

大范围 WRSNs 的数据路由和无线充电算法

孙永辉[†], 秦 晨, 王 义, 艾蔓桐

(河海大学 能源与电气学院, 南京 210098)

摘 要: 针对传统电池供电系统能量有限问题, 提出一种大范围无线可充电传感器网络 (WRSNs) 的数据路由和无线充电算法. 以无线感知识别平台为基础, 利用等边三角形的强覆盖性, 并综合考虑网络路由协议和无线充电器特性对节点能量的影响, 提出一种基于六边形路径的动态无线充电算法 (IJRC_HP). 算法包括两部分: 依据充电器特性设计数据路由方法, 使得能量接收功率高的节点承担更多的通信任务; 依据该路由的特点设计充电方案, 为能耗速度快的节点分配更多的充电时间. 与等边三角形算法 (TRIANGLE)、GRID 算法进行仿真对比, 实验结果表明, IJRC_HP 算法在网络寿命提升、能量均衡、充电器移动效率和节点平均充电延时等方面具有优越性.

关键词: 无线可充电传感器网络; 路由; 充电算法; 充电器特性; 六边形路径

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Data routing strategy and wireless charging algorithm for large-scale WRSNs

SUN Yong-hui[†], QIN Chen, WANG Yi, AI Man-tong

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the energy constraint problems in traditional battery-powered systems, a data routing strategy and wireless charging algorithm for large-scale WRSNs is proposed. Based on the the industrial wireless identification and sensing platform, considering the influence of the routing protocols and the characteristics of wireless charger, a dynamic wireless charging algorithm based on hexagon path, namely improved joint routing and charging algorithm based on hexagon path (IJRC_HP), is proposed by taking advantage of the strong coverage of equilateral triangle. The IJRC_HP algorithm contains two parts: a data routing strategy is designed in accordance with the characteristics of a wireless charger to make the nodes with high energy receiving power take more communication tasks; more charging time is allocated for the nodes with more energy consumption according to the characteristics of the routing strategy. Comparing with the TRIANGLE algorithm and GRID algorithm, simulation results demonstrate that the proposed IJRC_HP algorithm has a better performance in terms of network lifetime, energy balance, moving efficiency of wireless charger and average charging latency.

Keywords: WRSNs; routing; charging algorithm; wireless charger; hexagon path

0 引 言

无线传感器网络 (WSNs) 已广泛应用于国防军事、环境监测、医疗卫生、智能家居等各个领域^[1-3], 但能量供应问题一直是限制其发展的瓶颈. 目前, 大多数无线传感器节点都采用电池供能, 当电池能量耗尽时节点就会死亡, 这严重影响了网络的长期运作^[4-6]. 关于解决 WSNs 能量供应问题的方法研究大体分为 3 类: 网络节能运行^[7-9]、环境能量收集^[10-11]

和无线充电法^[12-20]. 其中: 网络节能运行只能从一定程度上降低节点能耗速度, 并不能实现能量的永久供应; 环境能量收集通过将太阳能、风能等环境能量转化为电能提供给节点, 虽然该能量丰富, 但不确定因素较多, 无法人为控制; 无线充电法通过运用电感耦合、电磁辐射、磁耦合谐振等技术将充电器的能量无线传输给传感器节点^[12], 能够保证节点的持久工作, 已成为解决传统电池供电系统能量有限问题最可靠

收稿日期: 2017-04-05; 修回日期: 2017-06-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61673161); 江苏省自然科学基金项目 (BK20161510); 江苏高校优势学科建设工程项目.

责任编辑: 陈红.

作者简介: 孙永辉 (1980—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定与控制、网络系统分析与综合等研究; 秦晨 (1992—), 女, 硕士生, 从事无线传感网供能、网络路由的研究.

[†]通讯作者. E-mail: sunyonghui168@gmail.com

的方法. 这种采用无线充电法为节点供能的WSNs被称为WRSNs.

WRSNs的研究重点是如何制定一种有效的充电算法来延长网络寿命. 关于WRSNs充电算法的研究已有很多, 根据充电器的状态可将其分为静态无线充电算法和动态无线充电算法. 静态无线充电算法中, 充电器的位置保持不变, 主要研究如何部署多个充电器实现网络全覆盖^[13-14]; 动态无线充电算法中, 充电器可在网络中移动并为节点充电, 对于单个移动充电器供能的网络, 主要研究充电器路径规划、充电驻留点位置设置及充电时间分配的问题^[15-18], 对于多个充电器, 主要研究如何协同各充电器达到最优的充电性能和最小的充电代价^[19-20]. 文献[13]以工业无线感知识别平台与射频读写器为基础, 研究了如何部署多个充电节点实现网络全覆盖的问题, 提出了点供应与路径供应两种算法, 得出按等边三角形部署充电节点时覆盖整个网络所需的充电节点个数最少; 文献[15]同样以无线感知识别平台为基础, 比较了4种移动信标覆盖曲线, 即扫描算法(SCAN)、希尔伯特曲线算法(HILBERT)、Z曲线算法(Z-CURVE)和S曲线算法(S-CURVES)作为充电器移动路径时充电性能的差异, 仿真实验验证了S-CURVES在各项评价指标中均优于其他曲线; 文献[16]在文献[15]的基础上, 考虑充电器的移动能耗, 提出了一种充电性能表现更优的充电器移动(TRIANGLE)路径; 文献[18]根据充电器特性设计了一种基于网格的数据路由方式和充电算法, 命名为GRID算法, 并与文献[15]中的S-CURVES对比验证了所提出算法的充电性能.

