doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.032

农用多旋翼无人机动力-载荷最优匹配与能耗验证

陈　瑜　张植勋　申遂愿　黄陶然　陈浩轩　李继宇
(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为解决农用多旋翼无人机动态能耗最优的载荷配置问题,提出一种根据农用无人机的动力系统和旋翼数量进行载荷配置使其动态能耗最优的新方法。首先在已建立的农用无人机动态能耗模型基础上,分别计算 3 种电机动力系统配置 7 种不同旋翼数量(四旋翼到十旋翼)对应载荷的动态能耗;然后绘制其不同旋翼数量对应的载荷-动态能耗曲线,再对曲线进行“相交”处理,得到不同旋翼数量下载荷-动态能耗曲线的交点。研究发现,对于相同动力系统配置不同旋翼数量的农用无人机,其相邻两个轴旋翼数量配置的载荷-动态能耗曲线的交点即为最优动态能耗载荷交点;最优动态能耗载荷交点对应的载荷从小到大,可依次构成最优动态能耗载荷区间,该区间即为不同旋翼数量对应的最优载荷配置区间。最后使用设计组装的四、六、八旋翼的农用无人机,进行了不同载荷的 80 次飞行验证试验。试验数据表明,在四、六、八旋翼数量配置下,存在最优动态能耗的载荷配置区间。其中,四旋翼无人机动态能耗测试值与理论值的平均误差为 3.22%,六旋翼无人机的平均误差为 2.87%,八旋翼无人机的平均误差为 2.85%。进一步通过飞行实测动态能耗值和理论模型计算能耗值的误差分析,得到最优动态能耗载荷有效区和失效区,进而得到更加准确的最优动态能耗载荷配置区间。

关键词: 农用无人机; 动力系统; 旋翼数量; 载荷配置; 动态能耗最优
中图分类号: S252$^+$.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0339-10　　**OSID**:

Optimal Power-Load Matching and Energy Consumption Verification of Agricultural Multi-rotor UAVs

CHEN Yu　ZHANG Zhixun　SHEN Suiyuan　HUANG Taoran　CHEN Haoxuan　LI Jiyu
(*College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of load configuration for optimal dynamic energy consumption of agricultural multi-rotor UAVs, a method of optimizing the dynamic energy consumption for agricultural UAVs by load configuration according to their power systems and number of rotors was proposed. Firstly, on the basis of established dynamic energy consumption model for agricultural UAVs, the dynamic energy consumption corresponding to the load of seven different rotor numbers (four-rotor to ten-rotor) under three kinds of motor power system configuration was calculated respectively. Then the load-dynamic energy consumption curves corresponding to different rotor numbers were plotted. And the data processing software was used to 'intersect' the curves to get the intersection points of the load-dynamic energy consumption curves under different rotor numbers. It was found that for agricultural UAVs with different rotor numbers for the same power system configuration, the intersection of the load-dynamic energy consumption curves for the two adjacent axis rotor number configurations was the optimal dynamic energy consumption load intersection. The load values corresponding to the intersection points of the optimal dynamic energy consumption load can form the optimal dynamic energy consumption load interval from small to large, which was the optimal load configuration interval corresponding to different rotor numbers. The dynamic energy consumption of the agricultural UAVs can be optimized by using the above method to configure the load according to the number of rotor numbers. Finally, totally 80 flight verification tests of different loads were carried out by using the designed agricultural UAV with four, six and eight rotor

收稿日期: 2024-08-02　修回日期: 2024-10-25
基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2023A1515011932)和广州市重点研发计划项目(2023B03J1323)
作者简介: 陈瑜(1981—),女,副教授,博士,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail: chenyu219@126.com
通信作者: 李继宇(1979—),男,教授,博士,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail: lijiyu@scau.edu.cn

structures. The test data showed that there was optimal dynamic energy consumption load configuration interval under different rotor configurations of four, six and eight. Among them, the average error between the test value and the theoretical value of the four-rotor UAV dynamic energy consumption was 3.22%. The average error of the six-rotor UAV was 2.87%. The average error of the eight-rotor drone was 2.85%. Furthermore, through the error analysis of the flight measured dynamic energy consumption value and the theoretical calculated energy consumption value, the optimal dynamic energy consumption load effective zone and failure zone was acquired. And then a more accurate optimal dynamic energy consumption load configuration interval was acquired. The research result can provide a reference for optimizing the load configuration of agricultural multi-rotor UAVs, which had certain theoretical significance and engineering practice value.

Key words: agricultural UAV; power system; rotor number; load configuration; optimal dynamic energy consumption

0 引言

目前,无人机技术已经被广泛应用于种植业[1-4]、林业[5-6]、畜牧业[7-8]、渔业[9-10]等广义农业(农林牧副渔)领域。无人机在农业上不断深化的研究与应用,有力推动了数字农业、智慧农业的发展。

我国农用无人机占有量超过世界 80%,目前中国农用无人机又以电动多旋翼无人机为主。无人机的动力配置情况将直接影响载重量、飞行速度、续航时间等性能指标[11]。

动力系统配置主要包括电机、电调、螺旋桨、电池等的选型[12-13]。某些品牌的无人机零配件销售商,其产品一般具有详细的参数和推荐的最优配置。例如有些商家除了提供电机、螺旋桨和电调等无人机动力系统部件,还专门为大载重植保无人机提供一体化动力系统。除了这些配置好的一体化动力系统,设计农用多旋翼无人机的旋翼架构配置时,一般根据不同的电机型号,配置其官方推荐的电调、电池、螺旋桨等动力系统主要组成部件后,旋翼数量配置就成为影响无人机载重量和续航时间等性能的主要因素。而旋翼数量对应动力系统配置的关系,会导致不同旋翼数量配置的无人机空机总质量不同,每个轴对应的旋翼分配的拉力不同,对应的输出和动态能耗也不同。因此,无人机的动力系统配置、载荷和动态能耗三者之间相互影响又相互制约。

目前制约农用无人机大规模应用发展的因素有动态能耗、飞行速度、作业精度、载荷水平与续航能力等。在目前的研究中,对于农用无人机在设计配置阶段的动力系统选型、旋翼数量选择以及载荷配置等,缺少较为完备的理论指导,在一定程度上限制了其作业精度与作业效率的进一步提升,限制了其在农业领域的进一步应用。

