

圆形多轴多旋翼电动无人机辅助授粉作业参数优选

李继宇^{1,2}, 周志艳^{1,2*}, 胡 炼^{1,2}, 臧 英^{1,2},
徐 赛^{1,2}, 刘爱民³, 罗锡文^{1,2}, 张铁民^{1,2}

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;
2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 3. 湖南隆平种业有限公司, 长沙 410006)

摘 要: 圆形多轴多旋翼无人直升机与单轴单旋翼无人直升机相比, 结构上有很大差异, 因而其旋翼所产生气流到达作物冠层后形成的风场参数亦有所不同。该文采用 3 种圆形多轴多旋翼无人直升机, 根据正交试验设计法设计了 3 因素 (飞行高度、飞行速度以及飞机与负载质量) 3 水平的正交试验, 通过考察平行于飞行方向 (X)、垂直于飞行方向 (Y)、垂直地面 (Z) 3 个方向上的峰值风速、 Y 向风场宽度 (越宽越好)、动力电池的压降 (放电越慢越好) 3 个指标, 对该机型用于水稻制种辅助授粉的田间作业参数进行优选, 试验结果分析表明: 圆形多轴多旋翼无人直升机在水稻冠层形成的 X 向风场宽度明显大于 Y 向的风场宽度; 有别于单旋翼无人直升机, 圆形多轴多旋翼无人直升机 X 向风场只有 1 个峰值风速中心, Y 向风场存在 2 个峰值风速中心, 这一现象主要由飞行器多个旋翼的侧向气流叠加形成, 相互之间存在干扰, 而且也影响了 Y 向风场的有效宽度。在实际应用中, 对于能实现 GPS 自主导航飞行的机型, 应根据作业的便利程度尽量利用 X 向的风力, 更有益于辅助授粉作业; 而对于未采用 GPS 自主导航飞行的机型, 为便于飞控手对飞机位置的判断与姿态操控而必须沿父本行方向进行飞行作业时 (即利用 Y 向风力), 应充分考虑垂直于飞行方向风场宽度较窄的实际情况, 通过降低作业效率来弥补。圆形多轴多旋翼无人直升机在水稻冠层所形成风场的峰值风速主要受飞机的飞行速度、飞机与负载质量、飞行高度影响。结合有效风场宽度及电池电量消耗程度来考量, 3 种主要因素的主次排序及其较优水平依次为飞行速度 1.30 m/s、飞机与负载质量 18.85 kg 和飞行高度 2.40 m。该结果可为其他圆形多轴多旋翼无人直升机用于水稻制种辅助授粉的田间作业参数设置提供参考, 而且也可为制定基于农用无人直升机的水稻制种辅助授粉作业技术规范提供依据。
关键词: 无人机; 测量; 试验; 多轴多旋翼; 电池动力; 极差分析; 作业参数优选; 正交试验

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.11.001

中图分类号: S252⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-11-0001-09

李继宇, 周志艳, 胡 炼, 等. 圆形多轴多旋翼电动无人机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 1-9.

Li Jiyu, Zhou Zhiyan, Hu Lian, et al. Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using round multi-axis multi-rotor electric unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 1-9. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

笔者在文献[1]和利用单旋翼电动无人机进行辅助授粉的田间试验中, 采用风场无线传感器网络测量系统, 在水稻生长已封行的稻田里分别对单轴

单旋翼油动力无人直升机 (自身质量约 69 kg, 作业载荷 3.75 kg) 和单轴单旋翼电池动力无人直升机 (自身质量约 9.3 kg, 作业载荷 2.75~4.75 kg) 飞行时到达水稻冠层的风场进行了测量试验, 并对风场进行了分析计算, 得到了上述机型较适合的飞行作业参数。

在文献[1]中笔者已对国内外进行水稻制种辅助授粉的研究情况及作物冠层风场的测量方法进行了综述, 但目前针对使用圆形多轴多旋翼电动无人直升机进行水稻制种辅助授粉的相关研究尚未见正式报道。圆形多轴多旋翼无人直升机目前主要有 3 旋翼、4 旋翼、6 旋翼、8 旋翼、18 旋翼、24 旋翼等机型, 与单轴单旋翼无人直升机相比, 其结构有很大差异^[2-3], 多个旋翼一般采用圆形对称结构布局, 均采用电池动力驱动, 飞行中所产生的气流

收稿日期: 2013-10-31 修订日期: 2014-03-14

基金项目: “十二五”国家“863”计划项目 (2013AA102303, 2012AA101901-3); 国家自然科学基金项目 (31371539); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201403057); 国家科技支撑计划课题 (2014BAD06B07)

作者简介: 李继宇 (1979-), 男 (汉族), 湖北黄冈人, 博士生, 讲师, 主要从事农业航空应用技术研究, 广州 华南农业大学工程学院, 510642. Email: lijiyu@scau.edu.cn

*通信作者: 周志艳 (1972-), 男 (汉族), 湖南永州人, 博士, 副教授, 主要从事农业航空应用技术研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642. Email: zyzhou@scau.edu.cn

中国农业工程学会会员 (E042100021M)

是多个旋翼共同作用的结果^[4]。圆形多轴多旋翼无人直升机除了具有作业高度低、可垂直起降、无需专用起降机场、操作灵活轻便、环境适应性强等突出优点外,与单轴单旋翼无人直升机相比,还具有机械结构更简单、易折叠拆卸、飞行更平稳、模块化程度高等特点^[5]。然而,与单旋翼无人机所形成风场相比,圆形多轴多旋翼无人直升机旋翼所产生气流到达作物冠层后形成的风场参数(风速、风向和场宽等)是否存在差异,需要进一步探索。

