

高梦闾, 韩继良, 冯晓春, 等. 基于农服平台的植保无人机任务分配与路径优化[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(3): 250-259.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.03.029

基于农服平台的植保无人机任务分配与路径优化

高梦闾¹, 韩继良¹, 冯晓春¹, 林娜², 阮俊虎¹

1. 西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100; 2. 大连理工大学经济管理学院, 大连 116024

摘要 为解决农业社会化服务平台下植保无人机“单基站-多无人机”模式任务分配调度的精细化匹配问题, 建立了任务分配调度的两阶段混合整数规划模型。首先, 引入了考虑温度影响下的农药药效可变时间窗、植保无人机农田中飞行模式选择、变动耗电速率等农业参数变量, 在快速精准解决农户分散的植保需求条件下, 求解出植保无人机任务分配调度的成本最小化目标; 然后在保证其他参数不变的情况下, 分别改变植保无人机的电池额定续航时间、农田中的飞行模式、温度对应的最佳药效可变时间窗和需求大小4个参数, 研究了植保成本的改进情况。结果显示, 各植保无人机搭载续航时间长的电池、在农田中选择长边转弯栅格形飞行、选用发挥最佳药效温度范围大的农药种类和提高单位时段平台服务量上限策略, 分别可以降低40.02%、12.45%、21.17%和39.19%的植保成本。以上结果表明, 引入了具体农业生产要素的混合整数规划的模型科学有效, 更适用于农服平台的植保无人机任务分配调度。

关键词 农业社会化服务; 农业物联网; 植保无人机; 绿色植保; 变化时间窗; 智慧农业

中图分类号 TP18; TP391.41; S252.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)03-0250-10

植保无人机具有作业速度快、药液漂移少、作物生长干扰小等特点^[1], 被广泛用于农情监测、农业植保等农业生产全过程^[2-3]。针对碎片化、离散化的农田服务需求, 依托植保无人机社会化服务平台对农户植保需求进行统一的任务分配和路径规划^[4], 对提高平台调度模型真实性和准确性、降低农业生产成本、扩大农业机械精准作业范围有着重要意义^[5]。

该研究通常建立任务分配和路径规划2个阶段组合模型, 学者往往从任务分区、无人机编队等方面细化模型, 如Babel^[6]、杜永浩等^[7]在传统无人机任务分配的基础上细化了研究对象, 总结了无人机群任务智能规划的建模和优化方法, 提高问题刻画的准确度和模型运算的精度。模型的进一步优化需要选取更加贴合实际的参数。多数学者研究无人机路径规划考虑电量、荷载、总功率、时间窗等约束和补给点选择、返航点选取、农田形状、农田中转弯情况等因素的组合作为参数选择^[8-9], 建立相应模型实现成本最小化目标。如郭兴海等^[10]确定无人机配送的初末位

置, 以路径长度、地形、雷达威胁、无人机碰撞为约束建立模型。Popescu等^[11]引入无人机动力学、路线间距、转弯点等因素。Conesa-muñoz等^[12]考虑作物间路径的距离、农药的补给情况、各类型车辆的速度、转弯半径、油箱容量等要素。孟志军等^[13]基于农田地块形状、机具参数、转弯模式等信息, 生成了转弯数最少、能耗最低、总作业路径最短的优化路径。阚平等^[14]通过补给总次数、返航补给总时间、总耗时和最小补给时间间隔因素, 实现各无人机喷药量和返航点位置的寻优。王宇等^[15]根据农田的规模、形状、高度起伏等地理环境信息, 实现返航点位置优化设计, 实现非植保作业耗时最短的目标。综上所述, 现有关于植保无人机任务分配和路径规划的研究变量普遍集中在改善植保无人机的常规机械参数和地块特征、地形地貌等方面参数, 而涉及到对农业生产过程中有关光热、水肥、害虫防治响应速度、绿色环保农业等方面的具体农业变量较少, 如针对温度对应的农药最佳药效可变时间窗、农田中植保飞行模式选

收稿日期: 2022-10-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100601); 国家自然科学基金项目(71973106, 72271202); 陕西省社会科学基金项目(2022R020); 陕西省杰出青年科学基金项目(2021JC-21); 杨凌示范区科技计划项目“杨凌示范区智慧农业应用场景建设需求研究”

高梦闾, E-mail: gaomengtian@nwfau.edu.cn

通信作者: 阮俊虎, E-mail: rjh@nwsuaf.edu.cn

择等。因此,本研究将温度对应的农药最佳药效可变时间窗、农田中植保飞行模式选择等农业生产要素加入传统的植保无人机路径规划模型中,决策出更加符合农业生产实际的植保无人机最优调度数量,并生成达到农业社会化服务平台(简称农服平台)总成本最小化目标的飞行方案,以期有效提升任务分配调度的准确性,达到更加科学高效的智慧农业生产管理效果。

1 材料与方法

1.1 数学模型的问题描述

采用植保无人机社会化服务平台,将无人机调

度优化平台、飞手和农户3个主体连接,运行逻辑是平台与农户签订服务合同,基于全球导航卫星系统、合作社提供的土地确权数据,明确每个农户的农田位置和面积等信息。农户根据自身植保需求在平台下单,平台接收订单并基于“单基站-多无人机”的运作模式,考虑荷载量、变动耗电速率、温度对应的农药最佳药效可变时间窗等农业生产特征约束,更加精准地对植保订单进行任务分配和路径规划,将调度规划结果反馈给农机手服务队,其收到任务立即开展植保服务。植保无人机社会化服务平台可以有效解决小农户购买植保无人机成本高、操作壁垒高等问题,其运作的过程如图1所示。

