

激光传能网络的双层优化能量路由策略研究

袁奥特^{1,2}, 蔡涛^{1,2†}, 蓝建宇³

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 电力电子与能量管理教育部重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;

3. 上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘要: 激光传能系统的供能质量差和传能效率低是制约其发展的重要因素。为提升传能网络的鲁棒性, 减少传能损耗, 对网络的路由策略进行了研究。通过对网络架构的分析和对激光传输效率计算式的修正, 将传能网络抽象成权重图。针对传能网络多维耦合的特点, 提出了一种时空解耦下的双层优化策略。第1层优化在空间上进行, 基于Dijkstra算法求取状态最优的传能路径; 第2层优化在时间上进行, 以最优传能路径为基础, 基于内层迭代粒子群(PSO)算法优化网络中各设备的充/放电功率。通过对一个无人机巡航系统进行仿真, 验证了所提出的双层优化策略的有效性和可行性。

关键词: 激光传能; 路径规划; 效率优化; 粒子群算法; Dijkstra算法

引用格式: 袁奥特, 蔡涛, 蓝建宇. 激光传能网络的双层优化能量路由策略研究. 控制理论与应用, 2025, 42(4): 703–712

DOI: 10.7641/CTA.2023.30085

Energy routing strategy of laser power transmission network based on two-layer optimization

YUAN Ao-te^{1,2}, CAI Tao^{1,2†}, LAN Jian-yu³

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan Hubei 430074, China;

2. Key Laboratory of Power Electronics and Energy Management for Ministry of Education of China (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan Hubei 430074, China;

3. Shanghai Space Power Research Institute, Shanghai 200245, China)

Abstract: The low transfer efficiency and poor robustness are important obstacles restricting the development of laser power transmission. The routing strategy of the network has been studied for efficient and reliable energy transfer. The paper analyzed the architecture of the laser power transmission network, modified the calculation formula of laser transmission efficiency in the atmosphere, and abstracted the network into a weight graph. Considering the multidimensional coupling characteristics in the laser power transmission network, a two-layer optimization strategy with spatio-temporal decoupling is proposed. The first layer optimization realizes path planning based on Dijkstra algorithm to find the most efficient energy transmission path. The second layer optimization is based on the optimal paths, takes the total loss as the objective function, builds mathematical models and solves it with inner iterative PSO algorithm. Through the simulation of an unmanned aerial vehicle (UAV) cruise system under different control strategies, the effectiveness and feasibility of the two-layer optimization strategy are verified.

Key words: laser power transmission; path planning; efficiency optimization; particle swarm optimization; Dijkstra algorithm

Citation: YUAN Aote, CAI Tao, LAN Jianyu. Energy routing strategy of laser power transmission network based on two-layer optimization. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(4): 703–712

1 引言

无线能量传输技术主要有:电磁耦合感应式传能、磁场共振式传能、微波式传能以及激光式传能^[1-2]。电磁耦合感应式基于电磁感应原理进行能量传输,磁场共振式基于电磁谐振进行能量传输,这两种传能方式均属于近距离传能,传输距离在厘米级,不适用于军事或航天领域对远距离传能的要求。微波式传能和激光式传能的传输距离均可达千米级,可运用范围更为广泛。相比于微波式传能,激光式传能设备的形小体轻,而且激光相比于微波具有更好的方向性,能量更为集中,同时也不会干扰其他设备间的正常通信,因此,激光式传能在远距离传能领域具有不可比拟的优势。目前,国内外对于点对点式激光无线传能及关键设备的研究较多。文献[3]研究了脉冲型激光二极管在激光传能领域中的应用,着重分析了驱动电压的幅值、频率及占空比对激光二极管工作点的影响。文献[4]对激光器的控制方法进行了研究,设计了一种双闭环控制器来调节激光器的输入电流占空比,从而提高激光传能系统的效率。文献[5]进行了点对点的无线传能实验,采用激光供能实现了电动风筝在50 m高空长时间飞行的实验,验证了激光无线传能的可行性。文献[6]设计了一种转换效率更高的泵浦激光器,并对利用激光传能为电动汽车充电的方案做了可行性分析。国外已有多家机构开展了激光无线传能的点对点实验及有效性分析^[7-8],但尚未有关于激光无线传能网络调控策略的研究。对于无线传能网络调控策略的研究在微波领域相对完善。文献[9]以传能效率和系统成本为目标,基于内外双层优化算法对微波式无线传能网络进行优化,用于指导中继端的位置排布和数量选择。文献[10]研究了基于蚁群算法的磁场共振式传能网络的组网问题,实现了对传能路径剩余电能和传能效率的优化。文献[11]采用元胞遗传算法对微波式传能网络进行了路径寻优,并通过仿真验证了该算法的可行性。因此,相比于其他无线传能方式,激光式无线传能的研究多集中于单体设备或者点对点的单一路径传能系统,对于激光无线传能网络优化控制的研究较少,但激光无线传能网络的优化控制对提升整个传能系统的效率至关重要。

基于此,本文对激光无线传能网络进行了分析与建模,着重分析了激光在大气中的传输效率计算式。针对激光传能网络多路径多变量强耦合的特点,提出了一种时空解耦的双层优化策略。在空间上,第1层优化基于Dijkstra算法的思想进行路径寻优,筛选出传能状态最佳(气象条件好且无遮挡)的路径组合。在时间上,第2层优化以第1层优化的结果为基础,基于内层迭代粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)进行充放电功率优化,从而减少系统的传能损耗,提高系统的传能效率。

