

文章编号: 1001-5078(2024)04-0529-07

· 激光应用技术 ·

新型激光多波束系统供能无人机集群方案研究

高会翔, 曹阳, 李金展

(重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054)

摘要: 由于单无人机执行任务量有限、整体效率低, 故而无人机集群运动以其稳定性好, 执行任务多样性, 易操作, 易控制等特点受到越来越多的关注。在激光供能无人机集群中, 针对无人机的机载能量限制了任务的范围和时长、传统供能方式仅能完成一对一供能导致供能效率较低等问题, 本文提出了一种基于光学相控阵技术的新型激光多波束供能系统, 包括整体的激光无线能量传输方案、系统工作的整体流程、基于领航跟随法的无人机集群编队控制等, 此方案可完成一对多的自调节供能, 满足整个无人机集群的能量需求, 提高传能距离及传输效率, 并通过对无人机集群进行算法控制精准到达预设供能区域。对未来激光无线能量传输应用的领域和方式具有参考价值。

关键词: 激光无线能量传输; 激光相控阵; 无人机集群控制; 领航跟随法

中图分类号: TN249; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.007

Research on a novel laser multi beam system powered unmanned aerial vehicle cluster scheme

GAO Hui-xiang, CAO Yang, LI Jin-zhan

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Due to the limited number of tasks performed by a single drone and the overall low efficiency, the drone cluster movement has received increasing attention for its good stability, diverse task execution, easy operation, and ease of control. In the laser powered drone cluster, a new type of laser multi-beam energy-supply system based on the optical phased array technology is proposed in response to the problems that the on-board energy of the drone UAV limits the range and duration of the mission, and that the traditional energy-supply method can only fulfil one-to-one energy supply resulting in low energy-supply efficiency. The system includes an overall laser wireless energy transmission scheme, the overall workflow of the system, the unmanned aerial vehicle cluster formation control based on the navigation following method. The scheme can achieve the one-to-many self-regulating energy supply to meet the energy demand of the entire unmanned aerial vehicle cluster, improve the energy transmission distance and efficiency, and accurately reach the preset energy supply area through the algorithm control of the unmanned aerial vehicle cluster. It is informative for future areas and modalities of laser wireless energy transfer applications.

Keywords: laser wireless energy transmission; laser phased array; drone cluster control; navigation following method

基金项目: 重庆理工大学研究生教育高质量发展行动计划资助成果项目 (No. qzlcx20233124); 重庆市教委科学技术研究项目 (No. KJQN201901103); 巴南区科学技术局项目 (No. 2019TJ07) 资助。

作者简介: 高会翔 (1999 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光无线能量传播技术。E-mail: 1286905793@qq.com

收稿日期: 2023-06-29; **修订日期:** 2023-08-14

1 引言

目前,无人机(Unmanned aerial vehicles, UAV)的高速发展已成定局,应用已经极为广泛,已覆盖工业,军事和民用等领域^[1-5]。另外为了执行部分特殊性任务,单一无人机已经不能胜任一些任务的执行,无人机集群的应用趋于集群化和协作化^[6-7]。当无人机集群联合执行任务时,由于一些任务的特殊性,同时对多个无人机进行无线供能,从而保证整个无人机集群具有更长的生存时间和任务的可靠性成为难题^[8]。

