with maximum deviation rates not exceeding 5.33%. Validation tests for the profiling targeted spraying control system on apple tree canopies were conducted by using quantitative metrics, including average droplet density, average droplet deposition volume, pesticide adhesion rate, and spraying coefficient of variation (CV). Results demonstrated that profiling targeted spraying achieved 72.4 droplets/cm^2 (average droplet density), 2.03 μL/cm^2 (deposition volume), 49.8% adhesion rate, and 26.4% CV. Compared with fixed-distance targeted spraying, profiling spraying improved droplet density by 64.2%, deposition volume by 40%, and

收稿日期:2025-02-19　修回日期:2025-04-17

基金项目:兵团科技合作计划项目(2022BC007)、兵团科技创新人才计划项目(2021CB035)、兵团英才支持计划青年项目和石河子大学国际科技合作推进计划项目(GJHZ202404)

作者简介:谭玉磊(1999—),男,硕士生,主要从事智能农业装备研究,E-mail:tanyulei@stu.shzu.edu.cn

通信作者:赵岩(1983—),男,教授,主要从事农业机械化工程研究,E-mail:zhaoyan@shzu.edu.cn

adhesion rate by 29.7%, while reducing CV by 42.5%, enhancing pesticide utilization efficiency and spraying uniformity.

Key words: canopy layer of apple trees; automatic profiling; precision application of pesticides; adaptive Kalman filtering algorithm; positional PID control algorithm

0　引言

新疆是我国重要的林果生产基地，苹果品质特色鲜明，但果园标准化、机械化水平亟待提升。药物喷施作业是林果业病虫害防治中的重要环节，占田间生产作业总劳动量的 25%[1]。以人工施药为主的传统施药方式农药利用率仅有 20% ~30%，存在农药过量施用和药液飘移的问题，不仅对果园周边的土壤、水源、空气造成污染，还对劳动者健康和生态系统造成破坏[2-4]。提升果树冠层施药过程中药液利用率与施药均匀性对农业绿色生产具有重要意义。仿形喷雾技术是提升药液利用率的主要手段之一，药液喷施装置的喷雾距离是影响喷雾效果的重要技术参数，测定果树冠层结构，并实现喷雾距离自动调节，将有效提升药液利用率与施药均匀性[5]。

根据传感器探测靶标信息，控制执行装置运动，从而对果树冠层进行精准仿形，是实现仿形对靶施药的关键核心技术[6]。目前针对果树冠层轮廓的测定方法较多[7]，主要有红外测量[8]、超声波测量[9]、视觉探测[10]与激光测量[11-13]等单一测量与组合测量技术。肖珂等[14]通过对果树树冠形状进行探测实现自动变距精准施药，药液附着率相比于定距施药提升了 18.66%，药液节约 30.25%。文献[15]设计了一种果园机器人主动视觉探测系统，通过激光雷达获取果树三维点云，控制器计算最佳位姿，控制直线电机与圆弧电机的运转调整视觉相机的空间位置与角度，准确获取果树冠层外形信息。OSTERMAN 等[16]采用激光传感器扫描冠层特性，通过定位算法计算喷头最佳位置，调控液压执行装置运动，实现精准目标喷雾，减少农药飘移。综上，对果树冠层外形轮廓的准确测定是喷施装置实现精准对靶仿形的前提条件，果园喷雾机械与探测传感器相结合是实现自动仿形喷雾的技术主线[17]，由于作业环境和作业对象不同，采用的技术路径和仿形方式存在区别。

由于目前果园喷雾以风送式喷雾机为主，较低的作业精度造成了药液利用率低、施药均匀性差的问题。本文以新疆常规种植苹果园果树冠层为作业对象，通过多路超声波传感器阵列获取果树冠层外形信息，采用自适应卡尔曼滤波算法[18]对超声波输入信号进行处理，基于位置式 PID[19]闭环控制算法调节电动推杆的运动，实现对仿形臂关节的实时调节；最后根据相关行业标准进行仿形对靶施药与定距对靶施药的对比试验。通过提高果树冠层外形喷雾作业精度以提升药液利用率、改善施药均匀性。

1　整机结构与工作原理

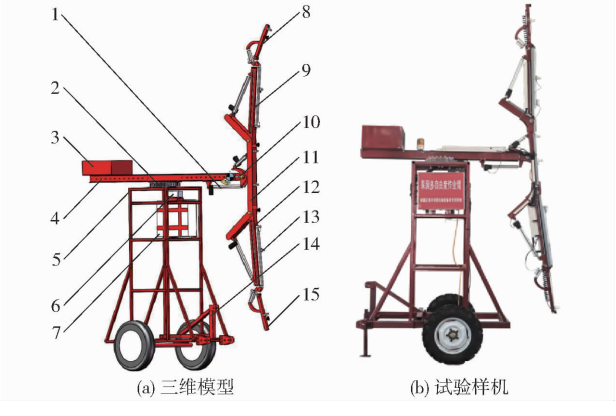
根据文献[20-21]和实地调研，新疆果园苹果树高度大多分布在 3.00 ~4.80 m，冠层高度最大范围为 0.30 ~4.80 m，果树树冠下方第一活枝距离地面高度 0.35 ~0.60 m。针对新疆常规种植果园种植环境，搭建了摇臂式果园仿形喷雾机具，机具关键参数如表 1 所示。

表 1　仿形喷雾机关键参数

Tab.1　Key parameters for canopy-profiling spraying device

参数	数值	参数	数值
总质量/kg	650	作业高度/m	0.3 ~5.4
机具最大倾斜角/(°)	12	作业幅宽/m	2.6 ~3.4
超声波传感器数量/个	6	旋转角/(°)	-95 ~95

如图 1 所示，该喷雾机由仿形作业臂、仿形控制系统、牵引机构、冠层探测系统等组成，具有环境感知、对靶仿形、姿态检测、人机交互等功能。机架通过三点悬挂式牵引机构与拖拉机进行连接，水箱放置于机架底部，以降低机具重心，通过上述措施保证机具作业时结构稳定性。



(a) 三维模型　　(b) 试验样机

图 1　果园仿形喷雾机

Fig.1　Orchard canopy-profiling spraying device

1. 电动推杆　2. 旋转机构　3. 配重箱　4. 工字钢　5. 机架　6. 旋转驱动电机　7. 控制箱　8. 上小臂　9. 上侧臂　10. 水平伸缩臂　11. 主臂　12. 下侧臂　13. 超声波冠层探测系统　14. 三点悬挂式牵引机构　15. 下小臂