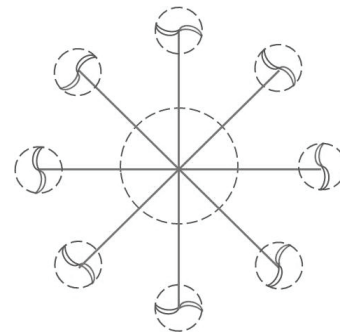
本文在前述工作的基础上,采用圆形多轴多旋翼无人直升机的代表机型,设计了3因素(飞行高度、飞行速度以及飞机与负载质量)3水平的正交试验,通过对正交试验结果进行相关分析,对圆形多轴多旋翼无人直升机用于水稻制种辅助授粉的田间作业参数进行优选,以期完善无人飞行器用于水稻制种辅助授粉的田间作业参数及其判别标准提供补充资料,为其他同类机型的田间作业参数优选提供参考,为制定基于农用无人直升机的水稻制种辅助授粉作业技术规范提供依据。

1 材料与方法

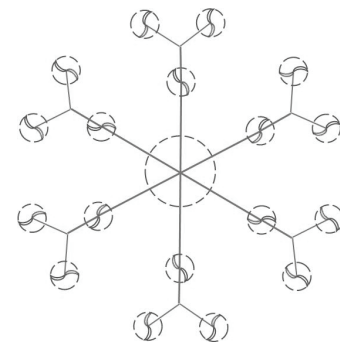
1.1 测试机型及参数

基于不同的机身结构参加本次测试的2类圆形多轴多旋翼无人直升机机型如图1所示,2种类型的翼展结构布局都为圆形、对称结构设计,由多个对称式布局的电机给相应的小旋翼提供动力,所有旋翼在飞控系统的集中控制下,通过协调各个旋翼之间的不同转速和旋转方向^[6-7],共同给机身提供向上的升力、控制机身的运动方向并保持机身平衡^[2-4],其飞行控制原理如图2所示。因此,该类机型在水稻冠层形成的辅助授粉风场,是所有单个旋翼的气流叠加在一起共同形成的^[8]。与单旋翼无人直升机相比,其

风场更为复杂^[9-10]。影响风场参数(风速、风向、授粉有效风力覆盖宽度等)的主要因素包括轴距(机身相距最远2个旋翼主轴的距离)、旋翼直径、旋翼数量、航向(与自然风的夹角)、飞行高度、飞行速度以及飞机与负载质量等^[11]。用于测试的几种圆形多轴多旋翼无人直升机代表机型的相关参数如表1所示。



a. 8 旋翼电动无人机结构
a. 8-rotors electric UAV



b. 18 旋翼电动无人机结构
b. 18-rotors electric UAV

图1 待测多轴多旋翼电动无人机结构

Fig.1 Multi-axis multi-rotor electric UAVs (unmanned aerial vehicles) used in test

表1 用于测试的无人机型及参数

Table 1 Parameters of tested UAVs (unmanned aerial vehicles)

型号 Type	自身质量 Weight/kg	最大有效负载能力 Maximum load/kg	旋翼直径 Rotor diameter/cm	轴距 Wheelbase/m	旋翼数量 Number of rotor	生产厂家 Manufacturer
DF-2	5.0	3	37	1.1	8	襄阳市东方绿园植保器械有限公司
TXC8-3	5.4	3	37	1.2	8	河南田秀才植保股份有限公司
WSZ-1805	14.1	5	43	2.4	18	山东卫士植保机械有限公司

1.2 风场无线传感器网络测量系统

采用汪沛等^[1]研究的风场无线传感器网络测量系统。

1.3 试验方案

1.3.1 材料及试验地

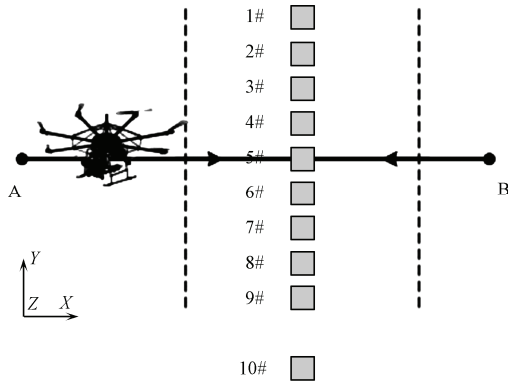
本次辅助授粉作业参数优选试验以杂交水稻品种两优 0293 为作业对象,种植于海南省三亚市乐东县黄流镇隆平种业公司杂交水稻繁育基地

(108°50'21"E, 18°28'24"N), 试验时水稻正处于始穗期,平均株高约为 50 cm。

1.3.2 风速传感器无线测量节点在田间的布置

参照汪沛等^[1]介绍的3向线阵风场测量方法在田间进行风速传感器无线测量节点(wireless wind speed sensor, WWSS)的布置,如图2所示。10个 WWSS 节点依次编号 1#~10#, 两两间隔 1 m 沿垂直水稻种植行方向排列为一行,为了同步测量对

应方向的自然风风速，将 10#WWSS 节点放置在距离 9#节点约 15 m 处的远端。每个节点上有 X、Y、Z 向 3 个不同方向的风速传感器，以风速传感器的轴心为参考安装方向^[12-13]，X、Y、Z 3 个方向的定义分别为：X 向，平行于飞行方向，即平行于水稻种植行方向；Y 向，垂直于飞行方向，即垂直于水稻种植行方向；Z 向，垂直于地面方向。



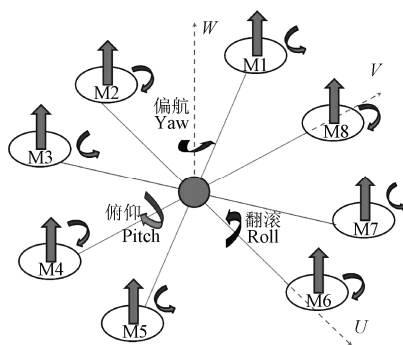
注：1#~10#依次为 10 个风速传感器无线测量节点的编号，A、B 分别为测试中飞行器目标航线（即风速传感器节点线阵中心轴）的 2 个端点
Note: The 1#~10# are the numbers of 10 wireless wind speed sensors (WWSS); A and B are the end points of the preplanned flight line.