对于大范围WRSNs, 由于充电设备覆盖范围有限且代价高昂, 采用静态充电节点部署的方案将不再适用. 本文针对该应用背景, 提出一种基于六边形路径的动态充电算法. 与目前已有的大多数WRSNs充电算法仅被动地针对路由协议导致的网络能量不均问题进行能量补充不同, 本文提出一种主动式的无线充电算法, 综合考虑网络路由协议和充电器特性对节点能量的影响, 提出基于充电器特性的数据路由方法和基于路由方法的动态充电算法, 并将其简称为IJRC_HP算法. 该算法主要包括两部分: 1) 将网络划分为多个等边三角形单元, 将充电器驻留点设置在单元顶点处, 根据充电器特性得到单元内能量分布特点, 由此设计一种数据路由方法, 使得单元内能量接收功率高的节点承担更多的通信任务, 避免单元内能量不均问题; 2) 针对该路由的特点制定充电策略, 为能耗速度快的节点分配更多的充电时间, 从而平衡各单元之间的能量差异. 也就是说, IJRC_HP算法利用

路由协议和充电器特性的相互作用, 在更大程度上优化了充电算法.

本文的主要贡献如下.

1) 针对大范围WRSNs, 利用节点的位置信息, 提出一种数据路由和无线充电算法. 首先, 利用等边三角形的强覆盖性, 对文献[18]中的路由方法进行改进; 接着, 针对改进后的路由特点, 提出JRC_HP充电算法, 并针对基站附近高能耗节点能量不均衡问题, 对JRC_HP算法分层改进, 得到IJRC_HP算法;

2) 将本文提出的JRC_HP算法和IJRC_HP算法与TRIANGLE算法^[16]、GRID算法^[18]进行对比实验分析, 通过仿真实验验证IJRC_HP算法在网络寿命提升、节点剩余能量及标准差、充电器移动效率和平均充电延时等方面的优越性.

1 模型介绍

1.1 网络模型

如图1所示, 假设 N 个传感器节点随机部署在边长为 L 的正方形区域中, 各节点有特定的ID号 $i, i \in (1, 2, \dots, N)$. 以网络的长和宽分别作为 x 轴和 y 轴建立坐标系, 则节点 i 的位置可用 (x_i, y_i) 表示. 无线充电器从服务站出发, 按照特定的路径以速度 v 在网络中移动, 并在充电驻留点位置停留为周围节点充电. 完成充电后, 无线充电器回到服务站补充自身的能量. 传感器节点每隔 T s采集一次环境数据, 通过多跳的方式将数据传递给基站. 基站可与无线充电器进行远距离通信, 并根据节点的实时能耗控制无线充电器每次驻留的时间.

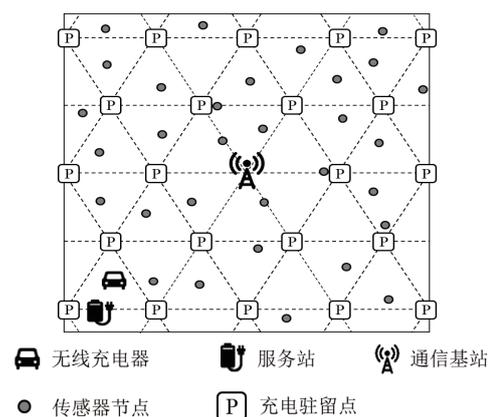


图1 网络模型

对于网络模型作以下假设.

假设1 传感器节点通过配备的GPS装置获得自身位置信息.

假设2 无线充电器携带电量足够, 即携带电量多于一轮充电消耗的总电量.

假设3 所有传感器节点初始能量 E_0 相同.

1.2 能量传输模型

本文以无线感知识别平台^[13]为基础, 充电器的发射功率 P_s 与节点的接收功率 P_r 之间的关系为

$$P_r = \frac{\alpha}{(d + \beta)^2} P_s. \quad (1)$$

其中: $\alpha = 4.31 \times 10^{-4}$, $\beta = 0.2316$, d 表示充电器与传感器节点间的距离. 由式(1)可知, 随着充电器与节点间距离的增加, 接收功率急速下降, 当距离超过一定阈值时, 节点能量接收功率太小, 可忽略不计. 取接收功率低于最大功率的二分之一时的距离为阈值, 即阈值 $d_0 = 3\text{m}$, 则式(1)可表示为

$$P_r = \begin{cases} \frac{\alpha}{(d + \beta)^2} P_s, & d \leq d_0; \\ 0, & d > d_0. \end{cases} \quad (2)$$

