

# 一种基于多节点充电模型的 按需顺带充电方案

水九生,徐向华

(杭州电子科技大学计算机学院,浙江杭州 310018)

**摘要:** 在无线可充电传感器网络中,针对提高充电能量效率问题,提出了一种按需多节点顺带充电调度方案.考虑移动充电器在为请求节点充电时,允许其为覆盖范围内的非请求节点同时充电.为了进一步减少分组个数,通过对已有的算法改进提出了一种更有效的启发式算法,并证明了停止点选择的正确性.分析了低效率分组对充电性能的影响,并提出了拆分低效率分组的有效策略,以局部优化行驶路径.仿真结果表明,在离线和按需场景中,所提算法和方案可以减少能耗和提高充电能效.

**关键词:** 无线可充电传感器网络; 移动充电器; 多节点充电模型; 按需充电

**中图分类号:** TN92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2021)02-0346-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.12263/DZXB.20200363

## An On-Demand Passer-by Charging Scheme Based on Multi-node Charging Model

SHUI Jiu-sheng, XU Xiang-hua

(School of Computer Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** To improve the charging energy efficiency in wireless rechargeable sensor networks (WRSNs), this paper proposes an on-demand multi-node passer-by charging (OMPC) scheduling scheme. Mobile chargers are considered to be allowed to simultaneously charge unrequested nodes within the range of coverage while charging the request nodes. To further reduce the number of groups, a more effective heuristic algorithm is proposed compared with the existing algorithms, and the correctness of the selection of the stopping points is proved. In this paper, the effect of low-efficiency grouping on charging performance is analyzed, and an effective strategy for splitting low-efficiency grouping is proposed to optimize the travel path locally. Simulation results show that in offline and on-demand scenarios, the proposed algorithm and scheme can reduce energy consumption and improve charging efficiency.

**Key words:** wireless rechargeable sensor networks; mobile charger; multi-node charging model; on-demand charging

### 1 引言

无线可充电传感器网络(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSNs)中的传感器节点通常由容量有限的电池供电,稀缺的能量资源阻碍了网络持续运行.为了解决传感器节点的能量约束问题,传统的解决方案有:更换传感器<sup>[1]</sup>,节能技术<sup>[2]</sup>和能量收集技术<sup>[3]</sup>.然而,更换传感器的成本太高;节能技术只能延缓却不能弥补传感器消耗的能量;且能量收集技术容易受外部环境影响.

无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术的突破为能量供应问题提供了一种新的思路. Kurs 等人<sup>[4]</sup>研发了一种称为磁共振耦合的技术,该技术不需要任何的插头与电线,能够在一定距离内实现全向稳定高效的能量传输.此外, Kurs 等人<sup>[5]</sup>指出通过适当调整耦合谐振器,可以实现向多个设备同时传输能量的增强技术,并表明对多个设备同时充电的整体输出效率优于对每个设备单独充电的输出效率.在 WRSNs 中,借助 WPT 技术,如何调度移动充电器(Mobile Charger, MC)为传感器节点充电是一个热门的研究问题<sup>[6]</sup>.

现有的研究大多都是周期性充电方案<sup>[7-9]</sup>,即 MC 按照预先规定的固定路径重复地为网络中的所有节点充电.然而,周期性充电方案忽略了网络动态变化因素,通常会导致低充电性能以及节点死亡.按需充电方案可以按需应变地为发送充电请求的节点服务<sup>[10-14]</sup>.但是,现有按需充电大多数都是单节点充电方案<sup>[10-12]</sup>,且多节点充电方案仍有一些亟待解决的问题<sup>[13,14]</sup>.如未充分利用对多个节点同时充电的功能;节点分组方法有待进一步优化;以及未考虑低效率分组对充电性能的影响等.

受到上述启发,本文研究了基于多节点充电模型的按需充电能量效率最大化问题,提出了一种按需多节点顺带充电(On-demand Multi-node Passer-by Charging, OMPC)调度方案,主要贡献如下:

(1) 在对请求节点充电时,同时考虑对一些非请求节点顺带充电;

(2) 提出了一种改进的算法用于减少分组的数量,并证明了停止点选择的正确性;

(3) 分析了低效率分组对充电性能的影响,并设计了拆分低效率分组的有效策略;

(4) 对所提的算法和方案分别在离线和按需场景中进行了评估.

## 2 相关工作

在周期性充电方案中,假设传感器节点的能量和网络路由信息呈周期性变化.Xie 等人<sup>[8]</sup>将网络区域划分为正六边形的蜂窝单元,让 MC 停靠在每个正六边形的中心为传感器充电,以最大化 MC 的休息时间比例.文献<sup>[9]</sup>中把无线充电器和基站绑定到一个移动平台,目标是减少整个系统的能量消耗.实际上,周期性充电方案并不适合动态变化的网络,通常导致低充电性能及节点死亡.

