

文章编号:1001-5078(2024)08-1221-08

· 激光应用技术 ·

## 集群无人机激光充电策略

李大林, 仲元昌, 陈宇, 杨子楚  
(重庆大学电气工程及其自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:**如今无人机(UAV)越来越趋向于群体运用,无人机群中的UAV数量也越来越多,但UAV的续航一直是限制其应用的原因。为了解决无人机群续航较短,充电效率低等问题,本文针对激光供电无人机群,提出一种同时充电的集群策略。利用圆中圆公式推导生成集群充电UAV的初始位置,后利用改进人工势场(IAPF)结合粒子群优化(PSO)算法对其位置进行优化,最后通过MATLAB仿真验证集群结果。结果表明激光光束为1束和7束情况下,集群最高效率为92.6%和91.9%,效率比优化前平均提升12.64%和10.41%,光斑外径下降7.06%和6.27%,有较好的集群效果。该集群充电策略能够解决传统充电方法在多数量无人机群时的调度问题,可以用在无人机群充电领域。

**关键词:**激光充电;无人机群;改进人工势场法;粒子群优化算法

**中图分类号:**V279;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.007

### Laser charging strategy of the cluster UAV

LI Da-lin, ZHONG Yuan-chang, CHEN Yu, YANG Zi-chu  
(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Nowadays, Unmanned Aerial Vehicles (UAV) is increasingly being used in groups, and the number of UAV in cluster is increasing, yet the endurance of UAVs has been the reason that limits its application. In this paper, a cluster strategy of simultaneous charging for laser-powered UAV cluster is proposed to solve the problems of short endurance and low charging efficiency of UAV cluster. The initial position of the cluster charging UAVs are derived through the formula of circle flocking, then optimized by using the Improved Artificial Potential Field (IAPF) combining with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and finally the results are verified by MATLAB simulation at last. The results show that in the case of laser beams of 1 and 7 beams, the highest efficiency of clustering is 92.6% and 91.9%, with an average increase of 12.64% and 10.41% in efficiency over the pre-optimization period, and a decrease of 7.06% and 6.27% in spot OD, which gives a better effect of clustering. The cluster charging strategy can address the scheduling problem of the traditional charging method when there are many numbers of UAV swarms, which can be used in the field of UAVs laser charging.

**Keywords:** laser charging; UAV group; IAPF; PSO

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. U22B2095);国网重庆市电力公司电力科学研究院项目(No. H20221585)资助。

**作者简介:**李大林(2000-),男,硕士研究生,研究方向为激光无线传能,智能算法。E-mail: lidalin@stu.cqu.edu.cn

**通讯作者:**仲元昌(1968-),男,博士,教授,研究方向为通信与测控、能源互联网、机器视觉与人工智能、无线输能。

E-mail: zyc@cqu.edu.cn

**收稿日期:**2023-11-17; **修订日期:**2024-01-02

## 1 引言

当今无人机在军事和民用上的地位越来越高,其应用也趋向群体化,协作化,无人机群中的无人机数量也越来越多。但无人机群的续航问题一直是限制其能力棘手问题。采用激光供能无人机可以有效提高无人机的续航,从而提高整个无人机群的应用能力<sup>[1-2]</sup>。文献[3]对激光充电无人机的运行系统进行了分析,并利用 MATLAB 模拟了在激光充电情况下的工作延长时间。文献[4]利用激光充电无人机通过随机几何的可处理工具来建模复杂的通信系统,并提出一种无人机部署策略来实现能源覆盖和所提供的服务质量之间的权衡。文献[5]重点分析了基于信标激光对准的无人机充电方法、模块组成、工作过程和关键过程,为系统的实现提供了理论依据。文献[6]针对无中断无线可充电无人机网络模型提出了有效的充电时间调度算法(ECTSA),来优化无人机任务和充电的调度时间。文献[7]利用推进功率消耗模型(PPC)研究了激光充电无人机中继网络的联合轨迹与充电功率优化。文献[8]针对激光充电无人机辅助无线充电传感器网络(WRSN)的无人机总飞行时间最小化问题,提出一种求解信息优化的平均年龄的近似算法。文献[9]针对无人机群充电问题提出一种根据发出充电需求的先后顺序进行的调度策略(FCFS),但没有考虑空间的优先级。文献[10]在文献[9]的基础上考虑空间优先级,提出了一种抢占式的调度策略(NJNP)。文献[11]提出一种基于实时能量检测的在线充电策略,其考虑了无人机的随机能量消耗,其策略相比离线策略能够降低无人机群的迫降率。文献[12]以平均队列长度和平均等待时间作为评价指标,结合分布式充电和集中式充电提出一种快速充电排队方案。

