

# 果树叶片雾滴沉积量检测系统设计与试验

杨 玮 郝子源 李民赞 张 旭

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083)

**摘要:** 为了获取植保无人机喷药后雾滴在果树叶片表面的沉积量,设计了面向植保无人机果树低空施药的果树叶片雾滴沉积量检测系统。该系统由 LWS 型叶面湿度传感器、数据传输模块、上位机检测软件组成。通过 LWS 型叶面湿度传感器的标定试验,建立了电导率为 553  $\mu\text{S}/\text{cm}$  自来水、860  $\mu\text{S}/\text{cm}$  甲基硫菌灵溶液、1 525  $\mu\text{S}/\text{cm}$  磷酸二氢钾叶面肥溶液的回归方程,通过分光光度计验证试验验证了方程的准确性。之后,建立基于 ZigBee 的传感器系统数据无线传输网络。同时,利用 Qt 编写了具有数据分析和显示功能的上位机程序,建立了完整的果树叶片雾滴沉积量检测系统。最后,利用 WSZ-4X 型植保无人机在樱桃果园中进行了检测系统与水敏纸的对比试验。对比结果显示,使用两种方法获得的雾滴沉积密度曲线的拟合度可达 0.926 6。对于单个测量点的雾滴沉积密度,其平均误差为 22.8%。在果园中进行试验时,受风速和无人机气流等环境因素的影响,传感器和水敏纸的雾滴分布会出现一定的差异,忽略环境因素影响,可认为两种方法在樱桃果园中测量得到的雾滴沉积密度一致性较好,而使用果树叶片雾滴沉积量检测系统可以更加快速、方便、实时地采集农药雾滴在叶面上的沉积量。

**关键词:** 果树叶片; 无线网络; 雾滴沉积量; 植保无人机

**中图分类号:** TP212.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0008-07

## Detecting System Design of Droplet Deposition on Fruit Leaves

YANG Wei HAO Ziyuan LI Minzan ZHANG Xu

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to obtain the deposition value of the droplets on the leaves of the fruit trees after spraying, a detecting system of droplet deposition on fruit leaves used in low altitude pesticide spraying was developed. The system consisted of dielectric leaf wetness sensor, data transmission module and host computer detection software. Through the calibration experiment of dielectric leaf wetness sensor, the regression equations of three solutions, which were tap water with 553  $\mu\text{S}/\text{cm}$  of EC, thiophonate-methyl with 860  $\mu\text{S}/\text{cm}$  of EC, and  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  foliar fertilizer with 1 525  $\mu\text{S}/\text{cm}$  of EC, were established. The accuracies of the regression equations were verified by spectra photometry. Then, a wireless data transmission sensor system based on ZigBee was developed. Moreover, the Qt platform was used to write the host computer program including data analysis and display functions. Finally, the contrast test between water sensitive paper and this system was carried out by using WSZ-4X type plant protection UAV in a cherry orchard. The results showed that the coefficient of correlation between the density values of the droplet deposition obtained by two methods was 0.962 6. For a single measurement point, the average error of the droplet deposition density was 22.8%. In the orchard experiments, under the influence of the wind speed and the unmanned aerial vehicle air flow and other environmental factors, the droplet distribution on the sensor and the water sensitive paper appeared certain differences. The consistency of the droplet deposition density obtained by two methods was preferable if the influence of environmental factors was ignored. However, the droplet deposition on leaves was acquired quickly, conveniently, timely and simply by using the developed system.

**Key words:** fruit leaf; wireless network; droplet deposition; plant protection unmanned aerial vehicle

收稿日期: 2017-07-03 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200700-2016YFD0200706)

作者简介: 杨玮(1981—),女,副教授,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

## 引言

现代果树生产经营规模正向大中型发展,对果树病虫害的防治是其中的一个重要工作,过去靠人力对果树喷洒农药的方式在这种经营模式不再适用。随着社会的发展和科技的进步,无人机在农业领域的应用已极为广泛,利用无人机进行喷雾作业具有成本低廉、节约人力、灵活性好、施药效率高等特点<sup>[1-6]</sup>。