1.3 节点能耗模型

采用一阶无线电模型, 即在通信距离较近时采用自由空间信道模型, 在通信距离较远时采用多路径衰减模型^[21-22]. 该模型下, 相距 $D\text{m}$ 的两个节点之间, 发送和接收 l 比特数据的能耗 E_{Tx} 和 E_{Rx} 分别为

$$E_{Tx} = \begin{cases} lE_{ele} + l\varepsilon_{fs}D^2, & D < D_0; \\ lE_{ele} + l\varepsilon_{mp}D^4, & D \geq D_0. \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{Rx} = lE_{ele}. \quad (4)$$

其中: 能耗参数 $E_{ele} = 50n\text{J/bit}$, $\varepsilon_{fs} = 10\text{pJ/bit/m}^2$, $\varepsilon_{mp} = 0.0013\text{pJ/bit/m}^4$, 自由空间信道模型与多路径衰减模型的临界距离 $D_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{mp}} \approx 87.7\text{m}$.

2 基于六边形路径的动态无线充电算法

2.1 考虑充电器特性的数据路由方法

由文献[13]可知, 当多个充电节点以等边三角形部署时, 覆盖整个网络所需的充电节点个数最少, 即单个充电节点覆盖率最高. 由此考虑将网络划分为多个等边三角形单元, 并将充电驻留点部署在该单元的顶点处, 如图2所示.

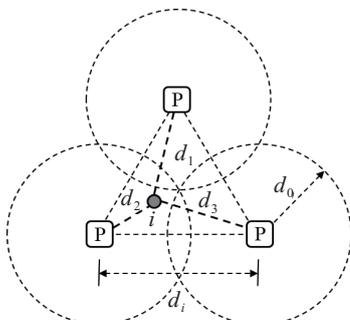


图2 等边三角形单元

图2中虚线圆表示充电器的充电范围, 两驻留点之间的距离为 d_i . 若要实现网络充电全覆盖, 则驻留点间距离需满足 $d_i \leq \sqrt{3}d_0$. 等边三角形单元确定之

后, 节点 i 可根据自身位置计算离单元顶点的距离 d_1, d_2, d_3 , 则节点 i 的接收功率 P_{r_i} 可表示为3个驻留点上接收功率之和, 即

$$P_{r_i} = \alpha \left(\frac{1}{(d_1 + \beta)^2} + \frac{1}{(d_2 + \beta)^2} + \frac{1}{(d_3 + \beta)^2} \right) P_s. \quad (5)$$

根据节点接收功率计算公式, 通过仿真得到, 越靠近等边三角形顶点位置的节点, 能量接收功率越高. 基于此, 本文对文献[18]的路由方法进行改进, 提出一种基于该充电器特性的数据路由方法, 旨在使得距离充电驻留点近、补充能量多的节点承担更多的通信任务. 在介绍路由由协议之前, 首先结合图3给出路由方法中的几个定义.

首选节点: 与充电驻留点间距离小于 r_1 的节点, 如节点 i , 该类节点离驻留点最近, 能量接收功率最高.

候选节点: 与充电驻留点间距离大于 r_1 但小于 r_2 的节点($r_2 > r_1$), 如节点 j .

其他节点: 网络中除首选节点和候选节点之外的节点, 如节点 k .

邻域驻留点: 首选节点的邻域驻留点有6个, 分别是与首选节点所属驻留点相邻的6个驻留点; 非首选节点的邻域驻留点有3个, 分别是为自身充电的3个驻留点. 例如, 节点 i 的邻域驻留点为 $P_2 \sim P_7$, 节点 j 和 k 的邻域驻留点分别为 P_1, P_3, P_4 和 P_1, P_5, P_6 .

排序因子: d_{ij}/P_{r_j} , j 表示 i 的邻居节点, d_{ij} 表示节点 i 与 j 间的距离, P_{r_j} 表示节点 j 的能量接收功率. 节点 j 的接收功率越高、离节点 i 越近, 排序因子越小, 节点 j 越适合作为节点 i 的下一跳.

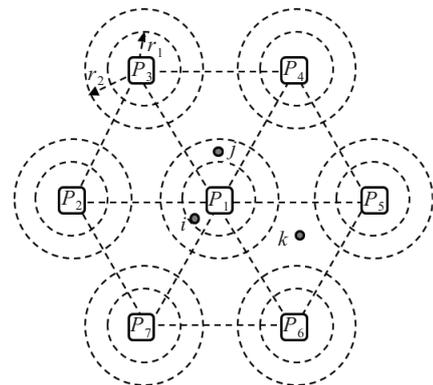


图3 首选节点和候选节点

网络部署完成之后, 节点开始感知周围环境中的数据, 并广播建立路由的请求信息, 启动路由建立的过程具体如下.

1) 节点 i 广播路由请求数据包, 该数据包包含节点 i 的信息: ID号、位置、与基站的距离、邻域驻留点信息.

