

控制与决策

Control and Decision

基于微波无线传能的动态无线传能链路多目标规划问题

宋元明, 刘亚杰, 王锐, 张涛

引用本文:

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[J]. *控制与决策*, 2021, 36(12): 3039–3048.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1187>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于无线携能通信的传感云系统Sink节点最优能效策略

Optimal energy efficiency optimization strategy for SWIPT-enabled sensor-cloud system

控制与决策. 2021, 36(8): 1929–1938 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1628>

基于分类的多策略预测方法求解动态多目标优化问题

Classification-based multi-strategy prediction method for dynamic multi-objective optimization problems

控制与决策. 2021, 36(7): 1569–1580 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1320>

基于分解的多目标多因子进化算法

A multiobjective multifactorial evolutionary algorithm based on decomposition

控制与决策. 2021, 36(3): 637–644 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0525>

基于多种群分解预测的动态多目标引力搜索算法

Dynamic multi-objective gravitational searching algorithm based on multi-population decomposition prediction

控制与决策. 2021, 36(12): 2910–2918 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1002>

考虑批量分割的单元装配系统工作量平衡联合决策模型

Joint decision model of Seru production system balancing considering lot-splitting

控制与决策. 2021, 36(10): 2517–2527 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0167>

基于微波无线传能的动态无线传能链路多目标规划问题

宋元明, 刘亚杰[†], 王锐, 张涛

(1. 国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410072; 2. 多能源系统智慧互联技术湖南省重点实验室, 长沙 410072)

摘要: 针对利用无线传能技术对移动无人单元进行动态传能的需求, 选取微波无线传能作为传能方式. 考虑在无线传能发射端与接收端之间设置中继传能节点的必要性, 以及因无人单元连续移动所导致的无线传能链路的动态性, 基于这类动态链路上采用不同中继传能节点部署方案所带来的在传能效率、系统成本等指标上的变化, 构建一个包含发射端、接收端和可移动能量中继平台的动态无线传能链路多目标规划模型, 在此基础上根据决策变量的特点, 采用两种不同的进化算法对动态无线传能链路多目标规划模型进行双层迭代求解. 求解结果验证了模型的有效性和微波能量中继传输对提高动态无线传能链路平均传能效率的作用.

关键词: 动态传能链路规划; 微波无线传能; 多目标优化; 进化算法; 双层迭代优化

中图分类号: N945.23

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1187

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 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[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 3039-3048.

Multi-objective planning of dynamic wireless energy transmission link based on microwave wireless energy transmission

SONG Yuan-ming, LIU Ya-jie[†], WANG Rui, ZHANG Tao

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China; 2. Hunan Key Laboratory of Multi-energy System Intelligent Interconnection Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: Aiming at the demand of dynamic power transmission for unmanned units using wireless power transmission technology, this paper selects microwave wireless power transmission as the power transmission method. The necessity of setting up an energy transmission relay node between the transmitting node and the receiving node in the wireless energy transmission, as well as the dynamics of the wireless power transmission link caused by the continuous movement of the unmanned unit are considered. A multi-objective planning model for dynamic wireless power transmission links including a transmitter, a receiver, and mobile wireless power relay units is constructed, in which the use of different power transmission relay node deployment solutions brings about changes in indicators such as power transmission efficiency and system cost. On this basis, according to the characteristics of the decision variables, two different evolutionary algorithms are used to solve the multi-objective planning model of the dynamic wireless power transmission link by a two-layer iterative solving method. The solution results verify the effectiveness of the model and the effect of microwave energy relay transmission on improving the average power transmission efficiency of dynamic wireless power transmission links.

Keywords: dynamic energy transmission link planning; microwave wireless energy transmission; multi-objective optimization; evolutionary algorithm; two-tier iterative optimization

0 引言

无线传能作为一种新型的电能传输技术, 可用于为工作中的无人车、无人机等智能无人装备提供持续的动态能量保障, 能够在无人装备自身携电量受当前储能技术发展水平限制的情况下有效提高其续航能力和工作范围^[1-3]. 由于无人装备执行任务时往

往会在一个较大的范围内移动, 并且控制端与无人装备的距离在数百米到数千米、数十千米不等, 这种情况下, 微波无线传能作为一种较为成熟的无线传能方式, 其有效能量传输距离可达数公里^[4], 能够较好地满足为工作中的无人装备构建动态无线传能链路的需要^[5-6].

收稿日期: 2020-08-24; 修回日期: 2020-09-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71901210, 61973310).

责任编辑: 巩敦卫.

[†]通讯作者. E-mail: liuyajie@nudt.edu.cn.

在基于微波的无线传能方式中,首先由无线传能发射端将电能转化为微波发射,微波被接收端接收后再次转化为电能,此过程需要考虑以下3个环节的能量损耗:发射端的电能-微波转换损耗、微波在大气传播过程中能量损耗^[7]、接收端的微波-电能转换损耗。鉴于微波波束在均匀大气中的损耗不仅包括穿过大气的指数衰减^[7],而且有长距离传输时波束在空间中扩散带来的损耗(几何衰减)^[8],为了尽量减少后一种损耗,微波无线传能一般采用激发发散角很小的定向波束进行点对点的能量传输,同时对波束进行调制使其能量大都集中于中心位置。即使采用了上述方法减小几何衰减,由于激发发散角不可能为零,定向波束在长距离传输时仍然不能看作由微波激发端平面起到接收端平面止的一段圆柱,而应当视为一个以微波激发点为顶点以微波激发发散角为顶角的锥体^[9-10];接收端只能接收到波束锥体横截面中分布在接收端天线有效面积上的能量^[7]。由于接收端天线的接收面积有限,当点对点直接传输的几何衰减比率远大于中继端接收转换后再次激发的中继效率时,在微波无线传能过程中进行中继传能就非常必要了。图1是微波激发角同为 α 时经过两次中继和不进行中继传能的几何衰减对比示意。

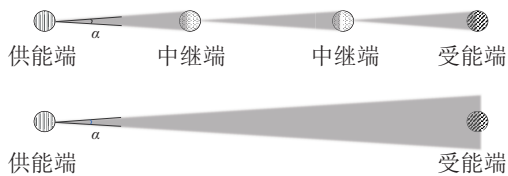


图1 经过两次中继和不进行中继传能的几何衰减对比

在链路中增加中继端固然能减少微波无线传能中的几何衰减,提高供能端到受能端的无线能量传输效率,但也势必带来以中继端的购置和运行成本为主的额外成本。因此,需要基于供能端到受能端的距离、无线供能设备性能参数和无线传能过程中的环境条件等信息,针对链路中中继端的类型、数量、位置和所需的中继能力(例如无线供能功率、受能天线孔径等)进行优化,实现以最低的中继成本达到较高的链路无线传能效率,形成一种典型的多目标优化问题。