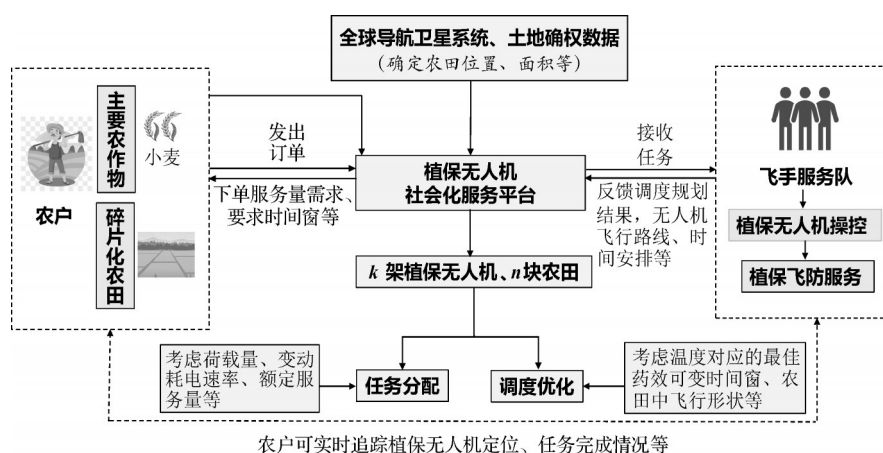


图1 植保无人机社会化服务平台运作流程

Fig.1 Schematic diagram of operation of plant protection UAV social service platform

平台处理农户发出的订单并生成调度规划结果,涉及到植保无人机飞防的任务分配和路径规划的集成问题。若植保无人机中途更换药液和电池,在实际操作中起降频繁、操作时间更长。故为提高植保无人机的作业效率,学者和企业开展“多无人机一控站”的研究开发^[16]。以单个无人机基站、多个农田点和多架无人机为研究对象,将该问题定义如下:已知植保无人机基站位置、 k 架型号为3WWDLC6-20(<https://m.tb.cn/h.fUdEJEQ?sm=0e7764>)的植保无人机、 n 块农田的位置和面积。每架植保无人机从同一基站出发,在农药荷载量、耗电速率变化、温度对应的农药最佳药效可变时间窗等约束下,启用合适数量的植保无人机进行任务分配,并在农户指定的时间窗内以最优的路径到达分配的农田并完成植保任务,任务完成后返回基站。

图2为该问题的具体阐述。以最小化无人机调度成本为目标,决策问题如下:(1)每块农田与植保无人机的服务关系;(2)每架植保无人机在对应服务

农田节点间的飞行路径。

1.2 模型假设

假设1,植保无人机飞行速度恒定;

假设2,所有植保无人机均从同一基站出发并飞回基站进行资源补给,每架植保无人机单次服务完成电量都能保证飞回基站;

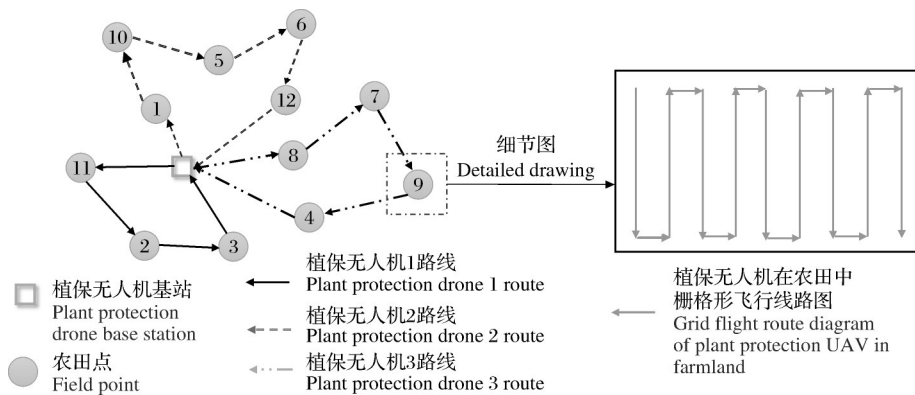
假设3,农户订单中每块农田植保使用的农药种类相同;

假设4,农田地形均规则且为矩形,农田边界不规则部分植保无人机仍按矩形直线作业;

假设5,在农田中作业期间状态稳定,不受地形、天气等因素的影响。

1.3 模型的构建和参数设置

无人机基站与农田的关系可以用 $G=(K, \{N, P\})$ 表示,定义 $K=\{1, 2, \dots, m\}$ 表示可支配无人机的集合, $N=\{1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n\} (i \neq j)$ 表示农田的集合, $P=\{0, n+1\}$ 表示无人机发射和回收的基站。每架无人机需要在农户下单选择的指



A: 植保无人机飞行路径 Flight path of plant protection UAV; B: 农田中无人机栅格形飞行路线示意图 Grid flight path diagram of UAV in farmland.

