

可充电无线传感器网络动态拓扑问题研究

丁煦^{1,2}, 韩江洪^{1,2}, 石雷^{1,2}, 夏伟^{1,2,3}, 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. 安全关键工业测控教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009;
3. 蚌埠学院 计算机科学与技术系, 安徽 蚌埠 233030)

摘要: 在可充电无线传感器网络中的能量补给设备兼任数据采集设备的情况下, 提出了可充电无线传感器网络时变动态拓扑模型, 并在此基础上根据最大化能量补给设备驻站时间比为目标提出了最优化问题。通过分析不同时刻不同传感器节点和无线能量补给/数据采集设备的工作情况及需要遵循的约束条件, 得到与原问题具有等优性的多状态线性规划问题。求解该优化问题, 获得可充电无线传感器网络动态拓扑下的周期动态路由和无线能量补给/数据采集设备的工作策略。与之前的研究成果相比, 优化目标值均有 20% 以上的提升。

关键词: 可充电无线传感器网络; 动态拓扑; 无线能量补给/数据采集设备; 动态路由

中图分类号: TN925+.3

文献标识码: A

Problem of the dynamic topology architecture of rechargeable wireless sensor networks

DING Xu^{1,2}, HAN Jiang-hong^{1,2}, SHI Lei^{1,2}, XIA Wei^{1,2,3}, 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 and Technology, Bengbu University, Bengbu 233030, China)

Abstract: The time-varying dynamic topology model for rechargeable wireless sensor networks is proposed in accordance with the scenario that the wireless charging equipment plays the role of a data collector while charging sensor nodes at the meantime. An optimization problem aiming to maximize the vacation time ratio of the wireless charging equipment is then raised from the study of the model established. Through comprehensively analyzing of the working states and constraints of different sensor nodes as well as the wireless charging equipment during different time instances, the multi-phase linear programming problem with the identical optimality is then obtained. The optimal dynamic data routing schemes of different phases compatible with the dynamic topology architecture are acquired from solving this optimization problem. What is more, the working strategies of the wireless charging/data collecting equipment are also obtained, simultaneously. Compared with the results of the previous work, the objective values are increased by no less than 20%.

Key words: rechargeable wireless sensor networks; dynamic topology architecture; wireless charging/data collecting equipment; dynamic routing protocols

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor networks) 为环境管理、资源保护、灾害监测等相关

领域提供了更好的技术设备和信息平台。近年来, 我国也将无线传感器网络的关键技术列为重点研究方向。目前, 基于无线传感器网络的研究主要集中在目标发现与定位^[1], 无线传感器网络的路由协

收稿日期: 2013-11-21; 修回日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61370088); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20100111110004); 安徽省自然科学基金资助项目 (1208085QF113); 安徽省国际科技合作计划项目基金资助项目 (1303063009)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61370088); The Doctoral Fund of Ministry of Education of China(20100111110004); The Natural Science Foundation of Anhui Province (1208085QF113); Anhui International Science and Technology Cooperation Project (1303063009)

议及路由恢复^[2-5]和 MAC^[6-8]协议等领域。然而,阻碍无线传感器网络长期工作的首要因素仍然是传感器节点能量耗尽引起的传感器节点失效。虽然通过节能路由协议和能量敏感型跨层优化^[9]等方式可以降低传感器网络的能耗,但最终仍会面临传感器节点因能源耗尽而失效的问题;通过为传感器节点加装能量获取设备从潮汐、日光中获取能源,虽然可行,但由于能量获取过程不可人为控制,也不能保证传感器节点长期正常工作。

在2007年,美国麻省理工学院的 Kurs 等在《科学》杂志上发表文章论证了进行无线能量传输的可行性^[10]。文章指出,通过耦合共振方式可以在较远距离以很高的效率对目标进行能量补给。在接下来的几年中, Karalis 和 Kurs 带领的小组成功研制出一系列用于无线能量传输的原型设备,并获得多项美国国家专利^[11-13]。同时,美国 WiTricity Corporation 公司购买了多项专利,并已生产出相关产品^[14],验证了这项技术的实际价值。这也意味着,在20世纪初由 Nikola Tesla 提出的无线能量传输设想^[15-17]也已付诸实践,同时为无线传感器网络的应用带来了新的曙光。

在无线能量传输技术日益成熟的背景下,针对可充电无线传感器网络的研究也逐步深入。在文献[18]中, Xie 等首先分析了无线能量传输技术对无线传感器节点进行能量补给的可行性,并依据该技术可同时多目标进行能量补给的性质,提出了相应的无线传感器网络模型及优化问题,最终得到无线能量补给设备对附近多个传感器节点进行能量补给的方案及无线传感器网络中传感器节点的工作方案,但并未考虑时变模型及网络动态拓扑的问题。文献[19]研究了可充电无线传感器网络中移动基站的问题,但是所研究的网络模型中并不存在固定的无线基站,且不涉及可充电无线传感器网络的动态拓扑问题。通过求解相应优化问题的近似最优解,获得了移动基站及无线传感器节点的工作方案。文献[20]通过研究无线能量补给策略,得到了可充电无线传感器网络中的联合数据路由及能量补给策略,但并未涉及无线能量补给设备同时作为数据采集设备导致的动态网络拓扑问题。文献[21]中,韩江洪等研究了时变模式下可充电无线传感器网络的时变充电及动态数据路由模型,通过求解相应优化问题,得到网络中传感器节点及无线能量补给设备的工作策略。然而,文献[21]并未考虑无线

能量补给设备在遍历网络中传感器节点时作为数据采集设备获取数据的问题。

在以往研究的基础上,通过研究可充电无线传感器网络中无线能量补给设备兼任数据采集设备时的网络动态拓扑模型及网络中相关设备的约束条件,建立了相应的时变优化问题模型,最终得到该问题的最优解,同时得到无线传感器节点及无线能量补给/数据采集设备的工作策略。本文的创新之处可以归纳为以下几点。

1) 提出了可充电无线传感器网络中的动态拓扑工作方式。无线能量补给设备在对传感器节点进行能量补给时也可以作为数据采集设备从该传感器节点处获取数据信息。由于无线能量补给设备需要造访网络中的所有传感器节点,那么以这个节点作为簇头的子网络不是固定不变的,因此网络具有动态拓扑特性。

2) 在文中,网络中除了存在固定基站接收数据外,无线能量补给/数据采集设备也可以遍历传感器节点收集信息。由于每个传感器节点均会担任相应子网络的簇头节点,这导致不同传感器节点在不同时刻需要遵循的约束条件是不同的,因此,在建立优化模型时,需要分时刻、分节点地考虑约束条件,增加了建立优化模型的难度。

依据该动态拓扑网络工作模式,建立相应的优化模型,并将其转变为线性规划问题,最终求解。仿真结果表明,工作在动态拓扑方式下的无线传感器网络中无线能量补给/数据采集设备的驻站时间比仅让其进行能量补给时有较大提升,均在20%以上。

2 可充电无线传感器网络的动态拓扑结构

如图1所示,在一个区域内分布着 N 个传感器节点,传感器节点的集合记为 $\mathcal{N}=\{1,2,\dots,N\}$ 。在这个区域内存在一个位置已知的数据基站 B 和一个维护站 S 。维护站是无线能量补给/数据采集设备(WCE, wireless charging/data collecting equipment)在执行完补给能量和数据采集任务后接受维护的场所。

传感器网络中的每个传感器节点通过多跳或单跳的方式将监测数据传输到基站 B 或WCE。WCE从维护站 S 出发,遍历无线传感器网络中的每个传感器节点,在对传感器节点进行无线能量补给的同时从该节点处获取数据信息。在对整个网络中节点进行能量补给和数据采集之后,WCE返回维护站接受维护并录入收集到的数据。

