

无人机静电喷雾系统设计与试验

茹煜, 金兰, 贾志成, 包瑞, 钱啸冬

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 为了实现无人机低空低量喷雾, 提高无人机施药后的雾滴沉积效果, 该文针对 XY8D 型无人机进行了静电喷雾系统整体设计, 重点对无人机静电喷头结构和高压静电的供给进行了描述, 并就静态条件下静电喷雾雾滴的雾化、荷电性能开展了试验研究, 确定了 0.4 L/min 流量、0.3 MPa 喷雾压力、8 kV 充电电压作为该无人机的田间试验作业参数。在水稻田中分别采用水敏纸和聚酯卡收集方法开展了不同飞行高度、静电喷雾和非静电喷雾条件下雾滴沉积和飘移试验。试验结果表明, 非静电喷雾时, 飞行高度为 2 m 时, 雾滴沉积效果较好, 水敏纸上雾滴沉积个数达到 56 个/cm²; 而静电喷雾使得雾滴沉积明显增加, 在靶标冠层、中层和下层的雾滴覆盖率平均增加了 35.4、26、9 个/cm²。当航高分别为 1、2、3 m 时, 雾滴飘移距离分别为 12.1、15.8 和 18.6 m, 飘移量分别为 5.88、10.31 和 14.98 μg/cm²; 静电喷雾方式对抑制雾滴飘移的作用不大, 但是聚酯卡上单位面积的雾滴沉积量分别增加了 2.36、2.91、1.56 μg/cm²。该研究为基于无人机开展静电喷雾研究提供参考。

关键词: 喷雾; 喷头; 设计; 无人机; 荷质比; 沉积; 飘移

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.08.007

中图分类号: S252

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-08-042-06

茹煜, 金兰, 贾志成, 等. 无人机静电喷雾系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 42—47.

Ru Yu, Jin Lan, Jia Zhicheng, et al. Design and experiment on electrostatic spraying system for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8): 42—47. (in Chinese with English abstract)

0 引言

据资料显示, 中国水稻、油菜等主要农作物的种植面积大, 水田、丘陵等复杂立地条件给病虫害防治带来了难题, 其中中国水稻病虫草害的防治面积约占农作物总防治面积的 35%^[1], 而甘蔗、玉米等高秆经济作物的病虫害也呈逐年上升趋势, 损失率达到 15%~30%^[2], 由于种植密度大, 机械化防治很难实现, 无人机最大特点就是作业灵活、地形适应性好, 它可以适应丘陵、山区、坡地等复杂地形, 而且无人机的低速作业条件、旋翼产生向下气流可非常适合应用于农业病虫害防治^[3]。因此, 应用无人机喷雾技术和装备进行粮食和经济作物的病虫害防治也是比较好的选择。

张京等^[4]利用 WPH642 型无人机搭载红外热像仪, 研究了无人驾驶直升机航空喷雾参数对药液雾滴沉积效果的影响。薛新宇等^[5]进行了 N-3 型无人直升机不同作业高度和不同喷洒浓度的田间药效试验, 探索了无人机施药对稻飞虱和稻纵卷叶螟的防治效果。高圆圆等^[6]应用 Af-811 小型无人机对不同雾化方式的喷头、不同药剂、不同助剂进行了低空喷洒试验, 并对雾滴沉积分布状况及防治效果进行了分析。邱白晶等^[7]研究了无人直升机飞

行高度与速度对喷雾沉积分布的影响。秦维彩等^[8]研究了不同作业高度和喷幅对玉米冠层雾滴沉积分布的影响。以上研究均表明无人机的作业参数对雾滴沉积效果有直接影响, 但是并没有考虑雾滴的荷电特性, 而静电喷雾具有雾滴尺寸均匀、沉积性能好的优点^[9]。多年来的航空静电喷雾研究表明, 静电喷雾雾滴在 80~200 μm 范围最容易荷电^[10-11]。

静电喷雾如果能与无人机低空低速飞行、旋翼产生向下气流等作业特点有机的结合, 可以实现无人机超低量喷雾, 提高喷雾作业质量。因此, 本文针对 XY8D 型无人机进行了静电喷雾系统设计, 就静态条件下静电喷雾雾滴的雾化、荷电及运动等性能开展了试验研究, 并将该无人机静电喷雾系统进行了水稻田间试验, 研究了动态飞行时, 不同飞行高度条件下雾滴的沉积效果和雾滴飘移情况, 以期将为静电技术在无人机上的应用提供技术支撑, 为有效应用无人机静电喷雾开展航空植保作业提供参考。

