

陈盛德, 兰玉彬, 周志艳, 等. 植保无人机航空喷施飞行质量的试验与评价 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 89-96.
CHEN Shengde, LAN Yubin, ZHOU Zhiyan, et al. Test and evaluation for flight quality of aerial spraying of plant protection UAV [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(3): 89-96.

植保无人机航空喷施飞行质量的试验与评价

陈盛德, 兰玉彬, 周志艳, 李继宇, 欧阳帆, 徐小杰, 姚伟祥
(国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心/广东省农业航空应用工程技术研究中心/
国际农业航空施药技术联合实验室/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】植保无人机的飞行质量是航空喷施作业效果的重要影响因素。探讨不同类型和不同控制方式的植保无人机航空喷施作业的飞行质量和作业效果, 为航空喷施作业机型的选择和植保无人机技术的改进提供数据支持和指导。【方法】采用微轻型机载北斗导航定位系统, 获取半自主飞行控制模式下单旋翼油动植保无人机 (So-UAV)、单旋翼电动植保无人机 (Se-UAV) 和半自动四旋翼电动植保无人机 (Saqe-UAV) 以及全自主控制模式下四旋翼电动植保无人机 (Faqe-UAV) 的飞行轨迹和飞行参数, 并对飞行质量 (包括飞行参数均匀性、航线精度和航线长度均匀性) 进行了分析和评价。【结果】四旋翼植保无人机飞行质量优于单旋翼植保无人机, 且 Faqe-UAV 飞行质量优于 Saqe-UAV; Faqe-UAV 在整个作业区域内的飞行参数变化的均匀性最佳, 飞行速度和飞行高度参数变化的均匀性分别为 3.66% 和 4.67%; Faqe-UAV 的平均飞行航线偏差最小, 为 0.172 m。飞行方向对 Saqe-UAV 飞行参数的影响显著, 但对 Faqe-UAV 飞行参数的影响不显著; 航线长度对 Faqe-UAV 飞行参数的影响显著, 但对 Saqe-UAV 飞行速度的影响不显著。【结论】在航空喷施作业过程中, 全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机飞行质量最佳, 对药液喷施质量更有保障。

关键词: 植保无人机; 航空喷施; 飞行质量; 自主控制; 四旋翼
中图分类号: S25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)03-0089-08

Test and evaluation for flight quality of aerial spraying of plant protection UAV

CHEN Shengde, LAN Yubin, ZHOU Zhiyan, LI Jiuyu, OUYANG Fan, XU Xiaojie, YAO Weixiang
(National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying
Technology / Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application (ERCAAA) / International Laboratory
of Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology / College of Engineering,
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】Flight quality of plant protection UAV is an important factor affecting the effectiveness of aerial spraying. The objective of this research is to explore flight qualities and operation effects of plant protection UAVs of different types and control models, which can provide data support and guidance for selecting the models and improving the spraying technologies. 【Method】Flight paths and parameters of single-rotor oil-powered plant protection UAV (So-UAV), single-rotor electric plant protection UAV (Se-UAV), semi-automatic-quad-rotor electric plant protection UAV (Saqe-UAV) and full-automatic-quad-rotor electric plant

protection UAV(Faqe-UAV) were obtained by micro-light Beidou navigation satellite system, and flight qualities (including path accuracy, variation uniformity of flight parameter and path length) were analyzed and evaluated. 【Result】 Flight qualities of quad-rotor plant protection UAVs were better than those of single-rotor plant protection UAVs, and flight quality of Faqe-UAVwas better than that of Saqe-UAV. Faqe-UAV had the best uniformity of flight parameters throughout the operating area, and the uniformities of flight speed and flight height were 3.66% and 4.67%, respectively. The average route deviation of Faqe-UAV was the minimum, which was 0.172 m. In addition, the effects of flight direction on flight parameters of plant protection UAVs under full-autonomous and semi-autonomous control modes were insignificant and significant respectively. The effect of route length on flight parameters of plant protection UAV under semi-autonomous control mode was not significant, but route length had a significant effect on flight speed of plant protection UAV under full-autonomous control mode. 【Conclusion】 In the aerial spraying process, quad-rotor plant protection UAV under full-autonomous control mode has the best flight quality, and gives spraying quality more security.