在按需充电方案中,当传感器的剩余能量低于某个阈值时,会向 MC 发送充电请求<sup>[10-14]</sup>.然后,根据制定的服务策略调度 MC 为请求节点充电.He 等人<sup>[10]</sup>提出了按照 NJNP(Nearest-Job-Next with Preemption)的规则来调度 MC 为节点充电,并从系统吞吐量和充电延迟方面评估了 NJNP 的性能.文献<sup>[11]</sup>中提出了一种 TSCA(Temporal-Spatial Charging scheduling Algorithm)算法,并在理论上分析了 TSCA 的特征.Khelladi 等人<sup>[13]</sup>提出了按需多节点充电(On-demand Multi-node Charging, OMC)方案,OMC 包含 TTL(Threshold-based Tour Launching)策略,通过对节点分组来优化 MC 的能量消耗.文献<sup>[14]</sup>在文献<sup>[13]</sup>的基础上将多节点充电技术和使用多个 MC 相结合,研究了如何避免 MC 之间出现聚集电磁辐射的问题.本文基于文献<sup>[13]</sup>的思想,研究

了按需多节点充电中的最大化充电能量效率问题.

## 3 问题建模

### 3.1 网络模型

本文考虑 WRSNs 包含:(1)  $n$  个同类可充电的静态传感器节点;(2) 一个具有多节点充电功能的 MC;(3) 一个基站(Base Station, BS).如图 1 所示,节点随机部署在二维平面内的一个正方形区域中,每个节点的电池容量相同.MC 可以对多个节点同时充电,能量传输功率  $p_t$ 、行驶速度  $v$ 、行驶能耗率  $q$  都是常数.BS 作为数据收集的汇聚节点位于区域的中心.每轮充电结束后,MC 返回 BS 休息并补充能量.通过无线通信,节点可以自组织成多跳系统,数据以中继的方式转发到 BS.

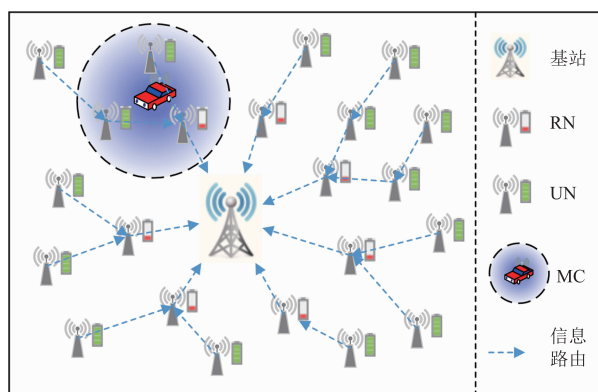


图1 无线可充电传感器网络模型

当节点的剩余能量达到某个阈值时,就会向 MC 发送充电请求.MC 将请求节点存储到服务队列  $Q$  中.此外,与 MC 的充电和行驶时间相比,假设转发充电请求所需的时间忽略不计<sup>[10]</sup>.本文将网络中的节点分为两类:请求节点(Request Node, RN)和非请求节点(Unrequested Node, UN).对于每轮充电,MC 的起点和终点都是基站位置  $s_0$ .有序集合序列  $P = (s_0, s_1, s_2, \dots, s_k, s_0)$  表示充电路径,路径的长度为:

$$L = \sum_{j=0}^{k-1} d_{s_j, s_{j+1}} + d_{s_k, s_0} \quad (1)$$

其中  $k$  是停止点的个数,  $s_j$  表示路径中第  $j$  个停止点,  $d_{s_i, s_j}$  表示两个任意停止点  $s_i$  与  $s_j$  之间的欧式距离.

### 3.2 能量消耗模型

如图 1 所示,位于 BS 附近的节点需要为其它远程节点转发数据.因此,离基站较近的节点的能耗率要远高于其它远程节点<sup>[12]</sup>.所以,节点的能量消耗率与节点和 BS 之间的距离成反比关系:

$$p_i = p_{\min} + \left(1 - \frac{d_{i, s_0}}{d_{\max}}\right) \times (p_{\max} - p_{\min}) \quad (2)$$

其中  $p_{\max}$  和  $p_{\min}$  表示网络中节点的最大和最小能耗率,  $d_{\max}$  表示正方形区域中 BS 与节点之间的最大欧式距

离,  $d_{i,s_j}$  表示节点  $i$  与 BS 之间的欧式距离.

每轮充电中 MC 消耗的能量  $E_{\text{total}}$  包含充电能耗  $E_{\text{charging}}$  和行驶能耗  $E_{\text{travel}}$ :

$$E_{\text{total}} = E_{\text{charging}} + E_{\text{travel}} = \sum_{j=1}^k p_i t_c(s_j) |N_c(s_j)| + qL \quad (3)$$

其中  $p_i t_c(s_j) |N_c(s_j)|$  表示 MC 在停止点  $s_j$  处消耗的充电能量,  $p_i$  是 MC 的能量传输功率,  $t_c(s_j)$  是充电持续时间,  $|N_c(s_j)|$  是同时充电的节点个数.  $qL$  是 MC 消耗的行驶能量.

### 3.3 能量传输模型

充电模型如图 2 所示,  $R_{\text{max}}$  是 MC 的充电半径. MC 在某个停止点为请求节点充电时, 可以同时为  $R_{\text{max}}$  内的非请求节点充电. 在停止点  $s_j$  覆盖范围内的充电节点集合为  $N_c(s_j) = N_r(s_j) \cup N_u(s_j)$ , 其中  $N_r(s_j)$  是请求节点集合,  $N_u(s_j)$  是非请求节点集合. 当某个停止点覆盖范围内的请求节点充满电时, MC 才会移动到下一个停止点.

