

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.029

履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究

姜红花^{1,2} 白 鹏³ 刘理民³ 董西峰¹ 宋坚利⁴ 张晓辉^{2,3}

(1. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 4. 中国农业大学理学院, 北京 100083)

摘要: 为提高较小树龄或稀疏果园的雾滴沉积量和省药率,将风送施药技术与物联网技术相结合,设计了履带自走式果园自动对靶风送喷雾机。该机主要由机架、操控系统、动力部分、行走系统、传动系统和风送系统等组成,其中控制部分由超声波传感器感知层、单片机数据处理层、Wi-Fi 无线传输层及手机上位机控制层组成。手机能实时显示施药状态参数并向微处理器发送操控指令。对样机进行了性能试验,试验结果表明:有风送时雾滴沉积量相对无风送时提高了34.57%,变异系数降低了13.39个百分点;自动对靶风送喷雾比普通喷雾综合省药率大于30%;风机气流提高了雾滴的靶标附着率和沉积均匀性;超声波传感器及在线处理喷药状态参数的控制系统实现了对有效靶标的间歇性喷药,节省了农药使用量,降低了农药残留量。该机尺寸小、行动灵活、通过性强,满足矮化果园植保机械作业要求。

关键词: 自动对靶喷雾;履带自走式;果园;物联网

中图分类号: S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0189-07

Caterpillar Self-propelled and Air-assisted Orchard Sprayer with Automatic Target Spray System

Jiang Honghua^{1,2} Bai Peng³ Liu Limin³ Dong Xifeng¹ Song Jianli⁴ Zhang Xiaohui^{2,3}

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
4. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the quantity of droplets deposition and reduce the quantity of pesticide in the orchard on small fruit tree or sparse orchard, a track self-propelled orchard sprayer was designed by combining the air-blast spray with internet of things technology. The machine was composed of mechanical frame, control system, power, walking system, transmission system and air-blast spray system. The control system was made up of ultrasonic sensors, microcomputer control layer, Wi-Fi wireless transport layer and mobile phone. The mobile phone can show some spray reference and send instructions to microcomputer. Experiment result showed that the quantity of droplets deposition was increased by 34.57% when the air-assisted sprayer was used, the variation coefficient was reduced by 13.39 percent points, and compared with continuous spray, automatic target spray could save pesticide by more than 30%. The fan driving airflow of air-blast sprayer improved droplets adhesion ratio on target and droplet distribution uniformity. The intermittent spraying was realized by ultrasonic sensors detection

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200706)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD20B10-2-4)、山东省重点研发项目(2015GGB01302)、山东省现代农业产业技术体系果品产业创新团队资金项目(SDAIT-06-12)、山东省农业重大应用技术创新项目和山东农业大学智能化农业装备研发项目(24132)

作者简介: 姜红花(1971—),女,副教授,主要从事物联网与自动控制研究,E-mail: j_honghua@163.com

通信作者: 张晓辉(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与理论研究,E-mail: Zhangxh@sdau.edu.cn

of effective target and control system processing spraying status parameters on-line, pesticide utilization was saved and residues were reduced. The machine had advantages of small size, convenient operation and good passing ability, which satisfied the need of plant protection work of low and short orchard.

Key words: automatic target spray; caterpillar self-propelled; orchard; internet of things