仿形作业臂前端安装超声波传感器，用于获取

机具与果树冠层的相对位置信息，由于仿形臂具有一定的伸缩余量，考虑到传感器分布均匀性，分别安装在距地面 4.60、3.84、3.10、2.80、1.46、0.61 m 处，从而完成对果树冠层顶部、上部、中部、下部与底部的检测，如图 2 所示。

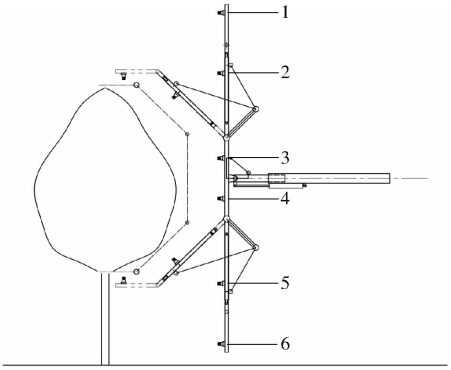


图 2 超声波传感器安装位置示意图

Fig. 2 Illustration of ultrasonic sensor installation position

1. 超声波测量点位 1 2. 超声波测量点位 2 3. 超声波测量点位 3 4. 超声波测量点位 4 5. 超声波测量点位 5 6. 超声波测量点位 6

单片机根据 6 路超声波传感器阵列测量的与果树冠层的距离数据，调节电动推杆伸缩以改变仿形臂空间姿态，从而实现针对苹果树冠层的精确仿形包络。仿形臂未进行作业时为收缩状态，如图 3a 所示；作业时首先调节水平伸缩臂运动到达目标位置；其次调节机具主臂与上下侧臂角度完成对冠层的初步仿形；最后驱动上下小臂完成对冠层外形整体包络，如图 3b 所示。



图 3 仿形作业臂运动示意图

Fig. 3 Schematics of motion of conformal operation arm

2 控制系统设计

2.1 控制系统总体设计

苹果树冠层仿形对靶施药控制系统总体方案如图 4 所示。图中 B_i 为姿态检测模块机具倾角信息输入，C_i 为定位模块机具坐标信息输入，D_i 为每个超声波传感器测量的空间距离，n 为仿形臂与果树外形的相对位置，X_i 为每个检测点位到果树外形的距离预设值，n_{target} 为推杆的目标长度，$e(t)$ 为实际距离与理论距离的偏差，$e_c(t)$ 为偏差值变化率，$u(t)$ 为直流电机 PWM 控制信号脉冲，N_i 为超声波传感器在 T_i 周期内的脉冲个数，M_i 为超声波分辨率，Y_i 为超声波反馈信号，控制系统主要由单片机模块、有刷直流电动推杆、电机驱动模块、超声波测距模块、人机交互模块、定位模块、姿态检测模块组成，系统启动后，设置各个超声波传感器的作业停止点，仿形臂进入作业状态后，单片机不断地将每一路超声波传感器返回值进行滤波处理并与预设值进行比较，计算距离偏差后输入位置式 PID 控制器，控制器根据不同超声波传感器测量偏差 e，按照比例增益 K_p、积分增益 K_i、微分增益 K_d 的函数关系进行运算，运算结果用以对电动推杆的伸出量进行控制，以调节仿形臂精准包络苹果树冠层外形。

2.2 硬件组成与电路设计

如图 5 所示，控制系统硬件主要由主控模块、驱动模块、供电模块、信号检测模块、通信模块、报警模块等组成。其工作原理为：手机 APP 通过 ATK－HC05－V13 蓝牙模块向主控制器下达指令，接收传感器检测数据；6 路超声波传感器阵列实时测量仿形臂至果树冠层距离信息，生成的脉冲信号通过 RS485 总线回传至主控制器，主控制器根据计算结果向驱动模块输出 PWM 波控制电动推杆伸缩，调节仿形臂姿态。激光传感器安装于仿形臂侧面，有一路或多路检测到障碍物时，电动推杆立即停止运

