

基于节点分级策略的无线可充电 传感器网络部分充电算法

季佳俊, 张丹[†], 胡佳乐, 王芯月, 匡盼盼

(南京林业大学, 江苏 南京 210037)

摘 要:提出了一种节点分级策略(node classification strategy, NCS)。根据传感器节点通信数据量和对应的能耗, 首先建立传感器节点耗能率模型, 然后结合传感器节点耗能率大小和空间距离信息来选择待充电传感器节点, 从而提高充电响应的公平性。另外, 传统充电算法默认将电池电量补充至最大值, 导致被充电的传感器节点个数有限。本文设计了部分充电算法(partial charging algorithm, PCA), 通过优化充电值使得充电后既能保证传感器节点工作的电量开销, 又能让 WCR 的有限电量被合理分配给更多有能量需求的传感器节点。最后, 仿真实验表明, 提出的充电算法 NCPCA(node classification and partial charging algorithm)能有效降低网络中传感器节点死亡率, 提高 WRSNs 的工作性能。

关键词:差异性; 动态性; 节点分级; 部分充电; 无线可充电传感器网络

中图分类号: TP212.9; TN929.5

文献标识码: A

Partial Charging Algorithm for Wireless Rechargeable Sensor Networks Based on Node Classification Strategy

Ji Jiajun, ZHANG Dan[†], HU Jiale, WANG Xinyue, KUANG Panpan

(Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: A node classification strategy (NCS) is proposed in this paper. By considering the communication data volume of the sensor nodes and the corresponding energy consumption, an energy consumption rate model is firstly established. Subsequently, the sensor nodes to be charged are selected based on the energy consumption rate and the spatial distance information, thereby improving the fairness of the charging response. Moreover, the traditional charging algorithm defaults to replenishing the battery power to the maximum value, which leads to a limited number of charged sensor nodes. In this paper, a partial charging algorithm (PCA) is designed. By optimizing the charging value, not only can the power consumption of sensor nodes be ensured, but the limited power of the wireless charging receiver (WCR) can also be reasonably allocated to more sensor nodes with energy requirements. Finally, simulation experiments demonstrate that the proposed node classification and partial charging algorithm (NCPCA) can effectively reduce the mortality of sensor nodes in the network and enhance the performance of wireless rechargeable sensor networks (WRSNs).

Key words: difference; dynamism; node classification; partial charging; wireless rechargeable sensor network

无线传感器网络(WSN)由大量微型传感器节点通过无线网络自组织形成^[1]。各种类型的传感

器节点被随机分布在监测区域实现环境感知, 任务对象包括温度、湿度、压力、浓度等等。同时传感器

节点还进行数据采集和预处理工作,再通过无线网络将数据发送给基站(Base Station,BS)^[2-3]。

WRSNs 充电算法可划分成三类^[4]。根据网络中 WCR 数量,第一种是根据充电策略的不同将算法分为单个或多个无线充电机充电,考虑到成本和效率问题,第二种是基于传感器节点的控制类型,将算法分为集中式和分布式两种,旨在提高网络覆盖率和吞吐量。第三种是根据充电应答及时性和充电路径是否动态规划将算法分为离线和在线两种,旨在提高充电效率和稳定性。^[5-8]

本文指出了在无线传感器网络中采用完全充电模型会导致一些节点能量饥饿和事件监测失败的问题,因此需要采用部分充电模型来提高节点存活率和网络覆盖率。目前关于部分充电模型的相关算法研究较少,已有的研究都存在一些问题,如忽略一些传感器节点的充电请求等。因此,需要进一步研究部分充电模型的理论形式化和具体操作方法。本文提出了一种基于节点分级策略(NCS)的 PCA,旨在避免某些传感器节点长期不能补充电量的问题。首先建立了通信耗能率模型,以得到传感器节点的总耗能率,并结合空间距离信息确定了饥饿传感器节点的优先级,选择优先级高的传感器节点作为待充电传感器节点并得到 WCR 充电路径。其次,采用了只对电池补充部分电量的方法,使 WCR 充电路径中被充电的传感器节点数达到最大化,并且使有限电量的利用达到最大化,从而提高了网络覆盖率和充电响应的公平性。

