

# 无线可充电传感网的高能效移动充电策略

王自强 林 辉

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

**摘 要** 采用无线能量传输技术的移动充电在无线可充电传感网的能量供给中扮演着重要角色。现有相关研究通常忽略了节点在等待充电时的能耗,简化对节点剩余能量阈值的假设,容易使节点耗尽能量而暂停工作。针对这一问题,文中提出一种新的移动充电策略,建立一种节点剩余能量预测模型以匹配节点的充电需求,分别构建了带权路径最小化以及基于带权路径的能量分配最大化问题,并分别采用遗传算法与线性规划对两者进行求解。通过仿真对所提移动充电策略进行了评估并与现有研究进行了对比。结果显示,所提移动充电策略有更高的移动充电能效,可维持网络长期正常工作。

**关键词** 无线可充电传感网,移动充电,能量分配,能效

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## High Energy Efficient Mobile Charging Strategy in Wireless Rechargeable Sensor Networks

WANG Zi-qiang LIN Hui

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** Mobile charging through wireless power transfer technology plays an important role in powering the wireless rechargeable sensor networks (WRSNs). Existing studies usually overlook the energy consumed by nodes during their waiting time before they get charged. These studies also make simplified assumption on the nodes' residual energy threshold, which can easily lead to the suspension of nodes. A novel mobile charging strategy was proposed in this paper so as to solve this problem. A residual energy prediction model was proposed in order to match the nodes' actual energy demand. The weighted path minimization problem and the weighted path based energy allocation maximization problem were formulated and solved with genetic algorithm and linear programming respectively. The proposed mobile charging strategy was then evaluated and compared with existing studies through simulations. The results demonstrate that the proposed strategy can increase the charging energy efficiency and can insure the network to operate permanently.

**Keywords** Wireless rechargeable sensor networks, Mobile charging, Energy allocation, Energy efficiency

## 1 引言

传统无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)中的节点一般由电池供电,这些电池不但容量受限,且对其进行更换维护往往很困难,这成为制约 WSN 进一步发展的瓶颈。Kurs 等<sup>[1-2]</sup>的突破性研究,采用无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)的方式解决了传统 WSN 节点更换电池的问题,催生了无线可充电传感网(Wireless Rechargeable Sensor Network, WRSN)的发展。如何充分利用 WPT 以维持 WRSN 长期稳定地工作成为近来学术界研究的热点问题,其中,利用移动充电器(Mobile Charger, MC)对 WRSN 进行移动充电的方式可以有效减少能量源的定点部署的开销,减少能量耗散,相关文献也对此进行了一定的研究。

Shi 等<sup>[3]</sup>首先研究了单 MC 周期性移动充电中最大化 MC 出站时间占巡回时间比的问题。Xie 等<sup>[4]</sup>则在此基础上利用 WPT 能量传输的全向性,将节点所分布的 2D 平面分割为密集的蜂窝单元,并假设 MC 只在单元中心停留充电,从而实现更高效率的移动充电。Shu 等<sup>[5]</sup>考虑了 WRSN 中的移

动充电器 MC 最优移动速度控制策略,以最大化瓶颈节点的充电量为目标函数从而延长全网络的生存时间,在求解非线性规划问题时采用离散化移动路径的方式将其转换为线性问题,并给出了可证上界的近最优解。然而,这些移动充电策略通常采取遍历 WRSN 所有节点进行充电的方式,在节点能耗速率各异的实际 WRSN 中,遍历所有节点会导致 MC 对高剩余能量节点的不必要访问,从而增大了 MC 的移动距离,在一定程度上降低了移动充电的能效。