目前针对无人机群充电的方案主要为一对一充电,其研究主要集中在充电时的路径策略优化。这类方式针对低数量的无人机群效果较好,但是随着无人机群的无人机数量愈来愈多,一对一的充电方案在迫降率、充电延迟时间等各方面性能将大幅度下降<sup>[11]</sup>。为此本文提出一种集群无人机激光充电优化策略,来解决传统充电方法在大多数无人机群时的调度问题,具有更高的生存率和更低的迫降率。本文后续第二章将介绍集群无人机充电策略及其模

型搭建,并在第三章对该策略进行性能优化, MATLAB 仿真对比结果在第四章呈现,最后在第五章提出结论。

## 2 无人机群充电策略

### 2.1 集群充电策略

本文提出一种多数量无人机同时充电的无人机群集群充电策略,其主要核心是让无人机群中有充电需求的无人机通过智能算法集群,通过地面激光器发射的激光光斑经过扩束、扩散后实现有充电需求无人机集群的整体覆盖式充电,其系统如图1所示。

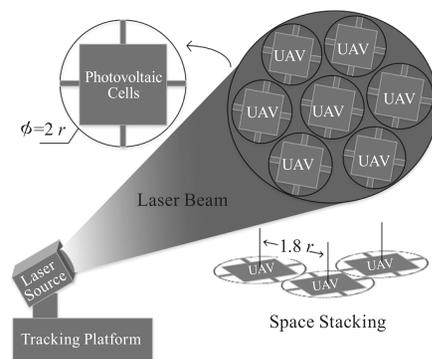


图1 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system

### 2.2 集群充电模型搭建

假设无人机之间的理想间隔半径为 $r$ ;无人机在空间上堆叠的极限容忍半径为 $0.9r$ ;激光的远场光场强度成高斯分布,其有效充电面积的半径为 $R$ ;视照射到无人机理想范围 $r$ 内的激光能被无人机吸收用作充电,则定义无人机群充电效率为:

$$\eta = \frac{E_u}{E_{\text{all}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $E_u$ 表示无人机群总共吸收到的能量; $E_{\text{all}}$ 表示激光器发出的所有能量。为了提高无人机集群的充电效率,应尽可能多的在激光光斑内填充有充电需求的无人机,增大总吸收面积占比来提高效率。则该问题可转化为在半径为 $R$ 的大圆中填充尽可能多的半径为 $r$ 的小圆的圆中圆问题。

针对圆中圆填充问题,采用 Srivastav 总结的公式<sup>[13]</sup>,并在此基础上进行推导从而总结得出不同半径为 $r$ 的 $N$ 个小圆填充时所需的最小外径 $R$ 。Srivastav 的推导过程是从大圆 $R$ 的最外层逐渐向内部填充小圆 $r$ 。由图2所示,当填充第 $i$ 层时,小圆 $r$ 的圆心填充在半径 $R_i = R - (2i - 1)r$ 的同心圆上。

由图 2 可得:

$$R - \frac{(2i - 1)r}{\sin\theta_i} = r \quad (2)$$

$$r = \frac{R}{1 + \frac{2i - 1}{\sin(\frac{\pi}{n_i})}}, n_i \neq 1 \quad (3)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  层填充的小圆  $r$  个数。对式进行变换可得:

$$n_i = \left\lfloor \frac{\pi}{\sin^{-1}\left(\frac{r}{R_i}\right)} \right\rfloor \quad (4)$$

$\lfloor x \rfloor$  为不超过  $x$  的最大整数。当  $i$  取最大值  $m$  时,为最内层填充。当  $0 \leq R_m < r$  时,由于半径小于  $r$  此时填充数量有且仅为 1;当  $r \leq R_m < 3r$ ,此时填充数量可以由式(4)计算;当  $R_m \geq 3r$  时,  $R_{m+1} \geq 0$ ,此时应更新最大值  $m = i + 1$ ,并重新分析。根据上述分析,可以得出  $R_m$  范围应为  $0 \leq R_m < 3r$ ,则最大值  $m$  的取值范围为式:

$$m = \max\left(\left\lfloor \frac{R+r}{2r} \right\rfloor, \left\lceil \frac{R-2r}{2r} \right\rceil\right) \quad (5)$$

其中,  $\lceil x \rceil$  为不小于  $x$  的最小整数。由此可得总填充个数  $N$  为:

$$N = \begin{cases} \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\pi}{\sin^{-1}\left(\frac{r}{R_i}\right)} + 1, 0 \leq R_m < r \\ \sum_{i=1}^m \frac{\pi}{\sin^{-1}\left(\frac{r}{R_i}\right)}, r \leq R_m < 3r \end{cases} \quad (6)$$