2 激光无线传能网络模型

2.1 激光无线传能网络拓扑

激光无线传能网络由激光发射端、中继端以及接收端组成。图1为一个典型激光无线传能网络的示意图,其含有1个激光发射端、1个接收端以及若干个中继端。

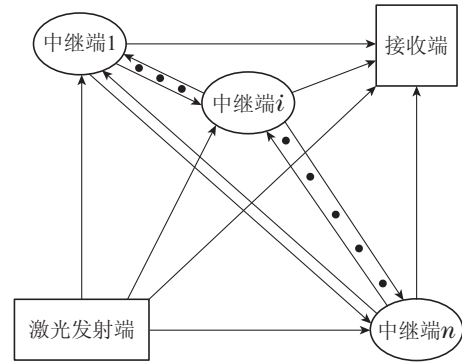


图1 激光无线传能网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser power transmission network

激光发射端通常由激光器、准直单元以及跟瞄单元组成。其能够将电能转换为激光能,并以激光束的形式发出能量,跟瞄中继端或者接收端上的激光光伏电池。激光发射端为系统的能量输入接口。中继端通常由激光光伏电池、变换器、蓄电池以及激光器等组成,其能够实现能量的中继传输,中继端可以将接收到的激光能量转换为电能,存储至蓄电池中,也可以将蓄电池中的电能转换为激光能,传输给后续设备。接收端通常由激光光伏电池、变换器以及蓄电池组成,其能够接收激光能量。

系统的控制目标是:在接收端运动的过程中,确定各时间段内由发射端至接收端的传能路径组合,确定发射端和中继端的充放电功率,在满足系统供能质量要求的前提下,尽可能减少系统损耗。考虑到激光在大气中的传输效率是距离和气象条件的函数、由发射端至接收端的路径组合数过多以及功率确定和路径确定之间存在耦合性这3个因素,本研究从系统复杂度的角度上选择双层优化的控制策略。先进行路径优化,用于确定各时间段内由发射端至接收端的传能路径,再进行功率优化,用于确定各时间段内发射端和中继端的充放电功率。

2.2 激光无线传能网络权重图

以图1为例,该网络中包含1个激光发射端、1个接收端及 n 个中继端,则一共存在 $(n^2 + n + 1)$ 条可能存在的传能路径。从激光发射端至接收端存在大量的可选路径组合,本节将描述激光无线传能网络权重图的建立机制,为最优路径的求解提供基础。

2.2.1 激光在路径中的传输效率

为了建立网络的权重图, 首先要求解出激光在路径中的传输效率.

以比尔-朗伯特定律 (Beer-Lambert law) 为基础, 对激光在路径中的传输效率进行修正, 推导出更贴合实际的效率计算式.

激光在大气中的衰减规律符合比尔-朗伯特定律, 其计算式如下所示:

$$e_0(D) = \exp[-\int_0^D \mu(r, \lambda) dr], \quad (1)$$

$$\mu(r, \lambda) = \mu_a(r, \lambda) + \mu_s(r, \lambda) + \mu_w(r, \lambda), \quad (2)$$

式中: D 为源节点与目标节点间的距离; $\mu(r, \lambda)$ 为衰减系数; $\mu_a(r, \lambda)$, $\mu_s(r, \lambda)$ 和 $\mu_w(r, \lambda)$ 分别表示分子散射与吸收、气溶胶以及气象条件对激光功率的影响, λ 为激光波长. 上述衰减系数均可通过经验公式计算.

激光在传输过程中会逐渐发散, 在接收处的激光光斑面积可能会大于激光光伏电池板的面积, 使激光能量无法完全被吸收, 为此引入面积系数进行修正. 而且, 激光在实际传输时可能被障碍物(山体楼宇等)遮挡, 此时传输效率应当为0, 引入遮挡因子对此进行修正. 综上所述, 激光在路径中的传输效率计算式为

$$e(D) = \exp[-\int_0^D \mu(r, \lambda) dr] \cdot \min\left\{\frac{S_r}{\pi(L \tan \frac{\beta}{2})^2}, 1\right\} \cdot q_k, \quad (3)$$

式中: S_r 为激光光伏电池板的面积; L 为激光源至激光光伏电池板的距离; β 为激光源的散射角; q_k 为遮挡因子, 当激光被遮挡时其取值为0, 未被遮挡时取值为1.

2.2.2 网络权重图的构建

为了对网络进行分析, 根据实际激光传能网络构建相应的权重图. 在权重图中, 激光发射端抽象成发射节点T, 接收端抽象成接收节点R, 中继端抽象成中继节点1至中继节点 n , 将传能路径抽象成边(由源节点至目标节点的边), 将目标节点设备的能量转换效率和激光以该边为路径的传输效率的乘积, 作为该条边上的权重, 构建的网络权重图如图2所示.

根据激光无线传能网络权重图可列写权重邻接矩阵, 利用改进的Dijkstra算法求解权重邻接矩阵即可求得效率最优的传能路径, 实现路径寻优, 从而避开气象条件差或存在遮挡的传能路径, 确保激光传能的供能质量和可靠性.

2.3 充放电功率优化模型

当接收端的运动轨迹已知时, 基于激光无线传能网络权重图和Dijkstra算法可预先进行路径优化, 得到全任务周期的效率最优传能路径. 再将全任务周期按时间单元分成若干个任务段, 在每个任务段内认为系

统的参数均为常量, 以每个任务段内激光发射端的输入电功率及中继端蓄电池的充放电功率为决策变量, 以全任务周期的总损耗为目标函数进行优化, 进一步减小系统的传能损耗, 提升整个系统的效率.