为了减少 MC 不必要的移动开销,相关研究采取了基于需求的移动充电策略,即由剩余能量较低的节点主动发起充电请求,而 MC 根据请求对节点进行按需能量分配。文献[6]首次提出了基于需求的移动充电模型,并采用非抢占式的最近节点优先的在线算法以降低充电时延。Fu 等<sup>[7]</sup>则提出能量同步的概念,将节点聚类后按类构建多条 MC 移动路径,从而降低了 MC 的移动能耗,使整个移动充电更为平滑。Khelladi 等<sup>[8]</sup>通过将充电请求分组,实现 MC 在移动充电过程中的停靠次数最小化,进而减少 MC 的移动开销。

尽管 WRSN 的移动充电策略众多,它们的适用场景以及

优化目标也不尽相同,但现有的移动充电策略往往对节点的剩余能量阈值缺乏考虑,同时忽略了节点在等待 MC 充电的过程中仍将继续消耗一部分能量,这使得节点在得到 MC 充电前就可能耗尽剩余能量而暂停工作,进而影响 WRSN 的感知和数据收集任务,使之难以长期稳定运行。再者,现有研究通常采取节点的能耗速率为常数的简化假设,而实际 WRSN 中的节点能耗速率存在一定波动,简化的假设会导致移动充电策略难以应用到实际 WRSN 中,其充给节点的有效能量也会因为与节点的实际能耗不匹配而变得低下。此外,现有研究在对 MC 的移动路径规划上通常只考虑了节点间距离这个单一因素,而忽略了低剩余能量节点对充电的迫切需求,进而影响移动充电的整体能效。

为解决上述移动充电问题,本文提出一种高能效 (High Energy Efficient, HEE) 的移动充电策略,构建了节点剩余能量的预测模型,随后定义了综合考虑节点剩余能量与节点间距离的权值,并提出带权路径的最小化问题,在带权路径的基础上最大化对节点分配的能量。之后,通过仿真分析了节点剩余能量阈值以及工作周期 (operation period) 对 HEE 的能效的影响,并与现有移动充电策略进行了对比,仿真结果显示 HEE 可减少 MC 的移动开销,且有更高的移动充电能效,可以保证 WRSN 长期稳定地运行。

## 2 系统模型

### 2.1 移动充电模型

考虑一个用于室内感知的 WRSN,该 WRSN 包含  $N$  个可充电的固定节点  $v_i (i=1,2,\dots,N)$  及一个固定的 Sink 节点  $v_0$ 。假设任一节点  $v_i$  可与 Sink 进行通信,从而向 Sink 传输数据及自身的充电请求。以  $G=(V,E)$  来表示这个 WRSN,其中  $V=\{v_0, v_1, \dots, v_N\}$  为网络中节点的集合, $E$  表示连接  $V$  中两个邻居节点间的无线链路。此外,一个移动充电器 MC 被用于给 WRSN 中的节点进行充电,且 MC 已知各个节点所处的位置 (可采用文献[9-10]所述的定位方法来确定)。

本文用欧氏空间  $R^2$  中的向量  $x_i$  来表示节点  $v_i (i=0,1,\dots,N)$  的位置,以  $(v_i, v_j)$  表示从节点  $v_i$  到其相邻节点  $v_j$  间的路径,则路径  $(v_i, v_j)$  的距离可表示为  $d(v_i, v_j) = \|x_j - x_i\|$ ,其中  $\|\cdot\|$  表示范数。将节点可存储的最大能量记为  $E_c$ ,并假设所有节点的初始状态都为被充满到  $E_c$ 。

一般情形下,节点的能耗速率是随时间波动的,不同节点之间的能耗速率并不一致,因此各个节点会在不同的时间出现剩余能量匮乏的状况。当一个节点的剩余能量低于一定阈值时,记该阈值为  $\delta E_c$ ,则称此节点处于“饥饿”状态,其中  $0 < \delta < 1$  是设定的阈值常数。当节点  $v_i$  处于饥饿状态时, $v_i$  向 Sink 发送一个充电请求  $CRReq_i = (v_i, E_i, r_i, t_i)$ ,其中  $E_i, r_i, t_i$  分别表示节点的剩余能量、节点能耗速率的估计值和发送此次充电请求的时间戳。