1 系统模型

WRSNs 由三部分组成:BS、WCR 以及大量随机分布在被测地域的传感器节点。如图 1 所示,BS 位于网络中心,收集传感器节点监测的数据并为返回 BS 的 WCR 快速更换电池。

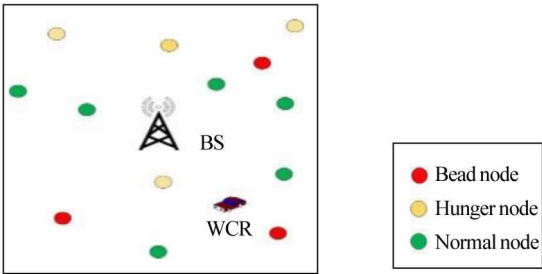


图 1 WRSNs 模型图

WCR 在网络中自由移动,通过无线能量传输技术为待充电传感器节点补充电量。但 WCR 自身电池能量有限,在电量耗尽前需要及时返回 BS 更换电池。

传感器节点随机分布在监测地域,具有接收线圈用于信息采集。图中节点根据电量被分为高于阈值的工作节点(绿色)和低于阈值但大于 0 的饥饿节点(橙色)。若饥饿节点无法及时充电,会变成死亡节点(红色),无法通过 WCR 再次充电,导致数据链路断开、信息丢失,监测任务失败。

网络所用符号及含义如表 1 所示。

表 1 符号含义

符号	含义
E_0	传感器节点电池容量
E_{in}	传感器节点 i 的当前电量
E_i	传感器节点 i 的充电量
E_t	电量阈值
E_{WCR}	WCR 电池容量
η_i	传感器节点 i 的耗能率
d_i	传感器节点 i 距离 BS 的长度
R_i	传感器节点 i 的当前通信数据量
v_{WCR}	WCR 行驶速度
N_d	网络死亡传感器节点数
N_{tot}	网络传感器节点总数
Alpha	分级权重

在现有研究中,大部分充电算法依赖传感器节点耗能率稳定且相等的假设,而实际情况下,传感器节点采样的数据类型各不相同,与环境的交互也不可预测,因此传感器节点计算耗能具有差异性、随机性和动态性。

针对传感器节点之间的能耗差异,本文首先提出了通信耗能率模型。该耗能模型每隔单位时间 t 统计传感器节点 i 的收发数据总量 R_i 以及对应的能量消耗 E_i ,得到第 j 次传感器节点 i 的通信耗能率 η_{ij} 为

$$\eta_{ij} = \frac{E_{ij}}{R_{ij}}$$

(1)

对 n 次统计的通信耗能率求均值可得:

$$\frac{\eta_{i1} + \eta_{i2} + \cdots + \eta_{in}}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n \eta_{ij}}{n}$$

(2)

根据[12]可知,传感器节点通信耗能所占比例最大,至少是采样计算的 3 倍,得到传感器节点 i 的总耗能率 η_i 为

$$\eta_i = \frac{4}{3} \frac{\sum_{j=1}^n \eta_{ij}}{n}$$

(3)

2 问题描述和分析

因传感器节点能耗速度不同,需要规划合理充电次序以提高公平性、有效性和避免死亡。传统算法完全充电有限 WCR 电量不能保证全网充电响应,导致死亡节点增多和任务失败。NCS 算法旨在选择充电节点和最小化死亡节点,确保网络完整性和连通性。约束条件将在后续讨论。

$$\min \kappa = \frac{N_d}{N_{tot}}$$

(4)

$$\text{s. t. } \sum_{i \in A} E_i + v_{WCR} * (\sum_{i \in A} L_i + L_r) \leq E_{WCR}$$

(5)

其中, κ 是 WRSNs 中传感器节点的死亡比例, A 是存放待充电传感器节点的充电池, L_i 是 WCR 前往传感器节点 i 的距离, L_r 是 WCR 返回 BS 的距离。

针对传感器节点能耗率差异的问题,采用 NCS 和考虑空间距离信息的方式,筛选待充电传感器节点,提高充电响应公平性,缓解能量空洞和网络瘫痪问题。同时,采用 PCA 算法提高 WCR 的充电响应及时性,使其在工作路径中覆盖更多传感器节点,提高能量利用率和降低死亡率,延长网络工作时间。