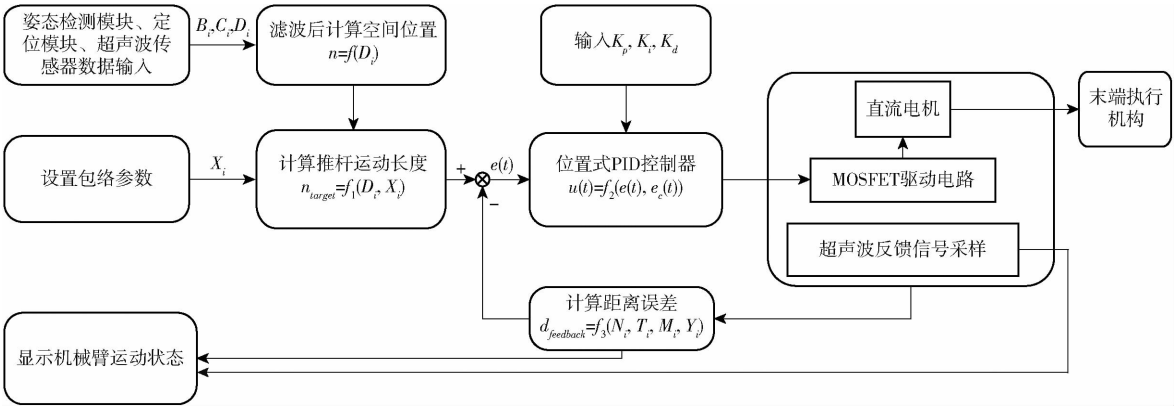


图 4 仿形控制系统总体方案

Fig. 4 Overall scheme of profile matching control system

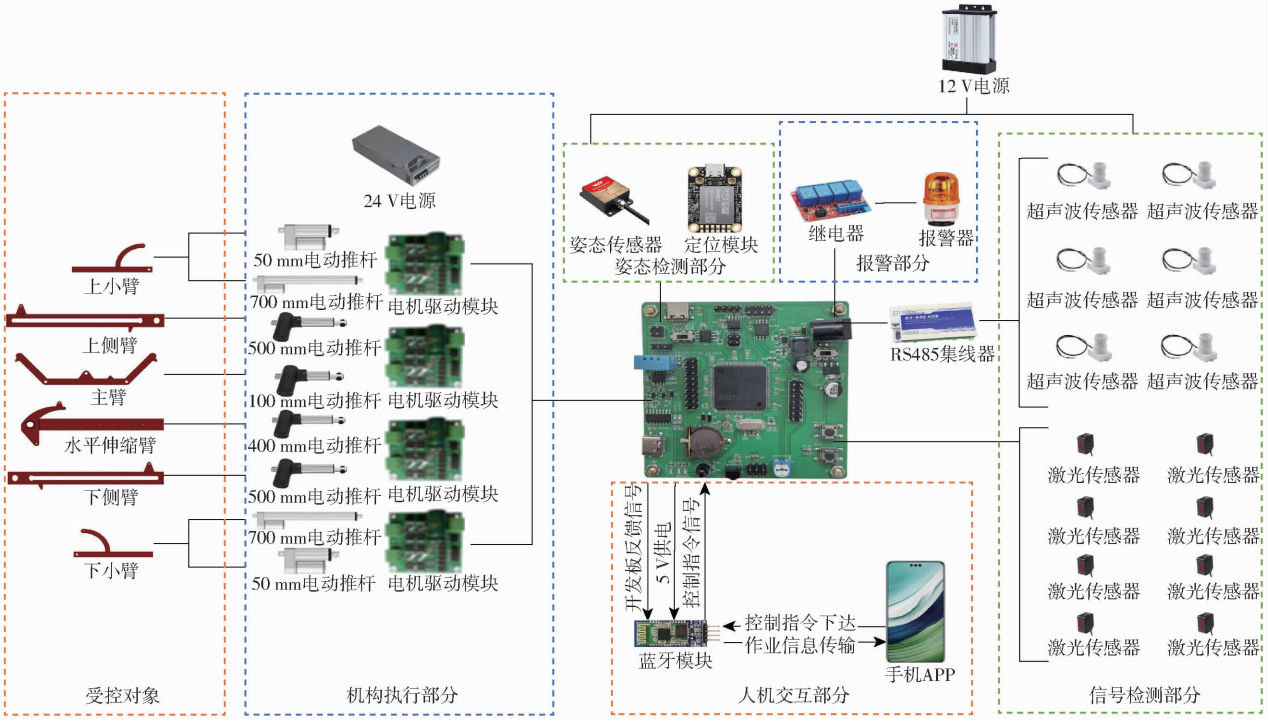


图 5　控制系统硬件组成

Fig. 5　Hardware composition diagram of control system

行，同时继电器动作，报警器进行声光报警。WTRTK－982 定位模块与 hwt905 姿态传感器实时检测机具位置与姿态，为自适应卡尔曼滤波提供数据支持。

执行系统选用 24 V 直流有刷电动推杆作为受控模块，驱动仿形臂各部分实现仿形包络作业。设计了基于 STM32F103ZET6 的单片机作为主控制器，并设计了直流有刷电机驱动模块作为从控制器接收单片机信号调节电动推杆运动，电机驱动模块由大功率 MOSFET 驱动电路、驱动信号处理电路、光耦信号隔离电路、电源电路与引脚接口电路等组成，可以为直流有刷电动推杆提供足够的驱动电流，并可独立控制每一路电动推杆的工作状态。执行系统电路如图 6 所示。

2.3　控制系统算法与软件设计

根据 ZAMAN 等[22]的研究，果园地面的不平整与拖拉机的非线性行驶是造成超声波传感器测量冠层参数误差的主要因素之一。为保证系统仿形精准度，采用自适应卡尔曼滤波处理超声波传感器测量数据，系统预测模型状态方程为

$$\boldsymbol{X}_{k|k-1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_{k}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{k-1} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_{k-1|k-2}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}+Q \tag{2}$$

更新状态方程为

$$\boldsymbol{K}_{k}=\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}+R) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{X}_{k|k}=\boldsymbol{X}_{k|k-1}+\boldsymbol{K}_{k}(\boldsymbol{Z}_{k}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_{k|k-1}) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_{k}\boldsymbol{H})\boldsymbol{P}_{k|k-1} \tag{5}$$

式中　$\boldsymbol{X}_{k|k-1}$——k 时刻状态预测值

$\boldsymbol{P}_{k|k-1}$——$x_{k|k-1}$的状态协方差

Q——系统过程噪声协方差

$\boldsymbol{K}_{k}$——k 时刻卡尔曼增益

$\boldsymbol{H}$——观测矩阵　　$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

$\boldsymbol{A}$——系统状态转移矩阵

$\boldsymbol{B}$——控制输入矩阵

$\boldsymbol{Z}_{k}$——传感器测量值

R——系统测量噪声协方差

为减小超声波传感器测量冠层参数误差，Q 和 R 取值时应在保留主运动分量的同时尽可能消除抖动分量；考虑到系统动态特性及传感器测量精度等因素，取 Q 在 0～0.1、R 在 1～2 内进行试验，Q 步长设为 0.005，R 步长设为 0.05，试验结果如图 7 所示，取 $Q=0.02$、$R=1.2$ 时能够达到较好的滤波效果。

当田间地表起伏较大或拖拉机连续非线性行驶时，固定 Q 和 R 滤波输出结果会与实际冠层外形存在较大误差，增加运动补偿难度的同时降低机具定位精度。

相较于 Q、R 固定滤波，自适应 R 修正滤波可以更好地跟随运动变化进行准确调节。当运动变化增大时 R 随之减小，系统整体跟随性能提升。将 N 个连续采样值固定为一个序列，将传感器测得的运动参数(x,y,θ)不断存入序列直至序列中参数数量达到 N，计算队列运动参数总和 $D(x,y,\theta)$，之后删除序列首位参数，补入后续测得参数进行递推运算，运用不断变化的 D 对 R 进行自适应修正，即

