

无线传感器网络时变充电和动态数据路由算法研究

韩江洪^{1,2}, 丁煦^{1,2}, 石雷^{1,2}, 韩东³, 魏振春^{1,2}

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009;

3. 休斯顿大学 计算机科学系, TX 77004, USA)

摘要: 利用无线充电设备周期地为无线传感器节点进行充电, 可使传感器节点持续工作, 解决无线传感器网络能量问题, 但需设计合适的节点充电方案和网络路由方案。以无线充电设备驻站比最大化为优化目标, 依次提出了充电及网络路由方案的连续时变模型、离散 $N+1$ 阶段非线性模型及可解的离散 $N+1$ 阶段线性模型, 在证明模型合理性后最终求解。结论给出了具体网络的最优充电和路由策略。

关键词: 无线传感器网络; 无线能量传输; 充电周期; 连续时变模型; 离散 $N+1$ 阶段模型; 线性规划

中图分类号: TN925+.3

文献标识码: A

文章编号: 100-436X(2012)12-0001-10

Research on the time-varying charging and dynamic data routing strategy for rechargeable wireless sensor networks

HAN Jiang-hong^{1,2}, DING Xu^{1,2}, SHI Lei^{1,2}, HAN Dong³, WEI Zhen-chun^{1,2}

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China;

3. Department of Computer Science, University of Houston, TX 77004, USA)

Abstract: The energy problem of wireless sensor networks could be solved by recharging sensor nodes periodically through the wireless energy transfer technique, which could make sensor nodes remain operational persistently. However, appropriate charging and routing strategies were also in great needs. According to the optimization object of maximizing the vacation time ratio of a wireless charging equipment, the continuous time-varying model, the discrete $(N+1)$ -phased nonlinear model and the solvable discrete $(N+1)$ -phased linear model for the charging and routing strategy were proposed successively. The feasibility of these models was proved as well. In conclusion, after solving the last proposed model, the optimized charging and routing strategies were obtained for networks in different scales.

Key words: wireless sensor networks; wireless energy transfer technique; charging cycle; continuous time-varying model; discrete $(N+1)$ -phased model; linear program

收稿日期: 2011-10-17; 修回日期: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60873003); 教育部博士点基金资助项目(20100111110004); 安徽省国际科技合作计划基金资助项目(10080703001); 广东省教育部产学研结合基金资助项目(2010B090400332); 浙江省科技厅优先主题重大基金资助项目(2010c11051); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011236)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60873003); Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20100111110004); Anhui International Science and Technology Cooperation Project (10080703001); Guangdong University-Industry Cooperation Projects of the Ministry of Education (2010B090400332); Priority Projects of the Science and Technology Department of Zhejiang Province (2010c11051); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011236)

1 引言

能量问题是无线传感器网络 (WSN, wireless sensor networks) 研究的一个关键问题。目前, 一般采用一次性电池对传感器节点供电, 节点必须定期更换电池, 否则将会报废, 这非常不适合有着特殊环境要求的行业应用, 如环境监测、野外科考等。

现有的关于能量问题的研究多着眼于节流和开源 2 个方面。节流指从 WSN 自身能量的节约和均衡出发, 针对传感器节点、网络拓扑结构和组网方式开展研究, 通过研究 WSN 的能量管理策略^[1-4]、路由 MAC 层协议算法^[5-10]及跨层协议 (cross-layer protocol)^[11,12], 平衡各传感器节点间的业务量, 降低节点的能耗, 提高 WSN 寿命。但该类方案只是尽可能延长电池寿命, 不能从本质上解决能量问题。开源指从 WSN 所处的地理环境出发, 通过适当的能量获取或补充设备, 对传感器节点进行充电。例如可通过能量获取设备将环境中的震动、温差、潮汐、电磁辐射转换为电能^[13-15]。但这些能量获取设备往往体积庞大, 使传感器节点布设困难。

借助无线能量传输 (WET, wireless energy transfer) 技术, 通过能量补充设备为传感器节点周期性的充电是一种解决 WSN 能量问题新的开源方案。WET 并不是新兴技术, 早在 20 世纪初, Nikola Tesla 就开始研究远距离无线能量传输的方法^[16-18]。然而在能量的传输过程中总产生较大的电场, 降低了传输效率, 导致该研究未能付诸实用。2007 年, Kurs 等人率先阐述了通过强耦合磁共振方式进行无线能量传输的可行性^[19]。在试验中, Kurs 发现这种无线能量传输方式受环境干扰很小, 即使发送方和接收方之间有物体遮挡, 在 1.5m 的距离上传输效率依然可以达到 70%。这使得无线能量传输技术应用于无线传感器节点的能量补充成为可能。

采用 WET 方式对 WSN 进行非接触充电后将会带来许多新的问题。例如如何设计在此环境下的数据传输策略和充电策略, 最大化整个网络的工作效率等。

在如图 1 所示的二维网络拓扑模型中, 传感器节点随机分布在中心基站的周围。整个网络中有一个无线充电设备 (WCE, wireless charging equipment), 采用 WET 方式对传感器节点进行充电。若在一个充电周期内 WCE 对 WSN 中每个节点的能

量补给等于节点在充电周期内的能量消耗, 就可确保节点不因能量损耗殆尽而失效。假设 WCE 可在网络中定期游走, 对所有节点进行充电, 每游走一个周期后将回到维护站休整。