引言

近年来,人们对绿色食品表现出浓厚的兴趣,对生物防治措施保护作物的重视程度逐年增加,但使用化学农药保护农业作物免受病虫害的侵蚀仍是目前最快捷、最经济的有效措施,在保障作物丰收、保障农业安全方面发挥了巨大的作用。我国目前大量使用的手动、背负式喷雾器和高压喷枪施药器械,普遍采用大雾量、雨淋式等连续喷药方法,仅有 30% 左右的药剂能达到靶标,绝大部分沉降到地面或者漂移到周围的环境中,不仅浪费农药污染环境,还严重影响果品质量。20 世纪 80 年代我国开始引进果园风送式喷雾机,继而设计了拖拉机牵引式、悬挂式果园风送喷雾机,该类型的喷雾机具有穿透性好、药液覆盖率高等优点,提高了我国果园病虫害防治水平。但国内果园多采用矮化种植模式,施药机具多为车载式、牵引式和悬挂式,体积较大,施药器械存在入园难、伤果率高的问题,已不适合我国果园的发展趋势,并且对于树龄较小或者种植较稀疏的果园,果树冠层之间存在较大的空隙,喷施在树冠间隙的药液无法沉积在果树上,形成无效喷雾^[1-2]。

自走式橡胶履带底盘具有结构紧凑、接地面积大、转弯半径小、跨沟越埂能力强等特点,超声波自动对靶控制系统能根据探测果树的有无来控制喷雾。在大数据互联网+环境下,将植保机械与电子控制技术、风送施药技术及物联网技术相结合,本文设计一种高通过性履带自走式果园自动对靶风送喷雾机,简述其工作原理和主要零部件设计,并进行喷头喷量、雾滴沉积量及自动对靶喷雾等试验^[3]。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

履带自走式果园自动对靶风送喷雾机由机架、操控系统、发动机、行走系统、传动系统、超声波自动对靶控制系统、药液管路系统、风送系统等组成,如图 1 所示。系统结构如图 2 所示。

主要技术参数为:整机尺寸(长×宽×高)1 900 mm×980 mm×1 150 mm,配套动力 9.6 kW,药箱容积 240 L,药泵流量 0~60 L/min,风机风量 3 645 m³/h,工作幅宽 0~6 m,喷药作业速度 1~2.5 km/h。

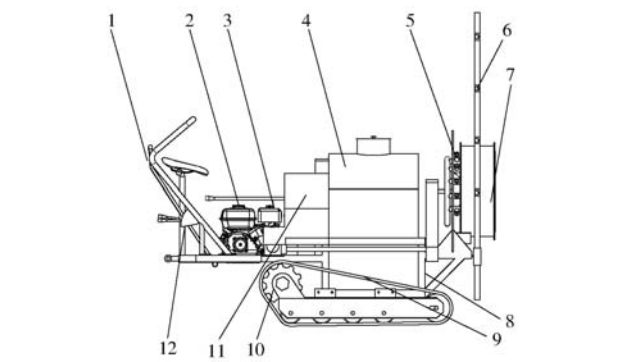


图 1 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机
Fig. 1 Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system
1. 操纵台 2. 发动机 3. 隔膜泵 4. 药箱 5. 喷头 6. 超声波传感器 7. 风机 8. 底盘 9. 履带 10. 驱动轮 11. 换向器 12. 离合器

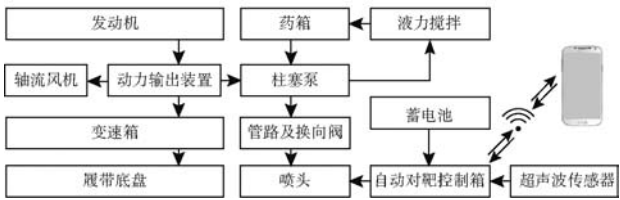


图 2 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机系统结构图
Fig. 2 Schematic diagram of caterpillar self-propelled orchard sprayer with automatic target spray system

1.2 工作原理

发动机经胶带和多挡变速箱进行换向,分别驱动履带底盘、柱塞泵和轴流风机,实现喷雾机的行走、药液输送和送风。蓄电池为自动对靶控制箱、电磁阀、超声波传感器等进行供电。

每个超声波传感器对应一个喷头探测有效靶标,根据果树行距,在上位机手机控制端设置超声波传感器探测阈值,以适应不同行距果树的对靶喷雾作业。随着喷雾机的行走,超声波传感器不间断地检测两侧靶标物,当靶标物处于阈值范围内时,自动对靶控制器接收信号并输出指令,控制相应的电磁阀打开喷药,喷头喷出的药液被轴流风机产生的高速气流二次雾化形成更细的雾滴,在气流的胁迫作用下吹向靶标物。由于气流对枝叶的翻动作用,使得作物的叶背、叶面和上、下都可均匀着雾,提高了农药使用率和雾滴分布均匀性。当超声波传感器未检测到靶标物时,关闭电磁阀,达到对靶间歇式喷药的目的^[4-7]。