2) 节点 i 判断基站是否在通信范围内,若在则选择基站作为下一跳。

3) 不能与基站直接通信的节点建立首选节点路由。

i) 节点 i 的邻居节点判断自身是否满足两个条件: 首选节点且属于 i 的某个邻域驻留点; 与基站的距离比 i 与基站的距离近。满足条件的邻居节点 j 回复路由请求数据包给原节点 i , 该数据包包含节点 j 的信息: ID号、位置、与基站的距离、充电功率, 不满足条件的邻居节点不回复。

ii) 节点 i 收到回复数据包后, 选择排序因子最小的邻居节点作为下一跳。

4) 若步骤3)中建立首选节点路由失败, 则尝试建立候选节点路由: 具体步骤与步骤3)相似, 只将判断条件改为候选节点。

5) 若步骤3)和步骤4)都建立失败, 则尝试建立其他节点路由: 具体步骤与步骤3)相似, 只将判断条件改为其他节点。

经过以上5个步骤, 网络中所有节点都确定了它们的下一跳节点, 整个网络的路由建立完毕。在步骤3)~步骤5)中, 先后选择首选节点、候选节点和其他节点作为目标下一跳, 再依据节点收获的能量和节点间的距离来确定下一跳。在这样的路由方式下, 靠近充电驻留点、收获较多能量的节点承担了更多的通信任务, 一定程度上均衡了整个网络中的节点能量, 同时每个节点更倾向于选择离自己最近的节点作为下一跳, 使得数据传输能耗降到最低。需要说明的是, 该路由方法虽然表面上是平面路由, 但却从一定程度上达到了分层路由的效果。由于建立路由时, 将网络划分为多个三角形区域, 并依据区域内节点的能量接收功率为其安排通信任务, 使得区域内其他节点更倾向于将数据包传递给首选节点, 所以首选节点也可以理解为该区域的簇头节点。

通过对该路由方法进行仿真, 将基站设置在网络的中心位置, 得到图4。

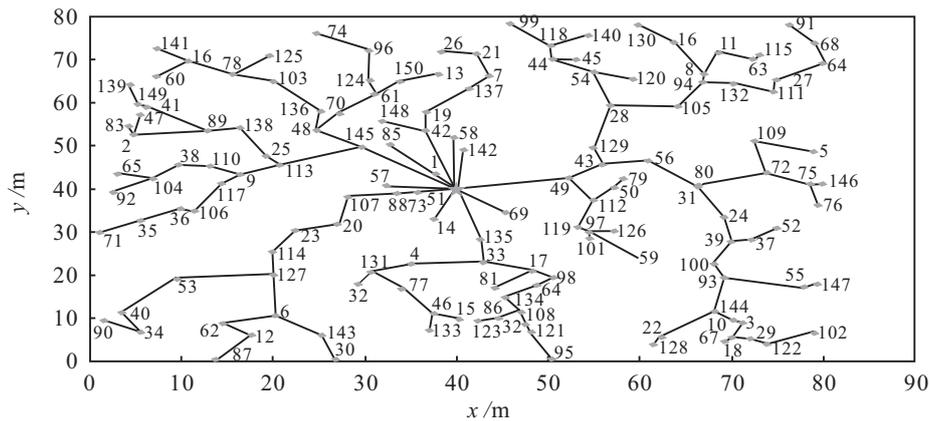


图4 路由结果

从图4可知, 数据以多跳的方式向中心基站汇聚, 且基站附近节点承担了更多的数据传输任务, 如节点49、88、135等, 而离基站较远的网络边缘节点数据传输量较少, 甚至只需传输自身采集的数据。节点间传输数据量的差异就带来了各节点的能耗差异, 这也导致了网络中的能量不均问题, 所以在设计充电算法时需考虑该路由的特点。

2.2 基于路由方法的动态充电算法

针对上节中路由方法的特点, 提出一种动态充电算法, 简称为JRC_HP算法。如图5所示, 基站位于网络的中心, 无线充电器从基站出发, 按箭头方向沿着逐渐扩大的六边形路径移动, 直至覆盖整个网络。JRC_HP算法中包含多个六边形充电层, 每个充电层中充电器需要多次驻留为节点充电。将靠基站最近的六边形充电层命名为第1层, 则覆盖整个网络

至少需要 $L/2d_i$ 个充电层。由于无线充电器的移动间隔为 d_i , 则第 i 层六边形路径的边长为 id_i , 而充电器在该层的驻留次数为 $6i$ 。此外, 要想实现网络的全覆盖, 仍需对网络的边角进行充电处理。

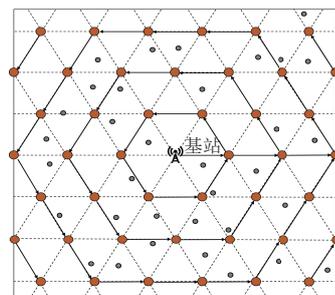


图5 JRC_HP算法路径

设计JRC_HP算法时, 可依据不同充电层的节点平均能耗为该充电层的驻留点分配充电时间, 使得各

层每次驻留的时间分配与该层的平均能耗成正比, 具体时间设定步骤如下.

