

微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究

王 玲¹ 兰玉彬² W Clint Hoffmann³ Bradley K Fritz³ 陈 度¹ 王书茂¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;

3. 美国农业部农业研究服务局, 大学城 TX 77845)

摘要: 针对我国施药机械和农药使用技术严重落后带来的农药用量大、资源有效利用率低、农作物产量和品质下降等问题, 设计了微型无人机脉宽调制型变量喷药系统, 并利用风洞的可控多风速环境, 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。变量喷药系统由地面测控单元和机载喷施系统两部分组成, 基于 LabWindows/CVI 的地面测控软件, 采用频率为 10 Hz、占空比可调的脉冲信号经无线数传模块远程控制机载喷施系统; 机载喷施系统以 ARM Cortex-M3 系列的 STM32F103VC 微处理器为核心, 接收地面控制信号实时调节电动隔膜泵电动机转速, 以改变系统喷雾压力和喷药量, 实现变量喷雾调节。悬停风洞试验中, 选择了 PWM 占空比、喷嘴直径、电动离心喷头转速等变量, 对不同距离和风速条件下雾滴沉积效果进行了试验研究。试验结果表明, 风速是影响雾滴沉积效果的最显著因素, 雾滴沉积以抛物线形式分布在采集区域, 沉积高峰区随风速增加不仅远离喷头, 且飘移沉积量逐渐减少; 雾滴粒径在风速小于 3 m/s 时对沉积效果影响不显著, 当风速大于 3 m/s 时, 不同粒径的雾滴均发生飘移, 飘移沉积量明显减少且沉积范围向远离喷头运动; 粒径 101.74 μm 的雾滴更易发生飘移, 沉积高峰区集中在距离喷头 4 m 以外, 且飘移沉积量明显低于粒径 164.00 μm 与 228.16 μm 的雾滴。

关键词: 无人机; 变量喷药; 系统设计; 雾滴沉积

中图分类号: S252⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0015-08

Design of Variable Spraying System and Influencing Factors on Droplets Deposition of Small UAV

Wang Ling¹ Lan Yubin² W Clint Hoffmann³ Bradley K Fritz³ Chen Du¹ Wang Shumao¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510462, China

3. USDA-ARS, College Station TX 77845, USA)

Abstract: A pulse width modulation (PWM) variable spraying system based on miniature unmanned aerial vehicle was developed, and based on controllable multi-speed environment, a droplet deposition test through droplets concentration method was studied for the PWM spraying system when the UAV was hovering. The system is consisted of airborne spraying device and ground measurement and control unit. The airborne spraying device with the MCU of STM32F103VC was remotely controlled by the ground measurement and control unit which was developed by LabWindows/CVI through wireless data transmission module. Frequency of 10 Hz square wave and adjustable duty ratio were evaluated to control micro electric diaphragm pump, and then pressure and flow rate of the system were changed. The experiments were carried on under the condition of different distance and wind speed to get the relationship among deposition volume, duty ratio, nozzle type, and the rotate speed of centrifugal nozzle. The results showed that wind speed was the most significant factor influencing the droplet deposition.

收稿日期: 2015-05-27 修回日期: 2015-06-30

基金项目: 土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放课题项目(2014-SKL-01)和北京市都市农业农机装备检测监测平台建设项目(D151100003715001)

作者简介: 王玲(1987—), 女, 博士生, 主要从事虚拟仪器技术与农业信息化研究, E-mail: wangling.0928@163.com

通信作者: 王书茂(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机电一体化和计算机测控技术研究, E-mail: wangshumao@cau.edu.cn

Deposition volume was distributed in a parabolic type in the collection area, gradually decreased and the deposition peak was far away from the nozzle with increasing of wind speed. Droplet diameter was not very important to deposition when wind speed was smaller than 3 m/s. When the wind speed was greater or equal to 3 m/s, the droplet was drifted of different diameters, and the deposition volume reduced significantly and moved away from the nozzle. Small droplet size (101.74 μm) was much easier to be drifted, and the peak concentration was 4 m far from the nozzle. Also the deposition volume of small droplet size was much lower than droplet size of 164.00 μm and 228.16 μm . The optimization of spraying parameters and a theoretical support to improve the quality of aviation operations were provided by the results.