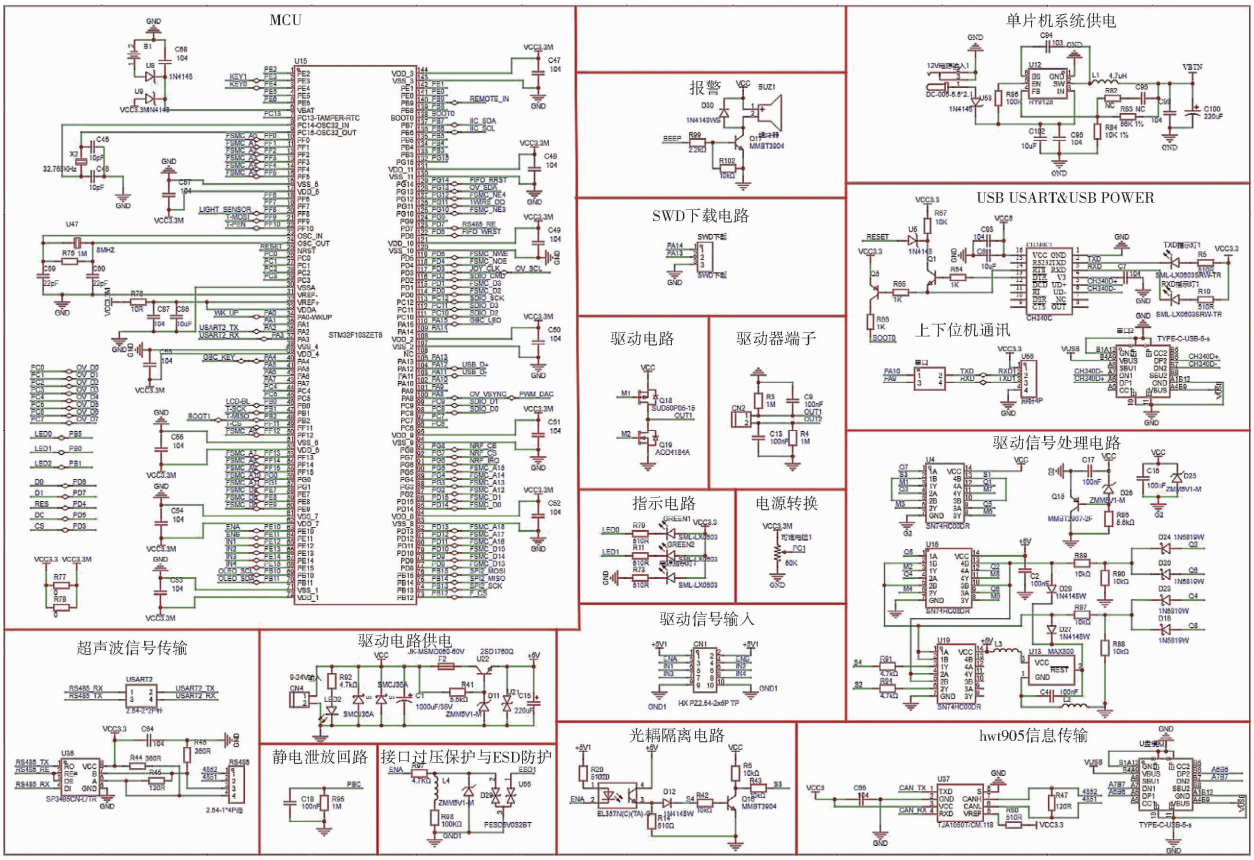


图 6 执行系统电路图

Fig. 6 Execute system circuit schematics

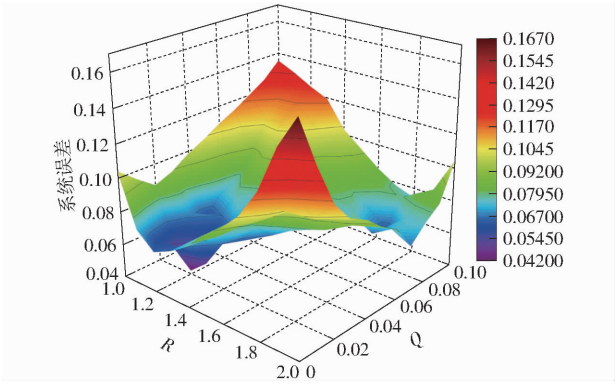


图 7 不同 Q、R 时系统测量误差

Fig. 7 Measurement errors for different Q and R values

$$D(x,y,\theta)=\sum_{i=1}^{N}(x_i,y_i,\theta_i) \tag{6}$$

$$R(x,y,\theta)=\left(\frac{R_0}{3|D_x|},\frac{R_0}{3|D_y|},\frac{R_0}{3|D_\theta|}\right) \tag{7}$$

式中 (x_i,y_i)——北斗模块测量机具坐标

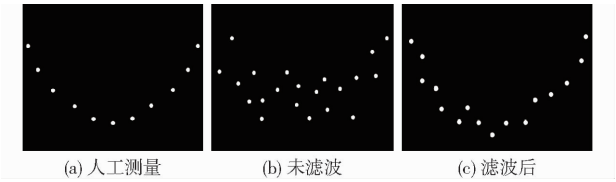
θ_i——姿态传感器测量机具倾角

R_0——系统预设值

D_x、D_y、D_θ——x、y、θ 方向估计量的和

当果园地面平整、拖拉机行驶线性程度较高时，D_x、D_y、D_θ增加，此时 R 将会减小，增益 K 增加，系统整体跟随性能提升；反之，D_x、D_y、D_θ减小，则说明果园地面不够平整或机具行驶线性程度较低，增益 K 降低，滤波器平滑性能提升，有效抑制干扰。

图 8 给出了一段拖拉机行驶时冠层测量数据的滤波结果，可以看出滤波算法能够在减小测量误差的同时较为准确地反映冠层边界信息。



(a) 人工测量 (b) 未滤波 (c) 滤波后

图 8 超声波信号处理效果对比图

Fig. 8 Ultrasonic signal processing effect comparison

在果树冠层仿形过程中，仿形臂需根据超声波传感器获取的冠层边界信息进行连续调整。位置式 PID 闭环控制算法能够根据误差的累积计算控制量，实时响应冠层外形变化，动态调整仿形臂位置，确保仿形臂在仿形作业过程中能够精准包络果树冠层，避免喷施区域偏移，提高药液利用率和施药均匀性。运用位置式 PID 闭环控制算法实现仿形臂在动态调节时各检测点位到果树冠层距离保持稳定；超声波采样数据经过滤波处理后，调用位置式 PID 公式计算输出量，即

$$u(k)=K_p\left(e(k)+K_iT\sum_{j=1}^{k}e(j)+\frac{K_d}{T}\Delta e(k)\right) \tag{8}$$