1 无人机静电喷雾系统

无人机静电喷雾系统(图 1)包括支撑架、蓄电池、高压静电发生器、电动液泵、药箱、静电喷头和两侧喷杆^[12]; 支撑架为铝质材料, 固定在飞机的起落架上, 用以搭载 2 个 5 L 的药箱、电动液泵(12V, 0~0.5 MPa, 型号 1202, 石家庄普兰迪机电设备有限公司)、静电高压发生电源(自行设计, 输入 3 A、12 V, 输出 3 mA, 4~15 kV 可调, 天津东文电源公司制作)、12 V 蓄电池等部件。两侧喷杆主要用来支撑静电喷头和管路, 设计为可

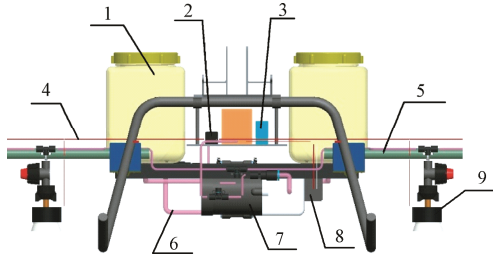
收稿日期: 2015-02-04 修订日期: 2015-03-09

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20131422); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 茹煜, 女, 副教授, 博士, 研究方向为植保机械和先进农药使用技术, 南京 南京林业大学机械电子工程学院, 210037。

Email: superchry@163.com

折叠型式, 展开总长 1.6 m, 约占无人机旋翼总长的 75%, 4 个静电喷头分两组通过套卡分别固定在无人直升机两侧喷杆的对称位置上; 为了防止重复喷洒, 每组两喷头间的距离定为 400 mm, 两组靠近机腹的荷相反电的喷头间距为 500 mm, 用 PVC 塑料软管作为药液输送管, 药管与泵、喷头、药箱之间采用快插接头连接。



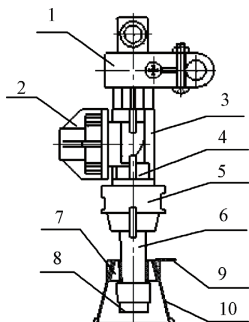
1. 药箱 2. 高压发生电源 3. 蓄电池 4. 高压导线 5. 喷杆 6. 管路 7. 电动泵 8. 流量控制阀 9. 静电喷头
1. Tank 2. High-voltage power 3. Storage battery 4. HV wire 5. Spray lance 6. Pipeline 7. Electric pump 8. Flow control valve 9. Electrostatic nozzle

图 1 无人机静电喷雾系统

Fig.1 Electrostatic spray system of unmanned aerial vehicle

1.1 静电喷头

静电喷头是静电喷雾系统的关键部件。如图 2 所示, 该喷头由喷嘴帽、圆锥形电极、电极支撑座、喷管、垫片、过滤器、旋拧头、溢流阀和喷头体等组成, 总长为 150 mm。圆锥形电极长度为 25 mm、小径为 27 mm、锥角设计为 80°, 与喷雾角相适应; 喷头体的上部加工出内螺纹, 与二通接头或者直角接头相连, 再通过快插接头与输药管相接。喷嘴帽长度为 12 mm, 底部开有 0.4、0.6、0.8、1.0 mm 等多系列的小孔。更换喷嘴帽, 可以获得不同喷雾流量, 与直径为 12 mm、长度为 38 mm 喷杆通过螺纹连接。电极支撑座为圆环柱体型式, 内圆柱用来与喷管固定, 外圆柱用来镶嵌电极, 内外圆环的空隙便于旋翼气流穿过, 一方面改变旋翼的紊流气流为层流, 提高雾滴在作物靶标内的穿透性; 另一方面减少雾滴接触电极的可能性, 使得电极保持干燥, 从而确保充电电压稳定, 有利于雾滴荷电充分。



1. 卡环 2. 溢流阀 3. 喷头体 4. 过滤器 5. 旋拧头 6. 喷管 7. 电极支撑座 8. 喷嘴 9. 电极引脚 10. 圆锥形电极
1. Clasp 2. Relief valve 3. Spray head body 4. Filter 5. Screwing head 6. Spout 7. Electrode supporting 8. Nozzle 9. Electrode pin 10. Cone-shaped electrode

