doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.012

基于能量优化的无人机喷施规划组合算法研究

李继宇[1,2]　罗慧莹[2]　朱长威[1,2]　李一凡[1,2]　汤　峰[3]

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642;
3. 华南理工大学软件学院, 广州 510006)

摘要: 针对目前无人机喷施规划并未达到能量利用率最大化的问题,以总航程最短、有效载荷和安全作业为作业目标,研究了一种基于能量优化的无人机喷施规划组合算法。利用栅格法对工作区域进行划分,得到全覆盖航线后,通过设置补给点,合理地分配各架次的返航点和有效载荷,从航线和载荷上降低无人机的能量消耗率,提高了作业效率。所设计的配套地面站软件对算法进行仿真,结果表明,在同等作业条件下,采用本组合算法进行无人机喷施规划,相比于传统以药液或能量耗尽为返航依据、偶有迫降或坠机危险的喷施规划,航程规划得到的能量节省率达 16.25%,载荷规划得到的能量节省率为 18.92%。田间对比试验表明,经过算法规划的作业比未经算法规划的作业节省了 272.5 m 的返航航程,航程节省率为 23.7%;节省载荷 1 L,载荷节省率为 16.7%。本组合算法能保证无人机在能量满足安全条件的情况下进行作业,证实了算法的节能性和安全性。

关键词: 无人机; 喷施规划; 能量优化; 栅格法

中图分类号: S252　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0106-10

Research and Implementation of Combination Algorithms about UAV Spraying Planning Based on Energy Optimization

LI Jiyu[1,2]　LUO Huiying[2]　ZHU Changwei[1,2]　LI Yifan[1,2]　TANG Feng[3]

(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology* (*NPAAC*), *Guangzhou* 510642, *China*
3. *College of Software*, *South China University of Technology*, *Guangzhou* 510006, *China*)

Abstract: Aiming at the current situation that the planning of unmanned aerial vehicle (UAV) spraying has not reached the maximum energy utilization rate, target for the shortest total path, payload and safe operation, a combined algorithm of UAV spraying planning based on energy optimization was researched. Using grid method to divide working area, after getting full coverage, the return points can be distributed rationally and the payloads of sorties by setting up supply points, which reduced energy consumption rate of UAV from route and path and improved operational efficiency. The simulation results of the algorithm by the designed mating software of earth station showed that under the same operating conditions, compared with traditional spraying planning which based on drug or energy exhaustion but had occasional forced landing or crash risk, using the combination algorithms to plan the spraying of UAV can save rate of range planning about 16.25% and that of load planning about 18.92%. From the field contrast test, the algorithm-planned operation saved 272.5 m returning flying range compared with the non-algorithm-planned operation. The savings rate of flying range was 23.7%. And it can save load about 1 L, which meant that the saving rate of load was 16.7%. In summary, this combinational algorithm can save energy effectively and ensure that only when their energy satisfied the safeguard requirement, UAV would operate, and it furtherly verified the energy saving and security of the algorithm.

Key words: UAV; spraying planning; energy optimization; grid method

收稿日期: 2019-03-11　修回日期: 2019-06-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701001)、国家自然科学基金项目(31771682)、广东省重大科技计划项目(2017B010116003)和广州市科技计划项目(201807010039)

作者简介: 李继宇(1979—),男,副教授,博士,主要从事无人机应用技术研究,E-mail: lijiyuscau@qq.com

通信作者: 汤峰(1979—),女,高级实验师,主要从事机器人控制系统及云计算研究,E-mail: Fengtang@scut.edu.cn

0　引言

作为新型农用机械，农用植保无人机具有小、轻、方便运输、无需跑道、操控灵活的特点，能够满足不同地域、地块和作物的植保需求[1-4]。而且，单位面积施药量小，作业效率高；同时，在应对农村劳动力减少及农田爆发性病虫害等方面具有突出优势[4-8]。但是，目前仍未有效解决植保无人机存在的自主作业能力差、承重小、续航时间短的问题[8-11]。

大部分植保无人机作业是基于遥控指挥的，人为因素依赖大，作业效果不理想，文献[12-13]利用 GPS 坐标采集无线传输系统，通过目视操控进行航线规划试验，指出人为即时规划的飞行路线与理论航线偏差严重、作业遗漏率及重复率高等问题。作业过程中，由于能量限制及作业经验不足，植保无人机因电量过低而迫降到农田里的情况时有发生，甚至有突然失控坠机的危险[14-15]。因此，在无人机作业前，应根据作业区域、喷施幅度、飞行速度、喷施流量合理规划出飞行航线，使无人机以固定高度沿着规划好的航线自主飞行作业，即可解决作业遗漏率及重复率高等问题。在多架次作业中，若是按照传统载荷进行分配（单架次满载起飞作业，喷施完农药后返航），无人机能量及载荷耗尽时必须返航的时机并不一致，则会产生更多的返航航程，而且无人机作业或返航时载荷有剩余，亦会导致能量浪费、时间延长、作业效率低等问题。

国外无人机研究起步较早，已有大量使用不同算法或不断改进现有算法对无人机航线规划的相关研究，如 YAO 等[16]基于干扰流、NURI 等[17]使用平行进化算法、SANDER 等[18]使用进化算法、CHEN 等[19]改进中心力最优算法，从不同算法方向对三维航线的规划进行优化，而 ATHINA 等[20]基于微分进化，POURVAZIRI 等[21]使用混合多种群遗传算法对二维航线进行规划，取得了许多成果。但目前大部分规划仅集中在航线规划的优化上，未考虑到实际作业中航线规划受有效载荷和能量的限制问题。

我国从 20 世纪 80 年代开始，亦对无人机航线规划方法进行了研究，但是大部分文献仅提及了航线规划（航程最短、能耗优化、损耗风险）的计算方法[22]。也有学者对航线规划进行了更精细的分析和优化。如，陈星[23]针对无人机多目标的航线规划对蚁群算法进行改进，并提出了一种新的启发式任务分配算法；徐博等[24]针对不规则区域的多余覆盖现象对算法进行了改进；凌诗佳[25]则对无人机航线规划系统进行了改造；张鲁遥等[26]提出了无人机自动飞行航线策略；陈侠等[27]提出无人机绕开威胁的三维航线规划等。其中，徐博等[28]虽指出，对作业航线进行规划能够缩短无人机的区域间调度飞行距离及作业距离，但仍沿用了将单一起点设置为作业规划中补给点、补给完毕后返航继续喷施作业的理想作业方式。对于大田喷施作业来说，植保无人机需多次补充载荷和能量而往返于单一起点，往返距离越长，能耗就越大，增加了作业成本和时间。因此，从实际作业角度，此类方式对于无人机载荷及能量的规划并未达到最优配置。在无人机实际作业中，往往根据无人机能量载荷消耗完毕时的航线中断点，在田边设置多个点进行补给。通过设置非起点为补给点的方法，根据减少无人机往返于补给点的航程来规划作业航线，符合现实作业需要，并能够极大程度地降低无人机航线能耗。