图 2 风场测量布置方案^[1]
Fig.2 Wind field measurement layout scheme

表 2 多轴多旋翼无人直升机辅助授粉作业参数优选试验设计

Table 2 Experiment design for optimization of supplementary pollination operation parameters using round multi-axis multi-rotor electric unmanned helicopter

试验名称 Experiment name	试验目的 Experiment purposes	测试机型 Test models	水平数 Number of levels	因素数 Number of factors	样本数 Number of samples
风场宽度对比试验 Wind field width of comparative experiments	Y 向风场分布情况 wind distribution at Y direction	DF-2	2	1	7
		TXC8-3	2	1	7
		WSZ-1805	3	3	18
3 因素 3 水平正交试验 3 factors and 3 levels orthogonal experiment	探寻各因素对授粉风场的影响程度 Explore the various factors on the degree of influence wind pollination	WSZ-1805	3	3	18



注：M1~M8 为沿机体平面对称分布的 8 个电机，U、V、W 为机体坐标系坐标轴
Note: The M1-M8 are 8 motors symmetrically distributed along the plane of the body, and U, V, W used for the body coordinate axes

图 3 圆形多轴多旋翼无人机飞行控制原理
Fig.3 Round multi-axis multi-rotor UAV flight control principle models

1.3.3 试验内容

试验内容的设计如表 2 所示，主要包括 2 方面的内容：多轴多旋翼机型的风场分布情况试验研究，主要了解其风场宽度是否能满足辅助授粉的需要；安排 3 因素 3 水平正交试验。根据多旋翼无人直升机空气动力学原理，通常多旋翼直升机旋翼的螺距是固定的，其飞行高度、飞行速度和飞机与负载质量变化均会直接影响旋翼转速，且各个旋翼的转速在不同工况下各不相同（其飞行控制原理如图 3 所示）^[14-15]。比如：要增加飞行高度或负载质量时，必须相应增大旋翼转速才能实现；改变飞机的航向并提高飞机的飞行速度时，在相同的旋翼尺寸条件下，也必须要通过降低运动方向一侧旋翼的转速而提高对立一侧旋翼的转速来实现。而转速的变化又通过旋翼的旋转反映在旋翼风场的变化上，从而进一步影响飞行器田间授粉作业的效果。此外，飞行高度、飞行速度和飞机与负载质量这 3 个作业参数易于控制调整，而各个旋翼的转速受制于作业参数。因此，本研究中选取了与水稻冠层风场紧密相关的飞行高度、飞行速度和飞机与负载质量 3 个主要影响因素进行多水平正交试验考察，考察各因素对圆形多轴多旋翼无人直升机旋翼气流到达作物冠层后形成风场的影响程度。

此外，电池能量消耗的快慢，直接关系到电动无人直升机的作业效益，为了解辅助授粉作业的经济性，在采用风场无线传感器网络测量系统获取风场数据的同时，对飞行器每个起降前后动力电池的电压值进行记录。

参照汪沛等^[1]介绍的 3 向线阵风场测量方法，每个试验处理条件下飞行器每次沿垂直于 WWSS 节点线阵的中心轴 A 至 B，B 至 A 来回飞行，飞行距离为 50 m。当飞行器飞行至距离传感器阵列 3 m 时开始采集数据，采样频率为 20 Hz，在 5 s 内共连续采集 100 次，获得去向和回向 2 组重复的样本数据，去向数据用作分析计算，回向数据作为参考与备用。

1.3.4 试验的因素与水平

为了对圆形多轴多旋翼无人直升机用于水稻

制种辅助授粉的田间作业参数^[16-17]进行优选, 根据正交试验设计法设计了 WSZ-1805 机型 3 因素 3 水平正交试验, 其因素及水平如表 3 所述。因飞行高度、飞行速度和飞机与负载质量三者相对于电机转速完全处于并列关系, 没有两因素之间有突出的交互作用, 且考虑到实际飞行试验环境复杂需尽量减少试验次数, 不考察因素间的交互作用。表中根据试验考察的因素及水平选用 L9(3³)水平的正交表来安排试验^[18-19], 每个飞行条件按照去向与回向重复 2 次, 共得到有效样本数据 18 个。

正交试验中, 重点考察 X、Y、Z 3 个方向上的峰值风速、Y 向风场宽度(越宽越好)、动力电池的压降(放电越慢越好) 3 个指标。

表 3 中因素 A 为飞机与负载质量, A1 水平是飞机机身自身质量 14.1 kg 与飞行航线测量系统(flight global position system, FGPS)质量 2.75 kg 之和, A2 与 A3 分别在 A1 基础上增加 1 和 2 kg 的标准砝码。因素 B 和 C 在实际试验时首先由飞控手根据授粉作业的预测值(0.5 m < 预测高度 < 3.5 m, 1 m/s < 预测速度 < 6 m/s)控制, 但最终值的确定根据 GPS 测得的位姿数据取其有效航线(采样时段内)的平均值获得。因素 B(飞行高度)指飞机上 GPS 天线至水稻冠层的距离。因素 C(飞行速度)指飞机飞越 WWSS 节点时采样时段内的平均速度。

表 3 3 因素 3 水平试验因素与水平
Table 3 3 Factors and 3 levels of test

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	飞机与负载质量 Takeoff weight/kg	飞行高度 Flight altitude /m	飞行速度 Flight speed/(m·s ⁻¹)
1	16.85	1.40	1.30
2	17.85	2.40	3.10
3	18.85	3.20	4.80