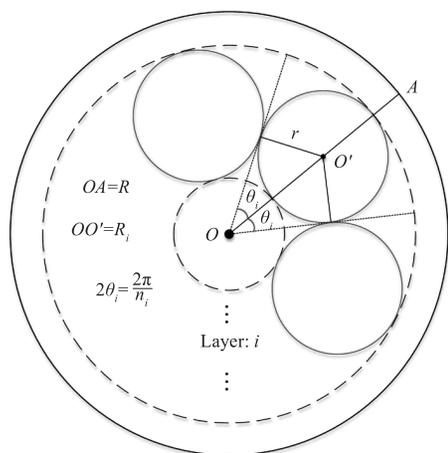


图 2 圆中圆填充示意  
Fig. 2 Circles in the circle

于是,在固定无人机理想半径  $r$  的情况下,可以根据式(5)~(6)利用 MATLAB 画出不同无人机数

量  $N$  的填充图像如图 3 所示(其中,(a)~(f)对应  $N = 5, 7, 8, 13, 20, 26$  的情况)。

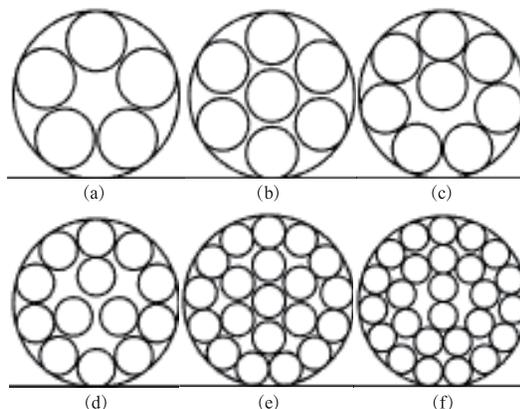


图 3 不同数量的填充情况

Fig. 3 Different amounts of fillings

### 3 无人机群充电策略优化

由图 3 分析可知,由于 Srivastav 的填充方法是边缘优先填充,在  $N = 5, 8, 13, 26$  所得的初始位置在边缘层数填充较密集,但中心较稀疏。而激光的光斑在远场呈高斯分布,与现有所得位置不匹配。为了进一步提高无人机集群充电的吸收效率,本文后续以上节计算所得的填充位置作为起始位置,并利用改进人工势场法(IAPF)结合 PSO 针对激光光斑远场的高斯分布进行位置迭代优化。

#### 3.1 传统人工势场法

传统人工势场法(TAPF)由吸引点和排斥点产生的叠加势场作用得来<sup>[14]</sup>,其作用势场力为:

$$\|F_g^\alpha(q_i)\| = K_\alpha d_{ig} \quad (7)$$

$$\|F_o^\beta(q_i)\| = \begin{cases} K_\beta \left(\frac{1}{d_{io}} - \frac{1}{r_o}\right) \left(\frac{1}{d_{io}^2}\right), d_{io} \leq r_o \\ 0, d_{io} > r_o \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $K_\alpha$  为吸引增益系数;  $K_\beta$  为排斥增益系数;  $q_i$  为无人机  $i$  的位置;  $q_g$  为吸引点位置;  $q_o$  为排斥点位置;  $d_{ig} = \|q_i - q_g\|$  为无人机到吸引点距离;  $d_{io} = \|q_i - q_o\|$  为无人机到排斥点距离;  $r_o$  为排斥力的作用半径,则每一时刻无人机  $i$  收到的合力即为引力和斥力之和:

$$F_{\text{all}}(q_i) = \sum_{g=1}^n F_g^\alpha(q_i) + \sum_{o=1}^m F_o^\beta(q_i) \quad (9)$$

式中,  $n$  为无人机  $i$  此时刻受到吸引作用点的总数,  $m$  无人机  $i$  此时刻受到排斥作用点的总数。对于本文所研究的优化问题,无人机群在集群充电时应该

尽可能的填充激光强度高的区域,同时避免无人机之间因间隙过小产生的干扰碰撞。因此无人机应该被激光照射的高强度区域所吸引,同时对周围的无人机产生作用。但 TAPF 法的目标点通常确定且唯一。并且由于其势场函数仅根据距离进行线性叠加,很容易出现局部极小值<sup>[15]</sup>。故后续本文对 TAPF 法进行改进。

### 3.2 改进人工势场法

针对上节所述 TAPF 法的缺陷,本文针对无人机集群充电问题,对其进行四点改进:

1)为使无人机集群运动时明确作用范围并且平滑作用力度,本文引入冲击函数来定义光滑邻接矩阵。冲击函数为(0,1)连续光滑变化的标量函数,引入冲击函数可以更好构建人工势场,增加势场的光滑度和非线性程度。本文引用冲击函数为<sup>[16]</sup>:

$$\rho_h(d') = \begin{cases} 1, d' \in [0, h) \\ 0.5 \left[ 1 + \cos\left(\pi \frac{d' - h}{1 - h}\right) \right], d' \in [h, 1) \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $h \in (0, 1)$ , 由于本文无人机群迭代的初始位置已有较密排布,无人机只需与相邻的无人机进行作用。故选择相互作用范围为  $3r$ , 理想距离为  $2r$ , 极限容忍距离为  $1.8r$ , 则取  $h$  值为  $2/3$ 。定义无人机  $i$  与无人机  $j$  的空间邻接矩阵  $A$ , 元素  $a_{ij}$  为:

$$a_{ij} = \rho_{\frac{2}{3}}\left(\frac{d_{ij}}{3r}\right) \quad (11)$$

取所有  $a_{ii} = 0$ , 由此定义根据距离的无人机群空间(0,1)邻接矩阵  $A$ 。

2)为解决线性引力场造成的局部极小值问题,本文在无人机线性引力场的基础上叠加根据高斯分布特性来建立非线性引力势场。

#### ①无人机之间的势场:

无人机之间的势场  $\Psi_u(d)$  是一个关于距离  $d$  的可微、非负的函数,并且满足:

$$\Psi_u(d) \begin{cases} \text{单调递减}, d < 2r \\ \text{单调递增}, d \geq 2r \end{cases}$$

在  $d = 2r$  时取得唯一最小值。根据要求定义无人机间的势场函数的负梯度  $F_u(d)$  如下:

$$\|F_u(d)\| = \begin{cases} k_1(d - 2r), d < 2r \\ k_2(d - 2r), d \geq 2r \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $k_1, k_2$  为无人机势场的斥力、引力系数。

#### ②无人机与激光光斑之间的势场:

假设充电时无人机均处于  $z = z_u$  平面上,激光光斑服从高斯分布,束腰在平面  $z = 0$  上,则射出的激光在  $z_u$  处的光斑光场分布为<sup>[17-18]</sup>:

$$U_l(d_{lu}, z_u) = \exp\left[\frac{-d_{lu}^2}{w^2(z_u)}\right] \times \exp\left\{-i\left(kz_u + k\frac{d_{lu}^2}{2R(z_u)} - \arctan\left(\frac{\lambda z_u}{\pi w_0^2}\right) + \phi_l\right)\right\} \quad (13)$$

$$\begin{cases} w^2(z_u) = w_0^2 \left[ 1 + \left(\frac{\lambda z_u}{\pi w_0^2}\right)^2 \right] \\ R(z_u) = z_u \left[ 1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z_u}\right)^2 \right] \\ d_{lu} = \|q_u - q_l\| \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数;  $\lambda$  为激光波长;  $\phi_l$  为附加相位因子;  $q_l$  为激光光斑的中心坐标;  $w_0$  为激光光束束腰半径。定义激光充电光斑在  $z_u$  平面上,光斑有效面积为光场边缘强度下降至  $1/e^2$  时内部包含的面积。无人机应被光斑光场强度高处所吸引,则无人机与激光光斑的势场  $\Psi_l(d)$  应满足可微,非负,在  $d = 0$  时有唯一最小值,在  $d > 0$  时单调递增。

故本文根据上述条件并结合高斯分布,定义无人机与激光光斑之间势场为:

$$\Psi_l(d) = \frac{k_3}{2} [1 - U_l(d_{lu}, z_u)] \quad (15)$$

式中,  $k_3$  为无人机与激光光斑势场的引力系数。忽略相位的影响,可得激光光斑对无人机的势场函数负梯度  $F_l(d)$ :

$$\|F_l(d_{lu})\| = \frac{k_3 d_{lu}}{w^2(z_u)} \exp\left[\frac{-d_{lu}^2}{w^2(z_u)}\right] \quad (16)$$

则可得出  $N$  个无人机所组成的无人机群接收  $M$  束激光充电时,无人机  $i$  每次位置迭代所受势场合力为:

$$F_i = \sum_{j=1}^N F_u(d_{ij}) a_{ij} n_{ij} + \sum_{l=1}^M F_l(d_{il}) n_{il} \quad (17)$$

$$\begin{cases} n_{ij} = \frac{q_j - q_i}{\|q_j - q_i\|} \\ n_{il} = \frac{q_l - q_i}{\|q_l - q_i\|} \end{cases} \quad (18)$$

3) 无人机位置共迭代  $t_{max}$  次, 无人机  $i$  在第  $t$  轮迭代的位置更新为:

$$q_i(t+1) = q_i(t) + \omega(t)F_i(t) \quad (19)$$

式中,  $\omega(t)$  为第  $t$  轮迭代的惯性权重, 本文采用非线性递减惯性权重<sup>[19]</sup>:

$$\omega(t) = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \times \tan\left(\frac{\pi t}{4t_{max}}\right) \quad (20)$$

