

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.04.027

果园喷雾机喷头自适应运动与自动喷雾控制系统研制与试验^①

陈 魁, 李光林, 李晓东, 马 驰

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 为了在丘陵山地果园施药过程中达到自动对靶、精确施药、提高农药的利用率、减少对环境污染的目的, 利用多个超声波传感器有效组合, 识别果树位置自动调整喷头高度及距离; 转动机构能自动调整喷头喷洒方向, 使喷头能更好地对准果树, 提高农药喷洒效果; 系统能根据有无果树实时控制喷头开闭, 降低农药损耗. 试验结果表明, 在车速为 0.3 m/s 的情况下, 喷头离树的距离能较好地控制在 0.25~0.75 m 范围, 并能根据果树高矮自动调节喷头高度; 转动机构使喷头始终对准果树, 使果树侧面农药覆盖率从 10% 提高到 30% 以上. 该系统实现了喷头自动对靶功能, 自动适应果树形态变化; 喷头转动机构弥补了系统滞后及超声波传感器分辨率不高的缺点, 提高了树冠侧面的喷洒效果.

关键词: 丘陵山地; 果园; 超声; 自动对靶; 精确喷药

中图分类号: S491

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)04-0178-07

随着我国经济的发展, 果树种植业发展很快, 种植面积及产量迅速上升. 2013 年, 我国水果种植面积超过 1 000 万公顷, 产量达到 2 亿吨. 病虫害防治是水果生产过程中的重要环节, 施药作业大约占到果园日常管理工作的 30%, 施药质量直接影响到水果品质和产量. 目前, 我国果园总体机械化水平较低, 施药技术相对落后, 大部分作业依赖人工完成^[1-4]. 传统施药作业以背负式手动喷药器为主, 多数打药机农药利用率低, 部分已经不适应生产的需求^[5-8]. 而且, 农药的过量施用, 对土壤、水质造成大量污染^[9-10]. 我国在上世纪 80 年代引进风送式喷药机, 风送喷雾与常规喷枪相比, 极大地提高了药液在靶标上的覆盖密度与均匀度^[11]. 目前国内果园喷药机大多无自动对靶功能, 由于某些果树种植间距较大, 农药利用率仍有很大的提升空间.

国外对精细化喷药机的研究起步较早, 利用红外、超声、激光、图像处理等技术获取靶标信息, 确定喷雾方案^[12]. Ch. G'ee 等^[13]基于图像处理技术对作物和杂草进行区分; Solanelles F 等^[14]使用风送式喷雾机, 并结合超声波传感器识别果树, 控制喷头开闭, 实现对靶施药; Aljaž Osterman 等^[15]利用激光扫描仪精确地测得树冠轮廓数据, 调整机械臂到最佳位置进行喷洒, 达到精准施药的目的. 近些年, 国内学者也进行了研究并取得了较大成果. 翟长远等^[16]基于红外传感器设计了幼树对靶器; 陈志刚等^[17]利用微波技术探测靶标; 张发军等^[18]运用图像处理技术实现对靶. 但这些研究都集中在喷头的水平和垂直移动, 很少涉及喷头的自适应转动.

本文以手扶式履带车为载体, 利用超声波传感器有效组合识别果树位置, 利用滑轨控制喷杆水平及垂

① 收稿日期: 2016-04-05

基金项目: 重庆市科委重点项目(CSTC2014XXKF0073); 中央高校科研业务费(2120130864).

作者简介: 陈 魁(1991-), 男, 浙江台州人, 硕士研究生, 主要从事自动控制与机电一体化研究.

通信作者: 李光林, 教授, 博士研究生导师.