本文将以最大化 WCE 驻站时间比为目标, 设计合适的充电策略和数据传输策略。最大化 WCE 驻站时间比旨在提高 WCE 的工作效率, 使其获得最优的休整时间。

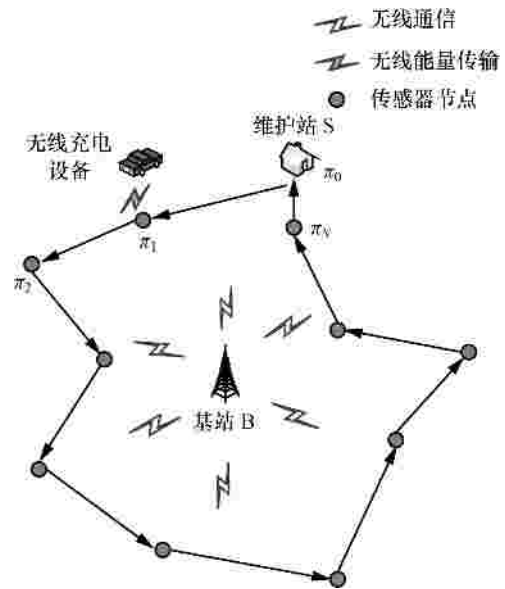


图 1 可无线充电的无限传感器网络二维拓扑

2 一般充电周期的连续时变模型

设在被监测区域内分布着 N 个传感器节点, 节点通过多跳的方式将信息传输到基站 B, 如图 1 所示。每个传感器节点上都装有一块统一型号的可充电电池, 电池满荷时能量为 E_{max} , 如果低于 E_{min} 则节点无法正常工作。传感器节点负责采集和传输信息, 部分传感器节点同时承担网络路由中继的任务。整个 WSN 中配有一个 WCE 对传感器节点进行无线能量补充。为了保证每个传感器节点的电量在任何时刻都不小于工作所需的最小电量 E_{min} , 该 WCE 需要在网络中周期遍历并为每个节点充电。WCE 遍历路径如图 1 所示, 其中, 寻找最优路径遍历网络中节点的问题是旅行商问题 (TSP, traveling salesman problem)。

整个充电过程可分为初始充电周期和一般充电周期, 如图 2 所示。首先讨论一般充电周期, 并以第一周期为例展开讨论, 余下周期均为第一周期的延拓。

设每个节点 $i (i \in N)$ 以 R_i 的速率产生监测数据, $g_{ij}(t)$ 和 $g_{iB}(t)$ 分别代表在 t 时刻, 节点 i 向节点 j 和基站 B 发送数据的速率, 单位为 bit/s。那么, 在 t 时刻, 节点 i 需要满足

$$\sum_{k \in N, k \neq i} g_{ki}(t) + R_i = \sum_{j \in N, j \neq i} g_{ij}(t) + g_{iB}(t) \quad (1)$$

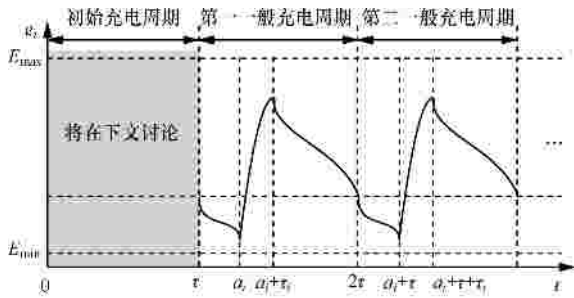


图 2 完整充电周期示意

在初始状态下, 每个节点的能量储备记为 E_S 。节点在接收和发送数据的过程中需要消耗能量, 在 t 时刻, 传感器节点 i 的功率记为 $p_i(t)$, 单位为 W; 在接收数据时, 节点在单位时间的功率参数记为 C_{ij} , 在发送数据时, 功率参数分别记为 C_{iB} 和 C_{ij} , 单位均为 J/bit。在 t 时刻, 节点 i 需要满足

$$p_i(t) = r \sum_{k \in N, k \neq i} g_{ki}(t) + \sum_{j \in N, j \neq i} C_{ij} g_{ij}(t) + C_{iB} g_{iB}(t) \quad (2)$$

WCE 从服务站 S 出发, 以速度 V (单位为 m/s) 移动, 当到达节点 i 时, 对节点充电的时长为 t_i , 充电功率记为 U , 单位为 W。当网络中所有节点能量补给完毕后, WCE 返回维护站 S, 进行修整和维护。记驻站时间为 t_{vac} , 充电设备行走的时间为 t_{tsp} , 整个充电周期为 t , $e_i(t)$ 为在 t 时刻节点 i 的剩余电量。

充电设备遍历整个网络的路径为 $P = (p_0, p_1, p_2, \dots, p_N, p_0)$, 如图 1 所示, 其中, p_0 代表维护站 S, p_i 代表充电设备经过的第 i 个节点, D_{p_i, p_j} 代表相邻两个节点或维护站-节点之间的距离。

设充电设备到达路径上第 i 个节点时的时刻为 t_{p_i} , 则有

$$t_{p_0} = t$$

$$t_{p_i} = t + \sum_{m=1}^{i-1} t_{p_m} + \sum_{m=0}^{i-1} \frac{D_{p_m, p_{m+1}}}{V} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3)$$

记 D_P 为整个路径的长度, 有 $t_{tsp} = \frac{D_P}{V}$, 则整个充电周期 t 为

$$t = \sum_{i=1}^N t_{p_i} + t_{tsp} + t_{vac} \quad (4)$$

一般充电周期的定义如下。

定义 1 在时间 t 内, 节点 $i (i \in N)$ 满足:

- 1) 起始时刻和结束时刻传感器节点的剩余电量相同;
- 2) 传感器节点的剩余能量值 $e_i(t) = E_{min}$ 。

则称 t 为一个一般充电周期。

依据定义, 第一个一般充电周期内, 充电设备的充电功率需要满足

$$\int_t^{2t} p_i(t) dt = Ut_i \quad (5)$$

且 $e_i(t) = E_{min}, t < t - 2t$ 。

在一般充电周期中, 节点 i 剩余电量最小值出现在 t_i , 即 WCE 到达节点 i 时; 剩余电量最大值出现在 $t_i + t_i$, 即充电设备离开时。即:

$$E_{min} = e_i(t_i) = e_i(t_i + t_i) = E_{max} \quad (t < t < 2t)$$

同时,

$$e_i(t_i) = e_i(t_i + t_i) - \int_{t_i + t_i}^{2t} p_i(t) dt - \int_{t_i}^{t_i + t_i} p_i(t) dt = E_{min}$$

$$\text{即: } \int_{t_i + t_i}^{2t} p_i(t) dt + \int_{t_i}^{t_i + t_i} p_i(t) dt = e_i(t_i + t_i) - E_{min} \quad (6)$$

