

文章编号: 2095-7386(2024)01-0068-09

DOI: 10.3969/j.issn.2095-7386.2024.01.010

无线可充电传感器网络自适应充电策略

王秋阳, 徐 震

(武汉轻工大学 电气与电子工程学院, 武汉 430048)

摘 要:在无线可充电传感器网络中, 充电调度的合理安排是保证网络节点存活率的关键。针对这个问题, 基于分簇型无线传感器网络, 将节点分为重要节点和普通节点, 由两台移动充电设备实时按需协同进行能量补充。基于移动充电设备的当前能量提出了自适应充电策略, 在充电请求数量过多时依据节点的能量需求紧迫程度调整充电方法。仿真实验结果表明, 相比于其他调度方案, 所提出的算法在存活节点数、总剩余能量、移动损耗比和首个死亡节点出现时间四个方面都具有较优的表现。该算法为实际应用场景中节点充电任务的不确定性和多个充电设备协同问题提供了解决方案, 在一定程度上延长了网络寿命。

关键词:无线传感器网络; 移动充电设备; 充电量; 网络寿命

中图分类号: TP 393

文献标识码: A

Adaptive charging strategy for wireless rechargeable sensor networks

WANG Qiu yang, XU Zhen

(School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, China)

Abstract: In wireless rechargeable sensor networks, the reasonable arrangement of charging scheduling is the key to ensuring the survival rate of network nodes. To solve this problem, the paper was based on a clustered wireless sensor network, dividing nodes into important nodes and ordinary nodes, which were charged by two mobile charging equipments (WCEs) collaborate in real-time on demand. Based on the current energy of mobile charging equipment, an adaptive charging strategy was proposed to adjust the charging method according to the urgency of the node's energy demand when there were too many charging requests. The simulation results show that the proposed algorithm performs better than other scheduling schemes in terms of the number of surviving nodes, total residual energy, mobile loss ratio and the occurrence time of the first dead node. This algorithm provides a solution for the uncertainty of charging tasks and the collaborative problem of multiple charging equipment in practical application scenarios, which extends the life of the network to a certain extent.

Key words: wireless sensor network; mobile charging equipment; charging capacity; network lifetime

收稿日期: 2023-11-16.

作者简介: 王秋阳(1998—), 男, 硕士研究生, Email: wangqy199824@163.com.

通信作者: 徐震(1974—), 男, 副教授, 博士, Email: xuzhen2046@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 61373091); 湖北省自然科学基金项目(编号: 2017CKB893).

0 引言

无线传感器网络由许多传感器节点组成,已被广泛应用于工业生产^[1]、智能医疗^[2]、智能交通^[3]、农业生产^[4]、灾害预警^[5]等领域。传感器节点通常由能量有限的电池供电,网络寿命受到限制。为了延长网络寿命,无线可充电传感器网络(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSNs)逐渐受到关注。在网络中配备移动充电设备(Wireless Mobile Charging Equipment, WCE)对剩余能量低的节点进行充电,在很大程度上能克服节点能量不足的问题,保证网络的正常运行。

然而 WCE 的电池容量是有限的,在一次充电行程中可能无法为所有节点进行能量补充^[6],因此需要规划合理的充电路径来完成节点的充电任务,尽可能避免节点因为能量耗尽而死亡。基于充电路径是否提前规划,充电调度策略可分为周期性充电和按需充电。在周期性充电策略中,WCE 按照预先确定的充电计划进行能量补充,每隔一段时间,WCE 重复之前的充电行程为节点充电。YE 等人^[7]针对规模较小的网络提出了一种封闭式充电路径的近似算法和一种遍历最小生成树的启发式算法。LI 等人^[8]在传感器丢失数据量和 WCE 的行驶距离之间引入了加权值,计算了静态路由和动态路由下的数据丢失量以及 WCE 的最小移动距离,最大限度地减少了无线可充电传感器网络中的数据丢失量。Soni 等人^[9]使用移动充电设备和固定充电设备分别对关键节点和普通节点进行充电,并利用增强学习算法优化了充电路径。李昱霖等人^[10]基于蚁群算法、目标规划模型、模拟退火算法研究了单个 WCE 和多个 WCE 两种情况下能量消耗最小化的充电路线,该方案只适用于离线情况。以上方案都是假设节点在网络运行期间的能量消耗率是可预测且不变的。

节点和 WCE 在充电行程中会不断变化,维持确定的充电服务顺序会降低 WCE 的充电效率,而周期性充电策略不能适应这种变化。基于此,一些学者提出了在线按需充电策略。CHEN 等人^[11]采用实时按需充电策略,并基于充电效用最大化来选择充电节点。HE 等人^[12]提出距离优先的 NJNP (nearest job next with preemption) 算法,距离 WCE 最近的请求充电节点会最先被响应,但是可能会出现高能耗率的节点因距离 WCE 太远而无法得到能量补充的情况。Sheikhi 等人^[13]使用虚拟区域划分整个网络,每个充电基站处于不同的虚拟区域,