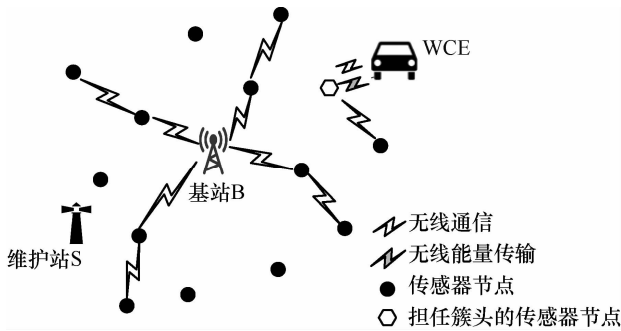


图 1 可充电无线传感器网络

WCE 的工作模式及子网络簇头节点的选取方案如下：由文献[21]中的仿真结果和数据分析可知，当传感器节点接受能量补给时，可以更积极地参与数据传输任务。因此，本文考虑利用正在被补给能量的节点作为子网络的簇头节点，它从附近传感器节点获取信息，并直接传输给 WCE。也就是说，传感器网络中 WCE 对传感器节点进行能量补给的同时也作为数据轮渡从该节点处接收信息，如图 2 和图 3 所示。由于 WCE 遍历传感器网络中的所有节点，所以担任子网络簇头的节点和子网络的划分不是固定的，这就导致该网络的拓扑发生变化（在后文的仿真实验和数据分析中将阐明具体的子网划分和簇头节点选择方案），这就是可充电无线传感器网络的动态拓扑结构。

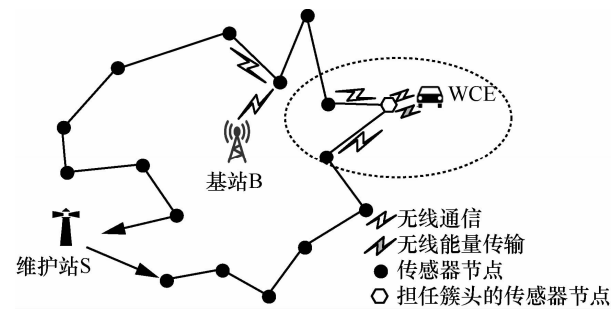


图 2 无线传感器网络动态拓扑：第 i 状态

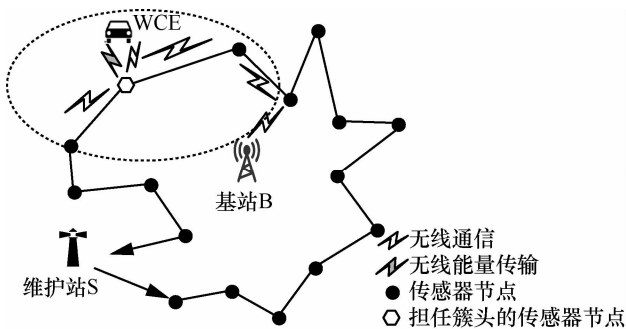


图 3 无线传感器网络动态拓扑：第 j 状态

3 问题描述及优化问题初步建模

3.1 WCE 的 2 种能量补给/数据采集阶段

每个传感器节点安装有同样型号的无线可充电电池，初始电量为 E_{max} ，当传感器节点剩余能量小于 E_{min} 时，传感器节点失效。无线传感器节点可以从环境中采集并传输数据，部分传感器节点还作为路由节点，承担数据中继业务。为了保证网络中每个传感器节点的剩余电量在任何时刻都不小于 E_{min} ，WCE 需要周期地遍历网络中的每个节点并对其进行能量补给。在进行能量补给时，WCE 亦可作为数据采集设备，从该节点处获取数据。WCE 遍历网络的路径如图 4 所示。其中 π_i 表示遍历路径上第 i 个传感器节点。

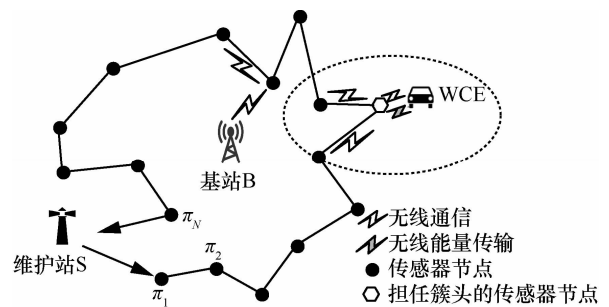


图 4 能量补给/数据采集路径

完整能量补给/数据采集过程可以分为初始能量补给/数据采集阶段和一般能量补给/数据采集阶段，需要如此划分的原因将在第 6 节中阐述。初始能量补给/数据采集阶段是指无线传感器网络布设完毕后，所有传感器节点第一次接受能量补给的阶段；一般能量补给/数据采集阶段是指除初始能量补给/数据采集阶段外的阶段。

一般能量补给/数据采集阶段由多个一般能量补给/数据采集周期组成^[21]，该周期需要满足以下条件。

1) 在任何一个能量补给/数据采集周期内，任何传感器节点的电量不能小于 E_{min} ，同时不能高于 E_{max} 。

2) 对每个传感器节点而言，其任意 2 个一般能量补给/数据采集周期内的能量—时间变化曲线均相同。

条件 1)要求在一般能量补给/数据采集周期内，任何传感器节点的电量都足以维持其正常工作，同时，限制了过充电操作的发生。

本文旨在讨论无线传感器网络中的传感器节点和 WCE 周期性的工作模式，并为其设计相应的工作方案，这就需要通过条件 2)对无线传感器节点

及 WCE 周期性的工作模式加以限制。

3.2 一般能量补给/数据采集周期模型

首先讨论一般能量补给/数据采集周期的模型。

由于最终建立的无线传感器网络中各个设备的工作方案在一般能量补给/数据采集阶段内具有周期性,因此,在这里仅讨论第一一般能量补给/数据采集周期。设一般能量补给/数据采集周期的长度为 τ ,那么,第一一般能量补给/数据采集周期起始于 τ ,终止于 2τ ;传感器节点 $i \in \mathcal{N}$ 通过监测环境产生数据的速率记为 R_i bit/s;在 $t(t \in [\tau, 2\tau))$ 时刻传感器节点 i 从其他传感器节点处接收数据,速率为 R_{ji} bit/s ($j \neq i, j \in \mathcal{N}$);传感器节点 i 向其他传感器节点传输数据的速率记为 R_{ik} bit/s ($k \neq i, k \in \mathcal{N}$),向基站 B 传输数据的速率记为 R_{iB} bit/s,向 WCE 传输数据的速率记为 R_{iW} bit/s。那么在任意时刻 $t(t \in [\tau, 2\tau))$,传感器节点 i 需要满足

$$R_i + \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in \mathcal{N}}} R_{ji}(t) = \sum_{\substack{k \neq i \\ k \in \mathcal{N}}} R_{ik}(t) + R_{iB}(t) + R_{iW}(t) \quad (1)$$

$(j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in [\tau, 2\tau))$

设传感器节点 $i \in \mathcal{N}$ 在 t 时刻工作功率为 $p_i(t)$ W,从其他节点接收单位数据对应的功率因子为 C_{ji} ($j \neq i, j \in \mathcal{N}$),向其他节点发送单位数据对应的功率因子为 C_{ik} ($k \neq i, k \in \mathcal{N}$),向基站发送单位数据对应的功率因子为 C_{iB} ,向 WCE 发送单位数据对应的功率因子为 C_{iW} ,则需要满足

$$p_i(t) = \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in \mathcal{N}}} C_{ji} R_{ji}(t) + \sum_{\substack{k \neq i \\ k \in \mathcal{N}}} C_{ik} R_{ik}(t) + C_{iB} R_{iB}(t) + C_{iW} R_{iW}(t) \quad (2)$$

