

## 网络能耗最小化的射频能量源布置与发射功率设置\*



葛海江<sup>1,2</sup>, 许星原<sup>1</sup>, 刘思杞<sup>1</sup>, 池凯凯<sup>1</sup>, 邱杰凡<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

<sup>2</sup>(杭州职业技术学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

通讯作者: 池凯凯, E-mail: kkchi@zjut.edu.cn

**摘要:** 射频能量捕获是应对无线网络节点能量受限的有效方法之一。射频能量源(energy source, 简称ES)的布置位置和发送功率决定了各个节点的能量捕获功率。现有的研究工作大部分考虑的是没有给定候选位置的场景。然而, 在实际应用场景中, 网络区域往往存在很多不可布置能量源的区域, 使得能量源只能在一些合理的候选位置中布置。目前仅有少量相关工作研究如何在ES的候选布置位置中选择合适布置位置。已知节点位置、节点的能量捕获功率需求值、ES的个数以及ES的候选布置位置, 研究并设计了最小化ES总供能的ES布置与发送功率设置方案。首先将该问题建模为混合整数规划问题; 然后分别提出了一种具有较低复杂度的启发式算法和一种能够达到更小总供能的基于遗传算法的算法。仿真结果表明, 与布置位置随机挑选法相比, 这两种算法的网络总功耗降低了约90%, 而遗传算法可达到比启发式算法高约35%的节能效果。因此, 基于遗传算法的布置算法可用于中小规模的ES布置场景, 而启发式算法可用于大规模的ES布置场景。

**关键词:** 射频能量捕获; 能量源布置; 网络功耗

中文引用格式: 葛海江, 许星原, 刘思杞, 池凯凯, 邱杰凡. 网络能耗最小化的射频能量源布置与发射功率设置. 软件学报, 2019, 30(Suppl. (1)): 1-8. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19001.htm>

英文引用格式: Ge HJ, Xu XY, Liu SQ, Chi KK, Qiu JF. Radio frequency energy source deployment and transmit power setting to minimize the network power consumption. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2019, 30(Suppl. (1)): 1-8 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19001.htm>

## Radio Frequency Energy Source Deployment and Transmit Power Setting to Minimize the Network Power Consumption

GE Hai-Jiang<sup>1,2</sup>, XU Xing-Yuan<sup>1</sup>, LIU Si-Qi<sup>1</sup>, CHI Kai-Kai<sup>1</sup>, QIU Jie-Fan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

<sup>2</sup>(Institute of Information Engineering, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China)

**Abstract.** Radio frequency (RF) energy harvesting is one of the effective methods to deal with the energy limitation of wireless network nodes. The deployment positions and transmit power setting of RF energy sources (ESs) determine the energy harvesting rate of each node. Most of the existing research work considers scenarios where no candidate ES deployment positions are given. However, in the practical application scenario, there are often many areas inside the network region where the ESs cannot be placed. The ESs can only be arranged in some reasonable candidate locations. So far, almost no work has been done to study how to select appropriate deployment positions among candidate deployment positions of ESs. Given the nodes' locations, nodes' energy energy-harvesting-rate demand, the number of ESs and the candidate deployment positions of ESs, design the ES deployment schemes which minimize the total network power consumption. Firstly, the problem is modeled as a mixed integer programming problem. Then a low-complexity approximation heuristic scheme and a genetic algorithm based deployment scheme with lower total network power consumption are proposed, respectively.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61872322); 浙江省基础公益研究计划(LGG18F020005)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61872322); Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province (LGG18F020005)

收稿时间: 2019-09-15; 采用时间: 2019-10-24

Simulation results show that the proposed two schemes reduce the total network power consumption by about 90% as compared to the scheme of randomly selecting the deployment locations and the total network power consumption of genetic scheme can be 35% lower than that of heuristic algorithm. Therefore, the deployment scheme based on genetic scheme can be used for the small and medium-sized ES deployment scenarios, while the heuristic scheme can be used for large-scale ES deployment scenarios.