本文基于微波无线传能技术进行动态无线传能链路的构建,根据传能的实际情况在链路中加入中继端进行中继传能以提高链路总体传能效率,并基于多目标进化算法对链路中中继端的类型、数量、位置和所需的中继能力进行优化。本文的主要贡献有如下几点:

1) 针对微波无线传能链路上动态部署中继传能

节点的必要性以及由此所带来的系统成本、总体传能效率等指标上的变化,对动态传能链路中发射端、接收端和可移动能量中继平台搭载的供能、传能设备建立相应的单元模型,并在此基础上进一步构建动态无线传能链路多目标规划模型;

2) 根据内层优化问题和外层优化问题的不同特点,在案例研究中分别选用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[11]和协同进化约束多目标优化(CCMO)^[12]算法对动态无线传能链路多目标规划模型进行双层迭代求解;

3) 通过对实验结果从最优帕累托前沿的总体情况到外层、内层优化具体结果的深入分析,验证模型的有效性和微波能量中继传输对提高动态无线传能链路平均传能效率的作用。

1 文献综述

当前关于无线传能链路的研究大都基于磁场耦合式无线传能技术。文献[13]基于磁场耦合式无线传能技术提出了无线电能传输网的概念:在这种无线电能传输网中,多个中继端借助自身的共振线圈构成共振链路,利用共振体间产生的强耦合作用形成“高效能量传输通道”,中继过程中不涉及能量形式的转换。基于该原理,文献[14-15]采用不同的智能算法对这类传能链路进行了优化。文献[16]将文献[13]定义的无线电能传输网进一步分为有源注入无线电能传输网和无源注入无线电能传输网,并通过实验证实了元胞遗传算法在有源注入和无源注入的无线电能传输网路径寻优中均能有效求解。

相比之下,与微波无线传能相关的研究几乎全部集中于提高两点间直接传能过程中直流-微波转换、接收整流、直流合成等各个环节的效率^[4]。从1974年NASA报告的微波无线传能实验在1.54 km距离上实现了6.7%的直流到直流转换效率^[17]开始,研究者一直致力于提高微波无线传能的总体传输效率。例如,2009年四川大学研制的C波段微波无线传能系统,在工作频率为5.8 GHz、发射功率为600 W的条件下实现了70%的整流效率^[4];2012年日本京都大学的研究团队基于相控阵列磁控管搭建了S波段无线传能系统,在传输功率1.9 kW时微波-直流转换效率可达54%^[4]。相比于磁场耦合式无线传能技术,基于微波无线传能技术进行中继传能优化目前还较少见到公开的研究成果。

综上所述,文献[13]提出的无线电能传输网中的中继传能思想为无线能量链路传输指明了一个发展方向。然而,受限于磁场耦合式无线传能的技术原理,

即使经过了多次中继,这类无线电能传输网也只能为数百米范围内的受能设备提供无线电能供应^[13-16],难以满足无人单元实际工作时的用能需求. 本文提出的微波能量中继传输在链路形式上与磁场耦合式中继传能^[13]相似,但在传能原理、添加中继端的意义等方面都与之截然不同,在优化模型、决策变量和优化目标上也有显著区别. 基于磁场耦合式无线传能技术的无线电能传输网作为一种静态网络,其相关的建模优化都是基于一个给定各中继节点位置的网络寻找效率最高的传能路径^[13-16]. 而本文的动态链路双层迭代优化针对的是,传能链路中继端的类型、数量,所需的中继能力和各个时刻的位置进行最小化中继成本、最大化链路无线传能效率的双目标优化,以最大程度地提高传能过程中供能端到受能端的能量传输效率,同时尽量减少因添加中继端所带来的系统额外成本.

2 模型构建

基于微波无线传能的动态无线传能链路主要由作为无线电能发射源的固定供能平台(供能端)、在链路中起能量中继转发作用的移动中继平台(中继端)和接收能量的无人单元(受能端)组成,本文链路中的中继端包括搭载无线供能设备的中继供能车和中继无人机两种具体形式. 在链路传能过程中,供能端首先将能量以微波形式发送到中继端,经由中继端接收转换为电能. 此后,中继端将接收到的电能扣除自身功率需求后重新转换为微波形式发送到受能端,由受能端接收转换为电能进行存储或直接使用.

2.1 单元模型

本文构建动态无线传能链路前会选择动力性能能够满足链路动态传能需要的中继端(搭载无线供能、受能设备的中继供能车和中继无人机)型号,因此,需要构建的单元模型主要由无线供能设备模型和无线受能设备模型构成. 为简化计算,假设无线传能中使用的微波波束是平面波,在波束截面上的能量密度服从均匀分布^[9-10].

2.1.1 无线供能设备模型

微波无线供能设备的主要参数有将电能转换为微波能量的转换效率 η_{wes} 、最大发射功率 P_{maxs} 、波束激发电角 α_{wav} 、设备重量 m_{wes} . 当其向空间中某个方向发射微波时,与发射端距离为 L_{wet} 的波束截面上分布的能量 $P_{mwsec}(L_{wet})$ 可由下式计算:

$$P_{mwsec}(L_{wet}) = \eta_{wes} \cdot \kappa \cdot e^{-\gamma \cdot L_{wet}} \cdot P_{wes}. \quad (1)$$

其中: P_{wes} 为发射端的实际发射功率; γ 为大气衰减

系数,与波束传输路径上的大气情况相关; κ 为跟踪损失系数,反映传能时供能、受能设备之间在同步跟踪传能时未能完全对正而造成的能量损失.

2.1.2 无线受能设备模型

微波无线受能设备主要参数有最大接收功率 P_{maxr} 、接收天线孔径 S_{wer} 、将分布在接收端天线上的微波能量转换为电能的效率 η_{wer} 、设备重量 m_{wer} . 当接收天线与发射端距离为 L_{wet} 时,接收端将微波能量转换为电功率 P_{wer} 的大小计算为

$$P_{wer} = \eta_{wer} \cdot \min\left(\frac{S_{wer}}{S_{wav}(\alpha_{wav}, L_{wet})}, 1\right) P_{mwsec}(L_{wet}). \quad (2)$$

在平面波假设下,式中的波束截面积 $S_{wav}(\alpha_{wav}, L_{wet})$ 与波束锥角 α_{wav} 、传输距离 L_{wet} 相关,即

$$S_{wav}(\alpha_{wav}, L_{wet}) = \pi \left(\tan\left(\frac{\alpha_{wav}}{2}\right) L_{wet} \right)^2. \quad (3)$$

在本文的传能链路规划中,同一中继端携带的多个无线受能模块可以同时参与能量接收.

