

果园自动变距精准施药系统设计与试验

肖珂<sup>1,2</sup> 郝毅<sup>1</sup> 高冠东<sup>3</sup>

(1. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001; 2. 河北省农业大数据重点实验室, 保定 071001;  
3. 中央司法警官学院信息管理系, 保定 071000)

**摘要:** 针对我国北方果园施药设备自动化程度不高、农药利用率低、适应性差等问题, 设计了基于冠层体积估算的果园自动变距精准施药系统。施药系统的喷施臂在控制系统的控制下可以在水平和垂直方向调整喷雾距离和喷施高度, 以适应不同果园的果树特征。为实现精准喷施, 利用红外测距传感器组成了传感器阵列, 通过该阵列探测冠层, 将测得的数据用数学方法构建了冠层体积估算模型, 并设计了喷雾参数调整方案, 使得喷雾距离与喷雾量可进行相应调整。为验证施药系统的性能, 测试了喷施臂在接收到移动指令时的响应时间与运动实际耗时以及冠层体积估算模型的准确率, 并选用仿真桃树进行了定距和变距两组自动对靶喷施试验。结果表明, 喷施臂的移动可实现瞬间响应, 运动实际耗时与理论耗时几乎一致, 冠层体积估算模型的相对误差为 11.27%; 与定距对靶喷雾相比, 自动变距对靶喷施的农药附着率提高了 18.66%, 节约了 30.25% 的药液。

**关键词:** 果园; 精准施药; 自动对靶; 变距喷施

中图分类号: S491      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2022)10-0137-09      **OSID:** 

Design and Experiment of Automatic Variable-distance  
Precison Spraying System in Orchard

XIAO Ke<sup>1,2</sup> HAO Yi<sup>1</sup> GAO Guandong<sup>3</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China  
2. Hebei Key Laboratory of Agricultural Big Data, Baoding 071001, China  
3. Department of Information Management, The National Police University for Criminal Justice, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low automation, low pesticide utilization and poor adaptability of orchard spraying equipment in northern China, an orchard variable distance spraying equipment based on crown volume estimation was designed. The spraying arm of the equipment could adjust the spraying distance and height in horizontal and vertical directions under the control of the control system, so as to adapt to the characteristics of fruit trees in different orchards. In order to achieve precise spraying, a sensor array was constituted by infrared ranging sensor to detect the crown. The data measured by sensor array was used to build a tree crown volume estimation model by mathematical method, and the adjustment scheme of spray parameters was designed to make the spray distance and spray volume adjusted accordingly. In order to verify the performance of the spraying system, the actual movement time and the response time of the spraying arm when received the movement command and the accuracy of the crown volume estimation model were tested. Two groups of automatic target spraying tests of fixed distance and variable distance were carried out on simulated peach trees. The results showed that the movement of the spraying arm could achieve the instantaneous response and the actual movement time was almost consistent with the theory, and the relative error of the volume estimation model was 11.27%. Compared with the fixed distance target spraying, the variable distance automatic target spraying increased the pesticide attachment rate by 18.66%, and saved 30.25% of the liquid medicine.

**Key words:** orchard; precise spraying; automatic target; variable-distance spraying

## 0 引言

在果园施药技术研究中,自动对靶喷雾技术可以有效解决农药浪费和环境污染问题<sup>[1]</sup>。研究人员利用红外传感器<sup>[2]</sup>、超声波传感器<sup>[3]</sup>、激光雷达传感器<sup>[4]</sup>、机器视觉<sup>[5]</sup>等技术构建的自动对靶喷雾系统可以准确检测树冠和喷施目标,从而实现间歇性有选择喷施,节约了农药资源。

为了进一步提高喷施效率,国内外研究人员开始对喷施区域的冠层特征、叶墙面积等进行检测分析,根据分析结果实时调整相应的喷施参数。薛秀云等<sup>[6]</sup>利用激光雷达(Laser detection and ranging, LiDAR)检测技术获取叶墙面积(Leaf wall area, LWA),应用图像处理技术计算相关参数,实现了基于LWA的变量喷雾,与纯对靶喷雾相比省药率为32.77%;姜红花等<sup>[7]</sup>将激光测距传感器和超声波传感器相结合,设计了基于多传感器阵列的冠层信息采集方法和果树冠层体积在线计算方法,在此基础上进行的变风量喷雾提高了沉积率,减少了喷雾漂移;OSTERMAN等<sup>[8]</sup>利用激光扫描仪测量冠层,将测得的数据利用数学方法拟合出轮廓,并使用逆运动学算法调整喷施臂到冠层的距离,使喷雾覆盖范围最佳。

在调整喷雾参数的研究中,对喷雾量的调整最常见,通过调整喷雾量可明显减少农药的使用<sup>[9]</sup>;而喷雾距离作为影响喷雾效果的重要参数之一,根据果树冠层结构实时调节喷雾距离,实现喷雾与冠层的仿形是广大学者关心的目标<sup>[10]</sup>。目前关于喷雾距离调整的研究较少,并且调整方式有局限性,不能保证实时性<sup>[11-12]</sup>。因此,在调整喷雾距离的研究中,保证调整过程的自动化程度与实时性将是研究重点。在目前果园喷雾系统的研究中,能同时针对喷雾量与喷雾位置进行调整的研究报道较少,为进一步提高喷雾效率,应设计能同时调整喷雾量和喷雾距离的喷雾系统。