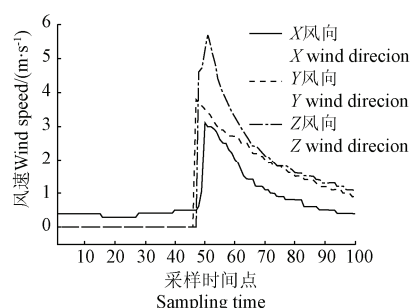
1.4 数据预处理

异常样本数据的剔除及自然风干扰的处理准则参照文献[1]及笔者在开展单旋翼电动无人机进行辅助授粉的田间试验中的方法, 采用 10#WWSS 节点测得的同向自然风风速值直接进行校正处理, 作为旋翼气流到达作物冠层后形成风场中 1#-9#WWSS 节点的近似值。

为了减少数据采集过程中传感器突变数据的干扰, 保证所采集的数据更可靠^[20], 对所采集到的数据进行了如下有效性分析:

单样本数据中每 1 列对应 1 个传感器, 每个模块上有 3 个传感器, 10 个 WWSS 节点, 共 30 列数据; 单样本数据中每行数据对应一个采样时刻, 采集 100 个时刻的风速值, 共 100 行数据。由于采样的起始时间由人工判定存在一定误差, 风速的最大

值可能没有被采集; 或由于外界干扰造成无线数据收发过程中出现偶尔丢失或突变, 故需对样本数据的连续单调性进行分析^[21-22]。以图 4 为例, 单个传感器 X、Y、Z 3 个方向以采样时间点为横坐标, 可以看到在采样开始后第 2.25s(第 45 个采样点)至 2.75s(第 55 个采样点)之间出现了 3 个方向的风速峰值, 说明该次采样数据包含了 3 向风速最大值; 同时以 Z 向风速为例, 从数值 0(第 48 个采样点)变化到最大值 5.8 m/s(第 52 个采样点)对应的采样点个数为 5, 采样时间为 200 ms, 数据样本没有发生突变, 则该次样本数据有效。



注: 图中采样间隔为 50 ms

Note: Sampling interval is 50 ms

图 4 样本数据的有效性分析

Fig.4 Effectiveness analysis of sample data

2 结果与分析

2.1 有效风场宽度分析

2.1.1 风场宽度试验结果

本文中考察风场宽度的适宜风速定义为花粉悬浮的参考速度(1 m/s)^[23-24], 即: 以飞机航线与 WWSS 传感器阵列交点为原点, 峰值风速 > 1 m/s 的 WWSS 节点所覆盖的宽度为风场宽度。针对 DF-2、TXC8-33、WSZ-1805 3 种圆形多轴多旋翼无人直升机设计了以 3 m/s 的速度、空载情况下在不同高度的飞行测试, 获取的风场宽度 (> 1 m/s) 结果如表 4 所示。

表 4 风场宽度试验结果

Table 4 Results of width of wind field

机型 Model	轴距 Wheelbase/m	去向风场宽度(>1 m/s)					
		Wind field width of go direction/m					
		飞行高度(1 m) Flight altitude			飞行高度(0.5 m) Flight altitude		
		X	Y	Z	X	Y	Z
DF-2	1.1	6.9	3.9	4.8	7.3	4.2	4.9
TXC8-33	1.2	7.2	4.1	4.3	8.2	4.4	6.3
WSZ-1805	2.4	7.6	5.8	5.2	8.5	6.9	6.5

注: 飞行速度为 3 m/s、空载; 飞行高度指飞机距离水稻冠层的高度; X 为平行于飞行方向; Y 为垂直于飞行方向; Z 为垂直于地面方向, 下同。
Note: Flight speed 3m/s, no load; Flight altitude is the height above the rice canopy; X, parallel to the direction of flight; Y, perpendicular to the direction of flight; Z, the direction perpendicular to the ground. The same below.

从表 4 中可以看出，飞行高度降低后，风场宽度数据均变大。轴距变大后，除飞行高度为 1 m 时 Z 向数据变小（由飞行操控误差引起）外，其余数据均变大，分别以飞行高度和轴距作为因素对表 4 中风场宽度做单因素方差分析，利用 MATLAB 程序计算 P 值如表 5 所示。除轴距变化时 Y 向风场有较显著差异外，其余情况差异均不明显。因此，在试验中所列的飞行条件下，可以认为圆形多轴多旋翼无人直升机的风场宽度 (>1 m/s) 随着飞行高度降低有增大的趋势，随着轴距变小有减小的趋势，但均无显著差异。

表 5 风场宽度方差值
Table 5 Wind field width variance value

风向 Wind direction	P 值 P values	
	因素 B (飞行高度) B factor (Flight altitude)	因素 D (轴距) D factor (Wheelbase)
X 向 X direction	0.1374(>0.1)	0.3708(>0.1)
Y 向 Y direction	0.6204(>0.1)	0.0301(<0.05)
Z 向 Z direction	0.1161(>0.1)	0.6361(>0.1)
不分方向 All directions	0.2599(>0.1)	0.2603(>0.1)

2.1.2 飞机过顶时传感器线阵上风场的分布情况

TXC8-3 型圆形多轴多旋翼无人直升机的 X、Y 向风场分布情况如图 5 所示。从图中可看出，X 向风速明显大于 Y 向，而且风场宽度更大，这主要是由于飞行器向前飞行时，推动飞行器前进的尾风气流比侧风气流更强所致；X 向风场具有一个峰值风速中心，分布在 5#传感器与 6#传感器之间，其风力沿中心往两侧逐步扩散，主要由推动飞行器前进的尾风气流构成；Y 向风场则有别于单旋翼无人直

升机只有单个峰值中心的情形，多旋翼无人直升机具有 2 个明显的峰值风速中心，分别位于 5#传感器与 7#传感器处，在风速峰值同时刻读取到 6#传感器附近的风速约为 0。Y 向风场的分布主要受飞行器旋翼的侧向气流影响，导致 Y 向风场出现 2 个峰值风速中心的原因主要包括：多旋翼机身上旋翼圆形布局对 Y 向风场的干扰；Z 向与 X 向气流对 Y 向风场的叠加干扰。X 向风场的宽度明显大于 Y 向的风场宽度，因此，在实际应用中，若能实现 GPS 自主导航飞行，建议利用 X 向（即平行于飞行方向）的风力，更有益于辅助授粉作业。对于未采用 GPS 自主导航飞行的机型，由于沿父本行方向进行飞行作业时（即利用 Y 向风力）最易于飞控手对飞机位置的判断与姿态操控^[25-27]，而本试验中所列机型 Y 向风场的宽度较窄，对作业效率有较大影响，在实际生产中应予以考虑。