如今,利用无人机喷雾的作业方式正在逐渐普及,随着无人机利用率的提高,无人机的喷雾质量问题也备受关注。在衡量无人机喷雾质量时,测量植株叶片上的雾滴沉积量是一个重要的方面,它可以直接反映出植物对农药喷雾的利用率。此外,当叶面有一定水汽时,叶面很容易受一些真菌和细菌感染。及时得到果树叶片的雾滴沉积量信息,可以预知果树疾病的发生,从而对果树采取相关的保护措施<sup>[7-10]</sup>。因此,国内外的学者针对雾滴沉积量进行了一系列的研究。张盼等<sup>[11]</sup>使用丽春红 2R 溶液和卡纸进行雾滴的标识和收集,用图像处理技术分析雾滴沉积参数。王玲等<sup>[12]</sup>通过荧光粉测试方法对悬停无人机变量喷药的雾滴沉积规律进行了试验研究。BRADLEY 等<sup>[13]</sup>对示踪剂进行了实验室评估,研究了通过比较处理过样品的荧光与已知染料浓度的参考样品的荧光测量雾滴沉积的方法。FOX 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于视觉效果雾滴沉积测量方法。使用成像系统对水敏纸进行了分析,测量了雾滴大小、点数和区域覆盖率。目前,雾滴沉积量的测量方法主要有水敏纸测量和示踪剂分析。而这两种方法都不能实时获得雾滴沉积量,且测量过程复杂、测量成本高。

叶面湿度传感器(Leaf wetness sensor, LWS)通过仿叶片介质的上表面介电常数的变化,来测量表面水或冰的存在量。该湿度传感器能够精确的测量叶面湿度,进而得到叶面的微量水分信息。无人机施药后,果树叶片的雾滴沉积量较小,检测困难,而该湿度传感器灵敏度高,可以进行叶片沉积雾滴的测量。

因此,本文基于变介电常数电容器原理的 LWS 型叶面湿度传感器,开发无人机低空施药中果树叶片雾滴沉积量自动检测系统以实现对果树叶片沉积量的实时测量,针对果树叶片雾滴沉积量检测系统进行一系列试验以实现系统功能,并通过无人机试验验证该检测系统在果园喷雾环境中测量叶片雾滴沉积量的实用性。

## 1 叶片雾滴沉积量检测系统设计

### 1.1 叶面湿度传感器设计与试验

#### 1.1.1 传感器原理

LWS 型叶面湿度传感器是一种变介电常数电容器原理的传感器,变介电常数电容器由 2 个平行电极组成,极间以空气为介质,其电容计算公式为

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1)$$

式中  $\epsilon$ ——两极板间介电常数

$S$ ——极板正对表面积

$d$ ——两极板间距

变介电常数电容器的原理是保持电容器的  $S$  和  $d$  固定不变时,通过改变两极板间电介质,使介电常数发生改变,从而引起电容器电容的变化。

LWS 型叶面湿度传感器外形采用仿叶片设计,真实模拟叶面特性,因而能够更准确地反映叶面环境的情况。LWS 型叶面湿度传感器的外形以及局部电容器放大示意图如图 1 所示。传感器的表面分布着一排又一排并联且间距相等的变介电常数电容器,电容器固定于树脂板上,表面用绝缘涂层喷涂<sup>[15]</sup>。A、B 为间距为  $d$  的固定金属板,两极板的正对表面积为  $S$ 。

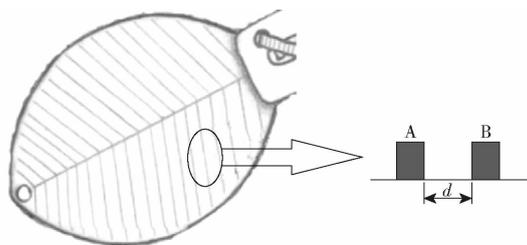


图 1 LWS 型叶面湿度传感器示意图

Fig. 1 Diagram of dielectric leaf wetness sensor

当没有雾滴沉积时,传感器表面的电容器两极板间的电介质为空气,此时的介电常数为  $\epsilon_0$ ,电容器的电容  $C_0$  计算公式为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (2)$$

当传感器表面有雾滴沉积时,电容器两极板间的电介质会变成空气与雾滴的混合物,由于雾滴与空气的介电常数不同,因此电容器两极板间的介电常数会发生改变。两极板间的空气与雾滴混合物可以近似的当成两者所对应的极板表面积不同,假设空气对应的表面积为  $S_0$ ,雾滴对应的表面积为  $S_1$ ,雾滴的介电常数为  $\epsilon_1$ ,根据电容的计算公式,可以知道传感器表面有雾滴沉降时,电容器的电容  $C_1$  为