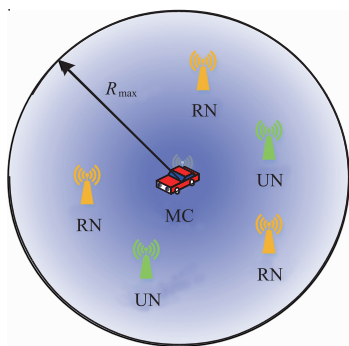


图2 充电模型

在每轮充电中, 对每个请求节点充电的原则是仅充电一次且充满电. 假设当前 MC 在停止点  $s_j$  处, 其充电范围内的请求节点  $i$  的能量接收率为:

$$r_i(s_j) = \mu(d_{i,s_j}) p_i \quad (4)$$

其中  $d_{i,s_j}$  是节点  $i$  与停止点  $s_j$  之间的欧式距离,  $\mu(d_{i,s_j})$  是无线充电效率函数<sup>[8,13]</sup>, 其值随着  $d_{i,s_j}$  的增加而衰减. 当分组内只有一个节点时, 选取节点的位置为停止点<sup>[13]</sup>. 此时 MC 与节点之间的距离在数学上视为 0,  $\mu(d_{i,s_j})$  取值为 1. 因此,  $0 < \mu(d_{i,s_j}) \leq 1$ .

要为电池容量为  $c_i$  的请求节点  $i$  充满电所需的时间为:

$$t_i(s_j) = \frac{c_i - \max(0, re_i)}{r_i(s_j) - p_i} \quad (5)$$

其中  $re_i$  是 MC 到达停止点  $s_j$  时请求节点  $i$  的剩余能量, 当  $re_i \leq 0$  时, 表示节点已经死亡.  $r_i(s_j) - p_i$  是请求节点  $i$  的净能量接收率, 且  $r_i(s_j) > p_i$ .

MC 需要为停止点  $s_j$  覆盖范围内的所有请求节点充满电, 则 MC 在  $s_j$  的充电停留时间  $t_c(s_j)$  为:

$$t_c(s_j) = \max_{i \in N_c(s_j)} (t_i(s_j)) \quad (6)$$

在每轮充电调度过程中, 对非请求节点充电的原则如下:

(1) 不影响 MC 在每个停止点的充电停留时间;

(2) 每次对非请求节点部分充电, 其获得的能量取决于 MC 在停止点的停留时间, 并且允许在不同停止点处对非请求节点多次充电, 直到充满电为止.

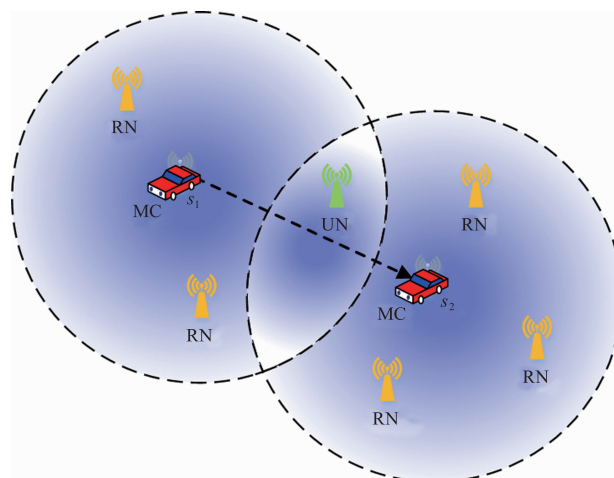


图3 在不同停止点对非请求节点多次充电

如图 3 所示, 绿色的非请求节点在 MC 到达停止点  $s_1$  和  $s_2$  先后被充电了两次. 若 MC 在停止点  $s_j$  处的充电时间为  $t_c(s_j)$ , 其充电范围内的非请求节点  $i'$  最多能够接收的净能量, 即 MC 向非请求节点  $i'$  传输的能量  $te_{i'}(s_j)$  为:

$$te_{i'}(s_j) = (r_{i'}(s_j) - p_{i'}) \cdot t_c(s_j) \quad (7)$$

由于节点的电池容量大小是有限的. 因此, MC 在停止点  $s_j$  完成充电后, 假设  $ge_{i'}(s_j)$  是非请求节点  $i'$  最终获得的能量, 则  $ge_{i'}(s_j)$  为 MC 传输的能量和节点  $i'$  充满电所需的能量两者之中的较小值:

$$ge_{i'}(s_j) = \min(te_{i'}(s_j), c_{i'} - \max(0, re_{i'})) \quad (8)$$

其中  $c_{i'} - \max(0, re_{i'})$  是当 MC 到达停止点  $s_j$  时, 非请求节点  $i'$  已消耗的能量, 即为  $i'$  充满电所需的能量.