2.2 正交试验方案与试验结果

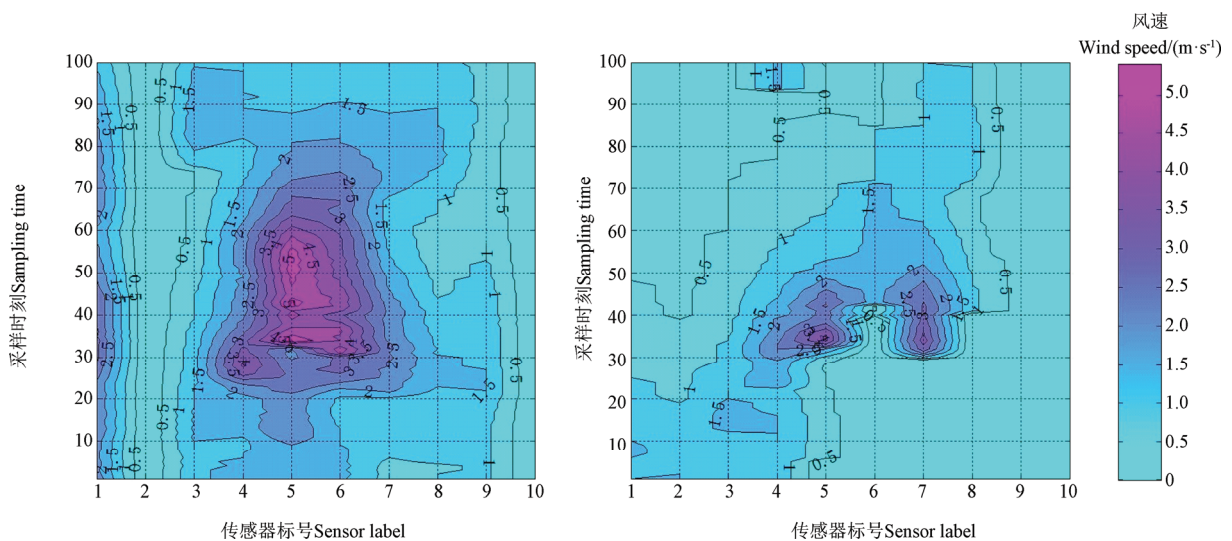
2.2.1 正交试验结果

WSZ-1805 机型正交试验结果如表 6 所示。

2.2.2 极差分析结果

对主要影响授粉效果的 X 向、Y 向峰值风速及 Y 向风场宽度进行极差分析，结果如表 7 所示。

表 7 中，K 为因素试验结果之和；k 为因素试验结果之和的均值；极差 R 为 k 值中的大数减去小数。根据 k 值大小可以确定各因素的较优水平。根据 R 值大小可以确定各因素作用的主次顺序^[28]。X 向与 Y 向峰值风速的影响因素主次排序为 C、A、B，Y 向风场宽度的影响因素主次排序也是 C、A、B。可以确定影响因素的优先顺序为 C（飞行速度）、A（飞机与负载质量）、B（飞行高度）。



注：图中采样间隔为 50ms
Note: Sampling interval is 50ms

图 5 TXC8-3 型无人机 X、Y 向去向风场的分布情况

Fig.5 Distribution of wind field on direction X and Y of TXC8-3 round 8-rotors electric unmanned helicopter

表6 正交试验方案与试验结果
Table 6 Orthogonal test programs and test results

试验号 Test number.	飞机与负载质量 <i>A</i> Takeoff weight/kg	飞行高度 <i>B</i> Flight altitude /m	飞行速度 <i>C</i> Flight speed /($m \cdot s^{-1}$)	去向试验结果 Test results				电压降 Voltage drop/V	综合评分结果 Synthetic score results
				峰值风速 Peak wind speed/($m \cdot s^{-1}$)			Y 向风场宽度 Wind field width/m		评分 <i>P</i> Score
				<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>			
1	1 (16.85)	1 (1.40)	1 (1.30)	4.80	4.20	7.70	6.8	1.60	8.34
2	1 (16.85)	2 (2.40)	2 (3.10)	3.40	4.60	4.70	3.8	1.60	5.63
3	1 (16.85)	3 (3.20)	3 (4.80)	1.90	2.60	5.80	4.7	1.60	5.23
4	2 (17.85)	1 (1.40)	2 (3.10)	3.60	6.60	6.00	4.2	1.80	7.48
5	2 (17.85)	2 (2.40)	3 (4.80)	3.50	3.30	3.50	4.8	1.80	6.82
6	2 (17.85)	3 (3.20)	1 (1.30)	4.60	6.70	8.40	6.2	1.80	9.67
7	3 (18.85)	1 (1.40)	3 (4.80)	1.60	5.10	5.20	5.8	2.20	9.37
8*	3 (18.85)	2 (2.40)	1 (1.30)	4.60	6.10	8.60	6.7	2.20	12.10*
9	3 (18.85)	3 (3.20)	2 (3.10)	1.80	3.50	2.90	5.6	2.20	8.57

注: Y 向风场宽度, 对应的峰值风速 > 1 m/s; *, 综合评分最高的试验号。

Note: ; Y Wind field width, corresponding to the peak wind speed > 1 m/s *, the test number, which has highest score.