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 S_0 + \varepsilon_1 S_1}{d} = \frac{\varepsilon_0(S - S_1) + \varepsilon_1 S_1}{d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)S_1}{d} = C_0 + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)S_1}{d} \quad (3)$$

由式(3)可以推导出沉积在两极板间液体的体积为

$$V = S_1 d = \frac{(C_1 - C_0)d^2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \quad (4)$$

假设沉积液体的密度为  $\rho$ , 根据液体密度公式, 可以计算得到沉积在两极板间液体的质量为

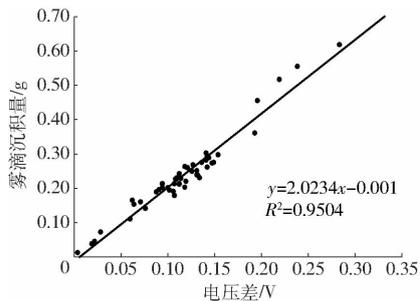
$$m = \rho V = \frac{\rho(C_1 - C_0)d^2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 对于该传感器来说, 当喷洒同一种液体时, 传感器的雾滴沉积量只与电容器的电容变化有关, 因此, 从理论分析来看, LWS 型叶面湿度传感器表面的雾滴沉积量可以通过雾滴在传感器表面沉积后引起的电容变化来反映。

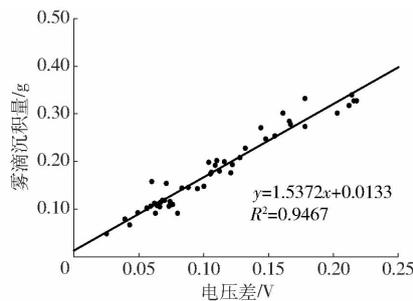
### 1.1.2 叶面湿度传感器标定实验

LWS 型叶面湿度传感器输出为电压, 但果树叶片雾滴沉积量检测系统最终要得到的是传感器表面的雾滴沉积量。因此, 该实验的目的是探究传感器表面雾滴沉积量与输出电压的关系。

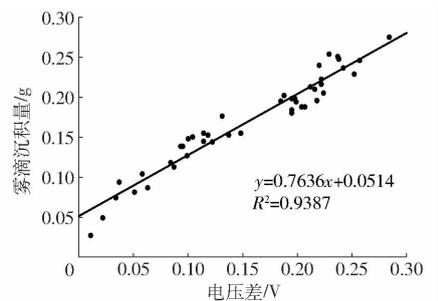
由于溶液的电导率对 LWS 型叶面湿度传感器的输出电压有较大的影响, 因此, 在标定实验时, 要



(a) 自来水沉积时传感器回归方程



(b) 甲基硫菌灵溶液沉积时传感器回归方程



(c) 磷酸二氢钾叶面肥溶液沉积时传感器回归方程

图2 3种液体分析结果图

Fig.2 Analysis results of three liquids

从图2中可以看出, 3种液体的决定系数均在0.9以上, 因此, 可以认为LWS型叶面湿度传感器表面雾滴沉积量与输出电压差具有线性关系, 在喷洒相同电导率的药物时, 数据分析得到的回归方程可用于计算传感器表面雾滴沉积量。

### 1.1.3 叶面湿度传感器验证实验

为了验证使用传感器标定实验中的方法得到的回归方程在计算雾滴沉积量时的准确程度, 使用分光光度计设计了LWS型叶面湿度传感器验证实验。分光光度计是实验室中测量沉积量较为普遍的一种方法, 可认为该方法测得的沉积量准确<sup>[16-18]</sup>。

该实验选择的分光光度计为上海光谱仪器有限

区分溶液的电导率。该实验选择了3种液体作为实验液体, 分别为樱桃树常用的电导率为860  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的甲基硫菌灵溶液和电导率为1525  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的磷酸二氢钾叶面肥溶液, 以及起对照作用的电导率为553  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的自来水。每次喷雾前用无尘纸将传感器擦拭干净, 将传感器放置在塑料皿上方, 实验前用万用表测量传感器的输出电压记为  $U_1$ , 用分析天平称量并记录塑料皿的质量  $m_1$  和喷雾瓶的质量  $m_2$ 。使用喷雾瓶对传感器进行喷雾, 喷雾后, 测量并记录传感器的输出电压  $U_2$  以及塑料皿的质量  $m'_1$  和喷雾瓶的质量  $m'_2$ 。3种液体分别重复实验50次。实验后, 计算传感器的输出电压差为