目前国内外专家学者主要是针对农用无人机的架构、载荷与能耗等单独进行研究,或者对其中二者之间的关系进行研究。李继宇等[14]基于能量优化对无人机喷施规划方法进行研究,提出一种组合算法以实现无人机喷施组合规划达到航线、载荷、能量三者相结合的最优配置。同时还针对多翼单臂电动无人机的旋翼布局方式进行研究,通过优化无人机机身尺寸,改善多旋翼无人机的气动特性、有效载荷、惯性、操控稳定性,进而实现无人机能耗、机体尺寸、飞行时间及稳定性等多种性能的优化匹配[15]。林晋立等[16]通过搭建测试台的方法研究无人机质量和作业速度变化下的能耗消耗规律,但没有进行实际的飞行测试来进一步验证规律。许绥佳[17]通过多次无人机飞行试验研究植保无人机的能量消耗规律,比较了在相同的作业路径下变速和匀速所需的能量,以寻找最优的速度值,但缺乏对植保无人机不同设定参数下动态能耗规律的研究。DORLING 等[18]通过数学推导和试验验证推导出多旋翼无人机的能量消耗模型,证明了多旋翼无人机消耗的能量与有效载荷和电池质量成近似线性比例的关系,但缺乏对该规律进一步的试验验证。张文星[19]设计了一种螺旋桨呈弧面分布,左右镜像对称的植保无人机,提高了无人机的能量利用率。STOLAROFF 等[20]通过对无人机运送包裹问题的研究,采用不同速度进行飞行来测试每段距离消耗的能耗,得出更高的速度可以减少无人机动态能耗这个规律,也研究了不同速度下电机的效率问题,但是缺少对无人机旋翼数量配置能耗的进一步研究。

综上所述,目前对于如何根据农用无人机的动力系统进行载荷配置使其动态能耗最优的研究报道较少。本文将通过理论分析和试验验证,研究农用无人机动力、载荷与动态能耗的最优匹配关系,用以指导农用无人机不同动力系统及旋翼数量对应的载荷配置选择,为优化设计农用无人机的载荷配置提供参考,以实现农用无人机整机作业效率和经济效益的提高。

1　农用多旋翼无人机动态能耗约束下载荷最优配置规律

最优能耗载荷区是指在农用无人机执行任务过程中，能够最大化完成任务的载荷量而同时最小化能量消耗的一个区间，在这个区间内，农用无人机的能耗和载荷之间的平衡达到最优状态。本文使用农用无人机动态能耗模型公式[21]进行理论计算分析，研究农用无人机动力系统、载荷和动态能耗三者之间的关系，从而得到其最优动态能耗的载荷配置规律。动态能耗模型公式为

$$E=\frac{\frac{\pi}{30}n_pMN}{U_bI_b}\left[\left(\frac{d}{v}+\frac{v}{a}\right)P_0+m_0v^2+\frac{1}{2}\rho dC_DA_ev^2\right] \tag{1}$$

式中　n_p——螺旋桨个数

M——螺旋桨转矩

N——螺旋桨转速

U_b——电池的总电压

I_b——电池电流　　a——飞行加速度

d——飞行距离　　v——飞行速度

P_0——电机输出的总功率

m_0——整机质量

ρ——飞行环境的空气密度

C_D——阻力系数

A_e——无人机受空气阻力影响的有效面积

E——动态能耗

首先假设同样动力系统配置下不同旋翼数量配置的 4 ~ 10 轴无人机为一个对称结构，每个轴使用一个旋翼，则旋翼配置分布为对称结构，无人机轴距设置为轴距相等，确保作业时的间隔保持相同，在同一飞行参数下飞行一样的航线，进行同一个区域作业。

根据农用无人机动态能耗模型公式（式（1）），假设速度保持相同；设定加速度为 1 m/s^2；设定海拔为 5 m，环境温度为 15℃，由 Python 编程计算得到空气密度为 1.23 kg/m^3；使用不同配置的动力系统计算不同旋翼对应载荷的动态能耗。

假设机架及其他外设等质量为确定值 2 000 g，单个机臂的质量也为一个确定值 143 g，其他质量主要为动力系统配置的部件质量。选取某无人机和配件公司的 3 种电机，并查询其对应的推荐配置。3 种电机主要参数及其搭配的其他动力系统部件的推荐配置如表 1 所示。

表 1　3 种电机主要参数及其搭配的其他动力系统部件参数

Tab. 1　Main parameters of three kinds of motors and their matching parameters of other power system components

电机型号	空载 KV 值/（r·min^{-1}·V^{-1}）	空载电流/A	空载电压/V	相间内阻/mΩ	电机质量/g	螺旋桨规格	电调/A	电池容量/（mA·h）
X4112S	450	0.7	10	43	169	1555/1660	80	10 000
X5212S	280	0.9	10	46	233	2265	50	10 000
X6215S	350	1.5	10	15	350	2265	80	10 000

不同电机型号推荐的动力系统部件最优配置不同，则搭配后的动力系统质量不同，空机质量也不同。3 种不同电机对应 7 种不同旋翼数量配置的无人机空机总质量如图 1 所示。由图 1 可知，无人机旋翼数量的增加带来的空机总质量增加及能耗增加均是不可忽视的。

进一步以 3 种电机中的 X4112S 型号电机为例，其单个电机在 1660 螺旋桨下最大可以支持 4 100 g 载荷，为确保整个系统有较高的安全冗余度[22]，无人机必须限制最大起飞质量，留出足够动力冗余[23]，以维持极限状态下的稳定飞行，取动力冗余系数为 60%，各自减去空机质量后，得到的最大载荷如图 2 所示。由图 2 可知，无人机的最大载荷随着旋翼数量的增加而增加。

由表 1 结合 3 种电机配置下对应动力系统的最大载荷情况，分别将各动力系统参数代入农用无人机动态能耗模型，计算 3 种不同动力系统配置下不

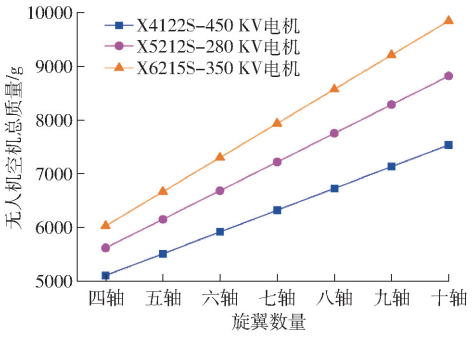


图 1　3 种不同电机对应不同旋翼数量配置的无人机空机总质量

Fig. 1　Three different motors corresponded to total air mass of UAV with different numbers of rotors