由于我国北方果园种植的果树多以落叶乔木为主,其生长状态与种植方式大体相同,与南方果园树种、树形、种植方式的多样化形成了明显差异。故本文结合实际应用中对喷雾系统普适性与实时性的要求,设计一款适用于我国北方果园病虫害防治的施药系统。该系统利用红外测距传感器组成的传感器阵列探测冠层,将测得的数据利用数学方法构建冠层体积估算模型,并通过设计喷雾参数调节方案,使喷雾距离和喷雾量可实时调整,以提高喷雾效率。

## 1 系统结构与组成

### 1.1 系统结构

据调查,在我国北方果园标准化种植中,株行距多为5 m×5 m,树高控制在2.5 m左右,果树冠层高度大约在1.6 m;果树冠层分布较分散,且不同高度的冠层密度各不相同。

为了能满足不同树冠高度和冠层密度对施药系统的要求,本文根据果园果树的特征与参数,设计一款可调整喷施距离和喷雾量的施药系统。该施药系统主要由喷施臂、控制系统以及相应的模块组成,其原理框图如图1所示。

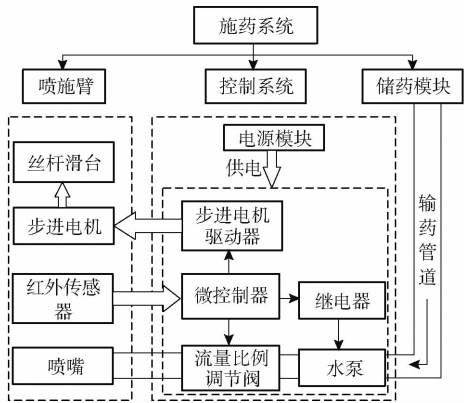


图1 施药系统原理框图

Fig.1 Principle block diagram of spraying system

### 1.2 喷施臂结构

喷施臂整体高1.8 m,宽0.72 m,分为上、中、下3部分,分别对应果树冠层的顶层、中层、底层。喷施臂每个部分都装有一个扇形喷嘴,在喷嘴处安装了一个由3个红外测距传感器组成的传感器阵列来探测树冠;各部分喷施臂通过步进电机驱动丝杆滑台实现移动。喷施臂的结构如图2所示。

如图2所示,上下两部分垂直丝杆滑台分别安装在两个整体丝杆滑台上,整体丝杆滑台通过连接板连接,当两个整体水平调节电机同时同步运转时,就可以通过控制整体丝杆滑台运动实现整体喷施臂的左右移动,其移动行程为0~50 cm,移动速度为1 cm/s;分支水平调节电机可以控制分支丝杆滑台左右运动,进而实现每个喷嘴的左右调距,其移动行程为0~30 cm,移动速度为2 cm/s,最大可调为4 cm/s;垂直调节电机可以控制垂直丝杆滑台上下运动,进而实现上下两喷嘴的上下移动,其移动行程为0~60 cm,移动速度为2 cm/s;3个安装架分别安装在3个分支丝杆滑台上,喷嘴与红外测距传感器分别固定在安装架上的特定位置,形成了红外传感器阵列,喷嘴与红外传感器的安装位置与距离如图3所示。

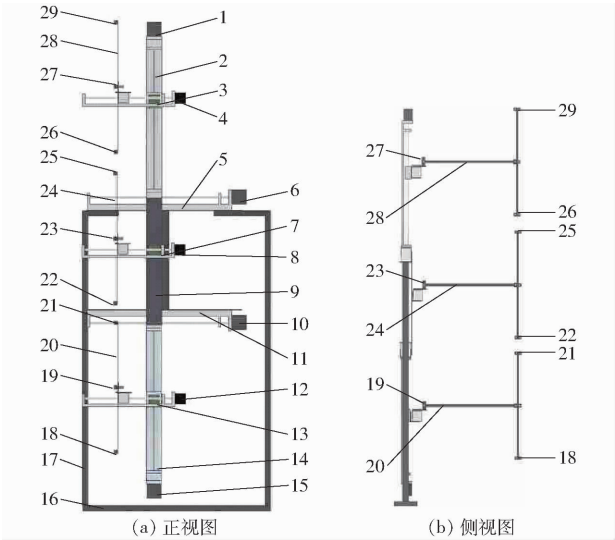


图 2 喷施臂结构图

Fig. 2 Structural drawings of spraying arm

1、15. 垂直调节电机 2、14. 垂直丝杆滑台 3、7、13. 分支丝杆滑台 4、8、12. 分支水平调节电机 5、11. 整体丝杆滑台 6、10. 整体水平调节电机 9. 连接板 16. 底座 17. 支架 18、21、22、25、26、29. 红外测距传感器 19、23、27. 喷嘴 20、24、28. 安装架