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (6)$$

当忽略实验过程中雾滴的蒸发以及对传感器喷雾时雾滴在塑料皿外的微量溅出, 可以近似的认为喷雾后传感器表面的雾滴沉积质量为

$$m = m_2 - m'_2 - (m'_1 - m_1) \quad (7)$$

根据式(6)、(7)得到喷雾后传感器表面的雾滴沉积质量和输出电压差, 用最小二乘法分别对3种液体的数据进行分析, 分析时以电压差作为自变量, 以雾滴沉积量作为因变量。最小二乘法实现简单、计算方便, 在数据量较小时, 使用该方法处理可以得到准确的结果。3种液体的回归分析结果如图2所示。

公司制造的752型紫外可见分光光度计。以电导率为553  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的自来水作为实验液体, 在水中加入质量分数为0.25%的柠檬黄87作为示踪剂。在LWS型叶面湿度传感器旁放置与传感器表面积相同的聚乙烯片, 在传感器与聚乙烯片正中间40 cm高度处进行喷雾, 喷雾后, 记录传感器的电压并用自来水沉积时传感器回归方程计算传感器表面的雾滴沉积质量。聚乙烯片放入玻璃皿中, 加入5 mL去离子水洗脱, 将试验液体作为标定液与洗脱液分别放入比色皿中, 用分光光度计测定吸光度, 重复实验50次。

吸光度计算公式为

$$A = abc \quad (8)$$

式中  $a$ ——吸光系数,  $L/(g \cdot cm)$

$b$ ——光在样本中经过的距离(通常为比色皿的厚度),  $cm$

$c$ ——溶液浓度,  $g/mL$

由于  $a$  是与溶质有关的一个常量, 在实验中使用的比色皿厚度相等, 可认为  $b$  为常量, 因此, 吸光度与吸光物质的浓度  $c$  成正比。

设标定液的浓度为  $c_1$ , 洗脱液的浓度为  $c_2$ , 由于喷到聚乙烯片上的标定液与加去离子水洗脱后洗脱液的溶质质量相同, 设喷到聚乙烯片上的雾滴总体积为  $V_1$ , 单位  $mL$ , 雾滴中溶质的质量为  $m$ , 单位  $g$ , 洗脱后的洗脱液体积为  $V$ , 单位  $mL$ , 加  $5 mL$  去离子水洗脱, 所以洗脱液的浓度  $c_2$  为

$$c_2 = \frac{m}{V} = \frac{c_1 V_1}{V_1 + 5} \quad (9)$$

由于吸光度与吸光物质的浓度  $c$  成正比, 设标定液的吸光度为  $A_1$ , 洗脱液的吸光度为  $A_2$ , 可得

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{c_1}{\frac{c_1 V_1}{V_1 + 5}} = \frac{V_1 + 5}{V_1} \quad (10)$$

$$\text{所以 } V_1 = \frac{5A_2}{A_1 - A_2} \quad (11)$$

取适量标定液, 测量其质量与体积, 计算出标定液的密度  $\rho_1$ , 则聚乙烯片上的雾滴沉积质量  $m_1$  的计算公式为

$$m_1 = \rho_1 V_1 = \frac{5\rho_1 A_2}{A_1 - A_2} \quad (12)$$

根据式(12), 可以计算出聚乙烯片上的雾滴沉积质量。将 LWS 型叶面湿度传感器测得的雾滴沉积量与分光光度计测得的雾滴沉积量进行比较, 结果如图 3 所示。

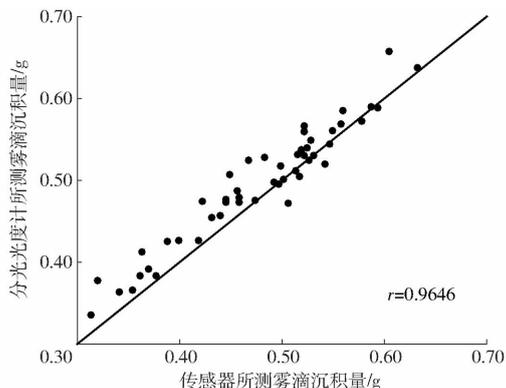


图3 分光光度计与传感器测量结果对比图

Fig. 3 Comparison between spectrophotometer and sensor

验证结果显示两种方法所测得的雾滴沉积量的误差范围在  $0 \sim 18.13\%$  之间, 平均误差为  $4.90\%$ , 均方根误差为  $0.027$ 。存在误差的主要因素为喷雾