### 3.4 问题定义

基于以上系统模型, 本文制定了一个最大化充电能量效率问题, 形式化定义如下:

$$\max \frac{E_{\text{receive}}}{E_{\text{total}}} = \frac{\sum_{j=1}^k \left( \sum_{i=1}^{|N_c(s_j)|} (c_i - \max(0, re_i)) + \sum_{i'=1}^{|N_c(s_j)|} ge_{i'}(s_j) \right)}{\sum_{j=1}^k p_i t_c(s_j) |N_c(s_j)| + qL} \quad (9)$$

约束条件为式(1) ~ 式(8), 以及:

$$d_{i,s_j} \leq R_{\text{max}}, \quad i \in N_c(s_j), \quad s_j \in P \quad (10)$$

$$t_a(s_{j+1}) = t_a(s_j) + t_c(s_j) + \frac{d_{s_j, s_{j+1}}}{v}, \quad s_j, s_{j+1} \in P \quad (11)$$

$$re_i = re_i - p_i \cdot t_c \quad (12)$$

其中式(9)中节点接收的总能量  $E_{\text{receive}}$  与 MC 消耗的总能量  $E_{\text{total}}$  的比值表示每轮的充电能量效率. 式(10)表示充电距离约束. 式(11)描述了相邻两个停止点之间的充电过程, 其中  $t_a(s_j)$  是到达停止点  $s_j$  的时间. 式(12)表示经过时间  $t_e$  后节点剩余能量的更新过程.

## 4 解决方案

针对上述问题, 本文提出了一种 OMPC 方案, 每轮充电包含三个步骤. 首先, 收集充电请求并决定何时启动充电. 然后, 对收集到的所有请求节点分组并确定停止点. 最后, 使用 TSP 规划一条可行的路径, 并拆分低效率分组, 确定最终的充电路径.

### 4.1 请求节点的收集与充电启动

该步骤使用文献[13]中提出的 TTL 策略. 该策略使用两个阈值  $L_c$  和  $L_r$ , 其中  $L_r$  是请求阈值,  $L_c$  是充电启动阈值, 且  $L_c \leq L_r$ . 收集请求节点和充电的启动过程如下: 当任何节点的剩余能量水平低于  $L_r$  时, 节点就会向 MC 发送请求充电的消息, MC 将请求节点存储在队列  $Q$  中. 当有节点的剩余能量低于第二个阈值  $L_c$  时, 节点就会发出一条警告消息, MC 收到警告消息时就会启动新一轮的充电. MC 将会对  $Q$  中的所有请求节点服务, 并会继续收集其他充电请求.

### 4.2 请求节点分组与停止点的确定

在全向多节点充电模型中, 每个节点都有一个能量接收圆, 它是指以节点位置为圆心,  $R_{\text{max}}$  为半径创建的圆. 如图4所示, 节点1和节点2分为一组, 节点3单独为一组, 选择阴影区域 A1 和 A2 中的坐标为停止点可以得到两个停止点, 此时是最优的分组个数. 但是确定最少的分组个数是一个 NP-hard 问题<sup>[13,15]</sup>, 当存在大量的请求节点时, 无法在多项式时间内得到最优解.

在文献[13,15]中提出了一个 MSP (Minimum Stop

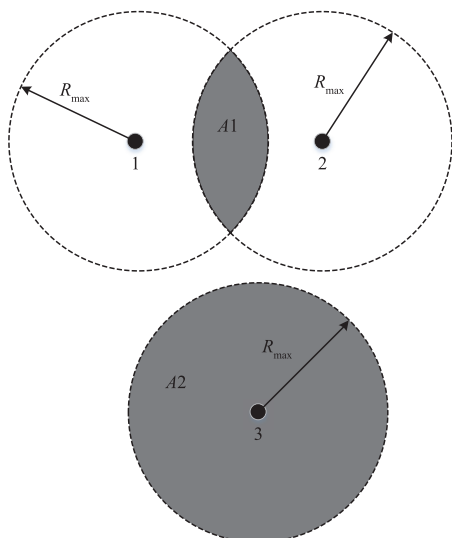


图4 节点分组与停止点选择

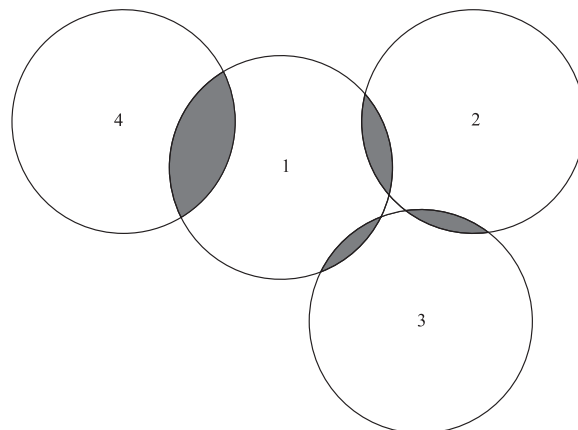


图5 MSP存在的问题

Planning) 算法将节点分组转化为团划分问题求解, 但 MSP 求解的分组个数有待进一步优化. 如图5所示, 应用 MSP 算法, 节点1, 2, 3 会形成一个团, 节点4 单独为一个团. 由于节点1, 2, 3 对应的能量接收圆之间没有公共的交集, MSP 把节点1 分离为独立的节点. 最终形成了3 个分组, 节点2 和节点3 分为一组, 节点1 和节点4 分别单独为一组. 显然, 还可以将节点1 和节点4 分为一组同时充电, 以减少分组的个数. 为此, 本文对请求节点的分组问题提出了一种更有效的启发式算法, 命名为 IGRN (Iteration Grouping for Request Nodes), 如算法1 所示.