Sink 节点负责维护一个服务队列,该队列用于存放来自处于饥饿状态的节点所发送的充电请求。MC 初始时位于  $v_0$ ,并以固定速度  $s$  进行移动,对这些饥饿状态的节点依次进行充电,随后返回  $v_0$  并对自身携带的能量进行补给。本文引入  $\sigma$  来表示“工作周期” (operation period),并要求 MC 在一个工作周期内完成对各个饥饿节点的充电与自身的能量补给。在上一个工作周期结束的瞬间,MC 读取存放在 Sink 中的服务队列进行移动充电规划,随后从  $v_0$  出发对处于饥饿状

态的节点进行充电。期间,MC 在给某节点充电时需保持静止在该节点附近,而 MC 所经过的节点组成的路径则称为移动充电路径,如图 1 所示。

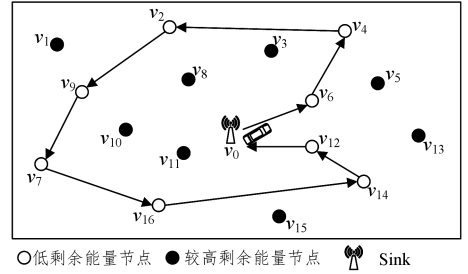


图 1 移动充电路径

记移动充电路径为  $\Gamma = v_0 \rightarrow v_1^* \rightarrow v_2^* \rightarrow \dots \rightarrow v_n^* \rightarrow v_0$ ,其中  $v_i^* (i=1,2,\dots,n)$  为 MC 所到达的第  $i$  个节点。因此,移动充电路径的长度可以表示为:

$$a(\Gamma) = \sum_{j=0}^n d(v_j^*, v_{j+1}^*) = \sum_{j=0}^n \|x_j^* - x_{j+1}^*\| \quad (1)$$

其中,  $v_0^* = v_{n+1}^* = v_0$  即为 Sink 节点。

### 2.2 节点剩余能量预测模型

在节点  $v_i$  所发送的充电请求  $CRReq_i = (v_i, E_i, r_i, t_i)$  中,能耗速率  $r_i$  实际上是关于时间的函数。为了平滑  $r_i$  的波动,将工作周期  $\sigma$  划分为  $m_0$  个等长的时隙  $\tau$ ,即  $\sigma = m_0 \tau$ 。假设在第  $j$  个时隙,节点  $v_i$  读取其自身的剩余能量  $E_i = E_i^{(j)}$ ,其中  $j=1,2,\dots,m_0$ ,此时的时间戳  $t_i = j\tau$ 。节点  $v_i$  可存储最近  $m$  ( $m < m_0$ ) 个时隙所读取的  $E_i$  值。为估计节点能耗速率  $r_i$ ,从存储的  $m$  个读取值中选取最初和最末的  $k$  个值以构成  $k$  个二元组  $(E_i^{(j)}, E_i^{(m-k+j)})$ ,如图 2 所示。

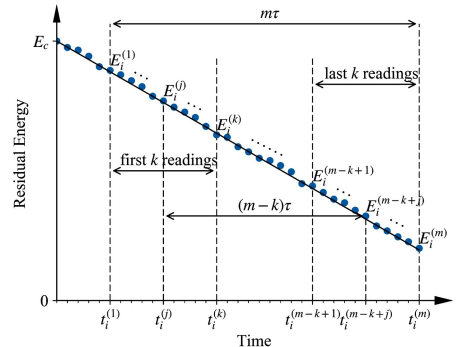


图 2 二元组估计节点能耗速率

节点从第  $j$  个时隙到第  $(m-k+j)$  个时隙期间所耗的能量可表示为  $E_i^{(j)} - E_i^{(m-k+j)}$ ,因此,这  $(m-k)$  个时隙内节点的平均能耗速率为  $(E_i^{(j)} - E_i^{(m-k+j)}) / (m-k)\tau$ 。对  $k$  个二元组计算的节点能耗速率取平均, $r_i$  可表示为:

$$r_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{E_i^{(j)} - E_i^{(m-k+j)}}{(m-k)\tau} = \frac{1}{k(m-k)\tau} \sum_{j=1}^k [E_i^{(j)} - E_i^{(m-k+j)}] \quad (2)$$