Key words: plant protection UAV; aerial spraying; flight quality; autonomous control; quad-rotor

近年来, 中国农业航空产业发展迅速, 特别是植保无人机在近年来的迅猛发展和应用引起了人们广泛的关注^[1-2]。植保无人机航空施药技术作为我国近年来的新型植保作业方式, 改变了中国传统植保作业方式的弊端, 植保无人机采用低容量或超低容量喷雾, 喷施作业效率高、雾化效果好、成本低, 且可解决作物生长过程中地面机械难以下田作业等问题, 正逐渐成为人们首选的植保作业方式^[3-6]。因此, 植保无人机航空喷施是减少农药用量, 降低农药残留, 提升农药防效的有力手段^[7]。随着植保无人机在中国的广泛应用, 其低空低量航空施药技术研究逐步成为研究热点^[8-14]。陈盛德等^[15]研究了HY-B-10L 型单旋翼电动无人直升机在不同作业参数下对杂交水稻植株冠层喷施作业的雾滴沉积分布效果; 王昌陵等^[16]探究了 3WQF80-10 型单旋翼油动植保无人机飞行方式、飞行参数及侧风等因素对无人机喷雾雾滴空间质量平衡分布和旋翼下旋气流场分布的影响; 张宋超等^[17]通过模拟和试验研究了 N-3 型农用无人机在不同飞行参数和不同等级侧风的条件下, 喷施雾滴在非靶标区域的药液漂移情况; 张盼等^[18]探究了 QJ-460 小型四旋翼无人机在不同类型喷头和飞行高度下, 雾滴在柑橘树体冠层的雾滴沉积效果, 并对喷雾效应做出了初步评价。

植保无人机飞行质量对喷施作业效果的提升有着重要意义。目前, 国内关于植保无人机喷施应用研究主要集中于航空喷施作业参数对雾滴沉积分布特性影响的层面上, 缺乏对不同类型植保无人机航空喷施作业时飞行质量(飞行参数均匀性、航线精度和航线长度均匀性)的整体评价。目

前飞控手主要采用半自主飞行控制模式进行喷施作业, 其飞行高度和飞行速度难以保持稳定。当前市场上植保无人机类型多样, 主要有单旋翼油动植保无人机、单旋翼电动植保无人机和多旋翼电动植保无人机等, 飞行性能好坏参差不齐; 导致喷施的雾滴沉积在农作物表面极不均匀, 容易造成对农作物的多喷、少喷甚至漏喷, 难以达到理想的防治效果, 造成农户的经济损失。本文采用微轻型机载北斗导航定位系统获取植保无人机航空喷施作业时的飞行轨迹和飞行参数, 对市场上半自主飞行控制模式下的单旋翼油动植保无人机、单旋翼电动植保无人机和四旋翼电动植保无人机的飞行质量进行比较和评价, 并对全自主飞行控制模式下的多旋翼电动植保无人机的飞行质量进行了测试和评价, 以期为航空喷施作业机型的选择和植保无人机技术的改进及发展提供数据支持和指导。

1 材料与方法

1.1 无人机类型及参数

本次测试的植保无人机(UAV)是选取目前市场上存在的 3 种主要类型的植保无人机, 分别是单旋翼油动植保无人机(So-UAV)、单旋翼电动植保无人机(Se-UAV)和四旋翼电动植保无人机(Qe-UAV), 其中, 单旋翼油动植保无人机和单旋翼电动植保无人机均采取飞控手动控制方式, 即半自主控制方式; 四旋翼电动植保无人机选取 2 种类型的植保无人机, 分别采用半自主控制方式和全自主控制方式, 主要性能指标如表 1 所示。

北斗定位系统为航空用北斗系统 UB351(上海

表 1 被测试的植保无人机机型及参数

Table 1 Types and parameters of tested plant protection UAVs

无人机机型 UAV type	作业速度/(m·s ⁻¹) Flight speed	有效喷幅/m Spraying width	最大载药量/L Maximum load
单旋翼油动植保无人机(So-UAV) Single-rotor oil-powered UAV	0~15	4~6	12
单旋翼电动植保无人机(Se-UAV) Single-rotor electric UAV	0~8	4~6	15
四旋翼电动植保无人机(Qe-UAV) Quad-rotor electric UAV	0~6	3~5	10

司南卫星导航技术股份有限公司), 具有 RTK 差分定位功能, 平面精度达 $(10+5\times10^{-7}D)$ mm, 高程精度达 $(20+1\times10^{-6}D)$ mm, 其中, D 表示该系统实际测量的距离 (单位: km)。无人机搭载该系统移动站给作业航线绘制轨迹、获取无人机作业参数并给各个采样点定位, 通过北斗系统绘制的作业轨迹观察实际作业航线与地面站规划航线之间的关系^[15]。

环境监测系统包括便携式风速风向仪 Kestrel 4500 (美国 NK 公司) 和试验用数字温湿度表 LS-204 (中山市朗信电子有限公司)。风速风向仪用于监测和记录试验时环境的风速和风向, 温湿度表用于测量试验时环境的温度及湿度。