当处于工作状态的传感器节点电量低于某阈值时,立刻向 BS 发送充电请求。BS 接受到充电请求信号后,将传感器节点放入 WCR 服务池,根据传感器节点的耗能率和距离代价计算充电因子 ω_i 。

$$\omega_i = Alpha * \eta_i + (1 - Alpha) * \frac{1}{d_i}$$

(6)

其中, $Alpha$ 是权重系数,决定了耗能率和距离代价对优先级的贡献度。传感器节点的充电因子越大则充电优先级越高,从而确定待充电传感器节点。排序后的传感器节点放入充电池 A,依据优先级顺序, WCR 确定好充电服务路径,前往充电池 A 中的传感器节点进行无线充电。

NCS 伪代码见算法 1。

Algorithm 1. Node hierarchy strategy

Input: Node power $S(i)$, E
Node number $S(i)$. num
Node power consumption rate $S(i)$. η
The distance between the node and the base station $S(i)$. d
Weight coefficient $Alpha$.

Output: Charging path(Sorted nodes to be charged)

1: if $S(i)$. $E < Threshold$

2: WCR Service pool $\leftarrow S(i)$. num

3: end if

4: if number of nodes in the service pool $n > 0$

5: for $j=1:1:n$

6: $S(j)$. $w = Alpha * S(i)$. $\eta + (1 - Alpha) * 1 / S(i)$. d

7: end for

8: The nodes to be charged are sorted according to w from large to small,

The sorted nodes are deleted from the service pool and enter the charging pool

9: end if

图 2 举例说明了 NCS。对于网络中的 8 个充电请求,根据每个传感器节点的耗能率和与 BS 之间的距离,代入公式(6)计算得到每个传感器节点的充电因子 ω_i ,如表 2 所示。再按 ω_i 大小排序后,传感器节点放入充电池 A,可知优先级顺序为:6>4>1>5>3>2>8>7,所以 WCR 首先前往传感器节点 6 充电,接着是传感器节点 4,以此类推,最后是传感器节点 8。假设本轮 WCR 电量充足,则充电完成后 WCR 返回 BS,最后形成了一轮完整充电的路径。

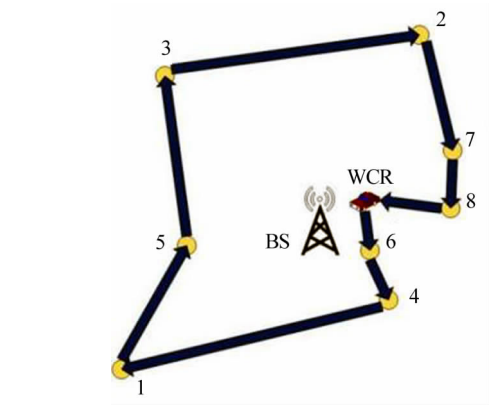


图 2 算法 1 的说明

表 2 请求充电节点的属性值

Node number	1	2	3	4	5	6	7	8
Node power consumption rate η_i	0.149	0.089	0.092	0.161	0.090	0.080	0.053	0.061
Distance d_i	51.35	46.96	37.79	18.46	30.30	6.55	38.53	37.82
Charge factor w_i	0.071	0.048	0.052	0.096	0.056	0.124	0.037	0.040

现有充电策略假设充电量为传感器电池容量和剩余容量之差,导致在给定充电路径中被充的传感器数目是固定的。采用 PCA 减少充电量可更好利用 WCR 能量,服务更多待充电传感器。部分充电模型可以降低单个传感器等待时间,但减小充电量会带来更频繁的充电请求,增大 WCR 充电压力和路程开销,需要在充电量可行性和充电代价之间权衡^[9-12]。