对于需要高效、节能、安全的农用植保无人机喷施作业来说，航线规划只是喷施作业规划的一部分，喷施作业规划还应包括载荷规划、能量规划等。目前国内外研究有效载荷算法的较少，往往作为航线规划中的一部分进行简单说明，针对能量的规划大多与航线规划相结合。

针对航线规划的现实可行性，本文研究无人机喷施规划组合算法，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。

1　基本思路

本文基于能量优化对无人机喷施规划方法进行研究，并提出包括航线规划算法、有效载荷算法、能量预警算法在内的组合算法，优化无人机大田喷施作业方式，减少作业经济成本及时间，提高作业效率和安全性。

无人机喷施规划流程如图 1 所示。作业前，先根据作业区域对预设航线进行规划，在保证喷施作业航线不变的情况下，增加补给点的设置，通过算法计算得出返航点与补给点之间的最短航程，进而合理分配返航点，有效缩短总航程，首先从航线上降低无人机的能耗。确定作业航线及返航点后，根据喷施作业航程及喷施流量计算出无人机单架次作业的最少载荷，以作业最小载荷起飞作业，当无人机飞行作业至规划的返航点时，无人机载荷恰好消耗完毕，然后空载飞回补给点，不仅进一步从载荷上降低无人机作业能耗，通过提高能量利用率，延长无人机续航时长，降低作业过程中因电量不足而无法作业的风险。然后结合规划所得的作业航程及作业载荷数据，即可利用算法来实时计算无人机的作业能耗及电池的剩余能量，并预估无人机下一架次所需能量，

再判断剩余能量是否满足作业条件而决定无人机是否允许起飞作业,提醒更换电池或充电,提高无人机作业的安全性。最后通过喷施规划地面站将该组合算法付诸实现,使无人机喷施作业高效化、自主化、专业化。

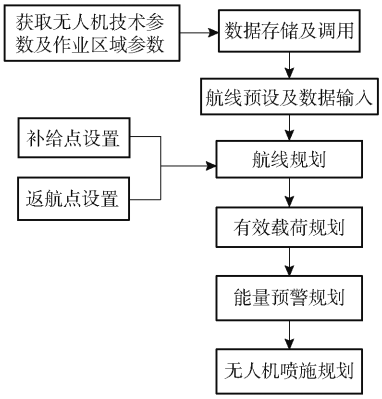

图 1 无人机喷施规划流程图

Fig. 1 Procedure of UAV spraying planning

2 无人机喷施规划组合算法

2.1 基础航线预设

植保无人机自主作业的基础是对作业区域全覆盖航线的预设,需先根据作业区域地理信息构建确定形状、长宽的作业区域边框,然后根据实际喷施幅度规划航线,并由此生成航点分布,依次连接得到作业路径总长度,结合实际作业中无人机施药量和续航时长,设置最佳架次数、载荷量、返航点及补给点。因此需要先构建全覆盖航线预设。为了方便航线预设及减少航线预设时的误差,采用栅格法对工作区域进行划分。以规则矩形和不规则梯形为例。

对于规则形状(如矩形农田)的待作业区域,如图 2 所示,$ABCD$ 为农田边框,长为 l,宽为 b,喷施幅度为 d,计算得出应设置 $2l/d$ 个航点,依次连接所有航点形成飞行航线。

对于不规则作业区域的航线预设,需要将区域内的航点按照实际区域边缘作出相应的调整,如图 3 所示。

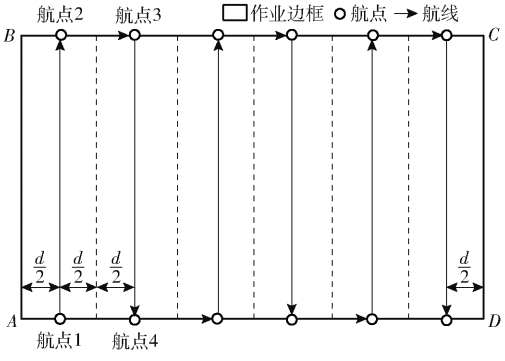

图 2 规则作业区域全覆盖航线预设

Fig. 2 Full coverage route presupposition in regular operation area

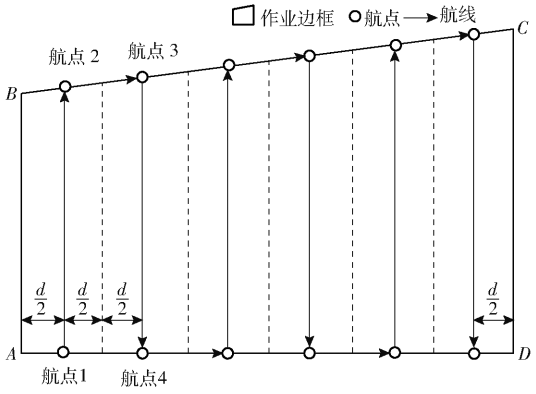

图 3 不规则作业区域全覆盖航线预设

Fig. 3 Full coverage route presupposition in irregular operation area

2.2 航线规划算法

2.2.1 补给点设置

对于植保无人机,确定喷施全覆盖航线规划后,在农田面积比较大的情况下,在多架次返航航线的规划中如何设置对无人机能量和载荷进行补充的补给点对航线长短起决定性作用。如图 4 所示,B 为补给点,f_1、f_2、f_3 为本文的返航点。