Key words: UAV; variable spraying; system design; deposition

引言

应用航空施药技术有利于实现农业病虫害的统防统治,提高农业资源利用率,实现精准喷施作业,而微小型无人机喷洒农药因具有运行成本低、作业灵活、自动控制能力强、作业高度低、飘移少,旋翼气流辅助增加气流对作物的穿透性等优点,逐步成为航空施药的重要发展趋势^[1]。但由于航空喷雾受作业条件 and 环境因素的影响,我国在航空变量施药技术、低空喷药沉积规律等方面还存在不足^[2]。

本文搭建适用于无人机的脉宽调制型(Pulse width

modulation,PWM)变量喷药系统,并通过无线数传模块实现地面测控单元对无人机变量喷药的远程控制。利用喷嘴雾化性能测试系统研究 PWM 占空比、电动离心喷头转速等变量对雾滴粒径的影响;并利用风洞的可控多风速环境,通过荧光粉测试方法,试验分析不同气流条件和雾滴粒径对沉积规律的影响。

1 无人机 PWM 变量喷药系统设计

无人机 PWM 变量喷药系统由地面测控单元和机载喷施系统两部分组成(图 1),并由无线数传模块实现两部分的远程通信。

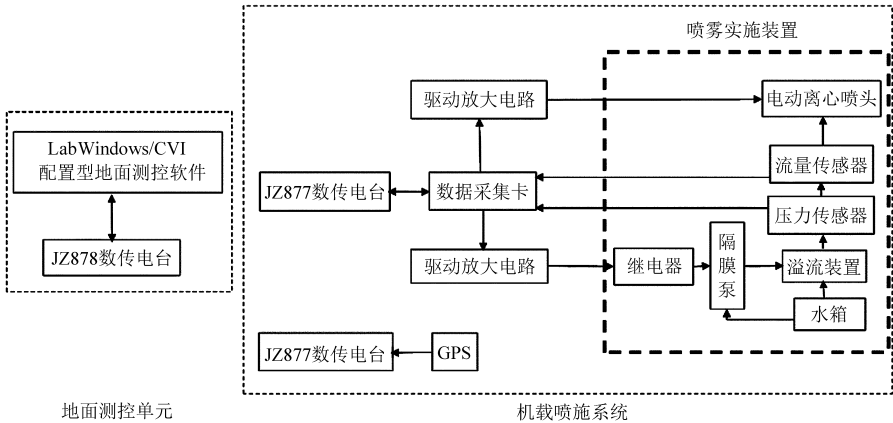


图 1 总体设计框图
Fig. 1 Diagram of overall design

无线数传模块选用技卓科技公司的 JZ878 和 JZ877 系列数传电台(图 2),可实现点对点、点对多点的多级组网通信,集收发于一体,在传输过程中通过加校验和或者 CRC 检验检错模式,保证了系统数据传输的可靠性与稳定性;该数传模块质量轻、体积小(63 mm×43 mm×15 mm),适用于微型无人机喷药系统。

1.1 配置型地面测控软件设计

以测试系统模块化、虚拟化、可复用化为理念^[3],开发了基于 LabWindows/CVI 的配置型地面测控界面,如图 3 所示。地面测控软件采用频率为

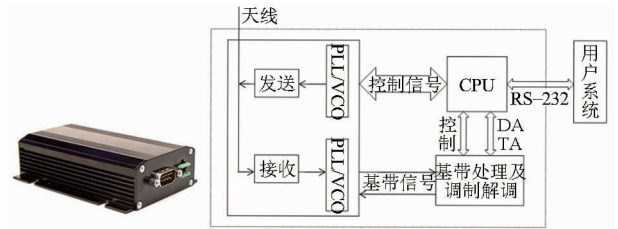


图 2 数传电台及原理框图
Fig. 2 Radio station and its system chart

10 Hz、占空比可调的脉冲信号,通过无线数传模块发射端,实现对机载喷施系统中隔膜泵的脉宽调制调速,从而改变系统压力及流量,实现无人机喷雾的

变量调节。对隔膜泵电动机采取脉宽调制调速,是在直流电源电压保持不变的情况下,通过改变 PWM 占空比来改变隔膜泵电动机导通和关断时间,从而调节隔膜泵电动机两端平均电压^[4-5]。

$$U = \frac{t}{T} U_d \tag{1}$$

式中 U ——加在电动机两端的平均电压,V
 U_d ——加在电动机两端幅值电压,V
 T ——PWM 波形周期,s
 t ——PWM 波形导通时间,s

地面测控单元还可远程传输电压信号,通过控制喷雾实施装置的电动离心喷头转速以调节雾滴粒径。



图 3 变量喷药软件界面

Fig. 3 Software interface of variable-spraying

1.2 机载喷施系统设计

机载喷施系统主要由微型无人机、数据采集模块、功率放大模块、喷雾实施装置与供电模块组成,喷雾实施装置通过水箱、隔膜泵、管道、溢流装置、流量传感器、压力传感器及电动离心喷头组成了供液系统;为实现无人机低空低量喷雾,本文选取了普兰迪 1203 型隔膜泵,其工作电压为 12 V,最大压力可达 0.5 MPa,最大流量 1.0 L/min,满足试验要求。