式中,  $\omega_{max}, \omega_{min}$  为权重的最大值和最小值, 采用这种方式更新迭代权重, 可以在迭代后期加速收敛。

4) 采用粒子群优化算法(PSO)对系数  $k_1, k_2, k_3$  进行寻优, 针对不同数量的无人机群单独求解。PSO 算法具有收敛速度快、参数少、简单易行的优点, 本文构建  $pop = [k_1, k_2, k_3]$  为 PSO 算法中的个体,  $fitness = 1 - \eta$  作为目标函数进行迭代, 则目标函数值越低, 效率越高, 个体适应度越高。迭代过程中也采用  $c$  点中的非线性递减惯性权重来加速收敛。

### 3.3 算法结构

无人机位置优化算法的结构如图 4 所示, 由无人机群和激光束信息输入开始, 得到初始位置, 利用粒子群优化算法得到最佳参数, 后带入参数利用 IAPF 法进行位置优化, 得到最终优化位置结果。详细步骤如下:

1) 初始化参数, 输入无人机群信息: 数量  $N$ , 理想半径  $r$ , 充电高度  $z_u$ ; 激光器信息: 光束数量  $M$ , 波长  $\lambda$ , 束腰半径  $w_0$ ; 迭代参数: 最大次数  $t_{max}$ , 最大和最小权重  $\omega_{max}, \omega_{min}$ , 吸引排斥系数  $k_1, k_2, k_3$ ; PSO 算法信息: 学习因子  $c_1, c_2$ , 种群个数  $sizepop$ , 迭代次数  $maxgen$ , 个体上下限  $pop_{max}, pop_{min}$ , 速度上下限  $V_{max}, V_{min}$ ;

2) 根据无人机群信息, 结合公式(6)得到无人机群初始分布位置  $pos_0$  和光斑半径  $R$ ;

3) 利用 PSO 算法对吸引排斥系数  $k_1, k_2, k_3$  进行寻优, 共进行  $maxgen$  次迭代, 得到最佳个体  $pop_{best} = [k_1, k_2, k_3]_{best}$ ;

4) 代入  $[k_1, k_2, k_3]_{best}$ , 开始  $t$  次迭代, 利用公式(20)计算当前迭代权重  $\omega(t)$ , 公式(11)计算无人机群邻接矩阵  $A(t)$ , 公式(17)计算势场合力矩阵  $F(t)$ ;

5) 更新无人机群位置  $pos(t+1) = pos(t) + \omega(t)F(t)$ , 更新光斑半径  $R$ ;

6) 计算并记录效率、最小间隙、半径等信息;

7) 重复步骤(4)~(6), 直至  $t = t_{max}$ ;

8) 取最小间隙大于极限距离时的最高效率作为最终结果;

9) 结束迭代, 对最终结果进行效率, 最短距离等分析。

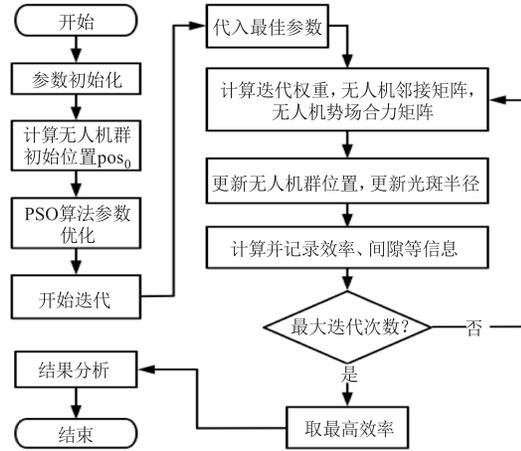


图 4 算法结构图

Fig. 4 The algorithm structure diagram

## 4 仿真及结果

### 4.1 仿真条件

算法参数设置如表 1 所示。

表 1 算法参数设置

Tab. 1 Simulation parameter settings

迭代算法		粒子群优化算法	
$r$	1	$c_1$	1.49445
$\lambda$	$8.15 \times 10^{-7}$	$c_2$	1.49445
$w_0$	2	$sizepop$	20
$z_u$	10	$maxgen$	20
$\omega_{max}$	1	$pop_{max}$	3.5
$pop_{max}$	0.2	$pop_{min}$	0
$t_{max}$	50	$V_{max}$	1
$N$	[2, 60]	$V_{min}$	0.1

### 4.2 优化结果及分析

仿真计算无人机数量[2, 60]的情况, 集群效果在无人机数量适中时最明显, 选取单束激光时无人机数量为 12、19、31, 七束激光时无人机数量为 22、30、37 六种情况来进行分析。