同旋翼数量对应载荷的动态能耗。本文研究的旋翼数量配置均为一个轴上配置一个旋翼，即四轴四旋翼，五轴五旋翼，以下不再赘述。

使用 OriginPro 2023b 软件，分别绘制其载荷-动态能耗曲线图，如图 3a、3c、3e 所示。接着使用

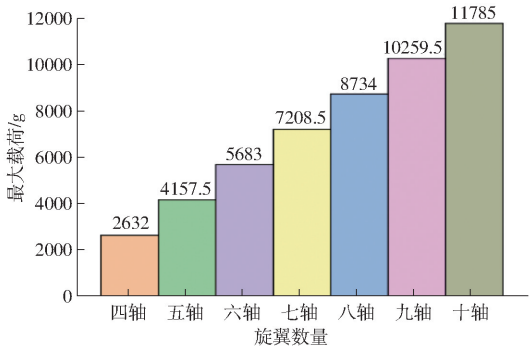
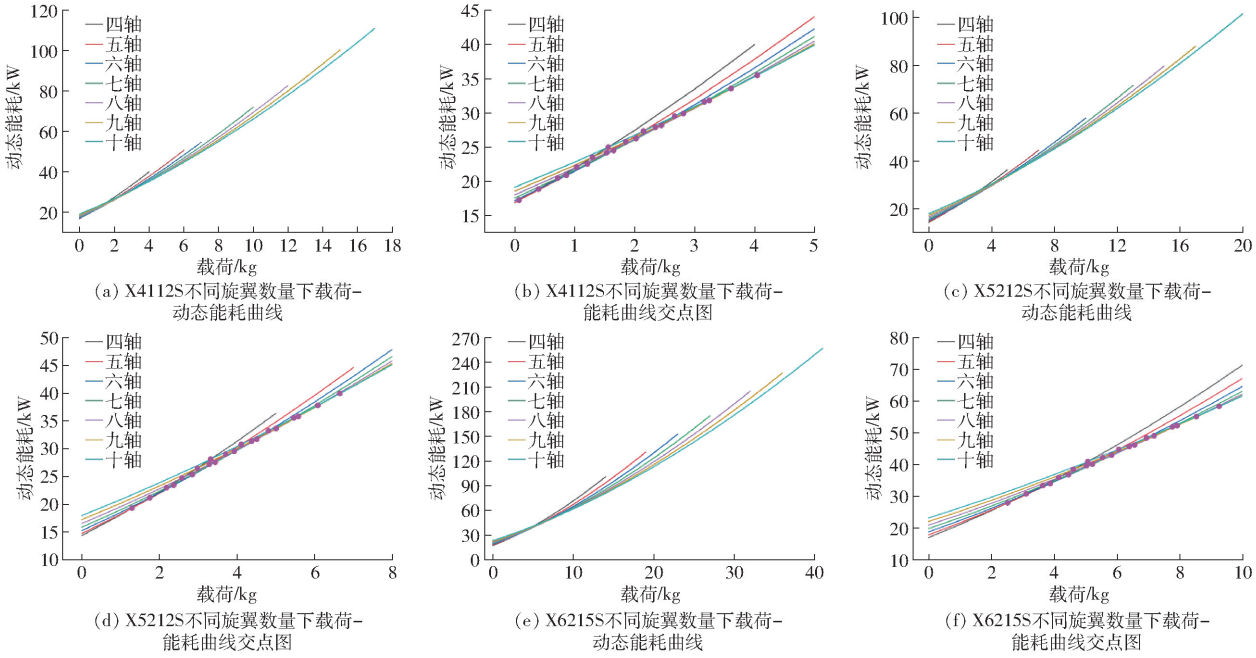


图 2 X4112S－450KV 电机不同旋翼数量对应的最大载荷

Fig. 2 Maximum load corresponded to number of rotor blades of X4112S－450KV motor

OriginPro 2023b 软件中“快捷分析”下的“相交”功能，得到 3 种电机动力系统在 7 种不同旋翼数量配置下载荷与动态能耗曲线对应的交点，分别如图 3b、3d、3f 所示，并且可以通过该功能输出交点数据，如表 2 所示，表中“交点”是指不同旋翼数量载荷-能耗曲线的交点，例如四轴载荷-能耗曲线和五轴载荷-能耗曲线的交点，即为 I4/5。本文所有数据处理和绘图均采用 OriginPro 2023b 软件。

由图 3 可以看出，随着旋翼数量（轴数）的增加，载荷-动态能耗曲线彼此均存在交点，这些交点即可表示为两种旋翼数量配置对应的载荷分界点：



(a) X4112S不同旋翼数量下载荷-动态能耗曲线　(b) X4112S不同旋翼数量下载荷-能耗曲线交点图　(c) X5212S不同旋翼数量下载荷-动态能耗曲线

(d) X5212S不同旋翼数量下载荷-能耗曲线交点图　(e) X6215S不同旋翼数量下载荷-动态能耗曲线　(f) X6215S不同旋翼数量下载荷-能耗曲线交点图

图 3 3 种电机动力系统在不同旋翼数量配置下的载荷-动态能耗曲线及交点图

Fig. 3 Load-dynamic energy consumption curves and intersection diagram of three kinds of motor power system under different rotor numbers configuration

当目标载荷小于该分界点对应的载荷时，两种旋翼数量配置较少的架构对应动态能耗最优；当目标载荷大于该分界点对应的载荷时，两种旋翼数量配置较多的架构对应动态能耗最优。以 X4112S 电机动力系统及旋翼数量配置为例，当有四旋翼和六旋翼无人机所对应的动态能耗相等时，得到其载荷分界点。当目标载荷小于该分界点对应的载荷时，选择四旋翼最优；当目标载荷大于该分界点对应的载荷时，选择六旋翼最优。

由表 2 中“交点、载荷及动态能耗”数据对比分析可知，最优的载荷-动态能耗曲线交点都集中在相邻轴（如四轴和五轴、六轴和七轴等）。将最优的载荷-动态能耗曲线交点进行处理，得到 3 种电机动力系统及 7 种不同旋翼数量的最优动态能耗载荷配置区间如图 4 所示。

由表 2 和图 4 研究分析得到以下规律：

（1）对于相同动力系统配置不同旋翼数量的农用无人机，其相邻两个轴（如四轴和五轴，五轴和六轴）旋翼数量配置的载荷-动态能耗曲线的交点为最优动态能耗载荷交点，由这些点连成的线可以看出，随着载荷值的增加，其动态能耗线性增长。

（2）最优动态能耗载荷交点 I4/5、I5/6、I6/7、I7/8、I8/9、I9/10 垂直在横坐标轴上的投影点，即为最优动态能耗载荷交点对应的载荷值，分别计为 L1、L2、L3、L4、L5、L6；L1 ~ L6 从小到大依次可构成最优动态能耗载荷区间，该区间即为不同旋翼数量对应的最优载荷配置区间，即四旋翼对应的最优载荷配置区间为 0 ~ L1，五旋翼为 L1 ~ L2，六旋翼为 L2 ~ L3，七旋翼为 L3 ~ L4，八旋翼为 L4 ~ L5，九旋翼为 L5 ~ L6。根据上述方法得到最优动态能耗的载荷配置区间后，即可根据农用无人机的动力系统和旋翼数量进行载荷配置，使其动态能耗最优。

表 2　3 种电机动力系统在 7 种不同旋翼数量下载荷与能耗曲线的交点

Tab. 2　Intersection of load and energy consumption curves of three motor power systems under seven different numbers of rotors