与文献[11]类似,本文假设在单个工作周期内,节点的能耗速率变化不大。因此,可以认为在节点发送  $CRReq_i$  之后,在当前工作周期所剩余的,节点仍按照  $r_i$  的速率消耗剩余能量。而后续较长时间内节点的能耗速率变动情况可以通过节点内存储的最近  $m$  个  $E_i$  读数的不断更新来反映。

事实上,在节点  $v_i$  发送充电请求  $CRReq_i$  后,直到  $v_i$  恰好得到来自 MC 的充电, $v_i$  必须等待一段时间。在最坏情况下,等待时间为一个工作周期的时长。例如, $v_i$  在某个工作周期

的开始时刻发送了  $CReq_i$ , 而不得不等到下一个工作周期才得到充电, 如图 3 所示。

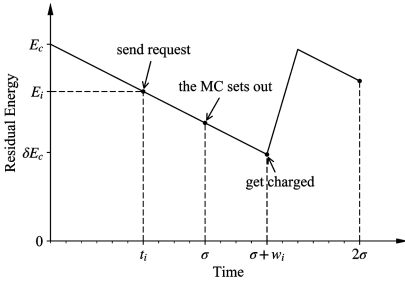


图 3 节点剩余能量预测

在这种情况下, 节点在当前工作周期内仍需消耗约  $\sigma r_i$  的能量, 在工作周期结束的时刻, 其剩余能量为  $E_i - \sigma r_i$ 。因此,  $v_i$  应当在以下条件满足时发送  $CReq_i$ , 即:

$$E_i - \sigma r_i \leq \delta E_c \quad (3)$$

其中,  $\delta E_c$  为预设的节点剩余能量阈值, 用以防止当 MC 出发后尚未抵达节点所在位置时, 节点提前耗尽剩余能量而中断工作。

### 3 移动充电策略

#### 3.1 带权移动路径规划

整个 WRSN 的能耗主要由两部分组成: MC 充给各个节点的能量以及其自身移动所耗的能量, 而这些能量均来自 MC 所携带的能量<sup>[12]</sup>。记  $E_m$  为 MC 可携带的最大能量, 并假设 MC 每移动单位距离(以 m 为单位)所耗的能量为  $\beta$ 。对于移动充电路径, 定义其移动充电能效为充入节点的有效能量比上这部分有效能量与 MC 自身移动耗能之和, 即:

$$\eta(\Gamma, e_1, e_2, \dots, e_n) = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{a(\Gamma)\beta + \sum_{i=1}^n e_i} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{\beta \sum_{i=1}^n \|x_i^* - x_{i+1}^*\| + \sum_{i=1}^n e_i} \quad (4)$$

其中,  $e_i$  为充给节点  $v_i^*$  的能量。考虑到由 MC 自身移动所消耗的能量属于额外开销, 为提高移动充电能效, 有必要通过选取合适的移动充电路径减小这一部分的开销。显然, 当  $n \geq 2$  时, 有多条移动充电路径可供 MC 选取。将所有可行的移动充电路径构成的集合记为  $\Omega$ 。

根据节点  $v_i$  所发的充电请求  $CReq_i$ , 计算  $v_i$  的期望生存时间为  $\epsilon_i = E_i / r_i$ 。一方面, MC 应当优先为期望生存时间较短的节点进行充电以避免这些节点因饥饿而死亡。另一方面, 为减小自身移动所带来的能量开销, MC 需要选取移动距离更短的路径。因此, 定义节点  $v_i$  与  $v_j$  之间的路径的权值如下:

$$\omega_{ij} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon} + \frac{\epsilon_j}{\epsilon} + \frac{d(v_i, v_j)}{d} \quad (5)$$