传感器节点分级后,按该传感器节点 i 自身的耗能率 η_i 和传感器节点与 BS 之间的距离 d_i ,计算出 WCR 到达该传感器节点的耗能 E_{p1} :

$$E_{p1} = \eta_i * \frac{d_i}{v_{WCR}} \tag{7}$$

其次,根据待充电传感器节点的当前数据量 R_i 和耗能率 η_i ,得到收发这些信息所需能量 E_{p2} :

$$E_{p2} = \frac{4}{3} \eta_i * R_i \tag{8}$$

于是,由 E_{p1} 和 E_{p2} 得到该传感器节点的最低充电量 $E_{\min}$:

$$E_{\min} = E_{p1} + E_{p2} \tag{9}$$

最低电量能尽量在传感器节点死亡前,使 WCR 及时赶到充电,即满足传感器节点的最低电量开销。最后考虑的是调节电量 E_{adj} ,若最低电量 $E_{\min}$ 大于传感器节点电池容量的一半,则该传感器节点能量需求较大,调节电量 E_{adj} 为

$$E_{adj} = E_0 - E_{\min} - E_{in} \tag{10}$$

其中 E_0 为传感器节点电池容量, E_{in} 为传感器节点当前剩余电量。若最低电量小于传感器电池容量的一半,则该传感器节点可以补充部分电量,调节电量 E_{adj} 为

$$E_{adj} = \eta_i E_0 \tag{11}$$

调节电量能保证传感器节点的正常工作,该状态下网络维持较高的完整性和连通性。因此,可以确定每个传感器节点最后所充电量 E_{charge} 为^[13-14]

$$E_{charge} = E_{\min} + E_{adj} \tag{12}$$

PCA 的伪代码见算法 2。

Algorithm2. Partial charging algorithm

Input: Node power consumption rate $S(i)$. η , The distance between the node and the base station $S(i)$. d , Node data volume $S(i)$. R , WCR speed V_{WCR}	
Output: Energy to be charged at node	
1:	After the charging nodes are sorted,let the first node $k = 1$
2:	while ($k < \text{number of nodes in charging pool}$)
3:	$S(k).E_{\min} = S(k). \eta * S(k). d / V_{WCR} + \frac{4}{3} S(k). \eta * s(k). R$
4:	if ($S(k).E_{\min} > 0.5 E_0$)
5:	$S(k).E_{adj} = E_0 - S(k).E_{\min} - S(k).E_{in}$ 6: else
7:	$S(k).E_{adj} = S(k). \eta * E_0$
8:	end if
9:	$S(k).E_{charge} = S(k).E_{\min} + S(k).E_{adj}$
10:	$k = k + 1$

表 3 给出了 PCA 的例子。该例考虑理想情况下,WCR 到达充电处时,传感器节点电量正好耗尽。假设 WCR 电池电量为 1000,传感器电池容量为 130。首先,由公式(7)算出 WCR 到达各个传感器节点的路程耗能 E_{p1} 。接着,根据传感器节点耗能率模型得到传感器节点的自身耗能 E_{p2} ,由(9)得到最低充电量 $E_{\min}$ 。再由各个传感器节点的最低充电量确定该传感器节点的调节电量 E_{adj} ,最后对最低充电量和调节电量求和,得到与每个传感器节点需求相匹配的的总充电量 E_{charge} ,如表 3 最后一行所示。根据表 2 中 8 个充电请求的优先级顺序,WCR 依次前往充电。每次充电后,WCR 都会更新自身电量,减去路程消耗以及传输给传感器节点的补充电量。直到公式(5)中的约束条件不满足,WCR 返回 BS 更换电池。

表 3 算法 2 的说明

Node number	1	2	3	4	5	6	7	8
E_{p1}	76.5	41.8	34.8	29.7	27.3	5.2	20.4	23.1
E_{p2}	19.2	21.4	38.8	68.8	39.0	8.9	5.3	7.1
$E_{\min}$	95.7	63.2	73.6	98.5	66.3	14.1	25.7	30.2
E_{adj}	34.3	11.6	56.4	31.5	33.7	10.4	6.9	7.9
E_{charge}	130	74.8	130	130	130	24.5	32.6	38.1