单束激光时由图 5 (其中(a)、(c)、(e)为优化前填充情况, (b)、(d)、(f)为优化后填充情况)可知: 无人机数量为 12 时, 中心数量为 3, 为六角密堆积分集, 最外层无人机向中心聚集后整体成莱洛三

角形形态,效率从 71 % 提升至 86.7 % ;数量为 19 时,中心数量为 7,成六角密堆积,故外层聚集后也成六角密堆积形态,效率从 79.4 % 提升至 92.5 % ;数量为 31 时,中心数量为 4,未达最密堆积,故外层收敛后整体成六角密堆积形态从光斑中心开始填充,但由于数量不匹配,在下方填充时出现对称溢出,效率从 73.7 % 提升至 87.8 % 。

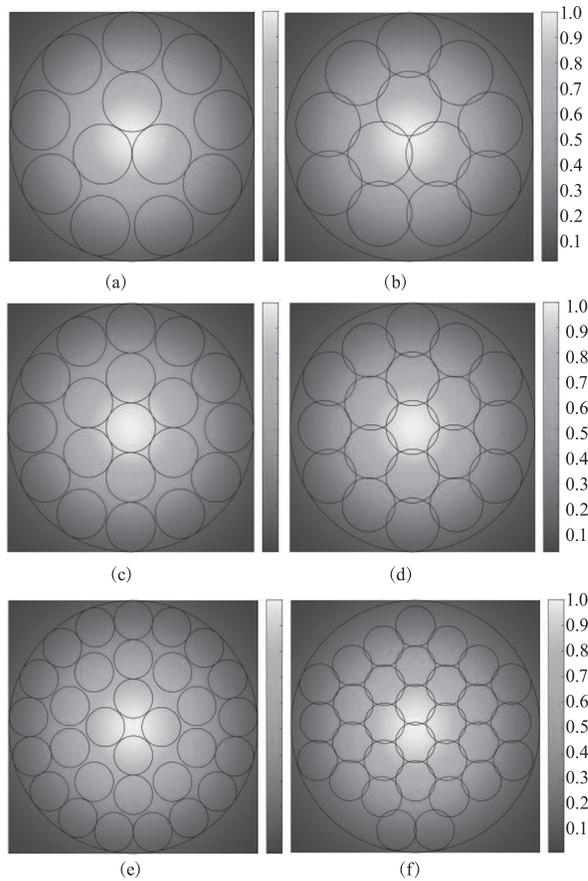
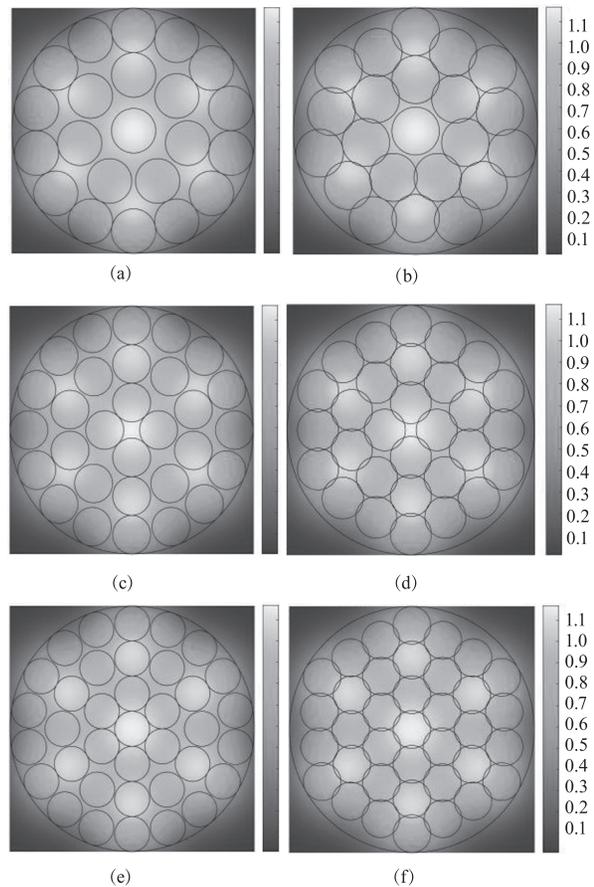


图 5 单束激光填充情况

Fig. 5 Single-beam laser filling situation

七束激光时由图 6 (其中 (a)、(c)、(e) 为优化前填充情况, (b)、(d)、(f) 为优化后填充情况) 可知:无人机数量为 22 时,中心数量为 8,非最密堆积,最外层无人机向 7 束激光聚集,在光斑附近形成密堆积,效率从 72.7 % 提升至 86.6 % ;数量为 30 时,中心数量为 4,聚集后成六角密堆积形态,效率从 73.5 % 提升至 87 % ;数量为 37 时,中心数量为 7,为六角最密堆积,聚集后以七束激光为中心分布六角最密堆积,且整体也成六角最密堆积,效率从 76.5 % 提升至 90.7 % 。展示的六种情况在优化后均由光斑中心以尽可能以最密堆积形态向外延伸,从而保证整体效率的明显提