图2 单无人机基站多农田点的无人机植保路径规划

Fig.2 UAV plant protection path planning for single UAV base station and multiple farmland points

定时间段 $[E_i, L_i]$ 内到达农田点完成植保任务。

根据问题描述及假设,参考文献[17-18],考虑耗电速率和服务时间测定,使植保无人机耗电成本、折旧成本、固定使用成本和惩罚成本的4个成本之和最小,建立混合整数规划模型如下,其中,决策变量表示如下:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{无人机} k \text{ 从农田(基站)} i \text{ 飞行到农田(基站)} j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{无人机} k \text{ 服务农田} i \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Z_k = \begin{cases} 1, & \text{启用的无人机} k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

1)耗电速率和服务时间。由于无人机自身质量占无人机总质量(无人机自身质量+药箱载质量)的比例较大,故应该考虑飞行中变动的无人机总质量对耗电速率的影响。因此,与传统车辆路径问题(VRP)不同,本模型考虑随着无人机药箱中农药量的减少,无人机耗电速率逐渐减小。根据商用植保无人机3WWDL6-20机型设定固定的速度、喷幅等飞行参数。植保无人机总载质量 C_n 与耗电速率 I_n 的关系如式(1)所示。

$$I_n = aC_n + I_0 \quad (1)$$

其中, I_n 为无人机载质量飞行时耗电速率,kW; I_0 为无人机空载飞行时耗电速率,kW; a 为引入耗电速率变动比例系数; C_n 为植保无人机的总载质量,额定总载质量为30 kg。

植保无人机服务的总时间 T 即基站和农田之间的飞行时间与在各农田中栅格形飞行植保洒农药飞行时间之和。计算见式(2)。

$$T = \frac{\sum_{i \in \{N, P\}} \sum_{j \in \{N, P\}} \sum_{k \in K} d_{ij} X_{ijk} + \sum_{i \in N} x_i}{v} \quad (2)$$

其中, T 为无人机飞行总时间,min; d_{ij} 为任意2个农田 i, j 之间的距离,m; x_i 为无人机在农田 i 中的飞行距离,m; v 为无人机飞行的恒定速度,m/min。

2)目标函数。植保无人机社会化服务平台背景下,目标是使植保服务的总成本最小,各项成本如下:

①植保无人机的耗电成本(f_1)。植保无人机总质量变化会影响耗电速率,从而影响单位耗电成本。

$$f_1 = \sum_{i \in \{N, P\}} \sum_{j \in \{N, P\}} \sum_{k \in K} (d_{ij} + x_i) \cdot X_{ijk} \cdot I_n \quad (3)$$

②植保无人机的折旧成本 f_2 。植保无人机转弯飞行时比直线飞行具有更大的折旧成本。

$$f_2 = \omega T + u \sum_{i \in N} \text{turn}_i \quad (4)$$

③植保无人机固定使用成本(f_3)。即每启用一架无人机,平台需要支付给植保无人机操作员的固定工资。

$$f_3 = \sum_{k \in K} Z_k \cdot \lambda, \forall k \in K \quad (5)$$

④植保无人机服务的惩罚成本(f_4)。平台每天有8个可供农户下单的服务时段,但受到同一时段服务量的限制,时段服务量满后,农户只能选择未超过平台服务量限制的时段下单。此时农户选择的服务时段可能与发挥最佳药效的时段存在偏差,故植保社会化农服平台存在惩罚成本。

$$f_4 = \sum_{i \in \{N, P\}} \sum_{j \in \{N, P\}} \sum_{k \in K} \alpha \cdot (\max(0, (LT_i - t_{ik}), (t_{ik} - RT_i))) \cdot X_{ijk} \quad (6)$$

其中, α 为与预期时段相差的到达农田惩罚成本

系数; t_{ik} 为无人机 k 到达农田 i 的时间, $\min;[E_i, L_i]$ 为农田(基站) i 的时间窗; LT_i 为在农田 i 最佳开始施药时间; RT_i 为在农田 i 最佳结束施药时间。

植保无人机在农田中栅格形飞行,每架无人机设置了固定的飞行参数:具有恒定的飞行高度、喷幅和速度等。因此,无人机在农田中飞行时间的长短仅与农田的大小呈正比,即农田面积与无人机栅格形飞行距离呈正比。故设置比例系数 e ,无人机在农田 i 中的飞行距离为 $x_i = e \cdot S_i$ 。目标函数 f 可以表示为:

$$f = \min(f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \quad (7)$$

3)约束条件(8)~(16)分别满足荷载约束、流量平衡约束、基站收发约束、服务满足约束、额定功率约束、基站及农田的时间窗约束。

约束条件(8)表示无人机飞行的每条路径上各农田喷洒农药的需求量之和不超过无人机农药的荷载量。

$$\sum_{i \in N} Q_i \cdot Y_{ik} \leq C, \forall k \in K \quad (8)$$

其中, Q_i 为农田 i 的农药需求量,kg; C 为每架无人机农药荷载量,kg。

约束条件(9)表示流量平衡约束,即对于投入使用的每架无人机而言,飞至某块农田完成了植保服务后,则飞往下一块农田(基站):

$$\sum_{j \in N} X_{ijk} = \sum_{j \in N} X_{jik}, \forall i \in N, \forall k \in K \quad (9)$$

约束条件(10)、(11)表示所有投入使用的无人机都会从基站出发并最终返回基站:

$$\sum_{i \in N} X_{i0k} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} X_{0ik} = 1 \quad (11)$$

约束条件(12)表示每个农田点都有且只有1架无人机服务:

$$\sum_i Y_{ik} = 1, \forall i \in N \quad (12)$$

约束条件(13)表示每架无人机飞行路径的距离不超过无人机单次飞行的最大飞行距离。其中, D 为每架无人机的最大飞行距离,m。

$$\sum_{i \in \{N, P\}} \sum_{j \in \{N, P\}} (d_{ij} + x_{ij}) \cdot X_{ijk} \leq D, \forall k \in K \quad (13)$$