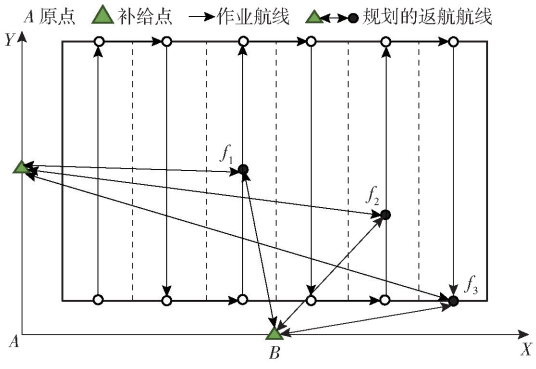

图 4 补给点的位置与返航航程的关系

Fig. 4 Relationship of supply points location and operation channel

为便于算法研究,本文返航均指无人机返回补给点,而非起航点。

与理想作业中使用单一起点作为补给点相比,在路边设置补给点,能够有效降低往返补给点的航程,而减少了无人机的返航能耗。

补给点的设置,不仅需兼顾最多的返航点,并能保证作用范围内的返航点在往返补给点的过程中不会因能量不足而坠毁。因此,单架次作业结束后,无人机的剩余航程 H_k 必须满足条件

$$H_k = \frac{C_m - C_p}{P_k} \geqslant 2m \tag{1}$$

式中 C_p——无人机作业最长航程为 H_p 消耗的总能量

C_m——无人机总能量

P_k——空载飞行功率

m——返航点与补给点 B 之间的单次航程

补给点可在作业区域的长宽边进行设置，如图 5 所示，在宽边设置补给点，随着作业区域长度的增加，返航点逐渐增多，所需返航航程越长，因此将补给点放置在长边。

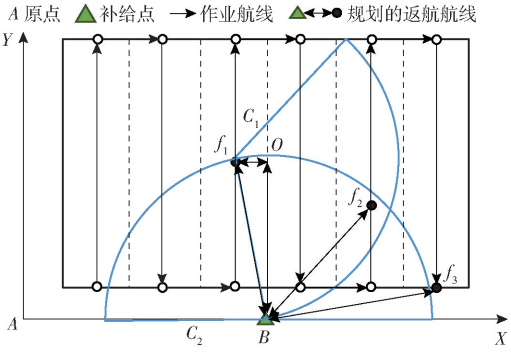

图 5　补给点与返航点的关系

Fig. 5　Relationship of supply point and return points

长边可分为北长边及南长边，补给点的设置并不影响返航航程，但为便于实际作业，起航点与补给点应处于同一侧，减少人员劳动，为方便规划，将补给点与起航点均放置于南长边。

如图 5 所示，未经规划的第 1 个返航点为 f_1，假设与补给点之间的最长安全返航航程为 $H_k/2$。以 f_1 为圆心，$H_k/2$ 为半径，所得到的圆 C_1 与补给点所在直线的交点即为无人机的补给点 B。再以 B 为圆心，$H_k/2$ 为半径，得到的圆 C_2 与作业区域的交界范围即为无人机安全返航的范围。

假设 f_1 坐标为 $\left(ad,\frac{b}{n}\right)(a=1,2,\cdots,n)$，如图 5 所示得 BOf_1 直角三角形，则 $l_{OB}=b/n$，$l_{Bf_1}=H_k/2$，根据勾股定理求得 $l_{Of_1}=\sqrt{l_{Bf_1}^2-l_{OB}^2}=\sqrt{\left(\frac{H_k}{2}\right)^2-\left(\frac{b}{n}\right)^2}$，则第 1 个补给点 B 的坐标为 $\left(ad+\sqrt{\left(\frac{H_k}{2}\right)^2-\left(\frac{b}{n}\right)^2},0\right)$，其水平作用范围 R 为 H_k。如果返航点 f_n 不在补给点 B 的作用范围内，则按需增加补给点，第 n 个补给点的坐标为 $\left(ad+\sqrt{\left(\frac{H_k}{2}\right)^2-\left(\frac{b}{n}\right)^2}+(n-1)H_k,0\right)$。

图 6 为补给点作用下的传统无人机作业航线图，设作业区域宽度 $b=R$，设补给点 $B\left(\frac{l}{2},0\right)$。图中 f_1、f_2、f_3 为返航点，Af_1、Af_2、Af_3 为原返航航线，Bf_1、Bf_2、Bf_3 为规划的返航航线。原返航航线大于规划返航航线，证明设置补给点能够减少无人机的返航航程，进而有效降低能耗。

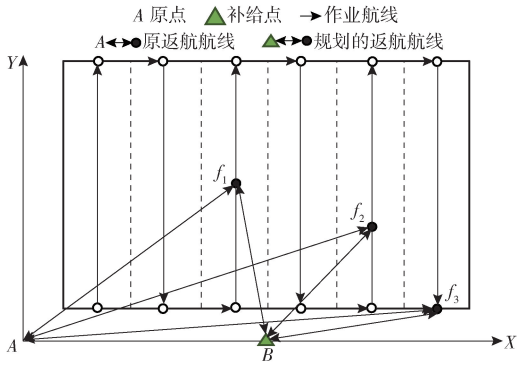

图 6　补给点作用下的无人机作业航线

Fig. 6　UAV operating route map under supply point

2.2.2　补给点与返航点的关系

确定补给点后，返航点在航线段上的选取位点，直接影响到返航航程，从而影响无人机能耗。根据航线最短的原则及已确定补给点的位置，对返航点的选取展开研究。

作业架次关系式为

$$j=\begin{cases}1 & (H<H_p)\\ \operatorname{int}\dfrac{H}{H_p} & (H\geqslant H_p)\end{cases}\tag{2}$$

式中　H——农田总航程

j——无人机作业架次，$j=1,2,\cdots,n$

其中，$H_m>H_p$，H_m 为无人机满能量单次最大航程。

返航点在确定之前被设置为“待确定返航点”。设补给点一侧为 S 方位，竖向航线段为 N 方位，O 为补给点，A、B、C、D、E、F、G 均为待确定返航点，其中 A、C、F 分别为所在航线段的中点，其余为两个横向航线段的两端。返航点及补给点之间的连线段为返航航线。待确定返航点的设置有以下两种情况：

(1) 如图 7b 所示，将返航点设置在竖直航线段上 A 点，$l_{AH}=l_{Bh}$，$l_{OH}>l_{Oh}$，$l_{OA}=\sqrt{l_{AH}^2+l_{OH}^2}>l_{OB}=\sqrt{l_{Bh}^2+l_{Oh}^2}$，因此排除将返航点设置在竖直航线段上的方案。

(2) 图 7c 为将返航点设置在横向航线段的中点 C 上，图 7d 为将返航点设置在横向航线段两端的航点 B 或 D 上。从返航点开始，假设均经过相同的作业航程，使得两个返航点间的直线距离为 $2d$，则经计算得各自返航线段总长 $l_{OC}+l_{OF}\approx l_{OD}+l_{OG}\approx l_{OB}+l_{OE}$。因此，返航点在横向航线段上的选取位置不影响返航路线的长短。

考虑到航线预设时已将横向航线段左右两侧的端点设为航点，直接将预设航点转换为返航点更快速高效。综上所述，将返航点设置在 S 方位横向航线段的左侧或右侧航点上能够保证返航点离补给点距离最近。