表7 极差分析结果
Table 7 Result of range analysis

	峰值风速 Peak wind speed						风场宽度 Wind field width		
	<i>X</i>			<i>Y</i>			<i>Y</i>		
	飞机与负载质量 <i>A</i> Takeoff weight/kg	飞行高度 <i>B</i> Flight altitude/m	飞行速度 <i>C</i> Flight speed/($m \cdot s^{-1}$)	飞机与负载质量 <i>A</i> Takeoff weight/kg	飞行高度 <i>B</i> Flight altitude /m	飞行速度 <i>C</i> Flight speed/($m \cdot s^{-1}$)	飞机与负载质量 <i>A</i> Takeoff weight/kg	飞行高度 <i>B</i> Flight altitude/m	飞行速度 <i>C</i> Flight speed/($m \cdot s^{-1}$)
<i>K</i> 1	10.10	10.00	14.00	11.40	15.90	17.00	15.30	16.80	19.70
<i>K</i> 2	11.70	11.50	8.80	16.60	14.00	14.70	15.20	15.30	13.60
<i>K</i> 3	8.00	8.30	7.00	14.70	12.80	11.00	18.10	16.50	15.30
<i>k</i> 1	3.37	3.33	4.67	3.80	5.30	5.67	5.10	5.60	6.57
<i>k</i> 2	3.90	3.83	2.93	5.53	4.67	4.90	5.07	5.10	4.53
<i>k</i> 3	2.67	2.77	2.33	4.90	4.27	3.67	6.03	5.50	5.10
极差 Range <i>R</i>	1.23	1.07	2.33	1.73	1.03	2.00	0.97	0.50	2.03
较优水平 Optimum level	<i>A</i> 2	<i>B</i> 2	<i>C</i> 1	<i>A</i> 2	<i>B</i> 1	<i>C</i> 1	<i>A</i> 3	<i>B</i> 1	<i>C</i> 1
主次因素 Order	<i>CAB</i>			<i>CAB</i>			<i>CAB</i>		

根据 *k* 值大小可以确定各因素的较优水平。飞行速度影响 3 向峰值风速的较优水平值均为 *C*1, 可以确定飞行速度较优水平为 1.30 m/s (平均速度); 飞行高度的较优水平中有 2 个为 *B*1, 1 个为 *B*2, 确定飞行高度较优水平为 1.40 m (平均高度); 飞机与负载质量较优水平为 *A*2 的是 *X* 向和 *Y* 向风速, 为 *A*3 的是 *Y* 向风场宽度, 飞机与负载质量的较优水平为 17.85 kg。

2.2.3 综合指标评价

极差分析结果表明, 3 个主要因素的较优水平中各不相同, 分别为: *X* 向峰值风速对应 *C*1、*A*2、*B*2、*Y* 向峰值风速对应 *C*1、*A*2、*B*1、*Y* 风场宽度对应 *C*1、*A*3、*B*1, 需从上述 3 个较优水平中进一步评出最优水平。

在多轴多旋翼电动无人直升机作业过程中, 希望有大的峰值风速和宽的有效风场宽度, 同时又希望尽量节省能源, 减少更换电池的时间, 降低作业

成本。为进一步从极差分析结果中优选出较佳的作业参数, 采用综合评分法^[29-30]结合有效风场宽度和电压降对 WSZ-1805 机型作业参数进一步进行分析评价。采用的评分公式如式 (1) 所示, 计算综合评分 *P* 值的结果如表 8 所示。

$$P_i = (X_i \times L \times 0.4 + Y_i \times L \times 0.4 + (1/Z_i) \times L \times 0.2) \times 0.5 + D_i \times L \times 0.5 \quad (1)$$

式中: *P* 为综合评分值, *i* 是试验号, *L* 为当次试验电压降, *X_i* 为 *X* 向峰值风速值, *Y_i* 为 *Y* 向峰值风速值, *Z_i* 为 *Z* 向峰值风速值 (如表 6 中所示, 越小越好), *D_i* 为 *Y* 向风场宽度值 (>1 m/s)。考虑到峰值风速与有效风场宽度对授粉效果具有相同的重要性, 两者权重系数同设为 0.5; 而 *X* 向与 *Y* 向峰值风速对授粉效果影响较大, 权重系数分别取为 0.4, *Z* 向峰值风速影响较小, 权重系数取为 0.2。

根据表 6 中的综合评分结果, 综合考虑各因素对峰值风速、有效风场宽度及电池电量消耗的影响, 优选出 WSZ-1805 型无人机的最佳作业水平为 C1、A3、B2 (对应试验号为 8), 该结果与 Y 向风场宽度的极差分析结果保持一致, 即飞行速度 (1.30 m/s), 飞机与负载质量 (18.85 kg), 飞行高度 (2.40 m)。

3 结 论

本文针对不同旋翼数量的圆形多轴多旋翼无人直升机, 采用正交试验设计法设计了 3 因素 (飞行高度、飞行速度以及飞机与负载质量) 3 水平的正交试验, 通过考察 X、Y、Z 3 个方向上的峰值风速、Y 向风场宽度、动力电池的压降 3 个指标, 对该机型旋翼在水稻冠层产生的风场宽度及其影响因素进行了试验研究, 并通过极差分析和综合评分法对该机型用于水稻制种辅助授粉的田间作业参数进行了优选, 试验分析结果表明:

1) 圆形多轴多旋翼无人直升机在水稻冠层形成的 X 向风场宽度明显大于 Y 向的风场宽度。X 向风场只有 1 个风速峰值中心, 主要由推动飞行器前进的尾风气流构成; 有别于单旋翼无人直升机, 圆形多轴多旋翼无人直升机的 Y 向风场存在 2 个风速峰值中心, 主要是由于飞行器多个旋翼的侧向气流叠加形成, 相互之间存在干扰, 从而也影响了 Y 向风场的有效宽度。在实际应用中, 对于可能实现 GPS 自主导航飞行的机型, 应根据作业的便利程度尽量利用 X 向 (即平行于飞行方向) 的风力, 更有益于辅助授粉作业; 而对于未采用 GPS 自主导航飞行的机型, 为便于飞控手对飞机位置的判断与姿态操控而必须沿父本行方向进行飞行作业时 (即利用 Y 向风力), 应充分考虑 Y 向风场宽度较窄的实际情况。