在无人机任务趋于集群化的背景下,无线能量传输的出现引起了研究人员的广泛关注,目前的无线能量传输主要有电磁感应供能、磁耦合供能、微波供能和激光供能^[9-11]。但电磁感应供能和磁耦合供能传输能量时对距离的要求较高,不适合进行远距离的供能。微波和激光供能适合远距离传输,但是微波发散角太大,不便于接收端接收^[12]。而激光具有密度高、发散角小等特点,因此在供能无人机集群中选择激光无线传能的方式^[13]。袁建华等人根据无人机集群中每架无人机的实时能量消耗提出一种高效的基于实时能量监测的充电策略,考虑了激光供能无人机集群的相关技术问题^[14]。但此方法供能无人机集群只能进行单光束供能,当一架无人机供能完成后再对下一架无人机进行供能,供能效率较低。本文研究方案在使用光学相控阵自动完成跟踪对准的同时也采用分束传能的方式,可进行一对多、多对多供能,大大提高了供能效率且激光相干合成的出现也解决了分束使每束功率减小的弊端。申景诗等人根据分离模块航天器的相关特点、需求等问题,也使用分束传能的方式提出一种相控阵技术的激光能量传输系统^[15]。但此方案使用的是传统的机械转台来完成跟踪对准,灵敏度较低,不能满足应用需求,且要应用在航天领域中难度也会变大。

光学相控阵作为当前的研究热点,在激光雷达,激光通信,高强度激光合成等领域已有大量应用^[16]。但光学相控阵目前还存在一些技术问题,如激光损伤阈值,偏转范围,反应速度以及传能强激光等问题。受激光损伤阈值和相关物理因素限制,激光器的输出功率提升均存在瓶颈;为此,人们在激光器出现后就开展了相干合成技术研究,并在输出功

率、合成阵元数量等方面均取得了飞速发展^[17]。关于偏转范围,传统的光学相控阵偏转范围较小,只有 $\pm 60^\circ$ 的覆盖范围,导致不能满足部分应用需求,一种解决的方式是,以两个“侧面”阵列来对一个前视的主阵列进行补充,以扩大两边的可观测范围。对于反应速度而言,若使用传统的机械转台来完成跟踪对准,会导致灵敏度较低,反应速度较慢。与此相反,相控阵的波束能在不到1 ms内在 $\pm 60^\circ$ 范围内的任何一个位置出现,灵敏度较高^[18]。对于传能强激光的问题,在走向实用过程中,确实存在较多技术问题亟待解决,主要包括高功率单频/窄线宽光纤激光器技术、大阵元数量光束相位调控技术、阵列光束高效合成技术等^[19]。因此文中结合上述问题开展了光学相控阵辅助下激光供能无人机集群的方案研究。

2 新型激光多波束系统供能无人机集群

新型激光多波束系统整体结构和传统激光供能系统最大的区别在于发射端采用激光相控阵的方式来完成对光束的处理,由地面发射端以及空中接收端组成。如图1所示,主要包括地面接收端的电网或蓄电池、激光电源、激光器、新型激光多波束光学系统、控制中心等,接收端的光伏电池、光电转换系统、充电电池等。

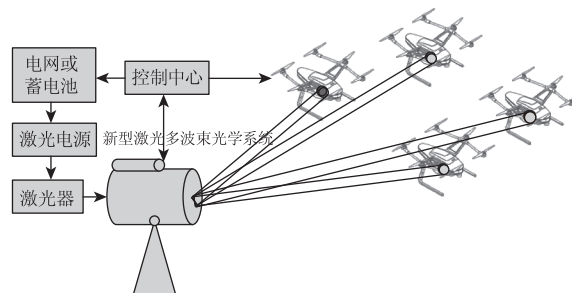


图1 新型激光多波束系统供能无人机集群示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a new laser multi-beam system powered drone cluster

2.1 新型激光多波束光学系统

本文所提出的一种新型激光多波束供能系统,发射端使用激光相控阵来为机身上的光伏电池供能,且可用多束激光合束增加光束光强及光斑均匀性,提升光伏电池接收效率以及传输距离,进而提高激光无线传能系统的总效率。可同时发射多路光束实现一对多的能量传输,且增加辅助阵面拓宽搜索范围将不存在供能盲区,相比传统机械转台跟踪对准速度更快,还具备相位控制、光束控制等功能,可

实现多路光束的非相干或相干合成。如图 2 所示,该系统由控制中心、激光电源、激光器、光学相控阵天线、光束耦合器、相位控制模块以及波控器组成,其中控制中心可以是 PC 或者其他终端设备;波控器包括储能系统、通信系统、管理系统、存储器、运算器以及驱动器组成。