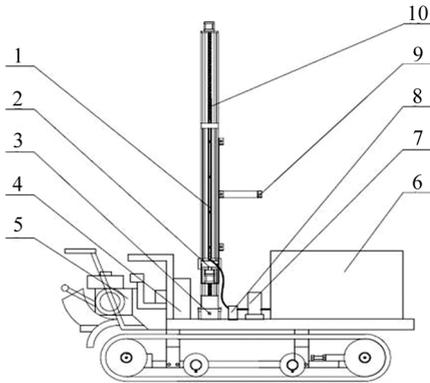
直移动,加入转动机构调整喷头角度,实现喷头多自由度运动控制,减少系统滞后造成的影响,提高果树树冠侧面部分的喷洒效果,并进行室外控制与喷洒效果试验.

1 整体方案设计

1.1 系统结构组成

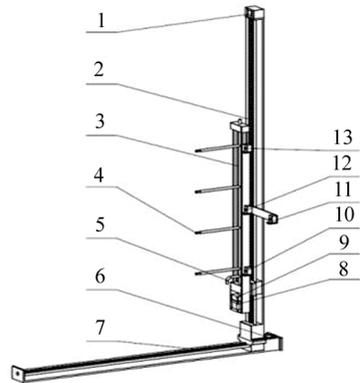
整个装置以手扶式履带车为载体,喷雾机的整体系统结构如图 1 所示.主要由水平移动机构、垂直移动机构、转动机构、喷杆、传感器组、药箱、水泵、电磁阀、控制器及电源构成.

其中关键部件包括水平移动机构、垂直移动机构、喷头转动机构、喷杆及传感器组,如图 2 所示.喷杆底部连接步进电机,实现转动功能;喷杆及转动机构置于垂直滑轨上,水平滑轨及垂直滑轨实现喷杆的水平和垂直移动;超声波传感器组安装于喷杆侧面可随喷杆移动,用于识别果树.垂直丝杆导轨长 1.7 m,水平丝杆导轨长 1.5 m,喷杆长度 1.1 m,喷头延伸出的距离为 0.3 m,喷杆长度及喷头数量可根据实际使用需要自由组装.转动机构电机步距角为 1.8° ,扭力为 $1.2 \text{ N} \cdot \text{m}$,减速箱减速比为 1:10.超声波传感器型号为 KS-109,最大识别距离为 10 m,波束角在 10° 以内,1号传感器及 3号传感器分别安装于与底部喷头及顶部喷头同等高度位置.在车速为 0.3 m/s 的情况下,2号传感器与 4号传感器之间的距离设为 0.3 m.



1. 喷杆; 2. 转动机构; 3. 水平移动机构; 4. 电源及控制器; 5. 履带车; 6. 药箱; 7. 水泵; 8. 电磁阀; 9. 超声波传感器; 10. 垂直移动机构.

图 1 喷雾机构结构



1. 垂直轴电机; 2. 垂直轴丝杆轨道; 3. 喷杆; 4. 喷头; 5. 进药口; 6. 水平轴电机; 7. 水平轴丝杆轨道; 8. 转动轴电机; 9. 减速器; 10. 1号超声波传感器; 11. 4号超声波传感器; 12. 2号超声波传感器; 13. 3号超声波传感器.

图 2 关键部件

喷雾机实物图如图 3 所示.

1.2 工作原理

柱塞式水泵用车载 220 V 交流电源供电.将 220 V 交流电经过开关电源降为 24 V 直流,为步进电机及电磁阀供电.24 V 直流电经过 LM7805 降压至 5 V 给传感器供电;再用 LM1117 将 5 V 电压降至 3.3 V 给单片机供电,单片机均选用 STM32F103CBT6.

通过超声波传感器测得果树距离,数据经过处理后,利用 CAN 总线向主控系统发送数据.主控系统接收数据进行处理,发送指令到电机驱动系统控制电机转动调整喷杆位置及角度,并控制电磁阀来实现喷头的开闭.系统结构框图如图 4.