由约束条件(1)、(2)、(4)、(5)、(6)和优化目标 $\max \frac{t_{vac}}{t}$, 可建立连续时变模型。

$$\text{OPT-I: } \max \frac{t_{vac}}{t}$$

$$\text{s.t.: } \sum_{k \in N, k \neq i} g_{ki}(t) + R_i = \sum_{j \in N, j \neq i} g_{ij}(t) + g_{iB}(t)$$

$$p_i(t) = r \sum_{k \in N, k \neq i} g_{ki}(t) + \sum_{j \in N, j \neq i} C_{ij} g_{ij}(t) + C_{iB} g_{iB}(t)$$

$$t = \sum_{i=1}^N t_i + t_{tsp} + t_{vac}$$

$$\int_t^{2t} p_i(t) dt = Ut_i$$

$$\int_{t_i + t_i}^{2t} p_i(t) dt + \int_{t_i}^{t_i + t_i} p_i(t) dt = e_i(t_i + t_i) - E_{min}$$

$$p_i(t), g_{ij}(t), g_{iB}(t), t_i, t, t_{vac} \geq 0 \quad (i, j \in N, i \neq j, t < t < 2t)。$$

其中, $r, C_{ij}, R_i, t_{tsp}, E_{min}, U$ 为常数, $g_{ij}(t), g_{iB}(t), p_i(t), t_i, t, t_{vac}$ 为优化变量。这一模型的最优解为 $j^* = \{g_{ij}^*(t), g_{iB}^*(t), p_i^*(t), t_i^*, t^*, t_{vac}^*\}$, 可以证明,

若每次都进行完全充电, 即 $e_i(t_i+t_i)=E_{\max}$ 时, 如图 3 所示, 该优化问题的最优解 f^*_{\max} 不会差于 f^* 。此时, 式(6)可改写为

$$\int_{t_i+t_i}^{2t_i} p_i(t)dt + \int_t^{t_i} p_i(t)dt = E_{\max} - E_{\min} \quad (7)$$

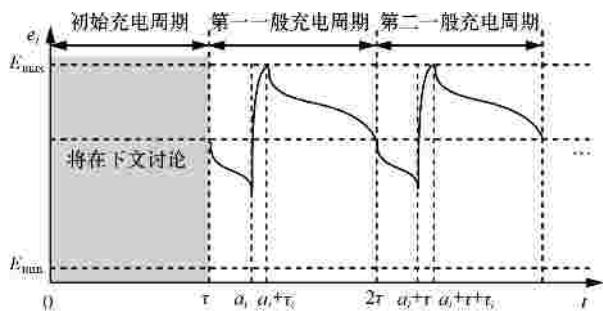


图 3 E_{\max} 充电方式下完整充电周期示意

3 一般充电周期的离散 $N+1$ 阶段模型

3.1 离散 $N+1$ 阶段非线性模型

由上节讨论可以看出, 连续时变充电模型最优解 f^* 为一个六元组, 其中, 3 个元素 $g_{ij}(t)$ 、 $g_{iB}(t)$ 、 $p_i(t)$ 是时间 t 的连续函数。确定这 3 个元素的值十分困难, 没有有效的算法能在多项式时间内计算连续时变充电模型 OPT-I 的最优解。因此下文讨论将整个一般充电周期划分不同阶段来简化模型。

在一般充电周期内, 可以将 WCE 的工作状态分为 3 类。

- 1) 行走状态: 在该状态下, WCE 沿遍历路径行走, 抵达下一个被充电传感器节点或维护站。
- 2) 充电状态: 在该状态下, WCE 对节点的进行充电。
- 3) 驻站状态: 在该状态下, WCE 在维护站 S 休息和接受维护。

在上述 3 种状态下, 只有在第 2 类状态时, WCE 会与传感器节点发生互动, 所以可以将 WCE 的整个充电周期 t 分为两大阶段。第 2 类状态构成第一阶段, 在第一阶段中, WCE 需要对 N 个分布在不同位置的传感器节点进行充电, 因此, 该阶段可以细化为 N 个子阶段, 其中, 第 i 阶段对应 WCE 对遍历路径上第 i 个传感器节点进行充电所需的时间; 而在第 1 类和第 3 类状态下, WCE 与传感器节点并不发生互动, 因此将其视为同一阶段。由上述讨论知, 可将 WCE 的一般充电周期分为 $N+1$ 个阶段, 第 1, 2, 3, ..., N 阶段分别对应 WCE 对第 1, 2,

3, ..., N 个传感器节点充电的阶段, 第 $N+1$ 阶段对应 WCE 行走或驻站的阶段, 令 $M = \{1, 2, 3, \dots, N+1\}$, 如图 4 所示, 有 $S_i = \sum_{k \in M, k \neq i} S_k$, 图中纵坐标 p_i 表示节点 i 的功率, 横坐标 m 表示节点 i 在第 i 阶段的功率, 面积 S_i 表示在第 m 阶段节点 i 的能耗。

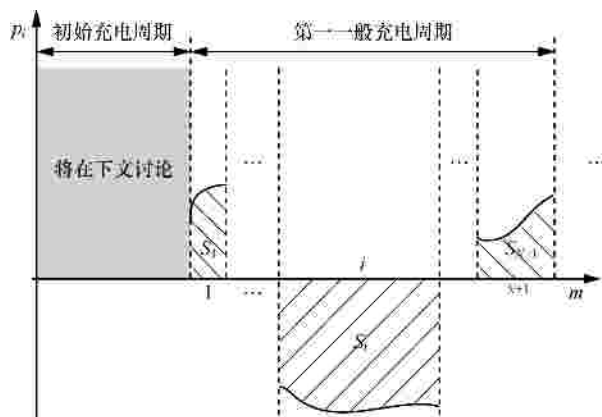


图 4 一般充电周期 $N+1$ 阶段示意

在一般充电周期的 $N+1$ 个阶段内, OPT-I 的约束条件依然要得以满足。可以证明, 在同一阶段内保持 $g_{ij}(t)$ 、 $g_{iB}(t)$ 及 $p_i(t)$ 不随时间变化并不会影响优化结果, 证明过程如下。

首先, 考虑优化问题 OPT-II。

$$\begin{aligned} \text{OPT-II:} \quad & \max \sum_{m \in M} t_m^{\text{vac}} \\ \text{s.t.:} \quad & \sum_{k \in N}^{k \neq i} g_{ki}[m] + R_i = \sum_{j \in N}^{j \neq i} g_{ij}[m] + g_{iB}[m] \\ & p_i[m] = r \sum_{k \in N}^{k \neq i} g_{ki}[m] + \sum_{j \in N}^{j \neq i} C_{ij} g_{ij}[m] + C_{iB} g_{iB}[m] \\ & t_{N+1} = t_{\text{tsp}} + t_{\text{vac}} \\ & \sum_{m \in M} p_i[m] t_m = U t_i \\ & E_{\max} - \sum_{m \in M, m \neq i} p_i[m] t_m = E_{\min} \end{aligned}$$

$$p_i[m], g_{ij}[m], g_{iB}[m], t_m, t_{\text{vac}} \geq 0 \quad (i, j \in N, i \neq j, m \in M)。$$