- 1) 根据应用需求设置一轮充电的总时间 t_{Σ} .
- 2) 根据已设定的路径总长度, 计算充电器的移动时间 t_m , 并依据下式得到充电器实际的驻留充电时间 t_c :

$$t_c = t_{\Sigma} - t_m. \quad (6)$$

3) 根据能耗模型和路由方法, 计算节点的能耗速度 γ_i , 并由此得到每一层节点的平均能耗速度 $\bar{\gamma}_i, i \in [1, L/2d_i]$, 即

$$\bar{\gamma}_i = \frac{1}{T} \left(\sum_{j=1}^{N_i} n_1(E_{Tx} + E_{Rx}) + n_1 E_{Tx} \right). \quad (7)$$

其中: T 表示节点采集数据的周期, n_1 表示节点采集的数据包大小, N_i 表示节点 i 的负载量.

4) 依据下式计算各充电层每次驻留的时间 $t_i, i \in [1, L/2d_i]$:

$$\frac{t_1}{\gamma_1} = \frac{t_2}{\gamma_2} = \dots = \frac{t_{\frac{L}{2d_i}}}{\gamma_{\frac{L}{2d_i}}}, \quad (8)$$

$$6 \left(t_1 + 2t_2 + \dots + \frac{L}{2d_i} t_{\frac{L}{2d_i}} \right) = t_c. \quad (9)$$

在节点大范围密集部署的网络背景下, 同一六边形充电层内的节点与基站的距离相近, 能耗速度也相近, 所以此时设置同一充电层内的每次驻留时间相同, 从一定程度上减少了充电驻留时间计算的复杂度. 由图4的路由结果可知, 基站附近也存在数据传输量较少的节点, 例如节点14、69、142. 由于建立路由的第1步设定了基站附近的节点可与基站直接通信, 而基站附近并非所有节点都承担了传输其他节点数据包的任务, 相对于其他位置, 基站附近区域的节点能耗差异最大. 所以JRC_HP算法将不再适用于基站附近的节点.

由此针对基站附近的节点能量不均衡问题, 对JRC_HP算法进行分层改进, 并将其称为IJRC_HP算法. 将可与基站直接通信的节点所在充电层称为“内层”, 其他充电层称为“外层”. 充电器对内层节点逐个遍历充电, 对外层节点的充电方法与JRC_HP算法一致, 如图6所示. 也就是说, 内层每个节点的位置都是充电器的驻留位置. 假设节点的通信范围为 R , 则内层包含 $\lfloor R/d_i \rfloor$ 个充电层. 充电器采用最近邻点法来遍历内层中的节点, 具体过程为: 充电器从基站出发, 每次选择距离当前位置最近的节点作为驻留位置, 直至遍历完所有内层节点.

IJRC_HP算法中各驻留点的时间设置方法如下.

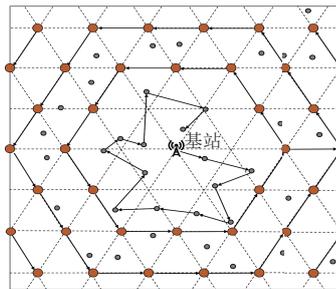


图6 IJRC_HP算法路径

1) 首先根据JRC_HP算法中驻留时间的设置方法得到各充电层驻留点的驻留时间.

2) 设置内层驻留总时间与前 $\lfloor R/d_i \rfloor$ 层驻留总时间一致, 用 t_{c_nei} 表示, 即

$$t_{c_nei} = 6(t_1 + 2t_2 + \dots + \lfloor R/d_i \rfloor t_{\lfloor R/d_i \rfloor}). \quad (10)$$

3) 得到内层充电总时间 t_{c_nei} 后, 依据内层各节点的具体能耗为其分配充电时间. 若内层节点个数为 n , 则充电器在每个内层节点处的驻留时间可由下式计算得到:

$$t_{c_1} + t_{c_2} + \dots + t_{c_n} = t_{c_nei}, \quad (11)$$

$$\frac{t_{c_1}}{\gamma_1} = \frac{t_{c_2}}{\gamma_2} = \dots = \frac{t_{c_n}}{\gamma_n}. \quad (12)$$

其中: t_{c_n} 表示充电器在第 n 个内层节点处的驻留时间, γ_n 表示第 n 个内层节点的能耗速度.

至此, 网络的充电驻留点位置设置、充电器的路径规划以及充电时间分配已确定, 得到分层改进的IJRC_HP算法, 该算法的优势在于: 1) 六边形路径将网络划分成多个等边三角形单元, 使得移动间隔一定时充电器的覆盖范围最大; 2) 充电器补充能量时从基站出发, 首先为能耗最快的节点充电, 有效避免了基站附近节点的“能量空洞”问题; 3) 对网络进行分层充电, 便于控制内层每个节点的充电时间, 从而控制其充电能量, 更大程度上实现了网络能量的均衡.

3 仿真结果分析

3.1 参数设置与评价指标

采用Matlab软件仿真模拟无线可充电传感器网络, 并验证本文提出的IJRC_HP算法的充电性能表现. 为了使实验结果更加准确, 每次仿真都重复部署50个随机网络, 将得到的结果取平均作为最终结果. 仿真参数设置如表1所示.

设立多个评价指标衡量充电算法的性能, 包括节点平均剩余能量 $\overline{E_{rest}}$ 、剩余能量标准差 σ 、网络寿命 $life$ 、充电器移动效率 δ 和平均充电延时 \overline{delay} . 节点平均剩余能量 $\overline{E_{rest}}$ 表示经过一轮充电后网络中各节点剩余能量的平均值, σ 表示剩余能量的标准差.