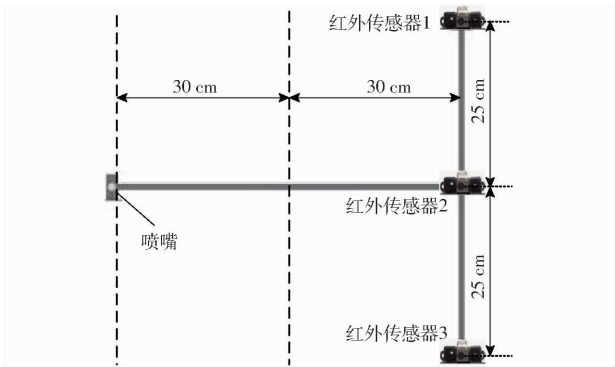


图 3 红外传感器阵列

Fig. 3 Infrared sensor array

1.3 控制系统组成

控制系统主要由微控制器、继电器、步进电机驱动器、电源模块、流量比例调节阀、水泵等组成。其中微控制器芯片选用 ST 公司生产的 STM32F407IGT6 芯片,该芯片集成了新的 DSP 和 FPU 指令,具有 168 MHz 的高运行速率,接口资源丰富,可以很大程度提升控制算法的执行速度和代码效率;继电器用来控制水泵的通断,可以由控制芯片根据相应的信号控制,流量比例调节阀用来调整喷施时的实际流量;步进电机驱动器选用东芝公司生产的 TB6600 型升级款驱动器,步进电机驱动器作为桥梁来连接控制芯片、电源和步进电机,达到低振动、低噪声、高速度的驱动效果,可以实现控制芯片对步进电机的精准控制;电源模块由纽曼 N300 型升级版移动电源和开关电源组成,纽曼 N300 负责整体系统的供电,开关电源负责给步进电机驱动器、

水泵、电磁阀等供电。

2 基于传感器阵列的冠层体积估算模型构建

在施药系统研究中,对于果树冠层体积的计算必不可少,也是实现精准喷雾的重要环节。本文选用红外测距传感器检测冠层,在每个喷嘴处,将 3 个红外测距传感器如图 3 所示安装组成传感器阵列,并利用此阵列构建冠层分割模型和冠层体积估算模型。

2.1 冠层分割模型

根据喷施臂结构设计,上、中、下 3 个红外传感器阵列分别探测果树冠层的顶层、中层、底层区域;由于喷施臂上、中、下 3 部分结构完全一致,故本文选取中部冠层区域分析喷施臂在前进过程中如何利用红外传感器阵列分割冠层。冠层分割模型如图 4 所示。

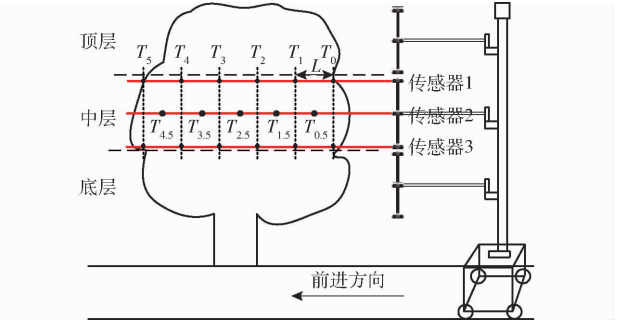


图 4 冠层分割模型

Fig. 4 Canopy segmentation model

如图 4 所示,喷施臂放置在一个可移动工作平台上,其移动平均速度为 30 cm/s;图中黑色标注点为红外传感器阵列在冠层上的探测点,当传感器 1 和传感器 3 都测得数据时为  $T_0$  时刻,即为起始时刻  $T_0$ 。本文利用  $T_n$  ( $n$  为整数)和  $T_{n.5}$  表示不同时刻。

传感器阵列随着工作台的移动探测整个冠层,在  $T_n$  (包括  $T_0$ ) 记录传感器 1 和 3 探测的数据,  $T_{n.5}$  记录传感器 2 的数据。其中  $T_n$  (不包括  $T_0$ ) 所探测的冠层为相邻分割区域的边界,即  $T_n$  既为前一分割区域的结束时刻也为下一分割区域的起始时刻,由于  $T_n$  与  $T_{n+1}$  的时间间隔为 1 s,则所分割的冠层区域的横向长度  $L$  为 30 cm;由图 3 可知,传感器 1 与传感器 3 之间的长度为 50 cm,因此冠层在平面上被分割为若干个 30 cm × 50 cm 的长方形区域。

2.2 冠层体积估算模型

由图 4 可知,在  $T_0$  时刻红外传感器阵列开始探测冠层,在  $T_1$  时刻,传感器阵列所探测过的冠层长度  $L$  为 30 cm;本节选取起始时间段  $T_0 \sim T_1$ ,结合喷施臂结构与冠层分割模型,构建如图 5 所示的冠层体积估算模型。



$$5(d_0 - d_3)x + 3(d_0 - d_1)y + 150z - 150(2d_0 - d_1 - d_3 + d_4) = 0 \quad (8)$$

由于点  $C$  为局部冠层的中心探测点, 根据点到平面的距离公式, 可得

$$d_p = \frac{75|-2d_0 + d_1 + 2d_2 + d_3 - 2d_4|}{\sqrt{25(d_0 - d_3)^2 + 9(d_0 - d_1)^2 + 150^2}} \quad (9)$$