图 3 喷雾机实物

2 控制方案

2.1 总体控制措施

4 个超声波测距模块组合探测果树距离, 并将测得的数据通过 CAN 总线发送到主控制系统. 为避免传感器之间的相互干扰, 利用中断方式触发探测, 即 1 号传感器完成探测后, 2 号传感器收到报文触发中断并开始探测, 3 号、4 号依照以上方式依次进行, 使 4 个传感器有序地进行探测. 当传感器所反馈的数据小于 2 m 时, 则认为该传感器探测到了果树. 只要有一个传感器探测到果树则打开电磁阀进行喷药. 同时, 以 4 个传感器所反馈数据中的最小值作为距离判断的主要依据, 控制水平滑轨的移动方向及速度, 调整喷杆离果树的距离. 1 号及 3 号传感器来判断果树树冠的高度, 控制垂直滑轨调整喷杆的高度. 根据 2 号及 4 号传感器反馈的数据控制转动轴电机转动, 经减速器减速后带动喷杆旋转, 使喷头始终对准果树. 系统总体流程如图 5 所示:

2.2 控制算法

水平方向控制依据传感器组反馈的数据选取最小的作为距离偏差 E ; 滑轨移动速度为偏差变化率 EC , 作为输入变量; 输出量为滑轨移动速度 U . 建立控制规则表如表 1 所示. 水平方向滑轨 1 档移动速度为 0.05 m/s, 2 档速度为 0.1 m/s.

表 1 控制规则表

E/m	EC				
	N2	N1	Z	P1	P2
$E \leq 0.6$	N2	N2	N2	N2	N2
$0.6 < E \leq 0.7$	N2	N1	N1	N1	N1
$0.7 < E \leq 0.8$	N1	N1	Z	Z	Z
$0.8 < E \leq 0.9$	Z	Z	Z	P1	P1
$0.9 < E \leq 1.0$	P1	P1	P1	P1	P2
$E > 1.0$	P2	P2	P2	P2	P2

表中: N2 表示 2 档后退, N1 表示 1 档后退, Z 表示停止, P1 表示 1 档前进, P2 表示 2 档前进.

垂直方向控制规则为当 1 号和 3 号传感器都未探测到树冠时, 电机停止; 当 1 号探测到果树 3 号未探测到果树, 则电机正转, 喷杆下移; 当 1 号未探测到果树 3 号探测到果树, 则电机反转, 喷杆上移. 垂直方向滑轨移动速度为 0.15 m/s. 流程图如图 6:

角度控制依据 2 号及 4 号传感器反馈的数据进行判断, 依据 2 个传感器是否探测到果树来确定喷杆相对果树所在的位置, 调整喷头的方向. 传感器探测完整的一组数据所需时间为 0.36 s; 2 号与 4 号传感器之间的距离为 0.3 m; 履带车低速行驶的速度为 0.3 m/s; 转动轴最大可转动角度为 60° , 转速为 $\frac{1}{6} \pi \text{ rad/s}$. 转动轴电机控制流程图如图 7 所示:

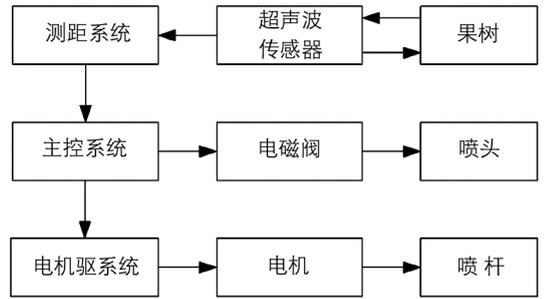


图 4 自动喷雾机控制系统结构框图

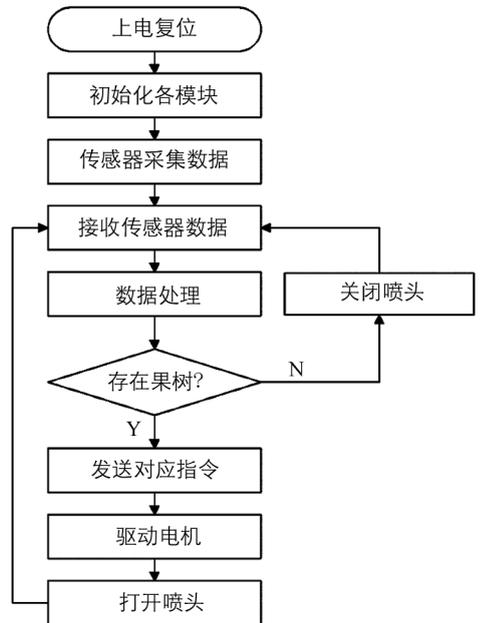


图 5 系统控制流程图

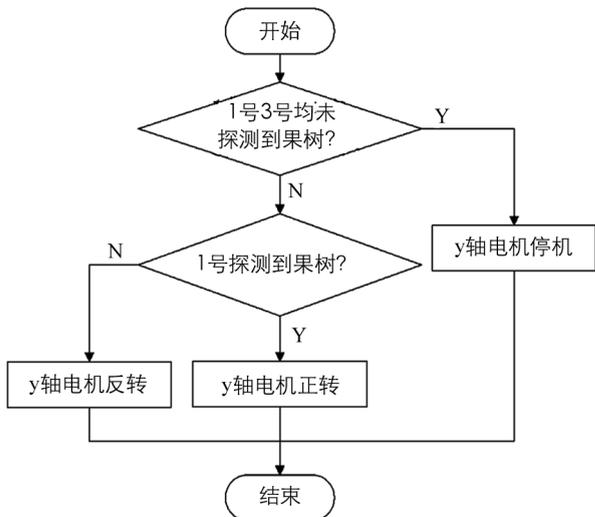


图 6 y 轴电机控制流程

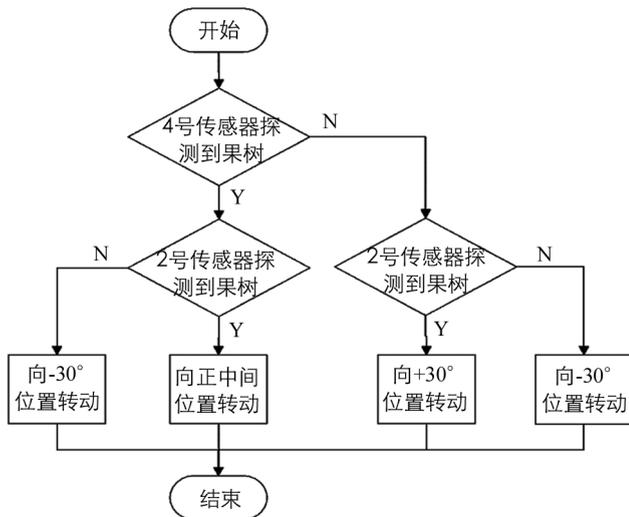


图 7 转动轴电机控制流程

转动机构运动状态如图 8 所示. 设置喷头初始方向为斜向前 30° , 4 号传感器探测到果树边缘, 考虑传感器数据和喷头打开存在滞后及受到传感器波束角的影响, 此时, 喷杆离树冠右边缘的水平距离为 S_1 , 计算公式为

$$S_1 = d \times \sin\theta + l - (t_s + t_v)v \quad (1)$$

离开喷洒区后, 2 号传感器已探测不到果树, 停止喷洒. 此时, 喷杆离树冠左边缘的水平距离为 S_2 :

$$S_2 = d \times \sin\theta + t_s v \quad (2)$$

其中, d 为传感器探测到离树冠的距离, θ 为传感器的波束角, l 为 2 号传感器与 4 号传感器之间的距离, t_s 为传感器的滞后时间, t_v 为喷头完全打开所需的时间, v 为车行驶速度.

在果树边缘处 d 为 $0.6 \sim 1$ m, 传感器波束角为 10° , 车速为 0.3 m/s, 设置 l 为 0.3 m. 此时, S_1 为 $0.16 \sim 0.23$ m, S_2 为 $0.21 \sim 0.28$ m.

3 性能试验

性能试验主要为了验证传感器的性能, 喷杆的喷洒幅度, 各部件的运动控制灵敏度, 整个系统的延时及整机室外使用效果.