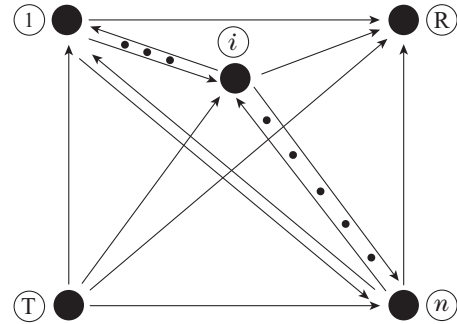


图2 激光无线传能网络权重图

Fig. 2 Weight graph of laser power transmission network

2.3.1 目标函数

目标函数为全任务周期内系统的总损耗, 其计算式为

$$Q_l = \sum_{k=1}^K ([P_{ink}^T - \sum_{i=1}^n (P_{ck}^i \cdot c_k^i) - P_{ck}^R - P_{loadk}] t_k), \quad (4)$$

式中: P_{ink}^T , P_{ck}^i , c_k^i , P_{ck}^R , P_{loadk} 分别为第 k 个任务段内, 激光发射端的输入电功率、中继端 i 蓄电池的充放电功率、中继端 i 的存在因子、接收端蓄电池的充放电功率以及负载功率, 当蓄电池充电时, 充放电功率为正值, 当蓄电池放电时, 充放电功率为负值, 当中继端存在于当前任务段的最优传能路径中时, 存在因子取1, 当中继端不存在于当前任务段的最优传能路径中时, 存在因子取0; t_k 为第 k 个任务段的时间长度, K 为总任务段数.

2.3.2 约束条件

为保证整个激光无线传能网络安全稳定地运行, 激光发射端、中继端以及接收端需满足一定的约束, 包括功率限值约束、功率平衡约束以及蓄电池电量约束.

对于发射端, 其存在功率限值约束

$$0 \leq P_{ink}^T \cdot e^T \leq P_{max}^T, \quad (5)$$

式中: e^T 和 P_{max}^T 分别为激光发射端的电光转换效率和最大输出功率; k 为任务段编号, $k = 1, 2, \dots, K$.

对于中继端, 其存在功率限值约束及蓄电池电量约束. 其功率约束为: 在各个任务段内, 中继端蓄电池的充放电功率一方面不能超过充放电功率的限值, 另一方面也不能超过由前级设备传输至本中继端的输入电功率; 其蓄电池电量约束为: 在各个任务段内, 中继端蓄电池的电量不能低于蓄电池电量的下限值, 也不能高于蓄电池电量的上限值. 约束表达式为

$$\begin{cases} P_{d\max}^i \leq P_{ck}^i \leq \min(P_{c\max}^i, P_{ink}^i), \\ \text{SOE}_{\min}^i \leq \text{SOE}_0^i + \sum_{f=1}^k (P_{cf}^i \cdot t_f) / \text{EN}^i \leq \text{SOE}_{\max}^i, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{d\max}^i$ 和 $P_{c\max}^i$ 分别为中继端 i 的放电功率限值和充电功率限值; SOE_{\min}^i , SOE_{\max}^i 和 SOE_0^i 分别为中继端 i 的蓄电池电量下限值、电量上限值以及电量初始值; P_{ink}^i 为第 k 个任务段内中继端 i 的输入电功率, P_{cf}^i 和 t_f 分别为第 f 个任务段内中继端 i 的充放电功率和任务段时间; EN^i 为中继端 i 的蓄电池容量; i 为中继端编号, $i = 1, 2, \dots, n$; k 为任务段编号, $k = 1, 2, \dots, K$.

对于接收端, 其存在功率限值约束、蓄电池电量约束以及功率平衡约束. 其功率限值约束为: 接收端蓄电池的充放电功率不能超过其充放电功率限值; 其蓄电池电量约束为: 在各个任务段内, 接收端蓄电池的电量不能超出电量的上下限值. 其功率平衡约束为: 在各个任务段内, 接收端蓄电池的充放电功率等于由激光发射端和中继端传输至接收端的总功率与负载功率的差值. 当激光发射端和中继端传递至接收端的功率大于负载功率时, 接收端接收到的功率一部分维持负载所需, 另一部分充入接收端的蓄电池中, 此时接收端的充放电功率为正值. 当激光发射端和中继端传递至接收端的功率小于负载功率时, 接收端接收到的功率全部供给至负载, 同时接收端的蓄电池也向负载放电, 弥补负载功率的缺额, 此时接收端的充放电功率为负值. 接收端的约束表达式为

$$\begin{cases} P_{d\max}^R \leq P_{ck}^R \leq P_{c\max}^R, \\ P_{ck}^R = \\ (P_{ink}^T e^T e^{\text{TR}k} S_{\text{TR}k} + \sum_{i=1}^n (P_{ok}^i e^{iRk} S_{iRk})) e^R - P_{\text{load}k}, \\ \text{SOE}_{\min}^R \leq \text{SOE}_0^R + \sum_{f=1}^k (P_{cf}^R t_f) / \text{EN}^R \leq \text{SOE}_{\max}^R, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{d\max}^R$, $P_{c\max}^R$ 分别为接收端的放电功率限值和充电功率限值; $e^{\text{TR}k}$, $S_{\text{TR}k}$, P_{ok}^i , e^{iRk} 和 S_{iRk} 分别为第 k 个任务段内, 激光在由发射端至接收端的路径中的传输效率、由发射端至接收端的路径选通信号、中继端 i 的输出激光功率、激光在由中继端 i 至接收端的路径中的传输效率以及由中继端 i 至接收端的路径选通信号; e^R 和 EN^R 分别为接收端的能量转换效率和蓄电池额定容量; SOE_{\min}^R , SOE_{\max}^R 和 SOE_0^R 分别为接收端蓄电池的电量下限值、电量上限值以及电量初始值, 当路径存在于当前最优传能路径之中时, 路径选通信号取值为1, 当路径不存在于当前最优传能路径之中时, 路径选通信号取值为0; i 为中继端编号, $i = 1, 2, \dots, n$; k 为任务段编号, $k = 1, 2, \dots, K$.