待充电节点只回应兴趣最高的 WCE,该算法缩短了充电行程,但成本较高。HE 等人^[14]提出了一种基于时间因素 FCFS(first come first serve)的算法,先发出充电请求的节点优先被服务,但是该算法会使 WCE 在充电行程中消耗大量的能量。WANG 等人^[15]引入了最佳充电比率,根据总体节点存活率来计算最优充电率,有效地延长了网络寿命。

基于以上分析,为延长 WRSNs 的网络寿命,笔者提出了基于双 WCE 的自适应充电调度算法。将节点分为重要节点和普通节点,基于每个节点的能量需求紧迫程度,设计充电调度策略为这些节点提供充电服务,充电过程中可以实时调整充电方法,以期降低节点的死亡率,延长网络生命周期。

1 网络模型与问题描述

1.1 网络模型

在一个平面区域内随机部署 M 个同质传感器节点, $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots, n_M\}$, 每个传感器节点 n_i 均配备一块容量为 E_m 的可充电电池,所有 WRSN 节点在运行开始时的能量均为 E_m 。节点每隔 Δ 时间向基站发送数据,每个传感器节点由于监测任务和传输数据量不同,其消耗的能量也不相同。为了平衡网络能耗,整个网络按照 K-means 方法^[16]进行分簇,簇头节点位于簇的中心附近。基站位于整个网络的中心,既可以接收节点的监测数据和充电请求,也能够对 WCE 进行能量补充与维护。WCE 的初始位置位于基站处,WCE 的电池容量为 E_w 。当节点 n_i 的剩余能量达到阈值 E_{th} 后向基站发出充电请求,基站收到充电请求消息后将利用其远程通信能力向 WCE 转发该充电请求^[17]。WCE 具有强大的计算和通信能力来维护充电请求服务池,并以一对一的充电方式根据调度顺序对服务池中的节点进行充电,在能量不足时将返回基站进行补充。

网络模型如图 1 所示。

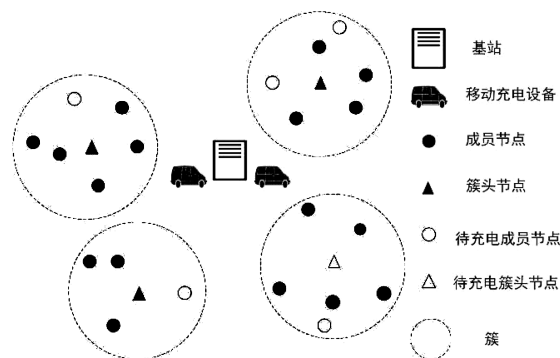


图 1 网络模型

Fig. 1 Network model

1.2 问题描述

假设 1: 节点发送充电请求的能量消耗忽略不计, 节点的电池容量在网络运行期间保持不变。

假设 2: 基站具有足够的功率和通信能力。WCE 在充电过程中可随时收到由基站转发的充电请求, 并在完成某一节点的充电任务后将请求放入服务池中。

定义 1: 对于每个节点, 都有一个最低能量 E_d , 节点能量达到 E_{th} ($E_{th} > E_d$) 则发出充电请求。当节点发出充电请求后在没有得到能量补充前达到最低能量 E_d 时, 节点将进入休眠状态, 不参与网络中的监测、转发等任务。

为避免节点死亡对网络性能的影响, 合理调度两个 WCE 对充电请求池中的节点进行充电。设网络运行过程中的存活节点数目为 U_s , 死亡节点数为 U_d , P_u 代表网络中死亡节点的占比, 则充电调度问题可以描述为:

$$P_u = \frac{U_d}{U_d + U_s} \quad (1)$$

$$\min(P_u) \quad (2)$$

$$s. t. \sum_{i=0}^P E_{n_i} + E_{tl} < E_w \quad (3)$$

$$E_{r,i} \leq RE_i \quad (4)$$

式(1)和(2)表明充电调度算法的目标是使死亡节点的数量最小化。式(3)表示 WCE 在单次充电行程中消耗的能量不能超过其最大电量。 E_{n_i} 为 WCE 为节点 n_i 补充的能量, P 为充电请求量, E_{tl} 表示 WCE 从基站出发到返回基站路程上消耗的能量。式(4)表示节点 n_i 任意时刻消耗的能量不得超过自身的剩余能量。