约束条件(14)表示基站的时间窗约束:

$$E_i \cdot Y_{ik} \leq t_{ik} \leq L_i, \forall i \in P, \forall k \in K \quad (14)$$

约束条件(15)表示任一农田的时间窗约束:

$$E_i \cdot Y_{ik} \leq t_{ik} \leq L_i \cdot Y_{ik}, \forall i \in N, \forall k \in K \quad (15)$$

约束条件(16)表示无人机服务不同农田时,在时间上客观存在的不等关系,当农田(基站) i 和农田

(基站) j 在无人机 k 的飞行路线上存在相邻的前后关系时取等值。其中, g 是一个足够大的数,可以取10的7次方。

$$t_{ik} + \frac{x_i}{v} + \frac{d_{ij}}{v} - t_{jk} \leq (1 - X_{ijk}) \cdot g, \\ \forall i \in \{N, P\}, \forall j \in \{N, P\}; \forall k \in K \quad (16)$$

设定上述模型中用植保无人机的相关参数,药箱容量20 L,额定总质量30 kg,喷幅和喷洒速度可自行设定。其中,喷幅范围为3~10 m,喷洒速度范围为1~10 m/s,满载时额定续航时间范围为15~40 min。为保证植保效果,参照植保无人机飞行的参数建议配置标准,设定农药喷幅和飞行速度恒定不变,分别为5 m和2 m/s。当与农田边缘距离小于半个喷幅时,喷洒原则是“可重叠、不漏喷”,即喷洒循环路径次数不足1次的按1次取整。默认设定植保无人机的转弯飞行方式为长边转弯栅格形飞行,于陕西省渭南市合阳县参加植保服务的10块农田序号、位置坐标、长度、宽度和面积见表1。其中,无人机基站位置坐标为(300,300)。

表1 农田参数
Table 1 Farm parameters

农田序号 Field number	位置坐标/m Position coordinates	长度/m Length	宽度/m Width	面积/m ² Area
1	(450,450)	100	10	1 000
2	(150,250)	600	10	6 000
3	(150,500)	100	10	1 000
4	(300,400)	150	20	3 000
5	(500,500)	200	20	4 000
6	(250,350)	200	30	6 000
7	(200,50)	20	20	400
8	(350,200)	150	20	3 000
9	(450,300)	100	20	2 000
10	(200,100)	100	10	1 000

根据上述模型与参数设定,对模型进行优化求解。Yalmip是Lofberg开发的一种免费的工具箱并提供了Matlab接入。Bmibnb是求解中的内置求解器,可以求出全局最优解,并且在规模较小的问题上表现出很好的鲁棒性。故本研究的混合整数规划模型通过Yalmip+Matlab+Bmibnb在硬件配置为AMD R5 2.1 GHz CPU和16 G RAM的计算机上求解。

2 结果与分析

在保证其他参数及模型不变的情况下,分别对各架植保无人机的电池额定续航时间、农田中飞行模式、温度对应的可变时间窗和需求大小4个因素对成本的影响做相应的数值实验分析,分析该农业社会化服务平台对各植保无人机的调度情况和成本节约情况。

2.1 满载时电池额定续航时间对成本的影响

每架植保无人机选择搭载不同的满载时续航时间的电池,其不但影响植保无人机搭载农药作业的服务时间和任务分配调度的总飞行时间,还影响农服平台任务分配调度启用的植保无人机数量及其服

务路径,从而影响目标函数中的耗电成本、折旧成本、固定使用成本和惩罚成本。当满载时额定续航时间范围为15~20 min时,农服平台任务分配调度启用的无人机数量、成本和植保无人机总飞行时间的变动率较大。因此,在此范围内研究的变化幅度更精细,满载时额定续航时间每1 min作为1个研究样本;而搭载的电池在满载时电池额定续航时间范围为25~40 min时,农服平台任务分配调度启用的无人机数量、成本和植保无人机总飞行时间的变动率较小,因此满载时额定续航时间每5 min作为一个研究样本。满载时电池额定续航时间变化对成本、启用无人机数量、总飞行时间和无人机路径的影响见表2。

表 2 满载时电池额定续航时间变动情况
Table 2 Change of battery rated life at full load

满载时电池额定续航时间/min Rated battery life at full load	成本/元 Cost	启用无人机数量 Number of UAVs used	总飞行时间/min Total flight time	无人机服务路径 UAV service path
15	613.02	6	103.03	1:1→5; 2:2; 3:3→4; 4:6; 5:8→9; 6:10→7
16	554.65	5	103.23	1:1→5; 2:2; 3:6→3; 4:8→9; 5:10→7→4
17	550.63	5	102.35	1:1→5→9; 2:2; 3:6→3; 4:8; 5:10→7→4
18	487.73	4	100.50	1:1→5→9; 2:6→3; 3:8→4; 4:10→7→2
19	486.68	4	100.10	1:1→5→4; 2:6→3; 3:8→9; 4:10→7→2
20	486.68	4	100.10	1:1→5→4; 2:6→3; 3:8→9; 4:10→7→2
25	427.87	3	101.33	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
30	425.02	3	99.73	1:6→3→1→5; 2:8→9; 3:10→7→2→4
35	369.60	2	101.50	1:6→3→1→5→8; 2:10→7→9→2→4
40	367.72	2	99.24	1:6→3→1→5→8→9; 2:10→7→2→4