数据采集模块选用 USB 总线及串口通信二选一的 多功能信号采集卡,可接收地面测控单元无线传输的脉冲信号,经驱动放大后控制隔膜泵及电动离心喷头电动机转速。该系统(图 4)能实现 2 路 PWM 输出、8 路数字信号输出、16 路模拟信号采集、2 路模拟信号输出及 8 路数字信号输入。

电动离心喷头是航空喷施装备的关键部件,直接影响喷药的沉积效果;本文选用英国 Micro 公司

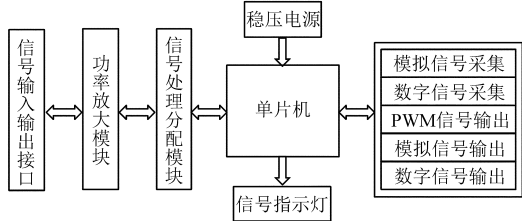


图 4 数据采集模块结构框图

Fig. 4 Structure of PWM controller

的 Ulva + 型喷头(图 5a),该离心喷头电动机与雾化转盘锁紧联接,当电动机驱动雾化转盘旋转时,隔膜泵将药液经喷嘴送到雾化转盘内,药液在离心力作用下,沿着雾化盘外缘上的齿尖螺旋状飞出,从而形成细小雾滴^[6]。该电动离心喷头有 4 种不同喷孔直径的喷嘴(图 5b),黄色喷嘴喷孔直径最小,灰色最大;该系统可通过螺栓对喷嘴类型进行更换,以获得不同喷孔直径对雾滴大小的影响。

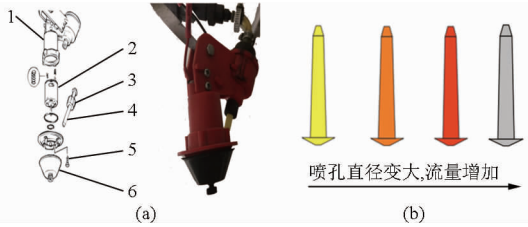


图 5 离心喷头结构与喷嘴类型

Fig. 5 Structure of centrifugal nozzle and different nozzle types

1.罩壳 2.电动机 3.螺栓 4.喷嘴 5.紧锁螺丝 6.雾化转盘

2 沉积规律试验设计与结果分析

影响雾滴沉积的主要因素包括雾滴粒径、风速、喷头作业高度等。由于飞机田间喷洒过程中飞行高度基本确定,所以在风洞试验中主要考虑雾滴粒径和风速对雾滴沉积的影响^[7],从而获得雾滴沉积规律。

2.1 雾滴粒径谱测试

2.1.1 试验条件设计

试验在美国农业部农业研究服务局(USDA-ARS)进行。喷嘴雾化性能测试系统主要由风洞、激光粒度仪、电动离心喷头及升降平台组成(图 6)。风洞风机提供水平稳定气流,离心喷头安装在 x 、 y 方向能移动的坐标架上,通过计算机控制离心喷头的上下运动使得激光粒度仪能完整地测量整个喷雾雾滴的动态雾化过程^[8]。激光粒度仪选用德国 Sympatec 公司 HELOS 型激光粒度仪,测试粒径范围可达 0.1 ~ 875 μm 。喷雾过程中,HELOS 软件记录并显示雾滴粒径测试数据及分布曲线。

试验选取 4 种不同喷孔直径的 Ulva + 型电动

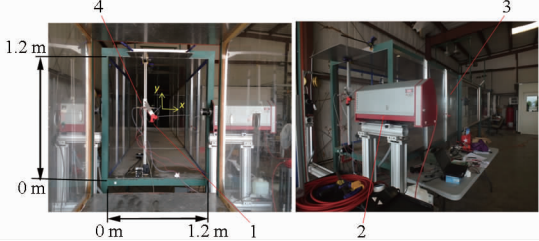


图 6 雾滴粒径测试平台

Fig. 6 Platform of droplet size

1. 离心喷头 2. 激光粒度仪 3. 风洞 4. 升降平台

离心喷头,测试了隔膜泵电动机电压、占空比、喷头直径及电动离心喷头转速对雾滴粒径的影响^[9-10]。表1给出了喷雾流量与系统压力、占空比及隔膜泵电动机电压的对应关系。测试过程中

室温恒定(23.4±0.25)℃,试验介质为带有染料的清水(质量浓度为1 g/L),雾滴粒径的表征选用体积中值直径(Volume median diameter, VMD);每组试验重复3次。