2.2 动态无线传能链路建模

某一时刻无线传能链路的链路传输效率 η_{link} 分以下情况进行计算:

1) 当链路中仅有 n 辆供能车作为中继端时,有

$$\eta_{link} = \eta_{ps-sg}(L_{ps-sg}) \prod_{i=1}^{n-1} \eta_{sg-sg}^i(L_{sg-sg}^i) \times \eta_{sg-ma}(L_{sg-ma}) \prod_{j=1}^n d_{gwpt}^j, \quad n \geq 1. \quad (4)$$

其中: $\eta_{ps-sg}(L_{ps-sg})$ 、 $\eta_{sg-sg}^i(L_{sg-sg}^i)$ 和 $\eta_{sg-ma}(L_{sg-ma})$ 分别为供能端到最近的中继供能车、第 i 台中继供能车到下一台中继供能车、最后一台中继供能车到受能端的传输效率函数, L_{ps-sg} 、 L_{sg-sg}^i 和 L_{sg-ma} 分别为供能端到最近的中继供能车、第 i 台中继供能车到下一台中继供能车、最后一台中继供能车到受能端的无线能量传输距离.

定义供能、受能的两点均处在地面的两点间,直接无线传能为地面无线能量传输. 链路中每经过一次两点间地面无线能量传输,均需要在计算链路效率时再乘以第 j 次地面传输对应的传输效率减益 d_{gwpt}^j . 当第 j 次地面传输不受障碍物遮挡时 d_{gwpt}^j 取值为1,否则 d_{gwpt}^j 视障碍物遮挡情况在区间 $[0, 1]$ 中取值.

2) 当链路中有 n 架中继供能无人机和 m 辆供能车作为中继端时,若 $n > 0$, $m \geq 0$, $n > m$,则有

$$\eta_{link} = \eta_{ps-sa}(L_{ps-sa}) \prod_{i=1}^m \eta_{sg-sa}^i(L_{sg-sa}^i) \times$$

$$\prod_{j=1}^m \eta_{sa-sg}^j(L_{sa-sg}^j) \prod_{k=1}^{n-m-1} \eta_{sa-sa}^k(L_{sa-sa}^k) \times \eta_{sa-ma}(L_{sa-ma}). \quad (5)$$

若 $n = m > 0$, 则有

$$\eta_{link} = \eta_{ps-sa}(L_{ps-sa}) \prod_{i=1}^{n-1} \eta_{sg-sa}^i(L_{sg-sa}^i) \times \prod_{j=1}^n \eta_{sa-sg}^j(L_{sa-sg}^j) \eta_{sg-ma}(L_{sg-ma}). \quad (6)$$

其中: $\eta_{sg-sa}^i(L_{sg-sa}^i)$ 为第 i 辆中继供能车到直接转发该供能车发射的微波能量的中继无人机的传输效率函数, $\eta_{sa-sg}^j(L_{sa-sg}^j)$ 为第 j 架中继无人机到直接转发该无人机发射的微波能量的中继供能车的传输效率函数, L_{sg-sa}^i 、 L_{sa-sg}^j 分别为前述两类传输效率函数对应的传输距离. 对于同时有中继供能无人机和供能车的链路, 在构建时尽可能利用中继无人机减少链路中的两点间地面无线能量传输. 当链路中 $m > n > 0$ 时, 将链路拆分成包括数量上满足中继无人机数量等于供能车数量加1的子链路 a 和只包含供能车这一种中继平台的子链路 b , 并分别利用式(5)和(4)计算链路传能效率.

2.3 优化目标

动态无线传能链路构建的首要目标是尽量提高传能过程中供能端到受能端的传能效率, 同时也需要考虑添加中继端带来的额外成本, 包括中继端的运行、维修、折旧成本. 因此, 以最大化链路平均传能效率、最小化链路中继(中继端运行/维修/折旧)成本作为构建动态无线传能链路的优化目标.

2.3.1 链路平均传能效率

本文的链路平均传能效率是指自无人单元到达任务区域开始执行任务起, 至无人单元任务结束时止的平均无线能量供应效率. 当无人单元任务总时长为 T 时, 为便于公式表达, 将 T 划分为多个长度为 t_{inc} 的周期, 以 t 表示任务中的周期索引. 任务时长内的链路平均传能效率 η_{link}^T 计算如下:

$$\eta_{link}^T = \frac{\sum_{t=1}^{T/t_{inc}} t_{inc} \eta_{link}^t}{T}, \quad (7)$$

其中 η_{link}^t 为第 t 个时间周期内的链路传能效率, 计算方式见式(4)~(6).

2.3.2 链路中继成本

在能源相关的网络规划中, 网络单元的成本一般包括购置成本、维修成本和运行成本3部分^[18]. 由于动态无线传能链路依照无人单元的预定任务进行规

划, 链路的传能时长即为无人单元的任务时长. 此时, 中继端成本中的维修成本和购置成本以中继端在任务时长内的折旧来代替; 中继端的运行成本则以维持传能链路时自身的用能成本为主.

对于链路中继成本 C_{link} , 有

$$C_{link} = C_{re} + C_{cons}^{re}. \quad (8)$$

其中: C_{re} 为中继端折旧成本, C_{cons}^{re} 为中继端运行成本. 中继端的折旧成本 C_{re} 计算如下:

$$C_{re} = N_{sg}(C_{depr}^{sg} + C_{mtn}^{sg}) + N_{sa}(C_{depr}^{sa} + C_{mtn}^{sa}). \quad (9)$$

其中 N_{sg} 、 N_{sa} 分别为链路中中继供能车和中继无人机的数量, C_{depr}^{sg} 、 C_{depr}^{sa} 分别为链路中中继供能车和中继无人机(包括搭载的无线供能、受能设备, 下同)的折旧成本, C_{mtn}^{sg} 、 C_{mtn}^{sa} 分别为链路中中继供能车和中继无人机及其搭载的无线供能、受能设备的任务维护成本. 其中中继端及其搭载设备的维护成本在一定时长的具体任务中可以直接给出金额, 而某型设备的折旧成本 C_{depr} 计算如下:

$$C_{depr} = \frac{T}{T_{life}} \cdot (C_{purc} - C_{salv}). \quad (10)$$

其中: T_{life} 为该型设备全寿命周期内能够正常工作的总时长, C_{purc} 为该型设备的购置成本, C_{salv} 为设备报废时的残值. 中继端的运行成本 C_{cons}^{re} 计算如下:

$$C_{cons}^{re} = E_{cons}^{re}(T) \text{PRI}_{elec}^{ps}. \quad (11)$$

其中: $E_{cons}^{re}(T)$ 为中继端累计能耗, PRI_{elec}^{ps} 为供能端电价. 此时 C_{cons}^{re} 即为维持传能链路时中继端自身的用能成本. 由于中继无人机在作为中继端工作时需要依靠传能链路获取能量, 本文的中继端累计能耗计算考虑了通过传能链路为中继无人机供能导致的大气衰减和几何衰减, 这些衰减都计入中继端累计能耗之中. 中继端累计能耗 $E_{cons}^{re}(T)$ 计算如下:

$$E_{cons}^{re} = \sum_{i=1}^{N_{sa}} E_{cons}^{sai}(T) + \sum_{j=1}^{N_{sg}} E_{cons}^{sgj}(T). \quad (12)$$