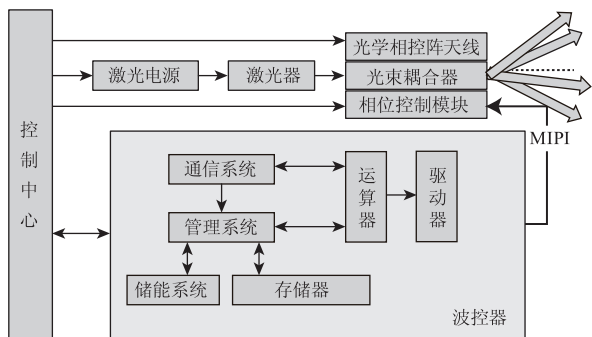


图 2 新型激光多波束光学系统

Fig. 2 New laser multi beam optical system

其中,光学相控阵天线主要用于相位控制,通过控制阵列天线中辐射单元的馈电相位来改变方向图形状的天线,控制相位可以改变天线方向图最大值的指向以达到波束扫描的作用。光束耦合器可将激光器发出的光束耦合至相控阵元。相位控制模块可以接收控制中心的指令,与波控器通过移动行业处理器接口(Mobile Industry Processor Interface, MIPI)相连接。根据波控器中各系统对无人机姿态、位置、能耗等信息的处理,从而对多个光束进行相干和非相干合成并完成光束偏转的任务。在激光相控阵功分网络的作用下,每副相控阵天线发射的光功率可根据激光器输出总功率完成调节,做到按需所求,不浪费多余的能量。

2.2 系统工作流程

首先激光电源根据控制中心发出的指令,开启激光器,数据通信模块负责接收无人机的位置信息等数据传输给控制中心,控制中心收到指令后控制光学相控阵天线自动完成光束的粗扫描;待无人机到达预设供能区域并完成编队后,控制中心根据无人机上光伏电池具体位置以及无人机本身姿态、位置信息等,通过预偏转角度的大小、传输距离、光斑的空间分布等经运算器快速解析和运算后控制相控阵元和移相器来完成精对准,如图 3 所示为光束的粗跟踪、精对准。同时,无人机根据自身的位置、姿态和发射天线位置信息等,

使机身上的光伏电池板指向发射端光学天线方向,辅助完成精对准。控制中心会在精对准完成后和充能全部完成后向无人机分别发出信号以提示无人机开始和结束供能。

在整个传能过程中,当控制中心收到接收端的请求或指令时,控制中心会将激光器、光学相控阵等准备情况通过无线通信的方式传递给无人机集群;无人机集群同样通过无线通信的方式将自身的位置信息、能耗信息等传递给控制中心。

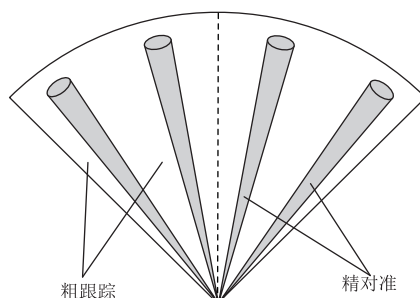


图 3 光束粗跟踪、精对准

Fig. 3 Beam coarse tracking and fine alignment

当无人机数量较多,导致的覆盖范围难以满足传能需求时,需要增加阵面来拓展覆盖范围。如图 4,为了满足更多数量无人机的需求,两个小一点的侧面阵列辅助中央的主阵列,“侧面”阵列在两边提供的是短程覆盖。