1.2 方法

选取一块 100 m×150 m 的地块进行植保无人

机喷施作业。携带北斗定位系统移动站对无人机的飞行航线进行绘制, 获取无人机飞行作业参数和航线长度; 采用无人机精准航迹观测系统将无人机的实际飞行航线与规划航线进行对比, 获取每条作业航线的飞行偏差以观测其飞行精度。

1.2.1 作业参数及轨迹处理 图 1 和图 2 分别表示由北斗定位系统 UB351 对 4 种不同类型植保无人机在作业区域内飞行速度和飞行高度变化对应的飞行航线轨迹, 其中, 北斗定位系统 UB351 在喷施作业时的轨迹定位频率为 1 Hz。半自主控制方式下, So-UAV、Se-UAV 和 Qe-UAV 的飞行质量测试时间为 09:00—10:00 之间, 据环境监测系统获取的环境风为微风, 平均风速均小于 1.0 m/s, 风向均垂直于飞行航线方向; 全自主控制方式下, Qe-UAV

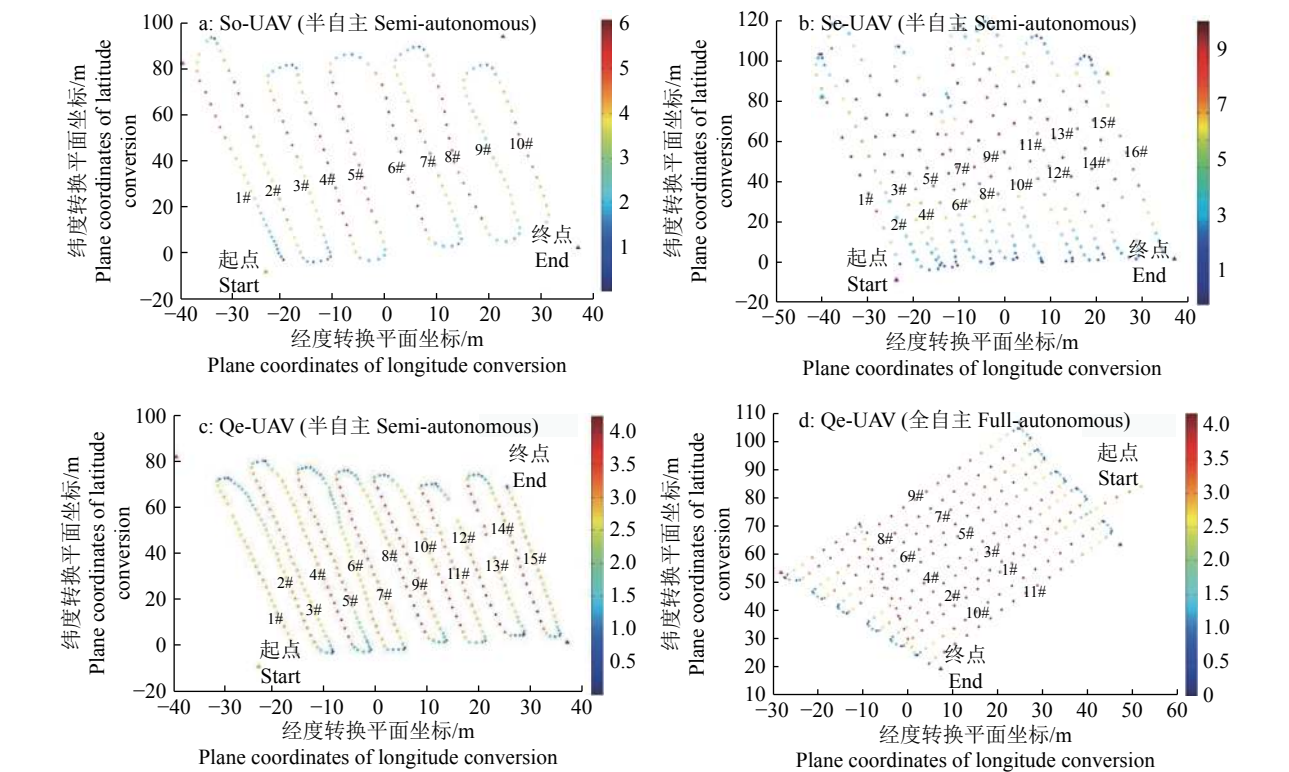


图 1 植保无人机速度变化对应飞行航线轨迹

Fig. 1 Flight paths corresponding to speed changes of plant protection UAVs

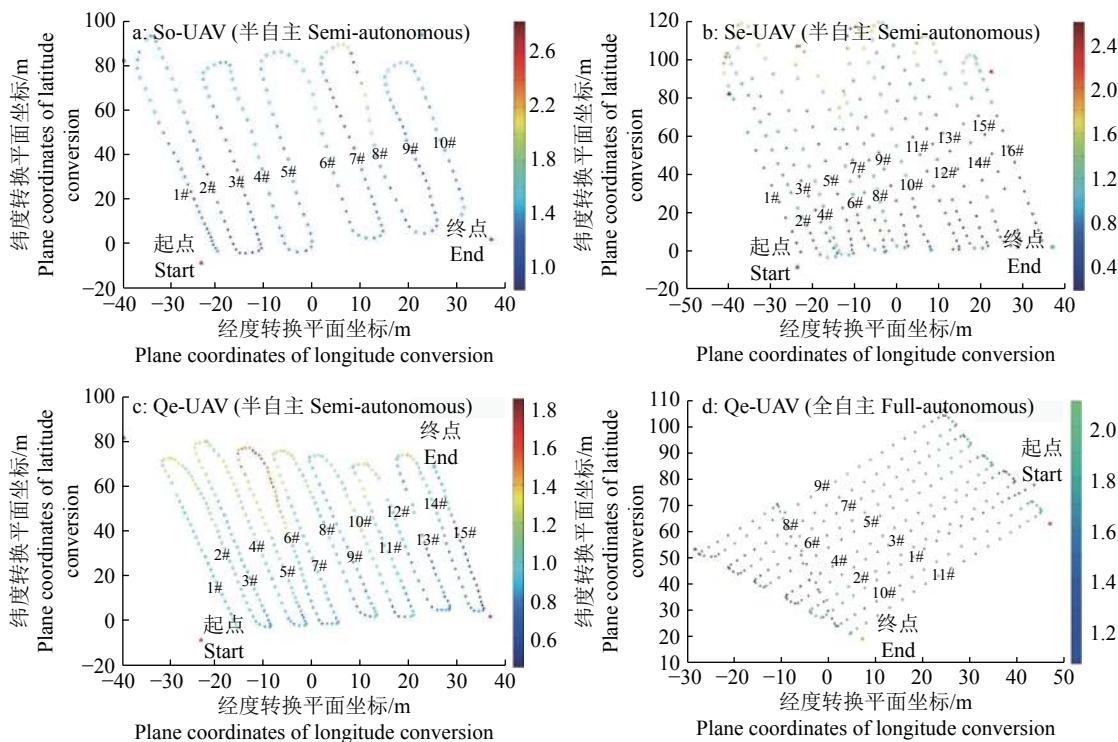


图 2 植保无人机高度变化对应飞行航线轨迹

Fig. 2 Flight paths corresponding to height changes of plant protection UAVs