对于链路中第 i 架中继无人机, 其在任务时长 T 内的累计能耗 $E_{cons}^{sai}(T)$ 计算如下:

$$E_{cons}^{sai}(T) = \sum_{t=1}^{T/t_{inc}} \frac{E_{cons}^{sai}(t_{inc})}{\eta_{link}^{sai}(t)}. \quad (13)$$

其中: $E_{cons}^{sai}(t_{inc})$ 为第 i 架中继无人机在一个任务时间周期内的能耗, $\eta_{link}^{sai}(t)$ 为第 t 个任务时间周期内供能端将能量传输到第 i 架中继无人机的链路效率, 计算方式见式(4)~(6). 链路中第 j 台中继供能车的累计能耗计算如下:

$$E_{cons}^{sgj}(T) = \sum_{t=1}^{T/t_{inc}} E_{cons}^{sgj}(t_{inc}), \quad (14)$$

其中 $E_{\text{cons}}^{\text{sgj}}(t_{\text{inc}})$ 为第 j 台中继供能车在一个任务时间周期内的能耗. 由于中继供能车可以携带较大容量的储能, 其作为中继端工作时不从链路获取能量.

3 模型求解

在本文的动态无线传能链路规划中, 需要考虑最大化链路平均传能效率、最小化链路中继成本这两个相互制约的目标, 是典型的多目标优化问题. 要实现以基于微波无线传能技术的动态传能链路为工作中的无人单元进行持续供能, 同时尽量提高传输效率的目的, 需要根据受能无人单元执行预定任务时的三维位置变化和中继端搭载的无线供能、受能设备性能对链路中各类中继平台的数量和位置进行优化.

由于决策变量中各型中继端数量的取值决定了中继端的坐标数量, 将各型中继端的数量和坐标编码在同一个个体中会导致各个个体的染色体长度不同. 在进化计算中, 长度不同的染色体无法进行交叉过程, 因此以最大化链路传能效率为优化目标对中继端位置单独进行内层优化, 并基于其返回的优化结果和其他相关参数完成对链路中中继端的数量、各型中继端搭载的无线供能设备类型和各型中继端搭载的无线受能设备类型及数量的外层优化.

就本文的动态无线传能链路双层优化而言, 其外层优化是一个双目标非线性优化问题; 内层优化是一个单目标非线性优化问题. 采用智能进化算法可以有效求解工程实践中的各类非线性优化问题^[18-19], 其中 NSGA-II 在求解 3 个以下目标的非线性优化问题时表现出了优异的性能^[11], 在求解工程实践中的非线性优化问题方面有着广泛的应用^[18], 因此, 选择 NSGA-II 作为内层优化问题的求解方法. CCMO 作为最新的约束多目标优化框架, 在多个测试问题上表现出了超越以往约束多目标优化算法的求解性能^[12], 其特性也适合本文的问题求解, 因此选择 CCMO 求解外层优化问题.

本文在外层优化中基于预先给定的供能端坐标和受能无人单元在执行任务中的位置信息进行目标函数计算. 由于受能无人单元的空间位置是连续变化的, 在优化过程中可以采用上一个任务时间周期内链路所需的各类中继平台数量、链路中各个中继平台的最优位置作为当前时间周期内内层进化算法求解的搜索起点, 以实现针对当前任务时间周期内供能链路的各个决策变量的双层快速迭代优化.

在双层迭代求解中, 外层优化的决策变量为链路中的中继无人机数量 N_{sa} 、中继无人机搭载的大型/小型无线受能设备数量 $N_{\text{hr}}^{\text{sa}}/N_{\text{lr}}^{\text{sa}}$ 、表示中继供能无人机

是否携带大型无线供能设备的布尔变量 $u_{\text{bool}}^{\text{sa}}$, 以及链路中的中继供能车数量 N_{sg} 、中继供能车搭载的大型/小型无线受能设备数量 $N_{\text{hr}}^{\text{sg}}/N_{\text{lr}}^{\text{sg}}$ 、表示中继供能车是否携带大型无线供能设备的布尔变量 $u_{\text{bool}}^{\text{sg}}$; 优化目标为最大化链路平均传能效率、最小化链路中继成本. 内层优化的决策变量为链路中各个中继端的三维坐标, 优化目标是最大化链路传能效率. 对于 $u_{\text{bool}}^{\text{sa}}$, 其值为 1 时表示中继无人机搭载大型无线供能设备, 其值为 0 时表示中继无人机搭载小型无线供能设备. $u_{\text{bool}}^{\text{sg}}$ 的表示逻辑与 $u_{\text{bool}}^{\text{sa}}$ 类似.

图 2 为动态无线传能链路双层迭代优化的目标值计算流程. 首先, 输入规划所需的相关背景参数, 传入外层优化个体对应的决策变量. 然后在循环中将时间周期索引计数加 1, 采用 NSGA-II 开始内层优化: 基于该时刻链路中供能、受能端的坐标以及各类中继端数量、中继端搭载的无线供受能设备情况, 以最大化链路传输效率为目标对链路中各中继端的位置进行优化; 基于内层优化结果计算当前时间周期内的链路传能效率和中继端运行成本, 并进行记录. 最后, 当时间周期索引 t 等于 T/t_{inc} 时跳出循环, 基于循环中每个时刻的记录计算外层优化的目标函数值.

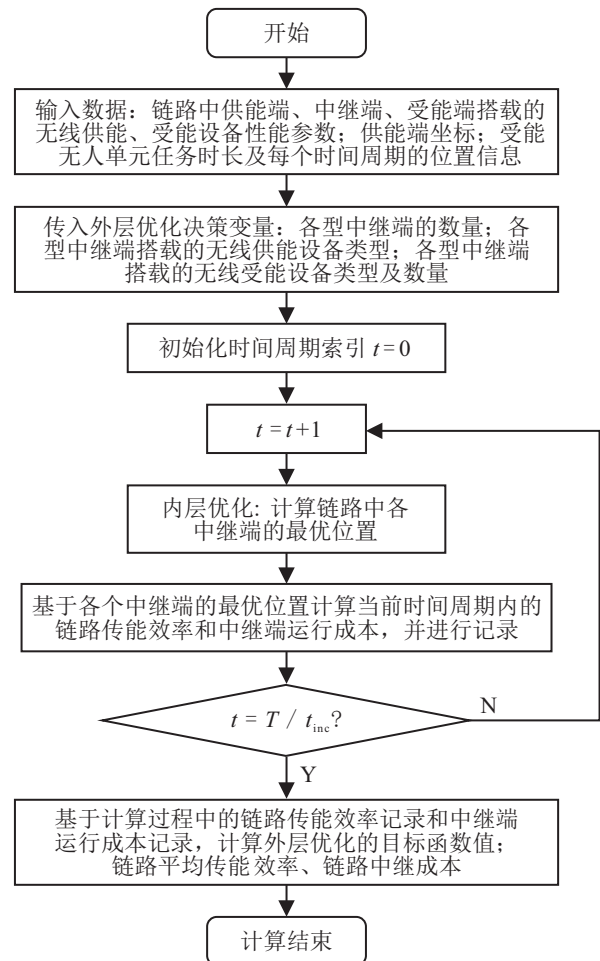


图 2 双层迭代中外层优化的目标值计算流程

基于前文已经确定的优化目标、决策变量及其约束条件,动态无线传能链路多目标规划问题可以描述如下.