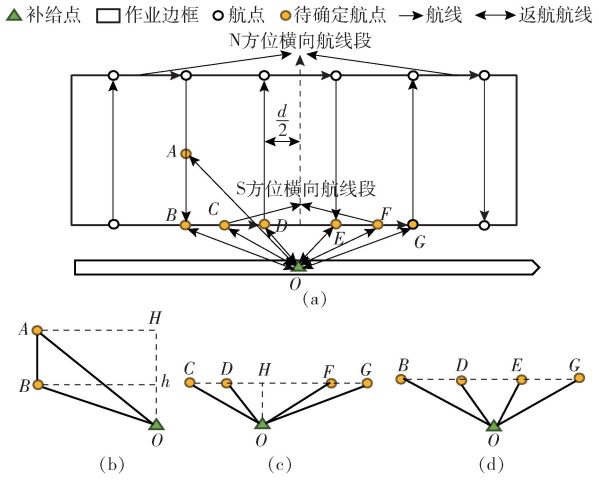

图 7 无人机作业返航点优选示意图

Fig. 7 Optimization sketch of UAV operation return points

2.2.3 最优航线的确定

如图 8 所示,将返航点设置在 S 方位横向航线段的左侧航点上继续进行航线规划算法的研究。

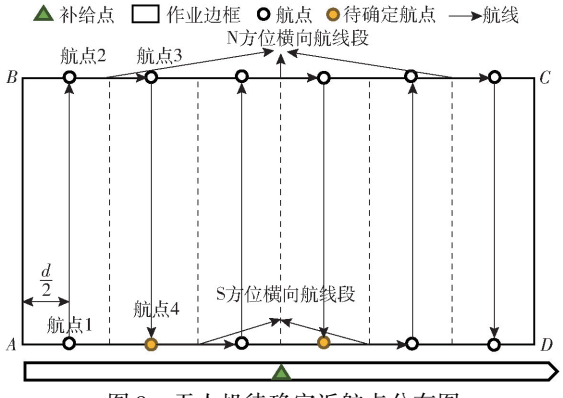

图 8 无人机待确定返航点分布图

Fig. 8 Distribution maps of UAV return points to be confirmed

在实际作业的航线规划中,从起点开始的 4 个连续的航点构成的航线是一次无人机飞行作业往返,图 9 为无人机飞行航点分布图,航点 $4k+1$、$4k+2$、$4k+3$、$4(k+1)$ 构成的航线为一次飞行作业往返,待确定返航点为第 $4k(k=1,2,\cdots,n)$ 个航点。

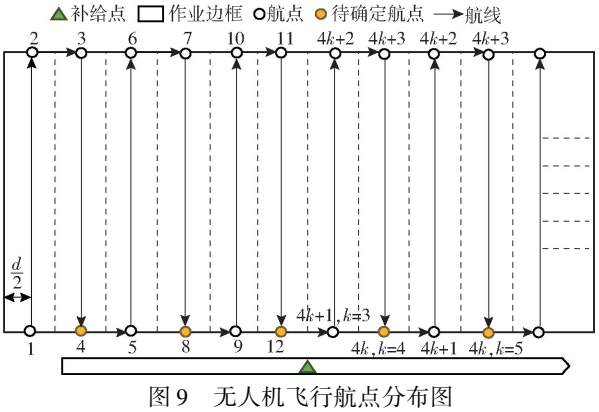

图 9 无人机飞行航点分布图

Fig. 9 Distribution map of UAV flying points

无人机到达待确定返航点时剩余能量不足以完成下一次的飞行作业往返航程时,该待确定返航点即为返航点。因此,从待确定返航点中选择第 1 个返航点需要满足的条件为:

条件① $2k\left(l+\dfrac{d}{2}\right)\leqslant H_p \quad (k=1)$

条件② $2k(l+d)-d\leqslant H_p \quad (k>1)$

条件③ $H_p\leqslant 2(k+1)(l+d)-d$

条件④ $H_b\leqslant H_y$

式中 H_y——无人机到返航点后剩余能量下的航程

H_b——从返航点到补给点的航程

其中 $2(k+1)(l+d)-d$ 为无人机飞到第 $k+1$ 个待确定返航点时已经飞过的航程。

当条件①不成立时无需返航,当条件①成立时,只需判断条件②、③、④;第 j 个返航点为第 $4kj$ 个航点。假设 $k=2$ 时满足条件,$4k=8$,即第 8 个航点为第 1 个返航点,依次类推,第 2 个返航点为第 16 个航点,第 j 个返航点为第 $8j$ 个航点。

返航点选取完毕后,结合现实作业情况,设田埂宽度为 B_T,求得第 n 个补给点 B 的坐标应为

$$\left(kd+\sqrt{\left(\frac{H_k}{2}\right)^2-B_T^2}+(n-1)H_k,0\right) \quad (k=1)$$

$$\left((4k-5)d+\sqrt{\left(\frac{H_k}{2}\right)^2-B_T^2}+(n-1)H_k,0\right) \quad (k>1)$$

将补给点坐标与返航点坐标转换为大地坐标,并连接返航点与补给点构成航线,如图 10 所示,即为最优航线。

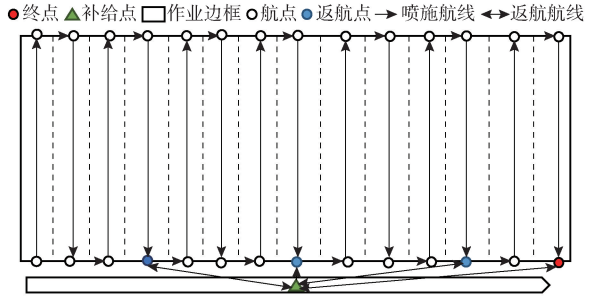

图 10 规划后的作业航线有齿

Fig. 10 Operating channel after planning

2.3 基于最短航线的载荷分配

航线规划算法保证了无人机作业总航程 H 最短,在此基础上,先在喷施作业前根据病虫害严重程度设置每公顷喷施量,根据每公顷喷施量设置喷施流量及飞行作业速度。当农田面积及喷药总量确定后,根据式(2)便可计算出无人机的飞行作业架次 j。通过条件①~④找出所有的返航点后,再根据飞行作业架次 j 和喷施流量 L 计算出每一架次作业有效载荷 Z,该载荷恰好能使无人机作业到返航点时消耗完毕,让无人机空载飞回补给点,通过减少无人

机无效载荷来进一步降低无人机作业能耗，提高续航时长。

$$\begin{cases} Z_{j-1} = \dfrac{H_d}{v}Q \\ Z_j = \dfrac{H-(j-1)H_d}{v}Q \end{cases} \tag{3}$$