式中　T——PID 采样周期

$\Delta e(k)$——实际距离值与预设距离值的偏差

$u(k)$——PID 输出

控制算法根据输出量调节电动推杆伸缩以保证各检测点位到果树距离维持在设定值。流程图如图 9 所示。

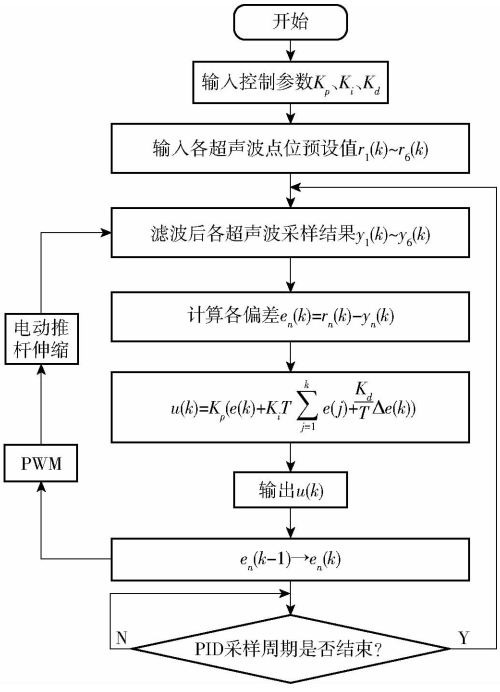


图 9　位置式 PID 控制器算法流程图

Fig. 9　Flowchart of incremental PID algorithm

采用临界比例度法进行 PID 参数整定，按照比例、积分、微分的顺序，确定 PID 控制算法中参数最优值分别为 K_p = 44.72，K_i = 12.67，K_d = 18.62。图 10 为单一超声波测量点位距离果树 1.0 m，目标距离为 1.0、0.8、0.6 m 的情况下 Simulink 仿真结果，可以清晰地观察到位置式 PID 控制系统的响应时间较短，振荡次数较少，表现出平稳的响应特性。

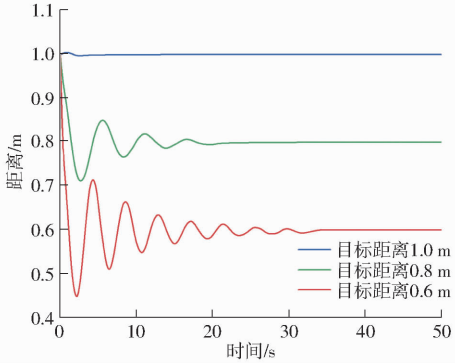


图 10　不同目标距离下控制系统响应曲线

Fig. 10　Control system response curves at different target distances

人机交互界面采用 Android Studio 软件开发，具有作业参数设定、控制指令设置、机具作业信息显示（作业时长、各点位超声波检测值）、故障状态显示等功能。为了应对田间作业时可能出现的突发情况，设计有急停与仿形臂一键回收按键，进行了多选项卡设计以方便操作者使用。主界面如图 11a 所示，系统选项卡包括作业模式选择、按键控制、作业参数设置、作业信息显示、作业日志、使用说明等。



(a) 人机交互主界面　(b) 按键控制调节

(c) 作业参数设置　(d) 作业信息显示

图 11　人机交互主界面及部分功能选项卡界面

Fig. 11　Main interface of human-computer interaction and some function option tabs interface

人机交互系统工作流程为：首先点击作业模式选择，进行手动/自动控制模式选择；若用户选择手动控制模式需输入通讯参数后跳转按键控制选项卡，如图 11b 所示；选择自动控制模式后自动搜索设备并跳转作业参数设置选项卡，如图 11c 所示，输入各超声波传感器与激光传感器检测点位作业距离后点击确认，机具开始进行自动仿形作业；作业信息显示选项卡如图 11d 所示，用户可以通过这一选项卡中的观察窗体查看各超声波传感器检测实时距离信息与设备作业时长；机具作业结束后可以点击作业日志选项卡查看作业记录，并通过控制器 USB 接口连接计算机导出作业记录；当机具作业时遇到故障或报警器声光报警时，可参考使用说明进行故障诊

断与排除。

2.4 仿形控制系统工作流程

作业流程如图 12 所示。系统支持手动控制与自动控制两种作业模式,手动控制模式操作者输入通讯参数后通过按键控制各路电动推杆伸缩;自动控制模式下系统启动后,操作者需打开手机蓝牙与主控系统进行自动通讯连接。单片机通过解析超声波测距信号获取仿形臂各检测点位到冠层距离信息,通过位置式 PID 闭环控制算法形成控制指令自动调节各电动推杆伸缩进行仿形作业,作业过程中超声波传感器检测的距离信息与作业时长实时显示在手机 APP 上。当激光传感器检测到有异物时,电动推杆制动,继电器控制报警器进行声光报警,系统停止作业。系统正常工作时,当超声波传感器检测到的距离误差小于阈值时,系统停止工作。