式中  $d_p$ ——局部冠层中心点到横截面的距离, cm

故以横截面  $A_0B_0B_1A_1$  为四棱柱底面,  $d_p$  为高, 有

$$V_L \approx Sd_p \quad (10)$$

式中  $V_L$ ——局部冠层体积,  $\text{cm}^3$

在求出时间段  $T_0 \sim T_1$  所探测的局部冠层体积后, 以  $T_1$  为起始时刻,  $T_2$  为结束时刻, 按照上述方法继续求解时间段  $T_1 \sim T_2$  和之后时间段的局部冠层体积, 直到喷雾停止。

### 3 喷雾参数调节与控制系统设计

#### 3.1 喷雾距离调节

选用的喷嘴为扇形喷嘴(东莞市博利喷雾净化有限公司), 喷施角度为  $60^\circ$ , 流量为  $76 \text{ mL/s}$ 。喷雾距离与覆盖范围的关系如图 6 所示(图中虚线为角平分线)。

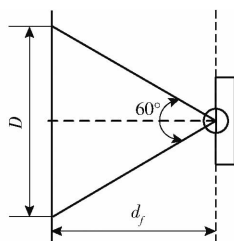


图 6 喷雾距离和覆盖范围

Fig. 6 Spraying distance and coverage

由图 6 可以看出, 在喷雾角度固定的情况下, 喷雾距离与喷雾覆盖范围的关系为

$$D = 2d_f/\sqrt{3} \quad (11)$$

式中  $D$ ——喷雾纵向覆盖范围, cm

$d_f$ ——喷雾距离, cm

如图 4 所示, 局部冠层最大纵向范围为  $50 \text{ cm}$ , 故在喷施前, 应调整喷雾距离  $d_f$ , 使得  $D$  为  $50 \text{ cm}$ , 从而使喷雾充分覆盖局部冠层。根据式(11)计算出最佳喷雾距离约为  $43 \text{ cm}$ 。

当施药系统行进至第 1 个喷施目标时, 即到达图 4 中的  $T_0$  时刻, 此时停止前进, 由于喷嘴与红外传感器阵列在同一平面, 故可将此时传感器 1 和 3 测得的距离的平均值近似为喷雾距离, 即

$$d_f = (d_0 + d_1)/2 \quad (12)$$

将测得的喷雾距离  $d_f$  与最佳喷雾距离对比自动进行调整, 若  $d_f > 43 \text{ cm}$ , 分支丝杆滑台则正向运动靠近冠层, 反之则反方向运动。分支丝杆滑台运动

的距离为

$$d_i = |d_f - 43| \quad (13)$$

式中  $d_i$ ——分支丝杆滑台运动距离, cm

$d_i < 10 \text{ cm}$  时, 运动速度  $v = 2 \text{ cm/s}$ ,  $d_i \geq 10 \text{ cm}$  时,  $v = 4 \text{ cm/s}$ 。

将喷雾距离调整至最佳后, 控制器重新采集记录  $T_0$  时刻传感器探测的数据, 施药系统继续前进, 直至喷施完当前目标。

由于同一果园中果树的特征与修枝方法一致, 故果树的形态差异较小, 因此施药系统在喷施下一目标时, 喷雾距离只需在原先的基础上根据公式(12)、(13)在行进中进行微调。调整时传感器的测距结果会受到影响, 但对冠层体积计算的最终结果影响甚小, 本文将微调过程中对冠层体积计算造成的影响忽略不计。

#### 3.2 喷雾量调节

冠层体积不同, 所需的喷雾量也要进行适当的调节, 从而降低农药的使用。为实现流量的精准控制, 本文选用流量比例调节阀(江西凯强实业有限公司)作为流量控制阀门, 该阀门通过改变  $0 \sim 10 \text{ V}$  范围内的输入电压来调节阀门开度;  $0 \sim 10 \text{ V}$  输入电压通过单片机控制 PWM 转电压模块提供。依据比例调节阀和 PWM 转电压模块的技术参数, 可推知占空比与喷嘴流量的关系为

$$Q = qP \quad (14)$$

式中  $Q$ ——喷嘴实际流量,  $\text{mL/s}$

$q$ ——喷嘴最大流量, 取  $76 \text{ mL/s}$

$P$ ——占空比

由图 4 可得, 在利用红外传感器阵列探测冠层时, 喷施区域在水平方向以  $30 \text{ cm}$  长度划分, 在估算出局部冠层体积后, 有

$$10^{-6} V_L u = Qt = qPt \quad (15)$$

式中  $t$ ——喷施局部冠层所用时间, 取  $1 \text{ s}$

$u$ ——单位体积冠层所需喷雾量,  $\text{mL/m}^3$

在文献[14]中  $u$  取  $100 \text{ mL/m}^3$ , 并指出  $u$  的取值往往根据药剂生产商的推荐用药量、田间试验或经验确定, 本文为了使试验效果更加明显, 提高系统喷施过程中的稳定性, 取  $u$  为  $500 \text{ mL/m}^3$ , 由此可得占空比与冠层体积的关系为

$$P = 5 \times 10^{-4} V_L / 76 \quad (16)$$

利用公式(16)即可根据估算出的局部冠层体积计算出流量比例调节阀所需的 PWM 占空比。为减少比例阀的调节时间, 在  $T_0$  时刻将其开度设定为  $1/3$ ; 如图 4、5 所示, 由于在  $T_1$  时刻, 施药系统还需运动  $1 \text{ s}$  喷嘴才能到达  $T_0$  时刻所检测的冠层处开始喷施, 在这  $1 \text{ s}$  的运动过程中, 比例阀根据占空比进