式中　Q——喷施流量

H_d——前 $j-1$ 次单架次作业航程

v——作业速度

当作业航程 H 并不一定为无人机满载单架次最大喷施航程 H_p 的整数倍时，为保证作业航程能够精确覆盖作业区域，单独计算第 j 架次作业航程以确定其有效载荷。

2.4　基于能量预警的安全作业

电动植保无人机基本都使用可充电的锂电池，而锂电池电压降到预设的电压值时，就会停止供电，导致无人机突然降落甚至坠机。因此，为保障植保无人机田间安全作业，本文设计了能量预警算法，预先计算出无人机单架次作业所需总能量，并与无人机剩余能量比较，如果剩余能量小于所需能量，则拒绝起飞并提醒用户充电或更换电池。

无人机按照携带载荷喷施作业，空载返航到补给点，再携带载荷从补给点飞到下一航点开始喷施作业的循环方式作业，喷施作业时单位时间内无人机的电机功率、功耗不断变化。因此，无人机作业安全条件为剩余电量大于下一架次作业功耗加上空载返航功耗。根据上述安全条件，通过图 11 的规划流程图，得出是否进行能量预警的条件为

$$\begin{cases} C_j > S\dfrac{C_k - C_{k\&b}}{t_{k\&b}}v + \sum_1^{t_p} C_P & \text{（起飞）} \\ C_j \leqslant S\dfrac{C_k - C_{k\&b}}{t_{k\&b}}v + \sum_1^{t_p} C_P & \text{（拒绝起飞）} \end{cases} \tag{4}$$

式中　C_j——第 $n-1$ 架次降落后剩余电量

S——下一个返航点到补给点的航程

$C_{k\&b}$——$n-1$ 架次到达补给点剩余电量

$t_{k\&b}$——$n-1$ 架次空载飞回补给点的时间

C_k——$n-1$ 架次空载剩余电量

C_P——实时记录下单位时间的平均耗电量

t_p——n 架次喷施所需时间

$\sum_1^{t_p} C_P$——n 架次喷施耗电量

3　仿真

为验证航线规划算法及有效载荷算法均能达到节省能量的目的，本次仿真分为两次进行，先独立验证航线规划算法在航线上节省能耗的程度，再在航线规划算法的基础上结合有效载荷算法进行仿真，验证组合算法在对航线及载荷的规划上对无人机作业过程的能量优化。

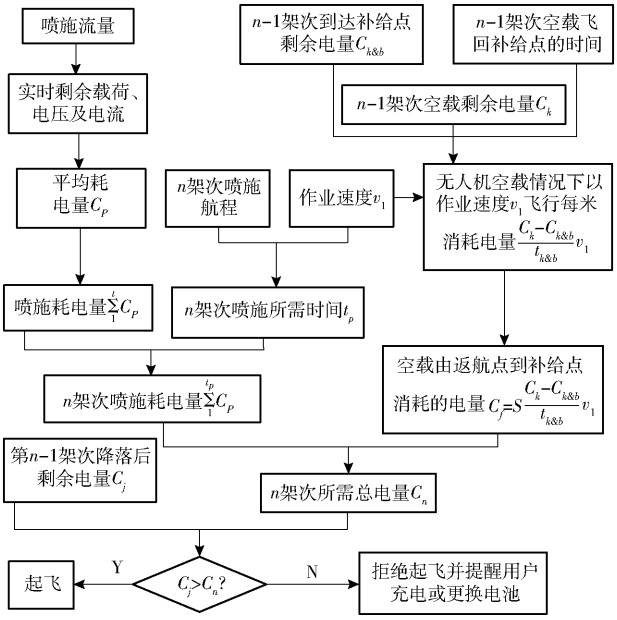

图 11　能量预警规划流程图

Fig. 11　Process of energy early warning

由于无人机作业能耗受到无人机载荷、飞行航程及飞行速度的影响，而且能耗受到作业环境因素影响，比如风速等，能量预警仿真的效果与实际作业效果差距较大，因此能量预警规划算法的仿真改成田间试验。

3.1　基于航线规划算法的能量节省率

选取 190 m×200 m 的一块矩形大面积区域作为无人机的喷施作业区域，喷幅宽度 $d=5$ m，无人机总喷施航程 $H=7\ 785$ m，设无人机作业速度为 4 m/s，药箱总容量为 10 L，喷施流量为 1 250 mL/min，单架次作业满载药液能喷施 1 920 m，最少作业架次为 5 个。航线规划仿真结果如图 12 所示，返航点与补给点的连线为规划后的返航航线，通过计算，采用喷完即返航方式所需要的总返航航程为 1 425.08 m，通过航线规划算法得到的总返航航程为 160.3 m。

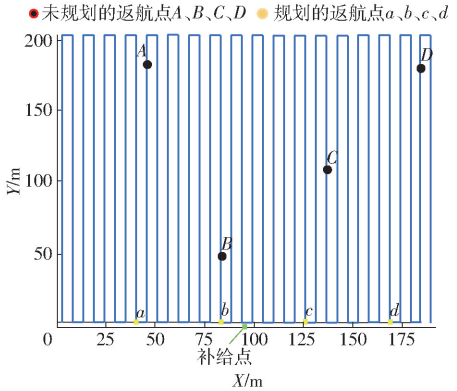

图 12　航线规划仿真图

Fig. 12　Simulation diagram of route planning

仿真结果(航线规划结果)如表 1 所示,能量节省率计算公式为

$$\lambda = \frac{2\left\{\sum_{1}^{n}\left[\sqrt{x_i^2+y_i^2}-\sqrt{(x_j-x)^2+(y_j-y)^2}\right]\right\}}{H}\times 100\% \quad (5)$$

式中 (x_i, y_i)——以药液耗尽为返航条件得到的第 i 个返航点坐标

(x_j, y_j)——航线规划算法得到的第 j 个返航点坐标

计算出能量节省率 $\lambda = 16.25\%$。

表 1 航线规划结果

Tab. 1 Result of route planning

参数	喷完即返航	航线规划算法
作业航线总航程/m	7 785	7 785
最大喷施航程/m	1 920	1 920
最少返航次数	5	5
第 1 次满载喷完返航点坐标/(m,m)	(42.5,182.5)	(37.5,2.5)
第 1 次返航航程/m	187.38	60.05
第 2 次满载喷完返航点坐标/(m,m)	(87.5,47.5)	(77.5,2.5)
第 2 次返航航程/m	99.05	20.15
第 3 次满载喷完返航点坐标/(m,m)	(137.5,107.5)	(117.5,2.5)
第 3 次返航航程/m	174.54	20.15
第 4 次满载喷完返航点坐标/(m,m)	(182.5,172.5)	(157.5,2.5)
第 4 次返航航程/m	251.12	60.05
补给点坐标(m,m)	(0,0)	(97.5,2.5)
总返航航程/m	1 425.08	160.30