3 NCPCA 算法仿真评估

本文用 Matlab 进行仿真实验来验证 NCPCA 算法的优势,该算法结合了 NCS 和 PCA 两个算

法。与 Eta only 算法、经典在线充电策略 NJNP 和 OfWR 最新算法进行对比。其中 Eta only 算法仅根据传感器节点能耗率排序,NJNP 通过抢占充电时隙为距离最近的节点充电,OfWR 通过最小化浪费率来优化充电通道并结合剩余能量选择充电节点。本文用网络死亡传感器节点总数、有效轮数下平均死亡传感器节点数、网络效用这三个指标来分析四种算法的充电性能。其中,网络死亡传感器节点总数指的是,在每轮充电过程中,出现死亡传感器节点的总数。有效轮数下平均死亡传感器节点数是指,在网络不再出现死亡传感器节点的有效轮数下,每轮平均死亡传感器节点的数量。有效轮数是指从网络开始运行到不再出现死亡传感器节点的充电轮数。最后,将网络死亡传感器节点总数与有效轮数之比称为网络效用。

有效轮数下平均死亡传感器节点数是指当网络不再出现死亡传感器节点时,从开始运行到这段时间结束的充电轮数,网络死亡传感器节点总数与有效轮数之比即为有效轮数下平均死亡传感器节点数。此时,WCR 能及时为存活的传感器节点充电,并且网络能量分布逐渐趋于稳定和合理化。

网络效用:网络不再新增死亡传感器节点时,若存活传感器节点数大于或等于 60%,该网络称为有效网络。网络效用定义为该有效网络出现的次数在仿真总次数中的占比。

仿真相关的参数默认值可见表 4。监测区域大小为 $100 \times 100\text{m}$,采用蒙特卡罗法在其中分布 100 个传感器节点并检测环境参数。传感器节点初始电量是落于 1000—5000 的随机值^[15]。根据单位时间内收发数据总量以及对应的能量消耗,可以计算得到每个传感器节点的耗能率。

表 4 参数默认值

Parameter	Value
E_0	5000
E_t	1500
E_{WCR}	100000
v_{WCR}	4m/s
N_{tot}	100

在 NCPCA 中,通过传感器节点的动态耗能率和充电距离代价来反映充电请求的优先性。因此计算充电因子 ω_i 时,如果耗能率和距离代价对优先级的贡献度各不相同,就会造成 NCPCA 算法充电性能的差异。令其他参数保持不变,本文将公式

(6)中的权重系数 α 值 0.1 开始逐渐递增至 0.9。显然,当 α 为 0.1 时,传感器节点耗能率对充电因子的大小贡献度最小,其他情况以此类推。

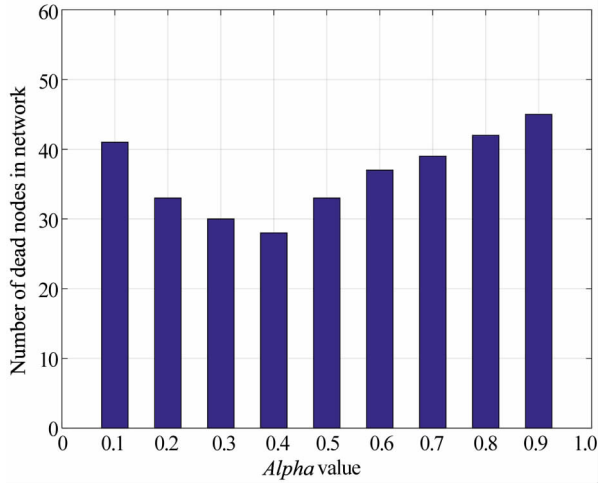


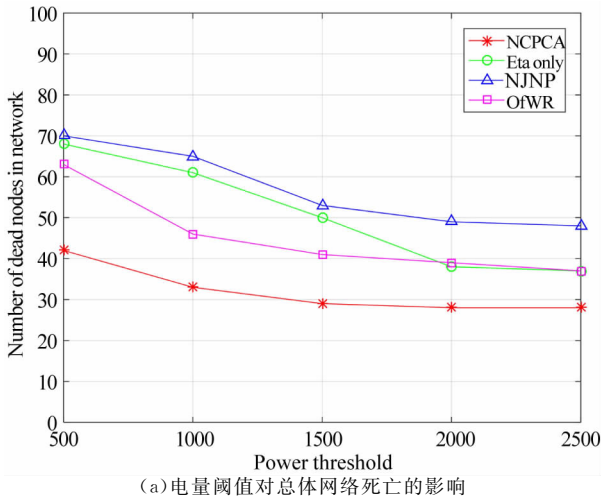
图 3 网络死亡节点数量和 α 值的关系图

实验发现,当 α 值设为 0.4 时死亡总数最少,电量阈值设置过小会导致饥饿传感器节点死亡,过大则容易形成伪饥饿现象,合适的阈值可以通过仿真实验得到。实验结果显示,随着电量阈值的增大,四种算法的死亡传感器节点总数逐渐下降并呈现稳定趋势。在四种算法中,NCPCA 的死亡总数始终低于其他三者,原因是 NCPCA 结合了饥饿传感器节点的空间信息和耗能率大小,并通过 PCA 使传感器节点得到恰当的电量分配。