表1 仿真参数设置

参数	符号	数值
网络边长	L/m	120
充电器功率	P_s/w	100
节点个数	N	250, 300, 350, 400, 450, 500
充电器速度	$v/(m/s)$	2.5
充电器移动间隔	d_i/m	5
首选半径	r_1/m	0.5
候选半径	r_2	$2.2r_1$
节点初始能量	E_0/J	2
通信范围	R/m	15
采集数据周期	T/s	20
节点低电量阈值	E_{th}/J	0.5
采集数据包大小	n_1/bit	100
节点信息数据包大小	n_2/bit	25
充电总时间	t_{Σ}/s	10000~140000

$$\overline{E_{rest}} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{rest_i}}{N}, \quad (13)$$

$$E_{rest_i} = E_0 + E_{r_i} - E_{\gamma_i}, \quad (14)$$

$$E_{r_i} = P_{r_i} \times t_{c_i}, \quad (15)$$

$$E_{\gamma_i} = \gamma_i \times t_{\Sigma}, \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{rest_i} - \overline{E_{rest}})^2}. \quad (17)$$

其中: E_{r_i} 表示充电器为节点 i 补充的能量, t_{c_i} 表示节点 i 的充电时间, E_{rest_i} 表示节点 i 的剩余能量, E_{γ_i} 表示一轮充电时间内节点 i 消耗的总能量. 设置节点低电量阈值 E_{th} , 当节点能量低于该阈值时进入休眠状态, 不参加网络数据传输的工作, 等待充电器为其补充足够能量后继续工作, 则该节点的寿命 $life_i$ 及网络寿命 $life$ 的定义如下:

$$life_i = \frac{E_{rest_i} - E_{th}}{\gamma_i}, \quad (18)$$

$$life = \frac{\sum_{i=1}^N life_i}{N}. \quad (19)$$

充电器移动效率 δ 定义为充电器总充电能量与移动路径的比值, 平均充电延时 \overline{delay} 是指从节点能量降低至低电量阈值 E_{th} 到充电器给该节点充电的平均时间间隔, 计算方法如下:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N E_{r_i}}{l}, \quad (20)$$

$$\overline{delay} = \sum_{i=1}^N delay_i, \quad (21)$$

其中 $delay_i$ 表示节点 i 的充电延时.

节点平均剩余能量从一定程度上反映了路由方法和充电算法的共同性能效果, 节点剩余能量标准

差可用来量化网络的能量均衡性, 充电器移动效率可用来评价充电算法中路径设置的优劣, 网络寿命和平均充电延时可用来表征充电算法的及时性和可靠性. 由定义可知, 相同条件下, 平均剩余能量 $\overline{E_{rest}}$ 、网络寿命 $life$ 、充电器移动效率 δ 越高, 节点剩余能量标准差 σ 、平均充电延时 \overline{delay} 越小, 充电算法性能表现越好.

3.2 IJRC_HP算法仿真

本节通过仿真探讨无线充电器的加入对网络寿命的影响. 设置一轮充电总时间为 10000 s, 改变节点个数比较 JRC_HP 与 IJRC_HP 两种算法在网络寿命提升方面的强弱, 比较结果如图 7 所示.

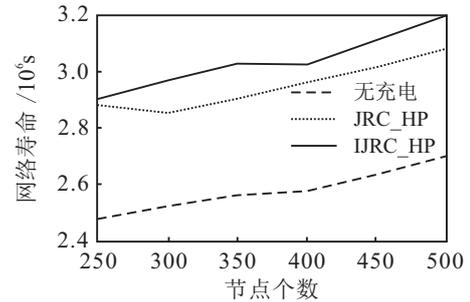


图7 网络寿命

随着节点数量的增加, 3种状态下的网络寿命都呈上升趋势. JRC_HP和IJRC_HP两种充电算法都提升了网络寿命, 且IJRC_HP算法在网络寿命提升方面表现更好. 这是由于IJRC_HP算法对网络中通信任务最多、能耗差异最大的内层区域节点逐个遍历充电, 延长了内层高能耗节点的寿命, 从而延长了整个网络的寿命.

3.3 仿真结果对比

本节验证 JRC_HP 和 IJRC_HP 算法在平均剩余能量及标准差、充电器移动效率及平均充电延时方面的性能表现, 并加入两种已有的充电算法 GRID 算法^[18]和 TRIANGLE 算法^[16]进行对比. TRIANGLE 算法假设节点能耗相同且保持不变, 为了使比较结果更加真实可信, 将最常见的贪婪路由作为该静态路径下节点的路由方式, 即每个节点选择离基站更近的邻居节点中离自身最近的作为下一跳.

首先比较 4 种充电算法的复杂度和算法中充电器的路径长度及驻留次数, 结果见表 2.