**Key words.** Radio frequency energy harvesting; energy source deployment; network power consumption

无线传感网络有着广阔的应用领域,如国防军事、环境监测、家庭网络、入侵警报等<sup>[1]</sup>.在某些敌对区域或某些军事战场,无线传感器可以代替人类,对危险的军事领域执行特定的信息数据收集,如核武器、生物化学武器等,以达到军事监视的目标<sup>[2]</sup>.另一方面,传感器可以部署在指定的环境中,用以监测各种自然灾害,如火山状态监测<sup>[3]</sup>;传感器也可以部署在野生动植物栖息地,用来监测野生动植物的生存状态或感知栖息地的环境指标<sup>[4]</sup>.

无线网络中的设备通常由电池供电,比如无线传感器网络.然而在一些场景中,给能量耗尽的设备更换电池是非常麻烦甚至是不可能的,因此设备的生命周期极其受限.应对该问题的方法之一是设计节能技术<sup>[5]</sup>,另一种比较受关注的方法是在设备上进行太阳能或振动动能等能量的采集<sup>[6]</sup>.近些年来,射频能量捕获技术由于能量捕获稳定、捕获强度可控等优点而备受关注<sup>[7-9]</sup>.

2013年,He等人<sup>[10]</sup>研究了射频能量源(energy source,简称ES)的最少化布置问题,分别考虑了点覆盖(保证区域中任意一个点的捕获能量值大于给定的一个工作值)以及路径覆盖问题(节点在规划路径上移动,确保节点的能量捕获功率大于给定的一个工作值).2015年,Zhang等人<sup>[11]</sup>研究了ES布置及其发送功率联合优化问题:给定节点位置和ES的候选布置点,在哪些候选布置点布置ES及设置到哪一档发送功率,满足ES的发送功率总和不超过给定值该条件下最大化能量捕获效益.2015年,我们<sup>[12]</sup>提出了一种新的考虑到不同供能信号存在到达相位差的射频能量充电模型,并提出了两种高效的SET最少化布置算法,使每个传感器节点的捕获功率不小于捕获功率需求.2016年,Dai等人<sup>[13]</sup>首次研究了电磁辐射强度约束下ES布置,在满足网络区域任意一个位置的电磁辐射不高于一个固定值的情况下,设计出一种给定个数ES的最优布置方案,最大化传感节点的能量捕获效益.2016年,Ejaz等人针对软件定义的无线传感网,研究了使每个节点达到其能量捕获需求的ES最少化布置问题<sup>[14]</sup>.

对定向供电模型也有一定的研究.2017年,文献[15]考虑布置好的可充电节点的有向天线朝向是随机的,提出一种近似算法来确定给定个数定向能量源(directional energy source,简称D-ES)的布置位置和朝向,最大化传感器节点的期望总充电效用.2018年,Yu等人研究了连接无线定向充电器的放置问题,并且提出一种具有恒定近似比的近似算法来放置无线能量源使得整体充电效用最大化<sup>[16]</sup>.2019年,文献[17]研究如何使用移动充电器部署可充电定向传感器网络,提出两种算法以确定放置传感器的最小站点子集和传感节点的工作方向.

本文考虑以下使用全向天线的ES布置问题:已知节点位置、节点能量捕获需求值、ES的个数以及ES的候选布置位置,设计最小化网络的总消耗功率的ES布置方案.不同于其他考虑全向天线ES布置问题的工作,本文研究给定ES候选布置的ES布置问题和功率的联合优化问题,以达到网络节能的目的.

## 1 系统模型

本节介绍网络模型和能量捕获模型.

### 1.1 网络模型

$M$ 个节点  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$  分布在一个二维平面上. $N$ 个ES的候选布置位置由集合  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$  来表示.用  $d_{i,j}$  表示节点  $s_i$  和候选位置  $c_j$  之间的距离,其中  $i=1,2,\dots,M$  和  $j=1,2,\dots,N$ .用  $K(K < N)$  表示有待布置的ES个数.用  $C'$  表示  $K$ 个ES的布置位置集合,即  $C' \subset C$ .

### 1.2 充电模型

用  $P_j$  表示布置在候选位置  $c_j$  的ES的射频发送功率,则节点  $s_i$  从布置在候选位置  $c_j$  的ES所捕获的功率可表示为<sup>[11,16]</sup>

$$p_{i,j} = \frac{\alpha}{(d_{i,j} + \beta)^2} P_j \quad (1)$$

其中,  $\alpha, \beta$  是由充电器和设备的硬件以及环境确定的常数.