其中 $p_i[m]$ 为 i 节点在第 m 阶段的功率, $g_{ij}[m]$, $g_{iB}[m]$ 分别为 i 节点在第 m 阶段向节点 j 和基站 B 发送数据的速率, t_m , t_{vac} 分别为第 m 阶段和充电设备维护阶段对应的时长。

下面定理证明上述优化问题 OPT-II 的最优解一定对应着 OPT-I 的最优解。

定理 1 若

1) $j^* = \{g_{ij}^*(t), g_{iB}^*(t), p_i^*(t), t_i^*, t^*, t_{\text{vac}}^*\}$ 为 OPT-I 的最优解。

2) $\hat{j} = \{\hat{g}_{ij}[m], \hat{g}_{iB}[m], \hat{p}_i[m], \hat{t}_m, \hat{t}_{vac}\}$, 其中, $m \in M$, 为 OPT-II 的最优解。

则有 $j^* = \{\hat{g}_{ij}[m], \hat{g}_{iB}[m], \hat{p}_i[m], \hat{t}_i, \sum_{m \in M} \hat{t}_m, \hat{t}_{vac}\}$, 其中, $i \in N$, $m \in M$, 为 OPT-I 的最优解。

证明 1) 可行性：首先, 若 $j = \{g_{ij}[m], g_{iB}[m], p_i[m], t_m, t_{vac}\}$ 为 OPT-II 的任意一个可行解, 由于 j 满足 OPT-I 的约束, 也为 OPT-I 的一个可行解, 因此 OPT-I 的最优解是 OPT-II 解的一个上界。

2) 可达性：若 OPT-I 问题存在最优解 j^* , 可以依据这个最优解构造出 OPT-II 问题的一个可行解, 构造方法如下。

OPT-I 最优解 $j^* = \{g_{ij}^*(t), g_{iB}^*(t), p_i^*(t), t_i^*, t^*, t_{vac}^*\}$, 构造五元组 $\hat{j} = \{\hat{g}_{ij}[m], \hat{g}_{iB}[m], \hat{p}_i[m], \hat{t}_m, \hat{t}_{vac}\}$, 其中, $\hat{g}_{ij}[m], \hat{g}_{iB}[m], \hat{p}_i[m]$ 分为对应时段内的 $g_{ij}^*(t), g_{iB}^*(t), p_i^*(t)$ 的均值, 即

$$\hat{g}_{ij}[k] = \frac{\int_{t_k}^{t_k+t_k} g_{ij}^*(t) dt}{t_k}$$

$$\hat{g}_{iB}[k] = \frac{\int_{t_k}^{t_k+t_k} g_{iB}^*(t) dt}{t_k}$$

$$\hat{p}_i[k] = \frac{\int_{t_k}^{t_k+t_k} p_i^*(t) dt}{t_k}$$

且有 $\hat{t}_i = t_i^*$, $\sum_{m \in M} \hat{t}_m = t^*$, $\hat{t}_{vac} = t_{vac}^*$ 。可以验证 \hat{j} 为 OPT-II 的可行解。由 1) 可知 OPT-I 的优化目标为 OPT-II 优化目标的一个上界, 所以 \hat{j} 必为 OPT-II 的最优解, 且使 $\frac{t_{vac}}{\sum_{m \in M} t_m}$ 达到最大值。

3) OPT-II 的任意一个最优解均为 OPT-I 的可行解, 且这个解满足 $\frac{t_{vac}}{\sum_{m \in M} t_m} = \frac{t_{vac}^*}{t^*}$, 则它也是 OPT-I 的最优解。

由上述证明可知, 当获得 OPT-II 的一个最优解后, 这个最优解一定也为 OPT-I 的一个最优解, 所以, 只需要求解 OPT-II 问题, 即可获得 OPT-I 优化目标的值。OPT-II 对应着离散 $N+1$ 阶段一般充电周期模型, 且在每个阶段内传感器节点的数据传输速

率为定值。

WCE 遍历网络中每个传感器节点的路径由下面讨论得出。

定理 2 若 $\hat{j} = \{\hat{g}_{ij}[m], \hat{g}_{iB}[m], \hat{p}_i[m], \hat{t}_m, \hat{t}_{vac}\}$ 为 OPT-II 的最优解, 则与之对应的 WCE 遍历路径构成最短 Hamilton 回路。

证明 1) 假设五元组 $\hat{j} = \{\hat{g}_{ij}[m], \hat{g}_{iB}[m], \hat{p}_i[m], \hat{t}_m, \hat{t}_{vac}\}$ 为 OPT-II 的最优解, 且与之对应的 WCE 的遍历路径为 $\hat{P} = (p_0, \hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_N, p_0)$ 且 \hat{P} 不构成最短 Hamilton 回路。令：

$$G = \begin{bmatrix} \hat{g}_{i_1}[1] & \hat{g}_{i_2}[1] & \dots & \hat{g}_{i_N}[1] \\ \hat{g}_{i_1}[2] & \hat{g}_{i_2}[2] & \dots & \hat{g}_{i_N}[2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{g}_{i_1}[N+1] & \hat{g}_{i_2}[N+1] & \dots & \hat{g}_{i_N}[N+1] \end{bmatrix}_{i_1, i_2, \dots, i_N}$$

矩阵 G 中的每个元素 $\hat{g}_i[m] = \{\hat{g}_{i_1}[m], \hat{g}_{i_2}[m], \dots, \hat{g}_{i_N}[m]\}$, 表示第 m 阶段内, 节点 i 与其他传感器节点之间的数据传输情况。

$$G_B = \begin{bmatrix} \hat{g}_{i_1B}[1] & \hat{g}_{i_2B}[1] & \dots & \hat{g}_{i_NB}[1] \\ \hat{g}_{i_1B}[2] & \hat{g}_{i_2B}[2] & \dots & \hat{g}_{i_NB}[2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{g}_{i_1B}[N+1] & \hat{g}_{i_2B}[N+1] & \dots & \hat{g}_{i_NB}[N+1] \end{bmatrix}_{i_1, i_2, \dots, i_N}$$