表 1 系统各参数间对应关系
Tab.1 Correspondence of different parameters

隔膜泵电动机 电压/V	占空比	系统压力/kPa				平均流量/(mL·min ⁻¹)			
		黄	橙	红	灰	黄	橙	红	灰
4	0.30	18.6	14.5	8.3	1.4	280±0.6	322±1.5	350±0.0	390±2.0
6	0.47	30.3	27.6	15.2	2.8	354±2.3	371±1.0	430±0.0	511±2.1
8	0.64	39.3	37.2	22.1	5.5	401±0.6	418±2.3	503±3.6	600±1.5
10	0.82	56.6	53.1	26.2	9.0	497±2.1	492±1.2	566±4.5	700±1.5
12	1.00	70.3	67.0	35.9	11.0	551±1.2	554±3.6	633±0.6	791±1.2

2.1.2 试验结果

由表2可知,离心喷头产生的雾滴粒径范围在101.74~228.16 μm,通过方差分析表明喷嘴类型对雾滴粒径的主效应 $F=0.717$,对应 $P=0.545>0.05$,说明同一占空比且喷嘴旋转速度相同的条件

下,喷嘴类型对雾滴粒径影响不大;而线性相关分析结果表明,雾滴粒径与PWM占空比呈正相关,相关系数0.406;与离心喷头转速呈负相关,相关系数0.725;离心喷头转速和PWM占空比是影响雾滴粒径的主要因素。

表 2 不同参数下的雾滴粒径
Tab.2 Droplet sizes of different parameters

喷嘴类型	占空比	离心喷头电动机电压(转速)		
		6 V(4 728 r/min)	9V(7 216 r/min)	12V(9 650 r/min)
黄	0.30	157.75±1.13	119.24±0.26	101.74±0.74
	0.47	171.43±0.42	134.71±0.10	113.00±0.26
	0.64	179.38±0.09	141.60±1.84	115.95±0.43
	0.82	198.71±2.53	154.62±0.81	126.44±1.08
	1.00	205.92±3.38	162.80±1.12	130.17±0.93
橙	0.30	164.00±2.21	125.80±0.94	106.54±0.95
	0.47	179.07±3.54	140.72±1.03	116.04±1.81
	0.64	178.86±1.83	140.46±0.65	117.09±0.92
	0.82	203.84±3.14	155.96±3.75	128.27±1.93
	1.00	208.29±1.74	162.09±2.65	129.74±1.80
红	0.30	158.96±2.03	125.67±1.79	105.90±1.30
	0.47	179.74±3.50	138.52±1.51	116.25±0.57
	0.64	196.60±0.68	151.75±1.38	119.50±0.78
	0.82	209.54±0.96	162.08±2.53	124.17±1.05
	1.00	218.75±1.83	170.99±1.72	129.23±0.42
灰	0.30	165.83±1.10	134.11±1.57	110.40±0.76
	0.47	188.96±0.73	158.23±0.82	122.67±0.36
	0.64	203.80±1.05	157.76±0.72	130.57±0.86
	0.82	218.38±3.95	168.93±0.75	135.43±1.39
	1.00	228.16±0.34	173.31±0.30	138.56±0.35

2.2 雾滴沉积分布测试

田间试验存在很大的不稳定性和不可控性,对影响沉积效果的因素进行量化很难,因此根据表2选取所测雾滴粒径范围内的最大值、中间值、最小值(228.16 μm、164.00 μm、101.74 μm)为研究对象^[11],利用风洞环境对影响PWM变量喷药系统沉

积效果的相关因素进行分析。

2.2.1 试验设计

沉积规律测试装置由小型无人机、风洞、PWM变量喷药系统及雾滴采集装置组成,如图7所示。选用Arducopter 3DR Hexas六旋翼无人机(图8),其螺旋桨尺寸为25.4 cm,螺旋桨由电动机带动,电动

机转速范围 0 ~ 10 200 r/min, 试验在旋翼最大转速下进行; 由于无人机旋翼产生的向下气流会影响沉积效果, 因此, 将旋翼无人机悬停在风洞上方; 风洞 (风洞有挡板, 为表示雾滴采集装置的位置, 图 7 将风洞透明化) 由风道和离心风机构成, 总长度 9.6 m, 风道截面为 1.2 m × 1.2 m, 可提供 0.5 ~ 10 m/s 的可调气流速度^[12], 试验所用风速为 1、2、3、4 m/s; 将离心喷头固定在微型无人机正下方, 试验过程中, 无人机悬停飞行高度为 1.2 m; 雾滴采集装置由 13 片 10 cm × 10 cm 方形采集片组成, 以离心喷头正下方为零点位置, 在喷雾下风方向 0.25 m、0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m、3.5 m、4.0 m 及上风方向 -0.25 m、-0.5 m、-1.0 m、-1.5 m 处分别放置采集片。试验介质采用荧光粉与水混合成浓度为 1 g/L 的溶液代替农药, 每次试