2) 影响 WSZ-1805 型圆形多轴多旋翼无人直升机在水稻冠层所形成风场的峰值风速主要受飞机的飞行速度、飞机与负载质量、飞行高度影响。结合有效风场宽度及电池电量消耗程度来考量, 3 种主要因素的主次排序及其较优水平依次为 C1 飞行速度 (1.30 m/s)、A3 飞机与负载质量 (18.85 kg) 和 B2 飞行高度 (2.40 m) (表 6 中对应试验号 8)。

致谢: 本文所述试验在开展过程中, 得到了湖南隆平种业有限公司、襄阳市东方绿园植保器械有限公司、河南田秀才植保股份有限公司、山东卫士植保机械有限公司相关技术人员以及华南农业大学闫梦璐、曹晓曼、王辉、祝伟杰等的大力支持和帮助, 在此表示深深的谢意!

[参 考 文 献]

- [1] 汪沛, 胡炼, 周志艳, 等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 54—61.
Wang Pei, Hu Lian, Zhou Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(3): 54—61. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘羽峰, 宁媛. 六轴旋翼碟形飞行器控制系统设计[J]. 现代机械, 2010, 19(5): 56—58.
Liu Yufeng, Ning Yuan. Design of Flight Control System for a Six-axis Rotor Saucer Shaped Rotorcraft[J]. Modern Machinery, 2010, 19(5): 56—58. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杨成顺, 杨忠, 张强. 一种新型多旋翼飞行器的建模与反演控制[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2013, 27(1): 52—58.
Yang Chengshun, Yang Zhong, Zhang Qiang. Modeling and backstepping control for a novel multi-rotor aircraft[J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2013, 27(1): 52—58. (in Chinese with English abstract)
- [4] 潘俊, 杨成顺, 周宾. 一种新型多旋翼飞行器的建模与反演控制[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2012, 30(4): 540—544.
Pan Jun, Yang Chengshun, Zhou Bin. Modeling and backstepping control for a novel multi-rotor aircraft[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2012, 30(4): 540—544. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王伟, 周勇, 王峰, 等. 基于气压高度计的多旋翼飞行器高度控制[J]. 控制工程, 2011, 18(4): 614—617.
Wang Wei, Zhou Yong, Wang Feng et al. Altitude control of multi-rotor type aircraft based on pressure sensor[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(4): 614—617. (in Chinese with English abstract)
- [6] Madani T, Benallegue A. Control of a Quadrotor Mini-helicopter Via Full State Backstepping Technique[C]// Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA: IEEE, 2006: 1515—1520.
- [7] Madani T, Benallegue A. Backstepping Sliding Mode Control Applied to a Miniature Quadrotor Flying Robot[C]// Proceedings of the 32nd IEEE Annual Conference on Industrial Electronics, Paris, France: IEEE, 2008: 700—705.
- [8] 陈铭, 胡继忠. 旋翼诱导速度空间分布的一种计算方法[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(3): 339—349.
Chen Ming, Hu Jizhong. A method of spatial distribution of helicopter rotor induced velocity[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005, 23(3): 339—349. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡永光, 刘胜忠, 沈建文. 茶园无人直升机防霜试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 692—695.
Hu Yongguang, Liu Shengzhong, Shen Jianwen. Frost protection experiment in tea fields using an unmanned helicopters[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(5): 692—695. (in Chinese with English abstract)
- [10] 茹煜, 贾志成, 范庆妮, 等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 47—52.
Ru Yu, Jia Zhicheng, Fan Qingni, et al. Remote control