矩阵 G_B 中的每个元素 $\hat{g}_{iB}[m]$ 代表第 m 阶段, 节点 i 向基站发送数据的情况。

$$O = \begin{bmatrix} \hat{p}_1[1] & \hat{p}_2[1] & \dots & \hat{p}_N[1] \\ \hat{p}_1[2] & \hat{p}_2[2] & \dots & \hat{p}_N[2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{p}_1[N+1] & \hat{p}_2[N+1] & \dots & \hat{p}_N[N+1] \end{bmatrix}_{i_1, i_2, \dots, i_N}$$

矩阵 O 中的元素 $\hat{p}_i[m]$ 表示在第 m 阶段时, 传感器节点 i 的工作功率。

2) 构造五元组。 $j^* = \{g_{ij}^*[m], g_{iB}^*[m], p_i^*[m], t_m^*, t_{vac}^*\}$, 且与之对应的 WCE 的遍历路径 $P^* = (p_0, p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, p_0)$ 构成 Hamilton 回路。

构造方法如下：依据最短 Hamilton 路径 P^* 将 G 进行初等行变换后得到 G^* G^* 的第 i 行对应 WCE 对遍历路径 P^* 上第 i 个传感器节点充电时网络中传感器节点发送接收数据情况。同样依据最短 Hamilton 路径 P^* , 对 G_B 及 O 也进行同样的初等行变换。令 $\hat{t}_m = [\hat{t}_1, \hat{t}_2, \hat{t}_3, \dots, \hat{t}_N, \hat{t}_{N+1}]$, 且 $\hat{t} = \sum_{k \in M} \hat{t}_k$, 将 \hat{t}_m 的前 N 个元素的顺序依据最短 Hamilton 路径 P^* 重新排列, 同时令 $\hat{t}_{N+1} = \hat{t}_{N+1}$, 有 $t_m^* = [t_1^*, t_2^*, t_3^*, \dots, t_N^*, \hat{t}_{N+1}]$, 此时 $t^* = \sum_{k \in M \setminus N+1} t_k^* + \hat{t}_{N+1} = \hat{t}$ 。可以

验证构造的五元组 $j^* = \{g_{ij}^*[m], g_{iB}^*[m], p_i^*[m], t_m^*, t_{vac}^*\}$ 仍为 OPT-II 的可行解。

3) 由于 $t_{N+1}^* = t_{N+1}^*$ ，而路径 P^* 的长度小于路径 \hat{P} 的长度，所以 $t_{tsp}^* > t_{tsp}^*$ ，那么 $t_{vac}^* < t_{vac}^*$ ，因此

$$\sum_{m \in M} \hat{t}_m < \sum_{m \in M} t_m^*$$

与 1) 中假设矛盾，所以最优解 \hat{j} 一定对应着最短 Hamilton 回路 \hat{P} 。

3.2 离散 $N+1$ 阶段线性模型

观察 OPT-II，由于含有比例项 $\frac{t_{vac}}{\sum_{m \in M} t_m}$ ，该优化

问题并非线性规划。令 $h_m = \frac{t_m}{\sum_{k \in M} t_k}$ ， $h_{vac} = \frac{t_{vac}}{\sum_{k \in M} t_k}$ ，

$$q_{ki}[m] = g_{ki}[m]h_m, \quad q_{ij}[m] = g_{ij}[m]h_m, \quad \text{代入 OPT-II}$$

的优化目标和约束条件，可推导出以下优化问题 OPT-III，推导过程略。

$$\begin{aligned} \text{OPT-III:} \quad & \max h_{vac} \\ \text{s.t.:} \quad & \sum_{k \in N}^{k \neq i} q_{ki}[m] + R_i h_m = \sum_{j \in N}^{j \neq i} q_{ij}[m] + q_{iB}[m] \\ & \sum_{m \in M} \sum_{k \in N}^{k \neq i} r q_{ki}[m] + \\ & \sum_{m \in M} \sum_{j \in N}^{j \neq i} C_{ij} q_{ij}[m] + \sum_{m \in M} C_{iB} q_{iB}[m] - U h_i = 0 \\ & \sum_{m \in M} h_m = 1 \\ & h_{vac} = h_{N+1} - \frac{t_{tsp}}{E_{max} - E_{min}} (U h_i - \sum_{k \in N}^{k \neq i} r q_{ki}[i] \\ & - \sum_{j \in N}^{j \neq i} C_{ij} q_{ij}[i] + C_{iB} q_{iB}[i]) \\ & q_{ij}[m], q_{iB}[m] \geq 0, \quad h_m, h_{vac} \geq 1 \\ & (i, j \in N, i \neq j, m \in M) \end{aligned}$$

其中， $r, C_{ij}, R_i, t_{tsp}, E_{min}, U$ 为常数， $q_{ij}[m], q_{iB}[m], h_m$ 为优化变量。

至此，经过推导和运算，一般充电周期的连续时变非线性模型 OPT-I 变为离散 $N+1$ 阶段线性模型 OPT-III，过程如图 5 所示。线性模型可以在多项式时间内求解。



图 5 模型推导过程示意

4 初始充电周期模型

将初始充电周期 t 分为 $N+1$ 段，每段对应的时长和含义与一般充电周期一致。在初始充电周期内，WCE 遍历路径及 WSN 的路由策略均与一般充电周期相同。唯一不同的是，初始充电周期开始时，每个节点的能量均为 E_{max} 。只要保证在初始充电周期结束时，传感器节点的剩余电量等于第一个一般充电周期起始时传感器节点的剩余电量，即可完成这两类周期的衔接。可通过调整充电功率至 U' 满足该要求， U' 的值可由以下运算求得。

设在一般充电周期内，传感器节点 i 的功耗为 $p_i[m]$ ， $m \in M$ ，充电的时长为 t_i ，一般充电周期起始和结束时传感器节点的剩余电量均为 E ，充电设备到达传感器节点时，节点剩余电量为 E_{i0} 。由于初始充电周期与一般充电周期仅存在传感器节点剩余电量上的不同，则有：