2 传动系统和主要零部件的设计

2.1 传动系统

传动系统主要分为3部分:履带行走传动系统、风机动力传动系统、柱塞泵动力传递系统。图3为履带自走式果园自动对靶风送喷雾机传动示意图。

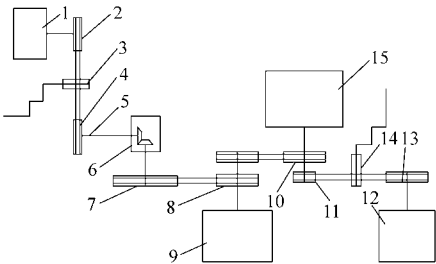


图3 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机传动结构图

Fig.3 Power train diagram of caterpillar self-propelled orchard sprayer with automatic target spray system

1. 轴流风机 2. 轴流风机胶带轮 I 3. 张紧轮 I 4. 轴流风机胶带轮 II 5. 传动轴 6. 换向器 7. 换向器胶带轮 8. 发动机输出胶带轮 9. 发动机 10. 变速箱胶带轮 11. 柱塞泵胶带轮 I 12. 柱塞泵 13. 柱塞泵胶带轮 II 14. 张紧轮 II 15. 多挡变速箱

履带行走传动系统由发动机、发动机输出胶带轮、变速箱胶带轮和多挡变速箱组成^[3]。风机动力传动系统由发动机、发动机输出胶带轮、换向器胶带轮、换向器、传动轴、轴流风机胶带轮、轴流风机组成。柱塞泵动力传递系统包括发动机、发动机输出胶带轮、变速箱胶带轮、柱塞泵胶带轮 I、柱塞泵胶带轮 II、柱塞泵。采用张紧轮 I、II 实现风机动力传动系统和柱塞泵传动系统的连接和断开,使机具在作业状态下和非作业状态下进行动力转换。

2.2 履带行走驱动功率计算

履带车辆转向时不仅要克服行走阻力,还要克服转向阻力。履带车辆转向时的功率消耗较直线行驶功率消耗要大得多。图4为履带接地平面核心域受力图^[8]。

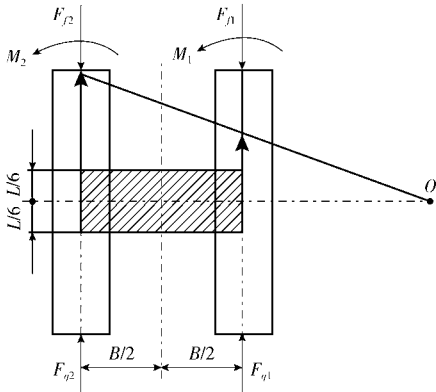


图4 履带接地平面核心域

Fig.4 Center region of tracked vehicle's gravity

$$M_{\mu} = \frac{\mu GL}{4} \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \tag{1}$$

$$F_{q2} = \frac{fG}{2} \left(1 + \frac{2C}{B} \right) + \frac{\mu GL}{4B} \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \tag{2}$$

$$F_{q1} = -\frac{fG}{2} \left(1 - \frac{2C}{B} \right) - \frac{\mu GL}{4B} \left[1 - \left(\frac{2e}{L} \right)^2 \right]^2 \tag{3}$$

$$M_{\max} = F_{q\max} r \tag{4}$$

$$W_{\max} = F_{q\max} v_x \tag{5}$$

- 式中 M_{μ} ——转向力矩
 μ ——转向阻力系数,取 0.6
 L ——履带接地长度,取 1.2 m
 G ——车体重力,取 14 700 N
 r ——驱动轮节圆半径,取 0.115 m
 C ——横向偏心距,取 0.45 m
 e ——纵向偏心距,取 0.2 m
 B ——履带中心距,取 0.9 m
 f ——滚动阻力系数,取 0.11
 v_x ——驱动轮线速度,m/s