外层优化目标函数

$$\min F_{\text{obj}} = (1 - \eta_{\text{link}}^T, C_{\text{link}}); \quad (15)$$

内层优化目标函数

$$\min(1 - \eta_{\text{link}}). \quad (16)$$

约束条件

$$(N_{\text{sa}}, N_{\text{sg}}, N_{\text{hr}}^{\text{sa}}, N_{\text{hr}}^{\text{sg}}, N_{\text{lr}}^{\text{sa}}, N_{\text{lr}}^{\text{sg}}) \geq 0; \quad (17)$$

$$u_{\text{bool}}^{\text{sa}}, u_{\text{bool}}^{\text{sg}} \in \{0, 1\}; \quad (18)$$

$$(1 - u_{\text{bool}}^{\text{sa}})m_{\text{ls}} + u_{\text{bool}}^{\text{sa}}m_{\text{hs}} + m_{\text{lr}}N_{\text{lr}}^{\text{sa}} + m_{\text{hr}}N_{\text{hr}}^{\text{sa}} \leq m_{\text{loadsa}}^{\text{max}}; \quad (19)$$

$$(1 - u_{\text{bool}}^{\text{sg}})m_{\text{ls}} + u_{\text{bool}}^{\text{sg}}m_{\text{hs}} + m_{\text{lr}}N_{\text{lr}}^{\text{sg}} + m_{\text{hr}}N_{\text{hr}}^{\text{sg}} \leq m_{\text{loadsg}}^{\text{max}}; \quad (20)$$

$$\min(P_{\text{maxr}}^{\text{rei}}, P_{\text{maxs}}^{\text{rei}}) \geq P_{\text{tspd}}^{\text{rei}}, \quad (21)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{re}}\}; \quad (21)$$

$$Z_{\text{min}}^{\text{sa}} \leq Z_{\text{sa}} \leq Z_{\text{max}}^{\text{sa}}. \quad (22)$$

其中: F_{obj} 为双目标的目标函数,由于优化算法中需要将最大化目标转为最小化目标,实验中以链路平均传能损耗率 $(1 - \eta_{\text{link}}^T)$ 替代链路平均传能效率 η_{link}^T 作为目标值之一;在约束条件中, m_{hs} 、 m_{ls} 分别为高功率、低功率无线供能设备重量; m_{hr} 、 m_{lr} 分别为高功率、低功率无线受能设备重量; $m_{\text{loadsa}}^{\text{max}}$ 、 $m_{\text{loadsg}}^{\text{max}}$ 分别为中继无人机和中继供能车的最大载重,链路中的每个中继端最多搭载一套型号可选的无线供能设备,无线受能设备可以搭载多套,但搭载的无线供能设备总重量不能超过其最大载重; $P_{\text{maxr}}^{\text{rei}}$ 、 $P_{\text{maxs}}^{\text{rei}}$ 分别为链路中第 i 个中继端的最大发射功率和最大接收功率,在中继端工作时它们都需要大于链路在该中继端进行中继的实际功率 $P_{\text{tspd}}^{\text{rei}}$; N_{re} 为链路中中继端总数; Z_{sa} 为中继无人机位置的 Z 轴坐标; $Z_{\text{min}}^{\text{sa}}$ 、 $Z_{\text{max}}^{\text{sa}}$ 分别为中继无人机的最小工作高度和最大工作高度.

对动态微波无线传能链路多目标规划问题进行求解时,设定外层优化的种群个体数为 25,最大迭代次数为 100;内层优化种群个体数设为 25,最大迭代次数依据每次内层优化的实际决策变量数目按既定规则浮动;遗传算子均采用模拟二进制交叉(SBX)和多项式变异(PM),具体参数参考文献[11, 20]中的相关讨论进行设置.求解中的染色体编码采用实数编码,外层优化中每条染色体由 8 个基因(决策变量)组成,即 $[N_{\text{sa}}|N_{\text{sg}}|N_{\text{hr}}^{\text{sa}}|N_{\text{hr}}^{\text{sg}}|N_{\text{lr}}^{\text{sa}}|N_{\text{lr}}^{\text{sg}}|u_{\text{bool}}^{\text{sa}}|u_{\text{bool}}^{\text{sg}}]$;内层优化中每条染色体由 n 个基因组成 ($n = 3 \times N_{\text{re}}$),即 $[X_{\text{re}}^1|Y_{\text{re}}^1|Z_{\text{re}}^1|X_{\text{re}}^2|Y_{\text{re}}^2|Z_{\text{re}}^2|\dots|X_{\text{re}}^n|Y_{\text{re}}^n|Z_{\text{re}}^n]$. 链

路中各平台、设备数量应为整数,且 $u_{\text{bool}}^{\text{sa}}$ 和 $u_{\text{bool}}^{\text{sg}}$ 是布尔值,在优化过程中需进行相应处理.为了加快计算,在生成初始种群时,所有无上界约束的决策变量将依据链路规划的输入信息,设置一个不影响最终优化结果的取值上限.在产生内层优化的初始种群时,中继端的坐标 $(X_{\text{re}}, Y_{\text{re}}, Z_{\text{re}})$ 取值范围如下:

$$\begin{aligned} X_{\text{ps}} &\leq X_{\text{re}} \leq X_{\text{pr}}, \\ Y_{\text{ps}} &\leq Y_{\text{re}} \leq Y_{\text{pr}}, \\ Z_{\text{ps}} &\leq Z_{\text{re}} \leq Z_{\text{pr}}, \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $(X_{\text{ps}}, Y_{\text{ps}}, Z_{\text{ps}})$ 、 $(X_{\text{pr}}, Y_{\text{pr}}, Z_{\text{pr}})$ 分别为供能端、受能端的坐标.

4 案例研究

为验证规划模型的有效性和正确性,本文基于实际测量的无人机执行预定任务的数据以及从相关文献和各类商用无人平台公开数据中整理出的链路规划所需的各平台、设备的技术参数和成本数据[4,7-10,21-22],为执行任务的无人机进行动态无线传能链路的规划.