的飞行质量测试时间为 16:30—17:00 之间，平均风速为 1.6 m/s，风向垂直于飞行航线方向。

1.2.2 数据处理 为了表征试验中植保无人机飞行速度、飞行高度和航线长度的均匀性，采用变异系数 (CV) 来衡量试验中各飞行参数的均匀性。

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%, \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)}, \tag{2}$$

式中， S 为同组试验飞行参数或航线长度的标准差， X_i 为植保无人机在各条航线上的飞行参数或航线长度， $\bar{X}$ 为各组试验飞行参数或航线长度的平均值， n 为各组试验航线数量。

为进一步表明植保无人机飞行方向和航线长度对飞行速度、飞行高度和飞行精度的影响，对所有试验结果通过 SPSS 16.0 软件采用逐步回归法进行方差分析和回归分析，建立植保无人机飞行参数之间的回归方程，并检验其显著性 ($P < 0.05$)^[19]。

2 结果与分析

2.1 植保无人机飞行作业参数

从图 1 和图 2 中的飞行航线和图例可以看出，植保无人机的飞行速度在单条作业航线上均经历

加速到减速的过程，其中，在航线中段飞行速度达到最大值，在航线两侧飞行速度达到最小值；半自主控制方式下植保无人机的飞行高度随着飞行距离的变大而逐渐升高，而全自主控制方式下植保无人机的飞行高度在整个飞行轨迹上保持稳定。