交点	X4112S 电机动力系统		X5212S 电机动力系统		X6215S 电机动力系统	
	载荷/kg	动态能耗/kW	载荷/kg	动态能耗/kW	载荷/kg	动态能耗/kW
I4/5	0.07	17.259 07	1.29	19.286 97	2.52	27.986 77
I4/6	0.39	18.896 44	1.76	21.185 31	3.11	30.793 91
I4/7	0.71	20.517 47	2.19	23.007 09	3.64	33.443 41
I4/8	1.03	22.113 40	2.58	24.748 61	4.14	36.034 70
I4/9	1.29	23.588 09	2.97	26.478 82	4.61	38.523 25
I4/10	1.56	25.054 59	3.32	28.115 94	5.07	40.982 36
I5/6	0.86	20.912 30	2.37	23.420 50	3.88	34.081 42
I5/7	1.21	22.609 84	2.85	25.355 56	4.46	36.887 90
I5/8	1.53	24.237 75	3.29	27.199 52	5.03	39.634 41
I5/9	1.85	25.854 16	3.70	28.994 57	5.55	42.248 85
I5/10	2.15	27.406 22	4.11	30.754 61	6.05	44.837 32
I6/7	1.65	24.557 88	3.44	27.551 42	5.22	40.141 65
I6/8	2.02	26.317 85	3.93	29.512 64	5.83	42.996 26
I6/9	2.35	27.951 05	4.38	31.374 29	6.39	45.748 02
I6/10	2.67	29.573 36	4.81	33.209 45	6.94	48.449 47
I7/8	2.44	28.220 51	4.51	31.680 71	6.56	46.198 67
I7/9	2.81	29.971 01	5.01	33.659 52	7.18	49.081 43
I7/10	3.16	31.660 06	5.46	35.537 52	7.76	51.869 30
I8/9	3.24	31.892 81	5.58	35.808 93	7.91	52.275 00
I8/10	3.61	33.631 08	6.08	37.790 65	8.53	55.151 55
I9/10	4.05	35.571 14	6.65	39.936 41	9.25	58.326 25

(3)得到图 4 后,即可根据目标载荷进行农用无人机的旋翼数量配置选择,即当目标载荷小于最优动态能耗载荷交点对应的载荷时,两种旋翼数量配置较少的架构对应动态能耗最优;当目标载荷大于该点对应的载荷时,两种旋翼数量配置较多的架构对应动态能耗最优。

以图 4c 为例,X6215S 电机动力系统搭配四旋翼推荐的最优载荷配置区间为 0 ~ 2.52 kg,其五旋翼推荐的最优载荷配置区间为 2.52 ~ 3.88 kg,六旋翼的最优载荷配置区间为 3.88 ~ 5.22 kg,七旋翼的最优载荷配置区间为 5.22 ~ 6.56 kg,八旋翼的最优载荷配置区间为 6.56 ~ 7.91 kg,九旋翼的最优载荷配置区间为 7.91 ~ 9.25 kg。反之亦可根据目标载荷选择旋翼数量使其动态能耗最优,例如目标载荷为 2.5 kg 时,小于最优动态能耗载荷交点 I4/5 对应的载荷为 2.52 kg,所以选择四旋翼配置其动态能耗最优。

可使用公式(2)表示不同旋翼数量配置下的最优动态能耗载荷区间,进而拓展到更多旋翼数量配置的无人机。

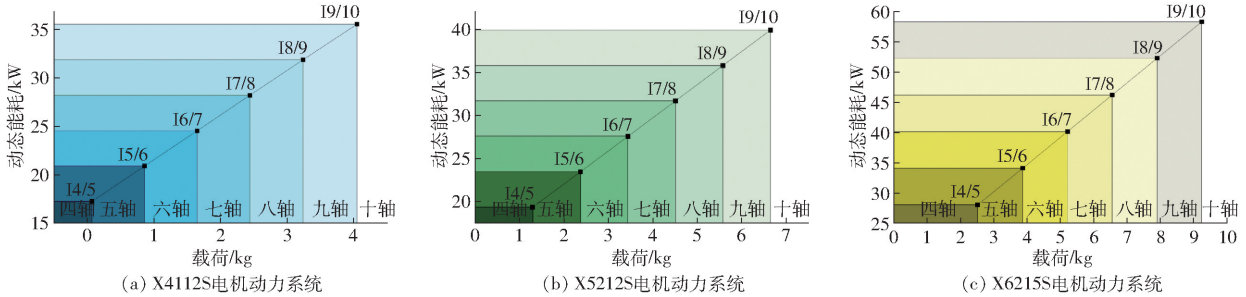
$$X = n \quad (L(n-4) \leqslant L < L(n-3);\ n \geqslant 4) \tag{2}$$

式中　X——最优能耗载荷的推荐旋翼数量配置

n——旋翼数量

L——n 旋翼对应的最优载荷配置区间

当 $n=4$ 时 $L(0)=0$;$L(n-3)$ 为最优动态能耗



(a) X4112S电机动力系统　(b) X5212S电机动力系统　(c) X6215S电机动力系统

图 4　3 种电机动力系统及 7 种不同旋翼数量的最优动态能耗载荷配置区间图

Fig. 4　Optimal dynamic energy consumption load configuration diagrams of three motor power systems and seven different numbers of rotors

载荷交点对应的载荷值。

以上规律表明,使用农用无人机动态能耗模型进行理论计算和分析,可以得到农用无人机不同动力系统配置不同旋翼数量对应的最优载荷配置区间;反之亦可由目标载荷得到动态能耗最优的动力系统及旋翼数量推荐选择。

将 3 种动力系统配置 7 种不同旋翼数量的最优动态能耗载荷交点绘图处理,得到动态能耗约束下载荷对应动力系统及旋翼数量最优配置图,如图 5 所示。在图 5 中,由目标载荷可以得到动态能耗最小的动力系统及旋翼数量最优配置选择。例如,图 5 中绿线表示目标载荷对应的动态能耗,根据最优动态能耗载荷配置规律,1 kg 载荷选择 X5212S 电机动力系统配置四旋翼最优,2 kg 载荷选择 X5212S 电机动力系统配置五旋翼最优,以此类推,3、4、5、6、7 kg 载荷,分别选择 X5212S 电机动力系统配置六旋翼、七旋翼、八旋翼、九旋翼、十旋翼最优,其相应的动态能耗都最小。

2　验证试验材料与方法

2.1　试验方案

由上述理论研究分析可知,对于不同旋翼数量

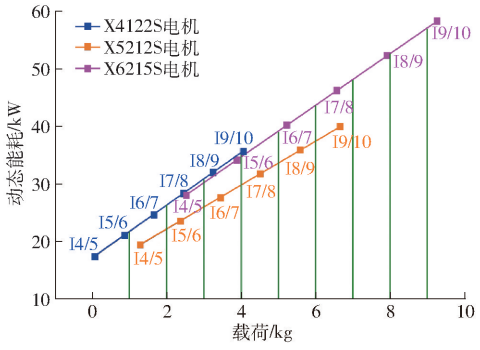


图 5 动态能耗约束下载荷对应动力系统及旋翼数量最优配置图

Fig. 5 Optimal configuration diagram of load corresponding to power system and rotor number under dynamic energy consumption constraint