后, 无法保证每次实验沉积在 LWS 叶面湿度传感器和聚乙烯片上的雾滴量都完全一致, 因此, 从实验结果来看, 两种方法测得的雾滴沉积量平均误差较小且数据离散程度较小, 标定实验得到的回归方程准确, 可以用于实际雾滴沉积量的计算。

## 1.2 叶片雾滴沉积量检测系统设计

### 1.2.1 系统结构

上述研究为整个系统的搭建提供了理论基础。系统首先通过 LWS 型叶面湿度传感器采集叶片湿度信息, 将其转换成电压信息后传递到 ZigBee 子节点中, 通过子节点把数据发送到 ZigBee 协调器上传出, 在上位机上利用推导出的雾滴沉积量与电容传感器输出电压的关系方程, 计算出雾滴沉积量并在上位机显示与存储。系统整体结构如图 4 所示。

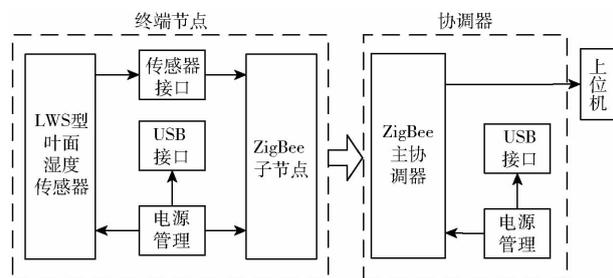


图4 系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of the system

### 1.2.2 数据传输模块

系统的数据传输模块主要功能是实现通过 ZigBee 子节点接收 LWS 型叶面湿度传感器输出的电压, 将其转换为数字量, 通过无线网络传送到远距离放置的 ZigBee 协调器, 并通过串口将数据发送至上位机。该模块是基于 NXP Jennic 公司的 JN5168 进行开发的。JN5168 是一款超低功耗、高性能 MCU, 集成了 IEEE802.15.4 兼容的  $2.4 GHz$  射频收发器。

软件的开发设计使用 NXP 刻制化后的 Eclipse 软件平台, 以及烧录工具 JN5168 Flash Programmer。

使用 JN5168 集成 ADC 实现对传感器输出电压的采集, JN5168 集成 10 位 ADC, ADC 可以使用外部输入, 也可以采样内部集成的温度传感器和电源电压。

ZigBee 子节点与主协调的无线数据传输是基于 IEEE 802.15.4 协议栈编写。IEEE 802.15.4 协议是一个基础的网络协议, 协议本身实现了基本的星形网络拓扑结构以及基本的无线网络创建和节点的管理。协议本身不具备复杂的网络拓扑结构, 开发的灵活性也足够大。

编写串口通信模块实现 ZigBee 协调器与上位机的通信, JN5168 集成有 2 个串口, 分别是 Uart 0

和 Uart 1, 2 个串口都和输入输出共用。本程序使用 Uart0 进行读写操作, 串口属性设置为波特率 115 200、数据位 8、校验位 no、停止位 1、无流控。

### 1.2.3 上位机检测软件

上位机检测软件主要功能是实现对 ZigBee 主协调器通过串口传输的数据进行接收和处理, 得到雾滴沉积量, 然后显示在主界面并可以保存在 Excel 表格中。软件的编写平台为 Qt 5.8。

在 Qt 中使用 Qt SerialPort 模块操作串口, Qt SerialPort 模块是 Qt 5.8 的附加部分, 为硬件和虚拟的串口提供了统一的接口。使用 Qt SerialPort 模块, 开发者可以大大缩短开发串口相关应用程序的周期。该模块 API 包括 SerialPort 和 SerialPortInfo 两类。SerialPort 是该模块的基础类, 提供了一系列基础的方法和属性来访问串口资源。SerialPortInfo 是一个帮助类, 提供了系统上可用的串口的信息。