$(j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in [\tau, 2\tau))$

令传感器节点 i 在 $t(t \in [\tau, 2\tau))$ 时刻剩余电量为 $e_i(t)$,由条件 1)可知

$$E_{\min} \leq e_i(t) \leq E_{\max} \quad (3)$$

若 WCE 在一般能量补给/数据采集周期内对传感器节点充电的功率为 U W,对传感器节点 i 充电的时长为 τ_i s,由条件 2)可知

$$\int_{\tau}^{2\tau} p_i(t) dt = U\tau_i \quad (4)$$

经讨论可知,在一般能量补给/数据采集周期内传感器节点剩余能量最小值出现在 WCE 刚到达时,最大值出现在完成充电时。对传感器节点

$i(i \in \mathcal{N})$, WCE 到达的时刻记为 t_i ,离开时刻为 $t_i + \tau_i$,则式(3)等价于

$$e_i(t_i) \geq E_{\min} \quad (5)$$

$$e_i(t_i + \tau_i) \leq E_{\max} \quad (6)$$

WCE 遍历所有节点的路径记为

$$P = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_N\}$$

其中, π_0 代表维护站 S, $\pi_i(1 \leq i \leq N)$ 代表遍历路径上的第 i 个传感器节点。遍历路径的长度记为 D_P ,则有

$$D_P = \sum_{k=0}^{N-1} D_{\pi_k \pi_{k+1}} + D_{\pi_N \pi_0} \quad (7)$$

设 WCE 行进的速率为 V m/s,则从维护站出发花费在遍历所有传感器节点并回到维护站的时间为

$$\tau_P = \frac{D_P}{V} \quad (8)$$

记 WCE 在维护站接受维护的时间为 τ_{vac} s,

则有

$$\tau = \tau_{vac} + \tau_P + \sum_{i \in \mathcal{N}} \tau_{\pi_i} \quad (9)$$

WCE 到达遍历路径上第 i 个节点的时刻记为 t_{π_i} ,则有

$$t_{\pi_i} = \tau + \sum_{k=0}^{i-1} \frac{D_{\pi_k \pi_{k+1}}}{V} + \sum_{k=1}^{i-1} \tau_{\pi_k}, i \in \mathcal{N} \quad (10)$$

其中, τ_{π_i} 代表对遍历路径上第 i 个传感器节点补给能量的时长。由以上约束条件和优化目标—WCE 驻站时间比 $\frac{\tau_{vac}}{\tau}$,可得以下优化问题 OPT-1。

$$\max : \frac{\tau_{vac}}{\tau}$$

subject to : (1), (2), (4) ~ (10)

$$p_i(t) \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N}, t \in [\tau, 2\tau))$$

$$R_{ik}(t), R_{ji}(t), R_{iB}(t), R_{iW}(t) \geq 0$$

$$(j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in [\tau, 2\tau))$$

$$P \in \mathcal{P}, D_P, \tau, \tau_{\pi_i}, \tau_{vac}, \tau_P, t_{\pi_i} \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N})$$

其中, \mathcal{P} 代表所有可行遍历路径; R_i 、 U 、 E_{\max} 、 E_{\min} 、 V 、 C_{iB} 、 C_{ij} 、 C_{iW} 为常数, P 、 D_P 、 τ 、 τ_{π_i} 、 τ_{vac} 、 τ_P 、 t_{π_i} 、 $R_{ij}(t)$ 、 $R_{iB}(t)$ 、 $R_{iW}(t)$ 、 $p_i(t)$ 、 $e_i(t)$ 为优化变量。

可以证明,若采取完全能量补给方式^[21],即每

次充电完成时传感器节点的能量达到 E_{\max} , 优化问题 OPT-1 的最优目标函数值不变。那么, 约束条件 (6) 变为

$$e_i(t_i + \tau_i) = E_{\max} \quad (11)$$

约束条件(5)变为

$$e_i(t_i) = E_{\max} - \int_{t \in T} p_i(t) dt \geq E_{\min}$$

即

$$\int_{t \in T} p_i(t) dt \leq E_{\max} - E_{\min} \quad (12)$$

其中, $T = [\tau, t_i) \cup [t_i + \tau_i, 2\tau)$ 。通过替换以上约束条件, 可以得到新的优化问题 OPT-2。

$$\begin{aligned} \max : & \frac{\tau_{vac}}{\tau} \\ \text{subject to :} & (1), (2), (4), (7) \sim (12) \\ & p_i(t) \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N}, t \in [\tau, 2\tau)) \\ & R_{ik}(t), R_{ji}(t), R_{iB}(t), R_{iW}(t) \geq 0 \\ & (j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in [\tau, 2\tau)) \\ & P \in \mathcal{P}, D_P, \tau, \tau_{\pi_i}, \tau_{vac}, \tau_P, t_{\pi_i} \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N}) \end{aligned}$$

4 模型分析与优化问题 OPT-3

4.1 优化模型分析

在上一节中, 依据最大化 WCE 驻站时间比这一目标和相应约束条件, 得到了优化问题 OPT-2。

首先, 计算约束条件的个数。若无线传感器网络中有 N 个传感器节点, 则约束条件(1)对应的约束等式有 N 个; 约束条件(2)对应的约束等式有 N 个; 约束条件(4)对应的约束等式有 N 个; 约束条件(7)~(9)对应的约束等式均为 1 个; 约束条件(10)对应的约束等式有 N 个; 约束条件(11)和约束条件(12)对应的约束等式和不等式均为 N 个; 而之后的非负定约束对应的约束不等式共有 $N^2 + 4N + 4$ 个。综上所述, 共有约束等式和不等式 $N^2 + 10N + 7$ 个。而 WCE 可选取的路径共有 $N!$ 条。

其次, 上述模型并非一个线性规划模型, 因为其约束条件中含有大量的积分项, 并且其优化目标函数 $\frac{\tau_{vac}}{\tau}$ 也非线性。因此, 想有效地计算该优化问题的最优解十分困难。

4.2 不同节点在不同状态内需要遵循的约束条件及优化问题 OPT-3

由前文分析可知, 优化问题 OPT-2 的约束条件中含有大量的积分项, 这是导致该优化问题非线性

的因素之一。为了消除这一因素, 首先分析 WCE 的工作状态。

总的来说, WCE 的工作状态可以分为 3 类^[21]。第一类为驻站维护状态, 在该状态下, WCE 停留在维护站 S 接受维护, 并将接收到的数据传输给数据中心; 第二类为行进状态, 在该状态下, WCE 在无线传感器网络内移动; 第三类为能量补给/数据采集状态, 在该状态下, WCE 对传感器节点进行能量补给并从该传感器处获取数据。在前两类状态内, WCE 和传感器节点并无交互, 所以可以归纳为一类状态。若传感器网络中含有 N 个传感器节点, 那么第三类工作状态又可以细化为 N 个子状态。其中第 i 个子状态对应 WCE 对遍历路径上第 i 个节点补给能量和进行数据采集。记这些状态的集合为 $\mathcal{M} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ 。其中 0 状态对应 WCE 驻站维护和行进, 其余状态对应遍历路径上第 i 个传感器节点进行能量补给/数据采集。

在 0 状态内, 由于网络中无线能量补给/数据采集设备并不进行数据采集任务, 因此, 约束条件(1)可改写为

$$\begin{aligned} R_i + \sum_{j \in \mathcal{N}}^{j \neq i} R_{ji}^0(t) &= \sum_{k \in \mathcal{N}}^{k \neq i} R_{ik}^0(t) + R_{iB}^0(t), \\ (j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in T_0) \end{aligned} \quad (13)$$

约束条件(2)可改写为

$$\begin{aligned} p_i^0(t) &= \sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} C_{ji} R_{ji}^0(t) + \sum_{k \neq i, k \in \mathcal{N}} C_{ik} R_{ik}^0(t) + C_{iB} R_{iB}^0(t), \\ (j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in T_0) \end{aligned} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{aligned} T_0 &= [\tau, t_{\pi_1}) \cup [t_{\pi_N} + \tau_{\pi_N}, 2\tau) \cup \\ & \cup_{k=1}^{N-1} [t_{\pi_k} + \tau_{\pi_k}, t_{\pi_{k+1}}) \end{aligned}$$

t_{π_i} 可由(10)求得。

在 i 状态 ($i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$) 内, WCE 对遍历路径上第 i 个传感器补给能量。在接受能量补给时, 该传感器节点作为簇头节点接收附近传感器节点数据, 并将数据直接传输给 WCE。

在状态 i 中, 节点 i 需要满足的约束条件有

$$\begin{aligned} R_i + \sum_{j \in \mathcal{N}}^{j \neq i} R_{ji}^i(t) &= R_{iW}^i(t), \\ (j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in T_i) \end{aligned} \quad (15)$$

$$p_i^i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}, j \neq i} C_{ji} R_{ji}^i(t) + C_{iW} R_{iW}^i(t),$$

$$(j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}, t \in T_i) \quad (16)$$