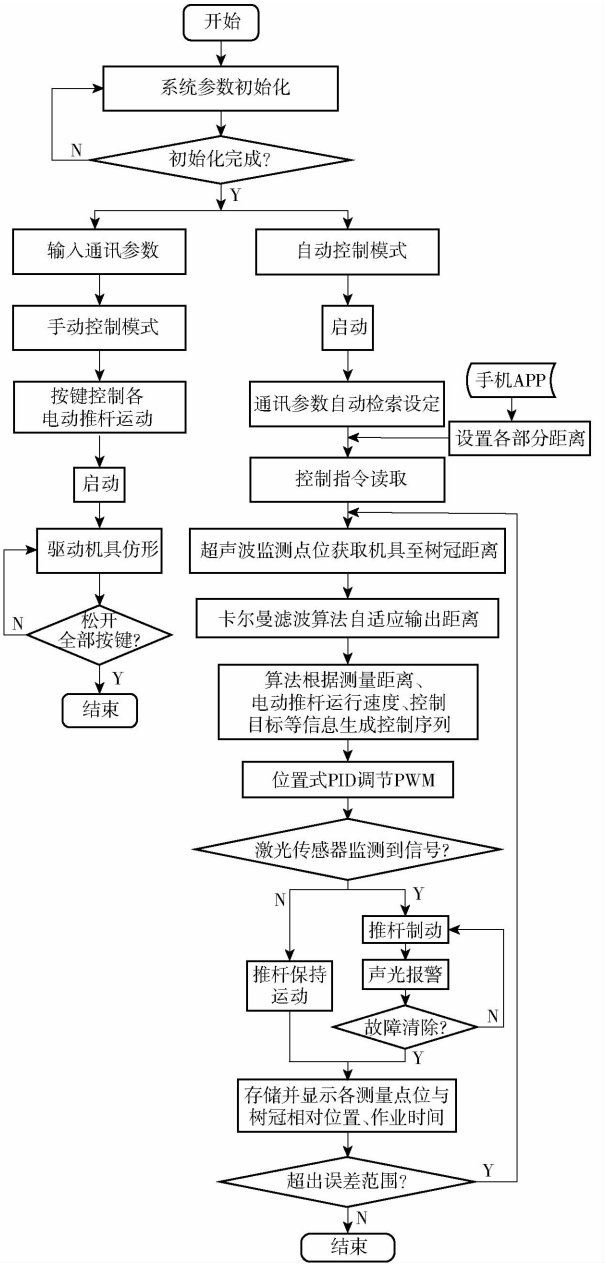


图 12 控制系统流程图

Fig. 12 Flowchart of control system

3 田间试验

3.1 仿形臂最大定位偏差测定试验

3.1.1 试验方案

2024 年 10 月 10 日,在新疆维吾尔自治区玛纳斯县常规种植果园开展试验,试验对象为纺锤形苹果树,株行距配置为 2 m×4.3 m,果树高 4.10 m,冠幅 2.1 m(修剪后)。试验前在手机端分别将作业距离设置为 0.6、0.8、1.0 m,选取 20 棵果树进行自动仿形重复定位精度试验,试验时机具作业速度为 1.5 km/h,到达作业位置后在手机 APP 端点击确定,随后机具进行自动仿形,仿形臂到达稳态后视为完成仿形,试验重复 3 次。人工测量并记录各超声波测量点位到每棵果树冠层距离,取所有超声波测量点位最大误差值为仿形臂最大定位偏差,并计算最大偏差率。仿形臂最大定位偏差和最大偏差率公式为

$$E_{\max} = \max |l_a - l_b| \tag{9}$$

$$E_c = \frac{E_{\max}}{l_b} \times 100\% \tag{10}$$

式中 $E_{\max}$——系统最大定位误差

l_a——人工测量各超声波点位最大误差

l_b——试验前手机端预设距离

E_c——系统最大定位偏差率

3.1.2 试验结果与分析

每棵果树仿形结束后,对各超声波点位到果树的实际距离进行测量并记录,整理结果如图 13 所示,不同作业距离下系统最大定位偏差与最大偏差率如表 2 所示。

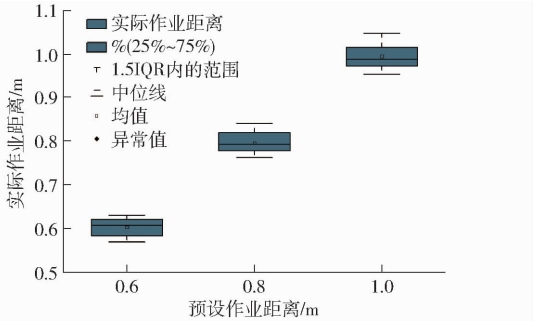


图 13 不同预设作业距离下各超声波点位实际作业距离测量值

Fig. 13 Measured actual working distances of each ultrasonic point at different preset distances

试验结果表明,控制系统可以根据传感器采集的距离信息自动识别并较为精准地包络果树外形,作业距离设置为 0.6、0.8、1.0 m 情况下最大偏差率不超过 5.33%,具有较高的准确性。

表 2　不同作业距离下系统最大定位偏差与最大偏差率

Tab. 2　Maximum positioning deviation and maximum deviation rate of system at different working distances

作业距离/m	最大定位偏差/mm	最大偏差率/%
0.6	32	5.33
0.8	41	5.13
1.0	48	4.8

3.2　仿形对靶施药作业效果试验

3.2.1　试验方案

2024 年 10 月 11 日，进行仿形对靶施药作业效果验证试验，试验地点与仿形臂最大定位偏差测定试验相同，试验时环境温度 19.5℃，相对湿度 52.7%，风速 1.3 ~ 2.0 m/s。

采用定距对靶施药与仿形对靶施药两种施药方式对比，验证运用苹果树冠层仿形对靶施药控制系统进行仿形对靶施药能够提升药液利用率、改善施药均匀性。如图 14a 所示，定距对靶施药是在喷雾距离参数恒定的条件下，试验平台移动过程中进行持续喷雾，属于不带任何检测措施及判断方法的喷雾，图 14b 所示仿形对靶施药，是通过超声波传感器检测果树冠层外形，施药过程中机具保持对冠层进行包络，喷头空间位置随着冠层外形变化而变动。



(a) 定距对靶施药　　(b) 仿形对靶施药

图 14　不同施药方式示意图

Fig. 14　Diagrams of different application methods

试验时机具保持 1.5 km/h 匀速行驶，仿形作业臂各检测点位距离为 0.6 m，采用臣源增压水泵确保 2 种施药模式下各作业喷头喷雾压力相同，液泵流量 29.5 L/min，分别选择 15 棵果树对应定距对靶施药、仿形对靶施药两种施药模式进行试验，在限定 2 种施药模式施药量相等的前提下对比药液利用率、施药均匀性的差异，试验重复 6 次。

以水敏纸作为载体，2 种施药模式下均在果树冠层上、中、下侧选择 10 个测试点，从外侧到内侧分 3 层布置若干水敏纸，用来计算雾滴在不同区域的沉积数据。水敏纸布设点位如图 15 所示，其中点 1、2、3、4、5 布置在冠层外侧，构成第 1 层；点 6、7、8 布置在冠层中部，构成第 2 层；点 9、10 布置在冠层内侧，构成第 3 层。