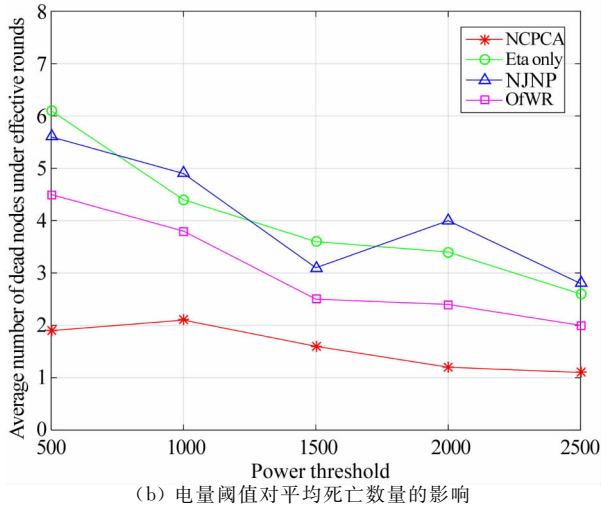
通过图 4(b)可以看到,四种充电算法在有效轮数下的平均死亡传感器节点数总体上都随着电量阈值的上升而下降。由 4(a)可知,NJNP 的网络死亡传感器节点总数最多,NCPCA 的存活传感器节点数最多。图 4(b)的平均死亡数反映出 Eta only 有效轮数最短,其次是 NJNP、OfWR 和 NCP-CA。因此,NCPCA 有效轮数下的平均死亡数最少,该算法在现有工作传感器节点更多的情况下,能够更好地维持网络连通性。

图 4(c)中四种算法的网络效用随着电量阈值的增大而提高。因为传感器节点电量低于阈值时,剩余能量越大,饥饿传感器节点的容忍延迟能力也越大,WCR 及时为饥饿传感器节点补充电量的可能性也越高。图中还可以看到 NCPCA 的网络效用远高于 Eta only、NJNP 和 OfWR。电量阈值并不是越高越好。随着阈值增大,充电请求的频率会急剧上升,WCR 在路上来回浪费的电量也越多,最后影响充电算法的总体性能,因此图中的网络效

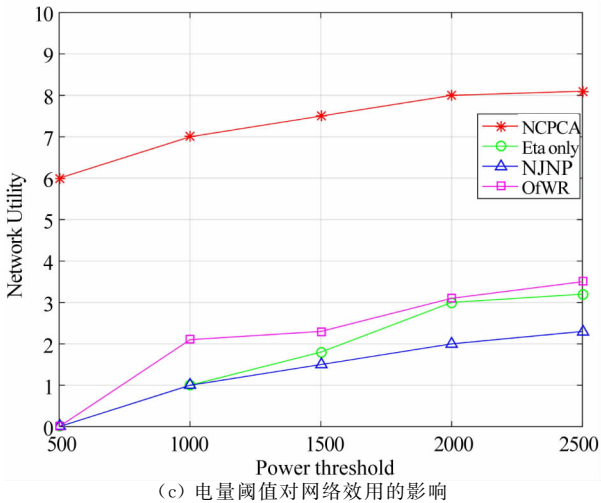
用曲线的增长率逐渐变小。综合以上有关充电算法三个指标的性能分析,可知最佳阈值应设为1500左右。