在状态 i , 异于 i 的节点 l 需要满足的约束条件有

$$R_l + \sum_{m \neq l, m \neq i, m \in \mathcal{N}} R_{ml}^i(t)$$

$$= \sum_{n \neq l, n \in \mathcal{N}} R_{ln}^i(t) + R_{lB}^i(t)$$

$$(l \neq i; m, n \neq l; l, m, n \in \mathcal{N}; t \in T_i, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (17)$$

$$p_l(t) = \sum_{m \neq l, m \neq i, m \in \mathcal{N}} C_{ml} R_{ml}^i(t) +$$

$$\sum_{n \neq l, n \in \mathcal{N}} C_{ln} R_{ln}^i(t) + C_{lB} R_{lB}^i(t)$$

$$(l \neq i; m, n \neq l; l, m, n \in \mathcal{N}; t \in T_i, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (18)$$

其中, $T_i = [t_{\pi_i}, t_{\pi_i} + \tau_{\pi_i})$ 。那么, 不同节点在不同状态内的约束条件与上一节优化问题 OPT-2 中约束条件(1)与约束条件(2)的关系如下所示。

$$(1) \Rightarrow \begin{cases} (13) & 0 \text{ 状态下所有节点约束} \\ (15) & i \text{ 状态下节点的约束} \\ (17) & i \text{ 状态下节点 } l, l \neq i \text{ 的约束} \end{cases}$$

$$(2) \Rightarrow \begin{cases} (14) & 0 \text{ 状态下所有节点约束} \\ (16) & i \text{ 状态下节点的约束} \\ (18) & i \text{ 状态下节点 } l, l \neq i \text{ 的约束} \end{cases}$$

同理, 约束条件(4)可改写为

$$\sum_{k \in \mathcal{M}} \int_{t \in T_k} p_i^k(t) dt = U \tau_{\pi_i}, i \in \mathcal{N} \quad (19)$$

约束条件(12)可改写为

$$\sum_{k \in \mathcal{M} \setminus \{i\}} \int_{t \in T_k} p_i^k(t) dt \leq E_{\max} - E_{\min}, i \in \mathcal{N} \quad (20)$$

利用上述不同传感器节点在不同状态内需要满足的约束条件, 可以得到新的优化问题 OPT-3。

$$\max : \frac{\tau_{vac}}{\tau}$$

subject to : (13) ~ (20), (7) ~ (11)

$$p_i^k(t) \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{M}, t \in T_k)$$

$$R_{ml}^k(t), R_{ln}^k(t), R_{lB}^k(t), R_{lW}^k(t) \geq 0$$

$$(l, m, n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{M}, m \neq l, m \neq k, n \neq l, t \in T_k)$$

$$P \in \mathcal{P}, D_P, \tau, \tau_{N_i}, \tau_{vac}, \tau_P, t_{\pi_i} \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N})$$

由上面分析可知, 优化问题 OPT-3 为细分网络工作状态的结果, 并不会改变原优化问题的最优解。通过观察 OPT-3 的形式可知, 该优化问题依然不是线性规划问题, 因为含有非线性项 $\frac{\tau_{vac}}{\tau}$ 与积分项。在下节中, 将先构造优化问题 OPT-4, 然后证

明其与 OPT-3 具有等优性, 再将 OPT-4 转化为线性规划 OPT-5 (线性)。

5 优化问题 OPT-3 的线性化

5.1 优化问题 OPT-4

在上一节中, 为了消除约束条件中的积分项, 首先将第一一般能量补给/数据采集周期划分为 $N+1$ 个状态。现在, 用这些状态中对应变量的均值代替这些变量, 构造新的优化问题 OPT-4。具体地说, 令

$$R_{ji}[m] = \frac{\int_{t \in T_m} R_{ji}^m(t) dt}{\tau_{\pi_m}}$$

$$R_{ik}[m] = \frac{\int_{t \in T_m} R_{ik}^m(t) dt}{\tau_{\pi_m}}$$

$$R_{lB}[m] = \frac{\int_{t \in T_m} R_{lB}^m(t) dt}{\tau_{\pi_m}}$$

$$R_{lW}[m] = \frac{\int_{t \in T_m} R_{lW}^m(t) dt}{\tau_{\pi_m}}$$

$$\text{其中, } T_m = \begin{cases} [t_{\pi_m}, t_{\pi_m} + \tau_{\pi_m}) & m \in \mathcal{M} \\ [\tau, 2\tau) - \bigcup_{i=1}^N T_i & m = 0 \end{cases}.$$

这些变量在某一状态 $m \in \mathcal{M}$ 内为常数, 在不同状态内可以不同。为了构造 OPT-4, 需要以下约束条件

$$R_i + \sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} R_{ji}[0] = \sum_{k \neq i, k \in \mathcal{N}} R_{ik}[0] + R_{lB}[0]$$

$$(j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}) \quad (21)$$

$$p_i[0] = \sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} C_{ji} R_{ji}[0] +$$

$$\sum_{k \neq i, k \in \mathcal{N}} C_{ik} R_{ik}[0] + C_{lB} R_{lB}[0]$$

$$(j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}) \quad (22)$$

$$R_i + \sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} R_{ji}[i] = R_{lW}[i]$$

$$(j \neq i, j \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (23)$$

$$p_i[i] = \sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} C_{ji} R_{ji}[i] + C_{lW} R_{lW}[i]$$

$$(j \neq i, j \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (24)$$

$$R_l + \sum_{m \neq l, m \neq i, m \in \mathcal{N}} R_{ml}[i] = \sum_{n \neq l, n \in \mathcal{N}} R_{ln}[i] + R_{lB}[i]$$

$$(l \neq i, m \neq l, m \neq i, n \neq l; l, m, n \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (25)$$

$$p_l[i] = \sum_{m \neq l, m \neq i, m \in \mathcal{N}} C_{ml} R_{ml}[i] +$$

$$\sum_{n \neq l, n \in \mathcal{N}} C_{ln} R_{ln}[i] + C_{lB} R_{lB}[i]$$

$$(l \neq i, m \neq l, m \neq i, n \neq l; l, m, n \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (26)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_k} p_i[k] = U \tau_{\pi_i} \quad (k \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N}) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \mathcal{M} \setminus \{i\}} \tau_{\pi_k} p_i[k] &\leq E_{\max} - E_{\min} \\ (i \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{M} \setminus \{i\}) \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $\tau_{\pi_0} = \tau - \sum_{i \in \mathcal{N}} \tau_{\pi_i}$ 。

OPT-4 的形式如下

$$\begin{aligned} \max : & \frac{\tau_{vac}}{\sum_{k \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_k}} \\ \text{subject to :} & (21) \sim (28), (7) \sim (11) \\ & p_i[k] \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{M}) \\ & R_{ij}[k], R_{iB}[k], R_{iW}[k] \geq 0 \\ & (i, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{M}, j \neq i) \\ & P \in \mathcal{P}, D_P, \tau, \tau_{\pi_i}, \tau_{vac}, \tau_P, t_{\pi_i} \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N}) \end{aligned}$$

其中, 约束条件(21)、约束条件(23)、约束条件(25)分别对应优化问题 OPT-3 中的(13)、(15)、(17), 约束条件(22)、约束条件(24)、约束条件(26)分别对应优化问题 OPT-3 中的(14)、(16)、(18), 约束条件(27)、约束条件(28)分别对应优化问题 OPT-3 中(19)、(20)。

下面的定理及证明说明 OPT-4 与 OPT-3 具有等优性。

定理 1 经过上述约束条件替换后优化问题 OPT-4 的解与原优化问题 OPT-3 的解具有等优性。

证明

1) 首先, 证明对于 OPT-3 的任意可行解 φ_3 , 都存在一个对应 OPT-4 的可行解 φ_4 , 使在 φ_3 下 OPT-3 的目标函数值与 φ_4 下 OPT-4 的目标函数值相等。

构造 φ_4 的方法如下。

① $p_i[k], R_{ij}[k], R_{iB}[k], R_{iW}[k]$ 为 φ_3 中前 4 项对应的第 k 态内的平均值。

② φ_4 中其余项与 φ_3 中相应项相同。

将 φ_4 带入 OPT-4 的约束条件逐一验证, 可以发现 φ_4 满足 OPT-4 的约束条件, 那么 φ_4 为 OPT-4 的一个可行解 (带入验算步骤略)。同时, 由于 φ_3 和 φ_4 中 WCE 驻站时间 τ_{vac} 相等, 且整个能量补给/数据采集周期的时间 τ 也相等, 那么两者优化目标函数的值也一定相等。所以对于 OPT-3 的任意一个可行解, 都存在一个 OPT-4 的可行解, 使得二者优化目标函数的值相同。