1) 当 WCE 到达传感器节点 i 时，传感器节点的剩余电量为 $E' = E_i + (E_{max} - E)$ ；

2) WCE 对传感器节点 i 充电时，该节点功耗仍为 $p_i[i]$ ，充电时长仍为 t_{i0} 。

$$U' t_i = E_{max} - (E_i + E_{max} - E) + p_i[i] t_i, \quad \text{所以}$$

$$U' = \{E_{max} - (E_i + E_{max} - E) + p_i[i] t_i\} / t_i = U - (E_{max} - E) / t_i。$$

初始充电周期内节点 i 的能量变化如图 6 所示。其中， t_k 为行走到 i 节点花费的时间， t_0 为行走到维护站花费的时间， t_{vac} 为在维护站停留的时间，有 $t_{N+1} = t_{vac} + \sum_{k=1}^N t_k + t_0$ 。

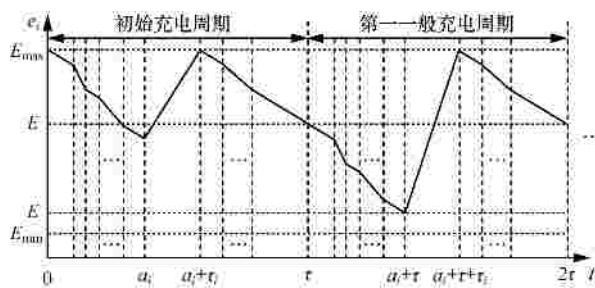


图 6 初始充电周期与一般充电周期示意

5 仿真结果

5.1 仿真平台

本文中描述优化问题的求解采用 IBM 公司提供的 IBM WEBSphere ILOG CPLEX。CPLEX 工具

包被广泛地应用于网络、金融等领域内优化问题的求解。该产品为 C#提供了相应的接口函数。利用 Microsoft Visual Studio 2005 编写 C#程序描述优化模型,并调用该接口函数,最终实现对优化问题的求解。

5.2 仿真参数

在 1 000m×1 000m 区域内分别对传感器节点数为 20、50、100 的 WSN 进行仿真。仿真时选取的参数为^[21]：

$$E_{\max} = 1.2V \times 2.5A \times 3600s = 10.8kJ$$

$$E_{\min} = 0.05E_{\max} = 540J$$

$$V = 5m/s$$

$$U = 5W$$

$$r = 50nJ/bit$$

$$C_i = j_1 + j_2 D_i^4$$

其中, $j_1 = 50nJ/bit$, $j_2 = 0.0013pJ/(bit \cdot m^4)$, R_i 为 1~100kbit/s 之间的随机数, 基站 B 位于坐标 (500,500)处,而维护站 S 位于坐标(0,0)处,WCE 的出发点为维护站。

5.3 仿真结果

20 节点 WSN：网络中 20 个传感器节点的坐标和产生监测数据速率 R_i 如表 1 所示。通过求解 TSP 问题,得到 WCE 最佳遍历路径如图 7(a)所示。不失一般性,令 WCE 沿逆时针方向遍历网络中节点。

通过求解 OPT-III,得到整个充电周期 t 为 20 516s,约为 5.70h, t_{vac} 为 9 458s,约为 2.63h,可得充电设备的驻站比 $\rho_{vac}=46.10\%$,在第一个一般充电周期内 WCE 对 WSN 中每个节点充电时长 t_i 详见表 1。从表 1 中可以看出位于坐标 (550,740) 处的第 12 号节点在 WCE 到达时剩余电量值为 540J,即达到了传感器节点工作的门限值,所以该节点为瓶颈节点,这时该节点所处的位置与承担的数据业务量造成的。该 WSN 的路由策略可以通过求解 OPT-III 中的 $q_{ij}[m]$ 、 $q_{iB}[m]$ 变量获得,若 $q_{ij}[m]$ 、 $q_{iB}[m]$ 不为零,则说明节点 i 向节点 j 或基站 B 传输数据。图 8(a)为 WSN 在第一阶段的数据传输路由策略,其中,瓶颈节点向第 13 号节点的数据传输速率为 $g_{12,13}[1]=195kbit/s$,而 $g_{12,B}[1]=0kbit/s$,说明在第一阶段内瓶颈节点并未向基站传送数据;而在此节点接受充电时,也就是在第 12 阶段内 $g_{12,13}[12]=0kbit/s$, $g_{12,B}[12]=195kbit/s$,说明此时,该节点将所有数据直接传送至基站处。由节点所处位置可知,12、13 号节点之间的距离小于 12 号节点与基站之间的距离,向基站直接传送数据必然需要更大的功率,但是由

于该节点正在接受充电,所以可以更加积极地参与数据传输,直接将数据传输至基站。由表 2 可以看出,在接受充电阶段,也就是 12 阶段瓶颈节点的功率出现最大值,为 0.934 6W。12 号节点初始充电周期和第一个一般充电周期内,瓶颈节点的能量-时间变化曲线如图 9 所示。图中曲线斜率