表 2 为 4 种不同类型植保无人机在作业区域内不同飞行航线所对应的平均飞行速度和平均飞行高度参数。从表 2 中单条作业航线的飞行参数可以看出，So-UAV(半自主) 最大平均速度出现在 6#回程航线轨迹上，为 5.16 m/s；最小平均速度出现在 9#去程航线轨迹上，为 3.25 m/s；最大平均高度出现在 8#回程航线轨迹上，为 1.75 m；最小平均高度出现在 3#去程航线轨迹上，为 1.22 m。Se-UAV(半自主) 最大平均速度出现在 1#去程航线轨迹上，为 7.43 m/s；最小平均速度出现在 2#回程航线轨迹上，为 4.99 m/s；最大平均高度出现在 4#回程航线轨迹上，为 1.12 m；最小平均高度出现在 15#去程航线轨迹上，为 0.70 m。Qe-UAV(半自主) 最大平均速度出现在 7#去程航线轨迹上，为 3.18 m/s；最小平均速度出现在 6#回程航线轨迹上，为 2.30 m/s；最大平均高度出现在 6#回程航线轨迹上，为 1.27 m；最小平均高度出现在 15#去程航线轨迹上，为 0.72 m；Qe-UAV(全自主) 最大平均速度出现在 9#去程航线轨迹上，为 3.68m/s；最小平均速度出现在 10#回程航线轨迹上，为 3.27 m/s；最大平均

表 2 植保无人机飞行航线对应的飞行参数

Table 2 Flight parameters corresponding to flight paths of plant protection UAVs

航线编号 Route No.	作业方向 Flight direction	So-UAV (半自主 Semi-autonomous)		Se-UAV (半自主 Semi-autonomous)		Qe-UAV (半自主 Semi-autonomous)		Qe-UAV (全自主 Full-autonomous)	
		$v/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	h/m
1	去 Go	3.35	1.29	7.43	0.88	2.74	1.02	3.28	1.57
2	回 Return	3.95	1.26	4.99	0.90	2.38	1.10	3.30	1.65
3	去 Go	3.83	1.22	6.77	0.89	2.77	1.02	3.28	1.59
4	回 Return	4.64	1.42	6.74	1.12	2.84	1.08	3.35	1.62
5	去 Go	4.87	1.35	6.44	0.88	2.73	1.14	3.36	1.60
6	回 Return	5.16	1.45	6.39	1.02	2.30	1.27	3.40	1.69
7	去 Go	3.94	1.23	5.66	0.87	3.18	1.02	3.42	1.67
8	回 Return	4.81	1.75	5.88	1.10	3.12	1.02	3.55	1.61
9	去 Go	3.25	1.26	7.18	0.97	3.13	0.89	3.68	1.66
10	回 Return	4.08	1.41	6.38	0.99	3.06	1.04	3.27	1.68
11	去 Go			6.92	0.77	2.97	1.01	3.32	1.62
12	回 Return			6.16	0.75	2.93	0.93		
13	去 Go			7.18	0.71	2.95	0.77		
14	回 Return			6.52	0.85	3.07	0.90		
15	去 Go			7.06	0.70	2.67	0.72		
16	回 Return			5.66	0.72				

高度出现在 6#回程航线轨迹上, 为 1.69 m; 最小平均高度出现在 1#去程航线轨迹上, 为 1.57 m。

表 3 为 4 种不同类型无人机整个航程中的飞行参数。从表 2 和表 3 中可以知道, 单旋翼植保无人机去程和回程的飞行参数之间存在较大差别, 而多旋翼植保无人机去程和回程的飞行参数之间存在的差别较小。对于植保无人机的飞行速度来说, 半自主控制方式下, So-UAV 回程的平均速度比去程的平均速度大 17.66%, Se-UAV 去程的平均速度比回程的平均速度大 12.15%; 而半自主和全

自主控制方式下, Qe-UAV 去程的平均速度分别比回程的平均速度大 2.85% 和 0.59%。对于植保无人机的飞行高度来说, 4 种不同类型植保无人机去程的平均高度均低于回程的平均高度, 其中, 半自主控制方式下的 So-UAV、Se-UAV 和 Qe-UAV 以及全自主控制方式下的 Qe-UAV 去程的平均高度分别比回程的平均高度小 14.96%、13.25%、9.47% 和 3.13%。

另外, 从 4 种不同类型植保无人机在整个作业过程中飞行参数的变化情况来看, 多旋翼植保无人

表 3 不同类型植保无人机轨迹参数

Table 3 Path parameters of different types of plant protection UAVs

机型 Type	作业方向 Flight direction	平均速度/($m \cdot s^{-1}$) Average velocity	速度均匀性/% Velocity uniformity	平均高度/m Average height	高度均匀性/% Height uniformity
So-UAV(半自主 Semi-autonomous)	去 Go	3.85	14.80	1.27	11.06
	回 Return	4.53		1.46	
Se-UAV(半自主 Semi-autonomous)	去 Go	6.83	9.95	0.83	14.53
	回 Return	6.09		0.94	
Qe-UAV(半自主 Semi-autonomous)	去 Go	2.89	8.91	0.95	12.48
	回 Return	2.81		1.04	
Qe-UAV(全自主 Full-autonomous)	去 Go	3.39	3.66	1.60	4.67
	回 Return	3.37		1.65	