2) 其次, 由于 OPT-4 仅为 OPT-3 的一个特例 (在每个状态 k 内, 解的前 4 项为常数), 那么 OPT-4 的

最优目标函数值不会好于 OPT-3 的最优目标函数值。

综上所述, OPT-4 与 OPT-3 具有等优性, 即 OPT-4 的目标函数与 OPT-3 的目标函数有相同的最优值。并且, OPT-4 的约束条件中不再含有积分项。

5.2 化问题 OPT-4 的简化与线性化

在优化问题 OPT-4 中, 并非所有的约束条件都是独立的, 因此可以移除部分相关联的约束条件及优化变量, 达到简化优化问题的目的。

首先, 式(22)、式(24)、式(26)代表着不同状态内不同传感器节点的功率约束条件, 而这些约束条件实为节点功率的计算公式, 这三式中的优化变量 $R_{ij}[k], R_{iB}[k], R_{iW}[k]$ 确定后, $p_i[k]$ 就唯一确定, 因此, 可以将约束条件式(22)、式(24)、式(26)和优化变量 $p_i[k]$ 略去。而由于采取完全能量补给的方式, 约束条件(11)也可以略去。

其次, 若能预先确定无线能量补给/数据采集设备的最佳遍历路径 P , 那么由式(7)和式(8)可知, 优化变量 D_P, τ_P 也就确定了, 所以可以将 D_P, τ_P 从优化变量中移除。而式(7)和式(8)仅为计算 D_P, τ_P 的方法, 所以也可以将其从约束条件中略去。同样, 若 τ_{π_i} 和 τ 确定, 优化变量 t_{π_i} 也就确定了, 且式(10)也仅为计算 t_{π_i} 的方法, 所以可以将优化变量 t_{π_i} 和约束条件(10)略去。下文将展开对最优遍历路径 P 的讨论, 在得到最优遍历路径后, 就可以实现对优化问题中相应优化变量和约束条件的简化。

可以证明, 要达到最优解, WCE 必须采用最短 Hamilton 路径遍历网络。证明采用反证法, 假设 WCE 未采用最短 Hamilton 路径遍历网络, 且优化问题得到最优解。那么总存在一个可行解, 可行解中 P 为最短 Hamilton 路径, 且这个解对应的目标函数值大于前者, 导出矛盾。所以, 要达到最优解, WCE 必须采用最短 Hamilton 路径遍历网络。那么优化变量 P 也可以从优化问题中移除, 同时可以移除的优化变量有 D_P, τ_P 和 t_{π_i} , 同样, 对应的约束条件也可以移除。这样得到简化后的优化问题 OPT-5 (非线性)。

$$\begin{aligned} \max : & \frac{\tau_{vac}}{\sum_{k \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_k}} \\ \text{subject to :} & (21), (23), (25), (27), (28), (9) \\ & R_{ij}[k], R_{iB}[k], R_{iW}[k] \geq 0 \\ & (i, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{M}, j \neq i) \\ & \tau_{\pi_i}, \tau_{vac} \geq 0 \quad (i \in \mathcal{N}) \end{aligned}$$

以上优化问题中已经不再含积分项,且约束条件和约束变量也得到了简化,但是却引入了乘积项,可以通过变量代换的方式,将以上优化问题转换为线性规划问题。具体步骤如下。

令

$$\begin{cases} \frac{\tau_{\pi_i}}{\sum_{k \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_k}} = \eta_i \\ \frac{\tau_{vac}}{\sum_{k \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_k}} = \eta_{vac} \\ f_{iB}[k] = R_{iB}[k]\eta_k \\ f_{iW}[k] = R_{iW}[k]\eta_k \\ f_{ij}[k] = R_{ij}[k]\eta_k \end{cases}$$

式(21)两边同时乘以 η_0 , 有

$$R_i \eta_0 + \sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} f_{ji}[0] - \sum_{k \neq i, k \in \mathcal{N}} f_{ik}[0] - f_{iB}[0] = 0 \quad (j \neq i, k \neq i; i, j, k \in \mathcal{N}) \quad (29)$$

式(23)、式(25)两边同时乘以 η_i , 有

$$R_i \eta_i + \sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} f_{ji}[i] - f_{iW}[i] = 0 \quad (j \neq i, j \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (30)$$

$$R_l \eta_i + \sum_{m \neq l, m \neq i, m \in \mathcal{N}} f_{ml}[i] - \sum_{n \neq l, n \in \mathcal{N}} f_{ln}[i] - f_{iB}[i] = 0 \quad (l \neq i, m \neq l, n \neq l; l, m, n \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{M} \setminus \{0\}) \quad (31)$$

式(27)两边同时除以 $\sum_{m \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_m}$, 有

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \eta_m p_i[m] = U \eta_i \quad (m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N})$$

将 $p_i[k]$ 表达式代入, 可得

$$\sum_{n \in \mathcal{M} \setminus \{i\}} \left[\sum_{j \neq i, j \neq n, j \in \mathcal{N}} C_{ji} f_{ji}[m] + \sum_{k \neq i, k \in \mathcal{N}} C_{ik} f_{ik}[m] + C_{iB} f_{iB}[m] \right] + \left[\sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} C_{ji} f_{ji}[i] + C_{iW} f_{iW}[i] \right] - U \eta_i = 0 \quad (i \in \mathcal{N}) \quad (32)$$

式(28)两边同时除以 $\sum_{m \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_m}$, 有

$$\sum_{m \in \mathcal{M} \setminus \{i\}} \eta_m p_i[m] \leq \frac{E_{\max} - E_{\min}}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \tau_{\pi_m}} \quad (i \in \mathcal{N}, m \in \mathcal{M} \setminus \{i\})$$

即

$$\eta_{vac} \leq \eta_0 - \frac{\tau_P}{E_{\max} - E_{\min}} \cdot \left\{ U \eta_i - \left[\sum_{j \neq i, j \in \mathcal{N}} C_{ji} f_{ji}[i] + C_{iW} f_{iW}[i] \right] \right\} \quad (i \in \mathcal{N}) \quad (33)$$

式(9)等价于

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \eta_m = 1 \quad (m \in \mathcal{M}) \quad (34)$$

至此, 得到优化问题 OPT-5 (线性)。

max : η_{vac}

subject to : (29) ~ (34)

$$f_{ij}[m], f_{iB}[m], f_{iW}[m] \geq 0$$

$$(i, j \in \mathcal{N}, m \in \mathcal{M}, j \neq i)$$

$$0 \leq \eta_{vac}, \eta_m \leq 1 \quad (m \in \mathcal{M})$$

通过消除了乘积项和比例项后, 得到以上优化问题, 且该优化问题为线性规划问题。求得最优解后, 通过替换运算的逆运算, 就可以得到 OPT-5 (非线性) 中相应优化变量的值。

6 初始能量补给/数据采集阶段

初始能量补给/数据采集阶段和一般能量补给/数据采集阶段不能合并讨论, 其原因是初始能量补给/数据采集阶段不满足一般能量补给/数据采集周期的条件②, 即初始能量补给/数据采集阶段开始和结束时, 传感器节点 i 剩余电量并不相等。具体地说, 在初始阶段开始时任何传感器节点的电量都处于满荷状态 E_{\max} , 而该阶段结束后, 任何传感器节点的电量都要小于 E_{\max} 。

研究初始能量补给/数据采集阶段的目的是为了保证在该阶段结束时, 传感器节点的剩余电量达到某种要求, 可以顺利地衔接到第一一般能量补给/数据采集周期, 如图5所示。第一一般能量补给/数据采集周期为一般能量补给/数据采集阶段中的第一个周期。在初始能量补给/数据采集阶段内, 保证传感器节点及 WCE 的工作方式与一般能量补给/数据采集周期相同, 通过调整能量补给功率就可以达到阶段衔接目的。