由表2可以看出,当配置不同规格的电池使得每架植保无人机的额定续航时间发生变化时,会影响成本、植保无人机启用的数量、总飞行时间和服务路径。由总体变化情况来看,在服务相同的10块农田时,随着满载时电池额定续航时间的增加,启用无人机的数量逐渐减少,成本阶梯状减少,而总飞行时间上下波动,随着启用无人机数量的减少先增加后减少。当启用无人机数量一定,如启用3架无人机时,随着满载时电池额定续航时间的增加,成本的变动率很小,而总飞行时间的变动率则比成本的变动率大得多。可见,各植保无人机搭载1块能支持更长续航时间的电池,并尽可能使每架无人机分配的任务量达到其额定值,有助于缩短运行时间,可降低成本40.02%。

2.2 农田中植保飞行模式对成本的影响

农田中不同飞行模式的选择,会影响无人机进出农田点的位置、转弯次数和服务总时间等因素。3种飞行试验设计见图3。

3种飞行模式情况具体描述见表3。由表3可知,无人机对同一块农田进行植保服务时,转弯次数的排序是:长边转弯栅格形飞行<直角螺旋形飞行<短边转弯栅格形飞行,且飞行模式的选择对启用无人机的数量和服务路径均不影响,但成本依次递增。故植保无人机在农田中进行飞行模式的选择时,应采用长边转弯栅格形飞行模式,从而达到转弯次数最少、折旧成本最小的目标,可有效降低成本12.45%。

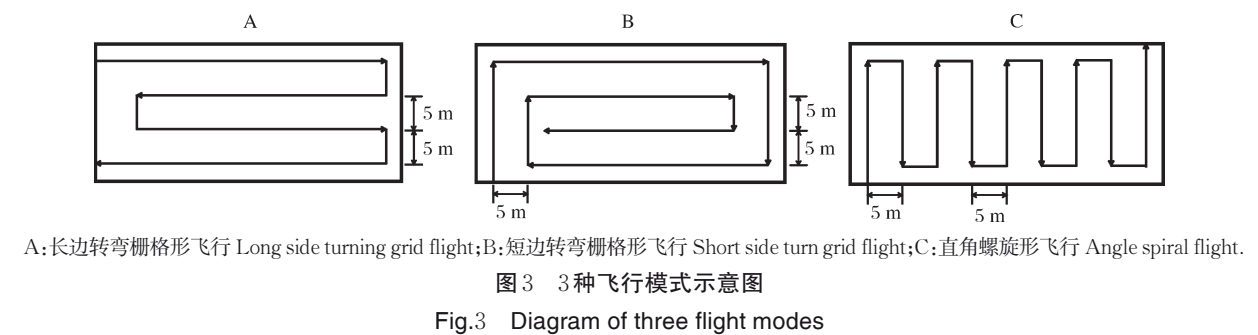


表3 3种飞行模式情况			
Table 3	Description of the three flight modes		
飞行模式 Flight modes	成本/元 Cost	转弯次数 Number of turns	无人机服务的 UAV service path
长边转弯栅格形飞行 Long side turn grid flight	427.88	48	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
短边转弯栅格形飞行 Short side turn grid flight	489.88	668	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
直角螺旋形飞行 Fly in a right angle spiral	429.88	68	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2

注:启用无人机架数均为3架,总飞行时间均为101.33 min。与表4、5相同。Note: The number of UAVs used in each group was 3, and the total flight time was 101.33 min.The same as Table 4 and 5.

2.3 温度对应的最佳药效可变时间窗对成本的影响

由于农药存在发挥最佳药效的喷洒温度范围,不同气温、不同农药种类可能会在农户订单要求的植保时间窗和温度对应的最佳药效可变时间窗之间产生差异,从而带来农户满意度成本,是否考虑最佳药效温度对应的可变时间窗对成本有一定影响。由表4可知,考虑温度对应的最佳药效可变时间窗引入了惩罚成本,成本变动率为33.76%,不但提高了模型的准确性,也实现了成本最小化的目标,故需要考虑由于时段服务量限制,农户对农田植保服务与最佳药效时段差的满意度情况。

为了验证农药发挥最佳作用的时间窗对成本的影响情况,本研究选取了2种农药,农药MA的最佳药效喷洒温度范围为20~30℃,MB农药最佳药效喷洒温度范围为25~30℃,引入喷洒农药期间当地3d的真实温度变化情况,针对温度情况绘制出当地3d内日温度变化曲线和3d的最优时间窗范围,具体如图4所示。从图4可以看出,不同农药种类、不同气温对应的最佳药效喷洒的温度时间窗有差异。