在各个任务段内, 中继端的输入电功率和输出激光功率可由方程组迭代求解得到. 用于迭代求解的方程组表达式如下:

$$\begin{cases} P_{ink}^i = (P_{ink}^T e^T e^{\text{TR}k} S_{\text{TR}k} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (P_{ok}^j e_{jik} S_{jik})) e_1^i, \\ P_{ok}^i = (P_{ink}^i - P_{ck}^i) e_2^i c_k^i, \end{cases} \quad (8)$$

式中: $e^{\text{TR}k}$, $S_{\text{TR}k}$, P_{ok}^i , e_{jik} 和 S_{jik} 分别为第 k 个任务段内, 激光在由发射端至中继端 i 的路径中的传输效率、由发射端至中继端 i 的路径选通信号、中继端 j 的输出激光功率、激光在由中继端 j 至中继端 i 的路径中的传输效率以及由中继端 j 至中继端 i 的路径选通信号; e_1^i 和 e_2^i 分别为中继端 i 的光电转换效率和电光转换效率; i 为中继端编号, $i = 1, 2, \dots, n$; k 为任务段编号, $k = 1, 2, \dots, K$.

3 优化算法

3.1 基于Dijkstra算法的路径寻优

在第2.2节建立的激光无线传能网络权重图中, 随着传能设备数量的增加, 由发射节点至接收节点的传能路径组合数将爆炸式增长. 路径寻优的目的就是求解出传能状态最佳的路径组合, 而激光在路径中的传输效率即是路径传能状态的最佳表征. 因此, 路径寻优等价于求解效率最高的传能路径组合. 设能量由激光发射站传输至激光接收端共经过了 m 条路径, 则激光传输的总效率可由各个效率值累乘得到, 路径寻优的目标函数表达式为

$$\max e^T \prod_{i=1}^m e_i, \quad (9)$$

式中 e_i 为激光在第 i 条路径中的传输效率.

经过数学变换, 将式(9)所述的最大值问题转换为最小值问题

$$\min(-\ln e^T - \sum_{i=1}^m \ln e_i), \quad (10)$$

式中, 将效率的对数值看作是路径长度, 则式(10)相当于在权重图中求最短路径. 在图论中, 求解最短路径的算法主要有Dijkstra算法、Floyd算法以及A*算法等. Floyd算法能够对负权图进行求解, 但是其时间复杂度为 $O(n^3)$, 对于复杂网络的求解速度较慢, n 为图中的节点数; A*算法是一种启发式搜索算法, 其是在Dijkstra算法的基础上改进得出的, 在求解过程中能够避开大多数无希望的节点, 搜索效率较高, 但是容易陷入局部最优解; Dijkstra算法基于贪婪思想进行搜索, 其保证所有节点均被标记时才停止搜索, 能够确保求解出图中的最短路径, 时间复杂度也低于Floyd算法, 缺点是只能求解正权图. 考虑到激光网络权重图中边的权重均为正值、权重图的节点数目较多以及激光传能效率较低的原因, 选择Dijkstra算法进路径优

化, 在确保求解出效率最大传能路径的基础上缩短求解时间。

Dijkstra算法原本用于求解网络中的最短路径问题, 现将优化目标函数从最短路径替换为最大效率, 将原算法中的路径求和运算替换为路径效率求积运算, 即可实现效率最大化链路的求解。基于Dijkstra算法的最优路径求解流程图如图3所示。

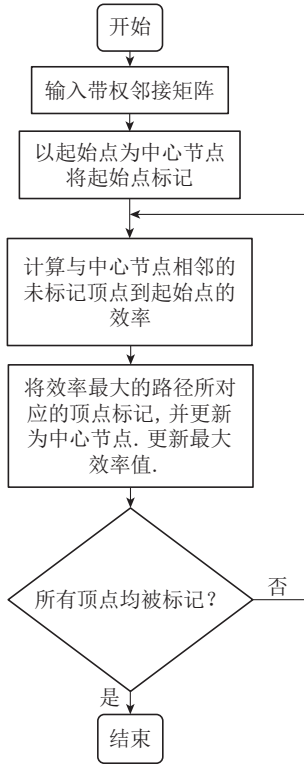


图3 基于Dijkstra算法的路径寻优流程图

Fig. 3 Flow chart of optimal path solution based on Dijkstra algorithm

3.2 基于内层迭代PSO算法的充放电功率优化

路径寻优在空间上对激光传能网络进行了优化, 充放电功率优化则是在时间尺度对网络进行优化。在求解出最优路径的基础上, 可进一步优化各个设备蓄电池的充放电功率, 在满足系统性能需求的前提下, 尽可能减少全任务周期的传能损耗, 提升系统的传能效率。

3.2.1 粒子设定

由前述分析可知, 充放电功率优化是非线性规划问题。粒子群算法在解决非线性规划问题方面具有收敛速度快、调节参数少以及简单易实现等优点, 对于高维度优化问题, 比遗传算法的收敛速度更快。因此, 选用粒子群算法对充放电功率优化模型进行求解, 并针对应用过程中所遇到的问题对算法进行一定的修正。

将每个任务段内激光发射站的输入功率与各蓄电池的充放电功率作为决策变量, 因此, 第*i*个粒子的位

置信息为

$$x_i = (x_1^i, x_2^i, x_3^i, \dots, x_K^i), \quad (11)$$

$$x_j^i = (P_{in j}^{T i}, P_{c j}^{1 i}, P_{c j}^{2 i}, \dots, P_{c j}^{n i}), \quad j = 1, 2, \dots, K, \quad (12)$$

