

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.006

# 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验

刘雪美<sup>1,2</sup> 李扬<sup>1,2</sup> 李明<sup>1</sup> 苑进<sup>1,2</sup> 方乾增<sup>1</sup> 侯加林<sup>1,2</sup>

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

**摘要:** 为减少大田施药时农药浪费,有效控制农药残留污染,针对植株行距、株距较大的作物对行施药的农艺要求,设计了喷杆喷雾精确对靶施药系统并进行试验。该系统以大田常用喷杆喷雾机为载体,沿喷杆方向按一定间距布置对应行和垄沟的超声测距传感器,实时采集喷杆到植株冠层以及喷杆到垄沟底部的距离信号;通过信号调幅消除由垄沟凹凸不平以及喷杆自身振动所产生的噪声影响。将调幅后的冠层高度信息依据植株株高、冠层胸径和冠层株高标准差等特征进行模式分析,从而识别靶标位置实现精准对靶。以大田团棵期烟草植株为对象,在烟草植株的株高达到30 cm左右,展开叶达15片左右时开展田间试验。结果表明:设计的精确对靶施药系统在植株平均胸径31 cm,株距比例39.2%的大田里,节省药液30%左右;在植株平均胸径35 cm,株距比例31.6%的大田里,节省药液20%左右。因此,此系统对大田植株间距在15 cm以上的对靶施药作业中具有较好的实用性。

**关键词:** 喷杆喷雾机; 精确对靶; 信号调幅

**中图分类号:** S224.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0037-08

## Design and Test of Smart-targeting Spraying System on Boom Sprayer

Liu Xuemei<sup>1,2</sup> Li Yang<sup>1,2</sup> Li Ming<sup>1</sup> Yuan Jin<sup>1,2</sup> Fang Qianzeng<sup>1</sup> Hou Jialin<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

(2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** In order to reduce pesticide waste of pesticide spraying in the field and alleviate the pollution to the soil, a smart-targeting spraying system on boom sprayer was designed, aiming at satisfying the requirements of spraying for large row spacing and plant spacing. The system was mounted on the common spray boom spraying machine in field, and an ultra-sonic ranging sensor, which was corresponding to row and furrow, was set according to a certain distance along spray bar direction. The distance between spray bar and canopy and the distance between spray bar and the bottom of furrow were measured in real time. The vibration noise generated by the uneven furrow and the boom vibration was eliminated by utilizing the signal amplitude modulation. According to the features such as plant height, canopy diameter and canopy height, etc., the amplitude modulated data was carried out in pattern analysis to recognize targets and realize smart-targeting. The equipment test was carried out on the tobacco plant in the field, which has 30 cm plant height and 15-piece leaves or so. The test results illustrate that, this smart-targeting spraying system has a valuable reference for the design of other target spraying systems. Comparing with continuous spray, the boom sprayer smart-targeting spraying system could save pesticides about 30% and 20% for the gap rate of 39.2% and 31.6%, respectively. Therefore, this smart-targeting spraying system is well performed in the target spraying operation in the fields where the plant space is beyond 15 cm and could significantly improve the agricultural economic efficiency.

**Key words:** boom sprayer; smart-targeting; amplitude modulation

收稿日期: 2015-09-13 修回日期: 2015-10-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51475278)、山东省农机装备研发创新计划项目(2015YB201、2015NJGG01)、山东科技发展计划项目(2014GNC112010)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B01-2)

**作者简介:** 刘雪美(1973—),女,教授,博士,主要从事植保机械与精准施药技术研究,E-mail: lxmywj@126.com

**通信作者:** 苑进(1972—),男,教授,博士,主要从事智能机电控制技术研究,E-mail: jyuan@sdau.edu.cn

## 引言

在作物精准施药技术中,针对喷雾靶区作物位置、植株大小决定是否实施差异化的农药喷施,能减少农药浪费、提高农药有效利用率,缓解土壤污染。这种将作物识别技术与农药喷施技术结合,由连续型施药向间隔型施药转变的技术,能够进行精确靶标施药,近期成为精确施药<sup>[1-3]</sup>技术研究的重点之一。

国内外学者已经在果园<sup>[4]</sup>、林木<sup>[5]</sup>、设施栽培<sup>[6-7]</sup>和大田杂草<sup>[8]</sup>上开展了农药精确对靶施用技术的研究。许林云等<sup>[9]</sup>、何雄奎等<sup>[10]</sup>等设计了针对果园的自动对靶静电喷雾机,研制了对靶喷雾控制系统。赵茂程等<sup>[5]</sup>采用基于机器视觉技术的树木图像特征,实现了农药精确对靶施用。邓巍等<sup>[11]</sup>采用植株侧向的红外识别技术实现了树木的靶标探测。翟长远等<sup>[12]</sup>也采用红外识别技术实现了树干的靶标识别。陆健等<sup>[13]</sup>设计了基于 ARM7 的精确对靶喷施除草嵌入式控制系统。张霖等<sup>[14]</sup>将超声波测距模块用于果树冠层扫描,以获取果树冠层形状。耿爱军等<sup>[15]</sup>依据其使用的烟叶打顶机的工作方式,采用反射式光电传感器从两侧检测烟草茎秆,实现了抑芽剂喷施控制。