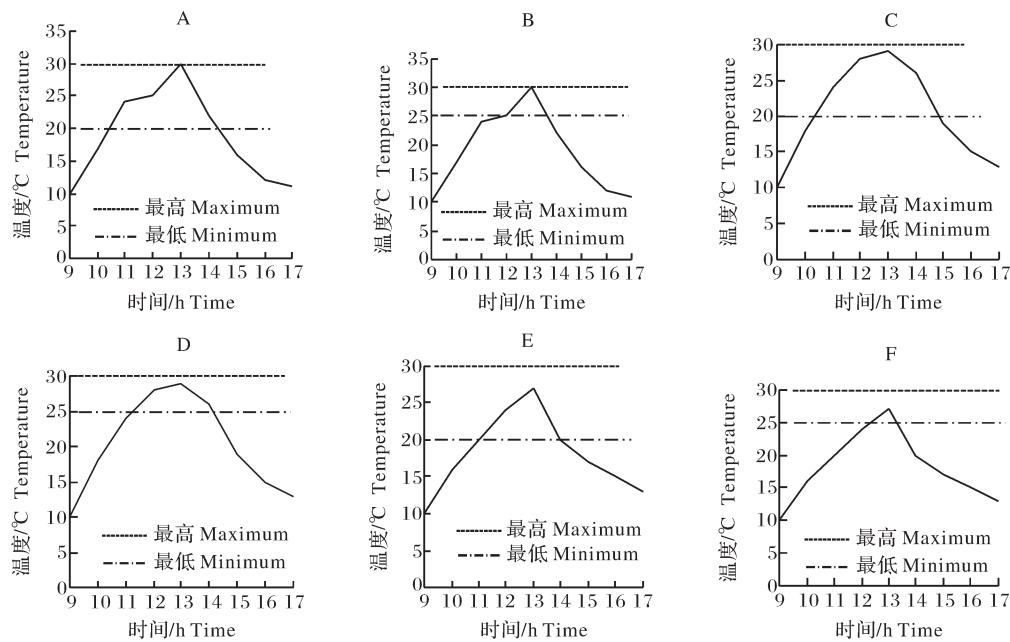
表4 温度时间窗对相关因素的影响		
Table 4	Influence of temperature time window on related factors	
温度时间窗 Consider temperature time window	成本/元 Cost	无人机服务的 UAV service path
是 Yes	319.88	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
否 No	427.88	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2

2种农药在3d内温度时间窗的变化对成本、启用无人机架数等相关因素的影响情况如表5所示。从表5可以看出,10块农田需服务的情况下,启用无人机的数量、总飞行时间和服务路径相同,但符合条件的时间窗越宽,农户对于农药喷洒发挥的药效满意度越高,平台对应的服务成本越低。针对不同种类的农药,该种农药发挥最佳药效适合的时间窗越宽,成本越低;且当天温度波动越剧烈,该农药可以满足的最佳温度时间窗变动越大,喷洒该种农药与其他农药相比可以节约的成本越多。故植保无人机在农药选择时,应该选用可以发挥最佳药效的时间窗更宽的农药种类,并且在喷洒当天适宜温度段内温度波动小,同时尽量提高植保无人机社会化农服平台每个下单时段的服务量上限,样本测试集中最多可降低成本21.17%,以达到成本最小化的目标。

2.4 需求大小对成本的影响

由于服务的主体是拥有碎片化、分散化农田的农户,土地的承包经营、耕地的占补平衡补贴政策等情况都可能使需要植保服务的农田规模增大。当各农田点的需求大小成倍扩大时,对成本、总飞行时间等相关因素的影响见表6。

由表6可见,当农户的服务规模需求倍数逐渐增大时,成本逐渐增大,植保无人机启用的数量逐渐增多,植保无人机系统总飞行时间逐渐增大并改变了



A、B表示当地第1天的温度变动,A表示喷洒MA农药,B表示喷洒MB农药;C、D表示当地第2天的温度变动,C表示喷洒MA农药,D表示喷洒MB农药;E、F表示当地第3天的温度变动,E表示喷洒农药MA,F表示喷洒农药MB。上方虚线表示该种农药发挥最佳药效对应的最高温度,下方虚线表示该种农药发挥最佳药效对应的最低温度。A and B represent the local temperature variation of the first day; A for spraying MA pesticide; B for spraying MB pesticide. C and D represent the local temperature variation of the second day; C for spraying MA pesticide, and D for spraying MB pesticide. E and F represent the local temperature variation curve of the third day; E for spraying MA pesticide and F for spraying MB pesticide. The upper dotted line indicates the highest temperature corresponding to the best effect, and the lower dotted line indicates the lowest temperature corresponding to the best efficacy.

图4 当地3 d内当日温度变化曲线

Fig.4 Local temperature change curve of the day within three days

表5 温度对应的最佳药效可变时间窗对相关因素的影响

Table 5 The influence of temperature corresponding optimal efficacy variable time window on relevant factor				
农药类型 Pesticide type	最佳喷洒效用温度段/°C Optimal spraying effective temperature range	最佳喷洒效用的温度时间窗 Optimal spraying effective temperature time window	成本/元 Cost	无人机服务的路径 UAV service path
MA	20~30	10:30—14:10	382.29	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
		10:20—14:50	366.29	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
		11:00—14:00	397.29	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
MB	25~30	11:20—13:40	416.97	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
		11:20—14:20	403.29	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
		12:20—13:20	464.64	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2

每架无人机植保服务的路径。从需求大小对成本和总飞行时间的影响情况来看,当10块农田的服务需求面积逐渐增大时,成本不断增加;且在启用无人机数量增加时,成本增长率显著增大。而总飞行时间图像趋向于线性正比例增长,不会随着无人机启用架数的增加而显著增加;当无人机数量一定,如启用4架无人机时,随着需要服务的任务量越来越接近各无人机的额定服务量,成本的增长率逐渐减小,总飞行时间的增长率没有明显变化。可见,当服务的任务量需要调度一定数量的无人机时,为缩短飞行时间,降低服务成本,任务量要尽可能接近启用无人机的额定服务量,成本最多可降低39.19%。