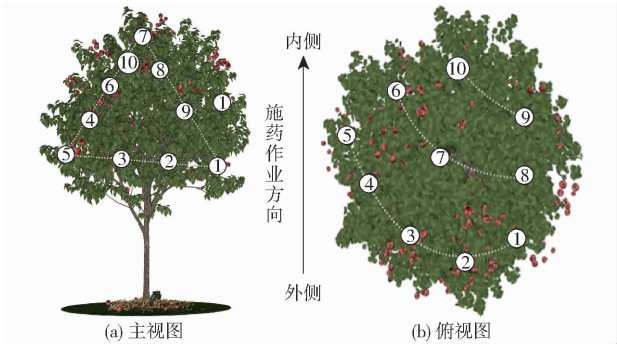


图 15　水敏纸布样点位示意图

Fig. 15　Diagrams of water-sensitive paper sample

依据行业标准《植保机械通用试验方法》和《喷雾机(器)作业质量》，以平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率与施药变异系数评价施药效果。其中平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率用于评价不同施药模式下药液利用率；变异系数评价不同模式施药均匀性。

3.2.2　试验结果与分析

采用六六山下植保科技有限公司雾滴图像处理软件对水敏纸雾滴沉积情况进行分析。单次试验雾滴分布对比如图 16 所示，2 种施药模式在 3、4 号测试点位水敏纸均有不同程度的过量液滴附着，因此认为 3、4 号测试点喷雾量充足，此时进行图像处理得到的不同量化指标对应值误差较大，故 3、4 号测试点不纳入统计范围。

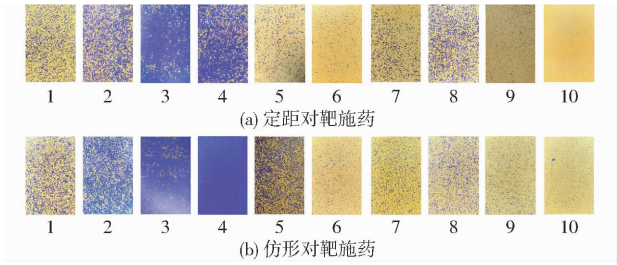


图 16　雾滴分布对比

Fig. 16　Comparison of droplet distribution

2 种施药方式各重复试验 6 次，获得各点位雾滴沉积量和雾滴密度的平均值如图 17 所示，仿形对靶施药各测试点平均雾滴密度与平均雾滴沉积量高于定距对靶施药。从冠层外侧到内侧，仿形对靶施药平均雾滴沉积量与平均雾滴密度降低速率更加平缓，这是由于仿形对靶施药可以根据不同果树冠层外形变化动态调节喷头空间位置和角度，更加有利于针对冠层内部和后部进行施药，避免了更多药液喷洒到无效空间中，改善了药液利用情况。仿形对靶施药与定距对靶施药的变异系数分别为 26.4% 和 45.9%，仿形对靶施药沉积量分布更均匀。

各测试点药液附着率指标如图 18 所示，其中测

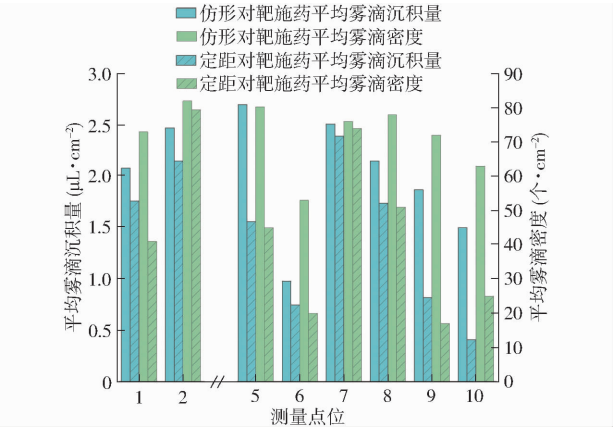


图 17 不同施药方式各测试点平均雾滴密度与平均雾滴沉积量

Fig. 17 Average droplet density and average droplet deposition amount indicators at each test point by different spraying methods

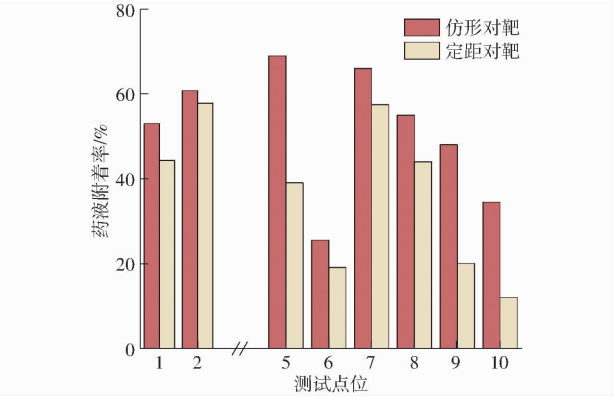


图 18 不同施药方式各测试点药液附着率指标

Fig. 18 Average index of drug liquid adhesion at each test point by different application methods

试点 9、10 位于冠层内侧,其仿形对靶施药药液附着率指标相较于定距对靶施药分别提升了 140%、187.5%,仿形对靶施药显著提升了冠层内侧药液附着率情况,相较定距对靶施药在不同测试点药液附着率更高。

对水敏纸雾滴沉积量、雾滴密度与不同测试点药液附着率数据进行统计学检验,设定显著性水平 $\alpha=0.05$,采用 Welch T 检验进行单侧检验以证明仿形对靶施药效果显著;表 3 结果显示仿形对靶施药在雾滴密度、雾滴沉积量及药液附着率指标上均显著优于定距对靶施药($p<0.05$)。

根据行业标准《JB/T 9782—2014》和《NY/T 650—2013》,药液附着率需大于 33%,平均雾滴密度不低于 20 个/cm^2,变异系数小于 50%。由表 4 可以看出,2 种施药方式整体施药指标均符合行业标准,仿形对靶施药相较于定距对靶施药,平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率均有所提高,变异系数明显下降,雾滴分布均匀性得到显著提升。

表 3 不同施药方式各测试点雾滴沉积量、雾滴密度、药液附着率统计学检验

Tab. 3 Statistical tests on average deposition amount of droplets, average droplet density and drug liquid adhesion rate at each test point by different spraying methods