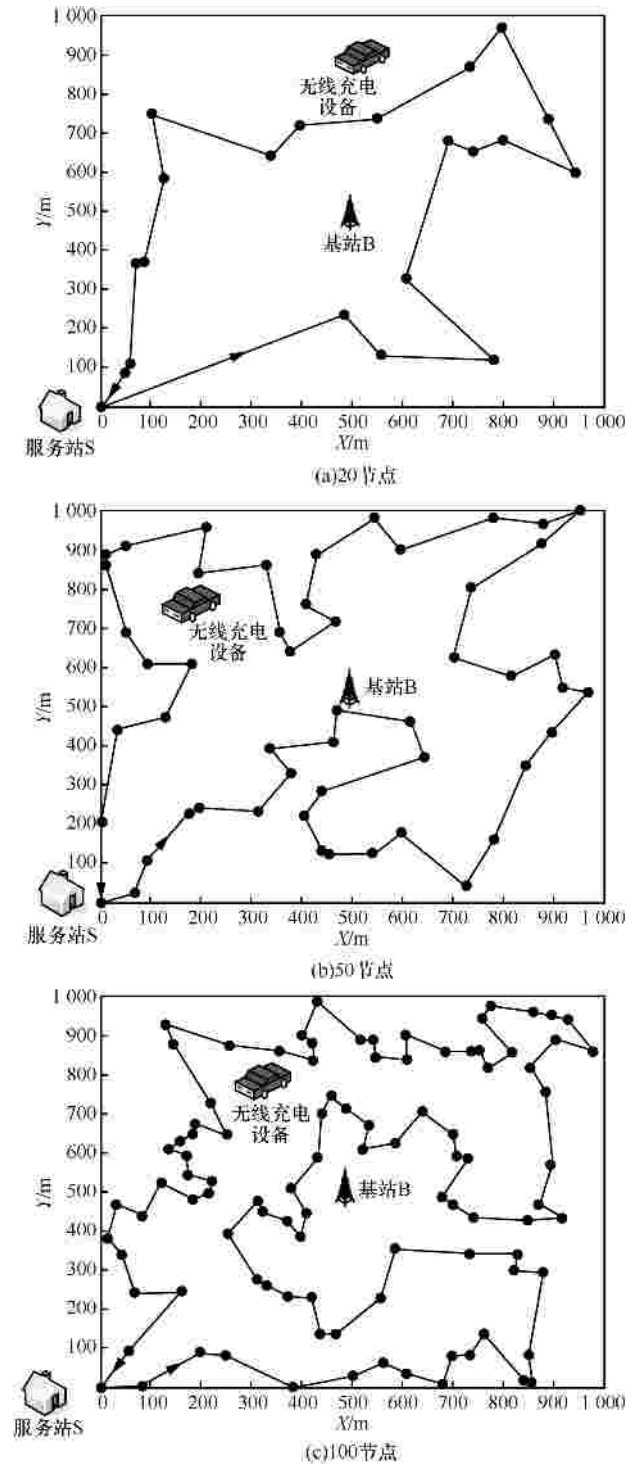


图 7 节点充电设备路径示意

表 1 20 节点运算结果 (第一个一般充电周期)

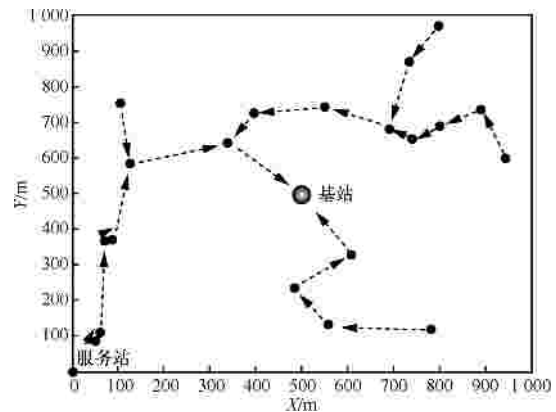
节点序号	节点坐标	产生监测数据速率 $R_i/(kbit \cdot s^{-1})$	到达时间/s	充电时长/s	到达时传感器节点剩余电量/J
1	485 235	10	20 624.198 6	241.12	9 608.015 7
2	557 132	20	20 890.452 6	100.34	10 301.031 1
3	780 117	40	21 035.493 4	540.65	8 171.190 1
4	608 329	20	21 630.743 0	836.11	6 781.282 7
5	639 684	40	22 539.859 8	565.97	8 048.634 9
6	741 654	5	23 117.150 6	42.68	10 587.145 0
7	798 685	25	23 172.807 5	32.74	10 636.642 7
8	743 598	10	23 239.367 0	26.89	10 665.793 7
9	890 735	40	23 295.635 9	44.37	10 578.901 9
10	799 971	10	23 390.593 3	14.12	10 729.472 2
11	734 867	15	23 429.241 7	172.13	9 945.540 2
12	550 740	25	23 646.086 4	2 523.30	540.970 4
13	397 723	15	26 200.174 7	89.09	10 359.615 6
14	338 641	15	26 309.468 7	2 530.18	624.857 0
15	105 749	15	28 891.011 3	66.19	10 468.706 5
16	128 583	35	28 990.718 5	1297.71	4 719.203 1
17	89 369	5	30 331.933 4	678.40	7 520.777 0
18	73 366	30	31 013.589 2	14.38	10 728.140 3
19	62 110	5	31 079.216 4	467.08	8 519.388 7
20	5 186	15	31 551.576 6	3.12	10 784.4305

为正的阶段对应 12 号节点正在被充电的阶段, 充电时长为 $26\ 169 - 23\ 646 = 2\ 523s$, 在充电完毕后, 若仍采用第 12 阶段路由策略, 即直接向基站发送数据, 则在下一周期开始前, 即 $16\ 629s$ 与 $37\ 146s$ 处该节点就会因为能量低于 E_{min} 而失效, 如图 9 中虚线 a、b 所示。

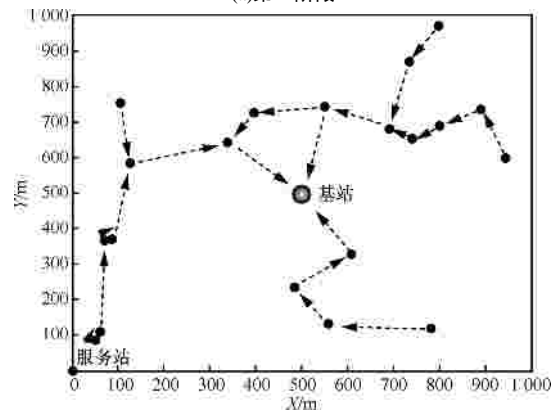
表 2 12 号节点各阶段功率

阶段序号	12 号节点功率/%	阶段序号	12 号节点功率/%
1	0.160 6	12	0.934 8
2	0.160 6	13	0.160 6
3	0.160 6	14	0.160 6
4	0.160 6	15	0.160 6
5	0.160 6	16	0.160 6
6	0.160 6	17	0.160 6
7	0.160 6	18	0.160 6
8	0.160 6	19	0.160 6
9	0.160 6	20	0.160 6
10	0.160 6	21	0.881 9
11	0.160 6		

50 及 100 节点 WSN: WCE 在 50 及 100 节点 WSN 内的最佳遍历路径如图 7(b)、7(c)所示, WCE 仍沿逆时针方向遍历网络中所有节点, 通过求解 OPT-III, 得到 $\eta_{vac_50} = 31.25\%$, $\eta_{vac_100} = 38.38\%$ 。