式(11)中: 第*i*个粒子的位置信息由*K*个任务段的决策变量构成, x_K^i 为第*i*个粒子在第*K*个任务段的位置信息, 它携带了第*K*个任务段内发射端和中继端的充放电功率信息; 式(12)中: P 为功率, 上标*T*, 1, 2, ..., *n*分别表示激光发射端、中继端1、中继端2及中继端*n*。下标in表示输入电功率, 下标c表示蓄电池的充放电功率, 下标*j*为任务段编号。

第*i*个粒子的速度信息为

$$v_i = (v_1^i, v_2^i, v_3^i, \dots, v_K^i), \quad (13)$$

$$v_j^i = (v_j^{T i}, v_j^{1 i}, v_j^{2 i}, \dots, v_j^{n i}), \quad j = 1, 2, \dots, K, \quad (14)$$

式(13)中: 第*i*个粒子的速度信息由*K*个任务段的速度信息构成, v_K^i 为第*i*个粒子在*K*个任务段的速度信息, 速度信息决定了粒子位置变化的方向和大小; v 表示速度; 上标*T*, 1, 2, ..., *n*分别表示激光发射端、中继端1、中继端2及中继端*n*; 下标*j*为任务段编号。

粒子的速度及位置更新公式为

$$v_i(q+1) = \omega v_i(q) + c_1 r_1 (pb - x_i(q)) + c_2 r_2 (gb - x_i(q)), \quad (15)$$

$$x_i(q+1) = x_i(q) + v_i(q+1), \quad (16)$$

式(15)中: $v_i(q+1)$ 为第(*q*+1)次迭代时第*i*个粒子的速度信息; ω 为权重系数; c_1 为个体学习因子; c_2 为群体学习因子; r_1 和 r_2 为0至1之间的随机数, 增加搜索随机性; pb 为当前的个体最优粒子; gb 为当前的群体最优粒子; $x_i(q+1)$ 为第(*q*+1)次迭代时第*i*个粒子的位置信息。

3.2.2 内层迭代

在列写目标函数及约束条件时, 如果仅利用决策变量进行描述会使问题变得非常复杂。以一个中继端充放电功率约束为例来说明这一问题。列写充放电功率约束时首先需要利用其他决策变量来表示出中继端的充放电功率, 但是中继端的输入能量路径存在多种可能性。如图4所示, 图中任何颜色路径都可以成为中继端*i*的能量输入路径, 在约束中需要列举出所有的路径可能性, 当网络节点较多时这种方法是极为复杂的。

为了简化复杂激光传能网络目标函数及约束条件的列写过程, 引入中间变量与内层迭代来简化原问题。具体而言, 对每个中继端在每个任务段内各引入两个中间变量, 分别为中继端的输入电功率和输出激光功率。如式(6)中 $P_{in k}^i$ 即为第*k*个任务段内中继端*i*的输入电功率, 式(7)中 P_{ok}^i 即为第*k*个任务段内中继端*i*的输

出激光功率. 由第1.3节可见, 引入中间变量后, 目标函数和约束条件都得到了较大简化, 但中间变量也要经过计算得到. 为此, 通过分析中继端输入电功率和输出激光功率之间的约束关系, 建立了用于计算中间变量的迭代方程, 如式(8)所示. 迭代起始时, 所有的中间变量初始值均设置为0, 根据粒子所携带的决策变量信息及路径选通信号进行迭代, 直到相邻两次迭代的结果相等时停止迭代, 此时各中间变量的计算值即为当前各中继端的真实输入电功率和输出激光功率, 且该计算结果具有唯一性.

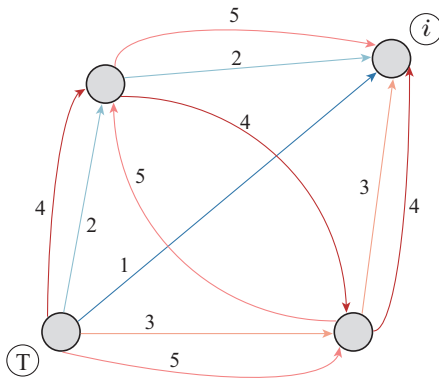


图4 能量输入路径示意图
Fig. 4 Energy input path diagram

3.2.3 初始值生成

当所求解的问题决策变量数过多而且约束条件较为复杂时, 如果采用随机生成粒子初始位置的方法, PSO算法将难以找到初始可行解, 可能无法完成对目标函数的优化.

当约束条件较为复杂时, 不可行域的面积占绝大部分. 如果直接在决策变量上下限值之间随机生成初始粒子, 则极大可能使所有初始粒子均位于不可行域之中, 进而使个体最优值和群体最优值均受到惩罚, 粒子难以向着最优解存在的方向移动, 迭代过程中目标函数值不会逐代衰减, 导致算法优化失败.