升。PSO 算法优化过程中的适应度下降曲线由图 7 所示。图 7 中图例 1\_12 表示单束激光无人机数量为 12,其他图例以此类推。



优化前:(a),(c),(e) 优化后:(b),(d),(f)

图 6 七束激光填充情况

Fig. 6 Seven-beam laser filling situation

由图 7 可见,PSO 参数优化在第 15 次迭代后均收敛至最佳,参数优化后在 7\_30 时提升程度最大为 24 % ,其余情况平均提升 13.5 % ,证明 PSO 算法的有效性。

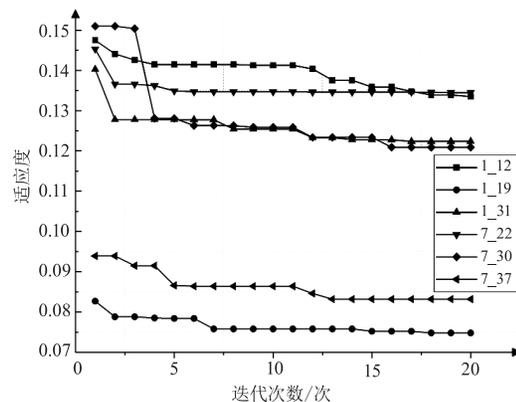


图 7 PSO 适应度迭代曲线

Fig. 7 PSO fitness iteration curve

由效率图 8 对比可知,单束激光和七束激光优化后总效率相差不大,在无人机数量为 7,19,37 时,填充数量满足六角密堆积,有最大效率。在无人机数量小于 10 时,优化前后效率提升较低;无人机数量大于 10 时,优化前效率趋于稳定值 74 % 左右,优化后效率趋于稳定值 86 % 左右,效率提升明显。采用 TAPF 结合 PSO 进行优化时会出现类似  $N = 20$  时无法收敛的情况,这是由于 TAPF 的线性势场存在局部最小值而无法收敛,该情况在七束激光时更明显,其原因是 7 束激光时的线性叠加势场的局部极小值更多。IAPF 算法的优化结果在无人机数量为 [10,37] 时要优于 TAPF 算法; [37,60] 时两者相差不大,但 IAPF 算法收敛率更高。无人机数量为 [2,60] 时,算法结果较优化前效率平均情况对比如表 2 所示。

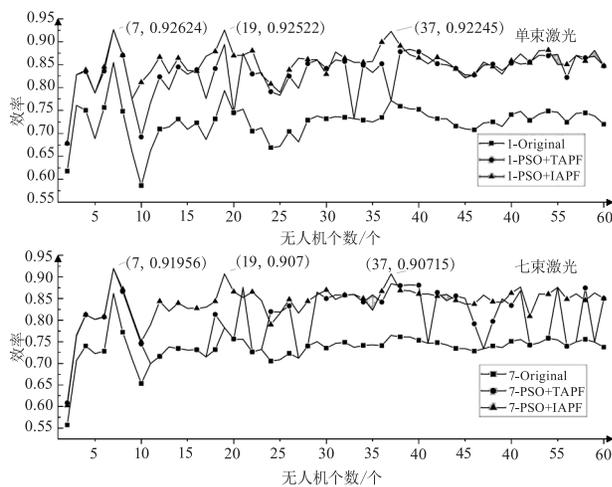


图 8 效率对比图

Fig. 8 Efficiency comparison

表 2 性能对照表

Tab. 2 Performance compare table

事项	TAPF	PSO + TAPF	PSO + IAPF
效率 $N_L = 1$	7.85 %	10.59 %	12.64 %
提升 $N_L = 7$	6.32 %	6.49 %	10.41 %
外径 $N_L = 1$	5.1 %	5.20 %	7.06 %
下降 $N_L = 7$	4.54 %	4.66 %	6.27 %
最小 $N_L = 1$	1.82r	1.81r	1.80 r
间隙 $N_L = 7$	1.86r	1.82r	1.81 r

由表 2 分析可得,PSO + IAPF 算法在平均情况下均优于 PSO + TAPF 算法,在  $N_L = 1$  的情况下平均效率分别多提升 4.79 % 和 2.05 %,外径分别多

下降 1.96 % 和 1.86 % ;在  $N_L = 7$  的情况下分别多提升 4.09 % 和 3.92 % ,外径分别多下降 1.73 % 和 1.61 % ,而且 PSO + IAPF 算法的结果在不同情况下都拥有最小的间隙,表明其对无人机的集群有着最高的效率和最大的程度。