配置的无人机,以 4 ~ 10 轴无人机为例,通过对 3 种动力系统配置的无人机在 7 种不同旋翼数量对应不同载荷的动态能耗研究,得到最优动态能耗的载荷配置规律,从理论上可以依照该规律对农用无人机的载荷进行最优配置。

目前主流的农用无人机对应的四轴、六轴、八轴普遍以四旋翼、六旋翼和八旋翼为主,多旋翼无人机的轴数增加以后,每个旋翼之间的距离也会缩减。通过实际测试研究最优动态能耗载荷规律的无人机旋翼数量配置,可以有效解决四轴、六轴、八轴的选择问题。因此设计验证试验,旨在测试常见的四、六、八轴无人机最优动态能耗的载荷配置区间,以评估该规律的可靠性和适用性。

农用无人机一般提前在地面站规划好对应航线,常见的无人机航线设置如图 6 所示,航线 Q 为转弯段,航线 L 为直线飞行段,也是主要的作业飞行段,也是整个航线消耗能量最多的飞行段,所以针对该飞行段的能耗进行研究。对于直线飞行段的飞行特点结合动态能耗模型,可以将直线飞行段的动态能耗表示为 E_L,其计算公式与公式(1)相同。

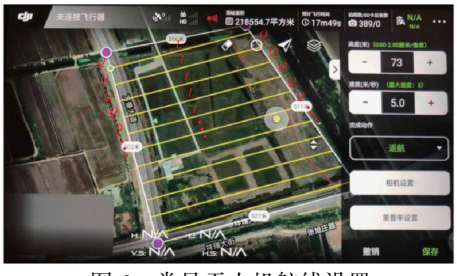


图 6 常见无人机航线设置

Fig. 6 Common UAV route setting diagram

使用相同动力系统配置的无人机,在四、六、八轴下飞行相同的航线进行试验,通过设计的动态能耗测试系统测得动态能耗数据,将测试试验数据与上述动态能耗模型理论计算结果进行比较,验证该规律。

2.2 试验材料和方法

飞行验证试验所用的四、六、八共 3 种旋翼数量的农用无人机,均由课题组成员自行配置组装。为保证试验所用无人机在 3 种不同旋翼数量配置下的轴距保持相等,使用 AutoCAD 重新设计了农用无人机的中心板。从中心板的轴距设计上避免因为轴距不同,无人机本身受力问题带来的能耗不同引起的试验误差。

3 种多旋翼无人机都选用 X4112S - 450KV 电机,使用官方推荐的 1555 螺旋桨进行计算(表 1),单个电机最大可以支持 3 290 g 的载荷,统一选用相同规格的 60 A 电调,并统一选用相同规格的 10 000 mA·h 锂电池(表 1)。在配置好所有设备后,得到当前四、六、八轴下无人机的空机质量。取动力冗余系数为 60%,各自减去空机质量后,得到其最大载荷。

飞行参数设定为:加速度 1 m/s^2,速度 5 m/s,飞行海拔高度 5 m,飞行航程 100 m。测得环境温度 15℃,由 Python 编程计算得到空气密度为 1.23 kg/m^3。每段航线都是一个加速飞行、匀速飞行和减速飞行的过程。使用农用无人机动态能耗模型计算在当前配置下,对应四、六、八轴无人机在不同载荷下的动态能耗,绘出其载荷-动态能耗曲线。并使用“相交”处理,得到 3 条曲线的 3 个交点 A(四轴和六轴)、B(四轴和八轴)、C(六轴和八轴)。由上述理论分析可知,相邻两个轴旋翼配置的载荷-动态能耗曲线的交点为最优动态能耗载荷交点,因此对于四、六、八轴无人机,四轴和六轴的交点 A 以及六轴和八轴的交点 C 为最优动态能耗载荷交点,A 和 C 对应的载荷值由小到大可构成最优动态能耗载荷区间,如图 7 所示。

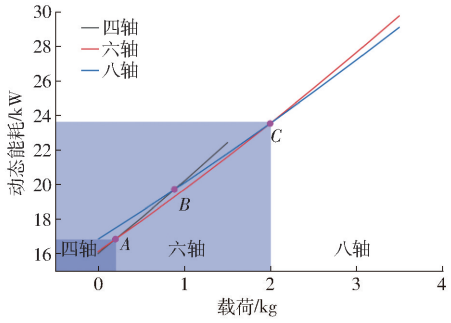


图 7 X4112S 电机动力系统及不同旋翼数量对应的最优动态能耗载荷区间

Fig. 7 Optimal dynamic energy consumption load range corresponding to X4112S motor power system and different numbers of rotors

由图 7 的 3 个交点 A、B、C 可知,交点基本集中在 2.5 kg 载荷区间内,参考交点情况及四、六、八轴的剩余载荷情况,为确保整个系统有较高的安全冗

余度，四轴使用范围为 0 ~ 1.5 kg 的载荷，以 0.5 kg 为间隔进行试验（共 4 次），六轴和八轴使用范围为 0 ~ 3.5 kg 的载荷以 0.5 kg 为间隔进行试验（共 8 次），每个旋翼数量配置无人机在每个载荷都飞行航线 4 个架次，分别记为测试 1、测试 2、测试 3 和测试 4，针对组装对应旋翼数量配置的无人机分别进行飞行试验。

飞行试验在华南农业大学华山运动场（113°35.15′N，23°16.59′E）进行。其中四轴无人机完成了 16 次试验，六轴无人机完成了 32 次试验，八轴无人机完成了 32 次试验，共计 80 次试验，如图 8a、8b、8c 所示。使用 MissionPlanner 将试验的日志文件转为 KML 格式，再使用 Google Earth 加载得到对应试验的轨迹，如图 8d 所示。