图 2 静电喷头结构图

Fig.2 Structure of electrostatic nozzle

1.2 高压静电连接方式

静电高压发生电源是航空静电喷雾系统的核心。它不仅会影响雾滴的充电效果, 而且关系着飞机作业时的安全。为了整机在工作时保持为零电势, 当静电喷雾系统正常工作时, 飞机两侧喷雾装置产生的雾滴荷质比应该相等, 即:

$$|(+)\dot{Q}/M|=|(-)\dot{Q}/M| \quad (1)$$

式中: \dot{Q} 为电荷量, mC; M 为雾滴质量, kg。

因此, 无人机静电喷雾系统设计为双极喷雾模式^[13], 即在无人机机体两侧分别安装两组相同数量(每组 2 个)、相同类型的喷头, 在机翼每一侧, 通过调节压力计、流量计使得喷雾量相等。高压发生电源的正、负极输出分别与飞机两侧两组喷头电极相连, 不仅保证了两侧的充电电压是一致, 而且可以形成雾滴感应充电方式, 当电源正极与喷头电极相连, 这时给电极充正电, 雾滴则荷负电, 反之亦然。两组喷头雾化后的雾滴群经过各自的静电感应区时就同时带有极性相反、电荷量相同的电荷, 这样飞机两侧的雾滴荷质比可以认为是相等的。电源接地对无人机静电喷雾系统的正常工作很重要。

因为大地是零电荷, 飞机的整个机架也必须是零点荷, 所以本系统将电源接地线与飞机的机架相接等同于接地, 但要求特别强调飞机两侧喷头数量和流量是一致的。由于分布在机翼两侧的流体的极性相反, 这样能保证整机处于零电势^[14]。

1.3 静电喷雾参数确定

为了方便应用无人机静电喷雾系统开展田间试验, 喷雾压力、流量、充电电压等最佳作业参数需要提前确定。试验系统如图 3 所示, 其中雾滴粒径采用激光粒度仪(粒径的测试范围为 0.1~3 500 μm , HELOS/VARIO-KR, 德国新帕泰克有限公司)进行测量, 测量位置是激光束距离喷头出口 500 mm 处, 测量雾滴群的体积中径。充电电压由雾滴最佳荷质比来确定, 荷质比通过法拉第筒和电荷量表(EST112A, 北京亿艾迪)来测定, 自行设计法拉第筒, 内筒直径为 $\Phi 500$ mm, 外筒直径为 $\Phi 600$ mm, 筒高 400 mm, 法拉第筒的输出端通过专用连接线与电荷量表的输入端相连。每次测量时间为 1 min, 电荷量表可读出测试时间段内的电荷量 Q , 带电雾滴荷质比可通过式(2)、式(3)得到。

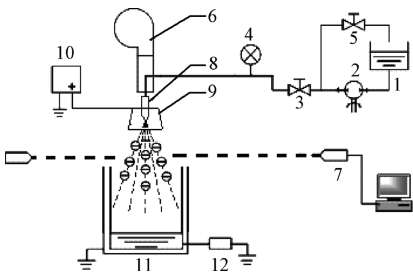
$$A_Q = Q/M \quad (2)$$

$$M = V\rho \quad (3)$$

式中: A_Q 为荷质比, mC/kg; V 为该时间段内法拉第筒中雾滴累计体积, m^3 ; ρ 为液体密度, kg/m^3 。

为了模拟旋翼气流, 在喷雾系统上方安装一个小型离心风机(DFY-85, 上虞风机), 目的是提供一个向下的气流(出口处风速为 15.4 m/s)。

试验结果如表 1 所示, 设置喷嘴的喷孔直径为 0.4、0.6、0.8、1.0 mm 4 种规格, 喷雾压力为 0.2~0.5 MPa, 标定 140.08、120.14、106.65、90.36 μm 4 种较大差异的雾滴粒径。针对这 4 种雾滴粒径进行荷质比测量, 测试时间定为 30 s。



1.药箱 2.液泵 3.节流阀 4.流量计 5.调压阀 6.风机 7.激光粒度仪
8.喷头 9.圆锥电极 10.高压发生电源 11.法拉第筒 12.电荷量表
1.Tank 2.Pump 3.Throttle valve 4.Flow meter 5.Pressure regulating valve
6.Fan 7.Winner laser diffraction particle analyzer 8.Nozzle 9.Cone-shaped
electrode 10.Adjustable high power 11.Faraday cage 12.Charge scale