(a)第 1 阶段



(b)第 12 阶段

图 8 20 节点无线传感器网络路由示意

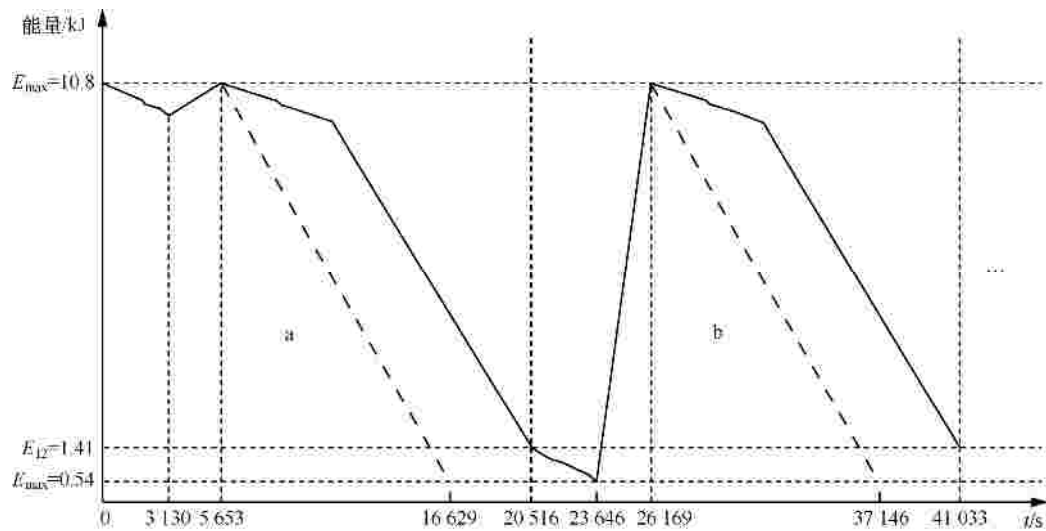


图 9 12 号传感器节点初始充电周期与第一个一般充电周期内能量—时间变化曲线

6 结束语

本文讨论了 WET 技术应用于 WSN 后所出现的问题。针对 WCE 驻站比最大化这一目标，首先建立了 WCE 充电策略和 WSN 路由的连续时变模型，并提出优化问题 OPT-I，但该模型难于求解。之后，依次推导出离散 $N+1$ 阶段非线性模型及优化问题 OPT-II 和离散 $N+1$ 阶段线性模型 OPT-III，在证明了模型的合理性后，通过仿真运算求得 OPT-III 的解。

针对可无线充电 WSN 的研究才刚刚起步，仍有许多问题需要深入研究，例如，当 WSN 覆盖面积过于广阔时，无法通过一个 WCE 遍历整个网络进行充电，如何将网络划分成子网络，安排多部充电设备对传感器节点进行周期充电等，是今后进一步研究的方向。

参考文献：

[1] PANTAZIS N A, VERGADOS D D. A survey on power control issues in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2007, 9(4):86-107.

[2] WANG Q, YANG W. Energy consumption model for power management in wireless sensor networks[A]. 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)[C]. 2007. 142-151.

[3] SALVADORI F, CAMPOS M, SAUSEN P S, *et al.* Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(9):3104-3111.

[4] SAUSEN P S, SOUSA J R B, SPOHN M A, *et al.* Exploring the

switching energy effect in a dynamic power management technique for wireless sensor networks[A]. 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)[C]. 2007. 2260-2265.

[5] YANG N, TIAN H, HUANG P, *et al.* Distributed energy-economical routing algorithm based on game theory for WSN[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1230-1233.

[6] DEMIRKOL I, ERSOY C, ALAGOZ F. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(14):115-121.

[7] SAZAK N, ERTURK I, KOKLUKAYA E, *et al.* An energy efficient MAC protocol for cluster based event driven WSN applications[A]. *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*[C]. 2010. 76-81.

[8] WU Y W, LI X Y, LIU Y H, *et al.* Energy-efficient wake-up scheduling for data collection and aggregation[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2010, 21(2):275-287.

[9] ZABIN F, MISRA S, WOUNGANG I, *et al.* REEP: data-centric, energy-efficient and reliable routing protocol for wireless sensor networks[J]. *IET Communications*, 2008, 2(8):995-1008.

[10] HUSSAIN S, SHAFIQUE M I. Energy efficient routing in wireless sensor networks through virtual backbone[A]. 7th Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR)[C]. 2009. 452-454.

[11] AKYILDIZ I F, VURAN M C, AKAN O B. A cross-layer protocol for wireless sensor networks[A]. 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems[C]. 2006. 1102-1107.

[12] VURAN M C, I F. XLP: a cross-layer protocol for efficient communication in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(11):1578-1591.

[13] PENELLA M T, ALBESA J, GASULLA M. Powering wireless sensor nodes: primary batteries versus energy harvesting[A]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*[C].

2009. 1625-1630.

- [14] LI P, WEN Y M, LIU P G, *et al.* An electromagnetic energy harvesting circuits for self-powered wireless sensor network[A]. 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)[C]. 2008. 214-217.
- [15] LU X, YANG S H. Thermal energy harvesting for WSNs[A]. IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)[C]. 2010. 3045-3052.
- [16] Nikola Tesla. Method of Utilizing Radiant Energy[P]. U S Patent 685,958 issued in 1901.
- [17] Nikola Tesla. Apparatus for the Utilization of Radiant Energy[P]. U S Patent 685,957 issued in 1901.
- [18] Nikola Tesla. Apparatus for Transmission of Electrical energy[P]. U S Patent 649,621 issued in 1900.
- [19] KURS A, KARALIS A, MOFFAT R t, *et al.* Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [20] HEINZELMAN W. Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks[D]. Cambridge, MA, Dept Elect Eng Comput Sci, MIT,2000.
- [21] ZIMMERLING M, DARGIE W, REASON J M. Energy-efficient routing in linear wireless sensor networks[A]. IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)[C].2007. 1-3.



丁煦 (1984-), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学博士生, 主要研究方向为无线网络、网络与通信。



石雷 (1980-), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学讲师, 主要研究方向为无线网络、网络与通信。



韩东 (1985-), 男, 江苏南京人, 美国休斯顿大学博士生, 主要研究方向为无线通信, 无线传感器网络及其路由协议。

作者简介:



韩江洪 (1954-), 男, 江苏南京人, 合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络与通信、无线网络、离散事件系统。



魏振春 (1978-), 男, 宁夏青铜峡人, 合肥工业大学副教授, 主要研究方向为物联网、分布式控制、传感器网络。