作为大田生产中较为常见的喷雾方式,喷杆式喷雾机<sup>[1]</sup>的主要作业对象是粮食或经济作物,对病虫害防治和除草的效果良好,但目前精确对靶技术在大田作业的喷杆式喷雾机应用较少。在一些依据农艺要求种植的植株行距和株距较大的作物或生长初期植的株冠层较大作物,如烟草、玉米等,作物冠层间距所占整行长度比率,即空隙比较高(可达30%),在进行连续喷雾施药时,喷施在植株间隙的药液被浪费掉,并造成一定程度的土壤污染。为了解决上述问题,将精确对靶技术应用到喷杆式喷雾机上具有实际意义。

## 1 系统整体设计

将超声波测距模块安装于喷杆喷雾机的喷杆上,可以获取喷杆到作物冠层的距离,依据扫描的距离信息可识别作物的位置。但是喷杆喷雾机的工作幅宽较大,最长可达32 m。在机具行走过程中,地面起伏易形成喷杆上不规则振动激励,使喷杆形成不规则振幅,安装在喷杆上的距离传感器检测信号不可避免地受到随机振动的干扰,因此控制系统在进行作物识别时必须消除这一干扰信号。本文提出一种针对喷杆喷雾机的精确对靶解决方案:通过固定在喷杆机架上的若干超声波距离传感器得到带有

随机振动干扰噪声的喷杆机架与地面距离信号和大田作物植株高度信号;将信号调幅处理后得到较准确的植株高度波形信号,并对植株信号进行模式分析从而确定植株的位置;得到植株位置后即可结合喷杆机具的行走速度控制喷雾动作,从而节省农药用量。

### 1.1 对靶系统硬件设计

差分式喷杆喷雾精确对靶喷雾系统的机械结构和系统结构如图1、2所示。本文的靶标检测传感器模块选用超声波测距传感器,相比于激光、红外方式具有受光照强度、灰尘、环境温湿度等因素影响小的优点,传感器型号为 XL - MaxSonar - WR 系列 MB7052,精度1 cm,最大探测距离可达765 cm。依据喷杆式喷雾机施药作业时喷头工作在作物冠层上方的特点,将上述超声波测距传感器安放于喷杆上,采集喷杆到作物冠层的距离和喷杆到地面的距离。

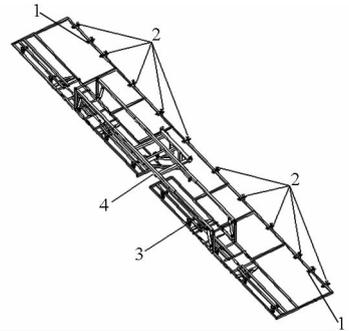


图1 机械结构示意图

Fig.1 Mechanical structure sketch

1. 垄沟测距传感器 2. 对行测距传感器 3. 喷头 4. 喷杆架

将喷杆上的测距传感器分为2组。一组为对行测距传感器,每个喷头对应一个超声波距离传感器,安装在相对于机具行走方向超前于喷头正前方的位置,垂直方向对应作物行。传感器数量根据喷杆喷雾机设计施药行数而确定,采集喷杆到垄上作物植株距离以及喷杆到垄的距离。另一组为垄沟测距传感器,喷杆左右两边各一个,分别安装在末端一组对行测距传感器之间,垂直方向对应实际喷雾作业时大田的垄沟。

精确对靶控制器核心采用 STM32F103VET6 单片机,电磁阀型号为 2W - 15K,动作时间 100 ms。两组传感器采集的数据输入到精确对靶系统控制器中,对靶系统控制器结合机具行走速度和垄沟与作物行间土地的测距信息对各喷头对应的垄进行实时靶标检测,当识别程序判断出是靶标时,通过输入输出接口驱动相应的电磁阀开启,从而使对应喷头实施喷雾。当程序判断出是非靶标时,通过输入输出接口驱动相应的电磁阀关闭,使对应喷头停止喷雾。

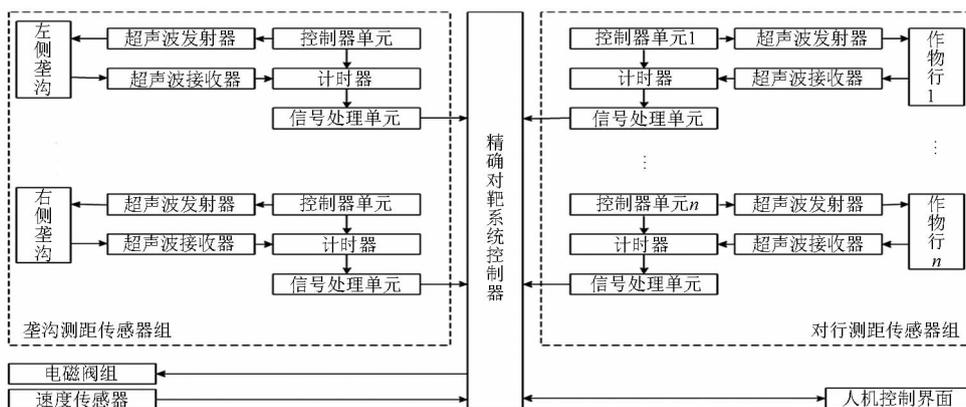


图 2 喷杆喷雾机精确对靶系统结构图

Fig. 2 Precision target system block

### 1.2 系统软件设计

喷杆喷雾机精确对靶施药系统的控制软件流程图见图 3。系统上电之后首先进行初始化,设置传感器和外围设备运行参数,并分配数据存储空间;之后进入作业等待,检测是否允许启动施药。系统施药模式设有两种:一种是连续施药模式,另一种是对靶施药模式。在连续施药模式下,电磁阀一直处于开启状态,对作物持续施药。