在激光无线传能网络中, 决策变量数目较多且约束条件较为复杂, 为了保证PSO算法能够可靠地找到目标函数的极值点, 需对粒子的初始位置进行一些控制. 具体而言, 部分粒子的初始位置根据各任务段的负载功率及最优路径计算得到的, 其余粒子的初始位置依旧在各自限值之间随机生成. 以第*i*个粒子的初始位置生成为例:

$$\begin{cases} P_{cj}^{1i} = P_{cj}^{2i} = \dots = P_{cj}^{ni} = 0, \\ P_{inj}^{Ti} = \text{rand}(P_{\text{load}j}/e_{sj}), \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, K, \quad (17)$$

式中 e_{sj} 为第*j*个任务段内最优传能路径的传输效率. 该种初始值生成方法中, 所有中继端蓄电池的充放电功率均为0, 这确保了中继端蓄电池满足电量约束, 同

时, 激光发射站的输入功率也是根据负载功率和路径传输效率逆向求解得到的, 进而使接收端蓄电池的电量容易满足约束. 经仿真验证, 这种初始值生成方法能使大部分初始粒子均位于可行域之内, 目标函数值能够可靠地进行优化. 特别说明, 不建议让所有粒子都按照这种方法生成初始值, 否则容易使初始粒子出现局部聚集的情况, 算法易陷入局部最优. 综上所述, 本文所提出的双层优化方法流程图如图5所示.

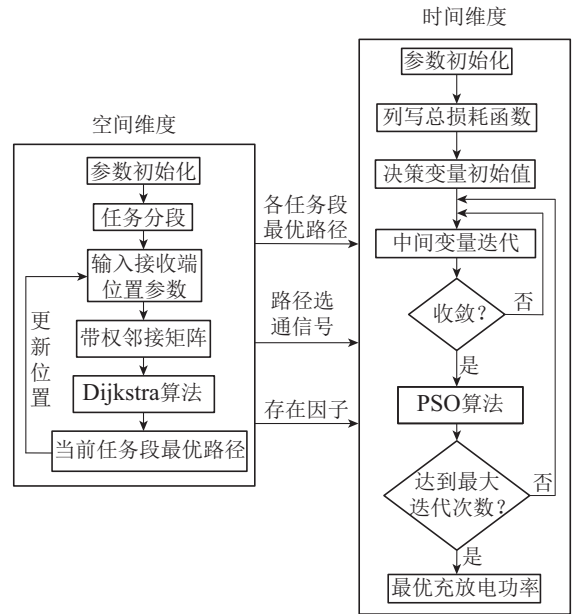


图5 双层优化方法流程图
Fig. 5 Flow chart of bilevel optimization method

4 算例分析

4.1 无人机巡航系统

为验证本文所述双层优化方法的有效性, 以一个无人机巡航系统为例, 进行算例分析. 图6为一个无人机巡航系统示意图, 其包括1架能量飞艇(激光发射端)、4架中继飞艇(中继端)、1架巡航无人机(接收端)以及两座山峰.

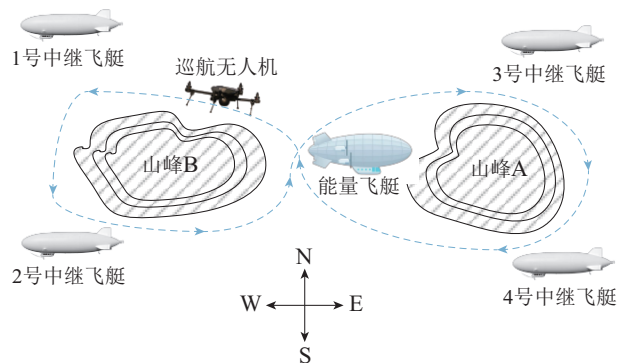


图6 无人机巡航系统示意图
Fig. 6 Schematic diagram of UAV cruise system

部分区段内均更高,在小部分区段内两者的传能效率相等.仿真结果表明Dijkstra算法能够在全任务段内求得效率最优的传能路径,从而避开气象条件差或者存在遮挡的传能路径,提升激光传能网络的供电质量和可靠性.

上述路径寻优过程是在晴天下进行的,在实际激光传能过程中可能会出现阴雨等恶劣天气.为了研究气象条件对路径寻优过程的影响,进行了阴雨气象下的路径寻优仿真实验.具体而言,在山峰A与山峰B间的山谷地带降雨量为20 mm/h,在山峰A的北面与东面降雨量为10 mm/h.阴雨气象下采用Dijkstra算法进行路径寻优的结果如表3所示.

表3 传能路径优化结果(阴雨)

Table 3 Energy transfer path optimization results (rainy)

时间/s	传能路径
0~141	T→R
141~314	T→1→R
314~484	T→2→R
484~710	T→R
710~739	T→1→R
739~811	T→3→R
811~1053	T→4→R
1053~1138	T→R

由表3可见,相比于晴天下的传能路径优化结果,阴雨气象下的传能路径优化结果在710~739 s内出现了变化.该段时间内巡航无人机飞行在山峰A的北面,由于山峰A的北面存在降雨,此时以3号中继飞艇进行中继传能效率较低,而1号中继飞艇所处区域未出现降水,因此算法选择以1号中继飞艇进行中继传能.该仿真结果表明Dijkstra算法在各种工况下均可实现传能路径优化,求解出状态最佳的传能路径.

由图9可见,降水对激光在路径中的传能效率有非常显著的影响,当巡航无人机经过降雨区段时,路径传能效率下降明显,部分区段的效率值相比于晴朗天气下降50%,在少数区段传能效率甚至接近于0.因此,激光无线传能对气象条件有较高的要求,该传能方式适合在气象条件良好时实施.

4.3 充放电功率优化仿真结果与分析

在路径寻优的基础上,建立充放电功率优化模型的目标函数与约束条件,采用所述的PSO算法进行求解,所得各个飞艇蓄电池的充放电功率如图10所示.