行相应的调整。

### 3.3 施药控制系统设计

本文将施药控制系统设计为手机 APP 控制系统和变量控制系统。手机 APP 控制系统通过控制板上的 ESP8266-01 模块与手机建立通讯连接,并利用手机 APP VLAN 控制整个系统。手机 APP 控制系统应用于喷施臂的运动测试以及喷施前喷施臂的调整。在喷施前,利用本项目组研究成果<sup>[15-16]</sup>,使用 Kinect 传感器获得果树冠层位置信息,通过改变可移动平台的高度使中部喷嘴校准到冠层中心位置,其校准误差范围为 3~4 mm,利用手机 APP 控制系统调整上下两部分垂直丝杆滑台使上下两个喷嘴运动到合适的喷施位置,其运动误差范围为 4~5 mm。

变量控制系统应用于施药系统前进时,如图 4 所示,在  $T_0$  时刻之前,系统通过传感器 2 检测冠层,

当检测到距离时,水泵电磁阀开启,对应部分比例阀开度由 0 逐渐调为 1/3,喷施对应区域冠层;当上、中、下 3 部分喷施臂都到达  $T_0$  时刻时,水泵电磁阀断开,系统停止前进,调整喷雾距离和比例阀开度;在  $T_1$  时刻,微控制器根据前文提到的冠层体积估算方法计算出局部冠层体积,计算出占空比  $P$ ;在  $T_2$  时刻,喷嘴到达  $T_0$  时刻所探测冠层处,此时比例阀已调整完毕,开始喷施  $T_0 \sim T_1$  时间间隔内所探测的局部冠层;按照如上方法喷施不同时间间隔所探测的局部冠层;在喷施过程中,若在  $T_n$  时刻传感器 1 和 3 都测有数据,在  $T_{n+k}$  时刻( $k < 1$ )传感器 1 和 3 没有测得数据,则在喷施完  $T_{n-1} \sim T_n$  时间间隔内冠层区域后,流量比例阀开度保持不变,喷施时间  $k(s)$  后停止喷施,此时所有冠层喷施完毕。施药控制系统原理如图 7 所示。

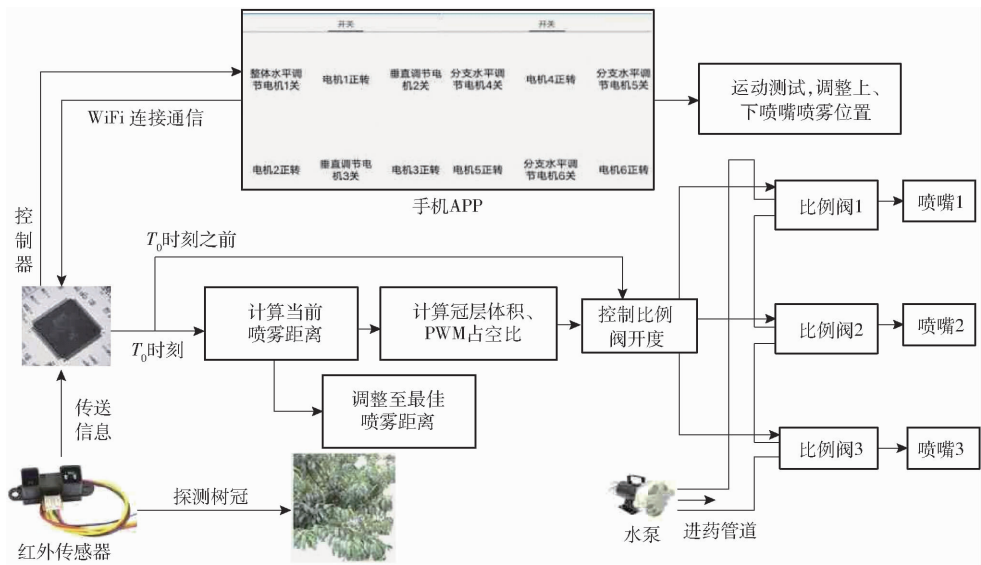


图 7 施药控制系统原理图

Fig. 7 Schematic of spraying control system

## 4 喷施臂运动与冠层体积估算模型准确性测试

由于在进行喷施试验时,喷施臂会进行调整,使喷嘴达到合适的喷施位置;在喷施过程中,分支丝杆滑台也会运动以达到最佳喷雾距离;而喷雾量的调节主要是根据估算的冠层体积决定的。因此喷施臂的运动效果与冠层体积估算模型的准确性都会对喷施效果产生影响,本文对此分别进行测试。

### 4.1 喷施臂运动测试

当系统工作时,控制器会根据喷雾距离调整方案和公式(13)计算出分支丝杆滑台运动的距离  $d_i$ 。在运动过程中,喷施臂的运动响应时间、运动实际耗时等都会影响整个施药系统的实时性。因此本文在户外对喷施臂的运动响应时间、实际耗时进行了测