当用户选择对靶施药模式后,系统采集对垄沟测距传感器信息  $s$  和对行测距传感器信息  $S_i$ ,并对信号进行处理。首先采用一维中值滤波方法剔除数

据异常点,为保证对靶实时性对 中值滤波算法进行必要的修正,截取已采集长度为  $p$  的序列  $s_p$ ,按照

$$s_p(k) = f_{mid} \{ s_p(k - n/2) : s_p(k + n/2 - 1) \}$$

更新数据,其中  $f_{mid}(\cdot)$  为取中值函数,  $n$  为偶数,且  $(k + n/2 - 1) < N$  ( $N$  值可由下文式(6)确定)。

其次,利用垄沟测距信息  $s$  对信号  $S_i$  进行调幅处理,消除振动噪声,处理过的距离信号  $S'_i$  即反映了垄上作物及垄的高度,并将信息  $S'_i$  分别存入先入先出队列(FIFO)中。最后,利用数据滑动窗口的概念,截取 FIFO 中的数据段进行标准差处理,将处理得到的特征值结合作物冠层信息进行拟合,确定出窗口内数据是作物植株还是垄上地面,在对应作物位置控制电磁阀的开启以实现精准施药。

### 2 靶标识别原理

由于机具的振动和地面凹凸不平,传感器在工作过程中采集到的信号包含由喷杆振动产生的噪声。判断作物靶标之前,需要去除因喷杆振动产生的噪声信号。

#### 2.1 信号调幅处理

采用信号调幅的方法消除振动噪声。机具行走过程中引起的振动在喷杆不同位置会产生不同振幅,如果不对信号幅值加以修正,很难准确判断靶标。如图 4 所示,垄沟测距传感器和 2 个对行测距传感器安装在同一喷杆上,传感器随喷杆产生共模振动,由于不同位置产生振幅不同,垄沟测距传感器和对行测距传感器在测量中产生的振动幅值不同。故将对行测距传感器做调幅处理,以垄沟测距传感器采集的振动数据为参照,消除对行测距传感器的背景干扰信号。

信号调幅原理如图 5 所示,  $l_s$  是垄沟测距传感器到机架中心的距离,  $l_i$  为第  $i$  个对行测距传感器到机架中心的距离,  $A$  是喷杆静止时离地高度,  $s$  是垄沟测距传感器的实测值,  $S_i$  是对行测距传感器的

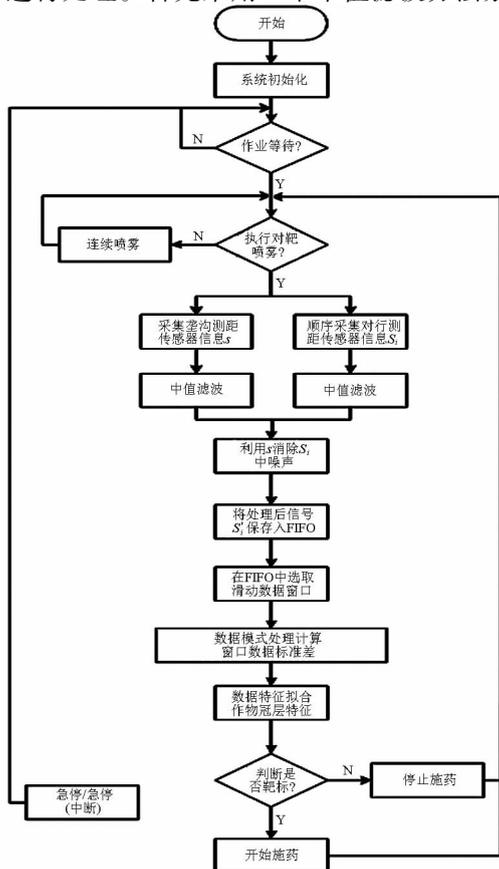


图 3 系统软件流程图

Fig. 3 System software flow chart

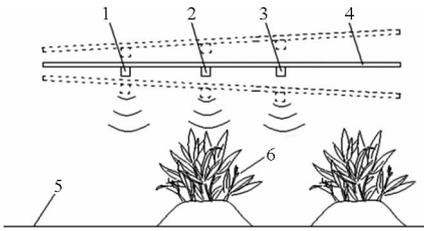


图4 机架振动示意图

Fig. 4 Spray bar vibration diagram

1. 垄沟测距传感器 2. 对行测距传感器 3. 垄沟测距传感器 2  
4. 喷杆架 5. 地面 6. 植株

实测值,  $\sigma$  为对行测距传感器由振动引起的误差幅值,  $B$  是垄高,  $W$  是作物行宽。由图 5 可知, 调幅处理后对行传感器测量值  $S'_i$  应为