2 充电调度算法

2.1 充电节点的分类

网络中的节点由于承担的监测任务和转发的数据流量不同, 单位时间内消耗的能量也会不同。在网络开始阶段, 基于 K-means 方法进行分簇, 簇头位于簇中心附近, 对簇内节点监测到的信息进行数据融合。由于需要接收簇内成员节点的信息并转发给基站, 簇头节点会消耗更多能量, 因此要选择候选簇头来保证整个簇的正常运作。假设某个簇的半径为 r , 则以簇头为中心, $0.2r$ 大小范围内的节点均有机会成为簇头。当簇头节点的剩余能量降低到 $1.5E_{th}$ 时, 则在候选簇头中选出下一个簇头。簇头选择的原则是具有最高匹配度 P_i 的候选簇头将成为下一个簇头。候选簇头 n_i 的匹配度 P_i 为:

$$P_i = \alpha RE_i(t) + (1 - \alpha) DC_i \quad (5)$$

式中, $RE_i(t)$ 是当前节点的剩余能量, DC_i 表示节点当前位置到簇中心的距离。 α 是权重, $\alpha \in [0, 1]$ 。不同的簇可以有不同的权重。在能量消耗较大的簇内, 适当增加 α 值会增大剩余能量因素在节点当选簇头的比重。如果 α 过大, 下一轮簇头将偏离中心位置, 距离簇头较远的边缘节点在发送消息时会消耗较多的能量才能到达簇头。

合适的簇头轮换机制能够让网络寿命得到延长, 但是随着网络的运行, 簇头以及候选簇头的剩余能量总会降到阈值 E_{th} , 如果网络中这些重要节点的能量得不到及时补充, 会导致网络发生故障, 因此需要 WCE 对其进行能量补充。处于同一个簇内的节点会有相似性(例如监测的对象和转发的数据量), 因此同一簇内的节点能量消耗率会很接近, 这种特性能够缩短 WCE 的充电路程。基站把待充电节点分为重要节点和普通节点, 重要节点为簇头和候选簇头节点, 普通节点为成员节点。WCE1 为重要节点充电, WCE2 为网络中除了重要节点外的普通节点充电。当一个或多个节点的剩余能量降到 E_{th} 时, 将向基站发出若干条充电请求消息, 每条消息包括了节点 ID 号、节点类别标识、节点位置等, 基站收到请求后对其进行分析处理, 并把该请求转发给对应的 WCE, WCE 收到消息后将其存储在服务池中, 并根据充电调度顺序在服务池中选择下一个充电节点。

2.2 充电节点的选择

当节点 n_i 的能量降低到 E_{th} 时, 它会向基站发出充电请求, 基站将对消息进行处理并转发给 WCE, 该消息将由 WCE 存储在充电请求服务池中并进行维护, 根据调度顺序依次为服务池中的节点提供充电服务。许多文献^[18,19]将节点剩余能量作为考虑因素, 但在实际网络运行过程中, 因监测对象、监测环境等因素的变化, 节点的能量消耗率是动态变化的。一些节点可能在网络初期阶段消耗了更多的能量, 随着网络运行逐渐趋于稳定, 能量消耗率也随之降低, 另外一些节点因为监测目标发生变化、转发数据流量增大而有一个较大的能量消耗率, 所以要考虑节点的实时能量消耗率才能更准确地估测节点的实时寿命。假设节点在工作时每隔 Δ 时间以多跳的方式将数据传给簇头节点, 再由簇头节点转发给基站进行数据分析处理, 这些数据不仅包括节点实时监测对象的信息, 而且包括节点自身 ID、剩余能量以及时间戳信息。假设节点 n_i 在 t 时刻的能量消耗为 $R_i(t)$, 则 t 时刻后的 Δ 时间段内的能量消耗率 $R_i(t + \Delta)$ 为:

$$R_i(t+\Delta) = \beta R_i(t) + (1-\beta) \frac{RE_i(t-\Delta) - RE_i(t)}{\Delta} \quad (6)$$

式中 $RE_i(t)$ 代表节点 n_i 在 t 时刻的剩余能量, $RE_i(t-\Delta)$ 代表节点 n_i 在 $(t-\Delta)$ 时刻的剩余能量, β 是权值, $\beta \in [0, 1]$ 。如果网络中所需要监测的对象较为复杂, 应降低 β 值。假设从节点发出充电请求到基站处理完请求信息的时间忽略不计, 则节点 n_i 的实时寿命 L_i 为:

$$L_i = \frac{RE_i(t)}{R_i(t+\Delta)} \quad (7)$$

充电请求服务池中节点的生存时间越少, 将有更大的机会作为 WCE 的下一个充电选择。当节点处于充电状态时, 该信息将暂停发送, 当节点充电完毕后, 节点将继续以 Δ 的时间间隔向基站发送信息。