设在一般能量补给/数据采集周期开始时, 传感器节点 i 的剩余电量为 E_{start} , 当 WCE 开始对该节点补给能量时, 该节点的剩余电量为 E_c 。那么在初始能量补给/数据采集阶段内, 当 WCE 开始对该传感器节点补给能量时, 该节点的剩余电量为

$$E'_c = E_{\max} - (E_{\text{start}} - E_c)$$

在初始能量补给/数据采集阶段内，同样采用完全能量补给方式，即在 WCE 完成能量补给时，传感器节点能量达到 E_{\max} 。这样，在初始能量补给/数据采集阶段内，WCE 进行能量补给的功率 U' 可由下式求得

$$E'_c - \tau_{\pi_i} p_i [i] + U' \tau_{\pi_i} = E_{\max}$$

即

$$E' = p_i [i] + \frac{E_{\text{start}} - E_c}{\tau_{\pi_i}} \quad (35)$$

又有

$$E_c - \tau_{\pi_i} p_i [i] + U \tau_{\pi_i} = E_{\max}$$

所以

$$U' = U - \frac{E_{\max} - E_{\text{start}}}{\tau_{\pi_i}} \quad (36)$$

至此，对初始能量补给/数据采集阶段和一般能量补给/数据采集阶段的讨论就完成了，将在第 7 节中进行仿真和数据分析。

7 优化问题 OPT-5 (线性) 的模型复杂度分析、仿真运算及结果分析

7.1 优化问题 OPT-5 (线性) 的复杂度分析

计算优化问题 OPT-5 (线性) 中约束条件的复杂度。若整个传感器网络中含有 N 个传感器节点，那么，约束条件的复杂度为 $O(N^2)$ ；优化变量复杂度为 $O(N^3)$ ；而约束条件中非零优化变量的复杂度

为 $O(N^3)$ 。20、50 及 100 节点网络对应的优化问题 OPT-5 (线性) 的约束条件、优化变量及约束条件中非零优化变量的个数如表 1 所示。

表 1 优化问题 OPT-5 (线性) 的复杂度

传感器节点数	约束条件数	优化变量数	约束条件中非零优化变量数
20	461	8 042	32 161
50	2 651	125 102	500 401
100	10 301	1 000 202	4 000 801

7.2 模型参数和仿真结果分析

本文的仿真参数同文献[21]。已知传感器节点信息，通过后台计算机求解优化问题 OPT-5 (线性) 就可以得到可充电无线传感器网络中无线能量补给/数据采集设备及传感器节点的工作策略。线性规划问题 OPT-5 (线性) 的求解，可以采用 IBM 公司提供的 IBM Websphere Ilog CPLEX 和 LINDO 公司提供的接口函数 Lindo API。

20 节点无线传感器网络仿真结果：在 $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}$ 的区域内，随机分布着 20 个传感器节点进行监测任务。维护站 S 坐标为(0,0)，在坐标(500,500)处存在一基站 B，负责收集从节点传输来的信息。WCE 从维护站 S 出发，遍历网络中所有传感器节点，进行能量补给和数据采集业务。20 个无线传感器节点的基本数据如表 2 所示，其中第 1 列为节点序号，第 2 列为节点坐标，第 3 列为节点产生监测数据的速率。

经过计算，WCE 遍历网络的路径如图 6 所示，该路径为最小 Hamilton 回路，该路径的求解利用加拿大滑铁卢大学数学系研发的 concorde 软件^[22]。

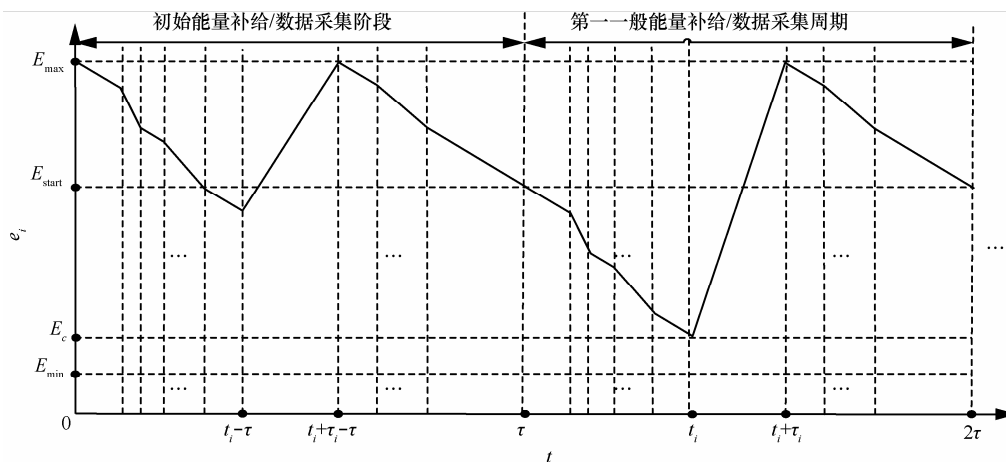


图 5 初始能量补给/数据采集阶段与一般补给/数据采集周期衔接

表2 网络中无线传感器节点仿真数据

节点序号	节点坐标	数据产生速率/(kbit·s ⁻¹)	节点序号	节点坐标	数据产生速率/(kbit·s ⁻¹)
1	50 950	18	11	750 150	8
2	590 480	19	12	360 900	17
3	450 900	17	13	850 700	20
4	100 200	19	14	980 50	19
5	650 750	20	15	470 700	10
6	560 560	12	16	100 600	17
7	100 500	12	17	420 20	17
8	520 540	18	18	400 750	17
9	800 700	19	19	200 550	19
10	300 100	17	20	800 480	17

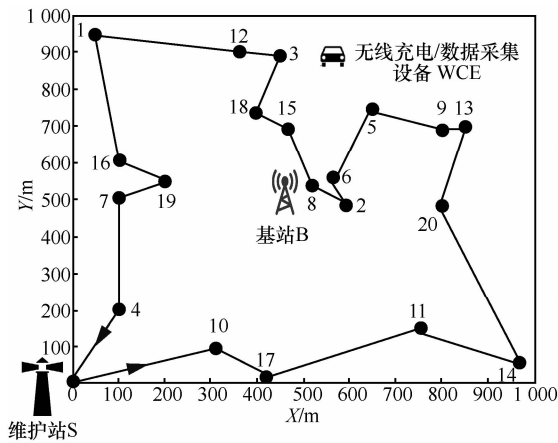


图6 WCE 遍历 20 节点无线传感器网络路径

通过仿真计算得：能量补给/数据采集周期长度 τ 约为 1.75×10^4 s， τ_{vac} 约为 0.76×10^4 s，所以 WCE 的驻站时间比约为 43.3%，较文献[21]提升约 22.7%。图 7~图 9 分别给出了在 0 状态、1 状态和 2 状态时该无线传感器网络的数据路由图，其中指向 WCE 的箭头表示接受能量补给节点向 WCE 进行数据传输，节点旁数字为节点号。从图 7~图 9 可以看出，第 0 状态内，即 WCE 与传感器节点无交互时，10 号节点仅担任中继节点，将 17 号节点及自身数据传输给 4 号节点，由于此时传感器节点并不与无线能量补给/数据采集设备进行数据交互，所以网络中并无子网划分；而在第 1 状态内，即 10 号节点接受 WCE 能量补给时，它将 17 号、4 号、7 号、16 号、19 号节点的数据及自身数据传输给 WCE，此时，10 号、17 号、4 号、7 号、16 号及 19 号传感器节点构成一个子网络，其中 10 号节点作为该

子网络内的簇头节点（六边形所示），子网络划分如图 8 中虚线内区域所示；在第 2 状态内，17 号节点将 10 号、4 号、7 号、16 号节点及自身数据传输给 WCE，此时，17 号、10 号、4 号、7 号、16 号传感器节点构成一个子网络，17 号节点作为该子网络的簇头节点（六边形所示），子网络划分如图 9 中虚线内区域所示。