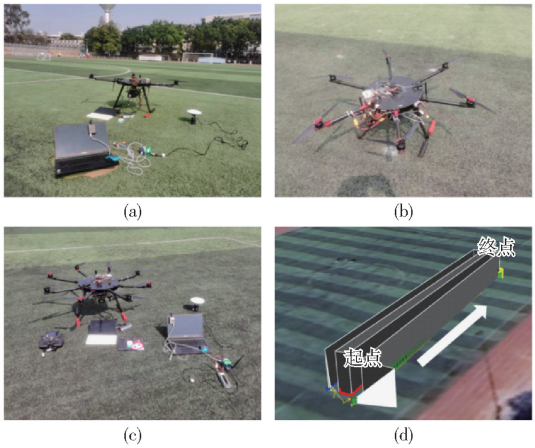


图 8　不同旋翼数量配置无人机的飞行试验场地和航线

Fig. 8　Flight test sites and routes of UAVs with different numbers of rotors

2.3　试验数据采集和处理方法

综合考虑农用无人机动态能耗测试的需求，以及作为机载检测系统的可靠性要求，设计了一套针对农用无人机的动态能耗测试系统，系统构成如图 9 所示。

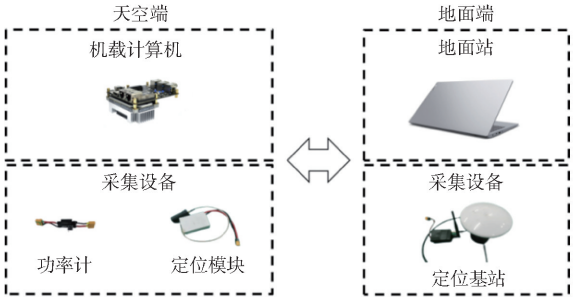


图 9　无人机动态能耗测试系统构成图

Fig. 9　UAV dynamic energy consumption test system

该测试系统主要包括机载的天空端和地面基准站。在测试时，将机载天空端的功率模块一端安装在被测无人机的能源输出端，另一端安装在被测无人机的能源输入端。安装后的功率模块可以实时测量被测无人机的能耗信息；定位模块固定在被测无人机上，实时获取被测无人机的经纬度位置、速度、卫星定位情况等信息；机载计算机固定在被测无人机的中间，功率模块和定位模块采集的信息上传到机载计算机上进行分析；地面端由地面站连接定位基站，通过数传为无人机实时提供厘米级的实时动态（Real-time kinematic，RTK）定位信息。

使用上述农用无人机动态能耗测试系统，首先连接好机载计算机、北斗定位和功率模块；上电后即可从机载计算机端打开机器人操作系统（Robot operating system，ROS），运行 ROS 系统上的采集程序；采集程序开始后，使用地面站的自动飞行功能，遥控器切换对应通道执行该功能进行对应航线飞行，降落后关闭采集程序，最后检查数据是否正常采集，保存备份。

每次试验结束后，对获取到的数据进行处理。首先将数据进行重新排列，进行数据预处理，再进行数据分析。机载计算机采集的北斗模块和功率模块数据保存为 CSV 文件。处理数据时首先进行数据筛选，取出其中的功率模块和北斗模块数据，然后将筛选后得到的北斗模块数据取出后转为 CSV 文件，代入北斗定位解算软件（来自华南农业大学无人机创新实验室），就可以得到对应的飞行轨迹和解算的北斗时间、*xyz* 坐标、距离、航程等信息。最后匹配每一段功率模块数据，得到每一个设定速度和加速度的动态能耗数据。

3　试验结果与分析

3.1　试验结果

使用 2.3 节的试验数据采集和处理方法，将采集得到的四、六、八轴无人机对应载荷的实际动态能耗数据进行处理，得到不同旋翼数量配置无人机每个载荷的 4 个架次的动态能耗测试值。并将 4 组测试值的平均值进行处理，再将它们与使用动态能耗模型计算的理论值进行对比，动态能耗测试值与理论值的误差结果如表 3 所示。

在表 3 中，四轴无人机对应动态能耗测试值与理论值的平均误差为 3.22%；六轴无人机对应测试值与理论值的平均误差为 2.87%；八轴无人机对应测试值与理论值的平均误差为 2.85%。由表 3 可知，实际测试值和模型理论计算值之间都存在一定的误差，但四、六、八轴无人机的动态能耗测试平均误差都小于 3.3%，说明根据动态能耗模型计算的理论能耗值与实际试验测试值较为接近，可将对应的理论值和测试值都进行数据拟合处理。对四、六、

表 3 动态能耗测试值与理论值误差

Tab. 3 Error between test value and theoretical value of dynamic energy consumption

轴数	负载质量/kg	测试 1 误差/%	测试 2 误差/%	测试 3 误差/%	测试 4 误差/%	测试平均误差/%
四轴	0	0.78	2.59	3.42	2.02	2.20
	0.5	4.87	4.51	9.07	2.71	5.29
	1.0	6.31	3.64	1.90	4.87	4.18
	1.5	0.04	2.08	2.57	0.18	1.22
六轴	0	3.43	3.74	6.40	6.23	4.95
	0.5	3.55	2.98	7.58	2.66	4.19
	1.0	6.76	5.35	3.51	5.36	5.25
	1.5	0.71	3.26	0.91	0.19	1.27
	2.0	3.27	2.04	3.88	1.06	2.56
	2.5	0.60	1.43	1.07	2.07	1.29
	3.0	2.11	2.56	2.05	1.04	1.94
	3.5	1.39	0.83	0.61	3.16	1.50
八轴	0	4.77	−3.61	6.13	5.56	5.02
	0.5	3.36	3.11	6.93	3.44	4.21
	1.0	5.49	4.25	2.56	4.61	4.23
	1.5	0.51	3.88	3.01	0.24	1.91
	2.0	2.07	0.89	2.52	−0.73	1.19
	2.5	0.72	1.09	0.76	1.41	1.00
	3.0	2.31	−0.83	0.55	0.11	0.54
	3.5	3.65	5.52	2.41	7.07	4.66

八轴旋翼数量配置下载荷对应动态能耗的理论值和测试值分别进行线性拟合，如图 10 所示。

由图 10 可知，3 种旋翼数量配置下的能耗测试值和理论值拟合线的 R^2 都达到 0.98，拟合效果较好。并且在 3 种旋翼数量配置下，载荷对应的动态能耗测试值大多数都大于动态能耗模型计算的理论值，而所有动态能耗都随载荷的增加呈等比例递增的趋势。

进一步使用“相交”处理，对 3 种旋翼数量配置下的动态能耗理论值和测试值的拟合线进行处理得到交点，如图 11 所示。其中图 11a 为理论数据拟合线得出的最优动态能耗载荷区间，图 11b ~ 11f 为测试平均和 4 次测试数据拟合线得到的最优动态能耗载荷区间。

由图 11 可知，四轴载荷-能耗拟合线与六轴载荷-能耗拟合线的交点记为 A（对应载荷值为 L1），四轴载荷-能耗拟合线与八轴载荷-能耗拟合线的交点记为 B，六轴载荷-能耗拟合线与八轴载荷-能耗拟合线的交点记为 C（对应载荷值为 L2）。交点 A、C 对应的载荷值由小到大，可依次构成四、六、八轴的最优动态能耗载荷区间，即四旋翼的最优载荷配置区间为 0 ~ L1，六旋翼的最优载荷配置区间为 L1 ~ L2，…。由此说明，在实际飞行试验时存在最