3.2 基于组合算法的能量节省率

在相同仿真区域数据下,基于航线规划算法进行有效载荷算法的仿真。有效载荷仿真结果如图 13 所示。采用满载起飞作业喷完载荷即返航的作业航程(喷施作业航程,下同)为 1 920 m,载荷为 10 L,而采用航线规划算法得到的作业航程为 1 635 m,

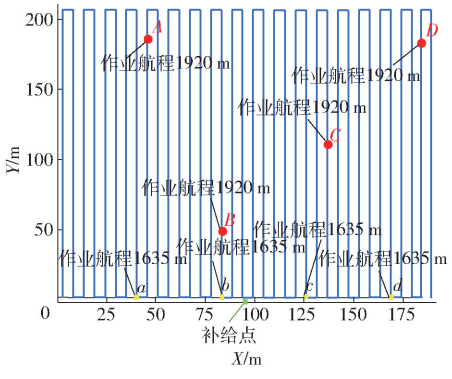

图 13 有效载荷仿真图

Fig. 13 Simulation map of payload

最后架次的作业航程为 1 245 m,根据无人机作业速度可以计算出无人机前 4 个架次作业时间为 408.75 s,第 5 架次作业时间为 311.25 s,由喷施流量为 20.83 mL/s 计算出前 4 个作业架次的有效载荷为 8.514 L,第 5 架次有效载荷为 6.483 L。

仿真结果如表 2 所示,在作业航线总航程为 7 785 m,最大喷施航程为 1 920 m,最少返航次数为 5 次的情况下,组合算法能够节省 9.461 L 载荷。如果仅考虑载荷与能耗成正比的关系,则计算公式为

$$\lambda = \frac{(j-1)(X-Y)+(X-Y_j)}{jX}\times 100\% \quad (6)$$

式中 X——无人机最大载荷

Y——算法规划后的单架次作业有效载荷

Y_j——算法规划出的第 j 作业架次有效载荷

计算出能量节省率 $\lambda = 18.92\%$。

表 2 有效载荷仿真结果

Tab. 2 Result of payload simulation

飞行架次	满载起飞喷完返航		组合算法	
	作业航程/m	载荷/L	作业航程/m	载荷/L
1	1 920	10	1 635	8.514
2	1 920	10	1 635	8.514
3	1 920	10	1 635	8.514
4	1 920	10	1 635	8.514
5	1 050	10	1 245	6.483
共节省载荷/L	9.461			

4 田间试验

根据试验内容及方法,使用如图 14 所示的无人机喷施规划地面站规划喷施作业路线,分别进行了两组室外试验,一组验证航线规划及有效载荷规划的组合算法,另一组独立验证能量预警规划。

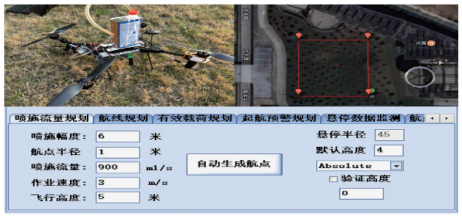

图 14 试验无人机、作业区域及地面站软件界面

Fig. 14 Test UAV, working area and interface of ground control station software

4.1 航线规划及有效载荷规划

为验证组合算法规划与常规的作业规划相较得出的能量节省程度,如图 14 右上所示在华南农业大学荷园(113.373 597° E,23.166 708° N)旁的空地上选取一块矩形作业区域,测得平面坐标。使用的作业无人机如图 14 左上所示,作业主要参数如表 3

所示。进行两次飞行作业试验，第 1 次试验是采用航线规划算法和有效载荷算法规划了航线和载荷的喷施作业试验，第 2 次试验为无人机满载起飞喷施完载荷即返航的喷施作业试验，通过实际试验数据论证组合算法的能量优化效果。作业过程中无人机往返田间所飞行的航线称为返航航线。

表 3　试验区域作业参数

Tab. 3　Working parameters of testing area

参数	数值
作业区域尺寸(长×宽)/(m×m)	60×50
无人机最大载荷 Z/L	1.2
作业飞行速度 v/(m·s^{-1})	3
喷施流量 Q/(mL·min^{-1})	900
总作业喷施航程 H/m	1 000
无人机单架次满载最大喷施航程 H_d/m	240

由航线规划算法规划得单架次喷施航程为 200 m，根据 900 mL/min 的喷施流量，由有效载荷算法规划出单架次作业的最佳载荷为 1 000 mL，经计算得 j = 5 个架次完成作业区域的喷施任务，因此航线规划时需要设置 4 个返航点，经过航线规划和不经过航线规划所得返航点平面坐标如表 4 所示。

表 4　返航点平面直角坐标

Tab. 4　Plane rectangular coordinates of return point

(m,m)

飞行架次	第 1 次试验返航点坐标	第 2 次试验返航点坐标
1	(10.5,3)	(13.5,43)
2	(22.5,3)	(28.5,23)
3	(34.5,3)	(43.5,23)
4	(46.5,3)	(58.5,43)

如图 15 所示，通过无人机喷施规划地面控制站将算法结果转换为无人机飞行航线。

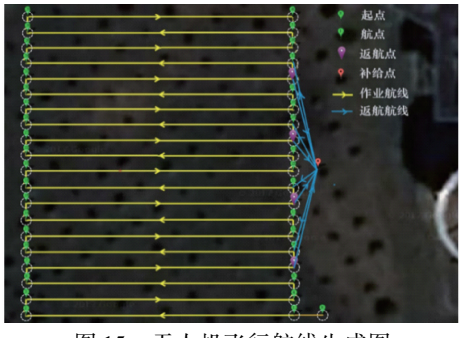

图 15　无人机飞行航线生成图

Fig. 15　Generation map of UAV flying route

第 1 次试验的航线规划如图 16a 所示，蓝点为返航点，绿点为补给点。无人机在实际喷施作业过程中，只在纵向航线上进行喷施作业，因此当无人机补给完成后，是从补给点飞到返航点的相邻下一纵向航线的端点，则返航点、补给点及下一航点的 3 点