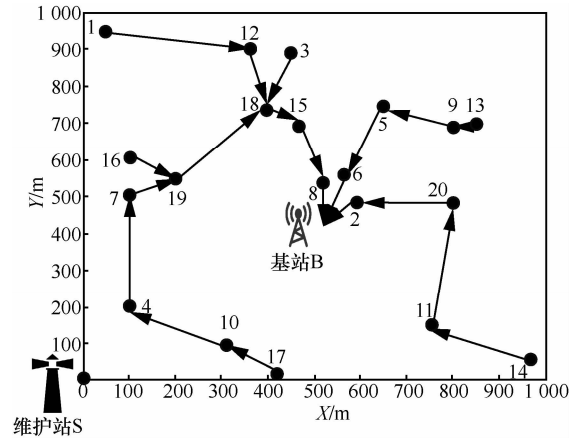


图7 第 0 状态无线传感网络路由

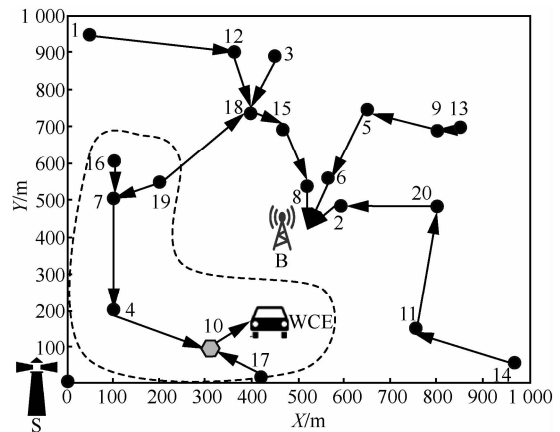


图8 第 1 状态无线传感器网络路由及子网络划分

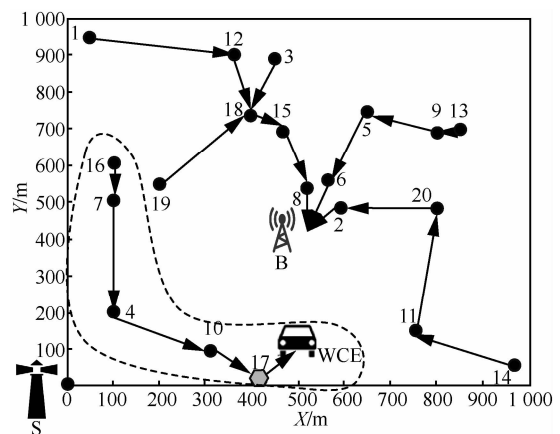


图9 第 2 状态无线传感器网络路由及子网络划分

表 3 给出了 WCE 在第一一般能量补给/数据采集周期内的充电策略。其中第 1 列传感器节点序号为该传感器节点在遍历路径上的序号，例如，10 号传感器节点是遍历路径上的第一个传感器节点，那么在该表中，该节点的序号为 1；第 2 列为传感器节点的坐标；第 3 列为 WCE 行进至该节点花费的时间；第 4 列为 WCE 到达该传感器节点的时间；第 5 列为 WCE 对该传感器节点进行能量补给的时长。

节点序号 (遍历顺序)	WCE 移动 时间/s	WCE 到达节点 时间/s	充电时间/s
1	63.25	17 541.25	350.78
2	28.84	17 920.87	386.23
3	70.94	18 378.04	1 397.46
4	50.16	19 825.66	338.98
5	93.23	20 257.87	369.18
6	45.12	20 672.17	4.07
7	10.00	20 686.24	126.87
8	31.62	20 844.73	506.87
9	42.05	21 393.65	36.41
10	17.09	21 447.15	36.94
11	18.44	21 502.53	54.80
12	33.53	21 590.86	552.55
13	17.20	22 160.61	83.05
14	31.62	22 275.28	51.10
15	18.00	22 344.38	99.08
16	62.80	22 506.26	764.47
17	70.71	23 341.44	14.43
18	22.36	23 378.23	2 056.11
19	22.36	25 456.70	272.40
20	60.00	25 789.10	1 575.08

从表 3 中可以看出，对遍历路径上第 18 个节点，也就是第 19 号传感器节点充电的时长约为 2 056 s。由前文推导可得，在 WCE 到达该节点时，该节点的剩余电量约为 540 J，已达到维持传感器节点正常工作能量的下限，即为该无线传感器网络的“瓶颈”节点，可以通过反证法证明，这样的“瓶颈”节点是始终存在的，否则，优化问题求得的 η_{vac} 不为最优。表 4 中，第 1 列为状态序号，第 2 列为该传感器节点从 16 号节点处接收数据的功率，第 3 列为该节点从 7 号传感器节点处接收数据的功率，第 4 列为该节点发送数据的功率，第 5 列为 19 号节点在不同状态内的总功率。其中在第 18 状态内，接收 16 号、7 号、4 号、10 号及 17 号节点的数据，

并向 WCE 发送，此时，19 号、16 号、7 号、4 号、10 号及 17 号节点构成一个子网络，而 19 号节点为该子网络的簇头节点（六边形表示），子网络的划分如图 10 中虚线内部分所示。图 10 描述了在 18 状态内整个传感器网络的数据路由图，其中指向 WCE 的箭头表明该传感器节点向 WCE 发送数据。在初始能量补给/数据采集阶段内，对该节点的进行能量补给的功率可由式(36)求得，约为 1.81 W。

序号	从 16 号节点接收 数据的功率(W)	从 7 号节点接收 数据的功率(W)	发送数据 功率(W)	总功率(W)
0	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
1	0.000 0	0.000 0	0.004 8	0.004 8
2	0.000 0	0.000 0	0.159 0	0.159 0
3	0.000 9	0.000 6	0.401 8	0.403 2
4	0.000 9	0.001 6	0.560 8	0.563 2
5	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
6	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
7	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
8	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
9	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
10	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
11	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
12	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
13	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
14	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
15	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
16	0.000 9	0.003 3	0.845 4	0.849 5
17	0.000 0	0.003 3	0.004 8	0.008 1
18	0.000 9	0.003 3	0.005 9	0.010 0
19	0.000 0	0.000 0	0.004 8	0.004 8
20	0.000 0	0.000 0	0.004 8	0.004 8

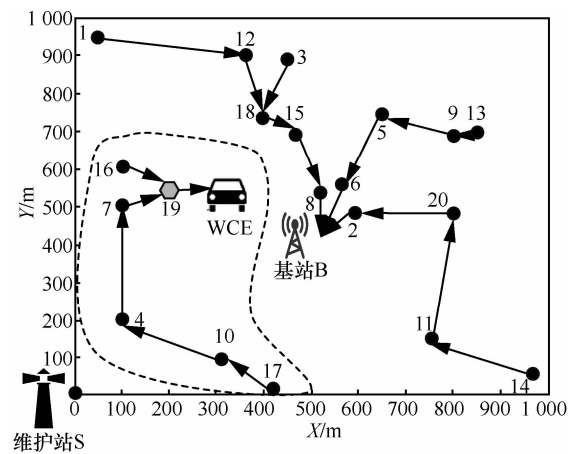


图 10 第 18 状态无线传感器网络路由及子网络划分

由以上分析可得出如下结论：在不同阶段内，无线传感器网络采用的数据路由是不同的；在接受能量补给时，传感器节点将数据直接传输给 WCE，承担更多的数据传输业务，作为簇头的传感器节点不是固定不变的，子网划分也不是固定不变的，说明该无线传感器网络内存在动态拓扑结构。将第一一般能量补给/数据采集周期内无线传感器节点及 WCE 的工作策略应用到其他一般能量补给/数据采集周期内，就可以得到相关设备周期性工作策略。

50 节点无线传感器网络仿真结果：在同样面积的区域中分布着 50 个传感器节点。通过计算得：一般能量补给/数据采集周期长度 τ 约为 2.72×10^4 s， τ_{vac} 约为 1.42×10^4 s，所以 WCE 的驻站时间比约为 52.2%，较文献[11]提升约 23.3%。图 11 为该情况下 WCE 遍历网络的路径。

100 节点无线传感器网络仿真结果：当区域内分布着 100 个传感器节点时，通过计算得：一般能量补给/数据采集周期长度 τ 约为 5.95×10^4 s， τ_{vac} 约为 2.70×10^4 s， τ_p 约为 1649 s，所以 WCE 的驻站时间比约为 45.3%，较文献[11]提升约 21.8%。图 12 为该情况下 WCE 遍历网络的路径。