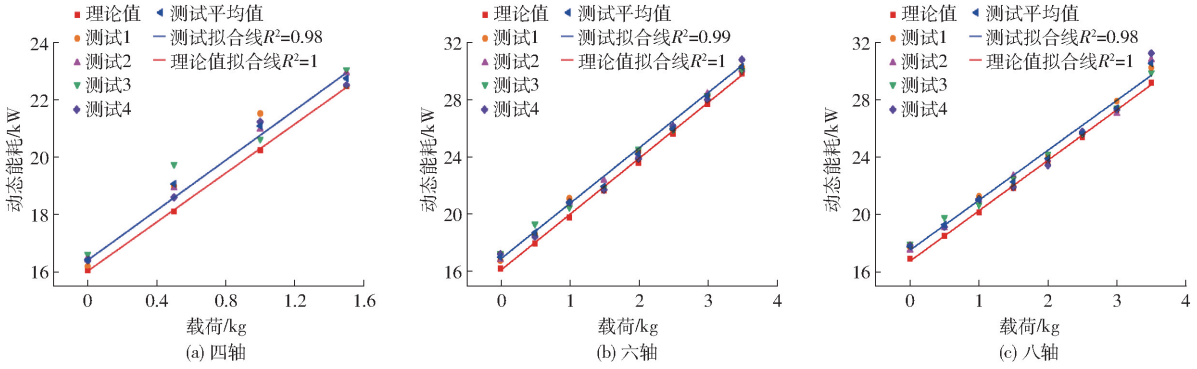


图 10 四、六、八轴旋翼数量配置下载荷对应动态能耗数据的线性拟合曲线

Fig. 10 Linear fitting of load corresponding dynamic energy consumption data under four, six and eight axis rotor number configuration

优动态能耗载荷区间。因此在实际应用中，根据最优动态能耗载荷区间设计农用无人机的载荷配置，可以有效提高其任务执行效率和能源利用率。但图 11 中6 幅图的交点 A 对应的载荷值，即图 11 中 A 后面括号中的数值都不相等，存在一定的偏差。同理，图 11 中的交点 B、C 对应的载荷值也都存在一定的偏差，下面将进一步分析这些交点误差。

3.2 误差分析

统计图 11 中理论计算数据和所有测试数据的交点 A、B、C 对应的载荷，得到最优动态能耗载荷区间的交点误差，再根据交点误差确定不同架构无人机的最优动态能耗载荷失效区和有效区。

最优动态能耗载荷有效区是指在这个区域内，使用本文提出的上述方法，可以理论计算得到较为准确的最优动态能耗载荷区间，在这个区间内本文提出的方法误差较小，准确可信。失效区是指在这个区域内，由于使用农用无人机动态能耗模型公式(1)计算的理论能耗值存在一定的误差，导致使用本文提出的方法理论计算得到的最优动态能耗载荷区误差较大，在这个区域内本文提出的方法失效。

例如，负载质量为 2 kg 时，根据动态能耗模型计算六轴和八轴无人机的理论能耗值分别为 23 592.21 W 和 23 591.33 W，这两个能耗值较为接近。而根据图 11a 可知，理论计算得到的六轴和八轴配置的载荷-动态能耗曲线交点对应的载荷为 2 kg。根据上述规律，即当目标载荷小于最优动态能

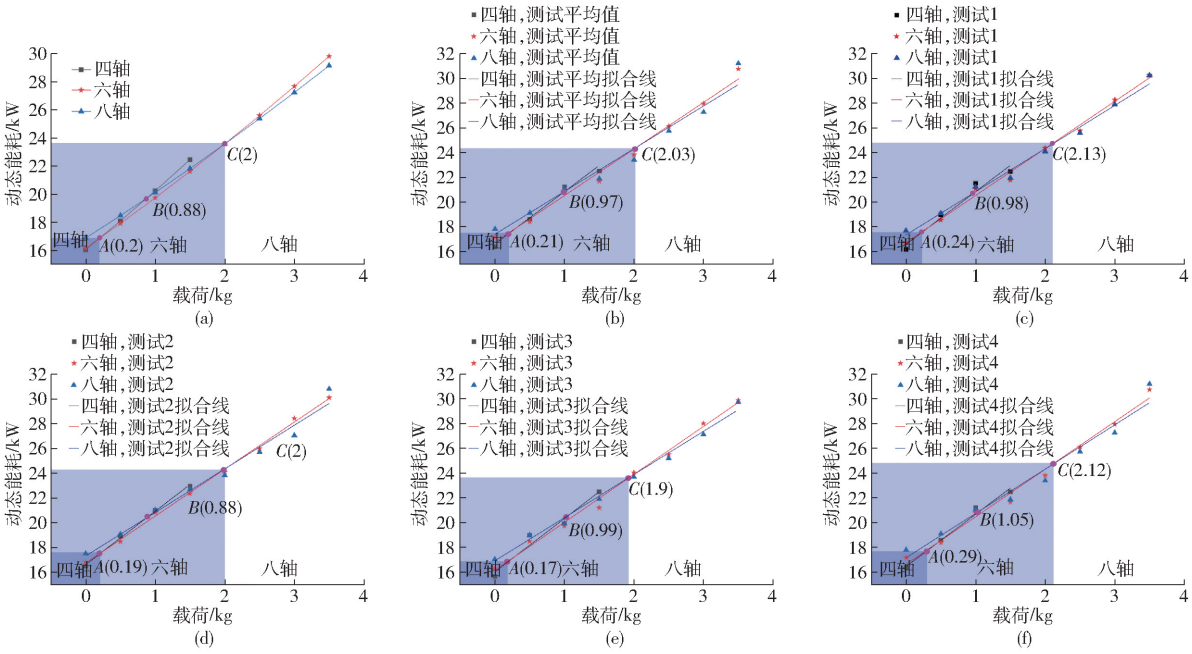


图 11　理论值和测试值拟合的最优动态能耗载荷区间

Fig. 11　Optimal dynamic energy consumption loading interval fitted by theoretical and test values

耗载荷交点对应的载荷时，两种旋翼数量配置较少的架构对应动态能耗最优。但是目标载荷为 2 kg 时，理论计算的六轴能耗略大于八轴能耗，说明动态能耗模型计算的理论能耗存在一定的误差。因此，最优动态能耗载荷失效区和有效区的提出，有助于更加准确地得到最优动态能耗载荷区间。当使用 3 个以上旋翼数量时，使用该方法通过测试数据与理论数据得到的交点误差进行对比，可以得到对应的有效区和失效区，进而得到更为准确的最优动态能耗载荷区间。

通过对四、六、八轴载荷-动态能耗曲线的 3 个交点误差数据进行处理，得到 A 的最优动态能耗载荷失效区为（0.2 ± 0.036）kg，B 的失效区为（0.88 ± 0.098）kg，C 的失效区为（2 ± 0.076）kg，其余的为 3 种旋翼数量配置的最优动态能耗载荷有效区，如图 12 所示。其中 A 以下除失效区外的为四轴（四旋翼）无人机的最优动态能耗载荷有效区，A 到 B 除失效区外的为六轴（六旋翼）无人机的最优动态能耗载荷有效区，C 以上除失效区外的为八轴（八旋翼）无人机的最优动态能耗载荷有效区。

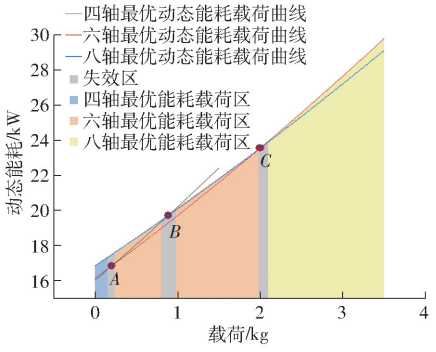


图 12　四、六、八轴配置下的无人机最优动态能耗载荷有效区和失效区

Fig. 12　Optimal dynamic energy consumption load effective zone and failure zone of UAV under four, six and eight axis configurations