- spraying system based on unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [11] Bouabdallah S, Siegwart R. Backstepping and Sliding Mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain :IEEE, 2005: 2247—2252.
- [12] 敖振浪, 李国森. 自动气象站风速传感器自动化检定系统设计与实现[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 429—431. Ao Zhenlang, Li Guosen. Design and realization of automatic wind-speed sensor calibration system for automatic weather stations[J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(3): 429—431. (in Chinese with English abstract)
- [13] 郑学文, 陈武框, 吕玉嫦. 风速传感器自动化检定系统中自动控制的实现[J]. 气象科技, 2009, 37(2): 253—256. Zheng Xuewen, Chen Wukuang, Lü Yuchang. Realization of automatic control for wind speed sensor automatic calibration system[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(2): 253—256. (in Chinese with English abstract)
- [14] Bouabdallah S, Noth A, Siegwart R. PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan: IEEE, 2004: 2451—2456.
- [15] 李继宇, 张铁民, 彭孝东, 等. 四旋翼飞行器农田位置信息采集平台设计与实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 202—206. Li Jiyu, Zhang Tiemin, Peng Xiaodong, et al. The field location information collection platform design based on the Four-rotor Aircraft[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 202—206. (in Chinese with English abstract)
- [16] 钱钰斌, 王刚, 郑涛, 等. 一种小型化履带式手扶田间作业机的设计与应用[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(5): 133—136. Qian Yubin, Wang Gang, Zheng Tao, et al. The design and application of a small caterpillar walking field working machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(5): 133—136. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘宏新, 王福林. 作业参数对立式圆盘排种器性能的影响[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 133—136. Liu Hongxin, Wang Fulin. Effects of working parameters on performances of vertical plate seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 133—136. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李君, 陆华忠, 杨洲, 等. 刀豆脱壳机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 26—32. Li Jun, Lu Huazhong, Yang Zhou, et al. Design and experiment of Canavalia shelling mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 26—32. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52—55. Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吕晓, 刘霞, 汪厚祥. 基于嵌入二维数组的迁移聚集树的数据流突变检测算法[J]. 计算机与数字工程, 2009, 37(10): 15—18. Lü Xiao, Liu Xia, Wang Houxiang. Burst detection over data streams based on embedding two-dimensional array into shifted aggregation tree[J]. Computer & Digital Engineering, 2009, 37(10): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [21] Guirguis S, Sharaf M A, Chrysanthis P K, et al. Three-Level Processing of Multiple Aggregate Continuous Queries[C]// Proceedings of the 28th International Conference, Washington, DC, USA: IEEE, 2012: 929—940.
- [22] Sun Jing, Yin Jianping, Wang Ting, et al. A novel model of bursts in event sequences[C]// Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012 2nd International Conference on, Yichang China: IEEE, 2012: 816—821.
- [23] 胡达明. 杂交稻制种授粉花粉悬浮速度测定与应用研究[J]. 杂交水稻, 1996(1): 11—13. Hu Daming. Studies on the measurement and use of pollen suspended velocity in hybrid rice seed production[J]. Hybrid Rice, 1996(1): 11—13. (in Chinese with English abstract)
- [24] 胡达明. 不同授粉方式的花粉密度分布与结实效应研究[J]. 杂交水稻, 1996(6): 21—23. Hu Daming. Distribution of pollen density and seed setting efficacy under different pollinating methods[J]. Hybrid Rice, 1996(6): 21—23. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘文炳, 郑旋, 林琼, 等. 谈三系杂交水稻超高产制种配套组装技术[J]. 中国稻米, 2010, 16(5): 54—58. Liu Wenbing, Zheng Xuan, Lin Qiong, et al. Three super high-yielding hybrid rice seed production technology supporting assembly[J]. Chinese Rice, 2010, 16(5): 54—58. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王跃星, 葛露方, 朱旭东. 杂交水稻机械化制种技术研究的现状与展望[J]. 杂交水稻, 2011, 26(4): 5—7. Wang Yuexing, Ge Lufang, Zhu Xudong. Research status and prospect of mechanized hybrid rice seed production[J]. Hybrid Rice, 2011, 26(4): 5—7. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王慧明, 汤楚宙, 李明, 等. 气流速度对杂交水稻制种授粉花粉分布的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 63—69. Wang Huimin, Tang Chuzhou, Li Ming, et al. Effect of airflow speed on pollens distribution for hybrid rice breeding pollination[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 63—69. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨剑秋, 王延荣. 基于正交试验设计的空心叶片结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 376—384. Yang Jianqiu, Wang Yanrong. Structural optimization of hollow fan blade based on orthogonal experimental design[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 376—384. (in Chinese with English abstract)
- [29] 许咏梅, 王讲利, 刘骅. 应用综合评分法评价新疆灰漠土土壤质量的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 465—468. Xu Yongmei, Wang Jiangli, Liu Hua. Evaluation of grey desert soil quality by index method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 465—468. (in Chinese with English abstract)

[30] 陈会英, 周衍平. 综合评分法的改进与应用[J]. 农业系统科学与综合研究, 1996, 12(1): 37—41.
Chen Huiying, Zhou Yanping. Improvement and application

of the comprehensive evaluation method[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 1996, 12(1): 37—41. (in Chinese with English abstract)

Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using round multi-axis multi-rotor electric unmanned helicopter

Li Jiyu^{1,2}, Zhou Zhiyan^{1,2*}, Hu Lian^{1,2}, Zang Ying^{1,2}, Xu Sai^{1,2},
Liu Aimin³, Luo Xiwen^{1,2}, Zhang Tiemin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Hunan Longping Seed Industry Co. LTD, Changsha 410006, China)

Abstract: Compare with uniaxial single-rotor electric unmanned helicopter (USREUH), the structure of round multi-axis multi-rotor electric unmanned helicopter (RMMEUH) is very different to USREUH, and thus its wind field parameters on rice canopy which formed by rotor airflow are also different. To explore the optimization parameters when the RMMEUH conducted supplementary pollination, in this study orthogonal tests of three factors (including flight operating load, altitude and speed) and three levels were carried out to measure the wind field. The tested RMMEUHs include two 8-rotors electric unmanned helicopters and an 18-rotors electric unmanned helicopter. The measured wind directions included parallel to the direction of flight heading (X), perpendicular to the direction of flight heading (Y), and the vertical direction (Z). The battery's voltage drop was also measured at each takeoff and landing of RMMEUH to estimate its economy. A wireless wind speed sensor network measurement system (WWSSN) was used to measure the wind field parameters of the RMMEUH. The WWSSN consists of several wireless wind speed sensors (WWSS, numbered 1#-10#), a flight global position system (FGPS), and an intelligent control focus node (ICFN). The WWSS was used to measure the wind field parameters on rice canopy. FGPS was used to measure the pose information of the RMMEUHs when they fly over the rice canopy. ICFN was used to control and record the wind field parameters. 1#-9# WWSSs were used to measure the wind field parameters which mixed with natural wind and RMMEUH produced wind. And another one, 10#, was set up far from 9#, was mainly used to measure the natural wind speed. In order to reduce the effect from natural wind speed, treatment rules about natural wind speed were adopted before wind field data analysis. The test results showed that: the width of the wind field at X direction was significantly wider than Y direction; Unlike USREUH, there were only one peak wind speed center at X direction of RMMEUH, while two at Y direction, this phenomena might be caused by the superimposition of multiple rotors of RMMEUH, and the lateral flow of the aircraft was also one of the interferences, as a result, narrowed the width of the wind field at Y direction. Comprehensively considered about the width of wind field and battery electricity consumption, the order of the three influence factors was flight speed, takeoff weight, and flight height. Flight speed of 1.30m/s, takeoff weight of 18.85 kg, and flight height of 2.40 m were suggested as the optimization of the operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using RMMEUH. The results provide references to develop a series of specifications of supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned helicopter.

Key words: unmanned aerial vehicles; measurements; experiments; round multi-axes multi-rotors; battery-powered; range analysis; optimization of the operation parameters; orthogonal test