## 2 问题建模

用变量  $I_i$  来刻画是否在候选布置位置  $c_i$  处放置一个 ES,  $I_i=1$  表示在候选布置位置  $c_i$  处放置一个 ES,  $I_i=0$  表示不在候选布置位置  $c_i$  处放置一个 ES.

因为要在  $K$  个候选布置位置放置 ES, 变量  $I_j (j=1, 2, \dots, N)$  的取值要满足以下约束:

$$\sum_{j=1}^N I_j = K \quad (2)$$

设备  $s_i$  所捕获的功率为

$$p_i = \sum_{j=1}^N I_j p_{i,j} \quad (3)$$

ES 的总供能  $P_T$  为

$$P_T = \sum_{j=0}^N I_j P_j \quad (4)$$

所考虑的供能最小化问题建模如下.

$$\begin{aligned} \text{最小化: } P_T &= \sum_{j=0}^N I_j P_j \\ \text{优化变量: } I_j &\in \{0, 1\} \text{ 和 } P_j, j=1, 2, \dots, N \\ \text{约束条件: } \sum_{i=1}^N I_i &= K \\ 0 \leq P_j &\leq P_{\max}, j=1, 2, \dots, N \\ p_i &\geq \bar{p}_i, i=1, 2, \dots, M \end{aligned}$$

其中,  $\bar{p}_i$  为节点的能量捕获功率需求值,  $P_{\max}$  为能量源的最大发送功率.

由于这是一个整数规划问题, 往往是 NP 难的, 因此本文致力于设计高效的算法来找出较优的解.

算法的主要思路是将问题分解成主问题和子问题: 子问题是给定了  $K$  个 ET 的布置位置, 求解出最优的 ET 的发送功率; 主问题是寻找出  $K$  个 ET 的最优布置位置.

下面先求解子问题. 给定了  $K$  个 ET 的布置位置, 这  $K$  个位置表示为  $c_{j_k} \in C, k=1, 2, \dots, K$ , 即  $K$  个 ET 分别放置在了第  $j_1, j_2, \dots, j_K$  个候选布置位置.

设备  $s_i$  所捕获的功率为

$$p_i = \sum_{k=1}^K p_{i,j_k} = \sum_{k=1}^K \frac{\alpha}{(d_{i,j_k} + \beta)^2} P_k \quad (5)$$

于是, 子问题建模如下.

$$\begin{aligned} \text{最小化: } P_T &= \sum_{j=0}^K P_j \\ \text{优化变量: } P_j, j &= 1, 2, \dots, K \\ \text{约束条件: } \sum_{k=1}^K \frac{\alpha}{(d_{i,j_k} + \beta)^2} P_k &\geq \bar{p}_i, i=1, 2, \dots, M \\ 0 \leq P_j &\leq P_{\max}, j=1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

这是一个线性规划问题, 存在有效的求解方法, 比如单纯形算法.

下面分别提出两种算法来解决主问题:一种是启发式算法,另一种是遗传算法.

### 3 ES 布置位置选取算法

#### 3.1 启发式算法

该算法分为布置位置初始化阶段和布置位置改善阶段.

布置位置初始化阶段如下.在  $N$  个候选布置位置上随机选取  $K$  个位置摆放能量源,然后求解子问题来得到各个能量源的最优发送功率  $P_j$  以及总供能,记该总供能为  $P_T^{\min}$ .

布置位置改善阶段是迭代地改善某一个 ES 的布置位置.每一轮迭代操作如下:按 ES 编号的顺序来依次检查是否可以将第  $k$  个能量源布置位置换到  $N-K$  个空余候选位置中的某一个来降低总功耗,如果可以,则将第  $k$  个能量源布置位置切换到该位置;如果  $K$  个 ES 的布置位置都不能改善,则算法结束.

该启发式算法的伪代码如下.