指标	检验方法	统计量 t	自由度	p	显著性结论
雾滴沉积量	Welch T 检验	2.10	13	0.028	仿形组显著更高
雾滴密度	Welch T 检验	3.11	9	0.006	仿形组显著更高
药液附着率	Welch T 检验	1.89	13	0.041	仿形组显著更高

表 4 整体施药指标对比

Tab. 4 Overall comparison of pesticide application indicators

施药方式	平均雾滴密度/(个·cm^{-2})	平均雾滴沉积量/(μL·cm^{-2})	药液附着率/%	变异系数/%
定距对靶施药	44.1	1.45	38.4	45.9
仿形对靶施药	72.4	2.03	49.8	26.4

相较于定距对靶施药,运用果树冠层仿形控制系统进行仿形对靶施药时平均雾滴密度提升了 64.2%,平均雾滴沉积量提升了 40%,药液附着率提升了 29.7%,变异系数降低了 42.5%。仿形对靶施药提升了冠层内部、两侧和后部的喷药效果,在药液利用率、施药均匀性方面均优于定距对靶施药,有助于减少农药使用剂量,降低无效施药造成的环境污染。

4 结论

(1)设计了苹果树冠层摇臂式仿形作业对靶施药控制系统,实现了针对苹果树冠层外形的精确仿形。仿形臂最大定位偏差测定试验结果表明:超声波传感器各点位距离果树冠层 0.6、0.8、1.0 m 处的仿形臂最大定位偏差分别为 32、41、48 mm,最大偏差率不超过 5.33%。

(2)通过仿形对靶施药作业效果验证试验,对比分析定距对靶施药与仿形对靶施药在作业效果上的差异。统计学检验结果表明:仿形对靶施药在不同测试点位雾滴密度、雾滴沉积量及药液附着率指标上均显著优于定距对靶施药。仿形对靶施药平均雾滴密度为 72.4 个/cm^2,平均雾滴沉积量为 2.03 μL/cm^2,药液附着率为 49.8%,施药变异系数为 26.4%。相同作业条件下与定距对靶施药相比,仿形对靶施药的平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率指标分别提升 64.2%、40%、29.7%,施药变异系数下降 42.5%,提升了药液利用率与施药均匀性。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 郑永军,陈炳太,吕昊暾,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, LÜ Haotun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 110 – 124. (in Chinese)

[3] 孙政,赖忠晓,赵晓敏,等. 渭北旱塬苹果病虫害全程生物防控技术应用效果评价[J]. 中国农业科学,2023,56(6):1102 – 1112.
SUN Zheng, LAI Zhongxiao, ZHAO Xiaomin, et al. Application evaluation of the whole-process biological management scheme for apple pests in the Weibei Dry Highland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(6): 1102 – 1112. (in Chinese)

[4] 李文伟,江世界,徐平凡,等. 丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):188 – 197.
LI Wenwei, JIANG Shijie, XU Pingfan, et al. Design and experiment of self-propelled small target following sprayer for hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 188 – 197. (in Chinese)

[5] 孙鑫. 可旋转式果树仿形喷雾机构的设计[D]. 南京:南京林业大学,2023.
SUN Xin. Design of rotary fruit tree profiling spray mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023. (in Chinese)

[6] 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(增刊 1):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(Supp. 1): 273 – 280. (in Chinese)

[7] ABBAS I, LIU J, FAHEEM M, et al. Different real-time sensor technologies for the application of variable-rate spraying in agriculture[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 316(40): 112265.

[8] 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 experiment of young tree target detector[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 18 – 22. (in Chinese)

[9] MAGHSOUDI H, MINAEI S, GHOBADIAN B, et al. Ultrasonic sensing of pistachio canopy for low-volume precision spraying [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 149 – 160.

[10] 丁为民,赵思琪,赵三琴,等. 基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究[J]. 农业机械学报,2016,47(6):1 – 10, 20.
DING Weimin, ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, et al. Measurement methods of fruit tree canopy volume based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 1 – 10, 20. (in Chinese)

[11] 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(增刊 1):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(Supp. 1): 273 – 280. (in Chinese)

[12] 台少瑜. 基于激光雷达树冠测量的变量喷雾系统研究与试验[D]. 重庆:西南大学,2024.
TAI Shaoyu. Research and experiment on variable spray system based on canopy measurement by LiDAR[D]. Chongqing: Southwest University, 2024. (in Chinese)

[13] MANANDHAR A, ZHU H, OZKAN E, et al. Techno-economic impacts of using a laser-guided variable-rate spraying system to retrofit conventional constant-rate sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 21(5): 1156 – 1171.

[14] 肖珂,郝毅,高冠东,等. 果园自动变距精准施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,53(10):137 – 145.
XIAO Ke, HAO Yi, GAO Guandong, et al. Design and experiment of automatic variable-distance precision spraying system in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 53(10): 137 – 145. (in Chinese)

[15] 张春龙,等. 一种果园机器人主动视觉探测系统及探测方法:201911390237.4[P]. 2019 – 12 – 30.

[16] OSTERMAN A, GODESA T, HOCEVAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 175 – 182.

[17] 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 CSAE, 2017, 33(1): 70 – 76. (in Chinese)

[18] 黄培奎,张智刚,罗锡文,等. 农机具姿态倾角测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(22):9 – 16.
HUANG Peikui, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design and test of tilt angle measurement system for agricultural implements[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 9 – 16. (in Chinese)

[19] 向军. 果园智能仿形变量喷雾控制系统设计与试验[D]. 广州:华南农业大学,2020.
XIANG Jun. Design and test of intelligent profiling spray control system in orchard[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[20] 姜春淼. 苹果树冠层仿形作业臂的设计与研究[D]. 石河子:石河子大学,2023.
JIANG Chunmiao. Design and research of apple canopy profiling manipulator[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. (in Chinese)

[21] 李昂. 全产业链视角下苹果产业投入产出效率研究——以新疆南疆苹果主产区为例[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2023.
LI Aang. Input-output efficiency of apple industry from the perspective of the whole industry chain: a case study of the main apple producing area in Southern Xinjiang[D]. Alar: Tarim University, 2023. (in Chinese)

[22] ZAMAN Q U, SCHUMANN A W, HOSTLER H K. Quantifying sources of error in ultrasonic measurements of citrus orchards [J]. Transactions of the ASAE, 2007, 23(4): 449 – 453.