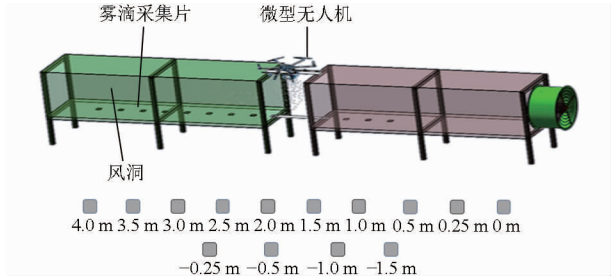


图 7 沉积测试系统与采集片放置位置
Fig. 7 Platform of deposition test and position of acquisition card



图 8 六旋翼无人机俯视图与离心喷头安装位置
Fig. 8 Top view of mini-UAV and installation site of spray nozzle

验重复 3 次。

2.2.2 试验结果

用浓度 10% 酒精清洗采样样本, 并通过 RF5301pc 型荧光光谱仪求出荧光强度^[13-14], 从而计算出雾滴在采样卡片上的沉积量

$$C_{\text{sample}} = \frac{\frac{F_{\text{wash}} C_{\text{standard}} V_{\text{wash}}}{F_{\text{standard}}}}{A_{\text{collector}}} \quad (2)$$

式中 C_{sample} ——每单位面积采样卡上雾滴沉积量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

C_{standard} ——标准溶液浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$

F_{wash} ——被测溶液荧光强度

F_{standard} ——标准溶液荧光强度

V_{wash} ——清洗样本酒精容量, mL

$A_{\text{collector}}$ ——采样卡片面积, cm^2

表 3 为 3 种雾滴粒径 101.74 μm 、164.00 μm 、228.16 μm 在方形采集片上的沉积量。

表 3 不同工况下飘移沉积量

Tab. 3 Depositions of different operating status					$\mu\text{L}/\text{cm}^2$				
风速 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	位置 $/\text{m}$	101.74 μm 平均沉积量	164.00 μm 平均沉积量	228.16 μm 平均沉积量	风速 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	位置 $/\text{m}$	101.74 μm 平均沉积量	164.00 μm 平均沉积量	228.16 μm 平均沉积量
1	-1.5	0.000 07	0.001 086	0.001 786	2	-1.5	0.000 06	0.000 242	0.000 118
	-1.0	0.000 06	0.000 169	0.010 000		-1.0	0.000 14	0.000 505	0.000 266
	-0.5	0.000 86	0.058 340	0.157 857		-0.5	0.000 15	0.002 903	0.001 088
	-0.25	0.251 80	0.975 960	1.449 011		-0.25	0.000 11	0.001 231	0.000 507
	0.25	1.326 21	1.664 870	0.933 956		0.25	0.001 56	0.000 881	0.001 252
	0.5	2.028 35	2.541 374	2.854 396		0.5	0.050 36	0.065 714	0.059 563
	1.0	0.301 07	0.410 950	0.855 714		1.0	0.238 93	0.188 214	0.219 643
	1.5	0.050 02	0.021 460	0.016 071		1.5	0.401 43	0.552 143	0.468 390
	2.0	0.002 90	0.001 209	0.000 611		2.0	0.389 29	0.705 714	0.539 370
	2.5	0.002 24	0.000 933	0.000 295		2.5	0.251 43	0.576 786	0.397 420
	3.0	0.001 87	0.001 087	0.000 212		3.0	0.121 07	0.316 786	0.207 640
	3.5	0.001 12	0.000 654	0.000 311		3.5	0.058 57	0.181 429	0.119 745
	4.0	0.001 10	0.000 480	0.000 250		4.0	0.017 14	0.088 571	0.050 893
3	-1.5	0.000 26	0.000 277	0.000 311	4	-1.5	0.000 05	0.000 057	0.000 053
	-1.0	0.000 11	0.000 160	0.000 220		-1.0	0.000 14	0.000 106	0.000 122
	-0.5	0.000 29	0.000 399	0.000 512		-0.5	0.000 17	0.000 600	0.000 357
	-0.25	0.000 19	0.000 936	0.001 930		-0.25	0.065 25	0.251 071	0.146 932
	0.25	0.000 11	0.000 503	0.000 920		0.25	0.001 13	0.008 571	0.004 398
	0.5	0.001 53	0.002 099	0.002 937		0.5	0.002 37	0.008 929	0.004 954
	1.0	0.000 74	0.005 986	0.012 143		1.0	0.000 16	0.036 429	0.016 524
	1.5	0.015 36	0.030 658	0.048 214		1.5	0.001 89	0.094 286	0.040 287
	2.0	0.034 64	0.074 937	0.117 857		2.0	0.003 93	0.217 857	0.102 934
	2.5	0.067 86	0.186 953	0.341 429		2.5	0.114 3	0.476 071	0.236 591
	3.0	0.144 29	0.305 940	0.538 214		3.0	0.048 21	0.405 000	0.203 498
	3.5	0.172 50	0.295 680	0.464 286		3.5	0.063 21	0.297 500	0.126 750
	4.0	0.173 21	0.263 185	0.382 857		4.0	0.101 43	0.248 571	0.150 380