WCE 在充电行程中与充电请求池中的节点距离是动态变化的, 如果忽视距离带给 WCE 充电调度的影响, 离 WCE 最近的节点可能一直没有机会得到充电, WCE 会在网络中行驶更多的路程, 消耗掉更多的能量。因此待充电节点与 WCE 之间的距离应该成为充电选择的重要因素, 节点与 WCE 距离越近, 将有更大的机会成为 WCE 的下一个充电节点。设节点 n_i 的坐标为 (X_i, Y_i) , WCE2 的坐标为 (X_{w2}, Y_{w2}) , 则节点 n_i 与 WCE2 之间的欧氏距离 D_i 为:

$$D_i = \sqrt{(X_i - X_{w2})^2 + (Y_i - Y_{w2})^2} \quad (8)$$

在簇状网络结构中, 如果一个节点因为电量耗尽而无法继续工作, 可能会带来很多问题。例如, 感知节点作为故障节点会引发监测目标数据缺乏问题, 中间节点作为故障节点会使数据转发路径发生改变从而消耗更多能量^[20]。因此充电选择时需要考虑节点在簇内的位置, 子节点数量 N_i 较多的待充电节点将在簇内充当更重要的角色, 有更大的机会成为 WCE 的下一个充电节点。

假设充电需求度 W 决定充电顺序, W 的值越大, 节点的充电优先级越高。基于节点的实时寿命、节点与 WCE 的欧氏距离以及节点的子节点数量三种因素对充电的影响程度, 节点 n_i 的充电需求度 W 为:

$$W(i) = xL_i + yD_i + zN_i \quad (9)$$

$$x + y + z = 1 \quad (10)$$

式中, x 、 y 、 z 分别为实时节点寿命 L_i 、节点与 WCE 的欧氏距离 D_i 和子节点数量 N_i 的权重。如果网络中节点平均剩余能量处于低水平, 应提高 x ; 如果网络节点分布较为密集, 应提高 y ; 如果希望确保

数据的传输时延, 应提高 z 。WCE 根据 $W(i)$ 的大小按顺序为节点进行能量补充。

在完成某一节点的充电任务后, WCE 会将该节点的请求从服务池中删除, 并立即向基站发送一个请求——更新服务池现存节点的实时寿命, 基站会根据最近一次收到的节点消息为 WCE 提供这些节点的实时寿命。在网络运行过程中, 由于基站和 WCE 都配备了大功率的通信设备, 基站可以直接向 WCE 发送节点的实时寿命信息, 从而让 WCE 更新服务池中每个节点的实时寿命。另外, 节点与 WCE 的欧氏距离也在不断变化, 节点的子节点数量也会随着网络运行发生一定的变化, 因此 W 的大小是动态变化的, WCE 总是在服务池中选择当前 W 值最高的节点请求对其进行充电服务。

2.3 动态充电阈值

当传感器节点的剩余能量低于充电阈值 E_{th} 时会向基站发出充电请求, E_{th} 的大小会影响 WRSN 的网络寿命: 如果 E_{th} 设置过高, 节点频繁地发出充电请求, WCE 会在移动过程中消耗掉更多的能量; 如果 E_{th} 设置过低, 会导致节点在 WCE 服务之前就进入休眠状态。为使充电效用最大化, 充电阈值采用动态调节方式。

WCE 初始位置位于基站附近, 选择服务池中需求度最高的节点请求后将前往该节点所在位置进行能量补充, 此过程所需时间为 t_{min} , 则

$$t_{min} = \frac{D_{i,b}}{v} \quad (11)$$

式中 $D_{i,b}$ 为节点 n_i 与基站的欧氏距离, v 为 WCE 的行驶速度。

为了使节点及时得到能量补充, 节点发送充电请求后的生存时间应大于该时间, 则:

$$E_{th} \geq \max[R_i(t+\Delta) \times t_{min}] \quad (12)$$

网络中的每一个节点都有一个充电时延, 即节点在发出充电请求后至 WCE 到达该节点进行充电的等待时间。节点的能耗不同, 其所能容忍的充电时延也不同。假设每个节点的平均等待时间为 t_n , 则

$$t_n = \left[\frac{D_a}{v} + \left(\frac{2D_a}{v} + \frac{E_m - E_{th}}{P_r} \right) + \dots + \left(M \frac{D_a}{v} + (M-1) \frac{E_m - E_{th}}{P_r} \right) \right] / M \quad (13)$$

式中, D_a 为节点间的平均欧氏距离, $\frac{E_m - E_{th}}{P_r}$ 表示 WCE 的充电时间。

设节点的平均能量消耗率为 $R_a(t+\Delta)$, 则

$$R_a(t+\Delta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_i(t+\Delta) \quad (14)$$

E_{th} 应大于节点的平均能量损耗:

$$E_{th} \geq t_n \times R_a (t + \Delta) \quad (15)$$

在网络开始运行时,基站基于簇内成员节点第一次发送的信息,可根据等式(12)来计算节点的初始能量阈值 E_{th} 。在网络运行一段时间后,基站分别根据等式(12)和(15)计算 E_{th} ,充电阈值 E_{th} 由等式(12)和(15)中的最大值确定。为了减少网络中不必要的能耗,规定当阈值变化小于 10% 时,基站不会更新充电阈值 E_{th} 。在网络稳定之后,充电阈值 E_{th} 也会趋于稳定。