(a) 电量阈值对总体网络死亡的影响



(b) 电量阈值对平均死亡数量的影响



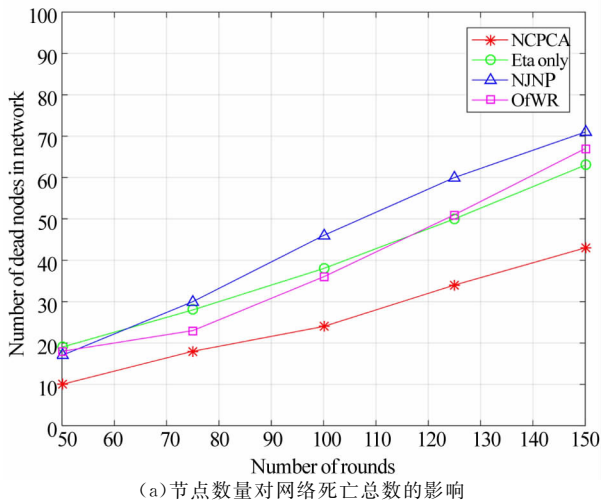
(c) 电量阈值对网络效用的影响

图 4 电量阈值对网络性能的影响

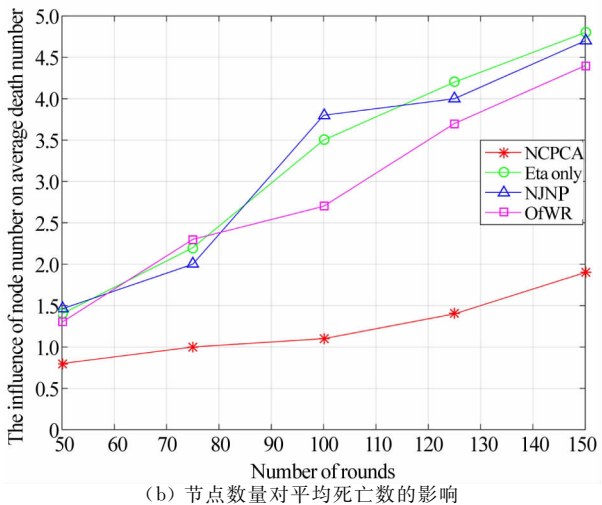
网络中传感器节点数目越多,空间分布越密集,发出充电请求的频率也随之增加。如果合理规

划 WCR 的充电路径和传感器节点待充电量,使其充电的传感器节点数达到最大化,WCR 路程耗能的占比可能反而下降。设置网络中传感器节点的数目从 50 递增到 150,得到各充电算法的性能变化情况。

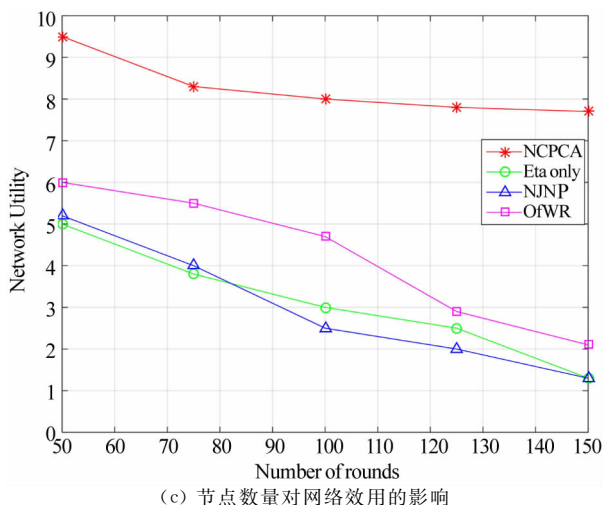
从图 5(a)可以看到,当传感器节点数目较少时,Eta only、NJNP 和 OfWR 算法的网络传感器节点死亡总数高于 NCPA,因为传感器节点分布疏散,WCR 在路程上耗能较大。随着节点数目增多,WCR 的充电负担不能满足所有请求充电的节点,导致死亡传感器节点数逐渐增大,但是 NCPA 算法下的死亡传感器节点数增长率始终低于其他算法。NCPA 根据传感器节点的优先级顺序规划充电路径,缩短了饥饿传感器节点的等待时间,使 WCR 的能量分配更合理化。因此,即使在网络中分布传感器节点多达 150 个,NCPA 的死亡总数仍然远低于其他对比算法。