图 3 喷雾参数测试系统
Fig.3 Test system of spray parameter

表 1 不同参数下的雾滴荷质比
Table 1 Droplet charge to mass ratio for different parameters
mC/kg

喷孔直径 Orifice diameter/mm	喷雾压力 Spraying pressure/MPa	雾滴粒径 Droplet size / μm	充电电压 Charging voltage/kV			
			6	8	10	12
1.0	0.3	140.08	1.22	1.46	1.52	1.50
0.8	0.4	120.14	1.58	1.72	1.78	1.76
0.6	0.4	106.65	1.65	1.92	1.86	1.80
0.4	0.3	90.36	1.84	2.08	2.04	1.96

结果显示，当雾滴粒径为 106.65、90.36 μm ，充电电压从 6 增为 8 kV 时，带电雾滴荷质比增加的比较明显，这是因为提高荷电电压能够增强电场强度，雾滴获得的电量会相应增加，因而雾滴平均荷质比也相应增大；当雾滴粒径为 90.36 μm 、充电电压为 8 kV 时获得了最大荷质比 2.08 mC/kg；当充电电压从 8 增为 10 kV 时，雾滴荷质比水平略有下降，说明充电电压为 8 kV 时，雾滴荷电进入饱和状态^[15]。当雾滴粒径为 140.08、120.14 μm 时，充电电压为 10 kV 时，雾滴荷电饱和，这时的雾滴荷质比最大。可以看出，相同充电电压下，荷质比随雾滴粒径的变大成下降趋势，原因是尽管单颗水雾粒子的荷电量随水雾粒径的增大而增大，但雾滴质量也随雾滴粒径增大而增大，根据式 (2) 可知荷质比反而随粒径增大而减小。

综合比较以上试验结果，当喷孔直径为 0.4 mm、喷雾压力为 0.3 MPa 时雾滴粒径为 90.36 μm ，可以在较低电压 8 kV 下获得较高的荷质比 2.08 mC/kg。测量喷头的流量为 0.4 L/min，并将这种喷头流量和喷雾压力作为无人机田间试验的喷雾工作参数。

2 雾滴沉积及飘移试验

2.1 试验设计

田间沉积和飘移试验于 2014 年 10 月在南昌水稻试验基地进行。试验之前，首先在无自然风环境中用水敏纸 (water sensitive paper, WSP) 方法 (2.5 cm \times 7.5 cm) 测试了无人机在 1、2、3 m 高度喷雾时的有效喷幅，试验飞行速度为 5 m/s、喷头喷嘴直径为 0.4 mm、喷雾压力

为 0.3 MPa 条件下进行，理论上超低量喷雾雾滴为 5 个/cm² 以上即达到有效幅宽的范围^[16]。

田间试验布置如图 4 所示，依据水稻种植区面积确定 50 m \times 30 m 的 2 个试验区，即静电喷雾区、非静电喷雾区，考虑可能有飘移的影响，试验区分在 2 个相邻的水稻田块内，利用 GPS 定位分别标定这 2 个试验区的方位，以便飞机喷洒时准确覆盖^[17]。测试过程中环境风速为 1~2 m/s，试验喷洒液为荧光素钠 (质量分数为 0.5) 水剂，航空静电喷雾和非静电喷雾使用同一套无人机静电喷雾装置，静电喷雾时打开静电，电压为 8 kV。考虑水稻试验时，湿度比较大，难以多次重复，在每个试验区内设置 3 排间距为 5 m 的靶标，每排靶标设置间距为 1 m 的 29 株水稻作为试验点，在每株水稻作物的冠层、中层、下层叶片上固定水敏纸 (2.5 cm \times 7.5 cm)，目的是测量雾滴的穿透性；在其旁边用杆子支撑并固定一个聚酯卡 (5 cm \times 10 cm)，用来接收雾滴，目的是测量雾滴的飘移。图 5 为无人机静电喷雾系统田间试验。