1. 在  $N$  个候选布置位置上随机选取  $K$  个位置摆放能量源;
2. 求解当前布置位置的子问题来得到各个能量源的最优发送功率  $P_j$  以及总供能功耗,记该总供能功耗为  $P_T^{\min}$ ;
3. Bool=TRUE;
4. **while** (Bool)
5.     Bool=FALSE;
6.     **for**  $k=1,2,\dots,K$
7.         **for**  $j=1,2,\dots,N-K$
8.             暂时将第  $k$  个能量源布置位置切换到第  $j$  个空余候选位置;
9.             计算出布置位置切换后的能量源所需最小总功耗  $P_T$ ;
10.             **if** ( $P_T < P_T^{\min}$ )
11.                 将第  $k$  个能量源布置位置切换到第  $j$  个空余候选位置;
12.                  $P_T^{\min}=P_T$
13.                 Bool=TRUE;
14.             **end for**
15.     **end for**
16. **end while**

下面对该算法的计算复杂度进行简要的分析.首先,子问题是个线性规划问题,使用单纯形算法的期望计算复杂度为  $O(M^2K)$ .前 3 行求解了一次子问题,有复杂度为  $O(M^2K)$ .第 6 行~第 15 行的 **for** 循环最多循环  $K$  次,一次循环操作最多检查  $N-K$  个空余候选位置,而对于每个空余候选要求解一次子问题.仿真发现 **while** 循环次数比较有限,因此总时间复杂度为  $O(NM^2K^2)$ .

#### 3.2 遗传算法

本节提出基于遗传算法的 ES 布置算法:染色体的长度设置为候选位置个数  $N$ ,染色体的第  $i$  个等位基因代表着第  $i$  个候选位置,即第  $i$  个等位基因为 0 则代表第  $i$  个候选位置不放置 ES,第  $i$  个等位基因为 1 则代表第  $i$  个候选位置放置 ES.染色体的适应度定义为其对应的 ES 布置下的最优总供能的倒数,从而总供能越小,适应度值就越大.

该算法步骤如下.

Step 1: 对于  $i=1,2,\dots,M$  和  $j=1,2,\dots,N$ ,计算第  $i$  个节点和第  $j$  个候选布置位置之间的距离  $d_{ij}$ .

Step 2: 种群初始化.随机生成  $m$  个染色体,每个染色体中随机挑出  $K$  个等位基因设置为 1,而其他  $N-K$  个等位基因设置为 0;为每个染色体,计算其 ES 布置下的总供能最小化该子问题,得到各个 ES 的最优发送功率以及

总供能(即得到该染色体的适应度值);将具有最大适应度的染色体表示为  $Ch\_best$ .

Step 3: 初始化迭代次数变量  $Times$  为 0.

Step 4: 选择.在当前这一代  $m$  个染色体中随机挑出 2 个染色体配为一对,进行该操作  $n$  次从而得到  $n$  对染色体.

Step 5: 交叉.如图 1 所示,对每一对染色体(用  $Ch1$  和  $Ch2$  表示)进行如下操作:将  $Ch1$  的前一半基因和  $Ch2$  的后一半基因并凑为一个新的染色体  $Ch3$ ;将  $Ch1$  的后一半基因和  $Ch2$  的前一半基因并凑为另一个新的染色体  $Ch4$ .由于  $Ch3$  和  $Ch4$  有可能值为 1 的基因个数不为  $K$ ,将其进行如下修正:当值为 1 的基因个数  $L$  大于  $K$  时,随机挑选出  $L-K$  个值为 1 的基因,将这些基因值修改为 0;当值为 1 的基因个数  $L$  小于  $K$  时,随机挑选出  $K-L$  个值为 0 的基因,将这些基因值修改为 1.