机飞行参数的变化均匀性要优于单旋翼植保无人机飞行参数的变化均匀性,全自主控制方式下,植保无人机飞行参数的变化均匀性要优于半自主控制方式下单旋翼植保无人机飞行参数的变化均匀性;其中,半自主控制方式下 So-UAV 的飞行速度变化最大,均匀性达到 14.80%;半自主控制方式下 Se-UAV 的飞行高度变化最大,均匀性达到 14.53%。Qe-UAV 在全自主控制方式下飞行参数的变化均匀性达到最佳,其中,飞行速度参数变化均匀性为 3.66%,飞行高度参数变化均匀性为 4.67%。表明在半自主控制方式下,多旋翼植保无人机比单旋翼植保无人机更加容易操控其作业;而全自主控制方式比半自主控制方式更加稳定。

2.2 植保无人机飞行轨迹精度参数

图 3 为通过无人机精准航迹观测系统所获得的 4 种不同类型植保无人机整个航程中飞行航迹偏差图,表 4 为 4 种不同类型植保无人机整个航程中每条飞行航迹的偏差和长度。从图 3 和表 4 可以看出,So-UAV 航线最小偏差出现在 1#去程航线轨迹上,为 0.128 m;最大偏差出现在 8#回程航线轨迹上,为 0.678 m。Se-UAV 航线最小偏差出现在 2#去程航线轨迹上,为 0.136 m;最大偏差出现在 6#回程航线轨迹上,为 0.703 m;Qe-UAV(半自主)航线最小偏差出现在 1#去程航线轨迹上,为 0.101 m;最大

偏差出现在 8#回程航线轨迹上,为 0.343 m。Qe-UAV(全自主)航线最小偏差出现在 3#去程航线轨迹上,为 0.075 m;最大偏差出现在 1#去程航线轨迹上,为 0.374 m。在整个作业过程中,四旋翼植保无人机的飞行航线精度要好于单旋翼植保无人机的飞行航线精度,且全自主控制方式下的 UAV 飞行航线精度要好于半自主控制方式;全自主控制方式下, Qe-UAV 在整个作业区域内的平均飞行航线偏差最小,为 0.172 m;半自主控制方式下, Se-UAV 在整个作业区域内的平均飞行航线偏差最大,为 0.338 m。

2.3 植保无人机飞行轨迹长度参数

对于植保无人机在作业区域内的航线长度而言,航线长度越整齐,表示作业区域漏喷面积越小,航空喷施作业质量越好。由图 3 和表 4 可知, So-UAV、Se-UAV、Qe-UAV(半自主)和 Qe-UAV(全自主)的飞行航线长度均匀性分别为 11.34%、10.97%、7.81%和 5.21%。单旋翼植保无人机的飞行航线长度不一,航线前段存在过长或过短的情况,即存在航空喷施作业多喷或漏喷等情况;四旋翼植保无人机的飞行航线长度均匀性要优于单旋翼植保无人机的飞行航线长度均匀性,且全自主控制方式下的 Qe-UAV 在整个作业区域内的飞行航线长度均匀性要优于半自主控制方式下的 Qe-UAV,表明全自主