#### 算法1 IGRN 算法

```

Input: the queue set  $Q$ 
Output: the groups set  $\Pi$ 
1  $\Pi = \emptyset$ 
2 //创建每个请求节点的能量接收圆
 $D = \text{calculate energy reception disk of each request nodes in } Q$ 
3 repeat //迭代分组直到孤立节点的能量接收圆之间没有交集为止
4 Create graph  $G(V, E)$  given  $D$  //根据能量接收圆的相交情况构造无向图
5 Find the set  $C$  of minimum number cliques in  $G(V, E)$  //求最小团个数
6  $C' = \text{check every clique and isolating nodes on } C$  //节点分离操作
7 Find the set  $C'_u$  of clique member number  $m \geq 2$  from  $C'$ 
8  $\Pi = \Pi \cup C'_u$  //将请求节点个数  $m \geq 2$  的团添加到结果集
9  $D = \text{find all isolate energy reception disk given } C'$  //找出独立圆
10 until no disk intersection in  $D$ 
11 Find the set  $C'_l$  of clique member number  $m = 1$  from  $C'$ 
12  $\Pi = \Pi \cup C'_l$  //将只含有1个节点的团添加到结果集
13 return  $\Pi$ 

```

停止点的候选区域要么来自节点的整个能量接收圆, 要么最终来自几个节点的能量接收圆的交集. 对于前者直接选择节点的位置作为停止点; 对于后者从几个能量接收圆的交集区域中选择停止点, 以便减少停

止点的数量和缩短行驶距离. 为了保证选择的停止点一定在圆的交集区域中, 选取圆交集区域边界上所有交点的算术平均值作为停止点. 定理 1 说明了方法的正确性.

**定理 1** 能量接收圆交集区域边界上所有交点的算术平均值, 一定在交集区域中.

**证明** 由于圆是凸集, 所以圆的交集区域  $S$  还是凸集. 显然, 属于凸集  $S$  的交点个数是有限的, 假设属于  $S$  的边界交点坐标的个数为  $m$  ( $m \geq 2$ ), 表示为  $p_1, p_2, \dots, p_m$ . 由于, 对于任何非负数  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ , 当  $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m = 1$  时, 有  $\sum_{k=1}^m \alpha_k p_k \in S$  成立. 特别地, 当取  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 1/m$  时, 此时  $\sum_{k=1}^m \alpha_k p_k$  表示  $m$  个交点的算术平均值, 则  $m$  个边界交点的算术平均值一定在交集区域  $S$  中.

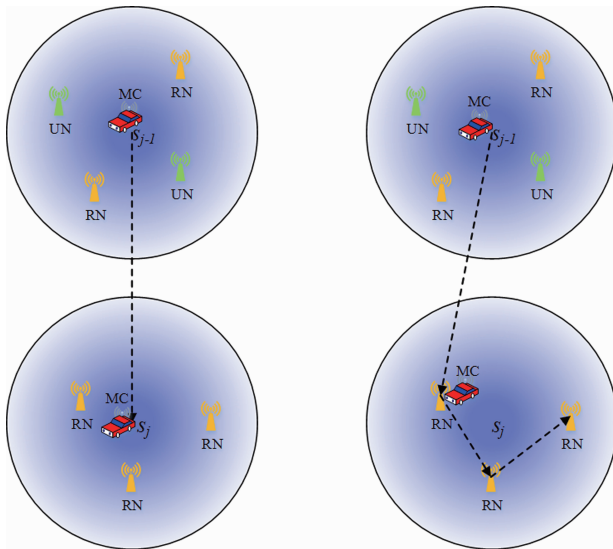
### 4.3 路径规划

为了便于叙述理解, 下面借助一个例子来分析一个分组  $\Pi_j$  是否为低效率分组. 如图 6 所示, 假设 MC 当前位于停止点  $s_{j-1}$  处, 下一个待服务的分组是  $\Pi_j$ , 停止点是  $s_j$ . 图 6(a) 展示了使用同时充电的方式时, MC 从  $s_{j-1}$  出发行驶至  $s_j$  处对分组  $\Pi_j$  内的节点同时充电消耗的能量  $E_M$  为:

$$E_M = d_{s_{j-1}, s_j} \cdot q + p_t t_c(s_j) |N_c(s_j)| \quad (13)$$

图 6(b) 展示了采用逐个充电的方式. 首先以  $s_{j-1}$  为起点, 通过对分组  $\Pi_j$  内的请求节点和  $s_{j-1}$  使用 TSP 形成一个节点序列. 然后, MC 从  $s_{j-1}$  出发依次访问序列中的节点并执行充电任务, 此时 MC 消耗的能量  $E_S$  为:

$$E_S = L_{TSP} \cdot q + \sum_{i=1}^{|N_r(s_j)|} p_t \frac{c_i - \max(0, re_i)}{p_t - p_i} |N_c(s_i)| \quad (14)$$



(a) 使用同时充电的方式

(b) 使用逐个充电的方式

图6 两种不同的充电方式比较

其中  $L_{TSP}$  是路径序列的长度,  $|N_c(s_i)|$  是指以请求节点  $i$  的位置为停止点, 能够被同时充电的节点个数.