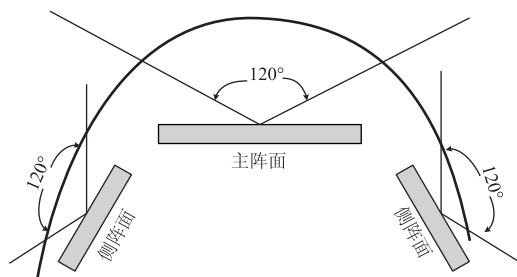


图 4 多面相控阵实现广域覆盖

Fig. 4 Wide-area coverage achieved by multi phased array

2.3 多光束发射方式

2.3.1 一对多发射

当整个无人机集群全部在某一个光学天线的传能范围内,且无人机集群所需要的总功率不超过单副天线可承受最大输出功率,则通过此方向的单副天线完成传能任务。

2.3.2 多对多发射

当整个无人机集群所需的总功率超过单副天线可承受最大输出功率,或者无人机集群数量过多超过单副天线的传能范围时。根据无人机相关

坐标位置和功率需求需要多副发射天线进行多角度发射光束。

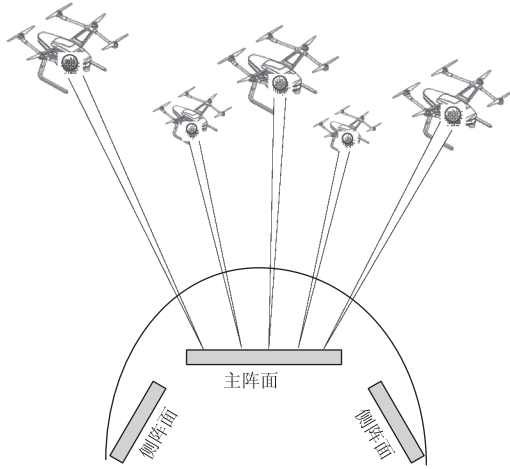


图5 一对多供能

Fig. 5 One to many energy supply

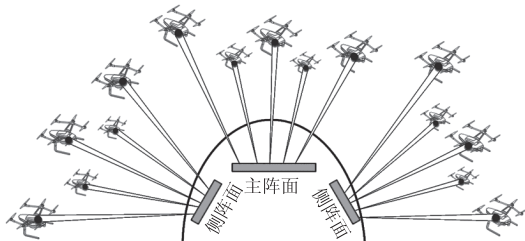


图6 多对多供能

Fig. 6 Multi to multi energy supply

3 无人机集群编队飞行控制模型

3.1 无人机供能集群编队设计

在此系统中,无人机集群编队快速准确的进入传能范围内是供能成功的基本保障。以五架无人机在二维平面呈圆形编队为例,所设计的无人机集群编队如图7所示,在圆形中心区域设置一架领航者,其余四架无人机为跟随者。

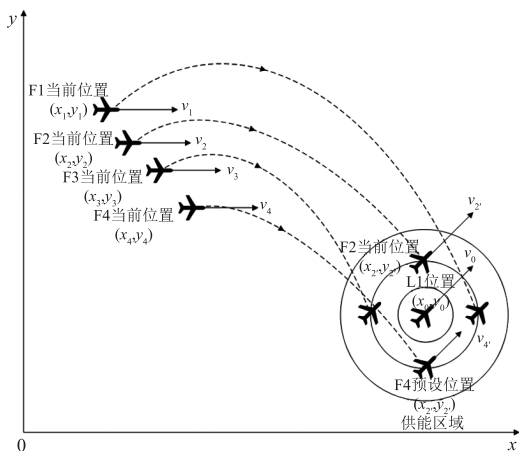


图7 无人机集群编队图

Fig. 7 UAV cluster formation diagram

图中 L1 为领航者, F1、F2、F3、F4 为跟随者,还包括领航者和跟随者的当前位置和预设位置以及无人机集群中每架无人机的飞行方向、轨迹以及圆形供能区域。在仿真中通过领航者的坐标信息和编队队形设计可以解算出跟随者在编队中预设的坐标信息和预设的跟随者飞行方向。