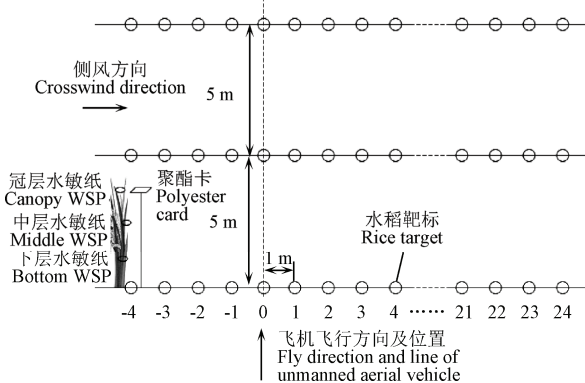


图 4 田间测试靶标示意图
Fig.4 Target position of field test system



图 5 无人机静电喷雾系统田间试验
Fig.5 Field test of UAV electrostatic spraying system

2.2 试验方法

试验作业时，无人机作业高度分别为 1、2、3 m，飞行速度 5 m/s。同一架次先后对 2 个试区进行相应的静电喷雾和非静电喷雾，飞机飞行方向与地面长方形试区的长边保持平行，机身限制在中间靶标位置。为了保证每次飞行飞机高度保持一致，试验前在试验区周边设置了高度参照，并由熟练的专业飞控手完成飞行试验作业。每次飞行喷雾结束后等待 2 个试区的试纸靶标和聚酯卡靶标样品干燥后 (约 30 min) 再分别收集，并装入预先做好标记的防潮牛皮纸袋中，待回实验室进行数据分析。将收集的水敏试纸样本用 Depositscan 软件扫描，然后扫

描图像进行沉积斑点的个数、分布密度进行统计分析^[18]。采样皿上的荧光素钠利用定量的去离子水洗脱，用荧光分光光度计（F96，波长 200~850 nm，上海精科仪器有限公司）测定每份洗脱液的荧光值，根据荧光素钠标样的“浓度-荧光值”标准曲线可计算出洗脱液中荧光素钠的沉积量^[19]。

3 结果与分析

3.1 飞行高度对喷幅的影响

表 2 为不同飞行高度下的喷幅。由表 2 中可以看出，飞行高度对喷幅影响比较明显，在飞行高度为 3 m 时，该飞机喷雾喷幅达到 6.8 m。因为每个喷头都有一个喷雾角，喷头的喷幅与雾滴下落距离成正比，当飞行高度增加，雾滴下落时间越长，喷头的喷幅也会增加。静电喷雾和非静电喷雾时比较，喷幅略有减小，但并不明显，主要是由于静电喷雾使雾滴的运动具有定向性，雾滴总是朝着最近的靶标运动的结果。

表 2 不同飞行高度下的喷幅

Table 2 Spray swath under different fly height

喷雾方式	航高 Height/m		
Spraying way	1	2	3
静电喷雾	5.6	6.2	6.7
Electrostatic spray			
非静电喷雾	5.8	6.4	6.8
Non-electrostatic spray			

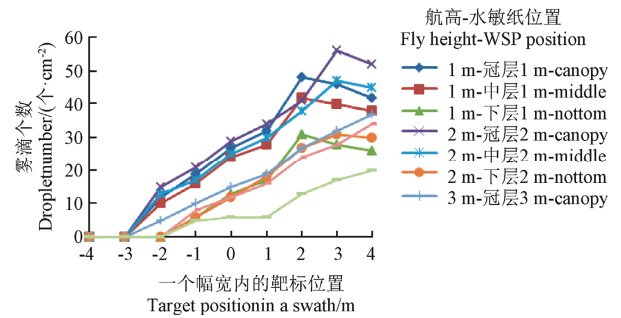
3.2 飞行高度对雾滴沉积的影响

试验作业了 1、2、3 m 3 个飞行高度，采集了在一个喷幅内 3 排水稻靶标上冠层、中层和下层的雾滴沉积在水敏纸上的数据，并对这 3 排对应靶标位置上的数据取平均值，非静电喷雾时雾滴沉积结果如图 6a 所示。图 6a 中横坐标 0 为幅宽的中点，也是无人机作业飞行位置，其他横坐标为靶标位置。可以发现在一个喷幅内雾滴沉积分布并未呈现正态分布规律，雾滴沉积出现了明显的飘移。但还是可以看出不同飞行高度对雾滴沉积的影响。当飞行高度距离靶标为 2 m 时，相比其他 2 种飞行高度，沉积效果好一些，单位面积上的雾滴沉积个数达到 56 个。当飞机在 1 m 高度作业时，旋翼的气流过大，对靶标的翻卷作用明显，雾滴沉积在靶标水敏纸上的可能性减弱。而在 3 m 高度作业时，雾滴飘移明显，雾滴在中下部的沉积较差。