在 Qt 中使用 ActiveX 控件操作 Excel, Qt for Windows 版本提供了 ActiveQt 组件, 使用这个组件可以在 Qt 中使用 ActiveX 控件, 并且也可以开发基于 Qt 的 ActiveX 控件。ActiveQt 包含了 QAxContainer 和 QAxServer 2 个组件。QAxContainer 允许使用 COM 对象, 并且可以将 ActiveX 控件嵌入到 Qt 程序中去。QAxServer 可以将 Qt 控件导出为 COM 对象或者是 ActiveX 控件。本文只是操作 Excel 进行读取写入, 只用到了 QAxContainer。

## 2 果园田间试验与结果分析

果树叶片雾滴沉积量检测系统最终的应用环境是果园, 在果园中常用的水敏纸检测雾滴沉积密度<sup>[19-21]</sup>。在上文中, 已经建立了完整的果树叶片雾滴沉积量检测系统, 并证明通过 LWS 型叶面湿度传感器得到的雾滴沉积量数值较准确。在这一部分中, 将比较果树叶片雾滴沉积量检测系统和水敏纸在实际果园中检测雾滴沉积密度的情况。试验地点在山东省某樱桃种植基地, 植保无人机的各项参数如表 1 所示, 试验气象参数如表 2 所示<sup>[22-25]</sup>。试验液体为电导率为 553  $\mu\text{S}/\text{cm}$  的自来水, 将水敏纸与 LWS 型叶面湿度传感器间隔 5 cm 固定在树枝上, 如图 5 所示操作无人机对果树进行喷药, 记录果树叶片雾滴沉积量检测系统中上位机检测软件显示的雾滴沉积量值, 并用面积纸测量传感器的面积, 计算传感器雾滴沉积密度。用扫描仪扫描水敏纸, 用 DepositScan 雾滴沉积处理软件对水敏纸进行处理, 得到水敏纸上的雾滴沉积密度<sup>[28]</sup>。重复试验 30 次, 比较传感器和水敏纸的雾滴沉积密度的一致程度。比较结果如图 6 所示。

表 1 植保无人机技术参数

Tab. 1 Parameters of plant protection UAV

参数	数值/型号
植保无人机型号	WSZ-4X
喷头雾化标准/ $\mu\text{m}$	130
喷头直径/mm	60
喷洒流量/ $(\text{L}\cdot\text{hm}^{-2})$	3
喷幅宽度/m	2
飞行高度/m	4

表 2 试验气象参数

Tab. 2 Parameters of meteorology

参数	数值
气温/ $^{\circ}\text{C}$	27
空气相对湿度/%	55
平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.7
风向	SE



图 5 传感器与水敏纸放置位置

Fig. 5 Position of the sensor and water sensitive paper

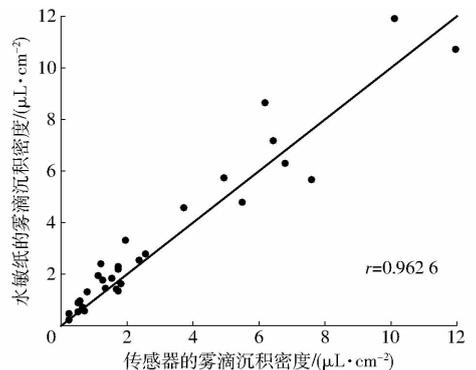


图 6 传感器和水敏纸比较结果图

Fig. 6 Comparison results of the sensor and water sensitive paper

对比结果显示, 使用两种方法获得的雾滴沉积密度曲线的拟合度可达 0.9626, 对于单个测量点的雾滴沉积密度, 其平均误差为 22.8%, 均方根误差为 0.877。在果园中进行试验时, 会受到风速等因素的影响, 而且, 植保无人机在喷洒农药时, 会产生较大的气流, 造成传感器和水敏纸的雾滴分布出现一定的差异。对收集到的水敏纸分析发现, 当喷雾

量较多时,水敏纸的雾滴会出现黏连的现象,从而影响了水敏纸检测的准确性,此外,使用水敏纸检测雾滴沉积密度在后期处理时要使用扫描仪并借助相应的处理软件,操作较为复杂。从总体来说,果树叶片雾滴沉积量检测系统与水敏纸测量得到的雾滴沉积密度一致性较好,而使用果树叶片雾滴沉积量检测系统可以快速实时地获得雾滴沉积量,在查看和保存雾滴沉积量时也比较方便和简单,相比于水敏纸,果树叶片雾滴沉积量检测系统在果园中更加适用。