3.2 基于驶向目标行为的跟随者飞行控制

通过 3.1 中算出跟随者的预设位置,也因此需要跟随者跟随领航者运动到预设位置,这种飞行方式为驶向目标行为,示意图如 8 所示。

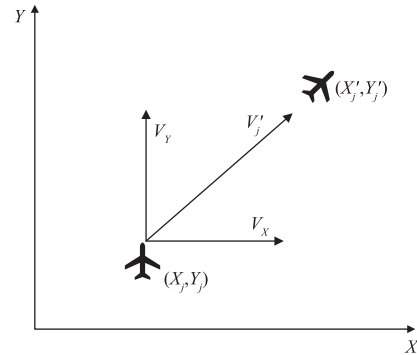


图8 驶向目标二维示意图

Fig. 8 2D schematic diagram of heading towards the target

图中驶向目标行为的输出为无人机的方向向量 V'_j , 在下式表示惯性坐标系中 x 轴和 y 轴的速度分量:

$$\begin{pmatrix} V'_x \\ V'_y \end{pmatrix} = \frac{V}{\sqrt{((x'_1 - x_1)^2 + (y'_1 - y_1)^2)}} \begin{pmatrix} x'_j - x_j \\ y'_j - y_j \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, V 为无人机的实时飞行速度。

3.3 基于圆形编队的队形保持方法

要求跟随者实际位置与预设位置的差值应满足下式:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\sqrt{(x'_j - x_j)^2 + (y'_j - y_j)^2}) = 0 \quad (2)$$

式中, t 为时间, (x'_j, y'_j) 为跟随者预设位置; (x_j, y_j) 为跟随者当前位置。满足式(2)的情况下要求领航者和跟随者之间保持相对静止,应如下式要求:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (V_m - V_n) = 0 \quad (3)$$

式中, V_m 和 V_n 分别为领航者和跟随者的飞行速度。

本文对相关运动规则空间进行如图 9 所示划分,以无人机集群中领航者位置为圆心,领航者周围被划分为靠近空间、保持空间和远离空间。

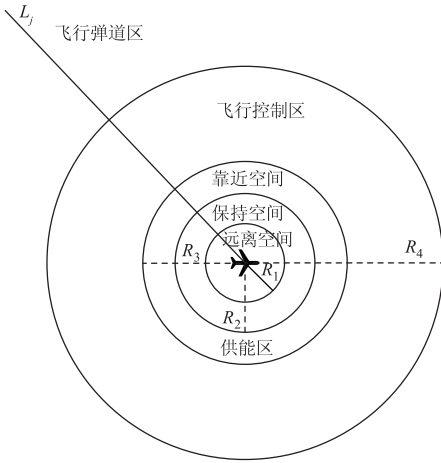


图9 无人机集群运动规则区间

Fig.9 Drone cluster motion rule interval

图中 L_j 为无人机与预设距离, R_1 、 R_2 、 R_3 分别为远离、保持、靠近空间的圆半径。无人机在飞行弹道区域时,以最大速度进入飞行控制区域,进入控制区域后,无人机飞行速度从外到内逐渐减小,到达供能区域后保持编队速度准确的到达每架无人机的预设位置。在供能区域内以领航者到达预设位置为标准并保持固定速度飞行,达到保持队形的目的。无人机在飞行过程中速度变化由下式表示:

$$V_j = \begin{cases} V_{\max}, L_j \geq R_4 \\ V_{\max} - (V_{\max} - V_L) \cdot \frac{R_4 - L_j}{R_4 - R_3}, R_3 \leq L_j \leq R_4 \\ V_L, R_1 \leq L_j \leq R_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$V_i = \begin{cases} V_{\min} + (V_L + V_{\min}) \frac{R_4 - L_j}{R_4 - R_3}, L_j \geq R_3 \\ V_L, R_1 \leq L_j \leq R_3 \end{cases} \quad (5)$$