表 6 需求倍数变动对相关因素的影响

Table 6 The demand multiple changes in relation to the relevant factors

需求倍数/% Demand multiple	成本/元 Cost	启用无人机数量 Number of UAVs used	总飞行时间/min Total flight time	无人机服务路径 UAV service path
100	427.88	3	101.33	1:1→5→4; 2:6→3→10→7; 3:8→9→2
110	442.53	3	108.91	1:1→5→9→4; 2:6→3→10→7; 3:8→2
120	510.08	4	115.57	1:1→5→9; 2:6→3→4; 3:8; 4:10→7→2
130	529.97	4	124.76	1:1→5→4; 2:6→3; 3:8→9; 4:10→7→2
140	544.40	4	132.98	1:1→5→4; 2:6→3; 3:8→9; 4:10→7→2
150	559.87	4	141.60	1:1→5→9; 2:6→3; 3:8→4; 4:10→7→2
160	581.03	4	152.08	1:1→5→9; 2:6→3; 3:8→7→4; 4:10→2
170	655.54	5	160.62	1:2; 2:3→1→5; 3:6; 4:8→9; 5:10→7→4
180	674.83	5	170.03	1:1→5; 2:2; 3:3→10→7→9; 4:6; 5:8→4
190	689.25	5	178.25	1:1→5; 2:2; 3:3→10→7→9; 4:6; 5:8→4
200	703.68	5	186.47	1:1→5; 2:2; 3:3→10→7→9; 4:6; 5:8→4

3 讨 论

针对“最先一公里”中植保无人机优化调度问题,研究了“植保无人机社会化农服平台”的任务分配调度问题,建立了一个混合整数线性规划模型,对带有可变时间窗的植保无人机调度优化进行研究,实现了农服平台下植保无人机任务分配调度的成本最小化目标。与传统车辆路径问题不同的是,涉及到农服平台下的植保无人机社会化服务模式,需要考虑更多方面的指标和衡量因素,如针对温度对应的农药最佳药效可变时间窗、农田中植保飞行模式选择、农田大小、形状等对植保无人机飞行模式的选择等方面的研究,而不仅是将具有不同固定成本、载重约束的车辆用于服务一组需求量和时间窗信息已知的客户,通过确定车队组成、行驶路线和时间安排,从而达到总运作成本最小化的目标^[19]。由此推断,“植保无人机社会化农服平台”的任务分配调度问题,是对传统车辆路径问题的接续研究,如 Vural 等^[20]考虑不同天气条件对使用不同位置的无人机能力的影响,Li 等^[21]提出农田中相邻路径的栅格飞行优化,可以大大提高植保无人机服务效率。这些研究都更加贴合田间作业的现实情况,能够更好地解决我国农田分散、小农自主管理成本高、效率低的现实问题,但对具体指导植保的实施效果还有待加强。

本研究充分考虑了农药最佳施用时间等农业运营管理知识,通过数值实验,验证了模型的可靠性,

相比于传统的模型与研究,本研究建立的模型可以有效减少植保无人机的运行时间和运行成本,实现更优化的目标。植保无人机平台在保证利润的前提下,应选择配置续航时间长的电池,并使每架无人机分配的任务量接近其额定服务量,可有效减少运行时间,降低总成本 40.02%;在农田中飞行采用长边转弯栅格形飞行方式,有利于减少转弯次数,可以减少转弯次数、降低折旧成本 12.45%;并且选用最佳药效温度范围大、适宜范围内温度波动小的农药,提高植保无人机社会化农服平台单位时段服务量上限,可以节约成本 21.17%。当服务的任务量需要调度一定数量的无人机时,需求的任务量尽可能接近启用无人机的额定服务量,可以节约成本 39.19%。未来的研究将构建车辆搭载植保无人机的联合优化模型,并在衡量带模糊时间窗的惩罚成本时进一步考虑农业节气等农业生产要素,从而优化结果精度,加快农业生产资料调度。

参考文献 References

[1] 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. ZHOU Z Y, ZANG Y, LUO X W, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24):1-10 (in Chinese with English abstract).

[2] DASH J P, WATT M S, PEARSE G D, et al. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during