计算得 $M_{\mu} = 19\,757\text{ N}\cdot\text{m}$, $F_{q2} = 4\,234\text{ N}$, $F_{q1} = -2\,323\text{ N}$, $M_{\max} = 4\,771.23\text{ N}\cdot\text{m}$, $W_{\max} = 20.78\text{ kW}$ 。

2.3 风送系统设计

2.3.1 风量的确定

采用置换原则确定风送式喷雾机中的风速,原理为风机吹出的气液二相流,能够将风机两侧到果树之间的空气驱散并替换,此外为了翻动枝叶提高药液的穿透性,所设计的喷雾机的风量应大于置换空间的空气量。假设喷雾作业时,风机的转速和行进速度不变,根据图5,这时风机的风量稍大于梯形体积^[9-10],即

$$\frac{Q}{2} \geq \frac{vKD(H+h)}{2} \tag{6}$$

- 式中 Q ——风机风量, m^3/s
 v ——喷雾机速度,取 0.3 ~ 0.7 m/s
 h ——风机出风口直径,取 0.7 m
 H ——果树高低树冠之间距离,取 1.5 ~ 2 m
 D ——喷头至果树的距离,取 0.4 ~ 0.6 m
 K ——气流衰减和沿途损失确定的系数,一般为 1.1 ~ 1.2

求得风量 $Q \geq 1.3\text{ m}^3/\text{s}$,考虑到泄露及风量的储备,最终选取 $Q = 2\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3.2 风压的确定

风从轴流风机到目标靶物过程中,有风压损失。它包括动压损失、局部压力损失^[10-11]。

动压损失

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2} \tag{7}$$

局部压力损失

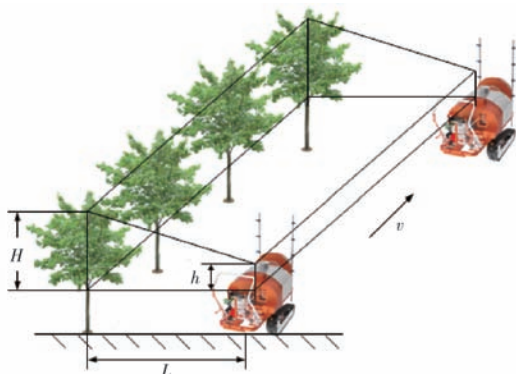


图5 风量置换原理图

Fig. 5 Diagram of air displacement principle

$$p_j = \frac{\varepsilon \rho v^2}{2} \quad (8)$$

总压

$$p = p_d + p_j \quad (9)$$

式中 ρ ——空气密度,取 1.23 kg/m^3

v ——气流速度,取 20 m/s

ε ——局部阻力系数,取 0.2

风机功率计算公式为

$$N = \frac{Qp}{1000\eta_i\eta_m} \quad (10)$$

式中 N ——风机功率, kW

η_m ——机械效率,取 90%

η_i ——叶轮效率,取 98%

最终经过风量及风压的计算确定使用轴流风机,功率为 2.2 kW 。

3 自动对靶控制系统的设计

3.1 对靶系统硬件设计

针对作物位置等信息的探测,最常用的探测传感器为激光传感器、红外线传感器和超声波传感器,由于树冠结构和密度分散较大,激光传感器及红外线传感器等直线类传感器探测易受影响,并且激光传感器成本高,红外线传感器探测易受光照强度的干扰,在对靶方面,超声波传感器最接近工程实际应用,本文选择了 NU40F30TR-1MD 防水型超声波传感器,该传感器测量范围为 $0.2 \sim 2 \text{ m}$,盲区 0.2 m ,频率 40 kHz ,工作电压 24 V (DC) ,输出电压 $0 \sim 5 \text{ V}$,工作温度 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$,角度 15° 。