2.2.2.1 雾滴粒径对沉积的影响

根据 2.2.1 节中雾滴沉积分布测试的试验条件得出雾滴沉积如图 9 所示。在风速为 1 m/s 的条件下,雾滴沉积范围主要集中在喷头上风方向 0.5 m 与下风方向 1.5 m 之间,雾滴沉积量随雾滴粒径增大而升高;风速为 2 m/s 时,由于风速产生飘移现象,雾滴沉积范围集中在下风方向 1 ~ 3 m 之间;风

速大于 3 m/s 时,在风力作用下雾滴产生明显飘移,101.74 μm 雾滴飘移沉积量明显减少,沉积范围移至远离喷头 4 m 外。由图可知,风速 1 m/s 时的雾滴沉积量远高于其他风速下的雾滴沉积量,其主要原因是雾滴喷洒过程中,雾滴在风洞横截面处凝结成水滴落至距离喷头 0.5 m 采集卡上,导致该点飘移沉积量明显增大。

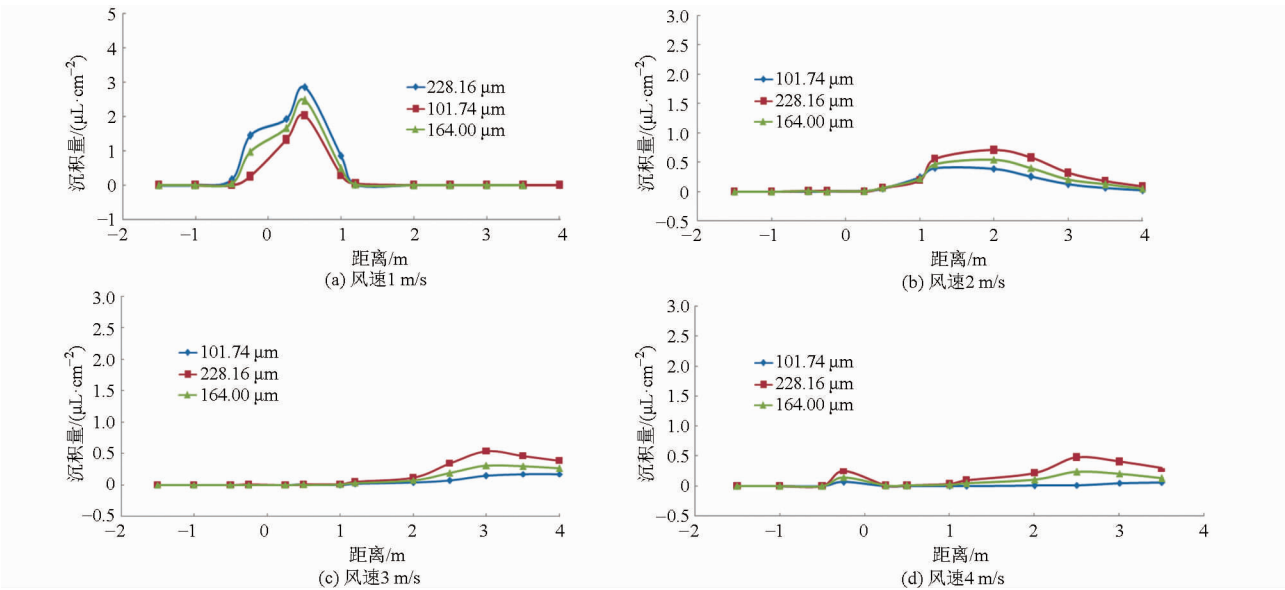


图 9 不同大小雾滴沉积量分布图

Fig.9 Deposition distributions of different drops

2.2.2.2 风速对沉积的影响

雾滴在不同风速下的沉积分布如图 10 所示。风速为 1 m/s 时,雾滴沉积高峰区^[15]主要集中在临近喷头处,出现该高峰区的主要原因是风力对雾滴

的水平作用力小,雾滴主要在自身重力和旋翼产生的垂直风力的共同作用下使得沉积在喷口前下方;随着风速的增加,雾滴所受水平风力增强,沉积高峰区向远离喷头下风方向移动,当风速大于 4 m/s 时,由于飘移作用明显,雾滴飘移沉积量明显减少,沉积高峰区距离喷头超过 3 m。