3.1 室内试验

3.1.1 传感器性能测定

选择靶标为 100×100 mm 的方形硬纸板. 以超声波传感器位置作为原点, 每隔 0.25 m 放置靶标, 水平移动靶标直到传感器无法探测到靶标为止, 记录此时纸板边缘到传感器中心轴的距离^[19]. 每个位置重复 5 次取平均值, 得到超声波的探测范围如图 9 所示. 试验表明, 超声波传感器探测物体距离在 4 m 范围内时, 波束角小于 10° , 物体距离越近分辨率越高.

3.1.2 喷杆喷幅测定

根据 JB/T9782-2014, 在室内无风环境下, 喷嘴离地面高度为 500 mm, 在 1.5 MPa 的压力下分别选取孔径为 $0.6, 0.7, 0.8$ mm 的喷头进行喷雾, 测量喷洒到地面上的药液实际幅宽, 试验示意图如图 10 所示, 试验结果如表 2. 在喷杆上安装孔径为 0.6 mm 以上的喷头喷幅大于 1.2 m, 满足室外试验需求, 本装备安装孔径为 0.8 mm.

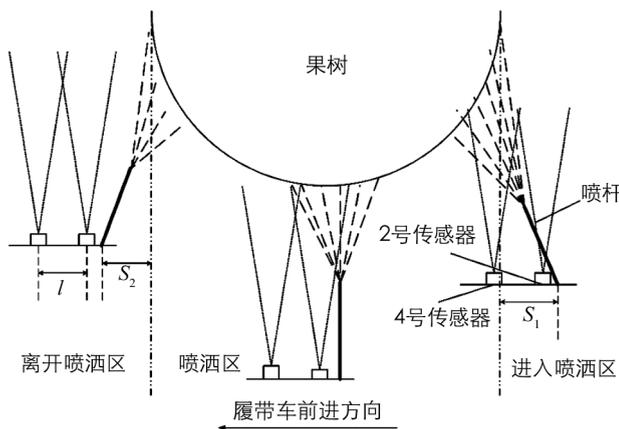


图 8 转动机构运动状态

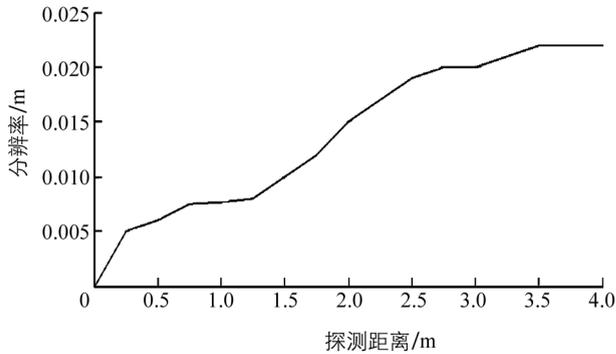


图9 波束角测定

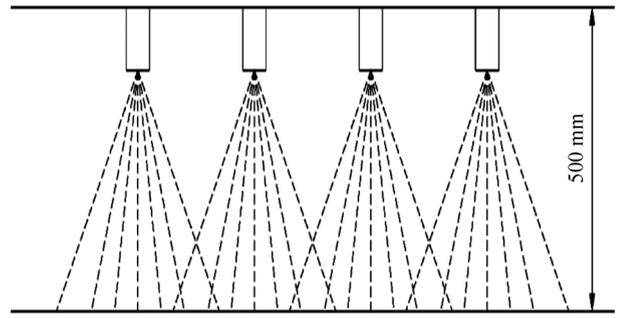


图10 喷杆喷幅测定

表2 喷杆喷幅测定表

孔径/mm	喷 幅/m			
	第一组	第二组	第三组	平均值
0.6	1.22	1.28	1.23	1.24
0.7	1.26	1.25	1.30	1.27
0.8	1.34	1.33	1.39	1.35