8 结束语

在以往研究成果的基础上，讨论了可充电无线传感器网络的动态拓扑问题。在网络中，每个传感

器节点在接受 WCE 能量补给的同时，担任子网络中簇头节点，从附近传感器节点处接收数据，直接传输给 WCE。通过分析在这种工作模式下，不同状态内不同传感器节点需要满足的约束条件，建立了 OPT-1 至 OPT-4，以及 OPT-5（非线性）和 OPT-5（线性）一系列优化问题，并阐明了这些优化问题的等优性，它们之间的关系如图 13 所示。通过仿真实验，获得了在动态网络拓扑结构下的动态数据路由及能量补给/数据采集策略。与文献[21]相比，优化目标值均有 20%以上的提升。

本文研究的无线网络覆盖范围内只存在单基站及单一能量补给/数据采集设备。然而，在某些特殊环境下，一个能量补给/数据采集设备无法完成任务时，如何安排和调度多部能量补给/数据采集设备协同工作还有待进一步研究。同时，在文中，无线能量补给/数据采集设备回到维护站 S 后才会将数据传输回数据中心，在一些对数据实时性要求较为苛刻的场合下，该工作模式还有待改进，可以考虑通过公用无线网络，例如 4G-LTE 等，实时地将 WCE 采集到的数据传输给数据中心加以分析。可充电无线传感器网络中的实时性问题，也是今后值得深入探讨的一个课题。此外，由第 7 节中的分析可知，该网络中一定存在“瓶颈”节点，这类节点的存在并不利于网络的稳定工作，可否通过提高对此类节点的能量补给频率从而彻底消除网络中的

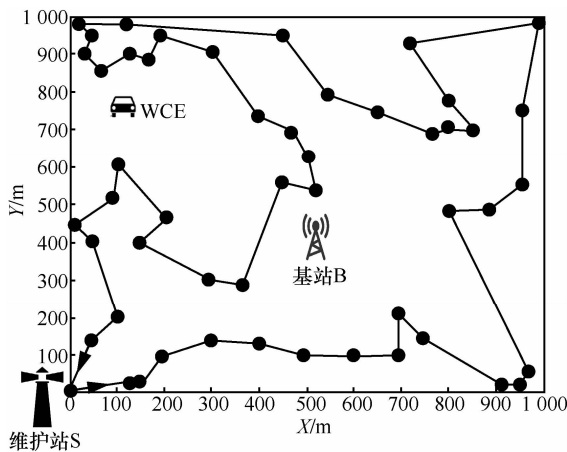


图 11 WCE 遍历 50 节点无线传感器网络路径

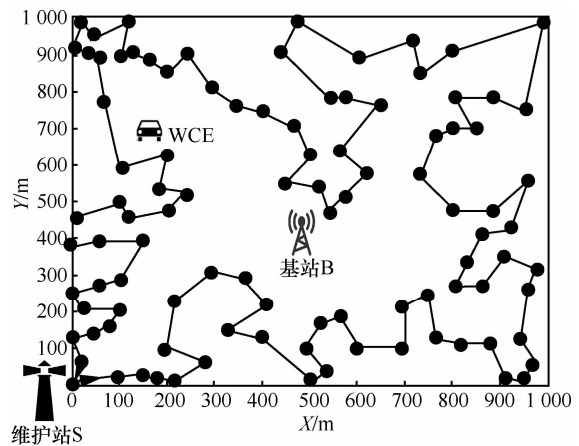


图 12 WCE 遍历 100 节点无线传感器网络路径

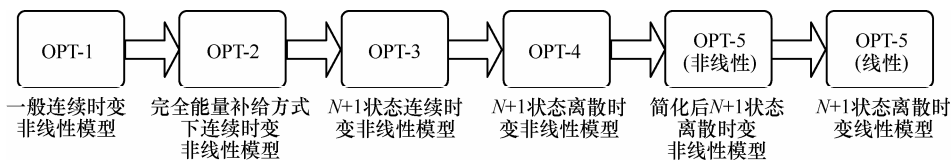


图 13 模型演进过程

“瓶颈”节点, 也亟待研究。

参考文献:

- [1] BRANCE J W, GIANNELA C, SZYMANSKI B, *et al.* In-network outlier detection in wireless sensor networks[J]. Knowledge and Information Systems, 2013, 34(1): 23-54.
- [2] AMALDI E, CAPONE M, FILIPPINI I. Design of wireless sensor networks for mobile target detection[J]. Networking. IEEE/ACM Transactions on, 2012, 20(3): 784-797.
- [3] KARABOGA D, OKDEM S, OZTURK C. Cluster based wireless sensor network routing using artificial bee colony algorithm[J]. Wireless Networks, 2012, 18(7): 847-860.
- [4] OKDEM S, OZTURK C, KARABOGA D. A comparative study on differential evolution based routing implementations for wireless sensor networks[A]. Innovations in Intelligent Systems and Applications(INISTA), 2012 International Symposium on[C]. Trabzon, Turkey, 2012.1-5.
- [5] GOUVY N, MITTON N, ZHENG J. Greedy routing recovery using controlled mobility in wireless sensor networks[J]. Ad-hoc, Mobile, and Wireless Network, 2013, 7960: 209-220.
- [6] RAHIM A, JAVAID N, ASLAM M. *et al.* A comprehensive survey of MAC protocols for wireless body area networks[A]. The 7th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA)[C]. Victoria, BC, 2012.434-439.
- [7] JANG B, LIM J B, SICHITIU M L. An asynchronous scheduled MAC protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2013, 57(1): 85-98.
- [8] HUANG P, XIAO L, SOLTANI S, *et al.* The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: a survey[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2012, 15(1): 101-120.
- [9] MURTHY J K, KUMAR S, SRINIVAS A. Energy efficient scheduling in cross layer optimized cluster wireless sensor networks[J]. International Journal of Computer Science and Communication, 2012, 3(1): 149-153.
- [10] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, *et al.* Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [11] KARALIS A, KURS A. Tunable Wireless Energy Transfer for Outdoor Lighting Applications[P]. US Patent, 8,466,583 B2, 2013.
- [12] KARALIS A, KURS A. Wireless Power Transmission Apparatus[P]. US Patent, 2012/0248884 A1, 2012.
- [13] KARALIS A, KURS A. Wireless energy transfer systems[P]. U S Patent, 2013/0175875 A1, 2013.
- [14] KESLER M. Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and Over Distance[R]. WiTricity Corporation, 2013.
- [15] TESLA N. Apparatus for the Utilization of Radiant Energy[P]. U S Patent, 685,957, 1901.
- [16] TESLA N. Method of Utilizing Radiant Energy[P]. U S Patent, 685,958, 1901.
- [17] TESLA N. Apparatus for Transmission of Electrical Energy[P]. U S Patent, 649,621, 1900.
- [18] XIE L G, SHI Y, HOU Y T, *et al.* On renewable sensor networks with energy transfer: the multi-node case[A]. Proc of SECON[C]. IEEE, Seoul, Korea, 2012.10-18.
- [19] XIE L G, SHI Y, HOU Y T, *et al.* Bundling mobile base station and wireless energy transfer: modeling and optimization[A]. Proc of INFOCOM[C]. IEEE, Turin, Italy, 2013.1636-1644.
- [20] LI Z, PENG Y, ZHANG W, *et al.* J-RoC: A joint routing and charging scheme to prolong sensor network lifetime[A]. Network Protocols (ICNP), IEEE International Conference on[C]. Vancouver, BC, 2011.373-382.
- [21] 韩江洪, 丁煦, 石雷等. 无线传感器网络时变充电和动态数据路由算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(12): 1-10.
HAN J H, DING X, SHI L, *et al.* Research on the time-varying charging and dynamic data routing strategy for rechargeable wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(12): 1-10.
- [22] MATH D. Concorde[EB/OL]. <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde/>, 2014.05.07.

作者简介:



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传感器网络、网络与通信。



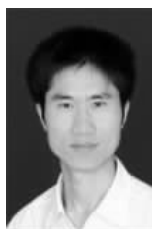
韩江洪[通信作者](1954-), 男, 江苏南京人, 合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机控制、可靠性工程、无线网络。E-mail:hjh@ialab.hfut.edu.cn。



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



夏伟(1973-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 蚌埠学院讲师, 合肥工业大学博士生, 主要研究方向为形式化技术及其在应用、无线网络。



魏振春(1978-), 男, 宁夏青铜峡人, 博士, 合肥工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网、无线传感器网络、嵌入式系统和分布式控制。