2.2.2.3 雾滴粒径与风速对沉积的影响分析

本文用 SPSS 软件进行正交设计并选取一般线性模型对数据进行分析,分析结果如表 4 所示。

表 4 风速、雾滴粒径对飘移沉积量的影响分析

Tab.4 Effect of wind velocity and droplet size on deposition

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	P
校正模型	3.426	7	0.489	2.958	0.008
截距	2.136	1	2.136	12.911	0.001
风速	2.979	3	0.993	6.002	0.001
雾滴粒径	0.042	1	0.042	0.254	0.616
风速与雾滴粒径乘积	0.405	3	0.135	0.816	0.488
误差	15.885	96	0.165		
总计	21.448	104			
校正总计	19.311	103			

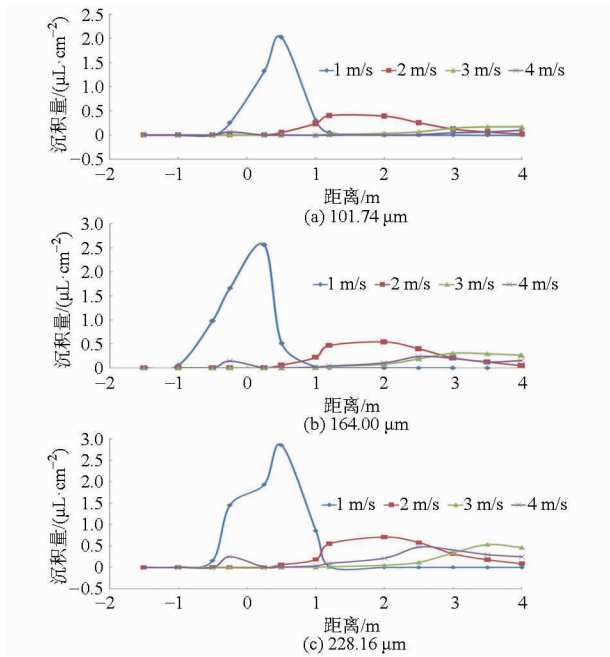


图 10 不同风速下雾滴沉积量分布图

Fig.10 Deposition distribution of drops on variable wind speed

风速对飘移沉积量影响的主效应 $F = 6.002$, 对

应的 P 值为 0.001, 小于 0.01, 具有显著的统计学意义, 说明不同风速对飘移沉积量具有重要的影响作用; 而雾滴粒径对飘移沉积量影响的主效应 $F = 0.254$, 对应的 P 值为 0.616, 大于 0.05, 说明相对于风速而言, 雾滴粒径对飘移沉积量的影响作用不显著。风速与雾滴粒径交互作用的主效应 $F = 0.816$, 对应的 P 值为 0.488, 大于 0.05, 说明风速与雾滴粒

径之间没有交互作用。

由于不同风速对飘移沉积量具有重要的影响作用, 进一步分析风速对飘移沉积量的影响作用。

由表 5 方差分析结果显示: 不同风速的飘移沉积量比较的 F 值为 6.081, 所对应的 P 值小于 0.01, 说明不同风速的飘移沉积量具有显著差异。

表 5 不同风速的飘移沉积量的比较分析
Tab.5 Analysis on deposition of different wind speeds

风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	样本量 N	平均值/($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	标准差	F	P
1	26	0.432 620 635	0.797 705 527 8	6.081	0.001 **
2	26	0.090 145 950	0.115 204 573 1		
3	26	0.035 175 673	0.054 588 451 6		
4	26	0.015 353 062	0.026 252 887 8		
总计	104	0.143 323 830	0.432 999 279 2		

注: **表示 P 值小于 0.01。

3 结论

(1) 搭建了应用于无人机的脉宽调制型变量喷药系统, 实现了地面测控软件通过调节脉冲宽度及电动离心喷头转速对机载喷施装置压力、流量、雾滴粒径的远程控制; 同时, 地面测控软件还可接收机载 GPS、流量及压力传感器数据, 进行显示、保存, 实现对无人机喷药作业的实时监测。

(2) 对无人机 PWM 变量喷药系统进行了雾滴粒径试验, 对于不同喷孔直径的同一型号电动离心喷头, PWM 占空比和离心喷头转速是影响雾滴粒径的主要因素, 离心喷头转速对雾滴粒径影响更显著; 相同占空比及喷头转速下, 喷孔直径对雾滴粒径影响不大。