若一个分组  $\Pi_j$  是低效率分组, 当且仅当满足以下两个条件:

(1) 分组  $\Pi_j$  内的请求节点个数至少有两个;

(2) 并且  $E_M - E_S > R_{\max} \cdot q$ .

其中条件(2)是一种最糟糕的极端情况, 即假设需要对低效率分组  $\Pi_j$  拆分, 逐个对  $\Pi_j$  中的所有节点完成充电后, MC 所处的最后一个节点位置与停止点  $s_j$  之间的距离为  $R_{\max}$ .

使用逐个充电的方式可以让 MC 停在节点的位置, 因此充电速度很快; 而同时充电需要对每个节点都充满电, 充电花费的时间较长. 当 MC 在某个停止点的充电持续时间较长时, 节约的行驶能量将不能弥补长时间消耗的充电能量. 因此, 为了提高充电性能, 提出了一种有效的算法来处理低效率分组, 算法命名为 SLEG (Splitting Low-Efficient Groups). 算法 2 (SLEG) 的基本思想是: 首先使用 TSP 构造一条基本可行的充电路径, 然后再对路径进行局部优化, 即当出现低效率分组时将其拆分.

### 算法 2 SLEG 算法

Input: the groups set  $\Pi$

Output: the path set  $P$

```

1 //使用 TSP 构造一条基本可行的哈密顿回路
  Generate a shortest Hamiltonian cycle  $H$  by using TSP for  $\Pi$  and BS
2  $P = \emptyset$ 
3 for each group  $\Pi_j$  in  $H$  do //遍历每个分组
4    $N_r(s_j) = \text{get request nodes set from } \Pi_j \text{ in } s_j$ 
5   if  $|N_r(s_j)| < 2$  then //  $\Pi_j$  不是低效率分组
6      $P = P \cup \{\Pi_j\}$ 
7   else
8      $s_{j-1} = \text{get last stop point from } P$  //纪录  $P$  中的最后一个停止点
9     Calculate  $E_M$  using Eqs. (13)
10     $N_{TSP} = \text{ordered set by applying TSP on } N_r(s_j) \text{ and } s_{j-1}$ 
11    Calculate  $E_S$  using Eqs. (14) given  $N_{TSP}$ 
12    if  $E_M - E_S > R_{\max} \cdot q$  then //  $\Pi_j$  是低效率分组
13      for each node  $i$  in  $N_{TSP}$  do //拆分低效率分组
14        create a group  $\Pi_i$  of only contain node  $i$ 
15         $P = P \cup \{\Pi_i\}$ 
16      end for
17    else //  $\Pi_j$  不是低效率分组
18       $P = P \cup \{\Pi_j\}$ 
19    end if
20  end if
21 end for
22 return  $P$ 

```

### 4.4 按需多节点顺带充电过程

在检查并拆分低效率分组后, 将会为 MC 规划一条

行驶路径  $P$ . 随后, MC 将沿着  $P$  访问每个停止点, 并为其覆盖范围内的请求节点和非请求节点同时充电. OMPC 的过程如下:

(1) 筛选出对应每个停止点  $s_j$  的充电节点集合  $N_c(s_j) = N_r(s_j) \cup N_u(s_j)$ ;

(2) 当 MC 在每个停止点  $s_j$  为节点充电时, 由式 (4) ~ 式 (8) 计算出  $N_c(s_j)$  中所有节点接收的能量和

$$\sum_{i=1}^{|N_c(s_j)|} (c_i - \max(0, re_i)) + \sum_{i'=1}^{|N_c(s_j)|} ge_{i'}(s_j);$$

(3) 根据式 (9) 统计节点接收的总能量  $E_{\text{receive}}$  和 MC 消耗的总能量  $E_{\text{total}}$ .

## 5 仿真实验

仿真使用 Java 语言编程来模拟实际的充电过程, 整个实验在 Windows10 系统上运行. 首先, 在离线场景中考虑每个实验都有确定的节点数量, 其目的是为了验证算法 1 和算法 2 的性能. 然后, 在按需场景中对所提的整个 OMPC 方案进行了评估. 实验的对比方案是文献 [13] 中的 OMC (包含 MSP) 和文献 [16] 中的选择传感器节点的位置作为停止点的充电方案 SNP (Stop at Node Position).

### 5.1 离线场景

#### 5.1.1 仿真环境

在离线场景中的实验参数如表 1 所示. 对于每一个模拟, 将 100 到 1000 个传感器随机部署在网络规模为  $100 \times 100 \text{m}^2$  的正方形区域中, 并且这些节点需要补充的能量大小为节点的电池容量大小 50J. 通过对文献 [5] 中的实验数据进行曲线拟合<sup>[8,13]</sup>, 可以得到能量传递效率函数为:  $\mu(d) = -0.0958d^2 - 0.0377d + 1.0$ . 假设 MC 的行驶速度  $v = 2 \text{m/s}$ , 行驶功率  $q = 15 \text{J/m}$ , 传输功率  $p_t = 5 \text{W}$ , 并且允许传感器的最小能量接收功率阈值为  $1 \text{W}$ , 则 MC 的最大充电范围  $R_{\text{max}} = 2.7 \text{m}$ .