规划中各平台、设备相关数据以及性能参数设置见表 1~表 3. 规划过程中不考虑地形变化,地面障碍带设置和无人机任务路径的 X - Y 平面示意如图 3 所示.图 3 中:原点为供能端位置,无人机任务路径上间隔不等的圆圈表示在任务总时间中均匀选取的 9 个时间点上无人机的位置.

表 1 供能端及受能端相关参数

平台	供能端	受能端
是否搭载大型无线供能设备	是	否
搭载大型无线受能设备数	0	0
搭载小型无线受能设备数	0	2
电价/(元/(kW·h))	0.769	—
储能损耗/(元/(kW·h))	6.3063	—
空气阻力系数	—	0.2
任务中的平均功率需求/W	—	100

表 2 中继端相关参数

平台	中继无人机	中继供能车
空载重量/kg	9.1	21
最大载重/kg	6	19
工作电压/V	22.2	48
空气阻力系数	0.2	0.45
滚动阻力系数	—	0.036
最大工作高度/m	500	—
最小工作高度/m	10	—
机体购置成本/元	23 321	50 000
储能购置成本/元	6 678	20 000
机体寿命/h	3 000	20 000
储能寿命/h	150	3 000

表 3 供能、受能设备相关参数

设备	设备价格/元	寿命/h	最大发射/接收功率/W	接收天线孔径/m ²
大型无线受能设备	13 300	18 000	600	2
小型无线受能设备	5 200	18 000	150	0.5
大型无线供能设备	180 000	13 500	3 000	—
小型无线供能设备	40 000	13 500	500	—

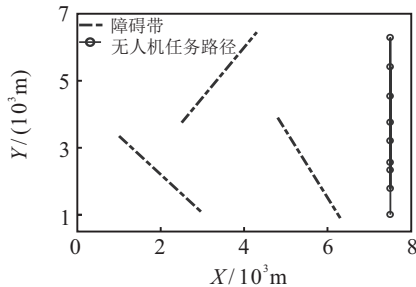


图 3 地面障碍带设置和无人机任务路径

在优化中,地面障碍带会使穿过它的微波波束功率衰减至原有功率的 30%,记为障碍带减益 η_{de} . 为简化计算,地面障碍带不设置具体高度属性,分以下 3 种情况计算障碍带对链路中某段两点间直接无线传能效率的减益:当链路中的地面节点(供能端、中继供能车)和需要与其进行直接无线传能的地面节点的连线共穿过了 n 个障碍带时,该段两点间无线传能传输效率需要乘以 η_{de}^n ;当链路中的空中节点(受能端、中继无人机)和需要与其进行直接无线传能的地面节点的连线穿过了 n 个障碍带时,该段两点间无线传能传输效率需要乘以 η_{de}^{n-1} ;空中节点之间的直接无线传能不受障碍带影响.

无人机的预设任务是以 500 m 的飞行高度在间距 5 400 m 的两点间往返拍摄沿途地面建筑,执行任务中无人机的飞行高度不变. 无人机坐标信息在气温 26 摄氏度、西南风、地表风力 3 级条件下采集,信息采集对象为当前在售的某款四轴航拍无人机. 由于需要采集数据的任务时长(2.5 h)超过该型无人机无能量输入时的最大续航时间,整体数据集由分段采集的数据拼接得到.

5 实验结果

利用 CCMO 和 NSGA-II 算法对动态无线传能链路多目标规划问题进行双层迭代求解时,首先生成含有 25 个个体的外层优化初始种群,然后进行 100 次双层迭代进化. 在迭代时,针对外层优化每一代的每一个个体都要完成一次完整的内层优化. 内层优化的种群个体数同样设为 25. 由于在测试中内层优化结果收敛所需的迭代次数随着内层优化决策变量个数的增多而增大,内层优化的最大迭代次数依据决策变量数在 50~300 之间取值. 优化中 t_{inc} 设为 1 s, T 设为 9 000 s.

求解动态无线传能链路多目标规划模型得到的最后一代,即最优帕累托前沿如图 4 所示. 可以看出,图 4 展现的最优帕累托前沿在横轴和纵轴上的取值跨度都较小,解方案的目标值呈现出在几个离散的小区域密集分布的形态. 这并不是因为算法性能问题导致的解分布不均匀或是求解陷入局部最优,而是因为对于本实验的供能端受能端距离和设备性能而言,链路中需要的中继端总数较少(最优帕累托前沿上的解方案最多选择了 3 个中继端). 导致最优帕累托前沿在链路中继成本上和链路平均传能效率上跨度较小,前沿中各个帕累托解在几个离散的小区域聚集. 因此,图 4 中的前沿形态符合理论预期,双层迭代求解已经找到了最优帕累托前沿. 由图 4 中帕累托前沿的趋势可以看出,链路中继成本(C_{link})目标与链路平均传能损耗率($1 - \eta_{link}^T$)目标间有着明显的负相关关系,一个平均传能效率更高的动态无线传能链路需要以更高的链路中继成本为代价;最优的链路规划方案将是权衡这两个优化目标得到的方案,不存在可以使链路中继成本目标和链路平均传能损耗率目标同时最小的规划方案.

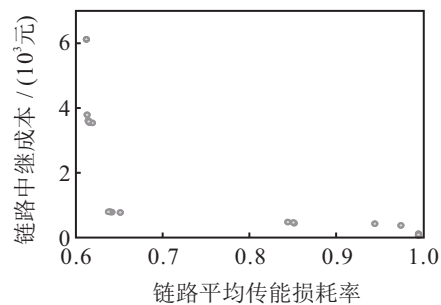


图 4 动态无线传能链路多目标规划的最优帕累托前沿

在经过 100 次迭代得到的最优帕累托集合中,非支配的候选解个数为 25,即最终获得了 25 种非支配的动态无线传能链路规划方案. 这些方案在理论上都是最优方案,决策者可以根据自己的偏好选择一个最合适的规划方案. 在方案选择方面,有很多方法可以用来辅助决策者进行决策^[23-25]. 例如,决策者采用期望水平方法^[26]选择方案时,可以指定在某个目标上需要达到某一个期望值,而后选择能够达到这个期望值,同时在另一目标上表现最优的解方案. 由于最优帕累托前沿包含了较多方案,考虑到图 4 中反映的前沿形态,这里在每个目标值密集分布的小区域选取

表4 帕累托前沿上代表性解对应的规划方案(外层优化部分)

方案序号	N_{sa}	N_{sg}	N_{hr}^{sa}	N_{hr}^{sg}	N_{lr}^{sa}	N_{lr}^{sg}	u_{bool}^{sa}	u_{bool}^{sg}	η_{link}^T	$C_{link}/\text{元}$
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0057	0
2	0	1	0	5	0	13	0	1	0.0260	352 375.4
3	0	2	0	4	0	2	0	1	0.0560	413 869.6
4	0	3	0	4	0	0	0	0	0.1487	423 923.4
5	0	3	0	5	0	1	0	0	0.1560	454 221.7
6	1	2	0	1	2	0	0	0	0.3487	767 621.0
7	1	2	1	1	1	2	0	0	0.3623	789 113.2
8	2	1	3	2	0	10	0	0	0.3808	353 4209.6
9	2	1	2	1	0	19	0	0	0.3868	378 461 6.2
10	2	1	1	2	4	16	0	0	0.3877	6 112 947.6

一个有代表性的解进行进一步分析. 这些解方案的外层优化决策变量取值和目标值如表4所示,表中目标值已将链路平均传能损耗率($1 - \eta_{link}^T$)转换为链路平均传能效率 η_{link}^T ,并将方案按照 η_{link}^T 的值进行升序排列.