上式(4)和式(5)中, V_j 为跟随者速度变化; V_i 为领航者速度变化; V_{\max} 为无人机最大飞行速度, V_L 为无人机集群编队速度。

4 无人机二维集群编队仿真

假设3架无人机达到供能区域期间相互之间间隔 50 m,且到达预设位置后三架无人机呈线性排列。无人机集群编队飞行速度为 30 m/s,领航者起始位置为 $(-320, 320)$,跟随者1起始位置 $(-330, 370)$,跟随者2起始位置 $(-280, 300)$,领航者的飞行预设位置为原点 $(0, 0)$,圆形供能区域为以领航者预设位置为原点,半径 250 m 的圆。领航者起始速度为 20 m/s。具体仿真图见图 10 ~ 图 13。

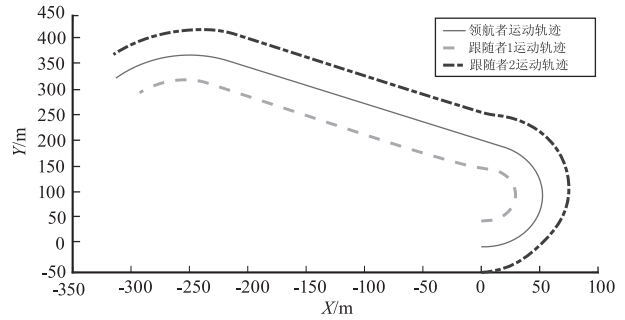


图10 二维飞行仿真图

Fig.10 2D flight simulation diagram

如图 10 所示,三架无人机在不同起始位置出发赶往供能区域,到达供能区域后按照编队队形直线飞行一段时间,为了验证领航跟随法在供能区域内当无人机集群改变飞行方向时是否仍保持稳定,在三架无人机飞行至圆形供能区域的上半圆轴时改变无人机飞行方向,并以此点到预设位置的距离为直径做半圆运动,直到到达预设点,由仿真结果可得出三架无人机在改变飞行方向时仍可以形成预期的编队队形,证明领航跟随法可以满足多架无人机的基本编队要求。

如图 11 所示,领航者收到指令后加速赶往供能区域,按照预设编队速度飞行,等待与其余两架跟随者汇合;两架跟随者在到达供能区域形成编队队形前的速度会大于领航者的速度,到达供能区域并与领航者形成预设编队队形后也按照预设的编队速度飞行。整个飞行过程中领航者和跟随者速度均较平滑,没有出现较大速度误差。

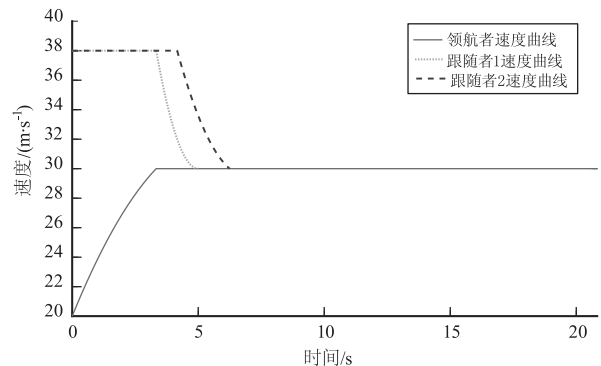


图11 无人机速度变化图

Fig.11 Drone speed variation diagram

由图 12 和图 13 可知,三架无人机均可按照指令从初始位置到达预设位置,到达预设位置后位置误差保持在理想范围内,且到达供能区域并形成编队后领航者与跟随者之间的距离也基本稳定在 50 m 左右,距离误差在 0 ~ 0.8 m 之间的理想范围