自动对靶喷雾控制系统系统结构图见图6,对靶系统控制器采用 STM32F103VET6 单片机,电磁阀型号为 2P025-06,动作时间 $0 \sim 50 \text{ ms}$ 。系统通过超声波传感器测量距离,信号数据经过转换电路输入到对靶系统控制器中,控制器根据机具的行走速度和上位机传输的喷雾控制逻辑进行实时的靶标检测,当程序判断出是有效靶标时,通过单片机的

I/O 接口驱动电磁阀开关电路控制电磁阀的开启,从而使对应喷头实施喷雾作业。当程序判断为非靶标时,通过单片机的 I/O 接口驱动电磁阀开关电路控制电磁阀的关闭,则与之对应的喷头停止喷雾作业^[4-7,12-14]。

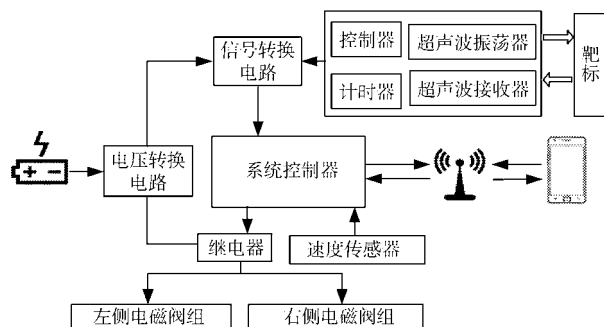


图6 履带自走式果园自动对靶系统结构图

Fig. 6 Automatic target spray system of caterpillar self-propelled orchard sprayer

3.2 对靶系统软件设计

履带自走式果园自动对靶控制系统软件流程图见图7。首先启动汽油机,然后开启下位机电源,上电后下位机系统初始化后无线通讯模块产生 Wi-Fi 信号,打开手机连接 Wi-Fi 信号,开启自动对靶喷药手机控制应用程序,选择喷药模式,系统可实现6种喷药模式的控制即自动对靶双喷模式、自动对靶左喷模式、自动对靶右喷模式、普通喷洒模式、普通左喷模式、普通右喷模式,控制程序界面截图见图8,普通喷洒模式时根据选择的喷雾方向使相应的电磁阀处于常开模式下,喷雾机进行连续喷雾^[12-14]。如果选择自动对靶模式需要根据果树的种植行距以及树冠的大小设置目标靶标物的区域范围(果树与喷雾机距离的最小阈值和最大阈值),点击“开始”按钮,手机控制程序通过 Wi-Fi 向下位机发送控制指令,下位机接收指令进行指令校验并反馈信号给手机控制程序,下位机感知层实时采集车辆的行驶速度以确定对应的喷雾延时时间,当检测到有效靶标时则开启电磁阀进行喷雾作业并延时相应的时间,未检测到有效靶标时关闭电磁阀停止喷雾。

4 样机性能试验

4.1 喷雾量测定

依据 NY/T 992—2006《风送式果园喷雾机作业质量标准》及 JB/T 9782—2014《植物保护机械通用试验方法》对该履带自走式果园自动对靶风送喷雾机分别进行喷雾量测定、有无风送时雾滴沉积量测定、自动对靶喷雾与普通喷雾药量测定。试验采用纯净水调配体积分数为 0.01% 的甲基紫溶液作为喷雾介质^[10]。试验在山东农业大学农学院前绿