2.4 自适应充电策略

基站收到节点的充电请求后会进行一定的处理,再将其转发给 WCE1 或者 WCE2。WCE1 和 WCE2 的电池容量均有限且相等,分别承担不同类型节点的充电任务。在充电过程中,当 WCE 的能量不足以为下一个节点充电或者判断出充电后不能返回基站时,WCE 就会返回基站进行能量补充,这段时间很可能导致某些节点死亡。为了改善这一问题,笔者提出了自适应充电策略,可有效延长网络寿命。

2.4.1 协同充电机制

采用两台 WCE 为节点进行一对一充电,WCE1 为簇头节点及其候选簇头节点进行充电,WCE2 为网络中的簇内成员节点进行充电。在分簇型无线传感器网络中,簇头节点和候选簇头的节点数量要远小于成员节点数量,所以 WCE1 和 WCE2 两个充电设备所承担的充电任务量不同,WCE1 服务池中的请求数量要远小于 WCE2。当 WCE2 在完成某个节点的充电任务后根据自身能量判断出无法为下一个节点进行充电、需要返回基站进行能量补充时,服务池中的节点可能会在 WCE2 补充能量期间死亡。

鉴于此,笔者基于双 WCE 设计了协同充电策略,当 WCE2 需要返回基站补充能量时,它会与 WCE1 进行通信,询问 WCE1 是否处于空闲状态。WCE1 收到消息后检查服务池是否为空,若为空表示已经完成充电任务,没有待充电节点,于是向 WCE2 返回一个消息表示可以协助 WCE2 完成剩余节点的充电。WCE2 收到来自 WCE1 的消息后将服务池中剩余的待充电节点传送给 WCE1,由 WCE1 为这些节点进行充电。在充电过程中,WCE1 可以收到基站转发的充电请求,由于该服务请求来自簇头节点和候选簇头节点,WCE1 会优先为这些节点提供充电服务,剩余待充电成员节点的充电请求将由 WCE2 完成。WCE2 收到 WCE1 的成员节点服务请求后回复确认消息,会优先为这些

节点提供充电服务。WCE1 收到确认消息后将该部分在其服务池中删除。

2.4.2 自适应充电机制

协同充电策略能够在一定程度上减少节点的死亡率,但是需要 WCE1 处于空闲状态。如果在 WCE2 返回基站并且完成电量补充之前,WCE1 和 WCE2 的服务池中均有请求,普通节点就不能得到 WCE1 的协助充电,这种情况下协同充电机制是无效的。实际工作中,传感器节点配备的锂电池的充电效率会随着电量增加而逐渐下降,为了最大化锂电池的使用寿命,当电量达到电池容量 80% 左右时充电效率会下降,此时若将能量补充至 E_m 会花费很多时间^[21]。传感器节点此时的能量已经足够其进行工作,WCE 可以利用充剩下电量的时间去为更多节点补充能量,从而保证节点总体的死亡率达到最低。基于簇头节点及其候选簇头节点的重要性,WCE1 对这些节点进行完全充电。WCE2 在其服务池中如果需求量大于自身电量时将改变充电方法,对普通节点进行部分充电。部分充电量由固定充电量 E_{fx} 和适应充电量 E_{ap} 两部分组成。

$$E_{fx} = \lambda \left(1 - \frac{P}{m}\right) E_{th} \quad (16)$$

式中, P 为当前网络中普通节点的充电请求数量; m 为网络中的普通节点数量; λ 为系数,用于控制固定充电量不低于最低要求, λ 不应过高,否则 E_{fx} 会超过 WCE 的剩余能量。假设节点在其充电后的最小电量为 fE_{th} ($f > 1$)、WCE2 当前剩余电量为 E_{re2} ,则:

$$E_{re2} > E_{fx} > fE_{th} \quad (17)$$

$$E_{ap} = E_{re2} - E_{fx} \quad (18)$$

请求充电的节点数越来越多时,分配给每个节点的固定充电量会随之降低,对于各个节点的适应充电量 E_{ap} 可根据节点的实时寿命 L_i 和子节点数 N_i 来确定。节点的实时寿命意味着节点的充电紧迫性,实时寿命越少的节点,其适应充电量的需求越多。子节点数代表了节点在监测任务中的重要性,节点的子节点越多,它在监测任务中的重要性越高,其适应充电量的需求就越多。节点 n_i 的适应充电量为:

$$E_{ap}(i) = (E_{re2} - E_{fx}) \cdot \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^m Q_i} \quad (19)$$

$$Q_i = \gamma L_i + (1 - \gamma) N_i \quad (20)$$

γ 是权重, $\gamma \in [0, 1]$ 。节点 n_i 在本轮的总充电量 E_{sum} 为:

$$E_{\text{sum}} = \lambda(1 - \frac{P}{m})E_{\text{th}} + (E_{\text{re}} - E_{\text{fx}}) \cdot \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^m Q_i} \quad (21)$$