$$S'_i = S_i + \sigma \quad (1)$$

进一步由几何关系可知

$$\frac{l_s}{l_i} = \frac{A - s}{\sigma} \quad (2)$$

$$\text{即} \quad \sigma = (A - s) \frac{l_i}{l_s} \quad (3)$$

由式(1)、(3)可得

$$S'_i = S_i + (A - s) \frac{l_i}{l_s} \quad (4)$$

因此, 在安装了垄沟测距传感器之后, 通过其测量值  $s$  可以消除振动产生的误差影响, 将信号幅值调整到没有振动干扰时的情形, 调整过程由式(4)计算得到。

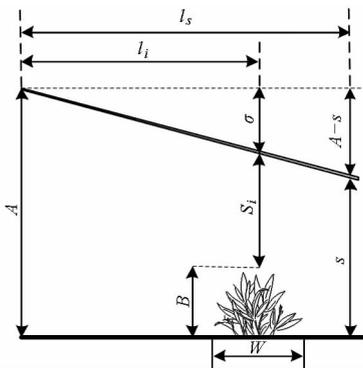


图5 信号调幅原理图

Fig. 5 Signal amplitude modulation

## 2.2 数据特征分析

调幅后的数据需要进一步区分作物冠层和地面凸起。假设喷雾机和对靶控制系统进入工作状态前, 测距传感器在垂直方向上对应大田土壤表面, 如图 6a 所示。启动喷雾机对靶系统后机具开始行走 (图 6 所示箭头为机具工作时行进方向) 并实时采集距离数据, 经过上述信号处理后, 将数据存入长度为  $N$  的先入先出的队列 (FIFO) 中。运行至图 6b 位置时电磁阀打开, 喷头开始喷施锥形药液, 能确定植株冠层都能被药液雾滴笼罩。施药完毕关闭电磁

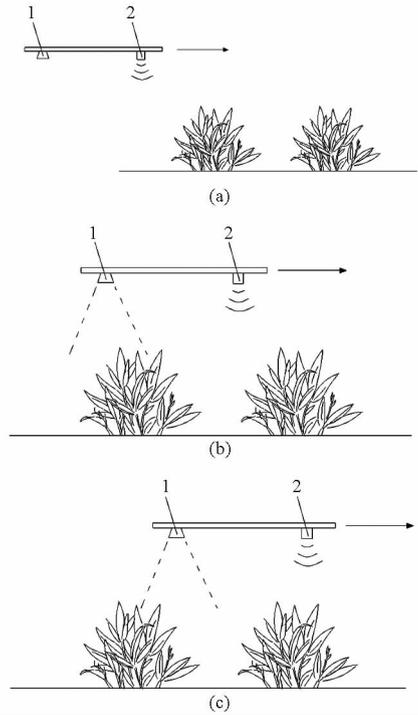


图6 机具行走作业示意图

Fig. 6 Machine operating diagram

1. 喷雾机喷头 2. 对行测距传感器

阀, 开始下一次靶标探测, 此过程循环往复。

在 FIFO 中选取定长的滑动窗口并对窗口内的数据进行特征分析, 其长度  $L_w$  应能够反映数据中的变异点, 为

$$f_{\text{round}} \left( \frac{w_{\text{max}}}{v_{\text{min}}} f_v \right) \leq L_w \leq N \quad (5)$$

式中  $f_{\text{round}}(\cdot)$  ——取整函数

$w_{\text{max}}$  ——作物的最大胸径

$v_{\text{min}}$  ——机具最小运行速度

$f_v$  ——测速传感器采样频率

$$N = f_{\text{round}} \left( 1.5 \frac{w_{\text{max}} f_v}{v_{\text{min}}} \right) \quad (6)$$

所述的滑动窗口宽度确定之后, 滑动窗口以 1 个单位的步长伴随队列数据的采集过程移动, 窗口末端始终对齐最新数据, 当机具启动过程中采集数据不足窗口长度时, 采用复制列头数据的方法进行填充。该窗口宽度计算能够确保在每一个滑动窗口内最多出现一个异变点, 避免因窗口宽度造成靶标遗漏或误判。

对队列的高度均值进行处理, 得到

$$\bar{x} = H - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S'_i \quad (7)$$

式中  $H$  ——静止状态下喷杆到垄上土壤的高度

如果滑动窗口的高度均值小于设定的作物高度阈值, 则判断为垄上土壤部分。如果窗口数据的高度均值大于设定的作物高度阈值, 则初步判断为靶

标,此时将窗口中第一个数据跳变点对应队列中的位置记为高度异变点。进一步计算该异变点与下一异变点间的数据标准差,如果标准差在给定的作物测距变化标准差阈值内,则确定为靶标。