其中,  $\epsilon = \max\{\epsilon_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ , 而  $d = \max\{d(v_i, v_j) \mid (v_i, v_j) \in \Gamma, \Gamma \in \Omega\}$ 。作为特例, 定义 Sink 节点与节点之间的路径权值如下:

$$\omega_{0i} = \omega_{00} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon} + \frac{d(v_0, v_i)}{d} \quad (6)$$

根据定义的路径权值, 构建如下优化问题(Optimization

Problem), 并记为 OP-I:

$$\min_{\Gamma \in \Omega} \omega(\Gamma) = \sum_{(v_i, v_j) \in \Gamma} \omega_{ij} \quad (7)$$

s. t.  $0 \leq i, j \leq n, i \neq j$

#### 3.2 遗传算法求解带权路径

事实上, OP-I 为旅行商问题(Travelling Salesman Problem TSP)的变种。作为一种经典的 NP 问题, 当  $n$  增大时, OP-I 的解空间会急剧增大, 故本文采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)求解 OP-I。

##### 3.2.1 编码

采用序列编码的方式将移动充电路径按节点索引值序列进行编码。例如, 图 1 中的移动充电路径可编码为“6-4-2-9-7-16-14-12”, 其中编码未包括 Sink 节点  $v_0$  的索引值, 因为  $v_0$  为所有移动充电路径的公共起始与结束位置, 为避免在 GA 后续的交叉与变异运算中改变这一条件, 所有编码后的染色体序列首尾均不含  $v_0$  的索引值, 而  $v_0$  隐含在所对应的移动充电路径中。

##### 3.2.2 适应度函数

适应度函数用于评价染色体个体, 即移充电路径的优劣, 适应度值越高的个体, 被选择的概率就越高。根据式(5)和式(6), 定义染色体  $\gamma$  的适应度为:

$$fit(\gamma) = \frac{1}{\omega_{0i} + \omega_{0j} + \sum_{\substack{i \neq j \\ (v_i, v_j) \in \Gamma}} \omega_{ij}} \quad (8)$$

其中,  $\gamma$  为其对应路径  $\Gamma(\Gamma \in \Omega)$  的编码, 且  $i, j$  分别为  $\gamma$  上的首个和最后一个节点的索引。

##### 3.2.3 选择操作

采用轮盘赌(Roulette Wheel)的选择方式, 每个染色体  $\gamma_i$  被选择的概率为:

$$fit(\gamma_i) / \sum_{i=1}^M fit(\gamma_i) \quad (9)$$

其中,  $M$  表示种群大小, 初始种群中的每个染色体均通过将待充电节点的索引值随机排列产生。

##### 3.2.4 交叉操作

经过选择的个体两两以  $P_x$  为概率进行交叉操作, 本文采用单点交叉的方式, 随机选取父代染色体上两个相邻的节点索引值的中间位置作为交叉点, 两个父代染色体互相交换交叉点后的基因序列片段, 因为交叉后的染色体上可能存在索引值重复的问题, 为保证交换后的染色体解码后仍满足可行解要求, 需要对交叉后的染色体上可能重复的节点索引进行对应替换。例如, 对如图 4 所示的两条染色体进行单点交叉。

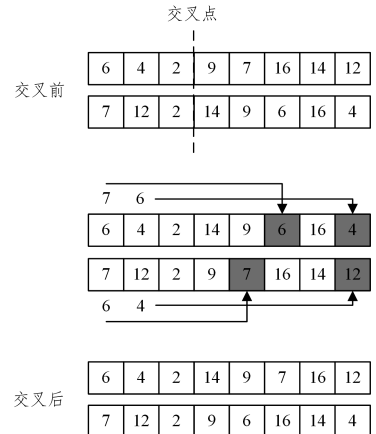


图 4 单点交叉操作



$$b_3 = \begin{bmatrix} p_c(\sigma - t_m - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^n \|x_i^* - x_{i+1}^*\|) \\ E_m - \beta \sum_{i=0}^n \|x_i^* - x_{i+1}^*\| \end{bmatrix}$$