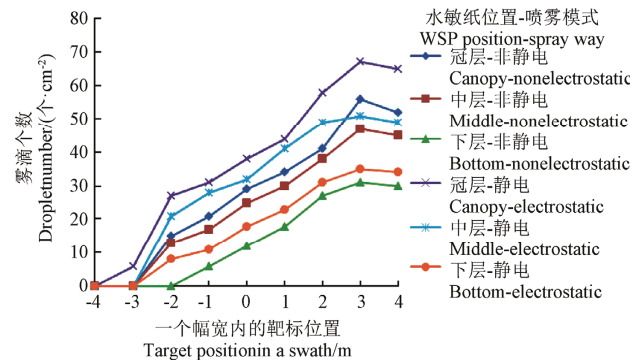
3.3 静电作用对雾滴沉积的影响

如图 6b 所示，飞行高度为 2 m，采集了 3 排在一个幅宽范围内静电（8 kV）和非静电状态下雾滴沉积在靶标冠层、中层、和下层位置处水敏纸上的雾滴沉积数据，并取对应靶标位置处的数据平均值。

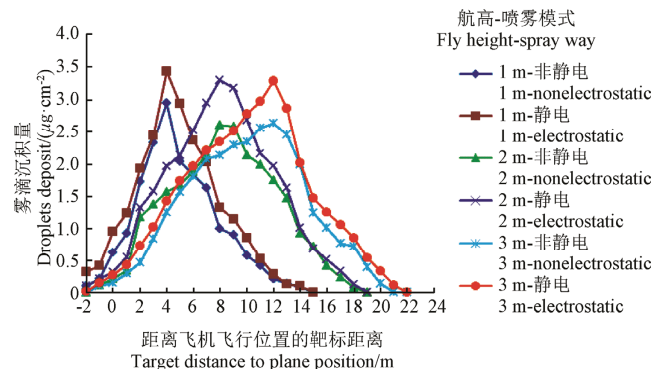
试验结果发现，与非静电喷雾相比，静电喷雾雾滴在靶标上的冠层和中部的沉积量明显增多，经统计计算，在靶标冠层的覆盖率平均增加了 35.4 个/cm²，中部的覆盖率平均增加了 26 个/cm²，而在靶标的下层的覆盖率平均增加了 9 个/cm²。试验表明，增加雾滴在靶标上的有效沉积可以通过施加静电而实现。



a. 不同飞行高度下的雾滴沉积结果
a. Droplets deposition under different fly height



b. 静电和非静电喷雾下的雾滴沉积（航高 2 m）
b. Droplets deposition under electrostatic or non-electrostatic spray (2 m fly height)



c. 雾滴飘移测试结果
c. Droplets drift test result

图 6 雾滴沉积和飘移的田间测试结果
Fig.6 Field test result of droplets deposition and drift

3.4 雾滴飘移测试结果分析

试验采集了 3 排不同靶标位置处雾滴沉积在聚酯片的雾滴沉积数据，取平均值，试验结果如图 6c 所示。图 6c 中横坐标是下风方向距离飞机飞行位置的横向距离，其中 0 为飞机的飞行位置，由于田块面积有限，这里共取了 27 个测试点，相邻 2 个测试点相距为 1 m。试验结果显示，当飞行高度为 1 m 时，根据表 2 喷雾幅宽测试结果，幅宽边界应该在 2.9 m 位置处，而图 6c 中显示在 15 m 位置处，雾滴飘移了 12.1 m，飘移量为 5.88 μg/cm²；当飞行高度为 2、3 m 时，雾滴雾滴分别飘移了 15.8 和 18.6 m，飘移量分别为 10.31、14.98 μg/cm²。静电喷雾相比非静电喷雾而言，雾滴在聚酯片上的沉积浓度增加，当航高分别为 1、2、3 m 时，在测试区内，单位面积的雾滴沉积量分别增加了 2.36、2.91、1.56 μg/cm²，但是 2

种喷雾方式形成的雾滴飘移曲线形态类似,说明静电喷雾方式对抑制雾滴飘移的作用不大,因此,静电喷雾用来增加雾滴沉积效果是好的,但是由于雾滴粒径较小,还是容易产生雾滴飘移。

4 结论与讨论

本文针对 XY8D 无人机进行了静电喷雾系统设计,研发了用于无人机上的静电喷头,通过模拟试验确定了 0.4 L/min 流量、0.3 MPa 喷雾压力、8 kV 充电电压作为该无人机的田间试验作业参数,在水稻田中进行了不同飞行高度、静电和非静电条件下的雾滴沉积和飘移试验。