- a simulated disease outbreak[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2017, 131(9): 1-14.
- [3] 周俊, 何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 1-14. ZHOU J, HE Y Q. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(9): 1-14 (in Chinese with English abstract).
 - [4] HU H T, ZHANG Y, ZHEN L. A two-stage decomposition method on fresh product distribution problem[J]. International journal of production research, 2017, 55(16): 4729-4752.
 - [5] 阮俊虎, 刘天军, 冯晓春, 等. 数字农业运营管理: 关键问题、理论方法与示范工程[J]. 管理世界, 2020, 36(8): 222-233. RUAN J H, LIU T J, FENG X C, et al. Digital agriculture operation and management: key issues, methodology and demonstration project[J]. Management world, 2020, 36(8): 222-233 (in Chinese with English abstract).
 - [6] BABEL L. Curvature-constrained traveling salesman Tours for aerial surveillance in scenarios with obstacles[J]. European journal of operational research, 2017, 262(1): 335-346.
 - [7] 杜永浩, 王凌, 邢立宁. 空天无人系统智能规划技术综述[J]. 系统工程学报, 2020, 35(3): 416-432. DU Y H, WANG L, XING L N. Intelligent planning technologies for unmanned aerospace system: a literature review[J]. Journal of systems engineering, 2020, 35(3): 416-432 (in Chinese with English abstract).
 - [8] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 1-14. ZONG Q, WANG D D, SHAO S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14 (in Chinese with English abstract).
 - [9] 陈海, 何开锋, 钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报, 2016, 37(3): 928-935. CHEN H, HE K F, QIAN W Q. Cooperative coverage path planning for multiple UAVs[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2016, 37(3): 928-935 (in Chinese with English abstract).
 - [10] 郭兴海, 计明军, 温都苏, 等. “最后一公里”配送的分布式无人机的任务分配和路径规划[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 946-961. GUO X H, JI M J, WEN D S, et al. Task assignment and path planning for distributed multiple unmanned aerial vehicles in the “Last Mile”[J]. Systems engineering-theory & practice, 2021, 41(4): 946-961 (in Chinese with English abstract).
 - [11] POPESCU D, STOICAN F, ICHIM L. Control and optimization of UAV trajectory for aerial coverage in photogrammetry applications[J]. Advances in electrical and computer engineering, 2016, 16(3): 99-106.
 - [12] CONESA-MUÑOZ J, BENGOCHEA-GUEVARA J M, ANDUJAR D, et al. Route planning for agricultural tasks: a general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications[J]. Computers and electronics in agriculture, 2016, 127: 204-220.
 - [13] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 农田作业机械路径优化方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 147-152. MENG Z J, LIU H, WANG H, et al. Optimal path planning for agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(6): 147-152 (in Chinese with English abstract).
 - [14] 阚平, 姜兆亮, 刘玉浩, 等. 多植保无人机协同路径规划[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 260-270. KAN P, JIANG Z L, LIU Y H, et al. Cooperative path planning for multi-sprayer-UAVs[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2020, 41(4): 260-270 (in Chinese with English abstract).
 - [15] 王宇, 陈海涛, 李海川. 基于引力搜索算法的植保无人机三维路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 28-33. WANG Y, CHEN H T, LI H C. 3D path planning approach based on gravitational search algorithm for sprayer UAV[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(2): 28-33, 21 (in Chinese with English abstract).
 - [16] LUO Y, YAN J, ZHAO Z Y, et al. A pesticide spraying mission assignment performed by multi-quadcopters and its simulation platform establishment [C]//2016 IEEE Chinese guidance, navigation and control Conference (CGNCC), August 12-14, 2016, Nanjing, New York; IEEE, 2017: 1980-1985.
 - [17] 威峰, 王红, 齐章利. 严格时间窗下多作业配送调度模型与算法[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(3): 69-74. QI F, WANG H, QI Z L. The multi-job delivery scheduling model and algorithm under strict time-window restriction[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(3): 69-74, 83 (in Chinese with English abstract).
 - [18] 盛虎宜. 生鲜电商物流配送的车辆路径问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019. SHENG H Y. Research on vehicle routing problem of fresh E-commerce logistics distribution[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019 (in Chinese with English abstract).
 - [19] 唐坚强, 祁超, 王红卫. 带时间窗的多仓库订单拆分与异构车辆路径联合优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(5): 1446-1464. TANG J Q, QI C, WANG H W, et al. Multi-warehouse order splitting with time window and heterogeneous vehicle routing joint optimization method[J]. Systems engineering theory and practice, 2023, 43(5): 1446-1464 (in Chinese with English abstract).
 - [20] VURAL D, DELL R F, KOSE E. Locating unmanned aircraft systems for multiple missions under different weather conditions[J]. Operational research, 2021, 21(1): 725-744.
 - [21] LI Y H, HUANG Z H, XIE Y. Path planning of mobile robot based on improved genetic algorithm[C]//2020 the 3rd international conference on electron device and mechanical engineering (ICEDME), May 8-10, Chengdou, New York: IEEE, 2020: 691-695.

Task allocation and service path optimization for plant protection drone based on agricultural service platforms

GAO Mengtian¹, HAN Jiliang¹, FENG Xiaochun¹, LIN Na², RUAN Junhu¹

1.School of Economics and Management, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2.School of Economics and Management, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract A two-stage mixed integer programming model was established to solve the problem of fine match of task allocation and scheduling in the “single base station multiple drones” mode of plant protection drones on the platform of the agricultural socialization service. First, the cost minimization goal of task allocation and scheduling of plant protection drone was solved under the condition of quickly and accurately solving the dispersed plant protection needs of farmers by introducing agricultural parameter variables including variable time windows for pesticide efficacy under the influence of temperature, flight mode selection of crop protection drone in farmland, and variable power consumption rate. Then, the improvement of the cost minimization goal was studied by changing the rated battery life time, flight mode in the field, optimal time window of drug efficacy corresponding to temperature and the size of demand of the plant protection drone while ensuring other parameters remain unchanged. The results showed that plant protection drones reduced the plant protection cost by 40.02%, 12.45%, 21.17% and 39.19%, respectively, by carrying batteries with long duration of flight, choosing the long-side turning grid flight, selecting pesticide types with the best efficacy and a wide range of temperature, and increasing the upper limit of platform service volume per unit time period. It is indicated that the mixed Integer programming model, which introduces specific agricultural production factors, is scientific and effective, and is more suitable for the task allocation and scheduling of plant protection drones on the platform of agricultural service.

Keywords agricultural socialization service; agricultural Internet of Things; plant protection drone; green plant protection; variable time window; smart agriculture

(责任编辑:赵琳琳)