### 3 结论

(1)系统使用 LWS 型叶面湿度传感器对无人

机低空施药中果树叶片雾滴沉积量进行检测。同时使用分光光度计对叶片雾滴沉积量传感器标定得到的回归方程的准确性进行了验证,验证试验中传感器与分光光度计测量的雾滴沉积量的平均误差为 4.90%,均方根误差为 0.027,误差较小、数据离散程度也较小。

(2)果园无人机低空施药试验对比了检测系统与传统水敏纸方法测量得到的雾滴沉积密度,结果显示 2 种方法获得的雾滴沉积密度曲线的拟合度可达 0.962 6,证明该系统具有很高的准确性。系统可以实时反映果树叶片雾滴沉积量的变化量,较传统的水敏纸测量方法有很大优势。

### 参 考 文 献

- 1 连德旗,王世恒,徐铭辰,等.小型无人飞行喷雾机喷雾性能试验研究与分析[J].农机化研究,2017,39(5):197-201.  
LIAN Deqi, WANG Shiheng, XU Mingchen, et al. Experimental study and analysis on spray characteristics of small scale unmanned aerial spraying in soybean field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 197-201. (in Chinese)
- 2 HUANG Y, HOFFMANN W C, LAN Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 25(6):803-809.
- 3 徐兴,徐胜,刘永鑫,等.小型无人机机载农药变量喷洒系统设计[J].广东农业科学,2014,41(9):207-210.  
XU Xing, XU Sheng, LIU Yongxin, et al. Variable pesticide spraying system design based on small UAV[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(9): 207-210. (in Chinese)
- 4 郭永旺,袁会珠,何雄奎,等.我国农业航空植保发展概况与前景分析[J].中国植保导刊,2014,34(10):78-82.  
GUO Yongwang, YUAN Huizhu, HE Xiongkui, et al. General situation and prospect analysis of agricultural aviation plant protection in China[J]. China Plant Protection, 2014, 34(10): 78-82. (in Chinese)
- 5 赵明理.浅析电动多旋翼飞行器的设计及其在农业领域中的应用[J].科技视界,2015(8):135.  
ZHAO Mingli. Analysis of the design of electric multiple rotor aircraft and its application in agriculture[J]. Science and Technology Vision, 2015(8): 135. (in Chinese)
- 6 张波,罗锡文,兰玉彬,等.基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J].农业工程学报,2015,31(17):176-182.  
ZHANG Bo, LUO Xiwen, LAN Yubin, et al. Agricultural environment monitor system based on UAV and wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 176-182. (in Chinese)
- 7 DONG M, OTA K, LIN M, et al. UAV-assisted data gathering in wireless sensor networks[J]. The Journal of Supercomputing, 2014, 70(3): 1142-1155.
- 8 THOMSON S J. Remote sensing and implications for variable-rate application using agricultural aircraft[J]. Proceedings of the Spie, 2004, 5153: 13-20.
- 9 扈菲菲,姬江涛,贺智涛,等.农田环境四旋翼 UAV 信息采集系统的设计与试验[J].河南科技大学学报自然科学版,2013,34(6):71-74.  
HU Feifei, JI Jiangtao, HE Zhitao, et al. Design and experiment of four rotor UAV information acquisition system in farmland environment[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 34(6): 71-74. (in Chinese)
- 10 张伟,余晓伟,余泳昌.电动多旋翼飞行器的特点及其在农业中的应用[J].现代农业科技,2014(13):215-216.  
ZHANG Wei, YU Xiaowei, YU Yongchang. Characteristics of electric multi rotor aircraft and its application in agriculture[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014(13): 215-216. (in Chinese)
- 11 张盼,吕强,易时来,等.小型无人机对柑橘园的喷雾效果研究[J].果树学报,2016,33(1):34-42.  
ZHANG Pan, LÜ Qiang, YI Shilai, et al. Evaluation of spraying effect using small unmanned aerial vehicle (UAV) in citrus orchard[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(1): 34-42. (in Chinese)
- 12 王玲,兰玉彬,HOFFMANN W C,等.微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(1):15-22. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160103&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160103&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.003.  
WANG Ling, LAN Yubin, HOFFMANN W C, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 15-22. (in Chinese)
- 13 BRADLEY K F, HOFFMANN W C, JANK P. A fluorescent tracer method for evaluation spray transport and fate of field and