其中,矩阵  $b$  应当满足  $b \geq 0$ 。由于 OP-II 是建立在 OP-I 所求最优解的基础上,因此当充电路径确定时,只要操作周期  $\sigma$  足够大,  $b_1$  和  $b_3$  可视为已满足非负约束。为满足  $b_2$  的非负约束,对于  $b_2$  中的每一行都有:

$$\frac{E_i}{r_i} - (\sigma - t_i) - \frac{1}{s} \sum_{j=0}^{i-1} \|x_j^* - x_{j+1}^*\| \geq 0, i=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

当节点  $v_i^*$  发送  $CReq_i$  时,其剩余能量  $E_i$  满足式(3),将式(3)代入式(17)可得:

$$\frac{\delta E_c}{r_i} + t_i \geq \frac{1}{s} \sum_{j=0}^{i-1} \|x_j^* - x_{j+1}^*\|, i=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

为使式(18)对所有节点均满足,只需考虑最坏情况,即能耗速率最大的节点。记  $r_{\max} = \max\{r_i | i=1, 2, \dots, n\}$ ,注意到  $t_i \geq 0$ ,式(18)经不等式缩放可化为:

$$\delta \geq \frac{r_{\max} \sum_{i=0}^n \|x_i^* - x_{i+1}^*\|}{s E_c} = \frac{r_{\max} \alpha(\Gamma^*)}{s E_c} \quad (19)$$

这表明,为满足线性规划约束要求,使得 OP-II 有解,阈值参数  $\delta$  的选取需满足式(19)。

对于线性规划问题,常见的解法有单纯形法、对偶法等,本文采用对偶法进行求解,所得的  $e_i$  值即为 MC 分配给对应节点的能量。

## 4 仿真分析

为验证所提的移动充电策略的有效性,本文以 MC 对 WRSN 中的所有节点至少完成一次充电为止,将 MC 的移动开销以及移动充电总能效作为评价指标。

仿真环境设置如下:在一个  $100 \times 100 \text{ m}^2$  的范围内随机部署可充电节点,所有可充电节点的能量都被初始化为  $E_c = 10.8 \text{ kJ}$ ,将该区域的中心作为 Sink 节点所在的位置。令 MC 的起始位置为 Sink 所在位置,并初始化 MC 携带的能量为  $E_m = 216 \text{ kJ}$ 。本文采用文献[4]中的能耗模型,节点的感知数据产生率为  $10 \sim 100 \text{ kbps}$ ,发送与收集数据的能耗系数均为  $50 \text{ nJ/bit}$ ,其余参数如表 1 所列。

表 1 参数设置

参数	值	描述
$s/(\text{m/s})$	5	MC 移动速度
$\beta/(\text{J/m})$	5.59	MC 单位距离移动能耗
$p_c/\text{Watts}$	5	MC 充电功率
$\tau/\text{min}$	2	时隙长度
$m_0$	[500, 3500]	单个工作周期内的时隙数
$m$	15	节点可存储的时隙个数
$k$	5	二元组个数
$N$	[20, 100]	节点个数
$\delta$	[0.3, 0.8]	剩余电量阈值
$M$	100	种群大小
$P_x$	0.9	交叉概率
$P_m$	0.05	变异概率
$g$	1000	最大遗传代数