由图10可见,各个飞艇的充放电功率每50 s进行一次刷新.在0~141 s, 484~710 s以及1053~1138 s这三个时间段内,最优路径为能量飞艇直射巡航无人机,在0~141 s和1053~1138 s这两段时间内,能量飞艇释

放能量为无人机供电,在484~710 s内能量飞艇未释放能量,此时由无人机自身携带的蓄电池为负载供电.在其余时间段内,最优路径均有中继飞艇参与,在这些时间段内,中继飞艇处于放电状态,而能量飞艇未进行放电,因为此时各中继飞艇电量充足,可直接向无人机提供能量,无需从能量飞艇索取能量,通过减少能量流经路径的长度来减小传能损耗.充放电功率优化算法的计算结果与理论分析一致.

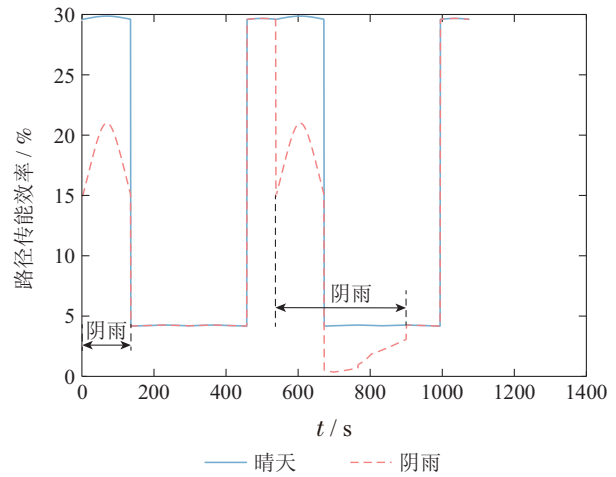


图9 不同气象下路径传能效率对比

Fig. 9 Comparison of energy transfer efficiency in different weather

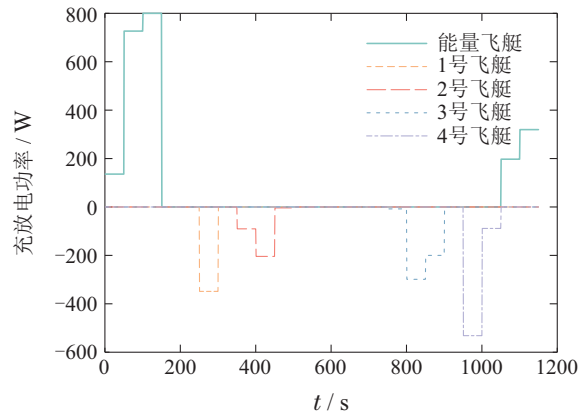


图10 各飞艇的充放电功率曲线

Fig. 10 Charge and discharge power curve of each airship

为了论证本文所述优化方法的有效性,比较了不同天气、不同传能路径及不同优化算法下系统的传能损耗,损耗对比结果如图11所示.由图11分析可知,在晴天条件下,当不进行任何优化时系统的传能总损耗为68.2 Wh,当仅进行路径优化时,系统传能总损耗为46.7 Wh,当仅进行充放电功率优化时,系统传能总损耗为40.0 Wh.相比之下,充放电功率优化对系统总损耗存在更为显著的影响,这是因为在本仿真系统中各设备的预设坐标较为接近,无人机巡航范围较小,而且晴天状况下气象条件良好,这使得激光在各条路径

中的传输效率差异不大, 进而削弱了路径优化对系统损耗的优化作用; 对比晴天和雨天下的传能损耗可知, 虽然都进行了双层优化, 但是阴雨天气下的传能损耗要远高于晴天下的传能损耗, 这反应了激光传输效率对于气象条件的敏感性, 表明激光无线传能对气象条件有较高的要求; 对比各种情况下(晴天)的传能总损耗可得, 采用路径优化策略和充放电功率优化策略均能减少激光无线传能的总损耗, 提升系统的传能效率.

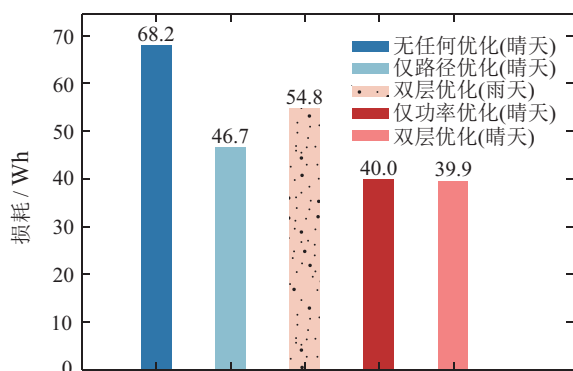


图 11 损耗对比图

Fig. 11 Loss comparison chart

4.4 探讨与展望

由图8可见, 在本无人机巡航系统中, 激光无线传能的效率主要在5%~30%之间, 传能效率相对而言比较低, 这主要由3个主要因素引起:

1) 目前激光器与激光光伏电池板的效率均不高, 激光器的电光转换效率大多在50%以内, 激光光伏电池的光电转换效率大多在60%以内, 提升激光器与激光光伏电池的能量转换效率至关重要.

2) 本文所构建的激光中继器是基于光电转换和电光转换的, 每经过一个中继器能量需进行两次转换, 这对传能效率影响较大. 未来可以考虑以光转光的方式实现能量中继, 这样可以通过减少能量转换的次数极大提高激光传能系统的效率.

3) 本文所验证的案例为无人机巡航系统, 激光在大气中传输时能量会逐渐衰减. 如果将激光无线传能应用于太空之中, 由于太空中气体稀薄, 激光在路径传输时的衰减会大幅减少, 从而有利于整个系统传能效率的提升.