文中所提算法的流程如图 2 所示。

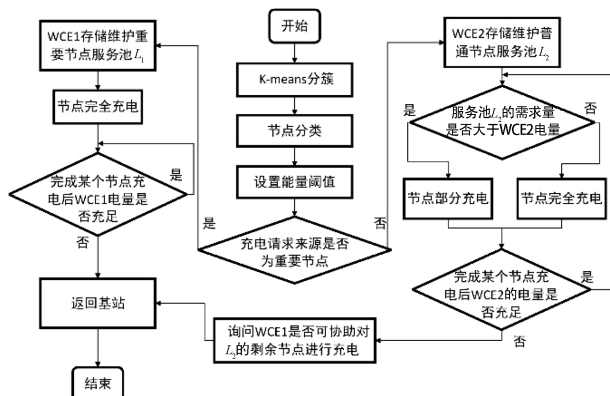


图2 充电调度算法流程图

Fig. 2 The flow chart of charging scheme

3 仿真与性能分析

3.1 仿真参数设置

通过 MATLAB R2018a 软件对文中提出的算法进行仿真分析,并与 NJNP 算法^[12]和 FCFS 算法^[14]进行比较。NJNP 和 FCFS 分别从空间和时间两个角度进行充电调度,是研究者们所认可的两种经典充电算法。监测区域设定为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的正方形区域,基站位于中心,两台 WCE 的初始位置位于基站旁。节点随机放置在监测区域内,节点的能量消耗率随机且随时间而变化。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值
节点数目 N	150(100~200)
节点初始能量	10 J
节点能量阈值	4 J
固定充电量	8 J
WCE1 初始能量	350 J
WCE2 初始能量	350 J
节点能量消耗率	$[0,1]/5$
分簇数目 K	9
簇头能量消耗率	$([0,1]/5)+0.3$
簇头轮换阈值	6 J
候选簇头范围	20 m
权重因子 x	0.5
权重因子 y	0.3
权重因子 z	0.2
基站位置	$[100,100]$
轮数	1 000

3.2 仿真结果分析

通过存活节点数、总剩余能量、WCE 移动损耗率和首个节点死亡时间四个方面来评估文中所提方案的性能。其中, WCE 移动损耗率为 WCE 移动消耗量在 WCE 总能量消耗中的占比。

3.2.1 存活节点数

图 3 为三种算法在网络存活节点数上的对比结果。网络趋于稳定后,文中方案的存活节点数最多,NJNP 次之,FCFS 表现最差,且文中方案在 200 轮之后就逐渐达到稳定状态,而 NJNP 和 FCFS 则需要 350 轮之后才能达到稳定状态。这是因为 NJNP 算法优先为距离最近的节点进行充电,这会导致距离较远节点的充电请求一直得不到响应。FCFS 算法只考虑充电请求的顺序,却忽略了节点的能耗是变化的,而且该算法不考虑距离因素带给充电任务的影响,使得服务池中节点的充电延迟大大增加,导致一些急需充电的节点无法得到能量补充。相比于 NJNP 算法和 FCFS 算法,文中方案能够为某一时间段内能耗大的节点及时补充能量。

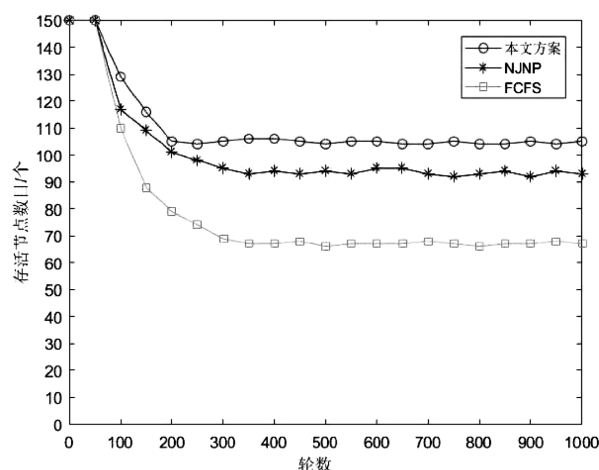


图 3 存活节点数对比

Fig. 3 Comparison of the number of surviving nodes

3.2.2 总剩余能量

图 4 为三种算法的网络总剩余能量的对比结果,表明文中方案最优,NJNP 算法次之,FCFS 算法表现最差。随着轮数不断增加,NJNP 算法和 FCFS 算法的充电策略使得 WCE 需要频繁往返基站进行能量补充而导致一些节点无法得到能量补充。文中方案采用协同充电模式,使得双 WCE 协同为节点进行充电,在一定程度上弥补了 WCE 能量补充期间的空洞期。在网络稳定后,与 NJNP 算法和 FCFS 算法相比,文中方案的平均剩余能量分别增加了 12.7% 和 43.2%。