1) 飞行高度越大,喷幅也相应增加,静电喷雾相比非静电喷雾而言,喷幅略有减小,但变化不明显。

2) 飞行高度对雾滴沉积在作物靶标的不同位置有明显影响。当飞行高度为 2 m 时,相比 1、3 m 飞行高度,沉积效果好一些,雾滴沉积个数达到 56 个/cm²。

3) 飞行高度对雾滴飘移有明显影响。当飞行高度为 1、2、3 m 时,雾滴飘移距离分别为 12.1、15.8、18.6 m,飘移量分别为 5.88、10.31、14.98 μg/cm²。

4) 与非静电喷雾相比,静电喷雾雾滴在作物靶标的冠层和中部的沉积量明显增多,聚酯卡上单位面积的雾滴沉积量分别增加了 2.36、2.91、1.56 μg/cm²,但是静电喷雾方式对抑制雾滴飘移的作用不大。

本文将静电喷雾系统应用于无人机植保作业上是首次尝试,静电作用对增加雾滴沉积有明显的效果,最佳的无人机静电喷雾作业参数还与风速、温度、湿度等环境因素及药液物理特性的影响,静电喷雾技术在无人机上的应用还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 梁丽欢. 水稻病虫害防治技术分析[J]. 新农村, 2012, 23(7): 59—61.
Liang Lihuan. Analysis of controlling rice diseases and insect pest technology[J]. New Rural, 2012, 23(7): 59—61. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李文凤, 单红丽, 黄应昆, 等. 云南甘蔗主要病虫害发生动态与防控对策[J]. 中国糖料, 2013, 35(1): 59—62.
Li Wenfeng, Shan Honhli, Huang Yingkun, et al. Occurrence dynamics and control measures of main diseases and insect pests of sugarcane pests in Yunnan[J]. Chinese Sugar, 2013, 35(1): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [3] Huang Yandong, Hoffmann W C, Lan Yubin, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 25(6): 803—809.
- [4] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 94—96.
Zhang Jing, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 94—96. (in Chinese with English abstract)
- [5] 薛新宇, 秦维彩, 孙竹, 等. N-3 型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. 植物保护学报, 2013, 40(3): 273—278.
Xue Xinyu, Qin Weicai, Sun Zhu, et al. Effects of N-3 UAV spraying methods on the efficiency of insecticides against planthoppers and cnaphalocrocis medinalis[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2013, 40(3): 273—278. (in Chinese with English abstract)
- [6] 高圆圆, 张玉涛, 赵西城, 等. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. 植物保护, 2013, 39(2): 152—157.
Gao Yuanyuan, Zhang Yutao, Zhao Youcheng, et al. Primary studies on spray droplets distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle(UAV) against the corn bore[J]. Plant Protection, 2013, 39(2): 152—157. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邱白晶, 王立伟, 蔡东林, 等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 26—32.
Qiu Baijing, Wang Liwei, Cai Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 26—32. (in Chinese with English abstract)
- [8] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50—56.
Qin Weicai, Xue Xinyu, Zhou Lixin, et al. Effect of spraying parameter of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 50—56. (in Chinese with English abstract)
- [9] Law S E. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51(1): 25—42.
- [10] 茹煜, 郑加强, 周宏平, 等. 航空双喷嘴静电喷头的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 58—61.
Ru Yu, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping, et al. Design and experiment of double-nozzle of aerial electrostatic sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周宏平, 茹煜, 舒朝然, 等. 航空静电喷雾装置的改进及效果试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 7—12.
Zhou Hongping, Ru Yu, Zheng Jiaqiang, et al. Improvement and experiment of aerial electrostatic spray device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [12] 茹煜, 金兰, 刘克勤, 等. 静电喷雾式无人机施药系统[P]. 中国专利: 201210182807.2, 2014-01-15.
Ru Yu, Jin Lan, Liu Keqin, et al. Unmanned aerial vehicle application system with electrostatic spray [P]. China Patent: 201210182807.2, 2014-01-15.