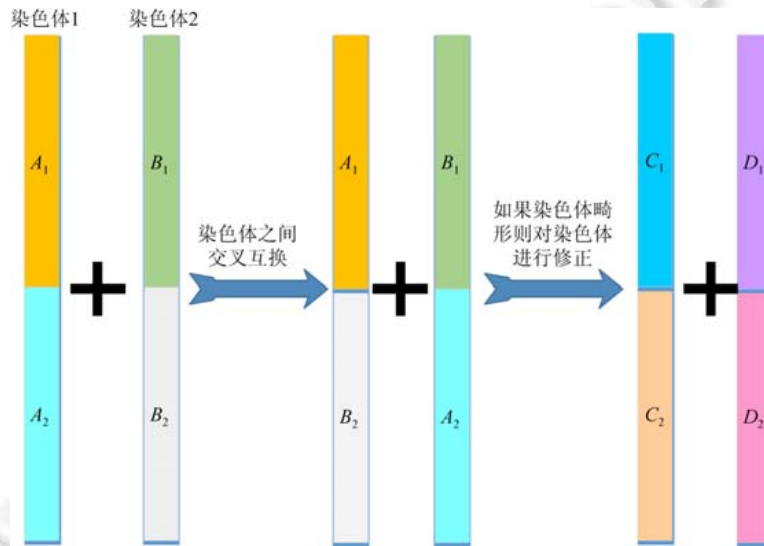


Fig.1 Illustration of chromosome crossing

图 1 染色体交叉示意图

Step 6: 变异.将 Step 6 中生成的  $2n$  个染色体中的每个染色体以 0.5% 的变异概率进行如下变异:在值为 1 的基因中随机挑出一个,将其值修改为 0;在值为 0 的基因中随机挑出一个,将其值修改为 1.

Step 7: 为这  $2n$  个染色体计算适应度值.如果 Step 6 中得到的  $2n$  个染色体中最优染色体  $Ch$  的适应度小于  $Ch\_best$  的适应度,则将这  $2n$  个染色体中适应度排前  $m-1$  个的染色体以及染色体  $Ch\_best$  保留为新一代种群(规模为  $m$ );如果 Step 6 中得到的  $2n$  个染色体中最优染色体  $Ch$  的适应度大于  $Ch\_best$  的适应度,则将  $Ch\_best$  更新为该  $Ch$ ,并将这  $2n$  个染色体中适应度排前  $m$  个的染色体保留为新一代种群.

Step 8:  $Times=Times+1$ ,如果  $Times$  等于预设的循环迭代次数  $H$ ,则算法结束;否则,跳到 Step 4.

下面对该算法的复杂度进行简要分析.Step 1 中,计算节点与位置的距离的计算复杂度为  $O(MN)$ .Step 2 中生成  $m$  个染色体的复杂度为  $O(mN)$ ,计算  $m$  个染色体适应度值的计算复杂度是  $O(mM^2K)$ .每一轮种群更新(即 Step 4~Step 7)中,选择操作的复杂度为  $O(n)$ ;每一对染色体的交叉操作复杂度  $O(N)$ ,所以  $n$  对染色体的交叉操作复杂度为  $O(nN)$ ;每一条染色体的变异操作复杂度为  $O(1)$ ,因此, $2n$  个染色体的变异操作复杂度为  $O(n)$ ;每个染色体适应度的计算复杂度为  $O(M^2K)$ , $2n$  个染色体适应度的计算复杂度为  $O(nM^2K)$ .综上,该算法复杂度为  $O(HnM^2K)$ ,其中  $H$  是迭代次数.

由于  $K$  和  $N$  取值通常不大,比如  $K=4$  和  $N=10$ ,该算法中的  $n$  取值通常大于  $K$ ,且  $H$  的取值远远高于  $N$ ,该算法复杂度高于启发式算法的复杂度  $O(NM^2K^2)$ .

#### 4 性能评估

本节评估所提出的 2 种射频能量源布置与发射功率设置方案的性能,将其与布置位置随机挑选法(简称随机法)进行对比.随机法中的 ES 使用随机挑选出来的布置位置下的最优发送功率.

节点的能量捕获功率模型相关公式参数取值来自文献[13],其中  $\alpha=5, \beta=0.23$ .所有节点有相同的能量捕获功率需求值  $\bar{p}_i=0.05$ .网络区域为  $30\text{m}\times 30\text{m}$ .下面数据图中的每个数据点是 1 000 个随机拓扑的平均结果.每个拓扑中  $M$  个节点的位置及  $N$  个 ES 的候选位置都是在网络区域中随机挑选出来的,然后利用各种算法得到 ES 的布置位置和发送功率,并得到 ES 的总供能.遗传算法的迭代次数为 1 500.

图 2 给出了当  $M=10, N=20$  时,不同能量源个数下 ES 的总功率消耗.由图 2 可以看出,首先,与随机算法相比,所提的启发式算法能够达到低很多的网络总功率消耗,比如当 ES 个数为 3 时,使用随机法时网络的总功率消耗为 12.406,使用启发式算法时网络的总功率消耗为 6.44,显然使用启发式算法达到了更低的网络总功率消耗.另外,由图 2 可以看出,随着能量源个数的增加,使用遗传算法所带来的网络总功率消耗远远比其他两种算法所带来的网络总功率消耗要低.当有 5 个能量源时,使用启发式算法时网络的总功率消耗为 5.3,使用遗传算法时的总功率消耗为 4.08,遗传算法所达到的网络总功率消耗比启发式算法要低 29.9%.综合比较对于不同能量源个数时总功率消耗的 3 种算法,遗传算法节能效果最好,其次是启发式算法,随机算法排在最后.