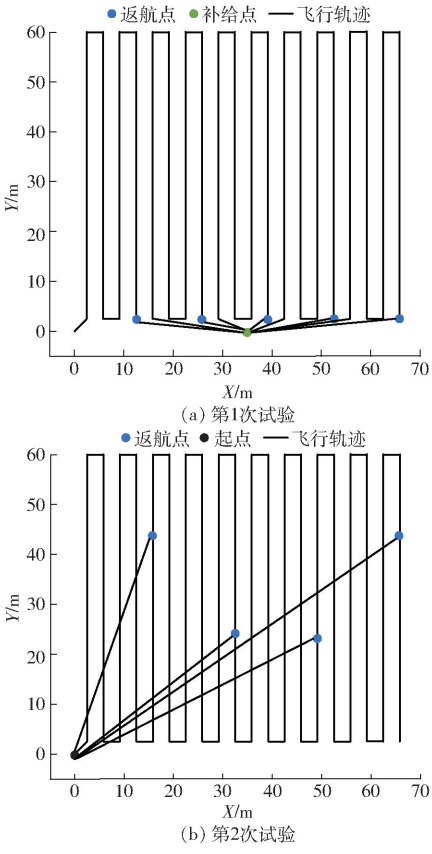

图 16　无人机作业飞行轨迹

Fig. 16　Flight trajectory of UAV

连线段即为单架次的返航航线。单架次作业结束后从返航点飞至补给点时，再按照地面站规划得出的有效载荷提示，重新为无人机装上载荷继续作业，直至完成整个作业区域的喷施任务。试验结果如表 5 所示。无人机总返航航程为 110.4 m，总载荷为5 L。

表 5　航线及有效载荷规划数值结果

Tab. 5　Numerical result of flying route and payload

作业架次	第 1 次试验		第 2 次试验	
	返航航程/m	载荷/L	返航航程/m	载荷/L
1	21.5	1	49.5	1.2
2	28.2	1	85.0	1.2
3	14.0	1	83.4	1.2
4	26.4	1	106.4	1.2
5	20.3	1	58.5	1.2
合计	110.4	5	382.8	6

第 2 次试验，即对照试验的飞行航线和载荷未经算法规划，无人机满载起飞作业，当载荷耗尽后立即返航，补满载荷后返回上一架次的返航点继续作业。如图 16b 所示，蓝点为返航点，黑点为起点，往返线段为返航路线，试验结果如表 5 所示，未采用算法规划的作业方式所需要飞行的返航航程为 382.8 m，总载荷为 6 L。

通过两次试验的试验数据进行对比，可得出以下结论：经过算法规划的作业比未经算法规划的作

业节省了 272.5 m 返航航程,航程节省率为 23.7%;节省载荷 1 L,载荷节省率为 16.7%。再次证明了本算法能够最大程度降低无人机能量及载荷的消耗,具有高度的可行性及有效性。

为了与前文中航线规划仿真方式相对应,本次试验同样不将作业结束点到补给点的航程数据纳入计算。

4.2 能量预警规划试验

在航线规划和载荷规划的基础上,在相同试验条件下进行能量预警规划试验,对能量预警规划的原理及可行性进行验证。

为无人机重新安装一块已确保为满电的电池组(2 600 mA·h),电池组由 6 块电压为 4.2 V 单电池串联组成,满电时总电压为 25.2 V,截止电压为不低于 19.2 V/整组。无人机按照规划后的航线及载荷起飞作业,飞完一个架次时,补充载荷继续作业,当地面控制站能量预警规划模块提示能量不足,不允许起飞作业时,记录下累计作业时间、实时电压、单位时间内平均功率(实时功率累加后除以累计时间)P_1 及剩余电量,试验记录的数据如表 6 所示。

表 6 各架次能量预警规划参数

Tab.6 Parameter value of sorties energy early warning

作业架次	平均功率/W	累计耗电量/(mA·h)	剩余电量/(mA·h)	下架次所需电量/(mA·h)	是否允许起飞
1	572.71	520.67	2 079.30	600.38	是
2	537.33	609.44	1 469.90	551.70	是
3	533.38	564.83	905.10	593.34	是
4	533.20	623.52	281.49	621.10	否

能量预警规划算法是将无人机剩余能量与地面站记录的上一架次所需总能量进行比较,因此理论上能量预警规划试验应当让能量预警下的无人机继续携带载荷飞行以验证可行性,但是为了避免无人机从高空坠毁,将无人机悬停在离地面 10 cm 处进行悬停,记录相关数据。实时电压低至 19.2 V 时,将无人机降落并记录悬停时间 t_x、悬停平均功率 P_2 及悬停耗电量,试验记录的数据如表 7 所示。无人机电池在悬停时的平均放电功率为 450.51 W,小于无人机喷施作业时的平均放电功率;无人机悬停时间 26.70 s。采用较喷施功率小的悬停功率对无人机剩余电量能够支持的作业航程 H_1 进行计算。

$$H_1 = vt_x \tag{7}$$

表 7 无人机能量预警模块数据及悬停能耗数据

Tab.7 Data of UAV energy early warning and hovering

项目	平均功率/W	累计耗电量/(mA·h)	剩余电量/(mA·h)	累计时间/s	实时电压/V
第 4 架次能量预警	533.20	623.52	281.49	86.20	20.759
悬停监测	450.01	146.51	134.98	26.70	19.199

利用式(7)得 H_1 为 80.1 m,与下一架次作业航程 H_2 作对比,得 $H_1 \leqslant 80.1\ \text{m} < H_2$,即便是使用悬停功率进行替代,延长了无人机的剩余作业航程,如果强行起飞,无人机继续作业,无人机一样会在作业中途由于低电量而迫降甚至坠机。由此证明了本能量规划算法可行且有效。

5 结论

(1)作业区域全覆盖航线的预设使用栅格法对工作区域进行划分,并根据作业区域的规则程度和无人机信息设置航点,连成飞行航线。沿途设置补给点可有效减少无人机的返航航线,从而降低无人机能耗,根据补给点及返航点之间的返航路线最短原则,在生成航点上选取无人机的返航点,由此获得无人机最短航程。通过在地面站仿真得出,采用喷完即返航方式所需要的总返航航程为 1 425.08 m,通过航线规划算法得到的总返航航程为 160.3 m,航线规划能量节省率为 16.25%。田间试验对比得出,经过航线规划的作业比未经规划的作业节省了 272.5 m 的返航航程,航程节省率为 23.7%。

(2)在最短航程的基础上,为避免无人机返航时仍携带载荷,产生无谓能耗,结合喷施量和作业架次,对每架次无人机的有效载荷进行规划,使无人机空载返航,以降低能耗。仿真采用有效载荷规划后节省载荷 9.461 L,能量节省率为 18.92%,证明了无人机喷施规划组合算法的可行性。田间试验对比得出,基于航线规划的有效载荷规划作业比未经算法规划的作业节省载荷 1 L,载荷节省率为 16.7%。

(3)为了保证无人机田间安全作业,根据无人机作业时数据变化计算出每一架次所需总能量,并在每次返航时获取无人机剩余能量,将两者进行比较,如无人机剩余能量不足以支持下一架次作业,则进行能量预警,拒绝起飞的同时提醒用户充电或更换电池。进行田间试验验证能量预警规划,在地面站软件发出能量预警时,通过无人机悬停时间和作业速度计算得出的无人机剩余作业航程小于下一架次作业航程,因此无人机继续作业,中途可能会发生迫降或坠机。由此证明能量预警算法是可行的。

参 考 文 献

[1] 蒙艳华,周国强,吴春波,等. 我国农用植保无人机的应用与推广探讨[J]. 中国植保导刊, 2014,34(增刊 1):33 – 39.