(a) 节点数量对网络死亡总数的影响



(b) 节点数量对平均死亡数的影响



(c) 节点数量对网络效用的影响

图 5 节点数量对算法性能的影响

图 5(b)中,随着网络中传感器节点数目增多,四种算法的平均死亡数也随之增加。OfWR 算法在节点增多的情况下缺乏公平性,死亡节点数增长最快。NJNP 和 Eta only 算法的死亡率也逐渐上升,而 NCPCA 算法结合了两者的优点,降低了死亡传感器节点总数并提高了有效轮数,因此平均死亡传感器节点数最少。

从图 5(c)中可以看到,当传感器节点数目高于 100 时,对比算法 Eta only、NJNP 和 OfWR 的网络效用下降,因为大部分传感器节点已经死亡。NCPCA 算法在此情况下具有较高的网络效用。当网络传感器节点数小于 100 时,NCPCA 的网络效用维持在 80% 以上,表现出较高的网络性能和较长生命周期。因此,传感器节点的数量设置为 100 较为合理。

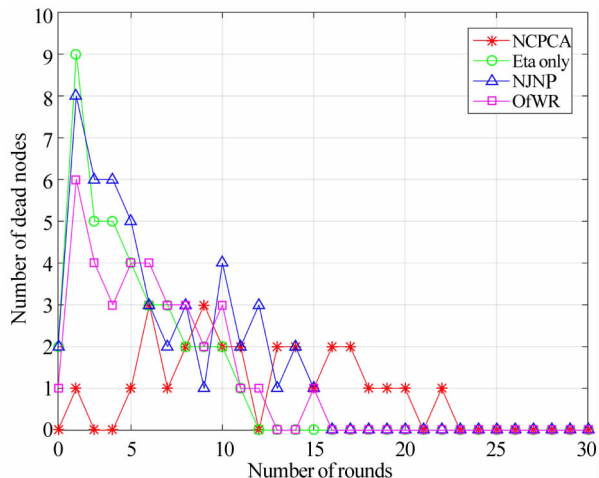


图 6 每轮死亡节点数量的对比

选择合适的电量阈值和网络传感器节点数后,不同充电算法下网络死亡传感器节点数目不同。

在 25 轮后,NCPCA 算法的死亡传感器节点数最少且较为稳定,而 Eta only、NJNP 和 OfWR 算法下传感器节点在前几轮充电中就已经死亡,导致后续充电服务负担下降。此外,Eta only 算法在初始几轮充电中有很多饥饿传感器节点死亡,有效轮数低于 NJNP 和 OfWR。相比其他算法,NCPCA 采用 PCA 优化了传感器节点的充电值,覆盖更多饥饿传感器节点,有效降低了传感器节点死亡率并延长了网络工作时间。

此外,可以通过时间复杂度和空间复杂度衡量算法执行时所需的计算资源数量。时间复杂度表示算法执行所需的时间与输入规模的关系,空间复杂度表示算法所需的额外空间与输入规模的关系。本文所提出的 NCPCA 算法在运行过程中循环的次数是由网络中的具体节点个数 n 决定的。当节点数为 n 时,其循环次数为 $n-1$ 次,所以该算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。因为算法中各节点变量是提前定义好的,运行过程中不存在递归调用和动态内存分配操作,所以空间复杂度为 $O(1)$ 。

4 结 论

针对无线可充电传感器网络(WRSN)中传感器节点能量限制的问题,提出了节点分级策略(NCS)和部分充电算法(PCA)。NCS 根据传感器节点的通信数据量和能耗率,选择待充电节点以提高充电响应的公平性。PCA 通过优化充电值,使得充电后能保证传感器节点工作的电量开销,并让充电机器人的有限电量被合理分配给更多有能量需求的传感器节点。仿真实验表明,本文提出的充电算法 NCPCA 能有效降低传感器节点死亡率并提高 WRSNs 的工作性能。

参考文献

- [1] 徐结海,谭德坤.基于自适应蚁群算法的 WCE 充电路径优化方法[J].南昌工程学院学报,2023,42(1):88-94+101.
- [2] 赵哲源,杨红卫,刘兵,等.基于模糊决策算法的新能源汽车充电桩布局优化方法[J].河南科学,2022,40(11):1721-1727.
- [3] 胡泽洲,于仲安,张军令.改进的灰狼算法在电动汽车充电调度中的应用[J].科学技术与工程,2022,22(30):13355-13362.