3.1.3 执行机构性能试验

利用秒表测试水平移动、垂直移动及转动最大行程的运行时间,分别测试5次取平均值,所得的数据如表3所示,水平移动速度为0.1 m/s,垂直移动速度为0.15 m/s,转动轴转动速度为 $\frac{1}{6}\pi$ rad/s,与预设值一致,达到既定效果。

表3 执行机构性能试验表

动 作	最大行程	所需时间/s
水平移动/m	0.6	6.2
垂直移动/m	1.2	8.2
转动/ $^{\circ}$	60	2.0

3.1.4 系统延时测定

整个喷药系统的延时主要由距离测量所需的时间与喷头启动的滞后所造成。

每一个传感器完成一次探测的最长时间需要0.083 s,为了避免传感器之间的相互干扰,系统设定4个传感器依次探测,探测一组数据的时间为0.36 s,试验所测得的时间与设定的一致。

水泵压力为1.5 MPa,管道充满水的情况下,打开电磁阀,喷头完全打开的时间如表4所示:

表4 喷头启动所需时间表

孔径/mm	时 间/s			
	第一组	第二组	第三组	平均值
0.6	0.4	0.4	0.5	0.43
0.7	0.5	0.5	0.4	0.46
0.8	0.5	0.4	0.5	0.46

整个系统识别到果树到打开喷头的最大滞后时间为0.82 s;喷头关断时只考虑传感器造成的滞后,最大滞后为0.36 s,能够满足应用需求。

3.2 室外试验

室外试验以五棵桂花树为目标,树高约2.2 m,树冠直径约1.6 m.小车以0.3 m/s的速度行驶。

3.2.1 整机性能试验

喷杆在进入喷洒区前0.1~0.3 m处,4号传感器探测到果树,喷头逆时针转动并对准果树开始喷药;

执行机构根据离果树的距离及果树高矮开始自动调整喷杆的位置及高度;进入喷洒区喷杆喷头自动调整到正对果树状态;在离开喷洒区前,4号传感器已探测不到果树,喷杆开始按顺时针转动重新调整姿态,使喷头转动对准果树;在喷杆离开喷洒区域 0.15~0.33 m 处,所有传感器均无法探测到果树,停止喷药,水平及垂直运动机构停止运动,转动机构复位

在整个运动过程中,喷头离果树的距离大于 0.6 m 时,喷杆向果树方向移动;距离小于 0.4 m 时,喷杆向后移动;喷头离果树的距离保持在 0.25~0.75 m 范围内.果树较矮时,喷杆向下移动,喷头最低可喷洒到 0.7 m 处树冠;果树较高时,喷杆向上移动,喷头最高可喷洒到 2.4 m 处.喷头在喷洒过程中始终指向果树.

3.2.2 喷洒效果试验

覆盖率对比试验以五棵桂花树为目标,在每棵树冠上、中、下的每层平面内均布 9 个采样点,用水敏试纸承接雾滴.加入转动机构之后农药覆盖率为未加转动机构情况下进行对比,得到的结果如表 5.

表 5 覆盖率对比表

平均覆盖率/%	左侧	正中	右侧
未加转动机构	10.7	50.3	11.3
加入转动机构	30.3	52.2	33.1

试验结果表明,加入转动后侧面喷洒平均覆盖率明显提高,左侧由 10.7% 提高到 30.3%,右侧由 11.3% 提高到 33.1%,正面喷洒效果基本不变.利用超声波传感器有效组合,喷头不仅能够根据果树形态自动调整位置,使喷洒较均匀,而且还能显著提高侧面喷洒效果,提高了农药的利用率,实现了喷头自动控制 and 自适应的目标.

4 结 论

1) 本文利用超声波传感器探测果树的位置、高度,通过控制 3 个电机实现了喷杆的上下、水平移动及喷头转动,并控制电磁阀实现喷头的开闭.

2) 传感器探测 4 m 范围内的物体时,波束角小于 10° .喷杆喷幅在 1.2 m 以上,整个传感器测距系统延时为 0.36 s,喷头完全打开所需时间为 0.46 s.