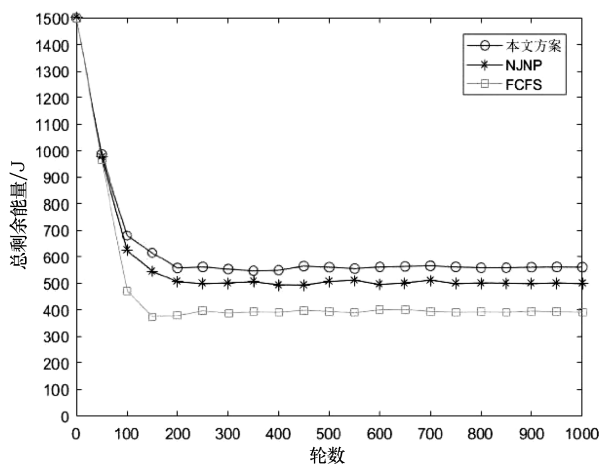


图4 总剩余能量对比

Fig. 4 Comparison of total residual energy

3.2.3 移动损耗率

图5为三种算法的移动能量损耗率的对比结果。随着轮数的增加,网络中的节点充电请求增多,FCFS算法对其适应性较差,这是因为FCFS算法只考虑了充电请求的顺序,大大增加了WCE在充电路程上的消耗。NJNP算法将距离作为充电选择因素,相较于FCFS算法有更好的表现。随着节点充电请求数量的增加,文中算法通过自适应充电能够应对增加的充电请求。另外,两个WCE以协同的方式为节点补充能量可在一定程度上减少WCE的能量消耗,从而降低移动能量的损耗率。在第1000轮时,相比于NJNP和FCFS,文中方案的移动能量损耗率分别下降了21.7%和33.3%。

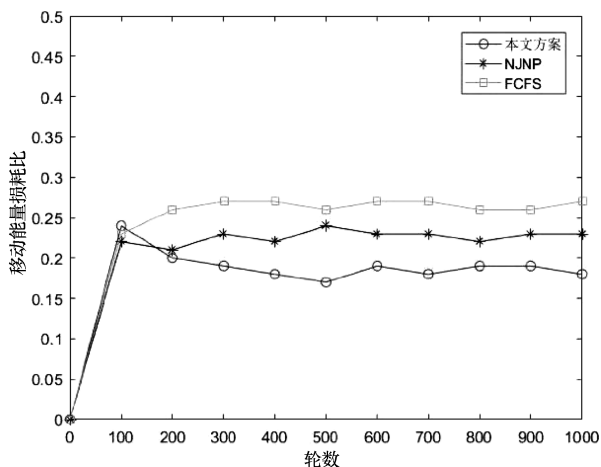


图5 移动能量损耗率对比

Fig. 5 Comparison of mobile energy loss ratio

3.2.4 首个节点死亡时间

图6为三种算法在不同节点数目下出现首个死亡节点的轮数。随着节点数量的增加,网络中的请

求数量增多,节点出现死亡的时间逐渐提前。文中方案采用双WCE协同充电模式,在WCE2能量不足以完成全部充电任务时更换充电方法,相较于NJNP算法和FCFS算法,在节点数量为100个时,文中方案的首个死亡节点出现时间分别延迟了12.8%和49.2%;在节点数量为200个时,首个死亡节点出现时间分别延迟了29.1%和47.9%。

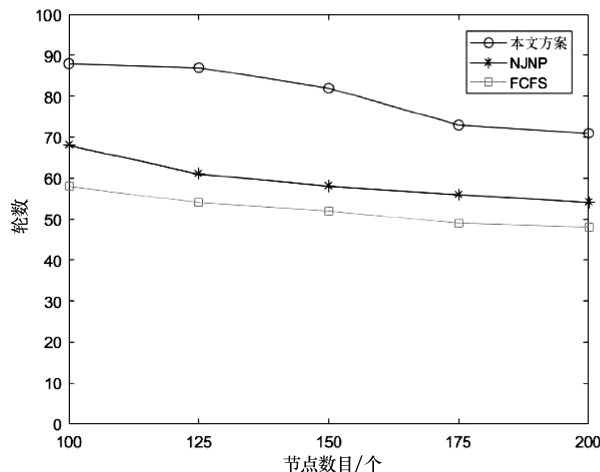


图6 首个死亡节点出现时间对比

Fig. 6 Time comparison of the first dead sensor

4 结论

针对WRSN的充电调度问题,提出一种基于双WCE的自适应充电算法,该算法基于分簇型无线传感器网络将节点分成重要节点和普通节点。基于节点能耗的动态性,WCE根据基站转发的节点充电请求信息,依据实时寿命、距离和子节点数选择下一个充电节点。为更好地应对网络的变化,节点的能量阈值根据生存时间和请求平均等待时间能够进行动态调整。为使网络存活节点数目最大化,提出了一种自适应充电策略,两台WCE根据服务池请求量可以自适应地调整充电策略,并能以协同的方式完成节点的充电任务。文中所提出的算法在网络存活节点数、总剩余能量、移动损耗比和首个死亡节点出现时间四个方面均优于NJNP算法和FCFS算法。文中算法为无线可充电传感器网络的按需充电问题提供了参考方案,有效地解决了充电场景的动态性问题以及多WCE的合理调度问题,在很大程度上降低了节点的能量空洞率和WCE的充电成本,使网络的充电效率和鲁棒性得以提高。