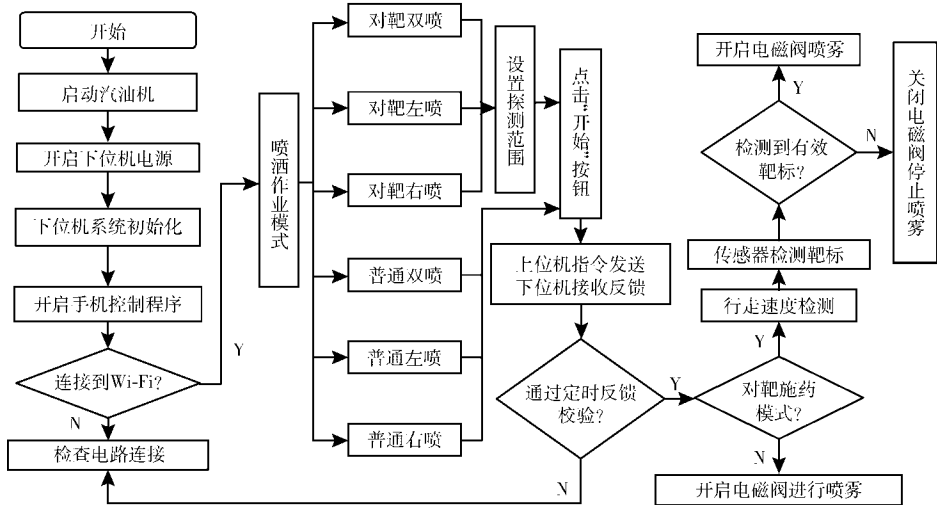


图7 自动对靶喷雾控制系统流程图

Fig.7 Software flowchart of automatic target spray system



图8 自动对靶喷药手机控制应用程序界面

Fig.8 Application interface of APP for automatic target spray system

化果树林内进行,试验地点气温 21.3℃,自然风速 0~0.8 m/s。

试验时启动发动机,调整发动机油门,使柱塞泵输出压力分别稳定在 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 MPa 下进行连续喷雾。利用量筒收集各个喷头喷出的液体,每次收集时间为 30 s,用电子秤称量并记录各量筒液体质量,试验重复 4 次。表 1 为不同压力下喷头的平均喷量、总喷量、标准差、变异系数。

由表 1 可知,每个喷头的喷雾量变异系数均较小,大体符合正态分布。当喷雾压力为定值时,每个喷头的喷量在较小范围内波动,随着喷雾压力的增大,喷量增幅呈现先增大后减缓的趋势。

4.2 沉积量测定

有风送和无风送时雾滴沉积量对比试验步骤如下:

(1) 选用冠层直径 2.4 m、冠层高度 1.8 m 的植

表 1 不同压力下喷头喷量

Tab.1 Volume of spray nozzle under different pressures

压力/ MPa	平均喷量/ mL	总喷量/ mL	标准差/ mL	变异系数/ %
0.3	611.3	3 667.8	42.28	6.92
0.4	665.5	3 993.0	31.67	4.76
0.5	755.8	4 534.8	20.43	2.70
0.6	803.7	4 822.2	37.37	4.64
0.7	849.6	5 097.6	47.60	5.60

株为试验用植株。试验用喷洒介质为体积分数 0.01% 的甲基紫溶液。

(2) 将植株冠层分为上、中、下 3 层,每层水平方向均匀布 5 个点、垂直方向 2 个点(即每层垂直方向分为两小层布点),这样每层共布 10 个点,每个固定点上用曲别针将直径 7 cm 的圆形滤纸固定在叶片的表面。根据表 2 可知靶标距离喷头越远,雾滴沉积量越少;有风送雾滴沉积量比无风送雾滴沉积量多,但每层每个点的沉积量差值有变化,中层的喷洒效果比较理想。