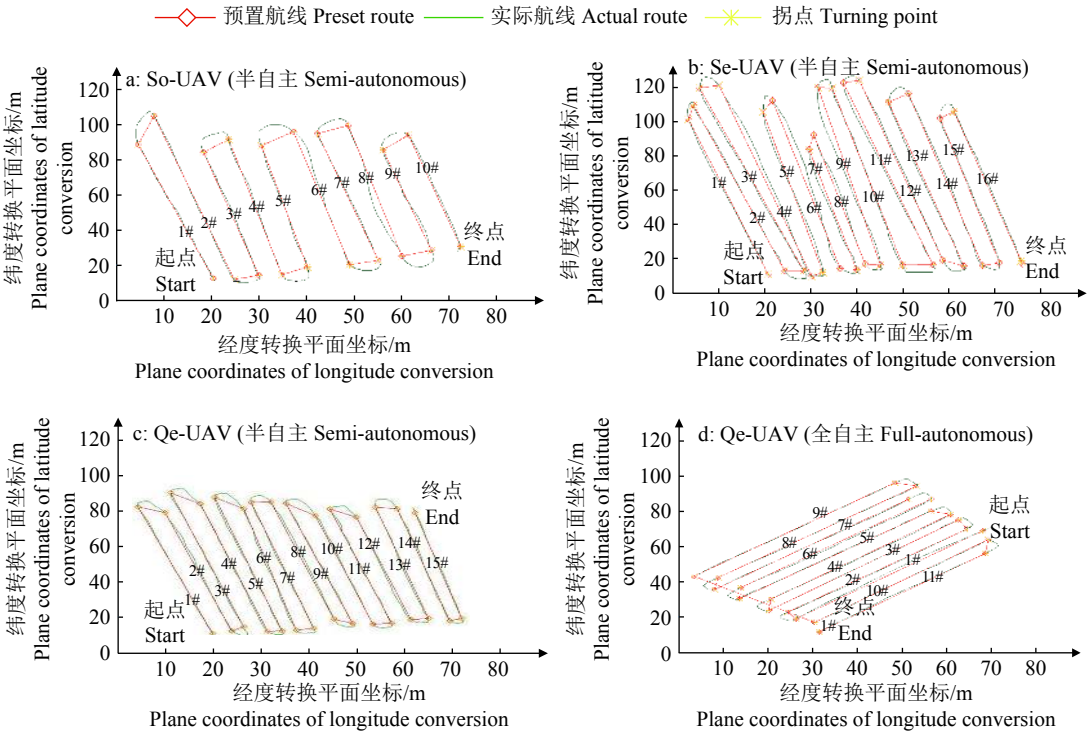


图 3 植保无人机飞行轨迹偏差
Fig. 3 Flight path deviation of plant protection UAV

表 4 植保无人机轨迹偏差和航线长度									
Table 4 Route deviation and length of flight path for plant protection UAV									m
航线编号 Route No.	作业方向 Flight direction	So-UAV (半自主 Semi-autonomous)		Se-UAV (半自主 Semi-autonomous)		Qe-UAV (半自主 Semi-autonomous)		Qe-UAV (全自主 Full-autonomous)	
		偏差 Deviation	<i>l</i> _{航线} Route length	偏差 Deviation	<i>l</i> _{航线} Route length	偏差 Deviation	<i>l</i> _{航线} Route length	偏差 Deviation	<i>l</i> _{航线} Route length
1	去 Go	0.128	83.72	0.261	104.01	0.101	76.70	0.374	63.63
2	回 Return	0.183	98.61	0.136	109.84	0.280	78.68	0.184	64.58
3	去 Go	0.285	76.59	0.266	121.94	0.140	80.37	0.075	65.37
4	回 Return	0.225	83.45	0.497	121.34	0.159	85.16	0.200	66.56
5	去 Go	0.206	77.91	0.426	109.39	0.215	79.29	0.158	67.27
6	回 Return	0.497	82.60	0.703	108.64	0.255	80.59	0.223	67.93
7	去 Go	0.162	78.85	0.453	84.87	0.123	76.38	0.166	69.22
8	回 Return	0.678	81.67	0.269	82.33	0.343	71.80	0.098	69.97
9	去 Go	0.304	65.01	0.691	114.86	0.080	71.96	0.115	72.11
10	回 Return	0.339	69.37	0.217	114.76	0.207	73.55	0.125	62.12
11	去 Go			0.412	117.67	0.155	68.30	0.172	59.71
12	回 Return			0.159	117.13	0.277	67.38		
13	去 Go			0.303	107.71	0.244	67.81		
14	回 Return			0.243	110.76	0.182	70.58		
15	去 Go			0.186	98.78	0.144	64.10		
16	回 Return			0.193	96.24				
平均Average		0.301		0.338		0.193		0.172	

控制方式下 Qe-UAV 航空喷施作业漏喷和多喷现象较少, 喷施作业质量最佳。

2.4 方差分析结果

为探明飞行方向和航线长度对飞行质量的影响, 分别选用了飞行方向和航线长度对 UAV 的飞行质量进行方差分析。

由飞行方向对植保无人机的飞行质量进行方差分析可知, 飞行方向对半自主控制方式下单旋翼油动植保无人机的飞行高度、单旋翼电动植保无人机的飞行速度和四旋翼电动植保无人机的航线精度对应的显著性水平值分别为 0.037、0.02 和 0.011, 均小于 0.05, 表明飞行方向对半自主控制方式下植保无人机的飞行参数存在一定程度的影响; 而飞行方向对全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机的飞行速度、飞行高度和飞行精度的显著性水平值均大于 0.05, 表明飞行方向对全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机的飞行参数影响不显著。

由航线长度对植保无人机的飞行质量进行方差分析可知, 航线长度对半自主控制方式下单旋翼油动植保无人机、单旋翼电动植保无人机和四旋翼电动植保无人机的飞行参数的显著性水平值均大