参考文献:

- [1] Arvind R V, Raj R R, Raj R R, et al. Industrial automation using wireless sensor networks

- [J]. Indian Journal of Science and Technology, 2016, 9(11): 1-8.
- [2] Jabeen T, Jabeen I, Ashraf H, et al. An Intelligent Healthcare System Using IoT in Wireless Sensor Network [J]. Sensors, 2023, 23(11): 5055.
- [3] Verma S, Zeadally S, Kaur S, et al. Intelligent and secure clustering in wireless sensor network (WSN)-based intelligent transportation systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8): 13473-13481.
- [4] Singh P K, Sharma A. An intelligent WSN-UAV-based IoT framework for precision agriculture application [J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 100: 107912.
- [5] Esposito M, Palma L, Belli A, et al. Recent advances in internet of things solutions for early warning systems: A review [J]. Sensors, 2022, 22(6): 2124.
- [6] Guo P, Liu X F, Tang S J, et al. Concurrently wireless charging sensor networks with efficient scheduling [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 16(9): 2450-2463.
- [7] Ye X G, Liang W F. Charging utility maximization in wireless rechargeable sensor networks [J]. Wireless Networks, 2017, 23: 2069-2081.
- [8] Li T, Liu T, Peng J, et al. Charge critical sensors first: minimize data loss in wireless rechargeable sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(7).
- [9] Soni S, Shrivastava M. Novel wireless charging algorithms to charge mobile wireless sensor network by using reinforcement learning [J]. SN Applied Sciences, 2019, 1: 1-18.
- [10] 李昱霖, 王楚涵, 田彪, 等. 无线可充电传感器网络充电路线规划 [J]. 科学技术创新, 2021(24): 18-19.
- [11] Chen Z S, Shen H, Wang T M, et al. An adaptive on-demand charging scheme for rechargeable wireless sensor networks [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2022, 34(2): e6136.
- [12] He L, Kong L H, Gu Y, et al. Evaluating the on-demand mobile charging in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 14(9): 1861-1875.
- [13] Sheikhi M, Sedighian K S, Samaee Z. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks with limited knowledge [J]. Wireless Networks, 2019, 25: 3531-3544.
- [14] He L, Zhuang Y, Pan J, et al. Evaluating on-demand data collection with mobile elements in wireless sensor networks [C]// 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference-Fall. Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2018: 1-5.
- [15] Wang K, Wang L, Obaidat M S, et al. Extending network lifetime for wireless rechargeable sensor network systems through partial charge [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(1): 1307-1317.
- [16] Razzaq M, Ningombam D D, Shin S. Energy efficient K-means clustering-based routing protocol for WSN using optimal packet size [C]// 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN). Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2018: 632-635.
- [17] Zhu J Q, Feng Y, Liu M, et al. Adaptive online mobile charging for node failure avoidance in wireless rechargeable sensor networks [J]. Computer Communications, 2018, 126: 28-37.
- [18] Dong Y, Wang Y H, Li S Y, et al. Demand-based charging strategy for wireless rechargeable sensor networks [J]. ETRI Journal, 2019, 41(3): 326-336.
- [19] Zhong P, Zhang Y W, Ma S H, et al. RCSS: A real-time on-demand charging scheduling scheme for wireless rechargeable sensor networks [J]. Sensors, 2018, 18(5): 1601.
- [20] Tian M Q, Jiao W G, Shen G Z. The charging strategy combining with the node sleep mechanism in the wireless rechargeable sensor network [J]. IEEE Access, 2020, 8: 197817-197827.

- [21] Chen K H, Namkoong M J, Goel V, et al. Efficient fast-charging of lithium-ion batteries enabled by laser-patterned three-dimensional graphite anode architectures[J]. Journal of Power Sources, 2020, 471: 228475.

(上接第 60 页)

- [24] 董盼. 苛刻腐蚀环境中 TC4 钛合金表面钝化膜特性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
- [25] Li Z, Zhao W, Xiao G, et al. Impact of microstructure evolution on the corrosion behaviour of the Ti-6Al-4V alloy welded joint using high-frequency pulse wave laser[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 4300-4314.
- [26] Li J Q, Lin X, Guo P F, et al. Electrochemical behaviour of laser solid formed Ti-6Al-4V alloy in a highly concentrated NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2018, 142: 161-174.