表4中,方案1未在链路中添加中继端,此时虽然链路中继成本为0,但链路的平均传能效率仅有0.57%. 以如此低的传能效率进行无线能量传输将会产生巨大的能源浪费,这种方案在实际应用中是不可行的. 相比之下,方案2仅在链路中添加了一辆中继供能车作为中继端,即可使链路平均传能效率相对方案1提高了456.14%(达到2.60%). 当然,2.60%的平均传能效率同样具有较低的实际应用可行性,但方案2与方案1相比有巨大提升,充分表明在链路中添加数量合适的中继端可以有效提高链路平均传能效率.

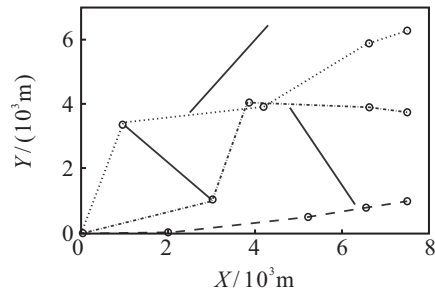
事实上,实验的求解结果不仅包括表4列出的外层优化方案结果,还包括与外层优化方案一一对应的内层优化结果:链路中的中继端在每个任务时间周期内的位置坐标. 这里抽取3个时刻,以方案4和方案7的内层优化结果为例对链路中各个节点的位置进行进一步分析,所选时刻和该时刻链路中受能端的坐标如表5所示. 由于X-Y平面图上无法反映中继无人机的飞行高度,将方案7内层优化结果中对应时刻的中继无人机坐标也列于表5.

表5 所选时刻及其对应的受能端坐标

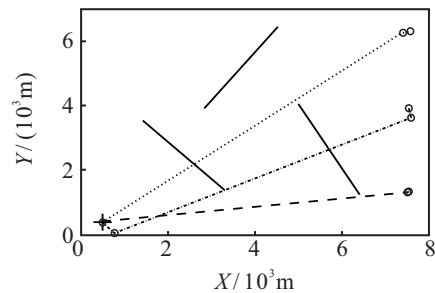
时刻/s	受能端坐标	中继无人机坐标
$t = 1000$	(7 500.26, 1 001.83, 498.87)	(12.93, 16.97, 10.02)
$t = 2000$	(7 500.43, 3 756.33, 99.32)	(312.27, -368.13, 10.8)
$t = 3000$	(7 499.75, 6 284.42, 500.71)	(15.62, -8.32, 10)

首先以链路中中继端只由3辆中继供能车构成的规划方案4为例,对不含中继无人机的供能链路内层优化结果进行分析. 对方案4在上述3个时刻链路中各个节点的X-Y平面位置进行绘制,结果如图5(a)

所示. 图中每条链路起始节点为供能端节点,终点是该时刻的受能端节点位置. 可以看到,在链路中仅有供能车作为中继节点的情况下,方案4的链路在所选时刻都绕过了障碍带进行能量传输,且传能链路贴近障碍带边界. 这样的内层优化结果符合这类优化问题的最优解的一般形态^[27],能够在一定程度上表明,在链路中只含有供能车的情况下,内层优化能够找到使当前时刻链路传能效率最高的链路部署位置.



(a) 方案4在所选时刻的链路X-Y平面位置



(b) 方案7在所选时刻的链路X-Y平面位置

图5 内层优化典型结果示意

以链路中包含1架中继无人机和两辆供能车的方案7为例,对含中继无人机的链路内层优化结果进行分析. 方案7链路中各个节点在所选时刻的X-Y平面位置如图5(b)所示,链路中中继无人机所在位置用圆圈加十字标出. 由图5(b)可见,各个时刻传能链路中的中继无人机节点与某个中继供能车节点间都进行了直接跨过障碍带的能量传输,且最多都只跨

过一条障碍带以规避再次穿过障碍带产生的大幅减益. 相比图5(a), 图5(b)中链路的一个突出特点是中继节点主要分布在供能端和受能端附近. 这主要是因为图5(b)中链路包含一架中继无人机; 该无人机的存在使得方案7中微波能量的链路传输可以跨越一条障碍带, 因此链路形态可以接近一条直线. 中继无人机自身能耗较高, 在靠近供能端的位置上可以以较高效率从链路中采集能量, 获得链路中继成本上的优势, 并通过使一辆中继供能车尽量靠近受能天线孔径为常量参数的受能端的方式减少几何衰减. 总体而言, 图5(b)所示的中继端的构成与链路位置最终在链路平均传能效率方面和链路中继成本方面都表现出了较好的效果.

经过前文对求解所得的最优帕累托前沿的深入分析, 总体而言求解得到的最优帕累托解符合基于输入数据信息和模型约束情况对求解结果的预期, 解方案从中继端类型、数量、搭载设备的选择到各时刻链路的位置都表现出良好的优化效果, 本文的无线传能动态链路多目标规划模型的有效性得到了验证. 在本文的微波动态无线传能链路中进行中继传能能够有效提高链路的平均传能效率, 决策者可权衡传能效率要求和经济成本预算在最优帕累托前沿上选择合适的方案.