图 5 与图 6 分别显示了在固定节点个数为 50 的情况下,工作周期长度和节点剩余电量阈值对移动充电能效的影响。

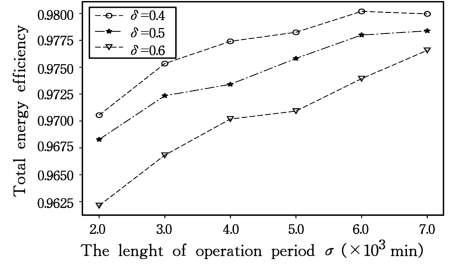


图 5 工作周期对能效的影响

由图 5 可知,移动充电的能效随工作周期时长的增加而增加,在较短的工作周期时长下,MC 需要频繁地从 Sink 出发对少部分节点进行充电,因此大大增加了 MC 在移动上的能量开销,故总体移动充电能效较低。尽管不同的剩余能量阈值下,能效随工作周期时长的变化基本一致,但当剩余能量阈值取值较低而工作周期时长较长时,总能效并没有随之提升(如  $\delta=0.4 \text{ min}, \sigma=7000 \text{ min}$ ),这是因为较长的工作周期使得大量节点的充电请求堆积在一起,部分能耗速度较大的节点成为 WRSN 中的瓶颈,在低剩余能量阈值下,这些节点发起充电请求的时间偏晚,为保证及时对它们进行充电,MC 不得不减少对其他节点的能量分配。

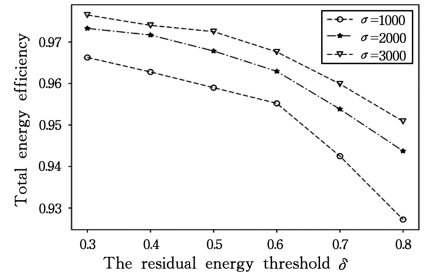


图 6 剩余电量阈值对能效的影响

在图 6 中,随着节点剩余电量阈值增大,移动充电的能效也迅速下滑。较高的剩余电量阈值意味着节点在能量仍然比较充沛的情况下就发起了充电请求,这不但导致 MC 为服务这些能量富裕节点而增大了移动距离,而且还限制了 MC 可分配给节点的能量上限,使得 MC 在每个工作周期中难以充分利用其携带的能量,这一点在工作周期时长较短时显得更为明显。

图 7 与图 8 分别为 HEE 移动充电策略在固定  $\delta=0.4 \text{ min}, \sigma=7000 \text{ min}$  时,与 NJNP<sup>[6]</sup>, ESync<sup>[7]</sup> 在不同网络规模下的 MC 移动开销与总能效的对比。图 7 显示随着节点个数的增多,各移动充电策略的 MC 移动能量开销都随之增大,因为当 WRSN 中总节点个数的增多时,相同时间段内的充电请求数目也随之增多,MC 也相应地需要移动更多的距离对这些节点进行充电。而由图 8 可知,移动充电的能效随节点个数的增多而降低,因为 MC 可携带的能量有限,当 MC 的移动开销增大时,整体的充电能效必然出现下降。

综合图 7 与图 8,与 ESync 以及 NJNP 相比,HEE 移动充电策略的 MC 移动开销更低,移动充电的能效更高,这主要得益于本文综合考虑了节点间距离和节点期望生存时间的移动充电路径,并基于优化的路径来分配充给各个节点的能量。因为在实际移动充电过程中,每次为节点分配的能量的多少

dian Journal of Applied Research, 2011, 3(5): 118-120.

- [4] 钮心忻. 信息隐藏与数字水印[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2004.
- [5] 马文姬,张煜林. 传统 LSB 图像隐藏算法的优化研究[J]. 电子产品世界, 2016, 23(9): 61-63.
- [6] 陈铭,张茹,刘凡凡,等. 基于区域相关性的 LSB 匹配隐写分析[J]. 通信学报, 2010, 31(3): 1-11.
- [7] STINSON D R. Cryptography Theory and Practice (Third Edition)[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.

- [8] 柏森,朱桂斌,曹玉强. 信息隐藏算法及应用[M]. 北京:北京国防工业出版社, 2015.
- [9] 刘洁. 信息隐藏技术及应用[J]. 现代情报, 2004, 24(6): 204-205.
- [10] 奚玲,平西建,张涛. 基于相邻灰度值对互补嵌入的 LSB 匹配隐写改进算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(9): 101-104.
- [11] 郭立甫,高媛,王嘉祯. 图像 LSB 密写的信息隐藏量分析[J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 157-161.