表 1 离线场景实验参数

参数(单位)	值
网络规模( $\text{m}^2$ )	$100 \times 100$
节点电池容量大小(J)	50
MC 的行驶速度( $\text{m/s}$ )	2
MC 的充电功率(W)	5
MC 的行驶功率(J/m)	15

#### 5.1.2 实验结果

首先, 为了评估算法 1 (IGRN) 的有效性, 分组个数的对比结果如图 7 所示. 随着节点数量的增加, SNP 的分组数量增加的最快, 其次是 MSP, IGRN 最慢. 这是因为 SNP 直接选择节点的位置为停止点, 没有进行优化. 此外, 开始时 IGRN 和 MSP 的分组数量相当, 但

是随着节点个数的增加, IGRN 和 MSP 之间的差距会越来越大, 由此可见 IGRN 算法的分组性能更好, 尤其是在大规模的网络中. 原因是 MSP 算法只进行了一次节点分组操作, 而 IGRN 通过多次迭代操作对节点进行分组, 且 IGRN 的多次迭代并不会造成较大的计算负担.

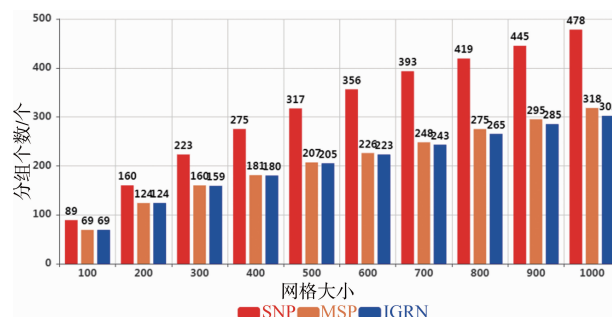


图7 网络大小与分组个数的关系对比

图 8 显示了算法 2 (SLEG) 与 MSP、SNP 在消耗的总能量方面的对比结果. 虽然 SLEG 拆分低效率分组会增加行驶距离, 但不会让 MC 在低效率分组处停留太久, 从而优化了充电能量的消耗, 使得 SLEG 消耗的总能量最少.

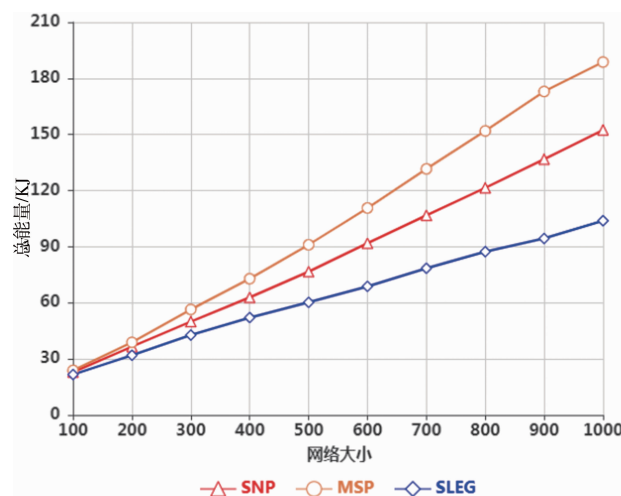


图8 网络大小与总能量的关系对比

### 5.2 按需场景

#### 5.2.1 仿真环境

在按需场景下评估整个 OMPC 方案的性能, 这包括请求节点的收集和对非请求节点顺带充电, 其中每个实验都考虑请求节点的数量从 20 到 200. 假设网络中节点用于传感和通信的能量消耗率最小值  $p_{\text{min}} = 0.01 \text{J/s}$ , 能量消耗率的最大值  $p_{\text{max}} = 0.06 \text{J/s}$ . 请求和充电启动阈值分别为  $L_r = 0.3, L_c = 0.18$ . 为了保证对比结果的可靠性, 三种方案都使用 TTL 策略收集请求节点及启动充电, 其它参数与离线场景中参数相同.

### 5.2.2 实验结果

由于单个 MC 的服务能力有限,随着请求节点的个数增加,就会不可避免地有节点死亡.从图 9 中可以看出 OMPC 的节点死亡率始终小于 SNP 和 OMC.这是由于 OMPC 优化了分组数量以及处理了低效率分组,具有更快的服务速度.