以本文针对烟草团棵期植株进行试验为例,选取植株冠层胸径在 30 ~ 40 cm 范围内,喷雾机具行走速度为 0.4 m/s (此速度选择以喷雾机田间工作实际行走速度为依据),传感器采集高度频率为 20 Hz 和 40 Hz,选择队列长度分别为  $f_{\text{round}}(1.5 \times 20 \times 40/40) = 30$  和  $f_{\text{round}}(1.5 \times 40 \times 40/40) = 60$ ,分别选择高度变异点后 20 个和 40 个距离数据不会超出植株冠层胸径的范围,能够比较好地反映对植物冠层测距的数据标准差。但喷雾机实际工作状态下采集的数据显示,地面高度和作物冠层高度有明显的差距,且两种高度信号的标准差范围相差明显(参见第3节)。

### 2.3 施药动作

系统确定高度变异点在队列中的位置时为零时刻,计速度传感器测量值为  $v_1$ ,下一采样时刻速度为  $v_2$ ,以此类推。超声波传感器超前于喷头的距离  $l_p$  计算式为

$$l_p = \sum_{i=1}^m \left( \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \frac{1}{f_v} \right) \quad (8)$$

式中  $v_i$ ——测速传感器采集的机具行走实时速度  
 $m$ ——大于等于窗口数据长度且小于  $N$  的整数  
 根据公式(8)计算的  $l_p$  值,即可从垄上测距传感器检测到靶标开始到喷头到达靶标的时间

$$t_1 = \frac{l}{v} \quad (9)$$

其中  $l = l_p - w$

式中  $v$ ——机具当前行走速度

从零时刻开始到发出开关阀命令的时间记为  $T$ ,则有

$$T = t_1 - T' - T'' \quad (10)$$

式中  $T'$ ——软件处理延时时间

$T''$ ——开关阀响应时间

系统确定的下一个高度变异点即为检测到的垄上土壤,两个高度变异点之间数据的个数记为  $M$ ,则开关阀打开时间  $t_2$  为

$$t_2 = \frac{M}{f_v} - T' - T'' \quad (11)$$

开关阀打开经过  $t_2$  时间后即可关闭,并对下一靶标继续上述过程。

## 3 对靶系统大田试验

喷杆喷雾机精确对靶施药系统在诸城市辛兴镇

西元烟叶农场进行大田试验(图7),选取作物为团棵期烟草植株。烟草的团棵期持续 27 d 左右,进入本时期的植株高度在 33 cm 左右,且植株每天增长可达 3 cm,新叶每两天可增加一片,生长旺盛,为烟草植株重要的生长期。此时期的烟草植株冠层边缘距离明显,空隙比在 30% 左右,具有较好的代表性。喷杆喷雾机所用载具为履带自走式机架。

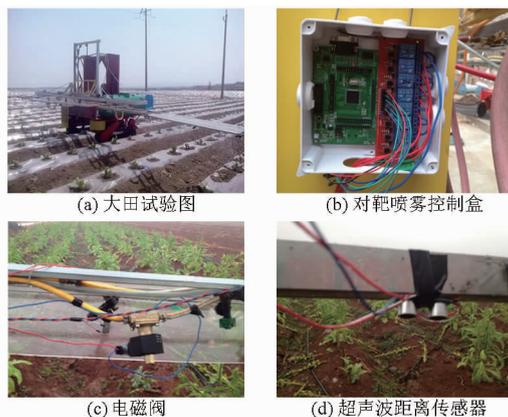


图7 大田工作图

Fig. 7 Field operations

### 3.1 传感器工作参数选择

上述喷杆喷雾机对靶方法中需要将截取的窗口数据进行标准差和平均值阈值分析从而检测出作物位置,故作物冠层高度的距离信号与垄上土壤高度的距离信号在上述两个参考值上应当有较为显著的分。经试验得出,在 20 Hz 和 40 Hz 采样频率下,垄上土壤高度距离的标准差在 15.3 ~ 29.6 范围内,较为一致。

在喷杆喷雾机工作状态下,距离传感器频率分别采用 20 Hz 和 40 Hz,喷雾机行进速度为 0.4 m/s,作物胸径平均值选择 39 cm 和 31 cm,在动态测量下每种情况采集 10 组传感器对作物冠层的测距数据。结果如表 1 ~ 4。

通过不同频率和不同胸径情况下试验采样数据可知,当采样频率为 40 Hz 时,采集数据个数少于式(5)中计算的  $L_w$  时,数据标准差明显增大。表 3、4 表明在采样频率为 20 Hz、平均胸径 39 cm 时,所采集数据的标准差数值不够稳定,且接近垄上土壤距离数据标准差值的组别较多,在进行特征分析时易混淆,对靶标的定位增加困难。所以在较高采样频率下,不同胸径作物冠层高度距离采样数据的标准差较为一致,标准差值的偏差较小,且与垄上土壤高度标准差值的差距较为明显。