试。喷施臂运动测试如图 8 所示。

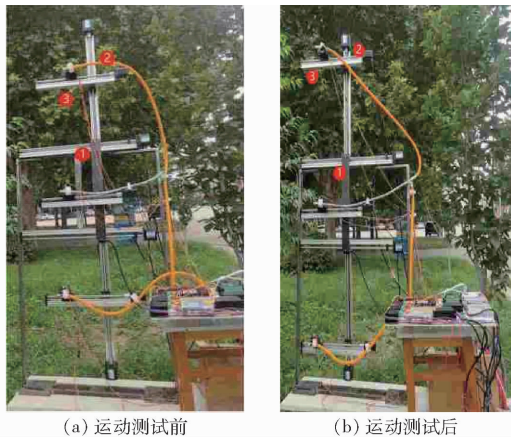


图 8 喷施臂运动测试

Fig. 8 Spraying arm movement test

如图 8a 中的红色标注所示,选取 3 个测试点,

利用手机 APP 控制系统控制其运动,运动后 3 个测试点的位置如图 8b 所示。测试结果如表 1 所示。

表 1 喷施臂运动测试结果

Tab. 1 Spraying arm movement test results

| 测试点 | 移动距离/cm | 理论耗时/s | 实际耗时/s |
|-----|---------|--------|--------|
| 1   | 10      | 10     | 10.3   |
| 2   | 20      | 10     | 10.2   |
| 3   | 5       | 2.5    | 2.5    |

由表 1 可知,喷施臂在接收到运动指令时会瞬间响应,实际耗时与理论耗时几乎一致,因此在施药过程中不会出现额外耗时的情况,最大程度保障了整个施药系统的实时性。

4.2 冠层体积估算模型准确性检测

为检测冠层体积估算模型的准确性,利用仿真桃叶制作了 3 个不同体积的冠层,从仿真桃树选取了 3 个不同体积的冠层,首先根据何诚等<sup>[17]</sup>的传统树冠体积计算方法计算出其大致体积(红框区域),然后利用基于红外传感器阵列构建的冠层体积估算模型进行体积计算。选取的冠层如图 9 所示,测量结果如表 2 所示。

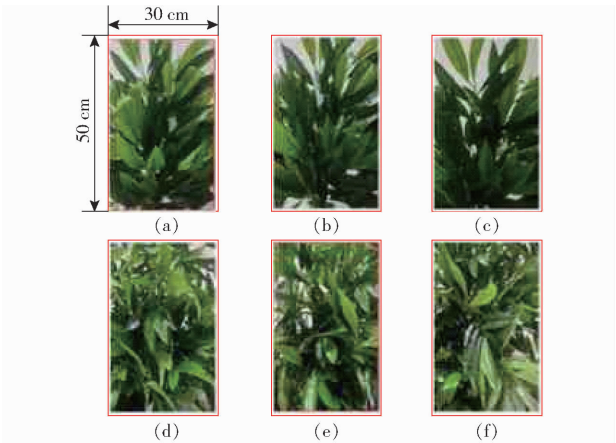


图 9 不同体积冠层

Fig. 9 Tree crown with different volumes

表 2 体积测量结果

Tab. 2 Volume measurement results

| 冠层   | 传统计算体积/<br>cm <sup>3</sup> | 模型估算体积/<br>cm <sup>3</sup> | 相对误差/<br>% |
|------|----------------------------|----------------------------|------------|
| 图 9a | 34 750                     | 37 312                     | 7.37       |
| 图 9b | 21 400                     | 24 189                     | 13.03      |
| 图 9c | 20 550                     | 18 457                     | 10.18      |
| 图 9d | 38 050                     | 42 834                     | 12.57      |
| 图 9e | 36 900                     | 31 217                     | 15.40      |
| 图 9f | 37 200                     | 40 578                     | 9.08       |

由表 2 可得,冠层体积估算模型求得的体积与传统方法计算出的体积相比,相对误差为 11.27%,因此该模型可以准确估算当前喷施区域的冠层

体积。

5 喷施试验

5.1 试验条件

为检验施药系统的喷雾效率,本文在室外进行了系统的喷施测试试验,地点选在河北农业大学校园空旷处,时间为 2022 年 3 月 19—21 日。试验选取 3 棵具有明显冠层差异的仿真桃树,由于该系统还处于初步研发阶段,在验证其喷施效率前还没有设计专用的承载工具,故在本试验中将施药系统放置在一个可移动工作台上。

5.2 试验方法

在喷施前,将水敏试纸均匀布置在桃树冠层的顶层、中层、底层;每次喷施试验开始前药箱中液体的体积均为 3 L,喷施结束后,记录药箱中剩余液体的体积。

本文设计 2 组喷施试验,第 1 组喷施试验为定距自动对靶喷雾,系统没有安装红外传感器阵列,仅使用一个红外测距传感器探测树冠,在检测到树冠后水泵开启,开始持续喷雾。第 2 组喷施试验为变距自动对靶喷雾,变量控制系统会根据冠层分割模型和冠层体积估算模型计算出分支丝杆滑台应该移动的距离并生成正确的占空比,在调整完喷雾距离和比例阀的开度后,水泵开启,开始喷施,直至喷施完所有树冠。