(3) 调整样机功率,样机以前进 1 挡 1.8 km/h 速度行驶,保证柱塞泵输出压力稳定在 0.5 MPa,分别进行自动对靶左喷风送喷药作业。

(4) 作业完毕后,收集每层滤纸并编号记录。

(5) 用 UV-2000 型分光光度计(日本岛津公司)对所收回干燥后的滤纸进行甲基紫浓度测定,得出沉积量^[11-12]。

(6) 关闭轴流风机,重复以上试验步骤。试验结果见表 2。

由表 2 可知,样机工作速度 1.8 km/h 时,在自动对靶左喷模式下,有风送比无风送沉积量提高了 34.57%,变异系数降低了 13.39 个百分点,风送喷雾效果明显。

表 2 雾滴沉积量

Tab.2 Deposition quantity of droplets μg						
编号	有风送			无风送		
	上	中	下	上	中	下
1	13.21	12.36	13.36	12.69	11.43	12.02
2	12.81	10.27	12.89	9.42	9.90	11.24
3	9.92	9.32	9.72	8.16	8.50	9.21
4	9.24	8.62	8.99	7.95	7.35	7.82
5	6.67	7.60	7.25	5.45	6.92	6.75
6	6.26	6.82	6.49	5.33	5.86	5.66
7	5.21	5.33	6.03	4.92	4.94	4.78
8	4.35	4.30	4.92	3.84	3.67	3.83
9	2.97	3.35	4.21	2.12	2.98	2.82
10	2.33	2.52	2.98	1.32	1.83	1.22
平均值	7.80	7.57	8.18	5.62	5.84	6.04
标准差	3.86	3.16	3.52	3.47	3.08	3.56
变异系数	49.49	41.74	42.03	61.74	52.74	58.94
总沉积量	23.55			17.50		
总变异系数/%	44.42			57.81		

4.3 自动对靶喷雾和普通喷雾对比试验

图 9 为喷雾现场图,图 10 为喷雾示意图。试验前测量喷雾机的总行走距离 L_z ,每棵果树的树冠高度 L_{CH} 、树冠宽度 L_{GC} 以及相邻果树的树间距 L_j ,详细参数见表 3。采用常温纯净水作为喷洒试验介质,为了测量方便,试验中采分别用自动对靶左喷模式和普通喷洒左喷模式进行单侧喷雾,采用 20 L 塑料桶改装为药箱,每次喷雾前后记录药箱水容量。每次试验重复 3 次。

由表 4 可知,自动对靶喷雾省药率均大于空隙比,这是由于果树间距的测量以树冠的最大横向覆盖长度作为冠宽,试验用果树树冠形状为疏散分层型,实际履带式自动对靶风送喷雾机上的超声波传



图 9 喷雾试验现场图

Fig.9 Photo of spray test

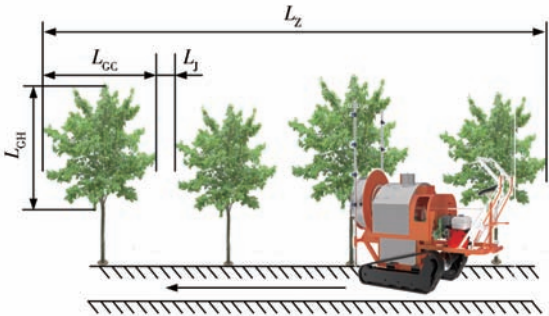


图 10 喷雾示意图

Fig.10 Diagram of spray test

表 3 果树冠层参数

Tab.3 Parameters of canopy of fruit trees cm			
编号	冠高 L_{CH}	冠宽 L_{GC}	冠层间距 L_j
1	163	212	—
2	152	198	63
3	149	186	72
4	153	196	56
5	158	201	—

表 4 试验结果

Tab.4 Result of tests

喷雾总长 L_z/cm	空隙比/ %	行驶速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	连续喷雾		对靶喷雾		省药量/ L	省药率/ %
			喷雾量/L	标准差	喷雾量/L	标准差	L	
1 261	21.25	0.5	2.25	0.05	1.63	0.07	0.62	27.6
		0.7	1.94	0.06	1.31	0.07	0.63	32.5