内,最高误差率仅为1.6%,仿真结果证明三架无人机均可在理想误差范围内准时到达预设位置。

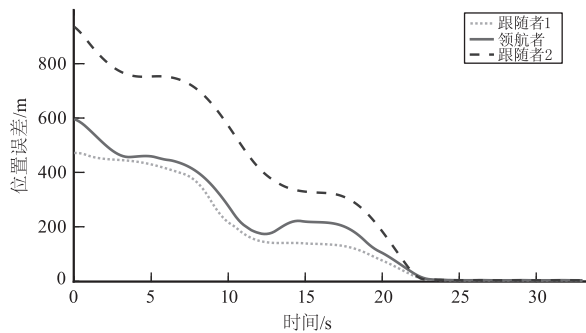


图12 领航者与跟随者距离预设位置误差

Fig. 12 The preset position error of the distance between the navigator and the follower

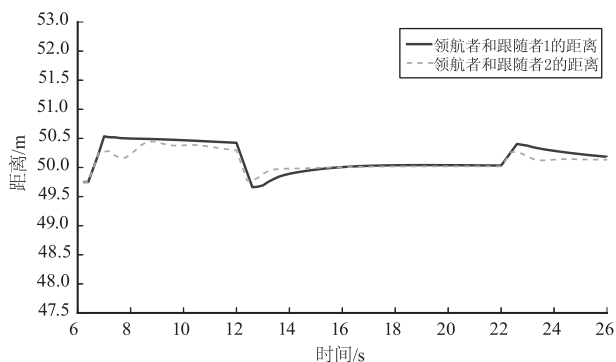


图13 形成集群编队后领航者与跟随者距离差

Fig. 13 Distance difference between navigators and followers after forming a cluster formation

5 结论

本文提出的新型激光多波束系统供能无人机集群的方案,发射端选取激光相控阵技术,可实现对无人机集群的粗跟踪、精对准,另外可以通过控制相位控制模块的相位大小来控制光束偏转,并实现多路激光光束的相干或非相干合成,实现对无人机集群进行供能并成功率分配的问题,提升了激光无线能量传输的供能距离及功率优化。后续设计出供能区域内无人机集群编队队形的相关控制准则并进行仿真完善整个供能系统,由整体仿真结果可知,三架无人机按照期望编队队形飞行至供能区域,领航跟随者法可以满足无人机集群编队队形设计。根据本文提出的运动准则可使无人机在编队飞行时不存在编队误差,集群的飞行速度也较平滑,位置误差率低于1.6%。最后在期望误差内准确进入供能范围内的预设位置。此方案不仅可以实现对无人机集群的供能问题,还可以应用于激光通信、激光雷达、激光

武器等系统,对未来激光多波束供能的相关应用具有参考价值。但此方案仍存在很大的探索空间,比如具体激光器和光伏电池的选型、无人机集群能耗信息的实时监测问题等。

参考文献:

- [1] J Cui, M Liu, Z Zhang, et al. Robust UAV thermal infrared remote sensing images stitching via overlap-prior-based global similarity prior model [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 270 - 282.
- [2] R Thillainayagi, K S Kumar, et al. Bi-dimensional empirical mode decomposition based contrast enhancement technique for UAV thermal images [J]. IETE Journal of Research, 2019, 65: 1 - 8.
- [3] K Kuzelka, P Surovy, et al. Automatic detection and quantification of wild game crop damage using an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with an optical sensor payload: a case study in wheat [J]. European Journal of Remote Sensing, 2018, 5(1): 241 - 250.
- [4] H C Oliveira, V C Guizilini, et al. Failure detection in row crops from UAV images using morphological operators [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(7): 991 - 995.
- [5] G Salvo, L Caruso, et al. Traffic data acquisition by unmanned aerial vehicle [J]. Eur. Journal of Remote Sensing, 2017, 50(1): 343 - 351.
- [6] Qi Shengjun, Jing Li, Wang Yalong. Summary of unmanned aerial vehicle systems and development trends [J]. Aeronautical Missiles, 2018, 400(4): 17 - 21. (in Chinese)
祁圣君, 井立, 王亚龙. 无人机系统及发展趋势综述 [J]. 飞航导弹, 2018, 400(4): 17 - 21.
- [7] Jia Gaowei, Wang Jianfeng. Overview of research on task planning methods for unmanned aerial vehicle clusters [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2021, 43(1): 99 - 111. (in Chinese)
贾高伟, 王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 99 - 111.
- [8] Huang Kai. Research on the application of laser energy supply technology in the range of unmanned aerial vehicles [D]. Yichang: Three Gorges University, 2020. (in Chinese)
黄开. 激光供能技术在无人机续航中的应用研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
- [9] Peng Cheng. Research on high efficiency and stable magnetic coupling wireless energy transmission system [D].