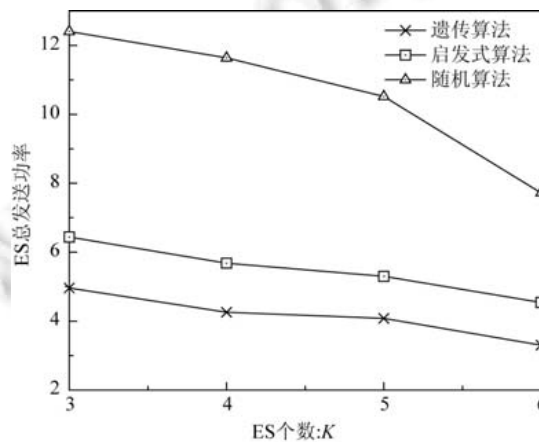


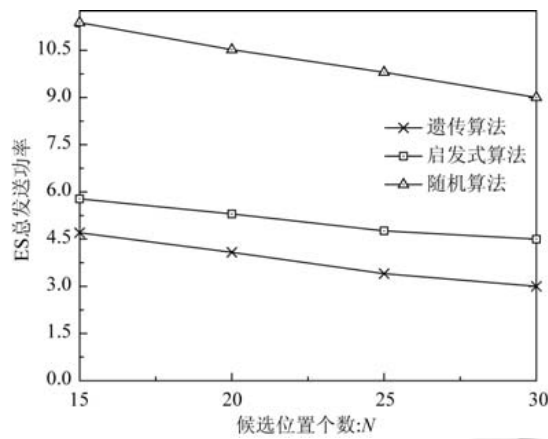
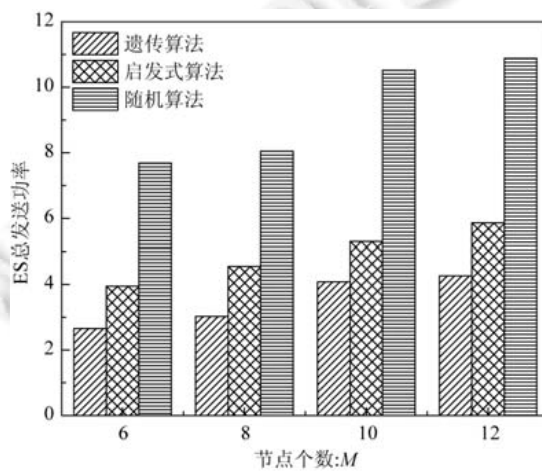
Fig.2 Total power consumption under different number of energy sources,  $M=10, N=20$

图 2 不同能量源个数时总功率消耗,  $M=10, N=20$

图 3 给出了当节点个数  $M=10$ , ES 个数  $K=4$  时,不同候选布置位置数目下的网络总功率消耗.由图 3 可以看出,随着候选布置位置个数的增加,3 种算法的网络总供能都是不断下降的.例如当只有 15 个候选布置位置时,使用遗传算法的网络功率消耗为 4.7,使用启发式算法的网络功率消耗为 5.78,使用随机算法的网络功率消耗为 11.4.但当有 30 个候选位置时,使用遗传算法时网络的总功率消耗为 3.0,使用启发式算法时网络的总功率消耗为 4.5.使用随机算法时网络的总功率消耗为 9.0.

图 4 给出了不同节点个数下的网络总功率消耗.可以看出,随着节点个数的增加,3 种算法所需要的 ES 总发送功率也相应地增加.但遗传算法与其他两种算法相比,具有更小的 ES 总发送功率.此外,值得强调的是,遗传算法比启发式算法具有更高的复杂度,一般要迭代上千轮才收敛到较优值.

综上,遗传算法能够达到比启发式算法更低的网络总功率消耗,而且该降低比率随着问题规模的增大而增大.但考虑到遗传算法的高复杂度,当布置问题的规模偏大而导致遗传算法运行时间不可接受时,可使用启发式算法.