[2] 尚春雨,蔡建法,黄思健,等. 我国农用植保无人机应用现状与前景分析[J]. 安徽农业科学,2017,45(30):193 - 195,217.
SHANG Chunyu, CAI Jianfa, HUANG Sijian, et al. Application status and prospect analysis of agricultural UAVs in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017,45(30):193 - 195,217. (in Chinese)
[3] 亓文哲,王菲菲,孟臻,等. 我国植保无人机应用现状[J]. 农药,2018, 57(4): 247 - 254.
QI Wenzhe, WANG Feifei, MENG Zhen, et al. Application status of unmanned aerial vehicle for plant protection in China[J]. Agrochemicals, 2018, 57(4): 247 - 254. (in Chinese)
[4] 林蔚红,孙雪钢,刘飞,等. 我国农用航空植保发展现状和趋势[J]. 农业装备技术,2014,40(1):6 - 11.
[5] 温源,张向东,沈建文,等. 中国植保无人机发展技术路线及行业趋势[J]. 农业技术与装备, 2014(5):35 - 38.
[6] 郭永旺,袁会珠,何雄奎,等. 我国农业航空植保发展概况与前景分析[J]. 中国植保导刊,2014,34(10):78 - 82.
[7] 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/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):53 - 59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):53 - 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20141009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)
[8] 纪明山. 植保无人机应用现状与发展趋势[J]. 新农业,2016(20):38 - 40.
[9] 娄尚易,薛新宇,顾伟,等. 农用植保无人机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(12):1 - 6.
LOU Shangyi, XUE Xinyu, GU Wei, et al. Current status and trends of agricultural plant protection unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(12):1 - 6. (in Chinese)
[10] 徐航煌,张宁,陈学永. 植保无人机在农林工作中的应用研究[J]. 民营科技,2017(4):213 - 214.
[11] 李欣雨,温晓鑫,葛宜元,等. 农业植保无人机发展现状及趋势[J]. 农机使用与维修,2017(8):1 - 4.
[12] 彭孝东,张铁民,李继宇,等. 基于目视遥控的无人机直线飞行与航线作业试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11):258 - 263.
PENG Xiaodong, ZHANG Tiemin, LI Jiyu, et al. Experiment of straight and airline flight operation for farm land based on UAV in visual remote mode[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):258 - 263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20141140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.040. (in Chinese)
[13] 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/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):29 - 33.
WANG Yu, CHEN Haitao, LI Haichuan. 3D path planning approach based on gravitational search algorithm for sprayer UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2):29 - 33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.004. (in Chinese)
[14] 王术波,陈建. 植保无人机飞行安全性研究[C]//中国空天安全会议,2017.
[15] 易建贵. 我国植保无人机的应用前景[J]. 广西农业机械化,2016(2):22 - 23.
[16] YAO P, WANG N, LIU C. 3-D dynamic path planning for UAV based on interfered fluid flow[C]//IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference,2014:997 - 1002.
[17] NURI Ö, OZGUR K S. Optimal UAV path planning in a 3D threat environment by using parallel evolutionary algorithms [C]// ICUAS,2013:308 - 317.
[18] SANDER G, RAY T. Optimal off line path planning of a fixed wing unmanned aerial vehicle(UAV) using an Evolutionary algorithm[C]//Congress on Evolution Computation,2007:4410 - 4416.
[19] CHEN Y, YU J, MEI Y, et al. Modified central force optimization (MCFO) algorithm for 3D UAV path planning [J]. Neurocomputing,2016,171:878 - 888.
[20] ATHINA N, BRINTAKI, IOANNIS K, et al. Coordinated UAV path planning using differential evolution[C]//Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Intelligent Control,2005: 549 - 556.
[21] POURVAZIRI H, NADERI B . A hybrid multi-population genetic algorithm for dynamic facility layout problem[J]. Applied Soft Computing Journal,2014,24:457 - 469.
[22] 姜荣凯. 无人机分布式任务规划技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
JIANG Rongkai. Research on distributed mission programming technology for UAV[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008. (in Chinese)
[23] 陈星. 无人机多目标的航线规划和任务分配算法研究[D]. 南京:南京大学,2018.
CHEN Xing. Research on multi-objective route planning and task allocation algorithm for UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University,2018. (in Chinese)
[24] 徐博,陈立平,谭彧,等. 基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证[J]. 农业工程学报,2015,31(23):173 - 178.
XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Route planning algorithm and verification based on UAV operation path angle in irregular area[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(23):173 - 178. (in Chinese)
[25] 凌诗佳. 无人机航线规划系统的改进设计与实现[J]. 现代电子技术,2017,40(2):99 - 102,106.
LING Shijia. Improved design and implementation of unmanned aerial vehicle route planning system[J]. Modern Electronics Technique,2017,40(2):99 - 102,106. (in Chinese)
[26] 张鲁遥,白梓永,孙瑜,等. 一种无人机自主航线控制策略[J]. 兵工自动化,2018,37(2):39 - 42.
ZHANG Luyao, BAI Ziyong, SUN Yu, et al. Autonomous routes control strategy of UAV[J]. Ordnance Industry Automation, 2018,37(2):39 - 42. (in Chinese)
[27] 陈侠,艾宇迪. 应用改进神经网络的无人机三维航迹规划[J]. 电光与控制,2018,25(9):7 - 11.
CHEN Xia, AI Yudi. Application of improved neural network in 3D path planning of UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2018,25(9):7 - 11. (in Chinese)
[28] 徐博,陈立平,徐旻,等. 多作业区域植保无人机航线规划算法[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(2):75 - 81.
XU Bo, CHEN Liping, XU Min, et al. Path planning algorithm for plant protection UAVs in multiple operation areas[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):75 - 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.010. (in Chinese)