为提高试验的对比性,每组喷施试验分别进行 4 次,喷施过程中施药系统的平均前进速度均为 30 cm/s。在每次喷施结束后,将不同冠层区域的水敏纸收集起来分别保存在干燥的试验袋中,同时记录药箱中剩余液体的体积,准备后续的分析工作。试验布置与喷雾效果如图 10 所示。



图 10 试验布置与喷雾效果

Fig. 10 Test layout and spray effect diagram

5.3 试验结果与分析

根据上述试验方法进行两组喷雾对比试验后,对完全干燥的水敏纸按照不同冠层区域分别进行喷雾附着分析。首先根据 JB/T 9782—2014《植保机械通用试验方法》中的要求与方法,对收集的水敏纸进行分级,按照药液附着面积与观察面积的比例

将水敏纸分为 0~4 共 5 个等级。本试验中大部分水敏纸的等级可以通过观察直接判定,对于无法用肉眼判断的水敏纸,利用 Image J 软件对药液附着面积(即水敏纸上的深色区域)进行计算并分级。水敏纸药液附着面积分析如图 11 所示。

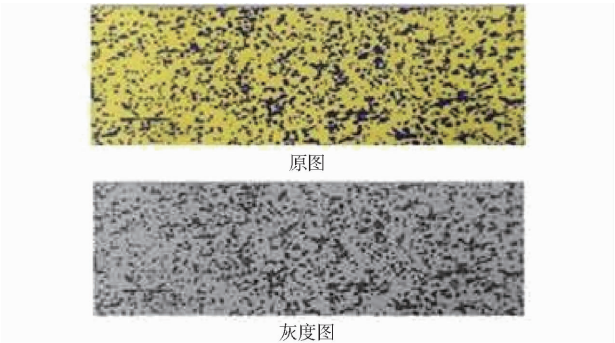


图 11 喷雾附着面积分析

Fig. 11 Spray deposition analysis

将所有的水敏纸分级后,根据附着率计算公式计算两组试验中不同冠层区域的喷雾附着率。定距和变距两种喷雾模式下喷雾附着率如表 3 所示。

表 3 不同喷雾模式喷雾附着率

| Tab. 3 Spray deposition rates for different modes |      |      |         |        |        |
|---------------------------------------------------|------|------|---------|--------|--------|
| 喷雾模式                                              | 试验序号 | 果树编号 | 喷雾附着率/% |        |        |
|                                                   |      |      | 顶层      | 中层     | 底层     |
| 定距对靶喷雾                                            | 1    | ①    | 64. 29  | 75. 00 | 67. 86 |
|                                                   |      | ②    | 71. 43  | 75. 00 | 67. 86 |
|                                                   |      | ③    | 64. 29  | 71. 88 | 71. 43 |
|                                                   | 2    | ①    | 67. 86  | 68. 75 | 75. 00 |
|                                                   |      | ②    | 71. 43  | 71. 88 | 64. 29 |
|                                                   |      | ③    | 75. 00  | 81. 25 | 67. 86 |
|                                                   | 3    | ①    | 71. 43  | 71. 88 | 71. 43 |
|                                                   |      | ②    | 64. 29  | 78. 13 | 75. 00 |
|                                                   |      | ③    | 60. 71  | 71. 88 | 71. 43 |
|                                                   | 4    | ①    | 71. 43  | 81. 25 | 75. 00 |
|                                                   |      | ②    | 67. 86  | 75. 00 | 71. 43 |
|                                                   |      | ③    | 71. 43  | 71. 88 | 71. 43 |
| 变距对靶喷雾                                            | 1    | ①    | 78. 57  | 84. 38 | 82. 14 |
|                                                   |      | ②    | 85. 71  | 87. 50 | 85. 71 |
|                                                   |      | ③    | 75. 00  | 90. 63 | 85. 71 |
|                                                   | 2    | ①    | 75. 00  | 84. 38 | 89. 29 |
|                                                   |      | ②    | 85. 71  | 90. 63 | 78. 57 |
|                                                   |      | ③    | 89. 29  | 93. 75 | 82. 14 |
|                                                   | 3    | ①    | 82. 14  | 84. 38 | 89. 29 |
|                                                   |      | ②    | 78. 57  | 93. 75 | 75. 00 |
|                                                   |      | ③    | 85. 71  | 90. 63 | 82. 14 |
|                                                   | 4    | ①    | 85. 71  | 90. 63 | 82. 14 |
|                                                   |      | ②    | 82. 14  | 84. 38 | 78. 57 |
|                                                   |      | ③    | 78. 57  | 90. 63 | 85. 71 |

根据每次喷施试验结束后所记录的药液剩余量,计算不同喷施模式下的用药量。定距和变距两种喷雾模式下用药量如表 4 所示。根据表 3 求得的

不同喷雾模式下的平均喷雾附着率如表 5 所示。

表 4 不同喷雾模式的用药量

| Tab. 4 Dosage of different spray modes |      |        |         |
|----------------------------------------|------|--------|---------|
| 喷雾模式                                   | 试验序号 | 用药量/L  | 平均用药量/L |
| 定距对靶喷雾                                 | 1    | 2. 089 | 2. 106  |
|                                        | 2    | 2. 131 |         |
|                                        | 3    | 2. 105 |         |
|                                        | 4    | 2. 097 |         |
| 变距对靶喷雾                                 | 1    | 1. 453 | 1. 469  |
|                                        | 2    | 1. 478 |         |
|                                        | 3    | 1. 469 |         |
|                                        | 4    | 1. 475 |         |