### 5 总结

本文提出了一种无人机群的集群充电策略,后利用改进人工势场法结合粒子群优化算法(IAPF + PSO)对集群策略进行优化,使其整体集群程度更高,平均效率在单束激光充电时提高 12.64 % ,在七束激光时提高 10.41 % 。采用该策略进行无人机群充电时应优先调度 7,19,37 数量的无人机进行集群充电以获得最大效率。该集群充电策略能够解决传统充电方法在多数量无人机群时的调度问题,并且可以运用在动态的集群算法中,适用于无人机群充电领域。

### 参考文献:

- [1] Prithvi Krishna Chittoor, Bharatiraja Chokkalingam, Lucianmihet-Popa. A review on UAV wireless charging: fundamentals, applications, charging techniques and standards[J]. IEEE ACCESS, 2021, 9:69235 – 69266.
- [2] Wael Jaafar, Halim Yanikomeroglu. Dynamics of laser-charged UAVs: a battery perspective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(13):10573 – 10582.
- [3] Balaji Kirubakaran, Jiri Hosek. Extending UAV's operational time through laser beam charging: system model analysis[C]//2022 45th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2022: 322 – 328.
- [4] Mohamed-Amine Lahmeri, Mustafa A. Kishk, Mohamed-Slim Alouini. Laser-powered UAVs for wireless communication coverage: a large-scale deployment strategy [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(1):518 – 533.
- [5] Ying Jiaju, He Yongqiang. UAV laser charging technology based on beacon laser alignment[C]//Second Symposium on Novel Technology of X-Ray Imaging, 2019:11068.
- [6] M Li, L Liu, J Xi, et al. ECTSA: an efficient charging time scheduling algorithm for wireless rechargeable UAV network[C]//2021 IFIP Networking Conference (IFIP Networking), Espoo and Helsinki, Finland, 2021:1 – 9.
- [7] Y I Park, D Y Kim, J W Lee. Joint trajectory and charging power optimization for laser-charged UAV relaying net-

- works[C]//2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (IC-TC), Jeju Island, Korea, 2022: 224 – 229.
- [8] Chuanwen Luo, Ning Liu, Yunan Hou, et al. Trajectory optimization of laser-charged UAV to minimize the average age of information for wireless rechargeable sensor network [J]. *Theoretical Computer Science*, 2023, 945: 113680.
- [9] He L, Gu Y, Pan J, et al. On-demand charging in wireless sensor networks: theories and applications [C]//IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, IEEE, 2013: 28 – 36.
- [10] He L, Gu Y, Pan J, et al. Evaluating the on-demand mobile charging in wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans. Mobile Comput.* 2015, 14(9): 1861 – 1875.
- [11] Yuan Jianhua, Li Shang, Huang Kai, et al. Research on cluster charging strategy of laser power supply UAV [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(10): 1190 – 1195. (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.
- [12] Wang Yunzhe, Xu Guoning, Wang Sheng, et al. Optimization method of charging and queuing of bee swarm UAV [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 41(10): 323928 – 1 – 11. (in Chinese)  
王云哲, 徐国宁, 王生, 等. 蜂群无人机充电排队优化方法 [J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 323928 – 1 – 11.
- [13] Ajeet K Srivastav. A generalized expression for filling congruent circles in a circles [J/OL]. <https://arxiv.org/pdf/2006.03819v/>
- [14] Liu Yunping, Xu Ze, Zhao Zhongyuan, et al. Algorithm based on improved artificial potential field method [J]. *High Technology Letters*, 2021, 31(5): 527 – 533. (in Chinese)  
刘云平, 徐泽, 赵中原, 等. 基于改进人工势场方法的多无人机编队避障算法 [J]. *高技术通讯*, 2021, 31(5): 527 – 533.
- [15] Wang Qinglu, Wu Fengguo, Zheng Chengchen, et al. Uav track planning based on optimized artificial potential field method [J]. *System Engineering and Electronics*, 2023, 45(5): 1461 – 1468. (in Chinese)  
王庆禄, 吴冯国, 郑成辰, 等. 基于优化人工势场法的无人机航迹规划 [J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(5): 1461 – 1468.
- [16] Reza Olfati-Saber. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 401 – 420.
- [17] He Yihuan, Zhang Enhua, Wang Zhihai, et al. Analysis of the incoherent synthesis effect of fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(6): 829 – 833. (in Chinese)  
贺也洹, 张恩华, 王志海, 等. 光纤激光非相干合成效果分析 [J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 829 – 833.
- [18] Su Y, Wan M. High energy laser system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 14 – 16.
- [19] Kang Lanlan, Dong Wenyong, Song Wanjuan, et al. Non-inertial opposition-based particle swarm optimization with adaptive elite mutation [J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(8): 66 – 78.