### 3.2 作物命中率试验

系统试验在山东农业大学试验站进行,首先对构建好的喷杆喷雾机主动控制系统进行性能试验。系统初始化后,控制系统将喷雾机工作参数调整到

表1 采样频率40 Hz时平均胸径39 cm测距数据

Tab.1 Measurement data of 39 cm DBH in 40 Hz sampling frequency

| 组别    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数据个数  | 45    | 37    | 35    | 47    | 33    | 31    | 41    | 49    | 51    | 45    |
| 均值/mm | 448.3 | 488.5 | 454.5 | 463.2 | 462.9 | 516.3 | 454.8 | 481.9 | 456.4 | 475.6 |
| 标准差   | 57.3  | 66.7  | 52.18 | 57.3  | 72.2  | 64.3  | 57.4  | 60.6  | 58.9  | 57.8  |

表2 采样频率40 Hz时平均胸径31 cm测距数据

Tab.2 Measurement data of 31 cm DBH in 40 Hz sampling frequency

| 组别    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数据个数  | 19    | 21    | 23    | 24    | 22    | 19    | 22    | 19    | 18    | 23    |
| 均值/mm | 166.7 | 166.8 | 152.4 | 129.6 | 147.3 | 114.6 | 150.2 | 157.3 | 159.5 | 132.8 |
| 标准差   | 66.4  | 72.8  | 77.2  | 72.7  | 72.6  | 76.9  | 78.2  | 63.35 | 63.8  | 71.9  |

表3 采样频率20 Hz时平均胸径39 cm测距数据

Tab.3 Measurement data of 39 cm DBH in 20 Hz sampling frequency

| 组别    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数据个数  | 32    | 30    | 16    | 25    | 22    | 19    | 22    | 26    | 15    | 20    |
| 均值/mm | 499.2 | 482.2 | 513.4 | 517.4 | 504.5 | 505.4 | 512.7 | 510.6 | 517.3 | 512.3 |
| 标准差   | 37.9  | 83.5  | 35.6  | 56.7  | 50.3  | 55.4  | 40.5  | 28.7  | 34.8  | 41.8  |

表4 采样频率20 Hz时平均胸径31 cm测距数据

Tab.4 Measurement data of 31 cm DBH in 20 Hz sampling frequency

| 组别    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数据个数  | 11    | 9     | 11    | 12    | 10    | 14    | 9     | 8     | 7     | 8     |
| 均值/mm | 155.8 | 157.1 | 177.4 | 159.7 | 184.0 | 149.3 | 129.1 | 176.5 | 158.4 | 172.6 |
| 标准差   | 70.3  | 65.6  | 69.7  | 60.7  | 54.4  | 51.5  | 54.6  | 59.4  | 53.2  | 59.6  |

初始值(风机风速最小值,喷杆高度80 cm),之后系统根据随机监测到的环境参数对喷雾参数进行调整,记录风筒出风口风速、喷杆高度和压力表示数(可表示流量变化)开始变化的时间和调整到最佳参数的时间。表5显示了该系统调整时间,表明在大田工作中,10 s左右的准备时间可以满足要求。

表5 系统控制量调整时间

Tab.5 Adjustment time of system controlling parameters

| 试验号 | 风速响应/<br>调整时间 | 喷杆高度响应/<br>调整时间 | 喷雾量响应/<br>调整时间 |
|-----|---------------|-----------------|----------------|
| 1   | 1.6/6.2       | 1.5/6.8         | 2.2/4.2        |
| 2   | 2.4/4.8       | 2.2/5.1         | 2.4/6.3        |
| 3   | 2.3/4.5       | 2.2/5.6         | 2.7/4.7        |
| 4   | 3.0/5.6       | 1.7/6.3         | 3.4/5.6        |
| 5   | 2.3/6.9       | 2.7/5.4         | 2.8/5.3        |

将试验作物旁边放置一行宽度为10 cm的定性滤纸作为喷雾雾滴的载体,方向平行于喷雾机行进方向,喷头在垂直方向对准滤纸行而不是植物,药液用结晶紫生物染色剂加蒸馏水配制体积分数为0.1%的溶液代替,按正常喷雾作业速度进行喷施。观察喷洒在滤纸上有色区域的长度,并将此长度与

相应位置的作物植株胸径对比,作物相对于喷雾机前进方向的前端和后端包含在有色区域内时,即认为对靶喷雾状态下命中作物。选择冠层边缘距离分别为21、15、7 cm 3组植物为试验对象,连续的50株为一次试验,每组进行3次,在机具通过速度0.4 m/s时,具体命中率见表6。

表6 对靶命中率

Tab.6 Target hit rate

| 组别 | 第1次 | 第2次 | 第3次 |
|----|-----|-----|-----|
| 1  | 98  | 94  | 98  |
| 2  | 94  | 90  | 92  |
| 3  | 100 | 100 | 100 |

试验采样频率选择为40 Hz,在系统工作过程中能够节省采样时间和分析时间,并能有效对垄上土壤和作物冠层作区分,从而对靶标作物进行定位和施药。表6表明,冠层距离增大情况下,施药命中率增加达到98%以上,能够有效节省药量。但在冠层距离减小时,由于存在系统延时,命中率有所下降。但随着冠层距离进一步减小,在第3组试验中未有明显的电磁阀开关动作,故喷雾命中率达到100%,没有参考价值。