5 结论

针对激光传能网络多路径多变量强耦合的特点, 提出了一种双层优化方法, 对网络进行时空解耦, 分别在空间维度和时间维度对网络进行优化调控. 将激光无线传能网络抽象成权重图, 在空间上基于Dijkstra算法进行路径寻优, 搜索出效率最高的传能路径. 在时间上, 以路径寻优为基础, 以传能总损耗为目标函

数, 基于内层迭代PSO算法对蓄电池的充放电功率进行优化, 减小系统的传能损耗. 通过仿真案例的实验结果得到以下结论:

1) 在激光无线传能系统中, 当计算激光在大气中的传能效率时, 可以以比尔-朗博特定律为基础, 再考虑激光发散角度和遮挡的影响进行效率求解.

2) 在激光网络权重图中, 以路径传能效率为目标, 利用Dijkstra算法进行最优路径的求解是可行的, 该方法可以求解出网络中效率最优传能路径, 避开气象条件差或存在遮挡的传能路径, 提升激光传能网络的供电质量和供电可靠性.

3) 以优化后的传能路径为基础, 以激光无线传能系统中蓄电池的充放电功率为决策变量, 采用PSO算法可对系统的传能损耗进行优化, 在保证系统约束的前提下, 尽可能减小激光传能的总损耗.

4) 气象条件对于激光无线传能系统的传能效率存在较大影响, 激光无线传能适合在良好的气象条件下或者太空之中实施运用. 同时, 提高激光器和激光光伏电池板的能量转换效率, 并研制光光传能式的激光中继器对提升激光传能系统的效率具有重大意义.

5) 所述方法虽不能求解出原问题的最优解, 但其能够给出一个次优的可行解, 满足实际激光传能网络的调控需求且易于实现, 适合于实际应用场合.

参考文献:

- [1] ETENG A A, GOH H H, RAHIM S K A, et al. A review of metasurfaces for microwave energy transmission and harvesting in wireless powered networks. *IEEE Access*, 2021, 9: 27518 – 27539.
- [2] ZHONG Yuanchang, WEI Yingying, YAO Bowen, et al. Development and key technologies of space solar power station. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(6): 1063 – 1066. (仲元昌, 魏莹莹, 姚博文, 等. 空间太阳能电站的发展及关键技术综述. *电源技术*, 2019, 43(6): 1063 – 1066.)
- [3] YIGIT H, BOYNUEGRI A R. Pulsed laser diode based wireless power transmission application: determination of voltage amplitude, frequency and duty cycle. *IEEE Access*, 2023, 11: 54544 – 54555.
- [4] ZHOU W, JIN K. Power control method for improving efficiency of laser-based wireless power transmission system. *IET Power Electronics*, 2020, 13(10): 2096 – 2105.
- [5] KAWASHIMA N, TAKEDA K, YABE K. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(101): S109 – S110.
- [6] MOTOHIRO T, TAKEDA Y, ITO H, et al. Concept of the solar-pumped laser-photovoltaics combined system and its application to laser beam power feeding to electric vehicles. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(8): 08MA07.
- [7] BLACKWELL T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC. *AIP Conference Proceedings*. New York: AIP Publishing, 2005, 766(1): 73 – 85.
- [8] DUNCAN K J. Laser based power transmission: Component selection and laser hazard analysis. *IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer*. Knoxville: IEEE, 2016, 100 – 103.

- [9] SONG Yuanming, LIU Yajie, WANG Rui, et al. Multi-objective planning of dynamic wireless energy transmission link based on microwave wireless energy transmission. *Control and Decision*, 2021, 36(12): 3039 – 3048.
(宋元明, 刘亚杰, 王锐, 等. 基于微波无线传能的动态无线传能链路多目标规划问题. *控制与决策*, 2021, 36(12): 3039 – 3048.)
- [10] SUN Yue, YANG Fangxun, DAI Xin. Construction of wireless power transfer networks based on improved ant colony optimization. *Journal of South China University of Technology*, 2011, 39(10): 146 – 151, 164.
(孙跃, 杨芳勋, 戴欣. 基于改进型蚁群算法的无线电能传输网组网. *华南理工大学学报*, 2011, 39(10): 146 – 151, 164.)
- [11] SUN Yue, XIA Jinfeng, TANG Chunsen, et al. Path optimization for wireless power transfer networks with cellular genetic algorithm. *Journal of XI'AN Jiaotong University*, 2017, 51(4): 30 – 36.
(孙跃, 夏金凤, 唐春森, 等. 采用元胞遗传算法的无线电能传输网路径寻优. *西安交通大学学报*, 2017, 51(4): 30 – 36.)
- [12] LI L, LIU G J, LI Z G, et al. High-efficiency 808-nm InGaAlAs-AlGaAs double-quantum-well semiconductor lasers with asymmetric waveguide structures. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(8): 566 – 568.
- [13] WILKENS M, WENZEL H, FRICKE J, et al. High-efficiency broadridge waveguide lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(6): 545 – 548.
- [14] LIU X, HOLLY C, JIANG C L, et al. Electro-optical efficiency and slow axis far-field improvement of high power laser diode bars using epitaxy structure optimization. *IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD)*. Coventry: IEEE, 2017.
- [15] HELMERS H, LOPEZ E, HHN O, et al. Pushing the boundaries of photovoltaic light to electricity conversion: A GaAs based photonic power converter with 68.9% efficiency. *IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference*. Fort Lauderdale: IEEE, 2021.

作者简介:

袁奥特 硕士研究生, 研究方向为无线传能网络优化调控、储能电池状态感知与安全评估, E-mail: m202171897@hust.edu.cn;

蔡涛 副教授, 研究方向为可再生能源系统建模与能量管理、储能系统管理与充放电控制等, E-mail: caitao@hust.edu.cn;

蓝建宇 高级工程师, 研究方向为高性能无线传能技术, E-mail: 2320483340@qq.com.