感器在竖直方向多点同时探测植株能正确地根据植株的冠型进行探测控制喷头对靶喷雾。随着机具行驶速度的增加省药率上升,这是由于单位时间内喷头的喷量一定,随着机具行驶速度的增加,总的喷药时间减少,实际应用中可根据果树的冠层密度降低机具的行驶速度或者采取多次对靶喷药。

5 结论

(1)针对矮化果园植保设计了一款履带自走式

果园自动对靶风送喷雾机,该机具尺寸小、结构紧凑、行动灵活、通过性强,满足矮化果园植保作业要求。

(2)开发了针对果园的自动对靶喷洒控制系统,控制系统分上位机、下位机两部分,上位机用手机设置显示施药参数,可随时发布命令,下位机实现对靶喷雾,增加了系统操作的灵活性,实现了 6 种喷洒作业模式。

(3)试验结果表明,机具作业效果良好,有风送

时雾滴沉积量比无风送时提高了 34.57%, 变异系数降低了 13.39 个百分点; 自动对靶风送喷雾比普通喷雾综合省药率大于 30%, 提高了农药的利用率。

参 考 文 献

1 傅泽田, 祁力钧. 国内外农药使用状况及解决农药超量使用问题的途径[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 7-12.
FU Zetian, QI Lijun. Over-use of pesticide and approaches to reduce pesticide dosage[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 7-12. (in Chinese)

2 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民, 等. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化学报, 2009(6): 10-13, 17.
FU Ximin, LÜ Xiaolan, DING Weimin, et al. Present state and technical requirement about orchard plant protection machinery in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2009(6): 10-13, 17. (in Chinese)

3 张晓辉, 姜宗月, 范国强, 等. 履带自走式果园定向风送喷雾机[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 117-122.
ZHANG Xiaohui, JIANG Zongyue, FAN Guoqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled directional air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 117-122. (in Chinese)

4 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 CSAE, 2014, 30(22): 1-9. (in Chinese)

5 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 CSAE, 2007, 23(1): 129-132. (in Chinese)

6 何雄奎, 严荷荣, 储金字, 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.
HE Xiongkui, YAN Herong, CHU Jinyu, et al. Design and testing of the automatic target detecting, electrostatic, air assisted, orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 78-80. (in Chinese)

7 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.
CHEN Zhigang, WANG Yuguang, DU Yansheng, et al. Microwave target detecting experiment for precise pesticide spraying[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 364-368. (in Chinese)

8 迟媛, 蒋恩臣. 履带车辆转向时最大驱动力矩的计算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 74-78.
CHI Yuan, JIANG Enchen. Method for calculating maximum tractive torque of tracked vehicle while steering[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 74-78. (in Chinese)

9 DEKEYSER Donald, DUGA Ashenafi T, VERBOVEN Pieter, et al. Assessment of orchard sprayers using laboratory experiments and computational fluid dynamics modelling[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(2): 157-169.

10 机械工程手册编辑委员会. 机械工程手册——机械产品(四)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

11 KHOT Lav R, EHSANI Reza, ALBRIGO Gene, et al. Air-assisted sprayer adapted for precision horticulture: spray patterns and deposition assessments in small-sized citrus canopies[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(1): 76-85.

12 PALLEJA Tomas, LANDERS Andre J. Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 108-117.

13 MAGHSOUDI Hossein, MINAEI Saeid, GHOBADIAN Barat, et al. Ultrasonic sensing of pistachio canopy for low-volume precision spraying[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 149-160.

14 张晓辛, 吕晓兰, 丁素明, 等. 果园风送式喷雾机仿形喷雾试验研究[J]. 中国农机化, 2011(3): 68-72.
ZHANG Xiaoxin, LÜ Xiaolan, DING Suming, et al. Experimental research on profiling spray of air-assisted orchard sprayer[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(3): 68-72. (in Chinese)