4　结论

（1）使用农用无人机动态能耗模型进行理论计算分析，得到农用多旋翼无人机动力-载荷最优配置规律：对于相同动力系统配置不同旋翼数量的农用无人机，其相邻两个轴旋翼数量配置的载荷-动态能耗曲线的交点，即为最优动态能耗载荷交点；最优动态能耗载荷交点对应的载荷值从小到大，依次构成最优动态能耗载荷区间，即是不同旋翼数量对应的最优载荷配置区间。由此可得到能耗最小的农用多旋翼无人机旋翼数量和载荷的最优匹配选择。

（2）使用设计组装的四、六、八旋翼的农用无人机，对上述规律进行飞行能耗验证试验。试验数据表明，以上 3 种旋翼数量无人机飞行测试能耗值与理论计算能耗值的平均误差分别为 3.22%、2.87% 和 2.85%；且在四、六、八旋翼数量配置下，存在最优动态能耗的载荷配置区间。进一步通过飞行实测能耗值和理论模型计算能耗值的误差分析，得到最优动态能耗载荷有效区和失效区，从而得到更加准确的最优动态能耗载荷配置区间。

（3）本研究可以在设计无人机前，通过动态能耗模型得到不同旋翼数量对应的最优能耗载荷区间，进而得到推荐的旋翼数量配置，用来优化无人机的设计和提高效率。

参 考 文 献

[1] MAES W H, STEPPE K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture[J]. Trends in Plant Science, 2019, 24(2): 152 - 164.

[2] 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 CSAE, 2014, 30(11): 1 - 9. (in Chinese)

[3] XUE Jinru, FAN Yeman, SU Baofeng, etl. Assessment of canopy vigor information from kiwifruit plants based on a digital surface model from unmanned aerial vehicle imagery[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(1): 165 - 171.

[4] 李继宇,兰玉彬,施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(12):104 - 118.
LI Jiyu,LAN Yubin,SHI Yeyin. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotarywing UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(12): 104 - 118. (in Chinese)

[5] MORGAN B E, CHIPMAN J W, BOLGER D T, et al. Spatiotemporal analysis of vegetation cover change in a large ephemeral river: multi-sensor fusion of unmanned aerial vehicle (UAV) and Landsat imagery[J]. Remote Sensing, 2020, 13(1):51.

[6] NAVARRO J A, ALGEET N, FERNANDEZ-LANDA A, et al. Integration of UAV, sentinel - 1, and sentinel - 2 data for mangrove plantation aboveground biomass monitoring in Senegal[J]. Remote Sensing, 2019, 11(1):77.

[7] ROBERTS B, NEAL M, SNOOKE N, et al. A bespoke low-cost system for radio tracking animals using multi-rotor and fixedwing unmanned aerial vehicles[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2020, 11(11): 1427 - 1433.

[8] HYUN C, PARK M, LEE W Y. Remotely piloted aircraft system (RPAS)-based wildlife detection: a review and case studies in Maritime Antarctica[J]. Animals, 2020, 10(12):2387.

[9] ROWLEY O C, COURTNEY R L, BROWNING S A, et al. Bay watch: using unmanned aerial vehicles (UAV's) to survey the box jellyfish Chironex fleckeri[J]. PLoS ONE, 2020, 15(10): e0241410.

[10] PROVOST E J, BUTCHER P A, COLEMAN M A. et al. Aerial drone technology can assist compliance of trap fisheries [J]. Fisheries Management and Ecology, 2020, 27(4):381 - 388.

[11] LI Jiyu, LONG Bo, WU Han, et al. Rapid evaluation model of endurance performance and its application for agricultural UAVs[J]. Drones, 2022, 6: 186.

[12] SHI D, DAI X, ZHANG X, et al. A practical performance evaluation method for electric multicopters [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2017, 22(3): 1337 - 1348.

[13] 臧英,何新刚,周志艳,等. 电动多旋翼植保无人机升力特性综合测评方法[J]. 农业工程学报,2018,34(14):69 - 77.
ZANG Ying, HE Xingang, ZHOU Zhiyan, et al. Comprehensive evaluation method for lifting characteristics of electric multi-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 69 - 77. (in Chinese)

[14] 李继宇,罗慧莹,朱长威,等. 基于能量优化的无人机喷施规划组合算法研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):106 - 115.
LI Jiyu, LUO Huiying, ZHU Changwei, et al. Research and implementation of combination algorithms about UAV spraying planning based on energy optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 106 - 115. (in Chinese)

[15] 李继宇,展义龙,欧阳帆,等. 多翼单臂纵列式布局电动无人机旋翼间距优化及能耗试验[J]. 农业工程学报,2019,35(23):87 - 95.
LI Jiyu, ZHAN Yilong, OUYANG Fan, et al. Optimization of rotor spacing and energy consumption test for multi-rotor single arm tandem electric UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 87 - 95. (in Chinese)

[16] 林晋立,兰玉彬,欧阳帆,等. 多旋翼农用无人机功率能耗模型构建与试验验证[J]. 农机化研究,2020,42(5): 143 - 149.
LIN Jinli,LAN Yubin,OUYANG Fan,et al. Construction and experimental validation of power consumption model for multirotor agricultural UAVs[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(5): 143 - 149. (in Chinese)

[17] 许绥佳. 植保无人机能量消耗规律的试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
XU Suijia. Experimental study on the energy consumption law of plant protection drone[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[18] DORLING K, HEINRICHS J, MESSIER G G, et al. Vehicle routing problems for drone delivery[Z/OL]. [2024 - 03 - 15]. DOI:10.1109/TSMC.2016.2582745.

[19] 张文星. 桨叶弧面分布六旋翼的农用植保无人机:CN105438455A[P]. 2016 - 03 - 30.

[20] STOLAROFF J K, SAMARAS C, O'NEILL E R, et al. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery[J]. Nature Communications, 2018, 9(1):409.

[21] 李继宇,张植勋,赵胤伟,等. 农用无人机作业能耗白盒模型构建与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):87 - 96.
LI Jiyu, ZHANG Zhixun, ZHAO Yinwei, et al. Construction and experiment of white box model for energy consumption of agricultural multi-rotor UAV operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8):87 - 96. (in Chinese)

[22] 毛锣. 长航时重负载多旋翼无人机动力系统及其隔振设计[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
MAO Liao. Design of multicopter power system and vibration isolation system for long endurance and heavy lift[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[23] ACHTELIK M, DOTH K M, GURDAN D, et al. Design of a multi rotor MAV with regard to efficiency, dynamics and redundancy[C]// AIAA Guidance, Navigation, & Control Conference, 2013.