3) 超声波传感器由于有一定的波束角,避免了由于树冠中的空隙存在所导致电磁阀频繁通断的问题.

4) 加入转动机构后,使喷头能更好地对准果树进行喷药,有效地提高了果树侧面的喷洒效果,并减少了由传感器波束角较大及系统延时造成的农药浪费.

5) 对于喷洒浓度要求较高的喷洒需求可以增加喷头的数量,若果树树冠较大可考虑延长喷杆增大喷幅.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 吕国强,芮洪梅,左雯,等.几种表面活性剂对农药雾滴在小白菜叶面上蒸发的影响规律研究[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(3):1-8.
- [5] 李倩,宋月鹏,高东升,等.我国果园管理机械发展现状及趋势[J].农业装备与车辆工程,2012,50(2):1-3,7.
- [6] 付大平,田耘.我国植保机械的发展状况与前景分析[J].农业与技术,2012,32(11):49-50,76.
- [7] 孟祥金,沈从举,汤智辉,等.果园作业机械的现状与发展[J].农机化研究,2012,34(1):238-241.
- [8] 曹兴乔.我国植保机械发展现状及趋势分析[J].农业科技与装备,2011(12):63-64.
- [9] 何雄奎,严苛荣,储金宇,等.果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J].农业工程学报,2003,19(6):78-80.

- [10] 李 丽, 李 恒, 何雄奎, 等. 红外靶标自动探测器的研制及试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 159–163.
- [11] 周良富, 傅锡敏, 丁为民, 等. 组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 64–71.
- [12] 周 伟. 对靶变量喷雾装置及其控制系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [13] GÉE C, BOSSU J, JONES G, et al. Crop/Weed Discrimination in Perspective Agronomic Images [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2008, 60(1): 49–59.
- [14] SOLANELLES F, ESCOLÁ A, PLANAS S, et al. An Electronic Control System for Pesticide Application Proportional to the Canopy Width of Tree Crops [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(4): 473–481.
- [15] OSTERMAN A, GODEŠA T, HOČEVAR M, et al. Real-Time Positioning Algorithm for Variable-Geometry Air-Assisted Orchard Sprayer [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2013, 98(7): 175 – 182.
- [16] 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.
- [17] 陈志刚, 王玉光, 杜彦生, 等. 精确对靶喷雾施药的靶标微波探测试验 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 364–368.
- [18] 张发军. 车载喷雾机及精确施药关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [19] GAMARRA-DIEZMA J L, MIRANDA-FUENTES A, LLORENS J, et al. Testing Accuracy of Long-Range Ultrasonic Sensors for Olive Tree Canopy Measurements [J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 2902–2919.

Development and Testing of a Nozzle Adaptive Movement and Automatic Control System in the Orchard Sprayer

CHEN Kui, LI Guang-lin, LI Xiao-dong, MA Chi

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to improve the utilization rate of pesticides, reduce pollution and realize automatic targeting and precise pesticide spraying in orchards in hilly areas, a nozzle adaptive movement and automatic control system was developed. According to the return data from the sensors, two slide rails adjusted the sprayer height and the distance away from fruit trees, a step motor drove spray rod rotation, and the sprayer could accurately aim at the fruit tree. With the help of an electromagnetic valve, the nozzles could turn on and turn off real-time, thus reducing the waste of pesticides. In an outdoor experiment with the system, the crawler drove from right to left at the speed of 0.3 m/s, and the results showed that it could adjust sprayer height according to tree height, and the distance of the nozzles from the canopy could be kept in the range of 0.25 m to 0.75 m. With the help of a rotating mechanism, the nozzles always aimed at the tree, and the pesticide coverage rate increased from 10% to 30%. In conclusion, as the system can automatically target the tree according to the shape of the crown, the nozzle rotating mechanism solves the problems of system delay and the low resolution of the ultrasonic sensor, thus resulting in improvement of the spraying effect of the canopy side.

Key words: hilly area; orchard; ultrasonic; automatic targeting; precision spraying