- laboratory spray application[J]. *Journal of ASTM International*, 2011, 8(3): 1-9.
- 14 FOX R D, DERKSEN R C, COOPER J A, et al. Visual and image system measurement of spray deposits using water sensitive paper[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, 19(5): 549-552.
- 15 张瑞瑞,陈立平,兰玉彬,等.航空施药中雾滴沉积传感器系统设计与实验[J/OL].*农业机械学报*,2014,45(8):123-127. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140820&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140820&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.020.
- ZHANG Ruirui, CHEN Liping, LAN Yubin, et al. Development of a deposit sensing system for aerial spraying application[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 123-127. (in Chinese)
- 16 HUANG Y, HOFFMANN W C, LAN Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008, 25(6): 803-809.
- 17 徐德进,顾中言,徐广春,等.喷雾器及施液量对水稻冠层农药雾滴沉积特性的影响[J].*中国农业科学*,2013,46(20):4284-4292.
- XU Dejin, GU Zhongyan, XU Guangchun, et al. Influence of sprayer and application rate on pesticide deposit character on rice canopy[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(20): 4284-4292. (in Chinese)
- 18 王波,宋坚利,曾爱军,等.水稻叶片上露水对农药沉积量的影响[J].*中国农业大学学报*,2012,17(3):94-100.
- WANG Bo, SONG Jianli, ZENG Aijun, et al. Influence of dew on pesticide droplet deposition on rice leaves[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(3): 94-100. (in Chinese)
- 19 LAN Y, HOFFMANN W C, FRITZ B K, et al. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008, 24(1): 5-10.
- 20 张海星,茹煜.自走式旋翼气流静电喷杆喷雾机喷雾性能测试[J].*农机化研究*,2017,39(7):164-168.
- ZHANG Haixing, RU Yu. Performance test of a self-propelled with rotary wing air-flow assisted electrostatic spray boom sprayer[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(7): 164-168. (in Chinese)
- 21 胡碧滢,罗嘉玲.一种基于旋翼无人机飞行的测量方法[J].*电子技术与软件工程*,2016(12):104-105.
- HU Biying, LUO Jialing. A method of flight measurement based on rotorcraft UAVs[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2016(12): 104-105. (in Chinese)
- 22 姬江涛,扈菲菲,贺智涛,等.四旋翼无人机在农田信息获取中的应用[J].*农机化研究*,2013,35(2):1-4.
- Ji Jiangtao, HU Feifei, HE Zhitao, et al. The application of quad-rotor UAV in farmland information acquisition[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(2): 1-4. (in Chinese)
- 23 杜文,曹英丽,许童羽,等.无人机喷雾参数对稗稻冠层沉积量的影响及评估[J].*农机化研究*,2017,39(4):182-186.
- DU Wen, CAO Yingli, XU Tongyu, et al. Effect and assessment of UAV spraying parameters at japonica rice canopies[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(4): 182-186. (in Chinese)
- 24 ZHU H P, MASOUD S, ROBERT D, et al. Portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(1): 38-43.
- 25 薛新宇,兰玉彬.美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL].*农业机械学报*,2013,44(5):194-201. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130534&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130534&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034.
- XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 194-201. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 57 页)

- 16 王慧平.基于 Web-GIS 的农机远程监管服务系统的设计与实现[D].北京:首都师范大学,2014.
- 17 THRUN S, BURGARD W, FOX D. A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots[J]. *Machine Learning and Autonomous Robots (Joint Issue)*, 1998, 31(3): 29-53.
- 18 王陈陈,马明建,马娜,等.基于 GPS 的土地面积测量算法[J].*山东理工大学学报:自然科学版*, 2013, 27(4): 64-68.
- WANG Chenchen, MA Mingjian, MA Na, et al. Research of area measurement algorithm based on GPS[J]. *Journal of Shandong University of Technology: Nature Science Edition*, 2013, 27(4): 64-68. (in Chinese)
- 19 XIANG M, WEI S, ZHANG M, et al. Real-time monitoring system of agricultural machinery operation information based on ARM11 and GNSS[J]. *IFAC PapersOnLine*, 2016, 49(16): 121-126.
- 20 张家飞.机器人群体协同任务规划与协调碰撞[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- 21 耿海霞,陈启军,王月娟.基于 web 的远程控制机器人研究[J].*机器人*,2002,24(4):375-379.
- GENG Haixia, CHEN Qijun, WANG Yuejuan. Research on web-based telerobot[J]. *ROBOT*, 2002, 24(4): 375-379. (in Chinese)