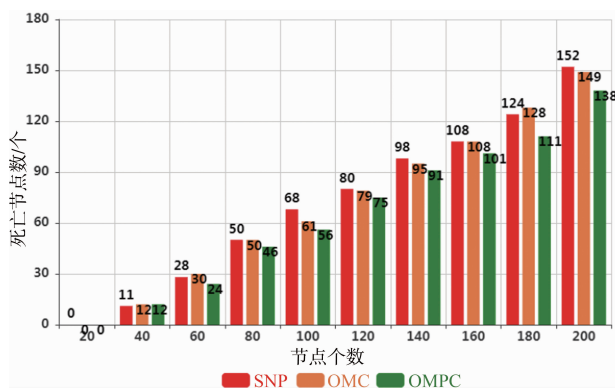


图9 请求节点个数与死亡节点个数的关系对比

在图 10 中比较了三种方案的充电能量效率,可以看出 OMPC 的充电能量效率明显高于其他两种方案.这是因为 OMPC 通过对低效率分组拆分来降低能量消耗,以及为更多的非请求节点充电,从而提高了充电能量效率.

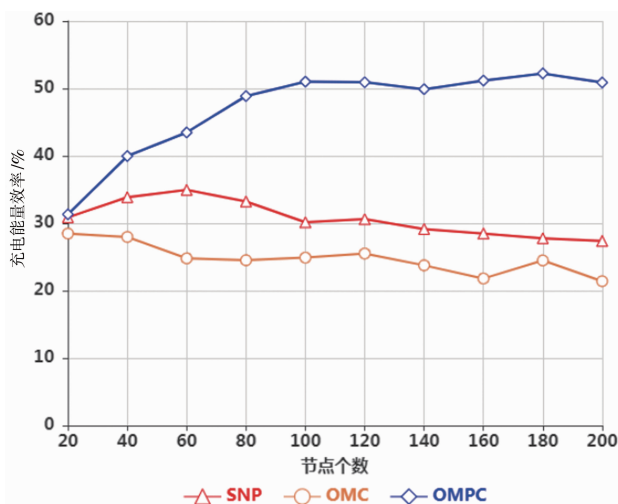


图10 请求节点个数与充电能量效率的关系对比

## 6 结论

本文研究了按需多节点充电调度问题,为了提高 MC 的充电能量效率,提出了一种 OMPC 方案. OMPC 允许 MC 在为请求节点充电时顺带为充电范围内的非请求节点充电.通过对已有算法改进减少分组的个数,并证明了停止点选择的正确性.考虑了低效率分组对充电性能的影响,并提出了拆分低效率分组的有效策略.仿真实验在离线和按需场景中分别评估了算法与方案

的性能.将充电方案扩展到在线式调度方案是今后值得研究的一个问题.

### 参考文献

- [1] Tong B, Wang G, Zhang W, et al. Node reclamation and replacement for long-lived sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(9): 1550 - 1563.
- [2] Anastasi G, Conti M, Di Francesco M, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(3): 537 - 568.
- [3] Kausar A S M Z, Reza A W, Saleh M U, et al. Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 973 - 989.
- [4] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83 - 86.
- [5] Kurs A, Moffatt R, Soljačić M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(4): 044102-1-044102-3.
- [6] 田贤忠, 祝驿楠, 何佳存, 等. 一种射频能量捕获网络移动能量源均衡化充电策略[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2985 - 2992.  
TIAN Xian-zhong, ZHU Yi-nan, HE Jia-cun, et al. A balanced charging scheme for mobile energy transmitter in RF energy harvesting network[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2985 - 2992. (in Chinese)
- [7] Shi Y, Xie L, Hou Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer[A]. Proceedings IEEE INFOCOM[C]. Shanghai, China: IEEE, 2011. 1350 - 1358.
- [8] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case[A]. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)[C]. Seoul, South Korea: IEEE, 2012. 10 - 18.
- [9] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. A mobile platform for wireless charging and data collection in sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1521 - 1533.
- [10] He L, Kong L, Gu Y, et al. Evaluating the on-demand mobile charging in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 14(9): 1861 - 1875.
- [11] Lin C, Zhou J, Guo C, et al. TSCA: A temporal-spatial real-time charging scheduling algorithm for on-demand architecture in wireless rechargeable sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(1): 211 - 224.
- [12] Kaswan A, Tomar A, Jana P K. An efficient scheduling scheme for mobile charger in on-demand wireless re-

- chargeable sensor networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, 114: 123 – 134.
- [13] Khelladi L, Djenouri D, Rossi M, et al. Efficient on-demand multi-node charging techniques for wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2017, 101: 44 – 56.
- [14] Rault T. Avoiding radiation of on-demand multi-node energy charging with multiple mobile chargers [J]. *Computer Communications*, 2019, 134: 42 – 51.
- [15] Khelladi L, Djenouri D, Lasla N, et al. MSR: Minimum-stop recharging scheme for wireless rechargeable sensor networks [A]. *IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC) [C]*. Bali, Indonesia; IEEE, 2014. 378 – 383.
- [16] Ma Y, Liang W, Xu W. Charging utility maximization in wireless rechargeable sensor networks by charging multiple sensors simultaneously [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2018, 26(4): 1591 – 1604.

#### 作者简介



水九生 男, 1992 年出生于安徽阜阳, 现为杭州电子科技大学硕士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络.  
E-mail: water92837@126.com



徐向华(通讯作者) 男, 1965 年出生于浙江金华, 现为杭州电子科技大学教授、博士生导师. 主要研究方向为无线传感网、物联网安全.  
E-mail: xhxu@hdu.edu.cn