表 5 不同喷雾模式的平均喷雾附着率

| Tab. 5 Average spray deposition rates for different spray modes |      |           |           |
|-----------------------------------------------------------------|------|-----------|-----------|
| 喷雾模式                                                            | 试验序号 | 冠层平均附着率/% | 整体平均附着率/% |
| 定距对靶喷雾                                                          | 1    | 69. 89    | 71. 26    |
|                                                                 | 2    | 71. 48    |           |
|                                                                 | 3    | 70. 69    |           |
|                                                                 | 4    | 72. 97    |           |
| 变距对靶喷雾                                                          | 1    | 83. 93    | 84. 56    |
|                                                                 | 2    | 85. 42    |           |
|                                                                 | 3    | 84. 62    |           |
|                                                                 | 4    | 84. 28    |           |

由表 4、5 可知,与定距对靶喷雾相比,变距对靶喷雾的药液附着率可以提高 18. 66%,节约 30. 25% 的药液。由此可见基于冠层体积估算的变距对靶喷雾可以提高喷雾附着率,减少农药使用量,从而减轻农药对环境的污染。

6 结论

(1)设计的施药系统可以满足不同特征果树的喷施需求。在喷施前,喷嘴可调整到合适的位置;在施药过程中,喷施臂的运动可以瞬间响应,并且移动速度与设定相同,可最大程度保证系统的实时性;通过调整喷雾距离,可使喷雾充分覆盖当前探测区域的冠层。

(2)通过选取 6 个不同体积的冠层对冠层体积估算模型的准确性进行了测试,与传统方法计算结果相比,其相对误差为 11. 27%,可以准确估算冠层体积。

(3)进行了定距对靶喷雾和变距对靶喷雾两组试验,并利用水敏纸和 Image J 软件进行了喷雾附着率的测定。试验结果表明,基于冠层体积估算模型的变距喷雾比定距喷雾的喷雾附着率提高 18. 66%,节约 30. 25% 的药液,从而证明该施药系统可以提高农药利用率,减少农药的使用。



## 参 考 文 献

- [1] 郑加强, 徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 1–16.  
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1–16. (in Chinese)
- [2] HE X, ZENG A, LIU Y, et al. Precision orchard sprayer based on automatically infrared target detecting and electrostatic spraying techniques[J]. The International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2011, 4(1): 35–40.
- [3] 姜红花, 白鹏, 刘理民, 等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 189–195.  
JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 189–195. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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.
- [6] 薛秀云, 许旭锋, 李震, 等. 基于叶墙面积的果树施药量模型设计及试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 16–22.  
XUE Xiuyun, XU Xufeng, LI Zhen, et al. Design and test of variable spray model based on leaf wall area in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 16–22. (in Chinese)
- [7] 姜红花, 牛成强, 刘理民, 等. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 298–307.  
JIANG Honghua, NIU Chengqiang, LIU Limin, et al. Design and experiment of air volume control system of orchard multi-pipe air sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 298–307. (in Chinese)
- [8] OSTERMAN A, GODEŠA T, STOPAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 175–182.
- [9] 刘雪美, 刘兴华, 崔慧媛, 等. 作物冠层雾滴沉积研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 1–20.  
LIU Xuemei, LIU Xinghua, CUI Huiyuan, et al. Research progress and trend analysis of crop canopy droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 1–20. (in Chinese)
- [10] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80–92.  
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 80–92. (in Chinese)
- [11] LI L L, HE X K, SONG J L, et al. Design and experiment of variable rate orchard sprayer based on laser scanning sensor[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2018, 11(1): 101–108.
- [12] 马驰, 李光林, 李晓东, 等. 丘陵山地柑橘果园多方位自动喷药装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 31–41.  
MA Chi, LI Guanglin, LI Xiaodong, et al. Development of multi-orientation automatic spraying device for citrus orchards in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 31–41. (in Chinese)
- [13] 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 CSAE, 2017, 33(1): 70–76. (in Chinese)
- [14] 闫成功, 徐丽明, 袁全春, 等. 基于双目视觉的葡萄园变量喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 13–22.  
YAN Chenggong, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Design and experiments of vineyard variable spraying control system based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(11): 13–22. (in Chinese)
- [15] XIAO K, MA Y J, GAO G D. An intelligent precision orchard pesticide spray technique based on the depth-of-field extraction algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 133: 30–36.
- [16] GAO G D, XIAO K, LI J P. Precision spraying model based on Kinect sensor for orchard applications[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(2): 291–298.
- [17] 何诚, 张思玉, MATTEO C, 等. 基于方格网法的树冠体积测算方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 308–315.  
HE Cheng, ZHANG Siyu, MATTEO C, et al. Algorithm of crown volume with square grid-based method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 308–315. (in Chinese)