表2 路径长度与驻留次数

算法名称	运行时间/s/信息交换量	路径长度/m	驻留次数
IJRC_HP	3.13/2096	2146	450
JRC_HP	2.63/2096	2340	469
TRIANGLE ^[16]	1.92/3874	5400	1081
GRID ^[18]	2.46/1766	3120	625

为了综合考虑路由的信息交换量和充电时间分配的計算量,选择算法运行时间来表征算法复杂度.表2中给出了节点个数为300时各充电算法的运行时间,可见各算法复杂度相差不大,其中静态TRIANGLE算法复杂度最低,这是由于TRIANGLE算法设置每次驻留的时间相等,虽然复杂度低,但并不符合实际应用的网络特征.通过比较各充电算法中路由建立过程的信息交换量得出,本文提出的考虑充电器特性的数据路由方法相比TRIANGLE算法中加入的贪婪路由而言,信息交换量较小.此外,IJRC_HP算法路径长度最短,驻留次数也最少,JRC_HP算法次之,而TRIANGLE算法路径长度最长,驻留次数最多.实际充电算法的规划中,在节点补充相同能量条件下,移动路径长度短、驻留次数少的充电算法具有更好的充电性能,这是因为移动路径越长、驻留次数越多,充电器就会产生越多的移动能耗.

本节进行两组仿真实验,第1组实验比较4种算法一轮充电后,网络不同运行时间下节点的平均剩余能量和剩余能量标准差,结果如图8和图9所示.

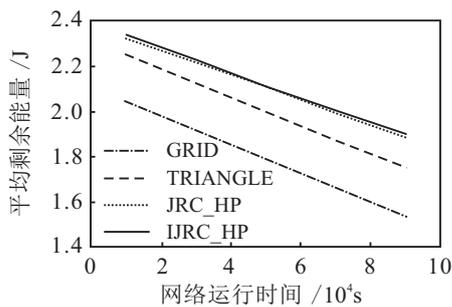


图8 平均剩余能量

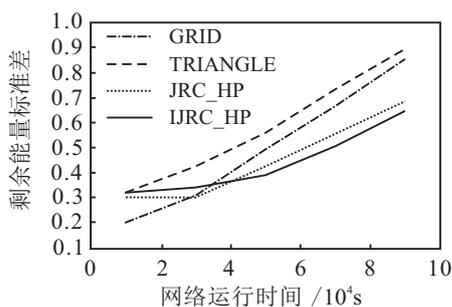


图9 剩余能量标准差

第2轮实验通过改变网络充电总时间,比较4种算法的移动效率和平均充电延时的差异,结果如图10和图11所示.

从图8中可知,随着网络的运行,节点的平均剩余能量不断下降,其中JRC_HP和IJRC_HP算法的节点平均剩余能量最高,这是因为两种算法都采用六边形路径,且驻留点以等边三角形方式部署,覆盖率高.从图9可知,随着网络的运行,节点剩余能量标准差不断增大,其中TRIANGLE算法的标准差最

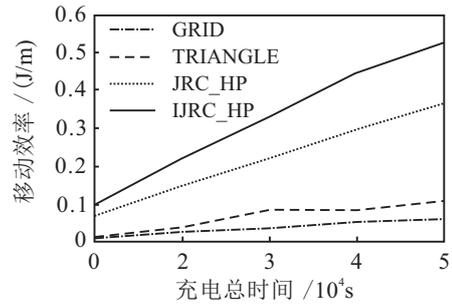


图10 移动效率

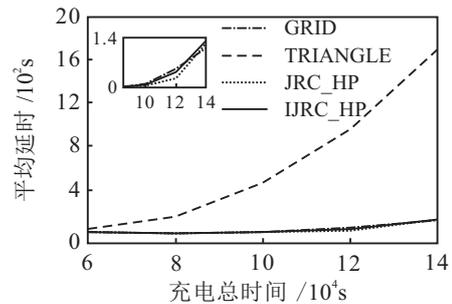


图11 平均充电延时

高,这是因为该算法未依据节点能耗来分配充电时间.相对而言,剩下的3种动态算法中节点剩余能量标准差较小,在网络运行初期,GRID算法中节点能量更均衡,而随着网络的运行,IJRC_HP算法剩余能量标准差上升趋势最缓慢,当网络运行到4000s之后,IJRC_HP算法中节点能量最均衡.这是由于刚充电完成时,IJRC_HP算法中高能耗节点都储备了较多的能量,引起整个网络的较高的剩余能量标准差,而随着网络的运行,这些节点因能耗速度快,引起的标准差部分将逐渐削弱.

综合图8和图9可以看出,IJRC_HP算法在能量补充量、能量均衡度上都有较好的性能.同时,随着网络运行时间的增加,这些好的性能也会下降,所以需要选择合适的时间对网络进行第2轮充电.

从图10可知,随着充电总时间的增加,4种算法的移动效率上升,其中IJRC_HP算法的移动效率最高且增长速度最快.联合表2与图8可知,IJRC_HP算法移动路径最短,而充电量最多,所以移动效率最高.

从图11可知,随着充电总时间的增加,平均充电延时也不断上升,其中TRIANGLE算法延时最高,而JRC_HP算法延时最低,IJRC_HP次之.这是因为网络充电总时间越多,内层分配的充电时间也越多,而内层节点能耗都较高且采取逐个遍历的充电方式,所以在遍历路径后部分的内层节点就存在较大的充电延时.在实际应用中,由于充电器可携带的能量有限,充电总时间过长是不现实的.