### 3.3 大田环境作业效果试验

喷杆喷雾精确对靶施药系统实物如图7所示。大田试验选取进入团棵期后生长天数不同的烟草植株,如图8所示,植株的行距为120 cm,植株株距 $L_3$ 为50 cm,植株冠层边缘距离 $L_2$ 为5~20 cm,植株冠层胸径为 $L_1$ ,喷杆喷雾机行驶速度0.4 m/s,传感器采样频率为40 Hz。选取3组不同时期的烟苗植株作为试验对象,每组烟草植株参数见表7。

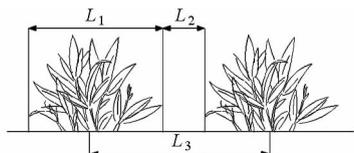


图8 烟草植株参数示意图

Fig. 8 Schematic of field operations

表7 烟草植株参数

Tab. 7 Main parameters of plants

| 组别 | 植株行长度/m | 冠层胸径总和/m | 冠层边缘平均距离/cm | 平均株距/cm | 平均高度/cm | 平均胸径/cm |
|----|---------|----------|-------------|---------|---------|---------|
| 1  | 321     | 199      | 21          | 50      | 34      | 31      |
| 2  | 319     | 223      | 15          | 50      | 39      | 35      |
| 3  | 319     | 246      | 7           | 50      | 46      | 39      |

试验中药液用清水代替,药液箱容量为15 L,对每组植株进行连续喷雾和对靶喷雾,每组3次,每次喷雾试验前后对药液箱总药液量进行读取并记录。

定义植株间距比例为 $\tau$ ,冠层边缘距总和为 $u$ ,植株行长度 $l_z$ ,省药率为 $\eta$ ,对靶喷雾量和连续喷雾量分别为 $v_d$ 、 $v_l$ ,则

$$\tau = \frac{u}{l_z} \times 100\% \quad (12)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{v_d}{v_l}\right) \times 100\% \quad (13)$$

如表8所示,机具行走速度为0.4 m/s,第1组烟草植株处于团棵期早期的阶段,平均植株冠层边

表8 大田喷雾试验数据

Tab. 8 Data of spray experiment in field

| 组别 | 次序 | 植株行长度/m | 植株间距比例/% | 机具速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 连续喷雾量/L | 对靶喷雾量/L | 省药率/% |
|----|----|---------|----------|---------------------------|---------|---------|-------|
| 1  | 1  |         |          |                           | 8.7     | 5.9     | 32.2  |
|    | 2  | 321     | 39.2     | 0.4                       | 9.3     | 6.7     | 27.9  |
|    | 3  |         |          |                           | 9.1     | 6.2     | 31.9  |
| 2  | 1  |         |          |                           | 8.5     | 6.9     | 18.8  |
|    | 2  | 319     | 31.6     | 0.4                       | 8.6     | 6.9     | 19.8  |
|    | 3  |         |          |                           | 9.2     | 7.5     | 18.5  |
| 3  | 1  |         |          |                           | 9.2     | 8.7     | 5.4   |
|    | 2  | 319     | 23.5     | 0.4                       | 8.2     | 8.6     | -4.8  |
|    | 3  |         |          |                           | 9.1     | 8.5     | 6.6   |

缘距为21 cm,与第2组、第3组相比较,植株间距总和所占植株行长度的比例达39.2%,节省了30%左右的药液;第2组空隙比为31.6%,节省了20%左右的药液;第3组植株平均冠层边缘距较小,只有7 cm,空隙比为23.0%,从命中率试验中已经得出电磁阀开关动作不明显,几乎处于一直喷药的状态,节省药液量不具有参考价值。

### 3.4 大田环境作业试验波形

试验表明,经过处理的信号较好保证了施药命中率,截取系统在实际作业中采集的一段连续的距离信号,如图9所示。喷杆喷雾机在正常工作情况下进行试验,垄沟测距传感器采集喷杆到植物冠层的距离,垄上测距传感器采集喷杆到地面的距离,经中值滤波处理后信号如图9a所示;去除垄沟测距传感器振动信号后如图9b所示,调幅处理后即可得更接近植物冠层高度真实情况的信号,如图9c所示。可以看到处理过的信号较为平整,达到了精确施药的控制要求。

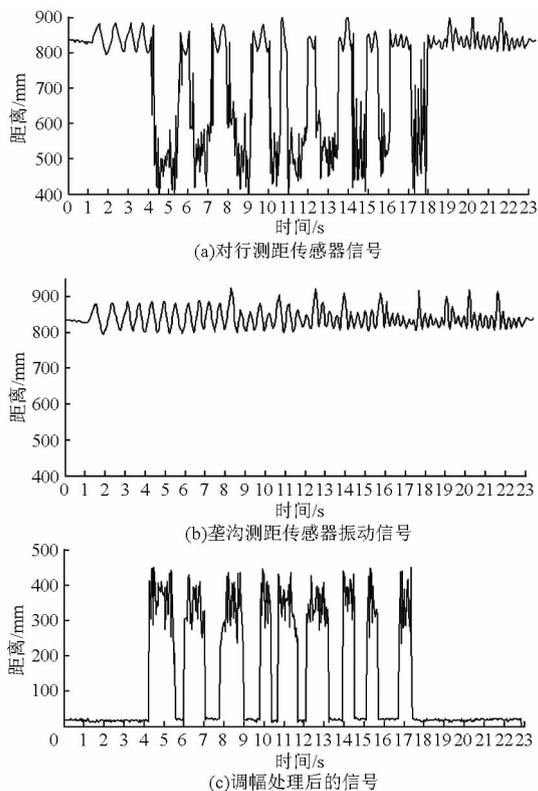


图9 调幅处理前后波形

Fig. 9 Wave form before and after processing

## 4 结束语

针对植株行距、株距较大的作物对行施药的农艺要求,设计了喷杆喷雾精确对靶施药系统。根据作物植株间距较大的生长期,将作物识别技术与农药喷洒技术结合在一起,只针对作物植株进行精确对靶施药。通过对采集到的植物冠层距离信号采取