(上接第 319 页)

将影响节点后续的充电请求情况,如果对某一节点在充电时分配的能量较少,该节点会很快再次发起充电请求,导致 MC 不得不频繁访问该节点,从而无形中增大了 MC 的移动距离。此外,因为 HEE 相比 NJNP 和 ESync 增加了对节点剩余能量的估计,同时考虑了节点在等待充电过程中的能耗,从而增大了可分配给节点的能量的上限值,进而提高了移动充电的整体能效。

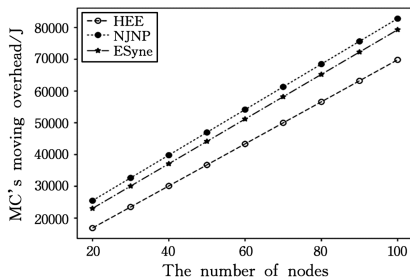


图7 不同节点个数下 MC 的移动开销

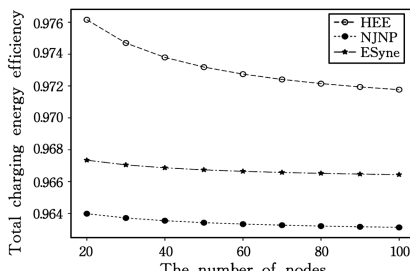


图8 不同节点个数下的充电总能效

**结束语** 本文研究了 WRSN 中的移动充电问题,提出一种高效的移动充电策略 HEE,通过节点剩余能量预测模型使节点能够在预计到自身剩余能量低于阈值时就发送充电请求,同时综合考虑了节点间距离与节点剩余能量来规划 MC 的移动路径,使更低剩余能量且距离更近的节点能够优先得到充电,并使用遗传算法进行求解。在求得的带权路径的基础上,将移动充电的能量分配问题转化为线性规划,使所有节点的充电量总和最大化。仿真结果显示,HEE 通过合适的路径规划与能量分配,降低了 MC 的移动开销,有着更高的移动充电能效,可保证 WRSN 长期稳定地工作。

## 参考文献

- [1] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power

transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.

- [2] KURS A, MOFFATT R, SOLJAČIĆ M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(4): 044102.
- [3] SHI Y, XIE L, HOU Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer [C] // INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE. IEEE, 2012: 1350-1358.
- [4] XIE L, SHI Y, HOU Y T, et al. Multi-node wireless energy charging in sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(2): 437-450.
- [5] SHU Y, YOUSEFI H, CHENG P, et al. Near-optimal Velocity Control for Mobile Charging in Wireless Rechargeable Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(7): 1699-1713.
- [6] HE L, KONG L, GU Y, et al. Evaluating the On-Demand Mobile Charging in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(9): 1861-1875.
- [7] FU L, HE L, CHENG P, et al. ESync: Energy Synchronized Mobile Charging in Rechargeable Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7415-7431.
- [8] 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.
- [9] SHU Y, SHU Y, CHENG P, et al. TOC: Localizing Wireless Rechargeable Sensors with Time of Charge [J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2015, 11(3): 44-66.
- [10] CHANG Z, WU X, WANG W, et al. Localization in Wireless Rechargeable Sensor Networks Using Mobile Directional Charger [C] // IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2015: 1-6.
- [11] XU W, LIANG W, JIA X, et al. Maximizing Sensor Lifetime in a Rechargeable Sensor Network via Partial Energy Charging on Sensors [C] // IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking. IEEE, 2016: 1-9.
- [12] WANG C, LI J, YE F, et al. A Mobile Data Gathering Framework for Wireless Rechargeable Sensor Networks with Vehicle Movement Costs and Capacity Constraints [J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(8): 2411-2417.