综合图10和图11可以看出,IJRC_HP算法在充电器移动效率、平均充电延时方面都有较好的性能.

此外,随着充电总时间的增加,充电器的移动效率和节点的平均充电延时同时增加,所以在实际应用中,需要综合考虑这两个指标设置合适的充电总时间。

4 结论

本文针对大范围 WRSNs,综合考虑了路由协议和充电器特性对节点能量的影响,提出了一种基于充电器特性的数据路由方法和基于路由方法的动态充电算法,即 IJRC_HP 算法. 将该算法与 GRID 算法、TRIANGLE 算法进行仿真对比,结果表明, IJRC_HP 算法在网络寿命提升、网络能量均衡、充电器移动效率、节点平均充电延时等方面都有更好的性能表现. 后期工作可以考虑无线充电器的移动启停能耗和网络中障碍物的影响,并在分层路由的技术上设计充电算法,使得算法适用于更多的应用场景。

参考文献(References)

- [1] Pez Riquelme J A, Soto F, Suardiaz J, et al. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2009, 68(1): 25-35.
- [2] Chen M, Wan J, Gonzalez S, et al. A survey of recent developments in home M2M networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 16(1): 98-114.
- [3] Khalil I M, Khreishah A, Ahmed F, et al. Dependable wireless sensor networks for reliable and secure humanitarian relief applications[J]. *Ad Hoc Networks*, 2014, 13(1): 94-106.
- [4] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [5] Hou Y T, Shi Y, Sherali H D, et al. On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2579-2590.
- [6] Toklu S, Erdem O A. BSC-MAC: Energy efficiency in wireless sensor networks with base station control[J]. *Computer Networks*, 2014, 59(3): 91-100.
- [7] Anastasi G, Conti M, Francesco M D, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568.
- [8] 单立群, 汪晋宽, 刘志刚, 等. 无线传感器网络中最大化网络寿命的数据聚合路由[J]. *控制与决策*, 2013, 28(4): 609-612.
(Shan L Q, Wang J K, Liu Z G, et al. Maximum lifetime routing with data aggregation in wireless sensor networks[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(4): 609-612.)
- [9] 毕晓君, 刁鹏飞. 基于引力搜索算法的异构无线传感器网络路由分簇算法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3): 563-569.
(Bi X J, Diao P F. Routing and clustering algorithm heterogeneous wireless sensor networks based on gravitational search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(3): 563-569.)
- [10] Park C, Chou P H. AmbiMax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes[C]. *IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. Reston: IEEE, 2006: 168-177.
- [11] Harb A. Energy harvesting: State-of-the-art[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(10): 2641-2654.
- [12] 胡诚, 汪芸, 王辉. 无线可充电传感器网络中充电规划研究进展[J]. *软件学报*, 2016, 27(1): 72-95.
(Hu C, Wang Y, Wang H. Survey on charging programming in wireless rechargeable sensor networks[J]. *J of Software*, 2016, 27(1): 72-95.)
- [13] He S, Chen J, Jiang F, et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2013, 12(10): 1931-1942.
- [14] Liao J H, Hong C M, Jiang J R. An adaptive algorithm for charger deployment optimization in wireless rechargeable sensor networks[J]. *Frontiers in Artificial Intelligence & Applications*, 2015, 274: 2080-2089.
- [15] Han G, Qian A, Liu L, et al. Impacts of traveling paths on energy provisioning for industrial wireless rechargeable sensor networks[J]. *Microprocessors & Microsystems*, 2015, 39(8): 1271-1278.
- [16] Qin C, Sun Y, Zhang Y, et al. A novel path planning of mobile charger in wireless rechargeable sensor networks[C]. *Chinese Control and Decision Conf. Chongqing: IEEE Press*, 2017: 1948-9447.
- [17] Li Z, Peng Y, Zhang W, et al. J-RoC: A joint routing and charging scheme to prolong sensor network lifetime[C]. *IEEE Int Conf on Network Protocols*. Vancouver: IEEE Press, 2011: 373-382.
- [18] Han G, Qian A, Jiang J, et al. A grid-based joint routing and charging algorithm for industrial wireless rechargeable sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2016, 101(C): 19-28.
- [19] Madhja A, Nikolettseas S, Raptis T P. Distributed wireless power transfer in sensor networks with multiple mobile chargers[J]. *Computer Networks*, 2015, 80(C): 89-108.
- [20] Beigel R, Wu J, Zheng H. On optimal scheduling of multiple mobile chargers in wireless sensor networks[C]. *Int Workshop on Mobile Sensing*. Philadelphia: ACM, 2014: 1-6.
- [21] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communication*, 2002, 1(4): 660-670.
- [22] 徐新黎, 皇甫晓洁, 王万良, 等. 基于无线充电的 Sink 轨迹固定 WSN 路由算法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(3): 570-578.
(Xu X L, Huangfu X J, Wang W L, et al. Wireless charging routing algorithm in WSN with a path-fixed Sink[J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 570-578.)