调幅处理的方法去除因机架自身振动和路况所产生的噪声,能够还原没有振动干扰时采样信号,更为准确地得到植物冠层高度信号。通过试验表明,采样频率为 40 Hz 时,不同胸径作物冠层高度距离采样数据的标准差较为一致,范围为 57.3 ~ 78.2,标准差值的偏差较小;垄上土壤部分采样标准差范围为 15.3 ~ 29.6。垄上土壤的高度标准差和作物冠层高度标准差数值相差较大,可作为区分靶标与非靶标的条件之一。通过将测距传感器安装于超前喷头 40 cm 的位置,在 0.4 m/s 的行驶速度下,能够有 1 s

的时间保证系统的电磁阀动作,对靶喷雾系统在确定靶标开始边缘时,根据试验情况设定延时,并提前靶标 2 cm 距离开始喷雾、离开靶标 2 cm 距离停止喷雾,使植株冠层能够被雾滴笼罩,确保施药效果。通过信号调幅处理方法和窗口数据模式分析的对靶策略,实现了喷杆喷雾精确对靶系统工作的稳定性,且在植株平均胸径 31 cm,植株平均间距 21 cm 的大田里,节省药液 30% 左右,具有较高的实用性;在植株平均胸径 35 cm,植株平均间距 15 cm 的大田里,节省药液 20% 左右。

### 参 考 文 献

- 刘雪美,苑进,张晓辉,等. 3MQ-600 型导流式气流辅助喷杆弥雾机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 8-12. LIU Xuemei, YUAN Jin, ZHANG Xiaohui, et al. Development and experiment on 3MQ-600 type air-assisted boom sprayer with air-deflector[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 8-12. (in Chinese)
- CHEN Y, ZHU H, OZKAN H E, et al. Spray drift and off-target loss reductions with a precision air-assisted sprayer[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(6): 1273-1281.
- 陈勇,郑加强. 精确施药可变量喷雾控制系统的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 69-72. CHEN Yong, ZHENG Jiaqiang. Control system for precision pesticide application based on variable rate technology[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 69-72. (in Chinese)
- 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)
- 赵茂程,郑加强. 树形识别与精确对靶施药的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 150-153. ZHAO Maocheng, ZHENG Jiaqiang. Tree crown recognition and precision toward-target pesticide application[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 150-153. (in Chinese)
- 曹峥勇,张俊雄,耿长兴,等. 温室对靶喷雾机器人控制系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 228-233. CAO Zhengyong, ZHANG Junxiong, GENG Changxing, et al. Control system of target spraying robot in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2): 228-233. (in Chinese)
- 张俊雄,曹峥勇,耿长兴,等. 温室精准对靶喷雾机器人研制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 70-73. ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, GENG Changxing, et al. Research on precision target spray robot in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 70-73. (in Chinese)
- 尹东富,陈树人,毛罕平,等. 基于模糊控制的棉田变量对靶喷雾除草系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 179-183. YIN Dongfu, CHEN Shuren, MAO Hanping, et al. Weed control system for variable target spraying based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 179-183. (in Chinese)
- 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)
- 何雄奎,严荷荣,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. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 78-80. (in Chinese)
- 邓巍,何雄奎,张录达,等. 自动对靶喷雾靶标红外探测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2285-2289. DENG Wei, HE Xiongkui, ZHANG Luda, et al. Target infrared detection in target spray[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2285-2289. (in Chinese)
- 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)
- 陆健,毛罕平,陈树人. 基于 ARM 7 的精确对靶喷施除草嵌入式控制系统[J]. 农机化研究, 2009(12): 76-79. LU Jian, MAO Hanping, CHEN Shuren. Embedded weed control system for target precision spraying based on ARM 7[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(12): 76-79. (in Chinese)
- 张霖,赵祚喜,俞龙,等. 超声波果树冠层测量定位算法与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 192-197. ZHANG Lin, ZHAO Zuoxi, YU Long, et al. Positioning algorithm for ultrasonic scanning of fruit tree canopy and its tests[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 192-197. (in Chinese)
- 耿爱军,张晓辉,曹胜柱,等. 烟草抑芽剂智能对靶施药系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 35-40. GENG Aijun, ZHANG Xiaohui, CAO Shengzhu, et al. Development and experiment of intelligent toward-target system of spraying restrain-germinatin pesticide on tobacco[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 35-40. (in Chinese)
- 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72. QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. (in Chinese)