- Chengdu:University of Electronic Science and Technology,2022. (in Chinese)
- 彭斌. 高效率稳定磁耦合无线能量传输系统的研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.
- [10] Wang Yijie, Sun Xilai, Mai Jianwei, et al. Overview of compensation networks for electromagnetic induction radio energy transmission systems under variable parameter conditions[J]. Journal of Electrical Engineering of China, 2022,42(20):7288-7306. (in Chinese)
- 王懿杰,孙熙来,麦建伟,等. 电磁感应式无线电能传输系统变参数条件下补偿网络研究综述[J]. 中国电机工程学报,2022,42(20):7288-7306.
- [11] Liu Yao, Xiao Jinyu, Zhao Xiaoling, et al. Overview of the development and application of radio energy transmission technology[J]. New Electrical Energy Technology, 2023, 42(2):48-67. (in Chinese)
- 刘耀,肖晋宇,赵小令,等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术,2023,42(2):48-67.
- [12] Zhai Yingge. Advantages of space laser communication technology and current research status abroad[J]. Information Recording Materials, 2019, 20(6):70-71. (in Chinese)
- 翟英歌. 空间激光通信技术的优势和国外研究现状[J]. 信息记录材料,2019,20(6):70-71.
- [13] Zhao Changming, Wang Yunshi, Guo Ludeng, et al. Development of laser wireless energy transmission technology[J]. Laser Technology, 2020,44(5):538-545. (in Chinese)
- 赵长明,王云石,郭陆灯,等. 激光无线能量传输技术的发展[J]. 激光技术,2020,44(5):538-545.
- [14] Yuan Jianhua, Li Shang, Huang Kai, et al. Research on the charging strategy of laser powered drone cluster[J]. Laser & Infrared, 2020,50(10):1190-11995. (in Chinese)
- 袁建华,李尚,黄开,等. 激光供能无人机集群充电策略研究[J]. 激光与红外,2020,50(10):1190-1195.
- [15] Shen Jingshi, Cheng Kun, Ma Bo, et al. Application method of laser wireless energy transmission in orbit[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(1):25-30. (in Chinese)
- 申景诗,程坤,马波,等. 激光无线能量传输在轨应用方法[J]. 航天器工程,2015,24(1):25-30.
- [16] Tian Boyu, Peng Yingnan, Hu Qiqi, et al. Research progress and development trend of optical phased array technology[J]. Intense Laser and Particle Beam, 2023, 35(4):6-27. (in Chinese)
- 田博宇,彭英楠,胡奇琪,等. 光学相控阵技术研究进展与发展趋势[J]. 强激光与粒子束,2023,35(4):6-27.
- [17] H Li, H Liu, Y Miao, et al. Research on coherent synthesis based on distributed radar system[C]//2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Xi'an, China, 2022: 1-5.
- [18] Chen Xiaolong, Xue Yonghua, Zhang Lin, et al. Radar: airborne radar systems and information processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2021:252-255. (in Chinese)
- 陈小龙,薛永华,张林,等. 雷达:机载雷达系统与信息处理[M]. 北京:电子工业出版社,2021:252-255.
- [19] Y Aslan, A Roederer, A Yarovoy. Concentric ring array synthesis for low side lobes: an overview and a tool for optimizing ring radii and angle of rotation[J]. IEEE Access, 2021,9:120744-120754.