Fig.3 Total power consumption under different number of candidate deployment points,  $M=10, K=4$ 图3 不同候选位置个数时的总功率消耗,  $M=10, K=4$ Fig.4 Total power consumption under different number of nodes,  $N=20, K=5$ 图4 不同节点个数时的总功率消耗,  $N=20, K=5$ 

## 5 结论

本文研究给定候选布置位置的射频能量源高效部署问题,在满足节点捕获到足够能量的前提下,尽可能最小化网络的总功率消耗.文中提出了一种具有较低复杂度的启发式算法和一种能够达到更小网络总功率消耗的基于遗传算法的布置算法.遗传算法能够达到比启发式算法更小的总功率消耗,而且该降低比率随着问题规模的增大而增大.但考虑到遗传算法的高复杂度,当布置问题的规模偏大而导致遗传算法运行时间不可接受时,可使用启发式算法.运行时间取决于所使用的计算机的运算速度,比如使用当前的普通台式机,当节点个数  $M$  和候选布置位置数  $N$  较大(如  $10^4$  数量级)时,遗传算法循环迭代次数为几千次,则可能遗传算法的运行时间不可接受.

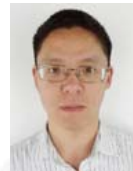
## References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, *et al.* A survey on sensor networks. IEEE Communication Magazine, 2002,40(8): 102-114.

- [2] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, *et al.* Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4):393–422.
- [3] Werner-Allen G, Lorincz K, Ruiz M, *et al.* Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Computing*, 2006,10(2):18–25.
- [4] Mainwaring A, Culler D, Polastre J, *et al.* Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. ACM, 2002. 88–97.
- [5] Dunkels A, Osterlind F, He Z. An adaptive communication architecture for wireless sensor networks. In: *Proc. of the 5th ACM Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. ACM, 2007. 335–349.
- [6] Ulukus S, Yener A, Erkip E, *et al.* Energy harvesting wireless communications: A review of recent advances. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015,33(3):360–381.
- [7] Chi K, Zhu Y, Li Y, *et al.* Minimization of transmission completion time in wireless powered communication networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017,4(5):1671–1683.
- [8] Zhu Y, Chi K, Hu P, *et al.* Velocity control of multiple mobile chargers over moving trajectories in RF energy harvesting wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2018,67(11):11314–11318.
- [9] Yu Z, Chi K, Hu P, *et al.* Energy provision minimization in wireless powered communication networks with node throughput requirement. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2019,68(7):7057–7070.
- [10] He S, Chen J, Jiang F, *et al.* Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(10):1931–1942.
- [11] Zhang S, Qian Z, Kong F, *et al.* P<sup>3</sup>: Joint optimization of charger placement and power allocation for wireless power transfer. In: *Proc. of the INFOCOM*. IEEE, 2015. 2344–2352.
- [12] Li Y, Fu L, Chen M, Chi K, *et al.* RF-based charger placement for duty cycle guarantee in battery-free sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2015,19(10):1802–1805.
- [13] Dai H, Liu Y, Liu A, *et al.* Radiation constrained wireless charger placement. In: *Proc. of the INFOCOM*. IEEE, 2016. 1–9.
- [14] Ejaz W, Naem M, Basharat M, *et al.* Efficient wireless power transfer in software-defined wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2016,16(20):7409–7420.
- [15] Dai H, Wang X, Liu A, *et al.* Optimizing wireless charger placement for directional charging. In: *Proc. of the INFOCOM*. IEEE, 2017. 1–9.
- [16] Yu N, Dai H, Liu A, *et al.* Placement of connected wireless chargers. In: *Proc. of the INFOCOM*. 2018. 387–395.
- [17] Zhu X, Li J, Zhou C, *et al.* Target coverage-oriented deployment of rechargeable directional sensor networks with a mobile charger. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019,6(3):5196–5208.



葛海江(1980—),男,浙江东阳人,副教授,主要研究领域为物联网。



池凯凯(1980—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网,机器学习。



许星原(1996—),男,学士,主要研究领域为物联网。



邱杰凡(1984—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网,嵌入式系统。



刘思杞(1999—),女,本科生,主要研究领域为物联网。