6 结论

针对利用无线传能技术延长移动无人单元不间断工作时间这一问题, 本文提出了基于微波无线传能技术, 通过一定数量的中继端将微波能量从发射端传输到接收端的供能方式. 首先, 选取微波无线传能作为动态无线传能链路的传能方式, 讨论了通过中继传输微波能量减少传能中几何衰减的可行性; 然后, 构建了动态无线传能链路多目标规划模型, 并根据问题特点采用两种进化算法对模型进行了双层迭代求解; 最后, 基于实测数据以及从相关文献和公开资料中整理出的相关研究, 通过对求解结果进行深入分析, 验证了模型的有效性和微波能量中继传输在减少微波无线传能过程中的几何衰减、提高动态无线传能链路平均传能效率方面的重要作用. 微波无线传能的几何衰减随着传能距离的增大急剧增加, 在供能端微波激发发散角一定、受能端天线孔径有限的情况下, 为长距离微波无线传能的供能端与受能端之间添加适当数量的中继端可以有效减少传输过程中的几何衰减; 由于中继端的可移动性, 特别是中继无人机可以在空中部署的特性, 在供能端到受能端的点对点直线传能受障碍物遮挡时, 供能端凭借灵活移动的中继

端可以绕过或者跨越障碍物对受能端进行不间断的无线传能. 这些特性体现了构建基于微波无线传能的动态无线传能链路的可行性和微波能量中继传输在实际应用中的价值.

后续将以本文的规划模型和双层迭代求解方法为基础, 面向实际应用需求对其进行修改和完善, 并基于求解所得规划方案构建实际的微波无线传能链路, 对链路传能效率进行实际测算以验证理论成果. 本文的研究成果可为后续关于无线传能网络的理论研究和工程化设计提供理论支持.

参考文献(References)

- [1] Fitra M, Elvy S. Wireless power for mobile battery charger[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2017, 6(2): 278-285.
- [2] Bi S, Zeng Y, Zhang R. Wireless powered communication networks: An overview[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(2): 10-18.
- [3] Zach Rosenberg. AUVSI: Laser motive, lockheed demonstrate real-world laser power[DB/OL]. <https://www.flightglobal.com/news/articles/auvsi-lasermotive-lockheed-demonstrate-real-world-laser-375166/>.
- [4] 黎深根, 陈仲林, 宋磊, 等. Ku波段微波无线输能系统技术研究[J]. 微波学报, 2019, 35(4): 56-61. (Li S G, Chen Z L, Song L, et al. Research on Ku-band microwave wireless energy transmission system technology[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(4): 56-61.)
- [5] Becker D E, Chiang R, Keys C C, et al. Photovoltaic-concentrator based power beaming for space elevator application[M]. Scottsdale: AIP, 2010: 271-281.
- [6] Yao Y, Song L W, Liu Y L. Subarray partition design of receiving antenna for microwave power transmission[C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Guangzhou: IEEE, 2019: 1-3.
- [7] 刘敏, 刘锡国, 牟京燕, 等. 无线光通信光功率衰减模型分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2136-2140. (Liu M, Liu X G, Mou J Y, et al. Analysis of optical power attenuation model for wireless optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2136-2140.)
- [8] Ales Prokes. Atmospheric effects on availability of free space optics system[J]. Optical Engineering, 2009, 48(6): 066001 (1-9).
- [9] Husagic Alma, Wajdi Al-Khateeb. Effect of weather conditions on quality of free space optics links (with focus on malaysia)[C]. Proceeding of the International Conference in Computer and Communication Engineering. Piscataway: IEEE, 2008: 1206-1210.
- [10] Sheikh M S, Kohldorfer P, Leitgeb E. Channel modeling for terrestrial free space optical links[C]. Proceedings of the 7th International Conference Transparent Optical

- Networks. Piscataway: IEEE, 2005: 407-410.
- [11] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [12] Tian Y, Zhang T, Xiao J H, et al. A coevolutionary framework for constrained multiobjective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2021, 25(1): 102-116.
- [13] 孙跃, 戴欣, 唐春森, 等. 分布式无线电能传输网[J]. 电力电子, 2010, 8(3): 59-61.
(Sun Y, Dai X, Tang C S, et al. Distributed wireless power transmission network[J]. Power Electronics, 2010, 8(3): 59-61.)
- [14] 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[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(10): 146-151.
(Sun Y, Yang F X, Dai X. Wireless power transmission network networking based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(10): 146-151.)
- [15] Xiang L, Sun Y, Dai X, et al. Route optimization for wireless power transfer network based on the CE method[C]. Electronics and Application Conference and Exposition. Piscataway: IEEE, 2015: 630-634.
- [16] 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络路径寻优[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 30-36.
(Sun Y, Xia J F, Tang C S, et al. Optimization of wireless power transmission network path using cellular genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4): 30-36.)
- [17] Dickinson R M. Performance of a high-power, 2.388 GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km[C]. IEEE MTT-S Digest. Piscataway: IEEE, 1976: 139-141.
- [18] Song Y, Liu Y, Wang R, et al. Multi-objective configuration optimization for isolated microgrid with shiftable loads and mobile energy storage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 95248-95263.
- [19] Guo Y, Zhang X, Gong D, et al. Novel interactive preference-based multiobjective evolutionary optimization for bolt supporting networks[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2020, 24(4): 750-764.
- [20] Purshouse R C, Fleming P J. On the evolutionary optimization of many conflicting objectives[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 770-784.
- [21] 古毅. 纯电动汽车动力性分析与匹配计算实例研究[J]. 汽车实用技术, 2017(10): 146-148.
(Gu Y. Case study of power analysis and matching calculation of pure electric vehicle[J]. Automobile Practical Technology, 2017(10): 146-148.)
- [22] Ma H H, Xu H, Li X, et al. A highly efficient microwave wireless power transmission system[J]. Space Electronic Technology, 2016(1): 1-5.
- [23] Wang R, Purshouse R C, Fleming P J. "Whatever works best for you" — A new method for a priori and progressive multi-objective optimisation[C]. Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Berlin: Springer Heidelberg, 2013, 7811: 337-351.
- [24] Wang R, Purshouse R C, Giagkiozis I, et al. The iPICEA-g: A new hybrid evolutionary multi-criteria decision making approach using the brushing technique[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 243(2): 442-453.
- [25] Purshouse R C, Deb K, Mansor M M, et al. A review of hybrid evolutionary multiple criteria decision making methods[C]. IEEE Congress on Evolutionary Computation. Beijing: IEEE, 2014: 1147-1154.
- [26] Fonseca C M, Fleming P J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1998, 28(1): 26-37.
- [27] Haeser G, Liu H C, Ye Y Y. Optimality condition and complexity analysis for linearly-constrained optimization without differentiability on the boundary[J]. Mathematical Programming, 2019, 178(1/2): 263-299.

作者简介

宋元明(1997—), 男, 硕士生, 从事混合能源系统、无线电能传输网络规划、智能优化算法方面的理论与应用等研究, E-mail: ysong9701@sina.com;

刘亚杰(1975—), 男, 研究员, 博士, 从事装备、后勤保障领域辅助决策理论方法及应用等研究, E-mail: liuyajie@nudt.edu.cn;

王锐(1986—), 男, 副研究员, 博士, 从事进化计算、多目标优化、强化学习等研究, E-mail: ruiwangnudt@gmail.com;

张涛(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与优化、能源互联网优化调度技术和智能微电网能量管理技术等研究, E-mail: zhangtao@nudt.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)