(3) 无人机悬停状态下, 雾滴沉积以抛物线形式分布; 风速是影响雾滴沉积效果的显著因素, 雾滴沉积高峰期随风速增加不仅远离喷头, 且飘移沉积量逐渐减少; 雾滴粒径在风速小于 3 m/s 时对沉积效果影响不显著, 当风速大于 3 m/s 时, 不同粒径的雾滴均会发生飘移, 飘移沉积量明显减少且沉积范围向远离喷头运动; 小雾滴 (101.74 μm) 更易发生飘移, 沉积高峰期集中在距离喷头 4 m 以外, 且飘移沉积量明显低于 164.00 μm 与 228.16 μm 雾滴。

由于无人机向下气流对雾滴粒径及沉积分布有较大影响, 因此, 目前正在对无“无人机”这一特定载体条件下的变量喷雾沉积情况进行试验, 并将试验数据与有“无人机”载体时的沉积情况进行对比分析。

参 考 文 献

1 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.
Zhang Dongyan, Lan Yubin, Chen Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53-59. (in Chinese)

2 姬江涛, 唐菲菲, 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(2): 1-4.
Ji Jiangtao, Tang Feifei, He Zhitao, et al. The application of quad-rotor UAV in farmland information acquisition[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2013(2): 1-4. (in Chinese)

3 杨芙清, 梅宏, 李克勤. 软件复用与软件构建技术[J]. 电子学报, 1999, 27(2): 68-75.
Yang Fuqing, Mei Hong, Li Keqin. Software reuse and software component technology[J]. Acta Electronic Sinica, 1999, 27(2): 68-75. (in Chinese)

4 Zhu H, Lan Y B, Wu W F, et al. Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(3): 276-283.

5 刘伟, 汪小岳, 丁为民, 等. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 16-21.
Liu Wei, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 16-21. (in Chinese)

6 茹煜, 金兰, 周宏平, 等. 航空施药旋转液力雾化喷头性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 50-54.
Ru Yu, Jin Lan, Zhou Hongping, et al. Performance experiment of rotary hydraulic atomizing nozzle for aerial spraying application [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 50-54. (in Chinese)

7 茹煜,朱传银,包瑞. 风洞条件下雾滴飘移模型与其影响因素分析[J]. 农业机械学报,2014,45(10):66-72.
Ru Yu, Zhu Chuanyin, Bao Rui. Spray drift model of droplets and analysis of influencing factors based on wind tunnel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):66-72. (in Chinese)

8 郭世俭,Peter Hughes,Robert Battaglia. 几种手动喷雾器喷头雾滴尺寸的比较[J]. 浙江农业学报,1998,10(3):150-153.
Guo Shijian, Peter Hughes, Robert Battaglia. Droplet size comparisons from the nozzles of hand-operated sprayers[J]. Acta Agricultural Zhejiangensis, 1998,10(3):150-153. (in Chinese)

9 吕晓兰,何雄奎,宋坚利,等. 标准扇形雾喷头雾化过程测试分析[J]. 农业工程学报,2007,23(9):95-100.
Lü Xiaolan, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Analysis of spray process produced by agricultural flat-fan nozzles[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(9):95-100. (in Chinese)

10 陆军,李萍萍,贾卫东,等. 3种喷头雾滴输运沉积参数的试验与分析[J]. 农业机械学报,2009,40(10):53-57.
Lu Jun, Li Pingping, Jia Weidong, et al. Experiment and analysis on droplets motion and deposition parameters of 3 nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):53-57. (in Chinese)

11 吕晓兰,傅锡敏,吴萍,等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):70-75.
Lü Xiaolan, Fu Xinmin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):70-75. (in Chinese)

12 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.

13 Bradley K F, Hoffmann W C, Birchfield N B, et al. Evaluation of spray drift using low-speed wind tunnel measurement and dispersion modeling[J]. Journal of ASTM International, 2010, 7(6): 1-14.

14 Bradley K F, Hoffmann W C, Wolf R E, et al. Wind tunnel and field evaluation of drift from aerial spray applications with multiple spray formulations[C] // STP1558 Pesticide Formulations and Delivery Systems: Innovating Legacy Products for New Uses, 2012:1-18.

15 宋淑然,洪添胜,孙道宗,等. 风送电源频率对风送式喷雾机喷雾沉积的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(1):153-159.
Song Shuran, Hong Tiansheng, Sun Daozong, et al. Effect of fan power supply frequency on deposition of air-assisted sprayer[J]. Transactions of the CASE, 2011,27(1):153-159. (in Chinese)