- [13] 茹煜, 周宏平, 贾志成, 等. 航空静电喷雾系统的设计及应用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 91—94.
Ru Yu, Zhou Hongping, Jia Zhicheng, et al. Design and application of electrostatic spraying system[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2011, 35(1): 91—94. (in Chinese with English abstract)
- [14] Carlton J B. Technique to reduce chemical usage and concomitant drift from aerial sprays [P]. United States Patent: 5975425, 1999-11-02.
- [15] 崔琳, 李林, 孟凡腾, 等. 雾滴感应荷电的影响因素及相关分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1390—1395.
Cui Lin, Li Lin, Meng Dateng, et al. Influencing factors of atomized droplets charging by induction and the correlation with charging effect[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1390—1395. (in Chinese with English abstract)
- [16] 范庆妮. 小型无人直升机农药雾化系统的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
Fan Qingni. The Research on The Pesticide Spray System Using For the Mini Unmanned Helicopter[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [17] Lan Y, Thomson S J, Huang Y, et al. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the USA[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(1): 34—38.
- [18] 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.
- [19] 宋淑然, 王卫星, 洪添胜, 等. 水稻田农药喷雾上层植株雾滴截留影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 114—117.
Song Shuran, Wang Weixing, Hong Tiansheng, et al. Testing research on effects of top layer rice fog drop interception on pesticide spraying distribution in rice fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 114—117. (in Chinese with English abstract)

Design and experiment on electrostatic spraying system for unmanned aerial vehicle

Ru Yu, Jin Lan, Jia Zhicheng, Bao Rui, Qian Xiaodong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) has the advantages of flexible operation and good adaptability to the terrain. Low-speed operating conditions and downward airflow generated by rotor wing of UAV can be very suitable for the application in agricultural pest control. Electrostatic spray has the advantages of uniformity in droplet size and good property of deposition, maturely applied in aerial spray system driven by people. The droplet of electrostatic spray is most likely to be charged when its size ranges from 80 to 200 μm . Taking advantages of such the characteristics as low-speed and low-height flight, and downdraft airflow from rotor, the electrostatic spray technology based on UAV can achieve ultra-low spray volume and hence improve spray quality. The electrostatic spray system is designed for the XY8D UAV, especially electrostatic nozzle structure with conical electrode adapted to the spray angle. The ring-shaped support makes the air flow through the electrodes, which can not only improve the penetrating capability of the droplets, but also guarantee the electrodes to be dry and the voltage to be stable. The power supply of high-voltage electrostatic uses bipolar charge mode, making both sides of the electrodes charged with opposite polarity and keeping the current balance for the UAV. The electrostatic spray test system is established. Under the condition of simulated UAV static electrostatic spray, the atomization and charging property of electrostatic nozzle has been tested by the laser particle size analyzer and Faraday tube test method. The results show high charge-mass ratio of 2.08 mC/kg can be obtained with nozzle tip of 0.4 mm, spray pressure of 0.3 MPa and charging voltage of 8 kV. So 0.4 L/min flow, 0.3 MPa spray pressure and 8 kV charging voltage are successfully identified as the UAV field operating parameters. The XY8D UAV electrostatic spray system is tested at different altitudes with electrostatic or non-electrostatic spray. Results show that the flying altitude is greater, the spray swath becomes wider; and the maximum spray swath is 6.8 m. Compared with non-electrostatic spray, the spray swath under electrostatic condition reduces slightly. Droplet sedimentation and drift experiments are conducted using the UAV electro-spray system over a 50 m \times 30 m rice field, with the methods of water-sensitive paper and polyester card collection, respectively. Test results show that for non-electrostatic spray, droplet deposition effect is better when flight altitude is 2 m compared with the flight heights of 1 and 3 m, and the number of droplet deposited on water-sensitive paper reaches 56 per square centimeter; electrostatic spray make droplet deposition increase, and droplet coverages averagely increased by 35.4, 26 and 9 per square centimeter in the target canopy, middle and lower layer respectively. When the flying attitudes are 1, 2 and 3 m, the drift results of electrostatic and non-electrostatic spray are similar, the average droplet drift distances are 12.1, 15.8 and 18.6 m respectively; the average drift amounts are 5.88, 10.31 and 14.98 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ respectively. It indicates that the flying altitude has greater influence on droplet drift, and the electrostatic spray method has little effect on inhibiting spray drift. While comparing with non-electrostatic spray, the deposition concentration of the droplets on polyester cards with electrostatic spray under 3 flying attitudes increases by 2.36, 2.91 and 1.56 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ respectively. Test results provide the reference for the research on electrostatic spraying technologies based on UAV.

Key words: spraying; nozzles; design; Unmanned aerial vehicle; charge to mass ratio; deposition; drift