于 0.05, 表明航线长度对半自主控制方式下植保无人机的飞行参数影响不显著。而航线长度对全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机平均飞行速度的显著性水平值为 0.01, 表明航线长度对全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机的平均飞行速度存在显著性影响; 且航线长度与平均飞行速度之间的回归方程显著性检验的概率 $P<0.01$, 因此被解释变量与解释变量的线性关系是极显著的, 可建立线性方程。

由回归分析结果可知, 回归方程的回归系数依次为 1.432 和 0.029, 因此, 在设定的飞行速度 (v) 范围内 (1~5 m/s), 植保无人机的 v 与航线长度 (l) 之间的关系模型为:

$$v = 0.029l + 1.432,$$

(3)

回归模型的决定系数 R^2 为 0.729。

在所建立的关系模型中, 航线长度 (l) 的系数大于 0 且为正值, 表示无人机平均飞行速度与航线长度之间呈正相关, 说明在设定范围内, 航线长度越长, 无人机的平均飞行速度会越大, 这与实际作业过程是相符的。

另外,在本次不同类型植保无人机飞行质量的测试试验中,半自主控制方式下的 So-UAV、Se-UAV 和 Qe-UAV 的飞行质量测试均为飞行操控手人为操控,由于操控手的专业素质和操控习惯存在差异,导致飞行质量的测试结果存在一定程度上的飞行误差;但本次的测试结果与实际作业情况和经验是相一致的。而且全自主控制方式下的 Qe-UAV 飞行测试时自然风速更大,结合外界自然风速和风向对植保无人机飞行测试的影响,进一步说明了全自主控制方式下 Qe-UAV 航空喷施作业的飞行质量更佳。

3 结论

飞行方向对半自主控制方式下植保无人机的飞行参数存在一定程度的影响,对全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机的飞行参数不存在显著性影响;在整个作业过程中,半自主控制方式下单旋翼油动植保无人机和四旋翼电动植保无人机、全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机回程的平均速度大于去程的平均速度,而半自主控制方式下单旋翼电动植保无人机去程的平均速度大于回程的平均速度;另外,半自主控制方式下单旋翼油动植保无人机、单旋翼电动植保无人机和四旋翼电动植保无人机以及全自主控制方式下四旋翼电动植保无人机去程的平均高度均小于回程的平均高度。

四旋翼植保无人机飞行质量优于单旋翼植保无人机,且全自主控制方式下四旋翼植保无人机飞行质量优于半自主控制方式下四旋翼植保无人机。在条件允许的情况下,为保障植保无人机航空喷施作业质量,应优先使用全自主控制方式下的四旋翼植保无人机进行航空植保作业。

参考文献:

[1] LAN Y B, CHEN S D, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. *Int J Agric & Biol Eng*, 2017, 10(3): 1-17.

[2] 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.

[3] 周志艳, 臧英, 罗锡文, 等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 1-10.

[4] CHEN S D, LAN Y B, LI J Y, et al. Effect of wind field below unmanned helicopter on droplet deposition distri-

bution of aerial spraying[J]. *Int J Agric & Biol Eng*, 2017, 10(3): 67-77.

[5] XUE X Y, LAN Y B, SUN Z, et al. Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system[J]. *Comput Electron Agric*, 2016, 128: 58-66.

[6] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 航空喷施与人工喷施方式对水稻施药效果比较 [J]. *华南农业大学学报*, 2017, 38(4): 103-109.

[7] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 82-90.

[8] XUE X Y, TU K, QIN W C, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field[J]. *Int J Agric & Biol Eng*, 2014, 7(4): 23-28.

[9] 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): 25-32.

[10] 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.

[11] 陈盛德, 兰玉彬, 周志艳, 等. 小型植保无人机喷雾参数对橘树冠层雾滴沉积分布的影响 [J]. *华南农业大学学报*, 2017, 38(5): 97-102.

[12] 陈盛德, 兰玉彬, FRITZ B K, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 105-113.

[13] QIN W C, QIU B J, XUE X Y, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers[J]. *Crop Prot*, 2016, 85: 79-88.

[14] 王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 等. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 117-123.

[15] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 40-46.

[16] 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 基于空间质量平衡法的植保无人机施药雾滴沉积分布特性测试 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 89-97.

[17] 张宋超, 薛新宇, 秦维彩, 等. N-3 型农用无人直升机航空施药雾滴飘移模拟与试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 87-93.

[18] 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.

[19] 王颖. 试验设计与 SPSS 应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

【责任编辑 周志红】